

# 應用分離元素法探討紅葉坪之古地滑及集集地震地滑事件

張光宗<sup>(1)</sup> 林明慧<sup>(2)</sup> 利寧真<sup>(3)</sup>

## 摘要

位於南投縣中寮鄉的紅葉坪於集集地震時產生了大面積的地滑情形，前人研究經航照判釋與現地調查等證據得此地為一古崩場地，尚無確切可直接證明造成紅葉坪古地滑之時間及致災因素。本研究根據前人調查結果，利用分離元素分析軟體 PFC2D 模擬地震與暴雨造成紅葉坪古地滑與集集地震使其產生地滑之行爲。並以 Hoek-Brown 破壞準則推估現地岩體強度，做為分析材料參數之依據，比較地震與暴雨狀況下的古地滑堆積，以探討紅葉坪地區的古地滑及集集地震的地滑事件。本研究之分析結果顯示，當材料地質強度指數(GSI)為 65，且其滑動面摩擦係數為 0.45 之情況下，模擬古地滑後其地形與集集地震前之崩積層地形十分相似，可重現事件產生後之地形形貌。

(**關鍵字**：紅葉坪、PFC2D、集集地震、地滑)

## Distinct-Element Modeling of the Ancient and Recent Landslides at Huntsaiping

*Kuang-Tsung Chang*

Assistant Professor, Department of Soil and Water Conservation

National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C.

*Ming-Hui Lin*

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation

National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C.

*Ning-Chen Li*

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation

National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. (Corresponding Author)

## ABSTRACT

The DEM software PFC2D was used to simulate the ancient landslides caused by earthquake and rainfall as well as the subsequent 1999 landslide. A large landslide was caused by the Chichi earthquake at Hongtsaiping, Chungliiao, Nantou county. Through aerial photographs and field surveys an large ancient landslide was speculated; however, when and how this ancient landslide happened

---

<sup>(1)</sup> 國立中興大學水土保持學系助理教授

<sup>(2)</sup> 國立中興大學水土保持學系研究生

<sup>(3)</sup> 國立中興大學水土保持學系研究生，通訊作者 e-mail: linijen@gmail.com。

have not been fully understood. The Hoek-Brown failure criterion estimate the strength of in-situ rock mass, which was used to calibrate the microparameters of PFC2D. The deposition of the ancient landslide caused by earthquake and rainfall was compared to the profile of the colluvium.

The results showed that with the sliding surface friction coefficient of 0.45 and geological strength index (GSI) of 65, the simulated landform after the ancient landslide shared high similarity with the colluvium landform before the Chichi earthquake. Therefore, it is possible to reproduce the two landslide events at Hungtsaiping area.

(Keywords : Hungtsaiping, PFC2D, Chichi earthquake, landslide)

## 前言

1999年9月21日集集大地震重創台灣，造成了台灣許多山區數千處大小不一之山崩，其中九份二山和草嶺兩處大崩山為崩塌現象較為明顯，且容易觀察研究記錄，然而部分地區之破壞形式為深層滑動，地表上經常不易觀察，紅茶坪地區即為此特殊例子。

由許多的研究調查結果顯示，紅茶坪地區在集集地震後僅滑動體發生下滑現象，滑動體本身受到較少的擾動並保持原先之地貌，因此該崩塌現象除了地表某些特徵可提供辨別外，於現地調查或遙測影像判斷時皆不明顯，且在集集地震前並無設立適當監測儀器，因此於災害發生後其確切之滑動範圍難以估計，並且為了能夠建立該地區之地滑發生機制，於集集地震後至今已有多位研究者投入相關研究。李錦發等(2004)根據現地調查後，除了發現紅茶坪地區有地表張力裂縫、地面落差、滑動崖等多項地滑證據，更進一步利用數值航測判釋，結合地理資訊系統(GIS)等方式，發現局部地區最大水平位移量達 32 公尺，大部分的位移方向多呈西北與北北西方向，滑動範圍寬約 800 公尺，長約 1500 公尺。

集集地震後，根據現地調查，發現到紅茶坪地滑區具有多項地滑證據，包括地表張力裂隙、地面落差、滑動崖、地面擠壓以及趾部擠壓崩塌等，其它如檳榔樹的傾斜方向等，亦明顯的指出該地區在集集地震後確實有大範圍地表滑動發生。但是因崩動體本身受到較少的擾動並保持原先的地貌，然而僅由航照色調變化判釋，並無法窺其地滑之全貌。因此該崩塌現象除了地表上某些特徵可提供辨別外，滑動塊體的邊界並不易清楚界定。

張家偉(2007)綜合至今前人之研究成果，歸納紅茶坪地滑之特色：

1. 寬約 800 公尺、長約 1500 公尺、深達 80 公尺之滑動量體，然而集集地震時之地表平均位移量僅 24.7 公尺。
2. 集集地震造成之地表位移方向並不一致，而可依其位移方向細分為三區。
3. 為一老崩場地，因此地表覆蓋厚達 80 公尺之崩積層，且其產狀緻密且呈層狀分佈。
4. 在集集地震作用下，崩積層滑動之紅茶坪其破壞摩擦角較同樣位於粗坑背斜之冀部之九份二山為小。

5. 在特殊之地質構造分佈下，使得其地層層面為一曲面，而古地滑與集集地震地滑皆沿此曲面滑動。

一般邊坡穩定分析時，常用的程式如 STABL、PLAXIS 等極限平衡與有限元素分析之軟體，然而極限平衡法無法討論邊坡破壞後之變形行爲。Cundall 於 1971 年提出之分離元素法(Distinct Element Method, DEM)，為一種解決粒狀材料特性或形體不連續的問題而開發之數值方法，適用於分析任何具有不連續面(如多節理之岩體)及顆粒材料(如砂性土壤)之力學行爲。因此，紅菜坪崩積層之大變形與大位移之問題，則可利用分離元素法及其應用軟體來模擬其地滑情形。

Tang(2009)利用分離元素法探討草嶺受震之運動行爲，其所使用之分析軟體為 PFC2D，於邊界以動態方式輸入地震加速度以模擬地震所造成之強地動行爲。其於最大地震加速度時，將邊界之摩擦係數下降，以模擬塊體驅動後，其界面摩擦係數由靜摩擦係數轉換為動摩擦係數之物理現象。此外，並改變顆粒之膠結強度，以探討草嶺受震後其岩體破裂運動之情形。

張家偉(2007)利用分離元素法探討紅菜坪地滑演化，其做法如同 Tang(2009) 於邊界以動態方式輸入地震加速度以模擬地震所造成之強地動行爲。以岩心力學試驗與現地調查，並配合 Hoek-Brown 準則推估紅菜坪現地岩體強度，再將不同之顆粒材料及邊界摩擦係數進行探討古地滑及集集地震地滑。

## 研究材料與方法

本研究以分離元素分析軟體 PFC2D(Particle Flow Code in Two Dimensions, Itasca, 2004)二維數值模式來模擬紅菜坪古地滑與集集地震時之地滑行爲。先藉由蒐集相關的文獻，來建立地滑模型，並依據 Hoek-Brown 準則推估現地岩體強度，以獲得分析時所需之材料參數。

### 2.1 研究區位之簡介

紅菜坪地區位於南投縣中寮鄉樟平溪流域內，距離南投市約 14 公里，其東邊界即為九份二山。地形上為東南側地勢較高，西北側較低，其平均坡度約為 13 度，其地形圖如圖 1 所示。區域內主要水系為永祿溪，其發源於崁斗山(海拔高度 1079 公尺)，而紅菜坪地區為永祿溪之左岸。

### 2.2 分離元素法及 PFC2D 簡介

本研究主要應用分離元素法進行地滑分析，而分離元素法(Distinct 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爲，如礫石。而後 Cundall 與 Strack(1979)開始將分離元素法應用於砂性土壤。Potyondy and Cundall (2004)利用 PFC2D 與 PFC3D，模擬花崗岩之力學行爲，並提出以含鍵結之圓型顆粒模擬岩石之方法，其法後來廣泛應用於與岩石破裂有關之分析。

PFC2D 為美國 Itasca 公司所發展，其是以分離元素法為基礎之一套數值分析軟體。PFC2D 之基本元素為圓球，因此一開始用來模擬顆粒材料之運動行爲。經過程式之改良，目前已發展成可透過鍵結模式(bonding model)將顆粒鍵結來模擬各種材料與形狀之

問題。

當程式開始進行運算時，接觸行為會因顆粒間及邊界條件位置之相對運動而不斷更新，繼而經由力與位移法之組合律模式計算每個接觸區域內的接觸力。而顆粒通常所連結之接觸通常不只一個，顆粒之所有接觸所產生之接觸合力與彎矩會使得顆粒產生新的位移與轉動，且皆依據運動定律不斷改變元素之速度與位置，邊界條件也藉由施予合適之邊界速度而更新，如此循環計算，直到系統達到穩定為止。

PFC2D 內建有接觸勁度、滑移及鍵結三種接觸模式，以模擬不同之問題。其中接觸勁度模式(contact stiffness model)與滑移模式(slip model)主要是用於模擬顆粒間變形與滑動之行為；而鍵結模式(bonding model)則模擬

具有膠結之材料，如岩石、混凝土，其膠結變形與破裂之行為，因 PFC2D 可允許監測鍵結之破裂與形式，因此可利用此模式探討材料之破裂行為。

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)方式表式，即顆粒間的接觸關係以依勁度彈簧代表之，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。

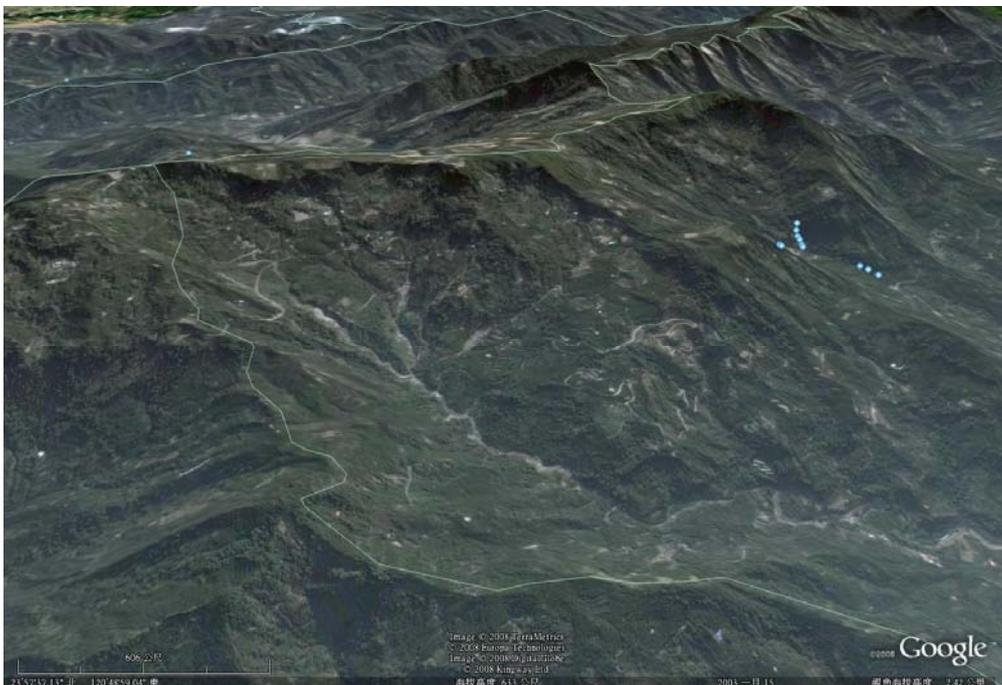


圖 1. 紅菜坪地形圖

Figure 1. Topographic map of Hungtsaiping.

(5)連結強度可存在於顆粒間之接觸點。

(6)所有的顆粒均為圓形。

### 2.3 模型建立概述

分析剖面為參考地調所之調查結果，大致以地滑範圍之中央繪製剖面，其為集集地震前之地形，模型剖面上段之方向為 N81° W，下段方向為 N39° W。由於模型下邊坡處為永祿溪谷，其河床長期冲刷侵蝕下，使得河床下切而形成集集地震前之形貌，而此剖面崩積體量大約為  $49254 \frac{m^3}{m}$ ，因此模擬古地滑時之模型，其滑動體量假設大於集集地震前崩積體量。

根據文獻其滑動面之位置，有學者認為集集地震之滑動面係由古地滑之滑動面與被崩積層覆蓋之古地形所組成，其主要位於崩積層與岩盤之界面，因此再配合中央地質調查所鑽探所得之岩盤位置推估地形面與滑動面，其剖面如圖 3、4 所示。

分析模型決定後，於 PFC2D 中建立模型時，根據 Potyondy and Cundall (2004)的建模步驟進行，以模擬岩石或混凝土等固體材料。步驟如下：

#### 1. 顆粒初始堆積與壓實

此步驟可以兩種方法進行，可讓顆粒在模型容器內自行生成，再調整其大小以使顆粒填充於容器內；亦可以實降之方式堆疊顆粒

#### 2. 施加等向應力

由分離元素法原理可知，當兩元素間有

重疊之情形，其會在元素間產生接觸力，若接觸力過大會使其於解除束制後產生分離之情形。而本研中之模型在顆粒堆疊階段，顆粒因為粒徑放大產生重疊，為避免接觸力過大，因此將逐一調整顆粒之粒徑，使其藉由量測圓所量測之等向應力值降低。

#### 3. 降低虛浮顆粒數

根據 Potyondy and Cundall (2004)之定義，所謂之虛浮點(floating particle)為與周圍顆粒或牆之接觸數小於三個之顆粒。虛浮點由於接觸數不夠，使得其與周圍顆粒無法有效膠結，而使其為模型中強度較弱之處，受力時易由此處開始破裂。若模型虛浮點之數量過多，會降低模型之整體強度。因此必須調整其粒徑，使其與周圍顆粒或牆接觸。

#### 4. 施加平行鍵結

將顆粒間以平行連結(parallel bond)鍵結起來，以模擬岩石材料膠結行為。

#### 5. 移除剛性邊界牆

此步驟與模擬之主題有關。若為單壓試驗之模擬，其除了移除側牆外，亦在上下版上施加牆之移動速率以模擬油壓機；而進行邊坡變形分析，則於移除束制牆後，施加地震力及改變邊界摩擦係數使顆粒產生滑動。

建立模型過程中，為了比較滑動前後地層分佈情形，將顆粒堆疊之不同深度以不同顏色區別，圖 5 所示。

本研究之邊界條件，由所蒐集之現地鑽探調查報告可知，滑動面以上之崩積層由砂岩與頁岩所組成，但分析時為了簡化模型，將坡體假設為單一材料所組成，而紅菜坪之

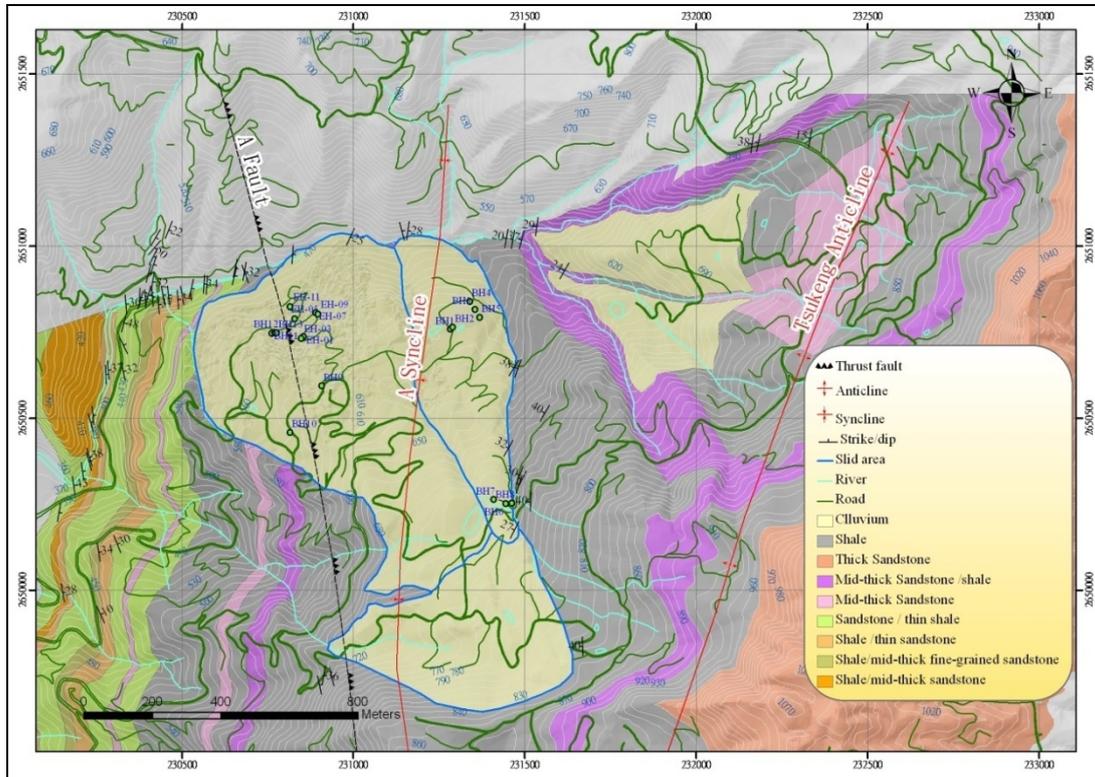


圖 2. 紅茶坪地區地質圖  
Figure 2. Geologic map of Hungtsaiping.

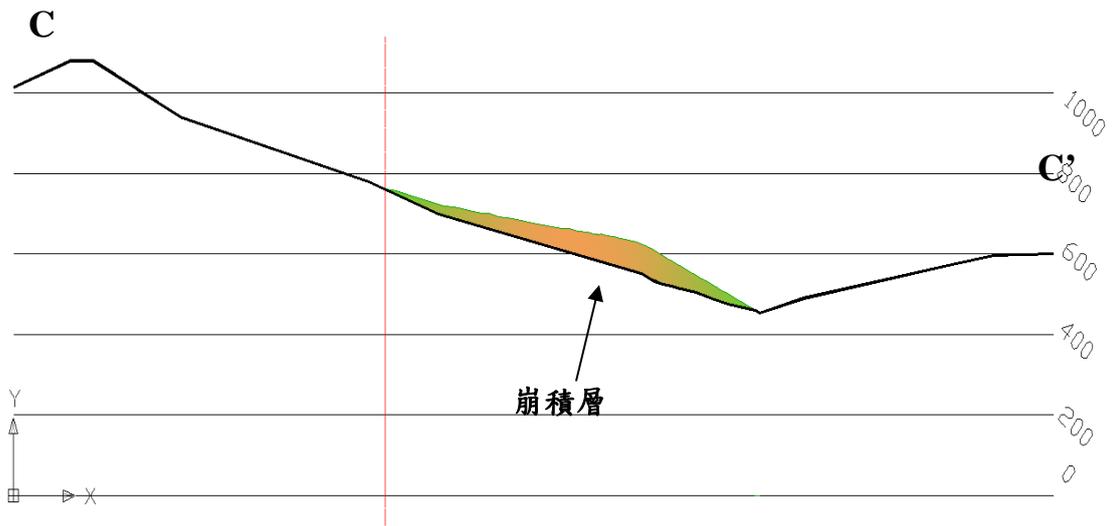


圖 3. 分析剖面  
Figure 3. Analysis of profile.

古地滑前之岩層

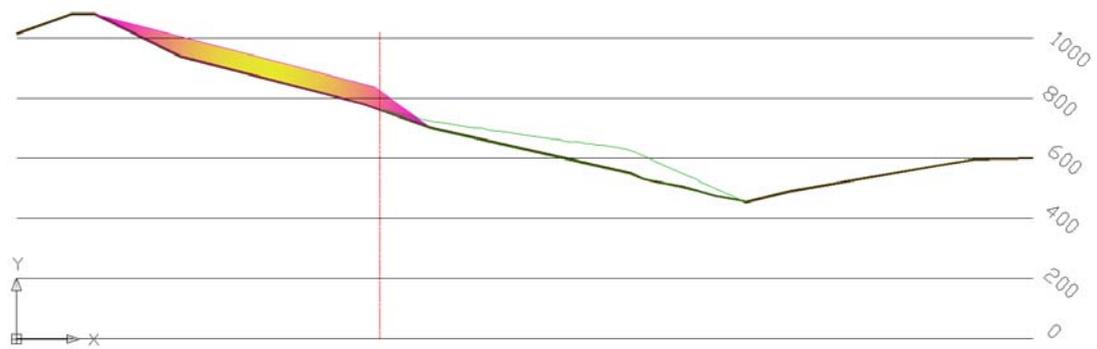


圖 4. 分析模型

Figure 4. The model for analysis

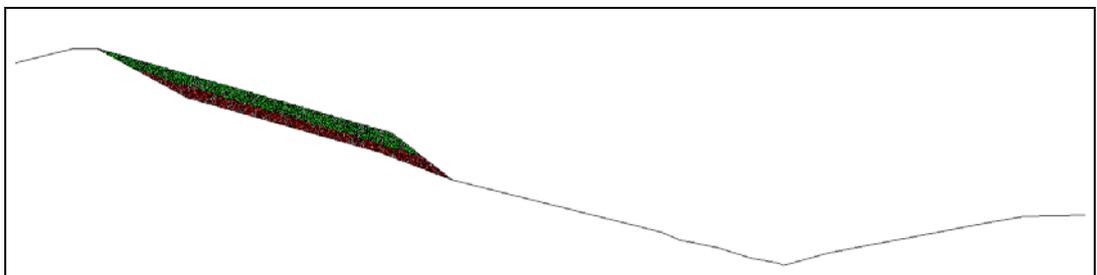


圖 5. PFC2D 建立之模型

Figure 5. Numerical model created by PFC2D

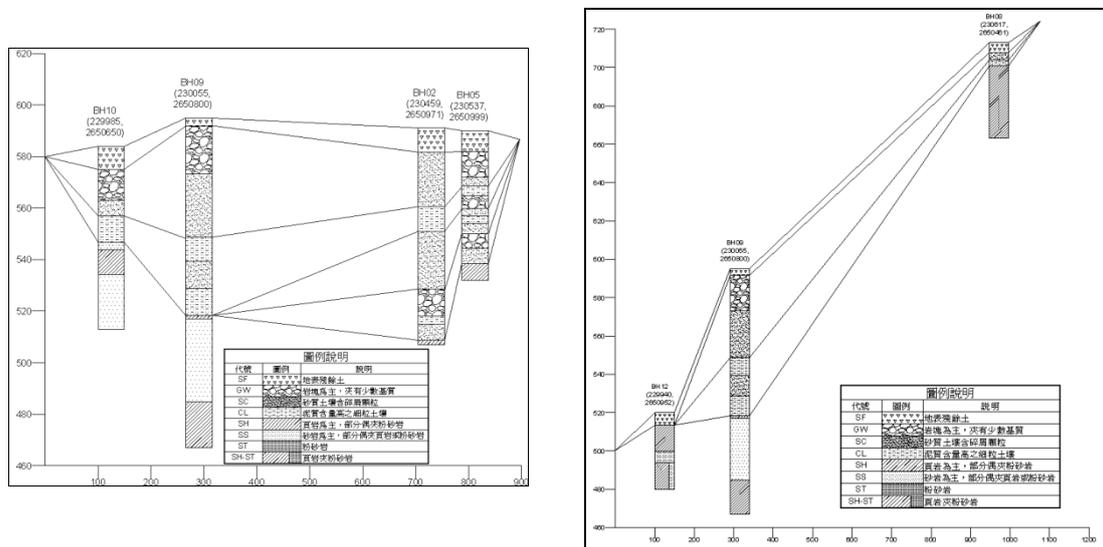


圖 6. 崩積層之地層延伸(張家偉，2007)

Figure 6. The extension of colluvium stratum

表 1. 巨觀與微觀參數轉換表(修改自張家偉，2007)

Table 1. Transformed table of macroscopic and microscopic parameter

微觀參數	公式	備註
顆粒法向勁度	$k_n = 2tE_c$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>t</math> 為顆粒厚度，一般常設為 1</li> <li>• <math>E_c</math> 為顆粒之彈性模數，可設為材料之變形模數</li> </ul>
顆粒切向勁度	$k_s = k_n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 假設法向與切向的相同</li> </ul>
顆粒摩擦係數	$\mu$	$\mu = \tan \phi$
半徑放大因子	$\bar{\lambda} \Rightarrow \bar{R} = \bar{\lambda} \min(R^{[A]}, R^{[B]})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 與鍵結強度有關，常設為 1</li> <li>• <math>R^{[A]}, R^{[B]}</math> 為接觸之兩顆粒粒徑</li> </ul>
鍵結法向勁度	$\bar{k}_n = \frac{\bar{E}_c}{L}$ $L = R^{[A]} + R^{[B]}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{E}_c</math> 為膠結彈性模數，設其與 <math>E_c</math> 相同</li> </ul>
鍵結切向勁度	$\bar{k}_s = \bar{k}_n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 參考 Tang(2009)做法將假設 <math>\bar{k}_n = \bar{k}_s</math></li> </ul>
鍵結強度	$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{\sigma}_c</math> 為膠結單壓強度，設其為材料單壓強度</li> <li>• 假設法向與切向的相同</li> </ul>

表 2. PFC2D 參數

Table 2. PFC2D parameters

顆粒法向勁度 (kn)		顆粒切向勁度 (ks)	
顆粒摩擦係數( $\mu$ )			
平行鍵結	鍵結法向勁度	鍵結切向勁度	
	鍵結法向強度	鍵結切向強度	
阻尼係數 (damping ratio)			

崩積層的分層與延伸，參考張家偉(2007)現地調查及鑽探岩心室內試驗之推論結果(圖 6)，崩積層在深度較淺的大部分為顆粒支持砂岩

質崩積層，隨深度增加而逐漸轉變為基質支持頁岩質崩積層，且再配合紅菜坪地滑地區地質圖(圖 2)，而假設本研究分析之滑塊體材料為砂岩材質組成，滑動面為頁岩材質。

## 2.4 材料參數

本研究之材料參數為根據中央地質調查所(2006)及參考張家偉(2007)之現地調查及室內試驗結果以進行分析假設。

在 PFC2D 中所要輸入之材料參數為顆粒之材料性質，而本研究所模擬之材料為岩石材料，所以必須將岩體之巨觀(macroscopic)力學參數轉換為模擬時所輸入之微觀(microscopic)參數。而對於巨觀與微觀參數之轉換方式，Potyondy and Cundall(2004)提出其建議轉換式，如表 1，且能夠將 Hoek-Brown 破壞準則所推估之岩體強度參數以此轉換式為 PFC2D 模擬所需之微觀參數。並且將所得之微觀參數進行 PFC2D 模擬單壓試驗，求其單壓強度、變形模數和岩體巨觀參數比較，以檢核微觀參數之正確性。其所需之輸入物理性質參數、接觸勁度、摩擦係數及平行鍵結等參數，如表 2。

### 2.4.1 材料粒徑、阻尼係數

模擬之滑塊體的顆粒粒徑，以根據張家偉(2007)所分析研究結果使用粒徑範圍為 1.6~2.4 m，且採用高斯分佈建立顆粒，總顆粒數為 7820 顆。

由於 local damping 會影響顆粒之加速度，其用於求解顆粒之運動行為時，會因加速度折減而使結果不符合實際情形，因此在一般與重力有關之動態模擬時，會將 local damping 設為 0，以符合重力作用之情形。關於阻尼系數，PFC2D 程式中有兩種阻尼，分別為 local damping 與 viscous damping。

然而，在 PFC 中並非直接設定阻尼係數，而是設定其臨界阻尼比(critical damping

ratio)，即為 viscous damping。有關 viscous damping 之決定方式，PFC2D 利用落下試驗模擬，找出臨界阻尼比與顆粒回彈係數之關係(圖 7)。而回彈係數與材料之關係，Ginal(1992)根據現地試驗求不同地質材料之回彈係數(表 3)。由於滑動材料與滑動面皆為岩盤滑動，其阻尼係數依據表 3 及圖 7 而得到法線臨界阻尼比為 0.216，切線臨界阻尼比 0.016。

表 3. 不同材料之回彈係數建議值(摘自 Giani,1992)

Table 3. Ranges of coefficients of restitution(Giani,1992)

邊坡組成材料	法線回彈係數	切線回彈係數
岩盤	0.5	0.95
礫石堆積層	0.35	0.85
岩屑堆積層	0.30	0.70
植生表土層	0.25	0.50

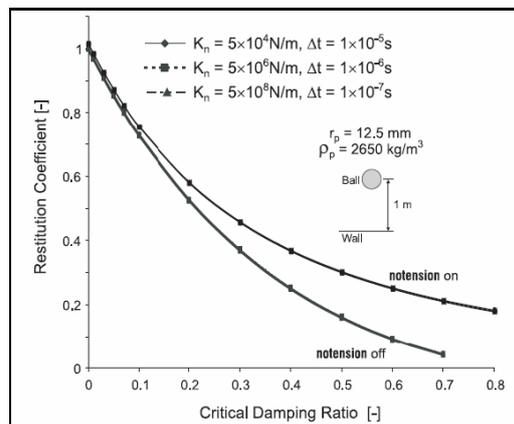


圖 7. 臨界阻尼比與回彈係數之關係(PFC2D Manual, 2004)

Figure 7. Relationship between critical damping ratio and restitution coefficient

### 2.4.2 岩體之巨觀參數

本研究為利用 Hoek-Brown 破壞準則來評估岩體強度與變形性，而由於 Hoek-Brown 破壞準則推估岩體強度時，必須先求的完整岩心之強度，因此採用張家偉(2007)紅茶坪現地岩石各項物理性質及力學試驗結果(表 4)所得之完整岩石力學參數後，依計算轉換後求得現地岩體之強度與變形性(表 5)，且將地質強度指數(GSI)取 45、55 及 65 三種砂岩材料，以做為地滑分析之材料參數之依據。

至於滑動面摩擦係數，由於假設滑動面為頁岩材質，由表 5 可知，其在應用 Hoek-Brown 破壞準則評估後之摩擦角為 20.08~30.63 度，換算摩擦係數為 0.36~0.59。

### 2.4.3 微觀參數之選定

對於岩石材料之巨觀與微觀參數轉換方式，Potyondy and Cundall (2004)以提出其建議轉換式，如表 1，且能夠將 Hoek-Brown 破壞準則所推估之岩體強度參數以此轉換式為 PFC 模擬所需輸入之微觀參數。因此，利用表 1 之轉換方法先求得 PFC 模擬時微觀參數值初始值(表 6)。為了使輸入之微觀參數能夠符合大地材料力學特性符合大地材料力學特性，因此進行與實際大地材料相同之試驗，本研究以模擬單壓試驗來檢核微觀參數之正確性。

表 4. 岩石之單壓試驗結果(張家偉, 2007)

Table 4. Results of unconfined compressive strength test of rock

試體	單壓強度 (MPa)	E (GPa)
砂岩	76.99	9.62
頁岩	42.10	9.47

表 5. 應用 Hoek-Brown 破壞準則評估之岩體強度

Table 5. Rock mass parameters estimated by the Hoek-Brown failure criterion

岩類	參數	Input		參數	Output	
		符號	數值		符號	數值
砂岩	Input	$\sigma_{ci}$ (MPa)	77.00	Output	$\phi'$ (°)	33.78、37.68、41.42
		$m_i$	12.760		$c'$ (MPa)	1.58、1.97、2.53
		GSI	45、55、65		$\sigma_{cm}$ (MPa)	9.64、12.647、16.691
		$E_i$ (GPa)	9.62		$\sigma_{im}$ (MPa)	0.054、0.127、0.3
		D	0.50		$E_m$ (GPa)	1.018、1.946、16.691
頁岩	Input	$\sigma_{ci}$ (MPa)	42.10	Output	$\phi'$ (°)	20.08-30.63
		$m_i$	6.129		$c'$ (MPa)	0.737-1.614
		GSI	35-65		$\sigma_{cm}$ (MPa)	2.722-6.664
		$E_i$ (GPa)	9.47		$\sigma_{im}$ (MPa)	0.026-0.342
		D	0.50		$E_m$ (GPa)	0.541-0.334

單壓模擬之模型，其顆粒間的排列與膠結情形為參考 Potyondy and Cundall (2004)的建議方式，逐步建立模型如圖 8 所示。而在施加軸差應力階段時，則參考張家偉(2007)及李宏輝(2007)之做法，以模型底部與頂部剛性牆同時壓縮試體，以模擬壓力機施壓。模

擬單壓之微觀參數，則是先以相同之初始微觀參數輸入 PFC 模擬單壓試驗，將模擬後之單壓強度和變形模數與巨觀的岩體強度進行比對而調整微觀參數，以取得正確性之微觀參數進而輸入動態的邊坡地滑模擬。模擬結果如圖 9 與表 7、8 所示。

表 6. 初始值(未經由單壓模擬)，砂岩材料

Table 6. Initial value of sandstone (without calibrating through unconfined compressive strength test)

GSI	Parameters of disks			Parameters of parallel bonds			
	normal stiffness (GN/m)	shear stiffness (GN/m)	friction coefficient	normal stiffness (GPa/m)	shear stiffness (GPa/m)	normal strength (MPa)	shear strength (MPa)
45	2.04	2.04	0.67	0.127	0.127	9.64	9.64
55	3.89	3.89	0.77	0.243	0.243	12.65	12.65
65	6.78	6.78	0.88	0.424	0.424	16.69	16.69

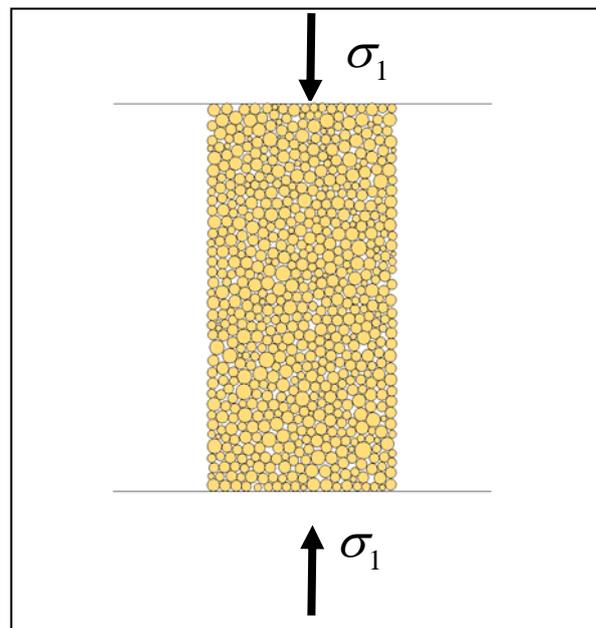


圖 8. 單壓模擬之模型圖

Figure 8. Numerical model of unconfined compressive strength test

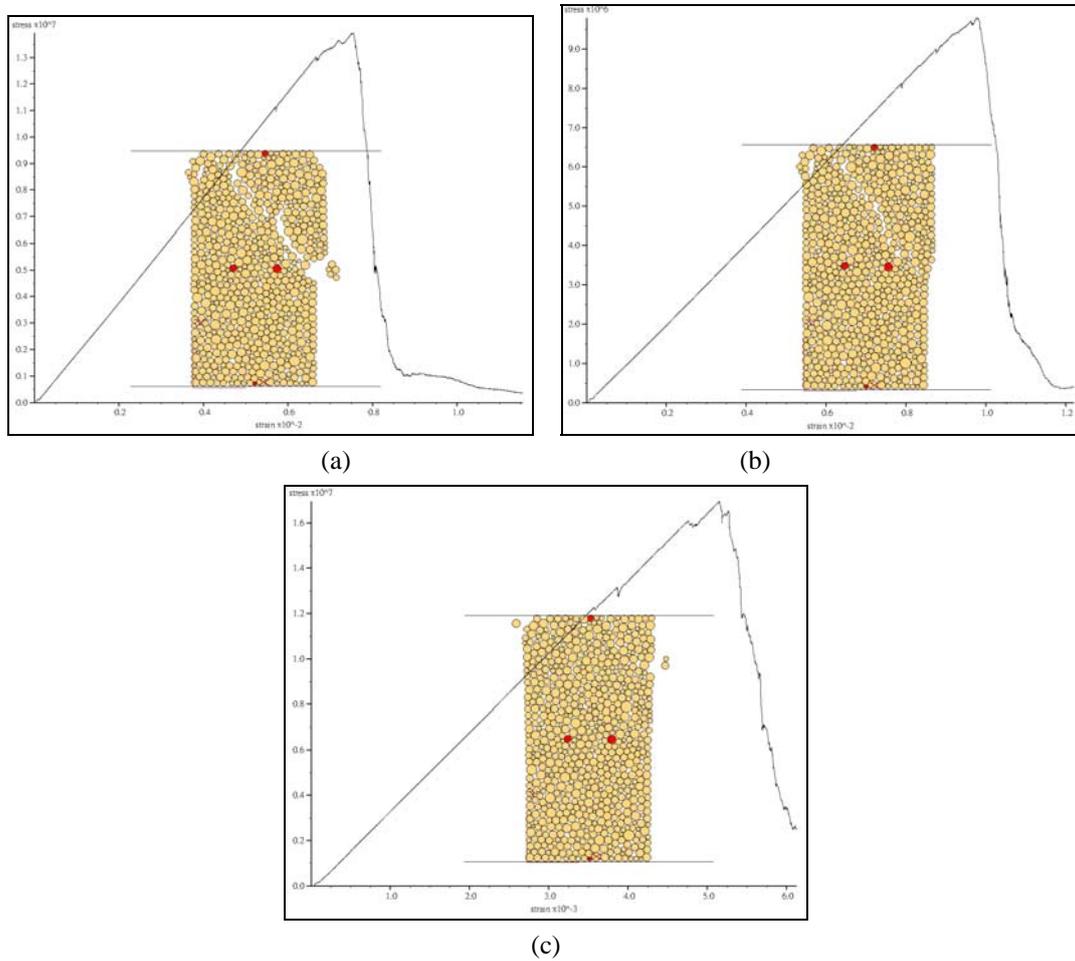


圖 9. PFC2D 模擬單壓結果 (a)GSI=45(b)GSI=55(c)GSI=65

Figure 9. Results of unconfined compressive strength test simulated by PFC2D

表 7. 單壓模擬試驗結果

Table 7. Results of unconfined compressive strength test

GSI	45		55		65	
	Hoek-Brown 岩體強度	PFC 模擬	Hoek-Brown 岩體強度	PFC 模擬	Hoek-Brown 岩體強度	PFC 模擬
單壓強度 (MPa)	9.64	9.8	12.647	13.94	16.691	16.96
變形模數 (GPa)	1.018	1.02	1.946	1.93	3.392	3.41

### 3.1.2 暴雨因素模擬古地滑

由於 PFC2D 無法考慮水壓力，因此本研

究應用無限邊坡理論折減滑動面之摩擦係數以代替受到水壓力之影響。當邊坡為乾燥之砂坡時，其安全係數為：

表 8. 經由單壓模擬調整之微觀參數 (砂岩材料)

Table 8. The microparameters of the sandstone mass is calibrated through uniaxial compressive strength

GSI	Parameters of disks			Parameters of parallel bonds			
	normal stiffness (GN/m)	shear stiffness (GN/m)	friction coefficient	normal stiffness (GPa/m)	shear stiffness (GPa/m)	normal strength (MPa)	shear strength (MPa)
45	2.04	2.04	0.67	0.127	0.127	5.30	5.30
55	3.89	3.89	0.77	0.243	0.243	7.50	7.50
65	6.78	6.78	0.88	0.424	0.424	9.00	9.00

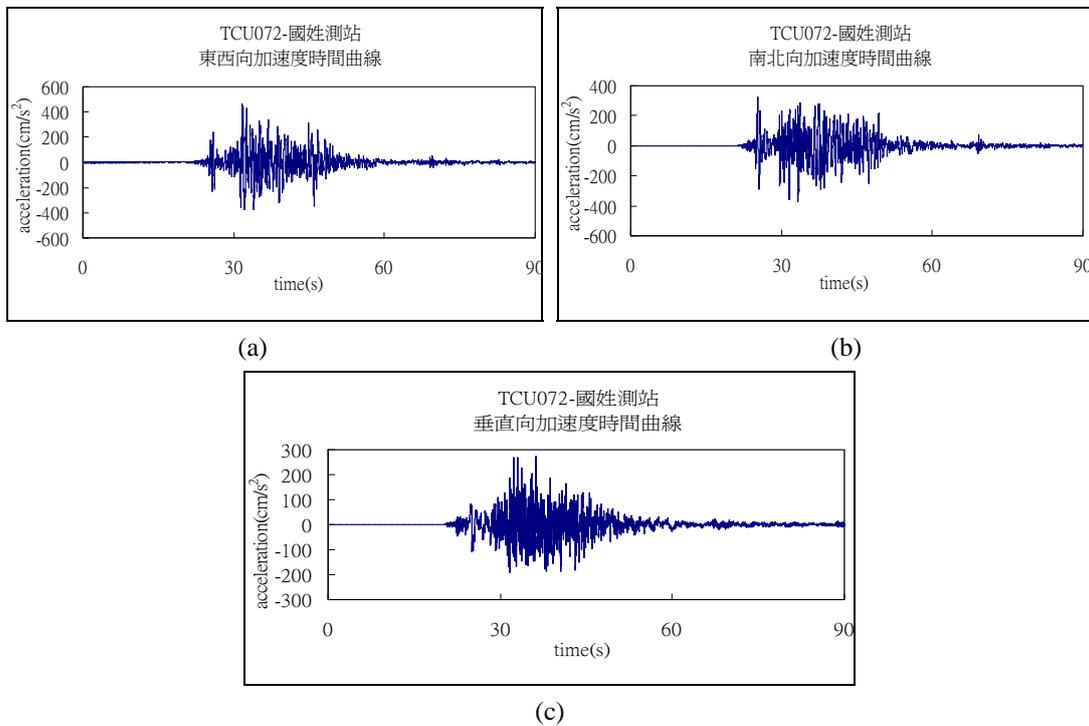


圖 10. 集集地震地表震波

(a)東西向加速度(b)南北向加速度(c)垂直向加速度

Figure 10. Seismic records at TCU072 in the (a)E-W (b)N-S (c)vertical directions

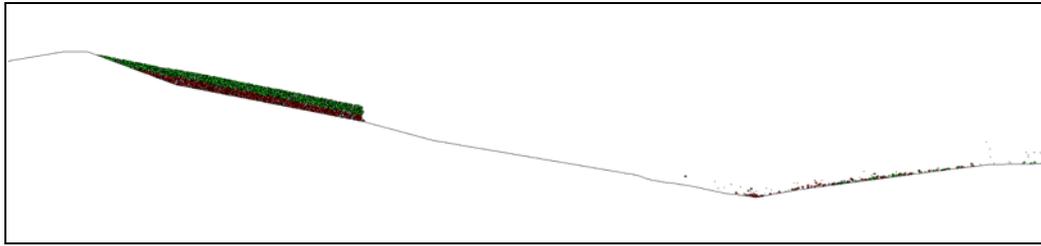
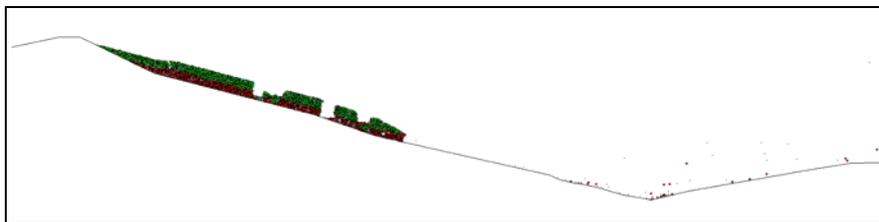
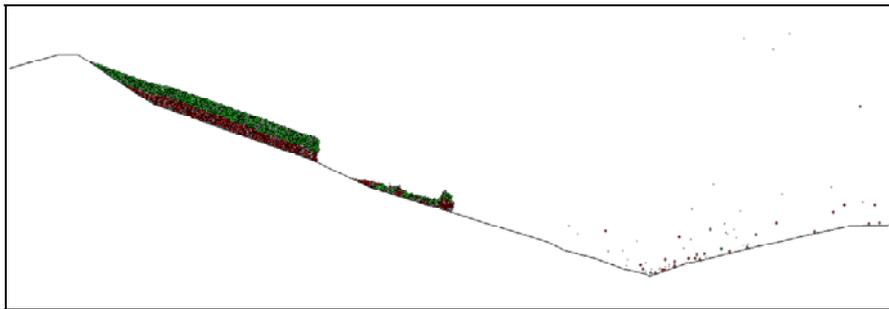


圖 11. 未弱化邊坡之地震模擬古地滑

Figure 11. The ancient profile subjected to earthquake without weakening the sliding surface friction coefficient



(a)



(b)



(c)

圖 12. 以地震機制模擬紅茶坪之崩積層，滑動面摩擦係數=0.45

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

Figure 12. The ancient profile subjected to earthquake, sliding surface friction coefficient=0.45

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

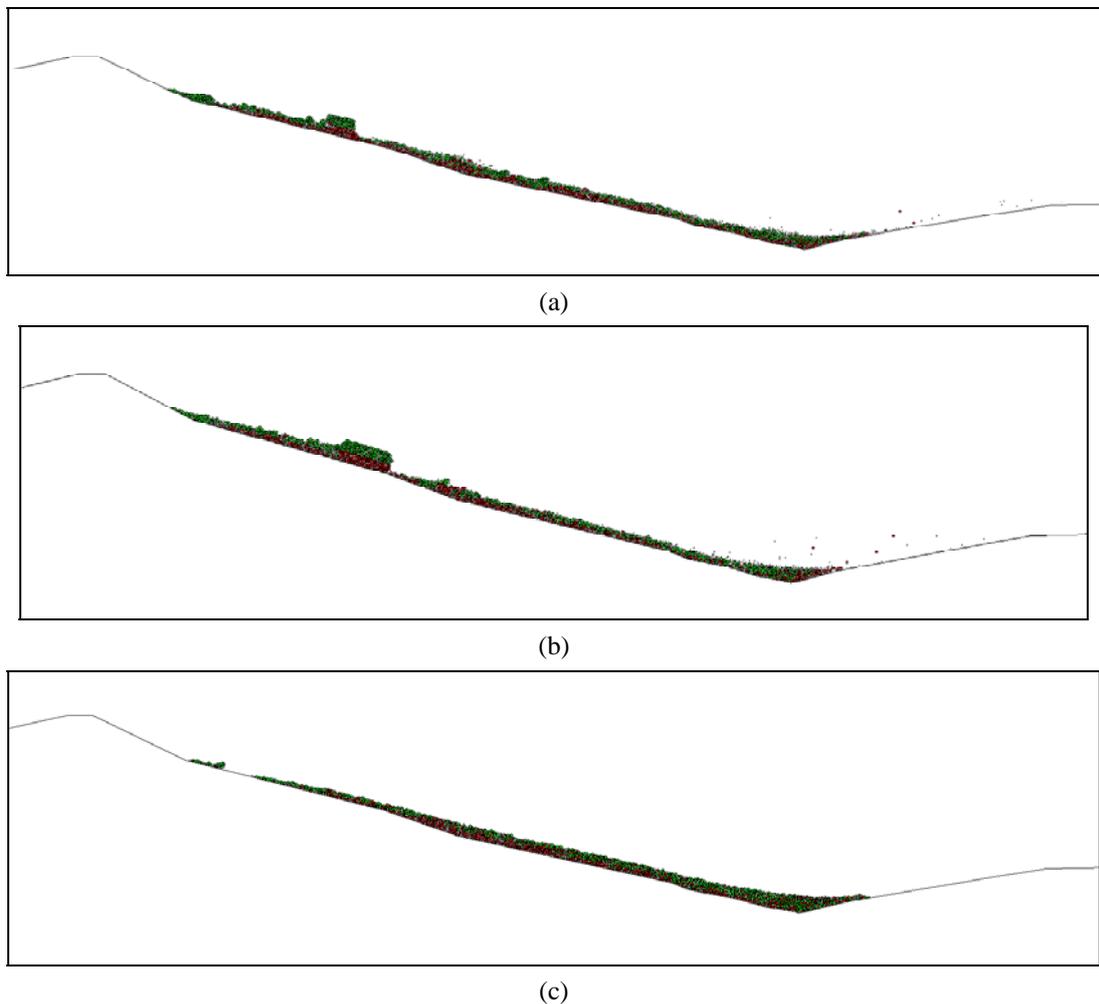


圖 13. 以地震機制模擬紅葉坪之崩積層，滑動面摩擦係數=0.4

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

Figure 13. The ancient profile subjected to earthquake, sliding surface friction coefficient=0.4

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

### 紅葉坪地滑模擬

分別

紅葉坪地區之古地滑事件的部分尚未找到明確的證據說明其發生時間和致災因素，雖地調所(2006)推論古地滑可能發生於 1916 年之南投地震，然而由於目前尚無直接之證據確實之時間與因素，因此，本研究在模擬古地滑事件時，假設兩種可能之致災因素，

為地震力及暴雨機制來進行模擬。而在古地滑之致災因素不明確之下，對於古地滑模擬之結果著重於發生地滑後滑塊體之運動情形及最後之堆積，以分別探討兩種因素對於崩積層分佈之情形。

### 3.1 古地滑模擬

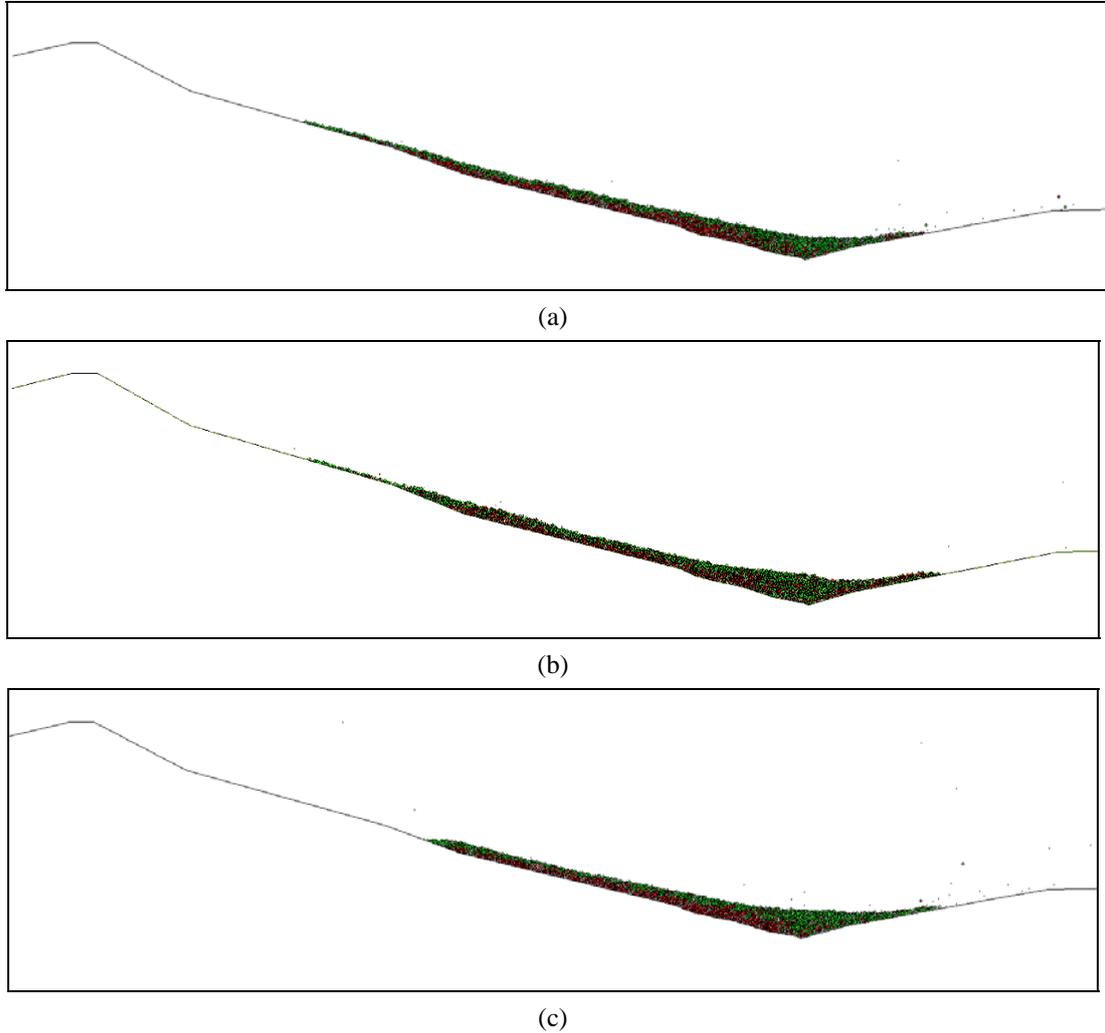


圖 14. 以暴雨機制模擬紅菜坪之崩積層，滑動面摩擦係數=0.45

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

Figure 14. The ancient profile subjected to heavy rainfall, sliding surface friction coefficient=0.45

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

### 3.1.1 地震因素模擬古地滑

由於古地滑致災因素的不明確，在假設地震力為造成因之分析時，利用有確實地滑現象之集集地震之紀錄資料進行模擬。地震之模擬方法，則採用 Tang (2009)以 PFC 模擬集集地震造成草嶺地滑之振動邊界方式，以

進行地震模擬。

本研究之集集地震地表加速度資料，來源為台灣中央氣象局國姓國小地震觀測站 TCU072 所量測之加速度歷時進行分析。加速度歷時資料每 0.005 秒記錄一筆，資料長度共 90 秒，將由測站所得到的震波共有三方向，

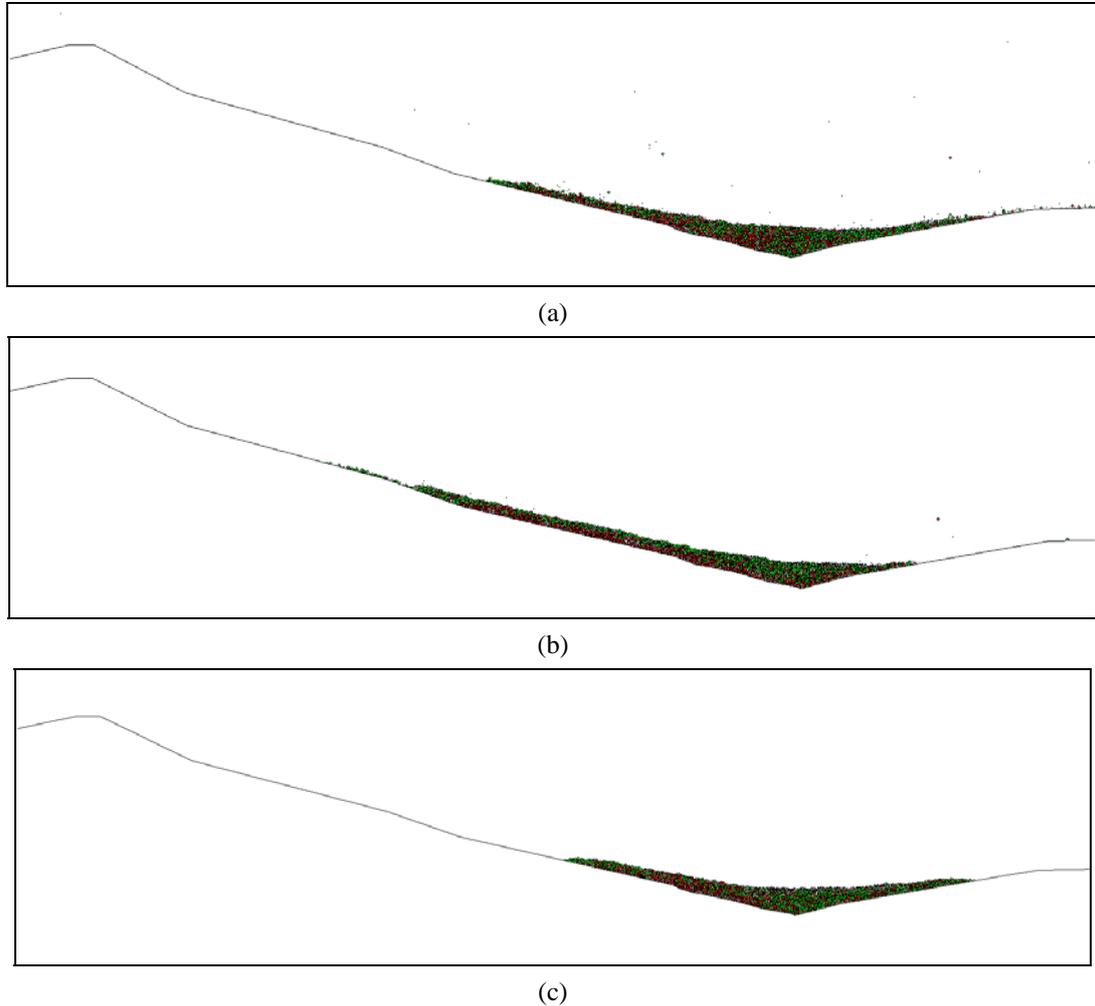


圖 15. 以暴雨機制模擬紅葉坪之崩積層，滑動面摩擦係數=0.4

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

Figure 15. The ancient profile subjected to heavy rainfall, sliding surface friction coefficient=0.4

(a) GSI=45 (b) GSI=55 (c) GSI=65

分別為東西向、南北向以及垂直向(圖 10)皆輸入至 PFC2D 模型。在模擬暴雨機制時，本研究分別以 0.45 及 0.4 為滑動面之摩擦係數，而在產生暴雨時將其滑動面摩擦係數降為 0.3 會使其滑動，模擬結果如圖 14、15 所示。

### 3.2 集集地震地滑模擬

綜合 3.1 之結果，可發現當材料強度以 GSI 為 65 的砂岩岩體、滑動面摩擦係數為 0.45 時，其所模擬地震及暴雨之結果重現集集地震前之崩積層分佈最為接近，因此，將此兩種情形接續模擬集集地震所造成之地滑現象。

在本研究中，假設古地滑之堆積結果會

影響集集地震時之地滑行為，因此進行集集地震模擬時，係以反算最合理之古地滑堆積形貌為分析模型。然而，由於模型下邊坡處為永祿溪谷，在河床地長期沖刷侵蝕下，使得河床下切而形成集集地震前之形貌。因此在集集地震模擬前先略作地形上之修正，移除堆積至溪谷之顆粒，使近河床處符合震前之地形。

將古地滑模擬結果之崩積物地形修正成集集地震前的地形樣貌後，以再利用此結果，繼續模擬集集地震事件。而為了探討地表面位移與崩積層內之位移量之分佈，將地

震及暴雨造成古地滑之崩積層於模擬集集地震後，在各崩積層內選取同樣斷面的六個監測點，以觀察因集集地震所造成的位移量，其監測點位置如圖 16、17。分析結果如表 9 所示。結果顯示：

- 1.地震機制造成古地滑後，模擬集集地震之監測點其最大水平位移量為 5.946 m；而暴雨造成古地滑後之集集地震模擬，監測到之最大水平位移量可達 33.77 m。
- 2.同一斷面上，不同深度之崩積層，其位移量隨深度增加而減少。

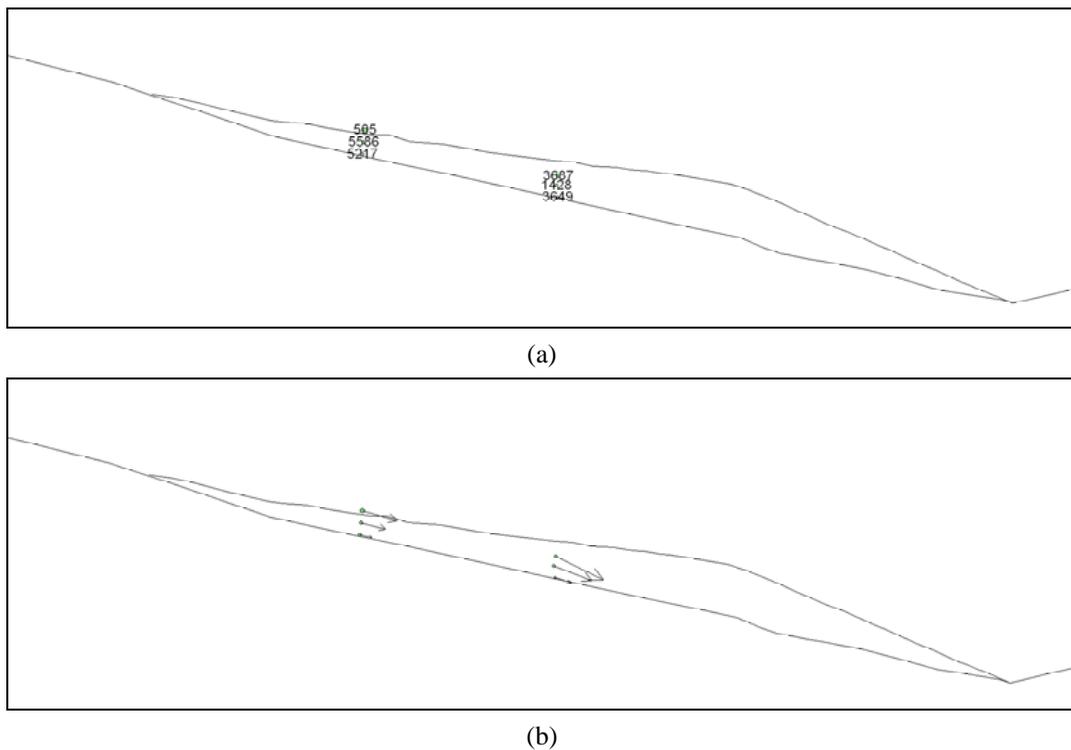
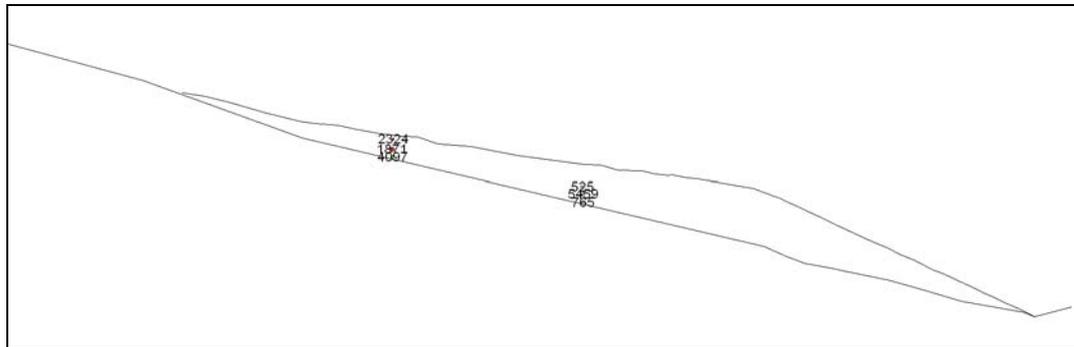


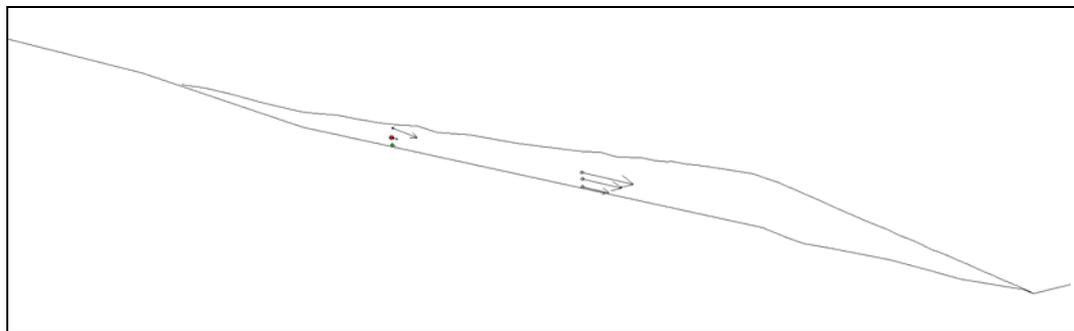
圖 16. 地震機制造成古地滑後，模擬集集地震之位移量監測  
(a)監測點位置選取(b)滑動面摩擦係數為 0.45 之位移情形

Figure 16. After ancient landslide caused by earthquake, the monitoring for the displacement of simulated Chichi earthquake

(a) Monitoring points (b) sliding surface friction coefficient=0.45



(a)



(b)

圖 17. 暴雨機制造成古地滑後，模擬集集地震之位移量監測

(a)監測點位置選取(b)滑動面摩擦係數為 0.45 之位移情形

Figure 17. After ancient landslide caused by heavy rainfall, the monitoring for the displacement of simulated Chichi earthquake

(a) Monitoring points (b) sliding surface friction coefficient=0.45

表 9. 不同因素造成古地滑結果之模擬集集地震後之位移情形

Table 9. Displacement of simulate Chichi earthquake after ancient landslide under the condition of earthquake and heavy rainfall

古地滑因素	顆粒編號	上邊坡(x=1456 m)			下邊坡(x=1719 m)		
			505	5586	5217	3687	1428
地震	X 水平位移(m)	4.438	3.076	1.540	5.946	4.758	2.094
	Y 垂直位移(m)	1.326	0.822	0.371	3.148	1.888	0.745
	顆粒編號	2324	1871	4097	525	5459	765
暴雨	X 水平位移(m)	15.91	4.247	1.865	33.77	25.67	17.42
	Y 垂直位移(m)	6.729	12.57	0.437	8.384	6.355	4.093

利用 PFC2D 內建的程式語言(FISH)以地震機制來模擬古地滑之崩積層分佈情形，而先進行摩擦係數為 0.45 及 0.4 之模擬，並監測其位移量，如圖 11 所示，可以發現滑塊體幾乎不為所動，只有塊體下方少數掉落，因此，推測邊坡有受到地下水位之影響。

在模擬地震機制時，本研究分別以 0.45 及 0.4 為滑動面之摩擦係數，而假設其邊坡受到地下水位之影響摩擦係數降低，因此在地震產生前其滑動面摩擦係數降為 0.32 施加地震壓力會產生滑動，且根據第三節所決定之材料強度及各項參數模擬結果，如圖 12、13 所示。

$$FS(\text{乾}) = \frac{N \tan \phi}{W \sin \beta} = \frac{W \cos \beta \tan \phi}{W \sin \beta} = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

$\beta$  為坡度， $\phi$  為砂之摩擦角，當安全係數為 1 時，則坡角即為砂之摩擦角。考慮無限邊坡之水位於地表情況下，其安全係數：

$$FS = \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \approx 0.6$$

因此，若水位於地表情況下之摩擦係數約為無水位情況的 0.6 倍，故在模擬暴雨機制產生地滑時，其摩擦係數之折減不能低於 0.6 倍。

## 結論

本研究以 PFC2D 分離元素軟體模擬南投縣中寮鄉紅茶坪地區不同時期之地滑事件，探討不同機制下造成紅茶坪地區之古地滑，藉以重現集集地震前之崩積層形貌，再以模擬集集地震造成其崩積層之位移情形，進而

討論 PFC 模擬地滑事件所需之參數影響。

1. 本研究以紅茶坪地區的歷史地滑，包含古地滑及集集地震事件進行模擬分析，並假設誘發古地滑是由地震及暴雨產生，其中以改變滑塊體及滑動面之材料參數進行模擬，結果可發現當材料地質強度指數(GSI)為 65，且其滑動面摩擦係數為 0.45 之情況下，滑動後之堆積形貌較能與集集地震前之地形接近。
2. 以分離元素法模擬單壓試驗，可模擬與實際大地材料相同之試驗，且能展現其宏觀性質，以檢核其微觀參數之使用正確性。
3. 由 Hoek-Brown 破壞準則推估紅茶坪現地岩體強度，再藉由合理的假設，以分離元素法進行兩種造成地滑的機制來模擬古地滑，可重現集集地震前之崩積層範圍。
4. 模擬集集地震造成崩積層之地滑，觀察其監測位移量結果，可發現坡體之位移量分佈受深度之影響，崩積層越近地表處其位移量越大，而以暴雨造成古地滑之崩積層，其模擬集集地震後之位移量比以地震力造成古地滑之位移量來得大。
5. 研究過程中，為了簡化模擬而以採用二維分析。然而，紅茶坪實際地滑行為為三維問題，因此，未來之研究中應掌握其更完整之地層空間分佈資訊，以三維進行分析將能得到更正確之實際情形。

## 參考文獻

1. 李宏輝(2008),「砂岩力學行為之微觀參數-以個別元素法探討」, 博士論文, 國立台

- 灣大學土木工程研究所。
2. 李旺儒(2006),「比較集集地震引致紅菜坪地滑及九份二山地滑特性之研究」, 碩士論文, 國立中央大學應用地質研究所。
  3. 張光宗、賴丞昶、林德貴(2008),「集集地震誘發紅菜坪地滑分析」, 中華水土保持學報, 39(3): 329-344。
  4. 張家偉(2007),「應用分離元素探討紅菜坪地區地滑演化」, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程研究所。
  5. 經濟部中央地質調查所 (2006),「山崩調查與危險評估－紅菜坪地滑地監測系統建立與變形機制研究」, 經濟部中央地質調查所第 95-19 號報告。
  6. Itasca Consulting Group Inc. (2004), “Particle Flow Code in 2 Dimensions”, Version 3.1, Minneapolis, MN: ICG.
  7. Chao-Lung Tang , Jyr-Ching Hu , Ming-Lang Lin , Jacques Angelier, Chia-YuLu , Yu-Chang Chan, Hao-Tsu Chu (2009), ” The Tsaoling landslide triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: Insights from a discrete element simulation ”, Elsevier B.V Engineering Geology 106 (2009) 1–19
  8. Giani, G. P. (1992), “Rock slop stability analysis”, Balkema, Rotterdam, pp. 207
  9. Potyondy, D., Cundall, P. (2004), “A bonded-particle model for rock”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume41, pp. 1329-1364.

99年04月29日收件

99年05月03日修改

99年05月06日接受