

地層探測調查與土壤試驗

其目的、方法與應用

SITE INVESTIGATION AND SOIL TESTING -  
PURPOSE, METHODS AND APPLICATION

莫 若 楫

ZA-CHIEH MOH

Executive Vice President, Moh and Associates  
Vice President, International Society for  
Soil Mechanics and Foundation Engineering

本文為六十六年土壤與基礎工程研討會專題講演  
原載於研討會論文專集，第69 - 92頁

*Reprinted from*

*Proceedings, Seminar on Soil and Foundation  
Engineering, April 1977, Taipei*

*pp. 69 - 92*

*Chinese Institute of Engineers*

*Chinese Institute of Civil & Hydraulic Engineering*

## ABSTRACT

This lecture introduces the purpose, methods and application of results of site investigation and soil testing in civil engineering work. Emphases are placed on the adequacy, correctness and quality of site investigation work with illustrations. Problem of "false economy" is discussed. An analogous comparison is made between the roles of a geotechnical engineer with that of a medical doctor.

# 地層探測調查與土壤試驗 其目的、方法與應用

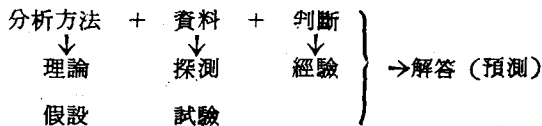
莫 若 楫

亞新工程顧問公司副總經理  
國際土壤及基礎工程學會副會長

## 前 言

在一件土木工程中負責設計的工程師通常需要做兩個作業，首先他必須能夠預測 (Prediction) 在建造過程中可能發生的問題及完成後該建造物是否能附合所需，第二他必須有能力根據他的預測來作判斷及決定。土壤及岩石為自然的產物，其性能變化甚大，並且有時很複雜。土壤的性能隨時間、壓力、水份變化、及環境更改而變化，因此土壤及基礎工程師所須做的預測更為複雜，同時也更難準確。

求得一個大地工程上的解答，也就是一個預測，其原理如下：



這次講演的主要題目將是資料收集，也就是地層之探測及試驗。

## 一、地層探測與調查之目的

### 1.1 地層探測與調查之目的

地層探測與調查之目的簡單來說是為了解地面下之土壤與及岩石各層次之分配、深度、與性能，尤其是指工程上的性能。現在我借此機會向各位介紹一個名辭 "Geotechnical Engineering"，這是近年來在世界各國所通用的一個名辭。在以往凡是屬於與土壤、岩石或基礎有關之工程常被稱為基礎工程，其含義較窄。近年來因土壤及岩石力學之發展，同時工程師對工程地質及土壤之物理與化學性能對工程性能之關聯有進一步的了解，這一類的學識現廣泛的稱為 Geotechnical Engineering。就字面而言，這是和地面及地下沉積物 (deposit) 有關的工程，現暫譯為「大地工程」。一個大地工程師可能遭遇到的工程主題可分為四類：

(a) 建造物與其周圍及下部的土壤岩石之關係，如基礎、擋土牆、隧道襯、埋管等：——此類工程的主要問題有二，其一是建造物與土壤交接面之壓力與變位的關係 (Load-deflection relationship)，另一為土壤之穩定性 (Stability)。在這類問題我們所須瞭解的是土壤在已受擾動情況下之工程性能。

(b) 以土壤或岩石作為建材之建造物，如公路及機場之填土及道床 (Base)、土壩、砂石壩、回填 (Backfill) 等：——對付此類工程，我們除了必須知道此類材料的來源、分配、及數量外，必須知道它們經處理後的性能。

(c) 自然邊坡及開挖邊坡問題：——邊坡之處理最主要的是坡身的穩定性，我們必須知道造成該坡身的土壤或岩石在原有狀況下及經開挖後的性能。

(d) 地下水問題：——地下水對土木工程建造物有極大的影響，我們不單需要了解地下水的分佈情形，也必須要對它的壓力及流動有充分的資料。因為地下水的壓力影響到地層土壤的強度及沉陷，如臺北盆地之下陷即因為地下水壓受深水井抽水之影響而降低。地下逕流則可造成地下沖刷 (Underground erosion) 及管湧 (Piping)。

### 1.2 地層探測與調查之分類

如上所述地層探測調查之主要目的為供給大地工程師足夠之資料以達到一個安全而又經濟之設計。以調查工作本身而言，必須有一個很好的規劃，才能完成目的。在一般情況下，調查工作可分成下列數類 (Phases)：

(a) 初步察探 (Reconnaissance survey)

(b) 細部探測 (Detailed exploration)

(i) 為初步設計用

(ii) 為細部設計用

(c) 特殊探測 (Special exploration)

(i) 為施工用

(ii) 為調查工程失敗 (Failure)

(d) 地下水調查

以上各類調查，並非在每一工程都必須進行，這與工程本身之大小及艱難度有密切的關聯。

### 1.3 地層探測規劃所需考慮之基本條件

在做地層探測調查工作與規劃時所須考慮之基本因素有二：

(a) 探測調查工作本身之可靠性：——地層之探測調查為作大地工程設計之必須的首步工作，設計資料均須根據探測所得及取樣試驗之結果，如果所取之樣品受到干擾而不能代表地層之原有性能，則無論採用任何精密儀器及高深理論所能獲得之分析結果均不可靠，不是過於保守，就是有發生失敗危害之可能。地層探測調查結果之可靠與否，基於從事此項工

作人員之訓練、經驗、及工作態度。在許多先進國家對從事鑽探調查工作人員之資歷均有嚴格的要求與審查。

(b) 工作的時間性：——地層探測工作的進行必須配合建造物之設計進度。最確當的做法是在規劃時首先進行地層探測工作，因為自探測所得之資料不單可以影響到結構物本身的設計，很多時候還牽涉到建造地點之更動。有些工程主管人員往往借因時間上來不及而決定不做適當的地層探測。如果時間上的確非常緊迫，則正當可靠的做法應該首先根據大地工程師之經驗作一設計時所需的假設 (Assumptions)，而同時進行地層探測及調查。由調查之結果來確定原來的假設是否可靠，如此才能達到一個工程設計的經濟及安全原則。在有些情況下，地層探測之資料不受設計者重視而由既無經驗又無能力的鑽探承包商負責進行，並且往往在整個設計已完成後才做，其目的僅為應付建管當局規格上的要求，像這一類情形，目前在國內發生很多，也可以說是一種既浪費又不安全的做法。

#### 1.4 影響探測及調查計劃範圍之因素

(a) 土層變化之可能性：——對一個地層探測與調查工作計劃之範圍影響最大的當然是地層土壤性能之變化。在均勻 (Homogeneous) 土層地區之探測工作與在極不規律的 (Erratic) 堆積土壤地區之探測工作，其範圍及方法可有極大的不同。

(b) 工程計劃之大小：——探測之地區範圍、深度、及方法與工程計劃本身之大小及複雜程度有很大的關聯。還有一點常被忽略的就是工程本身的重要性。

(c) 經費之考慮：——在先進國家一般情況下而言，做地層探測常用的經驗法則 (Rule of thumb) 是探測調查費用約佔總工程費之0.5至1.0%。工程越大所需費用之比例可較低，但特殊性的工程，如海底隧道等，則又當別論，如日本東京灣之過港隧道，調查費用佔總工程費之2~3%。此調查費用一半用作初步調查，另一半用於細部設計調查。施工時調查費用，則因有特殊要求而做，經費需要各不相同。除了實地探測及調查外，另外在規劃、試驗、及分析方面所需的費用，亦約為總工程費之0.5至1.0%。在規劃一個探測與調查工作計劃時，經辦人往往會受到一種所謂「假經濟」 (False economy) 的影響。固然做極少量的調查工作在表面上來講是節省了經費，但事實上，因為資料不足，設計者不得不用較大的安全係數，使工程總價反而增高。因為許多有關大地工程之工作位於地下，非常人所能目見，工程費用增高了也非一般人士所能瞭解。真正的經濟規劃，必須在過於保守及不安全兩種情況下取得一個平衡。

(d) 工程失敗 (Failure) 或損壞引起之影響及其重要性：——對一個調查計劃之周詳與否而言，另一個必須考慮的問題是如果該工程發生失敗或損壞，其產生的後果將如何，如是否會危及人民的生命與財產。

## 二、地層探測與調查之階段分類 (Phases)

如前所述地層探測與調查工作可分為兩階段，即初步察探與細部探測。為達到最經濟有效的做法，探測調查工作應分期進行，每一期的規劃應根據上一期所獲得之資料來決定。

### 2.1 初步察探

初步察探之主要目的為提供足夠的資料作為可行性的分析 (Feasibility study)、工程規劃、決定進一步探測的方法，及工價概估之用。初步察探的資料收集及調查，包括地形圖、地質圖、土壤測量 (Soil survey) 資料、航測相片、現場踏勘、及初步鑽探。最值得注意的是不能忽略現場踏勘的重要性。我們當大地工程師者，不能只坐在辦公室中做規劃設計，而必須對現場情況及週圍環境有充分的瞭解，往往能從鄰近結構物的使用情況獲得寶貴的資料。

### 2.2 細部探測

細部探測主要是為了獲得設計時所須的詳細資料，如土壤強度與壓力的關係、壓密性能、透水性等。一般用於細部探測的方法有下列四種：物理性探測 (Geophysical methods)、鑽探及取樣 (Boring and Sampling)、試坑開挖及取樣 (Test Pit and Sampling)、測探及探測桿 (Sounding and Probing)。方法之選擇視地層之性能及工程之大小與複雜而決定。有時可能採用一種或數種方法配合進行。

## 三、地層探測與調查方法簡介

地層探測與調查的方法有很多種，每種方法有其優點及限度，此與地層性能有密切的關聯。方法的選擇是否合適有賴於主持調查工作之大地工程師本人的經驗及對探測調查方法之認識。以下對幾種常用於土壤調查的方法作一簡介，詳細資料可參閱文獻<sup>(4)(12)</sup>等書籍。

### 3.1 物理性探測

物理性探測是一種快速的檢層測量，在一般情況之下僅能供給地層分佈之大致概況，當用於工程設計時，必須加以鑽探取樣，才能確定地層之性能。當一個工程所包含之面積較大時，如公路、機場等，物理性探測可幫助決定鑽探取樣之方案，如地點及數量等，因此物理性探測也常用於初步探測。

常用的物理性探測方法有下列四種：

(a) 震波調查法 (Seismic methods)：——震波探測方法之基本原理是震動波在經過不同物質時，其速度因各物質之密度、含水量、空隙比、彈性係數等性能之不同而有異。由於此速度與物質性能之關係可推斷出地層之變化。震波探測之震波通常是用炸藥來造成，然而利用檢波器 (Geophone) 在不同距離處檢定波速。所測檢之震波有折射波與反射波兩種，折射波震測 (Seismic refraction) 可用於探測地層變化至 300 公尺左右的深度，而反射波震測 (Seismic reflection) 則適用於探測深度超過 300 公尺以上的地層變化，因此後者極少應用於土木工程。兩種震測之原理簡略示於圖一。

(b) 電阻法：——當電流通過一物體時因物體性質之不同而產生不同之電阻，電阻探測法即根據此原理用來探測地層在縱向與橫向的變化。圖二示電阻探測法之原理。因為電阻量易受外界之干擾，所以採用此法來作地層調查須要格外小心。電阻法與震測法相似僅能判斷地層之大致變化，必須另外配以鑽探及取樣。

### 3.2 測探與探測桿 (Sounding and Probing)

測探與探測實際上是兩個通用的名稱，原理上非常簡單是將一根鐵桿用靜壓力或動壓力打入地層而紀錄其貫入阻力，由貫入阻力之紀錄可以判斷地層各層次的變化。如果貫入阻力與土壤性能有足夠相關資料的話，常可從貫入阻力之紀錄而用半經驗方式來估算土壤強度或壓密度。但此種半經驗式的相關係數 (Correlation factor) 因土質不同而變，所以必須在使用地區有足夠之資料而不能盲目的採用別處所得的係數。

探測桿之優點是速度快並且價格低，可以在短時間內探測相當大的面積，因此常用於補助鑽探之不足，尤其是在不規則地區更為有用。其最大的缺點是無法取得土樣，因此不能很準確的確定土壤分類及其工程性能。

探測桿經常用的有兩種，一種是簡單的直桿，另一種則在桿端附以貫入儀 (Penetrometer)。貫入儀之尺寸及形式變化甚多，如圖三所示，其中比較普遍的是荷式錐形貫入儀 (Dutch Cone Penetrometer)。近來歐洲各國鑒於所用的貫入儀種類太多，所得資料難以比較，在國際土壤及基礎工程學會內成立一專門小組研究訂定標準<sup>(10)</sup>並已於今年(1977) 7月在東京召開之執行委員會通過。

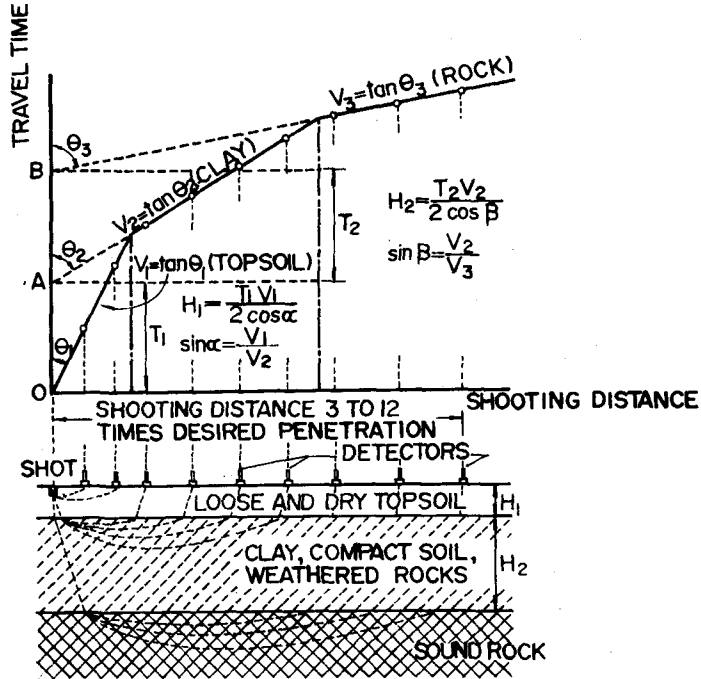
### 3.3 鑽探

#### 3.3.1 鑽探方法

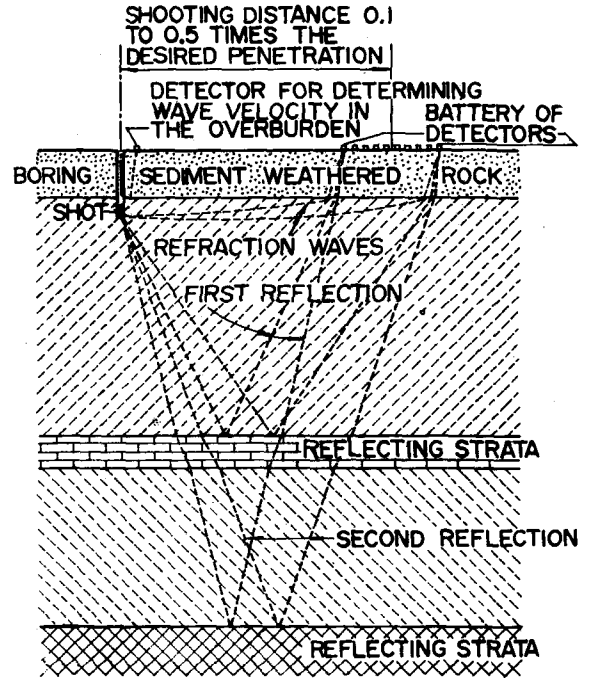
通常用的鑽探方法有螺旋鑽探 (Auger boring) 沖洗鑽探 (Wash boring) 及旋轉鑽探 (Rotary & drilling)。為易於在鑽探時明確認定土壤分類，應盡量使用螺旋鑽探法，尤其是探測在地下水水位上部之地層。沖洗鑽探操作較易在本省最為普遍。如欲探測之地層屬於堅實之土層、風化岩石、或岩盤，則必須用旋轉式鑽探法。鑽探方法及機械之選擇是否恰當，與工作進行速度及樣品品質有甚大之關聯。鑽探時必須使鑽孔穩定而不發生崩坍，最通常使用的辦法是用水泥漿、或套管，在特殊情況下，也有用冰凍或灌漿法。究竟應該採用何種方法，主要還是由地層土質性能來決定，如砂質土層則不適宜用水來作鑽孔之穩定劑，用套管在一般情況下是最可靠，並且對土壤樣品取拿也最少干擾，但費用則比較昂貴。

#### 3.3.2 鑽孔數量、位置與間隔之選定

一個鑽探工作最終的目的是獲得一個地層剖面圖 (Soil Profile)，此剖面圖必須要很明顯及確實的顯示出：地層在各方面的變化及其厚度、地層性能的變化、及任何特殊的不規律變化。在一般情形而言，鑽探位置分配最好是採取方格制 (Grid system)，但事實上大部分的工程因為經費的限制而不可能做到。總之鑽探工作的規劃必須以最有效並且又經濟的

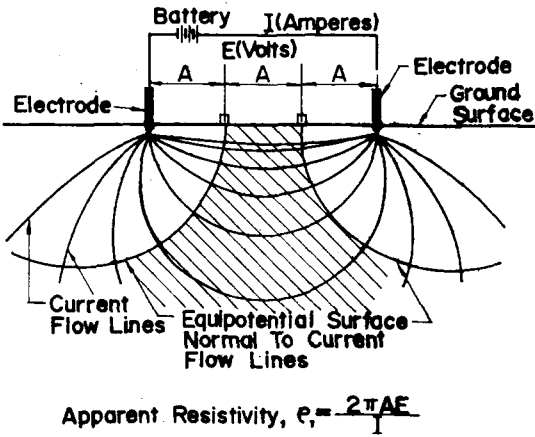


(a) 折射波震測

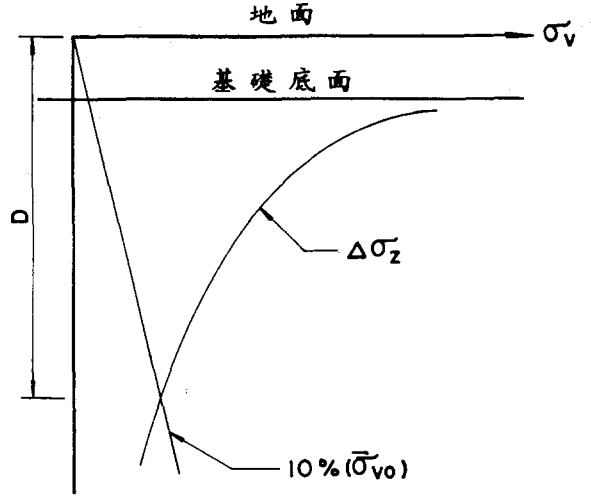


(b) 反射波震測

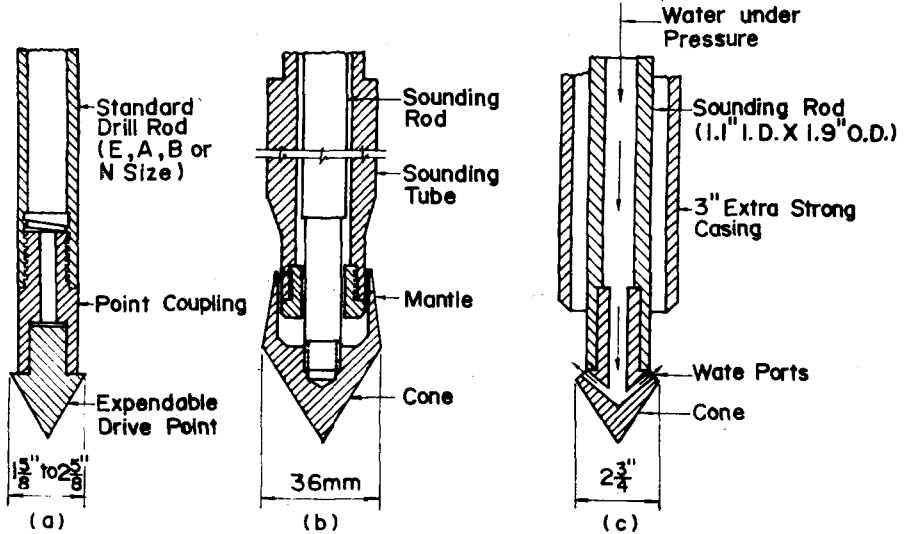
圖 一 測 震 原 理



圖二 電阻探測原理



圖四 鑽孔深度



圖三 錐形貫入儀：(a) 錘尖貫入儀；(b) 荷式錐形貫入儀；(c) Terzaghi 貫入儀

方法來達到前述之目的。一般的建築規範中的建築物常有最低鑽孔數的規定，但規劃者必須注意當地的地質情況變化，不應僅為附合規範而不作進一步的研討。

### 3.3.3 鑽探深度之決定

與鑽孔數量、位置、及間隔之選定一樣，鑽探深度也不宜加以很嚴格的規定。在規劃時有二個因素必須考慮，由此可估計鑽探所須的深度。

(a) 建造物所加於地層的壓力大小及其分佈：——鑽探必須顯示出在應力影響範圍內之土層變化。在一般情況下，如土壤所承受因建造物而增加之應力( $d\sigma_z$ )可於其原來之蓋土重量(Overburden pressure  $\bar{\sigma}_{v0}$ )之10%，則此加重對土壤之承載及壓密影響不大。一個很簡單的經驗法則是鑽探深度必須達到此深度，即 $\Delta\sigma_z = 10\% (\bar{\sigma}_{v0})$ ，如圖四所示。

(b) 地層中易壓縮土層(Compressible layer)之存在：——易壓縮土層受力後即發生壓密，為基礎沉陷之主因，所以在鑽探時必須確實找出易壓縮土層之深度及其壓密度。在有種地質情況下，甚至在相當深的深度突然會有一易壓縮土層存在，因此除非對當地地質情況有充分的瞭解，即使鑽探達到(a)所建議的深度，仍可能產生沉陷問題。在此種情況下，至少有一個鑽孔，通常是第一個，應該鑽到更深的深度，而至堅硬的層次。

在作壩、堤等基礎鑽探時，另一必須加以考慮的因素是地下滲透(Underground seepage)，鑽探之深度必須穿過有滲透可能之層次。當鑽探入岩石時，必須鑽入相當深度以確定岩石性能同時判定所遇到的確是岩盤而不是大塊卵石(Boulder)。

### 3.4 地下水觀測

地下水觀測除測定地下水位之變化外，尚須測量地下水之壓力、分佈及流向。其需要當然視工程性質而不同。通常在鑽探時，由鑽孔內所量得之水位實際上常常是地下棲止水(Perched water)，而非真正的地下水位，尤其在鑽孔時如用沖洗法，則水位之檢定更宜加以注意。

地下水觀測可採用下列兩種方法，如圖五所示。

(a) 觀測井(Open well)：——觀測井所得之水位為靜止水位(Static water table)，如深度不足時，量得的水位往往是棲止水位。

(b) 水壓計(Piezometer)：——水壓計不僅可以量得靜止水位，並且可測定因土壤受壓而產生之超水壓(Excess Pore Pressure)。水壓計並可埋設在不同深度，而觀測各土層內之水壓力變化。此類裝置對施工控制及長期觀測極為有用。水壓計之裝設又可分為開放式(Open type)及封閉式(Closed type)。開放式因當水壓有變化時，土壤之空隙水必須流動，因此反應較慢，尤其是在低透水性之黏土中。封閉式是最理想的裝置，反應極快。封閉式水壓測量有多種方法，如水壓式(Hydraulic System)、氣壓式(Pneumatic System)、及電震式(Vibrating-wire)。

### 3.5 土壤取樣 (Soil Sampling)

#### 3.5.1 土樣種類

鑽孔工作除鑽孔外另一重要部分為取土樣、以作檢定及試驗之用。土樣可分為擾動而代表性 (Disturbed and representative) 的土樣及非擾動性的土樣 (Undisturbed Sample) 二類。擾動性的土樣主要是用於來識別土壤的種類及變化，所以必須具有代表性，此類土樣可用來做顆粒分析、比重、塑性試驗等。一般鑽探時採用壁管 (Split spoon) 所取得的土樣即屬於這一類。非擾動性土樣是最重要的樣品，從此類土樣才能測出該種土壤的工程性能。

#### 3.5.2 土樣受擾動的原因

自地下取出土樣至試驗完成的整個過程中，受擾動的機會甚多，主要的原因可歸納如下：

##### (a) 鑽探及取樣

- (i) 在鑽探孔底之擾動：——包括有應力之減低、土壤膨脹、土壤旁擠、孔內沖洗水或泥漿之影響，
- (ii) 清理鑽探孔時產生的擾動，
- (iii) 取樣時之擾動：——可能發生的擾動有樣管壓入時管外土壤內擠、樣管內外面之摩擦、取樣時之張力等。

(b) 樣品保管、包裝、及運輸：——常常發生的擾動有如將樣管置於太陽下照晒、包裝不善而引起水份蒸發、運輸時的震動等。

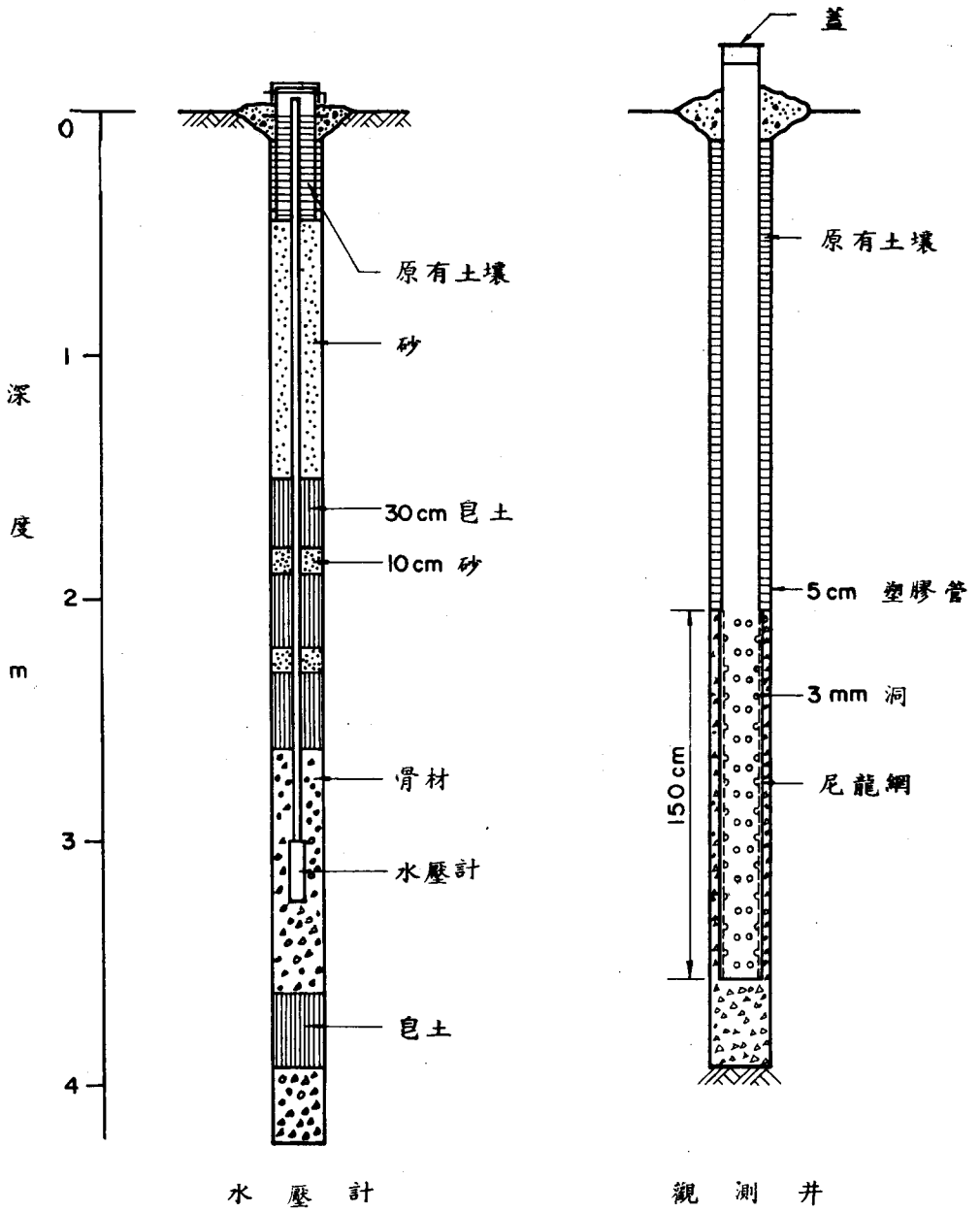
(c) 試體準備：——在作試驗時，如強度試驗、壓密試驗、樣品須自樣管中取出，並且加以修切，如不加特別注意，常會引起很大的擾動。

#### 3.5.3 土樣受擾動後之影響

土樣受擾動後產生之結果可簡單的歸入下列五點。至於擾動對土壤性能影響之程度，則與擾動度有關，將在下面予以討論。

- (i) 改變樣品內之應力，
- (ii) 改變含水量及孔隙比，
- (iii) 改變土壤組織結構 (Soil structure)
- (iv) 改變化學成份，
- (v) 使土粒混合。

由上所述，可見鑽探及取樣並非如一般人所想像中那麼簡單，應由經過專業訓練之技工在有經驗的大地工程師監督下進行。否則如所取的土壤不能代表原始的土壤，則所做試驗的結果就難以置信。



圖五 觀測井及水壓計之裝設

### 3.5.4 非擾動土樣之條件

在上節所述土樣受擾動後所產生之結果除了因將土壤自地底下取出而使土內應力減小是不可避免者外，一個非擾動性的土樣必須具備下列三條件：

- (i) 土壤組織結構不受擾動，
- (ii) 含水量及孔隙比不改變，
- (iii) 物理及化學成份不改變。

由以上各種原則性的需求，一個實用的非擾動性取樣管必須符合下述各點，見圖六：

- (i) 面積比 (Area ratio) :  $C_a < 10\%$  ,
- (ii) 管內淨空比 (Inside Clearance Ratio) :
 

短小土樣	$C_i = 0 \sim 1\%$
中長土樣	$C_i = 0.5 \sim 3\%$
長土樣	$C_i = 5 \sim 10\%$
一般用	$C_i = 0.35 \sim 1.5\%$ ,
- (iii) 管外淨空比 (Outside Clearance Ratio) :  $C_o$  .

砂 土  $C_o = 0$

黏 土  $C_o < 2 \sim 3\%$  ,

(iv) 單位採樣比 (Specific Recovery Ratio) =  $\frac{\Delta L}{\Delta H} (1 \sim 2C_i) > \frac{\Delta L}{\Delta H} > 1$

(v) 採樣比 (Total Recovery Ratio) =  $\frac{L}{H} \approx 1$

(vi) 所取得之土樣表面或剖切面無扭曲 (Distortion) 或缺陷，

(vii) 土樣之長度及重量不因取樣而改變。

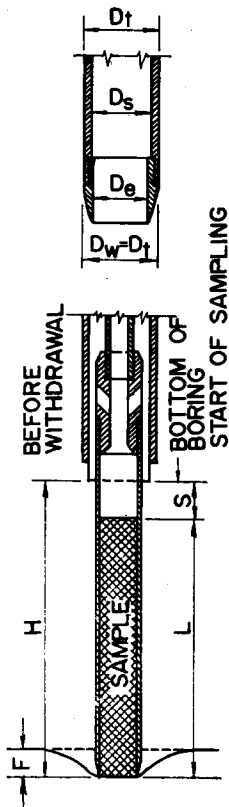
## 四、土壤試驗簡介

### 4.1 現場試驗 (In Situ Testing)

為求得土壤之工程性能，最可靠的試驗方法當然以現場試驗為最，因為不自地層下取出土樣，對土壤之擾動也可以最小。但是在很多情況下，因實地之各種限制而不能做現場試驗。現場試驗另外一個限制就是普通只能測定土壤在當時的性能而不能控制試驗環境來測得土壤將來可能發生之變化。

常用的現場試驗有下列數種：

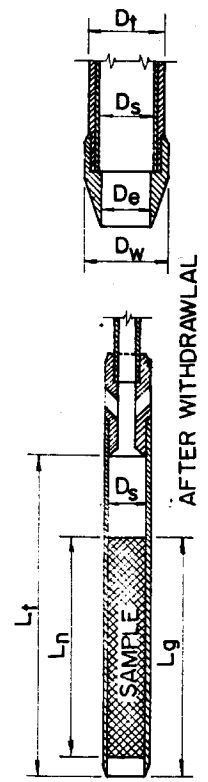
(a) 標準貫入試驗 (Standard Penetration Test) : —— 標準貫入試驗是屬於探測的一種試驗，所得之結果，即通常所謂的N值，僅為土壤對劈管貫入阻力的一種間接紀錄，而不能直接用於設計用。但N值的紀錄可使設計者對土層之大致強弱度有個概念。雖然有很多半經驗性的公式將N值與土壤的工程性能相聯，但此類公式僅可作為參考之用，而不宜用於設計。目前國內所用的所謂標準貫入試驗，受人為操縱的影響很大，所以在鑽探做該項試驗時，必須加以嚴密的控制與監督。



管內淨空比  $C_L = \frac{D_s - D_e}{D_e}$

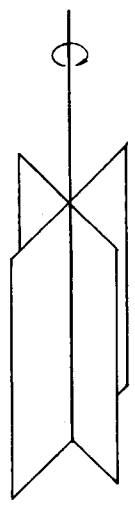
管外淨空比  $C_o = \frac{D_w - D_t}{D_t}$

面積比  $C_a = \frac{D_w^2 - D_e^2}{D_e^2}$



- H = 取樣套管貫入深度
- L = 套管取出前之土樣長度
- L<sub>g</sub> = 套管取出後自土樣上部至套管尖端距離
- L<sub>n</sub> = 套管取出後土樣淨長
- L<sub>t</sub> = 套管淨長
- $\frac{L}{H}$  = 採樣比
- $\frac{\Delta L}{\Delta H}$  = 單位採樣比

圖六 非擾動土樣套管條件



圖七 現場十字片剪力

(b) 荷式錐形貫入試驗 (Dutch Cone Penetration Test) : ——已在第 3.2節中簡單的討論過。

(c) 十字片剪力 (Vane Shear) : ——十字片剪力試驗是最有用的一種現場試驗。如圖七所示, 此試驗之原理非常簡單, 即轉動一個十字片, 由所需要的力距 (Torque) 可計算出十字片周圍的剪力強度。此種試驗最適合用於量測軟弱黏土的不排水剪力強度 (Undrained Shear Strength) 。

(d) 平板載重試驗 (Plate Bearing Test) : ——平板載重試驗由平板荷重與沉陷量的關係來估計土層的承載量 (Bearing Capacity) 。此類試驗常用於決定公、鐵路、機場道基及道床的承載量估計。卵石層及礫石層因鑽探困難也常用此種試驗來測定其承載量。但因為試驗時所用的平板大小有限, 一般最大的是75公分直徑, 與基礎之大小相差甚大, 在應用平板載重試驗之結果時必須加以注意。

(e) 透水試驗 (Permeability Test) : ——為求得土壤的透水性能, 常用的現場試驗是抽水試驗 (Pumping Test) 。因地層土壤常分層次所以現場抽水試驗是確定地層的總透水性最佳的方法。但此種試驗所需經費昂貴。近年來有利用水壓計來試驗現場透水性。

(f) 水壓力變化——土壤孔隙中之水壓力對土壤本身的工程性能有很大的影響。水壓力之測定已在第3.4節中討論過。

#### 4.2 試驗室試驗 (Laboratory Testing)

試驗室土壤試驗可以分成三大類, 即物理性質試驗、化學成份試驗、及工程性能試驗。

試驗的方法及步驟可參閱<sup>(1)(2)(6)</sup>等書籍。在下面各節將討論各種試驗特別須要注意的地方。

##### 4.2.1 物理性質試驗

此類試驗包括含水量、密度、顆粒分析、塑性、及比重等, 主要的目的為檢定土壤及分類之用。除含水量及密度外, 其他試驗均可用擾動土樣。

有些土壤因為其所含的礦物 (Mineral) 性能隨含水量而變化, 因此在做各項試驗時應盡量用原狀土樣而不予以晒乾或烘乾。

##### 4.2.2 化學成份試驗

近年來土壤力學的發展顯示出土壤的化學成份, 尤其是空隙水份中之化學成份對土壤的工程性能可有很大的影響<sup>(7)</sup>。在各種情況, 如壓力、含水量、密度都不變的情形下, 因環境的變更, 土壤所含水份內之化學成份可有變化; 此土壤的工程性能, 如強度、壓密度亦可能隨之而變。如在海洋環境 (Marine environment) 下沉積的黏土因受到雨水或其他流水的滲透, 土內水份中之鹽份 (Salt Content) 減少, 該土壤之靈敏度 (Sensitivity) 可能增加很多, 如北歐的「流性黏土」 (Quick Clay)。試驗分析主要的化學成份分析有孔隙水內的電導體含量 (Electrolyte content and type)、酸度 (pH)、及含硫量 (Sulphate)。

### 4.2.3 工程性能

土壤工程性能常需做試驗的有強度 (Strength)、體積變更 (Volume change)、及透水性 (Permeability)，其他尚有多種特殊用途的試驗 如施工時所用的夯實控制試驗等。強度試驗及體積變更試驗主要是測定土壤之應力與應變的關係。試驗的方法隨問題的不同而異，當然所得之結果也不相同。因為這一類試驗比較複雜，在這次講演中，將作進一步的討論。

(a) 應力應變關係試驗 (Stress-Strain Tests)：——測定土壤應力與應變關係常用的試驗方法有均向 (Isotropic)、單向 (One-dimensional)、三軸 (Triaxial)、及直接剪力 (Direct Shear) 四種。試驗時之基本情況及其用途如圖八所示。圖八同時也指出各種試驗進行時的應力變化途徑 (Stress Path)。在試驗室中做試驗最主要的一個基本條件是選擇一種試驗方法能使所產生的應力及應變等關係儘量符合或模仿該工程建造物所加諸於土壤之壓力與變形 (Simulate field condition)。圖八所列的四種試驗其中單向壓密試驗常用於估計建造物之沉陷量，三軸及直接剪力則用於測定土壤之強度。

#### (b) 剪力試驗

土壤因為其本身組成複雜不單含有顆粒、水分、及空隙三種成份，並且其結構組織對土壤性能有極大影響。不像鋼鐵、混凝土、木材等其他建築材料，土壤的強度不是固定的，而是跟隨試驗的方法而不同。因此，選擇試驗方法時，必須對土壤本身的性能及工程性質有充分的瞭解。

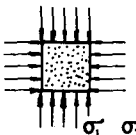
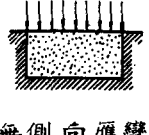
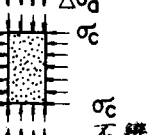
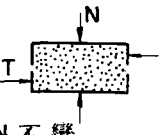
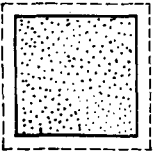
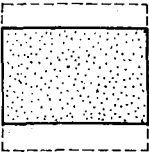
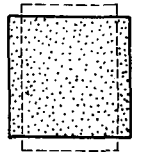

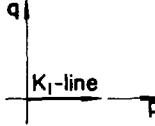
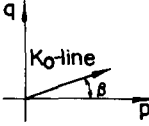
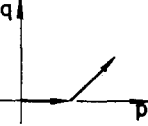
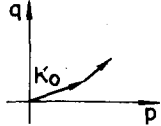
如以試驗所用的儀器及方法來分類，剪力試驗可分為下列數種，各種試驗之原理見圖九：

- (i) 直接剪力 (Direct shear)，
- (ii) 壓縮試驗 (Compression tests)
  - 無圍壓縮試驗 (Unconfined compression)
  - 三軸壓縮試驗 (Triaxial compression)，
- (iii) 伸縮試驗 (Extension tests)，
- (iv) 簡單剪力 (Simple shear)，
- (v) 扭轉剪力 (Torsional shear)，
- (vi) 平面應變 (Plane strain)。

如以試驗時採取之步驟及試驗條件來分，則以上所列的每種試驗又可分為三類：

- (i) 不壓密不排水 UU (Unconsolidated-Undrained)，
- (ii) 壓密不排水 CU (Consolidated-Undrained)，
- (iii) 排水 CD (Drained)。

而壓密時所加之壓力又有均向 (Isotropic) 及非均向 (Anisotropic) 之分。圖十簡示各種試驗之學理。

試驗	均向壓縮	單向壓縮	三軸壓縮	直接剪力
基本條件				
變形	<p>體積</p> 	<p>體積變形為主，少許扭曲</p> 	<p>扭曲及體積變</p> 	<p>扭曲變形為主</p> 
應力途徑				
用途	體積應變	單向壓密 沉陷計算	強度試驗	強度試驗

圖八 應力—應變關係試驗

## 五、試驗結果之應用及判斷

### 5.1 土樣品質

在前面第 3.5.2 節中曾討論過可能造成土樣擾動的各種原因。土樣擾動對試驗的結果有很大的影響。首先由圖十可看出在鑽探取樣及試體準備的過程中，土壤內部應力的變化。假使一個試體除了因為自地下取出樣品而應力減少的擾動外沒有其他任何的擾動，則土樣內部的有效應力  $\bar{\sigma}_p$  是均向的。但是由於其他的擾動，土樣內部的剩餘水壓改變，因而影響到有效壓力。由土樣之真正剩餘有效壓力  $\bar{\sigma}_r$  (Residual Effective Stress) 及  $\bar{\sigma}_p$  可以估計土樣所受干擾的程度  $D_d$  (Degree of Disturbance)。這是判斷土壤鑽探及取樣品質的一個方法。

### 5.2 土樣品質對試驗結果之影響

圖十二顯示兩個壓密不排水三軸試驗之應力曲線，其中一個試體為不擾動土樣，另一則為同樣的土樣經過重塑後的試驗。由此圖可以很清楚的看出擾動對土壤強度及應力的影響。

圖十三顯示土樣擾動對土壤壓密性的影響。

### 5.3 試驗方法對試驗結果之影響

圖十四顯示在各種不同試驗狀況下，三軸試驗所得之應力變化。由此圖亦可看出在不同試驗狀況下，同一土樣所測得之強度全不相同。

圖十五顯示試驗時所用的加壓比率 (Load-Increment Ratio) 及加壓時間 (Load-Increment Duration) 對壓密度的影響。

### 5.4 判斷與證明

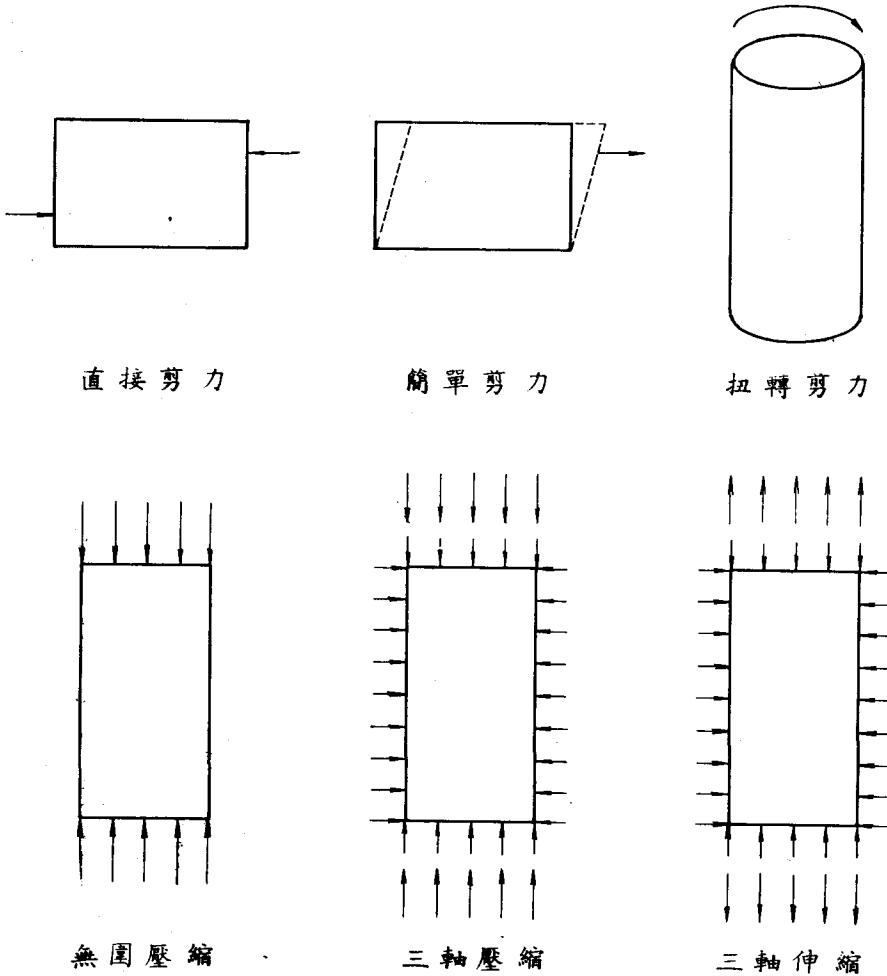
在前言中曾述及土木工程師在做一個分析與設計時，其結果可以說是一個「預測」。預測之準確與否，和原始資料之週全及假設之是否合乎實際狀況息息相關。在處理大地工程問題時，求得一個預測的步驟大概如圖十六所示。這次講演主要的是討論第四步資料之獲得。在資料的應用方面我們必須注意到所選擇的分析理論與方法是否與資料取得的方法互相配合。例如用來分析之資料僅僅是取自最粗糙及低品質的土樣試驗，而分析方法採用高深的「有限元素法」，所得之答案可能與實際狀況相距甚遠。沒有任何高深的理論可以來代替正確的原始資料。同樣的，如果只知做很複雜的試驗，而不預先考慮將來採用的分析方法，也會造成錯誤的預測。

大地工程的預測較之一般土木工程更為困難，其原因甚多，而以下列各點更為重要：

- (i) 地層本身之變化多端，
- (ii) 大部分時間無法收集足夠及準確之資料，
- (iii) 所有問題均屬超靜定 (Statically Indeterminate)。

因此在處理大地工程問題時，經驗與判斷成為極重要的一部分。同時在許多工程必須在施工期間逐步求證，在必要時隨時修改假設與設計。因為地層的變化無窮，可以說沒有兩個

工程現場的土壤性能是完全相同，有如沒有兩個病人的體質完全相同。大地工程師的責任及做事應採取的態度與步驟可以和醫生作一比較如圖十七所示。在此我們可以作一結論，在處理任何一件大地工程問題時，我們必須由專業人士來「對症下藥」。

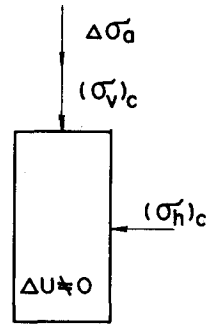
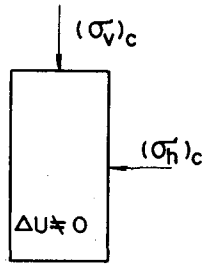
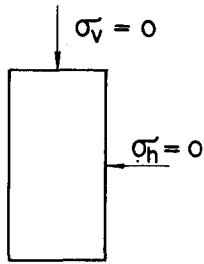


圖九 各種剪力試驗原理

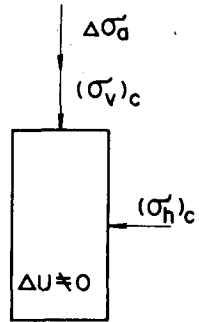
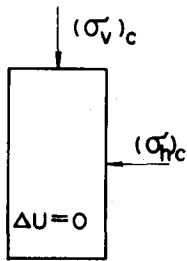
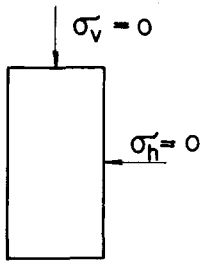
試驗前

壓密

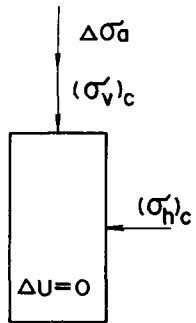
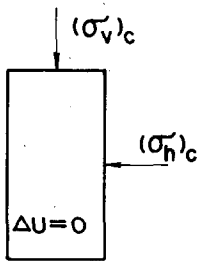
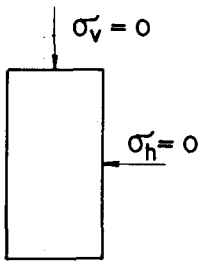
加壓



(a) 不壓密不排水試驗



(b) 壓密不排水試驗

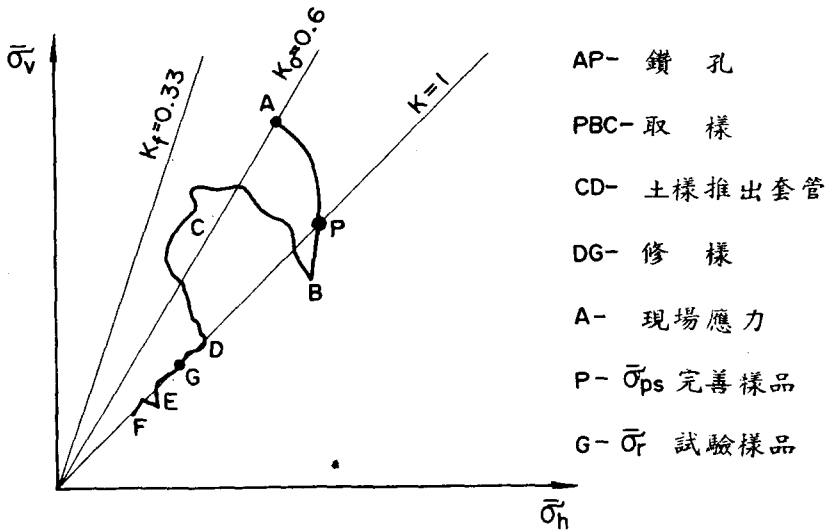


(c) 排水試驗

註：  $(\sigma_v)_c = (\sigma_h)_c$  均向壓密

$(\sigma_v)_c \neq (\sigma_h)_c$  不均向壓密

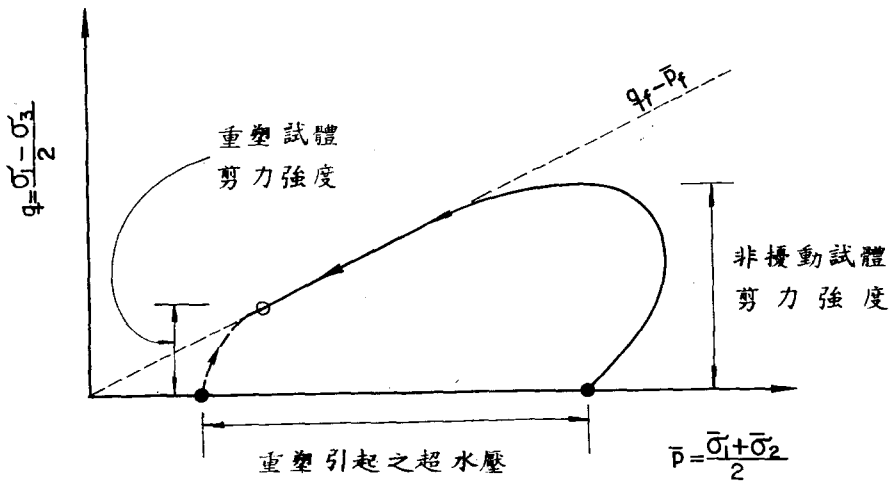
圖十 不同步驟之三軸剪力試驗



$$\bar{\sigma}_{ps} = \bar{\sigma}_{vo} [K_{ot} A_u (1 - K_p)]$$

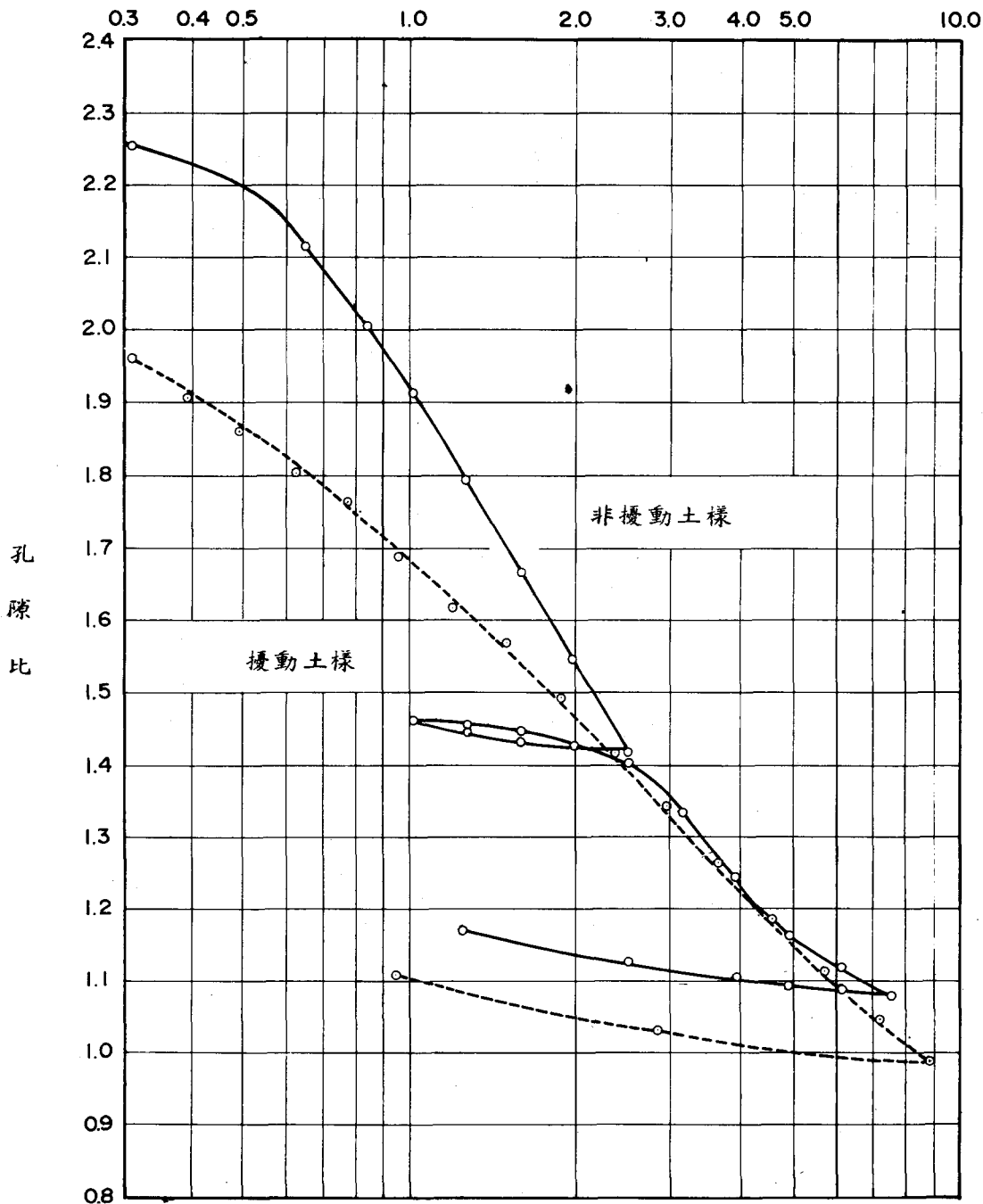
$$D_d = \frac{\bar{\sigma}_{ps} - \bar{\sigma}_r}{\bar{\sigma}_{ps}}$$

圖十一 鑽孔、取樣、修樣等對土樣之擾動

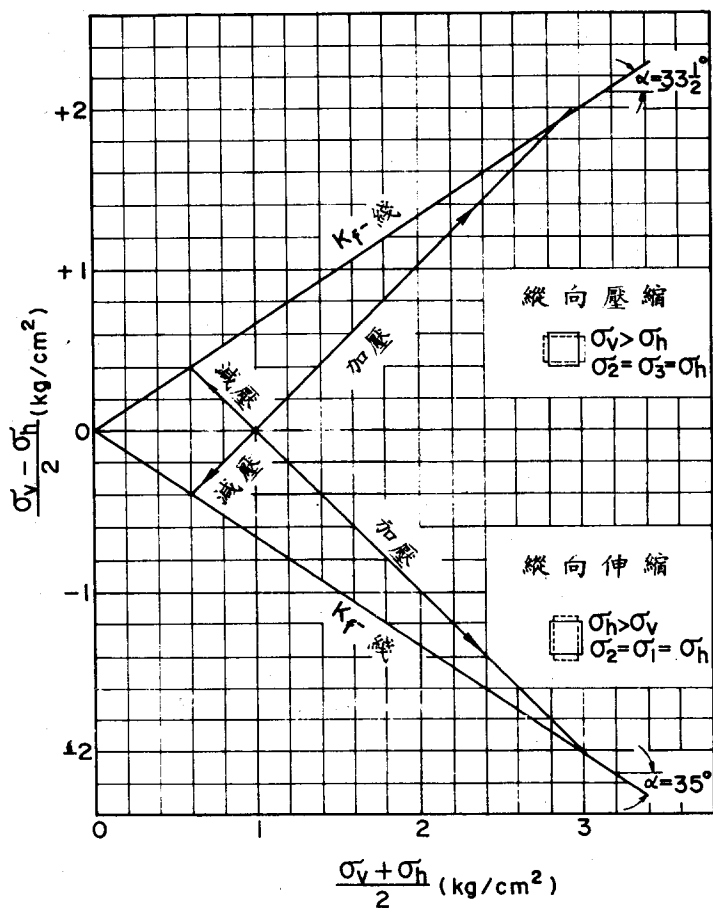


圖十二 擾動對剪力強度及應力曲線之影響

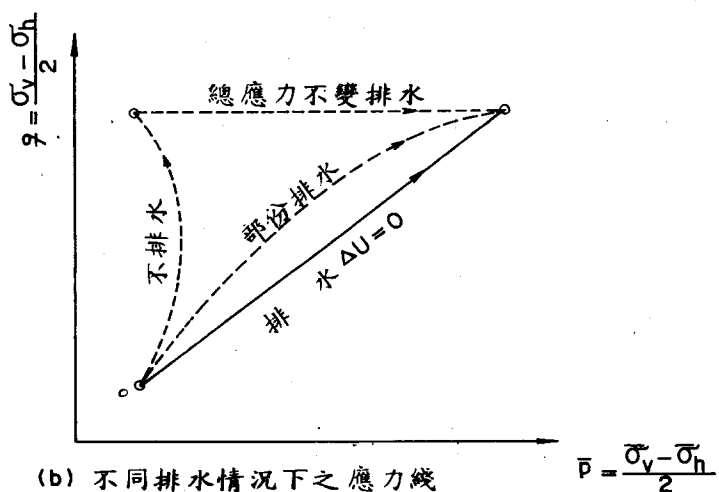
有效壓力,  $\text{kg/cm}^2$



圖十三 土樣擾動對壓縮性之影響

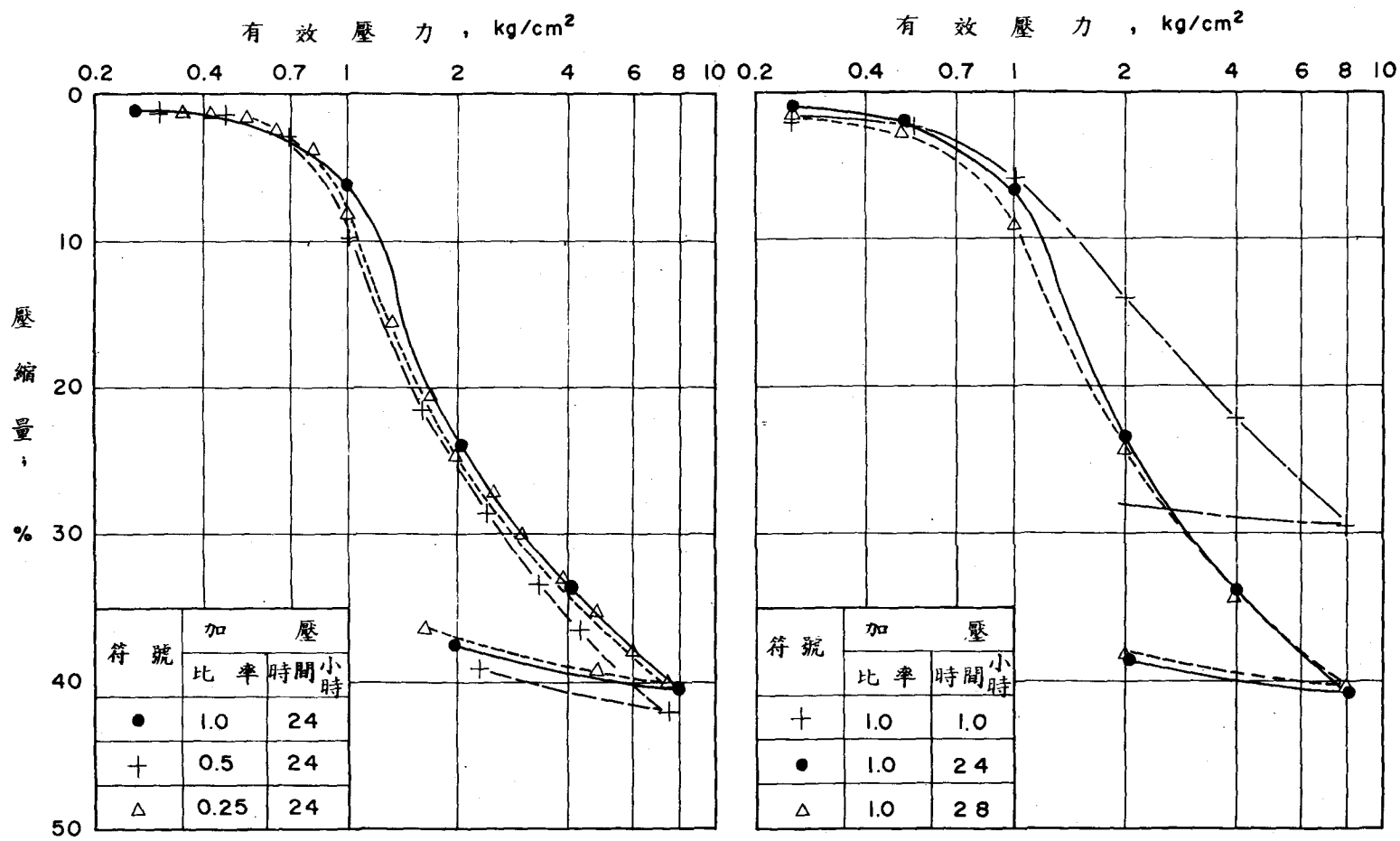


(a) 縱向壓縮與伸縮之應力綫



(b) 不同排水情況下之應力綫

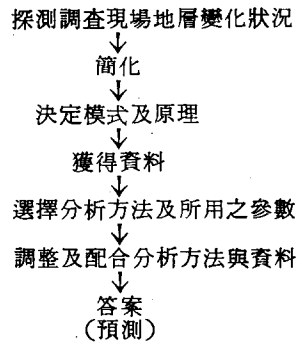
圖十四 三軸試驗應力綫



(a) 加壓比率之影響

(b) 加壓時間之影響

圖十五 試驗方法對土壤壓密性之影響



圖十六 大地工程分析與設計預測之步驟

<u>醫 師</u>	<u>大 地 工 程 師</u>
查詢病歷及家庭背景	初步察探及資料收集
瞭解病況	瞭解工程情況
體格檢查及試驗	探測、調查及試驗
病理學與經驗	土壤及岩石力學與經驗
診斷	簡化及分析
判斷及處方	判斷及設計
觀測及複診	觀測及修正

圖十七 大地工程師與醫師之比較

## REFERENCES

1. A.S.T.M. (1977), Soil and Rock; Building Stones; Peats, Annual Book of ASTM Standards, Part 19, A.S.T.M., Philadelphia.
2. BISHOP, A.W. and HENKEL, D.J. (1962), The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd Ed., Edward Arnold, London.
3. BRAND, E.W., MOH, Z.C. and WIROJANAGUD, P. (1975), Interpretation of Dutch Cone Tests in Soft Bangkok Clay, Proc. European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol. 2:2, pp. 51-58.
4. HVORSLEV, M.J. (1949), Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes, American Society of Civil Engineers, N.Y.
5. LADD, C.C. and LAMBE, T.W. (1964), The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests, STP No. 361, A.S.T.M., pp. 342-371.
6. LAMBE, T.W. (1951), Soil Testing for Engineers, John Wiley, N.Y.
7. LAMBE, T.W. (1959), Physico-Chemical Properties of Soils, Role of Soil Technology, Journal Soil Mech. & Found. Div., A.S.C.E., Vol. 85, No. SM2.
8. LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley, N.Y.
9. NELSON, J.D., BRAND, E.W., MOH, Z.C. and MASON, I.D. (1971), The use of Residual Stress to Define Sample Quality, Proc. Specialty Session on Quality in Soil Sampling, 4th Asian Reg. Conf. on S.M.F.E., Bangkok, Vol. 1, pp. 82-87.
10. SWEDISH GEOTECHNICAL SOCIETY (1975), Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, 3 Volumes.
11. SANGLERAT, G. (1972), The Penetrometer and Soil Exploration, Elsevier Publ. Co., Amsterdam.
12. WINTERKORN, H.F. and FANG, H.Y. (1975), Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., N.Y.