

# 基本土工技術

Basic Geotechnics

Essentials of Soil Mechanics and Foundations

原著者：David F. McCarthy

譯述者：陳煌銘 劉柏宏 吳柏裕

科技圖書股份有限公司

# 基本土工技術

Basic Geotechnics

Essentials of Soil Mechanics and Foundations

原著者：David F. McCarthy

譯述者：陳煌銘 劉柏宏 吳柏裕

科技圖書股份有限公司

## 第二版原序

本版仍繼續前版的原意，為教育而編寫的實用基本土壤力學與基礎教科書。本書的程度，向被土木工程、土木營建技術與建築等科系採作教本。由於這些題材的內容在本質上是適合實用的，又為非從事土壤與基礎專家們所需要的資料。

本版與第一版的重要不同處是擴充章節，新增加邊坡穩定，側壓力與擋土結構以及埋管載荷分析等專章。另在第一章中新添有關地質新資料，其他各章凡屬原理部分大部均予保留尙少改變外，在應用方面則添列在第一版出書後迄今的新發展部分為主。按照第一版的編寫作風，在新增各章中的附例後隨即討論題材內容使能渾成一體。本版中亦增列若干 SI 單位的例題，但仍維持英制單位，以應順在實際執業者慣用的雙軌辦法。

在此要特別感謝兩位在編寫第二版的贊助者。一位為 Syracuse 大學的 HS. Muskatt 博士，代為審閱第一章中有關地質部分的資料，並代為增刪，使更能正確完整。另一位為北 Essex 社區學院 F H. Collopy 教授，他在本第一、二版前後審查原稿多方建議，協力完成本版的初稿。

由營造業、顧問工程師、製造廠商與出版業等所提供本版新增加的實例及照片極多，在此一併致謝。

本版新增材料（約佔原書三分之一）仍由筆者在 N. Y 州的 Mohawk 學院休假期間所發展。承院中同僚的安排，以及圖書館諸同仁的協助，使能安心寫作順利完成新版工作。至深銘感。

新版的打字工作由 PKlossner 女士擔任，由於她是初版的打字原手，故非常順利完成任務。筆者全家的期望與贊助，使筆者能安心工作順利完成，實深欣慰。

D F. Mc Carthy 麥卡錫。

## 初版原序

本書將土壤力學的定理與應用，作廣泛而有系統的敘述。對於有志從事土壤基礎工程的規畫、設計及現場施工的學生們將有很大的助益。

由於本書屬於引導性的教科書，因此內容只限於基本定理的介紹與闡述，避免使用深奧題材與教學理論。但本書已涵蓋了土壤力學及基礎工程中所有重要的觀念。同時，將土壤力學的觀念與實際的設計與施工，連繫在一起。從事實際工作的工程師與教師們，當可發現本書所列的分析及評估方法，可應用到很多實際問題上。

本書的許多圖片係由器材製造廠商所惠贈，對本書的完成，有很大的助益。有關土壤鑽探方法的圖片，係節錄“土壤及岩心取樣的基本步驟（Will Acker's 著書，Basic procedures for soil sampling and core drilling）”一書。

在準備與編寫本書時，作者在“Dams & Moore、Empire soil investigation、Thomsen Associates”等公司的同事提供很多的資料與建議。另外，作者的家庭與 Patricia Klossnes，Sue Fox Hill，Grace Messere 女士等對於本書的出版提供了很多的幫助。在此一併誌謝。

David F. McCarthy

大衛·F·麥卡錫

## 編輯者言

溯自 1925 年在奧國 Vienni 的 Frang Deuticks 書店出版一本由 K. Terzaghi 所著的 “Erdbaumeckenik” 以來，世界上才有 “土壤力學” 的名詞，忽忽已歷 60 年矣。在 1925 年以前僅有 “土壓力” 理論附在結構力學書中作單章講述。至於有關基礎工程只在雜誌報告中另呈報道而已。直到 1936 年在美國召開第一次世界性學術會議，才將 “土壤力學與基礎工程” 的聯串名詞出現。美國土木工程師學會與波士頓土木工程學會自 1925 年起開始登載有關此類論文但另呈而寥落為數不多，直到 1963 年才有 “土壤力學與基礎工程” 彙刊發行。除英國土木工程師學會在 1948 年創印 “Geotechnique” (地工技術) 季刊，其內容與土壤力學與基礎工程相近。直到 1974 年美國土木學會將上述的彙刊改名為 “Geotechnical engineering (大地工程) 彙刊。這是鑒於內涵日益廣泛，工程的規模日益龐大，所指的土壤應包括岩石，基礎的範圍又將涉及採礦，隧道等工程。以大地工程或地工技術命名，自較切合。今後要討論的範圍日益擴大自無疑義。惟以有關岩石力學與採礦與隧道工程等研究起步較遲，且其範圍過廣，研究亦較困難。故目前所指的大地工程其內容尚不能脫離以往 “土力與基礎” 的範圍，要其名符其實的大地工程，尚待後日的努力。

本書原稱 “土力與基礎要義”，現因改版，其內容幾增加三分之一，茲按新版補譯，仍可適用作大學的 “大地工程” 或 “地工技術” 等課程的教科書。隨着潮流，依原書的名稱 Basic geotechnics 譯成 “基本地工技術”。而不用 “土力與基礎要義” 第二版的名稱。特將改名原諒說明如上。

原書第一版的譯者為陳煌銘碩士，現因出長地工技術主管已無暇繼續譯述新版，另請劉伯宏工程師代勞。另外有關地質部分的地塊滑動理論一節，特煩地質師吳柏裕碩士代為譯出。在此一併說明以誌伸謝。

科技圖書公司編輯部 謹識

# 目 錄

## 原序

## 第一章 土層的起源及特性

|                |    |
|----------------|----|
| 1-1 緒 論        | 1  |
| 1-2 岩石：土壤的母體   | 1  |
| 1-3 土壤總類       | 5  |
| 1-3-1 重力及風力運積土 | 6  |
| 1-3-2 冰川沉積土    | 7  |
| 1-3-3 河川沉積土    | 11 |
| 1-3-4 海灘沉積土    | 15 |
| 1-3-5 沼澤沉積土    | 15 |
| 1-4 對設計及施工影響   | 16 |
| 1-5 板塊構造學說     | 16 |
| 習 題            | 24 |

## 第二章 土壤組成：名詞與定義

|                    |    |
|--------------------|----|
| 2-1 緒 論            | 26 |
| 2-2 土壤組成 - 分析表示法   | 26 |
| 2-2-1 重量 - 體積之基本關係 | 27 |
| 2-3 與土壤組成有關的基本名詞   | 28 |
| 2-4 浸水土壤           | 35 |
| 習 題                | 37 |

### 第三章 土壤種類與土壤結構

|              |    |
|--------------|----|
| 3-1 緒 論      | 40 |
| 3-2 主要土壤種類   | 40 |
| 3-3 顆粒形狀與大小  | 42 |
| 3-4 粘土與水     | 47 |
| 3-5 土壤結構     | 48 |
| 3-6 若干特殊土壤類型 | 53 |
| 3-6-1 分散土壤   | 55 |
| 3-6-2 紅 土    | 57 |
| 習 題          | 58 |

### 第四章 指數性質、分類試驗與土壤分類法

|                  |    |
|------------------|----|
| 4-1 緒 論          | 59 |
| 4-2 指數性質         | 59 |
| 4-3 分類試驗         | 61 |
| 4-3-1 顆粒大小分佈     | 61 |
| 4-3-2 現場密度試驗     | 66 |
| 4-3-3 相對密度       | 67 |
| 4-3-4 含水量        | 70 |
| 4-3-5 粘土的稠度      | 70 |
| 4-3-6 重塑土壤的稠度與塑性 | 73 |
| 4-3-7 粘土礦物       | 75 |
| 4-3-8 分散土壤試驗     | 76 |
| 4-3-9 其他性質       | 78 |
| 4-4 分類法          | 78 |
| 習 題              | 80 |

### 第五章 土內水的流動：基本原理

|         |    |
|---------|----|
| 5-1 緒 論 | 83 |
|---------|----|

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 5-2 滲 透.....          | 83  |
| 5-2-1 影響水流的因素.....    | 83  |
| 5-2-2 達西定律.....       | 86  |
| 5-2-3 層流與紊流.....      | 87  |
| 5-2-4 土壤型類的影響.....    | 88  |
| 5-2-5 經驗關係式.....      | 89  |
| 5-2-6 透水試驗.....       | 89  |
| 5-2-7 試驗室透水試驗.....    | 91  |
| 5-2-8 現場透水試驗.....     | 94  |
| 5-3 毛細現象.....         | 94  |
| 5-3-1 毛細管中之水.....     | 94  |
| 5-3-2 土壤的毛管水升高現象..... | 99  |
| 5-3-3 毛管水上升率.....     | 102 |
| 5-3-4 懸浮毛細現象.....     | 102 |
| 5-3-5 土壤中毛管水的消除.....  | 102 |
| 5-3-6 表面張力的影響.....    | 103 |
| 習 題.....              | 104 |

## 第六章 土壤中之流動水

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 6-1 緒 論.....                | 107 |
| 6-2 流網與滲流.....              | 107 |
| 6-2-1 地下水流.....             | 107 |
| 6-2-2 流網及其原理.....           | 108 |
| 6-2-3 流網的繪製 - 等向性土壤的情況..... | 110 |
| 6-2-4 流網的界限.....            | 113 |
| 6-2-5 非等向性土壤中的流網.....       | 116 |
| 6-2-6 上揚力.....              | 117 |
| 6-2-7 其他滲流力.....            | 118 |
| 6-2-8 實際狀況之考慮.....          | 120 |
| 6-2-9 流 砂.....              | 121 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 6-3 排 水                | 121 |
| 6-3-1 需要排水的情況          | 121 |
| 6-3-2 淺深度的排水           | 122 |
| 6-3-3 中深度的排水           | 123 |
| 6-3-4 深排水              | 127 |
| 6-3-5 壓密排水             | 127 |
| 6-3-6 施工後的排水           | 128 |
| 6-3-7 基礎排水             | 128 |
| 6-3-8 氈式排水             | 129 |
| 6-3-9 截水溝排水            | 129 |
| 6-3-10 流經結構物的水流        | 130 |
| 6-3-11 濾層設計            | 131 |
| 6-3-12 用合成纖維材料隔開與排水的應用 | 134 |
| 6-3-13 地面排水            | 136 |
| 6-3-14 排水的影響           | 136 |
| 6-4 土壤凍脹               | 137 |
| 6-5 土壤的滲漏率             | 142 |
| 習 題                    | 143 |

## 第七章 土塊應力：點應力與摩爾圓

|                  |     |
|------------------|-----|
| 7-1 緒 論          | 145 |
| 7-2 點應力 - 分析法之演繹 | 145 |
| 7-3 摩 爾 圓        | 149 |
| 習 題              | 157 |

## 第八章 地內應力

|               |     |
|---------------|-----|
| 8-1 緒 論       | 159 |
| 8-2 覆土重引起的應力  | 159 |
| 8-2-1 垂直應力    | 159 |
| 8-2-2 地下水位的影响 | 160 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 8-2-3 水平（側向）應力·····       | 162 |
| 8-3 由垂直地面荷重引起的地內應力·····   | 164 |
| 8-3-1 均質土壤載重·····         | 164 |
| 8-3-2 布斯涅克氏應力分佈·····      | 164 |
| 8-3-3 威斯特格氏應力分佈·····      | 165 |
| 8-3-4 查表計算法·····          | 166 |
| 8-3-5 基礎載重分析的應用·····      | 167 |
| 8-3-6 $60^\circ$ 近似法····· | 171 |
| 8-3-7 不同性質的疊層土壤·····      | 172 |
| 8-3-8 基礎設置深度的影響·····      | 173 |
| 8-3-9 地面高程變化的影響·····      | 175 |
| 習題·····                   | 177 |

## 第九章 沉陷：土壤體積變化及壓密

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 9-1 緒論·····                | 179 |
| 9-2 壓縮性·····               | 180 |
| 9-2-1 試驗室壓密試驗結果的表示與分析····· | 181 |
| 9-2-2 由指數性質估計壓縮度·····      | 186 |
| 9-2-3 土壤壓縮引起的沉陷·····       | 186 |
| 9-3 砂土的體積變化·····           | 192 |
| 9-4 填土引起的沉陷·····           | 194 |
| 9-5 壓密·····                | 195 |
| 9-6 加載·····                | 199 |
| 9-6-1 縮短土壤改良時間的方法·····     | 200 |
| 9-6-2 砂樁排水或排水井·····        | 201 |
| 習題·····                    | 204 |

## 第十章 剪力強度理論

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 10-1 緒論·····      | 207 |
| 10-2 試驗室剪力試驗····· | 207 |

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| 10-2-1 | 直接剪力試驗             | 209 |
| 10-2-2 | 三軸壓縮試驗             | 212 |
| 10-2-3 | 無圍壓縮試驗             | 213 |
| 10-2-4 | 十字片剪力試驗            | 213 |
| 10-2-5 | 將剪力試驗結果繪成摩爾圓       | 215 |
| 10-2-6 | 破壞包絡線              | 216 |
| 10-3   | 剪力強度               | 218 |
| 10-3-1 | 非黏性土壤的剪力強度         | 218 |
| 10-3-2 | 由鑽探資料求 $\phi$ 角    | 224 |
| 10-3-3 | 粘土的剪力強度            | 225 |
| 10-3-4 | 由鑽探資料推求粘土的凝聚力      | 231 |
| 10-3-5 | 混合土壤的剪力強度          | 231 |
| 10-3-6 | 與 $\phi$ 角對應的破壞面位置 | 232 |
| 習題     |                    | 233 |

## 第十一章 現場調查：目的與方法

|        |             |     |
|--------|-------------|-----|
| 11-1   | 簡介          | 235 |
| 11-2   | 土質地圖及空照圖    | 236 |
| 11-2-1 | 美國地質調查地形圖   | 237 |
| 11-2-2 | 美國農業部水土保持地圖 | 237 |
| 11-2-3 | 地質圖         | 237 |
| 11-2-4 | 空照圖         | 237 |
| 11-3   | 鑽孔與試坑       | 238 |
| 11-3-1 | 鑽孔方法        | 238 |
| 11-3-2 | 土壤取樣        | 244 |
| 11-3-3 | 土樣的採取間距     | 249 |
| 11-3-4 | 鑽孔深度與距離     | 249 |
| 11-3-5 | 貫入抗力與標準貫入試驗 | 250 |
| 11-3-6 | 貫入抗力與錐頭貫入儀  | 251 |
| 11-3-7 | 試抗          | 254 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 11-3-8 岩心採樣              | 255 |
| 11-4 鑽探資料的表示             | 258 |
| 11-4-1 鑽探柱狀圖             | 258 |
| 11-5 鑽探資料的限制             | 261 |
| 11-6 地球物理探勘法             | 262 |
| 11-6-1 震波折射法             | 263 |
| 11-6-2 電阻法               | 267 |
| 11-6-3 電阻與土質間的關係         | 273 |
| 11-6-4 土層厚度              | 273 |
| 11-7 現場試驗                | 274 |
| 11-7-1 現場剪力試驗 - 十字片鑽剪力試驗 | 274 |
| 11-7-2 邊坡傾斜指示計           | 275 |
| 11-7-3 孔隙水壓與水壓計          | 276 |
| 習題                       | 277 |

## 第十二章 土壤的搬運、夯實與穩定

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 12-1 簡介            | 279 |
| 12-2 土壤現場處理的步驟     | 280 |
| 12-3 現場夯壓機具        | 285 |
| 12-3-1 淺土夯壓機具      | 286 |
| 12-3-2 深震夯實法       | 291 |
| 12-3-3 土層探測器與震擊夯壓法 | 294 |
| 12-3-4 重擊夯實法       | 295 |
| 12-3-5 爆炸夯實法       | 298 |
| 12-4 參考密度的決定法      | 298 |
| 12-5 現場夯壓控制與密度試驗   | 304 |
| 12-5-1 砂錐法         | 306 |
| 12-5-2 橡皮膜法        | 307 |
| 12-5-3 原子輻射法       | 307 |
| 12-6 土壤穩定          | 311 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 12-7 填土搬運的替代方法 | 315 |
| 習題             | 317 |

## 第十三章 基礎：概念

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 13-1 導論              | 320 |
| 13-2 一般的基礎型式         | 321 |
| 13-2-1 放腳基礎          | 321 |
| 13-2-2 筏式基礎          | 322 |
| 13-2-3 樁基與墩基         | 322 |
| 13-2-4 沉箱            | 324 |
| 13-2-5 浮式基礎          | 324 |
| 13-3 樁基種類與安裝步驟       | 325 |
| 13-3-1 錘擊樁用打樁機       | 326 |
| 13-3-2 樁的型式與材料       | 329 |
| 13-3-3 樁的承載力與適當長度    | 335 |
| 13-3-4 樁的埋植方法        | 336 |
| 13-3-5 樁的埋植必須考慮的其他事項 | 338 |
| 13-4 土層情況與基礎型式       | 339 |
| 習題                   | 341 |

## 第十四章 基礎：分析與設計

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 14-1 導論                    | 343 |
| 14-2 淺基礎                   | 344 |
| 14-2-1 承載力公式：長條基腳          | 344 |
| 14-2-2 方形、矩形及圓型基腳          | 350 |
| 14-2-3 承受傾斜載重的基腳           | 353 |
| 14-2-4 斜坡上的基腳              | 354 |
| 14-2-5 依貫入阻力試驗資料作基腳設計      | 355 |
| 14-2-6 依標準貫入試驗結果作支承砂土層基腳設計 | 358 |
| 14-2-7 標準貫入試驗與黏性土壤         | 362 |

|         |                      |     |
|---------|----------------------|-----|
| 14-2-8  | 應力靜力錐頭貫入試驗作砂土支承的基腳設計 | 363 |
| 14-2-9  | 靜力貫入儀的貫入阻力與黏性土壤      | 364 |
| 14-2-10 | 壓力計                  | 366 |
| 14-2-11 | 推定承載壓力               | 372 |
| 14-3    | 深基礎                  | 372 |
| 14-3-1  | 靜力分析：通論              | 373 |
| 14-3-2  | 靜力分析：砂土層中樁的承載力       | 374 |
| 14-3-3  | 靜力分析：砂土層中的樁基礎        | 380 |
| 14-3-4  | 安全因數                 | 385 |
| 14-3-5  | 負摩擦力                 | 386 |
| 14-3-6  | 其他設計必須考慮的事項          | 387 |
| 14-3-7  | 靜力分析法：鑽掘式樁基與墩基       | 387 |
| 14-3-8  | 群樁的安排                | 390 |
| 14-3-9  | 群樁的承載力               | 391 |
| 14-3-10 | 群樁沉陷                 | 393 |
| 14-3-11 | 試樁載重試驗               | 395 |
| 14-3-12 | 打樁公式                 | 397 |
| 14-4    | 基礎施工的監督              | 403 |
| 習題      |                      | 403 |

## 第十五章 無支承邊坡之穩定

|        |                 |     |
|--------|-----------------|-----|
| 15-1   | 緒論              | 409 |
| 15-1-1 | 邊坡移動的類型         | 410 |
| 15-2   | 分析方法            | 413 |
| 15-2-1 | 無限延伸等向性土壤與均一邊坡  | 413 |
| 15-2-2 | 有限延伸邊坡 - 具凝聚力土壤 | 419 |
| 15-2-3 | 邊坡穩定計算用圖表       | 445 |
| 15-2-4 | 剪應力中的變動與安全因數    | 464 |

|                |     |
|----------------|-----|
| 15-2-5 邊坡穩定的改良 | 465 |
| 習 題            | 467 |

## 第十六章 側壓力與擋土結構

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 16-1 緒 論          | 471 |
| 16-2 側向土壓力與擋土牆    | 473 |
| 16-2-1 土壤質量中的應力狀態 | 473 |
| 16-2-2 抵住擋土牆的土壓力  | 481 |
| 16-2-3 開挖支撐       | 510 |
| 16-2-4 錨碇護岸       | 521 |
| 16-2-5 擋水結構 - 水壩  | 523 |
| 習 題               | 544 |

## 第十七章 埋管上的載重

|               |     |
|---------------|-----|
| 17-1 緒 論      | 547 |
| 17-2 溝管載重     | 549 |
| 17-3 正敷設管道    | 552 |
| 17-4 負敷設管道    | 558 |
| 17-5 引 入 溝    | 561 |
| 17-6 穿鑿法埋管法   | 561 |
| 17-7 管道上的地面載重 | 563 |
| 17-8 所需管強度    | 564 |
| 習 題           | 572 |

## 附 錄

|      |     |
|------|-----|
| 符號說明 | 574 |
| 單 位  | 580 |
| 參考書目 | 582 |
| 習題答案 | 598 |

# 第一章

## 土層的起源及特性

### 1-1 緒 論

地殼 (earth's crust) 係由岩石與土壤所組成。岩石 (rock) 是一種自然礦物顆粒結合而成的聚合體，顆粒與顆粒之間，具有強而久的吸引力，是一種固結 (consolidated) 的物質。土壤 (soil) 係由岩石經過風化或分解作用所產生的固體顆粒經堆積而成，是一種非固結 (unconsolidated) 物質。在工程含意上，土壤也包括動植物，及工業污廢的殘渣在內。

土壤，是由顆粒體 (particulate)，經吸引力或機械力黏結組合而成，只是其結合力要比岩石的顆粒間的結合力為弱。土壤 (岩石) 的顆粒間都有孔隙存在，孔隙中通常含有液體或氣體 (一般為水及空氣)。因此，土壤是由固體、液體、氣體組合而成的一種三相 (three-phase) 物質。

### 1-2 岩石：土壤的母體

無機性土壤，通常是由岩石風化分解而成，因此，岩石通常被認為是土壤的母體。依其起源及形成的方式，岩石可分為三大類：火成岩 (igneous rock)、沉積岩 (sedimentary rock) 及變質岩 (metamorphic rock)。

metamorphic rock)。而土壤的生成，則與岩石的形成方式與礦物的成分有關。

火成岩，是地球內部的岩漿（magma）冷凝而成。由於冷凝速度的不同，火成岩的組織有粗粒、細粒、與玻璃質之分。若岩漿經火山口或其他裂縫口，漫散於地表而迅速凝固者，一般稱為“**迸出岩（extrusive rock）**”或“**火山岩（volcanic rock）**”，其結晶小，常為細粒組織。有時因為冷凝時間很短，未能形成結晶而成玻璃質組織。此類岩石包括玄武岩（basalts）、安山岩（andesites）及流紋岩（rhyolites）。

若岩漿在地面下頗深處緩慢冷凝者，稱為**迸入岩（intrusive rock）**或**深成岩（plutonic rock）**，其結晶大的為粗粒組織。此類岩石包括花崗岩（granites）、正長石（syenites）、閃綠石（diorites）及斑禰石（gabbros）。

地球表面的火成岩其化學成份通常不太穩定。由於暴露在空氣及水中，受到溫度變化與風化作用，岩石礦物會漸漸分解而形成土壤。主要成分為石英（quartz）或正長石（orthoclase）的岩石，通常分解成砂或帶有微量粘土的礫質土\*。花崗岩及流紋岩即屬於此類。由於此類岩石的矽酸（silica）含量很高，因此稱為**酸性岩（acidic rock）**。酸性岩（如花崗岩）是一種很好的建材。岩石含有鐵、鎂、鈣或鈉質及微量矽酸者稱為**鹼性岩（basic rock）**，通常會分解成沉泥（silt）及粘土（clay）。此類岩石有斑禰石、玄武岩及輝綠岩（diabases）等。

通常，酸性岩色淺而鹼性岩色深。若顏色不深不淺者，表示其化學成份介於兩者之間。此類岩石有正長石、閃綠岩、火山岩（trachytes）及安山岩。因為閃綠石及安山石具有特殊的礦物成份，很容易分解成細組織的土壤（fine textured soil）。細組織的土壤（如粘

\*依照工程上的定義；粗粒土壤包括砂與礫，其粒徑大於0.074mm，細組織的沉泥與粘土則小於0.074mm。此0.074mm的尺寸，是正常肉眼所能察出的最小粒徑，大部份的粘土粒徑是小於0.02mm。