

86.11
ZGH

工
程
叢
書

土壤力學與基礎

(增訂版)

C. R. Scott 原著
趙國華 李文勳 郭俊良 譯

中國工程師學會出版

工
程
叢
書

土 壤 力 學 與 基 礎

(增訂版)

C. R. Scott 原著
趙國華 李文勳 郭俊良 譯

中 國 工 程 師 學 會 出 版

原作者序

本書原為應大專土木工程學系學生所需而編。但若干實際的資料，均作成設計圖表，亦包括在本書內。對從事基礎設計與土工結構物工作人員，亦有相當的助益。

筆者在準備編寫本書第一版時，曾立下下列兩個主要企圖。第一，提供讀者以具體的土壤行為——屬於粘土礦物與土壤含水所導致的——。這些內容，要比通常的教科書為詳細。第二，培養讀者對常用的分析方法與設計方法的判斷能力，這一點是非常重要，因為這些方法，都要作若干簡化的假定，不然將無法求得其解。在設計時所引起的嚴重錯誤，極少能自己明白由這些方法所造成的後果。由於學習時未能透徹，以及未能了解當地的地質，或在嘗試運用分析方法解決問題時，未能掌握各種假定的含義與重心，而變成引用不當。在設計基礎與土工結構物時，極大部份，需要工程師在下決策時的判斷力。分析方法不能減輕其責任，但適當的應用，可保證其判斷是基於完整的知識，而非盲目的直覺。

在準備這第二版時，筆者對本書作全盤的修訂。一些數學與文字上的錯誤已予改正，並考慮近代的發展，而稍作修正。在第六章的後半部仍重新改寫，使數學模式與真實土壤間的關係，能有更清晰的概念。第十二章的末部亦已改寫使利用傳統方法預測沉降的信賴度，有最佳的評定，用此方法可獲得更好的結果。新添加的一章，為介紹大地處理法。鑑於使用有限元素法求分析解的最近趨勢，又增加一附錄，簡單的介紹這種方法。

書中附有不少計算例題，作為求解方法的指針。全書說明及例題，均採用國際公制。這種新單位制中絕對重要的是，如何區分重量與質量兩項。本書中的土壤密度的定義，是用重量密度 (weight density) 或單位重量 (unit weight)，(亦即，每單位體積的重力，用 kN/m^3 來計量)。這是比較合乎實用的一個定義。

謝辭 (略)

增訂版刊印誌言

民國六十一年間，曾將荷蘭 Elsevier 書局出版的 C. R. Scott 氏所著的 “an introduction to soil mechanics and foundation” 一書由趙、李兩人合譯，並由中國工程師學會列爲工程叢書刊行以來已再版五次。由於此書內容要言不繁，不尚辭費，字字都有用，句句是細節，故篇幅雖少而內容不缺。若採作教本，可在規定時間內全部教完。惟以科技書籍日新月異，原書刊印已逾五年，向例必需修訂一次，故久候原書新版本以作修改依據而不得。由於該書已改由英國的 Applied Science Publishers 書局再版刊行，輾輾經年始行購得原書，另約請郭俊良碩士將修改增訂部分全部譯出，經重新編校排版問世，使本書仍能保持常新的內容。有關新版增修的說明，原作者的序文中已有詳細說明不再重述。

此次新版中內容約增加三十餘頁。但仍未附每章習題以利研習，這是因爲習題一經固定，便有解題書發行的困擾，使學生失去自測其瞭解該書能力的機會，故通常由老師另行分發習題以資補救。有關土力與基礎命題彙編的刊印，科技圖書公司正在編譯中，不久即可問世，籍供選擇。

譯校者 趙國華誌

六十七年六月六日

符 號 解 釋

本書中所用主要符號，分別解釋如下：

- A 氣隙比；面積；孔隙壓力係數
- α 面積
- B 寬度；孔隙壓力係數
- b 寬度
- C_e 壓縮指數；彎曲係數
- c 外視凝聚力（以總應力計）
- c' 外視凝聚力（以有效應力計）
- c_u 不排水情形下之外視凝聚力（以有效應力計）
- c_e Hvorslev 氏真凝聚力
- c_v 壓密係數
- D 深度；直徑
- d 深度；直徑；排水路長度
- E 楊氏模數
- e 空隙比
- e_c 臨界空隙比
- F 安全因數
- F_e 對凝聚力安全因數
- F _{ϕ} ' 對摩擦力安全因數
- G_s 土粒比重
- H 高度
- h 水頭
- I_s 基礎下應力影響係數
- I_f 基礎沉陷影響係數
- i' 水力比降
- K 橫向土壓係數
- K_a 自動土壓係數
- K₀ 靜止土壓係數

K , 被動土壓係數
 L 長度
 ℓ 長度
 LI 液性指數
 $LL(w_e)$ 液限
 m , 體積變更係數
 N_e, N_q, N , 承載量係數
 n 孔隙率
 P 力
 PI 塑性指數
 $PL(w_p)$ 塑限
 p 壓力
 p_a 自動土壓力
 p_c 預壓密壓力
 p_o 現超載壓力
 p_p 被動土壓力
 q 流率
 q_a 基礎之許可承載力
 q_f 基礎之極限承載力
 q_o 地面超載重
 q_n 基礎淨壓力
 RD 相關密度
 r 半徑
 f_a 孔隙壓力比
 S_r 飽和度
 T 扭矩
 T_o 時間因數
 t 時間
 U , 壓密度
 $\bar{U}$ 平均壓密度

u	孔隙壓力
u_a	孔氣壓力
u_w	孔水壓力
V	體積
v	速度
W	重量
w	含水量
X	x 軸向之軸體分力
Z	z 軸向之軸體分力
β	坡角
γ	總體密度 (重量密度)
γ'	沒水密度 (重量密度)
γ_d	乾密度 (重量密度)
γ_w	水密度 (重量密度)
δ	牆背摩擦角
ϵ	應變
η	動滯性
ν	Poisson 比
ρ	沉陷量
σ	總正應力
σ'	有效正應力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主正應力
τ	剪應力
τ_f	剪力強度
τ_{max}	最大剪力強度；最大剪應力
τ_{res}	殘餘剪力強度
Φ	能函數
ϕ	剪力抵抗角 (依總應力計)
ϕ'	剪力抵抗角 (依有效應力計)
ϕ_u	不排水情形下剪力抵抗角 (依總應力計)
ϕ_o	Hvorslev 氏真摩擦角
χ	不飽和土之有效應力定義用係數
Ψ	流函數

目 錄

原作者序	一
譯校者言	二
目 錄	三
符號解釋	七

第一章 土壤之分析與分類

第一節 土壤與土壤之形成	1
第二節 土壤成份及其性質	2
第三節 指數試驗	6
第四節 土壤分類法	11
第五節 含水量與密度	16
第六節 壓實	24

第二章 粘土礦物

第一節 電化力	31
第二節 粘土礦物之基本結構	32
第三節 雙層礦物 — 高嶺土類	34
第四節 三層礦物	35
第五節 吸附作用與鹽基置換	38
第六節 粘土結構	40
第七節 對於工程性質之影響	42
第八節 起源與發生	44

第三章 孔隙壓力、有效應力與吸力

第一節 孔隙壓力與有效應力	47
第二節 由總應力變化而起之孔隙壓力變化	50
第三節 土壤吸力	52

第四章 滲透性與滲流

第一節	土壤之滲透性	61
第二節	滲透性之測定	64
第三節	就地透水試驗	68
第四節	疊積層土壤之滲透性	74
第五節	穩定之滲流	77
第五章 壓密		
第一節	壓密過程	97
第二節	壓密沉陷量之大小	101
第三節	壓密速度	108
第六章 土壤之剪力強度		
第一節	土壤之剪力破壞	123
第二節	土壤之剪力強度試驗	128
第三節	破壞準則	142
第四節	土壤之剪力強度	151
第七章 地基調查與原地試驗		
第一節	規劃	159
第二節	開挖與鑽探方法	162
第三節	採樣方法	164
第四節	原地試驗	167
第五節	地球物理法	172
第六節	記錄與報告	176
第八章 土體之破壞條件		
第一節	連續體之應力與應變	181
第二節	穩定分析	185
第三節	土體內部之主動與被動側壓力	190

第九章 側向土壓力

第一節	極限狀態分析	199
第二節	用 Rankine 法求擋土牆上之土壓力	200
第三節	作用於擋土牆上之側壓力——Coulomb 分析法	207
第四節	重力式擋土牆之穩定性	217
第五節	板橋牆之穩定性	220
第六節	用土土漿作壕溝之臨時支撐	230

第十章 斜坡之穩定

第一節	破壞面與安全因數	235
第二節	無粘性土壤之斜坡	236
第三節	粘性土壤之斜坡——總應力分析法	239
第四節	粘性土壤之斜坡——有效應力分析法	248
第五節	實際問題的應用	260

第十一章 基礎之承载力

第一節	基礎之破壞	265
第二節	帶狀基礎置在地平面上的極限承载力	267
第三節	基礎之深度與形狀之影響	272
第四節	容許承載壓力	276
第五節	實際問題之應用	278

第十二章 基礎之沉陷

第一節	沉陷分析	283
第二節	表面承受載重下半無限彈性介質內部之應力	284
第三節	承受載重之彈性固體的表面變位	296
第四節	結構物之沉陷	298

第十三章 樁基

第一節 樁基之型式	313
第二節 單樁之承载力	316
第三節 樁群之承载力	322

第十四章 大地處理技術

第一節 土壤性質的改良	327
第二節 夯實與預壓	327
第三節 排水方法	331
第四節 灌漿法	337
第五節 表面土壤穩定	343

附錄 A 有限元素法

A.1 概論	347
A.2 二維地下水流的有限元素法分析	347
A.3 有限元素與結點	347
A.4 元素矩陣	348
A.5 總體矩陣	350
A.6 邊界條件與解答	350
A.7 彈性聯體中位移的有限元素分析	351
A.8 位移與應變	352
A.9 彈性矩陣	353
A.10 結點力	354
A.11 總體矩陣	354
A.12 邊界條件與解答	355

第一章

土壤之分析與分類

第一節 土壤與土壤之形成

1.1 工程土壤 (engineering soils)

地球表面之大部份與部份之海床，覆蓋着一層粒狀體的堆積物，此堆積物主要是由岩石經破壞與分解而形成的。此種堆積物完全保持不凝結，或非常輕微地凝結而未改變其基本顆粒性質者，以及因開挖而被破碎的凝結材料。吾人均稱之為土壤 (soils)。一般在工程意義上，用以區別土壤與岩石者，即此顆粒或粒狀的性質。

1.2 土壤之形成 (soil formation)

土壤形成之過程異常複雜，但在此處，僅需考慮其直接影響最後生成者的工程性質。大部份土壤，由於風化過程的結果，由岩石之破碎作用而形成。風化過程可分為機械性的或化學性的。機械性風化作用 (mechanical weathering)乃因物理性的外營力而引起母岩之破碎作用，例如因溫度應力或結冰作用所引起者。由岩塊之冷卻，或接近地表面處每日溫度變化之結果所引起的溫度應力而導致破裂。若水滲入此等裂縫若接着凍結，則發生漲裂而使裂縫更大，直至最後，岩塊破裂成為碎片。依同樣之過程，此等岩片再經破壞而成越來越小的碎粒。在乾燥氣候裏，為強風所携運之碎粒的衝擊，亦可能引起岩石表面的快速侵蝕現象。

經機械性風化作用留下未發生變化的材料之結晶構造，明顯地與母岩的構造相一致。相反地，受化學性風化作用 (chemical weathering) 之產物，乃由水、氧或由溶解於土壤水份中的鹼類或酸類侵蝕岩石礦物的結果。由表層土內的空氣與有機物所產生的二氧化碳，乃為此種溶解酸類的一般來源。

粘土礦物，為一組主要由矽酸鋁所組成的複雜結晶材料，但亦含有其他材料。它們主要是化學性風化作用的產物。雖然有證據顯示它們有時因水熱作用 (hydrothermal action) 而形成的 (意即，因地

下熱與水之聯合作用)。它們的結晶構造，主要決定於它們在形成時的氣象條件，而不需要反映母岩的結晶構造。

機械性與化學性風化過程常同時發生，因此大部份的天然土壤，兼含主要(岩石)礦物與粘土礦物，雖然粘土礦物所佔比例可能很小。經風化後的材料可能被遷移至溪流與河道，因此它將沉積於湖沼或海洋中，或沿河道隨處沉積。能被流水攜帶遷移之顆粒大小完全依水之流速而定。由於河流速度變化，大小不同之顆粒可能沉積於不同的位置。此種現象可造成某種顆粒的一致性，使存在於任何一層內的顆粒可能屬於同一大小者佔着優勢。依此法在搬運期間，顆粒常遭受相當的磨損，破碎成較小的尺寸，並常獲得比較平滑的表面或更圓整的形狀。

冰河與移動的冰層，亦能搬運土粒離開原地，但其效果與流水遷移者頗為不同。一方面，非常大的石塊，可能被拖離原岩表面，並被搬移很遠的距離；在另一極端，於流動冰層之底層石頭竟被舉起，由於拖越岩石過程使岩石磨損，而產生非常細的岩粉(rock flour)。被移動冰層所搬移的土壤，當冰層溶解時立即沉積，而形成堆石(moraines)。此等沉積物，像有意堆積似的停留着。它們包含着粒徑範圍廣泛而密切混合在一起的粒料。另一方面，一部份的土壤被溶解的冰水，搬移至他處，而流入河流系統去。

過濾作用(leaching)，由於地面水滲流入地層內而起作用，可能——特別在熱帶環境條件下——產生廣大的風化粒料床層，由於埋在地層內部不復受侵蝕作用和搬運作用。此種材料，稱為殘積土(residual soil)。接近地面之處，岩石可能幾乎完全改變其礦物形式，但在離地面較深處，該項改變將越來越不完全。

第二節 土壤成份及其性質

1.3 土壤成份 (soil constituents)

任何土樣，將被發現含有下列某些或全部的成份：

a. 固相 (solid phase)：

1. 主要岩石礦物

2. 粘土礦物

3. 土粒間粘結劑

4. 有機物

b. 液相 (liquid phase) :

1. 水

2. 溶解的鹽類

c. 氣相 (gaseous phase) :

1. 空氣 (和有時為其他氣體)

2. 水蒸氣

所有這些均為土壤的組成部份，並且全部或大小都將影響其工程性質。

1.4 主要岩石礦物 (primary rock minerals)

這些礦物乃由母岩破碎而成的岩片。它們通常相當大，很少小於直徑 0.002 mm 者，雖然有些冰原 (glacial origin) 土壤內含有很小顆粒的岩粉。該項顆粒通常為圓球形或稜角狀。

此種由顆粒所形成土壤礦物的主要部份 (例如在礫石與砂土)，其工程性質主要決定於級配狀態 (意即粒徑的變化) 與充填的緊密度。此兩因素間多少是相依關聯的，因為若顆粒全部為同一大小，就不可能將它們充填得緊密。若有一自最大粒徑至最小粒徑的良好級配，則較小的顆粒能被用來填充較大顆粒間的空間。這種填充粒料，因為顆粒的銜合 (interlocking) 作用，具有低壓縮性及高剪力抵抗。顆粒的形狀與組織，對於性質上具有若干影響。但與礦物的組成則不相干。

1.5 粘土礦物 (clay minerals)

這些礦物，主要是化學風化作用的產物。顆粒非常微小，其主要尺寸很少大於 0.002 mm，且常小得更多。它們普通呈頁片形式 (雖然針狀的、管狀的或棒狀的可能存在)，且在某些情形，它們僅有幾

表-1.1 土粒之比表面之代表值

粘土礦物	m ² /g
高嶺土 (Kaolinite)	5 to 30
伊利土 (Illite)	50 to 100
蒙脫土 (Montmorillonite)	200 to 600
清淨砂	2×10^{-4}

個分子的厚度。所以，它們具有很大的表面積。表面積是用比表面（specific surface）來表示——意即材料的單位重內的表面積——此法最為方便。表 1.1 所示為若干種粘土礦物的比表面的代表值。

1.6 土粒間粘結劑 (intergranular cement)

有些土壤內部，含有相當量的粘結料（例如方解石、氧化鐵或砂土）沉積在土粒的表面上。此種粘結料可能起源於溶解的鹽類，而此鹽類係因土壤水份由別處引進，或由於滲水的過濾作用將土壤礦物起破碎作用的殘留產物。任一情形，此種礦物質形成顆粒間的一種粘結料，增大了土壤的剪力強度，和減少土壤的壓縮性。

1.7 有機物 (organic matter)

土壤中的有機物，係由植物或動物的遺骸所造成。通常積存在土壤的頂部厚在 0.3 至 0.5 m 處，但在滲透性土壤內部，經過過濾作用，可能將它滲透移至更深遠處。相反地，泥炭堆積物可能產生在相當深度處，但在該處，當正常的分解過程中，因缺乏空氣而受到了阻礙。

土壤中的新鮮有機物，在空氣中容易受到細菌的侵襲。此種侵襲的最後產物，為一羣非常複雜的有機混合物，統稱為腐植土 (humus)。所有這些有機物，皆具有工程結構上所不希望有的性質。茲將這些性質摘要說明於下：

- a. 有機物將吸收大量的水份（高達其本身重量的五倍）。因水份被排出，作用於粒料上的壓力增大，乃引起巨大的體積變化。因此，在一甚為和緩的荷重增加下，3 m 厚的泥炭層可能下陷 0.5 m 深。若將荷重除去，亦將發生相當大的膨脹現象。利用排水法將地下水位降低，亦可能引起土壤體積的減小，與土地的全盤沉陷。
- b. 此種土壤具甚小的剪力強度，並將影響到其他相當大的部份之土壤的強度。
- c. 腐植土具有一很大的鹽基置換能力。（此項能力的意義將於第二章解釋之）。
- d. 有機物的存在，能阻止粘結料的凝固。具高度之有機土，不能用粘結料使其穩定化。

能被容忍的有機物含量；決定於有機物的性質與對土壤所要求之目的。在高酸性條件下所產生的腐植土，通常對阻止粘結料之凝固性，具有最重大的影響。一般有機物含量在 0.5 % 以下者，未必影響到粘結料的凝固；含量在 2 % 至 3 % 者，將重大地改變土壤的力學性質。

1.8 水

土壤的含水量變化，為工程性質變化中最大的單一原因。剪力強度，壓縮性與滲透性，皆直接或間接地與含水量有關。

與結晶邊界 (crystal boundary) 處的電化力 (electro-chemical forces) 的結合，孔隙水 (pore water) 在決定粘土礦物的特殊性質時，將扮演一重要的角色。此等特殊性質的理由與影響，將在下章中作詳細的討論。

吾們必須記住，水份與固體的土粒同樣，佔土壤的大部份。雖然水份不能承受剪應力，但能支持一個正壓力，並且此壓力常為主壤所承受應力中的重要部份。作用在土壤之總應力的增大（除非土壤內能自由的排水），常引起土粒間的接觸壓力與孔隙水內之壓力兩者間的變化。當討論土壤內部應力時，兩種效果均須加以考慮。

局部飽和土壤的內部，在孔隙內的空氣與水之內部界面上有表面張力存在。孔隙空氣與孔隙水內的壓力，通常並不一樣。

1.9 溶解的鹽類 (dissolved salts)

凡水流經過土壤之處，水能攜帶溶液中的鹽類。依工程觀點，這些鹽類中最重要的是硫酸鹽，因它對混凝土具有破壞效果。硫酸鈉與硫酸鎂比較少見，但因它們具較大的可溶性，故比較危險。

土壤內含水，可容忍的硫酸鹽離子之集中現象，將依與該離子接觸的混凝土結構物之性質。詳細的說明可參閱參考文獻 [1.1]。

1.10 空氣

全部土壤為不完全飽和（意即土粒間的孔隙未完全充滿水份）。即使重粘土（heavy clay soil）亦可能含有高達 1 % 或 2 % 的空氣孔隙。孔隙內空氣量較小（約少於孔隙的 15 %）之處，空氣在土壤內部主要保持着小氣泡的形式。由表面張力保持這些氣泡安於其位，而且它們不易排除。因空氣具有壓縮性，故飽和度的不足，對於體積變化與孔隙壓力變化，具有相當大的影響。而這些變化，係由外部作用的荷重之變化所引起。

空隙內含有較高比率的空氣處，土內空隙將連續地通過整個土體，並且很容易的被排除。作一土壤夯實結果（意即土粒間受到強制的重新排列成一較小的體積），土內的空氣可能續被驅逐。此種作用將導致地表面的大量沉陷，亦可利用水的流充空隙，以排除空氣，但將引起剪力強度的減小，特別是粘土情形。

1.11 水蒸氣 (water vapour)

在局部飽和的土壤內部，孔隙內的空氣之相對濕度甚高。由於溫度的差異或其他原因，蒸氣壓力可能隨處變化。若飽和度低，以致空氣空間成為連續性的，則所含水份將以水蒸氣的形式，作相當大的移動。

第三節 指數試驗

1.12 粒徑分析與 Atterberg 限度試驗 (particle size analysis and the Atterberg limit tests)

依土壤與土壤粒料之不同的觀點，工程師們久已認為有簡單地記述土壤性質的需要，使它們的工程性質，能被迅速地評定。為此目的而發展的試驗，稱為指數試驗 (index tests)。茲分述於下：

a. 決定級配用之粒徑分析

這個分析，容許吾們作粗粒土壤的工程性質之估計。

b. Atterberg 限度試驗

是一系列的經驗試驗，由這些試驗可估計細粒土壤的工程性質。試驗方法將於下面的 1.16 節中說明之。