

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

利用泥漿壓密儀準備均勻試體之初步研究

計劃編號：NSC-86-2611-E-032-003

執行期間：85年8月1日至87年4月30日

主持人：祝錫智

執行單位：淡江大學土木工程學系  
中華民國87年4月

# 利用泥漿壓密儀準備均勻試體之初步研究

計畫編號：NSC-86-2611-E-032-003

執行期限：85年8月1日至87年4月30日

主持人：祝錫智 淡江大學土木工程系教授

## 一、摘要

泥漿壓密是一種試驗室準備均一黏性土壤試體的方法。本研究選用馬來西亞高嶺土進行泥漿壓密試驗，分別以單階加載(2 kg/cm<sup>2</sup>, 4 kg/cm<sup>2</sup>, 8 kg/cm<sup>2</sup>)與多階加載(1,2,4,8 kg/cm<sup>2</sup>)，及在除氣(1小時, 4小時)與不除氣等不同條件下進行壓密。研究結果指出：多階載重由於有充份的時間將超額孔隙水排出，使得土壤顆粒間之排列較緻密，故其沈陷量比同一壓密壓力之單階載重大。除氣後之泥漿其沈陷速率比無除氣泥漿慢，超額孔隙水壓之消散有明顯的遲滯現象，且多階加載之 $e-\log p$ 關係曲線為直線，其 $C_c=0.66$ 。直接剪力試驗所得之結果，說明了泥漿壓密黏土試體之強度均一性頗高。

## 二、前言

泥漿壓密(slurry consolidation)是一種試驗室準備均勻黏性土壤試體的方法。此方法將高含水量之泥漿，藉由泥漿壓密儀，按試驗之需要壓密。由於其過程可充分掌握，且試體具可重複製作的特性，因此，所得到的泥漿壓密黏土試體之均勻性頗高。雖然泥漿壓密之研究最早可追溯到1970年，由Krizek和Sheeran二位學者提出[1]，爾後陸續有其他學者發表相關研究[2][4][5][6]，但皆偏重於將泥漿壓密所得之試體，作為試驗室校正(calibrate)試驗之用，然而對於泥漿壓密過程之探討則較少見到。

為了進一步了解泥漿壓密之過程及其試體之均質性，本研究選用高嶺土進行泥漿壓密試驗，針對壓密之沈陷—時間關係，壓密係數( $C_c$ )隨壓密度( $U$ )變化情形，

超額孔隙水壓消散—時間關係，及除氣與否對其影響作一探討，期望得到一些結果，並將壓密完成之試體再取樣進行直接剪力試驗，以探討泥漿壓密試體之強度均勻性。

## 三、文獻回顧

土壤在承受一外加載重時，會產生某種程度之壓縮，此壓縮係由土壤顆粒的變形、土壤顆粒的重新排列、孔隙空氣或水的排出及其他原因所形成。一般而言，由外加載重所導致之土壤沈陷形式可歸類成壓密沈陷(consolidation settlement)與立即沈陷(immediate settlement)兩大類。本研究中所進行之高嶺土泥漿壓密(slurry consolidation)，是屬於大應變壓密(large strain consolidation)沈陷。

McManus and Kulhawy 於1991年提出大尺寸實驗室沈積之黏土材料選擇，所需考慮因素包括：(1)成本：由於泥漿壓密試驗所需之黏土量大，故成本不能太高；(2)連續性：由於土壤之所有性質必須維持均一性，故土壤來源不能中斷；(3)級配：粒徑分佈曲線必須為光滑且近似優良級配之形狀；(4)滲透性：土壤之滲透性必須低到足以摹擬不排水行為；(5)時間：將泥漿壓密至固定態所需之時間需合理[2]。Krizek and Sheeran經過不斷試誤後，認為1.5~2倍液性限度的泥漿壓密是個很好的起始點[3]。

## 四、試驗土樣、設備與方法

試驗土樣

本研究所使用之土樣係一種從馬來西亞進口之高嶺土，代號為AKIMA35，顏色為灰白色，其基本物理性質為：比重2.62，液性限度57%，塑性限度42%，塑性指數15%，活性0.5，自然含水量1.6%，標準夯壓試驗之最佳含水量36%，最大乾密度 $1.32 \text{ g/cm}^3$ ，圖1為粒徑分佈曲線圖。統一土壤分類為MH。

### 泥漿壓密儀

本研究所使用之泥漿壓密儀係參考美國西北大學(Northwestern University)第四代泥漿壓密儀(slurry Consolidometer)之規範而設計[3]、製造、組裝而成。主要規格包括：(1)最大壓密壓力為 $10 \text{ kg/cm}^2$ ，(2)直徑20 cm之試體，(3)單向或雙向排水功能，(4)可使泥漿除氣(de-air)之除氣孔，(5)四種不同高程之孔隙水壓量測點，(6)可供位移量測之沈陷桿，(7)試體壓密過程中，可任意調整反水壓(back pressure)之裝置，(8)減少試體與壁體摩擦之鐵氟龍(Teflon)。

### 泥漿試體之準備與製作

取6公斤乾粉狀之高嶺土置入攪拌桶中，再加入9公斤之潔淨自來水[泥漿之含水量超過二倍液性限度(LL = 57%) ]，以每分鐘280轉的速度攪拌一小時。小心將泥漿置入壓密室中，直至泥漿試體高度達30公分，並利用直尺將泥漿表面整平後放上濾紙。

### 泥漿壓密試驗方法

(1)首先在壓密室底部放上一片0.8 mm之厚濾紙，用以阻隔泥漿流入多孔石造成阻塞，而影響到排水或孔隙水壓之量測。(2)小心將泥漿置入壓密室中，直至預定高度，並用直尺將泥漿表面數平。若需除氣，則在此時封上蓋呈密閉狀態，利用真空抽氣機閥門抽氣(1小時或4小時)，除氣結束後再將表面數平。(3)在數平之泥漿表面放上一片厚濾紙，接著放上多孔之圓形荷重鋼板，以提供等應變之用。(4)在荷重鋼板上放一層不織布，並其上鋪一層厚約0.5公分之細砂為排水砂層，使泥漿能完全排水。(5)在細砂上再放一層濾紙後，封閉

上蓋。在放上蓋時要注意使空氣排出，並勿使橡皮氣囊產生扭曲。(6)有系統地將螺絲鎖緊後，壓下沈陷桿，直至完全接觸到砂層，再關閉閥門。(7)分別接上空壓管與排水管於B閥門及C閥門，並安裝LVDT於固定桿上。(8)打開電腦並執行自動記錄程式，進行壓密工作。(9)壓密完成後，取出試體並隨即封上保鮮膜，以防試體表面水份蒸發。

泥漿壓密完成後所取出之試體，直徑為20公分，高度則約在12~15公分左右，因此可約略分成上、中、下三層，每層利用三個裁土環(6 cmφ x 2 cm)裁取試體，以進行直接剪力試驗，同時求各層之含水量。

### 五、試驗結果與討論

在泥漿壓密試驗中又分單階加載( $2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $4 \text{ kg/cm}^2$ ,  $8 \text{ kg/cm}^2$ )與多階加載(1, 2, 4, 8  $\text{kg/cm}^2$ )，及除氣(1小時，4小時)與不除氣等不同條件下進行壓密，單階壓密時間約為33小時，多階壓密時間各為24小時，且所有試體確定在主壓密完成後取出。直接剪力試驗則是將泥漿壓密完成後所取出之試體，約略分為上、中、下三層，每層利用裁土環各取三個試體，分別加上 $0.25 \text{ kg/cm}^2$ 、 $0.5 \text{ kg/cm}^2$ 及 $1 \text{ kg/cm}^2$ 之正向力進行直接剪力試驗；所得之結果如下：

### 壓密沈陷-時間關係

圖2所示為無除氣泥漿試體在承受單階瞬時加載(imposed loadings)： $2 \text{ kg/cm}^2$ 、 $4 \text{ kg/cm}^2$ 、 $8 \text{ kg/cm}^2$ 及多階瞬時加載(1, 2, 4, 8  $\text{kg/cm}^2$ )之沈陷-時間關係曲線，從圖中可知：主壓密完成所需之時間為9~18小時不等，且壓密壓力越小所需之時間越長。沈陷量則從最少的15.74 cm至最大的18.72 cm，總應變量從52.47%至62.40%。多階載重由於有充份的時間將超額孔隙水排出，使得土壤顆粒間之排列較密，故其沈陷量比同一壓密壓力之單階載重大，且其與單階載重所得之沈陷差異量隨壓密壓力而增加(因為加載階數增加)，分別為2.96%、3.83%與5.2%。

由於泥漿試體之壓縮性與滲透性在整個壓密過程中變化很大，可以利用 Casagrande 與 Fadum 所建議之對數時間法，及公式  $T_v = C_v t / H^2$  求得之壓密係數  $C_v$  值與壓密度 (U%) 之關係。

#### 除氣對壓密沈陷—時間關係之影響

由於泥漿之初始孔隙比為 4.14，利用  $S_e = G_s W$  公式，可得泥漿之初始飽和度  $S = 98\%$ ，換算為空氣所佔試體高度，約為 0.6 公分，而泥漿試體在除氣 4 小時後，分別加載三種不同壓密壓力之總沈陷量，與無除氣時相差分別為 0.64 公分、0.59 公分與 0.41 公分，可見除氣 4 小時已足夠。

#### 超額孔隙水壓—時間關係

圖 3 則為無除氣泥漿壓密試體底部中心所測得之超額孔隙水壓。從圖中可清楚地看出，在壓密進行的前 100 分鐘，超額孔隙水壓之消散有明顯的遲滯 (lag) 現象，此係泥漿之含水量仍高 (大於二倍液性限度)，土粒間之孔隙較大的緣故。當壓密進行至 100~400 分鐘時，超額孔隙水壓才開始緩緩下降，在此段時間內，泥漿含水量約為 1-2 倍液性限度，土壤顆粒已經承擔部份荷重。在時間超過 400 分鐘，也就是含水量小於液性限度時，超額孔隙水壓下降的速度才變快，直至主壓密完成。除氣與否對超額孔隙水壓消散的影響，並無特別的規則性，但其消散趨勢是一致的。

#### 孔隙比—壓密壓力—時間關係

利用孔隙比 (e) 與壓密壓力 (p) 之關係圖，可求得單階與多階加載之壓縮係數 ( $a_v$ )，分別為 0.09、0.06  $\text{cm}^2/\text{kg}$  與 0.1、0.05  $\text{cm}^2/\text{kg}$ 。圖 4 為泥漿壓密完成後之孔隙比 (e) 與壓密壓力之對數值 ( $\log p$ ) 之關係圖。本研究之第一階壓密壓力為 1  $\text{kg}/\text{cm}^2$  ( $>0.56 \text{ kg}/\text{cm}^2$ )，其結果與 Monte 和 Krizek 所述相同，此外，求得之壓縮指數 ( $C_c$ ) 為 0.66。而單階載重之  $e-\log p$  關係亦近似直線，其平均壓縮指數為 0.7。

#### 直接剪力試驗結果

泥漿壓密完成之試體取出後，隨即進行直接剪力試驗，圖 5 為 2  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 、4

$\text{kg}/\text{cm}^2$  及 8  $\text{kg}/\text{cm}^2$  壓密壓力作用完成後之試體，進行直接剪力試驗所得之正向應力與剪應力關係 (圖示僅為除氣 1 小時在 2  $\text{kg}/\text{cm}^2$  壓密者，其餘試體之情況亦類似)，從圖中可得知壓密壓力越小，其剪力強度之均一性越高，壓密壓力增加時，土壤上層、中層與底層之強度會有小幅度的差異，但最大之差異量不超過 10%，若將差異量較大之底層不計在內，則最大差異量可縮小至 5% 左右。多階載重作用下之結果，亦有相同之趨勢。

由泥漿壓密與直接剪力試驗之結果，可知壓密完成後之試體幾乎皆為完全飽和，孔隙比與含水量隨壓密壓力之增加而減少，而乾密度與顆粒間之凝聚力則遞增，且含水量皆大於最佳含水量 (36%)，因此具有分散的 (dispersed) 結構，但顆粒間之摩擦角則較不具規則性，此可能與試驗點數太少有關。

由各試體之直接剪力試驗結果，當壓密壓力越大時，過壓密比 (OCR) 便越大，尖峰強度也就越明顯。換言之，在小壓密壓力作用後之黏土試體，其  $\sigma-\varepsilon$  行為與一般軟弱黏土相似，而大壓密壓力作用後之黏土試體，其  $\sigma-\varepsilon$  行為與一般硬黏土相似。

#### 六、結論

- (1) 高嶺土泥漿主壓密完成所需之時間為 9~18 小時不等，且壓密壓力越小所需之時間越長。軸應變量則從 52.5% 至 62.4%，且多階加載之沈陷量比單階加載略大。
- (2) 除氣後之泥漿，其沈陷速率比無除氣泥漿慢，此乃因泥漿試體飽和度增加之故，且除氣僅需 4 小時便足夠。
- (3) 超額孔隙水壓之消散有明顯的遲滯現象，此乃因泥漿之初始含水量偏高，土粒間之孔隙較大的緣故，但土壤之沈陷量仍隨時間增加。
- (4) 多階加載之  $e-\log p$  關係曲線為直線，其  $C_c = 0.66$ 。
- (5) 直接剪力試驗所得之結果，說明了泥漿壓密試體之強度均一性頗高。

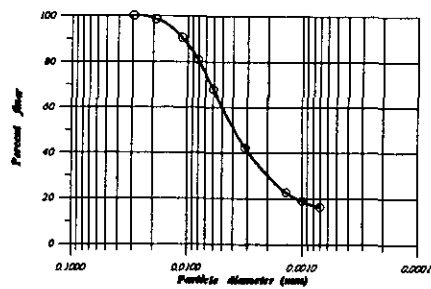


圖1 高嶺土之粒徑分佈曲線

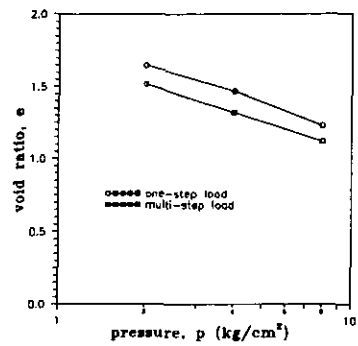


圖4 e-log P關係圖

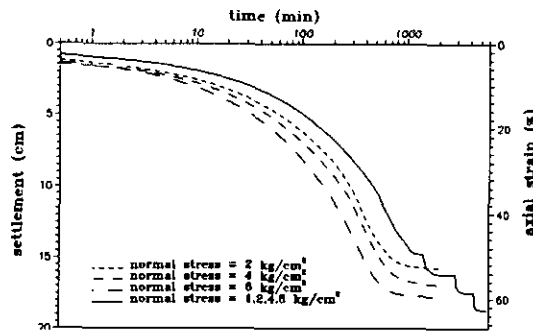


圖2 無除氣泥漿之壓密沉陷曲線

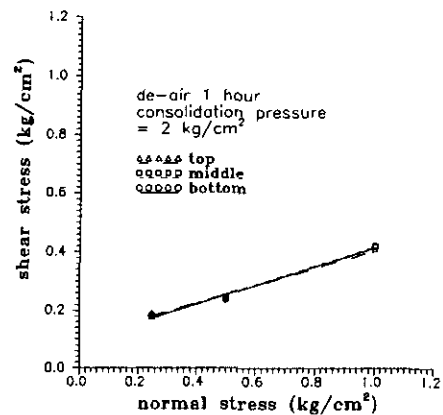


圖5 除氣1小時試體之直接剪力試驗結果

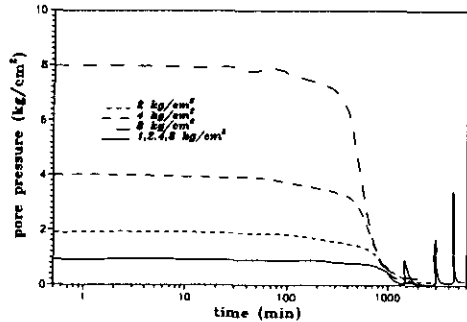


圖3 超孔隙水壓力消散—時間關係

### 參考文獻

- [1] Krizek, R. J. and Sheeran, D. E., 1970, "Slurry Preparation and Characteristics of Samples Consolidated in the Slurry Consolidometer," Technical Report No. 2, Contract No. DACW 37-70-C-0053, U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- [2] McManus, K. J. and Kulhavy, F. H., 1991, "A Cohesive Soil for Large-Size Laboratory Deposits," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 1, pp. 26-34.
- [3] Sheeran, D. E. and Krizek, R. J., 1971, "Preparation of Homogeneous Soil Samples by Slurry Consolidation," Journal of Materials, JMLSA, Vol. 6, No. 2, pp. 356-373.
- [4] Anderson, W. F., Pyrah, I. C. and Fryer, S. J., 1991, "A Clay Calibration Chamber for Testing Field Devices," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 14, No. 4, pp. 440-450.
- [5] Voyiadjis, G. Z., Kurup, P. U. and Tumay, M. T., 1993, "Preparation of Large-Size Cohesive Specimens for Calibration Chamber Testing," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 3, pp. 339-349.
- [6] Huang, A. B., Holtz, R. D., and Chameau, J. L., 1988, "A Calibration Chamber for Cohesive Soils," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 11, No. 1, pp. 30-35.