

序列滲流對地工皂土毯工程性質之影響

Effect of Sequential Permeation on the Engineering Properties of Geosynthetic Clay Liners

計畫編號：NSC89-2211-E009-033

執行期限：88/8/1 - 89/7/31

主持人：單信瑜 國立交通大學土木工程學系 副教授

一、中文摘要(關鍵詞：)

本研究之目的主要在於探討不飽和黏質土壤孔隙壓力參數之變化。本研究之試驗乃利用改良式單向度壓密滲透儀與壓力容器來進行不飽和土壤體積變形試驗及相關保持曲線實驗，觀察體積變化以推求孔隙壓力參數，最後並利用土壤—水保持曲線試驗結果來建立孔隙壓力參數隨結構張力變化之線性方程式。實驗結果顯示：土壤孔隙壓力參數會隨飽和度下降而成非線性減小，分析中也發現孔隙壓力參數的變化與正規化土壤—水保持曲線有近似的趨勢，藉由這層關係推導出孔隙壓力參數隨對數化結構張力變化之線性方程式。

ABSTRACT (Keywords:)

The engineering problems related to unsaturated soils are land subsidence resulting from change of effective stress and slope stability. The objective of this research is to study the pore pressure factor of unsaturated soils. The pore pressure factor varies with the degree of saturation. Deformation tests and soil-water characteristic tests of unsaturated soils were performed by using specially designed consolidometer simulate the behavior of field suction. The experimental results indicate that pore pressure factor of soils will decrease nonlinearly with degree of saturation. The results also show that pore pressure factor is closely related to soil-water characteristic curve. Equation for pore pressure factor and matric suction is developed.

二、計畫緣由與目的

土壤力學發展至今將近一百年的歷史中，絕大多數都是集中在飽和與完全乾燥土壤的問題處理，對於不飽和土壤的重視直到西元 1936 年第一屆國際土壤力學及基礎工程

會議才被提出，而不飽和領域真正受到大家廣泛研究卻已是 1950 年以後的事。在如此偏重飽和土壤研究的情形下，飽和土壤行為的理論及公式不能準確且直接地應用在負的孔隙水壓之不飽和土壤範圍。然而許多工程建設皆位於地下水位以上之不飽和層，如何有效掌控該區域土壤之行為，便是決定工程成敗的因素。

鑑於對不飽和土壤有效應力瞭解之不足，故透過一系列體積變形試驗以估計出不飽和土壤有效應力作為初步的認識與釐清。由於不飽和土壤機制的理論相當龐大，故本研究將重心放在孔隙壓力參數()的求取上，以期準確求得飽和土壤有效應力，並進一步應用在土壤工程等相關問題中。

三、研究方法及成果

3.1 試驗土壤

本研究選用之四種土樣分別為含細粒料含量 5% 及 30% 頭前溪砂，新竹地區紅土、高嶺土，頭前溪砂控制其相對密度在 60%，至於中壠紅土及高嶺土方面，則參考姚振天(1998)所作之 48% 改良夯實能量曲線，取略高於 O.M.C 之孔隙比為初始孔隙比，並以 O.M.C+2% 之含水量來夯實試體，試驗土樣之物理性質和初始條件列於表 3.1 及表 3.2。

表 3.1 試驗土壤基本物理性質

(a) 砂質土壤物理性質

	比重	最大乾密度 (kg/cm ³)	最小乾密度 (kg/cm ³)
5% 頭前溪砂	2.65	1.677	1.374
30% 頭前溪砂	2.65	1.862	1.478

(b) 黏質土壤物理性質(O.M.C)

	比重	乾密度 (kg/cm ³)	孔隙比
高嶺土	2.71	1.27	1.134
新竹紅土	2.58	1.72	0.5

表 3.2 試驗土壤初始條件

(a) 砂質土壤初始條件($D_r=60\%$)

	乾密度 (kg/cm^3)	孔隙比	飽和含水量 (%)	乾土量(g)
5%細料砂	1.541	0.719	27.13	649.65
30%細料砂	1.687	0.571	21.55	711.20
高嶺土	1.231	1.2	44.28	519.31
新竹紅土	1.29	1	38.75	543.83

實驗方法以經過改良的剛性壁壓密滲透儀，先將重模土樣進行壓密，之後控制不同的氣、水壓力來改變土壤之應力狀態，記錄土壤體積及孔隙水的變化，以求出孔隙壓力參數隨飽和度不同的改變趨勢。

3.2 試驗儀器與步驟

3.2.1 土壤-水保持曲線試驗

對於本研究中之四種土樣，依照砂性和黏性土壤來區分，而利用不同儀器來得到保持曲線。對於 5%、30% 細粒料含量之頭前溪砂而言，由於張力值較小，故採用美國 Soil Moisture 公司製造之 Tempe 壓力儀即可，氣壓控制的範圍為 0~70 kpa。至於本研究中中壠紅土及高嶺土之黏性土壤，由於空氣進入張力值較高，需要以較高之空氣進入壓力之陶瓷片來施作，故以 ASTM D2325-68 壓力平板試驗(Pressure Plate Test)進行之，試驗壓力範圍介於 0~900kpa，由空壓機提供氣壓，在高壓部份利用外接氮氣瓶提供氣壓。

表 3.3 實驗用土樣保持曲線試驗結果

	空氣進入壓力 (kpa)	殘餘含水比 θ_r (%)
5%頭前溪砂	6.87	5.76
30%頭前溪砂	13.74	5.25
新竹紅土	50.5	13.5
高嶺土	101	34

3.2.2 不飽和壓密儀器簡介及其改良

本研究所採用之單向度剛性壁壓密滲透儀其原始設計是美國 Trautwein Soil Testing Equipment Co.所製造壓密滲透儀。為有效控制土壤之飽和度以及克服之前實驗之困難，故做出以下幾點改良：

1. 壓力室底部放置陶瓷片，提供較高的空

氣進入值。

2. 為防止空氣從陶瓷片與底部凹槽的接觸邊緣溢流失去其阻隔空氣之功能，於底部排水孔外圈放置 O 環。
3. 避免乾燥空氣造成土內水分蒸散，接一飽和蒸氣壓裝置於加氣壓之閥門。
4. 壓力室頂蓋底下由外往內做斜坡，以防止空氣聚積於頂端影響到總體積的改變量。

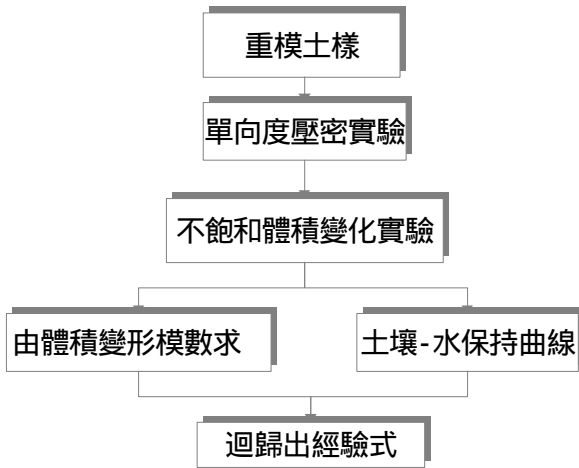
3.2.3 單向度飽和壓密實驗

根據 ASTM D2435-90 試驗規範進行，惟試驗步驟依本實驗所需略有修正，以本研究改良之單向度剛性壁壓密儀進行。

3.2.4 不飽和土壤體積變形試驗

土樣飽和完成後實驗步驟如下：

1. 先將飽和試體進行壓密，壓密有效應力為 274.8kpa，壓密時間持續 12 小時。
2. 固定反水壓力，同步調整總應力及氣壓力 u_a ，使得 $(-u_a)=274.8\text{kpa}$ 。
3. 在 $(-u_a)$ 不變的情況下，階段性調整 (u_a-u_w) 的大小，砂質土壤結構張力每階段增加 3.435kpa，直至出水量變化不甚顯著時，再加大結構張力的改變量，最大曾至 103.05 kpa；黏質土壤結構張力每階段改變 55.2 kpa，結構張力對出水量的改變不甚明顯時，加大結構張力的，最大至 552 kpa。各階段需量測體積及排水量的變化，持續記錄 24 小時直到土壤內張力平衡。
4. 加壓階段(結構張力增加)共分六次，再同步解壓，解壓間距同樣為 24 小時。



103.05	5.9E-06	0.067	1.735	2.7E-05	0.256	21.10	6
--------	---------	-------	-------	---------	-------	-------	---

(b) 黏土

土樣	高嶺土			新竹紅土		
	m_2^s (kpa ⁻¹)		Sr(%)	m_2^s (kpa ⁻¹)		Sr(%)
$u_a - u_w$ (kpa)						
55.12	0.000109	0.968	0.826	9.46E-05	0.743	0.652
110.24	0.000259	0.967	0.808	9.03E-05	0.632	0.512
165.36	0.000164	0.850	0.781	1.50E-04	1.070	0.434
220.48	0.000155	0.829	0.764	3.60E-04	3.303	0.396
275.6	0.000156	0.715	0.733	5.08E-04	4.841	0.364
330.72	0.000057	0.642	0.725	4.03E-04	4.687	0.336
385.84	0.000080	0.620	0.716	3.02E-04	2.343	0.316
440.96	0.000146	1.118	0.695	3.28E-05	0.508	0.302
496.06	0.000145	1.190	0.678	3.81E-05	0.493	0.283
551.18	0.000106	0.544	0.665	2.68E-05	0.297	0.272

灰色背景表孔隙壓力參數突增現象

四、結與果討論

將各土樣於每個結構張力改變階段所對應之 m_2^s 及 t 值列於表 4.1 中，可知孔隙壓力參數 t 會隨飽和度降低而由 1 變化至完全乾燥時的 0，但不會隨飽和度呈線性變化。高嶺土方面在受結構張力作用而排水的過程中，張力值只施予至 551 kPa 便不再增加，故仍舊有較高之含水量保留在土中，因此趨近於乾燥狀態之孔隙壓力參數便無法求得。

表 4.1 各不飽和土樣之體積壓縮係數、孔隙壓力參數及飽和度

(a) 砂土

	5%細粒料砂			30%細粒料砂		
	m_2^s (kpa ⁻¹)		Sr(%)	m_2^s (kpa ⁻¹)		Sr(%)
0	1E-04	1.000	100.000	0.00013	1.000	99.77
3.435	7.3E-05	0.821	97.479	0.00016	1.476	97.96
6.87	6.6E-05	0.739	90.260	9.8E-05	0.914	92.00
10.305	5.8E-05	0.657	76.948	7.5E-05	0.704	79.14
13.74	4.4E-05	0.493	59.714	6.8E-05	0.633	76.69
17.175	3.7E-05	0.415	13.036	5.7E-05	0.529	52.22
20.61	3E-05	0.341	6.910	4E-05	0.378	47.21
30.915				3.8E-05	0.353	36.39
48.09	1.4E-05	0.154	4.381	3.7E-05	0.348	26.74

觀察孔隙壓力參數 t 隨飽和度變化數據中可發現，當高嶺土飽和度為 69% 時， t 大於 1；新竹紅土部份則當飽和度介於 43%~31% 時出現了孔隙壓力參數比 1 大很多的現象，雖然 Sparks(1963)在推導孔隙壓力參數理論值時曾指出 t 值大於 1 的可能性，不過，該理論值是建立在土壤顆粒與水間之接觸角 (Contact Angle) 為 45 度的情況下，但羅文俊 (1997) 實驗之數種土樣其不飽和壓密結果也顯示孔隙壓力參數 t 大於 1 的情況，據推斷此現象應該與孔隙水不連續狀態的臨界點有關。故不論高嶺土或新竹紅土，由體積變形試驗所計算而得孔隙壓力參數之結果均能佐證 Bishop (1961) 認為 t 介於 0 1 之假設。至於 t 值突增的現象現階段無足夠的實驗數據以資比較，且氣水不連續段變化之詳細作用機制亦無定論，故目前只能認知黏質土壤飽和和壓密過程中有此種現象存在的可能。

考慮到孔隙壓力參數 t 為介於 0 與 1 之間的數，修正定義 $t = \frac{u_a - u_w}{u_s - u_r}$ 之關係式如

下： $t = \Theta = \frac{u_a - u_w}{u_s - u_r}$ 為正規化體積含水比 (Normalized Volumetric Water Content)。

高嶺土正規化保持曲線結果與孔隙壓力參數有頗為近似的關係存在，除了當結構張力介於 400~550 kPa 時因氣水不連續造成值變化較大的現象外，大致上兩曲線趨勢皆

互相吻合；新竹紅土也因氣水不連續介面造成某些加壓段比較結果差異大。整體來說利用保持曲線正規化結果來替代孔隙壓力參數值是可以被接受的，所以實際的工程應用上，只要藉由土壤—水保持曲線試驗結果就能將工程問題迎刃而解。

另外，在不飽和土壤連續變形曲面中，若將應力座標軸改以對數刻度，可得體積變率與應力對數約略成線性關係，同理將之延伸至體積含水比與結構張力對數關係上，也能夠迴歸出一近似直線，進而利用此線性關係，我們可以將正規化體積含水比（或孔隙壓力參數）與對數刻度結構張力方程式化，方法如下：

$$\theta = a - b \cdot \log(u_a - u_w) \quad (4.1)$$

其中 a、b 為迴歸參數，定義空氣進入壓力所對應之體積含水比為 θ_s ，因此：

$$\theta_s = a - b \cdot \log(u_a - u_w)_a \quad (4.2)$$

同理，殘餘體積含水比 θ_r 所對應之結構張力為 $(u_a - u_w)_r$ ：

$$\theta_r = a - b \cdot \log(u_a - u_w)_r \quad (4.3)$$

解聯立方程便得迴歸參數 a、b 如下：

$$a = \frac{\theta_s \cdot \log(u_a - u_w)_r - \theta_r \cdot \log(u_a - u_w)_a}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_a} \quad (4.4)$$

$$b = \frac{\theta_s - \theta_r}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_a} \quad (4.5)$$

正規化保持曲線表示如下：

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_s} = p - q \cdot \log(u_a - u_w) \quad (4.6)$$

將 a、b 代入上式，解得 p、q 代入，可得兩土樣正規化體積含水比方程式如下：

高嶺土：

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_s} = 1.59 - 0.34 \cdot \log(u_a - u_w) \quad (4.7)$$

新竹紅土：

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_s} = 2.43 - 0.79 \cdot \log(u_a - u_w) \quad (4.8)$$

表 4.2 實驗值與半對數下線性關係比較表

$u_a - u_w$ (kPa)	高嶺土		新竹紅土	
	實驗值	線性關係值	實驗值	線性關係值
55.12	0.97	1.00	0.74	1.05
110.24	0.97	0.98	0.63	0.78
165.36	0.85	0.92	1.07	0.65
220.48	0.83	0.87	3.30	0.57
275.60	0.72	0.83	4.84	0.50
330.72	0.64	0.80	4.69	0.44
385.84	0.62	0.78	2.34	0.39
440.96	1.12	0.76	0.50	0.35
496.08	1.19	0.74	0.49	0.32
551.20	0.54	0.72	0.29	0.28

55.12	0.97	1.00	0.74	1.05
110.24	0.97	0.98	0.63	0.78
165.36	0.85	0.92	1.07	0.65
220.48	0.83	0.87	3.30	0.57
275.60	0.72	0.83	4.84	0.50
330.72	0.64	0.80	4.69	0.44
385.84	0.62	0.78	2.34	0.39
440.96	1.12	0.76	0.50	0.35
496.08	1.19	0.74	0.49	0.32
551.20	0.54	0.72	0.29	0.28

灰色背景表孔隙壓力參數突增現象

由表中及圖中均顯示出藉由線性關係能夠大略地計算出孔隙壓力參數的大小，的初始值幾乎由 1 開始遞減的。高嶺土不計值突增段的話，則計算值和實際量得的誤差最大約 0.18；而新竹紅土誤差都在 0.17 以內，初步確立了此種線性方程式的可行性。不過高嶺土實驗所得值分佈的最小值為 0.54，仍然不夠明確表示出值由 1 遞減至驅近於 0 的假設。另相同的應力變化範圍內，新竹紅土值分佈情型較高嶺土廣。

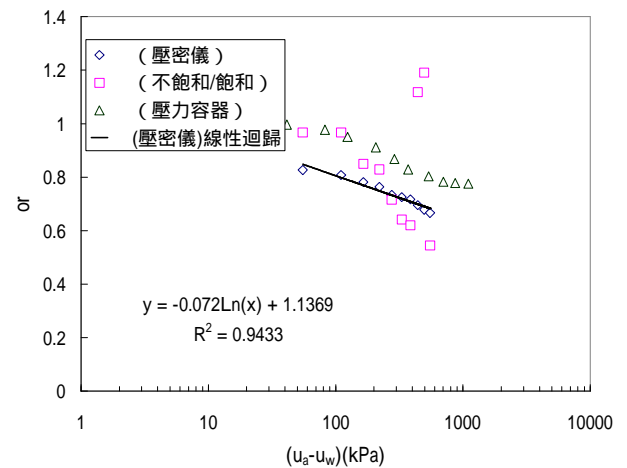


圖 4.1 高嶺土與對結構張力對數之線性關係圖

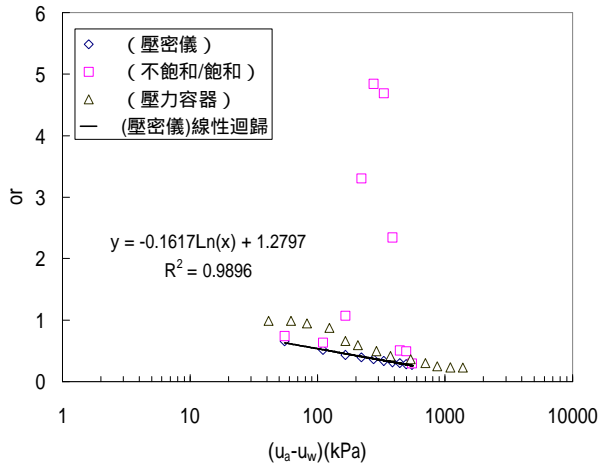


圖 4.2 新竹紅土 與 對結構張力對數之線性關係圖