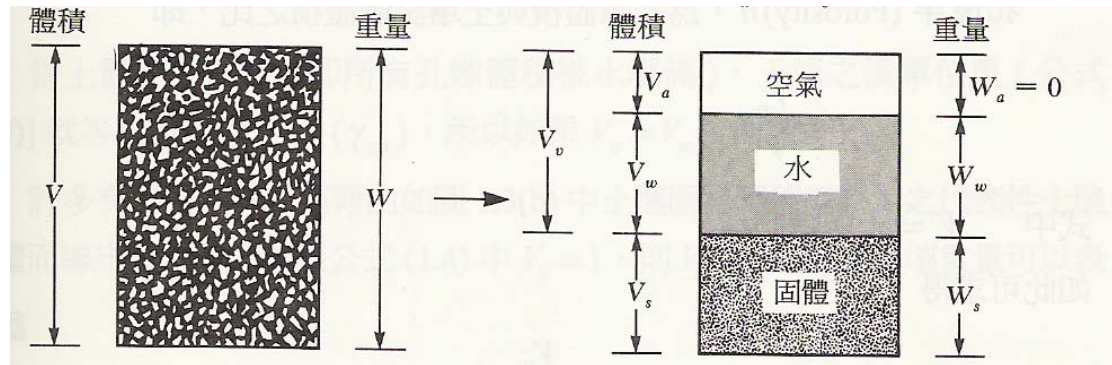


第2章 土壤力學導論 (大地工程原理 DAS)

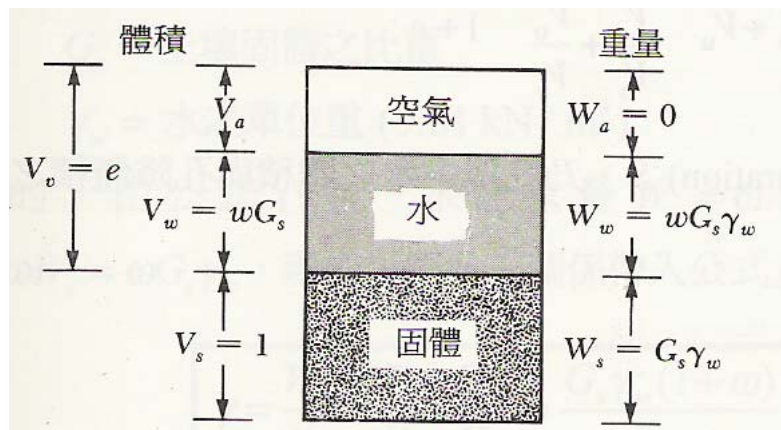
2-1 土壤三相圖

本質上，土壤乃包含固體土壤顆粒、水及空氣(或氣體)之三相系統。爲了發展土壤之重量-體積關係，此三相可分離成如圖 2-1(a)所示。基於此，體積關係可定義如下：

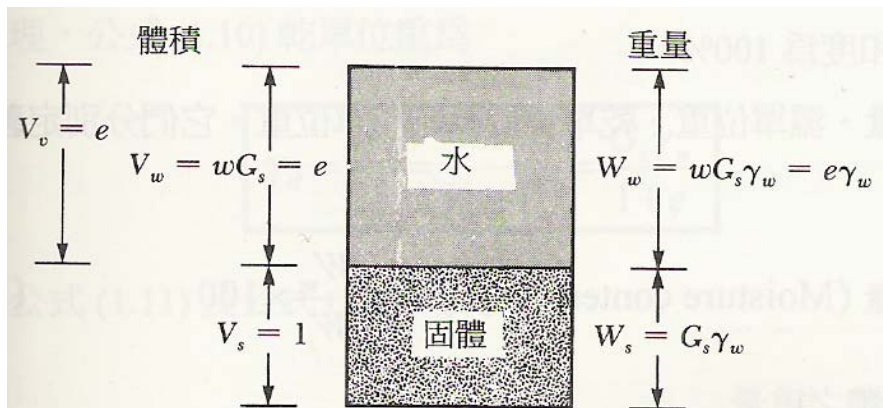


(a)

註：
 $v_a + v_w + v_s = v$
 $w_w + w_s = w$



(b) 不飽和土壤 $V_s=1$



(c) 飽和土壤 $V_s=1$

圖 2-1 土壤三相圖

孔隙比(Void ratio) e ，土體中孔隙和土壤固體體積之比，可寫成

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{式中: } V_v = \text{孔隙體積, } V_s = \text{土壤固體體積}$$

孔隙率(Porosity) n ，為孔隙體積和土壤試體體積之比，即

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \text{式中: } V = \text{土壤總體積。}$$

如此可求得

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1 + e}$$

飽和度(degree of saturation) S ，乃孔隙中水之體積與孔隙體積之比，通常以百分比表示之。所以

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{式中: } V_w = \text{水之體積}$$

飽和土壤其飽和度為 100 %。

重量關係為含水量、溼單位重、乾單位重及飽和單位重。它們分別定義如下：

$$\text{含水量(Moisture content)} = W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

式中: $W_w =$ 水之重量

$W_s =$ 土壤固體之重量

$$\text{濕單位重(Moist unit weight)} = \gamma_t' = \frac{W_t}{V_t}$$

式中: $W =$ 土壤試體之總重量 $= W_s + W_w$

假設土體中空氣之重量 W_a 可以忽略不計。

$$\text{乾單位重(Dry unit weight)} = \gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

當土體完全飽和(即所有孔隙體積被水填滿)，土壤之濕單位重就等於飽和單位重 (γ_{sat})，所以如果 $V_v = V_w$ ，則 $\gamma = \gamma_{sat}$ 。

重量與體積之關係式: $W = G_s V \gamma_w$

許多有用的關係式可藉由如圖 2-1(b)中土壤固體體積等於 1 之代表性土壤試體而導出。注意，如果孔隙比公式中 $V_s = 1$ ，則 $V_v = e$ 則土壤重量可以表示為

$$W_s = G_s \gamma_w \quad \text{式中 } G_s = \text{土壤固體之比重}$$

$$\gamma_w = \text{水之單位重} (9.81 \text{ KN/m}^3)$$

同樣以含水量公式水之重量 $W_w = \omega W_s$ ，因此，此土壤試體 $W_w = \omega W_s = \omega G_s \gamma_w$

現在將此一關係帶入濕單位重公式:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w (1 + \omega)}{1 + e}$$

同理，乾單位重公式為

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$$

由上述二公式可得

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$

如圖 2-1(c)所示如果土壤試體完全飽和

$$V_v = e$$

同時此情況下

$$V_v = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{\omega G_s \gamma_w}{\gamma_w} = \omega G_s$$

因此

$$e = \omega G_s \text{ (僅適用於飽和土壤)}$$

土壤飽和單位重即可決定為

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w + e \gamma_w}{1 + e}$$

類似單位重公式之關係亦可考慮以孔隙率，由具有單位體積之代表性土壤試體而求得。其關係為

$$\gamma = G_s \gamma_w (1 - n)(1 + \omega)$$

$$\gamma_d = (1 - n) G_s \gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = [(1 - n) G_s + n] \gamma_w$$

2-2 各種單位重相關的關係式

前一章節中我們推導出土壤濕單位重乾單位重與飽和單位重之基本關係式表 2-1 列舉一些其它形式與 γ 、 γ_d 、 γ_{sat} 相關之關係式。

表 2-1 各種 γ 、 γ_d 、 γ_{sat} 相關之關係式

溼單位重 (γ)		乾單位重 (γ_d)		飽和單位重 (γ_{sat})	
已知	關係式	已知	關係式	已知	關係式
w, G_s, e	$\frac{(1+w)G_s \gamma_w}{1+e}$	γ, w	$\frac{\gamma}{1+w}$	G_s, e	$\frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e}$
S, G_s, e	$\frac{(G_s + Se)\gamma_w}{1+e}$	G_s, e	$\frac{G_s \gamma_w}{1+e}$	G_s, n	$[(1-n)G_s + n]\gamma_w$
w, G_s, S	$\frac{(1+w)G_s \gamma_w}{1 + \frac{wG_s}{S}}$	G_s, n	$G_s \gamma_w (1-n)$	G_s, w_{sat}	$\left(\frac{1 + w_{sat}}{1 + w_{sat} G_s} \right) G_s \gamma_w$

表 2-1(續) 各種 γ 、 γ_d 、 γ_{sat} 相關之關係式

溼單位重 (γ)		乾單位重 (γ_d)		飽和單位重 (γ_{sat})	
已知	關係式	已知	關係式	已知	關係式
w, G_s, n	$G_s \gamma_w (1-n)(1+w)$	G_s, w, S	$\frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{wG_s}{S}}$	e, w_{sat}	$\left(\frac{e}{w_{sat}}\right) \left(\frac{1+w_{sat}}{1+e}\right) \gamma_w$
S, G_s, n	$G_s \gamma_w (1-n) + nS \gamma_w$	e, w, S	$\frac{eS \gamma_w}{(1+e)w}$	n, w_{sat}	$n \left(\frac{1+w_{sat}}{w_{sat}}\right) \gamma_w$
		γ_{sat}, e	$\gamma_{sat} - \frac{e \gamma_w}{1+e}$	γ_d, e	$\gamma_d + \left(\frac{e}{1+e}\right) \gamma_w$
		γ_{sat}, n	$\gamma_{sat} - n \gamma_w$	γ_d, n	$\gamma_d + n \gamma_w$
		γ_{sat}, G_s	$\frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w) G_s}{(G_s - 1)}$	γ_d, S	$\left(1 - \frac{1}{G_s}\right) \gamma_d + \gamma_w$
				γ_d, w_{sat}	$\gamma_d (1 + w_{sat})$

2-3 土壤分類系統

土壤分類係依照一般工程性質如粒徑分佈、液性限度及塑性限度而將土壤分成若干組和次組。目前使用之兩種主要分類系統是:(1)AASHTO(美國州公路和運輸官員協會)系統；(2)統一系統。AASHTO 分類系統主要用於公路路基之分類，而不用於基礎建造，以下將扼要地說明此兩種系統。

AASHTO 系統

AASHTO 土壤分類系統原由公路研究董事會之路基與礫狀型道路之材料分類委員會(1945)所提出，依此系統目前之形式，土壤可依其粒徑分佈、液性限度及塑性指數分成 8 個主要組別，由 A-1 至 A-8。A-1、A-2 和 A-3 組為粗粒材料，A-4、A-5、A-6 及 A-7 組為細粒材料。而泥炭土、碴(muck)和其它高度有機土則分類在 A-8 組，可用視察法判別。

表 2-2 列示 AASHTO 分類系統(由 A-1 至 A-7 組之土壤)。須注意 A-7 組中有二種形式之土壤。對於 A-7-5 形式之土壤，其塑性指數應小於或等於其液性限度減 30，對於 A-7-6 型式之土壤其塑性指數大於其液性限度減 30

表 2-2 AASHTO 土壤分類系統

一般分類	粒狀材料 (總試樣通過 200 號篩不超過 35%)						
	A-1		A-3	A-2			
組分類	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
篩分析 (通過 %)							
10 號篩	50 max						
40 號篩	30 max	50 max	51 min				
200 號篩	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
通過 40 號篩之部分							
液性限度 (LL)			40 max	41 max	40 max	41 max	
塑性指數 (PI)	6 max		無塑性	10 max	10 max	11 max	11 max
常見之材料型式	石碎屑、礫石和砂土		細砂	粉質或粘質礫石及砂土			
路基分級	極佳至佳						

一般分類	粉土 - 粘土材料 (總試樣通過 200 號篩超過 35%)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5a A-7-6b
篩分析 (通過 %)				
10 號篩				
40 號篩				
200 號篩	36 min	36 min	36 min	36 min
通過 40 號篩部分				
液性限度 (LL)	40 max	41 min	40 max	41 min
塑性指數 (PI)	10 max	10 max	11 min	11 min
常見材料型式	大部分粉質土壤		大部分粘質土壤	
路基分級	好至不良			

a 如果 $PI \leq LL - 30$ ，則為 A-7-5
b 如果 $PI > LL - 30$ ，則為 A-7-6

統一土壤分類系統

統一土壤分類系統最早係由 A.Casgrande 於 1942 年提出，以後經修訂並被美國農墾局和工兵署所採用。目前此系統實際應用於所有大地工作。

表 2-3 統一系統中下列符號被使用以資識別。

符號	描述
G	礫石
S	砂土
M	粉土
C	黏土
O	有機粉土和黏土
P _i	泥炭土和高度有機質土壤
H	高塑性
L	低塑性
W	優良級配
P	不良級配

表 2-3 及塑性圖(圖 2-2)列示出各類型式土壤之分組符號決定程序。在進行土壤分類時之重點為每一分組名稱以一分組符號表示土壤的一般性描述。表 2-4、2-5 及 2-6 分別示出求得粗粒土壤、無機質細粒土壤及有機質細粒土壤分組名稱之準則。這些表乃根據 ASTM 試驗名稱 D-2487 而得。

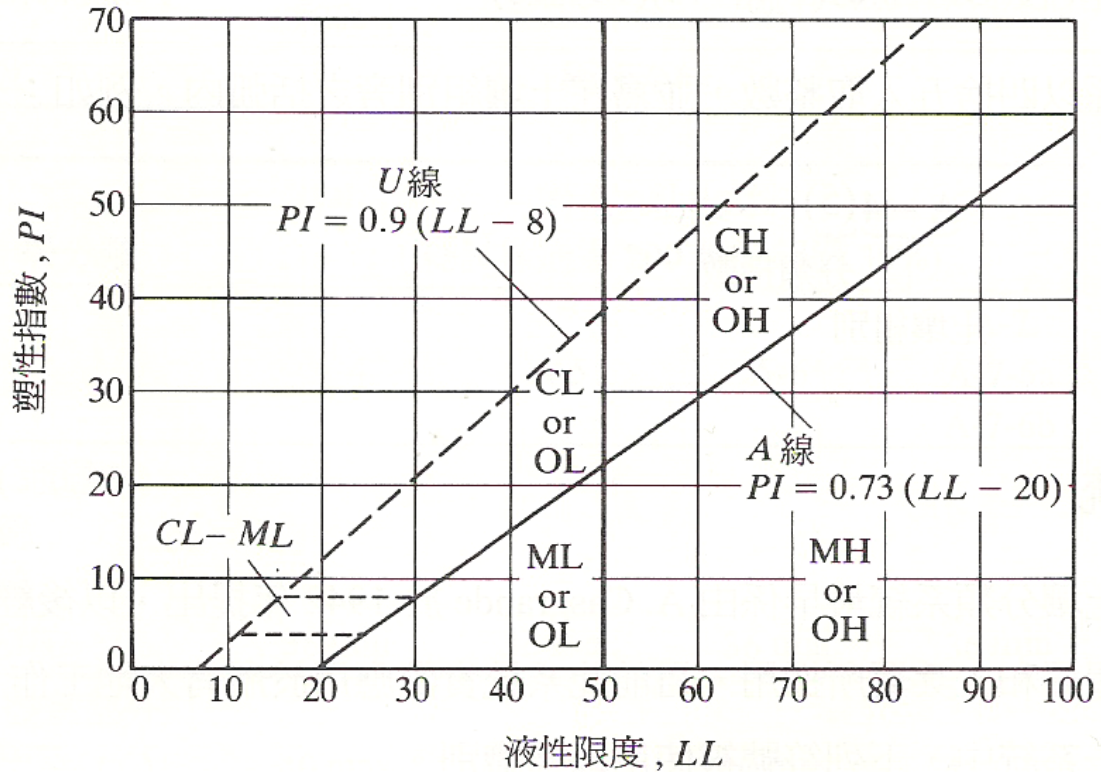


圖 2-2 塑性圖

表 2-4 根據統一土壤分類法之土壤分組符號[基於通過 3-in.(75-mm)篩之材料]

主要類別	準 則	分組符號
粗粒土壤	$F_{200} < 5, C_u \geq 4, 1 \leq C_z \leq 3$	GW
$R_{200} > 5$	$F_{200} < 5, C_u < 4$, 且 (或) C_z 不介於 1 與 3 之間	GP
礫石土	$F_{200} > 12, PI < 4$, 或阿太堡限度落於 A 線下方 (圖 1.5)	GM
$R_4 > 0.5R_{200}$	$F_{200} > 12, PI > 7$, 且阿太堡限度落於 A 線或其上方 (圖 1.5)	GC
	$F_{200} > 12, LL < 50, 4 \leq PI \leq 7$, 且阿太堡限度落於 A 線或其上方	GC-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GW 級配準則和 GM 塑性準則	GW-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GW 級配準則和 GC 塑性準則	GW-GC ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GP 級配準則和 GM 塑性準則	GP-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GW 級配準則和 GM 塑性準則	GP-GC ^a
砂質土壤	$F_{200} < 5, C_u \geq 6, 1 \leq C_z \leq 3$	SW
$R_4 \leq 0.5R_{200}$	$F_{200} < 5, C_u < 6$, 且 (或) C_z 不介於 1 與 3 之間	SP
	$F_{200} > 12, PI < 4$, 或阿太堡限度落於 A 線下方 (圖 1.5)	SM
	$F_{200} > 12, PI > 7$, 且阿太堡限度落於 A 線或其上方 (圖 1.5)	SC
	$F_{200} > 12, LL > 50, 4 \leq PI \leq 7$, 且阿太堡限度落於 A 線或其上方 (圖 1.5)	SC-SM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 SW 級配準則和 SM 塑性準則	SW-SM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GW 級配準則和 SC 塑性準則	SW-SC ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 SP 級配準則和 GM 塑性準則	SP-SM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; 見 GW 級配準則和 GM 塑性準則	SP-SC ^a
細粒土壤 (無機質)	$PI < 4$, 或阿太堡限度落於 A 線下方 (圖 1.5)	ML
$R_{200} \leq 50$	$PI > 7$, 且阿太堡限度落於 A 線或其上方 (圖 1.5)	CL
粉質和粘質土壤	$4 \leq PI \leq 7$, 且阿太堡限度落於 A 線 (圖 1.5)	CL-ML ^a
$LL < 50$	阿太堡限度落於 A 線下方 (圖 1.5)	MH
粉質和粘質土壤	阿太堡限度落於 A 線或其上方 (圖 1.5)	CH
$LL \geq 50$		、
細粒土壤 (有機質)	$\frac{LL_{未烘乾}}{LL_{烘乾}} < 0.75$	OL
有機粉土及粘土		
$LL < 50$		
有機粉土及粘土	$\frac{LL_{未烘乾}}{LL_{烘乾}} < 0.75$	OH
$LL \geq 50$		

註： F_{200} = 通過 200 號篩之百分比； R_{200} = 停留在 200 號篩之百分比； R_4 = 停留在 4 號之百分比； C_u = 均勻係數； C_z = 級配係數； LL = 液性限度； PI = 塑性指數；阿太堡限度基於小於 40 號篩之部分。

^a 落於虛線區之類別，須使用雙重符號。

表 2-5 粗粒土壤之分組名稱 (參考 ASTM 試驗名稱 D-2487)

分組符號	準則		分組名稱
	礫石部分 (%)	砂石部分 (%)	
GW	<15		優良級配之礫石
	≥15		優良級配之礫石 - 砂土混合物
GP	<15		不良級配之礫石
	≥15		不良級配之礫石 - 砂土混合物
GM	<15		粉質礫石
	≥15		粉質礫石 - 砂土混合物
GC	<15		粘質礫石
	≥15		粘質礫石 - 砂土混合物
GC - GM	<15		粉質粘性礫石
	≥15		粉質粘性礫石 - 砂土混合物
GW - GM	<15		優良級配之礫石 - 粉土混合物
	≥15		優良級配之礫石 - 粉土 - 砂土混合物
GW - GC	<15		優良級配之礫石 - 粘土混合物
	≥15		優良級配之礫石 - 粘土 - 砂土混合物
GP - GM	<15		不良級配之礫石 - 粉土混合物
	≥15		不良級配之礫石 - 粉土 - 砂土混合物
GP - GC	<15		不良級配之礫石 - 粘土混合物
	≥15		不良級配之礫石 - 粘土 - 砂土混合物
SW	<15		優良級配之砂
	≥15		優良級配之砂 - 礫石混合物
SP	<15		不良級配之砂
	≥15		不良級配之砂 - 礫石混合物
SM	<15		粉質砂
	≥15		粉質砂 - 礫石混合物
SC	<15		粘質砂
	≥15		粘質砂 - 礫石混合物
SM - SC	<15		粉質粘性砂
	≥15		粉質粘性砂 - 礫石混合物
SW - SM	<15		優良級配之砂 - 粉土混合物
	≥15		優良級配之砂 - 粉土 - 礫石混合物
SW - SC	<15		優良級配之砂 - 粘土混合物
	≥15		優良級配之砂 - 粘土 - 礫石混合物
SP - SM	<15		不良級配之砂 - 粉土混合物
	≥15		不良級配之砂 - 粉土 - 礫石混合物
SP - SC	<15		不良級配之砂 - 粘土混合物
	≥15		不良級配之砂 - 粘土 - 礫石混合物

註：砂土部分 = 通過 4 號篩但停留在 200 號篩上土壤百分比 = $R_{200} - R_4$

礫石部分 = 通過 3 in. 篩但停留 4 號篩上之土壤百分比 = R_4

表 2-6 無機質細粒土壤之分組名稱 (參考 ASTM 試驗名稱 D-2487)

準則					
分組符號	R_{200}	砂土部分			分組名稱
		礫石部分	礫石部分	砂土部分	
CL	< 15				貧級配粘土
	15 to 29	≥ 1			貧級配粘土 - 砂混合物
		< 1			貧級配粘土 - 礫石混合物
	≥ 30	≥ 1	< 15		砂質貧級配粘土
		≥ 1	≥ 15		砂質貧級配粘土
		< 1		< 15	礫石貧級配粘土
< 1			≥ 15	礫石貧級配粘土 - 砂混合物	
ML	< 15				粉土
	15 to 29	≥ 1			粉土 - 砂混合物
		< 1			粉土 - 礫石混合物
	≥ 30	≥ 1	< 15		砂質粉土
		≥ 1	≥ 15		砂質粉土 - 礫石混合物
		< 1		< 15	礫石性粉土
< 1			≥ 15	礫石性粉土 - 砂混合物	
CL-ML	< 15				粉質粘土
	15 to 29	≥ 1			粉質粘土 - 砂混合物
		< 1			粉質粘土 - 礫石混合物
	≥ 30	≥ 1	< 15		砂質粉性粘土
		≥ 1	≥ 15		砂質粉性粘土 - 礫石混合物
		< 1		< 15	礫石性粉質粘土
< 1			≥ 15	礫石性粉質土 - 砂混合物	
CH	< 15				肥粘土
	15 to 29	≥ 1			肥粘土 - 砂混合物
		< 1			肥粘土 - 礫石混合物
	≥ 30	≥ 1	< 15		砂質肥粘土
		≥ 1	≥ 15		砂質肥粘土 - 礫石混合物
		< 1		< 15	礫石性肥粘土
< 1			≥ 15	礫石性肥粘土 - 砂混合物	
MH	< 15				彈性粉土
	15 to 29	≥ 1			彈性粉土 - 砂混合物
		< 1			彈性粉土 - 礫石混合物
	≥ 30	≥ 1	< 15		砂質彈性粉土
		≥ 1	≥ 15		砂質彈性粉土 - 礫石混合物
		< 1		< 15	礫石性彈性粉土
< 1			≥ 15	礫石性彈性粉土 - 砂混合物	

註： R_{200} = 停留 200 號篩之土壤百分比；砂土部分 = 通過 4 號篩但停留在 200 號上之土壤百分比 = $R_{200} - R_4$ ；礫石部分 = 通過 3 in. 篩但停留 4 號上之土壤百分比 = R_4 。

表 2-7 有機質細粒土壤之分組名稱 (參考 ASTM 試驗名稱 D-2487)

分組符號	塑性	準 則			分組名稱		
		R_{200}	砂土部分 礫石部分	礫石 部分		砂土 部分	
OL	$PI \geq 4$ ，且阿	< 15			有機性粘土		
			大堡限度落於	≥ 1		有機性粘土 - 砂混合物	
	A 線上或上方	$15 \text{ to } 29$	≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粘土 - 礫石混合物	
			≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粘土	
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粘土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粘土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	礫質有機性粘土
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	礫質有機性粘土 - 砂混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粉土
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	有機性粉土 - 砂混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粉土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粉土
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粉土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粉土 - 礫石混合物
			≥ 30	≥ 1	< 15	礫質有機性粉土	
			≥ 30	≥ 1	≥ 15	礫質有機性粉土 - 砂混合物	
OH	阿太堡限度落	< 15			有機性粘土		
			於 A 線上或	≥ 1		有機性粘土 - 砂混合物	
	上方	$15 \text{ to } 29$	≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粘土 - 礫石混合物	
			≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粘土	
				≥ 30	≥ 1	< 15	砂質有機性粘土 - 砂土混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粘土 - 砂土混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	礫質有機性粘土
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	礫質有機性粘土 - 砂混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粉土
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	有機性粉土 - 砂混合物
				≥ 30	≥ 1	< 15	有機性粉土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粉土
				≥ 30	≥ 1	< 15	砂質有機性粉土 - 礫石混合物
				≥ 30	≥ 1	≥ 15	砂質有機性粉土 - 礫石混合物
			≥ 30	≥ 1	< 15	礫石有機性粉土	
			≥ 30	≥ 1	≥ 15	礫石有機性粉土 - 砂混合物	

註： R_{200} = 停留 200 號篩上之土壤百分比；砂土部分 = 通過 4 號篩但停留在 200 號上之土壤百分比 = $R_{200} - R_4$ ；礫石部分 = 通過 3 in. 篩但停留 4 號上之土壤百分比 = R_4 。

2-4 土壤之滲透性

滲透性

存在於土壤類粒間之孔隙容許水流經過。在土壤力學與基礎工程中，我們必須知道在單位時間內有多少水流經某一已知土壤。在設計土壩、決定水工結構物之滲流量和建造基礎期間之怯水都必須具備此種涵養。於 1856 年，達西提出下列公式(圖 2-3)計算水流經土壤之流速。

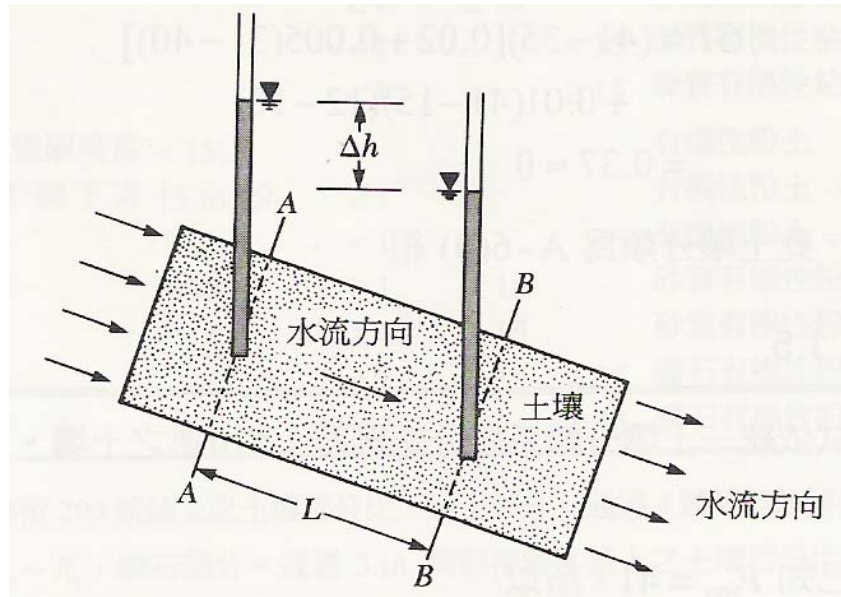


圖 2-3 達西定律之定義

$$v = ki$$

式中 v = 速度 (單位: cm/sec)

k = 土壤滲透係數(coefficient of permeability)(單位 cm/sec)

i = 水力坡降(hydraulic gradient)

水力坡降(i)可定義為

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

式中 Δh = 斷面 AA 與 BB 間之壓力水頭差

ΔL = 斷面 AA 與 BB 間之距離

(註: 斷面 AA 與 BB 垂直於水流方向)

達西定律(Darcy's law)廣泛通用於各類型式之土壤。但是，如乾淨礫石及開放級配填石(open-graded rockfill)，因水流通過之紊流性質而無法通用達西定律。

各類土壤之滲透性係數值變化相當大，在試驗室中可藉由定水頭(constant head)或變水頭(falling head)透水試驗求得。定水頭試驗較適用於粒狀土壤。表 2-9 列出各種土壤 k 值之一般範圍，在粒狀土壤中，此值主要視孔隙比而定。

表 2-9 各種土壤 k 值之範圍

土壤型式	滲透性係數 k (cm/sec)
中等至粗礫石	大於 10^{-1}
粗至細砂	10^{-1} 至 10^{-3}
細砂，粉質砂	10^{-3} 至 10^{-5}
粉土，粘質粉土，粉質粘土	10^{-4} 至 10^{-6}
粘土	10^{-7} 或更小

Hazen(1930)提出一個計算相當均勻砂土滲透性係數之公式，即

$$k = CD_{10}^2$$

式中 k =單位為(mm/sec)

C =在 1.0 與 1.5 間變化之常數

D_{10}^2 =土壤有效粒徑(單位 mm)

流線網

對大部分水工結構之地下滲流情況，其水流路徑會改變方向且不會均勻通過全部斷面，此種情況下之滲流率可用繪流線網之圖解法求得。流線網係基於 Laplace 連續理論，依此理論，在穩定狀態下，任何一點 A 圖(2-4)之水流可用公式表示為：

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

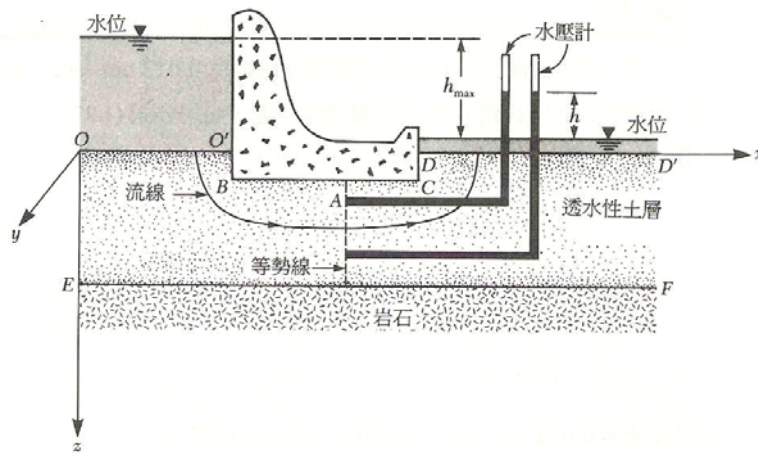


圖 2-4 穩定狀態之滲流

h =A 點水頭高

k_x, k_y, k_z =分別為土壤在 xyz 方向之滲透係數

上述之公式為 Laplace 公式且適用於受壓水流，代表二組互相垂直之曲線即所謂之流線與等勢線。流線網係由若干等勢線與流線組合而成，流線乃水分子由上游側流至下游側所行經之路徑，等勢線則為水壓計昇高至相同高程之線(參見圖 2-4)。

於繪製流線網時，須先建立邊界條件，例如圖 2-4 中，上游地表(OO')和下游地表(DD')為等勢線，在地表下之壩底 $O'BCD$ 和岩石表面 EF 為一流線。一旦邊界條件建立後流線和等勢線可用試誤法使得所有流網元素具有相同之長寬比(L/B)而繪出。通常情況， L/B 比維持等於 1，亦即，流網元素劃成如曲線式之正方形，如圖 2-5 所示之流線網，注意，所有流線必須和等勢線成直角相交。

一旦流線網繪出後，構造物在單位長度，單位時間內之滲流量可以計算為：

$$q = kh_{\max} \frac{N_f}{N_d} n = ki$$

式中 N_f = 流槽數

N_d = 落距數

n = 流線網中流網元素與長寬比

h_{\max} = 上游側與下游側之水位差

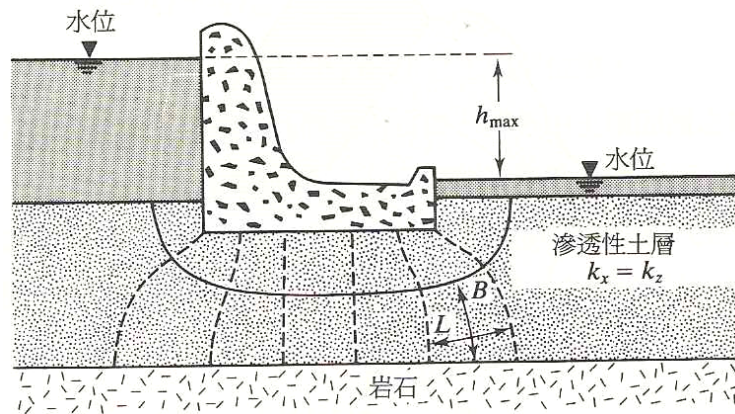


圖 2-5 流線網

2-5 土壤之壓密

當飽和土壤所受應力增加時，孔隙水壓立刻增加。在透水性很高的砂土中，孔隙水壓增加所導致之排水，瞬時之間即完畢。孔隙水壓消散的同時也使得土壤體積變小，進而產生沈陷。因為砂土中孔隙水壓快速的消散，瞬時與壓密沈陷同時發生。

當飽和而具有壓縮性黏土壤所受應力增加時，彈性沈陷在瞬時間內發生。因為黏土之水力傳導性遠低於砂土，由受載而產生之超額孔隙水壓需要很長的時間來慢慢消散。所以，黏土中與孔隙水壓消散同時進行之體積變化(也就是，壓密)在瞬時沈陷完成後還會繼續很長的一段時間。黏土中因壓密而產生之沈陷可能比瞬時沈陷要大上好幾倍。

正常壓密與過壓密黏土

土壤在現地之深度下於過去地質歷史的過程中，已承受過最大之有效應力。此過去所承受之最大有效應力，可能等於，或小於在取樣時存在於土壤中之覆土壓力。現地土壤中壓力之減低，可以來自於天然地質的變化或人為的因素。在取土樣的過程中，原存在於土壤中之覆土壓力也被解放，這造成土樣些許的膨脹。當土樣在做壓密試驗時，如果所施加於土樣上之總壓力低於此土壤在現地所會受過最大之有效覆土壓力時，其壓縮量會很小(也就是說，孔隙比之改變很小)。如果所施加於土樣上之總壓力高於此土壤在現地所會受過最大之有效壓力時，其孔隙比之改變會大很多，同時 $e-\log \sigma'$ 曲線幾乎是直線而且斜率比較陡。

以上之敘述帶來了兩種與黏土受力歷史相關之定義:

1. 正常壓密(normally consolidated), 土壤現有之有效覆土壓力是其所曾受過最大之壓力。
2. 過壓密(overconsolidated)土壤現有之有效覆土壓力低於其所曾受過最大之壓力。而過去所曾受過最大之有效壓力叫做預壓密壓力(preconsolidation pressure)

土壤之過壓密比(OCR)可以定義為

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_c}{\sigma'}$$

其中 σ'_c = 試體之預壓密壓力

σ' = 現存有效垂直壓力

正常壓密黏土之壓密作用

$$\Delta e = C_c [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log \sigma'_0]$$

其中 $C_c = e - \log \sigma'$ 曲線之斜率定義為(compression index)帶入公式得到

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)$$

過壓密土壤之壓密作用

當 $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$ 時, 現地 $e - \log \sigma'$ 之關係會隨著 h_j 曲線改變, 此一部分曲線之斜率與試驗中之回脹曲線之斜率類似, 回脹曲線之斜率, C_s 稱之為膨脹指數(swell index)所以

$$\Delta e = C_s [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log \sigma'_0]$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)$$

如果 $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$ 則

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right)$$

2-6 土壤之剪力強度

土體之剪力強度(shear strength)是每單位面積所能提供防止土體內沿任何平面的破壞或滑動之阻抗，我們必須了解剪力阻抗之特性，才能分析土壤穩定的問題，如基礎承載力、邊坡穩定、與擋土結構所受之橫向土壓力等。

摩爾庫倫破壞準則

摩爾(Mohr1900)提出了材料破裂的理論，認為一材料之破壞是因為正向應力與剪應力之組合達到一臨界狀況，而非單獨的最大正向應力或剪應力所造成。所以，破壞面上之正向應力與剪應力有一如下之函數關係：

$$\tau_f = f(\sigma)$$

公式所定義之破壞包絡線是一曲線。在大多數之土壤力學問題中，約略假設在破壞面上之剪應力是正向應力之線性函數即足夠(Coulomb 1776)此一線性函數可以寫成

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

其中 c =凝聚力

ϕ = 摩擦角

σ = 破壞面上之正向應力

τ_f = 剪力強度

以上之關係稱為摩爾-庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criteria)。

在飽和土壤中，在任何一點之總應力是有效應力(σ')與孔隙水壓(u)之總和，或

$$\sigma = \sigma' + u$$

有效應力 σ' 是由土壤固體來承擔。摩爾-庫倫破壞準則，使用有效應力來表示，則有以下之形式

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

其中 c' =凝聚力而 ϕ' = 摩擦角，根據有效應力。

所以，公式所表示的分別是根據總應力與以有效應力所得之剪力強度。砂土與無機粉土之 c' 值是0。對正常壓密之黏土而言， c' 大約是0。過壓密黏土之 c' 值大於0。摩擦角 ϕ' 有時也稱做排水摩擦角(drained angle of friction)。在圖 2-6 中， fg 乃是根據關係式 $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ 所定義之破壞包絡線。

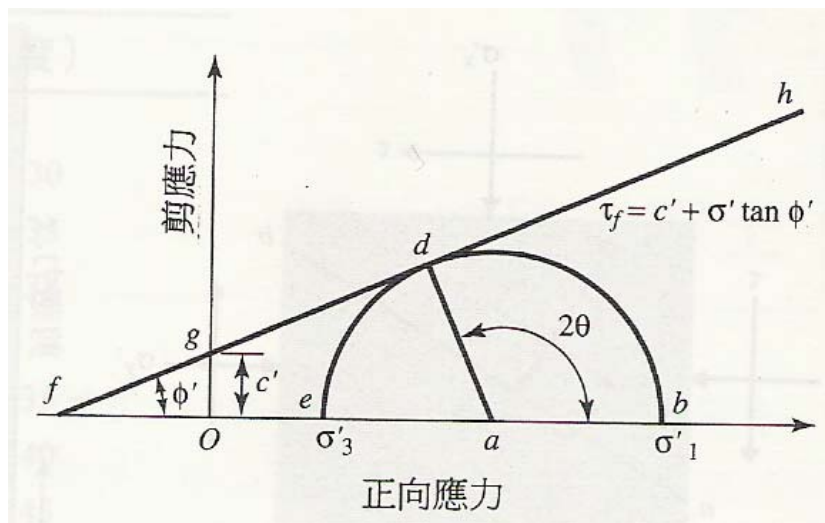


圖 2-6 摩爾圓與破壞包絡線

因此

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

也可使用總應力參數

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$