

名詞解說專欄

34. 不排水剪力強度(Undrained Shear Strength)

吳偉特*

「不排水剪力強度」一詞係指由室內三軸剪力儀器進行不壓密—不排水式(UU)試驗所得之強度，可代表土壤受現地應力壓密後取樣而求得之不排水強度。

由於取樣之擾動，試體土樣內之孔隙水壓變化，不能代表現場情況，故一般UU試驗中很少兼測其孔隙水壓；如果為飽和土壤，則試驗結果之總應力摩耳—庫倫破壞包絡線，為一平行於正應力軸之水平直線(圖一)，圖中之抗剪角 ϕ_u 為零，而土壤之不排水剪力強度 $\tau_f = c_u$ ，且等於 $\frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)_f$ 值；若試驗中可兼測孔隙水壓，則祇能得到一個有效應力摩耳圓，但無法得到有效應力破壞包絡綫。

使用不排水強度之觀念考慮分析土壤工程問題，係屬於總應力分析法，此因為可考慮現場土壤受力時，因透水性低且在短時間內，無法將所引致之超額孔隙水壓消散之情況；一般較符合此種情況之土壤為飽和黏土，且符合此種情況破壞之工程問題可分為：

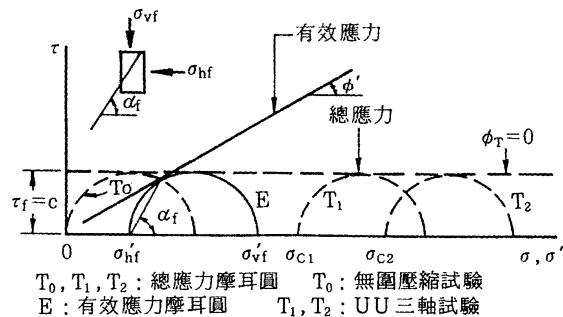
- (1) 結構建築物或堤壩，在飽和黏土上建立基礎時之初期穩定性分析。
- (2) 黏土之開挖面或擋土工開挖支撐土壓力之初期穩定性分析。
- (3) 開挖底面隆起之穩定性分析。

由於在實驗室中，完全模擬現場應力之狀況並非十分容易之事，故若要求得真正之不排水剪力強度，則以現場試驗求取之不排水強度較為適宜，有關近卅餘年來一般求取不排水剪

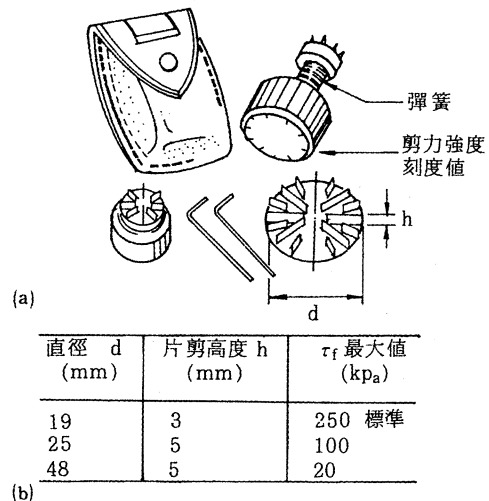
力強度之室內與現地試驗，可分為：

- (1) 手扭剪(Torvane)(TV)(圖二)

適用於極軟至硬實之黏土；不適用含有小



圖一 UU三軸試驗之不排水剪力強度



圖二 手扭剪示意圖

* 國立台灣大學土木工程學系教授

石子或裂紋之黏土；試驗範圍僅限於接近表面之土壤，且所得之不排水強度為粗略值。

以手力將扭剪壓入薄管頂端之表面土壤，或挖掘溝之側面土壁，並施加扭力可快速得知室內或現地土壤不排水強度；扭剪之剪力頭有三種尺寸，可依據土壤之軟硬程度變換之。根據彈簧之檢定換算值可直接讀取不排水剪力強度。

(2)袖珍貫入儀(Pocket Penetrometer) (PP) (圖三)

適用於極軟至硬實之黏土，不適用含有小石子或裂紋之黏土；試驗範圍僅限於接近表面之土壤，且所得之不排水強度為粗略值。

以手力直接貫入土壤中，可從貫入棒頂端貫入某一定值(6mm)時，相對應之土壤無圍壓縮強度(等於兩倍之 τ_f)直接讀取之，袖珍貫入儀於室內與現地土壤皆可進行之。

(3)瑞士落錐試驗(Swedish Fall-Cone Test) (SFC) (圖四) (Hansbo, 1957)

適用於極軟至軟弱之黏土，不適用含有小石子或裂紋之黏土，試驗範圍僅限於接近表面之土壤；可得到軟弱靈敏性黏土之不排水剪力強度良好關係試驗值。

土壤之不排水剪力強度，依據圓錐角度與質量而不同；係與錐質量成正比，並與錐貫入深度之平方成反比；將落錐以自由落體方式貫入試驗室中之薄管試體土壤中，以其貫入深度、使用之圓錐質量與角度相互關係，換算可得土壤之不排水剪力強度。

目前已可利用瑞士落錐求取不排水剪力強度之原理，求取軟弱飽和黏土之最小剪力強度，並求其該最小剪力強度時之含水量，即為液性限度(Liquid Limit)。

(4)十字片剪試驗(Van Shear Test) (VST) (圖五) (Cadling & Odenstad, 1950; Bjerrum, 1972; Ladd, et al, 1977)

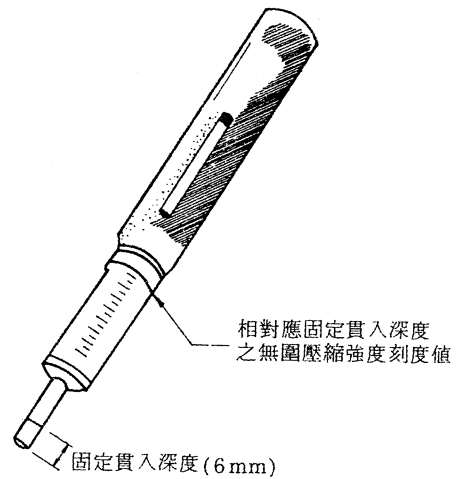
適用於試驗室或現地之軟弱至硬實黏土；黏土中若含有砂土薄層、小石子或十字片剪轉動速率較快時，會使得試驗值不準確；一般而言，十字片剪試驗所得之不排水剪力強度值偏向於高估，故對於極軟弱之黏土所測值，應加予修正之(圖六)。

依據試驗室與現地試驗使用之需要，而有

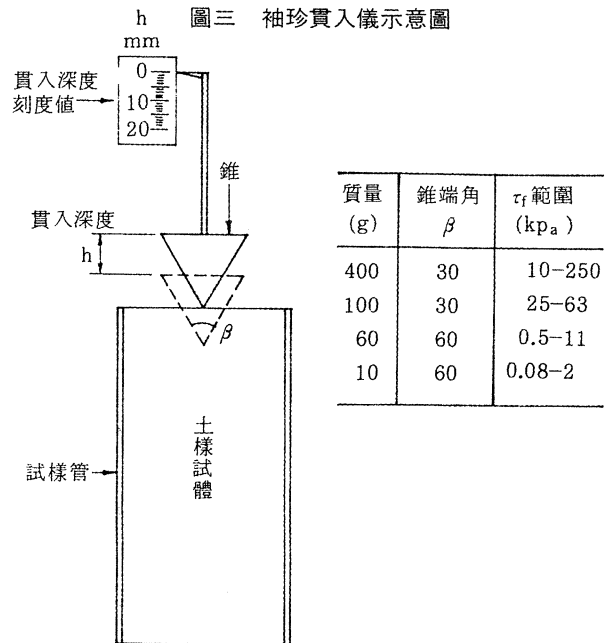
不同之尺寸(圖五(b))；現地試驗之十字片長度(H)與寬度(D)比值為2，而試驗室所使用者H/D則為1。

(5)標準貫入試驗(Standard Penetration Test) (SPT) (圖七)

適用於砂質土壤，但對於凝聚性之黏性土壤，所得標準貫入試驗值與不排水剪力強度之關係值甚為粗略；同時標準貫入試驗值可因試驗過程，使用器材、人為因素與土中含有礫石等原因，使得試驗數據甚為靈敏而有變化。



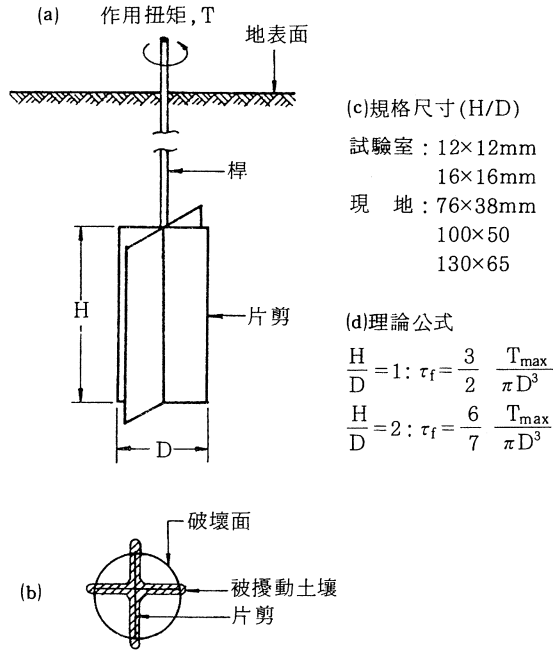
圖三 袖珍貫入儀示意圖



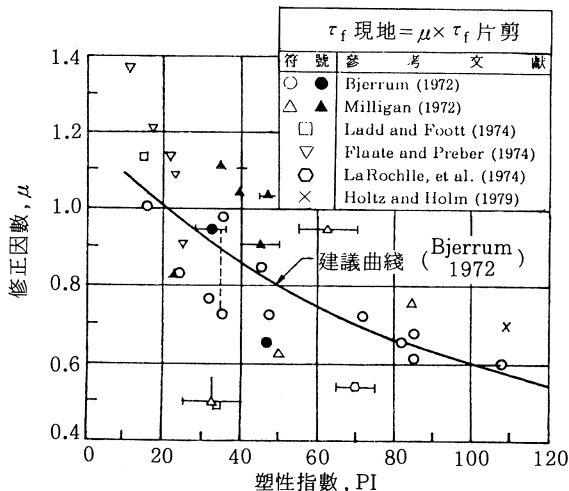
圖四 瑞士落錐試驗儀示意圖 (取自 Hansbo, 1957)

試驗採用標準規格之分裂式劈管(圖七)，並使用63.5kg之落錘，以每次落距0.76m打擊劈管，使其貫入土中預定深度0.45m，並以最後貫入土中0.30m之貫入打擊數，稱之為標準貫入試驗N值(SPT-N值)；所得劈管內之土樣為擾亂性土樣。

有關標準貫入試驗N值，相對應之黏土土壤性質，現場簡易判別法與粗略之無圍壓縮



圖五 十字片剪試驗示意圖
(取自Cadling & Odenstad, 1950)



圖六 現地十字片剪試驗之修正
(取自Ladd, et al 1977)

強度 q_u 值，示於表一。

(6)荷式錐貫入試驗(Dutch Cone Penetrometer) (CPT)(圖八)(Ladd, et al, 1977)

除粗粒礫石土壤外，可適用於所有類型土壤，惟土中含有礫石時不適用之；且對於軟弱黏土之試驗值常因地區性不同而有所差異。

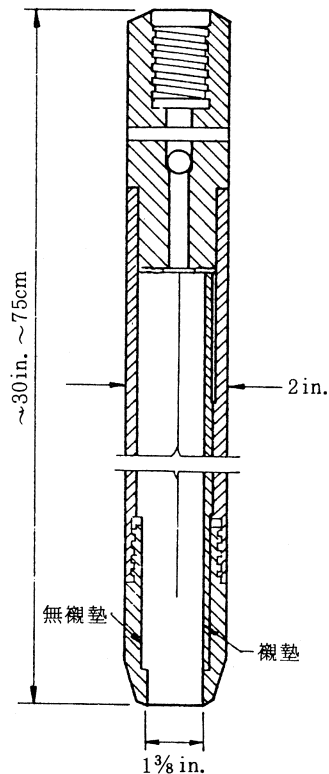
荷式錐錐頭為60度，錐投影面積為 10cm^2 ，其貫入土中之速率為1至2m/min；錐端阻抗 q_c 與摩擦套管之摩擦力 f_s ，可連續並直接顯示在深度變化之圖形上(圖九)；由兩者數據之關係變化，除可判別土壤性質外，並可以下列式子計算土壤之不排水剪力強度 τ_f ：

$$\tau_f = \frac{q_c - \rho g z}{N_c}$$

式中 $\rho g z$ ：為深度 z 之總覆土壓力

N_c ：為承载力相關因素，數據範圍依據土壤性質可從5變化至70

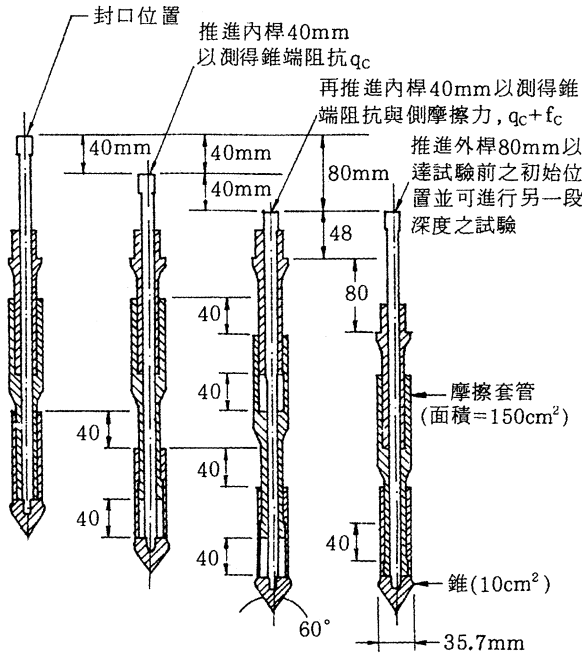
由於近年來荷式錐貫入儀之研究發展，在工程應用上，不但精確快速，並已逐漸取代標準貫入試驗及其他現地試驗之趨勢，荷式錐貫入儀已從一般簡單之機械式荷式錐，發



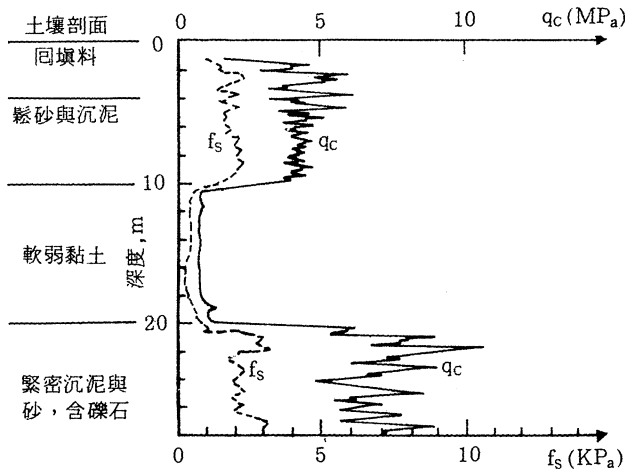
圖七 標準貫入試驗之分裂式劈管

展到電子式圓錐貫入儀，利用附加之裝置可取得小型水、土樣及氣體樣品，並可測得土層中之孔隙水壓，電阻與溫度；進而推求土層之液化強度潛能，相對密度，估計淺基礎及基樁承载力與沉陷量等工程特性，益發提高荷式錐試驗儀的可應用性與功能。

(7) 壓力計 (Pressuremeter) (PMT) (圖十) (Michell & Gardner, 1975; Menard, 1975; Baguelin, et al, 1978)



圖八 荷式錐貫入試驗進行之示意圖 (取自 Begemann, 1953)



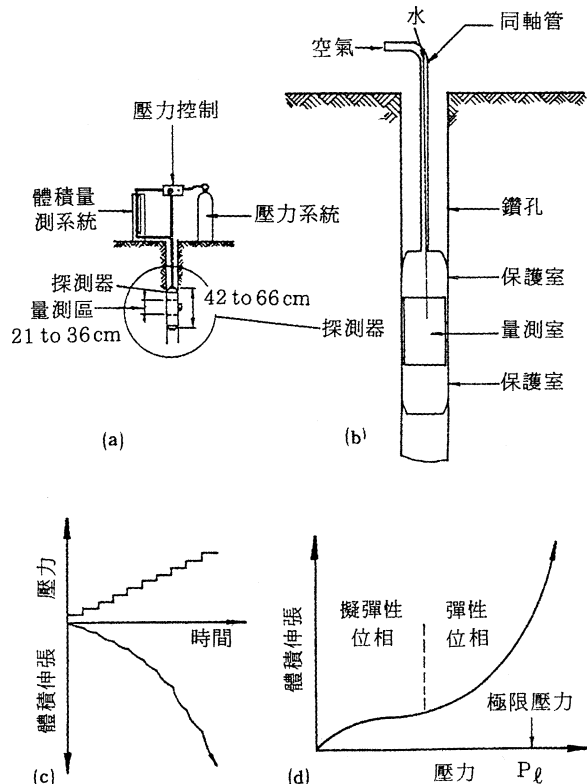
圖九 荷式錐貫入試驗結果之示意圖

適於所有類型之土壤；利用可徑向膨脹之圓柱體探測器，放置於預定深度之鑽孔內，上接構造為內外兩層之連接管，直通至置於地表面之加壓設備與量測儀器；連接管之內管輸送加壓水至圓柱體探測器之量測室，外管則輸送加壓氣至探測器之保護室。

施加壓力係分階段施加，而探測器量測室之徑向膨脹體積變化，可由地表面之體積儀讀取之(圖十(b))，並繪製體積膨脹與施加壓力關係曲綫，以求出極限壓力 (Limit Pressure) P_{ℓ} ；不排水剪力強度則可根據極限壓力與不排水剪力強度之關係式求出。

(8) 螺旋平板壓縮計 (Screw Plate Compressometer) (SPC) (圖十一) (Michell & Gardner, 1975; Schwab, 1976)

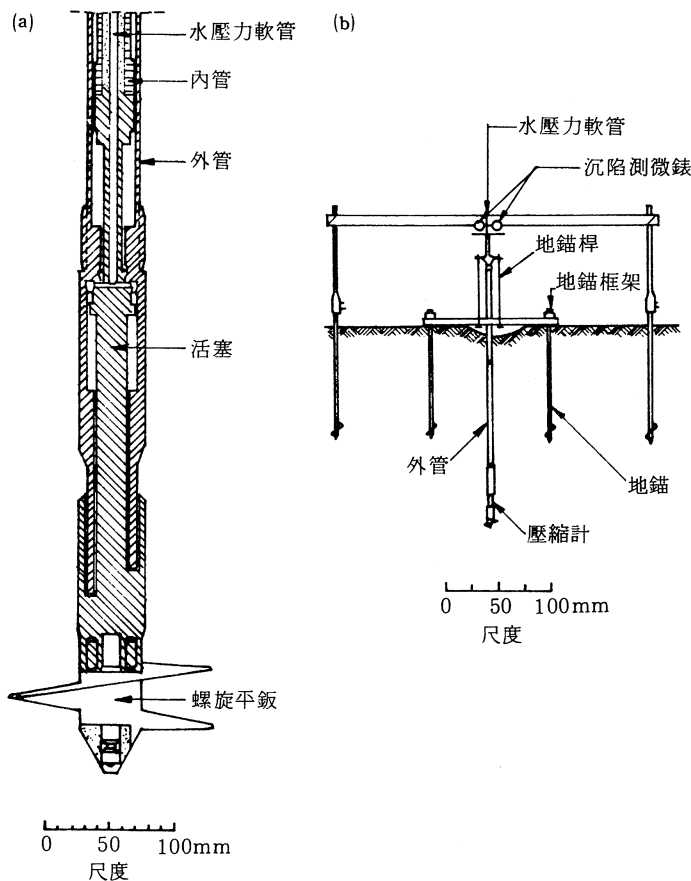
除粗粒礫石土壤外，可適於所有類型土壤；大部份係用為研究砂礫土壤之壓縮特性；根據研究結果得知，可得到黏性土壤螺旋平板壓縮計試驗值，與十字片剪試驗值兩者之良好關係。



圖十 壓力計試驗儀與結果示意圖 (取自 Menard, 1975)

表一 SPT-N值相對應之黏土工程性質

標準貫入試驗 N值	土 性	現地簡易判別法	無圍壓縮強度 q_u, kPa	不排水剪力強度 $\tau_f = c_u, \text{kPa}$
<2	極 軟	極易以拳頭貫入土中達數公分	<25	<12.5
2~4	軟	極易以拇指貫入土中達數公分	25~50	12.5~25
4~8	中 等	以拇指貫入土中數公分需要出力者	50~100	25~50
8~16	硬 實	以姆指壓入土中能易產生凹窪	100~200	50~100
16~32	極硬實	以姆指指甲壓劃土壤能易產生凹窪	200~400	100~200
>32	堅 硬	甚難以姆指指甲壓劃土壤產生凹窪	>400	>200

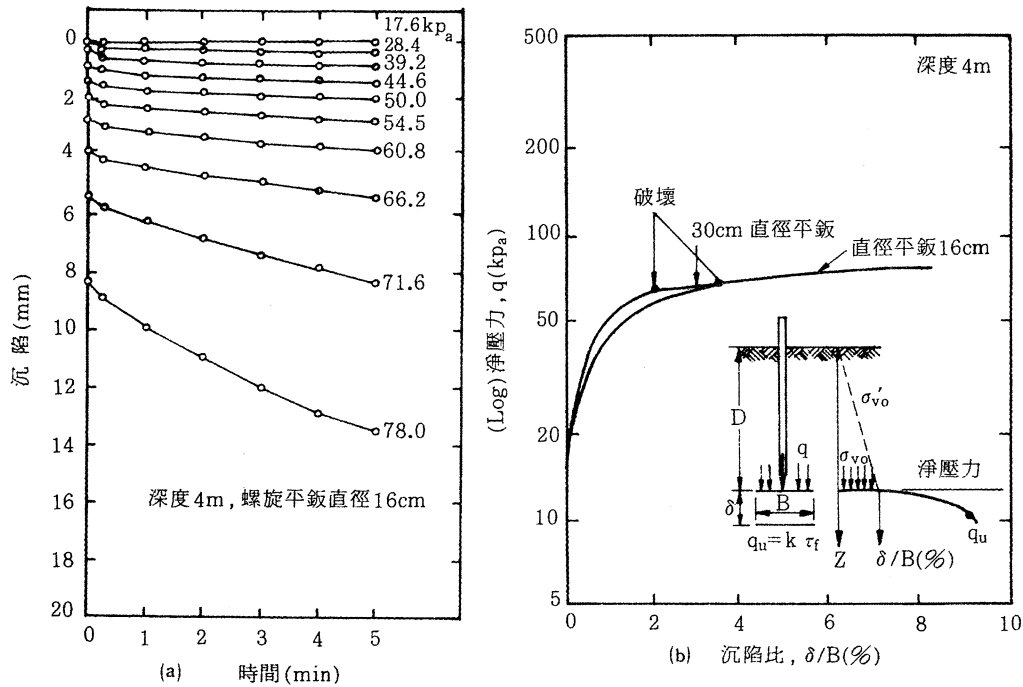


圖十一 螺旋平鈹壓縮計示意圖

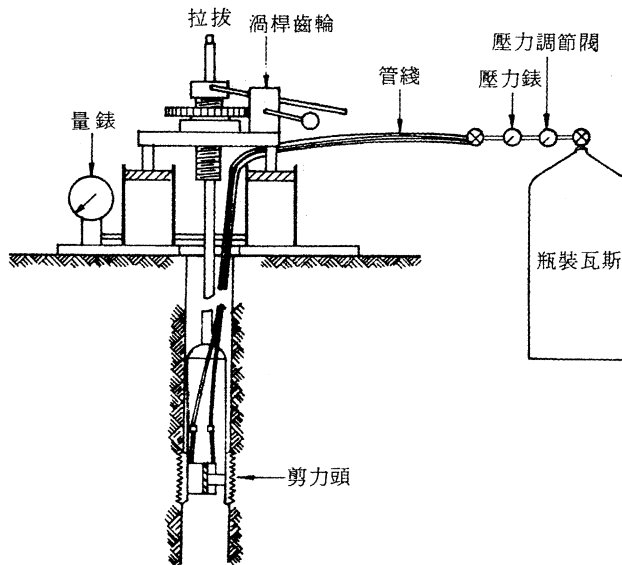
螺旋平鈹可螺旋下鑽至預定深度後，固定裝置於地表面之地錨系統，然後分段施加水壓力 (Hydraulic Pressure) 並記錄沉陷變化 (圖十二(a))，最後繪製淨載重壓力與 (沉陷/平鈹寬) 比值之關係曲綫 (圖十二(b))，求取土

壤之承載力；則黏土之不排水剪力強度可根據與承載力之關係式求取之；螺旋平鈹可分直徑 16cm 與 30cm 兩種尺寸。

(9) 愛荷華鑽孔剪力試驗 (Iowa Borehole Shear Test) (BST) (圖十三) (Wineland, 1975；



圖十二 螺旋平板壓縮計試驗結果示意圖



圖十三 愛荷華鑽孔剪力試驗儀示意圖

Schmertmann, 1975)

適合於黃土(Loessial Soils); 當土壤含有 10% 以上之礫石或砂土時不適合之; 試驗中若有排水情況發生時, 將使得試驗結果較難解釋其影響程度。

將儀器之剪力頭放置於鑽孔中預定深度後, 使剪力頭徑向伸張緊貼於孔壁上; 開動地表面上之機器將剪力頭緩慢拉拔而出鑽孔, 以求出土壤之不排水剪力強度。

參 考 文 獻

- BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J. F., and SHIELDS, D. H. (1978) *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans Tech. Publications, Clausthal, Germany, and Aedermannsdorf, Switzerland, 617 PP.
- BJERRUM, L. (1972) "Embankments on Soft Ground," *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, Vol. II, PP. 1-54.
- CADLING, L., and ODENSTAD, S. (1950) "The Vane Borer," *Proceedings No. 2*, Royal Swedish Geotechnical Institute, PP. 1-88.
- FLAATE, K., and PREBER, T. (1974) "Stability of Road Embankments," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 1, PP. 72-88.
- HANSBO, S. (1957) "A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-Cone Test," *Proceedings No. 14*, Swedish Geotechnical Institute, 47 PP.
- HOLTZ, R. D., and HOLM, G. (1979) "Test Embankment on an Organic Silty Clay," *Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, England, Vol. 3, PP. 79-86.
- LADD, C. C., and FOOTE, R. (1974) "A New Design Procedure for Stability of Soft Clays," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT 7, PP. 763-786.
- LADD, C. C., FOOTE, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F., and POULOS, H. G. (1977) "Stress-Deformation and Strength Characteristics," State-of-the-Art Report, *Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 2, PP. 421-494.
- LAROCHELLE, P., TRAK, B., TAVENAS, F., and ROY, M. (1974) "Failure of a Test Embankment on a Sensitive Champlain Clay Deposit," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 1, PP. 142-164.
- MENARD, L. (1975) "The Menard Pressuremeter," *Les Editions Sols-Soils*, No. 26, PP. 7-43.
- MILLIGAN, V. (1972) Discussion of "Embankments on Soft Ground," *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, Purdue University, Vol. III, PP. 41-48.M
- MITCHELL, J. K., and GARDNER, W. S. (1975) "In Situ Measurement of Volume Change Characteristics," State-of-the-Art Report, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, Vol. II, P. 333.
- SCHMERTMANN, J. H. (1975) "Measurement of In Situ Shear Strength," State-of-the-Art Report, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, Vol. II, PP. 57-138.
- SCHWAB, E. F. (1976) "Bearing Capacity, Strength, and Deformation Behaviour of Soft Organic Sulphide Soils," Ph.D. Thesis, Institutionen för Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 368 PP.
- WINELAND, J. D. (1975) "Borehole Shear Device," *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, North Carolina, Vol. I, PP. 511-522.