

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

基於全球資料庫的地區性土壤液化潛能預測

Prediction for Regional Soil Liquefaction Potential Based
on Global Database

涂育彰

Yu-Jhang Tu

指導教授：卿建業 博士

Advisor: Jianye Ching, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June, 2023

致謝

首先，我要感謝我的指導教授，卿建業教授，這兩年來老師給予我很大的空間可以調配研究的進度，並給予我研究的方向和教導我研究上的相關知識，在我遇到問題時也願意給予我協助。

在進入臺大的這兩年，遇到了許多學長以及同學，感謝朋盛和品淳學長在這段期間給予我的幫助，不管是學業還是研究上，感謝俊翔學長在我碩二時給我的幫助，最後這三個多月教導我太多太多，雖然途中出現許多波折，但你總是充滿耐心讓我詢問，我充滿感激，也感謝俊廷、羿帆、錦德和研究室的同學們，和你們一起做研究、玩樂、健身和聊天的日子真的很快樂，兩年不長，但有許多我們的回憶，謝謝你們豐富了我的碩士生活。

接著我要感謝我的家人，我的父母和祖父母，謝謝你們一路以來的養育之恩，在學習的過程中讓我可以很自由的做我想做的事，讓我能無後顧之憂的完成我的學業，能成為你們的家人很幸福。

最後我要感謝我的女朋友楊曉晴，這兩年又要準備考試又要完成學業真的相當忙碌，沒有太多時間陪伴，感謝你時常來臺北陪我，一起體驗生活，一起去沒去過的地方，一起吃沒吃過的東西，未來也請繼續地陪伴。

感謝曾經幫助過我，給予過我鼓勵的所有人，謝謝你們。

摘要

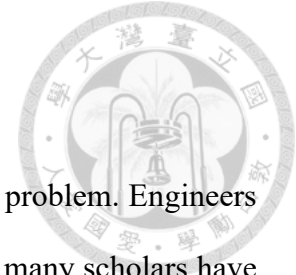
在大地工程領域中，土壤液化是相當重要的議題，工程師在設計時必須評估土壤液化潛能，因此有許多的學者提出預測模型來預測土壤液化潛能，然而這些預測模型都將全球的液化數據視為同一群體進行分析，但土壤液化應該受各區域以及土壤性質所影響，不應將全球的液化數據視為同一群體進行分析。近年來大數據分析和機器學習在各領域的應用上皆有一定的發展，因此本研究希望透過大數據分析建立起可以準確地預測土壤液化潛能之模型，且此模型需保有各區域的特性。

首先，會先回顧前人有關土壤液化的文獻，了解預測土壤液化潛能的各種方法，以及通常都運用哪些土壤參數進行分析，本研究會收集較具代表性的土壤參數，包括總應力與有效應力比值(σ_v/σ'_v)、正規化 N 值($(N_1)_{60}$)、正規化 q_c 值(q_{c1N})、土壤類型因子(I_c)、正規化 V_s 值(V_{s1})和細粒料含量(FC)，並代入前人的預測模型檢驗資料的正確性。

接著利用改良式層級貝氏模型(RHBM)進行分析，過程中會使用 Johnson 分布系統將參數轉換至標準常態空間，接著搭配吉普森取樣及貝氏分析中的共軛條件來學習參數間的相關性，且同時學習資料庫中各區域的行為特性，並將資料庫中的空缺資料填補，搭配目標區域中有限的已知資訊來推估未知資料的分布，推估出資料後即可運用此資料進行土壤液化機率的計算。

關鍵字:大數據分析、改良式層級貝氏模型、Johnson 分布系統、土壤液化、全球資料庫、吉普森取樣法

Abstract



In geotechnical engineering, soil liquefaction is very important problem. Engineers must evaluate soil liquefaction potential when designing. Therefore, many scholars have proposed prediction models to predict soil liquefaction potential. However, these prediction models all regard global liquefaction data as the same group for analysis, but soil liquefaction should be affected by various regions and soil properties, liquefaction data should not be analyzed as the same group. In recent years, the application of big data analysis and machine learning in various fields has developed to a certain extent. Therefore, this study hopes to establish a model that can accurately predict the potential of soil liquefaction through big data analysis, and this model have to maintain the characteristics of each region.

First of all, we will review the previous literature on soil liquefaction, understand various methods for predicting the potential of soil liquefaction, and what soil parameters are usually used for analysis. This study will collect more representative soil parameters, including the ratio of total stress to effective stress (σ_v/σ'_v), normalized N value $(N_1)_{60}$, Normalization q_c value q_{c1N} , soil type factor (I_c), normalized V_s value (V_{s1}) and fines content (FC) were substituted into previous prediction models to verify the accuracy of the data.

Then the revised hierarchical bayesian model (RHBM) is used for analysis. In the process, the Johnson distribution system will be used to convert the parameters to the standard normal distribution, and then the gibbs sampling and conjugate conditions in bayesian analysis will be used to learn the correlation between the parameters. At the same time, the behavior characteristics of each region in the database will be learned, and the unknown data will be estimated with the limited known information in the target

region, the data can be used to calculate the probability of soil liquefaction.



Key words: Big data analysis, Revised Hierarchical Bayesian model, Johnson distribution system, Soil liquefaction, Global database, Gibbs sampler



目錄

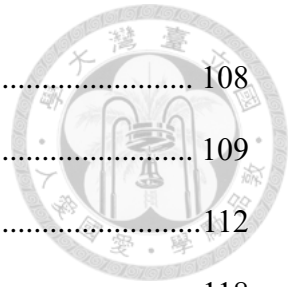


致謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	v
圖目錄	ix
表目錄	xiii
第一章 前言	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究方法	2
1.3 研究流程	3
1.4 本文內容	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 土壤液化介紹	5
2.1.1 土壤液化發生過程	5
2.1.2 土壤液化破壞類型	6
2.2 評估液化潛能之室內試驗	8
2.2.1 動力三軸試驗	8
2.2.2 反覆單剪試驗	8
2.3 評估液化潛能之數值分析法	8
2.4 評估液化潛能之應力法-現地試驗	9
2.4.1 標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT).....	9
2.4.2 圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT).....	10

2.4.3 跨孔式試驗(Cross-hole Seismic Test).....	11
2.4.4 下孔式試驗(Downhole Test)	12
2.4.5 表面波譜法(Spectral Analysis of Surface Waves, SASW)	12
2.5 評估液化潛能之應力法-Critical layer.....	13
2.5.1 Seed et al. (1985).....	14
2.5.2 Moss et al. (2006).....	14
2.5.3 Hu and Liu (2019)	15
2.5.4 Hwang et al. (2021)	15
2.6 評估液化潛能之應力法經驗式	16
2.6.1 Seed et al. (1985).....	16
2.6.2 Tokimatsu and Yoshimi (1983).....	18
2.6.3 AIJ 法(2001).....	19
2.6.4 日本道路協會(JRA1990 法)	20
2.6.5 NCEER (1997)	21
2.6.6 NCEER (2001)	22
2.6.7 Shibata and Teparaksa (1988).....	22
2.6.8 NCEER(1997)	23
2.6.9 NCEER (2001)	24
2.6.10 Juang et al. (2003)	24
2.6.11 Boulanger and Idriss (2016)	25
2.6.12 Ku and Juang (2012).....	26
2.6.13 NCEER (1997)	27
2.6.14 NCEER (2001)	28
2.6.15 Kayen et al. (2013)	29
2.7 Generic model.....	30

2.8 HBM 的應用	31
第三章 資料庫建構	32
3.1 資料庫介紹	33
3.2 資料蒐集方法	39
3.3 檢核資料庫的正確性	39
3.4 資料庫參數計算之假設	40
3.5 本研究資料庫資料與前人預測模型比對	42
3.6 本研究選用之預測模型	60
第四章 層級貝氏模型(HBM)	62
4.1 簡介	62
4.2 資料前處理	63
4.2.1 取自然對數	63
4.2.2 Johnson 分布系統	64
4.3 HBM 架構	71
4.4 RHBM 架構	72
4.4.1 貝氏分析(Bayesian analysis)	72
4.4.2 封閉型式下的條件機率	73
4.4.3 學習階段(Learning stage)	75
4.4.4 推論階段(Inference stage)	80
第五章 模擬結果與案例驗證	82
5.1 超參數模擬結果	82
5.2 通用液化預測表現的比較	92
5.3 特定地區場址液化預測表現的比較	95
第六章 結論與未來建議	107
6.1 結論	107

6.2 未來建議.....	108
參考文獻.....	109
附錄 I 「Liquefaction /6/2759」資料庫.....	112
資料庫參考文獻.....	118
附錄 II 口試問答紀錄.....	120



圖目錄



圖 1.1 量測參數與設計參數之轉換誤差(Ching and Phoon, 2014).....	1
圖 2.1 液化導致土壤顆粒排列改變過程 (Obermeier, 1996).....	5
圖 2.2 結構物傾斜示意圖 (Youd, 1984).....	6
圖 2.3 噴砂示意圖 (Obermeier, 1996).....	6
圖 2.4 地面震盪示意圖 (Obermeier, 1996).....	7
圖 2.5 側潰示意圖 (Obermeier, 1996).....	7
圖 2.6 跨孔式試驗示意圖 (Foti, 2012).....	11
圖 2.7 下孔式試驗示意圖 (Foti, 2012).....	12
圖 2.8 表面波譜試驗示意圖 (Foti, 2012).....	12
圖 2.9 CPT 數據示意圖 (NGL).....	13
圖 2.10 臨界液化強度曲線 (Seed et al., 1985).....	16
圖 2.11 C_N 值圖表 (Seed et al., 1985).....	17
圖 2.12 r_d 值圖表 (Seed et al., 1985).....	17
圖 2.13 Shibata and Teparaksa 建議之臨界液化曲線 (Shibata and Teparaksa, 1988)	22
圖 2.14 Andrus and Stokoe 建議之臨界液化曲線 (Andrus and Stokoe, 1997)	27
圖 2.15 Andrus and Stokoe 建議之臨界液化曲線 (Andrus and Stokoe, 2000)	29
圖 2.16 Kayen et al.建議之臨界液化曲線 (Kayen et al., 2013).....	30
圖 3.1 區域與資料數量分布圖	33
圖 3.2 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 分布圖	34
圖 3.3 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 分布圖.....	34
圖 3.4 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 分布圖	35
圖 3.5 q_{c1N} 與 V_{s1} 分布圖	35
圖 3.6 q_{c1N} 與 I_c 分布圖.....	36



圖 3.7 I_c 與FC 分布圖	36
圖 3.8 Seed et al., (1985)臨界液化曲線($FC\% \geq 15\%$).....	42
圖 3.9 Seed et al., (1985) 臨界液化曲線($FC\% < 15\%$)	43
圖 3.10 AIJ (2001) 臨界液化曲線.....	44
圖 3.11 SPT-NCEER (1997)臨界液化曲線($FC\% \geq 15\%$).....	46
圖 3.12 SPT-NCEER (1997)臨界液化曲線($FC\% < 15\%$).....	46
圖 3.13 SPT-NCEER (2001)臨界液化曲線($FC\% \geq 15\%$).....	47
圖 3.14 SPT-NCEER (2001)臨界液化曲線($FC\% < 15\%$).....	48
圖 3.15 Shibata et al., (1988)臨界液化曲線($D_{50} < 0.25\text{mm}$).....	49
圖 3.16 Shibata et al., (1988)臨界液化曲線($D_{50} \geq 0.25\text{mm}$)	49
圖 3.17 CPT-NCEER (1997)分析流程 (Robertson and Wride, 1998)	50
圖 3.18 CPT-NCEER (1997)臨界液化曲線.....	51
圖 3.19 CPT-NCEER (2001)臨界液化曲線.....	52
圖 3.20 Juang (2003)臨界液化曲線.....	53
圖 3.21 Boulanger and Idriss (2016)臨界液化曲線.....	54
圖 3.22 V_s -NCEER (1997)臨界液化曲線($FC\% \geq 20\%$).....	56
圖 3.23 V_s -NCEER (1997)臨界液化曲線($FC\% < 20\%$).....	56
圖 3.24 V_s -NCEER (1997)臨界液化曲線(沒有 FC).....	57
圖 3.25 V_s -NCEER (2001)臨界液化曲線($FC\% \geq 20\%$).....	57
圖 3.26 V_s -NCEER (2001)臨界液化曲線($FC\% < 20\%$).....	58
圖 3.27 V_s -NCEER (2001)臨界液化曲線(沒有 FC).....	58
圖 3.28 Kayen et al., (2013)臨界液化曲線.....	59
圖 3.29 Kayen et al., (2013)臨界液化曲線(沒有 FC).....	60
圖 3.30 Juang (2003)套用 Robertson (2009)之安全係數比較.....	61

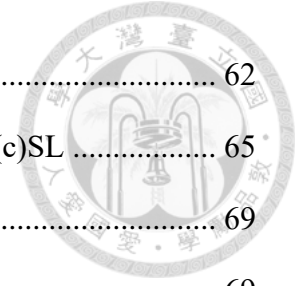


圖 4.1 群體資料和趨勢的示意圖(Ching et al., 2021).....	62
圖 4.2 Johnson 分布系統中三種型態的分布表現: (a)SU ; (b)SB ; (c)SL	65
圖 4.3 σ_{v0}/σ'_{v0} 和 $(N_1)_{60}$ 的 Y 分布與 X 分布之長條圖	69
圖 4.4 q_{c1N} 和 I_c 的 Y 分布與 X 分布之長條圖	69
圖 4.5 V_{s1} 和 FC 的 Y 分布與 X 分布之長條圖	70
圖 4.6 HBM 架構圖(Ching et al., 2021).....	71
圖 4.7 修正之 HBM 架構圖	72
圖 5.1 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖	83
圖 5.2 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖.....	83
圖 5.3 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖	84
圖 5.4 q_{c1N} 與 V_{s1} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖	84
圖 5.5 q_{c1N} 與 I_c 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖.....	85
圖 5.6 I_c 與FC 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖	85
圖 5.7 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖	86
圖 5.8 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖.....	86
圖 5.9 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖	87
圖 5.10 q_{c1N} 與 V_{s1} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖	87
圖 5.11 q_{c1N} 與 I_c 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖	88
圖 5.12 I_c 與FC 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖	88
圖 5.13 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 的原始資料點與模擬資料點分布圖	89
圖 5.14 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 的原始資料點與模擬資料點分布圖.....	89
圖 5.15 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 的原始資料點與模擬資料點分布圖	90
圖 5.16 q_{c1N} 與 V_{s1} 的原始資料點與模擬資料點分布圖	90
圖 5.17 q_{c1N} 與 I_c 的原始資料點與模擬資料點分布圖.....	91
圖 5.18 I_c 與FC 的原始資料點與模擬資料點分布圖	91



圖 5.19 通用液化預測機率比較-SPT.....	92
圖 5.20 通用液化預測機率比較-CPT	93
圖 5.21 通用液化預測機率比較- V_s	94
圖 5.22 USA-Monterey-560 預測機率比較-SPT.....	96
圖 5.23 USA-Monterey-560 $\ln(m)$ 期望值分布圖-SPT.....	96
圖 5.24 Taiwan-Chiayi-413 預測機率比較-SPT	98
圖 5.25 Taiwan-Chiayi-413 $\ln(m)$ 期望值分布圖-SPT.....	98
圖 5.26 Mexico-Mexicali-27 預測機率比較-CPT	100
圖 5.27 Mexico-Mexicali-27 $\ln(m)$ 期望值分布圖-CPT	100
圖 5.28 Taiwan-Taichung-292 預測機率比較-CPT	102
圖 5.29 Taiwan-Taichung-292 $\ln(m)$ 期望值分布圖-CPT	102
圖 5.30 USA-Imperial-658 預測機率比較- V_s	103
圖 5.31 USA-Imperial-658 $\ln(m)$ 期望值分布圖- V_s	104
圖 5.32 New Zealand-Canterbury-468 預測機率比較- V_s	105
圖 5.33 New Zealand-Canterbury-468 $\ln(m)$ 期望值分布圖- V_s	105
圖 5.34 各區域 $\ln(m)$ 期望值與變異數分布圖	106

表目錄



表 2.1 SPT 夯錘效率修正係數 (Skempton, 1986)	9
表 2.2 SPT 鑽孔直徑、取樣器以及鑽桿長度修正係數 (Skempton, 1986)	10
表 2.3 摩擦比土壤分類表 (Vos, 1982).....	11
表 2.4 $(N_1)_{60}$ 和結構物破壞情形分類表 (Seed et al., 1985).....	14
表 2.5 ΔN_f 計算表 (Tokimatsu and Yoshimi, 1983).....	18
表 2.6 土壤類型分類 (Robertson, 1990).....	24
表 3.1 「Liquefaction/6/2759」資料庫數量矩陣	37
表 3.2 「Liquefaction/6/2759」地區數量矩陣	38
表 3.3 土壤基本性質 (Chao et al., 2010)	40
表 3.4 各國夯錘效率假設	40
表 3.5 Tokimatsu and Yoshimi (1983)分析結果.....	43
表 3.6 AIJ (2001)分析結果.....	44
表 3.7 日本道路協會(JRA1990 法)分析結果	45
表 3.8 SPT-NCEER (1997)分析結果.....	45
表 3.9 SPT-NCEER (2001)分析結果.....	47
表 3.10 Shibata et al., (1988)分析結果.....	48
表 3.11 CPT-NCEER (1997)分析結果	51
表 3.12 CPT-NCEER (2001)分析結果	52
表 3.13 Juang (2003)分析結果	53
表 3.14 Boulanger and Idriss (2016)分析結果($P_L=50\%$).....	54
表 3.15 Ku and Juang (2012)分析結果.....	55
表 3.16 V_s -NCEER (1997)分析結果	55
表 3.17 V_s -NCEER (2001)分析結果	55

表 3.18 Kayen et al., (2013)分析結果($P_L=15\%$)	59
表 3.19 Juang (2003)與 Robertson (2009)計算 q_{c1N} 、 I_c 和 FS之誤差值	60
表 3.20 Juang (2003)與 Robertson (2009)計算 q_{c1N} 、 I_c 和 FS之誤差值	61
表 4.1 參數定義	63
表 4.2 參數 $Y_1 \sim Y_6$ 分布轉成 Johnson 分布之類型、分布參數和 p-value	68
表 5.1 通用液化預測準確率比較-SPT	93
表 5.2 通用液化預測準確率比較-CPT	93
表 5.3 通用液化預測準確率比較- V_s	94
表 5.4 USA-Monterey-560 驗證資料	95
表 5.5 Taiwan-Chiayi-413 驗證資料	97
表 5.6 Mexico-Mexicali-27 驗證資料	99
表 5.7 Taiwan-Taichung-292 驗證資料	101
表 5.8 USA-Imperial-658 驗證資料	103
表 5.9 New Zealand-Canterbury-468 驗證資料	104



第一章 前言

1.1 研究背景與動機

土壤液化是大地工程中相當重要的議題，像是 1964 年日本的新瀉地震、1989 年的 Loma prieta 地震、1995 年日本的 Kobe 地震和 1999 年臺灣的集集地震都發生了嚴重的土壤液化，一旦發生液化會造成許多的災害，包括基礎乘載力喪失、基礎沉陷量增大，甚至傾倒等等。因此工程師在設計前必須考量工址發生液化的可能性，但目前的做法大多使用該場址的鑽探資料搭配經驗公式進行設計，不會考量周圍場址的液化資訊，且缺少任一參數就不能計算安全係數。

在大地工程中，通常需要許多土壤參數才能進行工程設計，然而土壤有著高度的變異性，因此在設計前需做許多的試驗來求得土壤參數，但工程有工期以及預算上的考量，工程師常用以前學者所提出的轉換模型(Transformation model)推估土壤參數，此舉可有效節省時間與成本，然而轉換模型存在著許多不確定性，如圖 1.1，包括量測數據時所產生的不確定性，以及許多數據是研究特定區域或特定種類的土壤而得，若直接使用轉換的土壤參數進行設計，很可能會造成預估強度與實際強度的差異過大。

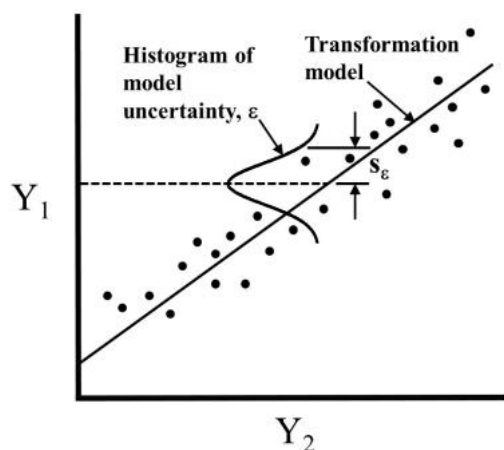



圖 1.1 量測參數與設計參數之轉換誤差(Ching and Phoon, 2014)



因此本研究希望收集大量世界各地的土壤液化數據，建立一個土壤液化資料庫，透過大數據分析找出參數間的關係，以及利用有限目標區域的已知資訊推估目標區域的土壤液化相關參數及液化機率，解決大地工程在設計上常有的資料不完整以及沒有考慮周圍場址液化資訊的問題。

1.2 研究方法

本研究從各大期刊中收集了世界各地的土壤液化數據，建構了一個土壤液化資料庫，並盡可能地收集每項土壤參數，在資料收集完成後，會將收集的數據帶入前人的預測模型，藉此檢核資料庫的數據是否正確以及找出與土壤液化相關的土壤參數。

接著為了解決預測模型多為某些特定土壤參數，造成使用上的不便與限制，本研究的資料庫收集了大量的現地資料，嘗試找出資料庫中參數間的相關性，其中如果有空缺的資料，則會利用 Johnson 分布系統 (Johnson distribution system)、吉普森取樣法 (Gibbs sampler, GS)與共軛條件 (Conjugate conditions)來解決此問題。

最後運用 Ching et al. (2021)所提出的階段式貝氏模型 (Hierarchical Bayesian model, HBM)來分析資料庫中不同區域的數據，藉此找出足以代表各區域數據的期望值向量和共變異數矩陣的超參數(Hyper-parameters)，本研究在操作階段式貝氏模型時有兩個假設，第一為世界各地的資料都受超參數所掌控，第二為每個區域的分布皆為聯合常態分布，階段式貝氏模型在分析時主要分為兩個階段，分別為學習階段(Learning stage)和推估階段(Inference stage)，學習階段主要為學習資料庫的數據分布，推估階段則為加上目標區域的資料推估區域的未知土壤參數及液化機率。



1.3 研究流程

1. 研讀有關土壤液化的文獻及期刊，將與土壤液化相關的土壤參數收集下來，建立有關土壤液化數據的全球資料庫，並整理前人所提出的預測模型。
2. 檢驗資料庫數據是否正確，主要分為兩部分，第一為利用前人所提出的模型來檢驗，第二為隨機取樣確認資料無誤。
3. 進行資料處理，利用 Johnson 分布系統將資料庫中的各參數轉換至標準常態空間，使其符合後續分析時聯合常態分布的假設。
4. 進行階段式貝氏模型的學習階段，由於資料庫中會有空缺資料，為了解決資料庫中未知資訊的問題，使用吉普森取樣來填補未知的資訊，並學習出足以代表資料庫的超參數及相關性矩陣。
5. 進行階段式貝氏模型的推估階段，利用前步驟得到的超參數和相關性矩陣以及加入目標區域的已知資訊，預測目標區域的未知參數，進而計算液化機率。
6. 最後則對階段式貝氏模型進行驗證，將某些區域的液化條件假設為未知，再用階段式貝氏模型預測該目標區域中其中一場址的液化機率，檢驗模型的準確性。



1.4 本文內容

第一章:前言

說明本研究的研究動機、研究方法以及流程

第二章:文獻回顧

藉由回顧前人文獻了解預測土壤液化的方法以及相關參數，並介紹前人文獻中提及的預測模型。

第三章:資料庫建構

說明資料蒐集的來源以及檢核方式，並從中挑選出與目標設計參數相關的參數，接著建置參數的數量矩陣，並將資料帶入前人預測模型中做比較。

第四章:改良式層級貝氏模型(RHBM)

介紹 RHBM 的基本架構及使用的假設，在進行分析前對資料的前處理，並說明學習階段(Learning stage)和推論階段(Inference stage)的流程及運作方法。

第五章:模擬結果與案例驗證

在此章節會先呈現運用 RHBM 學習出的超參數模擬之數據，確認超參數有學習到資料庫的行為，再透過數個資料庫中的實際案例來說明模型的驗證流程，同時驗證模型的準確性。

第六章:結論與未來建議

總結本研究內容並針對可改進的部分提供建議以利於後續延伸運用。

第二章 文獻回顧



2.1 土壤液化介紹

在大地工程領域中，土壤液化是個相當重要的議題，土壤液化的發生須具備三個要件，分別為土壤須為非凝聚性土壤、地下水位以下之飽和土壤和強烈的地震力，工程師在可能發生土壤液化的地區設計時就須針對土壤液化做出應對的措施，像是地盤改良和適當的基礎做應對。

因此本章節藉由回顧前人文獻來了解土壤的液化行為，以及探討土壤液化與各個土壤參數的關係，透過文獻中的經驗公式決定收集資料時所需要使用的目標參數。

2.1.1 土壤液化發生過程

土壤液化常發生在飽和狀態下且為疏鬆的非凝聚性土壤，土壤顆粒因受震動使顆粒排列方式改變，如圖 2.1 所示，土顆粒因受震動使得顆粒與顆粒間的孔隙變小，顆粒間的水受到擠壓產生超額孔隙水壓，在此瞬間因無法排除超額孔隙水壓，使得土壤的有效應力變為零，此時土壤即喪失乘載力，稱為土壤液化(Soil liquefaction)。

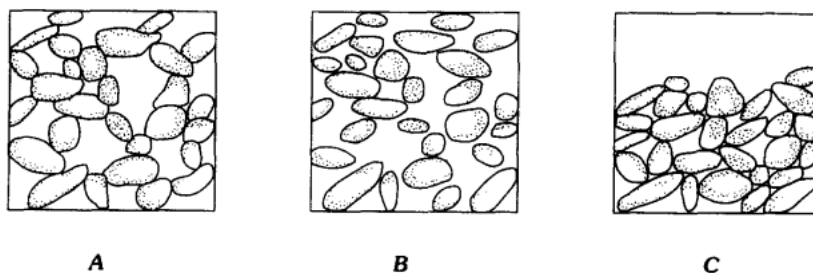


圖 2.1 液化導致土壤顆粒排列改變過程 (Obermeier, 1996)

(A) 液化發生前 (B) 液化發生時 (C) 液化結束時



2.1.2 土壤液化破壞類型

土壤液化對於大地工程來說是不可忽視的問題，因土壤液化常伴隨著許多的破壞，以下將歸納四種常見的土壤液化破壞類型並詳述之。(Youd, 1984; Obermeier, 1996)

1. 結構物沉陷和傾斜: 在液化發生時，土壤因受震動導致超額孔隙水壓增加，有效應力降為零，土壤顆粒像是懸浮在水中，此時的土壤即喪失乘載力，當震動結束時，超額孔隙水壓消散，使得土顆粒間的水排出進而造成結構物下陷，如圖 2.2 所示，土壤可能因土壤分布不均或厚度不同造成結構物產生傾斜。

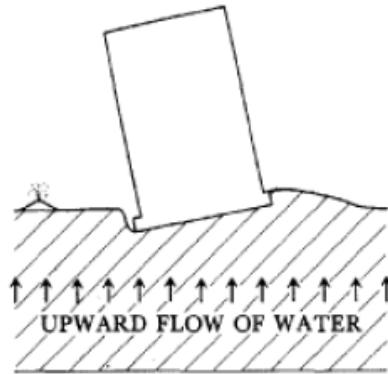


圖 2.2 結構物傾斜示意圖 (Youd, 1984)

2. 噴砂: 在工址的土層通常都非單一土層，若在液化土層的上方有不透水層，震動激發的超額孔隙水壓會因沒有地方排出而逐漸累積，累積到一定程度時會由土壤的裂縫或弱面排出，此時排出的水會帶著土顆粒一起噴出，在地表就有明顯的土壤沉積物，如圖 2.3 所示。

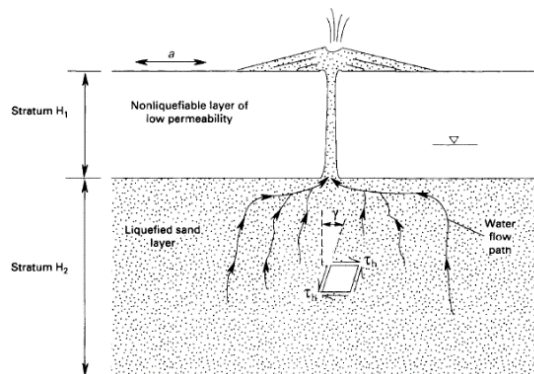


圖 2.3 噴砂示意圖 (Obermeier, 1996)



3. 地面震盪: 在圖 2.4 中可以看到上方為不易液化土層，當此土層下方發生液化時會與上方土層分離，上方的土層會因震盪而產生弱面，此種破壞常造成沉陷和裂縫。

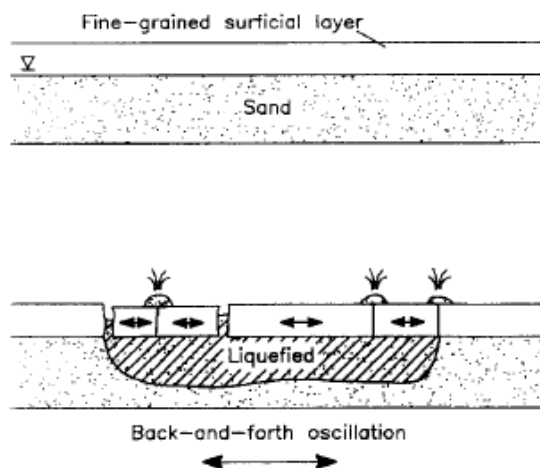


圖 2.4 地面震盪示意圖 (Obermeier, 1996)

4. 側潰: 此現象常發生在沖積海岸陡坡附近，因液化使得土壤的有效應力降為零，土壤像是漂浮在水中，此時地勢較高的土壤會因重力往下流動，此現象即為側潰，如圖 2.5 所示。

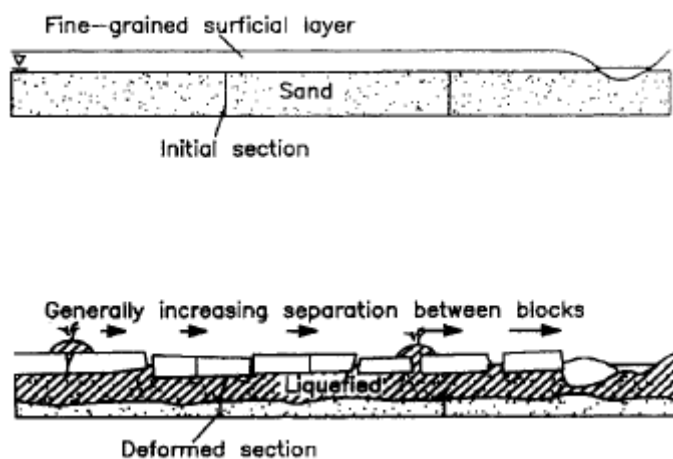


圖 2.5 側潰示意圖 (Obermeier, 1996)



2.2 評估液化潛能之室內試驗

評估液化潛能之室內試驗室利用 CSR(Cyclic stress ratio)和 CRR (Cyclic resistance ratio)計算安全係數來評估土壤液化潛能，常見的試驗有動力三軸試驗和反覆單剪試驗，然而因為室內試驗需要取得現地的不擾動土壤，在實務上的應用仍沒有那麼廣泛。

2.2.1 動力三軸試驗

動力三軸試驗(Dynamic triaxial test)可以模擬土壤在震動時的應力狀態，在模擬土壤液化破壞類型時主要分為兩種，第一種為應力上的考量，液化發生的當下即為超額孔隙水壓上升，有效應力等於零的情況，在反覆剪應力施作的過程中，超額孔隙水壓等於有效圍壓時即達到液化的條件。第二種為應變上的考量，在反覆剪應力施作的過程中，雙向震幅應變值達到設定值時即為破壞，達到液化的條件。

2.2.2 反覆單剪試驗

反覆單剪試驗(Cyclic simple shear test)可有效地解決直剪試驗受剪面積改變以及應力分布不均的問題，也可模擬土層在經歷地震時反覆受剪的情形，可經由量測試體之應力、應變和超額孔隙水壓評估該場址的動態反應，其破壞類型與前節介紹之動力三軸試驗相同。

2.3 評估液化潛能之數值分析法

有別於前節的室內試驗，此節介紹的是運用數值分析模擬土壤液化潛能，在學術界已開發出許多組成律模式可模擬土壤液化的力學行為，像是 Finn-Byrne model、PDMY02 model、SANISand、PM4Sand 和 UBCSand 等，透過這些組成律模式可求得土壤在受震過程中之地盤反應，可藉此觀察各地層之液化機制與過程，可配合像是 Plaxis 等軟體進行動態互制反應的評估。



2.4 評估液化潛能之應力法-現地試驗

2.4.1 標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)

SPT 試驗為大地工程中較常使用的試驗之一，其可估計單壓強度、相對密度 D_r 、內摩擦角和進行液化潛能評估等等。SPT 試驗以 63.5kg 重的夯錘，76.2 公分的落距，夯擊劈管取樣器，在土層變化處以及每 1.5 公尺深度處施作一次 SPT，在施作中，第一段的 15 公分可能受洗孔過程影響，因此忽略不計，後面兩段總共 30 公分的打擊數即為 N 值，若打數超過 50 還不到 30 公分，則可直接紀錄 50 並記錄其貫入深度。

因各國的 SPT 設備未標準化，同個工址使用不同儀器試驗得到的 N 值可能也不太一樣，為了讓不同儀器施作的成果能互相比較，Skempton (1986) 建議須對 N 值進行修正，將效率修正為 60% 稱為 N_{60} ，修正式如式 2.1 所示。

$$N_{60} = C_{ER} C_B C_S C_R N \quad (\text{式 2.1})$$

其中， C_{ER} 、 C_B 、 C_S 、 C_R 分別為夯錘效率修正係數、鑽孔直徑修正係數、取樣器修正係數以及鑽桿長度修正係數，N 為現地未修正的數值，各修正係數如表 2.1 和表 2.2 所示。

表 2.1 SPT 夯錘效率修正係數 (Skempton, 1986)

	Hammer	Release	ER_r : %	$ER_r/60$
Japan	Donut	Tombi	78	1.3
	Donut	2 turns of rope	65	1.1
China	Pilcon type	Trip	60	1.0
	Donut	Manual	55	0.9
USA	Safety	2 turns of rope	55	0.9
	Donut	2 turns of rope	45	0.75
UK	Pilcon, Dando, old standard	Trip	60	1.0
		2 turns of rope	50	0.8



表 2.2 SPT 鑽孔直徑、取樣器以及鑽桿長度修正係數 (Skempton, 1986)

Rod length: > 10 m	1.0
6-10 m	0.95
4-6 m	0.85
3-4 m	0.75
Standard sampler	1.0
US sampler without liners	1.2
Borehole diameter: 65-115 mm	1.0
150 mm	1.05
200 mm	1.15

進行效率修正後， N 也會受有效應力的影響，為了解決有效應力對 N 的影響，Liao and Whitman (1985) 提出修正的方式，如式 2.2 所示，將覆土壓力修正為 1 大氣壓。

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} \quad (\text{式 2.2})$$

其中 $P_a = 101.3 \text{ kPa}$ ， σ'_{v0} 為有效覆土壓力。

2.4.2 圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)

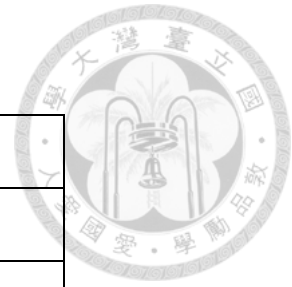
圓錐貫入試驗又名荷蘭錐貫入試驗，裝置常以車體載運至現地施作，CPT 錐頭斷面積為 10 cm^2 ，錐尖張角為 60 度，套筒側表面積為 150 cm^2 ，以 2 cm/sec 的速度貫入土層，同時測量錐尖阻抗應力 q_c 和套筒側面摩擦力 f_s ，進而計算出摩擦比 F_r (Friction ratio)，計算式如式 2.3 所示。

$$F_r = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \quad (\text{式 2.3})$$

摩擦比也可以用來判斷土壤種類，Vos (1982) 利用摩擦比將土體大致分類，如表 2.3 所示。

表 2.3 摩擦比土壤分類表 (Vos, 1982)

	Friction ratio (%)
Course sand and gravel	<0.5
Fine sand	1.0-1.5
Silt	1.5-3.0
Clay	3.0-7.0
Peat	>5



2.4.3 跨孔式試驗(Cross-hole Seismic Test)

跨孔式試驗需先在現地鑽兩個孔，名為震源孔及接收孔，通常間距約 2-3 公尺，並將震源及接收器分別置於兩孔的相同深度，此時震源產生震波傳遞至接收器，測量其時間及兩孔距離則能得出震波速度，此試驗的好處在於可以得到任何深度的剪力波速，試驗如圖 2.6 所示。

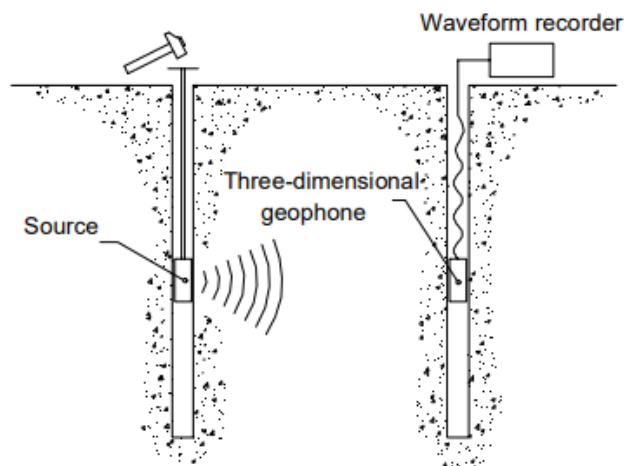


圖 2.6 跨孔式試驗示意圖 (Foti, 2012)



2.4.4 下孔式試驗(Downhole Test)

下孔式試驗與跨孔式試驗最大的不同在於下孔式的震源是設置在地表，且只需一個鑽孔即可施作，接收器一樣需設置在孔內，由震源產生震波傳遞至接收器即可計算波速，也因施作方式的差異，此方法只能得到平均的剪力波速，施作方式如圖 2.7 所示。

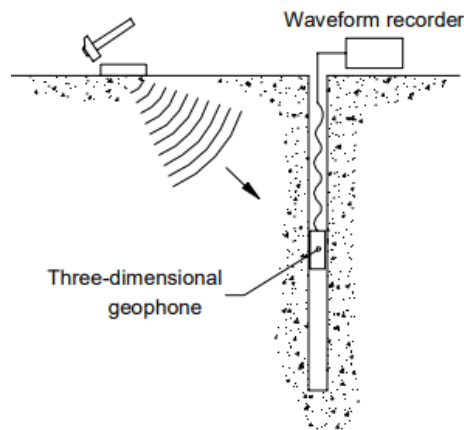


圖 2.7 下孔式試驗示意圖 (Foti, 2012)

2.4.5 表面波譜法(Spectral Analysis of Surface Waves, SASW)

表面波譜法會先將震源放置於地表上，接著將兩個接收器佈置於測線上，當接收器收到訊號即可得到波速，因每個地層的波速不同，搭配不同的波長就會有不同的相位速度，透過轉換即可得到波速資料，試驗配置如圖 2.8 所示。

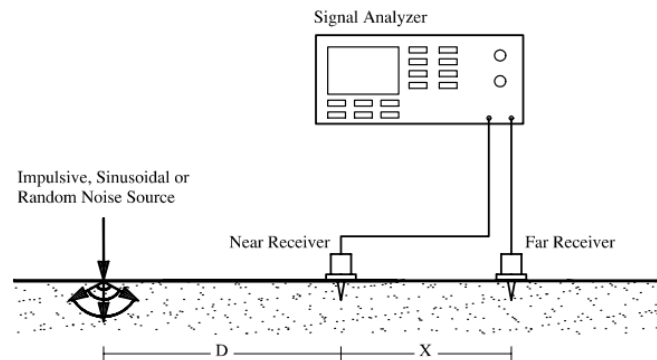


圖 2.8 表面波譜試驗示意圖 (Foti, 2012)



2.5 評估液化潛能之應力法-Critical layer

在設計工程前必須先進行鑽探了解土層的概況，大地工程在做現地調查時常做的試驗包括 SPT (Standard Penetration Test)、CPT (Cone Penetration Test)和 Cross-Hole 等，大約每一公尺就會有一筆資料，CPT 數據甚至每 0.05 公尺就會有一筆資料，示意如圖 2.9 所示，而土壤液化一般發生在 0-20 公尺間的飽和非凝聚性土層，若將各層的資料都進行分析資料量勢必相當大，因此在分析前會選擇一個鑽孔中最有可能液化的深度，此深度即為 Critical layer。

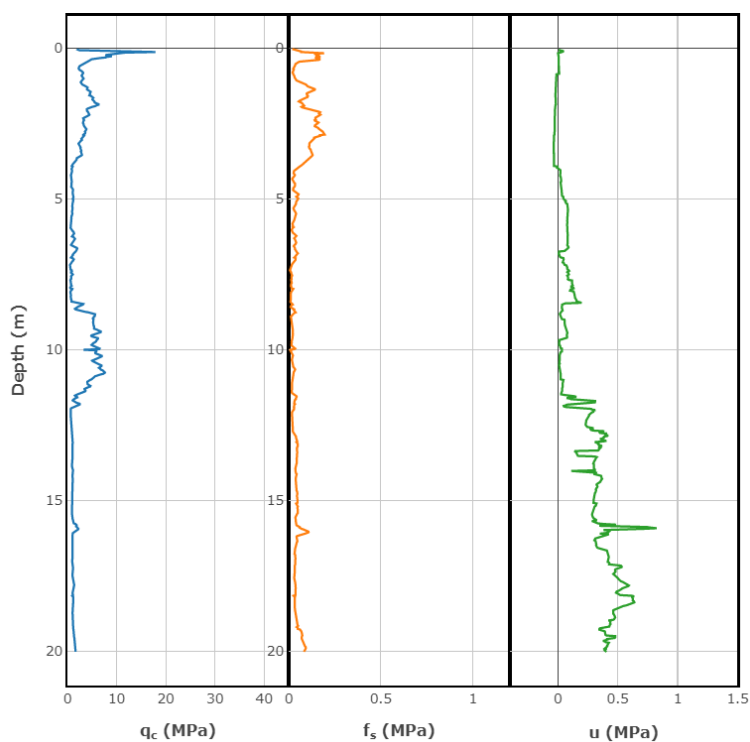


圖 2.9 CPT 數據示意圖 (NGL)



2.5.1 Seed et al. (1985)

Seed et al. (1985)中有 125 筆資料，包含了南美洲、日本和中國等地的資料，並收集了各項資料的 SPT-N 值，透過各個鑽孔的 SPT-N 值選出 Critical layer，選取的方法為該鑽孔最小的穿透力(Penetration resistance)。在這篇文獻中也歸納出 $(N_1)_{60}$ 在各個範圍中對於結構的破壞程度，如表 2.4 所示。

表 2.4 $(N_1)_{60}$ 和結構物破壞情形分類表 (Seed et al., 1985)

$(N_1)_{60}$	Potential Damage
0-20	High
20-30	Intermediate
>30	No significant damage

2.5.2 Moss et al. (2006)

Moss et al. (2006)中收集了許多 CPT 的現地資料，運用這些資料預測土壤液化潛能，文中提到 $q_{c,1}$ 和 R_f 對於選擇 Critical layer 是相當重要的， $q_{c,1}$ 計算方式如式 2.4 所示，有這兩項數據可以大致將土體分類並選取 Critical layer，在選擇時應選取低摩擦比(R_f)和連續的低錐尖阻抗土層，低摩擦比是為了確保選取的土層為非凝聚性土壤，因此類型土壤的摩擦比通常會較凝聚性土壤小。但對於河流沉積處的區域來說，土壤水平向和垂直向不連續而且很薄，不適用上述情形，可使用 CRR(Cyclic resistance ratio)來選擇 Critical layer，CRR 為土壤之抗液化剪力強度比，因此選擇 CRR 最小的土層，計算方式會在後續章節作介紹。

$$q_{c,1} = C_q \times q_c$$

$$C_q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^C \quad (\text{式 2.4})$$

其中 C 一般取 0.5 ； $P_a = 1\text{atm} = 101.3\text{kPa}$ ； C_q 需小於 1.7



2.5.3 Hu and Liu (2019)

Hu and Liu (2019)在文中選擇 Critical layer 的條件有六個，分別如下：

- (1) Critical layer 必須在地下水以下。
- (2) 黏土層應視為不會液化，不應將其選為 Critical layer，可以透過 SPT 鑽孔取樣或其他計算方法得知。
- (3) 被選為 Critical layer 的土層，需有足夠且穩定的數據。
- (4) 地層有最小的測量值或最小的 CRR。
- (5) 各項測量值(SPT、CPT 和 Vs)的鑽孔距離應小於 30 公尺，確保各個測量值為同一土層。
- (6) 各項測量值(SPT、CPT 和 Vs)所選出的 Critical layer 應位於同一土層。

2.5.4 Hwang et al. (2021)

Hwang et al. (2021)在文中將 Critical layer 定義為三種情況，分別為 Liq 1、Liq 2 和 Liq 3，說明如下：

Liq 1: 在最淺的深度，且安全係數(FS)需小於 0.9

Liq 2: 在整個鑽孔中該深度有最小的安全係數

Liq 3: 分為兩種情形，只須滿足一種即為 Liq 3

(1) FS 小於 0.9(與 Liq 1 相同)，但其厚度小於 0.5m

(2) FS 大於 0.9，但仍小於 1

在文中提到 Liq 3 被視為較不合理的選擇方式，在該文獻中 Liq 1 和 Liq 2 被視為主要數據，Liq 3 則為次要數據，本研究在收集資料時只會收集土層中最小安全係數的 Liq 2 數據。



2.6 評估液化潛能之應力法經驗式

2.6.1 Seed et al. (1985)

Seed et al. (1985)文中提到的方法為美國教授 H.B Seed 所提出，資料總共 125 筆，且都有各點的 SPT-N 數據，主要來自南美洲、日本和中國等地的資料，這些數據的地震規模(M)都約為 7.5，在分析時會將 N 值修正為 $(N_1)_{60}$ ，即鑽桿能量比為 60%且有效覆土應力修正為 1 atm，計算如式 2.5 所示，並計算地震引起之土層平均反覆剪應力比(Cyclic Stress Ratio, CSR)，計算如式 2.6 所示，接著建立出臨界液化曲線如圖 2.10，在曲線的左側被視為可能液化的點位，右側被視為可能不會液化的點位。

$$N_1 = C_N \times N \quad (\text{式 2.5})$$

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_0} = 0.65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} \times r_d \quad (\text{式 2.6})$$

其中 a_{max} 為最大地表速度； σ_0 為垂直總應力； σ'_0 為垂直有效應力； C_N 為修正因子，如圖 2.11 所示； r_d 為深度折減因子，如圖 2.12 所示。

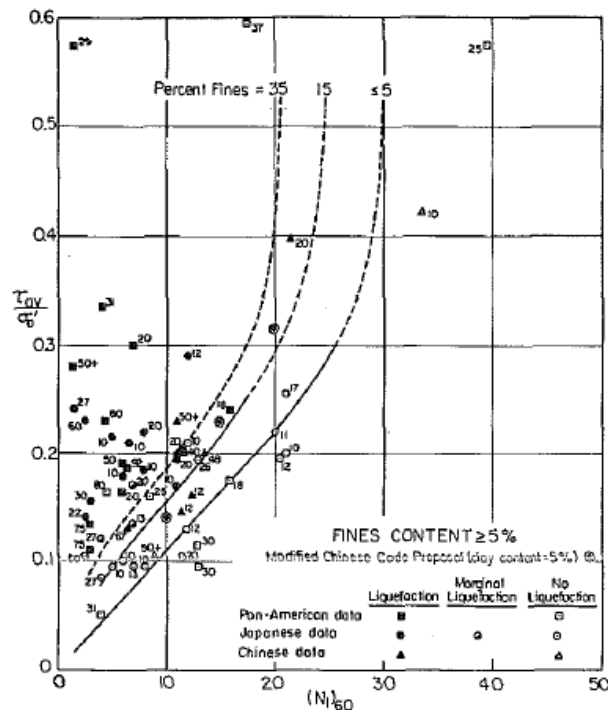


圖 2.10 臨界液化強度曲線 (Seed et al., 1985)

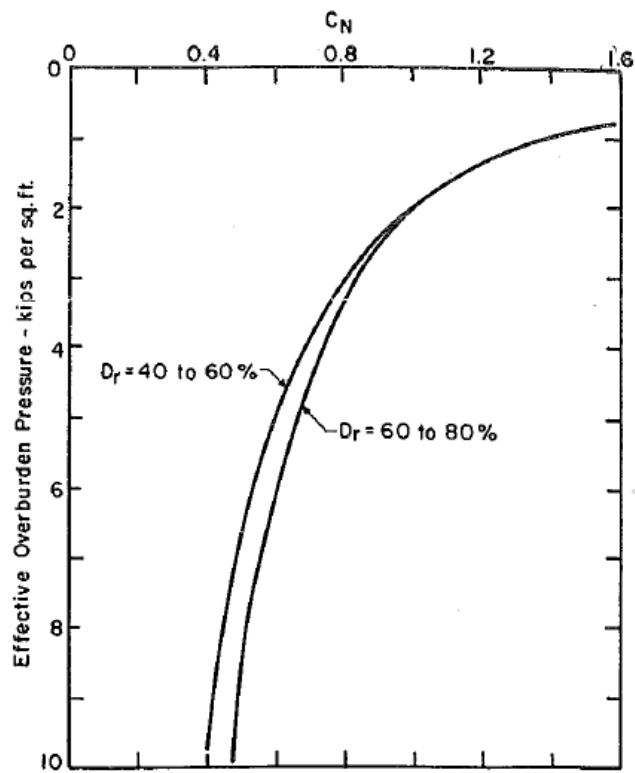


圖 2.11 C_N 值圖表 (Seed et al., 1985)

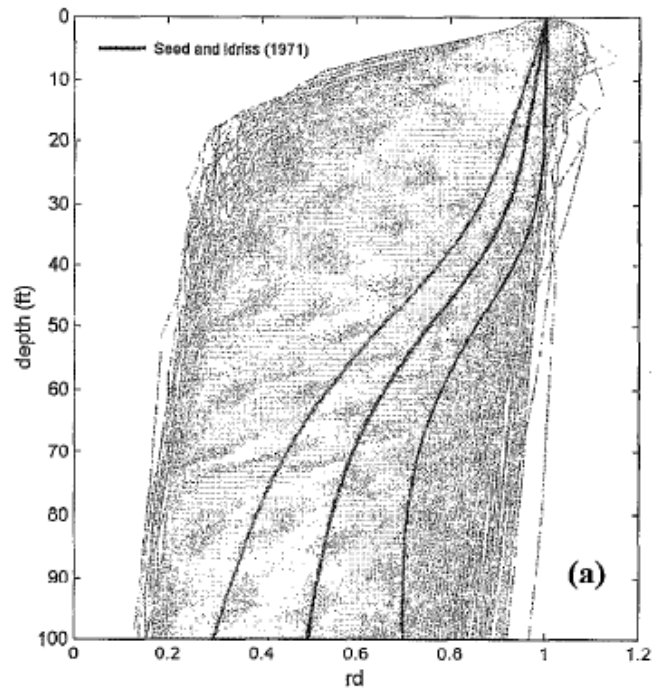


圖 2.12 rd 值圖表 (Seed et al., 1985)



2.6.2 Tokimatsu and Yoshimi (1983)

此篇文獻為 Tokimatsu 與 Yoshimi 教授收集日本當地的液化資料，推論出運用 SPT-N 預測土壤液化潛能的方法，此法又稱為 T-Y 法，此法考量了細粒料含量對液化的影響。在台灣高鐵土壤液化評估方法研究中，認為此法在各方面的考量均較合理，因此採用此法做土壤液化評估。

針對 SPT-N 值的修正如式 2.7 和 2.8，細粒料含量對液化的影響如表 2.5 所示。

$$N_1 = C_N \times N = \frac{1.7}{\sigma'_0 + 0.7} \times N \quad (\text{式 2.7})$$

$$N_a = N_1 + \Delta N_f \quad (\text{式 2.8})$$

σ'_0 單位為(kgf/cm²)

表 2.5 ΔN_f 計算表 (Tokimatsu and Yoshimi, 1983)

Fines Content FC(%)	ΔN_f
0-5	0
5-10	Interpolate
10-	0.1FC+4

CSR 和 CRR 的計算如式 2.9 和式 2.10 所示，在此公式中也考量了地震規模 (M) 以及深度所造成的影響， r_d 則使用 Iwasaki 等人(1978)建議之公式，如式 2.11 所示。

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = 0.1(M - 1) \frac{a_{max} \sigma_0}{g \sigma'_0} (1 - 0.015z) \quad (\text{式 2.9})$$

$$\frac{\tau_l}{\sigma'_0} = aC_r \frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{C_s} \right)^n \quad (\text{式 2.10})$$

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (\text{式 2.11})$$

其中 M 為地震規模；z 為深度(m)；a = 0.45； C_r = 0.57；n = 14； C_s = 80~90



2.6.3 AIJ 法(2001)

此法與 T-Y 法的概念類似，都源自 Tokimatsu 與 Yoshimi 教授在 1983 年所提出的方法，日本建築學會(Architecture Institute of Japan, AIJ)在 2001 年將 T-Y 法略為修改，並納入設計規範中，又稱 AIJ 法。此法在使用時有兩個前提：

- (1) 位於地表面下 20 公尺以內，細粒料含量<35%之飽和沖積砂質土層。
- (2) 細粒料含量>35%，其黏土含量<15%或塑性指數 $I_p < 15$ 回填土層。

此法的 CSR 計算方式與 T-Y 法計算方式相同，如式 2.11 所示，最大的不同在於 N 值對大氣壓力的修正，如式 2.12 所示，並針對細粒料含量對液化的影響有做些微的修正，如式 2.13 所示，CRR 計算如式 2.14 所示。

$$N_1 = C_N \times N$$

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.7 \quad (式 2.12)$$

$$N_a = N_1 + \Delta N_f$$

$$\Delta N_f = \begin{cases} 0 & FC \leq 5 \\ 1.2 \times (FC - 5) & 5 < FC \leq 10 \\ 6 + 0.2 \times (FC - 10) & 10 < FC \leq 20 \\ 8 + 0.1 \times (FC - 20) & 20 < FC \leq 50 \\ 11 & 50 < FC \end{cases} \quad (式 2.13)$$

$$CRR = 0.2565 \left[\frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{80} \right)^{14} \right] \quad (式 2.14)$$



2.6.4 日本道路協會(JRA1990 法)

JRA1990 法為 Iwasaki 及 Tatsuoka(1978,1980,1982)根據大量土壤液化資料提出有關 SPT-N 預測土壤液化潛能的方法，日本道路協會(Japan Road Association, JRA)在道路橋式方書第五步耐震設計規範中採用此法。

此法在計算 CSR 時使用的是最大反覆剪應力比而非平均反覆剪應力比，因此公式前的係數沒有 0.65，如式 2.15 所示，在計算 CRR 時此公式除了考量細粒料含量(FC) 也考量 D_{50} ，如式 2.16 所示，是與其他方法較不一樣的地方。但黃等人在 1993 年高鐵土壤液化評估研究方法中指出此法將低估較高 N 值土壤之抗液化強度，尤其是當 N 大於 20 時。

$$L = \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times r_d \quad (\text{式 2.15})$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$$

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02mm \leq D_{50} \leq 0.05mm) \\ 0.225 \times \log_{10} \frac{0.35}{D_{50}} & (0.05mm \leq D_{50} \leq 0.6mm) \\ -0.05 & (0.6mm \leq D_{50} \leq 2mm) \end{cases}$$

$$R_3 = \begin{cases} 0 & (0 \leq FC \leq 40\%) \\ 0.004 \times FC - 0.16 & (40\% \leq FC \leq 100\%) \end{cases} \quad (\text{式 2.16})$$

其中 r_d 則使用 Iwasaki 等人(1978)所建議如式 2.11， D_{50} 為粒徑分布曲線上相對應通過百分比為 50%的粒徑大小。



2.6.5 NCEER (1997)

此法為美國國家地震工程研究中心(NCEER)在 1997 年研討會所選用的方法，又稱 NCEER 法(1997)，此處介紹的為 SPT-N 試驗，該研討會邀請各學者討論土壤液化之評估方法，在此次的研討會中認為 Seed 在 1985 年提出的方法較其他方法準確，因此仍以該方法為主軸進行強化，包括細粒料含量對液化的影響以及加入較小 N 值的土壤仍有抗液化強度的理念，並將 Seed 評估法所需要使用的圖表公式化，方便工程師在設計時使用。

針對 SPT-N 值的修正以及細粒料含量對液化的影響，如式 2.17 所示。

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 && (FC \leq 5\%) \\ \alpha &= \exp[1.76 - (190/FC^2)] && (5\% \leq FC \leq 35\%) \\ \alpha &= 5 && (FC \geq 35\%) \\ \beta &= 1 && (FC \leq 5\%) \\ \beta &= [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] && (5\% \leq FC \leq 35\%) \\ \beta &= 1.2 && (FC \geq 35\%) \end{aligned} \quad (式 2.17)$$

CSR 的計算如式 2.6 所示，但此方法的 r_d 是將圖 2.12 的平均曲線公式化，如式 2.18 所示。

$$\begin{aligned} r_d &= 1 - 0.00765z && (z \leq 9.15m) \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z && (9.15m \leq z \leq 23m) \\ r_d &= 0.744 - 0.008z && (23m \leq z \leq 30m) \\ r_d &= 0.5 && (z \geq 30m) \end{aligned} \quad (式 2.18)$$

因各個地震規模不同，需先計算規模修正因子(MSF)，計算如式 2.19 所示，計算土壤之抗液化剪力強度比 CRR，如式 2.20 所示。

$$MSF = 10^{2.24/M_w^{2.56}} \quad (式 2.19)$$

$$CRR = \frac{a+cx+ex^2+gx^3}{1+bx+dx^2+fx^3+hx^4} \times MSF \quad (式 2.20)$$

其中 $x = (N_1)_{60cs} \leq 30$; a= 0.048 ; b= -0.1248 ; c= -0.004721 ; d=0.009578 ;
e= 0.0006136 ; f= -0.0003285 ; g= -1.673 $\times 10^{-5}$; h= 3.714 $\times 10^{-6}$



2.6.6 NCEER (2001)

此法與 NCEER (1997) 年計算方法類似，皆以 Seed 評估法為主軸進行公式化，其計算方式大致相同，在深度因子 r_d 和 CRR 的計算上與 NCEER (1997) 有些差異，如式 2.21 式 2.22 所示。

$$r_d = \frac{(1-0.4113z^{0.5}+0.04052z+0.001753z^{1.5})}{(1-0.4177z^{0.5}+0.05729z-0.006205z^{1.5}+0.001210z^2)} \quad (\text{式 2.21})$$

$$MSF = (M_w/7.5)^{-2.56}$$

$$CRR = \left(\frac{1}{34-x} + \frac{x}{135} + \frac{50}{(10x+45)^2} - \frac{1}{200} \right) \times MSF \quad (\text{式 2.22})$$

其中 $x = (N_1)_{60cs} \leq 30$

2.6.7 Shibata and Teparaksa (1988)

此篇文獻中收集了世界各地液化相關的數據，資料以 CPT 數據為主，以 q_c 值表示錐尖阻抗強度，並以 D_{50} 呈現細粒料含量的影響，最後建立判斷場址是否會液化的臨界曲線，如圖 2.13 所示。

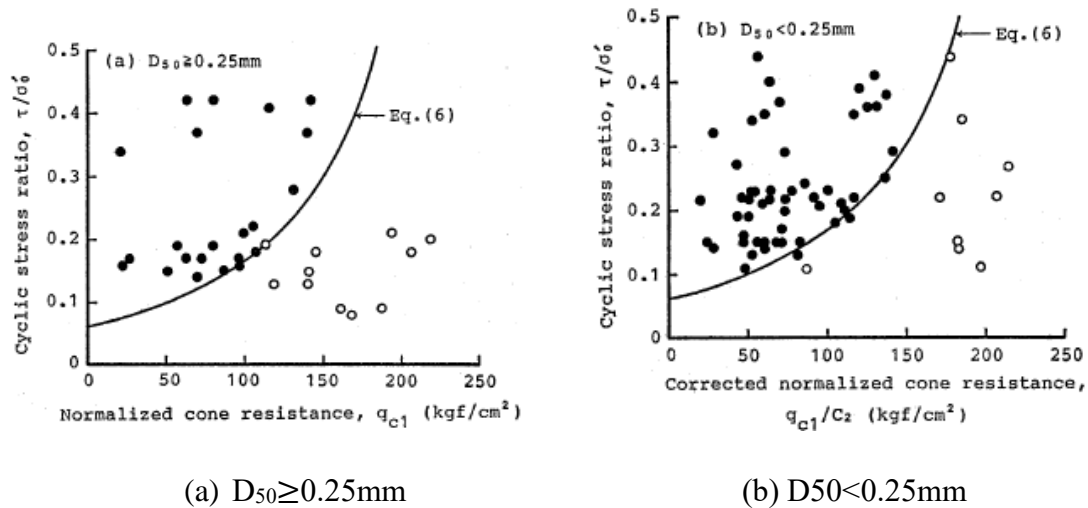


圖 2.13 Shibata and Teparaksa 建議之臨界液化曲線 (Shibata and Teparaksa, 1988)

在圖 2.13 中橫軸的 q_{c1} 為 q_c 值對有效應力的修正，計算式如式 2.23 所示，並以 D_{50} 計算細粒料對液化的影響，如式 2.24 所示，縱軸則為 CSR 的計算方法不僅考量最大地表加速度 a_{max} 也考量地震規模 M ，計算如式 2.25 所示。

$$q_{c1} = C_1 \times q_c = \left(\frac{1.7}{\sigma'_0 + 0.7} \right) \times q_c \quad \text{單位為(kgf/cm}^2\text{)} \quad (\text{式 2.23})$$

$$\text{當 } D_{50} \geq 0.25 \text{ mm } C_2 = 1$$

$$\text{當 } D_{50} < 0.25 \text{ mm } C_2 = \frac{D_{50}}{0.25} \quad (\text{式 2.24})$$

$$\frac{\tau}{\sigma'_0} = 0.1(M - 1) \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} (1 - 0.015z) \quad (\text{式 2.25})$$

其中 q_c 為錐尖阻抗； D_{50} 為粒徑分佈曲線上相對應通過百分比為 50% 的粒徑大小。

2.6.8 NCEER(1997)

此方法為美國國家地震工程研究中心(NCEER)研討會(1997)所選用之方法，此法稱為 NCEER 法(1997)，此處介紹的為 CPT 試驗，先利用 Robertson (1990)提出以 CPT 試驗將土體分類的方法將土體進行分類，計算方式如式 2.28 所示，在過程中需將 q_c 做有效應力的修正，如式 2.29 所示，土壤分類如表 2.6，在本文中指出計算 I_c 時需小於 2.6，如大於 2.6 則需使用其他準則做計算。

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)$$

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \times 100\%$$

$$I_c = [(3.47 - Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5} \quad (\text{式 2.26})$$

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (\text{式 2.27})$$

其中 q_c 為錐尖阻抗； f_s 為摩擦阻力； $P_a = 100\text{kPa}$ (當 σ'_0 單位為 kPa)； $P_{a2} = 0.1\text{Mpa}$ (當 q_c 單位為 MPa)； n 為 0.5 和 0.75(視情形選用)； $\left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \leq 2$ 。

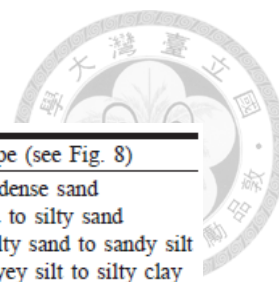


表 2.6 土壤類型分類 (Robertson, 1990)

Soil behaviour type index, I_c	Zone	Soil behaviour type (see Fig. 8)
$I_c < 1.31$	7	Gravelly sand to dense sand
$1.31 < I_c < 2.05$	6	Sands: clean sand to silty sand
$2.05 < I_c < 2.60$	5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt
$2.60 < I_c < 2.95$	4	Silt mixtures: clayey silt to silty clay
$2.95 < I_c < 3.60$	3	Clays: silty clay to clay
$I_c > 3.60$	2	Organic soils: peats

此法在判斷土壤種類後，也會計算地震後土層的 CSR 和 CRR 進而計算安全係數，因此法的計算較繁瑣，會在後續章節作介紹。

2.6.9 NCEER (2001)

此法與 NCEER (1997) 計算方法類似，其計算方式大致相同，但在深度因子 r_d 、地震規模修正因子 MSF 和 q_{c1N} 的計算上與 NCEER (1997) 有些差異，在式 2.27 中的 $\left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^n \leq 1.7$ ；n 為 0.5 和 0.7(視情形選用)。

2.6.10 Juang et al. (2003)

此篇文獻收集了 6 個不同地震在美國、中國和台灣等地的液化資料，主要是 CPT 試驗的資料，使用類神經網路法推論出判斷土層是否會發生液化的方法，又稱為 Juang 法，相較於 NCEER 的方法，此法的計算過程較簡單，且代入資料庫中的數據，準確度也不會比較低。

其中 r_d 則採用(Liao et al. 1988; Youd et al. 2001)建議之公式，如式 2.28 所示，為了將地震規模進行修正，需計算規模修正因子(MSF)， $CSR_{7.5}$ 的計算如式 2.29 所示。

$$\begin{aligned}
 r_d &= 1 - 0.00765z && (z \leq 9.15m) \\
 r_d &= 1.174 - 0.0267z && (9.15m \leq z \leq 23m)
 \end{aligned}
 \tag{式 2.28}$$

$$\begin{aligned}
 MSF &= 10^{2.24} / M_w^{2.56} = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-2.56} \\
 CSR_{7.5} &= \frac{0.65 \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) \left(\frac{a_{max}}{g}\right) (r_d)}{MSF}
 \end{aligned}
 \tag{式 2.29}$$



在此篇文獻也會將 q_c 進行修正，接著計算土壤類型因子 I_c ，計算如式 2.30， q_c 和 σ'_v 單位都為 kPa。

$$q_{c1N} = \frac{q_c/100}{(\sigma'_v/100)^{0.5}}$$
$$F = f_s/(q_c - \sigma_v)$$
$$I_c = [(3.47 - \log_{10} q_{c1N})^2 + (\log_{10} F + 1.22)^2]^{0.5} \quad (\text{式 2.30})$$

在此處如果 I_c 大於 2.6 也不須將此資料剔除，可以繼續進行計算，是本法與 NCEER 法的不同之處，接著計算 CRR 如式 2.31 所示。

$$C_\sigma = -0.016(\sigma'_v/100)^3 + 0.178(\sigma'_v/100)^2 - 0.063(\sigma'_v/100) + 0.903$$
$$K_I = 2.429(I_c)^4 - 16.943(I_c)^3 + 44.551(I_c)^2 - 51.497(I_c) + 22.802$$
$$q_{c1N,cs} = K_I q_{c1N}$$
$$CRR = C_\sigma \exp[-2.957 + 1.264(q_{c1N,cs}/100)^{1.25}] \quad (\text{式 2.31})$$

2.6.11 Boulanger and Idriss (2016)

此法收集了 253 個液化相關數據進行分析，且數據的 I_c 值皆小於 2.6，與 NCEER 法有相同之處，此法也完整的考量深度、地震規模、和細粒料含量的影響，如式 2.32、2.33 和 2.34 所示。

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \times M]$$
$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$
$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (\text{式 2.32})$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \times [8.64 \exp(-M/4) - 1.325]$$
$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3 \leq 2.2 \quad (\text{式 2.33})$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln(\sigma'_v/P_a) \leq 1.1$$
$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3$$



$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7$$

$$0.264 \leq m = 1.338 - 0.249(q_{c1Ncs})^{0.264} \leq 0.782$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$q_{c1N} = C_N q_{cN} = C_N \frac{q_c}{P_a}$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \quad (\text{式 2.34})$$

在此法中各參數間都有關係，因此需用迭代的方式進行運算，最後進行 CSR 與 CRR 的計算，如式 2.35 和 2.36 所示，與其他方法較不同的地方在於此法的參數中有有液化機率。

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1} = \frac{0.65(\sigma_v/\sigma'_v)(a_{max}/g)rd}{MSF \cdot K_\sigma} \quad (\text{式 2.35})$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp\left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.6 + \sigma_{\ln(R)} \cdot \Phi^{-1}(P_L)\right] \quad (\text{式 2.36})$$

其中 $\sigma_{\ln(R)} = 0.2$ ； P_L 為土壤液化機率。

2.6.12 Ku and Juang (2012)

此方法認為土壤液化行為深受排水條件所影響，因此使用了孔隙壓力參數 B_q 來描述此情況，尤其在黏土類土壤影響更顯著，在計算 CSR 時則是使用 Idriss and Boulanger (2006) 所提出的方法，在土壤類型指數上的計算與 NCEER 不相同，如式 2.37 所示，最後是 CRR 的計算，如式 2.38 所示。

$$B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{v0})$$

$$F_r = \left[\frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}}\right] \times 100\%$$

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$I_{c,BJ} = \sqrt{\{3 - \log_{10}[Q_t(1 - B_q) + 1]\}^2 + [1.5 + 1.3 \times \log_{10} F_r]^2} \quad (\text{式 2.37})$$



$$q_{t1N} = \left[\frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_a} \right] \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

$$A = I_{c,BJ} \times (q_{t1N}/100) - 14.7$$

$$B = 0.909 \times I_{c,BJ}^3 - 7.47 \times I_{c,BJ} + 19.28$$

$$C = 0.059 + 0.015 \times I_{c,BJ}^2$$

$$CRR = 0.05 + \exp[A + B \times (q_{t1N}/100)^C] \quad (式 2.38)$$

2.6.13 NCEER (1997)

此篇文獻的方法為美國國家地震工程研究中心(NCEER)研討會(1997)所選用之方法，此法稱為 NCEER 法，此處介紹的方法為剪力波速 V_s ，此篇文獻共收集了 193 筆與土壤液化相關數據，包含液化與無液化，並考量細粒料含量對液化的影響，提出建議的土壤臨界液化強度曲線。如圖 2.14 所示。

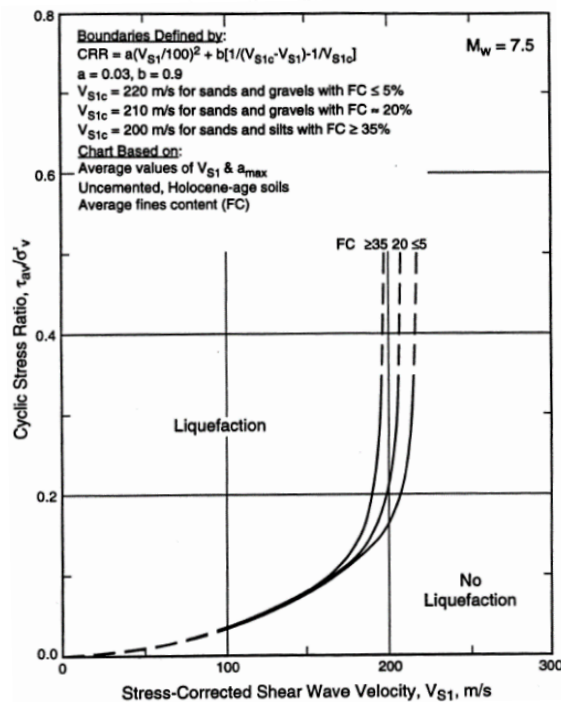


圖 2.14 Andrus and Stokoe 建議之臨界液化曲線 (Andrus and Stokoe, 1997)

規模修正因子計算式如式 2.39 所示，其中 n 為 -3.3，CSR 的計算如式 2.8 所示，其中 r_d 則採用 (Liao et al. 1988; Youd et al. 2001) 建議之公式，如 2.30 所示。

$$MSF = (M_w/7.5)^n \quad (式 2.39)$$



此處會將 V_s 對有效應力進行修正，計算如式 2.40 所示，所示，接著計算 CRR 如式 2.41 所示。

$$V_{S1} = V_s(P_a/\sigma'_v)^{0.25}$$

$$V_{S1c} = 220 \text{ m/s} \quad (FC \leq 5\%)$$

$$V_{S1c} = 210 \text{ m/s} \quad (FC \approx 20\%)$$

$$V_{S1c} = 200 \text{ m/s} \quad (FC \geq 35\%)$$

$$CRR = a(V_{S1}/100)^2 + b[1/(V_{S1c} - V_{S1}) - 1/V_{S1c}] \quad (\text{式 2.41})$$

其中 σ'_v 單位為 kPa； P_a 為 1atm； $(P_a/\sigma'_v)^{0.25}$ 上限值為 1.4； $a = 0.03$ ； $b = 0.9$

2.6.14 NCEER (2001)

此篇文獻提出的方法與 NCEER(1997)的方法相似，但在地震規模的修正採用較保守的計算方式，式 2.39 的 n 值改為-2.56，在細粒料含量的影響有進行修正，並將土壤抗液化曲線往上提高，如圖 2.15 所示，修正後的公式如式 2.42 所示。

$$V_{S1}^* = 215 \text{ m/s} \quad (FC \leq 5\%)$$

$$V_{S1}^* = 215 - 0.5(FC - 5) \text{ m/s} \quad (5\% < FC < 35\%)$$

$$V_{S1}^* = 200 \text{ m/s} \quad (FC \geq 35\%)$$

$$CRR = \{a V_{S1}/100\}^2 + b(1/(V_{S1}^* - V_{S1}) - 1/V_{S1}^*)MSF \quad (\text{式 2.42})$$

其中 $a = 0.022$ ； $b = 2.8$

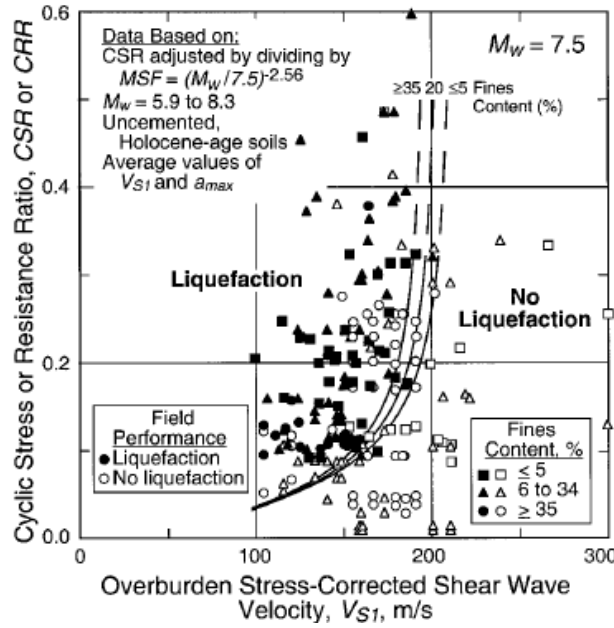


圖 2.15 Andrus and Stokoe 建議之臨界液化曲線 (Andrus and Stokoe, 2000)

2.6.15 Kayen et al. (2013)

此篇文獻收集了來自世界各地的資料，包含日本、美國和臺灣等地的數據，且這些數據都有剪力波速的資料，根據這些數據提出土壤液化強度曲線，如圖 2.16 所示，特別的是該曲線是用估計液化的機率來呈現分別為 5、15、50、85 和 95%。

針對深度和地震規模的修正如式 2.43 和 2.44 所示，圖 2.16 的橫軸 V_{s1} 計算如式 2.40，但此處的 $(P_a/\sigma'_v)^{0.25}$ 上限值為 1.5，縱軸計算如式 2.45 所示，此外 CRR 的計算如式 2.46。

$$r_d(d, M_w, a_{max}, V_{s,12m}^*) = \frac{\left(1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (-d + 0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}\right)}{\left(1 + \frac{-23.013 - 2.949 \cdot a_{max} + 0.999 \cdot M_w + 0.0525 \cdot V_{s,12m}^*}{16.258 + 0.201 \cdot e^{0.341 \cdot (0.0785 \cdot V_{s,12m}^* + 7.586)}}\right)} \pm \sigma_{erd}$$

$$\sigma_{erd}(d) = d^{0.85} \cdot 0.0198 \quad (d \leq 12.2m)$$

$$\sigma_{erd}(d) = 12.2^{0.85} \cdot 0.0198 \quad (d \geq 12.2m) \quad (式 2.43)$$

$$DWF = 15M_w^{-1.342} \quad (式 2.44)$$

$$CSR^* = CSR_{M_w=7.5, \sigma'_{v0}=1atm} = CSR / (DWF \times K_\sigma) \quad (式 2.45)$$

$$CRR = \exp \left\{ \left[\frac{(0.0073 \cdot V_{s1})^{2.8011} - 2.6168 \cdot \ln(M_w) - 0.0099 \cdot \ln(\sigma'_{v0}) + 0.0028 \cdot FC + 0.4809 \cdot \Phi^{-1}(P_L)}{1.946} \right] \right\} \quad (式 2.46)$$



其中 $V_{s,12m}^*$ 為上方土層 12.2m 平均之剪力波速(如果沒有相關資料可用 $V_{s,12m}^* = 150 - 200 \text{ m/s}$)， K_σ 為有效應力修正因子=1

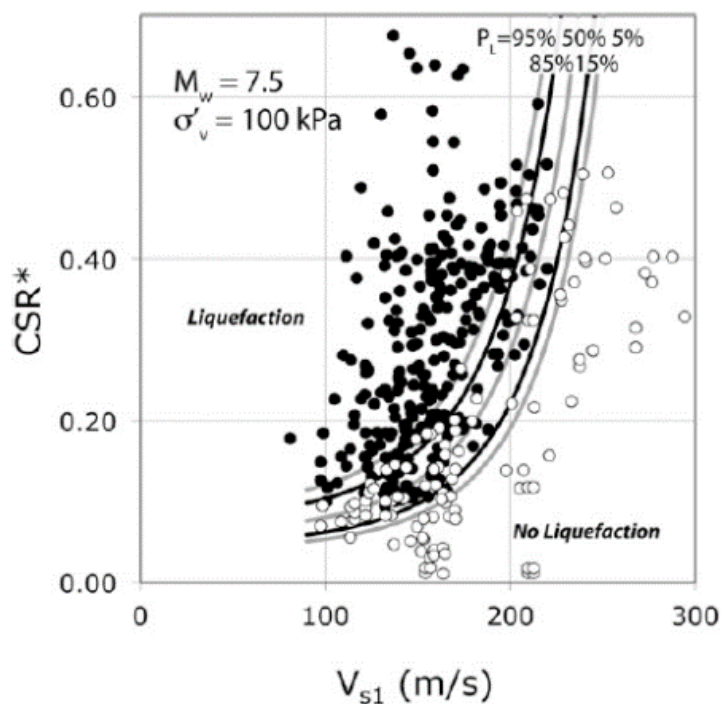


圖 2.16 Kayen et al.建議之臨界液化曲線 (Kayen et al., 2013)

2.7 Generic model

Generic model 是將所有資料視為同一群體進行分析的模型，因此無法表現出各群體的特性，然而目前大多的液化預測模型都為此類，本研究也將 Generic model 與 RHBM model 進行比較，本研究採用之 Generic model 相關定義如下所示：

$$\ln(FS_{act}) = \ln(m) + \ln(FS_{cal})$$

$$P(L) = P[\ln(FS_{act}) < 0] = P[\ln(m) + \ln(FS_{cal}) < 0]$$

$$= P[\ln(m) < -\ln(FS_{cal})] = P[\mu_{\ln(m)} + \sigma_{\ln(m)} \times Z < -\ln(FS_{cal})]$$

$$= P(Z < [-\ln(FS_{cal}) - \mu_{\ln(m)}] / \sigma_{\ln(m)}) = \Phi\left(\frac{-\ln(FS_{cal}) - \mu_{\ln(m)}}{\sigma_{\ln(m)}}\right)$$

其中 m 為 model factor； $\mu_{\ln(m)}$ 為 $\ln(m)$ 的期望值； $\sigma_{\ln(m)}$ 為 $\ln(m)$ 的標準偏差； Z 為標準常態隨機變數。

2.8 HBM 的應用

HBM (Hierarchical bayesian model) 應用於許多土壤參數的預測，此模型最大的優勢在於有分群的概念，大地工程使用之土壤參數可能因場址或區域的沉積條件不同而有各自的趨勢，然而大多的預測模型都不會考量區域的特性，HBM 能考量場址或區域的特性來預測大地工程相關之土壤參數。

HBM 的使用案例包括袁士翔(2020)預測黏土深開挖過程中牆的變形，郭明杰(2020)預測土壤模數 (Modulus)和靜止土壓力係數 (K_0)，游易宸(2021)預測土壤動力參數，黃朋盛(2022)預測飽和黏土之滲透係數，李芯茹(2022)預測垂直載重下之淺基礎行為，這些使用的案例都能有不錯的預測結果。

第三章 資料庫建構



在此章節中，會介紹本研究整理出有關土壤液化相關數據的資料庫，在進行液化潛能評估時，常用的現地試驗為標準貫入試驗(SPT)、圓錐貫入試驗(CPT)和跨孔法(Cross-hole)，在室內試驗為得到土壤單位重(γ)、細粒料含量(FC)和平均粒徑(D_{50})等為主，在現地試驗中，通常一個場址因預算上的考量或非必要性不會做太多的試驗，因此現地較少同時有三種試驗的數據。

資料庫的數據來自各大期刊及 NGL (Open Source Global Database and Model Development for the Next-Generation of Liquefaction Assessment Procedures)，在臺灣、日本、紐西蘭和美國等地發生土壤液化時常發生許多嚴重的災害，許多工程使用的預測模型分析數據較少，且沒有考慮近 20 年的重大歷史案例，因此為了提供足夠且值得信賴的數據，在 NGL 的資料庫中收集了世界各地液化的相關資料。

在進行數據分析之前，會先將土壤參數正規化，對於 SPT 試驗會先進行鑽桿能量效率的修正，將 N 值轉換為 N_{60} ，並使用 Liao and Whitman (1986)提出的應力修正式，如式 3.1 所示，且 Idriss and Boulanger (2008)提出對於淺層土壤(約 35kPa)須對 C_N 設定上界 1.7，對於 CPT 試驗主要修正錐尖阻抗 q_c 和計算土壤類型因子 I_c ，修正方法則採用 Robertson (2009)的修正式，會在後續章節作介紹，對於剪力波速的修正則採用 Kayen et al. (1992)和 Robertson et al. (1992)之修正式，如式 3.2 所示。

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} = (P_a/\sigma'_v)^{0.5} \times N_{60} \quad (\text{式 3.1})$$

$$V_{s1} = V_s \times \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{0.25} \quad (\text{式 3.2})$$

其中 $C_N \leq 1.7$ ； $P_a = 1\text{atm} = 101.3\text{kPa}$



3.1 資料庫介紹

本研究中的資料庫名為「Liquefaction/6/2759」，資料的原始數據包含 Critical layer、總應力(σ_{v0})、有效應力(σ'_{v0})、地下水位、SPT、CPT、 V_s 、細粒料含量(FC)、平均粒徑(D_{50})、地震規模(M)和最大地表加速度(a_{max})，數字「6」指的是從資料庫中挑出或進階計算出的六個參數進行分析，包括 σ_{v0}/σ'_{v0} 、 $(N_1)_{60}$ 、 q_{c1N} 、 I_c 、 V_{s1} 和FC，數字「2759」則代表資料庫的資料數量，表 3.1 為資料庫數量矩陣。

「Liquefaction /6/2759」資料庫中的資料主要來自 20 篇文獻及 NGL，來自世界各地，包括臺灣、中國、日本、美國、土耳其等地，並由 60 個區域組成，其中單一區域最多有 383 筆資料，最少則只有 1 筆資料，區域的資料數分布如圖 3.1 所示，每個參數的資料來自多少個地區如表 3.2 所示。另外本資料庫各參數的分布如圖 3.2 圖 3.7 所示。

NGL 網站的資料都為鑽孔的完整數據，如全部都取來分析資料量會過大，因此將 NGL 資料收集下來後會選取各點位的 Critical layer，選取的方法分為兩種，如為 SPT 數據則使用 NCEER(2001)法，如為 CPT 數據則使用 Juang(2003)法，因剪力波速在 NGL 的資料中較少，且各層的數據值較少，因此主要採用 SPT 和 CPT 的方法計算。

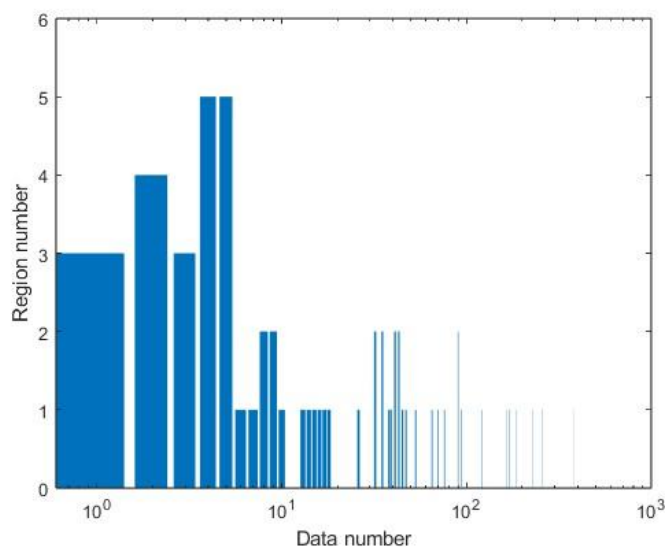


圖 3.1 區域與資料數量分布圖

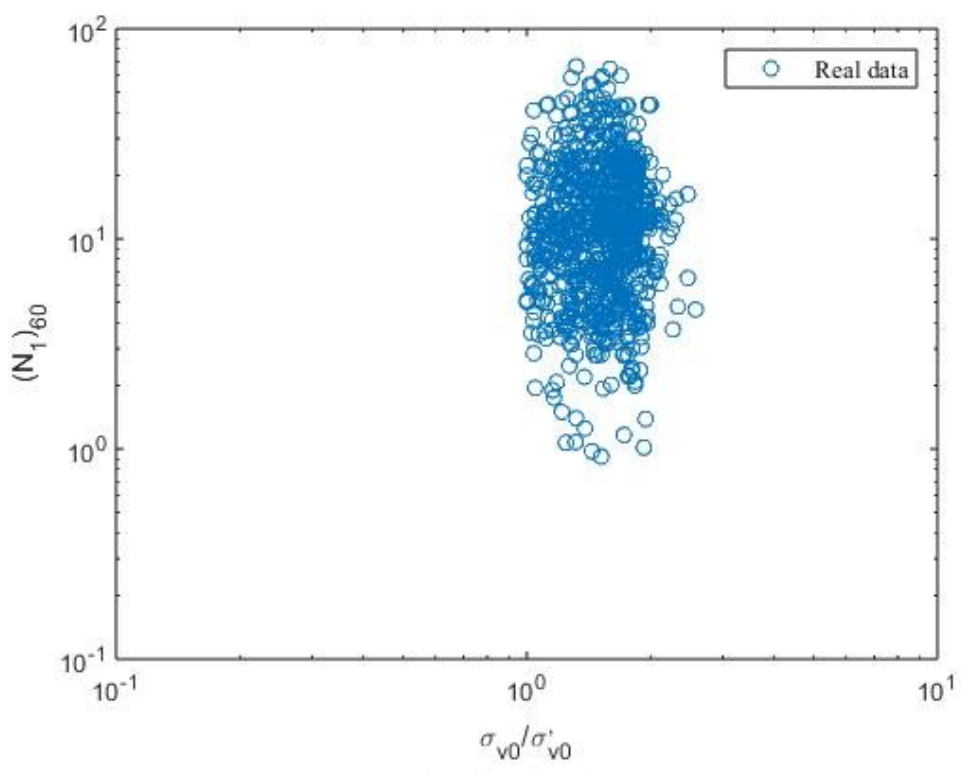
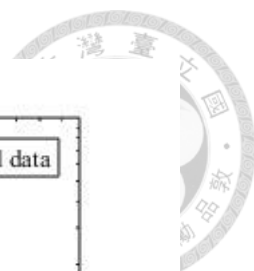


圖 3.2 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 分布圖

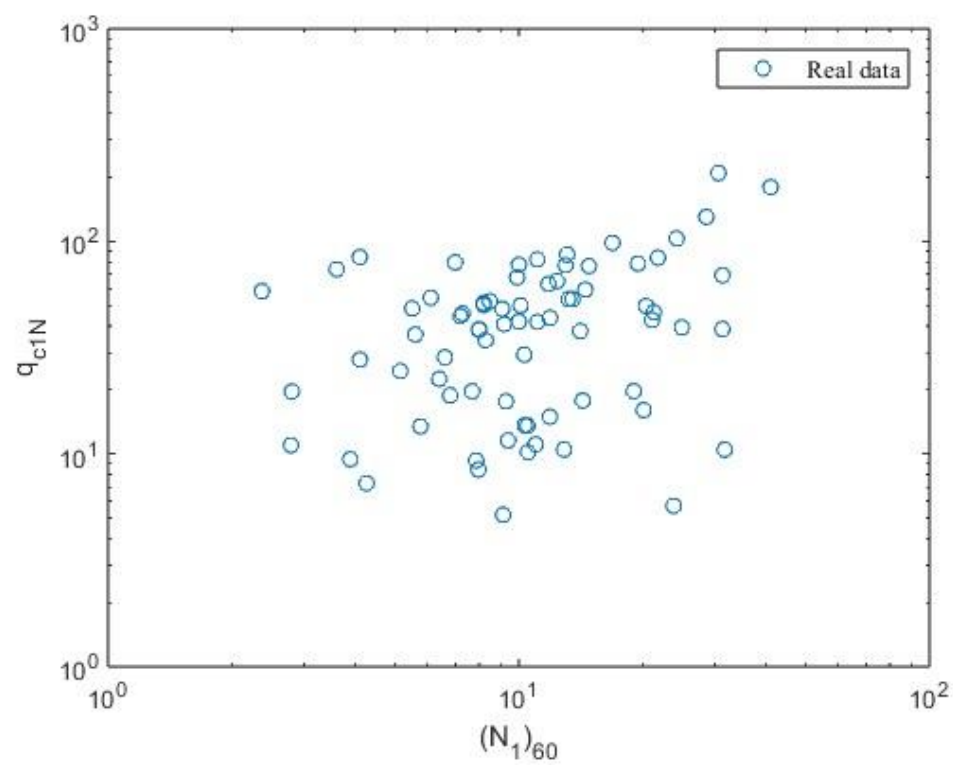


圖 3.3 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 分布圖

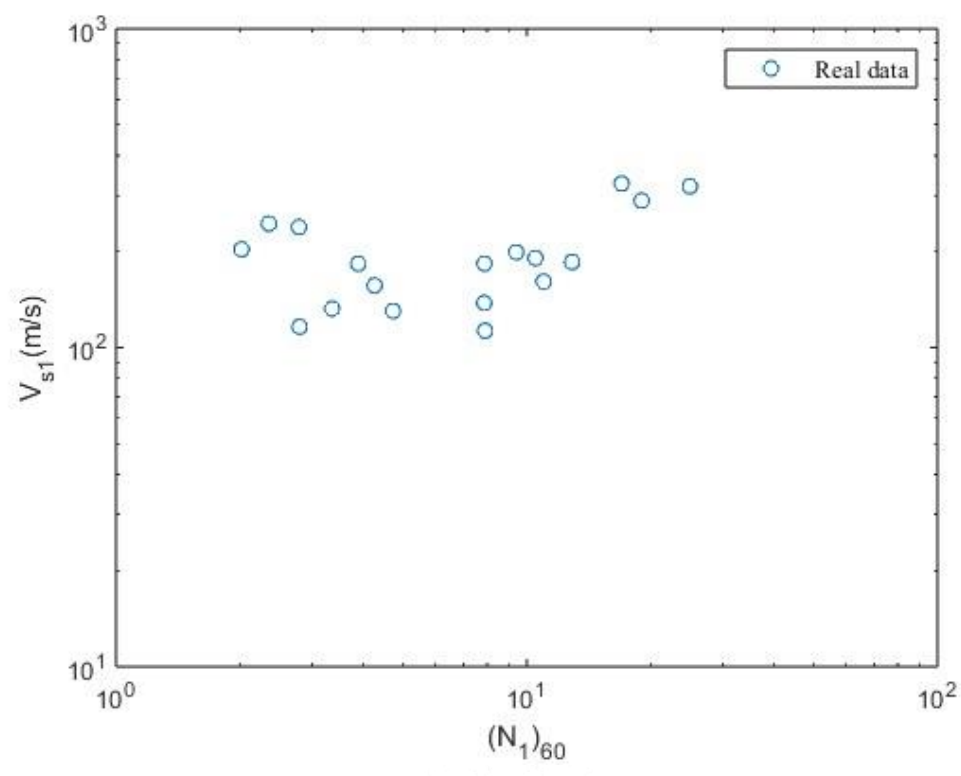
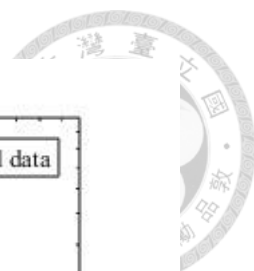


圖 3.4 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 分布圖

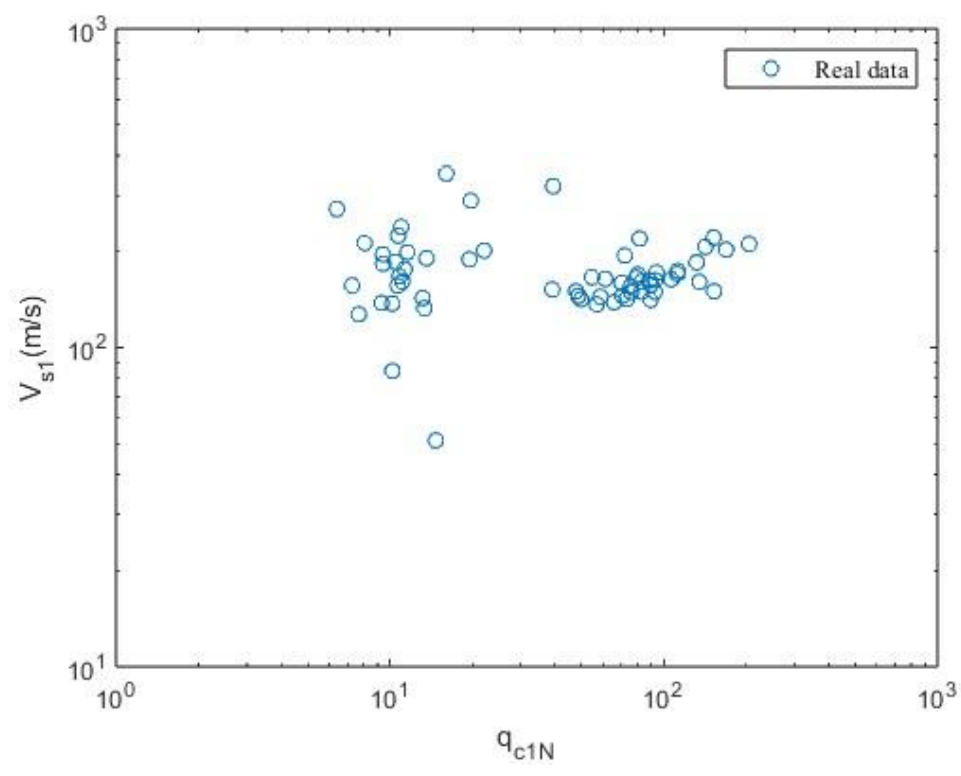


圖 3.5 q_{c1N} 與 V_{s1} 分布圖

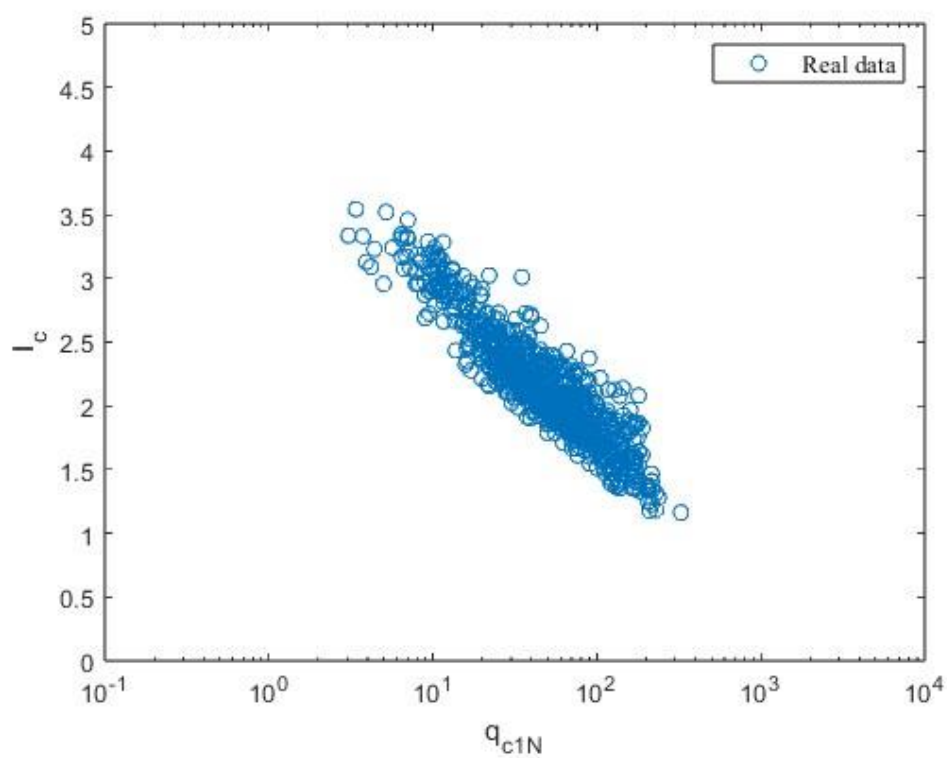


圖 3.6 q_{c1N} 與 I_c 分布圖

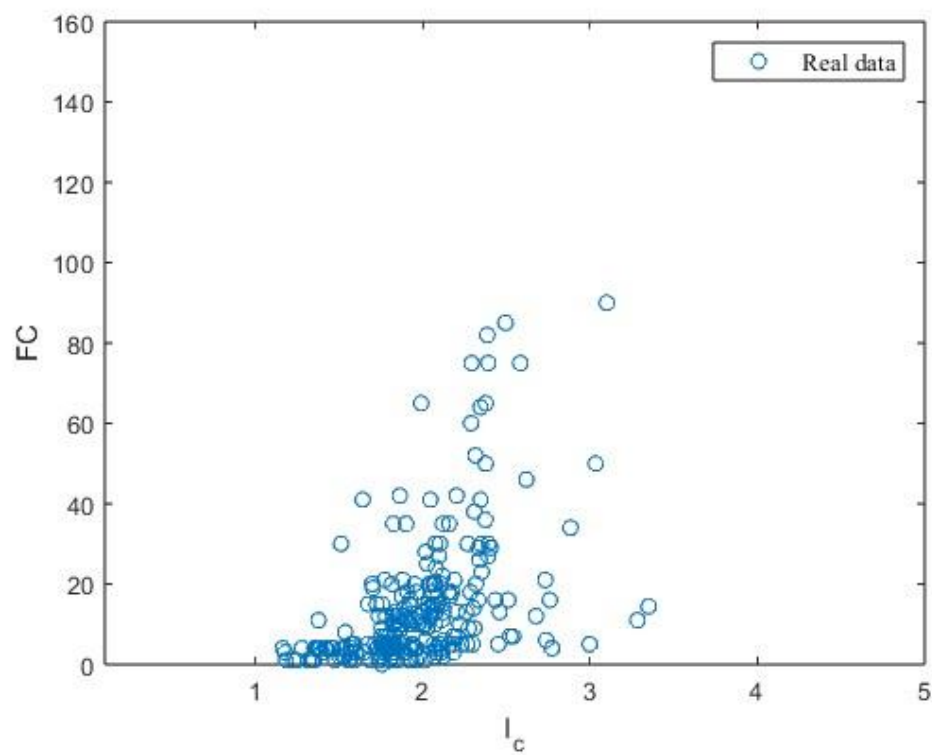


圖 3.7 I_c 與FC分布圖

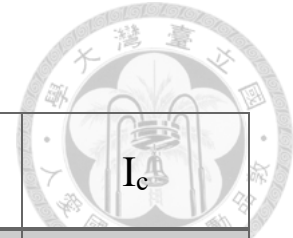


表 3.1 「Liquefaction/6/2759」資料庫數量矩陣

	Liquefaction	σ_v/σ'_v	V_{s1}	FC	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c
Liquefaction	2759	2759	849	1202	946	1107	1021
σ_v/σ'_v		2759	849	1202	946	1107	1021
V_{s1}			849	185	21	63	62
F _c				1202	809	281	247
$(N_1)_{60}$		Symmetry			946	75	71
q_{c1N}						1107	1021
I_c							1021

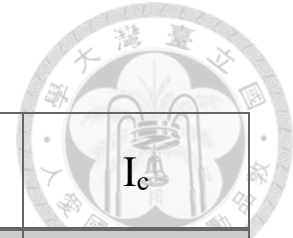
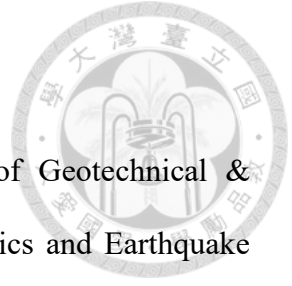


表 3.2 「Liquefaction/6/2759」地區數量矩陣

	Liquefaction	σ_v/σ'_v	V_{s1}	FC	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c
Liquefaction	60	60	39	47	41	38	36
σ_v/σ'_v		60	39	47	41	38	36
V_{s1}			39	21	12	15	15
F _c				47	37	26	25
$(N_1)_{60}$		Symmetry			41	17	16
q_{c1N}						38	36
I_c							36



3.2 資料蒐集方法

資料的來源為與土壤液化相關文獻和期刊 (Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Engineering Geology, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and Soils and Foundations) 以及 NGL (Next Generation Liquefaction) ，並將資料彙整於 excel 中。

3.3 檢核資料庫的正確性

資料收集完成後，為了確保資料庫數據的正確性，本研究會進行兩階段的檢核。

1. 第一階段:

將資料庫的數據帶入前人的預測液化潛能模型中，並計算該資料的安全係數和繪出該點與土壤臨界液化強度曲線的關係，如預測結果與實際情況誤差較大，則會再次確認該筆資料的正確性。

2. 第二階段:

從資料庫中隨機取 100 筆資料，重新檢視收集到 excel 的數據是否有誤，如有錯誤需檢視為單一錯誤還是系統錯誤，若為單一錯誤即改進這筆資料即可，若為系統錯誤，則須找出錯誤原因並修正，修正完成後重新隨機取 100 筆資料進行檢核，直到隨機取 100 筆資料完全無誤。



3.4 資料庫參數計算之假設

在收集資料時不一定能收集到完整的資訊，因此在研究中有做一些假設及計算，以下為本研究之假設及計算方法：

1. 在 NGL 的資料中只有各土層的土壤類型，並無提供土層單位重，因此無法計算土壤總應力及有效應力，本研究根據 Chao et al. (2010) 所整理的土壤基本性質，如表 3.3 所示進行計算。

2. SPT 試驗在各國使用頻繁，但各國的儀器設備有所不同，造成各國所施作出的 SPT-N 值無法互相比較，因此本研究針對不同地區的夯錘效率進行修正，如表 3.4 所示，進而計算出 $(N_1)_{60}$ 。

表 3.3 土壤基本性質 (Chao et al., 2010)

	濕單位重(t/m^3)	含水量(%)	飽和單位重(t/m^3)	平均 N 值
礫石層	2.11	8.86	2.34	26
極鬆砂	1.76	28.01	1.95	3
疏鬆砂	1.87	23.33	2.02	7
中等砂	1.92	21.96	2.04	20
緊密砂	2	18.84	2.10	39
低塑性黏土	1.84	33.61	1.87	8
低壓縮性粉土	1.83	31.03	1.91	11
粉土質黏土	1.84	29.44	1.93	10
高塑性黏土	1.89	28.09	1.95	23
高壓縮性粉土	1.76	37.3	1.83	8

表 3.4 各國夯錘效率假設

	夯錘效率(%)
臺灣	60
中國	55
日本	75
土耳其	45

3. 資料庫中的 q_{c1N} 和 I_c 兩者為使用 CPT 試驗計算土壤液化潛能的重要參數，且 I_c 的計算也有考慮摩擦阻抗 f_s 的影響，因此選用 I_c 作為分析參數，本研究的計算採用 Robertson (2009)的方法，如式 3.3 所示。然而資料庫中不一定會有孔隙水壓(u_2)的資料，在此情況如有地下水位則假設 $u_2 = u_0$ ，如都沒有則假設 $q_t = q_c$ ，因文獻中有提到砂土的 $q_t \cong q_c$ ，在液化的資料中大部分為砂土，因此做此假設， q_{c1N} 的計算則如式 3.4 所示。

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2$$

$$Q_{tn} = [(q_t - \sigma_{v0})/p_a](p_a/\sigma'_{v0})^n$$

$$n = 0.381(I_c) + 0.05(\sigma'_{v0}/p_a) - 0.15$$

$$F_r = [f_s/(q_t - \sigma_{v0})]100\%$$

$$B_q = (u_2 - u_0)/(q_t - \sigma_{v0})$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (\text{式 3.3})$$

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}}\right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}\right)^n \quad (\text{式 3.4})$$

其中 u_0 為靜態水壓； u_2 為孔隙水壓； a 假設為 0.7； $P_a = 100\text{kPa}$ (當 σ'_0 單位為 kPa)； $P_{a2} = 0.1\text{Mpa}$ (當 q_c 單位為 MPa)； n 設定範圍在 0-1 之間； $\left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}\right)^n \leq 1.7$ 。

4. 本研究有關剪力波速的評估法後續分析會使用 Kayen et al. (2013)的方法，因此本研究在計算 V_{s1} 使用式 3.2，但其中的 $\left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}\right)^{0.25}$ 上界為 1.5。



3.5 本研究資料庫資料與前人預測模型比對

本節會使用 2.6 小節所介紹的預測模型與本研究資料庫的數據進行比對，此舉的目的是透過前人的預測模型來檢視資料庫中的資料是否正確且具有同樣的趨勢。根據資料庫的數據計算出安全係數後，對比現地的液化資訊，或將數據點繪出，觀察與臨界液化強度曲線的相對位置關係，藉此判斷數據是否準確。

首先是 Seed et al. (1985)，如圖 3.8，圖中的細粒料含量為根據經驗所繪出，本研究也根據此細粒料含量將數據庫的資料分為四個範圍呈現。

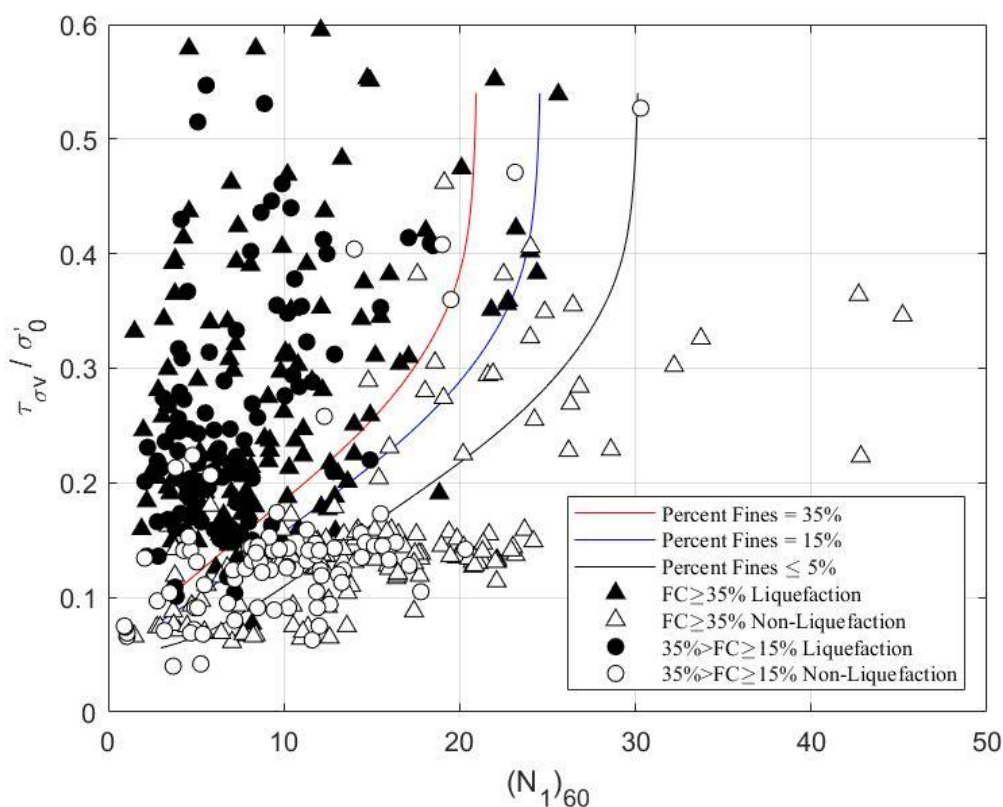


圖 3.8 Seed et al., (1985)臨界液化曲線(FC% ≥ 15%)

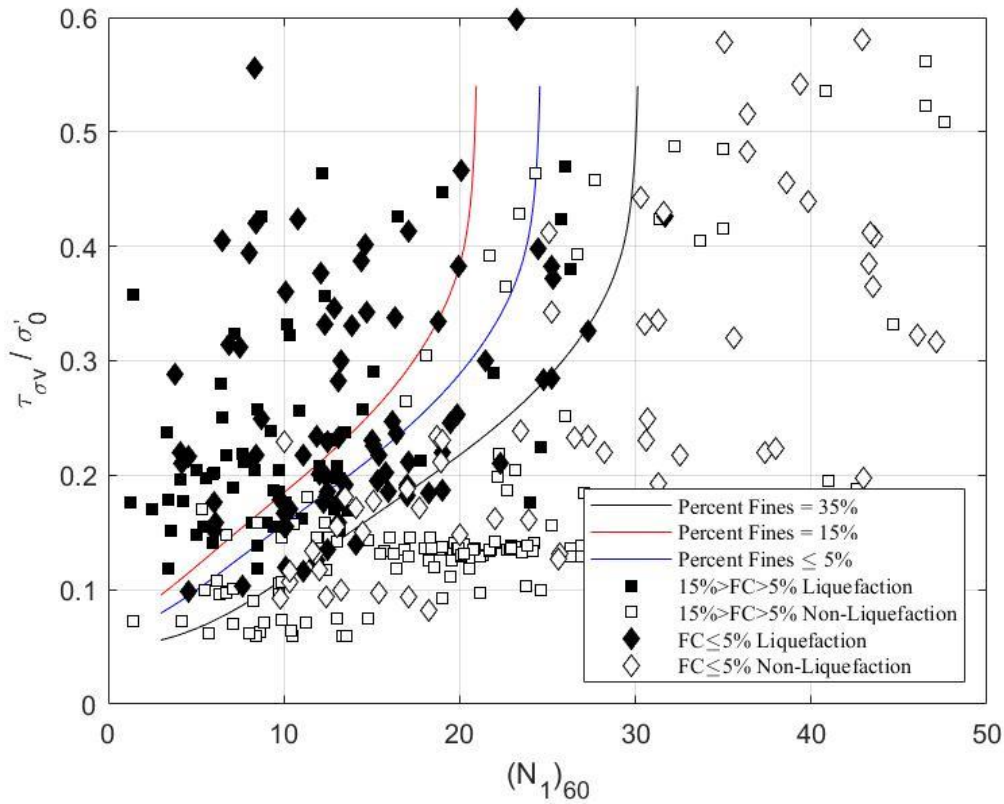
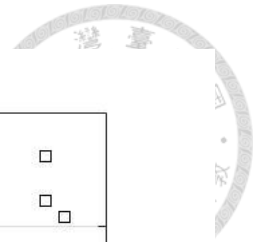


圖 3.9 Seed et al., (1985) 臨界液化曲線(FC% < 15%)

Tokimatsu and Yoshimi (1983)的分析主要使用的參數包括 SPT-N 值以及細粒料含量，因此法為使用日本的資料進行分析，故在計算安全係數前會先將 N 值的垂直效率修正為 75%，並以此值進行分析，結果表 3.5 所示。

表 3.5 Tokimatsu and Yoshimi (1983)分析結果

總數	818	
	正確	不正確
液化	356	38
非液化	343	81
比例	85.45%	14.55%

日本建築學會(AIJ, 2001)的分析步驟主要使用的參數包括 SPT-N 值和細粒料含量，此處也將 N 值的夯垂效率修正為 75%，並假設資料皆符合使用前提進行計算，計算結果如表 3.6 所示，剪應變(γ)為 5%的液化臨界曲線如圖 3.10 所示。

表 3.6 AIJ (2001)分析結果

總數	818	
	正確	不正確
液化	290	104
非液化	394	30
比例	83.62%	16.38%

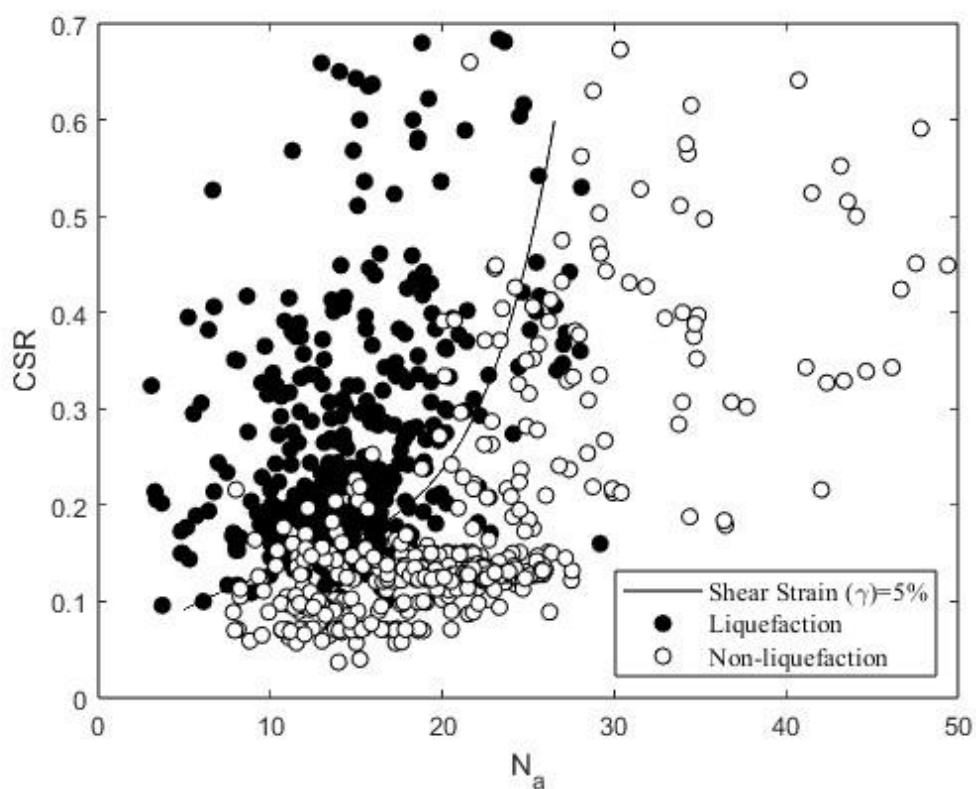


圖 3.10 AIJ (2001) 臨界液化曲線



日本道路協會(JRA1990 法)的分析步驟主要使用的參數包括 SPT-N 值、 D_{50} 和細粒料含量，此處也將 N 值的夯垂效率修正為 75%，結果如表 3.7 所示，可以觀察到此法在非液化的場址中預測較不準確。

表 3.7 日本道路協會(JRA1990 法)分析結果

總數	281	
	正確	不正確
液化	146	21
非液化	49	65
比例	69.4%	30.6%

NCEER(1997)的分析主要使用的參數包括 SPT-N 值和細粒料含量，此法是将 Seed (1985)的方法公式化，在臨界液化曲線也可明顯看到加入較小 N 值的土壤仍有抗液化強度的理念，且認定 $(N_1)_{60cs}$ 如大於 30 為非液化土層，分析結果如表 3.8 所示，臨界液化曲線如圖 3.11 和圖 3.12 所示。

表 3.8 SPT-NCEER (1997)分析結果

總數	818	
	正確	不正確
液化	346	48
非液化	363	61
比例	86.67%	13.33%

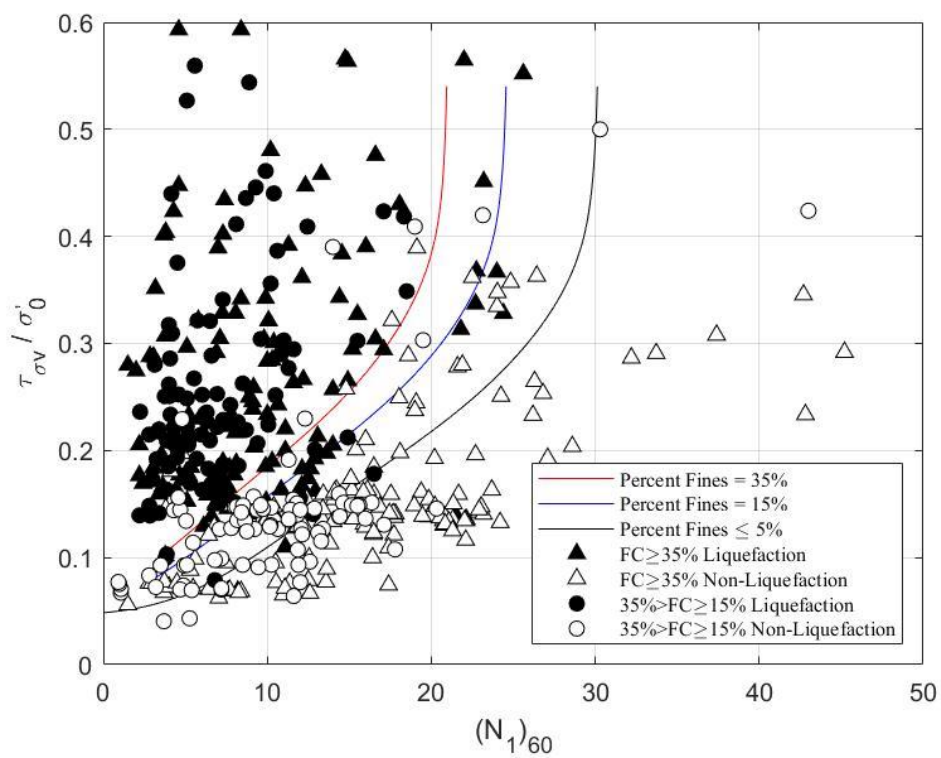


圖 3.11 SPT-NCEER (1997) 臨界液化曲線 (FC% ≥ 15%)

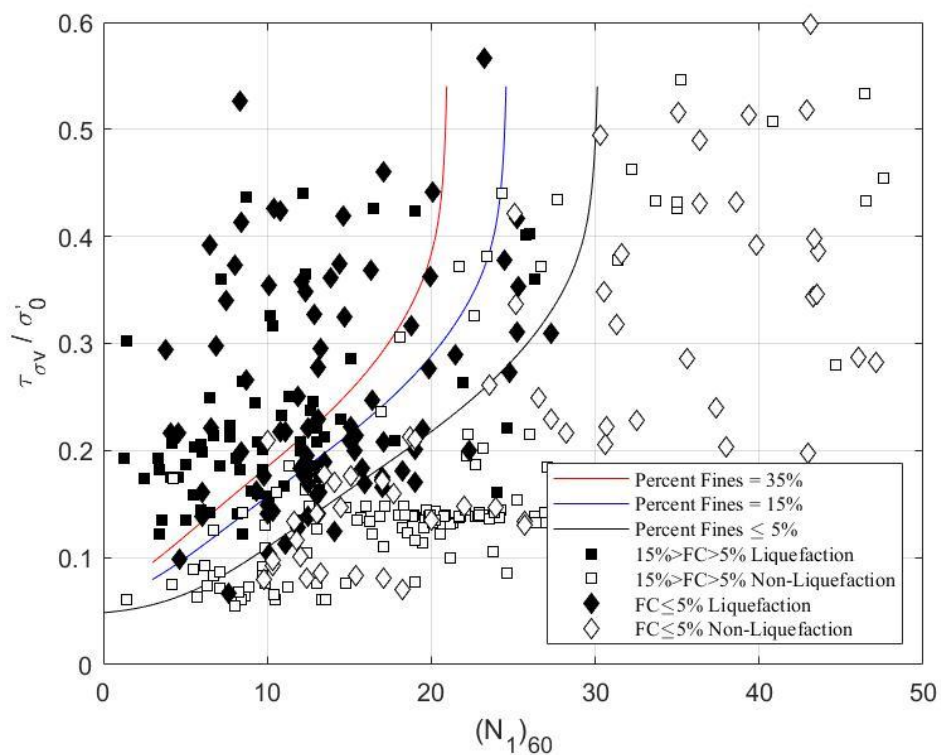


圖 3.12 SPT-NCEER (1997) 臨界液化曲線 (FC% < 15%)

NCEER(2001)的分析與 NCEER(1997)的方法類似，不同之處已在第二章做介紹，分析結果如表 3.9 所示，臨界液化曲線如圖 3.13 和圖 3.14 所示，兩者分析的準確率相近且都在約 86%，以 SPT 分析法來說算是很準確的方法，因此後續章節的分析在 SPT 方法中採用此法進行運作。

表 3.9 SPT-NCEER (2001)分析結果

總數	818	
	正確	不正確
液化	341	51
非液化	376	50
比例	87.65%	12.35%

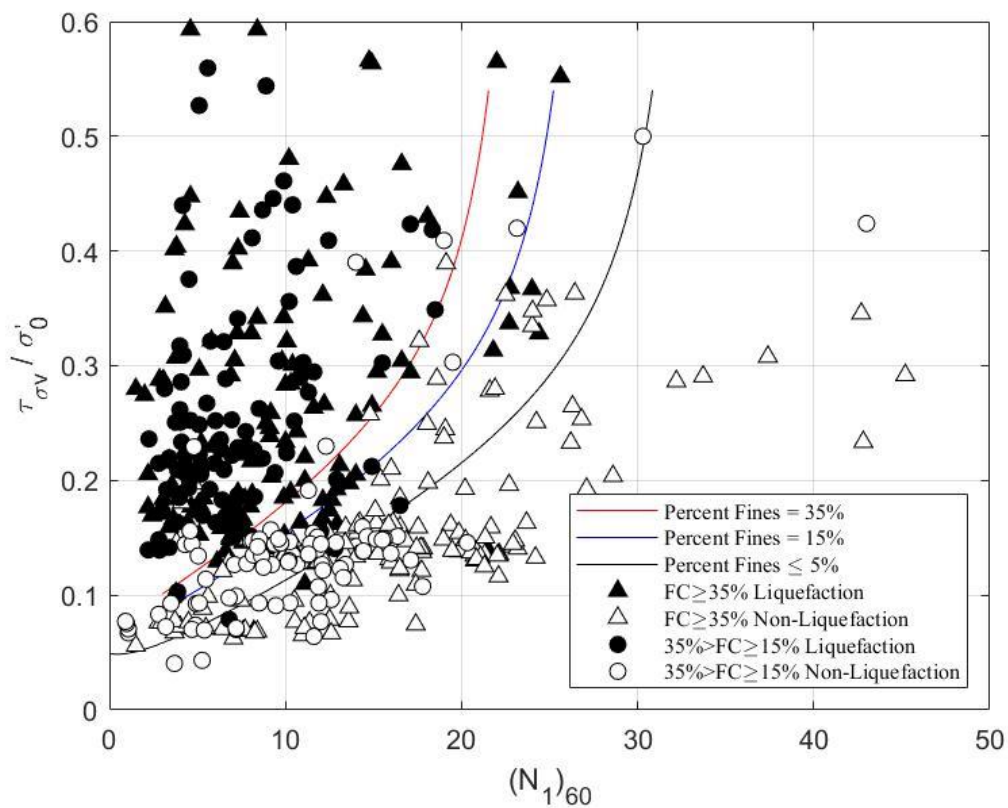


圖 3.13 SPT-NCEER (2001)臨界液化曲線(FC% ≥ 15%)

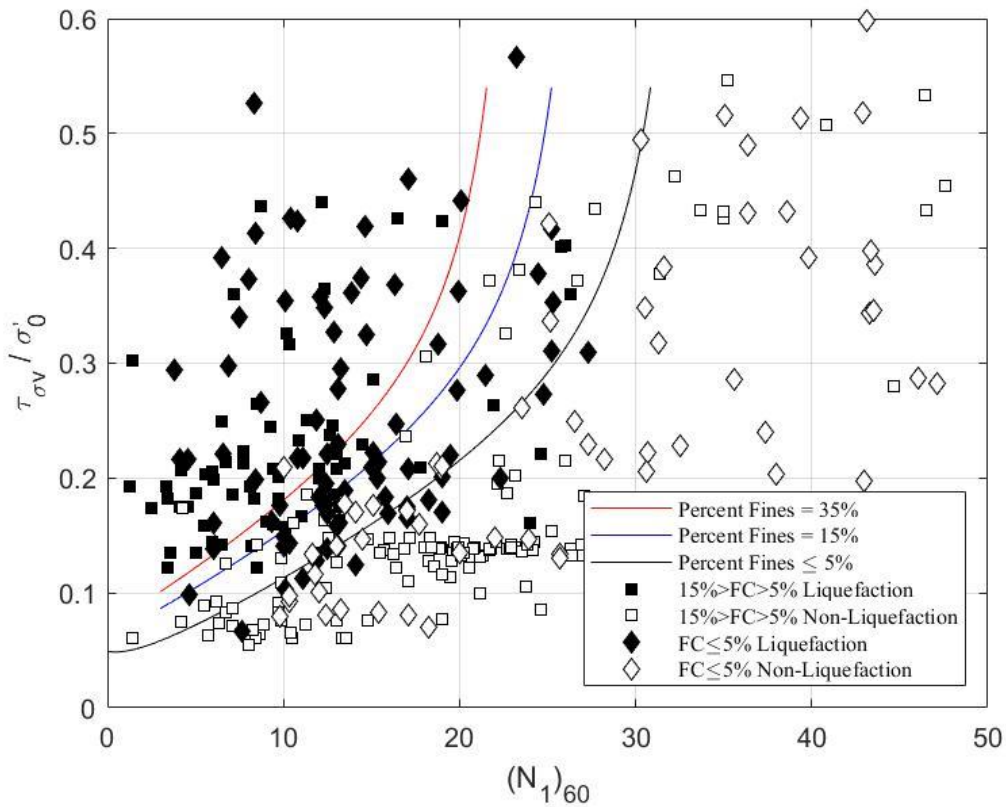


圖 3.14 SPT-NCEER (2001)臨界液化曲線(FC% < 15%)

Shibata et al. (1988) 的分析主要使用的參數包括 q_c 值和 D_{50} ，在 CPT 的方法中此法使用 D_{50} 是數據庫中較少的參數，且計算過程未使用到 f_s ，表示此法並未做初步的土壤分類，是與其他方法不一樣的地方，分析結果如表 3.10 所示，臨界液化曲線圖 3.15 和圖 3.16 所示。

表 3.10 Shibata et al., (1988)分析結果

總數	144	
	正確	不正確
液化	74	9
非液化	33	28
比例	74.3%	25.7%

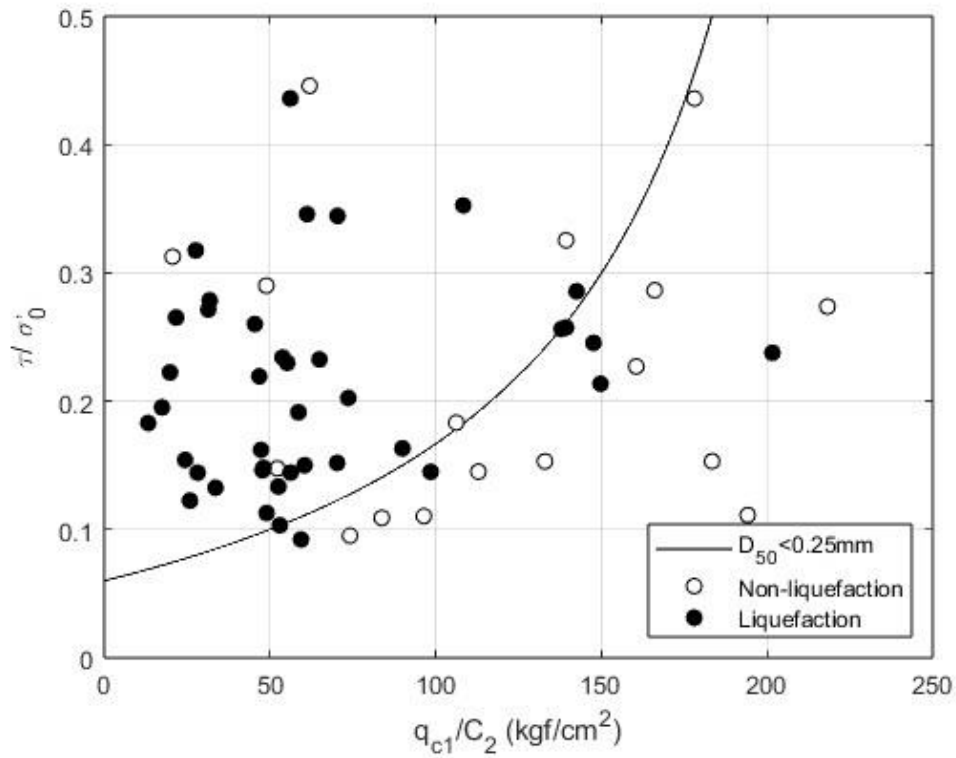


圖 3.15 Shibata et al., (1988)臨界液化曲線($D_{50} < 0.25$ mm)

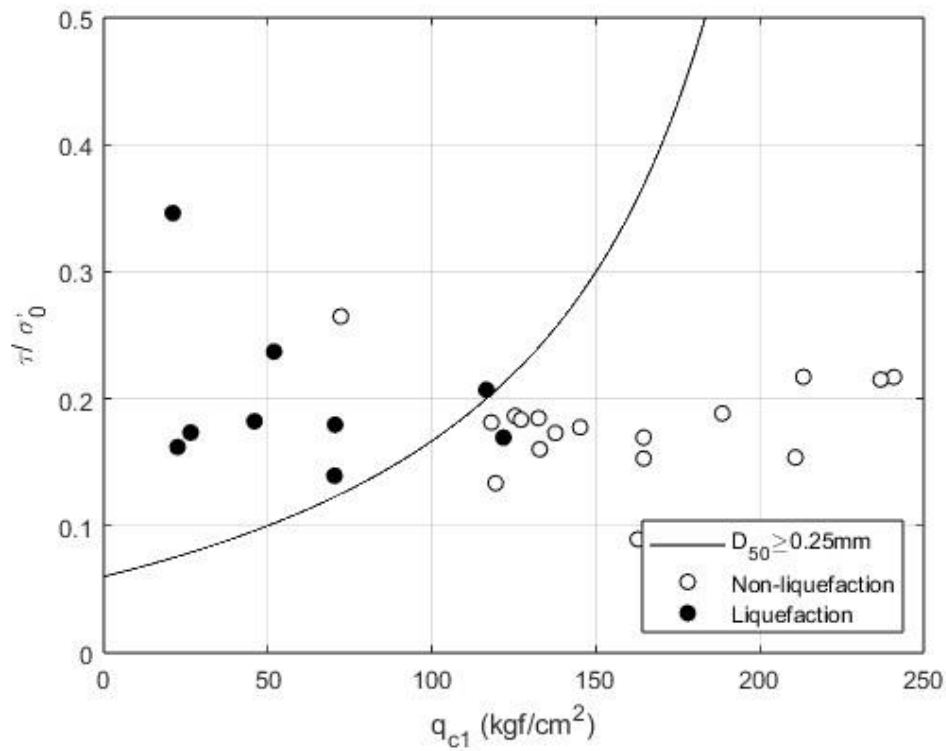


圖 3.16 Shibata et al., (1988)臨界液化曲線($D_{50} \geq 0.25$ mm)



NCEER(1997)的分析主要使用的參數包括 q_c 和 f_s ，會先計算出 I_c 值將土壤大致分類，如 I_c 大於 2.6 則不適用此法進行分析，分析流程如圖 3.17 所示，分析結果如表 3.11 所示，臨界液化曲線如圖 3.18 所示。

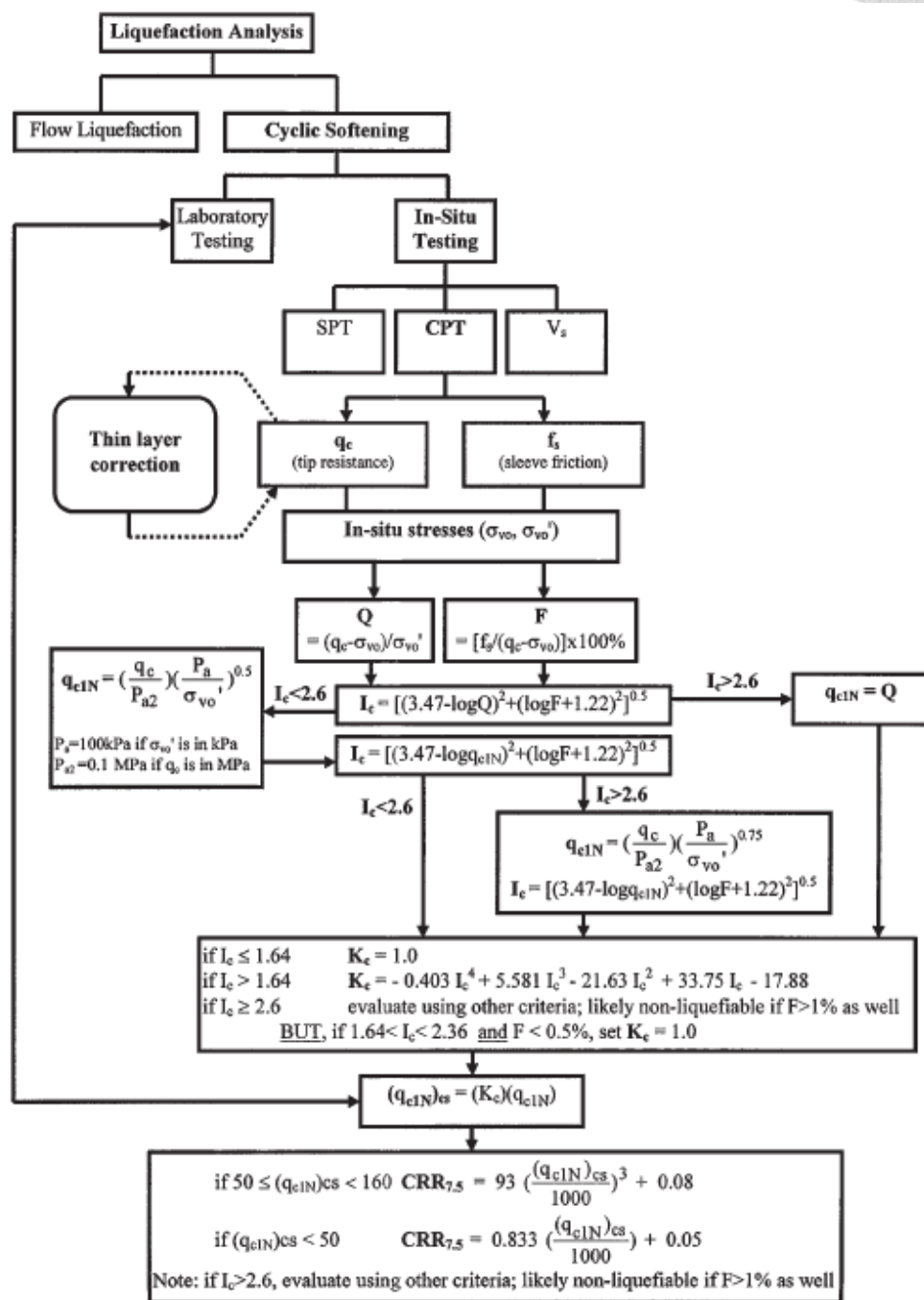


圖 3.17 CPT-NCEER (1997)分析流程 (Robertson and Wride, 1998)

表 3.11 CPT-NCEER (1997)分析結果

總數	883	
	正確	不正確
液化	459	66
非液化	203	155
比例	74.97%	25.03%

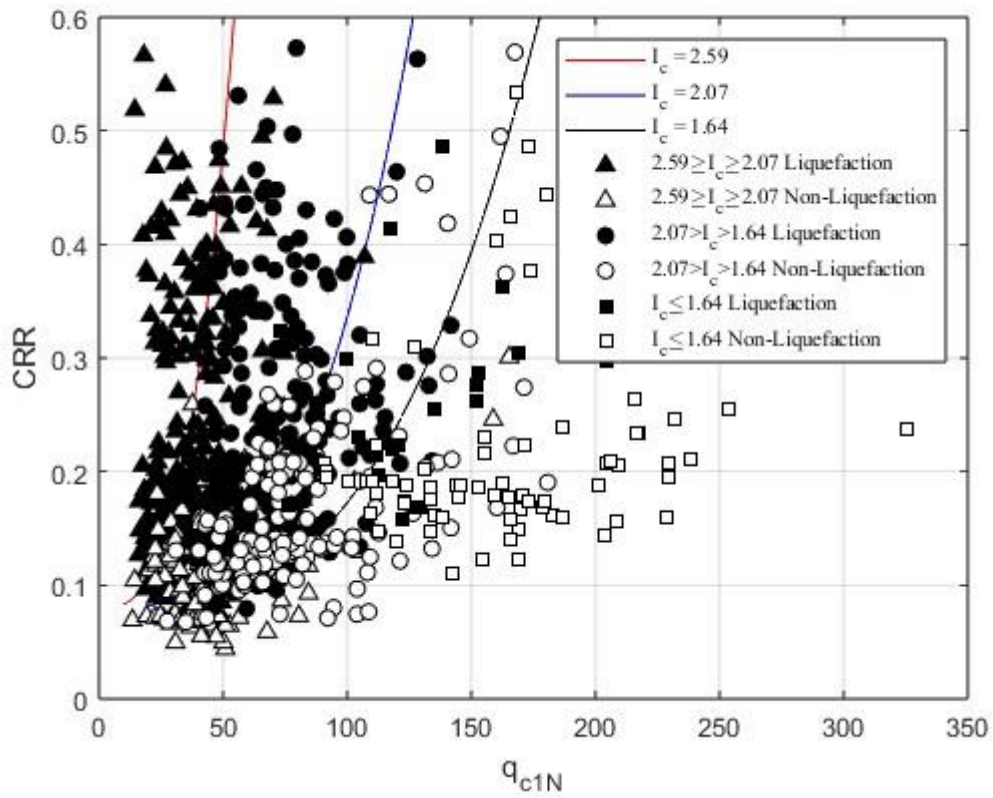


圖 3.18 CPT-NCEER (1997)臨界液化曲線

NCEER(2001)與 NCEER(1997)的計算方法相似，兩者的準確率皆有 75%，不同之處已在第二章作介紹，此處不多做贅述，分析結果如表 3.12 所示，臨界液化曲線如圖 3.19 所示。



表 3.12 CPT-NCEER (2001)分析結果

總數	890	
	正確	不正確
液化	464	66
非液化	210	150
比例	75.73%	24.27%

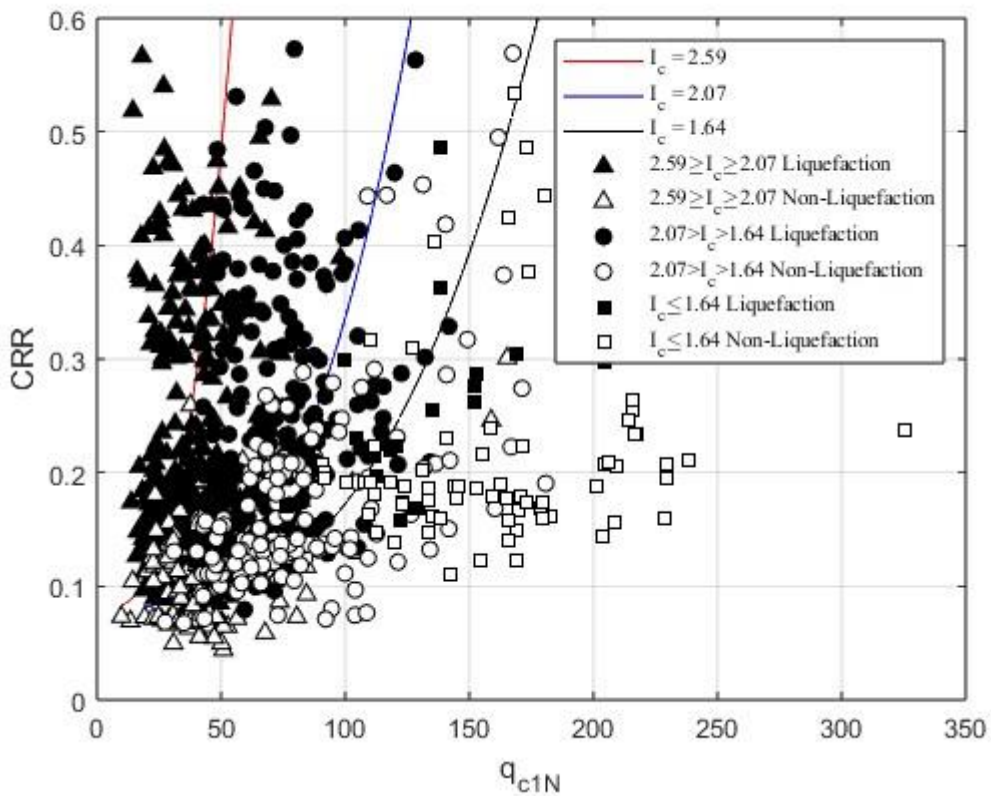


圖 3.19 CPT-NCEER (2001)臨界液化曲線

Juang(2003)法主要使用的參數包括 q_c 和 f_s ，此法也會先行計算 I_c ，但並沒有 I_c 需小於 2.6 的限制，此法不僅計算流程較簡單，且準確率有 79%，因此在後續章節的分析會使用此方法進行運作，分析結果如表 3.13 所示，臨界液化曲線如圖 3.20 所示。

表 3.13 Juang (2003)分析結果

總數	1021	
	正確	不正確
液化	563	78
非液化	247	133
比例	79.33%	20.67%

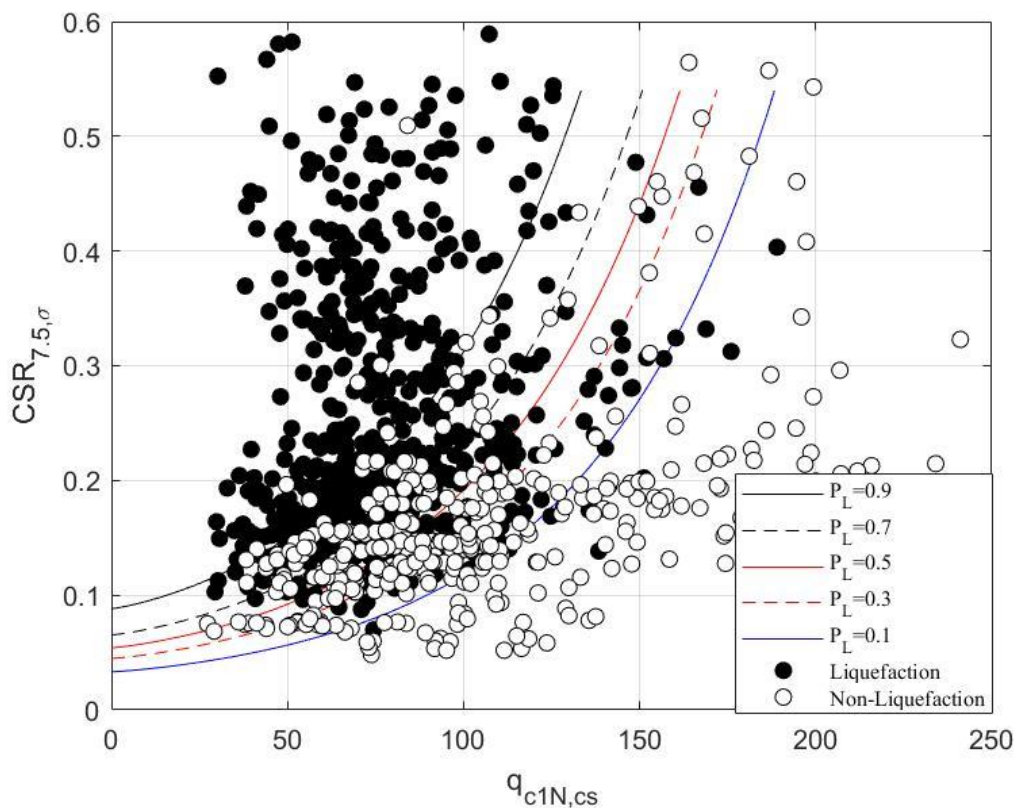


圖 3.20 Juang (2003)臨界液化曲線



Boulanger and Idriss (2016) 主要使用的參數包括 q_c 和 f_s ，此法與 NCEER 相同， I_c 值皆需小於 2.6，在分析中使用 $P_L=15$ 、50 和 85% 運算，其中 $P_L=50\%$ 的準確率較高，如表 3.14 所示，臨界液化曲線如圖 3.21 所示。

表 3.14 Boulanger and Idriss (2016)分析結果($P_L=50\%$)

總數	889	
	正確	不正確
液化	455	76
非液化	267	91
比例	81.21%	18.79%

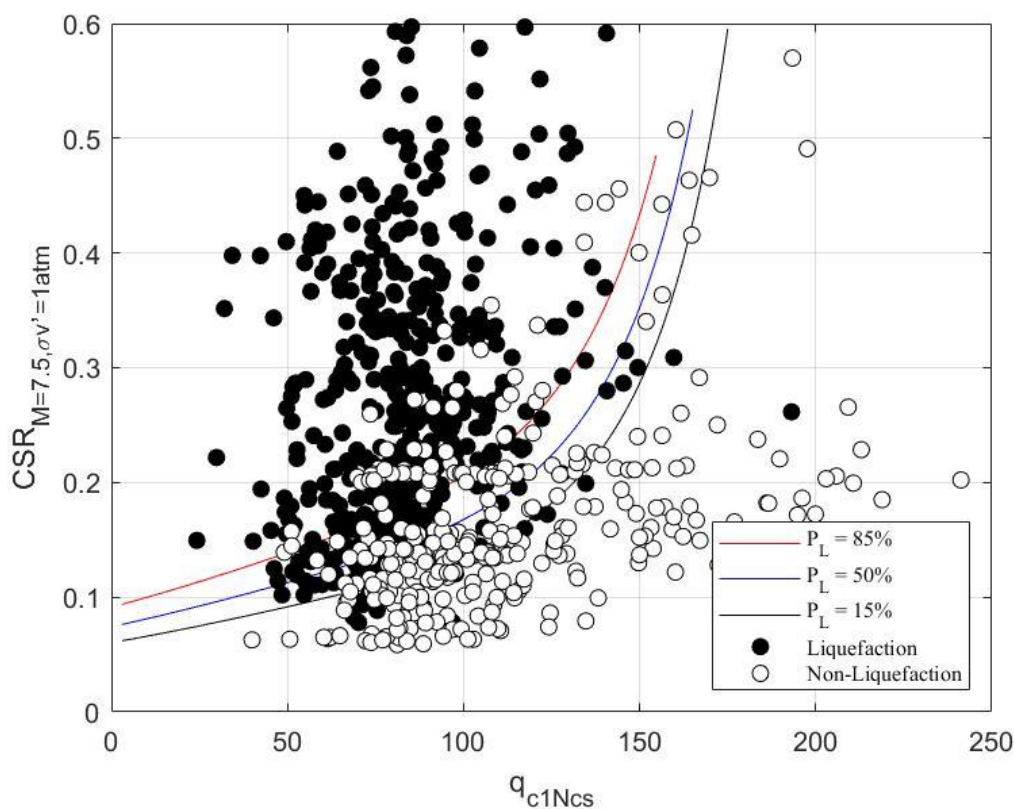


圖 3.21 Boulanger and Idriss (2016)臨界液化曲線



Ku and Juang (2012)主要使用的參數包括 q_c 和 f_s ，因此法在計算時需要孔隙水壓(u_2)，然而資料庫中不一定會有孔隙水壓(u_2)的資料，若沒有孔隙水壓則採用 3.4 節的假設，分析結果如表 3.15。

表 3.15 Ku and Juang (2012)分析結果

總數	1021	
	正確	不正確
液化	554	87
非液化	186	194
比例	72.48%	27.52%

NCEER(1997)和 NCEER(2001)的分析主要使用的參數包括 V_s 和 FC，然而此部分的資料在本研究的資料庫較少，因此分析的數量較少，分析結果如表 3.16 和表 3.17 所示，臨界液化曲線如圖 3.22 至圖 3.27 所示。

表 3.16 V_s -NCEER (1997)分析結果

總數	220	
	正確	不正確
液化	128	2
非液化	40	52
比例	75.68%	24.32%

表 3.17 V_s -NCEER (2001)分析結果

總數	217	
	正確	不正確
液化	126	4
非液化	40	48
比例	76.15%	23.85%

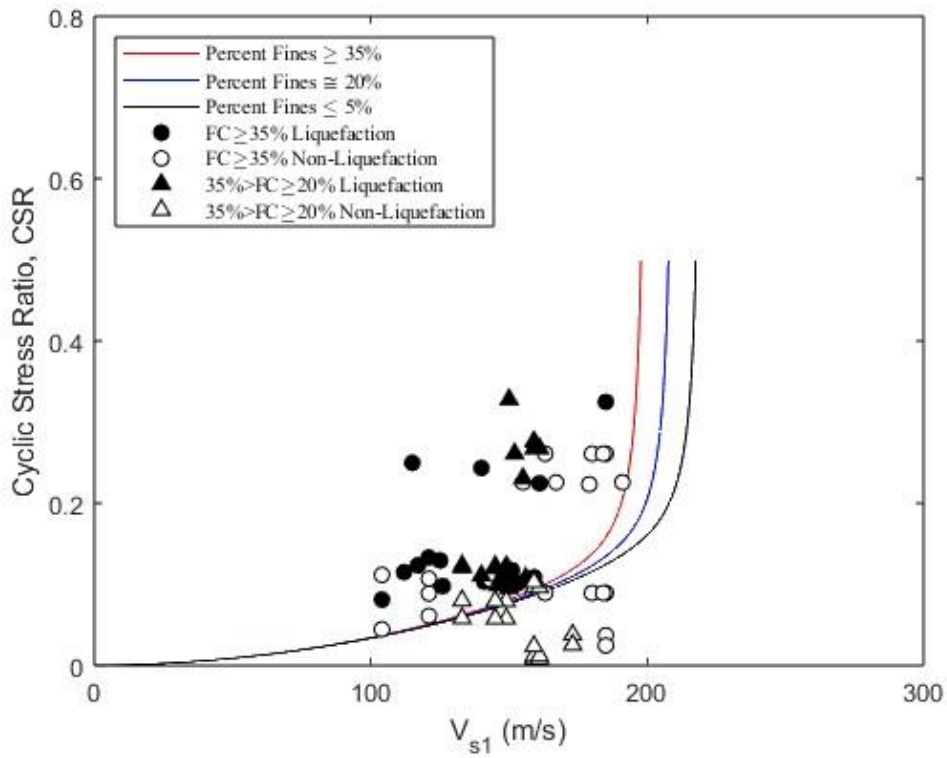


圖 3.22 V_s -NCEER (1997) 臨界液化曲線($FC\% \geq 20\%$)

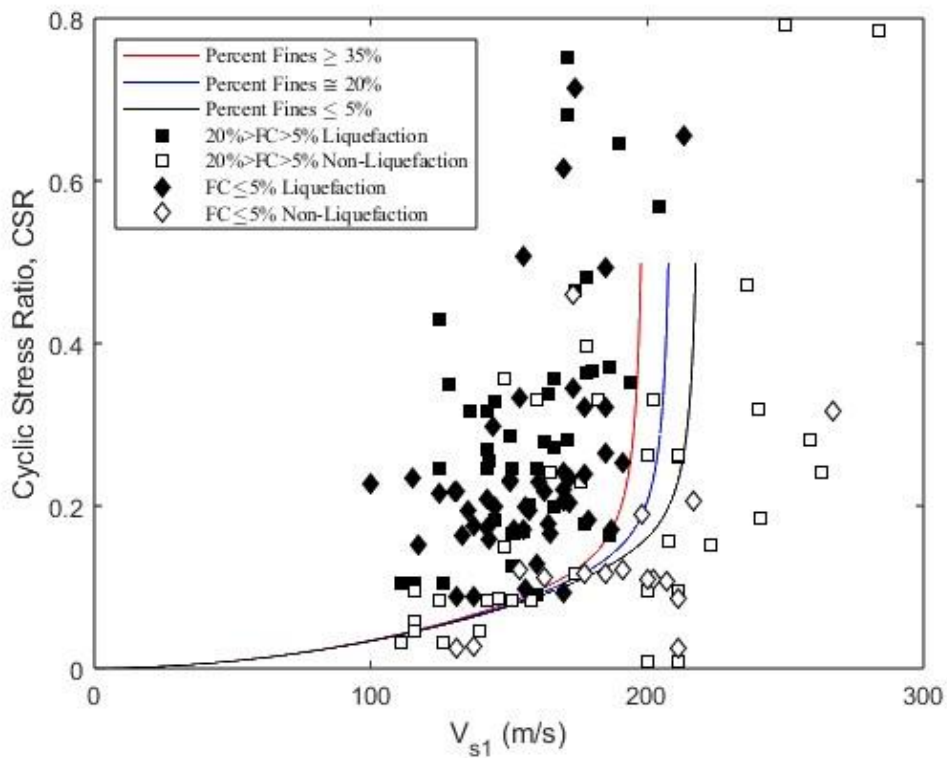


圖 3.23 V_s -NCEER (1997) 臨界液化曲線($FC\% < 20\%$)

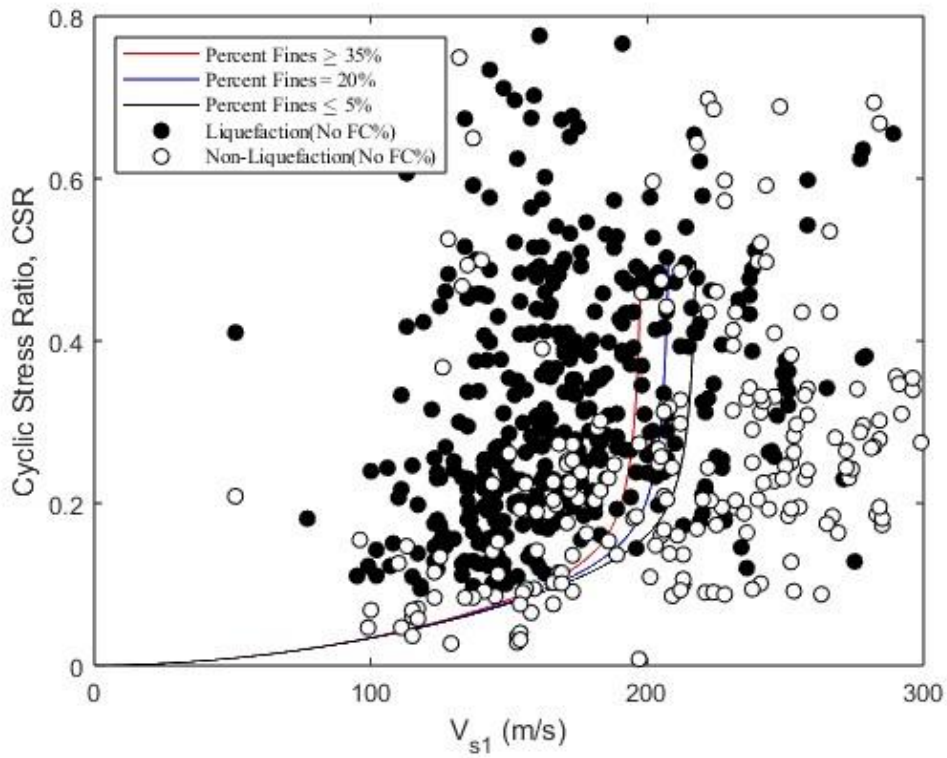
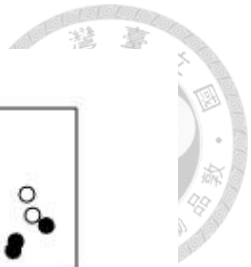


圖 3.24 V_s -NCEER (1997)臨界液化曲線(沒有 FC)

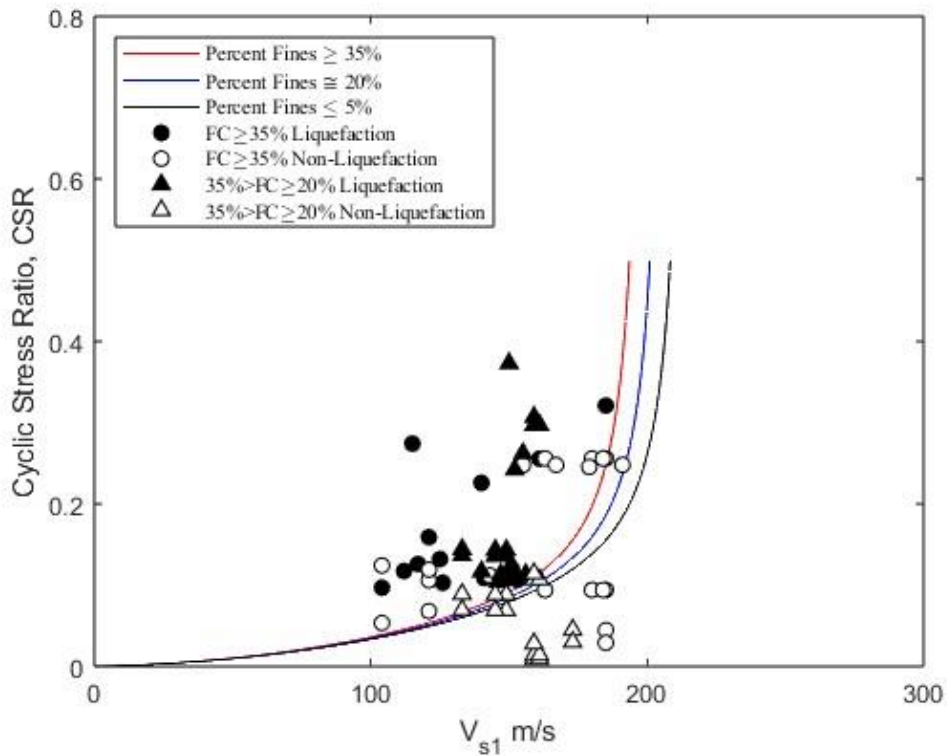


圖 3.25 V_s -NCEER (2001)臨界液化曲線($FC\% \geq 20\%$)

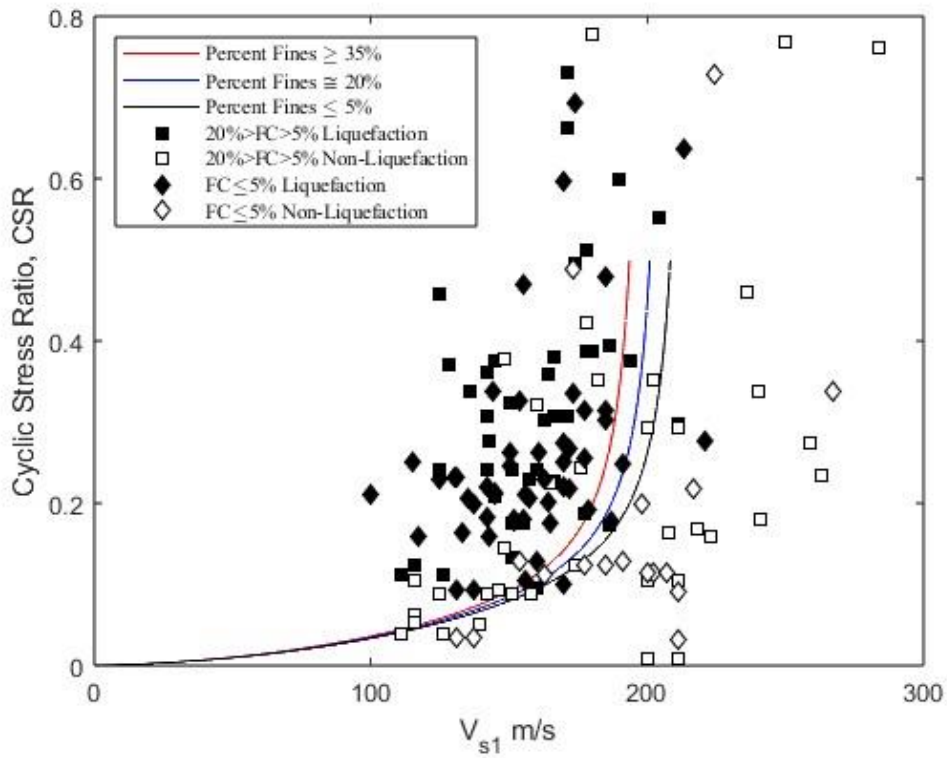
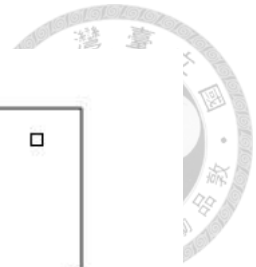


圖 3.26 V_s -NCEER (2001) 臨界液化曲線(FC% < 20%)

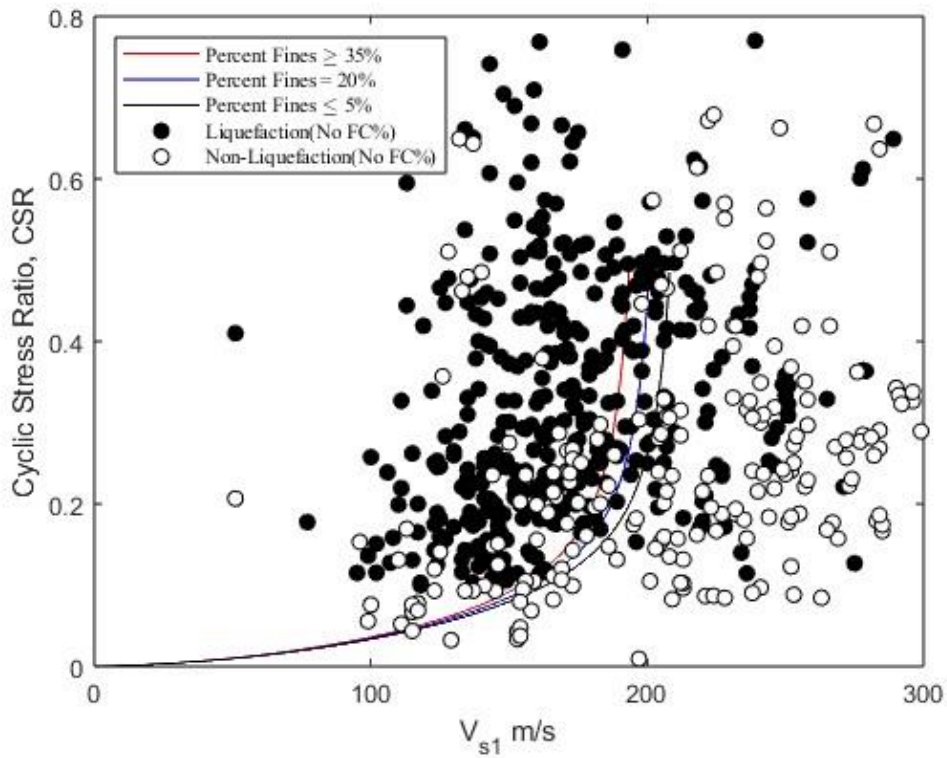


圖 3.27 V_s -NCEER (2001) 臨界液化曲線(沒有 FC)

Kayen et al. (2013)的分析主要使用的參數包括 V_s 和 FC，在分析時使用文中建議之 $P_L=15\%$ 進行計算，結果如表 3.18 所示，準確率有接近 80%，對於本研究使用的 V_s 評估法來說是最準確的，臨界液化曲線如圖 3.28 和圖 3.29 所示。

表 3.18 Kayen et al., (2013)分析結果($P_L=15\%$)

總數	185	
	正確	不正確
液化	88	13
非液化	59	25
比例	79.46%	20.54%

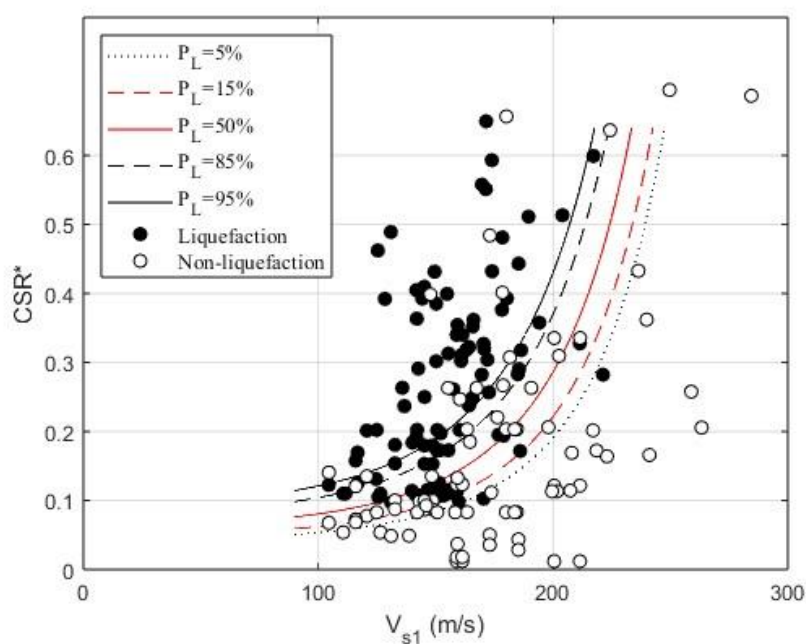


圖 3.28 Kayen et al., (2013)臨界液化曲線

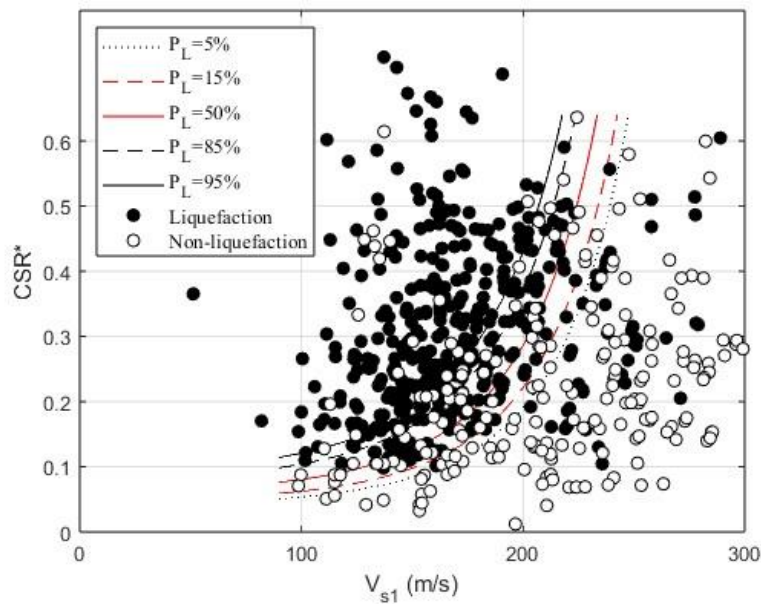


圖 3.29 Kayen et al., (2013)臨界液化曲線(沒有 FC)

3.6 本研究選用之預測模型

在後續章節的分析會分為三種試驗進行(SPT、CPT 和 V_s)，在分析時每種試驗會選用一種方法進行，挑選的原則有兩點：

1. 預測模型代入本研究資料庫，其準確率較高者。
2. 預測模型計算簡單且使用較常見之參數。

綜合上述，SPT 的方法用 NCEER (2001)；CPT 的方法選用 Juang (2003)； V_s 的方法選用 Kayen et al. (2013)。其中，Juang (2003)的方法在計算 q_{c1N} 和 I_c 參數時採用 Robertson (2009)的計算方法，原因在於參數 I_c 使用 Robertson (2009)方法計算是比較常見的，因此 q_{c1N} 也配合 I_c 使用連續性 n 值進行計算，且計算出的誤差值本研究認為是可以接受的，如表 3.19 所示。

表 3.19 Juang (2003)與 Robertson (2009)計算 q_{c1N} 、 I_c 和 FS 之誤差值

	q_{c1N}	I_c	FS
平均相對誤差	6.63%	1.39%	6.79%
相對誤差中位數	4.58%	0.93%	4.53%

除了比對誤差值，圖 3.30 也畫出了安全係數(FS)的 1:1 圖，可以看到使用 Juang 法計算出的安全係數和部分參數套用 Robertson (2009)的安全係數幾乎不會相差太多，有一個資料點偏離 1:1 線較多，其原因在於經過 Robertson (2009)法迭代，此點的 n 值為 1，但 Juang (2003)法的 n 值採用 0.5，因此有落差。表 3.20 也列出了部分參數套用 Robertson (2009)在本研究資料庫的準確率，與表 3.13 的表現差不多。

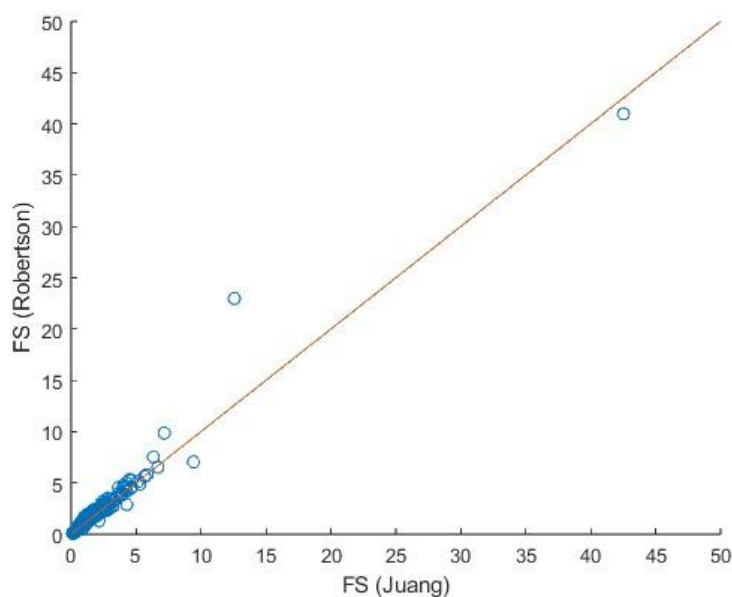


圖 3.30 Juang (2003)套用 Robertson (2009)之安全係數比較

表 3.20 Juang (2003)與 Robertson (2009)計算 q_{c1N} 、 I_c 和 FS 之誤差值

	正確	不正確
總數	1021	
液化	548	93
非液化	251	129
比例	78.26%	21.74%

第四章 層級貝氏模型(HBM)



4.1 簡介

層級貝氏模型(HBM)的優點可由圖 4.1 做說明，左圖中不同的標號代表各自不同的群體，可以理解為不同場址的資料，每個場址的趨勢都有其獨特性，右圖則呈現不同群體有各自的趨勢。假設將資料庫中所有資料點沒有分群的全部一起分析，這樣會忽略各群體的特性，但在大地工程中更應該考慮場址的特性，使用 HBM 能考慮各場址的特性，並透過現有的資料學習，進而模擬出新場址的行為，且隨著已知資訊的增加可逐步地降低不確定性，以達到節省成本和提高準確設計的目標。

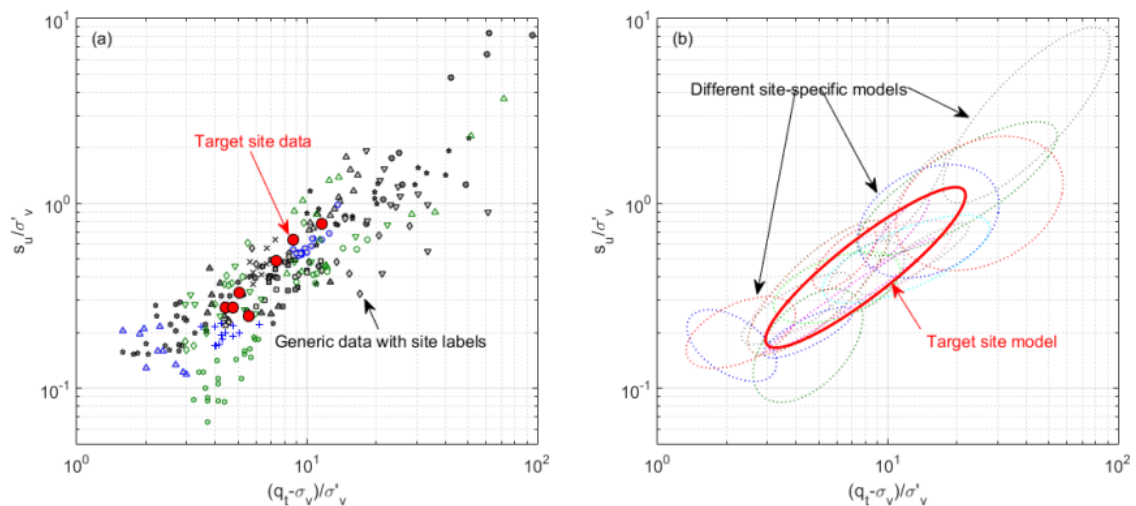


圖 4.1 群體資料和趨勢的示意圖(Ching et al., 2021)

在使用 HBM 分析時會遇到兩個問題，第一個問題為各群體的參數分布可能不是多變數常態分布，而這與我們前述資料的假設有所不同，此情況也可能導致 HBM 結果不確定性過大，第二個問題是 HBM 在運作時需要極大的運算量，會耗時許久。第一個問題會使用 Johnson 分布系統(Johnson distribution system)來解決，將各參數全部轉換至標準常態空間，而第二個問題則使用貝氏分析(Bayesian analysis)中的共軛概念給出封閉型式(Closed-form)條件機率，並搭配吉普森取樣(Gibbs sampler)來解決此問題。HBM 的運作流程大致如下：



- (1) 資料前處理:將參數取自然對數後透過 Johnson 分布系統將各參數轉換為標準常態分布。
- (2) 學習階段:利用貝氏分析(Bayesian analysis)中共軛先驗的概念搭配吉普森取樣(Gibbs sampler)，從資料庫中訓練出四個超參數。
- (3) 推論階段:使用訓練出的四個超參數，搭配吉普森取樣以及目標區域有限的調查資料模擬目標區域的未知資訊分布。

4.2 資料前處理

4.2.1 取自然對數

在大地工程中，有許多參數是不存在負值的，例如:土壤單位重、SPT-N 值、 q_c 和 V_s 等，但在模型中會去學習現有資料並模擬出類似結果，此作法可能抽樣出負值，產生不合理的結果，或是參數數值範圍較大，因此將部分土壤參數取自然對數，此時資料分佈稱為 Y 分布，將 Y 分布轉換成標準常態分布再進行分析，而標準常態下的分布稱之為 X 分布，分析完成後再將結果轉回原始分布空間，這樣做法能避免許多不合理的發生。而在參數 FC 中因數值可能會有 0 的情形及 I_c 範圍不大，因此沒有取自然對數，表 4.1 為資料庫進行分析時的變數定義:

表 4.1 參數定義

Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
$\ln(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0})$	$\ln((N_1)_{60})$	$\ln(q_{c1N})$	I_c	$\ln(V_{s1})$	FC



4.2.2 Johnson 分布系統

本研究中將採用 Johnson 分布系統(Johnson distribution system)來擬合所選用之土壤參數(Y_1 、 Y_2 、...、 Y_6)的機率密度函數邊界，並將其轉換至標準常態分布(X_1 、 X_2 、...、 X_6)進行後續的分析。

Johnson 分布系統分為三種類型，分別是 SU(Unbounded system)、SB(Bounded system)和 SL(Lognormal system)，SU 適用於無上下界限制的分布，SB 適用於有上下界範圍限制的分布，SL 適用於類似對數常態這種有下界無上界，這些分布皆由四個參數(a_X 、 b_X 、 a_Y 、 b_Y)所控制，可以透過微調這些參數表現出資料分布不同的特性，如圖 4.2 所示。

Slifker and Shapiro (1980)提出了使用百分位數來推估 Johnson 分布系統種類及參數的方法，方法如下：

1. 選擇一個大於 0 的數字 z ，可以根據 Slifker and Shapiro (1980)建議假設 $z=0.7$ 。
2. 分別計算 $-3z$ 、 $-z$ 、 z 、 $3z$ 標準常態累積機率密度函數(CDF)的百分位數(P_a 、 P_b 、 P_c 和 P_d)，代入 $z=0.7$ 後，四個百分位分別如下所示：

$$P_a = \Phi(-3z) = \Phi(-2.1) = 0.018$$

$$P_b = \Phi(-z) = \Phi(-0.7) = 0.242$$

$$P_c = \Phi(z) = \Phi(0.7) = 0.758$$

$$P_d = \Phi(3z) = \Phi(2.1) = 0.982$$

3. 計算完四個百分位數後，在分別計算其對應的 Y 值，分別是 $y_a = F^{-1}(P_a)$ 、 $y_b = F^{-1}(P_b)$ 、 $y_c = F^{-1}(P_c)$ 和 $y_d = F^{-1}(P_d)$ ，由於無法得知 Y 的累積分布函數 $F(y)$ ，因此以資料庫中各參數的樣本數量之分布情形當作累積機率密度函數，進而反推四個百分位數之反函數值。

4. 假設 $m=y_d - y_c$ 、 $n=y_b - y_a$ 、 $p=y_c - y_b$ ，並定義 $D = mn/p^2$ ，透過 D 的值來判段分布的類型， $D>1$ 為 SU(Unbounded system)， $D<1$ 為 SB(Bounded system)， $D=1$ 為

SL(Lognormal system) ◦

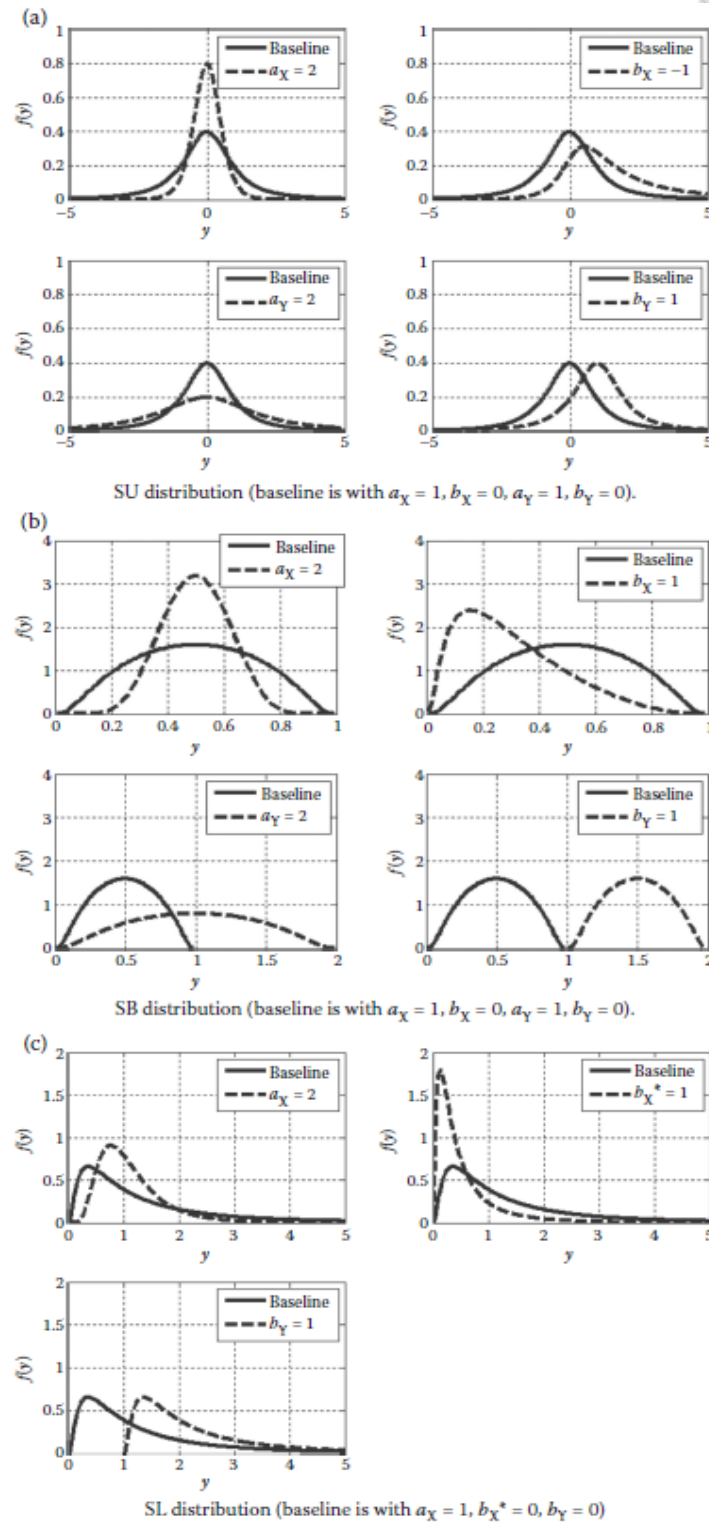
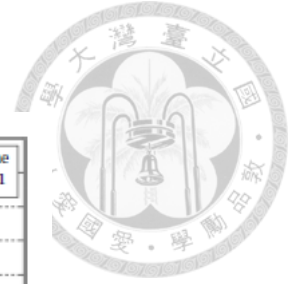
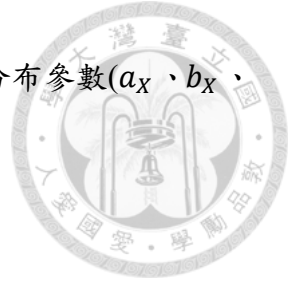


圖 4.2 Johnson 分布系統中三種型態的分布表現: (a)SU ; (b)SB ; (c)SL

(Ching and Phoon, 2015)



在確定參數的分布類型後，透過式 4.1-4.3 可決定各類型的分布參數(a_X 、 b_X 、 a_Y 和 b_Y)。

SU 類型:

$$\begin{aligned}
 a_X &= \frac{2z}{\cosh^{-1}\left[0.5\left(\frac{m}{p+\frac{n}{p}}\right)\right]}, a_X > 0 \\
 b_X &= a_X \sinh^{-1}\left\{\frac{\left(\frac{n-m}{p-\frac{n}{p}}\right)}{[2(D-1)^{0.5}]}\right\} \\
 a_Y &= \frac{2p(D-1)^{0.5}}{\left[\left(\frac{m+n}{p}+2\right)\left(\frac{m+n}{p}+2\right)^{0.5}\right]}, a_Y > 0 \\
 b_Y &= \frac{(y_c+y_b)}{2} + \frac{p\left(\frac{n-m}{p-\frac{n}{p}}\right)}{[2\left(\frac{m+n}{p}+2\right)]} \tag{式 4.1}
 \end{aligned}$$

SB 類型:

$$\begin{aligned}
 a_X &= \frac{z}{\cosh^{-1}\left\{0.5\left[\left(1+\frac{p}{m}\right)\left(1+\frac{p}{n}\right)\right]^{0.5}\right\}}, a_X > 0 \\
 b_X &= a_X \sinh^{-1}\left\{\left(\frac{p}{n}-\frac{p}{m}\right)\frac{\left[\left(1+\frac{p}{m}\right)\left(1+\frac{p}{n}\right)-4\right]^{0.5}}{[2(D-1-1)]}\right\} \\
 a_Y &= p \frac{\left\{\left[\left(1+\frac{p}{m}\right)\left(1+\frac{p}{n}\right)-2\right]^2-4\right\}^{0.5}}{(D-1-1)}, a_Y > 0 \\
 b_Y &= \frac{(y_c+y_b)}{2} - \frac{a_Y}{2} + \frac{p\left(\frac{p-p}{n-m}\right)}{[2(D-1-1)]} \tag{式 4.2}
 \end{aligned}$$

SL 類型:

$$\begin{aligned}
 a_X &= \frac{2z}{\ln\left(\frac{m}{p}\right)} \\
 b_X &= a_X \ln\left\{\frac{\left(\frac{m}{p}-1\right)}{\left[p\left(\frac{m}{p}\right)^{0.5}\right]}\right\} \\
 b_Y &= \frac{(y_c+y_b)}{2} - \frac{0.5p\left(\frac{m}{p}+1\right)}{\left(\frac{m}{p}-1\right)} \tag{式 4.3}
 \end{aligned}$$

在決定分布類型及分布參數後可藉由式 4.4 將資料從 Y 分布轉換為標準常態分布的 X，待分析完成後則使用式 4.5 將標準常態分布的 X 轉回原本的資料 Y 分布。



$$X = \begin{cases} b_X + a_X \times \ln \left(\frac{Y - b_Y}{a_Y} + \sqrt{1 + \left(\frac{Y - b_Y}{a_Y} \right)^2} \right) & \text{(SU)} \\ b_X + a_X \times \ln \left[\frac{\frac{Y - b_Y}{a_Y}}{1 + \frac{Y - b_Y}{a_Y}} \right] & \text{(SB)} \\ b_X + a_X \times \ln(Y - b_Y) & \text{(SL)} \end{cases} \quad \text{(式 4.4)}$$

$$Y = \begin{cases} b_Y + a_Y \times \sinh \left(\frac{X - b_X}{a_X} \right) & \text{(SU)} \\ \frac{b_Y + (a_Y + b_Y) \times \exp \left[\frac{X - b_X}{a_X} \right]}{1 + \exp \left[\frac{X - b_X}{a_X} \right]} & \text{(SB)} \\ b_Y + \exp \left(\frac{X - b_X}{a_X} \right) & \text{(SL)} \end{cases} \quad \text{(式 4.5)}$$

本研究資料庫的土壤參數分布轉成 Johnson 分布的類型及分布參數如表 4.2 所示，表中的 p 值代表 K-S test 檢驗值，目的為檢驗轉換至標準常態的變數 X 是否符合標準常態之假設，通常以 0.05 作為標準，當 p 值大於 0.05 時，代表該分布為標準常態分布的假設無法被拒絕，反之則為拒絕該假設，然而在本研究中有幾個分布的 p 值小於 0.05 但仍會被採用，這是因為 Johnson 分布系統有良好的理論基礎，圖 4.3 至圖 4.5 為資料庫各參數轉換前之 Y 分布和轉至標準常態空間之 X 分布的長條圖。

表 4.2 參數 $Y_1 \sim Y_6$ 分布轉成 Johnson 分布之類型、分布參數和 p-value

Random Variable	Soil Parameter	Distribution Type	ax	bx	ay	by	p-value
Y_1	$\ln(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0})$	SB	2.5981	0.5114	2.3227	-0.6757	$2.6664e^{-7}$
Y_2	$\ln((N_1)_{60})$	SU	4.005	2.6069	2.3585	4.1324	0.6792
Y_3	$\ln(q_{c1N})$	SU	5.6945	10.0487	1.6136	8.3948	0.308
Y_4	I_c	SB	1.8723	1.2287	4.1928	0.7833	0.0394
Y_5	$\ln(V_{s1})$	SU	2.4535	-1.1909	0.5576	4.8785	0.2489
Y_6	FC	SB	1.0138	2.4778	226.6592	-2.4523	0.0166

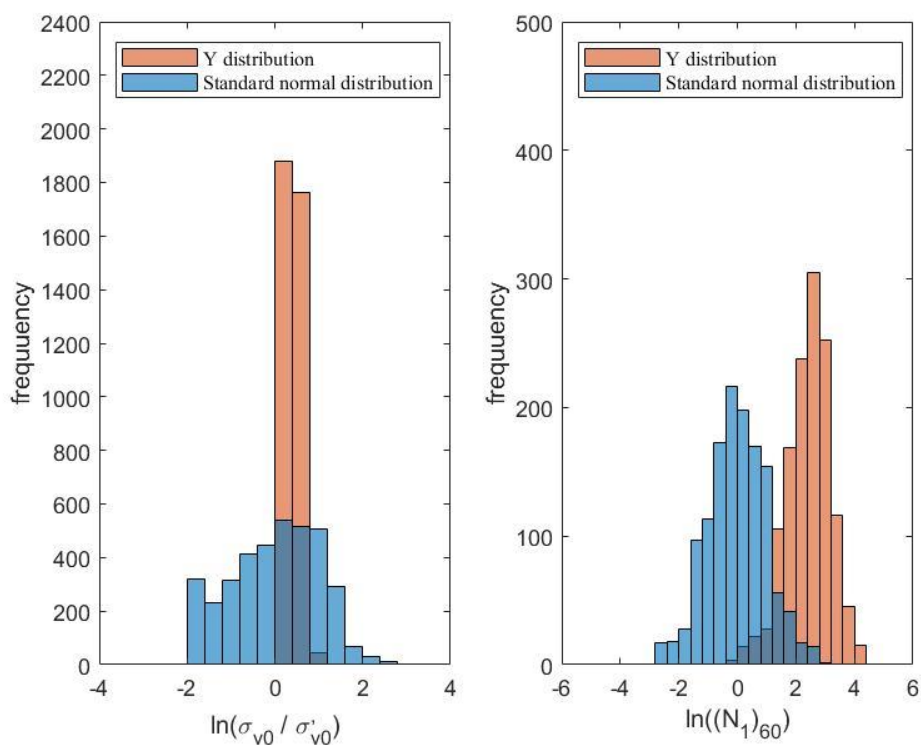


圖 4.3 $(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0})$ 和 $(N_1)_{60}$ 的 Y 分布與 X 分布之長條圖

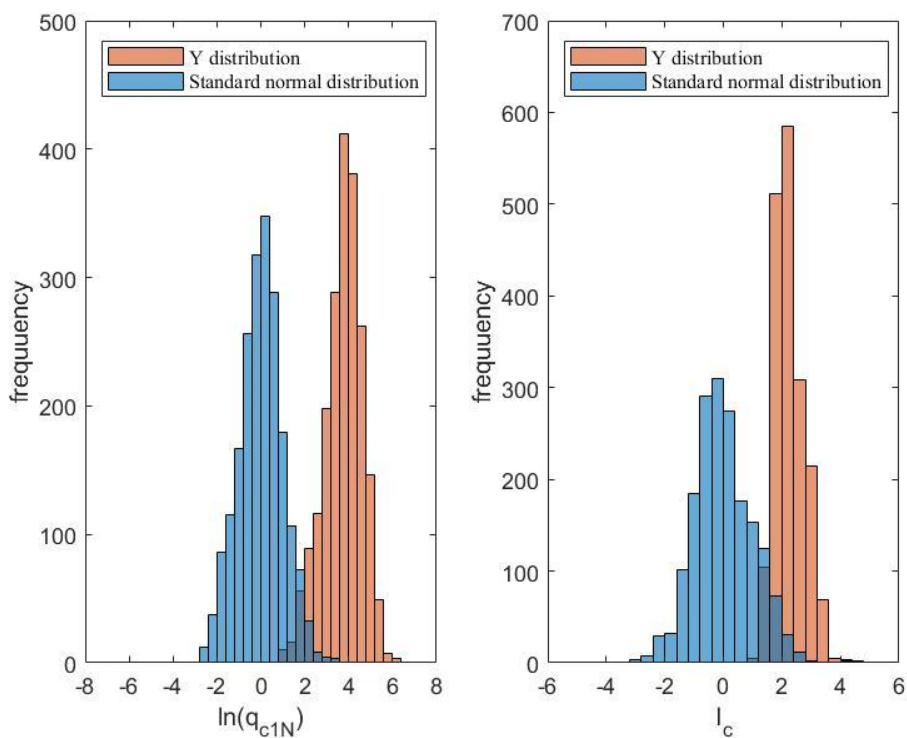


圖 4.4 q_{c1N} 和 I_c 的 Y 分布與 X 分布之長條圖

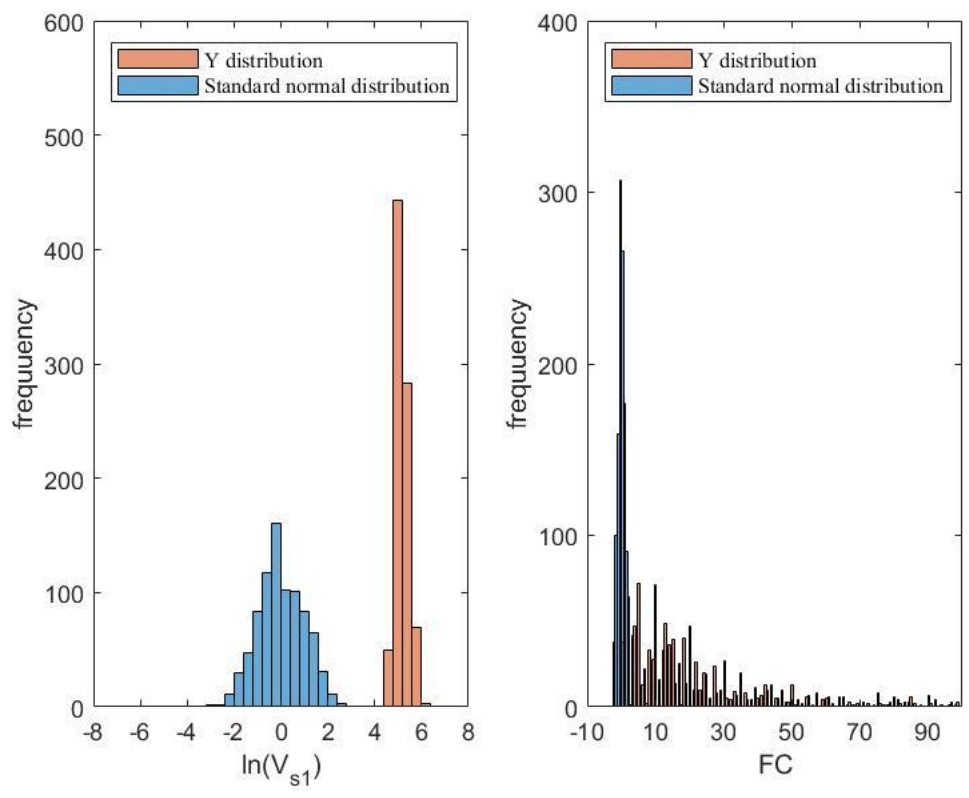


圖 4.5 V_{s1} 和 FC 的 Y 分布與 X 分布之長條圖



4.3 HBM 架構

Ching et al. (2021)提出層級貝氏模型(Hierarchical Bayesian model)又稱 HBM，其架構如圖 4.6 所示，圖中的灰圈代表各個群體的資料， x_{1j} 中小標數字 1 表示資料庫中的第一個群體，往後依此類推， j 則為該群體的資料筆數，而各群體的資料由平均值向量及共變異數矩陣(μ_i, C_i)所控制，且各個群體的資料皆為多變數常態分布，接著，希望由同一組參數控制各個區域參數的特性，此參數稱為超參數(Hyper-parameter)，超參數總共有四個($\mu_0, C_0, \Sigma_0, \nu_0$)，假設第 i 個群體的特性受到(μ_i, C_i)所控制，再分別由 μ_0 控制 μ_i 的平均， C_0 控制 μ_i 的變異性， Σ_0 控制 C_i 的平均， ν_0 控制 C_i 的變異性。HBM 主要分成兩個階段，第一個階段為學習階段(Learning stage)，此階段是根據第三章所介紹的資料庫，利用 HBM 去學習資料庫中各群體的行為，進而學習出四個超參數，第二個階段為推論階段(Inference stage)，利用第一階段所學習出的四個超參數，配合現地已知資訊去推估該群體的未知資訊。

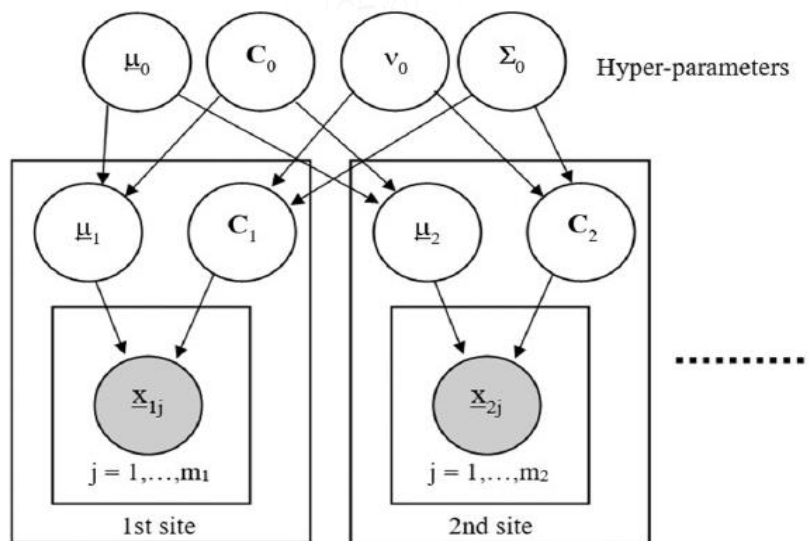


圖 4.6 HBM 架構圖(Ching et al., 2021)



4.4 RHBM 架構

然而因預測土壤液化並不是預測單一土壤參數的問題，因此不適用圖 4.6 的架構，本研究採用改良式階層式貝氏分析模型(Revised HBM, RHBM)模擬液化潛勢評估的地區特性，架構如圖 4.7 所示， L_{ij} 表示第 i 個區域中第 j 筆資料的實際液化行為， L_{ij} 只會是 0 或 1 的數字，0 表示未液化，1 則表示液化； x_{ij} 表示資料的土壤參數，模型中會根據土壤參數搭配前人預測公式計算出安全係數，但假設此安全係數並不是真正的安全係數，需乘上 Model factor (m_{ij}) 才為真正的安全係數，如式 4.6 所示，且在原本的架構中各個土壤參數的變異性會被兩個超參數影響，也就是變異性會有一定的關係，但實際上各參數都有自己的變異性，因此新的架構把 C_i 換成 σ_i^2 讓各自的參數保有自己的變異數，但每個區域使用共同的 correlation matrix，保有參數間的關係。

$$FS_{act} = m \cdot FS_{cal} \quad (式 4.6)$$

其中 FS_{cal} 為計算出的安全係數； FS_{act} 為真實的安全係數； m 為 Model factor

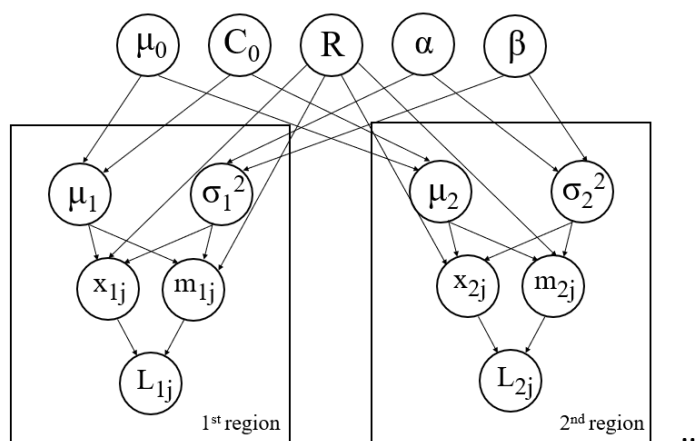


圖 4.7 修正之 HBM 架構圖

4.4.1 貝氏分析(Bayesian analysis)

貝氏分析是一種統計的方法，描述在已知資訊的條件下，推論某事件發生的可能性，貝氏定理可以表示成式 4.7:



$$f(\theta|X^0) = \frac{f(X^0|\theta) \times f(\theta)}{f(X^0)} \quad (\text{式 4.7})$$

其中， X^0 為已知資訊， θ 為未知資訊， $f(\theta|X^0)$ 為在已知資訊下未知資訊條件之條件機率，稱之為後驗分布(Posterior PDF)， $f(X^0|\theta)$ 為概似函數(Likelihood function)， $f(\theta)$ 為先驗分布(Prior PDF)， $f(X^0)$ 為已知資訊之邊際分布(Marginal distribution)。

在貝氏分析中，當先驗分布與後驗分布為相同分布形式，則稱之為共軛分布，先驗分布即為概似函數的共軛先驗(Conjugate prior)，在一般情況下，無法得知後驗分布的數學型式，進而影響隨機取樣，而使用共軛分布的好處在於給定共軛先驗後，可以直接給出後驗分布的封閉型式，達到簡化計算過程的目的。運用在本研究的概念是將過去的經驗作為先驗資訊(Prior information)，結合本資料庫的資料，可以得到新的後驗結果(Posterior)。

4.4.2 封閉型式下的條件機率

Ching et al. (2021)提出的 HBM 架構如圖 4.6 所示，但本研究在探討液化的問題，而非單一土壤參數，因此在模型中做了部分的調整，架構如圖 4.7 所示，其中 x_{ij} 由 μ_i 和 C_i 掌控，且為常態分布， m_{ij} 由 μ_i 和 C_i 掌控，且為對數常態分布。

$$x_{ij} \sim N(x_{ij}; \mu_i, C_i) \quad (\text{式 4.8})$$

$$m_{ij} \sim LN(m_{ij}; \mu_i, C_i) \quad (\text{式 4.9})$$

其中的 μ_i 是第 i 個區域的平均值向量，由 μ_0 和 C_0 兩個超參數所控制， μ_0 為常態分布，控制資料庫中各區域的平均值向量的平均值， C_0 為逆威沙特分布(Inverse-Wishart distribution)，控制資料庫中各區域平均值向量的變異性，且為常態分布。

$$\mu_i \sim N(\mu_i; \mu_0, C_0) \quad (\text{式 4.10})$$

$$\mu_0 \sim N(\mu_0; \mu_{\mu_0}, C_{\mu_0}) \quad (\text{式 4.11})$$

$$C_0 \sim IW(C_0; \Sigma_{C_0}, \nu_{C_0}) \quad (\text{式 4.12})$$



其中的 C_i 為變異數矩陣，但此處的 C_i 拆成兩個部分，由每個地區的標準偏差矩陣(S_i)和關聯性矩陣 R (Correlation matrix)所組成， S_i 為每個地區 x 的標準偏差 σ_i 組成之對角矩陣，可表示為式 4.13。

$$C_i = S_i R S_i$$

$$S_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{i2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{in} \end{bmatrix} \quad (\text{式 4.13})$$

σ_i^2 為逆伽瑪分布(Inverse-gamma distribution)，可讓各參數保有自己的變異性，受超參數 α 和 β 所掌控， α 為均勻分布，負責控制 σ_i 的集中程度， β 為伽瑪分布(Gamma distribution)，負責控制 σ_i 的散布程度。

$$\sigma_i^2 \sim IG(\sigma_i^2; \alpha, \beta) \quad (\text{式 4.14})$$

R 則為 LKJ 分布(Lewandowski-Kurowicka-Joe distribution)，可保有每個地區之 x 與 m 的關聯性，且每個地區共用同一個 R 矩陣， x 與 $\ln(m)$ 遵守聯合常態分布。

$$R \sim LKJ(R; \eta) \quad (\text{式 4.15})$$

$$[x_{ij}, \ln(m_{ij})] \sim N[x_{ij}, \ln(m_{ij}); \mu_i, S_i R S_i] \quad (\text{式 4.16})$$

由上述可知，基於全機率理論(Total probability theorem)可建構 RHBM，如下所示：

$$f(x, \mu, C, \theta) = \prod_i^M \prod_j^{m_s} \left[N(x_{ij}; \mu_i, S_i R S_i) 1(FS_{act,ij} < 1)^{L_{ij}} 1(FS_{act,ij} \geq 1)^{1-L_{ij}} \right]$$

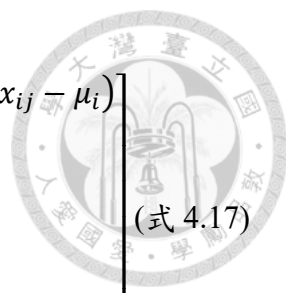
$$\cdot \prod_i^M N(\mu_i; \mu_0, C_0) \cdot N(\mu_0; \mu_{\mu_0}, C_{\mu_0})$$

$$\cdot IW(C_0; \Sigma_{C_0}, \nu_{C_0}) \cdot \prod_i^M \prod_k^n IG(\sigma_{ik}^2; \alpha_k, \beta_k) \cdot LKJ(R; \eta)$$

$$\cdot \prod_k^n f(\alpha_k) \cdot \prod_k^n \text{Gamma}[\beta_k | \alpha_\beta, \beta_\beta]$$

$$\propto |R|^{-\frac{(\sum_i^M m_{s,i})+2-2\eta}{2}} (\prod_i^M |S_i|^{-m_{s,i}}) \cdot |C_0|^{-\frac{M+\nu_{C_0}+n+1}{2}}$$

$$\cdot \left(\prod_k^n \frac{\beta_k^{M\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)^M} \right) \cdot \frac{\beta_\beta^{-\alpha_\beta} \prod_k^n \beta_k^{\alpha_\beta-1}}{\Gamma(\alpha_\beta)}$$



$$\cdot \prod_i^M \prod_k^n (\sigma_{ik})^{-\alpha_k - 1} \exp \left[\begin{array}{l} -\frac{1}{2} \sum_i^M \sum_j^{m_s} (x_{ij} - \mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1} S_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i) \\ -\frac{1}{2} \sum_i^M (\mu_i - \mu_0)^T C_0^{-1} (\mu_i - \mu_0) \\ -\frac{1}{2} (\mu_0 - \mu_{\mu_0})^T C_{\mu_0}^{-1} (\mu_0 - \mu_{\mu_0}) \\ -\frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_{C_0} \times C_0^{-1}) \\ -\sum_i^M \sum_k^n \beta_k \sigma_{ik}^{-2} - \sum_k^n \frac{\beta_k}{\beta_\beta} \end{array} \right] \quad (\text{式 4.17})$$

其中 $\Theta = \{\mu_0, C_0, \alpha, \beta\}$; M 為區域總數; n 為資料維度; m_s 為每個區域之資料總數。

4.4.3 學習階段(Learning stage)

在 RHBM 的學習階段中，目的是要學習資料庫中土壤參數的特性，然而因大地工程在工址調查中常有部分資料是缺漏的，造成 RHBM 在訓練超參數時變得更加困難，因此 RHBM 採用吉普森取樣(Gibbs sampler)又稱 GS 的方法來解決此問題，在學習過程中可填補缺漏的資料解決訓練超參數和相關性矩陣的困難，在使用吉普森取樣之前需要決定每個參數之後驗機率分布(Posterior pdf)，本文參數之後驗機率分布彙整如下：

1. 第 i 個地區之平均值 μ_i 後驗分布如下所示：

$$\begin{aligned} f(\mu_i | \mu_0, C_0) &= N(\mu_i, C_0) \\ &= |C_0|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mu_i - \mu_0)^T C_0^{-1} (\mu_i - \mu_0) \right] \end{aligned} \quad (\text{式 4.18})$$

其中 n 為變數維度， T 為矩陣轉置，在貝氏分析中，可以給定超參數 (μ_0, C_0) 的後驗分布，以減少計算的複雜程度，如以下介紹：

- (a) 超參數 μ_0 的後驗分布如下所示：

$$\begin{aligned} f(\mu_0 | \mu_{\mu_0}, C_{\mu_0}) &= N(\mu_0, C_{\mu_0}) \\ &= |C_{\mu_0}|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (\mu_0 - \mu_{\mu_0})^T C_{\mu_0}^{-1} (\mu_0 - \mu_{\mu_0}) \right] \end{aligned} \quad (\text{式 4.19})$$

為了讓該後驗分布為無資訊，將上式的 μ_{μ_0} 假設為零向量， C_{μ_0} 假設為對角矩陣，且假設對角上的數值為非常大的數字，在本研究中參考 Ching et al. (2021) 使用 10^4 為對角值。



(b) 超參數 C_0 的後驗分布如下所示:

$$f(C_0 | \Sigma_{C_0}, \nu_{C_0}) = IW(\Sigma_{C_0}, \nu_{C_0}) \\ = \frac{|\Sigma_{C_0}|^{\nu_{C_0}/2}}{2^{n\nu_{C_0}/2} \cdot \Gamma_n(\nu_{C_0}/2)} \cdot |C_0|^{-\frac{\nu_{C_0}+n+1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_{C_0} \times C_0^{-1})\right] \quad (\text{式 4.20})$$

其中, $\Gamma_n(\cdot)$ 為多變數伽瑪函數(Multivariate gamma function), $\text{tr}(\cdot)$ 為矩陣的跡(matrix trace), 且為了要讓逆威沙特之分布為無資訊的, 本研究使用 Huang and Wand (2013) 提出的方法, 假設 $\nu_{C_0} = n + 1$ 且 $\Sigma_{C_0} = 4 \times \text{diag}\left(\frac{1}{a_1}, \dots, \frac{1}{a_n}\right)$, $\text{diag}(\cdot)$ 為對角矩陣, a_k 為隨機的逆伽瑪分布(Inverse-Gamma distribution), 如式 4.21 所示。

$$f(a_k) = \text{IG}(a_k; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot a_k^{-\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{a_k}\right) \quad (\text{式 4.21})$$

其中, α 為形狀參數(Shape parameter), β 為尺度參數(Scale parameter), Huang and Wand (2013) 文中提到, 當 $\alpha = 0.5$ 且 β 為很小的數值時, 則 $IW(C_0; \Sigma_{C_0}, \nu_{C_0})$ 能視為無資訊的後驗分布。

2. 第 i 個地區的變異數 σ_i^2 後驗分布如下所示:

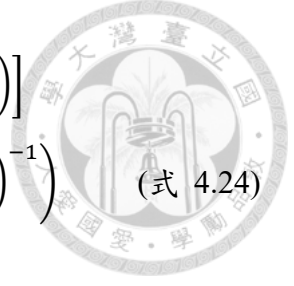
$$f(\sigma_i^2 | \Theta, \mu_i, x) \propto f(\sigma_i^2 | \alpha, \beta) \prod_j^{m_s} \left[f(x_{ij} | \mu_i, C_i) 1(FS_{ij} < 1)^{L_{ij}} 1(FS_{ij} \geq 1)^{1-L_{ij}} \right] \propto \\ \left(\prod_k^n \sigma_i^{-2(\alpha_k+1)} \exp[-\beta_k \sigma_i^{-2}] \right) \\ \cdot \left(|S_i|^{-m_s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \Sigma_j^{m_s} (x_{ij} - \mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1} S_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i)} \right) \quad (\text{式 4.22})$$

(a) 超參數 α 的後驗分布如下所示:

$$f[\alpha | \Theta, \mu_i, \sigma_i, x] \propto \prod_i^M \prod_k^n \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} \sigma_{ik}^{-2(\alpha_k+1)} \\ \propto \prod_k^n \frac{(\prod_i^M \sigma_{ik}^2)^{-\alpha_k-1} \beta_k^{M\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)^M} \quad (\text{式 4.23})$$

(b) 超參數 β 的後驗分布如下所示:

$$f[\beta | \Theta, \mu_i, \sigma_i, x] \propto \prod_k^n \prod_i^M \left[\beta_k^{\alpha_k} \exp\left(-\frac{\beta_k}{\sigma_{ik}^2}\right) \right] \cdot \left[\beta_\beta^{-\alpha_\beta} \beta_k^{\alpha_\beta-1} \exp\left(-\frac{\beta_k}{\beta_\beta}\right) \right]$$



$$\begin{aligned} &\propto \prod_k^n \beta_k^{M\alpha_k + \alpha_\beta - 1} \exp \left[-\beta_k \left(\frac{1}{\beta_\beta} + \sum_i^M \sigma_{ik}^{-2} \right) \right] \\ &\sim \prod_k^n \text{Gamma} \left(\alpha_\beta + M\alpha_k, \left(\frac{1}{\beta_\beta} + \sum_i^M \sigma_{ik}^{-2} \right)^{-1} \right) \end{aligned} \quad (\text{式 4.24})$$

3. 相關性矩陣 R 之後驗分布如下所示：

$$\begin{aligned} f(R|\theta, \mu_i, S_i, x) &\propto LKJ(R; \eta) \prod_i^M \prod_j^{m_s} f(x_{ij}|\mu_i, S_i R S_i) \\ &\propto |R|^{-\frac{(\sum_i^M m_{s,i})+2-2\eta}{2}} e^{-\frac{1}{2}\sum_i^M \sum_j^{m_s} \text{tr}[S_i^{-1}(x_{ij}-\mu_i)(x_{ij}-\mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1}]} \\ &\sim IW(\sum_i^M \sum_j^{m_s} S_i^{-1} Q_{ij} S_i^{-1}, (\sum_i^M m_{s,i}) + 1 - 2\eta - n) \end{aligned} \quad (\text{式 4.25})$$

其中 Q_{ij} 的定義如下所示：

$$Q_{ij} = (x_{ij} - \mu_i)(x_{ij} - \mu_i)^T \quad (\text{式 4.26})$$

4. 第 i 個地區的 x 後驗分布如下所示：

$$\begin{aligned} f(x_{ij}|\mu_i, C_i) &\propto N(\mu_i, C_i) \\ &= |C_i|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2}(x_{ij} - \mu_i)^T C_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i) \right] \end{aligned} \quad (\text{式 4.27})$$

5. 第 i 個地區的 m 後驗分布如下所示：

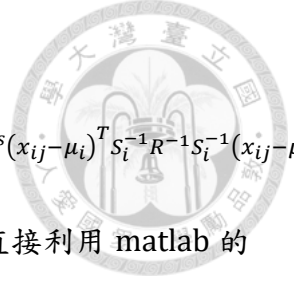
$$\begin{aligned} f(\ln(m_{ij})|\mu_i, C_i, x_{ij}) &\propto N(\mu_i, C_i|x_{ij}) \\ \ln(m_{ij}) &\sim N(\mu_m + C_{mx} C_x^{-1} (x_{ij} - \mu_x), C_m - C_{mx} C_x^{-1} C_{xm}) \end{aligned} \quad (\text{式 4.28})$$

$$\text{其中 } C_i = \begin{bmatrix} C_x & C_{mx} \\ C_{xm} & C_m \end{bmatrix}。$$

在具備上述各參數的後驗機率分布後，先將資料 (x_{ij}) 分類，缺失資料為 (x_{ij}^u) ，已知資料為 (x_{ij}^o) ，同樣的將平均值向量 (μ_i) 和共變異數矩陣 (C_i) 分類， (x_{ij}^u) 的平均值向量為 (μ_i^u) 而共變異數矩陣為 (C_i^u) ， (x_{ij}^o) 的平均值向量為 (μ_i^o) 而共變異數矩陣為 (C_i^o) ，RHBM 採用吉普森取樣法的流程如下所示：

1. 每個區域對 μ_i 的後驗分布取樣：

$$\begin{aligned} f(\mu_i|\theta, \sigma_i, x) &\propto e^{-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m_i} (x_{ij}-\mu_i)^T C_i^{-1} (x_{ij}-\mu_i) - \frac{1}{2}(\mu_i-\mu_0)^T C_0^{-1} (\mu_i-\mu_0)} \\ &= N \left\{ (C_0^{-1} + m_i C_i^{-1})^{-1} (C_0^{-1} \mu_0 + C_i^{-1} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij}), (C_0^{-1} + m_i C_i^{-1})^{-1} \right\} \end{aligned}$$



2. 每個區域對 σ_i^2 的後驗分布取樣:

$$f(\sigma_i^2 | \theta, \mu_i, x) \propto \left(\prod_k \sigma_i^{-2(\alpha_k+1)} \exp[-\beta_k \sigma_i^{-2}] \right) \cdot \left(|S_i|^{-m_s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_j^{m_s} (x_{ij} - \mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1} S_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i)} \right)$$

由上述可知， σ_i^2 的後驗分布並不是一個著名的分布，無法直接利用 matlab 的取樣函數取樣，但如果直接以 Metropolis-hastings 方法實現 MCMC(Markov Chain Monte Carlo simulation)又容易遇到預熱期與取樣不穩定的問題。因此本文採用無須調整之諧和蒙地卡羅 (Hamiltonian Monte Carlo 方法—No U-Turn Sampler(NUTS))(Hoffman and Gelman, 2014)實現 σ_i^2 的後驗分布的取樣。在使用 NUTS 進行取樣時，取樣的變數必須為無邊界(Unbounded)，使得本研究無法直接對 σ_i^2 進行取樣，因 σ_i^2 是有下界的變數($\sigma_i^2 > 0$)，因此本文改對 $\ln(\sigma_i)$ 進行取樣，其後驗分布取樣為：

$$\begin{aligned} f[\ln(\sigma_i) | \theta, \mu_i, x] &\propto \prod_k \frac{de^{2 \ln \sigma_{ik}}}{d \ln \sigma_{ik}} \left(\prod_k \exp[-2(\alpha_k + 1) \ln(\sigma_{ik}) - \beta_k e^{-2 \ln(\sigma_{ik})}] \right) \\ &\cdot \left(|S_i|^{-m_s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_j^{m_s} (x_{ij} - \mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1} S_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i)} \right) \\ &\propto \left(\prod_k \exp[-2\alpha_k \ln(\sigma_{ik}) - \beta_k e^{-2 \ln(\sigma_{ik})}] \right) \\ &\cdot \left(|S_i|^{-m_s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_j^{m_s} (x_{ij} - \mu_i)^T S_i^{-1} R^{-1} S_i^{-1} (x_{ij} - \mu_i)} \right) \end{aligned}$$

3. 每個區域對 x 的後驗分布取樣:

$$f(x_{ij}^u | \theta, \mu_i, C_i) \propto N\{\mu_i^u + C_{xx}^{uo} (C_{xx}^o)^{-1} (x_{ij}^o - \mu_i^o), C_{xx}^u - C_{xx}^{uo} (C_{xx}^o)^{-1} C_{xx}^{uo}\}$$

4. 每個區域對 $\ln(m)$ 的後驗分布取樣:

$$f(\ln(m_{ij}^u) | \theta, \mu_i, C_i, x) \propto N(\mu_m + C_{mx} C_x^{-1} (x_{ij} - \mu_x), C_m - C_{mx} C_x^{-1} C_{xm})$$

$$\text{其中 } C_i = \begin{bmatrix} C_x & C_{mx} \\ C_{xm} & C_m \end{bmatrix}。$$

5. 針對關聯性矩陣 R 的後驗分布取樣：

$$f(R | \theta, \mu_i, S_i, x) \propto IW \left(\sum_i^M \sum_j^{m_s} S_i^{-1} Q_{ij} S_i^{-1}, \left(\sum_i^M m_{s,i} \right) + 1 - 2\eta - n \right)$$

其中為使 R 的先驗分布無資訊， η 為 1。



6. 針對超參數 μ_0 的後驗分布取樣：

$$f(\mu_0 | \mu_i, C_i, C_0, \alpha, \beta, x) \propto e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (\mu_j - \mu_0)^T C_0^{-1} (\mu_j - \mu_0) - \frac{1}{2} (\mu_0 - \mu_{\mu_0})^T C_{\mu_0}^{-1} (\mu_0 - \mu_{\mu_0})}$$

$$= N \left\{ (C_{\mu_0}^{-1} + M \cdot C_{\mu_0}^{-1})^{-1} \left(C_{\mu_0}^{-1} \mu_{\mu_0} + C_0^{-1} \sum_{i=1}^M \mu_i \right), (C_{\mu_0}^{-1} + M \cdot C_0^{-1})^{-1} \right\}$$

其中 C_{μ_0} 為對角線矩陣，本研究假設對角線上數字為 10^4 。

7. 針對超參數 C_0 的後驗分布取樣：

$$f(C_0 | X, \mu, C, \mu_0, \Sigma_0, \nu_0, a)$$

$$\propto |C_0|^{-\frac{M+\nu_{C_0}+n+1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (\mu_i - \mu_0)^T C_0^{-1} (\mu_i - \mu_0) - \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_{C_0} \times C_0^{-1})}$$

$$= N \left\{ (C_{\mu_0}^{-1} + M \cdot C_{\mu_0}^{-1})^{-1} \left(C_{\mu_0}^{-1} \mu_{\mu_0} + C_0^{-1} \sum_{i=1}^M \mu_i \right), (C_{\mu_0}^{-1} + M \cdot C_0^{-1})^{-1} \right\}$$

8. 針對超參數 α 的後驗分布取樣：

$$f[\alpha | \theta, \mu_i, \sigma_i, x] \propto \prod_i^M \prod_k^n \frac{\beta_k^{\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} \sigma_{ik}^{-2(\alpha_k+1)} \propto \prod_k^n \frac{(\prod_i^M \sigma_{ik}^2)^{-\alpha_k-1} \beta_k^{M\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)^M}$$

α 與 σ_i^2 有一樣的情形，其後驗分布非為有名的分布，此處參考 σ_i^2 的後驗分布

取樣的方法，本文採用 NUTS 進行取樣，故本文亦對 $\ln(\alpha)$ 的後驗分布進行取樣：

$$f[\ln(\alpha) | \theta, \mu_i, \sigma_i, x] = \prod_k^n \frac{d e^{\ln(\alpha_k)}}{d \ln(\alpha_k)} f[\alpha | \theta, \mu_i, \sigma_i, x] | e^{\ln(\alpha)}$$

$$\propto \prod_k^n \frac{(\prod_i^M \sigma_{ik}^2)^{-\alpha_k-1} \beta_k^{M\alpha_k} \cdot e^{\ln(\alpha_k)}}{\Gamma(\alpha_k)^M}$$

9. 針對超參數 β 的後驗分布取樣：

$$f[\beta | \theta, \mu_i, \sigma_i, x] \propto \prod_k^n \text{Gamma} \left(\alpha_\beta + M\alpha_k, \left(\frac{1}{\beta_\beta} + \sum_i^M \sigma_{ik}^{-2} \right)^{-1} \right)$$

其中為使 β 的先驗分布無資訊， $\alpha_\beta = 0.5$ ， $\beta_\beta = 10^4$ 。

10. 重複上述 1-9 步驟 T 次，就能得到 T 個 Θ 和 R 樣本，吉普森取樣無法一開始就找到符合資料庫參數特性的樣本，需要透過一段時間的取樣得到近似分布，此時間稱為預熱期(Burn-in period, t_b)，在預熱期前的樣本通通捨棄，只收集預熱

期後的樣本，在取樣的過程中，由於每次取的樣本會變為下一次樣本的已知條件，導致樣本會有一定的相關性，而為了消除這些相關性，會採用間隔取樣的方式解決，每隔 Δt 次只取一組超參數和相關性矩陣樣本，本研究採用之總次數(T)為 21000，預熱期(t_b)為 1000，取樣間隔(Δt)為 10，總共能得到 $n_{learn} = T - t_b / \Delta t = 2000$ 組超參數和相關性矩陣樣本。

4.4.4 推論階段(Inference stage)

在 RHBM 的推論階段中，以學習階段所獲得的超參數 Θ 與 R 樣本當作目標區域的先驗分布，加上目標區域中已知的資料點(X_s^o)來對目標區域中未知的資料點(X_s^u)進行推估，推論出目標區域的土壤參數與土壤液化機率。在此階段將目標區域資料的參數表示為 (μ_s, σ_s) ，並假設 (μ_s, σ_s) 也受到超參數 Θ 所掌控，意即與資料庫中的行為相似，流程如下所示：

1. 針對目標區域的期望值 μ_s 取樣：

$$\mu_s \sim N(\mu_{0,k}, C_{0,k})$$

其中 k 為超參數的編號。

2. 針對目標區域的變異數 σ_s^2 取樣：

$$\sigma_s^2 \sim \text{IG}(\alpha_k, \beta_k)$$

3. 針對目標工地土壤的未知參數 $x_{s,j}^u$ 取樣：

$$x_{s,j}^u \sim N(\mu_{sx}^u + C_{sx}^{uo} (C_{sx}^o)^{-1} (x_{s,j}^o - \mu_{sx}^o), C_{sx}^u - C_{sx}^{uo} (C_{sx}^o)^{-1} C_{sx}^{ou})$$

其中 μ_{sx}^u 為未知土壤參數的期望值向量； μ_{sx}^o 為已知土壤參數的期望值向量； C_{sx}

為目標區域 x 資料的共變異數矩陣：

$$C_{sx} = S_{sx} R_x S_{sx} = \begin{bmatrix} C_{sx}^o & C_{sx}^{ou} \\ C_{sx}^{uo} & C_{sx}^u \end{bmatrix}$$

R_x 為土壤參數間的關聯性矩陣，已由學習階段獲得； S_{sx} 為目標區域標準偏差矩



陣，為標準差組成之對角矩陣：

$$S_{sx} = \begin{bmatrix} \sigma_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{sn} \end{bmatrix}$$

4. 針對目標工地的液化模型不確定性係數 $\ln(m_{s,j})$ 取樣：

$$\ln(m_{s,j}) \sim N(\mu_{s,m} + C_{s,mx} C_{s,x}^{-1} (x - \mu_{s,m}), C_{s,m} - C_{s,mx} C_{s,x}^{-1} C_{s,xm})$$

其中 $\mu_{s,m}$ 為 $\ln(m)$ 的期望值， $C_{s,m}$ 、 $C_{s,m}$ 、 $C_{s,mx}$ 和 $C_{s,xm}$ 定義如下所示：

$$C_s = S_s R S_s = \begin{bmatrix} C_{s,x} & C_{s,xm} \\ C_{s,mx} & C_{s,m} \end{bmatrix}$$

R 為土壤參數 x 與 $\ln(m)$ 間的關聯性矩陣，已由學習階段獲得； S_s 為目標工地標

準偏差矩陣，為標準差組成之對角矩陣：

5. 針對目標區域土壤是否液化取樣：

$$L_{s,j} \sim \text{Bin} \left[\Phi \left(\frac{-\ln(FS_{cal,j}) - \mu_s}{\sigma_s} \right) \right]$$

其中 $\text{Bin}(\cdot)$ 為二項分配， $L=1$ 為液化， $L=0$ 為不液化。

6. 上述步驟 1-5 為一次的循環，會重複 T 次，因為也使用了吉普森取樣，因此同樣會使用預熱期以及隔一段時間進行取樣來消除樣本間的相關性，本研究推論階段使用 $T=120$ 、 $t_b=20$ 、 $\Delta t = 10$ ，最終會得到 $n_{inf} = (T - t_b)/\Delta t = 10$ 組樣本，因此每一組超參數能得到 $n_{inf}=10$ 組的樣本。
7. 最後，學習階段會得到 n_{learn} 組超參數樣本，配上 n_{inf} 每一組超參數能得到 10 組 X_s^u 樣本，最終會有 $n_{learn} \times n_{inf}$ 組的 X_s^u 樣本，總共 20000 組的 X_s^u 樣本。



第五章 模擬結果與案例驗證

5.1 超參數模擬結果

此小節會使用 4.4.3 節所學習出的超參數去模擬資料，並將真實資料與模擬資料進行比對，此舉是確認參數是否有學習到資料庫的行為，假如模擬資料的趨勢與資料庫的真實資料趨勢相似，即可表示模型的學習階段是合理的，模擬過程如下：

1. 在學習階段時將某一區域的土壤參數移除，並學習出四個超參數 $(\mu_0, C_0, \alpha, \beta)$ 和相關性矩陣 (R) 。
2. 將每一組超參數分別透過 $\mu_{gb} \sim N(\mu_0, C_0)$ 及 $C_{gb} \sim IW(\Sigma_{C_0}, \nu_{C_0})$ 取樣，藉此得到該群體的平均值向量 (μ_{gb}) 和共變異數矩陣 (C_{gb}) 。
3. 將前步驟產生之之 μ_{gb} 和 C_{gb} 與資料庫中個群體的 μ 和 C 進行比較，但此處的變異數會改由標準差呈現，如圖 5.1-圖 5.12。
4. 從該群體的平均值向量 (μ_{gb}) 和共變異數矩陣 (C_{gb}) 中，由 $x_{gb} \sim N(\mu_{gb}, C_{gb})$ 進行取樣，得到 x_{gb} 。
5. 在資料前處理時有把一些參數取自然對數，因此須將模擬出的 x_{gb} 透過 Johnson 系統轉換回空間 Y 。
6. 將模擬出的參數和真實資料庫中的參數畫在一起進行對比，結果如圖 5.13 至圖 5.18 所示。

從結果來看，RHBM 有確實的學習到各參數的平均值，但在標準差上會集中於一個點，表示 RHBM 並沒有學習到真實資料的變異性，從模擬出的數據來看，RHBM 有確實的學習到數據的分布情形。

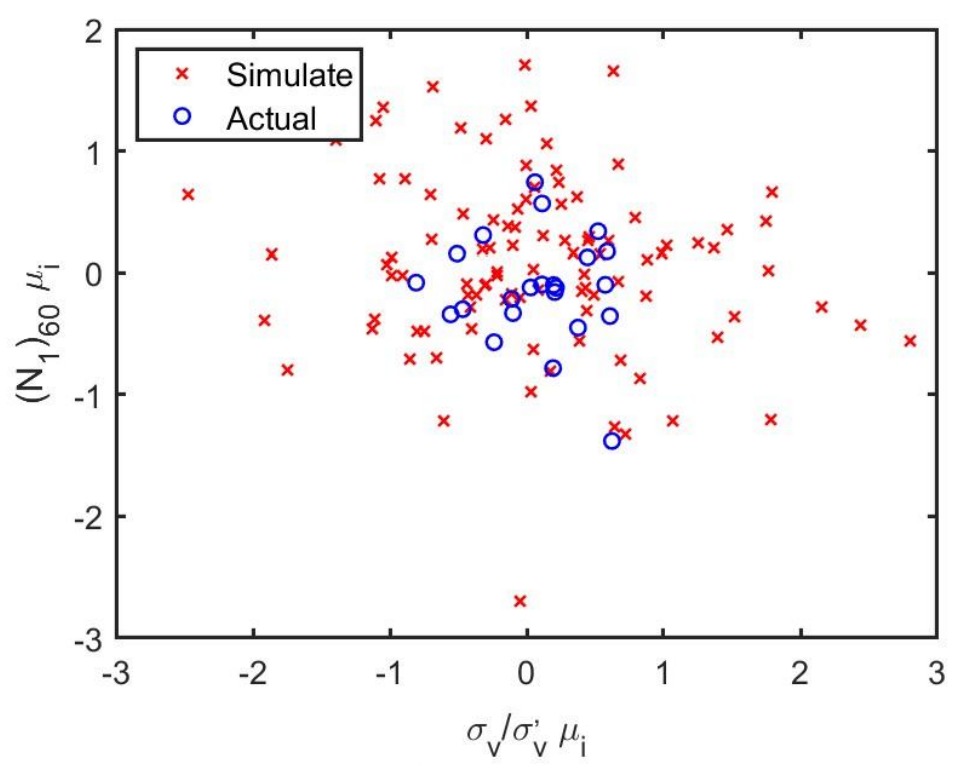


圖 5.1 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

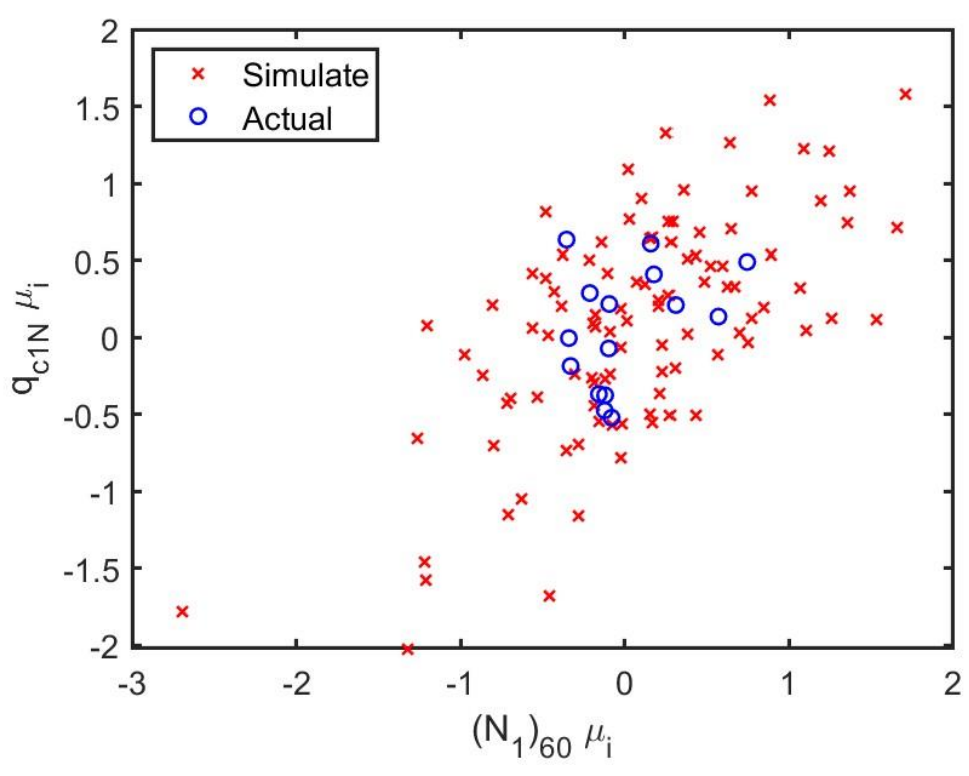


圖 5.2 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

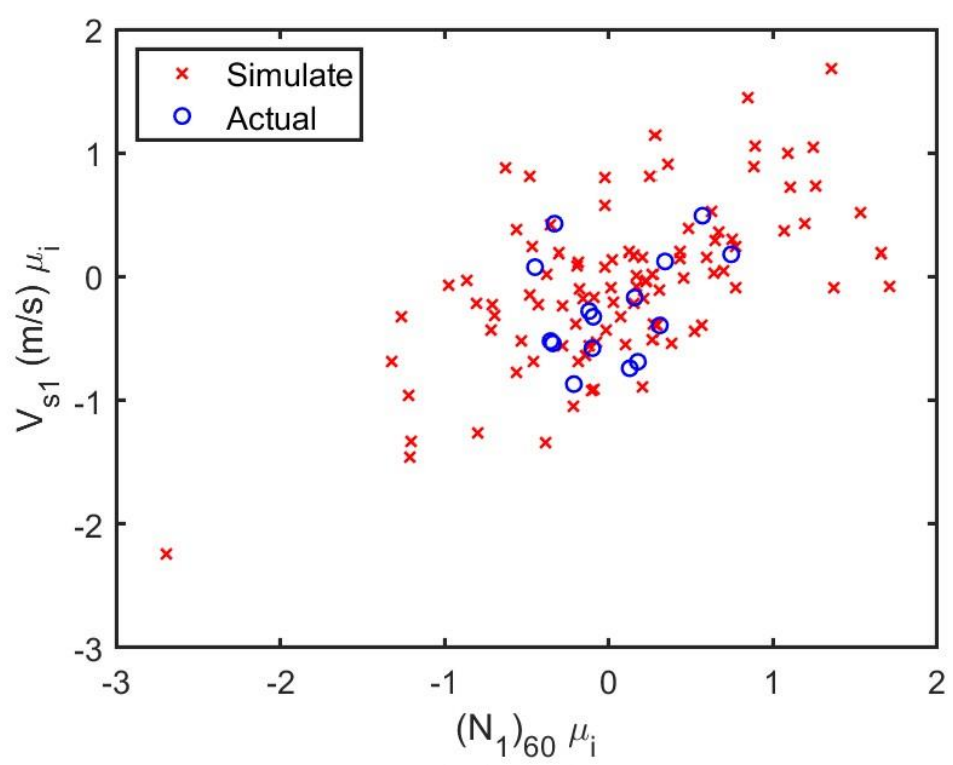


圖 5.3 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

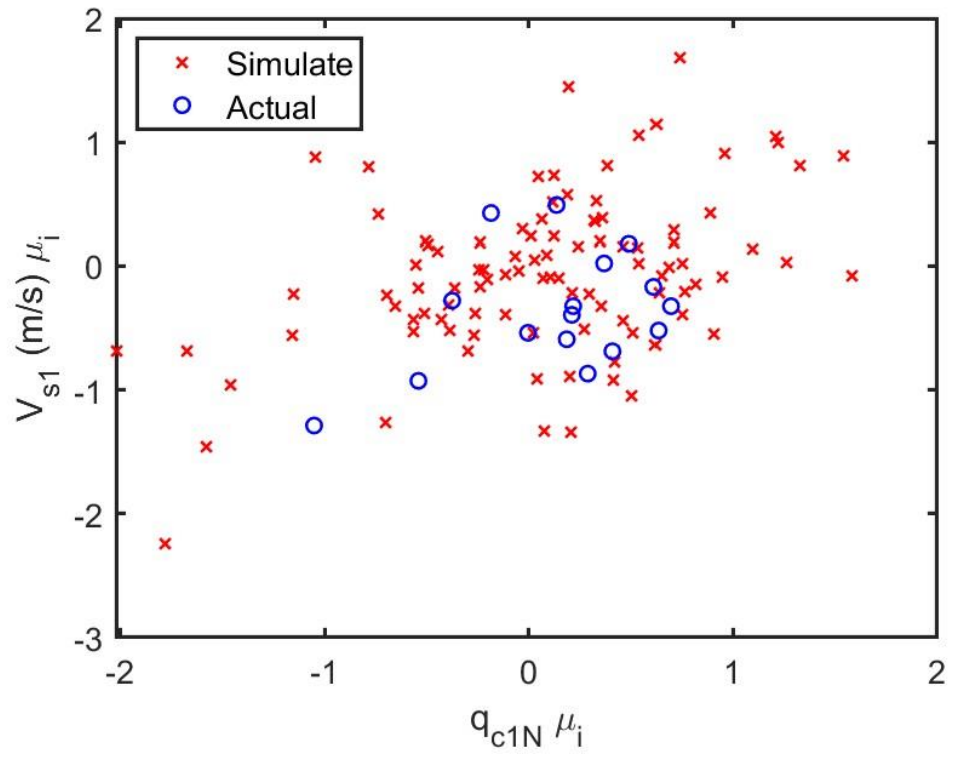


圖 5.4 q_{c1N} 與 V_{s1} 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

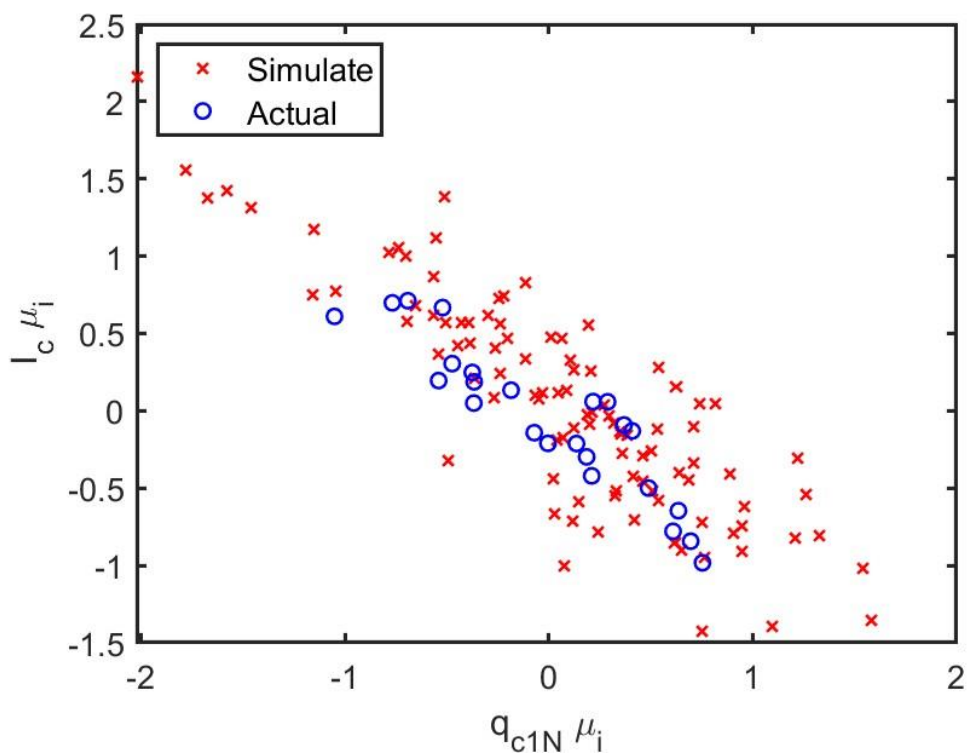


圖 5.5 q_{c1N} 與 I_c 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

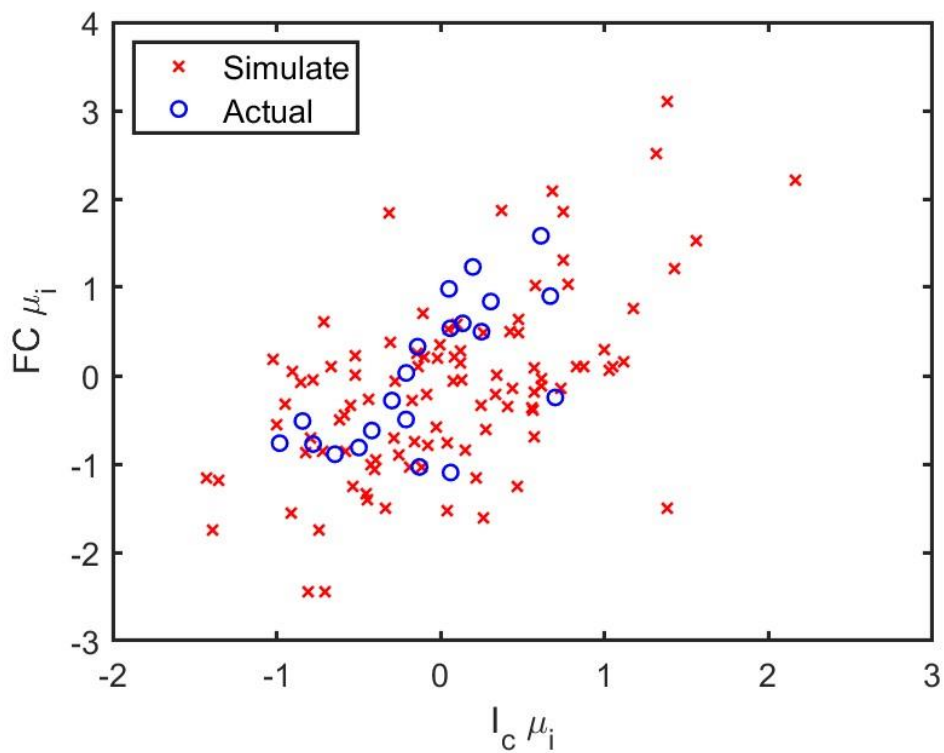


圖 5.6 I_c 與 FC 之原始資料平均值與模擬資料平均值分布圖

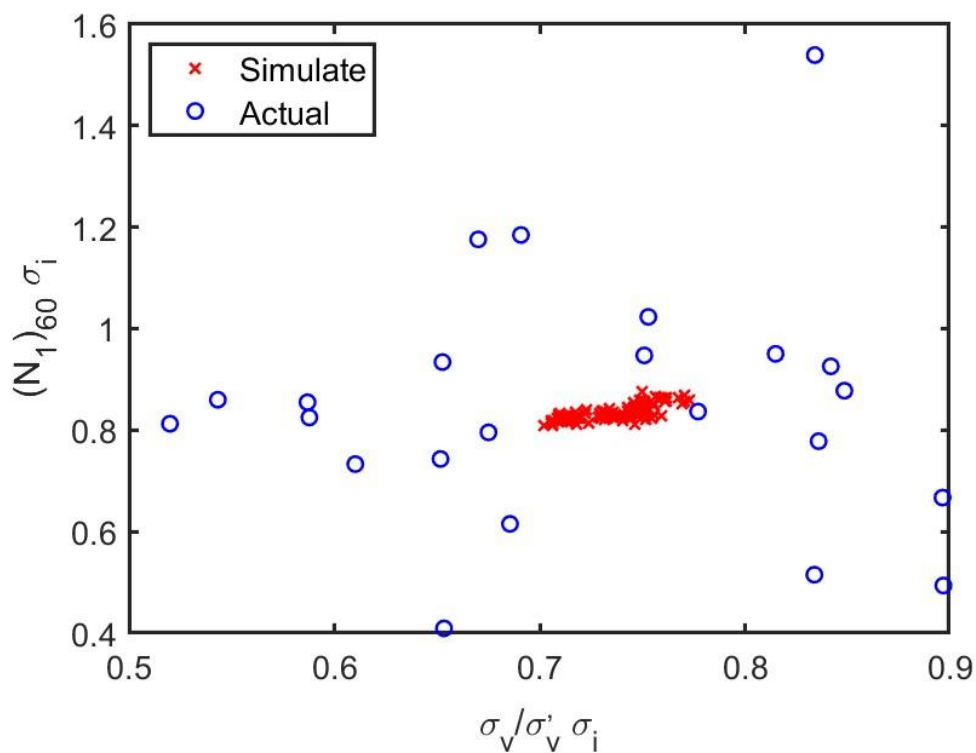
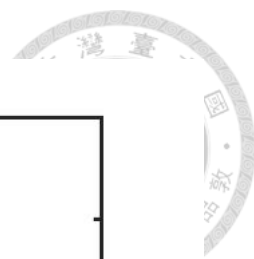


圖 5.7 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

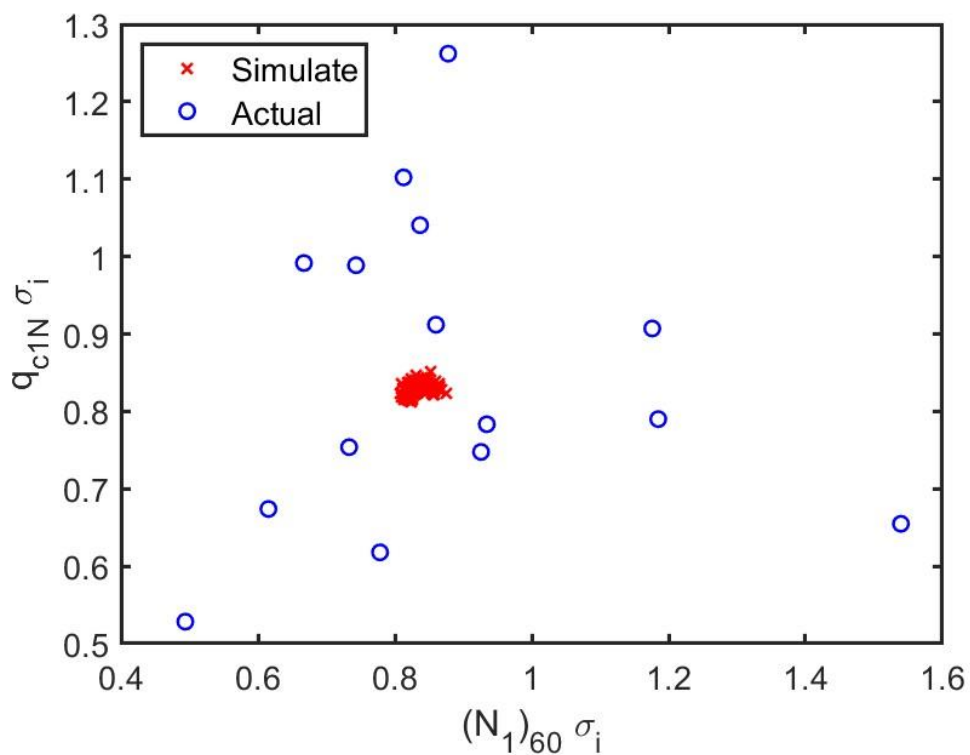


圖 5.8 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

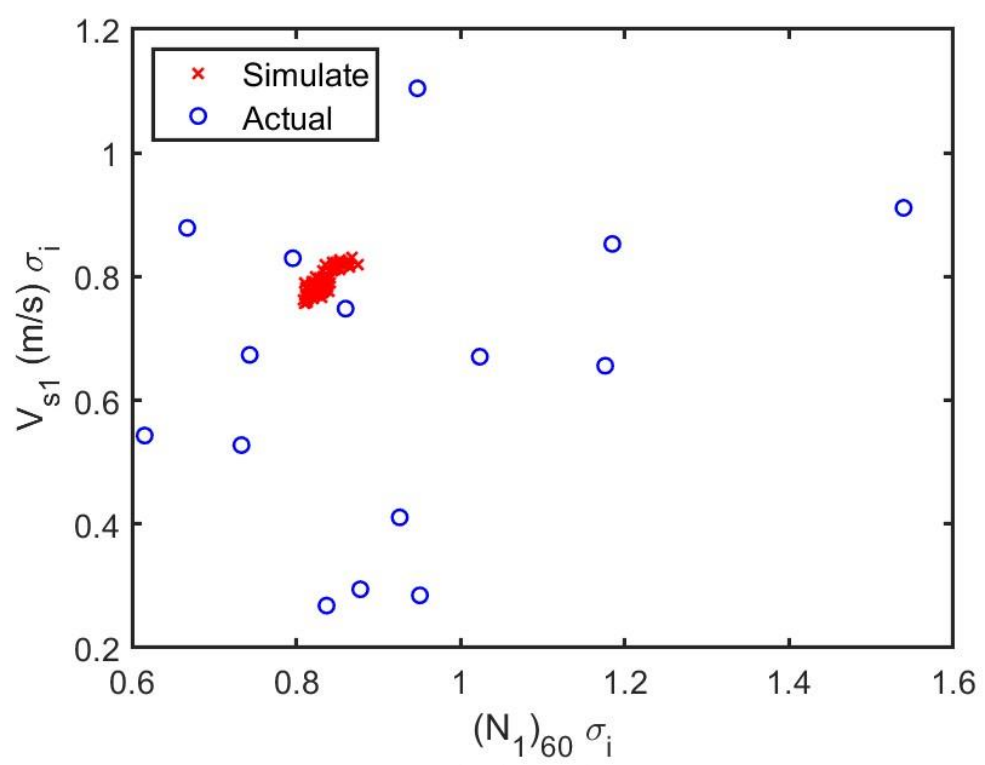


圖 5.9 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

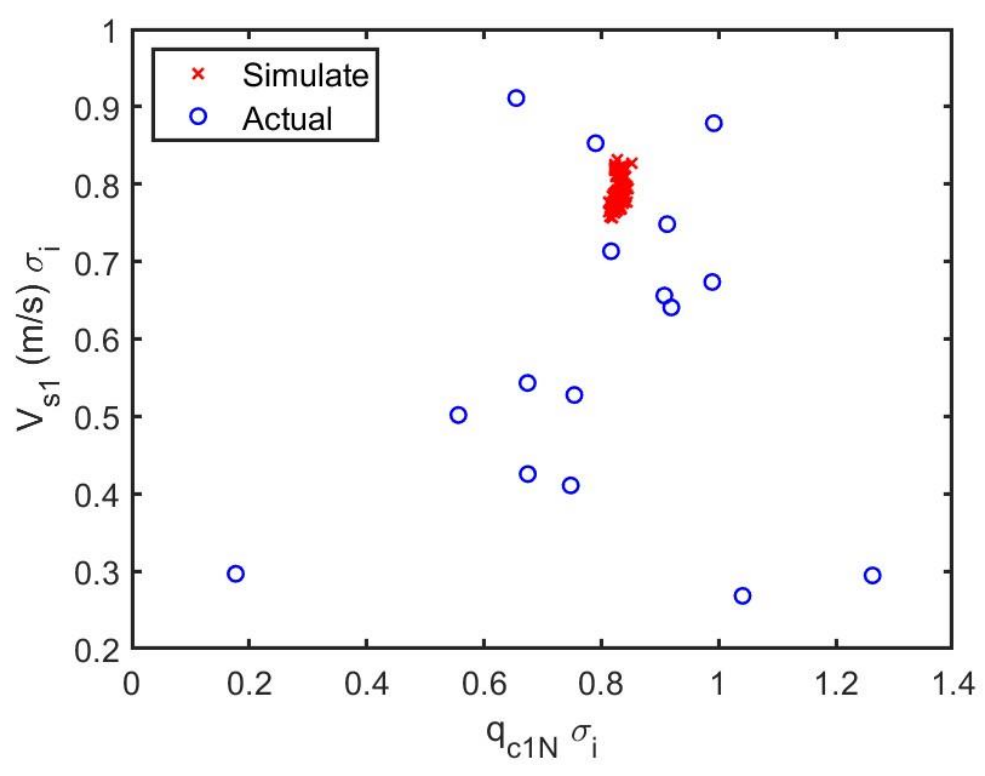


圖 5.10 q_{c1N} 與 V_{s1} 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

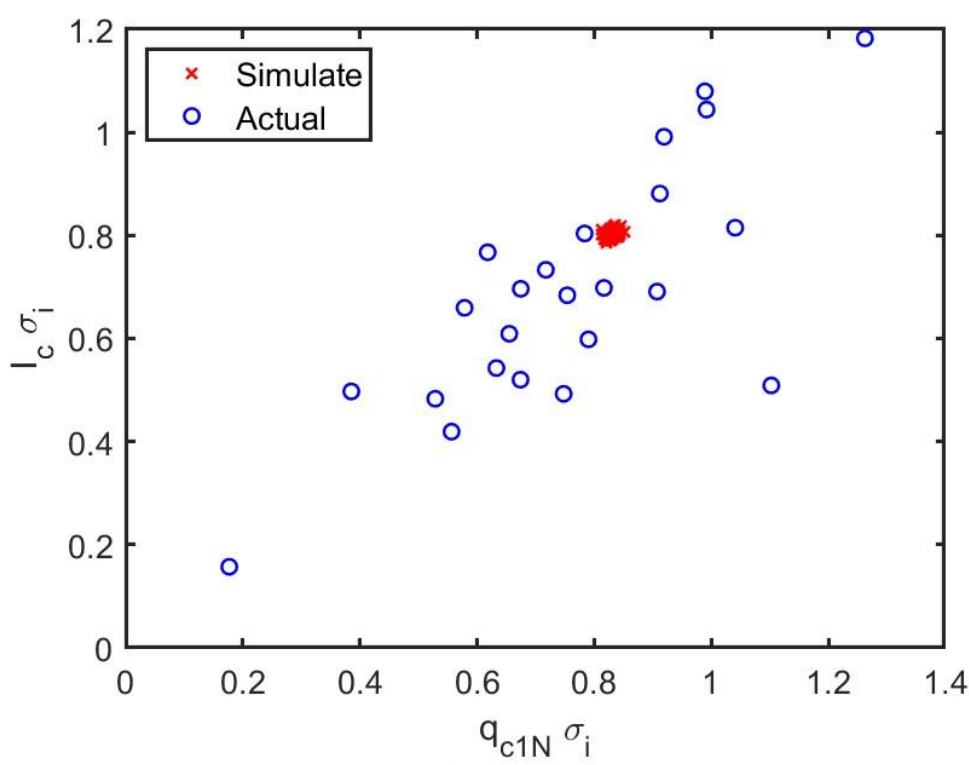


圖 5.11 q_{c1N} 與 I_c 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

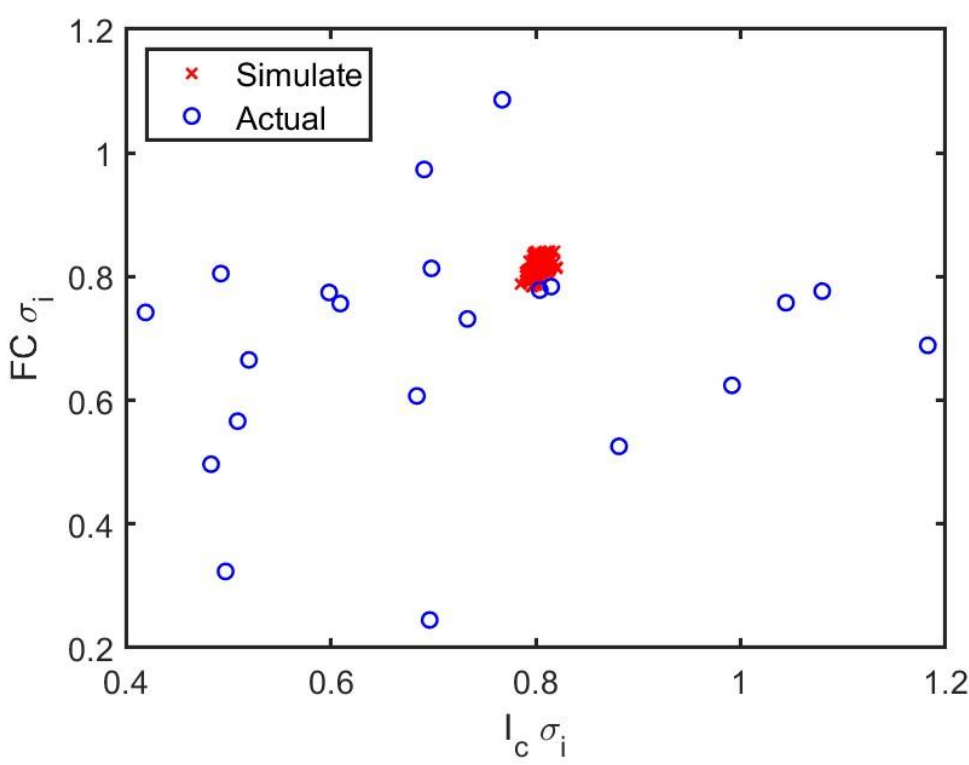


圖 5.12 I_c 與 FC 之原始資料標準差與模擬資料標準差分布圖

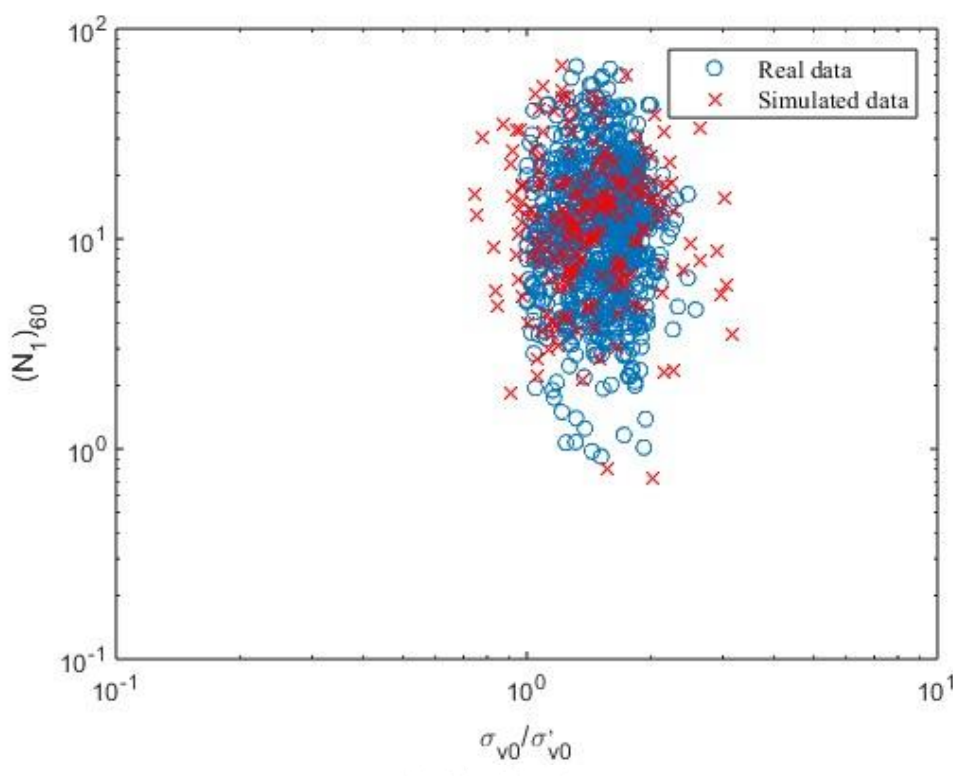


圖 5.13 σ_{v0}/σ'_{v0} 與 $(N_1)_{60}$ 的原始資料點與模擬資料點分布圖

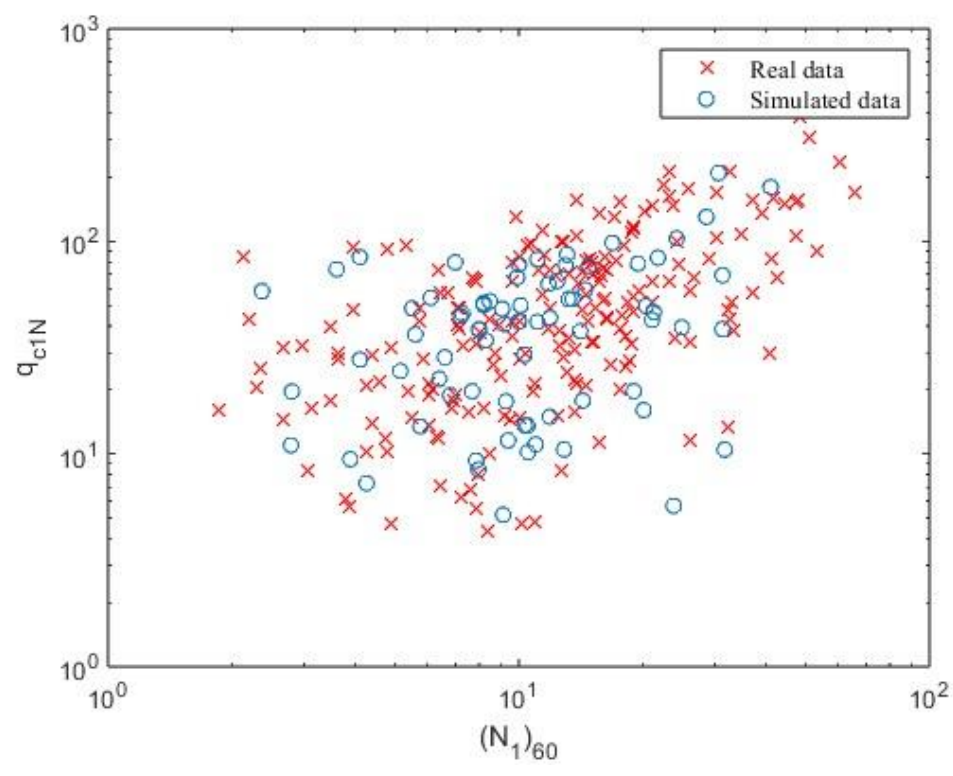


圖 5.14 $(N_1)_{60}$ 與 q_{c1N} 的原始資料點與模擬資料點分布圖

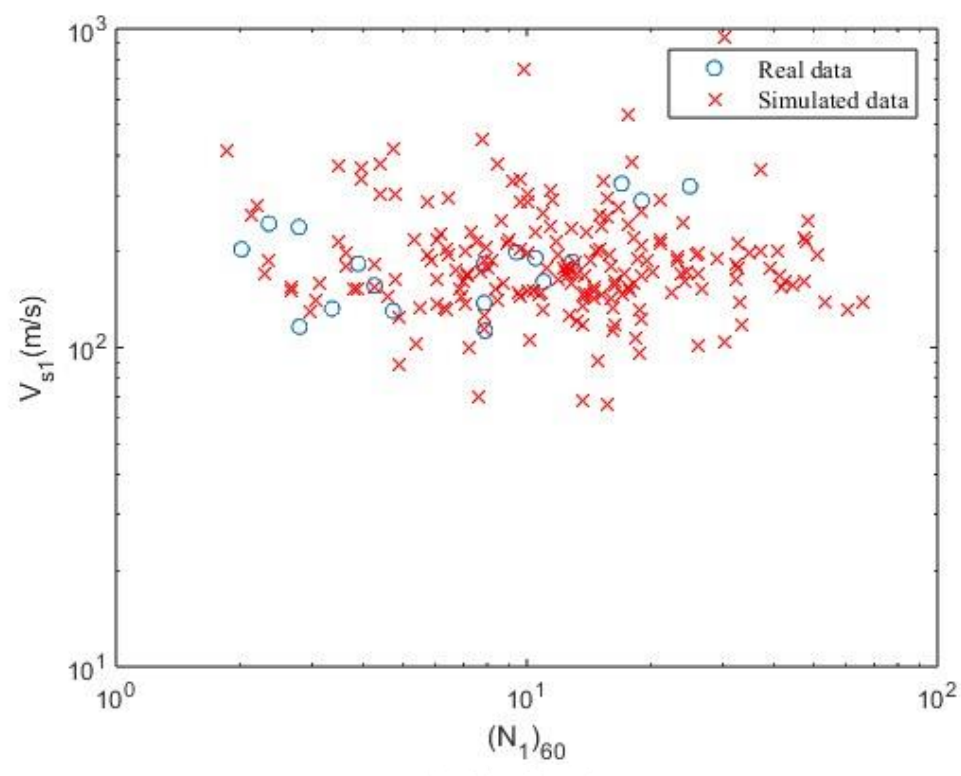
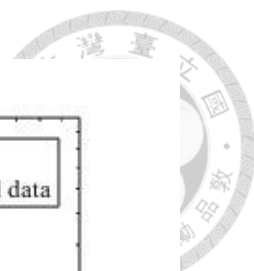


圖 5.15 $(N_1)_{60}$ 與 V_{s1} 的原始資料點與模擬資料點分布圖

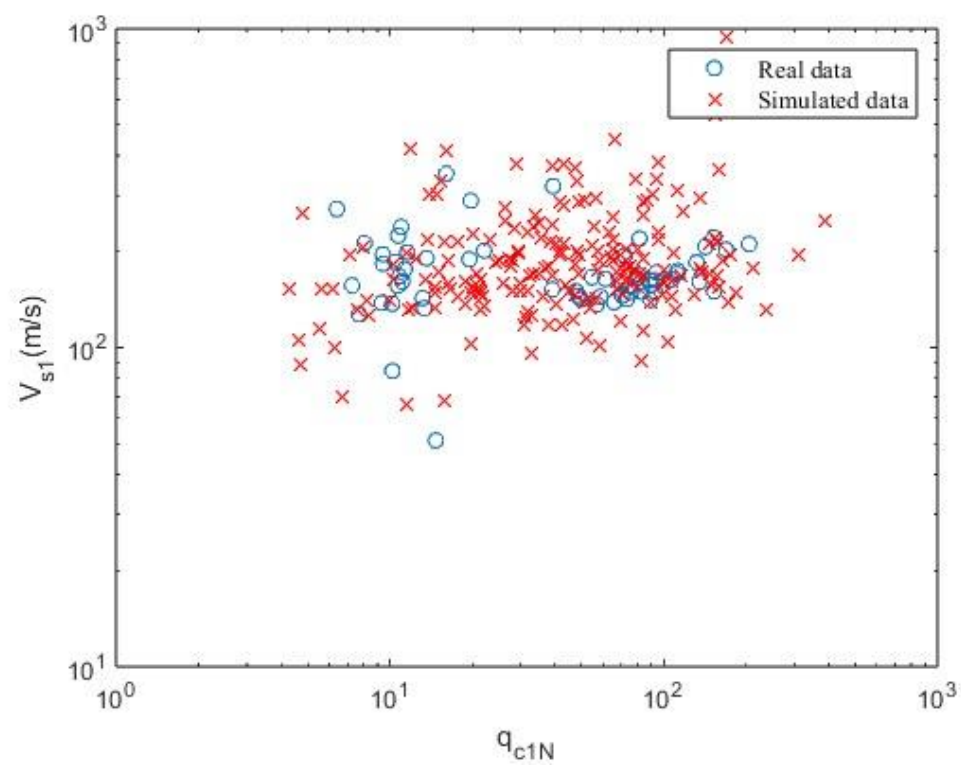


圖 5.16 q_{c1N} 與 V_{s1} 的原始資料點與模擬資料點分布圖

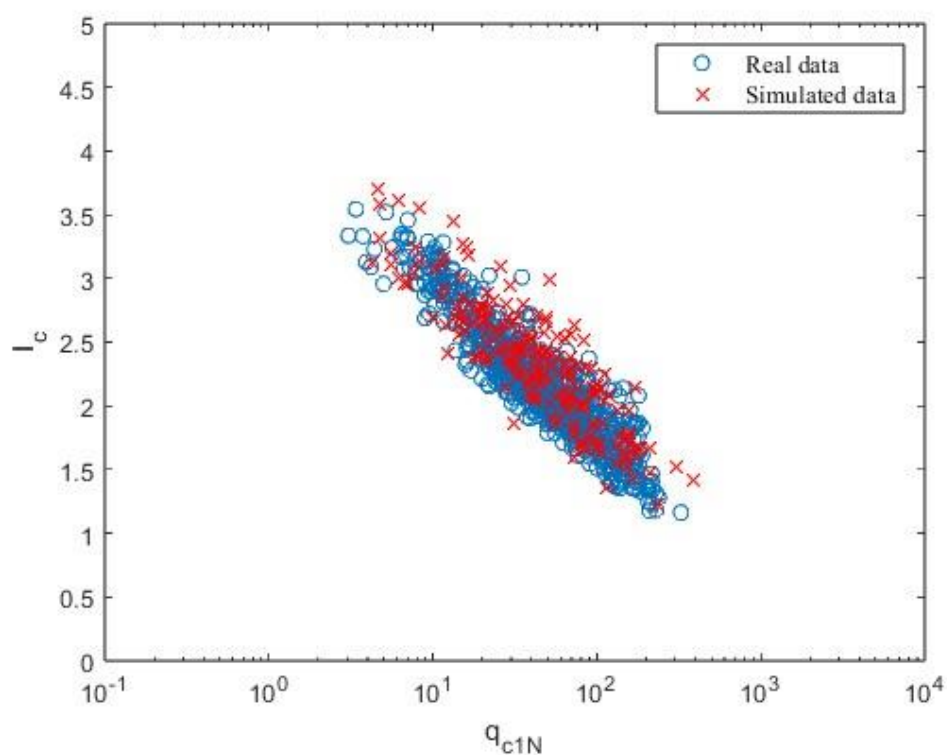
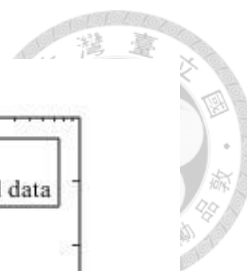


圖 5.17 q_{c1N} 與 I_c 的原始資料點與模擬資料點分布圖

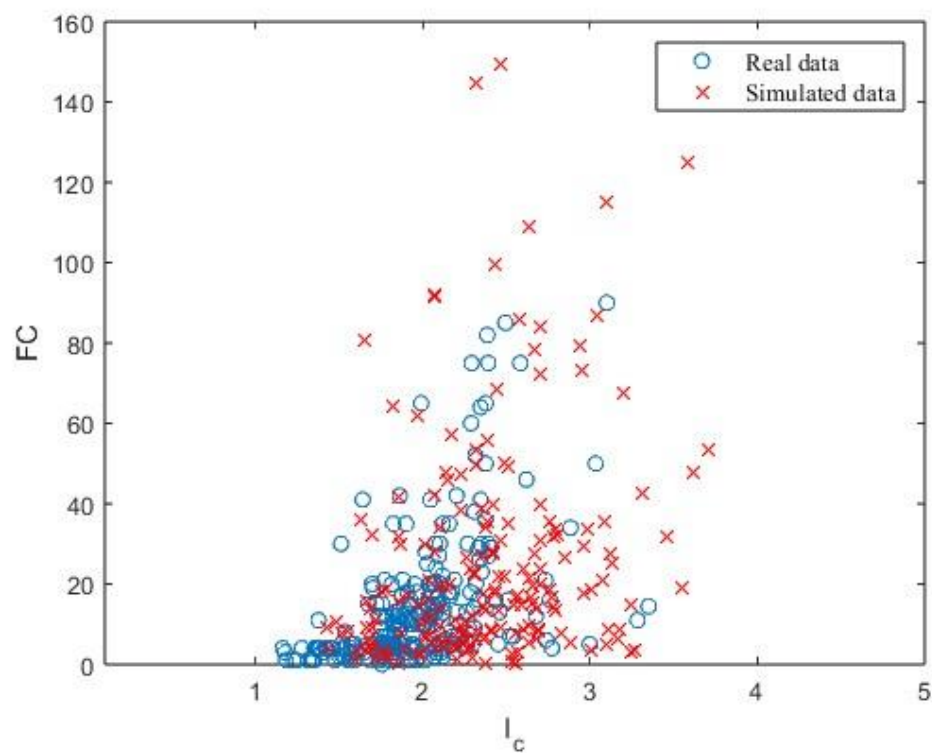


圖 5.18 I_c 與 FC 的原始資料點與模擬資料點分布圖



5.2 通用液化預測表現的比較

在此節的比較中，RHBM model 與 Generic model 都是在不會有周圍場址的已知液化資訊下進行，將比較兩模型在通用數據上所計算出的準確率是否差不多，詳細步驟如下：

1. 運用資料庫中可以計算安全係數的數據點學習 Generic model，此處皆保留液化與非液化資訊。
2. 訓練完成後將液化與非液化資訊移除，接著運用訓練出的 Generic model 計算各個數據點的液化機率，計算方式如 2.7 節。
3. 在 RHBM 的學習階段放入資料庫中的數據學習，此處皆保留液化與非液化資訊，並學習出四個超參數($\mu_0, C_0, \alpha, \beta$)以及相關性矩陣(R)。
4. 得到超參數後進行推論階段，將已知液化與非液化資訊移除，並計算各數據點的液化機率。
5. 將兩者之液化機率畫出觀察趨勢，橫軸為 RHBM model 的液化機率，縱軸為 Generic model 的液化機率。

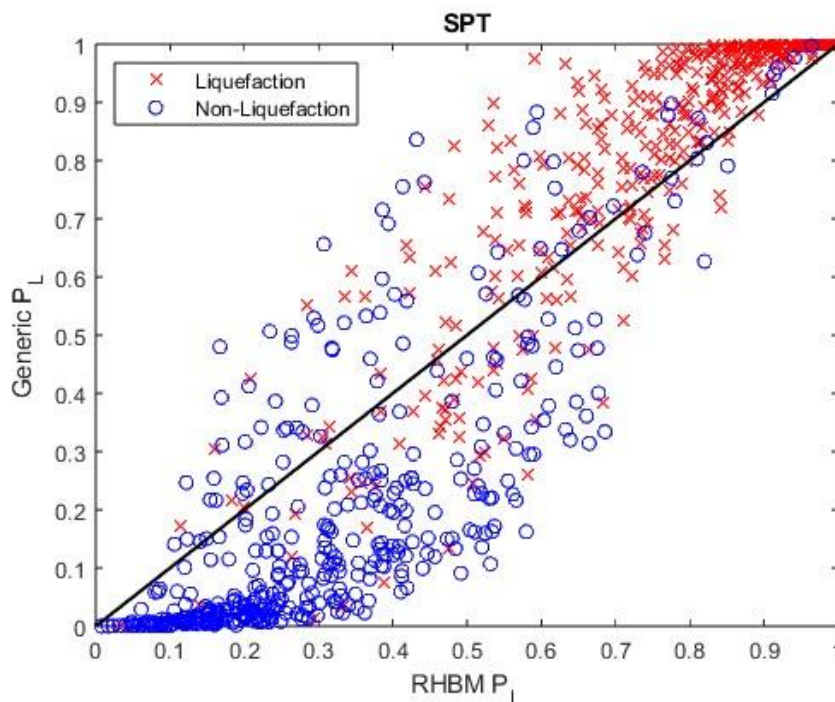


圖 5.19 通用液化預測機率比較-SPT

表 5.1 通用液化預測準確率比較-SPT

	準確率
RHBM model	83.56%
Generic model	86.53%

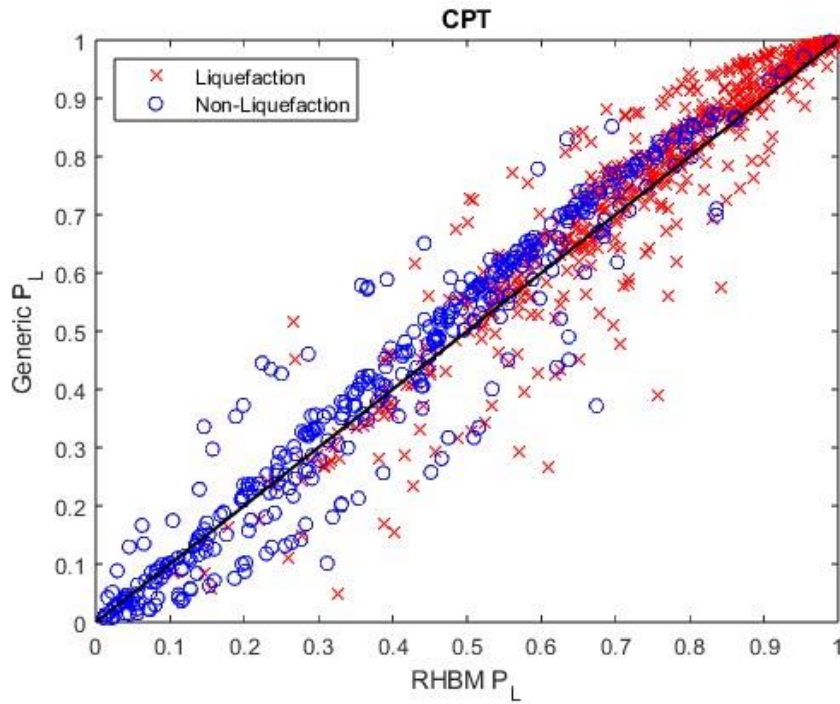
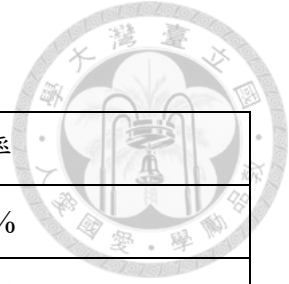


圖 5.20 通用液化預測機率比較-CPT

表 5.2 通用液化預測準確率比較-CPT

	準確率
RHBM model	79.04%
Generic model	76.79%

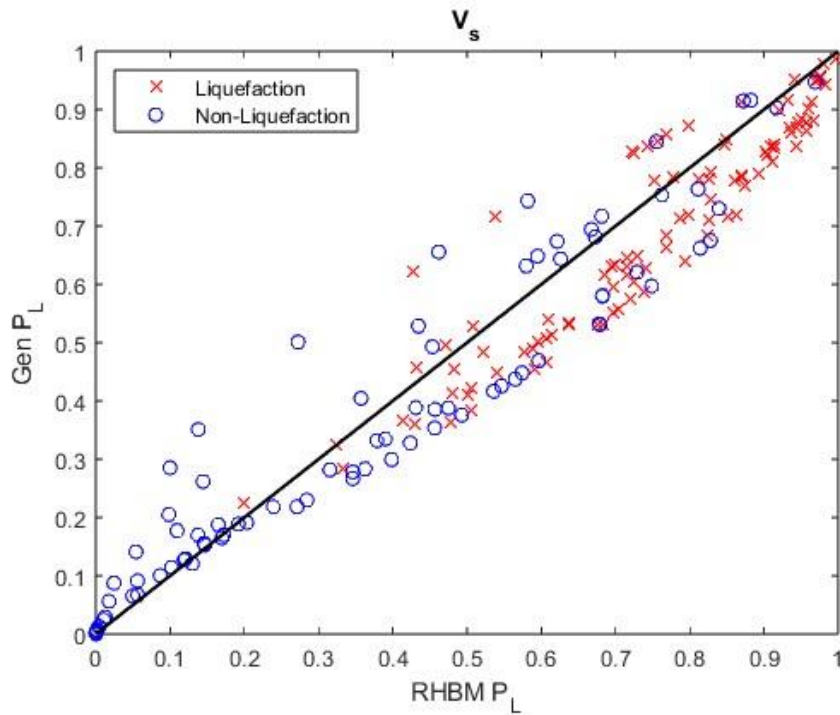


圖 5.21 通用液化預測機率比較- V_s

表 5.3 通用液化預測準確率比較- V_s

	準確率
RHBM model	78.38%
Generic model	75.14%

由圖 5.19-圖 5.21 和表 5.1-表 5.3 可觀察到，RHBM model 和 Generic model 在不考慮周圍場址的已知液化資訊下皆能進行土壤液化潛能的預測，且準確率在三種預測方法中皆差不多，此結果也符合我們的預期，RHBM 雖然有學習區域的特性，但因沒有該區域場址的資訊，使得在推論時是由超參數隨意模擬該區域的特性進行預測。



5.3 特定地區場址液化預測表現的比較

為了模擬目標場址在液化評估上每個地區獨有的特性，此節將使用 leave-one-site-out 的方式進行，總共挑選了六個不同的區域進行驗證，包括美國的蒙特瑞郡和因皮里爾郡、臺灣的嘉義和台中、墨西哥的墨西加利和紐西蘭的坎特伯里，將比較 Generic model 與 RHBM model 之預測機率，詳細分析步驟如下：

1. 挑選資料庫中一區域的場址作為目標場址，Generic model 在學習時將此區域的資料移除，運用其他的區域進行學習，再計算目標場址的液化機率。
2. RHBM model 在學習時將此區域的資料移除，運用其他的區域進行學習，並學習出四個超參數($\mu_0, C_0, \alpha, \beta$)和相關性矩陣(R)。
3. RHBM 在推論階段時將指定區域的其他場址之液化資訊設為已知資訊，目標場址之液化則為未知資訊，並計算其液化機率。
4. 將兩模型之液化機率畫出觀察趨勢，橫軸為液化機率，縱軸為目標場址的數據編號，並將經驗公式所計算出的安全係數呈現在兩側。

以下的介紹中，Generic model 簡稱為 Generic，RHBM model 則簡稱為 RHBM。

(1) 案例一 (USA-Monterey-560)

表 5.4 USA-Monterey-560 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
5.8	1.27	3.6	73.8	1.83	-	7	0.21	6.9	Yes
3.7	1.28	6.6	28.48	2.34	-	26	0.21	6.9	Yes
7.3	1.43	10	77.54	1.78	-	5	0.21	6.9	Yes
5.8	1.33	6.1	54.23	1.98	-	2	0.21	6.9	Yes
2.4	1.15	14.1	37.84	2.08	-	4	0.21	6.9	Yes

從圖 5.22 可以觀察到，在此區域中 Generic 有兩筆數據產生誤判，而 RHBM 則有一筆的誤判，且使用 NCEER(2001)的方法所計算出的安全係數也有一筆數據誤判，其原因可由圖 5.23 看出，此區域的 $\ln(m)$ 期望值 RHBM 相較 Generic 有左偏的情形，RHBM 算出的液化機率會較大，也可以說是此區域有較顯著的地域性。

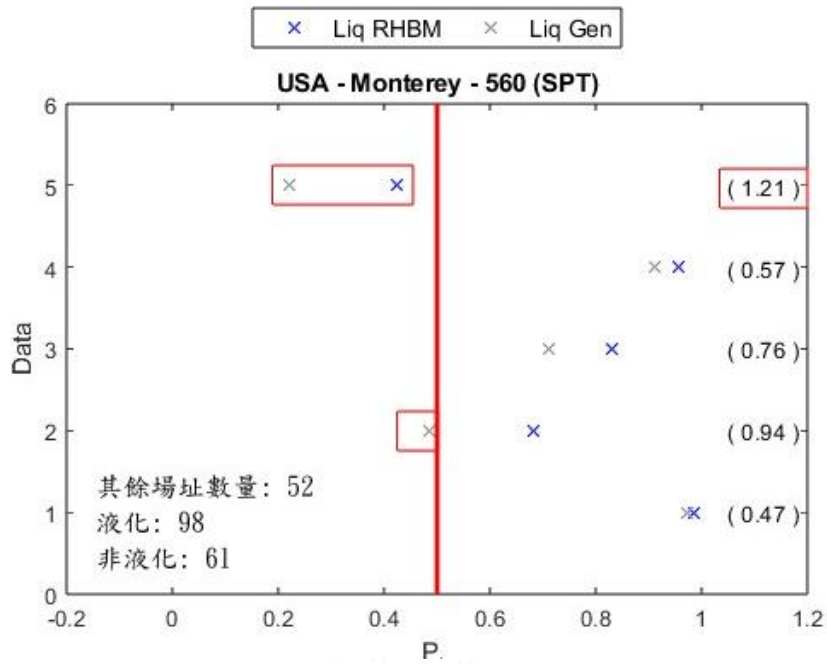


圖 5.22 USA-Monterey-560 預測機率比較-SPT

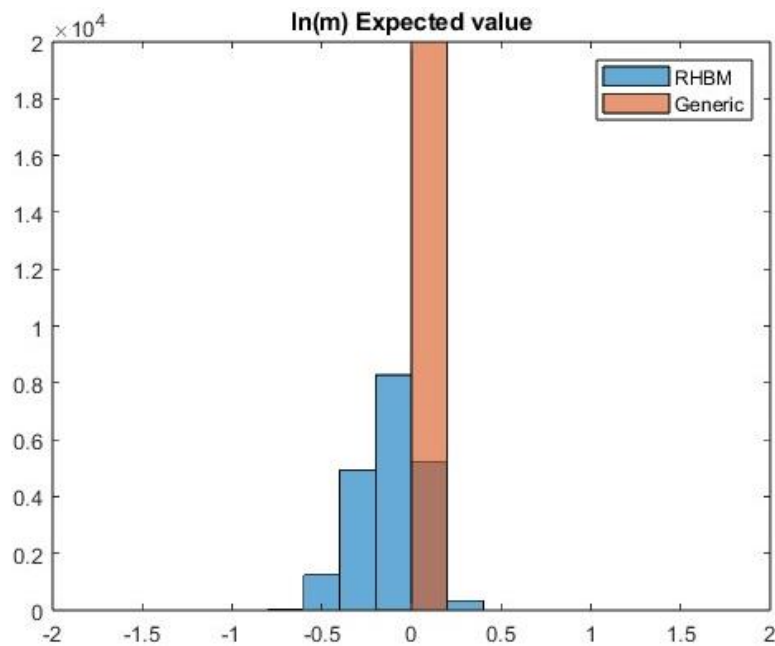


圖 5.23 USA-Monterey-560 $\ln(m)$ 期望值分布圖-SPT

(2) 案例二 (Taiwan-Chiayi-413)

表 5.5 Taiwan-Chiayi-413 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
11.3	1.43	14.37	-	-	-	37	0.19	7.6	No
12.8	1.47	9.17	-	-	-	43	0.19	7.6	No
14.3	1.51	14.63	-	-	-	41	0.19	7.6	No
15.8	1.55	13.39	-	-	-	31	0.19	7.6	No
18.8	1.59	8.51	-	-	-	15	0.19	7.6	No
8.3	1.31	4.58	-	-	-	35	0.19	7.6	No
14.3	1.52	11.92	-	-	-	33	0.19	7.6	No
15.8	1.55	12.87	-	-	-	47	0.19	7.6	No
17.3	1.59	12.42	-	-	-	25	0.19	7.6	No
18.8	1.61	21.30				14	0.19	7.6	No
15.8	1.02	10.51				32	0.19	7.6	No
17.3	1.06	10.26				44	0.19	7.6	No
18.8	1.10	9.45				42	0.19	7.6	No

從圖 5.24 可以觀察到，在此區域中 Generic 有一筆數據產生誤判，而 RHBM 則都準確的預測，在使用 NCEER(2001)的方法所計算出的安全係數也有產生誤判的情形，另外也可觀察到這些數據都為非液化，RHBM 所預測出的液化機率都比 Generic 來得小，即便大多數數據兩個模型都能準確預測，但 RHBM 所預估的液化機率更貼近現地的情形。圖 5.25 可以看到此區域的 $\ln(m)$ 期望值分布 RHBM 相較 Generic 有右偏的情形，表示 RHBM 算出的液化機率會較小。

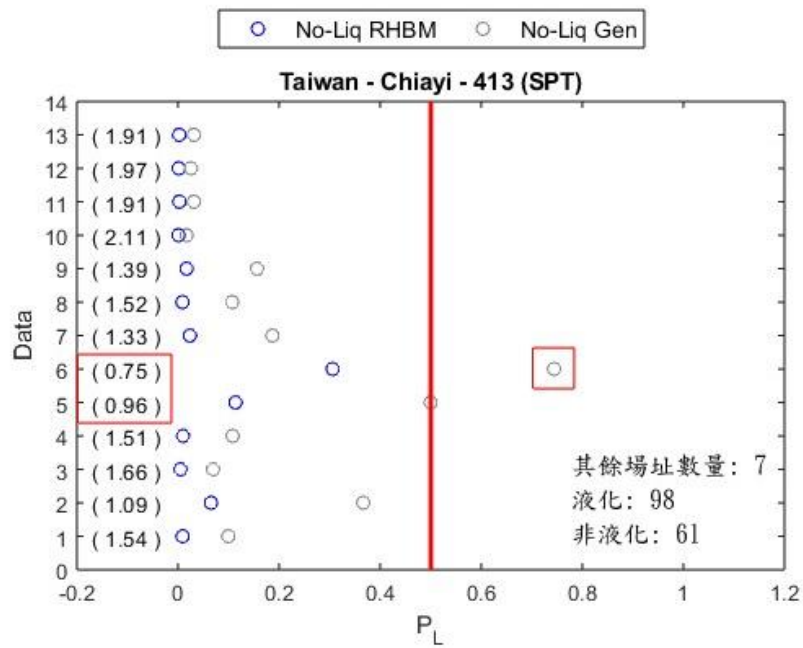
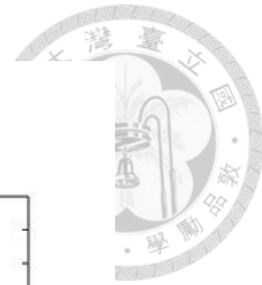


圖 5.24 Taiwan-Chiayi-413 預測機率比較-SPT

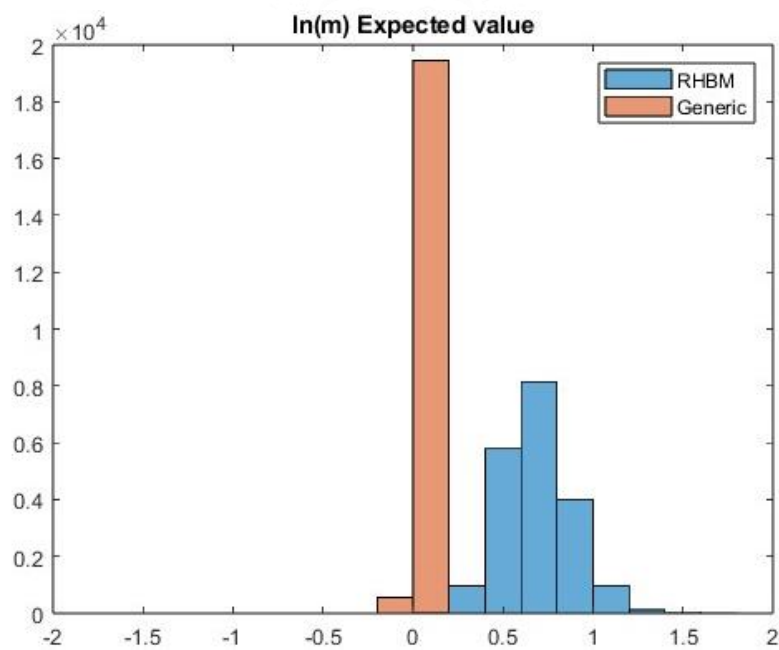


圖 5.25 Taiwan-Chiayi-413 $\ln(m)$ 期望值分布圖-SPT

(3) 案例三 (Mexico-Mexicali-27)

表 5.6 Mexico-Mexicali-27 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
2.9	1.22	-	31.40	2.28	-	-	0.19	6.2	Yes
3	1.19	-	32.42	2.31	-	-	0.19	6.2	Yes
5.05	1.45	-	55.26	2.31	-	-	0.19	6.2	No
2.7	1.12	-	49.96	1.79	-	-	0.19	6.33	Yes
2.9	1.21	-	29.24	2.32	-	-	0.19	6.33	Yes
3.2	1.17	-	32.64	2.32	-	-	0.19	6.33	Yes
2.3	1.08	-	51.77	2.10	-	-	0.19	6.33	Yes
6	1.48	7.97	8.44	3.13	-	-	0.19	6.33	Yes

從圖 5.26 可以觀察到，在紅色框中的數據不管是 RHBM 和 Generic 都產生了誤判，且在這些液化點中 RHBM 的液化機率也與 Generic 互有高低，沒有一個明顯的趨勢，原因在於 Mexicali 這個區域只有一個場址，導致 RHBM 在推論時沒有其他已知資訊，因此 RHBM 與 Generic 的表現差不多，由圖 5.27 可看到因沒有其他場址的資訊時，兩者的 $\ln(m)$ 期望值表現差不多。

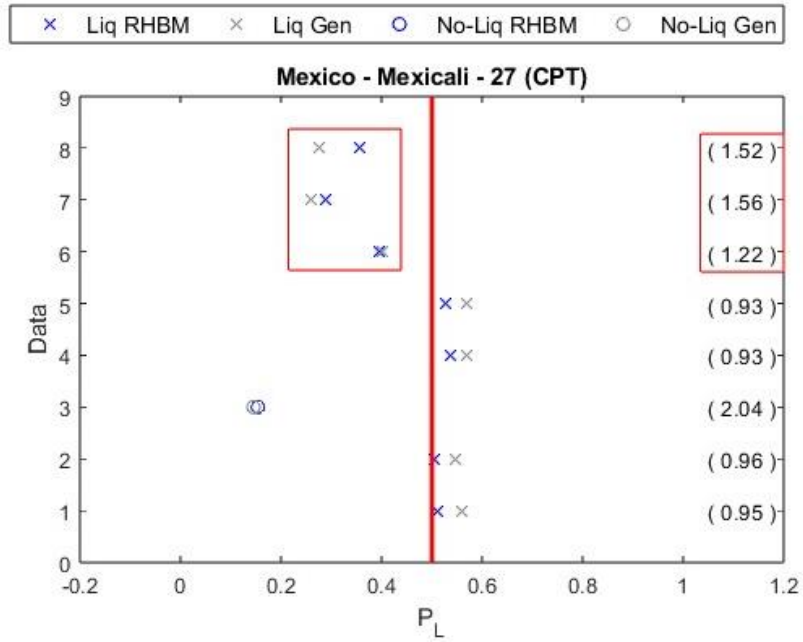
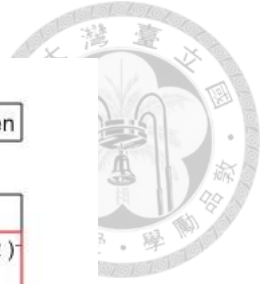


圖 5.26 Mexico-Mexicali-27 預測機率比較-CPT

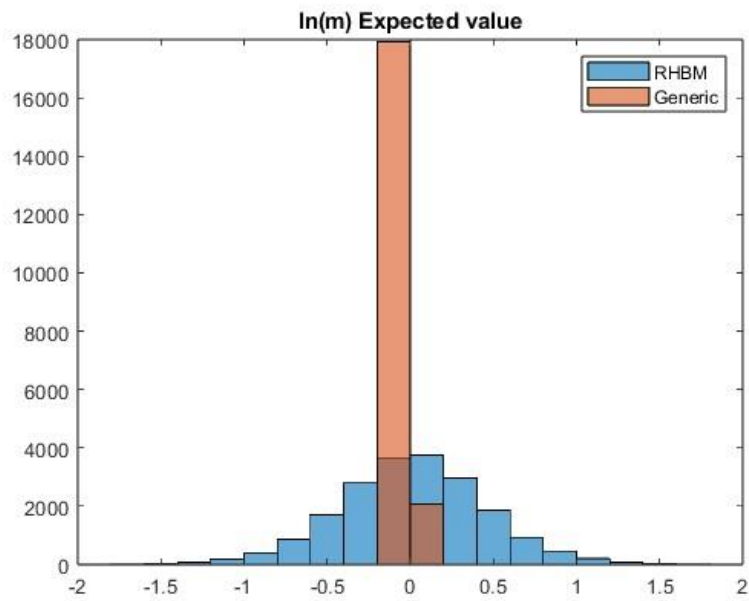


圖 5.27 Mexico-Mexicali-27 $\ln(m)$ 期望值分布圖-CPT

(4) 案例四 (Taiwan-Taichung-292)

表 5.7 Taiwan-Taichung-292 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
2.5	1.28	-	21.59	2.17	-	-	0.79	7.5	Yes
2.5	1.28	-	33.49	2.40	-	-	0.79	7.5	Yes
2.5	1.28	-	12.24	2.86	-	-	0.79	7.5	Yes
3.5	1.45	-	30.43	2.59	-	-	0.79	7.5	Yes
4.5	1.56	-	22.82	2.51	-	-	0.79	7.5	yes
6.5	1.71	-	145.03	1.92	-	-	0.79	7.5	no
7.5	1.76	-	159.32	1.80	-	-	0.79	7.5	no
12.15	1.90	-	128.10	2.12	-	-	0.79	7.5	no
13.8	1.93	-	168.46	1.85	-	-	0.79	7.5	no

從圖 5.28 可以觀察到，Generic 誤判了四筆數據，RHBM 則為正確判斷，若依據 Juang et al. (2003) 之預測方法計算安全係數，這四筆數據也都為誤判，其原因可由圖 5.29 看出，兩模型在此區域之 $\ln(m)$ 期望值分布有明顯不同，RHBM 相較 Generic 有右偏的情形，表示 RHBM 算出的液化率較小。

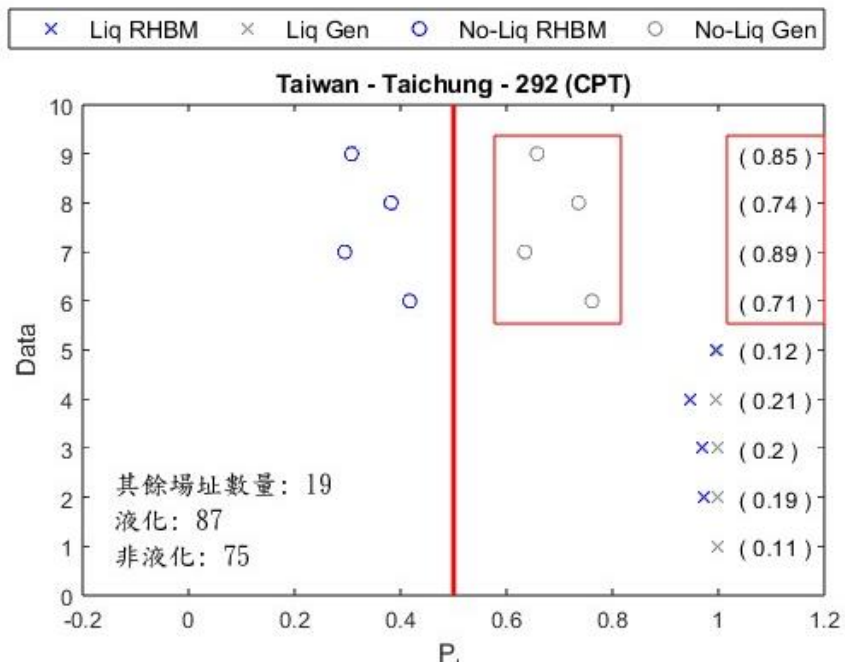


圖 5.28 Taiwan-Taichung-292 預測機率比較-CPT

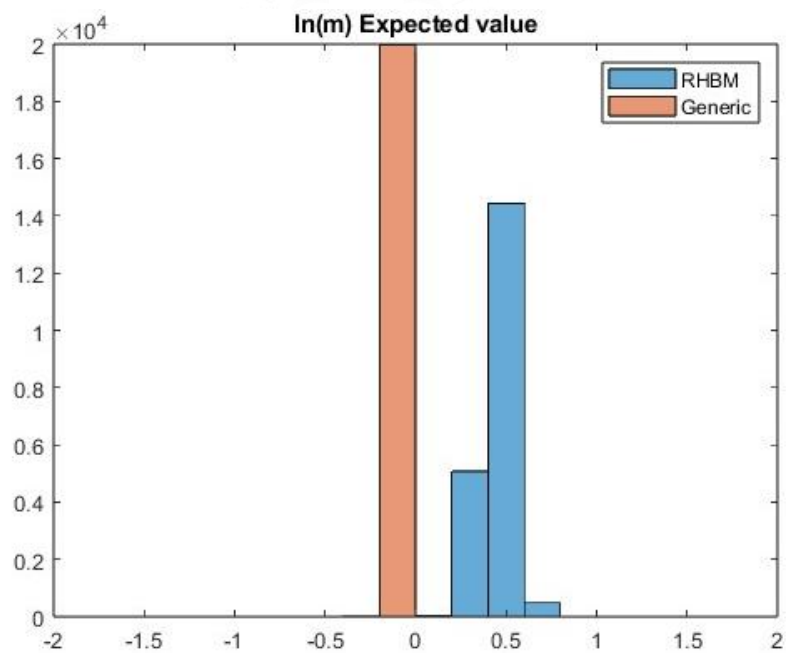


圖 5.29 Taiwan-Taichung-292 $\ln(m)$ 期望值分布圖-CPT

(5) 案例五 (USA-Imperial-658)

表 5.8 USA-Imperial-658 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
3.5	1.35	-	-	-	158.90	22	0.5	6.5	Yes
3.5	1.35	-	-	-	161.32	22	0.5	6.5	Yes
3.5	1.35	-	-	-	158.90	22	0.18	6.5	No
3.5	1.35	-	-	-	161.32	22	0.18	6.5	No

從圖 5.30 可以觀察到，在此區域中 RHBM 與 Generic 都準確的預測，在使用 Kayen et al. (2013)的方法所計算出的安全係數也都為正確判斷，另外也可觀察到 RHBM 所預測出的液化機率都比 Generic 來得小，其原因可由圖 5.31 可以看到此區域的 $\ln(m)$ 期望值分布 RHBM 相較 Generic 有右偏的情形。

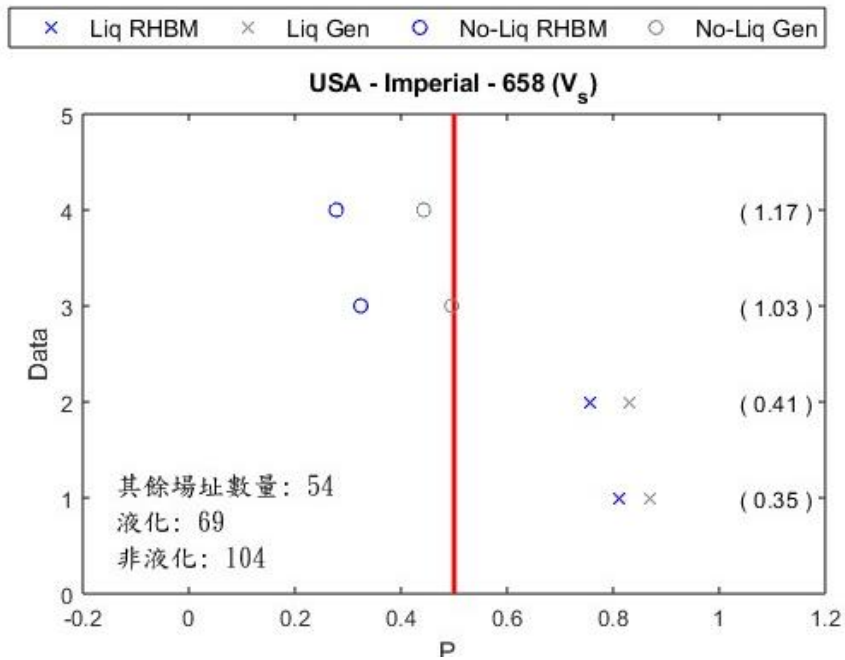


圖 5.30 USA-Imperial-658 預測機率比較- V_s

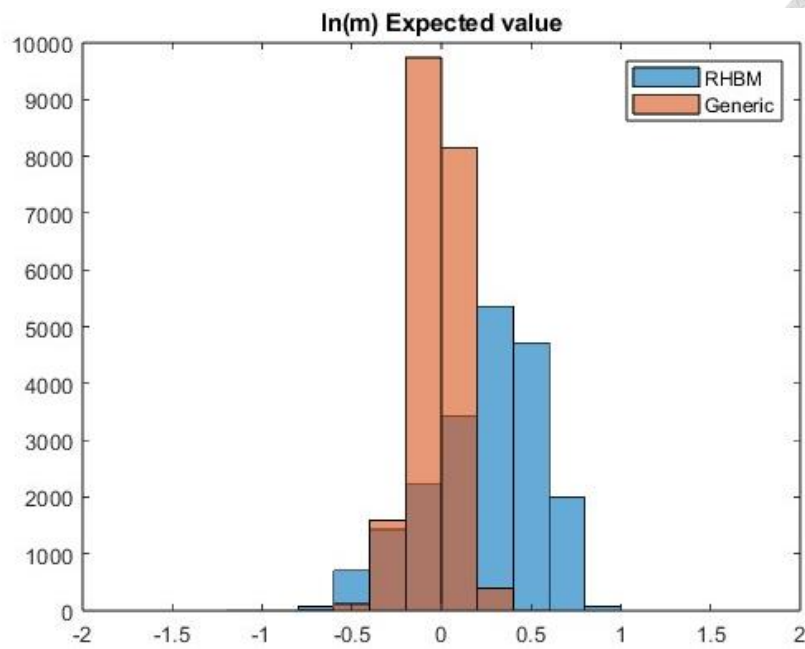
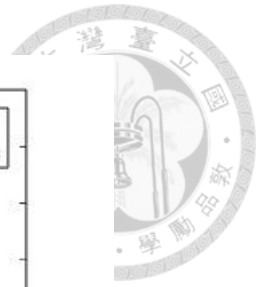


圖 5.31 USA-Imperial-658 $\ln(m)$ 期望值分布圖- V_s

(6) 案例六 (New Zealand-Canterbury-468)

表 5.9 New Zealand-Canterbury-468 驗證資料

深度(m)	σ_{v0}/σ'_{v0}	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1} (m/s)	FC(%)	PGA(g)	M_w	液化
9.5	1.69	-	131.63	1.75	184.94	2	0.47	6.3	Yes
4.4	1.71	-	58.65	1.96	144.26	4	0.49	6.3	Yes
4	1.49	-	54.64	1.93	166.08	16	0.51	6.3	Yes
4.8	1.36	-	152.39	1.59	150.18	5	0.48	6.3	Yes
7.8	1.57	-	151.89	1.60	221.20	3	0.45	6.3	Yes

從圖 5.32 可以觀察到，在此區域中 Generic 與 Kayen et al. (2013)的方法計算出的安全係數都有一點產生誤判，RHBM 則都為正判，且 RHBM 所預測出的液化機率都比 Generic 來得大，表示 HBM 所預估的液化機率更貼近現地的情形。圖 5.33 可以看到此區域的 $\ln(m)$ 期望值分布 RHBM 相較 Generic 有左偏的情形，表示 RHBM 算出的液化機率會較大。

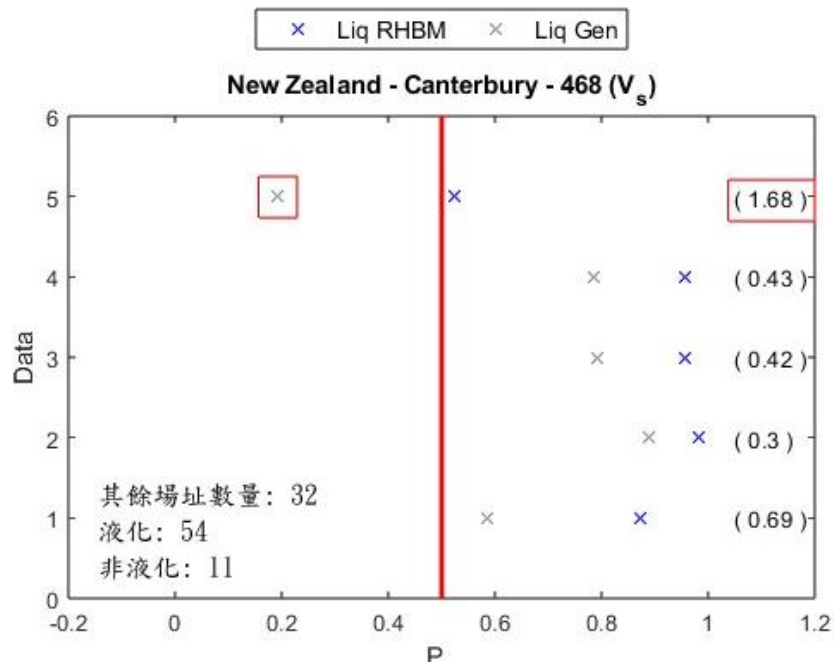


圖 5.32 New Zealand-Canterbury-468 預測機率比較- V_s

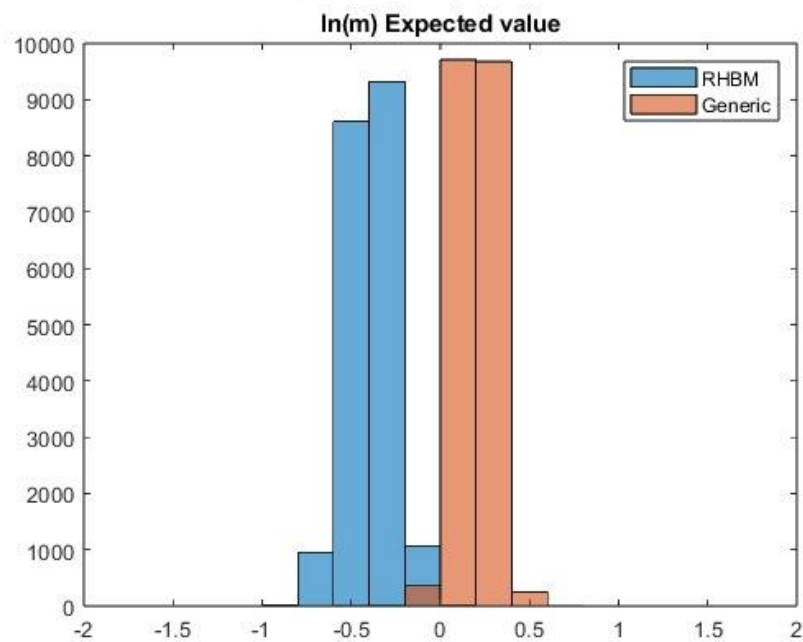


圖 5.33 New Zealand-Canterbury-468 $\ln(m)$ 期望值分布圖- V_s

在本章節前面的案例分析中呈現的都是單一區域的 $\ln(m)$ 期望值分布，圖 5.34 呈現的是以 SPT 方法得到各區域以及 Generic model 全部資料共用的 $\ln(m)$ 之期望值與變異數分布比較，距離 Generic model 之 $\ln(m)$ 之期望值越遠的區域表示該區域有越明顯的趨勢特性，此處也列出了幾個地區包含美國的 San Francisco、紐西蘭的 Canterbury、土耳其的 Sakarya、日本的廣島縣、臺灣的嘉義和中國的成都。

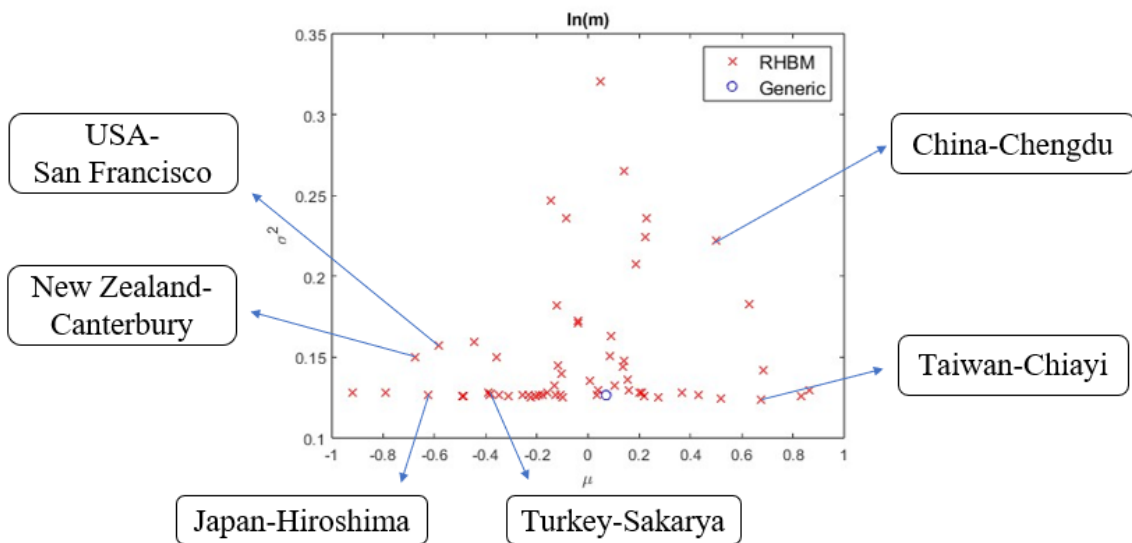


圖 5.34 各區域 $\ln(m)$ 期望值與變異數分布圖

第六章 結論與未來建議



6.1 結論

本研究建置了「Liquefaction/6/2759」資料庫，此資料庫收集了全球的液化資訊，資料庫有以下特點：

1. 目前較常見的簡易液化評估法中大多使用 SPT、CPT 和 V_s 的試驗資料進行分析，本研究的資料庫包含 SPT、CPT 和 V_s 試驗的相關數據。
2. 資料庫中不單只有特定國家和區域的數據，其中涵蓋了有液化歷史的 13 個國家和 60 個區域，本研究已將區域做劃分可供後續研究使用。
3. 資料庫中涵蓋許多重大歷史液化案例，包括臺灣的集集地震、中國的唐山地震、美國的洛馬普里塔地震、日本的新瀉地震、土耳其的科賈埃利地震和紐西蘭的基督城地震等。

根據第五章的案例驗證可以觀察到本研究所使用之改良式 HBM (RHBM) 可模擬預定場址的液化機率，當有該區域其他場址的液化資訊時，RHBM 能有效地針對該區域的特性修正液化機率做出正確的預測，即便預測錯誤，RHBM model 也能比 Generic model 推估出的液化機率更貼近現地的表現。

RHBM 相較前人的預測模型有兩個優勢，分別如下：

1. 相較於前人的預測模型，RHBM 可學習資料庫中來自全球各區域的特性，而不是將全球的資料全部當作同一群體做分析。
2. 前人的預測模型中只需要場址有足夠的鑽探資料就能計算安全係數，並進行土壤液化潛能的預測，但並不會考量周圍場址的液化歷史，然而本研究認為應該考量周圍場址的液化歷史才能更加準確預測土壤液化潛能，本研究使用之 RHBM 能辦到這件事，在第五章的案例驗證中也呈現了此結果。

然而，目前資料庫中總共有 60 個區域，涵蓋了目前全球較可能發生液化的區域，若需預估資料庫範圍外之區域的土壤液化潛能，在預估上的結果可能會與本研究所選用之前人預測模型差不多。

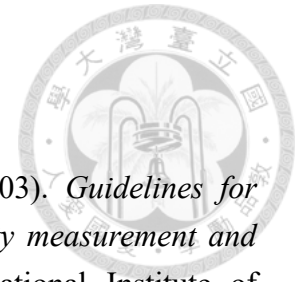


6.2 未來建議

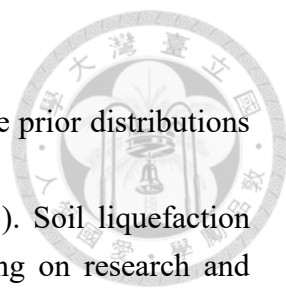
1. 目前資料庫中缺乏 V_{s1} 和 $(N_1)_{60}$ 、 q_{c1N} 的關係數據，若能將此關係補足，能讓資料庫更加完善，也能有效地增加 RHBM 學習參數間關係的能力。
2. 若能增加資料庫中更多區域和場址的土壤液化數據，能讓 RHBM 的預測能力更加準確。

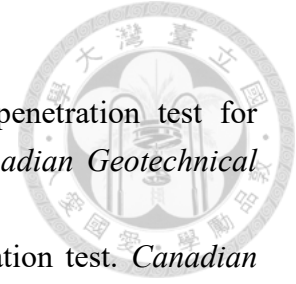


參考文獻



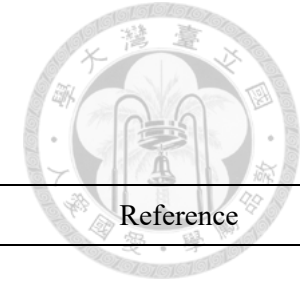
- Andrus, R. D., Chung, R. M., Juang, C. H., & Stokoe, K. (2003). *Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurement and simplified procedures*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Andrus, R. D., & Stokoe II, K. H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(11), 1015-1025.
- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. (1999). Liquefaction resistance based on shear wave velocity.
- Bolton Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., & Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical engineering*, 111(12), 1425-1445.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Report No. UCD/CGM.-14, 1*.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. (2016). CPT-based liquefaction triggering procedure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015065.
- Boulanger, R. W., Mejia, L. H., & Idriss, I. M. (1997). Liquefaction at moss landing during Loma Prieta earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 453-467.
- Ching, J., & Phoon, K.-K. (2014). Correlations among some clay parameters—the multivariate distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(6), 686-704.
- Ching, J., & Phoon, K.-K. (2015). Constructing multivariate distributions for soil parameters. *Risk and reliability in geotechnical engineering*, 3-76.
- Ching, J., & Phoon, K.-K. (2019). Constructing site-specific multivariate probability distribution model using Bayesian machine learning. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(1), 04018126.
- Ching, J., Wu, S., & Phoon, K.-K. (2021). Constructing quasi-site-specific multivariate probability distribution using hierarchical Bayesian model. *Journal of Engineering Mechanics*, 147(10), 04021069.
- Foti, S. (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*.
- Hoffman, M. D., & Gelman, A. (2014). The No-U-Turn sampler: adaptively setting path lengths in Hamiltonian Monte Carlo. *J. Mach. Learn. Res.*, 15(1), 1593-1623.
- Hu, J., & Liu, H. (2019). Bayesian network models for probabilistic evaluation of earthquake-induced liquefaction based on CPT and Vs databases. *Engineering*

- 
- Geology*, 254, 76-88.
- Huang, A., & Wand, M. P. (2013). Simple marginally noninformative prior distributions for covariance matrices.
- Hwang, J.-H., Khoshnevisan, S., Juang, C. H., & Lu, C.-C. (2021). Soil liquefaction potential evaluation—An update of the HBF method focusing on research and practice in Taiwan. *Engineering Geology*, 280, 105926.
- Idriss, I., & Boulanger, R. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. *Earthq. Eng. Res. Inst*, 160, 43.
- Iwasaki, T. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. Proc. of 2nd Int. National Conf. on Microzonation, 1978,
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D.-H., & Lin, P.-S. (2003). Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 66-80.
- Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A. D., Tanaka, Y., & Tokimatsu, K. (2013). Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), 407-419.
- Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R., Lodge, A., Nishio, S. y., & Coutinho, R. (1992). Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data. Proceedings of the 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Hamada, M. and O'Rourke, TD, eds,
- Ku, C.-S., & Juang, C. (2012). Liquefaction and cyclic softening potential of soils—a unified piezocone penetration testing-based approach. *Geotechnique*, 62(5), 457-461.
- Liao, S. S., Veneziano, D., & Whitman, R. V. (1988). Regression models for evaluating liquefaction probability. *Journal of Geotechnical engineering*, 114(4), 389-411.
- Liao, S. S., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical engineering*, 112(3), 373-377.
- Moss, R., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & Cetin, K. O. (2006). CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1032-1051.
- Obermeier, S. F. (1996). Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis— an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes.




- Engineering Geology*, 44(1-4), 1-76.
- Robertson, P., Woeller, D., & Finn, W. (1992). Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 686-695.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158.
- Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337-1355.
- Robertson, P. K., & Wride, C. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459.
- Shibata, T., & Teparaksa, W. (1988). Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests. *Soils and Foundations*, 28(2), 49-60.
- Skempton, A. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3), 425-447.
- Slifker, J. F., & Shapiro, S. S. (1980). The Johnson system: selection and parameter estimation. *Technometrics*, 22(2), 239-246.
- Stark, T. D., & Olson, S. M. (1995). Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of Geotechnical engineering*, 121(12), 856-869.
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56-74.
- Vos, J. (1982). The practical use of CPT in soil profiling. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-2, Amsterdam, May,
- Youd, T. L. (1984). Geologic effects-liquefaction and associated ground failure. *Proceedings of the Geologic and Hydraulic Hazards Training Program*, 210-232.
- Youd, T., Idriss, I., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.L., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313.
- 袁士翔.(2020). 以大數據分析黏土深開挖過程中的牆變形.國立臺灣大學. 臺北
- 李芯茹.(2022). 垂直載重下淺基礎行為的數據驅動預測.國立臺灣大學. 臺北
- 郭明杰.(2020). 土壤參數的大數據分析-著重於模數和靜止土壓力係數.國立臺灣大學. 臺北
- 游易宸.(2021). 基於全球資料庫的土壤動力參數估算.國立臺灣大學. 臺北
- 黃朋盛.(2022). 基於全球資料庫的飽和黏土滲透係數估算.國立臺灣大學. 臺北

附錄 I 「Liquefaction /6/2759」 資料庫



Country	Region	n	σ_v/σ'_v	$(N_1)_{60}$	q_{c1N}	I_c	V_{s1}	FC	Liq.	Reference
Taiwan	Changhua	180	1.09-2.1	2.1-15.36	3.06-66.83	1.87-3.54	161.82	4-98	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Chen et al. (2018) 3.Boulanger and Idriss (2014) 4.Ku et al. (2004) 5.Lai et al. (2004) 6.Huang et al. (2021) 7.Kayen et al. (2013) 8.NGL
		203	1.09-2.07	2.08-26.93	9.44-144.63	1.36-3.18	183.23	5-85	No	
	Chiayi	90	1.01-2	3.81-21.3	8.96-71.3	1.83-2.79	-	14-86	No	
	Nantou	65	1.03-1.94	2.85-26.98	6.91-81.48	1.8-3.17	171.45-205.76	0-97	Yes	
		11	1.19-1.85	24.01-	107.87-173.59	1.75-1.96	214.19	17-32	No	
	Taichung	92	1-1.87	3.4-25.61	9.47-58.91	1.95-3.07	142.92-218.5	9-68	Yes	
		79	1.09-1.93	4.69-23.69	13.34-168.46	1.8-2.91	133.03	8-97	No	
	Tainan	13	1.54-1.97	2.43-10.06	-	-	-	9-99	Yes	
		2	1.16-1.26	3.7-5.27	-	-	-	91-99	No	
	Taipei	7	1.04-1.56	3.81-22.75	-	-	-	17-61	Yes	
Yilan	5	1.89-2.51	-	-	-	155.22-190.66	50	No		
Yunlin	43	1.11-1.76	0.92-14.81	-	-	-	8-99	No		
	Aichi	24	1.11-2.11	1.9-15.13	-	-	100.42-202.55	4-30	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Boulanger and Idriss (2014) 3.Cetin et al. (2000)
		8	1.22-1.97	9.8-37	-	-	172.36	4-5	No	
	Akita	24	1.05-2.31	1.95-20.49	7.04-37.89	2.23-3.46	145.67-184.8	1-15	Yes	

Japan		11	1.11-2.04	11.21-	13.96-19.49	1.62-2.06	-	0-26	No	4.Huang et al. (2021) 5.Cetin et al. (2004) 6.Stark and Olson (1995) 7.Shibata and Teparaksa (1988) 8.Andrus et al. (2003) 9.Tokimatsu and Yoshimi (1983) 10.Kayen et al. (2013) 11.NGL
	Aomori	18	1.03-2.46	1.25-16.3	27.12-100.53	1.74-2.5	123.8-203.42	0-22	Yes	
		8	1.27-1.85	2.02-41.38	82.77-144.05	1.73-1.86	203.42	5	No	
	Chiba	2	1.54-1.79	-	19.5-83.49	1.89-2.87	189.18	-	Yes	
		3	1.36-2.33	4.75-8.25	9.99	3.21	-	13-27	No	
	Fukui	13	1.35-2	3.74-24.75	-	-	134.43-223.32	0-4	Yes	
		4	1.15-2	14-43.38	-	-	312.5-326.74	2-35	No	
	Gifu	4	1.38-1.94	13.88-	-	-	-	0-5	Yes	
	Hiroshima	5	1.51-1.97	-	-	-	146.37-179.88	-	Yes	
	Hokkaido	48	1.07-2.02	7.2-17.1	-	-	81.96-213.69	2-54	Yes	
		17	1.07-1.87	7.88-30.3	-	-	110.26-210.58	0-25	No	
	Hyogo	156	1-2.31	1.16-27.3	7.89-137.96	1.4-2.96	124.7-244.54	0-25	Yes	
		102	1.03-1.97	4.25-66.1	136.05-179.72	1.57-2.08	145.92-299.16	0-50	No	
	Ibaraki	1	1.72	2.79	10.99	2.97	239.05	-	Yes	
	Miyagi	46	1.04-2.21	1.01-24.63	6.4-9.31	3.29-3.31	110.56-271.88	0-60	Yes	
	44	1.03-1.98	1.01-32.13	-	-	116.32-172.76	0-60	No		
Niigata	29	1.18-2.46	4.25-13.88	21.97-68	2.07-2.68	122.6-160.28	0-10	Yes		

		16	1.08-1.87	8.46-43	99.86-166.62	1.83-2.01	163.47-171.15	0-8	No	
	Shizuoka	1	1.82	-	-	-	-	90	Yes	
	Tokyo	13	1.2-2.26	2.37-6.3	58.27	-	111.16-185.2	13-35	No	
	Tottori	4	1.61-1.84	4.72	-	-	100.42-130.33	-	Yes	
USA	Alameda	32	1.07-1.61	8.1-13.2	6.43-104.6	1.59-3.34	108.19-187.22	0-13	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Boulanger and Idriss (2014) 3.Cetin et al. (2000) 4.Huang et al. (2021) 5.Juang et al. (2003) 6.Toprak et al. (1999) 7.Stark and Olson (1995) 8.Shibata and Teparaksa (1988) 9.Andrus et al. (2003) 10.Tokimatsu and Yoshimi (1983) 11.Boulanger et al. (1997) 12.Kayen et al. (2013) 13.NGL
		7	1.06-1.55	42.6	87.47-111.69	1.59-2.22	207.92-222.96	7-10	No	
	Contra Costa	17	1.12-1.65	3.8-4.3	7.27-89.84	1.73-3.21	118.08-156.67	50-57	Yes	
		1	1.19	5.3	-	-	-	30	No	
	Custer County	35	1.13-1.69	-	84.04-84.58	2.07	115.27-217.7	2	Yes	
		6	1.09-1.52	-	-	-	266.8-329.66	6	No	
	Fremont County	5	1.04-1.7	-	69.72-99.62	1.51-2.37	216.7	20-30	Yes	
		1	1.62	-	-	-	233.35	-	No	
	Imperial	73	1-2.48	1.4-14.3	10.64-97.45	1.76-3.17	98.62-161.32	3-92	Yes	
		112	1-2.14	1.4-54	3.74-407.67	1.76-3.33	98.62-212.38	3-92	No	
	Kenai Peninsula	4	1.56-2.11	5.25-14.88	-	-	-	-	Yes	
	Los angeles	28	1-1.54	1.75-26	5.85-90.2	1.99-2.97	-	6-74	Yes	
		15	1.08-1.58	9.6-26	5.7-166	2.14-2.73	-	13-52	No	



	Monterey	103	1.01-1.8	2.8-24	6.43-89.44	1.78-3.32	124.9-183	2-41	Yes	
		61	1-1.77	4.15-41	19.77-182.76	1.49-2.87	124.5-184.53	3-47	No	
	San Francisco	33	1.15-1.85	7.6-7.63	11.32-73.1	2.03-3.15	110.63-176.07	2-24	Yes	
		14	1.03-1.79	11.8-31.3	38.68-204.05	1.36-2.13	110.63-210.66	2-13	No	
	Santa Clara	5	1.02-1.43	-	-	-	153.82-191.15	<5	Yes	
		11	1.07-1.56	3.5-21.3	46.41-68.05	2.02-2.21	153.92-191.15	7-40	No	
	Santa cruz	148	1-1.89	4.1-24	5.17-129.14	1.4-3.52	116.74-223.62	1-46	Yes	
		79	1-1.7	4.1-38	6.96-325.61	1.16-3.33	150.21-240.37	1-42	No	
	Sonoma Country	2	1.19-1.35	-	31.64-67.14	1.9-2.46	-	-	Yes	
	Valdez-Cordova	4	1.44-1.59	-	-	-	149.58-206.47	-	Yes	
		5	1.59	-	-	-	235.16-364.07	-	No	
	Ventura	8	1.08-1.39	10.5	13.29-105.12	1.95-3.06	142.57-170.59	10-37	Yes	
China	Chengdu	11	1.12-1.71	-	-	-	154-314	-	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Chen et al. (2018) 3.Boulanger and Idriss (2014) 4.Cetin et al. (2000) 5.Huang et al. (2021) 6.Cai et al. (2012) 7.Juang et al. (2003)
		42	1.03-1.94	-	-	-	180.5-435	-	No	
	Deyang	57	1.08-1.76	-	-	-	162-278.97	-	Yes	
		37	1.04-1.81	-	-	-	186-380.4	-	No	
	Mianyang	9	1.06-1.54	-	-	-	167.8-264.5	-	Yes	
		29	1.03-1.6	-	-	-	170.7-441.7	-	No	

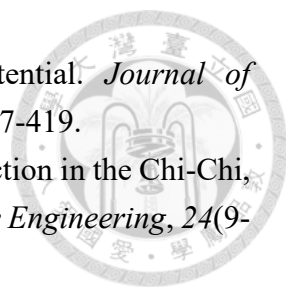
	Ngawa	3	1.16-1.32	-	-	-	277.7-320.2	-	Yes	8.Stark and Olson (1995) 9.Shibata and Teparaksa (1988) 10.Andrus et al. (2003) 11.Tokimatsu and Yoshimi (1983) 12.Zhou et al. (2020) 13.Cao et al. (2011) 14.Kayen et al. (2013) 15.NGL
		2	1.09	-	-	-	308.9-418.9	-	No	
	Panjin	2	1.96-1.99	8.2-11.1	-	-	-	5-67	Yes	
		1	1.49	10.96	-	-	-	-	No	
	Tangshan	77	1.02-2.2	8.7-24.92	10.2-151.83	1.75-3.24	84.46-320.61	2.5-75	Yes	
		44	1.03-2.17	20.39-	9.43-253.64	1.5-3.16	137.27-337.69	2-12	No	
	Tianjin	9	1.59-2.07	-	9.87-36.4	2.22-3.06	141.36-172.63	4.5	Yes	
		5	1.79-2.04	-	16.44-72.8	2.84	160.25-182.29	7.64	No	
	Yingkou	26	1.36-1.97	12.5-14.9	4.34-65.14	1.87-3.05	101.63-158.9	5-90	Yes	
		6	1.52-1.99	-	7.12-55.26	2.02-2.95	122.9-167.51	60-92	No	
New zealand	Auckland	3	1.39-1.54	-	79.22-89.85	1.78-1.89	157.46-169.58	5-14	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Boulanger and Idriss (2014) 3.Shen et al. (2016)
	Bay of plenty	25	1.3-2.12	-	6.49-138.4	1.35-3.35	-	1-35	Yes	
		10	1.04-2.07	-	48.91-215.7	1.47-2.18	-	1-15	No	
	Canterbury	59	1.11-1.85	-	33.26-204.73	1.38-2.18	136.63-221.2	1-41	Yes	
		11	1.11-1.84	-	33.26-153.16	1.63-2.01	-	-	No	
	West coast	4	1-1.9	-	13.78-32.98	2.17-2.45	-	16-18	Yes	
Turkey	Golcuk	3	1.12-1.79	16.5	34.93-122.57	1.85-3.01	-	11-12	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Boulanger and Idriss (2014)
		2	1.14-1.2	18.1	119.37	1.89	-	12-13	No	

	Kocaeli	9	1.32-1.84	6.8	11.54-43.1	2.16-3.28	-	5-16	Yes	3.Kayen et al. (2013) 4.NGL
	Sakarya	40	1.03-1.93	4-31.69	10.47-82.1	1.82-3.19	51.16-351.39	2-90	Yes	
		1	1.63	19	-	-	-	67	No	
	Yalova	2	1.63-1.82	14.4	88.67	1.75	-	9-19	Yes	
Mexico	Mexicali	7	1.08-1.48	7.97	8.44-51.77	1.79-3.13	-	-	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Boulanger and Idriss (2014) 3.NGL
		1	1.45	-	55.26	2.31	-	-	No	
Argentina	San Juan	5	1.02-1.58	3.56-7.6	-	-	-	20-50	Yes	1.Cetin et al. (2000) 2.NGL
		5	1.04-1.77	5.98-14.5	-	-	-	3-4	No	
Canada	Ferland	1	1.43	-	34.77	-	-	15	Yes	1.Stark and Olson (1995)
Greece	Achaia	2	2.06	-	-	-	191.62-194.03	-	Yes	1.Kayen et al. (2013)
Guatemala	Amatitlan	2	2.07-2.58	4.6-12.25	-	-	-	3	Yes	1.Cetin et al. (2000) 2.Tokimatsu and Yoshimi (1983)
		2	1.61-2.07	11.63-14.1	-	-	-	3	No	
Philippine	Luzon	1	1.62	14	-	-	-	19	Yes	1.Cetin et al. (2000) 2.Huang et al. (2021)
		2	1.39-1.43	26.2-42.82	-	-	-	19	No	
Romania	Vrancea	1	1.82	-	15.3	-	-	-	Yes	1.Moss et al. (2006) 2.Shibata and Teparaksa (1988)
		1	1.85	-	35.47	2.11	-	-	No	

資料庫參考文獻



- Andrus, R. D., Chung, R. M., Juang, C. H., & Stokoe, K. (2003). *Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurement and simplified procedures*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Report No. UCD/CGM.-14, 1*.
- Boulanger, R. W., Mejia, L. H., & Idriss, I. M. (1997). Liquefaction at moss landing during Loma Prieta earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 453-467.
- Cai, G., Liu, S., & Puppala, A. J. (2012). Liquefaction assessments using seismic piezocone penetration (SCPTU) test investigations in Tangshan region in China. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 141-150.
- Cao, Z., Youd, T. L., & Yuan, X. (2011). Gravelly soils that liquefied during 2008 Wenchuan, China earthquake, Ms= 8.0. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(8), 1132-1143.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr, L. F., Kayen, R. E., & Moss, R. E. (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314-1340.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Moss, R. E., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr, L. F., & Kayen, R. E. (2000). Field case histories for SPT-based in situ liquefaction potential evaluation. *Geotechnical engineering research report No. UCB/GT-2000/09*.
- Chen, L., Yuan, X., Cao, Z., Sun, R., Wang, W., & Liu, H. (2018). Characteristics and triggering conditions for naturally deposited gravelly soils that liquefied following the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China. *Earthquake Spectra*, 34(3), 1091-1111.
- Hwang, J.-H., Khoshnevisan, S., Juang, C. H., & Lu, C.-C. (2021). Soil liquefaction potential evaluation—An update of the HBF method focusing on research and practice in Taiwan. *Engineering Geology*, 280, 105926.
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D.-H., & Lin, P.-S. (2003). Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(1), 66-80.
- Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A. D., Tanaka, Y., & Tokimatsu, K. (2013). Shear-wave velocity-based probabilistic and

- 
- deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), 407-419.
- Ku, C.-S., Lee, D.-H., & Wu, J.-H. (2004). Evaluation of soil liquefaction in the Chi-Chi, Taiwan earthquake using CPT. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9-10), 659-673.
- Lai, S.-Y., Hsu, S.-C., & Hsieh, M.-J. (2004). Discriminant model for evaluating soil liquefaction potential using cone penetration test data. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1271-1282.
- Moss, R., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & Cetin, K. O. (2006). CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1032-1051.
- Shen, M., Chen, Q., Zhang, J., Gong, W., & Hsein Juang, C. (2016). Predicting liquefaction probability based on shear wave velocity: an update. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 1199-1214.
- Shibata, T., & Teparaksa, W. (1988). Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests. *Soils and Foundations*, 28(2), 49-60.
- Stark, T. D., & Olson, S. M. (1995). Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of Geotechnical engineering*, 121(12), 856-869.
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56-74.
- Toprak, S., Holzer, T., Bennett, M. J., & Tinsley III, J. C. (1999). CPT-and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction. Proc., 7th US–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction.
- Zhou, Y.-G., Xia, P., Ling, D.-S., & Chen, Y.-M. (2020). Datasets for liquefaction case studies of gravelly soils during the 2008 Wenchuan earthquake. *Data in Brief*, 32, 106308.

附錄 II 口試問答紀錄



提問口試委員	問題與建議	答覆
劉家男教授	Q1. 為甚麼要從原本的 HBM model 變成使用 RHBm model。	因為原本的架構中 model factor (m) 的不確定性會很高，沒有辦法知道確切的值，因此我們不希望土壤參數與 m 綁在一起。
	Q2. 使用不同方法，像是 SPT、CPT 和 Vs，算出來的 model factor 會不會有所不同。	會有所不同，但應該不會有太大的差距。
	Q3. 資料庫的數據中怎麼知道這些資料點有沒有液化。	在文獻中的資料大多都是該鑽孔的 critical layer，得到最有可能液化的深度後再根據現地情形判斷有沒有液化。
王瑞斌教授	Q1. 解釋一次甚麼是 Generic model。	Generic model 沒有分群的概念，沒有辦法學習到每個區域的特性，是全球共用一個 model factor。
	Q2. 聽到關鍵字是 model 在 learning，並計算 model 的 parameter，計算這些 parameter 的目的是甚麼。	目標是學習掌控群體行為的四個超參數和關係矩陣 R，可以運用這些參數去模擬資料庫中沒有

		的區域特性。
卿建業教授	Q1. 你目前大概驗證了多少個 site。	我口試前看 generic model 能計算安全係數的只有 100 多筆數據，可能沒有辦法用這 100 多筆代表全部的 800 筆數據，準確率的話 generic 準確率大概在 75%，RHBM 準確率大概在 80%。