

土石流沖淤模式應用於小林村角埔溪災害模擬

曾文孝^{[1]*} 徐郁超^[1] 賴文基^[2] 詹錢登^[1] 謝正倫^[1]

摘要 本文利用一以能量守恆觀點推導之土砂運動本構關係理論，建立適用於土石流及高含砂水流之數值模式，並考慮土石流運動過程中，因為濃度變化造成河床的沖刷、淤積效應，以模擬土石流的運動行為。本文以莫拉克颱風期間，小林村的角埔溪土石流為研究案例，將角埔溪的土石流分為兩階段進行模擬，第一階段的目的為評估土石流是否可能造成角埔溪八號橋的破壞。第二階段的模擬是以第一階段模擬成果，配合小林堰塞湖潰決後造成旗山溪河床抬升的地形資料進行計算，以此計算條件模擬所得之成果與實測的地形資料尚屬吻合。

關鍵詞：土石流、數值模擬、本構關係、莫拉克颱風。

The Debris Flow Numerical Model with Erosion and Deposition Effects: An Application in Jiaopu Creek, Hsiaolin Village

Wen-Hsiao Tseng^{[1]*} Yu-Chao Hsu^[1] Wen-Chi Lai^[2]
Chyan-Deng Jan^[1] Chjeng-Lun Shieh^[1]

ABSTRACT A debris flow model based on the constitutive equation derived from energy conservation and preferable in debris flow and sediment laden flow was developed. The model also considered the erosion and deposition effects contributed by the concentration variation of debris flow. The model was applied to simulate the debris flow disaster that occurred in Jiaopu Creek, Hsiaolin Village during typhoon Morakot. The scenario of the Jiaopu Creek debris flow event was considered in two stages. The primary purpose in the first stage was to see if the elevation of debris flow was enough to bury bridge no. 8. The simulation result and 5m DEM made after the Hsiaolin landslide dam failure were combined as the topographic data in the second stage. The simulation result was comparable to the survey data.

Key Words: debris flow, constitutive equation, numerical model, Typhoon Morakot.

一、前言

近年來受極端氣候的影響，台灣地區在颱風期間的降雨型態有逐漸趨於高強度、長延時的趨勢，並且同時誘發集水區內深層、淺層等不同類型的崩塌，故土石流等土砂災害的規模亦較以往嚴重許多，大規模的新增土砂量往往造成河床數

十公尺的變動，且在土石流事件的後期，隨著流量及河床上堆積土砂量的減少，土石流的濃度應小於發生前期的濃度，故對河床有沖刷的效應，因此在進行土石流數值模擬時，必須考慮土石流沖刷及淤積效應所造成的河床變動情形方能準確的評估土石流的影響範圍。

過去進行土石流等高濃度含砂水流的運動模

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立成功大學防災研究中心

Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: casey@dprc.ncku.edu.tw

擬的學者眾多，如 Takahashi *et al.* (1992) 從力學觀點出發分析土石流內大小顆粒之受力狀況，從而建立土石流顆粒分離計算之數值模式，並以實驗結果作驗證；劉格非 (1993、2002) 則以特徵線法 (method of characteristics) 來研究土石流的運動行為，配合強剪層與弱剪層分離的觀念，建立一土石流模式，並應用在神木村的土石流模擬；Nakagawa and Takahashi (1997) 以數值模式模擬災害現場，並根據其計算結果發展出一套土石流災害避難模式；蔡元芳 (1999) 以 Bagnold (1954) 提出的本構關係式建立數值模式，再將此模式應用至地形變化較複雜之土石流現場，進行災害之模擬及工程效果評估；Osti *et al.* (2004) 以 Itoh (2000) 建立的土石流模式，模擬 1999 年 San Julian 土石流事件；林美聆 (2001、2003) 及林德貴等 (2008) 則採用 FLO-2D 進行土石流潛勢的模擬。

二、基本方程式

1. 本構關係

由於土石流在流動過程中，隨著河床坡度的變化造成輸砂能力的改變，而導致流體濃度以及運動機制的變化，但是就現有商業套裝軟體或一般模擬土石流等高含砂水流運動特性的模式，多是針對單一流動機制進行模擬，無法合理描述流體中含砂濃度高低變化的複雜機制，因此本文採用 Egashira *et al.* (1997) 提出之適用於土石流及高含砂水流的本構關係理論建立一數值模式，進行土石流的運動行為之模擬。

Egashira *et al.* 提出的本構關係理論中，係以能量守恆為出發點，認為含砂水流中，能量的損耗主要為 (1) 顆粒間因摩擦所造成之能量損失；(2) 顆粒間之非彈性碰撞所造成之能量損失；(3) 顆粒間孔隙水紊流所造成之能量損失。在連體運動中，單位時間、單位體積之總能量散逸率 (energy dissipation rate) Φ 應等於剪應力與剪應變率之乘積，即

$$\Phi = \tau \frac{du}{dz} \quad (1)$$

$$\text{其中， } \Phi = \Phi_s + \Phi_d + \Phi_f \quad (2)$$

Φ_s 為顆粒間因摩擦所造成之能量散逸率， Φ_d 為顆粒間之非彈性碰撞所造成之能量散逸率， Φ_f

為顆粒間孔隙水亂流所造成之能量散逸率， u 為流動速度。

此連體運動所受應力為

$$\tau = \tau_y + \tau_d + \tau_f \quad (3)$$

$$p = p_s + p_d + p_w \quad (4)$$

其中 τ 為剪應力； τ_y 為顆粒間因摩擦所造成之剪應力； τ_d 顆粒間之非彈性碰撞所造成之剪應力； τ_f 顆粒間孔隙水亂流所造成之剪應力； p 為壓力； p_s 止時顆粒間接觸所造成之壓力， p_d 顆粒間之非彈性碰撞所造成之壓力， p_w 粒間孔隙水之靜水壓力。上式之各物理可分別表示如下。

$$p_w(z) = \rho g(h-z)\cos\theta \quad (5)$$

$$p_d = \sigma k_d e^2 c_d^{\frac{1}{3}} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (6)$$

$$\frac{p_s}{(p_s + p_d)} = f(c_d, c_*) = (c_d(z)/c_*)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s \quad (8)$$

$$\tau_d = k_d (1 - e^2) \sigma c_d^{\frac{1}{3}} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (9)$$

$$\tau_f = \frac{\rho k_f (1 - c_d)^{\frac{5}{3}}}{c_d^{\frac{2}{3}} d^2 (\partial u / \partial z)^2} \quad (10)$$

其中 ρ 為清水密度， h 為流動深， θ 為底床坡度， σ 為泥砂密度， e 為顆粒碰撞之恢復係數 (S. Egashira *et al.*, 1997; T. Itoh, 2000)，採用 0.85， c_d 為流體濃度， d 顆粒粒徑， c_* 為底床堆積層濃度， ϕ_s 為土砂材料的內摩擦角， k_d 、 k_f 為實驗係數，分別為 0.0828 及 0.16 S. Egashira *et al.*, 1997; T. Itoh, 2000)。

2. 控制方程式

若將土石流視為一連續且不可壓縮之固、液混合體之流動可得土石流之運動方程式如下：

(1) 連續方程式

$$\left[\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right] = \frac{E}{c_s} \quad (11)$$

(2) 動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \beta \frac{\partial}{\partial y}(vM) \\ = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{E}{c_s} u - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (vN)}{\partial y} \\ & = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{E}{c_*} v - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \end{aligned} \quad (13)$$

上式中, τ_{bx} 、 τ_{by} 分別為 x 、 y 方向的底床摩擦剪應力, 表示為:

$$\tau_{bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \{(\sigma - \rho)ghc_d \cos \theta \tan \phi + \rho_m f_b (u^2 + v^2)\} \quad (14)$$

$$\tau_{by} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \{(\sigma - \rho)ghc_d \cos \theta \tan \phi + \rho_m f_b (u^2 + v^2)\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} f_b &= \frac{25}{4} \left(\frac{d}{h}\right)^2 \\ & \left\{ k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) c_d^{1/3} + k_f \frac{(1 - c_d)^{5/3}}{c_d^{2/3}} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

(3) 土砂連續方程式

$$\frac{\partial (c_d h)}{\partial t} + \frac{\partial (c_d M)}{\partial x} + \frac{\partial (c_d N)}{\partial y} = E \quad (17)$$

(4) 底床高程變動方程式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_* \cos \theta} \quad (18)$$

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* (\tan \theta - \tan \theta_e) \quad (19)$$

(5) 土石流與不成熟土石流流況判別式

$$\tan \theta_c = \frac{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \frac{c_*}{2} \tan \phi_s}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \frac{c_*}{2} + 1} \quad (20)$$

上列方程式中, h 為流體的流動深度, M 、 N 分別為 x 、 y 方向的流量通量, E 為河床變動速度, c_* 為底床堆積層濃度, β 為動量補正係數, u 、 v 分別為 x 、 y 方向的平均流速, g 為重力加速度, η 為土石流液面高程, τ_{bx} 、 τ_{by} 分別為 x 、 y 方向的底床剪應力, ρ_m 為流體密度 ($\rho_m = (\sigma - \rho)c_d + \rho$), c_d 為流體濃度, z_b 為底床高程, θ 為底床坡度; θ_c 為與流體濃度相關的平衡坡度, ϕ_s 為土砂材料的內摩擦角, θ_e 為流況判別坡度,

當 $\theta \geq \theta_c$ 為土石流, 當 $\theta < \theta_c$ 為不成熟土石流 (immature debris flow)。

3. 數值方法

本文採用顯式差分之蛙跳法 (leap-frog method) 對上述方程式進行離散化, 網格配置採用交錯式格網 (staggered grid), 各物理量在計算格網中之配置如圖 1 所示, 差分蛙跳法網格示意圖如圖 2。

三、模式應用區域

1. 角埔溪土石流災況說明

莫拉克颱風於小林村所造成災害規模前所未見, 參考水保局「複合型災害調查、分析與境況

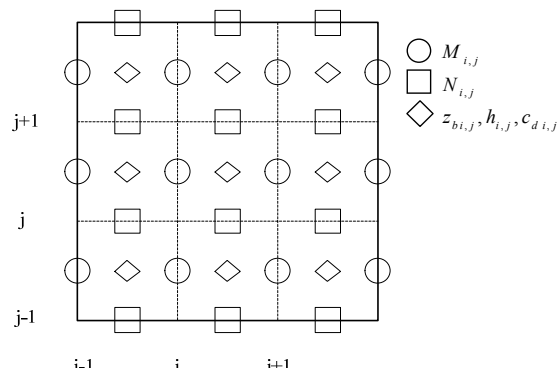


圖 1 各物理量於計算格點之配置圖

Fig.1 The conception of staggered grid

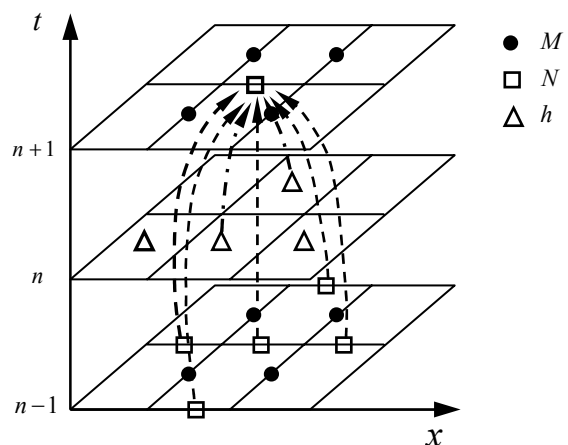


圖 2 蛙跳法網格配置示意圖

Fig.2 Grid system of leap-frog method

模擬」(2011)，綜合居民訪談紀錄及相關調查報告，當時小林村首先遭遇洪水及小規模土砂災害的侵襲，8月8日晚上7時左右，角埔溪的土石流造成八號橋破壞以及旗山溪水位高漲導致十號橋遭洪水淹沒，使得社區孤立成孤島；在晚上9時，第9鄰旁之台21線已成一條河流且屋內開始淹水。關於小林村相關災害發生時間順序整理如表1。

根據水保局「五子寮等集水區整體治理調查規劃」(2008)，角埔溪八號橋的橋面高程約為373公尺，依災前5m數值地形高程資料，該處高程與小林村南側部落相近，根據相關文獻紀錄村民對於災情的描述中，『8月8日晚上7點左右，8號橋被角埔溪土石流沖垮』、『8月8日晚上9點左右，小林村第9鄰旁的台21線，因為猛烈的雨勢，形成了一條河流』等，極可能為角埔溪發生土石流災害之後，大量的堆積土砂使得河床抬升至相當於道路的高程，首先造成八號橋遭土石流破壞，之後溪水沿著台21線道路流入小林村南側，造成南側聚落的淹水災情。

圖4為利用災害前後5m數值地形進行角埔溪縱斷面的比較，圖中顯示，角埔溪上游的南側支流由於坡度較陡，因此集水區上游雖然有大規模的新增裸露地，但崩塌土砂可能多已輸送至下游，因此災害前後的河道坡度沒有太多變化；北側支流由於坡度較緩，自卡玫基颱風至莫拉克颱風期間發生的土砂災害迄今，溪床上仍有大量的堆積土砂材料；此外，在角埔溪的主流部分，自南北兩支流匯流以下，溪床高程急遽抬升，在匯流處區域約抬升30公尺，而至旗山溪匯流口區域則約有16公尺。依據甲仙雨量站的雨量站記錄，降雨強度在8月9日凌晨之後已逐漸減緩，因此在八號橋沖毀後，河床抬升約十多公尺，應該不全然為上游供給大量的土砂材料所造成。根據現場調查的成果當中，角埔溪下游的河床劇烈抬升，極可能為小林堰塞湖潰決之後，導致旗山溪的河床上升，因此角埔溪土石流挾帶的土砂材料無法順利排入旗山溪，自匯流處開始不斷往上游淤積。

此外，透過前後期航照比對進行裸露地面積判識(如表2)，災前主要的裸露地分佈在南側支流集水區，約有18.31公頃，全角埔溪集水區的裸露地面積約為28.11公頃；在莫拉克颱風後，

表1 小林村複合性災害發生時間順序 (水保局，2011)

Table 1 The order of compound disaster in Hsiaolin Village

日期 date	時間 time	事件 event	資訊來源 reference
2009/8/6	08:30	颱風警報發布	中央氣象局
2009/8/7	17:00	黃色土石流警報發布；淺層崩塌發生。	水保局
	23:00	紅色土石流警報發布	水保局
2009/8/8	19:00	10號橋遭洪水淹沒；小林村北向交通中斷。8號橋斷裂，南向交通亦中斷。	居民訪談
		第9鄰旁之台21線，因猛烈雨勢，形成了一條河流。	李錫堤等人(2009)
	21:00	根據姚茂雄說法，台21線已成河流及第9鄰住戶屋內開始積水。	今日新聞(2009/8/15)
	23:00	小林村南部淹水，淹水深度約為60公分。	居民訪談
2009/8/9	05:20	小林村南部淹水，淹水深度升為約200公分。	居民訪談
	06:20	深層崩塌發生；堰塞湖隨即形成；楠峰橋毀損。	居民訪談
	07:00	堰塞湖土石壩潰決。	居民訪談

表2 災前前後角埔溪集水區裸露地分析

Table 2 The analysis of bare land and sediment yield volume in Jiaopu Creek watershed

	南側 支流集水區 South branch	北側 支流集水區 North branch	全集水區 Entire watershed
災前裸露地 Bare land before typhoon Morakot (公頃)	18.31	4.66	28.11
災後裸露地 Bare land after typhoon Morakot (公頃)	68.79	23.72	100.88
新增擴大面積 The enlarge Area (公頃)	54.74	22.51	84.65
推估土砂生產量 Estimated sediment yield (萬立方公尺)	109.49	45.02	169.29

全集水區的裸露地面積急遽擴大，增加至約 100.88 公頃，在南側支流集水區、北側支流集水區的裸露地新增擴大面積分析成果中，分別約有 54.74 公頃、22.51 公頃，全集水區內共有 84.65 公頃，若以平均深度為 2.5 公尺及孔隙率 0.8 進行新增土方量推估，則分別約為 109.49、45.02、169.29 萬立方公尺。

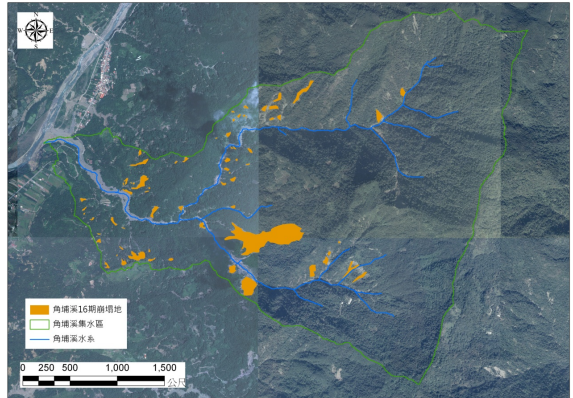
2. 數值地形條件

本文將角埔溪土石流事件，以小林堰塞湖潰決後改變旗山溪的河床條件為基準，分為兩階段進行模擬，首先以災前 5m 數值地形作為模式計算輸入的起始地形，評估 8 月 8 日晚上 7 點時，土石流造成角埔溪的河床抬升程度是否足以造成八號橋沖毀；再以角埔溪土石流地形變動計算成果作為角埔溪河道高程的起始條件，旗山溪河道部分則以災後 5m 數值地形為起始地形條件，進行第二次的土石流計算，藉以評估河床抬升與災後實測地形的差異。本文進行角埔溪土石流模擬，所採用 x 方向及 y 方向計算網格均為 5 公尺。

3. 入流邊界條件

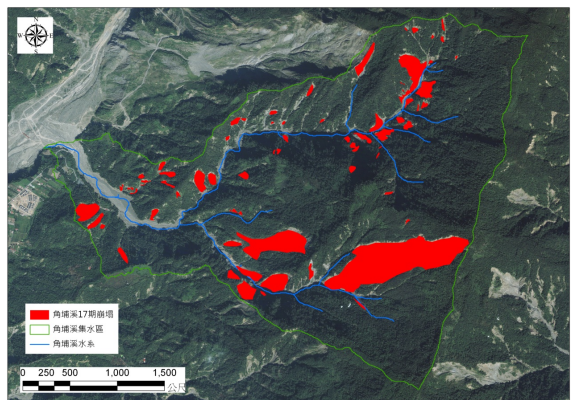
土石流的數值計算中所需之入流邊界條件，包含流量歷線及濃度歷線。本文以「複合型災害調查、分析與境況模擬」(水保局, 2011) 中，利用楠峰橋、杉林大橋兩處水位站流量記錄，推估角埔溪的流量歷線成果 (如圖 5) 作為模式的入流邊界條件。由於模式計算分為兩階段，各階段起始時間以降雨強度及流量歷線進行劃分；第一階段以 8 月 8 日下午 15 時為土石流模擬的起始計算時間，此時甲仙站的累積雨量及降雨強度分別為 941mm 及 71.5mm/hr，至 8 月 9 日上午 6 時小林堰塞湖形成為止。自 8 月 9 日上午 7 時小林堰塞湖潰決後為第二階段的起始計算時間，至 8 月 9 日下午 13 時降雨強度及流量漸歇為止，各計算時間點之水文資料如表 3。

在泥砂入流條件方面，由於第一階段為土石流主要發生的階段，故以南側支流集水區的新增土砂量 109.49 萬立方公尺為輸入的總泥砂量，平均泥砂濃度約為 0.12。第二階段因降雨強度及流量已逐漸趨緩，因此為土砂輸送的階段，故以角埔溪的平均坡度計算土石流平衡濃度作為入流濃度條件；以此計算，本階段的輸入泥砂量約為



a. 莫拉克颱風前期角埔溪集水區裸露地分佈

a. The bare land in Jiaopu Creek watershed before typhoon Morakot



b. 莫拉克颱風後期角埔溪集水區裸露地分佈

b. The bare land in Jiaopu Creek watershed after typhoon Morakot

圖 3 莫拉克災害前後角埔溪集水區裸露地分佈

Fig.3 The bare land in Jiaopu Creek watershed before and after typhoon Morakot

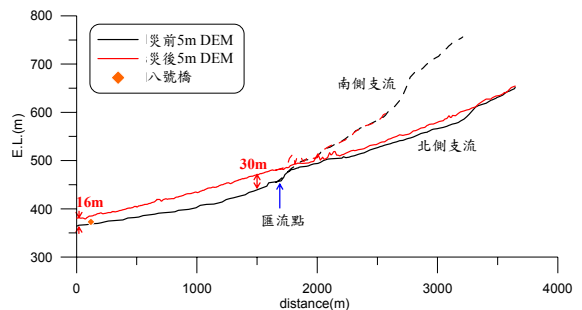


圖 4 角埔溪災害前後縱斷面比較

Fig.4 The longitudinal profile variation of Jiaopu Creek

11.47 萬立方公尺。合計兩階段的輸入泥砂總量 (120.96 萬立方公尺) 不超過前述推估的全集水區泥砂生產量。

4.河床土砂條件

程式計算中所需之參考粒徑，可經由現地河床質粒徑採樣調查分析後獲得。在角埔溪八號橋處之河床質粒徑分析成果中 (如圖 6)，d50 約為 17.85 mm。泥砂密度 σ 一般採用 2,650 kg/m³；泥砂顆粒的內摩擦角 ϕ_s 約在 30~37 度之間。

四、模擬結果

依據前述的計算條件及方法進行角埔溪土石流災害之數值模擬，可得各模擬情境之土石流沖淤深度及縱斷面比較，分別如圖 7、圖 8。圖 7 (a) 為自 8 月 8 日下午 15 時至晚上 19 時之地形變動量計算成果，河床的變動情形在角埔溪八號橋位置，淤積約 6.9 公尺 (河床高程為 375.9 公尺)，相較八號橋的原高程為 373 公尺，因此在 8 月 8 日晚上 19 時，角埔溪的土石流災害確實有可能造成八號橋沖毀，以及溪水沿道路流入小林村南側的情形。圖 7 (b) 為 8 月 9 日上午 6 時之模擬成果，此時角埔溪上游河床的淤積情形更為嚴重，但下游與旗山溪交會處的河床變動仍舊變化不大，主要因為角埔溪的土砂匯入旗山溪後，隨即往下游輸送，不會堆積在匯流處。圖 7 (c)

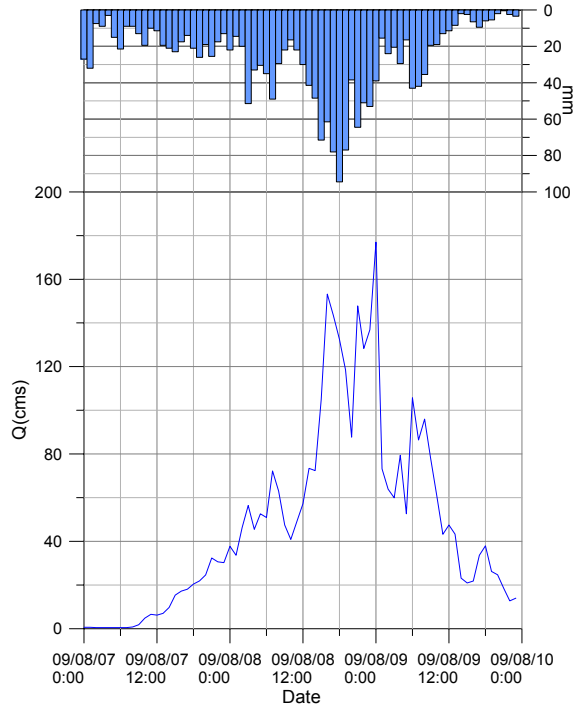


圖 5 甲仙站雨量記錄及角埔溪流量歷程解析成果 (水保局, 2011)

Fig.5 The rainfall records and the estimated flow discharge

表 3 角埔溪土石流模擬各階段水文資料

Table 3 The hydrologic data of simulation stage

計算時間點		推估流量 (cms) Estimated discharge	降雨強度 (mm) Rainfall intensity	累積雨量 (mm) Accumulative rainfall
第一階段 1st stage	8/8 15:00	104.9	71.5	941
	8/8 19:00	118.5	77	1252
	8/9 06:00	105.7	43	1647
第二階段 2nd stage	8/9 07:00	86.4	42	1689
	8/9 13:00	43.3	8.5	1796

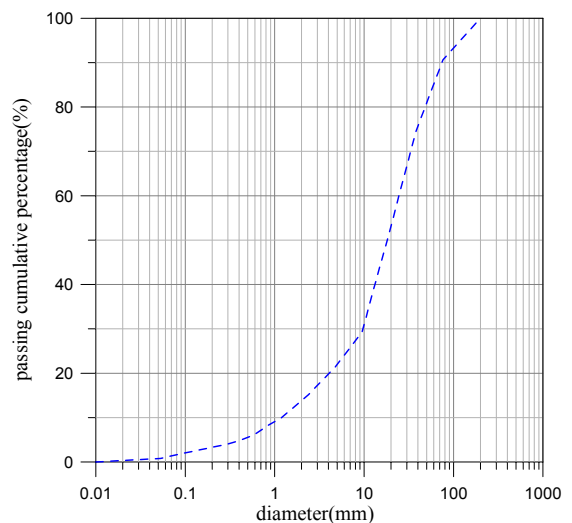
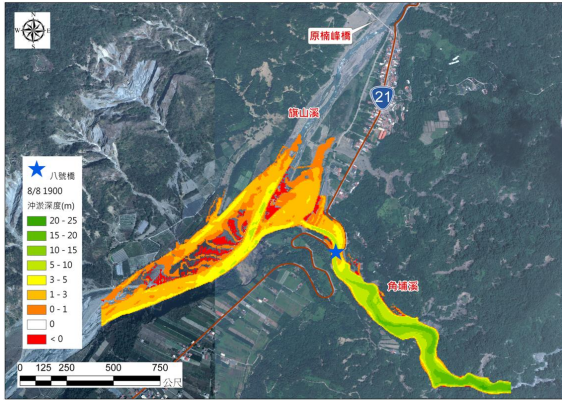
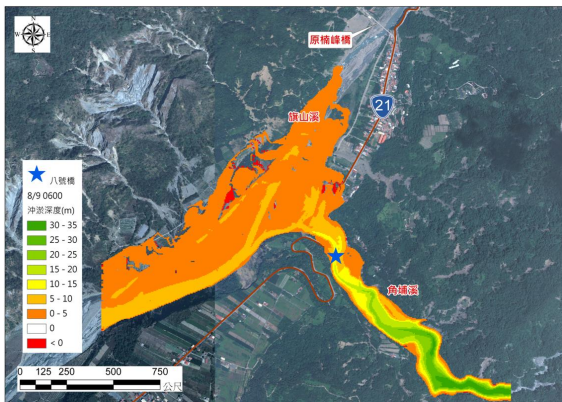


圖 6 角埔溪八號橋河床質粒徑調查成果

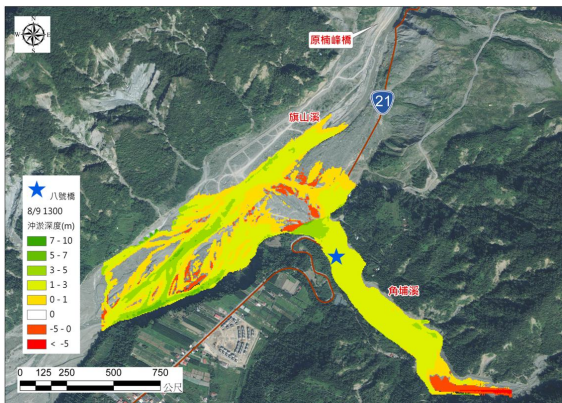
Fig.6 Grain size distribution analysis at bridge no. 8



a. 8月8日19時土石流沖淤模擬成果
 a. Simulation result at 19:00 PM, August 8



b. 8月9日6時土石流沖淤模擬成果
 b. Simulation result at 6:00 AM, August 9



c. 8月9日13時土石流沖淤模擬成果
 c. Simulation result at 13:00 PM, August 9

圖7 角埔溪土石流沖淤深度模擬成果

Fig.7 The simulation result of erosion and deposition depth

為自8月9日上午7時至下午13時之地形變動量計算成果，此時由於旗山溪河床因小林堰塞湖潰決而有顯著抬升，造成角埔溪的土石流在旗山溪匯流處區域大量淤積；此外，角埔溪上游的崩塌情形因降雨趨緩而逐漸減緩，因此堆積的土體逐漸往下游輸送而有沖刷的情形。

由圖8縱斷面成果比較圖中，本文採用計算條件所得之角埔溪土石流災害模擬成果，與災後的實測地形成果在趨勢上尚屬吻合。比較8月8日晚上19時及8月9日上午6時兩縱斷面，雖然角埔溪上游的河床淤積量逐漸加劇，但下游的區域河床上升的程度有限；在第二階段模擬至8月9日下午13時的成果中，此時的推估流量較第一階段模擬小，但在下游與旗山溪匯流處的淤積量顯著增加，表示小林堰塞湖潰決後造成旗山溪河床抬升，對於角埔溪的河床淤積亦有相當程度的影響。

五、結 論

由於目前模擬土石流的數值模式及商業軟體中，多未考量土石流的沖淤效應，且模式中的土石流本構關係多無法描述土石流運動過程中，因濃度不同而產生的運動機制變化，因此本文以 Egashira *et al.* (1997) 提出之本構關係理論建立一適用於土石流及高含砂水流的數值模式，模式中同時考量土石流運動過程中造成的沖刷、淤積效應，以進行大規模的土石流災害影響評估，並以 2009 年莫拉克颱風所造成的小林村角埔溪土石流災害為研究案例。本文中以小林堰塞湖的

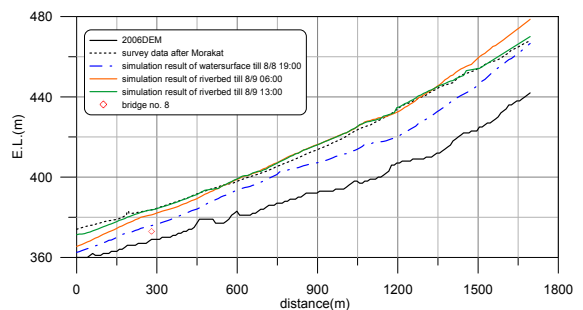


圖8 角埔溪土石流模擬成果與災後實測地形縱斷面比較

Fig.8 Longitudinal profile comparison of simulation and survey data

潰決時間為基準，並配合降雨強度及流量等水文條件，將角埔溪土石流事件分為兩階段進行模擬。第一階段以前後期航照裸露地判識成果所推估之集水區新增土砂量，作為模式輸入的泥砂量條件。第一階段的模擬成果中，角埔溪的河床抬升量在 8/8 晚上 7 時足以造成八號橋沖毀，並且可能造成角埔溪溪水沿道路流入小林村南側部落，導致淹水災情。第二階段的模擬，是以第一階段的模擬成果配合災後的 5m 數值地形進行計算，計算成果與災後的實測地形資料十分相近。

誌 謝

本文中角埔溪相關資料，由成功大學防災研究中心及水土保持生態工程研究中心提供，特此致謝。

參考文獻

- Bagnold, R. A. (1954). "Experiments on A Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid Under Shear," *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, 225, 49-63.
- Egashira, S., Miyamoto, K. and Itoh, T. (1997). "Constitutive equations of debris flow and their applicability," *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Proceedings, 1st International Conference, ASCE, 340-349
- Itoh, T. (2000). 「土石流の構成則およびその適用に関する研究」, 博士論文, 日本筑波大學。(Itoh, T. (2000). *Constitutive equations of debris flow and their applicabilities*, Ph. D. Thesis, Ritsumeikan University. (in Japanese))
- Nakagawa, H. and Takahashi, T., (1997). "Estimation of a Debris Flow Hydrograph and Hazard Area," *Proceedings of the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, California, USA, 64-73.
- Osti, R., Egashira, S. and Itoh, T. (2004). "Prediction of 1999-San Julian debris flows based on dependent and independent occurrences," *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 48, 913-918.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. and Yamashiki, Y., (1992). "Routing debris flows with particle segregation," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118, 11, 1490-1507.
- 林美聆、陳天健等 (2001), 「陳有蘭溪流域示範區土石流溪流潛勢分析與災害境況模擬」, 防災國家型科技計畫九十年度成果報告。(Lin, M. L. and Chen, T. C. (2001). "The Analysis and Scenario Simulation of Debris Flow Potential Stream in Chen-Yu-Lan Stream," *National Science and Technology Program for Hazards Mitigation*, Taipei, Taiwan, (in Chinese))
- 林美聆、王國隆、溫惠鈺 (2003), 「台灣藝術村土石流潛勢模擬」, 中華民國大地工程學會。(Lin, M. L., Wang, K. L. and Wen, H. Y. (2003). "The Simulation of Debris Flow Potential Stream in Taiwan Artist Village," *Taiwan Geotechnical Society*, Keelung, Taiwan. (in Chinese))
- 林德貴、徐森彥、趙啟宏、溫惠鈺、許世孟、顧承宇、冀樹勇 (2008), 「土石流流動模擬技術於災害風險區劃定及災損評估應用之研究」, 中華水土保持學報, 39, 4, 391-402。(Lin, D. G., Hsu, S. Y., Chao, H. Y., Wen, H. Y., Hsu, S. M., Ku, C. Y. and Chi, S. Y. (2008). "Applications of Simulation Technique on Hazard Zone Delineation and Damage Assessment of Debris Flow," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 39(4), 391-402. (in Chinese))
- 李錫堤、董家鈞、林銘郎 (2009), 「小林村災變之地質背景探討」, 地工技術雜誌, 122, 87-94。(Chen, S. C. and Wu, C. H. (2009). "Geological Investigation on the Catastrophic Landslide in Siaolin Village, Southern Taiwan," *Sino-Geotechnics*, 122, 87-94. (in Chinese))
- 劉格非、郭哲昆、吳昌修 (1993), 「緩坡上土石流運動之研究」, 中華水土保持學報, 24, 1, 1-11。(Liu, K. F., Kuo, C. K. and Wu, C. S. (2009). "Granular Flows On Mild Inclines," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 24(1), 1-11. (in Chinese))
- 劉格非、黃名村 (2002), 「土石流之現場數值模擬-應用於南投縣神木村」, 中華水土保持學報, 33, 3, 215-221。(Liu, K. F. and Huang, M.

C. (2002). "The Numerical Simulation of Debris Flows and Its Application in Shen-Mu Village," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 33(3), 215-221. (in Chinese))

2011年05月04日 收稿

2011年06月28日 修正

2011年07月05日 接受

(本文開放討論至2012年3月31日)