

## 應用定水頭試驗儀於大孔隙結構之流場特性探討

陳震遠\* 李忠潘\*

\*國立中山大學海洋環境及工程學系

### 摘要

本研究乃利用設計的大型定水頭透水儀器實際量測粒狀物之透水特性。隨流場變化所分析之阻力係數可進一步由圖表呈現其趨勢，並比較計算數值之結果；介質特性同時可由粒徑大小、比滲透係數、孔隙率來具體化。文中之重點乃針對各種規則粒徑及不規則石料之比滲透係數及阻力係數關係作深入之推論及研究，以為進一步研究孔隙介質內流場特性之基礎。本研究所採用之孔隙材料為不同粒徑之碎石及玻璃珠，可顯示出形狀、光滑度以及粒徑大小等變因對滲透係數與特性阻力係數之影響。此些數值更可引發未來對消波特性之研究。

**關鍵字：**孔隙介質，滲透係數，紊流係數，孔隙率

## Flow Characteristics inside Large Porous Structure by Constant Head Device

Chen-Yuan Chen\*, Chung-Pan Lee\*

\*Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung, Taiwan

### Abstract

The permeability and resistance characteristics in porous structures with different grain size and shape have been studied experimentally in the paper. The author analyses the experimental raw data via former experienced equation (Sollitt and Cross, 1972) and to compare with new equation from deriving himself by real physical concept further. This indicates the coefficient will change significantly as the grain size Reynolds number varies and is not constant in a non-uniform flow field such as in a wave field. Figures show that porous-structure characteristics like intrinsic permeability and turbulent coefficient tend to steady under high Reynolds number. than former equation.

**Keyword:** porous media, intrinsic permeability, turbulent coefficient, and porosity

---

文稿收件日期 90.12.27；文稿修正後接受日期 92.4.1.

Manuscript received Dec. 27, 2001; revised Apr. 1, 2003.



## 一、前言

海域開發與海岸保全工作為目前各臨海國家相當重視的工作，尤以台灣地區四面環海，海岸線長達 1600 公里，但由於受到天然災害，以及人類不當使用，已經使多處海岸面臨困境。何況台灣地狹人稠、陸地資源極其有限，許多人民居住在海邊，海岸的穩定與否關係著臨海居民的生命安全及土地公有私有問題；因此，若能積極妥善地從事海域開發與規劃將可以彌補天然環境的限制。於此，政府也早已投入大量經費在海岸防禦工程方面。各式各樣之海洋工程工作如建造突堤、海堤整建、護岸、人工養灘及離岸堤等；海域開發工作，諸如海埔新生地的圍墾、離島工業區的開發、沿海養殖漁業的發展、抑或國家對外經貿動脈的港埠設施等，各標的構造物之安全皆有賴良好的消能設施來保障。

傳統消減能量設計乃以構築防波堤來阻斷波浪之入侵，減緩入射波直接對海域構造物之衝擊，獲致保護海域設施與穩靜水域為目的。近年來由於經貿活動蓬勃發展，貨物往來運輸尚以船舶為主，為求經濟效益，船舶更趨於大型化且大噸位化，為容納大型船舶的停靠，深水港之建構為持續經貿成長之所繫。另外，加諸於國人生活品質之提昇，為求外海視野景觀之連續，潛式離岸透水堤之研究便更為重要。所謂「離岸堤」乃離開陸地，獨立於海中且多數平行海岸，用來削減波浪能量的剛性結構物。目前在許多國家海岸都可見到，而且已經證實其對於削減波浪能量、保護海岸避免破壞方面，均有著良好的效果。離岸堤依照孔隙之有無可以分為以下兩類，一為透水堤，另一為不透水堤。透水堤特性是將外海入射的波浪，產生部分反射及部分透射，或用其高度效應使

波浪產生碎波，藉由碎波能量的消散而衰減波浪運動，如此一來，只有部分波浪能量能到達海岸，達到保護海岸的目的。若透水堤最高處低於平均海平面，則稱為「透水潛堤」。隨著人類重視環保及休閒生活趨勢的影響，工程施工方式及結構物外觀亦隨之改變。而潛堤潛入海面，就不會破壞海岸自然視野，自然景觀亦得以保持連續。在種種優點之下，離岸潛式透水堤逐漸受到重視，相關研究也隨之蓬勃發展，故加強波浪與透水潛堤相互作用問題之瞭解，將有助於離岸透水潛堤之設計與運用。

為了保護海岸不遭受大浪衝擊，一般工程界所作之策略乃將離岸堤之透射係數設計甚小，而忽略反射係數之影響，以致反射係數均偏大[1]。許多學者指出反射係數偏大常導致堤基遭受侵蝕而崩坍，造成離岸堤之破壞。由此可知，透射係數大、反射係數小，將減少離岸堤阻斷波浪入侵之功能；反之，透射係數小、反射係數大，卻將趨使離岸堤之堤址遭受侵蝕而破壞，故降低反射係數可增長離岸堤之壽命。因此，若能發展出同時降低反射係數及透射係數之潛堤，實為工程界一大福音。於此，透水堤材料之研究相形重要，因為藉由透水堤內之材料形狀、孔隙率、粗糙度等等之最佳安排之下，一來將造成入射波正常入射於透水堤內，而降低反射係數；二來更藉由透水堤內阻力形式之最佳安排，將大量削減入射透水堤之波能而降低透射係數。

海岸工程之範疇中，離岸堤為常以消波塊或甚至以石塊組成，塊石之間存在之孔隙使波浪能量有部份透射至堤後。離岸堤之防浪功能主要經由反射，透射時之能量損耗，及造成波浪之破碎而達成。為了瞭解透水堤之防波效果，國內外學者已就各種簡化之流場進行頗多之研究，如早期之 Sollitt & Cross[2] 針對多孔介

質特性，提出孔隙介質內部流場的運動方程式，並應用等功率法可得到孔隙介質內部流場的勢流理論，進而解析矩形透水堤之透射及反射效果，其中波浪場僅考慮微小振幅波之線性波作用。Madsen[3]以線性長波理論，解析半無限長流場尾端設置矩形透水結構物之反射問題，Madsen[4]更將此等功率之方法應用至梯型堤，並得到類似之結果。此種等功率法後來廣為學者用來研究透水結構物之波流場特性，如 Steimer[5]即以此種勢能理論解析一沉箱座落於透水堤上的問題。而 Lee[6]更進一步將此勢流理論擴展到非等向性多層梯型複合堤之流場解析，其方法是以分離變數法求解矩型切割後的邊界值問題的特徵值，即可得到流場之流速勢。Dalrymple, Losada and Martin[7]根據 Sollitt & Cross 的方法解析一斜向的入射波受到透水堤作用的散射問題，其文中指出在透水堤內部的特徵值在以牛頓法求解時，較低的模數不易求得，且在某些條件下有所謂模式變換的現象，在此文當中同時以格林函數法來求解此種奇異點的特徵值。

李與黃[8]利用 Lee 所提潛式透水結構物中之週波數不必相同於其上方水域之理論分析方法，分別對堤頂及堤前後為不透水之潛式結構物與波浪作用的問題作理論解析，並以試驗方法探討波浪通過透水堤時產生的反射、透射，而與理論值比較。然而，此等理論忽略透水潛堤內部波數與其上方純水區波數的關係，致其理論解無法正確描述波浪通過潛堤上方波長改變的現象。柯[9]乃在線性考量之下，重新根據 Lee 的理論，以分離變數法對張力式可透水浮堤與波浪間之交互作用進行解析，並特別根據 Dispersion 方程式特性，定出每個複數特徵值的大約範圍及位置，進行證明無窮級數解的收斂性。其理論背景，乃因透水堤內邊界值

問題的特徵值為複數，且因分層造成數值求解不易。陳[10]另外使用邊界元素法用來描述在結構物外部波浪場和透水結構物內部的波浪場，發展出一個波浪通過潛式透水結構物的三維模式。

以數值方法求解而言，數值方法可以容易處理具不規則邊界之問題。Sulisz[11]用輻射邊界，計算任意透水結構組成任意形狀透水堤之效果，並與實驗比較驗證其正確性。Rojanakamthorn, et. [12]假設透水堤中及其上方水域流場週波數相同，而後得一平均效應，再將此解析代入波場之緩坡方程式中，並配合有限差分法求解梯形透水潛堤之數值解。之後，徐與吳[13]則以邊界元素法解析非線性的可透水防波堤問題。吳[14]等根據二維線性波理論，利用邊界元素法與有限元素法解析複合防波堤本身的穩定性及交互作用的流場。以上各法，經由驗證均可得到令人滿意之結果。

於實驗方面有 Harms 以廢輪胎所組成的張力式透水浮堤，採用實驗與現場的方法分析不同型式以及不同品牌的輪胎與波浪間的作用。歐等[15]在其實驗中發現透水堤之堤高相對於水深比值大於 0.8 以上時，無論反射係數、透射係數及試驗波形皆與線性理論有差距；亦發現波浪通過潛堤後，其非線性量可高達 40% 至 50%。黃及林[16]乃針對潛堤內多孔介質之基本參數進行檢驗探討，並且進行波浪通過潛堤之反射波、透射波以及堤心動態水壓的實驗量測。

## 二、內容

以上透水堤消波特性的研究裏，除了線性波的假設，以及大多限於簡單幾何形狀外，另外都假設孔隙結構內之流場阻力為如 Morison 方程式[17]，意即考慮流場之阻力包含速度平方

項之形狀阻力及加速度項之慣性阻力。甚而在波場中設置多重不同孔隙率及摩擦係數之透水潛堤，探討在不同孔隙率及摩擦係數組合下，透水潛堤厚度、層數等因素對於反射係數與透射係數之影響。然而，在實用上，線性波及結構物形狀的限制似可以數值方法克服，但是孔隙結構物內之阻力形成的假設，至目前為止仍無適當的證明。因此在上述的各研究裏，理論解與實驗之間仍存在著明顯差距。其主要原因即因流場阻力的表示式，以及所涉及之阻力係數與波場、孔隙介質特性（如孔隙率、透水係數、介質組成分子之形狀）之間的關係，尚未有足夠的理論或實驗根據所致。譬如各種孔隙結構透水係數的決定仍常根據 Dinoy[18]之結果，但其合理範圍則可至十倍[9]，故消波特性的理論結果與實驗結果間常僅達到趨勢的一致性，而甚難得更好的結果。

由於透水堤消波特性的關鍵乃取決於流體流經透水堤之難易程度，此主要決定於孔隙介質的特性[9]，如孔隙率（porosity）、及組成粒料的大小（grain-size）、形狀（shape）及表面（surface）粗糙度，以及孔隙流場內的阻力特性，而流場內的阻力特性又因不同的介質特性而變。因此，如何決定不同孔隙材料的介質特性與阻力特性，將直接影響透水堤消波特性的研究及其正確性。有鑑於此，本研究將根據孔隙流場內介質特性，重新討論阻力的表示方程式，藉由實驗方式量測多孔隙材料的比滲透係數對流場變化的影響，決定孔隙流場內部阻力係數的變化，同時將與 Ward[17]者比較，討論其適用性。如此可與理論解析[9]孔隙結構物流場的方法，就不同粒徑、形狀的石料所組成的透水堤，與實際量測透水係數之實驗結果比較，研究可能誤差的原因，以為往後研究孔隙流場特性的基礎。

### 三、孔隙結構物理論方程式

#### 3.1 前人之運動方程式（Momentum equation）

吾人常以 Sollitt and Cross（1972）提出的運動方程式，來從事關於透水物質之研究，亦為流場的控制方程式，即

$$\frac{du_j}{dt} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (P + \rho g z) + (\text{Resistance forces}$$

/unit mass) in the  $x_j$  direction

其中  $j=1, 2$ ，即  $x_1 = x, x_2 = z$ ， $P$  為流場壓力， $\rho$  為流體密度， $g$  為重力加速度， $u$  為流場流速；該方程式中對於水體和有孔介質間阻力的描述，包括摩擦阻力(friction drag)，形狀阻力(form drag)和慣性阻力(inertia drag)。依照 Ward(1964)的研究，friction drag  $\propto u_j$ ，form

drag  $\propto |u_j|u_j$ ，而 inertia drag  $\propto \frac{du_j}{dt}$ ，故上式

可以被表示成

$$\frac{du_j}{dt} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (P + \rho g z) - \beta_1 u_j - \beta_2 u_j^2 - \beta_3 \frac{du_j}{dt}$$

其中的  $\beta_i (i=1, 2, 3)$  是由實驗或經驗式得到的。且對於在大粒徑滲流介質之穩定、無對流項之流，則此式中之  $\beta$  可表示為 (Ward, 1964; Dinoy, 1971; Sollitt and Cross, 1972)：

$$\beta_1 = \frac{v\varepsilon}{k}$$

$$\beta_2 = \frac{C_f \varepsilon^2}{k^{\frac{1}{2}}}$$

式中  $\nu$  : 運動粘性係數

$\varepsilon$  : 孔隙率

$k$  : 比滲透係數

$C_f$  : 紊流係數

將  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  代入運動方程式中，且  $\beta_3$  的慣性阻力項相對於其他兩者可以省略，其中  $du_j/dt$  在考慮穩定流場狀況、對流項 (Convective term) 不隨垂直深度而改變，則，

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho g z) = \frac{\nu \varepsilon}{k} w + \frac{C_f \varepsilon^2}{k^{\frac{1}{2}}} w^2 \quad (1)$$

於此式中，藉由給定一已知的  $C_f$  值，進而計算  $k$  (intrinsic permeability) 隨流場改變造成之變化。並且，進一步依據比滲透係數之特性，其值乃為粒徑、孔隙率、形狀係數之函數進行代換，可得下式。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho g z) = \frac{\nu}{108 \times D^2 \varepsilon^2} w + \frac{C_f \varepsilon^{1/2}}{108^{1/2} D} w^2 \quad (2)$$

式中  $D$  : 材料粒徑

$w$  : 縱向流速

於此式中，藉由給定一已知的粒徑  $D$ 、孔隙率  $\varepsilon$ 、流速  $w$  等值，進而計算紊流係數  $C_f$  隨

流場改變造成之變化。

### 3.2 推導新的阻力方程式

本文提供另一思考模式，當流體通過孔隙介質 (如下圖 1)，所形成之孔隙流主要可分成兩部分：一為幅合作用 (convergence) 造成之摩擦阻力；另一為幅散作用 (divergence) 造成之形狀阻力。詳細可由下圖了解，當水流在邊界面時 (圖左)，首先會以幅合方式 (圖中) 擠入孔隙中 (pore space)，此時以摩擦機制為主；當孔隙流穿透第一層介質 (pore media) 空隙即將面臨第二層介質的阻擋，此時流體於位於一、二層介質內之空隙以幅散運動方式穿透介質，此時以形狀阻力之機制為主。

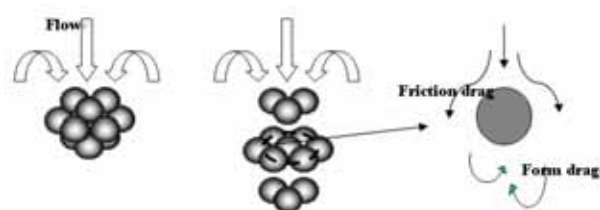


圖 1 孔隙流場示意圖。

#### 3.2.1 摩擦阻力：幅合作用造成

將規則材質總個數的觀念加入，思考之方向乃為

(材料顆數) = (總實體體積) ÷ (規則球體體積)，則可分別表示為

(總實體體積) = (放置於容器中之透水材質之斷面積  $A$ ) × (滲流經過透水材質之長度  $L$ ) =  $A \times L$

因此可定義出一表面力

(表面力)  $\propto$  (剪應力) × (材料顆數) × (球體表面積)

$$F_{\tau} = C_{\tau} \left( \mu \frac{w}{R_H} \right) \times \left( \frac{LA(1-\varepsilon)}{\frac{1}{6}\pi D^3} \right) \times (\pi D^2)$$

$$= \mu \frac{\varepsilon^{1/2} C_S^{1/2} C_{\tau} (1-\varepsilon)}{k^{1/2} D} LAw$$

式中  $C_{\tau}$ ：摩擦係數。

$w$ ：z 方向流速。

$C_S$ ：形狀係數。

### 3.2.2 形狀阻力：幅散作用造成

$$Force = \int_{Area} Pressure \cdot d(Area)$$

$$F_D \propto \frac{\rho}{2} A_0 w^2$$

給定一個係數  $C_D$ ，使得

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D A_0 w^2$$

式中  $C_D$ ：拖曳係數 (dimensionless drag coefficient)

$A_0$ ：正面的面積 (frontal area)

可依  $A_0 = \pi D^2 / 4$ 、並將規則材質總個數的觀念加入，則

$$F_D = \left( \frac{\rho}{2} C_D \frac{\pi D^2}{4} w^2 \right) \times \left( \frac{LA(1-\varepsilon)}{\frac{1}{6}\pi D^3} \right)$$

$$= \frac{3}{4} \frac{\rho C_D (1-\varepsilon)}{D} LAw^2$$

以此思維模式，運動方程式中之主導項將是摩擦阻力與形狀阻力互為影響，進一步合併摩擦阻力與形狀阻力兩機制後，並重新以無因次分析之方法定義新的運動方程式。則可得：

$$\frac{\gamma \Delta h}{L} = 36\mu \frac{C_{\tau} (1-\varepsilon)}{\varepsilon D^2} w + \frac{3}{4} \frac{\rho C_D (1-\varepsilon)}{D} w^2 \quad (3)$$

$$\frac{\gamma \Delta h}{L} = \mu \frac{\varepsilon^{1/2} C_S^{1/2} C_{\tau} (1-\varepsilon)}{k^{1/2} D} w + \frac{3}{4} \frac{\rho C_D (1-\varepsilon)}{D} w^2 \quad (4)$$

其中(3)式可經給定  $\varepsilon$ 、 $D$  值求  $C_D$ ；(4)式可經給定  $C_D$  值求  $k$ ，並分別畫圖比較  $k$ 、 $C_D$ 。

### 3.3 前人經驗式與本文方程式之比較

比較式(2)與式(3)可發現，粒徑之依賴性相同，僅孔隙率有完全不同的相關性。可知，粒徑大小非兩式分析比較上的主軸，唯孔隙率之變化為造成兩方程式中阻力係數差異來源。要看出何式較能符合實際之流場阻力特性，應進一步設計出範圍較大的孔隙率，重新進行實驗才行。比較式(1)與式(4)皆可經由已知之初始條件計算求得比滲透係數，兩式對待求  $k$  值之依賴性完全不同。

## 四、實驗佈置

實驗所使用之材料乃分為規則之玻璃珠粒料及不規則之石料區分之。規則粒料乃指各種不同粒徑之玻璃珠而言，因為玻璃珠是由工廠依照固定粒徑大小製作而成，其本身光滑、尺寸固定，故為規則粒料。在此本文所試驗之玻璃珠直徑分別為 35mm、25mm、16mm、13mm

四種不同粒徑尺寸，如圖 2.a 所示。由於玻璃珠為規則粒徑之粒料，其粒料大小固定，毋須藉由試驗來表示粒徑之均勻與否或粒徑大小之規模，故實驗之項目只需選擇不同孔隙率  $\varepsilon$  來決定比滲透係數。

不規則粒料乃指各種不同粒徑之碎石，種類如圖 2.b 所示。所謂之不規則粒料乃因實驗石料取自河床自然沖積、經正常淘選作用後之均勻礫石，礫石雖受河流良好搬運、沉積作用而使其大小、形狀、重量近乎相同，但顆粒間之表面形狀卻極不規則，基於礫石表面形狀不規則、粒徑大小之描述不具體之原因，本文除試驗其各種粒徑之孔隙率  $\varepsilon$  及比滲透係數之外，特地選擇均勻係數  $C_u$  之試驗，以具體表示石材顆粒、粒徑之均勻程度，以及細度模數  $F_M$  來表示石材顆粒、粒徑之粗細程度。

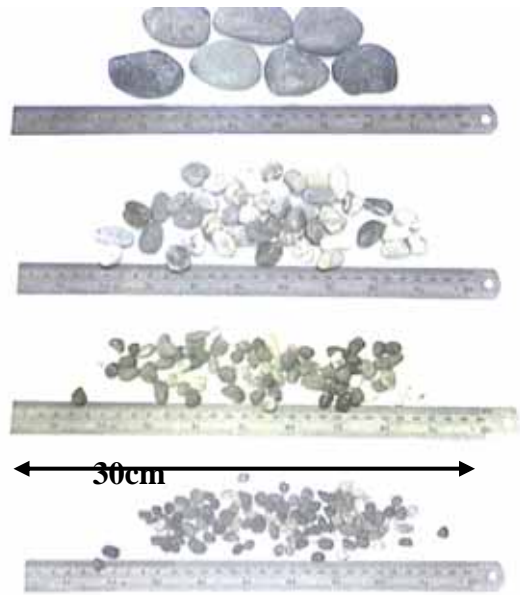


圖 2b 四種類型碎石全圖。

#### 4.1 孔隙率 (Porosity) $\varepsilon$ 之測定

孔隙率  $\varepsilon$  之實驗目的乃有助於吾人得知透水堤內空氣充填之比率。吾人可知，當透水堤內之空氣充填體積過大，將產生成紊流之虞，然而，當透水堤內之流場形式為紊流時，流場之流速與各參數間之關係不再呈線性，由此可知孔隙率  $\varepsilon$  對透水係數  $K_p$  之重要性。對於透水堤材質之孔隙率  $\varepsilon$  定義為

$$\varepsilon = V_v / V$$

式中  $V_v$  為模型孔隙體積，為水可流動之體積； $V$  為模型之全部體積。

研究當中的所有玻璃珠孔隙介質的排列皆為最密排列，並得到相同的孔隙率，其值為 0.41；不規則形狀的礫石亦得到相同的孔隙率值為 0.39。

#### 4.2 比滲透係數 $k$ 之測定

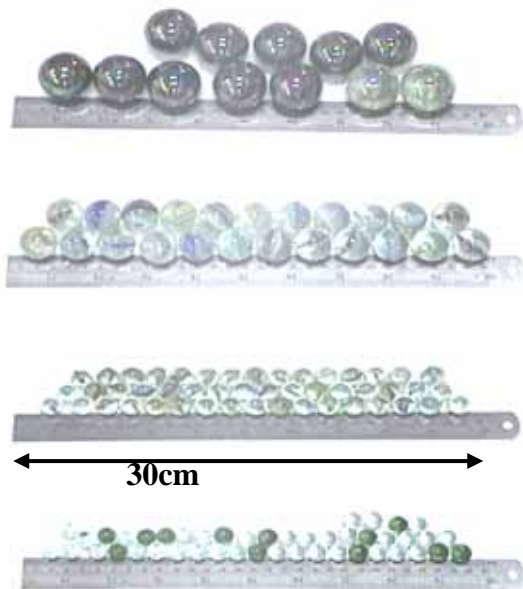


圖 2a 四種類型玻璃珠全圖。



比滲透係數乃為得知孔隙介質特性之一重大指標，亦為研究孔隙流場內阻力特性的基礎。為了得知透水模型之比滲透係數，特別製作了一個大型定水頭滲透儀試驗模型，其構造如圖 3, 4。若滲流路徑改以圓管取代，必須加以分析其能量損失比率，並計入滲流損失才可使用。於此乃使用全斷面滲流法，藉此忽略探討管流能量損失問題。圖中，左一室為進流方向，右一室為出流方向。試驗過程乃將水由左一室進流，藉由右二室放置之透水材料使水流經右二室時受阻而產生滲流水壓，並由右一室流出。

研究過程是將每一次流量設置固定，並於出流位置以幫浦重新打回入流口儲水區。維持固定流量情形一段時間後，兩邊水頭會形成一穩定的落差，紀錄水頭差及流量帶回式(1)及式(4)中求解 k 值。

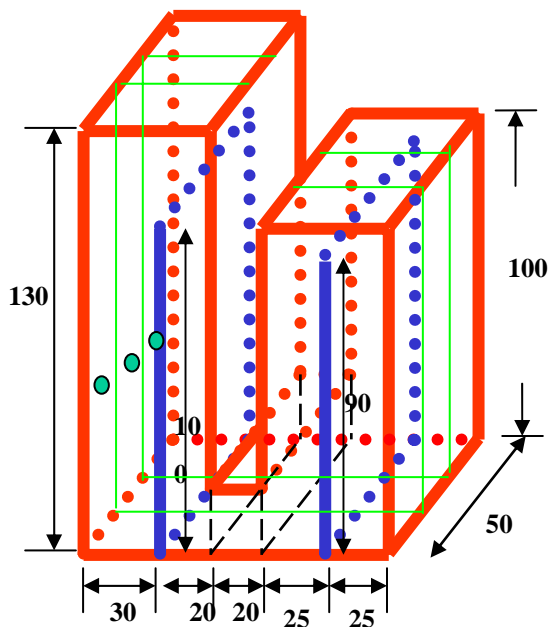


圖 3 透水儀 3-D 圖(單位：公分)。



圖 4 透水儀照片。

### 4.3 礫石均勻係數 $C_u$ 之測定

均勻係數  $C_u$  試驗之目的，為具體表示石材顆粒、粒徑之均勻與否，其試驗之器材是利用中山大學海洋環境及工程學系土力實驗室之篩分析試驗設備，其設備儀器包括：電動搖篩機、標準篩乙套、烘箱、台秤、鋁盤、鋼刷。 $C_u$  值最小值為 1，此時代表  $D_{10}$  及  $D_{60}$  之粒徑相同，顆粒大小均勻，是為均勻級配；而  $C_u$  值愈大，表示顆粒大小分佈範圍較廣，土石之粒徑並不均勻。

關於礫石均勻係數  $C_u$  定義為

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

$D_{60}$ ：粒徑分佈曲線上累積通過百分比為 60% 所對應之粒徑。

$D_{10}$ ：粒徑分佈曲線上累積通過百分比為 10% 所對應之粒徑。

試驗後得到四種不規則礫石的平均粒徑

5.2mm、7.4mm、12.2mm、31.7mm 之均勻係數 Cu 分別為 1、1.2、1.33、1.5，由數值的結果可以知道實驗中所使用的礫石，粒徑愈小者，具有較均勻的級配，而粒徑愈大者，顆粒大小之分佈顯得較不均勻。

#### 4.4 礫石細度模數 $F_M$ 之測定

細度模數  $F_M$  試驗之目的，為具體表示石材顆粒、粒徑之粗細程度，其試驗之設備儀器如 4.3 所述相同。關於細度模數  $F_M$  之定義為

$$F_M = \sum (\text{各標準篩號殘留累積百分數}) / 100$$

式中之標準篩為 No.100, # 50, # 30, # 16, # 8, # 4, 3/8", 3/4", 3/2"。更大者細度模數  $F_M$  之範圍從 0 ~ 10,  $F_M$  值愈大者表示石材之粒徑、顆粒愈大。

試驗後得到四種不規則礫石的平均粒徑 5.2mm、7.4mm、12.2mm、31.7mm 之細度模數  $F_M$  分別為 6.1、6.5、6.8、8.5，其中 5.2mm、7.4mm、12.2mm 粒徑之礫石的  $F_M$  值相差不大，表示石材顆粒大小相當，唯 31.7mm 的礫石  $F_M$  值明顯高出許多，這是實驗選材時的困難所致。

## 五、結果與分析

### 5.1 由(1)(2)式分析結果

當孔隙流之流速超過層流臨界流速，孔隙內將產生紊流現象，此時運動方程式不再由剪力項所主導，因紊流通過孔隙介質時所產生之渦流能量明顯高於剪力流，此項可依

$$\beta_2 = C_f \varepsilon^2 / k^{\frac{1}{2}}$$
 表示之。圖 5, 6 是式(1)分析下

比滲透係數與雷諾數之關係，試驗結果發現，粒徑尺寸 (grain size) 較小者似乎有符合 Ward (1964) 者，意即所謂 k 僅為粒徑平方有關，圖 5 之 13mm、16mm 之 k 曲線已達常數，而 25mm 的玻璃珠似乎介於臨界範圍，超過此一尺寸大小的粒徑竟然會有不規則、不穩定現象；圖 6 也可用 Ward 者解釋，5.2mm、7.4mm、12.2mm 之不規則石料皆達常數值，僅 31.7mm 粒徑之不規則石料有不穩定現象。流速是比滲透係數穩定之關鍵，流速大則 k 值愈趨穩態。並且比較 13mm 玻璃珠與 12.2mm 石料之 k 值曲線，兩曲線數值有重疊跡象，可知材料特性與 k 值相關性不大。

圖 7, 8 將紊流係數與雷諾數之關係作圖，橫座標以雷諾數表示，目的是藉由無因次分析方法過濾掉粒徑影響因素，單獨針對紊流係數值作討論。圖 7 之紊流係數曲線看似同一條並且隨雷諾數之增加而減少，此時紊流係數值固定於某一區間作擺盪，並且達常數值的趨勢，吾人可從此圖定義出一個合理的無因次紊流係數，此紊流係數不隨粒徑而變；在不規則石料時，紊流係數曲線數值與規則玻璃珠同為趨近 0.6~0.7 區間(圖 8)，變化不隨粒徑改變，然而 7.4mm、5.2mm 石料由於雷諾數僅達 500、800 之值，無法完全觀察其穩定數值，只能得知其紊流係數值由 0.8~1.0 向下趨近當中。

### 5.2 由(3)(4)式分析結果

分別根據式(3)、式(4)給定阻力係數  $C_D$  值求 k，並分別畫圖比較 k、 $C_D$ ，所得如圖 9-12 者。就比滲透係數 k 與雷諾數之關係(圖 9, 10)中，大粒徑的材料藉由雷諾數之增加而穩定；反之小粒徑者於雷諾數甚小時則已達穩定。且由新公式帶入計算所得到的穩定 k 值皆可明顯觀查出對粒徑平方的依賴性。

依幅合、幅散觀念所推導之方程式(3)進行之分析，各玻璃珠以及不規則石材之拖曳係數與雷諾數之關係(圖 11, 12)中阻力係數值隨雷諾數增加而降低並收斂至 0.4 且不隨粒徑及材料而變化。

## 六、結論

文中根據孔隙結構物內流體阻力特性所使用之新的數學解析方法所得之解析結果與 Sollitt and Cross (1972) 提之公式計算的結果趨勢性非常吻合，僅有常數係數不同而導致數值些許差異之別。其優點乃更具物理意義，並由此篇所得之結論討論敘述如下。

1. 此文之目的乃是尋找大粒徑孔隙結構物之孔隙介質特性。文中藉由比滲透係數及阻力係數間之關係、比滲透係數及粒料粒徑、孔隙率間之關係，進而觀察比滲透係數  $k$  及阻力係數  $C_f$  之特性。小粒徑之尺寸(小於 25mm 玻璃珠、小於 12.2mm 不規則粒料)似有 Ward 者所提之  $k$  僅正比於粒徑平方特性，而大粒徑卻仍隨著流速變化而有不穩定現象，當流速大時  $k$  達穩定後才能定義其特性。對於紊流係數而言，其特性可以一常數值表之，且以 Morison 式進行描述光滑規則玻璃珠及不規則粒料時所代表之常數值相同。新方程式所依據之物理特性對拖曳係數描述之值亦如此，其值不隨粒徑、材料而改變。

2. 文中根據幅合作用及幅散作用之特性所導述出之新公式與舊有公式之差異乃為：舊有 Sollitt and Cross (1972) 提之公式對於孔隙流場之孔隙率、滲透係數、粒徑、流速等重要性皆有考慮，但計算之結果卻無法顯現出紊流係數對  $k$  值之依賴性。然而真實之孔隙流場中，由

於幅合作用造成之摩擦阻力及幅散作用造成之形狀阻力，兩者重要性同等重要。於孔隙流場之幅合作用及幅散作用之重要性各佔泰半，即使流場流速大時，仍有主導摩擦之剪力流存在；當流場流速小時，亦有主導形狀阻力之渦流存在。故文中新式特別以描述流場阻力特性出發，同時兼顧摩擦及形狀造成之阻力影響，此種方法無論於流場流速大或小，分析時仍各顯本身阻力特性而無受到忽略本身重要性之情況。由此計算所得的  $k$  值有其物理存在價值且由文中發現其對粒徑平方關係亦較為顯著。

3. 實驗過程中，受限於設備之規模，無法針對更高流速狀況進行試驗，日後若可以將實驗設備之進流路徑延伸，並降低出流路徑高度以克服設備儀器難題並增加流速控制後，應可進一步詳細考量當流速增加到固定之臨界值所產生之液化問題。此時孔隙結構物受到高速流體擾動而造成結構體鬆動，壓力差於瞬間銳減，此時孔隙結構內之力學行為也許是另一研究方向之題材。

4. 此實驗並無討論孔隙壓 (pore-pressure) 問題，初步假設所有孔隙結構物之受力行為相同，兩邊造成之壓力差平均受力於材料上，未來相關研究若能配合壓力計將能提高實驗之精確性。

## 誌謝

本研究感謝國科會 No. NSC89-2611-E-110-019 提供專題計畫之補助，使實驗得以完成。

## 參考文獻

- [1] 涂盛文、邱乾忠，“多層透水堤消波最佳潛力之研究”，第十九屆海洋工程研討會論文

- 集，pp.165-172，1997。
- [2] Sollitt, C.K., and Cross, R.H., "Wave Transmission through Permeable Breakwater," Proc. 13<sup>th</sup> ICCE, ASCE, pp. 1827-1846, 1972.
- [3] Madsen, O.S., "Wave Transmission through Porous Structures," J. Waterway, Harbour and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol.100, No. 3, pp. 169-188, 1974.
- [4] Madsen, O.S., and White, S.M., "Wave Transmission through Trapezoidal Breakwaters," Proc. 15<sup>th</sup> ICCE, ASCE, 1976.
- [5] Steimer, R.B. and Sollitt, C.K., "Non-Conservative Wave Interaction with Fixed Semi-Immersed Rectangular Structure," Proc. 16<sup>th</sup> ICCE, ASCE, pp. 22209-2227, 1978.
- [6] Lee, C.P., "Wave Interaction with Permeable Structures," Ph.D. dissertation, Civil Engineering Department, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, 1987.
- [7] Dalrymple, R.A., Losada, M.A., and Martin, P.A., "Reflection and Transmission from Porous Structures under Oblique Wave Attack," J. Fluid Mech, Vol. 224, pp. 625-644, 1991.
- [8] 李兆芳、黃玄，"波浪與潛式透水結構物互相作用分析"，第十八屆海洋工程研討會論文集，pp. 273-281，1996。
- [9] Lee, C.P., and Ker, W.K., "Interaction of Waves and A Porous Tension Leg Platform with An Impermeable Top Layer," Proc. 17<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, pp. 207-214, 1997.
- [10] 陳伯義，"波浪通過潛式透水結構之三維計算"，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南，台灣，1998。
- [11] Sulisz, W., "Wave Reflection and Transmission through Permeable Breakwaters," Proc. 13<sup>th</sup> ICCE, Vol. III, pp. 1827-1846, 1985.
- [12] Rojanakamthorn, S., Isobe, M., and Watanabe, A., "A Mathematical Model of Wave Transmission over A Submerged Breakwater," Coastal Engineering in Japan, Vol. 32, No. 2, pp. 209-233, 1989.
- [13] 徐虎嘯、吳永照，"二階表面波與可透水防波堤的交互作用"，第十八屆海洋工程研討會論文集，pp. 306-317，1996。
- [14] 吳永照、楊貴森、許瑞昌，"波浪與複合防波堤之交互作用"，第十八屆海洋工程研討會論文集，pp. 342-349，1996。
- [15] 歐善惠、邱永芳、廖建明，"波浪通過潛堤變形之研究"，中華民國第十七屆海洋工程研討會暨 1995 兩岸港口及海岸開發研討會論文集，pp. 575-590，1995。
- [16] 黃材成、林怡成，"透水式潛堤波浪特性之實驗研究"，第十九屆海洋工程研討會論文集，pp. 220-227，1997。
- [17] Ward, J.C., "Turbulent Flow in Porous Media," J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 90, HY5, pp.1-12, 1964.
- [18] Dinoy, A., "A Friction Factor and Reynolds Number Relationship in Flow through Porous Media," ME Thesis, AIT, Bangkok, Thailand, 1971.

#### 圖表

以下各圖為文中所提及之各類圖表。

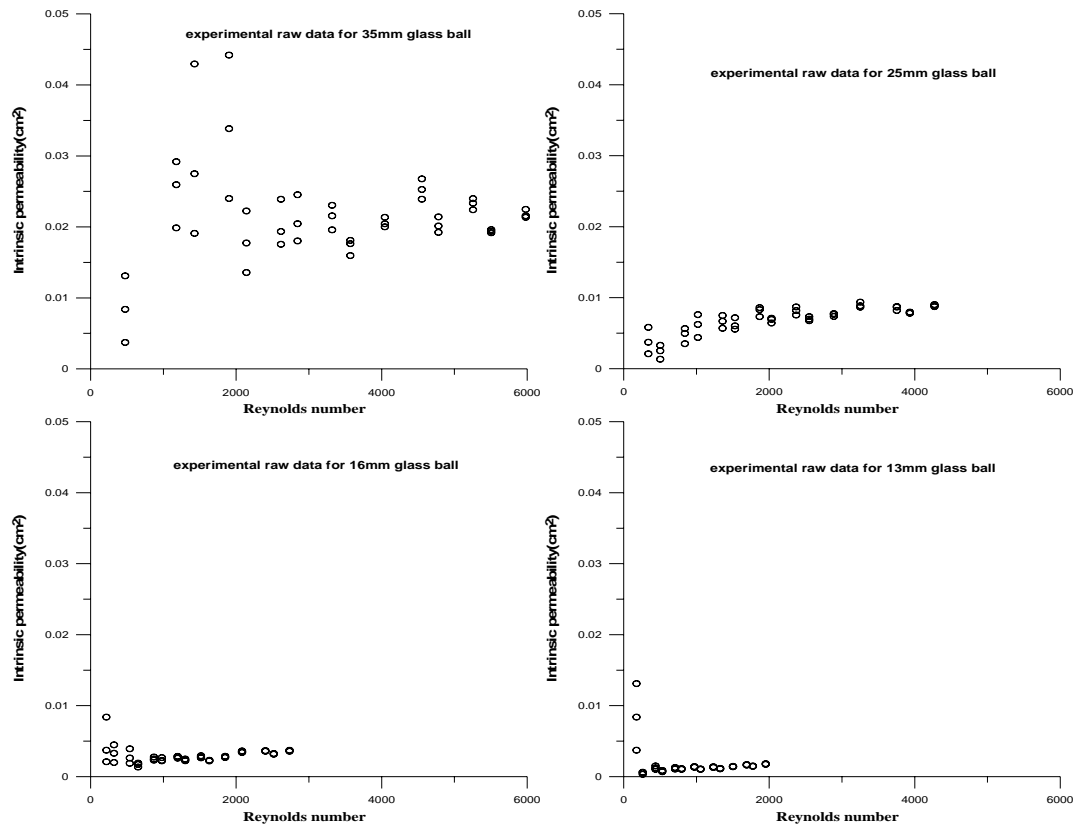


圖 5 (1)式分析下各玻璃珠之比滲透係數圖。

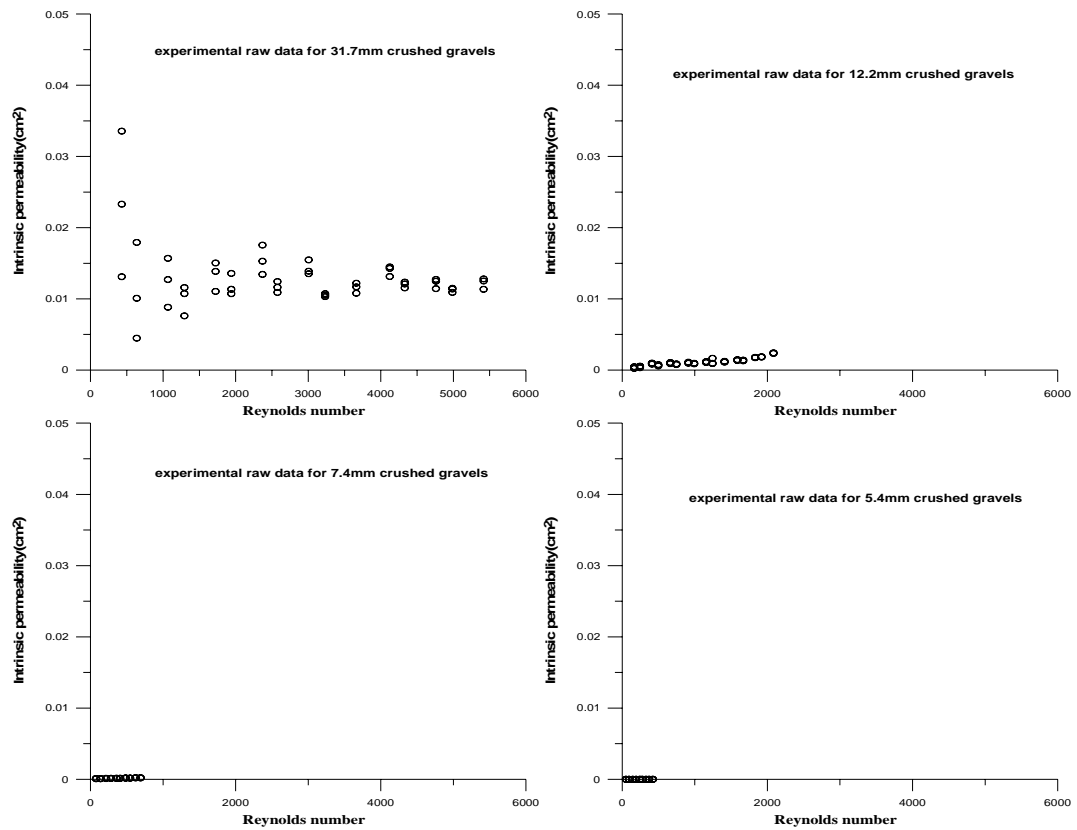


圖 6 (1)式分析下各不規則石料之比滲透係數圖。

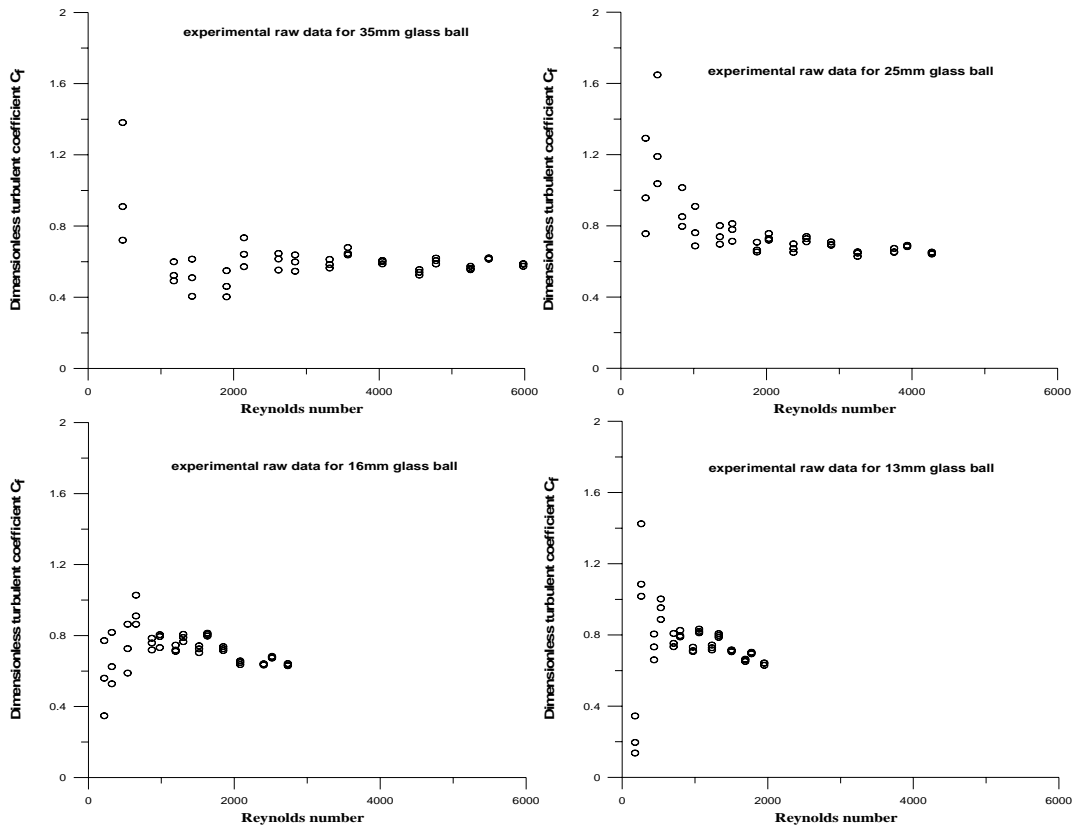


圖 7 (2)式分析下各玻璃珠之紊流係數圖。

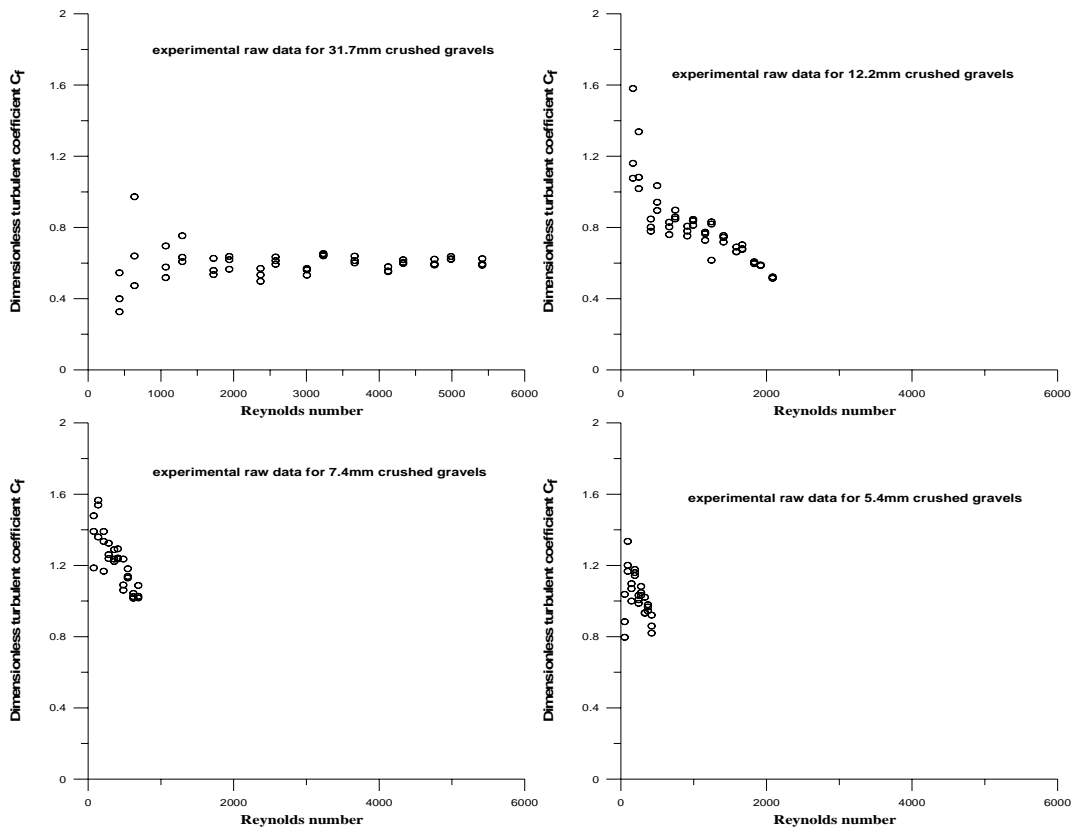


圖 8 (2)式分析下各不規則石料之紊流係數圖。

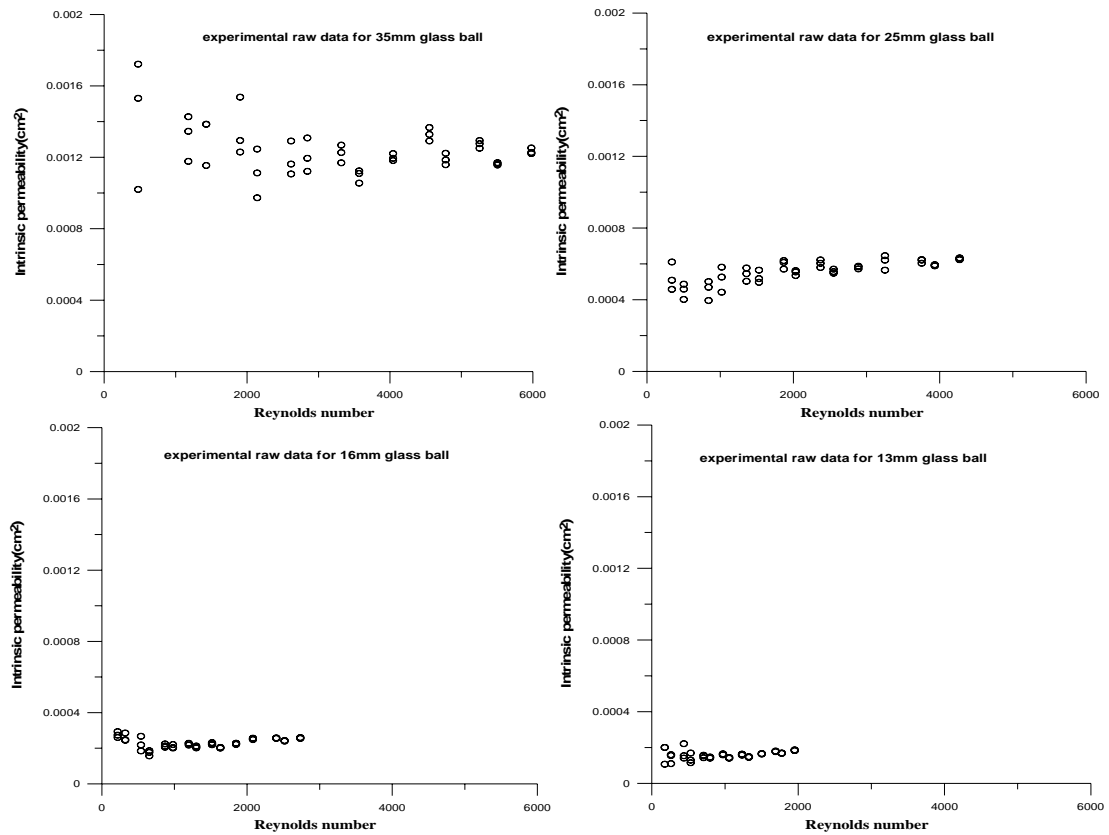


圖 9 (4)式分析下各玻璃珠之比滲透係數圖。

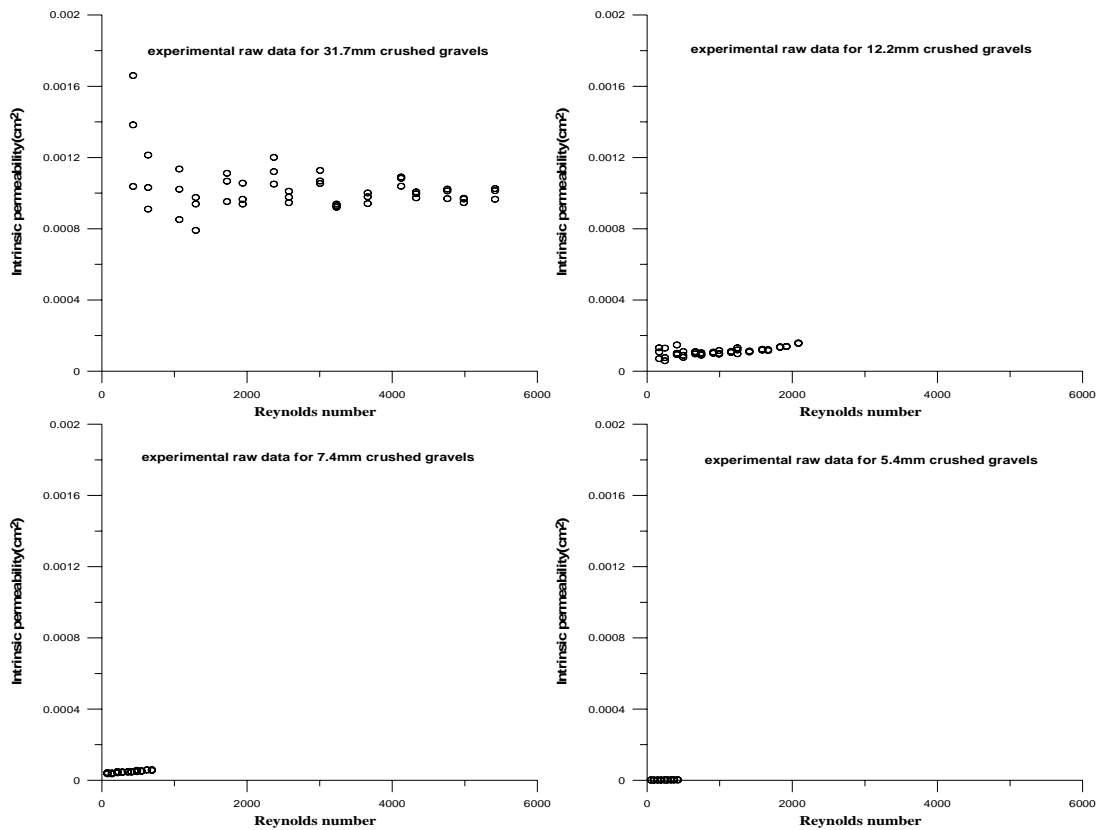


圖 10 (4)式分析下各不規則石料之比滲透係數圖。

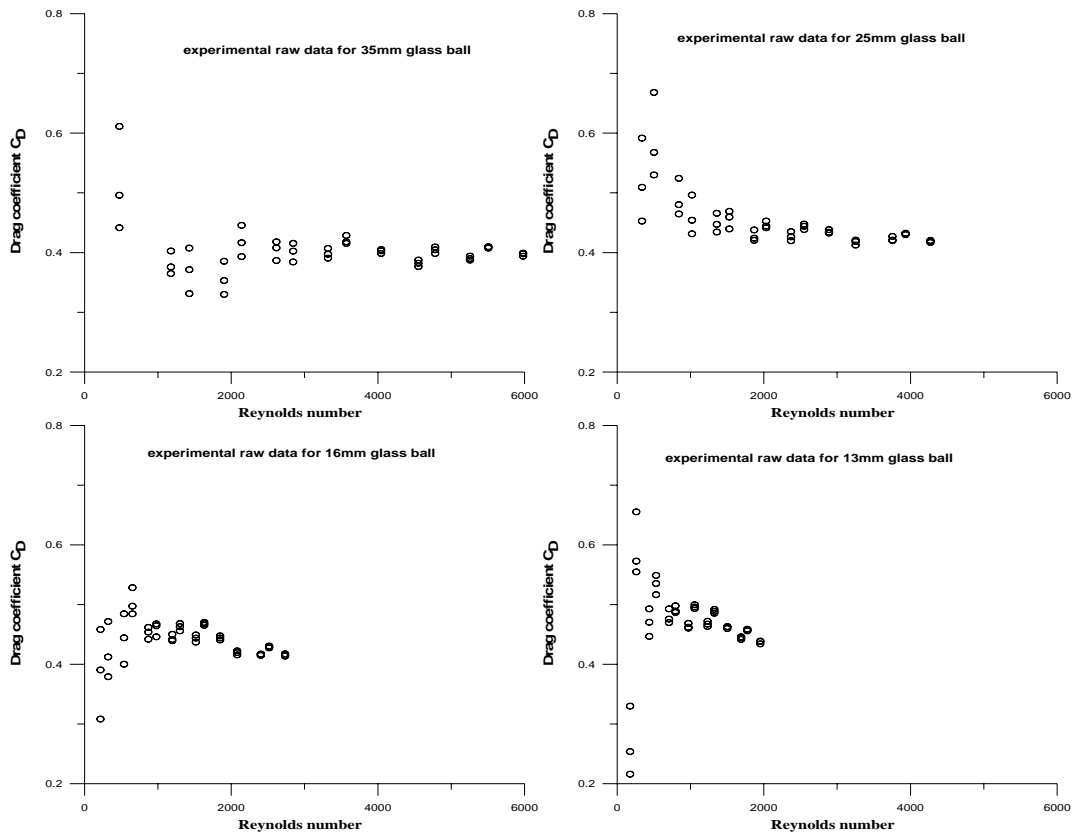


圖 11 (3)式分析下各玻璃珠之拖曳係數圖。

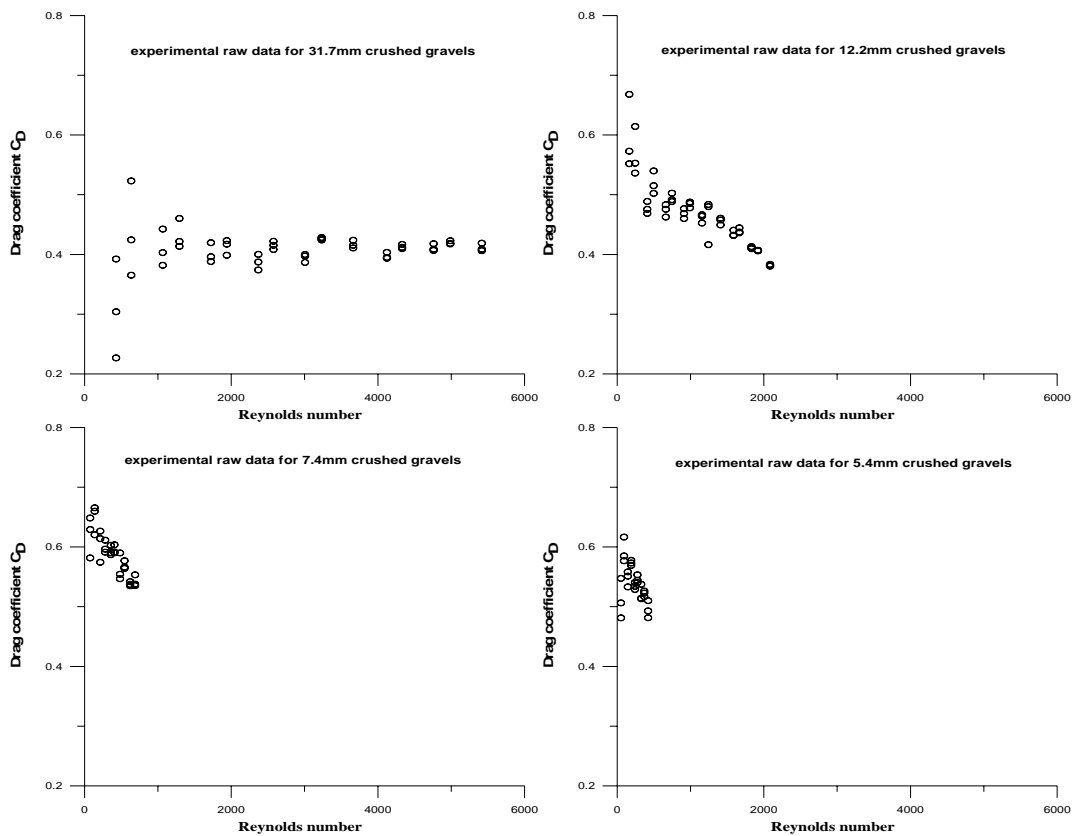




圖 12 (3)式分析下各不規則石料之拖曳係數圖。