

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以碎形參數描述組構對顆粒性材料強度之影響(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-032-001-

執行期間：94年08月01日至95年10月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：楊長義

計畫參與人員：王永煜、吳東杰、楊振榮、薛新翰、李柏翰

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 11 月 7 日

前 言

顆粒性大地材料中(例如卵礫石)之礫石顆粒的外形主要取決於顆粒的形狀、圓度，而顆粒外形將嚴重影響顆粒群體的大小過篩級配行為、與最終的堆疊形式。因此，在同一級配亦可以有多种不同排列結果。進而影響顆粒性材料的力學行為(例如剪力強度)。故顆粒外形、級配、與堆疊形式等組構因素是影響顆粒性材料的剪力強度之重要因子。

本報告是為期三年之研究成果，研究目的在利用碎形理論中之碎形維度與叢集維度來描述顆粒外形、級配、與堆疊形式等組構因素，並建立其與粒性材料的剪力強度之關係性。在物理模型模擬試驗上，以拌含粗骨材與黏性填充物(石膏與紅土)製造複合土為模型材料，借由試體準備中對之參數事先控制，探討以上三個組構因素其間之關聯性，及其與粒性材料的剪力強度之關係性，期盼瞭解顆粒外形、級配、與堆疊形式等對顆粒性材料之剪力摩擦行為的影響。其中，並引用影像處理技術與 GIS 量化功能以擷取個別顆粒之空間幾何資料，取代人工判讀之費時缺點。

第一章 研究動機

顆粒外形嚴重影響著顆粒群的堆疊密度、過篩行為、壓縮性、滲透性與剪力強度，因此顆粒性材料的力學行為通常與其顆粒外形有密切關係。通常，顆粒形狀與顆粒大小亦有關，兩者常常須同時探討，例如小顆粒較大顆粒越易趨於圓形。顆粒的外形與所含顆粒大小分佈範圍或顆粒級配(gradation)亦左右顆粒材料最終的堆疊排列方式(packing)。因此，顆粒性大地材料的力學行為例如剪力強度一般除受其組成顆粒外形與大小控制外，亦受到顆粒級配與堆疊形式等組構因素之影響。

以卵礫石層為例，國外 Sowers (1979)曾指出：當粗料體積大於細粒料兩倍時，則可分為接觸接合(contact-bound) 與孔隙接合 (void-bound) 兩種：其中，孔隙接合式組構係粗粒料先行沉積且相互接觸，而後細顆粒再填充於粗粒料四周空隙中，其粗粒料可以直接相互接觸，整體之力學行為由粗粒料主控。而接觸接合式組構係粗細粒料同時沉積，膠結料集中在粗粒料間而形成堅硬的骨架，骨架間之空隙則由細料加以填充，以致粗粒料彼此相互分隔，其力學行為反由細粒料所主控。國內，洪如江教授(1995) 早已指出：當複合土中礫石含量大於 75%時，礫石粒皆已相互接觸，其力學行為由礫石成份決定。褚炳麟教授(1996) 則由多年現地卵礫石直剪累積經驗判斷，芎林頭科山礫岩層與林口台地礫石層之礫石結構型式較屬接觸接合式組構，其抗剪磨擦角約為 47 度。而三義頭科山礫岩層則較屬孔隙接合式組構，其抗剪磨擦角約 54 度。從中比較亦可看出孔隙接合之力學行為由粗顆粒主控，且其抗剪磨擦角與粗顆粒百分比有關。

本研究試驗方式以控制骨材之級配類型，使試驗條件事先可控制。將剪斷面上骨材粒徑大小及分佈位置以數位相機取相，再透過影像分析技術，再引用碎形理論的觀念求得反應級配特徵的方格維度和反應顆粒特徵的雙點相關維度兩個參數以建立顆粒性材料之力學特性與級配方格維度、雙點相關維度分佈效應兩參數之關係，期望經由 D_b 、 D_{corr} 值能預測現地卵礫石之剪力強度參數，以進一步了解卵礫石之力學特性。

第二章 卵礫石相關文獻

2.1 組構堆疊的特性

顆粒材料 (granular material) 是粒狀材料 (particulate material) 之一，粒狀材料是互相接觸之固體顆粒或構造單元組成，並於孔隙填充液體或氣體之材料。顆粒材料則是固體顆粒或構造單元為肉眼可辨識 ($>0.1\text{mm}$) 之粒狀材料。

Cundall (1983) 曾將組構分為兩類，一為幾何組構 (geometric fabric)，另一類為應力組構 (kinetic fabric)。其中幾何組構又可分成兩種：(1) 個別顆粒之方向與 (2) 顆粒間之相互關係 (見圖 2.1)。幾何組構之構成參數包含了接觸數、中心點連線向量分佈、長軸向量分佈、級配、孔隙比等眾多因素。

對礫石顆粒型材料而言，礫石其本身特性並不會受外界擾動有太大的影響，但其堆積型態則會影響顆粒間之特性。而徐志謙 (1995) 以數值模擬方式研究發現顆粒形狀與顆粒級配均強烈控制著顆粒間的組構參數。

2.2 卵礫石材料

卵礫石材料有其獨特之堆積模式，Matheson (1986) 認為堆石材料中若有適量之細粒料 (小於 4 號篩者) 包裹大塊石，則將減少大顆粒間點對點的接觸，而降低因接觸點破碎以致造成大顆粒之旋轉。

對於基質含量之分類，國內學者亦曾發展其分類方式，洪如江 (1995) 觀察紅土礫石台地之膠結情形，以土壤之觀點將紅土礫石分為三種膠結情形

為三種膠結情況：基質構造、接觸結合構造、孔隙結合構造，如圖 2.2(a)、(b)、(c)。王文祥(1997)採取以下四種做分類：顆粒支持結構—基質淘選度良好、顆粒支持結構—無基質填充、顆粒支持結構—基質級配良好、基質支持結構—基質淘選度良好，如圖 2.3。

褚炳麟(1996)則由多年現地卵礫石直剪累積經驗判斷，芎林頭崙山礫岩層與林口台地礫石層之礫石結構型式較屬接觸接合式組構，其抗剪磨擦角約為 47 度。而三義頭崙山礫岩層則較屬孔隙接合式組構，其抗剪磨擦角約 54 度。從中比較亦可看出孔隙接合之力學行為由粗顆粒主控，且其抗剪磨擦角與粗顆粒百分比有關。但仍未詳細深究複合土中其間粗顆粒各個別組構變數之確切影響。

顆粒支持結構礫石層材料力學行為機制一般有以下幾點別注意(董家鈞與潘以文，1995)：

- (a) 由於礫石顆粒間有細顆粒之砂或凝聚性填充物存在，接觸應力將降低，且產生礫石顆粒束制作用。但受較大工程應力之礫石層材料需重視顆粒破碎效應，尤以低強度及風化程度較高之礫石顆粒為甚。
- (b) 礫石顆粒尺寸增加不但造成顆粒破碎效應顯著，同時，膨脹及旋轉所需能量均提高，尤以低圍壓時為甚。
- (c) 礫石層材料異向性明顯，顆粒排列方式引起之組構異向性源於顆粒接觸平面大多約與最大力方向垂直，而形狀引起之異向性乃源於顆粒長軸多垂直於最大作用力方向且平行流體運動方向。
- (d) 礫石層材料由於地質作用不同，可能產生所謂顆粒或泥質支持之礫石層。

- (e) 輕度膠結作用所提升顆粒接觸點之附著力，對礫石接觸機制影響不大，但對砂顆粒則產生相對滑動及滾動被限制之影響，此一效應將反映至材料整體力學行為。

2.3 剪力強度之影響因素

2.3.1 粒徑大小與試體尺寸之影響

Marsal(1969)認為試體直徑與其所含最大顆粒之粒徑之比值小於6時，尺寸效應(scale effect)會有明顯之影響，但當比值漸增後，影響程度將逐漸減小，而當此一比值大於10左右時，抗剪摩擦角則趨於一固定值。Marachi(1969)對最大粒徑與試體直徑之比值下了一個結論：「在最大粒徑範圍內之礫石佔總重30%以下時，對優良級配之礫石土而言比值應大於6；對不良級配之礫石土而言，比值應大於20」，若低於這個比值，則將因大顆粒材料間之互相干擾，而影響到求得的強度。

Bishop(1984)以最大粒徑3.18cm之試體進行直剪試驗，結果並未顯發現粒徑大小對材料之內摩擦角有明顯的影響。Holtz與Gibbs(1956)曾分別以最大粒7.62cm、3.81cm與1.91cm之試體做三軸試驗，結果發現強度隨最大粒徑之增加而略增，但相差不多。

Kirkpatrick(1965)等人之研究結果發現孔隙比相同條件下，尖峰內摩擦角將隨最大粒徑之增加而降低。褚炳麟等人(1996)考慮不同級配對抗剪強度參數之影響，發現在相同孔隙率下，平均粒徑越小之試體，其尖峰與殘餘摩擦角越大。但Tombs(1969)及Charles(1973)之試驗結果，則指出尖峰內摩擦角會隨最大粒徑之增加而有些微的增加。

綜合以上研究結果，可發現試體直徑與最大粒徑之比值應大於 6，以避免尺寸效應之影響，且最大粒徑與強度有關，但與內摩擦角卻不盡相關。

2.3.2 顆粒形狀之影響

Chen (1948) 由實驗證實在孔隙比相同的情形下，角顆粒比圓形顆粒具有較高之內摩擦角。Holtz and Gibbs (1956) 以最大粒徑為 7.62cm 之礫石土進行三軸試驗，結果顯示顆粒形狀為角形 (angular) 之強度最高，次角形 (subangular) 顆粒之強度次之，而以次圓形 (subrounded) 顆粒之強度最低，其主要的原因乃是顆粒形狀的差異影響顆粒表面之粗糙度，因而造成強度之差異。

Koerner (1970) 指出顆粒形狀會影響堆石材料之剪力強度，而以一比值來表示顆粒形狀的差異，稱之為球狀率 (sphericity)，其定義為顆粒投影之面積除以顆粒外接圓之面積。Koerner 利用優良級配之飽和石英材料進行排水三軸試驗，結果顯示當球狀率越小時，其相對密度越高，而抗剪角也越高。

由上述前人研究顯示，顆粒形狀明顯影響堆石材料之剪力強度，角顆粒因為受剪時容易有互鎖、堆疊、卡住等行為出現，造成強度提升，因此比圓形顆粒具有較高之內摩擦角。

2.3.3 孔隙比或孔隙率之影響

Lee and Seed (1967) 認為試體之應力-應變曲線會受孔隙比之影響，緊密狀態之試體於小應變時便可達到尖峰強度，而後強度便隨即下降；而疏鬆試體之應力-應變曲線則較具塑性行為，曲線緩慢上升，且當應變已達很大時，應力也不會下降，亦同時發現顆粒性土壤之破壞包絡線會受初始孔隙比之影響，緊密土壤之破壞包絡線為一曲線，而疏鬆土壤之包絡線為一直線。

Marachi 等人 (1969) 解釋孔隙比之所以對卵礫石層的剪力強度造成影

響，主要是因為孔隙比為級配與顆粒形狀的函數。由此可知影響剪力強度的各因素，彼此之間是息息相關而非獨立的。孔隙比之變化對強度之反應非常敏感，影響程度很大。一般而言，優良級配之密度較大，孔隙比較小，其剪力強度亦較高，同時應力-應變曲線之尖峰點（peaking）也較明顯，呈現脆性破壞行為；反之，級配不良之試體，密度較小，孔隙比較大，較不容易有尖峰強度，應力-應變曲線呈現較具塑性行為。

2.3.4 級配之影響

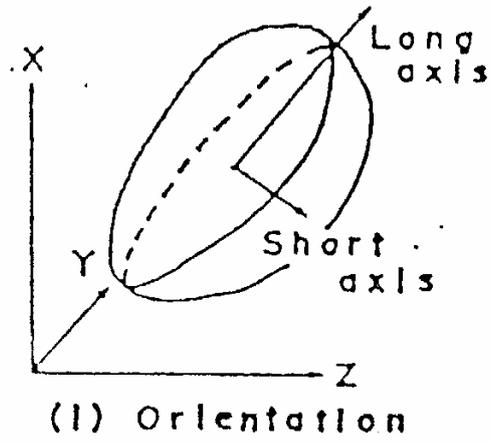
Bishop (1984) 認為在孔隙比相同條件下，均勻級配材料之內摩擦角高於優良級配材料，但在達到最大密度之情況下，優良級配材料之內摩擦角則高於均勻級配材料。Holtz (1961) 研究黏土質礫石土 (clayey gravel soil) 中礫石含量對其強度之影響，發現當礫石含量小於 65% 時，礫石土之內摩擦角將隨礫石含量之增加而增加；針對不同級配之顆粒性材料，發現在相同夯實能量情況下，細粒料含量越高，其抗剪強度則有降現象；若比較不同之細粒料成分，當細粒料為黏土時其剪力破壞包絡線呈直線關係，但細粒料為砂性土壤，包絡線則稍具凹向下的曲線關係。

Holtz and Gibbs (1956) 提出級配不良之材料其破壞包絡線呈現曲線關係，相反地，級配優良材料之破壞包絡線則是呈現直線關係。kirkpatrick(1965) 曾以人為方式調整 Leighton Buzzard 砂成為三種不同級配分別進行三軸試驗，結果顯示，不同級配的同類材料其抗剪強度亦不相同。Casagrande (1965) 指出當級配優良之夯實土壤在達到最大乾密度時，會呈現最小的壓縮性及最大抗剪強度。

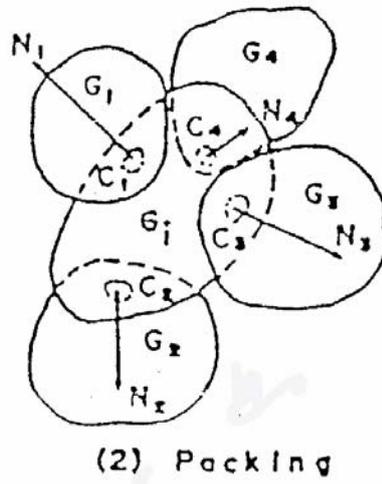
鄭文隆等人 ((1987) 曾針對台灣西部之紅土礫石材料，利用大、中、小型室內試驗設備進行力學性質研究，結果證實細料含量對紅土礫石之強度確

有重要之影響，細料含量增加則凝聚力增加，而內摩擦角減少。吳偉康(1994)以苗栗鯉魚潭水庫第三借土區之礫石土為材料，進行三軸 UU 試驗，發現紅土礫石之內摩擦角隨細粒土壤之增加而減少。國內學者研究結果顯示細粒含量、礫石含量對礫石土強度有影響。然而，此二因素皆可視為級配之函數，即當級配已定時，兩者亦同時被決定。

由以上一些學者的研究，可以瞭解到在相同材料，相同之試驗方法之前提下，級配對礫石土之強度特性確有其不可忽略之影響。就堆石材料之抗剪強度而言，級配優良之材料比級配不良之材料有較佳的抗剪強度。

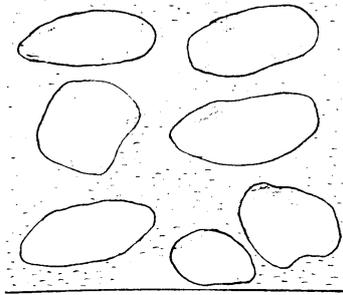


(a) 個別顆粒方向

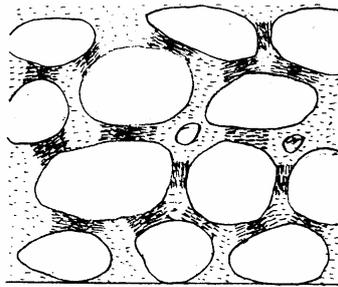


(b) 個別顆粒間相互關係

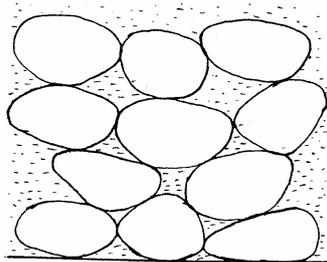
圖 2.1 幾何結構之示意圖



(a) 基質膠結土

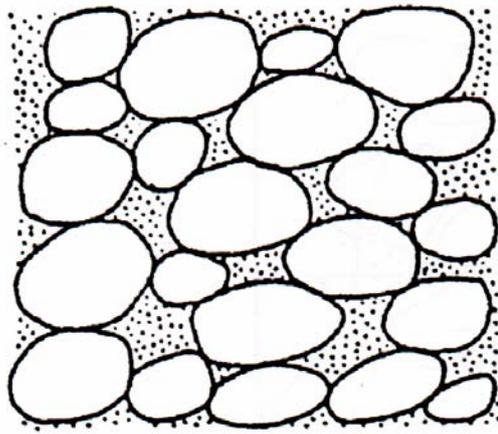


(b) 接觸接合膠結土

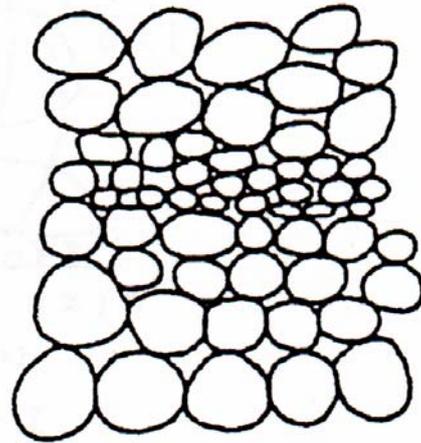


(c) 孔隙接合膠結土

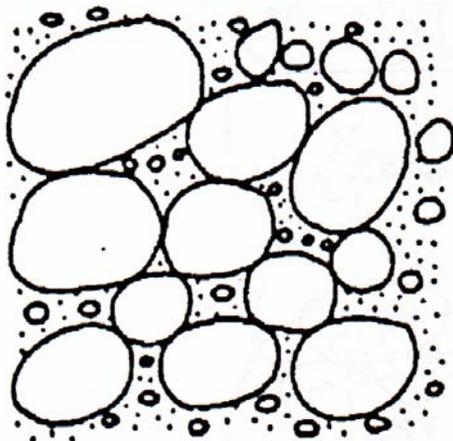
圖 2.2 紅土礫石中礫石與細土膠結狀況圖(洪如江，1995)



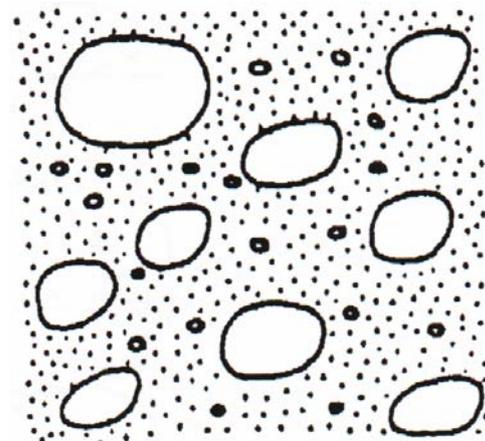
(a) 顆粒支持結構，基質掏選度良好



(b) 顆粒支持結構，無機質填充



(c) 顆粒支持結構，基質級配良好



(d) 基質支持結構，基質掏選度良好

圖 2.3 礫石層之描述 (王文祥, 1997)

第三章 碎形維度之計算法

Mandelbrot (1982) 認為自然界之幾何形狀特徵必有規則性，且統計數學上必須滿足自我相似性及連續不可微分兩個條件。若物件滿足上述兩個條件，則可以一碎形維度來描述其幾何特徵。此碎形維度可以不是整數。

關於碎形維度的計算法有許多種，各個計算法之維度的定義也因此有不同含意。本文將利用方格維度(box dimension)與雙點相關維度(two-point correlation dimension)的觀念針對單一顆粒形狀及群體顆粒成員或排列所表現出的維度值加以探討。

3.1 單一顆粒之碎形維度

利用方格覆蓋法(box-counting method)求取單一顆粒形狀之方格維度過程為：將一物體放在尺寸為 s (mesh size) 的規則網格上，然後計數此物體所覆蓋的網格數目 N ，每一種網格尺寸 s 會對應一個覆蓋網格數目 N ，其值與顆粒形狀或外形規則度有關。

接著，依序由變化網格尺寸 s ，並計算其對應覆蓋網格數目 N 。再將其繪成橫座標為 s 、縱座標為 N 之雙對數圖形，如圖 3.1(a)。該雙對數圖形若有良好線性關係，則表示覆蓋網格數目 N 與網格尺寸 s 具冪級數關係，存在碎形特色(Yang & Juo, 2001)。令該直線斜率為 $D_{(sp)}$ ，則 $D_{(sp)}$ 即為該顆粒之方格維度，而公計算式如下：

$$D_{(sp)} = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} \quad (3-1)$$

圖 3.1(a)為例來解說二維的方格維度計數，圖中同一圓形顆粒在不同的尺規網格量測下，將分別具有不同的覆蓋格數 N ，尺規越小則 N 越大。此外必須注意：只要有覆蓋到某一方格的一小部分即可算一格。而且，尺規愈小網格愈密集，則降低該顆粒所覆蓋的面積計算格數的誤差。最後，將每一個方格尺規及其所對應的覆蓋格數繪於雙對數座標上，並利用最小平方迴歸求得一條直線(參考圖 3.1(b))，則該直線斜率的絕對值即為方格維度 D_{sp} ，其意義可視為顆粒所佔滿的程度。

3.2 顆粒級配之碎形維度

將群體顆粒之粒徑級配曲線與方格維度關聯，係 Yang & Juo(2001)應用 Xie(1993)碎形模型演進而成。Xie(1993)發展推導一套碎形模型來描述巨觀顆粒尺寸的分佈，而定義粒徑分佈的函數如下：

$$Y_{n(x)} = \text{粒徑小於篩孔尺寸 } x \text{ 的顆粒數目百分比}$$

$$Y_{v(x)} = \text{粒徑小於篩孔尺寸 } x \text{ 的顆粒體積百分比}$$

且若令全部試體的顆粒數目為 N_t ，則介於上下兩尺寸為 x 及 $x+dx$ 的篩網間之顆粒數目(dN)可以下式表示，其中 $dY_{n(x)}$ 表示粒徑介於(x)及($x+dx$)篩網間顆粒數目的百分比：

$$dN = N_t dY_{n(x)} \quad (3-2)$$

經過推導可得到：

$$Y_{v(x)} \propto x^{3-D} \quad (3-3)$$

上式乃是將碎形表示為體積分佈函數，因此方格維度 D_b 可由 $\log(Y_{n(x)})$ 對

$\log(x)$ 所得圖形的斜率 (slope) 得到，即 $D_b = 3 - \text{slope}$ 。

在工程運用上，常使用粒徑分佈曲線來描述土壤顆粒的特性，此曲線通常用累積過篩顆粒的重量與篩孔尺寸來做圖，因此楊長義、楊振榮(2001)及 Yang and Juo (2001) 進一步將 Xie 的碎形模型表示成顆粒重量與顆粒尺寸(篩孔尺寸)的關係，可令： $Y_{M(x)}$ = 粒徑小於篩孔尺寸 x 的顆粒重量百分比。因為，顆粒重量等於顆粒體積乘以顆粒單位重，故亦可以得知：

$$Y_{M(x)} \propto x^{3-D} \quad (3-4)$$

因此，方格維度 D_b 亦十分容易的由傳統進行篩分析所得到的粒徑分佈曲線半對數關係：縱軸(顆粒重量百分比, % finer) — 橫軸 $\log(\text{顆粒粒徑}, x)$ 關係，將縱軸由 (% finer) 改為 $\log(\% \text{ finer})$ 重新以雙對數關係表示粒徑分佈曲線，便可由圖形中 [$\log(Y_{M(x)})$ — $\log(x)$] 之回歸直線斜率(3-D)得知該顆粒大小分佈特性之方格維度 $D_b(3 - \text{斜率})$ 。 D_b 之意義可視為大大小小顆粒群在空間的填塞鬆緊度，反應顆粒相互間之支持度或力的接觸點數(contact points)。其中，回歸直線線性度之相關系數也反應顆粒群組成之碎形程度，相關系數愈高愈具碎形特徵，顆粒愈小顆粒數愈多，兩者具冪級數關係，其指數次方值為 $3 - D_b$ (參見式(3-4))。

3.3 顆粒群堆疊之碎形維度

(1) 叢集維度 $D_{C(r)}$ ：

本案研究初期楊振榮 (2002) 以叢集維度 $D_{C(r)}$ (cluster dimension) 的觀念來計算顆粒間疏密的程度。叢集維度是以顆粒數目與計測半徑間的關係來

描述群體中各別顆粒距離群體分佈中心點的疏密關係，即使用不同計測半徑 r 的圓來覆蓋自然顆粒群體，然後計數半徑 r 的圓內所包含的顆粒數目 M 。如該群體顆粒相互的間隔距離是碎形的分佈，則計測半徑與所包含的顆粒數目間存在冪級數關係，兩者可表示如下式：

$$M_{(r)} = Cr^D \quad (3-5)$$

其中 C 為材料常數，與材料本身之組成材質有關。

計算叢集維度 $D_{C(r)}$ 之操作說明示如圖 3.2(a)：以自然離散顆粒群體之質心為圓心，將一系列已知半徑的計測同心圓覆蓋在離散體上，而後計數每個半徑 R 圓區域範圍內所包含到的顆粒數目 $M_{(R)}$ 。再將所得之 R 和 $M_{(R)}$ 之關係以雙對數座標繪圖表現如圖 3.2(b) 所示，即縱軸 $\log(M_{(R)})$ -橫軸 $\log(R)$ ，圖中之迴歸直線斜率即為該顆粒性材料離散特性之叢集維度 $D_{C(r)}$ ，其值可反應顆粒群之叢聚程度(degree of clustering)。

但本研究經三年嘗試後，發覺此法在選取同心圓中心無一定標準，若圓心位於整體顆粒體系分佈較離散處，則其叢集維度較低;反之，若圓心位於較集中處，則叢集維度較高。因此，另外提出雙點相關維度(two-point correlation dimension) D_{corr} ，以兩兩顆粒間距分佈成份來表示顆粒間之疏密程度，以避免叢集維度之缺憾。

所謂的雙點相關維度 D_{corr} 主要用於描述不規則分佈質點群集之幾何分

佈特徵，可用於描述群體中個別質點分佈的疏密關係，藉此可了解質點的空間堆疊特性。以卵礫石層為例，礫石層可視為是由許多顆粒先後沉積所堆成之自然分佈碎形，因此可以相關維度來描述其顆粒間之堆疊情形。進一步，透過反應顆粒間疏密關係的碎形維度，可加以建立其與卵礫石層強度工程性質的關連。

雙點相關維度 D_{corr} 主要以顆粒對偶(pair)對數與兩兩顆粒間距來描述離散體的疏密程度 (Kagan and Knopoff, 1980)，敘述如下：

$$s(i, j) = |X_i - X_j| \quad (3-6)$$

其中， $s(i, j)$ 為所有任兩質點之間距，而相關函數 $C(r)$ 之計算如下：

$$C(r) = \frac{2}{n(n-1)} \times (\text{Number of pair } s(i, j) \text{ with } s(i, j) < r) \quad (3-7)$$

經過正規化後，在小於 r 距離內下所包含之對數兩者具有以下關係：

$$C(r) = k \cdot r^{D_{corr}} \quad (3-8)$$

式(3-8) 再經取雙對數後：

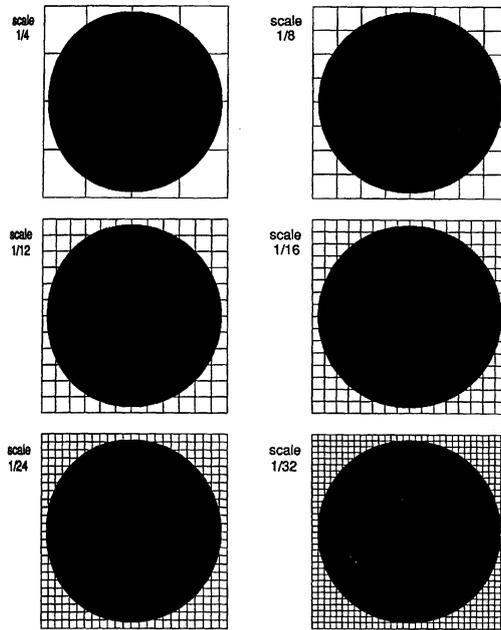
$$\log C(r) = D_{corr} \log(r) + k \quad (3-9)$$

若 $\log C(R)$ 與 $\log (R)$ 之關係是線性，則質點分佈具有自我相似特性之碎形，其迴歸直線之斜率碎形維度 D_{corr} 。本文實際計算方式是以 Coughlin and Kranz (1991) 公式為主：Coughlin and Kranz (1991) 指出地震位置之質點分佈型態具有重現的自我相似特性，而表現震源質點位置分佈之空間分佈特性，可用每兩次地震位置之距離關係來表達，及兩震源點間之相關函數為：

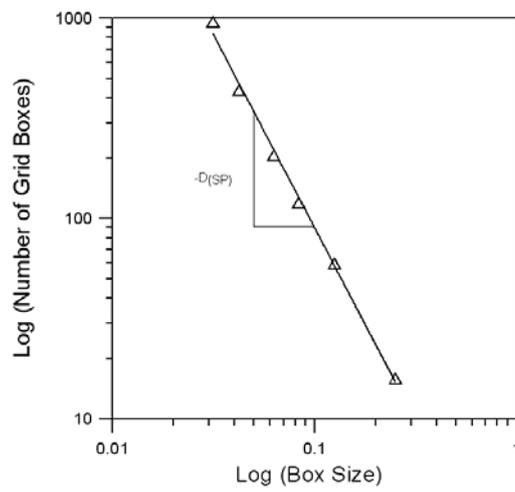
$$C(R) = \frac{2N}{n(n-1)} \quad (3-10)$$

其中 N 為兩震源點距離 R 小於某一距離 r_0 之組數， n 為空間中震源點總數。因此，計算雙點相關維度 D_{corr} 之操作方法如圖 3.3(a) 所示：將所有離散體之質心座標以影像分析軟體求出後，計算兩兩質心間之距離 R 。依照 R 的尺度歸類成 k 組等級(類似篩分析)，每一組的範圍為 $R_0 \leq R_i \leq R_1$ 、 $R_0 \leq R_i \leq R_2$ 、...、 $R_0 \leq R_i \leq R_k$ ，且計數屬於每組中的對數 N 個。再將所得到之 R 與 $C(R)$ 之關係以雙對數座標表現，即縱軸 $\log C(R)$ — 橫軸 $\log(R)$ (圖 3.3(b))，圖中迴歸直線斜率即為該顆粒性材料離散特性之疏密程度 ($D_{\text{corr}} = \text{斜率}$)。

相較於叢集維度需考慮同心圓的中心位置，雙點相關維度則無此點困擾。因此法主要是以兩兩質心間距來計算維度，而不需考慮同心圓中心點放置處，所以利用雙點相關維度將更能表現群體顆粒之疏密程度。本文在計算雙點相關維度時，主要是針對分佈於二維平面上的顆粒群體之相對距離疏密關係，故 D_{corr} 值的範圍應介於 0 到 2 之間：當 D_{corr} 值為 2 時，表示空間中之顆粒群體達到最為緊密的情形。反之，當 D_{corr} 越接近 0 時表示空間中之顆粒群體呈現越稀疏之狀態。

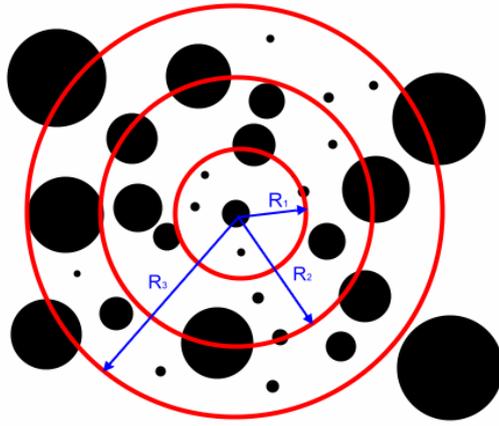


(a) 以不同網格覆蓋顆粒之計數示意

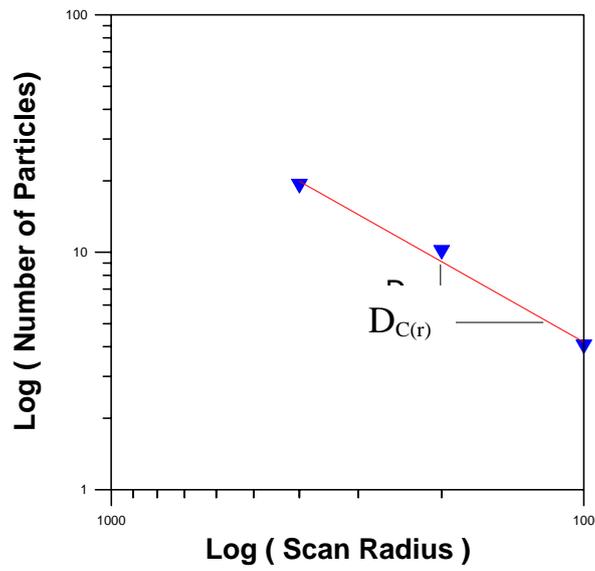


(b) 方格大小與方格數之雙對數圖繪製

圖 3.1 以網格覆蓋顆粒計數方格維度 $D_{(sp)}$ 之求法

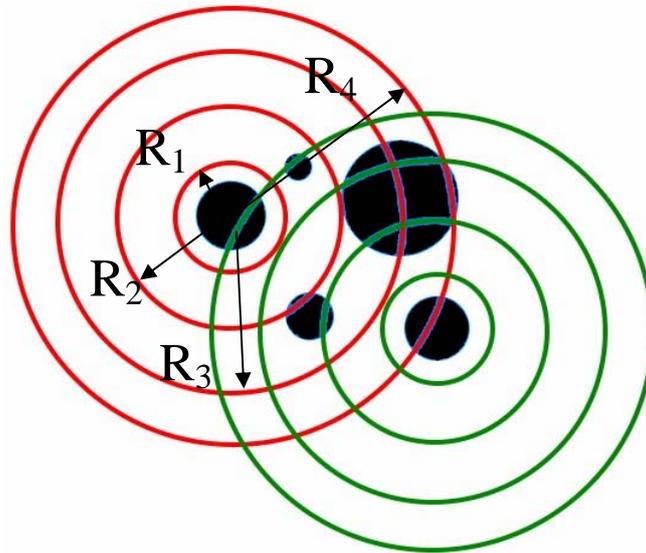


(a) 以同心圓覆蓋計數顆粒數示意圖

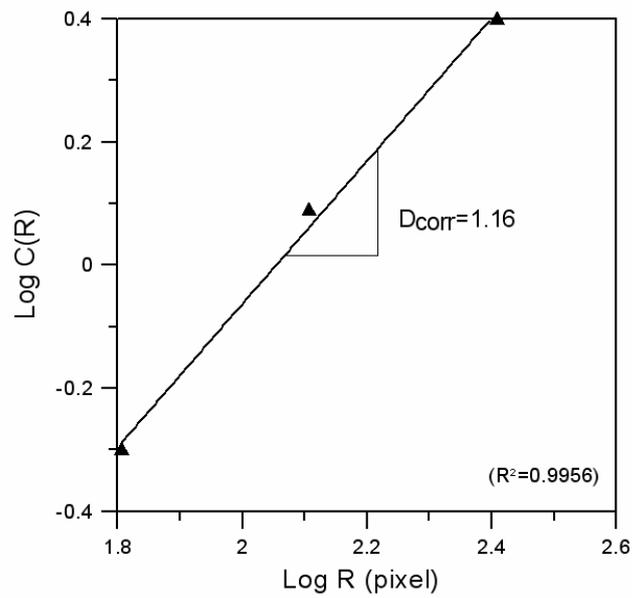


(b) 同心圓大小與函涵蓋顆粒數之雙對數圖繪製

圖 3.2 以同心圓覆蓋顆粒群計數其叢集維度



(a) 計算兩兩顆粒質心間距並分級計量



(b) 各等級顆粒距離與相關函數之雙對數圖繪製

圖 3.3 雙點相關維度 D_{corr} 計算方法

第四章 試驗配置與規劃

4.1 直剪儀簡介

本文試驗主要對顆粒性材料進行直接剪力試驗，目的為求得顆粒性材料之摩擦角及膨脹角等力學性質。直接剪力試驗儀係利用空壓機之氣壓帶動油壓機之油壓系統，正向應力施加方式則採槓桿定平系統來施加呆重，試體盒的內部空間為 $100 \times 100 \times (\text{高})50\text{mm}$ 。在直剪盒兩側是以壓克力板透明為內盒，以防止側邊顆粒掉出，也可從側邊觀察骨材剪動時顆粒旋轉的狀況（如圖 4.1）。剪動方向上安裝一位移計(精度 0.01mm)及應力衡盒(精度 0.5kg)，以量測水平剪位移及剪力；另於試體正上方安裝一自由式位移計(量測範圍 $\pm 25\text{mm}$ 、精度 0.0003mm)，以量測受剪過程之膨脹曲線。

4.2 試體種類與準備

本文旨在探討顆粒性材料之剪力行為，試體種類主要是以顆粒是否允許旋轉條件區分為三種：第一種為純骨材試驗（FE 組）、第二種為骨材添加紅土為填充材試驗（PR 組）、第三種為以石膏填充鎖住骨材試驗（FX 組）。利用不同填充材料模擬骨材不鎖住、部分鎖住與完全鎖住三種顆粒旋轉運動邊界條件。

(1) FE 組試體：使用不同粒徑的骨材(宜蘭石)，滿足骨材粒徑須小於試體邊長 (10cm)之 1/10，故本文選取的宜蘭石粒徑分別為 1.30~2、2~4.86、4.86~9.8、9.8~13.2mm 之間。調配如圖 4.2 中所示 A、B、C、D 四種級配

骨材（其中 A、B、C 屬於均勻級配，D 屬於優良級配），不添加填充基質材料。

骨材放置試體盒的方法係依據 CNS 10989 試驗中粒料四分法取樣，以減少骨材大小顆粒分佈不均。在放入試體盒時，並自製夯實器做分層夯實的動作（如圖 4.3(a)），每一層皆夯實 20 次。考慮骨材之最大粒徑，研究中試體盒四周預留 1cm 的剪力槽（如圖 4.3(b)）。

(2) PR 組試體：採用與 FE 組試體相同的四組級配之骨材，添加 15% (重量比) 之紅土作為填充材料 (紅土含水量 15%)。骨材與紅土放入試體盒方法也是使用四分法並做分層夯實。

(3) FX 試體：採用與 FE 組試體相同的四組級配之骨材 (重量佔 70%)、添加 30% 的石英砂與石膏 (與水) 填充材料製作完整試體。先將調配好的骨材級配料與石膏、石英砂及水混合，攪拌均勻後灌入模具中 (如圖 4.4)，而灌入之後務必搗實試體使試體成孔隙膠結 (顆粒與顆粒支撐)。

試體在室溫下風乾後即可拆模後，放置於烘箱養護 (40°C) 烘乾，直到含水量達穩定為止 (約 9%~10% 間)。圖 4.5 為養護過程中之含水量變化，圖中可得知試體於養護後 24 小時含水量即達穩定，本文為確保試體之含水量確實達穩定，進行試驗前試體均養護時間至少 48 小時。

4.3 填充材料與骨材之基本性質

(1) 填充材：

實驗中所使用之紅土為淡水紅土，其紅土之基本性質如下：土粒比重

$G_s = 2.72$ 、紅土之粒徑分佈曲線參見圖 4.6，由圖中可知細砂含量約 4%，粉土含量約為 41%，黏土含量為 55%。由阿太堡限度及紅土之粒徑分佈曲線，依統一土壤分類法此土壤為高塑性無機黏土(CH)。

本實驗所使用之 315 石英砂(宜蘭砂)顆粒形狀為次稜角狀 (圖 4.7)，其最大粒徑小於 0.425mm，粒徑分佈曲線如 (圖 4.7) 所示，為不良級配之砂 (SP)。而圖 4.8 則為本研究材料骨材、與兩種填充材(紅土、石英砂)之粒徑分佈比較。

此外，本研究並預骨材與填充材料間以三種不同正向應力 ($\sigma_n = 0.083, 0.16, 0.32\text{MPa}$) 進行直剪試驗，以求得兩材料間之基本摩擦角 ϕ_b 。將 10 cm (長) × 10 cm (寬) × 5cm (高) 之長方形試體以 5 噸直接剪力試驗儀進行試驗，試驗結果如所示：石膏與石膏兩材料間之 $\phi_b = 37.5^\circ$ (如圖 4.9)，石膏與骨材兩材料之 $\phi_b = 38^\circ$ (如圖 4.10)，骨材與骨材兩材料之 $\phi_b = 39.5^\circ$ (如圖 4.11) 所示。

4.4 試驗步驟

每個試體皆以直接剪力試驗儀進行直剪試驗，由剪應力-剪位移與膨脹曲線求得此試體之尖峰摩擦角 ϕ_p 及膨脹角 i 。再對於剪斷面上之骨材拍照，以進行方格維度及雙點相關維度之分析。

在 FX 組 (骨材與石膏填充材料) 先使完整試體預先產生一剪斷面，如圖 4.12 (a) 所示之裂縫即為試體之預裂剪斷面，圖 4.12 (b) 則為其裂面內部情況。接著將此試體歸位復原後再施作一次直剪試驗(剪動速率

1mm/min)，藉以得到此剪斷面之剪應力-剪位移曲線以及膨脹曲線，進而獲得剪斷面上之內摩擦角(ϕ)及膨脹角(i)等力學性質。在 FE 組(純骨材試驗)與 PR 組(以紅土為填充材料)則直接進行試驗。

4.5 直剪資料整理

經直剪試驗可獲得剪斷面之尖峰摩擦角(ϕ_p)為內摩擦角與膨脹角之總和，及 $\phi_p = \phi + i$ ，如圖 4.13(a)示意。本研究欲探討的剪動平面之問題，試體之強度所考慮之因素是分佈效應(顆粒之級配、堆疊的方式，見圖 4.13(b)示意)，故剪斷面之尖峰剪力強度 τ_p 均先扣除凝聚力係數 C 值，再依正向應力 σ_n 與膨脹角 i ，反求剪動平面上混合材料之內摩擦角 ϕ 。

本文安排在三種正向應力之下($\sigma_n = 0.083、0.16、0.32\text{MPa}$)下求得凝聚力 C：FX 試體之凝聚力 C 為 0.003MPa(如圖 4.14)，其 C 值可忽略；在 PR 試體之凝聚力 C 為 0.013MPa，其 C 值須扣除。

3.6 剪斷面之取像方法

試體經過剪動後之取像動作，在取像前須將上下直剪盒推開(如圖 4.15)。在純骨材試驗部份(FE 組)，骨材與骨材顆粒間無任何填充材料，所以在取像時會拍攝到上下兩層之骨材，以至於無法進行影像分離。所以，研究中特添加白色廣告原料液體至試體中，使能區分剪力面上之上層之骨材外形，於孔隙內添加白色廣告原料液體的高度至試體盒高(見圖 4.15)。在骨材與紅土部分(PR 組)，其施作方法與 FE 組類似，但不需添加白色廣告原料。

在骨材以石膏填充材鎖住部分(FX組)，因試體經直剪後其骨材皆黏於上盤，下盤幾乎無骨材，所以取像時是以上盤顆粒分佈為主要依據。在取像時拍攝鏡頭須與試體剪裂面成垂直，並以環形燈管光源照射，避免產生陰影。

4.6 試驗符號說明

本研究設計了 A、B、C、D 四組級配，每組級配有 4 種不同堆疊之試體，又顆粒的活動程度之邊界條件：FE—純骨材試體，骨材旋轉自由；PR：骨材以紅土填充，骨材旋轉部分受限；FX：骨材以石膏填充，骨材被鎖住無法旋轉。如 **FE (A1)** 其代表第一種邊界條件試驗 A 級配堆疊方式 1 之試體。如 **PR (B1)** 其代表第二部份試驗 B 級配堆疊方式 1 之試體。

4.7 試驗之可重複性驗證

本研究主要探討的是顆粒性材料之力學行為，其試驗之可重複性相當重要。因此本文以 PR 組之 A 級配(PR (A))、及 FX 組之 C 級配(FX (C))，各重複作兩組試體。經由直剪試驗可以得到剪應力-剪位移與膨脹曲線如圖 4.16、或圖 4.19：由圖中可以發現，其尖峰剪力強度與膨脹角均相當接近，具有可重複性。

進一步，將同級配的兩對照試體剪斷面採取影相（見圖 4.17 或圖 4.20），經 eVSION 影像分析(詳後)之後可以得到每個骨材的面積值與中心點座標位置等屬性資料，再進行影像篩分析(photo-sieving)：由 EXCEL 中具有對資料點進行邏輯判斷，轉換成等效圓直徑的觀念，將每個顆粒依序以不同的篩號大小進行邏輯判斷，以決定每一個個別篩號上之累積留篩顆粒數，將之表現成粒徑分佈曲線（見圖 4.17(c)、或圖 4.20(c)）、與級配方格維度值（見圖 4.18(a) 或圖 4.21(a)）；同理，由顆粒質心位置等屬性資料，亦可計算兩兩顆粒間之距離，藉此判斷顆粒群之相對排列堆疊情形（見圖 4.18(b)或圖 4.21(b)）。由圖 4.18 及圖 4.21 可以發現：兩兩試體剪斷面上之粒徑分佈曲線與級配碎形維度值均極為相近、且雙點相關維度亦極為接近，均證明了試驗可重複性。

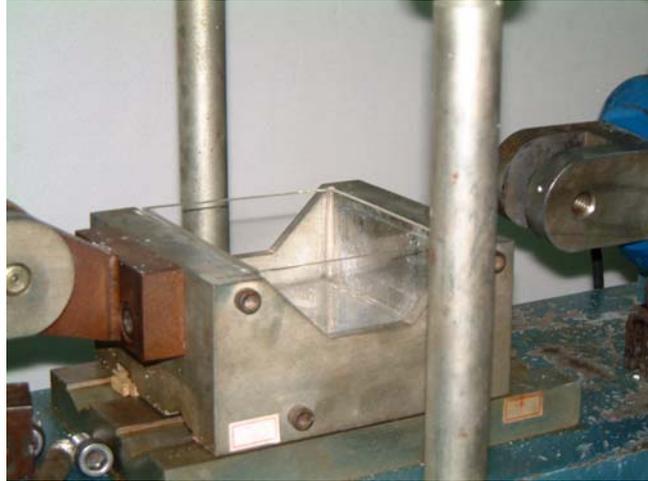


圖 4.1 直剪盒中之可透視壓克力內盒

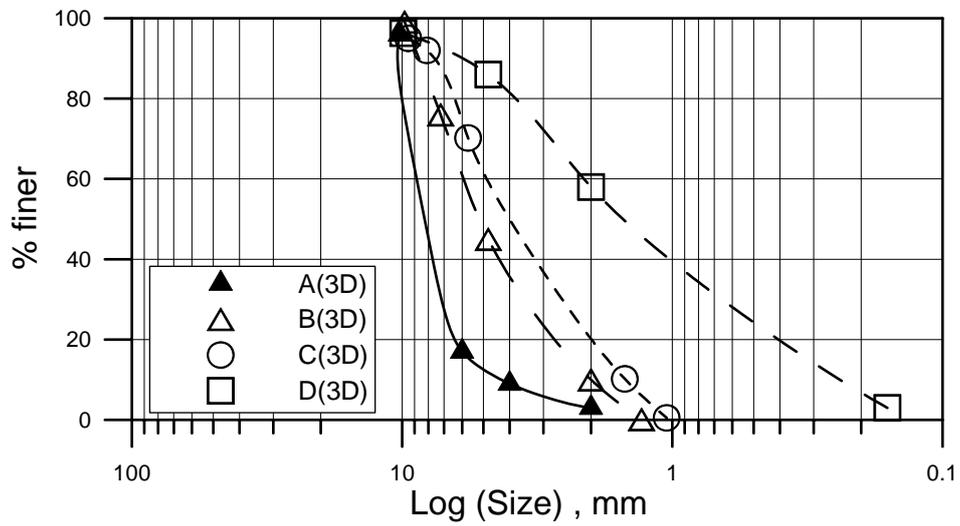
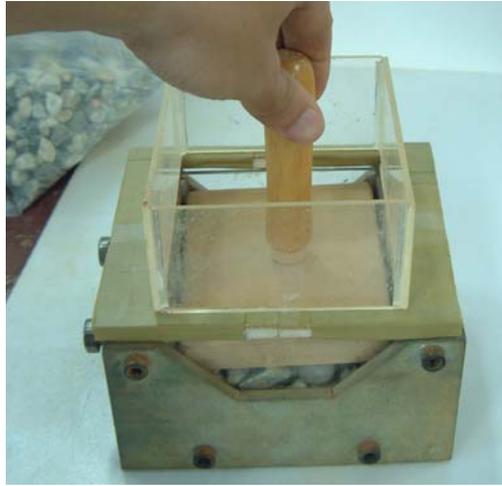


圖 4.2 本文使用之四種骨材級配曲線 (A、B、C：均勻級配；D：優良及配)



(a) 分層夯實過程



(b) 直剪試體之預留剪力槽高度 (1cm)

圖 4.3 FE 及 PR 組骨材分層夯實置入試體盒情況

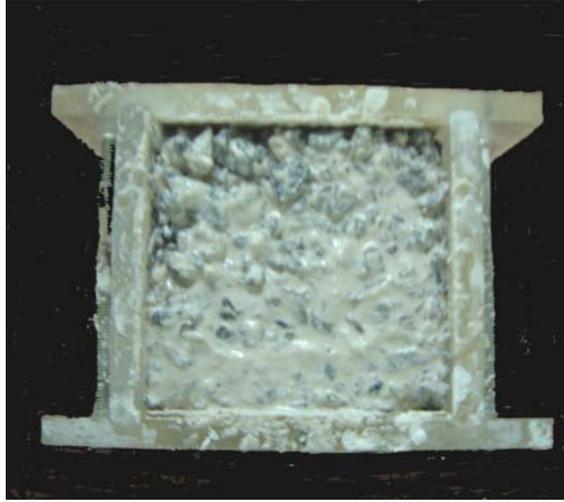


圖 4.4 FX 組試體中骨材與石膏混合後灌入試體之情況

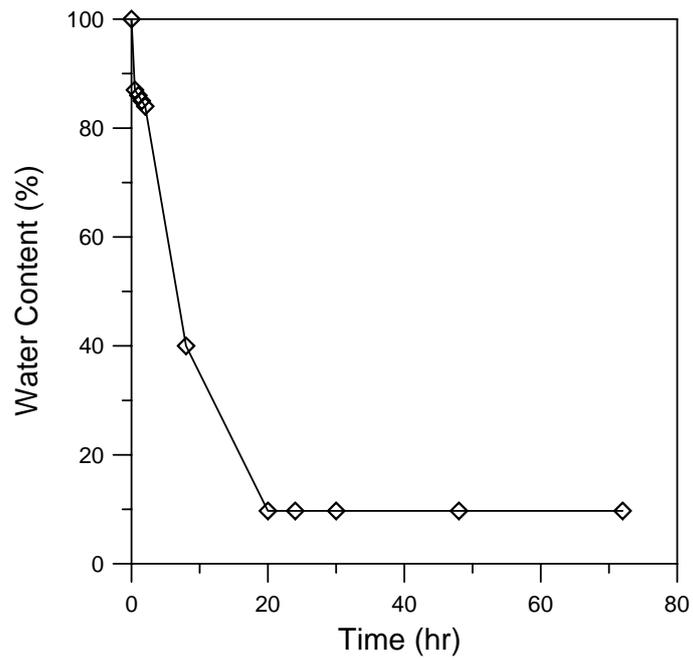


圖 4.5 FX 組試體含水量隨養護時間之變化

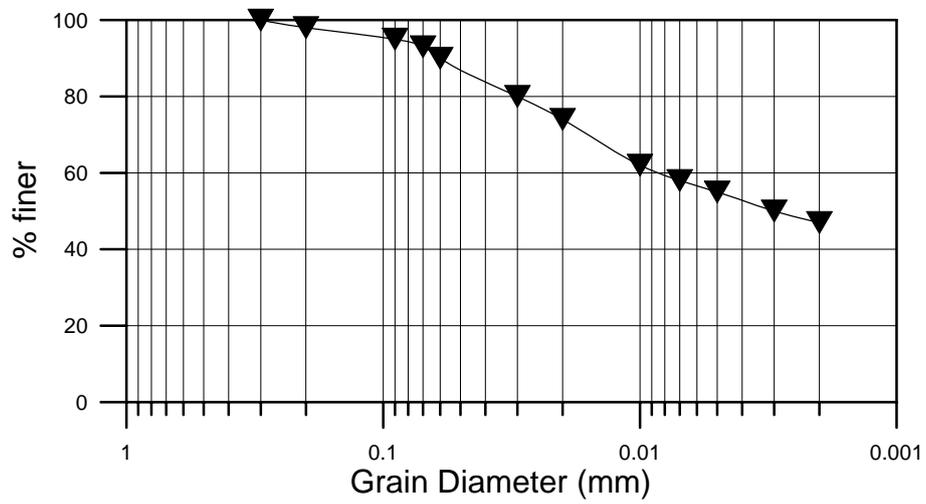


圖 4.6 PR 組填充材料（紅土）之粒徑分佈曲線

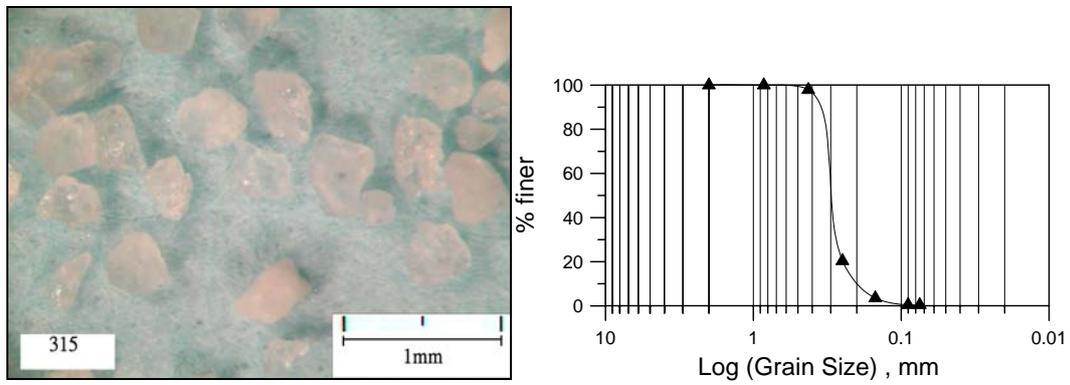


圖 4.7 315 號石英砂(宜蘭河砂)之形狀及粒徑分佈 (洪勇善、游以民, 2002)

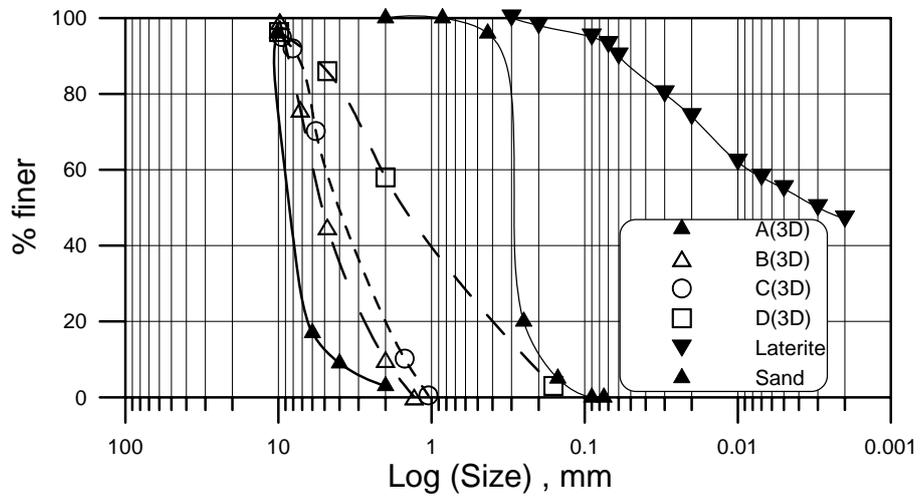
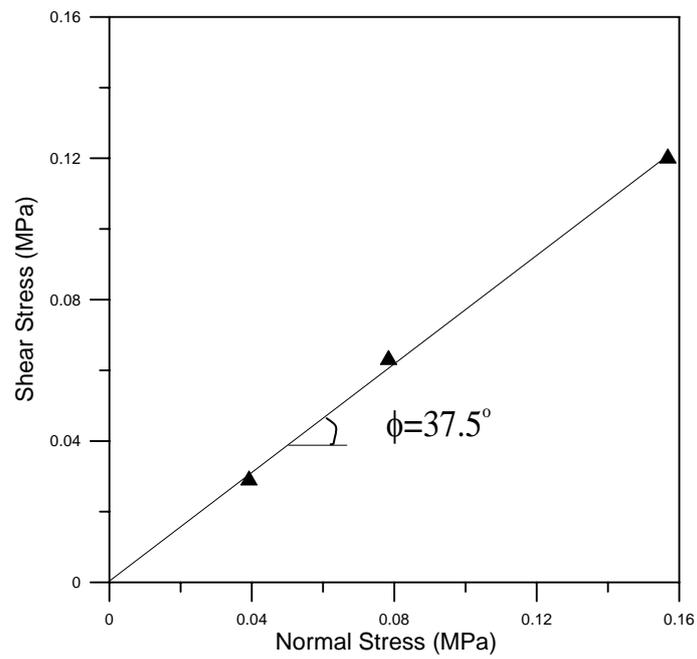
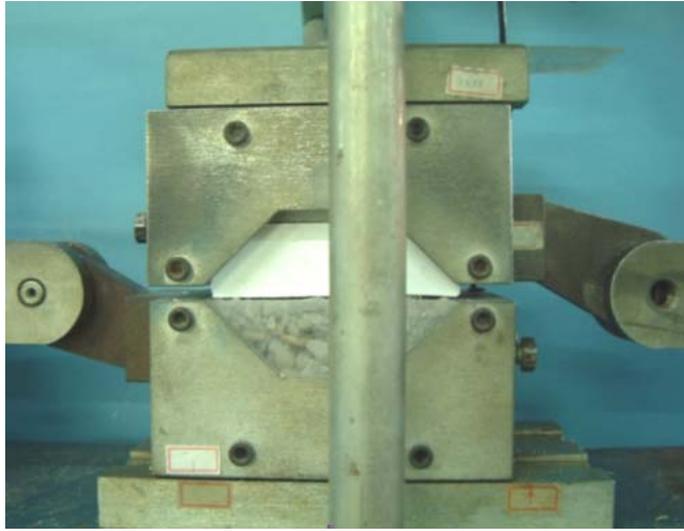


圖 4.8 四種級配骨材、紅土與石英砂之粒徑分佈比對

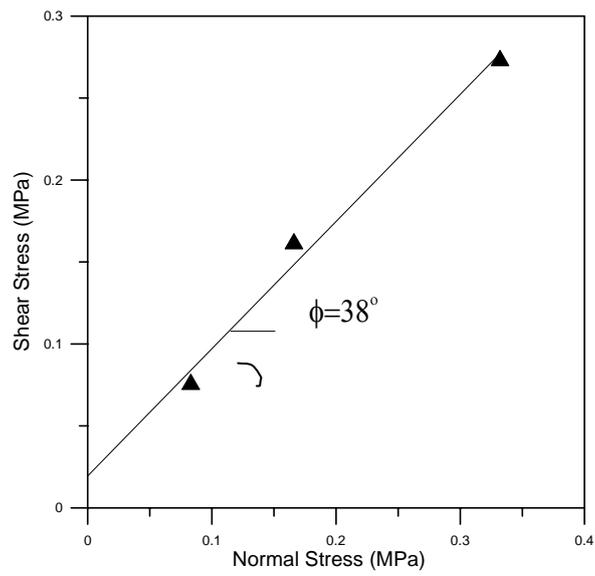


(b) 基本摩擦角

圖 4.9 石膏與石膏間之基本摩擦角試驗結果

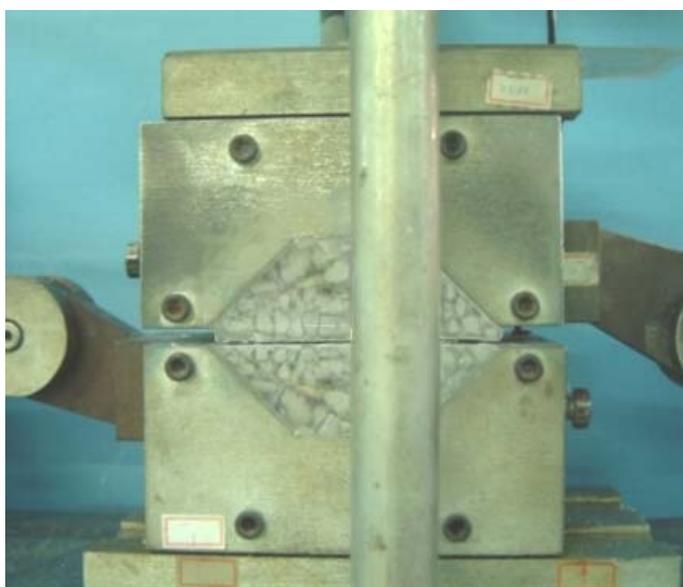


(a) 試驗過程示意圖

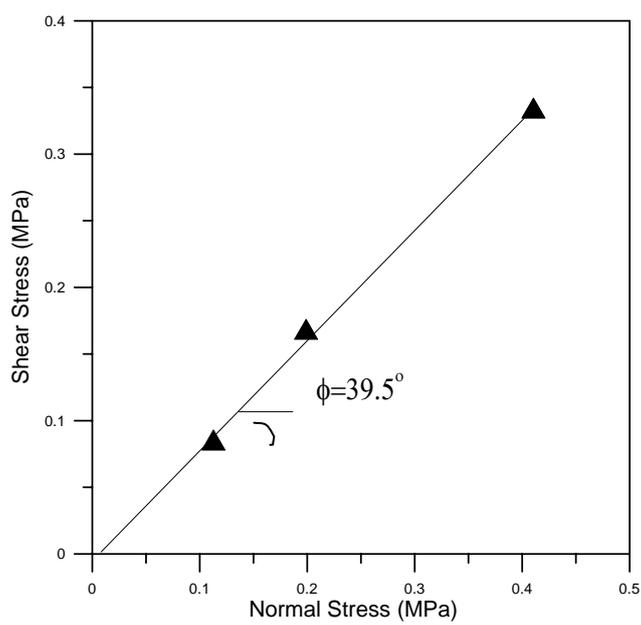


(b) 兩材料間之摩擦角

圖 4.10 石膏與骨材兩材料之摩擦角

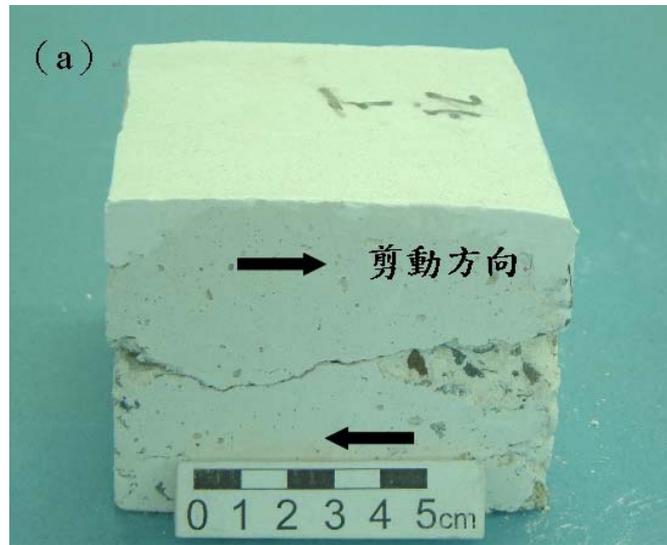


(a) 試驗過程示意圖



(b) 骨材之摩擦角

圖 4.11 骨材與骨材兩材料之摩擦角

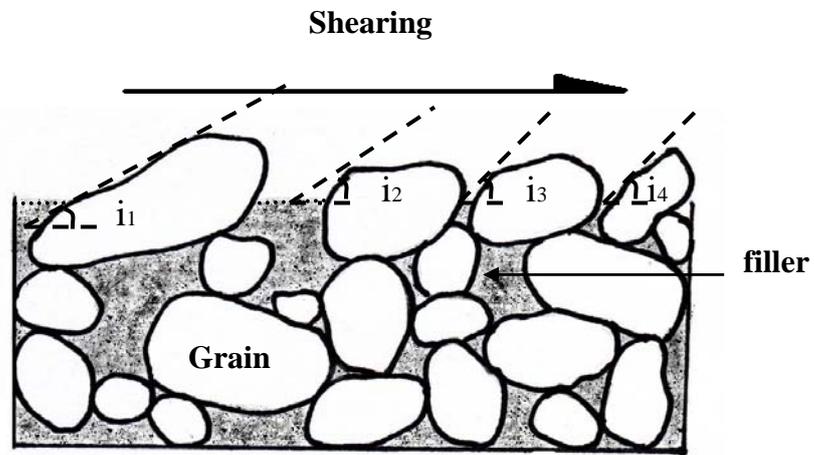


(a) 先經直剪儀剪斷預裂面

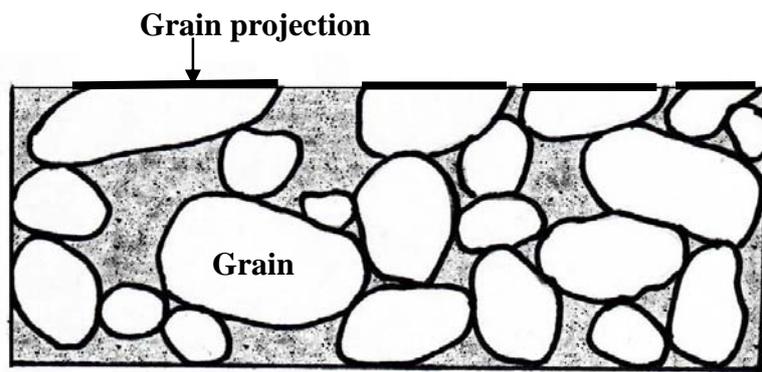


(b) 其上盤裂面狀況

圖 4.12 FX 組試體預裂面準備

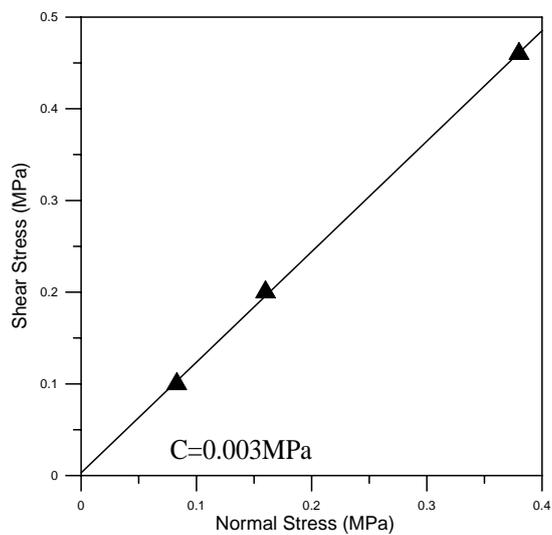


(a) 膨脹角之來源

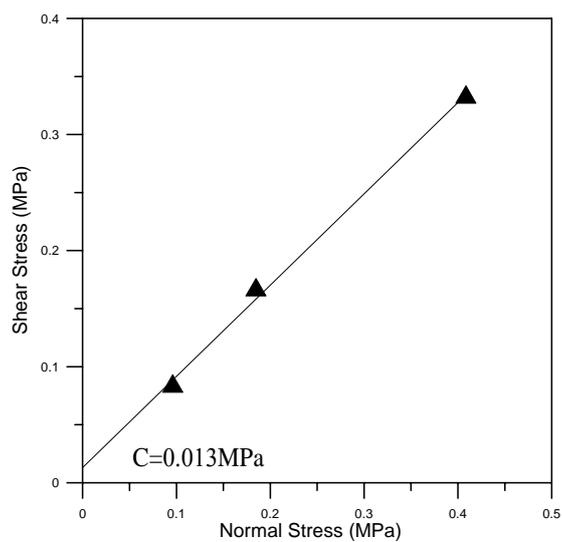


(b) 剪動平面之顆粒分佈

圖 4.13 顆粒性材料之膨脹角與平面剪動示意圖



(a) FX 試體之凝聚力



(a) FX 試體之凝聚力

圖 4.14 FX 組與 PR 組試體兩者之凝聚力



(a) FE 組試體剪裂後將直剪上下盒推開



(b) 剪動面添加白色廣告原料處理

圖 4.15 FE 組試體剪裂後添加白色廣告原料以利影像分析

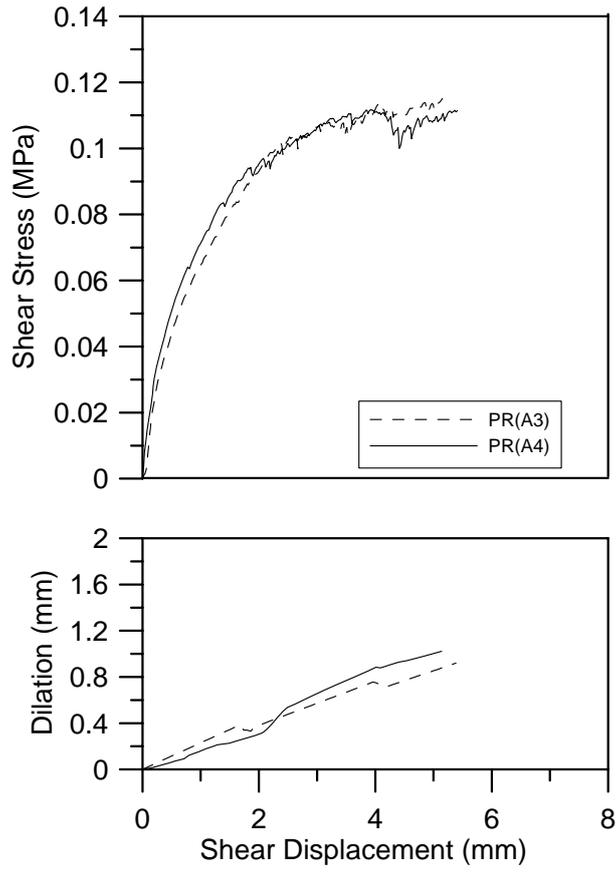
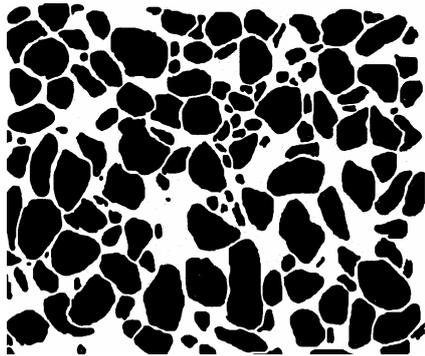
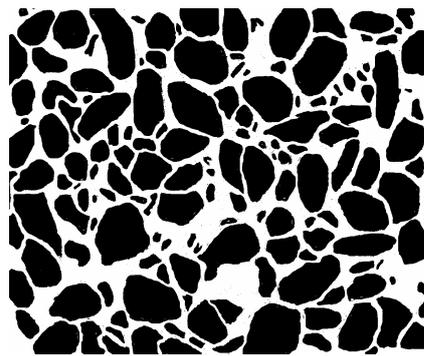


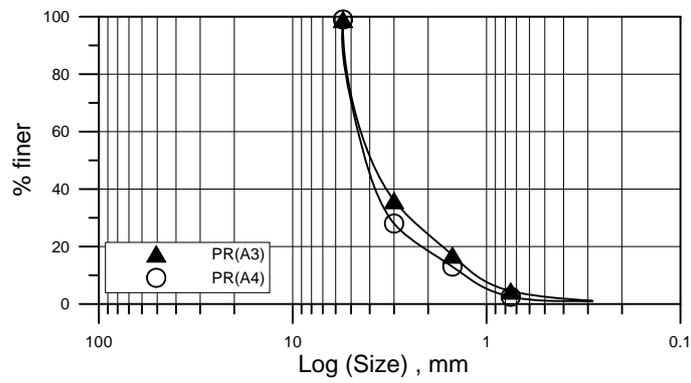
圖 4.16 剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線之重複性測試 (A 級配)



(a) PR(A3)剪斷面骨材分佈

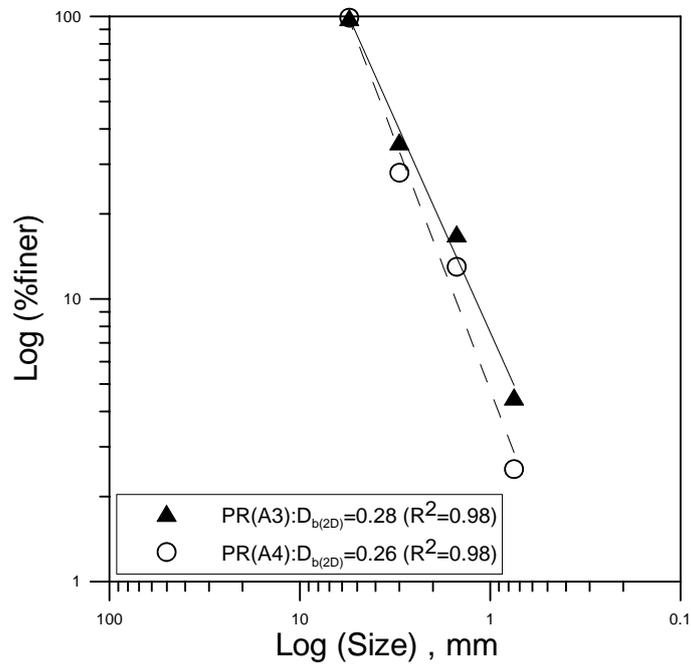


(b) PR(A4)剪斷面骨材分佈

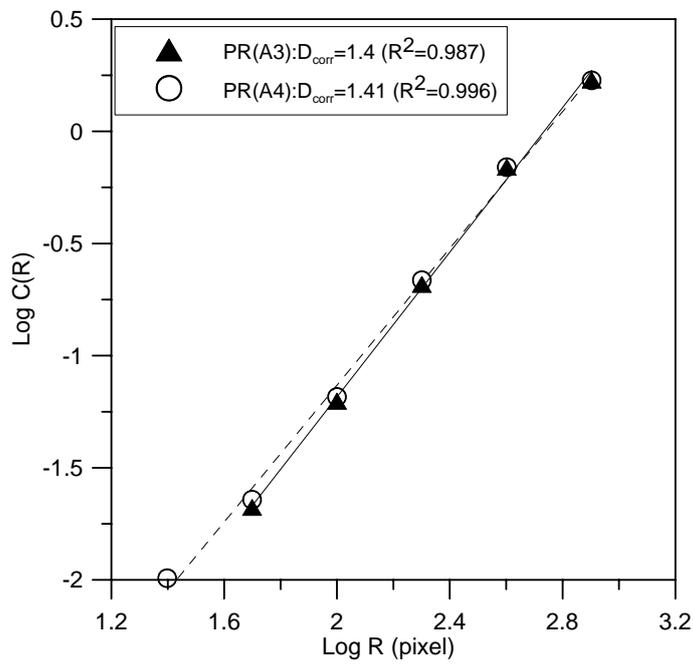


(c) 影像篩分析曲線比較

圖 4.17 剪斷面骨材粒徑分佈之重複性測試 (A 級配)



(a) 級配方格維度值比較



(b) 雙點相關維度值比較

圖 4.18 剪斷面骨材粒徑與排列分佈之重複性測試 (A 級配)

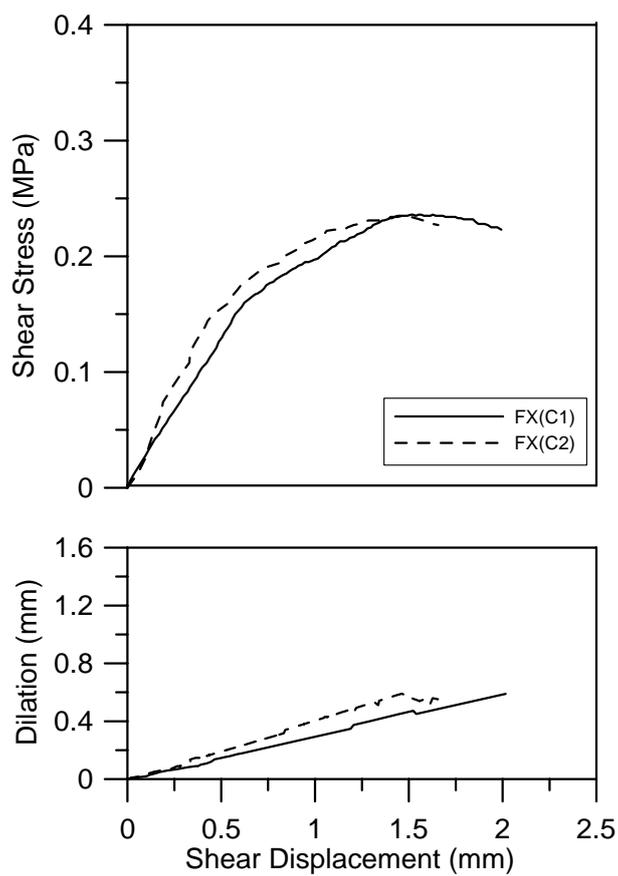
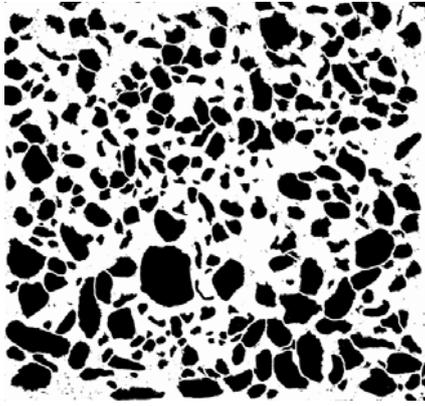
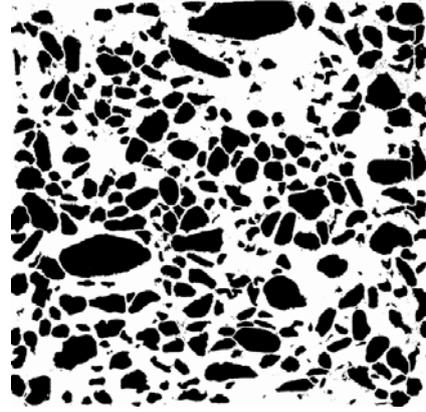


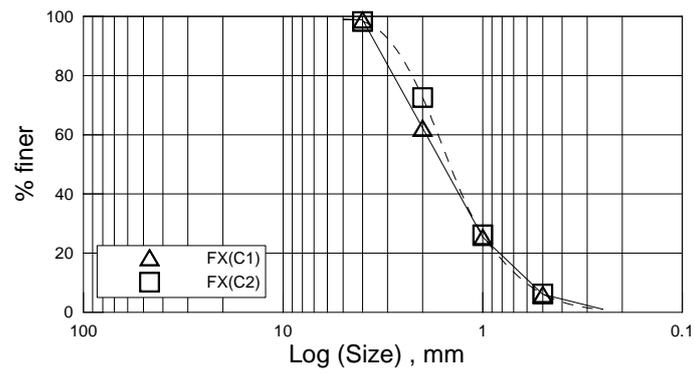
圖 4.19 剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線之重複性測試 (C 級配)



(a) FX(C1)剪斷面骨材分佈

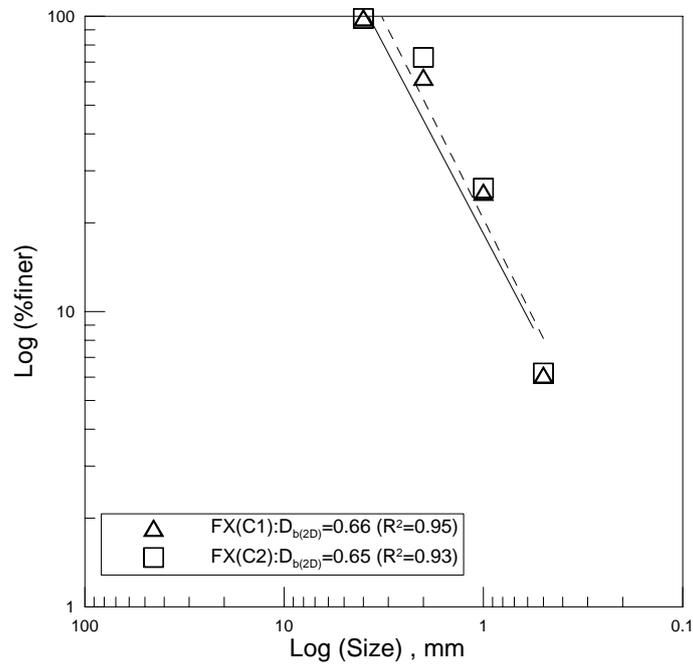


(b) FX(C2)剪斷面骨材分佈

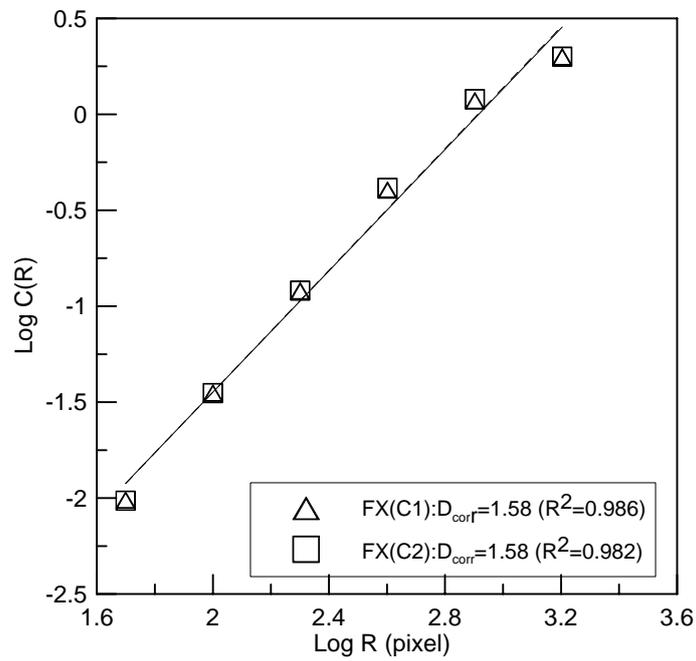


(c) 影像篩分析曲線比較

圖 4.20 剪斷面骨材粒徑分佈之重複性測試(C 級配)(Yang *et al.*,2003)



(a) 級配方格維度值比較



(b) 雙點相關維度值比較

圖 4.21 剪斷面骨材粒徑與排列分佈之重複性測試 (C 級配)

第五章 影像處理與分析技術

5.1 影像分析軟體簡介

本研究主要以 Arc View 與 eVision 這兩套軟體做為獲得顆粒空間屬性資料的工具。利用 Arc View 軟體中內建分析模式來求取個別顆粒性材料之屬性；及用 eVision 軟體來加以分析，進而得到各個顆粒的質心座標、面積、長短軸、傾斜角度等空間屬性(王永煜，2005)。

5.1.1 Arc View

地理資訊系統 Arc View 包含兩種不同的資訊，即空間資料與屬性資料，Arc View 使用實際的地理座標系統定義其確實的圖形位置；而屬性資料主要是指文、數字資料，包含文字、數值、符號等三種主要的資料。Arc View 之操作方法：

進入 Arc View 軟體後，首先(1)載入所欲分析的圖檔(create a new view) (如圖 4.1 (a))；(2)開啟 GIS 系統內建的空間分析模式 (spatial analysis) (如圖 4.1 (b))；(3)進行圖檔的轉換動作：此步驟主要將圖檔轉換為網格的資料分析模式 (convert to grids) 及定義圖檔中各顆粒的形狀參數 (convert to shape file) 等基本之屬性資料 (如圖 4.1 (c) ~ (f) 所示)。針對使用者對於圖檔進階或特殊之屬性資料需求，Arc View 系統提供使用者一個可自行撰寫程式之功能(SCRIPTS)。透過程式之運算及判斷，使用者可以獲得更多關於圖檔的進階屬性資料。

5.1.2 eVision

eVision 是 Euresys 的一套影像分析軟體，eVision 適用於量測、辨識、印字檢測、灰階及彩色影像的表面分析，也包含影像前處理功能如影像提高，雜訊的減少，開放且完整的文件讓客戶能很快的整合到任何需要做影像處理或分析的應用，它允許客戶在最新的編製程序環境及作業系統下發展自己所需的應用。eVision 之操作方法：

進入 eVision 軟體後，首先 (1) 選擇 EasyObject，開啟 New EasyObject Tool，輸入此次分析之名稱，Object Building：載入欲分析之圖檔，選擇欲分析之圖檔的顏色為黑色，Threshold 可調圖檔之對比、相容度，按 Execute 執行，如圖 4.2(a)。(2) Objects Analysis：將欲分析之功能點選出，如面積、質心位置、長短軸等，按 Execute 執行，即跳出一視窗顯示其分析資料，如圖 4.2(b)。(3) Objects Selection：此功能為將圖檔之細小雜質剔除，先選擇 Remove all，之後點選面積，輸入最大值與最小值，再選擇 Insert Range，按 Execute 執行，如圖 4.2(c)。(4) Drawing Options：此功能為直接在圖檔上顯示出質心點、長短軸等功能 (如圖 4.2(d)、4.2(e))。

5.2 Arc View 與 eVision 面積估算之誤差

5.2.1 對已知真正面積之檢驗

本文利用繪圖軟體繪出四個正方形 (其邊長為 100、50、25、10 pixel) 及四個圓形 (其直徑為 100、50、25、10 pixel)，見如圖 4.3 所示。估算面積時，若以繪圖軟體繪出之圖檔直接作面積之估算，利用此兩套影像分析軟體，

檢驗圓形與正方形面積之誤差。結果發現：兩套軟體計算出正方形之面積與實際之面積完全吻合，其誤差為零。

但 Arc View 與 eVision 對圓形估算之面積皆大於實際之面積，其失真之原因為圓形之邊界是由鋸齒狀之線段而非平滑之線段組成。因此，當本案顆粒愈大其誤差小，顆粒愈小其誤差則會愈大(圖 4.3)。而如表 4.1 所示，以 Arc View 對計算面積之誤差比 eVision 較小。

5.2.2 對照片中圖形之面積檢驗

進一步，若利用圖 4.3 八個大小不一之圓形與正方形，先經過以數位照相機翻拍，再將翻拍之圖檔經影像分析軟體估算其面積。其間，在相機翻拍時相機必須與相片垂直，機身也必須保持水平。拍攝的影像經由繪圖軟體 Photoimpact 直接轉成黑白圖檔，後再估算其面積。

結果如表 4.2 所示，表中顯示：影像分析軟體所得之正方形與圓形面積估計值均低於實際面積。且對正方形面積之誤差百分比較小，而圓形面積誤差百分比較大(圖 4.4(a)(b))。

5.3 影像篩分析技術

工程上，了解卵粒石粒徑分佈目前最常採用的方法是篩分析法。在篩分析時，當顆粒尺寸大於孔徑時會被停留在該號篩網上而較小則會通過。依序在每一篩網上重複進行上述之篩選邏輯，最後在不同尺寸篩網上會停留不等數量顆粒，根據篩網網孔尺寸與顆粒重量過篩百分比，表示成半對數關係之

粒徑分佈曲線，藉以表現顆粒間之級配特徵。而所謂影像篩分析即利用取像的動作，代替了現場實際的篩分析試驗。以下就其分析方式與本文實際施做時所採用之步驟加以說明。

5.3.1 分析方法

在進行影像分析之前，必須將所欲分析的照片利用現有的繪圖軟體 PhotoImpact 進行修圖的動作。以本文剪斷面上之骨材照片為例，目的在於利用簡單的方式將骨材顆粒與周邊填充材基質加以區分，將照片簡化為單純之黑白兩色的 BMP 圖檔，以利軟體進行分析。照片簡化的動作可依循下列步驟進行：

- (a) 將現地拍照之照片載入 PhotoImpact 軟體中。
- (b) 調整照片的對比及亮度，使得骨材與周邊的填充材料在顏色上有所區隔，如圖 4.5(a)。再者必須將骨材塗黑，但為了避免人為修圖動作造成骨材失真，建議拍照時使用高畫素拍攝，骨材塗黑時將圖片放大，使用畫筆有柔邊功能修圖(如圖 4.5(b))。
- (c) 將照片提高亮度與對比，此時骨材為黑色而填充材變為白色，如圖 4.5(c)，並可更謹慎參考原照片對黑白照片進行修正，以確保骨材間為分離的狀況。
- (d) 將照片存成點陣圖 BMP 檔，存成 BMP 檔目的在於 Arc View 軟體可以讀取此類檔案格式；且 BMP 檔於照片的壓縮性較小，較不容易失真。接下來使用影像分析軟體分析，但就顆粒性材料而言，其顆粒形狀多屬

於不規則，因而不易藉由影像分析軟體以數位的方式加以判斷顆粒之粒徑分佈及排列狀態。本研究以等效圓面積的觀念，透過影像分析軟體 Arc view 先取得每顆骨材之面積再轉換為等面積之圓形顆粒（如圖 4.6(a)），進而可推得各個顆粒之等效圓直徑粒徑，以及其質心位置座標值。

即本研究透過影像分析軟體計算每個骨材的面積與質心點位置等屬性資料，再由 EXCEL 中具有對資料點進行邏輯判斷的功能轉換成等效圓直徑的觀念，將每個顆粒粒徑大小依序以不同的篩號大小進行邏輯判斷，以決定個別篩號上之累積留篩顆粒數目，再將判定結果表現成粒徑分佈曲線，以供判斷顆粒的粒徑級配；同理，由顆粒中心點位置等屬性資料，亦可計算兩兩顆粒間之距離，藉此判斷顆粒群之相對排列堆疊情形。

5.4 對剪斷面上骨材面積之檢核

本文先將骨材進行篩分析，其中篩分析試驗是依照 ASTM D452-85 的規範以求得骨材級配曲線。同時，本研究亦利用數位相機於試體剪斷面上之骨材進行垂直攝影，先以 Photoimpact 影像處理，再經影像分析 Arc view 或 eVision 可求得平面上之骨材粒徑篩分析曲線，粒徑篩分析曲線比較如圖 4.6(b)。圖中共有三條曲線，兩條為以 Arc view 與 eVision 之等效直徑觀念所繪出之影像篩分析粒徑分佈曲線，另一條為實際篩分析曲線。圖中可發現 Arc view 所得之曲線較接近實際曲線，又因 Arc view 所算出之面積誤差比較小（見 4.2.2 節），故以下試驗之影像分析部份皆由 Arc view 軟體分析為主。

另外，圖 4.7 為長軸、短軸以 eVision 求得及等效圓直徑以 Arc view 與

eVision 所繪出之篩分析曲線，圖中可發現不論 Arc view 與 eVision 等效圓直徑觀念所繪出之曲線均介在以長軸與短軸繪出之粒徑曲線之間，與實際篩分析中其顆粒是以第二軸通過類似，表示使用等效圓直徑所繪出之粒徑曲線是可以接受的。

由影像分析軟體求得的篩分析曲線有向右平移的現象發生，亦即顆粒之粒徑在經由 Photoimpact 之影像分析的過程中粒徑會被低估的情形。其原因有以下幾點：(1) 對於骨材與周圍填充材料因對比不明顯而造成邊界之模糊地帶，造成判定上之誤差而使顆粒之面積縮小。(2) 經由取像再經過影像軟體分析時所產生的誤差，如 4.2.2 節中所討論之原因。(3) 礫石顆粒除了圓形外，皆具有不等長之三軸線，而真正之篩分析曲線，其顆粒通過主要為第二軸(中軸)，而試驗之骨材其長軸多與剪斷面成平行，再經過取像分析後之粒徑會與實際篩分析試驗所得之粒徑有些微的差異，曲線會產生位移，但是，經由雙對數求出之斜率相同。

4.5 對已知實際粒徑分佈顆粒之檢核

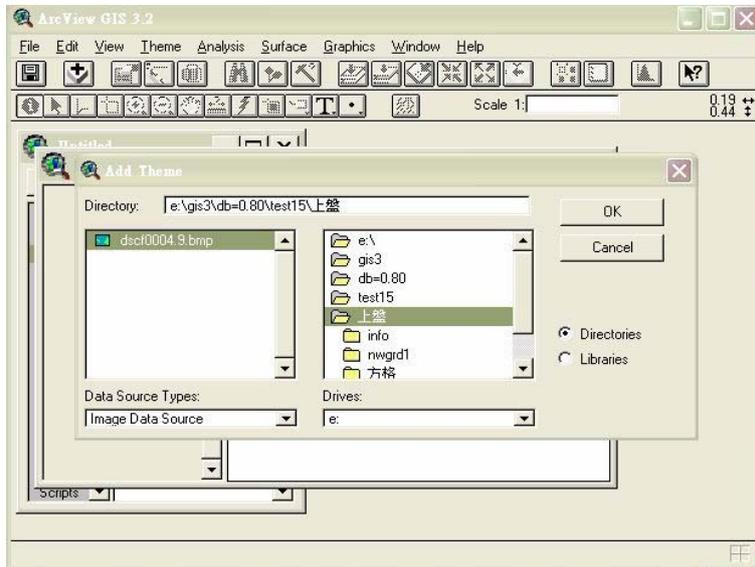
利用圖 4.8 (a) 假設一堆骨材顆粒大小與位置(其實際之顆粒粒徑分佈曲線已知)散佈於平面，利用數位相機對骨材進行垂直攝影，再以 Photoimpact 影像處理如圖 4.8(b)，再經影像分析 Arc view 可求得骨材在平面上之粒徑篩分析曲線。其粒徑篩分析曲線比較如圖 4.8(c)，由圖中發現由 Arc view 所得之曲線除了部分受面積之失真影響而出現偏離原先之粒徑分佈曲線現象外，兩條線相當將近。

表 4.1 影像分析軟體之誤差百分比(已知面積)

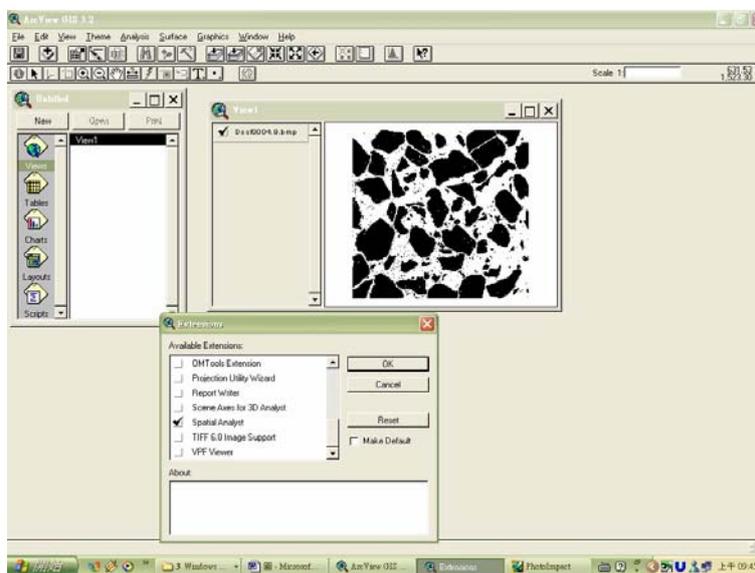
| 圓形真正面積 (pixel) | eVSION | Arc View | eVSION | Arc View |
|-----------------|----------|----------|--------|----------|
| | 估算面積 | 估算面積 | 誤差% | 誤差% |
| 7853.982 | 8000.00 | 7968.36 | 1.86 | 1.46 |
| 1963.495 | 2032.00 | 2029.50 | 3.49 | 3.36 |
| 490.8739 | 525.00 | 522.17 | 6.95 | 6.38 |
| 78.53982 | 88.00 | 85.03 | 12.05 | 8.26 |
| 正方形真正面積 (pixel) | eVSION | Arc View | eVSION | Arc View |
| | 估算面積 | 估算面積 | 誤差% | 誤差% |
| 10000 | 10000.00 | 10000.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2500 | 2500.00 | 2500.00 | 0.00 | 0.00 |
| 625 | 625.00 | 625.00 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 100.00 | 100.00 | 0.00 | 0.00 |

表 4.2 經由相片影像分析軟體之誤差百分比

| 取像之圓形真正面積 (pixel) | eVSION | Arc View | eVSION | Arc View |
|--------------------|----------|----------|--------|----------|
| | 估算面積 | 估算面積 | 誤差% | 誤差% |
| 63504 | 49101.00 | 50155.84 | 22.68 | 16.73 |
| 15876 | 12169.00 | 12723.74 | 23.35 | 17.37 |
| 3844 | 2911.00 | 3176.38 | 24.27 | 19.86 |
| 576 | 371.00 | 479.63 | 35.59 | 21.02 |
| 取像之正方形真正面積 (pixel) | eVSION | Arc View | eVSION | Arc View |
| | 估算面積 | 估算面積 | 誤差% | 誤差% |
| 64009 | 62217.00 | 63311.41 | 2.80 | 1.09 |
| 15876 | 15416.00 | 15967.46 | 2.90 | 0.58 |
| 3969 | 3652.00 | 3890.81 | 7.99 | 1.97 |
| 625 | 418.00 | 558.63 | 33.12 | 10.62 |

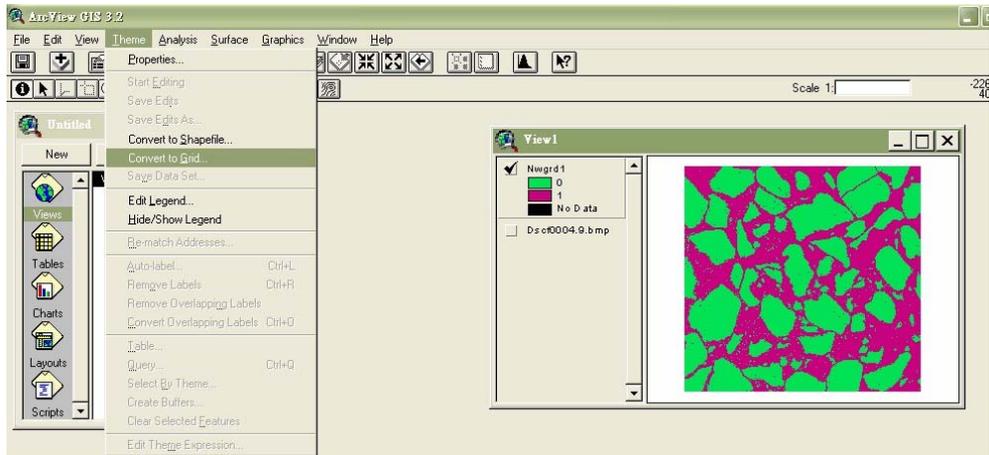


(a) 載入圖檔

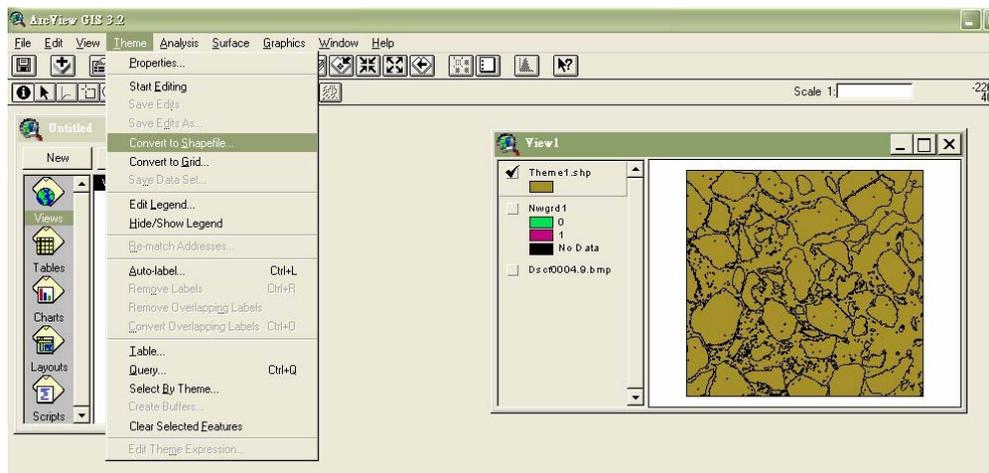


(b) 開啟 GIS 的空間分析模式

圖 4.1 影像處理及 Arc View 操作流程

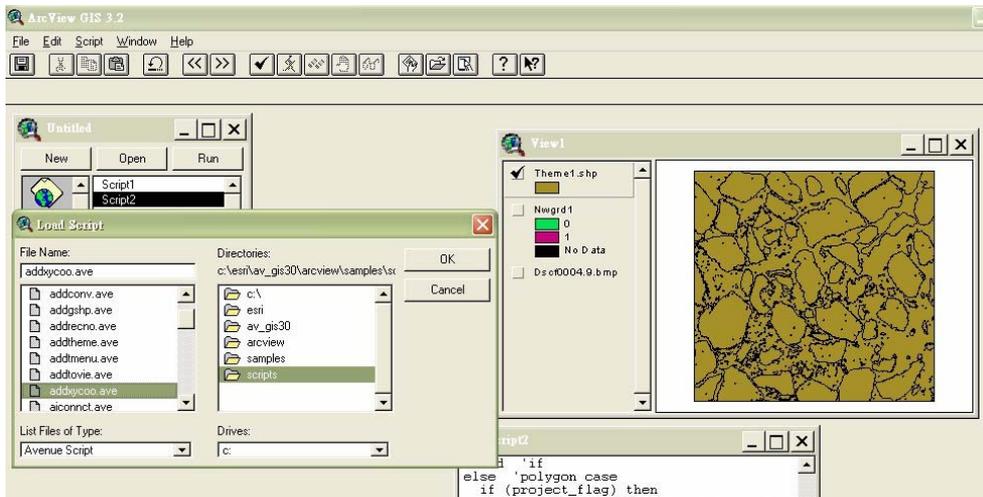


(c) 將圖檔轉換為網格的資料

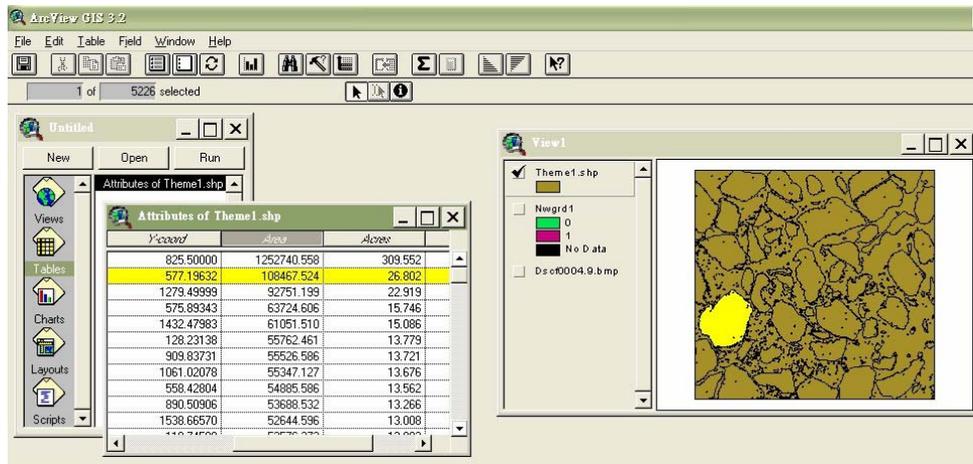


(d) 定義圖檔顆粒的形狀參數

圖 4.1 影像處理及 Arc View 操作流程(續)

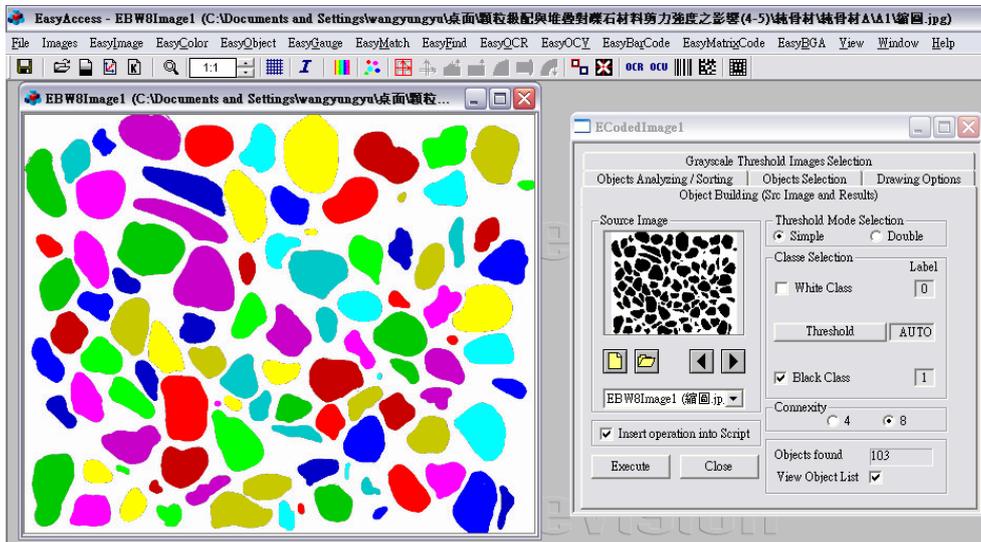


(e) 計算面積與質心位置

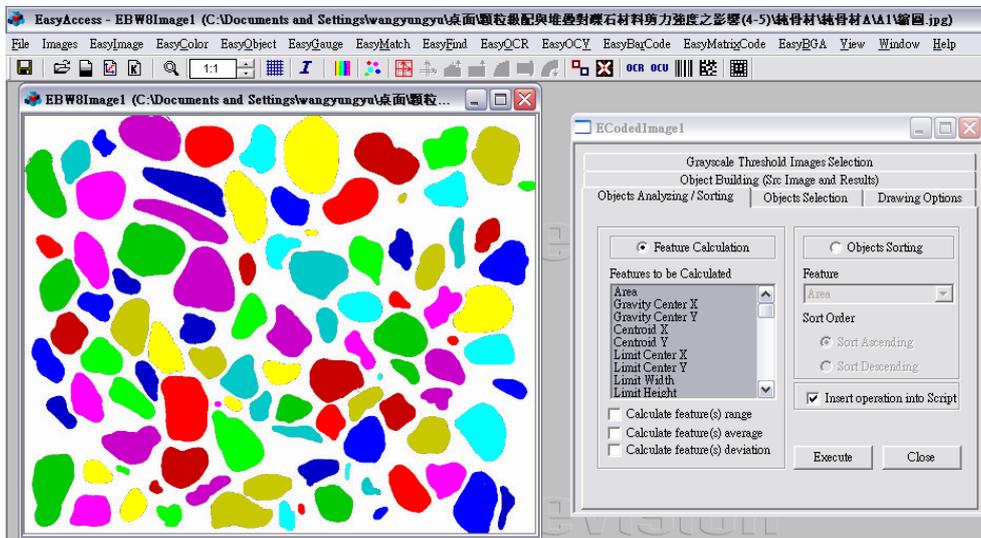


(f) 查看計算所得之屬性資料

圖 4.1 影像處理及 Arc View 操作流程(續)

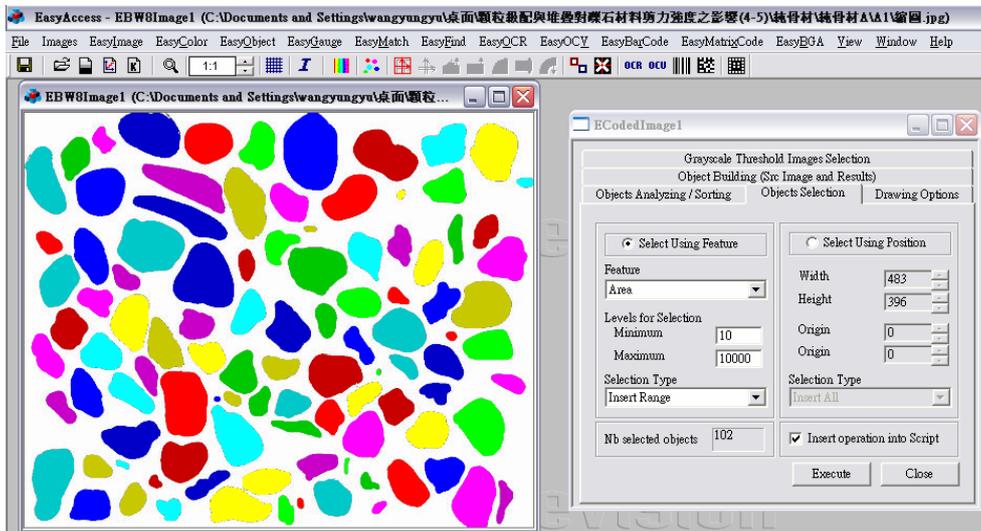


(a) Object Building：載入圖片

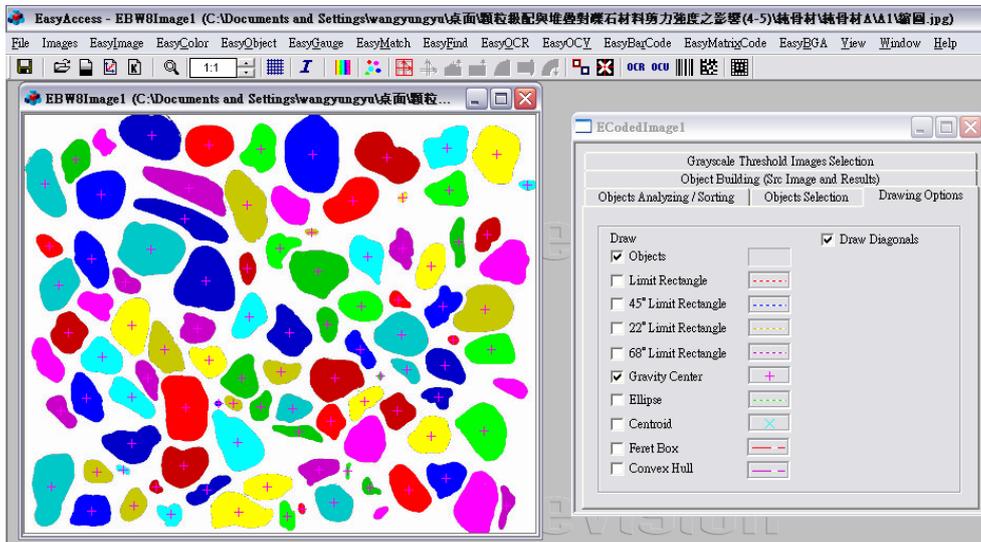


(b) Objects Analysis：選擇欲分析之功能

圖 4.2 eVision 操作過程

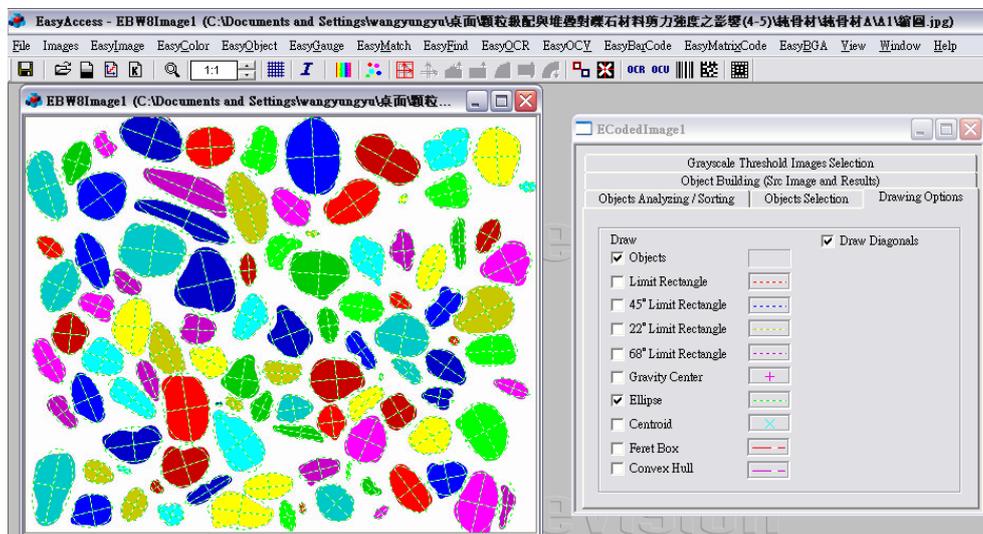


(c) Objects Selection



(d) Drawing Options : 顯示質心點

圖 4.2 eVision 操作過程 (續)



(e) Drawing Options：顯示長短軸

圖 4.2 eVision 操作過程（續）

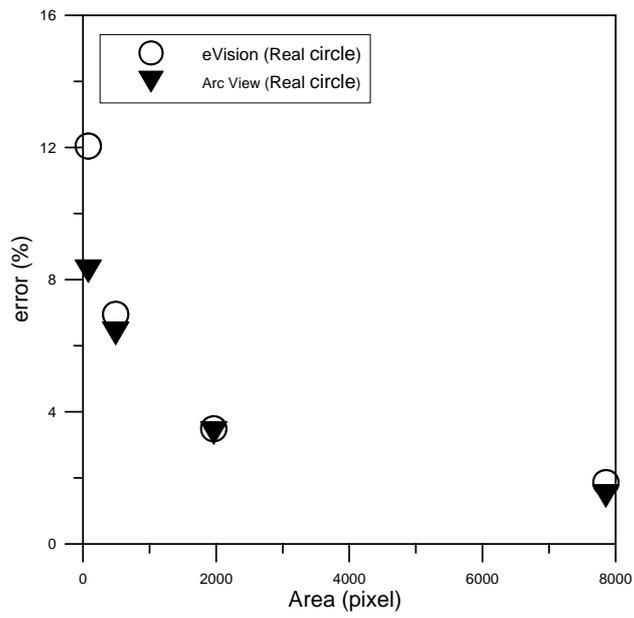
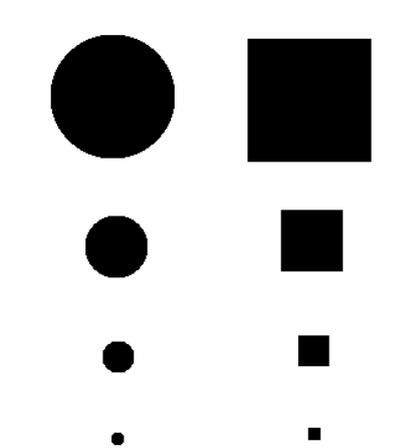
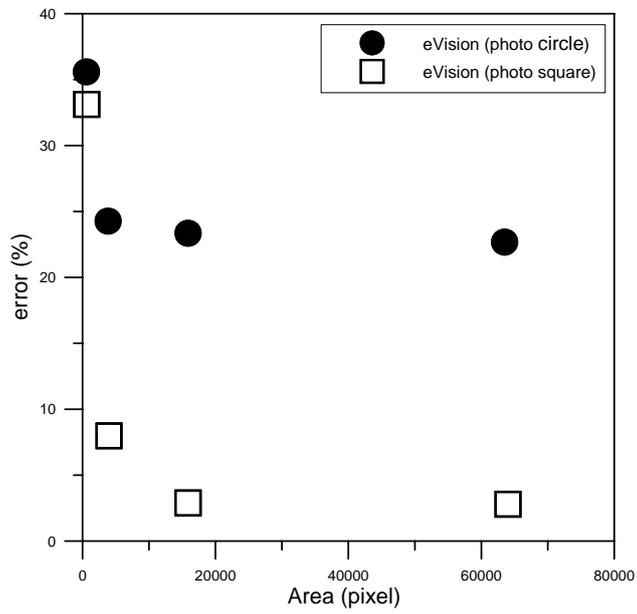
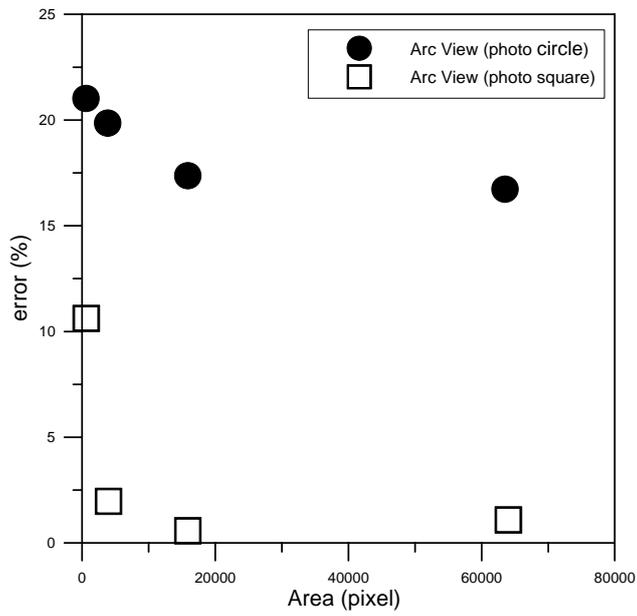


圖 4.3 以 eVision 與 Arc View 對已知面積物體計算面積誤差之檢驗

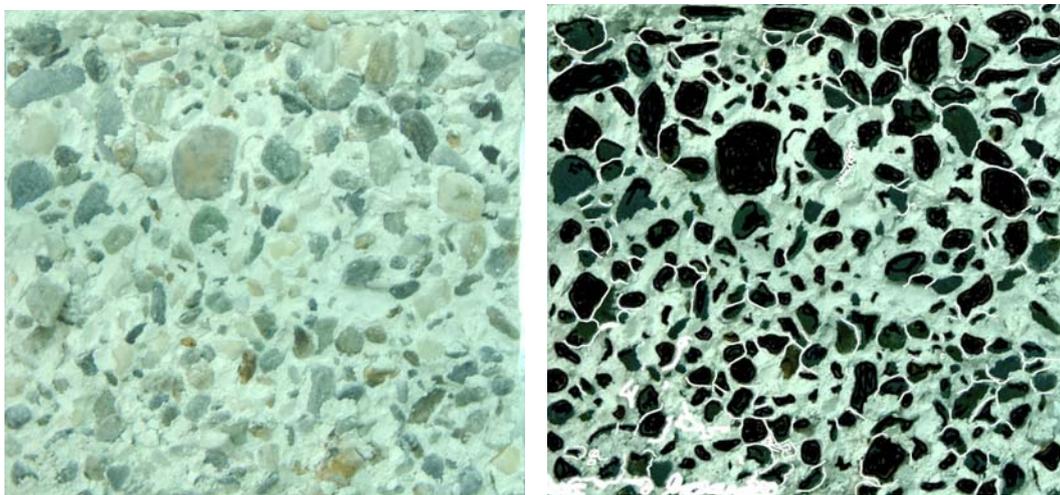


(a) eVision 軟體



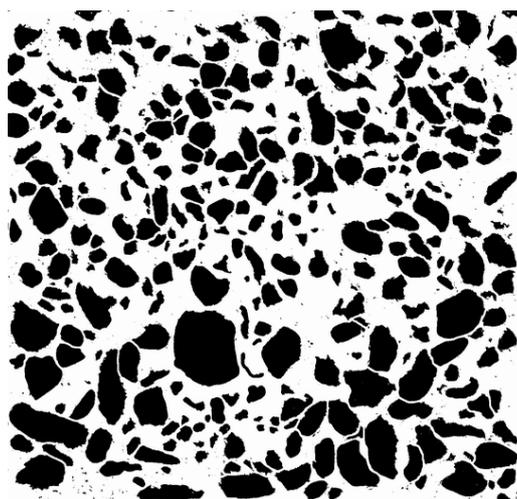
(b) Arc View

圖 4.4 對圖 4.3 拍照後計算圖形面積之比較



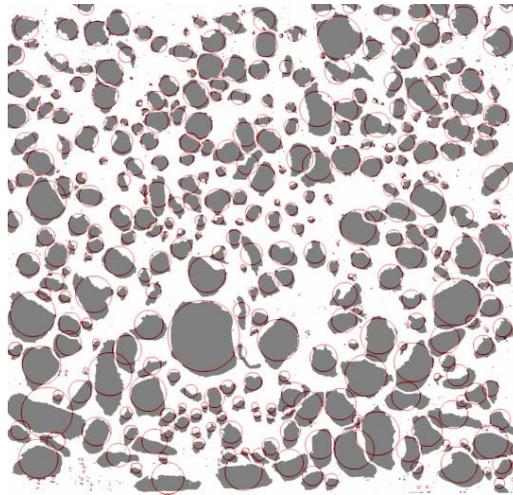
(a) 調整相片之(a)對比亮度

(b) 修圖

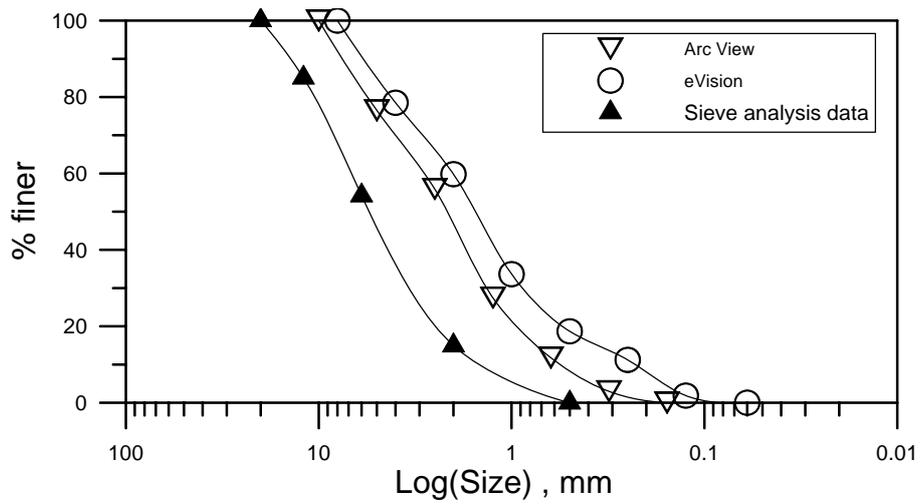


(c) 轉成黑白兩色相片

圖 4.5 影像分析前先以 PhotoImpact 軟體處理影像



(a) 實際顆粒影像與等效面積圓之比較



(b) 篩分析曲線之比較

圖 4.6 實際篩分析曲線與影像分析軟體(等面積圓代表)分析結果比較

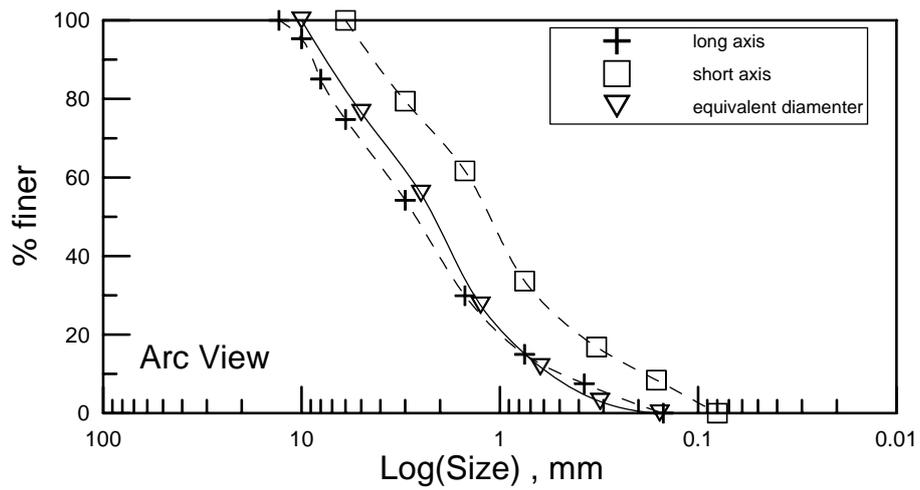
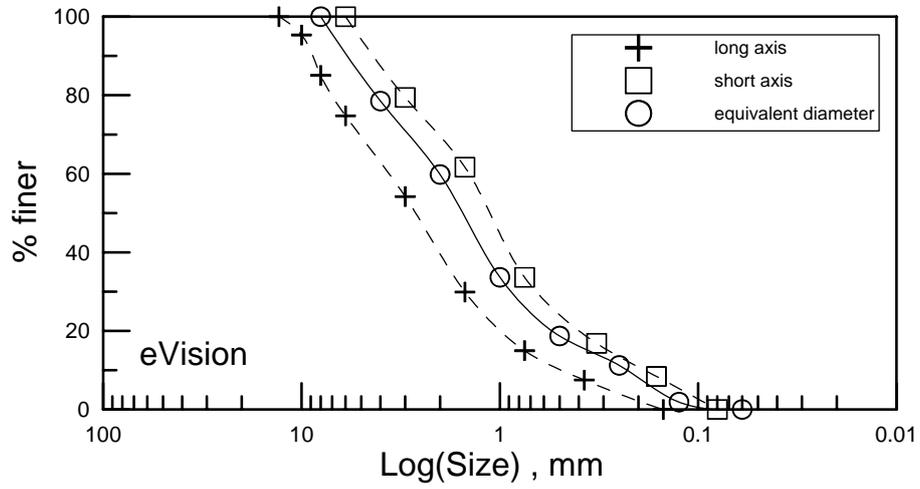
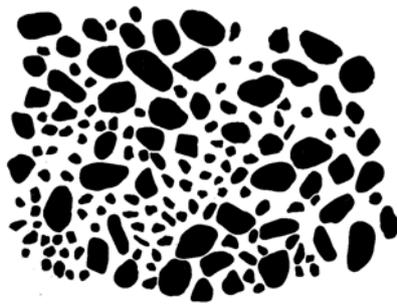


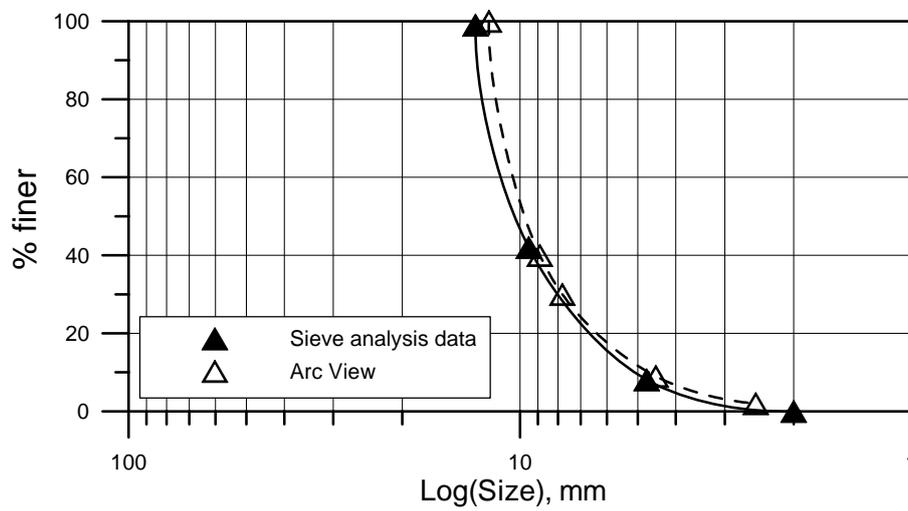
圖 4.7 以等效圓直徑及以長(短)軸分析篩分析結果比較



(a) 將以之級配之骨材散佈於平面上拍照



(b) 經由修圖轉成黑白圖檔



(c) 實際與影像篩分析比較

圖 4.8 Arc View 對已知骨材級配之檢核

第六章 顆粒組構之碎形

本研究導入碎形維度之觀念，利用碎形維度除可表現出顆粒、級配外，並可表現顆粒形狀與顆粒群體填塞之緊密程度，因此，可對顆粒材料做進一步之描述。

6.1 顆粒形狀之碎形維度

6.1.1 標準顆粒形狀之方格維度

Krumbein(1941)曾將顆粒形狀如圖 6.1 分為五種典型形狀，即角狀 (angular)，次稜角狀 (subangular)，次圓狀 (subrounded)，圓狀 (rounded) 及極良好圓狀 (well rounded)。本文採用方格覆蓋法依序以 0.056、0.07、0.14 及 0.28 (in) 四種不同尺寸之網格 b (其 $b/d \approx 1/2 \sim 1/15$)，計數此 25 顆標準顆粒形狀之碎形維度 $D_{(sp)}$ ，結果亦列於圖 6.1 及繪如圖 5.2 所示。

由圖 6.2 顯示：當顆粒形狀趨近圓狀時， $D_{(sp)}$ 值愈小；反之，當顆粒形狀趨近角狀時， $D_{(sp)}$ 值會變大，表示 $D_{(sp)}$ 值確可用以反應骨材形狀之特徵。須注意的是對每種形狀顆粒所使用的網格 (b) 與顆粒大小 (d) 比例 ($b/d \approx 1/2 \sim 1/15$) 必須一致，不然所計算出的 $D_{(sp)}$ 就無法做比較。

6.1.2 粒徑大小與形狀關係

本文試體是以四種大小範圍的宜蘭石來作為顆粒骨材，其粒徑依序為 1.30~2、2~4.86、4.86~9.8、9~13.2mm，在圖 6.3 中顯示：顆粒粒徑越大時，其 $D_{(sp)}$ 值也越大，顆粒形狀趨近角狀；反之， $D_{(sp)}$ 值則越小，顆粒形狀趨近

圓狀。本文宜蘭石骨材受河流搬運初期，粒徑越大磨損較少，其形狀愈接近角狀，則 $D_{(sp)}$ 值較大；但當骨材受河流搬運磨損愈嚴重時，粒徑越小形狀會趨近良好圓狀，則 $D_{(sp)}$ 值減少至接近 1。故同一類顆粒粒徑大小確與顆粒形狀 $D_{(sp)}$ 值兩者間具有關聯性。

6.1.3 本文骨材形狀

本文試體內是以四種大小範圍的宜蘭石來作為顆粒骨材，其粒徑依序為 1.30~2、2~4.86、4.86~9.8、9~13.2mm（如圖 6.3），每種粒徑之骨材各選取 10 顆，利用方格覆蓋法來計算骨材形狀之 $D_{(sp)}$ 值，結果如圖 6.3 所示。結果顯示：骨材形狀之碎形維度值 $D_{(sp)}$ 大約介於 1.15~1.75 之間，其值依圖 6.2 本研究骨材形狀可被歸類為次圓狀；若由目視比對標準顆粒，則介於次圓狀與圓狀間。

6.1.4 不同形狀骨材之安息角

一般而言，顆粒表面之粗糙度與岩性基本摩擦角會使顆粒表面存在有摩擦角，可產生摩擦阻抗抵抗顆粒之滑動。且顆粒形狀之互鎖效應，更可抵抗顆粒之旋轉，安息角便藉由邊界與顆粒間之磨擦力所造成，此摩擦力可支撐顆粒自重而形成圓錐狀堆積體。顆粒在非常疏鬆狀態下的最穩定邊坡（張義隆，2002），稱之為安息角（angle of repose），因此安息角亦可視為最疏鬆狀態下顆粒之內摩擦角或抗剪角。影響安息角之因素必非單純的只有顆粒表面之摩擦係數而已，尚有一些其他因素存在，例如：顆粒形狀與級配等等。

本文利用一圓柱筒（尺寸為直徑 5 公分，圖 6.4），將骨材放置於筒內，然後類似水泥砂漿之坍度試驗法，慢慢將圓筒抽向上，骨材會坍下與水平面形成一錐狀堆積，當此一骨材堆積達穩定後，量取此堆積體四個方向之上坡角，

再取其最小值代表堆積體之安息角。

本節共使用本試驗中的四種尺寸的骨材，先將骨材過篩以挑選顆粒大小較接近之四種骨材以供安息角試驗，如圖 6.6(a)~(d)。再各選出其中 6 顆骨材計算其形狀之碎形維度 $D_{(sp)}$ 值（如圖 6.5），以探討 $D_{(sp)}$ 與安息角（ ϕ_r ）之關係，其結果如圖 6.7 所示(Yang & Wu, 2006)。圖中顯示： $D_{(sp)}$ 值愈大安息角愈大（於 15° 至 43° 間），表示顆粒形狀愈接近角狀者，其安息角較大。由圖 6.7 安息角與 $D_{(sp)}$ 值之迴歸關係式可表示為：

$$\phi_r = 28 \cdot D_{(sp)} - 11 \quad (\pm 4.3^\circ) \quad (5.1)$$

由上式可知：當 $D_{(sp)}=1$ 時，安息角 $\phi_r=17^\circ(\pm 4.3^\circ)$ ，即若不考慮顆粒間之互鎖效果，自然坡度約為 17° 。而多角狀之顆粒其 $D_{(sp)}$ 值愈接近 2，因顆粒間的互鎖效應較佳，其安息角可到達 45° 左右，顯示顆粒形狀對邊坡穩定性或顆粒群之內摩擦角有重要的影響。

6.2 顆粒級配之碎形

目前最常採用的是傳統的篩分析法瞭解卵粒石粒徑分佈曲線，表示成半對數關係，藉以表現顆粒間之級配特徵。而借由碎形維度 D_b 值卻可進一步表現群體於空間的填塞程度（capacity），意即 D_b 值愈大表示在大顆粒間有較多小顆粒包圍環繞。

6.2.1 均勻級配與優良級配之方格維度範圍

從粒徑分佈曲線上可獲得兩個有關粒狀土壤粒徑分佈類型的定量參數：(1) 均勻係數： $C_u = D_{60}/D_{10}$ ，可提供比較粒徑分佈範圍之訊息。若 C_u 愈小表示

其級配愈均勻，即所含顆粒大小愈相近。(2)級配係數： $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$ ，可用以反應土體中粗細土粒含量之比較。 C_c 愈小表示粗細顆粒含量大致相等則級配良好； C_c 愈大則表示粗細粒料含量懸殊，其級配不良。

本研究將以 $D_{b(2D)}$ 值與 $D_{b(3D)}$ 值分別表示在二維空間與三維空間中之級配形式，其值皆可由粒徑分佈曲線轉成雙對數圖中的趨勢線斜率(S)所求得：在三維空間下， $D_{b(3D)} = 3 - \text{斜率}(S)$ ；在二維空間下， $D_{b(2D)} = 2 - \text{斜率}(S)$ 。本文以模擬級配曲線，再由雙對數曲線圖中的級配曲線斜率所求得 D_b ，如圖 6.8(a)、(b)或表 6.1 所示。獲得結論是：在二維平面上，當 $D_{b(2D)}$ 介於 0.8 至 2，或在三維空間內，當 $D_{b(3D)}$ 介於 1.8 至 3，級配曲線屬於優良級配(如圖 6.9)，藉此圖可了解級配碎形維度值與土力之級配參數 C_c 、 C_u 的關聯性(圖 6.10)。

6.2.2 本文骨材級配之方格維度

(1) 三維空間級配：

如前所述，顆粒性材料級配之方格維度可藉由將粒徑分佈曲線之半對數關係圖，重新以雙對數關係表示，再由圖中線性迴歸直線之斜率(S)得知該顆粒大小級配分佈之碎形維度($D_{b(3D)} = 3 - \text{斜率}$)。

本研究所設計之 A、B、C、D 四種級配(如前圖 3.12 所示)，級配碎形維度 $D_{b(3D)}$ 值示於圖 5.11(b)，其對應 $D_{b(3D)}$ 值分別為 0.80、1.38、1.62、2.83。因而，從表 6.2 試體之均勻係數(C_u)及級配係數(C_c)範圍，可知本文 A、B、C 級配的 FE(A)、FE(B)、FE(C)、PR (A)、PR (B)、PR (C)、FX (A)、FX (B)、FX (C) 試體屬於均勻級配，而 D 級配的 FE (D)、PR (D)、FX (D)

三組試體則屬優良級配。並且以不同之基質材料分作三類試體：FE 組、PR 組、FX 組(如 4.2 節所述)，每種級配各灌製 4 個顆粒分佈不同的試體。

從圖 6.12~圖 6.14 之 48 組級配的雙對數圖迴歸直線性度極佳(R-squared 皆在 0.9 以上)，顯示本文調配之骨材群體內顆粒大小與其顆粒數具有冪級數關係，故其級配具有碎形特性。

(2) 二維平面級配：

在每一個試體剪斷面進行影像分析，可獲得剪斷面上之二維粒徑分佈曲線與級配碎形維度 $D_{b(2D)}$ ，結果示如圖 6.12 所示。圖中 A 級配之三維粒徑分佈曲線亦同時繪於圖中，以資比對。例如，觀察圖 5.12(a) 可以發現：FE(A1)、FE(A2)、FE(A3)、FE(A4) 四個試體剪斷平面上之二維粒徑分佈曲線皆極為相似，正因此四顆試體之骨材皆是 A 級配所致，但對二維粒徑之估算則偏低估。

再進一步若取雙對數表示如圖 5.12，可得剪斷面級配之碎形維度，結果為 FE(A1) 剪斷面之 $D_{b(2D)} = 0.21$ 、FE(B1) 剪斷面之 $D_{b(2D)} = 0.51$ 、FE(C1) 剪斷面之 $D_{b(2D)} = 0.63$ 、FE(D1) 剪斷面之 $D_{b(2D)} = 1.49$ 。由 $D_{b(2D)}$ 值與級配曲線類型可得知：FE(A1)、FE(B1)、FE(C1) 剪斷面之粒徑分佈皆屬於均勻級配，而 FE (D1) 則屬優良級配。其中試體 FE (A1) 之 $D_{b(2D)}$ 值為最小，試體 FE (D1) 之 $D_{b(2D)}$ 值最大，即剪斷面 FE (D1) 之粒徑分佈曲線為優良級配，與試體 FE (D) 骨材在三維空間之級配曲線亦為優良級配的現象一致。

6.3 顆粒排列之碎形

如前所述，雙點相關維度 D_{corr} 主要透過兩兩顆粒間距與組數的關係，來描述質點之叢聚型態。又因本文在計算雙點相關維度時，是針對分佈於二維

剪動平面上的顆粒群體之相對距離疏密關係，故 D_{corr} 值的範圍應介於0~2之間：當 D_{corr} 值為2時，表示空間中之顆粒群體達到最為緊密的情形。

6.3.1 雙點相關維度之函意

(1)所謂叢集「cluster」並非密集，而在大地工程之中「均質」或「均勻」(uniform)是質點場中的「齊次」「homogenous」。以下試以圖 6.15 來對叢聚與均質兩種排列做說明：

如圖 6.15 (a1) 為人工模擬之均質 (homogenous) 質點，而圖 6.15 (b1) 則為叢集(cluster)狀況。其中，兩張圖內之質點顆粒數也相同 (顆粒總數 196 顆)。經計算得知圖 6.15(a2)之雙點相關維度 D_{corr} 值為 1.79，而圖 6.15(b2)之 D_{corr} 值為 1.54。由此可知：當分佈狀況為均質時 D_{corr} 值較大，而分佈為叢集時 D_{corr} 值較小，此與 Ali and Wilson (2002) 所述之情況相同。

進一步，再將上述圖 6.15 兩種排列在某一指定距離內所包含的顆粒對偶數表現於圖 6.16。可發現：在較近之距離內，「cluster」圖內之顆粒組數確皆多於均質圖內，表示叢集「cluster」群集內兩兩顆粒距離較短。可解釋為在某一區塊內，其質點分作一叢一叢的，且每一群(叢)顆粒卻互相緊密靠在一起， D_{corr} 值較小。

(2) 本研究先以人造的方法排列出如圖 6.17(a1)、(b1)、(c1) 三種疏密顆粒分佈狀況，說明 D_{corr} 值的意義。先以 Arc View 計算各顆粒之質心座標，如圖 6.17(a2)、(b2)、(c2)，再計算三者之 D_{corr} 值。結果得知：圖 6.17(a3)之顆粒分佈較緊密，但 D_{corr} 值最大代表顆粒叢聚均質；而圖 6.17(c3)之顆粒分佈較稀疏，但 D_{corr} 值最小代表顆粒叢聚。

6.3.2 級配對顆粒排列之影響

對相同粒徑級配顆粒而言，堆疊方式的不同會造成其空間分佈特性上的差異，造成顆粒間緊密程度的不同，將可能導致力學性質的不同。

(1) 同一級配：

本研究 3.2 節 A、B、C、D 四種級配所製作 FE(A)、FE(B)、FE(C)及 FE(D) 四個試體之 D_{corr} 值詳列於表 6.3 及圖 6.18 中，以觀察同一級配下之排列 D_{corr} 值的變化。如在 A 級配中，試體 FE(A1)~FE(A4)四個之 D_{corr} 值從 1.29 變化至 1.37，雖然級配相同但是其排列型態並不一致。

同理，B 級配下 FE(B1)~FE(B4)之 D_{corr} 值介於 1.44 至 1.49 之間；FE(C1)~FE(C4)之 D_{corr} 值介於 1.52 至 1.56 之間；FE(D1)~FE(D4)之 D_{corr} 值介於 1.70 至 1.73 之間。三者 D_{corr} 值均有顯著的差異性。

顯示，在相同級配下，顆粒與顆粒間可以產出多種不同的堆疊方式。故傳統粒徑分佈曲線或級配方格維度 D_b 並無法表現排列方式時，需輔助以雙點相關維度 D_{corr} 來表現顆粒間的排列特徵或疏密程度。

(2) 顆粒數量之影響

若以本研究所製作四種級配之剪斷面 FE (A1)、FE (B1)、FE (C1) 及 FE (D1)，經由影像分析得知：FE (A1) 之顆粒數為 102 顆，FE (B1) 為 224 顆，FE (C1) 為 347 顆，FE (D1) 為 412 顆，顯示顆粒數目隨著級配 $D_{b(3D)}$ 值的增加而漸增。意謂，在大小相同的剪斷平面中，顆粒數目越多時，顆粒所能夠排列的可能方式愈少，因此 D_{corr} 值的變化範圍越窄(如圖 6.18)。此外從表 6.3 可知：在大小相同的平面內，顆粒數目越多，會使顆粒間的雙點相關維度 D_{corr} 值增加，顆粒愈叢集。

表 6.1 篩分析曲線對應之 D_b 值

| Gradation No | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) | (i) | (j) |
|-------------------|---------|---------|---------|------|------|------|------|-------|------|--------|
| D10 | 1.65 | 1.1 | 1.1 | 0.8 | 0.55 | 0.34 | 0.2 | 0.2 | 0.16 | 1 |
| D30 | 2.8 | 2.05 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.2 | 0.7 | 0.65 | 0.5 | 1 |
| D60 | 3.9 | 3.7 | 3.8 | 3.5 | 3.2 | 2.9 | 2.2 | 2 | 1.4 | 1 |
| Cu | 2.36 | 3.36 | 3.45 | 4.82 | 5.82 | 8.53 | 9.36 | 11.58 | 8.75 | 1 |
| Cc | 1.22 | 1.03 | 1.5 | 1.15 | 1.28 | 1.46 | 1.14 | 1 | 1.05 | 1 |
| Gradation Type | Uniform | Uniform | Uniform | Well | Well | Well | Well | Well | Well | Single |
| Slope (S) | 2 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0 |
| Fractal Dimension | 0 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 2 |

表 6.2 各試體之級配類型

| 試體種類 | FE | | | | PR | | | | FX | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 級配類型 | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D |
| C _u | 3.4 | 2.8 | 2.5 | 5.2 | 3.4 | 2.3 | 2.7 | 4.5 | 2 | 2.9 | 3.3 | 5 |
| C _c | 1.7 | 1.7 | 1.1 | 1.3 | 2.4 | 1.5 | 1.2 | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1 | 1.1 |
| 級配類型 | 均 | 均 | 均 | 優 | 均 | 均 | 均 | 優 | 均 | 均 | 均 | 優 |
| | 勻 | 勻 | 勻 | 良 | 勻 | 勻 | 勻 | 良 | 勻 | 勻 | 勻 | 良 |

註：FE：不添加基質填充材 PR：添加紅土為填充材 FX：添加石膏為填充材

表 6.3 本文 FE 試體之最大與最小雙點相關維度值

| | FE (A) | FE (B) | FE (C) | FE (D) |
|-----------------|-------------|--------|--------|--------|
| | $D_{b(3D)}$ | 0.80 | 1.38 | 1.62 |
| $D_{corr(max)}$ | 1.37 | 1.48 | 1.56 | 1.70 |
| $D_{corr(min)}$ | 1.29 | 1.44 | 1.52 | 1.73 |

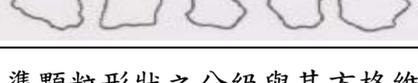
| Roundness | Typical grain shape | Box dimension |
|------------------|---|---------------|
| (1) Well rounded |  | 1.52–1.72 |
| (2) Rounded |  | 1.39–1.62 |
| (3) Subrounded |  | 1.50–1.68 |
| (4) Subangular |  | 1.48–1.68 |
| (5) Angular |  | 1.55–1.73 |

圖 6.1 Krumbein 標準顆粒形狀之分級與其方格維度值(Yang&Wu，2006)

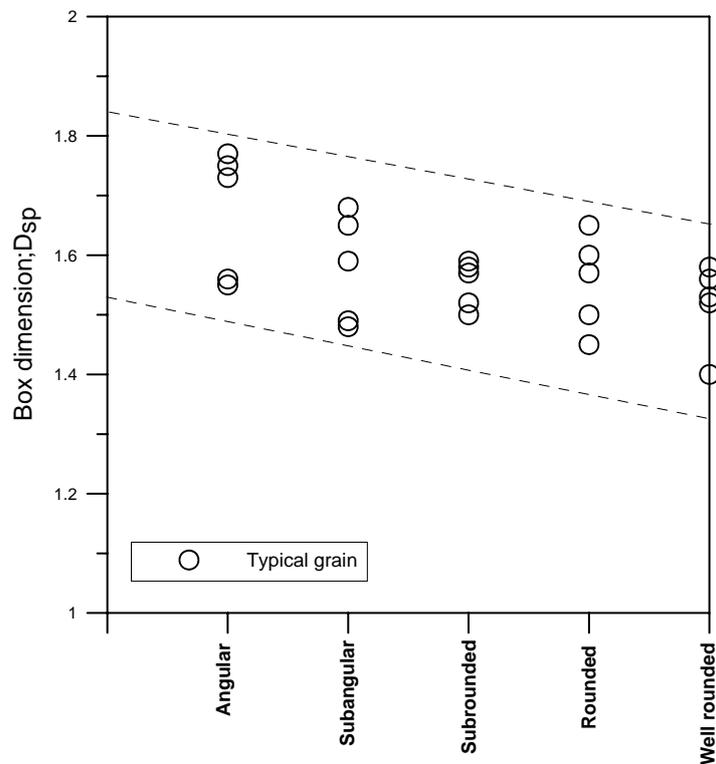
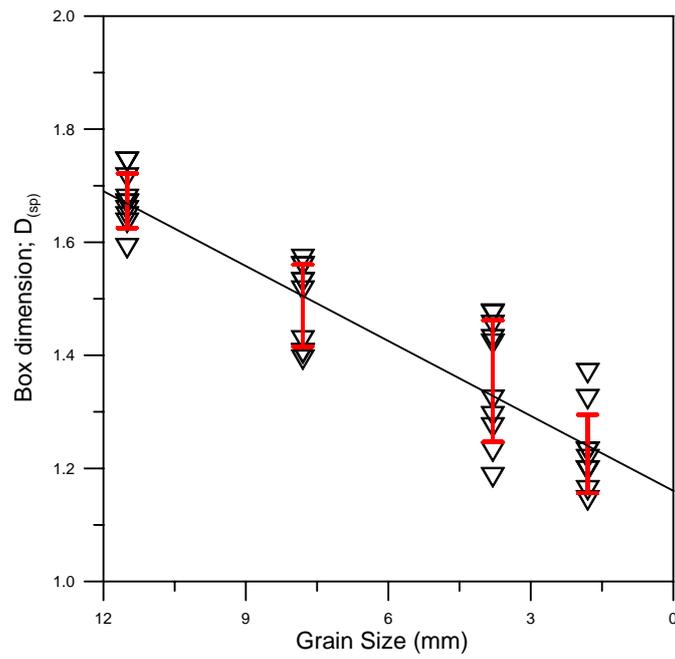


圖 6.2 標準顆粒形狀之方格維度值範圍



(a) 四種粒徑之骨材形狀



(b) 骨材形狀方格維度

圖 6.3 本文四種大小粒徑骨材之形狀方格維度 $D_{(sp)}$ 值

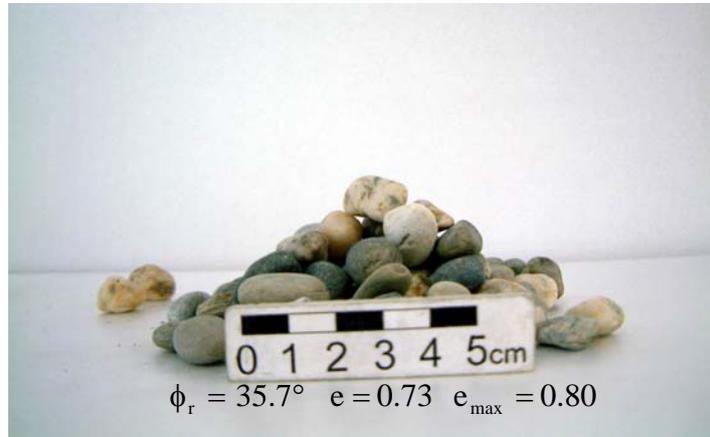
第六章 試驗結果與分析



圖 6.4 以圓柱筒抽坍骨材之試驗與安息角量測



圖 6.5 本文四種大小骨材中各挑選之 6 顆以計算其 $D_{(sp)}$ 值



(a) $D_{(sp)} = 1.67$ (停留在#3/8 以上)



(b) $D_{(sp)} = 1.48$ (停留在#4 以上)

圖 6.6 四種形狀骨材之安息角試驗結果

第六章 試驗結果與分析



(c) $D_{(sp)} = 1.35$ (停留在#10 以上)



(d) $D_{(sp)} = 1.23$ (停留在#16 以上)

圖 6.6 四種形狀骨材之安息角試驗結果(續)

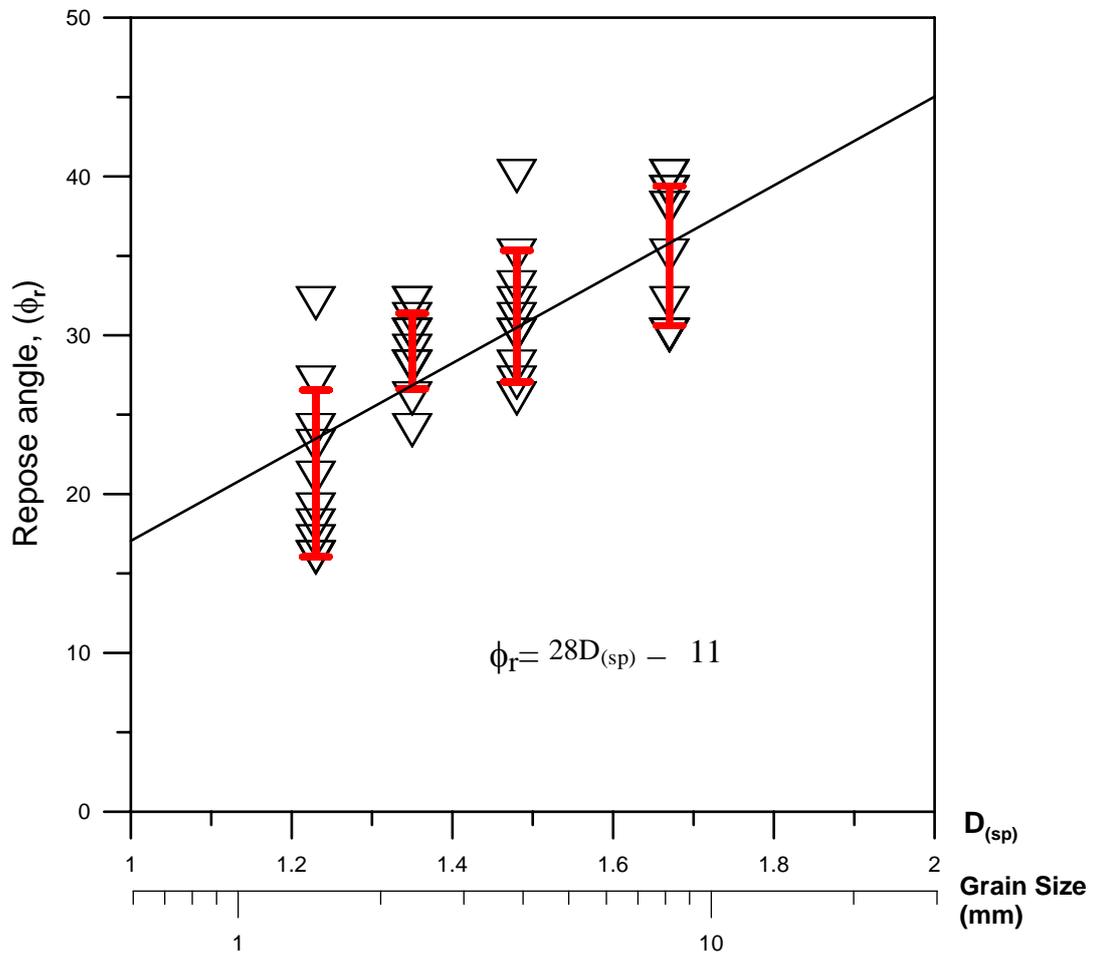


圖 6.7 大小顆粒之形狀方格維度與其安息角關係圖

第六章 試驗結果與分析

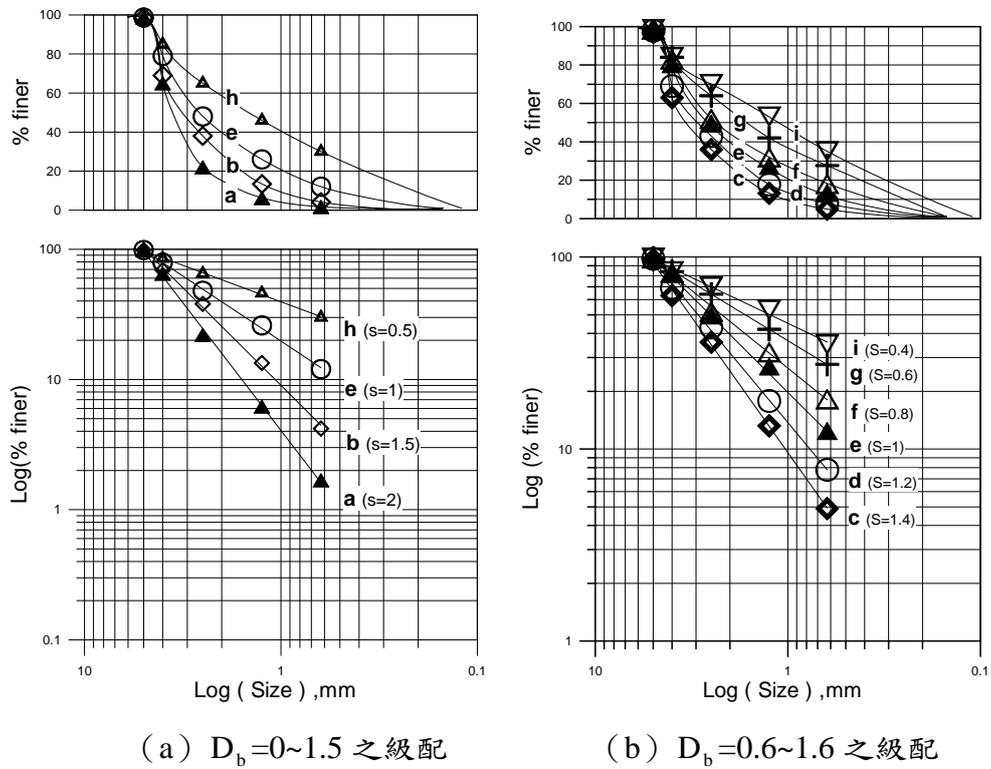


圖 6.8 篩分析曲線及其對應之級配方格維度 $D_{b(3D)}$ 值 ($D_{b(3D)} = 3 - S$)



圖 6.9 優良級配與均勻級配對應之級配方格維度 D_b 值範圍

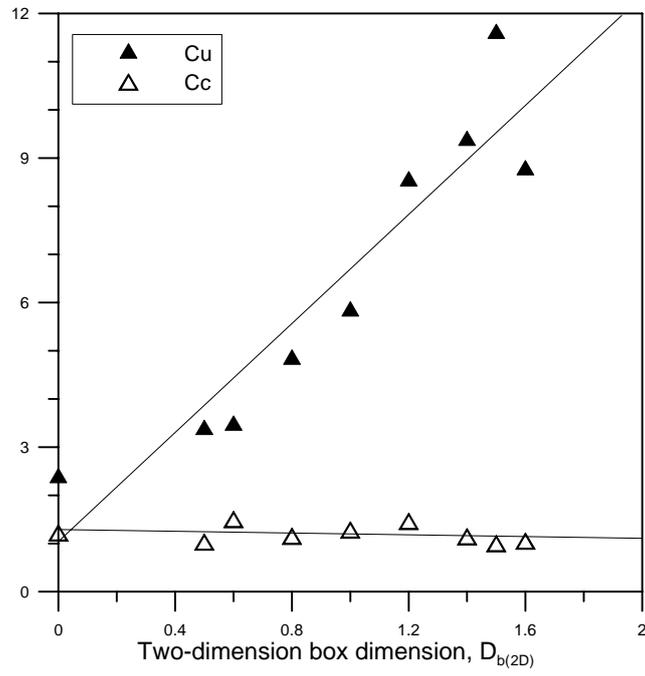


圖 6.10 級配方格維度 $D_{b(2D)}$ 值所對應之 Cu 與 Cc 示意圖

第六章 試驗結果與分析

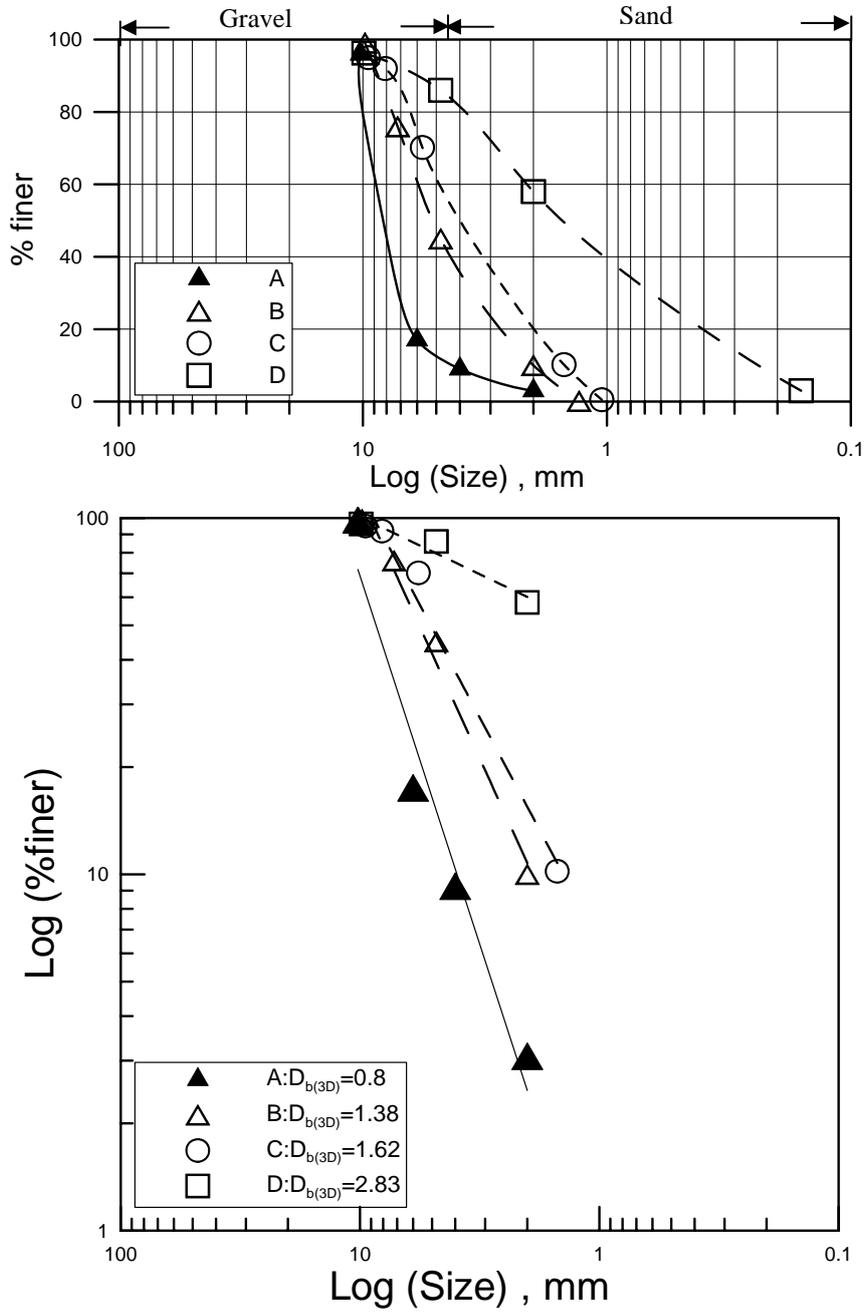
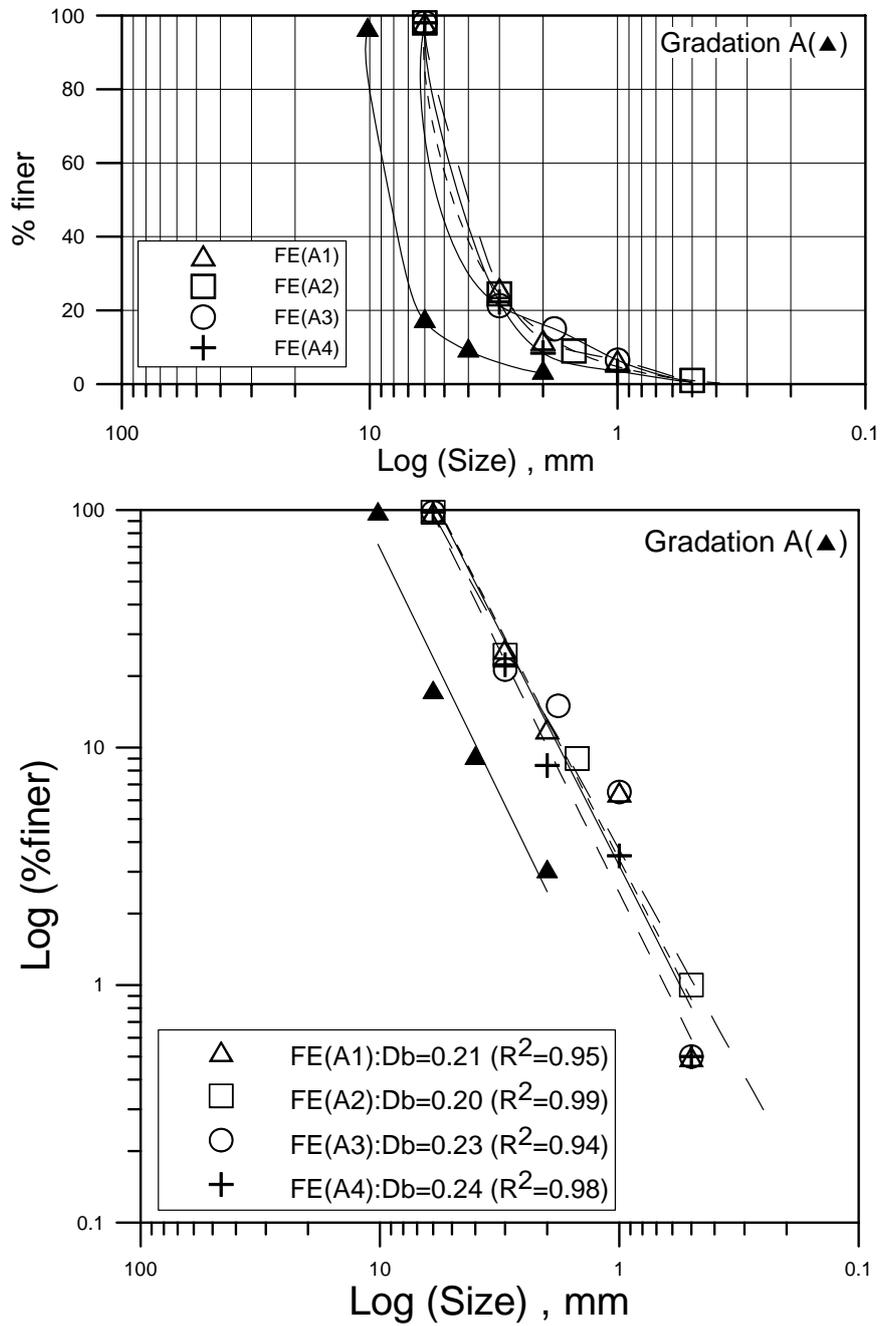


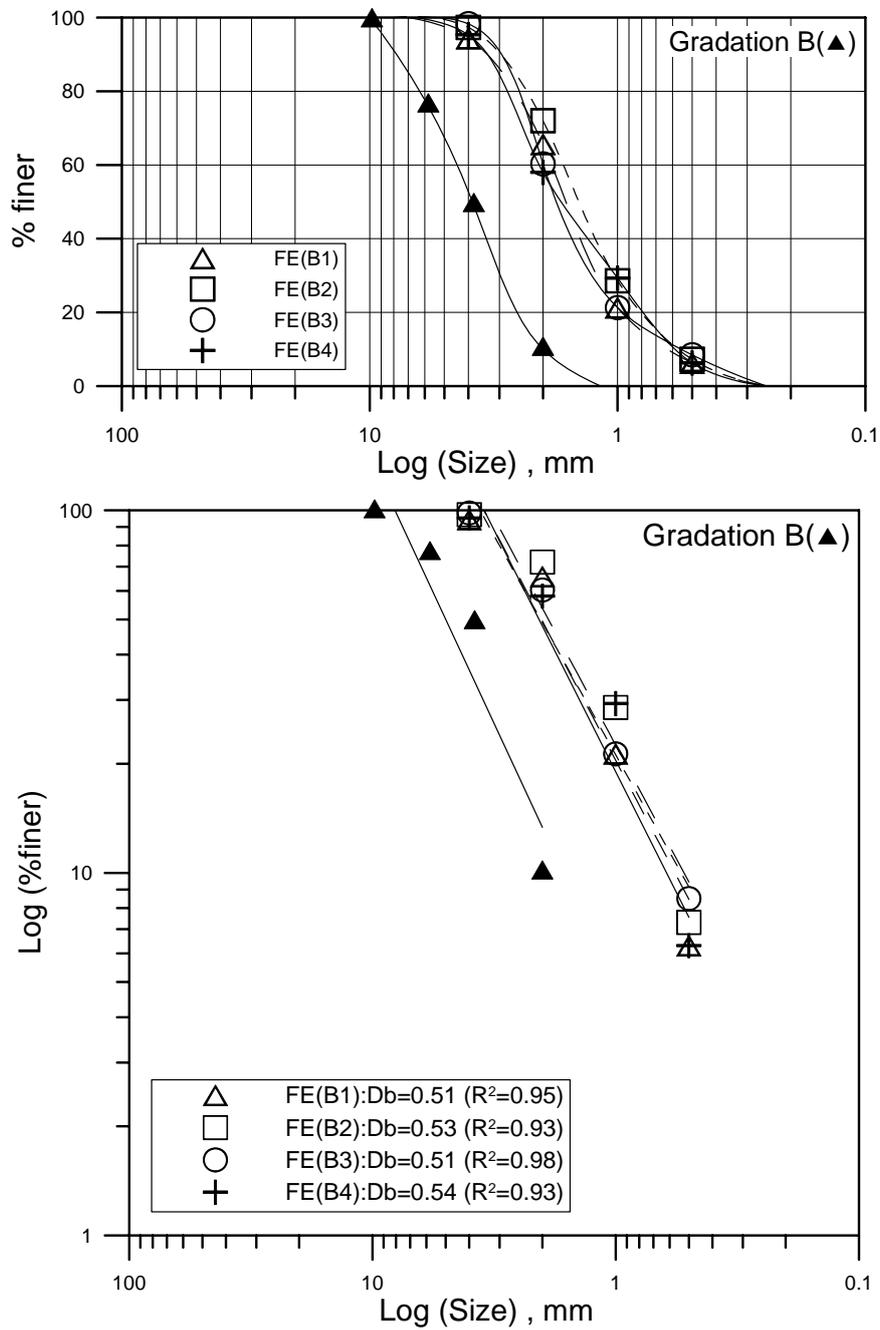
圖 6.11 本文 A、B、C、D 四組級配與其級配方格維度值



(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)

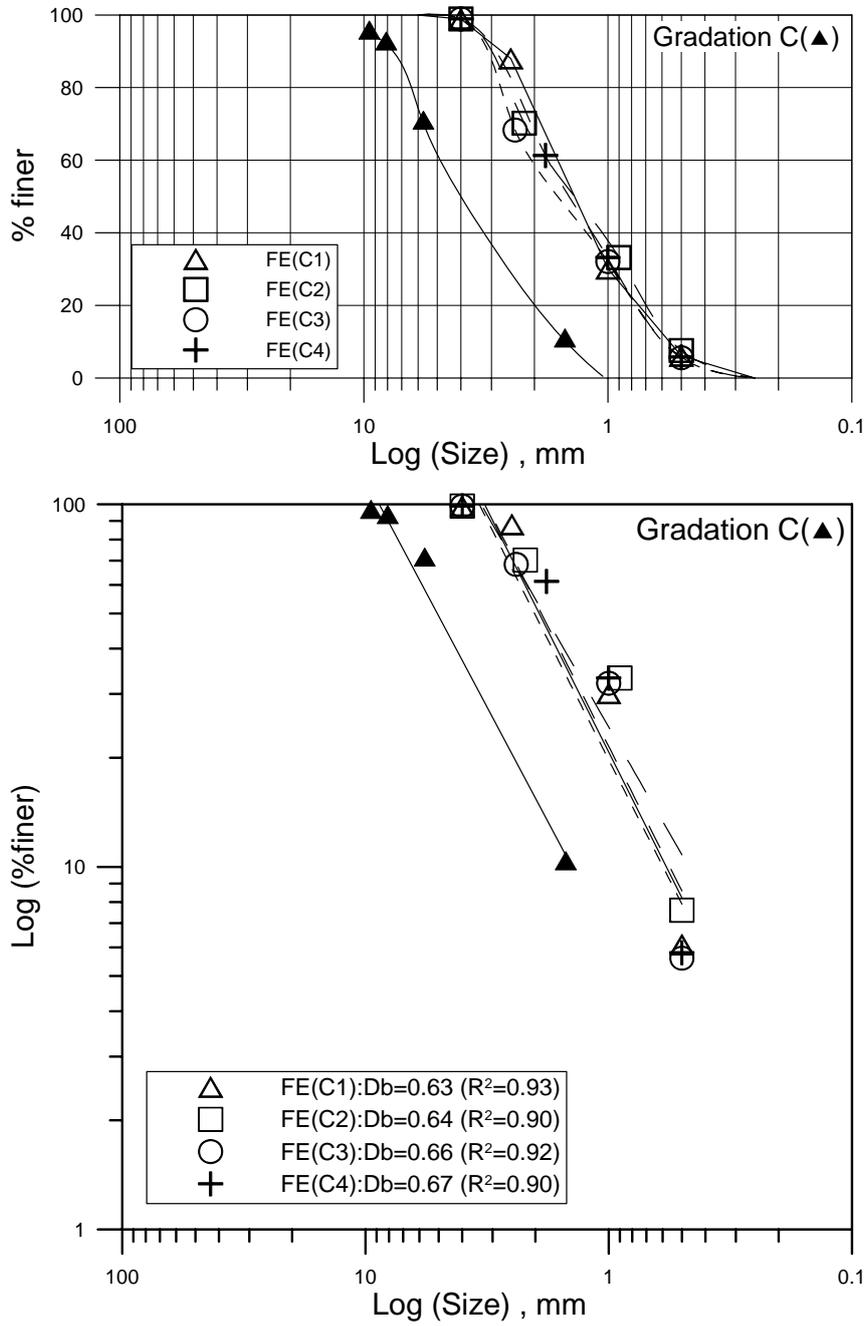
圖 6.12 FE 組試體(純骨材)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值

第六章 試驗結果與分析



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)

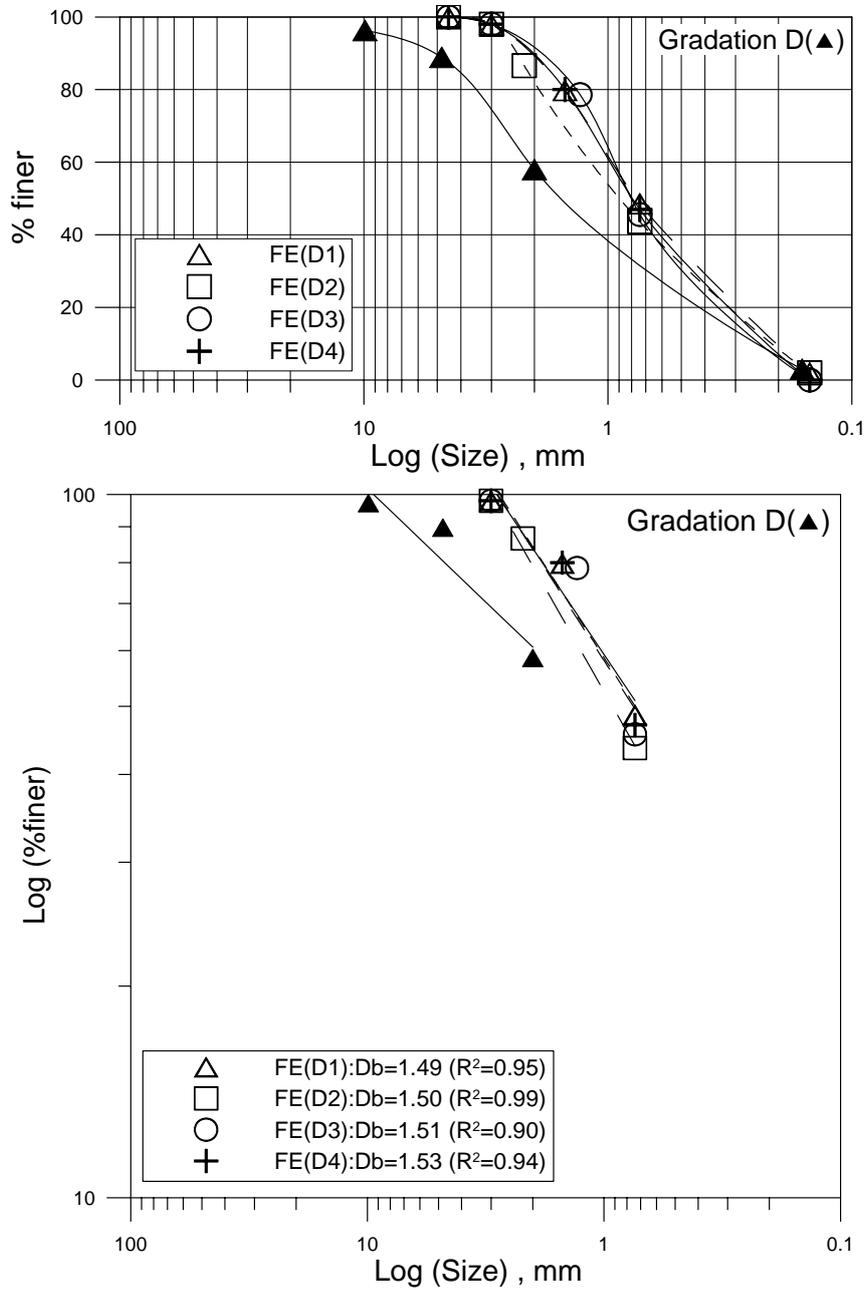
圖 6.12 FE 組試體(純骨材)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)



(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)

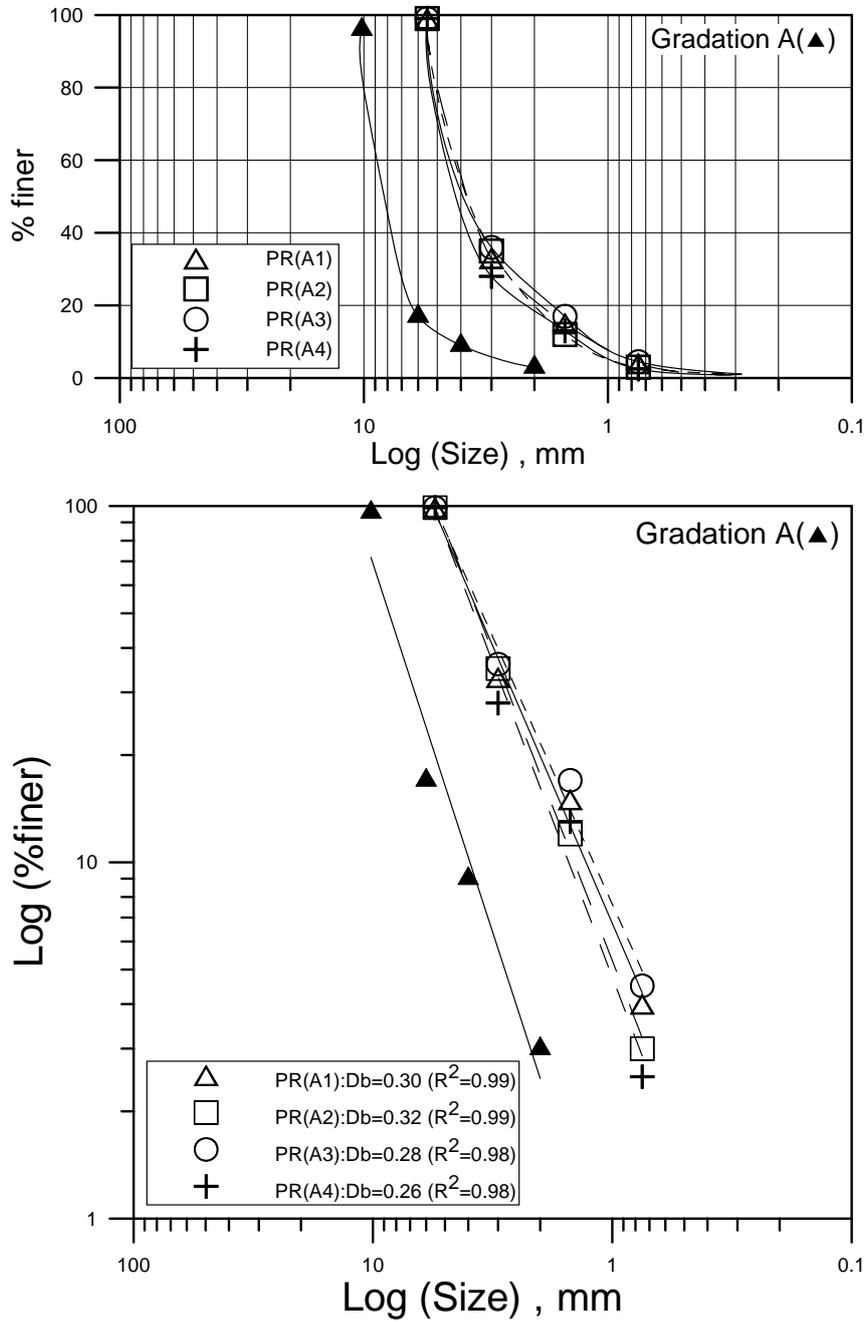
圖 6.12 FE 組試體(純骨材)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)

第六章 試驗結果與分析



(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

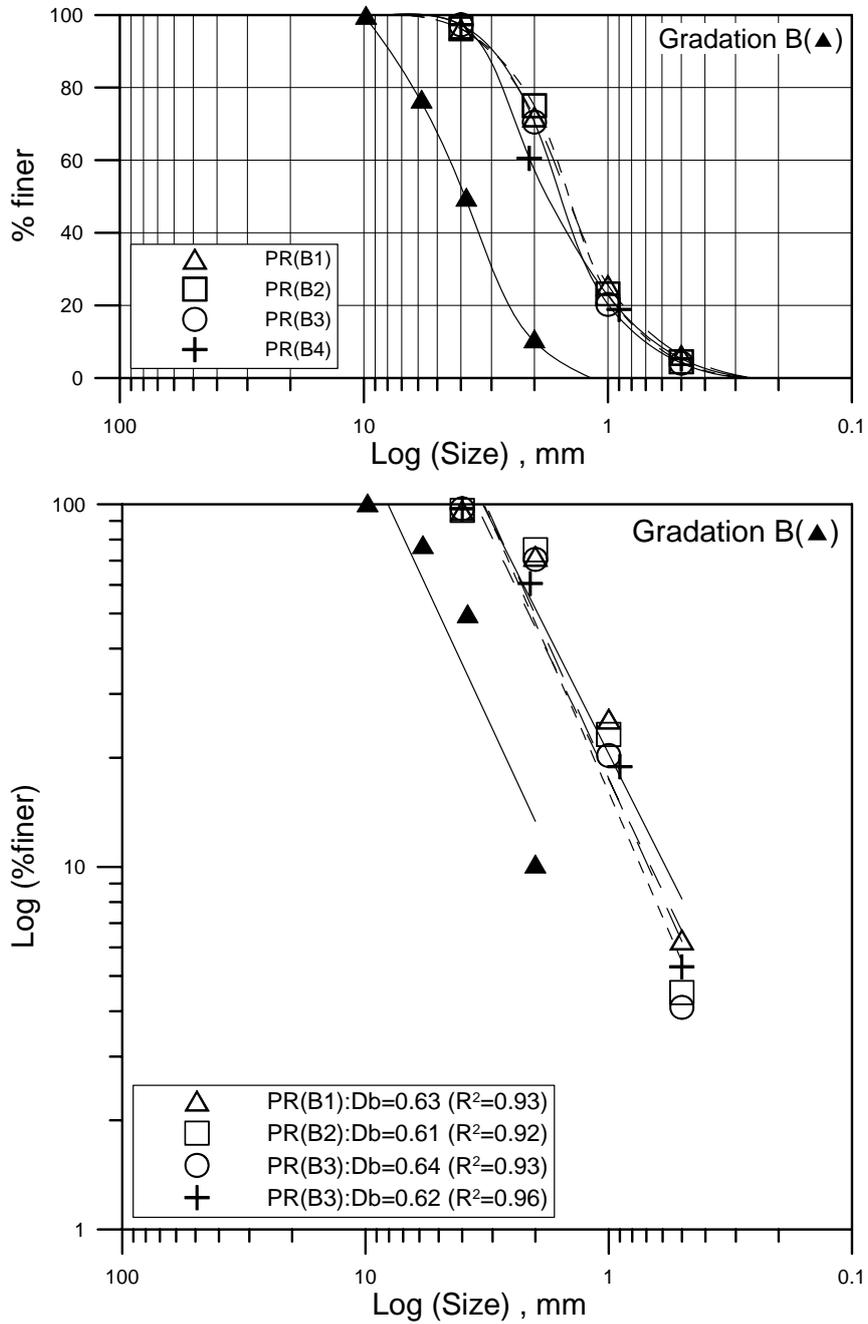
圖 6.12 FE 組試體(純骨材)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)



(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)

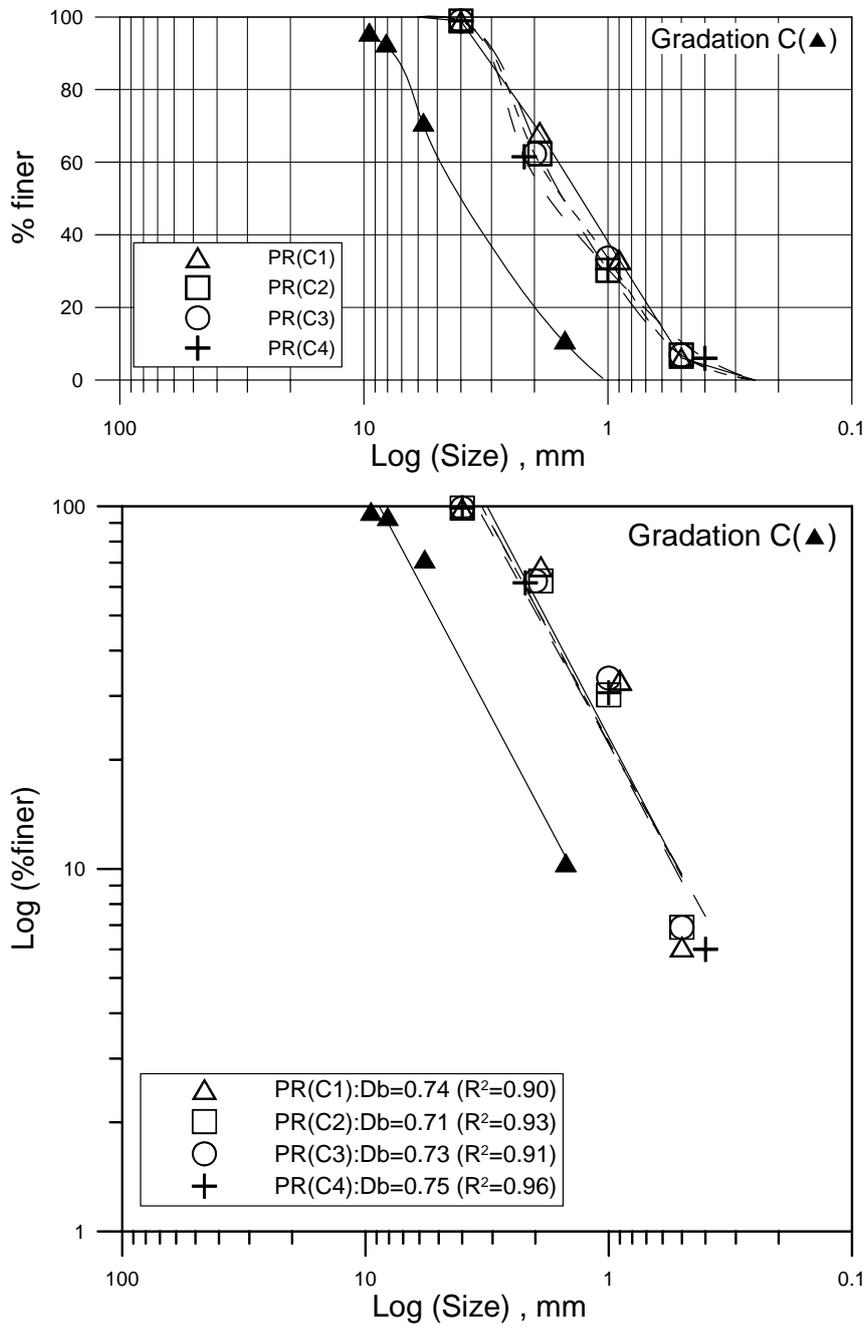
圖 6.13 PR 組試體(紅土為基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值

第六章 試驗結果與分析



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)

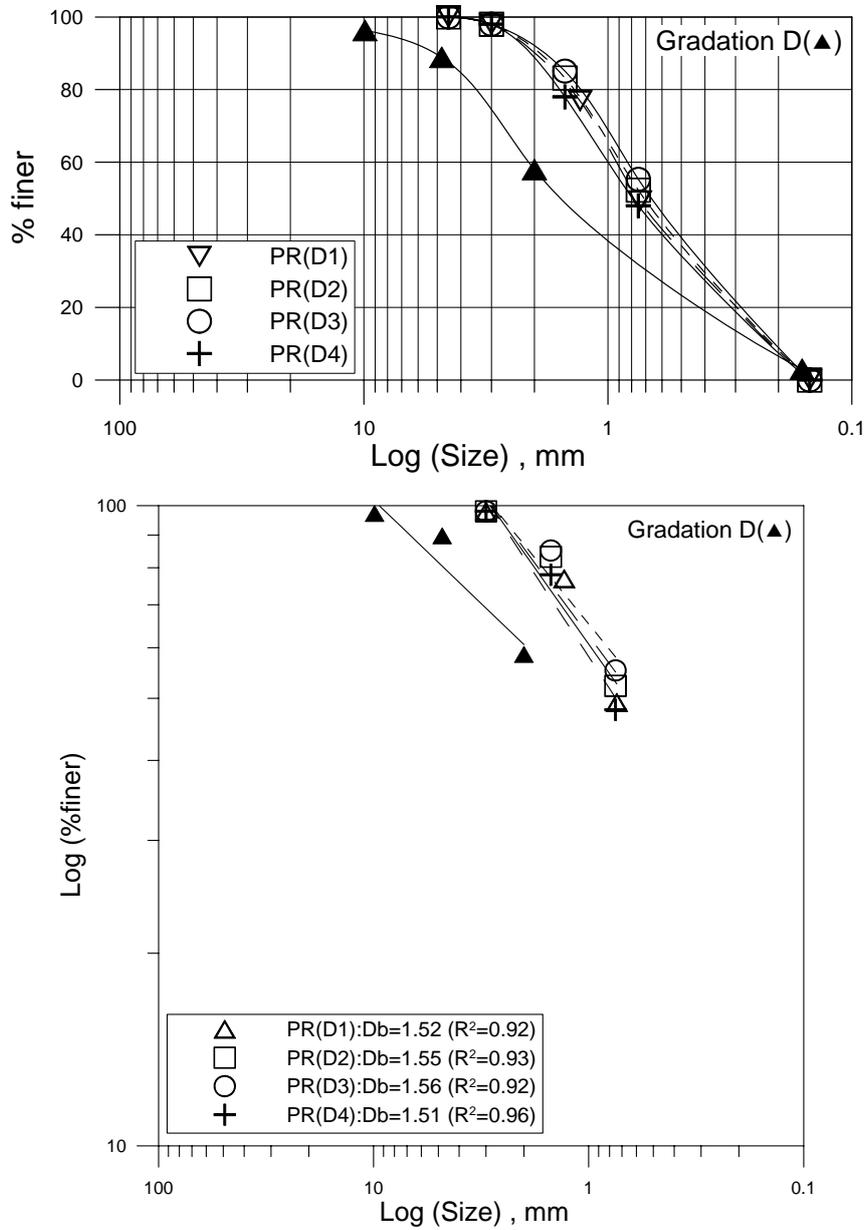
圖 6.13 PR 組試體(紅土為基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值(續)



(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)

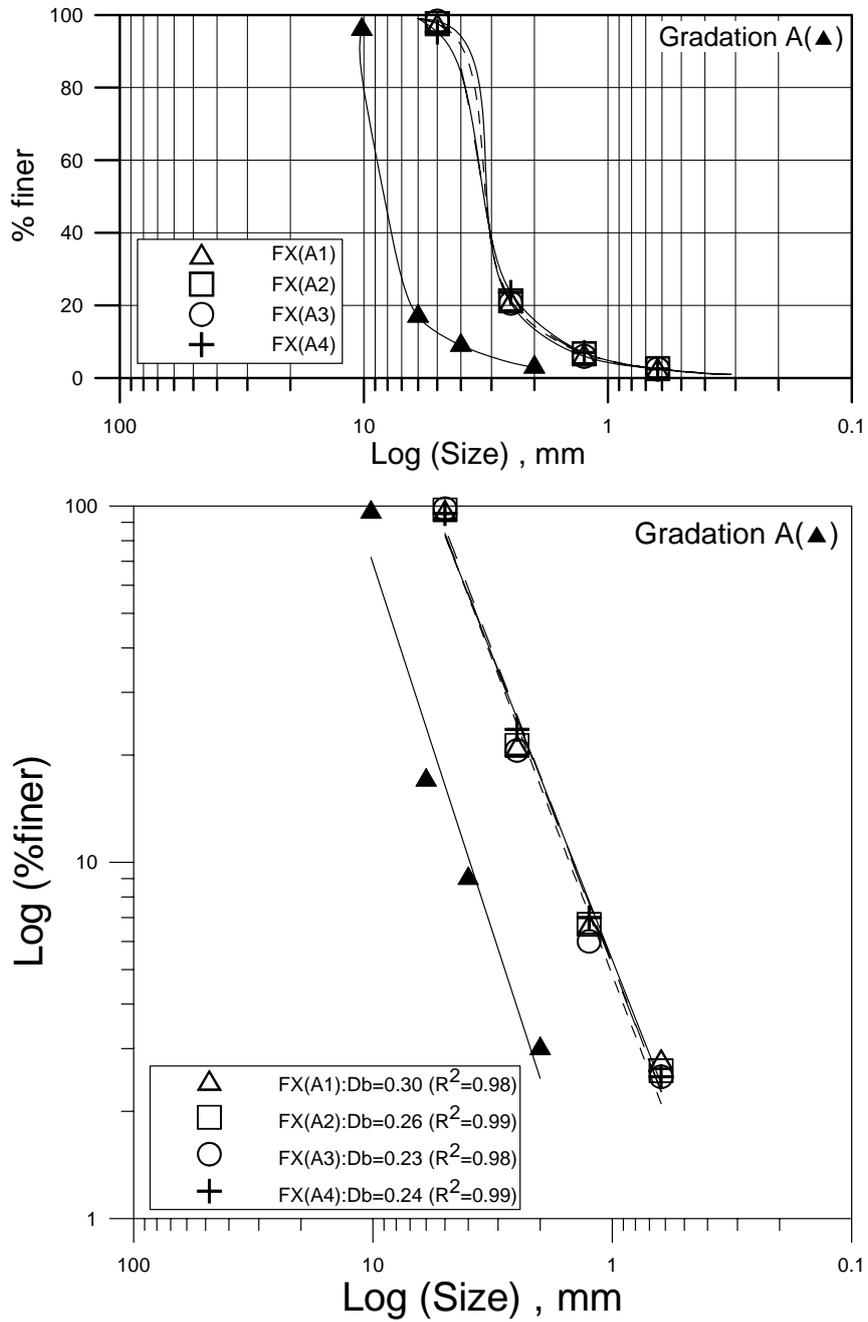
圖 6.13 PR 組試體(紅土為基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值(續)

第六章 試驗結果與分析



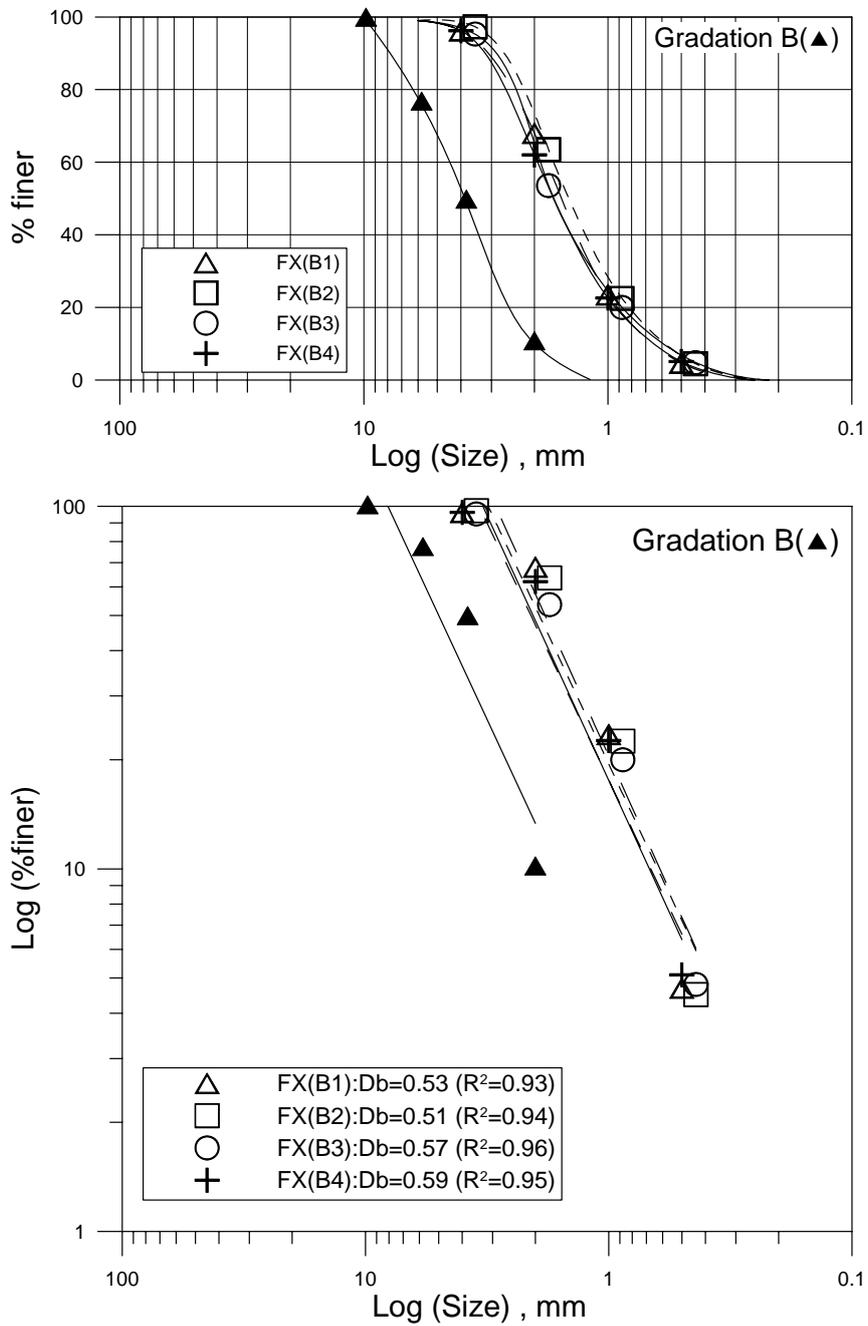
(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

圖 6.13 PR 組試體(紅土為基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值(續)



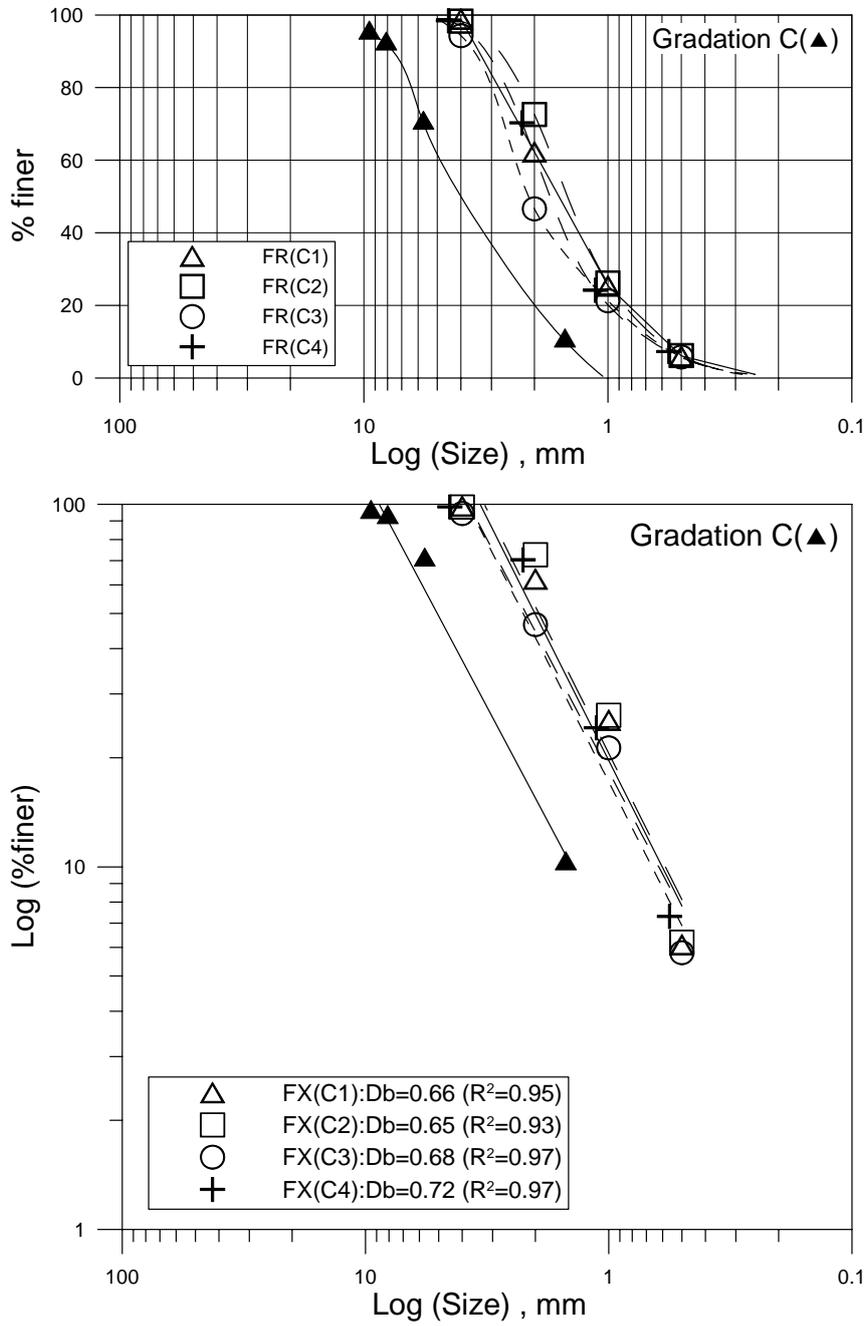
(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)

圖 6.14 FX 組試體(石膏基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)

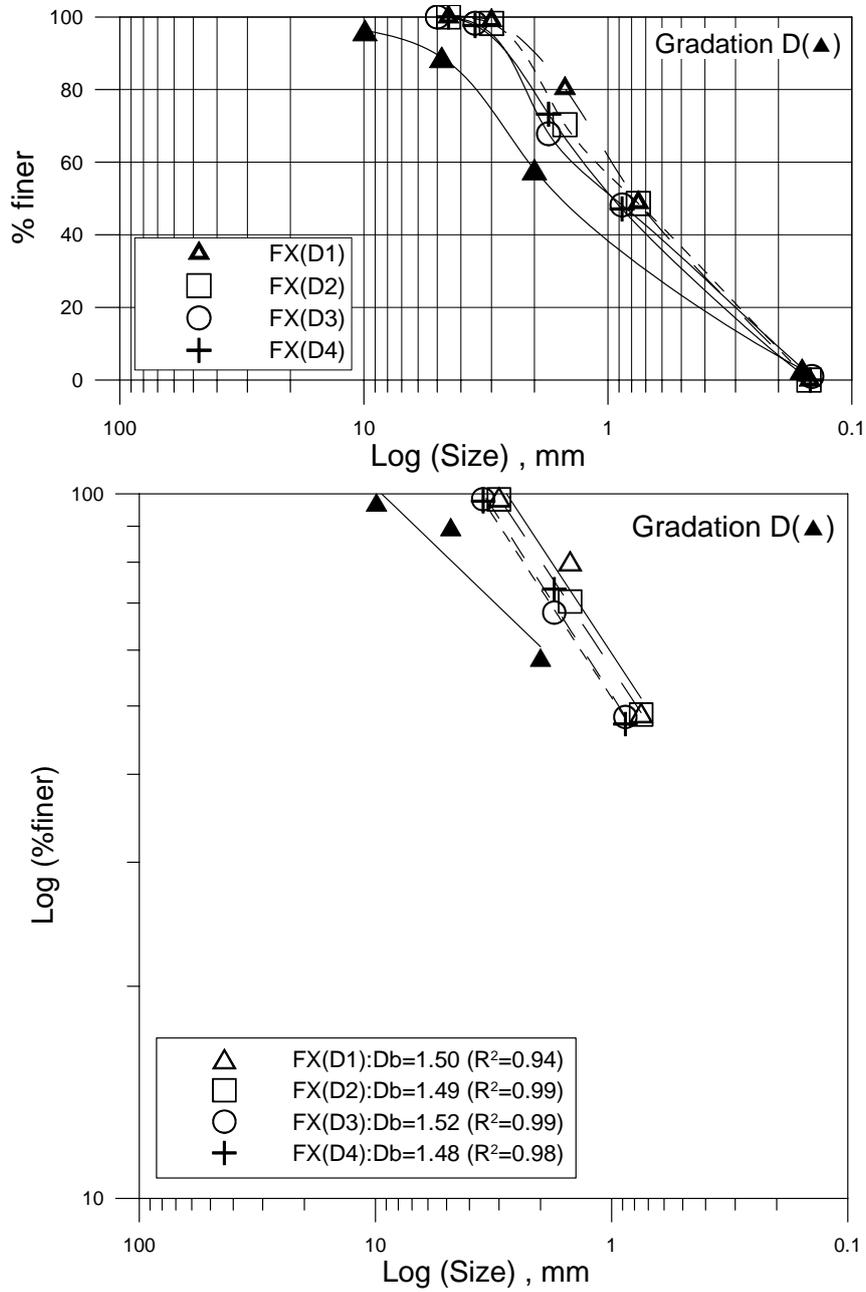
圖 6.14 FX 組試體(石膏基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)



(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)

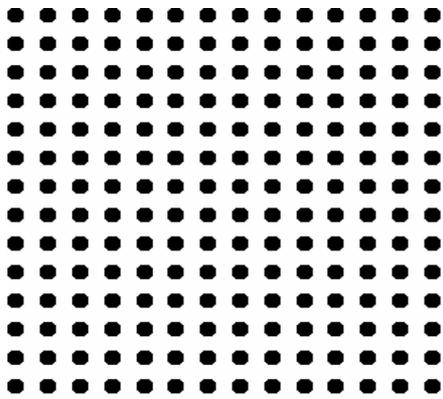
圖 6.14 FX 組試體(石膏基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)

第六章 試驗結果與分析

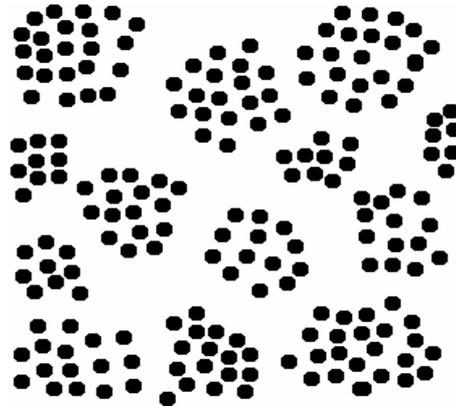


(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

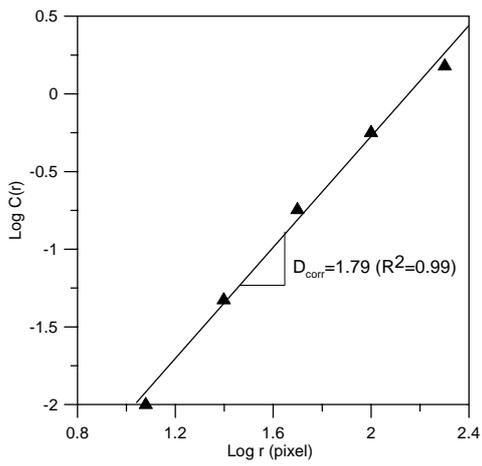
圖 6.14 FX 組試體(石膏基質材料)之篩分析曲線與其 2D 方格維度值 (續)



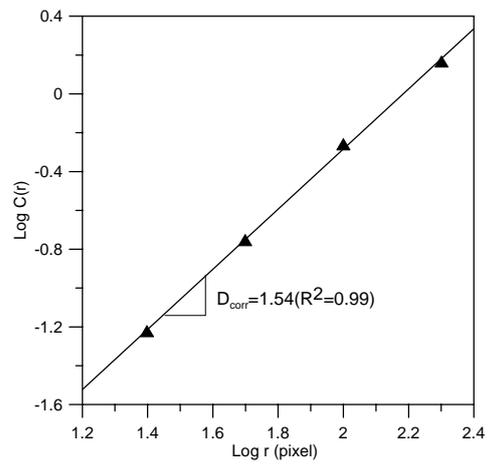
(a1) Homogenous(H), $D_{\text{corr}} = 1.79$



(b1) Cluster(C), $D_{\text{corr}} = 1.54$



(a2) Homogenous



(b2) Cluster

圖 6.15 兩種人造模擬質點場及其 D_{corr} 值比較

第六章 試驗結果與分析

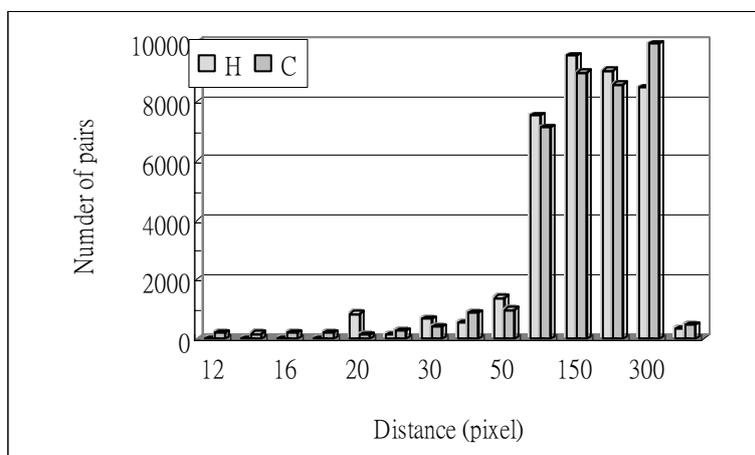


圖 6.16 叢聚與均質場兩兩顆粒距離之分佈比較

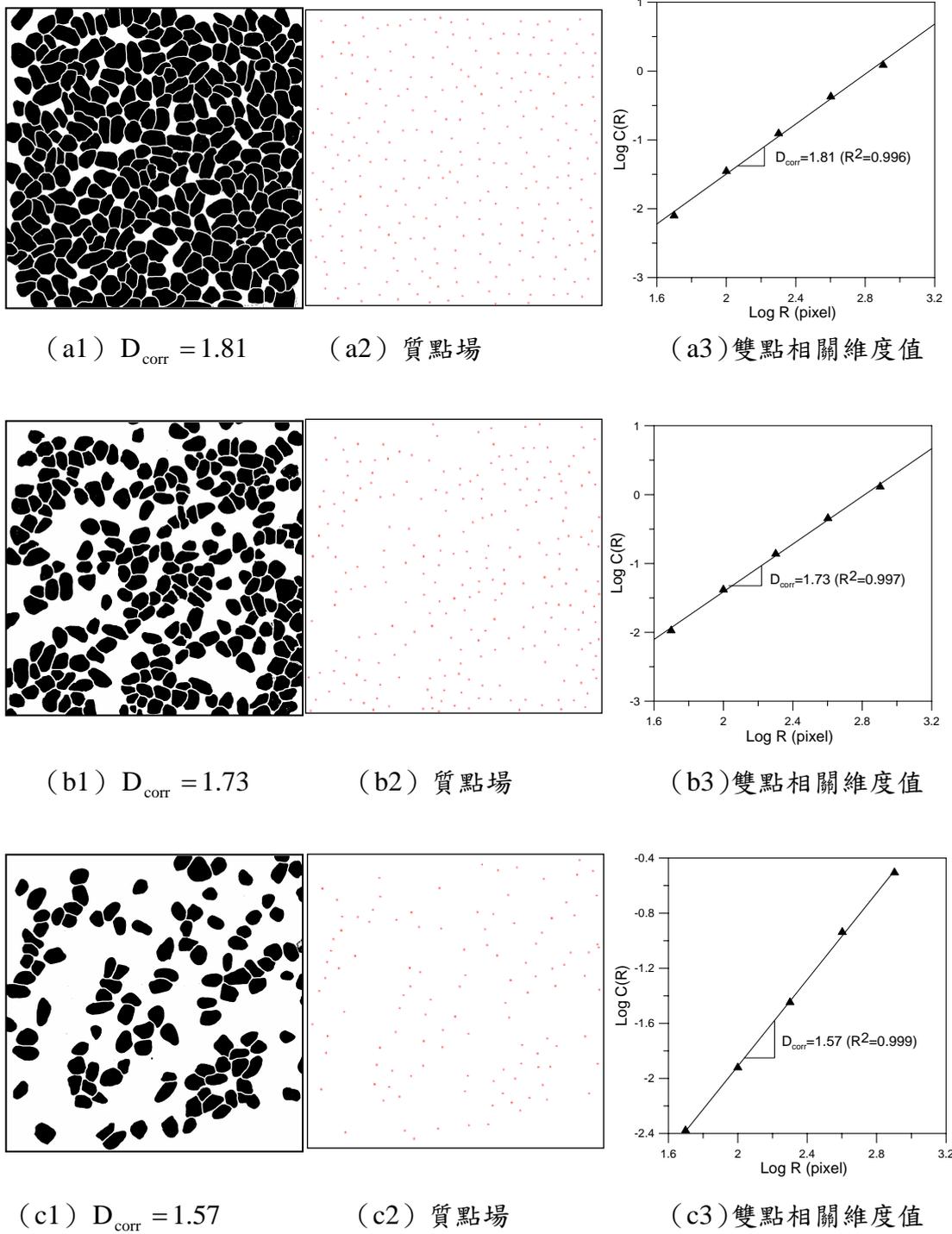


圖 6.17 三種不同排列狀況 (a、b、c) 及其 D_{corr} 值

第六章 試驗結果與分析

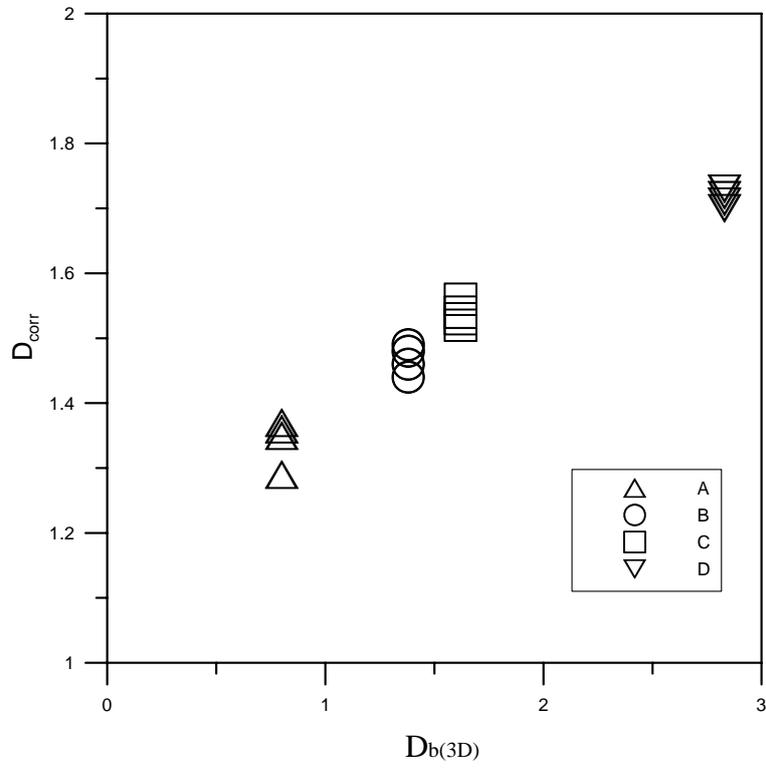


圖 6.18 本文四種級配 $D_{b(3D)}$ 與其排列 D_{corr} 之影響(以 FE 組為例)

第七章 直剪試驗結果與分析

本研究直剪試驗結果包括純骨材顆粒群試體(FE 組)、以紅土為填充材料部分限制骨材運動(PR 組)、以石膏為填充材鎖住骨材(FX 組)等三組試體之剪應力-剪位移曲線、膨脹曲線如圖 7.1~7.3 所示。其中，直剪試驗時之覆土正向應力皆固定為 0.083MPa。以下將由直剪試驗結果，探討級配方格維度 D_b 值、雙點相關維度 D_{corr} 與尖峰摩擦角 ϕ_p 、內摩擦角 ϕ 及膨脹角 i 等力學性質間之關聯性。

7.1 試驗結果

7.1.1 剪應力—剪位移行為

由圖 7.1~圖 7.3 直剪之剪應力-剪位移曲線可以發現：FX 組試體當應力達到尖峰強度後，下降較大行為較脆性。而 PR 組及 FE 組峰後剪應力之起伏則變化不大，呈現塑性剪力行為。PR 組及 FE 組試體之尖峰位移也較 FX 組大，其原因在反應受剪時骨材與骨材間位置會重組，需先使骨材間變緊密(壓密)後應力才上升。

進一步，由圖中比較得知：在 $\sigma_n = 0.083 \text{ MPa}$ 之下，FX 組試體強度遠高於 FE 組與 PR 組，係因 FX 組試體骨材被石膏鎖無法移動、轉動，因此提升試體之強度。而在 FE 組試體則因無任何填充材料之支持所以強度最低，PR 組強度居中。顯示填充物之有無影響著級配料之剪力行為。

圖中亦可發現：PR 組及 FE 組試體，在相同級配下(即 $D_{b(3D)}$ 相等)尖峰剪力強度值之差異不大；而在不同級配下(不同 $D_{b(3D)}$ 時)，在 PR 組試體當 $D_{b(3D)}$ 值愈大，其尖峰剪力強度反而愈小，呈負相關關係(詳細將在下一節作探討)。

7.1.2 膨脹曲線

圖 7.4 為 FE 組直剪時骨材運動現象之觀察：發現剪動時骨材會產生旋轉與膨脹，此現象亦反映在膨脹曲線上，如圖 7.1 膨脹曲線會先因骨材調整位置而有壓密現象。另圖 7.5 中 PR 組則因添加紅土當填充材，骨材因有紅土填塞其間，致使骨材不易旋轉移位，其膨脹曲線(如圖 7.2 之膨脹曲線)沒有壓密現象而直接膨脹。FE、PR 及 FE 三組試體之綜合比較歸納於圖 7.6。

由圖 7.1(a)~(d) 比較則可看出：級配方格維度 $D_{b(3D)}$ 值愈小(均勻級配)膨脹角愈大，反之則反是。顯示當 $D_{b(3D)}$ 值愈小的試體內小骨材較少之均勻級配其膨脹角大，而 $D_{b(3D)}$ 值愈大的試體(優良級配)則是除了大顆粒外，另含有較多小粒骨材之優良級配其膨脹角小。意即，顆粒級配(尤其是小粒的填充)將影響其膨脹行為，以至其剪力強度。

7.2 級配對剪力強度之影響

本研究試驗中，FE 組骨材佔 100%、PR 組試體骨材重量佔全部 85%、填充紅土佔 15%，FX 組試體之骨材重量佔整個試體 70%、填充材則佔 30%。依洪如江(1995)研究結論其力學行為均已由粗粒骨材所主控。然而，在直剪試驗中，實際參與剪動摩擦的僅僅是剪斷面上(附近)之骨材，因此剪斷面上骨材百分比將是影響剪力強度的主因。

若計算 PR 組及 FX 組剪斷面積之骨材面積(見圖 7.7)確實多佔 50%以

上，即剪力強度應已由骨材主控，而在 FE 組試體骨材面積之百分比則有低於 50 之狀況(但是整體之趨勢不變)，其原因可能為 FE 試體孔隙需添加白色廣告原料，在以影像處理過程中骨材面積變小之故。

而且如圖 7.7 所示，剪斷面上骨材所佔之比率越高，其剪力強度會越高；反之，若剪斷面上之軟弱填充材越多時，其剪力強度則越低。因之，剪斷面上骨材之二維分佈特性(粒徑分佈、排列分佈)將是本章以下討論重點。

如前所述，級配 $D_{b(2D)}$ 值介在 0.8~2 時屬於優良級配，即 $D_{b(3D)}$ 值大於 1.8 時屬於優良級配。本節將 $D_{b(2D)}$ 及 $D_{b(3D)}$ 分別和剪斷面上骨材面積百分比的關係繪於圖 7.8。由圖中可觀察出： $D_{b(2D)}$ 及 $D_{b(3D)}$ 皆與剪斷面上骨材所佔面積百分比呈正相關。即愈趨優良級配時，骨材佔面積百分比愈大，顯示在試體之骨材級配分佈愈接近優良級配時，骨材填塞程度愈高。而在碎形理論中 D_b 值正是用以反映顆粒在平面或空間之填滿程度(capacity)，填塞得愈滿其 D_b 值愈大($D_b < 2$)，因此級配方格維度確可與力學行為建立關係。

7.2.1 實際級配與剪動面級配之相關性

在二維剪動平面上骨材之分佈特徵是否與實際三維之粒徑分佈一致，此處將進一走了解。依碎形理論對同一個試體中，骨材實際級配之碎形維度 $D_{b(3D)}$ 值與(剪斷)平面上骨材級配碎形維度 $D_{b(2D)}$ 關係應為 $D_{b(3D)} = D_{b(2D)} + 1$ 。因此，本文將前述圖 7.8 中 $D_{b(2D)}$ 值與 $D_{b(3D)}$ 值整理繪如圖 7.9。

如圖 7.9(a)之關係，看出 $D_{b(3D)}$ 值與 $D_{b(2D)} + 1$ 值確很接近，但不直接相等。經前述第五章介紹影像軟體分析時已知顆粒愈小顆所造成之誤差愈大，此現象證諸由圖 7.9(a)中 B 與 C 級配較接近 $D_{b(3D)} = D_{b(2D)} + 1$ 線，源於 B、C 級配為小粒顆粒較少之均勻級配、而 D 級配則具有較多小粒骨材之優良級配。

故造成 $D_{b(3D)} \neq D_{b(2D)} + 1$ 但 $D_{b(3D)}$ 很接近 $D_{b(2D)} + 1$ ，其原因可能為：(1)卵礫

第六章 試驗結果與分析

石與周圍紅土對比不明顯造成顆粒邊界模糊，(2)經由影像軟體分析時所產生之誤差，(3)實際篩分析其顆粒通過主要以第二軸(中軸)為主與影像篩分析有所差異。

進一步，若將 $D_{b(2D)}$ 與 $D_{b(3D)}$ 的關係如圖 6.9(b) 中迴歸綜合一經驗式：

$$D_{b(3D)} = D_{b(2D)} + 0.9 \quad (7-1)$$

上式可暫時做為 $D_{b(2D)}$ 與 $D_{b(3D)}$ 間相互轉換之參考，意即由平面上獲得之級配碎形維度 $D_{b(2D)}$ 值，可用以推估三維空間內之實際級配特徵 $D_{b(3D)}$ 值。因此，應用此一觀念也可減少工地現場實際篩分析試驗之數量。

7.2.2 級配與尖峰摩擦角之關係

此處將針對直剪尖峰摩擦角 ϕ_p 與級配方格維度 $D_{b(3D)}$ 及 $D_{b(2D)}$ 關係加以探討，整理如圖 7.10~7.12。由圖中可發現：在 FE 組試體中(見圖 7.10)，不論 $D_{b(3D)}$ 或 $D_{b(2D)}$ 值如何變動，其尖峰摩擦角 (ϕ_p) 均介在 $40.4^\circ \sim 48.5^\circ$ 間、PR 組(見圖 7.11)介於 $46.9^\circ \sim 56.6^\circ$ 間、FX 組(見圖 7.12)介於 $66.6^\circ \sim 75.8^\circ$ 之間作不規則變動，變化範圍有 10 度之多，但均與 $D_{b(3D)}$ 或 $D_{b(2D)}$ 都沒有明顯的相關性。

其原因，除了源於試驗變異性，尚可能因為本文 FE 組試驗(或 FX 組、或 PR 組)的正向應力均相等(0.083Mpa)，即在同一正向應力下每組試驗之每個 $\tan \phi_p$ 值之變化並不大，致使每個尖峰摩擦角 ϕ_p 只在一狹窄範圍內跳動，並不易以 ϕ_p 剖析級配之影響。唯 PR 組試體稍微可以看出：在骨材百分比相等的條件下，當 $D_{b(2D)}$ 值愈大(趨於優良級配)，其整體尖峰摩擦角反而有變小之趨勢，級配 $D_{b(3D)}$ 與尖峰摩擦角 ϕ_p 呈負相關，將之迴歸後可得下式：

$$\phi_p = 54.26 - 5.44D_{b(2D)} \quad (7-2)$$

式中可看出，粗骨材百分比一樣的條件下，當 $D_{b(3D)}$ 與 $D_{b(2D)}$ 愈大時愈趨於優良級配(較多小粒)，其尖峰摩擦角均有較小之趨勢。

7.2.3 級配與膨脹角間之關係

由 7.1 節直剪試驗之膨脹曲線可得尖峰膨脹角 i ，結果顯示於圖 7.13。圖 7.13 (a) 為實際級配三維 $D_{b(3D)}$ 與膨脹角 (i) 的關係，圖中顯示：隨著 $D_{b(3D)}$ 的增加膨脹角 (i) 愈小。意即，在骨材百分比相等的條件下， $D_{b(3D)}$ 愈大的試體愈趨優良級配，因所含小粒骨材較多，因此出現在剪斷面中小顆粒骨材也較多，使得爬坡膨脹角較小。相反的， $D_{b(3D)}$ 值愈小時(均勻級配)，剪斷面中大粒骨材較多，因此形成較高之爬坡效應使膨脹角較大。

圖 7.13 (b) 則為三組試體在剪斷面的二維 $D_{b(2D)}$ 與試體膨脹角 (i) 之間的關係圖，由圖可得知膨脹角 (i) 也會隨著 $D_{b(2D)}$ 的增加而減少，此負相關的趨勢與圖 7.13 (a) 中 $D_{b(3D)}$ 與 i 之間的趨勢相同 (因 $D_{b(2D)}$ 與 $D_{b(3D)}$ 成正相關)。若將圖 7.13(b) 中數據回歸可得下式(見圖 7.14)：

$$i = 6.15 - 3.79D_{b(2D)}, \text{ FE 組} \quad (7-3(a))$$

$$i = 9.84 - 7.36D_{b(2D)}, \text{ PR 組} \quad (7-3(b))$$

$$i = 40 - 18.47D_{b(2D)}, \text{ FX 組} \quad (7-3(c))$$

顯見，三種試體之膨脹角皆由 $D_{b(2D)}$ (及 $D_{b(3D)}$) 影響，當 $D_{b(2D)}$ (及 $D_{b(3D)}$) 愈大時(趨優良級配)，其膨脹角均有較小之趨勢。

7.2.4 級配與內摩擦角間之關係

由尖峰摩擦角 ϕ_p 中扣除顆粒膨脹效應之膨脹角 i 後可得內摩擦角 $\phi (= \phi_p - i)$ ，內摩擦角類似基本摩擦角(basic friction angle)僅反映在剪動平面上的骨

第六章 試驗結果與分析

材分佈效應（粒徑分佈、排列分佈）之影響。圖 7.15~圖 7.17 為所有試體之 $D_{b(3D)}$ 、 $D_{b(2D)}$ 與內摩擦角 ϕ 之發展趨勢。由圖中可發現：當 $D_{b(3D)}$ 值越大時， ϕ 值亦會增加（此一趨勢與尖峰摩擦角 ϕ_p 相反）。因此，在骨材與基質比例固定的條件下，當骨材粒徑分佈屬於優良級配時，因骨材在剪動平面之填滿程度較高，骨材所佔百分比愈高，故平均的內摩擦角 ϕ 值則較大；而當均勻級配時，因在剪動平面之骨材填滿程度較低，骨材所佔百分比愈低，故內摩擦角 ϕ 之角度較小。

進一步，由圖 7.15~7.17 中剪斷面的二維 $D_{b(2D)}$ 與內摩擦角 ϕ 之關係，其 ϕ 亦隨著 $D_{b(2D)}$ 的增加而增加，可迴歸建立關係為：

$$\phi = 4.08D_{b(2D)} + 37.85 \quad , \text{FE 組} \quad (7-4(a))$$

$$\phi = 1.93D_{b(2D)} + 44.41 \quad , \text{PR 組} \quad (7-4(b))$$

$$\phi = 18.19D_{b(2D)} + 31.92 \quad , \text{FX 組} \quad (7-4(c))$$

此外，因 $D_{b(2D)}$ 與 $D_{b(3D)}$ 互為正相關，故內摩擦角 ϕ 亦會隨著 $D_{b(3D)}$ 增加而增大。亦即級配方格維度 $D_{b(2D)}$ 、 $D_{b(3D)}$ 愈大，則內摩擦角 ϕ 愈大。

但 7.2.3 節中已知級配方格維度 $D_{b(2D)}$ 、 $D_{b(3D)}$ 愈大，則膨脹角 (i) 隨著減少，呈負相關，因此圖 7.18 即綜合表示膨脹角 (i) 與內摩擦角 ϕ 彼此互為消長。因此，尖峰摩擦角 ϕ_p 隨 $D_{b(2D)}$ 、 $D_{b(3D)}$ 變化的改變不大（因 $\phi_p = \phi + i$ ）。為呈現三者之消長，特將級配方格維度 $D_{b(2D)}$ 、 $D_{b(3D)}$ 與膨脹效應、內摩擦角之消長呈現如圖 7.19。由圖中摩擦性質隨級配方格維度變動之增減現象，發現 FX 組（骨材被鎖住）膨脹角與內摩擦角受 $D_{b(2D)}$ 之消長，使尖峰摩擦角幾乎沒改變。而 FE 組與 PR 組之影響則沒 FX 組強烈。

綜上可知：經由照相取得剪動平面上骨材之二維級配特性 $D_{b(2D)}$ 與力學性質 (ϕ 及 i) 的關係，可轉換成實在三維空間之 $D_{b(3D)}$ 與其力學性質間的關連

性。此一概念，將可利用現地坡面上拍照獲得之粒徑級配曲線來預知其尖峰摩擦角 $\phi_p (\phi + i)$ 的範圍。

7.3 顆粒排列方式對力學特性之影響

如前所述，在相同級配條件下，仍有不同的排列方式，其排列方式可用雙點相關維度 D_{corr} 來描述。本文將剪斷面之相片經由影像分析軟體分析，得到剪斷面上各骨材之等效粒徑與中心點位置等各屬性資料，再經計算可求得雙點相關維度 D_{corr} 。以下將對 D_{corr} 與膨脹角(i)及內摩擦角(ϕ)關係做探討。

(1) 同一級配條件下

圖 7.20 為 D_{corr} 與膨脹角(i)及 D_{corr} 與 ϕ 間之關係，圖中可以發現：綜合三種試驗形式之四種級配試體(A、B、C、D)的雙點相關維度 D_{corr} 僅在 1.2 至 1.8 間變化，但對 i 或 ϕ 均已有明顯改變(有 15~20 度的改變)。以 FE 組試體為例，在同一級配下的改變：FE(D1)~FE(D4)四個試體，當 D_{corr} 值從 1.7 增至 1.73(其變化量僅為 0.03)，在圖 7.20 (a)膨脹角(i)降了 0.5 度之多，而在圖 7.20 (b)中 ϕ 卻增加了 5.2 度之多，其他 FX、PR 組也有類似現象。表示雙點相關維度 D_{corr} 的改變，對內摩擦角 ϕ 對影響相當靈敏。意謂，在同樣顆粒級配下，顆粒堆疊方式之些微變化，摩擦特性(i 或 ϕ)就可能發生極大的變化。

然而，如圖 7.21，在同樣顆粒級配下，不同顆粒堆疊方式對膨脹角(i)與內摩擦角(ϕ)的影響極劇，但 D_{corr} 的增加對膨脹角(i)的減少量、與對內摩擦角(ϕ)的增加量卻大致相等(FE、PR、FX 組試體均有相同狀況)。此一消長現象，導致累計自兩者之和的尖峰摩擦角($\phi_p = \phi + i$)依然只在某一狹窄範圍內變化(類似 7.2 節級配 $D_{b(2D)}$ 改變對尖峰摩擦角之影響)。

因此，可以圖 7.21 三組(FX、FE、PR 組)不同試體其 D_{corr} 對膨脹角與內

摩擦角之消長示意。圖中表現膨脹角 i 與內摩擦角 ϕ 對於 D_{corr} 相當敏感： D_{corr} 值只要有些微之變化，即顆粒排列方式稍有不同，摩擦特性就可能發生極大的變化，尤以對 FX 組影響最明顯。但在同一組級配下，因排列形式可能的變化有限，所以 D_{corr} 變化對各自 (FX、FE、PR 三組) 之尖峰摩擦角之影響並不明顯。

(2) 不同級配條件下

雖然 D_{corr} 排列方式改變對 FX、FE、PR 三組各自之尖峰摩擦角之影響並不明顯，但由圖 7.20 中可發現：整體觀察 FX、FE、PR 三組(在級配不同時) 只要 D_{corr} 值有些微改變，顆粒間堆疊方式對膨脹角會產生很大的變化。而相較於前述骨材的級配型態(見圖 7.14)需改變很大，膨脹角才會產生明顯的變化。由此可說明：膨脹角 i 雖同時受到顆粒級配及排列方式的影響，但以受顆粒排列叢聚程度(D_{corr} 值的變化)的影響較大。

另一方面，當 D_{corr} 增加 ϕ 亦隨之著增加，表示內摩擦角 ϕ 隨之增加。此一現象由 FE(A)及 FE(D)兩個代表級配之剪斷面照片為例(參圖 7.22)，可看出：FE(D1)組為細顆粒較多、粗顆粒較少的優良級配，照片中可看到粗骨材周圍皆有細骨材包圍支持著，顆粒整體分佈較均勻，故 D_{corr} 較大，其 ϕ 值較大(43.9°)。而 FE(A1)則為粗骨材較多細骨材較少的均勻級配，在粗顆粒周圍只有少許的細顆粒支持，故 D_{corr} 較小相對上較叢聚而稀疏，其 $\phi=38^\circ$ 小於 FE(D1)的 $\phi=43.9^\circ$ 。

7.4 顆粒級配與排列對摩擦角之重要程度

綜本章討論：當骨材之級配型態屬於優良級配時(例如 D 級配)， $D_{b(3D)}$ 及 $D_{b(2D)}$ 值較大，此時剪斷面上骨材所佔面積百分比增加，大粒徑骨材有較多

小粒徑骨材包圍著，顆粒間愈叢聚致 D_{corr} 也增加，將會導致試體內摩擦角 ϕ 升高，但膨脹角 i 會下降(小粒較多)。意即，級配參數 $D_{b(2D)}$ 與叢集參數 D_{corr} 之間會交互影響，進而共同影響 ϕ (或 i) 值的大小，故材料之摩擦特性應同時與 D_b 及 D_{corr} 值有關。

本研究共探討骨材的級配型態 (以 $D_{b(2D)}$ 描述試體剪斷面顆粒之級配)、堆疊方式 (以 D_{corr} 描述) 及顆粒形狀 (以 $D_{(sp)}$ 描述)，但在形狀方面因 $D_{(sp)}$ 無法以單一值來描述整個試體，故以下僅以 $D_{b(2D)}$ 與 D_{corr} 兩者顆粒分佈效應對剪斷面之摩擦角(已扣除膨脹角)之權重關係為討論對象。利用下列方程式以『多元回歸』分析之：

$$\phi = a \cdot D_{b(2D)} + b \cdot D_{corr} + c \quad (7-5)$$

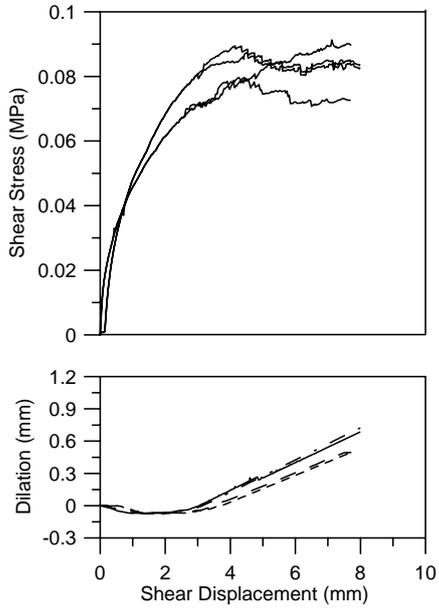
式中， a 為級配 $D_{b(2D)}$ 之係數、 b 為 D_{corr} 之係數、 c 則為一常數項，進而將本研究所有試驗資料代入上式回歸，得下一公式：

$$\phi = -7.64D_{b(2D)} + 56.75D_{corr} - 38.12 \quad (7-6)$$

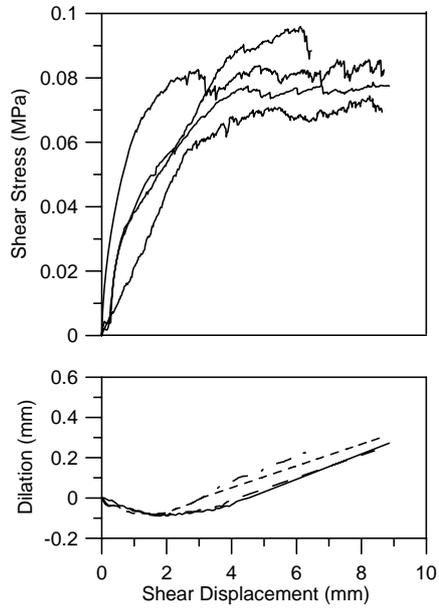
若將式(6-7)中 $D_{b(2D)}$ 、 D_{corr} 及內摩擦角 ϕ 值等參數進行標準化轉換，將資料點減去個別資料的平均數後，除以個別資料的標準差，可得下式：

$$\phi^* = 0.12D_{b(2D)}^* + 0.37D_{corr}^* \quad (7-7)$$

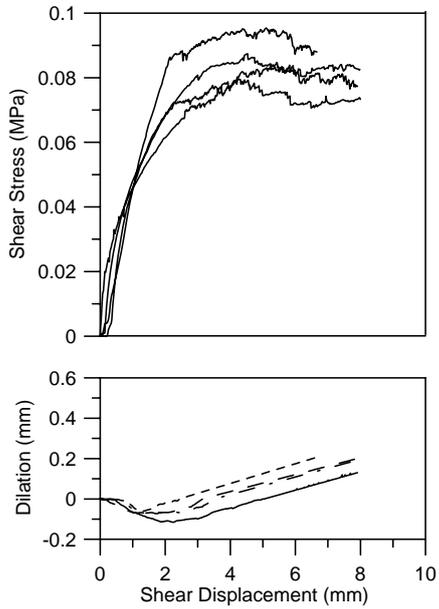
式中， $D_{b(2D)}^*$ 與 D_{corr}^* 之係數 0.12、0.37 即為顆粒之級配與排列對內摩擦角的影響程度之權重比。故顯示：顆粒排列方式對內摩擦角之影響約為顆粒級配之 3 倍，即顆粒的排列對內摩擦角 ϕ 的影響遠大於顆粒級配型態。



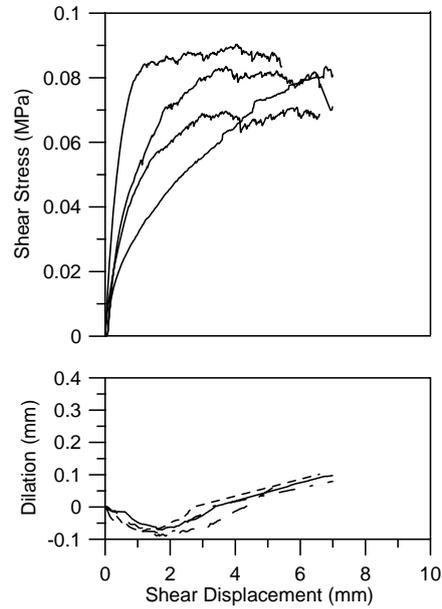
(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)

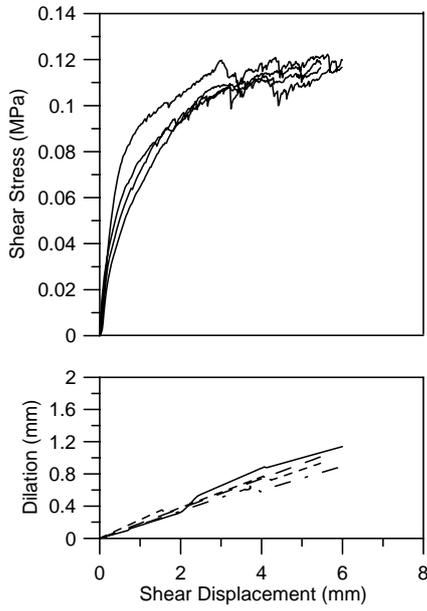


(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)

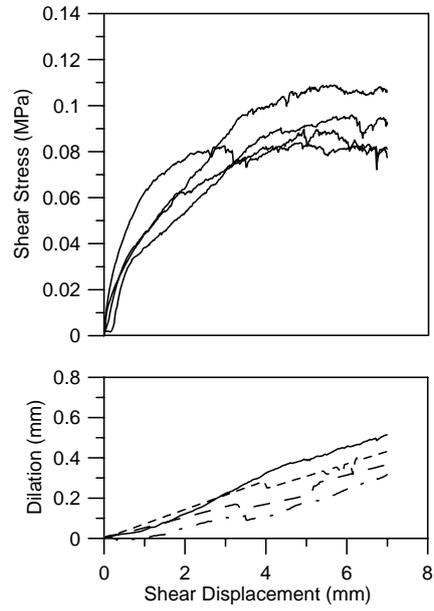


(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

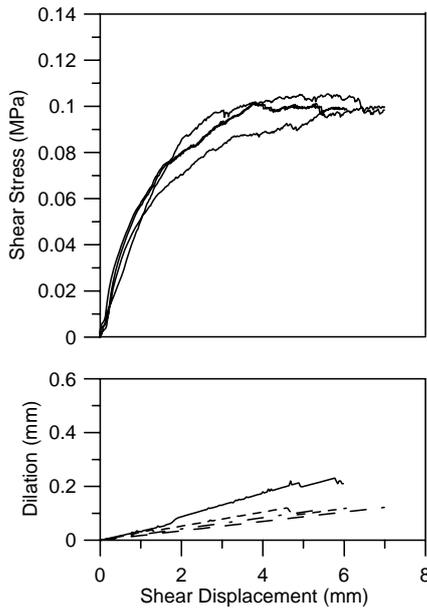
圖 7.1 FE 組試體之剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線



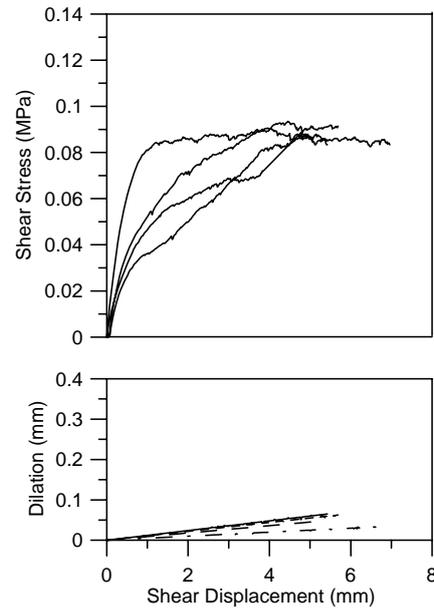
(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)



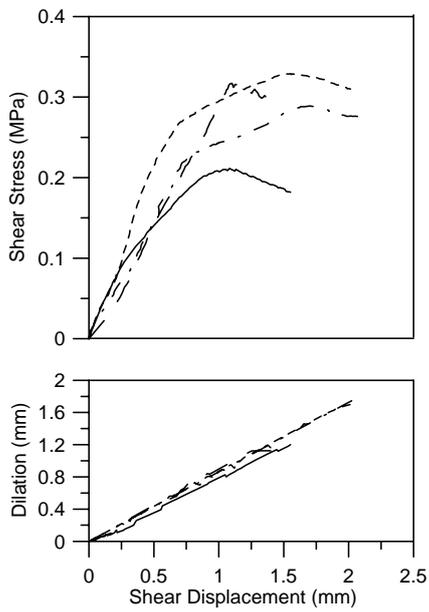
(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)



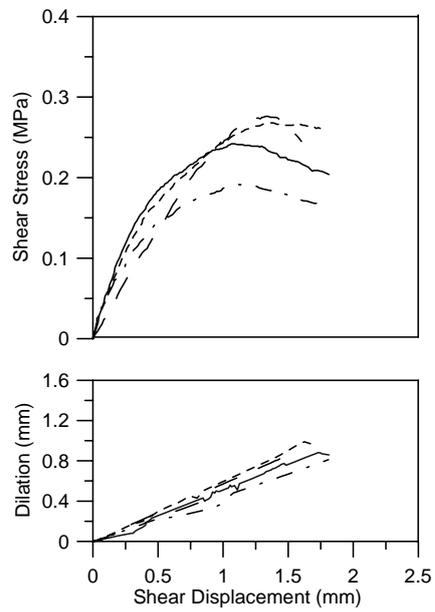
(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

圖 7.2 PR 組試體之剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線

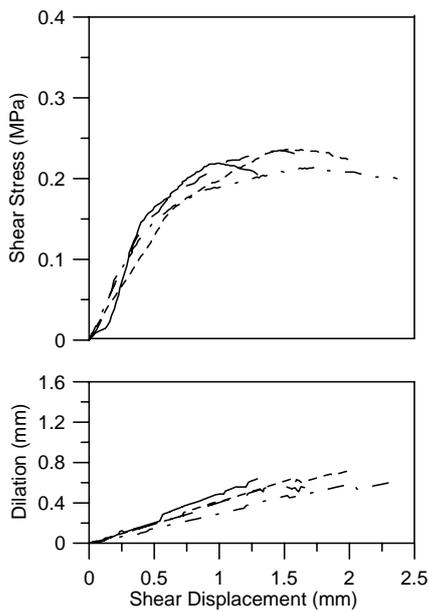
第六章 試驗結果與分析



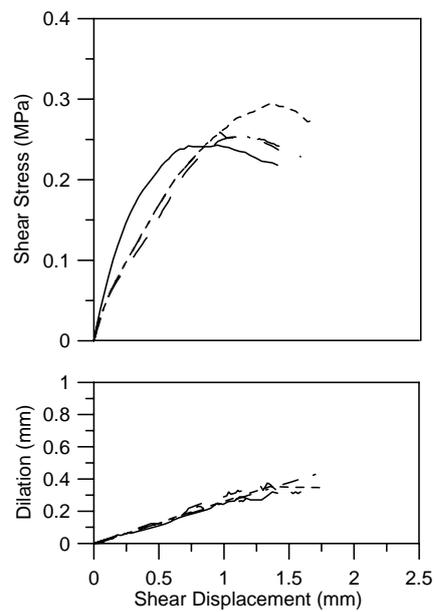
(a) A 級配 ($D_{b(3D)}=0.8$)



(b) B 級配 ($D_{b(3D)}=1.38$)



(c) C 級配 ($D_{b(3D)}=1.62$)



(d) D 級配 ($D_{b(3D)}=2.83$)

圖 7.3 FX 組試體之剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線



圖 7.4 純骨材試體 (FE 組) 之剪動過程骨材運動觀察



圖 7.5 添加紅土為填充材試體(PR 組)之剪動過程骨材運動觀察

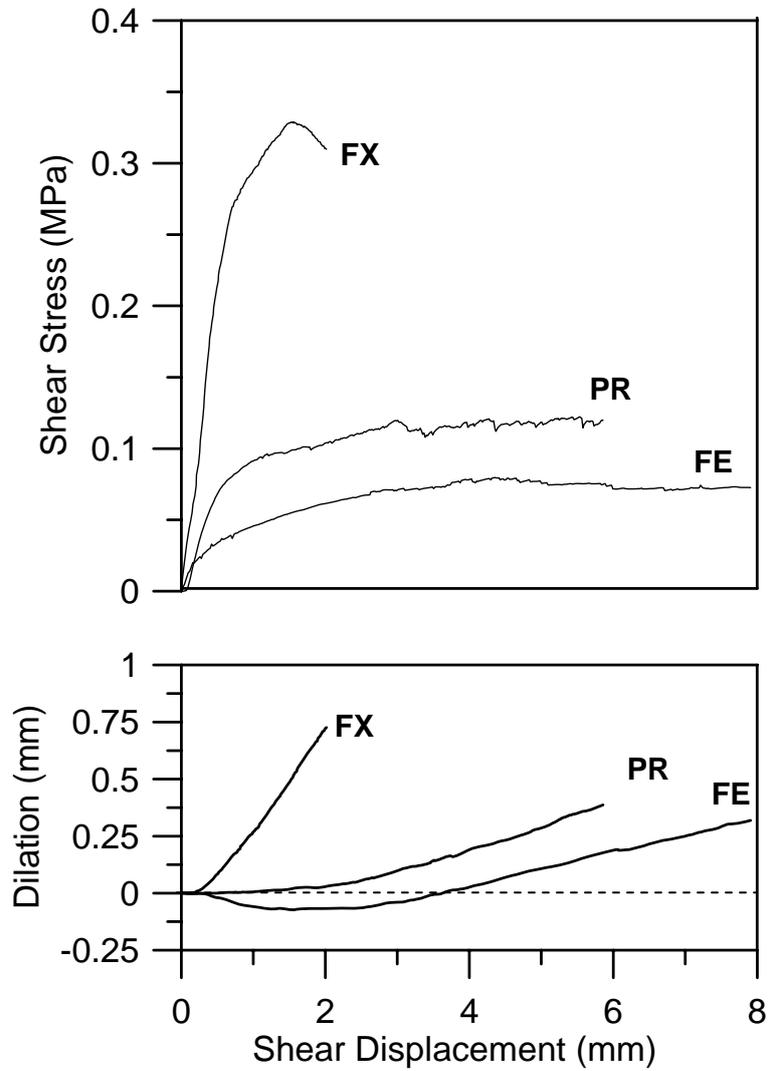


圖 7.6 三種型態試體之剪應力-剪位移曲線與膨脹曲線
(以 A 級配為例)

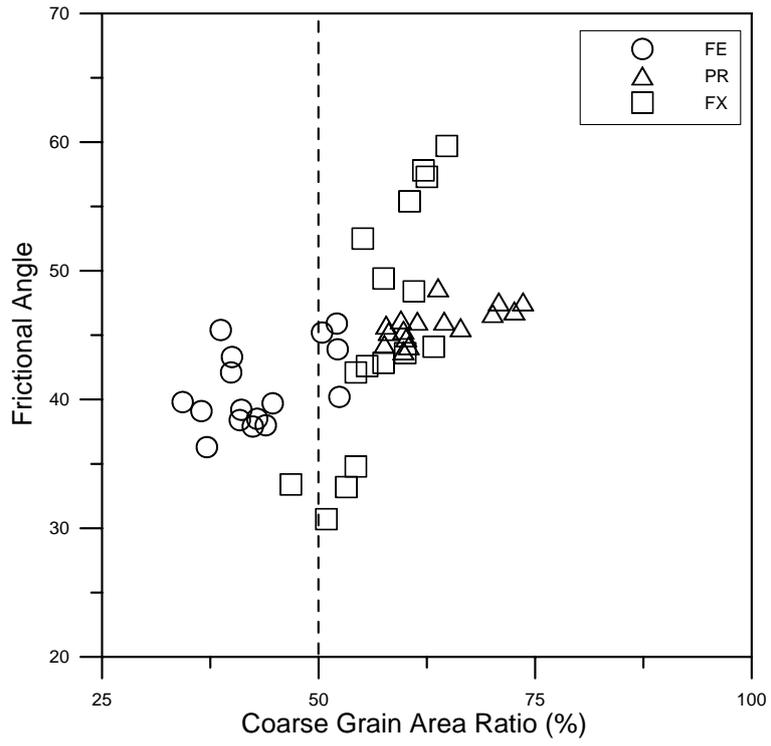
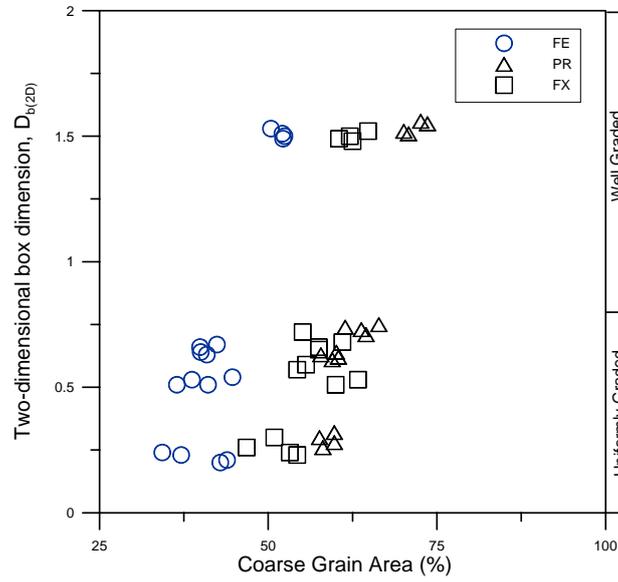
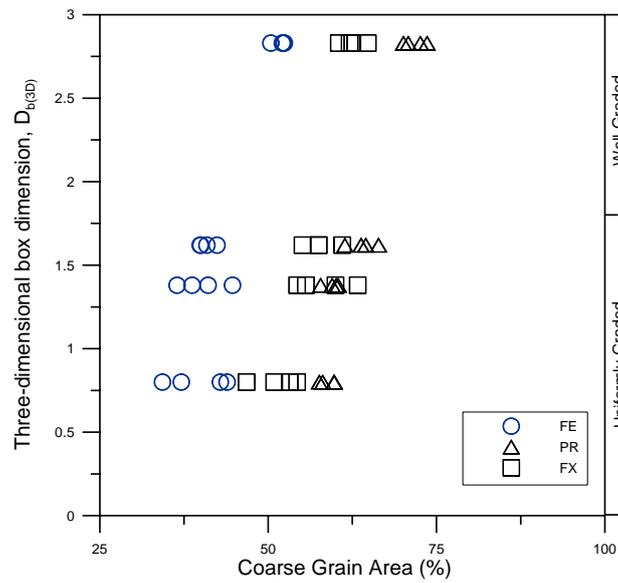


圖 7.7 剪動面上骨材所佔面積百分比與剪動面內摩擦角關係

第六章 試驗結果與分析

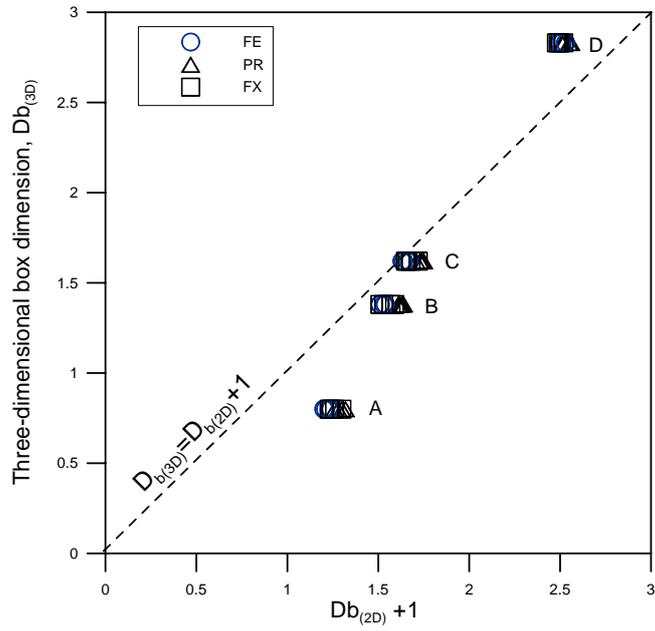


(a) $D_{b(2D)}$

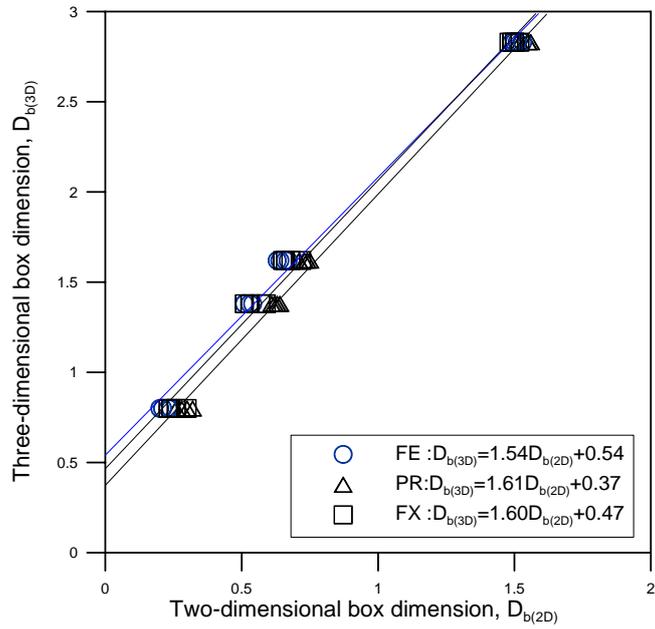


(b) $D_{b(3D)}$

圖 7.8 剪動面骨材面積百分比與級配方格維度之關係



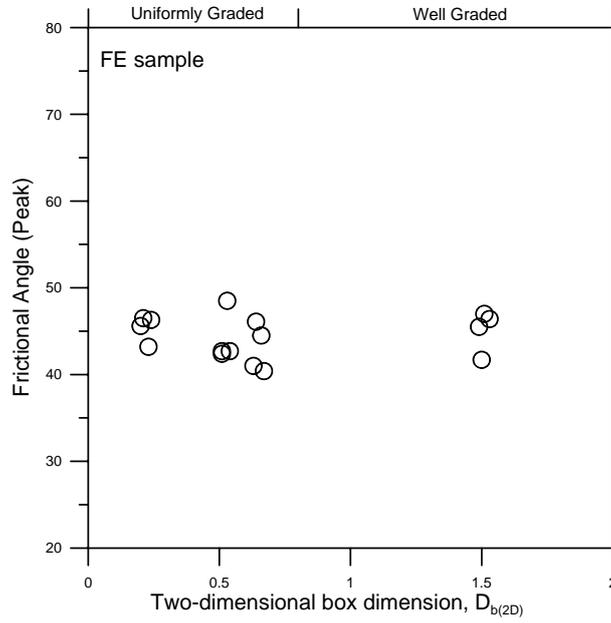
(a) $D_{b(2D)} + 1$ 與 $D_{b(3D)}$ 之關係圖



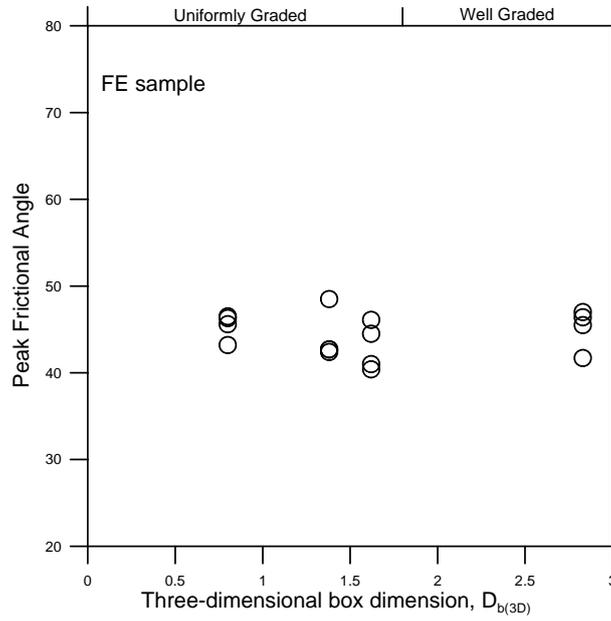
(b) $D_{b(2D)}$ 與 $D_{b(3D)}$ 之關係圖

圖 7.9 剪動面二維級配方格維度與實際級配方格維度關係

第六章 試驗結果與分析

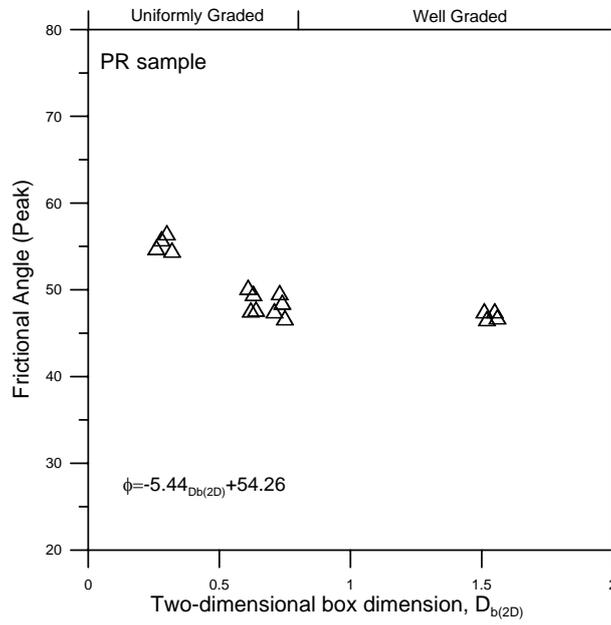


(a) $D_{b(2D)}$

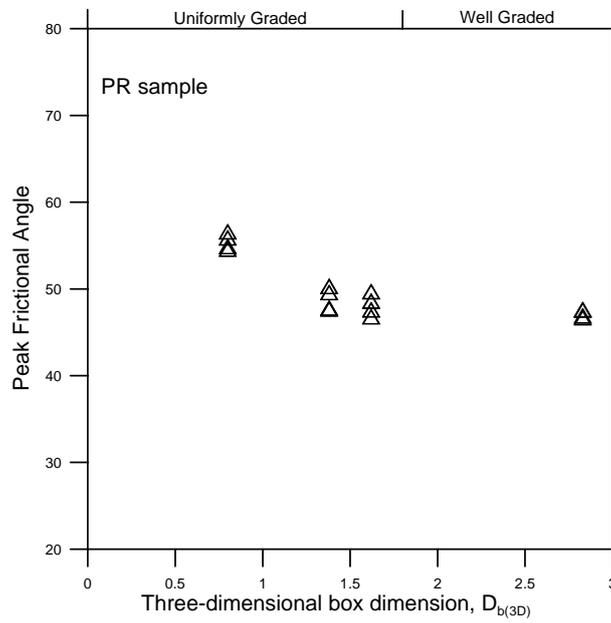


(b) $D_{b(3D)}$

圖 7.10 FE 組級配方格維度與尖峰摩擦角 ϕ_p 之關係



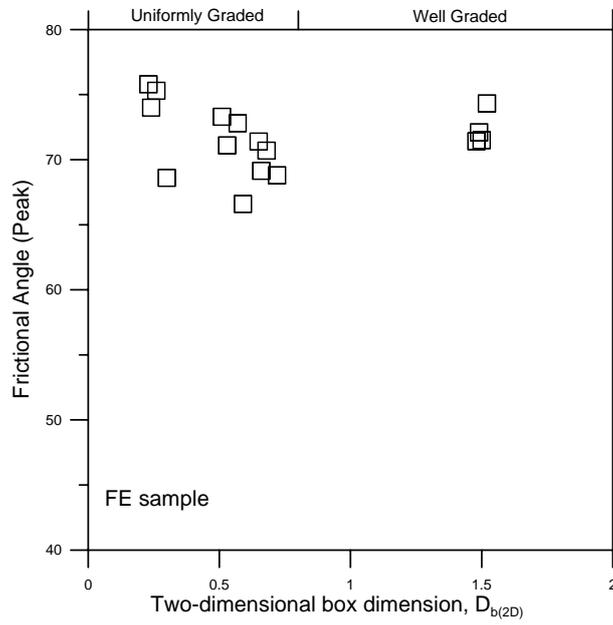
(a) $D_{b(2D)}$



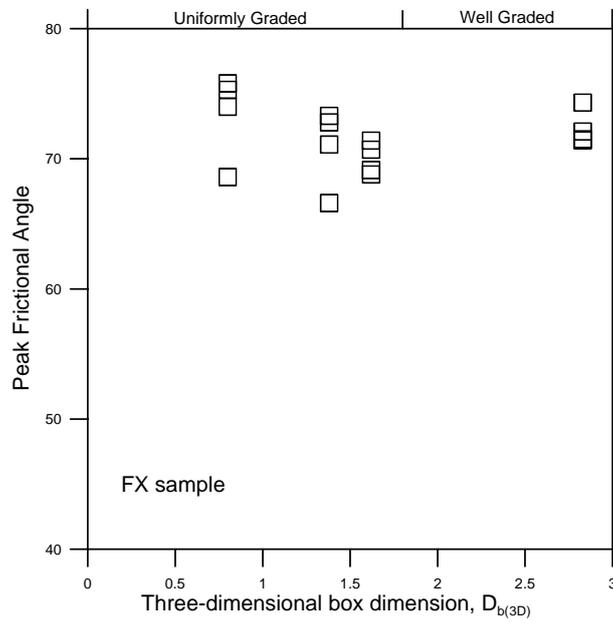
(b) $D_{b(3D)}$

圖 7.11 PR 組級配方格維度與尖峰摩擦角 ϕ_p 之關係

第六章 試驗結果與分析

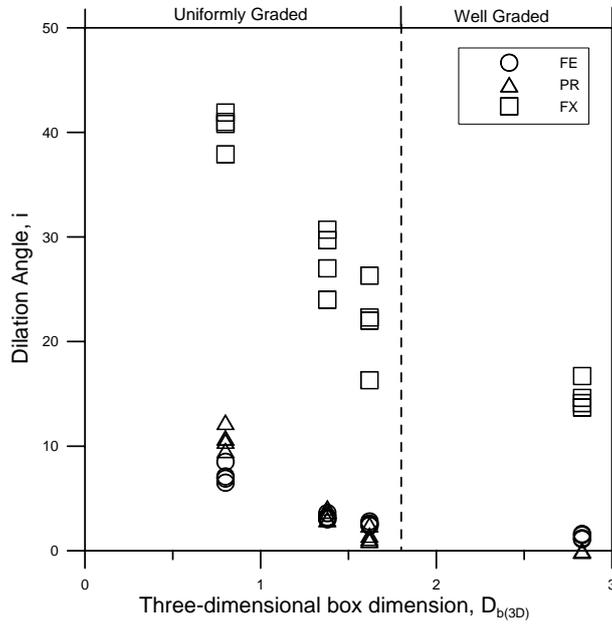


(a) $D_{b(2D)}$

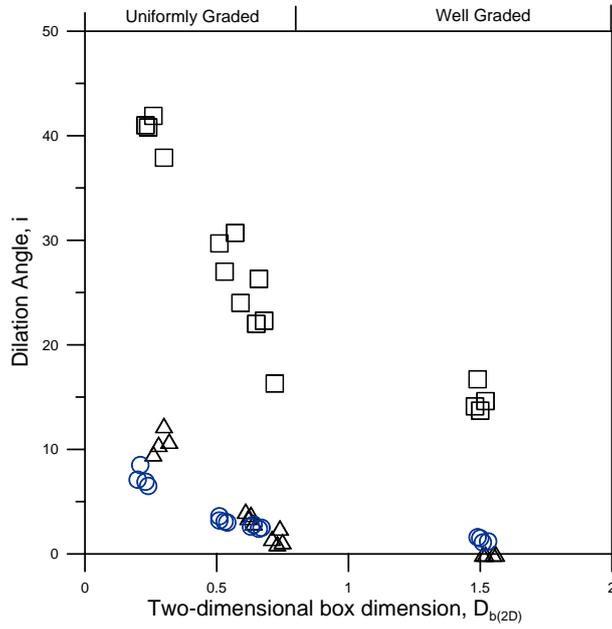


(b) $D_{b(3D)}$

圖 7.12 FX 組級配方格維度與尖峰摩擦角 ϕ_p 之關係



(a) $D_{b(3D)}$



(b) $D_{b(2D)}$

圖 7.13 顆粒級配方格維度值與膨脹角之關係

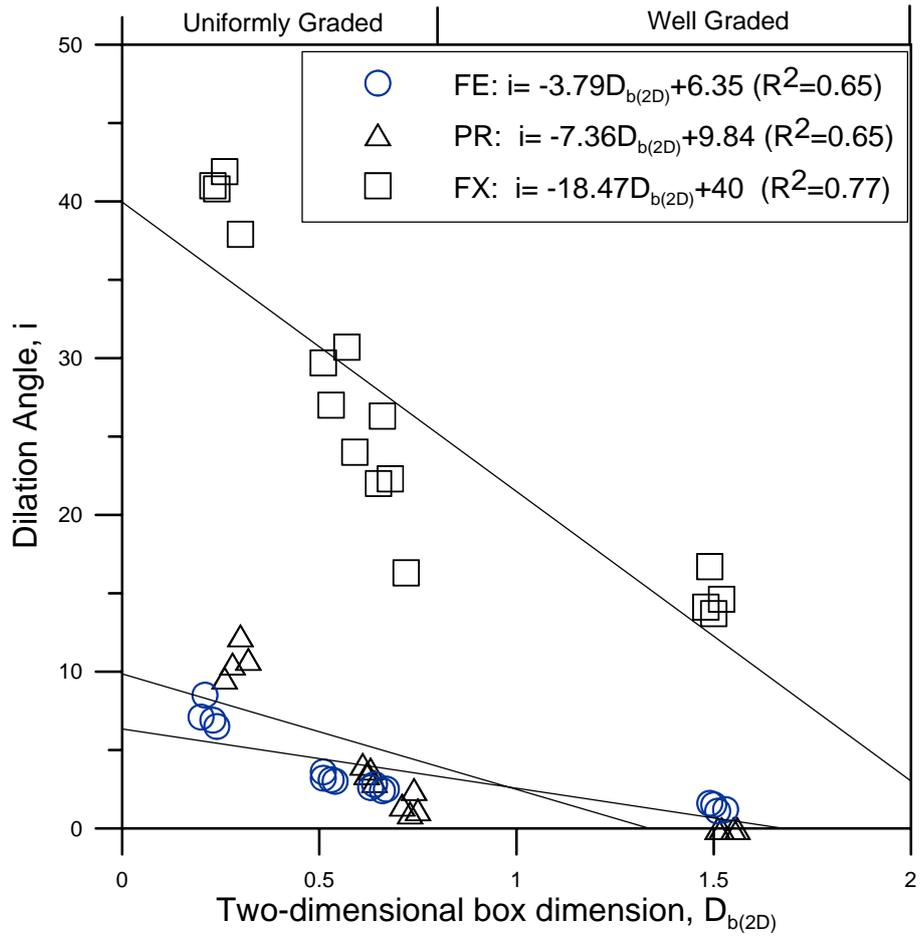
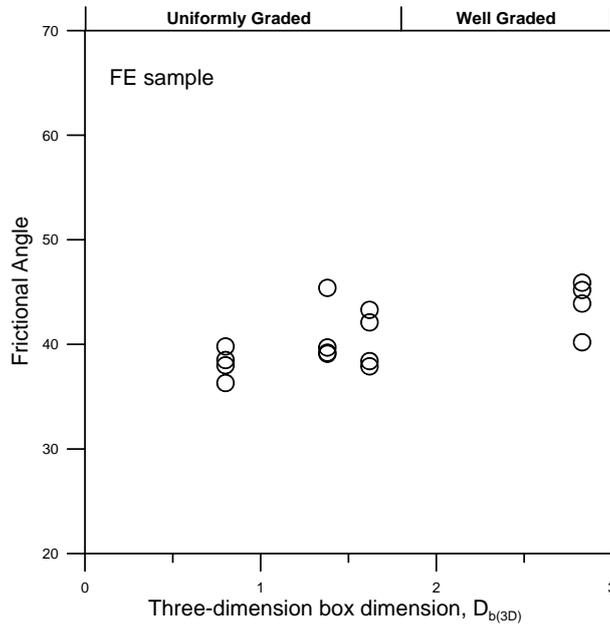
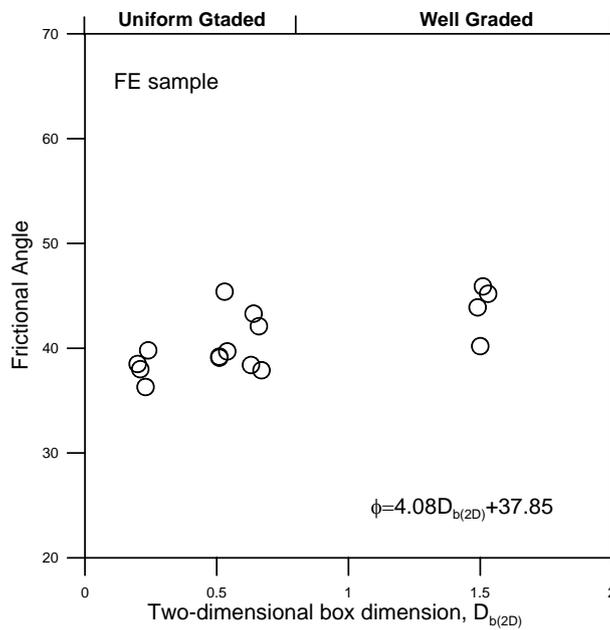


圖 7.14 顆粒級配方格維度值與膨脹角之關係圖



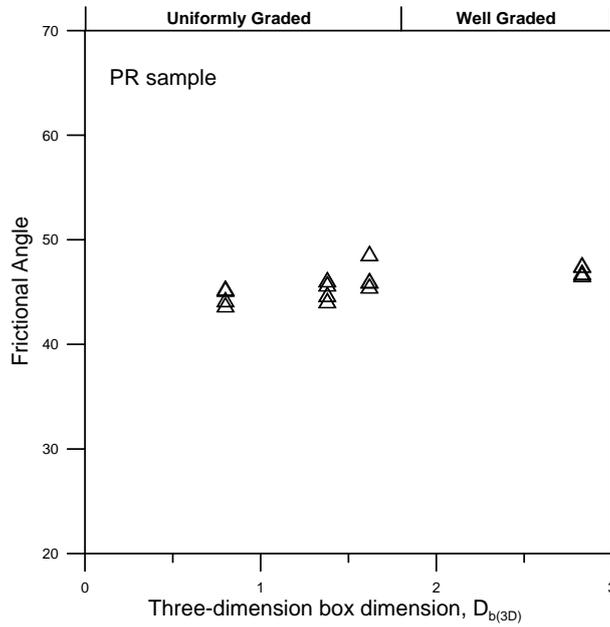
(a) $D_{b(3D)}$



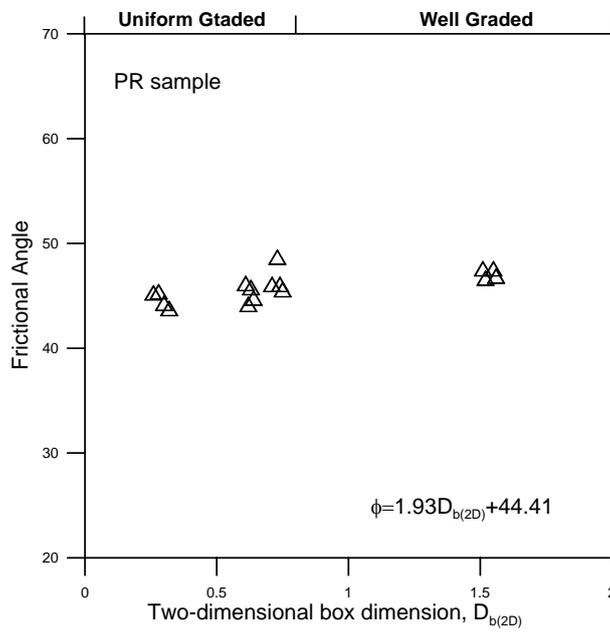
(b) $D_{b(2D)}$

圖 7.15 級配與剪動面內摩擦角之關係圖 (FE 組試體)

第六章 試驗結果與分析

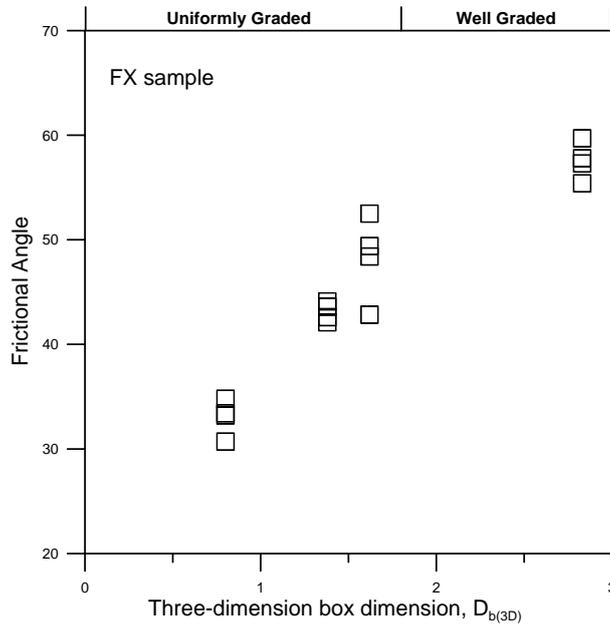


(a) $D_{b(3D)}$

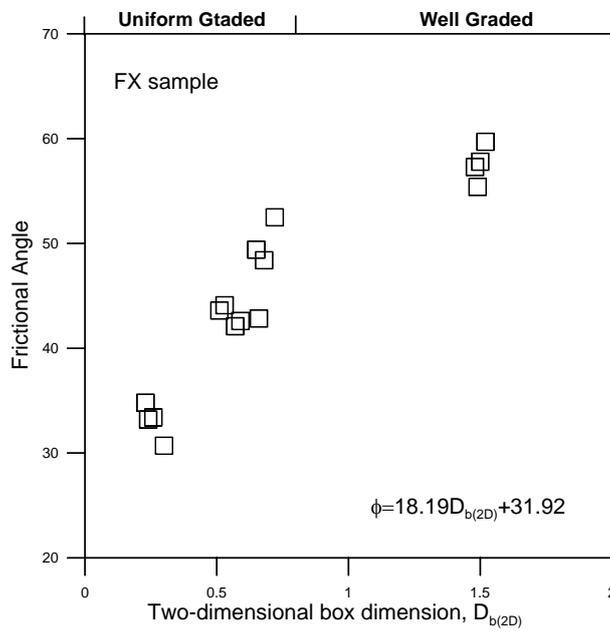


(b) $D_{b(2D)}$

圖 7.16 級配與與剪動面內摩擦角之關係圖 (PR 組試體)



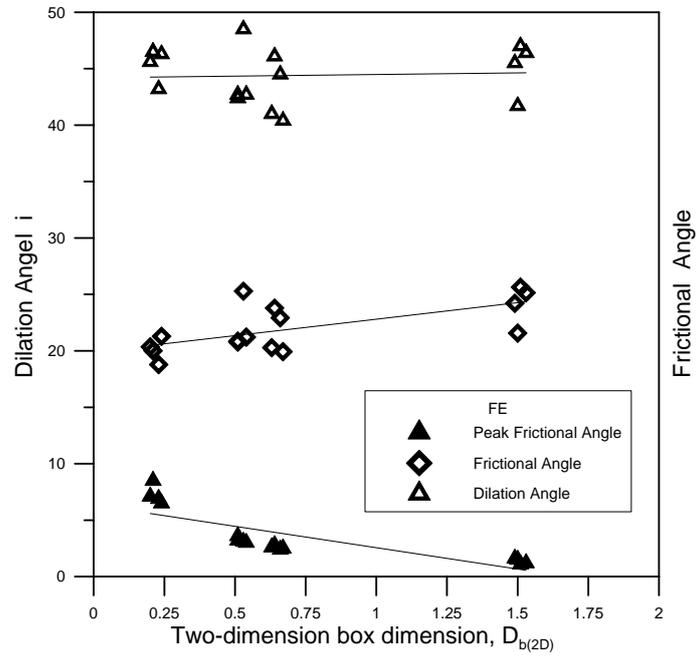
(a) $D_{b(3D)}$



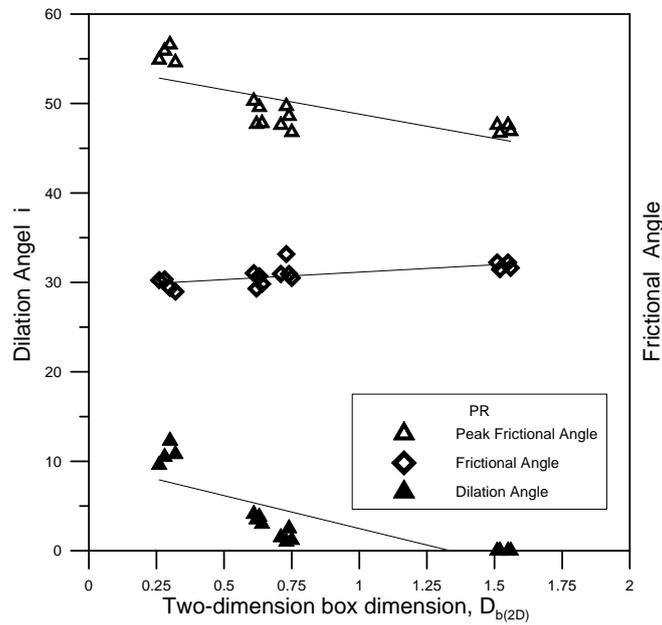
(b) $D_{b(2D)}$

圖 7.17 級配與剪動面內摩擦角之關係圖 (FX 組試體)

第六章 試驗結果與分析

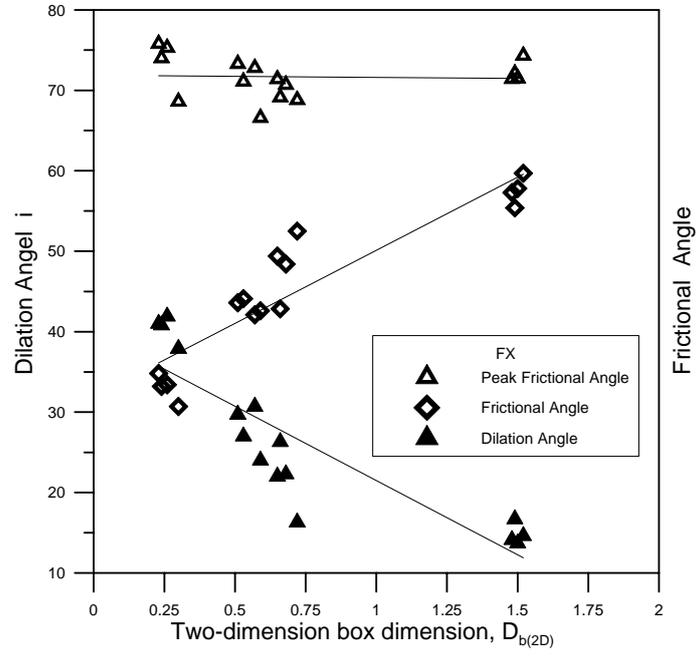


(a) FE 組試體



(b) PR 組試體

圖 7.18 膨脹角、尖峰模擦角與內模擦角隨級配方格維度變動之增減現象



(c) FX 組試體

圖 7.18 膨脹角、尖峰模擦角與內模擦角隨級配方格維度變動之增減現象(續)

第六章 試驗結果與分析

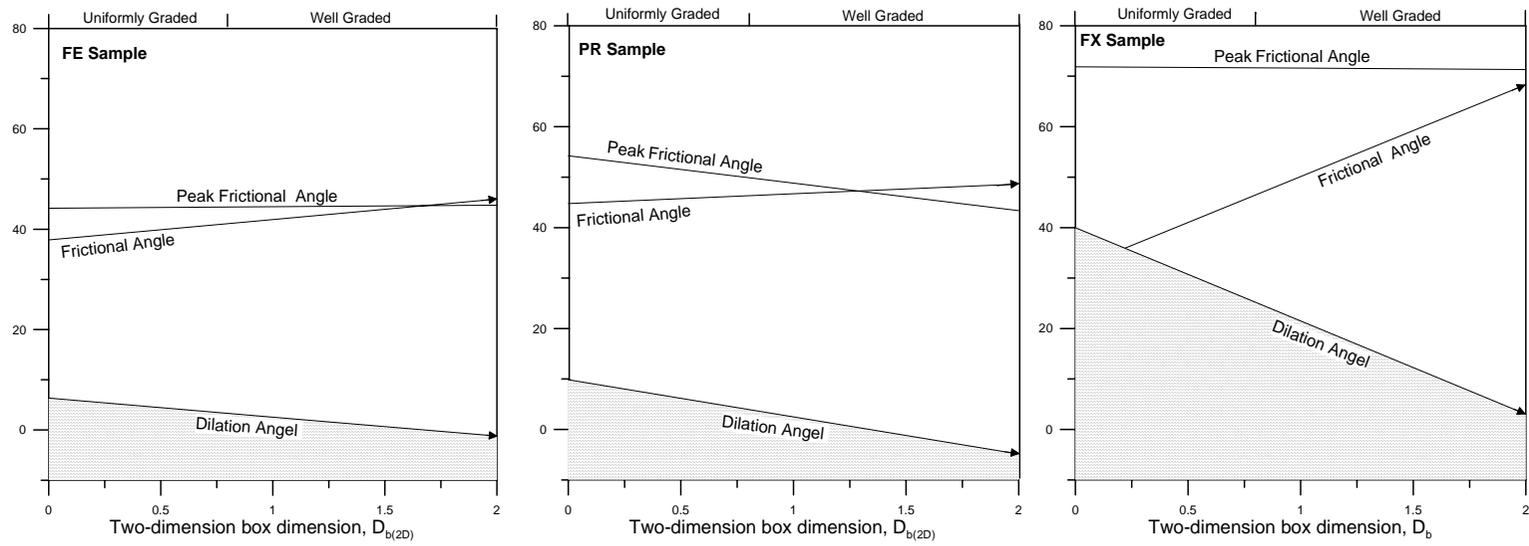
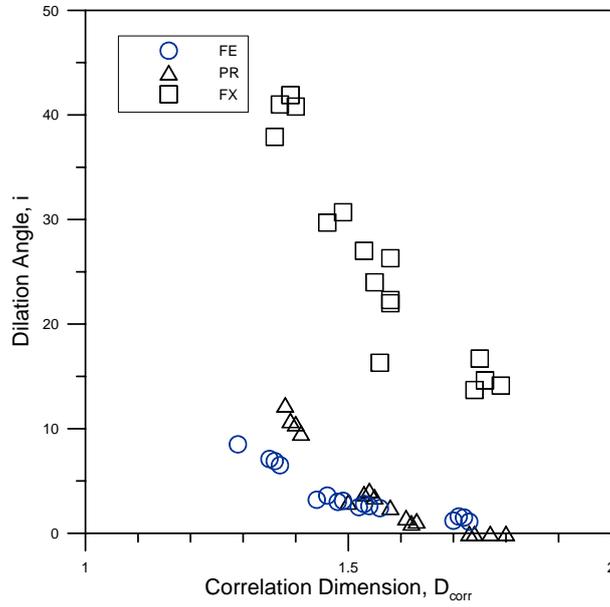
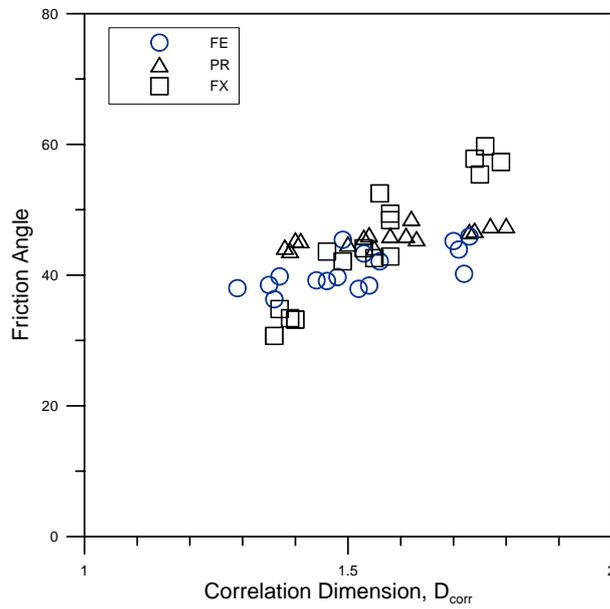


圖 7.19 顆粒級配方格維度對膨脹效應、內摩擦角之消長示意圖



(a) 雙點相關函數與膨脹角趨勢圖



(b) 雙點相關函數與內摩擦角趨勢圖

圖 7.20 排列點相關維度與剪力行為之關係($D_{corr} = 1 \sim 2$)

第六章 試驗結果與分析

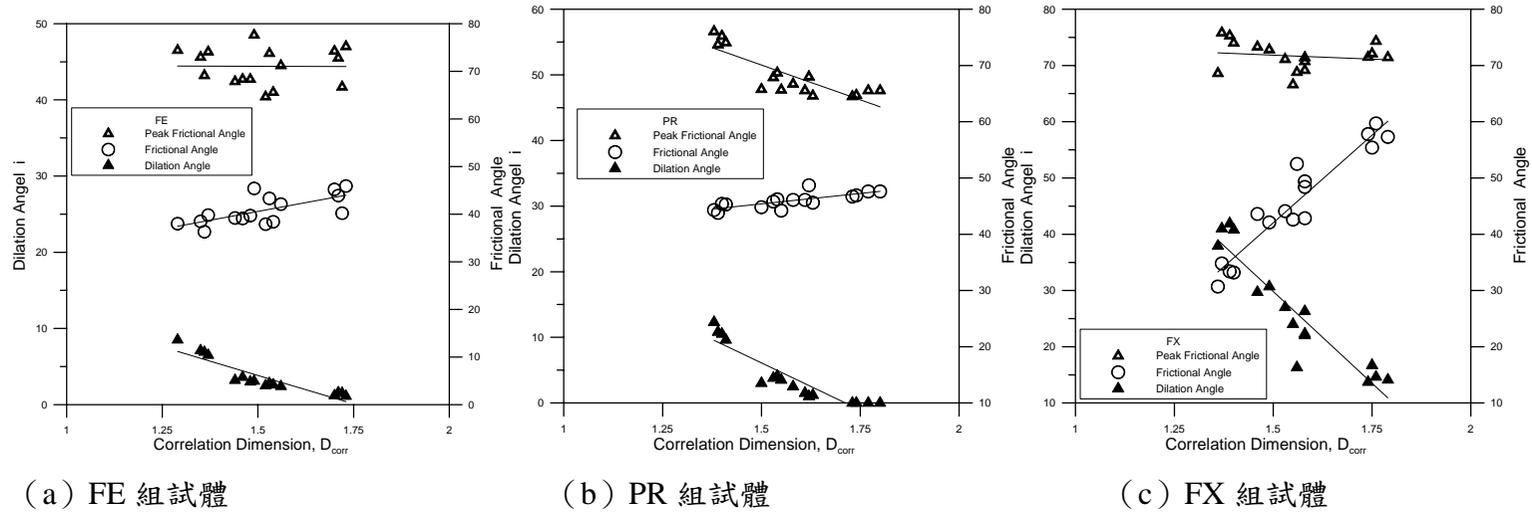
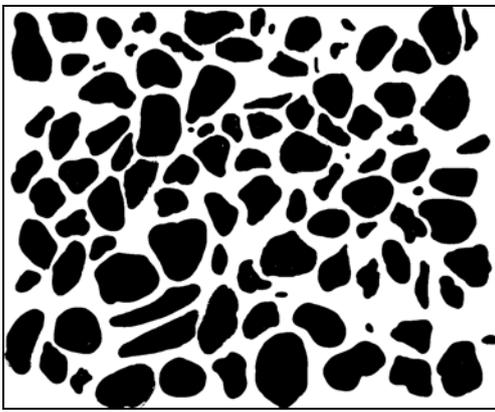
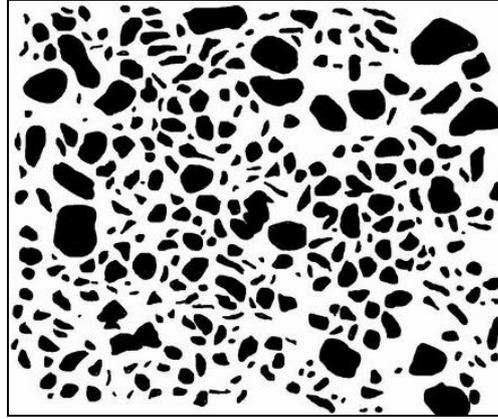


圖 7.21 膨脹角、尖峰模擦角與內模擦角隨雙點相關維度變動之增減現象



FE (A1): uniformle-graded



FE(D1): well-graded

圖 7.22 均勻級配與優良級配在剪動面上之顆粒分佈比較

第八章 結論

本三年期研究主要針對顆粒(骨材)形狀、級配與排列分佈，以顆粒性材料施作直剪試驗，對剪斷面上骨材大小分佈及位置分佈拍照，經由影像分析，藉此得到剪斷面上顆粒之級配方格維度(D_b)與疏離度的雙點相關維度(D_{corr})兩碎形參數，並建立顆粒材料內摩擦角兩參數的關係。得到以下結論：

1. 骨材形狀愈接近圓狀其形狀碎形維度值 $D_{(sp)}$ 值愈小，其自然穩定之安息角較小；反之，形狀愈接近角狀其 $D_{(sp)}$ 值愈大，安息角較大。對本文骨材而言正圓形($D_{(sp)}=1$)自然坡度為 17° ；多角狀之顆粒($D_{(sp)}=2$)顆粒間的互鎖效應較佳，其安息角可到達 45° 左右。而且，形狀碎形維度值 $D_{(sp)}$ 值與 Krumbein 五種典型顆粒形狀有直接對應關係。
2. 利用影像篩分析技術，雖然使粒徑分佈曲線有低估粒徑的現象，但在方格維度圖中實際與影像篩分析之兩條線卻近乎平行，其斜率相同碎形維度不變，。顯示影像分析技術可應用於現地顆粒級配碎形特性分析上。
3. 級配方格維度 D_b 係表達顆粒粒徑大小級配分佈、或在二維或三維空間內顆粒之填滿程度情形：優良級配其 D_b 值較大，均勻級配其 D_b 值則較小。而雙點相關維度 D_{corr} 係可反應顆粒間排列之叢聚程度，排列愈均勻其 D_{corr} 大，排列愈叢集(未必緻密)則 D_{corr} 愈小。若將兩參數搭配互補，則可同時反應顆粒之級配型態及排列方式。
4. 級配方格維度 D_b 值較大(愈趨優良級配)時，大粒骨材間有較多小粒徑骨材填塞其間，整體顆粒分佈越均勻(D_{corr} 值較高)，也致使顆粒間互鎖效應提高，使材料內摩擦角(扣除顆粒膨脹效應)隨之升高，但較少膨脹。

反之，均勻級配 D_b 值愈小，在骨材與基質配比固定條件下，試體內多為大粒徑顆粒，使得骨材距離較遠分佈較離散(其 D_{corr} 值較低)，粒間互鎖效應減低，故使內摩擦角降低，但膨脹量較大(大粒徑顆粒較多)。

5. 將平面上分佈效應之級配方格維度 D_b 、粒間位置雙點相關維度 D_{corr} 兩參數經多變數迴歸分析後，得知顆粒之排列方式對材料內摩擦角的影響約為粒徑級配的3倍。惟需更多試驗狀況以確認此一比值之量值。

參考文獻

- 王文祥 (1997), “礫石層之沈積特徵及量化描述方法嘗試”, 地工技術, 第 55 期, 第 25-34 頁。
- 王永煜(2005), 「顆粒級配與堆疊對礫石材料剪力強度之影響」, 私立淡江大學土木工程研究所, 碩士論文, 淡水。
- 吳東杰 (2003), 「以碎形維度探討顆粒性材料強度之組構因素」, 私立淡江大學土木工程研究所, 碩士論文, 淡水。
- 吳偉康、鄭文隆(1995), “夯實紅土礫石之工程性質”, 國際卵礫石地下工程研討會, 台北。
- 卓佳良 (1999), 「碎形維度於描述礫石層級配特徵之應用」, 私立淡江大學土木工程研究所, 碩士論文, 淡水。
- 洪如江 (1995), “台灣紅土礫台地之風化與侵蝕”, 國際卵礫石地下工程研討會, 台北, 第 11-19 頁。
- 洪勇善、游以民 (2002), “碎形維度於量化砂土顆粒形狀之研究”, 中華明國第二十六屆全國力學會議編號: C010, 雲林, 共 9 頁。
- 董家鈞、潘以文 (1995), “顆粒支持礫石層材料之力學機制及工程考量”, 中國土木工程學刊, 第 9 卷, 第 3 期, 第 379-388 頁。
- 褚炳麟、潘進明、張國雄 (1996), “臺灣西部卵礫石層現地之大地工程性質”, 地工技術, 第 55 期, 第 48-54 頁。
- 楊振榮 (2002), 「以 GIS 輔助分析顆粒材料之組構特性」, 私立淡江大學土木工程研究所, 碩士論文, 淡江。
- 楊長義、楊振榮 (2001), “以方格覆蓋法解釋卵礫石篩分析粒徑分佈特徵”, 第九屆大地工程學術研討會, 桃園, 第 B007-1 -8 頁。
- 謝和平(1996), 「分形—岩石力學導論」, 科學出版社, 北京。
- Ali and Wilson, T. H. (2002), “Space-time correlations of seismotectonic parameters:

examples from Japan and from Turkey preceding the Izmit earthquake”, *Bulletin of the Geological Society of America* , 92, pp.339-349.

Coughlin, J. and Kranz, R. (1991) , “New approaches to studying rock burst-associated seismicity in mines”, *Rock Mechanics*, pp. 491-500, Balkema, Rotterdam.

Kagan, Y.Y. and Knopoff, L. (1980) , “Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function”, *The Geophysical Journal of The Royal Astronomical Society*, Soc.62, pp.303-320.

Mandelbrot, B.B.(1982), *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco.

Sowers, G.F. 1979. *Introductory soil mechanics and foundations: Geotechnical engineering*. (4th ed.) Macmillian Publishing Co., New York.

Xie, H. (1993) , *Fractals in Rock Mechanics*, Balkema Publishers, Rotterdam.

Yang, Z.Y. and Jou, J.L. (2001) , “Interpretation of sieve analysis data using the box-counting method for gravel cobbles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.6, pp.1201-1212.

Yang, Z.Y., Wu, T.J. and Yang, G.L. (2003), “Application of fractal dimensions to examine the frictional behavior of granular materials.” *Proceedings of the Third International Conference on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Lyon, France.

Yang, Z.Y. and Wu, T.J.(2006), “An index for describing the core-stone shape in weathered columnar joints”, *Geotechnical and Geological Engineering* , Vol.24, No.5, 1349-1363.