

山區道路與小林村崩塌關係之探討

林昭遠⁽¹⁾ 藍欣茹⁽²⁾

摘要

2009年莫拉克颱風侵襲台灣地區，小林村東北側之獻肚山發生崩塌近500位居民喪生，山區道路柔腸寸斷。前人研究顯示，長延時、高強度降雨造成地質脆弱之獻肚山產生滑動，然而，鄰近具有相同環境的邊坡，並未產生同等規模災害，顯示仍有潛在因子影響著這個地區。本研究提出新的證據來解釋小林村崩塌之原因，透過圖資套疊，崩塌區位之道路密度相較於周遭未崩塌區位多，本地區道路里程密度高達4.21 km/km²，由此現象顯示，道路密度高較容易產生崩塌。本研究萃取小林村崩塌區位內之常態化差異植生指標(NDVI)及地形濕潤指數(TWI)，探討道路沿線兩環境指標之變化，試圖找出山區道路與小林村崩塌之關係。研究結果顯示，崩塌區位內NDVI平均值大且標準差小之區位，所佔比例極高，表示本區土壤深度較深；而道路沿線則有多處TWI值較高，顯示道路沿線下邊坡有多處坑溝通過，乃高崩塌潛勢區位。由於暴雨期間，坡面逕流易被道路邊溝所截，一旦逕流量過大，便可能由道路轉彎處下移，沖刷邊坡坡腳，由此可知山區道路過度開闢是小林村受災關鍵因素。

(**關鍵詞**：崩塌、常態化差異植生指標、地形濕潤指數)

A study of the relationship between the road development and landslide in Xiaolin Village

Chao-Yuan Lin⁽¹⁾ Hsin-Ju Lan⁽²⁾

Professor⁽¹⁾, Graduate student⁽²⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Hsien-Du-Shan, which located at the northeastern Xiaolin Village, collapsed during the hit of Typhoon Morakot in 2009. Many roads were completely damaged and about 500 residents were buried alive in the landslide. Previous studies found that the landslide occurred due to a long duration and high intensity rainfall couple with the property of fragile geology. However, the areas which are adjacent to the landslide and without failure also have the same situation. This means that there still exist some key factors which affect this disaster. This study provides a new evidence to explain the

(1)國立中興大學水土保持學系教授(通訊作者 e-mail : cylin@water.nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系碩士專班研究生

reason why Xiaolin Village destroyed by the typhoon event. Before the disaster, the road density which is up to 4.21 km/km^2 in the failure areas is higher than without failure area. This shows that the landslide would be occurred easily by high road density. The composite index of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Terrain Wetness Index (TWI) was extracted along the road with a buffer width of 40m to indicate the road vulnerability and potential landslide. There occupied a high ratio of area which has the characteristics of large mean and low standard deviation of NDVI, this shows that a deep soil depth it might be. In addition, some sites with higher TWI along the roads depicts that several small gullies have developed at the downslope, which are vulnerable to high potential of landslide. It is presumably that during high return period rainfall events, the excessive drainage water could overflow the road side ditches at the sharp curve, which is likely to erode the slope toe and causes slope failure. Hence, the road development is one of the key factors which contribute to the catastrophic disaster of Xiaolin Village.

(**Keywords** : Landslide, Normalized Difference Vegetation Index, Topographic Wetness Index)

前言

2009年莫拉克颱風行經台灣，高雄市甲仙區小林村旁的獻肚山因連日前降雨，緊鄰的旗山溪水位抬升弱化坡腳(toe of slope)，邊坡土體含水量受連日豪雨影響持續上升，總和以上不利因素導致邊坡深層滑崩現象，並於滑崩後堵塞旗山溪形成堰塞湖，水位不斷蓄積下，於8月9日清晨6點潰堤，緊接而來的洪水及其挾帶之土砂，造成境內多座橋樑及村莊掩埋，並造成近500人喪生的滅村慘劇，本次事件成為台灣不可抹滅之傷痛。

李錫堤等(2009)獻肚山發生山崩之癥結點有三：(1)地質構造上，滑動區北側地層層面與南側東西向節理暨小斷層共同形成一組向西傾斜且呈虛懸狀態之不利岩楔；(2)發生滑動的溪溝源頭儲積甚厚之老崩積層與新崩積物，有利於地表水入滲，使新鮮頁岩上方之破碎頁岩與崩積物容易含水飽和；(3)滑動區坡度太高，衝擊能量太大，擴大了災害之程度；顯見獻肚山源頭之地形、地質與崩積

層堆積分布等條件，為獻肚山崩塌重要因素。

魏倫璋等(2012)小林村獻肚山崩塌，位於地形坡度陡變區位，且鄰近河岸支流發展旺盛源頭，支流源頭一岸為順向坡，另一岸為逆向坡，呈現易匯水之不利岩楔(sphenolith)，意指邊坡為兩組弱面構成，肇致其滑動的各作用力在空間為三向度分佈，又稱楔形破壞(wedge failure)，當弱面傾角介於交線傾角與岩坡傾角間，岩楔則沿弱面中較陡區位滑動，且溪流源頭及沿岸具有崩積層堆積材，豪雨匯集時，帶動崩積層運移，並侵蝕兩側河岸，使岩體產生滑動，當岩塊崩解成岩屑，且遇高角度地形，形成坡面土石流之運動，為典型岩體滑動轉岩屑崩瀉(Debris Avalanche)型深層崩塌，崩積材料鬆散，且崩塌後於邊坡坡趾處(旗山溪)堆成高壩，形成堰塞湖，直接威脅臨近聚落小林村。

李鎮洋等(2011)小林村複合性災害發生歷程，依序為：颱風警報發布次日(即2009年8月7日)，獻肚山既通報有淺層崩塌發生

時，當時累積臨近之御油山雨量站測得之降雨深度為約 359.5mm；豪雨持續不斷，雨量累積至次日(2009 年 8 月 8 日)時，降雨深度已高達 1529mm，當日旗山溪發生洪水淹沒橋樑，造成小林村對外南向交通中斷，並引發後續小林村淹水情形；緊接而來的，獻肚山深層崩塌產生了，楠峰橋中斷，崩塌土石大量堆積於旗山溪，形成堰塞湖，此時，小林村對外交通宣告中斷，小林村維生道路受阻，形成孤島，堰塞湖在 1 個小時後即潰堤，河水挾帶大量崩積土砂，迅速覆蓋小林村。

前人研究探討崩塌致災原因，主要論述地區先天地質環境不良，加上後天豪雨誘發致災，然同樣天然條件下的鄰近集水區，卻只有零星崩塌，對比崩塌區位，深層崩塌區內通過一條林道，貫穿崩塌區位，而零星崩塌之其他集水區，並無道路，道路開闢對於小林村崩塌其影響為何，本研究試以此視角進行探討。

林昭遠等(2013)將道路崩塌點位之 TWI 與 NDVI 以 K-means 群集分類法，分為大小兩類，探討崩塌地與 TWI 及 NDVI 之間的關係，研究結果顯示，NDVI 與 TWI 指數均高之群組，有較多之崩塌，由此可知，道路若位於凹地地形，其土壤較為濕潤，若該處植生生長亦良好，顯示土壤風化化育情形良好，有較高的崩塌潛勢，故可作為道路脆弱度評估指標。

地形濕度(Topographic Wetness Index，TWD)能透過定量方法，指出地形對土壤濕度分布影響，坡度較陡時，由於逕流流速較高，其土壤入滲情形較差，土壤含水量亦相對較低，其排水性較佳；較為平緩坡地，逕流停

留於單位面積內之時間較長，入滲情形較高，土壤含水量亦較高。

常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，利用植物反射近紅外光，及吸收紅光之特性，使近紅外光輻射值減去紅光輻射值，其差值越大，即代表該地區植生生長量越大，土壤深度越深。

山區逕流水沿坡面而下，如經道路常截流於兩側邊溝，排水功能不足地區，則沿著道路而下，並循破壞點下移。地形濕度於圖形表現上具有相對的面積及形狀，道路崩塌則可視為線的呈現，作為人類移動之路徑，於有限度的寬度內，具有長度與位置表徵，並具連續性。道路開闢密度及轉彎段數量，亦影響坡面的穩定性，因為道路開闢越密集，其岩層坡趾受截斷的情形越嚴重，此外，坡面逕流水經道路截流，沿道路往下移動，水流具有直進性，如愈大轉彎段，無適當之消能處理，則有淘刷下邊坡之情形產生。

有鑑於此，本研究萃取小林村之地形濕度、常態化差異植生指標，並求得邊坡之坑溝區位及土壤深度之空間分布，與獻肚山崩塌位置進行套疊分析，找出其因果關係；同時的，進一步探討道路開闢密度及轉彎數量對坡面造成之影響。

研究流程

透過莫拉克颱風前後期衛星影像取得獻肚山之崩塌位置；並利用數值高程模型 (Digital Elevation Model, 簡稱 DEM) 萃取地形濕度指數，運用以上資料，研究流程如圖 1 所示。

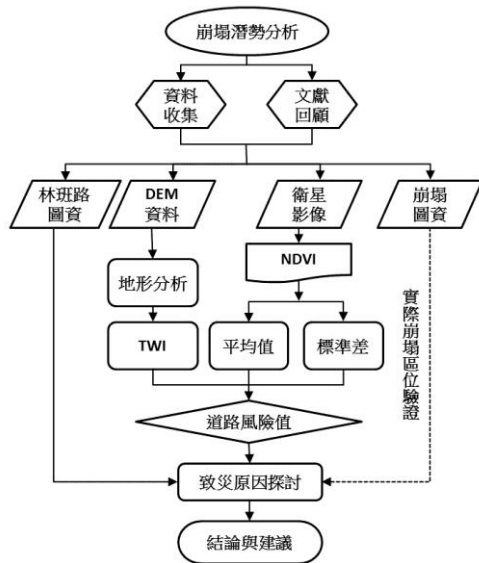


圖 1 研究流程圖
 Figure 1 Flow chart of this study

材料與方法

本節敘明研究位置、相關運用之圖資來源，並說明如何運用圖資及工具進行分析，作為後續探討之用。

1. 研究樣區

本研究樣區位於高雄市甲仙區小林村，其集水區為旗山溪，進入高雄市沿台 21 線即可抵達；莫拉克風災使台灣中南部地區受災嚴重，其中以高雄市小林地區遭受近 500 人喪生，災情最為慘重，主要災害原因是由小林村東側獻肚山產生之深層崩塌掩埋村落；獻肚山崩塌區位，有密集道路通過，其道路為林班道路，區位分布如圖 2 所示。

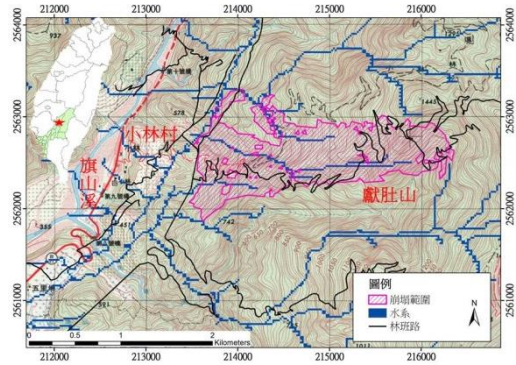


圖 2 地理位置圖
 Figure 2 Location of study area

2. 研究材料

蒐集研究樣區之數值高程模型(DEM)、各期衛星影像及崩塌地範圍等，蒐集圖資及用途彙整如表 1 所示。

3. 研究方法

3.1 常態化差異植生指標

常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 運用衛星影像，根據植物吸收紅光及反射近紅外光波段之特性，計算近紅外光及紅光波段之和差比值所得(Rouse, 1973)，以此萃取植生之分布，其計算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中，

NIR：近紅外光譜值

R：紅外光光譜值

表 1 研究圖層資訊

Table 1 Information of the geospatial data

基本圖資	時間	空間解析度	資料來源	用途
DEM	2003	5m×5m	內政部	TWI 分析
衛星影像	2008.12.21	20m×20m	中央大	NDVI 分析
	2009.5.9 莫拉克 風災前		學太空 及遙測 中心	
道路	2006	--	交通部 運輸研 究所	區位 探討
土地利用	2008	1/5000	國土測 繪中心	比對 NDVI 土地 分類

表 2 NDVI 平均值及標準差之地覆類別特性
Table 2 Land cover characteristics of mean and standard deviation NDVI

NDVI	特性
平均值小 標準差小	光合作用較差，該區域植生生長不易，推測為河道或道路等，植生不易地區。
平均值大 標準差小	光合作用強盛，該區域植生生長良好，植生覆蓋情形變化小，推測為森林地。
平均值小 標準差大	光合作用較差於森林地及草生地，且受人為耕作情形影響，地表情形植生覆蓋情形變化大，推測為農地。
平均值大 標準差大	植生生長情形受季節影響，冬季植被情形較差，夏天植被生長情形旺盛，推測為草生地。

(資料來源：張鑫歲，2013)

3.2 地形濕度指數

地形濕度指數 (Topographic Wetness Index, TWI)，該指數說明土壤濕度情形，當坡度較陡的時候，其坡面逕流之流速較高，入滲量較低，其土壤含水量較低，排水性較佳；當坡度漸緩，其逕流速度降低，其在單位面積停留時間較長，水體入滲時間亦拉長，其土壤含水量相對較高，則排水性較差，地形濕度指數公式如下：

$$\omega = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\theta}\right)$$

式中，

A_s ：特定集水區面積該網格之集水區面積。

θ ：網格坡度

坡面排水主要由凹地往下游流動，至於山區道路排水則沿著道路側溝，坡面臨水區其土體含水量較高有助於植生入侵，在坡面植生初期演替中有益於坡面穩定；然每逢暴雨，大量逕流易經道路側溝匯集後沿坑溝排出，進而淘刷坡腳造成崩塌；另一方面，逕流入滲至土壤，土體使得土體荷重增加，視凝聚力降低，土壤空隙水壓升高，邊坡穩定性則有下降之趨勢，提高致災機率。

3.3 道路里程密度

道路為每一平方公里土地面積之道路里程長度(道路里程長度／土地面積)。

$$\frac{\text{道路里程長度(km)}}{\text{土地面積(km}^2\text{)}} = \text{道路里程密度(km/km}^2\text{)}$$

結果與討論

透過 NDVI 分析、TWI 分析及道路沿線脆弱度分析等結果進行探討，說明崩塌區位具有之特徵與現象，並以道路崩塌的觀點，闡述獻肚山山區道路，崩塌致災原因，以客觀角度說明山區道路，如何成為小林村崩塌事件之推手。面臨氣候劇變的現今，為減少災害發生頻率及規模，可採取之因應作為為何，皆在本節進行探討及建議，以作為後續維護管理參考。

1. NDVI 指數分析

NDVI 採用崩塌前 2008 年 12 月 21 日(乾季)及 2009 年 5 月 9 日(濕季)等兩期莫拉克風災前之衛星影像，萃取平均值及標準差分布情形。圖 5 為 NDVI 平均值(圖 3)及標準差(圖 4)進行套疊成果，依據表 2 所示，平均值越大且標準差越小者，其地覆類別為森林地之機率越大，由於森林之保水固土情形良好，且土壤深度較深，平時坡面抗沖蝕能力較佳，邊坡能蓄積較大載重。持續豪雨期間，土體含水量較高，邊坡整體抗剪能力下降，另一方面，雨水沿著蝕溝下移刷深坡面，行經邊坡較陡區域，流速隨之加大，越往下游其匯集水量體增加，對下游野溪產生侵蝕力道淘刷兩側邊坡及對河床產生下切作用，其侵蝕情形漸漸向上發展，形成向源侵蝕(headward erosion)，崩塌情形逐漸逼近稜線(ridge)。

2. TWI 指數分析

崩塌地套疊 TWI 分析結果如圖 6 所示，地形濕度指數高代表該區域為坡面凹地，水流易匯集於此，平時有助於植物生長，故植生較為茂密，然暴雨期間，土壤累積過多水

體，土體荷重增加，孔隙水壓無法宣洩的情形，可能形成土壤液化(soil liquefaction)，意指排列鬆散且孔隙中充滿水的土壤受到擠壓，造成孔隙水壓增高，砂粒間的結合力因而減少甚至消失，液化發生時砂與水混和成為如泥漿般的液體，以至於失去支承上部結構物的能力，邊坡便會產生下陷或傾斜等現象(陳銘鴻，2002)。此外，道路通過易截斷坡面逕流，並將其沿道路排水邊溝排出，)然逕流量較大時，水流之直進性使其向道路轉彎處之凹地刷深，影響道路基腳之穩定產生崩塌。

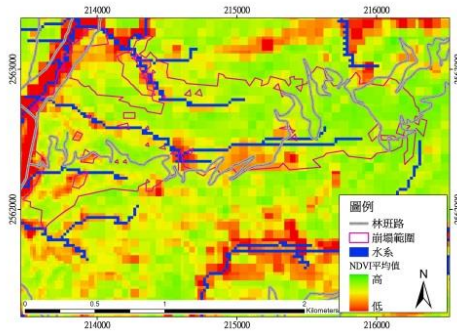


圖 3 NDVI 平均值之空間分布
Figure 3 Distribution of mean NDVI

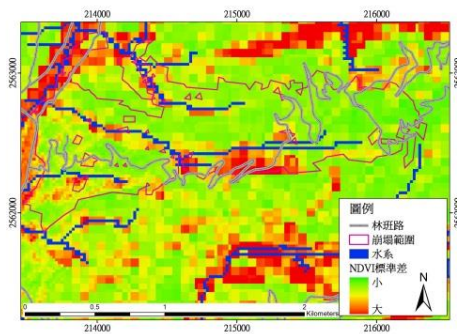


圖 4 NDVI 標準差之空間分布
Figure 4 Distribution of standard deviation NDVI

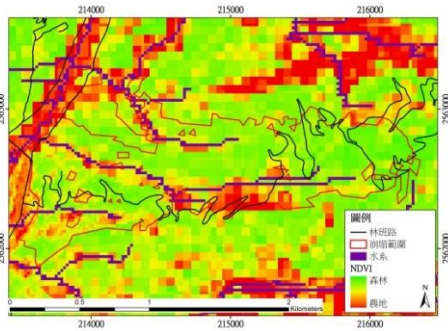


圖 5 NDVI 平均值及標準差之套疊結果
Figure 5 Mean and standard deviation NDVI
using overlay operation

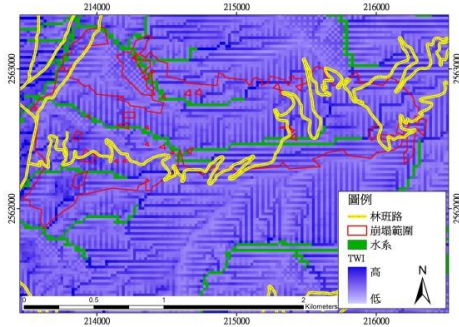


圖 6 地形濕度空間分布
Figure 6 Distribution of topographic wetness
index

3. 道路沿線脆弱度分析

本研究萃取小林村崩塌區位道路兩旁 40m 之 NDVI 及 TWI 空間分布(圖 7)，由前述分析結果可知，綜合指數較高者代表該地區地形較為濕潤，植生生長旺盛，其崩塌潛勢較高。由圖 7 顯示境內中段道路為崩塌潛勢較低之區位，但上下路段因崩塌潛勢高，連帶影響整體坡面之安定性。

依據崩塌投影面積與境內道路比，本區域道路里程密度為 $4.21\text{km}/\text{km}^2$ ，相較於全臺

總道路里程密度 $1.11\text{ km}/\text{km}^2$ (中華民國統計資訊網，2009)，高出 3.79 倍，經查表得知，各縣市區分道路密集處主要位於嘉義市($8.03\text{ km}/\text{km}^2$)、台北市($4.92\text{ km}/\text{km}^2$)、基隆市($4.62\text{ km}/\text{km}^2$)及新竹市($4.04\text{ km}/\text{km}^2$)等區，其他縣市密度則在 $0.37\sim 2.23\text{ km}/\text{km}^2$ ，里程密度為行政區域之土地面積除以各類道路之長度，中央山脈等受限制開發區域仍納入計算之中，雖受地形條件及法令保護，仍有中橫等橫貫公路穿越，各地區密度比較結果顯示，小林村崩塌區域之道路開發密度直逼都市。

本研究範圍之道路總長 7.57km，大小轉彎數計有 40 處，平均 189m 即一處轉彎，密度甚高，現行山區道路主要沿等高線構築，本地區連續轉彎距離甚近，且上下路線過於接近，使邊坡破壞過大，影響邊坡穩定。

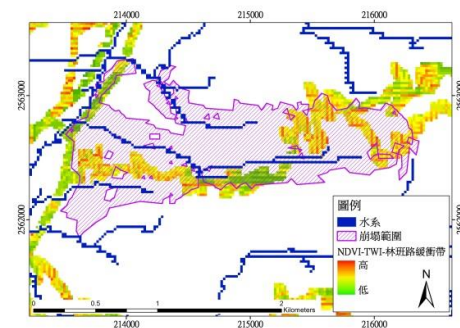


圖 7 道路沿線崩塌潛勢之空間分布
Figure 7 Distribution of landslide potential
along the road

4. 致災原因探討

透過 NDVI、TWI 及道路沿線脆弱度分析探討，可歸結幾項致災可能原因：

- (1) 崩塌範圍內森林生長茂密，土壤深度較深，平時固土能力良好，然連續降雨，

孔隙水壓上升環境下，較容易產生大規模之深層崩塌。

(2) 暴雨時產生之逕流沿著道路邊溝排水，於坡面之溼地匯流，進而沖刷道路邊坡基腳。

(3) 本地區道路里程密度為 4.21 km/km² 密度高，轉彎數計有 40 處，連續轉彎過於密集，間接影響邊坡穩定性。

5.經驗回饋

多數山區道路發生水土災害，水是重要關鍵，道路設計有其容許頻率及使用年限，在氣候變遷的現今，氣候急遽變化，山區道路於開發之時，受限於經費未必能將致災因子進行全盤考量，並加以防範。

道路在坡面為帶狀空間，在空間分布上形成隔離不同區塊之廊道結構，可提供人、動植物及水流通，尤其是水流，本研究顯示當逕流由自然坡面轉由人工結構物移動時，道路對水產生屏障功能，流動表面糙度降低，使得流速增加，且道路設計本為提供人們通行使用，並無阻隔設計，逕流沿道路流動時，若未妥善處理排水問題，即可能致災。

山區道路串聯沿線開發行為，使得受災問題，更加複雜；當發生土砂災害發生時，其沿線村鎮、農作及公共設施將無一倖免，本研究結果顯示，水資源處理是一重要指標，面對由水誘發之道路災害處理原則如下：

(1) 排水處理：邊坡因水產生崩塌原因有二，一為地表逕流致災，二為地下水誘發；前者應進行地表緊急排水，如在崩塌邊緣裂隙以低強度混凝土，或是塑膠布等低透水性材質進行覆蓋，避免災情擴大，並建構坡

面排水系統，利用縱橫向排水排除崩塌區域之逕流，崩塌區及鄰近區域其積水區域亦應設法排除，防止入滲引發土體解離，產生二次災害；後者，以截排地下水為手段，於滑動邊緣設置盲溝，或於滑動邊緣施作橫向排水孔，施作長度應穿越滑動面或是頭部裂隙下方。

(2) 坡面保護：採地工合成材覆蓋坡面、行框植生、噴植植生等方法，降低坡面沖蝕情形。

(3) 埤塘概念：急遽降雨或連日豪雨，水流入滲不及，使得逕流下移並匯集，造成下游排水系統壓力，可於道路沿線尋找淤蓄區位，設置埤塘，坡面逕流經過道路截流後，引導至埤塘，減少下移量體及流速，進而減輕下游排水系統負擔。

結論

本研究提出新的證據來解釋小林村崩塌之原因，依據 NDVI 及 TWI 等衛星影像萃取成果顯示，崩塌區位之道路密度較高於未崩塌區位，本地區道路里程密度高達 4.21 km/km²，研判道路密度高較容易產生崩塌。研究結果顯示，崩塌區位內 NDVI 平均值大且標準差小之區位，所佔比例極高，表示本區土壤深度較深；而道路沿線則有多處 TWI 值較高，顯示道路沿線下邊坡有多處坑溝通過，乃高崩塌潛勢區位。平時本地區植生發展良好，邊坡受根系保護，可承受較大載重，然而暴雨期間，坡面逕流易被道路邊溝所截，一旦逕流量過大，便可能由道路轉彎處下移，沖刷邊坡之坡腳，由此可知山區道路過度開闢是小林村受災關鍵因素。

在氣候變遷的現今，超限降雨，使得土地須面臨更嚴峻的挑戰，排水未完備的山區道路是受害者，亦是加害者，小林村的慘痛教訓猶言在耳，吾人應以更加謹慎並友善的態度，對待環境，使自然生生不息，與人共存共榮。

誌謝

本研究承蒙行政院科技部「環境指標應用於集水區道路沿線風險度分析之研究」(計畫編號：NSC 102 - 2628 - B - 005 - 004 - MY2)計畫經費支持，特於此敬上誠摯的感謝。

參考文獻

1. 中華民國統計資訊網(2009),「道路里程密度」, <http://www.stat.gov.tw/mp.asp?mp=4>。
2. 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, 122:87-94。
3. 魏倫璋、羅佳明、鄭添耀、鄭錦桐、冀樹勇(2012),「深層崩塌之地貌特徵-以台灣南部地區為例」, 中興工程, 115:42。
4. 李鎮洋、賴文基、陳振宇、黃效禹、郭力行(2012),「莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建-以小林村深層崩塌為例」, 水土保持學報, 42(4): 313-324。
5. 林昭遠、鄧亞恬、黃文政(2013),「應用環境指標劃定阿里山溪集水區道路沿線崩塌潛勢之研究」, 水土保持學報, 45 (3): 721-736。
6. 張鑫崑(2013),「因應氣候變遷合坑溪集水區調適策略之研究」, 中興大學水土保持學系碩士論文, P.30。
7. 易任(1993),「臺灣全區降雨時空分布之研究：主成分分析與群集分析」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
8. 陳銘鴻(2002),「土壤液化成因、災害與復建」, 臺灣之活動斷層與地震災害研討會, P.107-123。
9. 林昭遠、張鑫崑、傅桂霖(2013),「阿里山溪集水區源頭崩塌機制之探討」, 水土保持學報, 45(2): 653-662。
10. 吳淵洵、周南山(2006),「台灣山區道路邊坡災害及搶修處理工法之探討」, 臺灣公路工程, 32(12): 524-554。
11. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering(1973), "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS," Third ERTS Symposium, Goddard Space Flight Center, Washington, D. C. NASA SP-351, 390-317.

水土保持學報 47 (1): 1287–1296 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (1): 1287–1296 (2015)

103 年 06 月 05 日收稿

103 年 06 月 23 日修改

103 年 06 月 25 日接受