

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

黏土壓密參數多變數分布模型的建置

Development of the multivariate distribution model
for clay consolidation parameters.

吳俊廷

Chun-Ting Wu

指導教授：卿建業 博士

Advisor: Jianye Ching, Ph.D.

中華民國 108 年 7 月

July, 2019

口試委員會審定書

黏土壓密參數多變數分布模型的建置

Development of the multivariate distribution model
for clay consolidation parameters.

本論文係吳俊廷君(學號 R06521114)在國立臺灣大學土木工程學系、所完成之碩士學位論文，於民國 108 年 07 月 19 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

卿建業

(指導教授)

林志平

王瑞斌

謝尚賢

系主任

卿建業

林志平

王瑞斌

謝尚賢

(簽名)

誌謝

首先誠摯感謝我的指導教授卿建業老師，老師悉心的教導且不厭其煩的討論並指點我正確的方向，使我在研究所的日子獲益匪淺，甚至才能完成此論文研究。老師對學問的嚴謹及更是我們學習的典範。在此向卿老師致以最高謝意。

研究所兩年多的日子裡，也十分感謝觀嘉學長、沅義學長、宗祐學長、Debbie 學姐和姿町學姐時常給予指導，在我對研究或是學業上迷惘時為我解惑。還有同研究室的夥伴，映中、玟翰、元勳，無論是研究室中一起生活的點滴或是考前臨時抱佛腳的夜晚，都使我們研究生涯更加多采多姿。

然後感謝我的父母及哥哥姐姐，因為你們的細心栽培及支持，讓我無後顧之憂地完成學業，今日的成就都希望成為你們的驕傲。最後感謝我的女友璿瑩，感謝她在我背後默默支持，不管上班多辛苦還是都會煮飯給我吃，甚至收斂自己的脾氣，體諒並包容我的暴躁，在狗女兒哈娜生病時也堅強的自己帶她去看醫生。

謹以此篇論文獻給我的師長、家人、同學、女友及所有關愛我的朋友，謝謝你們。



摘要

大地工程中，普遍存在著不確定性，且為可靠度設計中不可缺少的要素之一，雖然目前業界仍然使用安全係數法，但因它無法準確地量化不確定性，進而導致過度保守之設計。故本研究之目的為：有效利用現地調查所得來之資訊去預測壓縮指數 C_c 、回脹指數 C_s 及壓密係數 c_v 的機率分布情形，並且結合其它黏土參數的資訊去降低其不確定性。

首先，藉由文獻回顧去蒐集前人對飽和黏土所做阿太堡試驗、壓密試驗以及其他試驗而測得之土壤參數去建立龐大資料庫，再篩選出我們認為有能探討之相關性的參數，包含：

(1)液性限度(liquid limit, LL)；(2)塑性指數(plasticity index, PI)；(3)含水量(water content, w_n)；(4)孔隙比(void ratio, e_0)；(5)垂直有效應力(vertical effective stress, σ_v')；(6)壓縮指數(compression index, C_c)；(7)回脹指數(swelling index, C_s)；(8)壓密係數(coefficient of consolidation, c_v)。

先用Johnson分布系統將參數轉至標準常態空間，再使用吉普斯取樣法搭配共軛條件計算得到這八個參數之間的期望值向量、共變異數矩陣建立多變數分布模型，接著在貝氏分析(Bayesian analysis)的架構下，藉由得到不同的現地參數條件，更新壓縮指數、回脹指數和壓密係數的後驗機率分布函數。當代入的已知資訊愈多，標準偏差越小，所能估出來參數就越準確，我們便能更清楚知道此三種黏土參數分布的範圍，於可靠度觀念下能更加準確地去設計大地結構物並且節省工程材料成本。

關鍵字：多變數分布模型、黏土參數、資料庫、Johnson 分布系統、吉普斯取樣法、共軛條件、貝氏分析

Abstract

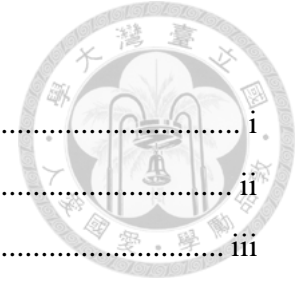
Comparing with safety factor method, reliability-based design method can quantify the uncertainty to design geotechnical structure in a more systematical and economical design. In this study, a multivariate distribution model for ten parameters of clay is constructed based on the database. These eight parameters are : (1) liquid limit, LL ; (2) plasticity index, PI ; (3) water content, w_n ; (4) void ratio, e_0 ; (5) vertical effective stress, σ_v' ; (6) compression index, C_c ; (7) swelling index, C_s ; (8) coefficient of consolidation, c_v .

Using Johnson distribution system to transform those distributions to standard normal distributions, then applying Gibbs sampler method under condition of conjugation let us get those 8 mean vector and covariance matrix to construct multivariate distribution model.

Under the Bayesian analysis framework, the original distributions of the design clay parameters (C_c , C_s , and c_v) would serve as prior distributions and can be updated into posterior distributions by using different multivariate site-specific information. From the results, the transformation uncertainty of predicted posterior distribution can be effectively reduced as the multivariate site-specific information increases. With smaller uncertainty, reliability-based design can be more economical.

Key words : multivariate distribution model, clay parameters; database, Johnson distribution system, Gibbs sampler, conjugate, Bayesian analysis.

目錄



誌謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	xi
第一章 前言	
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究方法.....	2
1.3 研究流程.....	4
1.4 本文內容.....	5
第二章 文獻回顧	6
2.1 壓密(Consolidation)	6
2.2 壓縮指數(Compression index, C_c)	7
2.3 回脹指數(Swelling index, C_s)	15
2.4 壓密係數(Coefficient of consolidation, c_v).....	19
2.4.1 壓密係數(c_v)介紹	19
2.4.2 壓密係數評估方法	23
第三章 資料庫	25
3.1 前言.....	25
3.2 本研究資料庫介紹.....	26
3.3 蒐集資料點方法.....	32
3.4 檢驗資料庫的正確性.....	32
3.5 本研究資料庫資料與前人轉換模型之對比.....	33
第四章 多變數機率分布模型建置與模擬	52
4.1 前言.....	52
4.2 Johnson 分布系統	53
4.2.1 多變數常態分布	53

4.2.2 Johnson 分布系統類型	54
4.3 貝氏分析(Bayesian analysis)與吉普斯取樣法(Gibbs sampler)	65
4.3.1 貝氏分析(Bayesian analysis)	65
4.3.2 吉普斯取樣法(Gibbs sampler)	69
4.4 模擬結果	72
第五章 現地設計參數預測與案例驗證	111
5.1 現地設計參數預測	111
5.1.1 混和高斯分布(Mixture Gaussian distribution)	111
5.1.2 預測現地參數	112
5.1.3 權重考量	113
5.2 案例驗證	114
5.2.1 預測步驟	114
5.2.2 案例一(非大資料庫資料)	115
5.2.3 案例二(非大資料庫資料)	125
5.2.4 案例三(非大資料庫資料)	129
5.2.5 案例四(非大資料庫資料)	137
5.2.6 案例五(非大資料庫資料)	141
第六章 結論與未來建議	148
6.1 結論	148
6.2 未來建議	150
參考文獻	151
附錄 I 資料庫資訊	154
附錄 I 資料庫參考文獻	189
附錄 II 口試問答紀錄	227



圖目錄

圖 1.1 量測參數與設計參數之轉換模型及其轉換誤差	2
圖 2.1 壓密示意圖	6
圖 2.2 $e - \log \sigma'_v$ plot	7
圖 2.3 凝聚性土壤的 C_c 轉換模型	8
圖 2.4 壓縮比 VS 含水量	9
圖 2.5 C_{ur} 示意圖	15
圖 2.6 回脹指數、解壓-再壓指數與塑性指數	17
圖 2.7 U-Z-T 關係圖	20
圖 2.8 c_v -LL 關係	22
圖 2.9 有效應力與壓密係數關係	22
圖 2.10 平方根時間調整法示意圖	23
圖 2.11 對數時間調整法示意圖	24
圖 3.1 C_c 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	34
圖 3.2 C_c 與 LL 轉換模型比較(全部資料)	35
圖 3.3 C_c 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	36
圖 3.4 C_c 與 PI 轉換模型比較(全部資料)	37
圖 3.5 C_c 與 e_0 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	38
圖 3.6 C_c 與 e_0 轉換模型比較(全部資料)	39
圖 3.7 C_c 與 w_n 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	40
圖 3.8 C_c 與 w_n 轉換模型比較(全部資料)	41
圖 3.9 C_s 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	42
圖 3.10 C_s 與 LL 轉換模型比較(全部資料)	43
圖 3.11 C_s 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	44
圖 3.12 C_s 與 PI 轉換模型比較(全部資料)	45
圖 3.13 C_s 與 e_0 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	46
圖 3.14 C_s 與 e_0 轉換模型比較(全部資料)	47
圖 3.15 c_v 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 資料)	48

圖 3.16 c_v 與 LL 轉換模型比較(全部資料).....	49
圖 3.17 c_v 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料).....	50
圖 3.18 c_v 與 PI 轉換模型比較(全部資料).....	51
圖 4.1 Johnson 分布系統幾種簡單的分佈表現：(a)SU；(b)SB；(c)SL.....	55
圖 4.2 轉換前數據(Y 空間)長條圖.....	61
圖 4.3 Johnson 分布系統擬和後(X 空間)結果.....	62
圖 4.4 $Y_i - Y_j$ 散佈圖.....	63
圖 4.5 $X_i - X_j$ 散佈圖.....	64
圖 4.6 所有資料點 C_c 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	77
圖 4.7 所有資料點 C_c 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	77
圖 4.8 所有資料點 C_c 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	78
圖 4.9 所有資料點 C_c 與 e_0 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	78
圖 4.10 所有資料點 C_c 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	79
圖 4.11 所有資料點 C_c 與 C_s 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	79
圖 4.12 所有資料點 C_c 與 c_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	80
圖 4.13 所有資料點 C_s 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	80
圖 4.14 所有資料點 C_s 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	81
圖 4.15 所有資料點 C_s 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	81
圖 4.16 所有資料點 C_s 與 e_0 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	82

圖 4.17 所有資料點 C_s 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	82
圖 4.18 所有資料點 C_s 與 c_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	83
圖 4.19 所有資料點 c_v 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	83
圖 4.20 所有資料點 c_v 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	84
圖 4.21 所有資料點 c_v 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	84
圖 4.22 所有資料點 c_v 與 G_s 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	85
圖 4.23 所有資料點 c_v 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型).....	85
圖 4.24 C_c 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ..	86
圖 4.25 C_c 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	86
圖 4.26 C_c 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	86
圖 4.27 C_c 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	87
圖 4.28 C_c 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ..	87
圖 4.29 C_c 與 C_s 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)....	87
圖 4.30 C_c 與 c_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)	88
圖 4.31 C_s 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ..	88
圖 4.32 C_s 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)....	88
圖 4.33 C_s 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	89
圖 4.34 C_s 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)	89
圖 4.35 C_s 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	89
圖 4.36 C_s 與 c_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)	90
圖 4.37 c_v 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	90
圖 4.38 c_v 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)	90

圖 4.39 c_v 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)....	91
圖 4.40 c_v 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1).....	91
圖 4.41 c_v 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1) ...	91
圖 4.42 C_c 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	92
圖 4.43 C_c 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	92
圖 4.44 C_c 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	93
圖 4.45 C_c 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	93
圖 4.46 C_c 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	94
圖 4.47 C_c 與 C_s 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	94
圖 4.48 C_c 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	95
圖 4.49 C_s 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	95
圖 4.50 C_s 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	96
圖 4.51 C_s 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	96
圖 4.52 C_s 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	97
圖 4.53 C_s 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	97
圖 4.54 C_s 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	98
圖 4.55 c_v 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	98
圖 4.56 c_v 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	99
圖 4.57 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	99
圖 4.58 c_v 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	100
圖 4.59 c_v 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型.....	100
圖 4.60 C_c 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型	101
圖 4.61 C_c 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	101
圖 4.62 C_c 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型	102
圖 4.63 C_c 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型	102
圖 4.64 C_c 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	103
圖 4.65 C_c 與 C_s 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	103
圖 4.66 C_c 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型	104
圖 4.67 C_s 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型	104

圖 4.68 C_s 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	105
圖 4.69 C_s 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	105
圖 4.70 C_s 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	106
圖 4.71 C_s 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	106
圖 4.72 C_s 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	107
圖 4.73 c_v 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	107
圖 4.74 c_v 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	108
圖 4.75 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	108
圖 4.76 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	109
圖 4.77 c_v 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	109
圖 4.78 c_v 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型.....	110
圖 5.1 混合高斯分布示意圖.....	112
圖 5.2 案例一場址與調查孔位.....	115
圖 5.3 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	116
圖 5.4 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型).....	117
圖 5.5 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	118
圖 5.6 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	119
圖 5.7 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型).....	120
圖 5.8 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	121
圖 5.9 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	122
圖 5.10 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型).....	123
圖 5.11 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	124
圖 5.12 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	126
圖 5.13 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型).....	127
圖 5.14 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	128
圖 5.15 案例三 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	129
圖 5.16 案例三 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	130
圖 5.17 案例三 C_s 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	131
圖 5.18 案例三 C_s 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	132

圖 5.19 案例三 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	133
圖 5.20 案例三 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	134
圖 5.21 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例三).....	135
圖 5.22 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例一).....	136
圖 5.23 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例二).....	136
圖 5.24 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	138
圖 5.25 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型).....	139
圖 5.26 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	140
圖 5.27 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	142
圖 5.28 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(LI>1 模型).....	143
圖 5.29 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	144
圖 5.30 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型).....	145
圖 5.31 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(LI>1 模型).....	146
圖 5.32 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型).....	147

表目錄

表 2.1 根據壓縮指數分類土壤壓縮性	8
表 2.2 前人壓縮指數轉換模型整理	10
表 2.3 種未擾動土樣的壓縮指數	14
表 2.4 前人回脹指數轉換模型整理	18
表 2.5 前人壓密係數轉換模型	21
表 3.1 參數分類	29
表 3.2 各參數的統計數據	29
表 3.3 變數定義($Y_1 \sim Y_8$).....	29
表 3.4 資料庫資料點數量	30
表 3.5 土壤參數間相關係數(Pearson(ρ_{ij}))	31
表 3.6 圖 3.1 和圖 3.2 轉換模型整理	35
表 3.7 圖 3.3 和圖 3.4 轉換模型整理	37
表 3.8 圖 3.5 和圖 3.6 轉換模型整理	39

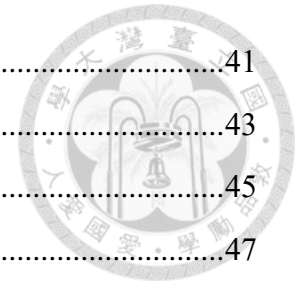
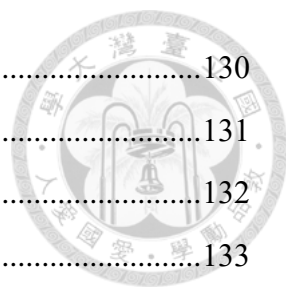


表 3.9 圖 3.7 和圖 3.8 轉換模型整理	41
表 3.10 圖 3.9 和圖 3.10 轉換模型整理	43
表 3.11 圖 3.11 和圖 3.12 轉換模型整理	45
表 3.12 圖 3.13 和圖 3.14 轉換模型整理	47
表 3.13 圖 3.15 和圖 3.6 轉換模型整理	49
表 3.14 圖 3.17 和圖 3.18 轉換模型整理	51
表 4.1 Y_1 到 Y_8 分布類型與參數.....	60
表 4.2 本研究中所用到之共軛分布	66
表 4.3 所有資料點吉普斯取樣法後 2000 個 X_i-X_j 共變異數矩陣樣本之一(第 81 個).....	74
表 4.4 所有資料點吉普斯取樣法後 2000 個 X_i-X_j 共變異數矩陣樣本之平均.....	75
表 4.5 (a)吉普斯取樣法之 2000 個 X_i 期望值向量樣本之一(第 81 個)； (b)吉普斯取樣法之 2000 個 X_i 期望值向量樣本平均.....	76
表 5.1 案例一土壤參數資料	115
表 5.2 案例一 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	116
表 5.3 案例一 C_c 真實值與預測值整理(LI<1 模型).....	117
表 5.4 案例一 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	118
表 5.5 案例一 C_s 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	119
表 5.6 案例一 C_s 真實值與預測值整理(LI<1 模型).....	120
表 5.7 案例一 C_s 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	121
表 5.8 案例一 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	122
表 5.9 案例一 c_v 真實值與預測值整理(LI<1 模型).....	123
表 5.10 案例一 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	124
表 5.11 案例二土壤參數資料	125
表 5.12 案例二 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	126
表 5.13 案例二 c_v 真實值與預測值整理(LI<1 模型).....	127
表 5.14 案例二 c_v 真實值與預測值整理 in-situ 模型).....	128
表 5.15 案例三土壤參數資料	129
表 5.16 案例三 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	130

表 5.17 案例三 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	130
表 5.18 案例三 C_s 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	131
表 5.19 案例三 C_s 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	132
表 5.20 案例三 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	133
表 5.21 案例三 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	134
表 5.22 案例四土壤參數資料	137
表 5.23 案例四 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	138
表 5.24 案例四 C_c 真實值與預測值整理(LI<1 模型).....	139
表 5.25 案例四 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	140
表 5.26 案例五土壤參數資料	141
表 5.27 案例五 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	142
表 5.28 案例五 C_c 真實值與預測值整理(LI>1 模型).....	143
表 5.29 案例五 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	144
表 5.30 案例五 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型).....	145
表 5.31 案例五 c_v 真實值與預測值整理(LI>1 模型).....	146
表 5.32 案例五 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型).....	147



第一章 前言



1.1 研究背景與動機

大地工程中存有著許多不確定性，而土壤為複雜工程材料，它受不同因素影響，例如：沉積環境、地形發展歷史、物理化學…等因素，使得土壤具有轉換不確定性。除了前人研究(Ching and Phoon, 2014a)所提出之十項重要黏土參數，壓縮指數(C_c)及回脹指數(C_s)及壓密係數(c_v)為三個也十分重要之設計參數，在大地工程中常以此三個參數去評估黏土層壓密行為，壓縮指數(C_c)和回脹指數(C_s)為計算壓密沉陷量的重要參數，而在工程中除了需計算壓密沉陷量，仍然需要瞭解壓密沉陷速率，此時就會透過壓密係數(c_v)去瞭解。

而考慮效率以及預算上的考量，前人提出經驗式藉由其它較簡易及費用較低的參數轉換得到預估值，而這種參數間的轉換關係式我們將它稱為轉換模型(transformation model)。然而這些由轉換模型預測所得到之設計參數並非等於真實的參數值，這些真實的參數值並非完全落在轉換模型的趨勢線上，如圖 1.1，實際值是散佈於周圍，實際值與轉換模型所得之估計值兩者間的差值稱為轉換誤差。過去傳統作法並未考慮土壤空間變異性、量測誤差及模型轉換誤差之不確定性影響。而在可靠度設計(reliability-based design)的架構下，藉由瞭解這些轉換誤差的偏差(bias)及變異性(variability)後，便可使可靠度設計更加準確，避免傳統之安全係數法(safety factor)可能過於保守的設計，適度節省工程材料。

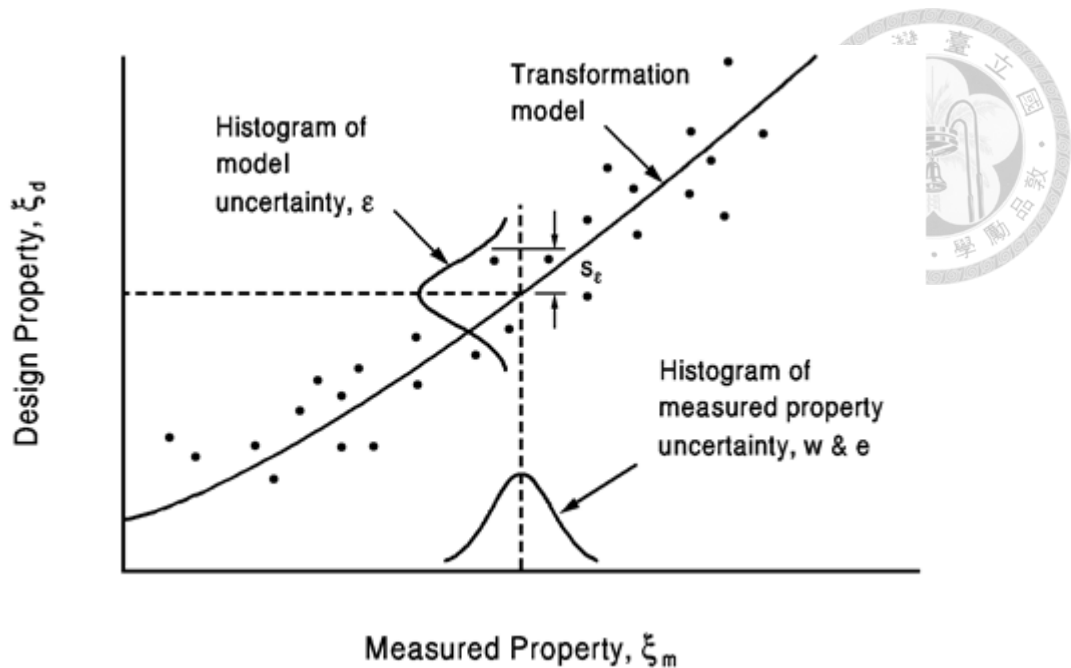


圖 1.1 量測參數與設計參數之轉換模型及其轉換誤差


(Ching and Phoon, 2014b)

1.2 研究方法

本研究蒐集來自各國各地方的現地資訊來建立資料庫，並且特別針對單向度壓密試驗(one-dimensional test)、不排水三軸等向壓密試驗(CIUC test)或等速率應變試驗(CRS test)所得到的壓縮指數(C_c)及回脹指數(C_s)及壓密係數(c_v)。

另外，因為不同轉換模型可能會有不同的訓練資料庫，因此一個轉換模型之資料套用到另一個模型中也許會出現過大之偏差，所以才藉由蒐集大量資料並彙集成一個龐大的資料庫，使其大致可以滿足大多數黏土參數間資料點的散佈行為。以此具代表性的資料庫量化其參數與參數間的相關性，計算其期望值向量和共變異係數矩陣。

而在不同工址中，也必會有不同的土壤特性，所以在尚未作現地調查前，土壤參數皆為未知，可由先前建立的大資料庫之資料分布情形判斷其土壤參數可能座落的範圍，此分布範圍是為機率密度函數(probability density function, PDF)，而 Johnson 分布系統(Johnson system of distribution)可根據資料庫的內容有效地量化出其機率分布函數，並將其的正常空間與標準常態空間下自由轉換。為了建立出準確的聯合機率分布，我們還需要填補所蒐集大資料庫中的空洞處，因此我們利用吉普斯取樣法搭配共軛條件，將空洞問題、期望值向量估算、共變異數矩陣估算這三個困難一併解決。

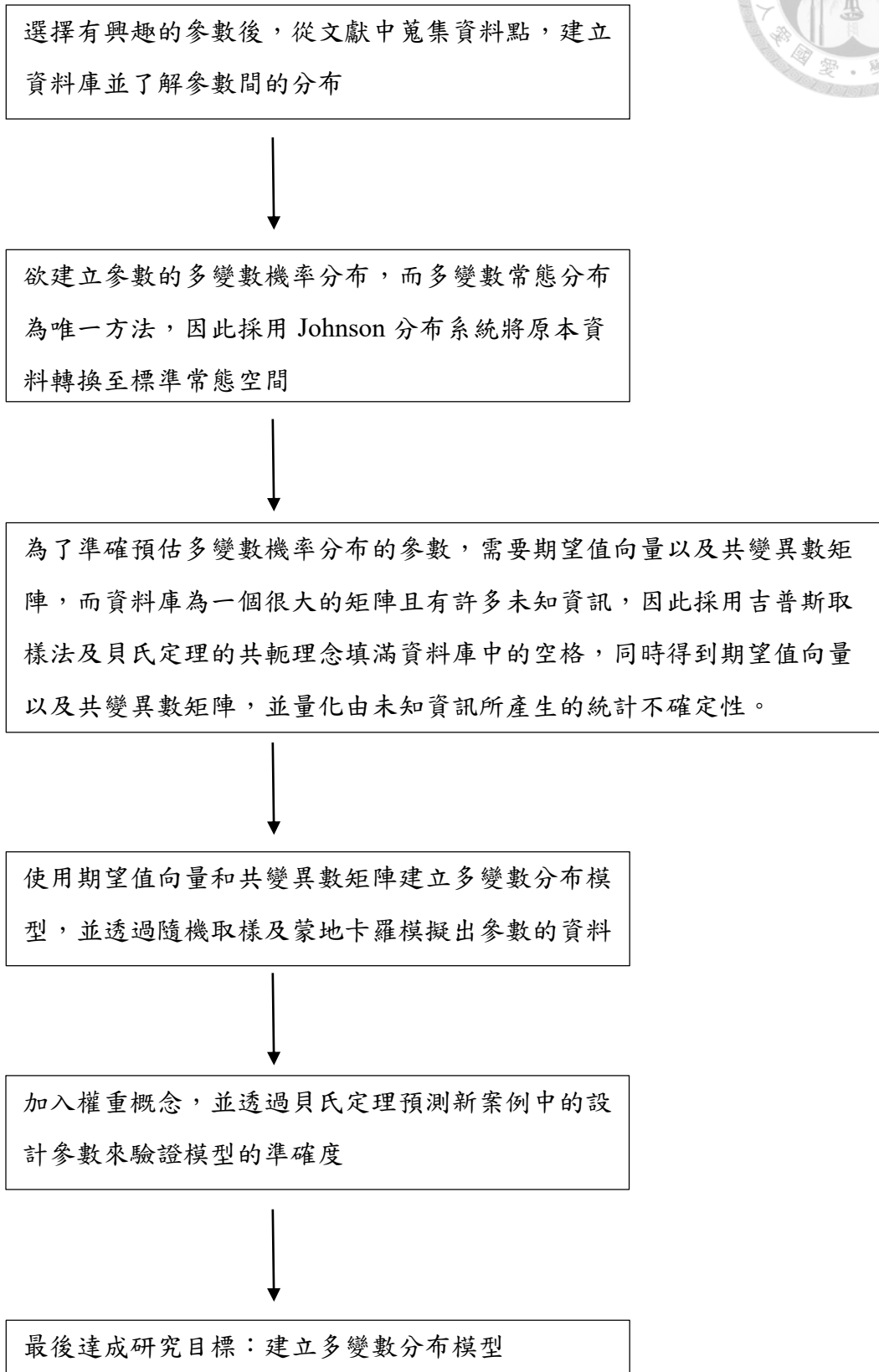


再利用貝氏分析(Bayesian analysis)，藉由條件機率的概念，將這些稱為事前(prior)設計參數的機率密度函數以其他不同事前參數的組合更新成為事後(posterior)機率密度函數。最後，藉由這套我們所建立的多變數分布模型(multivariate distribution model)，可根據現地調查和試驗結果代入對應之轉換模型中進而得到事後機率密度分布，了解其預估值(事後機率分布之中位數值)及變異性(variability)，藉此進行後續的可靠度設計。

此方法學已經應用於前人研究 Ching and Phoon(2014a)及 Ching and Phoon(2014b)，且此方法砂土、黏土和岩石皆可以使用，而此篇研究會將黏土壓密行為重要參數：壓縮指數、回脹指數和壓密係數與其他黏土參數一同進行建置。



1.3 研究流程





1.4 本文內容

第一章：前言

說明本研究的研究動機、研究方法與內容。

第二章：文獻回顧

藉由回顧前人研究了解壓縮指數、回脹指數和壓縮係數與其它參數之間的關係，同時其中模型訓練的資料點也將被彙整於本研究的資料庫中。

第三章：資料庫

說明資料點蒐集來源與處理方法，並比較前人所提之回歸式與資料庫之資訊。

第四章：多變數機率分布模型建置與模擬

以建立之資料庫中，求得選定之八個參數間之相關係數矩陣，利用 Johnson 分布系統擬合八個參數的分布情形和其分布參數，並使用吉普斯取樣法搭配貝氏定理的共軛概念估算期望值向量、共變異數矩陣以及填充的 2000 個樣本，再藉由期望值向量和共變異數矩陣模擬資料去和真實資料進行比對。

第五章：使用貝氏定理預測現地設計參數

利用第四章多變數機率分布模型，用貝氏分析的概念預測現地新的 C_c 、 C_s 和 c_v 的後驗機率分布。以多個實際案例說明此多變數模型的使用流程，驗證模型的準確程度。

第六章：結論與未來建議

總結本研究內容並針對不足的部分提供建議與後續延伸應用。

第二章 文獻回顧

在大地工程中，黏土的壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)及壓密係數(c_v)是重要的壓密參數，這三種參數評估了土壤隨時間變化的變形性，對於計算基礎的沉陷量是很重要的。因此本章節藉由回顧前人文獻，了解這三種參數和其它參數的關聯性，而這些參數間彼此相互轉換的經驗式我們將其稱作轉換模型(transformation model)。

2.1 壓密(Consolidation)

壓密是一個與時間相依的過程，而這個過程指的是飽和土壤中的水因為施加的外部荷重而被擠出孔隙。如圖 2.1，現地有一厚度為 H 的飽和黏土層，黏土層中間覆土壓力為 σ'_v 、初始孔隙比為 e_0 ，此時如果地表加載，覆土壓力增加、孔隙比下降，黏土層進入壓密過程。在無凝聚性土壤(例如:砂土)中幾乎是一瞬間就完成壓密；而在凝聚性土壤(例如:黏土)中，因為其低滲透性的特性，所以壓密完成需要較長的時間。一般而言，壓密理論適用於飽和凝聚性土壤，也是本研究所關注的土壤種類，而此類土壤壓密過程需數週至數年，所需的時間取決於黏土的壓密特性(例如:壓縮性、滲透性)、黏土層的厚度和邊界的排水條件。

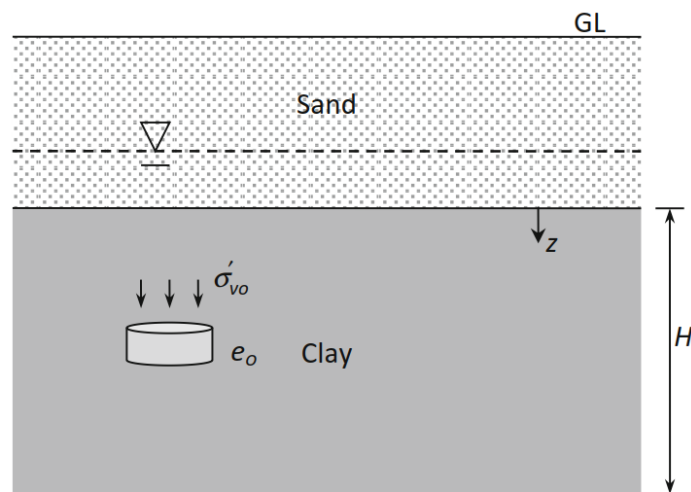


圖 2.1 壓密示意圖

(Ameratunga et al., 2016, p.34)

為了瞭解壓密性質，通常會透過單向度壓密試驗測得參數來瞭解，這些參數包括壓縮係數(a_v)、體積壓密係數(m_v)、壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)、壓密係數(c_v)、二次壓縮指數(C_α)、預壓密應力(σ'_p)。本研究從中選擇了壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)、壓密係數(c_v)三種參數來探討土壤的壓密行為，並瞭解三種參數與其他參數間的關聯性。

2.2 壓縮指數(Compression index, C_c)

凝聚性土壤在加載後激發超額孔隙水壓，此時土壤孔隙比下降，土壤受到的有效應力沿著圖 2.2 所示的路徑 ABC 增加，B 點轉折處為預壓密應力，也就是現地黏土層過去歷史中曾經受到最大的有效壓密應力，在 B 點之後 $e - \log \sigma'_v$ 的變化幾乎為線性，BC 線段的斜率即是壓縮指數(C_c)。

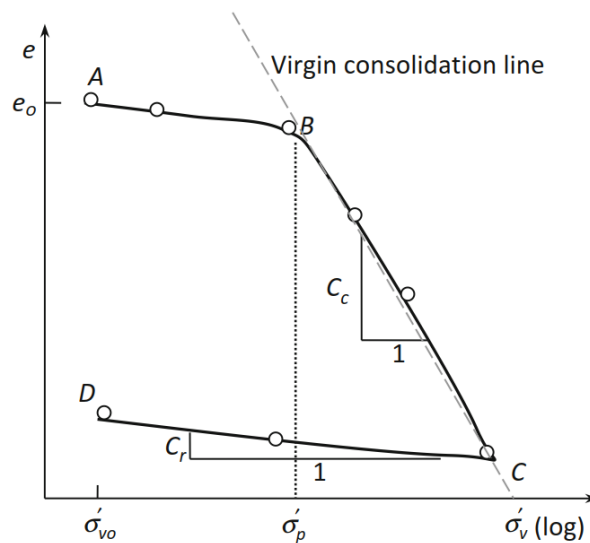


圖 2.2 $e - \log \sigma'_v$ plot

(Ameratunga et al., 2016, p.34)

壓縮指數的定義就是最初壓密線(virgin consolidation line)的斜率，及式

2.1 :

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.1)$$

這段斜率中的黏土為正常壓密狀態($OCR=1$)，壓縮指數為計算最終沉陷量的重要參數。有時會使用另一個形式來替代，就是畫出垂直應變(ϵ_v)與對數有效應力($\log \sigma'_v$)圖，在這個圖中，將初始壓密線(virgin consolidation line)的斜率定義為壓縮比(CR)，及式 2.2：

$$CR = \frac{C_c}{(1 + e_0)} \quad (2.2)$$

Kulhawy and Mayne (1990)根據壓縮指數對土壤的可壓縮性進行了分類，如下表 2.1 所呈現

表 2.1 根據壓縮指數分類土壤壓縮性

(Kulhawy and Mayne, 1990, p. 6-4)

Compressibility	C_c
Slight or low	< 0.2
Moderate or intermediate	0.2 - 0.4
High	> 0.4

凝聚性土壤的壓縮指數與其他參數間的轉換模型，已經有超過 70 個不同的轉換模型被發表，圖 2.3 說明了壓縮指數與其他參數間的變化範圍，可以發現，壓縮指數與含水量間的轉換模型比液性限度和孔隙比多。

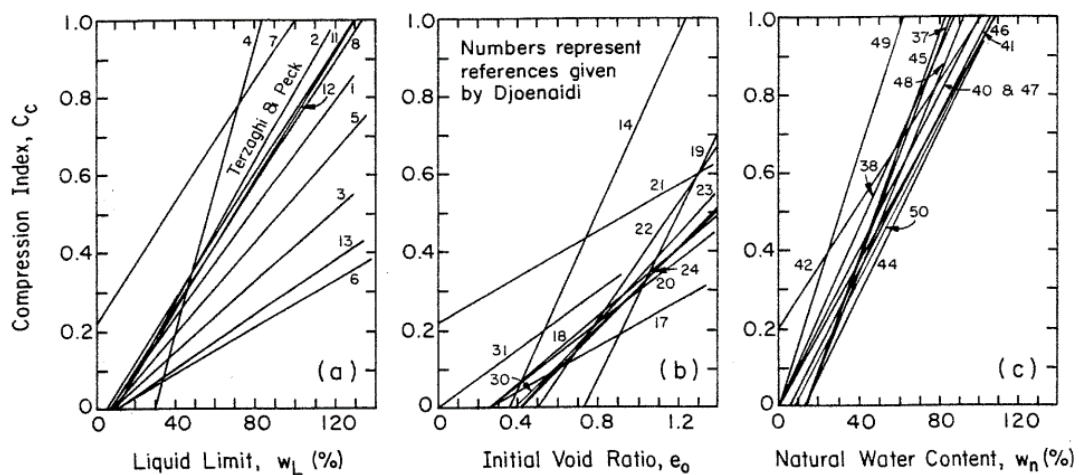


圖 2.3 凝聚性土壤的 C_c 轉換模型

(Djoenaidi, 1985, p.6-67)

雖然在圖 2.3 中，壓縮指數與液性限度的轉換模型都相當分散，但 Terzaghi and Peck (1967)對正常壓密自然黏土(NC natural clay)的轉換模型仍然很受歡迎，這個轉換模型及式 2.3：

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad (2.3)$$

根據 modified Cam clay model，Worth and Wood (1978)也可透過式 2.4 來預估壓密指數。

$$C_c = 0.5G_s \left(\frac{PI}{100} \right) \quad (2.4)$$

在黏土飽和的狀況下，假設黏土比重(G_s)為 2.7，可以得到式 2.5：

$$C_c = \frac{PI}{74} \quad (2.5)$$

除了這些轉換模型，前人也提出不少轉換模型，整理在表 2.2，

Winterkon and Fang (1975)歸納出，未擾動土樣的壓縮指數會比重模土樣大，一般來說，在大地工程中，未擾動土樣的壓縮指數也是我們比較想知道的，因為較符合現地的情況，可以更準確預估沉陷量，表 2.3 為從過去文獻中所得各種未擾動土樣的壓縮指數值。

前面有提到可以使用壓縮比(式 2.2)來呈現壓縮指數，透過這個方法可以將壓縮指數正規化以減少數據的分散(如圖 2.4 所示)，圖 2.4 呈現了壓縮比典型的範圍。

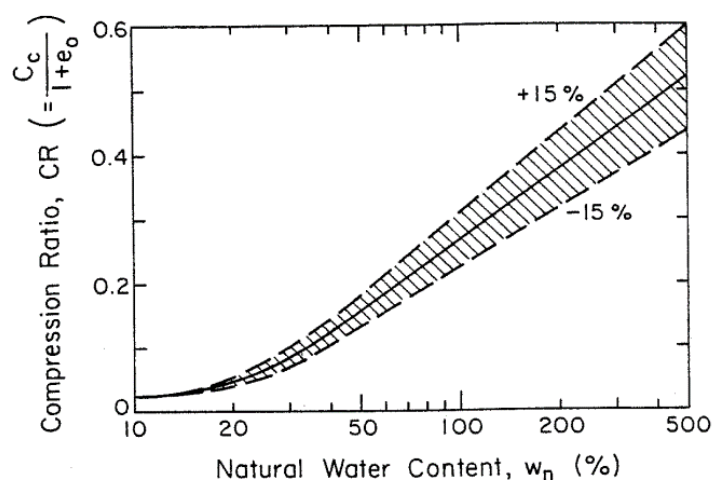


圖 2.4 壓縮比 VS 含水量

(Lambe and Whitam, 1969, p.321)

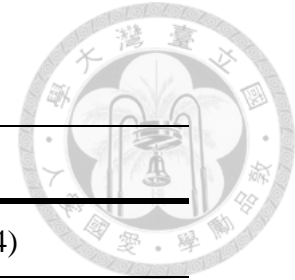
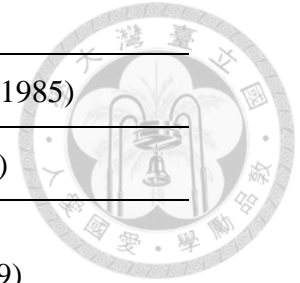


表 2.2 前人壓縮指數轉換模型整理

Transform model	Regions of Applicability	References
$C_c = 0.007(LL-10)$	Remolded clay	Skempton (1944)
$C_c = 0.85(w_n/100)1.5$	Finnish mud and clay	Helene Lund (1951)
$C_c = 17.66 \cdot 10^{-5} w_n^2 + 5.93 \cdot 10^{-3} w_n - 0.135$	Chicago clays	Peck and Reed (1954)
$C_c = 1.15(e_0 - 0.35)$	All Clays	Nishida (1956)
$C_c = 0.3(e_0 - 0.27)$	Inorganic, cohesive soil; silt; some clay	Hough (1957)
$C_c = 0.256 + 0.43(e_0 - 0.84)$	Brazilian clays	Cozzolino (1961)
$C_c = 0.0046(LL-9)$	Brazilian clays	
$C_c = 1.21 + 1.055(e_0 - 1.87)$	Moltey clays from Sao Paulo city	
$C_c = 0.00186(LL-30)$	Moltey clays from Sao Paulo city	
$C_c = 0.43(e_0 - 0.25)$	Brazilian clays	
$C_c = 0.009(LL-10)$	Natural soil	Terzaghi and Peck (1967)
$C_c = 0.075(e_0 - 0.5)$	Soils of very low plasticity	Sowers (1970)
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$	Chicago clays	Azzouz et. al. (1976)



$C_c = 0.006(LL-9)$	All Clays	
$C_c = 0.37(e_0+0.003LL+0.0004w_n-0.34)$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_c = 0.01(w_n-5)$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_c = 0.40(e_0-0.25)$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_c = 0.005I_pG_s$	All remolded normally consolidated clays	Wroth and Wood (1978)
$C_c = (LL-9)/109$	All Clays	Mayne (1980)
$C_c = 0.141G_s^{1.2}[(1+e_0)/G_s]^{2.38}$	Soil from 9 sites in USA	Herrero (1980)
$C_c = 0.5((1+e_0)/G_s)^{2.4}$	-	Oswald (1980)
$C_c = 0.01(w_n-7.549)$	Soil from 9 sites in USA	Rendon-Herrero (1983)
$C_c = 0.37(e_0+0.003LL-0.34)$	-	Bowles (1984)
$C_c = 0.0115w_n$	Organic silts and clays	

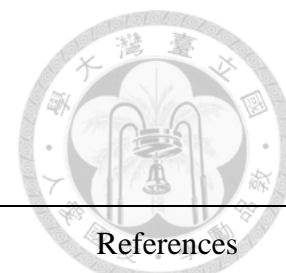


$C_c = 0.2343(LL/100)G_s$	All Clays	Nagaraj and Murty (1985)
$C_c = 0.009w_n + 0.005LL$	All clays	Koppula (1986)
$C_c = 0.015(w_n - 8)$	Cohesive soil in Taiwan	Moh et. al. (1989)
$C_c = 0.54(e_0 - 0.23)$	Taiwan clay	
$C_c = PI/73$	Data from different soils	Kulhawy and Mayne (1990)
$C_c = 0.01w_n - 0.042$	-	Ferreira and Ladeira (1995)
$C_c = 0.009LL + 0.035$	-	
$C_c = 0.61e_0 - 0.17$	-	Tan and Gue (2000)
$\ln C_c = 1.235 \ln w_n - 5.65$	All soil	Lav and Ansal (2001)
$\ln C_c = 1.272 \ln e_0 - 1.282$	All soil	
$C_c = 0.006(LL + 1)$	All soil	
$C_c = (0.001w_n + 0.114)(1 + e_0)$	For alluvial soils	Crumley, et. al. (2003)
$C_c = 0.0098LL + 0.194e_0 - 0.0025PI - 0.256$	East Coast	Yoon et. Al. (2004)
$C_c = 0.0038w_n + 0.12e_0 + 0.0065LL - 0.248$	West Coast	
$C_c = 0.011(I_p - 5.7)$	For cohesive soil	Heng (2006)

$C_c = 0.00454(w_n - 10)$	soft soils in southern Germany	Germany Kempfert Gebreselassie (2006)
$C_c = 1.02 - 0.95e_0$	For overconsolidated low plasticity clay	Gunduz and Arman (2007)
$C_c = -0.023 + 0.001LL + 0.271e_0$	-	Ahadiyan et. al. (2008)
$C_c = 0.287e_0 - 0.015$	Ahwaz Soil	
$C_c = 0.3(e_0 - 0.27)$	Soils in Southeastern Wisconsin.	Edilm and Benson (2009)



表 2.3 種未擾動土樣的壓縮指數
(Ameratunga et al., 2016, p.56)



Soil	C_c	References
Normally consolidated medium sensitive clays	0.2–0.5	Holtz and Kovacs (1981)
Organic clays (OH)	>4	
Boston blue clay, undisturbed (CL)	0.35	Lambe and Whitman (1979)
Chicago clay undisturbed (CH)	0.42	
Cincinnati clay (CL)	0.17	
Louisiana clay, undisturbed (CH)	0.33	
New Orleans clay undisturbed (CH)	0.29	
Siburua clay (CH)	0.21	
Kaolinite (CL/CH)	0.21–0.26	
Na-Montmorillonite(CH)	2.6	
Chicago silty clay (CL)	0.15–0.30	
Boston blue clay (CL)	0.3–0.5	
Vicksburg buckshot clay (CH)	0.5–0.6	
Swedish medium sensitive clays (CL-CH)	1–3	
Canadian Leda clays (CL-CH)	1–4	
Mexico City clay (MH)	7–10	
San Francisco Bay mud (CL)	0.4–1.2	
Bangkok clays (CH)	0.4	

2.3 回脹指數(Swelling index, C_s)

凝聚性土壤在加載後激發超額孔隙水壓，經過一段時間後，在圖 2.2 中 C 點超額孔隙水壓消散，此時孔隙比變大，黏土層隆起，C 點之後 $e - \log \sigma'_v$ 的變化也是線性，CD 線段的斜率即是回脹指數(C_s)，而圖上的符號為再壓指數(C_r)。土壤在垂直方向解壓(unloading)後，土壤將會沿著解壓線(unloading line)回彈或回脹，也就是沿著圖 2.2 中的 CD 線段前進，回脹指數(C_s)為此路徑的斜率；土壤回脹後，再次加載(reloading)後，土壤會再回到正常壓密狀態沿著初始壓密線(virgin consolidation line)繼續前進，也就是圖 2.2 中的 BC 線段前進，從加載後再回到初始壓密線這段路徑的斜率即為再壓指數(C_r)，圖 2.2 中，開始加在後到達預壓密應力這段路徑，即 AB 線段，也可以視為再壓(reloading)，這段路徑的斜率也是再壓指數(C_r)，一般來說，解壓階段(unloading)和再壓階段(reloading)的差異很小且可以被忽略，兩個階段的平均值更常被使用，而這個平均值被稱為解壓-再壓指數(C_{ur})(如圖 2.4 所示)。

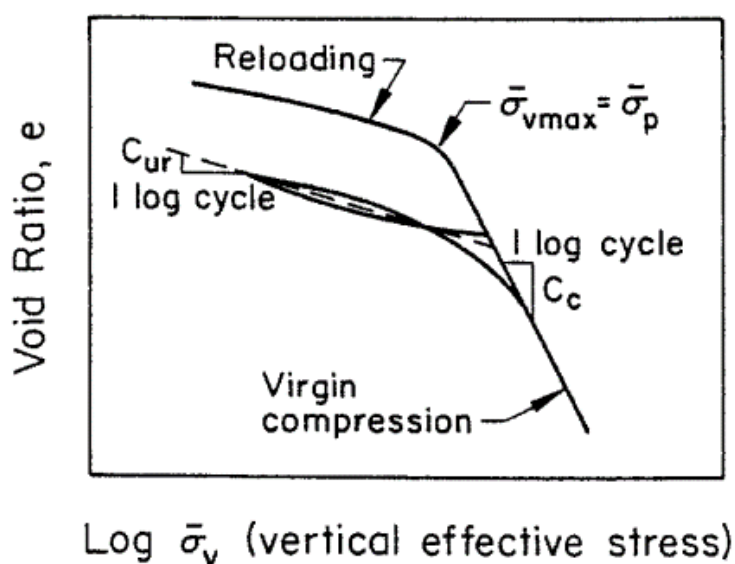


圖 2.5 C_{ur} 示意圖

(Kulhawy and Mayne, 1990, p.6-2)

此時的黏土為過壓密狀態($OCR > 1$)，此狀態在 $e - \log \sigma'_v$ 圖中的斜率為回脹指數的定義，即式 2.6：

$$C_s \approx C_r \approx C_{ur} = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.6)$$

除了從 $e - \log \sigma'_v$ 圖的斜率定義，也可以利用 modified Cam clay model 的 Λ 參數來計算得到解壓-再壓指數(式 2.7)，對於一般黏土 Λ 大約等於 0.8。

$$C_{ur} = C_c(1 - \Lambda) \quad (2.7)$$

將 $\Lambda = 0.8, G_s = 2.7$ 帶入式 2.5 可以得到式 2.8：

$$C_{ur} = \frac{PI}{370} \quad (2.8)$$

圖 2.6 縱軸為回脹指數與解壓-再壓指數，橫軸為縮性指數，圖中的兩條斜線為式 2.5 以及式 2.8 兩個根據 modified Cam clay model 所得到的轉換模型。由這些數據回歸出來的轉換模型，與 modified Cam clay model 只有一點點差距。前人的文獻中指出解壓-再壓指數大約為回脹指數的 10-20%，可以用這個比例來作簡略的換算，圖 2.6 中的數據解壓-再壓指數大約為回脹指數的 20%，也證明了前人所歸納的結果。

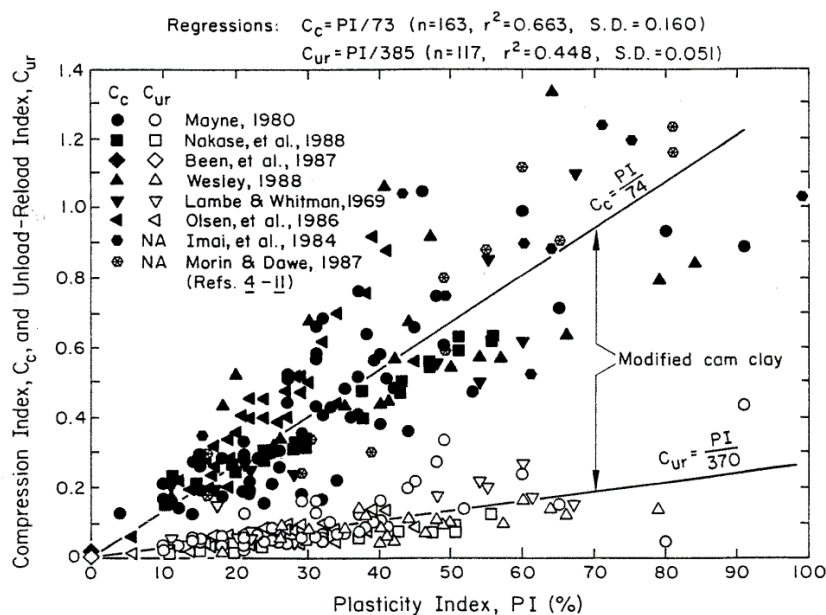


圖 2.6 回脹指數、解壓-再壓指數與塑性指數

(Kulhawy and Mayne, 1990, p.6-5)

表 2.4 為前人回脹指數轉換模型的整理，可以發現，相較於壓縮指數的轉換模型數量，回脹指數的數量少了很多，這表示前人對回脹指數的研究較少，但回脹指數在大地工程中也是預估壓密沉陷量的重要參數。

在表 2.2 及表 2.4 中，前人的轉換模型最常用來預估壓縮指數和回脹指數的參數為含水量(w_n)、液性限度(LL)、孔隙比(e_0)，前人整理的圖 2.3 亦是如此。壓密過程中，會將土壤中的水排出，所以土壤的含水量與兩個指數有關聯性；液性限度量化了土壤表面顆粒吸附水的能力，也就是電雙層的厚度，電雙層越厚，土壤的壓縮性就越大，兩個指數也會越大；孔隙比越大，表示土壤中的孔隙越多，能夠被壓縮的程度也就越高，且兩個指數的定義也與孔隙比有關。前人大多選擇這三種參數來預估壓縮指數和回脹指數也不是沒有原因的，本研究中，除了上述三種參數，加入了塑性指數(PI)並探討其中的關聯性。



表 2.4 前人回脹指數轉換模型整理

Transform model	Reigons of Applicability	References
$C_s = 0.208e_0 + 0.0083$	Chicago clays	Peck and Reed (1954)
$C_s = 0.156e_0 + 0.0107$	All Clays	Elanggar and Krizek (1971)
$C_s = 0.003(w_n + 7)$	Clay from Greece and some parts of USA	Azzouz et al. (1976)
$C_s = 0.126(e_0 + 0.003LL - 0.06)$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_s = 0.003w_n + 0.0006LL + 0.004$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_s = 0.135(e_0 + 0.01LL - 0.002w_n - 0.06)$	Clay from Greece and some parts of USA	
$C_s = PI/385$	Data from different soils	Kulhawy and Mayne (1990)
$C_s = 0.0007LL + 0.0062$	42 test data, Turkey	Isik (2009)



2.4 壓密係數(Coefficient of consolidation, c_v)

2.4.1 壓密係數(c_v)介紹

當黏土層地表受到加載，激發超額孔隙水壓後，黏土層便會開始壓密，而壓密完成的速度取決於壓密係數(c_v)，簡單來說，壓密係數(c_v)量化了壓密速率，壓密係數越大，壓密完成時間越短。一般而言，過壓密黏土的壓密係數比正常壓密黏土的大了一個數量級；結構較緊密的土壤壓密速率也較快。

現地的壓密係數很難評估，這是因為現地的土層中可能含有沙縫(sand seam)、扁豆形沙層(sand lens)或紋層(varves)等情形，這些情況都是實驗室樣本很難達到的，因此實驗得到的壓密係數與現地的壓密係數會有一些差異。此外，如果現地調查不正確，容易使黏土層上下的地層性質評估錯誤，造成錯估排水情況，進而使壓密速率預估錯誤。

Terzaghi (1925)提出了單向度理論，並發表了由三個變數組成的單向度壓密方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.9)$$

- 式中
- u ：為超額孔隙水壓
 - z ：為受壓黏土層的深度
 - t ：為加載後所過的時間
 - c_v ：壓密係數，單向度理論中假設為定值

而壓密係數被定義為：

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2.10)$$

- 式中
- m_v ：為體積壓密係數
 - γ_w ：為水單位重(=9.81 kN/m³)
 - k ：為黏土滲透係數

如果想要計算超額孔隙水壓在特定深度(z)及特定時間(t)下消散的程度，可以透

過壓密比(degree of consolidation)來計算，壓密比被定義為：

$$U(z, t) = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \sin(MZ) e^{-M^2 T} \quad (2.11)$$



其中， $M = (\frac{\pi}{2})(2m + 1)$ ， Z 為無因次的深度因數(depth factor)，被定義為：

$$Z = \frac{z}{H_{dr}} \quad (2.12)$$

T 為無因次的時間因數(time factor)，被定義為：

$$T = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} \quad (2.13)$$

在式 2.12 及式 2.13 中， H_{dr} 為最大排水路徑，當受壓土層為單向排水時， $H_{dr} = H$ ；當受壓土層為雙向排水時， $H_{dr} = H/2$ (H 為受壓黏土層厚度)， U 、 Z 和 T 之間的關係呈現在圖 2.7，從圖 2.7 可以得到任何深度、任何時間的超額孔隙水壓或未消散的孔隙水壓。

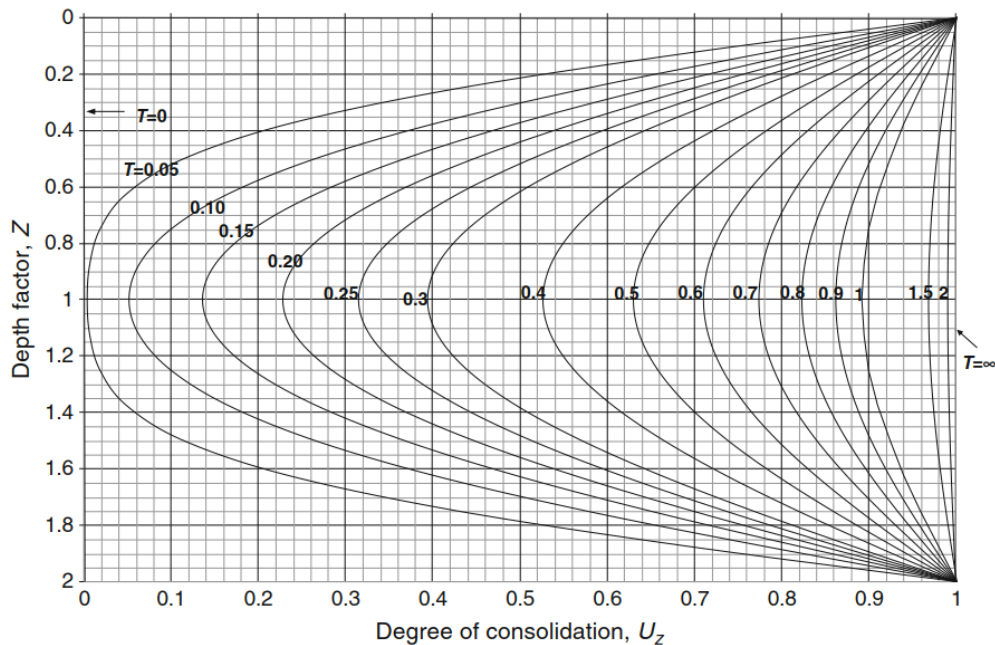


圖 2.7 U-Z-T 關係圖

(Ameratunga et al., 2016, p.36)

表 2.5 為前人提出的壓密係數轉換模型，比回脹指數又少了許多，除轉換模型，前人也有提供一些方法來瞭解壓密係數的範圍，Ameratunga et al. (2016) 中提到，根據黏土的滲透性，低滲透性的黏土到高滲透性的砂質黏土，壓密係數可以從 1 m²/year 變化到 1000 m²/year；Tezaghi et al. (1996) 建議黏土的液性限度為 10-100 時，壓密係數範圍在 0.3-30 m²/year；圖 2.8 為 U. S. Navy (1982) 提出，可以當作粗略指南或是第一階段的預估，用來檢驗實驗得到的壓密係數值。

根據式 2.10 可以得知，土壤的滲透性(k)及體積壓密係數(m_v)跟壓密係數有很大的關聯性，但是此兩種參數跟壓密係數一樣，需要較常實驗時間及較高的費用才能測得，Olson(1998)曾以八種不同塑性指數(PI)為例，指出在現地填土與實驗式分析數據中，皆顯示黏土在受外力荷重(σ'_v)時，壓密係數值會隨外力荷重值的改變而有所不同，如圖 2.9 所呈現，圖中的土壤性質皆不同，壓密係數會隨後荷重改變而變化，而外力荷重(σ'_v)相較於滲透性(k)及體積壓密係數(m_v)，為更容易、便宜取得的參數，因此外力荷重與壓密係數之間的關聯性也是本研究中想瞭解的。

表 2.5 前人壓密係數轉換模型

Transform model	Samples	References
$c_v = 3/(100IS^{3.54})$ (m ² /s)	Remoulded soils	Sridharan and Nagaraj (2004)
$c_v = 7.7525PI^{-3.1021}$ (cm ² /s)		Solanki and Desai (2008)
$c_v = 4 \times 10^{-7} - 4 \times 10^{-9} LL$ (m ² /s)	Soft clays	Soibam et al. (2015)
$c_v = 128.7/3.54IS + 0.0002$ (cm ² /s)	Clays with wide range of liquid limit	Jadhav (2016)

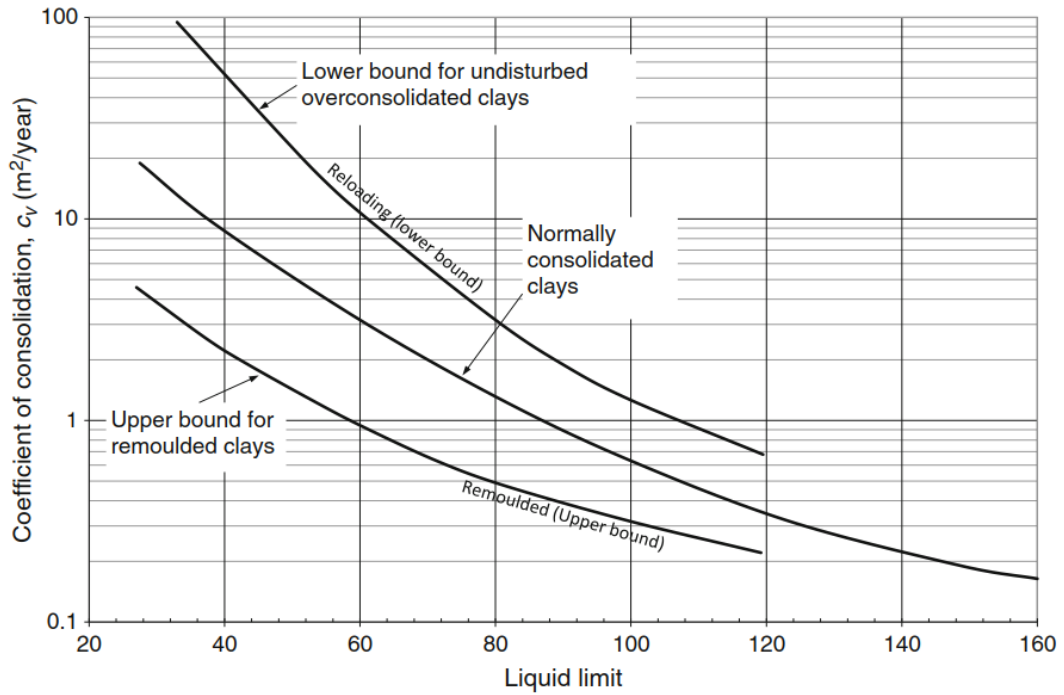


圖 2.8 c_v -LL 關係
(U. S. Navy, 1982)

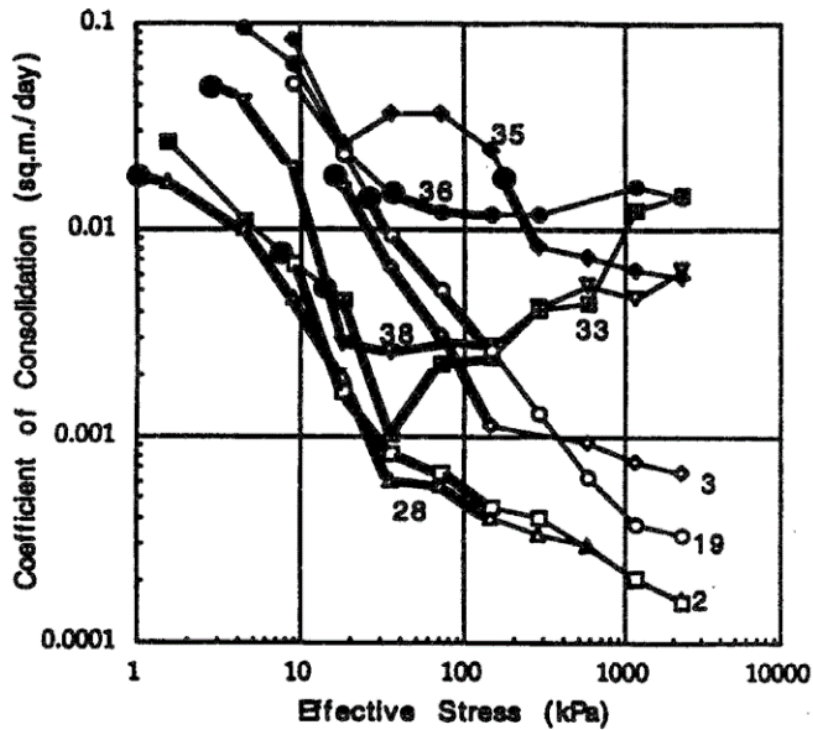


圖 2.9 有效應力與壓密係數關係
(Olson, 1998)



2.4.2 壓密係數評估方法

以往在實驗室中，較常用來評估壓密係數的方法有兩種，分別為平方根時間調整法(square root of time method)及對數時間調整法(logarithm of time method)，接下來將介紹這兩種方法。

一、平方根時間調整法為 Taylor 提出，此方法是以體壓密變形量為縱軸，時間之平方根為橫軸求其 90%平均壓密度時之平方根時間 $\sqrt{t_{90}}$ ，計算方法如下(圖 2.10)：

1. 繪出量測壓密變形量和其對應的 \sqrt{t} ；
2. 於圖上的上端部分向上延伸繪切直線 PQ；
3. 定 $OR=(1.15)(OQ)$ 值，再繪 PR 線；
4. 變形曲線圖與 PR 交於 S 點，S 點之橫坐標為 $\sqrt{t_{90}}$ ；
5. 壓密度為 90%時， $T=0.848$ ，透過式 2.13 可得： $c_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$ 。

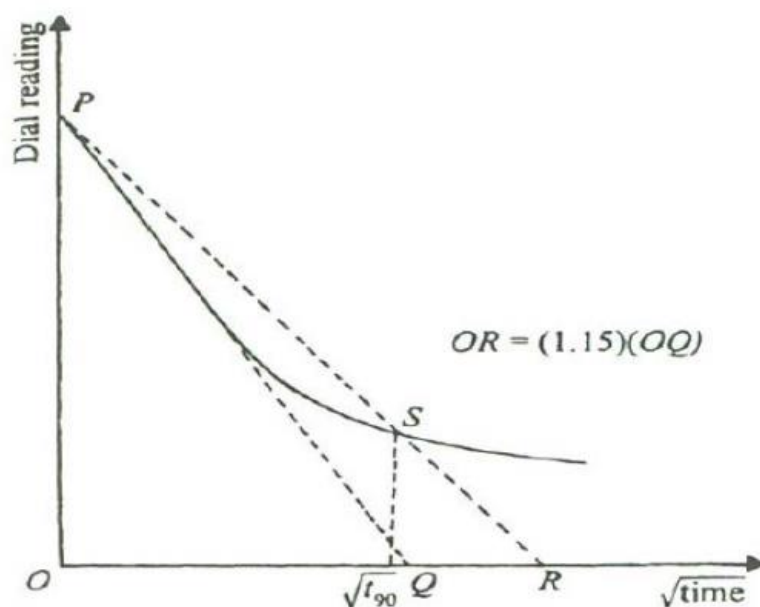


圖 2.10 平方根時間調整法示意圖

(王慧瑜, 2015, p.11)



二、對數時間調整法為 Casagrande 和 Fadum 提出，是以試體壓密變形量為縱軸，對數時間為橫軸之壓密曲線圖，接著求其 50% 平均壓密度時間 t_{50} ，計算方法如下(圖 2.11)：

1. 繪出壓密變形量與加載時間於半對數圖中；
2. 繪 P、Q 於壓密曲線的前端，對應於時間 t_1 和 t_2 ，且 $t_2=4t_1$ ；
3. 於壓密開始時段內 P、Q 兩點量測數據間的差值為 x ，將此 x 值為基礎往上疊加 x 定出 R 點；
4. 繪出水平線 RS，對應的數據為 d_0 ， d_0 表示壓密度為 0% 時；
5. 主壓密曲線和二次壓密曲線直線部分的延伸交於 T 點，T 點所對應的縱座標為 d_{100} ， d_{100} 表示壓密度 100% 時；
6. 於壓密曲線所對應量測數據，求取 $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ ，以此定出 V 點，V 點為壓密度 50% 時的時間 t_{50} ；
7. 壓密度為 50% 時， $T=0.197$ ，透過式 2.13，可得： $c_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$ 。

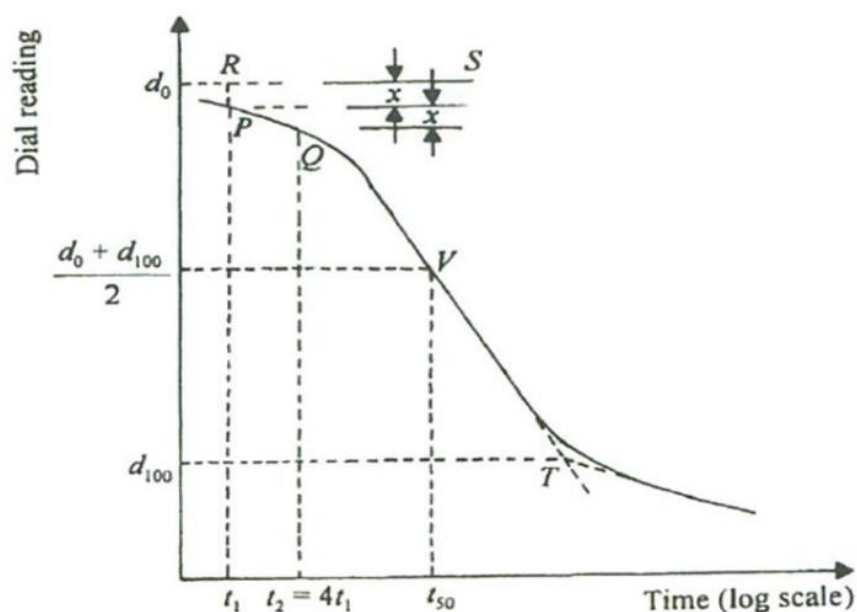


圖 2.11 對數時間調整法示意圖

(王慧瑜, 2015, p.12)

第三章 資料庫



3.1 前言

在大地工程中，基本試驗得到的測量值通常不能直接運用於設計上，需要透過轉換模型將測量值轉換成設計參數才能使用。大部分的轉換模型都是利用實驗數據迴歸分析得到的經驗式，且已經被廣泛使用在大地工程中，作為暫時的權宜之計，然而大多數的轉換模型是針對特定土壤種類和(或)特定區域而開發出來的。

如果沒有了解土壤種類和地質清況，就將這些模型不加選擇地應用於其他地點是不明智的，位點特異性(site-specific)是這些模型運用的限制，在大地工程中必須瞭解每個模型的限制，以免設計錯誤。與位點特異性(site-specific)模型相反，Ching and Phoon (2012)展示了「全球(global)模型」的建置，全球(global)模型根據涵蓋許多地點和土壤類型的全球資料庫進行較準。Ching and Phoon (2012)中觀察到位點特異性(site-specific)模型通常比全球(global)模型更準確，但是應用到另一個地點時，可能會有顯著的誤差，相反地，全球(global)模型雖不如位點特異性(site-specific)模型精確，但它們的誤差較小，且這個觀察結果已得到工程師的高度讚賞

因此在本章節中，將展示我們研究室蒐集的黏土全球資料庫，資料庫中的資料為大量前人訓練其模型的資料或是某項工程的研究資料。我們將這些資料彙整起來，試圖把這些文獻內可能僅代表某些特定類型、區域特性之黏土，擴展為一可大致代表整個黏土特性的全球資料庫。



3.2 本研究資料庫介紹

本資料庫為 Ching and Phoon (2014b)中的資料庫「CLAY/8/7490」的擴張，總共彙整了 427 篇文獻內的資料，並將擴張的資料庫命名為

「CLAY/8/12225」，其中，取名「CLAY」代表本資料庫中只蒐集凝聚性土壤；數字「8」表示在我們所蒐集的完整的資訊中選出 8 個主要感興趣的參數，包含：液性限度(LL)、塑性指數(PI)、含水量(w_n)、孔隙比(e_0)、垂直有效應力(σ'_v)、壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)、壓密係數(c_v)；數字「12225」則代表資料庫內所涵蓋的資料點數量。來自同一篇文獻的資訊筆數介於 1 至 664 筆之間，資料來源地點遍佈世界各地，包括：澳洲、奧地利、孟加拉、比利時、巴西、汶萊、加拿大、智利、中國、哥倫比亞、賽普勒斯、丹麥、埃及、英格蘭、芬蘭、法國、德國、迦納、希臘、香港、約旦、印度、印尼、伊拉克、伊朗、愛爾蘭、義大利、日本、韓國、馬來西亞、墨西哥、荷蘭、紐西蘭、北愛爾蘭、奈及利亞、挪威、巴拿馬、巴布亞紐幾內亞、菲律賓、波蘭、葡萄牙、蘇丹、南非、沙烏地阿拉伯、新加坡、瑞典、西班牙、台灣、泰國、千里達及托巴哥、土耳其、英國、美國、委內瑞拉、越南。本研究總共涵蓋 12225 資料筆數，而每一筆資料代表紀錄於 excel 檔案中的一列，同一列所紀錄的資訊就代表在同一工址、相同的深度等接近條件下該文獻所量測而得之所有土壤參數，excel 的資料整理在附錄I中，附錄中第一行為蒐集的第幾篇文獻；第二行為該筆資料的文獻；第三行為該文獻中紀錄的工址所在的國家及地點，其中

「remolded」代表該篇文獻中的資料來自重模樣本(remolded sample)，

「unknown」代表該篇文獻並無紀錄工址所在的國家及地點；第四行為該文獻中所涵蓋的資料筆數；其餘行為該文獻中參數值的範圍。

由這些參數中主要挑選出十個參數，其中三個為本研究之目標參數，分別為：壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)、壓密係數(c_v)，前兩者對於計算總沉陷量(或最終沉陷量)是不可或缺的參數，而第三者量化了壓密過程的速度，可以計算壓

密一段時間後的沉陷量，三個皆為大地工程中計算沉陷量的重要參數，而其他五個參數為一般認為可能影響目標參數的因子。這些參數主要分為基本物理性質(basic physical properties)、應力性質(Stresses)、壓密參數(Consolidation parameters)三類並呈現在表 3.1。

八個參數的統計數據列於表 3.2 中，第二行為各個參數的資料點數量，其它行的統計數據分別為期望值(Mean)、變異係數(COV)、最小值(Min)和最大值(Max)。因為 LL、PI、 σ'_v 和 c_v 的資料點分布範圍較廣，所以我們將這四個參數的資料點都取自然對數(natural logarithm)以縮小分布範圍、便於判讀， w_n 、 e_0 、 C_c 和 C_s 分布範圍較小，所以維持原狀，而為了使符號簡潔，我們也將每個參數定義為 Y_1 、 Y_2 、...至 Y_8 ，如表 3.3 所示。

表 3.4 為資料庫中的資料點數量，對角線上的數字代表單一參數的資料量，非對角線上的數字代表兩兩參數間的資料點數量，和表 3.2 一樣，用方塊將表格分成了三組。其中， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_5 為原本研究室資料庫中已有的參數，所以單一參數的資料量相較於其他參數多出了許多；而在 Y_6 、 Y_7 、 Y_8 三個壓密參數中， Y_6 是最多的，這可能和前人主要的研究方向有關，前人的轉換模型也是 Y_6 最多。

相關性(correlation)的概念可粗略地以一量測參數(Y_i)是否可以有效降低預測參數(Y_j)之不確定性，若 Y_i 與 Y_j 為完美正相關則表示參數 Y_j 可準確地由 Y_i 所推求而無誤差，若兩者無相關性，則代表 Y_i 無法有效地預測 Y_j 參數且伴隨著極大之不確定性。表 3.5 為各項參數間的相關係數，為皮爾遜(Pearson product-moment)相關係數。可以發現 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 與 Y_6 、 Y_7 有一定程度的相關性，這會使我們之後預測 Y_6 和 Y_7 較容易且準確；而 Y_8 與其他參數間的相關性較低，這會使我們之後較難預測 Y_8 ，但我們仍希望可以試著預測 Y_8 ，因為此參數亦是工程中重要參數。

Ching and Phoon (2014b)中的資料庫 CLAY/10/7490 整理了 251 篇文獻中的資料，並將蒐集的參數分為指數性質、應力與強度性質、CPTU 資料參數三大

類，並在可靠度的架構下，提出工程設計之建議，本資料庫與 Ching and Phoon (2014b)研究方向相同，並由 CLAY/10/7490 去擴張，增加了三個目標參數，並選擇不同的影響目標參數的因子參數(包含已有的已及增加的)去做分析、模擬、驗證。



表 3.1 參數分類

基本物理性質	指數性質	LL、PI
	一般物理性質	w_n 、 e_0
應力性質	σ'_v	
壓密資料參數	C_c 、 C_s 、 c_v	

表 3.2 各參數的統計數據

Variable	n	Mean	COV	Min	Max
LL	9572	62.8	0.63	18	550
PI	9169	35	0.98	2	493
w_n	8054	54.7	0.75	5.8	559.5
e_0	3168	1.35	0.74	0.132	14.663
σ'_v (kPa)	5581	171.04	1.38	0.3582	3200
C_c	5641	0.63	1.06	0.008	7.3
C_s	1800	0.08	1.33	0.0027	2.1598
c_v (cm ² /sec)	1085	0.065	8.53	1.3952e-10	1.4059

表 3.3 變數定義($Y_1 \sim Y_8$)

Basic physical properties				Stresses	Consolidation parameters		
Y_1	Y_2	Y_3	Y	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8
$\ln(LL)$	$\ln(PI)$	w_n	e_0	$\ln(\sigma'_v)$	C_c	C_s	$\ln(c_v)$

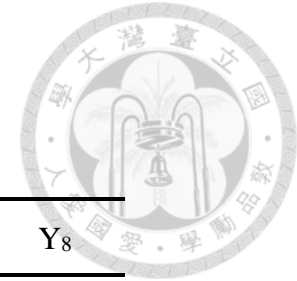


表 3.4 資料庫資料點數量

	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈
Y ₁	9665	8889	7081	1907	5066	3444	865	914
Y ₂		9790	7115	1863	5155	3014	865	815
Y ₃			8150	1844	4378	3039	791	680
Y ₄		Basic physical properties			1068	3002	722	573
Y ₅					5943 Stresses	1328	267	665
Y ₆						5642	1636	819
Y ₇							1798	273
Y ₈						Consolidation parameters		1099

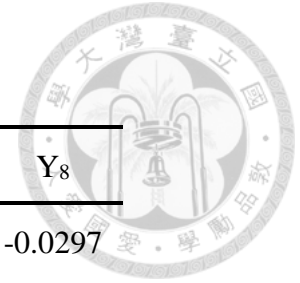


表 3.5 土壤參數間相關係數(Pearson(ρ_{ij}))

	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	
Y ₁	1	0.9719	0.8164	0.7899	-0.0722	0.6535	0.5974	-0.0297	
Y ₂		1	0.7513	0.7158	-0.0687	0.6739	0.5464	-0.0221	
Y ₃			1	0.9186	-0.2204	0.7166	0.4617	-0.073	
Y ₄		Basic physical properties		1	-0.0256	0.7196	0.7686	-0.0253	
Y ₅					1 Stresses	-0.0227	0.0120	-0.0112	
Y ₆					Symmetry		1	0.678	-0.0475
Y ₇							1	0.0461	
Y ₈							Consolidation parameters	1	



3.3 蒐集資料點方法

資料數據來源為文獻上的圖或者表，蒐集之資料盡量保持第一手資訊，因此蒐集時需閱讀文章來做確認是否為一手資訊。若文獻為圖片，則本研究採用 DigXY 軟體蒐集資料，它是一種抓座標之軟體，能精準地辨別所選點之座標，而座標可由使用者自由輸入。

3.4 檢驗資料庫的正確性

在資料蒐集完成後，我們會透過兩個階段來檢驗資料庫的正確性：

- 第一階段：

將前人轉換模型所使用到的參數兩兩參數間的點關係圖畫出，再將轉換模型的線段也加上去，挑出與轉換模型不同趨勢或是自成一種趨勢的資料點，並檢查資料是否有紀錄錯誤；如果轉換模型有使用超過一個參數去預估目標參數，便畫出紀錄的真實值與帶入轉換模型的預估值關係圖，再將 1:1 線段加上去，挑出遠離 1:1 線段的資料點，並檢查資料是否有紀錄錯誤。

- 第二階段：

從資料庫中隨機取樣一百筆資料，重新一個一個比對文獻和 excel 檔中的數字，檢查是否有錯誤，將這一百筆修改正確後，再隨機取樣一百筆檢核，重複此步驟，直到一百筆全部都是正確才停止。

在兩個階段中發現錯誤，若為系統錯誤需要整個修正，若為人為紀錄上的錯誤則進行單一修正即可。

3.5 本研究資料庫資料與前人轉換模型之對比

本小節將從第二章的表 2.2、表 2.4 及表 2.5 所整理的轉換模型中，挑出工程中較常使用的或是較具代表性的與資料庫中的資料做對比，結果為圖 3.1 至圖 3.18。

大部分資料點的趨勢斜率沒有相差很大，但有一部分的資料自成趨勢，斜率特別大，如圖 3.2 中 C_c 和 LL 的散佈圖，有一部分的資料點 C_c 很大， LL 卻沒有很大，我們認為會造成這個情形的原因可能有兩個，第一個是這些資料的土壤為敏感黏土(sensitive clay)，此類黏土為支搭結構，也就是孔隙比會很大，受外力後，支搭結構很容易被壓垮，壓垮後土壤會很像液體狀態，所以壓縮指數(或回脹指數)會很大，因此我們使用液性指數(Liquidity index, $LI = \frac{w_n - PL}{PI}$)將 $LI > 1$ 當作 sensitive clay， $LI < 1$ 當作 insensitive clay；第二個是這些資料的土壤為現地樣本(in-situ sample)，也就是非實驗室重模樣本(remolded sample)，現地樣本的壓縮指數正常情況下會比重模樣本大。所以在與前人轉換模型的比較時，也有將資料分為：in-situ, remolded, $LI < 1$, $LI > 1$ 四種情況去對比，如圖 3.1 的結果，in-situ 與 $LI > 1$ 確實都有包含斜率較大的資料點，而在之後建置多變數機率分布模型時，也會分成五個部分去建置，分別為：

- (1)全部資料模型：資料庫中所有的資料；
- (2) $LI < 1$ 模型：insensitive clay；
- (3) $LI > 1$ 模型：sensitive clay；
- (4) in-situ 模型：in-situ sample；
- (5) remolded 模型：remolded sample。

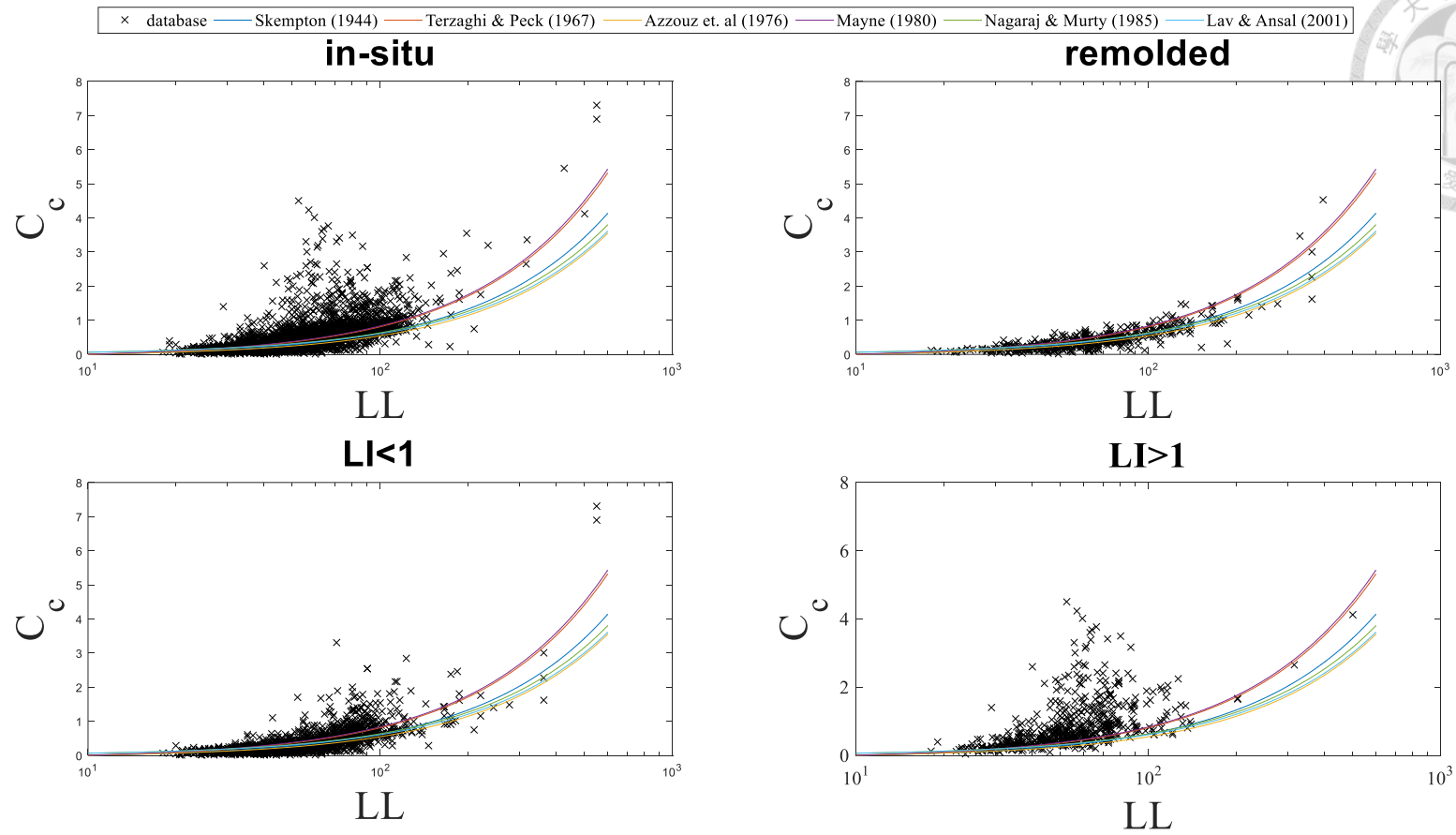
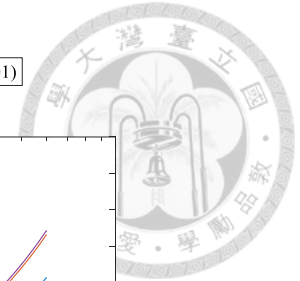


圖 3.1 C_c 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

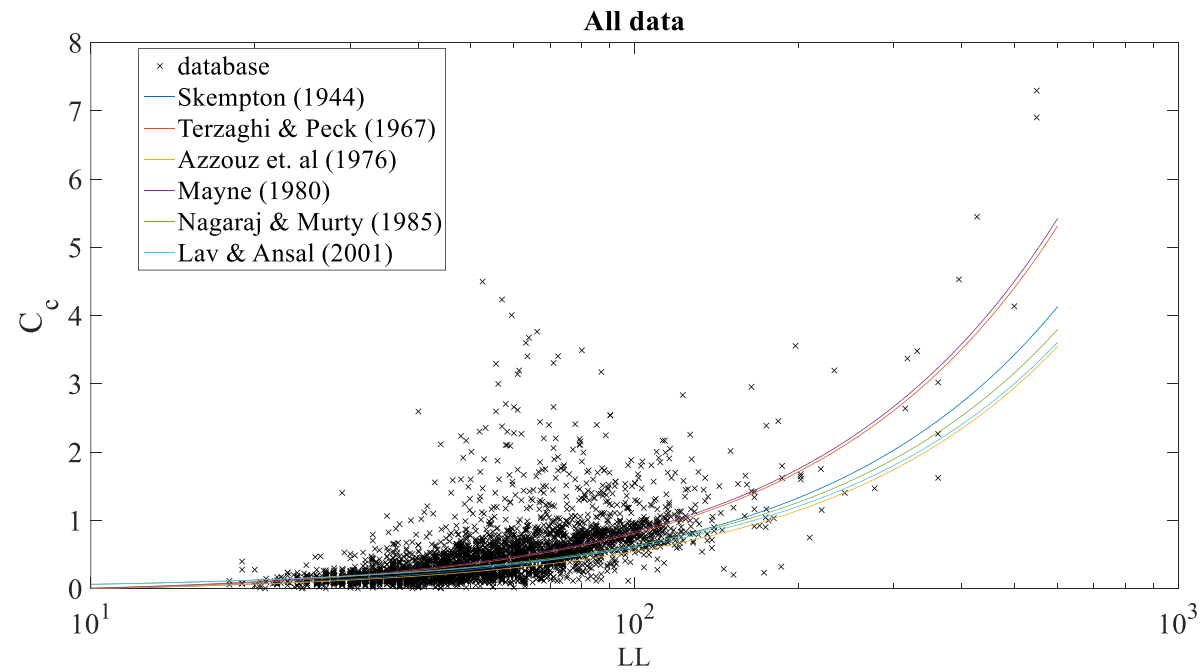


圖 3.2 C_c 與 LL 轉換模型比較(全部資料)

表 3.6 圖 3.1 和圖 3.2 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_c = 0.007(LL-10)$	Skempton (1944)
$C_c = 0.009(LL-10)$	Terzaghi & Peck (1967)
$C_c = 0.006(LL-9)$	Azzouz et al. (1976)
$C_c = (LL-9)/109$	Mayne (1980)
$C_c = 0.2343(LL/100)G_s$ (假設 $G_s = 2.7$)	Nagaraj & Murty (1985)
$C_c = 0.006(LL+1)$	Lav & Ansal (2001)

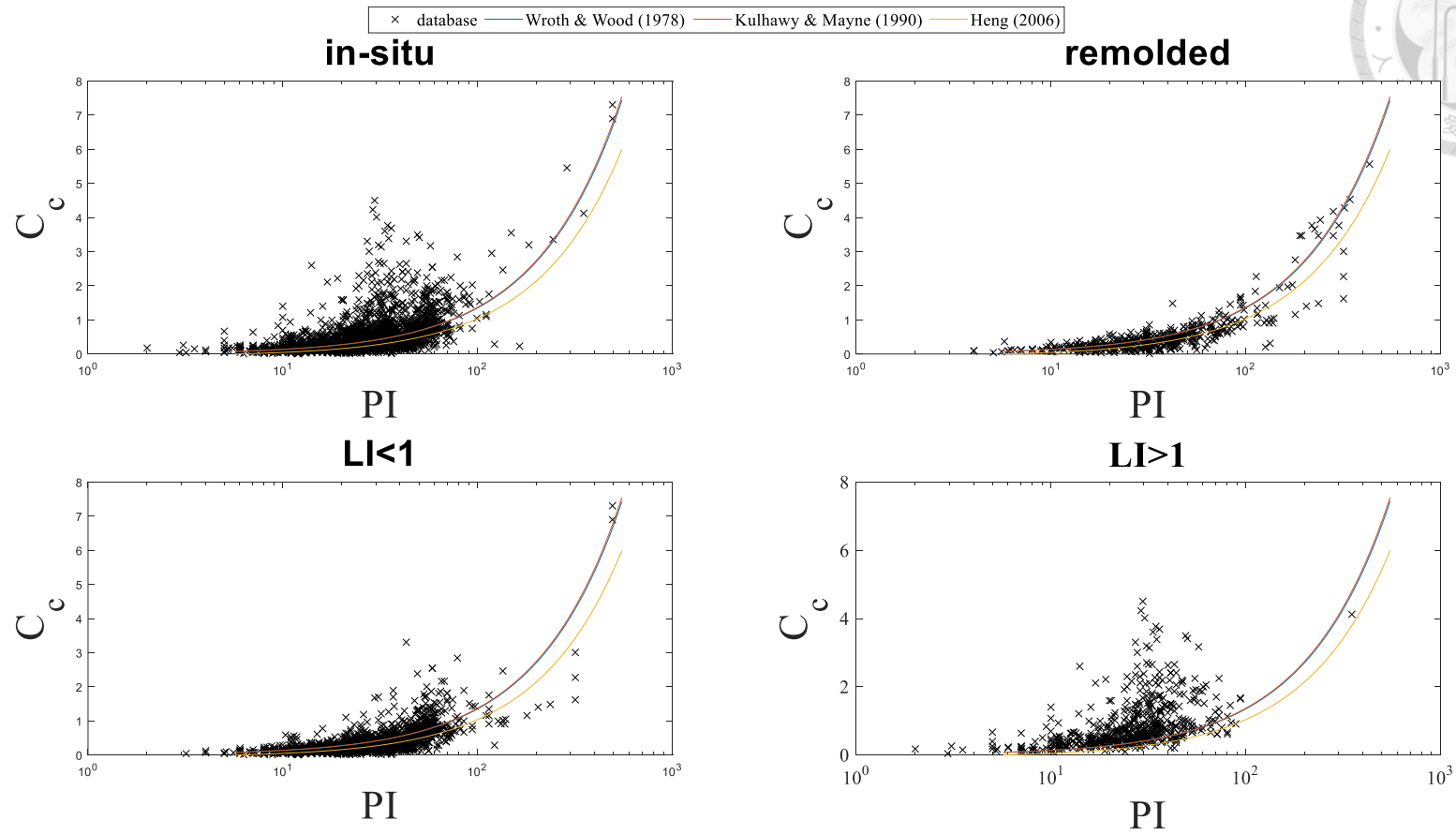
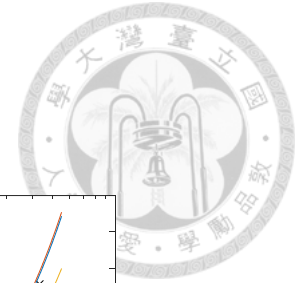


圖 3.3 C_c 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

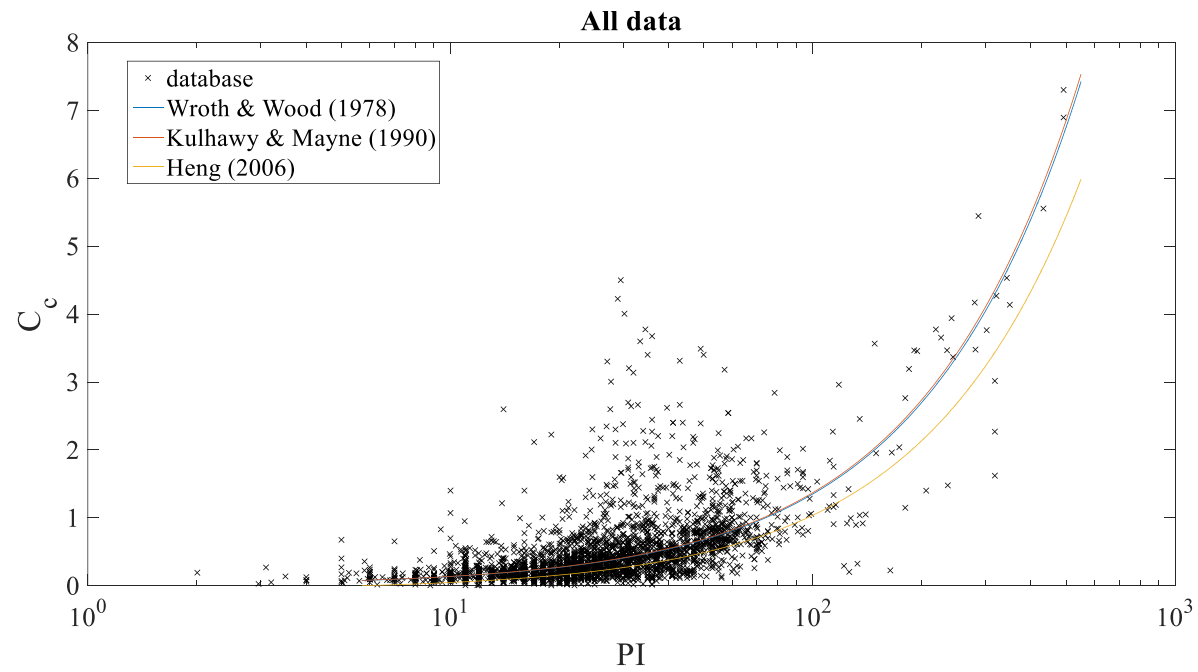


圖 3.4 C_c 與 PI 轉換模型比較(全部資料)

表 3.7 圖 3.3 和圖 3.4 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_c = 0.005PIG_s$ (假設 $G_s = 2.7$)	Wroth & Wood (1978)
$C_c = PI/73$	Kulhawy & Mayne (1990)
$C_c = 0.011(PI-5.7)$	Heng (2006)

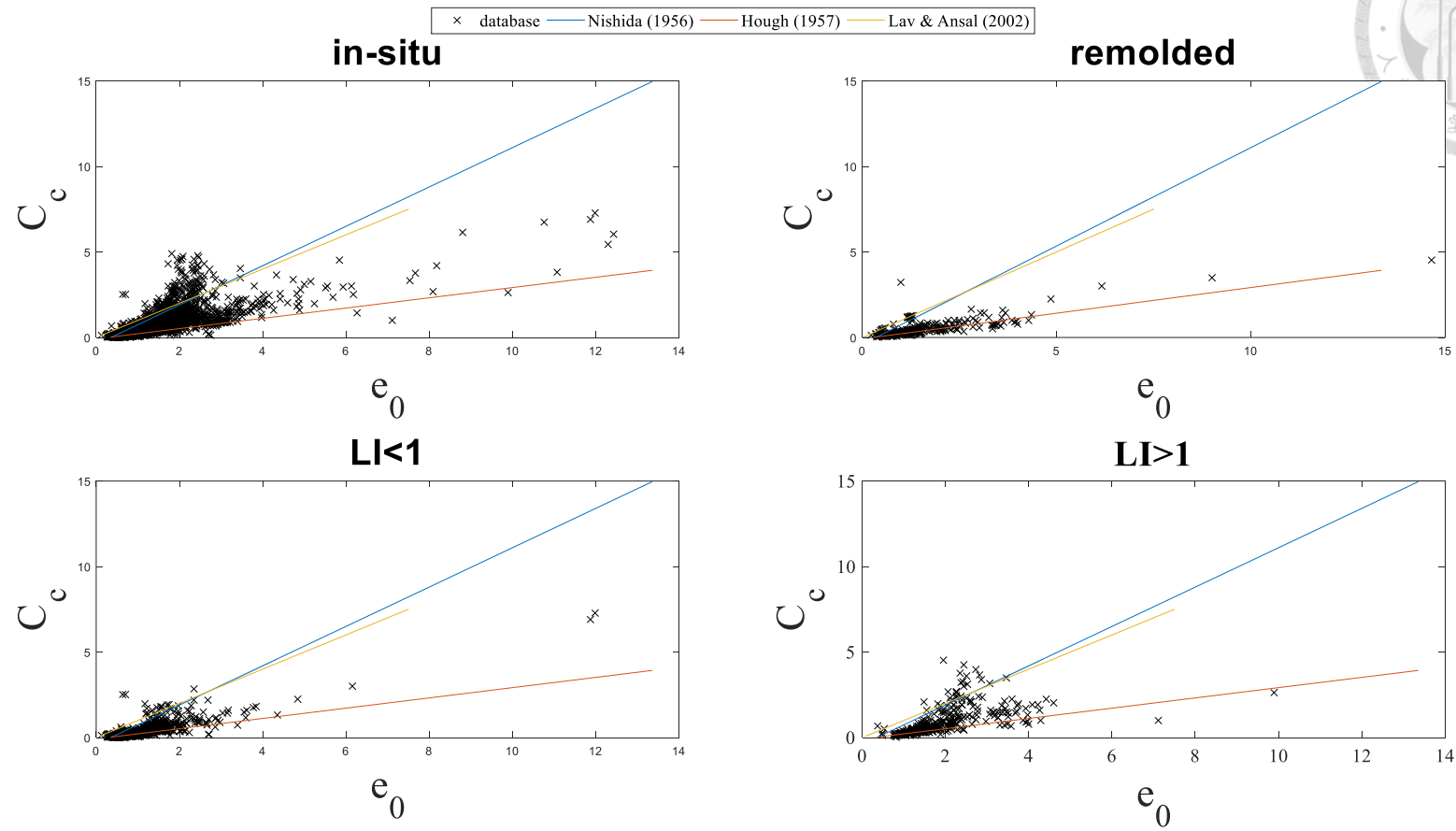
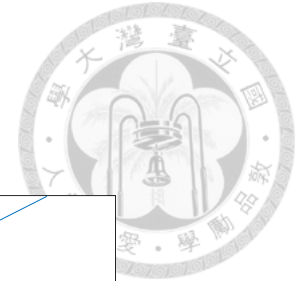


圖 3.5 C_c 與 e_0 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

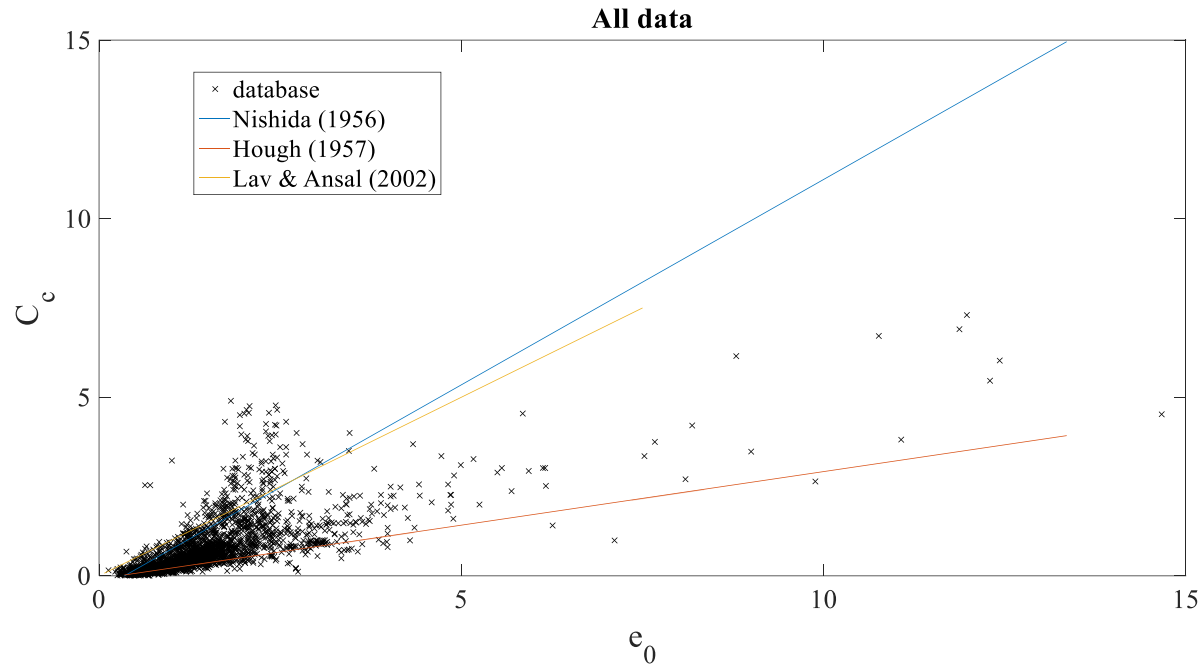


圖 3.6 C_c 與 e_0 轉換模型比較(全部資料)

表 3.8 圖 3.5 和圖 3.6 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_c = 1.15(e_0 - 0.35)$	Nishida (1956)
$C_c = 0.3(e_0 - 0.27)$	Hough (1957)
$\ln C_c = 1.272 \ln e_0 - 1.282$	Lav & Ansal (2002)

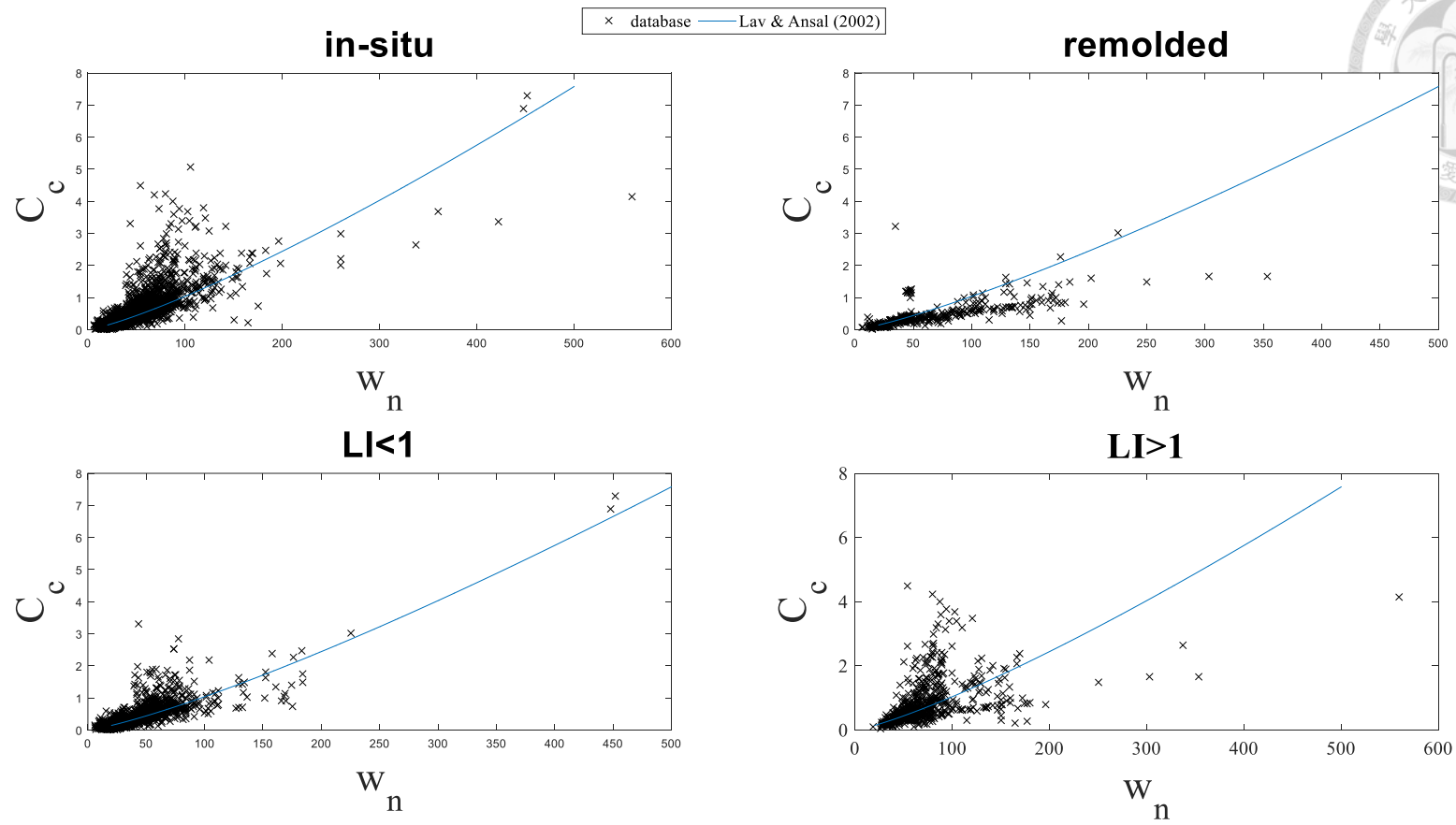
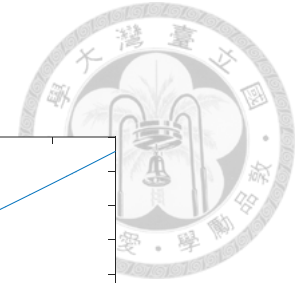


圖 3.7 C_c 與 w_n 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

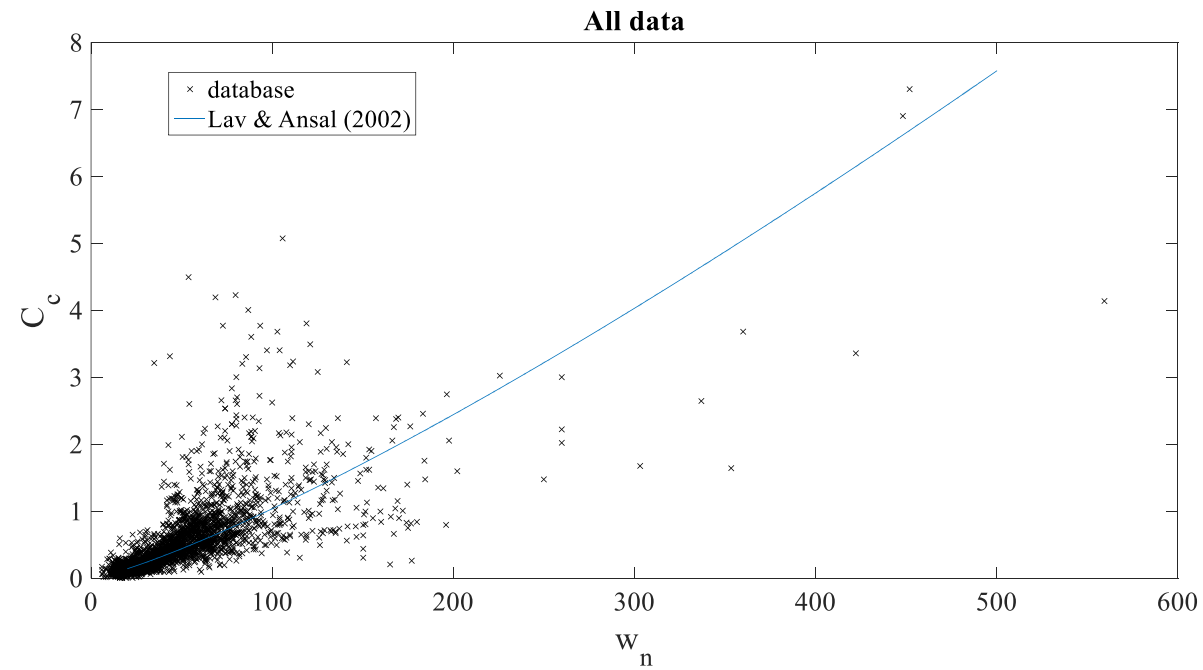


圖 3.8 C_c 與 w_n 轉換模型比較(全部資料)

表 3.9 圖 3.7 和圖 3.8 轉換模型整理

Transform model	Reference
$\ln C_c = 1.235 \ln w_n - 5.65$	Lav & Ansal (2002)

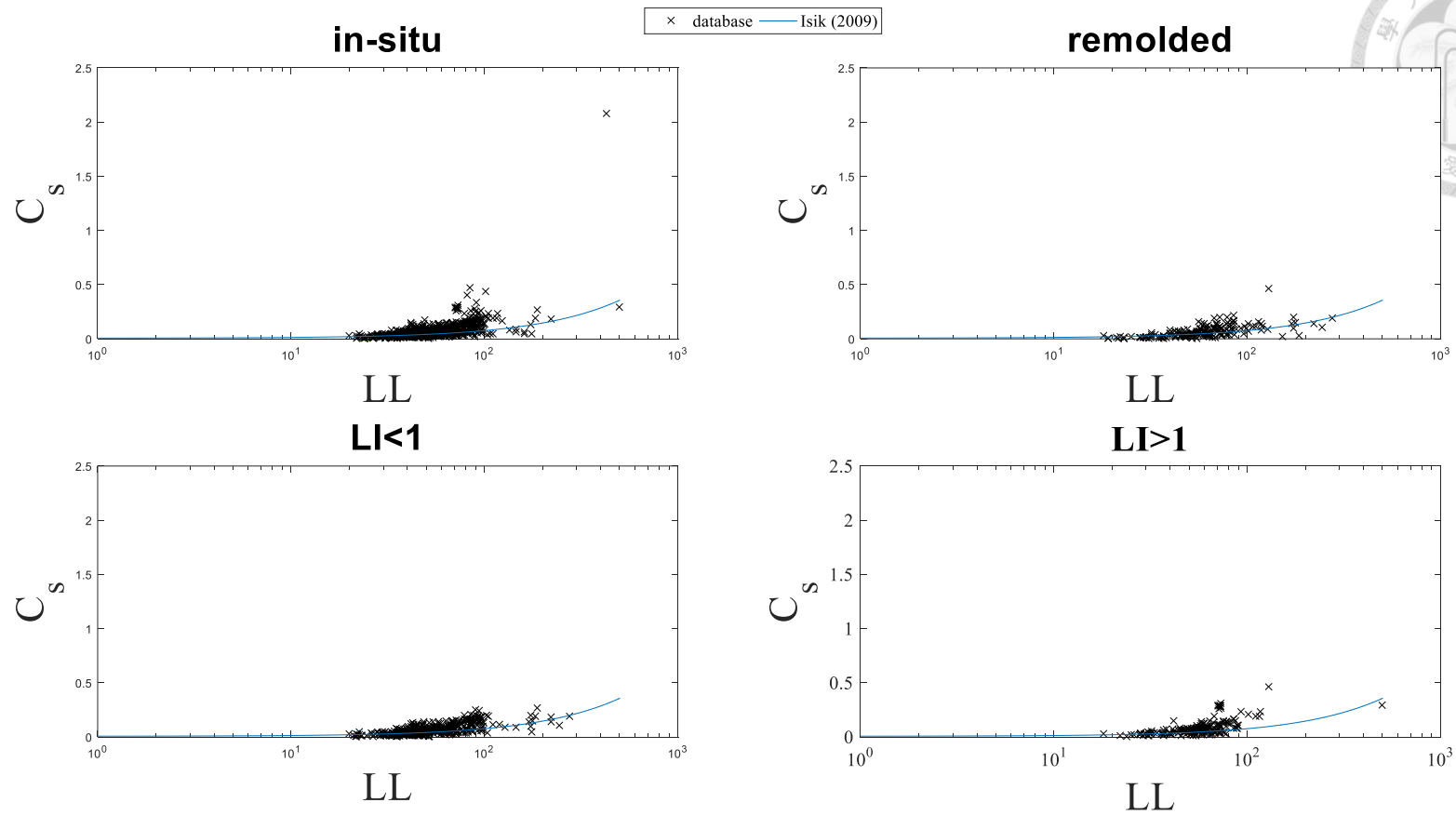
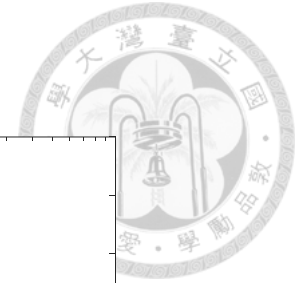


圖 3.9 C_s 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, $LI<1$, $LI>1$ 資料)

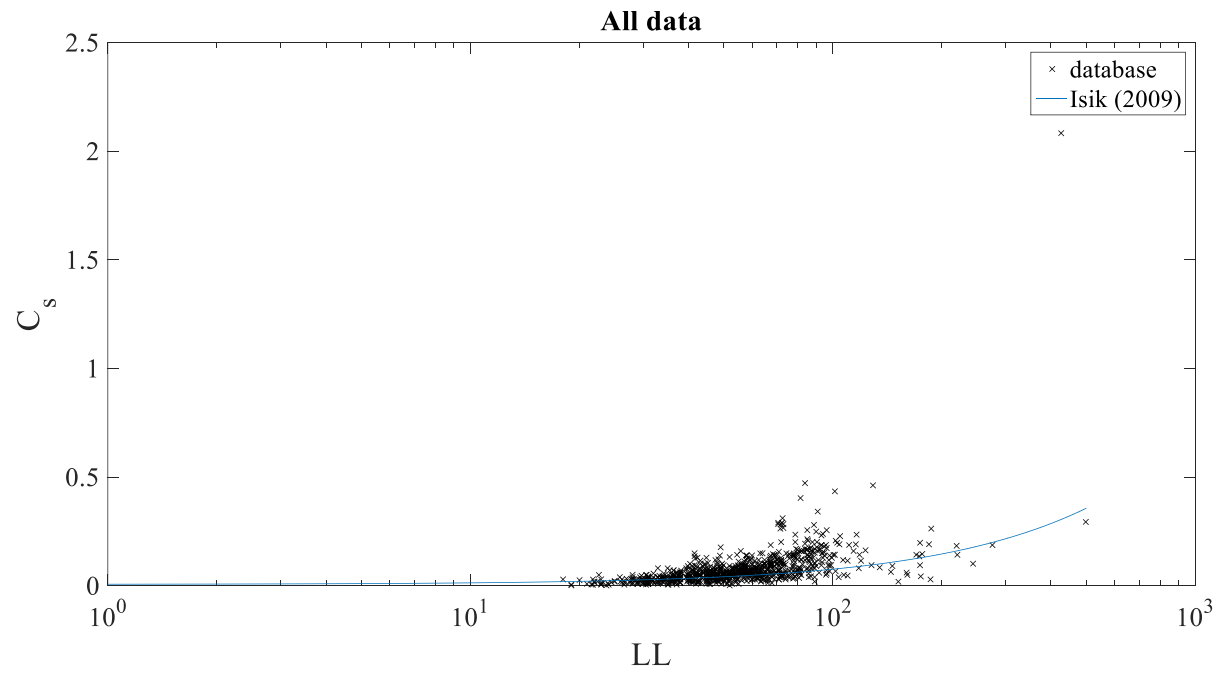


圖 3.10 C_s 與 LL 轉換模型比較(全部資料)

表 3.10 圖 3.9 和圖 3.10 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_s = 0.0007LL + 0.0062$	Isik (2009)

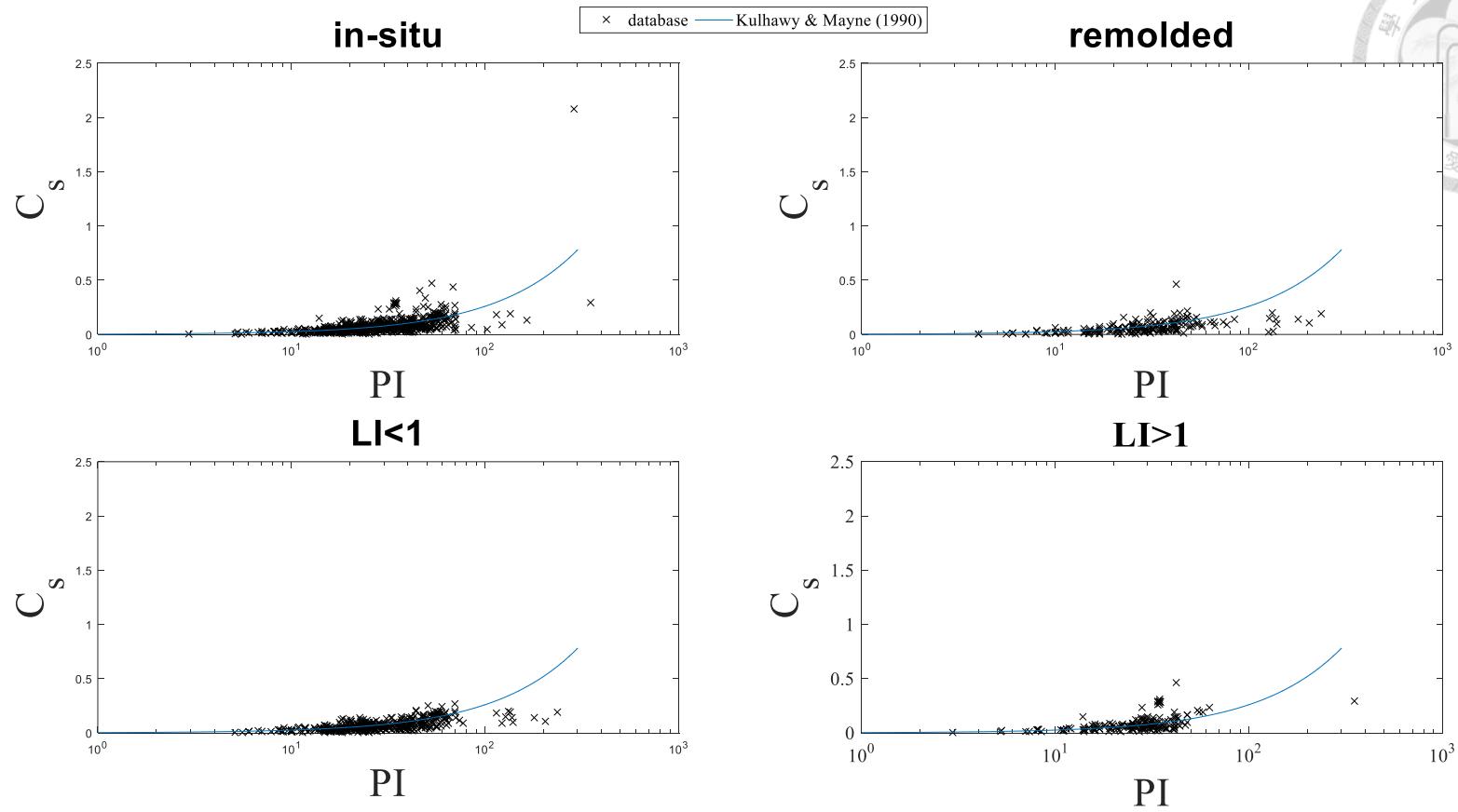
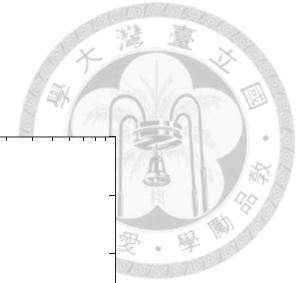


圖 3.11 C_s 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

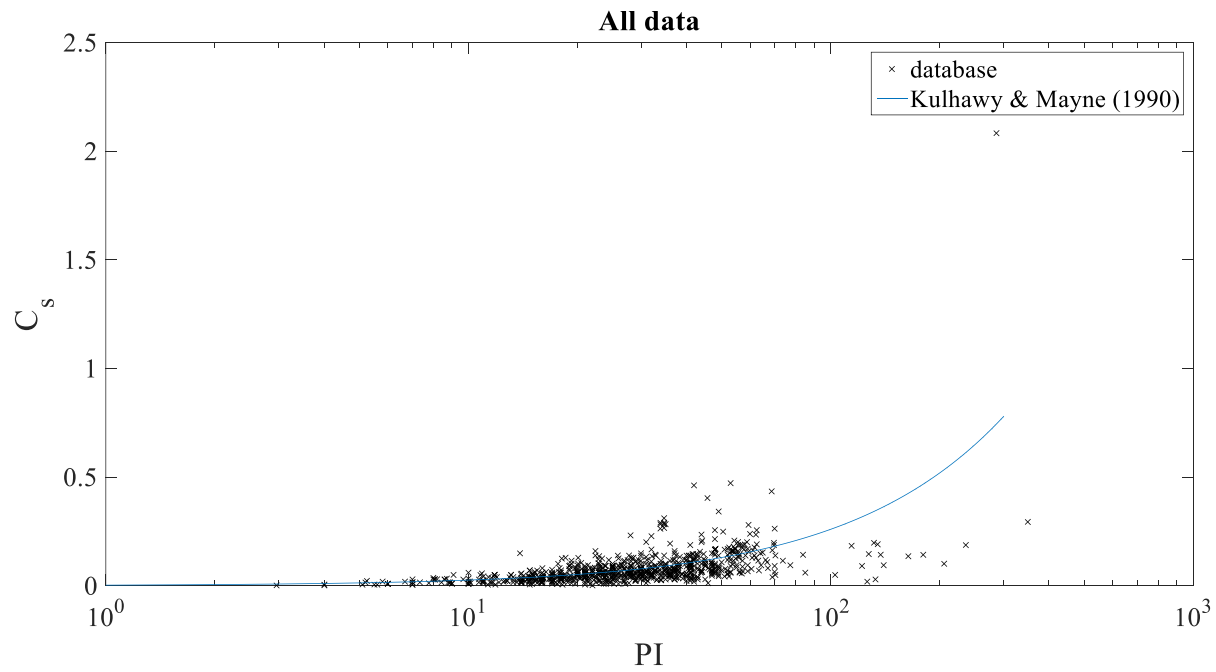


圖 3.12 C_s 與 PI 轉換模型比較(全部資料)

表 3.11 圖 3.11 和圖 3.12 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_s = PI/385$	Kulhawy & Mayne (1990)

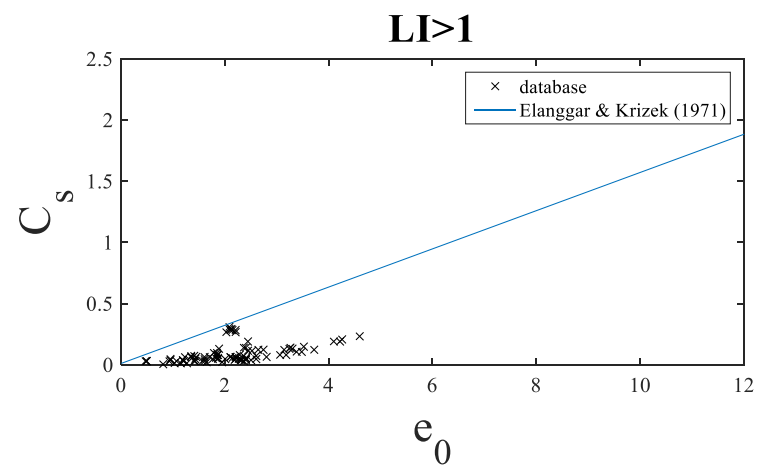
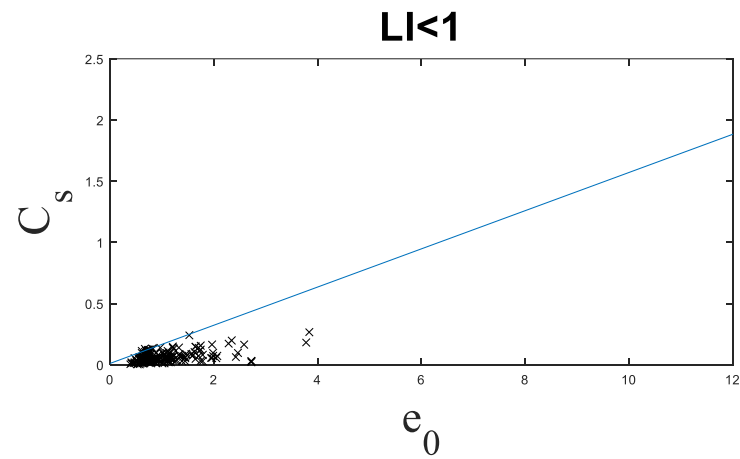
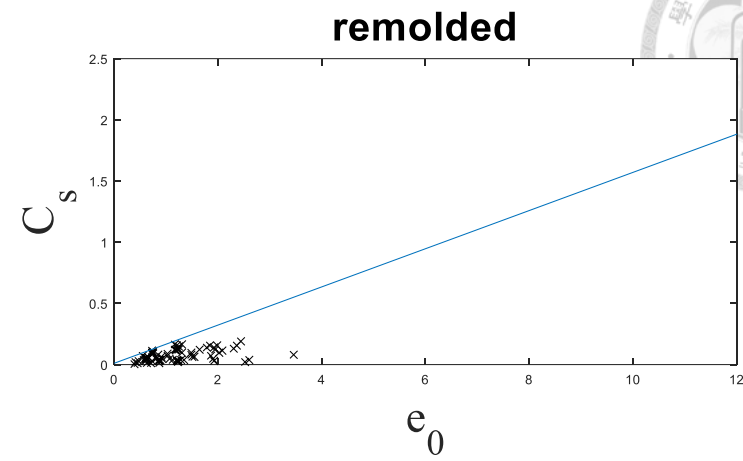
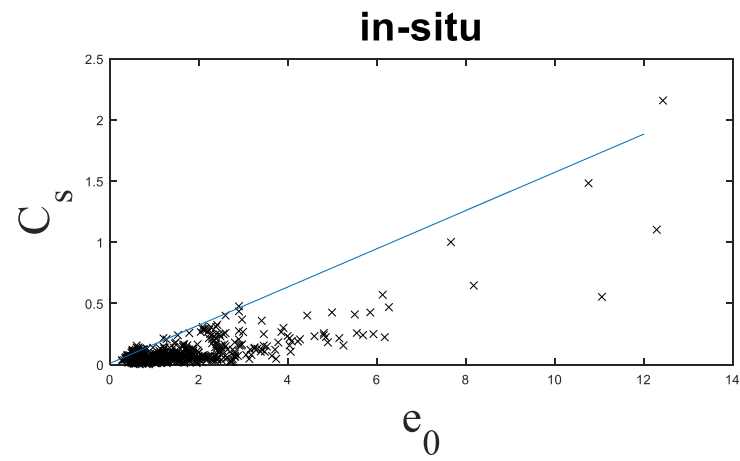
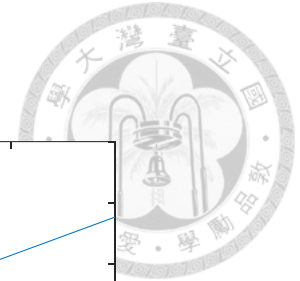


圖 3.13 C_s 與 e_0 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

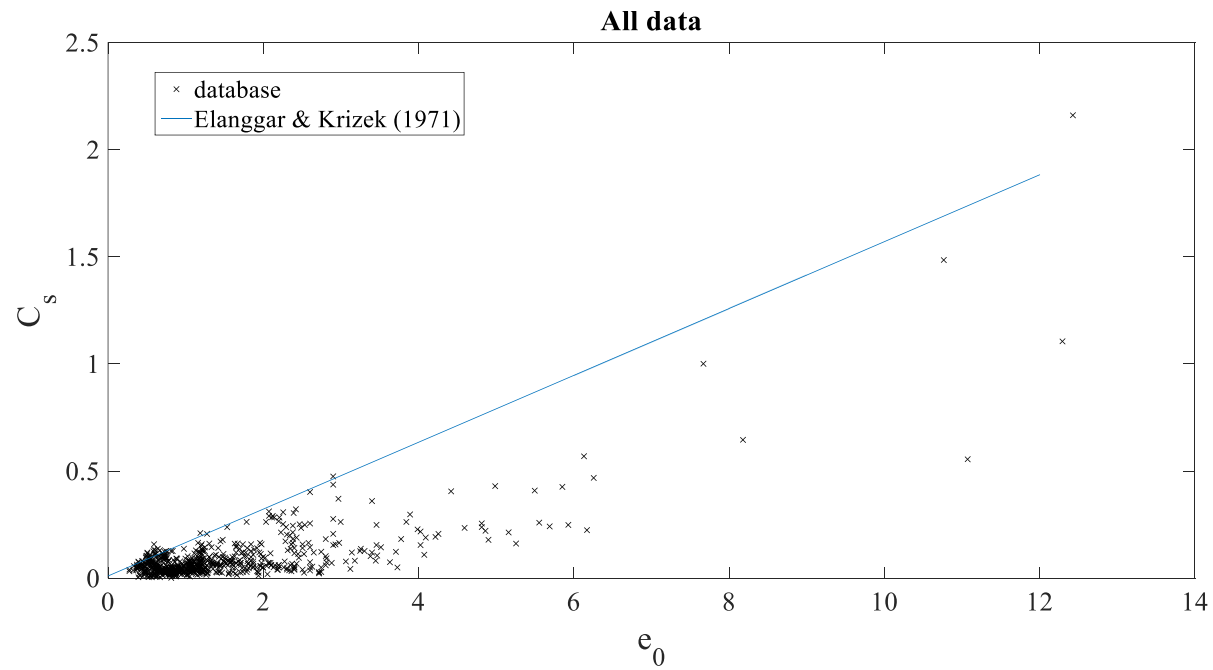


圖 3.14 C_s 與 e_0 轉換模型比較(全部資料)

表 3.12 圖 3.13 和圖 3.14 轉換模型整理

Transform model	Reference
$C_s = 0.156e_0 + 0.0107$	Elanggar & Krizek (1971)

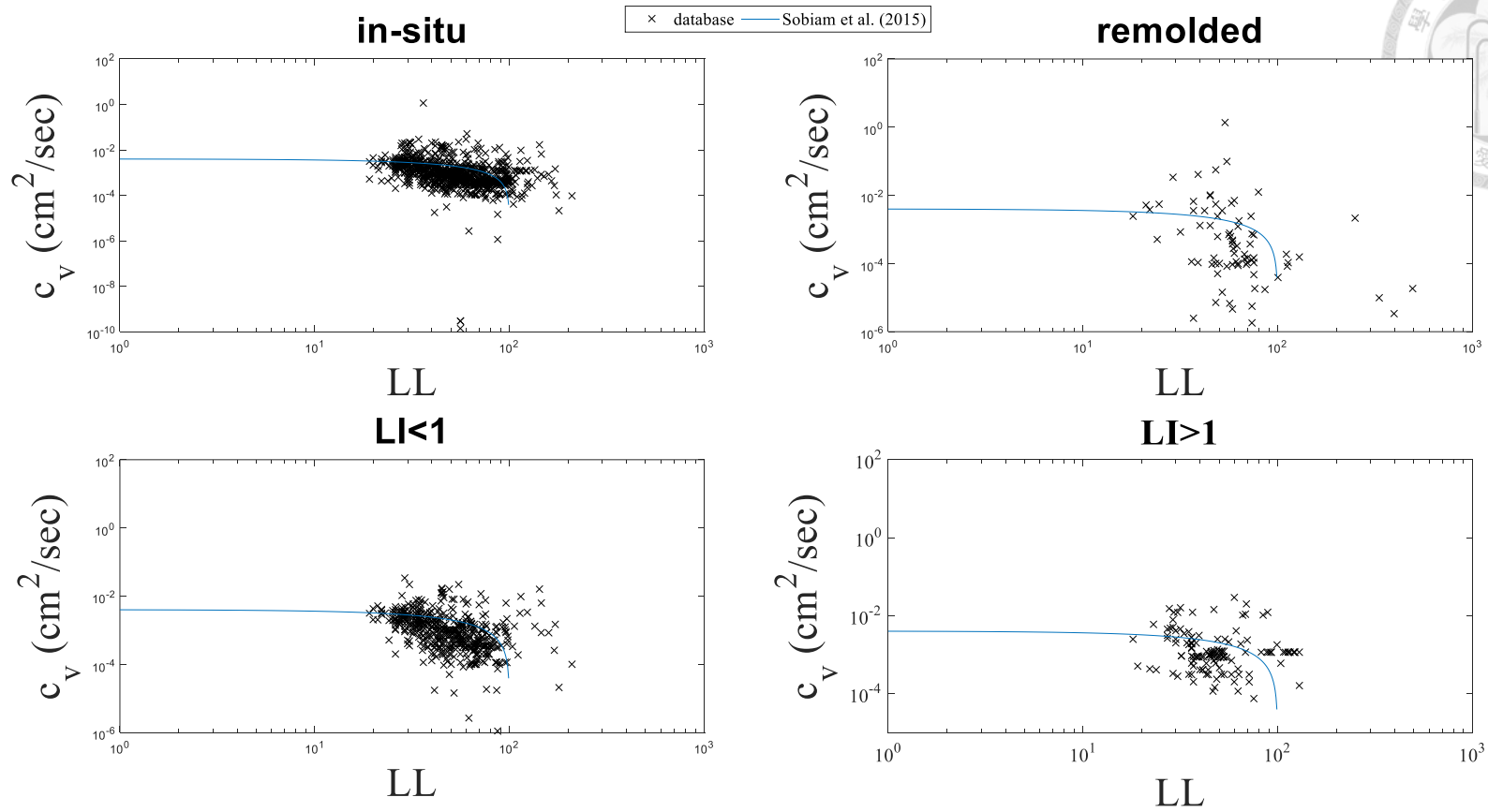
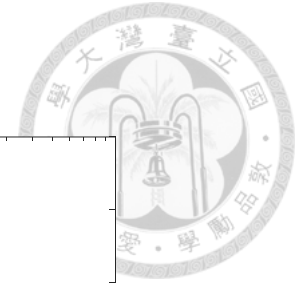


圖 3.15 c_v 與 LL 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

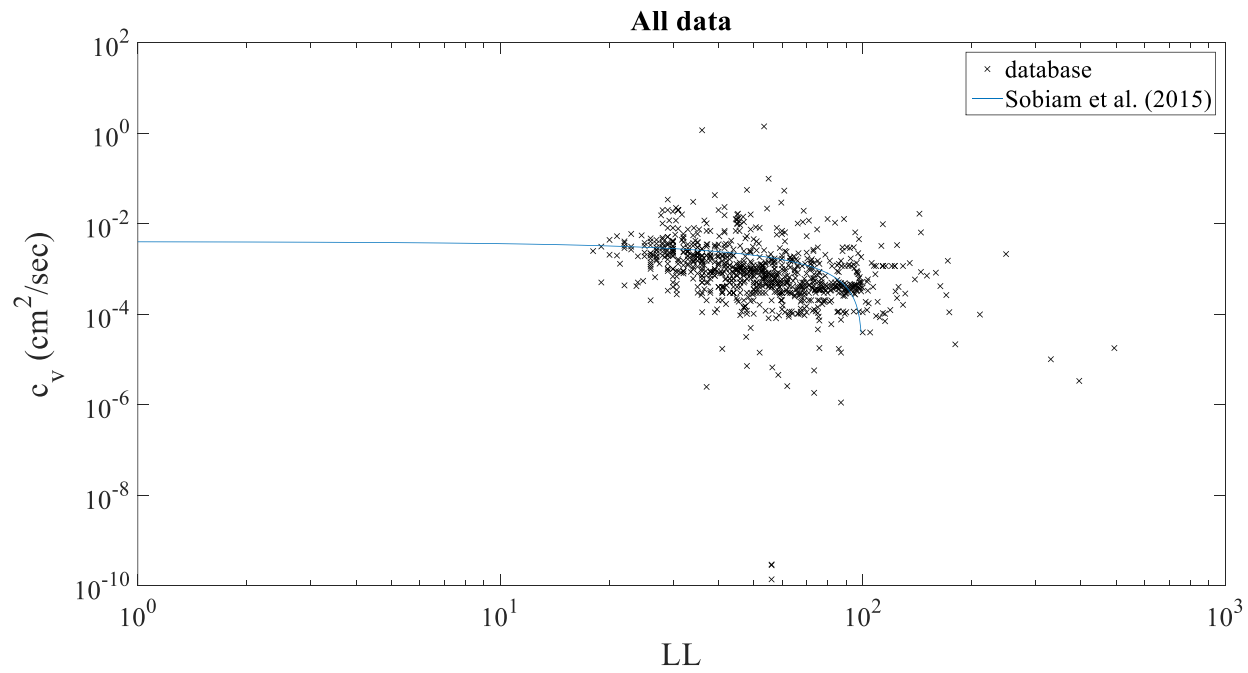


圖 3.16 c_v 與 LL 轉換模型比較(全部資料)

表 3.13 圖 3.15 和圖 3.6 轉換模型整理

Transform model	Reference
$c_v = 4 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-5} LL \text{ (cm}^2/\text{s)}$	Sobiam et al. (2015)

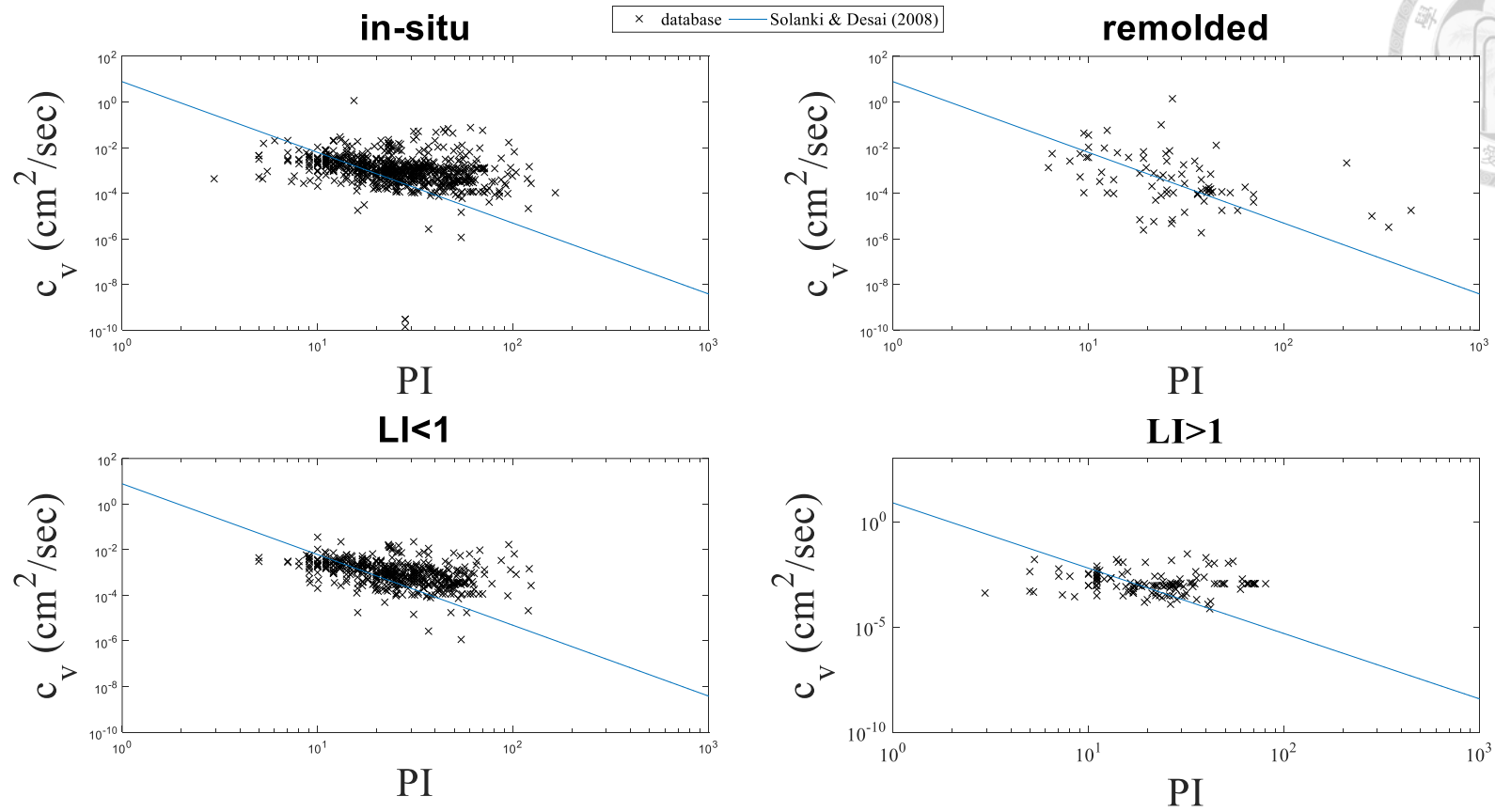
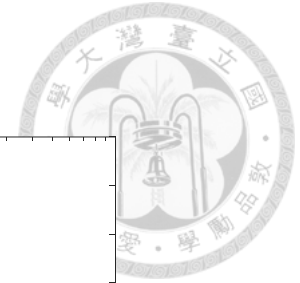


圖 3.17 c_v 與 PI 轉換模型比較(in-situ, remolded, LI<1, LI>1 資料)

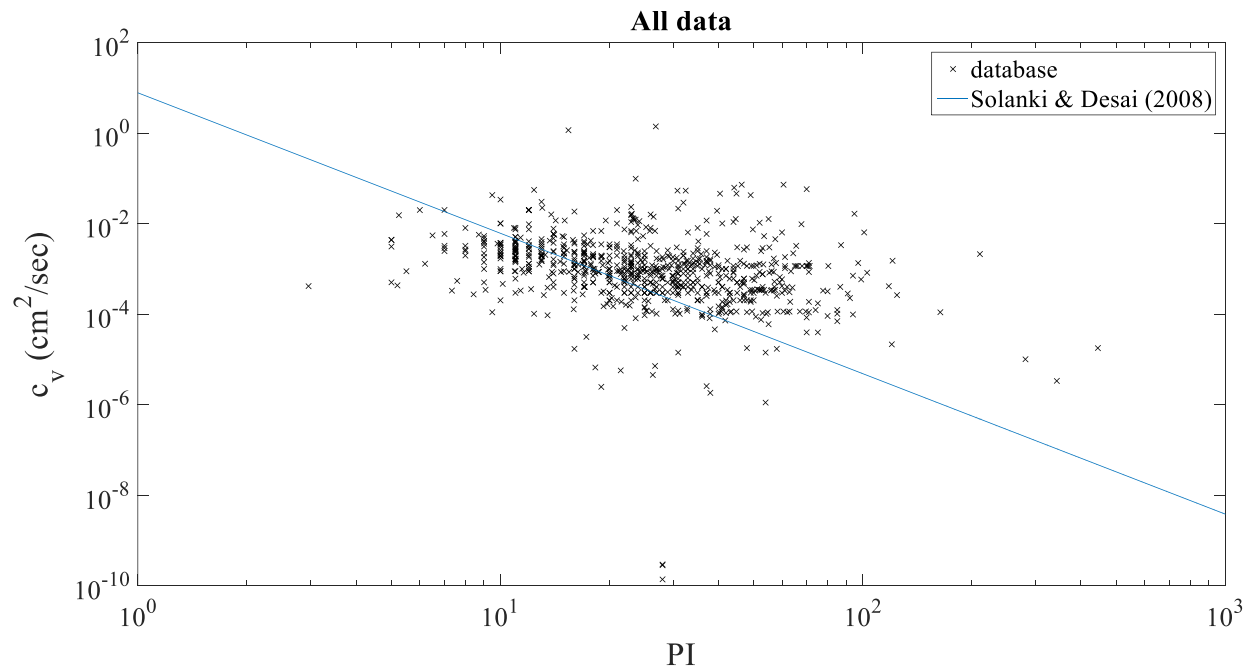


圖 3.18 c_v 與 PI 轉換模型比較(全部資料)

表 3.14 圖 3.17 和圖 3.18 轉換模型整理

Transform model	Reference
$c_v = 7.7525PI^{-3.1021} \text{ (cm}^2\text{/sec)}$	Solanki & Desai (2008)

第四章 多變數機率分布模型建置與模擬



4.1 前言

根據第三章所建立的資料庫 CLAY/8/12225，在假設其範圍足以涵蓋大部份區域黏土特性的前提下，建立一套以這八個參數所組合而成之多變數機率分布模型，和前人不同的是，前人所提出的模型大部分皆僅為一對一或者多至二或三對一的轉換關係，而本研究建立之模型並不僅限於此種一對一或是非得同時具有所有輸入參數才能推估目標參數(C_c 、 C_s 和 c_v)，而是不管在任何參數之排列組合下，皆可透過已知參數推估目標參數之機率分布，同時隨著輸入參數數量的增加，轉換不確定性會隨之降低，有利於提升後續可靠度設計之準確度，可避免過度保守的設計，並且節省材料成本。

如果想要透過本研究的資料庫建立一個正確的多變數機率分布模型 (multivariate probability distribution model) 將會遇到兩大困難，第一個是資料庫中的參數分布很複雜，因為資料庫為多個參數組合而成，即為多維度的分布，圖 4.2 為各個參數的分布形式，如果只要表達單一參數的分布，並不會太困難，而圖 4.4 為兩兩參數間的散佈圖，可以發現，光只有兩個參數的分布，就已經是很複雜了，如果再將所有參數組合起來，這個分布複雜的程度難以想像；第二個是資料庫中的資訊有限，因為資料庫所紀錄的資料在大部分的情況下，通常僅包含兩兩成對的參數或是加上該文獻所關注的土壤參數，少有本研究所選定的八個參數同時紀錄的資料，使得資料庫中有許多未知的資訊，也就是資料庫中有空格。在本研究中，將會利用 Johnson 分布系統 (Johnson distribution system)、吉普斯取樣法 (Gibbs sampler) 和貝氏分析 (Bayesian analysis) 來解決這兩大困難，並建立多變數機率分布模型。

而模型建置流程大致如下：

- (1) 首先必須瞭解 8 個選定參數之自身分布形式
- (2) 為了得到聯合分布，我們利用 Johnson distribution system 將各個參數轉換為標準常態分布，過程中所得到之四個參數(a_x 、 b_x 、 a_y 、 b_y)即為量化該機率分布之因子
- (3) 為建立準確之聯合常態分布，使用吉普斯取樣法 (Gibbs sampler) 及貝氏分

析(Bayesian analysis)中共軛先驗的概念，藉由假定初始值並且循環取樣 21000，扣除 1000 次的預熱期(burn-in period)，並且每間隔 10 個樣本取 1 個作為最後的樣本，可以得到 2000 個接近 0 的期望值向量(mean vector) 及 2000 個 8 乘以 8 的對稱共變異數矩陣(covariance matrix)，並附加 2000 個填滿空洞的大資料庫，這 2000 個填滿空洞的大資料庫即為我們接下來用來模擬的資料。

- (4) 建立後的模型加入新的現地資料，以貝氏定理之概念去推求未知的參數。(預測、貝式分析的部分會在第五章節做說明)

4.2 Johnson 分布系統

4.2.1 多變數常態分布

Phoon (2006)總結提出，當我們想要對多維度的分布進行建模或者模擬，多變數常態分布(multivariate normal distribution)為唯一的解決辦法。多變數常態分布亦稱作多變數高斯分布(multivariate Gaussian distribution)，多變數高斯機率密度函數(multivariate Gaussian probability function)可以透過期望值矩陣與共變異數矩陣來定義，如式 4.1 所示：

$$f(\underline{X}) = |C|^{-\frac{1}{2}} (2\pi)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\underline{X}-\underline{m})^T C^{-1}(\underline{X}-\underline{m})} \quad (4.1)$$

上式中， $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 為高斯分布中 n 個隨機變數組成的向量， \underline{m} 為期望值向量， C 為共變異數矩陣。以最簡單的二維度為例，期望值向量跟共變異數矩陣可以被表示為：

$$\underline{m} = \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

其中 m_i 為期望值； σ_i 為標準差； ρ 為 X_1 和 X_2 的相關係數。

我們可以透過式 4.4 將本研究原本非高斯分布的變數(Y_1, Y_2, \dots, Y_8)轉換成高斯分布(X_1, X_2, \dots, X_8)，也可以透過式 4.5 轉換回原本的分佈

$$X_i = \Phi^{-1}[F_i(Y_i)] \quad (4.4)$$

$$Y_i = F_i^{-1}[\Phi(X_i)] \quad (4.5)$$

其中 F_i 為 Y_i 的累積機率密度函數(cumulative density function)； Φ 為標準常態的累積機率密度函數， Φ^{-1} 則代表 Φ 的反函數。但即使(X_1, X_2, \dots, X_8)中每個參數皆為高斯分布，這並不表示整體的(X_1, X_2, \dots, X_8)為多變數高斯分布，而我們仍然假設(X_1, X_2, \dots, X_8)為多變數高斯分布。

在本研究中，將採用「Johnson 分布系統」(Johnson system of distribution)來量化黏土參數(Y_1, Y_2, \dots, Y_8)之機率密度函數的邊界。Ching and Phoon (2013)指出 Johnson 分布系統可以將 CDF 轉換法以自己的型式展現，且仍有相同的效果，更相較於過往冗贅的多項式方法，Johnson 分布系統以其它參數(X_j)更新目標參數(X_i)時，能以不變的型式表現出來(詳見後續貝氏分析章節)。過去 Ching and Phoon (2014a)和 Ching et al. (2014b)皆以 Johnson 分布系統成功表現出各黏土參數不同的資料分布形狀(如不同上下界、陡峭度、歪斜程度之情形)並利用此系統將各黏土參數轉換為標準常態之分布

4.2.2 Johnson 分布系統類型

Johnson 分布系統分成三種分布類型，分別為：SU (unbounded system)、SB (bounded system)、SL (lognormal system)；而這三種不同的分布下又可以求得分布參數： a_X 、 b_X 、 a_Y 、 b_Y ，分布參數數值大小可表現出不同資料分布的特性，如圖 4.2 即是在微調四個分布參數下，於不同 Johnson 系統類型中所量化之機率密度函數的行為，可看出此系統的確可表現出各種平均值、變異性、峰值(kurtosis)或偏態(skewness)不同變化程度的分布行為。

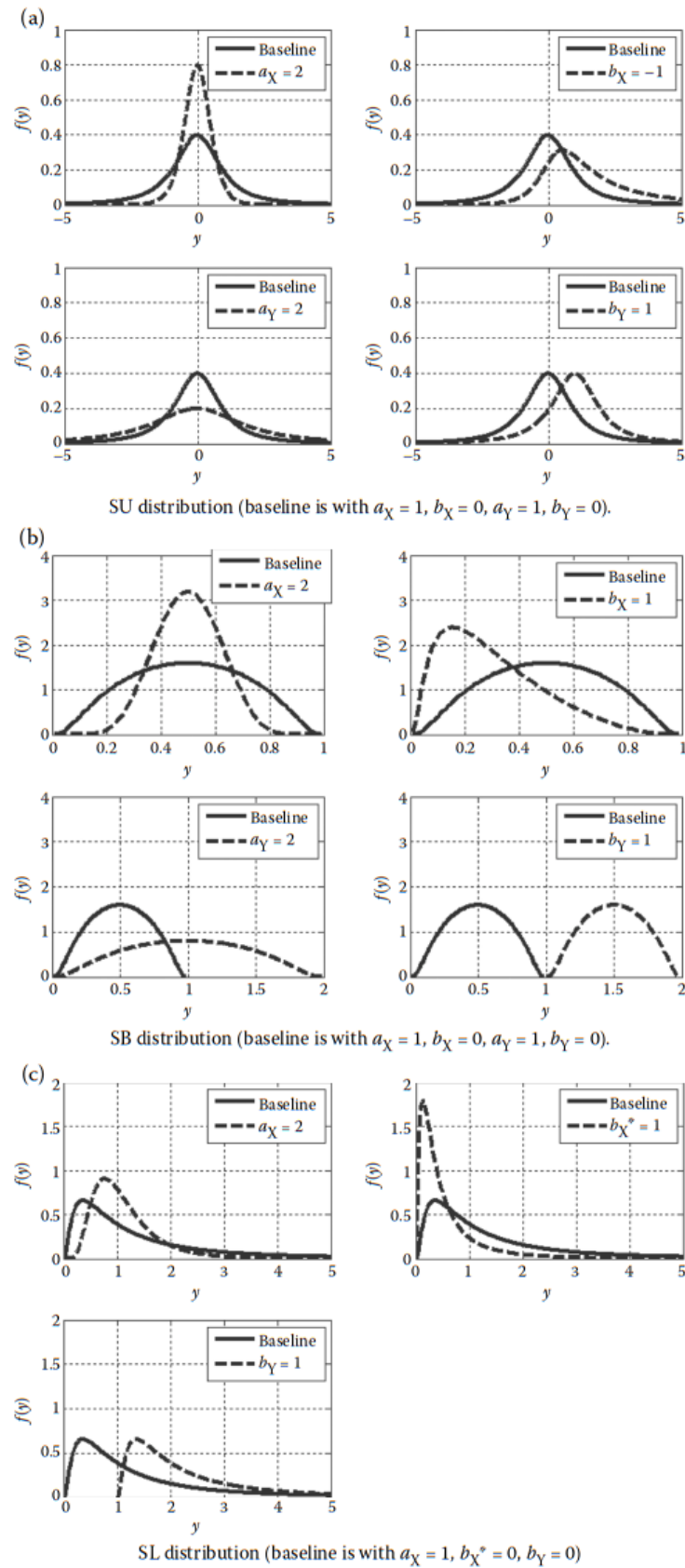


圖 4.1 Johnson 分布系統幾種簡單的分布表現：(a)SU；(b)SB；(c)SL

(Ching and Phoon, 2015, p.47)

基於 Slifker and Shapiro (1980)之內容，Johnson 分布系統應用於本研究的流程如下：

首先根據 Slifker and Shapiro 的建議假設一個大於零的值 $z = 0.7$ ，計算在標準常態累積分布函數下 $(-3z, -z, z, 3z)$ 的百分位數

$$\begin{aligned} p_a &= \Phi(-3z) = \Phi(-2.1) = 0.018 \\ p_b &= \Phi(-z) = \Phi(-0.7) = 0.242 \\ p_c &= \Phi(z) = \Phi(0.7) = 0.758 \\ p_d &= \Phi(3z) = \Phi(2.1) = 0.982 \end{aligned}$$

根據經驗，樣本數量必須大於 $10/p_a$ ，若小於 $10/p_a$ 則 z 值應該下修，對於 Slifker and Shapiro (1980)所建議之 $z = 0.7$ 的假設而言， $10/p_a = 556$ 代表樣本數至少需約大於 550 筆，此 z 值之假設才可成立，由表 3.4 對角線上的數字可看出各參數的樣本數量皆大於 550，因此可以說 $z = 0.7$ 在本資料庫的應用上為一合理之假設。接下來，計算此四個百分位數所對應之 Y 值，即 $y_a = F^{-1}(p_a)$ 、 $y_b = F^{-1}(p_b)$ 、 $y_c = F^{-1}(p_c)$ 、 $y_d = F^{-1}(p_d)$ ，然而， Y 之累積機率密度函數 F 並無從得知，但我們可以以資料庫各參數樣本數量的分布情形當作其累積機率密度函數，反推此四個百分位數之反函數值 y_a 、 y_b 、 y_c 、 y_d ，接著分別令 $m = y_d - y_c$ 、 $n = y_b - y_a$ 、 $p = y_c - y_b$ ，並定義 $D = mn/p^2$ ，最後根據所得之 D 值便可以判斷出該參數資料分布適用於何種分布系統的類型，Johnson (1949)將其大致分為三類：

(1) SU : $D > 1$; (2) SB : $D < 1$; (3) SL : $D = 1$ 。

第一類(SU, unbounded system)適用於無上下邊界限制之系統；

第二類(SB, bounded system)適用於有上下界範圍限制之系統；

第三類(SL, lognormal system)則適用於類似於對數常態此種有下界而無上界之系統。

一旦確立了資料分布類型(SU、SB、SL)，便可決定各類型之分布參數(a_X 、 b_X 、 a_Y 、 b_Y)，計算如下：

(1)對於 SU :

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{2z}{\cosh^{-1}\left[0.5\left(\frac{m}{p} + \frac{n}{p}\right)\right]}, a_x > 0 \\
 b_x &= a_x \sinh^{-1}\left[\frac{\frac{n}{p} - \frac{m}{p}}{2(D-1)^{0.5}}\right] \\
 a_y &= \frac{2p(D-1)^{0.5}}{\left(\frac{m}{p} + \frac{n}{p} - 2\right)\left(\frac{m}{p} + \frac{n}{p} + 2\right)^{0.5}}, a_y > 0 \\
 b_y &= \frac{(y_c + y_b)}{2} + \frac{p\left(\frac{n}{p} - \frac{m}{p}\right)}{2\left(\frac{m}{p} + \frac{n}{p} - 2\right)}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$



(2)對於 SB :

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{z}{\cosh^{-1}\left\{0.5\left[1 + \frac{p}{m}\right]\left[1 + \frac{p}{m}\right]\right\}^{0.5}}, a_x > 0 \\
 b_x &= a_x \sinh^{-1}\left\{\frac{\left(\frac{p}{n} - \frac{p}{m}\right)\left[1 + \frac{p}{m}\right]\left[1 + \frac{p}{m}\right] - 4}{2(D^{-1} - 1)}\right\}^{0.5} \\
 a_y &= \frac{p\left\{\left[1 + \frac{p}{m}\right]\left[1 + \frac{p}{n}\right] - 2\right\}^2 - 4}{D^{-1} - 1}, a_y > 0 \\
 b_y &= \frac{y_c + y_b}{2} - \frac{a_y}{2} + \frac{p\left(\frac{p}{n} - \frac{p}{m}\right)}{2(D^{-1} - 1)}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

(3)對於 SL :

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{2z}{\ln\left(\frac{m}{p}\right)} \\
 b_x &= a_x \ln\left[\frac{\frac{m}{p}-1}{p\left(\frac{m}{p}\right)^{0.5}}\right] \\
 b_y &= \frac{(y_c + y_b)}{2} - \frac{0.5p\left(\frac{m}{p}+1\right)}{\frac{m}{p}-1}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$



藉由這些分布參數便可利用[式 4.6 - 式 4.8]將原各參數之資料點 Y 轉為標準常態之變數 X。

$$X = \begin{cases} b_x + a_x \sinh^{-1}\left(\frac{Y-b_y}{a_y}\right) & \text{SU} \\ b_x + a_x \ln\left(\frac{Y-b_y}{a_y+b_y-Y}\right) & \text{SB}(b_y \leq Y \leq b_y) \\ b_x + a_x \ln\left(\frac{Y-b_y}{a_y}\right) & \text{SL}(Y \geq b_y) \end{cases} \tag{4.9}$$

其中之雙曲正弦之反函數(\sinh^{-1})亦可表為式 4.10 所示

$$\sinh^{-1}\left(\frac{Y-b_y}{a_y}\right) = \ln\left[\frac{Y-b_y}{a_y} + \sqrt{1 + \left(\frac{Y-b_y}{a_y}\right)^2}\right] \tag{4.10}$$

由標準常態下之變數 X 反推回變數 Y 之轉換如式 4.11 所示如下：

$$Y = \begin{cases} b_y + \frac{a_y}{2} \left(e^{\frac{X-b_x}{a_x}} - e^{-\frac{X-b_x}{a_x}} \right) & \text{SU} \\ b_y + a_y \left(1 + e^{\frac{X-b_x}{a_x}} \right)^{-1} & \text{SB} \\ b_y + a_y e^{\frac{X-b_x}{a_x}} & \text{SL} \end{cases} \tag{4.11}$$

最終整理之各參數(Y_1, Y_2, \dots, Y_8)其分布種類及分布參數整理如表 4.4 所示，其中

末欄之 p 值代表以 KS 試驗檢驗轉換至標準常態的變數(X_1, X_2, \dots, X_8)是否滿足標準常態之假設，可看出有六個參數($X_1, X_2, X_3, X_5, X_6, X_8$)之 p 值小於 0.05，代表其有足夠證據拒絕其為標準常態之此虛無假設，然而 Johnson 分布系統在此研究中仍將被採納，乃因其背後堅實之理論基礎及優雅的解析流程。

圖 4.2 為進行 Johnson 轉換前的(Y_1, Y_2, \dots, Y_8)的長條圖；圖 4.3 為轉換後的(X_1, X_2, \dots, X_8)的長條圖，圖上的紅線為 Johnson 分布系統擬和的常態分布曲線，可看出 Johnson 分布系統在擬合 CLAY/8/12225 中的各參數分布情形上具有相當不錯的表現。圖 4.4 為(Y_1, Y_2, \dots, Y_8)兩兩參數間的散佈圖，圖 4.5 為 Johnson 轉換後的(X_1, X_2, \dots, X_8)兩兩參數間的散佈圖。



表 4.1 Y_1 到 Y_8 分布類型與參數

Random variable	Soil parameter	Distribution type	Distribution parameters				p-value
			a_x	b_x	a_y	b_y	
Y_1	$\ln(LL)$	SU	3.648	-2.5728	1.2621	3.0177	5.6e-05
Y_2	$\ln(PI)$	SU	2.0652	7.477e-04	1.2138	3.3138	0.0094
Y_3	w_n	SB	1.5581	24.3078	2.4789e+08	3.243	0.032
Y_4	e_0	SB	1.575	26.3080	1.8279e+07	0.0931	0.1516
Y_5	$\ln(\sigma_v')$	SU	2.9108	0.1706	2.9098	4.7766	0.0103
Y_6	C_c	SB	1.111	5.2537	48.8585	-0.0091	0.0185
Y_7	C_s	SU	1.2959	-3.4017	0.0086	3.6928e-04	0.1497
Y_8	$\ln(C_v)$	SU	1.2468	-0.2517	1.559	-7.3629	0.0317

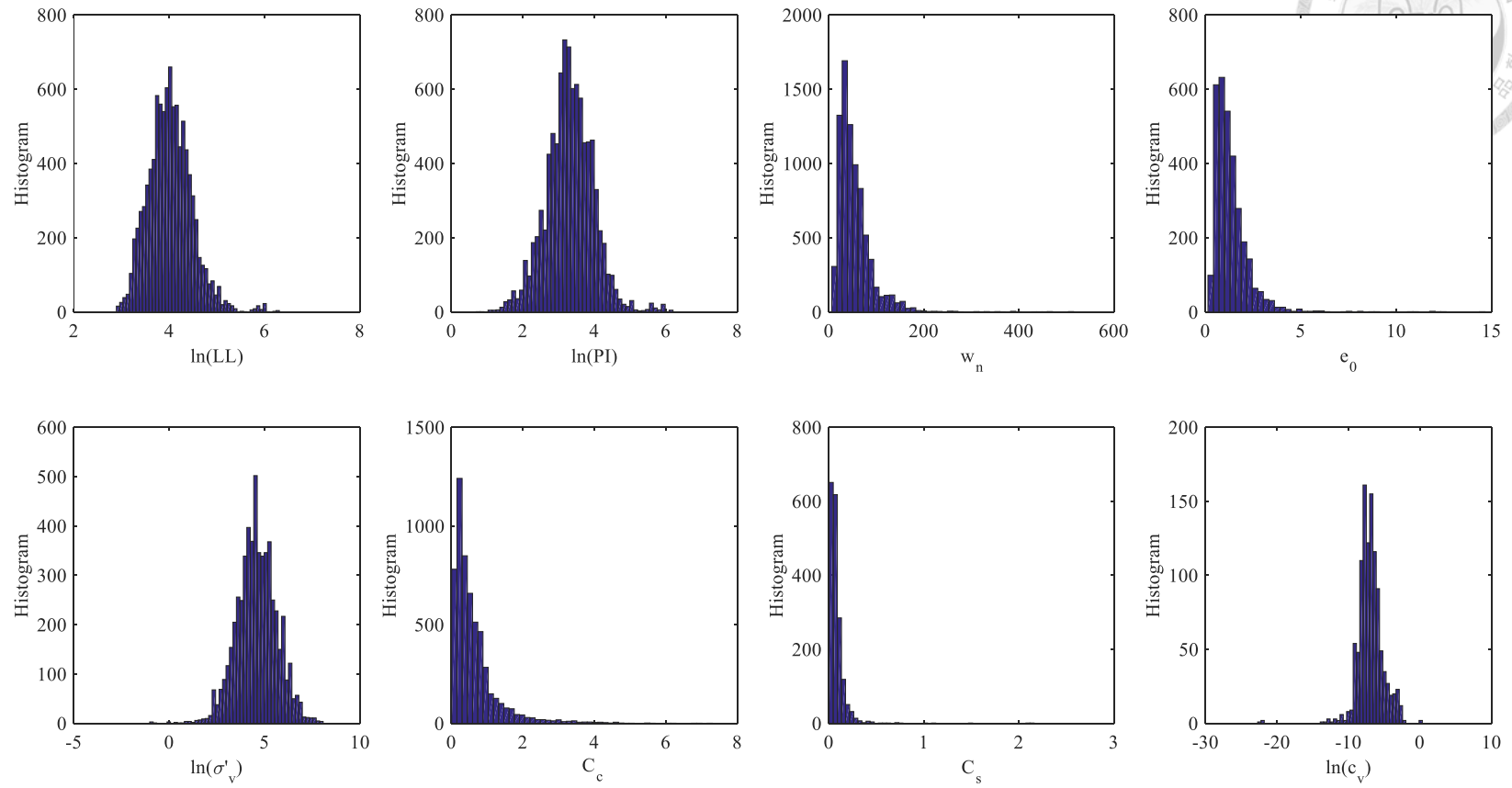
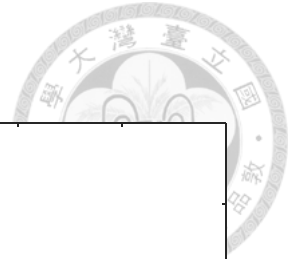


圖 4.2 轉換前數據(Y 空間)長條圖

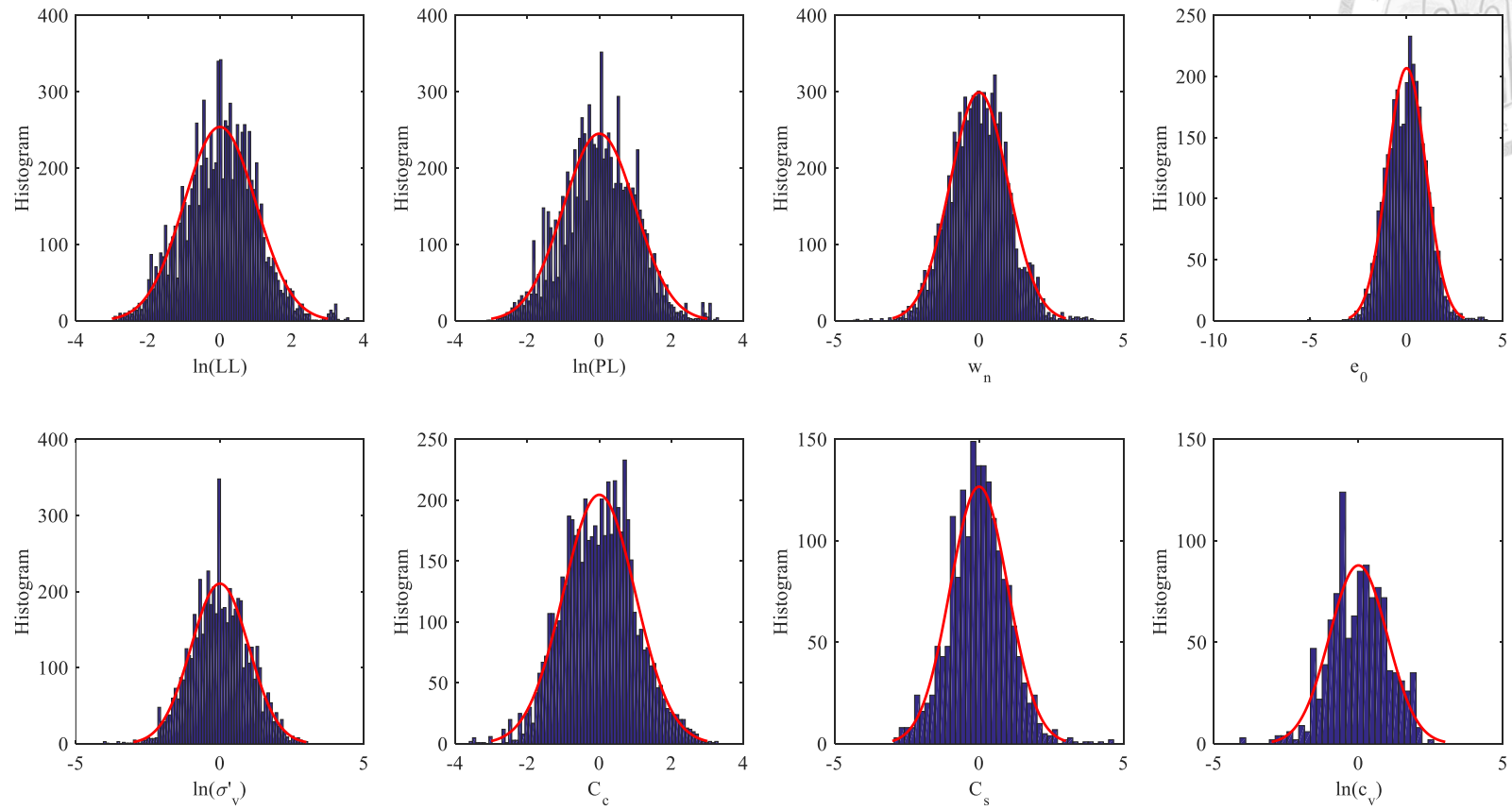
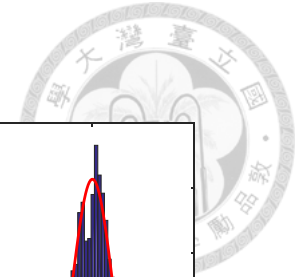


圖 4.3 Johnson 分布系統擬和後(X 空間)結果

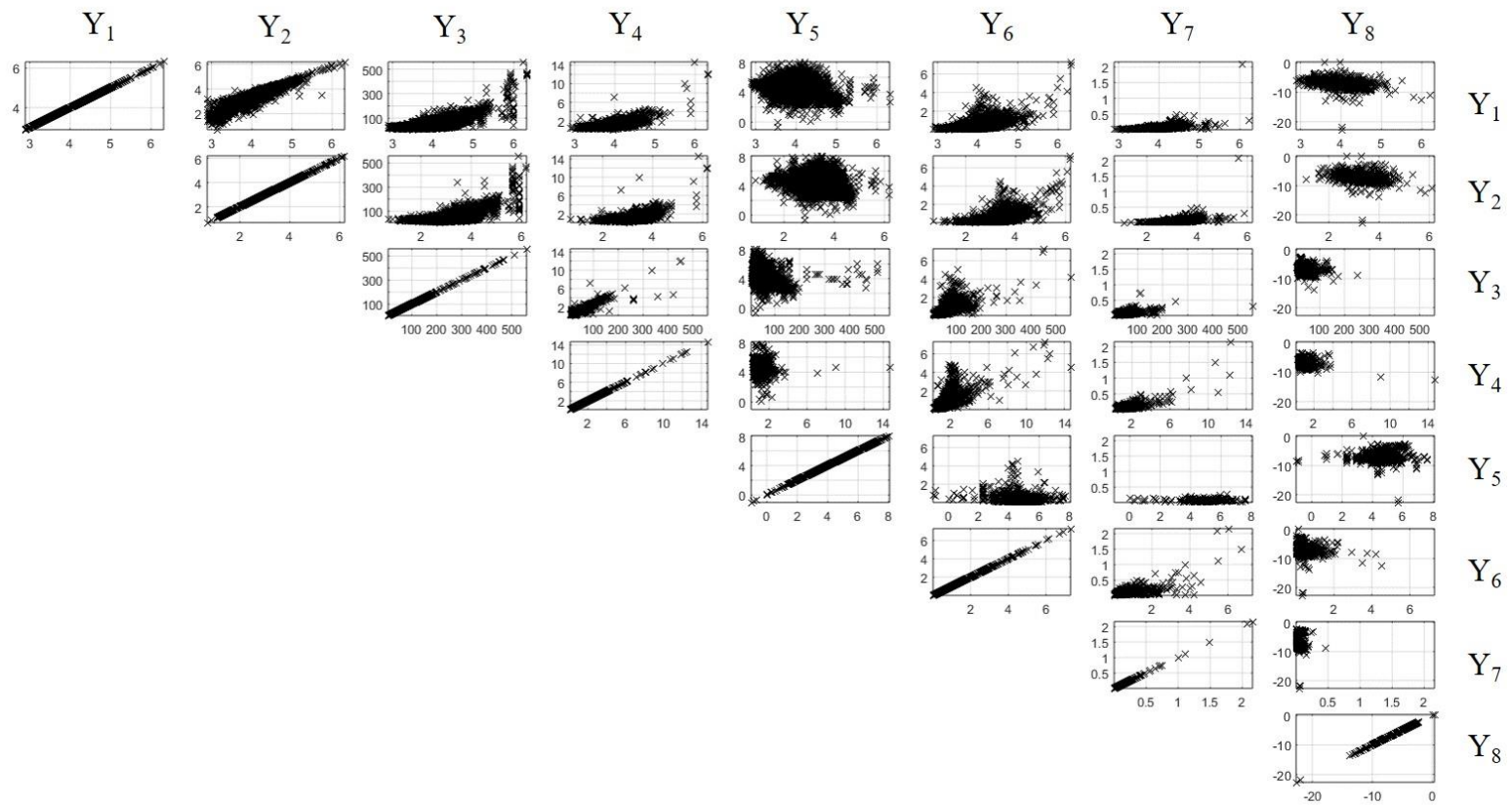


圖 4.4 $Y_i - Y_j$ 散佈圖

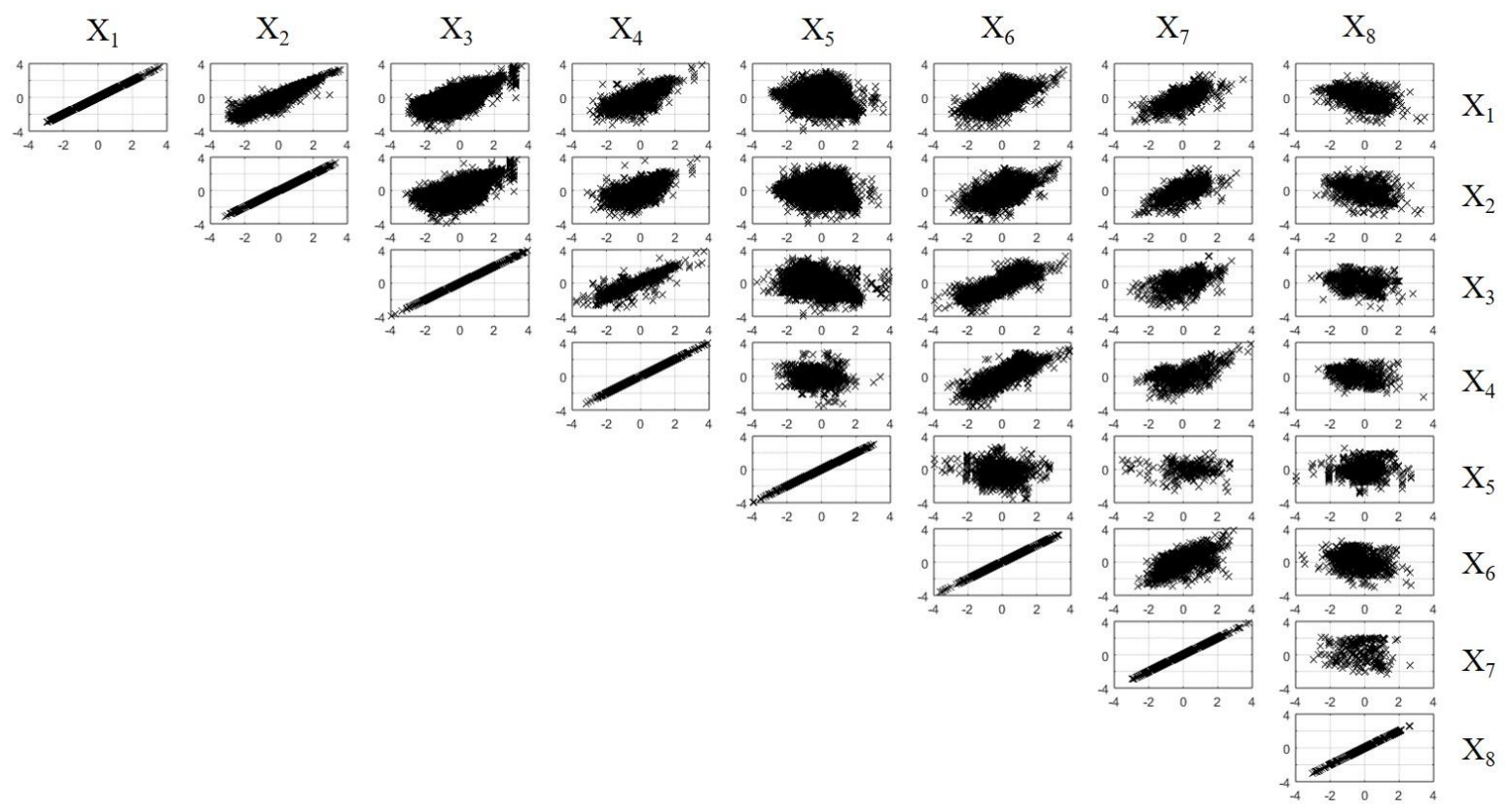


圖 4.5 $X_i - X_j$ 散佈圖



4.3 貝氏分析(Bayesian analysis)與吉普斯取樣法(Gibbs sampler)

建置多變數機率分布模型需要知道所選取參數間的期望值向量(μ)以及共變異數矩陣(C)，如果從現有的資料庫中的資料來計算參數間的期望值向量(μ)以及共變異數矩陣(C)，將會是不正確的，因為資料庫中有未知資訊，就會存在著統計不確定性，當資料量越稀疏，則統計不確定性(statistical uncertainty)會越大，雖然本資料庫資料量已經很多，但仍然存在著統計不確定性。面對這些資料庫中的未知資訊，在本研究中將會使用貝氏分析(Bayesian analysis)與吉普斯取樣法(Gibbs sampler)來量化統計不確定性以及填滿資料庫中的未知資訊，最後計算出參數間的期望值向量(μ)以及共變異數矩陣(C)。

4.3.1 貝氏分析(Bayesian analysis)

貝氏機率(Bayesian probability)是由貝氏理論所提供的一種對機率的解釋，它採用將機率定義為某人對一個命題信任的程度的概念。貝氏理論同時也建議貝氏定理可以用作根據新的信息導出或者更新現有的置信度的規則。

貝氏定理(Bayes' theorem)表示成如下公式：

$$f(\theta|X^o) = \frac{f(X^o|\theta) \times f(\theta)}{f(X^o)}$$

$f(X^o|\theta)$ 為概似函數(likelihood function)

$f(\theta)$ 為先驗分布(prior PDF)

$f(X^o)$ 為邊際分布(marginal distribution)

$f(\theta|X^o)$ 為後驗分布(posterior PDF)

X^o 為已知 data

θ 為未知參數

貝氏將過去經驗作為先驗資訊(Prior Information)，結合本次蒐集的資料(Data)，綜合可得新的經驗(後驗結果,Posterior)也就是欲求的：

先驗資訊(Prior)+實驗結果(data)=>後驗結果(Posterior)

將貝氏套用在本研究則為：

先驗分布(假設)+已知資訊+概似函數(假設為聯合常態) \Rightarrow 後驗分布

貝氏方法於實際應用時，可將過去經驗或是其他相關研究的結果視為先驗資訊。然而，使用時該注意假設條件及參數分布是否改變，如果情況不相同，可能須透過調權數因應。

在貝氏分析中，如果後驗分布與先驗分布屬於同類，則先驗分布與後驗分布被稱為共軛分布，而此先驗分布為概似函數的共軛先驗(conjugate prior)。

使用上即為假設概似函數(likelihood function)為已知的，再來就是選取什麼樣的先驗分布會讓後驗分布與先驗分布具有相同的數學形式則可形成共軛。形成共軛分布的好處有二：

- (1) 在於代數上的方便性，給定先驗分布後，可以直接給出後驗分布的封閉形式(因此不必知道邊際分布也可以求得後驗分布的後驗超參數)，否則的話只能數值計算。
- (2) 共軛先驗也有助於獲得關於概似函數如何更新先驗分布的直觀印象。

表 4.2 本研究中所用到之共軛分布

Likelihood	Model parameters	Conjugate prior distribution	Prior hyperparameters	Posterior hyperparameters
Multivariate normal with known covariance matrix	Mean vector	Multivariate normal	μ_0, C_0	$(C_0^{-1} + mC^{-1})^{-1}(\Sigma_0^{-1}\mu_0 + mC^{-1}\underline{x}),$ $(C_0^{-1} + C^{-1})^{-1}$
Multivariate normal with known mean vector	Covariance matrix	Inverse-Wishart	ν, Σ	$(m + \nu), \Sigma + \sum_{j=1}^m (\underline{x} - \mu)(\underline{x} - \mu)^T$
Normal with known mean vector	variance	Inverse-gamma	α, β	$a + \frac{n+1}{2}, \beta + 2C^{-1}$

一般對參數的假設是「未知但固定」，貝氏則認為參數「具有某種分配」，對參數的瞭解通常隨著樣本數增加而更確定。如果缺乏過去經驗，先驗分布可假設為無資訊的先驗分布(noninformative prior)，意謂先驗分布對整體的影響力極小。在貝氏分析的架構中， $f(\mu)$ 和 $f(C)$ 為無資訊的先驗分布，接著透過貝氏定理將 $f(\mu)$ 和 $f(C)$ 更新為後驗分布 $f(\mu|X^o)$ 和 $f(C|X^o)$ ，並在更新的過程中維持共軛，藉此來量化統計不確定性。

由於本研究中假設 (X_1, X_2, \dots, X_8) 為多變數常態分布，因此 μ 和 C 存在著共軛先驗的機率密度函數。而 μ 的共軛先驗機率密度函數為多變數常態，如式 4.12 所示：

$$f(\mu) = N(\mu | \mu_0, C_0) = |C_0|^{-1/2} \cdot (2\pi)^{-n/2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\mu - \mu_0)^T C_0^{-1}(\mu - \mu_0)\right] \quad (4.12)$$

式 4.12 中， μ_0 和 C_0 分別為 μ 的先驗期望值向量和先驗共變異數矩陣(μ_0 和 C_0 為我們給定的值並且為定值)，如果 μ_0 為零向量， C_0 為對角線值非常大的對角矩陣，先驗機率密度函數 $f(\mu)$ 會相當於無資訊(noninformative)的均勻分布。而 C 的共軛先驗機率密度函數為反沙威特(inverse Wishart)，如式 4.13 所示：

$$f(C) = IW(C | \Sigma, \nu) = \frac{|\Sigma|^{\nu/2}}{2^{n\nu/2} \cdot \Gamma_n(\nu/2)} \cdot |C|^{-\frac{\nu+n+1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}tr(\Sigma \times C^{-1})\right] \quad (4.13)$$

式 4.13 中， $IW(C|\Sigma, \nu)$ 代表了逆沙威特分布(inverse Wishart distribution)； Σ 為規模矩陣(scale matrix)； ν 為自由度(degree of freedom)； $\Gamma_n(\cdot)$ 為多變數伽瑪函數(multivariate gamma function)； $tr(\cdot)$ 為矩陣的跡數(matrix trace)，也就是方陣的對角線總和， n 為土壤參數個數。透過特定的 (Σ, ν) 來得到無資訊的先驗機率密度函數 $f(C)$ 很困難，無資訊的 $f(C)$ 表示每個共變異數矩陣 (C) 中的皮爾遜相關係數(Pearson correlation coefficients)都是獨立且均勻分布在 $[-1, 1]$ 區間中，而且所有共變異數矩陣 (C) 中的變異數(variances)或標準偏差(standard deviations)都是獨立且擁有相對平坦的分布，相關係數與標準偏差也只有微弱的相關性。

使 $\Sigma =$ 單位矩陣， $\nu = n+1$ 是一個受歡迎的選擇，在這個選擇之下，會使皮爾遜相關係數均勻分布在 $[-1,1]$ 區間中。然而，標準偏差的邊際分布並不平坦，在零附近的機率密度較低(Gelam 2006)，且相關係數與標準偏差存在著相依性(Tokuda et al. 2011；Alvarez et al. 2014)。標準偏差的非平坦先驗是不理想的，貝式方法旨在應用於各種各樣的土壤參數，且不同土壤參數的變異係數(coefficient of variation)可以顯著變化，而並不希望標準偏差此種非平坦先驗存在，因為可能會使變異係數偏好某些值。相關係數和標準偏差之間的相依性也是不期望的，因為沒有文獻有出現強力的證據支持這種相依性。為了使 $f(C)$ 能夠為更無資訊的分布且同時維持共軛性質，Huang and Wand (2013)提出了下列此種階層式(hierarchical)的 $f(C)$ ：

$$f(C | a_1, a_2, \dots, a_n) = IW(C | \Sigma, \nu)$$

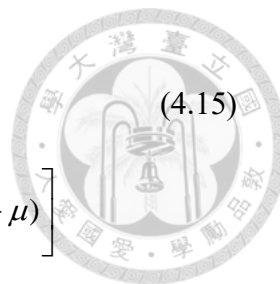
$$\Sigma = 2(\nu - n + 1) \begin{bmatrix} 1/a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/a_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/a_n \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$f(a_i) = IG(a_i | \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot a_i^{-\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta}\right)$$

式 4.14 中， (a_1, a_2, \dots, a_n) 為規模矩陣(Σ)的超參數(hyperparameter)並且為隨機產生的變數，超參數指的是參數的參數，也就是規模矩陣(Σ)為共變異數矩陣(C)的參數，而 a 為規模矩陣(Σ)的參數； $IG(a | \alpha, \beta)$ 指的是逆伽瑪分布(Inverse gamma distribution)， α 為形狀參數(shape parameter)而 β 為規模參數(scale parameter)，Huang and Wand (2013)指出，如果令 $\nu = n+1, \alpha = 0.5$ 而令 β 為一個很小的數字，如此一來，不只皮爾遜相關係數會均勻地分布在 $[-1,1]$ 區間，標準偏差的分布也會是平坦的，且相關係數與標準偏差之間的相依性也會相當微弱。

資料庫中為 $m \times 10$ (m 為資料總筆數)的資料矩陣 \mathbf{Y} ，而 \mathbf{X} 為轉換到標準常態空間後的矩陣，我們會假設 \mathbf{X} 中沒有未知的資訊，也就是沒有空格， \mathbf{X} 的多變數機率密度函數可以寫為：

$$\begin{aligned}
f(\mathbf{X} | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) &= \left[\prod_{j=1}^m N(x_j | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \right] \\
&= |\mathbf{C}|^{-m/2} (2\pi)^{-(m \cdot n)/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (x_j - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (x_j - \boldsymbol{\mu}) \right]
\end{aligned}
\tag{4.15}$$



而完整的多變數機率密度函數可以寫為：

$$\begin{aligned}
f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a}) &= f(\mathbf{X} | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \cdot f(\boldsymbol{\mu}) \cdot f(\mathbf{C} | \mathbf{a}) \cdot f(\mathbf{a}) \\
&= \left[\prod_{j=1}^m N(x_j | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \right] \cdot N(\boldsymbol{\mu} | \boldsymbol{\mu}_0, \mathbf{C}_0) \cdot IW(\mathbf{C} | \boldsymbol{\Sigma}, \nu) \cdot \left[\prod_{i=1}^n IG(a_i | \alpha, \beta) \right] \\
&\propto |\mathbf{C}|^{-(m+2n+2)/2} \cdot |\boldsymbol{\Sigma}|^{(n+1)/2} \cdot \left(\prod_{i=1}^n a_i^{-\alpha-1} \right) \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (x_j - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (x_j - \boldsymbol{\mu}) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{C}_0^{-1} \boldsymbol{\mu} - \frac{1}{2} \text{tr}(\boldsymbol{\Sigma} \times \mathbf{C}^{-1}) - \sum_{i=1}^n (\beta/a_i)}
\end{aligned}
\tag{4.16}$$

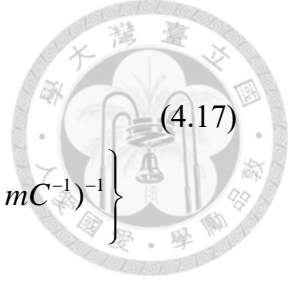
式 4.15 及式 4.16 中， x_j 為 \mathbf{X} 中第 j 列的資料； x_i 為第 j 列中的土壤參數

(X_1, X_2, \dots, X_8) 所組成 1×8 的向量； \mathbf{a} 為 (a_1, a_2, \dots, a_n) 。

4.3.2 吉普斯取樣法(Gibbs sampler)

吉普斯取樣法(Gibbs sampler, GS)是統計學中，用於馬爾可夫鏈蒙地卡羅法(Markov chain Monte Carlo methods)的演算法，用於在「難以直接取樣時，從某一多變量機率分布中近似抽取樣本序列。該序列可用於近似聯合分布、部分變量的邊緣分布或計算積分(如某一變量的期望值)。」某些變量可能為已知變量，則對這些變量並不需要取樣。

吉普斯取樣法的基本想法是將隨機參數拆解成組，並透過條件機率從其餘的組隨機取樣得到其中一組，依序將每一組進行吉普斯取樣法後，會發現取樣出來的樣本會逐漸地分布為我們所期望的分布。在本研究中，我們將多變數機率分布模型拆解成 $(\mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a})$ 四個隨機參數，我們假設 \mathbf{X} 為多變數常態分布，所以我們利用 4.3.1 小節中提到的共軛先驗，可以透過貝氏定理得知後驗分布的封閉形式， $\boldsymbol{\mu}$ 仍然會是多變數常態分布， \mathbf{C} 仍然會是逆沙威特分布， \mathbf{a} 仍然會是逆伽瑪分布， $\boldsymbol{\mu}$ 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{a} 的條件機率密度函數如式 4.17、式 4.18 和式 4.19 所示：



$$\begin{aligned}
 f(\mu | X, C, a) &\propto e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (x_j - \mu)^T C^{-1} (x_j - \mu) - \frac{1}{2} \mu^T C^{-1} \mu} \\
 &\propto e^{-\frac{1}{2} [\mu^T (C_0^{-1} + mC^{-1}) \mu - 2 \sum_{j=1}^m C^{-1} x_j \mu]} \\
 &= N \left\{ \mu | (C_0^{-1} + mC^{-1})^{-1} \left(\sum_{j=1}^m C^{-1} x_j \right), (C_0^{-1} + mC^{-1})^{-1} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
 f(C | X, \mu, a) &\propto |C|^{-(m+2n+2)/2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (x_j - \mu)^T C^{-1} (x_j - \mu) - \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma \times C^{-1})} \\
 &\propto |C|^{-(m+n+1)+n+1/2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \text{tr}([\Sigma + \sum_{j=1}^m (x_j - \mu)(x_j - \mu)^T] \times C^{-1})} \\
 &= IW \left\{ C | \Sigma + \sum_{j=1}^m (x_j - \mu)(x_j - \mu)^T, n + m + 1 \right\}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 f(a_i | X, \mu, C, a_{\setminus i}) &\propto a_i^{-(n+1)/2 - \alpha - 1} \cdot e^{-(1/2) \text{tr}(\Sigma \times C^{-1}) - (\beta/a_i)} \\
 &\propto a_i^{-[\alpha + (n+1)/2] - 1} \cdot e^{-(\beta + 2C_{ii}^{-1})/a_i} \\
 &= IG(a_i | \alpha + \frac{n+1}{2}, \beta + 2C_{ii}^{-1})
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

式 4.19 中 a_i 為 $(a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n)$ ； C_{ii}^{-1} 為 C^{-1} 矩陣中的 (i, i) 項。

在前面有提到，我們使用的資料庫是有未知的資訊，也就表示 X 中是有空格的，因此我們將 X 已知的資訊令為 x_j^o (observed) 向量，未知的資訊令為 x_j^u (unknown) 向量，我們將會透過吉普斯取樣法將這些空格填滿，此外，在已知 x_j^o 的條件下得到的 x_j^u 的機率密度函數仍然為多變數常態分布，如式 4.20 所示：

$$f(x_j^u | x_j^o, \mu, C, a) = N \left\{ x_j^u | \mu^u + C^{uo} (C^o)^{-1} (x_j^o - \mu^o), C^u - C^{uo} (C^o)^{-1} C^{ou} \right\} \tag{4.20}$$

在本研究中，將會假設 μ_0 為零向量， C_0 為對角線元素等於 10^4 的對角矩陣， $\nu = n + 1$ ， $\alpha = 0.5$ 和 $\beta = 10^4$ ，之後便可以開始進行吉普斯取樣，而這個疊代的過程如下：



1. 將 $(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a}, \mathbf{X}^u)$ 假設為任意初始值， $\mathbf{X}^u = \mathbf{x}_1^u, \mathbf{x}_2^u, \dots, \mathbf{x}_m^u$ 代表 \mathbf{X} 中的空格，要注意的是此時 \mathbf{X} 不包括空格。

2. 從 $f(\boldsymbol{\mu} | \mathbf{X}, \mathbf{C}, \mathbf{a})$ 隨機抽取得到新樣本 $\boldsymbol{\mu}$ ， $f(\boldsymbol{\mu} | \mathbf{X}, \mathbf{C}, \mathbf{a})$ 為期望值向量和共變異數矩陣所定義的多變數常態機率密度函數，如式 4.21 所示：

$$\boldsymbol{\mu} \sim N \left\{ \boldsymbol{\mu} | (\mathbf{C}_0^{-1} + m\mathbf{C}^{-1})^{-1} \left(\sum_{j=1}^m \mathbf{C}^{-1} x_j \right), (\mathbf{C}^{-1} + m\mathbf{C}^{-1})^{-1} \right\} \quad (4.21)$$

3. 使用上一步驟中更新的新樣本 $\boldsymbol{\mu}$ 並從 $f(\mathbf{C} | \mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{a})$ 隨機取樣得到新樣本 \mathbf{C} ， $f(\mathbf{C} | \mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{a})$ 為規模矩陣和自由度所定義的逆沙威特機率密度函數，如式 4.22 所示：

$$\mathbf{C} \sim IW \left\{ \mathbf{C} | \boldsymbol{\Sigma} + \sum_{j=1}^m (x_j - \boldsymbol{\mu})(x_j - \boldsymbol{\mu})^T, n + m + 1 \right\} \quad (4.22)$$

其中 $\boldsymbol{\Sigma} = \text{diag}(4/a_1, 4/a_2, \dots, 4/a_n)$

4. 接著使用第二、三步驟更新的新樣本 $\boldsymbol{\mu}$ 和 \mathbf{C} ，並從 $f(\mathbf{a}_i | \mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a}_i)$ 隨機取樣得到新樣本 \mathbf{a}_i ，其中 $i = 1, \dots, n$ ， $f(\mathbf{a}_i | \mathbf{X}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a}_i)$ 為形狀參數和規模參數所定義的逆伽瑪機率密度函數，如式 4.23 所示：

$$a_i \sim IG \left(a_i | \frac{n+2}{2}, 10^{-4} + 2C_{ii}^{-1} \right) \quad (4.23)$$

5. 再來使用第二、三、四步驟更新的新樣本 $\boldsymbol{\mu}$ 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{a} 樣本，並從 $f(\mathbf{x}_j^u | \mathbf{x}_j^o, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a})$ 隨機取樣得到新樣本 \mathbf{x}_j^u ，其中 $j = 1, \dots, m$ ， $f(\mathbf{x}_j^u | \mathbf{x}_j^o, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a})$ 為期望值向量和共變異數矩陣所定義的多變數常態機率密度函數，如式 4.24 所示：

$$x_j^u \sim N \left\{ x_j^u | \boldsymbol{\mu}^u + \mathbf{C}^{uo} (\mathbf{C}^o)^{-1} (x_j^o - \boldsymbol{\mu}^o), \mathbf{C}^u - \mathbf{C}^{uo} (\mathbf{C}^o)^{-1} \mathbf{C}^{ou} \right\} \quad (4.24)$$

6. 重覆第二到第五步驟 T 次後，可以得到 T 組參數 $(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{a}, \mathbf{X}^u)$ 。

吉普斯取樣法從初始樣本 (μ, C, a, X^0) 開始，接著透過最新的參數依序從條件機率密度函數隨機取樣。從初始值到收斂這段期間的樣本，稱作為預熱期 (burn-in period)，一般都透過視覺來觀察，這些樣本是我們不需要的，會將其刪除，刪除後剩下的樣本即為我們想要的後驗機率密度函數 $f(\mu, C, a, X^u | X^0)$ ，其中 $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ 為資料庫中已知的資料，也就是我們用來訓練的資料。吉普斯取樣法透過貝氏定理從完整的後驗機率密度函數抽取樣本，而在我們假設的多變數常態和使用的共軛先驗架構下，這些樣本將會是精確的。

在本研究中，我們總共進行 21000 次吉普斯取樣，前面有提到，一般都透過視覺來觀察預熱期的組數，根據以往的經驗，1000 組後已經進入收斂階段，所以我們將預熱期設為 1000 組，扣除預熱期後，得到 20000 組收斂的樣本，為了減少樣本間的相依性，我們每 10 組留下 1 組(即留下第 10, 20, 30, ..., 20000 組)，共 2000 組 (μ, C, a, X^u) ，當中的 (μ, C) 量化了資料庫的統計不確定性，也是用來建置多變數機率分布模型的基礎，我們將 2000 組 (μ, C) 樣本透過式 4.1 得到 2000 個多變數常態分布，進而得到 2000 個多變數機率分布模型。

4.4 模擬結果

在此節中，將會使用 4.3 節建置出來的多變數機率分布模型來模擬資料，並將模擬出來的資料與全球資料庫中的資料做比較來驗證模型是否準確，如果模擬資料點的趨勢或是分布與全球資料庫中的資料點一致或相近便表示建置模型成功。

模擬的過程大致如下：

1. 利用 2000 組 (μ, C) ，得到 2000 個多變數常態分布；
2. 接著依序從 2000 個多變數常態分布中，隨機取樣得到 2000 組 (X_1, X_2, \dots, X_8) 參數序列；
3. 再來將 2000 組 (X_1, X_2, \dots, X_8) 透過 Johnson 分布系統轉回標準常態 (Y_1, Y_2, \dots, Y_8) ；
4. 因為在一開始我們將 (Y_1, Y_2, Y_5, Y_8) 資料取自然對數，所以最後要將 (Y_1, Y_2, Y_5, Y_8) 的模擬資料進行自然指數轉換回原本的形式，便可以開始比較。

表 4.3、表 4.4 和表 4.5 分別為所有資料點經過吉普斯取樣後得到 2000 組共變異數矩陣和期望值向量其中之一和 2000 組的平均，可以發現，期望值向量不是個為零的向量，而是在零附近跳動，這與我們假設的多變數常態分布不一樣，但我們依然會維持取樣結果去定義多變數常態分布，因為跳動的共變異數矩陣和期望值向量誠實地表達出統計不確定性。這也是為什麼如果已知是多變數常態分布，我們還是需要對期望值向量進行取樣，因為我們並不預期取樣結果會真的是多變數常態分布。

圖 4.6~圖 4.23 為使用全部資料模型模擬得到的模擬值參數散佈圖與真實值散佈圖的比較圖，本研究中所關注的重點是其他參數與目標參數的關係，所以圖 4.6~圖 4.29 呈現的是其他參數與目標參數的散佈圖以及目標參數之間的散佈圖，並將真實值與模擬值分開畫出，可以發現模擬值大致上都有將原始資料點的趨勢及分布形式模擬出來，即使資料庫中原本兩兩參數間的資訊並沒有很多，還是可以透過貝氏分析與吉普斯取樣法來捕捉參數間的關係，並模擬出比原本資訊還多的樣本數。而圖 4.24~圖 4.41 呈現的結果為將全部模型的模擬值分為 $LI < 1$ 與 $LI > 1$ 兩類並與資料庫中分類後的做比對，可以發現資料的分布趨勢也很相近。

在第三章有說明，我們將資料另外分成四個種類並進行模擬，圖 4.42~圖 4.59 為 $LI < 1$ 模型與 $LI > 1$ 模型的模擬結果，圖 4.60~圖 4.78 則為 in-situ 模型與 remolded 模型的模擬結果，圖中包含分類後的原始資料點與模擬資料點，模擬資料點也大致上都有將原始資料點的趨勢及分布形式模擬出來，也可以發現 $LI > 1$ 模型的模擬資料點的斜率比 $LI < 1$ 的模擬資料點的趨勢斜率大，in-situ 模型的模擬資料點的趨勢斜率比 remolded 模型的資料點趨勢斜率大，這與我們在第三章的比較結果一樣。在第五章我們將會使用全部資料模型加上這四種模型去進行案例驗證，便可以知道分成五種模型的效果如何。

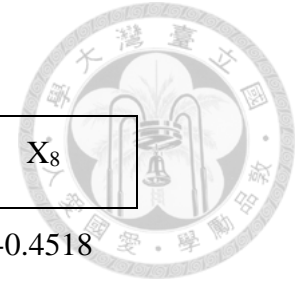


表 4.3 所有資料點吉普斯取樣法後 2000 個 X_i-X_j 共變異數矩陣樣本之一(第 81 個)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_1	1.0172	0.9648	0.6949	0.6331	-0.1557	0.6931	0.7613	-0.4518
X_2		1.0072	0.6026	0.5562	-0.1461	0.6490	0.7474	-0.4502
X_3			0.9788	0.8341	-0.3987	0.7729	0.5706	-0.3122
X_4				0.8718	-0.4085	0.7266	0.5164	-0.3852
X_5					1.0072	-0.2494	-0.1781	0.1696
X_6						0.9471	0.6699	-0.2604
X_7							1.1086	-0.3224
X_8								1.0404

Symmetry

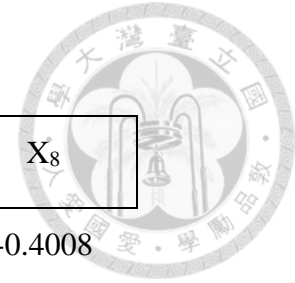


表 4.4 所有資料點吉普斯取樣法後 2000 個 X_i-X_j 共變異數矩陣樣本之平均

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_1	1.0311	0.9732	0.7079	0.6421	-0.1757	0.6984	0.7534	-0.4008
X_2		1.0121	0.6111	0.5605	-0.1555	0.6479	0.7364	-0.3911
X_3			0.9796	0.8354	-0.4233	0.7787	0.5803	-0.2593
X_4				0.8811	-0.4303	0.7295	0.5242	-0.3815
X_5					1.0046	-0.2514	-0.1765	0.1686
X_6						0.9515	0.6686	-0.2287
X_7							1.0814	-0.2469
X_8								1.0298

Symmetry



表 4.5 (a)吉普斯取樣法之 2000 個 X_i 期望值向量樣本之一(第 81 個)；

(b)吉普斯取樣法之 2000 個 X_i 期望值向量樣本平均

(a)	
	Mean vector
X_1	0.0083
X_2	0.0467
X_3	0.0160
X_4	0.1097
X_5	-0.0023
X_6	0.0313
X_7	0.0904
X_8	-0.0434

(b)	
	Mean vector
X_1	0.0039
X_2	0.0407
X_3	0.0196
X_4	0.1053
X_5	-0.0145
X_6	0.0283
X_7	0.0934
X_8	-0.0343

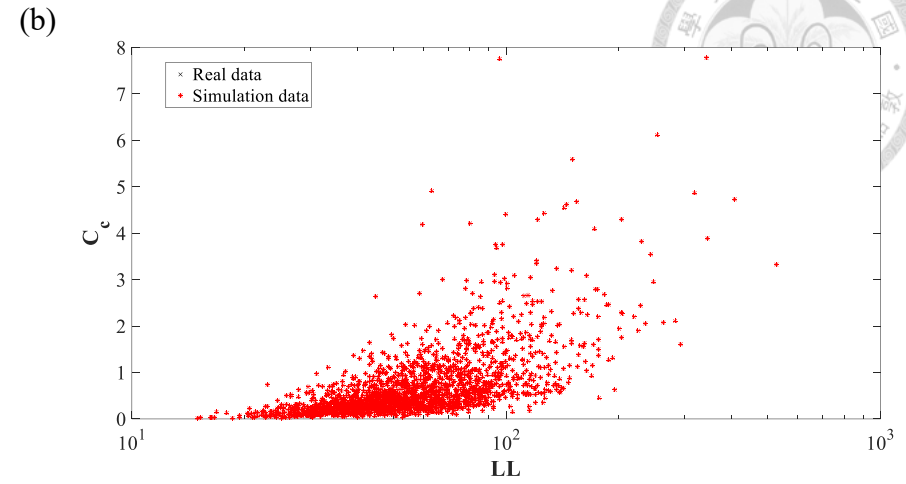
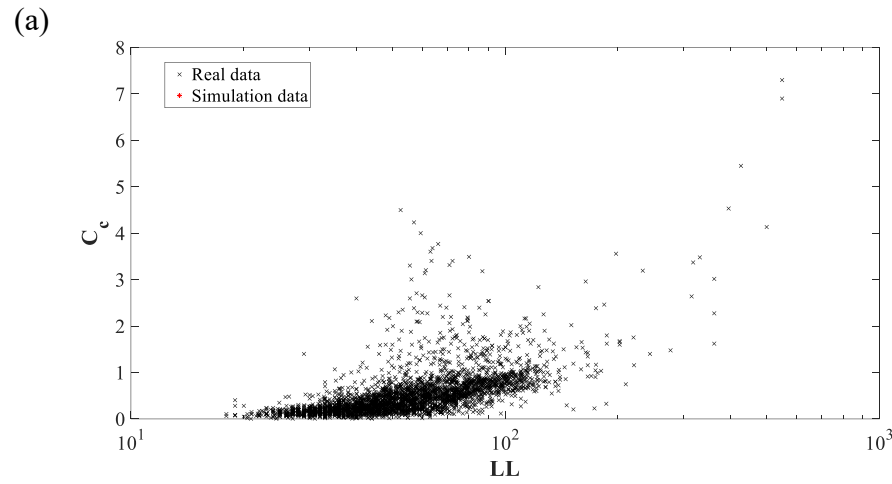
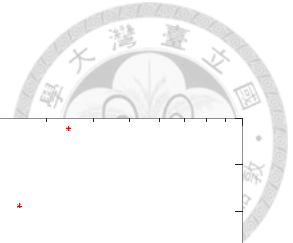


圖 4.6 所有資料點 C_c 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

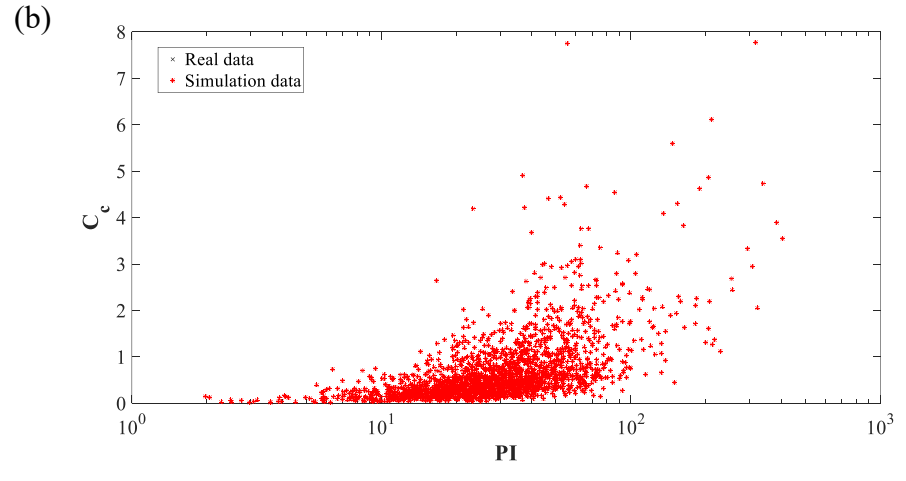
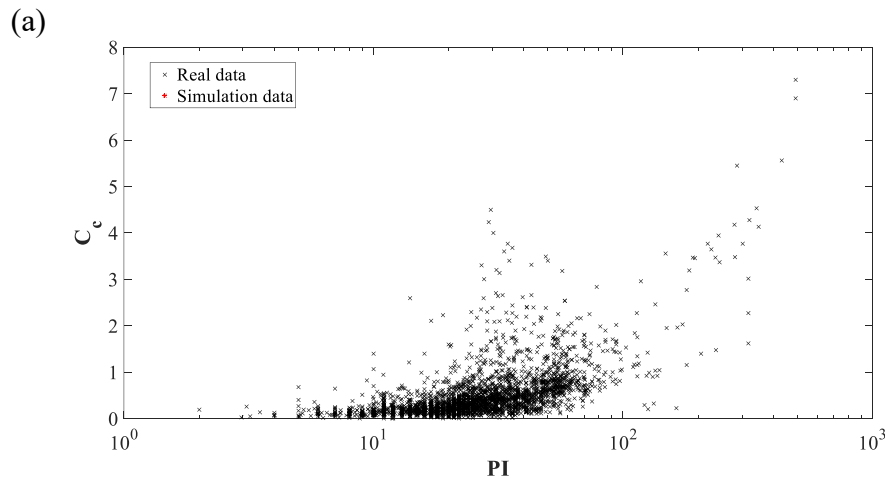


圖 4.7 所有資料點 C_c 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

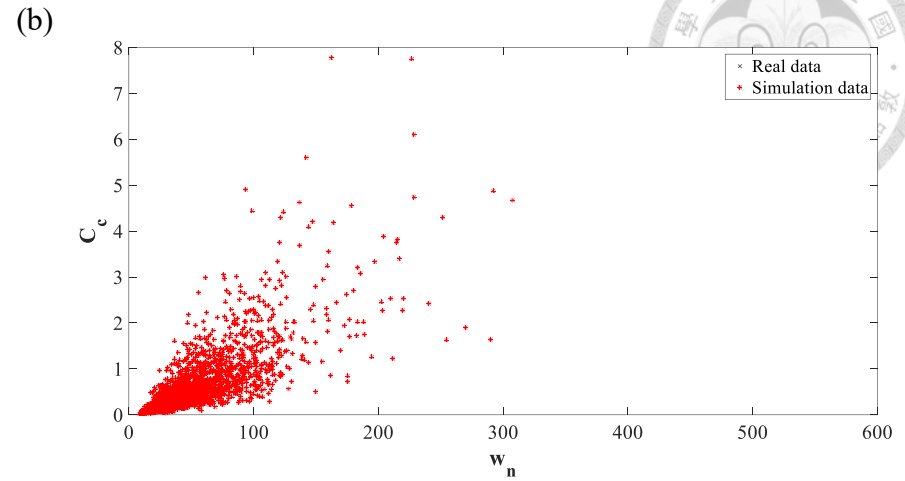
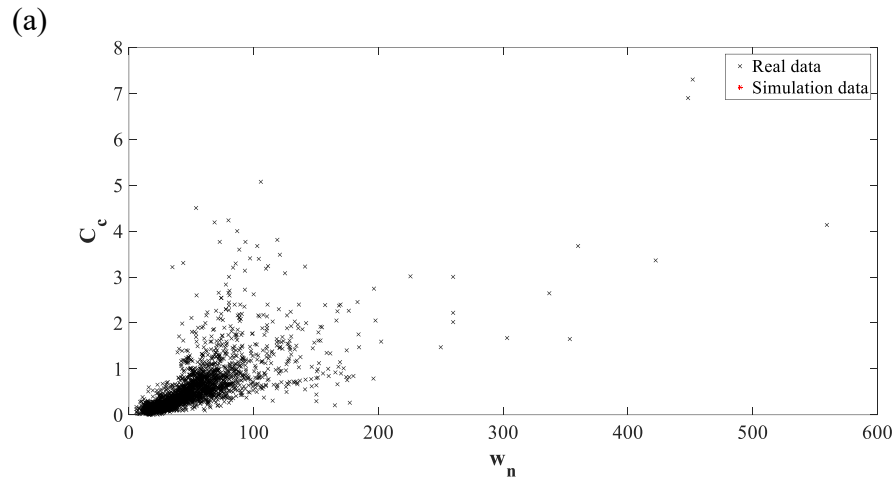
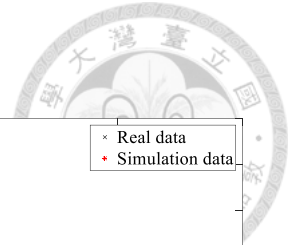


圖 4.8 所有資料點 C_c 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

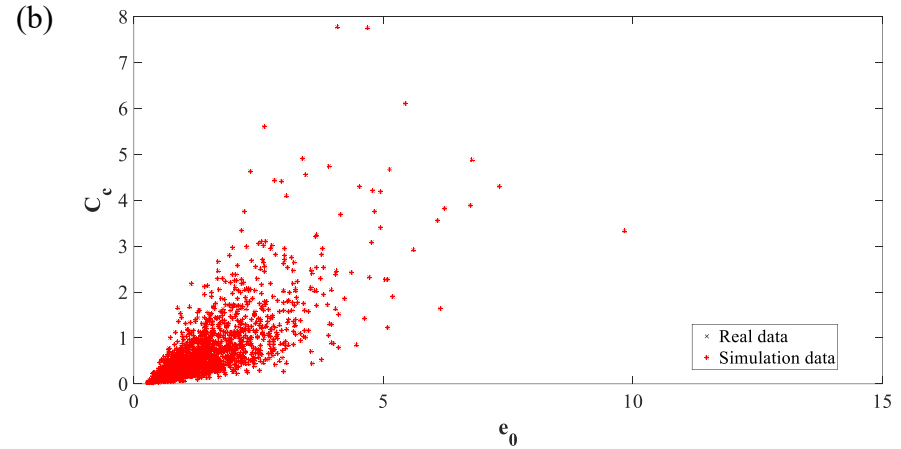
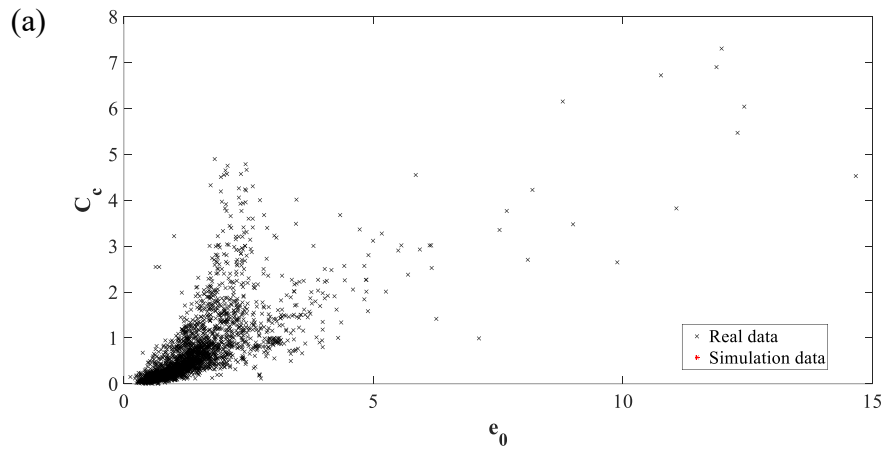


圖 4.9 所有資料點 C_c 與 e_0 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

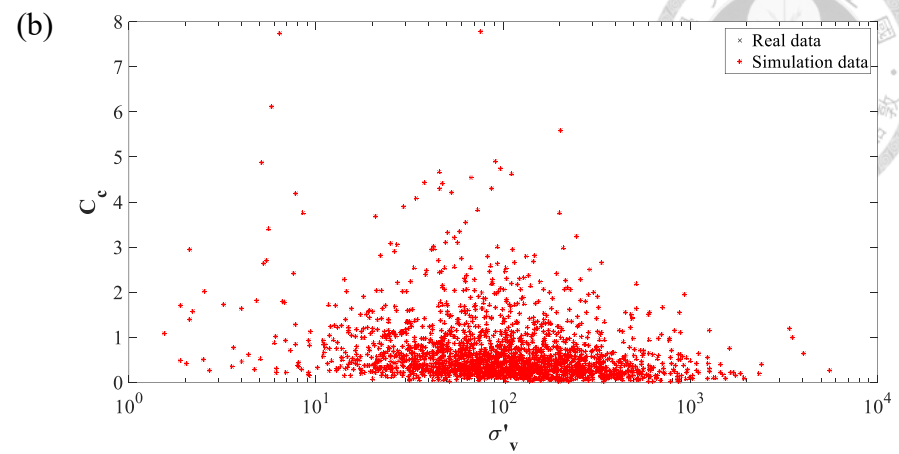
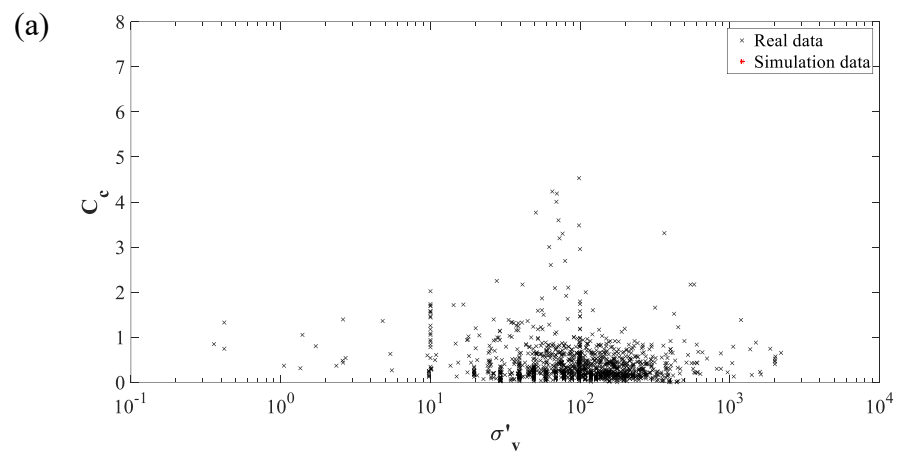
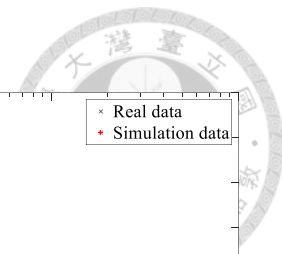


圖 4.10 所有資料點 C_c 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

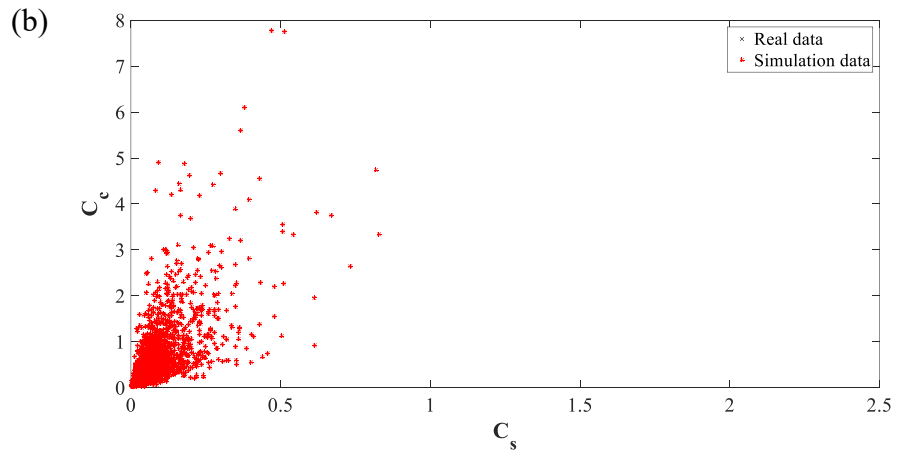
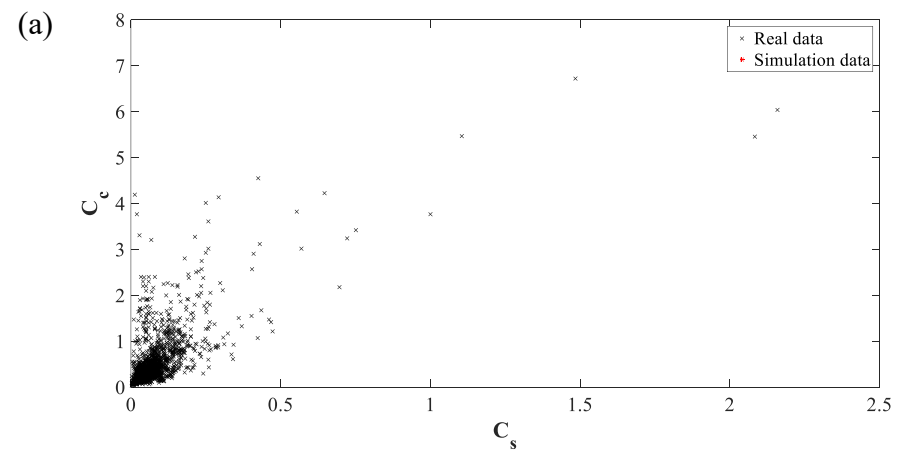


圖 4.11 所有資料點 C_c 與 C_s 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

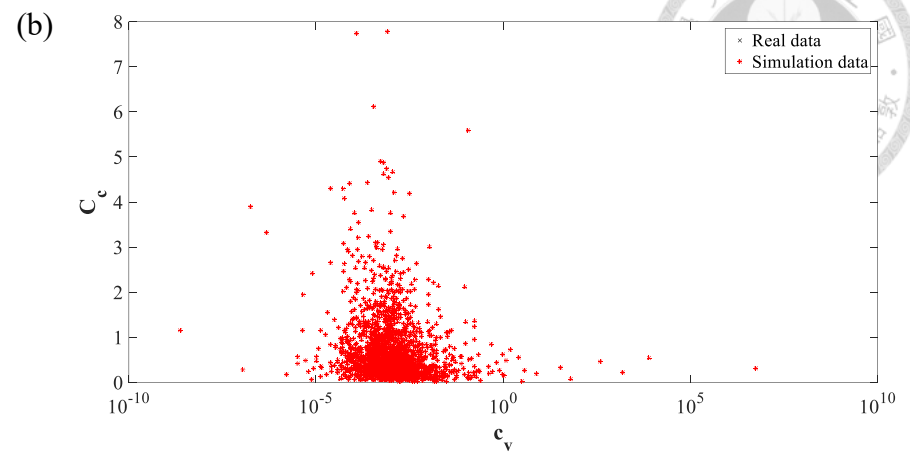
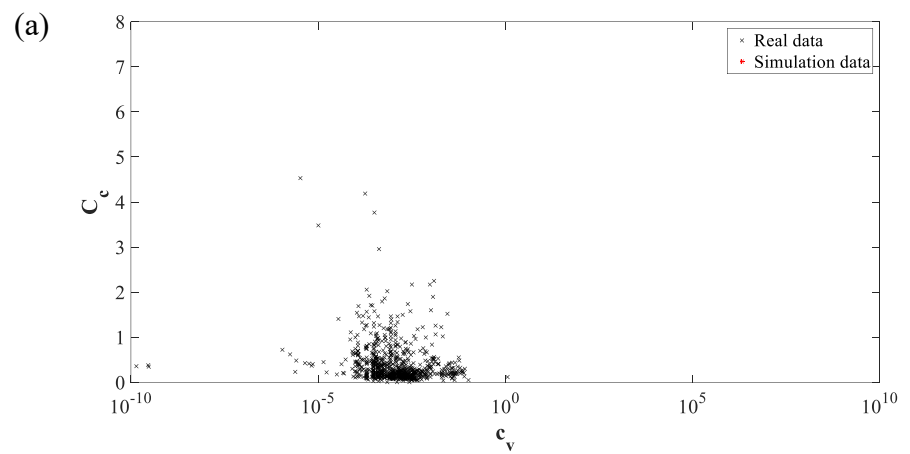
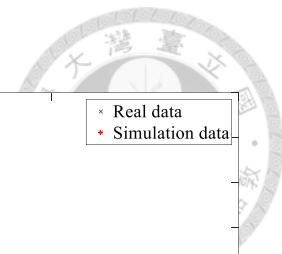


圖 4.12 所有資料點 C_c 與 c_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

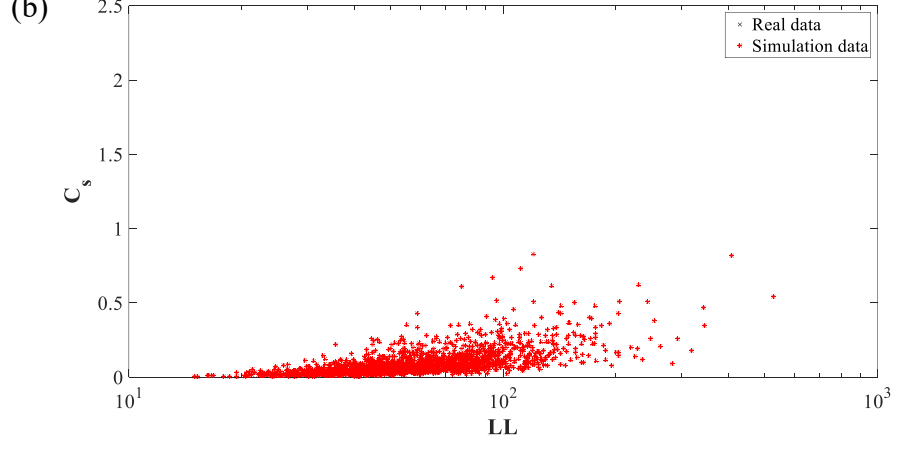
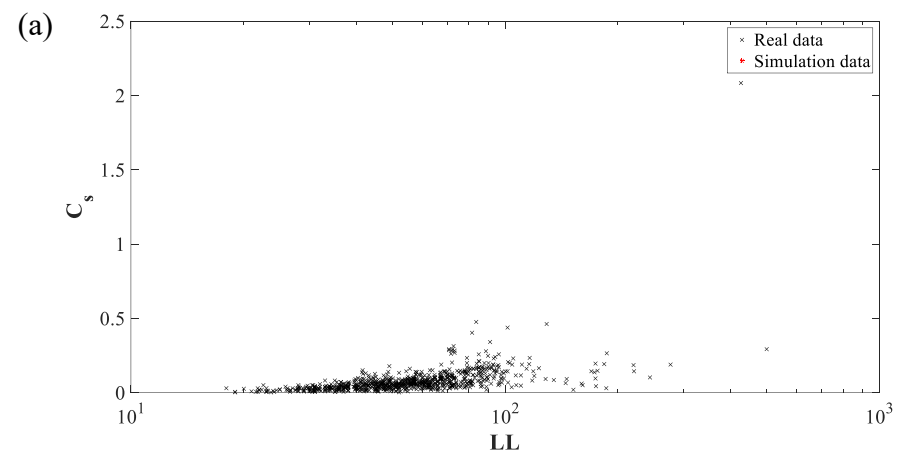


圖 4.13 所有資料點 C_s 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

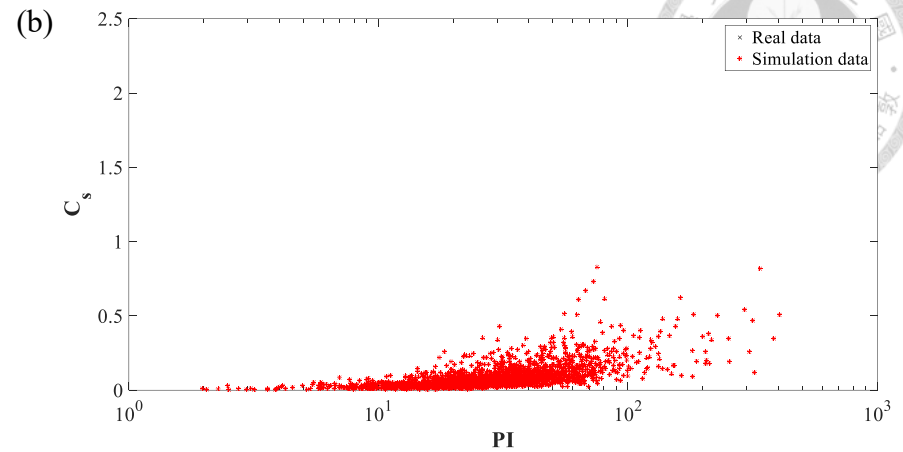
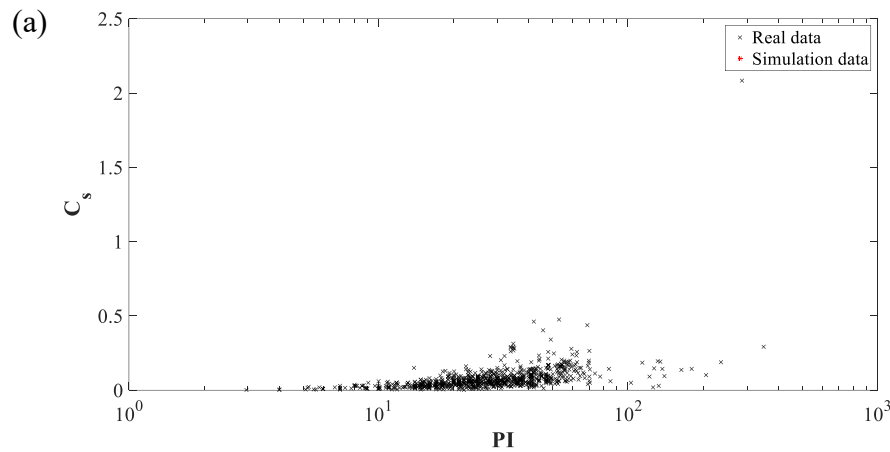


圖 4.14 所有資料點 C_s 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

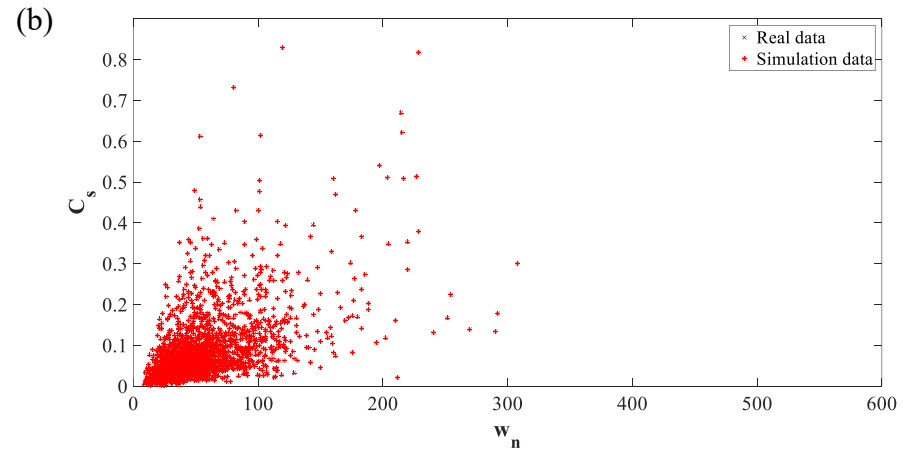
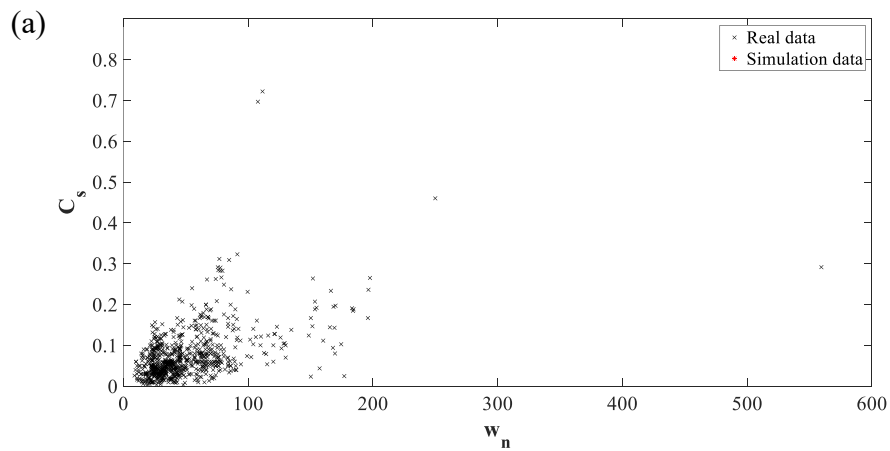


圖 4.15 所有資料點 C_s 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

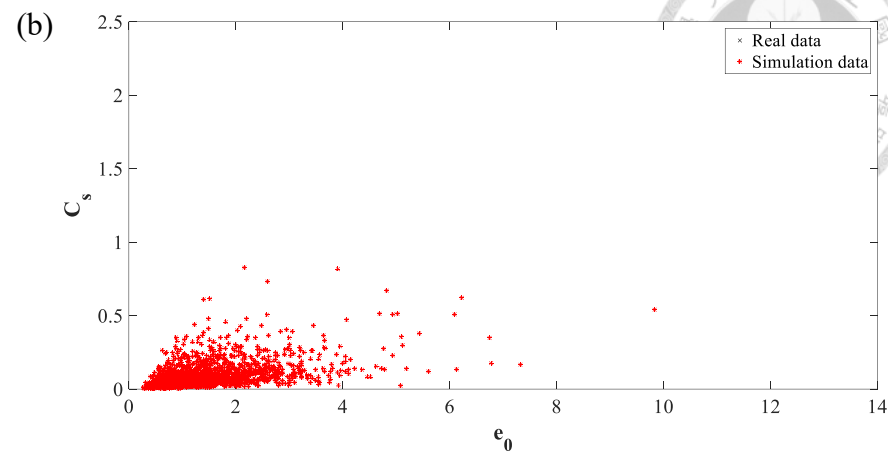
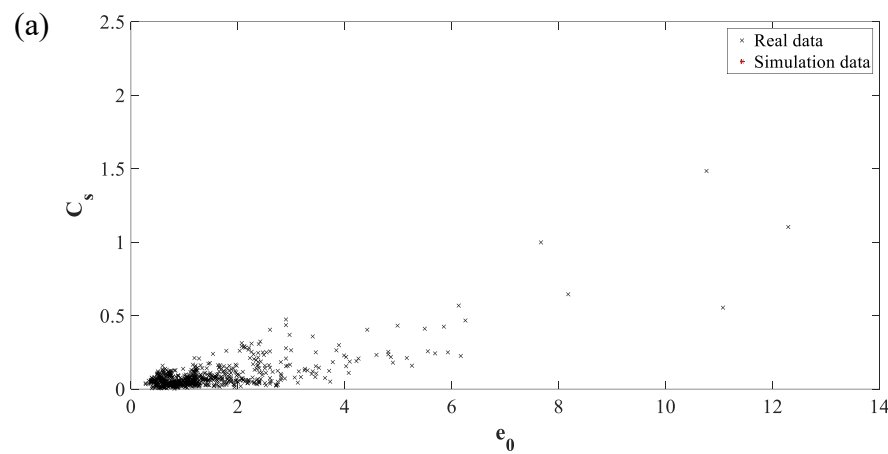
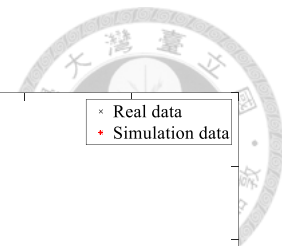


圖 4.16 所有資料點 C_s 與 e_0 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

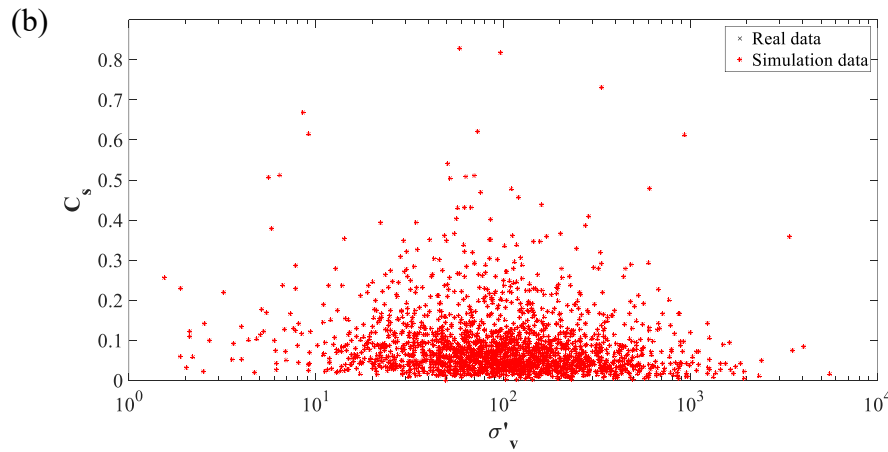
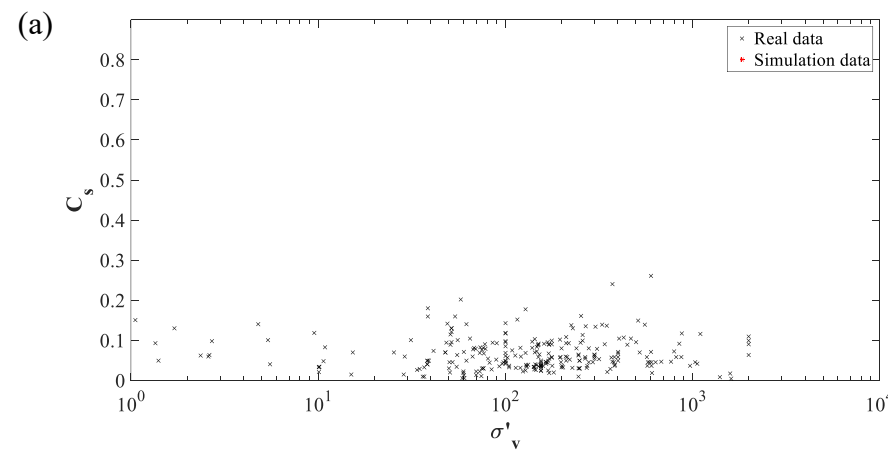


圖 4.17 所有資料點 C_s 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

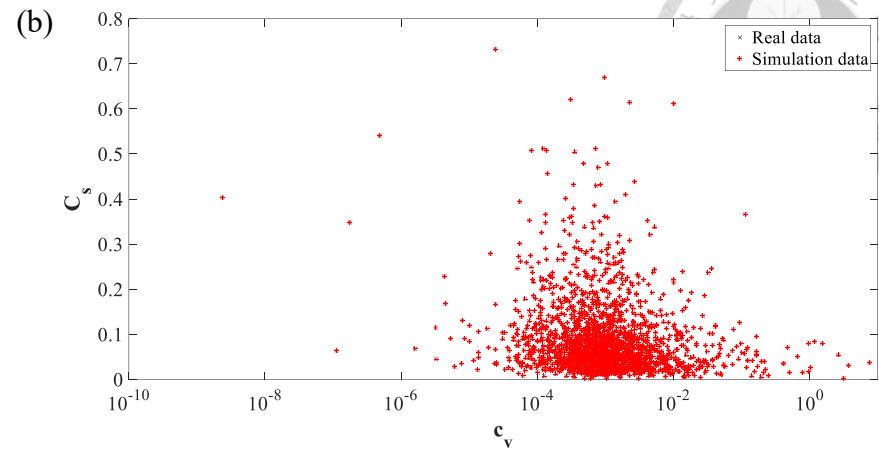
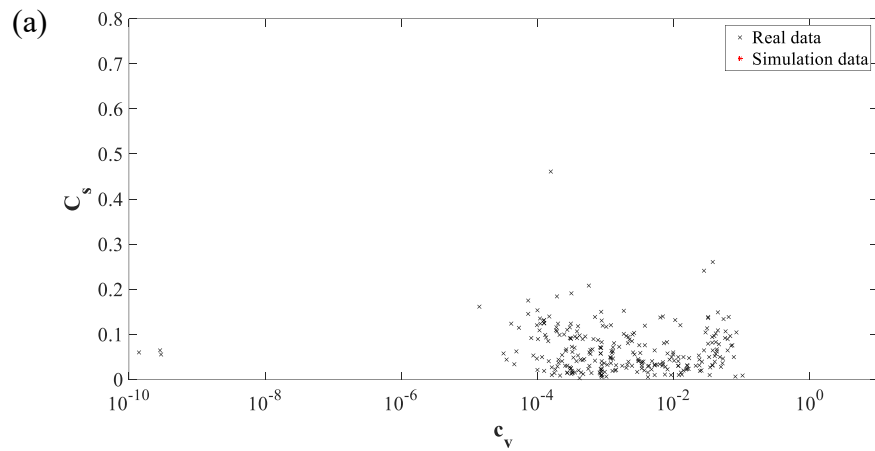


圖 4.18 所有資料點 c_s 與 c_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

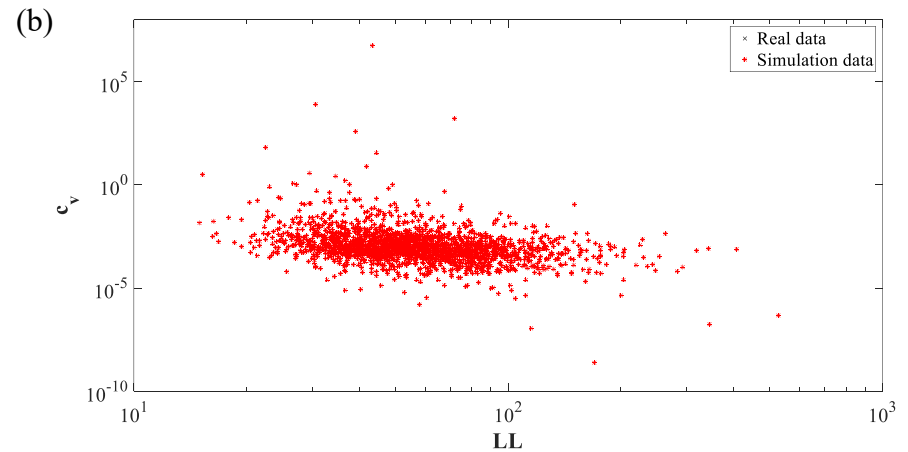
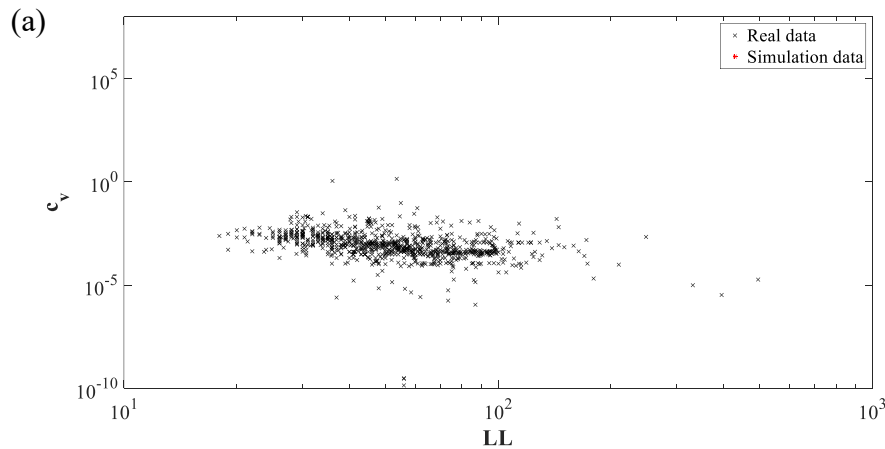


圖 4.19 所有資料點 c_v 與 LL 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

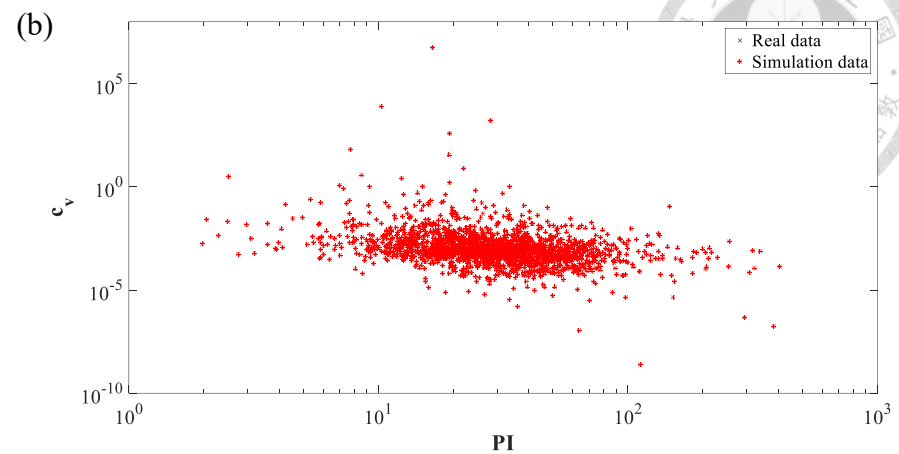
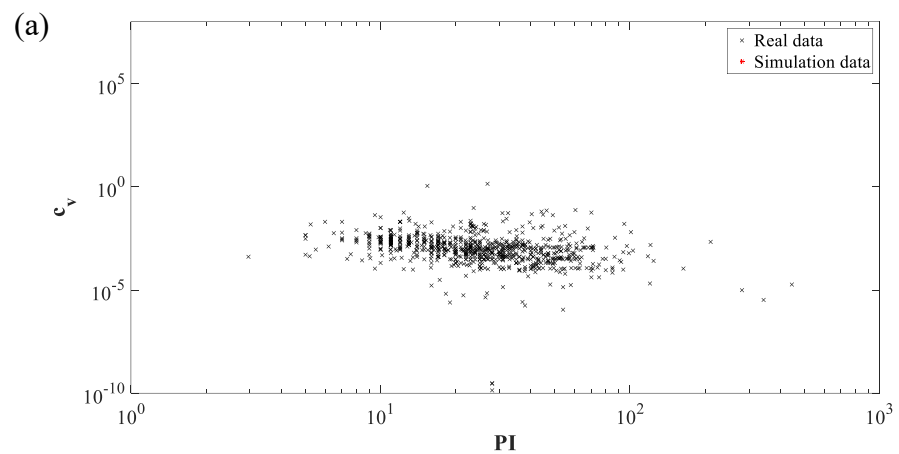
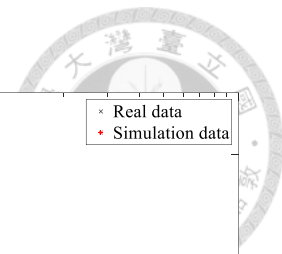


圖 4.20 所有資料點 c_v 與 PI 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

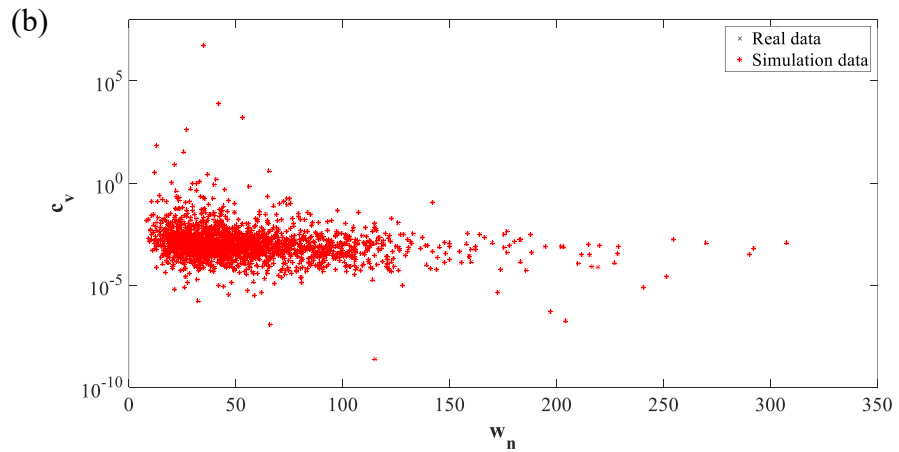
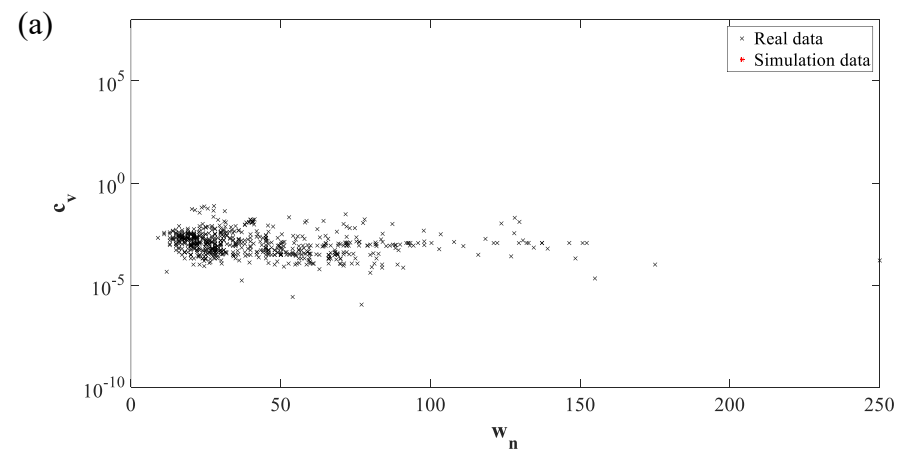


圖 4.21 所有資料點 c_v 與 w_n 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

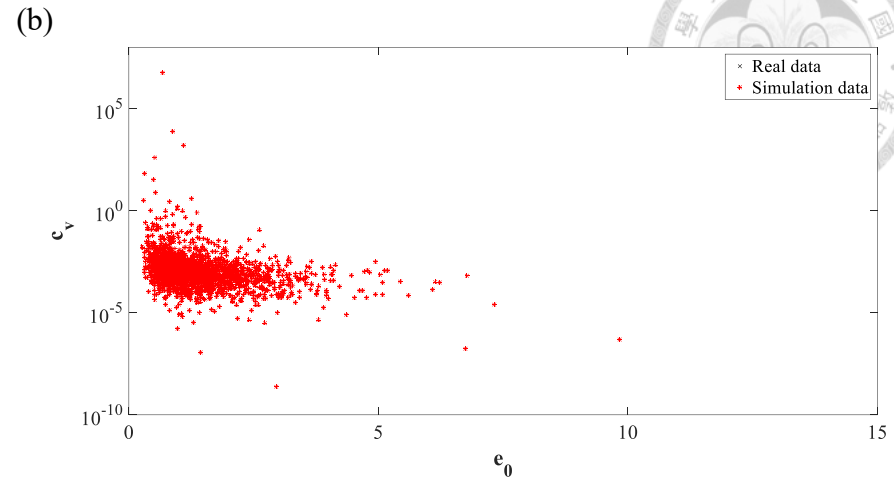
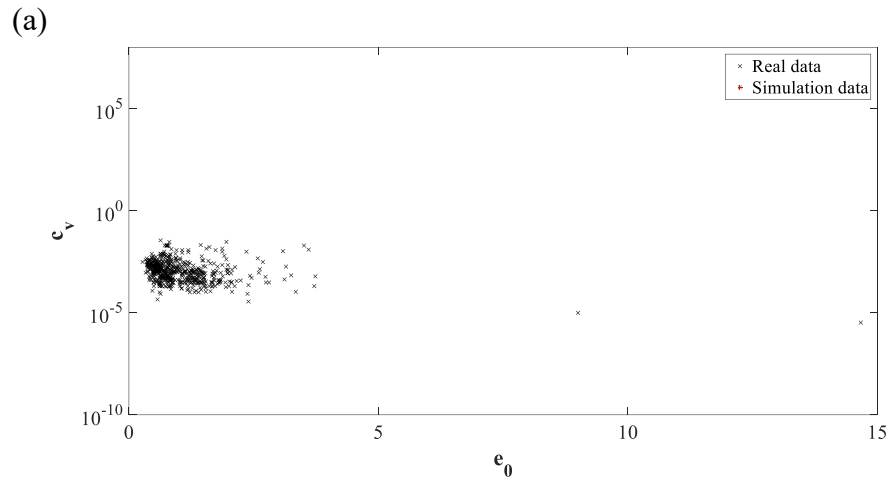
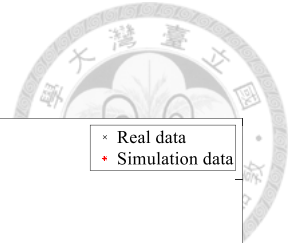


圖 4.22 所有資料點 c_v 與 G_s 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

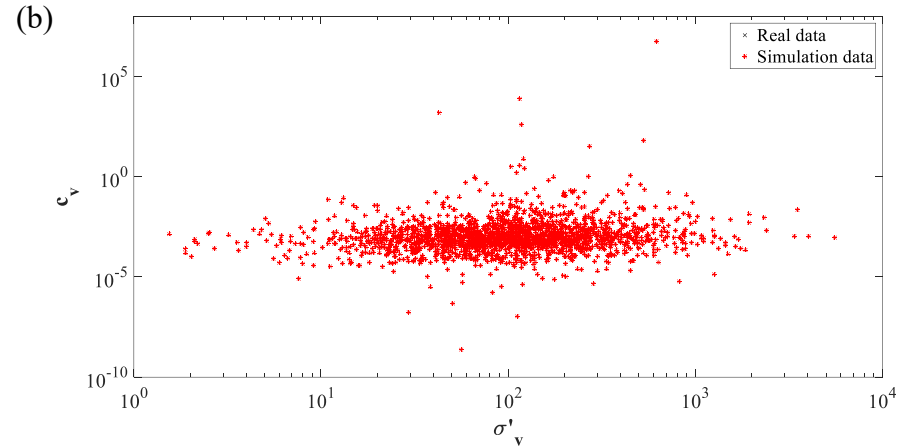
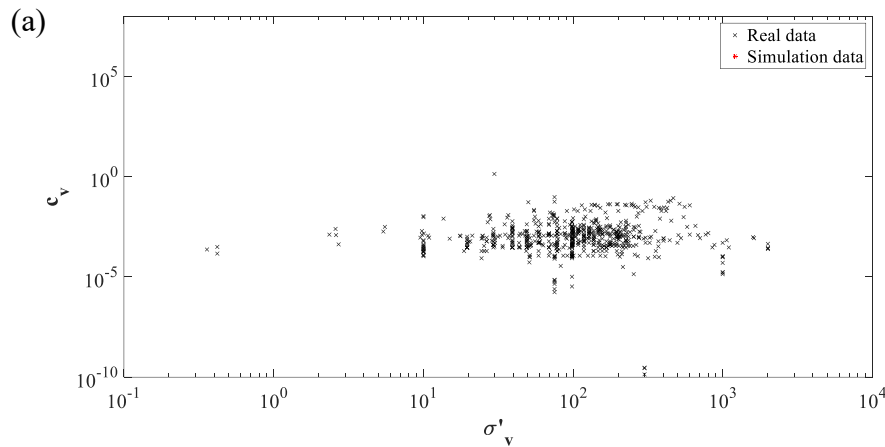


圖 4.23 所有資料點 c_v 與 σ'_v 散佈圖(a)真實資料點；(b)模擬資料點(全部資料模型)

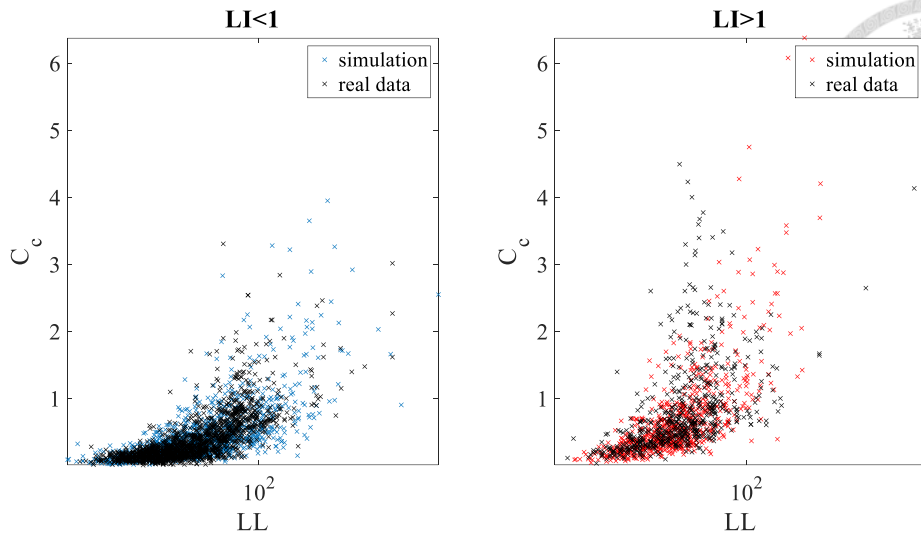
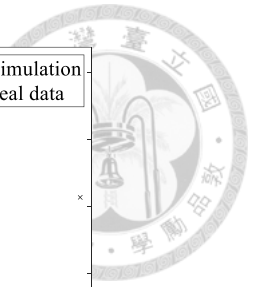


圖 4.24 C_c 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

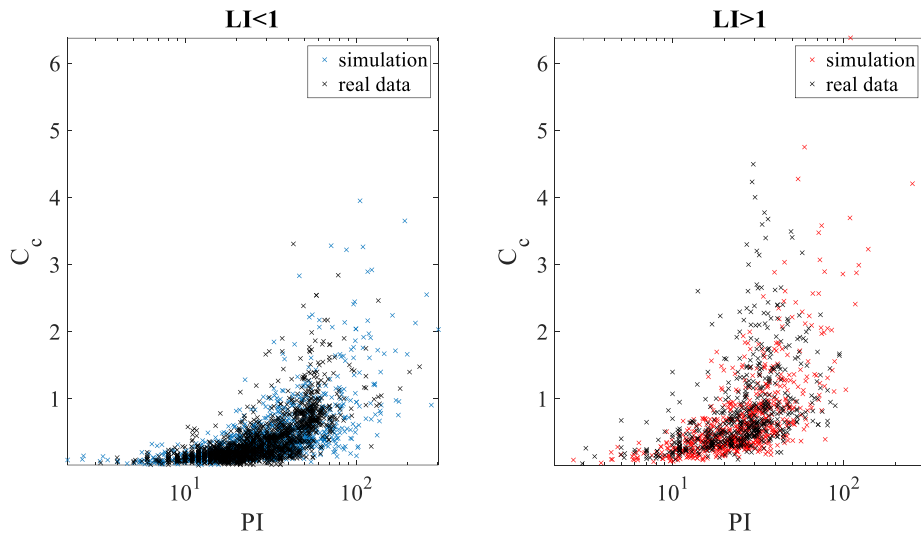


圖 4.25 C_c 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

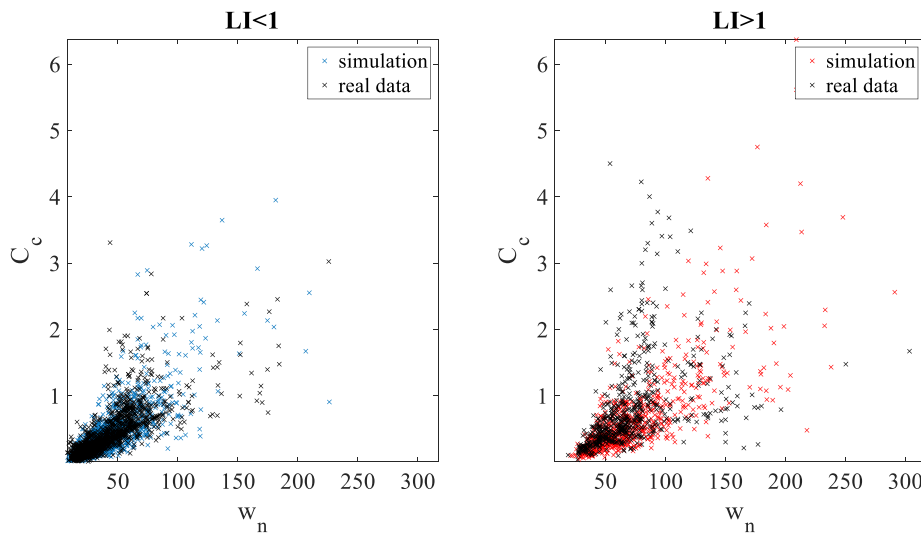


圖 4.26 C_c 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

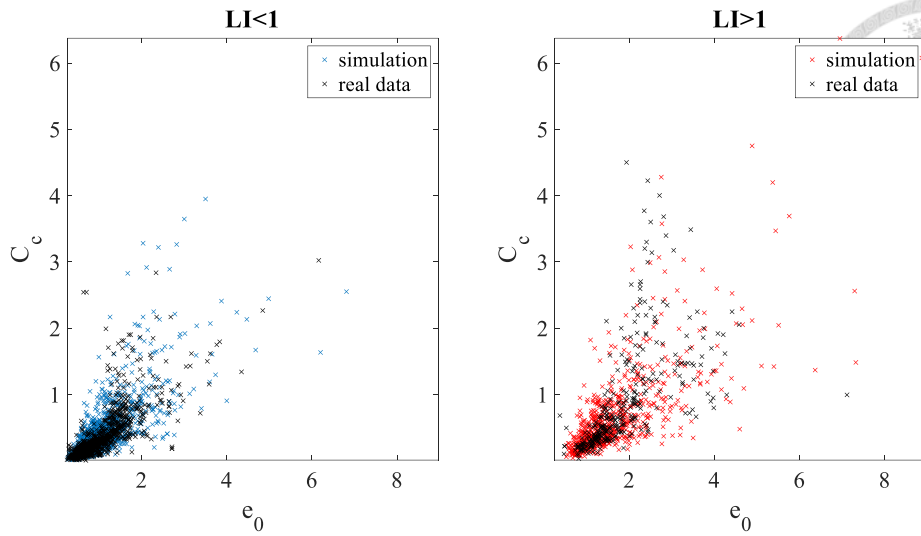
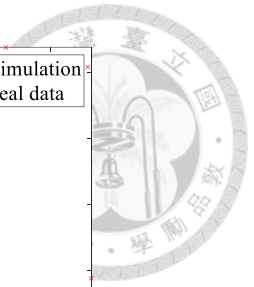


圖 4.27 C_c 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

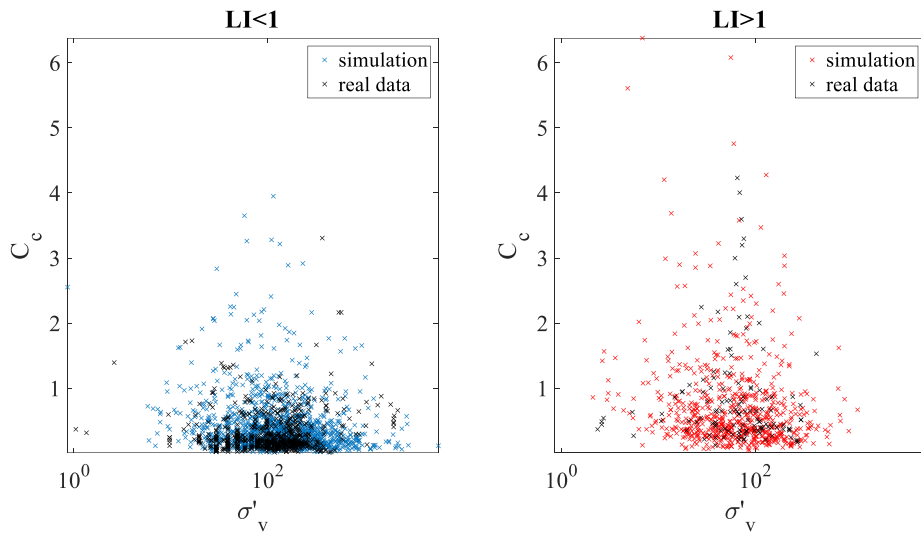


圖 4.28 C_c 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

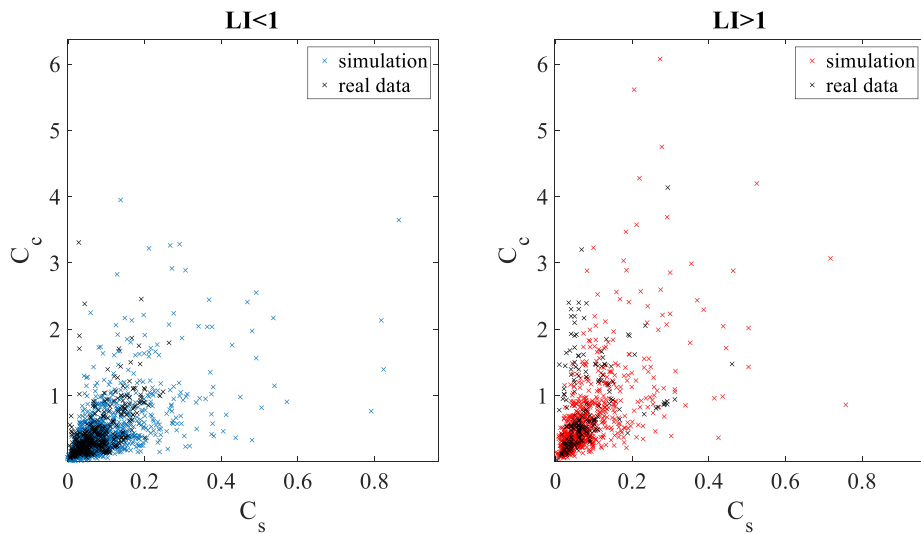


圖 4.29 C_c 與 C_s 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

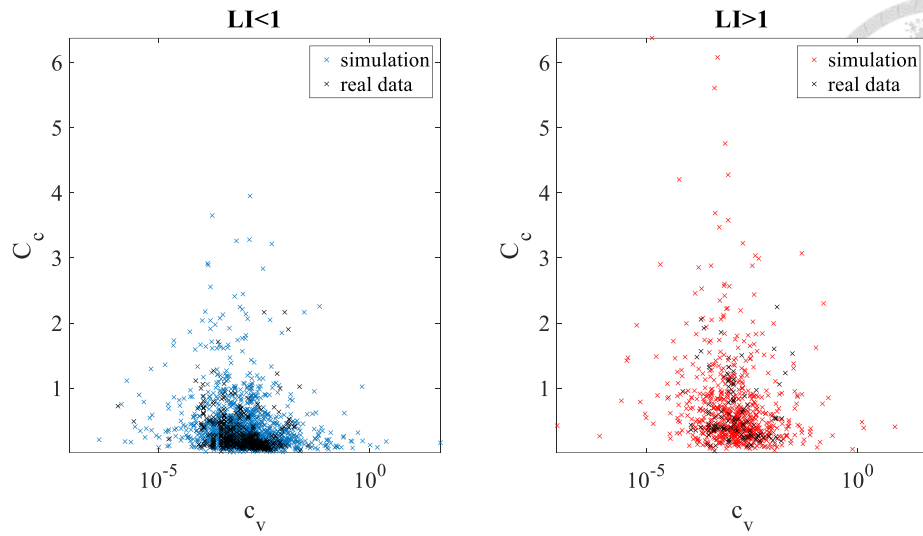
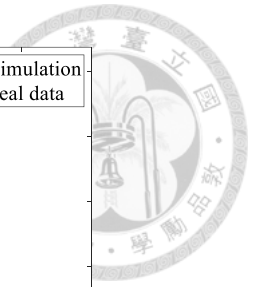


圖 4.30 C_c 與 c_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

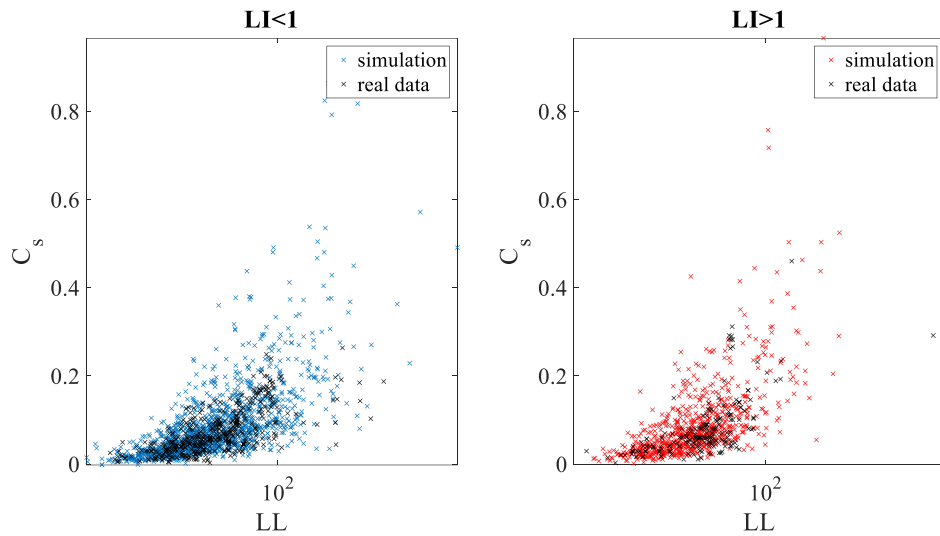


圖 4.31 C_s 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

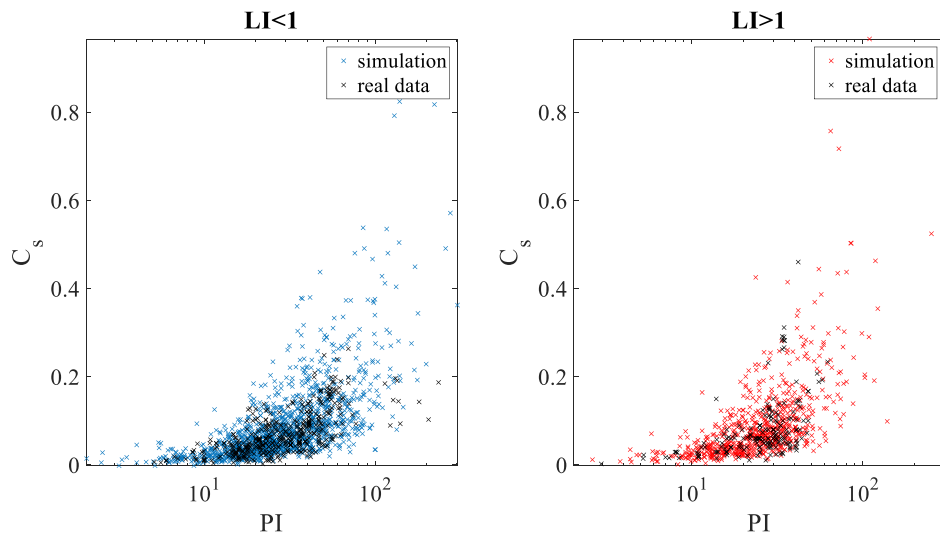


圖 4.32 C_s 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

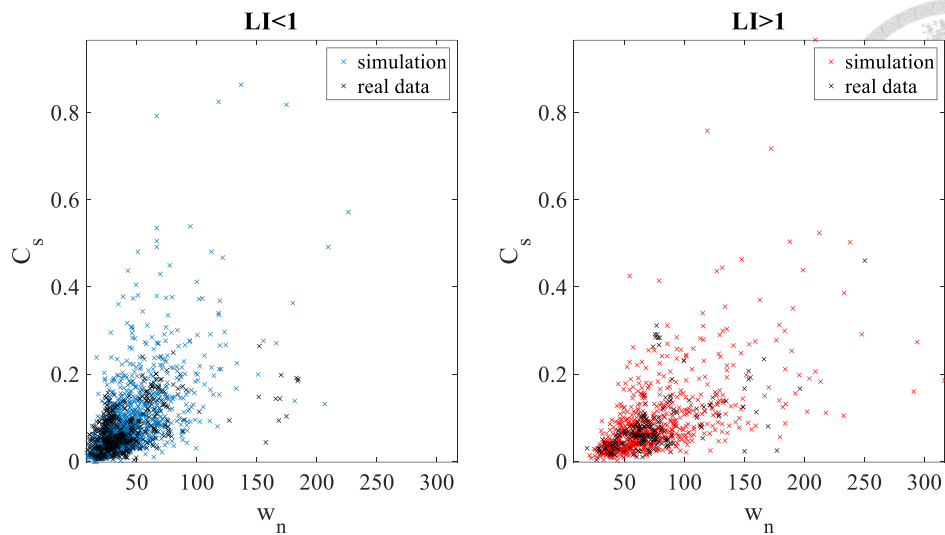


圖 4.33 C_s 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

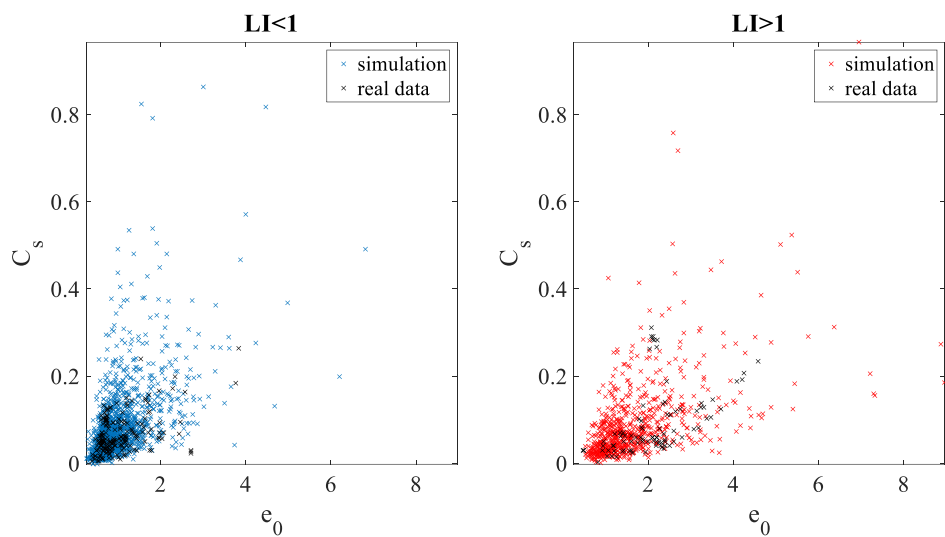


圖 4.34 C_s 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

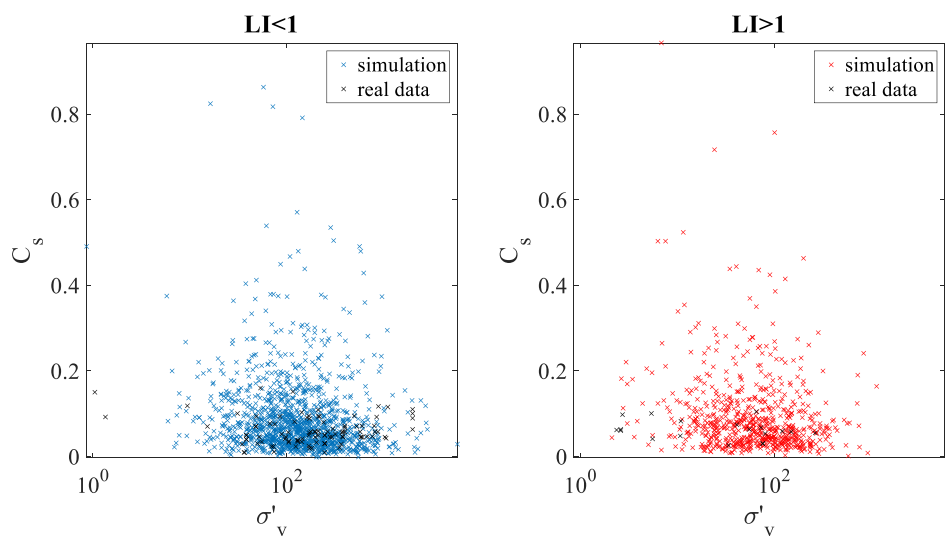


圖 4.35 C_s 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

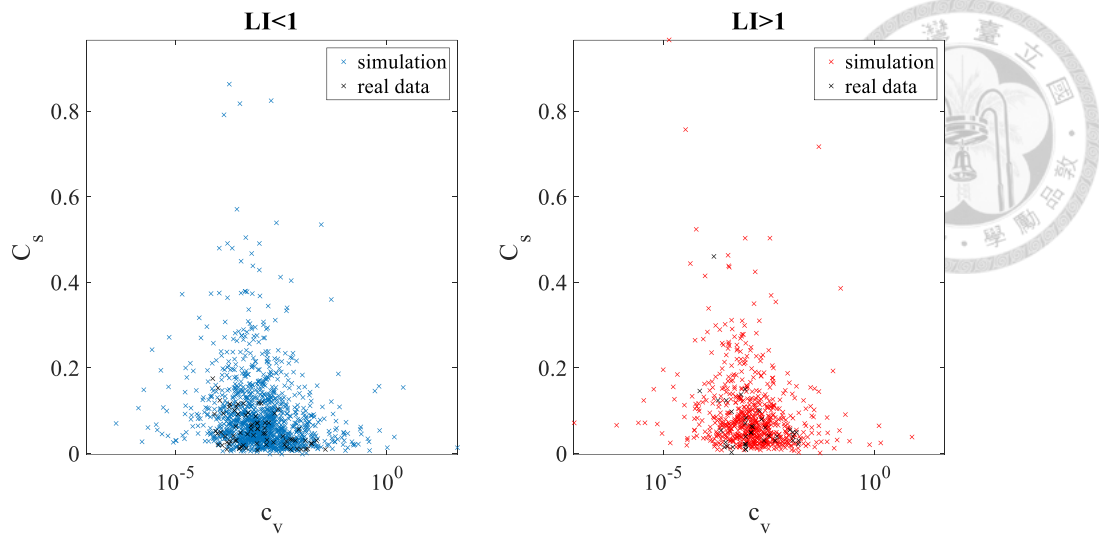


圖 4.36 C_s 與 c_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

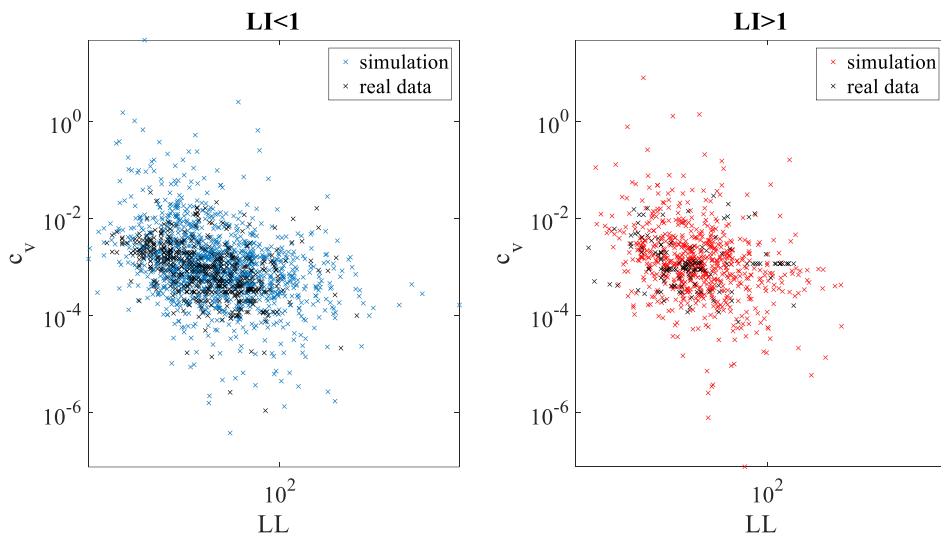


圖 4.37 c_v 與 LL 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

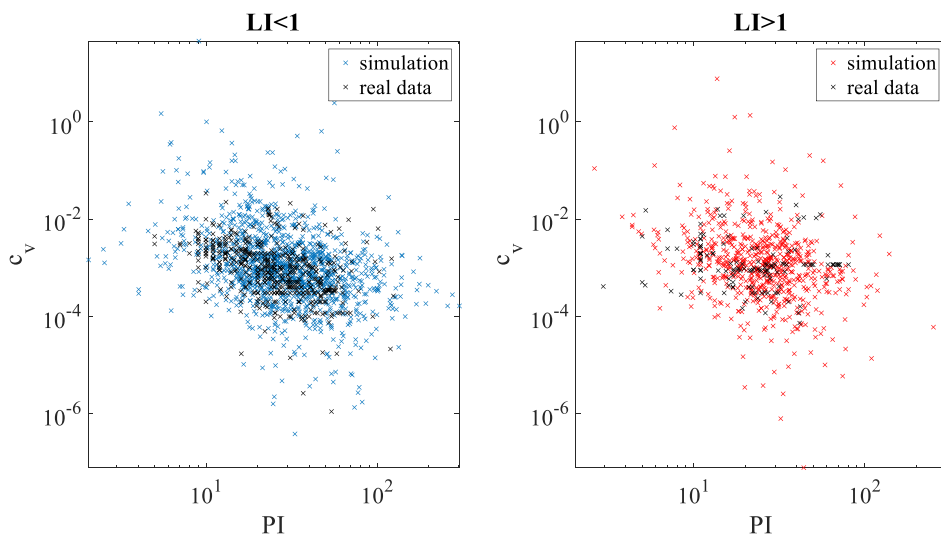


圖 4.38 c_v 與 PI 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

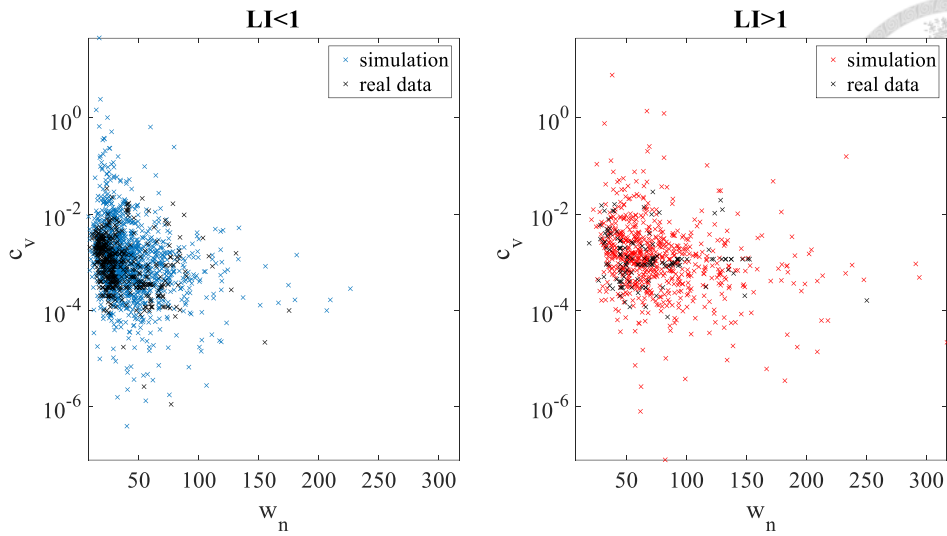


圖 4.39 c_v 與 w_n 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

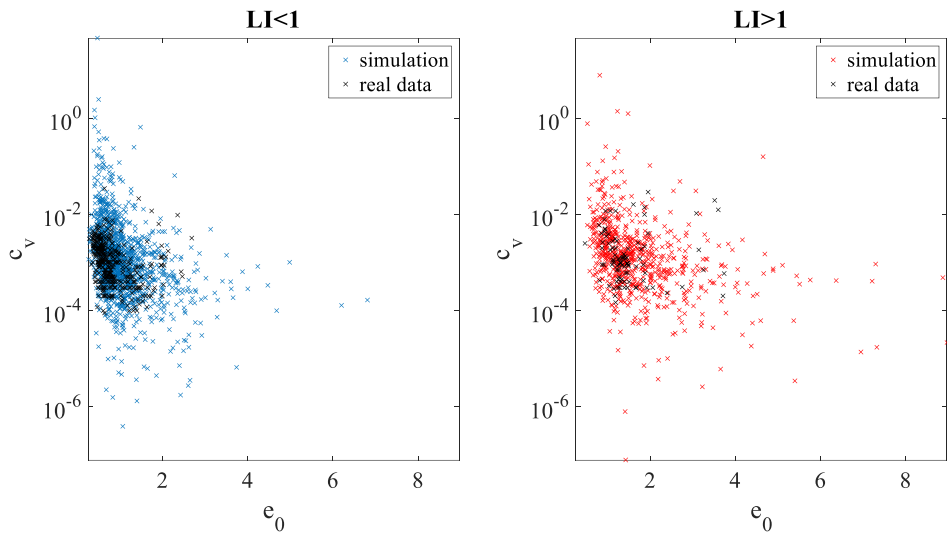


圖 4.40 c_v 與 e_0 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

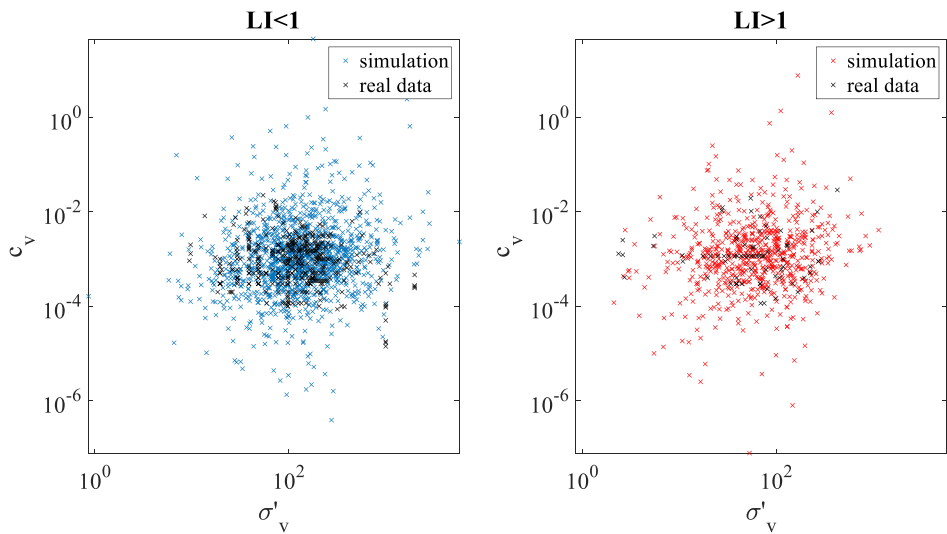


圖 4.41 c_v 與 σ'_v 全部資料模型模擬資料點與原始資料點(左：LI<1；右：LI>1)

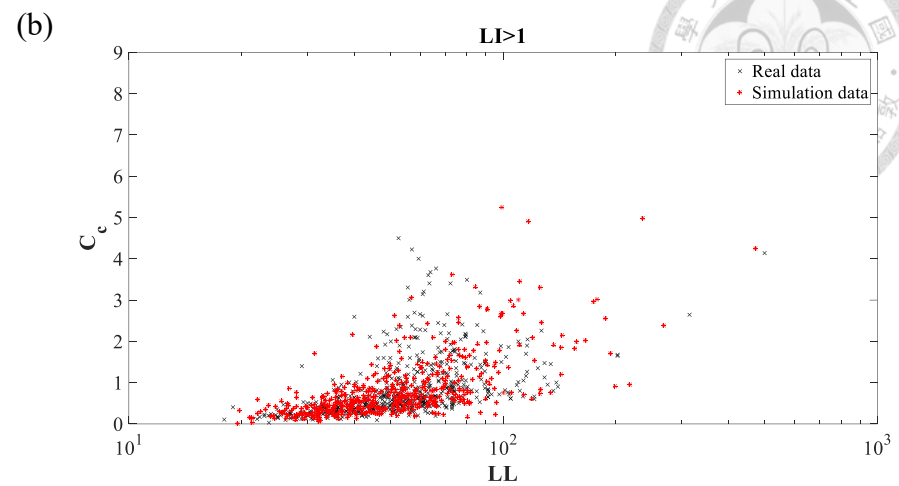
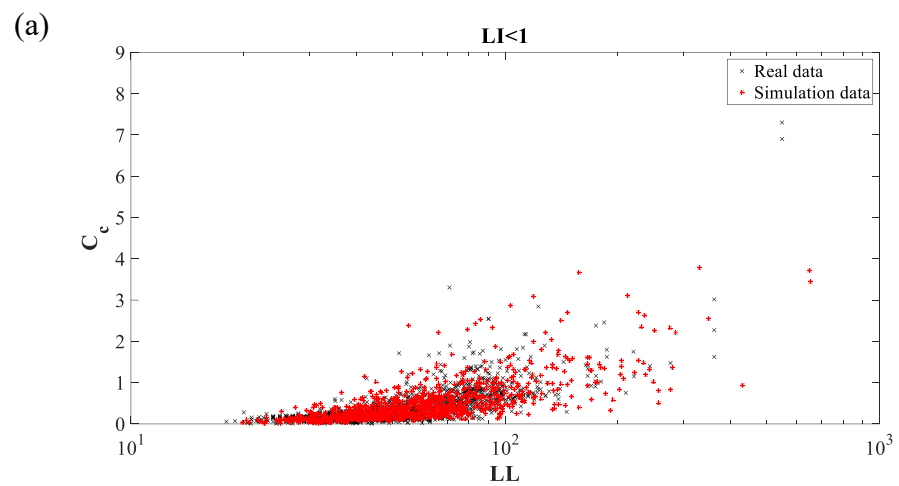
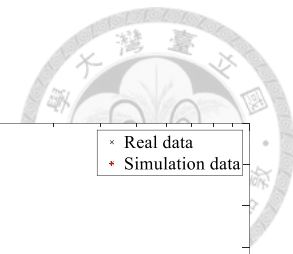


圖 4.42 C_c 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

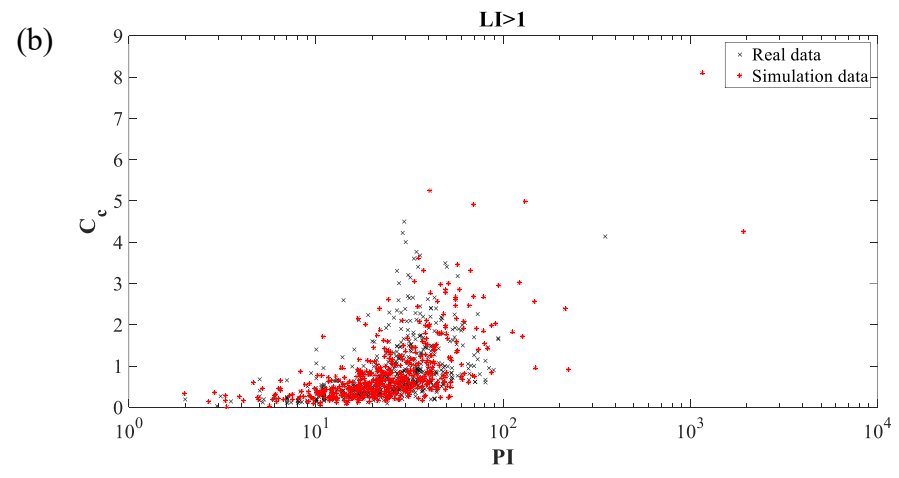
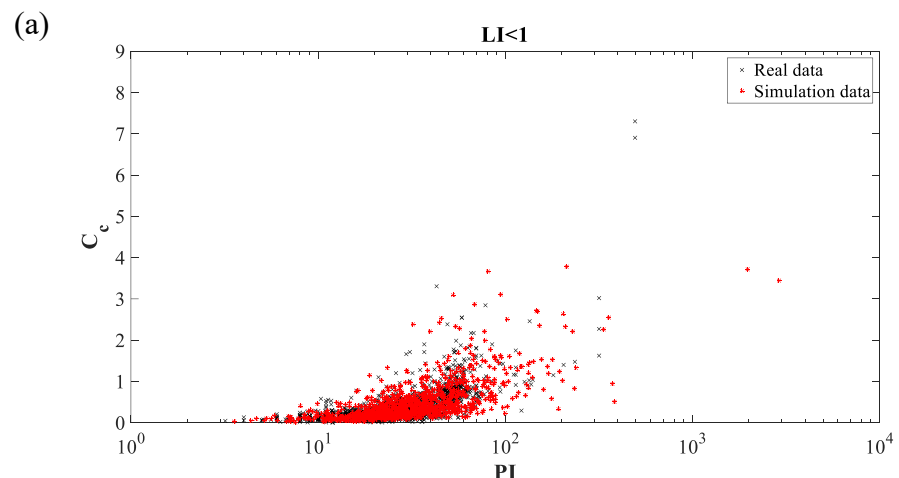


圖 4.43 C_c 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

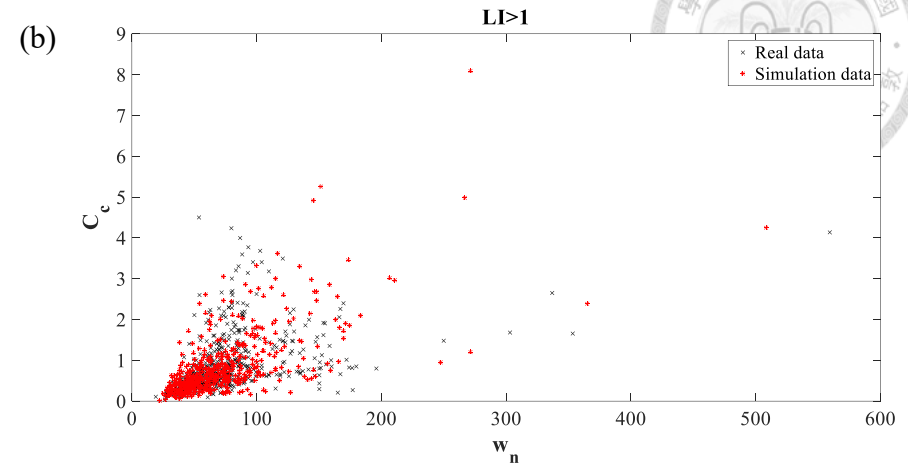
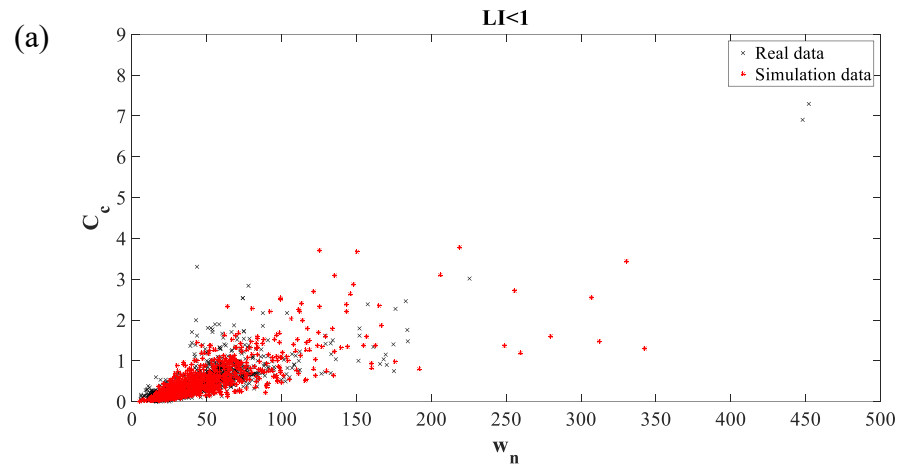


圖 4.44 C_c 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

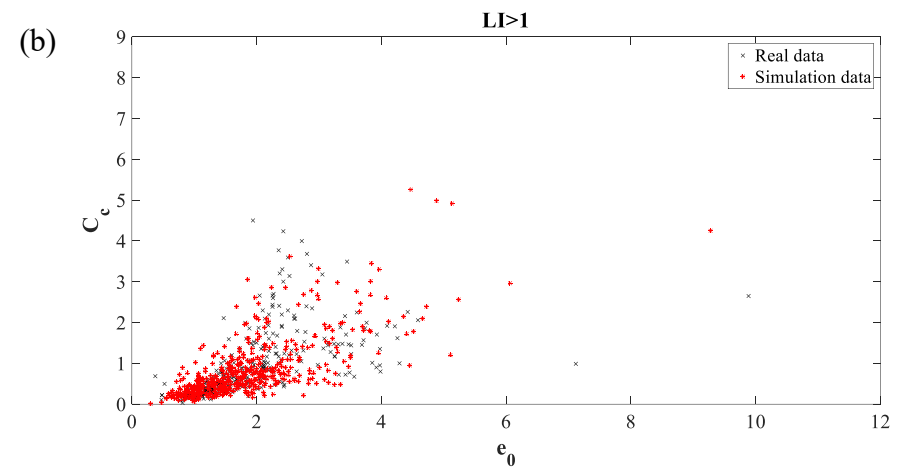
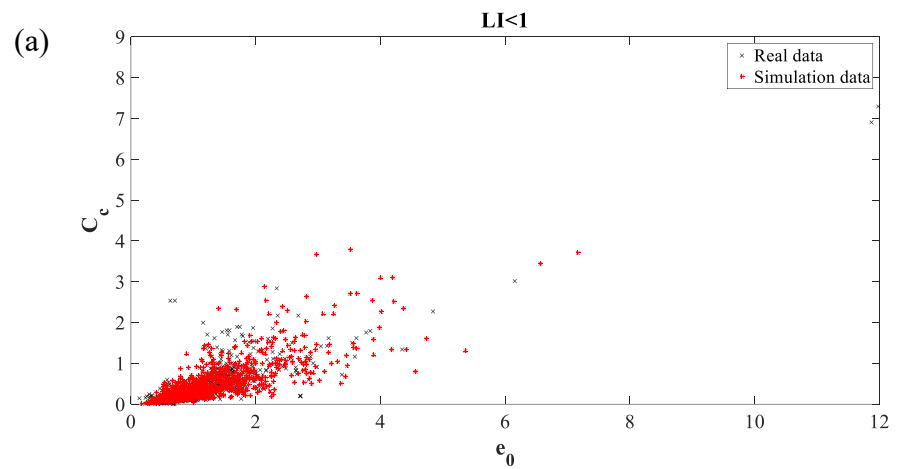


圖 4.45 C_c 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

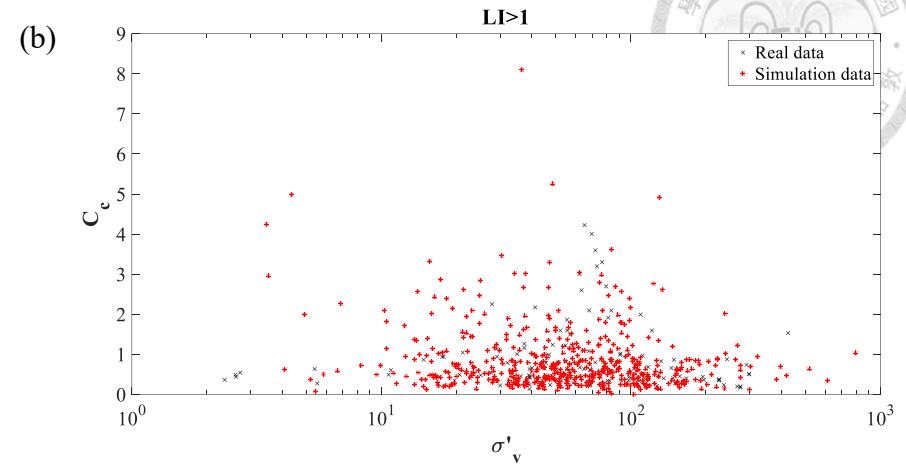
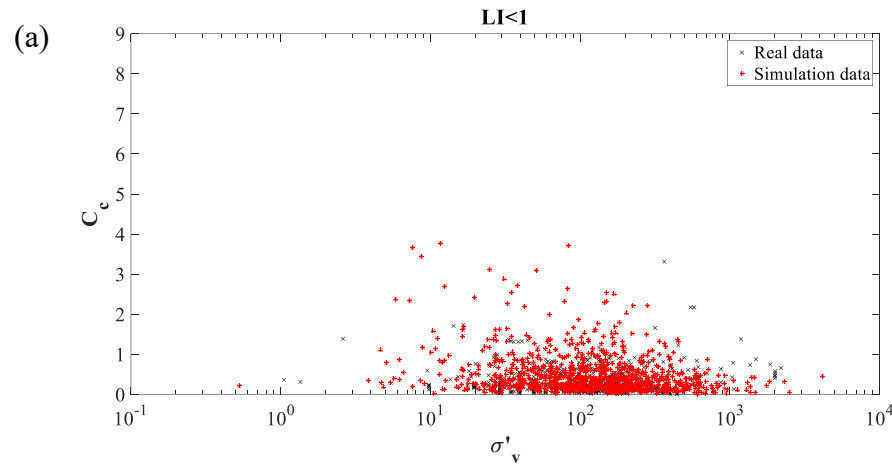
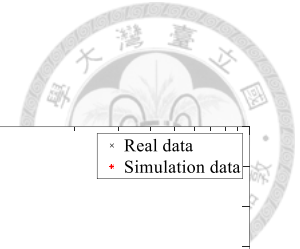


圖 4.46 C_c 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

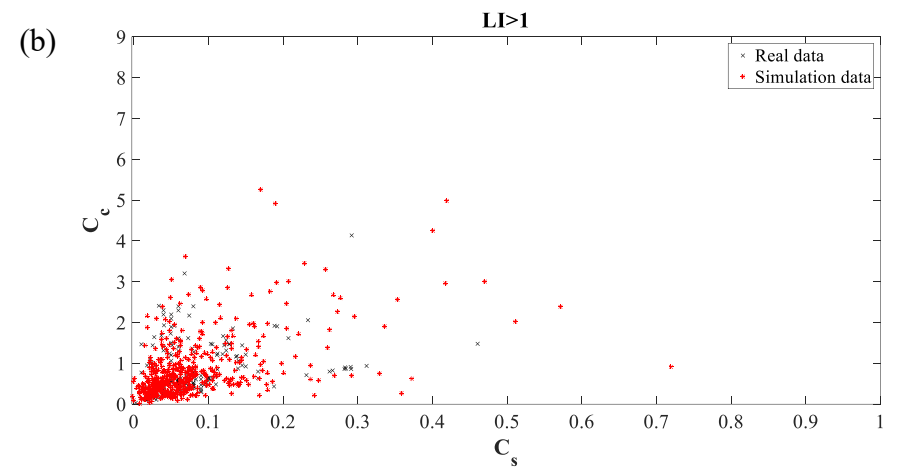
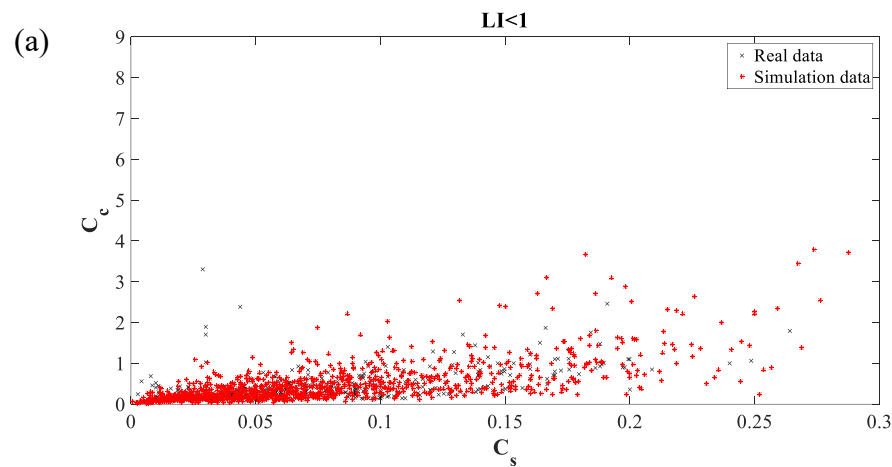


圖 4.47 C_c 與 C_s 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

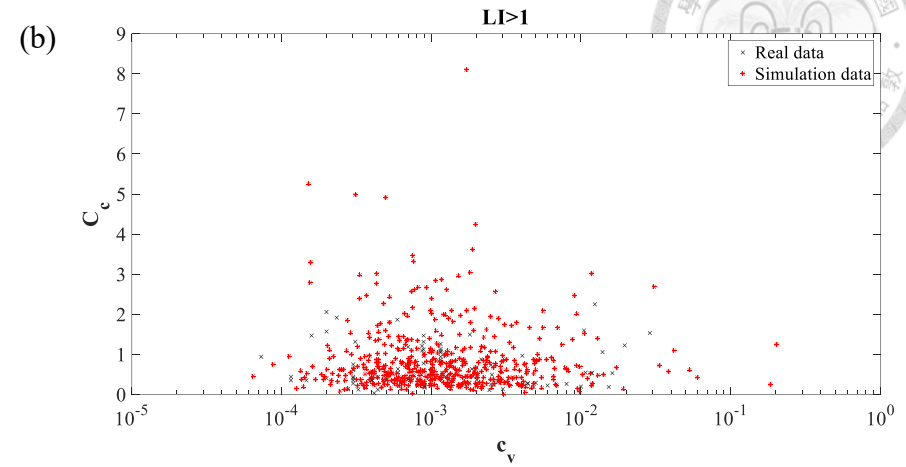
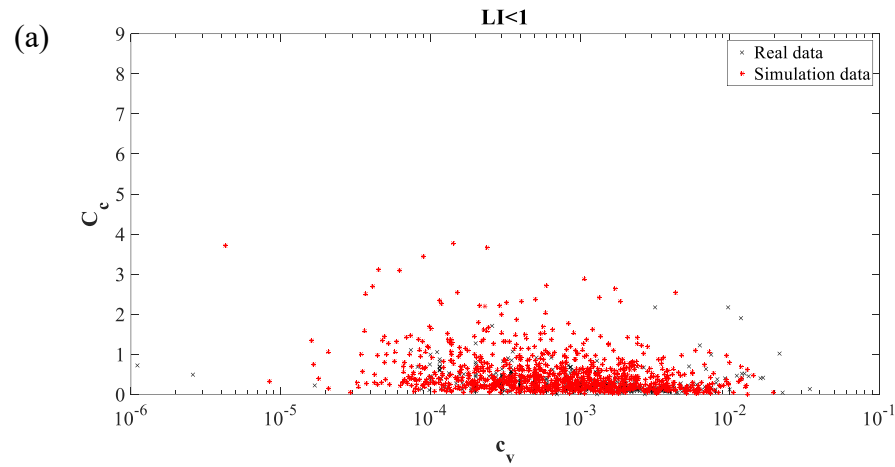
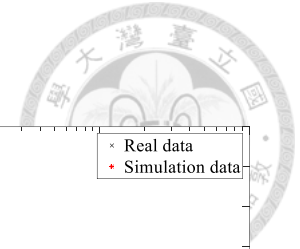


圖 4.48 C_c 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

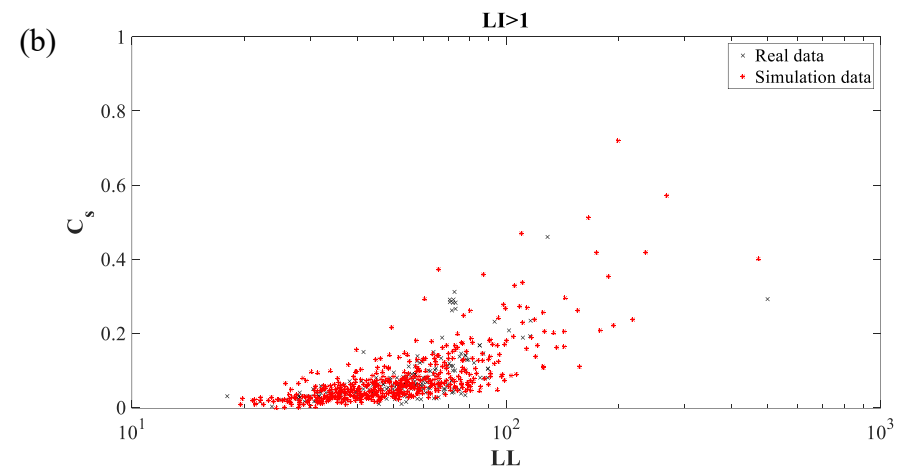
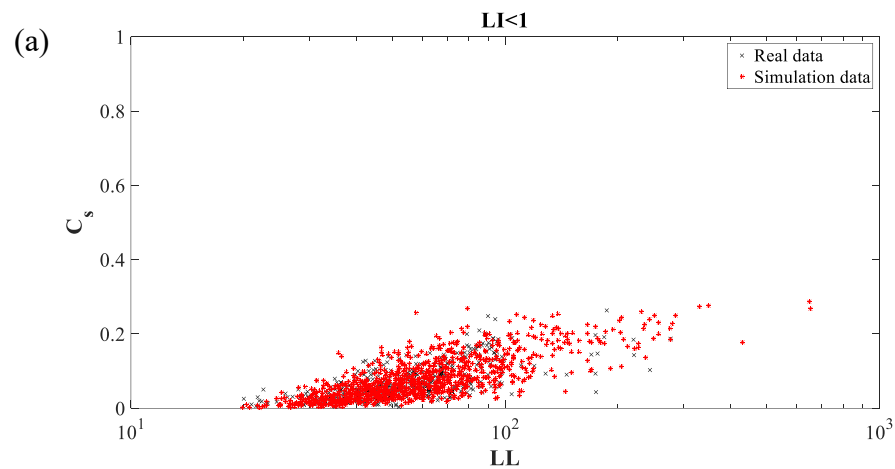


圖 4.49 C_s 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

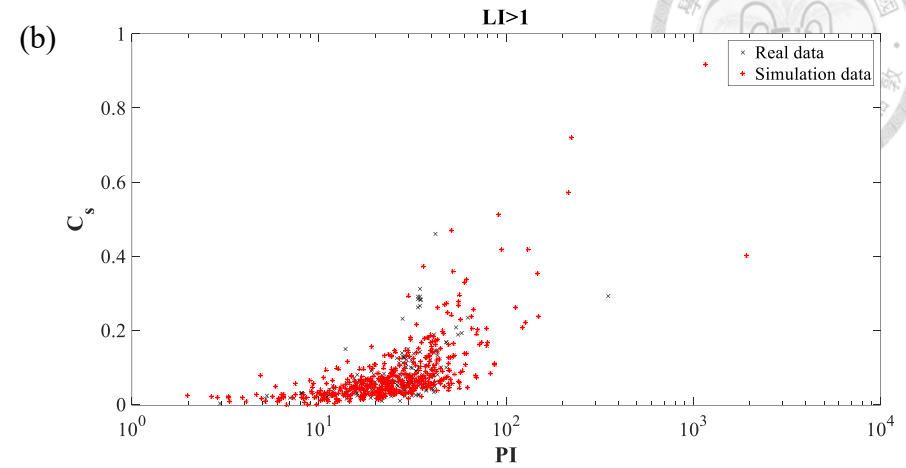
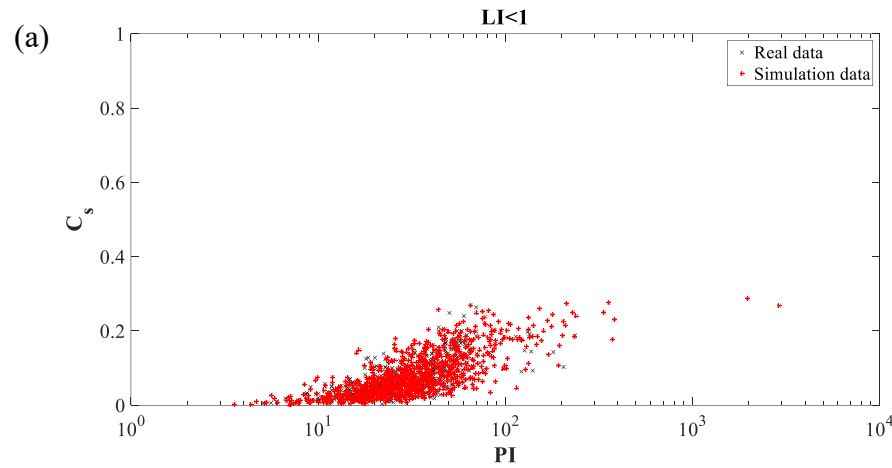
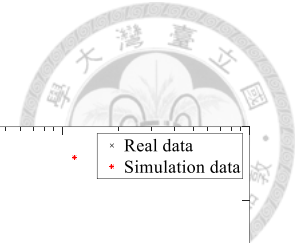


圖 4.50 C_s 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

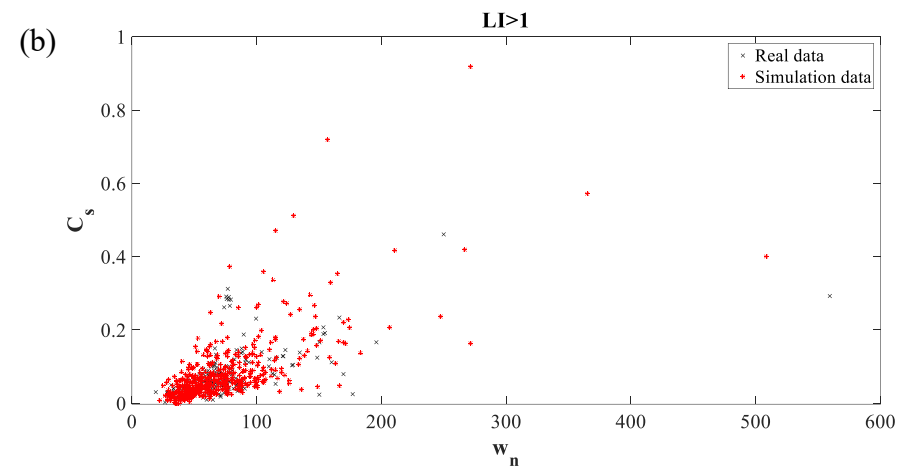
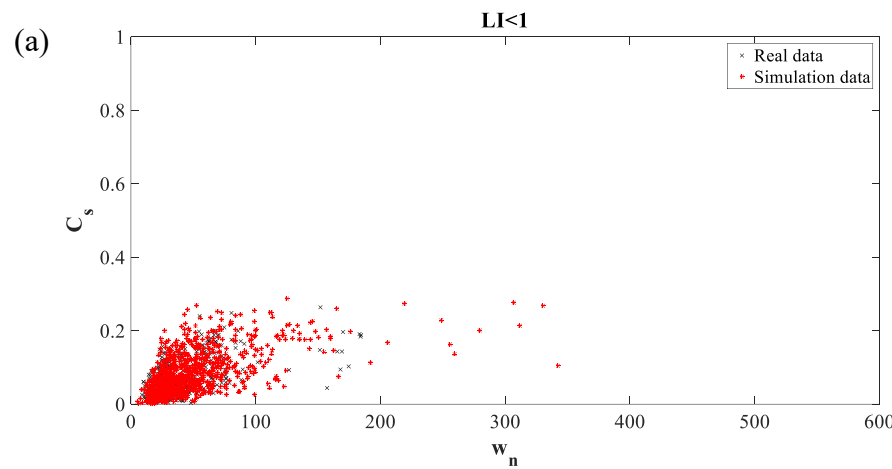


圖 4.51 C_s 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

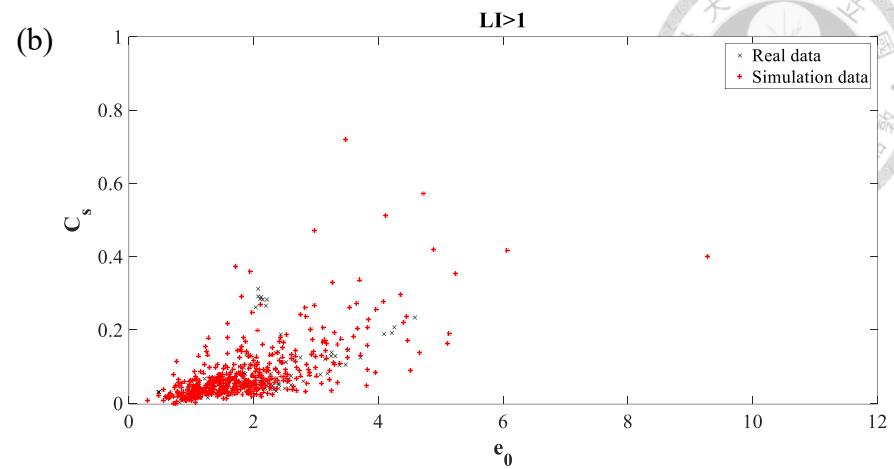
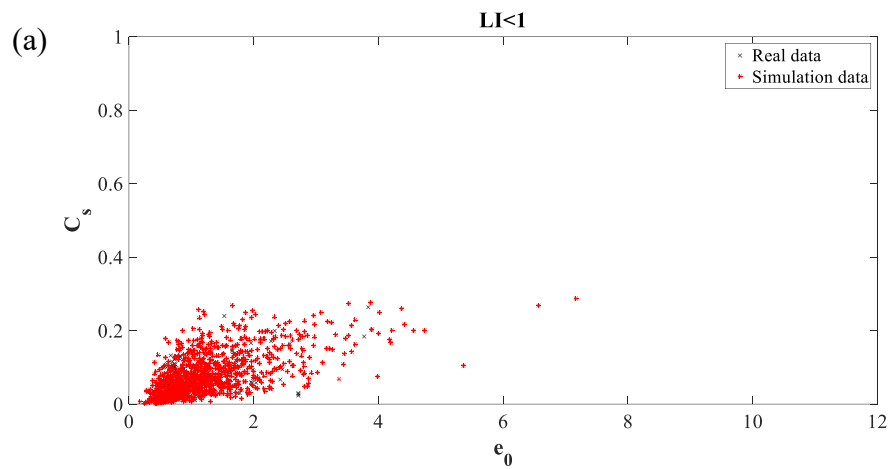


圖 4.52 C_s 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

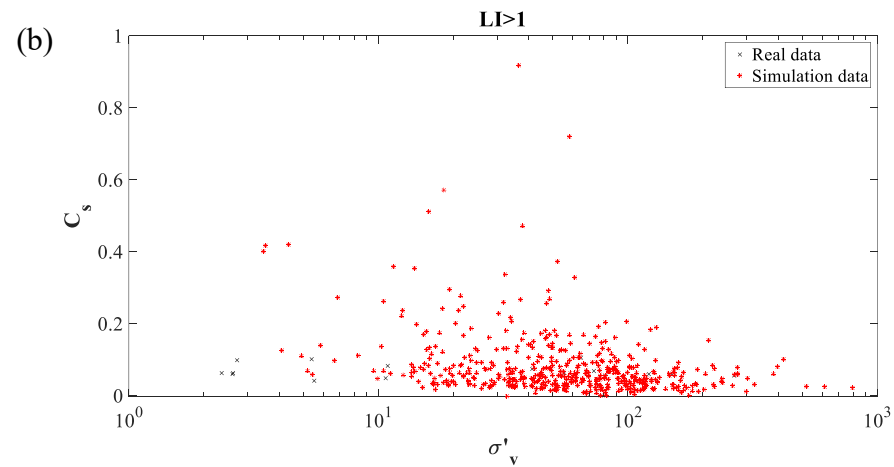
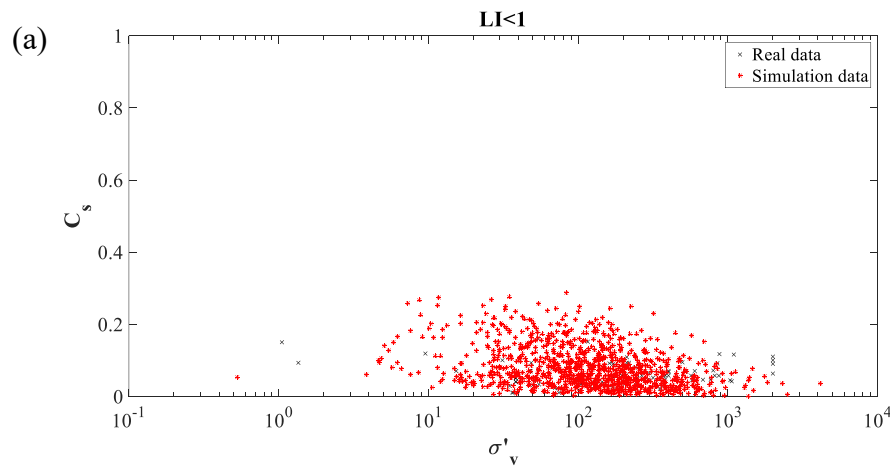


圖 4.53 C_s 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) $LI < 1$ 模型；(b) $LI > 1$ 模型

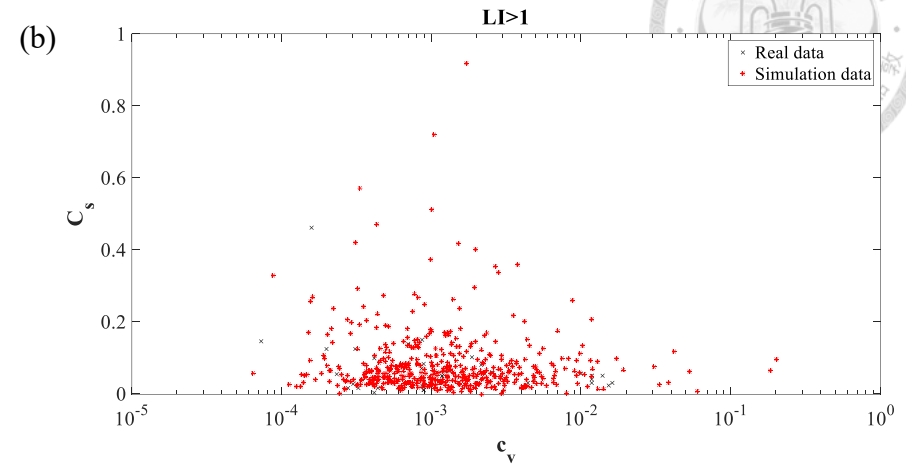
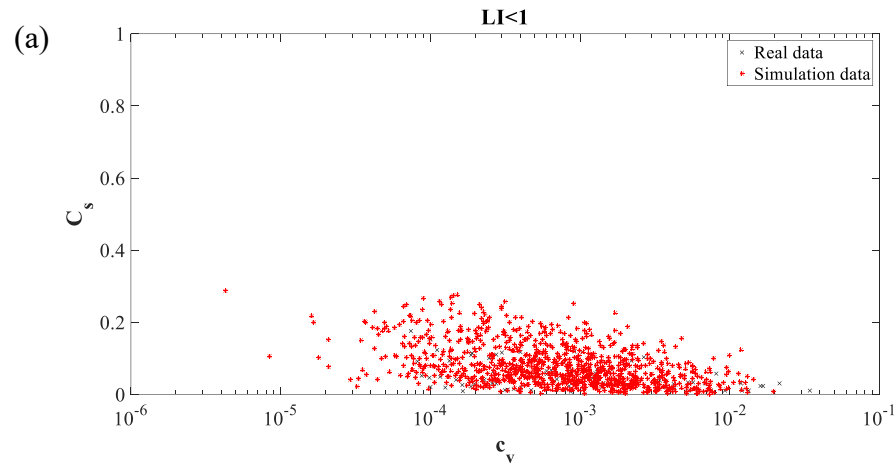
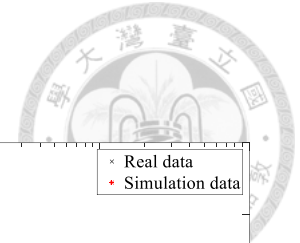


圖 4.54 C_s 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

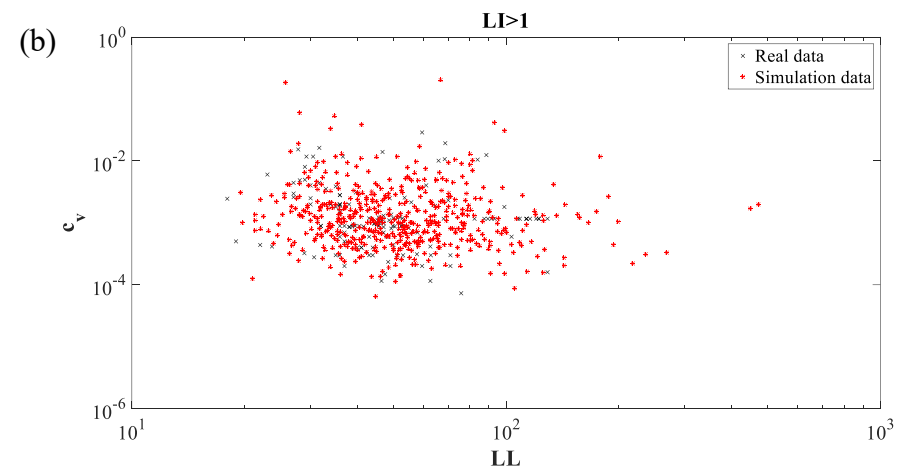
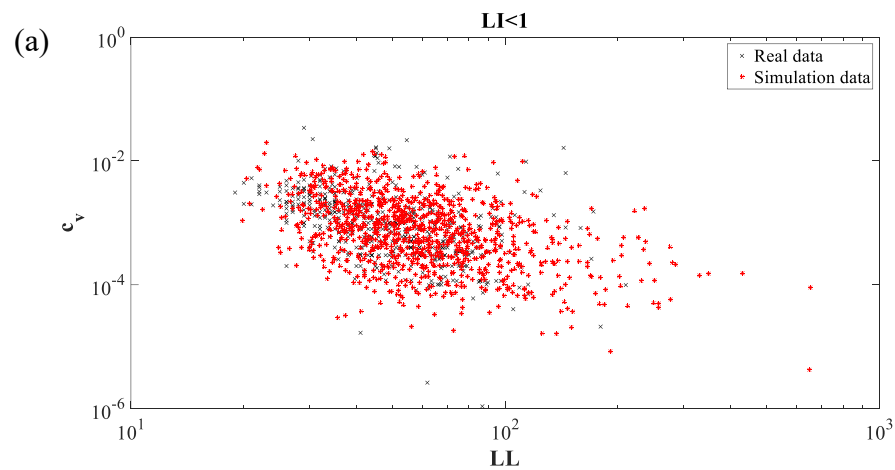


圖 4.55 c_v 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

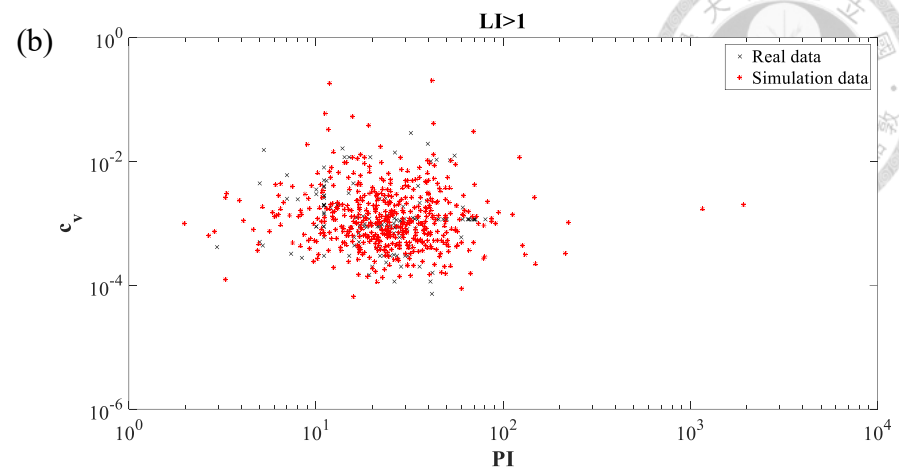
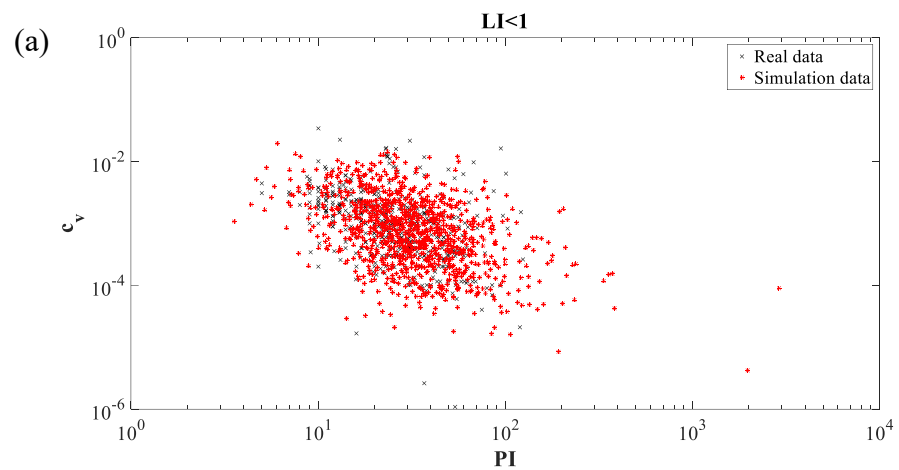
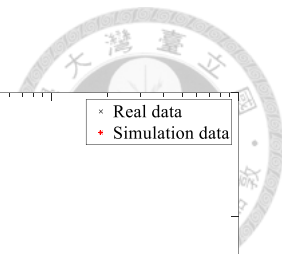


圖 4.56 c_v 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

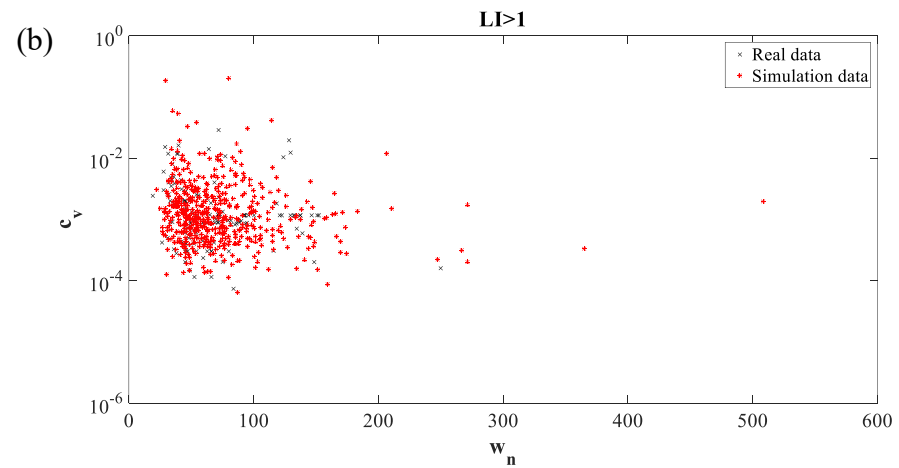
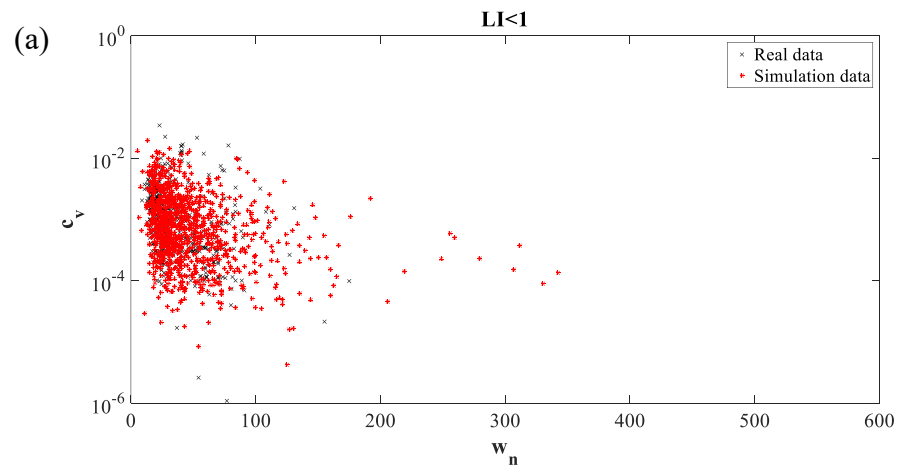


圖 4.57 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

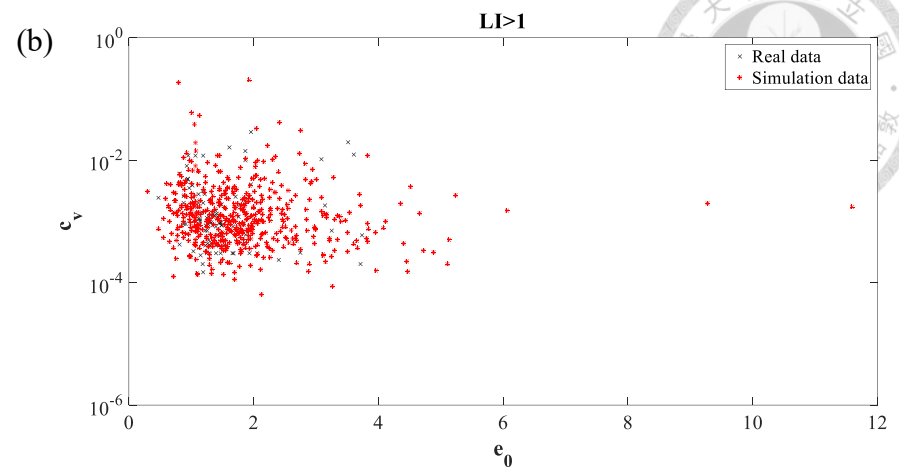
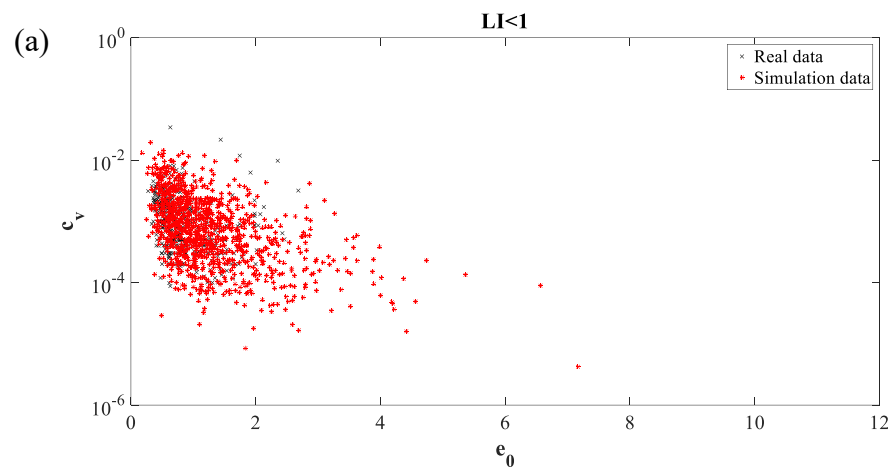
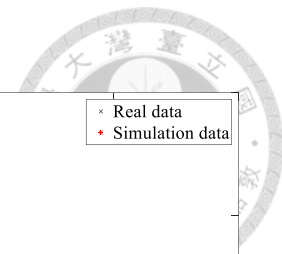


圖 4.58 c_v 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

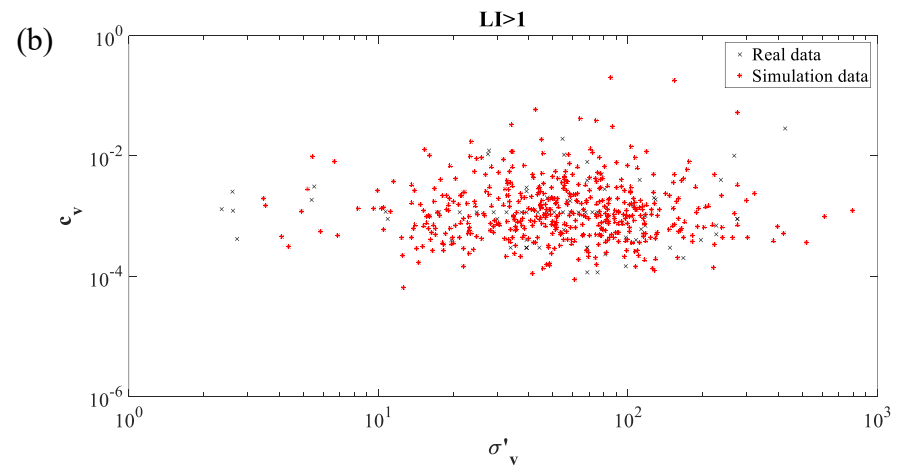
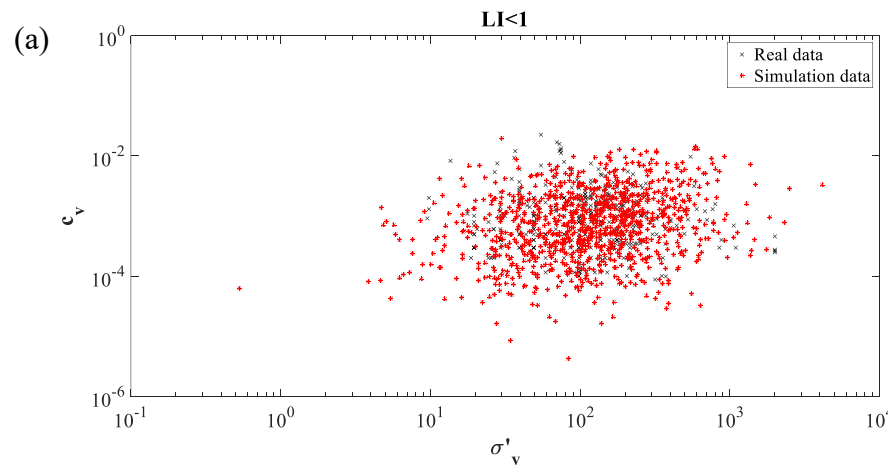


圖 4.59 c_v 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) LI<1 模型；(b) LI>1 模型

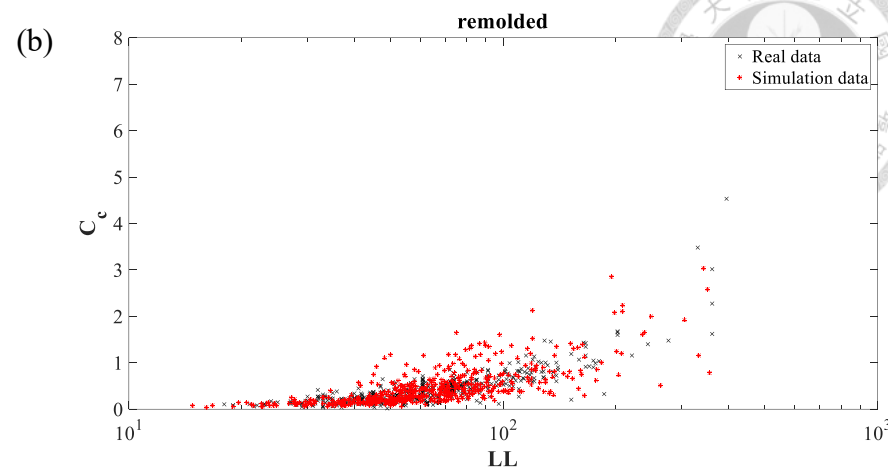
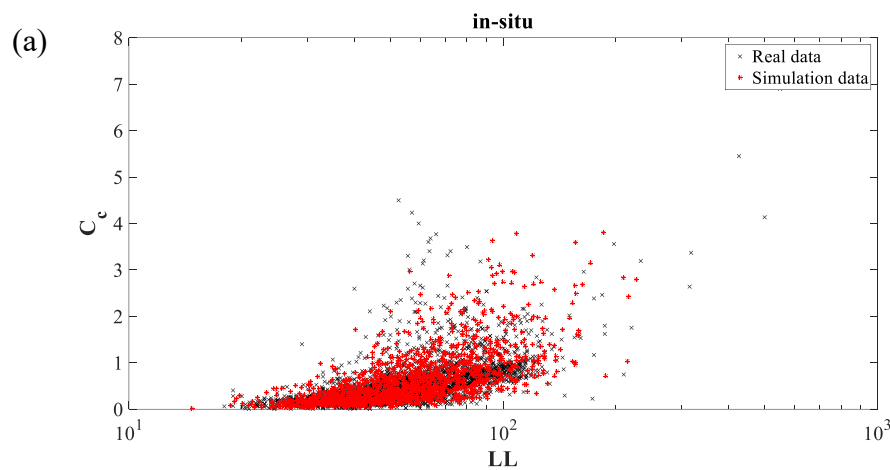
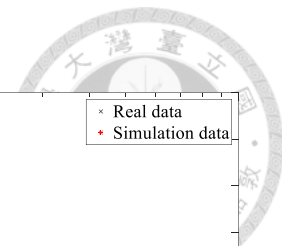


圖 4.60 C_c 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

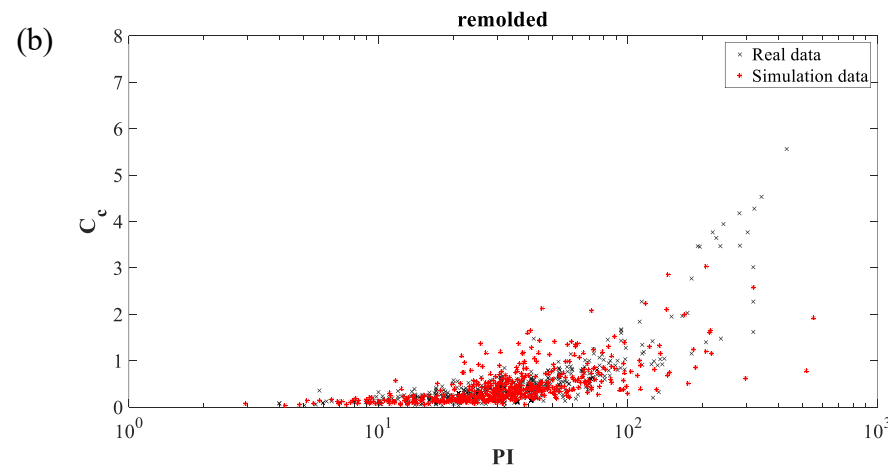
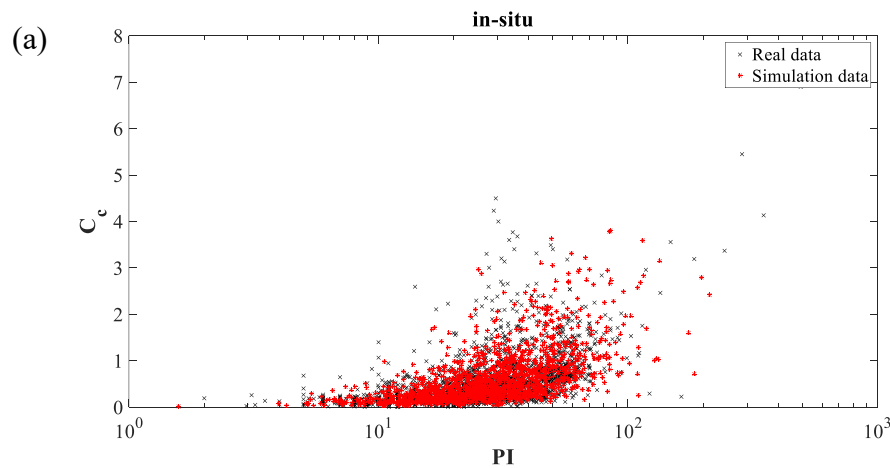


圖 4.61 C_c 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

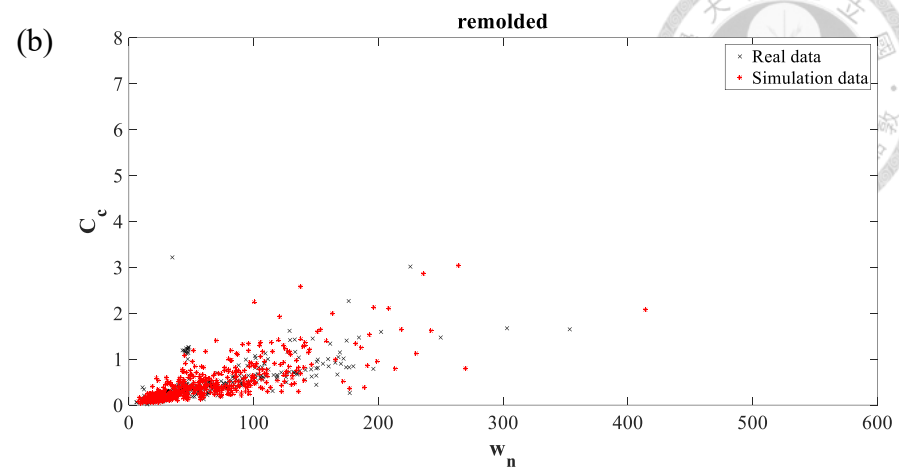
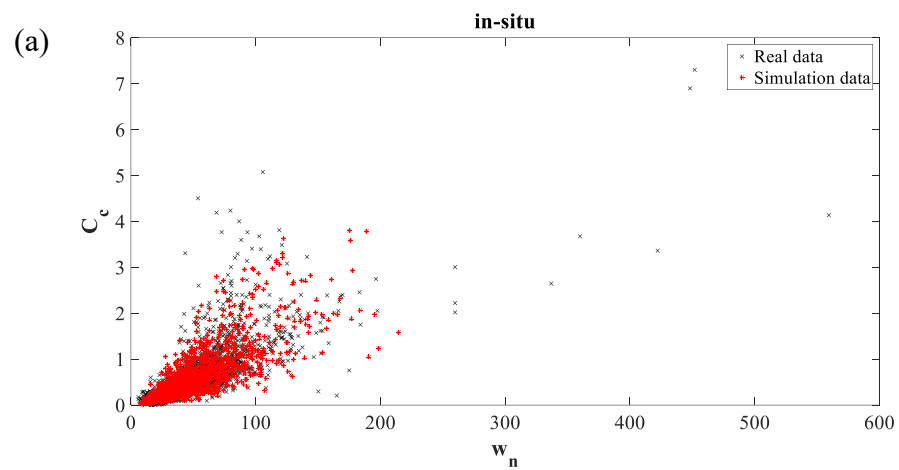
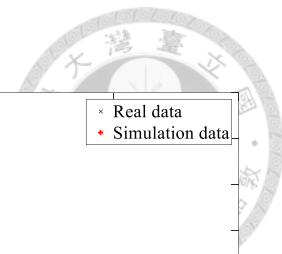


圖 4.62 C_c 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

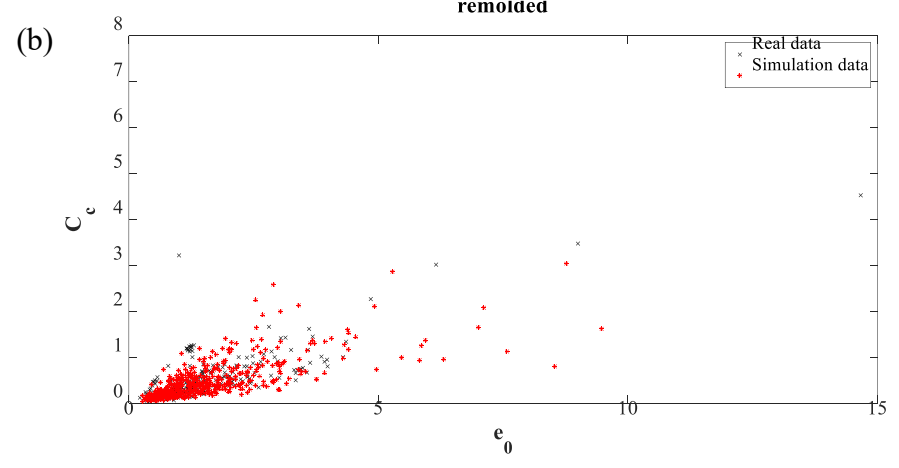
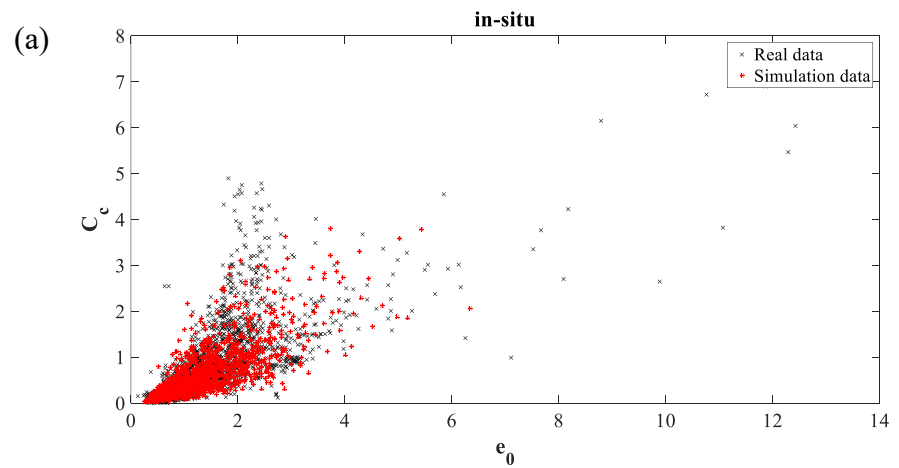


圖 4.63 C_c 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

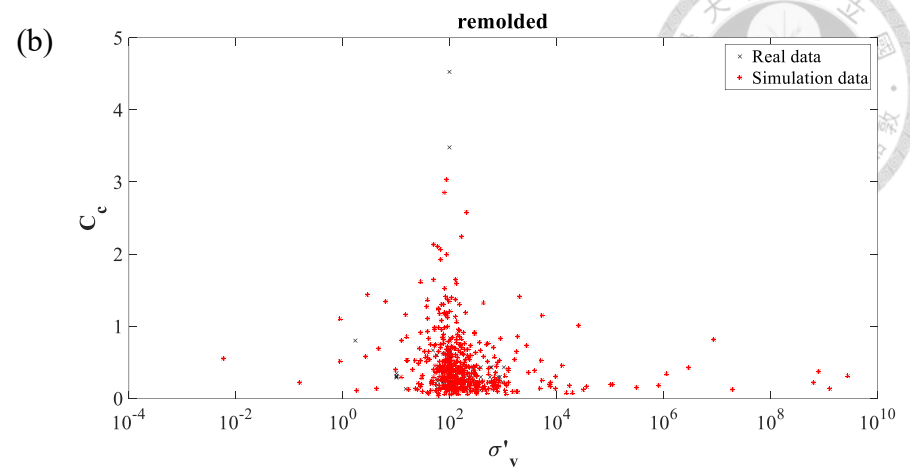
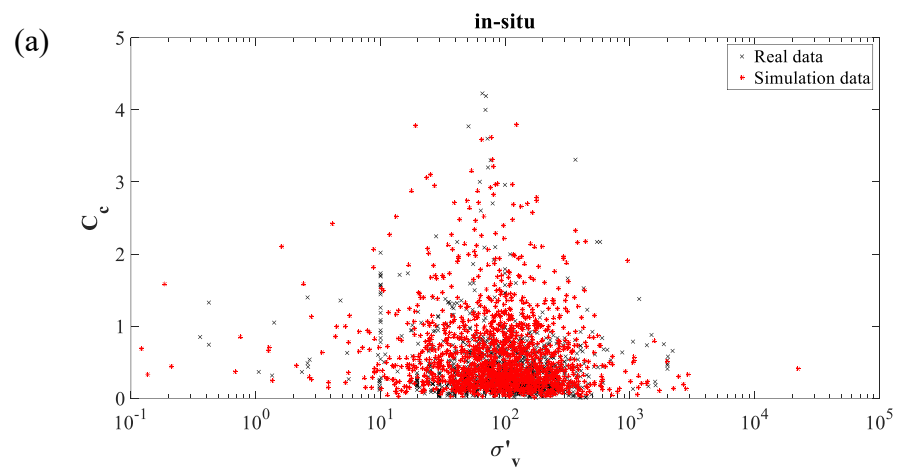
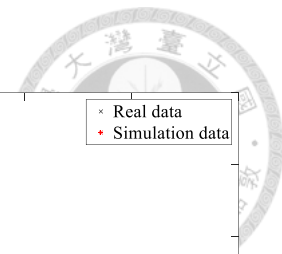


圖 4.64 C_c 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

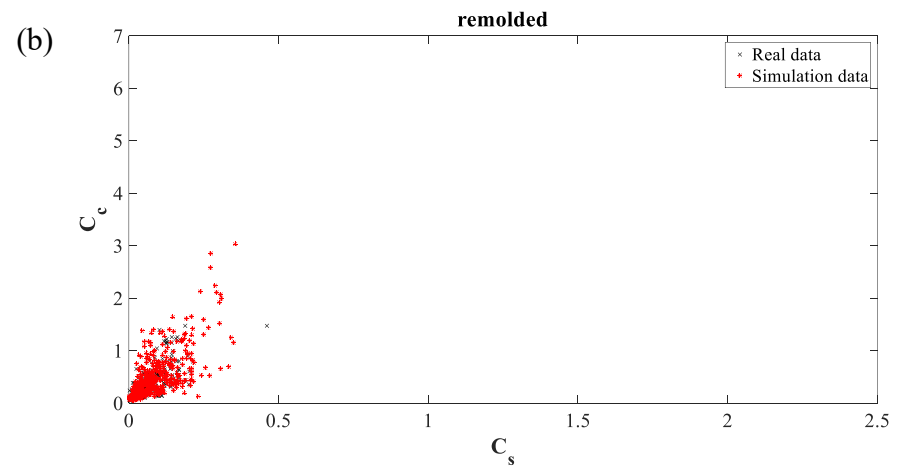
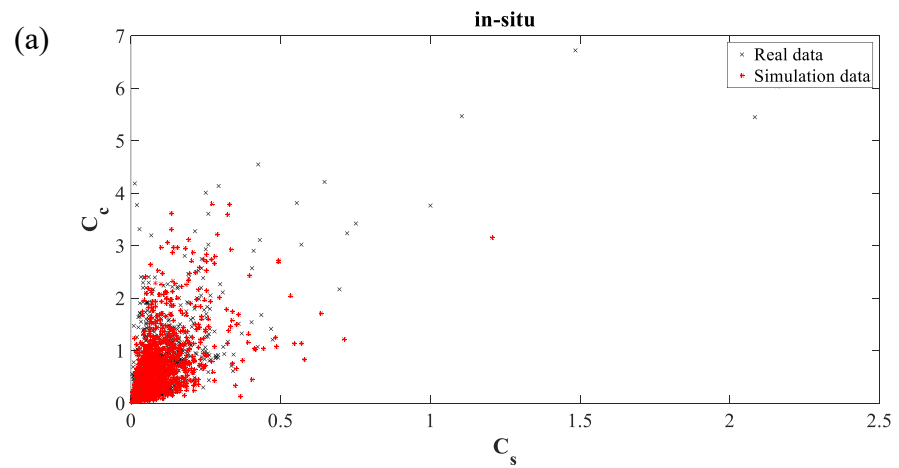


圖 4.65 C_c 與 C_s 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

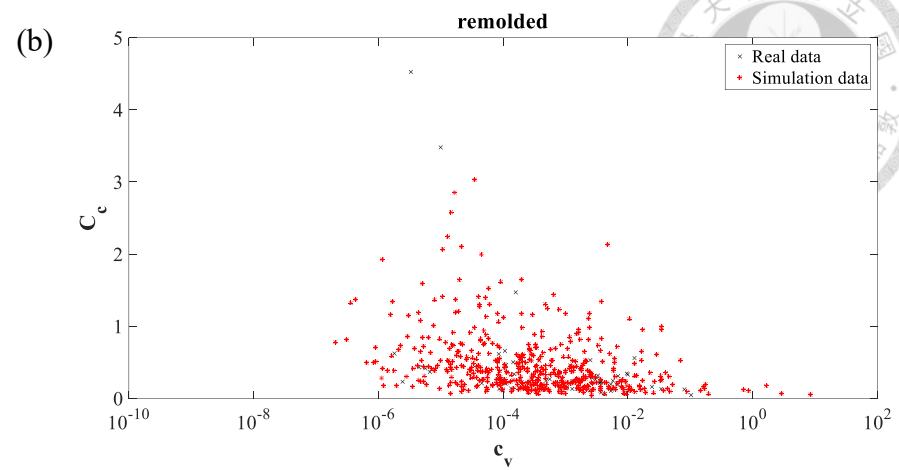
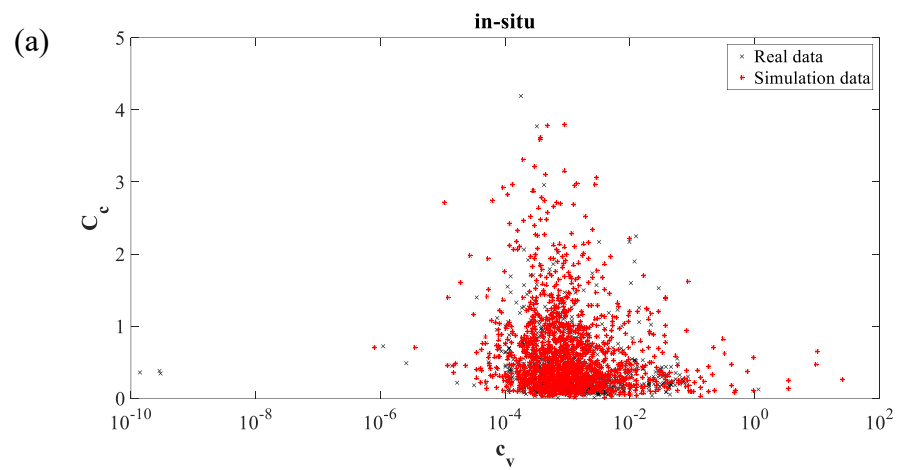
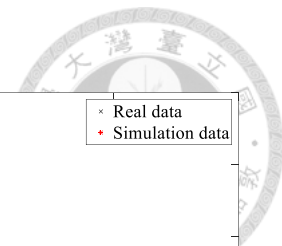


圖 4.66 C_c 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

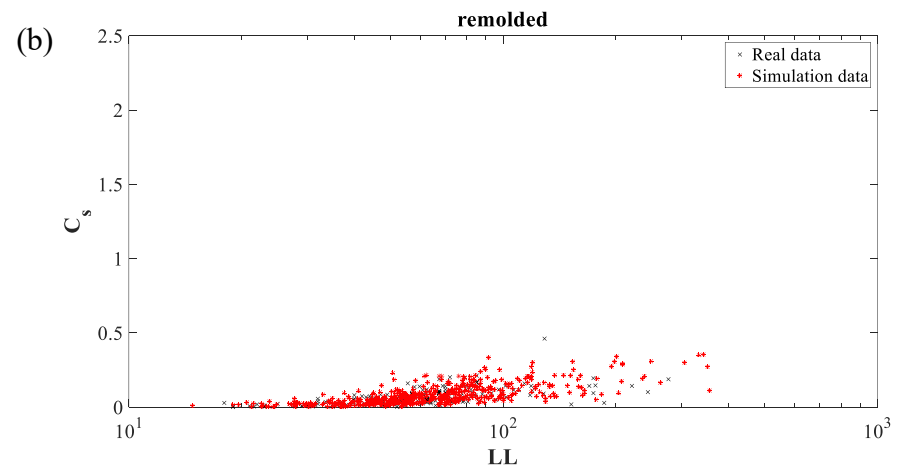
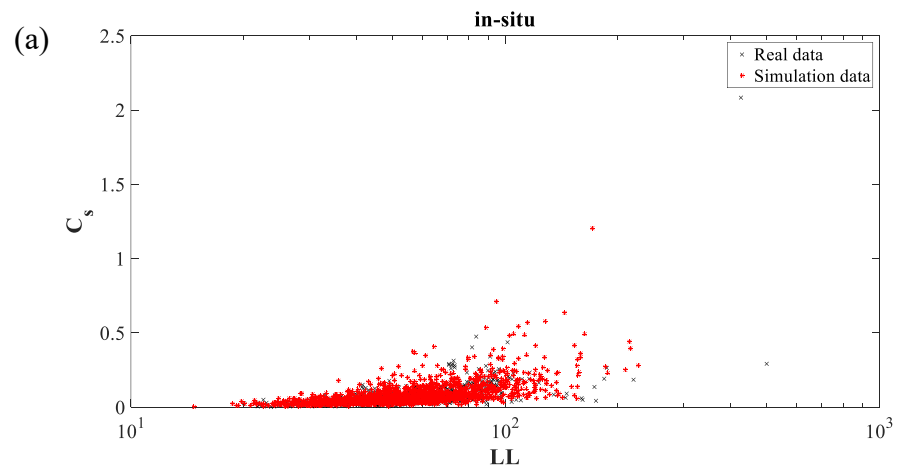


圖 4.67 C_s 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

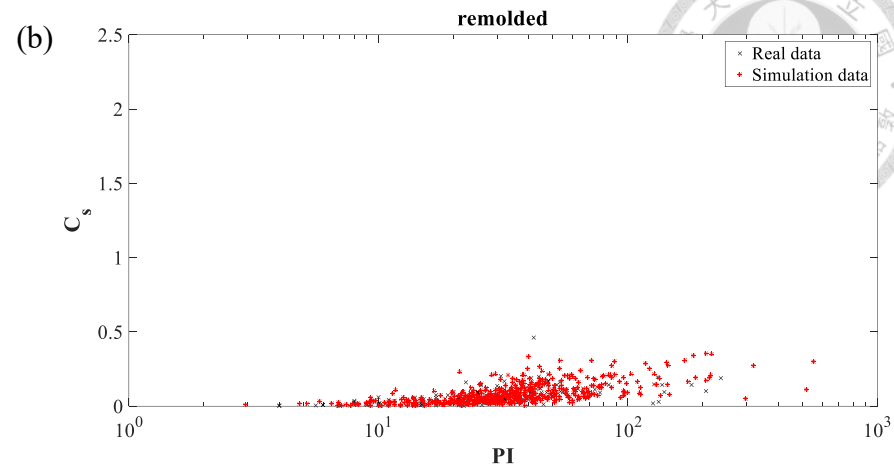
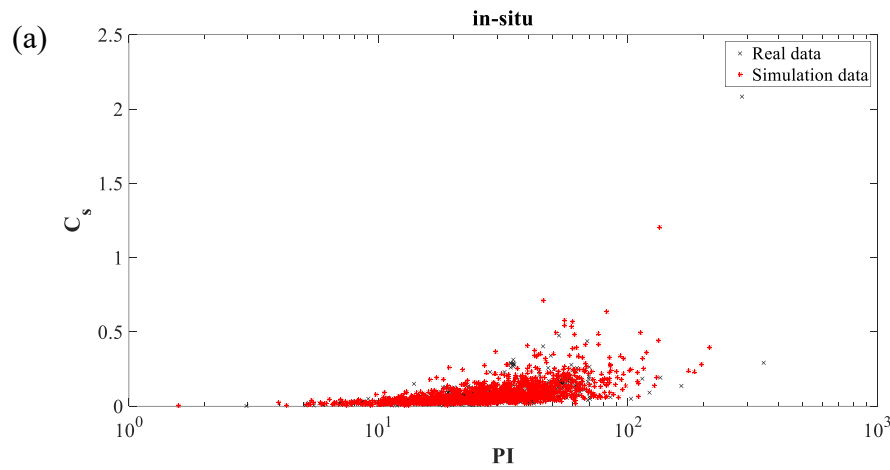


圖 4.68 C_s 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

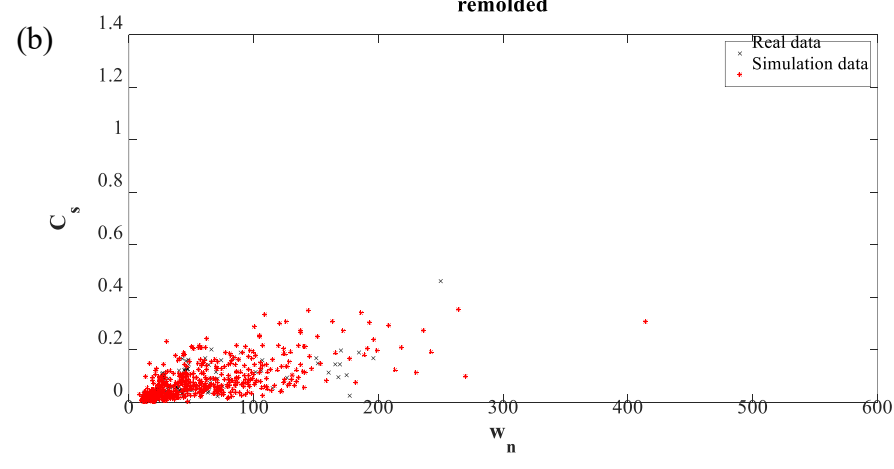
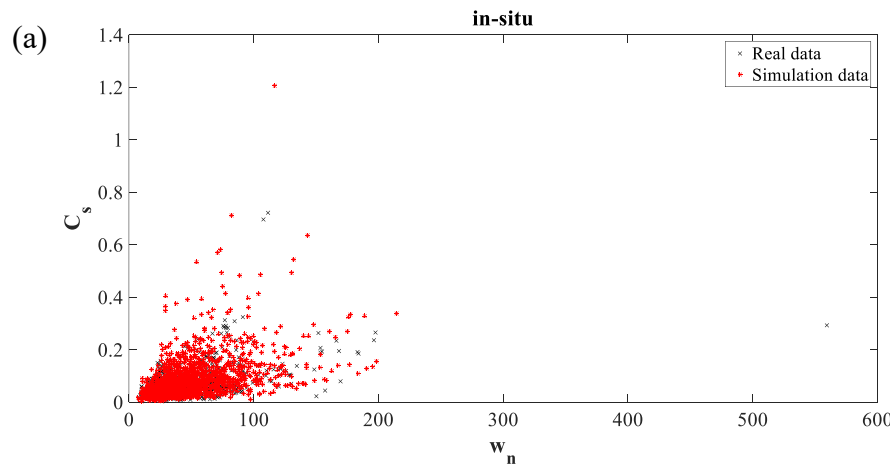


圖 4.69 C_s 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

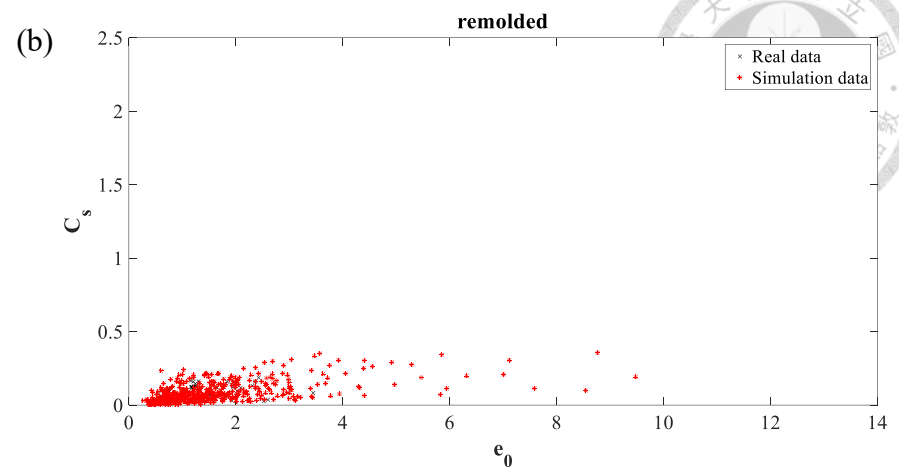
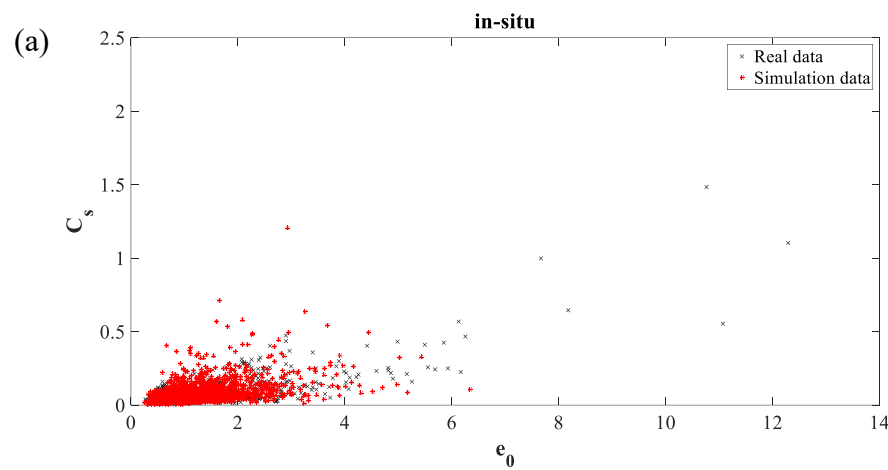
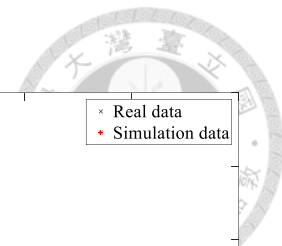


圖 4.70 C_s 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

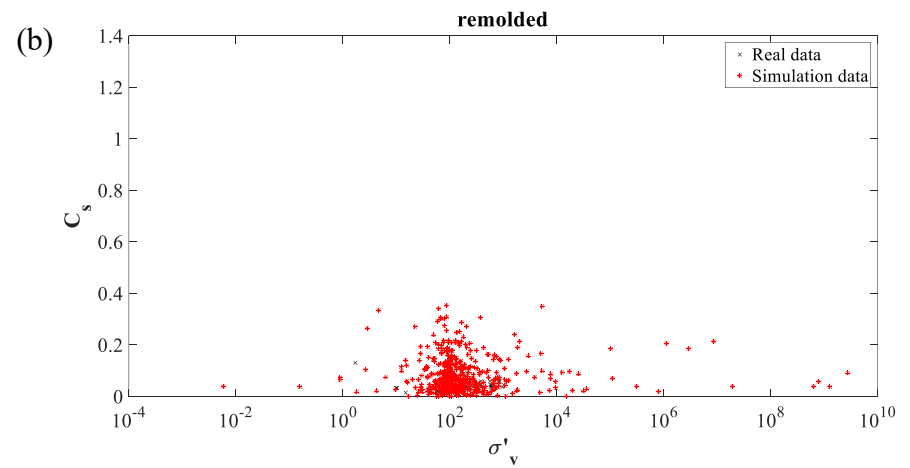
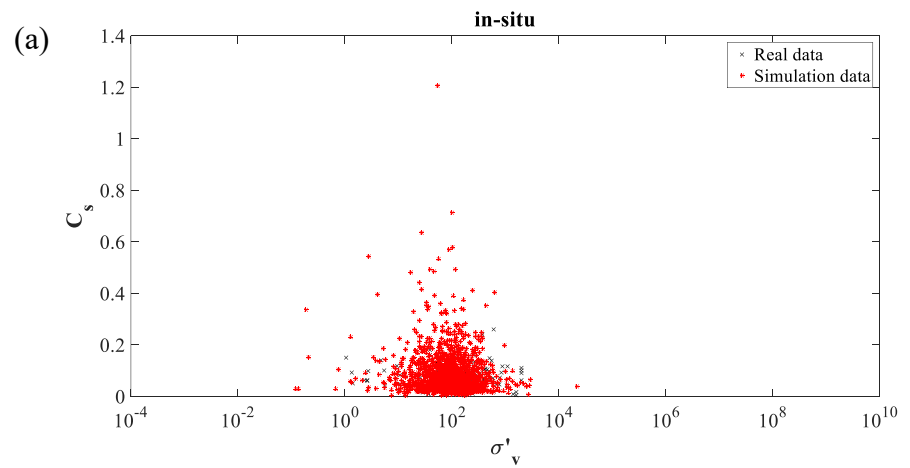


圖 4.71 C_s 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

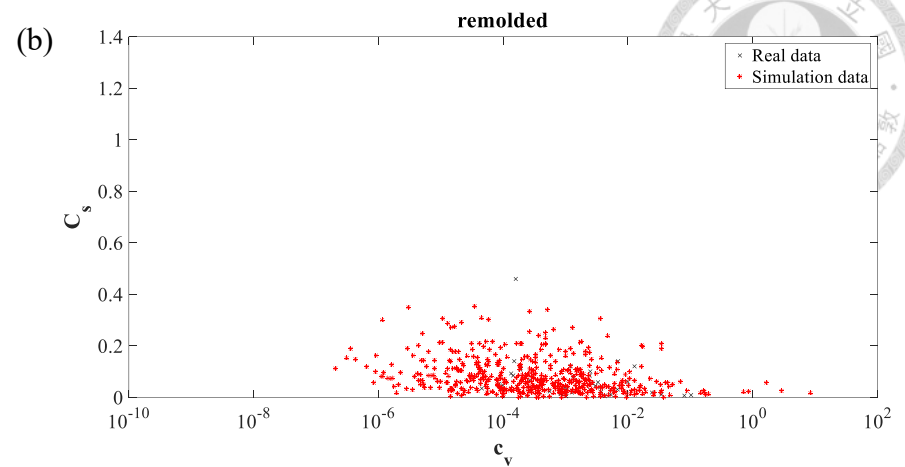
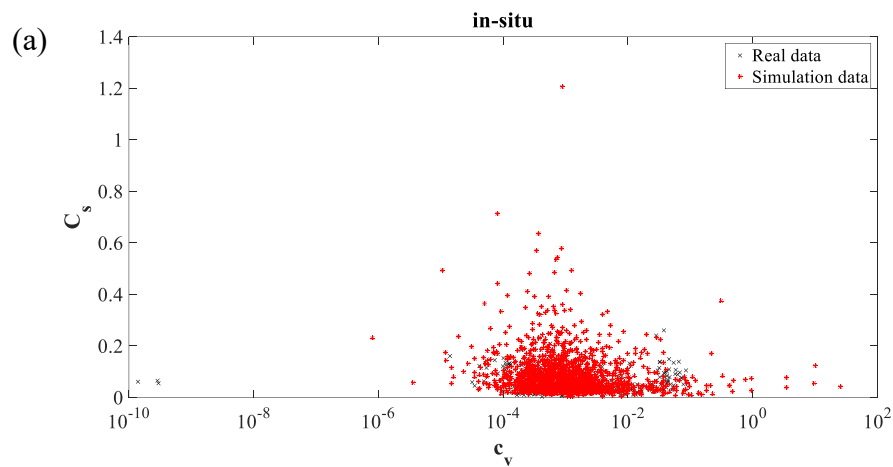


圖 4.72 C_s 與 c_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

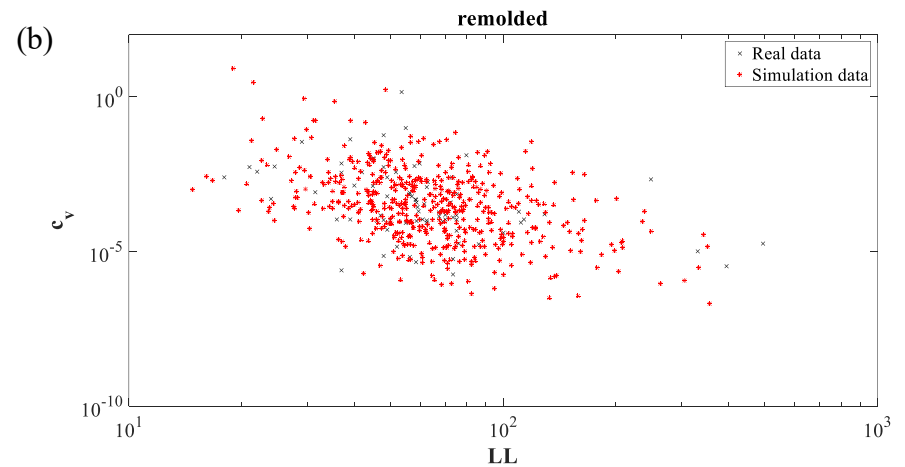
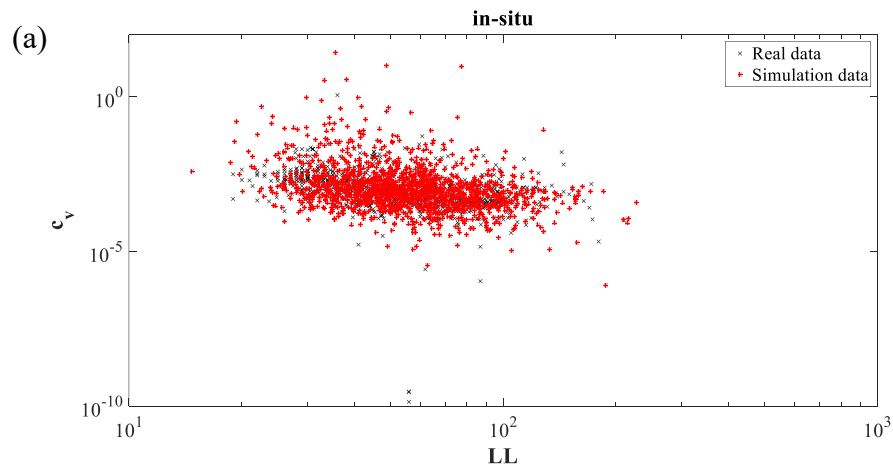


圖 4.73 c_v 與 LL 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

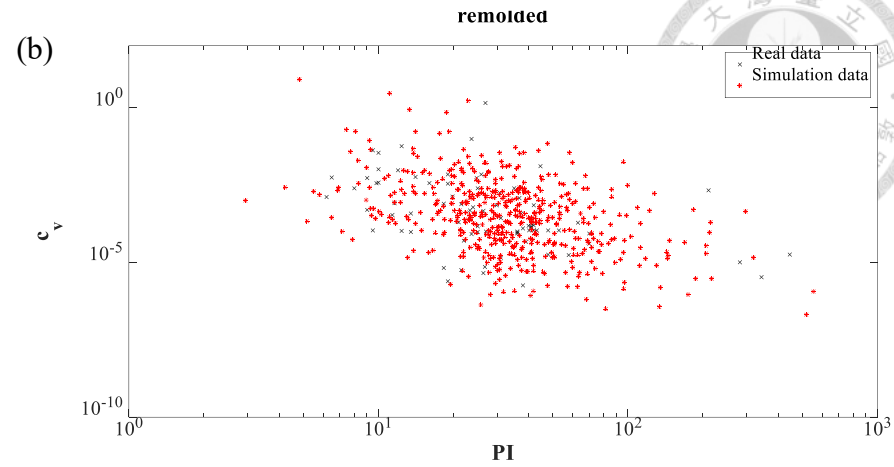
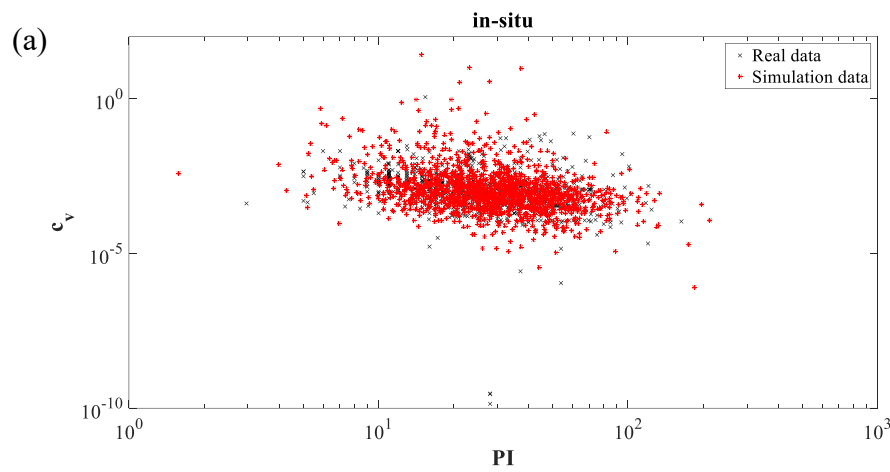


圖 4.74 c_v 與 PI 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

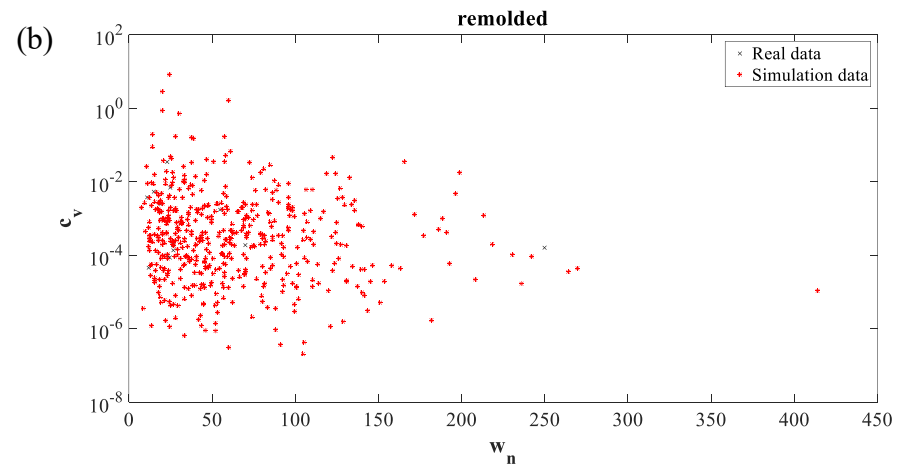
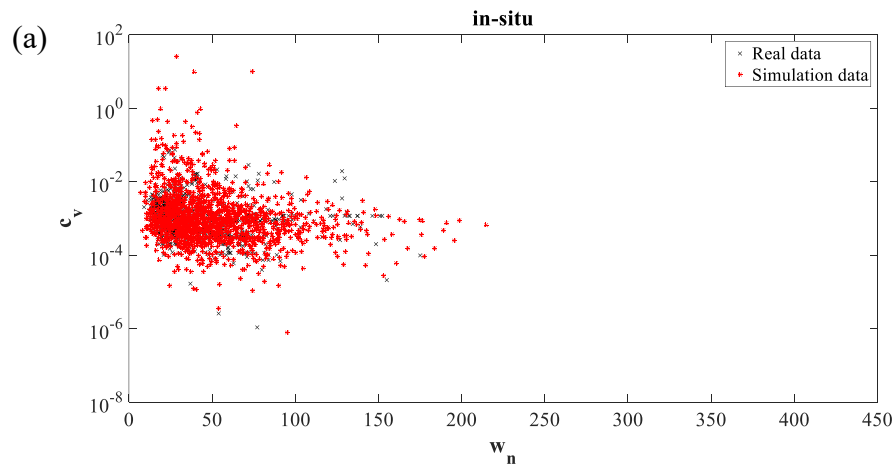


圖 4.75 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

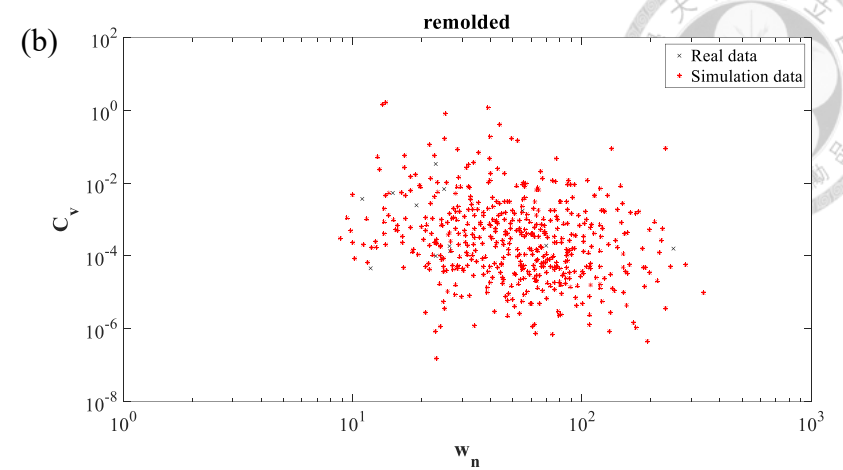
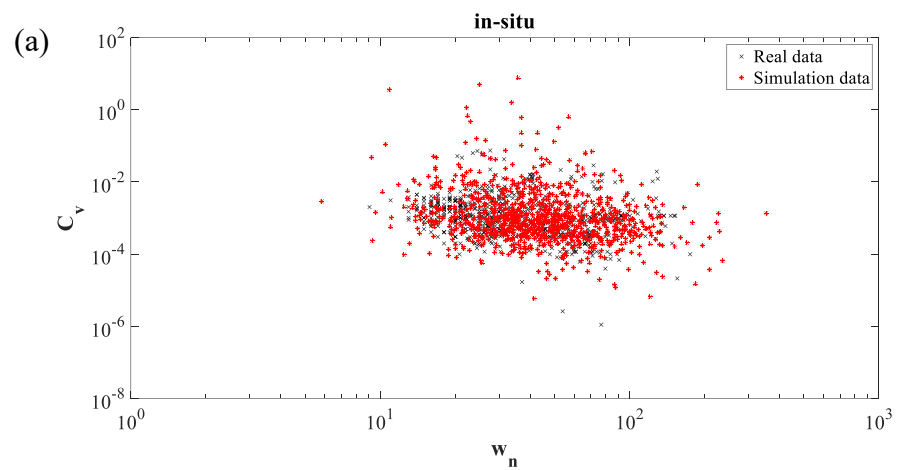
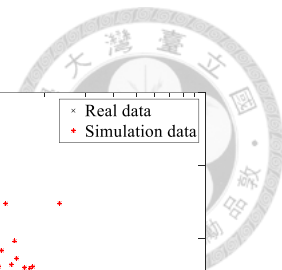


圖 4.76 c_v 與 w_n 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

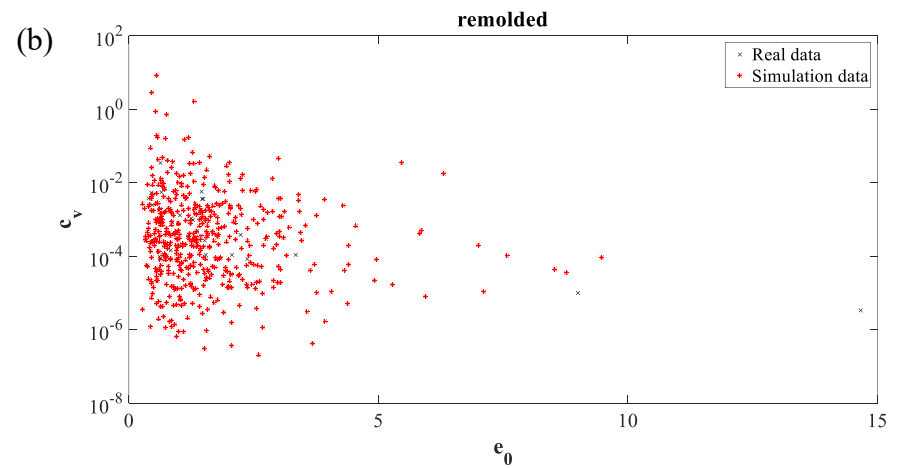
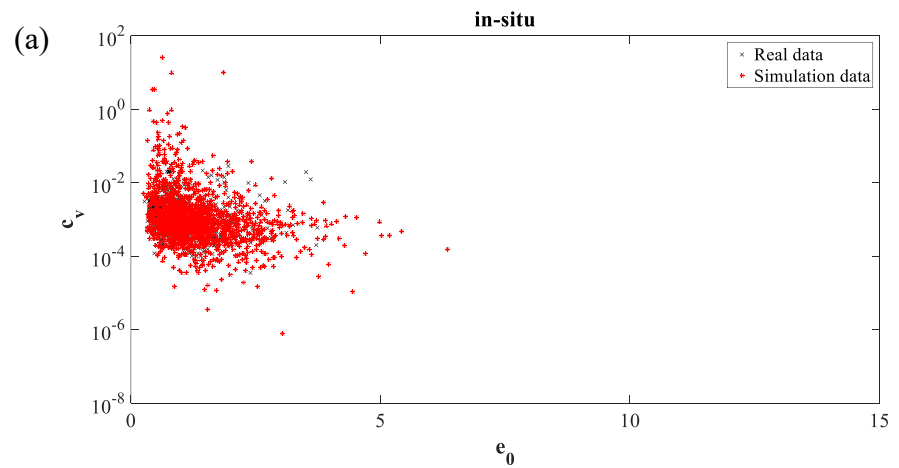


圖 4.77 c_v 與 e_0 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

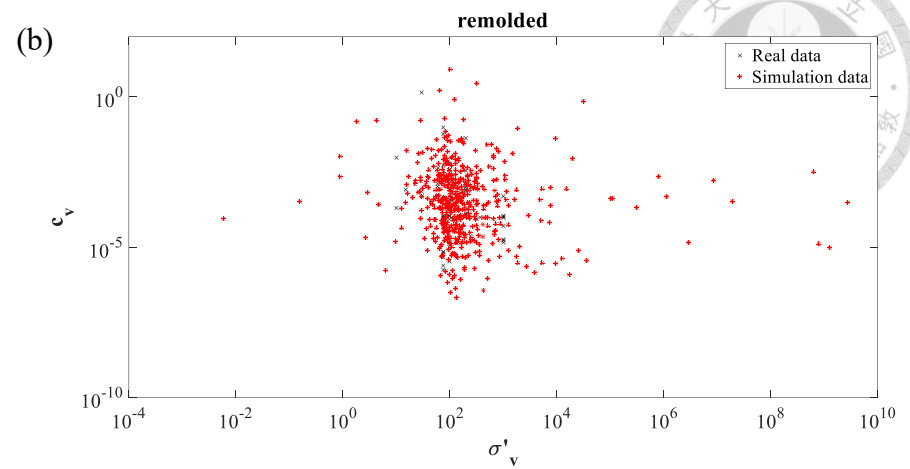
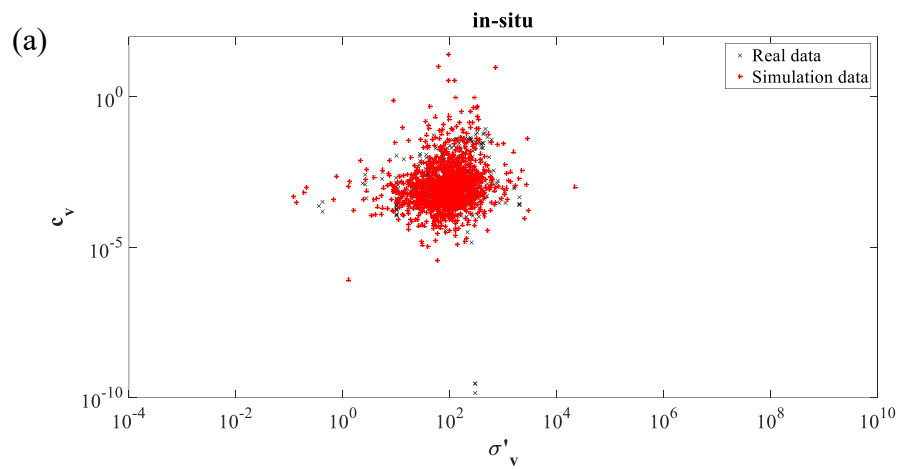


圖 4.78 c_v 與 σ'_v 原始、模擬資料點散佈圖(a) in-situ 模型；(b) remolded 模型

第五章 現地設計參數預測與案例驗證

以往在現地常為了節省時間或是費用，而使用轉換模型，從較容易取得的參數(通常為實驗時間較短或是費用較低的參數，如本研究中其它五個參數)去預測較難取得的參數(實驗時間較長或是費用較高，如本研究中的目標參數：壓縮指數、回脹指數和壓密係數)，而這些較難取得的參數通常是現地設計的重要參數。前面有提到，使用轉換模型無法得知轉換誤差，而且不能得知轉換模型是否適用於現地土壤，在本章節中，將提供一個利用貝氏定理和第四章得到的多變數機率分布模型，並加上現地已知參數預測現地設計參數的方法，此方法可以得知預測值的誤差範圍，除此之外，因為有使用現地已知參數，所以現地土壤的情況也有加入考慮。

資料庫 CLAY/8/12225 內八個參數個別機率分布情形，在貝氏理論的概念下，我們將其稱為先驗分布(prior distribution)，而根據不同現地資訊所更新之機率分布則稱它為後驗分布(posterior distribution)。有了前述各參數間的共變異數矩陣及 Johnson 分布系統，再加上貝氏分析條件機率的概念，便可更新出不同參數組合之後驗機率分布。

5.1 現地設計參數預測

5.1.1 混和高斯分布(Mixture Gaussian distribution)

透過吉普斯取樣法得到的 μ 和 C 捕捉了全球資料庫的機率密度函數，我們將每組 μ 和 C 所定義的多個高斯分布混合，組成了混合高斯分布(Mixture Gaussian distribution)，其中 μ 描述參數分布的位置， C 描述分布形狀的變化，混合高斯分布能夠平滑地近似任意型狀的機率分布。因為在第四章使用了無資訊(noninformtive)的先驗分布，所以得到 μ 和 C 樣本是一直跳動的，而不是固定不變，且樣本範圍並沒有很集中，最後得到的混和高斯分布的範圍也是如此，而 μ 和 C 的跳動同時也代表了統計不確定性，並在吉普斯取樣的過程中客觀的量化出來，圖 5.1 為混合高斯分布示意圖，是由吉普斯取樣後得到的 μ 和 C 樣本模擬出來的 C_c 和 C_s 樣本(X 空間)，圖上不平整的地方便是量化統計不確定性所呈現出來的結果。

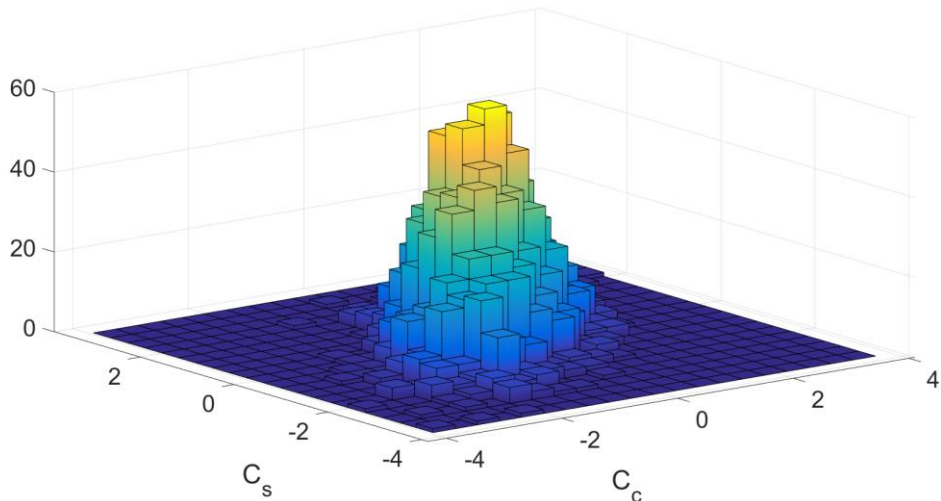


圖 5.1 混合高斯分布示意圖

5.1.2 預測現地參數

現地資訊為某一工址、相同深度的資料，相當於 excel 裡同一列的資料，我們將現地資訊令為 \mathbf{x}_{new} ，利用 \mathbf{x}_{new} 中已知的資訊預測未知的資訊，並假設訓練數據，也就是本研究建立的資料庫(\mathbf{X})涵蓋範圍夠廣，而此筆資訊(\mathbf{x}_{new})來自資料庫所涵蓋的範圍中與訓練數據屬於相同群體， \mathbf{x}_{new} 的機率密度函數也是期望值向量= $\boldsymbol{\mu}$ 、共變異數矩陣= \mathbf{C} (與大資料庫相同)的多變數高斯分布。根據總機率定理(total probability theorem)，可以得到透過 \mathbf{X} 來預測 \mathbf{x}_{new} 的條件多變數機率密度函數 $f(\mathbf{x}_{new}|\mathbf{X}^o)$ 為多變數高斯機率密度函數，其機率密度函數如下式所示：

$$f(\mathbf{x}_{new} | \mathbf{X}^o) = \int f(\mathbf{x}_{new} | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \cdot f(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{C} | \mathbf{X}^o) d\boldsymbol{\mu} d\mathbf{C} \quad (5.1)$$

$$\approx \frac{1}{T-t_b} \left[\sum_{t=t_b+1}^T N(\mathbf{x}_{new} | \boldsymbol{\mu}_t, \mathbf{C}_t) \right]$$

其中 $(\boldsymbol{\mu}_t, \mathbf{C}_t)$ 為吉普斯取樣得到的第 t 次的樣本； T 進行吉普斯取樣的總次數； t_b 為預熱期結束時的樣本。再來可以透過下列步驟，輕鬆地取樣得到 \mathbf{x}_{new} ：

1. 從 $(t_{b+1}, t_{b+2}, \dots, T)$ 中隨機取樣一個 t 樣本；
2. 從 $N(\mathbf{x}_{new}|\boldsymbol{\mu}_t, \mathbf{C}_t)$ 取樣得到 \mathbf{x}_{new} ，其中 t 為在第一步驟中取樣的 t 樣本。

而在本研究中我們總共進行了 21000 次吉普斯取樣，扣除 1000 次當作預熱期，將剩餘的 20000 個樣本，每 10 個留下一個，最後得到 2000 個樣本，所以在第

一步驟中就是將(1,2,...,2000)組樣本都使用，第二步驟就是得到 2000 個 x_{new} 樣本，得到的這些樣本包含了現地的訓練數據，所以現地有限的數據導致的統計不確定性也由這些樣本表達出來。



5.1.3 權重考量

在 5.1.2 小節介紹預測土壤參數的方法中，是將所有的高斯分布都當作等權的，也就是每個高斯分布都適合現地土層情況，但事實上，當中有些高斯分布對於現地土層情況是不合理的，此時加入現地已知資訊便可以找出所有高斯分布中，與新樣本(現地情況)相關性較高的，並提高權重，使他們較容易被選中。我們將現地已知資訊令為 x_{new}^o (可能為一個或多個資訊)，這些已知資訊通常是較容易取得的參數，例如：覆土有效應力(σ'_v)很容易被精確地計算出來，甚至是在沒有被調查到的深度，在本研究中，則是將除了三個目標參數外的七個參數認定是較容易取得的資訊當作 x_{new}^o ；而現地未知資訊我們則令為 x_{new}^u ，未知資訊通常是較難取得的資訊，在本研究中就是我們認為較難取得的三個目標參數。

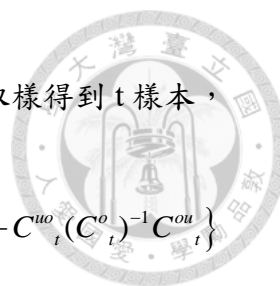
加入 x_{new}^o 後，混合高斯分布中每個高斯分布被切到的面積大小不同，影響到更新後的後驗分布的影響力也會隨之不同，而 (μ_t, C_t) 也相應地受到劃分，此時的條件機率密度函數 $f(x_{new}^u | X^o, x_{new}^o)$ 可以被表達如下式：

$$\begin{aligned} f(x_{new}^u | X^o, x_{new}^o) &\propto \sum_{t=t_b+1}^T N(x_{new}^u, x_{new}^o | \mu_t, C_t) \\ &\propto \sum_{t=t_b+1}^T w_t \times N(x_{new}^u | \mu_t, C_t, x_{new}^o) \end{aligned} \quad (5.2)$$

其中 w_t 代表每個多變數高斯機率密度函數的權重，其計算式如下：

$$\begin{aligned} w_t &= N(x_{new}^o | \mu_t^o, C_t^o) \\ &= |C_t^o|^{-1/2} \times (2\pi)^{-n/2} \times \exp\left[-\frac{1}{2} \mu_t^{oT} (C_t^o)^{-1} \mu_t^o\right] \end{aligned} \quad (5.3)$$

在 5.1.2 節中的取樣步驟可以被更改為取樣 x_{new}^u ，而其分布為 $f(x_{new}^u | X^o, x_{new}^o)$ ，



取樣步驟如下：

1. 根據正規化的權重 $w_t/(w_{t_{b+1}}, w_{t_{b+2}}, \dots, w_T)$ ，從 $(t_{b+1}, t_{b+2}, \dots, T)$ 取樣得到 t 樣本，權重的定義如式 5.3 所示；

2. 從機率密度函數 $N\{x_{new}^u | \mu_t^u + C_{t_{uo}}^{uo} + (C_{t_{o}}^o)^{-1}(x_{new}^o - \mu_{t_{o}}^o), C_{t_{o}}^u - C_{t_{uo}}^{uo} (C_{t_{o}}^o)^{-1} C_{t_{ou}}^{ou}\}$

中取樣得到 x_{new}^u 。

如 5.1.2 節中說明的一樣，在本研究中，將會使用我們吉普斯取樣過程中最後留下來的 2000 組來進行上述步驟得到 x_{new}^u 樣本。

5.2 案例驗證

5.2.1 預測步驟

- (1) 將現地資訊用大資料庫得到的 Johnson 參數 a_X 、 b_X 、 a_Y 、 b_Y 轉到 X 空間；
- (2) 利用現地已知資訊(x_{new}^o)計算依照權重取樣的期望值向量(μ)及共變異數矩陣(C)；
- (3) 利用步驟(2)得到的 μ 和 C 樣本所定義的機率密度函數中取樣得到未知資訊(x_{new}^u)樣本；
- (4) 再用 Johnson 參數 a_X 、 b_X 、 a_Y 、 b_Y 將 x_{new}^u 樣本轉換到原本的 Y 空間，並將一開始有轉換成對數常態的參數進行自然指數轉換回原本的形式，最後得到預測樣本(y_{new}^u)；
- (5) 最後我們會將利用的 y_{new}^u 樣本的 95%信賴區間來檢視預測的成果好不好，並藉此來驗證模型的效果。

接下來的小節中，將透過案例分析來驗證模型的成效。

5.2.2 案例一(非大資料庫資料)

案例一為位於美國休士頓的試驗場址的資料，圖 5.2 為場址的範圍與試驗土樣的取樣位置，表 5.1 為在此試驗場址中我們所需的土壤參數資料。案例一的資訊很完整，本研究所選用的 8 個參數皆能取得，接下來分別假設三個目標參數 (C_c 、 C_s 和 c_v) 為未知資訊，並進行預測，然而因為案例一中的土樣 LI 皆小於 1 且為現地樣本，所以除了使用全部資料的模型，也會使用 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型進行預測。

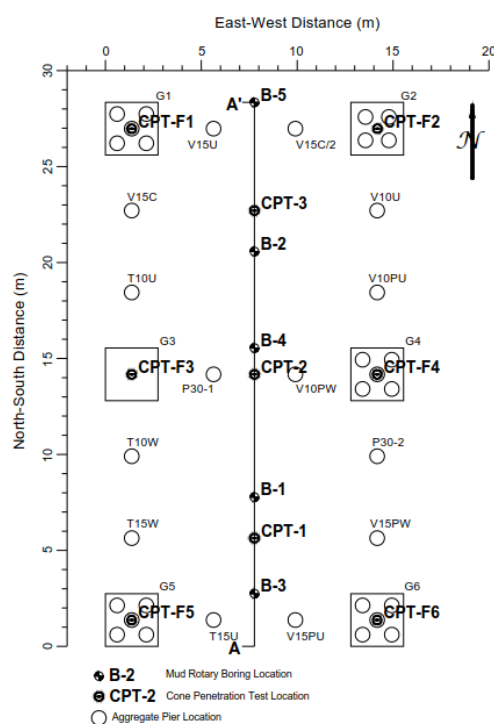


圖 5.2 案例一場址與調查孔位

表 5.1 案例一土壤參數資料

Boring, Sample	Depth (m)	σ'_v (kPa)	LL	PI	w_n	e_0	C_c	C_s	c_v (cm ² /sec)
B-4, S-1	1.37	191.39	39	18	21.2	0.58	0.173	0.018	1.93E-03
B-5, S-1	1.52	191.39	39	18	19.9	0.54	0.176	0.025	1.58E-03
B-4, S-2	2.64	191.39	42	26	21.9	0.6	0.156	0.028	1.58E-03
B-3, S-2	2.67	191.39	45	26	22.7	0.62	0.193	0.036	1.01E-03
B-4, S-2	2.9	191.39	56	33	28.4	0.77	0.247	0.048	1.69E-04
B-3, S-2	3.05	191.39	43	25	18.9	0.52	0.159	0.035	1.05E-03
B-5, S-3	4.5	191.39	79	52	21.5	0.59	0.187	0.059	2.62E-03
B-3, S-3	4.72	191.39	65	44	26.1	0.72	0.205	0.064	1.93E-03

一、預測 C_c (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他為已知資訊)：

(1)全部資料模型

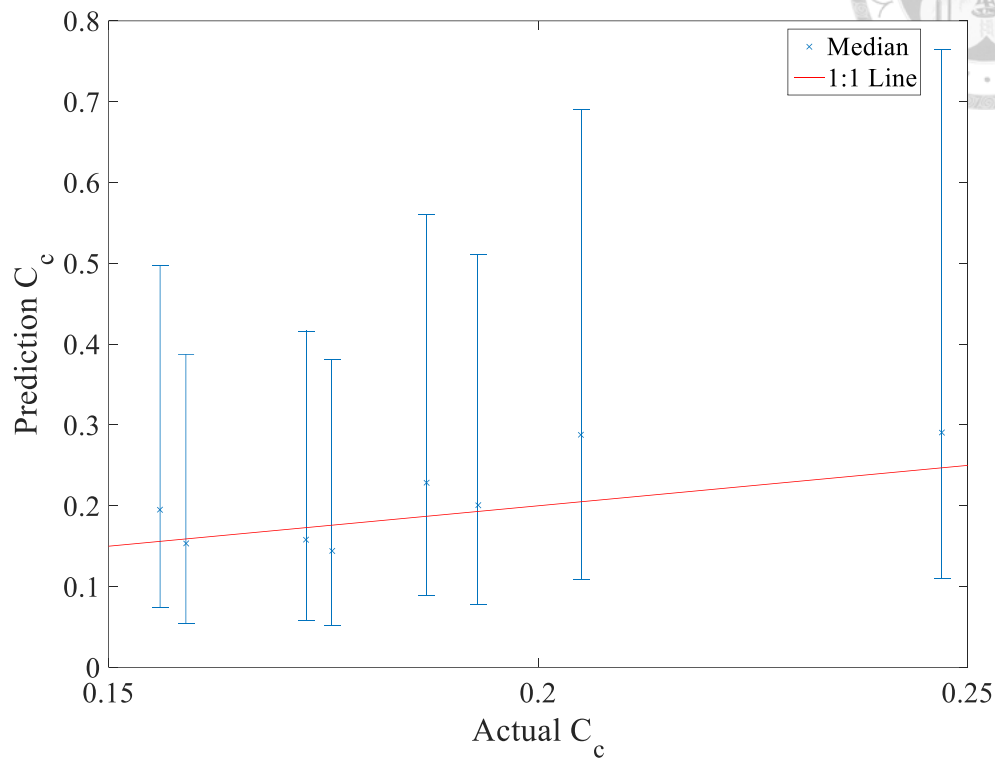


圖 5.3 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.2 案例一 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.156	0.074	0.195	0.497	0.423
0.159	0.055	0.153	0.387	0.333
0.173	0.059	0.158	0.416	0.358
0.176	0.052	0.144	0.382	0.330
0.187	0.089	0.229	0.561	0.472
0.193	0.078	0.200	0.511	0.433
0.205	0.109	0.288	0.690	0.581
0.247	0.110	0.291	0.765	0.655

(2) LI<1 模型

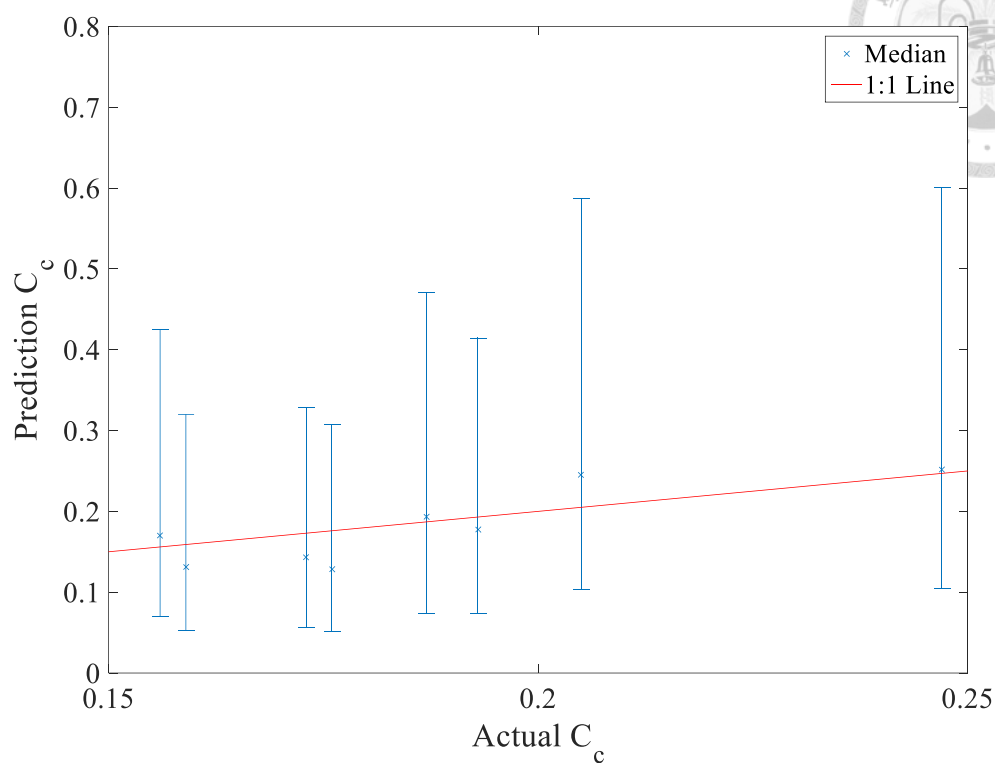


圖 5.4 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型)

表 5.3 案例一 C_c 真實值與預測值整理(LI<1 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.156	0.070	0.170	0.425	0.354
0.159	0.053	0.131	0.320	0.267
0.173	0.056	0.143	0.328	0.272
0.176	0.052	0.128	0.308	0.256
0.187	0.074	0.193	0.470	0.396
0.193	0.073	0.177	0.414	0.341
0.205	0.104	0.245	0.587	0.483
0.247	0.105	0.251	0.600	0.495

(3) in-situ 模型

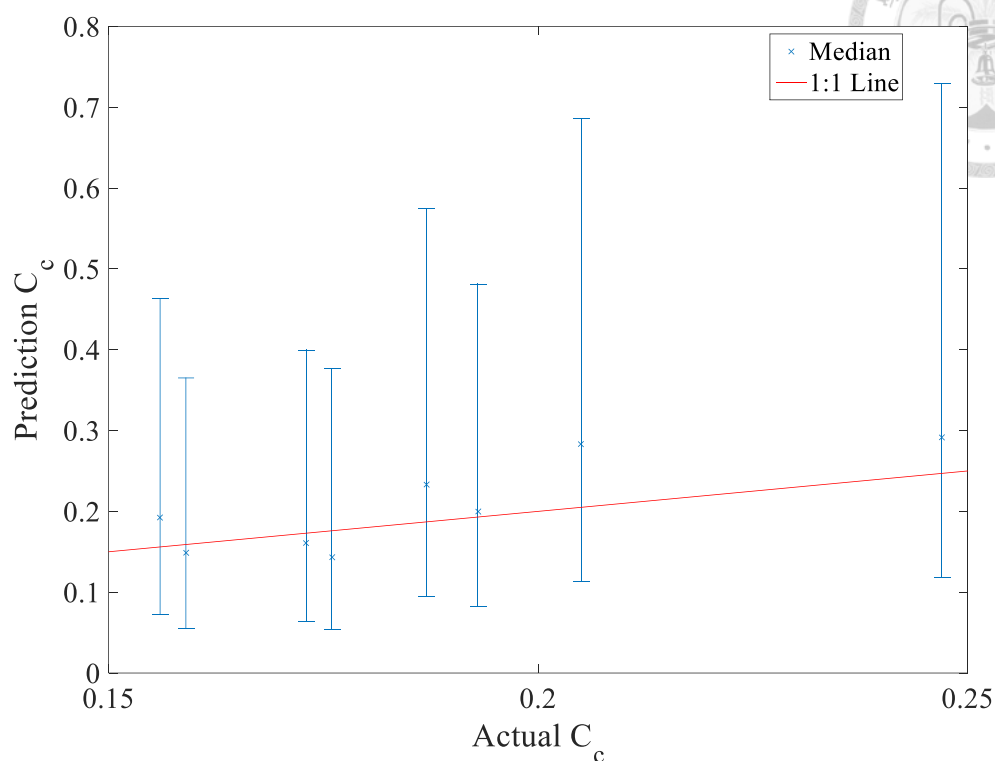


圖 5.5 案例一 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.4 案例一 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.156	0.072	0.193	0.463	0.391
0.159	0.055	0.149	0.365	0.311
0.173	0.064	0.161	0.400	0.335
0.176	0.054	0.143	0.376	0.323
0.187	0.094	0.233	0.574	0.480
0.193	0.082	0.200	0.481	0.399
0.205	0.113	0.283	0.686	0.573
0.247	0.118	0.291	0.729	0.611

圖 5.3、圖 5.4 和圖 5.5 分別為全部資料模型、 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型 C_c 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。另外圖 5.3 和圖 5.5 的誤差範圍(也就是 error bar 寬度，即表 5.2、表 5.3 和表 5.4 裡的信賴區間上下界差值)比圖 5.4 寬許多，而圖 5.3 和圖 5.5 並沒有明顯差距。

二、預測 C_s (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他為已知資訊)：

(1)全部資料模型

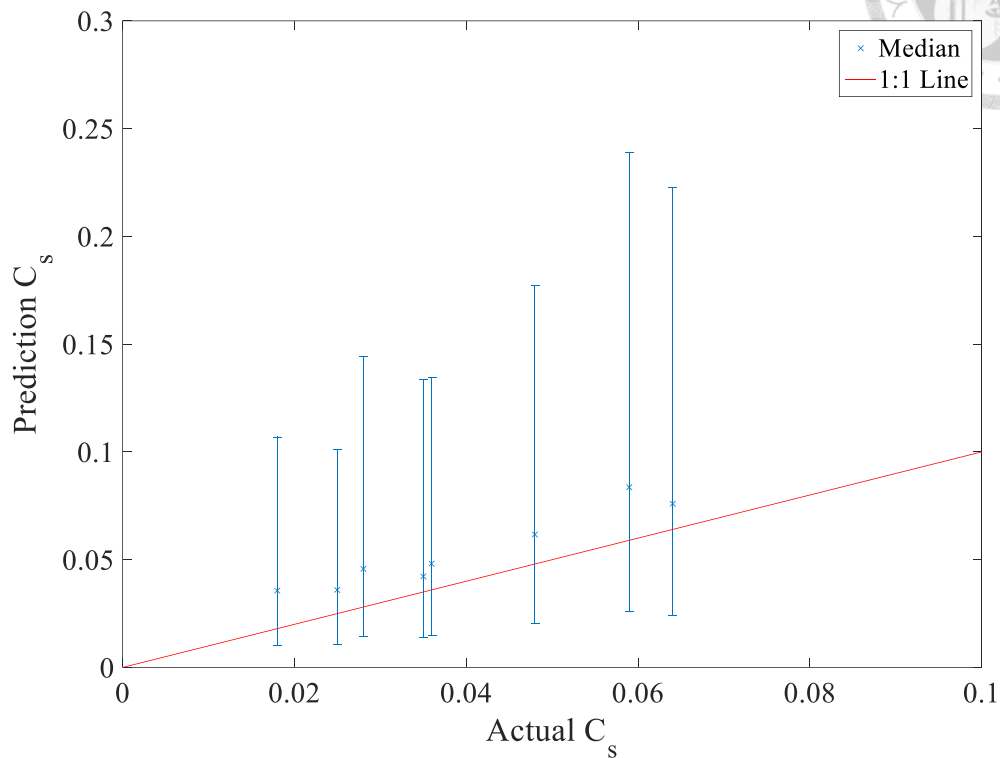


圖 5.6 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.5 案例一 C_s 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_s	預測 C_s 信賴區間下界	預測 C_s 中位數	預測 C_s 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.018	0.010	0.036	0.107	0.097
0.025	0.011	0.036	0.101	0.090
0.028	0.014	0.046	0.145	0.130
0.035	0.014	0.042	0.133	0.119
0.036	0.015	0.048	0.134	0.119
0.048	0.020	0.062	0.177	0.157
0.059	0.026	0.084	0.239	0.213
0.064	0.024	0.076	0.223	0.199

(2) LI<1 模型

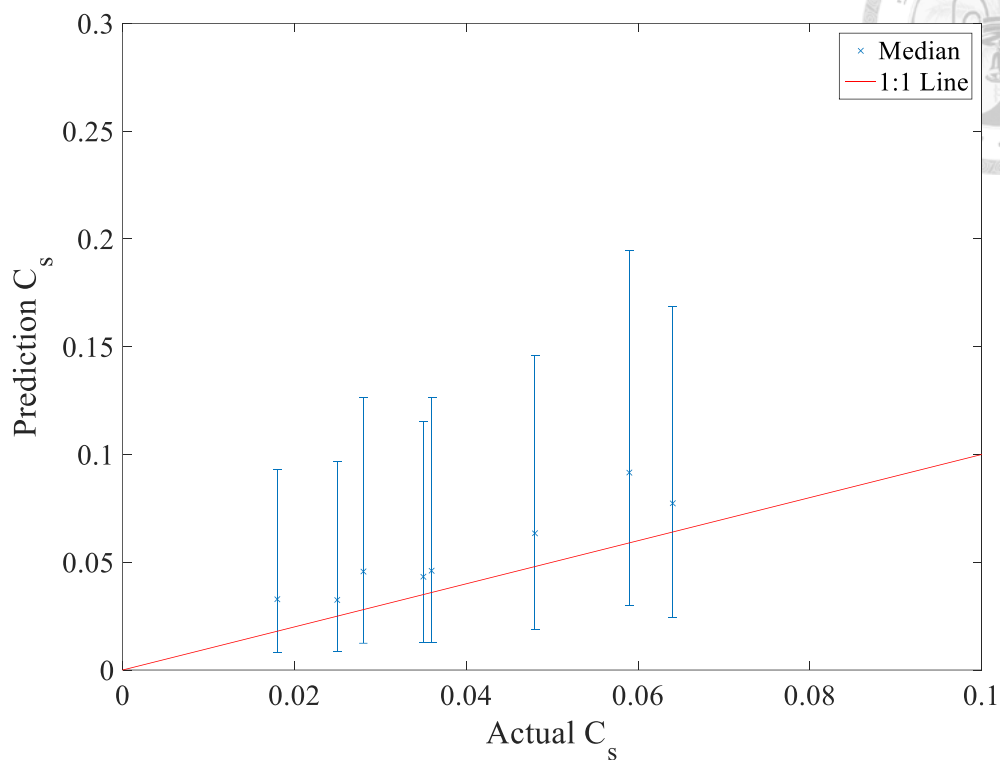


圖 5.7 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型)

表 5.6 案例一 C_s 真實值與預測值整理(LI<1 模型)

真實 C_s	預測 C_s 信賴區間下界	預測 C_s 中位數	預測 C_s 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.018	0.008	0.032	0.095	0.087
0.025	0.008	0.032	0.095	0.086
0.028	0.012	0.045	0.121	0.109
0.035	0.013	0.043	0.114	0.101
0.036	0.014	0.046	0.116	0.102
0.048	0.020	0.062	0.154	0.134
0.059	0.029	0.094	0.194	0.165
0.064	0.027	0.080	0.176	0.148

(3) in-situ 模型

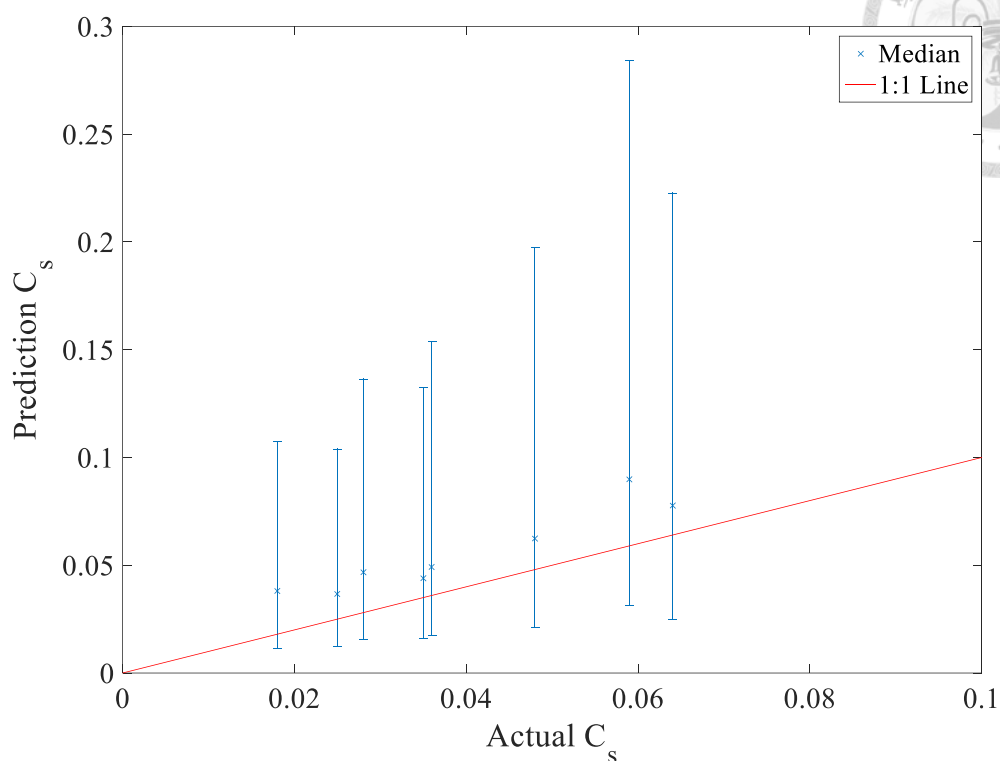


圖 5.8 案例一 C_s 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.7 案例一 C_s 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_s	預測 C_s 信賴區間下界	預測 C_s 中位數	預測 C_s 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.018	0.012	0.038	0.107	0.096
0.025	0.012	0.037	0.104	0.092
0.028	0.016	0.047	0.136	0.121
0.035	0.016	0.044	0.133	0.117
0.036	0.017	0.049	0.154	0.136
0.048	0.021	0.062	0.197	0.176
0.059	0.031	0.090	0.284	0.253
0.064	0.025	0.078	0.223	0.198

圖 5.6、圖 5.7 和圖 5.8 分別為全部資料模型、 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型 C_s 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。另外圖 5.6 和圖 5.8 的誤差範圍比圖 5.7 寬，而圖 5.6 和圖 5.8 並沒有明顯差距。

三、預測 c_v (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

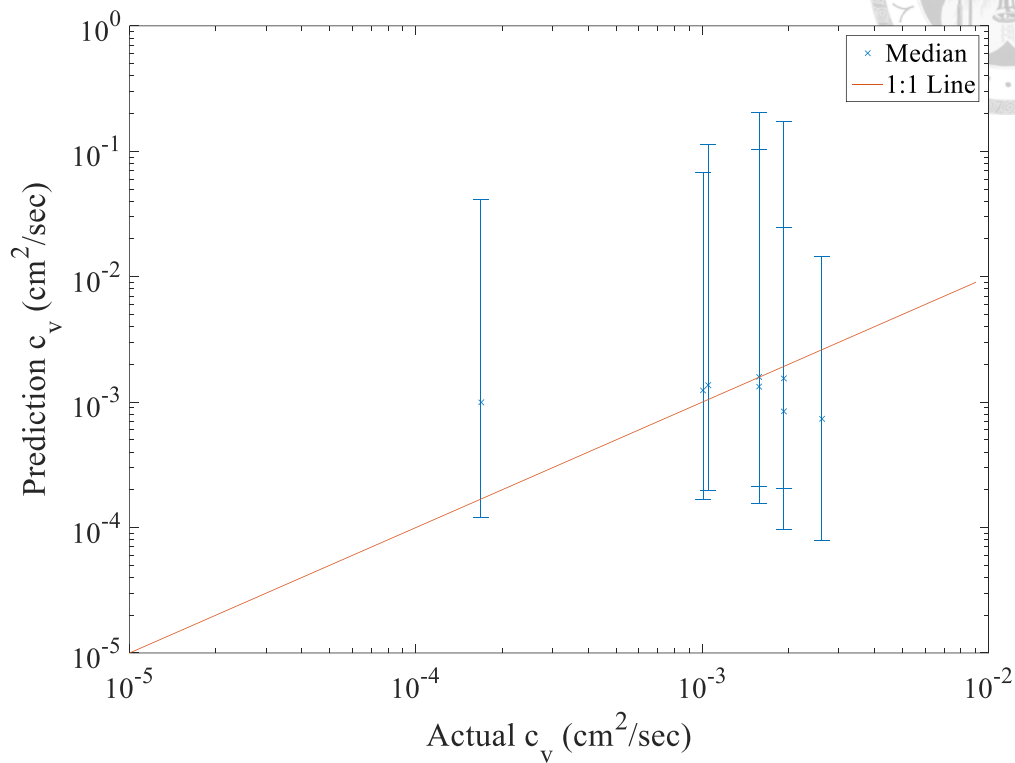


圖 5.9 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.8 案例一 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.69E-04	8.11E-05	9.02E-04	2.47E-02	2.46E-02
1.01E-03	1.12E-04	1.14E-03	3.62E-02	3.61E-02
1.05E-03	1.28E-04	1.29E-03	6.47E-02	6.46E-02
1.58E-03	1.67E-04	1.71E-03	1.19E-01	1.19E-01
1.58E-03	1.43E-04	1.28E-03	6.59E-02	6.57E-02
1.93E-03	1.44E-04	1.41E-03	8.35E-02	8.33E-02
1.93E-03	6.56E-05	7.38E-04	1.51E-02	1.51E-02
2.62E-03	4.72E-05	6.78E-04	1.14E-02	1.14E-02

(2) LI<1 模型

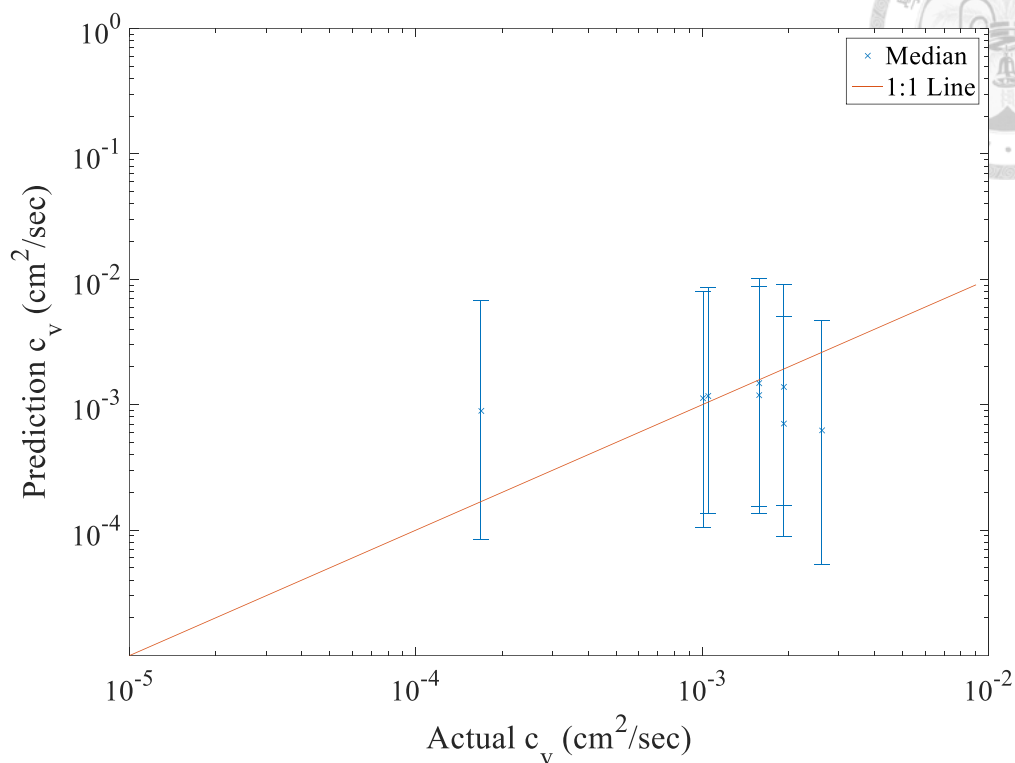


圖 5.10 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型)

表 5.9 案例一 c_v 真實值與預測值整理(LI<1 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.69E-04	8.40E-05	8.95E-04	6.72E-03	6.64E-03
1.01E-03	1.04E-04	1.13E-03	7.94E-03	7.84E-03
1.05E-03	1.35E-04	1.18E-03	8.57E-03	8.44E-03
1.58E-03	1.55E-04	1.49E-03	1.02E-02	1.00E-02
1.58E-03	1.35E-04	1.19E-03	8.70E-03	8.57E-03
1.93E-03	1.56E-04	1.39E-03	9.05E-03	8.89E-03
1.93E-03	8.84E-05	7.08E-04	5.09E-03	5.00E-03
2.62E-03	5.32E-05	6.23E-04	4.70E-03	4.65E-03

(3) in-situ 模型

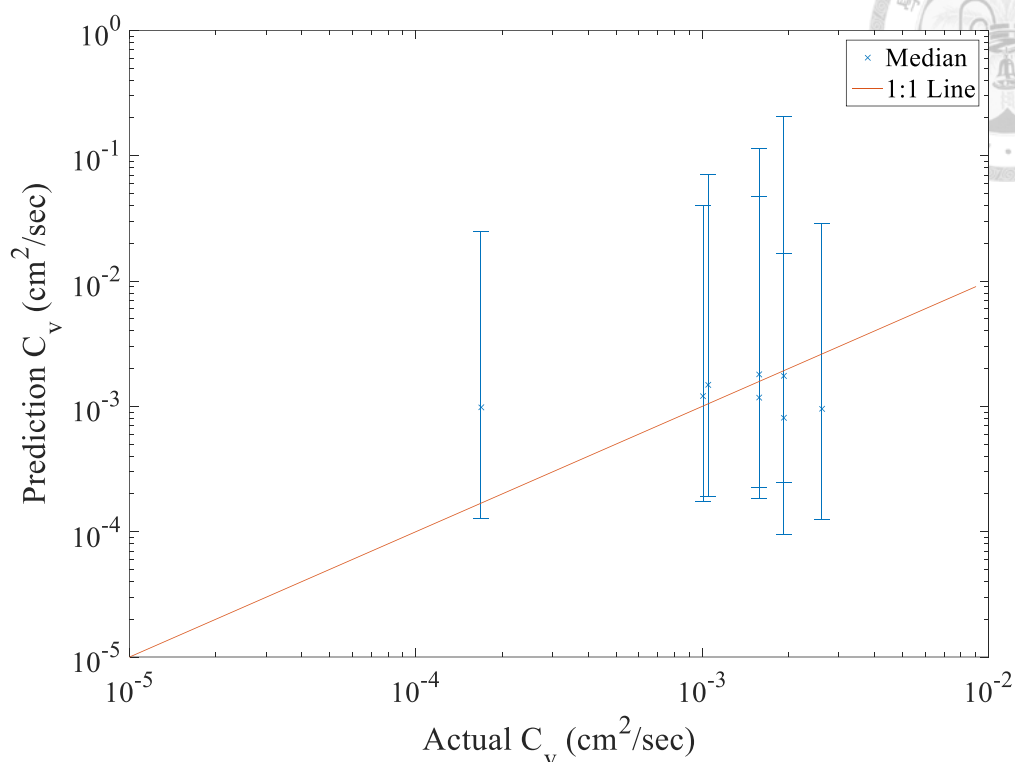


圖 5.11 案例一 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.10 案例一 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.69E-04	1.20E-04	9.98E-04	4.11E-02	4.10E-02
1.01E-03	1.66E-04	1.24E-03	6.76E-02	6.74E-02
1.05E-03	1.97E-04	1.36E-03	1.12E-01	1.12E-01
1.58E-03	2.11E-04	1.59E-03	2.02E-01	2.02E-01
1.58E-03	1.57E-04	1.34E-03	1.04E-01	1.04E-01
1.93E-03	2.03E-04	1.54E-03	1.71E-01	1.71E-01
1.93E-03	9.64E-05	8.43E-04	2.45E-02	2.44E-02
2.62E-03	7.87E-05	7.34E-04	1.44E-02	1.43E-02

圖 5.9、圖 5.10 和圖 5.11 分別為全部資料模型、 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型 c_v 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。另外圖 5.9 和圖 5.10 的誤差範圍比圖 5.11 寬，而圖 5.9 和圖 5.10 並沒有明顯差距。

四、案例一驗證結果：

案例一中，三種目標參數的預測結果都是好的，值得注意的是，因為 LI 的值小於 1 以及為現地樣本，所以我們除了全部資料庫模型也有使用 LI<1 模型和 in-situ 模型進行預測，最後得到的結果是，在 LI<1 模型中，三個目標參數的預測誤差都是最小的，而全部資料模型和 in-situ 模型的預測誤差並沒有明顯差距。

5.2.3 案例二(非大資料庫資料)

案例二為位於埃及的土樣，表 5.8 為案例二的土壤參數資料，除了 C_c 、 C_s 兩個目標參數以外，其他參數案例二中皆有記載，接下來會假設 c_v 為未知資訊進行預測，而案例中的四個土樣 LI 值皆小於 1 且為現地樣本，所以也會利用三個模型去預測，並進行比較。

表 5.11 案例二土壤參數資料

Sample	Depth(m)	σ'_v (kPa)	LL	PI	w_n	e_0	C_c	C_s	C_v (cm ² /sec)
S1	2.75	357.79	71	43	29.5	0.805	X	X	1.18E-03
S2	6	202.58	63	38	35	0.941	X	X	1.23E-03
S3	8	197.06	74	48	36	0.99	X	X	1.44E-03
S4	11	199.50	81	50	39	1.076	X	X	1.34E-03

一、預測 c_v (假設 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)

(1)全部資料模型

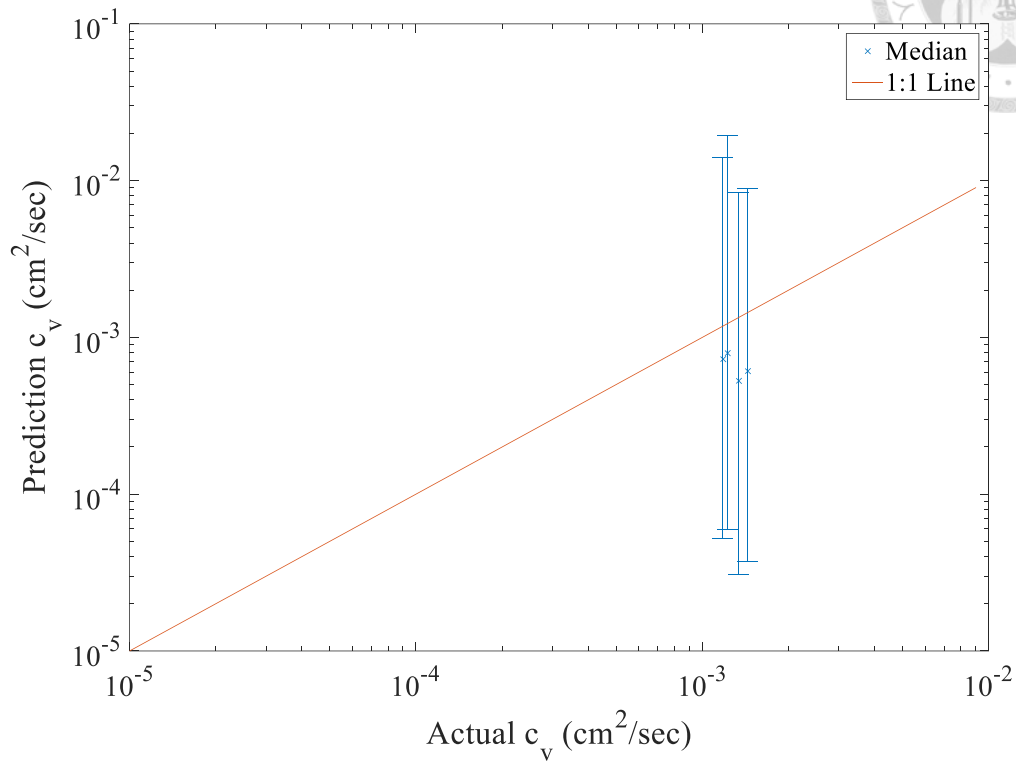


圖 5.12 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.12 案例二 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.18E-03	5.18E-05	7.23E-04	1.40E-02	1.40E-02
1.23E-03	5.94E-05	7.94E-04	1.95E-02	1.94E-02
1.34E-03	3.09E-05	5.27E-04	8.34E-03	8.31E-03
1.44E-03	3.72E-05	6.12E-04	8.92E-03	8.88E-03

(2)LI<1 模型

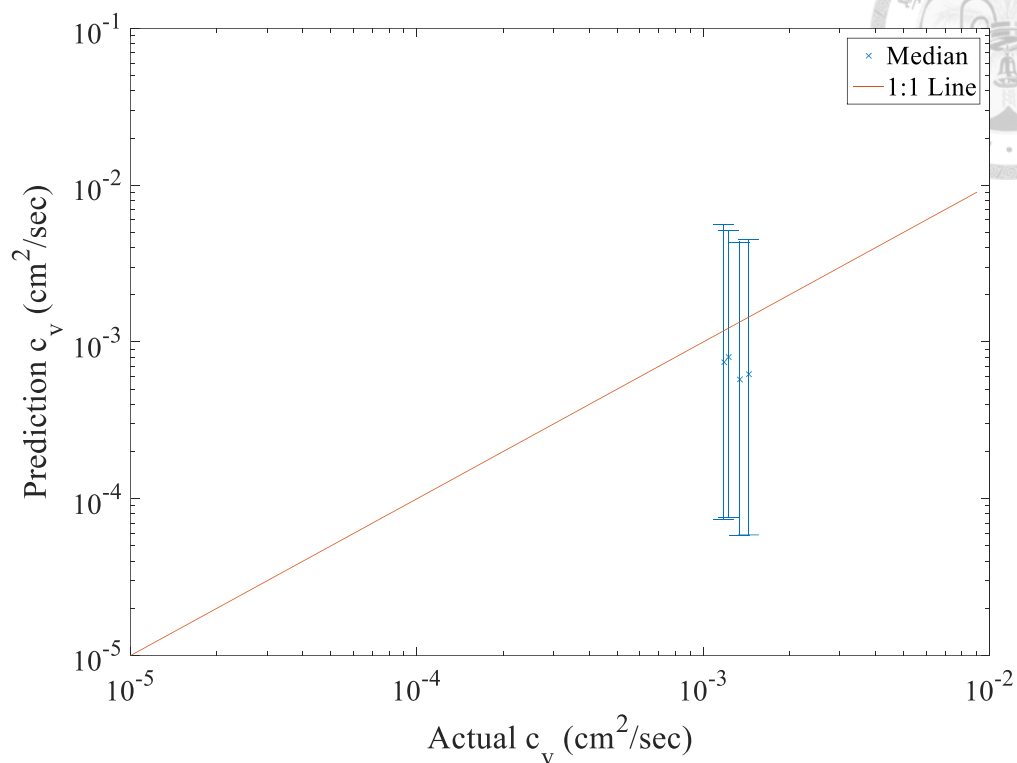


圖 5.13 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型)

表 5.13 案例二 c_v 真實值與預測值整理(LI<1 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.18E-03	7.36E-05	7.42E-04	5.58E-03	5.51E-03
1.23E-03	7.59E-05	8.02E-04	5.14E-03	5.07E-03
1.34E-03	5.87E-05	5.77E-04	4.32E-03	4.26E-03
1.44E-03	5.88E-05	6.21E-04	4.50E-03	4.44E-03

(3)in-situ 模型

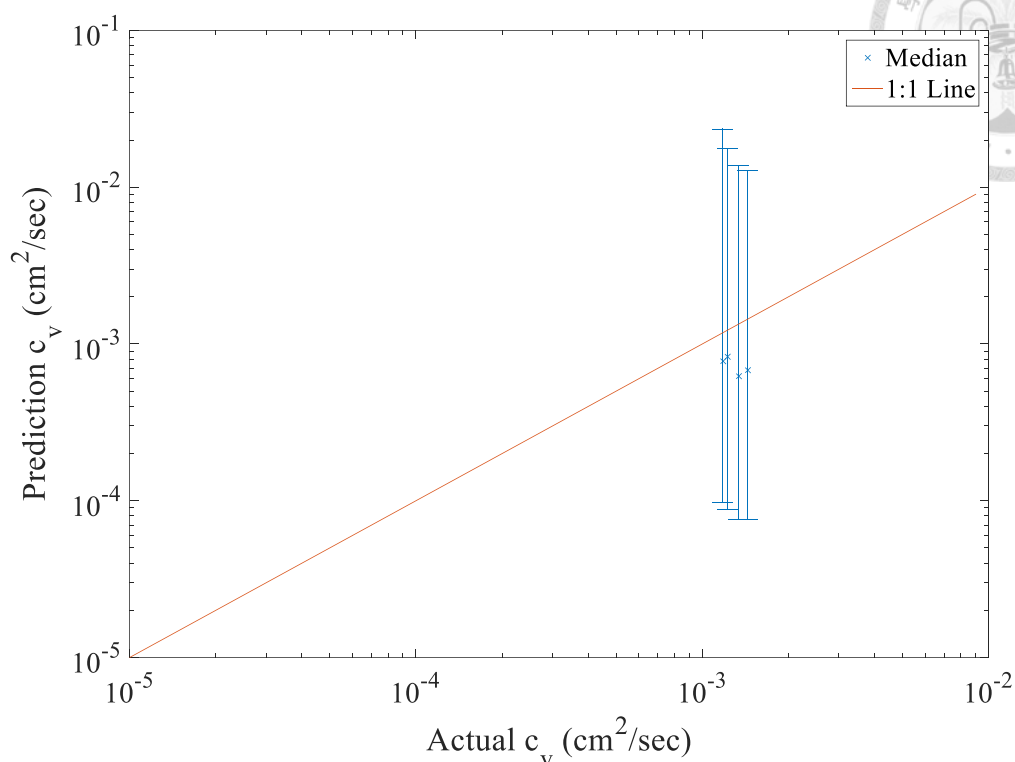


圖 5.14 案例二 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.14 案例二 c_v 真實值與預測值整理 in-situ 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
1.18E-03	9.79E-05	7.79E-04	2.35E-02	2.34E-02
1.23E-03	8.75E-05	8.31E-04	1.76E-02	1.75E-02
1.34E-03	7.56E-05	6.24E-04	1.37E-02	1.37E-02
1.44E-03	7.60E-05	6.79E-04	1.28E-02	1.27E-02

三、案例二驗證結果：

圖 5.12、圖 5.13 和圖 5.14 分別為全部資料模型、LI<1 模型和 in-situ 模型 c_v 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。與案例一相同，在案例二中我們也使用了兩種模型去預測，圖 5.12、圖 5.13 和圖 5.14 可以發現，LI<1 模型的誤差範圍最小，而全部資料模型和 in-situ 模型誤差範圍並沒有明顯差距。

5.2.4 案例三(非大資料庫資料)

案例三為位於印度的土樣，表 5.11 為案例三中所記載的土壤參數資料，除了 w_n 和 e_0 兩個參數，其餘參數案例三皆有記載，接下來將會三個目標參數分別假設為未知資訊進行預測，而案例三中，為現地土樣但是無法得知 LI 的值，所以只會使用全部資料模型和 in-situ 模型進行預測。

表 5.15 案例三土壤參數資料

Sample	σ'_v (kPa)	LL	PI	w_n	e_0	C_c	C_s	c_v (cm ² /sec)
1	195.323	68	32	X	X	0.622	0.152	3.65E-05
2	195.323	64	40	X	X	0.307	0.071	4.68E-05
3	198.074	63	34	X	X	0.59	0.102	4.58E-05
4	192.572	70	39	X	X	0.682	0.212	3.27E-05
5	195.323	70	31	X	X	0.343	0.119	4.19E-05
6	198.074	63	28	X	X	0.245	0.059	2.95E-05

一、預測 C_c (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

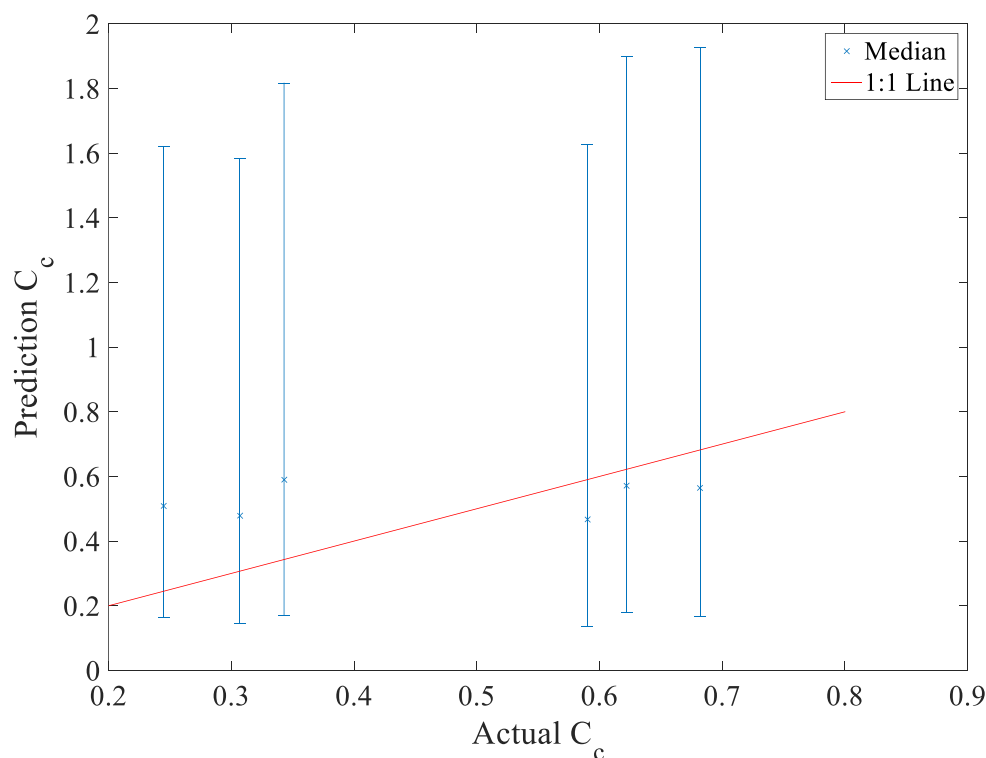


圖 5.15 案例三 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.16 案例三 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.245	0.164	0.509	1.622	1.458
0.307	0.145	0.479	1.584	1.439
0.343	0.170	0.589	1.817	1.647
0.59	0.137	0.467	1.626	1.489
0.622	0.179	0.572	1.898	1.719
0.682	0.167	0.565	1.928	1.761

(2) in-situ 模型

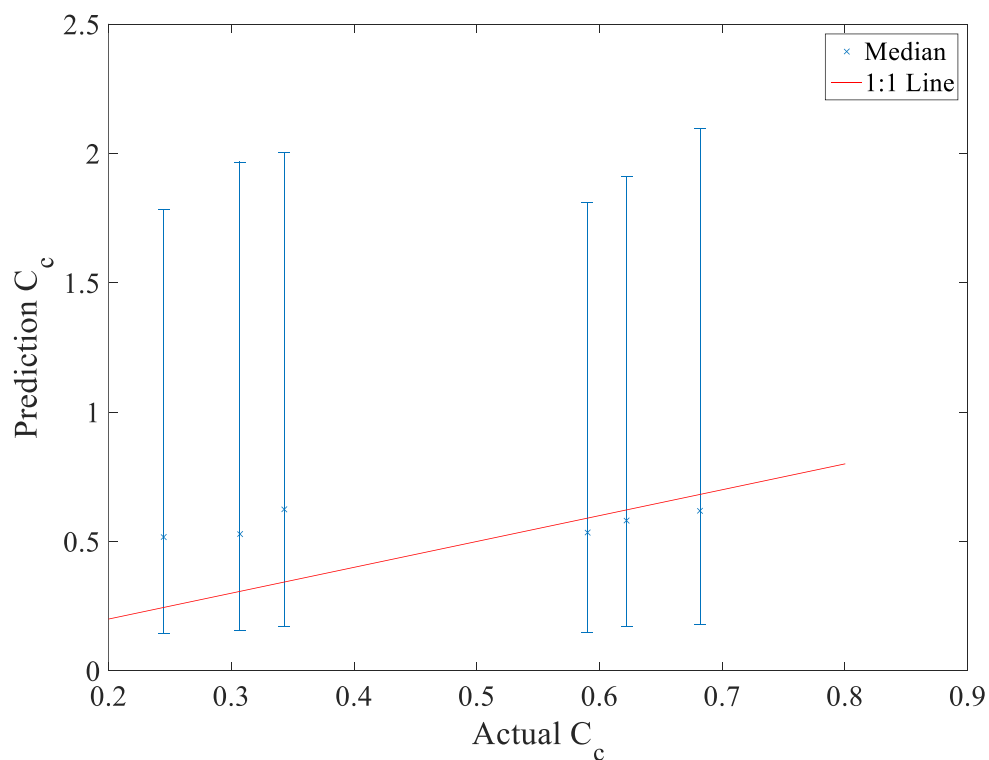


圖 5.16 案例三 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.17 案例三 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.245	0.143	0.518	1.783	1.640
0.307	0.154	0.528	1.966	1.812
0.343	0.172	0.624	2.004	1.832
0.59	0.148	0.536	1.809	1.661
0.622	0.170	0.582	1.909	1.739
0.682	0.178	0.618	2.096	1.918

圖 5.15 和圖 5.16 分別為全部資料模型和 in-situ 模型 C_c 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。而圖 5.15 和圖 5.16 的誤差範圍並沒有明顯的差距。



二、預測 C_s (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

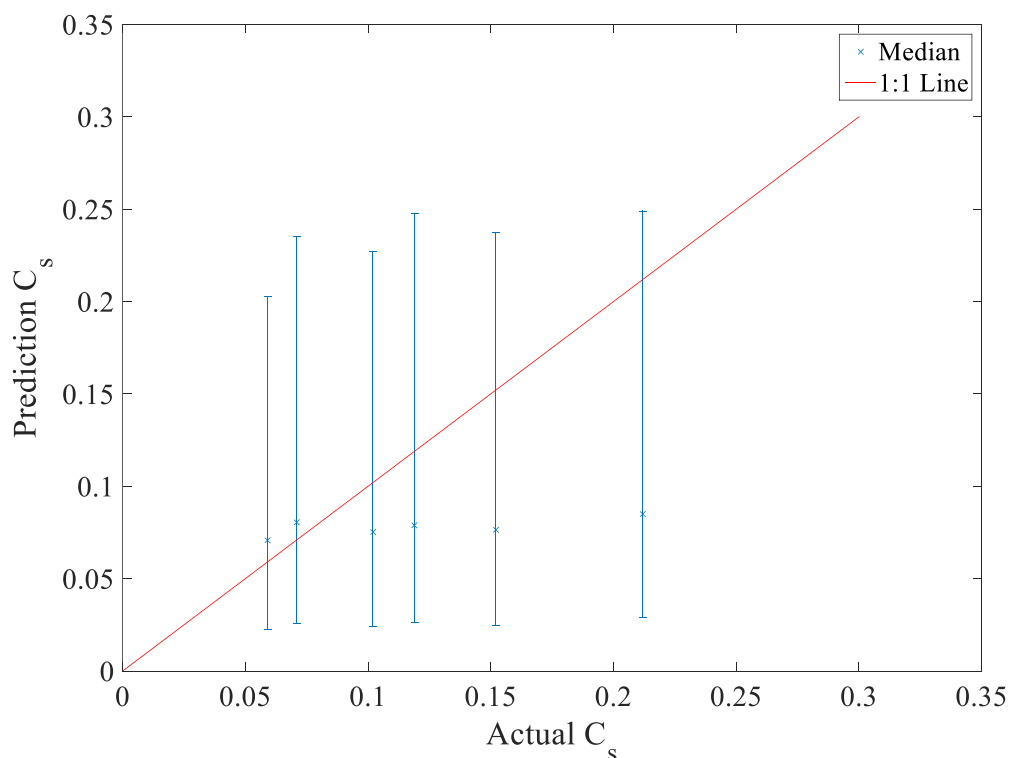


圖 5.17 案例三 C_s 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.18 案例三 C_s 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_s	預測 C_s 信賴區間下界	預測 C_s 中位數	預測 C_s 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.059	0.023	0.071	0.203	0.180
0.071	0.026	0.081	0.235	0.210
0.102	0.024	0.075	0.227	0.203
0.119	0.026	0.079	0.248	0.222
0.152	0.025	0.076	0.237	0.212
0.212	0.029	0.085	0.249	0.220

(2) in-situ 模型

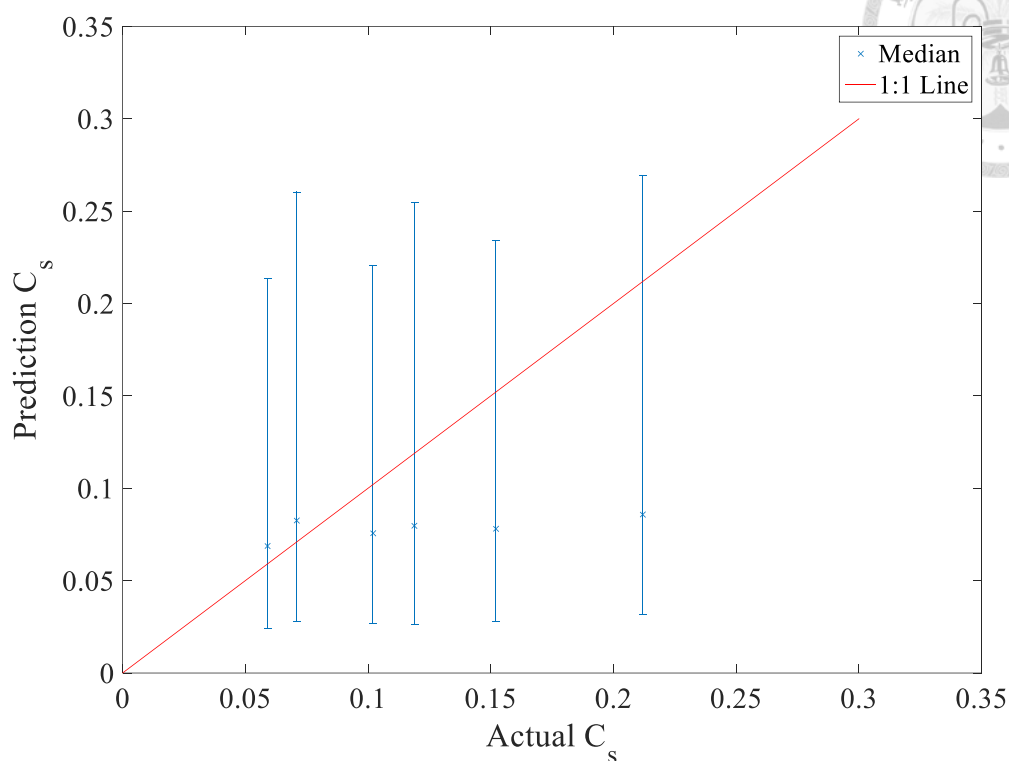


圖 5.18 案例三 C_s 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.19 案例三 C_s 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_s	預測 C_s 信賴區間下界	預測 C_s 中位數	預測 C_s 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.059	0.024	0.069	0.214	0.189
0.071	0.028	0.083	0.260	0.233
0.102	0.027	0.076	0.221	0.194
0.119	0.026	0.080	0.255	0.229
0.152	0.028	0.078	0.234	0.206
0.212	0.032	0.086	0.269	0.238

圖 5.17 和圖 5.18 分別為全部資料模型和 in-situ 模型 C_s 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。而圖 5.17 和圖 5.18 的誤差範圍並沒有明顯的差距。

三、預測 c_v (假設 C_c 、 C_s 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

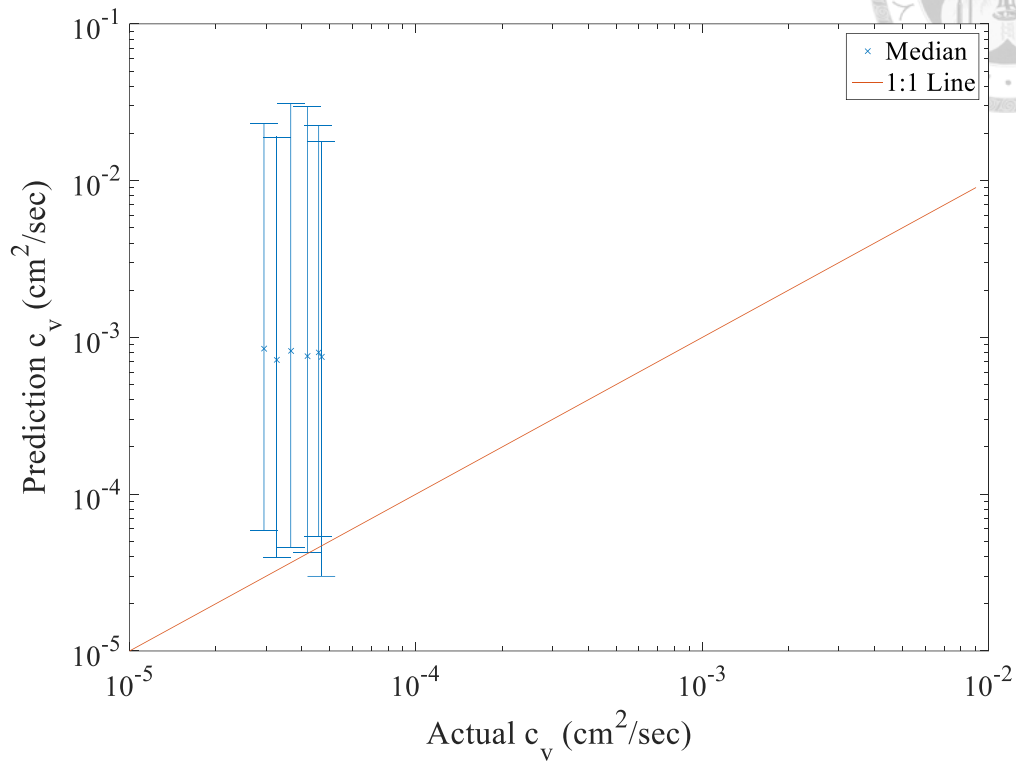


圖 5.19 案例三 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.20 案例三 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
2.95E-05	5.84E-05	8.48E-04	2.32E-02	2.31E-02
3.27E-05	3.96E-05	7.16E-04	1.89E-02	1.89E-02
3.65E-05	4.57E-05	8.20E-04	3.11E-02	3.11E-02
4.19E-05	4.26E-05	7.55E-04	2.95E-02	2.95E-02
4.58E-05	5.40E-05	8.06E-04	2.23E-02	2.23E-02
4.68E-05	2.99E-05	7.53E-04	1.77E-02	1.76E-02

(2) in-situ 模型

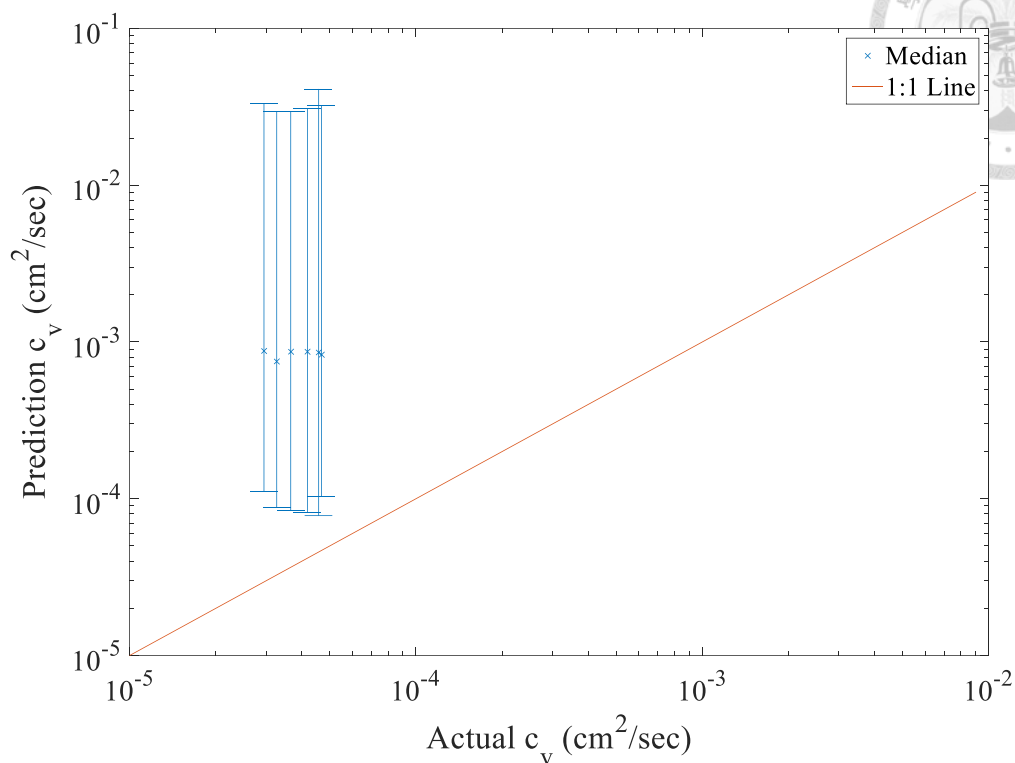


圖 5.20 案例三 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.21 案例三 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
2.95E-05	1.12E-04	8.79E-04	3.30E-02	3.29E-02
3.27E-05	8.80E-05	7.53E-04	2.95E-02	2.94E-02
3.65E-05	8.38E-05	8.63E-04	2.95E-02	2.94E-02
4.19E-05	8.17E-05	8.64E-04	3.09E-02	3.08E-02
4.58E-05	7.80E-05	8.58E-04	4.09E-02	4.08E-02
4.68E-05	1.03E-04	8.27E-04	3.22E-02	3.21E-02

圖 5.19 和圖 5.20 分別為全部資料模型和 in-situ 模型 c_v 真實值與模擬值的關係圖，而圖 5.19 和圖 5.20 的誤差範圍並沒有明顯的差距，但是全部資料模型只有 3 個樣本的真实值勉強有落在誤差棒(error bar)上，而 in-situ 模型則是每個樣本都沒有落在誤差棒上，表示在案例三中， c_v 預測結果並不是很好。

四、案例三驗證結果：

在案例三中，雖然缺少了 w_n 與 e_0 的資訊，但是 C_c 和 C_s 的預測結果還是好的。而 c_v 的預測結果不好，是因為案例三中的資料在原資料庫中是離群的，如圖 5.21 所示，圖中的紅點為案例三的資料，很明顯的不在原資料庫中的群體中，這不符合我們一開始假設的資料庫涵蓋範圍夠廣；在案例一與案例二中， c_v 的預測結果會是好的，則是因為這兩個案例中的資料是在原資料庫的群體中，從圖 5.22 和圖 5.23 中可以發現，兩個案例的資料都在分布在原資料庫中的資料裡。

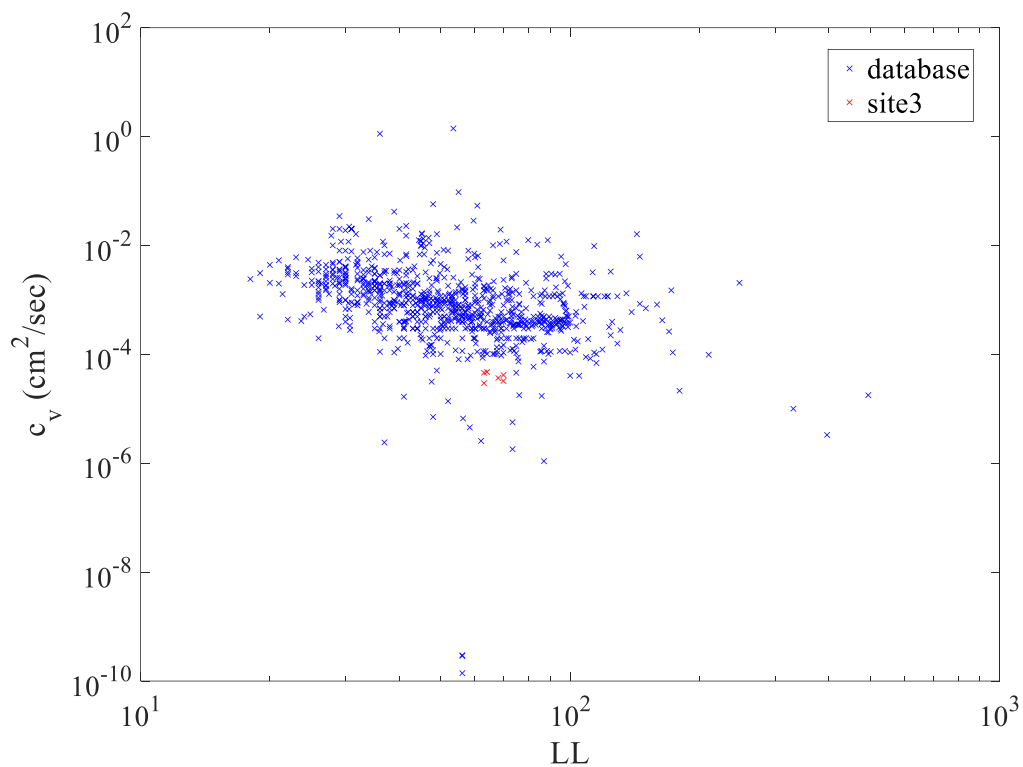


圖 5.21 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例三)

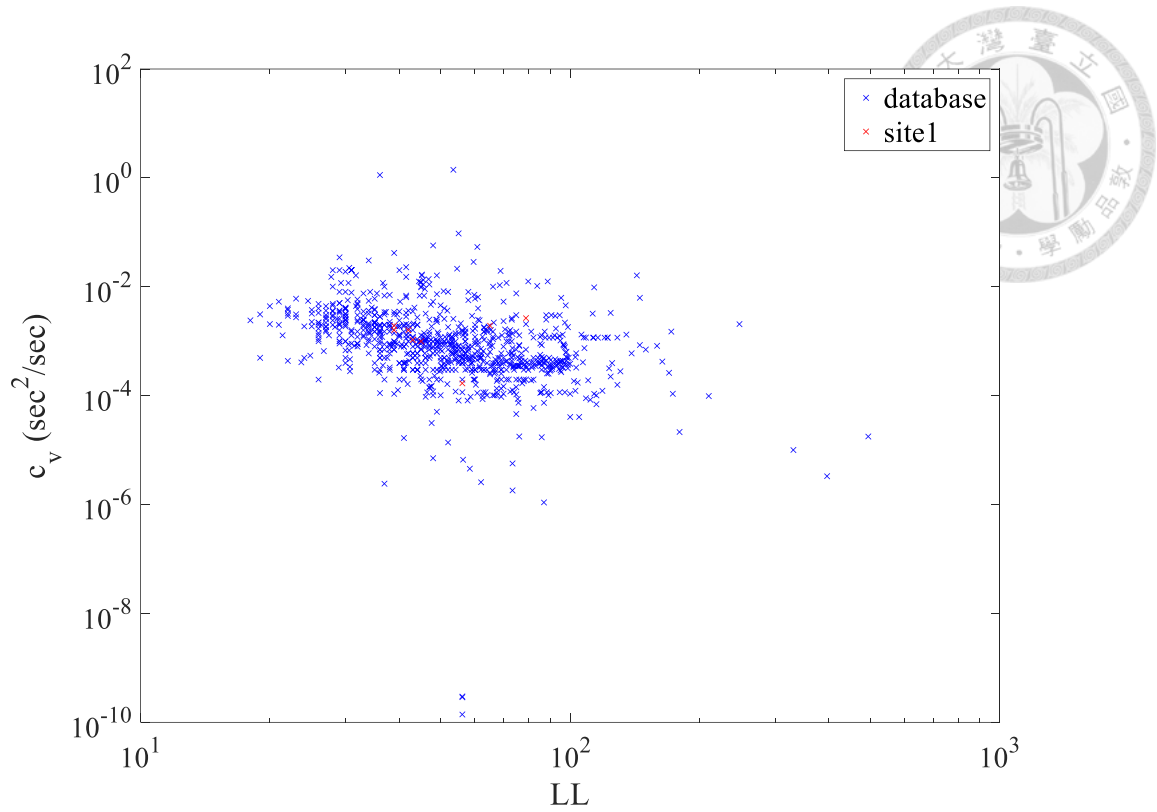


圖 5.22 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例一)

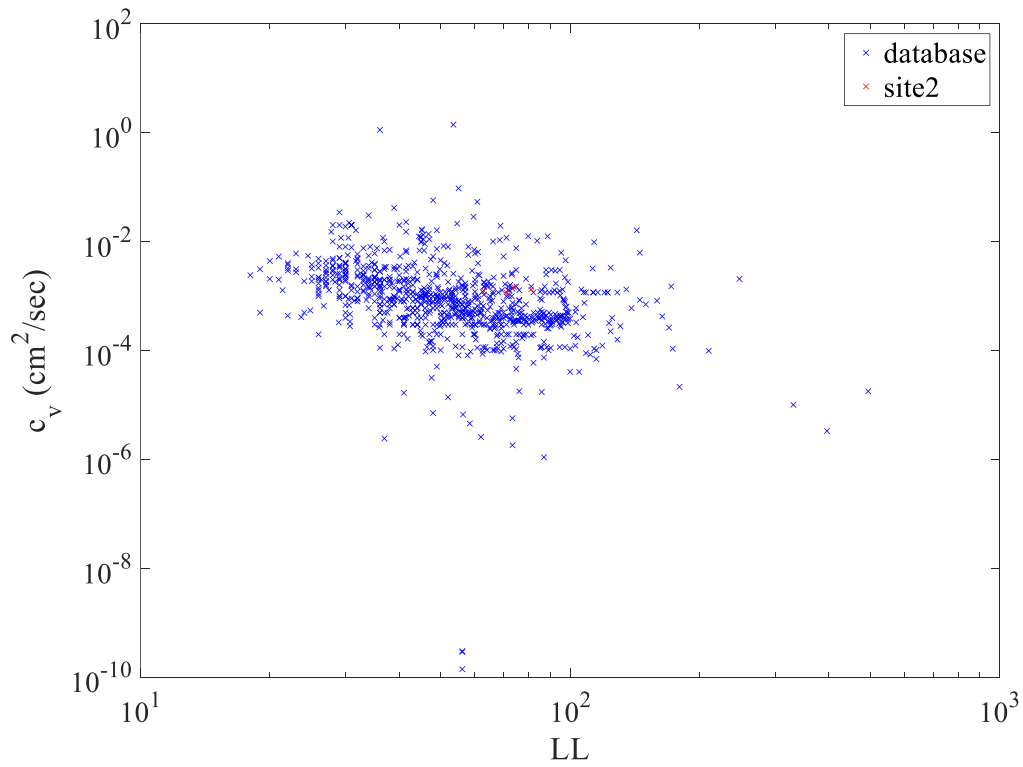


圖 5.23 LL 與 c_v 散佈圖(原資料庫與案例二)

5.2.5 案例四(非大資料庫資料)

案例四為位於中國的場址，表 5.15 為案例四中所記載的土壤參數資料，案例四只有記載 C_c 一個目標參數，接下來會假設 C_c 為未知資訊進行預測，而案例四為現地土樣，其中除了 NO.7 的 LI 值無法得知，其餘 LI 皆小於 1，因此在案例四中，將會使用全部資料模型、 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型進行預測。

表 5.22 案例四土壤參數資料

NO.	Depth(m)	σ'_v (kPa)	LL	PI	w_n	e_0	C_c	C_s	c_v (cm ² /sec)
1	1.37	X	34.64	14.64	32.86	0.961	0.323	X	X
2	4.12	X	33.93	14.29	29.64	0.817	0.251	X	X
3	16.65	X	31.07	12.86	26.43	0.706	0.179	X	X
4	34.16	X	32.86	13.93	25.36	0.706	0.19	X	X
5	41.37	X	33.57	13.57	26.07	0.722	0.143	X	X
6	55.62	X	32.14	13.21	23.93	0.656	0.164	X	X
7	73.99	X	X	X	22.86	0.639	0.154	X	X

一、預測 C_c (假設 C_c 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

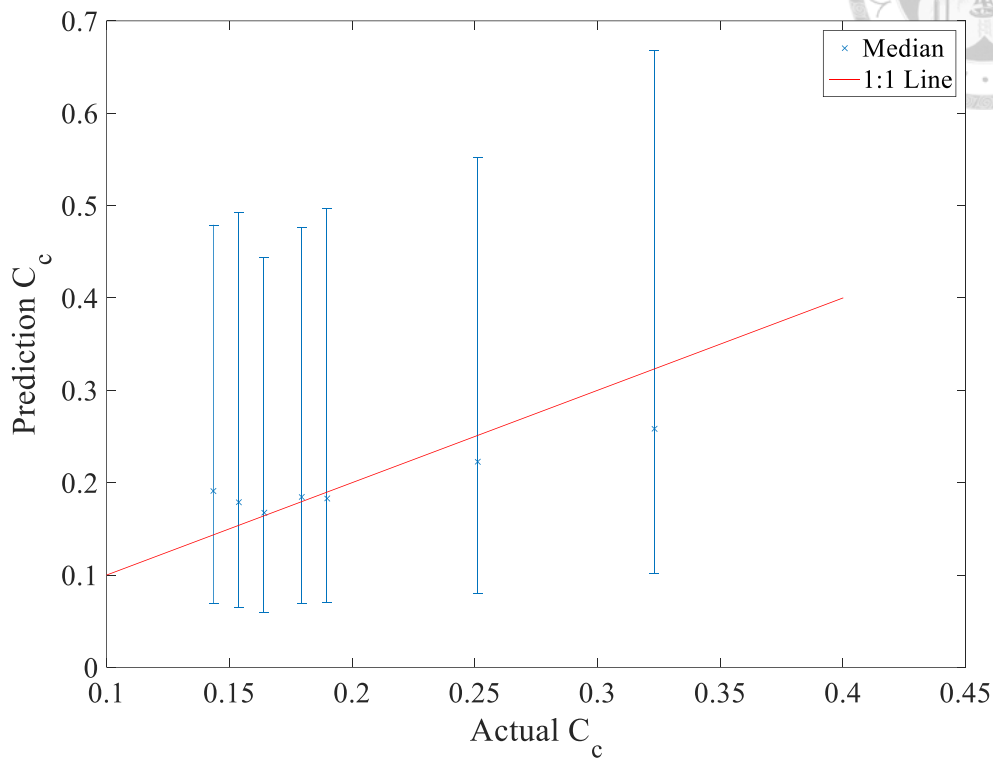


圖 5.24 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.23 案例四 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.144	0.069	0.191	0.479	0.410
0.154	0.065	0.179	0.493	0.428
0.164	0.059	0.168	0.444	0.385
0.179	0.069	0.184	0.476	0.407
0.190	0.071	0.183	0.497	0.426
0.251	0.080	0.222	0.553	0.472
0.323	0.102	0.258	0.667	0.566

(2)LI<1 模型

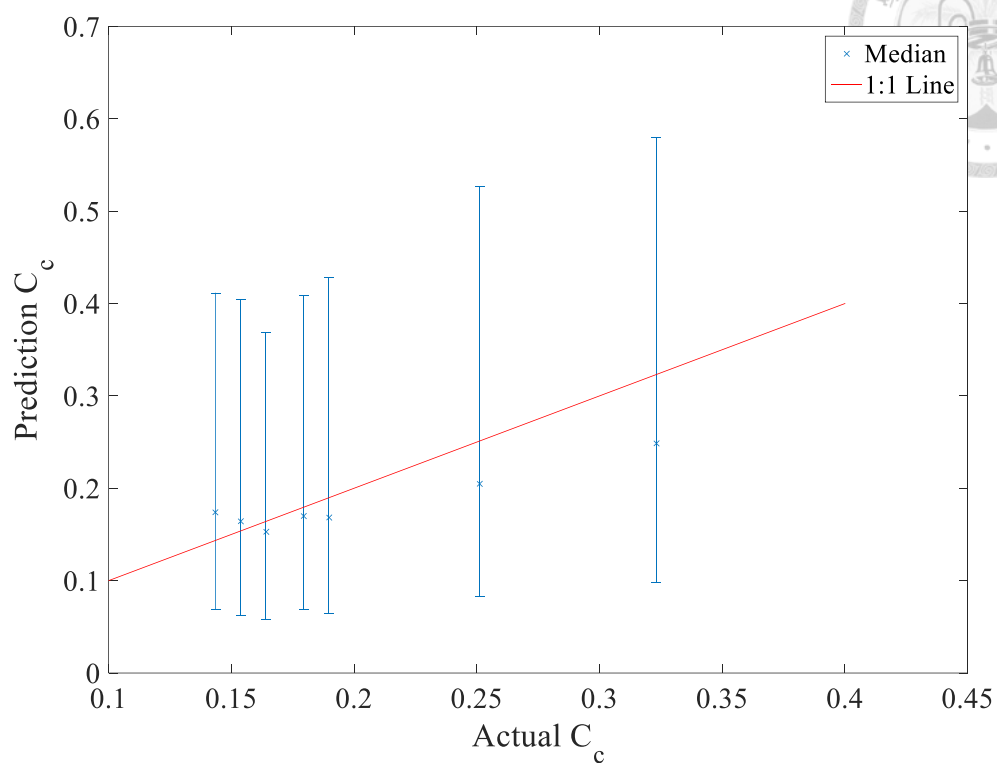


圖 5.25 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(LI<1 模型)

表 5.24 案例四 C_c 真實值與預測值整理(LI<1 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.144	0.069	0.174	0.411	0.343
0.154	0.062	0.164	0.404	0.341
0.164	0.058	0.153	0.369	0.310
0.179	0.068	0.170	0.409	0.340
0.190	0.065	0.168	0.428	0.363
0.251	0.082	0.205	0.526	0.444
0.323	0.099	0.249	0.580	0.481

(3) in-situ 模型

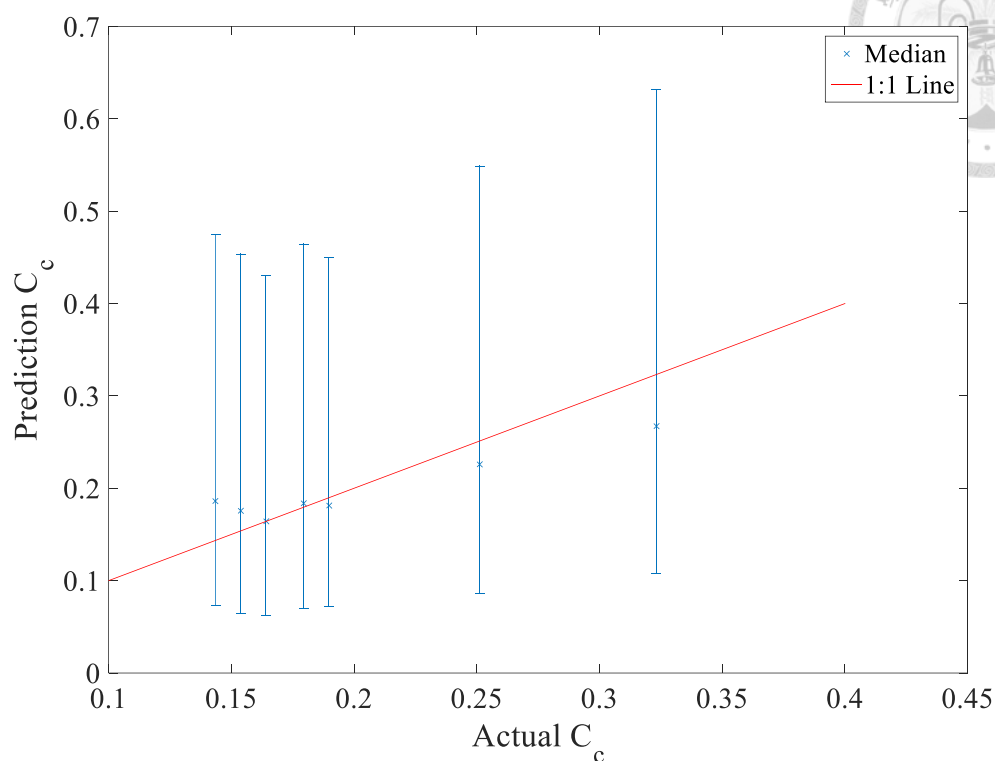


圖 5.26 案例四 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.25 案例四 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.144	0.073	0.187	0.474	0.401
0.154	0.065	0.176	0.453	0.388
0.164	0.062	0.164	0.431	0.368
0.179	0.070	0.184	0.464	0.394
0.190	0.073	0.182	0.449	0.377
0.251	0.086	0.226	0.549	0.462
0.323	0.108	0.267	0.632	0.524

二、案例四驗證結果：

圖 5.24、圖 5.25 和圖 5.26 分別為全部資料模型、 $LI < 1$ 模型和 in-situ 模型 C_c 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。與案例一、二相同，在案例四中我們也使用了三種模型去預測，從圖 5.24、圖 5.25 和圖 5.26 可以發現， $LI < 1$ 模型的誤差範圍最小，全部資料模型和 in-situ 模型並沒有明顯差距。

5.2.6 案例五(非大資料庫資料)

案例五位於馬來西亞的試驗場址，表 5.15 為案例五中所記載的土壤參數資料，除了 C_s ，其餘參數皆有記載，接下來會假設 C_c 和 c_v 為未知資訊進行預測，而在案例五中， LI 的值皆大於 1 且為現地土樣，所以將會使用全部資料模型、 $LI>1$ 模型和 in-situ 模型分別進行預測。

表 5.26 案例五土壤參數資料

NO.	Depth(m)	σ'_v (kPa)	LL	PI	w_n	e_0	C_c	C_s	C_v (cm ² /sec)
1	3.33	22.0896	83.44	53.47	114.81	2.99	2.2	X	1.98E-03
2	7.38	43.5821	46.43	22.63	61.34	1.61	0.752	X	1.61E-03
3	8.31	48.9552	50.03	24.68	62.37	1.61	0.855	X	9.07E-04
4	12.32	70.4478	46.94	22.11	56.2	1.46	0.89	X	2.41E-03

一、預測 C_c (假設 C_c 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

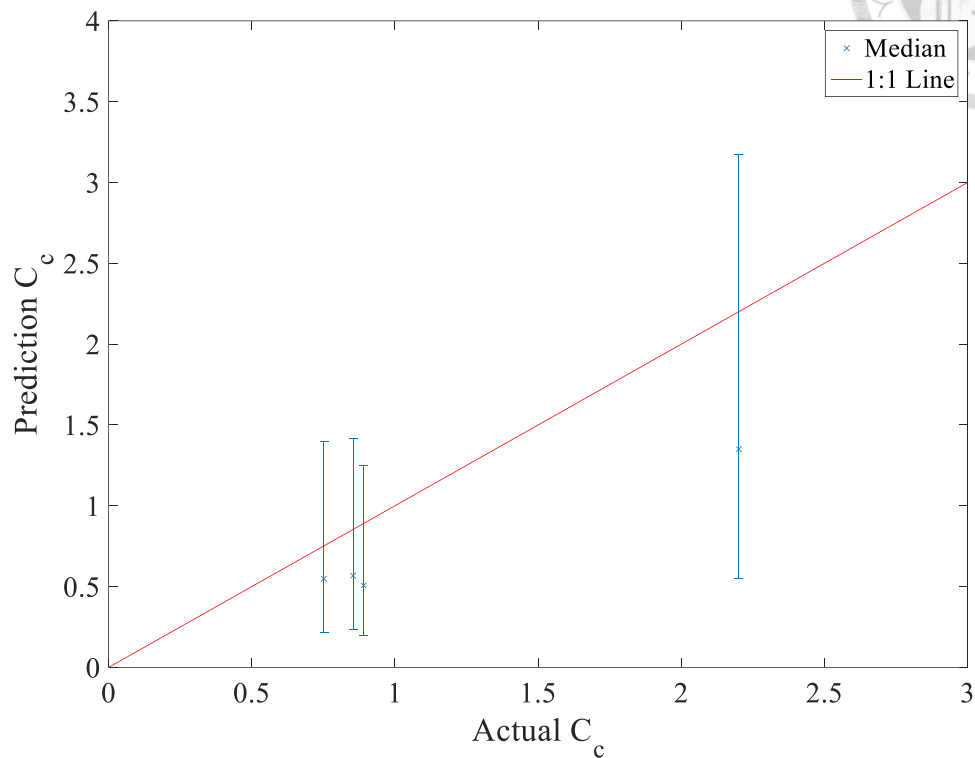


圖 5.27 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.27 案例五 C_c 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.752	0.219	0.547	1.396	1.177
0.855	0.233	0.569	1.415	1.182
0.890	0.197	0.507	1.250	1.053
2.200	0.551	1.349	3.175	2.624

(2)LI>1 模型

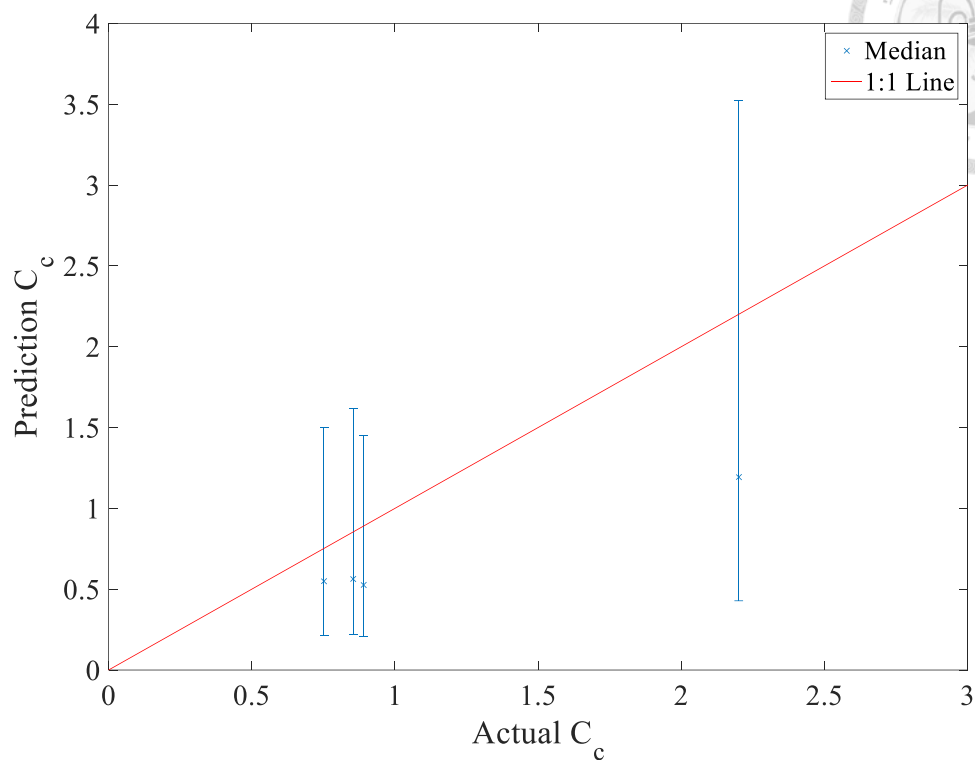


圖 5.28 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(LI>1 模型)

表 5.28 案例五 C_c 真實值與預測值整理(LI>1 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.752	0.212	0.547	1.502	1.290
0.855	0.219	0.562	1.615	1.397
0.890	0.205	0.525	1.449	1.245
2.200	0.428	1.192	3.525	3.097

(3) in-situ 模型

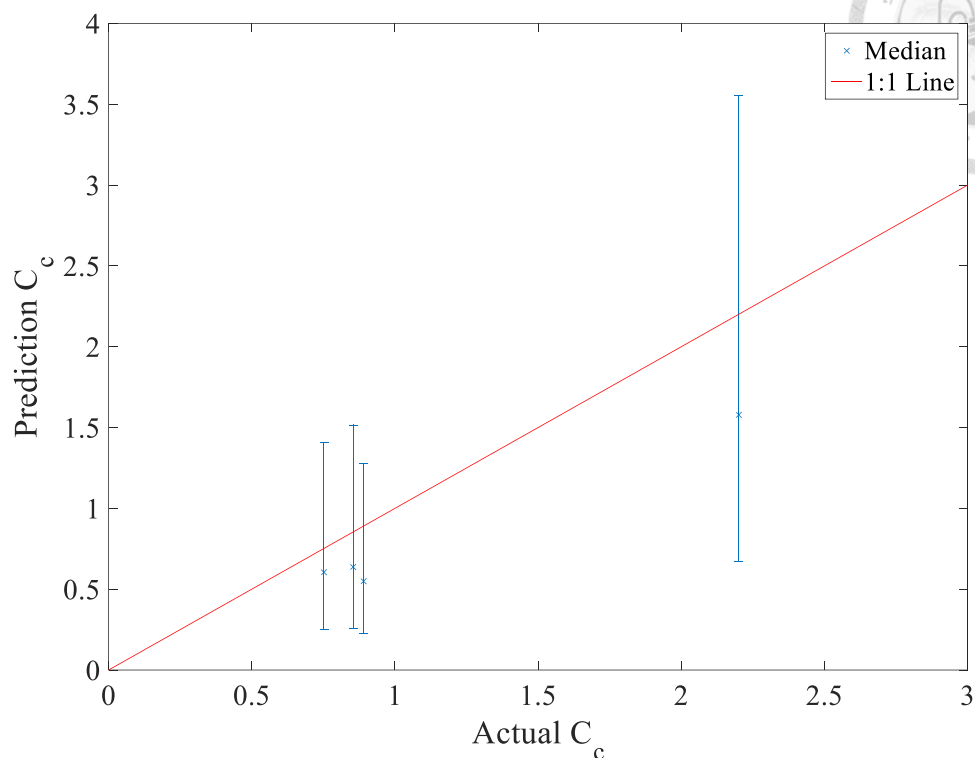


圖 5.29 案例五 C_c 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.29 案例五 C_c 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 C_c	預測 C_c 信賴區間下界	預測 C_c 中位數	預測 C_c 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
0.752	0.252	0.606	1.409	1.157
0.855	0.255	0.637	1.515	1.260
0.890	0.228	0.550	1.277	1.048
2.200	0.670	1.580	3.552	2.882

圖 5.27、圖 5.28 和圖 5.29 分別為全部資料模型 $LI>1$ 模型和 in-situ 模型 C_c 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。另外圖 5.27、圖 5.28 和圖 5.29 的誤差範圍(也就是 error bar 寬度)並沒有明顯差距。

二、預測 c_v (假設 C_c 、 c_v 為未知資訊，其他參數為已知資訊)：

(1)全部資料模型

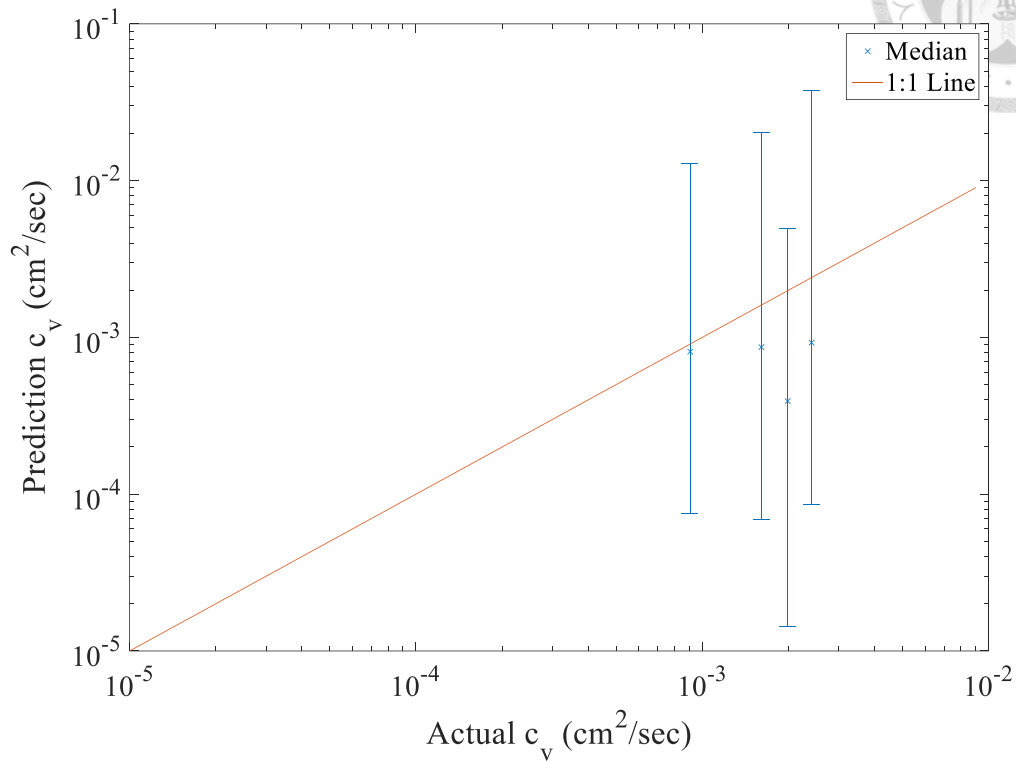


圖 5.30 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(全部資料模型)

表 5.30 案例五 c_v 真實值與預測值整理(全部資料模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
9.07E-04	7.51E-05	8.15E-04	1.29E-02	1.28E-02
1.61E-03	6.85E-05	8.65E-04	2.02E-02	2.02E-02
1.98E-03	1.43E-05	3.92E-04	4.96E-03	4.95E-03
2.41E-03	8.60E-05	9.21E-04	3.74E-02	3.73E-02

(2)LI>1 模型

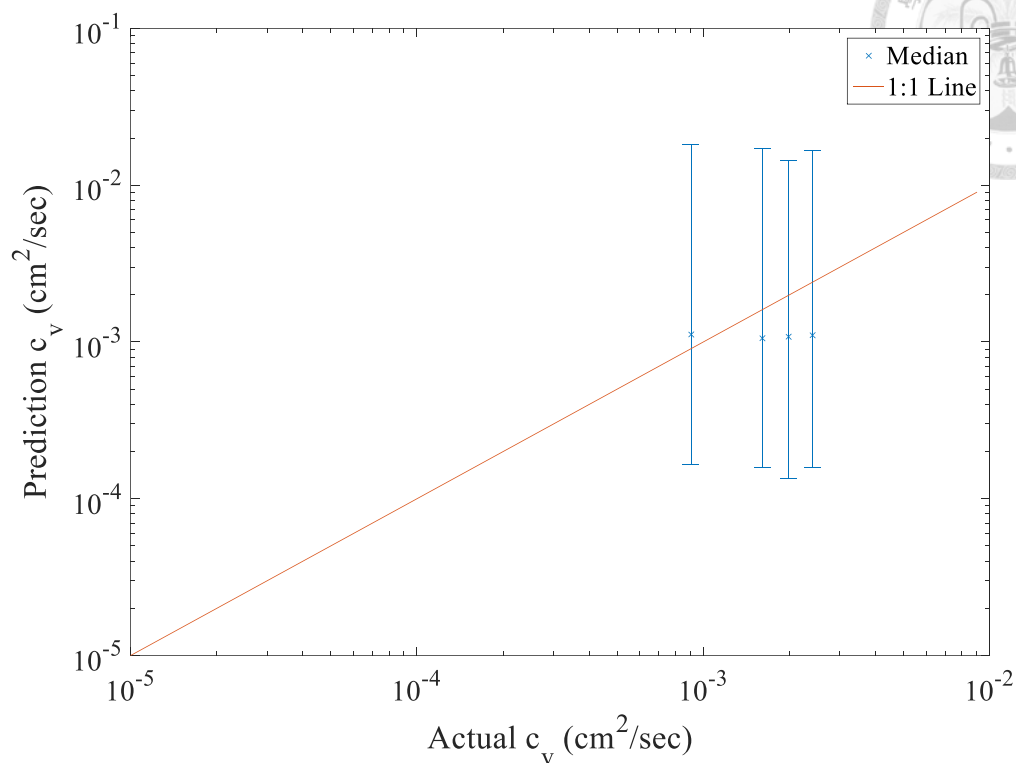


圖 5.31 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(LI>1 模型)

表 5.31 案例五 c_v 真實值與預測值整理(LI>1 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
9.07E-04	1.66E-04	1.12E-03	1.81E-02	1.79E-02
1.61E-03	1.58E-04	1.06E-03	1.71E-02	1.69E-02
1.98E-03	1.35E-04	1.07E-03	1.43E-02	1.42E-02
2.41E-03	1.58E-04	1.10E-03	1.67E-02	1.66E-02

(3) in-situ 模型

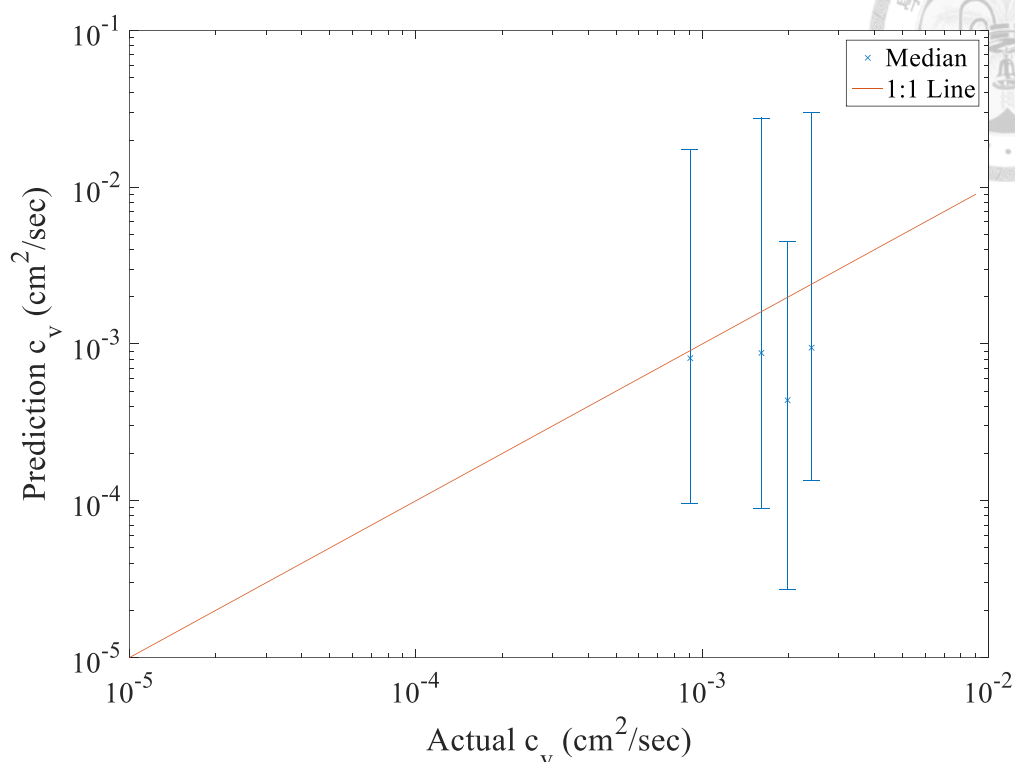


圖 5.32 案例五 c_v 真實值與預測值關係圖(in-situ 模型)

表 5.32 案例五 c_v 真實值與預測值整理(in-situ 模型)

真實 c_v	預測 c_v 信賴區間下界	預測 c_v 中位數	預測 c_v 信賴區間上界	信賴區間上下界差值
9.07E-04	9.54E-05	8.14E-04	1.73E-02	1.72E-02
1.61E-03	8.89E-05	8.79E-04	2.76E-02	2.75E-02
1.98E-03	2.70E-05	4.40E-04	4.47E-03	4.45E-03
2.41E-03	1.35E-04	9.50E-04	2.99E-02	2.98E-02

圖 5.30、圖 5.31 和圖 5.32 分別為全部資料模型、 $LI > 1$ 模型和 in-situ 模型 c_v 真實值與預測值的關係圖，真實值都有落在誤差棒(error bar)上也就是所模擬出來的樣本有落在 95%信賴區間中，表示模擬的結果是好的。另外圖 5.30 和圖 5.32 的誤差範圍(也就是 error bar 寬度)比圖 5.31 寬，而圖 5.30 和圖 5.32 並沒有明顯差距。

三、案例五驗證結果：

使用全部資料模型、 $LI > 1$ 模型和 in-situ 模型預測案例五的結果都是好的，但 $LI > 1$ 模型並沒有像案例一、三、四，篩選過後的模型(案例一、二、四是使用 $LI < 1$ 模型)預測效果皆較好，只有在預測 c_v 時結果較好，而在預測 C_c 時，則是與全部資料型、in-situ 模型沒有明顯差距。

第六章 結論與未來建議



6.1 結論

成對的轉換模型已經廣泛運用於從測量參數(例如：液性限度)預測設計參數(例如：壓縮指數)，轉換模型通常只限定於特定性質或是特定區域的土壤，且一個轉換模型只能預估一個設計參數，而本研究的訓練模型比轉換模型強大之處在於，它可以從多個現地與(或)實驗室得到的資料同時預估多個設計參數，並使用與現地最相近的資料，且訓練模型輸入的測量參數比轉換模型多出了不少，當輸入的資訊越多，預估效果也會越好，工址調查所得之資訊也不至於浪費。在大多數的應用中，轉換模型只能得到期望值，而參數間的離散情形是不能得知的，相反地，使用訓練模型預測設計參數時，可以獲得更多的資訊，所以如果要進行可靠度分析，訓練模型的使用是必要的。

為了使用訓練模型，必須要建立多變數機率分布，此多變數機率分布將設計參數和現地與(或)實驗室量測結果結合在一起(在機率意義上)。因此在本研究中，建立資料庫 CLAY/8/12225，其中包含了五個測量參數以及三個設計參數，並使用 Johnson 分布系統將資料轉換到標準常態空間，並透過吉普斯取樣法以及貝氏定理的共軛條件，得到資料庫參數的期望值向量以及共變異數矩陣，接著使用期望值向量和共變異數矩陣預測參數，而預測樣本便可以做為可靠度分析的基礎。

本模型的價值是，它能將這些由資料庫所彙整出各參數之期望值向量和共變異數矩陣獲得先驗分布(prior PDF)，並藉由加入現地資料找出這些先驗分布與現地情況的相關程度，提高相關性高分布的權重，也就是相關性越高，則越容易被取出當作先驗分布，最後利用貝氏分析的概念將加入權重的先驗分布更新為後驗分布(posterior PDF)進而得到預測樣本。而大地工程可靠度設計(reliability-base design, RBD)最為人詬病的就是常常沒有足夠現地資料去建一個現地的機率密度函數，因此可以利用此模型搭配貝氏分析來計算得到後驗機率密度函數，也就是可以拿來作為現地機率密度函數的參考模型。

然而，本研究的資料庫無法完全涵蓋地球上所有可能，所以如果案例中的參數間之相互關係落在資料庫範圍外，則此推估之後驗分布可能有使用上的疑慮，

會使真實之目標參數值可能會落於在預測樣本(後驗分布)95%信賴區間外(例如：案例三預測 c_v 值)。

本研究將資料庫中資料分為五個種類進行建模，分別為：全部資料模型、 $LI < 1$ 模型、 $LI > 1$ 模型、in-situ 模型和 remolded 模型，並透過案例一到案例五進行驗證。所有案例都有使用全部資料模型和 in-situ 模型進行驗證，同個案例中兩個模型的預測結果，有時是全部資料模型較好，有時是 in-situ 模型較好，而在案例三預測 C_v 值的成效皆不好，此案例的 c_v 值與 LL 值的分布範圍落於資料庫外；案例一、二和四為使用 $LI < 1$ 模型進行驗證的案例，其預測成果皆比全部資料模型與 in-situ 模型的成效好；案例五為唯一有使用 $LI > 1$ 模型進行驗證的案例，雖然預測成效也是好的，但是與全部資料模型並沒有太大的區別。透過五種模型的驗證結果，可以得知，如果將得到的資訊加以分類，並成功捕捉分類後的參數分布趨勢，便能夠提高預測的準確度。

6.2 未來建議

從表 3.4 可以得知，回脹指數(C_s)和壓密係數(c_v)的資料筆數比壓縮指數(C_c)少了許多，如果往後能夠持續蒐集較少資料的 C_s 和 c_v ，便可以使模型適用的範圍更廣，除了針對較少資料的目標參數蒐集資料，也可以針對 $LI>1$ 的資料，因為 $LI>1$ 模型在案例驗證中表現沒有跟 $LI<1$ 模型一樣好，很可能是因為 $LI>1$ 的資料量比 $LI<1$ 的資料量少許多，所以模型的成效比較不好。

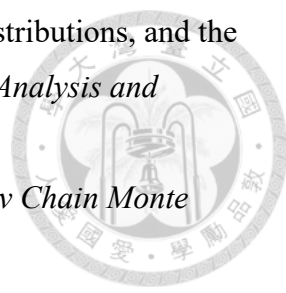
除了擴張資料庫，也可試著更改預測 c_v 的測量參數紀錄方式，因為從表 3.5 可以發現， c_v 與其他參數間並沒有明顯的關聯性，而我們認為含水量(w_n)、孔隙比(e_0)和有效應力(σ'_v)是應該與 c_v 有關聯性的，在資料庫中我們 w_n 和 e_0 紀錄的都是最初的；而 σ'_v 和 c_v 會選擇與取樣地層深度的 σ'_v 紀錄相對應的 c_v 或是該篇論文作者所選定的，如果前面兩者都無從依據，我們則會選取在整個壓密過程中較中間的 σ'_v 和 c_v 來紀錄，事實上，在壓密試驗過程中，每隔一段時間便會增加荷重(σ'_v)得到新的 c_v ，此時的 w_n 和 e_0 也不是初始值，如果將每個階段的變化值都清楚記載，也許就能夠找出 c_v 與 w_n 、 e_0 、 σ'_v 之間的關聯性，使預測的效果更好。

經過前人的努力，我們研究室的黏土資料庫已經有紀錄不排水剪力強度(S_u)、不排水楊氏模數(E_{50})、靜止側向土壓力係數(K_0)與其他參數的資料，加上本研究的壓縮指數(C_c)、回脹指數(C_s)、壓密係數(c_v)，已經建立起相當大的黏土重要設計參數資料庫，而滲透係數(k)亦為黏土的重要設計參數之一，實驗時間相當長也與壓密係數(c_v)有相關，或許能在資料庫加上滲透係數並探討與其他參數間的關聯性，使資料庫更加完整以及提升壓密係數(c_v)或其他目標參數的預測效果。

參考文獻

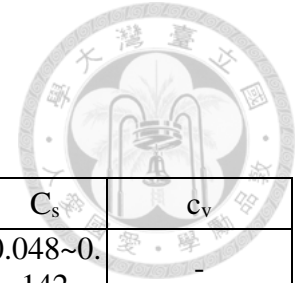


- 王慧瑜 (2015)。不同評估壓密係數方法之比較研究。碩士論文。國立中興大學。台中。
- Al-Busoda, B. S. and Al-Taie, A. J. (2010). Statistical Estimation of the Compressibility of Baghdad Cohesive Soil. *Journal of Engineering*, 4(16), 5863-5876.
- Alvarez, I., Niemi J., and Simpson, M. (2014). Bayesian Inference for a Covariance Matrix. *In Proc., 26th Annual Conf. on Applied Statistics in Agriculture*. Manhattan, KS: Kansas State Univ.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., and Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*.
- Cao, Z., Wang, Y., and Li, D. (2016). Quantification of Prior Knowledge in Geotechnical Site Characterization. *Engineering Geology*, 203, 107–116.
- Ching, J., and Phoon, K.-K. (2012). Establishment of Generic Transformations for Geotechnical Design Parameters. *Structural Safety*, 35, 52–62.
- Ching, J., and Phoon, K.-K. (2014a). Transformations and Correlations among Some Clay Parameters — the Global Database. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 663–685.
- Ching, J., and Phoon, K.-K. (2014b). Correlations among Some Clay Parameters — the Multivariate Distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 686–704.
- Ching, J., and Phoon, K.-K. (2015). *Constructing Multivariate Distributions for Soil Parameters*. Chap. 1 in *Risk and Reliability in Geotechnical Engineering*, Ed, K. K. Phoon and J. Ching.
- Djoenaidi, W. J. (1985). *A Compendium of Soil Properties and Correlations*. M. Eng. Sc. Thesis, University of Sydney, 836p.
- El-Kasaby, E., Eissa, E., Ab-Elmeged, M. and Abo-Shark, A. (2019). Coefficient of Consolidation and Volume Change for 3-D Consolidation. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4(5), 126-131.
- Gelman, A. (2006). Prior Distributions for Variance Parameters in Hierarchical Models. *Bayesian Analysis*, 1(3), 515–534.
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., and Rubin, D. B. (2013). *Bayesian Data Analysis*. 3rd ed. Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC.

- 
- Geman, S., and Geman, D. (1984). Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-6(6), 721–741.
- Gilks, W. R., Spiegelhalter, D. J., and Richardson, S. (1996). *Markov Chain Monte Carlo in practice*. London: Chapman and Hill.
- Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods using Markov Chains and Their Applications. *Biometrika*, 57(1), 97–109.
- Huang, A., and Wand, M. P. (2013). Simple Marginally Noninformative Prior Distributions for Covariance Matrices. *Bayesian. Anal*, 8(2), 439–452.
- Isik, N. S. (2009). Estimation of Swell Index of Fine Grained Soils Using Regression Equations and Artificial Neural Networks. *Scientific Research and Essay*, 4(10), 1047-1056.
- James, A. T. (1964). Distributions of Matrix Variates and Latent Roots Derived from Normal Samples. *The Annals of Mathematical Statistics*, 35(2), 475–501.
- Kulhawy, F. H., and Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Cornell University, Palo Alto.
- Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. John Willy and Sons, New York, 553p.
- Mardia, K. V., Kent, J. T., and Bibby, J. M. (1979). *Multivariate Analysis*. London: Academic Press.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., and Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092.
- Olson, R. E. (1977). Consolidation Under Time-Dependent loading. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 103(GT1), 55-60.
- Phoon, K. K. (2006). *Modeling and Simulation of Stochastic Data*. GeoCongress 2006, ASCE, Reston, VA.
- Poulos, H. G., Lee, C. Y. and Small, J. C. (1991). Predicted and Observed Behaviour of a Test Embankment on Malaysian Soft Clays. *Australian Geomechanics Journal*, 20, 1-23.
- Shen, S.-L., Cui, Q.-L., Ho, C.-E., and Xu, Y.-S. (2016). Ground Response to Multiple Parallel Microtunneling Operations in Cemented Silty Clay and Sand. *Journal of*

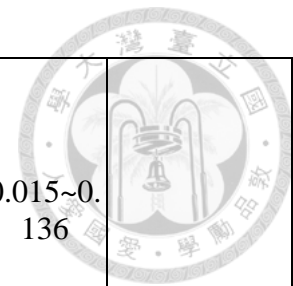
- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(5), 04016001.
- Shiva Prashanth Kumar K. and Darga Kumar N. (2016). Evaluation of Coefficient of Consolidation in CH Soils. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 10(4), 515-528.
- Slifker, J. F., and Shapior, S. S. (1980). The Johnson System: Selection and Parameter Estimation. *Technometrics*, 22(2), 239-246.
- Stuedlein, A. W. (2008). *Bearing Capacity and Displacement of Spread Footings on Aggregate Pier Reinforced Clay.* Ph.D. thesis, Univ. of Washington, Seattle.
- Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Ed., John Willey and Sons, New York, 729p.
- Tokuda, T., Goodrich, B., Van Mechelen, I., and Gelman, A. (2011). Visualizing Distributions of Covariance Matrices. Accessed August 3, 2017
- U. S. Navy (1982). *Soil Mechanics – Design Manual 7.1*, Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Winterkorn, H. F., and Fang, H.-Y (1975). *Foundation Engineering Handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- Wroth, C. P., and Wood, D. M., (1978). The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 137-145.

附錄 I 資料庫資訊



	Reference	Country/Site	n	LL	PI	w _n	e ₀	σ' _v	C _c	C _s	C _v
1	Wesley (1988)	remolded	15	29.6~12 1.6	10.4~83. 7	-	0.6~2.1	100	0.18~0.8 4	0.048~0. 142	-
2	Imai et al. (1984)	Japan/Befu port	18	20~150	12~99	-	-	10	0.35~2.0 2	-	1.08e- 04~1.09e-02
		Japan/Hakata port									
		Japan/Hatsukaichi port									
		Japan/Hiroshima bay									
		Japan/Off Kanda									
		Japan/Kawanoishi port									
		Japan/Osaka									
		Japan/Otaru port									
		Japan/Sendai bay									
	Japan/Tokyo										
3	Umehara & Zen (1982)	Japan/Minamata Bay	16	59.4~16 4	24.4~11 8.1	-	-	10, 100	0.64~2.9 6	-	4.03e- 04~2.89e-03
		Japan/Honmoku									
		Japan/Tokyo									
		Japan/Yokohama Port									
		Japan/Nagoyo Port									
		Japan/Osaka									
	Japan/Fushiki-Toyama Port										
4	Olsen & Rice (1982)	USA/mid-atlantic	35 5	18~79	3~48	19~110	-	-	0.06~0.9 3	0.06~0.1 5	-
5	Nakase et al. (1988)	remolded	12			-		-			-

		Japan/Kobe								
		Japan/Aomori								
		Japan/Toyama								
		Japan/Niigata		27.6~86	10.7~55.		0.7~1.4		0.15~0.6	0.015~0.
		Japan/Sakaiminato		.1	8		9		3	136
		Japan/Nagoya								
		Japan/Ohita								
6	Hanna & Javed (2014)	Canada/Chambly								
		Canada/St.Nicolas	4	41~62	19~35	43~63	-	-	0.28~0.5	-
		Canada/Terrebonne							2	-
		Canada/Mont St. Hilarie								-
7	Teng et al. (2014)	Taiwan/Taipei	10	-	-	-	0.8~1.1	-	0.18~0.4	0.016~0.
							6		4	052
8	Delage (2010)	Canada/Champlain	8	29~62	10~36	40~80	-	-	0.7~2.28	-
9	Zapata-Medina et al. (2014)	USA/Bootlegger Cove	9	35.6~49	16.1~25.	27.1~34.	0.65~0.	50~170	0.16~0.3	0.025~0.
				.3	2	4	89		2	049
10	Kamruzzaman et al. (2009)	Singapore/Singapore	1	87	52	70	1.85	-	0.85	-
11	Mcclelland (1967)	USA/Mississippi River	54	32~98	9~72	28~81	0.75~2.	-	0.2~1.09	-
							18			
12	Sanglerat (1972)	France/Montmelian								
		France/St-Etienne								
		France/Lyons	17	18~66	3.5~25	16~54	-	-	0.06~0.4	-
		France/Miribel								
		France/Oyonnax								
		France/Venissieux								





		France/Autun									
		France/Calais									
		France/Sotteville									
		France/Saint-Quentin									
		France/Port ST-Louis du Rhone									
		Spain/Seville									
13	Cozzolino (1961)	Spain/Sao Paulo City	82	30~136. 4	15~75	-	0.5~2.4 8	-	0.02~1.7 5	-	-
		Spain/lowlands of Santos									
14	Salai (2001)	Japan/Suko	8	64.8~12 6.8	25.4~73. 2	55.2~16 6.9	1.47~4. 42	-	0.42~2.2 5	-	-
15	Suddepong et al. (2015)	Japan/Ariake	20	41~116. 4	19.7~70. 5	30.4~16 6.4	0.95~4. 59	-	0.32~2.0 5	0.08~0.2 34	-
		Japan/Shiroishi									
16	Di Matteo et al. (2011)	Spain/Galicia	7	73~80	-	-	-	-	0.5~0.6	-	-
17	Lambe & Whitman (1969)	USA/Boston									
		USA/Fore River									
		USA/Chicago									
		USA/Louisiana									
		USA/New Orleans									
		USA/Montana	15	47~89	18~69	-	-	-	0.17~0.8 4	0.025~0. 195	-
		USA/Fort Union									
		USA/Cincinnati									
		USA/St.Lawrence									
		Canada/Beauharnois									
		Venezuw/Siburua									

18	Chai et al. (2004)	China/Shanghai	22	26.2~42.4	10.4~21.5	17.8~48.2	0.60~1.36	-	0.08~0.82	-	-
19	Chung et al. (2017)	Korea/Busan	20	40.2~77.7	10.7~41.2	42.9~85.7	1.21~2.31	-	0.54~2.4	0.024~0.053	-
20	Chung (2005)	Australia/Burswood	20	-	-	23~103	0.6~2.74	20.1~95.4	0.54~1.39	-	1.93e-04~1.87e-03
21	Salem & Krizek (1976)	USA	47	45~88.7	-	-	-	-	0.31~0.69	-	-
22	Skempton & Jones (1944)	remolded	42	24.2~133	14~97	-	0.23~2.17	-	0.07~0.91	-	-
		UK/Gosport									
		UK/Stanpit marsh									
		USA/New orleans									
23	Leroueil wt al. (1983)	Canada/Champlain	246	-	-	-	0.61~2.58	-	0.09~4.9	-	-
24	Dascal & Larocque (1973)	Canada/Chute Rouge	79	22.4~87	2~57	22~121	0.61~3.45	-	0.01~4.5	-	-
		Canada/Rivière Rupert									
		Canada/Nottaway									
25	Nishida (1956)	Brazil/Rio de Janeiro	173	-	-	-	0.32~2.8	-	0.04~2.5	-	-
		Brazil/Santos									
		Brazil/Sao Paulo									
		Brazil/Minas Gerais									
26	Rendon-Herrero (1980)	remolded	94	24~166	9~97	5.8~147.4	0.37~2.69	-	0.014~1.45	-	-
27	MacDonald & Sauer (1970)	Canada/Saskatoon	14	18~51.1	6.4~30.3	-	-	-	0.08~0.11	0.007~0.014	-
28	Sridharan & Nagaraj (2000)	remolded	10	37~73.5	9.5~26.7	-	-	75	0.2~0.43	-	1.8e-06~1.09e-04

29	Leonaeds & Ramiah (1960)	remolded	1	59	31	-	1.51	76.93	0.242	0.067	2.67E-04
30	Burland (1990)	UK/Asford Common	2	35,70	14,43	23.89	0.662	-	0.23,0.13	-	-
		remolded									
31	Gens (1982)	UK/Cromer	1	25	12	-	-	-	0.15	-	-
32	Newland & Allely (1955)	remolded	2	136,108	75,71	-	-	-	0.8,0.62	-	-
33	Samuels (1975)	UK/Ely-Ouse	11	64~86	38~54	20.8~29.4	-	350~1100	0.13	0.021~0.133	1e-04~1.6e-03
34	Horseman et al. (1987)	Belgium/Mol	4	65~67	47	22.3~24.2	0.61~0.65	2000	0.41~0.53	0.063~0.11	2.47e-04~4.61e-04
35	Lo (1962)	Mexio	1	426	286	-	-	-	5.45	2.083	-
36	Whitman (1960)	USA/Vicksburg	1	70	40	-	-	-	0.265	0.055	-
37	Olson & Hardin (1963)	USA/Fithian	2	79	44	66	-	-	0.26,0.65	0.2,0.23	-
		remolded									
38	Lambe (1963)	Venezue/Amuay	2	71	42	-	-	-	0.488,0.4	-	-
		remolded									
39	Ladanyi et al. (1965)	remolded	1	33.5	11.6	29	-	-	0.138	0.037	-
40	Ladd (1964)	unknown	1	-	-	-	-	-	0.207	0.083	-
41	Wu et al. (1978)	USA/Toledo	15	30,41.5	16,23	-	0.6349	225.38	0.76	0.1373	4e-04~2.3e-02
42	Mitachi & Kitago (1976)	remolded	21	51~72	21,32	31.7~50.4	-	159.5~1034.4	0.23~0.43	0.036~0.058	-
43	Yudhbir & Varadarajan (1974)	India/Kanpur	2	38,91	18,49	-	-	-	0.28,0.61	0.06,0.34	-
		India/Rann of Kutch									
44	Wu (1962)	USA/Sault Ste. Marie	2	55	32	45,39	-	171.675	0.53,0.39	0.089,0.055	-
		remolded									

45	Broms & Ratnam (1963)	remolded	1	48	15.2	-	-	637.282	0.189	0.045	-
46	Saxena & Ladd (1978)	USA/Hackensack	48	18~51	-	-	0.79~2.06	84.34~147.1	0.12~0.8	0.019~0.178	-
47	Crawford (1964)	Canada/Winnipeg	3	94	60	54.9~57.8	1.53~1.61	-	1,1.1	0.24	-
48	Peck & Reed (1954)	USA/Chicago	21	23~57	-	11.1~45.5	0.31~1.51	-	0.034~0.79	0.011~0.062	-
49	Mitchell (1956)	USA/Charlestown	14	28.1~41.6	13.5~31.4	19.1~35.6	0.65~1.68	-	0.15~0.67	-	-
		USA/Fore River									
		USA/Chicago									
		USA/Dow Field									
		USA/Cincinnati									
		USA/New Orleans									
		USA/Texas									
		USA/Bayou Cocodrie									
		Canada/Goose Bay									
		Canada/Beauharnois									
Mexio/Mexico City											
50	陳斗生 (2001)	Taiwan/Taipei	4	38~43	15~20	28~39	0.8~1.2	-	0.25~0.4	0.02~0.04	-
51	Bozozuk & Leonards (1972)	Canada/Gloucester	19	38.8~63.1	17.9~33.3	51.7~89.5	1.3~2.72	37.3~121.4	0.63~4.23	0.059~0.074	-
52	Ng & Lo (1985)	Canada/Thunder Bay	2	35,70	17.5,47.5	-	2.79,2.805	94,119	0.79,0.24	-	-
53	Burland et al. (1996)	Italy/Pietrafitta	4	27.5~87	2.8~52.5	-	0.6~1.13	230~610	0.22~0.81	0.0019~0.13	-
		Italy/Todi									
		Italy/Vallericca									

		Greece/Corinth Canal									
54	Futai (2004)	Brazil/Ouro Preto	2	57,42	29,22	-	-	75400	0.44,0.3	-	-
55	Skempton & Henkel (1953)	UK/Shell Haven	10	54~115	31~85	46~91	-	-	0.5~0.91	-	4e-05~1.2e-04
		UK/Tilbury									
56	Hvorslev (1960)	remolded	1	47	25	-	0.84	-	0.5	0.084	1.45E-04
57	Olson (1962)	remolded	6	85	48	61~196	-	-	0.48~0.79	0.142~0.213	-
58	France & Sangrey (1977)	remolded	1	57	31	39.5	-	-	0.431	-	-
59	Sangrey et al. (1969)	USA/Newfield	1	28	10	24	-	-	0.12	-	-
60	Skempton (1961)	UK/Bradwell-on-Sea	1	95	65	31.1	-	115.92	0.714	0.152	-
61	Brown et al. (1975)	remolded	1	32	14	-	-	150	0.272	0.058	-
62	deGraft-Johnson et al. (1969)	Ghana	1	47.64	17.27	-	-	214.5	0.182	0.058	3.17E-05
63	Taylor & Bacchus (1969)	remolded	1	62	26	115	-	-	0.304	0.053	-
64	Raymond (1972)	Turkey/Kars	11	37~52.5	10.9~27.2	33~72	-	-	0.16~1.47	0.008~0.45	8.7e-04~4.2e-03
65	Nagaraj & Srinivasa Murthy (1986)	remolded	3	45.3~159.3	-	-	-	-	0.27~1.07	-	-
66	Newland & Allely (1957)	remolded	2	136	75	151.5,132.6	-	-	0.81,0.7	-	-
67	Nitindra (1968)	remolded	22	62.5,67.5	36,41	23~89.6	0.61~0.75	211.2~374.7	0.1~0.43	0.032~0.188	8.7e-05~1.3e-04
68	Rutledge (1939)	remolded	11	21.6~186.6	5.6~91	10.3~422	0.286~4.72	52.22	0.05~3.68	0.006~0.264	4.83E-04
		USA/New Hampshire									
		USA/Providence R.I.									
		USA/Boston									
		USA/Chicago	8								



		USA/Detroit									
		USA/Texas									
		USA/Eastport									
		USA/Philadelphia									
		USA/Flushing Meadows									
		Egypt/Cairo									
		Canada/St. John									
		Austria/Vienna									
		Panama/Panama									
		Denmark									
		Thailand/Bangkok Siam									
		Netherlands/Rotterdam Holland									
69	Soderman & Kim (1970)	England/Tilbury	2	34.5,33.5	13.7,14.7	22.9,26.4	0.65,0.73	34.88,124.64	0.2,0.27	0.029,0.023	4.2e-03,8.5e-04
70	Amerasinghe & Parry (1975)	remolded	1	72	61	-	-	57.98	0.601	0.202	-
71	Kaufman & Sherman (1964)	USA/Prot Allen	5	31~81	6~56	29.8~50.6	-	171.6~364.7	0.16~3.31	0.01~0.065	-
72	Quigley & Ogunbadejo (1972)	Canada/New Liskeard	4	69,73	45,47	52.5~66	0.85~1.63	143.64	0.16~0.69	0.052~0.103	2.70E-03
73	Samson & Garneau (1973)	Canada/Berthierville	17	28.1~71.2	11.4~37	31.7~66.7	0.93~1.87	-	0.19~1.71	0.02~0.1	2.6e-04~2.2e-02
74	Insley (1972)	Canada/Victoria	8	30.6~51.1	16.7~2.	41.9~63.6	-	62.5~135.1	0.32~0.67	-	-
75	Devata & Darch (1973)	Canada/Ottawa	17	48.4~71.6	24.1~43.8	70.6~90.3	1.6~2.8	81~164.5	1.2~2.4	0.04~0.06	3.5e-05~2.3e-04

76	Bartlett & Lee (2004)	USA/Salt Lake City	19 9	19~76	6~53	-	0.56~2. 16	24~465	0.086~1. 12	-	-
77	Hong (2007)	remolded	8	50.9~12 1.1	23.3~80. 6	51.1~16 7.1	-	-	0.27~0.6 7	-	-
78	Hong et al. (2010)	remolded	29	61~91	31~53	43~180	-	-	0.35~0.7 7	-	-
79	Vinod & Bindu (2010)	remolded	18	70.8~27	34.8~23	64.7~18	-	-	0.52~1.4	0.073~0.	-
	Bindu & Vinod (2011)			6.3	5.5	4.3	-	-	8	197	-
80	Tsuchida (1991)	Japan/Osaka	24	29.1~12	-	-	-	-	0.25~1.2	-	-
		Japan/Tokyo	4	2.4	-	-	-	-	3	-	-
81	Widodo & Ibrahim (2012)	Indonesia/Pontianak	18	24.9~62 .5	9.4~29.7	34.9~91	0.9~7.1 14	-	0.35~1.6 6	-	-
82	Anderson et al. (1994)	USA/Salt Lake City	25	22~56.2	3~33	24.5~55. 4	0.79~1. 64	-	0.03~0.4 3	0.003~0. 05	1.2e- 04~4.7e-04
83	Cerato & Lutenegger (2004)	remolded	13	42~202	22~94	42~353. 5	-	-	0.19~1.6 8	-	-
84	Henkel (1956)	remolded	2	43,78	25,52	-	-	-	0.21,0.3 7	0.067,0. 143	-
85	Wimberly et al. (1994)	USA/Pennsylvania	6	27.9~38	8.1~16.1	16.6~28. 8	0.48~0. 66	38.3~249	0.18~0.2 9	0.03~0.0 7	-
86	Tanaka & Locat (1999)	Japan/Osaka	17	79.1~12 7.3	47.1~69. 7	39.1~83	1.16~2. 34	-	1~2.84	-	-
87	Watabe et al. (2002)	Japan/Osaka	8	71.4~98 .3	42.3~61. 3	42.8~87. 4	1.27~2. 02	-	0.7~1.54	-	-
88	Kogure & Ohira (1977)	remolded	26	-	-	-	0.71~2. 81	-	0.23~1.6 6	-	-
89	Lee et al. (2014)	Korea/Busan	12	-	-	23.8~76.	-	-	0.15~1.2	-	-
		Korea/Inchon	0	-	-	1	-	-	8	-	-

90	Tanaka (2005)	Japan/Osaka	16	69.7~12 4.2	45.3~80. 2	44.4~90. 9	1.33~2. 37	-	0.4~1.38		
		Japan/Amagasaki									
		Japan/Yamashita									
		Japan/Rakusai									
		Canada/Louiseville									
		Italy/Pisa									
91	Tanaka et al. (2001)	Japan/Ariake	38	32.3~17 8.8	26.2~11 4.6	30.4~19 8.8	-	10.27~252 .45	0.36~1.2 6	-	1.2e- 04~3.5e-04
		Singapore/Singapore									
		Thailand/Bangkok									
92	Zhou et al. (2013)	remolded	1	43.7	21.5	50.7	1.31	-	0.19	-	-
93	Wang et al. (2016)	China/Wenzhou	18	38~52.9	17.1~33. 7	69.3~94. 4	1.12~1. 49	-	-	-	8.2e- 04~1.3e-03
94	Yeo et al. (2005)	remolded	1	32.3	17.8	-	-	-	0.27	-	-
95	Cao et al. (2001)	Singapore	46	64.1~10 4.2	39.6~70. 3	54.7~80. 36	-	-	0.049~0. 249	-	-
96	Fox, P. J. (2007)	remolded	1	66	46	-	-	-	0.1366	0.1288	-
97	Rosine & Sabbagh (2015)	remolded	3	63	30.6	55~80	-	110.174	0.132~0. 415	-	0.0017
98	Indraratna et al. (2011)	Australia/Port of Brisbane	7	56.3~87 .5	33.9~62. 7	51.3~71	-	-	0.55~1.0 7	-	3e-04~1.3e- 03
99	Ahmed et al. (2005)	USA/Lakeland	8	-	-	-	2.09~7. 67	-	0.82~4.0 1	0.007~1	-
100	Yeo et al. (2005)	USA/Fort Collins	5	-	-	-	-	59.04~60. 54	0.06~0.2 7	0.005~0. 023	5.6e- 04~4.2e-03
101	Kumar & Yong (2002)	USA/Carbondale	8	42.5~49 .3	24.7~30. 7	18~20	-	-	0.12~0.1 6	0.012~0. 034	-
	Chai et al. (2005)	China/Tianjin	7	-	-	-	-	-	-	-	-



10 2		China/Yaoqiang airport					0.65~1. 35		0.08~0.2 8		
10 3	Chung et al. (2005)	Korea/Busan	56	30.9~74 .3	10.7~40	23.2~77. 3	0.56~2. 13	-	0.15~1.0 4		
10 4	Niemunis & Krieg (1995)	remolded	1	220	114	184	3.77	-	1.75	0.184	
10 5	Indraratna et al. (2005)	Australia/Moruya	1	42	25	45	-	-	0.29	-	-
10 6	Indraratna et al. (2012)	Australia/Ballina Bypass	16	81.6~10 1.3	45.7~68. 6	71.7~12 7.8	2.28~4. 88	-	0.78~1.6 8	0.144~0. 474	-
10 7	Khera & Schulz (1984)	remolded	1	54	-	54	0.61	-	0.23	0.054	-
10 8	Lee & Fox (2009)	remolded	1	47.6	25.8	-	2.524	-	0.65	0.025	-
10 9	Koumoto & Park (1998)	remolded	23	32.1~14 0.2	8~89.2	29.3~17 2.2	0.83~3. 99	-	0.13~1.0 1	-	-
11 0	Park & Koumoto (2004)	remolded	22	50.4~36 1.9	32.8~31 7.5	31.5~22 5.5	0.9~6.1 6	-	0.23~3.0 2	-	-
11 1	Walker & Indraratna (2006)	remolded	1	70	40	-	-	-	0.34	0.14	-
11 2	Wang et al. (2016)	remolded	1	28	6	-	-	-	0.09	0.009	-
11 3	Abu-Hejleh et al. (1996)	USA/Florida	4	114~31 8	81~244	-	-	-	1.99~3.5 6	-	-
11 4	Anderson et al. (1987)	remolded	3	40~72	17~36	-	-	-	0.23~0.6	0.058~0. 115	-
11 5	Casey et al. (2016)	USA/Central Maine	3	33~74	14~48	-	-	-	0.19~0.2 9	-	-
Ursa Basin, Gulf of Mexico											
UK/West Hendon											

116	Chung et al. (2002)	Korea/Shinho Korea/Jangyu	29	43~70.8	19~45.3	40.9~89.1	-	-	0.3~1.75	-	-
117	Chung et al. (2012)	Korea/Nakdong River delta	70	-	-	-	0.88~2.46	-	0.23~1.68	-	-
118	DeJong et al. (2018)	remolded	6	19~30	4~15	-	-	-	0.08~0.27	0.003~0.019	-
119	Finno & Chung (1992)	USA/Chicago	47	-	-	18.4~52.6	-	-	0.1~0.59	-	-
120	Fujiyasu et al. (2000)	Australia/Yoganup	1	96	61	-	-	-	0.405	-	-
121	Haque et al. (2017)	USA/Louisiana	38	33.7~103.9	15.8~77.7	24.6~82.7	-	29.7~43.6	-	-	3.3e-04~5e-04
122	Hong et al. (2006)	Japan/Oita Japan/Ariake remolded	4	-	-	126.2~141.3	3.01~3.35	-	0.5~3.23	-	-
123	Atkinson et al. (1987)	remolded	1	65	30	150	-	60	0.438	-	-
124	Bergado et al. (1991)	remolded	1	-	-	-	-	1.71	0.8	0.13	-
125	Abdulhadi (2009)	remolded	28	-	-	29.6~45.2	0.85~1.27	10.1~10.15	0.29~3.22	0.024~0.041	-
126	Ng et al. (2013)	USA/Iowa	13	21.4~47.5	7.6~24	-	-	-	-	-	5.5e-04~2.5e-03
127	Penumadu & Chameau (1997)	USA/ Akron	3	56	28	-	-	300	0.35~0.38	0.055~0.064	1.4e-10~3e-10
128	Jung et al. (2007)	USA/Chicago	2	36.3,35.9	18.4,17.7	29.2,28.5	0.82,0.79	-	0.32,0.25	0.05,0.04	-

12 9	Koutsoftas et al. (1987)	Hong Kong/Chek Lap Kok	10 5	26.4~10 6.9	-	-	-	-	-	-	2.5e- 04~4.7e-03
13 0	Mortezaie & Vucetic (2016)	remolded	1	93	55	-	-	-	0.553	0.0946	-
13 1	Najjar et al. (2010)	remolded	1	55.7	22.4	-	-	-	0.41	0.16	-
13 2	Nakase et al. (1984)	remolded	1	53.5	26.9	-	-	29.86	-	-	-
13 3	Prakasha & Chandrasekaran (2005)	remolded	4	47~88	30~57	-	-	-	0.48~0.8 7	0.03~0.0 87	-
13 4	Briaud et al. (2007)	USA/Huston	32	-	-	-	-	101.27~60 1.27	0.06~0.4 8	0.027~0. 085	1.6e- 02~8.5e-02
13 5	Chai et al. (2001)	China/Shaoxing	8	30.3~41 .1	10.8~16. 7	-	-	-	0.08~0.6 5	-	-
13 6	Sheahan & Watters (1997)	remolded	13	-	-	44.1~47. 9	1.23~1. 34	-	0.34~0.4	-	-
13 7	Crawford & Campanella (1991)	Canada/Surrey	14	36	11	48	1.03~1. 88	30~129.27	0.16~0.5 5	0.027	3e-04~2.8e- 03
13 8	Aboshi (1995)	Japan/Shin-Ube	7	90.8~97 .2	49.5~64. 2	74.3~83. 5	1.95~2. 13	195.71~52 4.1	0.37~0.7 5	0.057~0. 094	3.4e- 04~2.2e-03
13 9	Diaz-Rodriguez (1992)	Mexico/Mexico city	2	550	493	448,452	11.87,1 1.98	-	6.9,7.3	-	-
14 0	Hunt et al. (2002)	USA/San Francisco	6	76~98	44~59	57.5~89. 5	1.53~2. 46	400.33~70 1.7	0.53~0.9 2	0.058~0. 095	5.1e- 04~1.3e-03
14 1	Deutsch et al. (1989)	USA/Delaware	1	33	10	20.7	-	-	0.2	0.01	-
14 2	Indraratna et al. (2009)	remolded	1	55	27	-	-	-	0.42	0.06	-

14 3	Indraratna et al. (1994)	Malaysia/Peninsular Malaysia	16	56.1~10 8.1	21.9~55. 3	-	-	-	-	-	5.5e-04~3e- 03
14 4	Indraratna et al. (2010)	Australia/Sandgate	6	57.8~89	37.9	54.6	51.1~83 .9	-	0.12~1.1 1	0.015~0. 176	7.3e- 05~2.7e-04
14 5	Kempfert & Soumaya (2004)	Germany	89	-	-	22.6~45. 6	-	-	0.07~0.3 9	0.008~0. 084	-
14 6	Singh et al. (2008)	India/Chandigarh	3	32.7,85. 1	12.9,50. 3	-	-	-	0.17,0.5	-	2.4e-04,5.6e- 04
14 7	Santagata & Germaine (2002)	remolded	1	44.09	22.43	39.93	-	-	0.362	-	-
14 8	Santagata et al. (2005)	remolded	1	46.1	22.6	-	-	-	0.319	0.04	-
14 9	Sivakugan et al. (1993)	remolded	2	63,37	27,14	-	-	-	0.35,0.2 2	0.054,0. 022	-
15 0	Stamatopoulos & Kotzias (1983)	Greece/Thessaloniki	2	70,55	40,30	52,51	-	-	0.46,0.6 3	0.077	-
15 1	Wesley (1990)	Indonesia/Java	2	175,104	49,43	157.4,46 .4	-	-	2.39,0.3 1	0.044,0. 038	-
15 2	Yong et al. (2009)	unknown	1	314.5	31.5	337	9.89	-	2.644	-	-
15 3	Sridharan & Nagaraj (2004)	remolded	10	37~73.5	9.5~37.9	-	-	-	-	-	1.3e- 04~9.7e-02
15 4	Azzouz (1974)	Greece USA	66 4	19~98	5~62	6~128	0.28~2. 12	9.81~657. 05	0.008~0. 98	-	1e-04~8e-03
15 5	Georgiannou et al. (2018)	remolded Greece/Lamia	7	57	25	30~80.4	-	-	0.24~0.3 9	0.04~0.1	-
15 6	Kavvas et al. (2003)	Greece/Corinth	4	30.5~34	5.5~11.5	-	0.62~0. 95	1400~161 1.54	0.15~0.2 3	0.005~0. 018	8.9e- 04~9.9e-04

157	Almeida et al. (2015)	Brazil/Rio de Janeiro	3	-	-	-	-	-	-	0.024~0.091	2.1e-04~3.1e-04
158	Briaud et al. (2015)	USA/San Jacinto Monument	32	-	30.3~69.9	15.4~31.4	-	-	0.09~0.55	0.036~0.208	4.2e-05~7.4e-02
159	Cho & Finno (2010)	USA/Chicago	3	30.7~31.8	15.3~15.4	25~25.2	2.72	-	0.19~0.21	0.023~0.03	-
160	Chow & Airey (2014)	remolded	1	44	17	-	-	-	0.205	0.073	-
161	Horpibulsuk et al. (2001)	Japan/Saga	1	120	63	-	-	18	1.018	-	-
162	Pandian et al. (1993)	India/Parur	1	-	-	-	-	-	0.736	0.116	-
163	Jones (2010)	remolded	13	-	-	42.9~48.1	1.16~1.3	-	1~1.26	0.118~0.166	-
164	Kim & Finno (2012)	USA/Chicago	2	34.3,34.9	15.8,16.7	26,24.4	-	143,204	0.21,0.18	0.034,0.033	-
165	Lanzo et al. (1997)	remolded	2	52,66	22,34	48,58.4	-	-	0.24,0.28	0.003,0.042	-
166	Liu et al. (2011)	China/Lianyungang	136	30.3~75.3	-	-	-	-	0.2~1.03	-	-
167	Silvestri (1984)	Canada/Rigaud	1	60	35	75	-	-	0.672	-	-
168	Simpson & Evans (2016)	remolded	9	49	25	-	-	-	0.05~0.32	0.006~0.085	2.5e-03~1e-01
169	Newson et al. (2006)	UK	1	54	14	57	-	-	0.41	0.015	-
170	Mathew & Rao (1997)	India/Madras	6	45~65	21~49	-	0.88~1.63	-	0.28~0.61	-	-

17 1	Fredlund (1967)	Canada/Regina	1	75.5	50.6	-	-	24.53	0.651	-	8.70E-05
17 2	Nagaraj & Murthy (1986)	remolded	2	45.3,97.3	-	-	-	-	0.042,0.12	-	-
17 3	Lambe (1964)	remolded	1	49.1	-	-	1.92	49.05	0.666	0.142	-
17 4	Fujiyasu & Fahey (2000)	remolded	1	33	16	-	-	-	0.31	-	-
17 5	Gräbe & Clayton (2009)	remolded	4	25~37	11~21	-	-	-	0.08~0.15	0.005~0.014	-
17 6	Hyde et al. (1993)	Japan/Ariake	1	123	69	-	-	-	0.7	0.163	-
17 7	Li et al. (2018)	remolded	1	79.8	44.7	-	-	100	0.56	0.12	1.30E-03
17 8	Lo et al. (1990)	Singapore/Bishan	2	155	63	-	-	-	1.54	-	-
17 9	Low & Randolph (2010)	Australia/Swan River	1	81	43	-	-	-	0.77	-	0.00019
18 0	Yapage et al. (2014)	Australia	9	59~85.3	29.5~41.1	72.6~169.5	-	-	0.51~2.4	0.007~0.127	-
18 1	Afacan et al. (2014)	remolded	1	86	43	-	-	-	0.43	0.04	-
18 2	Verdugo (2008)	USA/Santa Barbara	2	107.1,160.9	70.4,102.7	-	2.75,3.73	-	1.23,1.53	0.05	-
		Chile/Chillán									
18 3	Venda Oliveira & Lemos (2014)	USA/Santa Clara	1	42.5	22.5	-	-	-	0.104	0.015	-
18 4	Tong & Yin (2013)	remolded	2	64.2,59.3	34,28.8	177,71	-	-	0.27,0.2	0.025,0.022	-

185	Tavenas et al. (1974)	Canada/Champlain	2	-	-	-	1.92,1.71	-	1.55,1.64	0.034,0.025	-
186	Shen et al. (2005)	China/ Shaoxing	16	28~43.2	6.9~17.8	19.9~48.3	-	-	0.08~0.66	-	-
187	Sahdi et al. (2017)	remolded	1	58	30	-	-	-	0.647	0.138	-
188	Shibata & Sekiguchi (1984)	Japan/Kurashiki	6	30.6~74.9	13.1~53.5	27.6~77.4	-	13.65~54.68	0.04~0.1	-	5.4-03~2.2e-02
189	Giao & Hien (2007)	Vietnam	115	-	-	-	-	-	0.07~0.33	0.006~0.106	-
190	Coutinho & Oliverira (1997)	Brazil/Recife	13	-	-	-	1.11~2.48	-	0.58~2.2	0.081~0.252	-
191	Prashant & Penumadu (2004)	remolded	1	65	35	-	-	-	0.28	0.05	-
192	Poulos et al. (1985)	Canada/Québec	1	-	-	-	-	100	0.47	-	8.50E-03
193	Tiwari & Ajmera (2012)	remolded	36	-	5.04~43.2.03	-	-	-	0.04~5.56	-	-
194	Hirata et al. (2010)	Japan/Fukui-ken	10	-	-	-	1.5~5.85	-	0.33~4.55	0.075~0.425	-
195	Sridharan & PrakashP (1997)	remolded unknown	10	47~495	25~446	-	-	-	-	-	1.8e-05~2.1e-03
196	Cooling & Skempton (1941)	remolded	1	78	53	76	1.19	-	0.479	-	-
197	Vinod & Sridharan (2015)	remolded	5	56.2~59.5	21~29.8	-	-	10~120	-	-	2e-04~7e-04
198	Shi et al. (2015)	remolded	1	63.2	31.7	96.7	-	-	0.491	-	-

199	Walker & Indraratna (2009)	remolded	1	70	40	40	-	-	0.34	0.12	-
200	Tran-Nguyen et al. (2010)	remolded	1	49	24	-	-	-	-	-	6.00E-04
201	Lee et al. (1993)	Singapore	3	-	-	-	-	0.36~0.42	0.74~1.33	-	1.5e-04~3.2e-04
202	Look & Williams (1994)	Australia/Queensland	82	-	-	-	-	-	0.06~1.72	0.009~0.26	-
203	Kog (2016)	remolded	1	79.8	44.7	-	-	-	0.533	0.145	-
204	Kianfer et al. (2013)	remolded	1	55	28	-	-	-	0.392	0.069	-
205	Zhou & Chai (2017)	remolded	2	118,61	67,37	-	3.45,1.93	-	0.74,0.33	0.082,0.03	-
206	Chai et al. (2009)	remolded	1	116.6	59.1	-	3.63	-	0.88	-	-
207	Li et al. (2019)	China	4	31.9~52.6	10.9~19.5	20.3~47.8	0.77~1.6	-	0.17~0.34	-	-
208	Day et al. (1998)	USA/Carolina	1	38	14	-	-	-	0.191	0.012	-
209	Seo et al. (2009)	remolded	5	18~37	8~19	11~25	0.4~0.73	-	0.08~0.19	0.01~0.03	2.5e-03~3.4e-02
210	Zeevarert (1991)	Mexico/Texcoco Mexico/Mexico city	2	-	-	-	-	-	1.1,0.811	0.09,0.102	-
211	Goh & Tay (1993)	Singapore	1	86.3	56	80.3	-	-	0.53	-	-
212	Okamura et al. (1997)	remolded	1	40	19.8	-	-	200	0.239	0.08	1.30E-03

21 3	White et al. (2007)	USA/Neola	1	-	-	36	-	-	0.1	-	-
21 4	Indraratna & Redana (1998)	remolded	1	73	40	40	-	-	0.264	0.0571	-
21 5	Hamed et al. (1991)	remolded	1	64	30	-	-	-	0.25	0.035	-
21 6	Kang & Bate (2016)	remolded	1	-	-	-	1.19	-	0.37	0.12	-
21 7	Nasr & Gangopadhyay (1988)	remolded	1	60.7	25	-	-	-	0.5	0.07	-
21 8	Quigley & Thompson (1966)	Canada/Ottawa remolded	2	56	27	78	-	-	0.603,0.391	-	-
21 9	Burton et al. (2014)	remolded	1	69	43	-	-	-	0.463	0.143	-
22 0	Shibuya (2000)	Japan/Ariake	4	71.4~85	37~48.9	-	-	-	0.34~1	0.037~0.256	-
		Thailand/Bangkok									
		USA/Louisville									
		unknown									
22 1	Fei et al. (2017)	unknown	5	-	-	-	0.75~2.18	-	0.15~0.68	0.021~0.046	-
22 2	Castro & Sagasetta (2012)	Spain/Valencia	7	21.8~35.4	5.1~18.2	18~22	0.52~0.62	-	0.065~0.13	0.006~0.02	-
22 3	Araujo et al. (2009)	Brazil/Brasilia	10	36.6~46.2	8.3~17.9	17.9~31	0.89~1.6	-	0.08~0.58	-	-
22 4	Alsherif & McCartney (2015)	remolded	1	-	-	-	-	-	0.26	0.01	-
22 5	Huang et al. (2014)	China/Shanghai	5	-	-	32.2~49.4	0.93~1.39	-	0.32~0.99	-	-

22 6	Mohamedzein & Al-Shibani (2011)	Egypt/Gezira	1	54	25	47	1.674	-	0.541	-	-
22 7	Chai et al. (2011)	Japan/Saga	5	-	-	-	1.75~3.25	-	1.15~2.36	-	-
22 8	Atkinson (2007)	remolded	7	-	23~32	-	-	-	0.34~0.53	0.06~0.168	-
22 9	Aldrich & Pickering (1959)	USA/Boston	3	-	-	34.3~41.8	-	-	0.36~0.47	-	-
23 0	Caicedo et al. (2018)	Colombia/Medellín	5	35.2~71.2	11.3~27.2	30.1~48	-	-	0.27~0.56	0.004~0.04	-
23 1	Pennington et al. (1997)	remolded	1	-	-	-	-	-	0.276	0.0908	-
23 2	Brandes & Nakayama (2010)	USA/Manoa	4	62~210	16~94	37~175	-	-	0.22~0.75	-	1.1e-06~9.9e-05
		USA/Kapolei									
		USA/Hilo									
		USA/Kapolei									
23 3	Sultan et al. (2012)	unknown	1	184	135	183	-	-	2.459	0.191	-
23 4	Witteveen et al. (2013)	remolded	1	54	24	-	-	-	0.126	0.021	-
23 5	Izumi et al. (1997)	Japan	1	60.1	33.2	30.7	-	-	0.372	0.0288	-
23 6	Mata & Ledesma (2003)	remolded	1	-	-	12	0.57	-	0.208	0.034	4.60E-05
23 7	Gasparre et al. (2007)	UK/London	6	63~72	37~45	23~26	1.65~1.74	-	0.33~0.45	0.12~0.16	-
23 8	Chandler et al. (1998)	USA/Prospect Park	2	67,71	42,47	23,27.9	-	-	0.15,0.12	0.09,0.07	-

23 9	Zeevaert (1957)	Mexico/Mexico city	5	-	-	107.9~1 97.5	-	-	2.05~3.2 3	0.19~0.7 2	-
24 0	Zhang et al. (2014)	China/Zhanjiang remolded	2	64.3,51 7	32,20.8	50,48	1.43,1.3 7	-	1.2,0.56	-	-
24 1	Nishimura (2014)	Japan/Kansai international airport	6	54~84	26~52	35~78	-	-	0.57~0.8 1	-	-
	Japan/Izumi										
	Japan/Urayasu										
		Japan/Moriyama									
24 2	Amorosi & Rampello (2007)	Italy/Vallericca	4	53.9,59. 2	29.2,31. 6	25.7~27. 9	0.72~0. 78	-	0.37~0.4 4	0.06~0.0 8	-
24 3	Bedin et al. (2012)	remolded	6	-	-	-	0.9~2	-	0.06~0.5 2	-	-
24 4	Ng et al. (2016)	remolded	1	36	17	10.9	-	-	0.383	0.016	-
24 5	Hansen (1950)	Norway/Rustadbrygga	5	29.1~34	14.2~17. 1	32.2~39. 9	-	-	0.16~0.3 1	-	-
24 6	Fonseca et al. (2006)	Portugal/Porto	1	-	-	22.1	-	-	0.274	0.028	-
24 7	Muirwood (1955)	UK	1	82	49.1	27.3	-	-	0.145	0.05	-
24 8	Smith & Redlinger (1953)	USA/North Dakota	1	89	24	-	-	-	0.322	0.019	-
24 9	Baroni & Almeida (2017)	Brazil/Jacarepaguá Lowlands	48	-	-	-	1.4~12. 43	-	0.35~6.7 2	0.064~2. 16	-
25 0	Mesri et al. (1975)	Mexico/Mexico city	1	500	350	559.5	-	-	4.135	0.292	-

25 1	Ola (1982)	Nigeria/Sokoto	1	173.3	163.6	-	-	269.94	0.23	0.135	1.10E-04
25 2	Chai et al. (2010)	Japan/Fukuoka	13	47.6~67 .6	-	53.8~97. 9	1.52~1. 99	24.66~76. 71	0.39~0.6 8	-	-
25 3	Khan et al. (2006)	remolded	1	77.5	47.2	-	-	-	0.55	0.092	-
25 4	Chai et al. (2017)	Japan/Kyushu	24	45.8~11 4.9	26~70.1	29~139. 1	1.15~3. 74	27.79~576 .99	0.31~2.2	-	5.9e- 04~2.9e-02
25 5	Haiderali & Madabhushi (2016)	English Channel	3	63.3~78	40.9~57	-	-	-	0.17~0.5 8	0.022~0. 115	-
25 6	Wallace (1971)	Papua New Guinea	9	-	-	90~130	-	-	0.74~2.3	0.04~0.1	-
25 7	Ng et al. (2014)	remolded	1	61	34	-	-	-	0.58	0.12	-
25 8	Mao & Fahey (1999)	Western Australia	2	-	-	-	-	-	0.39,0.5 1	0.037,0. 037	-
25 9	Bjerrum et al. (1967)	Norway/Oslo	1	19	5	31	-	-	0.4	-	5.00E-04
26 0	Cotecchia & Chandler (1997)	Italy/Pappadai	3	65	35	31	-	-	0.43~0.5 5	0.079~0. 098	-
26 1	Kluger et al. (2018)	New Zealand/Tauranga Harbour	1	66	41	71	1.87	267	0.199	0.055	1.00E-02
26 2	Kog (2017)	Singapore	5	55~106	34~71	22~84	0.65~1. 98	-	0.17~0.8 5	-	3.5e- 04~1.3e-03
26 3	Glossop & Farmer (1979)	Northern Ireland/Belfast	1	55	30	35.5	0.96	-	0.12	-	-
26 4	Watson et al. (1984)	Trinidad and Tobago/Point Lisas	12	26.8~53 .8	3.1~28.2	26.7~41. 1	0.69~1. 07	-	0.01~0.3 4	-	-

26 5	Lee et al. (2016)	Korea/Nakdong River Delta	23	51.1~79.1	22.3~46.8	50.8~89	-	-	0.69~2.19	-	-
26 6	O'Kelly et al. (2018)	remolded	3	-	-	74~107	1.84~1.95	-	0.52~0.59	0.12~0.16	-
26 7	Perret et al. (1995)	Canada/Québec	4	-	-	-	-	-	0.14~0.87	0.027~0.09	-
26 8	Robinson et al. (2004)	remolded	2	82,56	42,23	-	-	-	0.6,0.53	0.12,0.07	-
26 9	Bergado et al. (2000)	Thailand/Bangkok	8	52~92	31~61	40~91	1.21~2.58	-	0.36~1.87	0.09~0.199	-
27 0	Jones et al. (2008)	UK/Surtees Bridge	4	-	-	-	0.48~0.99	-	0.11~0.29	0.03~0.06	5.8e-04~3.5e-03
27 1	Vardanega et al. (2012)	remolded	1	62.2	32.6	-	-	-	0.58	0.09	-
27 2	Mohamed Jais (2017)	Malaysia	2	31	7	15.4,38.4	-	-	0.14,0.1	0.014,0.017	-
27 3	Hosseinpour et al. (2015)	Brazil/Rio de Janeiro	3	-	-	-	0.87~3.12	-	0.13~1.27	0.024~0.091	3.1e-04~4.4e-04
27 4	Wong et al. (2017)	remolded	4	52~64	8~16	-	-	-	0.15~0.2	0.035~0.042	-
27 5	Parry & Nadarajah (1974)	remolded	1	72	32	160	-	-	0.844	0.112	-
27 6	Meriggi & Del Fabbro (2010)	Italy	1	60.7	30.8	-	-	50.22	0.353	0.046	5.40E-02
27 7	Arulanandan et al. (1971)	USA/San Francisco	1	93	28	99.5	-	-	0.717	0.231	-
27 8	Hong et al. (2007)	Japan/Fukuoka	7	70~83	35.3~46.7	56.1~97.5	-	-	0.46~0.9	-	-
		Japan/Ariake									
	Cotecchia et al. (2007)	Italy/Montemesola	10		24~41.7	17.1~31		-			-

27 9		Italy/Pappadai		42.5~69 .8			0.55~0. 88		0.21~0.5 6	0.011~0. 132	
28 0	Adachi et al. (1995)	Japan/Osaka	1	-	-	-	-	-	0.822	0.078	-
28 1	Artidteang et al. (2015)	Thailand/Bangkok	7	-	-	44.6~91. 1	1.19~2. 41	-	0.48~1.1 7	0.099~0. 323	-
28 2	Mirzababaei et al. (2018)	Australia/Queensland	1	74	47	-	-	-	0.51	0.07	-
28 3	Yukselen-Aksoy & Kaya (2013)	Turkey remolded	28	24.5~39 5.8	6.2~343. 4	24.9~59. 8	0.47~14 .67	98.07	0.13~4.5 3	-	3.3e- 06~5.8e-03
28 4	Hayashi et al. (2012)	Japan/Toubetsu	11	-	-	42~128	-	-	0.51~1.5 4	-	-
		Japan/Mihara									
		Japan/Tsuruno									
		Japan/Riyamunai									
28 5	Nicholson & Jardine (1981)	UK/Queenborough	12	-	-	-	1.12~2. 45	-	0.26~1.6 1	-	-
28 6	Debats et al. (2013)	Atlantic Ocean	1	-	-	57	1.65	-	0.61	0.072	3.20E-04
28 7	Changizi & Haddad (2017)	Iran/Behbahan	4	47.8~54 .6	8.9~20.4	-	-	-	0.1~0.23	0.012~0. 032	-
		remolded									
28 8	Kavvadas & Amorosi (2000)	Italy/Vallericca	1	55	29	26.4	-	-	0.374	-	-
28 9	Bergado et al. (1998)	Thailand/Bangkok	5	-	-	-	1.2~2.8	-	0.23~1.6 8	0.023~0. 184	-
29 0	Taghavi et al. (2016)	remolded	1	32	17	-	-	-	0.42	0.04	-

29 1	Murthy et al. (1988)	remolded	2	106,75	-	-	-	-	0.69,0.4 3	-	-
29 2	Polidori (2014)	Italy	5	62~152	26~116	-	-	-	0.21~1.9	-	-
		remolded									
29 3	Day (1994)	USA/Oceanside	1	-	-	-	-	-	0.16	0.03	-
29 4	Fakharian & Mehdizadeh (2015)	Iran/Mahshahr	3	34~40	15~18	25~30	-	-	0.2~0.22	0.026~0.03	-
29 5	Khemissa et al. (1997)	France/Vallericca	7	-	-	58.3~71.3	1.49~1.75	55.68~78.2	0.51~0.87	0.059~0.101	-
29 6	Xu et al. (2018)	remolded	2	-	-	-	1.29,1.25	201.62,199.72	0.14,0.15	0.036,0.033	9.6e-04,1.1e-03
29 7	Meegoda & Ratnaweera (1994)	remolded	8	56~78	28~45	-	-	-	0.33~0.58	0.037~0.097	-
29 8	Tan et al. (2003)	Malaysia/Klang	65	-	-	30.5~136.3	-	-	0.23~3.8	-	-
29 9	Chin & Liu (1997)	Taiwan/Taipei	3	-	-	38~42	1.07~1.17	165.13~168.9	0.36~0.4	0.042~0.088	2.3e-03~8.7e-03
30 0	O'Kelly (2006)	Ireland/Carrickmacross	3	20~29	18~52	24~91	1.27~3.93	-	0.3~1.7	-	-
30 1	McCabe (2002)	Northem Ireland/Belfast	7	-	-	-	-	25.45~51.52	0.39~0.66	0.07~0.13	5.4e-05~8.8e-04
30 2	Kelln et al. (2007)	Northem Ireland/Belfast	40	-	-	-	-	-	0.08~1.26	0.011~0.424	-
30 3	Filho et al. (2018)	Brazil/Rio de Janeiro	3	57.8~59.7	26~28.4	115.9~148.4	2.75~3.71	-	1.18~1.57	0.124~0.138	3.1e-04~7e-04
30 4	Chakravarthi & Phanikumar (2006)	India/West Benga	1	49	22	-	0.68	-	0.48	-	7.40E-03

305	Bo et al. (1998)	Singapore/Changi	10	68.5~85.1	-	48~77.3	-	14.29~159.18	0.26~1.71	-	-
306	Schnaid et al. (2013)	Brazil/Rio Grande	13	-	-	-	-	-	0.17~1.1	0.012~0.335	-
307	Mayne et al. (2009)	Atlantic Ocean	1	48	21	-	-	39	0.35	0.05	-
308	Jacob & Hair (2016)	India/Kuttanad	60	68~131	27~62	50~95	-	-	0.38~0.79	-	-
309	Akayuli & Ofosu (2010)	Ghana/Kumasi	62	20.5~67.6	3.2~44.7	12.6~36.3	0.13~1.43	-	0.01~0.28	-	-
310	Ibrahim et al. (2012)	Brunei/Kampung Ujong Bukit	9	-	28.3~32.8	-	-	-	0.26~0.97	-	-
311		Malaysia/Kampung Behor Mempelam									
311	Jain et al. (2015)	India	44	20.5~59.7	5.9~29.4	-	-	-	0.09~0.38	-	-
312	Osman et al. (2015)	Malaysia/Seberang Perai Utara	48	-	-	-	2.38~3.28	-	0.53~1	-	-
313		Malaysia/Seberang Perai Tengah									
313	Cotecchia & Santaloia (2003)	Italy/Senerchia	2	83,57	29,21	-	0.44,0.58	-	0.19,0.12	0.062	-
314	Chung et al. (2006)	Korea/Busan	23	25.9~80.3	10~54.3	44.7~85.1	-	-	0.47~1	-	-
315	Al Haj & Standing (2015)	Sudan/Khartoum	2	60,87	30,54	-	-	258.71,254.5	0.295,0.452	0.099,0.161	1.3e-04,1.41e-05
316	Alonso et al. (2000)	Spain/Llobregat delta	13	20~45.8	5.3~23.7	9.1~31.8	-	-	0.12~0.29	0.011~0.057	3.6e-04~1.13

31 7	Boukpeti & White (2017)	remolded	2	129,110	42,63	-	-	-	1.47,0.2 8	0.46,0.1 2	1.6e- 04~1.9e-04
31 8	Burns et al. (2006)	remolded	8	50.7~10 1.3	-	-	-	-	0.43~0.8 7	0.043~0. 142	-
31 9	Miller et al. (2000)	unknown	3	67~86	22~30	35~41	-	-	0.24~0.2 7	0.06,0.0 7	-
32 0	Thamm (1984)	unknown	3	-	-	-	1.95~8. 09	-	0.2~2.7	-	-
32 1	Ye & Ye (2016)	China/Shanghai	5	33.9~44	13.7~19. 5	-	-	-	0.14~0.3 8	-	-
32 2	Thoang & Giao (2015)	Vietnam/Ho Chi Minh City	3	45.8~47 .3	23.2~24. 4	21.4~30	0.64~1. 11	-	0.1~0.61	0.065~0. 117	6e-04~1e-03
32 3	Munshi (2003)	Bangladesh	34	34~78	7~51	32~165	0.93~2. 13	-	0.19~0.6 5	0.049~0. 091	-
32 4	Wallace (1973)	Papua New Guinea	4	110~16 0	35~85	-	-	-	0.86~1.6 6	0.045~0. 085	-
32 5	Stark et al. (1994)	remolded	6	29~186	6~133	17.3~23. 3	-	-	0.08~0.3 2	0.009~0. 028	-
32 6	Cola et al. (2006)	Italy/Cavallino-Treporti	16	-	-	-	-	-	0.21~0.4 8	0.016~0. 132	2.1e- 03~7.8e-02
32 7	Leong et al. (2000)	Singapore	4	43~89	25~59	-	-	-	0.07~0.6 8	-	-
32 8	Hong et al. (2013)	remolded	2	78.9,61. 1	-	118.5,70 .4	-	-	0.58,0.4	-	-
32 9	Rutledge (1944)	USA/Chicago	7	-	-	33.9~73. 4	-	-	0.19~0.5 5	0.037~0. 077	-
USA/Indiana											
unknown											
33 0	Won & Chang (2007)	Korea/Namak	20	54.4~64 .1	13~44.1	45.6~64. 3	1.09~1. 5	-	0.51~0.9 1	-	-

33 1	Win et al. (1998)	Singapore/Changi	25	39.2~86 .6	24.9~59. 1	24.8~78. 4	-	2.61~181. 37	0.2~1.73	-	-
33 2	Juneja & Chafale (2018)	India/Gujarat	1	48	16	150	-	-	0.302	0.023	-
33 3	Bjerrum (1967)	Norway/Drammen	2	59.1,35. 5	30.9,14. 1	51.5,34. 6	1.42,0.9 5	-	0.34,0.1 2	-	-
33 4	Chu et al. (2006)	China/Shanghai	5	32.8~38 .3	13~13.8	29.8~37. 6	0.84~1. 05	-	0.22~0.4 7	-	-
33 5	Lewis et al. (1975)	England/Oxford	19	46~180	17~124	28~155	-	-	-	-	2.1e- 05~1.6e-02
		UK/Avonmouth									
		UK/Tickton									
		unknown									
33 6	Seymour Jones (1972)	USA/Delaware	4	33~42.3	12.8~19. 1	-	-	-	0.11~0.2 5	0.021~0. 034	-
33 7	Martinez & Henning Stutz (2018)	remolded	1	59.8	25.9	-	-	-	0.31	0.14	7.00E-03
33 8	Tanaka & Tsutsumi (2016)	remolded	2	62,91	26,53	46.2,70. 7	0.83,1.4 7	-	0.47,0.7	-	-
33 9	Seah (1990)	USA/Kendall	8	44.5~45 .9	23~24.1	39.4~41. 2	-	36.24~74. 34	0.4~0.52	0.01~0.0 23	9.3e- 03~1.7e-02
34 0	Azam (2003)	Saudi Arabia/Al-Qatif	1	174.6	110.9	41.8	1.7	-	1.166	-	-
34 1	Cortellazzo (2002)	Italy/Adria	9	44.5~70	15.5~32	-	-	-	0.33~0.5 5	-	-
		Italy/Malcantone									
		Italy/Volta Vaccari									
34 2	Lefebvre & Burnotte (2002)	Canada/Mont St. Hilaire	8	-	-	-	-	-	0.38~0.6 6	0.072~0. 103	-

34 3	Cortellazzo & Simonini (2001)	Italy/Po River delta	12	31.8~60 .1	11.8~30. 1	31.8~45. 8	0.73~1. 21	89.39~240 .77	0.2~0.53	0.019~0. 098	-
34 4	Griffiths & Joshi (1991)	remolded	3	29~65	11~36	-	-	-	0.16~0.4 8	-	-
		unknown									
34 5	Kodikara & Rahman (2002)	remolded	2	74,36	42,21	-	-	-	0.38,0.1 1	0.03,0.0 17	-
34 6	Crawford & DeBoer (1987)	Canada/Surrey	8	27~38	5~13	42~49	-	-	0.25~0.6 7	0.013~0. 047	2e-03~4.4e- 03
34 7	Deng et al. (2011)	Germany/Essen	1	70	57	27.2	0.73	-	0.398	0.122	-
34 8	Cimentada et al. (2011)	remolded	1	73	35	-	-	-	0.53	0.1	2.50E-03
34 9	Chakrabarti & Horvath (1985)	Canada/Dundas remolded	2	74,23	32,7	-	-	-	0.34,0.1 18	0.037,0. 03	-
35 0	Mohamedelhassan & Shang (2002)	remolded	1	31.5	11.6	-	0.874	15	-	-	8.30E-04
35 1	Liu et al. (2018)	USA/Seattle	6	-	17~51	-	-	-	0.26~0.8 4	0.043~0. 087	-
35 2	Umar & Sadrekarimi (2017)	remolded	4	35.1~46	14.8~24	19.4~34. 3	-	-	0.06~0.1 8	0.005~0. 03	-
35 3	Raymond (1966)	remolded	4	33.4~11 8.4	17.1~72. 2	37.7~88. 8	-	-	0.26~0.6 4	-	-
35 4	Blight (1988)	South Africa/Ventersdorp	40	-	-	-	0.51~1. 2	-	0.2~0.53	0.009~0. 09	-
35 5	Lanzo et al. (2009)	Italy/Vasto	1	54.44	-	-	-	-	0.47	0.07	-
35 6	Chehat et al. (2018)	Canada/St-Adelphe	1	-	21	-	-	-	0.686	0.046	-

357	Lo & Becker (1979)	Canada/Ontario	1	-	-	-	1.08	37.01	0.45	0.033	8.80E-04
358	Amarisiri et al. (2014)	remolded	1	62.6	36.7	-	-	-	0.46	0.12	1.20E-03
359	Becker et al. (1987)	Canada/Wallaceburg	3	-	19~22	30.4~45.3	0.83~1.24	-	0.23~0.38	0.091~0.093	-
		Beaufort Sea									
360	Berre (2014)	Norway/Onsøy	4	-	-	45.6~72.9	1.28~2.05	10.1~69.9	0.29~4.19	0.014~0.019	1.8e-04~1.4e-03
361	Brown & Rashid (1975)	Canada/Canso Strait	9	39.6~64.8	14.9~31.6	42.4~68.2	1.18~1.84	2.35~10.9	0.27~0.63	0.041~0.119	4.2e-04~32.e-03
362	Brugger et al. (1998)	Brazil/Sergipe Harbour	6	-	-	-	-	-	0.8~1.05	0.049~0.112	-
363	Brzezinski (1968)	Canada/Lac Quevillon	3	-	-	92~126	2.5~3.4	-	0.91~1.23	0.102~0.14	-
364	Campanella & Vaid (1972)	Canada/Haney	1	-	-	-	-	-	0.417	0.087	-
365	Casagrande et al. (1965)	Canada/Varenes	2	-	-	-	2,1.7	-	0.87,0.57	0.099,0.084	-
366	Chai & Chanmee (2018)	remolded	5	39.9~114	18.6~53.4	-	0.81~2.36	-	0.23~0.8	0.05~0.16	-
367	Crawford & Sutherland (1971)	Canada/Victoria	12	-	-	39.6~50.6	1.05~1.36	-	0.36~0.81	-	-
368	Crawford et al. (1992)	Canada/Vernon	6	48.8~71	21.8~35.8	55.7~75	-	-	0.52~2.06	-	2e-04~3.6e-03
369	Crawford et al. (1994)	Canada/Vancouver	4	-	-	-	1.18~1.88	-	0.39~0.7	-	-
370	Dascal et al. (1973)	Canada/Broadback	6	-	-	63.4~102.5	1.73~2.88	-	0.34~0.69	0.047~0.074	-

37 1	Demars & Charles (1982)	North Atlantic	1	93.5	66.9	-	-	-	0.721	0.109	-
37 2	Eden & Poorooshab (1968)	Canada/Ottawa	1	-	-	-	-	73.55	0.667	0.083	-
37 3	Eigenbrod & Burak (1991)	UK/Fort William	1	48	27	45	-	-	0.637	0.093	-
37 4	Elsamny (1973)	remolded	1	68	31	-	-	-	0.388	0.013	-
37 5	Golder & Osler (1968)	Canada/Sorel	4	-	-	-	1.07~1.57	-	0.42~1.91	0.039~0.079	-
37 6	Hardy (1965)	Canada/Prairie provinces	5	37~105	18~32	-	-	-	0.1~1.34	0.04~0.23	-
		Canada/Agassiz									
		Canada/Alberta									
		Canada/Regina									
37 7	Hinchberger & Rowe (2005)	Canada/Sackville	2	50.1,48.5	19.1,16.9	57,45.4	-	-	0.48,0.3	0.094,0.037	-
37 8	Karunaratne et al. (1989)	Singapore/Changi	11	61.7~96.2	37.3~55.4	42.8~60.7	-	-	0.53~0.82	-	-
37 9	Konrad & Seto (1994)	Canada/Saint-Alban	1	-	-	-	-	-	2.08	0.07	-
38 0	Krizek et al. (1977)	USA/Kane and DuPage Counties	72	-	-	-	0.28~0.75	-	-	0.023~0.158	-
38 1	Lee & Ng (1999)	Hong Kong/New Territories	3	-	-	-	-	150	0.52~0.98	0.035~0.091	3.8e-04~1.2e-03
38 2	Lo & Ho (1991)	unknown	1	42.9	20.3	-	2.384	-	1.556	-	-
38 3	Locat & Leroueil (1988)	Canada/Saguenay Fjord	10	47.9~89.2	23.2~48.1	60~122	1.48~2.98	-	0.38~0.96	-	-

384	Low & Phoon (2008)	Singapore/Pulau Tekong	1	89	45	63	-	-	0.732	-	-
385	Mesri & Feng (2018)	Canada/Batiscan	4	46~122	22~81	63.5~111	-	39~84	0.48~0.76	-	-
		Canada/Berthierville									
		Canada/St. Hilaire									
		Sweden/Vasby									
386	Morissette et al. (2001)	Canada/Ottawa	4	26.5~72.4	12~50.1	32.2~105.8	-	-	0.48~5.08	-	-
387	Powell et al. (2012)	Canada/Saskatchewan	1	145.9	122	29	-	-	0.289	0.09	-
388	Qiu et al. (2007)	China/Port of Guangzhou	2	44.5,39.7	19,15.5	71.5,45.2	1.85,1.27	-	0.55,0.36	-	-
389	Raymond et al. (1971)	Canada/Ottawa	2	71.4,34.	47.1,15.5	80.5,76.4	-	-	0.76,0.28	0.072,0.037	-
390	Rivard & Goodwin (1978)	Canada/Prairie provinces	87	-	-	9.6~39.9	-	-	0.08~0.38	-	-
391	Sauer & Christiansen (1991)	Canada/Delisle	1	35.5	23	15.8	-	246	0.13	0.03	-
392	Sauer & Christiansen (1988)	Canada/Blaine Lake	10	45.8~64	30~45.8	21.4~25.5	-	-	0.19~0.45	0.05~0.12	-
393	Sauer et al. (1993)	Canada/Saskatchewan	20	21.8~57.6	9.7~38.3	9.7~27.4	-	-	0.12~0.37	0.03~0.14	-
394	Yin (1999)	Hong Kong	39	23~60	8.6~49	22~57	-	-	0.09~1.24	0.013~0.068	-
		remolded									
395	Yong et al. (1980)	France/Orleans	1	81	52	69	-	-	0.775	0.053	-
396	Zhu et al. (2001)	Hong Kong/Chek Lap Kok	92	-	-	17.7~47.2	-	-	0.09~0.5	0.009~0.06	-

39 7	Perpich et al. (1965)	USA/Chicago	1	62	39	19	-	-	0.119	0.032	-
39 8	Gasparre & Coop (2008)	UK/Heathrow Airport	10	60~72	33~48	21~32	-	-	0.25~0.3 8	0.061~0. 128	-
39 9	Lefebvre et al. (1991)	France/St. Marcel	3	60~66	35~41	64~87	-	32~75	0.52~0.7 9	0.076~0. 105	-
		France/Varenes									
		Canada/Ottawa									
40 0	Ripley (1995)	Canada/Vancouver	11	32.5~45	11.4~22	32.2~35	-	-	0.23~0.4 6	-	-
40 1	Brzezinski (1969)	Canada/Newfoundland	2	78,64	47,38	43.3,35. 2	1.2,1	1.05,1.35	0.37,0.3 2	0.15,0.0 93	-
40 2	Yanful et al. (1995)	Canada/Québec	1	61	37.6	-	-	-	0.11	-	-
40 3	Baracos (1969)	Canada/Winnipeg	5	78.7~10 2.8	52.7~70	46.2~66. 4	-	-	0.39~1.4	0.198	-
40 4	Chai et al. (2002)	China/Lian-Yun-Gang	11	-	20.6~37. 1	45.1~65. 7	1.01~1. 9	-	0.23~0.6 2	-	-
40 5	Stermac et al. (1967)	Canada/Ontario	5	33~68	14~43	31~60	-	-	0.1~1.29	0.02~0.1 21	-
40 6	Lo & Stermac (1964)	Canada/Metropolitan Toronto	2	-	15,8.9	-	0.83,0.6	-	0.26,0.0 63	0.052,0. 017	-
40 7	Dusseault & Scafe (1979)	remolded	8	24~86	9~58	-	-	1000	-	-	1.4e-05~5e- 04
40 8	Bertok (1987)	Canada/Sea Island	3	-	-	-	0.87~1. 28	-	0.18~0.6 5	0.017~0. 081	-
40 9	Tian et al. (1994)	Gulf of Mexico	11	-	-	-	-	1.4~177.2	0.44~1.3 6	0.05~0.1 8	-
41 0	Moulin (1989)	France/Sea Island	13	33.4~10 5	8.2~67.7	49~100. 3	1.31~2. 47	14.77~74. 92	0.35~1.1 1	-	-

41 1	Baracos et al. (1980)	Canada/university of Manitoba	5	69.6~10 2.1	36.4~61. 3	50.4~61. 3	-	50.63~120 .43	0.63~1.0 7	-	-
41 2	Batenipour et al. (2014)	Canada/Manitoba	8	36.9~57 .7	18.8~32. 6	31.5~39. 1	-	-	0.12~0.3	0.017~0. 06	-
41 3	Callisto & Rampello (2004)	Italy/Pisa	3	60.2~87	33.4~52. 5	28.6~62	-	-	0.33~0.5 3	0.044~0. 081	-
		Italy/Pietrafitta									
		Italy/Vallericca									
41 4	Gajo & Colleselli (2009)	Italy/Mantova	12	26.7~68 .3	8~40.9	20.8~41. 7	-	-	0.12~0.5 3	-	-
41 5	Giao et al. (2008)	Vietnam/U Minh District	19	40.5~73 .2	17.7~35. 1	29.4~79. 2	0.66~2. 21	-	0.16~0.9 4	0.1~0.31	-
41 6	Labossiere et al. (1989)	Canada/Saskatchewan	1	82.3	53.9	57.9	-	54	0.62	0.16	-
41 7	McClung & Mollard (1987)	Canada/Cold Lake	10	28~40	6~21	-	0.63~0. 8	91~419	0.11~0.2 8	-	8e-03~3e-02
41 8	Meriggi et al. (2000)	Italy	5	27~65	10~35	15.6~30. 6	0.48~0. 79	-	0.15~0.3	0.031~0. 086	-
41 9	Meyerhof & Sebastyan (1970)	Canada/Sea Island	3	-	-	31.1~47. 5	0.85,1.1 9	-	0.19~0.7	0.015~0. 08	7.2e- 03~1.3e-03
42 0	Öncü & Bilsel (2017)	Cyprus/Nicosia	1	65	29	-	-	-	0.275	-	-
42 1	Suddepong et al. (2015)	Japan/Ariake	8	60.7~11 0.7	25~55.4	48.2~15 3.6	1.33~4. 09	-	0.68~1.9 2	0.079~0. 189	-
42 2	Yong & Silvestri (1979)	Canada/St-Louis	1	48	20	66	-	-	1.6	-	-
42 3	Rowe et al. (1996)	Canada/Sackville	3	41.6~76	11.8~23. 4	41.7~74. 4	-	-	0.26~0.5 5	0.049~0. 126	-
42 4	Ali (1993)	USA/Boston	14	31~38	14~18	-	0.67~0. 83	141.65~15 5	0.19~0.2 7	0.024~0. 05	2.2e- 03~7.7e-03


42 5	Wimberly et al. (1994)	USA/Pennsylvania	6	27.9~38	8.1~22.4	16.6~28. 8	0.48~0. 66	-	0.18~0.2 9	0.03~0.0 7	-
42 6	Bazett & McCammon (1986)	Canada/Annacis Island	3	-	-	-	0.79~1	-	0.22~0.3 5	0.03~0.0 48	-
42 7	Duncan & Seed (1966)	remolded	1	45	10	-	-	-	0.33	0.06	0.01

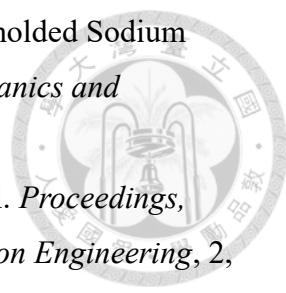
附錄 I 資料庫參考文獻




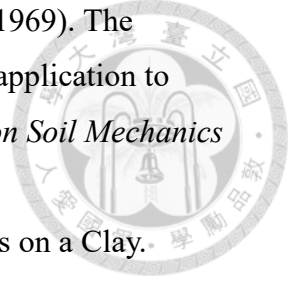
- [1] Wesley, L. D. (1988). Compression Index: A Misleading Parameter? *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(6), 718-723.
- [2] Imai, G., Yano, K., and Aoki, S. (1984). Applicability of Hydraulic Consolidation Test for Very Soft Clayey Solis. *Soils and Foundations*, 24(2), 29-42.
- [3] Umehara, Y., and Zen, K. (1982). Consolidation Characteristics of Dredged Marine Bottom Sediments with High Water Content. *Soils and Foundations*, 22(2), 40-52.
- [4] Olsen, H. W., and Rice, T. L. (1982). Geotechnical Profiles for Thirty-One Sites on the Mid-Atlantic Upper Continental Slope. *U.S. Geological Survey OpenFile Report*, 82-841.
- [5] Nakase, A., Kamei, T., and Kusakabe, O. (1988). Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(7), 844-858.
- [6] Hanna, A. M., and Javed, K (2014). Experimental Investigation of Foundations on Sensitive Clay Subjected to Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), 04014065.
- [7] Teng, F.-C., Ou, C.-Y., and Hsieh, P.-G. (2014). Measurements and Numerical Simulations of Inherent Stiffness Anisotropy in Soft Taipei Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 237–250.
- [8] Delage, P. (2010). A Microstructure Approach to the Sensitivity and Compressibility of Some Eastern Canada Sensitive clays. *Géotechnique*, 60(5), 353–368.
- [9] Zapata-Medina, D. G., Finno, R. J., and Vega-Posada, C. A. (2014). Stress History and Sampling Disturbance Effects on Monotonic and Cyclic Responses of Overconsolidated Bootlegger Cove Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 599–609.
- [10] Kamruzzaman, A. H., Chew, S. H., and Lee, F. H. (2009). Structuration and Destructuration Behavior of Cement-Treated Singapore Marine Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(4), 573–589.


- 
- [11] McClelland, B. (1967). Progress of Consolidation in Delta Front and Prodelta Clays of the Mississippi River. *Marine Geotechnical*, 22-40.
- [12] Sanglerat, G. (1972). The Static Penetrometer and the Prediction of Settlements. *Developments in Geotechnical Engineering*, 1, 337-405.
- [13] Cozzolino, E. V. M. (1961). Statistical Forecasting of Compression Index. *Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris*, 1, 51-53.
- [14] Salai, A. (2001). Land Subsidence Due to Seasonal Pumping of Groundwater in Saga Plain, Japan. *Lowland Technology International*, 3(1), 24-39.
- [15] Suddepong, A., Chai, J., Shen, S., and Carter, J. (2015). Deformation Behaviour of Clay under Repeated One-Dimensional Unloading–Reloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1035–1044.
- [16] Di Matteo, L., Bigotti, F., and Ricco, R. (2011). Compressibility of Kaolinitic Clay Contaminated by Ethanol-Gasoline Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9), 846–849.
- [17] Lambe, T.W., and Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
- [18] Chai, J.-C., Shen, S.-L., Zhu, H.-H., and Zhang, X.-L. (2004). Land Subsidence due to Groundwater Drawdown in Shanghai. *Géotechnique*, 54(2), 143-147.
- [19] Chung, S. G., Lee, J. M., Kweon, H. J., and Singh, V. K. (2017). Penetration Behavior and Sample Quality of Hydraulically Activated Fixed-Piston Samplers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3), 04016103.
- [20] Chung, S. G., Lee, J. M., Kweon, H. J., and Singh, V. K. (2017). Penetration Behavior and Sample Quality of Hydraulically Activated Fixed-Piston Samplers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3), 04016103.
- [21] Salem, A. M., and Krizek, R. J. (1976). Stress-Deformation-Time Behavior of Dredgings. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 102(GT2), 139-157.
- [22] Skempton, A. W., and Jones, O. T. (1944). Notes on the Compressibility of Clays. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 100(1-4), 119–135.
- [23] Leroueil, S., Tavenas, F., and Bihan, J.-P. L. (1983). Propriétés Caractéristiques Des Argiles De L'est Du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 681–705.

- 
- [24] Dascal, O., and Larocque, G. S. (1973). Caractéristiques De Compressibilité Des Argiles Du Complexe Nottaway-Broadback-Rupert (Baie James). *Canadian Geotechnical Journal*, 10(1), 41–63.
- [25] Nishida, Y. (1956). A Brief Note on Compression Index of Soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82(SM3), 1027.
- [26] Rendon-Herrero, O. (1980). Universal Compression Index Equation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(11), 1179-1200.
- [27] MacDonald, A. B., and Sauer, E. K. (1970). The Engineering Significance of Pleistocene Stratigraphy in the Saskatoon Area, Saskatchewan, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 7(2), 116–126.
- [28] Sridharan, A., and Nagaraj, H. B. (2000). Compressibility Behaviour of Remoulded, Fine-Grained Soils and Correlation with Index Properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 712-722.
- [29] Leonaeds, G. A., and Ramiah, B. K. (1960). Time Effect in the Consolidation of Clays. *ASTM Special Technical Publication NO. 254*, 116-130.
- [30] Burland, J. B. (1990). On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays. *Géotechnique*, 40(3), 329–378.
- [31] Gens, A. (1982). *Stress-Strain and Strength Characteristics of a Low Plasticity Clay*. Ph. D. Department of Civil and Mechanical Engineering, Imperial College London.
- [32] Newland, P. L., and Allely, B. H. (1955). Results of Some Investigations on Two Sensitive Clays. *New Zealand Engineering*, 10(11), 403-407.
- [33] Samuels, S. G. (1975). Some Properties of the Gault Clay from the Ely–Ouse Essex Water Tunnel. *Géotechnique*, 25(2), 239–264.
- [34] Horseman, S. T., Winter, M. G., and Entwistle, D. C. (1987). *Geotechnical Characterization of Boom Clay in Relation to the Disposal of Radioactive Waste*. United Kingdom: European Communities.
- [35] Lo, K. Y. (1962). Shear Strength Properties of a Sample of Volcanic Material of the Valley of Mexico. *Géotechnique*, 12(4), 303–318.
- [36] Whitman, R. V. (1960). Some Considerations and Data Regarding the Shear Strength of Clays. *Proceedings, Am. Soc. Civil Engrs. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, Colo., 33-162.

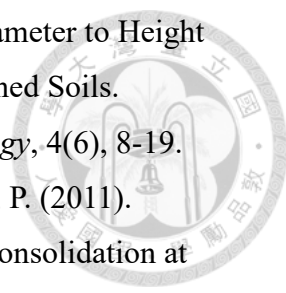
- 
- [37] Olson, R. E., and Hardin, J. (1963). Shearing Properties of Remolded Sodium Illite. *Proceedings, 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 201-218.
- [38] Lambe, T. W. (1963). An Earth Dam for the Storage of Fuel Oil. *Proceedings, 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 257-308.
- [39] Ladanyi, B., LaRoche, P., and Tanguay, L. (1965). Some Factors Controlling the Predictability of Stress-Strain Behaviour of Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(2), 60-89.
- [40] Ladd, C. C. (1964). Stress-Strain Behavior of Saturated Clay and Basic Strength Principles. *Research Report R64-17*.
- [41] Wu, T. H., Chang, N. Y., and Ali, E. M. (1978). Consolidation and Strength Properties of a Clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(GT7), 889-905.
- [42] Mitachi, T., and Kitago, S. (1976). Change in Undrained Shear Strength Characteristics of Saturated Remolded Clay due to Swelling. *Soils and Foundations*, 16(1), 45-58.
- [43] Yudhbir, and Varadarajan, A. (1974). Undrained Behavior of Overconsolidated Saturated Clays during Shear. *Soils and Foundations*, 14(4), 1-22.
- [44] Wu, T. H., Douglas, A. G., and Goughnour, R. D. (1962). Friction and Cohesion of Saturated Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(SM3), 1-32.
- [45] Broms, B. B., and Ratnam, A. M. (1963). Shear Strength of an Anisotropically Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 59(SM6), 1-26.
- [46] Saxena, S. K. and Ladd, C. C. (1978). Geotechnical Properties of Hackensack Valley Varved Clays of New Jersey. *Geotechnical Testing Journal*, 1(3), 148-161.
- [47] Crawford, C. B. (1964). Some Characteristics of Winnipeg Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(4), 227-235.
- [48] Peck, R. B., and Reed, W. C. (1954). *Engineering Properties of Chicago Subsoils*. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.

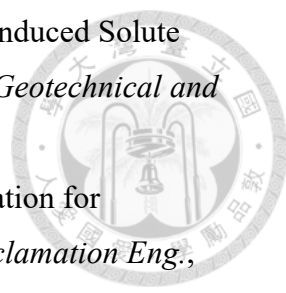
- 
- [49] Mitchell, J. K. (1956). The Fabric of Natural Clays and its Relation to Engineering Properties. *Proceedings of the Highway Research Board*, 35, 693-713.
- [50] 陳斗生(2001) 超高大樓基礎設計與施工(四)-臺北國際金融中心工址斷層及大地工程調查, *地工技術*, 84, 29-48.
- [51] Bozozuk, M., and Leonards, G. A. (1972). The Gloucester Test Fill. *Proceedings, Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, 1(1), 299-317.
- [52] Ng, R. M. C., and Lo, K. Y. (1985). The Measurements of Soil Parameters Relevant to Tunnelling in Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(3), 375-391.
- [53] Burland, J. B., Rampello, S., Georgiannou, V. N., and Calabresi, G. (1996). A laboratory study of the strength of four stiff clays. *Géotechnique*, 46(3), 491-514.
- [54] Futai, M. M., Almeida, M. S. S., and Lacerda, W. A. (2004). Yield, Strength, and Critical State Behavior of a Tropical Saturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11), 1169-1179.
- [55] Skempton, A. W., and Henkel, D. J. (1953). The Post-Glacial Clays of the Thames Estuary at Tilbury and Shellhaven. *Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 302-308.
- [56] Hvorslev, M. J. (1960). Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays. *Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE*, 169-273.
- [57] Olson, R. E. (1962). The Shear Strength Properties of Calcium Illite. *Géotechnique*, 12(1), 23-43.
- [58] France, J. W., and Sangrey, D. A. (1977). Effects of Drainage in Repeated Loading of Clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(GT7), 769-785.
- [59] Sangrey, D. A., Henkel, D. J., and Esrig, M. I. (1969). The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(3), 241-252.
- [60] Skempton, A. W. (1961). Horizontal Stresses in an Over-Consolidated Eocene Clay. *Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 351-357.
- [61] Brown, S. F., Lashine, A. K. F., and Hyde, A. F. L. (1975). Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay. *Géotechnique*, 25(1), 95-114.

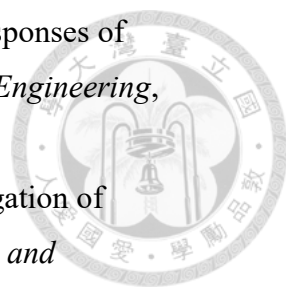
- 
- [62] deGraft-Johnson, J. W. S., Bhatia, H. S., and Gidigasu, D. M. (1969). The Strength Characteristics of Residual Micaceous Soils and their application to stability problems. *Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 165-172.
- [63] Taylor, P., and Bacchus, D. (1969). Dynamic Cyclic Strain Tests on a Clay. *Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 401-409.
- [64] Raymond, G. P. (1972). The Kars Embankment Foundation. *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, 1, No. 2, 319-340.
- [65] Nagaraj, T. S., and Srinivasa Murthy, B. R. (1986). A critical reappraisal of compression index equations. *Géotechnique*, 36(1), 27–32.
- [66] Newland, P. L., and Allely, B.H. (1957). A Study of the Sensitivity Resulting from Consolidation of a Remolded Clay. *Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 83-86.
- [67] Nitindra, B. C E., D. I. C. (1968). *The Effect of Stress Path on The Deformation and Consolidation of London Clay*. Ph. D. thesis, University of London.
- [68] Rutledge, P. C. (1939). *Compression Characteristics of Clays and Application to Settlement Analyses*. S.D. thesis, Harvard University
- [69] Soderman, L. G., and Kim, Y. D. (1970). Effect of Groundwater Levels on Stress History of the St. Clair Clay till Deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 7(2), 173–187.
- [70] Amerasinghe, S. F., and Parry, R. H. G. (1975). Anisotropy in Heavily Overconsolidated Kaolin. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(GT12), 1277-1293.
- [71] Kaufman, R. I., and Sherman, W. C. (1964). Engineering Measurements for the Port Allen Lock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison*, 90(5), 221-247.
- [72] Quigley, R. M., and Ogunbadejo, T. A. (1972). Clay Layer Fabric and Oedometer Consolidation of a Soft Varved Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 9(2), 165–175.
- [73] Samson, L., and Garneau, R. (1973). Settlement Performance of Two Embankments on Deep Compressible Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(2), 211–226.

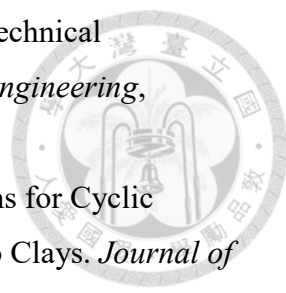
- 
- [74] Insley, A. (1972). A Deep Excavation and a Raft Foundation in Soft Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 9(3), 237–248.
- [75] Devata, M., and Darch, B. T. (1973). Settlement of an Embankment Constructed on Marine Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(2), 161–179.
- [76] Bartlett, S. F., and Lee H. S. (2004). *Estimation of Compression Properties of Clayey Soils, Salt Lake Valley, Utah*. Salt Lake City, Utah: Utah Dept. of Transportation.
- [77] Hong, Z. (2007). Void Ratio-Suction Behavior of Remolded Ariake Clays. *Geotechnical Testion Journal*, 30(3), 234-239.
- [78] Hong, Z.-S., Yin, J., and Cui, Y.-J. (2010). *Compression Behaviour of Reconstituted Soils at High Initial Water Contents*. *Géotechnique*, 60(9), 691-700.
- [79-1] Vinod P., and Bindu J. (2010). Compression Index of Highly Plastic Clays – an Empirical Correlation. *Indian Geotechnical*, 40(3), 174-180.
- [79-2] Bindu, J., and Vinod, P. (2011). Compressibility Behaviour of Preloaded Highly Plastic Clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(2), 65–72.
- [80] Tsuchida T. (1991). A New Concept of e-logp Relationship for Clays. *Proceeding of the 9th Asian Region Conference on Soil Mechnics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand*, 1, 87-90.
- [81] Widodo, S., and Ibrahim, A. (2012). Estimation of Primary Compression Index (Cc) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(5), 2232-2236.
- [82] Anderson, L. R., Sampaco, C. L., Gilani, S. H., and Rausher, R. (1994). *Settlements of Highway Embankments on Soft Lacustrine Deposits. Geotechnical Special Publication*, 40, 376-397.
- [83] Cerato, A. B., and Lutenegeger, A. J. (2004). Determining Intrinsic Compressibility of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 872–877.
- [84] Henkel, D. J. (1956). The Effect of Overconsolidation on the Behaviour of Clays During Shear. *Géotechnique*, 6(4), 139–150.
- [85] Wimberly, P. M., Mazzella, S. G., and Newman, F. B. (1994). Settlement of a 15-Meter Deep Fill Below a Buliding. *Geotechnical Special Publication*, 40, 398-416.

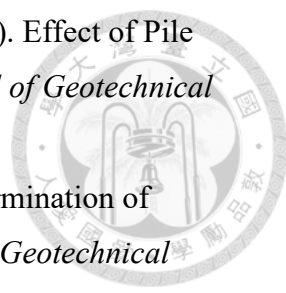
- 
- [86] Tanaka, H., and Locat, J. (1999). A Microstructural Investigation of Osaka Bay Clay: The impact of Microfossils on Its Mechanical Behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), 493-508.
- [87] Watabe, Y., Tsuchida, T., and Adachi, K. (2002). Undrained Shear Strength of Pleistocene Clay in Osaka Bay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(3), 216-226.
- [88] Kogure, K., and Ohira, Y. (1977). Statistical Forecasting of Compressibility of Peaty Ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(4), 562–570.
- [89] Lee, C., Hong, S.-J., Kim, D., and Lee, W. (2014). Assessment of Compression Index of Busan and Incheon Clays with Sedimentation State. *Marine Georesources and Geotechnology*, 33(1), 23–32.
- [90] Tanaka, H. (2005). Consolidation Behavior of Natural Soils around pc Value-Inter-connected Oedometer Test. *Soils and Foundations*, 45(3), 83-95.
- [91] Tanaka, H., Locat, J., Shibuya, S., Soon, T. T., and Shiwakoti, D. R. (2001). Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), 378–400.
- [92] Zhou, Y., Deng, A., and Wang, C. (2013). Finite-Difference Model for One-Dimensional Electro-Osmotic Consolidation. *Computers and Geotechnics*, 54, 152–165.
- [93] Wang, J., Cai, Y., Ma, J., Chu, J., Fu, H., Wang, P., and Jin, Y. (2016). Improved Vacuum Preloading Method for Consolidation of Dredged Clay-Slurry Fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11), 06016012.
- [94] Yeo, S.-S., Shackelford, C. D., and Evans, J. C. (2005). Membrane Behavior of Model Soil–Bentonite Backfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 418–429.
- [95] Cao, L. F., Chang, M.-F., Teh, C. I., and Na, Y. M. (2001). Back-Calculation of Consolidation Parameters from Field Measurements at a Reclamation Site. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 755–769.
- [96] Fox, P. J. (2007). Coupled Large Strain Consolidation and Solute Transport. II: Model Verification and Simulation Results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), 16–29.

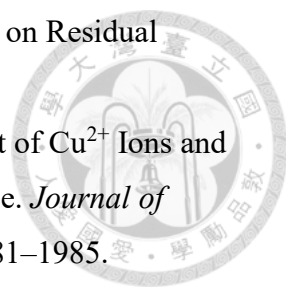
- 
- [97] Rosine, T. N., and Sabbagh, T. T. (2015). The Impact of the Diameter to Height Ratio on the Compressibility Parameters of Saturated Fine-grained Soils. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(6), 8-19.
- [98] Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ameratunga, J., and Boyle, P. (2011). Performance and Prediction of Vacuum Combined Surcharge Consolidation at Port of Brisbane. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1009–1018.
- [99] Ahmed, Z., McVay, M., Horhota, D., and Ho, R. (2005). Polk County Expressway: A Laboratory, Numerical, and Field Study of Consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1118–1129.
- [100] Yeo, S.-S., Shackelford, C. D., and Evans, J. C. (2005). Consolidation and Hydraulic Conductivity of Nine Model Soil-Bentonite Backfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1189–1198.
- [101] Kumar, S., and Yong, W.-L. (2002). Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers. *Soil and Sediment Contamination an International Journal*, 11(1), 71–89.
- [102] Chai, J. C., Carter, J. P., and Hayashi, S. (2005). Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1552–1561.
- [103] Chung, S. G., Ryu, C. K., Jo, K. Y., and Huh, D. Y. (2005). Geological and Geotechnical Characteristics of Marine Clays at the Busan New Port. *Marine Georesources and Geotechnology*, 23(3), 235–251.
- [104] Niemunis, A. and Krieg, S. (1995). *Viscous Behaviour of Soil under Oedometric Conditions*. Ottawa Canada. National Research Council Canada
- [105] Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., and Sathananthan, I. (2005). Radial Consolidation of Clay Using Compressibility Indices and Varying Horizontal Permeability. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(5), 1330–1341.
- [106] Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Kelly, R., and Buys, H. (2012). Soft Soil Foundation Improved by Vacuum and Surcharge Loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 165(2), 87–96.
- [107] Khera, R. P., and Schulz, H. (1984). Past Consolidation Stress Estimates in Cretaceous Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2), 189–202.

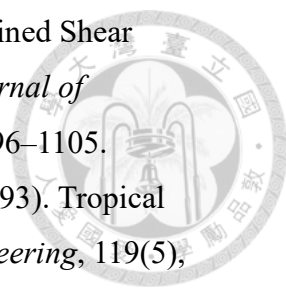
- 
- [108] Lee, J., and Fox, P. J. (2009). Investigation of Consolidation-Induced Solute Transport. II: Experimental and Numerical Results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(9), 1239–1253.
- [109] Koumoto, T., and Park, J. H. (1998). Compression Index Equation for Remolded Clays. *Trans. Japanese Soc. Irrigation Drainage Reclamation Eng.*, 193, 81–85.
- [110] Park, J. H., and Koumoto, T. (2004). New Compression Index Equation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2), 223–226.
- [111] Walker, R., and Indraratna, B. (2006). Vertical Drain Consolidation with Parabolic Distribution of Permeability in Smear Zone. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7), 937–941.
- [112] Wang, S., Luna, R., and Onyejekwe, S. (2016). Effect of Initial Consolidation Condition on Postcyclic Undrained Monotonic Shear Behavior of Mississippi River Valley Silt. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015075.
- [113] Abu-Hejleh, A. N., Znidarčić, D., and Barnes, B. L. (1996). Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(4), 295–301.
- [114] Anderson, W. F., Pyrah, I. C., and Ali, F. H. (1987). Rate Effects in Pressuremeter Tests in Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(11), 1344–1358.
- [115] Casey, B., Germaine, J. T., Abdulhadi, N. O., Kontopoulos, N. S., and Jones, C. A. (2016). Undrained Young's Modulus of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015070.
- [116] Chung, S. G., Giao, P. H., Kim, G. J., and Leroueil, S. (2002). Geotechnical Properties of Pusan Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1050–1060.
- [117] Chung, S. G., Ryu, C. K., Min, S. C., Lee, J. M., Hong, Y. P., and Odgerel, E. (2012). Geotechnical Characterisation of Busan Clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(3), 341–350.
- [118] DeJong, J. T., Krage, C. P., Albin, B. M., and DeGroot, D. J. (2018). Work-Based Framework for Sample Quality Evaluation of Low Plasticity Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(10), 04018074.

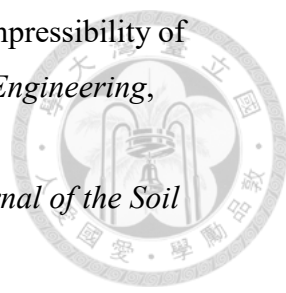
- 
- [119] Finno, R. J., and Chung, C. (1992). Stress-Strain-Strength Responses of Compressible Chicago Glacial Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1607–1625.
- [120] Fujiyasu, Y., Fahey, M., and Newson, T. (2000). Field Investigation of Evaporation from Freshwater Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 556–567.
- [121] Haque, M. N., Abu-Farsakh, M. Y., Tsai, C., and Zhang, Z. (2017). Load-Testing Program to Evaluate Pile-Setup Behavior for Individual Soil Layers and Correlation of Setup with Soil Properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), 04016109.
- [122] Hong, Z., Tateishi, Y., and Han, J. (2006). Experimental Study of Macro- and Microbehavior of Natural Diatomite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 603–610.
- [123] Atkinson, J. H., Richardson, D., and Robinson, P. J. (1987). Compression and Extension of K0 Normally Consolidated Kaolin Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(12), 1468–1482.
- [124] Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S. (1991). Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(10), 1509–1530.
- [125] Abdulhadi, N. O. (2009). *An Experimental Investigation into the Stress Dependent Mechanical Behavior of Cohesive Soil with Application to Wellbore Instability*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [126] Ng, K. W., Roling, M., AbdelSalam, S. S., Suleiman, M. T., and Sritharan, S. (2013). Pile Setup in Cohesive Soil. I: Experimental Investigation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 199–20
- [127] Penumadu, D., and Chameau, J.-L. (1997). Strain Rate Effects in Model Pressuremeter Testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1051–1059.
- [128] Jung, Y.-H., Cho, W., and Finno, R. J. (2007). Defining Yield from Bender Element Measurements in Triaxial Stress Probe Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 841–849.

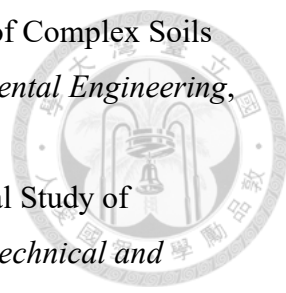
- 
- [129] Koutsoftas, D. C., Foott, R., and Handfelt, L. D. (1987). Geotechnical Investigations Offshore Hong Kong. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(2), 87–105.
- [130] Mortezaie, A., and Vucetic, M. (2016). Threshold Shear Strains for Cyclic Degradation and Cyclic Pore Water Pressure Generation in Two Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(5), 04016007
- [131] Najjar, S. S., Sadek, S., and Maakaroun, T. (2010). Effect of Sand Columns on the Undrained Load Response of Soft Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9), 1263–1277.
- [132] Nakase, A., Kusakabe, O., and Wong, S. (1984). Centrifuge Model Tests on Bearing Capacity of Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(12), 1749–1765.
- [133] Prakasha, K. S., and Chandrasekaran, V. S. (2005). Behavior of Marine Sand-Clay Mixtures under Static and Cyclic Triaxial Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 213–222.
- [134] Briaud, J.-L., Nicks, J., Rhee, K., and Stieben, G. (2007). San Jacinto Monument Case History. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11), 1337–1351.
- [135] Chai, J.-C., Shen, S.-L., Miura, N., and Bergado, D. T. (2001). Simple Method of Modeling PVD-Improved Subsoil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11), 965–972.
- [136] Sheahan, T. C., and Watters, P. J. (1997). Experimental Verification of CRS Consolidation Theory. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 430–437.
- [137] Crawford, C. B., and Campanella, R. G. (1991). Comparison of Field Consolidation with Laboratory and in Situ Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 103–112.
- [138] Aboshi, H. (1995). Case Records of Long-Term Measurement of Consolidation Settlement and Their Prediction. *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Toshikuni and Kusakabe (eds), 2, 847-872.
- [139] Diaz-Rodriguez, J. A., Leroueil, S., and Alemán, J. D. (1992). Yielding of Mexico City Clay and Other Natural Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(7), 981–995.


- 
- [140] Hunt, C. E., Pestana, J. M., Bray, J. D., and Riemer, M. (2002). Effect of Pile Driving on Static and Dynamic Properties of Soft Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(1), 13–24.
- [141] Deutsch, W. L., Koerner, R. M., and Lord, A. E. (1989). Determination of Prestress of in Situ Soils Using Acoustic Emissions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(2), 228–245.
- [142] Indraratna, B., Attya, A., and Rujikiatkamjorn, C. (2009). Experimental Investigation on Effectiveness of a Vertical Drain under Cyclic Loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 835–839
- [143] Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S., and Ratnayake, P. (1994). Performance of Embankment Stabilized with Vertical Drains on Soft Clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 257–273.
- [144] Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ewers, B., and Adams, M. (2010). Class a Prediction of the Behavior of Soft Estuarine Soil Foundation Stabilized by Short Vertical Drains beneath a Rail Track. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(5), 686–696.
- [145] Kempfert, H.-G., and Soumaya, B. (2004). Settlement Back-Analysis of Buildings on Soft Soil in Southern Germany. *Proceeding, 5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, 1.24, 1-10.
- [146] Singh, S. K., Srivastava, R. K., and John, S. (2008). Settlement Characteristics of Clayey Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(3), 290–300.
- [147] Santagata, M. C., and Germaine, J. T. (2002). Sampling Disturbance Effects in Normally Consolidated Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12), 997–1006.
- [148] Santagata, M., Germaine, J. T., and Ladd, C. C. (2005). Factors Affecting the Initial Stiffness of Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 430–441.
- [149] Sivakugan, N., Chameau, J. L., and Holtz, R. D. (1993). Anisotropy Studies on Cuboidal Shear Device. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(6), 973–983.
- [150] Stamatopoulos, A. C., and Kotzias, P. C. (1983). Settlement-Time Predictions in Preloading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(6), 807–820.

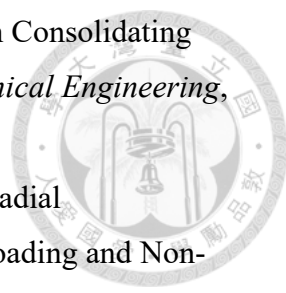
- 
- [151] Wesley, L. D. (1990). Influence of Structure and Composition on Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(4), 589–603.
- [152] Yong, R. N., Ouhadi, V. R., and Goodarzi, A. R. (2009). Effect of Cu^{2+} Ions and Buffering Capacity on Smectite Microstructure and Performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1981–1985.
- [153] Sridharan, A. and Nagaraj, H. (2004). Coefficient of Consolidation and its Correlation with Index Properties of Remolded Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 27(5), 469-474.
- [154] Azzouz, A. S. (1974). *Statistical Analyses of Index Properties and Compressibility of Soils*. M. S. thesis, Northwestern University.
- [155] Georgiannou, V. N., Coop, M. R., Altuhafi, F. N., and Lefas, D. I. (2018). Compression and Strength Characteristics of Two Silts of Low and High Plasticity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(7), 04018041.
- [156] Kavvadas, M., Anagnostopoulos A. G., Georgiannou, V. N., and Bardanis, M. E. (2003). Characterisation and Engineering Properties of the Corinth Marl. *Conference: Int. Workshop 'Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils'*, Singapore, Vol. 2.
- [157] Almeida, M. S. S., Hosseinpour, I., Riccio, M., and Alexiew, D. (2015). Behavior of Geotextile-Encased Granular Columns Supporting Test Embankment on Soft Deposit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3), 04014116.
- [158] Briaud, J. L., Koohi, Y., Nicks, J., and Jung, I. (2015). San Jacinto Monument: New Soil Data and Analysis Including Subsidence. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 04015023.
- [159] Cho, W., and Finno, R. J. (2010). Stress-Strain Responses of Block Samples of Compressible Chicago Glacial Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 178–188.
- [160] Chow, S. H., and Airey, D. W. (2014). Free-Falling Penetrometers: A Laboratory Investigation in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 201–214.

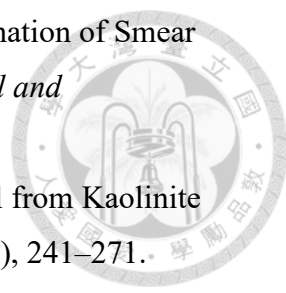
- 
- [161] Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D. T. (2001). Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1096–1105.
- [162] Pandian, N. S., Nagaraj, T. S., and Sivakumar Babu, G. L. (1993). Tropical Clays. II Engineering Behavior. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(5), 840–861.
- [163] Jones, C. A. (2010). *Engineering Properties of Resedimented Ugnu Clay from the Alaskan North Slope*. S.M. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [164] Kim, T., and Finno, R. J. (2012). Anisotropy Evolution and Irrecoverable Deformation in Triaxial Stress Probes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), 155–165.
- [165] Lanzo, G., Vucetic, M., and Doroudian, M. (1997). Reduction of Shear Modulus at Small Strains in Simple Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1035–1042.
- [166] Liu, S. Y., Shao, G. H., Du, Y. J., and Cai, G. J. (2011). Depositional and Geotechnical Properties of Marine Clays in Lianyungang, China. *Engineering Geology*, 121(1-2), 66–74.
- [167] Silvestri, V. (1984). Preconsolidation Pressure of Champlain Clays. Part II. Laboratory Determination: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3), 600–602.
- [168] Simpson, D. C., and Evans, T. M. (2016). Behavioral Thresholds in Mixtures of Sand and Kaolinite Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015073.
- [169] Newson, T., Dyer, T., Adam, C., and Sharp, S. (2006). Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 143–151.
- [170] Mathew, P. K., and Rao, S. N. (1997). Influence of Cations on Compressibility Behavior of a Marine Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1071–1073.
- [171] Fredlund, D. G. (1967). *Comparison of Soil Suction and One-Dimensional Consolidation Characteristics of a Highly Plastic Clay*. National Research Council Canada. Division of Building.

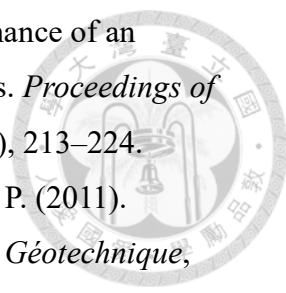
- 
- [172] Nagaraj, T. S., and Murthy, B. R. S. (1986). Prediction of Compressibility of Overconsolidated Uncemented Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(4), 484–488.
- [173] Lambe, T. W. (1964). Methods of Estimating Settlement. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(SM5), 43-67.
- [174] Fujiyasu, Y., and Fahey, M. (2000). Experimental Study of Evaporation from Saline Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1), 18–27.
- [175] Gräbe, P. J., and Clayton, C. R. (2009). Effects of Principal Stress Rotation on Permanent Deformation in Rail Track Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(4), 555–565.
- [176] Hyde, A. F. L., Yasuhara, K., and Hirao, K. (1993). Stability Criteria for Marine Clay under One-Way Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(11), 1771–1789.
- [177] Li, Y. P., Yi, J. T., Lee, F. H., Goh, S. H., and Hu, J. (2018). Effect of Lattice Leg and Sleeve on the Transient Vertical Bearing Capacity of Deeply Penetrated Spudcans in Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(5), 04018019.
- [178] Lo, K. W., Ooi, P. L., and Lee, S. (1990). Unified Approach to Ground Improvement by Heavy Tamping. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(3), 514–527.
- [179] Low, H. E., and Randolph, M. F. (2010). Strength Measurement for Near-Seabed Surface Soft Soil Using Manually Operated Miniature Full-Flow Penetrometer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(11), 1565–1573.
- [180] Yapage, N. N. S., Liyanapathirana, D. S., Kelly, R. B., Poulos, H. G., and Leo, C. J. (2014). Numerical Modeling of an Embankment over Soft Ground Improved with Deep Cement Mixed Columns Case History. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), 04014062.
- [181] Afacan, K. B., Brandenburg, S. J., and Stewart, J. P. (2014). Centrifuge Modeling Studies of Site Response in Soft Clay over Wide Strain Range. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), 04013003.

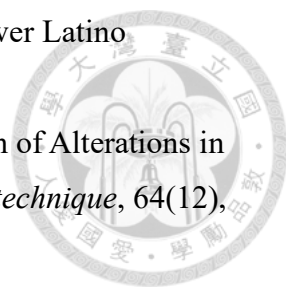
- 
- [182] Verdugo, R. (2008). Singularities of Geotechnical Properties of Complex Soils in Seismic Regions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), 982–991.
- [183] Venda Oliveira, P. J., and Lemos, L. J. L. (2014). Experimental Study of Isotropic and Anisotropic Constitutive Models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(8), 06014008.
- [184] Tong, F., and Yin, J.-H. (2013). Experimental and Constitutive Modeling of Relaxation Behaviors of Three Clayey Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1973–1981.
- [185] Tavenas, F. A., Chapeau, C., Rochelle, P. L., and Roy, M. (1974). Immediate Settlements of Three Test Embankments on Champlain Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(1), 109–141.
- [186] Shen, S., Chai, J., Hong, Z., and Cai, F. (2005). Analysis of Field Performance of Embankments on Soft Clay Deposit with and without PVD-Improvement. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(6), 463–485.
- [187] Sahdi, F., White, D. J., and Gaudin, C. (2017). Experiments Using a Novel Penetrometer to Assess Changing Strength of Clay during Remolding and Reconsolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), 06016030.
- [188] Shibata, T. and Sekiguchi, H. (1984). Performance of Trial Embankment on Soft Clay. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 27. 599-607.
- [189] Giao, P. H., and Hien, D. H. (2007). Geotechnical Characterization of Soft Clay along a Highway in the Red River Delta. *Lowland Technology International*, 9(1), 18-27.
- [190] Coutinho, R. Q., and Oliverira, J. T. R. (1997). Geotechnical Characterization of a Recife Soft Clay-Laboratory and In-Situ Tests. *Proceeding of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1(14), 69-72.
- [191] Prashant, A., and Penumadu, D. (2004). Effect of Intermediate Principal Stress on Overconsolidated Kaolin Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(3), 284–292.

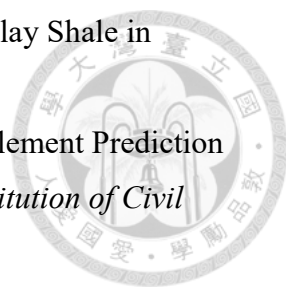
- 
- [192] Poulos, S. J., Robinsky, E. I., and Keller, T. O. (1985). Liquefaction Resistance of Thickened Tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1380–1394.
- [193] Tiwari, B., and Ajmera, B. (2012). New Correlation Equations for Compression Index of Remolded Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(6), 757–762.
- [194] Hirata M., Kitoh M., Yamada K., Izuka A., and Arai K. (2010). Deformation Behavior and Counter Measures of Expressway Embankment on Super-Soft Ground. *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, 66(2), 356–369.
- [195] Sridharan, A., and PrakashP, K. (1997). The Log δ -Log t Method for the Determination of the Coefficient of Consolidation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 125(1), 27–32.
- [196] Cooling, L. F., and Skempton, A. W. (1941). Some Experiments on the Consolidation of Clay. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 16(7), 381–398.
- [197] Vinod, J. S., and Sridharan, A. (2015). Laboratory Determination of Coefficient of Consolidation from Pore Water Pressure Measurement. *Géotechnique Letters*, 5(4), 294–298.
- [198] Shi, J., Qian, S., Zeng, L. L., and Bian, X. (2015). Influence of Anisotropic Consolidation Stress Paths on Compression Behaviour of Reconstituted Wenzhou Clay. *Géotechnique Letters*, 5(4), 275–280.
- [199] Walker, R., and Indraratna, B. (2009). Consolidation Analysis of a Stratified Soil with Vertical and Horizontal Drainage Using the Spectral Method. *Géotechnique*, 59(5), 439–449.
- [200] Tran-Nguyen, H. H., Edil, T. B., and Schneider, J. A. (2010). Effect of Deformation of Prefabricated Vertical Drains on Discharge Capacity. *Geosynthetics International*, 17(6), 431–442.
- [201] Lee, K., Choa, V., Lee, S. H., and Quek, S. H. (1993). Constant Rate of Strain Consolidation of Singapore Marine Clay. *Géotechnique*, 43(3), 471–488.
- [202] Look, B.G., and Williams, D.J. (1994). An Evaluation of Empirical Correlations for the Compression and Swell Indices for Queensland Soil Conditions. *Australian Geomechanics*, 25, 96-101.

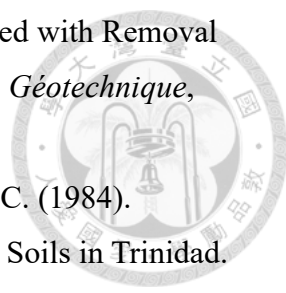
- 
- [203] Kog, Y. C. (2016). Centrifuge Tests of Axially Loaded Piles in Consolidating Soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 169(1), 15–24.
- [204] Kianfer, K., Indraratna, B., and Rujikiatkamjorn, C. (2013). Radial Consolidation Model Incorporating the Effects of Vacuum Preloading and Non-Darcian Flow. *Géotechnique*, 63(12), 1060–1073.
- [205] Zhou, Y., and Chai, J. C. (2017). Equivalent “Smear” Effect due to Non-Uniform Consolidation Surrounding a PVD. *Géotechnique*, 67(5), 410–419.
- [206] Chai, J.-C., Matsunaga, K., Sakai, A., and Hayashi, S. (2009). Comparison of Vacuum Consolidation with Surcharge Load Induced Consolidation of a Two-Layer System. *Géotechnique*, 59(7), 637–641.
- [207] Li, G., Amenuvor, A. C., Hou, Y., Lu, X., Wu, J., and Nguyen, T. N. (2019). Effect of Open-Ended PHC Pile Installation during Embankment Widening on the Surrounding Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(2), 05018006.
- [208] Day, R. W., Mayne, P. W., Harris, D. E., Wang, C. E., and Borden, R. H. (1998). Discussions and Closure Deformation Characteristics of Piedmont Residual Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6), 555–557.
- [209] Seo, H., Yildirim, I. Z., and Prezzi, M. (2009). Assessment of the Axial Load Response of an H Pile Driven in Multilayered Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1789–1804.
- [210] Zeevareert L. (1991). Seismosoil Dynamics of Foundations in Mexico City Earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 117(3), 376-428.
- [211] Goh, A. T. C., and Tay, J. (1993). Municipal Solid-Waste Incinerator Fly Ash for Geotechnical Applications. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(5), 811–825.
- [212] Okamura, M., Takemura, J., and Kimura, T. (1997). Centrifuge Model Tests on Bearing Capacity and Deformation of Sand Layer Overlying Clay. *Soils and Foundations*, 37(1), 73–88.
- [213] White, D. J., Pham, H. T. V., and Hoevelkamp, K. K. (2007). Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12), 1503–1511.

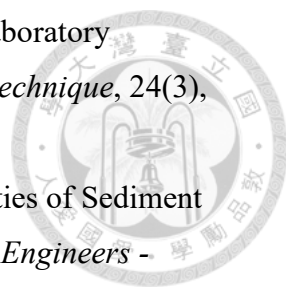
- 
- [214] Indraratna, B., and Redana, I. W. (1998). Laboratory Determination of Smear Zone due to Vertical Drain Installation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), 180–184.
- [215] Hamed, J., Acar, Y. B., and Gale, R. J. (1991). Pb(II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(2), 241–271.
- [216] Kang, X., and Bate, B. (2016). Shear Wave Velocity and Its Anisotropy of Polymer Modified High-Volume Class-F Fly Ash–Kaolinite Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 04016068.
- [217] Nasr, A. N., and Gangopadhyay, C. R. (1988). Study of S_u Predicted by Pressuremeter Test. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11), 1209–1226.
- [218] Quigley, R. M., and Thompson, C. D. (1966). The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), 61–73.
- [219] Burton, G. J., Sheng, D., and Campbell, C. (2014). Bimodal Pore Size Distribution of a High-Plasticity Compacted Clay. *Géotechnique Letters*, 4(2), 88–93.
- [220] Shibuya, S. (2000). Assessing Structure of Aged Natural Sedimentary Clays. *Soils and Foundations*, 40(3), 1–16.
- [221] Fei, X., Zekkos, D., Li, L., Woods, R., and Sanford, L. (2017). Geo-Characterisation of Lime Water Treatment Sludge. *Environmental Geotechnics*, 4(3), 209–219.
- [222] Castro, J., and Sagaseta, C. (2012). Pore Pressure During Stone Column Installation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 165(2), 97–109.
- [223] Araujo, G. L. S., Palmeira, E. M., and Cunha, R. P. (2009). Behaviour of Geosynthetic-Encased Granular Columns in Porous Collapsible Soil. *Geosynthetics International*, 16(6), 433–451.
- [224] Alsherif, N. A., and McCartney, J. S. (2015). Thermal Behaviour of Unsaturated Silt at High Suction Magnitudes. *Géotechnique*, 65(9), 703–716.
- [225] Huang, X., Huang, H., and Zhang, D. (2014). Centrifuge Modelling of Deep Excavation over Existing Tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 167(1), 3–18.


- 
- [226] Mohamedzein, Y. E.-A., and Al-Shibani, I. H. (2011). Performance of an embankment supported on soft soil reinforced by stone columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(4), 213–224.
- [227] Chai, J. C., Agung, P. M. A., Hino, T., Igaya, Y., and Carter, J. P. (2011). Estimating Hydraulic Conductivity from Piezocone Soundings. *Géotechnique*, 61(8), 699–708.
- [228] Atkinson, J. (2007). Peak Strength of Overconsolidated Clays. *Géotechnique*, 57(2), 127–135.
- [229] Aldrich, H. P., and Pickering, C. A. (1959). Load Test on a Deep Circular Footing on Clay. *Géotechnique*, 9(4), 147–152.
- [230] Caicedo, B., Alonso, E., Mendoza, C., and Alcoverro, J. (2018). The Collapse of Space Building. *Géotechnique*, 1–14.
- [231] Pennington, D. S., Nash, D. F. T., and Lings, M. L. (1997). Anisotropy of G_0 Shear Stiffness in Gault Clay. *Géotechnique*, 47(3), 391–398.
- [232] Brandes, H. G., and Nakayama, D. D. (2010). Creep, Strength and Other Characteristics of Hawaiian Volcanic Soils. *Géotechnique*, 60(4), 235–245.
- [233] Sultan, N., Degennaro, V., and Puech, A. (2012). Mechanical Behaviour of Gas-Charged Marine Plastic Sediments. *Géotechnique*, 62(9), 751–766.
- [234] Witteveen, P., Ferraria., and Laloui, L. (2013). An Experimental and Constitutive Investigation on the Chemo-Mechanical Behaviour of a Clay. *Géotechnique*, 63(3), 244–255.
- [235] Izumi, K., Ogihara, M., and Kameya, H. (1997). Displacements of Bridge Foundations on Sedimentary Soft Rock: A case Study on Small-Strain Stiffness. *Géotechnique*, 47(3), 619–632.
- [236] Mata, C., and Ledesma, A. (2003). Permeability of a Bentonite–Crushed Granite Rock Mixture Using Different Experimental Techniques. *Géotechnique*, 53(8), 747–758.
- [237] Gasparre, A., Nishimura, S., Coop, M. R., and Jardine, R. J. (2007). The Influence of Structure on the Behaviour of London Clay. *Géotechnique*, 57(1), 19–31.
- [238] Chandler, R. J., Willis, M. R., Hamilton, P. S., and Andreou, I. (1998). Tectonic Shear Zones in the London Clay Formation. *Géotechnique*, 48(2), 257–270.


- 
- [239] Zeevaert, L. (1957). Foundation Design and Behaviour of Tower Latino Americana in Mexico City. *Géotechnique*, 7(3), 115–133.
- [240] Zhang, X. W., Kong, L. W., and Li, J. (2014). An Investigation of Alterations in Zhanjiang Clay Properties Due to Atmospheric Oxidation. *Géotechnique*, 64(12), 1003–1009.
- [241] Nishimura, S. (2014). Cross-Anisotropic Deformation Characteristics of Natural Sedimentary Clays. *Géotechnique*, 64(12), 981–996.
- [242] Amorosi, A., and Rampello, S. (2007). An Experimental Investigation into the Mechanical Behaviour of a Structured Stiff Clay. *Géotechnique*, 57(2), 153–166.
- [243] Bedin, J., Schnaid, F., Da Fonseca, A. V., and Costa Filho, L. D. M. (2012). Gold Tailings Liquefaction under Critical State Soil Mechanics. *Géotechnique*, 62(3), 263–267.
- [244] Ng, C. W. W., Sadeghi, H., Hossen, S. K. B., Chiu, C. F., Alonso, E. E., and Baghbanrezvan, S. (2016). Water Retention and Volumetric Characteristics of Intact and Re-Compacted Loess. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(8), 1258–1269.
- [245] Hansen, J. B. (1950). Vane Tests in a Norwegian Quick-Clay. *Géotechnique*, 2(1), 58–63.
- [246] Fonseca, A. V. D., Carvalho, J., Ferreira, C., Santos, J. A., Almeida, F., Pereira, E., ... Oliveira, A. (2006). Characterization of a Profile of Residual Soil from Granite Combining Geological, Geophysical and Mechanical Testing Techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(5), 1307–1348.
- [247] Muirwood, A. M. (1955). Folkestone Warren Landslips: Investigations, 1948-1950. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 4(3), 410–428.
- [248] Smith, C. K., and Redlinger, J. F. (1953). Soil Properties of Fort Union Shale. *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Fdn Engng, Zurich*, 1, 62-66.
- [249] Baroni, M., and Almeida, M. de S. S. (2017). Compressibility and Stress History of Very Soft Organic Clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 170(2), 148–160.
- [250] Mesri, G., Rokhsar, A., and Bohor, B. F. (1975). Composition and Compressibility of Typical Samples of Mexico City clay. *Géotechnique*, 25(3), 527–554.

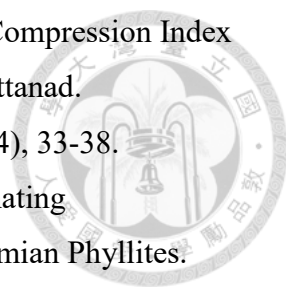
- 
- [251] Ola, S. A. (1982). Geotechnical Properties of an Attapulgite Clay Shale in Northwestern Nigeria. *Engineering Geology*, 19(1), 1–13.
- [252] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T., and Hino, T. (2010). Settlement Prediction for Soft Ground Improved by Columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 163(2), 109–119.
- [253] Khan, M. R. A., Takemura, J., and Kusakabe, O. (2006). Centrifuge Model Tests on Behavior of Double Sheet Pile Wall Cofferdam on Clay. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 6(3), 1–23.
- [254] Chai, J.-C., Hino, T., and Shen, S. (2017). Characteristics of Clay Deposits in Saga Plain, Japan. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 170(6), 548–558.
- [255] Haiderali, A., and Madabhushi, G. (2016). Improving the Lateral Capacity of Monopiles in Submarine Clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 169(4), 239–252.
- [256] Wallace, K. B. (1971). Residual Soils of the Continually Wet Highlands of Papua New Guinea: - A Basic Study of Their Occurrence and Geotechnical Properties. *Papua New Guinea Institute of Technology, Civil Engineering Department, Bulletin, No. 2*.
- [257] Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., and Laloui, L. (2014). Centrifuge Modelling of Energy Piles Subjected to Heating and Cooling Cycles in Clay. *Géotechnique Letters*, 4(4), 310–316.
- [258] Mao, X., and Fahey, M. (1999). A Method of Reconstituting an Aragonite Soil Using a Synthetic Flocculant. *Géotechnique*, 49(1), 15–32.
- [259] Bjerrum, L., Moum, J., and Eide, O. (1967). Application of Electro-Osmosis to a Foundation Problem in a Norwegian Quick Clay. *Géotechnique*, 17(3), 214–235.
- [260] Cotecchia, F., and Chandler, R. J. (1997). The Influence of Structure on the Pre-Failure Behaviour of a Natural Clay. *Géotechnique*, 47(3), 523–544.
- [261] Kluger, M. O., Kreiter, S., Moon, V. G., Orense, R. P., Mills, P. R., and Mörz, T. (2018). Undrained Cyclic Shear Behaviour of Weathered Tephra. *Géotechnique*, 1–12.
- [262] Kog, Y. C. (2017). Rehabilitation of Abandoned Non-Hazardous Tailings Ponds. *Environmental Geotechnics*, 4(1), 27–39.


- 
- [263] Glossop, N. H., and Farmer, I. W. (1979). Settlement Associated with Removal of Compressed Air Pressure during Tunnelling in Alluvial Clay. *Géotechnique*, 29(1), 67–72.
- [264] Watson, G. H., Crooks, J. H. A., Williams, R. S., and Yam, C. C. (1984). Performance of Preloaded and Stage-Loaded Structures on Soft Soils in Trinidad. *Géotechnique*, 34(2), 239–257.
- [265] Lee, J. M., Chung, S. G., Kweon, H. J., and Singh, V. K. (2016). Effects of Fixed-Piston Sampler Fixity on Clay Sample Quality. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 169(6), 554–566.
- [266] O’Kelly, B. C., Oettle, N. K., and Ramos, J. A. (2018). Geotechnical Properties of Compacted Biosolids for Monofill Design. *Environmental Geotechnics*, 1–106.
- [267] Perret, D., Locat, J., and Leroueil, S. (1995). Strength Development with Burial in Fine-Grained Sediments from the Saguenay Fjord, Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(2), 247–262.
- [268] Robinson, R. G., Dasari, G. R., and Tan, T. S. (2004). Three-Dimensional Swelling of Clay Lumps. *Géotechnique*, 54(1), 29–39.
- [269] Bergado, D. T., Voottipruex, P., Modmoltin, C., and Khwanpruk, S. (2000). Behaviour of a Full-Scale Test Wall Reinforced with Hexagonal Wire Mesh. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 4(2), 47–58.
- [270] Jones, C. A., Stewart, D. I., and Danilewicz, C. J. (2008). Bridge Distress Caused by Approach Embankment Settlement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 161(2), 63–74.
- [271] Vardanega, P. J., Lau, B. H., Lam, S. Y., Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G., and Bolton, M. D. (2012). Laboratory Measurement of Strength Mobilisation in Kaolin Link to Stress History. *Géotechnique Letters*, 2(1), 9–15.
- [272] Mohamed Jais, I. B. (2017). Rapid Remediation Using Polyurethane Foamresin Grout in Malaysia. *Geotechnical Research*, 4(2), 107–117.
- [273] Hosseinpour, I., Almeida, M. S. S., and Riccio, M. (2015). Full-Scale Load Test and Finite-Element Analysis of Soft Ground Improved by Geotextile-Encased Granular Columns. *Geosynthetics International*, 22(6), 428–438.
- [274] Wong, S. T. Y., Ong, D. E. L., and Robinson, R. G. (2017). Behaviour of MH Silts with Varying Plasticity Indices. *Geotechnical Research*, 4(2), 118–135.

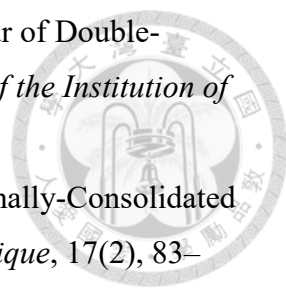
- 
- [275] Parry, R. H. G., and Nadarajah, V. (1974). Observations on Laboratory Prepared, Lightly Overconsolidated Specimens of Kaolin. *Géotechnique*, 24(3), 345–357.
- [276] Meriggi, R., and Del Fabbro, M. (2010). Geotechnical Properties of Sediment Subjected to Ultrasound. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 163(3), 141–148.
- [277] Arulanandan, K., Shen, C. K., and Young, R. B. (1971). Undrained Creep Behaviour of a Coastal Organic Silty Clay. *Géotechnique*, 21(4), 359–375.
- [278] Hong, Z., Shen, S., Deng, Y., and Negami, T. (2007). Loss of Soil Structure for Natural Sedimentary Clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 160(3), 153–159.
- [279] Cotecchia, F., Cafaro, F., and Aresta, B. (2007). Structure and Mechanical Response of Sub-Apennine Blue Clays in Relation to Their Geological and Recent Loading History. *Géotechnique*, 57(2), 167–180.
- [280] Adachi, T., Oka, F., Hirata, T., Hashimoto, T., Nagaya, J., Mimura, M., and Pradhan, T. B. S. (1995). Stress-Strain Behavior and Yielding Characteristics of Eastern Osaka Clay. *Soils and Foundations*, 35(3), 1–13.
- [281] Artidteang, S., Bergado, D. T., Chaiyaput, S., and Tanchaisawat, T. (2015). Embankment Reinforced with Limited Life Geotextiles on Soft Clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 168(2), 130–143.
- [282] Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Haque, A., Nimbalkar, S., and Mohajerani, A. (2018). Effect of Fiber Reinforcement on Shear Strength and Void Ratio of Soft Clay. *Geosynthetics International*, 25(4), 471–480.
- [283] Yukselen-Aksoy, Y., and Kaya, A. (2013). Specific Surface Area Effect on Compressibility Behaviour of Clayey Soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(1), 76–87.
- [284] Hayashi, H., Yamazoe, N., Mitachi, T., Tanaka, H., and Nishimoto, S. (2012). Coefficient of Earth Pressure at Rest for Normally and Overconsolidated Peat Ground in Hokkaido area. *Soils and Foundations*, 52(2), 299–311.
- [285] Nicholson, D. P., and Jardine, R. J. (1981). Performance of Vertical Drains at Queenborough bypass. *Géotechnique*, 31(1), 67–90.

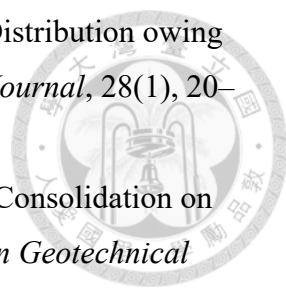
- 
- [286] Debats, J.-M., Scharff, G., Balderas, J., and Melentijevic, S. (2013). Ground Improvement Efficiency and Back-Analysis of Settlements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 166(3), 138–154.
- [287] Changizi, F., and Haddad, A. (2017). Improving the Geotechnical Properties of Soft Clay with Nano-Silica Particles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 170(2), 62–71.
- [288] Kavvadas, M., and Amorosi, A. (2000). A Constitutive Model for Structured Soils. *Géotechnique*, 50(3), 263–273.
- [289] Bergado, D. T., Chai, J. C., Miura, N., and Balasubramaniam, A. S. (1998). PVD Improvement of Soft Bangkok Clay with Combined Vacuum and Reduced Sand Embankment Preloading. *Geotech. Engng (Southeast Asian Geotechnical Society)*, 29(1), 95–121.
- [290] Taghavi, A., Muraleetharan, K. K., Miller, G. A., and Cerato, A. B. (2016). Centrifuge Modeling of Laterally Loaded Pile Groups in Improved Soft Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(4), 04015099.
- [291] Murthy, B. R. S., Vatsala, A., and Nagaraj, T. S. (1988). Can Cam-Clay Model Be Generalized? *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(5), 601–613.
- [292] Polidori, E. (2014). On the Intrinsic Compressibility of Common Clayey Soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(1), 27–47.
- [293] Day, R. W. (1994). Surficial Stability of Compacted Clay: Case Study. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(11), 1980–1990.
- [294] Fakharian, K., and Mehdizadeh, A. (2015). Investigation of Field Instrumentation in a Preloading Project. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 168(1), 87–98.
- [295] Khemissa, M., Magan, J. -P., and Josseaume, H. (1997). Laboratory Study of the Mechanical Properties of Guiche Soft Clay (Adour Valley). *Revue Française de Géotechnique*, 81, 3-25.
- [296] Xu, Y., Methiwala, J., Williams, D. J., and Serati, M. (2018). Strength and Consolidation Characteristics of Clay with Geotextile-Encased Sand Column. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 171(3), 125–134.
- [297] Meegoda, N., and Ratnaweera, P. (1994). Compressibility of Contaminated Fine-Grained Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 17(1), 101-112.

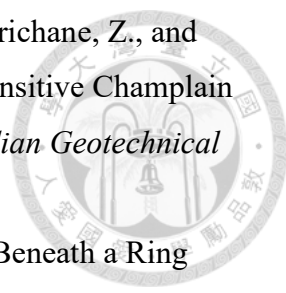
- 
- [298] Tan, Y. C., Gue. S. S., Ng, H. B., and Lee, P. T. (2003). Design Parameters of Klang Clay, Malaysia. *12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Singapore, 4th - 8th August, pg 4.
- [299] Chin, C.T., and Liu, C.C. (1997). Volumetric and Undrained Behaviors of Taipei Silty Clay. *J. of the Chinese Inst. of Civil and Hydraulic Engrg.*, 9(4), 665–678. (in Chinese)
- [300] O’Kelly, B. C. (2006). Compression and Consolidation Anisotropy of Some Soft Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(6), 1715–1728.
- [301] McCabe, B. A. (2002). *Experimental Investigations of Driven Pile Group Behaviour in Belfast Soft Clay*. PhD thesis, University of Dublin, Trinity College, Ireland.
- [302] Kelln, C., Sharma, J., Hughes, D., and Gallagher, G. (2007). Deformation of a Soft Estuarine Deposit under a Geotextile Reinforced Embankment. *Proceedings of the Soft Ground Engineering Conference*, Athlone, Ireland, 44(5), 603–617.
- [303] Filho, M. V. R., Cirone, A., Almeida, M. de S. S. de, Rodriguez, T. T., and Faria, D. de A. (2018). Site Investigation and Performance of Radial Deep Consolidation Grouting in Soft Soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 1–12.
- [304] Chakravarthi, V. K., and Phanikumar, B. R. (2006). Efficacy of Preloading Combined with Prefabricated Vertical Band Drains in Improving a Clayey Silt Stratum in Situ. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 10(4), 147–152.
- [305] Bo, M. W., Arulrajah, A., Choa, V., and Chang, M. E. (1998). Site Characterization for a Land Reclamation Project at Changi in Singapore. *Proceedings 1st International Conference on Site Characterization*, April, Atlanta, USA, 333-338.
- [306] Schnaid, F., Dienstmann, G., de Mello, L. G., and Sandroni, S. (2013). The Rio Grande Port Breakwater, Brazil; Geotechnical Design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 166(6), 56–61.
- [307] Mayne, P.W., Coop, M., Springman, S., Huang, A.B., and Zornberg, J.G. (2009). Geomaterial Behavior and Testing. State-of-the-Art Keynote Lecture, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 5-9 October, 2777-2872.

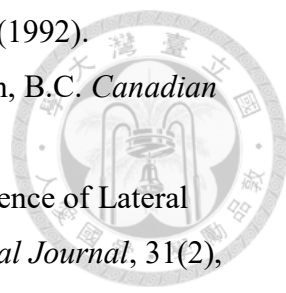
- 
- [308] Jacob, K., and Hair, G. (2016). Study on the Relationship of Compression Index from Water Content, Atterberg Limits and Field Density for Kuttanad. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 3(4), 33-38.
- [309] Akayuli, C., and Ofosu, B. (2010). Empirical Model for Estimating Compression Index from Physical Properties of Weathered Birimian Phyllites. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 6135-6144.
- [310] Ibrahim, N. M., Rahim, N. L., Amat, R. C., Salehuddin, S., and Ariffin, N. A. (2012). Determination of Plasticity Index and Compression Index of Soil at Perlis. *APCBEE Procedia*, 4, 94–98.
- [311] Jain, V. K., Dixit, M., and Chitra, R. (2015). Correlation of Plasticity Index and Compression Index of Soil. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 5(3), 263-270.
- [312] Osman, M. H., Albar, A., Hasan, A. S., and Osaman, M. (2015). Relationship of Compression Index and Initial Void Ratio for Remoulded Penang Marine Clay. *International Conference on Advances in Civil and Environmental*, pg. 12.
- [313] Cotecchia, F., and Santaloia, F. (2003). Compression Behaviour of Structurally Complex Marine Clays. *Soft Ground Engineering in Coastal Areas*, Tsuchida et al. (eds), 63-72.
- [314] Chung, S. G., Kim, S. K., Kang, Y. J., Im, J. C., and Nagendra Prasad, K. (2006). Failure of a Breakwater Founded on a Thick Normally Consolidated Clay Layer. *Géotechnique*, 56(6), 393–409.
- [315] Al Haj, K. M. A., and Standing, J. R. (2015). Mechanical Properties of Two Expansive Clay Soils from Sudan. *Géotechnique*, 65(4), 258–273.
- [316] Alonso, E. E., Gens, A., and Lloret, A. (2000). Precompression Design for Secondary Settlement Reduction. *Géotechnique*, 50(6), 645–656.
- [317] Boukpeti, N., and White, D. J. (2017). Interface Shear Box Tests for Assessing Axial Pipe–Soil Resistance. *Géotechnique*, 67(1), 18–30.
- [318] Burns, S. E., Bartelt-Hunt, S. L., Smith, J. A., and Redding, A. Z. (2006). Coupled Mechanical and Chemical Behavior of Bentonite Engineered with a Controlled Organic Phase. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1404–1412.

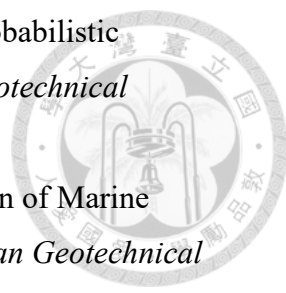
- 
- [319] Miller, G. A., Teh, S. Y., Li, D., and Zaman, M. M. (2000). Cyclic Shear Strength of Soft Railroad Subgrade. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(2), 139–147.
- [320] Thamm, B. R. (1984). Field Performance of Embankment over Soft Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(8), 1126–1146.
- [321] Ye, G., and Ye, B. (2016). Investigation of the Overconsolidation and Structural Behavior of Shanghai Clays by Element Testing and Constitutive Modeling. *Underground Space*, 1(1), 62–77.
- [322] Thoang, T. T., and Giao, P. H. (2015). Subsurface Characterization and Prediction of Land Subsidence for HCM City, Vietnam. *Engineering Geology*, 199, 107–124.
- [323] Munshi, M. K. (2003). *Geotechnical Characterization of Soft Soil along Mollahat-Noapara Road Section at Bagerhat*. M. D. thesis, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka.
- [324] Wallace, K. B. (1973). Structural Behaviour of Residual Soils of the Continually Wet Highlands of Papua New Guinea. *Géotechnique*, 23(2), 203–218.
- [325] Stark, T. D., Ebeling, R. M., and Vettel, J. J. (1994). Hyperbolic Stress-Strain Parameters for Silts. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(2), 420–441.
- [326] Cola, S., Ricceri, G., and Simonini, P. (2006). Geotechnical Characterization and Properties of Venice Lagoon Heterogeneous Silts. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 2289-2327.
- [327] Leong, E. C., Soemitro, R. A. A., and Rahardjo, H. (2000). Soil Improvement by Surcharge and Vacuum Preloadings. *Géotechnique*, 50(5), 601–605.
- [328] Hong, E. C., Bian, X., Cui, Y.-J., Gao, Y.-F, and Zeng, L, -L. (2013). Effect of Initial Water Content on Undrained Shear Behaviour of Reconstituted Clays. *Géotechnique*, 63(6), 441–450.
- [329] Rutledge, P. C. (1944). Relation of Undisturbed Sampling to Laboratory Testing. *Trans. ASCE*, 109, 1155-1216.
- [330] Won, J. Y., and Chang, P. W. (2007). The Causes of Apparent Overconsolidation in the Namak Marine Deposit, Korea. *Géotechnique*, 57(4), 355–369.
- [331] Win, B. M., Arulrajah, A., and Choa, V. (1998). The hydraulic Conductivity of Singapore Marine Clay at Changi. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 31(4), 291–299.


- 
- [332] Juneja, A., and Chafale, A. S. (2018). Consolidation Behaviour of Double-Porosity Clay Using Flexible Wall Permeameter. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 1–13.
- [333] Bjerrum, L. (1967). Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Géotechnique*, 17(2), 83–118.
- [334] Chu, J., Yan, S. W., and Zheng, Y. R. (2006). Three Soil Improvement Methods and Their Applications to Road Construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 10(3), 103–112.
- [335] Lewis, W., Murray, R., and Symons, I. (1975). Settlement and Stability of Embankments Constructed on Soft Alluvial Soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 59(4), 571–593.
- [336] Seymour Jones, A. (1972). Settlement Studies for the Chesapeake and Delaware Canal Railroad Bridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 52(1), 57–73.
- [337] Martinez, A., and Henning Stutz, H. (2018). Rate Effects on the Interface Shear Behaviour of Normally and Over-Consolidated Clay. *Géotechnique*, 1–43.
- [338] Tanaka, H., and Tsutsumi, A. (2016). Isotache Model for Consolidation with a Small Incremental Load. *Geotechnical Research*, 3(4), 180–191.
- [339] Seah, T. H. (1990). *Anisotropy of Resedimented Boston Blue Clay*. Sc.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [340] Azam, S. (2003). Influence of Mineralogy on Swelling and Consolidation of Soils in Eastern Saudi Arabia. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 964–975.
- [341] Cortellazzo, G. (2002). Comparison Between Laboratory and in Situ Values of the Coefficient of Primary Consolidation C_v . *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 103–110.
- [342] Lefebvre, G., and Burnotte, F. (2002). Improvements of Electroosmotic Consolidation of Soft Clays by Minimizing Power Loss at Electrodes. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 399–408.
- [343] Cortellazzo, G., and Simonini, P. (2001). Permeability Evaluation and Its Implications for Consolidation Analysis of an Italian Soft Clay Deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(6), 1166–1176.

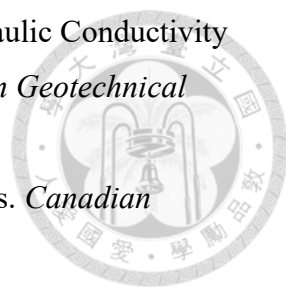
- 
- [344] Griffiths, F. J., and Joshi, R. C. (1991). Change in Pore Size Distribution owing to Secondary Consolidation of Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 20–24.
- [345] Kodikara, J. K., and Rahman, F. (2002). Effects of Specimen Consolidation on the Laboratory Hydraulic Conductivity Measurement. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 908–923.
- [346] Crawford, C. B., and DeBoer, L. J. 1987). Field Observations of Soft Clay Consolidation in the Fraser Lowland. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(2), 308–317.
- [347] Deng, Y.-F., Tang, A.-M., Cui, Y.-J., and Li, X.-L. (2011). Study on the Hydraulic Conductivity of Boom Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(10), 1461–1470.
- [348] Cimentada, A., Da Costa, A., Cañizal, J., and Sagasetta, C. (2011). Laboratory Study on Radial Consolidation and Deformation in Clay Reinforced with Stone Columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), 36–52.
- [349] Chakrabarti, S., and Horvath, R. G. (1985). Slope of Consolidation Lines. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 254–258.
- [350] Mohamedelhassan, E., and Shang, J. Q. (2002). Vacuum and Surcharge Combined One-Dimensional Consolidation of Clay Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1126–1138.
- [351] Liu, L., Elwood, D., Martin, D., and Chalaturnyk, R. (2018). Determination of Permeability of Overconsolidated Clay from Pressuremeter Pressure Hold Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(4), 514–527.
- [352] Umar, M., and Sadrekarimi, A. (2017). Accuracy of Determining Pre-Consolidation Pressure from Laboratory Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(3), 441–450.
- [353] Raymond, G. P. (1966). Laboratory Consolidation of Some Normally Consolidated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(4), 217–234.
- [354] Blight, G. E. (1988). Keynote Paper: Construction in Tropical Soil. *Geomechanics in Tropical Soils*, 2, 449-467.
- [355] Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P., and Chiocci, F. L. (2009). Simple Shear Testing of Sensitive, Very Soft Offshore Clay for Wide Strain Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1277–1288.


- 
- [356] Chehat, A., Hussien, M. N., Abdellaziz, M., Chekired, M., Harichane, Z., and Karray, M. (2018). Stiffness-And Damping-Strain Curves of Sensitive Champlain Clays through Experimental and Analytical Approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(3), 364-377.
- [357] Lo, K. Y., and Becker, D. E. (1979). Pore-Pressure Response Beneath a Ring Foundation on Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(3), 551–566.
- [358] Amarisiri, A., Shannon, B., and Kodikara, J. (2014). Numerical Modelling of Desiccation Cracking in a Restrained Ring Test. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(1), 67–76.
- [359] Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K., and Jefferies, M. G. (1987). Work as a Criterion for Determining in Situ and Yield Stresses in Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 549–564.
- [360] Berre, T. (2014). Test Fill on Soft Plastic Marine Clay at Onsøy, Norway. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(1), 30–50.
- [361] Brown, J. D., and Rashid, M. A. (1975). Geotechnical Properties of Nearshore Sediments of Canso Strait, Nova Scotia. *Canadian Geotechnical Journal*, 12(1), 44–57.
- [362] Brugger, P. J., Soares de Almeida, M. de S., Sandroni, S. S., and Lacerda, W. A. (1998). Numerical Analysis of the Breakwater Construction of Sergipe Harbour, Brazil. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), 1018–1031.
- [363] Brzezinski, L. S. (1968). The Performance of a Timber Crib Founded on Soft Very Sensitive Lacustrine Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(1), 1–15.
- [364] Campanella, R. G., and Vaid, Y. P. (1972). A Simple Ko Triaxial Cell. *Canadian Geotechnical Journal*, 9(3), 249–260.
- [365] Casagrande, L., Firing, P., Schoof, G., and Tttrcke, E. J. (1965). Settlement of Mat Foundation on Thick Stratum of Sensitive Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(4), 299–312.
- [366] Chai, J., and Chanmee, N. (2018). A Modified Method for Estimating Permeability of Clayey Soils Based on Piezocone Sounding Results. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(9), 1268–1281.
- [367] Crawford, C. B., and Sutherland, J. G. (1971). The Empress Hotel, Victoria, British Columbia. Sixty-Five Years of Foundation Settlements. *Canadian Geotechnical Journal*, 8(1), 77–93.

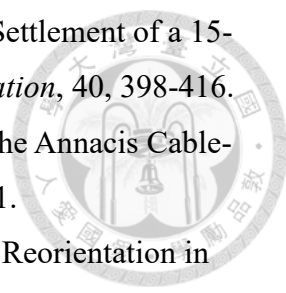
- 
- [368] Crawford, C. B., Fannin, R. J., Deboer, L. J., and Kern, C. B. (1992). Experiences with Prefabricated Vertical (wick) Drains at Vernon, B.C. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(1), 67–79.
- [369] Crawford, C. B., Jitno, H., and Byrne, P. M. (1994). The Influence of Lateral Spreading on Settlements Beneath a Fill. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 145–150.
- [370] Dascal, O., Larocque, G. S., and Tournier, J.-P. (1973). Digue D’essai Pour L’étude Des Tassements D’une Fondation D’argile Molle et Sensible. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(3), 363–391.
- [371] Demars, K. R., and Charles, R. D. (1982). Soil Volume Changes Induced by Temperature Cycling. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(2), 188–194.
- [372] Eden, W. J., and Poorooshasb, H. B. (1968). Settlement Observations at Kars Bridge. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(1), 28–45.
- [373] Eigenbrod, K. D., and Burak, J. B. (1991). Effective Stress Paths and Pore-Pressure Responses during Undrained Shear along the Bedding Planes of Varved Fort William Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 804–811.
- [374] Elsamny, M. K. (1973). Evaluation of the Elasticity of Clay Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 10(4), 632–642.
- [375] Golder, H. Q., and Osler, J. C. (1968). Settlement of a Furnace Foundation, Sorel, Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(1), 46-56.
- [376] Hardy, R. M. (1965). Identification and Performance of Swelling Soil Types. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(2), 141–153.
- [377] Hinchberger, S. D., and Rowe, R. K. (2005). Evaluation of the Predictive Ability of Two Elastic-Viscoplastic Constitutive Models. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), 1675–1694.
- [378] Karunaratne, G. P., Tan, S. A., Lee, S. L., and Choa, V. (1989). Analysis of Flexible Drains in Changi Reclamation. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(3), 401–417.
- [379] Konrad, J.-M., and Seto, J. T. C. (1994). Frost Heave Characteristics of Undisturbed Sensitive Champlain Sea Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 285–298.

- 
- [380] Krizek, R. J., Corotis, R. B., and El-Moursi, H. H. (1977). Probabilistic Analysis of Predicted and Measured Settlements. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1), 17–33.
- [381] Lee, K.-M., and Ng, P. C. (1999). A Geotechnical Investigation of Marine Deposits in a Nearshore Seabed for Land Reclamation. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), 981–1000.
- [382] Lo, K. Y., and Ho, K. S. (1991). The Effects of Electroosmotic Field Treatment on the Soil Properties of a Soft Sensitive Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 763–770.
- [383] Locat, J., and Leroueil, S. (1988). Physicochemical and Geotechnical Characteristics of Recent Saguenay Fjord Sediments. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(2), 382–388.
- [384] Low, H.-E., and Phoon, K.-K. (2008). Effect of Cementation on the Compressibility of Singapore Upper Marine Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(7), 1018–1024.
- [385] Mesri, G., and Feng, T.-W. (2018). Constant Rate of Strain Consolidation Testing of Soft Clays and Fibrous Peats. *Canadian Geotechnical Journal*, pg 39.
- [386] Morissette, L., St-Louis, M. W., and McRostie, G. C. (2001). Empirical Settlement Predictions in Overconsolidated Champlain Sea Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 720–731.
- [387] Powell, J. S., Take, W. A., Siemens, G., and Remenda, V. H. (2012). Time-Dependent Behaviour of the Bearpaw Shale in Oedometric Loading and Unloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(4), 427–441.
- [388] Qiu, Q. C., Mo, H. H., and Dong, Z. L. (2007). Vacuum Pressure Distribution and Pore Pressure Variation in Ground Improved by Vacuum Preloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(12), 1433–1445.
- [389] Raymond, G. P., Townsend, D. L., and Lojkasek, M. J. (1971). The Effect of Sampling on the Undrained Soil Properties of a Leda Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 8(4), 546–557.
- [390] Rivard, P. J., and Goodwin, T. E. (1978). Geotechnical Characteristics of Compacted Clays for Earth Embankments in the Prairie Provinces. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 391–401.

- 
- [391] Sauer, E. K., and Christiansen, E. A. (1991). Preconsolidation Pressures in the Battleford Formation, Southern Saskatchewan, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(10), 1613–1623.
- [392] Sauer, E. K., and Christiansen, E. A. (1988). Preconsolidation Pressures in Intertill Glaciolacustrine Clay Near Blaine Lake, Saskatchewan. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 831–839.
- [393] Sauer, E. K., Egeland, A. K., and Christiansen, E. A. (1993). Compression Characteristics and Index Properties of Tills and Intertill Clays in Southern Saskatchewan, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), 257–275.
- [394] Yin, J.-H. (1999). Properties and Behaviour of Hong Kong Marine Deposits with Different Clay Contents. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), 1085–1095.
- [395] Yong, R. N., Taplin, D., and Wiseman, G. (1980). Influence of Cyclic Load Input on the Mechanical Properties of a Sensitive Soil from Orleans, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), 498–508.
- [396] Zhu, G., Yin, J.-H., and Graham, J. (2001). Consolidation Modelling of Soils under the Test Embankment at Chek Lap Kok International Airport in Hong Kong Using a Simplified Finite Element Method. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), 349–363.
- [397] Perpich, W. M., Lukas, R. G., and Baker, Jr., C. N. (1965). Desiccation of Soil by Trees Related to Foundation Settlement. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(1), 23–39.
- [398] Gasparre, A., and Coop, M. R. (2008). Quantification of the Effects of Structure on the Compression of a Stiff Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1324–1334.
- [399] Lefebvre, G., Bozozuk, M., Philibert, A., and Hornych, P. (1991). Evaluating K_0 in Champlain Clays with Hydraulic Fracture Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(3), 365–377.
- [400] Ripley, C. F. (1995). Preloading Thick Compressible Subsoils: a Case History. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(3), 465–480.
- [401] Brzezinski, L. S. (1969). Behavior of an Overpass Carried on Footings and Friction Piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(4), 369–382.

- 
- [402] Yanful, E. K., Shikatani, K. S., and Quirt, D. H. (1995). Hydraulic Conductivity of Natural Soils Permeated with Acid Mine Drainage. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 624–646.
- [403] Baracos, A. (1969). Design of Foundations on Winnipeg Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(2), 197–208.
- [404] Chai, J.-C., Miura, N., and Shen, S.-L. (2002). Performance of Embankments with and without Reinforcement on Soft Subsoil. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 838–848.
- [405] Stermac, A. G., Lo, K. Y., and Barsvary, A. K. (1967). The Performance of an Embankment on a Deep Deposit of Varved Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 4(1), 45–61.
- [406] Lo, K. Y., and Stermac, A. G. (1964). Some Pile Loading Tests in Stiff Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(2), 63–80.
- [407] Dusseault, M. B., and Scafe, D. (1979). Mineralogical and Engineering Index Properties of the Basal McMurray Formation Clay Shales. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(2), 285–294.
- [408] Bertok, J. (1987). Settlement of Embankments and Structures at Vancouver International Airport. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(1), 72–80.
- [409] Tian, W.-M., Silva, A. J., Veyera, G. E., and Sadd, M. H. (1994). Drained Creep of Undisturbed Cohesive Marine Sediments. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(6), 841–855.
- [410] Moulin, G. (1989). Caractérisation De L'état Limite De L'argile De Pornic. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 705–717.
- [411] Baracos, A., Graham, J., and Domaschuk, L. (1980). Yielding and Rupture in a Lacustrine Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), 559–573.
- [412] Batenipour, H., Alfaro, M., Kurz, D., and Graham, J. (2014). Deformations and Ground Temperatures at a Road Embankment in Northern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(3), 260–271.
- [413] Callisto, L., and Rampello, S. (2004). An Interpretation of Structural Degradation for Three Natural Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 392–407.

- 
- [414] Gajo, A., and Colleselli, F. (2009). Calculated and Observed Behaviour of Clayey Soil under Cyclic Loading Beneath Preloading Embankments for Oil Tanks. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(5), 494–512.
- [415] Giao, P. H., Dung, N. T., and Long, P. V. (2008). An Integrated Geotechnical–Geophysical Investigation of Soft Clay at a Coastal Site in the Mekong Delta for Oil and Gas Infrastructure Development. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(11), 1514–1524.
- [416] Labossiere, J. L., Sauer, E. K., and Christiansen, E. A. (1989). Postfailure Analysis; Tramping Lake Causeway, Saskatchewan, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 687–704.
- [417] McClung, J. E., and Mollard, J. D. (1987). Predicting Settlement at a Damsite on a Tunnel Valley Deposit in Alberta. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(1), 45–57.
- [418] Meriggi, R., Paronuzzi, P., and Simeoni, L. (2000). Engineering Geology Characterization of Lacustrine Overconsolidated Clays in an Alpine Area of Italy. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1241–1251.
- [419] Meyerhof, G. G., and Sebastyan, G. Y. (1970). Settlement Studies on Air Terminal Building and Apron, Vancouver International Airport, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 7(4), 433–456.
- [420] Öncü, Ş., and Bilsel, H. (2017). Effect of Zeolite Utilization on Volume Change and Strength Properties of Expansive Soil as Landfill Barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(9), 1320–1330.
- [421] Suddeepong, A., Chai, J., Shen, S., and Carter, J. (2015). Deformation Behaviour of Clay under Repeated One-Dimensional Unloading–Reloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1035–1044.
- [422] Yong, R. N., and Silvestri, V. (1979). Anisotropic Behaviour of a Sensitive Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(2), 335–350.
- [423] Rowe, R. K., Gnanendran, C. T., Landva, A. O., and Valsangkar, A. J. (1996). Calculated and Observed Behaviour of a Reinforced Embankment over Soft Compressible Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 324–338.
- [424] Ali, S. (1993). *Engineering Properties of Undisturbed Samples of Boston Blue Clay*. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- 
- [425] Wimberly, P. M., Mazzella, S. G., and Nerman, F. B. (1994). Settlement of a 15-Meter Deep Fill below a Building. *Geotechnical Special Publication*, 40, 398-416.
- [426] Bazett, D. J., and McCammon, N. R. (1986). Foundations of the Annacis Cable-Stayed Bridge. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4), 458-471.
- [427] Duncan, J. M., and Seed, H. B. (1966). Anisotropy and Stress Reorientation in Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(5), 21-50.

附錄II 口試問答紀錄



提問者	問題與建議	回覆
王瑞斌 老師	<p>在案例驗證中，只要有落在 95%信賴區間中，就認為預測成果是好的，但事實上有 些 95%信賴區間範圍還蠻大的，有沒有更好的方法來檢驗預測的成效好不好？</p>	<p>我們目前沒有更有效的方法可以確認預測的成效好不好，而 95%信賴區間範圍很大也是我們無法控制的，因為資料的呈現就是如此，但可以發現，透過加入現地的新資訊，預測樣本 95%信賴區間有比資料庫的 95%信賴區間小，而測量參數越完整的案例中，95%信賴區間會會越小。</p>
	<p>扣除 1000 次的 burn-in period 樣本是指什麼？</p>	<p>執行吉普斯取樣法時，一開始會給定初始值，所以一開始的結果會離收斂值很遠，我們所需要的樣本只有收斂後的樣本，這些未收斂的樣本我們稱做為 burn-in period，正確的做法應該是要用肉眼判斷，我們採用的 1000 次是以往的經驗，是個保守的次數。</p>
林志平 老師	<p>計算最終壓密沉陷量時，除了 e_0、σ'_v、C_c 和 C_s 這些參數，σ'_p 也是需要使用到的參數，為什麼沒有加入資料庫中一起分析呢？</p>	<p>學長姐已經有建立 σ'_p 與其他參數的資料庫，所以如果想得知 σ'_p 的值可以使用學長姐的資料庫，但是不加入 σ'_p 最主要的原因是因為它與 C_c、C_s 和 c_v 沒有相關性。</p>

	<p>LL、PL、PI 三個阿太堡指數，只要能夠得到其中兩個就能得到另一個；黏土的 G_s 範圍也沒有很大，w_n 和 e_0 也是一體兩面的參數，只要有其中一個就可以假設 G_s 來得到另一個參數。這些可以重複的參數有需要加入資料庫中嗎？</p>	<p>從相關係數矩陣(表 3.5)中，可以發現三個阿太堡限度的相關性都很高，所以使用三個或兩個參數應該不會差異太大，與卿老師討論後，三個參數中，我們去除 PL 留下 LL 以及 PI。在蒐集資料時，文獻中可能只有 w_n 和 C_c 或者 e_0 和 C_c，並不一定同時有 w_n、e_0 和 C_c，所以如果只挑其中一個可能會影響到資料量，如果用 G_s 換算的話，可能會不準確，因為資料庫中的資料，有可能是有機黏土，其 G_s 會比一般我們所認知的黏土 $G_s = 2.65 \sim 2.75$ 還要小，如果直接換算會是錯誤的，而 G_s 與其它參數沒有相關性，與卿老師討論後，決定去除 G_s。</p>
--	--	---