

86-11

12430 01869

土 壤 力 學

(中國工程師手冊土木類第四篇)

趙國華 洪如江 編 著
王中村 林永德

59
1

中國土木水利工程學會編行

土 壤 力 學

(中國工程師手冊土木類第四篇)

趙國華 洪如江 編 著
王中村 林永德

中國土木水利工程學會編行

2. 25

土 壤 力 學

趙國華 洪如江 編 著
王中村 林永德

特價新台幣35元

版 權 所 有
翻 印 必 究

出版者：中國土木水利工程學會

總經銷：科技圖書股份有限公司

臺北市博愛路一八五號二樓

電 話：三一—〇九五三號

郵政劃撥儲金15697號

六十五年十二月增訂六版

第四篇

土壤力學

目 錄

頁

第一章 土壤性質

A 土壤的生成	4— 1
B 土壤的組織	4— 4
C 土壤的指數性質	4— 8
D 內摩擦角與凝聚力	4— 17
E 土壤的工程性質	4— 18

第二章 採樣，試驗與分類

A 目的與範圍	4— 20
B 採樣方法	4— 20
C 野外試驗	4— 26
D 室內試驗	4— 28
E 土壤分類	4— 39
F 土壤鑑別	4— 47

第三章 毛管性，滲透性與滲流網

A 毛管性	4— 49
B 滲透性	4— 52
C 有效應力與孔隙壓力	4— 59
D 流網	4— 63

第四章 土之剪力強度

A 土之剪力強度理論	4— 66
B 剪力試驗	4— 68
C 飽和粘土之剪力強度	4— 73
D 未飽和粘土之剪力強度	4— 78
E 粗粒土壤之抗剪強度	4— 78

第五章 土 壓 力

A 靜止土壓力，自動土壓力與被動土壓力	4— 82
---------------------	-------

B 作用於擋土牆上的土壓力·····	4— 93
C 特殊問題·····	4— 94

第六章 邊坡穩定分析

A 概說·····	4— 98
B 總應力邊坡穩定分析法·····	4—105
C 有效應力邊坡穩定分析法·····	4—112

第七章 土之承力

A 承力之定義·····	4—121
B 極限承力之理論·····	4—122
C 斜力或偏心作用下之極限承力·····	4—124
D 就地承力試驗法——平鈑荷重試驗·····	4—127

第八章 壓密與沉降

A 土壤的壓密性·····	4—132
B 壓密理論·····	4—132
C 壓密試驗及試驗結果之處理·····	4—137
D 土層之壓密特性·····	4—141
E 土內應力·····	4—143
F 沉降·····	4—150

第九章 土壤夯實

A 土壤夯實原理·····	4—156
B 夯實試驗·····	4—157
C 夯實對土壤力學性質之影響·····	4—159
D 各種土壤的夯實特性及夯實率之限定·····	4—163
E 貫入試驗與 C. B. R. 試驗·····	4—163
F 工地夯實法·····	4—165

第十章 土壤穩定法

A 排水穩定法·····	4—166
B 冰凍穩定法·····	4—167
C 水泥穩定性·····	4—167
D 瀝青穩定法·····	4—168
E 化學穩定法·····	4—169

附錄 (一) (二) (三) (四) (五) (六)	4—171
----------------------------	-------

第 四 篇

土 壤 力 學

趙國華 洪如江 王中村 林永德

第一章 土 壤 性 質

A 土 壤 的 生 成

1·1 土壤的生成 地殼硬化之後，就開始有滄桑演變，許多岩石不斷地變成土壤，也有許多土壤不斷地變成岩石。這種滄桑演變，是由於內營力及外營力兩種地質作用所促成的。

a. 內營力地質作用 (endogenic geological processes)

地球內部的熱力使地殼發生壓應力或張應力，因而有地殼變動。地殼受壓力起褶皺，高山大陸於是生成；受張力起斷層運動，於是發生地震現象與懸崖景觀，地面因而有起伏，岩石因而暴露在大氣中。岩石恒由於這些壓應力或張應力的作用而破裂，因而更增加了暴露的程度。

b. 外營力地質作用 (exogenic geological processes)

地球的表面包圍着一層空氣，受到太陽熱作用而產生的天然化學反應，生物的活動，以及氣候的變化，這些都是外營力地質作用。

外營力地質作用又可以分成風化作用，侵蝕作用，與沉積作用三種。

1. 風化作用 岩石暴露在空氣中，受到靜態的作用而瓦解或朽腐，稱為岩石的風化 (weathering)。岩石的風化又可分成：

物理性的風化 (physical weathering)，可使岩石破碎但不變更其成分，水結成冰體積膨脹，可使岩石張裂。岩石由於外面包圍壓力的減小或消除，也會膨脹而裂開；至於滾熱的岩石暴露於空氣中受到冷卻；水成岩由於水份的喪失，都會發生收縮的現象，岩石因收縮而破裂；此外，由於日夜的溫差以及季節性的溫度變化。膨脹與收縮反覆進行，岩石因而破裂，尤其在潮濕的環境下，這種破碎作用更易完成。

化學性的風化 (chemical weathering)，可使岩石完全朽爛，成分完全改變，化學反應在乾燥狀態下是很難進行的，通常要加上水的參與作用才行；岩石中的礦物很少能溶於純粹的水中，因此，水的溶解作用也要有其他的因素才行。

例如石灰岩被水溶解，必需要有二氧化碳才能進行。至於空氣中的氮雖然很不活潑，但由於生物的媒介，也能產生作用。因此，化學性的風化，通常是由幾種因素在同時作用，甚至與物理性風化互相配合在一起，加速風化的進行。

表層岩石經風化作用，形成土壤的層次 (soil horizons)，如圖 1.1 所示。

A_{00} ：正在進行分解中之腐土。

A_0 ：腐土，或局部尚在進行分解的腐土。

A_1 ：暗黑色有機質及礦物質之混合土。

A_2 ：淺黑色經濾解的混合土。

A_3-B_1 ： A 、 B 兩層的過渡層，上部接近 A 層性質，下部接近 B 層性質。

B_2 ：深色，為濾解物沉積而成的土層。

B_3 ： B 、 C 兩層的過渡層，接近 B 層性質。

C ：由 D 層岩石風化而成的岩層，或其他沖積層。

D ：未經風化的岩石層，如火成岩，水成岩，或變質岩等。

岩石風化後，若留在原來的位上，稱為殘留表土 (residual soil)，其厚度約在

0.6—1.2^m。農業方面的土壤研究，即就該範圍內，分成 A, B 二層，最頂上一層稱為 A 層 (A -horizon)，由於生物的活動，使該層內積聚着大量有機物質，土呈黑色， A 層中亦因受濾失作用，使土色改淺，並呈粗糙組織。該層過濾成分和微細膠體土續向下沉，使下層土質具有微細顆粒不易透水的性能，稱為 B 層 (B -horizon)。 B 層以下為未受生物活動影響的土層，但已受風化作用的影響，如水流風吹，冰河堆積而成的沖積土層，稱為 C 層 (C -horizon)。 C 層以下為完全未受風化作用的岩層，如水成岩，火成岩等，稱為 D 層 (D -horizon)，此層的厚度甚大。

圖 1.1 中所述土層斷面的層次乃一完整剖面的描述，事實上是絕無僅有的。因土壤之生成深受當地各種環境因素的影響，如氣候，雨量及排水情形等，均可使土層斷面的生成發生變化。

熱帶或亞熱帶地區，氣溫高，雨量多，若排水良好，則土壤內之有機物及二

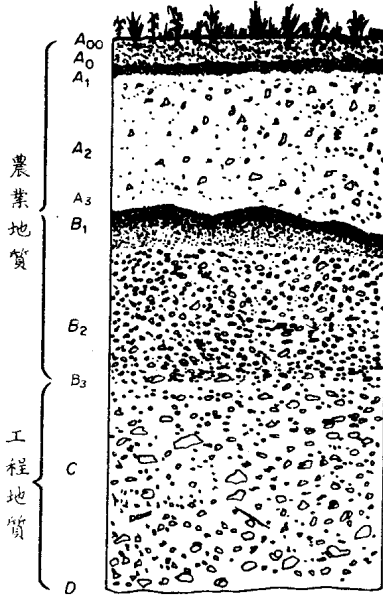


圖 1.1 土層斷面詳細分類與說明

價的氧化物易被溶解及沖失，僅存留着三價的氧化物，如氧化鐵 (Fe_2O_3) 和礬土 (Al_2O_3) 等，所造成的土壤呈紅色，稱為紅壤土 (laterite)。

溫帶地區降雨量適中，冷熱有週期性，由於朽腐植物（如土壤真菌）的作用，可促進表土中有機酸的產生，如果排水良好，這些有機酸就溶濾了頂面一層的氧化鐵和礬土，使土內含有高度的砂質，溶濾的物質則聚結在下層土層不去，通常 A_2 層被溶淋最烈，受漂洗呈灰色，酸性强，含砂酸，因其剖面層次呈灰白色，稱為灰壤土 (podzol)，此種化學性分解過程，稱為灰土化 (podzolization)。

降雨量少而且排水良好的地方，礦物質向下淋失或移轉之量有限，並且由於毛管作用，使可溶性鹽類向上移轉，積聚成石灰層，這種化學性分解過程稱為鈣化 (calcification)。

降雨量極稀地區，礦物質無被溶濾之虞，土壤內充滿可溶性鹽類，植物不能生長，稱為鹹土化 (salonization)。

2. 侵蝕作用 (denudation) 風雨，流水，冰川，波浪等等動態作用力，把殘留表土，甚至岩石等搬離母岩，此種作用稱為侵蝕作用。

侵蝕作用使新鮮岩石暴露在外接受風化作用；風化作用把整塊或大塊岩石變成小塊或細粒，更使侵蝕作用易於進行，如此互相作用，加速了削平地殼的作用。

3. 沉積作用 (sedimentation) 侵蝕作用的一些動力，把侵蝕下來的土壤，挾帶至遠處，當挾帶力不足的時候，土壤就沉積下來，成為運積土層 (transported deposits)。運積土層共分三大類。由洪水挾帶播遷之土，謂之沖積土 (alluvial deposits)；由風力積聚之土，謂之風積土 (aeolian deposits)；由冰河挾帶放置之土，謂之冰積土 (glacial deposits)。

沖積土的成分，因河水挾帶土粒的粗細，流水的速度與河床的比降等因素而不同。溪流內的洪積土，常含有大如枕石，細如璫珠的粒料。河川的比降小，沖積土的粒徑愈小，由於河川流量與流速隨季節而變化，其沉積的土層厚薄，粒子的粗細亦隨之各異。溪流出谷，在山麓沉積成沖積扇 (alluvial fan)。洪水泛濫，常在廣大平原上造成洪積土層，川流入湖，在湖口處往往淤積廣大扇形地。江水匯流入海，海口處亦多造成三角洲 (delta)。川流入湖，由遠處湧來，歷久未沉之極微土粒，因流速突減而起沉積，成為湖底粘土 (lacustrine deposits)。江水入海，微粒泥土放積海底，乃成海底粘土 (marine deposits)。

風積土係由流動的空氣所挾帶之微細土粒，隨風播送至遙遠的地方堆積而成。由於風力的強弱與吹向沒有一定，故其堆積的土層範圍較廣，厚度亦深。我國大陸中部有 620,000 km^2 的面積為風積土所覆被，其色黃，稱為黃土 (loess)。

，最深的黃土層厚達 120 m。風積土粒徑均勻，空隙較大，組織疏鬆，但因中間含有多量鈣質土，能結集疏鬆之土粒，使挖成直立坡度而不坍。

冰積土係因冰川而形成，高山上的冰層積到相當厚度以後就往低處作緩慢的爬行移動，稱為冰川 (glacier)。在地球的歷史中，有幾次冰期，整個地球的三分之一（歐洲北部，加拿大全部，美國北部，亞洲的西伯利亞全部），覆蓋着深厚的冰層，向赤道作緩慢的移動，形成冰川作用 (glaciation)。冰川移行，夾帶着大量的岩石碎屑，同時也有大量泥土被凍結在冰川內部。最後一次冰期約在一萬年以前開始退却，冰川的邊緣先被融化，所携岩石碎屑沿途堆放，是謂邊堆石 (terminal moraine)。寬大冰川受熱融化，携帶的物質沿途就地堆積，是為地堆石 (ground moraine)。在冰川邊緣附近地區由於融冰的水流連同凍結的泥土橫流至附近地區隨處沉積，是謂橫流平原 (outwash plains)。此種冰積的土層，統稱為冰積層 (glacial till)。由於冰川在移動中所携帶的土石粒徑參差不齊，大者如石桌，細者為塵土，無所不包。因之造成的地層，其顆粒大小，參差異常，土質成分，且無一定。

風化作用與侵蝕作用將地殼突起部份削平，而沉積作用把地殼低窪部份填平，被重壓於底部的土層，由於重力和物理化學的相互作用，又硬化為岩石。

若僅有外營力作用，則地殼必逐漸變平，但由於內營力作用的對抗，使地殼發生起伏，因此只要這兩種作用力不停止，地殼的滄桑演變就永不停止。岩石固然可以變成土壤，土壤也可以由石化作用而變成岩石。

除了上述的原因之外，生物的屍體和排泄，人為的作用，都能造成土壤。沼澤池塘內蘆葦叢生，枯枝敗葉萎棄朽腐，歷久分解成土。分解不完全而具大量植物纖維，能吸收大量水份，這種土壤稱為泥炭土 (peat)，若所含植物纖維再經氧化分解而成極細的顆粒，是為腐泥 (muck)。

矽藻 (diatom) 吸收矽質 (SiO_2) 為外殼，死亡之後，其外殼堆聚成矽藻質土壤 (diatomaceous earth)。有孔蟲吸收碳酸鈣 (CaCO_3) 為外殼，死亡之後，堆積成白堊土 (chalk)。鳥類的糞堆積成磷灰土或磷灰石，如我國南沙羣島中的太平島是其一例。就土木工程師的觀點來講，人為的垃圾及廢墟，亦均可視為土壤。

B 土壤的組織

1-2 土壤的組織 土壤的組織，係指土壤顆粒大小 (grain size)，形狀 (grain shape)，與其排列形式 (arrangement) 而言。土粒排列的形式又稱為土壤結構 (soil structure)。

a. 土粒大小 按 ASTM-ASCE (美國材料試驗學會, 及美國土木工程學會) 的粒徑區分, 土粒大小的規定如表 1.1。

表 1.1 ASTM-ASCE 粒徑區分

名 稱		粒 徑 (mm)	篩 號
大 卵 石	(boulder)	300 以上	
卵 石	(cobbles)	300 — 100	
礫石 (gravel)	粗 (coarse)	100 — 20	
	細 (fine)	20 — 4.76	# 4 以上
砂 (sand)	粗 (coarse)	4.76 — 2.00	# 4—# 10
	中 (medium)	2.00 — 0.42	# 10—# 40
	細 (fine)	0.42 — 0.074	# 40—# 200
細料 (fines)	沉泥 (silt)	0.074— 0.002	# 200 以下
	粘土 (clay)	0.002 以下	

一般說來, 砂以上的土粒, 都由物理性的風化所造成的; 沉泥的土粒, 有由物理性的破碎所造成, 有由化學性分解或生物屍解所造成; 粘土的土粒則幾乎全部由於生物或化學分解所造成。

另有 MIT 的粒徑區分法亦為一般所常用, 其規定如表 1.2:

表 1.2 MIT 粒徑區分表

顆 粒 名 稱			粒 徑 (mm)
礫	石		2 以上
粗	砂		2 — 0.6
中	砂		0.6 — 0.2
細	砂		0.2 — 0.06
粗	沈 泥		0.06 — 0.02
中	沈 泥		0.02 — 0.006
細	沈 泥		0.006 — 0.002
粗	粘 土		0.002 — 0.0006
中	粘 土		0.0006 — 0.0002
膠	體 土*		0.0002—以下

*Colloidal

ASTM-ASCE 的粒徑分類係用篩號為單位。

MIT 的粒徑分類係用十進單位分類。

b. 土粒形狀 沉澱以上的土粒，大都成粒狀或塊狀 (bulky shape)，各方向的尺寸大多相差有限。粒狀或塊狀土粒又可分為稜角形，半稜角形，半圓形，圓形及全圓形等五種。如圖 1•2 所示。



圖 1•2 粒狀或塊狀土壤之五種形狀

沉澱以下的土粒大都呈片狀 (flaky shape)，如高嶺土 (kaolinite)；或呈針狀 (needle shape)，如海泡石 (attapulgite)；或呈管狀 (tubular shape)；如管狀高嶺土。

土壤結構 懸浮於水中的土粒，受重力作用而下沉，與已沉的或正在下沉的其他土粒接觸，即發生斥力與吸力作用。

非粘性土壤 (cohesionless soil，或稱 non-cohesive soil)，如砂，礫以至沉泥，在沉澱時由於單位體積土粒的表面積很小，重力作用遠大於顆粒間的表面作用力（如吸力或斥力等）。故土粒的排列到達平衡位置時即行停止，形成單粒結構 (single grained structure)，如圖 1•3 (a) (b)；極細的砂土或沉泥，有時形成蜂窩結構 (honeycombed structure)，如圖 1•3 (c)。

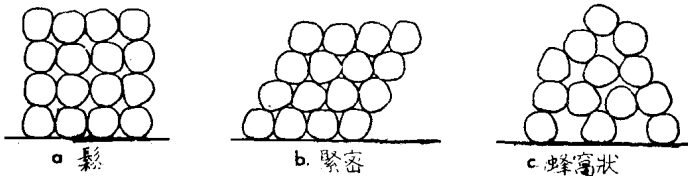


圖 1•3 非粘性土壤結構

粘性土壤 (cohesive soil)，如粘土，因顆粒過小，每單位體積土粒的表面積很大，顆粒的表面作用力遠大於重力的作用，因此浮懸水中不易下沉。如水中含有電解質，則微細土粒常在沉澱過程中互相結成一團，有如飛絮而繼續下墜，造成圖 1•4 之結構，稱為飛絮結構 (flocculent structure)。

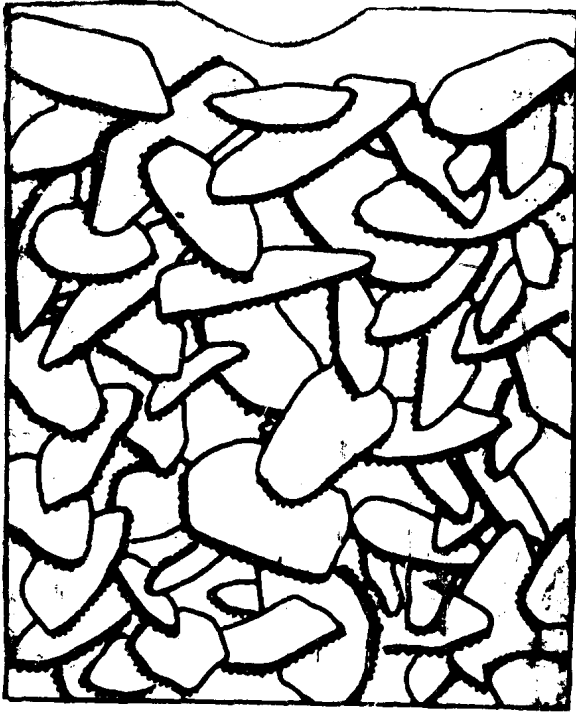


圖 1•4 飛絮結構之三度排列

飛絮結構的形態亦因淡水與鹹水而有別，圖 1•5(a) 所示為淡水中所構成的飛絮結構，圖 1•5(b) 所示為鹹水中所構成的飛絮結構。

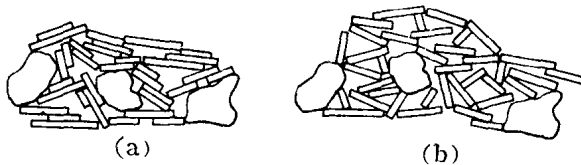


圖 1•5 (a) 為淡水中所構成的飛絮結構
(b) 為鹹水中所構成的飛絮結構

飛絮結構受到壓密 (consolidation)，剪力 (shearing)，擾亂 (disturbance)，夯壓 (compaction) 等作用，即變成分散的樣子，如圖 1•6 (a) (b) (c) (d) 所示。

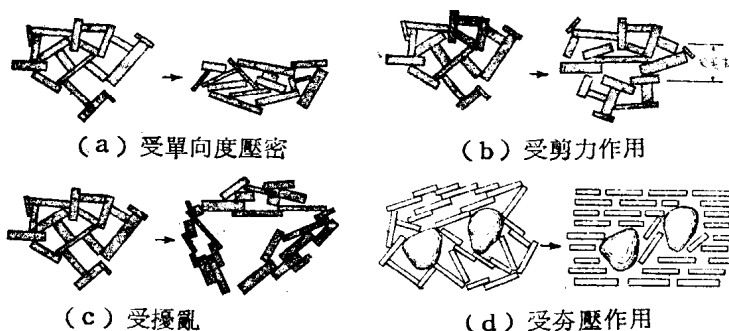


圖 1.6 飛絮結構受擾動後顆粒排列的變化

C 土壤的指數性質

1.3 土壤的指數性質 所謂土壤的指數性質 (index properties) 係指由簡單試驗所求出的數據，作為判斷土壤性質的間接資料。包括土壤的顏色，各相 (phase) 間 (氣體、水、固質土粒) 的體積關係和重量關係，砂土的顆粒性質如大小，形狀，級配 (gradation)，細料百分比 (fines-percentage) 等，及貫入抵抗 (penetration resistance)，粘土的塑性 (plasticity)，稠度 (consistency)，靈敏度 (sensitivity)，活率 (activity) 等。

土壤的顆粒性質已略述於本章 B 節，其他詳見第二章。貫入抵抗則在第九章中討論。

a. 體積關係

土粒結構之間均留有空隙 (voids)，在通常情形下孔隙內一部份為水份所佔據，一部份則為氣體，其關係如圖 1.7 所示：

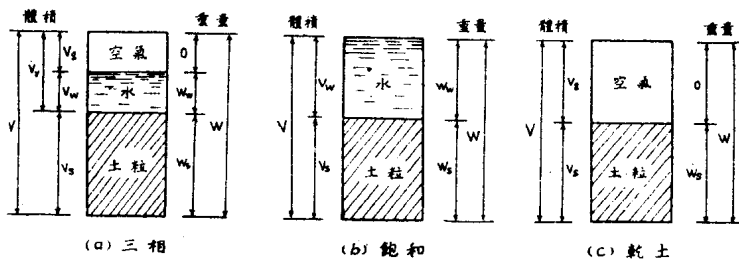


圖 1.7 土壤成份示意圖

1. 空隙比 (void ratio) 土壤內，空隙容積 V_v 與土粒體積 V_s 之比，稱為空隙比 e ，即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.1)$$

單粒結構土壤的空隙比約在 0.4 至 0.8 。

蜂窩結構土壤的空隙比約在 0.6 至 1.5 。

飛絮結構土壤的空隙比約在 4.0 至 5.0 。

2. 孔隙率 (porosity) 土壤內，空隙容積 V_v 與土壤統體積 (gross volume) V 之比，稱為孔隙率 n 。

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1.2)$$

因 $V = V_v + V_s$

$$\text{所以 } n = \frac{e}{1+e} \quad (1.3a)$$

$$\text{或 } e = \frac{n}{1-n} \quad (1.3b)$$

3. 飽和度 (degree of saturation) 水份容積 V_w 與空隙容積 V_v 之比，稱為飽和度 S_r ；以百分率表示之。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1.4)$$

表 1.3 為土壤飽和度與一般稱謂的對照。

表 1.3 土壤飽和度之區分

稱謂	乾 (dry)	潤 (humid)	潤 (damp)	濕 (moist)	淋 (wet)	飽和 (saturated)
$S_r\%$	0	1—25	25—50	50—75	75—99	100

單粒結構之土壤，常呈潮潤狀態；蜂窩狀結構之土，常呈潮濕以至飽和狀態；飛絮結構之土，常呈濕淋以至飽和狀態。

b. 重量關係

1. 含水量 (water content, 或稱 moisture content) 土壤內，水分重量 W_w 與土粒重量 W_s 之比，稱為含水量 w ，可用百分率或小數表示之。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (1.5)$$

單粒結構土壤之含水量約自 0% 至 20%，至多 30%。

蜂窩結構土壤之含水量約自 100% 至 200%。

飛絮結構土壤之含量約自 200% 至 300%，亦有多至 300% 以上。

2. 單位重 (unit weight) 土壤全重 W 與統體積 V 之比，稱為統體單位重 (gross unit weight) γ ；即為一般所指之土壤單位重。

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.6)$$

其單位為 gm/cm^3 ，或 T/m^3 。

土粒重量 W_s 與土粒體積 V_s 之比，謂之實體單位重或土粒單位重 (unit weight of solid constituents) γ_s 。

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1.7)$$

單位體積的水重稱為水之單位重 γ_w ，其值在 4°C 時為 1 gm/cm^3 。

土粒單位重 γ_s 與水之單位重 γ_w 之比，稱為土粒比重 (specific gravity of solids) G_s 。

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1.8)$$

表 1.4 各種主要造土礦物質之比重

名	稱	比 重 G_s
石 英 (quartz)		2.65
雲 母 (mica)		2.8-3.2
高 嶺 土 (kaolinite)		2.5-2.65
伊 利 土 (illite)		2.6-3.1
蒙 脫 土 (montmorillonite)		2.0-2.4
綠 泥 土 (chlorite)		2.6 - 2.96

表 1.5 各種土壤的土粒比重

土 壤 名 稱	土 粒 比 重 G_s
朋 脫 粘 土	2.34
白 堊 土	2.63-2.73-2.81
粘 土	2.41-2.53-2.92
高 嶺 土	2.47-2.58
黃 土	2.65-2.75
泥 煤 土	1.26-1.5-1.8
石 英 砂	2.61-2.65
沉 泥	2.63-2.72
含 有 機 質 沉 泥	2.40-2.50

由表 1.4 可見一般主要造土礦物質的比重約在 2.65 左右。

由表 1.5 可見各種相異土壤內所含造土礦物質的成分不同，土粒的比重亦各不同。

土粒重量 W_s 與統體體積 V 之比，稱為乾單位重 (dry unit weight)。

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{V_s \gamma_s}{V} = \gamma_s (1-n) \quad (1.9)$$

沒入水中之土壤其空隙為水分所填充，此時單位體積的重量，稱為飽和單位重 (saturated unit weight) γ_{sat}

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s}{V} + \frac{V_w \gamma_w}{V} = \gamma_d + n \gamma_w \quad (1.10)$$

飽和單位重 γ_{sat} 與水之單位重 γ_w 之差，稱為土壤的浸水單位重 (submerged unit weight) γ' ，即

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (1.11)$$

綜合上列多種土壤單位重量公式如表 1.6

表 1.6 土壤單位重量公式表

土壤之情況	飽和度	單 位 重 量 公 式
乾 土	$S_r = 0$	$\gamma_d = (1-n) G_s \gamma_w = \frac{G}{1+e} \gamma_w$
濕 土	$1 > S_r > 0$	$\gamma = (1-n) G_s \gamma_w + n S_r \gamma_w = \frac{(1+w) G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{e S_r + G_s}{1+e} \gamma_w$
飽 和 土	$S_r = 1$	$\gamma_{sat} = (1-n) G_s \gamma_w + n \gamma_w = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = (1+w) \gamma_d$
浸 水 土		$\gamma' = (1-n) (G_s - 1) \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w$

3. 相對密度 (relative density) 相對密度係描述粗粒土壤的一種指數性質，其定義用下式表示之。

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100\% \\ &= \frac{(n_{max} - n)(1 - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})(1 - n)} \times 100\% \\ &= \frac{D_{max}(D - D_{min})}{D(D_{max} - D_{min})} \times 100\% \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中： e_{max} 為砂土最鬆時之最大空隙比。

n_{max} 為砂土最鬆時之最大孔隙率。

D 為砂土在天然狀態下之乾土單位重 即 (1.9) 式之 γ_d 。

D_{min} 為砂土最鬆時之最小乾土單位重。

e_{min} 為砂土最緊密時之最小空隙比。

n_{min} 為砂土最緊密時之最小孔隙率。

D_{max} 為砂土最緊密時之最大乾土單位重。

e 為砂土在天然狀態下之空隙比。

n 為砂土在天然狀態下之孔隙率。

相對密度可用以瞭解砂土之緊密或鬆散程度同時和內摩擦角具有相關，如表 1.7 所示。

表 1.7 砂土之相對密度與其單位重量及內摩擦角間之關係

相 對 密 度 $Dr\%$	0—15	15—35	35—65	65—85	85—100
濕砂之單位重量 (T/m^3)	1.60	1.52—2.00	1.76—2.08	1.76—2.24	>2.08
砂之沒水單位重量 (T/m^3)	0.96	0.88—1.04	0.96—1.12	1.04—1.36	>1.20
內 摩 擦 角	28° 以下	28°—30°	30°—36°	36°—41°	41° 以上
鬆 緊 程 度	極鬆散	鬆 散	普 通	緊 密	極緊密

常之見土壤的空隙比，孔隙率與單位重，如表 1.8 所列。

c. 粘性土壤的塑性 (plasticity)

一個物質單位體，受剪力 τ 作用 (如圖 1.8) 而起剪力變形，其可能發生的變形情形計有三種：

1. 剪力加上後立即發生相當量之變形，但不再繼續。

2. 不論剪力大小如何，變形永遠繼續。

3. 剪力在某限度之下，所起變形如 (1) 項所述；但剪力超過某限度時，變形繼續發生，這種繼續變形，稱為塑流 (plastic flow)。

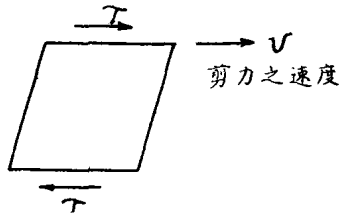


圖 1.8 物質單位體之剪應變

發生 (1) 項變形之物質，謂之固體；發生 (2) 項變形之物質，謂之液體；發生 (3) 項變形之物質，謂之塑性體 (plastic)。粘性土壤，究竟是固體，塑性體，或是液體，完全依含水量的多寡而定。含水量極高之土壤，不具可以測出之剪力強度，可視為液體，含水量漸減至某一限度，可量得一起碼的剪力強度 τ ，作為塑性體開始，這時土壤的含水量，為土壤當作液體與當作塑性體之界限，稱為土壤的液性限度 (liquid limit w_l)，簡稱液限。試驗土壤液限的儀器及試驗