

不連續變形分析法於礫石型土石流之應用

蕭沛佳⁽¹⁾ 顧承宇⁽²⁾ 謝平城⁽³⁾

摘要

台灣中部及東部地區多礫石層崩積土之分佈，過去眾多災害案例顯示，礫石型土石流係為主要之土石流災害。本研究以 DDA 建立模擬土石流運動之理論與程式架構，進行土石流數值模擬分析，同時考慮形成土石流之重要因子，探討坡度、摩擦角及水位等不同的變因對土石流的影響，並進一步應用於研究土石流之啟動機制。分析結果顯示，DDA 對於土石流運動之模擬有不錯之適用性，惟對於模擬土石流中水的影響方面，需再深入研究以獲得更接近現地狀況之力學行為。

(**關鍵詞**：不連續變形分析法、礫石型土石流)

Modeling of Granular Debris Flow Using Discontinuous Deformation Analysis

Pei – Jia Hsiao⁽¹⁾, Ping – Cheng Hsieh⁽³⁾

Graduate Student⁽¹⁾, Associate Professor⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation
National Chung Hsing University, Taichung, 402 Taiwan, R.O.C.

Cheng – Yu Ku⁽²⁾

Senior Researcher, Geotechnical Research Center,
Sinotech Engineering Consultant. Inc.

ABSTRACT

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生
(2) 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員兼組長
(3) 國立中興大學水土保持學系副教授 *通訊作者

The hazards of debris flow triggered by earthquake activities and heavy rainfalls occur frequently in Taiwan during the past decades, especially after the 921 earthquake in 1999. Based on the observation from colluviums of conglomerate formation in central and eastern Taiwan, it is found that the granular debris flow is the major type in these areas. The Discontinuous Deformation Analysis (DDA) is therefore adopted to study the initiation and mechanism of the granular debris flow.

Verification and application examples were provided to demonstrate the applicability of the revised DDA method. In addition, the influence of several important factors such as slope, friction angle, and water depth (or flow discharge) on the initiation of the granular debris flow were studied. The results obtained show that: (1) the DDA method can be a useful tool to model the initiation and mechanism of the granular debris flow under different situations, and (2) the hydrodynamic mechanism of mixed fluid and solid particles needs to be further studied.

(**Keywords** : Discontinuous Deformation Analysis, Granular Debris Flow)

前言

台灣地區近年來由於山坡地過度開發以及經歷九二一大地震，促使台灣整體自然環境急速劣化，再加上台灣地區地形地勢陡峭、地質脆弱且河川源短流急、侵蝕劇烈，每逢颱風豪雨時期，致使山區常發生山崩、地滑、土石流等土砂災害造成人員財產傷亡損失及水土流失，尤以土石流災害有逐年加重的趨勢，故成爲各界所關注的問題。

土石流係指斜坡面上未固結之沉積物或經風化之礫石、岩屑等堆積土體，因豪雨或逕流集中之影響，而失去原有安定之狀態，土砂礫石伴隨著洪流在重力作用下沿著自然坡面形成集體流動現象。由於土石流流速快，沖蝕力強，遇阻礙不繞流而產生直接撞擊，固破壞力極大。因此，如何掌握其運動機制和流動特性，以減少土砂災害，將成爲重要課題。

由於土石流的運動機制極爲複雜，現地

的各項資訊不太可能完全地掌握，但近年來，隨著電腦運算速度之提昇，以數值方法如有限元素法及有限差分法等進行土石流之模擬日漸普遍，如 O' brien、Julien、與 Fullerton (1993)所提出之 Flo-2D 便是以非牛頓流體模式與中央有限差分法所發展之數值方法。唯前述現行之數值方法，如 Flo-2D 之土石流變模式研究多侷限於土石流體中之細泥成分，對於礫石型土石流，目前其機制並不明瞭而前述泥流型土石流之方法也不甚適用。

本研究針對台灣中部及東部常形成之礫石型土石流進行研究，並依據土石流之重要影響因子：土石材料、坡度與水分條件(詹錢登，2000)，利用不連續變形分析法 (Discontinuous Deformation Analysis , DDA)進行初步之探討。

不連續變形分析

1. 假設與限制

對於單一塊體而言，塊體變形使用一階線性變形函數，塊體內部的應力與應變不論在任何狀態下均固定，但在許多的情況下，應力的分佈常是不規則的，在此由於塊體以一階線性變形函數計算，使得塊體的應力與應變能力受到限制。當塊體與其它塊體接觸時，塊體假設為彈性，其邊界間的剪抵抗力遵守莫爾 - 庫倫準則 (Mohr-Coulomb criterion)。(蕭沛佳等人，2005)

2. 控制方程式

2.1. 變形函數

Shi (1984, 1989)以詳細的矩陣形式來呈現不連續變形分析，對於二維 DDA 數值方法，根據以上的假設，採用一階近似，其不連續塊體結構的大位移變形函數如下：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

或

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{2 \times 1} = [T]_{2 \times 6} [D]_{6 \times 1} \quad (1)$$

其中

$$[D_i] = [d_{1i} d_{2i} d_{3i} d_{4i} d_{5i} d_{6i}]^t = [u_0 v_0 r_0 \varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}]^t \quad (2)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$[D]$ 為位移矩陣，包含六個與位移相關的變

數， $[T]$ 為轉換矩陣， (x_0, y_0) 為塊體質心座標， (x, y) 為塊體內部任一點之座標， (u_0, v_0) 為點 (x_0, y_0) 在 X 與 Y 方向上的位移， r_0 為點 (x_0, y_0) 的轉動量， $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ 為塊體的正向應變， γ_{xy} 為塊體的剪應變， (u, v) 為塊體內部任一點在 X 與 Y 方向上的位移。

2.2. 最小勢能法

DDA 基於最小勢能的原理，對於包含 N 塊塊體的系統的總勢能而言，其為所有勢能來源(即各種力和應力)的總和，包括：初始應力、外部載重、塊體變形、系統限制、塊體動力勢能等，其總勢能函數如下：

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \iint \frac{1}{2} \varepsilon \sigma^t dA_i + C \quad (4)$$

其中 $\sum_{i=1}^N \iint \frac{1}{2} \varepsilon \sigma^t dA_i$ 為變形勢能，C 為其他勢能的總和。而對於系統中第 i 塊體而言，個別計算每個力或應力的勢能及根據最小能量原理，將其勢能對位移作微分，微分如下：

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri}}, \quad r=1, \dots, 6; \quad i=1, \dots, N \quad (5)$$

以上諸項係由 6×1 子矩陣產生，所以將其加入 $[F]$ 的子矩陣中。

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}}, \quad r, s=1, \dots, 6; \quad i, j=1, \dots, N \quad (6)$$

以上諸項係由 6×6 子矩陣產生，所以將其加入 $[K]$ 的子矩陣中。

最後可得到第 i 塊體的 $[K]$ 矩陣和 $[F]$ 矩陣，系統中獨立塊體經由塊體接觸與單一塊體位移限制，利用塊體運動接觸彈簧的作

用，將獨立塊體組合起來，考慮 N 個塊體的系統，其總平衡方程式如下：

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2N} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}$$

或

$$[K][D]=[F] \quad (7)$$

其中 K_{ij} 為一個 6x6 矩陣是系統中第 i 塊與第 j 塊互相作用的子矩陣， D_i 為 6x1 的位移子矩陣， F_i 為 6x1 荷重子矩陣，而在總平衡式中 $[K][D]=[F]$ 中， $[K]$ 為一個 6Nx6N 勁度矩陣， $[D]$ 和 $[F]$ 分別為 6Nx1 的位移和載重矩陣。

塊體運動 (Block kinematics)(即塊體間無穿透和無張力作用)與沿塊體介面滑動的庫倫摩擦力(Coulomb friction)相關的多變性系統限制了式(7)的解，而其解是為了求得位移的變數，系統的最後解遵守以下的過程：首先，檢查解是否滿足限制，假如發現張力或穿透沿著任何接觸面，重新選擇新的地點和限制位置調整限制條件，並且從新的解中得到修正後的 $[K]$ 和 $[F]$ ，重複此過程直到沿著所有的塊體接觸面沒有張力產生和貫入發生為止。因此，藉由疊代過程(Iterative process)確實地得到所給定的時間間距(Time step)的位移變數。

3. DDA 結合水力機制之理論

DDA 主要用於探討塊體間之力學行為，因此運用於土石流方面時，須予以適當的修改。土石流之顆粒浸潤於水體中，其孔隙壓

力與流體流動力以荷重方式作用於土石顆粒外圍邊界，於此將假設水壓力呈線性分佈荷重。

3.1. 不連續塊體分析的流體壓力項

在DDA裡流體壓力項使用最小勢能法予以闡述。在此常見的慣例是壓力呈線性分佈於塊體邊界兩端點 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 所定義的長度L上，如圖1所示(參考Jing, 2001)。

$$\begin{cases} x = (x_2 - x_1)\omega + x_1 \\ y = (y_2 - y_1)\omega + y_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

$0 \leq \omega \leq 1$ 代表沿著塊體邊界的相關距離。假設向量 $\{p(\omega)\} = \{p_x(\omega), p_y(\omega)\}^t$ 沿著塊體邊界潮濕部分呈線性變化，則可以表示如下：

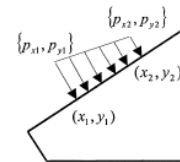


圖 1 . 流體壓力作用在塊體上
Figure 1 . Fluid pressure on a block.

$$\begin{cases} p_x(\omega) = (p_{x2} - p_{x1})\omega + p_{x1} \\ p_y(\omega) = (p_{y2} - p_{y1})\omega + p_{y1} \end{cases} \quad (10)$$

因為流體壓力所造成的剛體或元素的勢能表示如下：

$$\begin{aligned}
 \Pi_w &= -\int_0^1 \{p(\omega)\}^t \{u\} L d\omega \\
 &= -\int_0^1 \{p_x(\omega), p_y(\omega)\} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} L d\omega \\
 &= -L \left(\int_0^1 \{p_x(\omega), p_y(\omega)\} [T(\omega)] d\omega \right) [X] \{d\} \\
 &= -L \{F_p\}^t [X] \{d\} \tag{11}
 \end{aligned}$$

具有封閉形式積分，在此向量{d}是元件節點的位移向量(或剛性塊體在其形心的位移向量)，矩陣[X]是塊體或元件的形狀矩陣，向量{F_p}隨其元件的類型而變化。在式(11)裡函數Π_w的最小化及對節點位移向量{d}進行微分：

$$\frac{\partial \Pi_w}{\partial \{d\}} = L \{F_p\}^t [X] \rightarrow [F] \tag{12}$$

所推得{F_p}如式(13)所示，然後將其增加至相關元件所屬的塊體載重向量[F](Load vector)，之後，將塊體的載重向量加入總體載重向量內，如總體運動方程式(即式(7))。

(13)式中，各符號的定義分別為

$$\begin{aligned}
 \Delta x_{21} &= x_2 - x_1, \quad \Delta x_{10} = x_1 - x_0, \quad \Delta y_{21} = y_2 - y_1, \\
 \Delta y_{10} &= y_1 - y_0, \quad \Delta p_x = p_{x2} - p_{x1}, \\
 \Delta p_y &= p_{y2} - p_{y1}.
 \end{aligned}$$

式(12)可用來模擬非線性壓力的分佈，在處理自由水面與元件邊界相交的自由水面

$$\{F_p\} = \begin{bmatrix} \frac{(p_{x2} + p_{x1})}{2} \\ \frac{(p_{y2} + p_{y1})}{2} \\ -\frac{\Delta p_x \Delta y_{21}}{3} - \frac{\Delta y_{10} \Delta p_x + p_{x1} \Delta y_{21}}{2} - \Delta y_{10} p_{x1} + \frac{\Delta p_y \Delta x_{21}}{3} + \frac{\Delta x_{10} \Delta p_y + p_{y1} \Delta x_{21}}{2} + \Delta x_{10} p_{y1} \\ \frac{\Delta p_x \Delta x_{21}}{3} + \frac{\Delta x_{10} \Delta p_x + p_{x1} \Delta x_{21}}{2} + \Delta x_{10} p_{x1} \\ \frac{\Delta p_y \Delta y_{21}}{3} + \frac{\Delta y_{10} \Delta p_y + p_{y1} \Delta y_{21}}{2} + \Delta y_{10} p_{y1} \\ \frac{\Delta p_x \Delta y_{21}}{6} + \frac{\Delta y_{10} \Delta p_x + p_{x1} \Delta y_{21}}{4} + \frac{\Delta y_{10} p_{x1}}{2} + \frac{\Delta p_y \Delta x_{21}}{6} + \frac{\Delta x_{10} \Delta p_y + p_{y1} \Delta x_{21}}{4} + \frac{\Delta x_{10} p_{y1}}{2} \end{bmatrix} \tag{13}$$

位置時更有彈性，在這樣的狀態下，只有部分元件(或塊體)邊界可能被浸沒在自由水面下並且部分是保持乾燥的。而對所有浸沒的元件來說，只需設定(x₁, y₁)和(x₂, y₂)的座標等於交界的座標，即可求得浸沒在水中的部分。

3.2. 水流對塊石產生之作用力

土石流的材料由許多塊石所組成，為探討其受水流之作用力，故先以單一塊石探討之。自然河道中，塊體之穩定乃受至於其所受之各重作用力而定。對於完全浸沒於水流中的塊石而言，其所受之作用力包括水平拖曳力(F_D)、垂直上舉力(F_L)、浸水自重(W_s)、及底床水平抵抗力(F_R)，如圖2

所示(Yang,1996)。

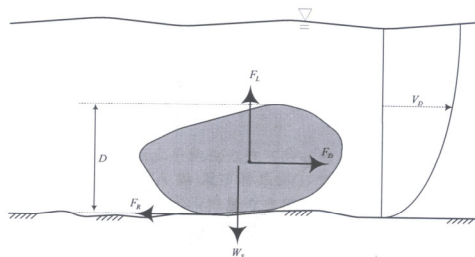


圖 2 . 河道上塊石受力示意圖
Figure 2 . Forces on a block in the river.

塊石受力的起始運動條件(Incipient motion criteria)依據 Yang 等人(1996)之描述，可以下列各式表示。

$$F_L = W_s \quad (14)$$

$$F_D = F_R \quad (15)$$

$$M_O = M_R \quad (16)$$

其中上述各參數之意義分別敘述如下：

(1) 水流水水平拖曳力 (\$F_D\$)

直接作用於塊石之水平拖曳力 \$F_D\$，依據動力方程式考慮水流流速，可表示如下：

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho V_D^2 \quad (17)$$

式中，\$C_D\$ 為考慮表面與形狀因子之拖曳係數，隨雷諾數 \$R\$ 而變化，\$A\$ 為塊石投影至水流方向之面積，\$\rho\$ 為水之密度，\$V_D\$ 為水流於塊石高度之流速 (m/s)。

對於雷諾數 \$R\$ 值而言，球體 \$R\$ 值之臨界值為 \$2 \times 10^5\$。因此，對於 \$R\$ 值小於其臨界值之情況，\$C_D\$ 值約為 0.4，而在亂流區域中，\$C_D\$ 值將會降成 0.2。對於河道水流中，完全浸沒之塊石，一般可估計

\$R=5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6\$，因此可假設其相當之拖曳係數 \$C_D=0.2\$。(Millar and D'Aoust, 1998)

(2) 水流垂直上舉力 (\$F_L\$)

直接作用於塊石之垂直上舉力 \$F_L\$，同樣依據動能方程式考慮水流流速，可表示如下：

$$F_L = C_L \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho V_D^2 \quad (18)$$

式中，\$C_L\$ 為上舉係數，依據 Cheng 與 Clyde(1972)之研究，其值可定為 0.17。由於本研究採用 \$C_D=0.2\$，\$C_L=0.17\$，因此 \$C_L=0.85C_D\$，此亦導致 \$F_L=0.85 F_D\$。

(3) 浸水自重 (\$W_s\$)

塊石之浸水自重 \$W_s\$ 可表示如下：

$$W_s = B_{vol} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \quad (19)$$

式中，\$B_{vol}\$ 為塊石之體積，\$\rho_s\$ 為塊石之密度，\$\rho\$ 為水之密度，\$g\$ 為重力加速度。

(4) 底床水平抵抗力 (\$F_R\$)

若不考慮塊石凝聚力之情形下，水平抵抗力 \$F_R\$ 可表示如下：

$$F_R = (W_s - F_L) \cdot \tan \phi \quad (20)$$

式中，\$\phi\$ 為塊石與底床之摩擦角。

結合水力機制後之土石流運動如圖3所示。(蕭沛佳等人，2005)

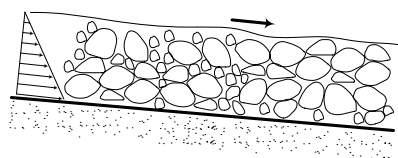


圖 3 . 結合水力機制後以DDA進行土石流模擬示意圖

Figure 3 . Modeling debris flow using revised DDA considered fluid pressure.

2.4 不連續變形分析法之驗證

為驗證所加入 DDA 程式中之水壓力項及其相關之水力機制之正確性，採以下幾個範例作為驗證。

2.4.1. 不規則塊體於穩定流中之驗證

本驗證例為底床上一不規則塊體於水中受均勻水流流速之影響，其幾何模型建構如圖 4，底床上一不規則塊體其面積為 1.422 平方公尺，於水深為 2.283 公尺之水面下所受水流之作用力，假設條件如表 1、表 2 及表 3 所示，並假設水流平均流速為 3.3 m/s，經由 DDA 分析並與半經驗公式解之結果比較整理成表 4 之結果。

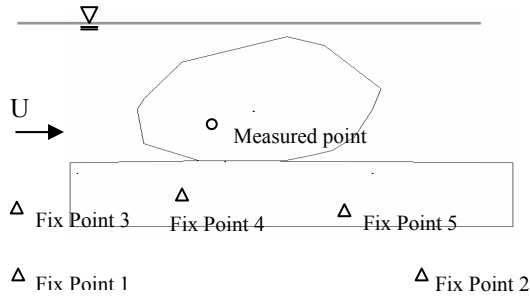


圖 4. 驗證例(一)：底床上不規則塊體之幾何模型

Fig 4. Verification example 1 : An irregular block in the river.

表 1 . 驗證例(一)：幾何模式邊界條件
Table 1 . Boundary condition of verification example 1.

邊界條件	編號	X 座標	Y 座標
固定點 Fix Point	固定點 1	1.05	0.50
	固定點 2	3.4825	0.50
	固定點 3	1.05	1.00
	固定點 4	2.05	1.11
	固定點 5	3.05	1.00

表 2 . 驗證例(一)：幾何模式之監測點座標

Table 2 . Measuring point adopted in verification example 1.

監測點	編號	X 座標	Y 座標
	監測點 1	2.2440	1.5817

表 3 . 驗證例(一)：不連續變形分析之材料參數輸入值

Table 3 . Parameters used in verification example 1.

塊體	單位重	26.46 kN / m ³
	楊式模數	357000 kN / m ²
	柏松比	0.25
不連續界面處	內摩擦角	10°
	凝聚力	0 kN / m ²
	張力強度	0 kN / m ²

塊石於水中所受水流之水平拖曳力為

$$F_d = C_d \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho V_d^2$$

$$= 0.2 \cdot 1.42(m^2) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000(kg/m^3) \cdot (3.3m/s)^2$$

$$= 1.546kN$$

塊石於水中所受水流之垂之上舉力為

$$F_L = C_L \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho V_d^2 = 0.85 F_d = 1.314kN$$

表 4 . 驗證例(一)：DDA 分析與半經驗公式解結果之比較

Table 4 . Comparison of results from DDA and semi-empirical formula for verification example 1.

	正向作用力	切向作用力
DDA	22.36 kN	1.80 kN
半經驗公式解	22.38 kN	1.96 kN

依據表 4 結果顯示, DDA 與半經驗公式解所分析之正向與切向作用力相當接近, 其誤差在 1% 以內。

2.4.2. 不規則塊體於坡面上之驗證

本驗證例為單一不規則形狀塊體於坡度 30° 之坡面上之力平衡進行驗證, 其幾何模型建構如圖 5 所示, 塊體共分割為二塊, 其中不規則形狀塊體之面積為 0.394 平方公尺, 分析條件如表 5、表 6 及表 7 所示。本驗證例亦利用極限平衡法(LEM)分別計算正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等, 如表 8 所示。

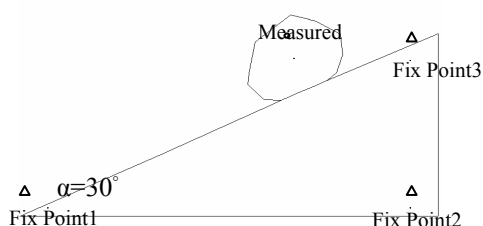


圖 5 . 驗證例(二)：不規則塊體於坡面上之幾何模型

Figure 5 . Second example : Initial geometry of the irregular block on the slop.

表 5 . 驗證例(二)：幾何模式邊界條件
Table 5 . Boundary condition of verification example 2.

邊界條件	編號	X 座標	Y 座標
固定點 Fix Point	固定點 1	0.2	0.6
	固定點 2	2.8	0.6
	固定點 3	2.8	2

表 6 . 驗證例(二)：幾何模式之監測點座標
Table 6 . Fixed point adopted in verification example 2.

監測點	編號	X 座標	Y 座標
	監測點 1	1.966	2.0211

經由模擬得到塊體於坡度 30° 之坡面上, 考量不同摩擦角分別為 15 至 45 度, 每隔 5 度即進行上述正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等之計算, 所得到之結果與極限平衡法比較如表 8 所示, 其安全係數之比較如圖 6 所示。

極限平衡法係假設塊體之重量作用於正中心, 惟本例塊體形狀為一不規則塊體, 其形心位置並非在塊體之正中心處, 以 DDA 分

表 7 . 驗證例(二)：不連續變形分析之材料參數輸入值

Table 7 . Parameters used in verification example 2.

塊體	單位重	$26.46 \text{ kN} / \text{m}^3$
	楊式模數	$157000 \text{ kN} / \text{m}^2$
	柏松比	0.25
不連續處	內摩擦角	$20^\circ \sim 45^\circ$
	凝聚力	$0 \text{ kN} / \text{m}^2$
	張力強度	$0 \text{ kN} / \text{m}^2$

析結果發現, 臨界情形介於摩擦角為 33 度至 37 度間, 較極限平衡法所分析之 30° 略大, 此結果顯示形狀效應亦影響邊坡之安全係數值。

表 8 . DDA 與極限平衡法分析結果之比較
Table 8 . Comparison of results from DDA and LEM.

摩擦角 (度)	極限平衡法		剪力強 度 (kN)	安全係數 (極限平衡 法)	DDA		安全係數 (DDA)
	正向力 (kN)	滑動力 (kN)			正向力 (kN)	滑動力 (kN)	
20	9.03	5.21	3.29	0.63	8.95	3.26	1.00
25	9.03	5.21	4.21	0.81	9.03	4.21	1.00
30	9.03	5.21	5.21	1.00	9.03	5.21	1.00
32	9.03	5.21	5.64	1.08	9.03	5.21	1.00
38	9.03	5.21	7.06	1.35	9.02	5.21	1.35
40	9.03	5.21	7.58	1.45	9.03	5.21	1.45
45	9.03	5.21	9.03	1.73	9.03	5.21	1.73

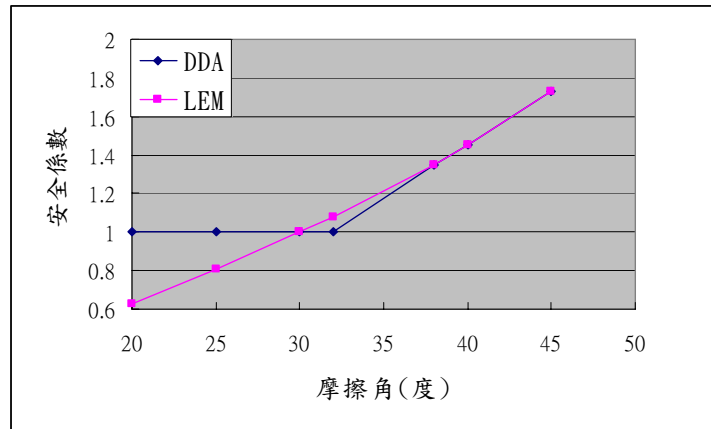


圖 6. DDA 與 LEM 安全係數計算結果比較

Figure 6 . Comparison of results from DDA and LEM with different friction angles.

DDA 與極限平衡法之計算結果於摩擦角大於等於 38 度時之正向力與滑動力之數值幾乎完全相同，惟當安全係數在小於 1 時，因

DDA 具非連續體計算之特性，上方不規則形狀塊體已開始滑動，如圖 7 所示，而極限平衡法因無法反映非連續體分析之特性，其僅能

以安全係數小於 1 之結果顯示塊體具滑動之趨勢。

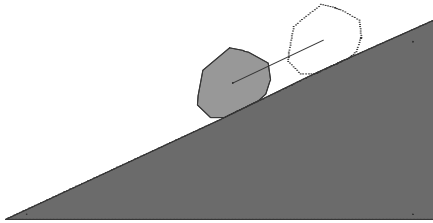


圖 7 . DDA 分析塊體發生滑動之情形
Figure 7 . Simulation of sliding block using DDA.

數值模擬

1. 幾何模型之建立

為探討 DDA 進行土石流分析之適用性，本文考慮河床上一崩積礫石土層為模擬分析之模型，由於礫石型土石流中含有大量的礫石，加以土石流發生區的範圍廣大且交通不易，根據 Johnson 等人(1971)發現土石材料在源頭部及堆積部之粒徑分布曲線相似，認為土石流在傳輸的過程中，粒徑分佈的改變是很小的(間接取自莊鴻榜，2001)，因此本研究以觀察法觀測估算現地礫石型土石流堆積部的粒徑分布，繪製一平均厚度 0.8m，平均長度 4m 之礫石堆積土體如圖 8 所示。

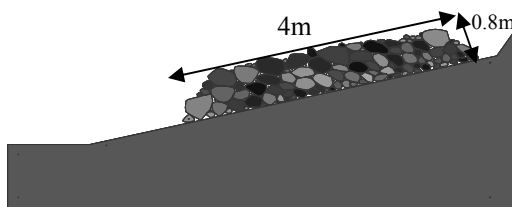


圖 8 . 數值模擬之幾何圖形
Figure 8 . Geometry of application example.

2. 土石物理參數之設定

本文之土石材料參數是以礫石型土石流之土石材料參數作為模擬背景，再配合塊體強度特性做為本研究模擬案例之參數值，茲將各項參數考量敘述如下：

(1) 單位重 γ (Unit weight)

參考丁伯欣(1999)對豐丘地區明坑採樣的結果(間接取自陳榮河，2001)，本研究採用現地密度為 $1.83 t/m^3$ ，單位重 $\gamma=17.93 kN/m^2$ 。

(2) 柏松比 ν (Poisson's ratio)

鄭富書(1994)收集台灣地區岩石試驗約 2100筆，進行工程性質歸納得到台灣地區岩石之柏松比大致在0.2~0.5之間，本文採用柏松比(ν)為0.3進行分析。(間接取自謝翠萍，2005)

(3) 不連續接觸面摩擦角 ϕ

陳漢平(2003)透過實驗發現礫石型土石流發生之摩擦角約介於30°~40°間，但由於模型尺寸效應之考慮與繪製幾何模型之限制，故將小粒徑的細粒料加以忽略，故本研究之範例分析取摩擦角 ϕ 為20°、25°、30°、35°及40°五種條件分析。

(4) 凝聚力

根據林炳森(1993)使用各級配試體之凝聚力值均很小，故其假設於試體破壞前，其凝聚力值趨近於零，且由於本研究所繪製之礫石堆積土體，細粒料含量少，凝聚力的影響亦甚小，故本研究採用凝聚力為零。

(5) 水流流速

由Manning應用公式：

$$U = (1/n) R^{2/3} (S)^{1/2} \quad (21)$$

n：粗糙係數（≈0.1）

R：土石流粒徑（≈水深：h）

S：溪床坡度

（參考網站：

http://open.nat.gov.tw/OpenFront/report/show_file.jsp?sysId=C09403244&fileNo=006)

根據式(21)計算出本文滿水位(0.8m)時所使用之流速如表 9 所示。

表 9 . 本文所使用之流速一覽表
Table 9 . Velocity adopted in the analysis.

坡度 (°)	10	15	20	25	30
流速 (m/s)	3.59	4.38	5.04	5.60	6.09

以上將使用於模擬分析之參數整理如表10。

表 10 . 不連續變形分析模擬材料參數輸入值
Table 10 . Parameters used in the analysis.

塊 體	單位重	17.93 kN / m ³
	變形模數	10000 kN / m ²
	柏松比	0.3
不連續接觸面	摩擦角	20°~40°
	凝聚力	0 kN / m ²
	張力強度	0 kN / m ²

3. 土石流之數值模擬

影響土石流發生的因素甚多，根據前人研究顯示土石材料、坡度與水分為最主要之

影響因子。本文在模擬土石流過程中所探討之相關分析變數包括：(1)土石流發生之坡度，取坡度 $\alpha=10^\circ$ 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 等五種不同坡度；(2) 土石流發生之摩擦角，取所探討發生礫石型土石流之摩擦角並經由折減後之範圍取 $\varphi=20^\circ$ 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 等五種不同之摩擦角；(3) 土石流發生之水位(流量)，考量水位(h)為0m、0.2m、0.4m、0.6m、0.8m 等五種不同之水位。以上分析變數綜合整理列於表 11。

表 11 . 分析變數表

Table 11 . Factors considered in the analysis.

分析變數	變化範圍
平均坡度(°)	10、15、20、25、30
摩擦角(°)	20、25、30、35、40
平均水位高(m)	0、0.2、0.4、0.6、0.8

結果與討論

1. 坡度對土石移動之影響

(1) 水位與堆積面齊平，並考慮其受流速之影響，所用之流速採用表 9 所計算出之流速，不連續接觸面之摩擦角分別考慮 $\varphi=20^\circ$ 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 五種不同之狀態下坡度對土石移動之影響。

分析結果顯示，所模擬之土體在各種不同參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位移量之分析所得結果，如圖 9 所示，現當坡度越大，土體的位移量越大，越易產生滑動，整體來看在改變摩擦角的狀態下，不同坡度位移改變量不大，因此可看出摩擦角之影響小於坡度。

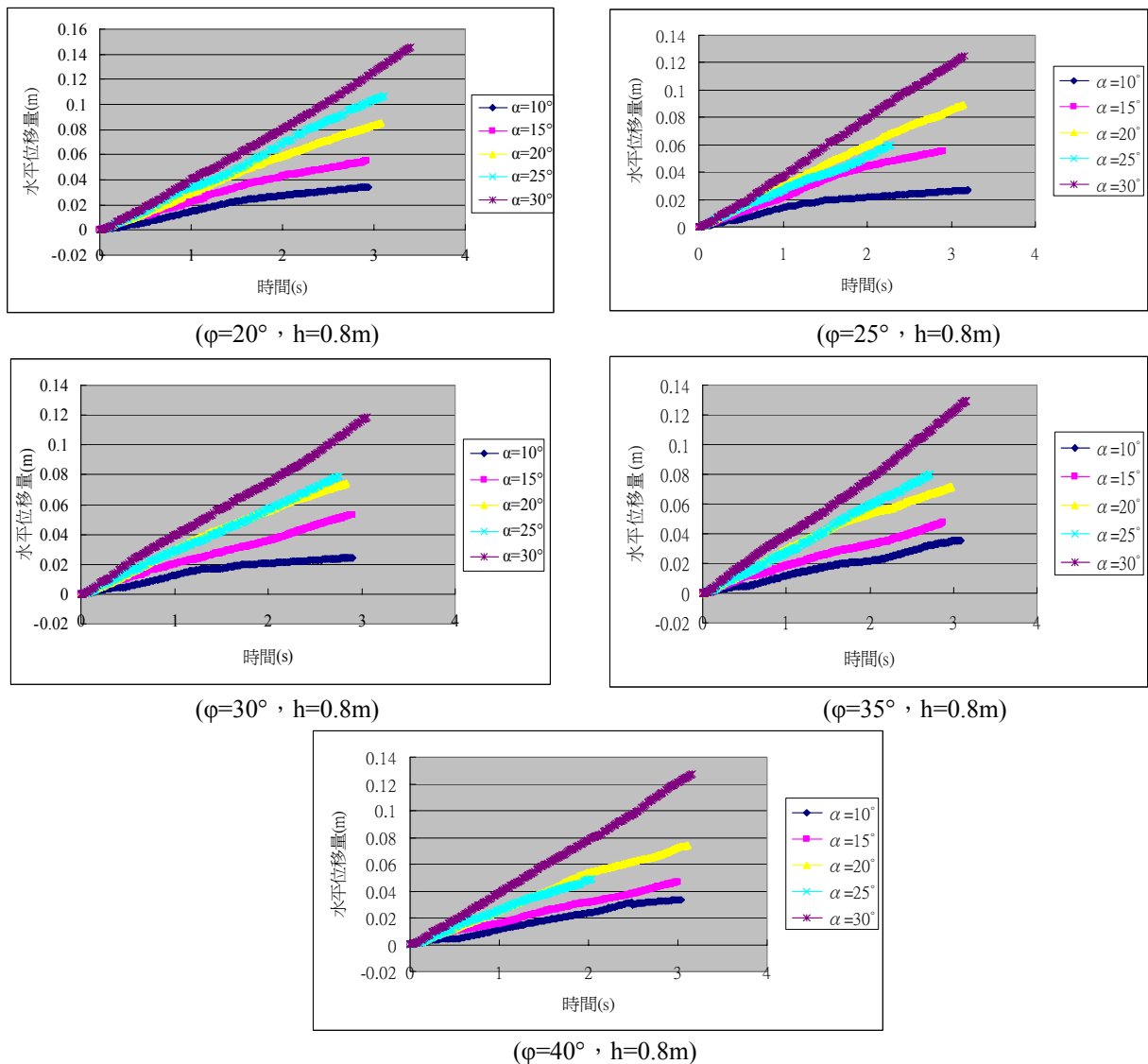


圖 9 . 不同摩擦角與坡度條件下對於土體滑動之影響

Figure 9 . Influences of different slope angles and friction angles on the movement of debris flow.

(2) 水位位於堆積面下，由於地下水的流速屬滲流流速，其值較小，故本研究將忽略滲流流速的影響，並分別考慮水位為 0m、0.2m、0.4m、0.6m 四種狀態於不連續面摩擦角 $\phi=30^\circ$ 下，坡度對土石移動之影響。

分析結果顯示，所模擬之土體在各種不同參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位

移量之分析所得結果，如圖 10 所示，顯示當坡角越大，土體的位移量越大，土體越易產生滑動，整體來看在改變摩擦角的狀態下，不同坡度位移改變量不大，因此可看出坡度之影響大於摩擦角。

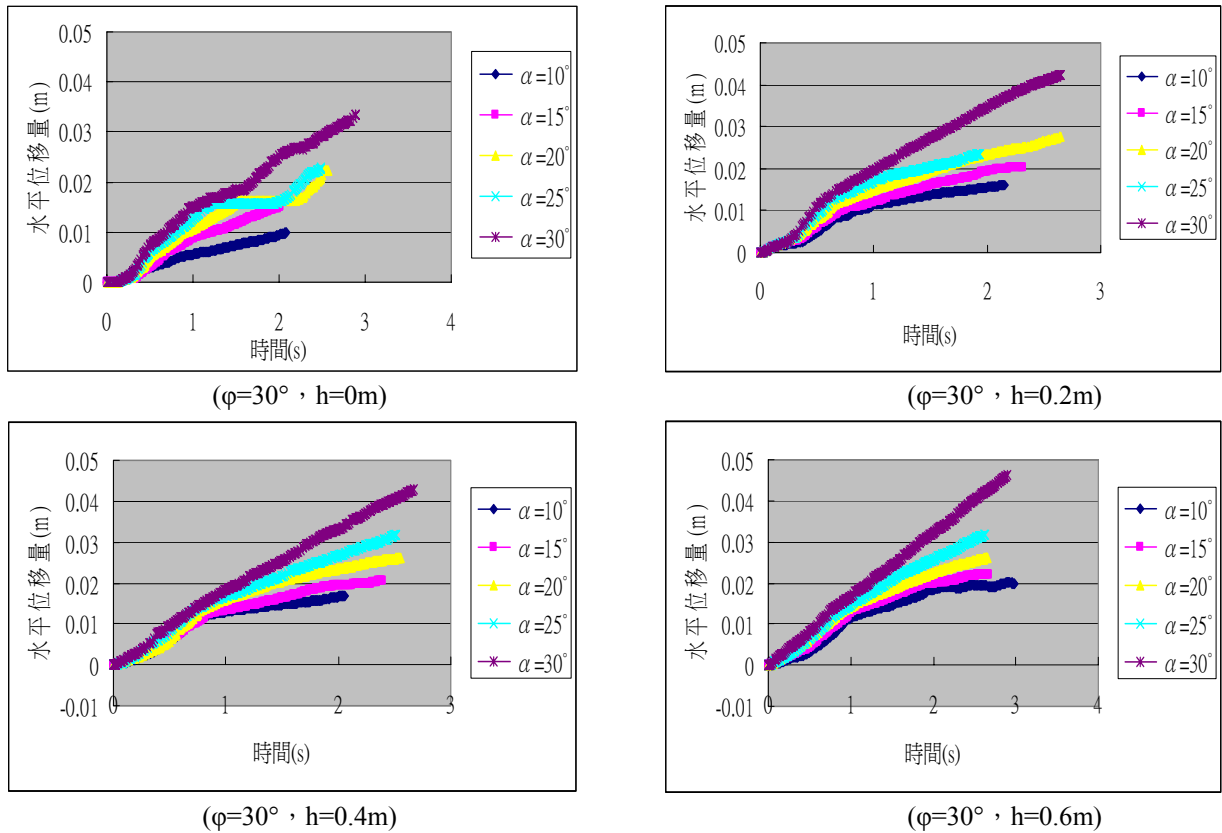


圖 10 . 不同邊坡高與坡度條件下對於土體滑動之影響

Figure 10 . Influences of different slope angles and heights on the movement of debris flow.

2. 不連續接觸面摩擦角對土石移動之影響

2.1. 水位與堆積面齊平，並考慮其受流速之影響，所用之流速採用表 9 所計算出之流速，分別考慮坡度 $\alpha=10^\circ$ 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 五種不同狀態下，摩擦角對土石移動之影響。

分析結果顯示，所模擬之土體在各種不同參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位移量之分析所得結果，如圖 11 所示，發現位移量隨摩擦角之降低而增加，整體看來，在摩擦角改變的狀態下位移量變化不大，而當坡度改變時造成位移量有明顯的變化，顯示出坡度的影響大於摩擦角之影響。

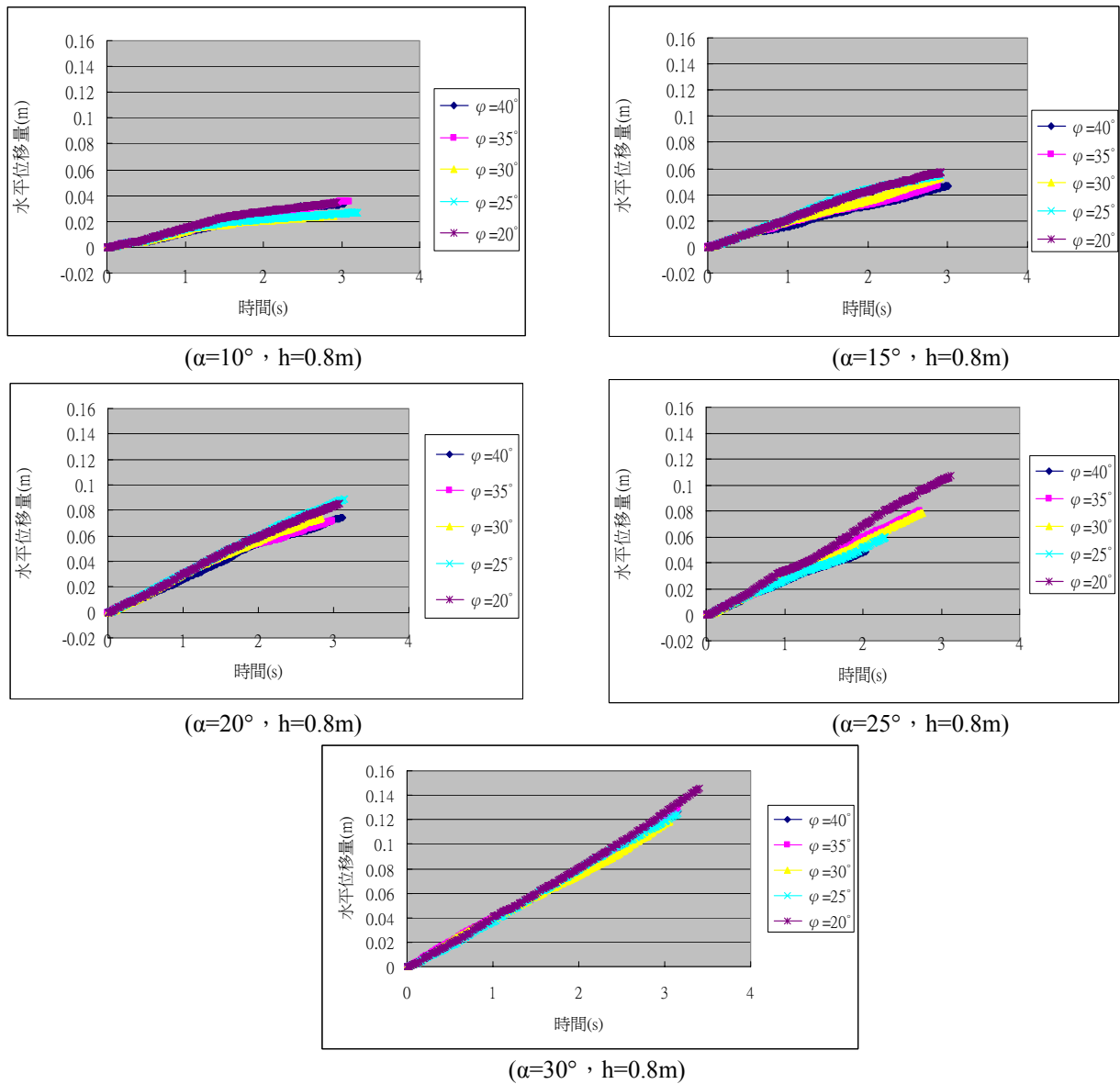


圖 11 .不同條件下摩擦角對於土體滑動之影響

Figure 11 . Influences of different slope and friction angles on the movement of debris flow.

2.2. 水位位於堆積面下，忽略滲流流速的影響，並分別考慮水位為 0m、0.2m、0.4m、0.6m 四種狀態於坡度 $\alpha=30^\circ$ 下，摩擦角對土石移動之影響。

分析結果顯示，所模擬之土體在各種不同參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位移量之分析所得結果，如圖 12 所示，仍可觀察出位移量隨摩擦角之降低而增加，整體看

來，當摩擦角改變時位移量變化不大，而當坡度改變時造成位移量有明顯的變化，再次

顯示出坡度的影響大於摩擦角之影響。

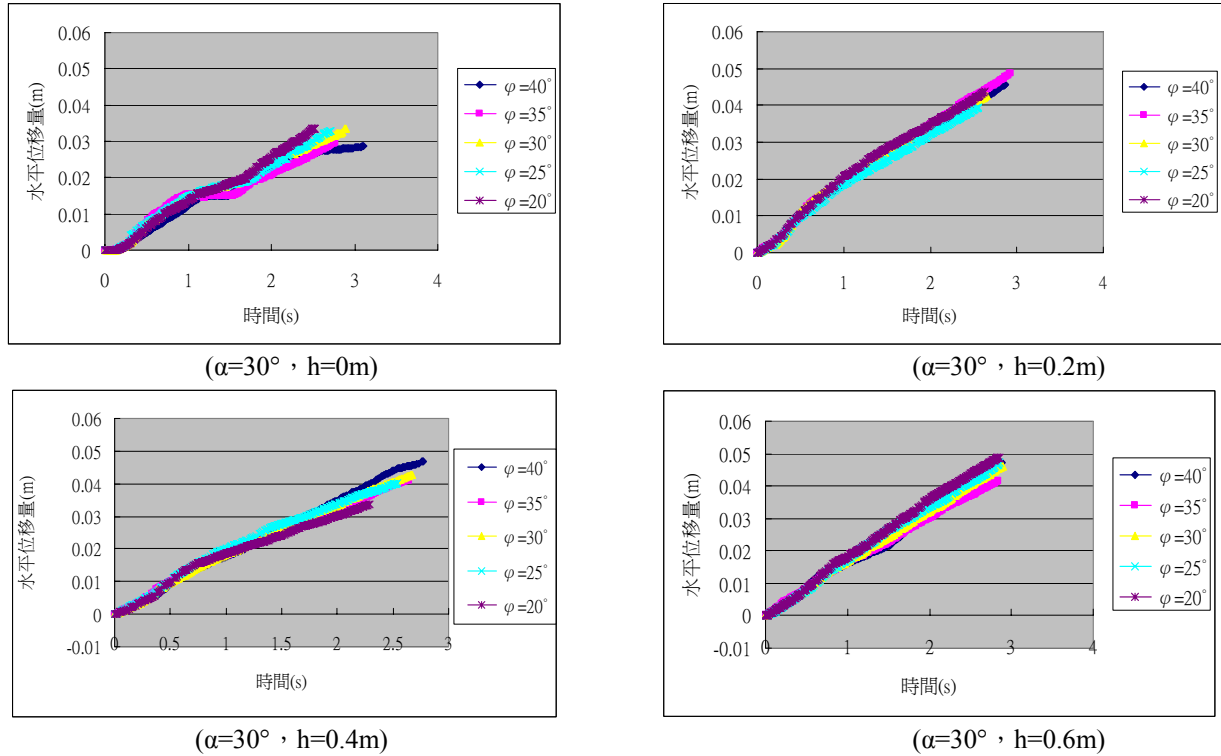


圖 12. 不同條件下摩擦角對於土體滑動之影響

Figure 12 . Influences of different slope heights and friction angles on the movement of debris flow.

2.3. 水位高對土石移動之影響

- (1) 水位位於堆積面下，忽略滲流流速的影響，在坡度 α 為 20° 的情形下，分別考慮摩擦角 $\phi=20^\circ$ 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 五種不同狀態下，水位對土石移動之影響。

分析結果顯示，所模擬之土體在各種不同

參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位移量之分析所得結果，如圖 13 所示，大致上可看出水位愈高，位移量愈大之趨勢，整體看來在改變摩擦角的狀態下，位移量的變化不大，可觀察出摩擦角之影響較小。

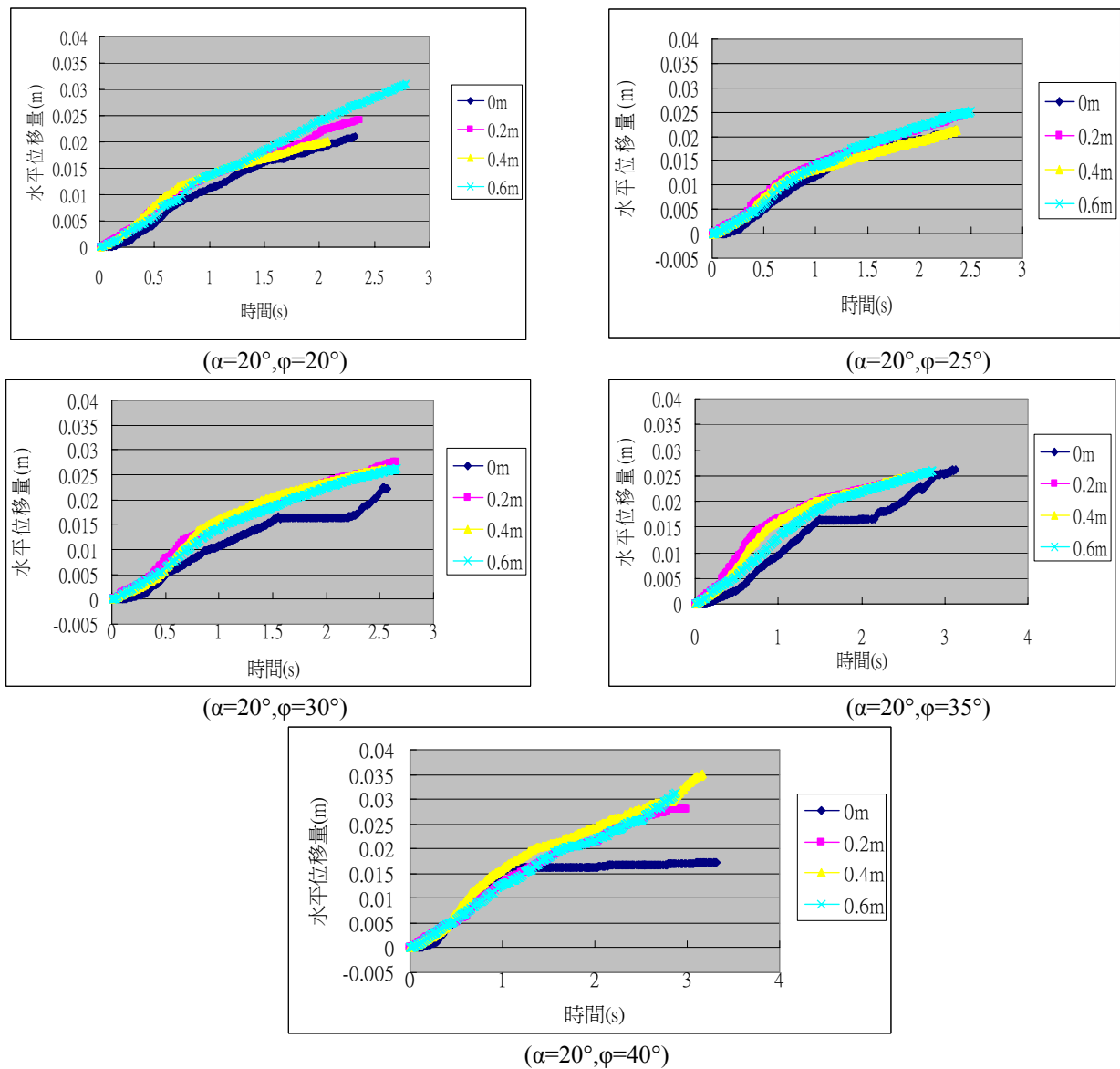


圖 13 .不同條件下水位對於土體滑動之影響

Figure 13 . Influences of different water depths and friction angles on the movement of debris flow.

(2) 水位位於堆積面下，忽略滲流流速的影響，在摩擦角 ϕ 為 30° 的情形下，分別考慮坡度 $\alpha=10^\circ$ 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 五種不同狀態下，水位對土石移動之影響。

分析結果顯示，在各種不同參數條件下，土體塊石先端觀測點水平位移量所得結果，如圖 14 所示，大致上可觀察出位移量隨水位之增加而增加之趨勢，整體看來在改變坡度的狀態下，位移量有明顯的增

加，可觀察出坡度的影響大於水位的影響。

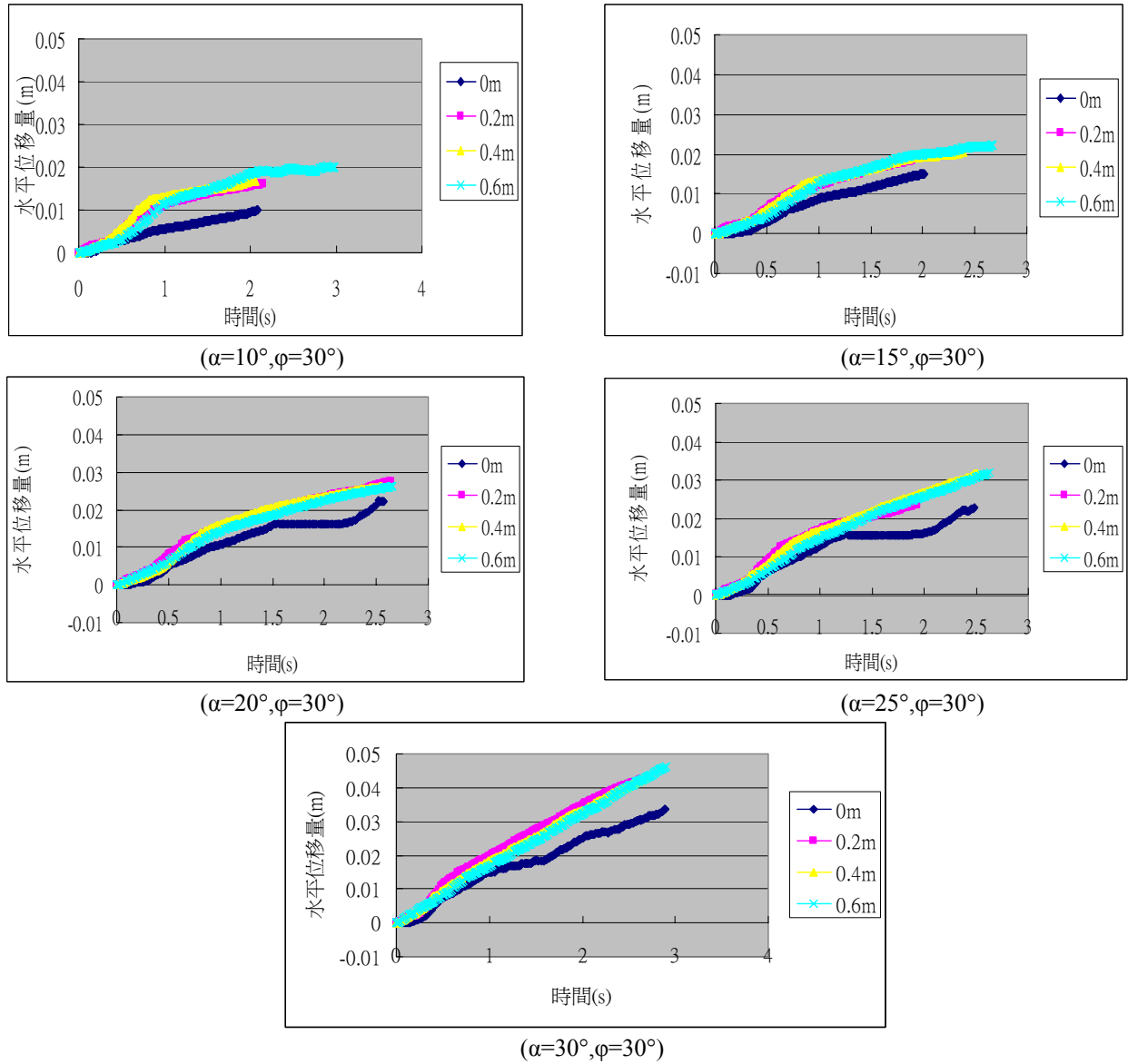


圖 14 . 不同條件下水位對於土體滑動之影響

Figure 14 . Influences of different water depths and slope angles on the movement of debris flow.

結論與建議

1. 結論

1.1 . DDA 可模擬土石細部運動狀態，藉此可模擬土石流土體內，個別顆粒之運動狀態，

及土石間互制的情形。

1.2.DDA 模擬之結果可觀察出位移量與坡度、水位成正比，而與摩擦角成反比，與現地情況相符。

1.3.本文利用 DDA 模擬土體內細部狀態，藉此模擬影響土石流重要因子之影響程度，可歸納出各因子之影響力為坡度大於水位，水位又大於摩擦角。

2.建議

經由本文探討之結果顯示，DDA 在土石流運動之應用上有其相當的適用性及發展潛力，日後若能在理論及程式上加以修改補強，應可使分析結果更接近現地之狀況，在使用上也更為方便，故對未來發展方向提出以下幾點建議：

2.1.水為激發土石流的重要因子，本研究對於水與土石顆粒之互制機制係以非偶合分析方式加以考慮，即堆積土體下之水所導致之孔隙水壓力及流體流動時之拖曳力以荷重型態作用於土石顆粒邊界進行分析，同時並未考量降雨情形對於土石流運動之影響，未來可進行水與土石顆粒之偶合力學行為研究，以進一步掌握土石流之行爲。

2.2.本文僅就數值的部分配合文獻資料進行土石流之研究，未來應結合現地調查與實驗，加以深入分析評估。

2.3.由於以 DDA 進行土石流分析時之幾何模型建立十分繁瑣複雜，未來可進一步考量改善 DDA 程式之分析介面，如增加類似 CAD 之互動式人機介面，將有助於分析複雜問題時之便利性。

參考文獻

1. 林炳森、馮賜陽、李俊明(1993),「礫石層土石流發生特性之研究」,中華水土保持學報 24(1):55~64
2. 陳榮河(2001),「土石流災害防治之研究(Ⅲ):以南投示範區陳有蘭溪為對象-子計畫:土石流發生機制之研究(三)」,行政院國家科學委員會成果報告,NSC 89-2625-Z-002-042
3. 陳漢平(2003),「降雨入滲引致邊坡破壞機制之探討—以土石流源頭為對象」,碩士論文,台灣大學土木工程學系
4. 莊鴻榜(2001),「不飽和礫石土剪力強度之研究」,碩士論文,國立台灣大學土木工程學系
5. 詹錢登(2000),「土石流概論」,科技圖書股份有限公司
6. 謝翠萍(2005),「材料空間變異性對軟岩邊坡穩定之影響」,碩士論文,朝陽科技大學營建工程系
7. 蕭沛佳、顧承宇、謝平城(2005),「土石流運動數值模式之建立---結合水力機制與不連續變形分析法」,水土保持學報,第三十七卷,第四期,第 341-348 頁。
8. Jing, L., Y. Ma and Z. Fang (2001), "Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences., Vol. 38, pp.343-355.

9. Millar, R.G., and D'Aoust, S.G.(1998), "Hydraulic stability of in-stream habitat structures" Proceedings, Wetlands Engineering and River Restoration Conference, ASCE, Denver, CO, March 1998; 235-241.
10. O'brien, J. S., Julien, P. J., Fullerton, W. T. (1993), "Two-Dimensional water flood and mudflow simulation, " Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 244-261.
11. Shi, G.H. (1989), "Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis," Ph.D. Thesis.
12. Shi, G.H. and R.E. Goodman (1984), "Discontinuous Deformation Analysis,"
13. Proceedings of the 25th U.S. Symposium
14. on Rock Mechanics, pp.269-277.
15. Yang, C.T.(1996),"Sediment transport theory and practice", McGraw-Hill, pp.19-48.

95 年 10 月 01 日 收稿

95 年 10 月 30 日 修改

95 年 11 月 08 日 接受