

土壤力學

(增訂版)

鄭勝銘 著

水电部科技情报所	
图书总号	中06276
分类号	S152.2



005573 水利部信息所

大學圖書供應社

著者簡歷

中原理工學院水利工程學系畢業工學士。

日本早稻田大學理工研究所畢業工學碩士。

考試院工業技師考試及格水利技師。

行政院經濟合作發展委員會新港計劃小組配合工程師。

台灣省交通處台中港務局幫工程司、副工程司。

萬能工業專科學校講師、副教授。

現任：萬能工業專科學校教授兼土木工程科主任。

著作：1.土壤力學。

2.土壤試驗法。

3.柔性路面設計法之檢討與提案。

中華民國六十一年八月第一版發行

中華民國六十六年八月增訂版發行

中華民國六十八年八月增訂再版發行

著作人
：鄭 勝 銘

發行人

總經銷：大學圖書供應社

地 址：台中市文華路73號

電 話：(042) 240273號

印刷所：東洋印刷廠

地 址：台中市自治街145號

函 購：台中市干城街145巷4弄6號

台中郵局劃撥23958號

鄭 勝 銘

定價：新台幣貳佰元整

土壤力學目錄

1. 土壤的基本物理性質及工程分類

1. 1. 土壤的生成	1
1. 2. 土壤的三相組織及其關係	2
1. 3. 土壤的顆粒比重	7
1. 4. 土壤的顆粒分析	9
1. 5. 粘土的稠度	15
1. 6. 土壤結構	19
1. 7. 粘土礦物	21
1. 8. 土壤顆粒與水的關係	24
1. 9. 土壤的工程分類	28

2. 土壤之滲透性與土壤水力學

2. 1. 土壤的滲透性	44
2. 2. 成層土壤體之滲透性	48
2. 3. 滲透係數測定法	49
2. 4. 毛細管作用	54
2. 5. 水力坡度	56
2. 6. 流線網	58
2. 7. 滲透流速及流量	62
2. 8. 堤體滲透	63
2. 9. 濾層設計規範	65
2. 10. 全應力與有效應力	66

3. 土壤的壓縮性及壓密

3. 1. 概述	85
3. 2. 土壤的壓縮性	85

3 . 3 . Terzaghi單向度壓密理論的基本假設	87
3 . 4 . 壓密作用與Taylor 模式	88
3 . 5 . 粘土的壓縮特性	89
3 . 6 . 單向度壓密的基本方程式	93
3 . 7 . 壓密方程式的解法	95
3 . 8 . 壓密度	98
3 . 9 . 壓密度與時間因數的關係	99
3 . 10 . 壓密試驗	101
3 . 11 . 壓密試驗結果之整理	103
4 . 土壤之應力表示	
4 . 1 . 八面體之應力表示	112
4 . 2 . 應力空間	117
4 . 3 . 土壤質流學	118
5 . 土壤的剪力強度	
5 . 1 . 剪力破壞及破壞理論	126
5 . 2 . 破壞線	127
5 . 3 . Mohr 氏的應力圓	128
5 . 4 . 極軸法	129
5 . 5 . 破壞應力圓	130
5 . 6 . 剪力孔隙水壓	132
5 . 7 . 直接剪力試驗	133
5 . 8 . 三軸壓縮試驗	135
5 . 9 . 無側限壓縮試驗	137
5 . 10 . Vane 剪力試驗	138
5 . 11 . 砂的剪力特性	139
5 . 12 . 粘土的剪力特性	141

5 . 13 . 粘土之剪力強度與物理性質的關係	149
6 . 土壓	
6 . 1 . 主動土壓與被動土壓	159
6 . 2 . Coulomb 土壓	164
6 . 3 . 地表面傾斜時之主動土壓	168
6 . 4 . 地表面傾斜時之被動土壓	170
6 . 5 . 考慮壁面摩擦時之主動土壓	171
6 . 6 . 考慮壁面摩擦時之被動土壓	171
6 . 7 . 摩擦圓法	172
6 . 8 . 圖解法	173
6 . 9 . 地表面有荷重時之被動土壓	178
6 . 10 . 壁體以中點轉動時之土壓	179
6 . 11 . 挖掘支撐之土壓力	181
6 . 12 . 版樁下端之固定條件	181
6 . 13 . 自由支撐版樁	182
6 . 14 . 固定支撐版樁	183
6 . 15 . 圖解法	185
6 . 16 . 等應力梁法	186
6 . 17 . 擋土牆之穩定分析	188
7 . 地盤承载力	
7 . 1 . 概述	203
7 . 2 . 地盤的剪力破壞	204
7 . 3 . 連續基脚之全面剪力破壞	205
7 . 4 . 連續基脚之局部剪力破壞	210
7 . 5 . 由標準貫入試驗推定砂地盤之內部摩擦角及承载力係數	210

7 . 6 . 圓形及正方形基腳的承載力	213
7 . 7 . 承載力的一般公式	213
7 . 8 . 容許承載力	214
7 . 9 . 由於基礎之傾覆所生粘土地盤的破壞	216
7 . 10 . 樁基礎之種類	218
7 . 11 . 樁之承載力	219
7 . 12 . 樁基底層應力之校核及其沉陷量之計算	232
7 . 13 . 樁帽之設計	233
7 . 14 . 樁基承受水平力及上揚力之分析	234
8 . 土內應力及基礎沉陷	
8 . 1 . 概述	245
8 . 2 . 地表面受集中荷重所生土內應力	246
8 . 3 . 地表面受線荷重所生土內應力	248
8 . 4 . 地表面受均佈條帶狀荷重所生土內應力	249
8 . 5 . 堤狀荷重所生土內應力	251
8 . 6 . 地表面受圓形均佈荷重所生土內應力	253
8 . 7 . 地表面受長方形均佈荷重所生土內應力	254
8 . 8 . Newmark 影響圓法	256
8 . 9 . 土內應力近似算法	257
8 . 10 . 粘土層沉陷量之估計	258
8 . 11 . 砂土層沉陷量之估計	260
9 . 斜坡穩定	
9 . 1 . 穩定解析的基本概念	269
9 . 2 . 影響斜坡穩定之滲透水	271
9 . 3 . 長斜坡的穩定解析(無凝聚力土)	273
9 . 4 . 長斜坡的穩定解析(凝聚力土)	274

9 . 5 . 斜坡受全應力的穩定解析	274
9 . 6 . 由於有效應力之斜坡穩定解析	279
9 . 7 . 穩定解析法之選擇	283
10. 土壤動力性質	
10 . 1 . 土壤動力學性質	296
10 . 2 . 土壤的波動傳播理論	297
10 . 3 . 土中之波動的傳播速度	306
10 . 4 . 土壤的夯實	310
附錄：重要名詞解釋	320
參考書籍	326

1. 土壤的基本物理性質及工程分類

1.1 土壤的生成

億萬年前地殼硬化所形成的岩石，經過物理性或化學性的風化作用，再經侵蝕、沉積等外力，將岩塊分解而成大小不同的顆粒，如礫石、砂、粘土，這些顆粒混合起來，形成了不均質的土層。

土壤的生成是由火成岩 (Igneous rocks) 開始分解，此由圖 1-1 之地質學的循環可知，土壤及岩石均包含在此過程中。岩石由

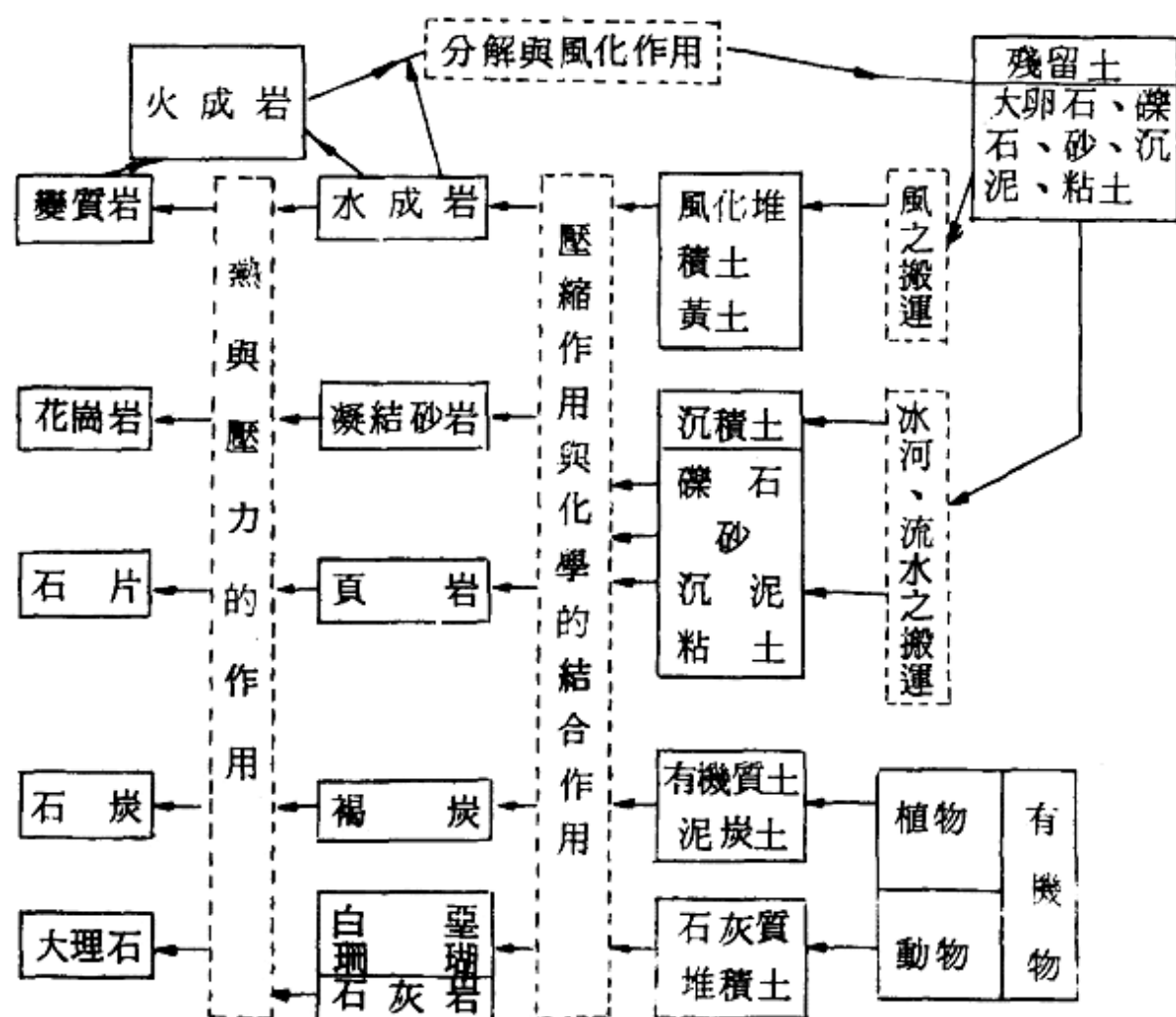


圖 1-1 岩石與土壤之間的循環演變

於受不均衡的壓力及溫度變化而產生體積變化，終於龜裂分解，更有由於化學的作用而生成粘土及沉積土，此土壤經過長期間的壓縮，成為下一代的岩石母體，如此造成由岩石變為土壤顆粒，再由土壤顆粒變為岩石之周期性長循環過程。

土壤顆粒愈細，表面積愈大。如由每邊 1 cm 之立方體，分成各邊為 0.1 cm 之立方體時，表面積由 6 cm^2 成為 60 cm^2 。若每邊為 1000 分之 1 mm [即 1 micron (μ)] 時，此相當於粘土顆粒的大小，表面積為 $60,000 \text{ cm}^2$ 。又膠狀顆粒相當於粘土顆粒的十分之一，表面積將大 10 倍。比表面積 (Specific surface) 為表面積除以體積之值，例如 1 cm^3 之立方體的比表面積為 6 cm^{-1} ；每邊 1μ 之立方體的比表面積為 $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ，又同樣 1 cm^3 之體積，成為厚度 0.1 cm 之圓盤狀時，比表面積為 $21,121 \text{ cm}^{-1}$ ； 1μ 厚度時為 $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ，此相當於正立方體分割成 1000 分之 1。一般之粘土顆粒為細小扁平者較多，有極大的比表面積，因而易受化學作用，扁平之土壤顆粒多成平行堆疊狀態，顆粒較緊密，使吸水層間的干擾增加，並引起更多的顆粒接觸，因此土壤的剪力強度隨空隙比的減少而增大。

1.2 土壤的三相組織及其關係

土壤係由各種不同粒徑的顆粒所配合而成，因此顆粒間徑的顆粒配合而成，因此顆粒間必有空隙 (Void) 存在，而此種空隙由水份及空氣 (或其他氣體) 所佔有。故土壤係由土壤顆粒、水及空氣所組成的

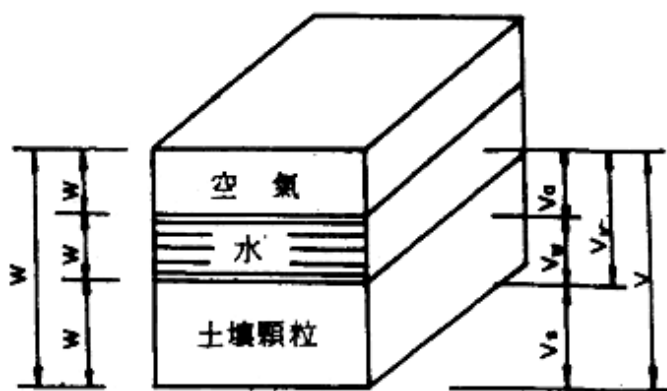


圖 1-2 土壤的三相結構

三相結構 (Three phase structure) 如圖 1-3 所示。

設 V : 土壤全體積

V_s : 土壤顆粒體積

V_v : 空隙 (包含液相與氣相, 也可稱為流體相 Fluid phase) 體積

V_w : 孔隙水 (液相) 體積

W : 土壤全重量

W_s : 土壤顆粒重量 (乾燥重量)

W_w : 孔隙水重量

γ_w : 水單位體積重量 (於 4°C 時 $1\text{t}/\text{m}^3$ 或 $62.4\text{lb}/\text{ft}^3$)

由上述土壤的三相關係, 可得如下的定義。

1. 土壤顆粒的單位體積重量 (Unit weight of solid constituents) γ_s : 不含空隙及水份之狀態的土壤單位重量。亦稱為絕對單位重量 (Absolute unit weight)。

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (1-1)$$

2. 水之單位體積重量 (Unit weight of water) γ_w : 4°C 時。

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 1 \quad (\text{g}/\text{cm}^3) = 1 \quad (\text{t}/\text{m}^3) \quad (1-2)$$

3. 土壤顆粒比重 (Specific gravity) G_s : 土壤單位重量與同溫度的水單位重量之比值, 稱為土壤之比重。

統體比重 (Bulky specific gravity) G : 土壤之統體單位重量與水單位重量之比值, 稱為土壤之統體比重, 亦即天然土壤之比重。

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\bar{W}}{V\gamma_w} \quad (1-3)$$

絕對比重 (Absolute specific gravity) G_s : 土壤之絕對單位重與同溫度的水單位重之比值, 稱為土壤之絕對比重, 亦

即無空隙狀態的土粒比重。

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-3)$$

4. 濕密度 (即土壤之單位體積重量) (Wet unit weight) γ_t : 天然狀態 (含有空隙及水份之狀態) 之土壤單位重量。亦稱為統體單位重量 (Bulky unit weight)。

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = G \cdot \gamma_w \quad (g/cm^3) \quad (1-4)$$

5. 乾密度 (Dry unit weight) γ_d : 乾燥狀態的土壤單位重量，稱為乾密度。

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (g/cm^3) \quad (1-5)$$

6. 含水量 (Water content or moisture content) w : 土壤內部水份所佔之重量 (W_w) 與土壤顆粒所佔之重量 (W_s) 之比，稱為含水量。通常以百分率表之。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad (1-6)$$

7. 空隙比 (Void ratio) e : 一定體積之土壤內部，空隙體積 (V_v) 與土壤顆粒體積 (V_s) 之比，稱為空隙比。

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} \quad (1-7)$$

8. 孔隙率 (Porosity) n : 一定體積之土壤內部，空隙體積與土壤體積之比，稱為孔隙率。通常以百分率表之。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \% \quad (1-8)$$

9. 飽和度 (Degree of saturation) S_r : 土壤內部之水份體

積 (V_w) 與空隙體積 (V_v) 之比，稱為飽和度。以百分率表之。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-9)$$

完全飽和： $S_r = 100\%$ ，局部飽和： $S_r < 100\%$ ；乾燥狀態： $S_r = 0$ 。

10. 空隙比 e 與孔隙率 n 的關係 (參考圖 1-3)。

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\frac{V_v}{V}}{\frac{V - V_v}{V}} = \frac{n}{1 - n} \quad (1-10)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{1} = V_v$$

$$V = V_s + V_v = 1 + e$$

$$\therefore n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{1 + e} = \frac{e}{1 + e} \quad (1-11)$$

11. 含水量 w ，空隙比 e ，孔隙率 n ，飽和度 S_r ，比重 G_s 及密度的相互關係 (參考圖 1-2)。

$$W = W_s + W_w$$

$$(\because W_w = \frac{w}{100} W_s)$$

$$\therefore W = W_s + \frac{w}{100} W_s$$

$$W_s = \frac{W}{1 + \frac{w}{100}} \quad (1-12)$$

圖 1-3 土壤之孔隙與體積之關係

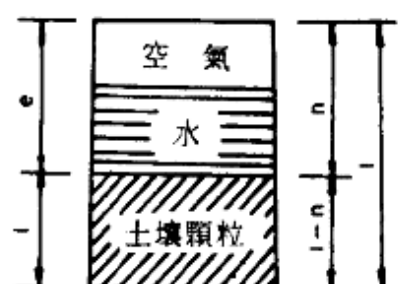


圖 1-3 土壤之孔隙與體積之關係

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{100}{100 + w} \gamma_s \quad (1-13)$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s}{1 + e} = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w \quad (1-14)$$

$$[\because \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s}{1} = W_s]$$

$$\gamma_s = \frac{W}{V} = \gamma_d \left(1 + \frac{w}{100} \right) = \frac{\gamma_w G_s}{1 + e} \left(1 + \frac{w}{100} \right) \quad (1-15)$$

飽和度 S_r

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} \times 100\% = \frac{\frac{W_w}{W_s} \cdot \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w}}{\frac{V_v}{V_s}} \%$$

$$= \frac{w G_s}{e} \% \quad (1-16)$$

將(1-16)式代入(1-15)式

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w G_s}{1 + e} \left(1 + \frac{S_r e}{100 G_s} \right) = \frac{G_s + \frac{S_r}{100} e}{1 + e} \gamma_w \quad (1-17)$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{1}{\frac{V_s}{W_s} + \frac{V_v}{W_s} \cdot \frac{V_v}{V_s}} = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}} \quad (1-18)$$

或由(1-14)式

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w = \frac{G_s}{1 + \frac{w G_s}{S_r}} \gamma_w = \frac{1}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}} \gamma_w \quad (1-18)'$$

$$\begin{aligned}
 G_s &= \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \\
 \therefore V_s &= \frac{W_s}{G_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \\
 e &= \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V - \frac{W_s}{G_s \gamma_w}}{\frac{W_s}{G_s \gamma_w}} \\
 &= \frac{G_s V \gamma_w}{W_s} - 1 = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (1-19)
 \end{aligned}$$

由 (1-17) 式

$$\gamma_s = \frac{W}{V} = \frac{G_s + \frac{S_r}{100} e}{1 + e} \gamma_w$$

飽和時 $S_r = 100\%$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \cdot \gamma_w \quad (g/cm^3) \quad (1-20)$$

水中單位重量 γ_{sub}

$$\begin{aligned}
 \gamma_{sub} &= \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w - \gamma_w \\
 &= \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \quad (g/cm^3) \quad (1-21)
 \end{aligned}$$

1.3 土壤的顆粒比重

構成土壤的礦物，其比重大約在 2.65 ~ 2.80 之間，像石英（

Quartz) 的平均比重是 2.65，以石英為主要成份之砂 (Sand) 的比重是接近此值。粘土之膠狀份 (Colloid fraction) 所構成的粘土礦物 Clay minerals (高嶺土 Kaolinite，賀羅土 Halloysite，蒙特土 Montmorillonite，伊來土 Illite) 之平均比重是 2.80 至 2.90，由此可知粘土礦物較以砂為母體之礦物有較大的比重。土壤試樣之土粒部份的平均比重 G_s ，與試樣之全體重量加以區別時，可謂真比重 (True specific gravity)，更進一步的說明，土壤比重是土壤顆粒部份之重量與同體積 20°C 之水的重量相比所得。

測定土壤比重所用的比重瓶 (Pycnometer)，如圖 1-4 所示容積為 100c.c.。今假設溫度 $T^{\circ}\text{C}$ 之蒸餾水 (Distilled water) 注滿比重瓶時之重量為 W_s ，試料與注滿水時之比重瓶重量為 W_b ，測定土壤試樣之

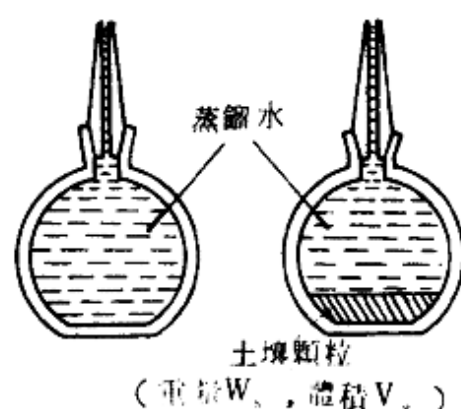


圖 1-4 由比重瓶測定比重

乾燥重量 (土壤顆粒部份之重量) 為 W_s ，與同溫度 $T^{\circ}\text{C}$ 之水之比值，稱為 $T^{\circ}\text{C}$ 之土壤顆粒的比重 G_T ，可由下式求得。

$$G_T = \frac{W_s}{W_s + (W_b - W_b)} \quad (1-22)$$

20°C 之水對於土壤顆粒的比重 G_s 是 $G_s = K \times G_T$ ，通常求到小數三位。此處的 K 是修正因數 (Supplemental factor)，為 $T^{\circ}\text{C}$ 之水的比密度 (Specific density) 被 20°C 之水的比密度所除之值 (參照表 1-1)。

除了纖維質之有機土 (Fibrous organic soil) 外，幾乎全部土壤顆粒比重在 2.3 ~ 2.9 的範圍，大體上可視為 2.65 或 2.7

表1-1 水之比密度與修正因數K

溫度(°C)	18	20	22	24	26	28
水之比密度	0.9986244	0.9982343	0.9978019	0.9973286	0.9968156	0.9962652
修正因數K	1.0004	1.0000	0.9996	0.9991	0.9986	0.9980

，若是試驗所使用土壤，裏面存有氣泡時，會得非常低之值，故比重試驗 (Specific gravity test) 之結果如在 2.5 以下時，有再度求精確值的必要。因此必須特別注意煮沸，以除去氣泡 (Bubble)。

1.4 土壤的顆粒分析

構成土壤之細粗顆粒的混合比例，叫做級配 (Grading)。土壤的分類 (Soil classification)，主要是依粒徑而定。從前視顆粒的大小，支配土壤的性質，當作很重要的要素，現在這種想法，多少被修正，而認為尚須視土壤性質而定。也就是說像砂或礫石 (Gravel) 的粗粒土的密度，滲透性 (Permeability)，剪力強度等，與粒徑都有很大的關係，現在也是成為分類上決定的要素。像粘土之細粒土 (Fine grained soil)，粒徑與土壤諸性質間，並不能看出一定的關係來，莫如依照稠度 (Consistency) 方面，可以得到較合理的分類，若僅依粒徑判斷，結論並不是正確的。

測定土壤之粒徑試驗叫做機械分析 (Mechanical analysis)，對於比較大的顆粒，用篩分析 (Sieve analysis)，小顆粒可用沉降分析 (Sedimentation analysis)。一般土壤顆粒分類法，如表 1-2 所示。

1. 篩分析

粗粒砂可用一組篩而分析，測定各篩所停留土重。篩依其孔徑大

表 1-1 土壤工程學院土壤顆粒分類

土 壤 名 稱		粒 徑 (mm)
礫石 (Gravel)		2 mm以上
砂 {	粗砂 (Coarse sand)	2 ~ 0.6
	中砂 (Medium sand)	0.6 ~ 0.2
	細砂 (Fine sand)	0.2 ~ 0.06
粉土 {	粗粉土 (Coarse silt)	0.06 ~ 0.02
	中粉土 (Medium silt)	0.02 ~ 0.006
	細粉土 (Fine silt)	0.006 ~ 0.002
粘土 {	粗粘土 (Coarse clay)	0.002 ~ 0.0006
	中粘土 (Medium clay)	0.0006 ~ 0.0002
	膠狀體 (Colloid)	0.0002 mm以下

小則有 3" (76.2 mm) , $1\frac{1}{2}$ " (38.1 mm) , 1" (25.4 mm) , $\frac{3}{4}$ " (19.1 mm) , $\frac{3}{8}$ " (9.52 mm) 及 No 4 (4.76 mm) , No 8 (2.38 mm) , No 10 (2.00 mm) , No 16 (1.19 mm) , No 20 (0.86 mm) , No 30 (0.59 mm) , No 40 (0.42 mm) , No 100 (0.149 mm) , No 200 (0.074 mm) 。粒徑分析之結果, 可求得各種等價粒徑 (Equivalent grain size) D (mm) 及其通過重量百分率 P (%) 之大小。此種結果之最方便的表示方法, 便是將 D 及 P 之數據繪成一粒徑分佈曲線 (Grain-size distribution Curve) 於半對數座標紙上。因通過重量百分率 P (%) 為一種累積值, 故粒徑分佈曲線又被稱為粒徑累積曲線 (Grain size accumulation curve) 。

2. 沉降分析 (Sedimentation analysis)

假設土粒為一圓球體, 在無限的靜水中以等速下沉時, 則須同時