

軟弱地盤基礎設計調查
SITE INVESTIGATION FOR FOUNDATION
DESIGN IN SOFT GROUND

歐晉德，亞新工程顧問股份有限公司協理

游 坤，亞新工程顧問股份有限公司大地工程部经理

CHIN-DER OU, Vice President

and

KUEN YU, Manager of Geotechnical
Engineering Department

Moh and Associates, Inc.

Taipei

原載於地工技術雜誌第3期72年7月第15-23頁

Reprinted from
Sino-Geotechnics, No. 3
July 1983, pp. 15-23

ABSTRACT

The paper presents major concepts and methods for site investigation for construction on soft ground.

軟弱地盤基礎設計調查

歐 晉 德* 游 坤**

國內近年來由於工業迅速發展，對工廠及建築用地需求亦相對提高，而如衆所周知，臺灣島與本身地質條件複雜，除山坡丘陵地外，平原地區僅佔全島面積約30%，而平原地區多屬新生紀之沖積地層，如臺北盆地屬正常壓密狀態之土層達約 60 公尺，在此種地層上興建構造物常需對地盤之承載能力與預期沉降量均作適當考慮，再而選擇合適之基礎，而將來工程發展之趨勢，不但是工程規模的擴大，同時投資額亦大量增加，為加強經濟效益，工程的進度亦求其快速，因此在工程之設計及施工中任何疏忽都將導致財力及時間上大量的損失，此種情況在地質條件差的地盤上更易發生，於軟弱地盤上進行工程，事先必須有完善的調查，同時將結果正確的運用於設計與施工上，本文敘述調查的重點、原則及應注意事項。

一、基地調查之幾項觀念問題

對軟弱地盤進行調查亦如其他土壤調查一般，有幾項基本觀念問題必須事先澄清，即

(1)地層構造的複雜性——地層的生成或堆積前後歷經大自然多次變化，其構造與組成都受到影響，固然從地質之廣角點視之，可尋得一大致的軌跡，但土木工程之進行，常侷限於一小區域，對地層局部性的變化，必須針對該地區做精細的調查方得瞭解，甚至各土層的結構、性質更需由各種強度試驗以獲得之。

(2)土壤試驗及調查法之短處——目前土壤工程界雖不斷在土壤的調查及試驗方法上改進，以求精確掌握土壤變化行為，但由於土壤的複雜性，土壤試驗不論是現場或室內，皆有其能力上的界限，很

難涵蓋土層完全的性質，因此必須加以研判，一般對軟弱地盤而言，土壤無論砂質土或黏質土極易在取樣過程中受干擾，而試驗過程與現場狀況並不完全相合，因此現場的試驗常為較可靠資料的來源，表一略述在不同調查目的下，所需之調查法與試驗項目。

(3)土壤力學理論的極限——土壤力學理論發展迄今已數十年，但是由於理論本身為求簡化常引進甚多假設條件，此假設條件對理論的適用性加上不少限制，並使預測的精確度受到多項因素的控制，因此不但於事前利用各種試驗研判土壤性質，設計時尚需選擇恰當安全係數，並且配合經驗及施工中繼續的追蹤觀測方足以彌補理論的不足。

(4)工程施工作業之變異性——土層的性質並非一成不變，其受施工環境的影響甚大，軟弱地盤尤其甚，如施工中遭遇長期泡水、震動等皆可使軟弱黏土強度更形降低，分析時固然可調查土壤強度受溫度變化、解壓及再壓、乾燥及濕潤過程的影響程度，但並不能完全對工程施工作業之變異性加以掌握，工程設計及施工應有適當的配合，應不致於完全依賴某些簡單試驗與分析，即求獲得完善之設計資料。

對以上基本問題點如有事先瞭解，則對調查計劃的安排與分析不致落於以偏概全，或偏失之途。

二、一般調查方針重點與步驟

在介紹軟弱地盤工程現場調查方法之前，先說明一般基礎工程調查之方針重點與步驟。調查工作進行目的在於取得設計及施工所需資料，因此調查項目必須與設計要求密切配合，於軟弱地盤建築構造通常所有的問題不外乎二者：

* 亞新工程顧問公司協理

** 亞新工程顧問公司大地工程部经理

表一 一般調查目的與試驗項目

調查目的	調查方法	試驗項目
判別土壤層次	探測或鑽探 物理探測	基岩深度 覆蓋層厚度 地層層次
分類性質	取樣	單位重 γ , 含水重 w 比重 G_s , 粒徑分佈 阿太堡限 e
支承力	取不擾動土樣	單軸壓縮強度 q_u
邊坡穩定	鑽探	凝聚力 c_u
土壓力	現場試驗	內摩擦角 ϕ 相對密度 D_r
壓密特性	不擾動取樣	壓密係數 C_v 體積壓縮係數 m_v
透水性	取不擾動土樣 現場透水試驗	透水係數 K
夯實特性	取樣及夯實試驗	最大乾密度 γ_{max} 最佳含水量 W_{opt} CBR 值
地下水位及 地下水壓	鑽觀測 水壓計	地下水位變化 地下水壓變化

(1)基礎支承力不足以負荷建築物之荷重。

(2)地盤所生沉陷超過建築物所能接受的限度。

對疏鬆砂質土壤而言，全盤之剪力破壞通常不易發生，其問題常在於震動荷重或地震情況發生之液化或大量沉陷，軟弱黏質土則局部性破壞或長期遲重沉陷常是必須考慮的重點，再進一步言之，對軟弱地層的改良及基礎施工法，其適用性因土壤性質而異，因此調查項目亦需就設計要點及施工目的作適切安排，不恰當或不週全的調查都可導致工程本身由於資料缺少發生浪費甚至失敗的後果，不能不慎重視之。

無論自任何角度觀察，對軟弱地盤進行調查，有兩項要目均屬必須，即

(1)在工程區及荷重影響範圍內，軟弱地盤的分佈狀況包含分佈面積、深度及各層次的厚度等。

(2)各軟弱土層的組成及其工程性質。

自然界中土層的分佈狀況通常相當複雜，近年

來固然土壤力學的理论與實際應用均有相當的進步，但是若調查工作進行有所疏忽，則不論理論如何完美，均無法達致精確的預測，例如利用預壓法使土壤壓密改良土層，常使用 Terzaghi 單向壓密理論，其精確度不但需賴於土層之壓縮性質，同時排水性亦為主要控制，通常土層中含有薄層之砂土存在時，促使排水時間縮短，調查中若疏忽了薄層土的存在，對壓密時間、土壤強度增加率等預測均有絕大的影響，因此自整體觀點言之，在進行調查工作時，其具體計劃可建議按表二之流程分成前期調查、初步調查、細部調查以及配合工程特性之特殊調查等，其主要目的分別為：

(1)前期調查——根據地質狀況配合地質人員作全面性的現場踏勘，將地形、地物的特徵詳細列入記錄，對該軟弱地盤之形成過程與環境條件亦求了解，以安排合理及經濟的詳細調查計劃，並為設計施工之重要參考。

(2)配合設計之初步調查——根據工程設計之目的進行初步調查計劃，利用現場鑽探、物理探測、取樣及試驗室試驗等獲取工程區之基礎土壤資料，部份現場試驗如標準貫入試驗、圓錐貫入試驗、孔內側壓試驗等等可能亦均配合使用。

(3)重點性之細部調查——根據初步調查獲得工程區土層之大致性質，於進行細部設計當中，應就工程建築之重要性，對重要地區進行更詳細的補充調查，以求取進一步確實資料，必要時常需連續取樣，以確實掌握軟弱土層性質。

(4)配合工程施工之特殊調查——當工程施工法大致決定，仍宜配合施工目的，進行試驗，以確定該施工法之可行性，並考慮工程之應變性，可對工程施工合理規劃，地震區域，必要時對地震反應問題亦需作進一步調查工作。

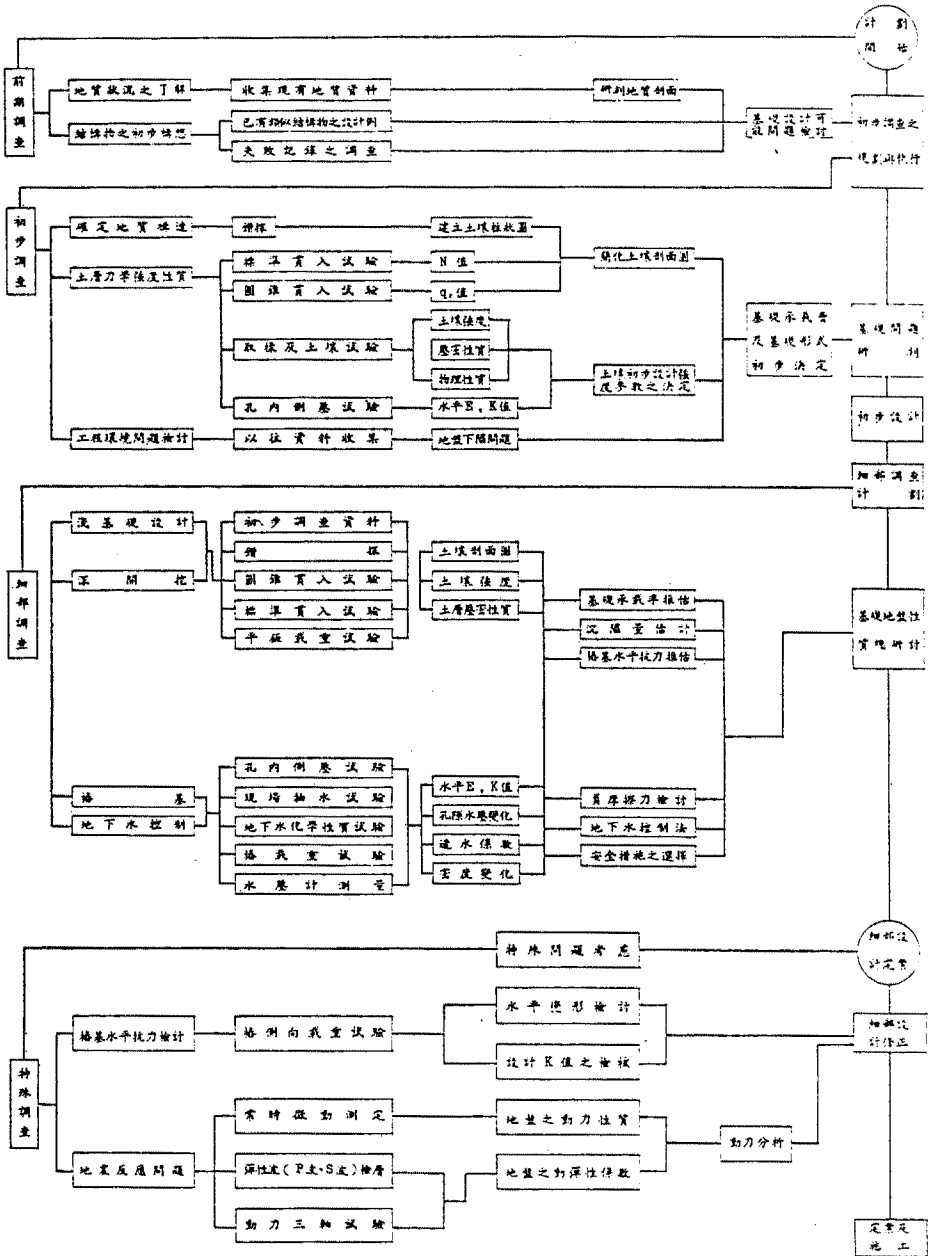
三、適用之現場調查方法

在軟弱地盤進行現場土壤調查，與一般調查並無特殊不同，但其方法選擇則應針對土壤之軟弱特性加以考慮。

(1)鑽探

鑽探之主要目的在了解土壤層次的變化，以及到達取樣深度時取得適用之土壤樣品，一般之鑽探方法大致都可對土壤層次的變化獲致相當程度的了解，但是對土壤的干擾程度則各不相同，在軟弱地盤中影響尤甚，本文甚難一一細述，表三大致列

表二 調查工作之分類及目的



表三 常用鑽探法說明

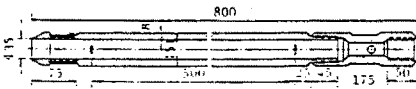
鑽探法	說明	對土壤之干擾度				可靠性						限制
		砂質土壤		黏質土壤		顏色	深判度	夾層	代土性	標入試驗	不擾動	
		緊密	疏鬆	堅實	軟弱							
螺旋鑽探 (Auger Boring)	利用人力或機械旋轉螺旋鑽探移除土壤。	小但難入	小但常需保護	小~中等	小	佳	佳	佳	可	可	一	受動力限制，探測深度有限，配合其他試驗困難，使用中空鑽桿，可提高對土壤辨別效果。
衝擊式 (Percussion Drilling)	利用動力衝擊鑽孔，擠壓孔內土壤。	中等	高	小~中等	高	可	不良	可	尚可	可	不良	干擾程度通常較高，常影響取樣之精確度。
沖洗鑽探 (Wash Boring)	利用水力沖洗鑽孔，通常利用套管保護孔壁。	小	中等~小	中等~小	小	可	可	可~困難	可	可	可	使用穩定液時，常對顏色辨別困難，薄層土壤容易忽略。
旋轉鑽探 (Rotary Drilling)	利用動力旋轉鑽探並移除土壤，通常利用套管保護孔壁。	小	小	小	小	佳	可	可	可	可	可	使用穩定液時，對顏色辨別困難，需使用重機械，對軟弱地盤難以使用。
連續取樣 (Continuous Sampling)	利用取樣器壓入或打入土層中並移除土壤。	小但難入	小但常需保護	小	小	佳	佳	佳	佳	可	佳	需藉其他鑽探方法達到清孔之目的。

各種鑽探法之通用範圍及干擾程度，以為執行者之參考。

(2)現場試驗

係指於現場探測土壤強度的方法，除了一般熟悉之標準貫入試驗外，尚應包含圓錐貫入試驗、十字片剪試驗、孔內側壓試驗以及平鉸載重試驗，由於軟弱地盤本身易受擾動，同時取樣困難，為準確獲得土壤強度資料，此類現場試驗常為必須。

(i) 標準貫入試驗——屬於動力式的探測法，目前世界各國通用者為採用外徑 51 mm 之取樣器 (圖一)，利用 63.5 kg 落錘自由落下 76 cm，將取樣器垂直打入土中 45 cm，記錄最後貫入 30 cm 之打擊次數，此打擊次數稱為標準貫入試驗 N 值，與土壤之強度有相對應關係。



單位：公厘

圖一 標準貫入試驗分裂式取樣器

(ii) 圓錐貫入試驗——屬靜力式，通常對於自然沉積土層之探測效果極佳。圖二為一荷蘭式圓錐貫入試驗儀，此法利用一標準圓錐 (直徑 36 mm，底面積 10 cm²，錐角 60°)，將之壓入土中，記錄壓力大小，稱為圓錐貫入阻力值 (q_c)

$$q_c = \frac{\text{貫入壓力}}{\text{圓錐底面積}} \text{ kg/cm}^2$$

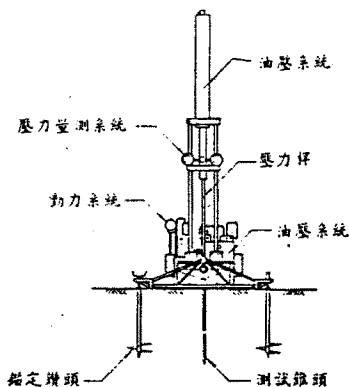
於砂土層中，如土層本身並未承受較此現有覆土壓力更大的壓力狀態時，圓錐貫入阻力值與土層彈性係數 (E , kg/cm²) 可有相當直接的關係 (De Beer 1965, Webb 1970)，根據 Schmertman (1970) 的建議，其關係式為

$$E = 2 q_c$$

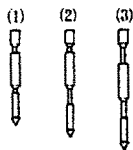
對於黏土層而言， q_c 值與其單軸壓縮強度亦有大致的關係式

$$q_c = 0.2 q_u$$

由於圓錐貫入值係利用靜力方式執行，不似標準貫入試驗受現場執行變化的影響，其值較為可靠



(a) 貫入試驗儀



(1) 測試前閉合狀況

(2) 延伸測試錐頭，測試貫入抵抗力

(3) 繼續延伸桿探套環，測試摩擦阻力

由 BEEMANN 式測試錐測試程序

圖二 荷錐貫入試驗儀

，然而在多種情況下，標準貫入試驗之利用較圓錐貫入試驗為多，Schmertman (1970) 曾建議表四之關係值，可利用為參考。

表四 圓錐貫入阻力值 q_c 與標準貫入試驗 N 值關係

土 壤 性 質	q_c/N
沉泥、砂質沉泥、微凝聚性沉泥砂混合體	2.0
清潔細至中砂、及少量沉泥之砂	3.5
粗砂及帶少量礫石砂	5.0
砂質礫石及礫石	6.0

表五 傳統孔內壓力儀比較

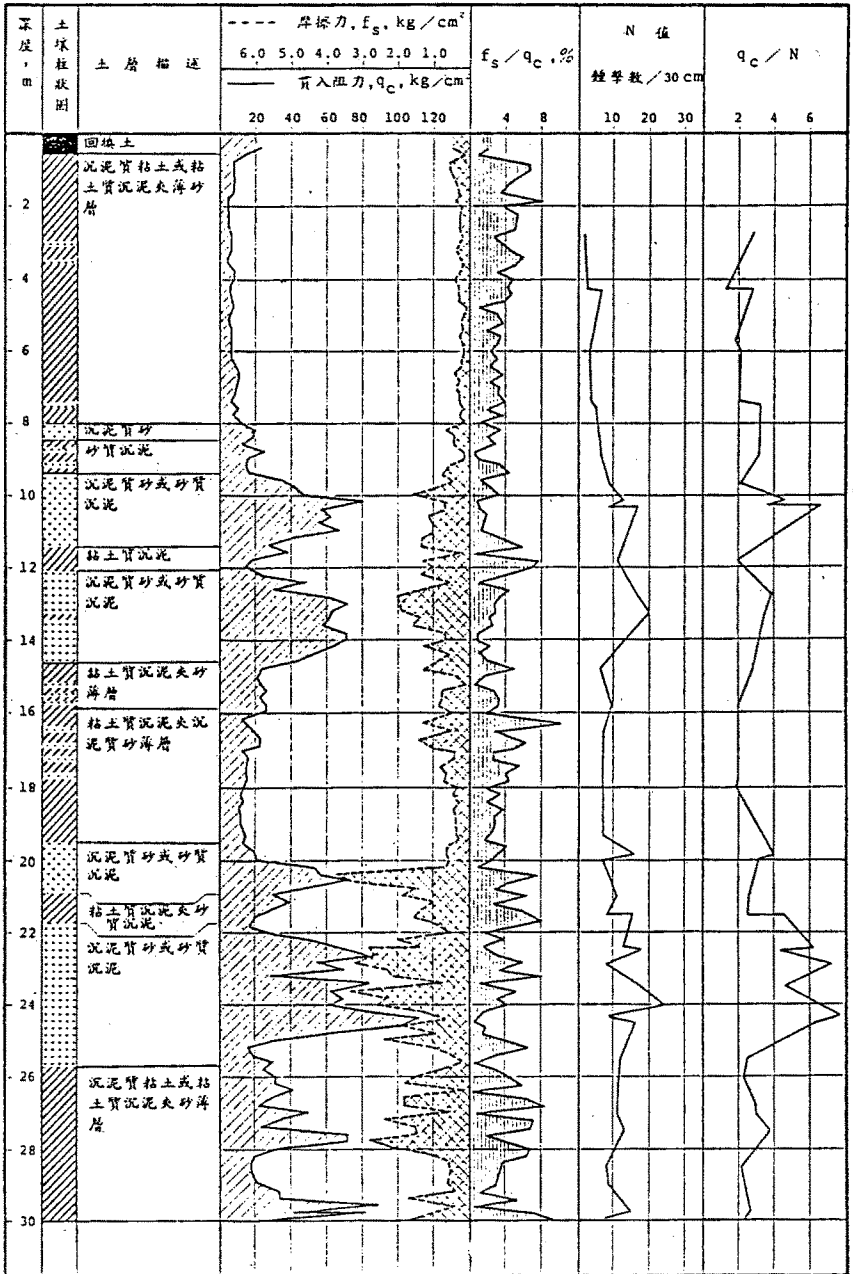
儀 器	壓 力 來 源	變 形 測 量 法	壓 力 儀		
			直徑 (mm)	長 度 (cm)	壓 力 囊
Kögler 側體積	壓 縮 空 氣	空 氣 體 積	150.200	125	單 囊
日本 LLT 側壓儀	壓 縮 空 氣 或 氮 氣	水 體 積	110	100	單 囊
Menard 壓力儀	二 氧 化 碳 氣 體	水 體 積	55.65	50	三 囊

圓錐貫入試驗通常於孔中連續進行，如於均勻土層狀況，可對土層之分佈及強度獲得相當程度的了解，圖三為臺北市建國南路一高樓建築基地調查時，獲得之土層狀況圖，圓錐貫入試驗結果顯示與土層變化甚吻合。

(iii) 十字片剪試驗——在極軟弱或靈敏度極高的黏土層，非常困難獲取不擾動樣品，同時在樣品取出後由於有效覆土壓力解除導致土壤孔隙水壓改變，形成土樣干擾，在試驗室中固然可以模擬方式使土樣接近於原始狀態，但終究難以完全相似，為克服此類困難，可利用十字片剪試驗取得現場土壤之抗剪強度，十字片剪試驗目前引用之葉片規格甚多，圖四係一代表性之十字片剪儀，試驗時，當鑽孔進行至預定深度，將十字片葉謹慎壓入土中，然後扭轉剪斷土體，記錄所需之力矩，由此可推算土壤之壓密不排水剪力強度，此試驗如謹慎實施通常可得較可靠的結果。

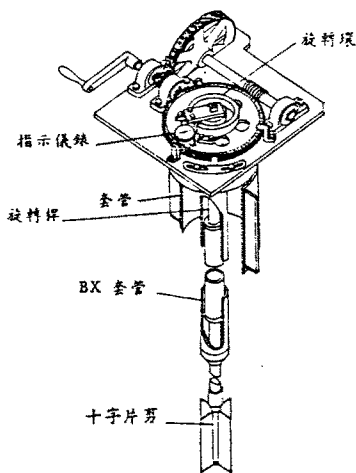
(iv) 孔內側壓試驗——在鑽孔內直接測定土壤壓縮特性的方法是由 Kögler 於 1930 年提出，Kögler 建議採用鋼管保護將橡皮膜送入鑽孔中，利用壓縮空氣使橡皮膜膨脹推擠孔壁，使土壤受壓，記錄送入氣體體積、壓力、橡皮膜膨脹量或鑽孔擴張量用以推求土壤受壓後之變形係數，表五列舉目前通用之孔內壓力試驗計；此方法在近年來有甚多的發展，壓力計由傳統之單囊式改良為三囊式，置入孔中方法，除大部份均利用鑽機鑽孔外，Brown 亦發明配有自動鑽孔器之壓力計，圖五為改良型三囊式孔內壓力儀之設置圖。

(v) 平鈔載重試驗——軟弱地盤受壓力後之變形亦可利用平鈔載重試驗於土層上施加較重繪製壓力與沉降量之關係圖求之(圖六)，平鈔載重試驗常難保持均勻之鈔面壓力，同時平鈔本身亦可能變形，為減少此影響，試驗時常以直徑或寬度為 75 cm、60 cm 及 45 cm 平鈔重疊使用，試驗有時亦利用 30 cm 平鈔進行，唯因其影響深度較淺，所得

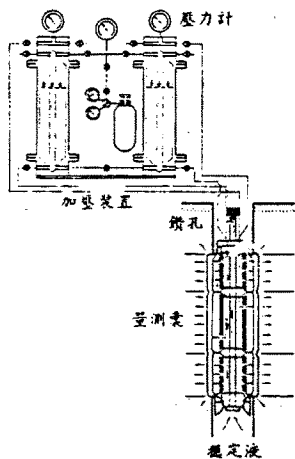


註：2 m - 22 m連續取樣

圖三 圓錐貫入試驗結果



圖四 十字片刃

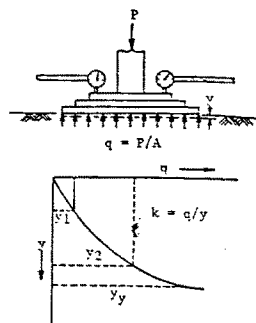


圖五 三孔式孔內壓力儀裝設圖

結果與實際基礎的行為不完全一致，75 cm 直徑之平鈑，試驗時所需之反力較大，在現場實行常有困難，所得結果亦需就基礎形狀、土層及地下水位、試驗深度等再加修正，因此除非土層特別軟弱，一般仍以試驗小面積之平鈑試驗較為可行。

(3) 取樣

現場試驗除標準貫入試驗及圓錐貫入試驗可以進行至相當深度之土層內外，其餘皆僅能於有限深度內進行，因此大部份之調查工作皆有賴於試驗室中對土壤進行試驗以獲得其強度，於軟弱地層中如



圖六 平鈑載重試驗圖

何取得不受干擾土樣為一重要課題，軟弱土壤通常含水量較高，強度低，利用一般取樣器，樣品容易滑落，因此常需借助一些特殊裝備，以保持土樣不受干擾及落失，近年來，取樣方法之改進與發展甚為進步，表六列舉目前曾被利用之取樣器，以為參考。

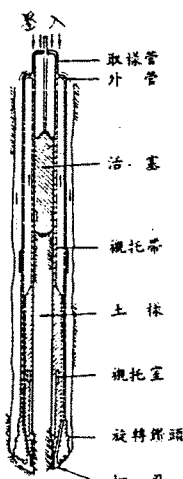
此類取樣器中以固定式活塞取樣器在國內之應用較普遍，如臺北市沉泥質土層較多，以固定式活塞取樣器成功率仍屬相當高者，至於沖積之軟弱土層中為徹底明瞭土層層次變化與性質則常有連續取樣之必要，特別是在考慮利用預壓，垂直排水等方法改良土質時，軟弱黏土中之薄透土細砂土層的存在，對分析及預壓效果預測之正確性有決定性影響，因此連續取樣在此類調查中顯得極為重要，連續取樣法在臺北市地下鐵路工程及基隆河廢河道地質改良工程中均已應用，圖七為較適合利用為連續取樣之旋轉襯托式取樣器。

取樣工作之正確性對分析工作之可靠程度有極大的影響，近年來大地工程界人士對取樣方法逐漸重視，為配合各種土層之特性，在取樣器上亦有相當之發展，圖八為針對疏鬆砂土層特別設計有柵欄之大型取樣器，取土樣步驟如圖九所示，此類大型取樣器壁體固然甚厚，但若與直徑相比，則其所謂之面積比 (Area Ratio) 亦僅約 17%，與一般薄管相似，所生之擾動度有限。

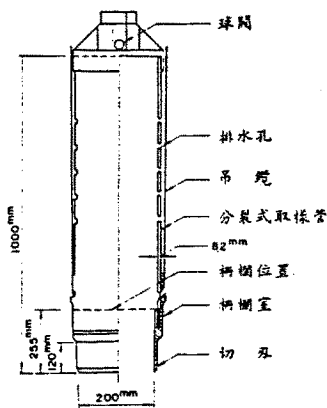
疏鬆砂土之取樣，尚可利用如圖十之扭轉取樣器，取樣器中加置橡皮套，於抵達取樣深度，壓取樣品後，將取樣器略提高，並予扭轉，此運動促使管內橡皮膜緊縮於孔口而將砂土托束於薄管內，此取樣器曾成功的運用在 N 值小於 5 之砂土層中，其他取樣器如改良式之 Bishop 取樣器 (圖十一)，

表六 常用之不擾動土樣取樣器

型 式	操 作 基 本 方 式	適 用 土 層	說 明
1. 固定式活塞取樣器	以靜壓將薄管壓入土中，壓入時活塞固定於土樣頂部。	鬆砂 $0 < N < 10$	活塞如不能完全活動，易干擾土樣密度。
2. 水力式活塞取樣器 (Osterberg)	利用水壓將薄管壓入土中，壓入時活塞固定於土樣頂部。	鬆砂至緊密砂土 $5 < N < 30$ 軟弱黏土層 $N < 4$	取樣長度較難控制，對鬆砂取樣率較佳。不會發生薄管過重壓入之現象。
3. 分段式活塞取樣器	以靜壓將薄管壓入土中，以特殊固定方式使土樣頂部之活塞配合薄管之向下運動而上升。	軟弱黏土層 $N < 4$	較易控制樣品品質，但對取樣率無法完全掌握。
4. 活動式活塞取樣器	以靜壓將薄管壓入土中，壓入時，活塞靜置於土壤頂部。	軟弱黏土層 $N < 4$	砂土層取樣較不適宜。
5. 打擊式取樣器	以打擊方式將薄管打入土中。	堅實至極堅硬黏土層 $N > 20$	不適合於砂土層之取樣。
6. 丹尼森 Denison 取樣器	薄管取樣器壓入土中時，薄管外之套管利用類似岩心鑽洗方式擴孔，以免除薄管管壁外之摩擦阻力。	鬆砂至緊密砂土層 $5 < N \leq 30$ 堅實黏土 $4 < N < 20$	並不適宜於鬆砂或軟弱黏土層之取樣工作。對於緊密砂土之取樣可用三重管形式之丹尼森取樣器。
7. 扭轉式取樣器 (Twisted Sampler)	經改良之薄管取樣器，於取樣器外圍加鋼套管及橡皮環，取樣後，薄管略提升，扭轉之，使管口橡皮環收緊以抓住土樣。	極疏鬆砂土至中等緊密砂土 $0 < N < 20$	極鬆砂層之取樣率可達 95% 以上。
8. 改良 Bishop 取樣器	利用空氣及水壓將薄管壓入土中，取土後，薄管縮回至外套管內，繼續加空氣壓力，利用毛細水表面張力托住土樣。	鬆砂 $0 < N < 10$	對於極鬆之砂土層，取樣特別有利，但為了保持表面張力水，樣品斷面通常較小。
9. 旋轉襯托式取樣器 (Rotary Foil Sampler)	襯托式取樣器置於岩心管中，加壓時，以金屬襯托擴孔，使薄管能順利壓入土中取得樣品。	堅硬黏土層 $4 < N < 20$	適合於極長之連續取樣工作。



圖七 旋轉襯托式取樣器



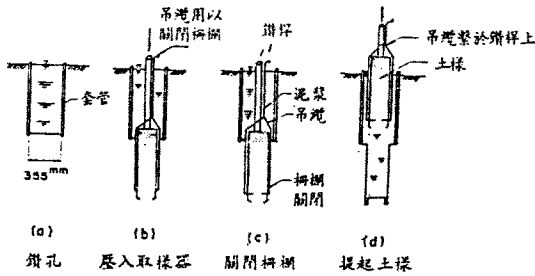
圖八 大型取樣器

利用空氣壓力消除土樣內之部份孔隙水壓，再利用土體水份之表面張力托住土樣亦是一可利用於疏鬆砂土之取樣器。如前所述，土樣在取樣過程中應儘

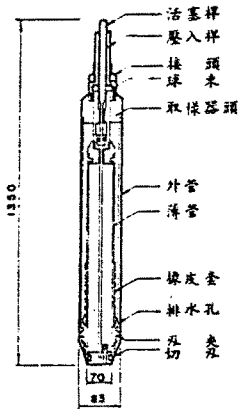
可能避免擾動，否則嚴重影響將來之分析工作，土樣受擾動之因素甚多，一般情況而言，大致可分為：

(i) 土體應力變化因素

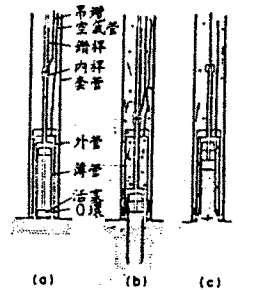
(a) 取樣過程中水壓，土壓之減少導致土體膨脹。



圖九 大型取樣器取樣步驟



圖十 扭轉取樣器



圖十一 改良 Bishop 取樣器

(b) 溫度變化、壓力減少後，水中氣泡之擴大造成土體組織之改變。

(ii) 設備因素

(a) 取樣器形式，如厚度、切刃角度，面積比長徑比等等均影響樣品品質。

(b) 取樣器材料、剛性度等。

(iii) 取樣方法

(c) 取樣器壓入方式及速度。

(d) 取樣器提取步驟。

最後諸如取樣後如何運送、保存、試驗室中如何擠取樣品、整理試驗用土樣等在在均影響其精度，不可不慎而為之。

總而言之，於軟弱地盤上建造工程，必須考慮之基礎工程問題相當複雜，不但應清楚明瞭土壤層次變化外，對其強度、壓密特性、透水性質、水壓變化等均需相當深入了解，以期於設計時得以選擇適當之基礎形式，或適宜有效之地盤改良施工法，而施工中亦不致遭受困難甚至失敗，此均有賴於事

前調查工作之精密程度與完整性，本文僅略述軟弱地盤調查工作之原則及適用法，唯尚有賴大地工程專業工程師於各工程中之經驗配合，以獲最佳之成果。

參 考 文 獻

DEBEER, E. E. (1965) Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundation on Sand, *Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations*, Duke University, p. 15.

SCHMERTMANN, J. H. (1970) Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand, *Journal Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE Vol. 96, No. SM3*.

WEBB, D. L. (1970) Settlement of Structures on Deep Alluvial Sandy Sediments in Durban, South Africa, *Conference on In Situ Investigation of Soils and Rocks, London, p. 189*.