

# 應用分離元素法及連續體力學法分析流槽中砂土的流動與堆積

張光宗<sup>(1)</sup> 江志文<sup>(2)</sup>

## 摘要

本研究利用分離元素法 PFC2D 及連續體力學法 FLO-2D 模擬真實大型流槽試驗，其中二者共同參數分別給予適當設定，如顆粒密度決定土石比重、孔隙率決定體積濃度，其餘參數透過 PB 設計篩選出影響堆積行為的重要因子，得知在 PFC2D 影響量體堆積範圍最主要的參數是顆粒勁度、顆粒摩擦係數及阻尼比，在 FLO-2D 為降伏應力及黏滯係數，再依序決定出參數設定的先後順序及各參數的合理值，使數值模型的堆積狀態能夠驗證真實大型流槽結果。之後將 PFC2D 及 FLO-2D 模擬出相似堆積狀態的參數組合成一筆資料，持續搜尋有相似堆積結果的參數，即有多筆資料，將 24 筆資料利用統計軟體 R 進行典型相關分析，得到典型相關係數 0.8922，且其 P 值為 5.29e-6 小於 0.05，達到統計上的顯著水準，證明二者之間有高相關存在，最後再進行多變數迴歸分析建立 PFC2D 與 FLO-2D 參數間的關係式。

(**關鍵詞**：PFC2D、FLO-2D、大型流槽、堆積)

## Application of the Discrete Element Method and Continuum Mechanics Method on the Flow and Deposition of Sands in a Flume Test

*Kuang-Tsung Chang*<sup>(1)</sup> *Chih-Wen Chiang*<sup>(2)</sup>

Associate Professor<sup>(1)</sup>, Graduate Student<sup>(2)</sup> Department of Soil and Water Conservation National Chung Hsing University, Taiwan.

## ABSTRACT

The Discrete Element Model PFC2D and Continuum Mechanics Model FLO-2D are used to simulate the real large flume test. The parameters which both PFC2D and FLO-2D have the same type are set as follows: specific gravity and volume concentration are determined by particle density and void ratio, respectively. The PB design is used to study the relative influence of the parameters on

---

(1)國立中興大學水土保持學系副教授

(2)國立中興大學水土保持學系研究生(通訊作者 e-mail:g356290@hotmail.com)

the deposition behavior. For PFC2D, the important parameters are particle stiffness, particle friction and viscous damping, while for FLO-2D, they are yield stress and viscosity. Next, we determine the procedure of parameters' setting and reasonable parameter values to make numerical deposit results verify the real flume result. Finally, the parameters of both PFC2D and FLO-2D that yield similar deposition behavior are collected for canonical correlation analysis through statistical software R. A canonical correlation coefficient 0.8922 is obtained. Its P-value is 5.29e-6, which is less than 0.05. It shows that the parameters of both models have high correlation with each other. After that, the relationships between the parameters of both PFC2D and FLO-2D for sandy material are established by multivariate regression analysis.

(**Keywords** : PFC2D, FLO-2D, flume test, runoff)

## 前言

台灣地形陡峭、地質條件不佳，受到梅雨、颱風與豪雨後，常有崩塌、地滑及土石流的發生，造成人民生命財產的損失，影響經濟發展。若能對山崩影響範圍加以預測分析，將能減低人民生命財產的損失，使經濟更蓬勃發展。

為探討山崩事件的影響範圍，本研究分別以分離元素法的 PFC2D 及連續體力學法的 FLO-2D 模擬真實大型流槽的堆積情形，探討二者的相關性，建立二者參數間的關係。

由於 PFC2D 之參數眾多，如顆粒本身的勁度( $k_n$ 、 $k_s$ )、粒徑範圍、摩擦係數、阻尼比( $\beta_n$ 、 $\beta_s$ )及牆的勁度、摩擦係數，如果模擬的材料為岩體時，又會有接觸鍵結或平行鍵結參數的設定，加上這些參數又都不是我們常見的巨觀參數(如土壤的強度參數  $c$ 、 $\phi$ )而是顆粒本身的微觀參數，如何決定微觀參數成為 PFC2D 使用上的一大棘手問題。

相較於 PFC2D 有眾多微觀參數，FLO-2D 如果選擇土石流、泥流的流變模式，只有土石比重  $G_s$ 、體積濃度  $C_v$ 、降伏應力  $\tau_y$ 、賓

漢黏滯係數  $\eta$ 、層流(laminar flow)阻滯係數  $K$ 、曼寧係數  $n$  的巨觀參數。

欲建立 PFC2D 及 FLO-2D 之間的關係式，本研究在 FLO-2D 建立寬度為 1m 的渠道，使其能與 PFC2D 的二維模型對應，將二者有相似堆積結果的參數分別挑選出來，透過多變數迴歸建立二者參數間的關係。

## 研究材料與方法

本研究以分離元素軟體 PFC2D (Particle Flow Code in Two Dimensions, Itasca, 2004)及連續體力學有限差分軟體 FLO-2D 來模擬大型流槽乾顆粒流之運動堆積行為。關於堆積特徵的定義，本研究參考 D' Agostino (2010) 定義的堆積體長度(Runout) ( $R$ )及運移距離(Travel) ( $L$ )如圖 1 所示。其中， $V$  為滑動體的體積、 $H$  為滑動體的位能、 $\theta_u$  為滑動區的上邊坡坡度、 $R$  為堆積體長度、 $L$  為滑動體在滑動前最高點位置至堆積後最遠點位置之水平運移距離。藉由蒐集前人流槽試驗的文獻建立流槽模型，並依據適當之假設獲得模擬時之材料參數。

### 一、流槽模型之簡介

本研究採用的流槽模型為 Yang et al. (2011)所進行的大型室內流槽試驗的佈置(圖 2)，槽長 15.5 公尺、高度 5.7 公尺、槽寬 1

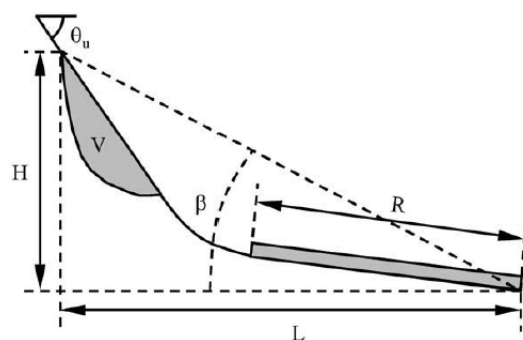


圖 1 滑動體堆積特徵圖

Figure 1 The characteristic of the sliding body.

公尺、槽深 1 公尺。在數值軟體依照其剖面圖建置等比例相同長度及坡度的流槽模型(圖 3、圖 4)，作為後續乾顆粒流模擬之流動邊界。在本研究中採用的顆粒流為 Yang et al. (2011)一系列試驗中的第三組試驗，400 公斤的砂土，粒徑範圍 0.075 ~ 19.121mm，總體積 0.2738m<sup>3</sup>，摩擦角 32.53°。

FLO-2D 數值模型是藉由 AutoCAD 根據圖 2 剖面圖的數據得到座標，預先在 CAD 裡畫出 0.25 × 0.25 公尺水平平面網格，在每個網格的十字交線上畫點，於點上輸入高程資料，存檔成 .dxf 檔案，再將這些高程點透過 ArcMap 轉檔成 .shp 檔即可由 FLO-2D 載入。

## 二、分離元素法及 PFC2D 簡介

分離元素法(Discrete Element Method)是由 Cundall 於 1971 年所發展出來的，最早是用於分析粒狀材料之力學行為。而後 Cundall 與 Strack (1979)開始將分離元素法應用於砂

性土壤。

PFC2D 為美國 Itasca 公司所發展，其是以分離元素法為基礎之數值分析軟體。基本元素為 disc，亦可透過鍵結模式將顆粒鍵結來模擬各種材料與形狀之問題。PFC2D 之基本假設包括以下幾點:

- (1) 顆粒視為剛體，不可變形。
- (2) 顆粒間彼此接觸時，其接觸面積很小，可忽略。
- (3) 顆粒間的接觸以軟接觸方式(soft contact)方式表示，即顆粒間的接觸關係以一勁度彈簧代表之，且允許相鄰顆粒在其接觸點上產生重疊(overlap)。
- (4) 相鄰顆粒重疊量與接觸力及接觸勁度有關，可藉由力-位移關係式計算得到。但所有的重疊尺寸皆遠小於顆粒尺寸。
- (5) 顆粒間之接觸點可設定鍵結。
- (6) 所有的顆粒均為圓形。

程式運算是利用外顯有限差分法(explicit finite difference method)計算每一時階(timestep)之系統變化。模擬過程是由許多運算時階組成，在每一運算時階開始時先看顆粒間及邊界條件之位置，根據其接觸程度利用力-位移定律計算接觸力的大小，如果顆粒周遭的接觸不只一個，顆粒周遭之所有接觸產生的接觸合力與彎矩會使顆粒產生新的方向的位移與轉動，之後再利用牛頓第二運動定律計算顆粒新的速度與位置，結束時階。數個時階如此循環計算，使顆粒連續不斷的運動。

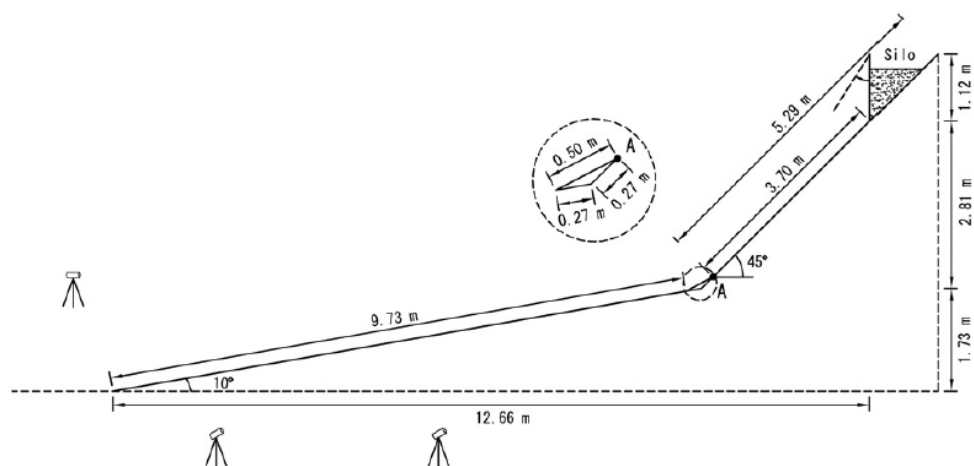


圖 2 大型流槽剖面圖

Figure 2 The profile of large flume

### 三、連續體力學法及 FLO-2D 簡介

FLO-2D 是一套簡單的體積守恒模式，運用外顯中央有限差分法求解，其控制方程式有(1)連續方程式(2)運動方程式。分別表示如下：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \quad (1)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

其中，在連續方程式中，h 為流深，V 為 x 方向的平均流速，i 為降雨強度，t 為時間。在運動方程式中，Sf 為摩擦坡降(friction slope)，S0 為底床坡降(bed slope)，g 為重力加速度。

另外，FLO-2D 還有一套適用於高含砂水流、土石流及泥流之流變模式，經過類推改寫成無因次坡度模式如下式：

$$S_f = S_y + S_v + S_{sd} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{sd}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (3)$$

其中，Sy 為降伏坡降，Sv 為黏滯坡降，Std 為紊流-擴散坡降，τy 為降伏應力，η 為賓漢黏滯係數，γm 為土石流體的單位重，K 為層流阻滯係數(laminar flow resistance parameter)，n 為曼寧係數。FLO-2D 之基本假設包括以下幾點：

- (1)差分時間的間隔內為穩定流(steady flow)。
- (2)靜水壓分佈。
- (3)水力粗糙度是根據穩定、均勻紊流阻力設定。
- (4)渠道元素由均勻渠道幾何形狀和粗糙度構成。

### 四、PB 設計

Plackett 和 Burman (1946)發展出當因子

之間沒有交互作用時，可找出有效因子的篩選方式，簡稱為 PB 設計。PB 設計是 2 水準的部分因子設計，水準可以是屬量的，如溫度、壓力或時間點；或者為屬性的，如不同的設備、不同的人員或因子的低和高水準。

PB 設計的實驗次數皆為 4 的倍數，即實驗次數  $N = 4m$  ( $m$  為整數)，而由這  $N$  次實驗中，最多可從  $N-1$  個因子之中找出影響力較大的因子。本研究選用  $N=12$  之直交表(表 1)。

首先定出每個因子之上限(+1)與下限(-1)，再依據直交表調整參數輸入程式運行，整理得出其所對應之輸出結果。最後將直交表與輸出結果進行複迴歸分析，即可得出線性之迴歸式。

在本研究中，各因子之上下限的決定是參考前人研究的合理值與測試結果以量體不滑動至流槽外及避免量體完全不滑動的原則下使各因子的上下限有較大的範圍。

## 五、典型相關分析

相關分析是討論兩組變數  $x$  與  $y$  的相關性，當  $x$  和  $y$  只有一個變數時，其相關稱為簡單相關(又稱做皮爾森相關)；若其中一組只有一個變數，另一組有很多變數，其相關稱為複相關，可以利用複迴歸分析來計算相關係數；如果這兩組變數都是一個變數以上，則量測這兩組變數間的相關稱為典型相關(Canonical Correlation)。典型相關分析是找  $x$  組的線性組合  $\chi_1$  與  $y$  組的線性組合  $\eta_1$ ，使得  $\chi_1$  與  $\eta_1$  的相關係數為最大，其相關係數表示為

$$\rho(\chi_1, \eta_1) = \frac{Cov(\chi_1, \eta_1)}{\sqrt{Var(\chi_1) \cdot Var(\eta_1)}} = \frac{a_1' \Sigma_{xy} b_1}{\sqrt{a_1' \Sigma_{xx} a_1 b_1' \Sigma_{yy} b_1}}$$

亦即在  $a_1' \Sigma_{xx} a_1 = 1$ ， $b_1' \Sigma_{yy} b_1 = 1$  的條件下，使  $a_1' \Sigma_{xy} b_1$  最大。

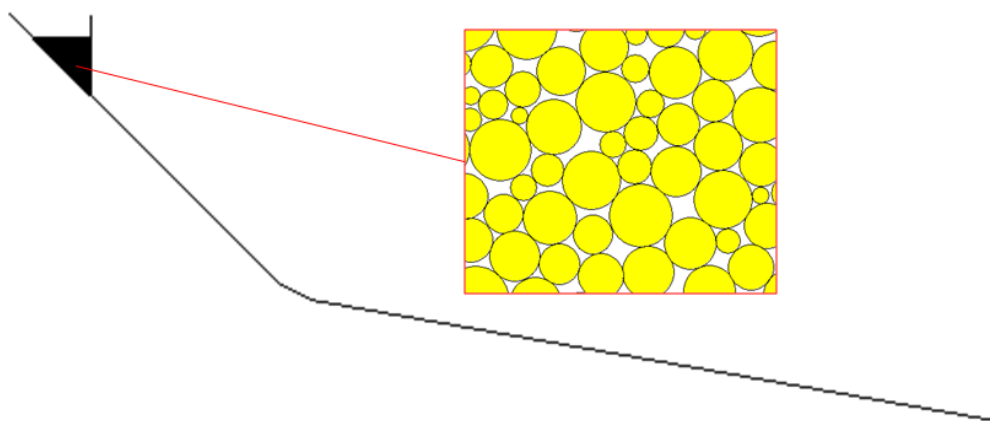


圖 3 PFC2D 大型流槽模型  
Figure 3 Large flume model generated by PFC2D.

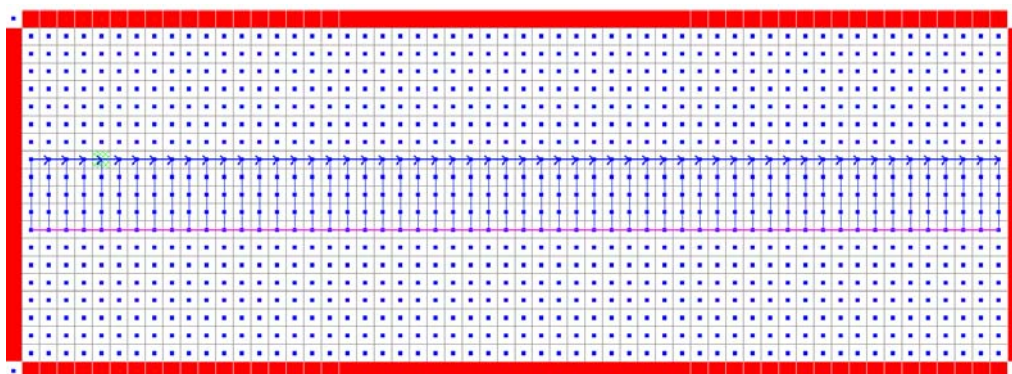


圖 4 FLO-2D 大型流槽模型

Figure 4 Large flume model generated by FLO-2D.

表 1 PB 設計 N=12 直交表

Table 1 Orthogonal array of PB design.

N=12	X1	X2	X3	X4
1	1	1	-1	1
2	-1	1	1	-1
3	1	-1	1	1
4	-1	1	-1	1
5	-1	-1	1	-1
6	-1	-1	-1	1
7	1	-1	-1	-1
8	1	1	-1	-1
9	1	1	1	-1
10	-1	1	1	1
11	1	-1	1	1
12	-1	-1	-1	-1

## 流槽數值模擬

### 一、PFC2D 流槽模擬

由於流槽試驗為無膠結之砂土，所以 PFC2D 之微觀參數有顆粒的勁度(kn、ks)、摩擦係數 f、阻尼比( $\beta_n$ 、 $\beta_s$ )，其實驗粒徑

分佈曲線如圖 5 藍線所示。但由於計算機的運算效能及處理能力的限制，如在 PFC2D 生成實驗粒徑分佈曲線的顆粒，總體積 0.2738m<sup>3</sup> 則需生成約 54 萬顆，計算機會當機且運算效能不佳。考量運算效能及能夠模擬的粒徑分佈有最大範圍的情況下，調整出模擬粒徑分佈曲線如圖 5 紅線所示，顆粒數為 5066 顆。

由於流槽剖面圖的傾角分別是上坡段 45 度及下坡段 10 度，為兩段非水平的底面，顆粒會不斷滾動甚至流出流槽，考量砂與礫石的真實材料具不規則形狀且不若球的易滾動性，因此將模擬顆粒設定為不轉動。蔣志宏(2007)認為顆粒 ks/kn 為 0.3 時可模擬出較佳的結果，本研究測試一系列不同勁度比的堆積比較如圖 6 所示，亦發現 ks/kn 為 0.3 時可模擬出較佳的結果，所以之後的試驗都是以此勁度比做為切向勁度 ks 的設定。

在驗證流槽前，先進行 PB 設計比較各項微觀參數對堆積長度的影響，表 2 為各因子的上下限，將此參數設定代入 PB 設計 N=12 的直交表(表 1)，模擬結果如表 3。將

表 1 和表 3 做複迴歸分析可得線性迴歸式及影響百分比(表 4)。

由於表 1 為正規化之直交表，可透過迴歸式的係數求得影響百分比，各因子的影響百分比為線性迴歸式的各因子係數絕對值佔所有因子係數的絕對值總和的百分比。

從表 4 可發現影響堆積體長度主要是顆粒摩擦係數  $f_b$  及阻尼比  $\beta$ ；影響運移距離主要是顆粒正向勁度  $k_n$  及阻尼比  $\beta$ ；影響最大堆積高度主要是顆粒摩擦係數  $f_b$ 。

再觀察個別參數對堆積狀態的影響，第一個參數(X1)可透過 PB 設計直交表(表 1)的第 1 組及第 4 組、第 2 組及第 9 組、第 7 組及第 12 組觀察出其他參數不變的情況下，勁度較大者運移距離較小，勁度較小者運移距離較大；(X2)可由第 2 組及第 5 組、第 7 組及第 8 組、第 4 組及第 6 組觀察到牆摩擦係數對堆積狀態幾乎沒有影響；(X3)可由第 4 組及第 10 組、第 8 組及第 9 組、第 5 組及第 12 組觀察到顆粒摩擦係數較大者堆積體長度較短、最大高度較高，運移距離稍微較大；(X4)可由第 1 組及第 8 組、第 2 組及第 10 組、第 6 組及第 12 組觀察到阻尼比較大者，運移距離較小，堆積體長度較短。

瞭解各微觀參數的影響後，於流槽模擬的參數決定依序如下：(1)摩擦係數 (2)勁度 (3)阻尼比。

#### (1) 摩擦係數:

由於牆摩擦係數影響不顯著，其設定即根據礫石和底床墊子之間介面摩擦角  $31.52^\circ$  經由  $f=\tan \phi$  得到  $f_w=0.61$ 。滑動體的顆粒摩擦係數一開始也是根據礫石的摩擦角  $32.53^\circ$

經由  $f=\tan \phi$  得到  $f_b=0.64$ ，但考量顆粒的不轉動設定，使顆粒摩擦係數的設定約在 0.64 上下之間分佈，輸入程式運算的值有 0.55、0.6、0.64、0.7、0.75、0.8。

#### (2) 勁度:

參考林洋震(2008)模擬標準砂的設定  $k_n$ 、 $k_s$  皆為  $1e7$  N/m、蔣志宏(2007)模擬礫石的水槽試驗設定  $k_n$ 、 $k_s$  分別為  $1e6$  N/m、 $3e5$  N/m、林明慧(2010)砂之雙軸試驗初始設定  $k_n$ 、 $k_s$  皆為  $7.428e7$  N/m，使用 UCODE 最佳化的結果  $k_n$ 、 $k_s$  分別為  $7.25e8$  N/m、 $1.125e6$  N/m。綜合以上之前人研究，本研究初始設定範圍  $k_n$  為  $1e6$  N/m ~  $1e9$  N/m，勁度比為 0.3，觀察其在流槽之堆積情形，最後選用  $k_n$  為  $5e7$  N/m ~  $2e8$  N/m 為最適合之勁度值。

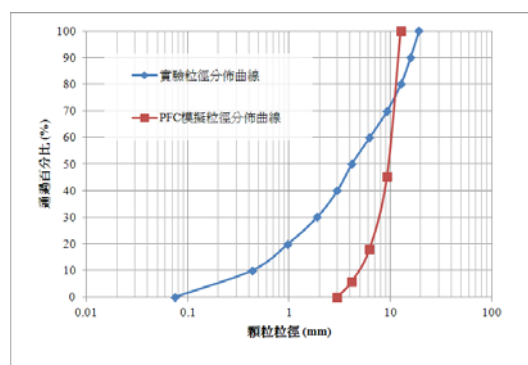


圖 5 流槽實驗與模擬粒徑分佈曲線之比較

Figure 5 The contrast of particle size distribution curve between experiment and simulation.

#### (3) 阻尼比:

由於本研究使用 PFC 屬動態模擬，根據 PFC 手冊(2004)的建議，作用在顆粒本身的局部阻尼(local damping)應設為 0，取而代之的

是在每個接觸點上設置正向及切向的阻尼緩衝器(viscous damping)，也就是要設定阻尼比。PFC 的阻尼比是由顆粒的回彈係數決定的，阻尼比與回彈係數呈現一反比之關係，阻尼比愈大則回彈係數愈小，反之亦然。關於回彈係數之研究，Habib (1977)及 Labiouse (2009)均認為回彈係數的大小和坡角有關。其中，Habib 分析了一關係式如下：

$$E^* = \sqrt{\frac{1}{\frac{2 \sin \theta}{1 - \sin \theta} + 1}}$$

其中，E\*為回彈係數之極限值、 $\theta$  為坡角，依照其關係式可以表示如圖 7。

將已決定勁度與粒徑大小之顆粒利用 PFC 手冊範例(2004)的程式碼模擬不同阻尼比情況下之回彈係數如圖 8。由於流槽上坡段之坡角為 45°，代入 Habib 之關係式可得到極限回彈係數為 0.414，再根據圖 8 可得到最小阻尼比為 0.35，之後的模擬即從 0.35 往上調整阻尼比，並觀察其堆積狀態。

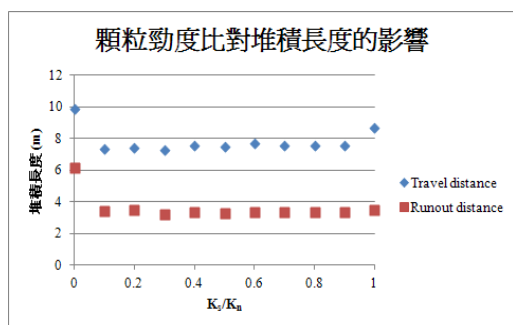


圖 6 不同勁度比的堆積長度比較圖

Figure 6 Deposit lengths of different stiffness ratio.

## 二、FLO-2D 流槽模擬

本研究使用 FLO-2D 模擬流槽的砂與礫石運動堆積行為，是在單位寬度(1m)的渠道上進

表 2 PFC2D PB 設計參數上下限

Table 2 PFC2D parameters for PB design.

	-1	1
$K_n$ (N/m)	7e7	1e8
fw	0.1	10
fb	0.4	0.8
$\beta$	0.45	0.95

表 3 PFC2D PB 設計模擬結果

Table 3 Simulated results by PFC2D for PB design.

	Runout	Travel	Height
1	3.17	3.7	0.14
2	3.14	10.9	0.2
3	2.85	3.75	0.28
4	3.77	7.86	0.14
5	3.14	10.9	0.2
6	3.77	7.86	0.14
7	4	7.9	0.14
8	4	7.9	0.14
9	3.28	9.1	0.2
10	2.8	7.1	0.2
11	2.85	3.75	0.28
12	3.91	8	0.14

$$Runout = 3.39 - 0.03k_n - 0.03fw - 0.38fb - 0.19\beta$$

$$R^2 = 0.90$$

$$Travel = 7.39 - 1.38k_n + 0.37fw + 0.19fb - 1.72\beta$$

$$R^2 = 0.87$$

$$Height = 0.18 + 0.01k_n - 0.01fw + 0.04fb + 0.01\beta$$

$$R^2 = 0.93$$



表 4 PFC2D PB 設計參數影響百分比  
Table 4 The influence percentage of PFC2D parameters for PB design.

影響百分比 (%)	$k_n$	fw	fb	$\beta$
Runout	5.03	4.76	60.32	29.89
Travel	37.65	10.03	5.19	47.13
Height	16	16	52	16

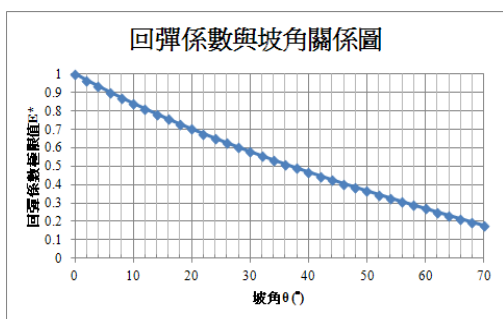


圖 7 回彈係數與坡角關係圖(Habib,1977)  
Figure 7 Relationship between restitution coefficient and slope angle (Habib,1977).

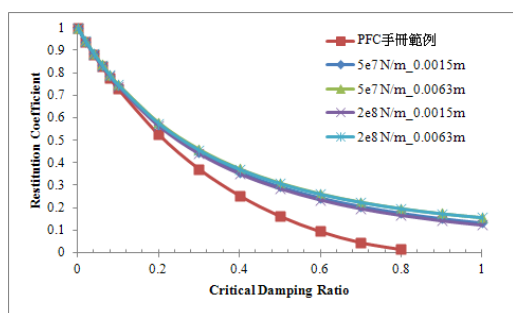


圖 8 不同阻尼比與回彈係數關係  
Figure 8 Relationship between critical damping ratio and restitution coefficient.

行。選用高含砂水流、土石流及泥流之流變模式，參數有土石比重  $G_s$ 、體積濃度  $C_v$ 、

降伏應力  $\tau_y$ 、賓漢黏滯係數  $\eta$ 、層流(laminar flow)阻滯係數  $K$ 、曼寧係數  $n$ 。其中，土石比重  $G_s$  對照 PFC2D 顆粒密度  $2600\text{kg/m}^3$  設定為 2.6，體積濃度  $C_v$  的設定(1-孔隙率)為 0.55，其在 FLO-2D 手冊(2009)歸類為 Mudflow 及 Landslide。入流點流量為矩形流量歷線如圖 9，使其乘上 BF 放大因子  $1/(1-C_v)$  產生的土砂量與真實流槽相當。模擬時間為足夠長的時間使量體停止運動，本研究設定為 6 小時，輸出間隔為 0.1 小時。

由於 FLO-2D 中降伏應力設定為  $\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ 、賓漢黏滯係數  $\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ ，要分別輸入  $\alpha$  及  $\beta$  值，彭繼賢(2007)認為在  $\tau_y$  與  $\eta$  維持定值下，不同  $\alpha$ 、 $\beta$  之比例對於堆積型態幾乎沒有影響，因此會固定  $\alpha$  值，以不同的  $\beta$  值來顯示不同之  $\tau_y$  與  $\eta$ ，在本研究中  $\alpha$  值固定為 0.002，藉由不同的  $\beta$  值來顯示不同之  $\tau_y$  與  $\eta$ 。

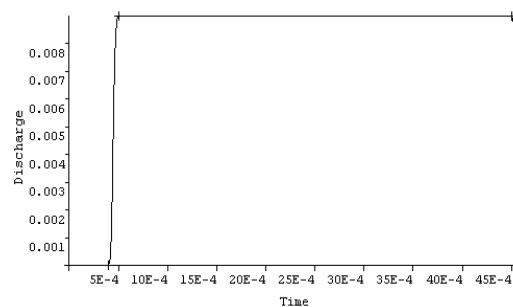


圖 9 FLO-2D 流量歷線  
Figure 9 FLO-2D hydrograph chart.

在驗證流槽前，先進行 PB 設計比較其餘各項參數對堆積長度的影響，表 5 為各因子的上下限，其中， $\beta_1$  的上下限表示降伏應力分別為  $1690.55\text{Pa}$ 、 $324.67\text{Pa}$ ， $\beta_2$  的上下限表示黏滯係數分別為  $187.32\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、

35.97Pa·s，層流阻滯係數及曼寧係數則參考 FLO-2D 手冊(2009)設定。將此參數設定代入 PB 設計 N=12 的直交表(表 1)模擬結果如表 6。將表 1 和表 6 做複迴歸分析可得線性迴歸式及影響百分比(表 7)。

從表 7 可發現影響堆積體長度主要是降伏應力及黏滯係數；影響運移距離及影響最大堆積高度主要是降伏應力。此結果與彭繼賢(2007)進行參數敏感分析結果相似，其發現對於堆積狀態而言，降伏應力的影響最大，而黏滯係數則有些微的影響，因此以降伏應力作為主要調整因子。

再觀察個別參數對堆積狀態的影響，第一個參數(X1)可透過 PB 設計直交表(表 1)的第 1 組及第 4 組、第 2 組及第 9 組、第 7 組及第 12 組觀察出其他參數不變的情況下，降伏應力較大者運移距離較小，堆積體長度較長，最大高度略微上升；(X2)可由第 2 組及第 5 組、第 7 組及第 8 組、第 4 組及第 6 組觀察到黏滯係數較大者運移距離較小，堆積體長度顯著減小，最大高度略微上升；(X3)可由第 4 組及第 10 組、第 8 組及第 9 組、第 5 組及第 12 組觀察到層流阻滯係數較大者運移距離較小，堆積體長度較短；(X4)可由第 1 組及第 8 組、第 2 組及第 10 組、第 6 組及第 12 組觀察到曼寧係數對堆積體狀態影響不大。

瞭解各參數的影響後，於流槽模擬的參數決定依序如下：(1)曼寧係數 (2)層流阻滯係數 (3)降伏應力、黏滯係數。

(1) 曼寧係數

取 PB 設計中 0.04~0.2 的中間值約等於

表 5 FLO-2D PB 設計參數上下限

Table 5 FLO-2D parameters for PB design.

	-1	1
$\beta_1$	26	29
$\beta_2$	22	25
K	1000	4000
n	0.04	0.2

表 6 FLO-2D PB 設計模擬結果

Table 6 Simulated results by FLO-2D for PB design.

	Runout	Travel	Height
1	3.99	4.66	0.13
2	2.55	6.11	0.13
3	4.11	4.66	0.13
4	3.33	7.22	0.08
5	3.55	7.44	0.08
6	4.11	7.66	0.09
7	4.78	5.66	0.12
8	3.99	4.66	0.13
9	3.78	4.44	0.13
10	2.78	6.66	0.09
11	4.11	4.66	0.13
12	4.33	7.99	0.09

$$Runout = 3.78 + 0.34\beta_1 - 0.38\beta_2 - 0.30K - 0.05n$$

$$R^2 = 0.95$$

$$Travel = 5.99 - 1.20\beta_1 - 0.36\beta_2 - 0.32K - 0.07n$$

$$R^2 = 0.98$$

$$Height = 0.11 + 0.02\beta_1 + 0.004\beta_2 + 0.004K - 0.003n$$

$$R^2 = 0.76$$

0.1 作為之後模擬輸入程式運行的值，且 0.1 在 FLO-2D 手冊(2009)中也是很多地表類型的涵蓋值。

(2) 層流阻滯係數

取 PB 設計中 1000~4000 的中間值 2500 作為之後模擬輸入程式運行的值。

表 7 FLO-2D PB 設計參數影響百分比

Table 7 The influence percentage of FLO-2D parameters for PB design.

影響百分比 (%)	$\beta_1$	$\beta_2$	K	n
Runout	31.91	35.48	28.34	4.27
Travel	61.49	18.52	16.64	3.34
Height	61.76	14.71	14.71	8.82

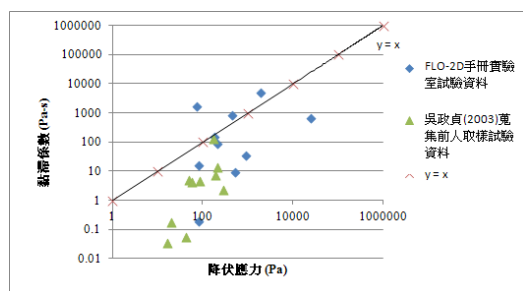


圖 10 降伏應力與黏滯係數的關係

Figure 10 Relationship between yield stress and viscosity.

(3) 降伏應力、黏滯係數

前人研究大多以現地估計方法、流變計試驗或是參考 FLO-2D 手冊(2009)的圖表來決定此值，圖 10 為手冊列舉實驗室試驗資料及吳政貞(2003)蒐集眾多前人取樣試驗資料所做的圖，由圖中可知大多數案例的資料點都位在斜線下方，只有幾個案例例外，本研究模擬的砂及礫石相較於流體含量較多的土石流來說，流動性應較低，可能會在斜線上方分佈，所以在之後的模擬中會給定幾個降

伏應力值對應一系列從小到大而變化的黏滯係數，觀察其堆積情形。

結果與討論

經由本研究決定參數的程序，可模擬出與真實實驗相似的結果，圖 11 為 Yang et al.(2011)一系列試驗中的其中三組試驗結果，本研究模擬的對象是第三組(實線)，運移距離為 5.85m，堆積體長度為 2.15m，最大堆積高度為 0.21m。圖 12 為 PFC2D 模擬的結果，微觀參數為顆粒勁度  $kn=5e7N/m$ 、 $ks=1.5e7N/m$ 、牆摩擦係數  $fw=0.61$ 、顆粒摩擦係數  $fb=0.6$ 、阻尼比  $\zeta=0.95$ ，運移距離為 6.46m，堆積體長度為 2.64m，最大堆積高度為 0.18m。圖 13 為 FLO-2D 模擬的結果，參數為降伏應力  $\tau_y=324.67Pa$ 、賓漢黏滯係數  $\eta=975.36Pa-s$ 、層流阻滯係數  $K=2500$ 、曼寧係數  $n=0.1$ ，運移距離為 5.61m，堆積體長度為 2.26m，最大堆積高度為 0.15m。

要了解 PFC2D 及 FLO-2D 之間的相關性，本研究運用統計軟體 R 執行兩者的典型相關分析，資料的構成是分別去運算 PFC2D 及 FLO-2D，將有相似運移距離結果的參數挑出來，依序排列成顆粒勁度  $kn$ 、顆粒摩擦係數  $fb$ 、阻尼比  $\zeta$ 、降伏應力  $\tau_y$ 、黏滯係數  $\eta$ ，組成一筆資料，持續找出有相似結果的參數，即有多筆資料如表 8。圖 14 為典型相關分析結果路徑圖，圖中觀察變項與典型因素間的數值皆為標準化典型加權係數，而典型負荷記錄於表 9，由圖 14 可知第一典型因素相關高達 0.8922，且其 P 值經檢定為  $5.29e-6$  小於 0.05(表 10)，達到統計上的顯著水準。第二典型因素相關為 0.3675，其 P 值為 0.2343

大於 0.05，無法拒絕虛無假設，且從表 9 可知第二典型因素的重疊指數分別為 X 組變項 0.0432、Y 組變項 0.0661，其值相當低，推論第二典型因素解釋對方標準化觀察變項的比例太低，因此只保留第一典型因素。

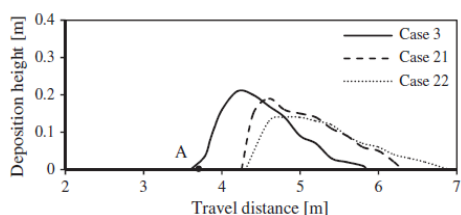


圖 11 真實試驗結果(Case3 實線)

Figure 11 Result of actual flume test (Case3).

完成典型相關分析後，再將表 8 進行多變數迴歸分析，可得到 PFC2D 及 FLO-2D 之關係式如式(4)、式(5):

$$\beta_1 = 26.413 + 0.083k_n - 1.824fb - 0.384\beta$$

$$R^2=0.27 \quad (4)$$

$$\beta_2 = 17.426 + 0.410k_n - 1.361fb + 6.092\beta$$

$$R^2=0.68 \quad (5)$$

(註:  $k_n$  單位為  $10^7N/m$ )。

式(4)、式(5)中可看出 PFC2D 參數只能解釋降伏應力 27%的變異及黏滯係數 68%的變異，但從圖 15 及圖 16 標準化殘差散佈圖也看不出有其他特殊的規則分佈，此資料應為線性構造。再觀察資料後將標準化殘差較大的 2 筆資料做適當刪除，保留剩下的 22 筆資料再進行多變數迴歸分析，可得到式(6)及式(7)，未來可將其進行山崩預測，觀察其預測性。

$$\beta_1 = 26.998 + 0.104k_n - 2.989fb - 0.344\beta$$

$$R^2=0.52 \quad (6)$$

$$\beta_2 = 16.798 + 0.387k_n - 0.110fb + 6.058\beta$$

$$R^2=0.68 \quad (7)$$

(註:  $k_n$  單位為  $10^7N/m$ )。

## 結論

PB 設計能夠有效篩選出具有影響力的因子，本研究在 PFC2D 及 FLO-2D 分別只挑選 4 個因子，所以每個因子都能夠透過 3 組兩兩試驗之間的差異觀察該因子對堆積狀態的影響，得知在 PFC2D 影響量體堆積範圍最主要的參數是顆粒勁度、顆粒摩擦係數及阻尼比，在 FLO-2D 為降伏應力及黏滯係數。

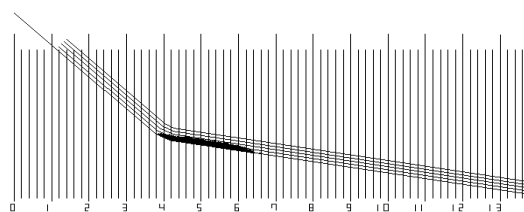


圖 12 PFC2D 流槽模擬結果

Figure 12 Simulated result by PFC2D.

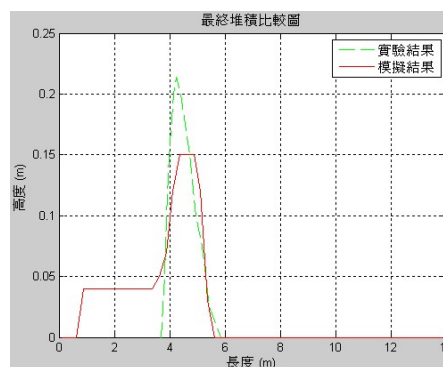


圖 13 FLO-2D 流槽模擬結果

Figure 13. Simulated result by FLO-2D

表 8 典型相關分析樣本資料

Table 8 The data samples of canonical correlation analysis.

資料數	$k_n$ ( $10^7\text{N/m}$ )	fb	$\beta$	$\beta_1$	$\beta_2$
1	20	0.75	0.75	27	29
2	20	0.75	0.85	26.5	29
3	5	0.7	0.8	26.5	22
4	5	0.6	0.85	26.5	21
5	5	0.55	0.85	25.5	26.5
6	7	0.64	0.8	26	23
7	7	0.8	0.7	25.5	25.5
8	7	0.7	0.7	26	23.5
9	7	0.7	0.9	25	26.5
10	6	0.64	0.95	25.5	26
11	6	0.55	0.5	26	21
12	8	0.6	0.8	25.5	24.5
13	7	0.55	0.95	25	26
14	6	0.55	0.4	26	22
15	10	0.7	0.6	25.5	25
16	9	0.6	0.8	24.5	26.5
17	6	0.64	0.65	25.5	22
18	8	0.6	0.7	25.5	23.5
19	10	0.7	0.35	25.5	23
20	8	0.75	0.45	25	24
21	5	0.8	0.85	25	23
22	8	0.75	0.8	25	23.5
23	5	0.75	0.95	24.5	24.5
24	5	0.75	0.65	25	21

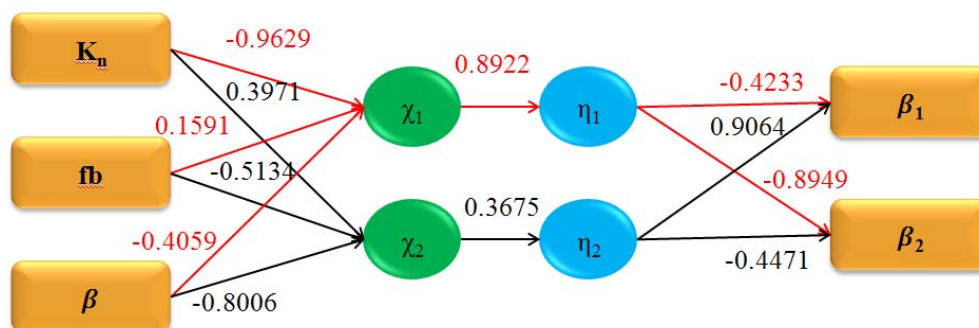


圖 14 典型相關分析路徑圖

Figure 14 The path diagram of canonical correlation analysis

表 9 典型相關分析摘要表

Table 9 Summary table of canonical correlation analysis.

控制變項 (X 組變項)	典型因素		效標變項 (Y 組變項)	典型因素	
	$\chi_1$	$\chi_2$		$\eta_1$	$\eta_2$
$k_n$	-0.9045	0.2799	$\beta_1$	-0.4469	0.8946
fb	-0.1266	-0.4319	$\beta_2$	-0.9061	-0.4231
$\beta$	-0.3675	-0.8332			
抽出變異數 百分比	0.3231	0.3197	抽出變異數 百分比	0.5103	0.4897
重疊指數	0.2572	0.0432	重疊指數	0.4062	0.0661
			$\rho^2$	0.7960	0.1351
			$\rho$	0.8922	0.3675
			P	5.29E-06	0.2343

表 10 檢定典型相關的顯著性

Table 10 Inspection of canonical correlation analysis for statistically significant.

典型因素	WilksL	F Value	Num DF	Den DF	Pr > F
1	0.1764	8.7427	6	38	5.29E-06
2	0.8649	1.5619	2	20	0.2343

將 PFC2D 及 FLO-2D 模擬大型流槽的結果具相似運移距離的參數分別挑出來進行典

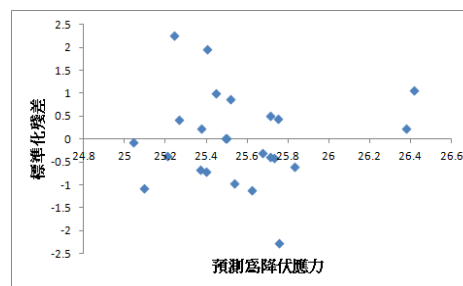


圖 15 降伏應力  $\beta_1$  標準化殘差圖

Figure 15 The standardized residuals of  $\beta_1$ .

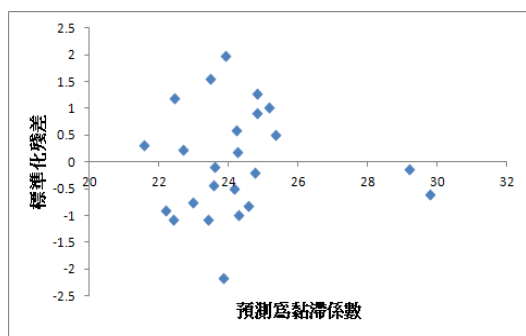


圖 16 黏滯係數  $\beta_2$  標準化殘差圖

Figure 16 The standardized residuals of  $\beta_2$ .

型相關分析，得到相關係數高達 0.8922，且其 P 值為  $5.29e-6$  遠小於 0.05，達到統計上的顯著。之後再進行多變數迴歸分析得到 PFC2D 與 FLO-2D 之間的關係式。

## 誌謝

本文承 國 科 會 NSC99-2625-M-005-006-MY3 之支持，致使本研究得以順利完成，作者在此表達謝意。

## 參考文獻

1. 林洋震(2008)，「顆粒流從斜坡到水平地形後堆積過程之研究」，碩士論文，國立暨南國際大學土木工程學系。
2. 蔣志宏(2007)，「分離元素法應用於土石流行為之研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系。
3. 林明慧(2010)，「分離元素模型於地質材料及邊坡之應用」，碩士論文，國立中興大學水土保持學系。
4. 彭繼賢(2007)，「應用 FLO-2D 於臺灣中部地區土石流流況分析之研究」，碩士論文，國立臺灣大學工學院土木工程學研究所。
5. 吳政貞(2003)，「土石流流況數值分析-以溪頭為例」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所。
6. Itasca Consulting Group Inc. (2004), "Particle Flow Code in 2 Dimensions", Version 3.1, Minneapolis, MN: ICG.
7. FLO-2D Software Inc. (2009), "FLO-2D users manual", Version 2009, Nutrioso, AZ: CONTACTUS.
8. Yang, Q., F. Cai, K. Ugai, M. Yamada, Z. Su, A. Ahmed, R. Huang and Q. Xu (2011), "Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume." *Engineering Geology*, 122: 249-260.
9. D'Agostino, V. M. Cesca and L. Marchi (2010), "Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps)." *Geomorphology*, 115: 294-304.
10. Plackett, R.L. and J.P. Burman. (1946), "The Design of Optimum Multifactorial Experiments." *Biometrika* 33 (4): 305-25.
11. Habib, P. (1977), "Note sur le rebondissement des blocs rocheux." *Pubbl ISMES Bergamo*, 90: 123-125.
12. Labiouse, V. and B. Heidenreich (2009), "Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 1981-199

水土保持學報 44(3) : 251 – 266 (2012)

Journal of Soil and Water Conservation , 44 (3) : 251 - 266 (2012)

---

101 年 05 月 14 日收稿

101 年 06 月 03 日修改

101 年 06 月 04 日接受