



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's Thesis

基於層級貝葉斯模型之 CPT 土壤分類研究

CPT-Based Soil Classification Using Hierarchical Bayesian Model

李曷

Xiang Li

指導教授：卿建業 博士

Advisor : Jianye Ching, Ph. D.

中華民國 114 年 7 月

July 2025



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE

基於層級貝葉斯模型之CPT土壤分類研究

CPT-Based Soil Classification Using Hierarchical Bayesian Model

本論文係李 昌 (R12521121) 在國立臺灣大學土木工程學系大地工程組
完成之碩士學位論文，於民國114年07月18日承下列考試委員審查通過及口試
及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Civil Engineering Geotechnical Engineering
on 07,18,2025 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Xiang Li
(R12521121) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

卿建業

(指導教授 Advisor)

卿建業

林志平

林志平

王瑞斌

王瑞斌

系主任 Director :

葛宇甯

葛宇甯

誌謝



求學生涯應該是最後的兩年，這期間我受到許多人的幫助和支持，讓我可以完成我的碩士論文。首要感謝的絕對是我的父母，他們無條件的支持，使我可以無後顧之憂的在甚麼多很貴的台北完成學歷。還有我的指導教授卿建業老師，在學期間從老師身上不只學到可靠度工程，更多的是一位學者的應有的態度。同時對我研究的指導，以及品質的追求，使得這本論文可以順利完成。

而在台大的兩年，同齡的夥伴們形形色色。首先特別感謝卿門的丫祐、許哥和欣儀，從暑假遠端上可靠度，到一起討論研究、喝酒，最後口試結束，你們都是最扛的夥伴。謝謝葛門的筱丰、靜穎常常一起加班；Gino 一起爐石、皇室、找大家看棒球；小汪在旁邊搞笑；琮洧國防課的深聊。謝謝楊門 An 的麥卡倫；三次去花蓮琬潔的招待；津津的活力跟做飯給我吃。謝謝郭門很常搞笑；特別大元，常常找大家出去玩，還會剪片，想小遊戲帶動氣氛，每次有他的局都能玩得特開心。最後，感謝從海大到台大一路走來的張怡茹。認識五年，開始熟兩年半，到這一年變成超好的朋友。一起喝酒，聊了很多八卦跟祕密。讓我的研究所生涯特別刺激。而還有很多大地組（體育組）的夥伴沒能提及到的，也感謝大家的陪伴。

最後的最後，不忘感謝本研究的核心人物們，湯瑪斯·貝葉斯 (Thomas Bayes) 和 彼得·K·羅伯森 (Peter K. Robertson) 以及我的 Matlab 老師 ChatGPT。

摘要



現今常見的土壤分類系統為統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS)。然而在現地實務中，受限於經費與工期，往往僅能於特定深度土壤取樣分類，難以獲得連續的地層資訊。近年來，圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT) 因具備高度重現性與近乎連續的量測能力，逐漸成為現地調查的主流手段。CPT 的一項重要應用為土壤分類，其中又以 Robertson (2009) 所提出的正規土壤行為類別 (normalized soil behavior type, SBTn) 最具代表性。該方法可實現沿深度方向的連續土壤分類，有效降低 USCS 因樣本稀少所帶來的不確定性。

在大地工程中，另一項不可忽視的挑戰為「場址獨特性」。SBTn 方法是依據大量歷史資料迴歸所建構的通用模型，雖於多數場址中表現良好，然而在特定場址上可能因場址特性差異而降低其適用性。此外，場址特定資料通常相當有限，使得建立之場址特定模型常伴隨較高的統計不確定性。

為解決上述問題，本研究首先建立一套名為「CPT-USCS/8/4182」之資料庫，整合來自全球 506 個場址共 4182 筆 CPT 試驗與 USCS 土壤分類對應資料，作為後續模型訓練之基礎。此外，本研究提出一套改良之層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM) 架構，稱為 USCS-HBM，用以處理 CPT 土壤分類問題，並學習資料庫中各場址的場址特徵。

USCS-HBM 經由資料庫訓練後，能為任意目標場址產生對應的先驗模型，該模型可進一步融合目標場址的少量觀測資料進行更新，進而推估出準場址特定模型。透過本研究所提出之 USCS-HBM 架構，能有效處理 CPT 土壤分類中「場址獨特性」與「資料稀疏性」所帶來的挑戰，提升分類準確性與模型實務應用性。

關鍵字：土壤分類、圓錐貫入系統、土壤行為類別、全球資料庫、層級貝葉斯模型

Abstract

The Unified Soil Classification System (USCS) is one of the most commonly used soil classification methods. However, in practice, due to budget and time limits, soil sampling is often done only at specific depths. In recent years, the cone penetration test (CPT) has become a popular site investigation method because of its high repeatability and nearly continuous measurements. One key application of CPT is soil classification, with the normalized soil behavior type (SBT_n) (Robertson 2009) being widely used. This method allows continuous soil classification with depth and helps reduce the uncertainty of USCS caused by limited sampling.

A key challenge that should not be overlooked in geotechnical engineering is site-uniqueness. The SBT_n method is a generic model constructed through regression analysis of extensive historical data. While it performs well in most global site, its applicability may be reduced at certain sites due to differences in site characteristics. Moreover, site-specific data are often limited, which introduces a higher degree of statistical uncertainty when developing site-specific models.

To address these issues, this study develops a global database, CPT-USCS/8/4182, containing 4,182 CPT-USCS data pairs from 506 sites. In addition, this study proposes an improved hierarchical Bayesian model (HBM) framework, referred to as USCS-HBM, to address CPT-based soil classification and to learn site-specific characteristics from the database. The trained model can generate a prior for any target site and update it with sparse target-site data to produce a quasi-site-specific model. This approach improves CPT-based soil classification under conditions of site uniqueness and the practical challenge of sparse target-site data.

Keywords: soil classification, cone penetration test, soil behavior type, global database, hierarchical Bayesian model

目次



口試委員會審定書	I
誌謝	II
摘要	III
Abstract.....	IV
目次	V
圖次	VII
表次	IX
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究方法	2
1.3 研究流程	3
1.4 本文架構	4
第 2 章 文獻回顧	5
2.1 土壤的基本介紹與分類系統	5
2.1.1 粒徑分析與分布	5
2.1.2 黏性土壤的參數	6
2.1.3 統一土壤分類系統	6
2.2 基於 CPT 的土壤分類系統	9
2.2.1 土壤行為	9
2.2.2 圓錐貫入試驗 (Cone penetration test, CPT)	10
2.2.3 正規土壤行為類別 (Normalized soil behavior type, SBTn).....	12
2.3 層級貝葉斯模型 (Hierarchical Bayesian model, HBM)	15
2.3.1 HBM 架構	17
2.3.2 學習階段-Gibbs 採樣法 (Gibbs Sampler)	22
2.3.3 推論階段	25
第 3 章 資料庫建置	28
3.1 CPT-USCS/8/4182.....	28
3.1.1 資料類型	28

3.1.2 資料庫規模、分類與統計	29
3.1.3 參數與土壤類別的關聯性	30
3.2 CPT-USCS/3/2017.....	37
3.2.1 資料庫概要	37
3.2.2 資料特性與分類對應關係分析	37
第 4 章 USCS-HBM.....	41
4.1 USCS-HBM 架構.....	41
4.2 學習階段	47
4.3 推論階段	50
4.4 學習階段成果	54
第 5 章 真實案例與交叉驗證	57
5.1 真實案例驗證	57
5.1.1 場址介紹	57
5.1.2 驗證方式	59
5.1.3 驗證結果	61
5.2 Leave-one-site-out 交叉驗證	73
第 6 章 結論與未來建議	76
6.1 結論	76
6.2 未來建議	76
參考文獻	78
附錄 A 「CPT-USCS/8/4182」資料庫	82
資料庫參考文獻	118
附錄 B 「CPT-USCS/8/4182」統計資訊	134

圖次



圖 1.1 兩個場址的 Q_{tn} - F_r 資料: (a)員林場址; (b)蒙特雷灣場址。.....	2
圖 2.1 塑性圖。(ASTM International 2011).....	7
圖 2.2 圓錐貫入儀示意圖.....	11
圖 2.3 Robertson (2009) 所提出之 SBTn 圖。.....	13
圖 2.4 土壤行為類別指數 I_c 之等值線於 SBTn 圖上。(Robertson 2009).....	14
圖 2.5 不同場址特定模型的示意圖。(Ching et al. 2021).....	16
圖 2.6 HBM 架構示意圖。(Ching et al. 2021).....	20
圖 3.1 「CPT-USCS/8/4182」中細粒料土壤於塑性圖上的分布。.....	33
圖 3.2 「CPT-USCS/8/4182」中 FC - D_{50} 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	33
圖 3.3 「CPT-USCS/8/4182」資料中 FC 與 I_c 對應關係及其與 Robertson and Wride (1998) 所定義之 SBTn 分類區域之對照。.....	34
圖 3.4 「CPT-USCS/8/4182」中 FC - Q_{tn} 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	35
圖 3.5 「CPT-USCS/8/4182」中 FC - F_r 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	35
圖 3.6 「CPT-USCS/8/4182」中 D_{50} - Q_{tn} 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	36
圖 3.7 「CPT-USCS/8/4182」中 D_{50} - F_r 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	36
圖 3.8 「CPT-USCS/8/4182」中 Q_{tn} - F_r 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。.....	39
圖 3.9 Q_{tn} - F_r 圖中 USCS 土壤類別與 Robertson SBTn 區域之對比分析圖.....	40
圖 4.1 USCS-HBM 的模型架構.....	46
圖 4.2 各 USCS 類別預測機率 $P_{pred}^{(1:5)}$ 在 SBTn 圖中之先驗分布。.....	55
圖 4.3 各 USCS 類別在假設場址中之橢圓分布。.....	56
圖 5.1 威尼斯潟湖與 Malamocco 場址位置。(Ricceri et al. 2002).....	58
圖 5.2 Malamocco 場址的現地調查資料。(Ricceri et al. 2002).....	58
圖 5.3 Malamocco 場址的資料與 Robertson SBTn 圖之比對。(Jung et al. 2008)....	59
圖 5.4 $n_L = 1$ 時, USCS 類別預測機率示意圖。.....	64
圖 5.5 $n_L = 1$ 時, 後驗參數橢圓示意圖。.....	65
圖 5.6 $n_L = 3$ 時, USCS 類別預測機率示意圖。.....	66
圖 5.7 $n_L = 3$ 時, 後驗參數橢圓示意圖。.....	67

圖 5.8 $n_L = 7$ 時，USCS 類別預測機率示意圖。	68
圖 5.9 $n_L = 7$ 時，後驗參數橢圓示意圖。	69
圖 5.10 USCS 分類機率 $P_{\text{pred}}^{(k)}$ 之預測結果，對應 $n_L = 0、1、3$ 及 7 四種情境。	70
圖 5.11 後驗參數橢圓，對應 $n_L = 0、1、3$ 及 7 四種情境。	71
圖 5.12 USCS 類別預測機率隨深度變化，對應 $n_L = 0、1、3$ 及 7 四種情境。	72
圖 5.13 Leave-one-site-out 交叉驗證後，不同已知紀錄數量下，USCS-HBM 與 SBT 指數預測之 Brier score 比較。	74
圖 5.14 Leave-one-site-out 交叉驗證後，不同已知紀錄數量下，USCS-HBM 與 SBT 指數預測之正確預測率比較。	75

表次



表 2.1 土壤粒徑分類。(Kulhawy and Mayne 1990).....	6
表 2.2 土壤分類表。(ASTM International 2011).....	8
表 2.3 土壤行為類別分類。(Robertson and Wride 1998)	14
表 2.4 超參數之共軛先驗及後驗。(Ching et al. 2021).....	21
表 3.1 「CPT-USCS/8/4182」中具雙變量資訊的紀錄點（場址）數量。.....	31
表 3.2 「CPT-USCS/8/4182」中在通用層級下的統計資訊。.....	32
表 5.1 不同 I_c 值對應的 USCS 類別預測機率。.....	61
表 5.2 不同已知紀錄點情境下 USCS-HBM 與 SBT 指數的預測表現。.....	63

第 1 章 緒論



1.1 研究動機與目的

土壤分類在大地工程領域中扮演很重要的角色，因為不同類型的土壤在強度、滲透性和壓縮性等工程性質上存在顯著差異，這些特性直接影響基礎工程的設計和施工步驟。現今的土壤分類法大多根據土壤的物理性質，如粒徑分佈和塑性，來進行分類，當中最廣為人知的方法為「統一土壤分類系統」(Unified Soil Classification System, USCS)。然而現地實務中，考量到施工成本與工期，往往僅於特定幾個深度進行取樣分類，難以獲得連續的地層資訊，導致結果存在較大不確定性。

圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT) 因具備良好的經濟效益，且可提供快速、近乎連續且具高度重現性的量測紀錄，已在近年逐漸成為現地調查中廣泛應用的工具。然而，CPT 的一項主要限制在於無法直接取得土樣，因此無法依據粒徑分布進行傳統的土壤分類。儘管如此，過去許多研究 (Begemann 1965; Douglas and Olsen 1981; Robertson et al. 1986) 指出，CPT 仍可透過土壤的力學性質進行土壤分類。其中，最具代表性的方法為 Robertson (1990) 所提出的「土壤行為類別」(soil behavior type, SBT)，並於 Robertson (2009) 中進一步修正與標準化為「正規土壤行為類別」(normalized soil behavior type, SBTn)。透過此方法，能有效降低因樣本稀缺所導致的 USCS 土壤分類不確定性，進而提升工程師對場址土層特性整體的理解與設計的可靠性。

然而，在大地工程領域中，一項不可忽視的挑戰是場址獨特性 (site uniqueness)。過去的研究便曾指出，Robertson 所提出的 SBTn 圖雖為通用模型，在某些場址可能無法準確對應實際土壤類別 (Jung et al. 2008)。圖 1.1 蒐集兩個不同場址的資料以說明此問題，分別來自臺灣彰化員林地區 (Moss 2003) 與美國加州蒙特雷灣 (Bennett and Tinsley III 1995)。結果發現：員林場址的 USCS 土壤分類與 SBTn 圖之分類結果良好，但蒙特雷灣場址則顯示出明顯偏差，大部分被 USCS 判定為黏土的樣本，落於 SBTn 圖中對應粉土混合區的位置，顯示通用模型在不同地質條件下的適用性可能受限。

因此，本研究目標在於突破傳統 CPT 分類方法無法反映場址特性的限制，並建立一套具備高調整性與預測效能的 CPT-USCS 分類模型，以提升分類的準確度與實用性。

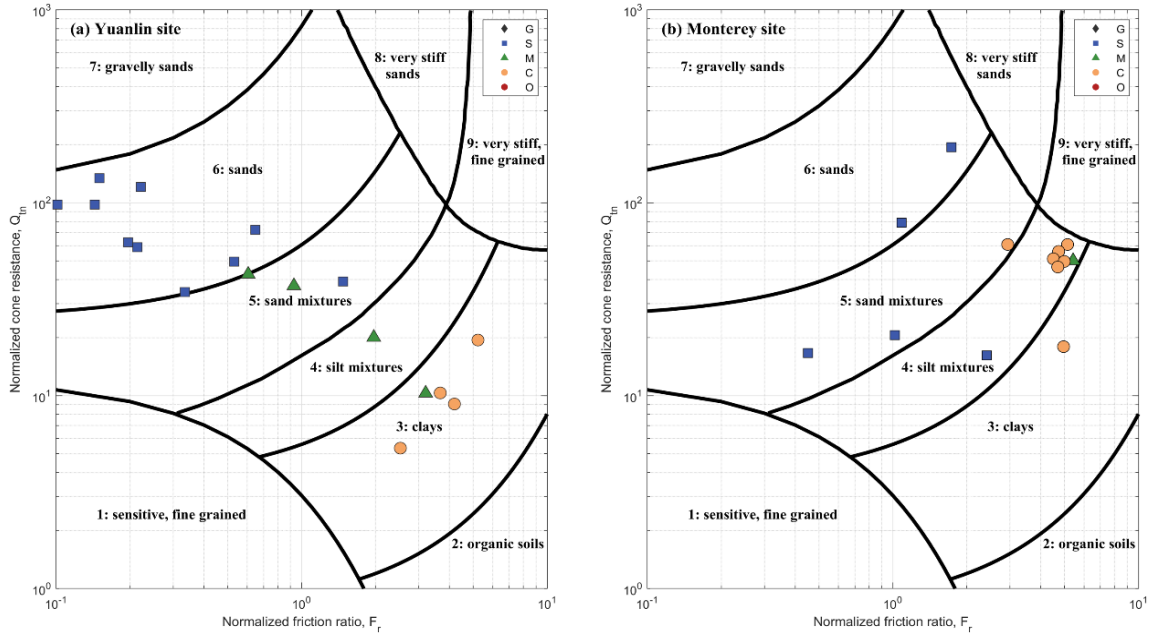


圖 1.1 兩個場址的 Q_{tn} - F_r 資料: (a)員林場址; (b)蒙特雷灣場址。

1.2 研究方法

為建立一套可處理場址獨特性的土壤分類模型，本研究首先蒐集並整合過去文獻與期刊中，來自全球各地場址的土壤分類資料，涵蓋其對應的 CPT 試驗參數與 USCS 分類結果。透過篩選與整合，最終建立一筆包含 4182 筆資料與多個場址的綜合性資料庫，命名為「CPT-USCS/8/4182」，作為模型建構與學習的依據。

Ching et al. (2021) 提出層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM)，可用以處理多變量且具場址特定性的土壤參數。在 HBM 架構中，資料庫中每一場址的資料皆可建構其獨特的場址特定模型，並由同一組超參數 (hyper-parameters) 所共同控制。這些超參數會根據資料庫進行更新，藉以學習各場址的潛在特徵，並進一步建立用於目標場址之先驗模型 (prior model)。該先驗模型可結合目標場址的觀測數據，進一步更新為後驗模型 (posterior model)。由於該模型同時結合資料庫的整體資訊與目標場址的零星紀錄，因此被視為一種準場址特定模型 (quasi-site-specific model)。

然而，Ching et al. (2021) 所提出之 HBM 僅適用於土壤或岩石工程參數的推估，並不適用於土壤類型之預測。因此，本研究提出一套改良後之分層貝葉斯模型，稱為 USCS-HBM，可應用於不同類型土壤之分類，並實現基於 CPT 數據的準場址特定土壤類型預測。



1.3 研究流程

本研究整體流程可分為以下四個主要階段：

1. 資料庫建立：從全球具代表性的期刊和地質調查報告中蒐集 CPT 與 USCS 土壤分類資料，建立「CPT-USCS/8/4182」資料庫，作為模型建構與驗證基礎。
2. 模型建構：在 Ching et al. (2021) 提出的 HBM 架構下，發展出適用於土壤分類任務的 USCS-HBM 模型。為提升模型運算效率，特別設計具封閉形式之共軛先驗結構，使模型可於 Gibbs 採樣過程中進行有效更新。
3. 模型訓練與學習：利用資料庫中多個場址的紀錄，對模型之超參數進行訓練，學習全球各地 USCS 類別與 CPT 特性的潛在關聯，建立通用的先驗模型。
4. 模型驗證：透過真實案例分析與交叉驗證，評估 USCS-HBM 在不同已知記錄點條件下的預測能力，並比較其正確預測率與 Brier Score，驗證模型的場址適應性與推論穩定性。



1.4 本文架構

本文一共分成六章節，各章主要內容如下：

第一章 緒論

闡述本研究之研究背景、動機、目的與研究流程，以及論文架構。

第二章 文獻回顧

綜述統一土壤分類系統及其基礎理論，探討以圓錐貫入試驗為基礎之土壤分類方法，並回顧層級貝葉斯模型於處理場址特性上的應用與潛力，作為後續模型發展之理論基礎。

第三章 資料庫建置

詳細說明本研究資料庫的建置方式，並介紹資料庫的規模以及統計量，並探討各參數間之相關性與潛在關聯。

第四章 USCS-HBM

說明如何建立可預測土壤類別的 USCS-HBM，模型架構以及分析方式。

第五章 真實案例與交叉驗證

應用所提出之 USCS-HBM 真實場址案例，觀察在不同已知記錄的情境下，以正確預測率及 Brier score 評估模型的預測能力。再透過交叉驗證全面評估模型的預測穩定性。

第六章 結論與未來建議

總結本研究之成果與主要發現，評估所提模型的優勢與限制，並針對未來研究方向與資料庫擴展提出具體建議。

第 2 章 文獻回顧



為了建立一套能夠處理場址獨特性，且基於圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT) 數據的土壤分類系統，本章將回顧相關的前人研究。內容將依序介紹目前最廣泛使用的土壤分類系統——統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS)，包括其所使用的土壤參數與分類邏輯。接著，說明與 CPT 資料相關的土壤分類方法，其中最具代表性的為 Robertson (2009) 所提出之正規土壤行為類別 (normalized soil behavior type, SBTn)，包含其分類依據及相關參數計算方式。最後，重點介紹 Ching et al. (2021) 所提出的層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM)，該模型具備處理場址獨特性的能力，為本研究的重要基礎。

2.1 土壤的基本介紹與分類系統

在進行任何大地工程設計之前，首先必須對該場址的土壤進行充分的了解與掌握。土壤是一個相當複雜的工程材料，其性質受成因、礦物組成、結構特徵以及環境條件等多種因素影響。因此，了解其基本的性質有助於妥當地進行後續的工程設計。土壤分類系統，提供了一套標準化的框架，用以將性質相近的土壤歸類於相同類別，幫助工程師在設計與施工過程中能有一致的認知。本小節將介紹土壤的基本工程性質，並介紹目前最具有代表性的土壤分類系統——統一土壤分類系統，以作為後續討論的基礎。

2.1.1 粒徑分析與分布

粒徑分析在描述土壤基本性質時扮演著極為重要的角色 (Kulhawy and Mayne 1990)。一般而言，粒徑大於 75 微米的土壤被歸類為粗粒料，通常透過篩分析 (sieve analysis) 進行測定；粒徑小於 75 微米的土壤則歸類為細粒料，常使用比重計分析 (hydrometer analysis) 來加以測定，如表 2.1 所示。

藉由粒徑分布曲線，可獲得多項指標參數，包括： D_{60} (樣本中 60% 質量的顆粒粒徑小於此值)、 D_{50} (中位粒徑，即樣本中 50% 質量的顆粒粒徑小於此值)、 D_{10} (有效粒徑，即樣本中 10% 質量的顆粒粒徑小於此值)，以及均勻係數 C_u (定義為 D_{60} 與 D_{10} 之比，即 $C_u = D_{60} / D_{10}$)。一般而言， C_u 值越高，代表土壤級配越佳，粒徑分布亦較為均勻，進而有助於提升土壤之工程性質。



2.1.2 黏性土壤的參數

黏性土壤指的是以黏土與具塑性的粉土等細粒料為主的土壤類型 (Kulhawy and Mayne 1990)。其相對稠性 (consistency) 通常可藉由數個重要的參數加以描述，這些參數多以土壤在特定狀態下的含水量為基礎，反映土壤塑性行為與狀態變化。不同稠性的狀態通常以阿太保限度 (Atterberg limit) 來描述，常見的參數包括：現地自然含水量 (w_n)、液性限度 (liquid limit, LL)、塑性限度 (plastic limit, PL)、塑性指數 (plasticity index, PI)、和液性指數 (liquidity index, LI)。

當土壤的液性限度大於 50% 時，即可被歸類為高塑性土壤。此外，若塑性指數大於 25 ~ 30，則該土壤可能會出現低強度、高壓縮性，以及高收縮或膨脹潛勢，進而造成工程問題。

表 2.1 土壤粒徑分類。(Kulhawy and Mayne 1990)

Broad Group	Name	Size Limits	
		ASTM sieve Number	mm
Coarse-Grained	Boulder	> 12 in	> 305
	Cobble	12 in to 3 in	305 to 76
	Coarse gravel	3 in to 3/4 in	76 to 19
	Fine gravel	3/4 in to No. 4 sieve	19 to 4.75
	Coarse sand	No. 4 to No. 10 sieve	4.75 to 2.0
	Medium sand	No. 10 to No. 40 sieve	2.0 to 0.42
	Fine sand	No. 40 to No. 200 sieve	0.42 to 0.075
Fine-Grained	Silt and/or clay	< No. 200 sieve	< 0.075

2.1.3 統一土壤分類系統

統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS) (ASTM International 2011) 是目前工程界最常使用之土壤分類系統之一。該系統主要依據擾動或重塑土壤樣本之粒徑分析與阿太保限度進行分類，反映其物理性質。

USCS 將土壤大致劃分為兩大類：粗粒料 (包括砂土與礫石) 與細粒料 (包括黏土、粉土及有機土)。當留在 200 號篩 (粒徑大於 0.075 mm) 上的顆粒質量占總重超過 50% 時，該土壤被歸類為粗粒料，並可依據粒徑分布特性及細粒料含量進一步細分；反之，若通過 200 號篩 (粒徑小於 0.075 mm) 的顆粒質量占比超過 50%，

則被歸類為細粒料，並依其阿太保限度在塑性圖上區域（圖 2.1）進行進一步分類。
整體分類步驟如表 2.2 所示。

儘管 USCS 是依據土壤的物理性質進行分類，根據過去的現地經驗，主要土壤類別的典型工程行為仍可概略描述如下：粗粒料土壤通常具備高強度、低可壓縮性及高滲透率；相較之下，細粒料土壤則多呈現中等至低強度、中等至高可壓縮性及低滲透率的特性。

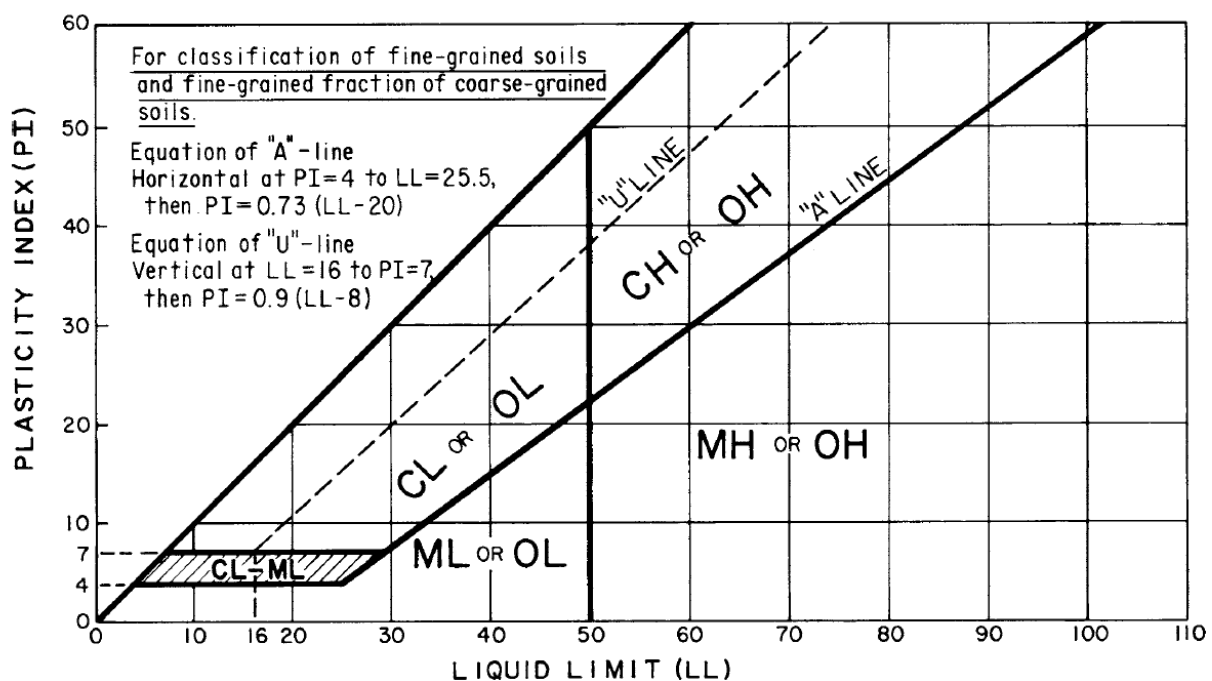
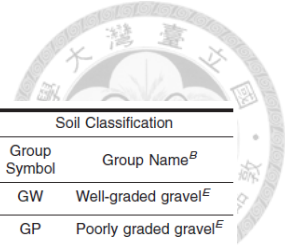


圖 2.1 塑性圖。(ASTM International 2011)

表 2.2 土壤分類表。(ASTM International 2011)



Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A				Soil Classification		
				Group Symbol	Group Name ^B	
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels (More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve)	Clean Gravels (Less than 5 % fines ^C)	$Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	GW	Well-graded gravel ^E	
			$Cu < 4$ and/or [$Cc < 1$ or $Cc > 3$] ^D	GP	Poorly graded gravel ^E	
	More than 50 % retained on No. 200 sieve	Gravels with Fines (More than 12 % fines ^C)	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel ^{E,F,G}	
			Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel ^{E,F,G}	
		Sands (50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve)	$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^D$	SW	Well-graded sand ^I	
			$Cu < 6$ and/or [$Cc < 1$ or $Cc > 3$] ^D	SP	Poorly graded sand ^I	
	FINE-GRAINED SOILS	Sands with Fines (More than 12 % fines ^H)	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand ^{F,G,I}	
			Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand ^{F,G,I}	
		Silt and Clays	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line ^J	CL	Lean clay ^{K,L,M}
				$PI < 4$ or plots below "A" line ^J	ML	Silt ^{K,L,M}
50 % or more passes the No. 200 sieve		organic	$\frac{Liquid\ limit - oven\ dried}{Liquid\ limit - not\ dried} < 0.75$	OL	Organic clay ^{K,L,M,N} Organic silt ^{K,L,M,O}	
	Silt and Clays	inorganic	PI plots on or above "A" line	CH	Fat clay ^{K,L,M}	
			PI plots below "A" line	MH	Elastic silt ^{K,L,M}	
		organic	$\frac{Liquid\ limit - oven\ dried}{Liquid\ limit - not\ dried} < 0.75$	OH	Organic clay ^{K,L,M,P} Organic silt ^{K,L,M,Q}	
HIGHLY ORGANIC SOILS		Primarily organic matter, dark in color, and organic odor		PT	Peat	

^A Based on the material passing the 3-in. (75-mm) sieve.

^B If field sample contained cobbles or boulders, or both, add "with cobbles or boulders, or both" to group name.

^C Gravels with 5 to 12 % fines require dual symbols:

GW-GM well-graded gravel with silt
GW-GC well-graded gravel with clay
GP-GM poorly graded gravel with silt
GP-GC poorly graded gravel with clay

^D $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$

^E If soil contains ≥ 15 % sand, add "with sand" to group name.

^F If fines classify as CL-ML, use dual symbol GC-GM, or SC-SM.

^G If fines are organic, add "with organic fines" to group name.

^H Sands with 5 to 12 % fines require dual symbols:

SW-SM well-graded sand with silt
SW-SC well-graded sand with clay
SP-SM poorly graded sand with silt
SP-SC poorly graded sand with clay

^I If soil contains ≥ 15 % gravel, add "with gravel" to group name.

^J If Atterberg limits plot in hatched area, soil is a CL-ML, silty clay.

^K If soil contains 15 to < 30 % plus No. 200, add "with sand" or "with gravel," whichever is predominant.

^L If soil contains ≥ 30 % plus No. 200, predominantly sand, add "sand" to group name.

^M If soil contains ≥ 30 % plus No. 200, predominantly gravel, add "gravelly" to group name.

^N $PI \geq 4$ and plots on or above "A" line.

^O $PI < 4$ or plots below "A" line.

^P PI plots on or above "A" line.

^Q PI plots below "A" line.

2.2 基於 CPT 的土壤分類系統

儘管 USCS 在實務中被廣泛應用，其仍存在若干限制與爭議。實際現地土壤之工程行為受多種因素影響，單純依據擾動或重塑樣本的物理性質進行分類，往往難以準確反映其自然狀態下之行為特性。此外，由於取樣困難與深度限制，傳統土壤試驗通常僅針對特定深度進行，無法有效掌握整層土壤之變化與行為趨勢。因此，如何建立一個針對現地土壤行為進行連續分類的系統，便成為一個亟待解決的重要問題。

2.2.1 土壤行為

Robertson (2016) 指出，土壤行為 (soil behavior) 是指土壤在各種外部作用 (如載重、應變、環境變化) 下所產生的反應，其表現受多種因素影響，包括地質成因 (如沉積歷史與成分特性)、環境條件 (如應力狀態與溫度) 以及物理化學過程 (如老化與膠結作用) 等。

在土壤力學中，一項重要的研究策略，是透過對等向壓密且重塑的土壤樣本進行試驗，以模擬飽和且均質的「理想土壤」 (ideal soil) 行為。然而，實際現地土壤多半具有某種形式的天然結構性 (structure)，這使得它們的現地土壤行為與理想土壤有所區別。這些結構性可能源自沉積過程中的層理、裂隙，或是微觀尺度下的排列與膠結，並受到成岩歷程與時間效應影響。這類微觀結構通常賦予土壤較高的強度與剛度，使其在未擾動狀態下的降伏應力、極限強度與小應變勁度均顯著高於同孔隙比下的無結構土壤。然而，在大應變狀況下，微觀結構容易被破壞，進而導致土壤行為的變異 (Leroueil and Hight 2003)。

土壤在剪力破壞前的行為大致可分為兩種類型：在大應變下傾向膨脹的土壤，以及大應變下傾向收縮的土壤。對飽和土壤而言，若呈現收縮行為，則在不排水條件下的剪力強度通常低於排水條件下的強度；相對地，若土壤在大應變下傾向膨脹，則其不排水剪力強度通常等於或高於排水剪力強度。值得注意的是，當飽和土壤呈現收縮行為時，不排水剪力可能導致顯著的應變軟化 (strain softening) 反應，對於工程安全性具有高度影響。因此，將土壤依其大應變行為區分為膨脹型與收縮型，成為許多大地工程問題中的一項關鍵指標 (Robertson 2016)。

根據 Idriss and Boulanger (2008)，土壤可依其行為特性進一步劃分為兩大類：類砂土 (sand-like) 與類黏土 (clay-like)。其中，類砂土較容易在反覆荷載下產生液

化 (cyclic liquefaction)，而類黏土則相對穩定。細粒料土壤的行為在某個特定的塑性指數範圍內，會呈現從類砂土逐漸轉變為類黏土的行為過渡。根據 Bray and Sancio (2006)，PI 小於 10% 的細粒料通常表現為類砂土行為，反之，PI 大於 18% 的則多表現為類黏土行為。這種行為上的連續轉變，與 USCS 分類系統中粗粒料與細粒料之間的性質差異有概念上的相似之處。

綜上所述，土壤在不同應力條件下所表現出的力學行為，與其微觀結構、沉積環境及塑性特性密切相關，這些行為特徵能有效反映土壤在工程載重下的反應潛勢。因此，將土壤分類的依據轉向行為本身，也能提供另一種更貼近現地實況的工程評估依據。此一思維也促使研究者發展出以現地試驗資料為基礎的土壤行為分類系統，其中又以圓錐貫入試驗最具代表性。

2.2.2 圓錐貫入試驗 (Cone penetration test, CPT)

鑒於現地天然土壤行為的複雜性，基於土壤行為特徵的分類系統應透過連續可重複量測之試驗，以有效捕捉土壤在現地狀態下的各種反應。圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT)(圖 2.2) 是一種利用特定規格之圓錐體 (錐頭橫截面積為 10 cm^2)，以每秒 2 公分的速度貫入土壤的現地測試方法。該試驗可量測貫入過程中之錐尖阻抗 (q_c) 與錐身摩擦 (f_s)。現今常見之 CPTu (u 表示孔隙水壓) 則進一步於圓錐後方 (u_2 位置) 量測孔隙水壓。

Lunne et al. (1997) 有針對 CPT 之設備、施作程序、標準規範與修正方式之發展，提供更詳細的描述。然而，孔隙水壓在錐頭幾何影響下，會於錐頭後肩與摩擦套筒兩端表面產生不等作用，形成所謂「端面面積不等效應」(unequal end-area effect) (Campanella et al. 1982)。為修正此效應對量測結果的影響，Campanella et al. (1982) 建議將原始錐尖阻抗 q_c 修正為有效錐尖阻抗 q_t ，其修正公式如下所示：

$$q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (2-1)$$

其中 a 為有效面積比，Robertson (1990) 建議可由下式計算：

$$a = \frac{d^2}{D^2} \quad (2-2)$$

式中， d 為載重元件支撐部的直徑， D 為錐頭的直徑。

現今，許多商用圓錐頭目前已配備等端面面積的摩擦套筒，基本上可大致免除對錐身摩擦 (f_s) 進行修正。然而，對於錐尖阻抗，端面面積不等效應仍然存在，因

此仍須對錐尖阻抗 (q_c) 進行修正。然而在砂土中，因為 q_c 遠大於孔隙水壓 u_2 ，故 $q_t \approx q_c$ ，此時端面修正影響可忽略，實務上常直接使用 q_c 作為代表參數。相對地，在軟弱細粒料土壤中，由於貫入過程為不排水狀態，導致錐體周圍產生較高的孔隙水壓，同時細粒料土壤的錐尖阻抗 q_c 相對較低，使得端面不等修正具有顯著影響。現今對於此類土層，CPT 結果通常會進行端面不等修正，並以 q_t 、 f_s 及 u_2 的形式呈現。

上述量測參數提供了土壤行為的多維度資訊，為建立基於土壤行為的分類系統奠定了實證基礎。下一節將探討如何利用這些 CPTu 參數進行土壤分類。

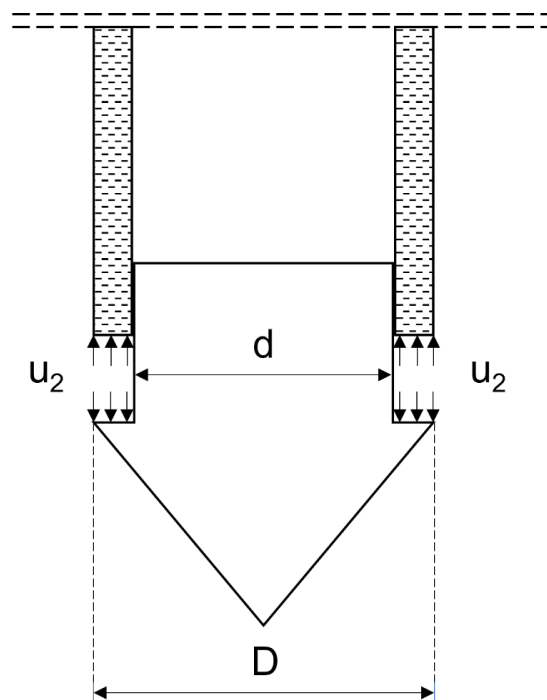


圖 2.2 圓錐貫入儀示意圖

2.2.3 正規土壤行為類別 (Normalized soil behavior type, SBTn)

由於具備成本效益高、快速、連續且可靠的量測特性，現今 CPT 已廣泛應用於工程場址之地層調查。過去便有許多研究 (Begemann 1965; Douglas and Olsen 1981) 指出，由於圓錐可直接反應現地土壤之力學行為，CPT 得以透過辨識不同土壤行為，以判釋土層剖面與辨識土壤類別。而在眾多方法中，又以 Robertson et al. (1986) 和 Robertson (1990) 提出，基於 CPT 參數的圖表可用於預測「土壤行為類別」 (soil behavior type, SBT)，逐漸成為最廣為使用的 CPT 土壤分類方法。

為提升 CPT 結果在不同應力條件下對土壤行為解釋的一致性，Robertson (2009) 進一步提出「正規土壤行為類別」 (normalized soil behavior type, SBTn)。該方法核心在於對 CPT 所獲得之參數進行正規化處理，包含正規化錐尖阻抗 (Q_{tn}) 與摩擦比 (F_r)，其定義如下。並可利用 Q_{tn} - F_r 關聯圖，(亦稱為 SBTn 圖，見圖 2.3) 進行土壤行為類別的判釋。

$$Q_{tn} = \left[\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right] \times \left[\left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^n \quad (2-3)$$

$$F_r = \left[\frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \right] 100\% \quad (2-4)$$

其中， σ_{v0} 為現地垂直總應力、 σ'_{v0} 為垂直有效應力。 p_a 為大氣壓力 (與 q_t 、 σ_{v0} 同單位)。參數 n 為應力指數，且 $n \leq 1$ 。Robertson (2009) 指出，在 SBTn 圖中，對於大多數細粒料土壤，應力指數 n 約為 1.0；而當現地有效應力不高時，大部分粗粒料土壤的應力指數則會落在 0.5 至 0.9 之間。其值可由下式計算：

$$n = 0.381(I_c) + 0.05 \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0.15 \quad (2-5)$$

Zhang et al. (2002) 建議，應力指數 n 可由土壤行為類別指數 (soil behavior type index, I_c) 來估算，而 I_c 則由 Q_{tn} 所定義。SBT 指數 I_c ，最早由 Jefferies and Davies (1993) 提出，用以表正規化錐尖阻抗 (Q_{tn}) 與摩擦比 (F_r) 所構成圖形中各土壤行為類別區域。後續，Robertson and Wride (1998) 對此指數的定義進行修正，使其更適用於 Robertson (1990) 所提出的 SBT 圖。修正後的 I_c 定義如下：

$$I_c = [(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (2-6)$$

I_c 的等值線圖可繪製於 SBTn 分類圖上，以近似劃分不同土壤類別區域，如圖 2.4。Robertson and Wride (1998) 建議可使用 $I_c = 2.6$ 作為砂土質與黏土質土壤的近似邊界，並於表 2.3 彙整不同 I_c 範圍對應之土壤行為類別。

截至目前為止，前兩節分別介紹了統一土壤分類系統 (USCS) 與 Robertson 所提出的正規土壤行為類別 (SBTn) 兩種土壤分類方法。相較於傳統常見的 USCS，由於實際工程中土樣採集不易，USCS 通常僅能針對特定深度進行。另一方面，CPT 能提供近乎連續的土壤參數資料，進而實現連續深度的土壤分類，在得到更多土層資訊的條件下，可以降低該場址的不確定性。因此，基於 CPT 的土壤分類方法相對具有更高的效率與可靠性。

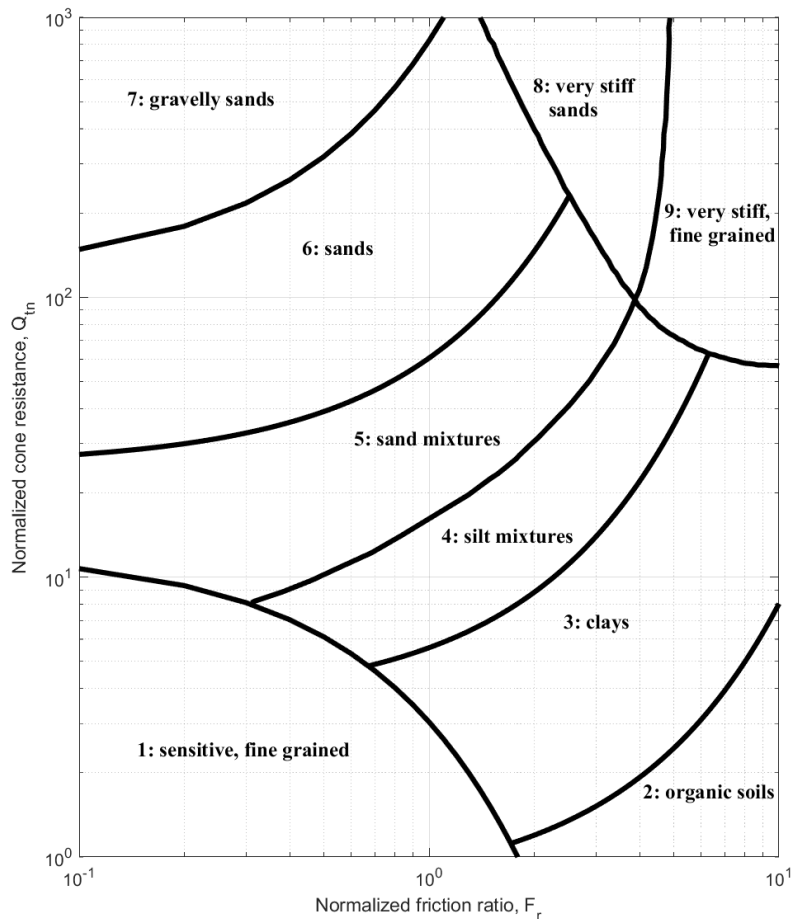


圖 2.3 Robertson (2009) 所提出之 SBTn 圖。

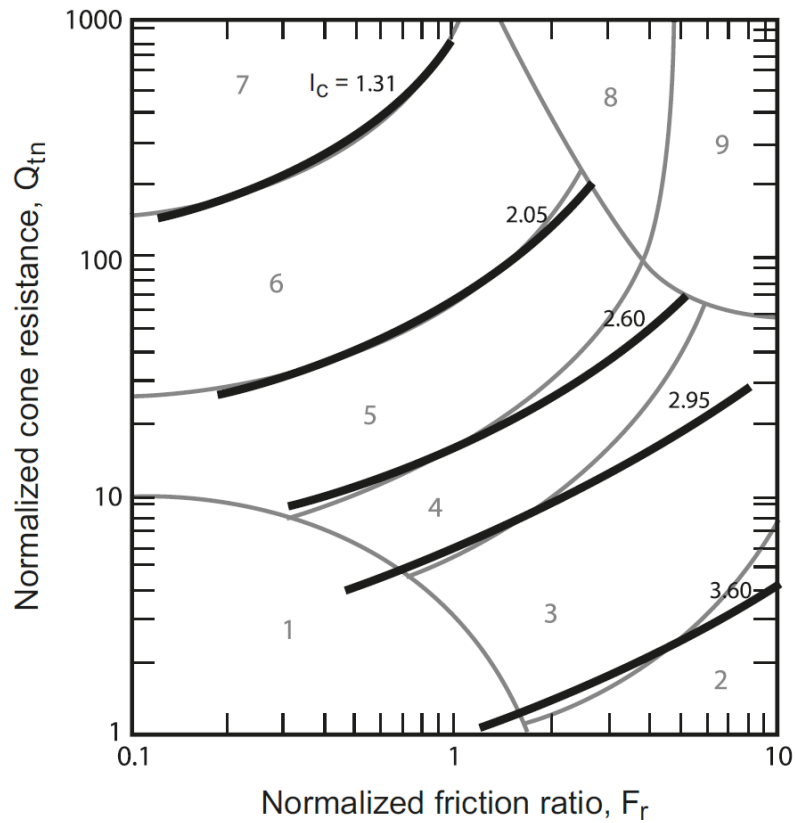
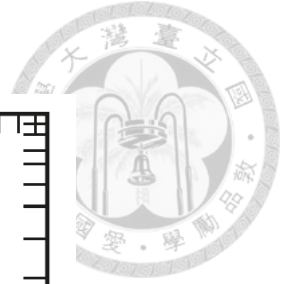


圖 2.4 土壤行為類別指數 I_c 之等值線於 SBTn 圖上。(Robertson 2009)

表 2.3 土壤行為類別分類。(Robertson and Wride 1998)

土壤行為類別指數, I_c	區域	土壤行為類別
$I_c < 1.31$	7	礫石質砂土至緊沙
$1.31 < I_c < 2.05$	6	砂土: 乾淨砂土至粉土質砂土
$2.05 < I_c < 2.60$	5	砂土混合層: 粉土質砂土至砂土質粉土
$2.60 < I_c < 2.95$	4	粉土混合層: 黏土質粉土至粉土質黏土
$2.95 < I_c < 3.60$	3	黏土: 粉土質黏土至黏土
$I_c > 3.60$	2	有機土壤: 泥炭土

2.3 層級貝葉斯模型 (Hierarchical Bayesian model, HBM)

可靠度設計 (reliability - based design, RBD) 為大地工程提供一種合理的架構，可考量到設計過程中的不確定性。為配合此架構，建立能反映目標場址特性的多變量機率模型相當重要。此一多變量機率模型的建立，仰賴實驗室和現地試驗所取得的多變量相關資料，從而建立「虛擬場址」(virtual site) 資料。儘管難以模擬真實場址的所有面向，虛擬場址至少能在特定關注範圍內，生成具代表性的模擬資料。值得強調的是，虛擬場址的目的並非用來取代實際場址調查，而是作為一項工具，協助工程師在 RBD 架構下，探索更具成本效益且安全可靠的設計方案 (Ching and Phoon 2015)。

貝葉斯分析 (Bayesian analysis) 可應用於建立機率性的場址特定模型 (site-specific model)，用以處理不完整的多變量資料，並預測多變量的輸出。Ching and Phoon (2014) 提出，可以假設資料庫 $\mathbf{X}$ 中的參數群集皆遵循多變量常態機率密度函數，儘管無法嚴格證明每個參數的多變量常態性，該假設仍可產出具有物理意義的結果。

在經典的貝葉斯分析架構下，首先設定似然函數 (likelihood) $f(\mathbf{X}|\underline{\mu}, \mathbf{C})$ ，表示在給定模型參數 $\underline{\mu}$ (平均向量) 與 $\mathbf{C}$ (共變異數矩陣) 條件下，觀測資料 $\mathbf{X}$ 的機率密度函數 (probability density function, PDF)。接著，指定先驗 (prior) $f(\underline{\mu}, \mathbf{C})$ ，用以表達在觀測資料之前對模型參數的初步信念。最終，根據貝葉斯定理 (Bayes' theorem)，可得後驗機率密度函數 (posterior PDF)，由下所示：

$$f(\underline{\mu}, \mathbf{C}|\mathbf{X}) = \frac{f(\mathbf{X}|\underline{\mu}, \mathbf{C}) \cdot f(\underline{\mu}, \mathbf{C})}{f(\mathbf{X})} \quad (2-7)$$

透過上述推導，後驗 PDF 可同時結合觀測資料與先驗知識，對模型參數作出更新與推論。

在土壤/岩石性質的研究背景下，Ching et al. (2021) 提出一種層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM)，作為經典貝葉斯分析的延伸與強化。HBM 可用來處理如圖 2.5 所示，具備場址標籤的土壤/岩石性質資料。具體而言，資料 $\mathbf{X}$ 由多個場址所構成，第 i 個場址的觀測資料記為 $\mathbf{X}_i$ 。每一場址具有其場址特定的模型參數 $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ ，在多變量常態 PDF 下的場址特定模型即如圖 2.5 (b) 的橢圓

所示。所有場址特定參數皆由一組共同的超參數 (hyper-parameters) 所控制。透過 HBM 架構，模型得以融合來自不同場址的集體知識 (通用資料庫) 與目標場址的有限觀測資訊，進而建立「準場址特定模型」 (quasi-site-specific model)。研究亦指出，即便目標場址資料相當有限，HBM 所建構之準場址特定模型仍具備良好的預測能力與應用潛力。

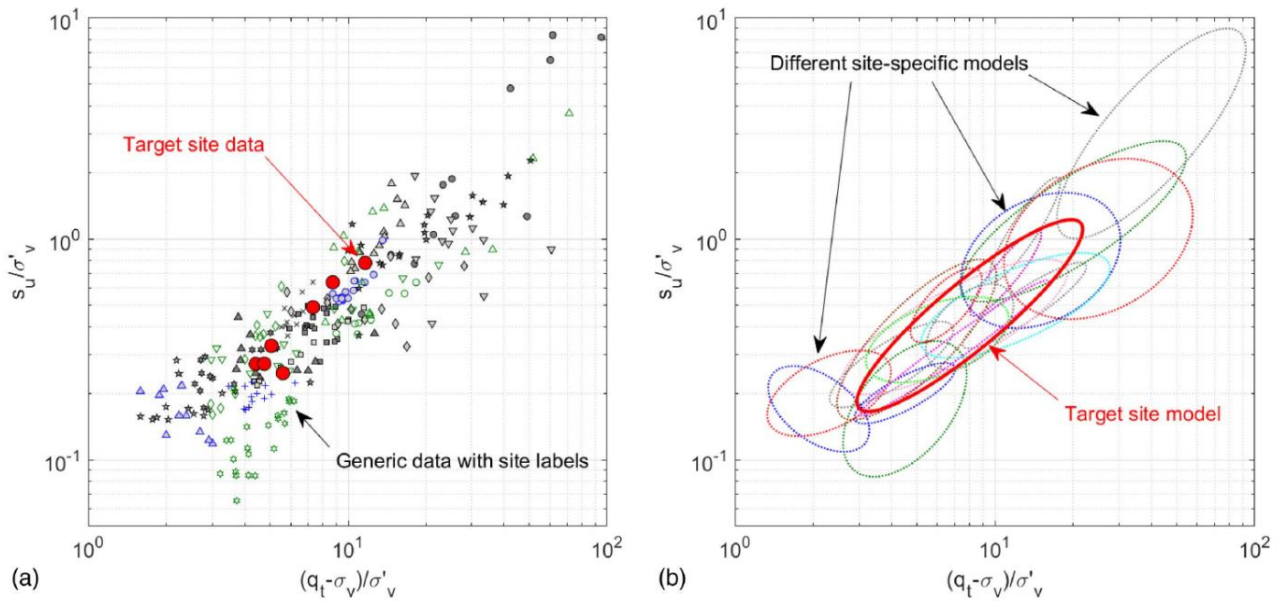


圖 2.5 不同場址特定模型的示意圖。(Ching et al. 2021)

2.3.1 HBM 架構

Ching et al. (2021) 提出的 HBM 以封閉形式 (closed-form) 的條件機率建模通用資料庫中場址間的平均值與變異性，詳細的模型架構如圖 2.6 所示。設資料庫中所有紀錄為 $\mathbf{X} = [\underline{x}_{ij} : i = 1, \dots, n_s ; j = 1, \dots, m_i]$ ，其中， n_s 為資料庫中場址總數， m_i 則為第 i 個場址中的觀測數量。

HBM 假設通用資料庫中第 i 個場址遵循其專屬的場址特定模型，並由平均值向量 $\underline{\mu}_i$ 和共變異數矩陣 $\mathbf{C}_i$ 控制，由於每個場址具備不同的地質條件，因此不同場址具有不同的參數，亦即當 $i \neq j$ 時， $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i) \neq (\underline{\mu}_j, \mathbf{C}_j)$ 。

假設資料庫中第 i 個場址之紀錄可以依據以下生成過程所產生：

1. 生成場址特定的平均值向量 $\underline{\mu}_i \sim f(\underline{\mu}_i | \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0) = N(\underline{\mu}_i; \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0)$ ，即 $\underline{\mu}_i$ 服從均值向量 $\underline{\mu}_0$ 、共變異數矩陣 $\mathbf{C}_0$ 的多變量常態 PDF。此處 $(\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0)$ 為控制通用資料庫中所有場址 $\underline{\mu}_i$ 分佈的超參數，其中 $\underline{\mu}_0$ 控制均值， $\mathbf{C}_0$ 則控制其變異性。
2. 生成場址特定的共變異數矩陣 $\mathbf{C}_i \sim f(\mathbf{C}_i | \Sigma_0, \nu_0) = IW(\mathbf{C}_i; \Sigma_0, \nu_0)$ ，即共變異數矩陣 $\mathbf{C}_i$ 服從具尺度矩陣 Σ_0 和自由度 ν_0 的逆 Wishart (inverse-Wishart) (James 1964) 機率密度函數。其中 (Σ_0, ν_0) 為控制通用資料庫中所有場址 $\mathbf{C}_i$ 分佈的超參數。
3. 生成觀測紀錄 $x_{ij} \sim N(x_{ij}; \underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ ，即第 i 個場址中的第 j 個紀錄 x_{ij} 由場址特定參數 $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ 所決定的多變量常態機率密度函數所產生。

HBM 的層級式架構如圖 2.6 所示。模型中超參數 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, \nu_0)$ 扮演很重要的角色，其控制所有場址特定參數 $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ 如何生成，亦即掌握不同場址間之平均值與變異性。HBM 的推論流程主要分為兩個階段，第一階段是學習階段，此階段的主要目的是透過大量不同場址所構成的通用資料庫學習超參數 Θ ，以建立針對目標場址的先驗模型。第二階段是推論階段，即根據學得的超參數 Θ ，結合目標場址的觀測資料，將先驗模型更新成後驗模型（準場址特定模型），以此來推斷現地的數據。

值得一提的是，HBM 中指定超參數 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, \nu_0)$ 採用了共軛先驗 (conjugate prior)。對於一個給定的似然函數 $f(\text{data}|\theta)$ ，若其後驗 PDF $f(\theta|\text{data})$ 與先驗 PDF $f(\theta)$ 有相同的分布形式，則稱該先驗為此類似然函數的共軛先驗。

使用共軛先驗的主要優勢在於，其後驗 PDFs 具備封閉形式 (closed-form solution)，使部分條件機率可以獲得解析的貝葉斯解 (analytical Bayesian solution)，進一步降低推論所需的運算成本與複雜度。Ching et al. (2021) 彙整了 HBM 中所採用的共軛先驗 PDF，詳見表 2.4。以下將詳細說明各參數所對應的 PDF:

1. $\underline{\mu}_i$ 被假設遵循以下的多變量常態 PDF

$$\begin{aligned} f(\underline{\mu}_i | \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0) &= N(\underline{\mu}_i; \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0) \\ &= |\mathbf{C}_0|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T \mathbf{C}_0^{-1}(\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)\right] \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中 n = 變數的維度；上標 T = 矩陣轉置。

- ($\underline{\mu}_0$ 的先驗 PDF) 根據表 2.4， $\underline{\mu}_0$ 的共軛先驗是多變量常態 PDF，在缺乏先驗資訊的情況下，採用非資訊性先驗 (non-informative prior) 是一種可行且常見的作法。實務上，這可透過將 $\underline{\mu}_0$ 設為零向量，並將其共變異數矩陣 $\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}$ 設定為一個對角元素較大的對角矩陣來實現。Ching et al. (2021) 建議將對角元素的值設定為 10^4 ，以反映對超參數的低先驗信心，進而使資料主導後驗推論。
- ($\mathbf{C}_0$ 的先驗 PDF) 根據表 2.4， $\mathbf{C}_0$ 的共軛先驗是逆 Wishart (Inverse-Wishart, IW) PDF。

$$\begin{aligned} f(\mathbf{C}_0 | \Sigma_{\mathbf{C}_0}, \nu_{\mathbf{C}_0}) &= IW(\mathbf{C}_0; \Sigma_{\mathbf{C}_0}, \nu_{\mathbf{C}_0}) \\ &= \frac{|\Sigma_{\mathbf{C}_0}|^{\nu_{\mathbf{C}_0}/2}}{2^{n\nu_{\mathbf{C}_0}/2} \cdot \Gamma_n(\nu_{\mathbf{C}_0}/2)} \cdot |\mathbf{C}_0|^{-\frac{\nu_{\mathbf{C}_0}+n+1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\text{tr}(\Sigma_{\mathbf{C}_0} \times \mathbf{C}_0^{-1})\right] \end{aligned} \quad (2-9)$$

其中 $\Gamma_n(\cdot)$ 表示多變量 Gamma 函數 (multivariate gamma function) (James 1964)， n 為變數的維度；而 $\text{tr}(\cdot)$ 則表示矩陣的跡 (trace of a matrix)。需要注意的是，為了使逆 Wishart PDF 的先驗具有非資訊性並不容易。Huang and Wand (2013) 提出可以令 $\nu_{\mathbf{C}_0} = n + 1$ ，而 $\Sigma_{\mathbf{C}_0} = 4 \times \text{diag}(1/a_1, \dots, 1/a_n)$ ，其中 $\text{diag}(\cdot)$ 表示一個對角矩陣。此外 a_m 為一個隨機變數，假設其遵從逆 Gamma 分布 (inverse-Gamma distribution, IG)，其對應的形狀參數為 α ，尺度參數為 β 。



$$f(a_m) = \text{IG}(a_m; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot a_m^{-\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{a_m}\right) \quad (2-10)$$

Huang and Wand (2013) 指出，若設形狀參數 $\alpha = 0.5$ ，尺度參數 β 為一個很小的數 (Ching et al. (2021) 建議採用 10^{-4})，則逆 Wishart PDF 可以被視為接近非資訊性。

2. $\mathbf{C}_i$ 被假設遵循以下的逆 Wishart (inverse-Wishart, IW) PDF。

$$\begin{aligned} f(\mathbf{C}_i | \boldsymbol{\Sigma}_0, \nu_0) &= \text{IW}(\mathbf{C}_i; \boldsymbol{\Sigma}_0, \nu_0) \\ &= \frac{|\boldsymbol{\Sigma}_0|^{\nu_0/2}}{2^{\nu_0/2} \cdot \Gamma_n(\nu_0/2)} \cdot |\mathbf{C}_i|^{-\frac{\nu_0+n+1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\text{tr}(\boldsymbol{\Sigma}_0 \times \mathbf{C}_i^{-1})\right] \end{aligned} \quad (2-11)$$

- ($\boldsymbol{\Sigma}_0$ 的先驗 PDF) 根據表 2.4， $\boldsymbol{\Sigma}_0$ 的共軛先驗是 Wishart PDF。

$$\begin{aligned} f(\boldsymbol{\Sigma}_0 | \boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}, \lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}) &= \text{W}(\boldsymbol{\Sigma}_0; \boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}, \lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}) \\ &= \frac{|\boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}|^{-\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}/2}}{2^{n\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}/2} \cdot \Gamma_n(\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}/2)} \cdot |\boldsymbol{\Sigma}_0|^{\frac{\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}-n-1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\text{tr}(\boldsymbol{\Sigma}_0 \times \boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}^{-1})\right] \end{aligned} \quad (2-12)$$

其中， $\boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}$ 是尺度矩陣 (scale matrix)，而 $\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}$ 則為自由度 (degree of freedom)。Chung et al. (2015) 指出，若將自由度設為 $\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0} = n + 2$ ，且將尺度矩陣設定為一個對角元素較大的對角矩陣 (Ching et al. (2021) 建議採用 10^4)，則該 Wishart PDF 可視為接近非資訊的先驗。

- (ν_0 的先驗分布) 為一個離散變數，其取值範圍從維度 n 到無限大。為使 ν_0 的先驗分布呈現非資訊性，Ching et al. (2021) 建議採用介於 n 與一個較大上限 (1000) 之間的均勻分布作為先驗分布。

3. $\underline{x}_{ij}$ 被假設遵循以下的多變量常態 PDF

$$\begin{aligned} f(\underline{x}_{ij} | \underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i) &= \text{N}(\underline{x}_{ij}; \underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i) \\ &= |\mathbf{C}_i|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)\right] \end{aligned} \quad (2-13)$$

在 HBM 中，考慮的變數包含經轉換的土壤/岩石 $\mathbf{X}$ 、場址特定的模型參數 $(\underline{\mu}, \mathbf{C})$ 、超參數 Θ 以及參數 $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ，這些變數的完整多變量機率密度函數可表示為：

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \Theta, \underline{a}) &= f(\mathbf{X}|\underline{\mu}, \mathbf{C}) \cdot f(\underline{\mu}|\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0) \cdot f(\mathbf{C}|\Sigma_0, \nu_0) \cdot f(\underline{\mu}_0) \cdot f(\mathbf{C}_0) \cdot f(\Sigma_0) \cdot p(\nu_0) \cdot f(\underline{a}) \\
 &= \left[\prod_{i=1}^{n_s} \prod_{j=1}^{m_i} N(\underline{x}_{ij}; \underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i) \right] \cdot \left[\prod_{i=1}^{n_s} N(\underline{\mu}_i; \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0) \right] \cdot \left[\prod_{i=1}^{n_s} IW(\mathbf{C}_i; \Sigma_0, \nu_0) \right] \cdot N(\underline{\mu}_0; \underline{\mu}_{\mu_0}, \mathbf{C}_{\mu_0}) \\
 &\quad \cdot IW(\mathbf{C}_0; \Sigma_{C_0}, \nu_{C_0}) \cdot W(\Sigma_0; \Psi_{\Sigma_0}, \lambda_{\Sigma_0}) \cdot p(\nu_0) \cdot \left[\prod_{r=1}^n IG(a_r; \alpha, \beta) \right] \\
 &\propto \left(\prod_{i=1}^{n_s} |\mathbf{C}_i|^{-\frac{m_i + \nu_0 + n + 1}{2}} \right) \cdot |\mathbf{C}_0|^{-\frac{n_s + \nu_{C_0} + n + 1}{2}} \cdot |\Sigma_0|^{\frac{n_s \nu_0 + \lambda_{\Sigma_0} - 1}{2}} \cdot \frac{\prod_{r=1}^n a_r^{-\alpha-1}}{2^{n_s n \nu_0 / 2} \cdot \Gamma_n(\nu_0 / 2)^{n_s}} \\
 &\quad \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{m_i} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T \mathbf{C}_0^{-1} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0) - \frac{1}{2} (\underline{\mu}_0 - \underline{\mu}_{\mu_0})^T \mathbf{C}_{\mu_0}^{-1} (\underline{\mu}_0 - \underline{\mu}_{\mu_0})} \\
 &\quad \cdot e^{-\frac{1}{2} \text{tr}[\Sigma_0 \times (\Psi_{\Sigma_0}^{-1} + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{C}_i^{-1})] - \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_{C_0} \times \mathbf{C}_0^{-1}) - \sum_{r=1}^n \frac{\beta}{a_r}}
 \end{aligned} \tag{2-14}$$

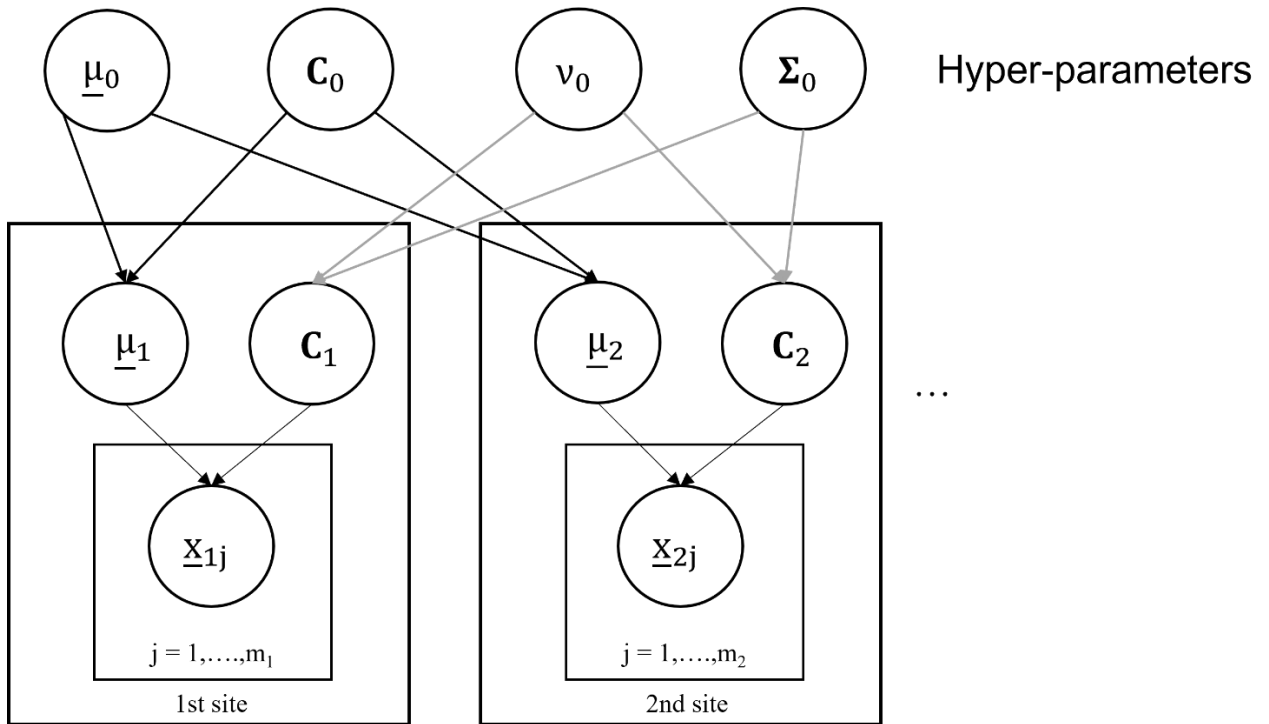


圖 2.6 HBM 架構示意圖。(Ching et al. 2021)



表 2.4 超參數之共軛先驗及後驗。(Ching et al. 2021)

Hyperparameter	Likelihood (s)	Conjugate distribution	Prior PDF	Posterior PDF
$\underline{\mu}_0$	$N(\underline{\mu}_i; \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0)$ ($i = 1, \dots, n_s$)	Normal	$N(\underline{\mu}_0; \underline{\mu}_{\underline{\mu}_0}, \mathbf{C}_{\underline{\mu}_0})$	$N\left\{\underline{\mu}_0; \left(\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + n_s \mathbf{C}_0^{-1}\right)^{-1} \left(\mathbf{C}_0^{-1} \sum_{i=1}^{n_s} \underline{\mu}_i\right), \left(\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + n_s \cdot \mathbf{C}_0^{-1}\right)^{-1}\right\}$
$\mathbf{C}_0$	$N(\underline{\mu}_i; \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0)$ ($i = 1, \dots, n_s$)	Inverse-Wishart	$IW(\mathbf{C}_0; \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}, \nu_{\mathbf{C}_0})$	$IW\left\{\mathbf{C}_0; \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0} + \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)(\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T, n_s + \nu_{\mathbf{C}_0}\right\}$
$\mathbf{\Sigma}_0$	$IW(\mathbf{C}_i; \mathbf{\Sigma}_0, \nu_0)$ ($i = 1, \dots, n_s$)	Wishart	$W(\mathbf{\Sigma}_0; \mathbf{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}, \lambda_{\mathbf{\Sigma}_0})$	$W\left\{\mathbf{\Sigma}_0; \left(\mathbf{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}^{-1} + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{C}_i^{-1}\right)^{-1}, n_s \nu_0 + \lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}\right\}$

2.3.2 學習階段-Gibbs 採樣法 (Gibbs Sampler)

在 HBM 的架構中，第一階段——學習階段的主要目的是從通用資料庫中學習超參數 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, \nu_0)$ 。Ching et al. (2021) 建議採用 Gibbs 採樣法 (Gibbs Sampler, GS) 進行推斷。GS (Geman and Geman 1984) 的核心概念是將所有未知參數劃分為若干子集，並在固定其他子集條件下，依序對每一組參數進行條件式隨機抽樣，隨著抽樣次數增加，整體樣本分布將逐漸收斂至目標分布。儘管完整的後驗 PDF $f(\underline{\mu}, \mathbf{C}, \Theta, \underline{a} | \mathbf{X})$ 並無封閉解析形式，但下列條件 PDFs 皆具有封閉解析形式，使得可透過 Gibbs 採樣法逐步進行抽樣。

$$\begin{aligned} f(\underline{\mu}_i | \mathbf{X}, \underline{\mu}_{\setminus i}, \mathbf{C}, \Theta, \underline{a}) &\propto e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_i} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i) - \frac{1}{2} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T \mathbf{C}_0^{-1} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)} \\ &= N \left\{ \underline{\mu}_i; (\mathbf{C}_0^{-1} + m_i \mathbf{C}_i^{-1})^{-1} \left(\mathbf{C}_0^{-1} \underline{\mu}_0 + \mathbf{C}_i^{-1} \sum_{j=1}^{m_i} \underline{x}_{ij} \right), (\mathbf{C}_0^{-1} + m_i \mathbf{C}_i^{-1})^{-1} \right\} \quad (2-15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\mathbf{C}_i | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}_{\setminus i}, \Theta, \underline{a}) &\propto |\mathbf{C}_i|^{-\frac{m_i + \nu_0 + n + 1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_i} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i) - \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_0 \times \mathbf{C}_i^{-1})} \\ &= \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_i; \Sigma_0 + \sum_{j=1}^{m_i} (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i) (\underline{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T, m_i + \nu_0 \right\} \quad (2-16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\underline{\mu}_0 | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, \nu_0, \underline{a}) &\propto e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T \mathbf{C}_0^{-1} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0) - \frac{1}{2} (\underline{\mu}_0 - \underline{\mu}_{\mu_0})^T \mathbf{C}_{\mu_0}^{-1} (\underline{\mu}_0 - \underline{\mu}_{\mu_0})} \\ &= N \left\{ \underline{\mu}_0; (\mathbf{C}_{\mu_0}^{-1} + n_s \mathbf{C}_0^{-1})^{-1} \left(\mathbf{C}_{\mu_0}^{-1} \underline{\mu}_{\mu_0} + \mathbf{C}_0^{-1} \sum_{i=1}^{n_s} \underline{\mu}_i \right), \right. \\ &\quad \left. (\mathbf{C}_{\mu_0}^{-1} + n_s \cdot \mathbf{C}_0^{-1})^{-1} \right\} \quad (2-17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\mathbf{C}_0 | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \Sigma_0, \nu_0, \underline{a}) &\propto |\mathbf{C}_0|^{-\frac{n_s + \nu_{\mathbf{C}_0} + n + 1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T \mathbf{C}_0^{-1} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0) - \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_{\mathbf{C}_0} \times \mathbf{C}_0^{-1})} \\ &= \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_0; \Sigma_{\mathbf{C}_0} + \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0) (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T, n_s + \nu_{\mathbf{C}_0} \right\} \quad (2-18) \end{aligned}$$



$$f(\underline{\Sigma}_0 | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, v_0, \underline{a}) \propto |\underline{\Sigma}_0|^{\frac{v_0 + \lambda_{\underline{\Sigma}_0} - 1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \text{tr}(\underline{\Sigma}_0 + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{C}_i^{-1})}$$

$$= W \left\{ \underline{\Sigma}_0; \left(\underline{\Psi}_{\underline{\Sigma}_0}^{-1} + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{C}_i^{-1} \right)^{-1}, n_s v_0 + \lambda_{\underline{\Sigma}_0} \right\} \quad (2-19)$$

$$p(v_0 | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \underline{\Sigma}_0, \underline{a}) \propto \frac{\prod_{i=1}^M |\mathbf{C}_i|^{-\frac{v_0}{2}} \cdot |\underline{\Sigma}_0|^{\frac{n_s v_0}{2}}}{2^{n_s n v_0 / 2} \cdot \Gamma_n(v_0 / 2)^{n_s}} \quad (2-20)$$

$$f(a_m | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\Theta}, \underline{a}_{\setminus m}) \propto a_m^{-(n+1)/2 - \alpha - 1} \cdot e^{-\frac{\beta + 2\mathbf{C}_{0,mm}^{-1}}{a_m}}$$

$$= \text{IG} \left\{ a_m; \alpha + \frac{n+1}{2}, \beta + 2/\mathbf{C}_{0,mm} \right\} \quad (2-21)$$

此外，GS 亦能有效處理資料庫 $\mathbf{X}$ 中缺失資料的問題。假設 $\underline{x}_{ij}^u$ 為缺失（尚未觀測到）的資料，已 $\underline{x}_{ij}^o$ 為已觀測的資料。相應地，缺失資料的均值向量與共變異數矩陣分別為 $\underline{\mu}_i^u$ 與 $\mathbf{C}_i^u$ ，已知資料的均值向量與共變異數矩陣則分別為 $\underline{\mu}_i^o$ 與 $\mathbf{C}_i^o$ 。此外， $\mathbf{C}_i^{uo}$ 表示缺失與已知資料間的共變異數矩陣。則缺失資料 $\underline{x}_{ij}^u$ 在給定已觀測資料條件下，依然服從多變量常態 PDF：

$$f(\underline{x}_{ij}^u | \underline{x}_{ij}^o, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, v_0, \underline{\Sigma}_0, \underline{a})$$

$$= N \left\{ \underline{x}_{ij}^u; \underline{\mu}_i^u + \mathbf{C}_i^{uo} (\mathbf{C}_i^o)^{-1} (\underline{x}_{ij}^o - \underline{\mu}_i^o), \mathbf{C}_i^u - \mathbf{C}_i^{uo} (\mathbf{C}_i^o)^{-1} \mathbf{C}_i^{ou} \right\} \quad (2-22)$$

因此我們可以透過 GS 模擬缺失的數據 $\underline{x}_{ij}^u$ 。總結來說，GS 會重複以下動作：

1. 以任意數值假設 $(\mathbf{X}^u, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \underline{\Sigma}_0, v_0, \underline{a})$ ，其中 $\mathbf{X}^u$ 代表資料庫 $\mathbf{X}$ 中缺失的數值，而 $\mathbf{X}$ 在假設後不再有缺失數值。
2. $(i = 1, \dots, n_s)$ 取樣 $\underline{\mu}_i$

$$\underline{\mu}_i \sim N \left\{ \underline{\mu}_i; (\mathbf{C}_0^{-1} + m_i \mathbf{C}_i^{-1})^{-1} (\mathbf{C}_0^{-1} \underline{\mu}_0 + \mathbf{C}_i^{-1} \sum_{j=1}^{m_i} \underline{x}_{ij}), \right.$$

$$\left. (\mathbf{C}_0^{-1} + m_i \mathbf{C}_i^{-1}) \right\} \quad (2-23)$$



3. ($i = 1, \dots, n_s$) 取樣 $\mathbf{C}_i$

$$\mathbf{C}_i \sim \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_i; \mathbf{\Sigma}_0 + \sum_{j=1}^{m_i} (\mathbf{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)(\mathbf{x}_{ij} - \underline{\mu}_i)^T, m_i + v_0 \right\} \quad (2-24)$$

4. 取樣 $\underline{\mu}_0$

$$\underline{\mu}_0 \sim N \left\{ \underline{\mu}_0; (\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + M \cdot \mathbf{C}_0^{-1})^{-1} \left(\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} \underline{\mu}_{\underline{\mu}_0} + \mathbf{C}_0^{-1} \sum_{i=1}^{n_s} \underline{\mu}_i \right), \right. \\ \left. (\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + M \cdot \mathbf{C}_0^{-1})^{-1} \right\} \quad (2-25)$$

其中 $\underline{\mu}_{\underline{\mu}_0}$ 為 0 向量; $\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}$ 為對角矩陣，其對角線元素均為 10^4 。

5. 取樣 $\mathbf{C}_0$

$$\mathbf{C}_0 \sim \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_0; \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0} + \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)(\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_0)^T, n_s + v_{\mathbf{C}_0} \right\} \quad (2-26)$$

其中， $\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0} = \text{diag}(4/a_1, 4/a_2, \dots, 4/a_n)$ ， $v_{\mathbf{C}_0} = n + 1$ 。

6. 取樣 $\mathbf{\Sigma}_0$

$$\mathbf{\Sigma}_0 \sim W \left\{ \mathbf{\Sigma}_0; \mathbf{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}^{-1} + \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{C}_i^{-1}, n_s v_0 + \lambda_{\mathbf{\Sigma}_0} \right\} \quad (2-27)$$

其中 $\mathbf{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}$ 為對角元素 = 10^4 的對角矩陣， $\lambda_{\mathbf{\Sigma}_0} = n + 2$ 。

7. 從下述的離散分布取樣 v_0

$$p(v_0 | \mathbf{X}, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{\Sigma}_0, \underline{a}) \propto \frac{\prod_{i=1}^{n_s} |\mathbf{C}_i|^{-\frac{v_0}{2}} \cdot |\mathbf{\Sigma}_0|^{-\frac{n_s v_0}{2}}}{2^{n_s n v_0 / 2} \cdot \Gamma_n(v_0 / 2)^{n_s}} \quad (2-28)$$

8. (對 $m = 1, \dots, n$) 取樣 a_m

$$a_m \sim IG \left(a_n; \alpha + \frac{n+1}{2}, \beta + 2\mathbf{C}_{0,m}^{-1} \right) \quad (2-29)$$

其中 $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 10^{-4}$ 。

9. 取樣 $\underline{x}_{ij}^u$

$$\underline{x}_{ij}^u \sim N \left\{ \underline{x}_{ij}^u; \underline{\mu}_i^u + \mathbf{C}_i^{uo} (\mathbf{C}_i^o)^{-1} (\underline{x}_{ij}^o - \underline{\mu}_i^o), \mathbf{C}_i^u - \mathbf{C}_i^{uo} (\mathbf{C}_i^o)^{-1} \mathbf{C}_i^{ou} \right\} \quad (2-30)$$

10. 重複 T 次步驟 2 至步驟 9 已取得 T 個 $(\mathbf{X}^u, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, v_0, \mathbf{\Sigma}_0, \underline{a})$ 樣本。

Gibbs 採樣法從初始狀態 $(\mathbf{X}^u, \underline{\mu}, \mathbf{C}, \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \underline{\Sigma}_0, \nu_0, \underline{a})$ 開始，依序根據每個變數在給定其他變數下的條件機率密度函數進行取樣。在經過燃燒期 (burn-in period) 後，起始時間步長記為 t_b ，樣本將被保留，燃燒期長度可透過視覺檢查收斂性來判定。若僅保留超參數 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \underline{\Sigma}_0, \nu_0)$ 的樣本，則這些樣本將服從 $f(\Theta|\mathbf{X}^o)$ ，其中 $\mathbf{X}^o$ 表示資料庫中所有已觀測到的資料集合，換言之，這些樣本反映了由 $\mathbf{X}^o$ 中學習到的超參數知識。

考量到 Gibbs 採樣法所產生的樣本在相鄰時間步間可能具有高度自相關性，為了降低樣本間自相關性並減少後續計算負擔，僅每隔 Δt 個時間步保留一組超參數 Θ 的樣本。最終將獲得 $n_{\text{learn}} = \frac{T-t_b}{\Delta t}$ 組超參數樣本，記為 $\{(\underline{\mu}_{0,t}, \mathbf{C}_{0,t}, \underline{\Sigma}_{0,t}, \nu_{0,t}) : t = t_b + 1, t_b + \Delta t + 1, \dots, T\}$ 。其中超參數 Θ 服從的後驗 PDF 為 $f(\Theta|\mathbf{X}^o)$ ，代表以觀測資料 $\mathbf{X}^o$ 所學習到的超參數分布，可進一步用來控制各場址特定參數 $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ 的生成。

Ching et al. (2021) 所提出的 HBM 透過假設多變量常態分佈並採用共軛先驗，有效地解決了計算負擔的問題。由於此設定下的條件機率密度函數皆具有封閉解析形式，因此 Gibbs 取樣法可直接對式 (2-23) 至 (2-30) 所對應的條件 PDF 進行精確取樣，無須額外檢查 $(\mathbf{C}, \mathbf{C}_0, \underline{\Sigma}_0)$ 是否為正定矩陣 (因為取樣結果保證為正定)。相較於未採用多變量常態與共軛先驗的情況，此方法在計算成本上的節省相當可觀。

2.3.3 推論階段

在第二階段——推論階段，首要考慮一目標場址，其場址特定參數為 $(\underline{\mu}_s, \mathbf{C}_s)$ 。需注意的是，該目標場址被假設為與資料庫中的任一場址相似，但並不完全相同。亦即，其參數 $(\underline{\mu}_s, \mathbf{C}_s)$ 受控於與資料庫中場址相同的超參數 Θ 。推論階段的目的是，在同時考慮通用資料庫 $\mathbf{X}$ 以及目標場址的觀測資料 $\mathbf{X}_s$ 的條件下，對未觀測資料進行預測。假設目標場址包含 m_{TG} 個紀錄： $\mathbf{X}_s = \{\mathbf{x}_{\text{TG},j} : j = 1, \dots, m_s\}$ 。其中， $\mathbf{X}_s$ 中可能存在缺失值，將其分為已觀測部分 $\mathbf{X}_s^o$ ，與未觀測部分 $\mathbf{X}_s^u$ 。本階段的重點在於，給定通用資料庫中觀測資料 $\mathbf{X}^o$ 與目標場址觀測資料 $\mathbf{X}_s^o$ 的情況下，預測目標場址為觀測資料 $\mathbf{X}_s^u$ ，即希望從條件機率分布 $f(\mathbf{X}_s^u|\mathbf{X}^o, \mathbf{X}_s^o)$ 中進行取樣。

當給定任一組來自學習階段之超參數樣本 $(\underline{\mu}_{0,t}, \mathbf{C}_{0,t}, \Sigma_{0,t}, v_{0,t})$ 時， $f(\mathbf{X}_s^u | \underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, v_0, \Sigma_0, \mathbf{X}_s^o)$ 可由以下方法進行採樣：

1. 將 $(\mathbf{X}_s^u, \underline{\mu}_s, \mathbf{C}_s)$ 初始化為任意值。須注意，經初始化後的 $\mathbf{X}_s$ 中不再包含缺失值。
2. 取樣 $\underline{\mu}_s$ (可使用 MATLAB 指令“mvnrnd”)

$$\underline{\mu}_s \sim N \left\{ \underline{\mu}_s; (\mathbf{C}_{0,t}^{-1} + m_s \cdot \mathbf{C}_s^{-1})^{-1} \left(\mathbf{C}_{0,t}^{-1} \underline{\mu}_{0,t} + \mathbf{C}_s^{-1} \sum_{j=1}^{m_s} \underline{x}_{s,j} \right), \right. \\ \left. (\mathbf{C}_{0,t}^{-1} + m_s \cdot \mathbf{C}_s^{-1})^{-1} \right\} \quad (2-31)$$

3. 取樣 $\mathbf{C}_s$ (可使用 MATLAB 指令“iwishrnd”)

$$\mathbf{C}_s \sim \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_s; \Sigma_{0,t} + \sum_{j=1}^{m_s} (\underline{x}_{s,j} - \underline{\mu}_s)(\underline{x}_{s,j} - \underline{\mu}_s)^T, m_s + v_{0,t} \right\} \quad (2-32)$$

4. (對 $j = 1, \dots, m_s$) 取樣 $\underline{x}_{s,j}^u$ (可使用 MATLAB 指令“mvnrnd”)

$$\underline{x}_{s,j}^u \sim N \left\{ \underline{x}_{s,j}^u; \underline{\mu}_s^u + \mathbf{C}_s^{uo} (\mathbf{C}_s^o)^{-1} (\underline{x}_{s,j}^o - \underline{\mu}_s^o), \mathbf{C}_s^u - \mathbf{C}_s^{uo} (\mathbf{C}_s^o)^{-1} \mathbf{C}_s^{ou} \right\} \quad (2-33)$$

5. 重複上述第 2 至第 4 項步驟 T' 次以獲得 T' 組 $(\mathbf{X}_s^u, \underline{\mu}_s, \mathbf{C}_s)$ 的樣本。燃燒期記為 t'_b ，可透過視覺檢查來判定。為減少樣本間的相關性，每隔 $\Delta t'$ 個時間步抽取一組樣本。最終將獲得 $n_{\text{inf}} = \frac{T' - t'_b}{\Delta t'}$ 組 $(\mathbf{X}_{s,t'}^u, \underline{\mu}_{s,t'}, \mathbf{C}_{s,t'})$ 的樣本， $\{t' = t'_b + 1, t'_b + \Delta t' + 1, \dots, T'\}$ 。值得注意的是，我們在推論階段所使用的 Gibbs 採樣法中，相關記號均加上撇號 (如 t' 、 T' 、 t'_b)，以與學習階段所用之符號 (t 、 T 、 t_b) 加以區別。對每一個時間步長 $t = t_b + 1, t_b + \Delta t + 1, \dots, T$ ，執行步驟 1 至步驟 5。最終將獲得 $n_{\text{learn}} \times n_{\text{inf}}$ 組 $(\mathbf{X}_s^u, \underline{\mu}_s, \mathbf{C}_s)$ 的樣本。

值得注意的是，整個推論程序中包含兩次 Gibbs 採樣程序，分別對應於學習階段與推論階段。其中，學習階段的 GS 目的是根據包含場址標籤資訊的觀測資料 $\mathbf{X}^o$ ，取得一組超參數樣本 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, v_0)$ 。推論階段的 GS 則基於這些以學習到的超參數樣本，對目標場址的缺失資料 $\mathbf{X}_s^u$ 進行預測。若需對另一個目標場址進行推論，則無須重新執行學習階段，只需使用學習階段所得之超參數樣本，再次執行一次推論階段，即可完成對該新場址的預測任務。

本章重點介紹了 Ching et al. (2021) 提出的層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM) 之基本架構，並說明其透過共軛先驗分布達成推論效率提升的優勢。HBM 結合多變量常態假設與具封閉解析形式的條件機率密度函數，能夠有效整合通用資料庫與目標場址資訊，即使在面對目標場址資料稀缺與場址獨特性的情境下，依然能提供穩健的預測能力。後續章節將延續此 HBM 架構，進一步應用於以 CPT 參數預測 USCS 土壤分類問題。

第 3 章 資料庫建置



為了運用層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM) 建立具場址特性的準場址特定模型 (quasi site-specific model)，以發展基於圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT) 之土壤分類方法，本研究建構一套涵蓋美國統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS) 分類結果及其對應 CPT 參數的全球通用資料庫。此資料庫除了作為 HBM 中先驗機率密度函數建構之依據外，更有助於提升模型於資料不足地區的預測準確性與穩健性。

本研究所建構之資料庫，主要蒐集自具代表性的國際期刊論文與現地調查報告。由於文獻中的 CPT 資料多以圖形形式呈現，為有效取得各深度對應之數值資料，本研究採用 RockWare 公司開發之 DigiData 軟體進行圖像資料數位化。DigiData 可將二維座標圖像中的紀錄轉換為數值座標，且其座標軸尺度可依實際需求進行調整。紀錄點擷取完成後，統一彙整於 Excel 檔案中，以便後續分析與資料庫整理使用。

3.1 CPT-USCS/8/4182

3.1.1 資料類型

本研究建立了一個全球性資料庫，命名為「CPT-USCS/8/4182」。其中數字「8」代表資料庫涵蓋共 8 項關鍵土壤參數，包含 5 項與 USCS 相關之傳統實驗室參數，以及 3 項 CPT 衍生參數。具體包括：

- ◆ USCS 相關參數：
 - ◆ 液性限度 (Liquid limit, LL)
 - ◆ 塑性指數 (Plasticity index, PI)
 - ◆ 細粒料含量 (Fines content, FC)
 - ◆ 砂土含量 (Sand content, SC)
 - ◆ 中位粒徑 (Mean grain size, D_{50})
- ◆ CPT 相關參數：
 - ◆ 正規化錐尖阻抗 (Normalized cone resistance, Q_{tn})
 - ◆ 摩擦比 (Friction ratio, F_r)
 - ◆ 土壤行為類別指數 (Soil behavior type index, I_c)

上述 Q_{tn} 、 F_r 與 I_c 參數，通常基於原始 CPT 量測之錐尖阻抗 (q_t)、錐身摩擦 (f_s)、現地總應力 (σ_{v0}) 和有效應力 (σ'_{v0}) 計算而得，對應公式可參照第二章之式 (2-3) - (2-6)。

然而，部分文獻並未提供現地單位重 (γ)，導致無法直接估算有效應力與正規化參數。針對此情況，Mayne et al. (2010) 建議可使用以下經驗式，透過 f_s 、 q_t 與深度 z 間接估算單位重 γ ，如下所示：

$$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)} = 11.46 + 0.33 \log(z) + 3.10 \log(f_s) + 0.70 \log(q_t) \quad (3-1)$$

其中， q_t 與 f_s 的單位為 kPa， z 為深度，以公尺 (m) 為單位。經由此經驗公式估得之 γ ，可進一步應用於應力估算與後續參數正規化。

3.1.2 資料庫規模、分類與統計

資料庫名稱中之「4182」代表本資料庫共收集 4182 筆具備 USCS 土壤分類結果的紀錄。這些紀錄來自全球 506 個場址，分布於 37 個國家、五大洲。詳細的資料來源與文獻將彙整於表 A 1。其地理分布如下：

- ◆ 亞洲：台灣、新加坡、泰國、越南、日本、中國、南韓、印度、菲律賓、伊朗、亞美尼亞、土耳其。
- ◆ 美洲：美國、加拿大、巴西、厄瓜多、智利。
- ◆ 歐洲：義大利、波蘭、瑞士、德國、葡萄牙、英國、挪威、瑞典、荷蘭、愛爾蘭、斯洛維尼亞、塞爾維亞。
- ◆ 非洲：阿爾及利亞、南非、加納、喀麥隆、埃及。
- ◆ 大洋洲：紐西蘭、澳洲。

每筆紀錄皆具備對應的 USCS 分類結果，包括：「G (礫石 Gravel)、S (砂土 Sand)、M (粉土 Silt)、C (黏土 Clay)、O (有機土壤 Organic)」。

其中，泥炭土 (Peat) 在本研究統一歸為「O」類別。有關 Q_{tn} 與 F_r 資料齊全的有機土壤與泥炭土資料，多數取自 Lengkeek (2022)。

資料庫的詳細資訊請參照表 A 1。表 3.1 統整了資料庫中具備雙變量資訊的紀錄筆數 (括弧中為對應場址數量)，各類 USCS 土壤類別的結果則彙整於表 A 2 至表 A 6。資料庫整體之統計量，包括平均值 (Mean)、變異係數 (coefficient of variation, COV)、最小值 (Min) 與最大值 (Max)，彙整於表 3.2，各類 USCS 類別之統計量則呈現於附錄表 B 1 至表 B 5。

值得注意的是，本段所述統計量係針對整體資料庫進行計算，並非針對單一場址。若關注每個場址內部的變異性，則需參考場址層級 (site-level) 之統計分析結果，已彙整於表 B 6 至表 B 10。為確保統計結果之代表性，僅納入紀錄筆數 ≥ 3 的場址。此類場址層級的二階統計量 (second-order statistics)，可用以評估場址內部參數的變異性，與全域統計提供不同層次之分析依據。

3.1.3 參數與土壤類別的關聯性

在本研究建立之資料庫中，部分土壤分類參數對於區分特定類型土壤具有明確意義。

對於細粒料土壤，其分類主要仰賴塑性相關參數，例如 LL 與 PI。這兩項指標為區分黏土 (C) 與粉土 (M) 的關鍵依據，其分布特性可透過塑性圖 (Plasticity Chart) 進行觀察與解釋，如圖 3.1 所示。

另一方面，針對粗粒料土壤 (如礫石與砂土)，其分類則較依賴粒徑分析參數，特別是 FC 與 D_{50} 。例如，礫石 (G) 通常對應較大的 D_{50} 值，而砂土 (S) 則分布於中等至較小 D_{50} 範圍。圖 3.2 呈現了 FC 與 D_{50} 在不同土壤類別間的分布關係，顯示其可作為辨識粗粒料土壤的重要依據。

此外，鑒於 Robertson and Wride (1998) 所提出之土壤行為類別指數 I_c 範圍與土壤行為類別 SBT 之間的關係 (見表 2.3)，本研究亦進一步探討了資料庫中 I_c 值與 USCS 分類結果間的關係。圖 3.3 顯示了 FC 與 I_c 之間呈現輕微正相關。隨著 I_c 值增加，USCS 土壤類別亦傾向由粗粒料轉為細粒料。

整體而言，透過觀察資料庫中各參數與土壤類別間之關聯性，不僅有助於深入理解各類別之特徵特性，亦有助於識別潛在異常值，進而提升資料庫品質與模型可靠性，圖 3.4 至圖 3.7 進一步呈現了資料庫中 CPT 參數與粒徑分析數據之間的關聯性，提供更全面的視覺化佐證與參數關係探討。

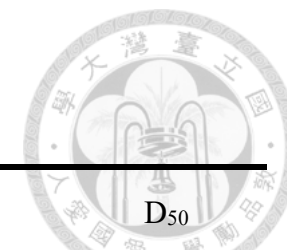


表 3.1 「CPT-USCS/8/4182」中具雙變量資訊的紀錄點（場址）數量。

Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	2261(354)	2210(346)	2222(352)	858(123)	664(87)	664(87)	945(161)	618(113)
PI		2214(346)	2175(344)	844(118)	644(87)	644(87)	915(159)	579(108)
FC			3818(473)	2389(242)	1342(116)	1342(116)	1653(195)	1612(185)
SC				2389(242)	1057(79)	1057(79)	1137(90)	1432(151)
Q _{tn}					1706(149)	1706(149)	1706(149)	959(78)
F _r						1706(149)	1706(149)	959(78)
I _c							2017(228)	1030(91)
D ₅₀								1619(186)

表 3.2 「CPT-USCS/8/4182」中在通用層級下的統計資訊。

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	2261	52.28	0.43	13.00	179.09
PI	2214	26.24	0.65	0.00	116.23
FC (%)	3818	56.98	0.66	0.00	100.00
SC (%)	2389	43.17	0.75	0.00	100.00
Q _{tn}	1706	41.38	1.54	0.84	645.47
F _r	1706	2.69	0.98	0.02	19.44
I _c	2017	2.70	0.23	1.18	4.34
D ₅₀ (mm)	1619	1.36	4.31	0.001	87.56

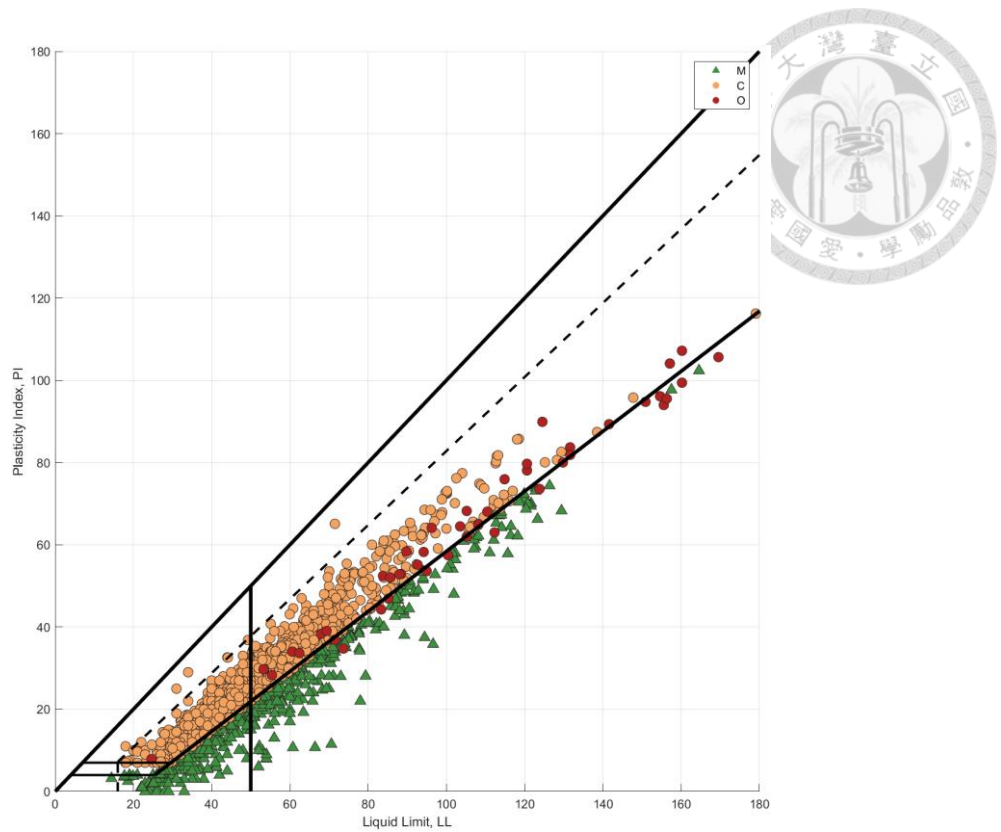


圖 3.1 「CPT-USCS/8/4182」中細粒料土壤於塑性圖上的分布。

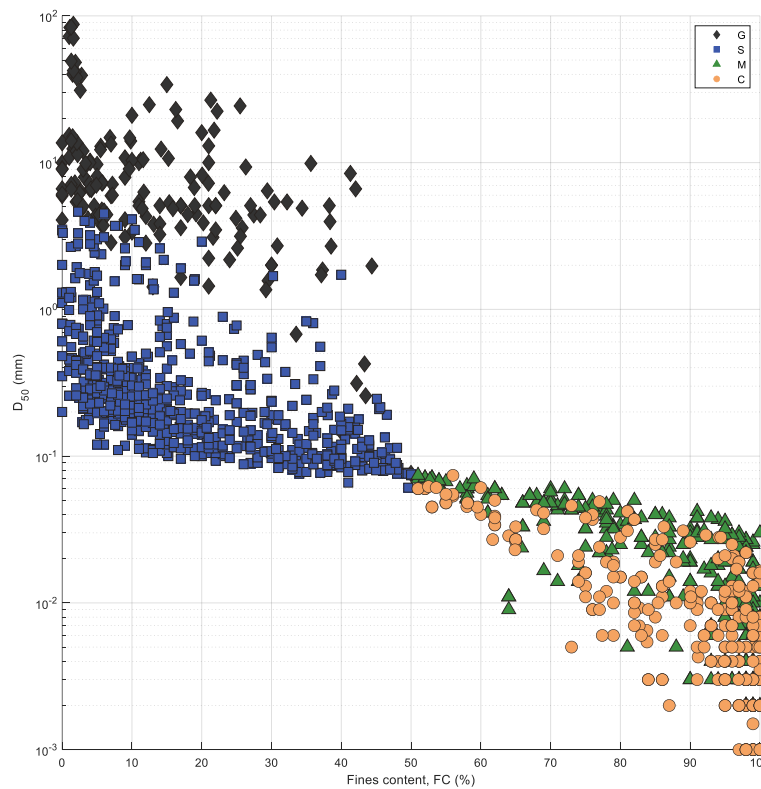


圖 3.2 「CPT-USCS/8/4182」中 FC-D₅₀ 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。

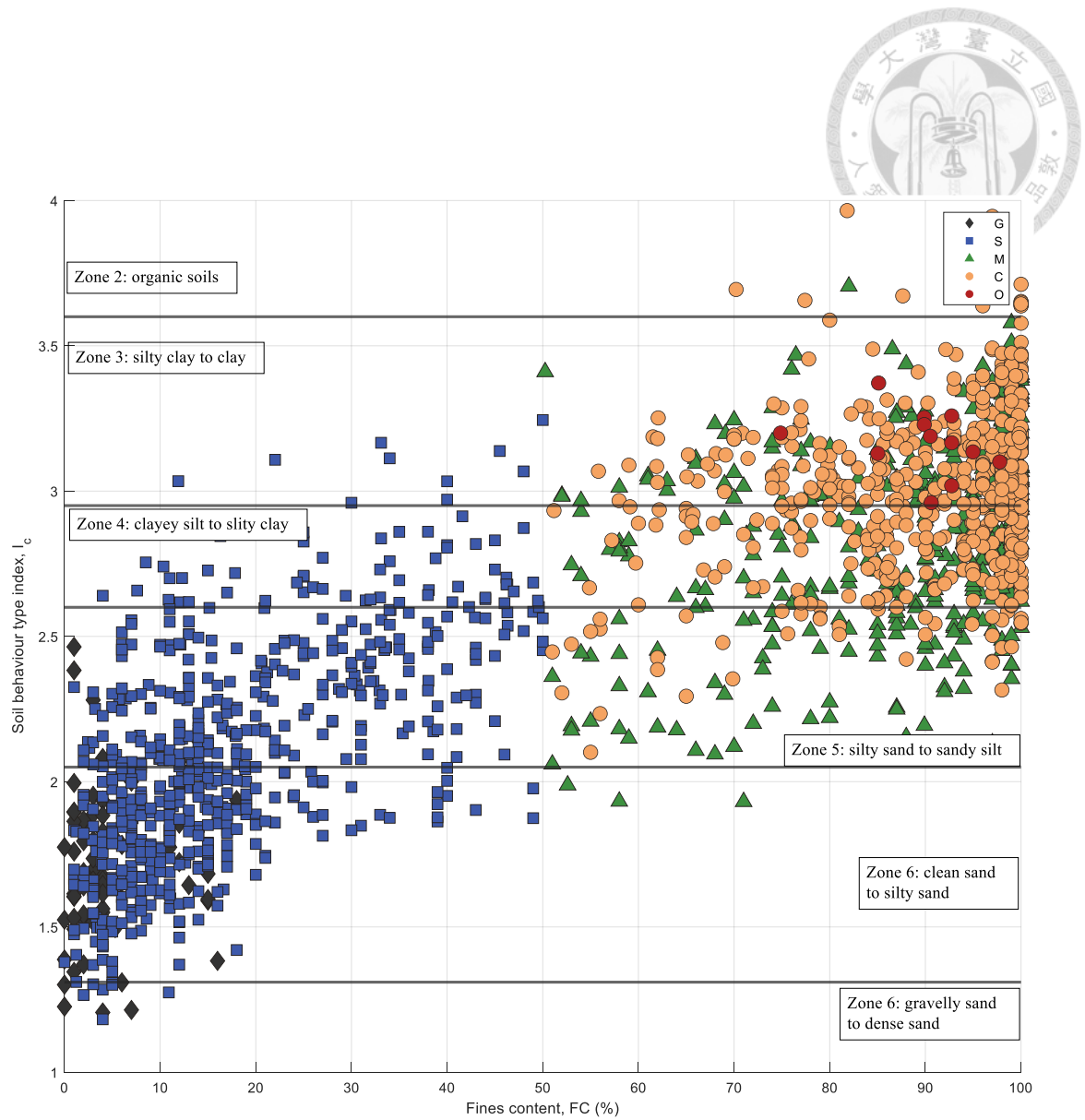


圖 3.3 「CPT-USCS/8/4182」資料中 FC 與 I_c 對應關係及其與 Robertson and Wride (1998) 所定義之 SBTn 分類區域之對照。

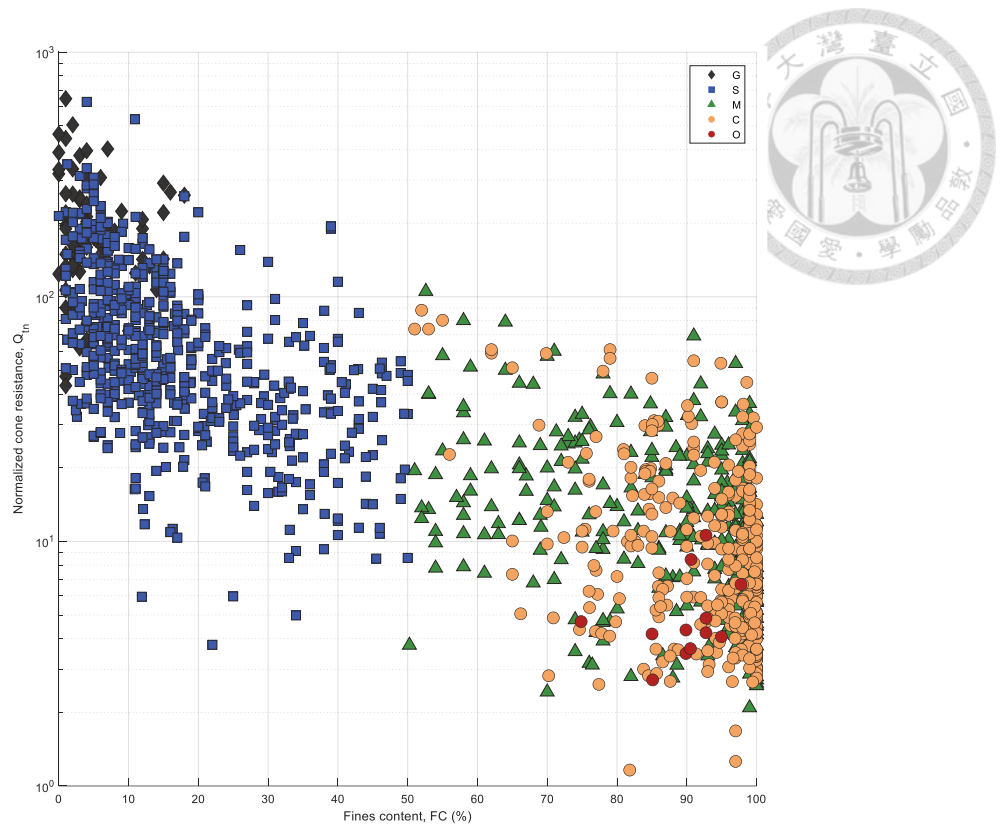


圖 3.4 「CPT-USCS/8/4182」中 $FC-Q_n$ 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。

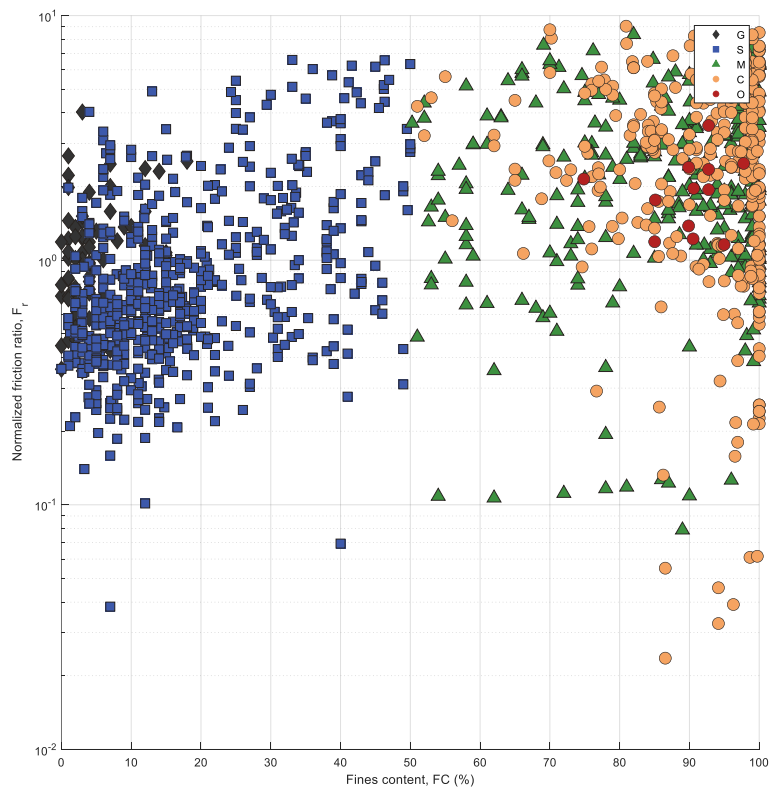


圖 3.5 「CPT-USCS/8/4182」中 $FC-F_r$ 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。

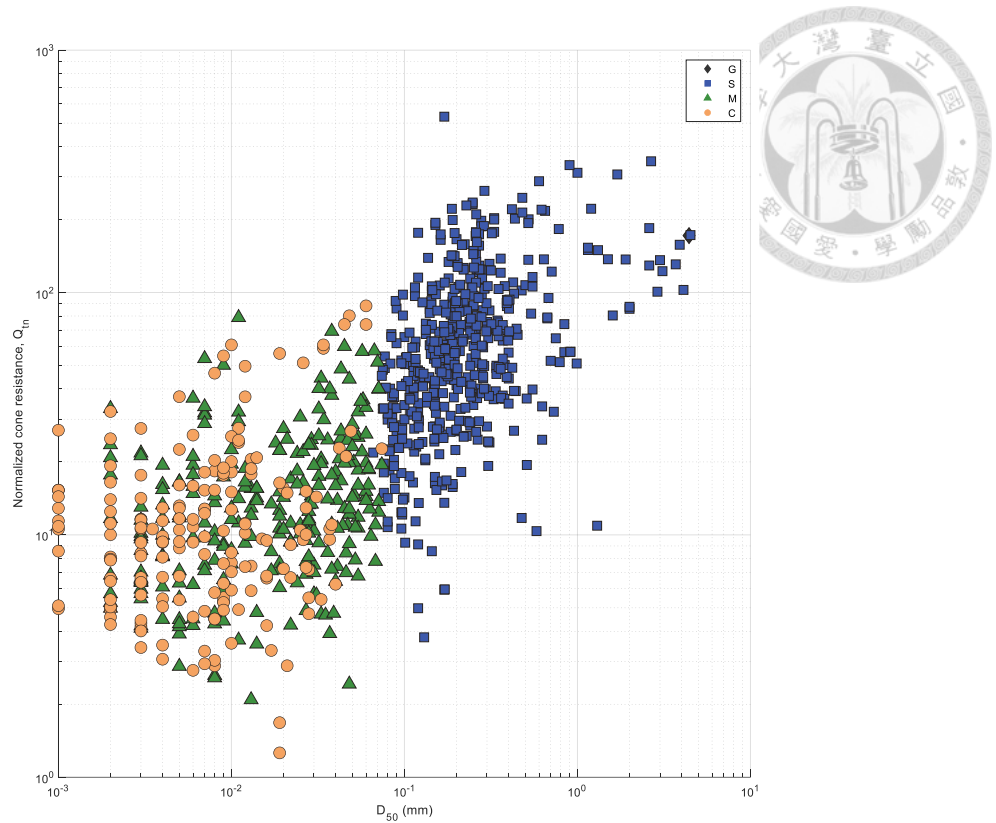


圖 3.6 「CPT-USCS/8/4182」中 D_{50} - Q_{tn} 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。

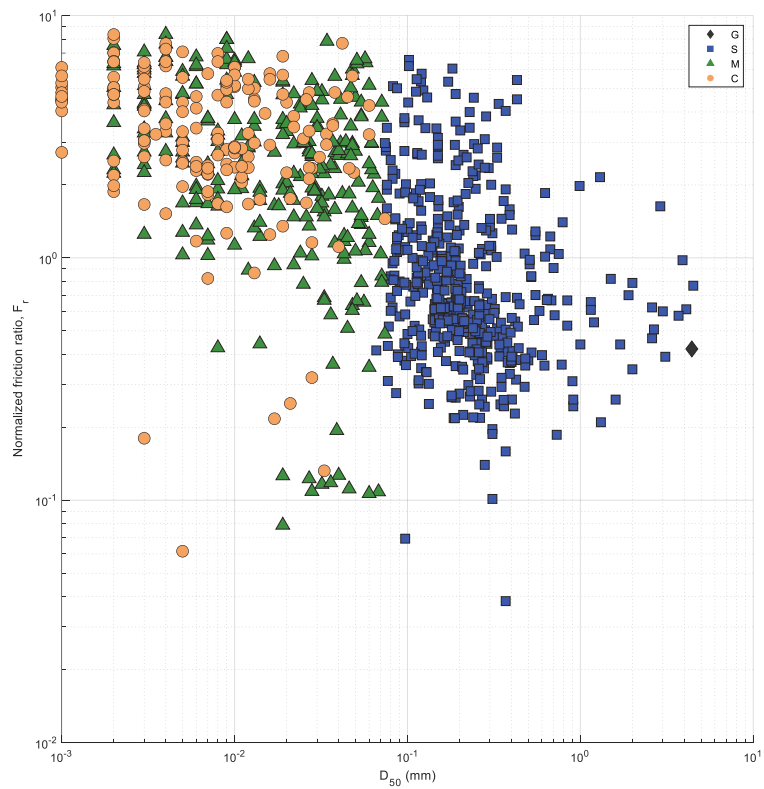


圖 3.7 「CPT-USCS/8/4182」中 D_{50} - F_r 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。



3.2 CPT-USCS/3/2017

3.2.1 資料庫概要

由於本研究之主要目標為發展一套可實現 CPT 數據與土壤類別轉換之模型，因此後續模型訓練與分析所採用之資料，為自前述「CPT-USCS/8/4182」資料庫中進行精簡與重組所得。考量模型建立所需的特徵變數與資料一致性，本研究僅保留與土壤分類高度相關的三項 CPT 參數：正規化錐尖阻抗 (Q_{tn})、摩擦比 (F_r) 與土壤行為類別指數 (I_c)。同時，仍保留每筆資料之 USCS 土壤分類結果 {G、S、M、C、O}。

經過篩選後所建置之通用資料庫命名為「CPT-USCS/3/2017」，共包含 2017 筆紀錄，來自 228 個場址，其地理分布涵蓋 19 個國家，詳列如下：

- ◆ 亞洲：台灣、新加坡、越南、日本、中國、南韓和土耳其。
- ◆ 美洲：美國、加拿大和巴西。
- ◆ 歐洲：波蘭、葡萄牙、挪威、斯洛維尼亞、塞爾維亞、英國、荷蘭以及瑞典。
- ◆ 大洋洲：紐西蘭。

該資料庫作為後續 HBM 之訓練依據，提供全球不同場址之 CPT 參數與 USCS 土壤類別之間的對應關係，使模型能夠學習並捕捉跨場址的土壤行為特性與變異性。此特性對於建立具備泛化能力與地區適應性的土壤預測模型，具有關鍵性的貢獻。

3.2.2 資料特性與分類對應關係分析

「CPT-USCS/3/2017」資料庫中，每筆紀錄都包含來自同一 CPT 測線之 Q_{tn} 與 F_r 參數，並搭配由鄰近鑽孔於相近深度所獲得之 USCS 土壤分類結果 {G、S、M、C、O}。該資料庫最具價值之處，在於提供了 CPT 參數 (Q_{tn} 與 F_r) 與 USCS 土壤類別之間的交叉關聯性，圖 3.8 顯示了資料庫紀錄在 SBTn 空間中的分布情形。

為進一步探討 USCS 分類與 CPT 分類系統 (SBTn) 間的對應關係，圖 3.9 將各 USCS 類別於 Robertson SBTn 圖中的分布區域進行標示。整體而言，兩者具有高度一致性，但亦存在若干不一致之處。例如，圖 3.9 (b) 顯示，大多數 USCS 分類為礫石 (G) 者，在 SBTn 圖中卻被劃分至第 6 區 (CPT 分類為砂土)；圖 3.9 (f) 則顯示，多數 USCS 為有機土 (O) 之紀錄，對應至 SBT 第 3 區 (CPT 分類為黏土)。對於有機土，先前研究如 Ricceri et al. (2002) 與 Lengkeek (2024) 也有類似觀

察，即 Robertson SBTn 圖可能無法準確描述有機土之行為特性。此外，值得注意的是，M 類與 C 類紀錄間亦有明顯重疊現象（見圖 3.9 (d) 和圖 3.9 (e)）。

在「CPT-USCS/3/2017」資料庫中，每筆紀錄之 CPT 向量可定義為 $\underline{X} = [X_1, X_2] \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ ，其中包含 CPT 參數 (Q_{tn}, F_r) 的自然對數值：

$$X_1 = \ln(Q_{tn}) \quad X_2 = \ln(F_r) \quad (3-2)$$

每一筆紀錄的 USCS 分類以一個類別向量 $\underline{L} \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$ ：

$$\underline{L} = \begin{cases} [1 & 0 & 0 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = G) \\ [0 & 1 & 0 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = S) \\ [0 & 0 & 1 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = M) \\ [0 & 0 & 0 & 1 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = C) \\ [0 & 0 & 0 & 0 & 1]^T & (\text{USCS first letter} = O) \end{cases} \quad (3-3)$$

在接下來的章節中，若某筆土壤紀錄的向量 $\underline{L}$ 中第 k 項為 1，則表示該紀錄屬於第 k 類 USCS 分類。例如，礫石紀錄屬於第一類 USCS 分類，砂土紀錄屬於第二類，依此類推。

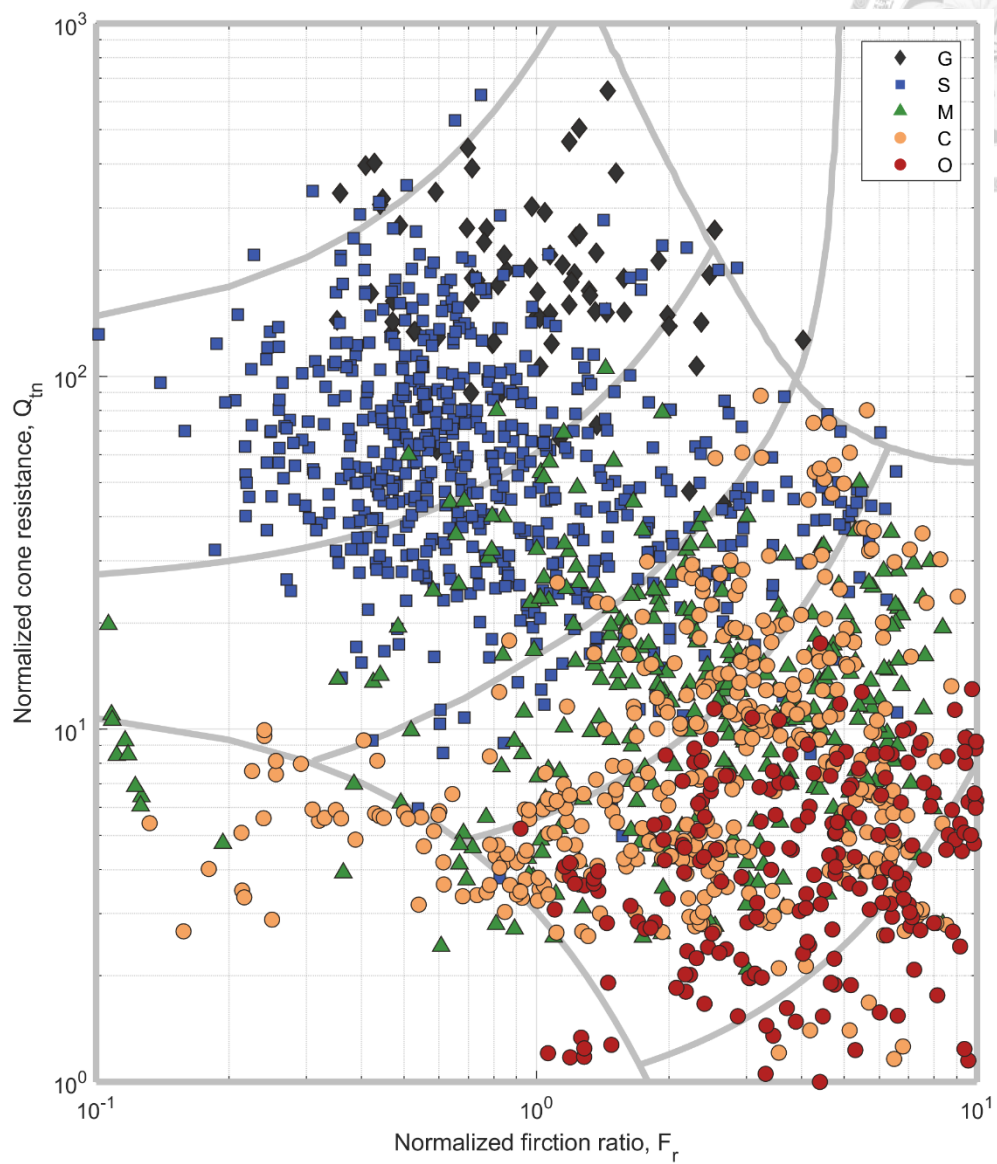


圖 3.8 「CPT-USCS/8/4182」中 Q_{tn} - F_r 關係圖與 USCS 土壤類別分佈。

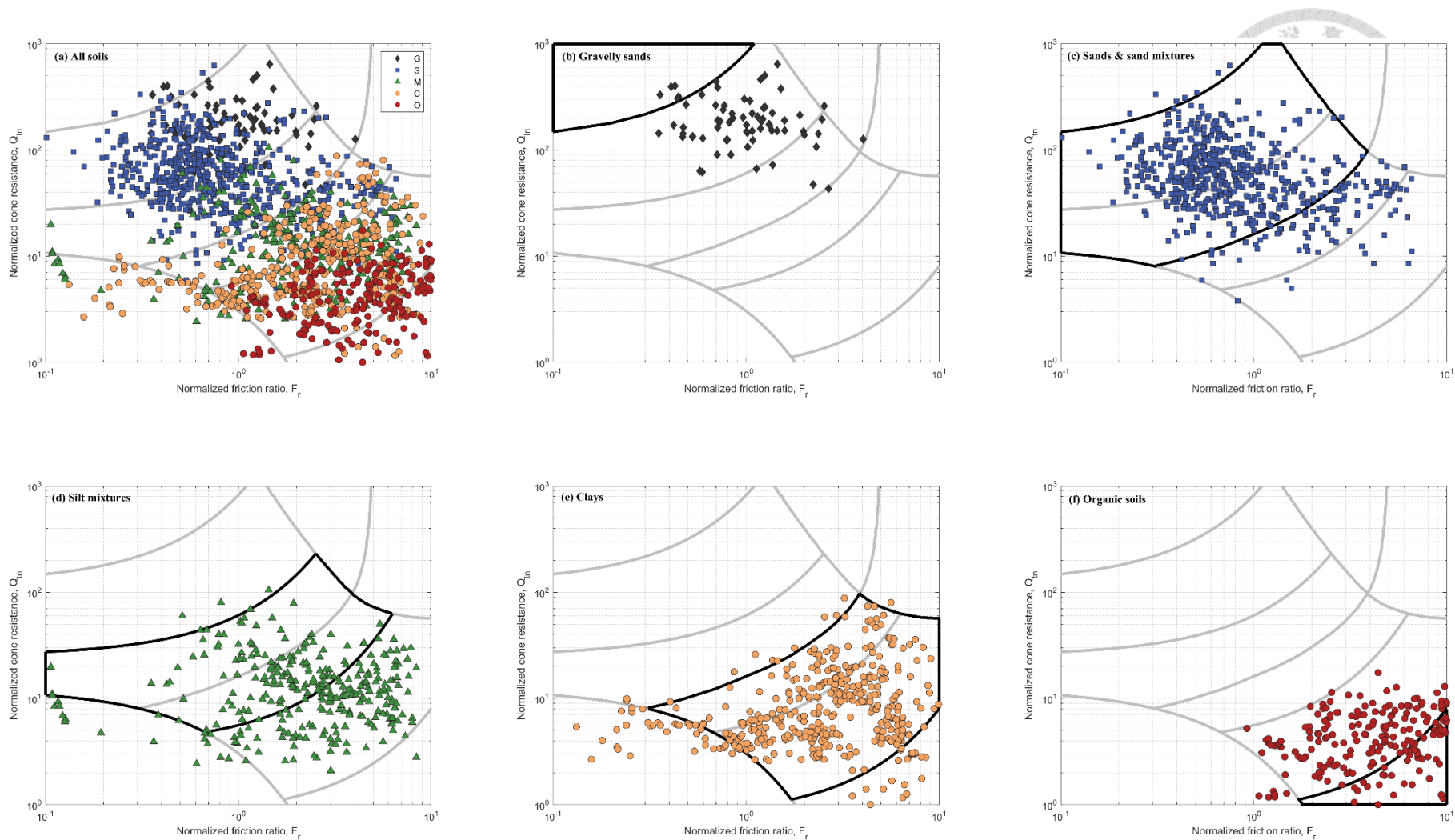


圖 3.9 Q_{tn} - F_r 圖中 USCS 土壤類別與 Robertson SBTn 區域之對比分析圖

第 4 章 USCS-HBM



2.2.3 節所介紹之基於 CPT 的 SBTn 圖屬於通用模型 (generic model)，其依據全球多個場址的大量資料所建立，並以經驗式方式劃定分類邊界，在大多數的場址中具備良好的適用性與操作性。然而，通用模型可能無法因應特定場址的地質條件變異，導致分類結果出現偏差。相對地，場址特定模型 (site-specific model) 雖能反映場址獨特性，但往往因現地資料稀少而面臨顯著的統計不確定性。為因應此問題，Phoon et al. (2022) 提出「場址識別挑戰」(site recognition challenge) 之概念，強調在尊重場址獨特性的前提下，如何有效整合通用資料庫中其他場址的資料與目標場址的有限觀測資訊，以提升對場址的預測能力。

Ching et al. (2021) 提出層級貝葉斯模型 (hierarchical Bayesian model, HBM)，以建模土壤/岩石性質之間的交叉相關性，並考量不同場址的獨特性。在該模型架構中，每個場址皆有其專屬的場址特定模型，各場址模型之參數雖然彼此不同，但皆受到一組共通的超參數 (hyper-parameters) 所控制。

這組超參數會透過通用資料庫更新，以學習不同場址之間的共通特性，進而建立一組適用於新目標場址的先驗模型 (prior model)。當有目標場址具備少量觀測資料時，該先驗模型可進一步更新為後驗模型 (posterior model)。此後驗模型結合了通用資料庫的大量場址資料的統計力量與具場址獨特性的目標場址資料，因此被稱為「準場址特定模型」(quasi-site-specific model)。

然而，需注意的是，統計學中之分類問題 (classification) 與迴歸問題 (regression) 在性質上有本質差異。迴歸所預測的為連續實數變數，而分類則是預測離散類別。Ching et al. (2021) 所提出之 HBM 主要針對土壤/岩石之物理性質變數的預測，並不適用於以類別為目標的土壤分類預測問題。為此，本研究針對 USCS 分類下的土壤分類預測問題，提出一套全新的層級貝葉斯模型，稱為 USCS-HBM，將在本章節進行詳細的介紹。

4.1 USCS-HBM 架構

USCS-HBM 的架構如圖 4.1 所示，記 $\underline{X}_{ij} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ (其中 $n=2$ 表 X 的維度) 為資料庫中第 i 個場址中第 j 筆記錄的向量，包含 (X_1, X_2) 。對應的類別向量記為

$\underline{L}_{ij} \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$ ，表該筆紀錄所屬之 USCS 土壤類別。其中資料庫中總共有 n_s 個場址 ($n_s = 228$)，第 i 個場址包含 m_i 筆 $(\underline{X}, \underline{L})$ 紀錄。

以下依圖 4.1 中自下而上的架構順序，逐一說明 USCS-HBM 各參數間的條件機率密度函數 (PDF)。

1. 在給定 $\underline{L}_{ij}$, $\underline{\mu}_i^{(1:5)}$ 和 $\mathbf{C}_i^{(1:5)}$ 的條件下， $\underline{X}_{ij}$ 的 PDF：

若 $\underline{X}_{ij}$ 屬於第 k 種 USCS 類別，則假設其遵循以下多變量常態分布 $N(\underline{X}_{ij}; \underline{\mu}_i^{(k)}, \mathbf{C}_i^{(k)})$ ，其中 $\underline{\mu}_i^{(k)} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ ， $\mathbf{C}_i^{(k)} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 因此給定條件下的 PDF 可以寫作：

$$f(\underline{X}_{ij} | \underline{\mu}_i^{(1:5)}, \mathbf{C}_i^{(1:5)}) = \prod_{k=1}^5 N(\underline{X}_{ij}; \underline{\mu}_i^{(k)}, \mathbf{C}_i^{(k)})^{L_{ij}^{(1:5)}} \quad (4-1)$$

$$= \prod_{k=1}^5 \left\{ |\mathbf{C}_i^{(k)}|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (\underline{X}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)})^T (\mathbf{C}_i^{(k)})^{-1} (\underline{X}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)}) \right] \right\}^{L_{ij}^{(k)}}$$

其中， $L_{ij}^{(k)}$ 表 $\underline{L}_{ij}$ 中第 k 個元素，代表該筆資料是否屬於第 k 種 USCS 類別。

2. 在給定 $\underline{P}_i$ 的條件下， $\underline{L}_{ij}$ 的 PDF：

假設類別變數 $\underline{L}_{ij}$ 遵循類別分布 (categorical distribution)：

$$f(\underline{L}_{ij} | \underline{P}_i) = \text{Cat}(\underline{L}_{ij}; \underline{P}_i) = \prod_{k=1}^5 [P_i^{(k)}]^{L_{ij}^{(k)}} \quad (4-2)$$

其中， $\underline{P}_i = [P_i^{(1)}, P_i^{(2)}, \dots, P_i^{(5)}]^T \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$ 是第 i 個場址中的土壤類別機率分布；

而 $P_i^{(k)}$ 則是第 i 個場址中，任一記錄屬於第 k 種 USCS 類別的機率，因此滿足 $P_i^{(1)} + P_i^{(2)} + \dots + P_i^{(5)} = 1$ 。

3. 在給定 $\underline{\mu}_0^{(k)}$ 和 $\mathbf{C}_0^{(k)}$ 的條件下， $\underline{\mu}_i^{(k)}$ 的 PDF：

場址 i 中第 k 種 USCS 類別的均值向量 $\{\underline{\mu}_1^{(k)}, \underline{\mu}_2^{(k)}, \dots, \underline{\mu}_{n_s}^{(k)}\}$ ，雖然相似但不相同，皆被假設遵循以下多變量常態 PDF：

$$f(\underline{\mu}_i^{(k)} | \underline{\mu}_0^{(k)}, \mathbf{C}_0^{(k)}) = N(\underline{\mu}_i^{(k)}; \underline{\mu}_0^{(k)}, \mathbf{C}_0^{(k)}) \quad (4-3)$$



$$= \left| \mathbf{C}_0^{(k)} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)} \right)^T \left(\mathbf{C}_0^{(k)} \right)^{-1} \left(\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)} \right) \right]$$

其中， $\underline{\mu}_0^{(k)} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 且 $\mathbf{C}_0^{(k)} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 為超參數，用以描述第 k 種 USCS 類別場址間的均值和變異性。

4. 在給定 $\Sigma_0^{(k)}$ 和 $\nu_0^{(k)}$ 的條件下， $\mathbf{C}_i^{(k)}$ 的 PDF：

場址 i 中第 k 種 USCS 類別的共變異數矩陣 $\{\mathbf{C}_1^{(k)}, \mathbf{C}_2^{(k)}, \dots, \mathbf{C}_{n_s}^{(k)}\}$ ，雖然相似但不相同，皆被假設遵循以下逆 Wishart (IW) PDF：

$$f\left(\mathbf{C}_i^{(k)} \mid \Sigma_0^{(k)}, \nu_0^{(k)}\right) = \text{IW}\left(\mathbf{C}_i^{(k)}; \Sigma_0^{(k)}, \nu_0^{(k)}\right) \quad (4-4)$$

$$= \frac{\left| \Sigma_0^{(k)} \right|^{\nu_0^{(k)}/2}}{2^{n\nu_0^{(k)}/2} \cdot \Gamma_n(\nu_0^{(k)}/2)} \cdot \left| \mathbf{C}_i^{(k)} \right|^{-\frac{\nu_0^{(k)} + n + 1}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{tr} \left[\Sigma_0^{(k)} \times \left(\mathbf{C}_i^{(k)} \right)^{-1} \right] \right\}$$

其中， $\Sigma_0^{(k)} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 且 $\nu_0^{(k)} \in \mathbf{R}$ 是控制每一個場址中，第 k 種 USCS 類別共變異數矩陣的超參數。其中， $\Gamma_n(\cdot)$ 是多變量 Gamma 函數 (James 1964)。此外， n 是變數的維度，而 $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩陣的跡 (trace)，即方矩陣中對角元素的總和。

5. 在給定 $\underline{\gamma}$ 的條件下， $\underline{P}_i$ 的 PDF：

場址 i 中第 k 種 USCS 類別的土壤類別機率分布 $\{\underline{P}_1, \underline{P}_2, \dots, \underline{P}_{n_s}\}$ 是相似但不相同的，但被假設遵從相同的 Dirichlet PDF：

$$f\left(\underline{P}_i \mid \underline{\gamma}\right) = \text{Dir}\left(\underline{P}_i; \underline{\gamma}\right) = \frac{1}{B(\underline{\gamma})} \prod_{k=1}^5 \left(P_i^{(k)} \right)^{\gamma_k - 1} \quad (4-5)$$

其中， $\underline{\gamma} = [\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}, \dots, \gamma^{(5)}]^T \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$ 為 Dirichlet PDF 中的集中參數 (concentration parameter)， $B(\underline{\gamma})$ 是多變量 beta 函數 (Abramowitz and Stegun 1965)。在本研究中，對於每一筆資料的土壤類別機率向量 $\underline{P}_i$ ，我們採用非資訊性 (non-informative) 的 Dirichlet PDF 作為其先驗 $f(\underline{P}_i \mid \underline{\gamma})$ 。亦即設定 $\gamma^{(1)} = \gamma^{(2)} = \dots, \gamma^{(5)} = 1$ ，代表在無觀察資料下，各類別的機率被視為相同可能，反映對於類別分布的中立假設。

在本研究中，所有超參數的集合記為 $\Theta = (\underline{\mu}_0^{(1:5)}, \mathbf{C}_0^{(1:5)}, \mathbf{\Sigma}_0^{(1:5)}, \nu_0^{(1:5)})$ 。在貝葉斯分析架構下，需為上述所有超參數指定先驗機率密度函數。為了能以 Gibbs 採樣法執行具解析解的後驗推論，本研究對各參數採用適當的共軛先驗分布。以下逐一說明各參數的先驗設定方式：

1. $\underline{\mu}_0^{(k)}$ 的先驗 PDF：

每一類 USCS 土壤類別 k ，其超參數 $\underline{\mu}_0^{(k)}$ 的共軛先驗採用多變量常態 PDF $N(\underline{\mu}_0^{(k)}; \underline{\mu}_{\mu_0}, \mathbf{C}_{\mu_0})$ 。當缺乏明確的先驗資訊時，建議採用非資訊性先驗。具體做法可將 $\underline{\mu}_{\mu_0}$ 設定為零向量，並令 $\mathbf{C}_{\mu_0}$ 為對角矩陣，其對角元素設為較大的數值（如 10^4 ），以反映對 $\underline{\mu}_0^{(k)}$ 的高度不確定性。

2. $\mathbf{C}_0^{(k)}$ 的先驗 PDF：

每一類 USCS 土壤類別 k ，其超參數 $\mathbf{C}_0^{(k)}$ 的共軛先驗採用逆 Wishart PDF $IW(\mathbf{C}_0^{(k)}; \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)}, \nu_{\mathbf{C}_0}^{(k)})$ 。由於逆 Wishart PDF 不容易設定為完全非資訊性，為了實現近似非資訊性的先驗設定，Huang and Wand (2013) 提出令自由度 $\nu_{\mathbf{C}_0} = n + 1 = 3$ ，其中 n 是變數維度，並設定尺度矩陣 $\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)} = 4 \times \text{diag}(1/a_1^{(k)}, \dots, 1/a_n^{(k)})$ ，其中， $\text{diag}(\cdot)$ 表對角矩陣，而每個 $a_m^{(k)}$ ($m = 1, \dots, n$) 皆獨立且遵循逆 Gamma PDF，形狀參數 = α ，尺度參數 = β ：

$$f(a_m^{(k)}) = \text{IG}(a_m^{(k)}; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot [a_m^{(k)}]^{-\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{\beta}{a_m^{(k)}}\right) \quad (4-6)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函數。為達近似非資訊性效果，Huang and Wand (2013) 建議將參數設為 $\alpha = 0.5$ 、 β 為一個極小的數值（如 10^{-4} ）。

3. $\mathbf{\Sigma}_0^{(k)}$ 的先驗 PDF：

每一類 USCS 土壤類別 k ，其超參數 $\mathbf{\Sigma}_0^{(k)}$ 的共軛先驗採用 Wishart PDF：

$$\begin{aligned} f(\mathbf{\Sigma}_0^{(k)} | \boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}, \lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}) &= W(\mathbf{\Sigma}_0^{(k)}; \boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}, \lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}) \\ &= \frac{|\boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}|^{-\lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}/2}}{2^{n\lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}/2} \cdot \Gamma_n(\lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}/2)} \cdot |\mathbf{\Sigma}_0^{(k)}|^{\frac{\lambda_{\mathbf{\Sigma}_0}-n-1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \text{tr}(\mathbf{\Sigma}_0^{(k)} \times \boldsymbol{\Psi}_{\mathbf{\Sigma}_0}^{-1})\right] \end{aligned} \quad (4-7)$$

其中， Ψ_{Σ_0} 是尺度矩陣，而 λ_{Σ_0} 則為自由度。根據 Chung et al. (2015)，若令自由度 $\lambda_{\Sigma_0} = n + 2 = 4$ ，並設定尺度矩陣 Ψ_{Σ_0} 為一個對角元素較大的對角矩陣 (如 10^4)，則 $W(\Sigma_0^{(k)}; \Psi_{\Sigma_0}, \lambda_{\Sigma_0})$ 可視為接近非資訊的先驗。

4. $v_0^{(k)}$ 的先驗分布：

逆 Wishart PDF 中自由度參數 $v_0^{(k)}$ 為整數。為提供非資訊性先驗，Huang and Wand (2013) 建議採用一個在合理範圍內均勻分布作為先驗，即將 $v_0^{(k)}$ 定義為落在 $n = 2$ 至某一較大整數 (例如 1000) 之間的均勻整數分布。

在本研究中記 $\mathbf{X}_{DB} = \{X_{ij}: i = 1, \dots, n_s; j = 1, \dots, m_i\}$, $\mathbf{L}_{DB} = \{L_{ij}: i = 1, \dots, n_s; j = 1, \dots, m_i\}$ ，其中 "DB" 表示 database，分別代表圖 4.1 中底層涵蓋的所有可觀測變數。亦即 $\{\mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}\}$ 表示所有可觀測的資料庫資料。中層變數則包含各場址所對應的特定參數，包括每個場址與土壤類別對應的均值向量與共變異數矩陣： $\boldsymbol{\mu} = \{\underline{\mu}_i^{(k)}: i = 1, \dots, n_s; k = 1, \dots, 5\}$ 、 $\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_i^{(k)}: i = 1, \dots, n_s; k = 1, \dots, 5\}$ ，以及各場址對五種 USCS 土壤類別的機率分布參數 $\mathbf{P} = \{P_i: i = 1, \dots, n_s\}$ 。頂層為控制場址特定參數分布的超參數，記為 $\boldsymbol{\Theta} = (\underline{\mu}_0^{(1:5)}, \mathbf{C}_0^{(1:5)}, \Sigma_0^{(1:5)}, v_0^{(1:5)})$ 。此外，為了建構非資訊性之逆 Wishart 先驗 PDF 所需的參數 $\mathbf{a} = \{a_m^{(k)} = m = 1, \dots, n; k = 1, \dots, 5\}$ 則位於超參數之上的更高層級 (儘管圖 4.1 中未顯示該層)。

綜合上述所有層級之變數，本研究所建立之 USCS-HBM 模型可表示為以下的多變量聯合機率密度函數：



$$\begin{aligned}
 & f(\mathbf{X}_{\text{DB}}, \mathbf{L}_{\text{DB}}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\Theta}, \boldsymbol{\alpha}) \\
 &= f(\mathbf{X}_{\text{DB}} | \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{L}_{\text{DB}}) \cdot f(\mathbf{L}_{\text{DB}} | \mathbf{P}) \cdot f(\boldsymbol{\mu} | \underline{\mu}_0^{(1:5)}, \mathbf{C}_0^{(1:5)}) \cdot f(\mathbf{C} | \boldsymbol{\Sigma}_0^{(1:5)}, \nu_0^{(1:5)}) \cdot f(\mathbf{P} | \boldsymbol{\gamma}) \cdot f(\underline{\mu}_0^{(1:5)}) \cdot f(\mathbf{C}_0^{(1:5)} | \boldsymbol{a}) \cdot f(\boldsymbol{\Sigma}_0^{(1:5)}) \cdot f(\boldsymbol{a}) \\
 &= \left\{ \prod_{i=1}^{n_s} \prod_{j=1}^{m_i} \prod_{k=1}^5 \mathcal{N}(\underline{X}_{ij}; \underline{\mu}_i^{(k)}, \mathbf{C}_i^{(k)}) \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{n_s} \prod_{j=1}^{m_i} \text{Cat}(\underline{L}_{ij}; \mathbf{P}_i) \right\} \cdot \left\{ \prod_{i=1}^{n_s} \prod_{k=1}^5 \mathcal{N}(\underline{\mu}_i^{(k)}; \underline{\mu}_0^{(k)}, \mathbf{C}_0^{(k)}) \right\} \cdot \left[\prod_{i=1}^{n_s} \prod_{k=1}^5 \text{IW}(\mathbf{C}_i^{(k)}; \boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)}, \nu_0^{(k)}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\prod_{i=1}^{n_s} \text{Dir}(\underline{\mathbf{P}}_i; \boldsymbol{\gamma}) \right] \cdot \left[\prod_{k=1}^5 \mathcal{N}(\underline{\mu}_0^{(k)}; \underline{\mu}_{\mu_0}, \mathbf{C}_{\mu_0}) \right] \cdot \left[\prod_{k=1}^5 \text{IW}(\mathbf{C}_0^{(k)}; \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}, \nu_{\mathbf{C}_0}) \right] \cdot \left[\prod_{k=1}^5 \mathcal{W}(\boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)}; \boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}, \lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0}) \right] \cdot \left[\prod_{k=1}^5 \prod_{m=1}^n \text{IG}(a_m^{(k)}; \alpha, \beta) \right] \\
 &\propto \left[\prod_{k=1}^5 \frac{|\mathbf{C}_0^{(k)}|^{\frac{n_s + \nu_{\mathbf{C}_0} + n + 1}{2}} \cdot |\boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)}|^{\frac{n_s \nu_0^{(k)} + \lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0} - n - 1}{2}} \cdot |\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)}|^{\nu_{\mathbf{C}_0}/2}}{2^{n_s n \nu_0^{(k)}/2} \cdot \Gamma_n(\nu_0^{(k)}/2)^{n_s}} \right] \cdot \left[\prod_{i=1}^{n_s} \prod_{k=1}^5 (\mathbf{P}_i^{(k)})^{m_i^{(k)} + \gamma_i - 1} \cdot |\mathbf{C}_i^{(k)}|^{-\frac{m_i^{(k)} + \nu_0^{(k)} + n + 1}{2}} \right] \cdot \left\{ \prod_{k=1}^5 \prod_{m=1}^n [a_m^{(k)}]^{-\alpha - 1} \right\} \\
 &\cdot e^{\left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^{m_i} (\underline{X}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)})^T (\mathbf{C}_i^{(k)})^{-1} (\underline{X}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)}) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{k=1}^5 (\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)})^T (\mathbf{C}_0^{(k)})^{-1} (\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)}) - \frac{1}{2} \text{tr} \left[\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{k=1}^5 \mathbf{x}_0^{(k)} (\mathbf{C}_i^{(k)})^{-1} \right] \right\}} \\
 &\cdot e^{\left\{ -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^5 (\underline{\mu}_0^{(k)} - \underline{\mu}_{\mu_0})^T (\mathbf{C}_{\mu_0})^{-1} (\underline{\mu}_0^{(k)} - \underline{\mu}_{\mu_0}) - \frac{1}{2} \text{tr} \left[\sum_{k=1}^5 \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)} (\mathbf{C}_0^{(k)})^{-1} \right] - \frac{1}{2} \text{tr} \left(\sum_{k=1}^5 \mathbf{x}_0^{(k)} \boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}^{-1} \right) - \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^n \frac{\beta}{a_m^{(k)}} \right\}} \quad (4-8)
 \end{aligned}$$

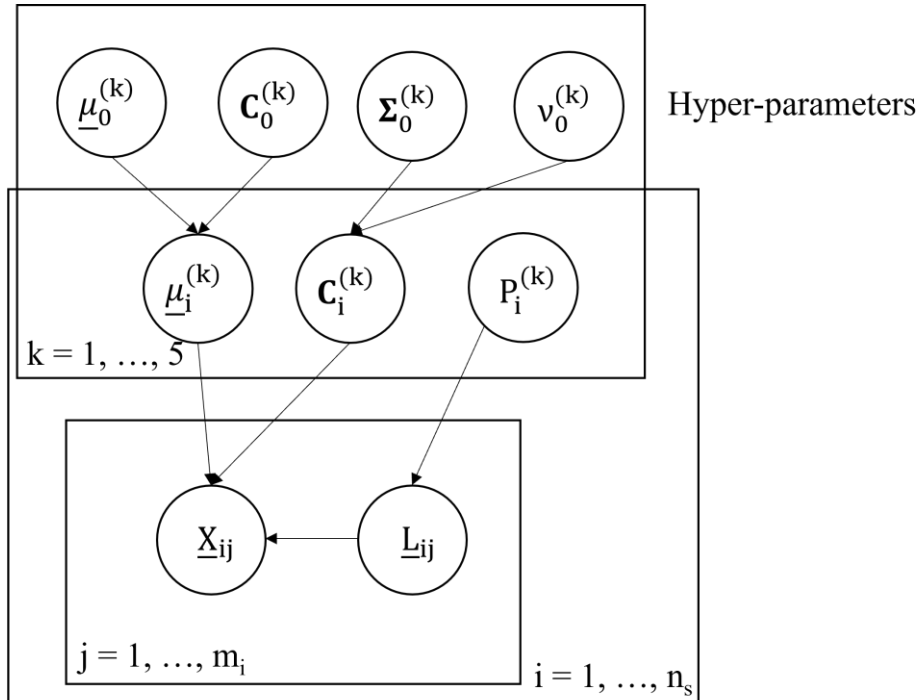


圖 4.1 USCS-HBM 的模型架構

4.2 學習階段

在學習階段的主要目標，是根據資料庫 $\{\mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}\}$ 學習超參數 $\Theta = \{\underline{\mu}_0^{(1:5)}, \mathbf{C}_0^{(1:5)}, \Sigma_0^{(1:5)}, \nu_0^{(1:5)}\}$ 。透過對超參數 Θ 的學習，USCS-HBM 得以掌握資料庫中各場址的「場址特性」，並進一步應用於某個目標場址的先驗模型建構。該先驗模型再結合目標場址的觀測資料，於推論階段中轉化為後驗模型，又稱準場址特定模型 (quasi-site-specific model)。

在學習階段中，採用貝葉斯分析來估計 Θ 。具體而言，透過 Gibbs 採樣法 (Gibbs sampler) (Geman and Geman 1984)，從條件機率密度函數 $f(\underline{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{P}, \Theta, \mathbf{a} | \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 中抽取樣本，並保留其中的 Θ 樣本作為學習結果。

Gibbs 採樣法屬於馬可夫鏈蒙地卡羅 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 方法，其基本概念是將所有隨機變數分組，並針對每一組變數，在固定其他組變數的條件下，根據其「完全條件機率密度函數」進行抽樣。重複進行所有參數的條件抽樣，即可形成收斂至後驗分佈的馬可夫鏈。

以下將逐一說明 Gibbs 採樣法的步驟與邏輯：

1. 以任意數值初始化 $\{\underline{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{P}, \Theta, \mathbf{a}\}$ 。
2. (每 i 個場址對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\underline{\mu}_i^{(k)}$:

$$\underline{\mu}_i^{(k)} \sim N \left\{ \underline{\mu}_i^{(k)}; \left[\left(\mathbf{C}_0^{(k)} \right)^{-1} + m_i^{(k)} \left(\mathbf{C}_i^{(k)} \right)^{-1} \right]^{-1} \left[\left(\mathbf{C}_0^{(k)} \right)^{-1} \underline{\mu}_0^{(k)} + \left(\mathbf{C}_i^{(k)} \right)^{-1} \sum_{j=1}^{m_i^{(k)}} \underline{X}_{ij} \right], \right. \\ \left. \left[\left(\mathbf{C}_0^{(k)} \right)^{-1} + m_i^{(k)} \left(\mathbf{C}_i^{(k)} \right)^{-1} \right]^{-1} \right\} \quad (4-9)$$

本研究採用拒絕抽樣法 (rejection sampling)，以確保五種 USCS 類別的平均向量 $\{\underline{\mu}_i^{(1)}, \underline{\mu}_i^{(2)}, \dots, \underline{\mu}_i^{(5)}\}$ 符合正確的順序，即滿足 $I_{c, \underline{\mu}_i^{(1)}} < I_{c, \underline{\mu}_i^{(2)}} < \dots < I_{c, \underline{\mu}_i^{(5)}}$ ，其中， $I_{c, \underline{\mu}_i^{(k)}}$ 為根據式 (2-6) 以 $\underline{\mu}_i^{(k)}$ 所對應之 (Q_m, F_r) 值所計算所得。如此設計的目的在於，使 G 類 (礫石) 之平均向量傾向分布於 SBTn 圖的最左上角，依序為 S (砂土)、M (粉土)、C (黏土)，而 O 類 (有機土) 之平均向量則傾向分布於最右下角。此策略有助於維持各類別在 SBTn 空間中的合理排列與可辨識性。



3. (每 i 個場址對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\mathbf{C}_i^{(k)}$:

$$\mathbf{C}_i^{(k)} \sim \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_i^{(k)}; \boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)} + \sum_{j=1}^{m_i^{(k)}} (\underline{\mathbf{X}}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)})^T (\underline{\mathbf{X}}_{ij} - \underline{\mu}_i^{(k)}), m_i^{(k)} + v_0^{(k)} \right\} \quad (4-10)$$

4. (對每 i 個場址) 取樣 $\underline{\mathbf{P}}_i$:

$$\underline{\mathbf{P}}_i \sim \text{Dir}(\underline{\mathbf{P}}_i; m_i^{(1)} + \gamma^{(1)}, m_i^{(2)} + \gamma^{(2)}, \dots, m_i^{(5)} + \gamma^{(5)}) \quad (4-11)$$

其中, $\gamma^{(1)} = \gamma^{(2)} = \dots = \gamma^{(5)} = 1$ 。

5. (對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\underline{\mu}_0^{(k)}$:

$$\underline{\mu}_0^{(k)} \sim \text{N} \left\{ \underline{\mu}_0^{(k)}; \left[\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + n_s (\mathbf{C}_0^{(k)})^{-1} \right]^{-1} \left[\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} \underline{\mu}_{\underline{\mu}_0} + (\mathbf{C}_0^{(k)})^{-1} \sum_{i=1}^{n_s} \underline{\mu}_i^{(k)} \right], \right. \\ \left. \left[\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}^{-1} + n_s \cdot (\mathbf{C}_0^{(k)})^{-1} \right]^{-1} \right\} \quad (4-12)$$

其中, $\underline{\mu}_{\underline{\mu}_0}$ 是零向量, 且 $\mathbf{C}_{\underline{\mu}_0}$ 是一個對角元素很大的對角矩陣。

6. (對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\mathbf{C}_0^{(k)}$:

$$\mathbf{C}_0^{(k)} \sim \text{IW} \left\{ \mathbf{C}_0^{(k)}; \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)} + \sum_{i=1}^{n_s} (\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)})^T (\underline{\mu}_i^{(k)} - \underline{\mu}_0^{(k)}), n_s + v_{\mathbf{C}_0} \right\} \quad (4-13)$$

其中 $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{C}_0}^{(k)} = \text{diag}(4/a_1^{(k)}, \dots, 4/a_n^{(k)})$; $v_{\mathbf{C}_0} = n + 2$ 。

7. (對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)}$:

$$\boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)} \sim W \left\{ \boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)}; \left(\boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}^{-1} + \sum_{i=1}^{n_s} (\mathbf{C}_i^{(k)})^{-1} \right)^{-1}, n_s v_0^{(k)} + \lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0} \right\} \quad (4-14)$$

其中, $\boldsymbol{\Psi}_{\boldsymbol{\Sigma}_0}$ 是一個對角元素很大的對角矩陣; $\lambda_{\boldsymbol{\Sigma}_0} = n + 2$ 。

8. (對第 k 種 USCS 類別) 根據以下離散分布取樣 $v_0^{(k)}$:



$$p\left(v_0^{(k)} \mid \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}, \mathbf{P}, \underline{\boldsymbol{\mu}}_0^{(1:5)}, \mathbf{C}_0^{(1:5)}, \boldsymbol{\Sigma}_0^{(1:5)}, \mathbf{a}\right)$$

$$\propto \frac{\prod_{i=1}^{n_s} \left| \mathbf{C}_i^{(k)} \right|^{\frac{-v_0^{(k)}}{2}} \cdot \left| \boldsymbol{\Sigma}_0^{(k)} \right|^{\frac{n_s v_0^{(k)}}{2}}}{2^{n_s n v_0^{(k)}/2} \cdot \Gamma_n(v_0^{(k)}/2)^{n_s}}$$

(4-15)

其中， $v_0^{(k)} = n, n+1, \dots, 1000$ 。

9. (對 $\underline{a}^{(k)}$ 中每 m 個元素與第 k 種 USCS 類別) 取樣 $a_m^{(k)}$:

$$a_m^{(k)} \sim IG\left(a_m^{(k)}; \alpha + \frac{v_{\mathbf{C}_0}}{2}, \beta + 2\left(\mathbf{C}_0^{(k)}\right)_{mm}^{-1}\right) \quad (4-16)$$

其中， $\left(\mathbf{C}_0^{(k)}\right)_{mm}^{-1}$ 是 $\left(\mathbf{C}^{(k)}\right)^{-1}$ 中的第 m 個對角項； $v_{\mathbf{C}_0} = n+1$ ； $\alpha = 0.5$ ； $\beta = 10^{-4}$ 。

10. 重複步驟 2 至步驟 8，直至達到總抽樣次數 T 。其中， T 表示總共進行的抽樣輪數。

經過燃燒期 (burn-in period，記為 t_b) 後所產生的樣本將被保留。在 Gibbs 採樣過程中，鄰近時間步的樣本之間通常存在相關性。為了降低樣本間的相關性，本研究僅每隔 Δt 個時間步取出一組 $\boldsymbol{\Theta}$ 樣本。最終可以獲得 $N = (T - t_b)/\Delta t$ 組 $\boldsymbol{\Theta}$ 超參數樣本，記為 $\left\{\left(\underline{\boldsymbol{\mu}}_{0,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{0,t}^{(1:5)}, \boldsymbol{\Sigma}_{0,t}^{(1:5)}, v_{0,t}^{(1:5)}\right) : t = 1, 2, \dots, N\right\}$ 。在本研究中，設定總採樣次數 $T = 21,000$ 、燃燒期為 $t_b = 1000$ 、取樣間隔 $\Delta t = 10$ ，因此最終獲得 $N = 2,000$ 組超參數樣本，做為學習階段的結果。



4.3 推論階段

現在考慮一個不在資料庫中的目標場址。假設該場址僅具有稀疏的觀測資料，導致無法可靠地建立其專屬的場址特定模型。如前所述，層級貝葉斯模型的策略是：在學習階段，先從資料庫中學習「場址特性」以建構先驗模型；隨後，在推論階段，利用目標場址的稀疏觀測資料對先驗模型進行更新，從而建立後驗模型（亦稱「準場址特定模型」）。

令目標場址的土壤參數（即 Q_m 和 F_r ）記為 $\{\underline{X}_{TGj}; j = 1, 2, \dots, m_{TG}\}$ ，其中 m_{TG} 為目標場址中的紀錄數。進一步記為 $\mathbf{X}_{TG} = \{\underline{X}_{TGj}; j = 1, 2, \dots, m_{TG}\}$ 。這些紀錄所對應的 USCS 類別向量記為 $\mathbf{L}_{TG} = \{\underline{L}_{TGj}; j = 1, 2, \dots, m_{TG}\}$ 。我們假設該目標場址也符合圖 4.1 所示之相同模型結構。

$$\underline{X}_{TGj} \sim \prod_{k=1}^5 N(\underline{X}_{TGj}; \underline{\mu}_{TG}^{(k)}, \mathbf{C}_{TG}^{(k)})^{\underline{L}_{TGj}^{(k)}} \quad \underline{L}_{TGj} \sim \text{Cat}(\underline{L}_{TGj}; \underline{P}_{TG}) \quad (4-17)$$

其中， $\underline{\mu}_{TG}^{(k)}$ 和 $\mathbf{C}_{TG}^{(k)}$ 分別代表目標場址中第 k 個 USCS 類別的平均向量與共變異數矩陣，而 $\underline{P}_{TG} = [P_{TG}^{(1)}, P_{TG}^{(2)}, \dots, P_{TG}^{(5)}]^T$ 則為該場址的 USCS 類別分布向量。推論階段的主要目標，是將學習階段所建構的先驗模型，透過目標場址的觀測資料，更新為「準場址特定模型」。此目標可透過由下列條件機率分布進行抽樣來實現：

$$\{\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG}\} \sim f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) \quad (4-18)$$

其中， $\{\mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}\}$ 為資料庫的觀測資料集合， $\{\mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}\}$ 則為目標場址的觀測資料集合。

根據全機率定理 (Total Probability Theorem)，式 (4-19) 可寫為：

$$\begin{aligned} & f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) \\ &= \int f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}) f(\boldsymbol{\Theta} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) d\boldsymbol{\Theta} d\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)} d\mathbf{C}_{TG}^{(1:5)} d\underline{P}_{TG} \\ &\approx \int f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}) f(\boldsymbol{\Theta} | \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) d\boldsymbol{\Theta} d\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)} d\mathbf{C}_{TG}^{(1:5)} d\underline{P}_{TG} \end{aligned} \quad (4-19)$$

其中， $f(\boldsymbol{\Theta} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 為條件於整體資料（包含目標場址與資料庫）下的超參數後驗分布。然而，因為資料庫 $\{\mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}\}$ 包含 232 個場址，而目標場址

$\{\mathbf{X}_{\text{TG}}, \mathbf{L}_{\text{TG}}\}$ 僅有 1 個場址，因此可依據其資料量的懸殊程度，近似為 $f(\boldsymbol{\Theta}|\mathbf{X}_{\text{DB}}, \mathbf{L}_{\text{DB}})$ 。接著，根據大數法則 (Law of Large Numbers)，上式可用學習階段所取得的超參數樣本 $\{\boldsymbol{\Theta}_t: t = 1, 2, \dots, N\} \sim f(\boldsymbol{\Theta}|\mathbf{X}_{\text{DB}}, \mathbf{L}_{\text{DB}})$ 近似如式 (4-20)：

$$f(\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \underline{p}_{\text{TG}} | \mathbf{X}_{\text{TG}}, \mathbf{L}_{\text{TG}}, \mathbf{X}_{\text{DB}}, \mathbf{L}_{\text{DB}}) \approx \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N f(\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \underline{p}_{\text{TG}} | \boldsymbol{\Theta}_t, \mathbf{X}_{\text{TG}}, \mathbf{L}_{\text{TG}}) \quad (4-20)$$

此近似方式提供了一種實務上可行的途徑，將來自大量資料庫的先驗知識，透過有限的抽樣推論，合理地傳遞至目標場址，進而建立準場址特定模型。

以下為根據 Gibbs 採樣法 (Gibbs Sampler) 所設計的步驟，用以從準場址特定模型 $f(\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \underline{p}_{\text{TG}} | \mathbf{X}_{\text{TG}}, \mathbf{L}_{\text{TG}}, \mathbf{X}_{\text{DB}}, \mathbf{L}_{\text{DB}})$ 中抽取樣本：

1. 對於學習階段所獲得的每一個超參數樣本 $\boldsymbol{\Theta}_t = \{\underline{\mu}_{0,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{0,t}^{(1:5)}, \boldsymbol{\Sigma}_{0,t}^{(1:5)}, \nu_{0,t}^{(1:5)}\}$ 進行下列推論階段的 Gibbs 抽樣程序：

(a) 以任意初始值設定目標場址參數 $\{\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{\text{TG}}^{(1:5)}, \underline{p}_{\text{TG}}\}$ 。

(b) (對每 k 個 USCS 類別) 取樣 $\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(k)}$ ：

$$\underline{\mu}_{\text{TG}}^{(k)} \sim N \left\{ \underline{\mu}_{\text{TG}}^{(k)}; \left[(\mathbf{C}_{0,t}^{(k)})^{-1} + m_{\text{TG}}^{(k)} (\mathbf{C}_{\text{TG},t}^{(k)})^{-1} \right]^{-1} \left[(\mathbf{C}_{0,t}^{(k)})^{-1} \underline{\mu}_{0,t}^{(k)} + (\mathbf{C}_{\text{TG},t}^{(k)})^{-1} \sum_{j=1}^{m_{\text{TG}}^{(k)}} \underline{X}_{\text{TG}j} \right], \right. \\ \left. \left[(\mathbf{C}_{0,t}^{(k)})^{-1} + m_i^{(k)} (\mathbf{C}_i^{(k)})^{-1} \right]^{-1} \right\} \quad (4-21)$$

其中， $m_{\text{TG}}^{(k)}$ 表示目標場址中第 k 個 USCS 類別的記錄數量，對 $j = 1$ 至 $m_{\text{TG}}^{(k)}$ 的求和是針對所有屬於第 k 個 USCS 類別的記錄進行加總。此處同樣採用拒絕採樣法，以確保滿足排序條件 $I_{\mathbf{C}, \underline{\mu}_{\text{TG}}}^{(1)} < I_{\mathbf{C}, \underline{\mu}_{\text{TG}}}^{(2)} < \dots < I_{\mathbf{C}, \underline{\mu}_{\text{TG}}}^{(5)}$ 。

(c) (對每 k 個 USCS 類別) 取樣 $\mathbf{C}_{\text{TG}}^{(1:5)}$ ：

$$\mathbf{C}_{\text{TG}}^{(k)} \sim IW \left\{ \mathbf{C}_{\text{TG}}^{(k)}; \boldsymbol{\Sigma}_{0,t}^{(k)} + \sum_{j=1}^{m_{\text{TG}}^{(k)}} (\underline{X}_{\text{TG}j} - \underline{\mu}_{\text{TG}}^{(k)})^T (\underline{X}_{\text{TG}j} - \underline{\mu}_{\text{TG}}^{(k)}), m_{\text{TG}}^{(k)} + \nu_{0,t}^{(k)} \right\} \quad (4-22)$$

(d) 取樣 $\underline{p}_{\text{TG}}$ ：

$$\underline{p}_{\text{TG}} \sim \text{Dir} \left(\underline{p}_{\text{TG}}; [m_{\text{TG}}^{(1)} + \gamma^{(1)}, m_{\text{TG}}^{(2)} + \gamma^{(2)}, \dots, m_{\text{TG}}^{(5)} + \gamma^{(5)}]^T \right) \quad (4-23)$$



其中， $\gamma^{(1)} = \gamma^{(2)} = \dots = \gamma^{(5)} = 1$ 。

令推論階段 Gibbs 採樣法的燃燒期 (burn-in period) 為 t'_b ，其值可透過視覺判斷方式決定。緊接在燃燒期之後的樣本 (即時間步 = $t'_b + 1$) 被視為最終樣本，記為 $\{\underline{\mu}_{TG,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG,t}\}$ 。

2. 對所有 N 組超參數重複執行步驟 # 1，以獲得 $\{(\underline{\mu}_{TG,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG,t}) : t = 1, \dots, N\}$ 這些樣本即為從準場址特定模型 $f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 中所取得的抽樣結果。

現在，考慮一筆新的目標場址紀錄，其 USCS 類別尚未得知。我們以 $\underline{X}_{TGn}$ ，以 $\underline{L}_{TGn}$ 表示其 USCS 類別向量。則此準場址特定的 USCS 分類機率分佈由下所示：

$$f(\underline{L}_{TGn} | \underline{X}_{TGn}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) \quad (4-24)$$

$$= \int f(\underline{L}_{TGn} | \underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG}, \underline{X}_{TGn}) f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \underline{X}_{TGn}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) d\boldsymbol{\theta} d\mu_{TG}^{(1:5)} d\mathbf{C}_{TG}^{(1:5)} d\underline{P}_{TG}$$

$$\approx \int f(\underline{L}_{TGn} | \underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG}, \underline{X}_{TGn}) f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) d\boldsymbol{\theta} d\mu_{TG}^{(1:5)} d\mathbf{C}_{TG}^{(1:5)} d\underline{P}_{TG}$$

在此，條件機率 $f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \underline{X}_{TGn}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 可以近似為 $f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ ，原因在於 $\underline{X}_{TGn}$ 僅包含一筆紀錄，影響微小。根據大數法則，上述條件機率分佈下的期望值可透過樣本平均來估計：

$$f(\underline{L}_{TGn} | \underline{X}_{TGn}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB}) \approx \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N f(\underline{L}_{TGn} | \underline{\mu}_{TG,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG,t}, \underline{X}_{TGn}) \quad (4-25)$$

其中， $\{(\underline{\mu}_{TG,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG,t}) : t = 1, 2, \dots, N\}$ 為由準場址特定模型 $f(\underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG} | \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 所獲得的樣本。 $f(\underline{L}_{TGn} | \underline{\mu}_{TG}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{TG}^{(1:5)}, \underline{P}_{TG}, \underline{X}_{TGn})$ 為一類別分佈，其每一類別 k 的機率與下列乘積成正比：

$$P_{TG}^{(k)} \cdot N(\underline{X}_{TGn}; \underline{\mu}_{TG}^{(k)}, \mathbf{C}_{TG}^{(k)}) \quad (4-26)$$

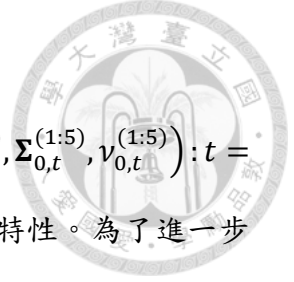
因此，整體條件分佈 $f(\underline{L}_{TGn} | \underline{X}_{TGn}, \mathbf{X}_{TG}, \mathbf{L}_{TG}, \mathbf{X}_{DB}, \mathbf{L}_{DB})$ 為以下形式的類別分佈：

$$\underline{L}_{TGn} = \begin{cases} [1 & 0 & 0 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = G) & \text{w.p. } P_{\text{pred}}^{(1)} \\ [0 & 1 & 0 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = S) & \text{w.p. } P_{\text{pred}}^{(2)} \\ [0 & 0 & 1 & 0 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = M) & \text{w.p. } P_{\text{pred}}^{(3)} \\ [0 & 0 & 0 & 1 & 0]^T & (\text{USCS first letter} = C) & \text{w.p. } P_{\text{pred}}^{(4)} \\ [0 & 0 & 0 & 0 & 1]^T & (\text{USCS first letter} = O) & \text{w.p. } P_{\text{pred}}^{(5)} \end{cases} \quad (4-27)$$



其中，w.p.表示「以某一機率」。因此，USCS 類別預測機率為下式：

$$P_{\text{pred}}^{(k)} = \frac{\left[\sum_{t=1}^N P_{TG,t}^{(k)} \cdot \left| \mathbf{C}_{TG,t}^{(k)} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(\underline{X}_{TGn} - \underline{\mu}_{TG,t}^{(k)})^T (\mathbf{C}_{TG,t}^{(k)})^{-1} (\underline{X}_{TGn} - \underline{\mu}_{TG,t}^{(k)})} \right]}{\left[\sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^N P_{TG,t}^{(k)} \cdot \left| \mathbf{C}_{TG,t}^{(k)} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(\underline{X}_{TGn} - \underline{\mu}_{TG,t}^{(k)})^T (\mathbf{C}_{TG,t}^{(k)})^{-1} (\underline{X}_{TGn} - \underline{\mu}_{TG,t}^{(k)})} \right]} \quad (4-28)$$



4.4 學習階段成果

學習階段的主要成果為一組超參數樣本集合 $\left\{ \left(\underline{\mu}_{0,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{0,t}^{(1:5)}, \underline{\Sigma}_{0,t}^{(1:5)}, \nu_{0,t}^{(1:5)} \right) : t = 1, 2, \dots, N \right\}$ 。這些樣本反映了 USCS-HBM 自資料庫中學得的場址特性。為了進一步展示這些場址特性，可根據上述超參數樣本生成一個「假設場址」(hypothetical site)，包括該場址的平均向量與共變異數矩陣，分別記為 $\underline{\mu}_{h,t}^{(1:5)}$ 與 $\mathbf{C}_{h,t}^{(1:5)}$ ，其中下標 h 表示「hypothetical」。

對於每一組超參數樣本 $\left\{ \underline{\mu}_{0,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{0,t}^{(1:5)}, \underline{\Sigma}_{0,t}^{(1:5)}, \nu_{0,t}^{(1:5)} \right\}$ ，可依下列步驟模擬對應之假設場址：

1. 平均向量取樣：

(對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\underline{\mu}_{h,t}^{(k)} \sim N \left(\underline{\mu}_{h,t}^{(k)}; \underline{\mu}_{0,t}^{(k)}, \mathbf{C}_{0,t}^{(k)} \right)$ 。為確保五種類別在 SBTn 空間中呈現一致的分類順序，須以拒絕抽樣法來確保 $I_{c, \underline{\mu}_{h,t}^{(1)}} < I_{c, \underline{\mu}_{h,t}^{(2)}} < \dots < I_{c, \underline{\mu}_{h,t}^{(5)}}$ 。

2. 共變異數矩陣取樣：

(對第 k 種 USCS 類別) 取樣 $\mathbf{C}_{h,t}^{(k)} \sim IW(\mathbf{C}_{h,t}^{(k)}; \underline{\Sigma}_{0,t}^{(k)}, \nu_{0,t}^{(k)})$ 。

3. 重複上述步驟 $t = 1, 2, \dots, N$ 次，以取得 $\left\{ \left(\underline{\mu}_{h,t}^{(1:5)}, \mathbf{C}_{h,t}^{(1:5)} \right) : t = 1, 2, \dots, N \right\}$ 。

每一組 $\left\{ \underline{\mu}_{h,t}^{(k)}, \mathbf{C}_{h,t}^{(k)} \right\}$ 樣本代表不同土壤類別在假設場址中的分布。根據式 (4-28)，可以計算出 SBTn 圖中每一網格點對應之 USCS 類別預測機率。圖 4.2 顯示不同土壤類別在 SBTn 圖中的預測機率分布。SBTn 圖中每一個網格點對應於現地可能出現的 CPT 數據。圖 4.2 (a) 進一步將各網格點中 USCS 預測機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ 之最大值視覺化，得到本研究所建立之先驗 SBTn 圖，此時預測對象 USCS 土壤類別。

每一組 $\left\{ \underline{\mu}_{h,t}^{(k)}, \mathbf{C}_{h,t}^{(k)} \right\}$ 亦可在 SBTn 圖上繪製為一個橢圓，代表該土壤類別於假設場址中的分布。圖 4.3 顯示了此假設場址中，各 USCS 土壤分類所產生的橢圓形分布。進一步揭示 USCS-HBM 從「CPT-USCS/3/2017」資料庫所學得的場址特性。此外，圖中亦同時呈現資料庫中觀測資料點，結果顯示由超參數學習所產生的

統計模型與原始資料分布具有良好的一致性，驗證了所建立先驗模型的有效性與合理性。

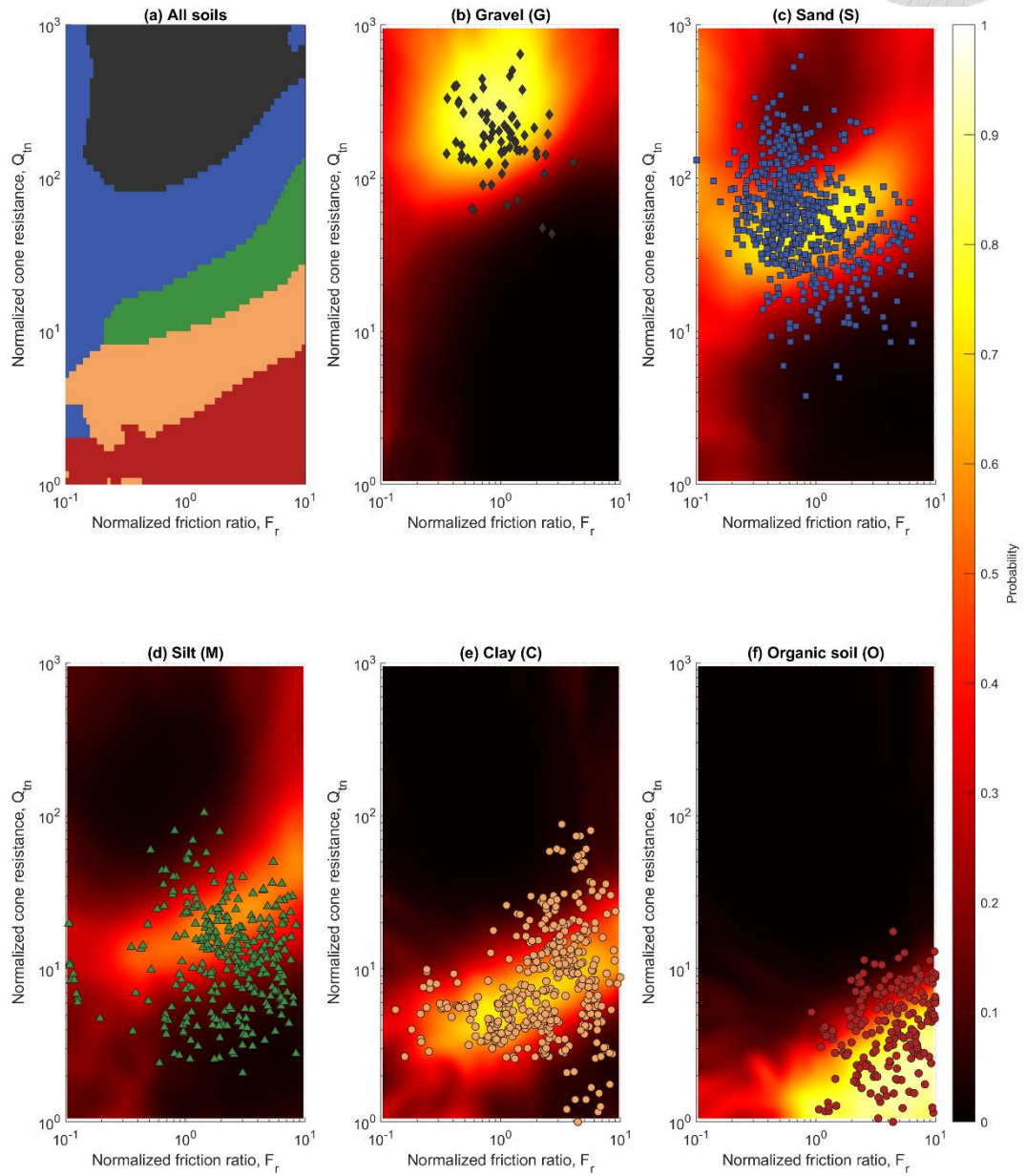


圖 4.2 各 USCS 類別預測機率 $P_{pred}^{(1:5)}$ 在 SBTn 圖中之先驗分布。

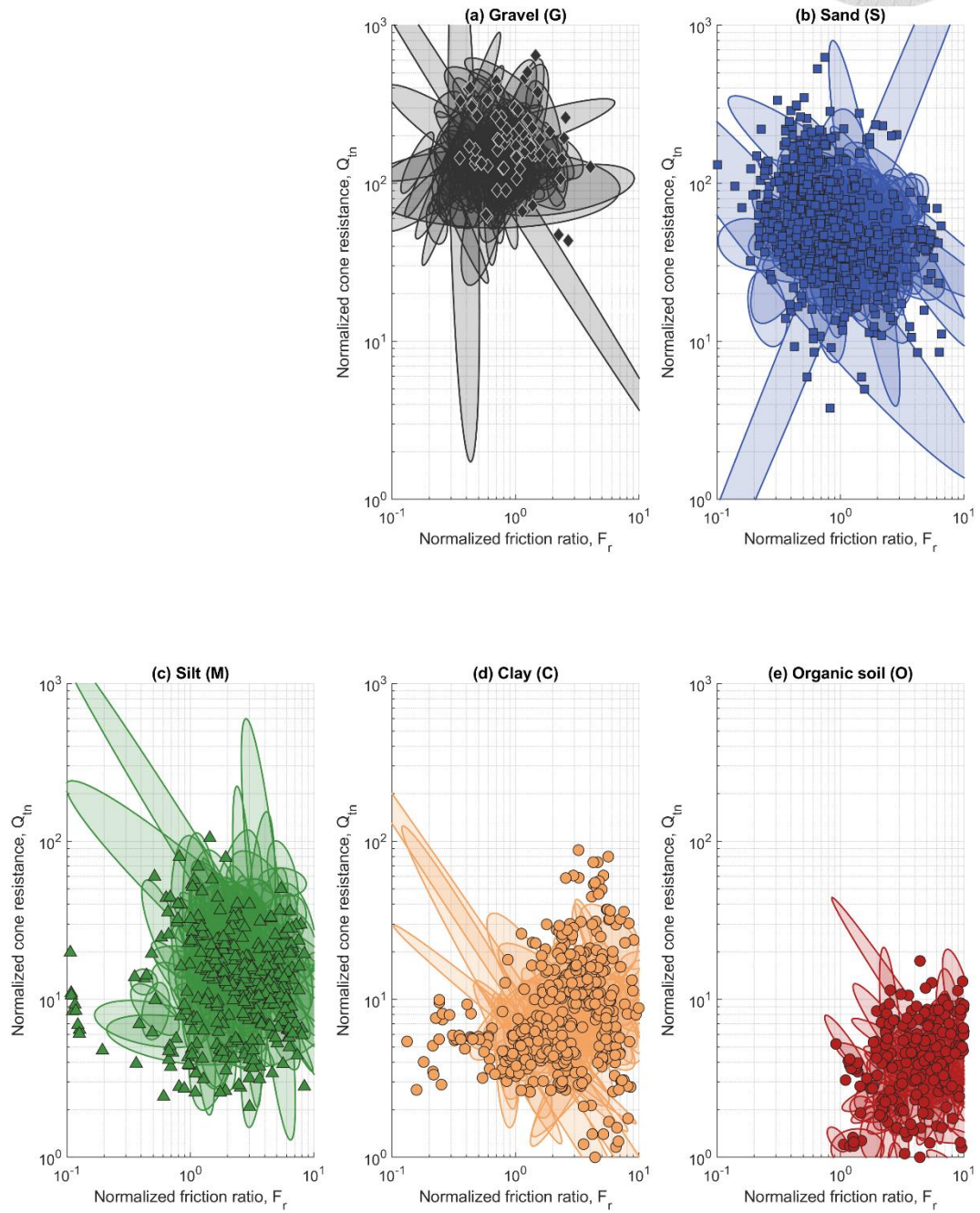


圖 4.3 各 USCS 類別在假設場址中之橢圓分布。

第 5 章真實案例與交叉驗證



5.1 真實案例驗證

在上一章中，已介紹本研究所提出之 USCS-HBM，以建立一個以 CPT 數據預測 USCS 土壤類別的模型，同時可以整合資料庫中不同場址以及目標場址的資料特徵，解決一定程度因場址獨特性導致的不確定性。

本章將進一步探討 USCS-HBM 在實際工程案例中的應用，藉由真實場址的調查資料，驗證模型在現地情境下的可行性與預測能力。透過此應用案例，將說明模型如何結合有限的現地觀測資訊與先驗知識，進行合理的 USCS 土壤類別推論，並與傳統的通用方法進行比較分析，以突顯其潛在優勢與適用範圍。

5.1.1 場址介紹

義大利威尼斯潟湖在 1946 年至 1970 年間，曾由於人為原因導致地層下陷加速，使得威尼斯市區出現淹水頻率上升的情形。自此之後，工程師提出多種解決方案，其中之一即為於潟湖三個主要通海口設置可動式閘門，以調控潟湖內海水位的交換。在此背景下，Ricceri et al. (2002) 針對 Malamocco 入口的一個試驗場址，進行密集的大地工程調查。圖 5.1 顯示了威尼斯潟湖與 Malamocco 場址的相對位置。

該場址的地層組成屬於第四紀沉積物，主要由砂土 (SP-SM)、粉土 (ML)、黏土 (CL) 以及局部夾雜的泥炭層所構成，皆根據 USCS 進行分類。圖 5.2 (a) 顯示一口代表性鑽孔之隨深度變化的土壤組成，根據多項篩分析與沉降分析得出。此外，於鑽孔水平距離 8.1 公尺處設有一 CPT 試驗點 (在 Ricceri et al. 2002 中編號為 SCPTU19)，其錐尖阻抗 (q_t) 與錐身摩擦 (f_s) 經數位化 (使用 DigiData 軟體) 後，以 0.1 公尺的間距內插繪製剖面，結果如圖 5.2 (b) 與 (c) 所示。

圖 5.3 顯示該場址配對之 CPT-USCS 資料 (即具有已知 USCS 分類的 $\{Q_{tn}, F_r\}$ 資料) 在 Robertson SBTn 圖上的分佈情形。資料中包含 59 筆 S 類 (SP-SM)、51 筆 M 類 (ML) 以及 92 筆 C 類 (CL) 紀錄，總計 202 筆紀錄。圖中所有資料均引用自 Ricceri et al. (2002) 與 Jung et al. (2008)。

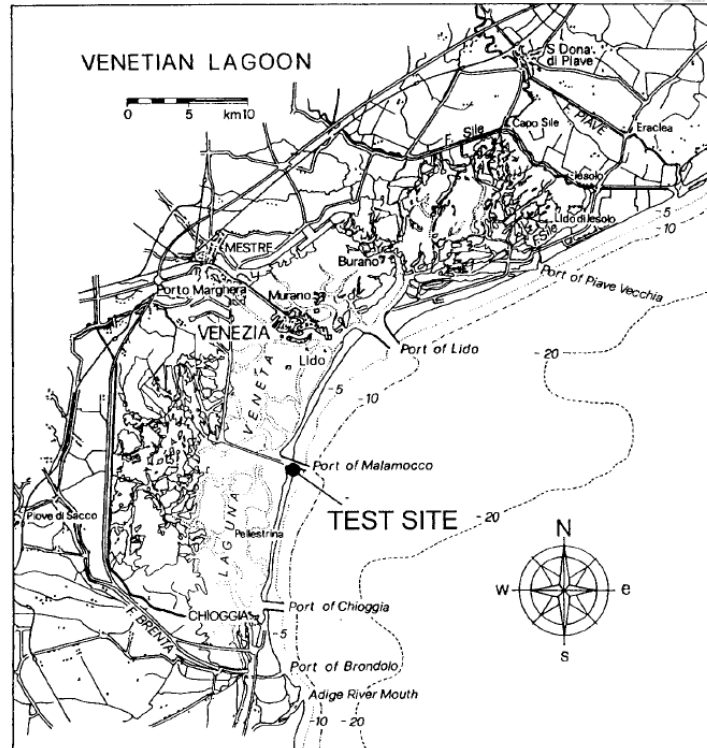


圖 5.1 威尼斯潟湖與 Malamocco 場址位置。(Ricceri et al. 2002)

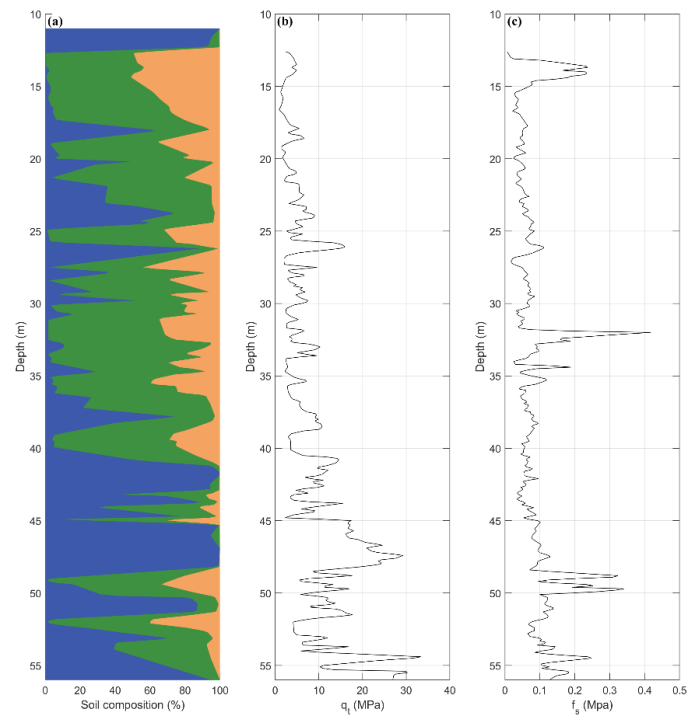


圖 5.2 Malamocco 場址的現地調查資料。(Ricceri et al. 2002)

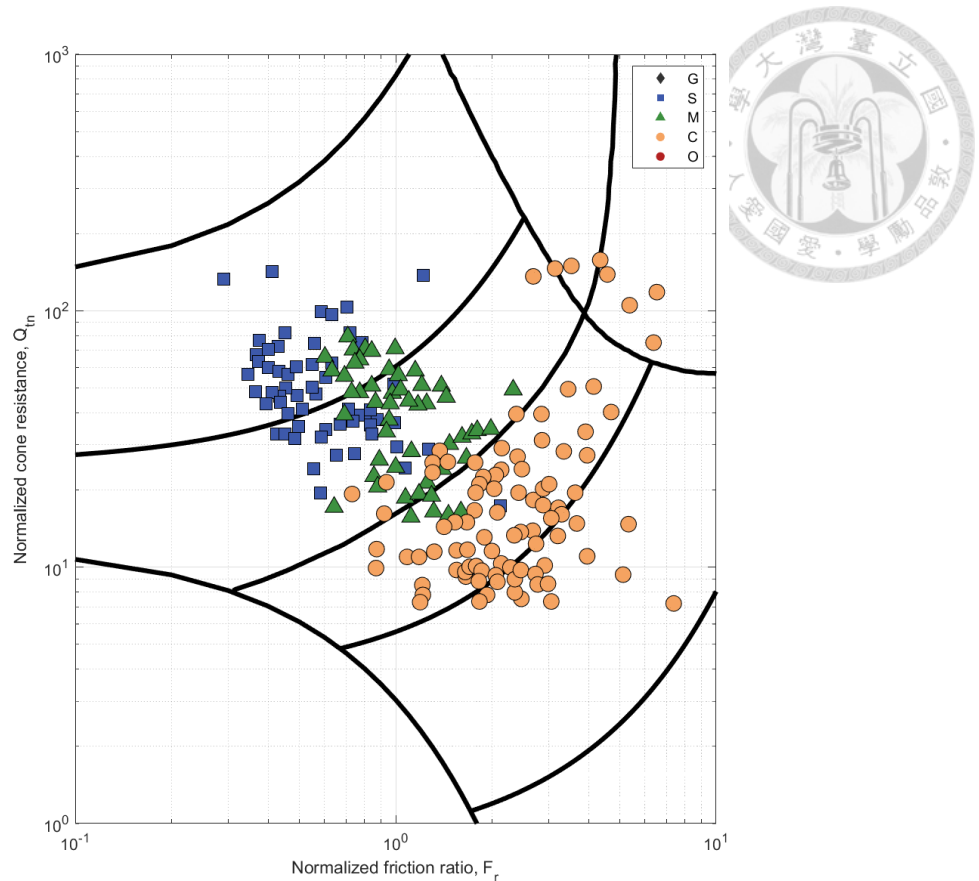


圖 5.3 Malamocco 場址的資料與 Robertson SBTn 圖之比對。(Jung et al. 2008)

5.1.2 驗證方式

如前所述，在學習階段中，由「CPT-USCS/3/2017」資料庫訓練而得的 USCS-HBM 模型可產生先驗模型。該先驗模型的場址獨特性特徵顯示於圖 4.3 中。後續，在推論階段中，此先驗模型會根據 Malamocco 場址的觀測資料（圖 5.3 中的資料）進行更新，以產生後驗（準場址特定）模型。

為說明推論階段的運作與結果，本研究考慮以下稀疏資料的情境：假設僅有 n_L 筆 S 紀錄、 n_L 筆 M 紀錄與 n_L 筆 C 紀錄具有完整的 $\{Q_{tn}, F_r\}$ 資訊，以及對應的 USCS 分類。這組共 $3 \times n_L$ 筆的 Malamocco 場址紀錄，將用於更新原本的先驗模型，形成準場址特定模型。

接著，準場址特定模型將應用於預測其餘 $202 - 3 \times n_L$ 筆紀錄的 USCS 分類機率 $P_{pred}^{(k)}$ ，其依據公式(4-28) 進行計算。由於這些 $202 - 3 \times n_L$ 筆紀錄的 USCS 類別實際上是已知的，因此可作為驗證案例使用，用以評估模型的預測能力與合理性。

由於驗證案例的 USCS 類別為已知，因此可利用兩個指標：正確預測率 (chance of correct prediction) 與 Brier score 來量化模型之預測準確度。其計算方式如下。

$$\text{正確預測率} = \frac{\text{預測土壤類別} = \text{實際土壤類別的筆數}}{N} \quad (5-1)$$

$$\text{Brier score} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^5 \sum_{i=1}^N \left[P_{\text{pred},i}^{(k)} - L_{\text{actual},i}^{(k)} \right]^2 \quad (5-2)$$

其中， $N = 202 - 3 \times n_L$ 為驗證樣本的總數。對於每一筆驗證紀錄，其預測土壤類別定義為預測機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ 中最大值所對應的類別。例如，若某筆驗證紀錄的預測機率結果為 $P_{\text{pred}}^{(1)} = 0.1$ 、 $P_{\text{pred}}^{(2)} = 0.5$ 、 $P_{\text{pred}}^{(3)} = 0.3$ 、 $P_{\text{pred}}^{(4)} = 0.1$ 、 $P_{\text{pred}}^{(5)} = 0$ ，則預測土壤類別為第二類，即 S 類，因為 $P_{\text{pred}}^{(2)} = 0.5$ 有最大值。 $P_{\text{pred},i}^{(k)}$ 表示第 i 筆驗證紀錄對於第 k 個 USCS 類別的預測機率。 $L_{\text{actual},i}^{(k)}$ 為實際已知的類別函數，若第 i 筆驗證紀錄屬於第 k 類 USCS 類別，則 $L_{\text{actual},i}^{(k)} = 1$ ，否則為 0。

作為對比分析的傳統通用模型，本研究採用 Robertson and Wride (1998) 所提出之 SBT 指數 I_c 來預測土壤行為類別。表 5.1 顯示了 I_c 區間所對應的土壤行為描述。需特別注意，這些描述與 USCS 分類之間並非一一對應。例如，當 $2.60 < I_c < 2.95$ 時，該區間所對應的行為描述為「混合粉土：黏土質粉土至粉土質黏土」，此類土壤在 USCS 分類中可能屬於 M 類或 C 類。對於此類模糊區間，採用線性內插的方式推估 USCS 分類機率，即假設 $P_{\text{pred}}^{(1)} = 0$ 、 $P_{\text{pred}}^{(2)} = 0$ 、 $P_{\text{pred}}^{(3)} = \frac{2.95-I_c}{2.95-2.60}$ 、 $P_{\text{pred}}^{(4)} = \frac{I_c-2.60}{2.95-2.60}$ 、 $P_{\text{pred}}^{(5)} = 0$ 。表 5.1 同時列出了其他 I_c 區間下，所對應的假設機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ ，用以建立 I_c 的區間與 USCS 分類相對應的機率預測模型。

表 5.1 不同 I_c 值對應的 USCS 類別預測機率。

SBT 指數	土壤行為類別描述 (Robertson and Wride 1998)	USCS 分類預測機率				
		$P_{pred}^{(1)}$	$P_{pred}^{(2)}$	$P_{pred}^{(3)}$	$P_{pred}^{(4)}$	$P_{pred}^{(5)}$
$I_c < 1.31$	礫石質砂土至緊砂	$\frac{1.31-I_c}{1.31-0.52}$	$\frac{I_c-0.52}{1.31-0.52}$	0	0	0
$1.31 < I_c < 2.05$	砂土：乾淨砂 至粉土質砂土	0	1	0	0	0
$2.05 < I_c < 2.60$	混合砂土：粉土質砂土 至砂土質粉土	0	$\frac{2.60-I_c}{2.60-2.05}$	$\frac{I_c-2.05}{2.60-2.05}$	0	0
$2.60 < I_c < 2.95$	混合粉土：黏土質粉土 至粉土質黏土	0	0	$\frac{2.95-I_c}{2.95-2.60}$	$\frac{I_c-2.60}{2.95-2.60}$	0
$2.95 < I_c < 3.60$	黏土：粉土質黏土 至黏土	0	0	0	1	0
$I_c > 3.60$	有機土：泥炭	0	0	0	0	1

5.1.3 驗證結果

為說明準場址特定模型 (quasi-site-specific model) 於不同情境下之預測行為，本研究考慮四種已知紀錄情境，分別為 $n_L = 0, 1, 3$ 及 7，分別評估模型在不同已知紀錄下的預測能力。模型表現將透過正確預測率與 Brier score 兩項指標進行量化，以評估其準確度與實務適用性

圖 5.4 (b) 至 (f) 顯示當 $n_L = 1$ 時，根據式 (4-28) 所預測之 USCS 分類機率 $\{P_{pred}^{(k)}: k = 1, 2, \dots, 5\}$ 在 SBTn 空間中各網格點之分布情形。由圖中可觀察不同 USCS 類別在 SBTn 空間中之機率分布特徵，顯示模型如何透過有限的已知資料進行合理推論。圖 5.4 (a) 則呈現每一網格點之預測土壤類別，即取 $P_{pred}^{(1:5)}$ 最大值所對應的類別進行著色，進而形成類似 SBTn 圖中不同土壤行為類別的邊界劃分，不同的是，此處預測的為 USCS 土壤類別。為提供參考比較，圖中同時標示 Malamocco 場址之實際紀錄點：其中，大型標記代表具有已知 USCS 類別的訓練資料，小型標記則為用以驗證模型預測準確度之未知樣本。

在推論階段中，模型產生了 N 組後驗參數樣本，記為 $\left\{\left(\underline{\mu}_{TG,t}^{(k)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(k)}\right): t = 1, 2, \dots, N\right\}$ 。其中，每一組 $\left(\underline{\mu}_{TG,t}^{(k)}, \mathbf{C}_{TG,t}^{(k)}\right)$ 表示對第 k 類 USCS 土壤在 SBTn 空間中之平均值與共變異數矩陣的樣本，這些樣本可視為該類別在 SBTn 上不確定性之表徵，並可利用橢圓進行視覺化。圖 5.5 即顯示當 $n_L = 1$ 時，各 USCS 土壤類別在 SBTn 圖中的後驗分布。圖中每一橢圓對應一組樣本，反映模型對該類別可能分布位置與不確定範圍。為利比較與驗證，圖中亦標示 Malamocco 場址之實際紀錄點，提供模型推論與現地觀測間之對照依據。

圖 5.6 至圖 5.9 分別顯示了當 $n_L = 3$ 與 $n_L = 7$ 情境下，USCS 預測機率分布與橢圓後驗參數圖。為清楚呈現已知樣本數對模型預測行為之影響，圖 5.10 整理當 $n_L = 0, 1, 3$ 及 7 四種情境下之預測機率分布圖，由於本場址不包含 G (礫石) 與 O (有機土) 類別的紀錄，故在此不繪製 $P_{\text{pred}}^{(1)}$ 與 $P_{\text{pred}}^{(5)}$ 。由圖可見，當 $n_L = 0$ 時，預測機率 $P_{\text{pred}}^{(k)}$ 接近 0.5，顯示模型預測不確定性較高。隨著 n_L 增加，預測機率逐漸趨向 0 或 1，表示模型不確定性顯著降低，推論結果更具決定性。

圖 5.11 則整理了在各 $n_L = 0, 1, 3$ 及 7 四種情境下，推論階段所產生之橢圓圖示。與前述相同，礙於場址紀錄缺乏 G (礫石) 與 O (有機土) 類別，故在此圖中亦未繪製相關橢圓。特別值得注意的是，當 $n_L = 0$ 時，所使用的模型即為圖 4.3 所示之先驗模型。隨著 n_L 增加，橢圓圖逐漸朝向大型標記 (即具有 USCS 資訊的紀錄) 偏移，顯示推論階段成功反映出場址資料之資訊，並有效更新原始的先驗知識。

為進一步說明 USCS-HBM 模型的預測能力，圖 5.12 呈現 SCPTU19 位置下，在 $n_L = 0, 1, 3$ 及 7 四種情境下，USCS 分類機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ 隨深度的剖面變化。首先，將 SCPTU19 處個深度的 (q_t, f_s) 根據式 (2-3) 至 (2-6) 轉換為標準化參數 (Q_{tn}, F_r) ，有效應力的計算，根據 Ricceri et al. (2002)，採用土壤飽和單位重 $\gamma_{\text{sat}} = 18.5$ 。再依據式 (4-28) 計算各深度之 USCS 分類機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ 。圖中最左側顯示該鑽孔處土壤組成與阿太保限度 (PL, LL) 剖面。依據各深度樣本 (LL, PI) 在塑性圖中的位置，若屬於 CL 區域，則以橙色點標示；若屬於 ML 區，則以綠色點標示；若屬於 CL-ML 的陰影區，則以黃色點表示。由圖可觀察到，實際 USCS 分類 (圖最左欄) 與模型預測之分類機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ 具有一定程度的一致性，隨著已知記錄點 n_L 增加，模

型預測結果更加接近現地實測分類，顯示本研究所提出之 USCS-HBM 模型能有效結合 SBTn 參數與場址已知資訊，提供具體而可信的 USCS 分類機率推估，驗證了其在實務應用中之可行性與準確性。

表 5.2 彙整了不同已知紀錄 n_L 情境下，模型之正確預測率與 Brier score 的比較結果。由表中可明顯觀察到，隨著 n_L 增加，模型的正確預測率穩定上升，而 Brier score 則持續下降，顯示本研究所提出之 USCS-HBM 模型在納入更多目標場址資料後，其預測準確度隨之提升。作為對照，採用 Robertson 所提出之 SBT 指數 I_c 進行分類時，其正確預測率與 Brier score 分別為 0.59 和 0.63。當 $n_L = 0$ ，即無目標場址資料的情況下，該方法之預測表現略優於使用 USCS-HBM 模型。然而，隨著 $n_L = 1, 3$ 及 7 所提出之準場址特定模型 (USCS-HBM) 在初始階段即具備基本預測能力，且能隨已知資料量的增加持續學習並修正推論，展現出相較於通用模型 (基於 Robertson 的 SBT 指數 I_c) 更強的適應性與預測潛力。

表 5.2 不同已知紀錄點情境下 USCS-HBM 與 SBT 指數的預測表現。

	USCS-HBM				I_c (Robertson and Wride 1998)
	$n_L = 0$	$n_L = 1$	$n_L = 3$	$n_L = 7$	
正確預測率	0.45	0.70	0.74	0.80	0.59
Brier score	0.71	0.40	0.36	0.28	0.63

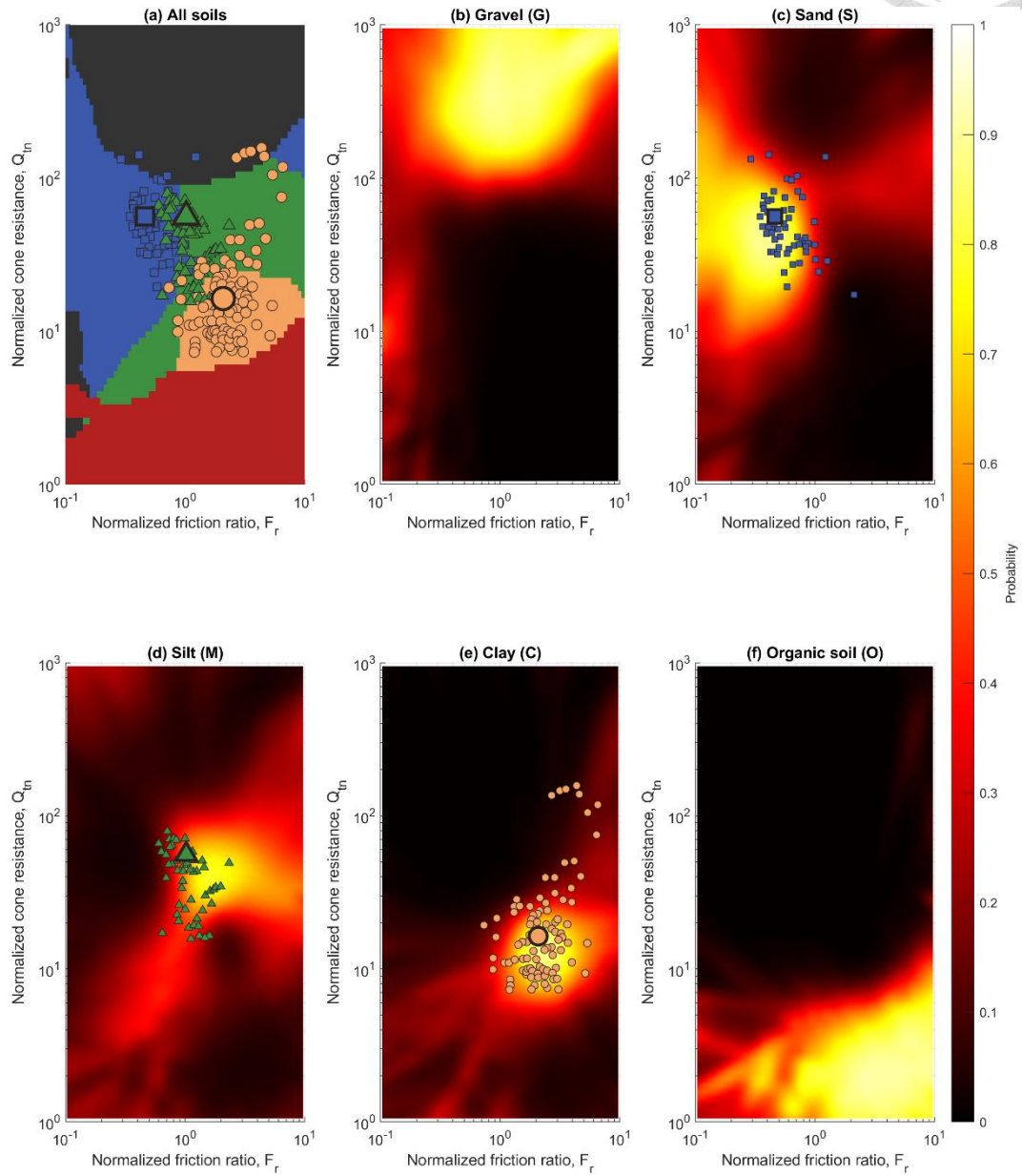


圖 5.4 $n_L = 1$ 時，USCS 類別預測機率示意圖。

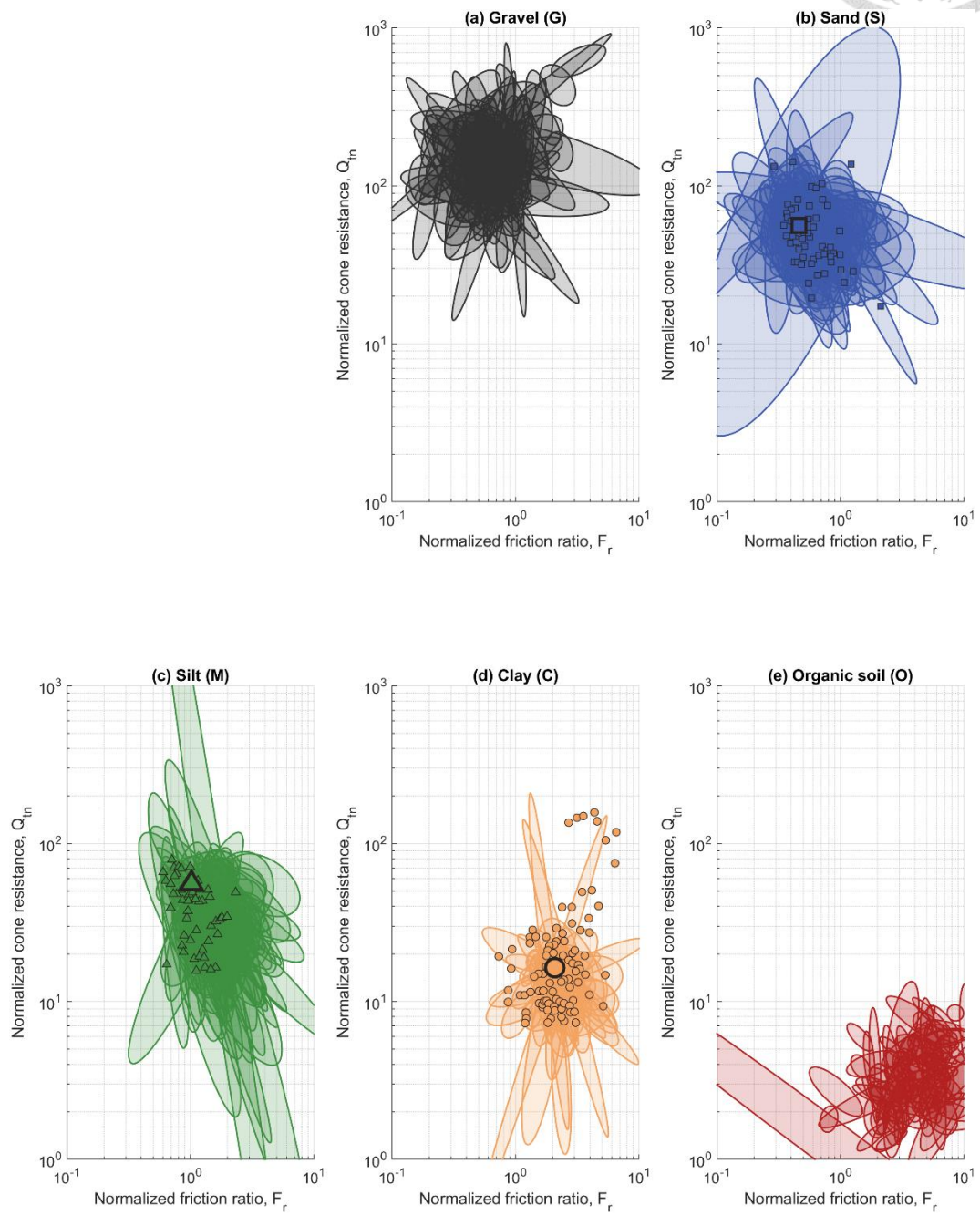


圖 5.5 $n_L = 1$ 時，後驗參數橢圓示意圖。

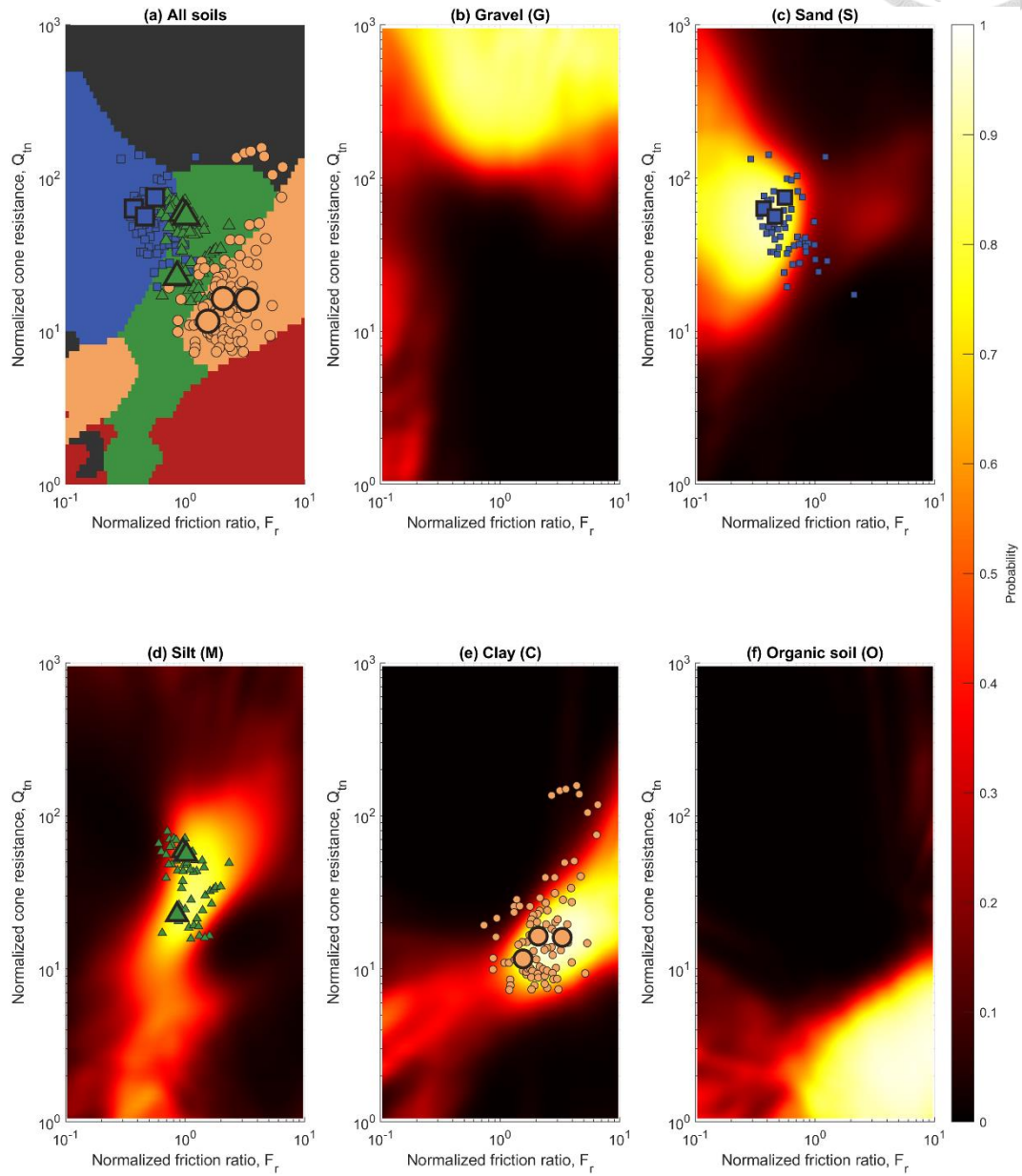


圖 5.6 $n_L = 3$ 時，USCS 類別預測機率示意圖。

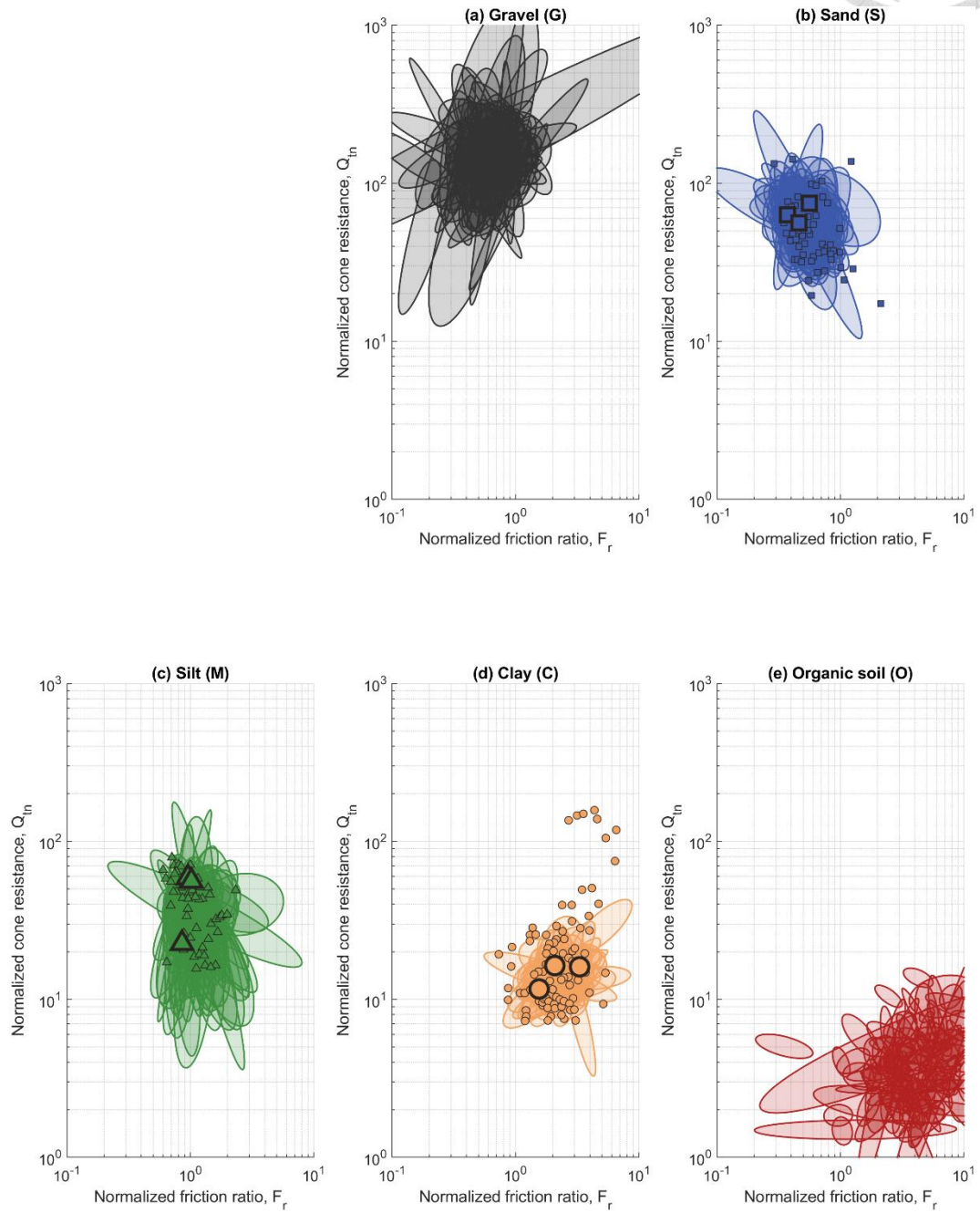


圖 5.7 $n_L = 3$ 時，後驗參數橢圓示意圖。

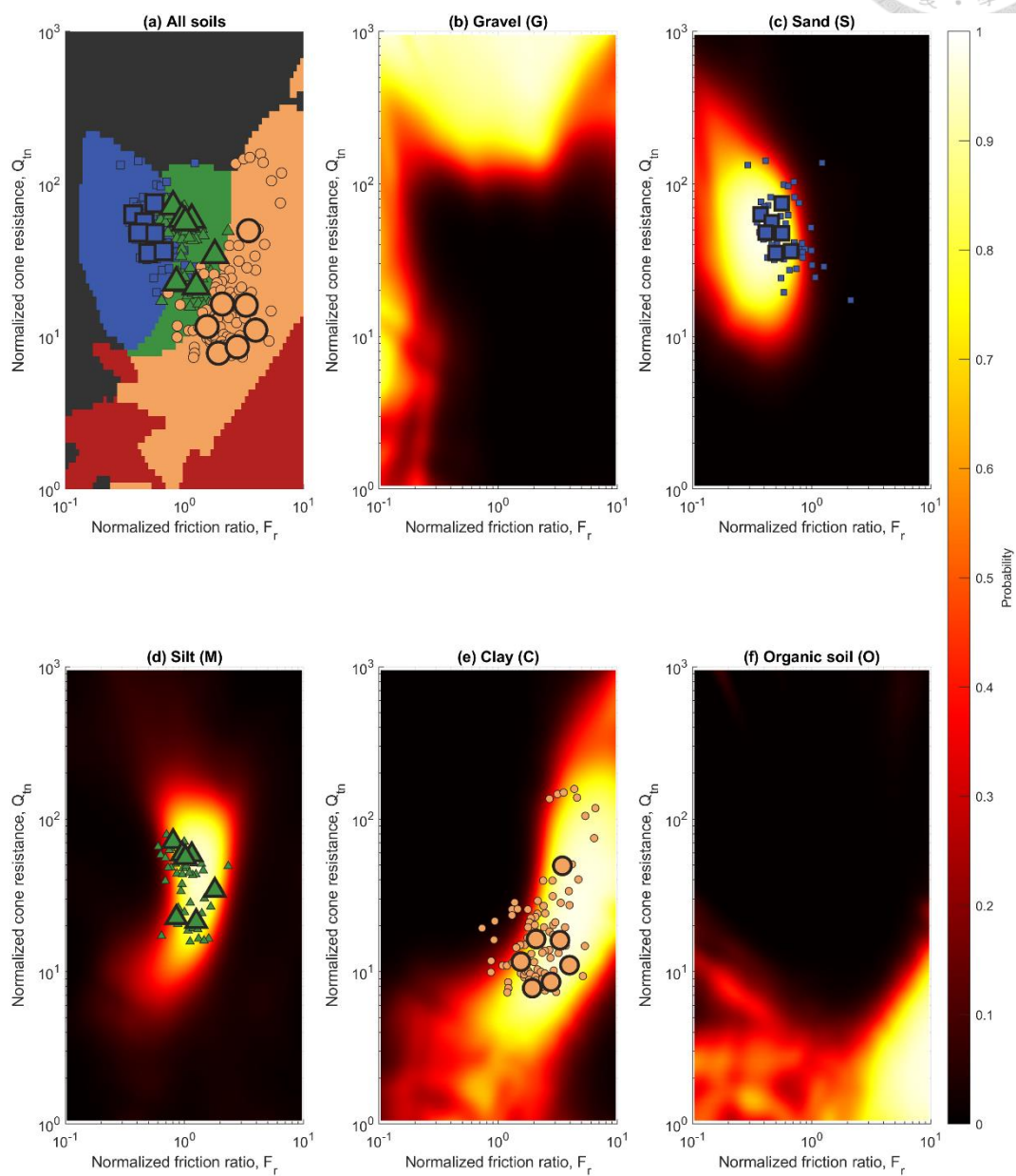


圖 5.8 $n_L = 7$ 時，USCS 類別預測機率示意圖。

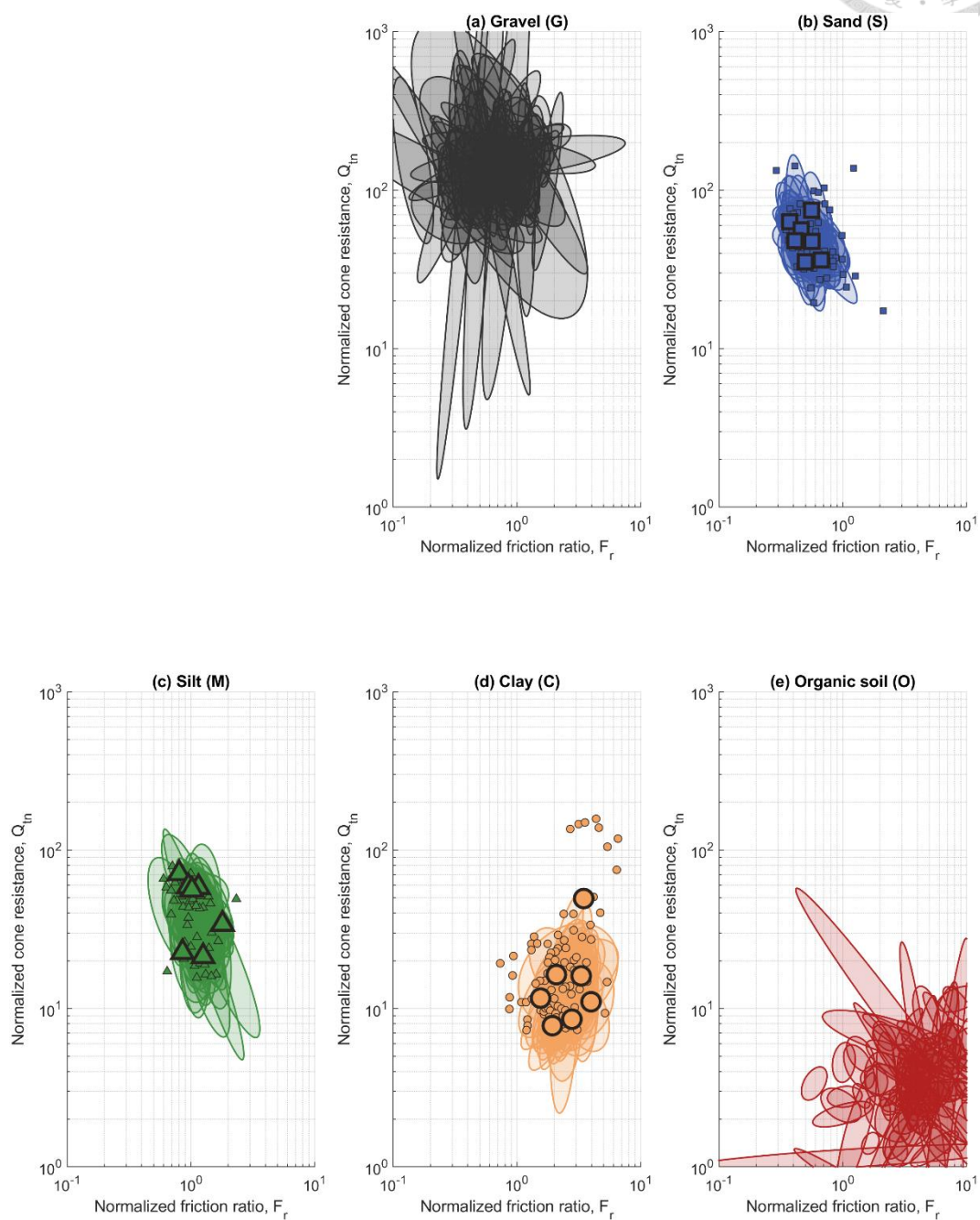


圖 5.9 $n_L = 7$ 時，後驗參數橢圓示意圖。

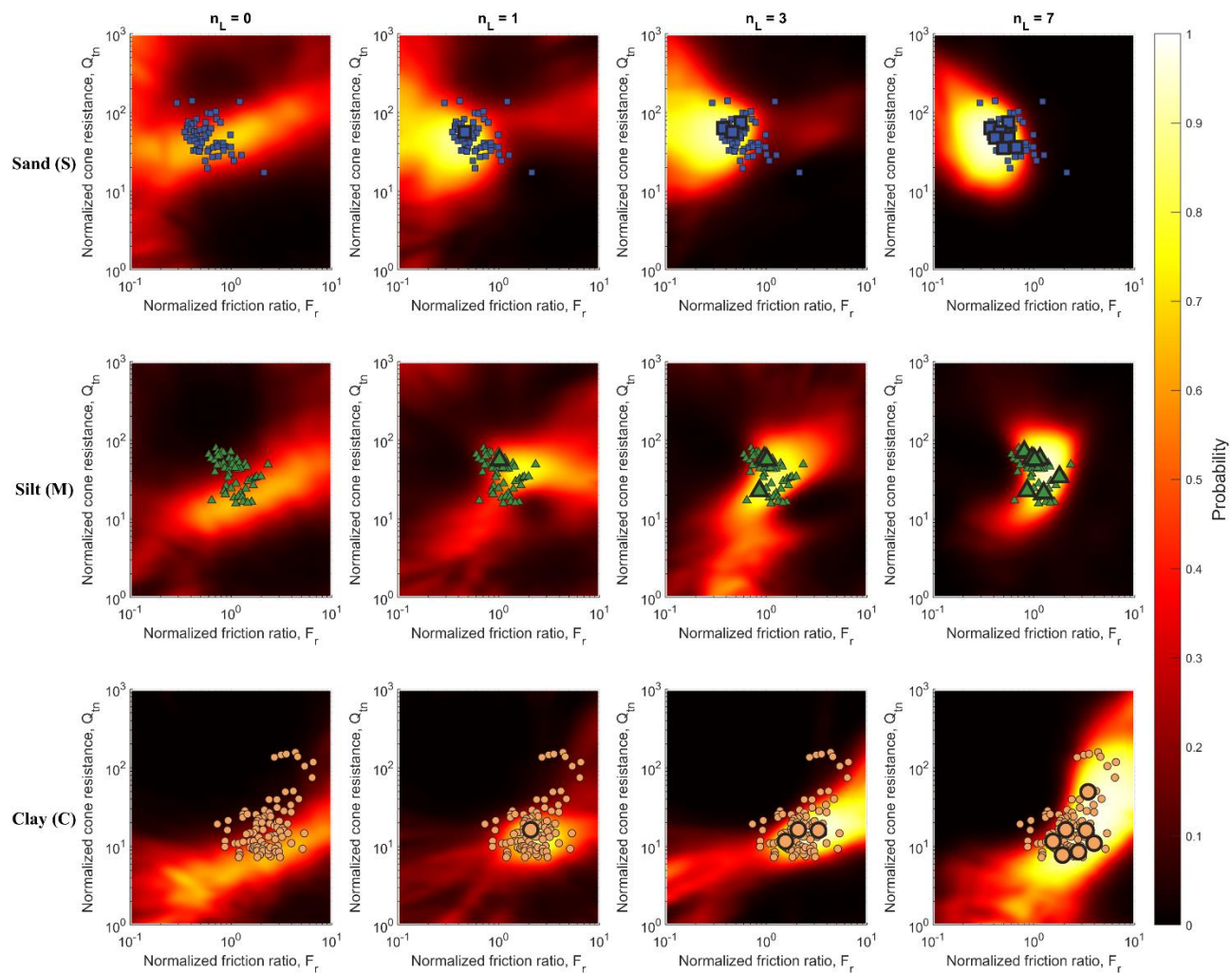


圖 5.10 USCS 分類機率 $P_{\text{pred}}^{(k)}$ 之預測結果，對應 $n_L = 0、1、3$ 及 7 四種情境。

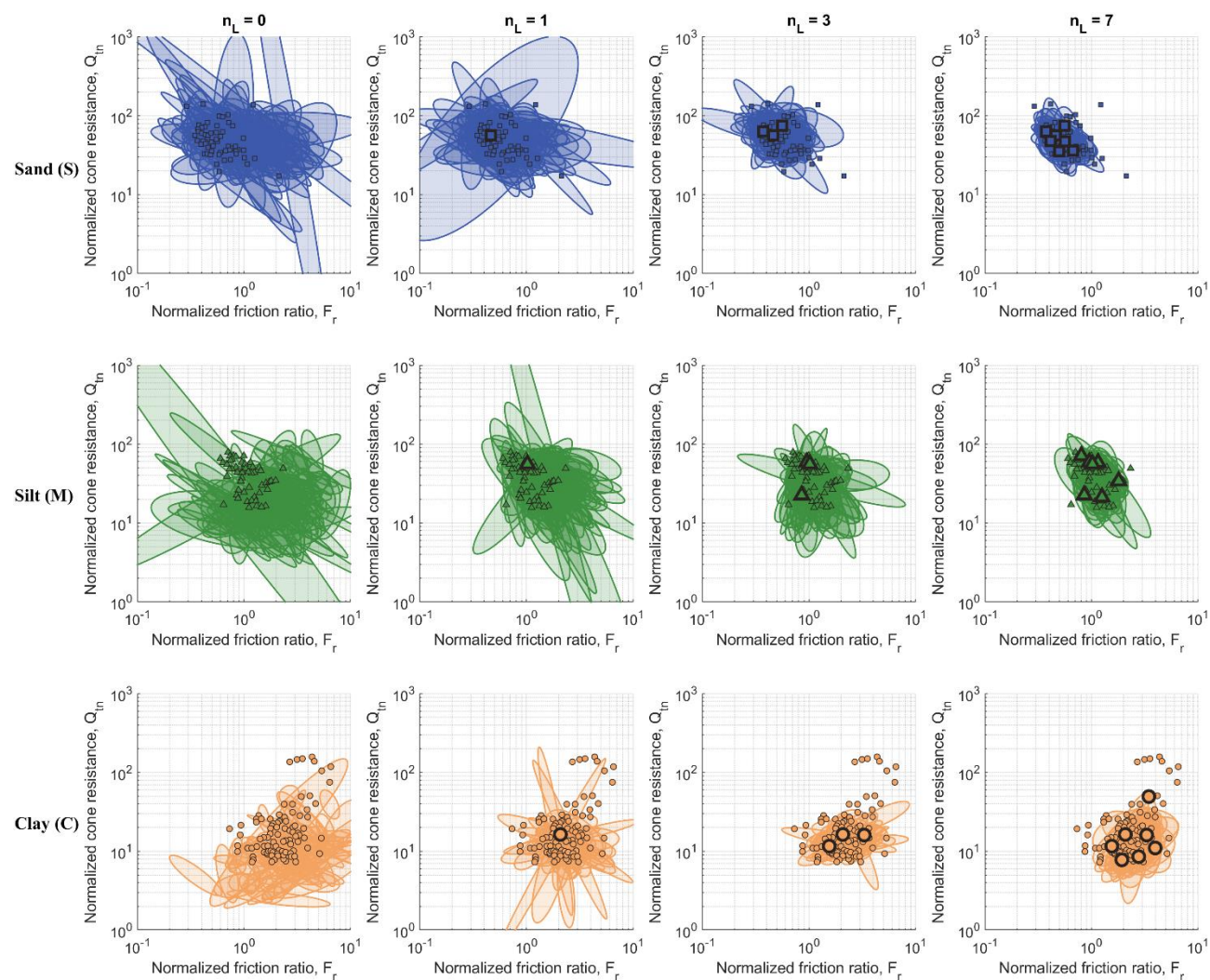


圖 5.11 後驗參數橢圓，對應 $n_L = 0$ 、 1 、 3 及 7 四種情境。

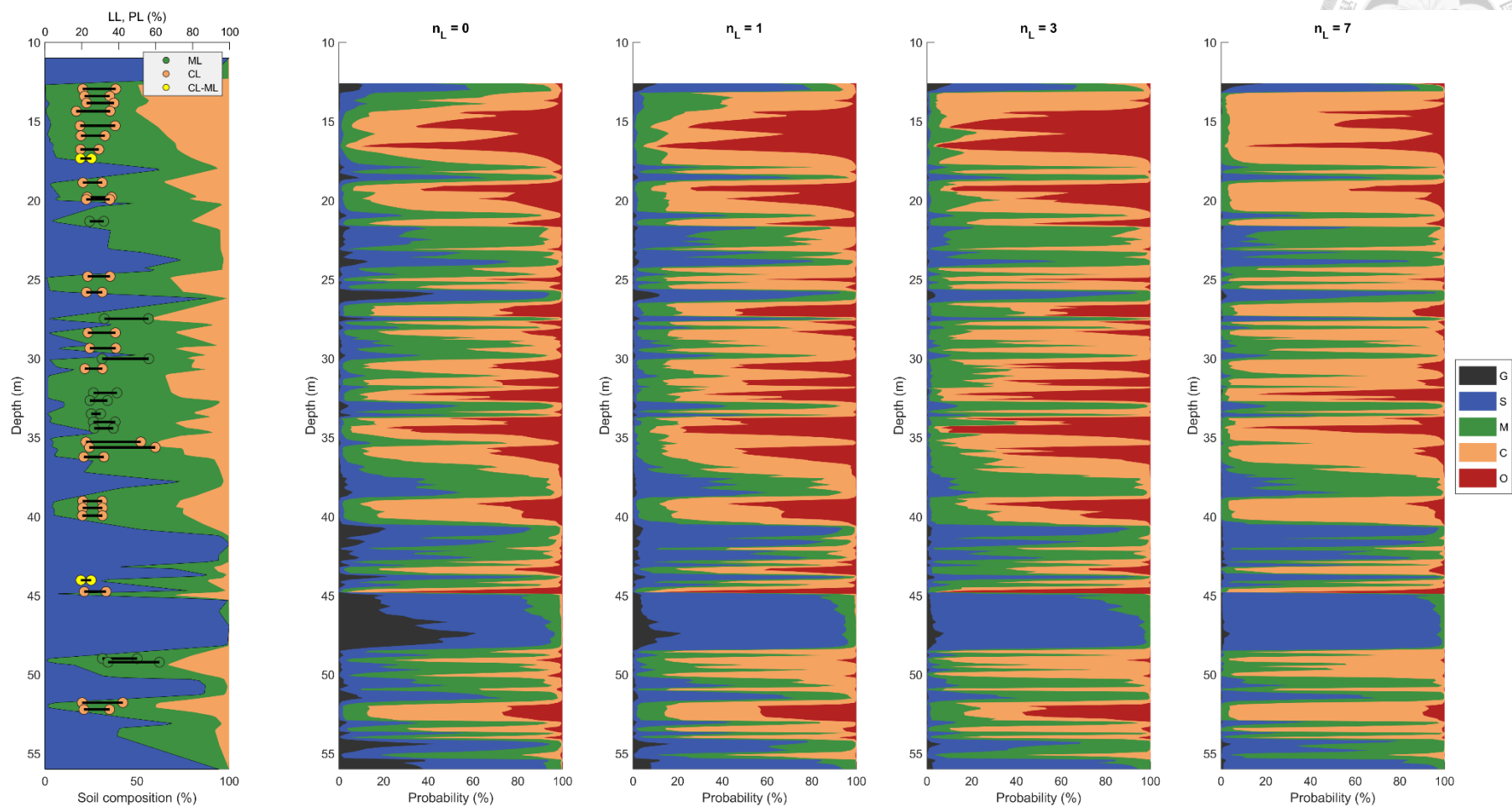


圖 5.12 USCS 類別預測機率隨深度變化，對應 $n_L = 0$ 、1、3 及 7 四種情境。



5.2 Leave-one-site-out 交叉驗證

Leave-one-out 交叉驗證 (Leave-one-out cross-validation, LOOCV) (James et al. 2013) 是一種常見的交叉驗證方法，特別適用於測試資料不足的情況。此方法的核心概念為：每次從資料集中提取一筆資料作為驗證資料，其餘作為訓練資料，以評估模型在遇到未知資料時的預測能力。

本研究為驗證 USCS-HBM 模型在不同場址上的預測能力，進一步採用 Leave-one-site-out 交叉驗證 (Leave-one-site-out cross-validation, LOSOCV)。假設資料庫中共有 n_s 個場址，其操作步驟如下：

1. 將第 i 個場址 ($i = 1, 2, \dots, n_s$) 的所有紀錄提出作為目標場址，其餘 $n_s - 1$ 個場址的紀錄則作為訓練資料。透過 USCS-HBM 模型的學習階段，於訓練資料中學習超參數 Θ ，以建構該目標場址的先驗模型。
2. 考慮三種不同已知紀錄 n_L 的情境， $n_L = 0, 1$ 及 3 。以圖 1.1 中的員林場址為例，其包含 10 筆 S、4 筆 M 及 4 筆 C 類別的紀錄。若設定 $n_L = 3$ ，則從每一類別中隨機抽取 3 筆紀錄作為已知 USCS 資訊，並用以更新先驗模型，建立準場址特定模型。其餘 7 筆 S、1 筆 M 和 1 筆 C 類別紀錄則作為驗證樣本。
3. 以更新後的準場址特定模型，預測驗證樣本的 USCS 類別機率 $P_{\text{pred}}^{(1:5)}$ ，並將其與實際分類進行比較。模型的預測準確度同樣以正確預測率與 Brier score 進行量化評估。同時，亦計算基於 Robertson 所提出之 SBT 指數 I_c 的通用模型預測結果，以進行後續比較。
4. 重複步驟 1 至步驟 3 共 n_s 次，確保資料庫中每個場址皆曾作為一次驗證的目標場址，以全面評估模型的預測能力。

採用 Leave-one-site-out 交叉驗證的優點在於能最大化資料庫使用率，每次僅排除一個場址，其餘所有資料皆可參與訓練先驗模型，進而降低先驗模型的偏差。圖 5.13 與圖 5.14 展示了 USCS-HBM 於 LOSOCV 中的預測表現，並與基於 Robertson SBT 指數 I_c 的通用模型預測結果進行比較。結果顯示當 $n_L = 0$ 時，兩者表現相當。然而，當 $n_L = 1$ 或 $n_L = 3$ 時，USCS-HBM 的預測表現明顯優於 Robertson I_c 模型，具體表現在正確預測率的提升與 Brier score 的降低上。此結果驗證 USCS-HBM 在隨著目標場址資料量的增加，其預測能力能顯著提升，並優於基於通用模型的預測方式。

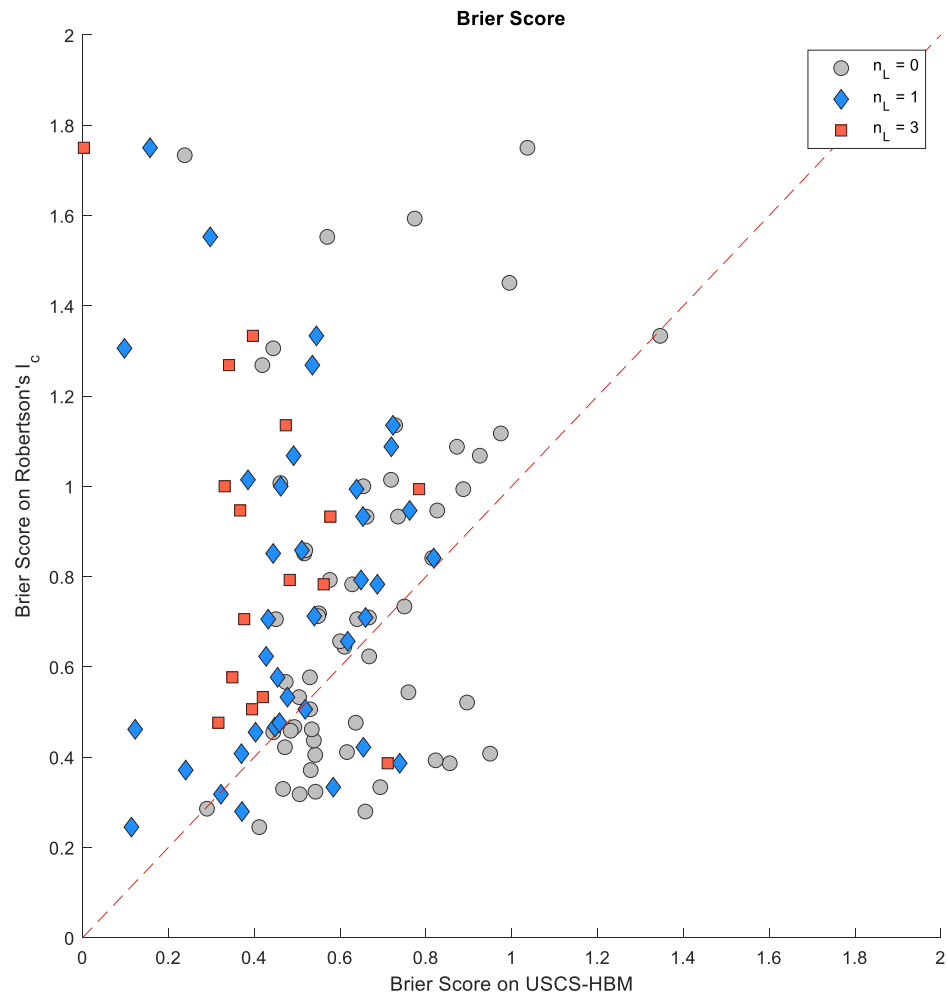


圖 5.13 Leave-one-site-out 交叉驗證後，不同已知紀錄數量下，USCS-HBM 與 SBT 指數預測之 Brier score 比較。

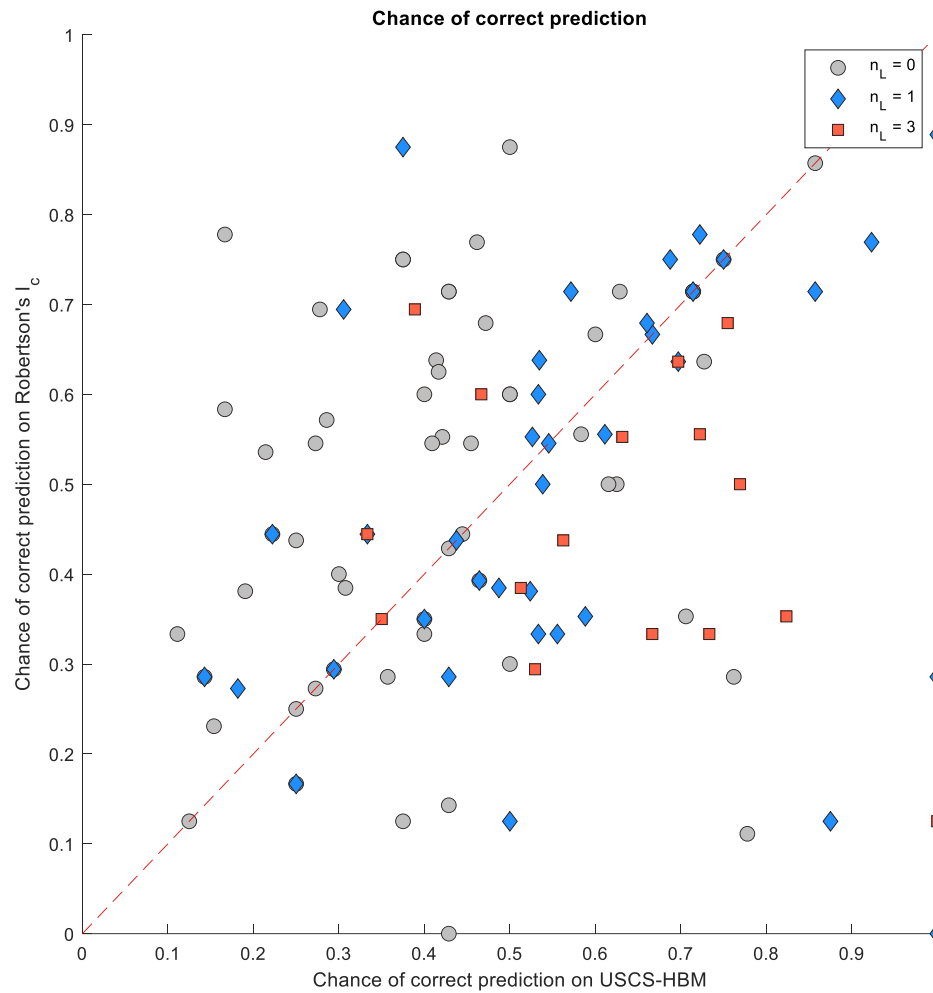


圖 5.14 Leave-one-site-out 交叉驗證後，不同已知紀錄數量下，USCS-HBM 與 SBT 指數預測之正確預測率比較。

第 6 章 結論與未來建議



6.1 結論

本研究顯示，CPT 資料與 USCS 分類之間的關係存在一定程度的場址獨特性。因此，像 Robertson 的 SBTn 圖這類「通用型」CPT 土壤分類方法，當應用於特定場址時，往往難以提供準確的分類結果。另一方面，「場址特定」的分類方法雖可提升準確性，卻通常需要大量的目標場址資料，才可建立可靠的場址特定模型，而這在一般的場址調查中往往難以取得。

為解決通用模型與場址特定模型之間的兩難，本研究提出一個新的推論架構，稱為 USCS-HBM，以實現準場址特定的 CPT 土壤分類方法。研究首先彙整了一筆名為「CPT-USCS/8/4182」的資料庫，包含來自全球 506 個場址、共 4182 筆 CPT 與 USCS 相關參數的配對資料。再從上述資料庫中，僅取 CPT 參數以及 USCS 類別變數，精簡成「CPT-USCS/3/2017」資料庫，包含來自全球 228 個場址、共 2017 筆紀錄。USCS-HBM 架構利用這筆精簡後的資料庫學習場址獨特性，進而產生對目標場址的先驗模型，並可透過少量的目標場址資料進行後驗更新，形成準場址特定模型，用以預測其他深度或位置的 USCS 分類。

透過真實案例研究與大量的 leave-one-site-out 交叉驗證，本研究發現：在沒有任何目標場址資料的情況下 ($n_L = 0$) USCS-HBM 與通用的 Robertson I_c 方法的預測準確度差異不大。然而，當具備少量目標場址資料 ($n_L = 1$ 、3 及 7) 時，本研究所提出的 USCS-HBM 架構，無論是在正確預測率或著 Brier score 上，皆顯著優於通用模型，展現其良好的適應性與實用價值。

6.2 未來建議

本研究目前彙整的資料庫「CPT-USCS/3/2017」，在部分土壤類別的樣本數仍顯不足。例如，礫石 (G) 的紀錄相對稀少，而有機土 (O) 的紀錄則多來自少數特定文獻，場址分布較集中，且數量相較其他土壤類別也比較不足，可能無法反映全球各地的土壤特徵。因此，建議未來應持續擴充資料庫規模與場址多樣性，以涵蓋更多土壤類別與地理區域，進一步提升模型對全球不同場址條件下的預測能力與泛化表現。

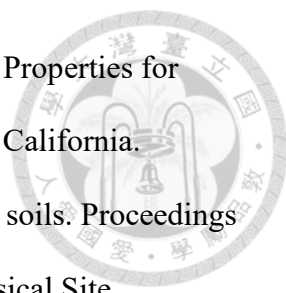
此外，在 Ching et al. (2021) 所提出的層級貝葉斯模型中，每個場址特定的模型參數 $(\underline{\mu}_i, \mathbf{C}_i)$ 是由一組相同的超參數 $\Theta = (\underline{\mu}_0, \mathbf{C}_0, \Sigma_0, \nu_0)$ 所控制，並會在學習階段透過 Gibbs 採樣法持續更新。然而，本研究所提出之 USCS-HBM，場址特定的土壤類別機率參數 $\underline{p}_i$ 是由一組固定的超參數 $\underline{\gamma} = [1, 1, 1, 1, 1]^T$ 控制，雖屬於非信息先驗，但在學習過程中不會隨資料而調整。因此，建議未來研究可探索是否存在合適的機率密度函數，使得 $\underline{\gamma}$ 、 $\underline{p}_i$ 、 $\underline{L}$ 能形成封閉形式的共軛先驗結構。如此一來，便可在模型學習過程中動態更新土壤類別機率的超參數，使模型更具靈活性與適應性，並提升對土壤分類不確定性的描述能力。

參考文獻



- Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (1965). Handbook of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York.
- ASTM International (2011). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system) (ASTM D2487-11). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Begemann, H. (1965). The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proceedings of the 6th ICSMFE, Montreal, Canada, 17-20.
- Bennett, M. J. and Tinsley III, J. (1995). Geotechnical Data from Surface and Subsurface Samples Outside of and within Liquefaction-Related Ground Failures Caused by the October 17, 1989, Loma Prieta Earthquake, Santa Cruz and Monterey Counties, California. Open-File Report 95-663, US Geological Survey, Menlo Park, California.
- Bray, J. D. and Sancio, R. B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (9), 1165-1177.
- Campanella, R. G., Gillespie, D., and Robertson, P. K. (1982). Pore pressures during cone penetration testing. Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testings, Amsterdam.
- Ching, J. and Phoon, K. K. (2014). Correlations among some clay parameters—the multivariate distribution. Canadian Geotechnical Journal, 51 (6), 686-704.
- Ching, J. and Phoon, K. K. (2015). Constructing multivariate distributions for soil parameters. Risk and Reliability in Geotechnical Engineering, 3-76.

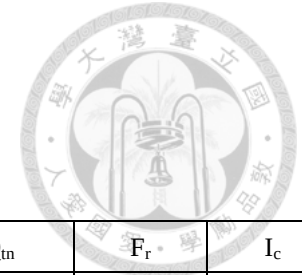
- 
- Ching, J., Wu, S., and Phoon, K. K. (2021). Constructing quasi-site-specific multivariate probability distribution using hierarchical Bayesian model. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 147 (10), 04021069.
- Chung, Y., Gelman, A., Rabe-Hesketh, S., Liu, J., and Dorie, V. (2015). Weakly informative prior for point estimation of covariance matrices in hierarchical models. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 40 (2), 136-157.
- Douglas, B. J. and Olsen, R. S. (1981). Soil classification using electric cone penetrometer. *Proceedings of Symposium on Cone Penetration Testing and Experience*, St. Louis, Missouri, 209-227.
- Geman, S. and Geman, D. (1984). Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* (6), 721-741.
- Huang, A. and Wand, M. P. (2013). Simple marginally noninformative prior distributions for covariance matrices. *Bayesian Analysis*, 8 (2), 439-452.
- Idriss, I. M. and Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- James, A. T. (1964). Distributions of matrix variates and latent roots derived from normal samples. *The Annals of Mathematical Statistics*, 35 (2), 475-501.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., and Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. Springer.
- Jefferies, M. G. and Davies, M. P. (1993). Use of CPTU to estimate equivalent SPT N 60. *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 458-468.
- Jung, B.-C., Gardoni, P., and Biscontin, A. (2008). Probabilistic soil identification based on cone penetration tests. *Géotechnique*, 58 (7), 591-603.

- 
- Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. Electric Power Research Inst., Palo Alto, California.
- Lengkeek, A. (2024). CPT based classification with focus on organic soils. Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Barcelona, Spain.
- Lengkeek, H. J. (2022). CPT-based classification and correlations for organic soils. 4TU.ResearchData. <https://doi.org/10.4121/19139651.v2>.
- Leroueil, S. and Hight, D. (2003). Behaviour and properties of natural soils and soft rocks. Characterisation and engineering properties of natural soils, 1, 29-254.
- Lunne, T., Powell, J. J. M., and Robertson, P. K. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Taylor & Francis, UK.
- Mayne, P., Peuchen, J., and Bouwmeester, D. (2010). Soil unit weight estimation from CPTs. Proceedings of 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- Moss, R. E. S. (2003). CPT-Based Probabilistic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation. PhD Dissertation, University of California, Berkeley, USA.
- Phoon, K. K., Ching, J., and Shuku, T. (2022). Challenges in data-driven site characterization. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 16 (1), 114-126.
- Ricceri, G., Simonini, P., and Cola, S. (2002). Applicability of piezocone and dilatometer to characterize the soils of the Venice Lagoon. Geotechnical & Geological Engineering, 20, 89-121.
- 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. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—an update. Canadian Geotechnical Journal, 53 (12), 1910-1927.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). Use of piezometer cone data. Proceedings of ASCE Specialty Conference In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA.
- Robertson, P. K. and Wride, C. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35 (3), 442-459.
- Zhang, G., Robertson, P., and Brachman, R. W. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. Canadian Geotechnical Journal, 39 (5), 1168-1180.

附錄 A 「CPT-USCS/8/4182」資料庫

表 A 1 「CPT-USCS/8/4182」詳細資料



#	Reference	Country	Region	USCS	N	LL	PI	FC (%)	SC (%)	D ₅₀ (mm)	Q _{tn}	F _r	I _c
1	Marchetti (1980)	Italy	Montalto	C	8	41-58.41	24.54-38.25	100-100	0-0	-	-	-	-
2	Ku (2008)	Taiwan	Changhua	S	12	-	-	2.6-28.7	-	-	18.1-75.88	0.27-1.9	1.91-2.84
3			Kaohsiung	S	6	-	-	7-33	-	-	42.17-72.68	0.23-1.26	1.71-2.27
				M	7	-	-	53-94	-	-	2.8-25.28	1.01-8.37	2.43-3.7
				C	2	-	-	84-97	-	-	3.33-29.74	2.41-6.5	2.85-3.35
4	Tanaka et al. (2001)	Singapore	-	C	10	50.39-82.09	33.99-57.19	70.21-100	0-29.79	-	2.82-4.74	6.32-8.08	3.46-3.71
5	Watabe et al. (2004)	Thailand	Ekachai	C	8	58.15-108.44	37.78-74.87	82.09-99.34	-	-	-	-	-
6		Vietnam	Hai-Phong	C	20	46.26-67.57	25.03-41.94	82.6-100	0-14.06	-	4.85-9.99	0.94-2.54	2.85-3.22
7	Takemura et al. (2007)	Vietnam	Can Tho	C	8	45.21-72.32	22.35-65.1	80.35-98.67	-	-	2.67-6.37	0.02-1.49	2.69-3.07
8	Mayne and Brown (2003)	USA	Alabama	S	4	-	-	-	-	0.082-0.123	40.12-47.75	4.91-5.75	2.64-2.7
				M	3	34.1-53.9	4.6-10	-	-	0.034-0.058	22.01-36.12	6.39-7.83	2.79-2.95
9	DeGroot and Lutenegger (2003)	USA	New England	M	10	39.83-54.13	11.87-23.75	100-100	0-0	-	2.71-7.83	0.81-1.13	2.82-3.31
10	Tanaka and Tanaka (1998)	Japan	Niigata	S	5	-	-	3.28-29.46	70.54-96.72	-	48.07-173.2	0.21-2.73	1.45-2.29
11	Leong et al. (2002)	Singapore	Bukit Timah Granite	S	1	-	-	48.77	51.23	-	-	-	-
				M	7	38.8-54.55	12.86-19.74	53.08-61.38	38.62-46.92	-	-	-	-
				C	3	38.14-68.07	15.52-37.92	50.73-59.87	40.13-49.27	-	-	-	-
12			Jurong Formation	S	4	-	-	23.76-40.81	76.24-59.19	-	-	-	-
				C	1	30.27	11.76	81.56	18.44	-	-	-	-
13	Vinson and Brown (1997)	USA	Alabama	S	2	-	-	46.2-46.3	52-53.8	0.087-0.102	37.02-53.82	5.01-6.56	2.68-2.7

				M	4	42-54	4-8	69.1-89.5	10.5-30.9	-	11.43-29.45	6.62-7.57	2.87-3.2
14				S	3	-	-	29.4-45	54.7-69.9	0.101-0.337	39.13-50.62	4.32-6.19	2.57-2.73
				M	2	37-54	6-9	74.6-90.1	9.9-25.4	-	25.94-32.74	4.44-5.69	2.7-2.85
15				S	4	-	-	33.1-42.3	57.5-66.1	0.112-0.116	23.27-50.3	3.7-6.25	2.51-2.91
				M	1	38	3	71.3	28.7	-	28.05	6.14	2.85
16	Coutinho and Mayne (2012)	China	Nanjing	S	5	-	-	20.87-38.09	61.97-79.13	-	12.96-29.62	0.45-1.58	2.18-2.66
				C	3	21.8-37.41	10.76-13.41	75.61-87.65	12.35-24.39	-	10.99-22.91	1.37-2.83	2.51-2.95
17				M	2	29.33-29.78	6.64-6.79	88.46-95.8	4.2-11.54	-	17.36-24.18	1.6-1.7	2.54-2.65
18		Poland	Zelazny Most	S	22	-	-	9.91-33.44	66.56-90.09	-	17.41-92.55	0.39-0.95	1.72-2.45
19	Mantaras et al. (2015)	Brazil	Tubarão	C	8	39.95-57.97	17.85-32.13	66.81-99.79	-	-	-	-	2.7-3.3
20	Konrad et al. (1985)	Canada	Vancouver	M	3	35.55-36.59	10.13-11.36	50.25-93.2	-	-	3.41-3.76	3.04-4.59	3.36-3.49
				C	2	36.42-41.31	12.41-18.17	77.41-93.2	-	-	2.6-3.14	3.71-6.16	3.47-3.66
21	Rocha et al. (2016)	Brazil	São Paulo	S	8	-	-	9.02-18.85	81.15-90.98	-	34.93-45.7	0.22-0.53	1.9-2.11
22	Mayne and Harris (1993)	USA	Atlanta	S	11	-	-	30.88-35.2	64.81-69.12	-	26.23-63.18	1.43-2.46	2.3-2.59
23	Sabatini et al. (2002)	USA	Alabama	S	5	-	-	33.1-50	50-66.9	-	8.56-48.61	4.45-6.59	2.58-3.24
				M	1	44	5	84.8	15.2	-	36.51	5.3	2.72
24	Wang and Borden (1996)	USA	Raleigh	M	4	38.73-60.77	5.84-10.7	50.25-64.94	-	-	-	-	-
25	Boller Jr (2008)	USA	Charleston	S	5	-	-	7-38.56	61.44-93	0.108-0.476	11.74-139.15	0.6-1.04	1.69-2.7
26		USA	Georgetown	S	7	-	-	2.45-7.44	92.56-97.55	0.18-0.28	34.35-104.73	0.14-0.49	1.53-2.14
27	Geiger (2010)	USA	Walterboro	S	15	-	-	2.89-46.33	53.67-97.11	0.09-0.2	3.78-141.84	0.36-2.58	1.27-3.11
28	Williamson (2013)	USA	Georgetown	S	5	-	-	3.1-5.42	94.58-96.9	0.142-0.247	-	-	1.5-1.76

29				S	3	-	-	5.4-6.97	93.03-94.6	-	-	-	1.71-2.28
30			Summerville	S	3	-	-	7.84-15.37	84.63-92.16	-	-	-	2.04-2.49
31			South Carolina	S	2	-	-	8-13.32	86.68-92	-	-	-	1.67-2.06
32			Dorchester, SC	S	6	-	-	7.6-12.96	81.8-92.4	-	-	-	2.31-2.75
33	Marachi (1969)	Switzerland	Göscheneralp dam	G	2	-	-	11.7-13.12	34.39-39.44	3.803-6.291	-	-	-
				S	3	-	-	14.54-36.4	46.67-63.6	0.144-2.176	-	-	-
34	Wichtmann and Triantafyllidis (2009)	Germany	Dorsten	G	3	-	-	0-9.83	0-28.16	5.949-14.032	-	-	-
				S	7	-	-	0-15.22	84.78-100	0.1-3.496	-	-	-
35	Wang et al. (2019)	China	Fujian	S	5	-	-	0-0	100-100	0.797-0.797	-	-	-
36	Liu et al. (2020)	China	Kunming	G	4	-	-	6.85-43.33	15.69-29.24	0.425-3.592	-	-	-
				S	2	-	-	30.23-35.98	38.01-46.12	0.805-1.684	-	-	-
37	Welker et al. (2013)	USA	Pennsylvania	S	6	-	-	0-5.34	71.43-84	0.896-3.449	-	-	-
38	Fonseca et al. (2006)	Portugal	Porto	S	4	-	-	38.05-46.97	53.03-61.95	0.113-0.19	43.81-87.71	3.65-5.46	2.35-2.67
39	Kayabasi (2012)	Turkey	Mersin	G	1	-	-	49.99	21.5	0.076	-	-	-
				S	1	-	-	42.49	43.9	0.178	-	-	-
40	Marchetti et al. (1986)	Italy	Lazio	C	3	41-46	20-25	90-100	0-10	-	-	-	-
41	Berrill et al. (1988)	New Zealand	Murchison	S	3	-	-	25.78-33.51	63.19-74.22	0.1-0.117	-	-	-
42	Hamada and O'Rourke (1992)	Japan	Tokyo	S	6	-	-	3.08-15.96	82.28-96.92	0.215-0.35	-	-	-
43			Kawakuba	S	3	-	-	3.75-26.54	73.46-96.25	0.134-0.443	-	-	-
44	Bartlett and Youd (1992)	USA	Alaska	S	8	-	-	0.08-39.85	54.41-88.09	0.109-3.321	-	-	-

45				G	5	-	-	2.2-20.23	27.6-46.19	3.887-10.368	-	-	-
				S	2	-	-	4.64-16.83	61.28-82.68	0.158-2.433	-	-	-
46				S	5	-	-	4.52-48.2	51.8-89.6	0.083-2.69	-	-	-
47				S	11	-	-	3.44-50	63.21-90.68	0.075-1.797	-	-	-
48	Rollins et al. (2020)	Italy	Friuli	G	4	-	-	1.36-4.59	18.87-47.28	4.75-12.403	-	-	-
				S	1	-	-	10.37	46.09	3.483	-	-	-
49	Andrus (1994)	USA	Idaho	G	7	-	-	0-3	33-47	-	43.33-443.77	0.7-2.67	1.35-2.46
				S	1	-	-	4	54	-	277.27	1.42	1.71
50				G	2	-	-	2-3	37-39	-	90.1-248.92	0.71-1.23	1.69-1.86
				S	2	-	-	3-4	49-51	-	189.84-626.57	0.73-0.75	1.28-1.61
51				G	5	-	-	1-9	34-44	-	61.77-253.83	0.59-1.37	1.65-1.95
52				G	5	-	-	1-4	38-45	-	63.31-378.01	0.58-1.51	1.6-1.94
53			Colorado	G	4	-	-	0-4	27-33	-	212.57-462.28	0.45-1.9	1.3-1.88
				S	1	-	-	18	77	-	257.44	0.53	1.42
54			Idaho	G	11	-	-	0-6	34-47	-	123.67-263.83	0.44-4.03	1.31-2.28
				S	6	-	-	1-5	47-64	-	81.14-285.47	0.39-1.8	1.52-2.14
55			Colorado	G	10	-	-	1-16	26-42	-	66.58-395.6	0.41-2.47	1.21-2.08
56			Colorado	G	8	-	-	0-13	29-40	-	129.1-504.79	0.36-1.58	1.23-1.86
				S	1	-	-	26	74	-	155.31	1.43	1.88
57				G	6	-	-	2-15	31-38	-	163.3-302.89	0.47-1.32	1.54-1.83
58				G	8	-	-	1-7	26-44	-	134.31-645.47	0.35-1.58	1.21-1.91
59			-	G	4	-	-	0-1	22-35	6.09-15.3	-	-	-
				S	3	-	-	3-33	63-97	0.11-0.5	-	-	-

60				G	4	-	-	7-14	26-45	-	72.56-142.28	1.37-2.37	2.02-2.14
				S	1	-	-	11	45	-	82.27	0.47	1.79
61				G	1	-	-	18	24	-	260.14	2.54	1.94
				S	3	-	-	11-18	45-52	-	69.86-212.3	0.71-4.9	1.56-2.51
62				G	7	-	-	7-21	20-37	1.44-13.37	-	-	-
				G	8	-	-	6-21	18-40	2.23-10.78	-	-	-
63				S	1	-	-	16	73	0.19	-	-	-
64	Chiaro (2022)	New zealand	Blenheim	G	4	-	-	1.89-5.79	16.11- 46.16	3.75-13.584	-	-	-
				S	2	-	-	8.38-9.94	81.56- 87.8	0.221-0.346	-	-	-
65				M	6	27-31	-	51-80	-	0.034-0.07	-	-	2.06-2.78
66				M	4	23-35	-	40-99	-	0.015-0.06	-	-	-
67				M	4	22-30	-	58-93	-	0.016-0.051	-	-	2.53-2.76
68				M	5	31-38	10-13	87-97	-	0.008-0.022	-	-	-
69	Lunne et al. (1997)	Japan	Kyushu	S	6	-	-	9.95-35.36	58.85- 90.05	0.148-0.476	24.71-110.09	0.29-1.03	1.6-2.42
70	Meigh and Nixon (1961)	Germany	North Rhine- Westphalia,	G	1	-	-	0	48.6	4.067	-	-	-
				S	2	-	-	1.37-7.33	72.03- 92.67	0.255-0.466	-	-	-
71	Dhakal et al. (2022)	New zealand	Thorndon	G	5	-	-	15.23-27.46	16.29- 26.09	4.397- 10.683	-	-	-
72	Han et al. (2019)	USA	Indiana	G	1	-	-	4.79	46.51	4.313	-	-	-
				S	9	-	-	0.55-4.22	56.65- 95.77	0.452-2.691	-	-	-
73	Silvestri (2003)	Canada	Mauricie	C	8	64.34-72.09	40.7-46.12	100-100	0-0	-	5.63-9.93	0.24-0.55	2.55-2.88
74	Watabe et al. (2004)	Japan	Fukuoka	M	11	87.69- 121.67	46.5-71.21	88.58-100	0-11.42	-	3.12-10.15	0.39-1.27	2.65-3.26
				C	5	68.03- 128.26	36.49-80.63	83.81-98.86	1.14- 16.19	-	3-5.85	0.6-1.39	2.88-3.29
75	Ozan (2003)	Turkey	Bursa	M	2	24-29	-	71-95	-	0.027-0.045	15.2-59.92	0.51-1.35	1.93-2.66
				C	5	44-79	25-51	97-100	-	0.001-0.005	8.83-27.03	2.99-5.05	2.77-3.04

76				M	4	33-40	-	68-99	-	0.007-0.048	17.03-43.91	0.64-1.73	2.09-2.67
				C	2	39-63	21-39	94-99	-	0.001-0.004	9.86-15.29	3.33-5.27	3-3.03
				S	1	-	-	20	-	0.14	85.46	0.49	1.79
77				S	7	-	-	8-40	-	0.12-4.1	100.76-184.4	0.47-1.63	1.58-2.05
78				S	10	-	-	4-14	-	0.84-4.5	56.74-172.55	0.26-0.98	1.6-1.96
79				S	6	-	-	10-33	-	0.1-0.26	41.42-73.15	0.27-1.3	1.74-2.28
				C	3	31-36	17-19	56-90	-	0.026-0.074	7.18-22.67	1.45-2.34	2.53-2.88
80				S	1	-	-	16	-	1.3	10391	2.15	2.89
				C	4	55-58	32-34	86-96	-	0.009-0.011	4.91-5.51	1.26-2.8	3.05-3.22
81				S	4	-	-	5-43	-	0.09-0.55	39.79-121.25	0.26-0.8	1.52-2.15
				C	2	33-38	15-20	70-70	-	-	9.76-13.23	5.85-8.75	3.18-3.19
82	Ganju et al. (2020)	USA	Indiana	G	1	-	-	5.31	46.03	4.415	171.77	0.42	1.5
				S	4	-	-	1.23-3.2	57.65-96.97	0.451-2.665	36.52-347.95	0.21-0.94	1.31-2.25
83	Takemura et al. (2007)	Vietnam	Tan An	C	4	100.13-112.87	72.45-85.75	100-100	-	-	3.49-8.37	0.21-0.78	2.78-3.02
84	Almeida and Marques (2003)	Brazil	Rio de Janeiro	O	11	83.79-154.62	46.91-96.12	-	-	-	1.53-4.04	4.47-7.2	3.5-3.84
85	Chen and Hsieh (1996)	Taiwan	Taipei	C	19	30.13-48.36	8.77-22.41	66.2-100	-	-	3.03-5.9	0.62-1.07	2.96-3.2
86	Ng and Lo (1985)	Canada	Ontario	C	3	53.81-69.69	34.29-47.62	96-100	-	-	-	-	-
87	Hanzawa (1979)	Japan	Natsushima	M	9	75.87-96.59	37.84-53.43	90.73-94.16	-	-	-	-	-
				C	9	60.49-89.66	35.31-54.66	80.54-93.27	-	-	-	-	-
88	Tan et al. (2003)	Singapore	Singapore Arts Centre	C	10	50.66-83.01	34.68-58.45	100-100	0-0	-	-	-	-
89			Pulau Tekong	C	15	81.04-102.17	53.85-70.12	98.31-100	0-1.69	-	-	-	-
90	Kjekstad and Lunne (1981)	Norway	North Sea	C	19	33.67-56.63	18.62-34.44	68.82-85.93	14.07-31.18	-	9.98-31.16	1.78-4.45	2.48-3.03
91	Tanaka (2002)	Japan	Kobe	C	13	58.64-104.04	37.24-77.41	69.73-100	0-30.27	-	-	-	-
92	Coutinho (2007)	Brazil	Recife	O	17	24.6-124.54	7.88-89.91	74.86-97.77	-	-	4.23-10.6	1.85-2.56	2.96-3.26

93				O	16	83.32-169.54	44.28-105.64	85.11-94.97	-	-	2.71-4.34	1.16-2.4	3.13-3.37
94	Suddeepong et al. (2015)	Japan	Ariake	M	9	59.5-115.7	23.14-59.5	72.04-99.6	-	-	-	-	-
95			Shiroishi	M	7	54.1-116.39	19.67-62.29	91.33-100	-	-	-	-	-
				C	4	40.98-114.75	22.95-70.49	94.67-98	-	-	-	-	-
96	Chung et al. (2005)	Korea	Busan	M	5	49.73-65.59	20.18-30.99	74.73-96.15	3.85-25.27	-	-	-	-
C				8	38.2-69.91	20.18-38.92	76.93-97.81	2.19-23.07	-	-	-	-	
97				M	3	49.33-69.54	20.21-32.69	94.09-98.39	1.61-5.91	-	-	-	-
				C	21	30.91-72.51	14.26-39.23	62.9-100	0-37.1	-	-	-	-
98				M	11	45-74.29	10.71-35	85.35-99.49	0.51-14.65	-	-	-	-
				C	7	47.86-73.57	25-40	80.3-98.48	1.52-19.7	-	-	-	-
99	Chung et al. (2002)	Korea	Shinho	M	2	49.81-52.83	20.38-21.13	97.92-98.44	1.56-2.08	-	-	-	-
C				8	43.02-68.68	26.42-45.28	94.79-98.44	1.56-5.21	-	-	-	-	
100			Jangyu	M	2	48.91-67.88	20.44-31.39	91.87-96.09	3.91-8.13	-	-	-	-
				C	17	43.07-70.8	18.98-38.69	92.48-97.29	2.71-7.52	-	-	-	-
101	Shibata and Sekiguchi (1984)	Japan	Kurashiki	C	6	30.57-74.94	13.08-53.53	60.96-99.51	-	-	-	-	-
102	Hansen (1950)	Norway	Rustadbrygga	C	5	29.33-34.2	14.33-17.6	82.69-91.14	8.86-17.31	0.004-0.009	-	-	-
103	Chung et al. (2006)	Korea	Busan	C	5	25.9-68.91	9.97-43.01	76.91-87.63	12.37-23.09	-	1.16-4.29	1.93-6.85	3.21-3.97
104				M	4	44-73.3	17.5-37.4	76-88.5	11.5-24	-	3.12-5.3	1.64-3.64	3.11-3.47
				C	12	42.27-80.31	24.76-54.35	70.87-91.36	8.64-29.13	-	3.4-6.07	0.92-2.28	3.07-3.2
105	Giao et al. (2008)	Vietnam	Ca Mau	M	8	70.79-73.16	33.88-35.06	98.16-99.54	0.46-1.84	-	-	-	-

				C	11	40.46-48.73	17.73-22.85	76.06-92.17	7.83-23.94	-	-	-	-
106	McClung and Mollard (1987)	Canada	Alberta	M	1	26	4	90.02	9.98	0.032	-	-	-
				C	5	29-34	7-13	81.06-100	0-18.94	0.014-0.042	-	-	-
107	Ohtsubo et al. (1995)	Japan	Ariake Bay	M	1	164.57	102.36	97.71	-	-	-	-	-
				C	8	68.77-125.2	40.68-80.05	87.4-98.84	-	-	-	-	-
108	Ohtsubo et al. (2006)	Japan	Saga	M	6	60.41-102.31	24.83-57.93	79.23-97.79	-	-	-	-	-
				C	3	69.72-138.52	36.73-87.42	95.32-97.38	-	-	-	-	-
109			Kumamoto	M	3	70.18-94.04	32.28-51.93	56.15-88.69	-	-	-	-	-
				C	5	58.95-113.68	32.28-68.77	65.82-100	-	-	-	-	-
110		Japan	Nagasaki	M	5	72.38-113.33	37.14-67.62	92.68-97.39	-	-	-	-	-
				C	6	81.9-105.71	45.71-62.86	98.28-99.75	-	-	-	-	-
111		Japan	Saga	M	11	50.96-129.43	16.31-74.39	73.05-99.61	-	-	-	-	-
				C	7	59.11-147.77	30.57-95.8	89.04-99.88	-	-	-	-	-
112				M	7	87.65-157.53	47.3-97.7	92.94-99.88	-	-	-	-	-
				C	2	80.58-106.01	44.4-64.34	83.03-96.91	-	-	-	-	-
113				M	12	49.57-101.91	20.47-48.01	89.14-99.73	-	-	-	-	-
				C	4	53.11-65.84	25.84-39.49	63.37-93.15	-	-	-	-	-
114	Kulkarani et al. (1967)	India	Mumbai	M	5	75-116.5	39-64.5	100-100	0-0	-	-	-	-
115		Canada	Quebec	C	9	63.55-76.42	38.62-47.56	100-100	0-0	-	-	-	-
116	Rochelle et al. (1974)	Canada	Quebec	C	11	26.22-48.43	9.38-25.67	85-99	-	-	-	-	-
117	Crooks and Graham (1976)	UK	Belfast	C	9	71.01-109.67	41.75-74.49	90.23-99.14	0.86-9.77	-	-	-	-
118	Cancelli (1981)	Italy	San Cristoforo	C	13	40.11-60.08	16.92-33.5	85.59-97.82	-	-	-	-	-

119	Rahardjo et al. (2004)	Singapore	Yishun	M	2	63.46-68.28	19.26-24.68	65.83-69.02	-	-	-	-	-
120	Wersäll et al. (2022)	Sweden	Stockholm	S	8	-	-	5.22-31.99	44.82-94.78	0.131-0.331	-	-	-
121	Beyzaei et al. (2018)	New zealand	Christchurch	M	1	26	2	94	-	0.037	-	-	2.32
122		New zealand	Christchurch	M	4	28-33	4-9	91-94	-	0.013-0.031	-	-	2.38-2.71
123		New zealand	Christchurch	M	5	23-41	1-15	87-100	-	0.007-0.033	-	-	2.53-3.08
124	Tanaka et al. (2001)	Japan	Ariake	M	9	86.99-122.81	46.79-73.1	88.55-100	0-11.45	-	-	-	-
				C	8	67.25-179.09	35.82-116.23	85.42-100	0-14.58	-	-	-	-
125		Thailand	Bangkok	C	11	63.44-102.55	26.83-76.2	87.64-100	0-12.36	-	-	-	-
126	Nash et al. (1992)	UK	Scotland	M	1	45.95	17.44	93.13	-	-	-	-	-
				C	15	53.77-79.92	27.27-49.4	83.13-98.75	-	-	-	-	-
127	Tanaka (2000)	UK	Scotland	C	9	55.99-77.99	32.6-46.51	82.2-100	0-10.62	-	-	-	-
128		Norway	Lier	C	16	34.15-48.35	16.34-26.92	100-100	-	-	-	-	-
129	Benbouras (2018)	Algeria	Algiers	C	2	39-52	24-32	52-78	-	-	-	-	-
130				C	3	36-43	18-25	74-90	-	-	-	-	-
131				C	4	54-69	33-40	63-86	-	-	-	-	-
132				C	3	37-51	20-27	79-90	-	-	-	-	-
133				C	3	57-59	29-30	95-98	-	-	-	-	-
134				C	3	55-57	28-29	94-96	-	-	-	-	-
135				C	4	46-65	24-36	94-97	-	-	-	-	-
136				C	4	52-59	29-32	83-97	-	-	-	-	-
137				C	3	45-56	19-32	98-99	-	-	-	-	-
138				C	2	40-71	21-38	51-82	-	-	-	-	-
139				C	6	43-60	24-35	74-98	-	-	-	-	-
140				C	5	38-57	21-32	56.4-97.5	-	-	-	-	-

141			C	2	42-42	19-20	61-66	-	-	-	-	-
142			C	3	52-56	26-28	95-97	-	-	-	-	-
143			M	2	64-67	32-33	98-98	-	-	-	-	-
144			C	1	60	30	97	-	-	-	-	-
145			C	3	65-75	34-41	95-98	-	-	-	-	-
146			C	3	37.74-58.62	19.91-31.65	96.5-98	-	-	-	-	-
147			C	3	38.34-48.56	21.5-27.97	94-97	-	-	-	-	-
148			C	5	38.7-56.02	22.3-32.09	62-97	-	-	-	-	-
149			C	5	42.32-58.3	20.39-35.47	69-98	-	-	-	-	-
150			C	3	40.4-46	19-27	68-100	-	-	-	-	-
151			M	3	61-61	27-29	97-100	-	-	-	-	-
152			C	2	58-63	28-32	99-100	-	-	-	-	-
153			M	1	59	27	99	-	-	-	-	-
154			C	5	54-67	26-34	99-100	-	-	-	-	-
155			M	3	60-63	27-31	99-100	-	-	-	-	-
156			C	5	48-62	25-32	93-100	-	-	-	-	-
157			M	1	68	35	99	-	-	-	-	-
158			C	4	56-66	32-36	95-99	-	-	-	-	-
159			C	6	35-58	18-30	64-94	-	-	-	-	-
160			C	6	55-66	28-39	98-100	-	-	-	-	-
161			C	2	61-66	35-36	70-98	-	-	-	-	-
162			C	3	37-47	18-25	97-99	-	-	-	-	-
163			C	4	52-56	26-28	94-98	-	-	-	-	-
			C	4	37-59	19-36	77-85	-	-	-	-	-
			C	4	37-65	18-39	64-89	-	-	-	-	-
			C	4	43-48	23-26	90-95	-	-	-	-	-
			C	4	51.5-54.41	23.1-28.15	85.72-99.04	-	-	-	-	-
			M	1	49	21	95	-	-	-	-	-

164			C	3	69-46	17-21	80-89	-	-	-	-	-
165			M	1	55.48	23.8	98.34	-	-	-	-	-
166			C	3	41.27-48.5	16.07-22.95	92-97.66	-	-	-	-	-
167			C	4	50-55	27-30	90-99	-	-	-	-	-
168			C	4	48-55	24-27	81-96	-	-	-	-	-
169			C	4	48-52	24-26	79-91	-	-	-	-	-
170			C	4	39-58	20-29	54-98	-	-	-	-	-
171			C	5	54-56	27-28	98-100	-	-	-	-	-
172			C	5	55-58	27-29	98-99	-	-	-	-	-
173			C	5	37.48-44.83	19.95-24.58	73.6-88.8	-	-	-	-	-
174			C	4	42.24-50.47	21.1-24.94	67.58-92.83	-	-	-	-	-
175			M	1	35.62	11.14	65.13	-	-	-	-	-
176			C	3	40.27-51.45	19.91-26.92	71.06-90.9	-	-	-	-	-
177			M	1	32.44	9.08	62.04	-	-	-	-	-
178			C	2	45.12-58.56	23.45-28.15	99.32-99.4	-	-	-	-	-
179			M	1	43.58	17.21	67.08	-	-	-	-	-
180			C	2	30.26-47.91	9.78-20.38	55.03-74.28	-	-	-	-	-
181			M	1	77.64	38.36	89.04	-	-	-	-	-
			C	4	35.37-63.04	18.24-31.79	63.84-76.32	-	-	-	-	-
			M	2	75.64-77.85	34.18-37.84	92.28-93.28	-	-	-	-	-
			C	5	27.51-55.28	14.43-29.68	53.6-89.28	-	-	-	-	-
			M	2	82.89-89.02	40.95-43.91	70.43-99.4	-	-	-	-	-
			C	2	46.51-47.27	22.8-23.13	68.24-97.6	-	-	-	-	-
			M	2	88.08-90.47	43.96-44.47	93.92-98.4	-	-	-	-	-
			C	3	56.29-61.08	27.92-30.29	67.04-75.32	-	-	-	-	-
			M	1	67.54	33.04	94.48	-	-	-	-	-
			C	4	37.71-45.95	18.59-22.82	54-95.72	-	-	-	-	-
			C	3	31.2-41.7	9.5-16	52.6-93.63	-	-	-	-	-

182			M	3	46.8-65	18.8-32.2	98.9-100	-	-	-	-	-
			C	4	36.7-44.2	12.26-18.02	63.3-100	-	-	-	-	-
183			M	2	67.96-75.7	34.1-37.54	58.24-62.08	-	-	-	-	-
			C	3	48.74-60.84	23.85-29.88	53.04-96.16	-	-	-	-	-
184			M	1	62.74	30.57	92.04	-	-	-	-	-
			C	3	36.67-53.84	17.76-26.49	96.04-98.6	-	-	-	-	-
185			M	7	33.9-57.1	10.02-26	81.6-100	-	-	-	-	-
			C	1	50.25	22.1	96.93	-	-	-	-	-
186			C	6	28.3-57	11-32	53.7-97	-	-	-	-	-
187			C	5	29.5-36.3	11.5-16.4	74-99.5	-	-	-	-	-
188			C	4	28.66-37.92	11.5-18.79	58.28-71.94	-	-	-	-	-
189			C	3	31.93-52.81	15-26.42	63.24-71.92	-	-	-	-	-
190			C	2	28.05-29.39	10.11-11.52	54.49-55.08	-	-	-	-	-
191			M	1	47	19	99.96	-	-	-	-	-
			C	4	47-60	21-30	99.2-99.8	-	-	-	-	-
192			M	1	61	28	99.48	-	-	-	-	-
			C	5	30-47	9-27	95.84-99.88	-	-	-	-	-
193			C	7	42-52.5	22.7-29	96-99	-	-	-	-	-
194			C	6	42.5-50.5	22-28	69-98	-	-	-	-	-
195			C	1	45.5	25.2	97	-	-	-	-	-
196			C	3	28.5-41.5	10.2-20.9	62-99	-	-	-	-	-
197			C	5	34.5-46.5	17.1-25.1	75-98	-	-	-	-	-
198			C	3	36.9-43.3	18.5-21.4	73.71-78.73	-	-	-	-	-
199			C	8	18-44	11-25	57.8-99.68	-	-	-	-	-
200			M	2	66-75	33.22-37.48	88-98.8	-	-	-	-	-
			C	7	34-63	18.46-33.73	63.5-99.2	-	-	-	-	-
201			C	4	33.5-50.5	17.5-27.4	90-98	-	-	-	-	-
202			C	4	41.5-46.5	22.1-25.1	75-98	-	-	-	-	-

203				M	2	71-73	33.48-35.52	86-99.2	-	-	-	-	-
204				C	6	38-60	16.67-31.37	54.4-90.67	-	-	-	-	-
205				C	2	34-42.5	15-21.1	71-98	-	-	-	-	-
206				C	5	44.5-49.5	23.8-27.3	55-99	-	-	-	-	-
207				M	1	61	29	96.72	-	-	-	-	-
208				C	9	29-44	10-23	85.28-97.72	-	-	-	-	-
209				C	4	44.5-47.5	23.7-25.6	96-99	-	-	-	-	-
210				M	1	42	15	87.56	-	-	-	-	-
211				C	7	32-57	9.6-30	80.12-99.76	-	-	-	-	-
212				M	3	65-79	32.47-40.91	97.5-99.67	-	-	-	-	-
213				C	11	37-64	13.7-32.24	93.67-99.67	-	-	-	-	-
214				C	4	45.4-59.5	25.4-33.8	55-74	-	-	-	-	-
215	Yiqiang and Berrill (1992)	New zealand	Murchison	C	5	38-60.3	20.5-32.2	58-97	-	-	-	-	-
216				C	5	37.5-85.5	18-58.4	81-100	-	-	-	-	-
217	Andrus and Youd (1989)	USA	Idaho	C	2	50-56	22-27	97-98	-	-	-	-	-
218				C	5	39.5-50	21.3-25.7	63-91	-	-	-	-	-
219	Bennett et al. (1984)	USA	California	S	4	-	-	4.52-47.63	52.37-90.76	0.083-0.613	-	-	-
220				S	5	-	-	1.13-21.19	78.31-98.87	0.330-0.484	-	-	-
221				G	4	-	-	2-3	27-47	5.4-12	-	-	-
222				G	8	-	-	10-30	15-34	2-34	-	-	-
223				S	1	-	-	27	73	0.089	92.32	1.24	2
224				M	3	28-64	4-32	90-98	2-10	0.002-0.03	9.48-23.55	3.02-7.53	2.97-3.02
225	Bennett et al. (1984)	USA	California	C	3	33-51	12-27	81-96	4-19	0.011-0.031	20.52	4.52	2.86
226				S	6	-	-	17-34	66-83	0.076-0.102	-	-	-
227				M	5	30-64	4-26	93-100	0-7	0.002-0.038	-	-	-
228				S	8	-	-	14-34	66-86	0.084-0.114	-	-	-
229				M	1	28	4	97	3	0.023	-	-	-

222				C	6	30-68	9-41	95-99	1-4	0.001-0.025	-	-	-
				S	4	-	-	13-38	62-87	0.082-0.11	-	-	-
				M	1	51	16	99	1	0.002	-	-	-
				C	1	71	42	99	1	0.003	-	-	-
223				S	9	-	-	6-33	67-94	0.082-0.12	-	-	-
224				C	3	23-51	7-30	76-95	5-24	0.002-0.037	-	-	-
225				S	1	-	-	38	62	0.078	-	-	-
226				C	1	69	44	100	0	0.001	-	-	-
				S	2	-	-	18-23	77-82	0.1-0.125	-	-	-
227				S	6	-	-	13-31	69-84	0.085-0.11	-	-	-
				C	1	55	32	94	6	0.003	-	-	-
228				S	3	-	-	66-68	32-34	0.081-0.088	-	-	-
229				S	4	-	-	20-35	65-80	0.078-0.103	-	-	-
230				S	8	-	-	15-33	67-85	0.085-0.12	-	-	-
231				S	1	-	-	37	63	0.077	-	-	-
232	Bennett and Tinsley III (1995)	USA	Monterey	S	2	-	-	16	84	0.277	4.98	1.56	3.11
				M	7	26-68	1-32	66-98	2-34	0.002-0.051	4.87-69.18	1.02-6.32	2.07-3.24
233				S	8	-	-	11-41	59-85	0.066-0.43	21.85-59.56	0.41-1.05	2.00-2.29
				M	3	23-29	0-6	53-66	34-47	0.033-0.071	39.9-44.34	0.69-0.84	2.11-2.19
234				S	7	-	-	7-49	51-93	0.077-0.31	22.51-131.31	0.1-0.95	1.37-2.43
				M	2	28-28	0-2	58-74	26-42	0.054-0.06	32.17-33.57	0.79-1.16	2.26-2.33
				S	2	-	-	30-35	65-70	0.114-0.18	27.43	2.67	2.62
235				M	10	-	-	52-98	2-48	0.003-0.071	10.6-33.08	0.11-5.22	2.44-3
				C	2	-	-	86-99	1-14	0.002-0.013	7.44-24.93	4.43-4.89	2.83-3.2
236				M	7	31-80	7-41	72-98	2-28	0.002-0.046	8.42-31.19	0.11-4.72	2.56-3.06
				C	8	34-81	11-51	81-99	1-19	0.002-0.042	9.31-32.29	0.082-7.68	2.62-3.27
237				S	1	-	-	22	78	0.113	45.29	0.83	2.14
				M	4	30-44	11-15	79-97	3-21	0.006-0.05	14.28-21.08	4.6-6.75	2.97-3.06

238	C	3	32-45	9-23	85-96	4-15	0.007-0.027	9.83-15.56	4.39-5.73	2.94-3.18
	S	11	-	-	3-47	53-93	0.095-0.55	12.38-231.54	0.66-5.42	1.66-2.97
	M	1	44	16	95	5	0.008	7.86	3.34	3.11
239	C	2	39-60	15-33	88-96	4-12	0.01-0.01	7.67-15.04	5.08-6.11	2.99-3.27
240	S	9	-	-	5-31	88-95	0.098-0.91	26.76-197.76	0.16-2.01	1.49-2.29
	S	4	-	-	7-39	61-93	0.096-0.245	28.34-52.45	0.38-0.43	1.92-2.19
	M	2	32-41	2-9	62-86	14-38	0.04-0.06	6.43-19.81	0.11-0.13	2.19-2.68
241	S	2	-	-	8-48	52-92	0.08-0.262	-	-	-
	M	2	37-58	9-20	98-98	2-2	0.003-0.024	-	-	-
	C	1	63	32	95	5	0.005	-	-	-
242	S	4	-	-	6-15	85-94	0.19-0.42	-	-	-
	M	7	55-75	22-37	96-100	0-4	0.002-0.011	-	-	-
	C	7	54-76	31-43	83-100	0-17	0.003-0.01	-	-	-
243	S	3	-	-	7-8	92-93	0.247-0.281	-	-	-
	M	2	57-67	24-31	99-100	0-1	0.006-0.008	-	-	-
	C	2	57-65	30-36	92-99	1-8	0.006-0.007	-	-	-
244	S	7	-	-	8-43	54-92	0.08-0.345	15.46-129.15	0.4-0.84	1.63-2.42
	M	3	66-73	32-35	98-100	0-2	0.002-0.003	5.72-6.43	6.09-6.39	3.33-3.38
	C	8	60-81	30-52	95-100	0-5	0.001-0.009	4.19-6.5	4.94-7	3.31-3.49
245	S	10	-	-	1-20	80-94	0.15-0.455	-	-	-
	M	1	71	35	98	2	0.003	-	-	-
246	S	12	-	-	1-16	84-99	0.204-0.418	-	-	-
	M	1	49	17	64	35	0.011	-	-	-
247	S	6	-	-	7-29	71-91	0.108-0.625	24.69-51.47	0.62-1.85	2.06-2.56
248	S	11	-	-	14-36	62-85	0.128-0.305	-	-	-
	C	7	23-72	10-39	51-86	14-48	0.003-0.06	-	-	-
249	S	7	-	-	2-43	57-98	0.085-0.29	24.17-104.41	0.44-3.43	1.69-2.73
250	S	4	-	-	15-40	60-85	0.112-0.229	29.53-132.24	0.71-4	1.72-2.71

251				M	6	47-65	14-27	1-3	97-99	0.003-0.011	6.24-14.81	1.28-6.15	2.83-3.16
				C	3	49-66	20-35	99-100	0-1	0.004-0.016	6.63-18.35	2.66-6.19	2.75-3.31
				S	5	-	-	15-39	36-75	0.151-0.67	15.76-190.05	0.59-4.75	1.86-2.96
252				C	2	28-45	11-21	62-76	24-38	0.009-0.034	17.62-58.83	3.25-5.26	2.43-2.95
				S	8	-	-	2-40	49-98	0.15-0.56	17.34-177.38	0.76-4.04	1.65-2.81
				C	1	49	24	90	10	0.01	5.91	2.37	3.13
				S	9	-	-	5-26	74-95	0.135-0.24	35.13-80.67	0.53-2.03	1.83-2.46
253				M	3	30-68	5-34	82-99	1-18	0.003-0.037	7.63-11.49	5.31-5.78	3.12-3.24
				C	1	64	36	99	1	0.002	8.1	8.04	3.33
				S	3	-	-	21-27	73-79	0.116-0.171	5.96-74.41	0.3-0.54	1.75-2.86
254				M	6	27-46	3-14	67-95	5-41	0.001-0.062	9.2-22.47	1.47-6.54	2.6-3.02
				C	1	56	32	93	7	0.007	4.84	2.25	3.2
				S	5	-	-	12-14	86-88	0.172-0.288	41.14-75.39	0.41-0.93	1.9-2.06
255				M	9	33-62	3-28	74-100	0-26	0.005-0.029	4.78-24.74	0.94-4.72	2.56-3.15
				C	2	39-49	19-27	98-98	2-2	0.011-0.022	9.1-27.55	2.15-3.84	2.56-3.09
				S	2	-	-	28-40	60-72	0.084-0.121	29.71-67.34	0.85-1.12	2-2.37
256				M	16	32-74	8-36	78-99	20-1	0.003-0.04	5.97-18.81	0.12-6.48	2.52-3.4
				C	3	41-65	19-33	97-100	0-3	0.003-0.019	1.26-10.57	3.23-6.79	3.16-3.95
				S	10	-	-	11-49	51-89	0.08-0.162	10.76-164.91	0.52-1.91	1.58-2.58
257				M	6	26-32	3-8	58-91	9-42	0.028-0.043	7.42-25.02	1.17-3.53	2.43-3.05
				C	4	30-44	9-21	65-98	2-35	0.01-0.037	7.34-18.17	2.36-6.12	2.94-2.98
258	A3GEO (2018)	USA	California	S	1	-	-	50	43.7	-	-	-	-
				M	1	31	7	63.4	36.6	-	-	-	-
				C	2	46-36	17-26	66.3-84.7	15.2-26.3	-	-	-	-
259				G	1	-	-	19.3	39.5	-	-	-	-
				C	4	43-58	26-35	62.6-88.1	11.5-37.4	-	-	-	-
260	Lee et al. (2001)	Taiwan	Changhua	S	5	-	-	6.29-38.84	61.16-93.07	0.086-0.247	-	-	-

261	Architecture Engineering Consultancy Services Pvt. Ltd (2014)	India	Ibrahimpattanam	S	4	-	-	1.08-15.38	84.62-96.98	-	-	-	-
262				S	3	-	-	0.18-3.27	96.1-97.76	-	-	-	-
263				S	3	-	-	5.44-23.9	96.65-94.56	-	-	-	-
264	Ibarra (2018)	Philippines	Tunod	S	10	-	-	23-44	35-63	0.117-0.891	-	-	-
				C	1	37	15	59	37	-	-	-	-
265	Herraez and Oo (2020)	Australia	Jabiru	G	4	-	-	10-14	28-37	2.827-10.348	-	-	-
				S	2	-	-	15-42	47-54	0.795	-	-	-
266	Outeniqua Geotechnical Services (2015)	South Africa	Nieu-Bethesda	S	5	-	-	5-42	52-59	0.079-1.314	-	-	-
				C	5	27-39	11-19	55-60	34-45	0.029-0.061	-	-	-
267	Acquah (2021)	Ghana	University of Cape Coast	G	1	-	-	18	25	-	-	-	-
				S	3	-	-	27-44	56-70	-	-	-	-
				C	1	40	24	60	40	-	-	-	-
268	AECOM Infrastructure and Environment UK Limited (2019)	UK	-	G	2	-	-	22.21-29.5	11.79-32.09	1.567-22.39	-	-	-
				S	1	-	-	46.52	29.01	0.192	-	-	-
269				G	2	-	-	20.97-21.78	13.87-21.68	7.234-16.634	-	-	-
270				G	8	-	-	2.78-44.38	2.43-13.27	1.975-39.355	-	-	-
271				G	5	-	-	16.28-38.29	8.08-22	1.855-26.645	-	-	-
272				G	6	-	-	19.19-42.06	7.34-32.37	0.677-6.622	-	-	-
				S	1	-	-	45.44	28.48	0.209	-	-	-
273	Amey (2015)	UK	Burton upon Trent	G	2	-	-	11.61-24	26.89-31	2.177-10.467	-	-	-
				S	3	-	-	21-37	35-52	0.411-0.557	-	-	-
				C	2	29-35	10-12	82-90	10-15	0.007-0.009	-	-	-

274				G	2	-	-	1.83-2.21	29.49-42.37	7.276-11.35	-	-	-
				S	1	-	-	38.69	33.31	0.264	-	-	-
275	IGSL Ltd (2019)	-	-	G	5	-	-	2.68-43.49	18.57-30.07	0.258-6.36	-	-	-
				S	1	-	-	40	31.61	1.723	-	-	-
276	Alaska DOT&PF (2022)	USA	Alaska	G	35	-	-	0.4-11.5	4.9-49.6	-	-	-	-
				S	6	-	-	1.8-30.1	35.9-97.2	-	-	-	-
277	Nzabakurikiza et al. (2017)	Cameroon	Nganke	G	5	-	-	14-22	13-23	3.481-5.09	-	-	-
278				G	5	-	-	17-27	12-18	4.434-5.09	-	-	-
279	Ulusay et al. (1995)	Turkey	Muğla	G	2	-	-	9.68-30.83	18.02-25.67	2.708-14.736	-	-	-
				S	1	-	-	46.24	28.06	0.134	-	-	-
280	Gali and Rao (2020)	India	Mizoram	G	3	-	-	30.41-34.39	7.09-13.51	4.889-5.394	-	-	-
281	Tasman Geotechnics (2022)	Australia	Gravelly Beach Road	G	1	-	-	40	29	0.146	-	-	-
				S	1	-	-	12	49	2.087	-	-	-
282	Nkhophole Holdings (2019)	South Africa	Magatle	G	1	-	-	15.34	31.66	5.329	-	-	-
				S	3	-	-	13.09-33.74	45.61-69.06	0.131-1.367	-	-	-
283	Golder Associates Ltd (2019)	Canada	Ottawa	G	1	-	-	4	28	10.23	-	-	-
				S	3	-	-	19-35	38-48	0.642-1.604	-	-	-
284	WSP Canada Inc (2016)	Canada	Ontario	G	1	-	-	11	36	5.081	-	-	-
				S	4	-	-	9-47.9	30.1-78	0.084-0.334	-	-	-
285	Black Jills JV (2018)	South Africa	Gauteng	G	3	-	-	13-48	12-40	1.423	-	-	-
				S	3	-	-	16-39	47-71	0.28-0.878	-	-	-
				C	1	31.5	15	54	10	-	-	-	-
286	DANBIMZ LIMITED (2022)	Ghana	La-Nkwantanan Municipality	G	2	-	-	27.3-31.1	16.8-27.8	-	-	-	-
				S	1	-	-	13.2	45.1	-	-	-	-

287	Terraprobe Inc (2011)	Canada	Ontario	G	3	-	-	5-6.4	28-44.4	4.424-9.725	-	-	-
				S	2	-	-	9.1-11	47.9-48	2.123-2.873	-	-	-
288	General Directorate of Disaster Affairs (2004)	Turkey	Adapazari	M	1	32	7	85	-	-	-	-	3.14
				C	3	12-23	35-47	59-90	-	-	-	-	2.6-3.09
289	Bennett and Tinsley III (1995)	USA	California	S	25	-	-	2-40	60-98	0.097-0.91	12.13-187.6	0.04-1.85	1.5-2.7
				M	9	51	16	55-97	3-45	0.005-0.067	4.47-48.36	0.08-2.75	2.21-3.08
				C	1	55	23	93	7	0.004	5.45	1.52	3.07
290				S	28	-	-	7-49	51-93	0.076-0.31	9.13-158.18	0.19-2.71	1.46-2.76
				M	28	26-68	0-32	52-98	2-48	0.003-0.071	5.45-40.1	0.44-7.63	2.18-3.27
				C	2	-	-	86-99	1-14	0.002-0.013	5.88-19.28	5.02-5.06	2.91-3.31
291				S	20	-	-	2-43	57-98	0.085-0.29	23.43-105.36	0.41-1.46	1.66-2.48
				M	11	35-53	7-21	51-99	1-49	0.005-0.074	3.9-35.56	0.48-5.62	2.18-3.49
				C	5	26-66	9-38	77-99	1-23	0.002-0.049	6.63-26.8	2.25-7.08	2.58-3.3
292				S	5	-	-	6-27	73-94	0.15-0.316	37.86-124.6	0.3-0.78	1.61-2.16
				M	1	31	6	75	25	0.044	10.92	3.02	2.97
293				S	36	-	-	1-38	62-99	0.086-0.51	17.47-188	0.29-1.92	1.72-2.54
				M	10	55-84	22-40	96-100	0-4	0.002-0.011	2.57-6.82	1.74-5.05	3.22-3.42
				C	7	57-76	28-43	92-100	0-8	0.003-0.01	2.76-4.358	1.67-3.04	3.24-3.42
294				S	5	-	-	15-39	36-75	0.132-0.67	16.22-194	0.45-2.41	1.88-2.77
				M	1	45	16	64	34	0.009	50.1	5.42	2.64
				C	7	28-50	11-35	62-85	15-38	0.008-0.034	17.96-60.81	2.93-5.14	2.39-2.93
295				S	21	-	-	5-43	57-95	0.08-0.345	9.28-165.93	0.22-0.82	1.58-2.64
				M	3	66-73	32-35	99-100	0-1	0.002-0.003	4.98-6.53	6.27-6.33	3.33-3.43
				C	8	60-84	30-52	95-100	0-5	0.001-0.009	4.27-6.67	4.86-6.47	3.3-3.43
296				S	7	-	-	11-42	58-89	0.087-0.229	23.84-127.57	0.43-3.44	1.71-2.71
				M	6	46-65	14-27	97-99	1-3	0.003-0.011	4.12-11.2	1.69-6.25	2.93-3.34
				C	4	46-66	20-35	91-100	0-9	0.004-0.016	6.76-24.04	2.83-6.45	2.68-3.33
297				S	18	-	-	4-43	57-95	0.084-0.303	11.37-141.21	0.36-2.66	1.71-2.82

			M	15	29-65	3-40	57-99	1-43	0.003-0.06	4.67-16.54	0.67-7.97	2.8-3.43
			C	7	31-67	12-41	76-100	0-24	0.003-0.04	1.68-22.53	1.11-6.16	2.66-3.8
298			S	19	-	-	7-49	51-93	0.076-0.252	11.36-175.54	0.4-2.12	1.52-2.69
			M	7	26-32	3-6	58-100	0-42	0.028-0.052	5.71-26.84	1.04-4.88	2.39-3.32
			C	12	30-65	9-37	65-100	0-35	0.001-0.037	8.31-37.12	2.12-6.12	2.66-3.2
299			S	26	-	-	0-44	56-100	0.096-1.2	8.56-235.14	0.19-4.51	1.37-3.03
			M	1	44	16	95	5	0.008	4.76	3.21	3.28
			C	1	39	15	96	4	0.01	8.46	5.69	3.22
300			S	24	-	-	2-24	76-98	0.15-0.418	18.16-228.69	0.35-1.73	1.27-2.5
			M	5	37-71	12-35	64-99	1-35	0.003-0.022	4.21-78.83	1.25-7.32	2.18-3.51
			C	7	58-85	31-61	95-100	0-5	0.003-0.016	3.07-5.78	1.25-7.27	3.13-3.64
301			S	19	-	-	3-26	74-97	0.135-0.403	22.4-143.96	0.26-2.52	1.47-2.67
			M	4	30-68	5-34	82-99	1-18	0.003-0.037	10.16-40.01	3.01-6.74	2.52-3.17
302			C	1	64	36	99	1	0.002	5.4	8.35	3.48
			S	18	-	-	2-50	50-98	0.075-0.79	30.84-64.74	1.04-3.44	2.07-2.62
			S	6	-	-	8-28	72-92	0.098-0.262	13.97-161.39	0.28-0.72	1.56-2.45
303			M	3	29-58	0-20	68-98	2-32	0.003-0.054	6.34-9.86	1.05-4.4	2.94-3.23
			C	2	43-63	19-32	91-95	5-9	0.003-0.005	8.18-37.16	5.47-5.55	2.73-3.22
			S	20	-	-	8-39	61-91	0.093-0.395	13.53-142.09	0.49-3.42	1.72-2.86
304			M	1	33	0	79	21	0.032	40.18	2.4	2.46
			C	1	37	15	86	14	0.027	15.13	3.34	2.88
305			S	8	-	-	6-30	70-94	0.108-0.625	25.1-109.87	0.38-1.76	1.72-2.41
			S	12	-	-	11-41	59-89	0.078-0.288	26.62-72.96	0.34-0.87	1.9-2.29
306			M	13	30-62	3-28	70-100	0-30	0.005-0.048	2.42-23.42	0.19-4.77	2.58-3.29
			C	3	39-49	19-27	91-98	2-9	0.009-0.022	6.67-54.75	2.38-4.39	2.54-3.18
307			S	6	-	-	2-39	61-98	0.096-0.78	24.92-182.76	0.36-0.67	1.44-2.3
			M	2	32-68	2-34	62-99	1-38	0.005-0.06	5.49-13.87	0.35-3.15	2.45-3.23
308			S	8	-	-	13-36	63-80	0.182-0.305	19.25-94.94	1.33-6.04	2.01-2.66

				C	7	23-72	9-39	51-86	14-48	0.003-0.06	9.47-88.09	2.92-5.63	2.31-3.08
309				S	6	-	-	2-40	49-98	0.137-0.28	34.13-176.55	0.75-2.93	1.64-2.57
				C	1	49	24	90	10	0.01	7.04	2.84	3.11
310				S	2	-	-	21-27	73-79	0.116-0.133	53.19-70.12	0.25-0.31	1.74-1.89
				M	7	27-46	3-14	59-95	5-41	0.01-0.062	8.12-24.56	1.5-6.41	2.65-3.04
				C	2	28-56	8-32	73-93	7-27	0.007-0.046	2.94-21.06	2.22-2.34	2.67-3.39
311	Bray et al. (2001)	Turkey	Adapazari	S	1	-	-	5	-	0.29	262.7	0.47	1.38
				M	5	29-53	6-23	58-94	-	0.045-0.057	13.38-79.95	0.81-5.74	1.93-3.06
				C	4	46-65	20-35	87-100	-	0.004-0.012	10.58-19.51	1.67-3.24	2.68-3
312				M	5	31-51	7-22	74-99	-	0.007-0.026	9.21-23.93	0.84-4.27	2.53-3.11
				C	3	43-51	20-25	85-100	-	0.001	9.4-11.43	1.94-4.04	2.84-3.03
313				S	3	-	-	5-21	-	0.17-1.7	68.55-307.04	0.4-0.48	1.3-1.84
				M	4	31-42	-	59-96	-	0.007-0.07	9.24-51.6	0.89-1.67	2.15-2.87
				C	1	62	40	100	-	0.001	12.88	4.46	3.01
314				S	4	-	-	3-5	-	0.4-1	34.8-335.5	0.31-0.44	1.18-2.09
				M	1	37	9	91	-	0.038	17.68	1.59	2.64
				C	1	42	18	87	-	0.014	20.83	1.74	2.6
315				S	1	-	-	5	-	0.7	52.25	0.91	2.11
				M	6	27-73	15-28	71-99	-	0.002-0.014	9.85-44.05	1.33-4.07	2.33-3.05
				C	3	40-74	15-45	97-99	-	-	11.38-26.03	1.12-3.73	2.41-3.01
316				S	1	-	-	45	-	0.08	14.18	2.53	2.83
				M	2	36-40	-	94-99	-	0.014-0.017	13.41-15.56	1.87-2.73	2.72-2.87
				C	4	42-56	18-33	91-100	-	0.002-0.005	10.02-13.18	1.88-3.84	2.85-2.98
317				M	2	36-44	8-17	98-99	-	0.001-0.002	14.47-14.78	1.58-1.85	2.7-2.74
				C	1	64	42	99	-	0.001-0.002	16.03	4.05	2.91
318				M	1	42	13	99	-	-	8.96	1.65	2.9
				C	2	35-36	12-12	94-95	-	0.02-0.021	7.25-14.89	1.76-2.25	2.72-3.05
319				M	1	52	22	99	-	-	12.48	2.19	2.84

320				C	5	44-62	21-35	95-99	-	0.002-0.007	12.48-27.5	2.19-3.57	2.61-2.95
				M	2	38-47	12-19	90-97	-	0.008-0.019	9.44-11.95	1.64-2.02	2.84-2.88
321				C	4	35-58	13-29	85-100	-	0.005-0.019	11.67-18.14	1.35-2.35	2.63-2.84
				M	2	52-58	22-22	99-99	-	0.005	15.92-16.51	2.74-3.13	2.8-2.84
322				C	3	41-53	16-33	84-97	-	0.005-0.013	6.75-18.91	0.87-2.78	2.5-3.12
				M	4	33-47	7-18	77-66	-	0.006-0.028	9.35-28.8	1.23-4.76	2.4-3.14
323				C	5	43-60	18-31	95-99	-	0.001-0.007	9.3-14.38	1.88-4.39	2.81-3.1
				M	3	37-68	9-32	94-99	-	0.004-0.02	9.96-27.46	2.04-4.45	2.54-3.1
324				C	6	40-70	17-46	75-100	-	0.001-0.038	10.4-18.77	1.99-4.81	2.77-3.08
				M	2	39-39	12-13	89-96	-	0.019-0.021	22.3-24.8	1.85-1.9	2.55-2.6
325				C	2	53-73	33-48	94-99	-	0.001-0.006	11.59-16.28	1.17-3.04	2.73-2.83
				M	4	35-49	7-16	92-99	-	0.003-0.01	7.58-32.33	0.97-4.22	2.31-2.89
326				C	2	55-62	29-32	94-96	-	0.005	9.37-16.47	3.11-4.01	2.83-3.09
				M	1	37	10	99	-	0.006	36.64	1.74	2.4
327				C	2	66-75	40-44	99-100	-	0.001-0.002	13.4-29.26	2.26-3.82	2.55-2.96
				M	4	35-41	9-14	81-95	-	0.005-0.028	10.09-23.54	1.02-3.58	2.43-3.02
328				C	2	46-46	21-23	98-99	-	0.003-0.004	9.36-10.7	3.04-4.4	2.98-3.12
				M	4	33-51	6-22	87-98	-	0.003-0.03	8.69-19.34	1.6-5.84	2.61-3.22
				C	2	42-46	21-24	77-93	-	0.009-0.01	7.62-12.69	2.86-5.4	2.9-3.24
329	Takemura et al. (2007)	Vietnam	Ho Chi Minh	C	17	43.42-73.44	22.31-51.16	76.69-99.73	-	0.003-0.033	2.66-7.97	0.06-2.79	2.66-3.4
330				C	4	100.16-118.07	73.06-85.65	100-100	-	0.002-0.005	-	-	-
331	Cetin and Ozan (2009)	Turkey	-	M	2	29-53	6-23	74-94	-	-	-	-	2.58-2.92
				C	4	46-65	20-35	87-100	-	-	-	-	2.65-3.04
332				M	2	31-35	7-8	74-93	-	-	-	-	2.58-3.17
				C	3	43-51	20-25	85-100	-	-	-	-	2.79-3.11
333				C	1	62	40	100	-	-	-	-	3.08
				M	1	37	9	91	-	-	-	-	2.7
334				C	1	42	18	87	-	-	-	-	2.95

335			M	2	42-42	15-15	87-94	-	-	-	-	2.82-2.96
			C	1	74	45	99	-	-	-	-	2.94
336			C	2	42-48	18-27	91-100	-	-	-	-	2.68-3.01
337			C	1	45	22	98	-	-	-	-	3.1
338			C	2	40-67	15-36	88-98	-	-	-	-	2.7-2.71
			M	1	42	13	99	-	-	-	-	2.94
339			C	2	35-36	12-12	94-95	-	-	-	-	2.81-2.89
340			C	2	33-50	14-26	81-99	-	-	-	-	2.53-3.23
341			C	1	31	12	96	-	-	-	-	2.81
			M	1	52	22	99	-	-	-	-	2.72
342			C	1	61	33	95	-	-	-	-	2.93
			M	1	47	19	97	-	-	-	-	2.87
343			C	3	33-53	13-29	81-100	-	-	-	-	2.51-2.8
			M	1	37	10	77	-	-	-	-	3.09
344			C	4	40-58	18-31	95-99	-	-	-	-	2.72-2.97
			M	2	52-58	22-22	99-99	-	-	-	-	2.82-3
345			C	2	41-53	16-33	97-97	-	-	-	-	2.41-2.57
			M	1	68	32	98	-	-	-	-	3.04
346			C	7	36-70	17-46	75-100	-	-	-	-	2.51-3.18
			M	1	39	13	92	-	-	-	-	2.41
347			C	1	73	48	99	-	-	-	-	2.91
348			C	2	66-75	40-44	99-100	-	-	-	-	2.98-3
			M	2	37-43	10-15	93-97	-	-	-	-	2.51-2.83
349			C	2	55-62	29-32	94-96	-	-	-	-	2.8-3.03
			M	2	35-41	9-14	85-95	-	-	-	-	2.47-2.97
350			C	2	46-46	21-23	98-99	-	-	-	-	2.94-3.05
			M	3	33-51	6-22	87-98	-	-	-	-	2.26-3.14
351			C	1	46	24	77	-	-	-	-	2.96

352			C	4	39-63	21-39	88-99	-	-	-	-	2.88-3.03
353			M	1	34	6	82	-	-	-	-	2.68
354			C	3	34-68	22-44	72-99	-	-	-	-	2.67-3.18
355			C	1	41	18	78	-	-	-	-	3.01
356			C	5	44-79	25-51	97-100	-	-	-	-	2.75-3.02
357			M	1	39	13	90	-	-	-	-	2.77
358			C	1	73	48	99	-	-	-	-	3.03
359			C	1	54	30	92	-	-	-	-	3.03
360			M	1	62	27	98	-	-	-	-	3.07
361			C	4	39-54	14-27	96-98	-	-	-	-	2.32-2.97
362			C	4	33-70	16-44	86-99	-	-	-	-	2.64-3.2
363			M	2	37-47	11-18	88-96	-	-	-	-	2.15-2.72
364			C	3	48.5-65	22-40	97-100	-	-	-	-	2.46-3.17
365			M	2	34-43	10-15	98-100	-	-	-	-	2.45-3.07
366			C	1	35	15	90	-	-	-	-	2.8
367			C	3	34-57	12-28	89-99	-	-	-	-	2.46-3.22
368			C	2	39-47	19-25	87-89	-	-	-	-	3.1-3.17
369			C	1	59	35	97	-	-	-	-	3.15
370			M	1	41	15	99	-	-	-	-	2.97
371			C	4	53-65	28-38	98-100	-	-	-	-	3-3.31
372			C	2	41-45	18-23	89-99	-	-	-	-	3.02-3.03
373			C	3	39-39	17-19	82-96	-	-	-	-	2.99-3.11
			C	4	55-58	32-34	86-96	-	-	-	-	3.09-3.4
			M	1	41	13	90	-	-	-	-	2.98
			M	3	35-51	8-22	85-99	-	-	-	-	2.51-3.09
			C	3	31-36	17-19	56-90	-	-	-	-	2.56-3.12
			C	2	41-43	21-24	72-77	-	-	-	-	3.18-3.29
			M	4	33-39	8-12	86.9-90	-	-	-	-	2.19-3.27

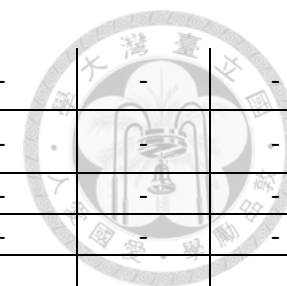
				C	1	52	25	99.8	-	-	-	-	3.2
374				C	4	37-47	16-25	84.8-94.9	-	-	-	-	2.73-3.11
375				C	3	30-48	11-33	68-86	-	-	-	-	2.7-3.22
376				C	1	35	15	74	-	-	-	-	3.05
377				C	1	35	17	88	-	-	-	-	3.15
378				C	1	70	50	95	-	-	-	-	2.96
379				C	2	45-74	29-52	88-98	-	-	-	-	2.42-3.05
380				C	2	40-61	24-40	76-95	-	-	-	-	3.15-3.2
381				C	3	40-44	22-25	75-88	-	-	-	-	3.05-3.06
382				C	2	33-38	15-20	70-70	-	-	-	-	3.18-3.19
383				M	7	29-42	2-12	78-95	-	-	-	-	2.64-2.74
384				C	7	24-34.5	7.9-14	72-94	-	-	-	-	2.81-2.96
385				C	5	33.1-47.6	11.6-22.1	60-99	-	-	-	-	2.61-3.09
386				C	4	30.6-32.4	10.4-13.9	80-96	-	-	-	-	2.84-3.02
387				M	1	41.4	12.7	98	-	-	-	-	2.95
388				C	2	29.9-41.9	11.1-16.3	75-96	-	-	-	-	3.09-3.29
388				M	1	44.3	17.4	90	-	-	-	-	2.4
389				C	3	35.3-41.5	14.3-16.2	93-97	-	-	-	-	2.68-3.23
389		USA	Virginia	C	5	45-71	21-48	61.9-99.8	-	-	-	-	2.72-3.18
390	Reale et al. (2018)	Slovenia	-	C	14	43.35-72.07	23.21-38.12	65.58-90.25	-	-	-	-	2.75-3.41
391	Librić et al. (2017)	Serbia	-	C	17	31.15-66.12	13.26-43.87	51.17-92.15	-	-	-	-	2.67-3.49
392	El-Shinawi (2017)	Egypt	Badr	M	14	29.2-57.9	4.9-22	60.4-95.8	-	-	-	-	-
392				C	26	27.8-69.7	7.2-44	64.2-90.9	-	-	-	-	-
393	Li et al. (2007)	USA	Charleston	M	18	42.83-107.06	11-59	52-80.7	-	-	-	-	-
393				C	6	59.5-80.45	29-48	62-87	-	-	-	-	-
394	Hoyos and Macari (1999)	USA	Alabama	M	2	37-39	10-12	74.7-79.7	-	-	-	-	-
394				C	1	34	29	68.2	-	-	-	-	-

395	Borden et al. (1996)	USA	North Carolina	M	4	35-78	5-22	77.7-94.2	-	-	-	-	-
396	Wang et al. (2013)	China	Wenchuan county	G	6	-	-	1.3-2.5	8.5-43.1	5.5-40	-	-	-
				S	4	-	-	4-7.5	61-86.7	0.9-3.2	-	-	-
397	Bennett et al. (1998)	USA	California	S	4	-	-	23-48	42-67	0.087-0.45	-	-	2.44-2.63
C				12	30-49	10-27	62-87	13-38	0.002-0.039	-	-	2.59-3.05	
C				3	29-30	8-10	62-74	26-38	0.021-0.038	-	-	2.84-3.18	
M				1	33	9	74	26	0.018	-	-	-	
C				8	27-44	7-22	20-38	62-80	0.011-0.05	-	-	2.89-3.59	
G				1	-	-	4	19	10	-	-	-	
S				12	-	-	12-48	49-87	0.076-0.5	-	-	1.87-2.87	
C				6	26-39	7-17	55-82	18-42	0.014-0.055	-	-	2.1-3.12	
S				4	-	-	15-44	49-57	0.099-0.75	-	-	-	
C				1	34	15	69	31	0.032	-	-	2.74	
402	Haque et al. (2017)	USA	Louisiana	S	5	-	-	16-45.5	54.5-82.17	-	8.51-49.86	1.49-4.87	2.33-3.14
403	Briaud (2000)		Texas	C	11	30.5-71.8	10.52-47.06	69.86-98.1	-	-	19.34-58.64	2.55-7.53	2.35-2.84
404				M	1	47.7	16.7	52.6	-	-	105.24	1.44	1.99
405	Jardine et al. (2003)	UK	Queenborou gh	C	1	63.79	37.53	100	0	0.001	-	-	3.47
406	Enomoto et al. (2013)	Japan	Toyama	G	4	-	-	1.9-2.6	23.4-28.9	31.09-48.19	-	-	-
407				G	7	-	-	1-1.6	12.3-20	42.35-87.56	-	-	-
408	Tanaka et al. (2000)	Taiwan	Hualin	G	2	-	-	18.91-29.09	47.29-58.53	0.436-1.572	-	-	-
				S	3	-	-	0-11.47	35.54-39.03	4.86-13.64	-	-	-
409	Lopez et al. (2018)	Ecuador	Muisne- Pedernales	G	5	-	-	3.37-15.87	17.3-34.61	4.86-12.9	-	-	-
410	Yegian et al. (1994)	Armenia	Geghasar	G	1	-	-	0	35.44	9.1	-	-	-
				S	3	-	-	2.28-2.28	49.87-62.28	2.81-4.63	-	-	-

411	Cubrinovski et al. (2018)	New zealand	Wellington	G	5	-	-	0-5.5	19.5-46.56	5.03-12.24	-	-	-
				S	2	-	-	2.06-7.56	48.86-58.94	1.94-3.71	-	-	-
412	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	Japan	Tohoku	S	6	-	-	16.88-44.68	55.32-80	0.09-0.24	-	-	-
413	Sirovich (1996)	Italy	Avasinis	S	4	-	-	15.12-30.65	66.34-80.45	0.112-0.958	-	-	-
414	Haeri and Hamidi (2005)	Iran	Tehran	G	7	-	-	0-5.39	37.42-45.41	-	-	-	-
				S	7	-	-	3.89-29.82	35.23-87.82	-	-	-	-
415				G	2	-	-	9-11.4	40.1-41.9	-	-	-	-
				S	7	-	-	12.6-35.9	33.56-62.8	-	-	-	-
416	Gillins and Franke (2016)	USA	Weber County	M	1	33	9	99	-	-	-	-	-
				C	7	25-49	7-31	85-100	-	-	-	-	-
417				M	1	21	4	69	-	-	-	-	-
				C	13	26-56	7-39	92-100	-	-	-	-	-
				S	25	-	-	2.1-50	97.9-50	-	-	-	-
418				M	3	22-25	1-3	76.3-91.5	8.5-23.6	-	-	-	-
				C	7	26-36	7-16	87.4-99.5	0.5-12.6	-	-	-	-
419				G	6	-	-	9.9-22.3	17.3-39.6	-	-	-	-
				S	4	-	-	26.3-34.9	39.9-59.7	-	-	-	-
420				G	3	-	-	6.1-9.7	20.7-25.6	-	-	-	-
				S	9	-	-	8.7-49.4	42.7-78	-	-	-	-
421				M	1	25	3	74	-	-	-	-	-
				C	9	27-36	7-15	91-99	-	-	-	-	-
422				G	6	-	-	2-25	27-43	-	-	-	-

			S	34	-	-	3-49	51-96	-	-	-	-
			M	5	26-42	3-12	63-98	2-37	-	-	-	-
			C	58	20-61	7-35	52-99	1-45	-	-	-	-
423			G	4	-	-	4-9	26-38	-	-	-	-
424			G	3	-	-	4.9-8.2	25.4-31.5	-	-	-	-
425			G	5	-	-	6.2-9.6	34.4-41.7	-	-	-	-
			S	1	-	-	5.4	55.4	-	-	-	-
426			G	12	-	-	12-32.3	17.1-33.8	-	-	-	-
			S	4	-	-	13.6-30.4	39-73.6	-	-	-	-
			G	9	-	-	7.3-41	15.3-45.1	-	-	-	-
427			S	14	-	-	5-46.9	37.8-91.1	-	-	-	-
			C	1	28	8	52.4	47.6	-	-	-	-
			G	28	-	-	7-37	20-45	-	-	-	-
428		Utah County	S	14	-	-	11-43	41-80	-	-	-	-
			C	1	26	8	74.5	-	-	-	-	-
429			G	4	-	-	11.5-32.4	31.7-36.3	-	-	-	-
			S	1	-	-	22.6	43.5	-	-	-	-
			G	8	-	-	10-27	24-43	-	-	-	-
430			S	6	-	-	16-24	44-56	-	-	-	-
			M	2	19-33	4-8	56-61	40	-	-	-	-
			C	3	18-25	7-10	56-68	31-33	-	-	-	-
			S	8	-	-	9-47	32.1-86.6	-	-	-	-
431			M	9	24-42	2-10	54-92	-	-	-	-	-
			C	20	23-43	7-20	54-99	30.9-42	-	-	-	-
432			G	6	-	-	15-33	24-40	-	-	-	-

				S	1	-	-	47	35	-	-	-	-
433				G	5	-	-	2.4-21.7	21.1-34.3	-	-	-	-
434				G	4	-	-	0.8-3.5	24.9-31.9	-	-	-	-
435				S	4	-	-	2.5-37.4	31.7-58.9	-	-	-	-
436				G	4	-	-	3.2-10.4	20.8-41.8	-	-	-	-
437				G	3	-	-	6-11.8	22.9-37.8	-	-	-	-
438				S	1	-	-	20.1	54.6	-	-	-	-
439				G	5	-	-	4.4-8	30.5-39.1	-	-	-	-
440				G	6	-	-	2.3-27	7.3-26.8	-	-	-	-
441				G	4	-	-	1.6-10.4	21.4-35.3	-	-	-	-
442				G	7	-	-	2-32	18-41	-	-	-	-
443				G	3	-	-	3.8-5.6	25.9-27.4	-	-	-	-
444				S	1	-	-	22.7	75.8	-	-	-	-
445				G	4	-	-	5.3-8.3	32.3-41.3	-	-	-	-
446				G	4	-	-	4.9-38.2	17.8-26.2	-	-	-	-
447				G	3	-	-	4.1-9.7	15-39.2	-	-	-	-
				S	5	-	-	5.6-19.4	69.4-85.4	-	-	-	-
				G	4	-	-	3.7-24.2	24.5-42	-	-	-	-
				S	1	-	-	14	50	-	-	-	-
				G	7	-	-	2-17.5	26.2-40.1	-	-	-	-
				G	5	-	-	3.5-21.2	23.7-38.3	-	-	-	-



				S	5	-	-	2.3-17.1	73.8-97.6	-	-	-	-
448				G	5	-	-	15.5-20.4	25.3-40.5	-	-	-	-
449				G	10	-	-	3-30.5	9.8-43.7	-	-	-	-
450				S	1	-	-	33.6	45.9	-	-	-	-
				G	7	-	-	6.2-31.3	10.2-29.2	-	-	-	-
451			Salt Lake County	S	2	-	-	19-19	67-67	-	-	-	-
				M	3	21-39.38	4-10	65-96	4-26	-	-	-	-
				C	3	37.38-38.17	16.63-17.37	69.5-84.74	-	-	-	-	-
452				G	3	-	-	24.7-33.7	27.7-35.6	-	-	-	-
				S	7	-	-	19.6-30.3	40-48.5	-	-	-	-
				C	3	35-42	12-18	86-86	-	-	-	-	-
453				G	7	-	-	0.7-18.1	22.7-45.3	-	-	-	-
				S	3	-	-	6.1-6.5	47.4-53	-	-	-	-
454				S	2	-	-	49.4-49.4	50.2-50.2	-	-	-	-
				M	12	22.2-26.8	1-4.2	57.3-96.8	2.4-33.6	-	-	-	-
				C	4	16.1-21.7	35.1-44.6	68.3-99.4	0.6-26.8	-	-	-	-
				G	7	-	-	4.3-31.5	13.5-45	-	-	-	-
455				S	1	-	-	22.4	46.4	-	-	-	-
				M	3	25.1-27.2	2-5	59.6-63.5	-	-	-	-	-
				C	2	27-29.5	7.3-10.8	59.6-69.5	-	-	-	-	-
456				G	9	-	-	14.1-27.6	26-38.1	-	-	-	-
				M	6	17.6-19.9	2.5-3.8	67.4	-	-	-	-	-
457	Montalva et al. (2022)	Chile	Concepción	M	8	60-70	19-28	80-90	-	-	-	-	-
458				M	4	41-52	7-10	65-88	-	-	-	-	-
				C	1	38	14	87	-	-	-	-	-

459				C	1	37	20	91.6	8.4	-	-	-	-
460	Salvatore et al. (2022)	Italy	Sulmona Basin	G	4	-	-	7.2-42.2	17.1-36	0.313-7.125	-	-	-
				S	2	-	-	3.2-37.2	50.4-51.4	0.2-4.004	-	-	-
				M	1	50	18	78.8	15.4	0.023	-	-	-
				C	6	30-49	14-29	52.5-94.9	5.1-20.7	0.004-0.062	-	-	-
461	Golder Associates Ltd (2021a)	Canada	Pitt Meadows, BC	S	5	-	-	1.3-7.9	89.1-96.3	0.231-0.553	-	-	-
G				1	-	-	24.9	25.8	4.17	-	-	-	
S				5	-	-	2.5-47	44.6-79.3	0.081-1.766	-	-	-	
S				3	-	-	3-45.6	31.1-89	0.215-0.653	-	-	-	
C				1	48	31	94	6	0.009	-	-	-	
464	Golder Associates Ltd (2018)	Australia	Queens land	S	5	-	-	21-50	45-73	0.075-0.51	-	-	-
				C	5	63-84	42-61	73-99	1-26	0.002-0.005	-	-	-
465	White (2005)	Ireland	Bauxite	M	3	37-49	12-16	70-100	0-30	-	-	-	-
C				4	39-64	16-36	79-100	0-14	-	-	-	-	
G				1	-	-	30	31	-	-	-	-	
M				3	39-45	12-18	84-91	9-16	-	-	-	-	
G				3	-	-	22-36	29-36	-	-	-	-	
S				1	-	-	32	36	-	-	-	-	
C				1	19.3	7.6	53.6	25.3	0.061	-	-	-	
468	Golder Associates Ltd (2022b)	Canada	Ontario	G	1	-	-	29.2	31.6	1.36	-	-	-
				S	2	-	-	10-49.6	30.4-88.4	0.061-0.477	-	-	-
				C	1	18.6	7.4	59.5	32.2	0.045	-	-	-
S				3	-	-	39.8-45.8	32.7-61.9	0.096-0.186	-	-	-	
C				1	18.1	7	58.1	32.1	0.048	-	-	-	
S				3	-	-	8.6-48	43-89.6	0.088-0.393	-	-	-	
470				M	1	14.4	3.2	52.7	35.2	0.069	-	-	-

				C	2	21-24.7	9.7-11.4	64.9-77.4	17.2-27.4	0.006-0.023	-	-	-
471	Golder Associates Ltd (2022a)	Canada	Mississauga	S	3	-	-	20-47	49-68	-	-	-	-
472				C	7	21-34	7-16	60-75	16-30	-	-	-	-
473				S	9	-	-	10.8-46	50-85	0.396	-	-	-
474				S	4	-	-	7.12-48	35-92.78	0.114-1.61	-	-	-
475	Golder Associates Ltd (2021b)	Canada	Pickering	S	2	-	-	18.3-47.8	38.6-71.3	0.09-0.5	-	-	-
475	ENGEO (2018)	USA	California	G	1	-	-	5.7	33	7.27	-	-	-
				S	2	-	-	14-33.4	54-77.8	0.31-0.65	-	-	-
				C	1	39	19	80.1	19.9	-	-	-	-
476	Lengkeek (2022)	Netherlands	Bergambacht	O	8	-	-	-	-	-	2.83-4.26	1.1-7.59	3.24-3.62
477				O	7	-	-	-	-	-	3.22-8.46	2.92-5.13	3.11-3.49
478			Streefkerk	O	11	-	-	-	-	-	3.5-10.77	3.09-10.02	2.98-3.47
479				O	7	-	-	-	-	-	6.75-8.13	2.37-4.65	3.02-3.21
480				O	6	-	-	-	-	-	7.73-17.51	2.53-5.39	2.9-3.24
481				O	8	-	-	-	-	-	4.58-9.91	0.92-6.98	3-3.31
482			Delft	C	10	-	-	-	-	-	2.59-4.63	0.54-3.46	3.12-3.48
483				O	3	-	-	-	-	-	2.93-5.16	3.16-10.49	3.46-3.57
484				O	6	-	-	-	-	-	4.55-5.9	3.8-9.16	3.32-3.51
485			DOV	C	9	-	-	-	-	-	0.85-2.13	3.55-8.13	3.61-3.98
486				O	17	-	-	-	-	-	1-8.56	2.02-13.59	3.19-4.06
487			Eemdijk	O	38	-	-	-	-	-	2.02-9.82	2.02-13.55	3.19-3.94
488			MMD Katwoude	C	17	-	-	-	-	-	5.57-5.92	0.24-0.51	2.79-2.88
489				C	8	-	-	-	-	-	3.75-4.55	1.58-5	3.16-3.47
490				C	9	-	-	-	-	-	3.8-4.81	1.8-2.62	3.15-3.32
491				C	5	-	-	-	-	-	2.67-3.03	2.32-2.53	3.39-3.45
492			Kinderdijk	O	6	-	-	-	-	-	2.31-4.68	3.96-7.99	3.48-3.69
493			Schalkwijk	O	6	-	-	-	-	-	3.86-9.37	2.49-4.84	2.98-3.43

492				O	6	-	-	-	-	-	5.4-7.04	3.21-6.72	3.15-3.37
493			Koehool	C	22	-	-	-	-	-	3.48-16.32	1.19-9.93	2.67-3.44
				O	11	-	-	-	-	-	4.38-11.34	3.75-9.93	3.25-3.4
494				O	5	-	-	-	-	-	6.59-9.04	2.69-7.97	3.08-3.4
495			MMD	O	5	-	-	-	-	-	8.5-10.57	5.82-10.79	3.22-3.38
496			Pieterman	O	8	-	-	-	-	-	4.74-12.74	5.48-11.17	3.07-3.56
497				O	5	-	-	-	-	-	11.36-12.98	4.89-10.37	3.07-3.29
498			Delft	C	6	-	-	-	-	-	3.85-6.28	0.95-2.35	3.01-3.21
				O	1	-	-	-	-	-	5.64	4.13	3.28
499			DOV	C	4	-	-	-	-	-	1.54-1.76	6.61-8.13	3.86-3.86
				O	4	-	-	-	-	-	3.85-8.56	6.24-13.59	3.24-3.72
500			Eemdijk	S	6	-	-	-	-	-	25.38-65.11	0.44-0.85	1.92-2.36
				C	3	-	-	-	-	-	1.21-1.4	3.55-4.18	3.8-3.82
				O	12	-	-	-	-	-	2.97-6.95	4.62-11.87	3.26-3.77
501	Boylan et al. (2011)	Netherlands	Utrecht	O	8	-	-	-	-	-	1.05-2.38	2.69-5.3	3.51-3.9
502		Netherlands	Markermeer	O	7	-	-	-	-	-	0.84-2.53	10.23-19.44	3.81-4.34
503		Sweden	Gammelgård en	O	5	-	-	-	-	-	2.5-3.93	2.16-4.7	3.27-3.58
504	Agaiby (2018)		Recife RRS1	O	9	-	-	-	-	-	1.66-4.25	1.95-2.51	3.22-3.62
505		Brazil	Recife RRS2	O	8	-	-	-	-	-	1.17-2.73	1.06-1.82	3.37-3.65
506			Sarapuí II,	O	9	-	-	-	-	-	1.48-2.32	2.31-3.88	3.5-3.76



表 A 2 「CPT-USCS/8/4182」 中具雙變量資訊的紀錄點 (場址) 數量。(礫石 G)

Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	36 (14)	33 (13)	36 (14)	36 (14)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	22 (8)
PI		33 (13)	33 (13)	33 (13)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	19 (7)
FC			493 (101)	492 (101)	71 (13)	71 (13)	71 (13)	159 (47)
SC				492 (101)	71 (13)	71 (13)	71 (13)	159 (47)
Q _{tn}					71 (13)	71 (13)	71 (13)	1 (1)
F _r						71 (13)	71 (13)	1 (1)
I _c							71 (13)	1 (1)
D ₅₀								159 (47)

表 A 3 「CPT-USCS/8/4182」 中具雙變量資訊的紀錄點 (場址) 數量。(砂土 S)

Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	94 (41)	81 (35)	90 (40)	88 (38)	27 (12)	27 (12)	29 (14)	47 (23)
PI		85 (37)	81 (36)	80 (35)	26 (11)	26 (11)	28 (13)	44 (20)
FC			1172 (196)	1115 (183)	614 (78)	614 (78)	646 (86)	859 (140)
SC				1115 (183)	557 (65)	557 (65)	589 (73)	820 (129)
Q _{tn}					624 (80)	624 (80)	624 (80)	521 (63)
F _r						624 (80)	624 (80)	521 (63)
I _c							656 (88)	545 (68)
D ₅₀								863 (141)



表 A 4 「CPT-USCS/8/4182」中具雙變量資訊的紀錄點 (場址) 數量。(粉土 M)

Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	653 (179)	618 (172)	650 (178)	316 (72)	268 (64)	268 (64)	336 (96)	274 (71)
PI		618 (172)	615 (171)	313 (72)	249 (60)	249 (60)	307 (90)	241 (64)
FC			701 (180)	359 (73)	314 (65)	314 (65)	382 (97)	315 (71)
SC				359 (73)	244 (42)	244 (42)	244 (42)	239 (46)
Q _{tn}					317 (66)	317 (66)	317 (66)	258 (52)
F _r						317 (66)	317 (66)	258 (52)
I _c							385 (98)	278 (57)
D ₅₀								318 (72)

表 A 5 「CPT-USCS/8/4182」中具雙變量資訊的紀錄點 (場址) 數量。(黏土 C)

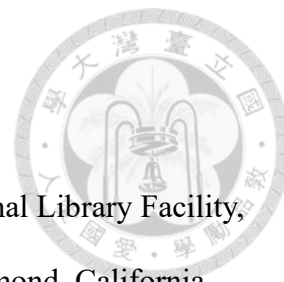
Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	1434 (300)	1434 (300)	1434 (300)	569 (98)	325 (67)	325 (67)	536 (133)	275 (79)
PI		1434 (300)	1434 (300)	569 (98)	325 (67)	325 (67)	536 (133)	275 (79)
FC			1440 (303)	573 (100)	331 (70)	331 (70)	542 (136)	279 (81)
SC				573 (100)	206 (41)	206 (41)	233 (47)	214 (59)
Q _{tn}					424 (80)	424 (80)	424 (80)	179 (53)
F _r						424 (80)	424 (80)	179 (53)
I _c							635 (146)	206 (59)
D ₅₀								279 (81)



表 A 6 「CPT-USCS/8/4182」中具雙變量資訊的紀錄點 (場址) 數量。(有機土 O)

Variable	LL	PI	FC	SC	Q _{tn}	F _r	I _c	D ₅₀
LL	44 (3)	44 (3)	12 (2)	0 (0)	44 (3)	44 (3)	44 (3)	0 (0)
PI		44 (3)	12 (2)	0 (0)	44 (3)	44 (3)	44 (3)	0 (0)
FC			12 (2)	0 (0)	12 (2)	12 (2)	12 (2)	0 (0)
SC				0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Q _{tn}					270 (30)	270 (30)	270 (30)	0 (0)
F _r						270 (30)	270 (30)	0 (0)
I _c							270 (30)	0 (0)
D ₅₀								0 (0)

資料庫參考文獻



A3GEO (2018). Geotechnical Investigation Report: Northern Regional Library Facility,
Phase 4 Expansion, University of California, Berkeley, Richmond, California.

University of California, Berkeley.

Acquah, E. N. B. (2021). Geotechnical Investigation Report for Design and
Construction of Proposed ACECOR Building at University of Cape
Coast. Accra, Ghana.

AECOM Infrastructure and Environment UK Limited (2019). Ground Investigation
Report for Homes England. Homes England, UK.

Agaiby, S. (2018). Advancements in the Interpretation of Seismic Piezocone Tests in
Clays and Other Geomaterials. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and
Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.

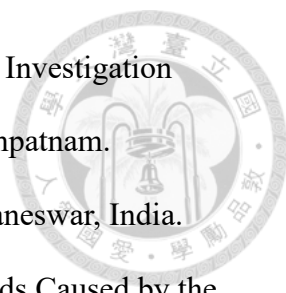
Alaska DOT&PF (2022). Parks Highway MP 305-325 Reconstruction Rex Pit MS 37-2-
069-2 Material Site Investigation.

Almeida, M. and Marques, M. (2003). The behaviour of Sarapuí soft clay.
Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 1, 477-504.

Amey (2015). Geotechnical Investigation Report for Phase 1 Site Access, Branston
Locks Housing Development. Staffordshire County Council, Staffordshire, UK.

Andrus, R. D. (1994). In Situ Characterization of Gravelly Soils That Liquefied in the
1983 Borah Peak Earthquake. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering,
The University of Texas at Austin, Texas, USA.

Andrus, R. D. and Youd, T. L. (1989). Penetration tests in liquefiable gravels.
Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation
Engineering, Rio De Janeiro, 679-682.

- 
- Architecture Engineering Consultancy Services Pvt. Ltd (2014). Soil Investigation Report for Static Test Facility for Propellants at BDL, Ibrahimpatnam. GD/AECS/2014-272, Graphics Designers, Hyderabad, Bhubaneswar, India.
- Bartlett, S. F. and Youd, T. L. (1992). Case Histories of Lateral Spreads Caused by the 1964 Alaska Earthquake. Case Studies Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes: United States Case Studies, 1-127.
- Benbouras, M. A. (2018). L'utilisation des SIG sur les données d'infrastructure et de fondations: Application dans la zone d'Alger. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Abbes Laghrour Khenchela, Khenchela, Algeria.
- Bennett, M. J., McLaughlin, P. V., Sarmiento, J. S., and Youd, T. L. (1984). Geotechnical Investigation of Liquefaction Sites, Imperial Valley, California. Open-File Report 84-252, US Geological Survey, Menlo Park, California, USA.
- Bennett, M. J., Ponti, D., Tinsley III, J., Holzer, T. L., and Conaway, C. (1998). Subsurface Geotechnical Investigations Near Sites of Ground Deformation Caused by the January 17, 1994, Northridge, California, Earthquake. Open-File Report 98-373, US Dept. of the Interior, US Geological Survey, USA.
- Bennett, M. J. and Tinsley III, J. (1995). Geotechnical Data from Surface and Subsurface Samples Outside of and within Liquefaction-Related Ground Failures Caused by the October 17, 1989, Loma Prieta Earthquake, Santa Cruz and Monterey Counties, California. Open-File Report 95-663, US Geological Survey, Menlo Park, California.
- Berrill, J., Bienvenu, V., and Callaghan, M. (1988). Liquefaction in the Buller region in the 1929 and 1968 earthquakes. Bulletin NZ National Soc. Earthquake Eng, 21, 174-189.

Beyzaei, C. Z., Bray, J. D., Cubrinovski, M., Riemer, M., and Stringer, M. (2018).

Laboratory-based characterization of shallow silty soils in southwest

Christchurch. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 93-109.

Black Jills JV (2018). Geotechnical investigation report: Fuel Cells Plant at Impala

Platinum. PS-RE 39-2016/273, Black Jills JV, Midrand, South Africa.

Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., and Özocak, A. (2010). Liquefaction of silts: the

Adapazari criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 859-873.

Boller Jr, R. C. (2008). Geotechnical Investigations at Three Sites in the South Carolina

Coastal Plain That Did Not Liquefy During the 1886 Charleston

Earthquake. M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Clemson University,

Clemson, SC, USA.

Borden, R. H., Shao, L., and Gupta, A. (1996). Dynamic properties of Piedmont residual

soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (10), 813-821.

Boylan, N., Long, M., and Mathijssen, F. A. (2011). In situ strength characterisation of

peat and organic soil using full-flow penetrometers. *Canadian Geotechnical*

Journal, 48 (7), 1085-1099.

Bray, J. D., Önalp, A., Durgunoglu, H. T., and Stewart, J. (2001). Ground Failure and

Building Performance in Adapazari, Turkey. *Pacific Earthquake Engineering*

Research Center (PEER), University of California, Berkeley, USA.

<https://apps.peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/index.html>.

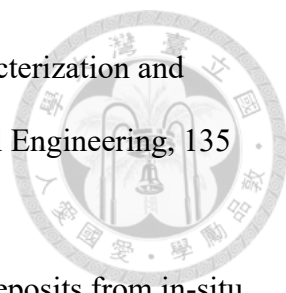
Briaud, J. L. (2000). The National Geotechnical Experimentation Sites at Texas A&M

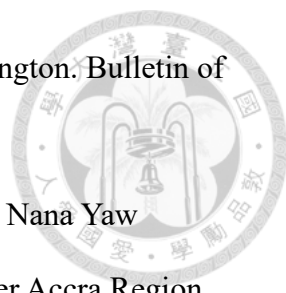
University: Clay and Sand, a Summary. *National Geotechnical Experimentation*

Sites, Geotechnical Special Publication, GSP 93, ASCE, 26–51.

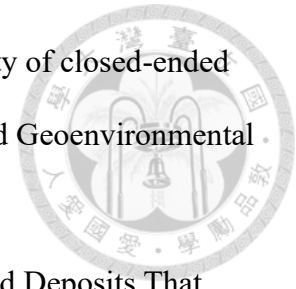
Cancelli, A. (1981). Evolution of slopes in over-consolidated clays. *Proceedings of*

Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 377-380.

- 
- Cetin, K. O. and Ozan, C. (2009). CPT-based probabilistic soil characterization and classification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (1), 84-107.
- Chen, H. and Hsieh, B. (1996). Geotechnical properties of the clay deposits from in-situ test on Keelung River reclaimed land. *Sino-Geotechnics*, 54, 55-66.
- Chiaro, G. (2022). Site characterisation and liquefaction potential of Blenheim gravelly sandy deposits. Final-Reporting-2, University of Canterbury.
- Chung, S., Giao, P., Kim, G., and Leroueil, S. (2002). Geotechnical properties of Pusan clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (5), 1050-1060.
- Chung, S., Kim, S., Kang, Y., Im, J., and Nagendra Prasad, K. (2006). Failure of a breakwater founded on a thick normally consolidated clay layer. *Geotechnique*, 56 (6), 393-409.
- Chung, S., Ryu, C., Jo, K., and Huh, D. (2005). Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan new port. *Marine Georesources and Geotechnology*, 23 (3), 235-251.
- Coutinho, R. (2007). Characterization and engineering properties of Recife soft clays- Brazil. *Proceedings of International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, 2049-2099.
- Coutinho, R. Q. and Mayne, P. W. (2012). *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*. CRC Press, USA.
- Crooks, J. and Graham, J. (1976). Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits. *Geotechnique*, 26 (2), 293-315.
- Cubrinovski, M., Bray, J. D., de la Torre, C., Olsen, M., Bradley, B., Chiaro, G., Stocks, E., Wotherspoon, L., and Krall, T. (2018). Liquefaction-induced damage and

- 
- CPT characterization of the reclamations at CentrePort, Wellington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (3B), 1695-1708.
- DANBIMZ LIMITED (2022). Geotechnical Investigation Report for Nana Yaw Boakye, Madina Project. La-Nkwantanan Municipality, Greater Accra Region, Ghana.
- DeGroot, D. and Luttenegger, A. (2003). Geology and engineering properties of Connecticut Valley varved clay. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1, 695-724.
- Dhakal, R., Cubrinovski, M., and Bray, J. (2022). Application of the CPT for Liquefaction Assessment of Gravelly Reclamations at the Port of Wellington. *Cone Penetration Testing 2022*, CRC Press, 894-899.
- El-Shinawi, A. (2017). A comparison of liquid limit values for fine soils: A case study at the north Cairo-Suez district, Egypt. *Journal of the Geological Society of India*, 89, 339-343.
- ENGEO (2018). 1095 Rollins Road-Geotechnical Exploration. ENGEO Incorporated.
- Enomoto, T., Qureshi, O. H., Sato, T., and Koseki, J. (2013). Strength and deformation characteristics and small strain properties of undisturbed gravelly soils. *Soils and Foundations*, 53 (6), 951-965.
- Fonseca, A. V. D., Carvalho, J., Ferreira, C., Santos, J., Almeida, F., Pereira, E., Feliciano, J., Grade, J., and Oliveira, A. (2006). Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 1307-1348.
- Gali, M. L. and Rao, R. P. (2020). *Geotechnical Characterization and Modelling*. Springer Nature Singapore.

Ganju, E., Han, F., Prezzi, M., and Salgado, R. (2020). Static capacity of closed-ended pipe pile driven in gravelly sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146 (4), 04020008.



Geiger, A. J. (2010). Liquefaction Analysis of Three Pleistocene Sand Deposits That Did Not Liquefy During the 1886 Charleston, South Carolina Earthquake Based on Shear Wave Velocity and Penetration Resistance. M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC, USA.

General Directorate of Disaster Affairs (2004). Seismic Microzonation for Municipalities: Pilot Studies: Adapazari, Gölcük, İhsaniye and Değirmendere. Republic of Turkey, Ministry of Public Works and Settlement, Turkey.

Giao, P. H., Dung, N., and Long, P. (2008). An integrated geotechnical–geophysical investigation of soft clay at a coastal site in the Mekong Delta for oil and gas infrastructure development. *Canadian Geotechnical Journal*, 45 (11), 1514-1524.

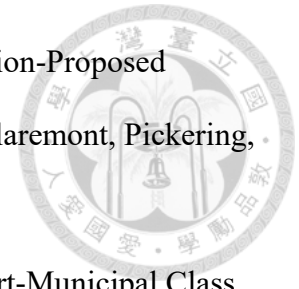
Gillins, D. and Franke, K. (2016). Geotechnical Database of Utah (GeoDU): Compilation and application for regional liquefaction hazard mapping. Utah Geological Survey.

Golder Associates Ltd (2018). GEOTECHNICAL INVESTIGATION FACTUAL REPORT-Gatcombe and Golding Cutting Channel Duplication Project (Dredger Access Channel and Transfer Location). Golder Associates Ltd,.

Golder Associates Ltd (2019). Geotechnical Investigation-Proposed Residential/Commercial Development 4639 Bank Street, Ottawa, Ontario. Ottawa, Ontario.

Golder Associates Ltd (2021a). Geotechnical Site Investigation Report-CP Logistics Park: Vancouver. 19134726-022-R, Golder Associates Ltd,.

Golder Associates Ltd (2021b). Preliminary Geotechnical Investigation-Proposed Residential Subdivision, 5113 Old Brock Road, Hamlet of Claremont, Pickering, Ontario.



Golder Associates Ltd (2022a). Geotechnical Desktop Review Report-Municipal Class Environmental Assessment, Capacity of Expansion of the Central Mississauga Wastewater System, Region of Peel Project No. 19-2590. Golder Associates Ltd,.

Golder Associates Ltd (2022b). Preliminary Geotechnical Investigation-Proposed Residential Redevelopment, Fergus Golf Club, 8243 and 8232-Wellington Road 19, Fergus, Ontario. Golder Associates Ltd,.

Haeri, S. M. and Hamidi, A. (2005). Steady state and liquefaction characteristics of gravely sands. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23, 141-156.

Hamada, M. and O'Rourke, T. D. (1992). Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes. Volume 1, Japanese Case Studies., National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), State University of New York at Buffalo, 1-28.

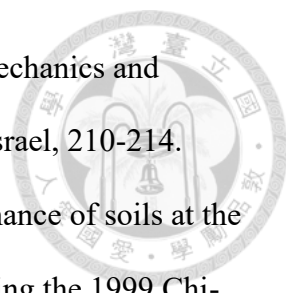
Han, F., Ganju, E., Salgado, R., and Prezzi, M. (2019). Comparison of the load response of closed-ended and open-ended pipe piles driven in gravelly sand. *Acta Geotechnica*, 14, 1785-1803.

Hansen, J. B. (1950). Vane tests in a Norwegian quick-clay. *Geotechnique*, 2 (1), 58-63.

Hanzawa, H. (1979). Undrained strength characteristics of an alluvial marine clay in the Tokyo Bay. *Soils and Foundations*, 19 (4), 69-84.

Haque, M. N., Abu-Farsakh, M. Y., Tsai, C., and Zhang, Z. (2017). Load-testing program to evaluate pile-setup behavior for individual soil layers and correlation

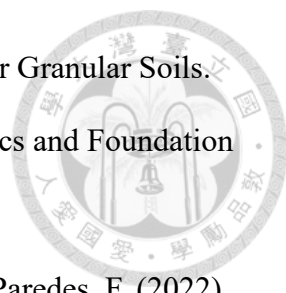
- of setup with soil properties. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143 (4), 04016109.
- Herraez, R. and Oo, J. (2020). Jabiru Redevelopment –Report No.1 Power Station –Lot 2303. Construction Sciences (NT) Pty Ltd, Darwin, Northern Territory.
- Hoyos, L. J. and Macari, E. J. (1999). Influence of In Situ Factors on Dynamic Response of Piedmont Residual Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125 (4), 271-279.
- Ibarra, W. M. (2018). Final Report for Geotechnical Investigation of Panguil Bay Bridge Project. Yooshin Engineering Corporation.
- IGSL Ltd (2019). Geotechnical Investigation Report.
- Jardine, R., Smith, P., and Nicholson, D. (2003). Properties of the soft Holocene Thames estuary clay from Queenborough, Kent. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1, 599-643.
- Kayabasi, A. (2012). Prediction of pressuremeter modulus and limit pressure of clayey soils by simple and non-linear multiple regression techniques: a case study from Mersin, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 66, 2171-2183.
- Kjekstad, O. and Lunne, T. (1981). Soil parameters used for design of gravity platforms in the North Sea. *Applied Ocean Research*, 3 (2), 50-58.
- Konrad, J., Bozozuk, M., and Law, K. (1985). Study of in-situ test methods in deltaic silt. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, USA, 879-886.
- Ku, C. S. (2008). CPT and DMT Site Investigation and Analysis. Research Project Report NSC 96-2221-E-214-059. National Science Council, Taiwan.
- Kulkarani, K., Katti, A., and Patel, A. (1967). A study of the properties of Bombay marine clay deposits in relation to certain foundation problems. *Proceedings of*

- 
- Proceedings of the 3th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Jerusalem Academic Press, Haifa, Israel, 210-214.
- Lee, D.-H., Juang, C. H., and Ku, C.-S. (2001). Liquefaction performance of soils at the site of a partially completed ground improvement project during the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (6), 1241-1253.
- Lengkeek, A. (2024). CPT based classification with focus on organic soils. Proceedings of 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Barcelona, Spain.
- Lengkeek, H. J. (2022). CPT-based classification and correlations for organic soils. 4TU.ResearchData. <https://doi.org/10.4121/19139651.v2>.
- Leong, E., Rahardjo, H., and Tang, S. (2002). Characterisation and engineering properties of Singapore residual soils. Proceedings of Proceedings of the International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, 2-4.
- Li, D. K., Juang, C. H., Andrus, R. D., and Camp, W. M. (2007). Index properties-based criteria for liquefaction susceptibility of clayey soils: a critical assessment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (1), 110-115.
- Librić, L., Jurić-Kačunić, D., and Kovačević, M. S. (2017). Application of cone penetration test (CPT) results for soil classification. *Građevinar*, 69 (1), 11-20.
- Liu, D., Li, Y., You, Y., Liu, J., Wang, B., and Yu, B. (2020). Velocity of debris flow determined by grain composition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146 (8), 06020010.
- Lopez, J. S., Vera-Grunauer, X., Rollins, K., and Salvatierra, G. (2018). Gravelly Soil Liquefaction After the 2016 Ecuador Earthquake. *Geotechnical Earthquake*

Engineering and Soil Dynamics V, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 273-285.



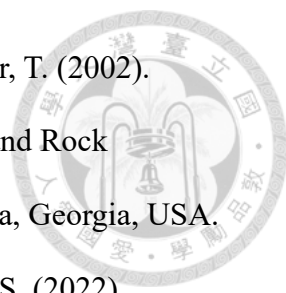
- Lunne, T., Powell, J. J. M., and Robertson, P. K. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Taylor & Francis, UK.
- Mantaras, F., Odebrecht, E., and Schnaid, F. (2015). Using piezocone dissipation test to estimate the undrained shear strength in cohesive soil. Canadian Geotechnical Journal, 52 (3), 318-325.
- Marachi, N. (1969). Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials. University of California, Berkeley.
- Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106 (3), 299-321.
- Marchetti, S., Totani, G., Campanella, R., Robertson, P., and Taddei, B. (1986). The DMT- σ_{hc} Method for Piles Driven in Clay. Proceedings of Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, ASCE, 765-779.
- Mayne, P. and Brown, D. (2003). Site characterization of Piedmont residuum of North America. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 2, 1323-1339.
- Mayne, P. and Harris, D. (1993). Axial Load-Displacement Behavior of Drilled Shaft Foundations in Piedmont Residuum. ADSC/ASCE Research Study, Federal Highway Administration, Turner-Fairbanks Highway Research Center, McLean, Virginia.
- McClung, J. and Mollard, J. (1987). Predicting settlement at a damsite on a tunnel valley deposit in Alberta. Canadian Geotechnical Journal, 24 (1), 45-57.

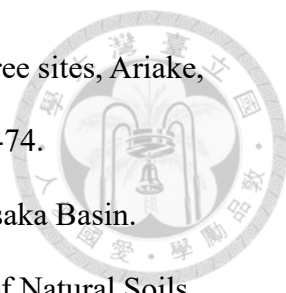
- 
- Meigh, A. C. and Nixon, I. K. (1961). Comparison of in Situ Tests for Granular Soils. Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris.
- Montalva, G., Ruz, F., Escribano, D., Bastías, N., Espinoza, D., and Paredes, F. (2022). Chilean liquefaction case history database. *Earthquake Spectra*, 38 (3), 2260-2280.
- Nash, D., Powell, J., and Lloyd, I. (1992). Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar. *Géotechnique*, 42 (2), 163-181.
- Ng, R. M. C. and Lo, K. Y. (1985). The measurements of soil parameters relevant to tunnelling in clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (3), 375-391.
- Nkhophle Holdings (2019). Geotechnical investigation for Magatle Filling station development. Nkhophle Holdings.
- Nzabakurikiza, A., Onana, V. L., Ze, A. N. o., Mvindi, A. T. N., and Ekodeck, G. E. (2017). Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 1549-1562.
- Ohtsubo, M., Egashira, K., and Kashima, K. (1995). Depositional and post-depositional geochemistry, and its correlation with the geotechnical properties of marine clays in Ariake Bay, Japan. *Geotechnique*, 45 (3), 509-523.
- Ohtsubo, M., Higashi, T., Kanayama, M., and Takayama, M. (2006). Depositional geochemistry and geotechnical properties of marine clays in the Ariake Bay area, Japan. *Proceedings of Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Two Volume Set: Proceedings of the Second International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, 29 November-1 December 2006, CRC Press, 1893.

Outeniqua Geotechnical Services (2015). Phase 1 Geotechnical Site Investigation Report: Proposed Subsidy Housing Project, Nieu-Bethesda, Eastern Cape Province. Outeniqua Geotechnical Services, George, South Africa.

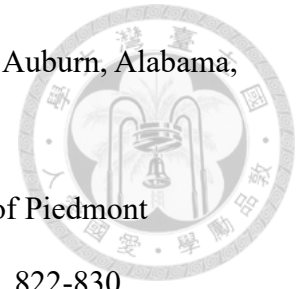


- Ozan, C. (2003). Estimation of Grain Characteristics of Soils by Using Cone Penetration Test (CPT) Data.M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Rahardjo, H., Aung, K., Leong, E. C., and Rezaur, R. (2004). Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Engineering Geology*, 73 (1-2), 157-169.
- Reale, C., Gavin, K., Librić, L., and Jurić-Kaćunić, D. (2018). Automatic classification of fine-grained soils using CPT measurements and Artificial Neural Networks. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 207-215.
- Rocha, B., Santos, R., Bezerra, R., Rodrigues, R., and Giacheti, H. (2016). Characterization of unsaturated tropical soil site by in situ tests. *Proceedings of 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. [online], 1129-1136.
- Rochelle, P. L., Trak, B., Tavenas, F., and Roy, M. (1974). Failure of a test embankment on a sensitive Champlain clay deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 11 (1), 142-164.
- Rollins, K. M., Amoroso, S., Milana, G., Minarelli, L., Vassallo, M., and Di Giulio, G. (2020). Gravel liquefaction assessment using the dynamic cone penetration test based on field performance from the 1976 Friuli earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146 (6), 04020038.

- 
- Sabatini, P., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., and Zettler, T. (2002). Geotechnical Engineering Circular No. 5 Evaluation of Soil and Rock Properties. FHWA-IF-02-034, GeoSyntec Consultants, Atlanta, Georgia, USA.
- Salvatore, N., Pizzi, A., Rollins, K. M., Pagliaroli, A., and Amoroso, S. (2022). Liquefaction assessment of gravelly soils: the role of in situ and laboratory geotechnical tests through the case study of the Sulmona basin (Central Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 141 (2), 216-229.
- Shibata, T. and Sekiguchi, H. (1984). Performance of Trial Embankment on Soft Clay. *Proceedings of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, USA.
- Silvestri, V. (2003). Assessment of self-boring pressuremeter tests in sensitive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 40 (2), 365-387.
- Sirovich, L. (1996). Repetitive liquefaction at a gravelly site and liquefaction in overconsolidated sands. *Soils and Foundations*, 36 (4), 23-34.
- Suddeepong, A., Chai, J., Shen, S., and Carter, J. (2015). Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading–reloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (8), 1035-1044.
- Takemura, J., Watabe, Y., and Tanaka, M. (2007). Characterization of alluvial deposits in Mekong Delta. *Proceedings of International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, 1805-1829.
- Tan, T., Phoon, K., Lee, F., Tanaka, H., Locat, J., and Chong, P. (2003). A characterisation study of Singapore lower marine clay. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1, 429-454.

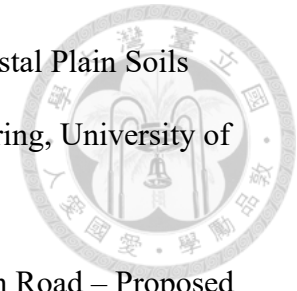
- 
- Tanaka, H. (2000). Sample quality of cohesive soils: lessons from three sites, Ariake, Bothkennar and Drammen. *Soils and Foundations*, 40 (4), 57-74.
- Tanaka, H. (2002). Geotechnical properties of clay deposits of the Osaka Basin. *Proceedings of Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 455-474.
- Tanaka, H., Locat, J., Shibuya, S., Soon, T. T., and Shiwakoti, D. R. (2001). Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (2), 378-400.
- Tanaka, H. and Tanaka, M. (1998). Characterization of sandy soils using CPT and DMT. *Soils and Foundations*, 38 (3), 55-65.
- Tanaka, Y., Kudo, K., Nishi, K., Okamoto, T., Kataoka, T., and Ueshima, T. (2000). Small strain characteristics of soils in Hualien, Taiwan. *Soils and Foundations*, 40 (3), 111-125.
- Tasman Geotechnics Pty Ltd (2022). Geotechnical Investigation Beach Nourishment Gravelly Beach. Invermay, TAS, Australia.
- Terraprobe Inc (2011). Preliminary Geotechnical Investigation Dixie Road (Reginal road 4) Queen Street To 2.1 km North of Mayfield Road Regin of Peel, Ontario.
- Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. *Soils and Foundations*, 23 (4), 56-74.
- Ulusay, R., Arikan, F., Yoleri, M., and Çağlan, D. (1995). Engineering geological characterization of coal mine waste material and an evaluation in the context of back-analysis of spoil pile instabilities in a strip mine, SW Turkey. *Engineering Geology*, 40 (1-2), 77-101.
- Vinson, J. and Brown, D. (1997). Site Characterization of the Spring Villa Geotechnical Test Site and a Comparison of Strength and Stiffness Parameters for a Piedmont

Residual Soil. Auburn University Highway Research Center, Auburn, Alabama, USA.



- Wang, C. E. and Borden, R. H. (1996). Deformation characteristics of Piedmont residual soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (10), 822-830.
- Wang, H.-L., Zhou, W.-H., Yin, Z.-Y., and Jie, X.-X. (2019). Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil–structure interface. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (10), 04019238.
- Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Tang, S.-C., and Liang, Y. (2013). Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (11), 1994-1997.
- Watabe, Y., Tanaka, M., and Takemura, J. (2004). Evaluation of In-situ K₀ for Ariake, Bangkok and Hai-Phong clays. Paper presented at the 2nd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, Portugal. , 1765-1772.
- Welker, A. L., Jenkins, J. K. G., McCarthy, L., and Nemirovsky, E. (2013). Examination of the material found in the pore spaces of two permeable pavements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (4), 278-284.
- Wersäll, C., Massarsch, K. R., and Spross, J. (2022). Heavy vibratory plate compaction of silty sand: A field study. *Soils and Foundations*, 62 (5), 101208.
- White, R. (2005). Geotechnical Investigation and Borrow Assessment for the Phase 2 Bauxite Residue Disposal Area at Aughinish Alumina. Golder Associates (UK) Ltd.
- Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T. (2009). Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (10), 1404-1418.

Williamson, J. (2013). Liquefaction Potential of South Carolina Coastal Plain Soils Using Dilatometer Data. M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina, USA.



WSP Canada Inc (2016). Geotechnical Investigation – 185 Mountain Road – Proposed Industrial Development (Rev. 1).

Yegian, M., Ghahraman, V., and Harutiunyan, R. (1994). Liquefaction and embankment failure case histories, 1988 Armenia earthquake. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3), 581-596.

Yiqiang, D. and Berrill, J. B. (1992). Pattern Recognition Approach to Evaluation of Liquefaction Potential: Exploration of Buller Sites. Department of Civil Engineering, University of Canterbury.

附錄 B 「CPT-USCS/8/4182」統計資訊



表 B 1 「CPT-USCS/8/4182」中在通用層級下的統計資訊。(礫石 G)

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	-	-	-	-	-
PI	-	-	-	-	-
FC (%)	493	11.68	0.88	0.00	49.99
SC (%)	492	30.33	0.31	0.00	49.60
Q _{tn}	71	206.83	0.55	43.33	645.47
F _r	71	1.12	0.60	0.35	4.03
I _c	71	1.72	0.15	1.21	2.46
D ₅₀ (mm)	159	11.42	1.35	0.08	87.56

表 B 2 「CPT-USCS/8/4182」中在通用層級下的統計資訊。(砂土 S)

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	-	-	-	-	-
PI	-	-	-	-	-
FC (%)	1172	18.64	0.71	0.00	50.00
SC (%)	1115	75.18	0.23	28.06	100.00
Q _{tn}	624	72.07	0.86	3.78	626.57
F _r	624	1.12	1.03	0.04	6.59
I _c	656	2.09	0.18	1.18	3.24
D ₅₀ (mm)	863	0.40	1.52	0.06	4.63

表 B 3 「CPT-USCS/8/4182」 中在通用層級下的統計資訊。(粉土 M)

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	653	52.28	0.46	14.40	164.57
PI	618	21.03	0.82	0.00	102.36
FC (%)	701	86.85	0.16	50.25	100.00
SC (%)	359	12.79	1.11	0.00	49.00
Q _{tn}	317	15.74	0.85	2.09	105.24
F _r	317	2.91	0.69	0.08	8.37
I _c	385	2.85	0.12	1.93	3.70
D ₅₀ (mm)	318	0.02	0.79	0.002	0.074

表 B 4 「CPT-USCS/8/4182」 中在通用層級下的統計資訊。(黏土 C)

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	1434	52.44	0.35	18.00	179.09
PI	1434	28.56	0.51	7.00	116.23
FC (%)	1440	88.87	0.14	50.73	100.00
SC (%)	573	10.99	1.09	0.00	49.27
Q _{tn}	424	10.84	1.12	0.85	88.09
F _r	424	3.09	0.71	0.02	9.93
I _c	635	3.03	0.10	2.10	3.98
D ₅₀ (mm)	279	0.01	1.06	0.001	0.074

表 B 5 「CPT-USCS/8/4182」 中在通用層級下的統計資訊。(有機土 O)

Parameter	N	Mean	COV	Min	Max
LL	44	106.13	0.32	24.60	169.54
PI	44	64.78	0.37	7.88	107.20
FC (%)	12	89.74	0.07	74.86	97.77
SC (%)	0	-	-	-	-
Q _{tn}	270	5.03	0.59	0.84	17.51
F _r	270	5.85	0.60	0.92	19.44
I _c	270	3.44	0.07	2.90	4.34
D ₅₀ (mm)	0	-	-	-	-

表 B 6 「CPT-USCS/8/4182」 中在場址層級下的統計資訊。(礫石 G)

Property	No. of data groups	No. of tests/group		Range of data	Property mean value		Property COV (%)	
		Range	Mean		Range	Mean	Range	Mean
LL	-	-	-	-	-	-	-	-
PI	-	-	-	-	-	-	-	-
FC (%)	74	3-35	6.16	0-48	0.5-34.33	11.78	0.06-1.73	0.53
SC (%)	74	3-35	6.15	0-49.6	8.41-41.82	29.56	0.03-0.9	0.23
Q _{tn}	10	4-11	6.70	43.33-645.47	115.14-313.99	208.25	0.26-0.84	0.49
F _r	10	4-11	6.70	0.35-4.03	0.81-2.01	1.16	0.23-0.87	0.48
I _c	10	4-11	6.70	1.21-2.46	1.55-2.08	1.74	0.03-0.25	0.12
D ₅₀ (mm)	27	3-8	4.89	0.26-87.56	1.42-69.87	11.08	0.06-1	0.50

表 B 7 「CPT-USCS/8/4182」 中在場址層級下的統計資訊。(砂土 S)

Property	No. of data groups	No. of tests/group		Range of data	Property mean value		Property COV (%)	
		Range	Mean		Range	Mean	Range	Mean
LL	-	-	-	-	-	-	-	-
PI	-	-	-	-	-	-	-	-
FC (%)	140	3-36	7.81	0-50	0-42.88	19.09	0-2.65	0.55
SC (%)	132	3-36	7.89	30.1-100	43.07-100	73.16	0-0.62	0.15
Q _{tn}	63	3-36	9.57	3.78-531.63	20.01-232.03	72.61	0.07-1.35	0.55
F _r	63	3-36	9.57	0.04-6.59	0.27-5.65	1.32	0.07-1.2	0.51
I _c	70	3-36	9.04	1.18-3.24	1.48-2.89	2.11	0.01-0.29	0.14
D ₅₀ (mm)	105	3-36	7.71	0.066-4.63	0.08-3.58	0.44	0-1.29	0.49

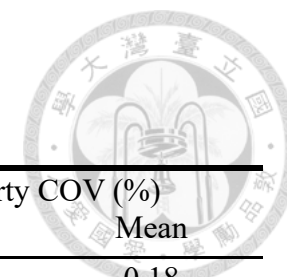


表 B 8 「CPT-USCS/8/4182」中在場址層級下的統計資訊。(粉土 M)

Property	No. of data groups	No. of tests/group		Range of data	Property mean value		Property COV (%)	
		Range	Mean		Range	Mean	Range	Mean
LL	89	3-18	5.96	17.6-157.53	18.35-114.84	50.71	0-0.5	0.18
PI	84	3-18	5.94	0-97.7	2-66.29	20.02	0.01-1.73	0.42
FC (%)	90	3-28	6.42	50.25-100	56.32-100	87.14	0-0.3	0.10
SC (%)	46	3-28	7.02	0-49	0-43.68	12.36	0.08-1.73	0.89
Q _{tn}	43	3-28	6.58	2.09-79.95	3.63-42.12	15.85	0.05-1.56	0.49
F _r	43	3-28	6.58	0.08-8.37	0.76-7.12	3.23	0.01-1	0.49
I _c	51	3-28	6.25	1.93-3.70	2.15-3.42	2.86	0.01-0.22	0.09
D ₅₀ (mm)	45	3-28	6.24	0.002-0.074	0.003-0.05	0.02	0.22-1.17	0.61

表 B 9 「CPT-USCS/8/4182」中在場址層級下的統計資訊。(黏土 C)

Property	No. of data groups	No. of tests/group		Range of data	Property mean value		Property COV (%)	
		Range	Mean		Range	Mean	Range	Mean
LL	203	3-59	6.36	18-179.09	22-111.05	52.15	0-0.43	0.16
PI	203	3-59	6.36	7-116.23	8-80.2	28.15	0.02-0.77	0.23
FC (%)	203	3-59	6.36	50.73-100	55.23-100	88.68	0-0.29	0.08
SC (%)	64	3-59	8.22	0-49.27	0-44.77	12.08	0.1-3.16	0.80
Q _{tn}	52	3-22	7.29	0.85-88.09	1.34-50.37	11.43	0.02-1.01	0.32
F _r	52	3-22	7.29	0.02-9.93	0.24-7.75	3.24	0.03-2.13	0.37
I _c	84	3-22	6.44	2.1-3.98	2.54-3.86	3.01	4.1e-05-0.16	0.06
D ₅₀ (mm)	44	3-12	5.18	0.001-0.074	0.001-0.047	0.01	0.11-1.34	0.66

表 B 10 「CPT-USCS/8/4182」中在場址層級下的統計資訊。(有機土 O)

Property	No. of data groups	No. of tests/group		Range of data	Property mean value		Property COV (%)	
		Range	Mean		Range	Mean	Range	Mean
LL	3	11-17	14.67	24.6-169.54	83.28-124.64	107.48	0.2-0.35	0.27
PI	3	11-17	14.67	7.88-107.2	50.53-76.76	65.56	0.22-0.46	0.33
FC (%)	2	6-6	6.00	74.86-97.77	89.23-90.25	89.74	0.04--0.09	0.06
SC (%)	0	-	-	-	-	-	-	-
Q _{tn}	29	3-38	9.28	0.84-17.51	1.51-12.11	5.32	0.05-0.74	0.28
F _r	29	3-38	9.28	0.92-19.44	1.35-14.55	5.85	0.08-0.52	0.29
I _c	29	3-38	9.28	2.9-4.34	3.06-4.06	3.42	0.01-0.06	0.04
D ₅₀ (mm)	0	-	-	-	-	-	-	-