

80—研（八）

利用土壤之電阻特性評估其動態行為之研究

臺灣省政府交通處港灣技術研究所

中華民國八十年六月

基本研究—研究計劃（八）

計劃名稱：利用土壤之電阻特性評估其動態行為之研究

執行期限：民國七十八年七月一日至八十年六月三十日

計劃主持人：李 豐 博

協同主持人：簡 連 貴

計劃顧問：李 建 中

研究人員：李 延 恭

陳 圭 璋

謝 明 志

賴 聖 耀

蘇 吉 立

陳 志 芳

趙 光 華

助理員：陳 義 松

李 春 榮

張 阿 平

張 惠 華

臺灣省政府交通處港灣技術研究所

中華民國八十年六月

摘 要

組構於粒狀土壤力學行為中扮演一重要角色，組構性質包括顆粒特性及堆積特性，對受剪過程中之變形機制與異向性行為有決定性之影響。本研究計劃利用電性自動補償量測系統，結合電性構造因素理論，重新設計反復動力電性三軸室及三向度電性量測盒。針對台灣西部沖積砂性土壤，利用濕搗法及多層篩震降法準備不同孔隙之試樣，進行一連串初始組構電性試驗、反復三軸排水及不排水試驗與動力試驗，來探討砂性土壤受剪過程中力學反應機制、動態性質及液化特性等與其電阻特性之關係。

數值模擬方面，本研究利用 Cundall (1979) 所發展出之三向度『TRUBAL』程式，描述粒狀土壤顆粒在空間運動行為，模擬顆粒之堆積與均向壓密狀況，以獲得所須之孔隙大小。並結合顆粒切片的觀念、構造因素理論與電磁學基本原理，考慮顆粒孔隙曲折效應，發展出可以描述粒狀土壤組構與電性參數關係之粒狀土壤電阻數值模式，進行顆粒電性分析。由試驗分析顯示：本文所發展之電阻數值模式及電性量測，對粒狀土壤組構性質之描述應能提供合適的途徑。利用台灣西部海岸沖積砂土動態特性資料，所建立之土壤電阻特性評估砂土層動態行為之方法，有助海岸結構物基礎之規劃與設計之參考依據。另採用台中港砂所進行之滲透試驗與利用電性參數所推求之砂土滲透係數值亦相當符合。

利用土壤之電阻特性評估其動態行為之研究

目 錄

摘 要

第一章 緒 論	1
第二章 文獻回顧	6
2.1 粒狀土壤之微觀組構	6
2.1.1 異向性之定義	6
2.1.2 異向性對砂土應力—應變行為之影響	6
2.1.3 粒狀土壤微觀組構之定義	7
2.1.4 粒狀土壤組構受剪之變化	9
2.2 構造因素之基本理論及其定義	12
2.2.1 導電度之定義	12
2.2.2 構造因素之定義	13
2.2.3 構造因素之基本理論	14
2.3 粒狀土壤動態性質	20
2.3.1 剪力模數之影響因素	20
2.3.1.1 圍壓效應	20
2.3.1.2 剪應變振幅效應	21
2.3.1.3 內含異向性	21
2.3.1.4 其它影響因素	22
2.3.2 阻尼比之影響因素	22

2.4	土壤動態性質之推求	23
2.5	粒狀土壤之滲透係數	25
2.5.1	滲透係數之影響因素	25
2.5.2	滲透係數之測定	27
第三章	砂土結構導電度量測系統之探討與設計	37
3.1	導電度量測影響因素之探討	37
3.2	導電度量測影響因素之校正	40
3.2.1	溫度效應之校正	40
3.2.2	容器常數之校正	41
3.3	導電度之量測原理	43
3.4	導電度量測系統之設計	43
第四章	試驗計劃、儀器與方法	57
4.1	試驗砂樣	57
4.2	砂樣試體之準備	57
4.3	三向度及圓柱導電盒試驗	59
4.3.1	三向度及圓柱導電盒試驗設備	59
4.3.2	導電度量測系統	59
4.3.3	試驗方法	59
4.4	共振柱試驗	60
4.4.1	試驗設備與步驟	61
4.4.2	試驗結果之計算方法	65
4.5	反復式三軸剪力導電度試驗	67
4.5.1	反復式三軸剪力導電度試驗設備	67
4.5.2	試驗方法	68
4.5.3	動態試驗資料擷取系統	69

4.6	滲透係數導電度試驗	70
4.6.1	試驗設備	70
4.6.2	試體準備方式	71
4.6.3	三向度導電盒試體之飽和	71
4.6.4	砂土試體滲透係數之量測	71
4.6.5	導電度之量測	72
4.6.6	飽和狀態下之透水試驗	72
第五章	切片觀念之粒狀土壤電阻模式	85
5.1	相關模式之探討	85
5.2	切片觀念之粒狀土壤電阻模式	87
5.2.1	基本假設	88
5.2.2	粒狀土壤電阻模式之推導	88
5.3	數值模擬之描述	95
第六章	試驗結果之分析與討論	99
6.1	構造因素與孔隙率之基本關係	99
6.2	砂土異向性之特性	100
6.3	平均構造因素與相對密度關係之評估	101
6.4	砂土顆粒形狀與構造因素之關聯性	102
6.5	台灣西部海岸沉泥質砂性土壤之動態特性	103
6.6	砂土最大剪力模數與構造因素之關係	103
6.7	滲透係數與電性參數關係之探討	104
第七章	受剪過程中導電度試驗結果分析與討論	125
7.1	反覆載重下軸向應變與構造因素之關係	125
7.2	不同應力階段組構之變化	126
7.3	以導電度觀點探討組構變化與液化潛能之關係	127

第八章	數值模擬結果分析討論	-----135
第九章	結論與建議	-----142
9.1	結論	-----142
9.2	建議	-----146
參考文獻	-----147	
附錄一	砂土之滲透係數與電性參數計算分析	-----158

第一章 緒 論

台灣位於環太平洋地震帶之西環，每年地震頻繁。而地震對於工程環境的危害，一般係由斷層、地陷、土壤液化等現象所引起。當地震發生時，岩盤受震並將震波傳至表層土壤，使土層承受相當的地動作用。在土木工程領域內，如高填土、深開挖、隧道、地下結構物及其他結構物基礎等工程，常涉及砂性土壤，近年來海域平台，許多大型發電廠及其他重要結構亦屢建築在砂質地盤上。為了防止砂土在動態荷重的作用下產生液化及過多的沈陷，而致危害結構物之使用與安全，因此在工程規劃與設計階段對土壤液化行為之評估為重要之課題。利用室內動力三軸試驗結果之應力比較分析法為較佳之評估方法 (Seed and Idriss, [1-2])，但涉及不擾動土樣之不易取得，且評估大面積土層之液化行為又需增加取樣試驗數目，費時昂貴。因此目前常用現地SPT-N值作初步評估，惟N值之人為試驗誤差大 (Schmertmann [3])，而致評估結果令人質疑，所以發展一種經濟可靠之監測方法實有其必要性。另外亦必須對砂土變形及破壞機制澈底了解，才能防止災害的發生，確保港灣結構物及工程安全。

土壤的基本力學性質，如壓縮性、剪力強度、滲透性等，皆與其組構息息相關。砂土是由個別顆粒所堆積而成，而砂土組構性質係由顆粒特性及堆積方式兩大因素所決定 (如圖1-1) [4]。

在沖積沉澱作用過程中，砂土顆粒係在重力方向堆積，受到單方向的壓縮荷重，於是逐漸發展出砂土之指向性質 (Orientation)。許多學者 (Oda [5, 6], Michell et al. [7]) 已經研究證實組構對粒

狀土壤異向性行為的影響。有關組構 (Fabric) 方面之研究，已有學者 (Oda [6], [8]; Mitchell et al. [7]) 利用切片法，觀察出許多砂土組構之微觀性質。綜合上述學者的研究成果，可得知組構對粒狀土壤之異向性行為有決定性之影響。所以，欲了解粒狀土壤受剪時之力學機制，則必須對組構之初始狀態及其在受剪過程中之變化徹底了解。但有關切片法之研究，其求取過程太過於繁複，且所得結果之研判，並不十分客觀，故實有必要另闢研究途徑。Arulanandan 等人 [9] 提出構造因素，利用構造因素可以適當的反應出砂土之孔隙率、顆粒長軸之指向、顆粒形狀等組構特性。近年來，利用電性方法，以土壤組構的特性為指標，分析土壤的力學性質，以作為評估砂土之液化潛能，無論在理論或實際的應用上，都已獲致良好成果 [9, 10, 11, 12, 13]，惟其結果均以間接方式整合，且未加以詳細說明，因此，有必要作進一步的研究。

飽和砂土之孔隙水是為電之良好通路，當相對密度較低時，空隙比較大，電阻即降低；當相對密度較高時，空隙比較小，電阻即提高。砂土液化潛能之可能性與電阻之變化有所關聯可成為一極佳之指標 (李建中 [14])。以往相對密度最常來研究砂土各種性質，但是相對密度只說明了緊密程度，並未對砂土結構之其他性質作任何解釋。有關電性之研究，Archie [15] 首先利用飽和土壤孔隙水電解質之導電度與砂水混合物導電度之比值，定義出『構造因素』來描述孔隙率之狀況。

有關砂土之孔隙率與平均構造因素之關係，經由簡連貴 [13]、朱專誌 [16] 等之研究證實，當砂土孔隙率愈大，平均構造因素就愈小，亦即孔隙率與構造因素為一反比關係。Arulanadan and Kutter [9] 研究結果顯示，不同的砂土結構與構造因素有關，尤其是顆粒之組合排

列、顆粒形狀及孔隙率。另外亦指出對於具異向性之粒狀土壤，構造因素為很有用之方向指數參數，所以對研究砂土而言構造因素為比相對密度更佳之指標。Erchul and Gularte[17]以飽和砂土之電阻特性為液化潛能及沈陷特性；Arumoli et al. [4]利用特殊設計之電極量測應用到現地，已有相當完善之成果。綜合以上學者在電性之研究，大都偏向於初始狀態之研究，對於荷重受剪過程中之情況及土壤動態性質並未深入探討。值得我們進一步深入探討，尤其對溫度效應、電解液濃度、電極常數等對導電度影響很大的因素，並未加以特別考量（簡連貴，李建中及朱專誌[18]）。簡連貴等經由許多相關率定試驗，結合許多電子及化工專業知能，已成功自行設計發展出適合粒狀土壤組構量測之電性自動補償系統。

本計劃研究方向即是想利用土壤電阻特性與動態行為之關係，深入探討電性量測所代表之反應機制，建立適當之電性指數以為力學行為之指標；利用受剪時顆粒孔隙所引致不同之組合，以數值模擬方式計算出電阻大小；並針對野外量測之特性改良簡連貴等所發展系統之缺點或結合地電阻探測法，使其能應用到現場之監測。

本計劃研究目的為：

1. 利用共振柱試驗結果，建立台灣西部海岸砂土之最大剪力模數 G_{max} 與砂土孔隙比之關係。
2. 進行土壤電性試驗，以期探討建立平均構造因素與孔隙率之關係。最後建立最大剪力模數 G_{max} 、 K_{2max} 與平均構造因素之關係，以作為預測評估土壤動態特性之參考依據。
3. 利用電性參數所推求計算之砂土滲透係數與實驗值比較分析，以探討其適應性。
4. 進行三軸不排水壓縮、伸張試驗。藉由受剪期間導電度的量測

，瞭解砂土受靜態兩種應力路徑作用下之最大主應力方向、組構變化與構造因素之關係。

5. 為深入瞭解粒狀土壤在動態受剪過程中，組構產生連續性變化的情形，由液化試驗進行中，導電度量測系統所量導電度值的變化，來探討砂土受不排水反覆載重期間，其組構變化的情形，以及孔隙水壓上升的機制。
6. 利用個別元素法，模擬砂土在空間堆積排列之情形。並結合切片觀念來計算砂土所相對應之電性特性。以數值模擬方式評估粒狀土壤組構性質與力學行為之關聯性。

本研究分兩年進行，第一年之研究重點主要在搜集國內外相關論文、模式資料；砂樣之採集與分析與電子掃描照相分析；三向度電性盒及圓柱導電室之設計、製作，建立導電度自動量測系統；結合e/p電空調壓閥與資料擷控制系統(AD/DA)，完成反復荷重試驗系統以作為第二年，進一步描述砂土受反復剪力作用時，組構特性與建立砂土動態特性之基礎。

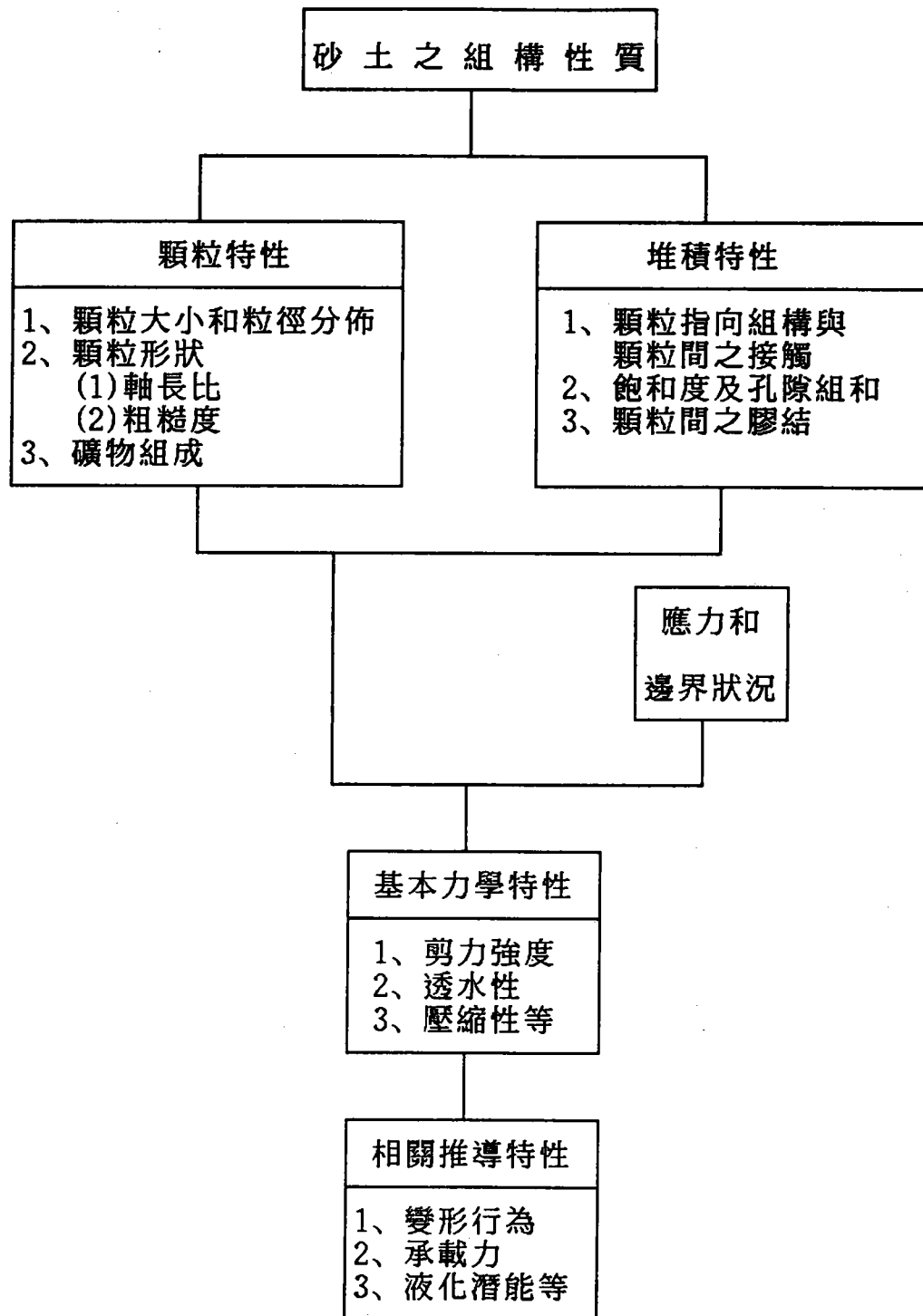


圖 1-1 砂土結構與相關之特性 [4]

第二章 文獻回顧

2.1 粒狀土壤之微觀組構

2.1.1 異向性之定義

粒狀土壤之異向性一般可分為內含異向性(Inherent Anisotropy)及外加異向性(Induced Anisotropy)。有關異向性力學性質之研究，許多學者已有深入之研究，Casagrande 與 Carillo[19]最早提出土壤異向性強度模式，並對土壤剪力強度之異向性提出定義，前者於土壤受剪前便已存在，後者則因受剪變形而產生。茲將其定義描述於下：

內含異向性——土壤因自然沉積過程所形成之異向性與外力作用無關。

外加異向性——土壤因受剪變形所造成之異向性。

2.1.2 異向性對砂土應力—應變行為之影響

Parkin et al.[20]利用自由落體方式，將砂注入立方形試體模，製作中等緊密度砂試體，並進行一系列等向性壓縮試驗(Isotropic Compression Test)，由試驗結果發現，試體徑向應變大於垂直方向應變，且顆粒長軸有排列於水平方向之趨勢，而其排列則對稱於垂直軸方向。

Arthur[21]則對砂土剪力強度受內含、外加異向性個別之影響進行探討。在內含異向性方面，由對不同沉積方向之Leighton Buzzard

砂的立方三軸壓縮試驗(Cubical Triaxial Compression Test)結果發現，試體破壞時之最大軸差應力，因砂土沉積方向之不同而改變。此外，試體破壞所需之軸向應變也有所不同，其差異程度最大可達200%。在外加異向性方面，Arthur[22]控制砂試體沉積方向為中間主應力方向(Intermediate Principal Stress)，以消除內含異向性之影響。然後，進行一系列在平面應變條件下，主應力軸方向旋轉之剪動試驗，由試驗結果發現，外加異向性對剪力阻抗之摩擦角(ϕ')無顯著之影響，但於主應力軸旋轉後之再壓試驗中，試體達到某一剪應力比所須之應變量則有明顯的影響，如圖2-1所示。

Ochiai和Lade[23]將砂樣倒入置於除氣水中的立方試體模，並施加水平振動一分鐘，取得相對密度為90%~93%的試體，然後，進行均向性壓縮試驗。由試驗結果顯示，垂直顆粒長軸方向的應變，僅是另外兩個方向應變量之一半，此結果與Parkin等人之結論相同。同時，其三軸排水壓縮試驗(應力施加方式 $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{constant}$)的結果，如圖2-2所示。在顆粒沉積方向，表現較小之壓縮性與較大之膨脹性，而在顆粒沉積方向所須的破壞應變也較小。

由前人之研究發現，粒狀土壤的異向性為影響砂土力學變化行為之一重要因素，而此因素又受砂土顆粒間之排列結構的影響。所以，若能了解砂土在不同受力情形下，顆粒排列結構之變化情形，則將有助於粒狀土壤力學行為之分析。故茲將有關粒狀土壤微觀結構之研究結果，及相關之結構參數分述於下：

2.1.3 粒狀土壤微觀結構之定義

粒狀土壤結構可定義為顆粒在空間之排列與孔隙之組合(Brewer[24])。在自然環境產生的沈積土(Sand Deposits)以及實驗室不同方

法準備的重模試體，砂顆粒在空間的排列位置，互相接觸的狀況以及伴隨產生的孔隙分佈均不同。

Mitchell et al.[7]針對Monterey No.0 砂，分別利用多重篩貫降法(Multiple Sieving Method, 簡稱MSP法)、濡溼搗固法(Moist Tamping Method, 簡稱 MT法)及濡溼震動法(Moist Vibration Method)三種方法準備試體。於試體準備完成後，將樹脂(Kopper polyester resin No.1806-4 及 Styrene No.VM-901)混合液緩緩灌入試體孔隙中，待其凝固後，切取適當之薄片，再以顯微鏡與 X-ray 觀察之(見圖 2-3a)。由試驗結果，定義下述之組構參數，以描述砂土顆粒間的排列結構。

(A) 顆粒方位指向(Orientation of Particle)

此參數定義為顆粒長軸與水平方向之夾角，如圖 2-3b 所示。若以方位角(Azimuthal Angle, θ')表示此夾角，並將 0° - 90° 劃分為每 10° 一區間，統計所觀察到顆粒之方位角的分佈情形，並以頻率分佈圖表示，則如圖 2-3c所示。若假設砂土具有橫面等向(Transverse Isotropy)之特性，則亦可以玫瑰圖，表示顆粒長軸方位角之分佈情形，如圖 2-3d，由圖中結果顯示，粒狀土壤顆粒之長軸係趨向排列於水平方向。

(B) 接觸點數目(Coordination Numbers)

接觸點數目用以描述砂土顆粒與鄰近間顆粒聚集之緊密程度。由此參數也可預估，顆粒於試體受剪過程中移動之難易程度。根據 Oda [6]及 Field[25]等學者之研究結果可發現，隨著孔隙比之增加，接觸點數目將減少。如圖 2-4所示。

(C) 接觸點法向量(Contact Normal)

單以接觸點數目，並不足以描述顆粒之堆積組構(Packing of

Fabric)。故再定義接觸點處之接觸點法向量，用以描述接觸點處的接觸情形。如圖2-5 所示，在接觸點 G處， N_1 與 N_2 即分別為顆粒 g_1 與 g_2 之接觸點法向量。陳堯中[26]以Cundall[27]所發展之Trubal程式，探討圓形顆粒，在受剪過程中組構的變化。由接觸點法向量的分佈玫瑰圖，在不同應變階段之改變，可看出，在加壓階段隨著剪應變的增加，接觸點法向量有集中於最大主應力方向之趨勢，如圖 2-6所示。

Oda[8,28]曾由試驗結果得到下列幾項關於堆積組構特性之結論：

- 1.由 $E(\alpha, \beta)$ 所定義的接觸點法向量分佈密度函數，具有軸對稱之特性，而其對稱軸則與最大主應力方向平行。
- 2.接觸點法向量具有向最大主應力軸方向集中的趨勢，此趨勢通常發生於軸差應力增加階段，當試驗達到尖峰應力後，即使軸差應變已達 15%， $E(\alpha, \beta)$ 仍無顯著之改變。由此顯示：影響 $E(\alpha, \beta)$ 較巨者為應力而非應變。

2.1.4 粒狀土壤組構之形成及其受剪之變化

沈積砂土受重力作用，砂顆的長軸指向有垂直於貫降方向的趨勢，而形成具有方向性的沈積。Arthur及Menzies[21]以貫降法以Tilting Mold製作相同孔隙比的重模試體，進行三軸排水剪力試驗，發現貫降方向和最大主應力方向夾角不同時，破壞時之應力比均不同。Oda[8]利用垂直衝擊法(Plunging)、側擊法(Tapping)及湯匙放置法(Loose-Spooning)等三種不同方式準備試體，進行三軸排水剪力試驗並利用膠結切片法，實際觀察不同準備方法的試樣在試驗前後各階段的砂顆粒接觸點方向及砂顆粒長軸分佈，試驗結果發現利用側擊法製

作的砂試體具較高滑動強度(Mobilized Strength)、膨脹率(Dilatancy Rate)及切線變形模數, E_{so} 。另由膠結切片法分析得知其顆粒接觸點方向在垂直於最大主應力之方向有較多的分佈。此亦充分說明砂試樣因準備方法的不同, 雖然孔隙比相同其組構亦隨之不同, 所以利用相對密度(或孔隙比)無法完全代表砂土之力學行為, 亦無法適當地作為描述砂土組構之指標。Mitchell et al.[7]及Mulilis et al.[29]研究發現以不同試體準備相同空隙比的試體, 其砂土抗液化強度不同, 研究發現是受顆粒長軸方向及接觸平面不同所致, 所以砂土之力學特性均受到砂土組構的影響(圖 2-7)。李崇正[30]對砂土受剪變形之行為所建立應力膨脹關係亦強調砂土受剪行為, 必須考慮砂土組構之變化。

有關電性導電度之研究, Archie[15]首先利用飽和土壤孔隙水電解質之導電度(Conductivity)與砂水混合物導電度之比值, 定義出構造因素(Formation Factor)來描述孔隙率之狀況。Arulanadan 及 Kutter[9], Arulmoli et al.[4]研究結果顯示, 不同的砂土組構與構造因素有關, 尤其是顆粒之組合排列、顆粒形狀及孔隙率。另外亦指出對於具異向性之粒狀土壤, 構造因素為很有用之方向指數參數, 所以對研究砂土而言構造因素為比相對密度更佳之指標。Erchul and Ronald[17]以飽和砂土之電阻特性為液化潛能及沈陷特性, 已有相當完善之成果。

Oda, Konish and Nemat-Nasser[31], 認為組構是適於用來描述粒狀砂土幾何特性, 而對稱是經常用來簡化砂土顆粒幾何特性。一般粒狀土壤組構對稱型式有以下幾種:

(1) 球對稱(Spherical Symmetry)

組構為球對稱屬於等向性(isotropic), 粒狀土壤經常假設為球對

稱，但自然界祇有少許情況會產生。

(2) 軸對稱 (Axial Symmetry)

當顆粒受重力作用沉積時，其組合經常表示顆粒形狀的對稱型式。在此類情況下以垂直軸為軸對稱，組構在水平橫面將顯示等向性。

(3) 菱形對稱 (Rhombic)

粒狀土壤在受剪時主應力並不相等 ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)，若初始對稱存在將迅速消失，則菱形異向性對稱將產生。

(4) 單斜對稱 (Monocline)

Johansson[32]，粒狀土壤顆粒受黏性流體作用時所產生的沉積屬於此類對稱。

除此之外之其它方式對稱亦有可能，但較少產生且證明亦有困難。在自然界沈積形成之砂質地盤可視為以沈積方向為對稱軸之橫面等向性，而在實驗室各種方法準備的試體，如震降、濡溼搗固、震動等則以垂直方向為對稱軸之橫面等向性 (Mahmood[33], Miura and Toki[34], Mitchell et al.[7])。

綜合前面諸位學者的研究成果，可知研究砂土的力學行為，必須對組構之起始狀態及受剪過程的變化有所了解。所以本研究盼能結合化工、電子及機械之相關知識設計出高解析度之導電度量測系統，並利用構造因素之變化來描述砂土組構之變形行為。

2.2 構造因素之基本理論及其定義

2.2.1 導電度之定義

若材料物質每單位長度 L (或電極板之距離)，截面積為 A' 上的電阻大小為 R' ，則導電度 (Electrical Conductivity)， κ 可由下式表示

$$\kappa = \frac{L}{A' \cdot R'} \dots\dots\dots (2-1)$$

式中， L/A' 定義為容器常數 (Cell Constant, C_c)，僅受電極幾何形狀及二者間之空間影響，與兩平行電極間材料所佔空間導電度之大小無關。若二電極板不平行，則容器常數便不等於 L/A' ，此時容器常數為有效長度與有效面積之比，需由實驗求得 (在本文有詳細說明) 可以由下式表示

$$\left(\frac{L}{A'}\right)_{eff} = \kappa \cdot R' \dots\dots\dots (2-2)$$

此時之容器常數非定值且隨著電阻而變，若可量測求得電阻， R' 與有效容器常數， $(L/A')_{eff}$ 則導電度可由 (2-2) 式算得，稱之為視導電度 (Apparent Conductivity)， κ_{app} 。

$$\kappa_{app} = \left(\frac{L}{A'}\right)_{eff} \cdot \left(\frac{1}{R'}\right) \dots\dots\dots (2-3)$$

2.2.2 構造因素之定義

一般砂土顆粒本身並無法導電，但充滿於其中之孔隙水，則因多

含有游離之陰陽離子，故對飽合砂土整體而言，可經由孔隙水之傳導，而具導電性(何樹根[35]，Dafalias et al.[36])。但當通電於飽和砂土時所有電流經由孔隙水來傳送，所以此導電能力則受顆粒間孔隙之大小、形狀及分佈情形所影響，亦即試驗中所量測得砂土之導電度，將因此而改變根據。Archie[15]及Arulanandan及Kutter([9]所提構造因素(Formation Factor)，F 之定義為『孔隙間液體之導電度(κ_s)除以砂土整體之導電度(κ_m)』為無因次之數值。

2.2.3 構造因素之基本理論

(1) 構造因素

飽合砂土之導電度和孔隙間液體之導電度成正比，因而構造因素之大小不受孔隙間液體導電度之影響而僅為土壤組構特性之函數。當土壤受外力作用大到足以改變其組構特性時，構造因素即產生變化。根據Kutter[37]，Arulanadan & Kutter[9]，Arulmoli et al.[4]，Dafalias et al.[36]等多位學者研究成果所得之結論顯示，構造因素受砂土顆粒形狀、顆粒長軸方位、接觸點法向量之方位、孔隙比、膠結(cementation)、飽和度等之影響。對一具異向性之砂土而言，所得導電度，將隨量測方向之不同而改變。故依上述定義，可將垂直及水平構造因素定義如下

$$\text{垂直構造因素} \quad F_v = \frac{\kappa_s}{\kappa_v} \quad \text{-----} (2-4)$$

$$\text{水平構造因素} \quad F_h = \frac{\kappa_s}{\kappa_h} \quad \text{-----} (2-5)$$

其中 κ_s = 電解質溶液之導電度

κ_v = 砂土試體垂直方向之導電度

κ_h = 砂土試體水平方向之導電度

在孔隙率與構造因素相關性之研究中，如 Maxwell[38]對懸浮液中不導電圓球顆粒之研究，及Fricke[39]以橢圓球代替圓球之方式進行探討。Dafalias et al.[36]假設砂土具橫面向等向性 (Transverse Isotropy)，且此等向性具有一旋轉對稱軸，而此軸對大部份沉積砂土層而言，可以垂直軸為其旋轉對稱軸。依此假設，構造因素與孔隙率之相關性可以下式表示

$$F_v = 1 + \frac{1-n}{n} f_v \quad \text{-----} (2-6.a)$$

$$F_h = 1 + \frac{1-n}{n} f_h \quad \text{-----} (2-6.b)$$

而

$$\text{垂直形狀因素} \quad f_v = \frac{2S - P_e(3S-1)}{2S(1-S)} \quad \text{-----} (2-7.a)$$

$$\text{水平形狀因素} \quad f_h = \frac{S+1+P_e(3S-1)}{4S(1-S)} \quad \text{-----} (2-7.b)$$

$$P_e = \int_0^{\pi/2} P(\theta) \cos^2 \theta d\theta \quad \text{-----} (2-8)$$

其中 $P(\theta)$ = 顆粒長軸與垂直軸夾角之或然率分

佈密度函數 ($0 \leq \theta \leq \pi/2$)

θ = 顆粒長軸與電場方向之夾角

(見圖 2-8)

且

$$\int_0^{\pi/2} P(\theta) d\theta = 1 \quad \text{-----} (2-9)$$

若以 a, b, c 表示一橢圓球各方向長軸長度之半，則可將隨軸長比改變之因素 S 表示為

對扁長顆粒 ($a > b=c, 0 \leq PR=b/a \leq 1$)

$$S = \frac{1}{2(1-PR^2)} \left[\frac{PR^2}{2\sqrt{1-PR^2}} \ln \frac{1-\sqrt{1-PR^2}}{1+\sqrt{1-PR^2}} + 1 \right] \quad \text{----} (2-10.a)$$

對扁圓顆粒 ($a < b=c, PR=b/a \geq 1$)

$$S = \frac{1}{2(PR^2-1)} \left[\frac{PR^2}{\sqrt{PR^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{PR^2-1} - 1 \right] \quad \text{-----} (2-10.b)$$

(2-10.a)、(2-10.b)等式，尚未考慮顆粒集中 (Concentration) 效應，且適用於極稀之溶液。對於濃度較大之溶液，可使用巴格曼積分技巧 (Bruggeman's Integration Technique) [40] (詳見附錄一)，而得到下列之表示方式

$$F_v = n \frac{-f_v}{\quad} \text{----- (2-11.a)}$$

$$F_h = n \frac{-f_h}{\quad} \text{----- (2-11.b)}$$

(2) 構造因素張量 (Formation Factor Tensor)

由歐姆定律 (Ohm's Law)

$$E_i = R_{ij} J_j \text{----- (2-12)}$$

其中 $E_i = i$ 方向之電場強度

$J_j = j$ 方向之電流密度

$R_{ij} = j$ 方向電流 i 方向之電阻

$i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2, 3$

若以 1, 2, 3 表示電阻之主要方向，且假設橫面等向性成立，則可將 R_{ij} 表示成一對角矩陣 (Diagonal Matrix) 如下

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} R_v & 0 & 0 \\ 0 & R_h & 0 \\ 0 & 0 & R_h \end{bmatrix} \text{----- (2-13)}$$

$$\text{由 } R_v = \frac{1}{\kappa_v}, \quad R_h = \frac{1}{\kappa_h} \text{----- (2-14)}$$

代入上式並乘以溶液導電度得

$$\kappa_s R_{ij} = \begin{bmatrix} \kappa_s/\kappa_v & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_s/\kappa_h & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_s/\kappa_h \end{bmatrix} \text{-----(2-15)}$$

或以構造因素表示即為構造因素張量如下式

$$\kappa_s R_{ij} = \begin{bmatrix} F_v & 0 & 0 \\ 0 & F_h & 0 \\ 0 & 0 & F_h \end{bmatrix} = F_{ij} \text{-----(2-16)}$$

上述張量之第一不變量 (First Invariant) 不隨主軸方位之轉動而變

$$F_1 = F_v + 2F_h \text{-----(2-17)}$$

定義一平均構造因素 (Average Formation Factor), F_{ave}

$$F_{ave} = \frac{F_{11}}{3} \text{-----(2-18)}$$

由上述得知, F_{ave} 亦不隨主軸轉動而變。

再由式 (2-6)

$$F_{ave} = 1 + \frac{1-n}{3n} (f_v + 2f_h) \text{-----(2-19)}$$

若定義一平均形狀因素 f_{ave} , 則

$$f_{ave} = \frac{(f_v + 2f_h)}{3} \text{-----(2-20)}$$

$$F_{ave} = 1 + \frac{1-n}{n} f_{ave} \quad \text{-----} (2-21)$$

並由式 (2-7) 及式 (2-20)

$$f_{ave} = \frac{3S+1}{6S(1-S)} \quad \text{-----} (2-22)$$

由式 (2-22) 顯示， f_{ave} 僅是顆粒形狀之函數。

由式 (2-21) 及式 (2-22) 可看出： f_{ave} 與 F_{ave} 均與顆粒之旋轉方向無關。正如構造因素張量之第一不變量所顯示。此外，對於濃度較大之濃液，則可由式 (2-21) 而得

$$F_{ave} = n^{-f_{ave}} \quad \text{-----} (2-23)$$

故對非膠結性之砂土而言，平均構造因素僅是砂土孔隙率與顆粒形狀之函數。

(3) 異向性指數 (Anisotropy Index)

考慮在一卡氏座標中， X, Y, Z 為三個軸向，且分別代表電阻之主要方向，假設橫面等向性成立，當以垂直軸做對稱旋轉時，則歐姆定律可表成

$$J = -\kappa_h \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} i + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} j \right) - \kappa_v \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} k \quad \text{-----} (2-24)$$

$$\nabla \cdot J = \kappa_h \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) + \kappa_v \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \quad \text{-----} (2-25)$$

其中 J : 電流密度

ϕ : 電位

i, j, k : X, Y, Z 方向上之單位向量

在等向性之情況下, $\kappa_v = \kappa_h$, (2-24) 式可寫成拉普拉斯方程式 (Laplace's Equation), 即

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = 0 \quad (2-26)$$

以 $U=X, V=Y, W=\nu Z$, 代入 (2-23) 式, 其中 $\nu = (\kappa_h / \kappa_v)^{1/2}$ 可得

$$\kappa_h \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial U^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial V^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial W^2} \right) = 0 \quad (2-27)$$

Arulanandan 及 Kutter [9] 即根據此推導結果, 而提出一表示顆粒異向性之電性指數 A , 其定義如下

$$A = \left(\frac{F_v}{F_h} \right)^{1/2} \quad (2-28)$$

同時由式 (2-7)、式 (2-11) 及式 (2-28) 可得

$$A = n^{\alpha'} \quad (2-29)$$

$$\text{其中 } \alpha' = \frac{(3S-1)(3Pe-1)}{8S(1-S)} \quad (2-30)$$

2.3 粒狀土壤動態性質

2.3.1 剪力模數之影響因素

2.3.1.1 圍壓與孔隙比之影響

對砂土而言，剪應變在 $10^{-3}\%$ 以下，其剪力模數趨於一最大值 $G_{\max}$ (Hardin及Drnevich[41])，其值僅與圍壓及孔隙比有關。Hardin 和 Richart[42]將其關係表示如下：

(圓形顆粒)

$$G_{\max} = 700 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_0)^{0.5} \quad \text{----- (2-31)}$$

(角狀形顆粒)

$$G_{\max} = 326 \frac{(2.97-e)^2}{1+e} (\sigma_0)^{0.5} \quad \text{----- (2-32)}$$

其中 e = 孔隙比

σ_0 = 圍壓

($G_{\max}$ 和 σ_0 的單位均為 kg/cm^2)

兩式所根據的剪應變約為 $2.5 \times 10^{-3}\%$ ，Iwasaki和Tatsuoka[43]以各種砂樣作試驗，歸納出剪力模數的最大值可以下式表示：

$$(2.17-e)^2$$

$$G_{\max} = 900 \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\sigma_v)^{0.4} \quad \text{----- (2-33)}$$

式中的剪應變約為 $10^{-4}\%$ ，左右。而當剪應變為 $10^{-2}\%$ 左右時，他們得到之剪力模數公式與 (2-31) 式相同，不過此 G 值略低於 (2-33) 式。因此，Iwasaki 和 Tatsuoka 採用 (2-33) 式作為剪力模數最大值的經驗公式。

2.3.1.2 剪應變振幅之影響

剪力模數隨著剪應變振幅的增加而減少，對於土壤此種非線性行為須加以考慮才能合理地評估地表的振動反應。Hardin 及 Drnevich [41] 根據砂土之剪應力與剪應變關係近似於雙曲線，而提出下列的雙曲線模式

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad \text{----- (2-34)}$$

其中 G = 對應某一剪應變 γ 的剪力模數。

γ_r = 參考剪應變 (Reference Shearing Strain)

$$= \tau_{\max} / G_{\max}$$

$\tau_{\max}$ = 土體所能承受之最大剪應力。

2.3.1.3 內含異向性之影響

關於內含異向性對剪力模數之影響較少有文獻提及，Stokoe [44] 在一大尺寸之三軸設備中，量測試體內部剪力波與壓縮波之傳遞情形

，結果發現，所測得之壓縮波波速，在水平面的兩個方向，其波速相近；但若水平面之結果與垂直面之結果比較，則有較大之差異。由此可發現，內含異向性存在於水平與垂直方向，而所得之剪力波速值亦顯示：水平面與垂直面之波速有所不同，且存在於波速傳遞平面之內含異向性有減小剪力模數之趨勢，但此項結論有待更進一步之研究証實。

2.3.1.4 其它影響因素

Iwasaki 及Tatsuoka[43]之研究結果發現，對於潔淨之砂土而言，顆粒形狀與大小對剪力模數影響不大。而在對數種不同砂樣所進行之共振柱試驗結果則顯示：對非潔淨均勻之砂土而言，剪力模數將因均勻係數與細粒料含量之增加而減少。

Tatsuoka et al.[45]為探討試體準備方式對剪力模數之影響，對潔淨砂樣進行共振柱試驗與靜態扭轉剪力試驗（Static Torsional Shear Test）。結果顯示：在一廣泛剪應變之範圍內，所對應之剪力模數受試體準備方式之影響不大。

2.3.2 阻尼比之影響因素

Hall及Richart[46]對渥太華砂及玻璃珠進行共振柱試驗，結果發現：在固定圍壓下，阻尼比將隨著振動振幅之增大而變大；而在固定振幅的振動條件下，阻尼比則將隨著圍壓之增加而減小。另一方面，密度對於阻尼比影響不大。

Hardin & Drnevich[41]之研究顯示，應變振幅、平均有效主應力、孔隙比、反復載重作用次數均對阻尼比有顯著之影響。Iwasaki

et al. [47]對正常壓密砂土進行共振柱試驗與靜態扭轉剪力試驗，分別探討各種影響因素之效應，而得到下列結論：

1. 阻尼比隨著剪應變振幅之增加而增加，尤其當剪應變振幅大於 $10^{-2}\%$ 時。
2. 對 Toyoura 砂而言，其孔隙比對阻尼比之影響可忽略之。
3. 阻尼比將隨反復載重作用次數及圍壓之增加而減小。
4. 砂樣種類及試體準備方式對阻尼比影響不大。

總結上述討論，與剪力模數之影響因素比較，可發現阻尼比係因能量消散所反應之現象。故對於組構、孔隙比、應力狀態之反應尚無明顯之趨勢，其反應機制有待更進一步之研究。

2.4 土壤動態性質之推求

有關土壤動態性質之試驗研究，約在 1960 年代初期始為人所重視，其後漸有關文獻零散發表，至 1970 年後 Hardin, Drnevich 及 Seed 等學者進行較為廣泛，有系統之研究、整理與分析，大抵對純砂及粘土之動態性質有初步了解，至今，各類型土壤之動態性質仍為大地工程學者致力研究之課題。

綜合前人對土壤動態性質之試驗研究，其測定方法包括試驗室與現地試驗方法，可歸納出如下所述者：

1. 現地波速之測定

現地試驗利用人工震源產生壓力波、剪力波或雷利波 (Rayleigh wave)，測定其在不同土層之傳播速度，以計算不同土壤之動態剪力或彈性模數，其相對應之應變振幅範圍甚低，約在 $10^{-4} \sim 10^{-5}\%$

之間,惟本試驗不克測求土壤之阻尼比特性。

2. 強制振動試驗 (Forced vibration test)

本試驗係利用圓柱狀之土壤試體,於試驗室中施以縱向或於兩端施以扭轉之強制振動,測定土壤之共振頻率 (Resonant frequency) 以及其他頻率之動態反應,以測定土壤之動力模數與阻尼比。此外本試驗利用振動台 (Shaking table) 對層狀土壤試體施以剪力振動,可測定其動態性質。本試驗所測定之應變振幅範圍自相當低至大等程度,約在 10^{-4} - $10^{-2}\%$ 之間。

3. 自由振動試驗 (Free vibration test)

本試驗係利用土層或土壤試體自由振動之衰減反應,以測定土壤之動力模數與阻尼比特性,其試驗振動方法與強制振動試驗相似,本試驗測定之應變振幅範圍自相當低至高程度,約在 10^{-3} -1% 之間。

4. 由應力應變係直接測定

利用土壤試體在實驗室實施動力三軸試驗 (Cyclic triaxial test), 動力單剪試驗 (Cyclic simple shear test) 或扭剪試驗 (Torsional shear test), 由土壤在反復荷重情況下之應力應變關係,直接測定其剪力模數與阻尼比,其所測定之應變振幅範圍自中等至相當高程度,約在 10^{-2} -5% 之間。

5. 土層動態反應分析

利用計算機分析法計算分析土層在地震荷重作用下之動態反應,以

獲取支配該反應之不同深度土層之有效剪力模數與阻尼比，目前已發展之計算機程式有 Schnabel, Lysmer 及 Seed (1972) 之 SHAKE II, Idriss et al. (1973) 之 QUAD-4 以及 Lysmer et al. (1974) 之 LUSH 等。

圖2-9 表示由現地及試驗室試驗測定土壤動態性質之各種試驗方法及其相關之應變振幅範圍。一般較為普遍採用者為現地震測法以及試驗室共振柱法與動力三軸試驗。本研究經研討後決定採用共振柱法研究土壤在不同應變振幅之動態性質。有關該試驗之原理與試驗方法於後詳述之。

2.5 粒狀土壤之滲透係數

2.5.1 滲透係數之影響因素

影響土壤滲透性(permeability)之因素很多，迄今已經有多位學者予以討論，如Lambe[48]、Taylor[49]、Leonards[50]、Scheidegger[51]等，歸納起來其影響因素包括孔隙率、孔隙形狀(土壤的結構)、飽和度、粒徑、流體的性質、土壤表面與流體之互制作用等等。Lambe[48]是首先從事細粒土壤的滲透性調查的學者，他發現夯實土壤的含水量多寡與滲透性有關；Seed[52]更明白指出土壤結構與滲透性有關；Lambe[48]之實驗結果後來陸續被Bjeerum與Hudder[53]、Mit-chell et al.[54]等所證實。

根據 Kozney-Carman 方程式，即能對級配良好的砂土或沉泥的滲透係數做一預測，但對於極細粒土壤則不適用，此點經由Lambe[48]

1、Michaels及Lin[56]等所證實。由於Kozney-Carman方程式本身牽涉到幾個較難決定的參數，諸如形狀因素(Pore Shape Factor)、迂迴因素(Tortuosity Factor)等，其值求取困難。所以，欲得土壤正確之滲透係數，恐非易事。

關於滲透係數的研究，大多偏重於各種粘土沉泥方面之研究，砂土則少有。由前人之研究可知，土壤之結構與其滲透性有非常密切之關係，殆無疑問。對於滲透係數與砂土電性之關研究，僅見於 Sanjeevan[56]分別對砂土及沉泥砂土做滲透性及電性量測試驗，其結論說明電性模式參數與滲透係數的相關性，Arulanandan等[10]將其結果整理所建立之參數組合致為複雜，且所採用之量測系統並沒考慮許多影響導電度之因素；簡連貴[13]研究顯示：土壤孔隙率與構造因素間存在一良好之線性關係，可提供利用電性量測之結果，以描述粒狀土壤結構緊密程度之特性。而粒狀土壤滲透係數與液化分析有密切之關係，值得利用粒狀土壤電性特性深入探討。

Archie[15]定義了構造因素 F

$$F = R_{rw} / R_w \text{ ----- (2-35)}$$

其中， R_{rw} ：含鹽水飽和岩層電阻率； R_w ：鹽水電阻率。另定義了構造因素 F 與孔隙率 n 的關係為：

$$F = a \cdot n^{-b} \text{ ----- (2-36)}$$

a ， b 為對應於不同岩類之不同常數。

滲透係數 k 與孔隙率 n 之關係非常複雜，Archie[56]在Gulf Coast的許多個經壓密與未壓密的沉積層中得到 k 與 n 的許多相對關係

，將其表為經驗式：

$$k = c \cdot n^{-d} \text{ ----- (2-37)}$$

由 (2-36)，(2-37) 式可推得

$$k = p \cdot F^q \text{ ----- (2-38)}$$

c, p, d, q 皆為常數。

2.5.2 滲透係數之測定

一般滲透係數之測定，可在實驗室及現場進行。實驗室中用以測定滲透係數的方法包括 [58, 59]：變水頭滲透試驗、定水頭滲透試驗及在壓密試驗中直接或間接測定滲透係數等。滲透係數之測定，除了上述方法外，還有毛細管法及許許多多的經驗公式。而現場之滲透係數測定，主要是利用抽水試驗的原理，觀測水位變化，以求出滲透係數。

本研究透水試驗則利用變水頭 (Falling Head) 方式量測，使用變水頭方式量測之原因，係根據 Casagrande [19] 曾提出滲透係數水準值 (Benchmark Values) 一說，認為 10^{-4} cm/sec 的滲透係數值是在低的水力坡度下透水和不良排水土壤的約略分界值，在此值附近，對細料移動或管湧 (Piping) 現象是非常敏感的。而本試驗用砂，其滲透係數均在 10^{-4} cm/s 左右，為避免砂土結構之擾動，以求得正確之滲透係數，故採用變水頭方式量測，其公式如下：

$$K = 2.3 \cdot \frac{a' \cdot L}{A'' \cdot \Delta t} \cdot \log_{10} \frac{H_0}{H_1} \text{ ----- (2-39)}$$

式中， a' ：供水管之面積， cm^2 ； A'' ， L ：土壤面積， cm^2 及長度， cm ； Δt ：供水管內水頭由 H_0 降至 H_1 所需之時間， sec 。

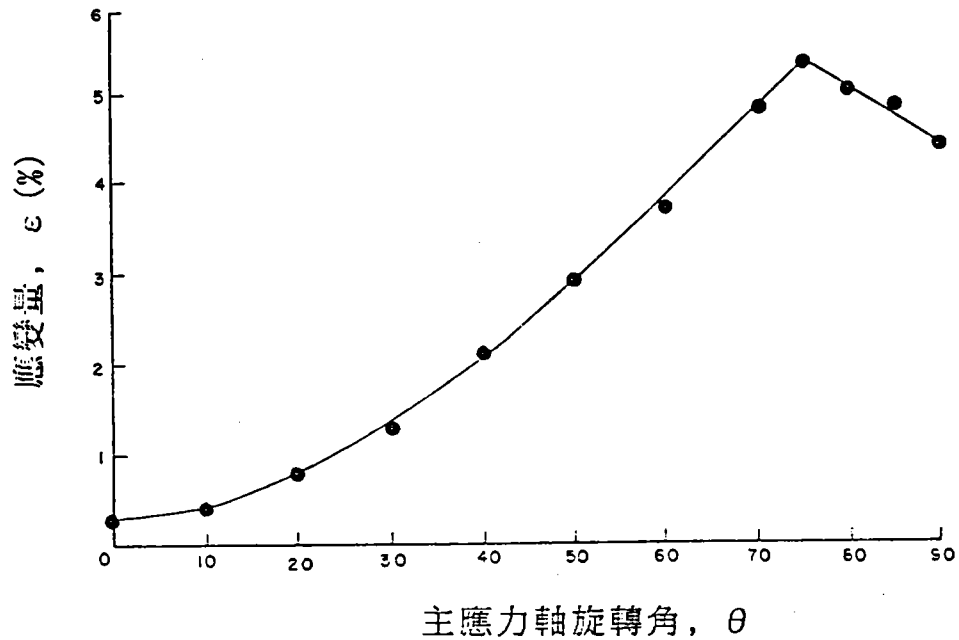


圖 2-1 最大主應力軸旋轉角度對試體達到某一剪應力比所需剪應變量之影響 [21]

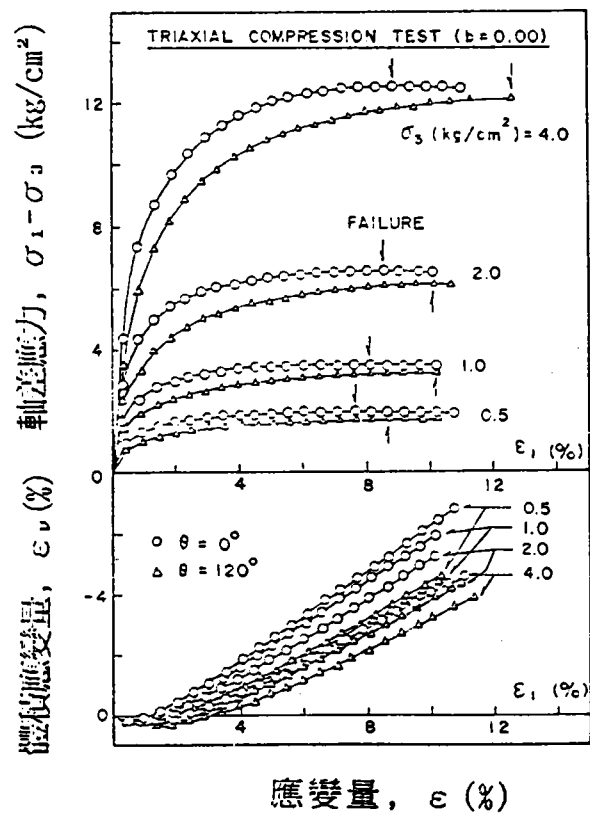
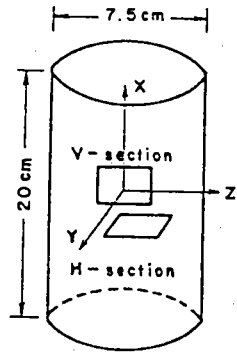
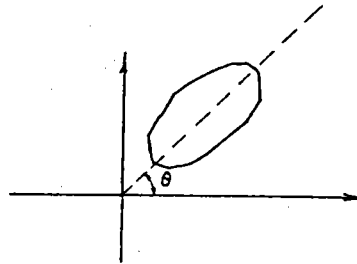


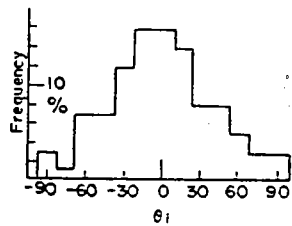
圖 2-2 Cambria 砂在三軸壓縮試驗中所表現之異向性 [23]



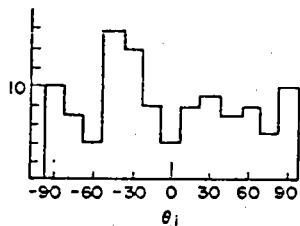
(a) 試體切片



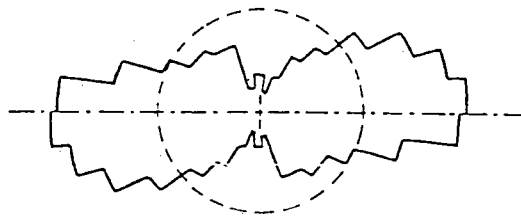
(b) 顆粒長軸傾角



(1) V-section



(2) H-section



(c) 顆粒長軸傾角頻率分佈圖 (d) 顆粒長軸傾角頻率分佈圖玫瑰圖

圖 2-3 切片法中切片位置示意圖及顆粒長軸方位角之頻率分佈圖 [7]

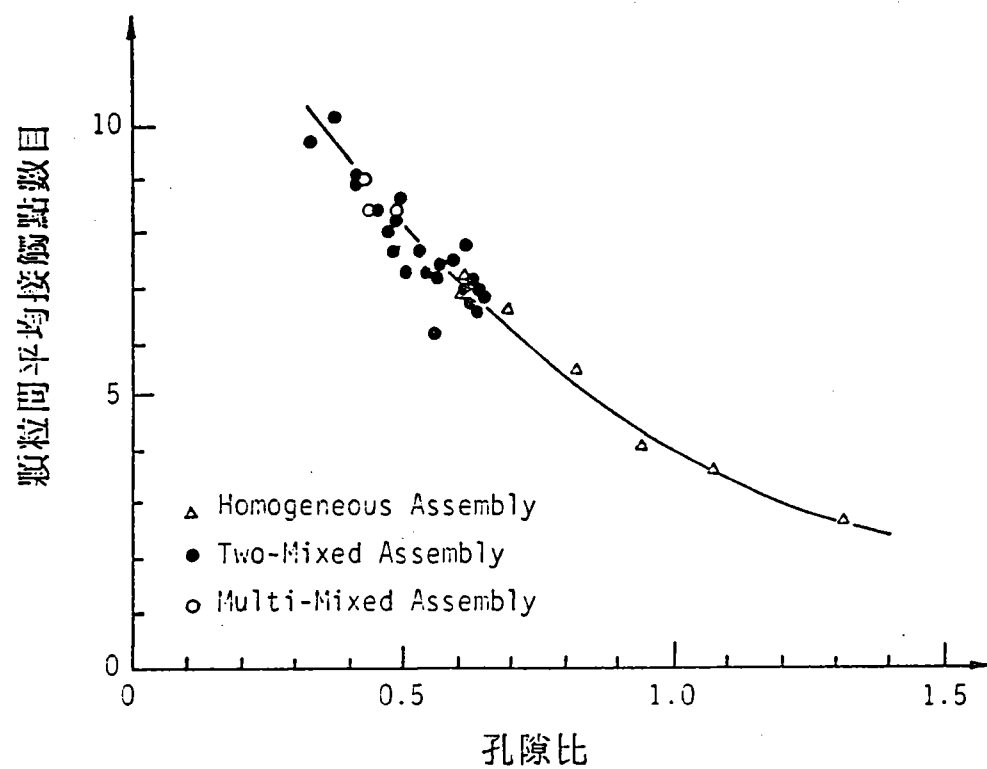


圖 2-4 顆粒間平均接觸點數目與孔隙比之相關性 [6]

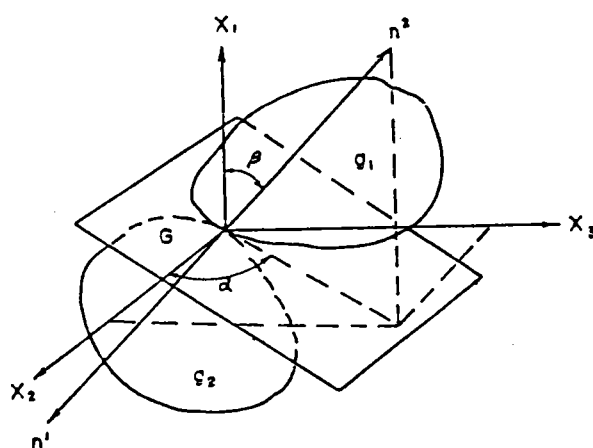
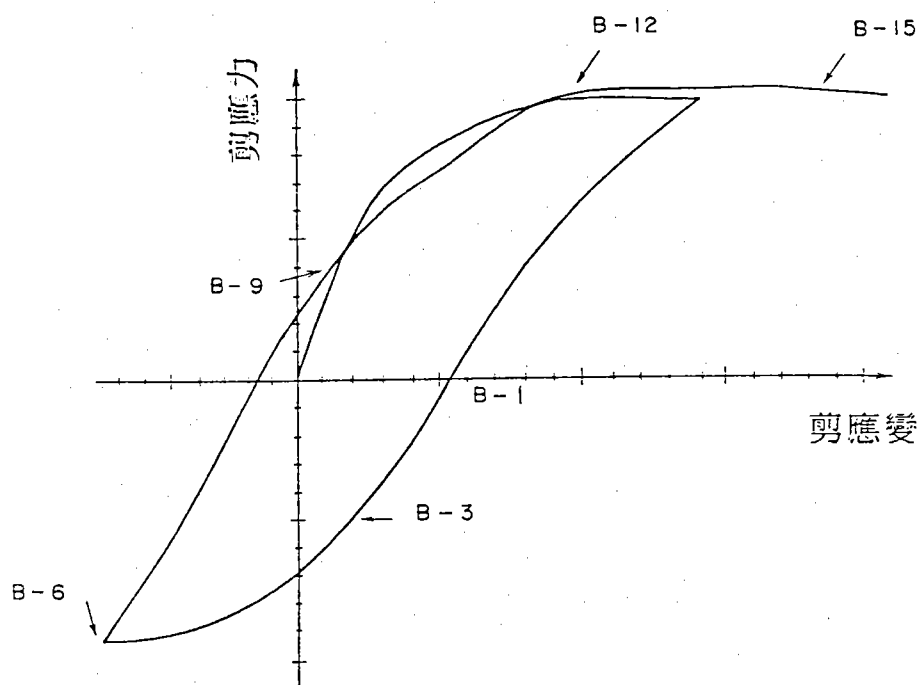
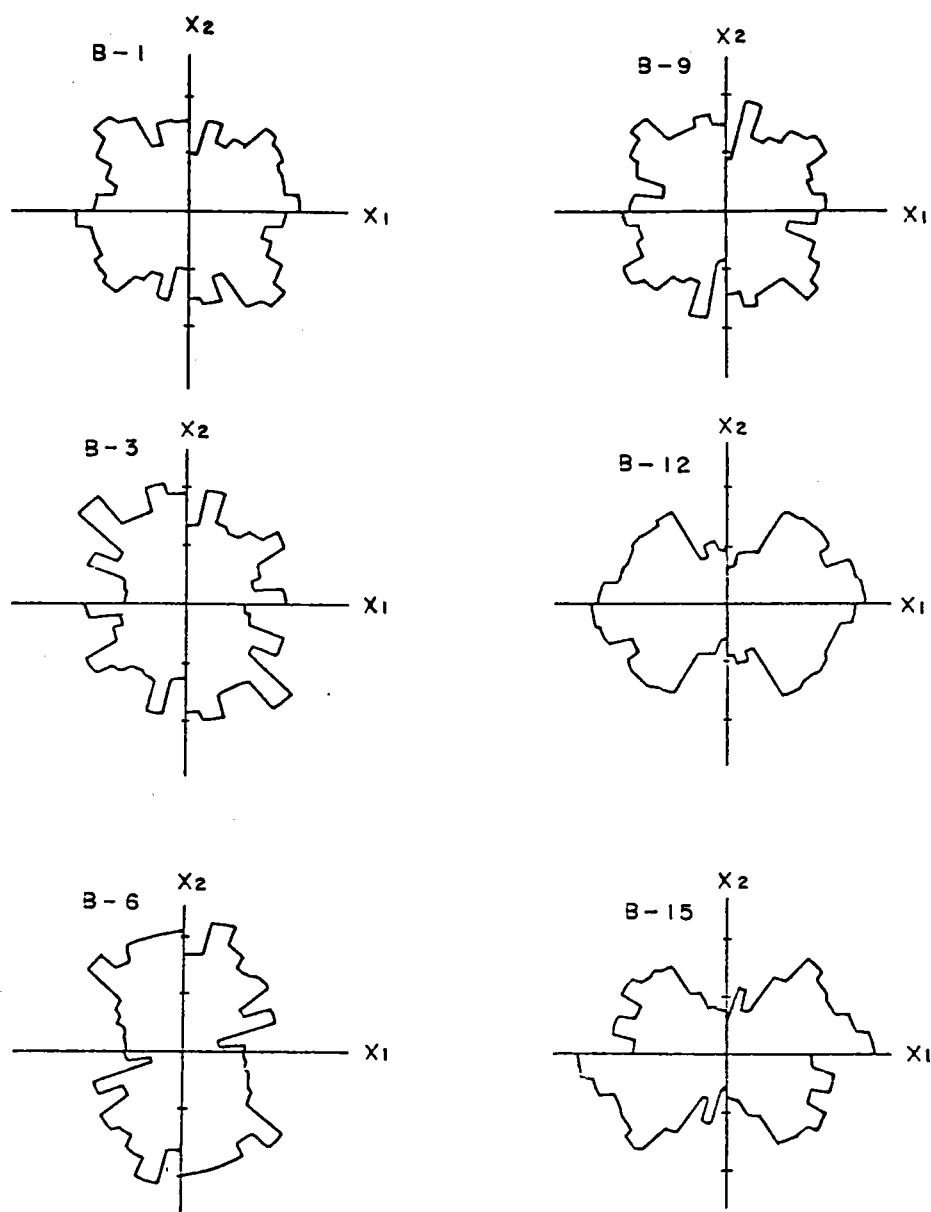


圖 2-5 顆粒間接觸點法向量 N_1 與 N_2 示意圖 [6]



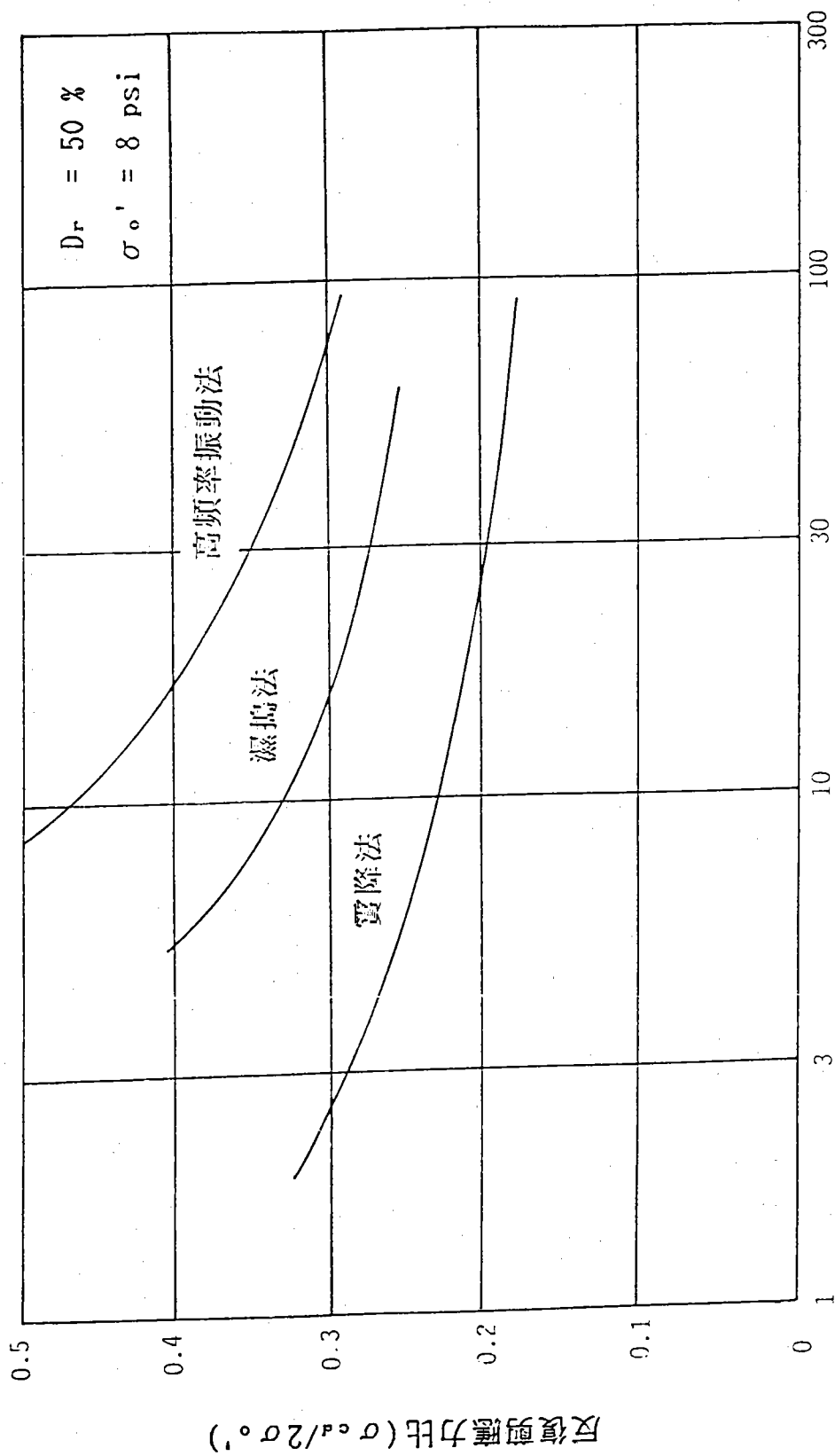
(a) 試體加壓解壓過程中所觀察接觸點法向量變化情形之各個階段示意圖

圖 2-6a 顆粒間接觸點法向量頻率分佈玫瑰圖於受剪過程中之變化情形 [26,27]



(b)不同階段接觸點法向量分佈頻率玫瑰圖之變化情形

圖 2-6b 顆粒間接觸點法向量頻率分佈玫瑰圖
於受剪過程中之變化情形 [26, 27]



引致初始液化之反復載重次數

圖 2-7 Monterey No. 0 砂土以不同試體準備方法之砂土液化行為 [7]

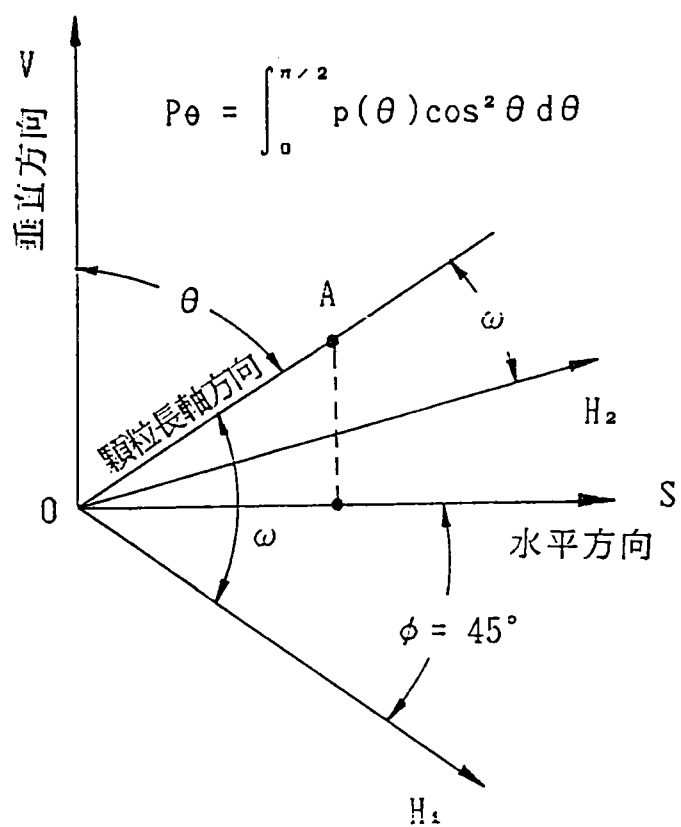
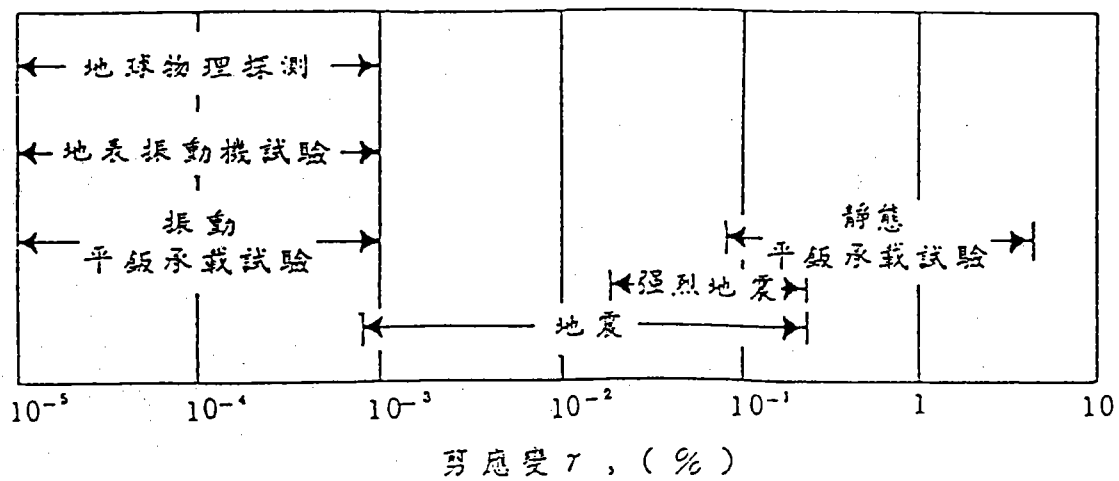
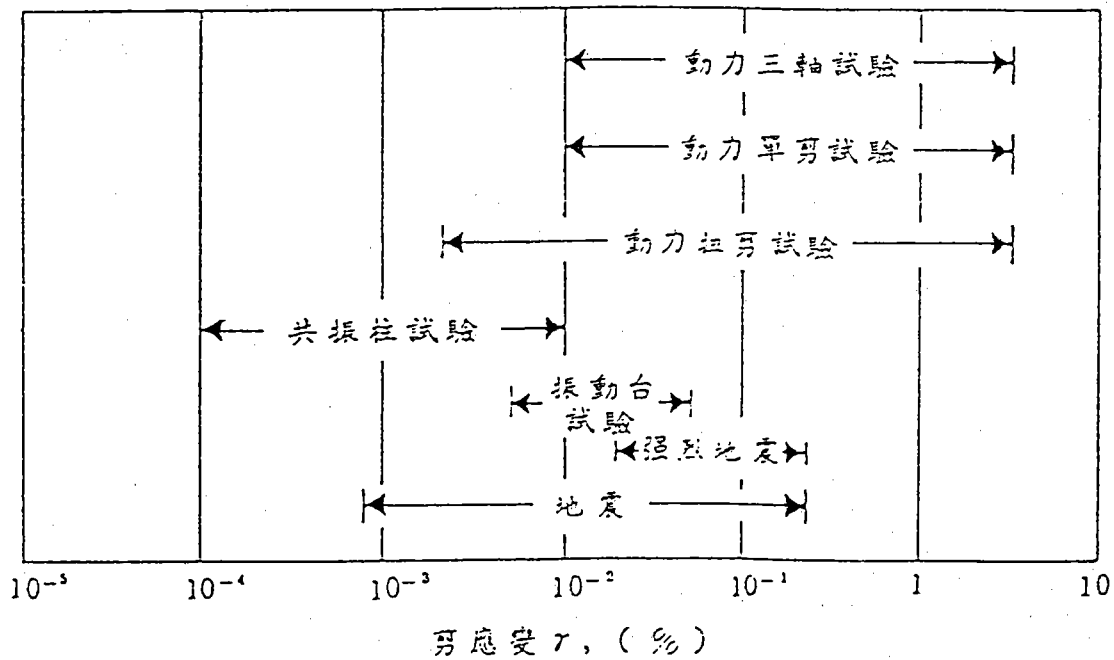


圖 2-8 橫面等向性砂土內，顆粒長軸傾角示意圖 [36]



(a) 野外試驗



(b) 試驗室試驗

圖 2-9 土壤動態性質測定方法及其應變範圍

第三章 砂土組構導電度量測系統之探討與設計

3.1 導電度量測時影響因素之探討

飽和粒狀土壤孔隙導電度之量度，基本上必須有以下組合：

- (1) 電源（直流或交流電源）
- (2) 量測電極
- (3) 導電度溶液
- (4) 電阻電橋裝置 (Resistance Bridge)

由於砂顆粒一般為不導電物質，故在試體兩側所量測之導電度值，係為試樣孔隙中電解液對電極板方向之孔隙形狀分佈反應之值。關於導電度或電阻量測運用到飽和粒狀土壤之研究，有許多學者Arulanadan及Kutter[9]，Jackson[60]，Erchul及Ronald[17]，Arulmoli et al.[4]）在理論與實驗皆已有良好完善的成果。

但對影響導電度的各項因素，則很少有深入完整的探討。飽和粒狀土壤受剪時組構改變為連續性，一般之惠斯登電橋無法作連續性之量測，所以必須重新設計導電度測量系統。故本研究希望進一步了解影響導電度量測的各項因素，重新設計製作合適粒狀土壤組構研究的測量系統。依何樹根[35]、簡連貴等[18]、Li et al.[61]的研究發現影響導電度量測之因素，大致可歸納出以下幾點：

(1) · 溫度之影響

對一溶液而言，影響其導電度最大之環境因素為溫度，溫度之高低會影響導電度，導電度隨溫度升高而增加。雖然變化

之幅度不大，但用以推求構造因素則有相當程度之影響（何樹根[35]），所以實驗過程最好能控制溫度隨時加以修正。本研究為了方便比較，依下列公式[62]將不同溫度之量測結果修正至25℃時之導電度 κ_{25} 。

$$\kappa_{25} = C_t \cdot \kappa_t \quad \text{----- (3-1)}$$

式中， κ_t ：在溫度 $T^\circ\text{C}$ 時之導電度

T ：溫度

$C_t = 1 / (1 + 0.0191(T - 25))$ ，溫度修正係數。

(2) · 交流電源頻率之影響

若採用直流電源可除去電容效應，但在電極周圍則會產生氧化還原作用，使試體不飽和，因而直流電無法使用。在低頻交流電下電容效應不會很顯著（Angus[63]），因而電源可採用低頻率之交流電。另頻率之高低亦會影響到電極電性改變之速度，而使得電極中間孔隙溶液濃度產生變化。依何樹根[33]之研究發現，利用交流電源時，電阻隨著頻率增加而減小，但當頻率大於100 Hz後呈穩定態，當頻率為1000 Hz時其誤差小於2%（如圖3-1所示）。

(3) · 電極之影響

利用公式(3-1)計算導電度時，其電場必需均勻可視為無限平行電極。但實際上很難得到完完全全均勻之電場，一般若邊界以絕緣體包圍且電極相互平行，則其電場便可假設為均勻電場。另電極材料導電性之良好否，將影響到量測時靈敏度。一般電極可分為白金電極與非白金電極兩種[61]。以白金電極為最佳，另不銹鋼電極(No.316)製造之電極亦廣被使用。

(4) · 電解液之濃度

導電度會隨電解液濃度之增加而增加，如表 3-1所示。依自來水與廢水試驗標準方法[61]，一般所採用電解標準溶液為0.01M 氯化鉀溶液，利用0.7456克無水氯化鉀（KCL）溶於新鮮煮沸之二次蒸餾水，在25℃時補足至1000ml稱為標準溶液。在25℃之視導電度(或比導電度)為 $1413\mu\text{-mhos/cm}$ 。

(5) · 容器常數(Cell Constant)之影響

由公式(2-3)可知容器常數之選定與導電度測量有相當密切的關係。電極板間距與容器常數之關係，將再3.2.2節中詳盡描述探討。

(6) · 砂土飽和度之影響

依 Kutter[37]之研究顯示：非飽和時因空氣本身不導電，因此氣泡會減少電的通路，而使砂土導電度降低(如圖3-2所示)。

(7) · 粘土及導電礦物出現之影響

若試樣本身含有導電礦物存在，則當通入溶液時帶電離子會溶入孔隙溶液使得導電度驟增，而影響到量測的精度。

由以上之探討研究可知，在發展設計適合砂土組構導電度量測系統時，必須要能考慮各項影響導電度之因素。而本研究在試驗設計時，考慮飽和砂土及其顆粒不導電，並採用1 kHz正弦波交流電源頻率與結合構造因素理論來分析。所以量測導電度時，僅需針對(1)、(5)兩項因素進行修正即可。

3.2 導電度量測影響因素之修正

3.2.1 溫度效應之校正

有關溫度效應之校正，本研究考慮兩種方式以探討溫度對導電度量測之影響，一為放置電解質溶液於三向度導電盒中，利用恆溫箱控制不同之平衡溫度，同時記錄導電度之變化情形；另外一種，則真正準備一砂土試體，通入溶液後，亦記錄導電度隨溫度變化之變動情形。利用線性內插方式，即可求出以上兩種校正方式，在25℃時砂水混合或純溶液之導電度(κ_{25})。因砂土孔隙組合若保持不變其導電度應為定值，不會隨溫度變化而改變。所以由砂水混合或純溶液之導電度(κ_{25})與量測導電度(κ_t)之比值，可解溫度效應對導電度之影響，其校正結果如圖 3-3a所示。

依公式(3-1)

$$\kappa_t = \kappa_{25} / (1 + 0.0191(T-25)) \quad \text{----- (3-2)}$$

可知溫度效應修正係數， C_t 為

$$C_t = \frac{1}{1 + 0.0191(T-25)} \quad \text{----- (3-3)}$$

(3-3)式[60]所示經驗公式，是針對純溶液而言的修正結果。並不見得適用於砂土混合時之狀況，有賴進一步之比較，由圖 3-3b之砂水混合時校正結果顯示，校正值與經驗式值吻合，而校正值經換算結果為

$$C_t = \frac{1}{1 + 0.0213(T-25)} \quad \text{----- (3-4a)}$$

同理，可針對純溶液之校正結果進行換算如下所示

$$C_t = \frac{1}{1+0.0199(T-25)} \text{-----} (3-4b)$$

若參考溫度採用25℃，而量測溫度在20℃～30℃之間時，其所量測導電度誤差皆在±1%以下(如表3-2、圖3-3b所示)。為便於分析比較與量測系統儀器之設定，本研究於導電度量測儀中，設定修正係數為±2%/1℃。

3.2.2 容器常數之修正

在導電度電性試驗中，除了溫度效應、人為誤差及儀器量測誤差外，容器常數之修正相當重要。由第二章公式(2-3)可看出，導電度除受電阻影響外，尚受電極板面積及其距離影響。在本研究所進行之動態試驗、反復三軸試驗及初始組構之試驗過程中，試體高度並非完全保持固定，而使得容器常數亦非常數。所以，須求得試驗使用之電極板的容器常數隨試體變化之情形。可利用已知導電度之0.01M氯化鉀標準電解質溶液置入導電盒中，在盒中之電極板擺設條件下，調整不同容器常數值，量測其導電度值，求出導電度隨容器常數改變之變化關係曲線，再以標準溶液之導電度值線性內差求出相對應之容器常數。依上述之法，經調整不同試體高度(即兩垂直電極板之距離)後，可求取各組電極板，在不同電極板距離時所使用之關係曲線。可求取圓柱導電室與三向度導電度盒電極板，在不同電極板距離(L)時，所對應之有效容器常數 $(C_c)_{eff}$ 之關係曲線(如圖 3-4，圖3-5所示)。由於三向度導電度盒中使用三組電極片，故定義其編號，依次為A1-A2、B1-B2、C1-C2，有關電極片容器常數編號之方向，請參照圖3-6。校正所得有效容器常數 $(C_c)_{eff}$ 與試體高度(L)之關係式，如下所示：

(A) 圓柱導電室

$$(C_c)_{eff} = 0.0286 + 0.0243 \cdot L, R=0.99--(3-5.a)$$

(B) 三向度導電盒

垂直方向

$$C1-C2 (C_c)_{eff} = 0.0775 + 0.0057 \cdot L, R=0.99--(3-5.b)$$

水平方向

$$A1-A2 (C_c)_{eff} = 0.1897 - 0.0058 \cdot L, R=0.98--(3-5.c)$$

$$B1-B2 (C_c)_{eff} = 0.2008 - 0.0078 \cdot L, R=0.98--(3-5.d)$$

其中 $(C_c)_{eff}$: 有效容器常數

L : 電極板之垂直距離

R : 相關係數

此外，關於量測孔隙中之電解質溶液，所使用導電度計(Conductivity Cell)(如照片 1 所示)的容器常數，同理亦可利用用0.01M氯化鉀標準電解質溶液，依上述所建議方式進行校正，由試驗結果發現其值為 1.112 (簡連貴等[18])。

利用容器常數之修正可得試體之導電度值為

$$\kappa_c' = \kappa_c \times (C_c/C_m) \text{ -----}(3-6)$$

其中 κ_c' = 真正容器常數所對應之導電度

C_m = 量測時使用之容器常數

C_c = 試體高度所對應之容器常數

κ_c = 試驗量測之導電度

3.3 導電度之測量原理

導電度量測基本原理係利用歐姆定律，以一標準電阻， R_s (本研究依導電度之不同大小，採用100k ohm、10k ohm、1k ohm及100 ohm之標準電阻)作為量測比較之參考。在標準電阻及量測試樣電極間，同時施加約300mV之電壓，利用比例方式(如3-7式所示)即可求取電極間試體之電阻大小(R) (如圖3-7所示)。

$$R = \frac{V}{V_s} \cdot R_s \text{ ----- (3-7)}$$

式中， R = 試體之電阻

R_s = 外接標準電阻

V = 試體之電壓

V_s = 外接電阻之電壓

然後將所測得之電阻經 R/V 及AC/DC 轉換器轉換為直流電壓(DC)，再量測過程中亦同時考慮到容器常數及溫度係數之補償，即可測得飽和砂土結構之導電度。

3.4 導電度測量系統之設計

經由以上對導電度影響因素及其量測原理之探討，本實驗研究所設計的砂土導電度量測系統，如圖 3-8所示，而其電子線路配置方式如圖 3-9所示。本研究所設計之導電度量測系統，有以下幾點特色：

- (1)系統上採用1kHz正弦波交流電源，以消除頻率對導電度的影響。

- (2) 另在實驗過程中要保持恆溫狀態是相當不容易且所需經費較高，所以本研究為克服溫度效應之影響，在試樣底部裝置 Netsushin 公司出品之白金電阻式 (Pt 1kohm) 溫度測針，以量測試體內部溶液之溫度，使得試體溶液溫度能自動量測。
- (3) 系統之參考溫度，可依實際須要來設定 (一般導電度量測都以 25°C 為參考溫度 [59])，並可調整適當的修正係數 (依 3.2.1 節所述採用 $\pm 2\%/1^{\circ}\text{C}$)，在所須的容器常數 (如 (3-5) 式所示) 下，利用三軸導電室與喪三向度導電度盒所裝置之溫度測針，系統溫度可自動補償修正至參考溫度，而不受孔隙溶液溫度變化的影響，以方便砂土導電度量測之比較。
- (4) 在解析度方面已提高至 12bit 以上，並將量測訊號輸出電壓由 0~2 伏特放大為 0~5 伏特，以配合微電腦自動擷取系統資料分析。

照片 2 為本研究設計完成之砂土導電度測量系統。有四種導電度 ($200\mu\text{-mhos}$, $20\mu\text{-mhos}$, 2m-mhos , 20m-mhos) 範圍可供選擇，溫度與導電度可顯示在數位電表上，精度可達 0.1mV ；另溫度補償亦分為手動與自動兩種方式可視須要作選擇。而容器常數設定範圍為 0~1.999，可依需要選擇設定 (如 (3-5) 式所示)。在依公式 (2-3) 及公式 (3-6) 加以計算，即可推求出粒狀土壤組織之導電度。

另外為使能同時擷取水平、垂直方向組織之導電度變化，本研究使用隔離放大器 (Isolation Amplifier) 將量測參考零位 (Zero Level) 加以分開，來解決同一電場兩組訊號相互干擾的問題，量測效果良好。

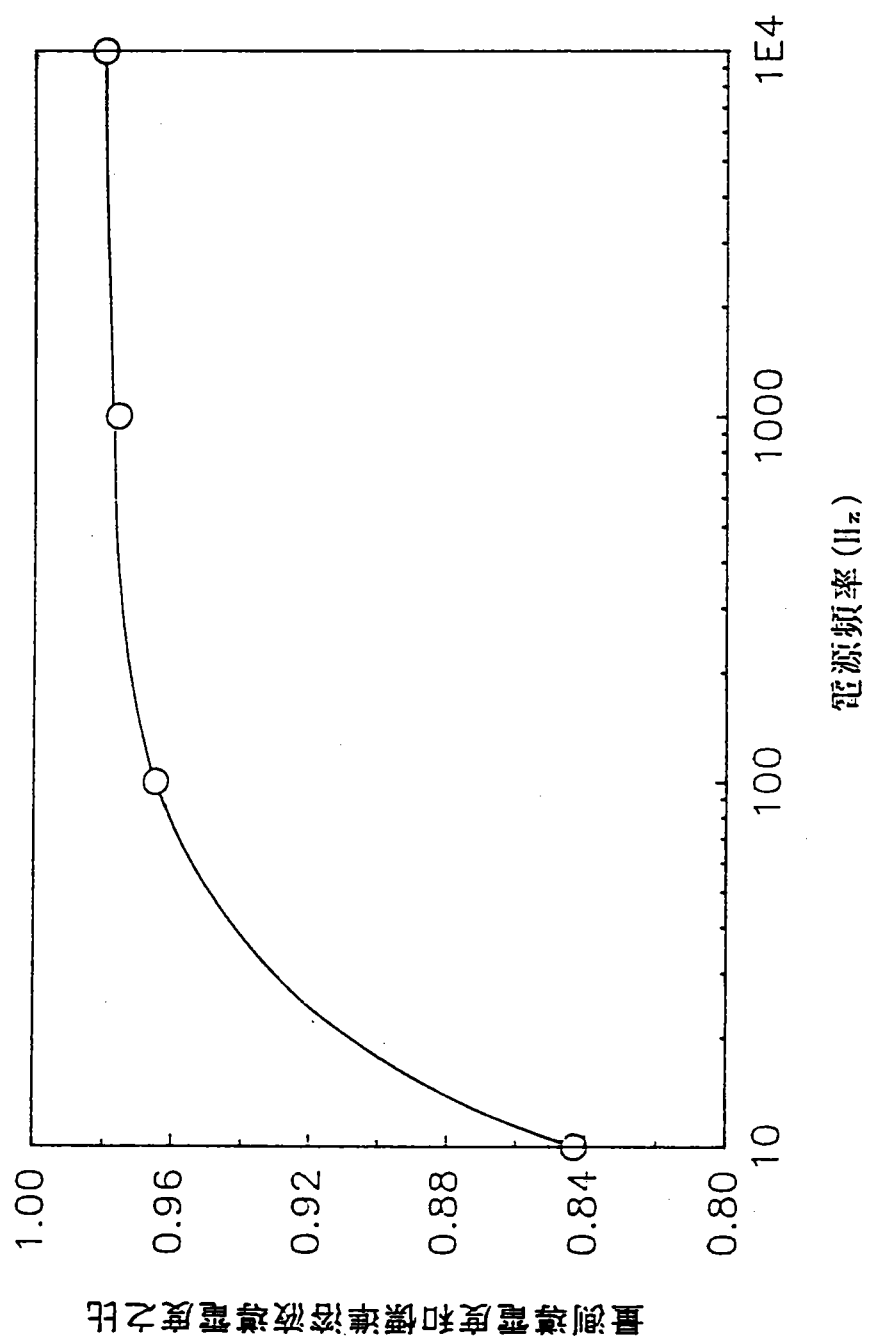


圖 3-1 導電度量測與電源頻率之關係 [35]

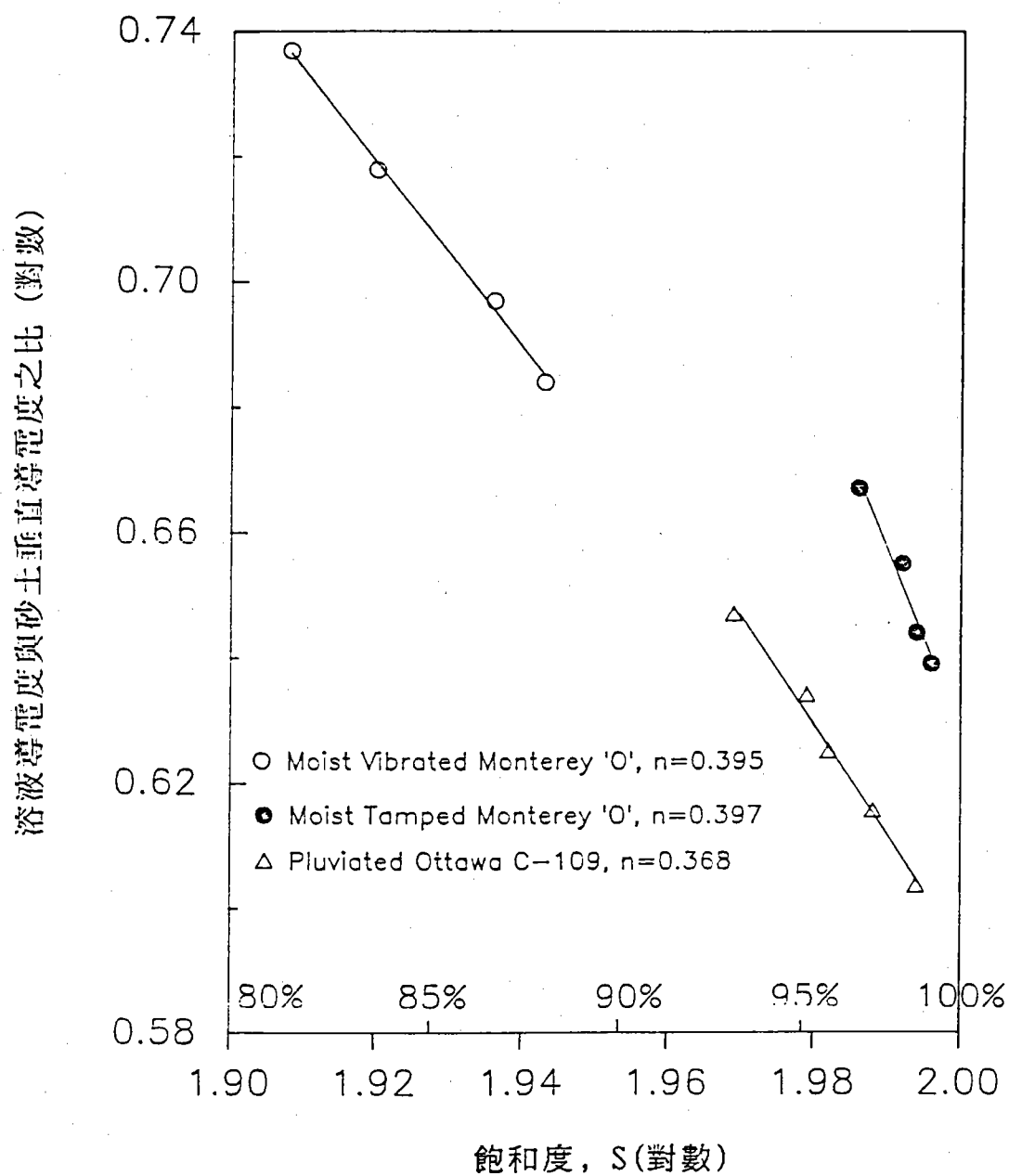


圖 3-2 飽和度對構造因素之影響 [37]

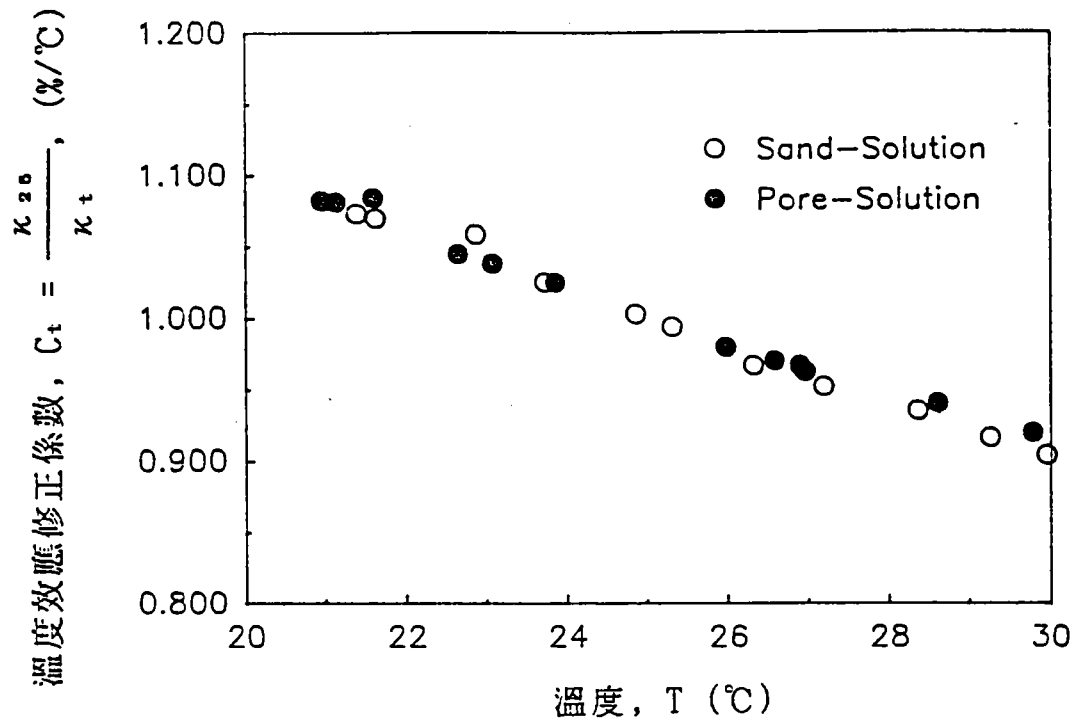


圖 3-3a 導電度量測試驗中，純溶液與砂土混合時，在25℃溫度效應修正係數 C_t ，隨溫度變化之情形。

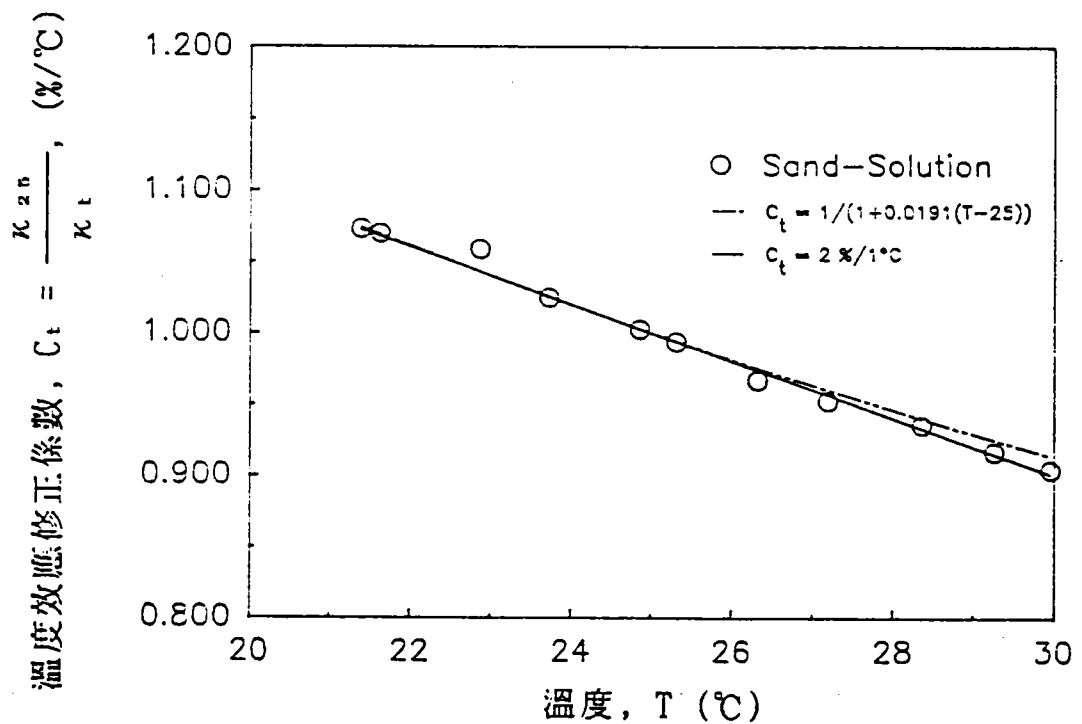


圖 3-3b 各種相關溫度效應修正係數 C_t 關係式之比較

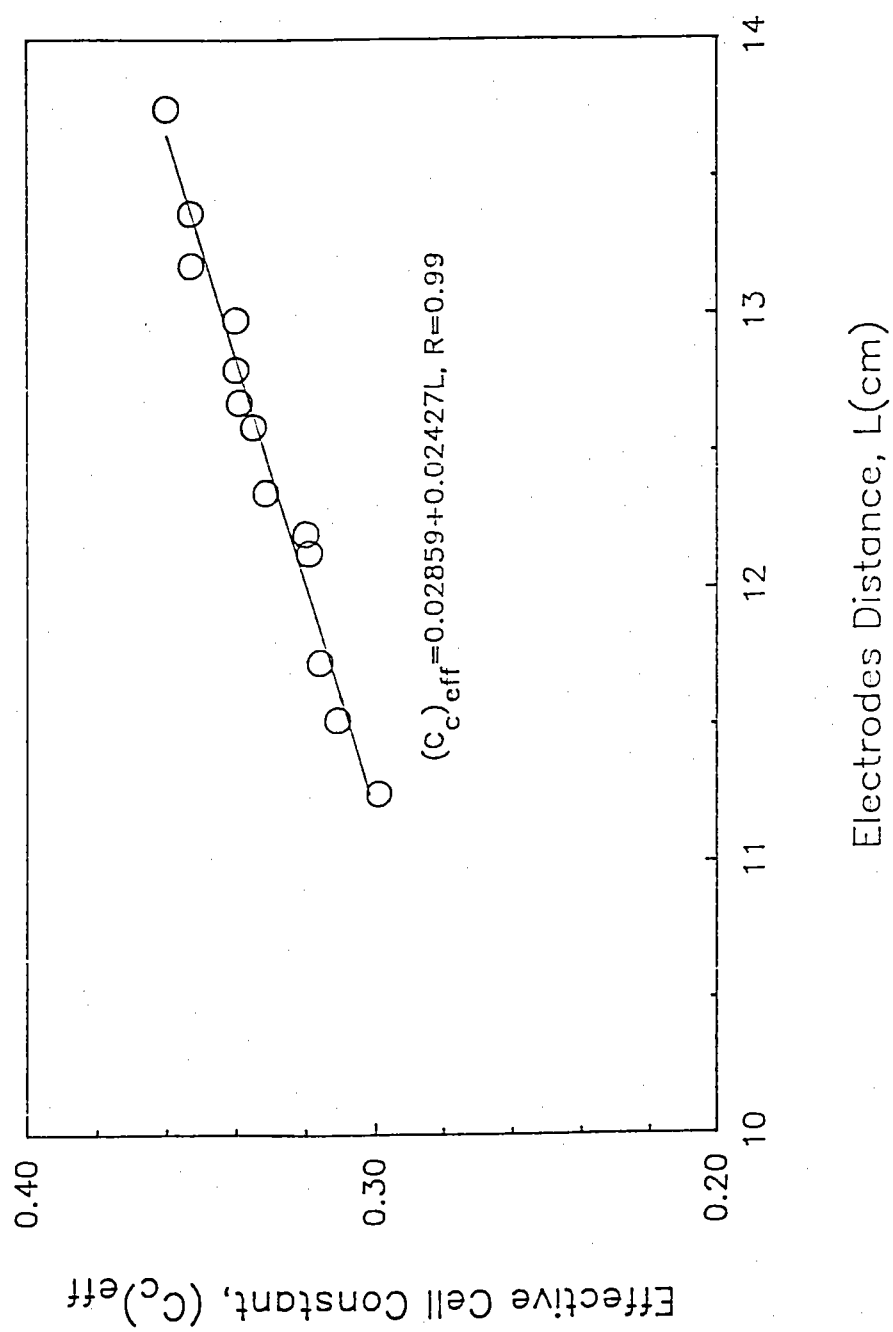


圖 3-4 圓柱導電室電極板有效容常數隨高度變化之關係

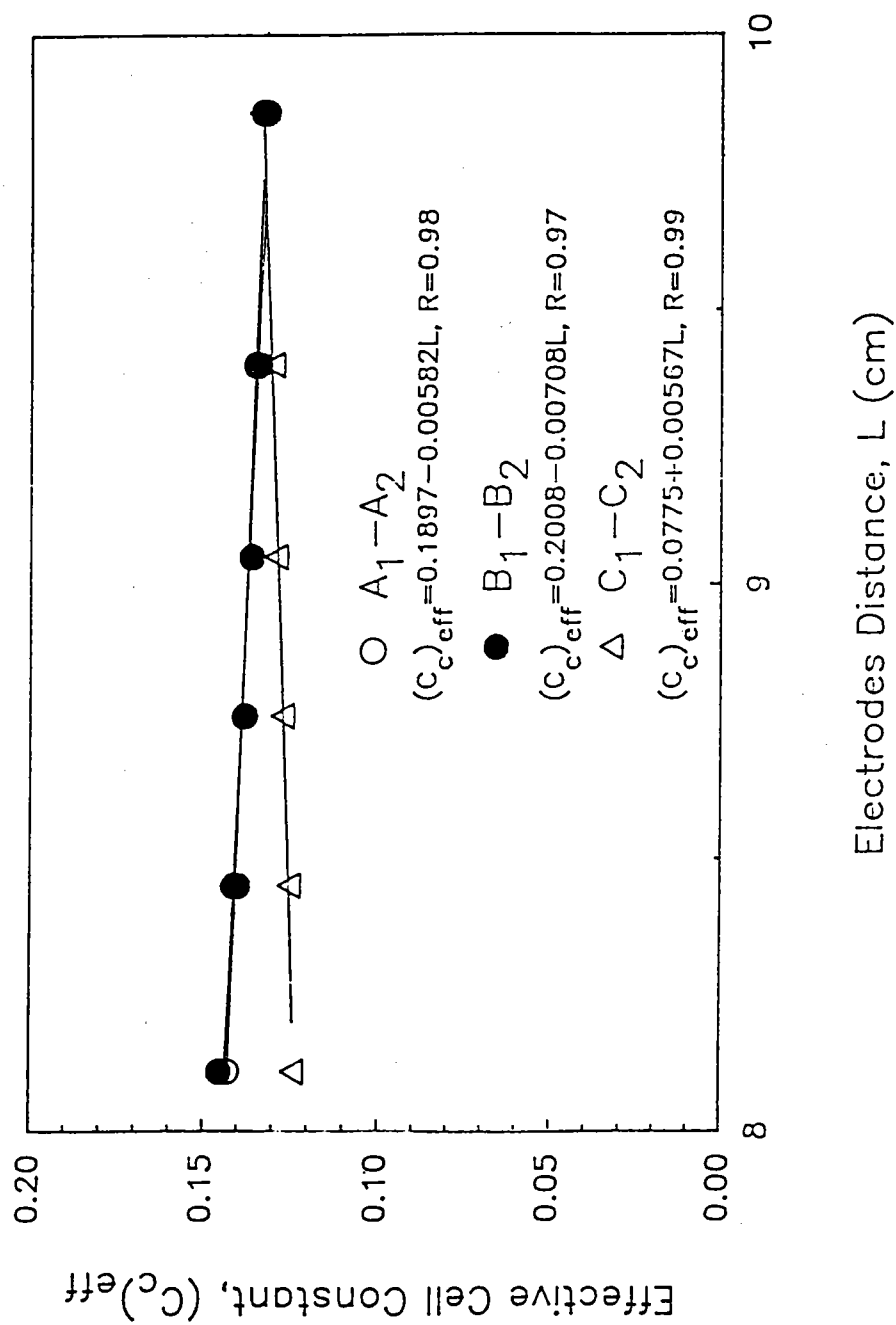


圖 3-5 三向度導電盒試驗中，各組電極板有效容器常數
隨高度變化之關係

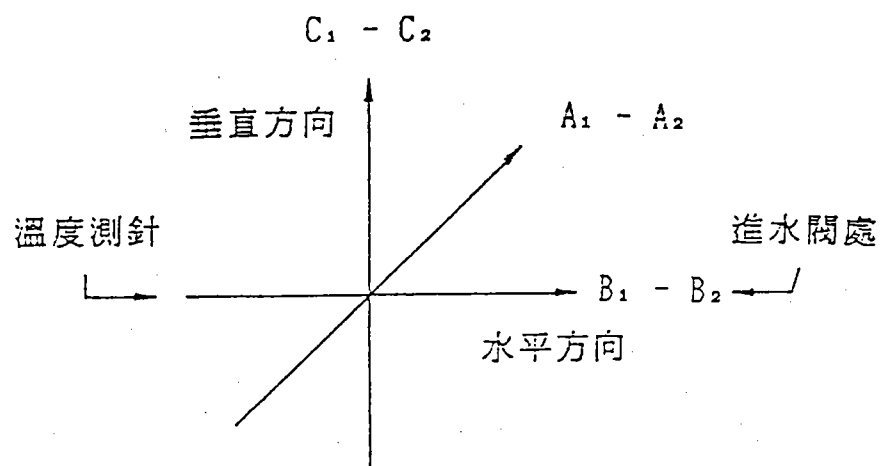


圖 3-6 三向度導電盒中電極板方向與編號示意圖

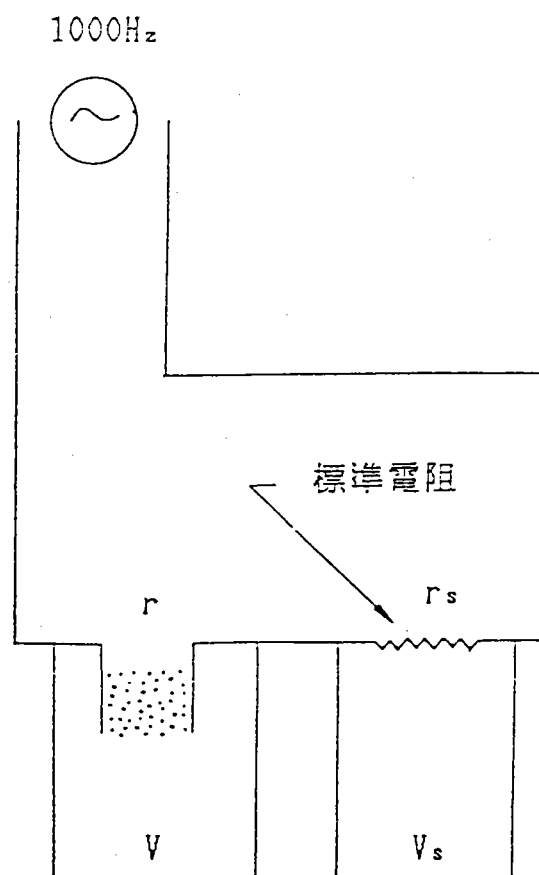


圖 3-7 量測電阻之簡單電路示意圖 [35]

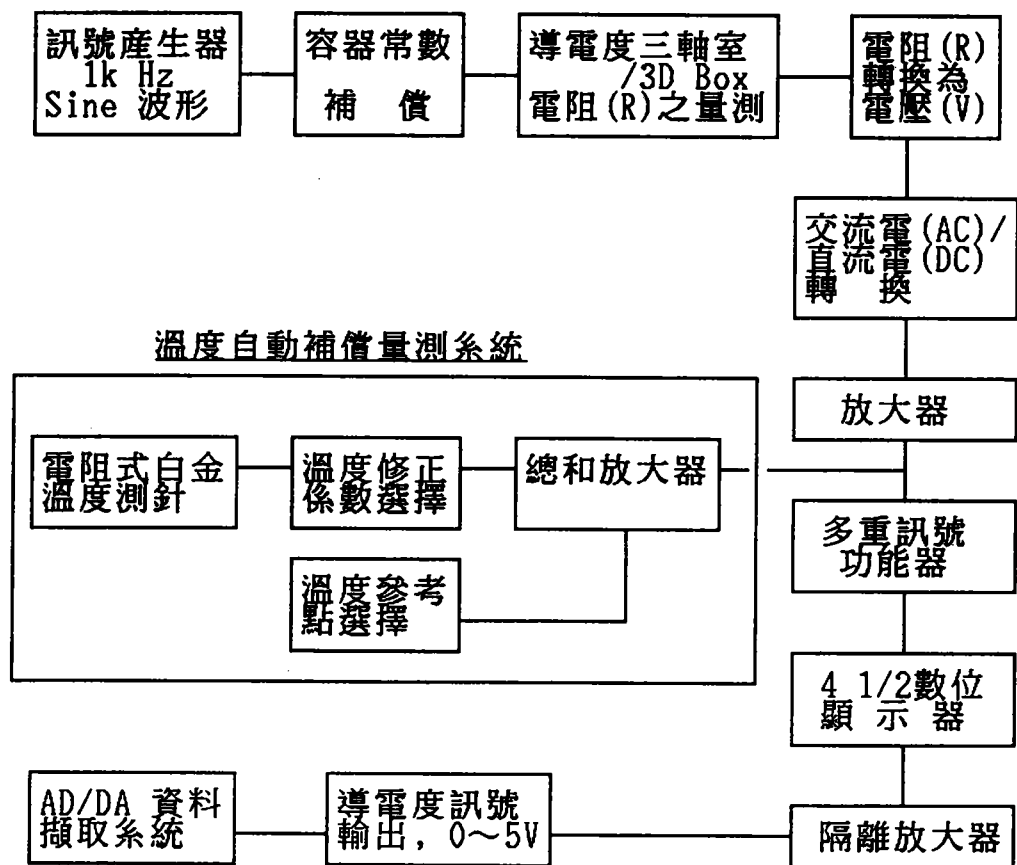


圖 3-8 砂土導電度量測系統簡易設計流程圖(簡連貴等[18])

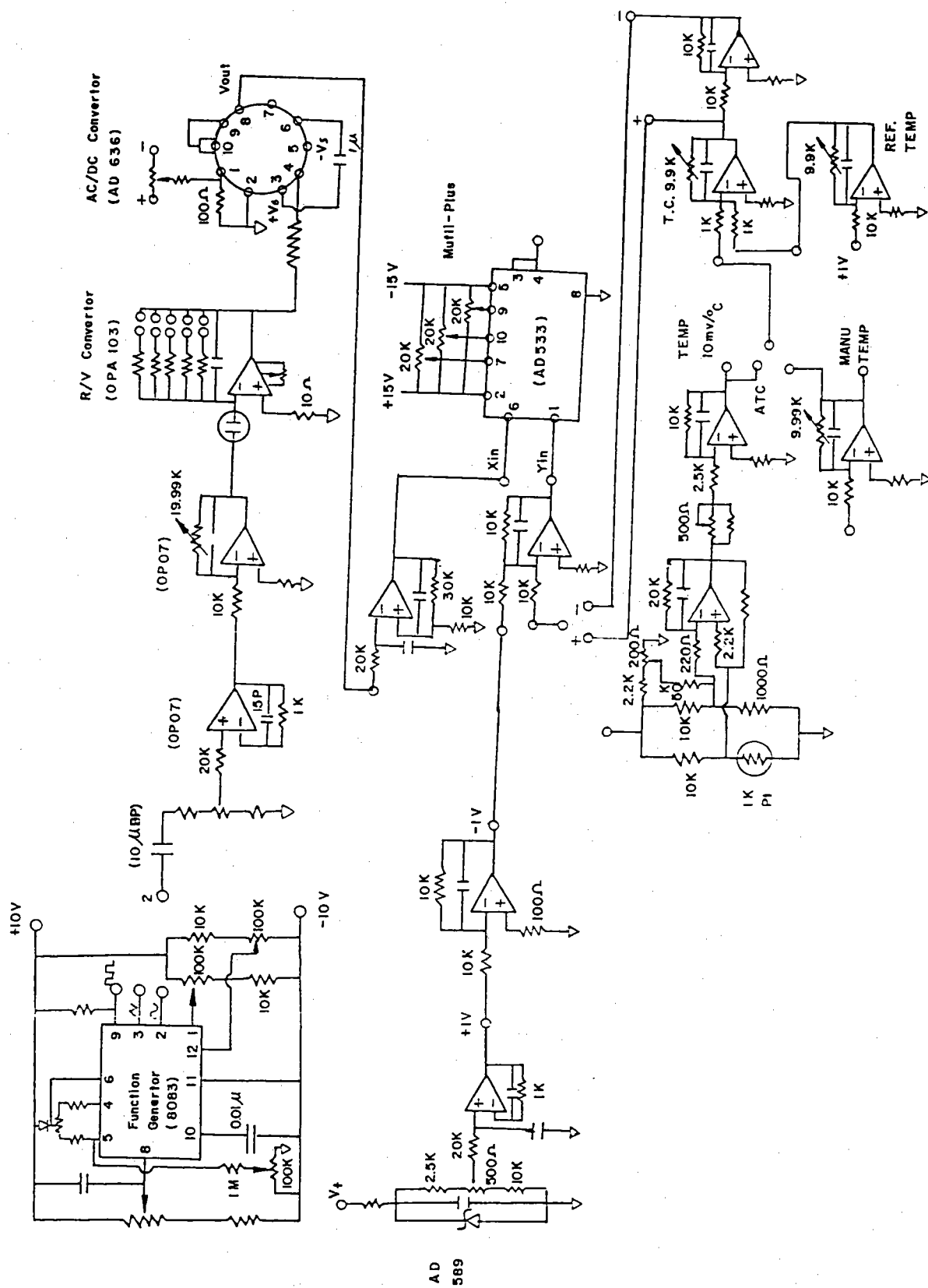


圖 3-9 砂土導電度量測系統電子線路配置設計圖 [13]

表 3-1 在25℃時，不同濃度氯化鉀 (KCL)之導電度

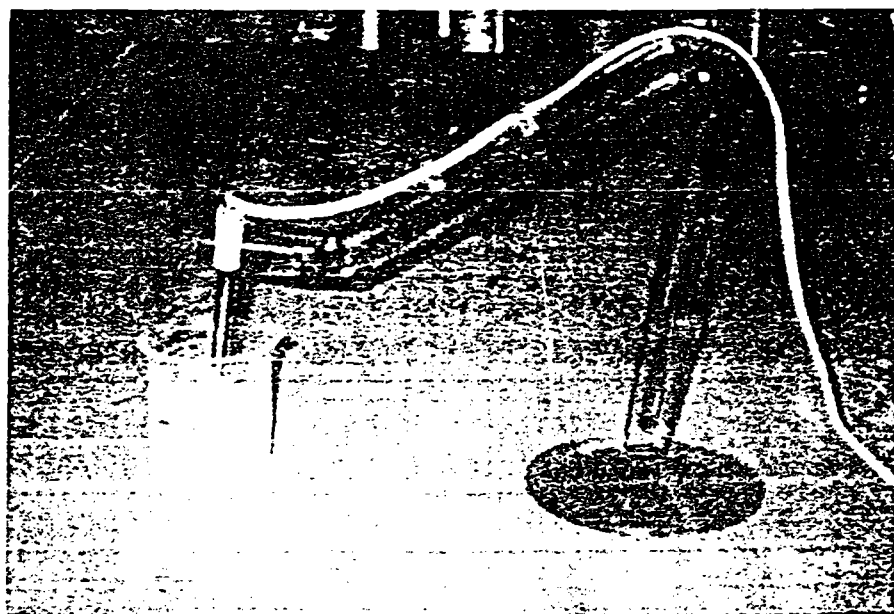
濃度, M	視導電度, μ -mho/cm
0	-----
0.0001	14.94
0.0005	73.9
0.001	147.0
0.005	717.8
0.01	1,413
0.02	2,767
0.05	6,668
0.1	12,900
0.2	24,820
0.5	58,640
1.0	111,900

表 3-2a、砂水混合時溫度修正係數設定與校正值之比較 [13]

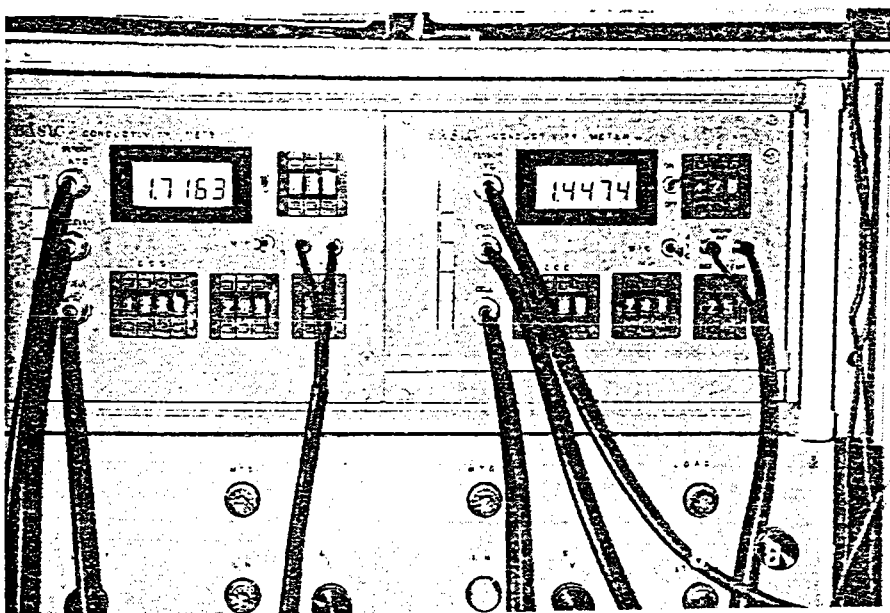
(1) 量測溫度 ℃	(2) 校正值, C_t (3-3)式	(3) 設定值 (25-(1)) $\times 0.02/1^\circ\text{C}$	(4)=(3)-(2) 修正誤差, %
21.38	1.0731	1.0724	-0.0656
21.62	1.0696	1.0676	-0.1975
22.87	1.0585	1.0426	-1.5909
23.72	1.0249	1.0256	0.0730
24.86	1.0027	1.0028	0.0096
25.31	0.9940	0.9938	-0.0170
26.32	0.9668	0.9736	0.6836
27.19	0.9522	0.9562	0.4018
28.36	0.9354	0.9328	-0.2572
29.26	0.9163	0.9148	-0.1506
29.96	0.9040	0.9008	-0.3222

表 3-2b、純溶液時溫度修正係數設定與校正值之比較[13]

(1) 量測溫度 ℃	(2) 校正值, C_t (3-3)式	(3) 設定值(25-(1)) $\times 0.02/1^\circ\text{C}$	(4)=(3)-(2) 修正誤差, %
19.09	1.1361	1.1182	-1.7881
19.12	1.1361	1.1176	-0.0185
19.13	1.1355	1.1174	-0.0181
19.18	1.1353	1.1164	-0.0189
19.20	1.1346	1.1160	-0.0186
19.30	1.1328	1.1140	-0.0188
19.79	1.1275	1.1042	-0.0233
21.59	1.0842	1.0682	-0.0160
22.65	1.0449	1.0470	0.0021
23.08	1.0382	1.0384	0.0002
23.85	1.0247	1.0230	-0.0017
25.98	0.9798	0.9804	0.0006
26.59	0.9701	0.9682	-0.0019
26.97	0.9624	0.9606	-0.0018
26.90	0.9671	0.9620	-0.0051
28.61	0.9408	0.9278	-0.0130
29.79	0.9198	0.9042	-0.0156



照片 1 孔隙溶液導電度計 (Conductivity Cell)



照片 2 本研究所設計完成之砂土組構導電度量測儀

第四章 試驗計劃、儀器與方法

4.1 試驗砂樣

本研究所採用之砂樣，有八里砂(淡水河砂)、台中港砂、布袋砂、旗津砂及渥太華砂[13]，並與簡連貴[13]所採用砂樣之試驗結果作為分析比較。上述砂樣，首先利用水洗去易懸浮之細砂以除去雜質，然後將砂土作充份的浸泡與沖洗，烘乾後即為試驗砂樣，圖 4-1所示為砂樣之顆粒粒徑分佈曲線。

砂樣的最大、最小乾密度，採用日本JSF T26-81T 標準試驗法進行試驗，其詳細實驗步驟方法請參考游啓亨[64]，[65]，表 4-1為顆粒基本性質。

4.2 砂樣試體之準備

本研究砂樣以多重篩貫降法(Multiple Sieving Pluviation, 簡稱MSP法)及濡濕搗固法(Moist Tamping, 簡稱MT法)二種方式準備試樣，以進行砂試樣初始狀態及反復三軸加壓試驗，其詳細步如下：

A. 多重篩貫降法((吳偉特)[66], Miura et al.[34], Vaid et al.[67])

多重篩貫降設備如圖 4-2所示。將固定適量之烘乾砂放入一漏斗中，依所選定之孔徑及高度落下，經六層篩網之裝置後，砂

顆粒如下雨般均勻注入分裂模內，然後利用真空抽氣機，以約 20 mm Hg之吸取過多之砂顆粒並將表面整平，製作完成直徑約 7.1公分，高度約16公分之三軸試體。三向度導電盒試樣為邊長約10公分，高約 9.6公分之方形試體。圖 4-3a,b,c,d所示四種砂樣，不同漏斗口徑、高度與相對密度之關係。

B. 濡濕搗固法(Mitchell et al.[7])

依試體所需之相對密度將預定試體分五層搗固。例如選定之相對密度為80%，則各層之相對密度值為

層數 (由下往上)	相對密度 (%)
1	78
2	79
3	80
4	81
5	82

根據各層相對密度，計算所需砂量(高度為1.9cm，長寬各為10cm)，並多加 8%之水量。於試驗前一天予以濡溼，試驗進行時，調整各層所需之落差，將砂樣搗平至所需高度，並於進行下一層土樣搗固前，將土樣表面刮出約 0.5cm之刮痕，以使兩層土樣之接和均勻。最後可完成一高度 9.5cm，而長、寬各為 10cm之立方試體。

4.3 三向度及圓柱導電盒試驗

4.3.1 三向度及圓柱導電盒試驗設備

本研究自行設計三向度導電盒(如圖 4-4所示)，用以量測砂土初始狀態之導電度，其主要為一 $10\text{cm}\times 10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 立方之壓克力盒，在盒內側六個面分別裝有面積 $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ 厚度約 1mm 之不銹鋼(No.316)電極片，再由電極板後方，以BNC座接頭將訊號接出，盒下方並裝置有阻抗式白金溫度測針，於試驗進行時，量測試體之溫度，以此作為導電度量測值溫度效應修正之用，方盒之上蓋板連結一軸桿，控制上蓋板能與濡濕法或實降法準備之試體確實接觸。壓克力圓柱盒導電度試驗設備，其主要為一內徑 7cm 圓形之壓克力盒，在上下頂板分別安裝電極板如圖 4-5所示。

4.3.2 導電度量測系統

本研究採用之量測系統(如圖 3-8所示)，詳細如第三章所述，有四種導電度範圍可供選擇，溫度補償亦分為手動與自動兩種方式可供選擇，另參考溫度及容器常數亦可依所需設定。

4.3.3 試驗方法

(1). 試體準備方式

本研究砂樣以多重篩實降法(MSP法)及濡濕搗固法(MT法)二種方式準備試體，以進行砂樣初始狀態導電度量測試驗，其詳細步驟如4.2節所述。

(2). 三向度及圓柱導電盒之組合與飽和

按照上述之試體準備法完成試體後，調整內頂板至適當位置，使頂板電極板與砂樣表面能緊密接合，為防止砂土內可能導電之雜質溶於水，所造成導電度之量測誤差。本研究採用0.01M 標準氯化鉀溶液為孔隙水飽和溶液。利用溶液箱與試體高差之水頭（約30~40公分），以防止試體顆粒的塌陷，通水過程中，接取流出之孔隙水溶液，並記錄其導電度值（使用之溶液導電度計請參見照片 1），直至所記錄值穩定後開始飽合階段。為確保試體之完全飽和，以0.2 kg/cm²一階，每一階5分鐘的速率加反水壓，並觀測各方向之導電度值的變化，若各方向導電度值不再發生變化，則可說明試體為飽和。為便於比較，本研究加壓至3.0kg/cm²為止，再靜置4~ 5小時視為飽和之狀態（朱專誌[16]）。

(3).量測各方向之導電度值

試體飽和完畢後，利用BNC接頭連接各組電極板（二組水平及一組垂直），任一組電極板其中一片可視為發射端，則另一片視為接收端。利用電纜線與導電度量測系統連接，然後調整適當之容器常數、參考溫度及修正係數，即可量度各方向之導電度值，以了解砂樣之初始結構與異向性行為特性。

4.4 共振柱試驗

共振柱試驗法(Resonant column method)約在 1960 年後被採用為試驗室土壤動態性質之研究。其試驗原理，係根據有限長度之土壤圓柱試體受縱向或扭矩振盪，其於某一正規振態(Normal mode)下產生共振現象，以共振時之頻率與柱體尺寸資料，計算波傳速度，根據波動公式(Wave equation)，求得土壤之動態性質。圖 4-6為共振柱試

驗示意圖。

4.4.1 試驗使用設備及步驟

本研究共振柱試驗[68]使用之共振柱設備係美國 Soil Dynamics Instruments 公司所製之 Drnevich 式共振柱儀(Drnevich Long-Tor Resonant Column Apparatus)，其組合示意圖如圖 4-7 所示，主要設備包括：

- (1)共振柱室：用以安裝土壤試體，施加圍壓，試體上下之透水石各鑲有六片輻射狀刀片，嵌入試體，使透水石與試體緊密結合，下透水石膠固定於底座上為固定端；上透水石固定於頂板(Top platen system)，為自由端，利用含磁鐵之頂板系統與周圍固定線圈之互制作用，使試體產生定常扭轉振動。
- (2)振盪器(Oscillator)：提供 20~200,00Hz 頻率範圍之正弦電流，可調整不同之頻率及振幅，以控制施加於試體之定常扭矩與頻率。
- (3)功率放大器(Power amplifier)：連接於振盪器與共振柱室之線圈間，用以放大振盪器之電流。
- (4)示波器(Oscilloscope)：用以決定試體發生共振時之李氏圖形(Lissajous figure)，並顯示試體自由振動之衰減情形，以計算阻尼比。
- (5)負荷放大器(Charge amplifier)：用以放大試體振動反應加速度之訊號。
- (6)LVDT(Linear variable differential transformer)：用以測定試體壓密後之高度變化。
- (7)計頻器(Frequency counter)：用以測定試體振動頻率，精

度為 0.1Hz。

- (8)壓力感應器 (Pressure transducer)：用以量測反水壓或試體內孔隙水壓。
- (9)調壓閥 (Pressure regulator)：調節施加於試體之圍壓及反水壓。
- (10)體積變化儀 (Volume change apparatus)：用以量測試體壓密前後之體積變化。

共振柱試體之試驗步驟，依下述辦理：

A. 試體準備

重塑試體之準備方法如下：

- (1)先將橡皮膜以油封圈 (O-ring) 固定於共振柱室底座上使用分裂模 (Split mold) 使橡皮膜直立，並施加真空吸力，使橡皮膜緊貼在分裂模內壁。
- (2)按試體之需要密度或相對密度，秤出每分層之烘乾土樣，分置於瓷皿內，以噴霧器各添加約 8~15% 含水量，同時充分攪拌，使含水量均勻。
- (3)試體準備使用溼夯法 (Moist tamping method)，分五層以夯頭直徑約 7cm 之夯壓桿夯壓之，完成直徑 7.1cm，高約 11cm 之圓柱試體。

原狀試體之準備方法如下：

- (1)自冷凍櫃取出 Shelby 薄管 (冷凍溫度約 -15°C)，旋以裁管機切鋸成短管，再頂出其中土樣並修裁之，成為直徑約 7.1cm，高約 11cm 之冷凍試體。

(2)將修裁之冷凍試體移置共振柱室底座上封以橡皮模。

B. 共振柱室安裝與試體飽和

(1)試體準備完成後，輕置共振柱頂板系統上之透水石於試體頂面，緩緩將透水石上之刀口壓入試體，再用油封圈將橡皮模固定於頂板系統上。

(2)在頂板系統之中心裝置通水(氣)螺絲，接妥排水(氣)管路，由試體底部先通入二氧化矽約 20 分鐘，再緩緩地通入除氣水(Deairedwater)，直至上排水(氣)管路不再出現氣泡為止。

(3)通水完畢後，拆除上排水(氣)管路，將通水螺絲代之以螺絲塞頭，使頂板系統上方封閉，且無管路牽扯，而利其自由轉動。

(4)施加真空吸力約 10cmHg 於試體底部，試體即承受相當於 0.15 Kg/cm^2 之接觸壓力，而能自行直立不潰。拆除分裂模，在試體兩側安裝線圈承架及線圈，並調整線圈位置，使線圈與頂板系統之磁鐵間之空隙對稱一致，而後固定之。

(5)安裝 LVDT於頂板系統上監測試體之高度變化。將一彈性適當之彈簧，其一端鉤住頂板系統，另一端掛在長條桿上，使頂板系統之呆重對試體之作用減至最小，以使試體在試體過程中處於等向壓密狀態(Isotropic consolidation)。

(6)安置透明壓克力罩於共振柱室底皮上連接頂板系統上之各線路至蓋皮上之相關接頭後，覆上蓋皮並旋緊螺絲。

- (7) 打開底皮閥門，將水通入共振柱室內並於水位線略高於試體頂端後關閉之。施加 0.15Kg/cm^2 之接觸壓力，同時相對地解除試體內部之真空吸力，而後同時等量增加室壓與反水壓，使試體在 4.0Kg/cm^2 之反水壓下飽和。
- (8) 檢核試體之飽和度，當孔隙水壓參數 B 值高於 0.95 以上則試體視為已飽和。

C. 試體壓密

- (1) 試體飽和後，進行階段式壓密，先提高第一階段預定圍壓，使試體在該圍壓下進行等向壓密。
- (2) 壓密完成，試體即可施加振動扭力，測定剪應變 $10^{-4} \sim 10^2$ %間之剪力模數。在此應變範圍，試體可視為未破壞，可進行其他不同圍壓之試驗。
- (3) 再提高室壓，進行另階段預定有效圍壓下之壓密。

D. 施加高頻扭轉振動

- (1) 試體壓密完成後，保持排水管路暢通，打開控制箱開關，將正弦電流入線圈，驅動頂板系統，使之扭轉振盪，同時調整輸入電流之頻率與振幅，並研判示波器上之圖形變化。
- (2) 當示波器上顯示李氏圖形時，試體達到共振狀態，記錄共振時之頻率值 f_n 及試體扭轉加速反應波經放大後之均方根電壓 V_{rms} 。

4.4.2 試體結果之計算方法

根據上述共振柱試驗結果，計算土壤之剪應變值，剪力模數計算方法如下所述：

(1) 剪應變振幅之計算

剪應變振幅， γ ，以平均剪應變表示，以下式計算之：

$$\gamma = \frac{\theta}{L} \text{-----} (4-1)$$

式中， $\frac{D}{3}$ = 平均剪應變所對應之平均半徑 = $\frac{D}{3}$

θ = 試體頂端之旋轉量

L = 試體高度

D = 試體直徑

θ 值可以下式計算：

$$\theta = \Delta a / \gamma_a \text{-----} (4-2)$$

式中， Δa = 扭轉加速度感應之位移量。

γ_a = 加速度感應子與轉動軸之距離

由於扭轉加速度感應子呈正弦運動，其位移量可以下式計算：

$$\Delta a = \frac{a}{(2\pi f_n)} \text{-----} (4-3)$$

其中， f_n = 共振頻率

a = 扭轉加速度，可由實驗所得之均方根電壓與負荷放大器之率定因數計算之。

(2) 剪力模數之計算

剪力模數 G 值之計算，係根據波動公式

$$G = \rho V_s^2 \text{ ----- (4-4)}$$

W/V

式 $\rho = \text{試體之質量密度 (Mass density)} = \frac{\text{-----}}{g}$

$V_s = \text{剪力波速}$

$W = \text{試體之重量}$

$V = \text{試體之體積}$

$g = \text{重力加速度}$

剪力波速可以下式表示：

$$V_s = 2\pi f_n L / \phi_s \text{ ----- (4-5)}$$

式中 $f_n = \text{扭轉振動之非阻尼自然頻率 (Natural frequency)}$

$L = \text{試體之高度}$

$\phi_s = \text{頻率方程式 (frequency equation) 之根}$

頻率方程式以下式表示：

$$\phi_s \tan \phi_s = J/J_0 \text{ ----- (4-6)}$$

式中， $J = \text{試體之扭轉慣量} = (WD^2)/8g$

$J_0 = \text{頂板系統之扭轉慣量}$

$W = \text{試體之重量}$

D = 試體之直徑

g = 重力加速度

則剪力模數, G , 可以下式計算之 :

$$G = (W/(V \cdot g))(2\pi L/\phi_s)^2 f_n^2 \text{ ----- (4-7)}$$

(3) 阻尼比之計算

阻尼 D 比值, 採用自由振動之振幅衰減法, 以下式計算 :

$$D = (1/(2\pi n)) \log_e (A_0/A_n) \times 100\% \text{ ----- (4-8)}$$

式中 A_0 = 驅動電源切斷同時之加速度振幅

A_n = 自 A_0 開始計量後第 n 個循環之振幅

4.5 反復式三軸導電度試驗

4.5.1 反復式三軸試驗系統

本研究中所採用之反復三軸系統為本所自行設計之氣動式反復三軸儀, 其主要動作原理如圖 4-8所示, 其概要如下:

首先於套裝軟體之DA(Digital to Analogy)中設定吾人所需之波形檔, 經由轉換器轉換成類比訊號, 電空調壓閥(e/p Load Transducer), 接收到此訊號後即隨類比訊號之大小來控制其出氣量, 並結合無摩差氣壓缸, 藉由氣壓缸之活塞即可將壓力傳遞至三軸儀之加壓桿, 以達到應力控制目的。

再利用套裝軟體之AD(Analogy to Digital)中設定資料擷取檔案，則動力試驗中之荷重、變位及孔隙水壓之變化均由感應器量取，經由轉換器將感應器之類比訊號轉換成數值訊號，再利用電腦快速儲存、計算之能力，將此訊號轉換成相對之物理量。

試驗中主要量測項目包括：軸向荷重、軸向變化、體積變化、試樣內溶液溫度及垂直導電度。

- (1) 衡盒：置於加壓桿上。
- (2) 位移感應器 (LVDT) 及其訊號調節器。
- (3) 體積變化儀，利用LVDT重新改裝設計而成，精度為0.2 cc/cm。
- (4) 白金電阻式溫度感應器：Netsushin公司所製，電阻大小為1000 ohm，安置於導電三軸室及導電度盒底部，以量測試體孔隙溶液溫度之變化，其靈敏度可達0.01℃。
- (5) 導電度儀：白金電極鉑置於上下鉑，以量測組構之變化，有四段量測範圍可依砂樣導電度大小，選擇測量適當之範圍。溫度修正係數、參考溫度、容器常數可直接設定。輸出範圍為0~5Volt。直接量測精度為 0.1mV，可輸入電腦擷取系統，便利資料之處理。

上述之三軸反復載重系統之組合見照片 3。

4.5.2 試驗方法

(1) 試體拆模與飽和

依 4.2節之試體準備法完成砂試體後，試體頂部放上濾紙，然後將上蓋板調整至與砂樣接觸之適當位置。關閉反水壓閥門，於上排水線施加上50mm-Hg 之真空吸力，以防止試體在拆除分裂模時，試體仍

能保持穩定不倒坍。拆模後，分別量取砂試體下、中、下直徑與高度，計算試體拆模後之相對密度。

套上三軸室外罩，將水注入三軸室，當水約達試體上部15公分，接上室壓線並施予 0.1 kg/cm^2 的接觸壓力。將真空壓力慢慢完全解除後，再由試體底部通入二氧化碳 2小時後，改通除氣溶液 (De-aired Solution)，每隔30分鐘左右，觀測排出溶液之導電度，直至溶液導電度趨於穩定為止，關閉排水線，於20分鐘內將反水壓提升至 3.0 kg/cm^2 ，藉以飽和試體。利用孔隙水壓參數 B ，來檢核飽和度。 B 值應在0.95以上，然後提高室壓至所需壓密壓力（本研究預計採用有效圍壓為 1.0 kg/cm^2 ）。鬆開加壓桿內桿固定鈕，使試體受等向壓密至體積不再變化。一般而言砂之壓密非常迅速，為求試驗條件一致，壓密時間均預定為 1小時，才進行下一步驟試驗。

(2) 施加不同應力路徑之軸差應力

試驗時採用斜波 (Ramp Wave) 施加軸差主應力，加載速率為 $10 \text{ cm}/40,000 \text{ sec}$ 。砂土顆粒在受剪過程中，同時量測體積變化、荷重及導電度，以探討砂土孔隙率與導電度之關係。

(3) 粒狀砂土導電度之量測

在砂土受剪過程中，依3.4節所述導電度量測系統，在所設定之容器常數、參考溫度及溫度修正係數下，可同時量測砂土組構之導電度，以進行砂土組構電性分析。

4.5.3 試驗資料擷取系統

本研究中之三軸反復載重試驗，採用之資料擷取系統為 Metra Byte公司出品，編號為 DASH-16之類比／數值及數值／類比訊號轉換器 (A/D, Analog to Digital and D/A, Digital to Analog Convert)

，安置於IBM PC/AT相容型個人電腦內，以Laboratory Technologies Corporation 發展的NoteBook資料擷取軟體，配合Lotus 1-2-3 整合軟體來擷取試驗資料(林少思[69])。由於反復三軸導電度試驗中量測之荷重、變位、體積變化及導電度變化均有感應放大裝置，將訊號放大為電壓變化訊號，於是藉由 A/D轉換器換成數據訊號，再利用電腦快速儲存、計算之能力，將此訊號再轉換成有物理意義的荷重、變位、體積變化及導電度之讀數，經分析、運算，求得吾人需要之試驗結果。

DASH-16 為十六位元（註一），可同時擷取十六個類比訊號頻道之轉換器，其輸入電壓範圍可依量測訊號大小加以變換，共有單極式（註二）+1V, +2V, +5V, +10V與雙極式（註二） $\pm 1V, \pm 2V, \pm 5V, \pm 10V$ 的輸入範圍可選擇。

（註一）16位元係指其可將輸入電壓之範圍分為 2^{16} 個區段，即其量測之靈敏度為

$$(\text{輸入電壓範圍值})/2^{16}$$

（註二）單極式係指輸入電壓範圍是由零至某一正電壓值；雙極式則其輸入電壓值包括了正負電壓值。

4.6 滲透係數導電度試驗

4.6.1 試驗設備

本研究使用之三向度導電盒試驗設備，其構造及導電度量測原理詳見朱專誌[16]之說明。其與三向度導電盒之組合試驗如圖 4-9所示。

4.6.2 試體準備方式

本研究採用多重篩質降法(MSP法)及濡溼搗固法(MT法)準備試體，試體之製做程序詳細步驟請參考朱專誌[16]。

4.6.3 三向度導電盒試體之飽和

以多重篩質降法或濡溼搗固法完成三向度導電盒試體之準備後，利用 0.01M 氯化鉀標準溶液，以 30 至 40公分高差之水頭（透水計管液面與試體之高差），由下排水閥徐徐通入試體，約二小時後，由上排水閥接取流出之溶液，並連續記錄其導電度值，待導電度值穩定後，開始量測試體之透水係數，量測之步驟如下節所述。

4.6.4 砂土試體滲透係數之量測

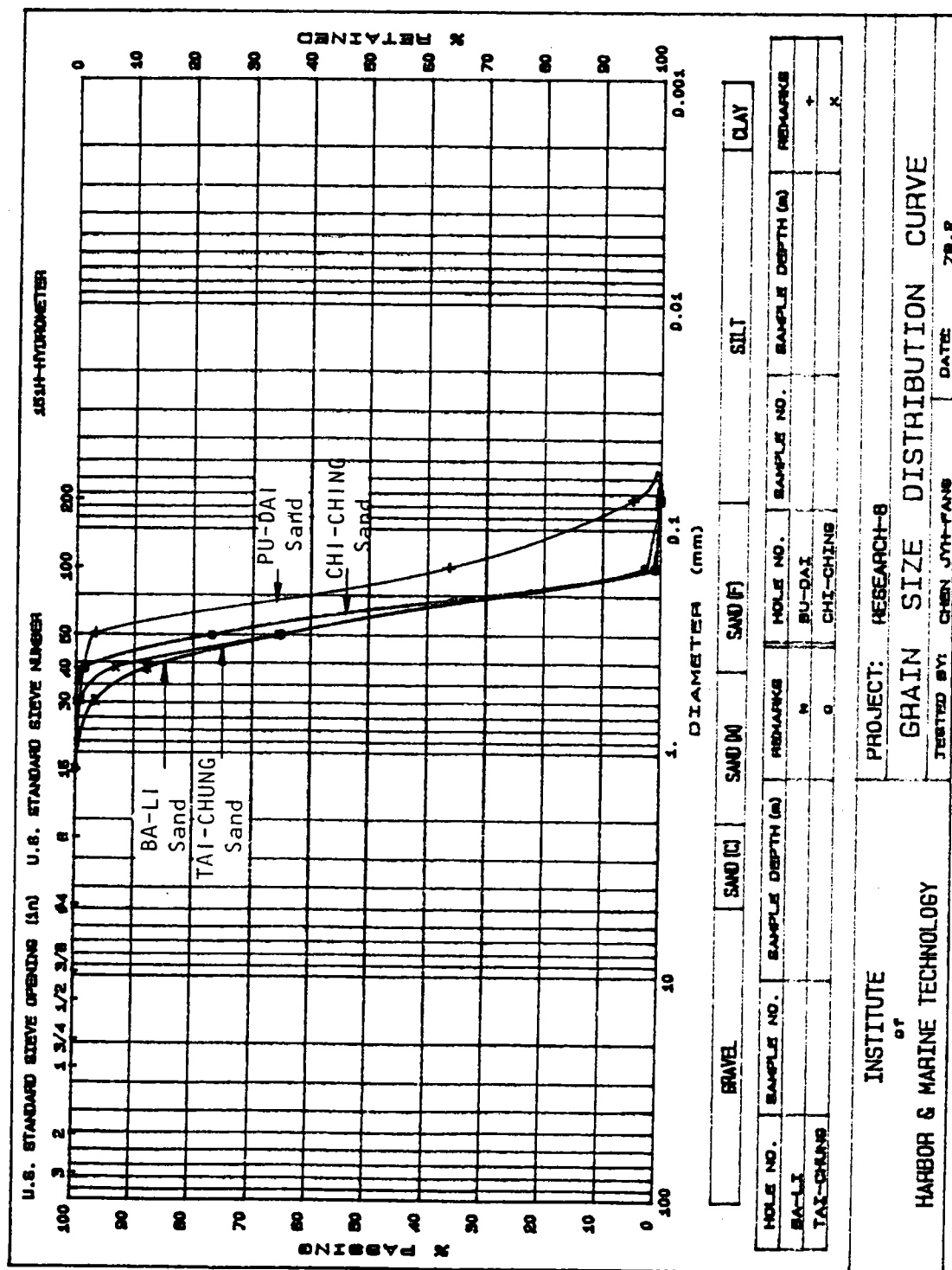
- (a) 變水頭試驗設備如圖 4-9所示，先將透水(溶液)管水頭位置 H_0 ， H_1 定出，並檢查供水管與導電盒間之管路，使其不存在氣泡；同時，將導電盒下排水閥關閉。
- (b) 試驗開始時，將下排水閥打開，當水位下降至 H_0 處，記錄其時間，同時記錄水位降至 $\sqrt{H_0 H_1}$ 及 H_1 時所歷經之時間，當水位降至 H_1 時，關閉下排水閥。
- (c) 紀錄溶液之溫度。
- (d) 比較 H_0 降至 $\sqrt{H_0 H_1}$ 與 $\sqrt{H_0 H_1}$ 至 H_1 所消耗之時間，其差距若超過 2% 或 3%，則重新試驗。

4.6.5 導電度之量測

透水試驗完畢後，開始進行試體飽和，試體之飽和方式及量測水平、垂直之導電度值仍依照朱專誌[16]中所述，以做為比較之依據。

4.6.6 飽和狀態下之透水試驗

由於飽和度對滲透係數之影響甚大[58]，為進一步求得砂土在飽和狀態下之滲透係數，本研究利用三向度導電盒試體通二氧化碳的方式(多重篩貫降法之試體通 CO_2 約二小時，濡濕搗固法則需十小時以上)，再依4.6.2節所述，將試體飽和。試體之飽和程度可依導電度值加以判斷，因飽和度對導電度量測之影響非常顯著。而以朱專誌[16]於飽和狀態下，所量測之導電度與本研究試體通 CO_2 所量測之導電度值比較(準備方式相同、孔隙率相同)，其值相當。故可證明試體之飽和度已達95%以上。飽和完成後，即可進行4.6.3 節之透水試驗。



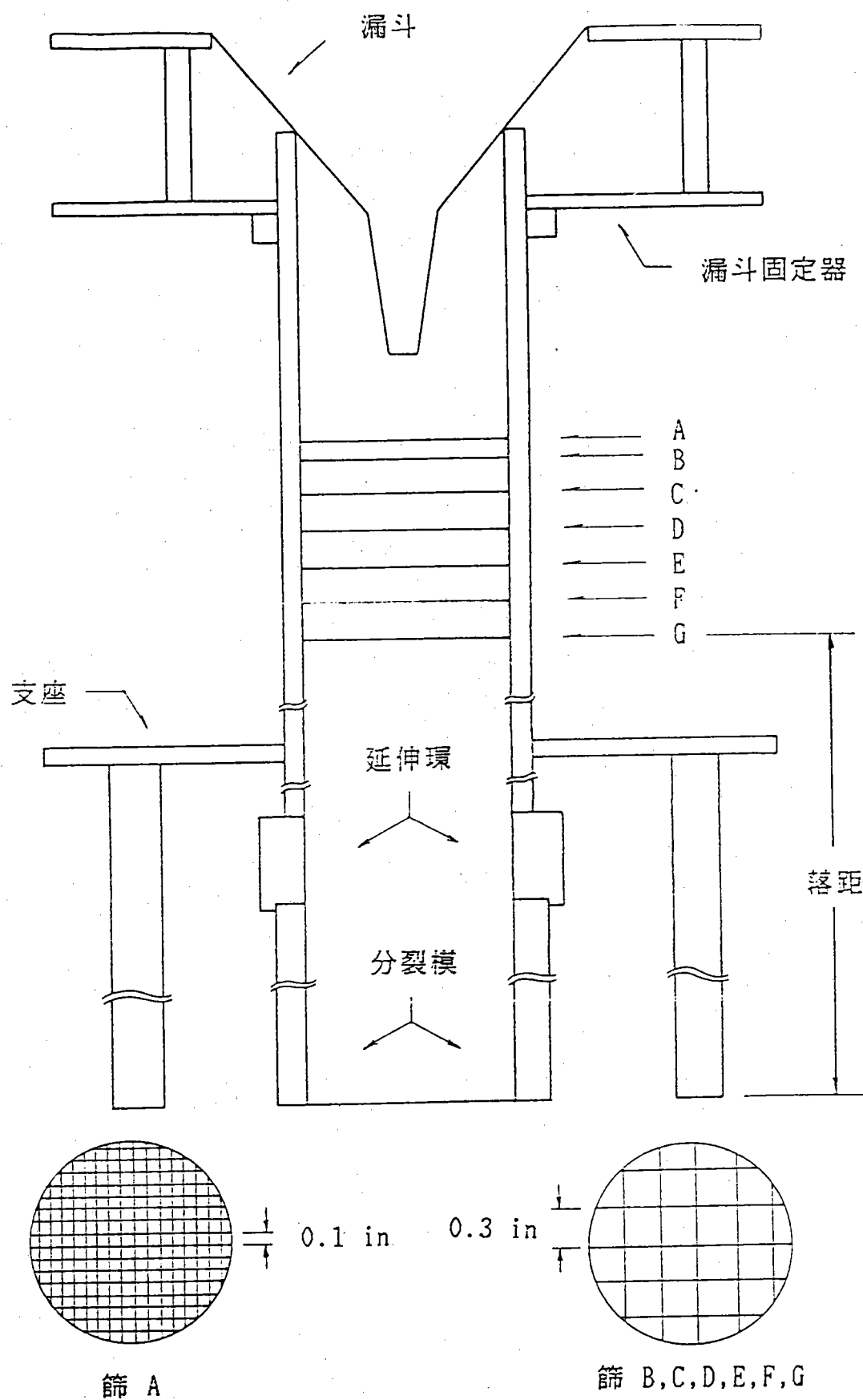


圖 4-2 多重篩質降法設備示意圖 [13]

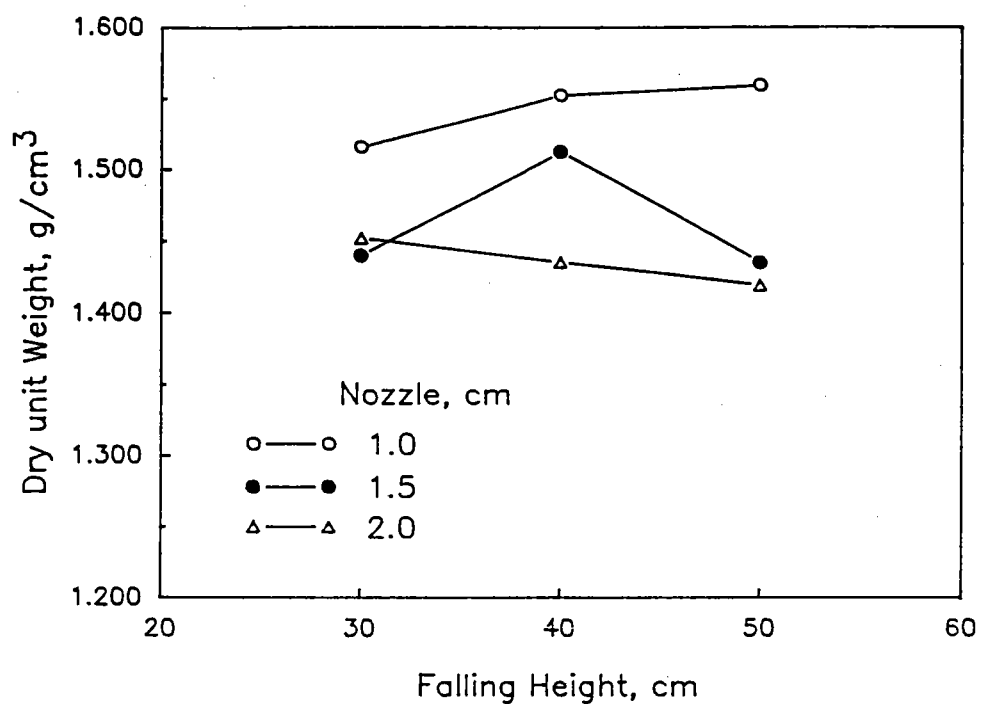


圖 4-3a 八里砂，多重篩貫降法中漏斗口徑、落差與乾砂單位重之關係

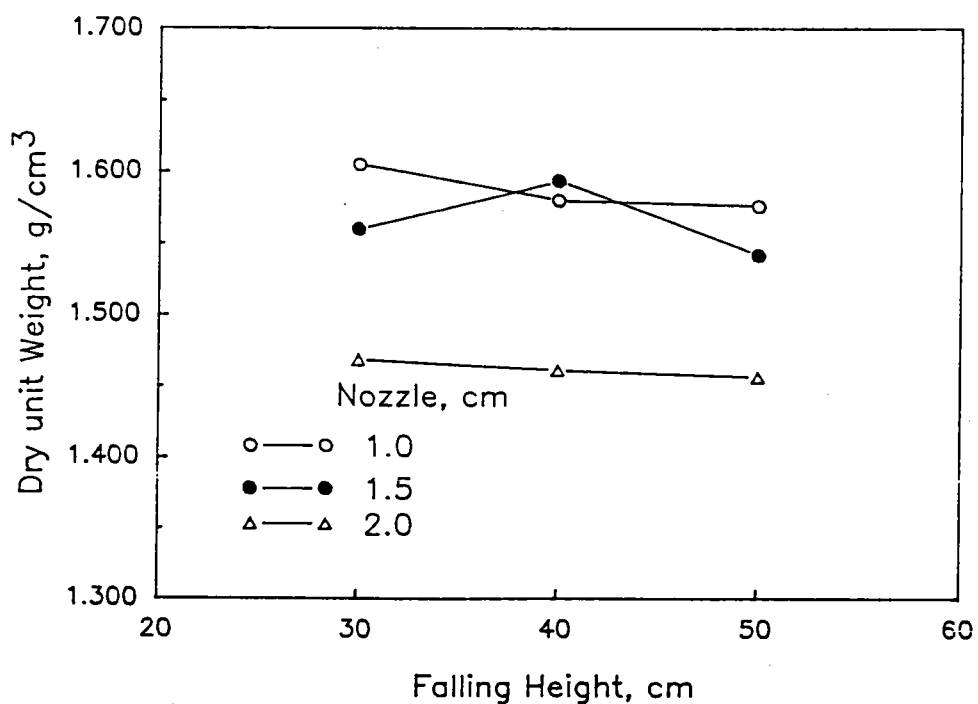


圖 4-4b 台中港砂，多重篩貫降法中漏斗口徑、落差與乾砂單位重之關係

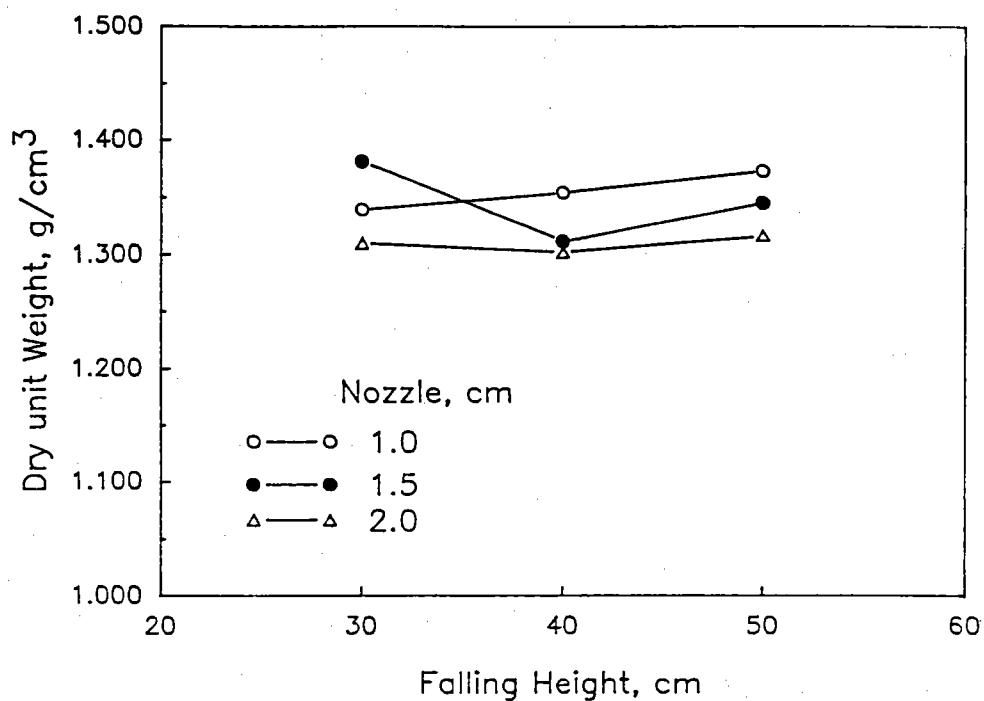


圖 4-3c 布袋砂，多重篩震降法中漏斗口徑、落差與乾砂單位重之關係

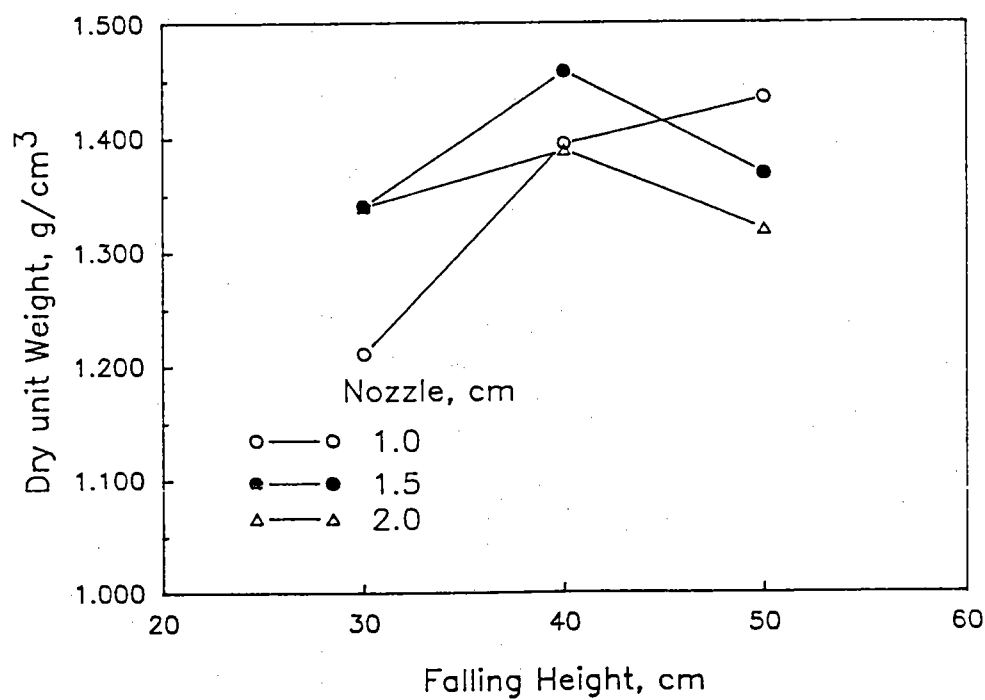


圖 4-3d 旗津砂，多重篩震降法中漏斗口徑、落差與乾砂單位重之關係

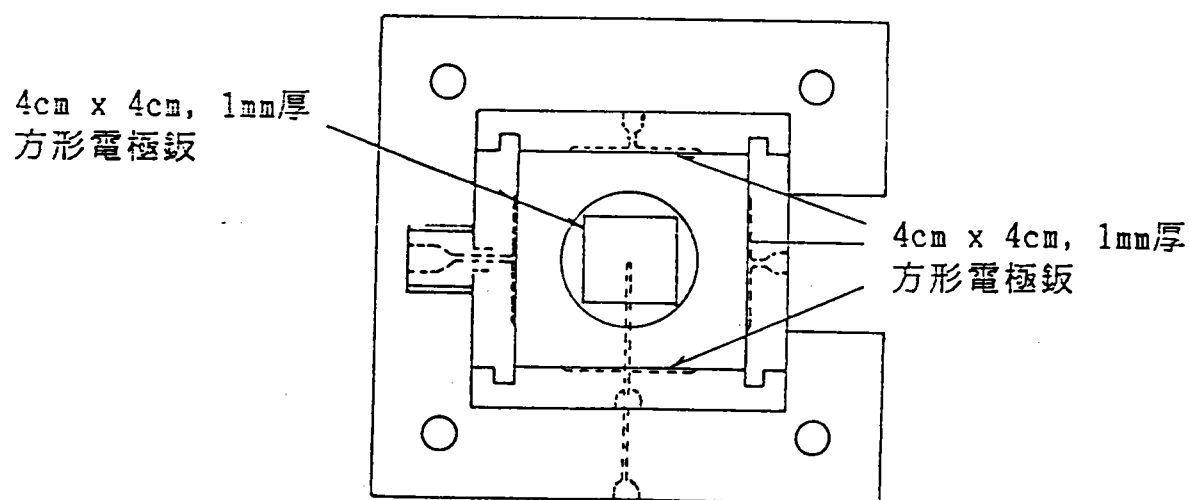
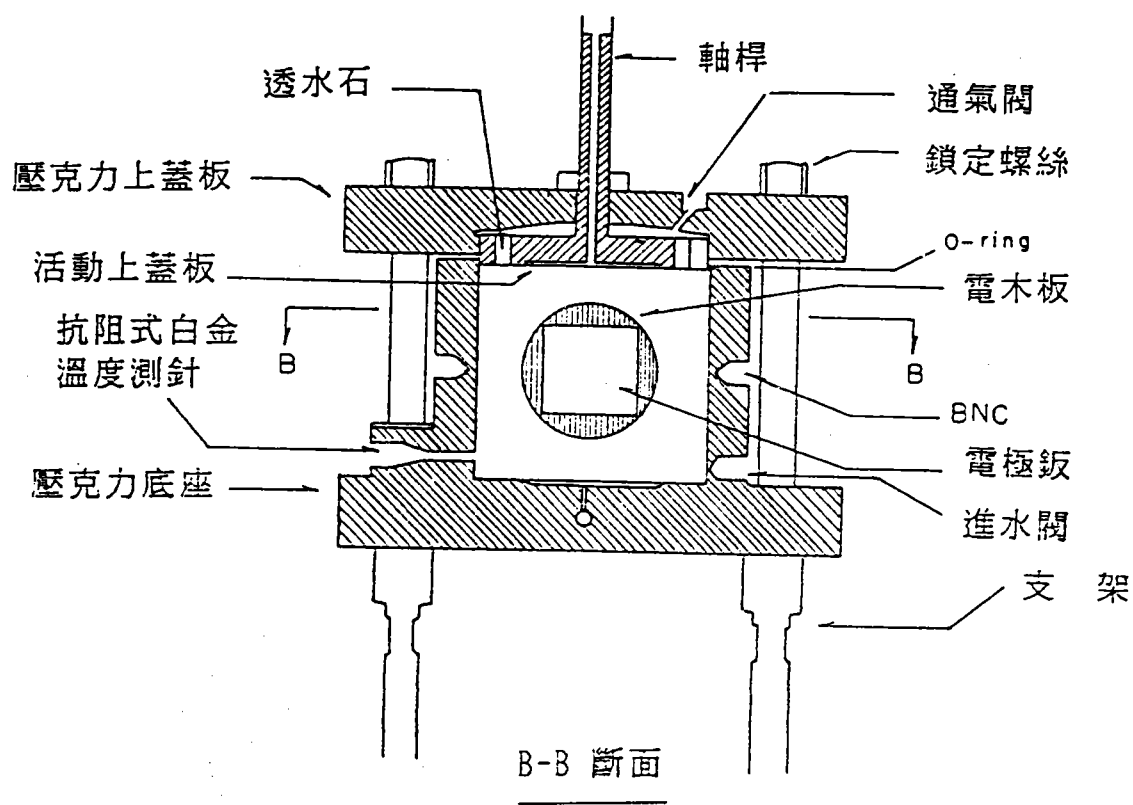


圖 4-4 三向度導電盒平面圖 [13]

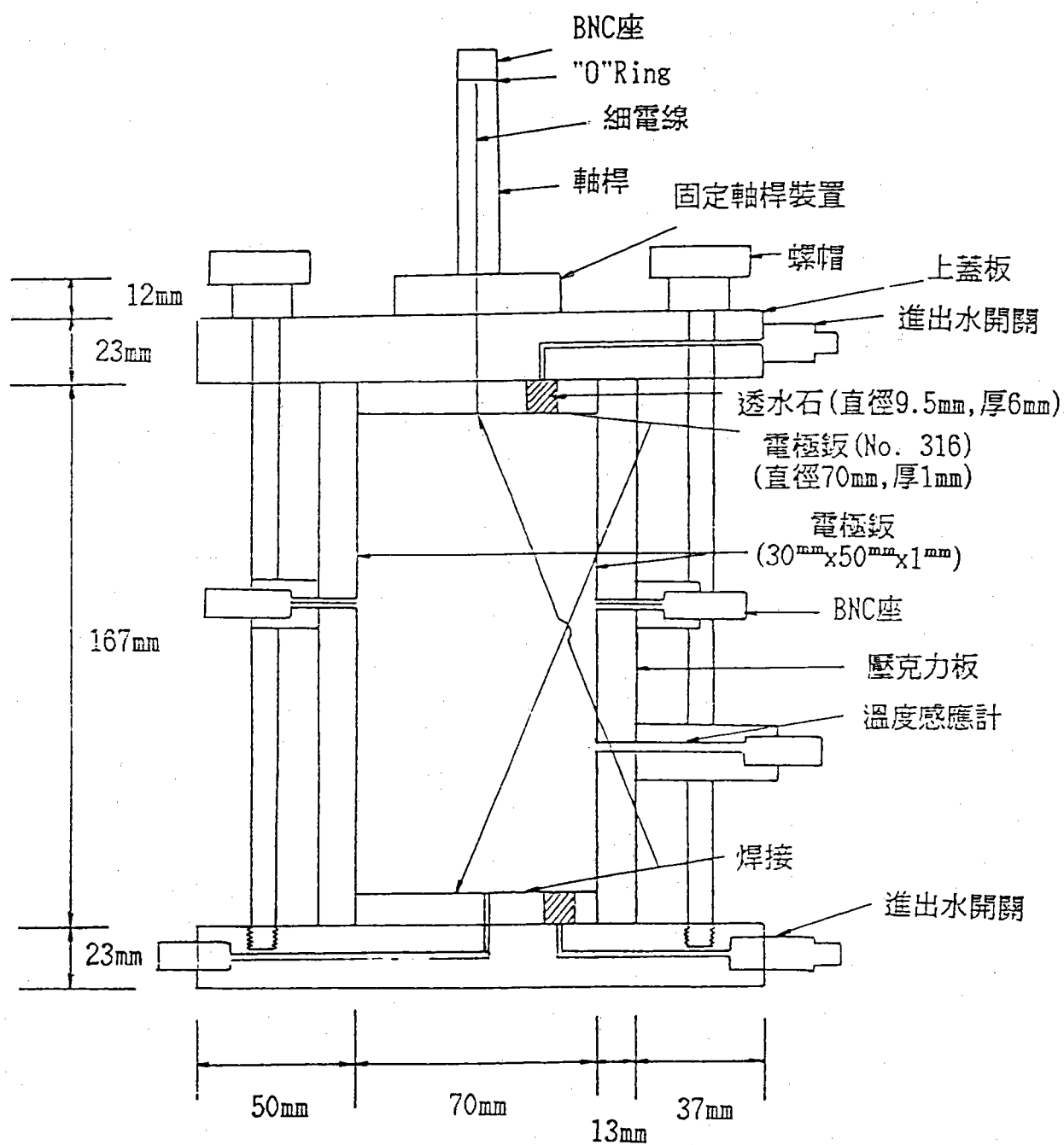


圖 4-5 壓克力圓柱導電盒平面圖 [13]

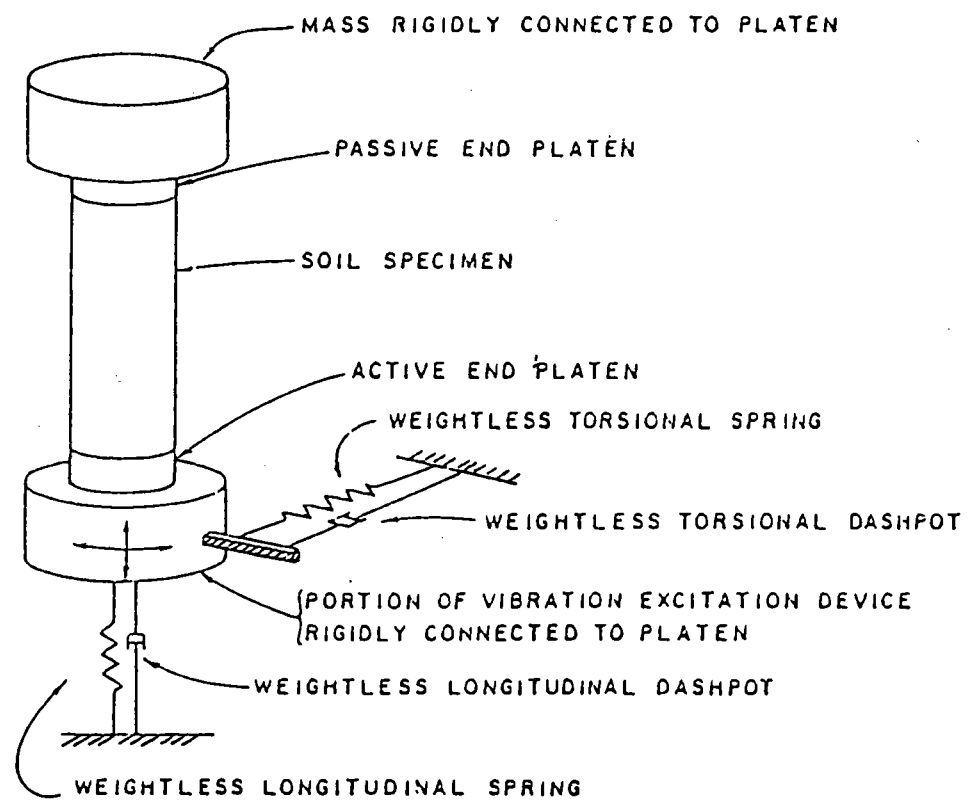


圖 4-6 共振柱試驗示意圖 [68]

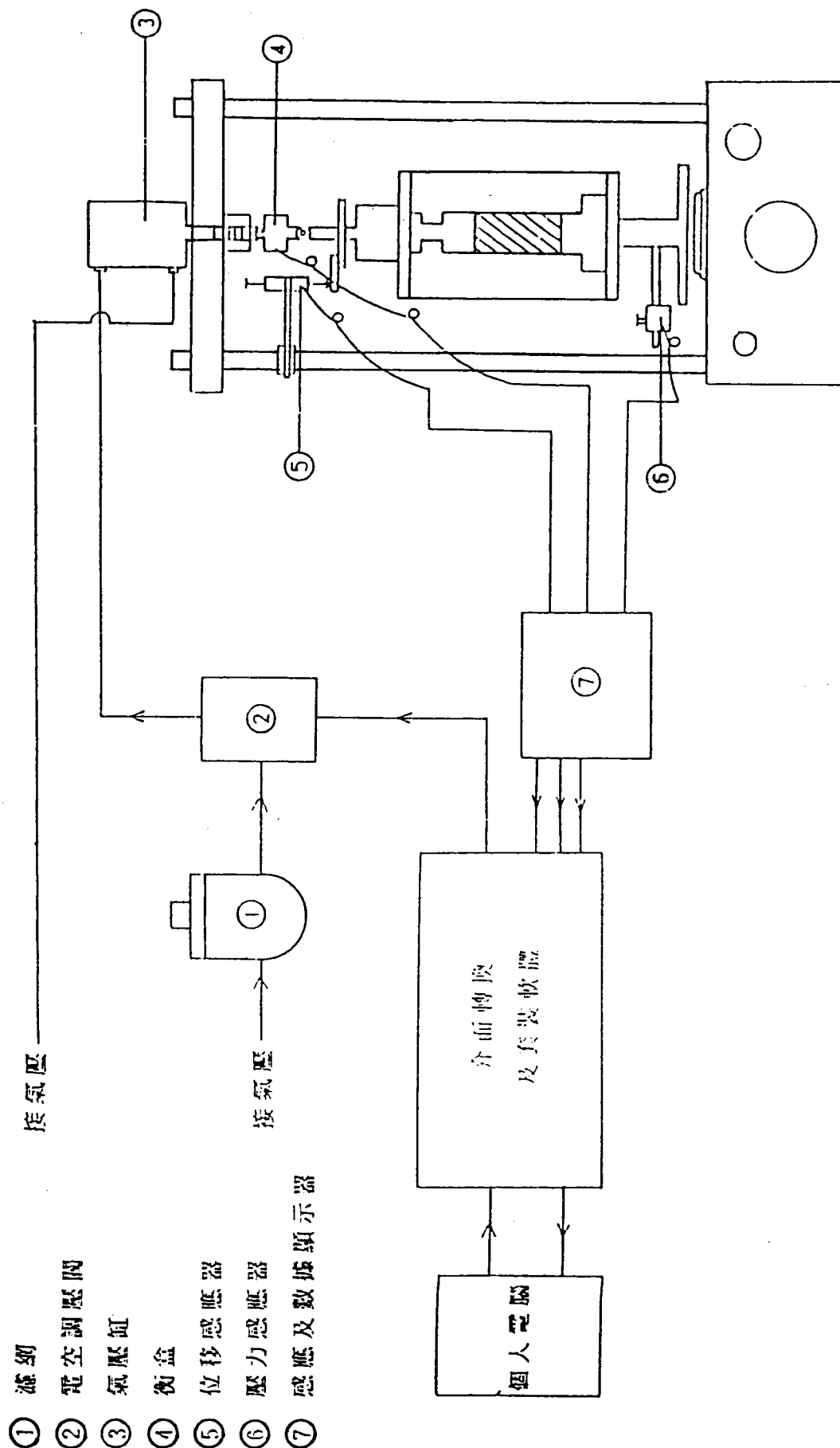


圖 4-8 氣動式反復三軸試驗設備組合示意圖

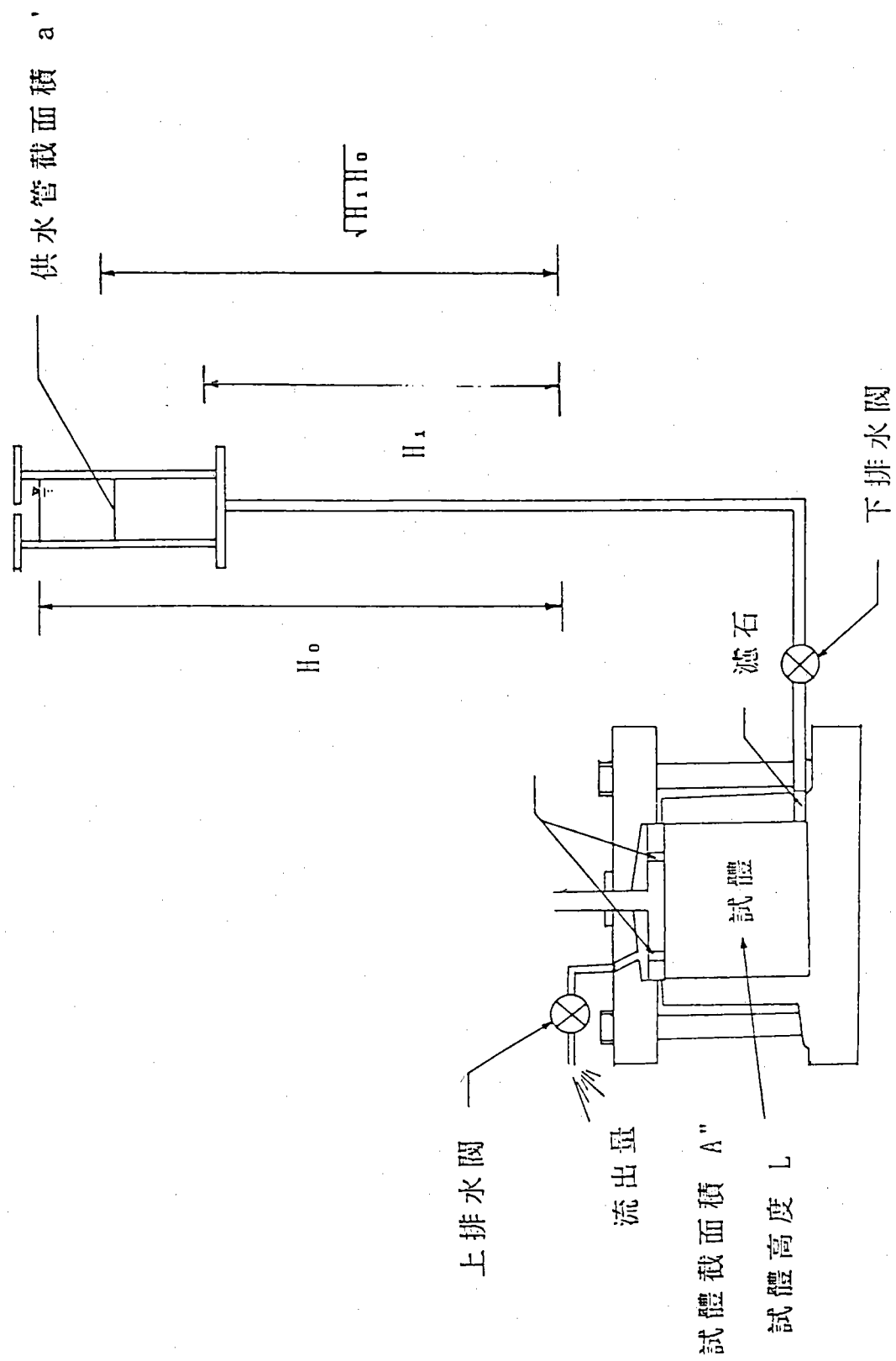
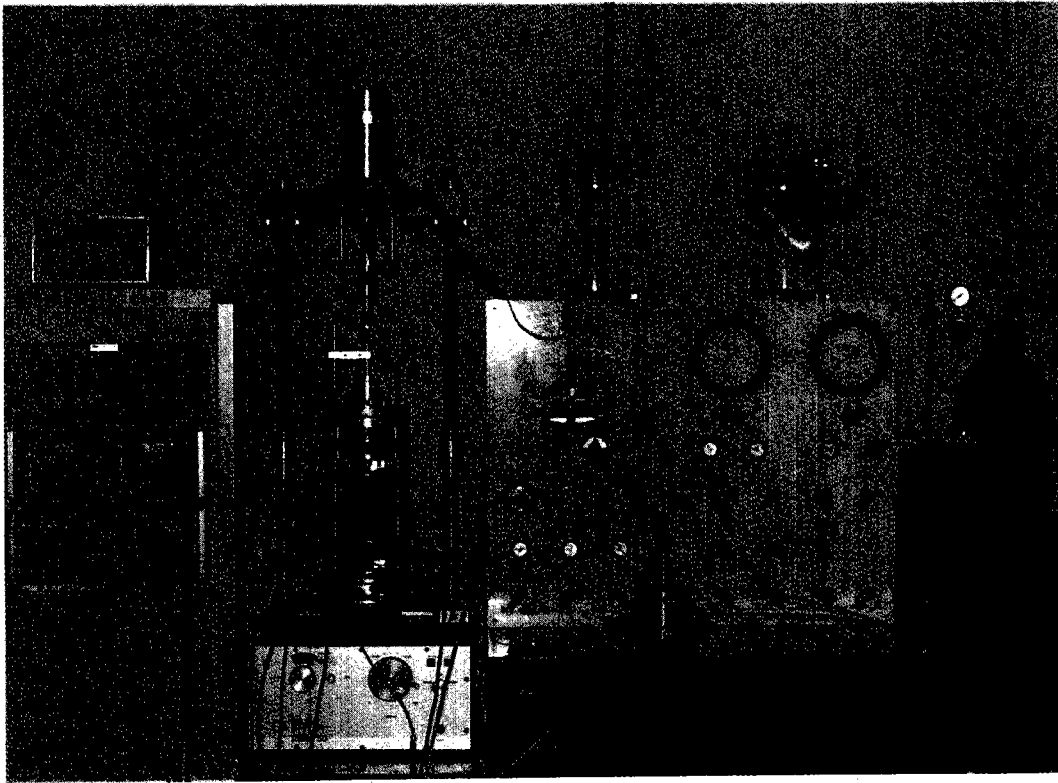


圖 4-9 三向度導電盒滲透試驗設備示意圖

表 4-1 試驗用砂樣基本性質

砂 樣	比 重	D50 (mm)	均勻係數	最 大 乾 密 度 (g/cc)	最 小 乾 密 度 (g/cc)
八里砂	2.681	0.26	1.62	1.635	1.314
台中港砂	2.684	0.23	1.48	1.703	1.399
布袋砂	2.640	0.19	2.30	1.644	1.255
旗津砂	2.695	0.27	1.60	1.550	1.257



照片 3 氣動式反復三軸載重系統組合

第五章 切片觀念之粒狀土壤電阻模式

5.1 相關模式之探討

Arulanandan及Smith[71]利用電路模式(Circuit Model)來表示孔隙填充的不同成份，成功的發展出黏土電性特性與黏土結構之關係。Livingston[72]利用模式建立構造因素，F(Formation Factor)與砂～水混合電介常數， ϵ_m (Dielectirc Constant)關係之理論。

$$\kappa_m = \kappa_s(C) + \kappa_p(1-C) \text{ ----- (5-1)}$$

$$\epsilon_m = \epsilon_s(C) + \epsilon_p(1-C) \text{ ----- (5-2)}$$

其中， κ_m = 砂水混合之導電度； κ_p = 砂土顆粒之導電度； κ_s = 孔隙水之導電度 ϵ_p = 砂土顆粒之電介常數； ϵ_p = 孔隙水溶液之電介常數，隨孔隙流体之特性而變。若顆粒不導電($\kappa_p = 0$)，則式(5-1)可改寫為

$$\kappa_m = \kappa_s(C)$$

$$C = \kappa_m / \kappa_s = 1/F \text{ ----- (5-3)}$$

利用各別土壤的成份分佈與電介常數關係，即可決定參數 C。將式(5-3)代入式(5-2)，可得到

$$\epsilon_m = \epsilon_s \left(\frac{1}{F} \right) + \epsilon_p \left(1 - \frac{1}{F} \right) \text{-----(5-4)}$$

將上式重新整理則可得

$$\frac{\epsilon_m - \epsilon_p}{\epsilon_s - \epsilon_p} = \frac{1}{F} \text{-----(5-5)}$$

但基本上，利用上式來分析土壤之電性特性，首先必須建立混合物間導電特性與電介體之關係。Arulanadan[73]認為混合物的電介常數特性 (Dielectric Properties)，最好是能考慮各別成份分佈所對應之有效截面積來決定較合理。有效電性路徑截面積與長度，由構造因素與孔隙率之關係可求得。Frazer與Ward[74]定義出下列兩項：

1. 曲折率，T(Tortuosity)

電極電流實際不規則之通路徑長度 (L_e) 與近似直線流動途徑即試樣長度 (L_s) 之比值。

2. 縮小係數，d(Diminution coefficient)

有效電極路徑面積 (A_{eff}) 與試樣面積 (A_s) 之比值。

等值電極路徑利用均勻圓柱電極管來得到長度與面積，試樣經由混合電極路徑具有相同之電極體積與電阻，其關係如下所示：

$$T = \sqrt{F \cdot n} \text{-----(5-6)}$$

$$d = \sqrt{n/F} \text{-----(5-7)}$$

另外，Cundall [75]提供一分析模式『個別元素法』企圖以對顆粒個別行為的模擬來了解粒狀土壤的力學行為。初期因元素形狀的選擇導致計算過程缺乏效率，由於圓盤(disc)及圓球(ball)元素的取代

，而增加了個別元素法的可行性。並能藉此與實際試驗結果比較，且由個別元素法所發展的『BALL』及『TRUBAL』程式，在微觀(microscopic)與巨觀(macrosopic)方面都提供了定性及定量的解釋。在探討粒狀土壤材料的力學行為過程中，大部份係以其總體之應力及應變描述之，但對內部顆粒之應力分佈情形則不得而知。近年來有許多學者，Dantu[76]及Wakabayashi[77]利用圓盤狀光感材料(photoelastic disc)於載重過程中分析其應變情形，但費時頗巨。

為深入探討粒狀土壤力學行為之性質，本文嘗試利用Cundall[75]所發展之個別元素法，模擬砂土在空間堆積排列之情形。將其均向壓密至所需之孔隙率，然後利用切片觀念來計算砂土所相對應之電性特性。並進行粒狀土壤電性量測試驗，以評估粒狀土壤組構性質與力學行為之關聯性，同時作為電阻數值模擬比較之依據。

5.2 切片觀念之粒狀土壤電阻模式

切片觀念之粒狀土壤電阻模式[78]是依據砂土顆粒在空間堆積或受外力作用時，顆粒間相對排列的狀況，探討砂土孔隙面積分佈及其所對應之電性特性。

砂土是由許多相接觸的砂顆粒所組成，隨不同之堆積及外力之改變，各顆粒在空間的排列方式以及砂顆粒間接觸力大小和方向亦隨之改變，而達到另一平衡狀態。此種因砂土顆粒間接觸點、關聯數之改變，導致砂土顆粒組構(Fabric)改變為粒狀材料受應力作用特有之現象，傳統之聯體力學觀念或力學模式無法適當描述此機制。本文根據切片觀念以三向度『TRUBAL』程式模擬砂土不同之堆積狀況，建立砂土孔隙面積隨切面之分佈關係。並結合電磁學的觀念，建立砂土在不

同孔隙組合時之電性特性。

5.2.1 基本假設

砂土在空間中之堆積排列方式及位置，及顆粒間之相對位移等相當複雜的機制，這是一般電性數值模擬粒狀土壤最大的困難。本文的切片圓球電阻模式，作了下列四個有關砂顆粒性質及顆粒間電磁反應機制的基本假設。

1. 若圓球顆粒本身為不導電體，而各方向分量電極板間具有平行均勻之電場。則各元素之導電特性，可利用元素顆粒孔隙溶液物質面積之電性來代表。
2. 顆粒在空間堆積排列之方式，為電腦以隨機亂數(Random)將顆粒一個個放入所模擬之Box內，每個顆粒不能相復重疊。
3. 所切片之元素孔隙面積具連續性，則各元素之電性可假想為一等值電阻所替代，而各方向(X_1, X_2, X_3)之電性特性為各個等值電阻之線性代數和。
4. 容器常數為各方向分量斷面積與其長度之比值，不受邊界因素之影響。

5.2.2 粒狀土壤電阻模式之推導

Cundall [79]發展出各別元素法來研究粒狀土壤之力學行為，本研究即利用其所發展之三向度『TRUBAL』程式，以計算粒狀顆粒在空間排列組合堆積之位置。若顆粒之大小、形狀已知，則可求得各個顆粒在空間所代表之球體方程式，如下式所示

$$\frac{(X_1 - X_{1i})^2}{a^2} + \frac{(X_2 - X_{2i})^2}{b^2} + \frac{(X_3 - X_{3i})^2}{c^2} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (5-8)$$

式中， a, b, c ：表示顆粒各軸之半軸長； X_{1i}, X_{2i}, X_{3i} ：表示顆粒相對於坐標軸之中心位置（坐標系統如圖 5-1所示）； n ：空間中顆粒之數目。為求取 X_1, X_2, X_3 各方向分量所代表之電性特性，而一般粒狀土壤孔隙率大小為其性質之重要指標。所以首先可利用切片方式分析求取各方向元素孔隙面積之大小。

為配合『TRUBAL』程式分析及簡化計算，顆粒各軸長取等長（即 $a=b=c$ ，為圓球顆粒）進行分析。考慮顆粒大小之影響，各方向分量之切片元素厚度 ΔL_{xi} 必須小於顆粒之最小粒徑 d_{min} ，以增加其分析之精度。

$$\Delta L_{xi} < d_{min} \quad (5-9)$$

為便於計算， X_1, X_2, X_3 各方向分量可分割成 s 等分之元素，即

$$\begin{cases} \Delta L_{x1} = \Delta L_{x2} = \Delta L_{x3} \cdots = \Delta L_{xs} \\ \Delta L_{x1} + \Delta L_{x2} + \Delta L_{x3} + \cdots + \Delta L_{xs} = L_{xi} \end{cases} \quad (5-10)$$

式中， $i = 1, 2, 3$ ； L_{xi} 表示 X_1, X_2, X_3 各方向之長度，本文取一方形盒（Box）試樣（即 $L_{x1} = L_{x2} = L_{x3}$ ）。若各元素斷面積為 A_{xi} ，而以各元素之中心切面代表各元素圓球之分佈特性。則利用以下之計算可求得各元素孔隙斷面積之分佈狀況。

$$R_x = a^2 - (X_1 - X_{1i})^2 \geq 0 \quad (5-11)$$

其中, $i=1,2,3; j=1,2,3,\dots,n$ 。若 $R_x \geq 0$, 則表示空間中之圓球與所指定之切面有相交。反之, 則各元素之中心切面與圓球不相交。所以, X_i 各方向各元素所伴隨之孔隙斷面積, 可由以下各式加以計算

元素1 ($0 \sim \Delta L_{x1}$)

$$\begin{cases} X_i = \Delta L_{x1} / 2, i=1,2,3 \\ \frac{(X_1 - X_{11})^2}{a^2} + \frac{(X_2 - X_{21})^2}{a^2} + \frac{(X_3 - X_{31})^2}{a^2} = 1 \end{cases} \quad (5-12)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n_1$; n_1 表示各方向元素 1 所相切之圓球數目。解式 (5-12) 之聯立方程式, 即可計算 $0 \sim \Delta L_{x1}$ 斷面元素與圓球所相切顆粒斷面積之和, A_{sx1} 。則孔隙之斷面積和 A_{px1} , 可以由圖 5-2 表示。所以, 圓球孔隙斷面積可由下式求得

$$A_{x1} - A_{sx1} = A_{px1} \quad (5-13)$$

同理, 可求得元素 2 $\sim s$ 所相對應之孔隙斷面積

元素2 ($\Delta L_{x1} \sim \Delta L_{x1} + \Delta L_{x2}$)

$$\begin{cases} X_i = \Delta L_{x1} + \Delta L_{x2} / 2, i=1,2,3 \\ \frac{(X_1 - X_{11})^2}{a^2} + \frac{(X_2 - X_{21})^2}{a^2} + \frac{(X_3 - X_{31})^2}{a^2} = 1 \end{cases} \quad (5-14)$$

其中, $i=1,2,\dots,n_2$ 。

$$A_{x1} - A_{sx2} = A_{px2} \quad (5-15)$$

元素3 ($\Delta L_{x1} + \Delta L_{x2} \sim \Delta L_{x1} + \Delta L_{x2} + \Delta L_{x3}$)

$$\begin{cases} X_i = \Delta L_{x1} + \Delta L_{x2} + \Delta L_{x3} / 2, i=1,2,3 \\ \frac{(X_1 - X_{11})^2}{a^2} + \frac{(X_2 - X_{21})^2}{a^2} + \frac{(X_3 - X_{31})^2}{a^2} = 1 \end{cases} \quad (5-16)$$

其中, $i=1,2,\cdots,n_s$ 。

$$\begin{aligned} A_{x1}-A_{sx3}=A_{px3} & \text{-----} (5-17) \\ & \vdots \\ & \vdots \end{aligned}$$

元素 $s(\Delta L_{x1}+\Delta L_{x2}+\cdots+\Delta L_{xs-1}\sim\Delta L_{x1}+$
 $\Delta L_{x2}+\cdots+\Delta L_{xs})$

$$\begin{cases} X_i=\Delta L_{x1}+\Delta L_{x2}+\cdots+\Delta L_{xs}/2, i=1,2,3 \\ \frac{(X_1-X_{1i})^2}{a^2} + \frac{(X_2-X_{2i})^2}{a^2} + \frac{(X_3-X_{3i})^2}{a^2} = 1 \end{cases} \text{-----} (5-18)$$

其中, $i=1,2,\cdots,n_s$ 。

$$A_{x1}-A_{sx3}=A_{px3} \text{-----} (5-19)$$

計算式(5-12)~(5-19)即可求得 X_i 方向各元素孔隙面積 A_{px1} , A_{px2} ,
 $\cdots, A_{pxs}$ 之分佈。所以利用『TRUBAL』程式, 可依隨機亂數方式, 自動由電腦製造產生各種不同大小之圓球顆粒級配之組合。然後進行等向壓密, 等到所須之孔隙時即可控制程式, 得到空間中各個圓球所在位置。因不同粒狀圓球空間位置組合不同, 則其相對應之孔隙組合亦有不同的孔隙面積分佈, 利用此孔隙分佈特性即可進一步分析各方向分量之電性特性。

每一元素孔隙導電之斷面積, 厚度已知。依Fricke[39]之推導若顆粒為不導電, 則粒狀土壤導電大小可由孔隙溶液之導電特性來表示

$$\kappa_m \cdot U = n \cdot \kappa_s \cdot E \text{-----} (5-20)$$

式中, κ_m , κ_s =表示砂土顆粒與水混合時及孔隙溶液之導電度大小;
 U =電場電位; E =電場強度; n = 孔隙率。所以電性數值模擬分析

每一元素時，可將孔隙假想為一等值電阻。由電阻之定義即可求出相對應方向 X_i 各元素之電阻 $R_{(x_i)j}$ ，可由以下來表示：

$$R_{(x_i)1} = \rho \frac{\Delta L_{x1}}{A_{Px1}} \text{-----} (5-21)$$

$$R_{(x_i)2} = \rho \frac{\Delta L_{x2}}{A_{Px2}} \text{-----} (5-22)$$

$$R_{(x_i)3} = \rho \frac{\Delta L_{x3}}{A_{Px3}} \text{-----} (5-23)$$

$$\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ R_{(x_i)s} = \rho \frac{\Delta L_{xs}}{A_{Pxs}} \text{-----} (5-24) \end{array}$$

式中， $R_{(x_i)j}$ ：各方向各切片元素所代表之等值電阻， Ω (ohms)； $i=1, 2, 3$ ； $j=1, 2, 3, \dots, s$ ； ρ ：孔隙物質之電阻係數，ohms-cm；若孔隙介質為均勻物質，則電阻係數為常數。

利用電學之基本原理，在一均勻電場區域裡，各 X_i 方向粒狀顆粒之電性特性，可視為各切片元素孔隙所代表電阻， $R_{(x_i)j}$ 串聯線性代數之和（如圖 5-3所示）。由圖 5-3可計算出各 X_i 方向之等值電阻， $R_{(x_i)}$ ，如下式所示

$$\sum_{j=1}^s R_{(x_i)j} = R_{(x_i)}, i=1, 2, 3 \text{-----} (5-25)$$

考慮孔隙流通路徑所造成曲折效應之影響，Das[80], Hillel[81]將曲折率， T 定義為『孔隙孔道之平均有效長度(L_e)與土樣長度(L_s)之比值』，所以曲折率為多孔體(如砂土)無因次幾何參數，其比值恆大於1。

Carman[82]依據水力半徑(Hydraulic Radius)乃一特性長度參數

(Characteristic Length) 假定所擬想之孔道相關性。推導出絕對滲透係數 (Absolute Permeability), K 與幾何性質關係理論。Kozney - Carman 公式如下所示

$$K = \frac{1}{C_s S_s^2 T^2} \frac{e^3}{1+e} \quad \text{-----} (5-26)$$

式中, C_s = 形狀係數; S_s = 顆粒比表面積; T = 曲折率。Das [80] 建議對粒狀土壤而言曲折率, T 可取為 $\sqrt{2}$, 即

$$L_e = \sqrt{2} \cdot L_s \quad \text{-----} (5-27)$$

若圓球之電性構造因素 F 與孔隙率 n 之關係, 可由下式表示

$$F = x_1 + x_2 \cdot n + x_3 \cdot n^2 \quad \text{-----} (5-28)$$

式中, x_1, x_2, x_3 為相關之常數。

另利用 Frazer 與 Ward [74] 所定義之曲折率 T 與構造因素 F 之關係式, 將上式代入式 (5-6), 即可求出有效電極電流通路徑長度 (L_e)

$$L_e = \sqrt{x_1 + x_2 \cdot n + x_3 \cdot n^2} \cdot L_s \quad \text{-----} (5-29)$$

若考慮孔隙間因顆粒堆積所產生之曲折特性, 可將式 (5-27)、(5-29) 分別代入式 (5-25), 則可得到各方向 X_i 之有效等值電阻 (R_{eff}) _{i}

$$(R_{eff})_i = (L_e / L_s) \cdot R(x_i) \quad \text{-----} (5-30)$$

本研究在數值計算分析時，將分別比較探討式(5-27)與式(5-29)，對有關孔隙曲折效應所造成之影響及其適應性。依據視導電度 κ_{app} (Counductivity)之基本定義[13]，將式(5-30)代入，即可求出 X_i 方向視導電度之數值解 $(\kappa_{app})_{xi}$

$$(\kappa_{app})_{xi} = \frac{1}{(R_{eff})_i} \left(\frac{L_{xi}}{A_{xi}} \right)_{eff} \text{-----} (5-31)$$

式中， $i=1,2,3$ ； $(L_{xi}/A_{xi})_{eff}$ ：有效電極常數， $1/\text{cm}$ 。孔隙物質溶液之導電度 κ_s ，可由其電阻係數 ρ 之導數求得。

$$\kappa_s = 1/\rho \text{-----} (5-32)$$

依Archie[15]構造因素之定義，重新整理即可分析計算出試樣各 X_i 方向之電性構造因素 F_{xi}

$$F_{xi} = \kappa_s / (\kappa_{app})_{xi}, i=1,2,3 \text{-----} (5-33)$$

對 X_1, X_2, X_3 各方向所求得之構造因素，取平均值即可計算出平均構造因素， F_{ave} 。

$$F_{ave} = (F_{xi})/3, i=1,2,3 \text{-----} (5-34)$$

5.3 數值模擬之描述

數值模擬所採用圓球顆粒特性如表 5-1所示。在程式 (Program) 並未使用單位，全部採用無因次之數值計算分析 (但亦可以已知曉之物理量參數代入)。圓球顆粒以隨機方式產生，放入所指定之模擬空間，圓球顆粒相互間並沒有接觸。與參考模擬空間坐標系統原點 0 相關之三個面保持固定不動，然後在 X_1, X_2, X_3 方向 (如圖 5-1所示) 以相同之應變速度 (如 0.001) 進行等向壓密試驗作用，以獲得所需要之孔隙大小，此時可得到圓球顆粒在空間排列堆積之位置，然後在進行進行切片分析。本文數值模擬所採用三種不同直徑圓球顆粒及幾種組合大小分佈 (如表 5-2所示)。

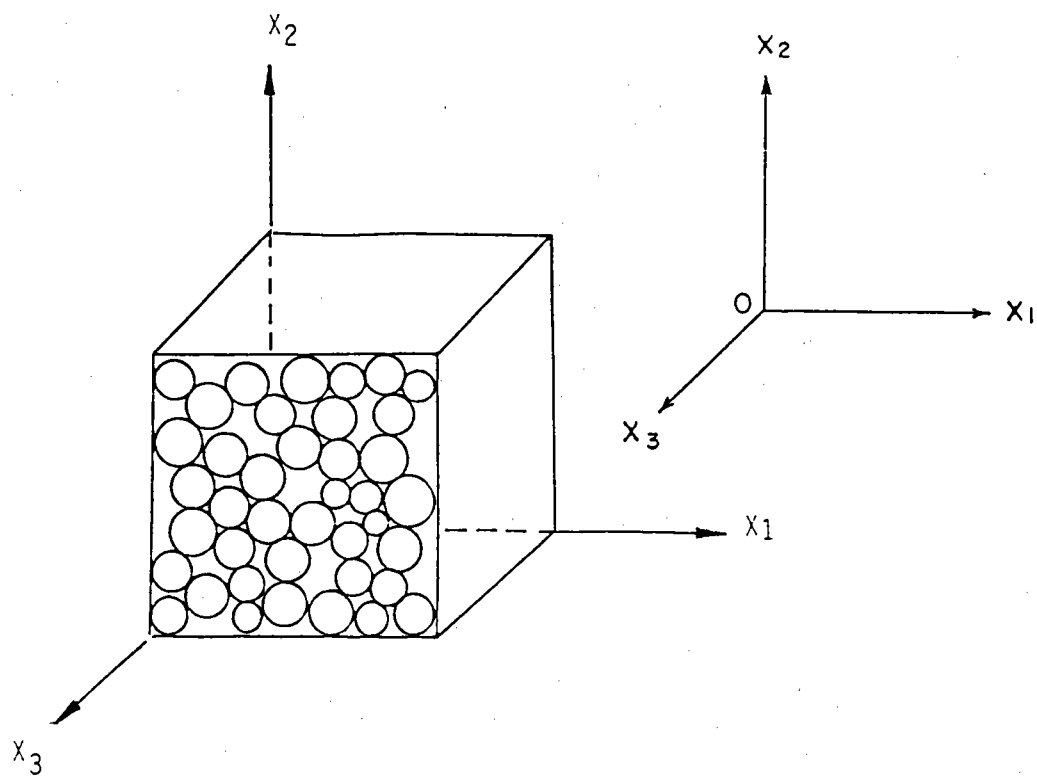


圖 5-1 模擬所採用之坐標系統與圓球立方形試樣示意圖 [78]

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{元素斷面積} \\ A_{x1} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{圓球顆粒} \\ \text{斷面積} \\ A_{sx1} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{孔隙} \\ \text{斷面積} \\ A_{px1} \\ \hline \end{array}$$

圖 5-2 元素孔隙斷面積計算示意圖

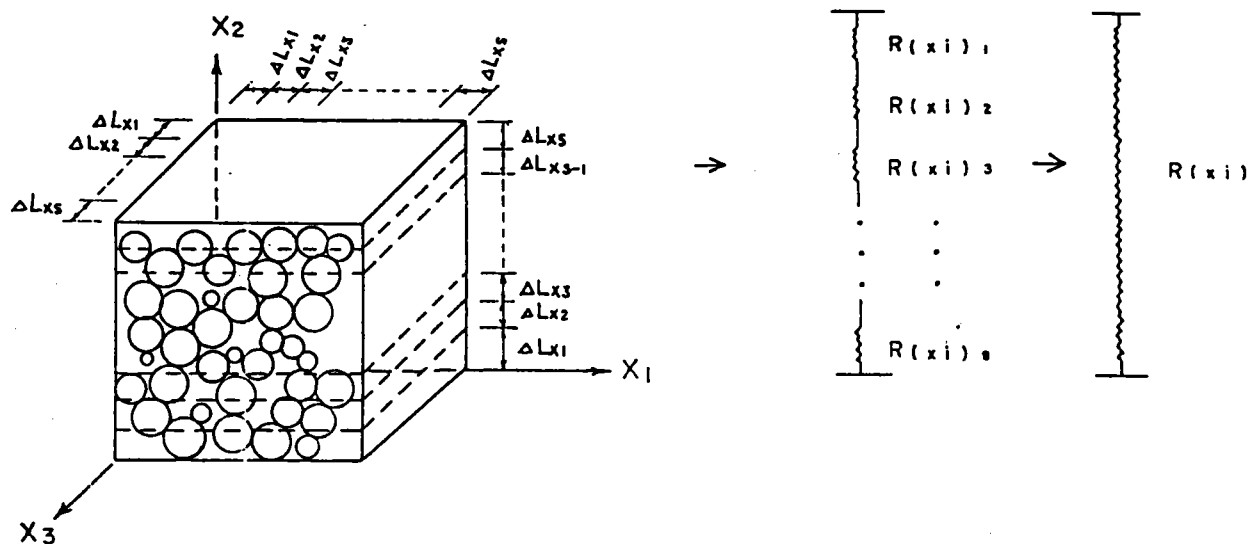


圖 5-3 各方向分量切片元素等值電阻串聯之計算示意圖 [78]

表 5-1、數值模擬圓球顆粒之特性

所有接觸之剪力勁度：	1×10^8
正向勁度：	2×10^8
密度	1000
摩擦係數：	1.0
阻尼	0.5 at 0.25 Hz
顆粒數目：	155
顆粒大小：	含半徑 10, 15, 20

表 5-2、圓球顆粒所採用之大小分佈

試樣 圓球 編號 半徑	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4	RUN 5
10之個數	155	--	--	50	20
15之個數	--	155	--	50	135
20之個數	--	--	155	33	--

第六章 試驗結果之分析與討論

6.1 構造因素與孔隙率之基本關係

在粒狀土壤初始組構導電度之研究，利用三向度導電盒之試驗，可量測到試體的兩組水平導電度(κ_{h1} , κ_{h2})及一組垂直導電度(κ_v)。因溫度效應修正已經設定在量測系統上，所以計算時不必在進行修正，祇須針對有效容器常數給已修正即可(如公式(3-5.c, 3-5.d)所示)。最後配合導電度計所量測之孔隙溶液之導電度(κ_s)，利用(2-5)式即可推求出砂土初始組構兩組水平方向之構造因素， F_{h1} 及 F_{h2} 。砂土導電度系統在水平方所量測到之導電度值 κ_{h1} 及 κ_{h2} ，將代表粒狀砂土組構在水平橫向之排列組合與孔隙之特性。

$$F_{h1} = \frac{\kappa_s}{\kappa_{h1}} \quad \text{及} \quad F_{h2} = \frac{\kappa_s}{\kappa_{h2}} \quad \text{----- (6-1)}$$

在垂直方向砂土初始組構導電度之量測，因受垂直向電極板距離改變所影響，所以必須先了解電極板間距與有效容器常數之關係(如公式(3-5.b)所示)，然後加以修正。經無因次化計算((2-4)式)即可推求砂土垂直構造因素， F_z 。

$$F_v = \frac{\kappa_s}{\kappa_v} \quad \text{----- (6-2)}$$

依Dafalias et al.[36]考慮顆粒在垂直軸正交之平面上具有橫向之

等向性， $F_{h1} = F_{h2} = F_{ho}$ ，另令 $F_v = F_{vo}$ ，則可推求初始平均構造因素， F_{ave} ((2-20)式)。

$$F_{ave} = \frac{F_{h1} + F_{h2} + F_v}{3} = \frac{2 \cdot F_{ho} + F_{vo}}{3} \text{ ---- (6-3)}$$

若依照圖 6-1所示之顆粒沉積方式，則在水平方向，因導電路徑較短，故有著較大之導電度，經過換算所得的構造因素，垂直方向者將大於水平方向（如圖 6-2a 所示）。由此可推論，多重篩震降法準備之試體，其顆粒長軸趨於水平方向。此與前人研究結果 (Oda [8], Mulilis et al. [29], Mitchell et al. [7]) 對砂顆粒沉積方式之描述相同，另一方面，濡濕搗固法試體之試驗結果，則見於圖 6-2b。而由圖 6-3之結果顯示，兩組水平構造因素值頗為接近，可由此證實橫面等向性假設之合理性。

6.2 砂土異向性之特性

砂土組構產生異向性主要是因為顆粒個體之方向性、顆粒接觸點之方向性及外力之異向性所引起 (Casagrande et al. [19], 李建中 [14])。Kutter [37] 採用了一個異向指數 (Anisotropy Index) A ， A 之定義如 (2-24) 式所示，來描述砂土之異向性行為，當 A 等於或接近於 1.0 時，表示砂土組構較趨於等向性，砂土顆粒軸長比 $PR_{ave} \approx 1.0$ ，顆粒長軸指向 (Orientation of Particle) 已旋轉某個角度。依 Dafalias et al. [36] 之研究砂土組構呈現等向性時，其平均方位角為

54.74°；當 A 小於或大於 1.0 時，表示砂土組構趨於非等向性，顆粒軸長比 $PR_{ave} < 1.0$ ，顆粒長軸指向趨於水平或垂直方向。

6.3 平均構造因素與相對密度關係之評估

組構性質中最常被用來描述粒狀土壤各種性質者為相對密度，但其為一純量 (Scalar) 並且只說明了緊密程度。為使電性量測結果能夠更廣泛之應用，本研究亦定義一無方向性之砂土平均構造因素 (如 (6-3) 式)，以建立導電度量測結果與一般粒狀土壤相對密度間之關係。對砂土而言平均構造因素僅是砂土孔隙與顆粒形狀之函數。

當砂土之相對密度低時，孔隙比較大，此時具有導電性之孔隙水佔有較大之斷面積，故此時砂土之電阻係數 (Resistivity) 較低，即導電度較高 (見 (2-3) 式)，而有較低之構造因素。當砂土之相對密度高時，孔隙比較小，此時具有導電性之孔隙水佔有較小之斷面積，故此時砂土之電阻係數較高，即導電度較低，而有較高之構造因素。由 (6-3) 式可推求出平均構造因素， F_{ave} 與相對密度之關係，由此可提供利用電性量測之結果，以描述或預測粒狀土壤組構緊密程度之特性。本研究台中港砂相對密度， $D_r\%$ 與構造因素， F_{ave} 之關係如圖 6-5 所示，可表示為：

$$D_r = -376.83 + 124.64 F_{ave}, R = 0.871 \text{ ----- (6-5)}$$

6.4 砂土顆粒形狀與構造因素之關聯性

為了解粒狀砂土顆粒之形狀及大小，利用電子掃描式顯微鏡 (SEM)，針對四種砂樣進行分析。照片 4~7 為四種砂樣經不同倍數放大之情形。顆粒平均軸長比 PR_{ave} ，可依 Oda [6] 及 Dafalias et al. [36] 建議方式求得，其步驟如下所示：

1. 利用掃描式顯微鏡照像，將砂土顆粒投影在相片上。
2. 量測外視最長軸長 (Apparent Longest Axis) L_1 及外視最短軸長 (Apparent Shortest Axis) L_2 ，如圖 6-4 所示。
3. 計算軸長比， $PR_i = (L_2/L_1)_i$ 及 $PR_{ave} = (1/n') \sum (L_2/L_1)_i$ ， $0 < PR_{ave} < 1$ ，式中， n' 為量測之顆粒數目。(註：當 $PR_{ave} \approx 1.0$ 時，表示顆粒接近圓形。

表 6-1 為砂樣經電子顯微鏡照像後，量測軸長比之結果。

經由電子顯微鏡 (SEM) 所求得之平均軸長比， PR_{ave} ，結合第二章構造因素基本理論之推導，由式 (2-10.a) 可得到 S (Shape Factor)，然後代入 (2-22) 式即可計算出砂土顆粒平均形狀因素， f_{ave} (Average Form Factor)，如表 6-2 所示；由此亦可推得構造因素與孔隙率關係式，如圖 6-7 所示，由計算結果顯示：平均構造因素可有效消除砂土顆粒及試體準備所導致之異向性，不同顆粒平均形狀因素所計算之平均構造因素相當一致。

由表中結果可歸納出：布袋砂 $PR_{ave} = 0.715$ 最大，八里砂 $PR_{ave} = 0.654$ 最小；不同砂樣，其構造因素隨孔隙率變化之斜率值大小亦不同 (即 S 及 f_{ave} 值)，亦即 PR_{ave} 愈大，砂土顆粒愈圓滑其 S 值愈小；另計算所得之平均構造因素也有相同之變化趨勢。故可由砂樣之軸長比、平均形狀因素的大小，解釋其平均構造因素隨孔隙率變化趨勢之差

異。

6.5 台灣西部海岸沉泥質砂性土壤之動態特性

依據港研所[68]研究顯示：台灣西部沉泥質砂性土壤之動態性質與剪應變之關係趨勢大致與一般純淨砂相同。圖 6-8及圖 6-9所示大致可分別代表台灣西海岸沉泥質砂性土壤之剪力模數及阻尼比特性。

6.6 砂土最大剪力模數與構造因素之關係

一般砂性土壤之剪力模數在剪應變低於 $10^{-3}\%$ 時將趨於最大值，最大剪力模數 G_{max} 一般可以下列關係式表示：

$$G_{max} = A F(e) (\bar{\sigma}_o)^n \text{ ----- (6-6)}$$

式中， A ， n 為常數； $\bar{\sigma}_o$ 為平均有效圍壓； $F(e)$ 為孔隙比 e 之函數。利用Hardin & Richart[42]提出 $F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$ 之函數型式，表示砂土剪力模數與孔隙比之關係。本研究依據台中港原狀土樣之共振柱試驗(採用多階段壓密試驗)結果分析，求得 A ， n 之平均值，分別為 $A=420$ ， $n=0.51$ 如下式所示：

$$G_{max} = 420 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\bar{\sigma}_o)^{0.51} \text{ ----- (6-7)}$$

式中， G_{max} 及 $\bar{\sigma}_o$ 皆以 kg/cm^2 為單位。利用(6-4)式可推求出孔隙比， e 與平均構造因素， F_{ave} 之關係，如下式所示：

$$e = 2.209 - 0.427 F_{ave} \text{ ----- (6-8)}$$

若考慮 $\bar{\sigma}_o = 1 \text{ kg/cm}^2$ ，則可將 (6-8) 式代入 (6-7) 式，經重新整理即可得到平均構造因素與最大剪力模數之關係，如下式所示：

$$G_{max} = 179.34 \cdot \frac{(0.091 - F_{ave})^2}{(7.516 - F_{ave})} \text{ ----- (6-9)}$$

利用 (6-9) 式，即可由構造因素來預測描述砂土之最大剪力模數。同理可推求出不同 $\bar{\sigma}_o$ ($\bar{\sigma}_o = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ kg/cm}^2$) 所對應 G_{max} 與 F_{ave} 之關係，如圖 6-10 所示。

另一般而言，最大剪力模數與孔隙比、圍壓之關係，尚可以以下式表示：

$$G_{max} = 1000 \cdot K_{zmax} (\bar{\sigma}_o)^2 \text{ ----- (6-10)}$$

式中， G_{max} ， $\bar{\sigma}_o$ 單位為磅/平方英尺； K_{zmax} 與孔隙比、沉積層歷史、顆粒形狀與現場應力有關。若考慮 $\bar{\sigma}_o$ 之單位換算，將 (6-9) 式與 (6-10) 式合併，即可計算出 F_{ave} 與 K_{zmax} 之關係，如圖 6-11 所示。所以利用非破壞性之電性檢測方式，可據以預估土體之最大剪力模數。

6.7 滲透係數與電性參數關係之探討

本研究利用蕭仲光 [70] 所建議以平均構造因素， F_{ave} ，比表面積，SSA 及平均形狀因素， f_{mean} 等組合之電性參數來描述滲透係數，

其形式如下：

$$\frac{1}{F_{ave} \cdot SSA^2 \cdot f_{mean}} \text{-----} (6-11)$$

其中， F_{ave} ：平均構造因素； SSA ：比表面積， cm^2/cm^3 ； f_{mean} ：平均形狀因素。

利用(6-11)式來定量其與滲透係數之相關性，應能得到一良好的預測結果。有關平均形狀因素(f_{mean})之求取，可利用圖 6-4之平均構造因素(F_{ave})與孔隙率(n)所建立之關係式，求得 f_{mean} 。

$$f_{mean} = -\log(F_{ave}) / \log(n) \text{-----} (6-12)$$

比表面積之求法，本研究採用 Arulanandan 等人[10]所建議之方法，利用篩分析得出之顆粒分佈曲線結果加以計算，公式如下：

$$SSA = 6 \cdot \left[\frac{W_1 - W_0}{d_1} + \frac{W_2 - W_1}{d_2} + \text{-----} \right. \\ \left. \text{---} \frac{100 - W_n}{d_n} \right] / 100 \text{-----} (6-13)$$

其中， $W_0, W_1, \text{-----}, W_n$ ：過篩百分比； $d_1, d_2, \text{-----}, d_n$ ：介於 W_n 與 W_{n-1} 之平均粒徑。

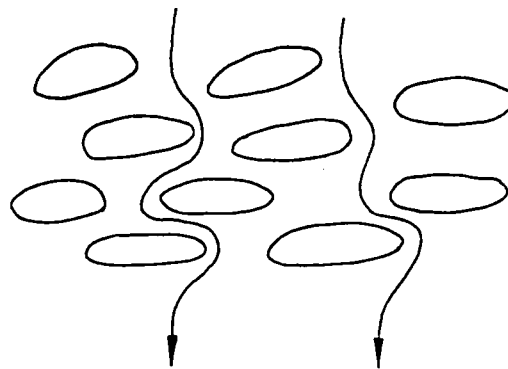
將圖 4-1之曲線加以切割，使其線段近乎直線，然後取其每段之平均粒徑及過篩百分比，代入(6-13)式計算即可推求出砂樣之比表面積(SSA)，本實驗用砂，其 SSA 值計算之結果，台中港砂為 $250 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 。

本研究砂樣之滲透係數可利用(6-11)式所定義之電性參數，由圖 6-12推求出。經計算其結果實驗值與電性參數計算值相當符合，如表

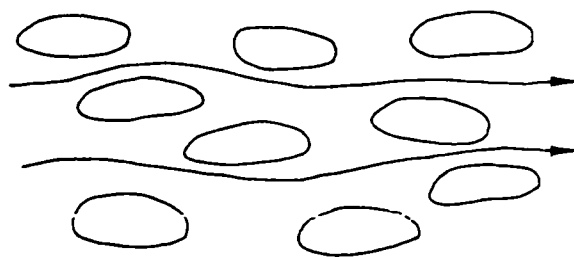
6-3所示。(詳細計算結果請參考附錄一)

目前有關滲透係數之量測有兩種方式，一為由實驗室以變水頭或定水頭測定，細粒土壤之滲透係數則以壓密試驗間接計算而得，另一則為現地透水試驗。前者受土壤取樣擾動之影響，真正之滲透係數不易求得。而後者雖能獲得較正確之滲透係數，但過程繁鎖，且耗費大。因此，若能利用電性參數之量測即可取代透水試驗，相當經濟實惠。

。



垂直方向



水平方向

圖 6-1 飽和砂土顆粒之長軸趨於水平排列時，垂直與水平方向之電通路

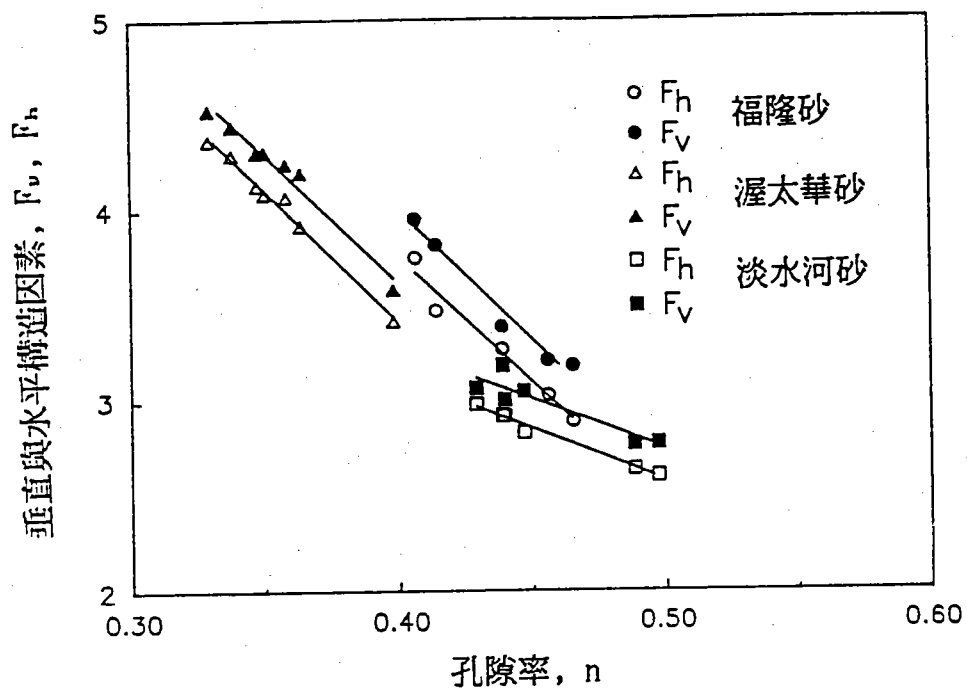


圖 6-2a 導電盒試驗中不同砂樣之 MSP法試體，垂直及水平構造因素與孔隙率之關係 [13]

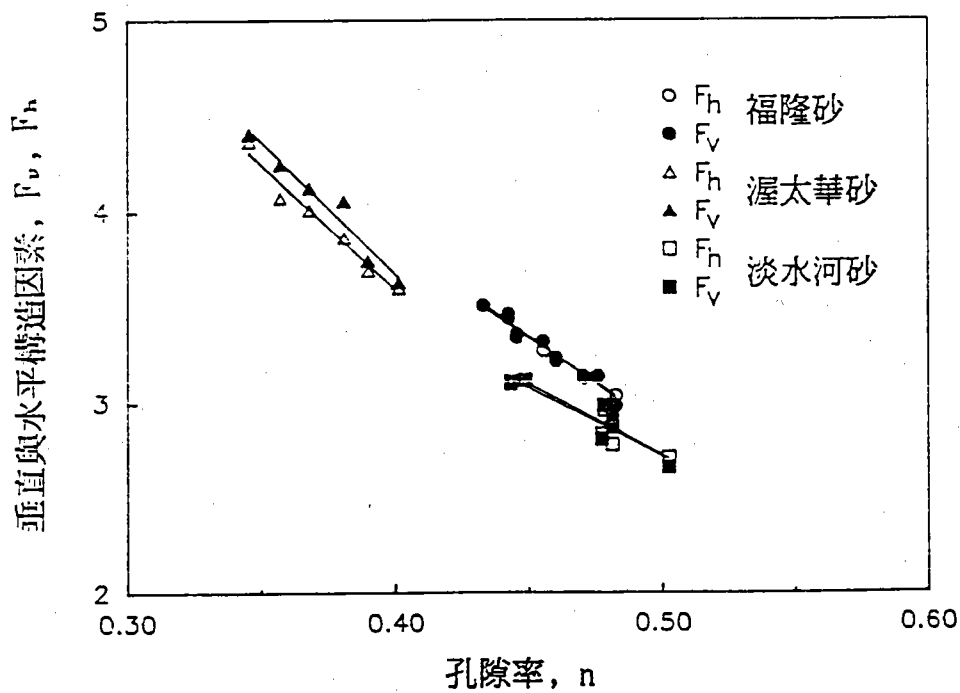


圖 6-2b 導電盒試驗中不同砂樣之 MT 法試體，垂直及水平構造因素與孔隙率之關係 [13]

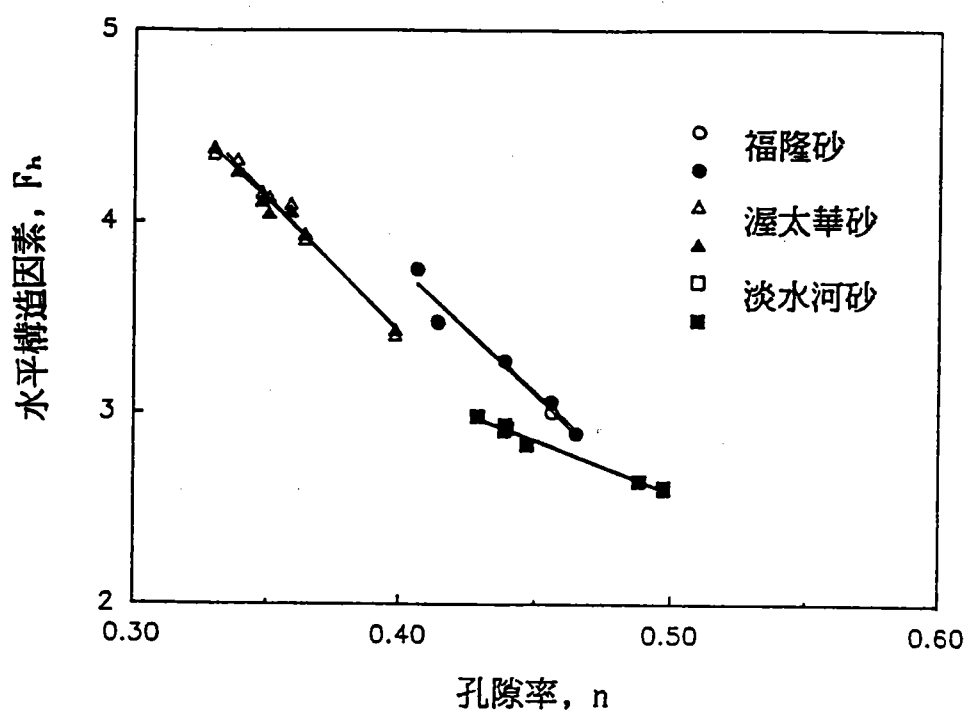


圖 6-3a 導電盒試驗中不同砂樣之 MSP 法試體，其兩組水平構造因素與孔隙率之關係 [13]

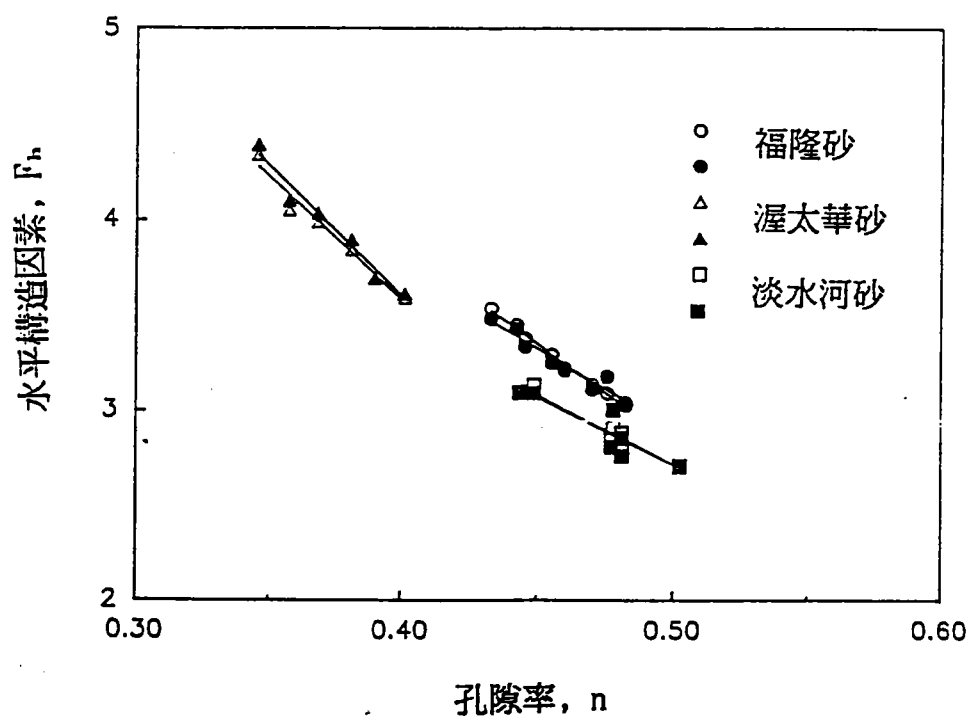


圖 6-3b 導電盒試驗中不同砂樣之 MT 法試體，其兩組水平構造因素與孔隙率之關係 [13]

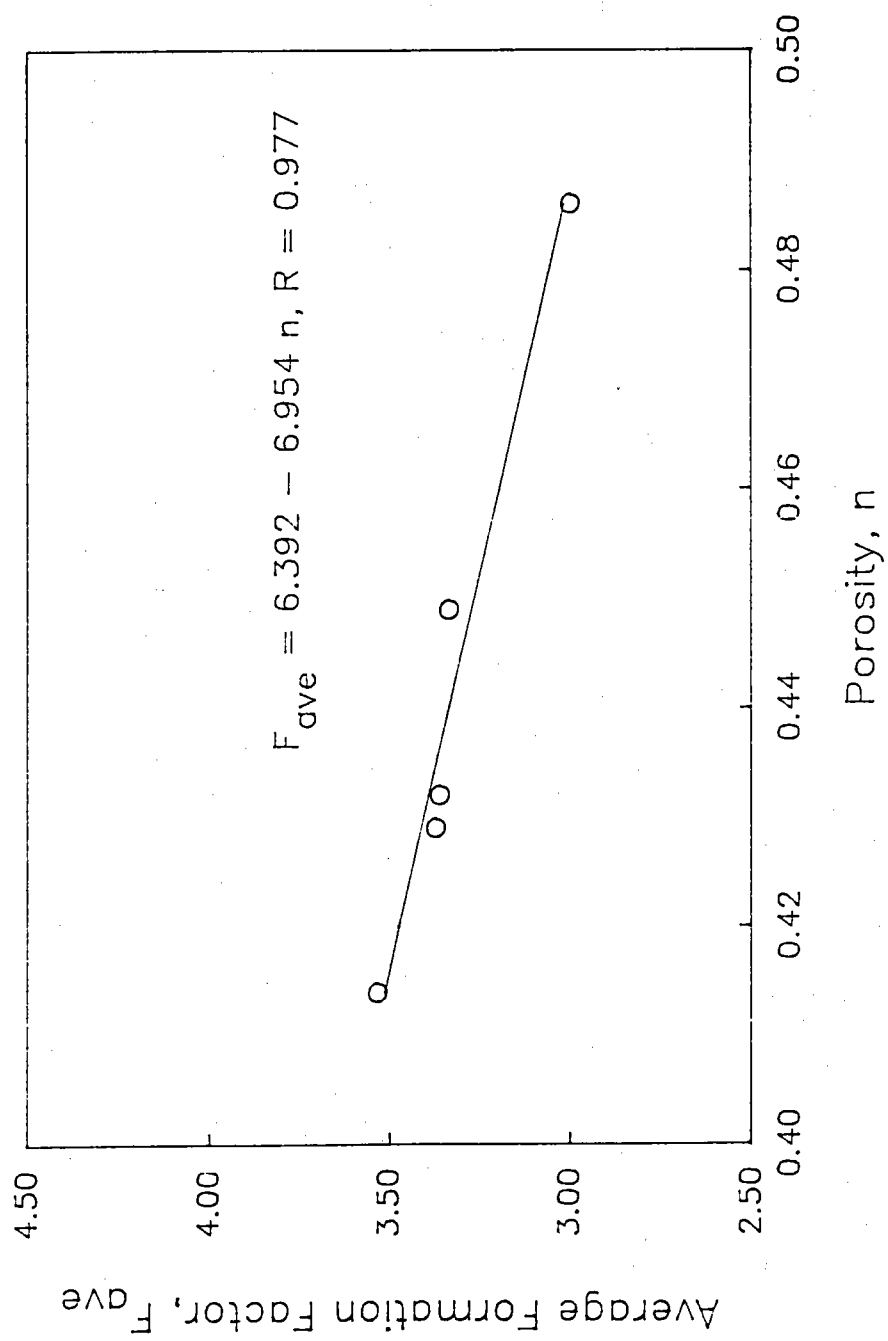


圖 6-4 台中港砂平均構造因素與孔隙率之關係

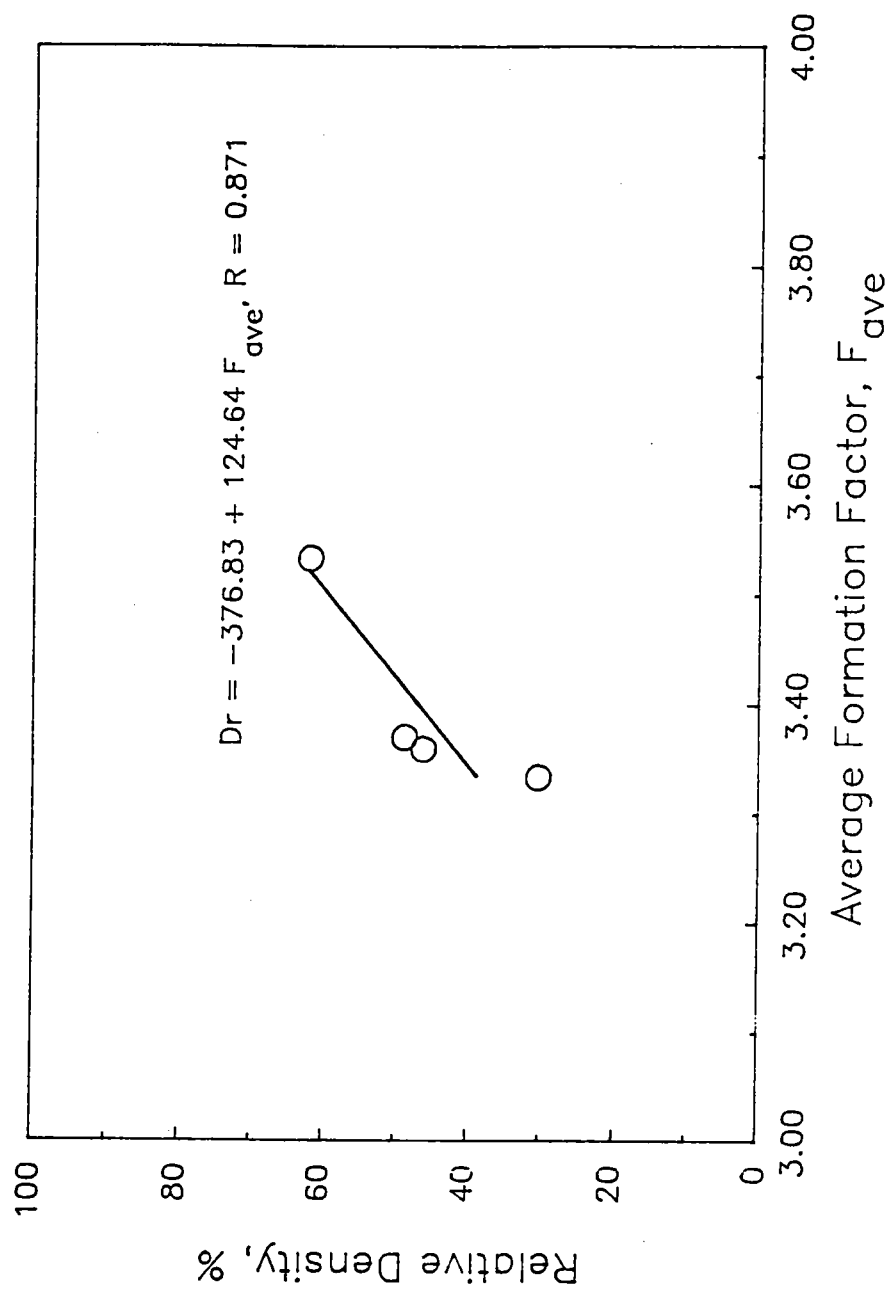
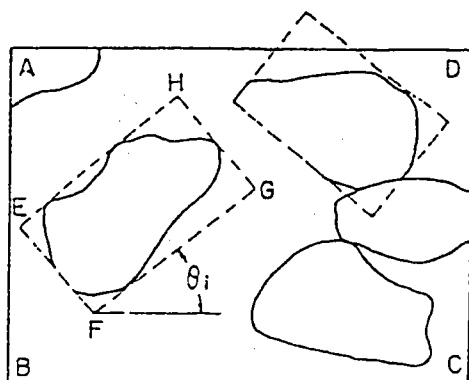


圖 6-5 台中港砂平均構造因素與相對密度之關係



ABCD--切片範圍

EFGH--包含顆粒之長方形

FG--外視長軸

HG--外視短軸

圖 6-6 試驗砂樣，外視最長軸長與最短軸長
量測方式示意圖 [6]

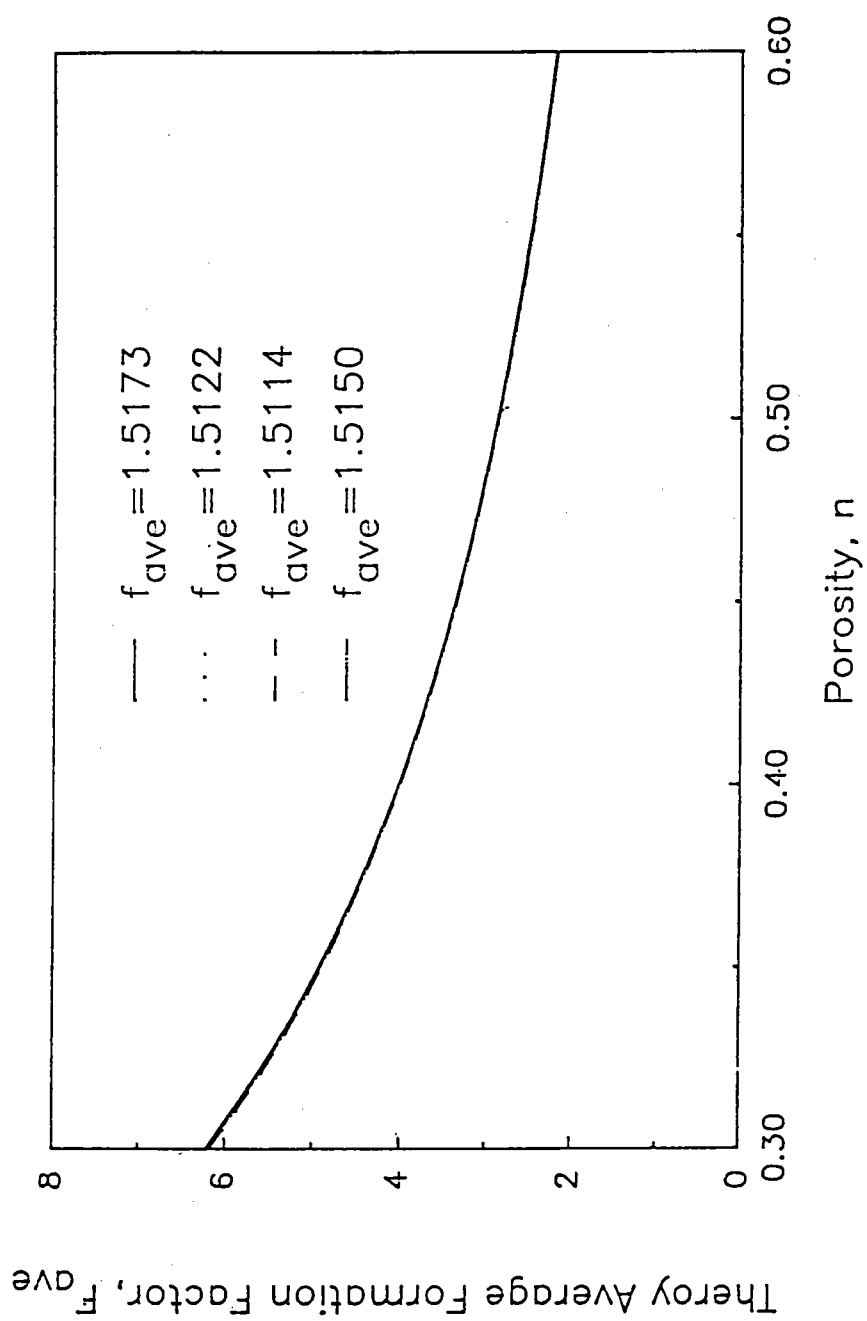


圖 6-7 砂樣平均構造因素計算值與孔隙率之關係

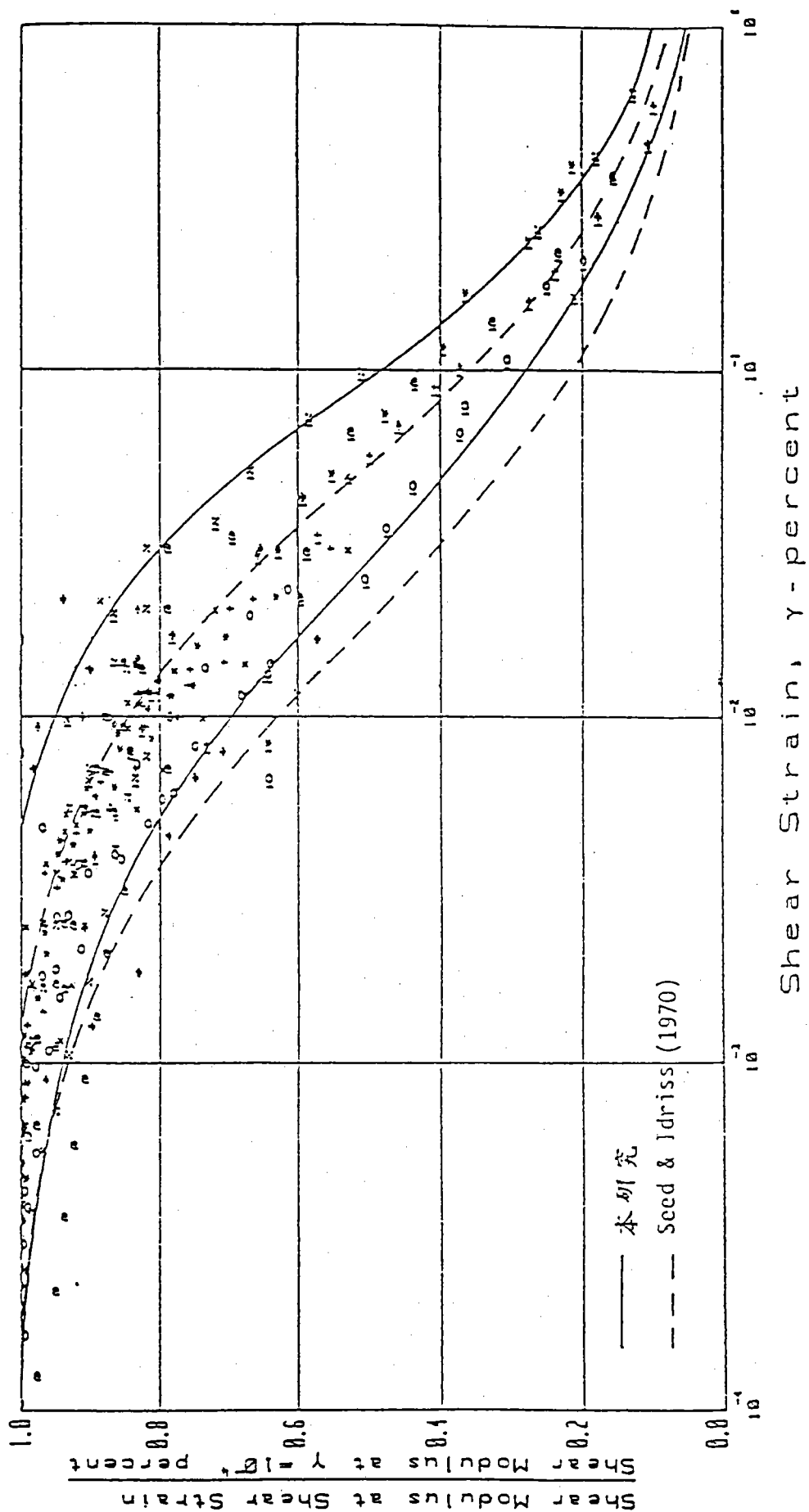


圖 6-8 沉泥質砂性土壤 G/G_{max} 與剪應變之關係

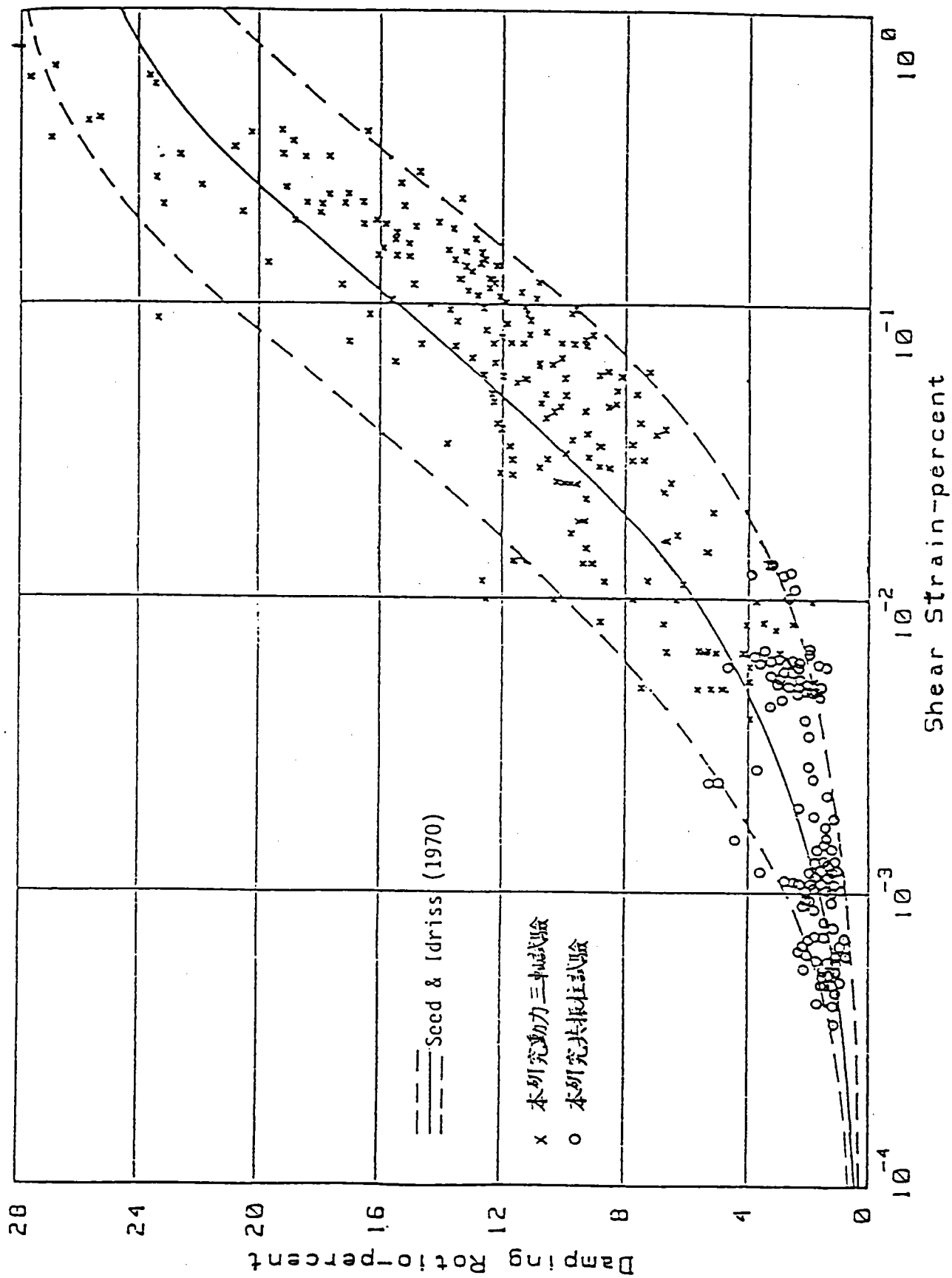


圖 6-9 沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應變之關係

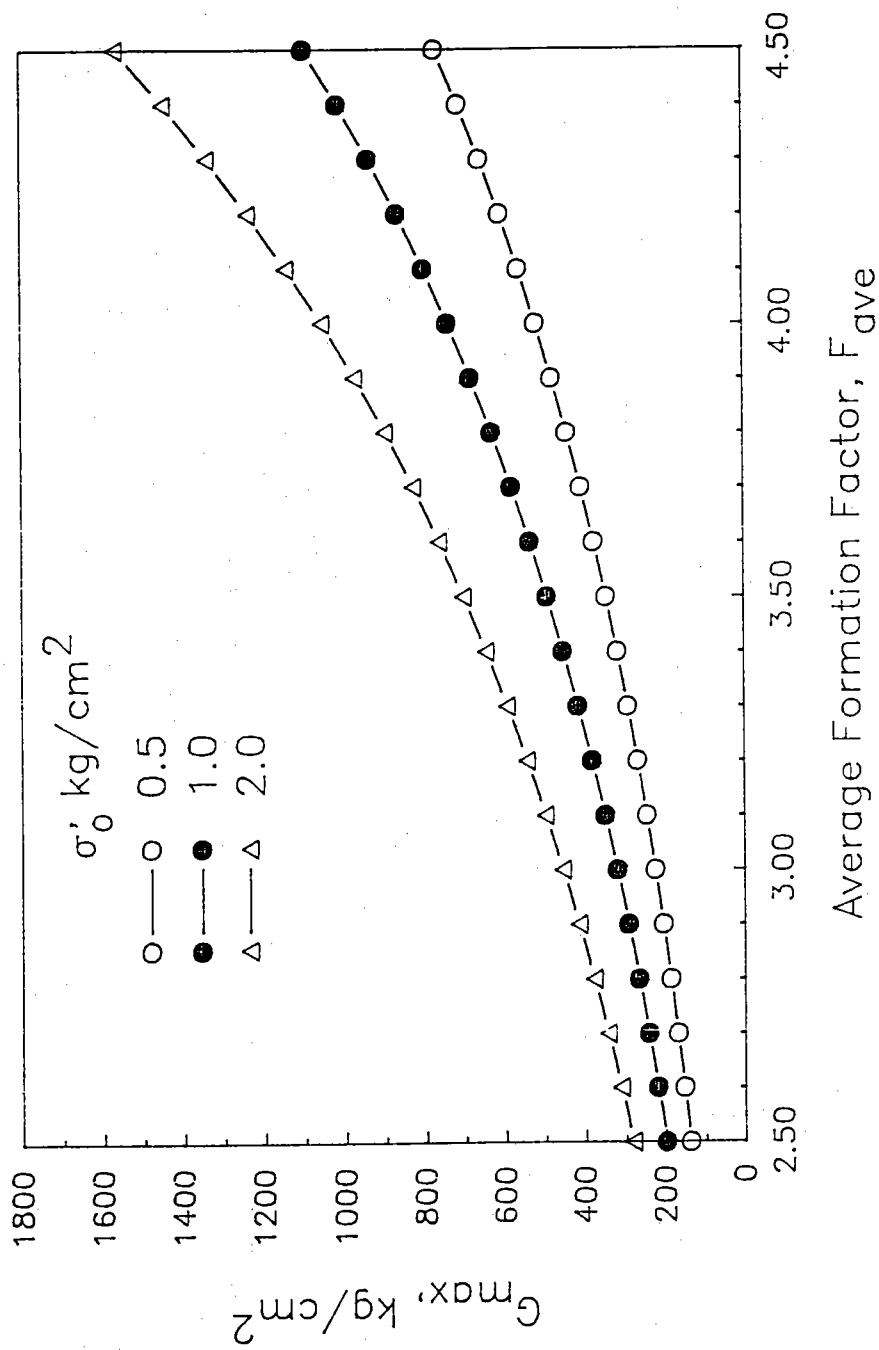


圖 6-10 不同有效圍壓下，砂土最大剪力模數 G_{max} 與平均構造因素之關係

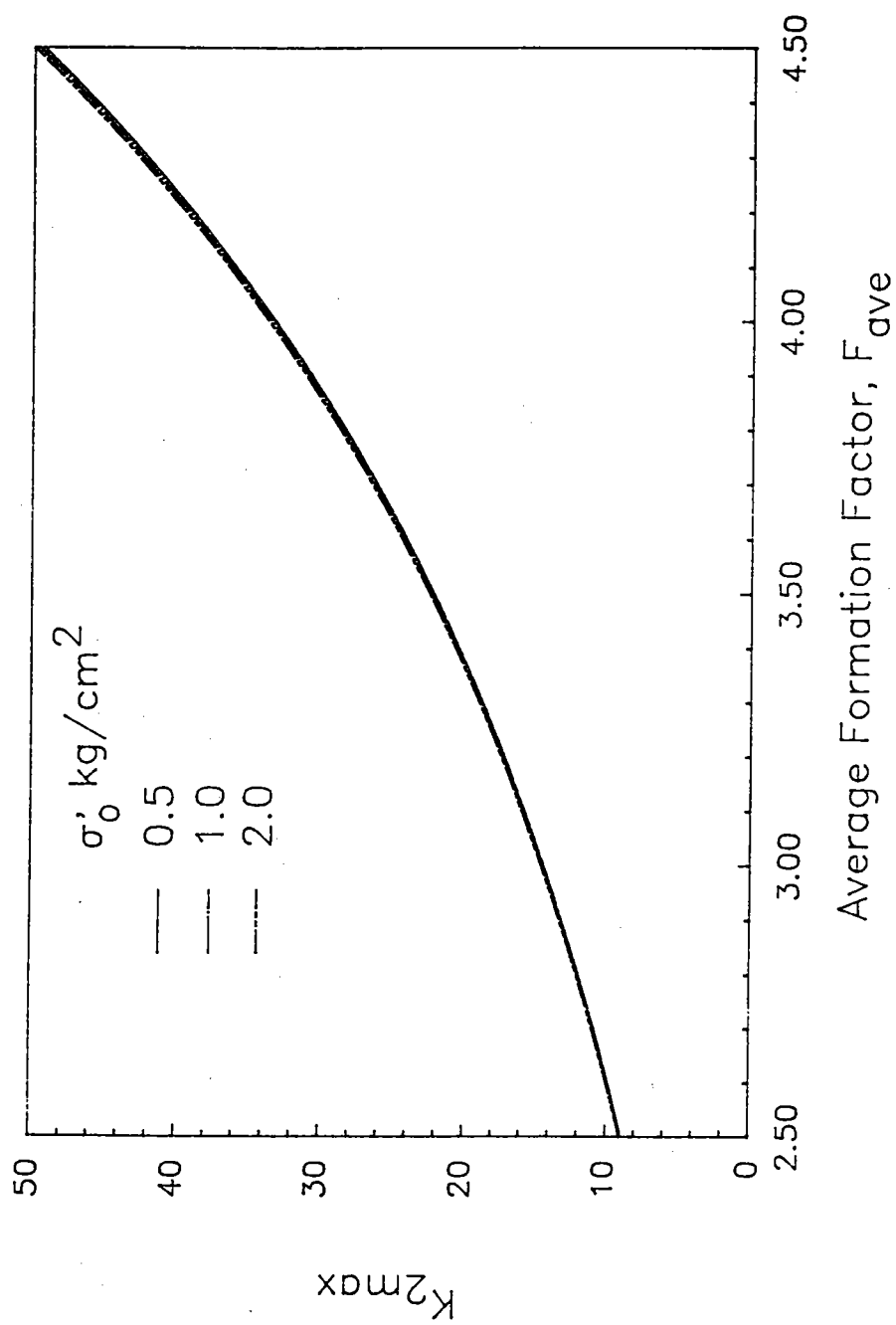
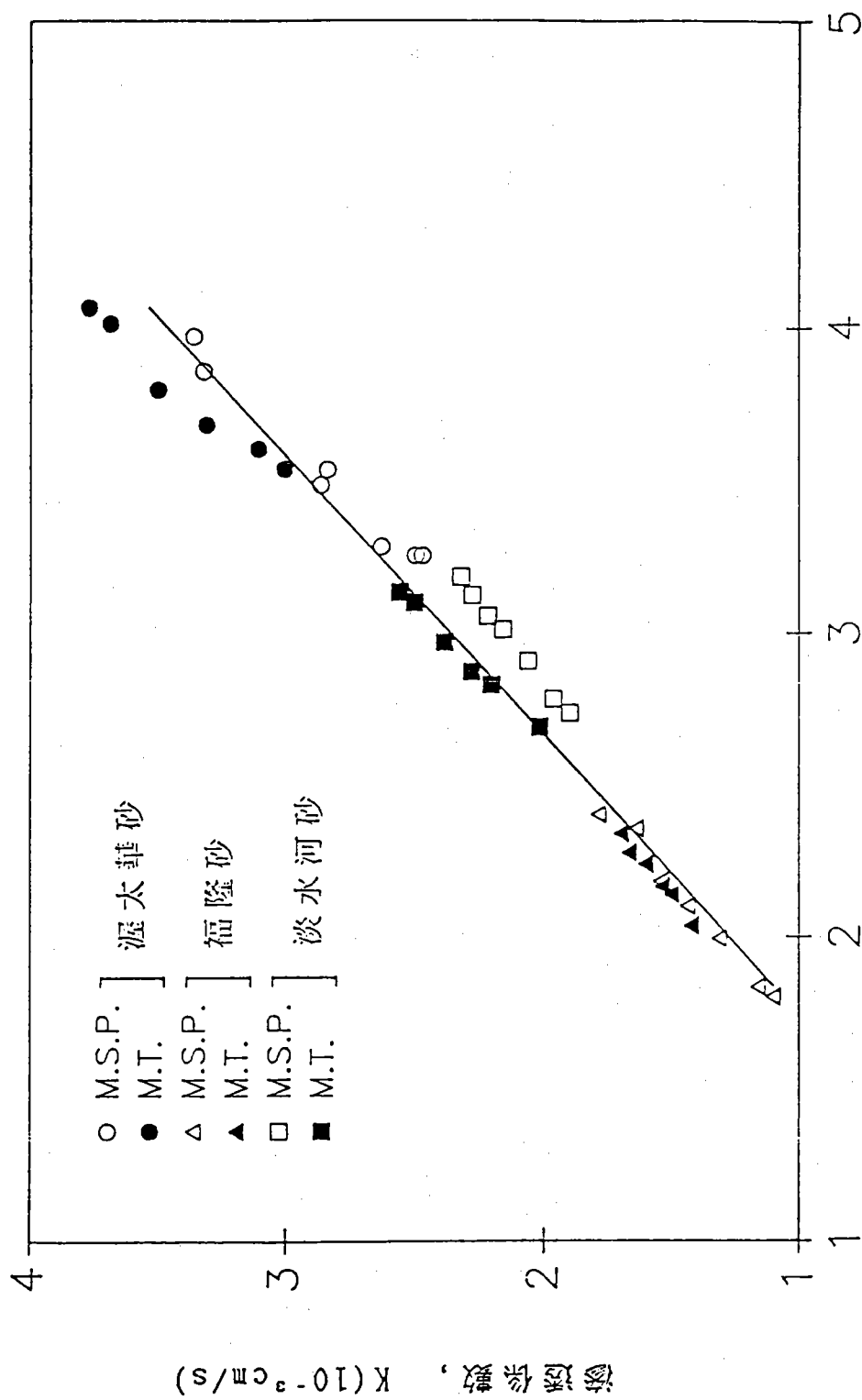


圖 6-11 不同有效圍壓下，最大剪力模數參數 K_{2max} 與平均構造因素之關係



電性參數, $1 / (F_{ave} \cdot SSA^2 \cdot f_{mean}) (10^{-6} \text{ cm}^2)$

圖 6-12 砂土電性參數與滲透係數之關係 [70]

表 6-1 砂樣在電子掃瞄式顯微鏡分析之結果

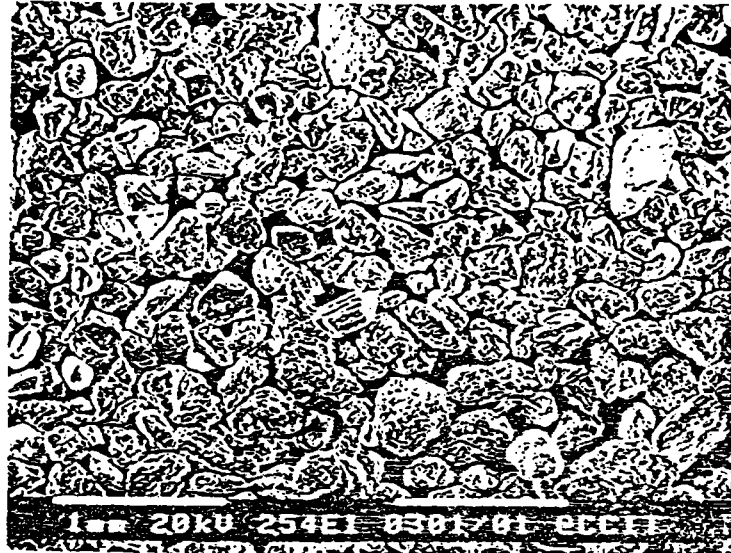
砂 樣	顆 粒 形 狀	平均軸長比
八里砂	Angular	0.654
台中港砂	Sub-Angular	0.705
布袋砂	Sub-Angular	0.715
旗津砂	Angular	0.676

表 6-2 砂樣顆粒平均形狀因子之計算值

砂樣	軸長比	S	形狀因子 (計算值)
八里砂	0.654	0.3857	1.5173
台中港砂	0.705	0.3771	1.5122
布袋砂	0.715	0.3755	1.5114
旗津砂	0.676	0.3819	1.5150

表 6-3 砂土滲透係數試驗值與計算值之比較

透 水 試 驗 值					
試驗砂樣	試驗體積 (cm ³)	試樣重 (g)	乾密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	滲透係數 (cm/sec)
台中港砂	987	1573.63	1.594	40.6	0.63×10^{-3}
電 性 參 數 計 算 值					
採用砂樣	孔隙率 (%)	平 均 構 造 因 素	平均形 狀因素	比表面積 (cm ² /cm ³)	滲透係數 (cm/sec)
台中港砂	40.6	3.57	1.412	250	2.5×10^{-3}

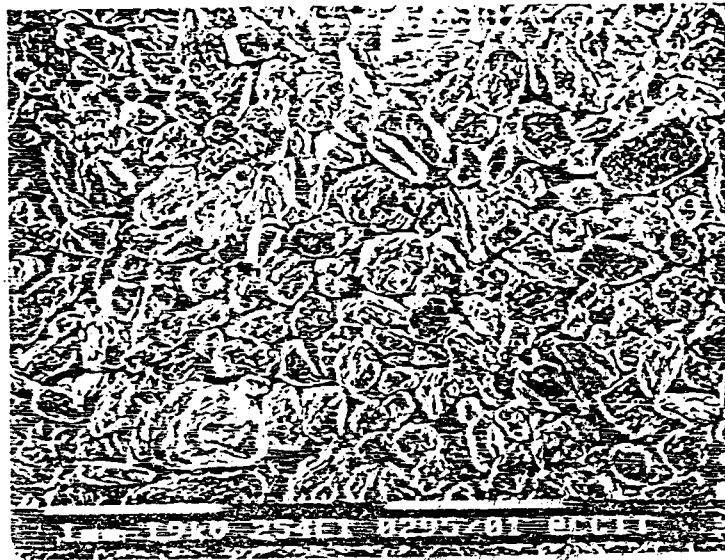


(a) 線性放大 25.4倍

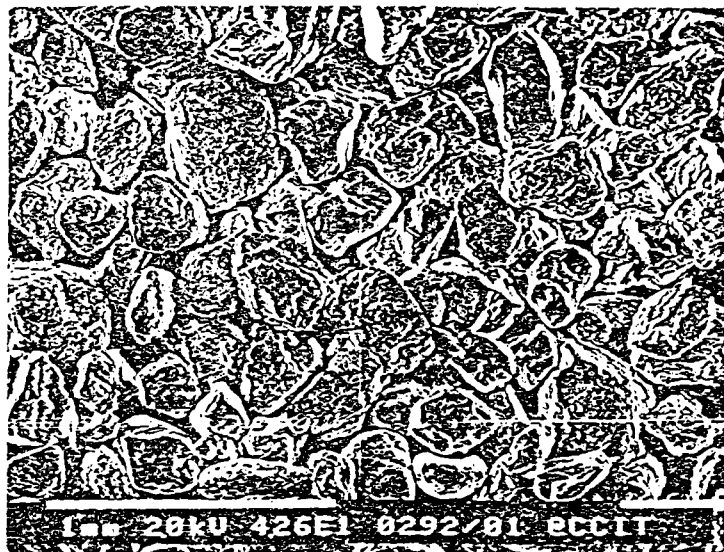


(b) 線性放大 42.6倍

照片 4 八里砂顆粒，電子顯微鏡 (SEM)放大照片

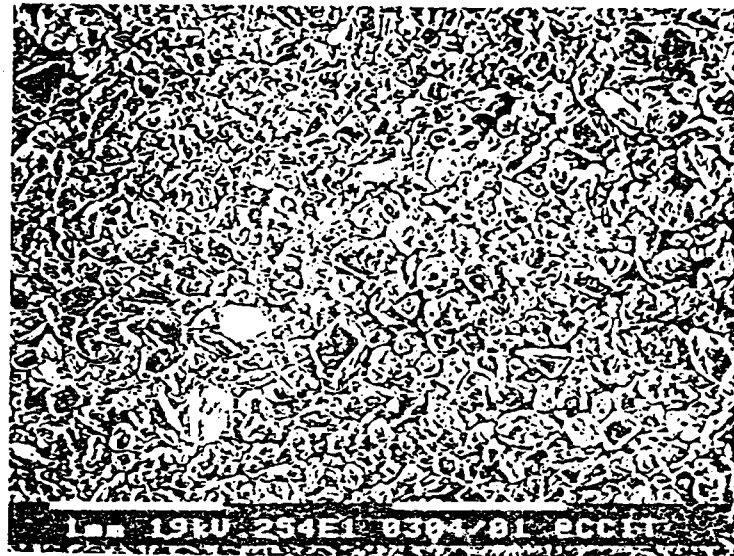


(a) 線性放大 25.4倍



(b) 線性放大 42.6倍

照片 5 台中港砂顆粒，電子顯微鏡 (SEM) 放大照片

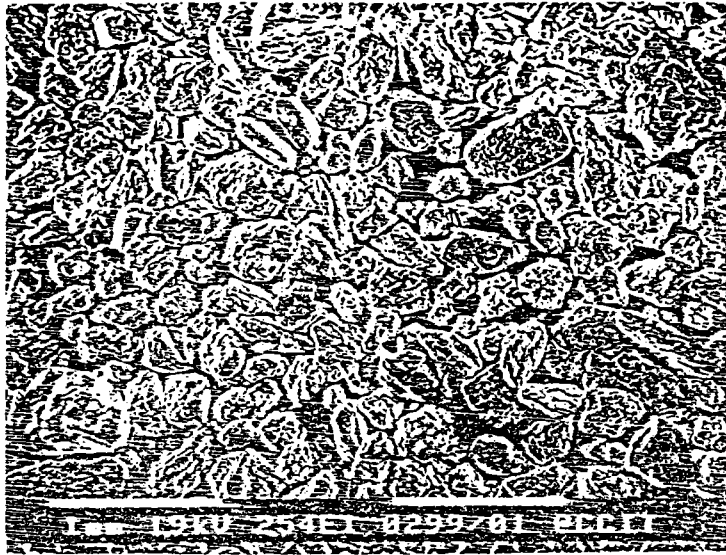


(a) 線性放大 25.4倍



(b) 線性放大 42.6倍

照片 6 布袋砂顆粒，電子顯微鏡 (SEM) 放大照片



(a) 線性放大 25.4倍



(b) 線性放大 42.6倍

照片 7 旗津砂顆粒，電子顯微鏡 (SEM) 放大照片

第七章 受剪過程中導電度試驗之結果與分析

本研究在探討砂土在受不排水反覆載重期間組構變化情形，以及孔隙水壓上升機制，以渥太華砂在多重篩震降法及濡濕搗固法兩種試體準備方法下之四組液化試驗結果作為分析基礎（有效圍壓均為 1.5kg/cm^2 ），其初始相對密度與反覆應力比為：

試體A. 多重篩震降法(MSP)，初始相對密度=50%，反覆應力比=0.182

試體B. 多重篩震降法(MSP)，初始相對密度=75%，反覆應力比=0.250

試體C. 濡濕搗固法(MT)，初始相對密度=50%，反覆應力比=0.250

試體D. 濡濕搗固法(MT)，初始相對密度=75%，反覆應力比=0.450

7.1 反覆載重下軸向應變與構造因素之關係

砂土受反覆載重，因顆粒的滑動與滾動，導致組構發生變化，軸向應變也隨之產生，此一論點，可由軸向應變與垂直構造因素的變化趨勢加以佐証。由於限制體積改變(孔隙率保持固定)，因此垂直構造因素的改變應可反應組構的變化。各試體液化試驗前之初始組構與達液化時垂直構造因素的變化情形，示於圖 7-1，由圖可知，在達液化時垂直構造因素均比原來之垂直構造因素小，此乃因試體在伸張方（最大主應力方向在水平方向）達液化時，水平方向(徑向)有較多的接觸點，顯示顆粒長軸較趨近於垂直方向，因而導電度值較高，垂直構造因素較小。

相對密度較高的試體，孔隙率比較小，具有導電性之孔隙水佔有

較小之截面積，且顆粒間接觸較緊密，此時砂土之導電度較低，其初始構造因素大於相對密度較低的試體。

以多重篩震降法(MSP)準備之試體，因顆粒長軸趨向水平方向，導電路徑曲折，其初始構造因素略大於以濡溼搗固法(MT)準備之試體，達液化時，在伸張方破壞，此時垂直構造因素減至最低，導電度值最大，顯示顆粒長軸集中在垂直方向較多。而試體A、B其構造因素的變化量比濡溼搗固法準備之試體C、D較大，由此可知多重篩震降法準備之試體其組構變化比濡溼搗固法準備試體之組構變化較為明顯。圖7-2 (a)，(b)，(c)，(d)分別為各試體，於試驗過程中導電度的量測，所得垂直構造因素隨應力週期數變化的情形。以MSP法準備之試體，在最後幾個載重次數，垂直構造因素才有明顯的變化，由壓縮方之垂直構造因素小於初始組構值，且伸張方之垂直構造因素愈來愈小，可知導電度值愈來愈大，顯示有部份顆粒長軸指向已不再回復原來之水平方向，軸向應變量愈來愈大。以MT法準備之試體，由於組構分佈較不規則，受反覆載重初期就有軸向應變產生，但垂直構造因素與軸向應變的對應關係也有同樣的趨勢。即軸向應變為正(壓縮方)時，垂直構造因素增大；軸向應變為負(伸張方)時，垂直構造因素變小。

7.2 不同應力階段組構之變化

本節將以濡溼搗固法準備之試體C及試體D來探討試體受反覆載重時，在不同應力階段，其軸向應變、孔隙水壓與構造因素之關係。如圖7-3所示，點1代表壓縮方之最高點；點3代表伸張方之最低點；點0,2,4則分別代表三個不同階段之應力零點。

圖7-4，7-5，當應力由壓縮方回到應力零點(點1→2)垂直構造

因素大於由伸張方回到應力零點(點3→4)，由垂直構造因素的差距，可知當應力回到等向性狀態，組構未回到原來的狀態，而形成異向性組構，顆粒接觸點法向量有較多的數量仍殘留在前半個週期之最大主應力方向，由此可知組構的變化比應力的變化慢。組構的變化應該是介於應力與應變之間，應力的作用導致組構的改變，然後是應變產生。在Chen[26]的研究中，亦有同樣的結論。

7.3 以導電度觀點探討組構變化與液化潛能之關係

整個不排水反覆載重的過程中，應力的作用造成顆粒的滑動與滾動，使得組構產生變化，以抵抗外加應力，組構改變造成砂土產生應變，因組構改變所產生的能量轉而作用在孔隙水，隨著荷重次數的增加，累積的能量愈來愈多，造成孔隙水壓的增加，當孔隙水壓上升而有效應力漸趨於零，顆粒間的力鏈(force chain)就逐漸崩潰，砂土的強度降到最低，於是液化產生，這就是砂土受反覆載重其組構變化情形以及孔隙水壓上升機制。在整個受剪過程中，最重要的關鍵就在組構的改變，這包括了接觸點數目的增減與接觸點法向量的改變，若能對兩者加以探討將有助於瞭解砂土之液化行為。本研究以導電度的實驗方法，利用粒狀土壤孔隙水具導電性，且受孔隙形狀、大小影響而變化的特性，來研究粒狀土壤組構與砂土受剪過程力學行為應是可行之道。若能建立構造因素與組構變化的相關性，則能推廣於軸向應變與孔隙水壓的上升機制。前面幾節的探討，已可以看出構造因素隨著軸向應變與孔隙水壓而變化的趨勢，如液化時應變停留在伸張方的試體，顆粒接觸點在徑方向較多，而由垂直構造因素減小，顯示在軸向有很好的流通性與導電性，亦即顆粒的長軸較趨向於軸向。

孔隙水壓的上升致使土體中有效應力減低，是造成液化的主因。影響液化潛能的因素，包括結構性質、持續荷重時間、應力歷史等。其中結構部份，與顆粒形狀、孔隙率、以及異向性行為有關。本研究於不排水反覆載重期間，利用導電度量測方法，由垂直構造因素的變化可知結構產生外加異向性(Induced Anisotropy)的行為。導電度值的改變是由於顆粒的重新排列，構造因素的變化應可以反應出結構的變化。由前幾節的分析，可知當砂土受不排水反覆載重，不同的相對密度試體以及不同準備方法之試體，其垂直構造因素與孔隙水壓的變化趨勢有明顯的不同。因此，本研究從荷重期間的探討，更能幫助了解結構變化與孔隙水壓上升機制之關係。

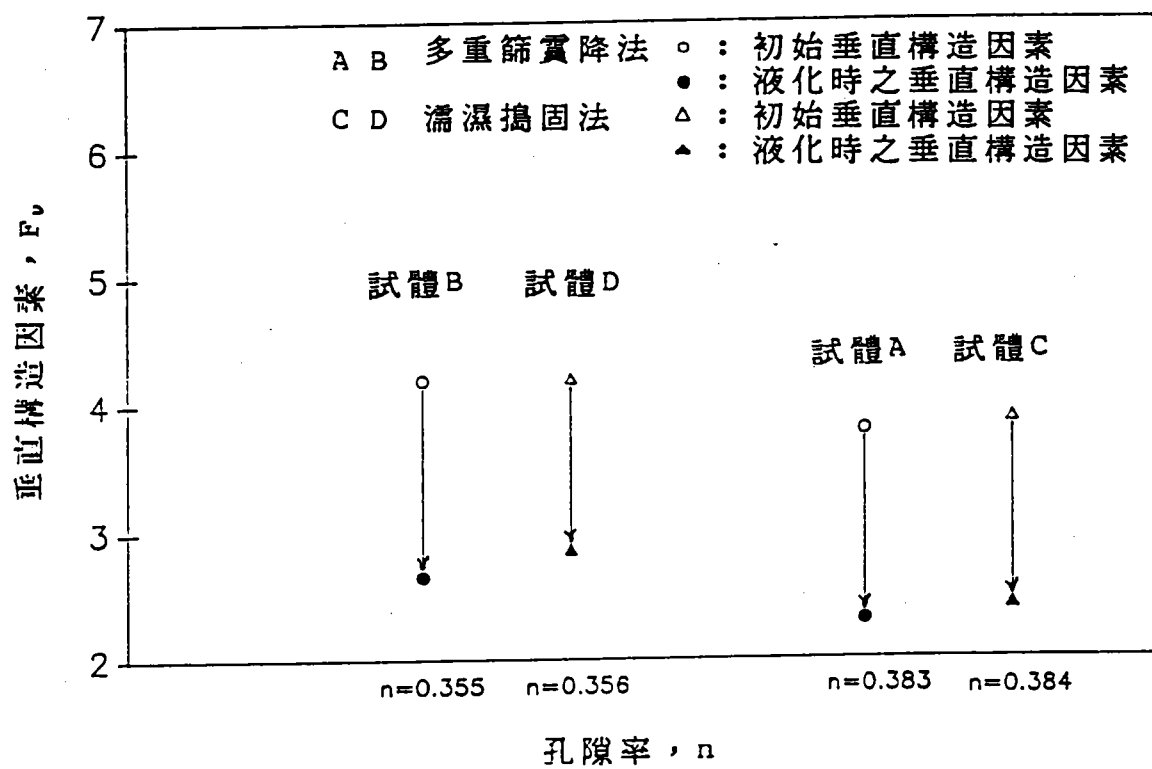


圖 7-1 各試體初始及液化時之垂直構造因素變化

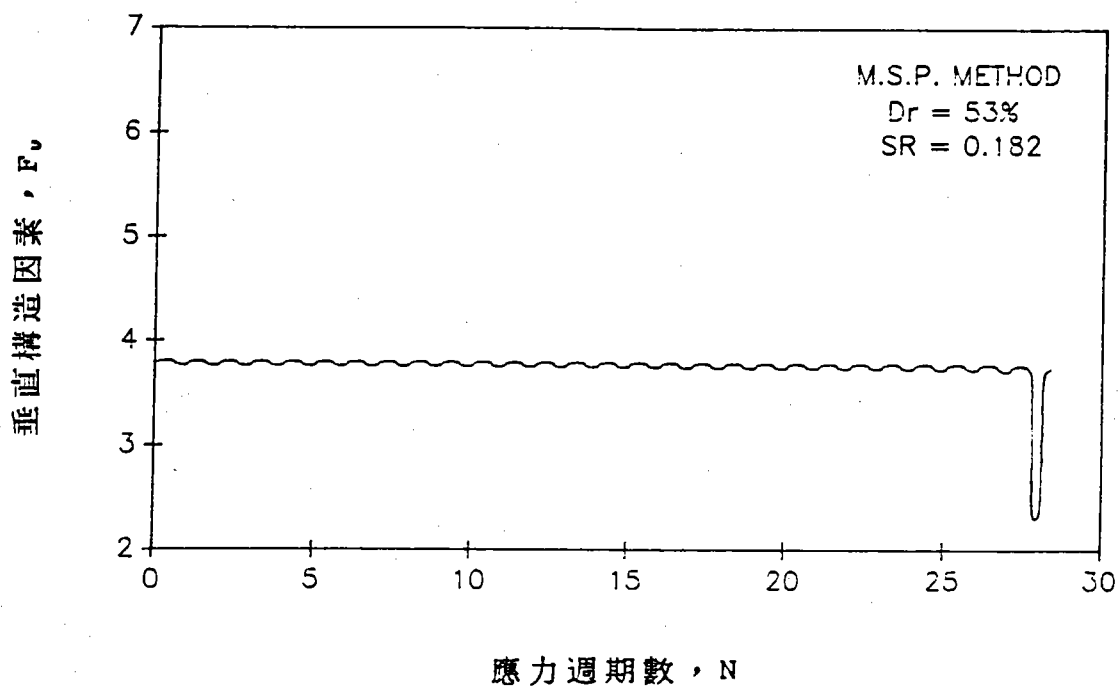


圖 7-2(a) 多重篩震降法，相對密度53%之垂直構因素變化情形

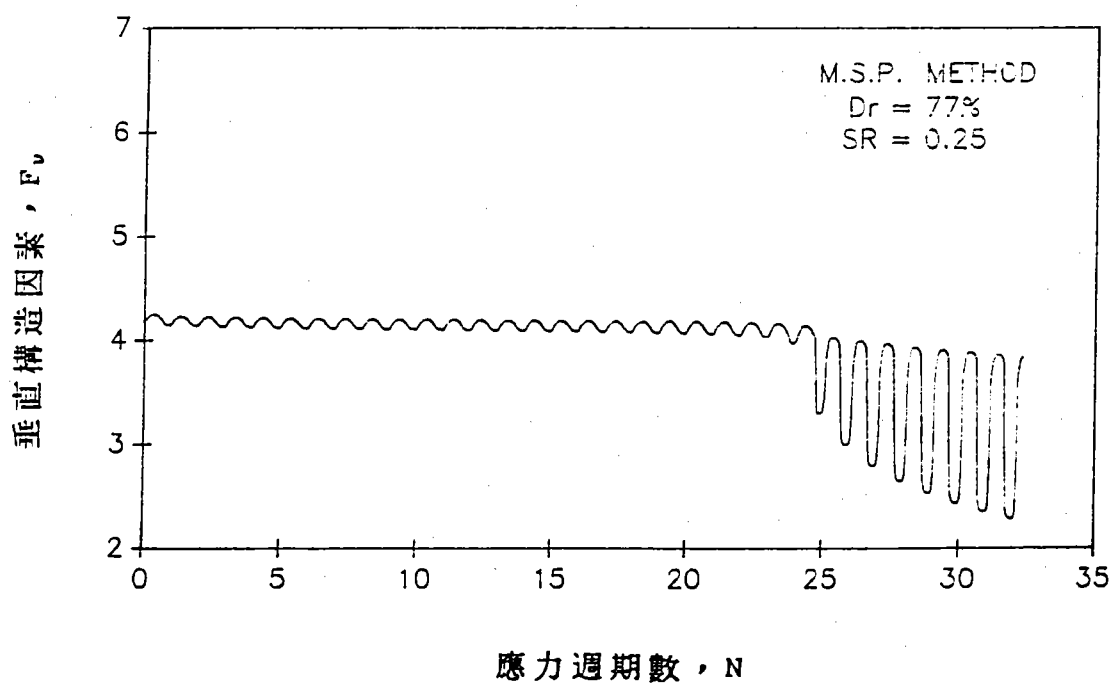


圖 7-2(b) 多重篩震降法，相對密度77%之垂直構因素變化情形

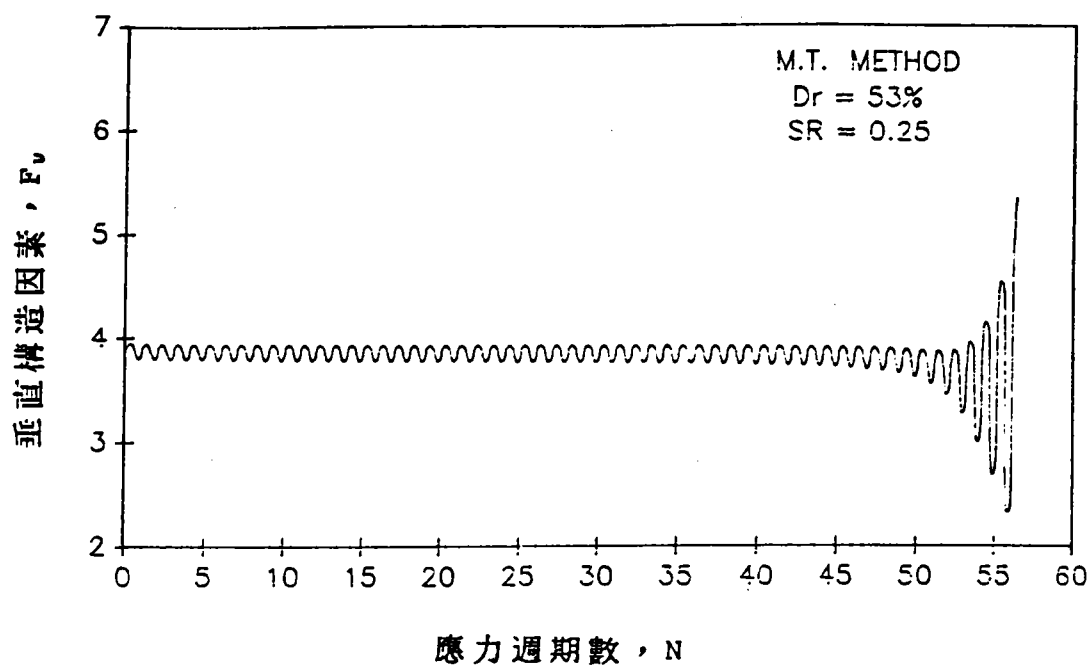


圖 7-2(c) 濡濕搗固法，相對密度53%之垂直構因素變化情形

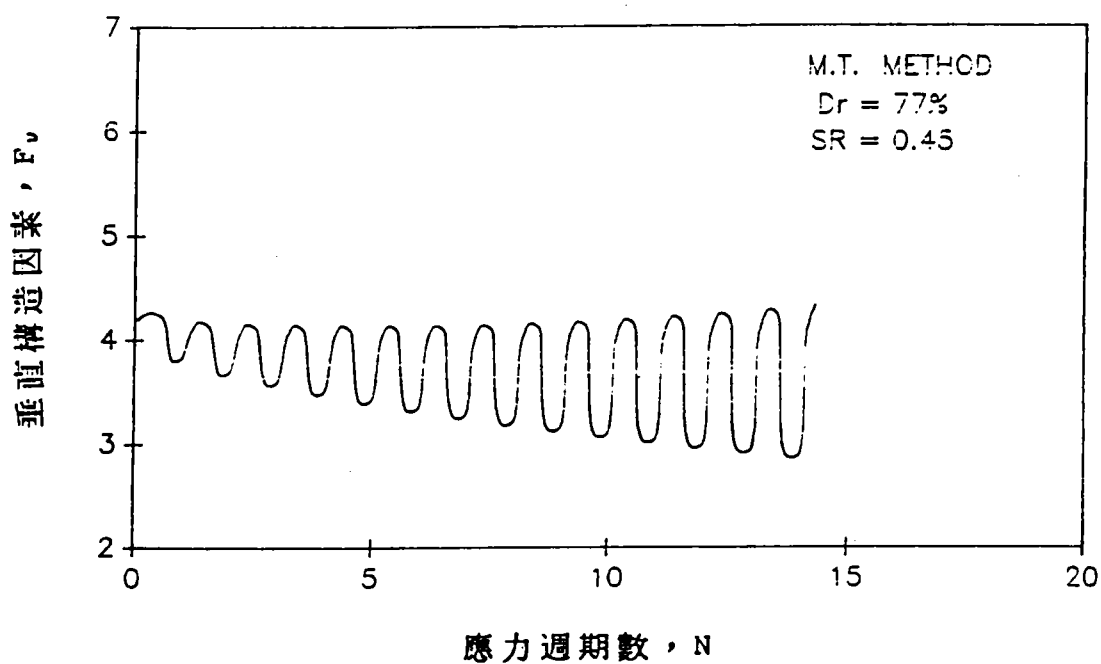


圖 7-2(d) 濡濕搗固法，相對密度53%之垂直構因素變化情形

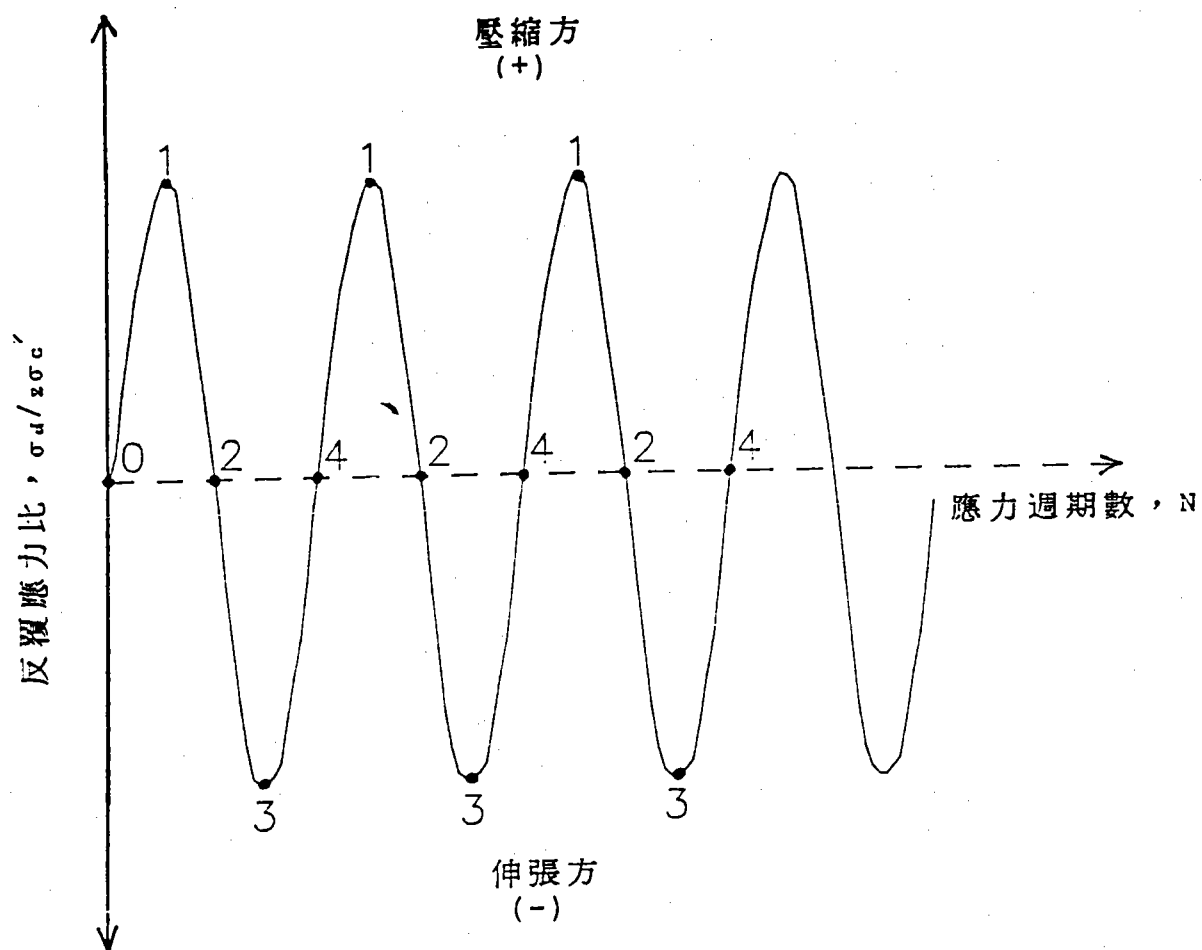


圖 7-3 不同應力階段代表點

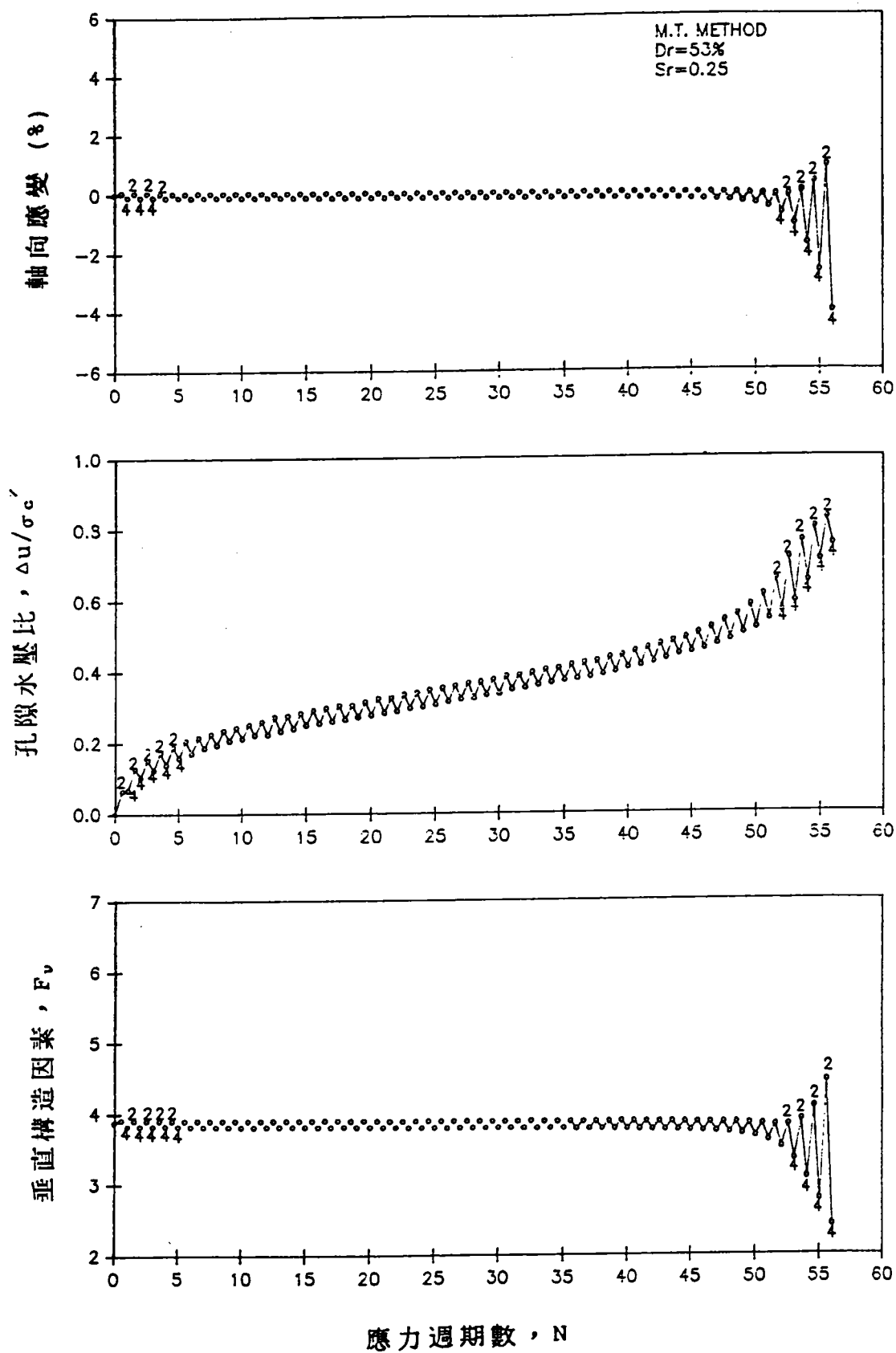


圖 7-4 相對密度53%在應力零點之軸向應變、
孔隙水壓與垂直構造因素

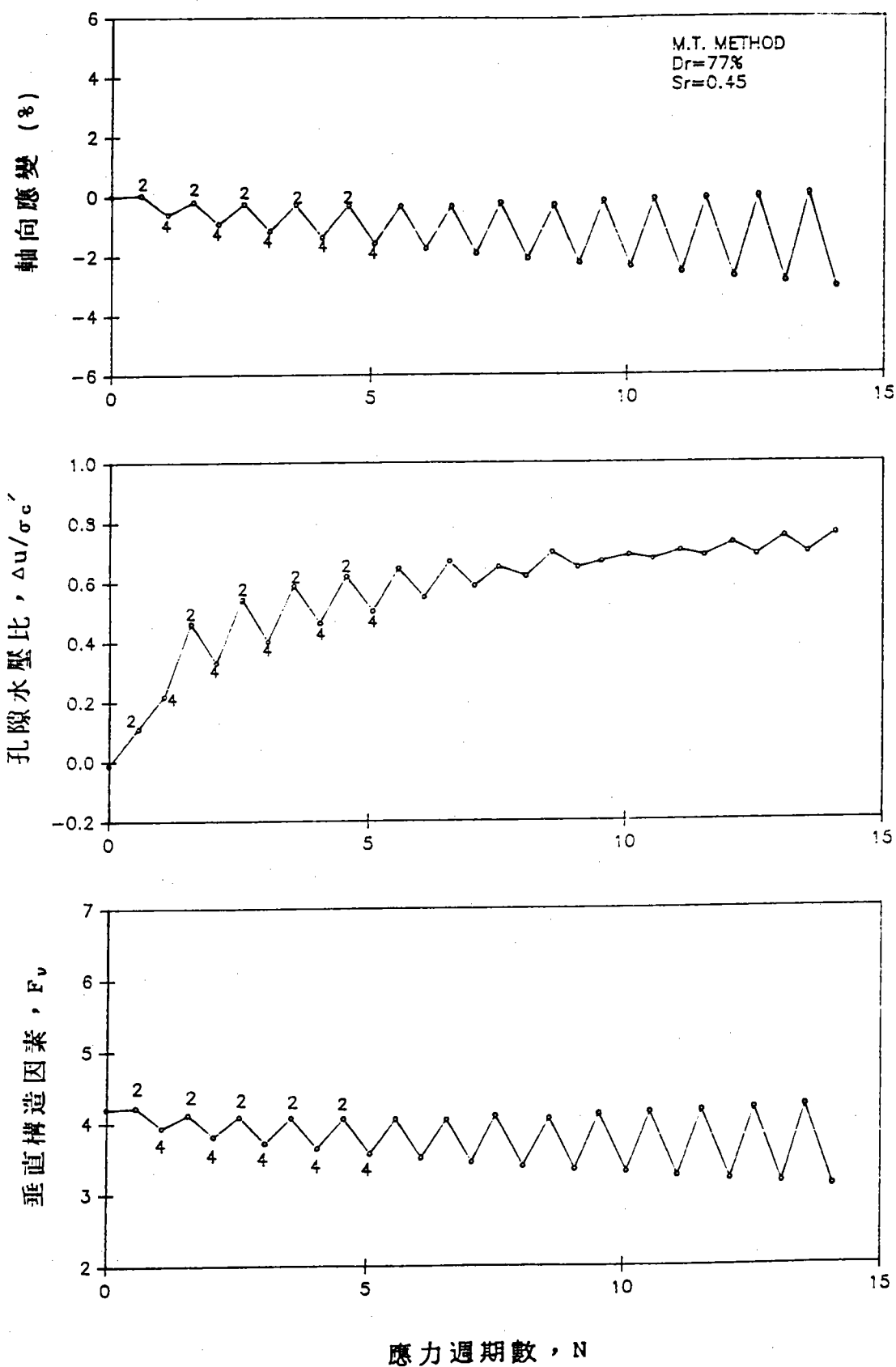


圖 7-5 相對密度77%在應力零點之軸向應變、
孔隙水壓與垂直構造因素

第八章 數值模擬結果分析討論

依前節所述，利用電腦模擬可控制 X_1, X_2, X_3 方向(如圖 5-1所示)之壓密速率(本文採用0.001)，直至圓球顆粒之孔隙率在0.3~0.5之間。為配合電性導電度試驗結果之比較，取約十個孔隙狀態來分析。每一孔隙狀態在各方向分割成100等份，並符合式(5-9)之要求。然後利用式(5-12)~式(5-19)即可了解， X_1, X_2, X_3 方向分量之圓球顆粒孔隙分佈情形。圖 8-1表示RUN-1試樣在孔隙率為0.4287時，各方向隨切割元素之不同其圓球顆粒之分佈狀況。由圖可知其圓球分佈隨各切面位置之改變而有所不同，所以利用其孔隙面積分佈之差異性，可進一步探討圓球之結構特性。由切面之截面積減去孔隙顆粒所佔之面積，即可得到孔隙之斷面積。其各方向隨切面之孔隙面積變化，如圖8-2所示。

若在一均勻電場，則圓球組合試樣之電性可由孔隙面積大小表示。當切面元素厚度很薄時，元素間可視為連續。每一切片元素之電性，依式(5-21)~(5-24)之計算可以一電阻來表示(如圖 8-3所示)。因元素間可視為連續，則以式(5-25)即可以串聯線性相加方式，求得圓球試樣所代表之等值電阻。考慮孔隙物質之電阻特性，利用式(5-27)~(5-29)可得圓球顆粒電性平均構造因素與各孔隙率之關係曲線(如圖 8-4所示)。圖 8-5為顆粒接觸關聯數與孔隙大小之關係，隨顆粒之緊密其關聯數亦隨之增加。

考慮孔隙流通路徑所造成曲折效應之影響，依簡連貴[13]粒狀土壤電性試驗所得果，平均構造因素 F_{ave} 與孔隙率 n 之關係(如圖 8-6

), 可由下式表示

$$F_{ave}=9.99-21.24n+13.45n^2, R=0.966 \quad \text{----- (8-1)}$$

將上式代入式 (5-29) 即可求出之有效電極電流路徑 (L_e), 代入式 (5-30) 即可進行數值分析, 推求相關之電性參數, 模擬結果顯示: 試驗值與理論值誤差約為 15% 左右 (如圖 8-7 所示)。若依 Das [80] 所建議之曲折率 $\sqrt{2}$, 將其代入模擬數值分析計算, 試驗值與理論值則相當符合。

Kutter [37] 及 Arulmoli [11] 分別利用合成樹脂圓球 (Lucite Ball, 大小為 1/8") 與 40 至 60 號篩級配之圓狀玻璃球 (Glass Sphere) 進行電性試驗。本研究亦利用三種不同直徑 (分別為 1mm, 2mm, 3mm) 之玻璃球 (Glass Ball), 進行三向度導電度試驗 [13], 圖 8-8 為平均構因素與不同孔隙之關係曲線, 我們可發現顆粒大小對於電性影響不大, 且構造因素隨孔隙率之增加而減少, 與砂土之試驗結果有相同趨勢 (圖 8-9)。電性顆粒數值模擬與玻璃球及粒狀土壤之比較, 如圖 8-8、圖 8-9 所示。由分析結果顯示本研究所推導之切片電性數值分析結果, 與試驗有相同趨勢之結果。所以本文所發展之電性模式, 對粒狀土壤組構性質之描述應能提供合適的途徑。

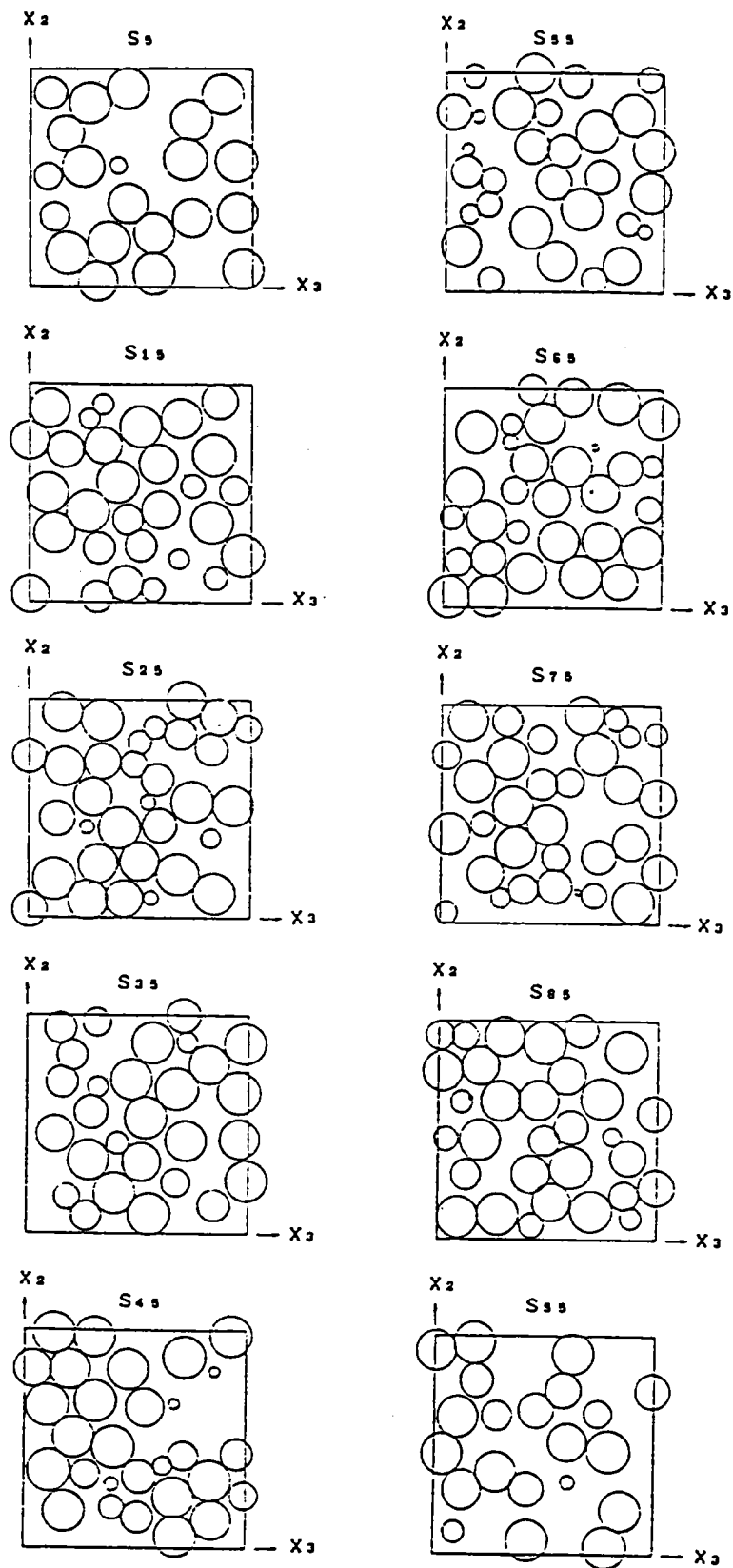


圖 8-1 RUN-1試樣孔隙率為0.4287時， X_1 方向圓球顆粒與各切面($s=5, 15, 25, \dots, 75, 95$)相交孔隙之分佈情形。

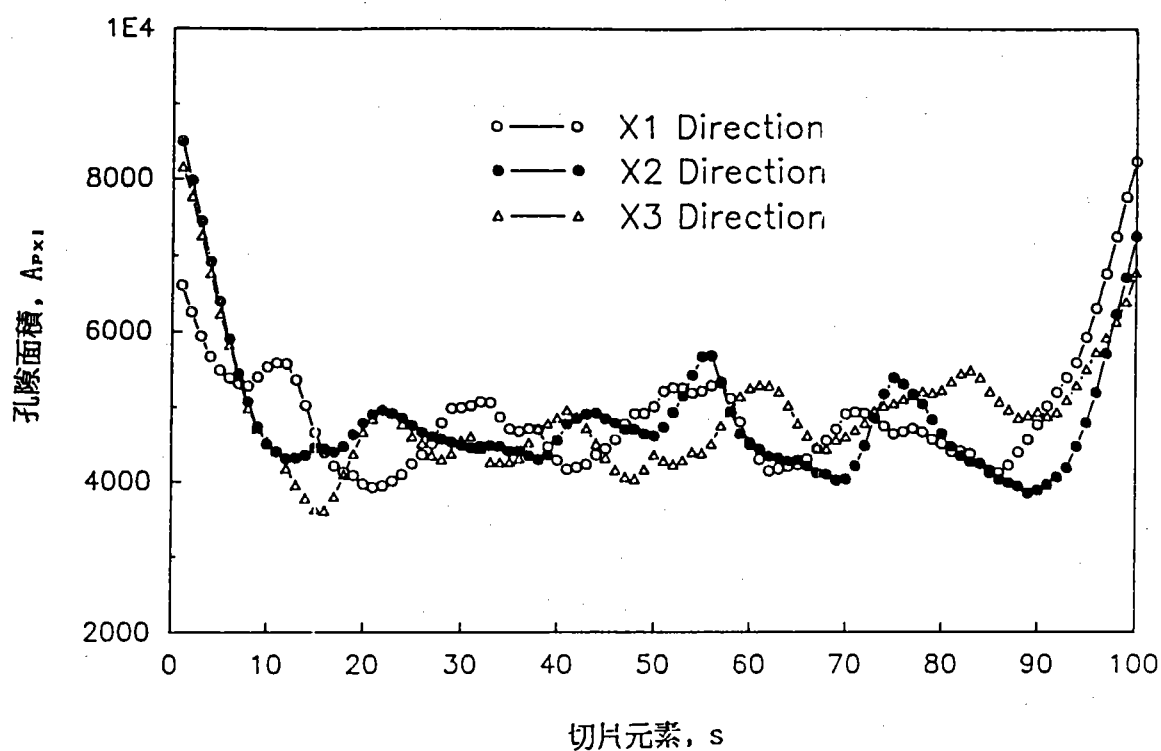


圖 8-2 RUN-1試樣孔隙率為0.4287時， X_1 各方向圓球顆粒孔隙面積隨各切面元素之分佈。

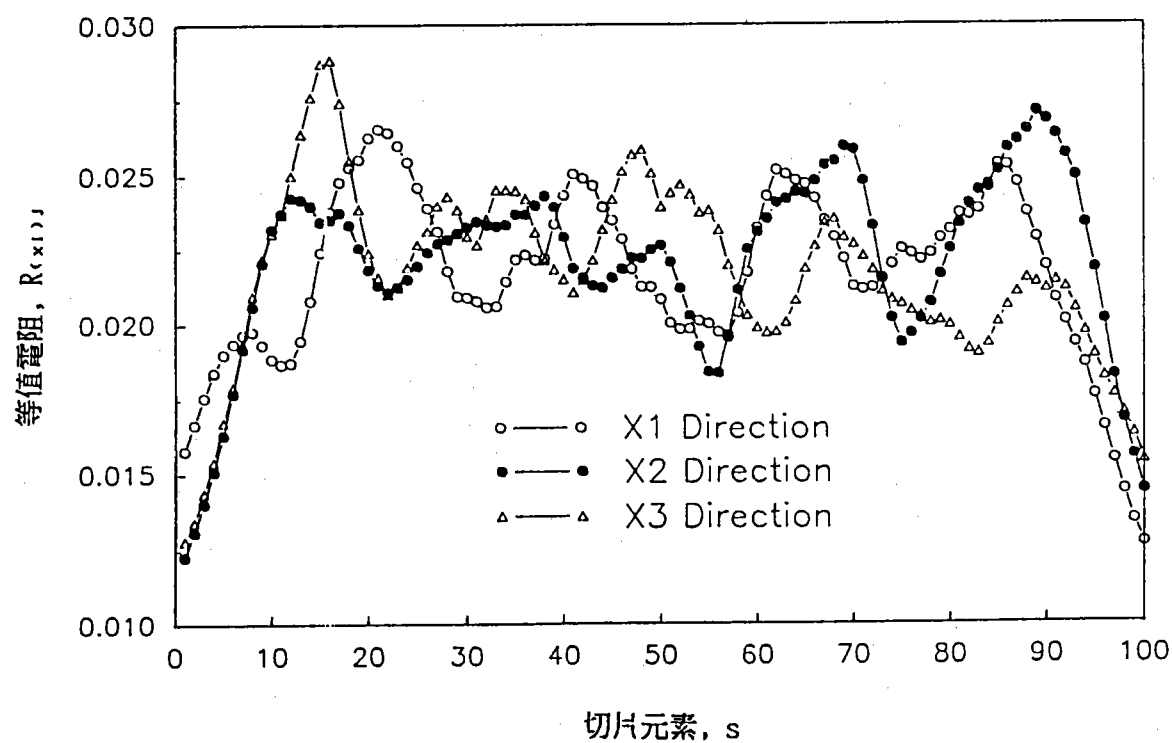


圖 8-3 RUN-1試樣孔隙率為0.4287時， X_1 各方向圓球顆粒孔隙面積所對應等質電阻隨各切面元素之分佈。

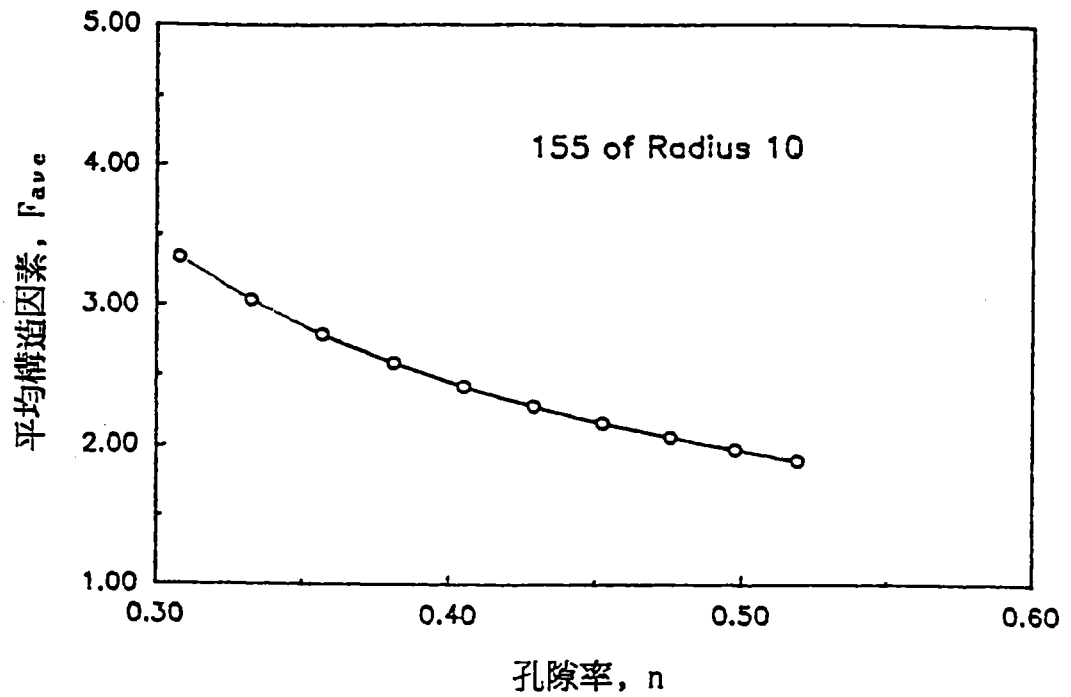


圖 8-4 圓球顆粒數值模擬，電性平均構造因素與孔隙率之關係。

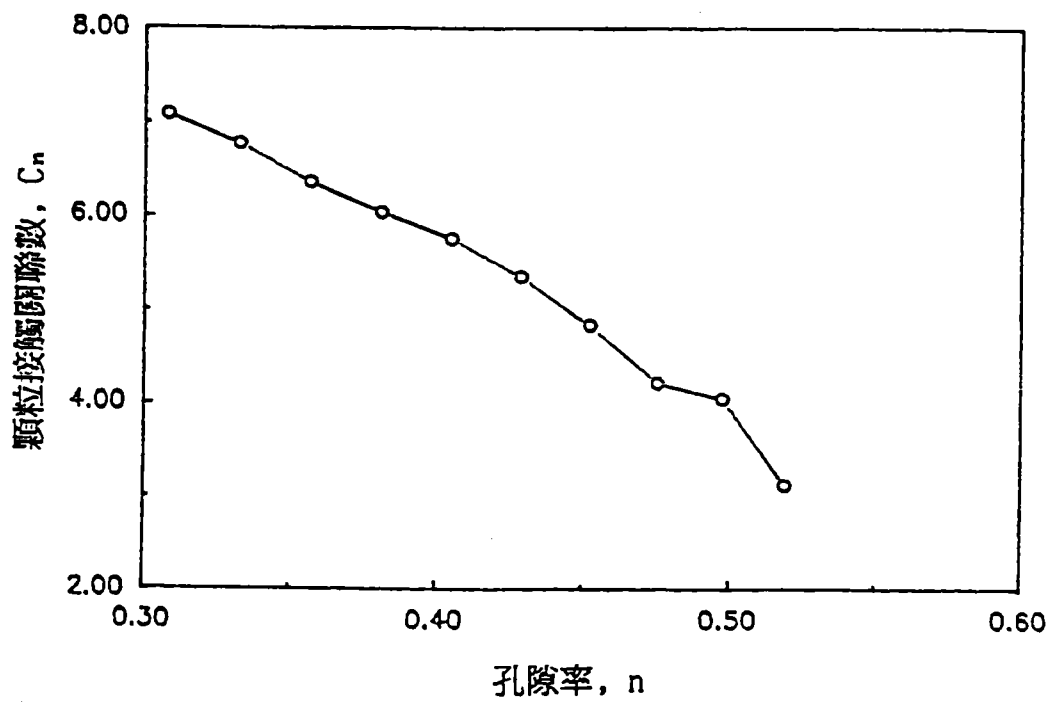


圖 8-5 圓球顆粒數值模擬，關聯數與孔隙率之關係。

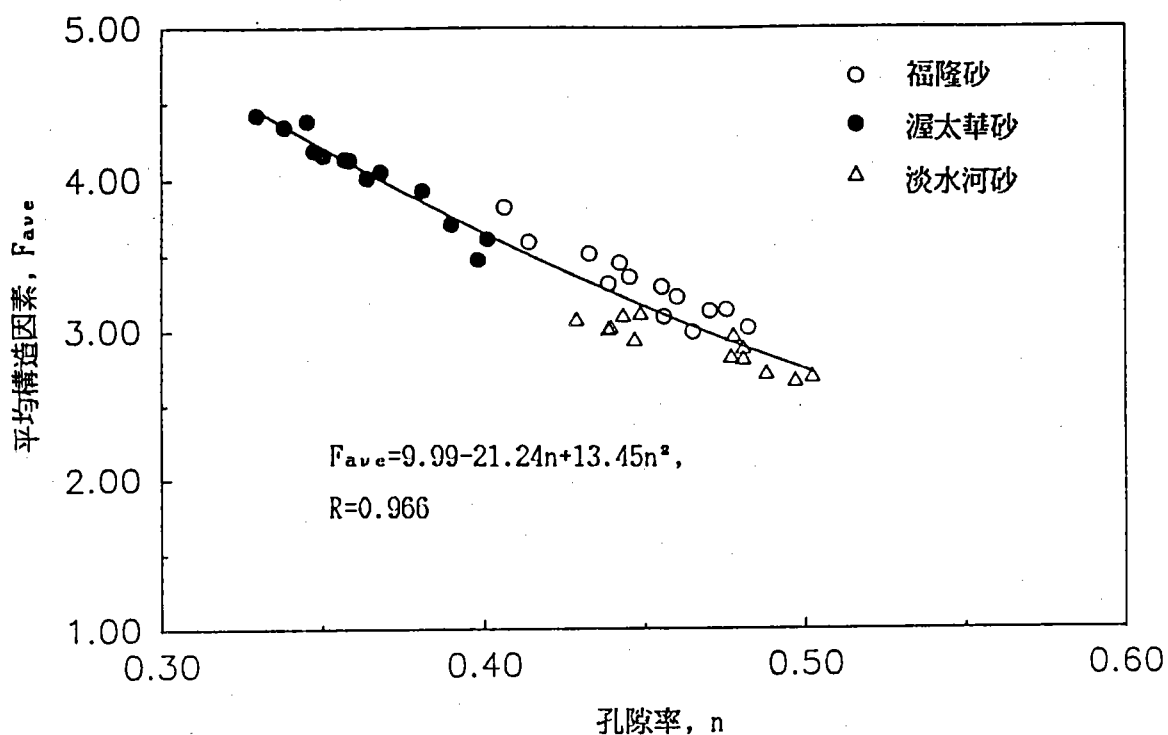


圖 8-6 粒狀土壤電性平均構造因素與孔隙率之關係

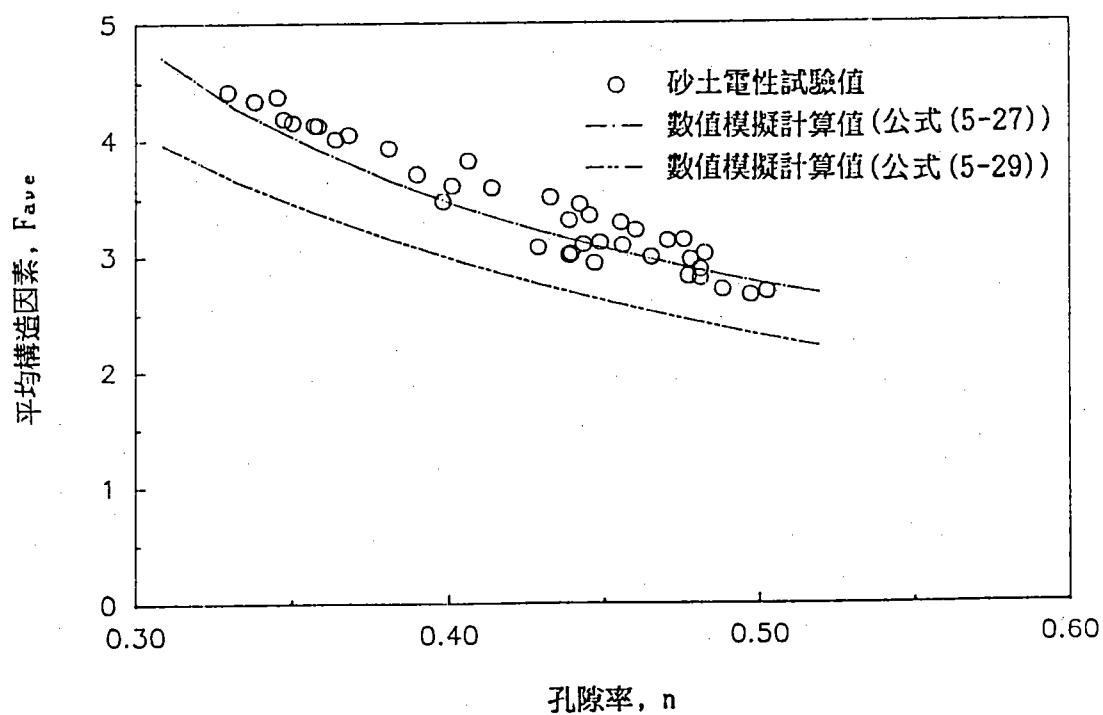


圖 8-7 粒狀土壤電性試驗與數值模擬之比較

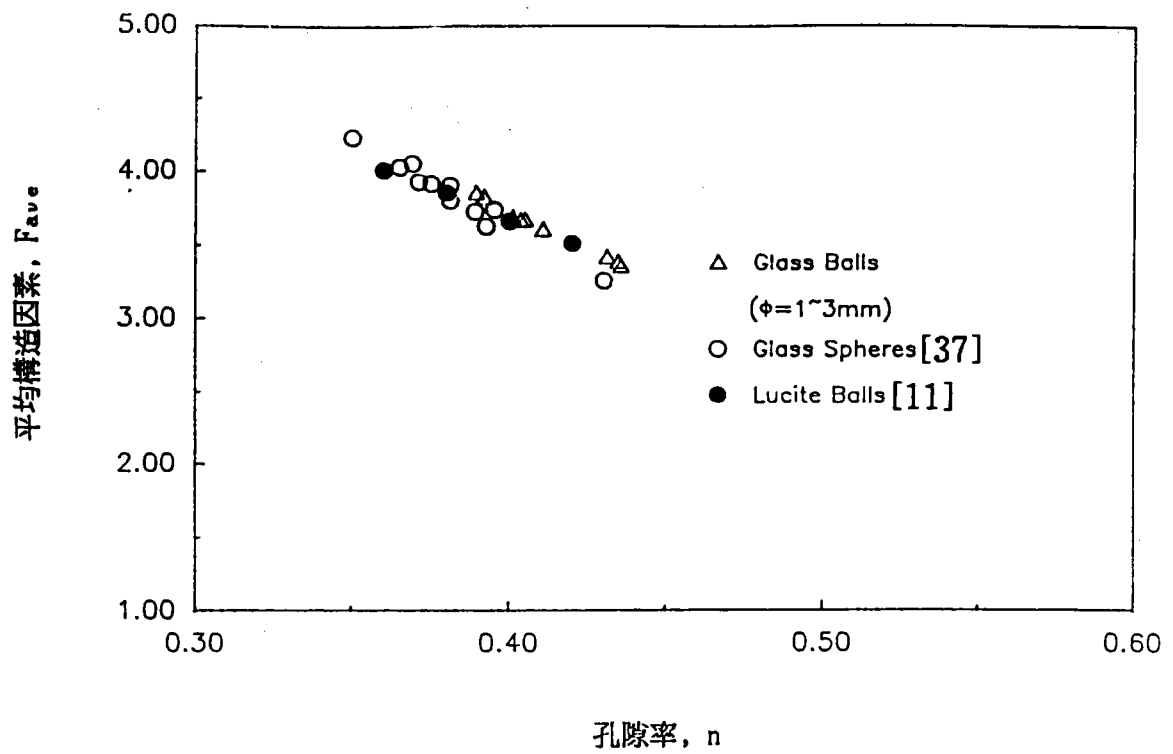


圖 8-8 玻璃圓球電性平均構造因素與孔隙率之關係

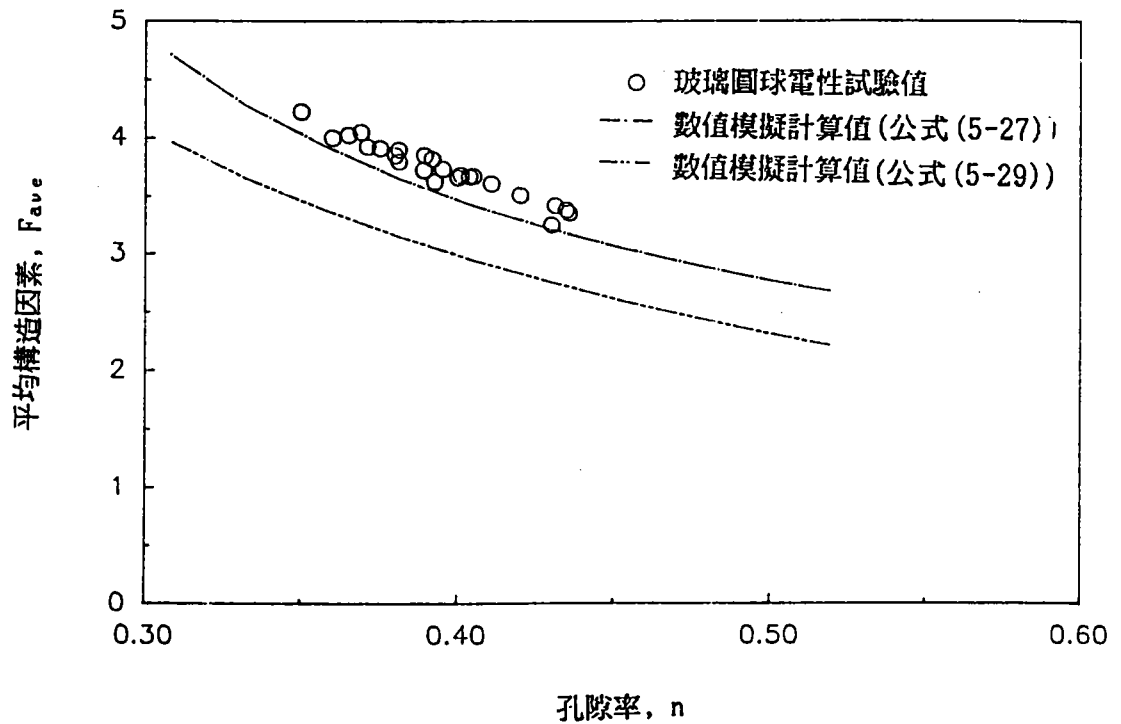


圖 8-9 玻璃圓球電性試驗與數值模擬之比較

第九章 結論與建議

9.1 結論

一、粒狀土壤導電度量測系統及試驗分析方面：

1. 本研究所設計之砂土組構導電度量測系統，是針對飽和砂土並採用1 kHz正弦波交流電源頻率，以消除頻率之影響，避免產生電容效應與氧化還原作用。另進行導電度量測推算時，必須考慮溫度效應修正及電極相關之容器常數修正。
2. 導電度會隨溫度之增加而變化，本研究以25℃為參考溫度，利用白金電阻式溫度感應測針，以量測孔隙溶液之溫度，並自動補償修正至參考溫度。根據本文試驗結果修正係數採用 $\pm 2\%/1^\circ\text{C}$ 時，在20℃~30℃時，其誤差皆在 $\pm 1\%$ 以下，效果良好且方便量測之設定。
3. 電極對導電度之量測有相當程度之影響，尤其不同容器之電極佈置。本研究利用0.01MKCL溶液為標準液，來校正消容器形狀之影響，對量測技術之提升有相當助益。
4. 利用砂樣顆粒電子掃描照片，量得砂顆粒之軸長比，可用以計算理論推導之平均形狀因素值。由此因素值，可判別不同砂樣，其構造因素隨孔隙率之變化程度，由本研究之結果顯示：較為圓滑之顆粒(如布袋砂)，具較小之軸長比、孔隙率及較大之平均形狀因素，其構造因素與孔隙率相關直線之斜率較大，

反之則較小（如八里砂）。由於布袋砂顆粒較為圓滑，故其異向指數較趨近於 1，而八里砂因較為扁平，故顯現較大之異向指數。

5. 在建立構造因素與孔隙率之基本關係的過程中，可發現：孔隙率與構造因素間存在一良好之線性關係。利用平均構造因素分析，可消除因試體準備方式不同所引致異向性之影響。

6. 台灣西海岸一般沉泥質砂土壤之剪力模數及阻尼比特性大致可分別依據圖5-8及圖5-9所示之平均值推估，其最大剪力模數 G_{max} 大致為：

$$G_{max} = 420 \cdot \frac{(2.17-e)^2}{1+e} (\bar{\sigma}_o)^{0.51}$$

其中 e 為土壤孔隙比， $\bar{\sigma}_o$ 為平均有效圍壓， G_{max} 及 $\bar{\sigma}_o$ 皆以 Kg/cm^2 表示。

7. 本研究針對台灣西海岸台中港砂，進行電性試驗分析，建立平均構造因素與孔隙率之關係，最後建立最大剪力模數 G_{max} 與平均構造因素 F_{ave} 之關係，如下所示：

$$G_{max} = 179.34 \cdot \frac{(0.091-F_{ave})^2}{(7.515-F_{ave})}$$

利用上式，即可由構造因素來預測及描述砂土之最大剪力模數。另由最大剪力模數與最大剪力模數參數 K_{smax} 之關聯性，亦可計算出 F_{ave} 與 K_{smax} 之關係，所以利用非破壞性之電性檢測方式，可據以預估土壤動態特性之參考依據。

8. 本研究採用蕭仲光建議，以電性參數推求計算砂土之滲透係數

與採用滲透試驗所求得之實驗值比較，結果相當符合，因此利

用電性參數之量測推估土壤之滲透特性實為相當可行之方式。

9. 壓縮方的應變量小於伸張方的應變量，以多重篩貫降法準備之試體有更明顯的差別，顯示其初始組構接觸點法向量較多趨向於垂直方向。
10. 當應力由壓縮方回到應力零點時垂直構造因素大於由伸張方回到應力零點，由垂直構造因素的差距，可知當應力回到等向性狀態，顆粒接觸點法向量有較多的數量仍殘留在前半個週期之最大主應力方向，組構未回到原來的狀態，而形成異向性組構，由此可知組構的變化比應力的變化慢。亦即組構的變化是介於應力與應變之間，應力的作用導致組構的改變，然後是應變產生。
11. 孔隙水壓上升機制，組構的改變是一個重要關鍵，本研究利用導電度的方法了解構造因素與組構變化之關係，以及孔隙水壓上升機制，已得到初步的成果。
12. 試體承受不同方向靜態荷重，有較多的接觸點法向量將漸趨向與外加應力平行，組構的改變造成應變的產生，應變的方向與外加應力作用方向相同。

二、在切片數值模擬方面：

1. 玻璃球三向度導電度試驗結果顯示，顆粒大小對於電性影響不大，且構造因素隨孔隙率之增加而減少，與砂土之試驗結果有相同趨勢。
2. 利用『TRUBAL』三向度之程式，以隨機變數方式將不同大小之顆粒圓球置入模擬空間內，可適當描述粒狀土壤之堆積排列之特性。
3. 本文以切片觀念所發展出之圓球電阻模式，其圓球之電性特性與砂土、玻璃球電性試驗結果相當符合之趨勢，由此可作為受剪過程模擬之依據。

9.2 建議

1. 影響構造因素(F)與孔隙率(n)關係中，最重要的因素是形狀因素 f (shape factor)，亦即顆粒形狀。即使是同一種砂，在電子顯微鏡下其形狀也未必絕對相同，如何由試驗以及統計方法求得較具代表性的 f 值，是值得進一步研究的方向。
2. 如何準備不同沉積方向的試體，進行壓縮及伸張試驗，建立主應力作用方向與土壤顆粒沉積方向之夾角(α)對應於土壤滑動摩擦角(ϕ)之關係，並推求出粒狀土壤之力學強度特性，是另一可研究之方向。
3. 進行三軸試驗時，由於橡皮膜的關係，邊界條件不可能不改變。建議自行設計一加勁橡皮膜，可容許側向變形產生，以0.01M 之 KCL標準溶液進行校正，瞭解邊界效應對導電度量測的影響。
4. 台灣西部廣大的沖積砂質海岸，以及大規模水力回填之新生地，利用導電度及粒狀土壤液化潛能特性之關係，將來配合現場研究，可供工程設計初步調查之參考，在結構物耐震工程及經濟建設將有實質的貢獻。

參 考 文 獻

1. Seed, H. B. and Idriss, I. M., " Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake, " JSMFD, ASCE, Vol. 93, No. SM3, May. (1967).
2. Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," JSMFD, ASCE, Vol. 97, SM9, Sept., (1971).
3. Schmertmann, J. H., "Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? -- Yes, But ... !," Special Technical Publication 654, ASTM, Oct. (1978).
4. Arulmoli, K., Arulanandan, K., and Seed, H. B., "New Method for Evaluating Liquefaction Potential," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No.1, pp. 95-114(1985).
5. M. Oda, "Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests," Soils and Foundations, Vol. 12, No4, Dec., 25-38(1972c)。
6. M. Oda, "Co-Ordination Number and Its Relation to Shear Strength of Granular Materials," Soils and Foundation, Vol. 17, No. 2, June, pp. 29-42(1977).
7. Mitchell, J. K., Chat, J. M. & Carpenter, G. C., "The Influence of Sand Fabric on Liquefaction Behavior,"

Report No. TE 76-1, Geotechnical Eng., University of California, Berkeley (1976).

8. M. Oda, "Deformation Mechanism of Sand in Triaxial Compression Tests," Soils and Foundations, Vol. 12, No. 4, Dec., pp. 25-38 (1972c).
9. Arulanadan, K. & Kutter, B. L., "A Directional Structure Index Related to Sand Liquefaction," Proceeding on the Speciality Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Pasadena California, pp. 213-229 (1978).
10. Arulanandan, K., and Muraleetharan, K. K. (1988), "Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties, part I." J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 114(7), 753-770.
11. Arulmoli, K., "Electrical characterization of sands for in situ prediction of liquefaction potential," thesis presented to the Univ. of California at Davis, Calif., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy (1982).
12. Arulanandan, K., and Muraleetharan, K. K., "Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties, part II" J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 114(7), 771-790 (1988).
13. 簡連貴, 「以導電度探討粒狀土壤組構與力學行為之研究」, 國立中央大學土木工程研究所, 博士論文 (1990)。
14. 李建中, 「砂土液化與電組之變化」, 第一屆大地工程學術研究

討論會論文專集, pp. 65-77(1985).

15. Archie, G.E., "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics," A.I.M.E., Trans., Vol.146, pp. 54-61(1942).
16. 朱專誌, 「電性參數與粒狀土壤剪力模數相關性之研究」, 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所, 中壢(1989)。
17. Erchul, R. A. and Ronald, C. G., "Electrical Resistivity Used to Measure Liquefaction of Sand, " Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109, No. 5, May, pp. 778-782(1982).
18. 簡連貴, 李建中, 朱專誌, 「導電度在粒狀土壤結構研究之應用」, 中華民國第十二屆全國力學會議論文集, 台北市, STAMROC-12-603, 第649-658頁(1988)。
19. Casagrande, A., and Carrillo, N., "Shear Failure of Anisotropic Material." Proc. Boston Soc. Civ. Engrs 31, pp. 74-87(1944).
20. Parkin, A. K., and Gerrard, C. M., "Deformation of Sand in Hydrostatic Compression," Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE, Vol.94, No.SM1, pp. 336-340 (1968).
21. Arthur, J. R. F., and Menzies, B. K., "Inherent Anisotropy in a Sand," Geotechnique, Vol. 22, No.1, pp.115-128 (1972).
22. Arthur, J. R. F., and Chura, K. S., and Dunstan, T., "Induced Anisotropy in a Sand, " Geotechnique, Vol. 27,

No. 1, pp. 115-128(1977).

23. Ochiai, H., and Lade, P. V., "Three-Dimension Behavior of Sand with Anisotropic Fabric," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109, No.10, pp. 1313-1328(1983).
24. Brewer, R., Fabric and Mineral Analysis of Soils, New York, John Wiley & Sons(1964).
25. Field, W. G., "Towards the Statistical Definition of a Granular Mass," Proc. 4th Aus. NZ Conf. Soil Mech., pp.143-148(1963).
26. Chen, Y.C., "Experimental Determination of Fabric for Granular Materials," Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca New York(1986).
27. Cundall, P.A., Drescher, A., and Strack, O. D. L., "Numerical Experiments on Granular Assemblies : Measurement and Observations," Deformation and Failure of Granular Materials, IUTAM Symposium, Delft, pp.335-370 (1982).
28. M. Oda , "The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of Sand," Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, June, pp. 1-18(1972b).
29. Mulilis, J. P. and Chan, C. K. and Seed, H. B., "The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sand, " Report No. EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, University of

California, Berkeley, July(1975).

30. 李崇正, 「砂土剪變形行為之研究」, 博士論文, 國立台灣大學土木工程研究所, 台北(1987)。
31. Oda, M. and Konishi, J., "Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear," Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 25-37(1974).
32. Johansson, C. E., "Structural Studies of Sedimentary Deposits," Geologiska Föreningens, Stockholm, Föreläsningar, Vol. 87, pp. 3-61 (1965).
33. Mahmood, A. and Mitchell, J. K., " Fabric Property Relationships in Fine Granular Materials," Clay and Clay Minerals, Vol. 22, pp. 397-408 (1974).
34. Miura, S. and Toki, S., "A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation Strength Properties of Sand," Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, Mar., pp. 62-77(1982).
35. 何樹根, 「以飽和砂土之導電度對飽和砂土之結構及液化之初步探討」, 碩士論文, 國立中央大學土木工程研究所, 中壢(1986)。
36. Dafalias, Y. F. and Arulanadan, K., "Electrical Characterization of Transversely Isotropic Sands," Archives of Mechanics, 31, 5, Warsaw, pp. 723-739(1979).
37. Kutter, B. L., "Electrical Properties in Relation to Structure of Cohesionless Soils, " Master Dissertation, Calif. University, at Davis(1978).

38. Maxwell, J. C., Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford, Clarendon Press (1873).
39. Fricke, H., "A Mathematical Treatment of the Electrical Conductivity and Capacity of Dielectric Dispersive Systems," Physics Review, Vol. 24, pp. 575-587 (1924).
40. Bruggeman, D. A. G., "Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten Von Heterogenen Substanzen," Ann. Phys. Lpz. 5, Vol. 24, pp. 636 (1935).
41. Hardin, B. O., and Drnevich, V. P., "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 98, No. SM7, July, pp. 667-692 (1972).
42. Hardin, B. O., and Richart, F. E., Jr., "Elastic Wave Velocities in Granular Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1, Feb., pp. 33-65 (1963).
43. Iwasaki, T. and Tatsuoka, F., "Effects of Grain Size Grading on Dynamic Shear Moduli of Sand," Soils and Foundations, Vol. 17, No. 3, Sept, pp. 19-35 (1977).
44. Stokoe, W. O., Foote, P. D., and Busang, P. F., "Shear Moduli Measurements Under True Triaxial Stresses," Advances in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions, ASCE Convention, Detroit, Michigan, Oct., pp. 166-185 (1985).
45. Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Fukushima, S., and Sudo, H.,

- "Stress Conditions and Stress Histories Affecting Shear Modulus and Damping of Sand Under Cyclic Loading," Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 19, No. 2, June, pp. 39-54(1979).
46. Hall, R. J., and Richart, F. E., Jr., "Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils," Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE," Vol. 89, No. SM6, Nov., pp. 27-56(1973).
47. Iwasaki T., Tashuoka F. and Takagi Y., "Shear Modulus of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading," Soils and Foundations, Vol. 18, No. 1, Mar., pp. 25-40(1978).
48. Lambe, T. W., "The Permeability of Fine-Grained Soils," Permeability of Soils, ASTM STP 163, American Society for Testing and Materials, pp. 56-67(1954).
49. Taylor, D. W., Fundamentals of Soils Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.(1948).
50. Leonards, G. A., "Engineering Properties of Soils," Foundation Engineering, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N. Y., pp. 107-139(1962).
51. Scheidegger, A. E., The Physics of Flow Through Porous Media, 3rd ed., University of Toronto Press, Toronto, Canada(1974).
52. Seed, H. B., "A Modern Approach to Soil Compaction," Engineering, Construction and Maintenance, pp77-93(1965)
53. Bjerrum, L., and Huder, J., "Measurement of Permeability

- of Compacted Clays," 4th International Conference on Soil Mechanics, Vol. 1, pp 6-8(1957).
54. Mitchell, J. K., Hooper, D. R., and Campanella, R. G., "Permeability of Compacted Clay," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM4, Proc. Paper 4392, July, pp. 41-65(1965).
55. Michaels, A. S., and Lin, C. S., "Permeability of Kaolinite," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46, No. 6, pp 1239-1246(1954).
56. Sanjeevan, S., "Correlation of electrical properties of soils to permeability," thesis presented to the Univ. of California, at Davis, Calif., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (1983).
57. Archie, G.E., "Introduction to petrophysics of reservoir rock," Bulletin of the AAPG, Vol. 34, No. 5, 943 - 961(1950).
58. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.(1981).
59. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y.(1969).
60. Jackson, P. D., "An Electrical Resistivity Method for Evaluating the In-Situ Porosity of Clean Marine Sand," Marine Geotechnology Engineering, Vol. 1, No. 2, pp. 91-

-115(1975).

61. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 15th Edition, APHA -AWWA-WPCF (1980).
62. Li, J. C., Chien, L. K., Chuan, C. C., "Electrical Conductivity and the Mechanical Behavior of Granular Soil Fabric," XVII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Grenoble, France(1988).
63. Angus, R. B., Electrical Engineering Fundamentals, 蘇慶宗等翻譯，復漢出版社發行。
64. 游啓享，廖瑞堂，「最小及最大乾土單位重試驗之變動係數比較研究」，中國土木水利工程學會七十一年年會論文專集，高雄，Vol. III (1982)。
65. 日本土質工學會，「土質試驗法」，土質學會編(第2回改訂版)，pp. 172-188(1979)。
66. 吳偉特，「多重篩貫降方法準備飽和砂性土壤試體之液化強度反應」，國立台灣大學工程學刊，第二十五期，第11-30頁(1979)。
67. Vaid, Y. P. and Negussey, "Relative Density of Pluviated Sand Samples," Soils and Foundations, Vol. 24, No. 2, pp. 101-105(1984).
68. 李豐博等，「土壤動態性質研究」，港灣技術研究所，75-研(五)，(1986)。
69. 林少思，「台北盆地粉質土壤之動態性質」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，中歷(1987)。
70. 蕭仲光，「以導電度探討飽合砂土滲透性與液化潛能之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，中歷(1990)。

71. Arulanandan, K. and Smith, S. S., "Electrical Dispersion in Relation to Soil Structure," Journal of the Soil Mech. and Found. Division, ASCE, Vol.99, No.12(1973).
72. Livingston, J., " A NondestructiveElectrical Method of Determining In Situ Sand Density, " Thesis Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of M.S.,University of California, Davis(1974).
73. Arulanandan, K., "Pore Structure, In Situ Density, and Liquefaction of Sands," Technical Paper, Unoversity of California, Davis(1975).
74. Fraser, D. C. and Ward, S. H., "Electrical Pore Space Geometry of Porous Media," Inst. of Eng. Research, Univ. of California, Berkeley, Report No. MT-63-8, July(1963).
75. Cundall, P. A., "A Computer Model for Simulating Progressive, Large-sacle Movements in Blocky Rock System ," Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mech., Nancy II, Art. 8, (1971).
76. Dantu, P., "Contribution a l'etude Mecanique et Geometrique des Milieux Pulverulents," Proc. 4-th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., London, 144-148, 1957.
77. Wakabayashi, T., "Photoelastic Method for Determination of Stress in Powdered Mass," Proc. 7-th Japan Nat. Cong. Appl. Mech., 152-158(1957).
78. 簡連貴, 李建中, 『構造因素數值模擬應用在粒狀土壤結構性質之研究』, 中華民國第十四屆全國力學會議, 中歷, pp.851-860

(1990)。

79. Cundall, P. A., and Strack O.D.L., "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, " *Geotechnique*, 29, No.1, 47-65 (1979).
80. Das, Braja M., *Advanced Soil Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, London, pp. 91-94 (1983).
81. Hillel, D., *Applications of Soil Physical*, Academic Press, New York (1980).
82. Carmen, P.C., *Flow of Gases Through Porous Media*, Academic Press, New York (1956).

附 錄 一 砂土之滲透係數與電性參數計算分析

本文利用蕭仲光[70]之研究結果，係以顆粒累積曲線及比表面積(SSA)，結合電性參數(Electrical Parameter)，而求得滲透係數 k 值之方法，對台灣西部砂性土壤進行滲透性之評估。

其分析步驟及結果如下：

1. 利用台中港砂性土壤之透水試驗，求得平均孔隙率 $n=40.60\%$
2. 由砂樣平均構造因素計算與孔隙率之關係如圖 6-4 所示，求得孔隙率 $n = 40.60\%$ 時，其平均構造因素 F_{ave} 為 3.57。
3. 根據蕭仲光[70]之建議，平均形狀因素(f_{mean})與平均構造因素(F_{ave})及孔隙率(n)之關係，如(6-12)式所示。因此台中港砂性土壤之平均形狀因素為

$$f_{mean} = -\log(3.57)/\log(0.406)=1.412$$

4. 本研究採用 Arulanandan 等人[10]所建議之方法，利用篩分析得出之顆粒分佈曲線結果加以計算。

即將圖 4-1 之曲線加以切割，使其線段近乎直線，然後取其每段之平均粒徑及過篩百分比，代入(6-13)計算即可推求出砂樣之比表面積(SSA)，本實驗用砂其 SSA 值計算結果為 $250\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 。

5. 由蕭仲光[70]之建議，電性參數可用平均構造因素(F_{ave})；與比表面積(SSA)及平均形狀因素(f_{mean})等組合來描述。因此將步驟 2、3、4 之結果代入(6-11)式，求得台中港砂之電性參數為 $3.17 \times 10^{-6}\text{cm}^2$ 。

6. 由滲透係數與電性參數之關係如圖 6-12 所示，將電性參數求得之結果，查得滲透係數 K 值為 $2.50 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 。

本研究利用變水頭試驗進行分析，求得台中港砂性土壤之 k 值為 $0.63 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ ，因此由電性參數與變水頭試驗所求得之滲透係數，兩者比較結果其值相當符合。