

反覆增減孔隙水壓下的土壤行為

張光宗⁽¹⁾ 廖睿凱⁽²⁾

摘要

本研究探討孔隙水壓變化對土壤行為的影響，我們使用三軸試驗反覆增減孔隙水壓，分別對無凝聚性與凝聚性土壤進行試驗。結果顯示，無凝聚性土壤的強度受孔隙水壓反覆增減行為影響有限。而凝聚性土壤會隨孔隙水壓反覆增減的影響而強度弱化，會在低於單調荷重強度下的應力產生破壞，反覆增減孔隙水壓對凝聚性土壤行為有顯著的影響。

(**關鍵詞**: 三軸試驗、孔隙水壓、潛變)

Soil Behavior under cyclic changes of pore water pressure

Kuang-Tsung Chang⁽¹⁾ *Ruei-Kai Liao*⁽²⁾

Professor⁽¹⁾, Graduate Student⁽²⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

To find out how the changes of pore water pressure affects the slope behavior, we conducted the triaxial test with sinusoidal cyclic changes of pore pressure on non-cohesive and cohesive soils. The test results show that the behavior of non-cohesive soil is slightly affected by the cyclic changes of pore pressure, whereas cohesive soil is weakened due to the cyclic changes of pore pressure, which can induce failure at the stress that is less than the strength under monotonic loading. Cyclic changes of pore pressure significantly affect the behavior of cohesive soil .

(**Keywords**: triaxial test, pore water pressure, creep)

⁽¹⁾國立中興大學水土保持學系 教授

⁽²⁾國立中興大學水土保持學系 碩士生 (通訊作者, email: bq720964@gmail.com)

前言

很多邊坡的滑動和每次豪雨造成地下水位反覆上升與下降往往有關，南投縣廬山滑動邊坡幾十年來因為豪雨陸陸續續產生滑動，這些豪雨使滑動體內的地下水反覆的升降，造成邊坡滑動。

Eigenbrod (1993)研究一淺層的地滑，包括野外調查監測及反覆改變孔隙水壓的三軸試驗，指出此地滑地沒有明顯的滑動面，主要是深度 2 米內的黏土有潛移的情況，跟孔隙水壓反覆改變有關。Take and Bolton(2011)進行邊坡模型的離心機試驗，模擬黏土邊坡季節性的乾季濕季，孔隙水壓的循

環變化，造成邊坡不可逆的位移和漸進破壞，其邊坡模型控制降雨及濕度改變，造成基質吸力變化，進而改變孔隙水壓。Chang and Huang (2015)進行土壤三軸排水試驗，發現固定軸差應力下，反覆增減試體內的孔隙水壓，試體會累積軸差應變，但每一次循環的軸差應變增量逐漸減小。Sawicki et al.(2013)進行飽和砂土三軸排水試驗，固定軸差應力後反覆改變試體內的孔隙水壓，會累積軸差應變，而體積應變維持定值。圖 1 為應變和孔隙水壓增減循環次數的關係；此土壤行為被稱為「視潛變」，軸差應變隨著孔隙水壓反覆循環次數增加而增加就如同剪應力固定下，軸差應變隨著時間而增加，他們提到此狀況類似海床下地質材料受到的應力路徑，也類似固體材料的潛變行為。

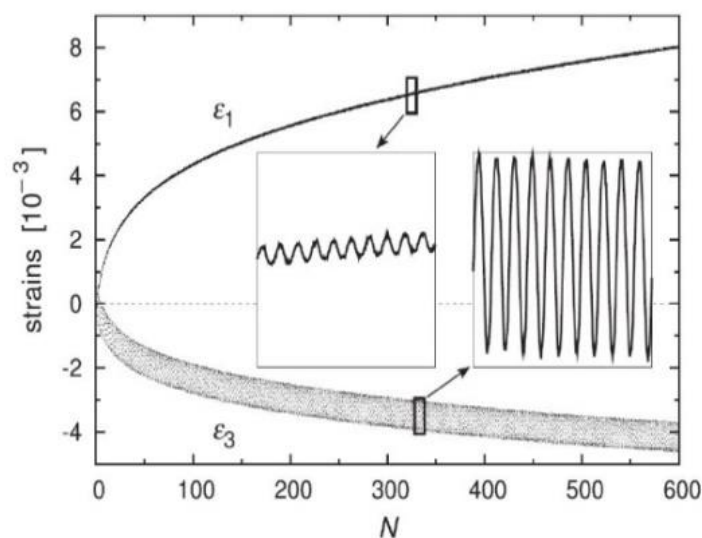


圖 1 緊砂最大最小主應變和孔隙水壓增減循環數的關係 (Sawicki et al., 2013)

Figure 1 Relationship between principal strains and number of cycles of pore pressure changes (Sawicki et al., 2013)

研究方法與步驟

1. 研究方法

邊坡內的元素受到某一有效平均應力 $P'=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3$ 和軸差應力 $q=\sigma_1-\sigma_3$ ，反覆的孔隙水壓升降應力路徑如圖 2，相當於有效

平均應力 P' 反覆改變。為了瞭解此種地滑機制，有必要先瞭解地質材料在此應力路徑下的行為。土壤在三軸壓密排水試驗的行為，在前期土壤變形之後，分為應變軟化(strain softening)與應變硬化(strain hardening)兩種行為。本研究試驗設計在土壤軸壓密排水試驗階段，固定軸差應力，進行反覆增減孔隙水壓，如圖 3 所

示。

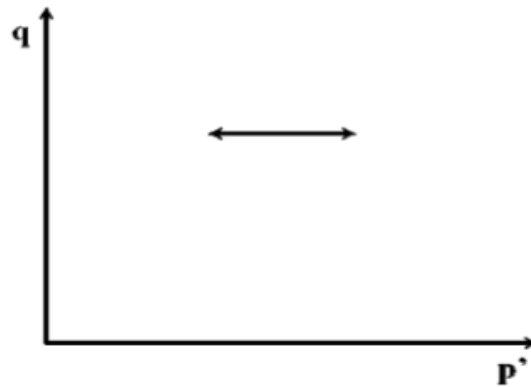


圖 2 軸差應力固定反覆增減孔隙水壓下的應力路徑

Figure 2 Stress path under cyclical changes of pore water pressure with constant deviator stress

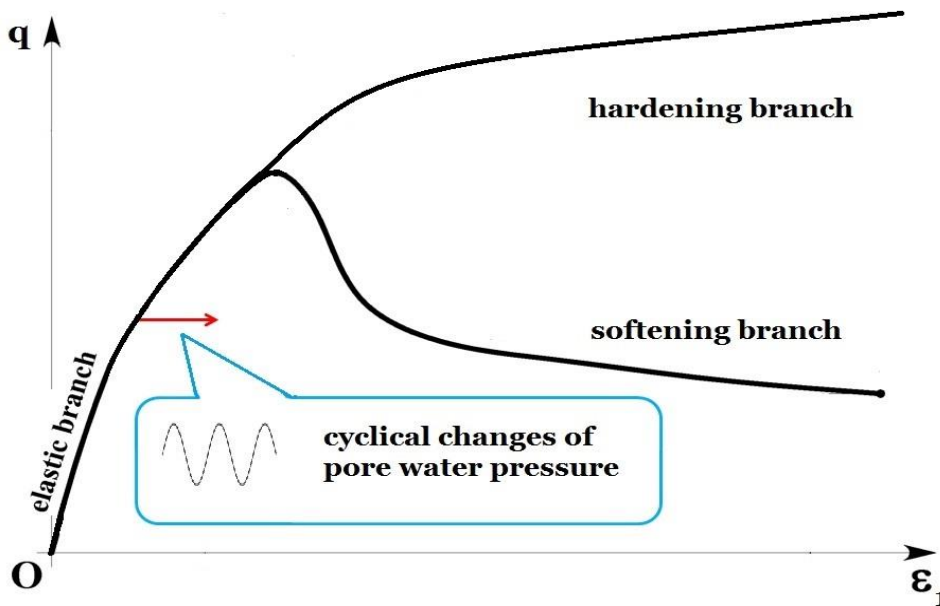


圖 3 三軸壓密排水試驗土壤行為與軸差應力固定反覆增減孔隙水壓步驟

Figure 3 Soil Behavior of triaxial CD test and the step that fixes deviator stress and changes pore water pressure.

當孔隙水壓增加，土壤產生一應變；當孔隙水壓減少，土壤的應變並不會回復到改變前；當孔隙水壓再一次增加，土壤再一次產生應變，但這一次的應變變化會小於上一次的應變變化(圖 4)。

本研究對無凝聚性土壤材料，比較 strain hardening 與 strain softening 行為受反覆增減孔隙水壓的影響。而對凝聚性土壤材料，先比較過壓密比(over consolidation ratio, OCR)對土壤行為的影響，再觀察反覆增減孔隙水壓對土壤行為的影響。

2. 實驗儀器

為了定時定量的反覆增減孔隙水壓，需要可以半自動化的三軸試驗儀器，此試驗需求可由 GDS 自動三軸試驗機組(GDSTAS,圖 5)進行試驗，機組包含一荷重架、稱重傳感器、位移傳感器、兩個體積/壓力控制器、三軸室、八通道訊號串流器與控制軟體。

荷重架除了固定三軸室之外，底座也能升降，兩個體積/壓力控制器分別控制三軸室圍壓與試體反水壓。GDS 機組所含軟體 GDSLab 可藉由 USB 在電腦上操作荷重架、體積/壓力控制器，控制軸向位移(荷重)、室壓與反水壓，並監測記錄所有數據。在自定義的「正弦循環孔隙水壓」模式中，可以做到動態調整使軸向荷重與圍壓固定，只反覆加減孔隙水壓，且每次增減都可為一定值，定義一次上下增減為一循環。

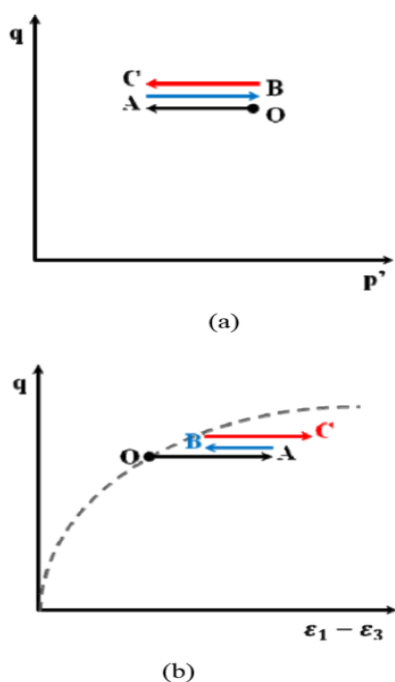


圖 4 (a) 反覆增減孔隙水壓應力路徑 (b) 軸差應力與軸差應變關係

Figure 4 (a) stress path of pore pressure cyclical changes (b) Deviator stress and deviator strain

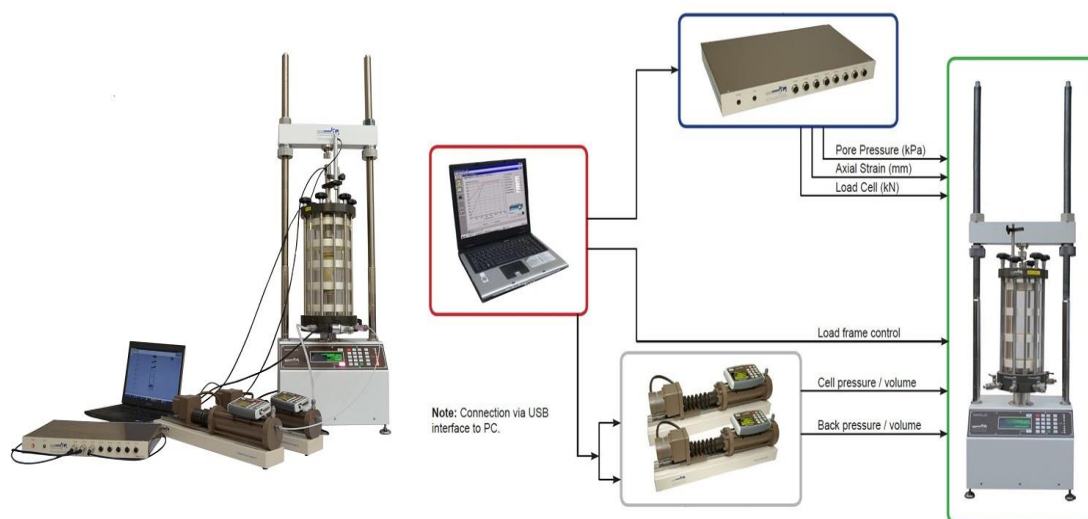


圖 5 GDS 自動三軸試驗機組
Figure5. GDS triaxial automatic system

3. 實驗步驟

(1) 試體製作

依照標準三軸試驗要求製作試體，利用模型將大小統一為直徑 70mm 高度 140mm，並在填料時計算重量使各試體密度也相等。

(2) 飽和

在放置好三軸室並注滿水，並將各儀器與電腦連線後，使用軟體 GDSLab 自動飽和模式至 B 參數大於 0.95。

(3) 壓密/過壓密

使用凝聚性土壤材料時，為了產生凝聚力以觀察應變軟化行為，會進行試體的過壓密：設定壓密排水試驗時的有效圍壓 σ_3' 為 100 kPa，根據需求的 OCR(過壓密比)給予壓密所需的壓密圍壓。例如 OCR=5，壓密有效圍壓 $\sigma_3'=100*5=500$ kPa。

(4) 一般壓密排水試驗

凝聚性土壤最後解壓至有效圍壓 $\sigma_3'=100$ kPa，進入三軸壓密排水試驗，於接觸應力 0.2

kN 時為試驗起點，施加單調荷重並固定軸向應變速度為 0.25 mm/min，此實驗步驟的排水與應變可完全由電腦控制並記錄，試驗結束於軸向應變達到 25%。

(5) 孔隙水壓增減循環

在進行壓密排水試驗的過程中加入孔隙水壓增減循環的步驟:在達到要求的軸差應力時進入孔隙水壓增減循環，以原本的孔隙水壓為基準，在一定時間內像正弦波增加減少為一個循環，孔隙水壓增減量以不使應力狀態達原本的莫爾庫倫破壞準則為原則。

4. 試驗設計

試驗以一個壓密排水試驗與一個加入孔隙水壓增減步驟的壓密排水試驗進行對照，主要分為非凝聚性與凝聚性土壤材料，分別使用砂土與過壓密黏土；砂土部分再分為高圍壓與低圍壓進行觀察。過壓密黏土則先探討 OCR 值對土壤材料的影響，再探討反覆增減孔隙水壓的影響。

表 1 試驗設計
Table 1 test contents

	Cell Pressure (kPa)	Back Pressure (kPa)	Pore pressure Amplitude (kPa)	Time per cycle (min)	Number of Cycles	OCR
砂土 1	900	400	-	-	-	-
砂土 2	900	400	200	10	10	-
砂土 3	200	100	-	-	-	-
砂土 4	200	100	10	10	10	-
過壓密黏土 1	600	500	-	-	-	5
過壓密黏土 2	600	500	-	-	-	10
過壓密黏土 3	600	500	--	-	-	15
過壓密黏土 4	600	500	25	10	直到破壞*	15
過壓密黏土 5	600	500	25	10	20	15

結果與討論

GDSLab 每隔 10 秒自動記錄觀測數據，為清楚觀察應變硬化應變軟化行為，以及清楚比較反覆增減孔隙水壓對土壤的影響，我們從數據中取軸差應力與軸向應變做圖比較，以下簡稱應力應變圖；觀察反覆增減孔隙水壓對土壤的影響時，則取孔隙水壓與軸向應變做圖比較。

1. 非凝聚性土壤材料—砂土

圖 6 為砂土 1 砂土 2，即高圍壓下非凝聚性土壤的應力應變圖，在有效圍壓 σ_3' 為 500 kPa 的情況下，砂土 1 其單調荷重強度約為 1380 kPa；砂土 2 固定軸差應力 q 在 900 kPa，孔隙水壓 u 為 400 kPa，孔隙水壓振幅為 200 kPa，進行 10 個增減循環共 100 分鐘。在應力應變圖可看出，兩次試驗前期的應力應變曲線幾乎重合，證明兩試驗試體狀況相同。

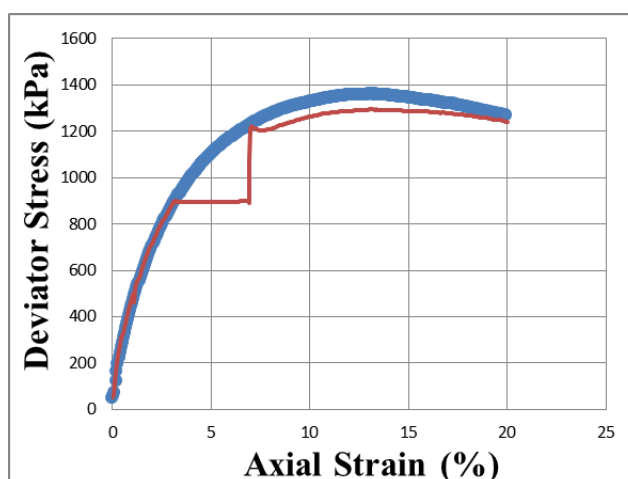


圖 6 軸差應力-軸向應變關係圖(高圍壓)；粗線為砂土 1，細線為砂土 2

*結果為 161 次循環

由圖 6 得知，在軸差應力固定在 900 kPa 時，孔隙水壓增減造成約 3.8% 的應變(細線)。並且由圖 7 孔隙水壓與軸向應變關係圖看出，單次循環的應變變化愈來愈小，最後到達一個極限值。這個極限值應是增減孔隙水壓導致有效應力變化產生的新平衡。砂土 2 結束反覆增減孔隙水壓再度施加單調荷重，也就是回到一般三軸壓密排水試驗程序，理論上如果土壤不受反覆增減孔隙水壓影響，會與原本的應力應變曲線重合，但新的應力應變曲線稍低於原本壓密排水試驗的曲線。

圖 8 為砂土 3 砂土 4，即低圍壓的非凝聚性土壤應力應變圖，strain softening 行為較明顯，在尖峰應力過後應力隨應變緩緩下降，而反覆增減孔隙水壓的影響也同高圍壓，新的應力應變曲線稍低於原本壓密排水試驗的曲線。綜合上述結果推斷，在其他條件固定的情況下，反覆增減孔隙水壓的過程稍微弱化了砂土的強度。

Figure 6 Relationship between deviator stress and axial strain (high confining pressure); Thick line: Sand 1; Fine line: Sand 2

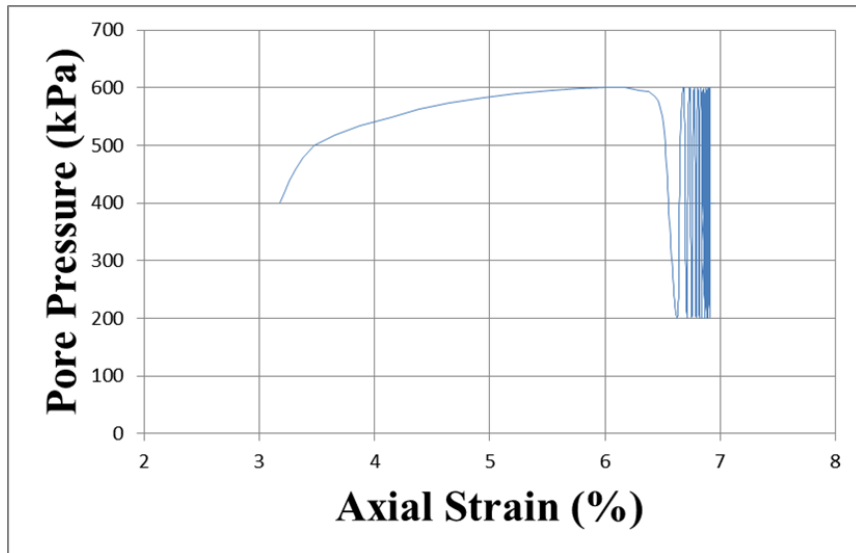


圖 7 砂土 2 孔隙水壓-軸向應變關係圖

Figure 7 Relationship between pore pressure and axial strain (Sand 2)

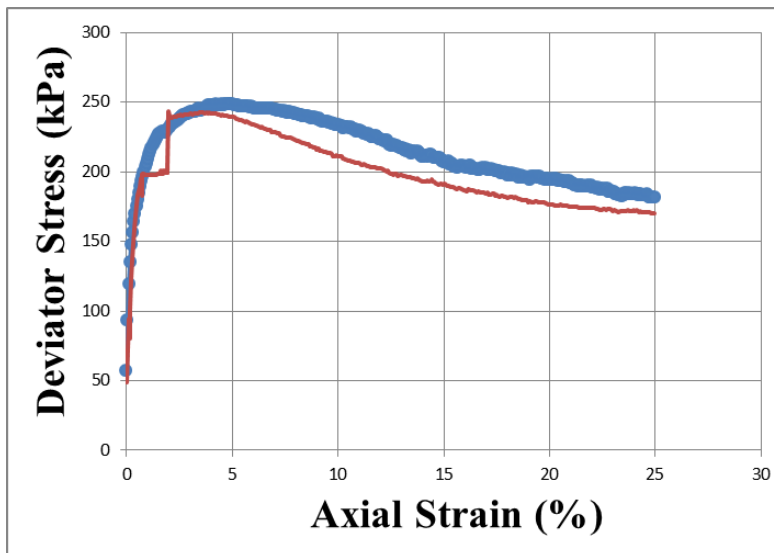


圖 8 軸差應力-軸向應變關係圖(低圍壓)；粗線為砂土 3，細線為砂土 4。

Figure 8 Relationship between deviator stress and axial strain (low confining pressure); Thick line: Sand 3; Fine line: Sand 4

2. OCR(過壓密比)對凝聚性土壤行為的影響

圖 9 所示為凝聚性土壤在 OCR 不同時的應力應變圖，其中 OCR=5(細線)應變軟化行為不明顯；OCR=10(方形標記)強度遠大於 OCR=5，應變軟化行為明顯；OCR=15(圓形標記)單調荷重強度最大，尖峰應力對應的應變也最小。OCR 值愈大，單調荷重強度愈大，對應的應變愈小，應變軟化行為也愈明顯，為方便觀察，凝聚性土壤就以 OCR=15 為基準進行試驗比較。

3. 凝聚性土壤材料—過壓密黏土

圖 10 所示為過壓密黏土 3、4、5 的應力應變圖，此三項試驗同樣是進行有效圍壓 $\sigma_3'=1500$ kPa 的預壓密，再降至有效圍壓 $\sigma_3'=100$ kPa 進行壓密排水試驗，過壓密黏土 3 進行一般壓密排水試驗，過壓密黏土 4 反覆

增減孔隙水壓直到破壞，過壓密黏土 5 反覆增減孔隙水壓 20 次。試驗最大軸向應變為 25%。

圖 11 所示，在固定軸差應力並反覆增減孔隙水壓的過程中，凝聚性土壤材料單次應變變化與砂土不同，變化遞減的現象不明顯，當軸向應變達到 7%時，也就是過壓密黏土 3 單調荷重尖峰強度對應的應變時，應變的變化量由小開始變大，最後試體產生剪切面，這個破壞單純由反覆增減孔隙水壓造成，也跟一般單調荷重一樣會產生破壞面(圖 12、圖 13)，而最後一次循環的單次應變量甚至超過前面的總和(圖 11)。

另一對照組過壓密黏土 5 反覆增減孔隙水壓達 20 次，軸向應變約 1.8%時，再施加單調荷重回到一般三軸壓密排水試驗程序，結果同樣表現出 strain softening 行為，其強度則明顯下降，從約 330 kPa 降到約 290 kPa。

綜合上述試驗結果，得出反覆增減孔隙水壓對過壓密黏土行為、強度有顯著的影響，甚至可在固定的軸差應力低於原本單調荷重破壞的軸差應力下，使試體破壞。

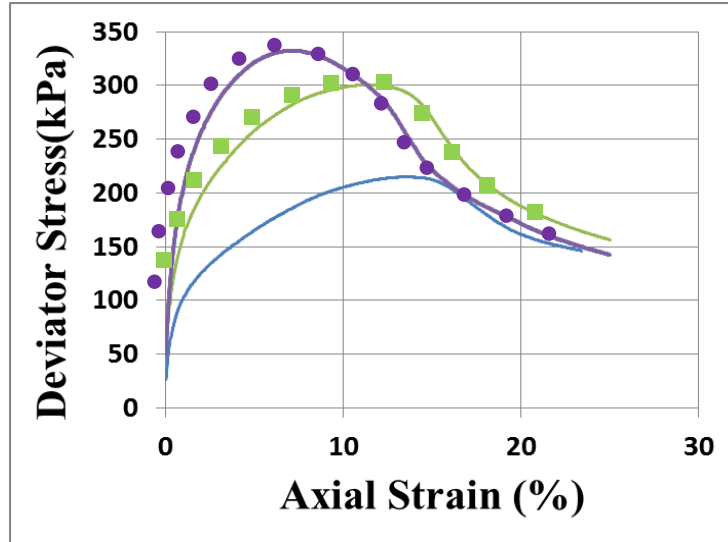


圖 9 過壓密黏土軸差應力-軸向應變關係圖。細線：過壓密黏土 1，方形標記：過壓密黏土 2，圓形標記：過壓密黏土 3

Figure 9 Relationship between deviator stress and axial strain. Fine line: overconsolidated Clay 1 (OCR=5). Square mark: overconsolidated Clay 2 (OCR=10). Circle mark: overconsolidated Clay 3 (OCR=15)

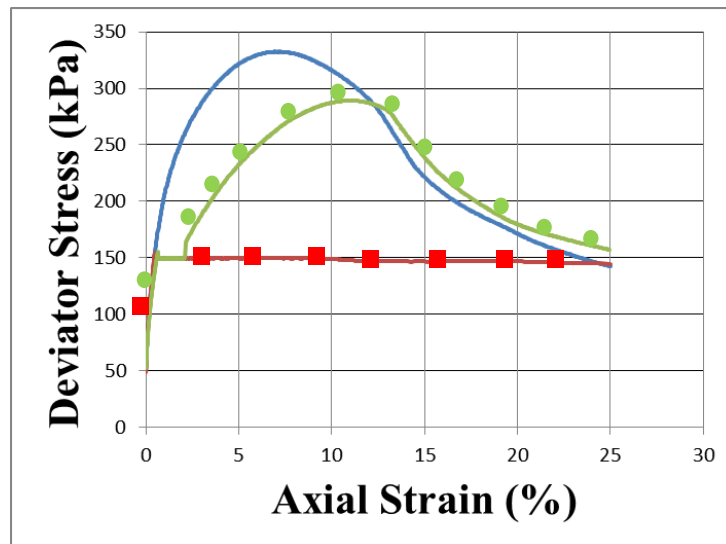


圖 10 過壓密黏土(OCR=15)軸差應力-軸向應變關係圖。細線：過壓密黏土 3(單調荷重)，方形標記：過壓密黏土 4(孔隙水壓反覆增減)，圓形標記：過壓密黏土 5(孔隙水壓反覆增減)

Figure 10 Relationship between deviator stress and axial strain of overconsolidated clay (OCR=15) Fine line: overconsolidated Clay 3 (monotonic loading); Square mark: overconsolidated Clay 4

(cyclic changes of pore pressure); Circle mark: overconsolidated Clay 5 (cyclic changes of pore pressure).

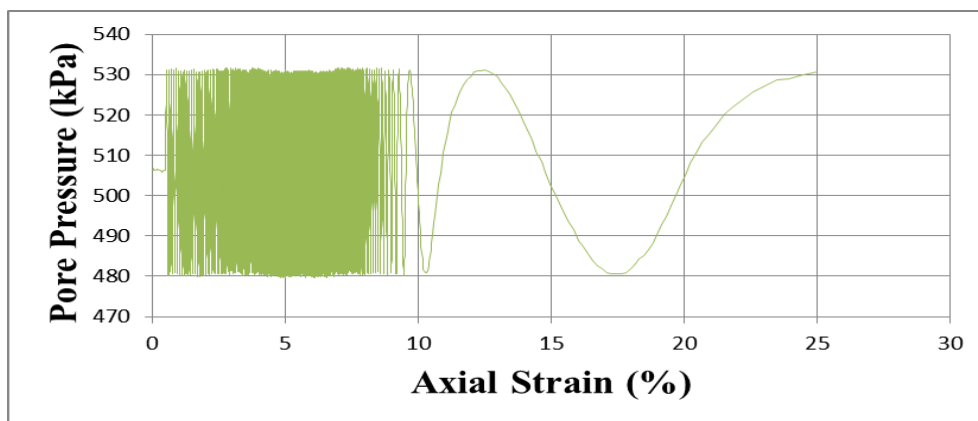


圖 11 過壓密黏土 4 孔隙水壓-軸向應變關係圖

Figure 11 Relationship between pore pressure and axial strain for overconsolidated Clay 4



圖 12 過壓密黏土 3 破壞後照片

Figure 12 Photo of failed overconsolidated Clay 3



圖 13 過壓密黏土 4 破壞後照片

Figure 13 Photo of failed overconsolidated Clay 4

結論

本研究藉由反覆增減孔隙水壓的三軸試驗來模擬土壤材料受地下水位變化的潛移行為，探討反覆增減孔隙水壓對土壤行為的影響。無凝聚性土壤材料，反覆增減孔隙水壓對其強度影響較小。反覆增減孔隙水壓單次造成的應變量隨循環次數增加而遞減，最後總應變到達一個極限值，無法再增加。

凝聚性土壤材料，反覆增減孔隙水壓對其行為影響明顯。反覆增減孔隙水壓單次造成的應變量，一開始隨循環次數增加而遞減，直到軸向應變超過土壤尖峰強度對應的

軸向應變，單次應變量開始增加，破壞時最後一個反覆增減孔隙水壓循環造成的應變量，甚至超過之前的累積應變。凝聚性土壤材料可直接由孔隙水壓反覆增減造成破壞。

致謝

本研究承蒙科技部計畫補助，計畫編號：MOST 105-2625-M-005-009，在此致謝。

參考文獻

1. Chang, K. T.* and Huang, H. C. (2015). "Three-dimensional analysis of a

- deep-seated landslide in central Taiwan.”, *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1379-1390.
2. Eigenbrod K.D. (1993). “Downslope movements at shallow depths related to cyclic pore-pressure changes.”, *Can. Geotech. J.* , 30, pp. 464-475
 3. Sawicki, A., Mierczyński, J., & Świdziński, W. (2013). “Apparent creep of saturated sand caused by intrinsic cyclic loading.”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2),06013002-3.
 4. Take, W. A., & Bolton, M. D. (2011). “Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first-time failure.”, *Géotechnique*, 61(9), 757-769.
 5. Wood, D.M. (1990). “Soil behavior and critical state soil mechanics(1).”, the United States, Cambridge University Press.

106 年 6 月 9 日收稿

106 年 6 月 19 日修改

106 年 6 月 22 日接受