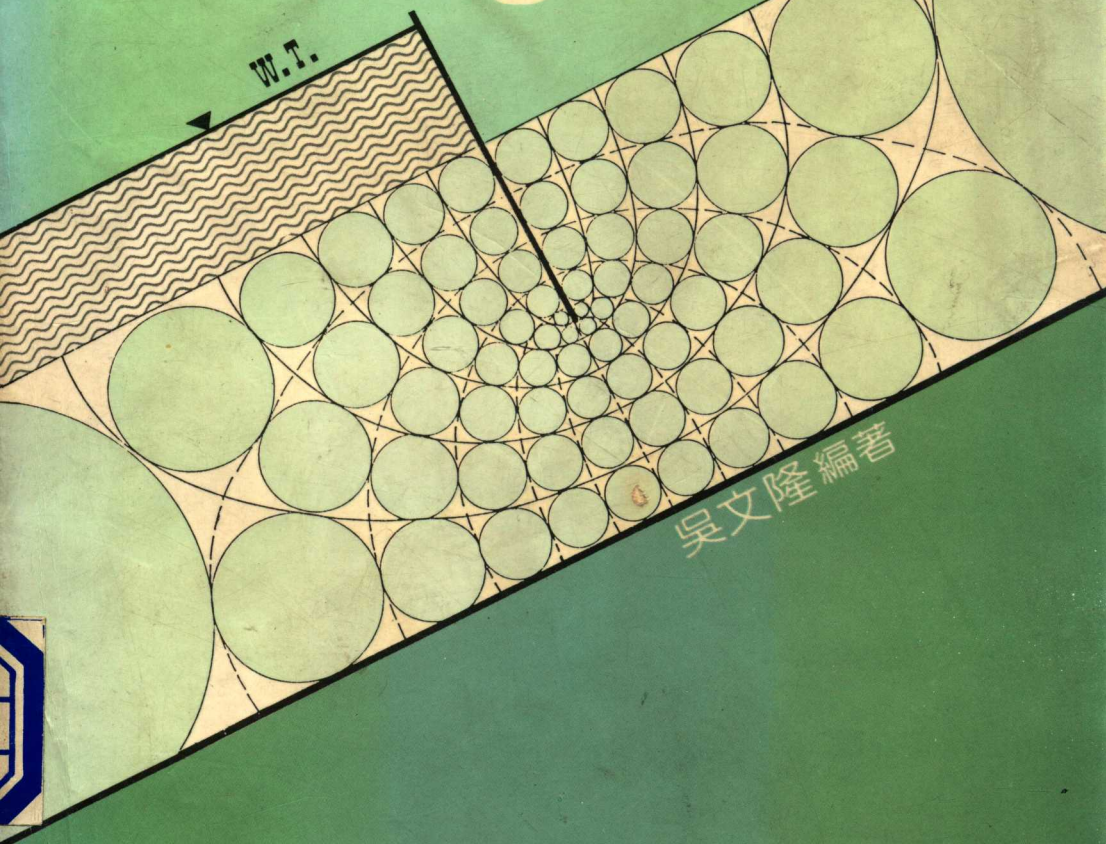


大地工程學

Geotechnical
Engineering



吳文隆編著

九 樺 出 版 社

吳文隆

國立臺灣工業技術學院

國立臺灣大學土木研究所大地工程組

土木工程普考、高考及格

土木技師、結構技師

版權所有



翻印必究



編著者：吳文隆

住址：臺北市南昌路一段 161 號 2 樓

發行所名稱：九樺出版社

發行人：陳木生

地址：臺北市南昌路一段 161 號 2 樓

印刷廠：欣文印刷打字有限公司

總經銷：九樺出版社

住址：台北市南昌路一段 161 號 2 樓

郵撥：0112514-2 號

台北市私立九華土木建築短期職業補習班

定價：新臺幣 360 元整

三版日期：78 年 8 月 1 日

• 巫 序 •

吳先生以本書的原稿約我寫序時，我發現他寫作的範疇與我的想法非常接近，能夠將切實可靠的資料以深入淺出的方式貢獻出來，使讀者最易犯的錯誤完全予以糾正，個人內心感到十分的欣慰與讚佩，看完全書之後，讓人有愛不釋手的感覺，因為它包括了如下幾個特色：

- (1) 全書內容相當豐富，取材範圍廣，而且資料很新，難能可貴的是在系統整理方面更是井然有序，看了之後一目了然。
- (2) 搜集業界很多實務問題，各種考題資料，以最親切的手法來配合，完全掌握大地工程學之核心，尤其結論方面更是扣人心弦，使人有柳暗花明又一村的感覺。
- (3) 文筆流暢生動，寫活了大地工程這門學問的真諦，對初學者易於正確導向，對已經具有某種程度的人而言，更容易使其更深入地加強觀念。

由於具有上述的特點，個人願意誠心的推薦本書給工程界、各大專院校當作教材或參考資料，又由於書中每一章節均具有連貫性，聲息相通，理論及實務並重，使讀者容易融會貫通，實為一本難得的好書。在此希望各位工程界之前輩、學者專家能夠給予文隆先生更好的建議，使此書明天會更好，更完美。

巫垂晃 74 年 11 月

· 自 序 ·

大地工程學是一門相當年輕的科學，由於許多理論尚未建立，因而充滿著許多未知數，所以屬於一種半理論半經驗的科學，這與其他學科來講是有所不同。面對著一大堆的經驗公式，如何適宜地採用其參數，以安全且經濟地處理大地工程的問題，是我們研習的鵠的。

坊間有關大地工程方面著作甚多，各家學說紛紜，加上所採用之專有名詞與符號均不相同，前後不連貫，徒增學習過程中的困難。筆者有鑑於此，乃理首著作，採擷中外名著的優點，融入當前大地工程的理論與觀念，以輕鬆的筆調，深入淺出地說明，並配合簡單的圖表，來探討土壤的工程性質，了解土壤與水之間的互制行為，以及土壤與結構物的關係，使您知其然，也知其所以然，來建立大地工程之基本理論，啓發觀念，使您能有效地應用。故“教之以技，而不施之以物”是本書的特色。

本書共分十四章，依序為土壤指數性質與分類、土壤結構與粘土礦物、土壤的滲透性與滲透性分析、孔隙水壓與有效應力、土壤的壓密與沈陷、土壤的剪力強度、側向土壓力、邊坡穩定分析方法、土壤承載理論、淺基礎、樁基礎、擋土結構、土壤改良以及工址調查，除原理闡述外，所附之例題均具代表性；而重點整理與習題精解，是當前土木、結構技師、研究所考試的趨勢。

首先感謝林晉祥教授給予筆者在學期間，許多觀念的啓發與研習的態度。本書之編成承蒙主任陳木生先生之指導與大力鼎助，巫垂晃老師之指導與提供寶貴意見，以及好友李政緯兄精心的封面設計，在此一併致謝。

筆者才疏學淺，雖全力以赴，校稿再三，誤謬處在所難免，尚望學界先進不吝指教，是所至盼。

吳文隆

1985 年冬於台北

• 再版序 •

本書自出版以來，深受工程界與學術界的採用，熱烈的迴響，所以不到一年內，初版已售罄，回顧這一年來，接獲許多工程界的先進、與學者、專家來函指正，使筆者獲益良多，藉此次再版時，深表謝意。

筆者熱衷於大地工程，憑著一股傻勁，孜孜不倦於大地工程的理論探討、設計與施工實務。很榮幸能夠參與鐵路地下化工程、台北都會區大眾捷運系統工程、興達港液化天然氣貯槽工程、第二高速公路以及台北近郊衛生下水道工程……等等國家重大工程建設，深知不論任何工程均牽涉到大地工程的問題，由於大地工程是一種藝術（State of the Art），往往為了使工程既安全且經濟，以致土壤或岩石的諸參數的選用，或安全係數的採用，均煞費腦筋，但都能以理論為基礎，配合施工的經驗，加上學理的平均，來克服未知數。誠如Focht所說：「We know that we don't know.」這就是大地工程師可愛的地方。

此次再版一方面更正初版謬誤之處，另一方面酌添幾個章節，散見於各章，並配合最新的大地工程的習題，以收研習心得之提昇。筆者戒慎為之，猶恐能力不逮，不周之處，冀望各位工程界前輩繼續指教。

吳文隆

1987年冬於台北

第一章 土壤指數性質與分類

本章提要

- 1.1 土壤的生成
- 1.2 土壤指數性質與分類的目的
- 1.3 土壤的基本性質
- 1.4 土壤性質試驗
- 1.5 土壤的指數性質
- 1.6 土壤的分類
- 1.7 觀念啓發
- 1.8 重點整理與習題精解

1. 黏稠性質：了解土壤受載重後變形狀況。
 2. 剪力強度性質：了解土壤的各種狀態下之剪力強度。
 3. 滲透性質：了解土壤內水移動與土壤排水問題。
- 其流程圖如下：



1.1 土壤的基本性質

1.1.1 土壤的生成

目 錄

第一章 土壤指數性質與分類

1.1	土壤的生成	1
1.2	土壤指數性質與分類的目的	1
1.3	土壤的基本性質	1
1.4	土壤性質試驗	3
1.5	土壤的指數性質	11
1.6	土壤的分類	15
1.7	觀念啓發	21
1.8	重點整理與習題精解	21

第二章 土壤結構與粘土礦物

2.1	概述	31
2.2	非粘性土壤結構	31
2.3	粘土礦物	34
2.4	粘土礦物構造與工程性質	37
2.5	粘土礦物對工程性質之影響	38
2.6	觀念啓發	39
2.7	重點整理與習題精解	40

第三章 土壤的滲透性與滲透分析

3.1	土壤中水之行爲	45
3.2	毛細管的現象	45
3.3	達西定律	48

3 . 4	滲透性係數之測定.....	50
3 . 5	影響滲透係數之因素.....	55
3 . 6	管內之層流	57
3 . 7	疊層土壤滲透性係數.....	59
3 . 8	滲透理論.....	63
3 . 9	流線網之繪製與應用.....	65
3 .10	管湧防止.....	68
3 .11	觀念啟發.....	71
3 .12	重點整理與習題精解.....	71

第四章 孔隙水壓與有效應力

4 . 1	總應力，有效應力及孔隙壓力的關係.....	87
4 . 2	有效應力原理.....	89
4 . 3	飽和土壤的有效應力及孔隙壓力.....	94
4 . 4	毛細水份負壓力之影響.....	96
4 . 5	粘土層之長、短期效應.....	99
4 . 6	臨界水力坡降與土壤液化.....	101
4 . 7	外加载重造成地中應力.....	107
4 . 8	觀念啟發.....	115
4 . 9	重點整理與習題精解.....	115

第五章 土壤之壓密與沈陷

5 . 1	壓縮與壓密.....	127
5 . 2	壓密理論及試驗.....	127
5 . 3	壓縮與沈陷.....	130
5 . 4	工地壓密曲線之應用.....	134
5 . 5	壓密與時間.....	136
5 . 6	壓密試驗與壓密係數.....	144
5 . 7	即時沈陷.....	149

5 . 8	觀念啓發.....	150
5 . 9	重點整理與習題精解.....	150

第六章 土壤的剪力強度

6 . 1	垂直應力與剪應力.....	167
6 . 2	土壤之剪力強度.....	171
6 . 3	破壞理論.....	172
6 . 4	剪力強度試驗.....	174
6 . 5	飽和粘土之剪力強度.....	181
6 . 6	粗粒土壤之抗剪強度.....	188
6 . 7	經驗公式與現場試驗.....	191
6 . 8	粘土之靈敏度.....	193
6 . 9	剪力強度參數之應用.....	194
6 . 10	應力軌跡.....	195
6 . 11	觀念啓發.....	198
6 . 12	重點整理與習題精解.....	199

第七章 側向土壓力

7 . 1	土壓力之種類.....	213
7 . 2	土壤之極限平衡狀態.....	214
7 . 3	Rankine 土壓力理論.....	216
7 . 4	Coulomb 土壓力理論.....	224
7 . 5	泥漿牆穩定性分析.....	228
7 . 6	加勁土壤及其施工法.....	231
7 . 7	觀念啓發.....	237
7 . 8	重點整理與習題精解.....	238

第八章 邊坡穩定分析方法

8.1	邊坡破壞的原因	249
8.2	邊坡穩定之安全係數之選擇	249
8.3	邊坡破壞的種類	251
8.4	邊坡穩定分析方法	253
8.5	無限邊坡	254
8.6	平面破壞分析法	265
8.7	粘性土壤之邊坡—總應力分析法	268
8.8	粘性土壤之邊坡—有效應力分析法	280
8.9	層狀土壤的滑動破壞	289
8.10	坍方之防止與控制方法	294
8.11	觀念啓發	296
8.12	重點整理與習題精解	297

第九章 土壤承载力與基礎沈陷

9.1	基礎破壞	305
9.2	土壤承载力定義	305
9.3	基礎下面土壤內部之塑性平衡	307
9.4	基礎破壞之型式	308
9.5	極限承载力理論	310
9.6	極限承载力影響因素	316
9.7	砂性土層之容許承载力	320
9.8	開挖與隆起	332
9.9	基礎與土壤之互制	338
9.10	觀念啓發	340
9.11	重點整理與習題精解	341

第十章 淺基礎

10.1	基礎的種類	357
10.2	基礎型式選擇	358

10.3	淺基礎的種類	360
10.4	單獨基脚	361
10.5	聯合基脚	362
10.6	懸臂基脚	368
10.7	筏式基礎	369
10.8	浮筏式基礎	373
10.9	觀念啓發	378
10.10	重點整理與習題精解	379

第十一章 樁基礎

11.1	樁基礎的目的	385
11.2	樁基礎設計要求	386
11.3	樁基礎的分類	386
11.4	單樁承載力估計	387
11.5	動力公式估計承載力	398
11.6	樁之負表面摩擦力	410
11.7	群樁承載力之估計	412
11.8	承受彎矩或偏心荷重之群樁基礎	417
11.9	群樁基礎之沈陷量估計	419
11.10	觀念啓發	422
11.11	重點整理與習題精解	423

第十二章 擋土結構

12.1	擋土結構物之種類	435
12.2	擋土牆的功用與設計	435
12.3	版樁牆	442
12.4	懸臂式版樁	443
12.5	錨式版樁	446

12. 6	支撐式版樁·····	449
12. 7	觀念啓發·····	459
12. 8	重點整理與習題精解·····	460

第十三章 土壤改良

13. 1	土壤改良·····	473
13. 2	置換工法·····	473
13. 3	現場土壤之物理改良工法·····	474
13. 4	現場土壤之化學改良工法·····	477
13. 5	地下灌漿法·····	477
13. 6	土壤夯實理論·····	478
13. 7	影響土壤夯實之因素·····	483
13. 8	夯實對粘土工程性質之影響·····	485
13. 9	工地夯實·····	487
13.10	觀念啓發·····	490
13.11	重點整理與習題精解·····	491

第十四章 工址調查

14. 1	工址調查的主要目的·····	499
14. 2	工址調查之分段·····	499
14. 3	各種工程之主要調查項目·····	500
14. 4	擬判工址調查的風險·····	502
14. 5	工址調查方法·····	503
14. 6	現場試驗·····	506
14. 7	現場觀測·····	513
14. 8	工址調查報告·····	516
14. 9	觀念啓發·····	517
14.10	重點整理與習題精解·····	518

1.1 土壤的生成

土壤是指地球外殼之火成岩、水成岩或變質岩等岩石，經風化作用所形成之疏鬆或不甚堅實的沈積物或堆積物，如卵石、礫石、砂、粘土及有機物等。土壤的全部成分，不但包括固體顆粒本身，尚包含其孔隙內所充滿的水份，水中溶解的鹽類及孔隙中的空氣。

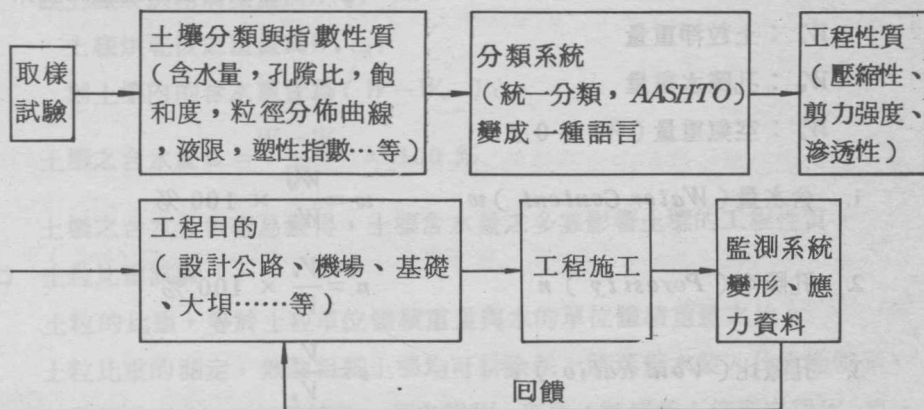
1.2 土壤指數性質與分類的目的

土壤是一種極為複雜的材料，而任何一種工程皆與土壤有關，為使工程設計與施工，能達到安全性、經濟性、耐用性，工程師必須了解土壤性質，並加以分類，而得到土壤的工程性質，為設計之依據。

土壤工程性質包括下列幾項：

1. 壓縮性質：了解土壤受載重後變形狀況。
2. 剪力強度性質：了解土壤的各種狀況下之剪力強度。
3. 滲透性質：了解土壤內水滲透與土壤排水問題。

其流程圖如下：



1.3 土壤的基本性質

(一) 組成土壤之三態：

固態包括岩石礦物，粘土礦物，粒間粘結劑及有機物。

液態包括水份及溶於水中之離子。

氣態包括空氣、水蒸氣。

土壤由複雜物質組成，結構變化很大非連體，故嚴格說土壤不適用於所有連體力學 (*Continuous Mechanics*) 。

(二) 名詞與定義

如圖 1.1 所示，為土壤體積成份圖，稱為土塊圖 (*Block Diagram*)，這種表示方法只是一種假想，為了方便計算與了解。事實上，固、液、氣體不能完全分離。

V ：土壤總體積

V_s ：土粒淨體積

V_v ：孔隙總體積

$$(V_v = V_w + V_a)$$

V_w ：孔隙水體積

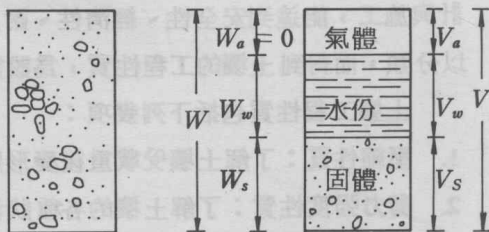
V_a ：孔隙空氣體積

W ：土壤總重量

W_s ：土粒淨重量

W_w ：孔隙水重量

W_a ：空氣重量 ($W_a \doteq 0$)



(a) 原土實樣

(b) 土壤成份示意圖

圖 1.1 土壤體積與重量間關係

1. 含水量 (*Water Content*) w

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \%$$

2. 孔隙率 (*Porosity*) n

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \%$$

3. 孔隙比 (*Void Ratio*) e

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

4. 飽和度 (*Degree of Saturation*) S

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \%$$

飽和度大小影響土壤工程，尤其是粘土。

5. 乾土單位重 (*Dry Unit Weight*) γ_d , $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$
6. 統體單位重 (*Gross Unit Weight*) γ_m , $\gamma_m = \frac{W}{V}$
7. 土粒單位重 (*Unit Weight of Solid Particles*) γ_s , $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$
8. 飽和單位重 (*Saturated Unit Weight*) γ_{sat} , $\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w$
9. 浸水單位重 (*Submerged Unit Weight*) γ_{sub} , $\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$
10. 土粒比重 (*Specific Gravity of Solids*) G_s , $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

1.4 土壤性質試驗

(一) 含水量試驗

含水量 (*Water Content*) 為土壤內之含水重量，與經過 24 小時置在溫度 105 °C 的烘箱中，烘乾後的乾土重量之比。

設土樣未烘乾前重量為 $W_{(g)}$

土樣烘乾後之重量為 $W_{s(g)}$

則土壤內的含水重量為 $(W - W_s)_{(g)}$

土壤之含水量 $w = \frac{W - W_s}{W_s} \times 100 \%$

土壤之含水量很容易獲得，土壤含水量之多寡影響土壤的工程性質。

(二) 土粒比重試驗

土粒的比重，等於土粒單位體積重量與水的單位體積重量之比。

土粒比重的測定，無論粗細土壤均可排除法。將蒸餾水裝入比重瓶使滿，加熱至溫度 20 °C 加蓋抹乾，秤之得 W_1 克重。將烤乾土樣秤之得 W_s 克，放入比重瓶內（此時瓶內的蒸餾水只留三分之一）然後將比重瓶加熱煮沸，使土內空氣排除，俟其冷卻再補充蒸餾水裝滿加蓋，仍使其保持溫度 20 °C，秤之得 W_2 克，則被土壤排出的水重量為 $(W_1 + W_s) - W_2$ 。

$$\text{則 } G_s = \frac{W_s}{(W_1 + W_s) - W_2}$$

若土內含有易溶物質，不能用蒸餾水時，可改用其他液體，設其比重為 G ，則土粒的比重為

$$G_s = \frac{W_s}{(W_1 + W_s) - W_2} G$$

粗粒土壤用上法測定所得結果頗易正確。細粒土壤，尤其含有機質者，其試驗結果常有出入，應多試幾次，取其平均值。

例如已知，充滿水之比重瓶的質量 (W_1) = 1.734 Kg

乾土樣的質量 (W_s) = 0.391 Kg

含土壤試樣且充滿水的比重瓶質量 (W_2) = 1.980 Kg

則

$$\begin{aligned} G_s &= \frac{0.391}{(1.734 + 0.391) - 1.980} \\ &= 2.70 \end{aligned}$$

大多數常見的主要礦物，其比重在 2.55 至 2.75 範圍之內，其平均值為 2.65。粘土礦物的 G_s 值通常稍大，約在 2.70 至 2.85 範圍之內，其平均值為 2.75。

(三) 單位重試驗

單位重乃單位體積內土壤重量，在實驗室測定時，通常測定已知體積的容器內之土壤重量，如透水、壓密、剪力、夯實等試驗之試體。野外測定方法、砂錐法 (Sand Cone)、橡皮膜法 (Rubber Ballon Method)。

(四) 粒徑分析試驗

土壤粒徑分析試驗包含兩種方法：

1. 篩析法 (Sieve Analysis)：使用於粗粒土之粒徑分析，係將土樣通過一組十盒的不同的篩號，分別計算停留各篩內的土重。

2. 比重計分析 (Hydrometer Analysis)

(1) 斯篤克定律 (Stoke's Law)

土粒採用篩分析，因銅篩製造技術關係，其孔徑僅小至某一定限度，如超出此限度，則無法應用。通常土粒小於 0.074 mm 者，即通過泰勒氏標準篩及美國標準篩 # 200 者，將採用比重計分析法。

比重計分析法，亦稱沉澱分析法，係根據流體力學中之斯篤克定律。斯篤克氏定律說明細圓球體，自一無限制面之液體內降落時，最初由於地心吸力作用，速度遞增，惟轉瞬則達成一常速下降。

設 V = 土粒於水中之下降速度 (cm/sec)

γ_s = 土粒單位重 (g/cm^3)

γ_w = 水之單位重 (g/cm^3)

r = 土粒之半徑 (cm)



設土粒為圓球體，其重量為 $\frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_s$ ，與土

粒同一大小體積之水重為 $\frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_w$ ，則土粒

於水中之重量 W' 為

$$W' = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_s - \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_w$$

$$W' = \frac{4}{3} \pi r^3 (\gamma_s - \gamma_w)$$

土粒於水中下沉過程中，其與水所接觸處產生一種相反作用之阻力稱為下降摩擦阻力 F ，其值與下降速度 V 大小成正比，與土粒之半徑 r 大小成正比，與水之粘滯係數 (*Viscosity*) μ 大小成正比，得

$$F = 6 \pi V \mu r$$

6π 為土粒四圍與水間之滑動阻力係數，係經試驗所求出之數值。

土粒能於水中等速下降，須下降之重量等於下降阻力，則 $W' = F$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\gamma_s - \gamma_w) = 6 \pi V \mu r$$

D : 為土粒直徑

應用斯篤克定律於比重分析時，可能發生下列四項誤差：