# 蘇花公路穩定問題與分析初探-以蘇花公路 115.9k 為例

朱晃葵1 羅佳明2 張玉粦3

<sup>1</sup>財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心研究助理 <sup>2</sup>建國科技大學土木工程系暨土木與防災研究所助理教授 <sup>3</sup>財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心副經理

### 摘要

蘇花公路於梅姬颱風豪雨期間,造成蘇澳至南澳段附近山區公路邊坡產生嚴重損毀,其 中以公路路線曲率最大處(里程115.9k)附近溪溝周緣受到降雨誘發的岩屑崩滑事件最為嚴 重。對於山區道路周緣山崩量體與影響範圍之掌握,實為當前關鍵之防救災課題,亦為目前 國內外研究之發展重點。本研究透過現場調查及合理的假設來建立蘇花公路115.9k附近的三 維數值模型,利用三維有限元素軟體(midas/GTS)模擬邊坡的穩定狀況,藉此描述山崩破壞機 制以及釐清坍塌範圍與滑動深度,作為山區道路高潛勢災害路段防災之參考。

關鍵字:蘇花公路邊坡穩定、工程地質、數值模型。

### 一、前言

蘇花公路(又稱台9線)於梅姬颱風(民國99年10月21~24日)豪雨期間,造成蘇澳至南澳段附 近山區公路邊坡產生嚴重損毀,以公路路線曲率最大處(里程115.9k)附近的岩屑崩滑事件最為 嚴重,經航照判釋估算坍塌面積與崩落體積約1×10<sup>-1</sup>km<sup>2</sup>與2.1×10<sup>-3</sup>km<sup>3</sup>,其產生之土石流往東 南方下邊坡衝擊道路後堆積於太平洋海岸線,形成面積約4×10<sup>-2</sup>km<sup>2</sup>之三角洲沖積扇,山崩材 料與破壞類型以崩積土層與風化岩塊之岩屑崩滑為主(Chou, 2012; 李彥良, 2010;中央氣象 局防災颱風資料庫, 2012),在此事件前後亦有芭瑪颱風(民國98年10月)與奈格颱風(民國100 年10月)的長時間降雨事件導致此區域路段邊坡產生坍滑造成路基持續流失,產生道路阻斷的 災害(交通部公路防救災資訊系統, 2012)。

事件發生後,已有相關工程單位與部分研究針對本區域進行山崩機制調查與整治規劃, 並加強蘇花公路沿線邊坡穩定性調查、監測與預警,如交通部運輸研究所(2011)針對115.9k 邊坡的崩塌監測預警模式之建立。而現今山區道路因天災預警封路的依據主要是透過降雨量 預測來施行,對於區域性坡地狀況及災損機制尚未進行系統性的歸納統整,故山區道路周緣 邊坡山崩潛勢高低的預警工作仍有加強空間,尤其是對於邊坡整體構造特性以及山崩量體與 影響範圍之掌握,實為相當關鍵之重點課題,此亦為當前國內外研究之發展重點。而對於邊 坡穩定分析問題,近年來廣為應用數值軟體與適當的分析模式,可以求得與實際較為接近的 破壞狀態,也能夠進行更貼近實際狀況的分析,但傳統二維平面應變分析只能分析邊坡的單 一滑動面,利用它來考慮蝕溝兩側的三維坡壞機制並不恰當,而二維分析和三維分析的最大 區別在於,是否考量地表面起伏和滑動面的形狀、大地材料特性以及滑動面的分佈等因素, 且三維分析中可進一步考慮二維分析未考慮到的三維受力情況,故與實際更接近。因此本 研究利用三維有限元素軟體(midas/GTS),建立蘇花公路115.9k附近邊坡的三維數值模型,經 由相關調查資料與假設條件模擬此區域山崩事件,釐清崩塌範圍與滑動深度之特性。

### 二、研究方法

本研究工作項目主要分為現場調查、影像判釋分析及現地全尺度數值模擬分析等三大項,主要蒐集現場調查與影像判釋成果,利用地質強度指數 GSI(Geological Strength Index, Hoek and Brown, 2006)的概念簡化建置成數值模型,並驗證比對既有破壞區域模擬成果,藉 此預測說明尚未發生災損的區域及範圍。

#### 2.1 研究區域說明

根據中央地質調查所區域地質圖(2012)分佈及地貌分析,蘇花公路蘇澳-東澳段沿線經過 之溪流除南、北兩端外,皆為短急的山溝。李彦良(2010)於梅姬颱風災後地形判釋與地質調 查結果顯示,本路段岩性以大南澳片岩之石墨片岩、石英雲母片岩偶夾綠泥石片岩為主,公 路沿線有角閃岩出露,此區域地質構造複雜且岩體破碎,蝕溝發育密集,公路里程115.9k的 崩塌事件即是沿蝕溝兩側發育,並於豪雨時擴大並產生向源侵蝕,造成土石崩落並形成土石 流衝擊下方公路。其中以梅姬颱風侵台期間(2010 年 10 月)災損最為嚴重,阻斷公路之日期 長達25 天(交通部公路總局第四區養護工程處,2010)。

#### 2.2 三維模型建置說明

三維模型建置所需要的資訊包含:(1)災前地貌影像分析、(2)崩積層厚度率定說明、(3) 岩盤參數假設以及(4)地層設定與全尺度數值模型建置,分項說明如下:

#### 2.2.1 災前地貌影像分析

本研究所採用之影像包含 2004 年拍攝之正射航照影像、數值高程模型(20m×20m 精度之 DEM)與崩塌前後空拍資料等,利用 ArcGIS 將 DTM 內插為 5m×5m 網格點,再以 Clip 功能 切割出所需模擬範圍載入 midas/GTS 軟體中生成災前地形面。判釋方法主要利用各影像之地 貌表徵與地形起伏變化,進行冠部弱面線理發展之特徵判釋,並搭配現場調查所量得之原次 生弱面位態,初步釐清蘇花公路 115.9k 一帶之弱面發展,做為數值模型建置之參考。

#### 2.2.2 崩積層厚度率定說明

根據現場調查,從岩塊表面擦痕得知崩落材料除了崩積土層外亦有岩體滑動跡象,且從 邊坡破壞深度亦可映證此區域並非介於土岩交界面的淺層破壞,而是屬於切穿岩盤的岩屑滑 動類型,因此三維邊坡模型崩積土層厚度的假設建置顯得重要,關於土層厚度林柏勳等人 (2011)歸納出數種估算方式,包含等值法、力學法以及坡度法,其中若研究區域較大並不適用 將土層深度視為單一值的等值法,而力學法雖有力學基礎,但各個區域的剪力強度取得甚難, 須配合代表性的鑽孔取樣進行試驗來求得,故有執行上的困難,而坡度法的假設較適用於本 研究,因此透過現場調查岩盤露出區域並配合坡度法公式加以估算全區域崩積層厚度;坡度 法是利用坡度分區或坡度回歸經驗式來推估土層厚度,坡度主要為描述高度之變化速率(林淑 媛,2003),以5×5 網格資料為例中心點 Z5 之坡度θ計算公式如下(Wilson and Gallant, 2000):

$$\begin{cases} z_{x_{1}} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_{3} - Z_{1}}{2h_{1}} \\ z_{x_{2}} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{z_{6} - z_{4}}{2h_{1}} \\ z_{x_{3}} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_{9} - Z_{7}}{2h_{1}} \end{cases} \qquad \begin{cases} z_{y_{1}} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_{1} - Z_{7}}{2h_{2}} \\ z_{y_{2}} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_{9} - Z_{8}}{2h_{2}} \\ z_{y_{3}} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_{9} - Z_{9}}{2h_{2}} \end{cases}$$

$$\overline{x} = \frac{\left(z_{x_1} + z_{x_2} + z_{x_3}\right)}{3} \qquad \overline{y} = \frac{\left(z_{y_1} + z_{y_2} + z_{y_3}\right)}{3}$$

hl 和 h2 分別為 x 軸和 y 軸間距,因此可以得到中心點 Z5 之坡度 $\theta$ 為:

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{(\overline{x})^2 + (\overline{y})^2}$$

其中變質岩片岩區崩積土層厚度可用下式表示,崩積層厚度為坡度的指數函數關係為(h 單位為 m, θ單位為度):

$$h = 25.601 e^{-0.096 \theta}$$

2.2.3 岩盤參數假設

在數值分析上,大地材料參數的決定往往影響分析結果,影響岩體強度、變形性之因子 包括:地層、岩性、單壓強度、變形模數等,因此岩體參數在無詳盡的力學試驗將出現相當 多之排列組合,目前大多是透過力學試驗及相關文獻來估計地層參數,但這些預估之參數值 並不一定具代表性。因此本研究參考「臺9線蘇花公路山區道路改善計畫可行性研究與工程 規劃暨優先路段工程設計工作-大地工程調查紀實報告(交通部公路總局,2010)」之東澳區域 鄰近鑽探及試驗,岩盤變形及強度參數係根據鑽探取樣岩心之單軸壓縮強度進行推估,由於 岩盤存在不連續性,蘇花公路沿線片岩為膠結不良、低強度的岩石,屬於 IRSM 定義的軟岩 (1981),採用 Hoek and Brown 破壞理論(2006),藉由岩心單壓強度、GSI 評分、岩體性質以及 邊坡開挖擾動程度等條件,進行岩盤與岩心的尺度關係進行參數折減。

根據 Hoek and Brown 破壞理論建議,片岩岩性參數 mi 設為 10,小尺度或機械式開挖邊 坡假設擾動係數 D 為 0.7,地質強度指數 GSI 則依據現地調查選取較具代表性的區域,作為 參數分類假設,主要依岩體破碎程度可分為三類型,分別為崩坍區域、崩積層以及塊狀岩盤, GSI 值分別假設為 15、25 及 35,分析所需地層強度及變形參數整理如表 1。

	崩坍區	崩積層	塊狀岩盤
單位重(t/m <sup>3</sup> )	2.7	2.4	2.7
GSI	15	25	35
摩擦角 (°)	15.08	20.76	24.72
凝聚力(MPa)	0.180	0.270	0.405
變形模數(MPa)	570.74	714.05	1058.37

表1 地層分析參數表

2.2.4 地層設定與全尺度數值模型建置

圖 1 為研究區域在梅姬颱風致災前的衛星影像及數值地形檔案,輸出網格中的平均坡度 可作為坡度法推估崩積土層厚度之用,接下來於三維分析軟體中生成真實地形面模型及網 格,網格大小由小至大從地表面漸變至模型邊緣,如此建置目的主要可節省分析運算的時間, 圖 2 模型網格圖可看出地表面的網格較密,越遠離製模型邊界則逐漸擴大,分析網格總數為 95,280 個,圖中模型分層則依據岩盤參數假設進行設定,地表面薄層區域為崩積土層,其厚 度係利用坡度法求得輸入建置,即坡度越陡區域崩積土層越薄,分析區域邊坡坡度為 0~63.3 度,考量該區域屬變質岩區片岩為主地層,計算後崩積土層厚度為 0.9~25 公尺,另外岩盤依 破碎程度及 GSI 值的評估可再區分為崩坍區域及尚未致災的完整區域,前者主要為目前已經 產生破壞的區域,後者為考量岩盤自立性較佳尚未遭受蝕溝侵蝕的區域,由此設定以避免分 析結果會產生邊坡滑動破壞面皆產生在坡度較陡之區域。





(a) Google earth 災前立體影像 (b) 數值地形 DEM 影像及網格坡度圖

圖 1 分析區域之衛星影像及數值地形坡度圖(梅姬颱風致災前)



圖 2 現地調查代表性岩盤照片及數值分析地層分布及網格示意圖

#### 2.3 强度折减法邊坡穩定分析原理

對於邊坡,傳統定義穩定性的安全係數(FS)概念是由 Bishop (1955)提出,為土壤之實際 剪力強度與破壞發生時之剪力強度兩者之比值。剪力強度折減技巧決定安全係數為土壤之實 際剪力強度與折減至破壞發生時之剪力強度兩者之比值,此方法最早使用在 Zienkiewicz 等人 (1975),之後此概念即被廣為應用。折減方法以剪力強度之參數來做折減,在莫爾-庫倫破壞 準則中即是以大地材料的凝聚力與摩擦角,先假設初始運算之邊坡安全係數,根據收斂條件 與安全係數增量之關係來決定邊坡最後的安全係數,當位移變化量穩定即是邊坡未達破壞狀 態,於某一強度參數比值下有明顯位移增大量表示邊坡已達破壞,依此決定安全係數,並可 透過邊坡網格中之最大剪應變等值線圖(max shear strain contour),作為觀察邊坡整體破壞區的 變化,可進一步定義出最危險破壞面的形狀與位置。

# 三、研究結果

#### 3.1 現地調查及影像判釋成果

研究團隊近期於2012年4月30日及5月21日赴現地調查(其中5月12日遭逢豪雨事件), 主要調查釐清邊坡左翼既有崩坍地之破壞機制,以及邊坡右翼蝕溝遍佈尚未致災區域,透過 現地調查及影像判釋可歸納出此區域屬於複合型坡地災害,破壞機制大致可分成下列幾點:

 坡面蝕溝向源侵蝕現象:從圖3梅姬颱風前後的航照圖比對可發現,災損最為嚴重的上邊 坡左翼是由兩條主要蝕溝侵蝕造成,水流匯聚即造成上方及兩側崩塌,產生 V 型深谷陡 坡,若蝕溝發育已達平衡則通常會得到下凹形狀的蝕溝縱剖面,但由於地殼擠壓之作用, 地殼位移速率甚高(每年近20mm,陳惠芬,1984),地盤上升現象亦加速造成本區域溪谷 下切速度,而侵蝕源頭往往持續向上游溯源,雙溝同源亦容易使雙溝間的塊體因自持力不 足產生土石鬆動滑落,此現象稱為溯源侵蝕現象,此現象若發生在道路上邊坡,則易產生 落石或岩屑滑動阻斷路面,發生在道路下邊坡則容易造成路面裂縫、下陷及斷裂等現象(如 圖4調查點B)。



圖 3 梅姬颱風災前災後崩坍地與蝕溝關係比對圖



圖 4 蘇花公路 115.9k 附近現地調查點照片

蝕溝發展階段之沖蝕種類可概分為三項:(1)水瀑沖蝕(waterfall erosion):指高程差造成水瀑對溝底造成劇烈淘刷作用,此常於溯源侵蝕產生之現象,圖4調查點F可觀察到此現象。(2)溝底沖蝕(channel erosion along gully beds):水流對溝底淘刷作用,使蝕溝加深; (3)側壁沖蝕(land-slide erosion on gully banks):溝底逕流流速快時,水流侵蝕淘空溝側趾部,使側壁土石崩落,此側壁沖蝕結果可演變出蝕溝之支幹。後兩者蝕溝沖蝕機制可充分說明此區主要致災因子,圖5為調查點E位於上邊坡右翼尚未發生明顯崩坍區域為溝底及側壁沖蝕破壞機制之證據,由於水流充沛攻擊坡趾引致淘空,劈理面順節理面錯開侵蝕後 淘空,接著壓垮造成上方料源再崩塌,崩塌流動後再刮掉中下游的邊坡,又引致其他崩塌, 航照圖顯示上邊坡右翼蝕溝遍佈,現地調查亦可發現沿劈理弱面開裂的跡象(最嚴重達 15cm),另外弱面呈高角度方向排列亦為此區域破壞機制特性之一。



圖 5 調查點 E 溝底及側壁沖蝕破壞機制

2. 變質岩區節理發達且破碎為亦為此區域複合型致災原因之一,加上劈理與其他弱面十分發達,造成本路段邊坡存在傾覆或楔形破壞問題,圖6照片可看出上邊坡左翼與下邊坡右翼崩坍地屬於高角度逆向坡地層,當岩盤層面過度傾斜至使重心延線超過塊體基部,容易因自重產生驅動力矩而發生傾覆,而蝕溝側蝕亦加劇傾覆破壞現象。邊坡傾覆或楔形滑動堆積於下邊坡形成扇狀堆積於坡趾,長期形成植被良好的緩坡地,此外觀看似穩定的坡地下伏透水性差的岩盤,坡趾又受海浪淘刷,因此公路下邊坡亦屬於不穩定狀態。



圖 6 弱面呈高角度排列現地照片

115.9k 道路上下邊坡恰逢地層交界面,不同的岩性差異侵蝕現象更顯劇烈,下邊坡石英雲母片岩不透水特性導致積蓄在上邊坡風化角閃岩層中的水分較難排出,容易造成上邊坡滑動驅動力的累積。

### 3.2 滑動範圍及體積估算

蘇花公路 115.9k 附近邊坡穩定分析結果顯示,圖 7 左上圖為邊坡塊體大地自重平衡分析 的垂直應力狀態,右上圖為邊坡安全係數(FS)等於 0.9 時的剪應變分布圖,顯示邊坡此時屬近 於臨界不穩定狀態,除模型邊緣可能因邊界束制的關係外,其餘剪應變較明顯的位置可視為 邊坡不穩定滑動面,以 115.9k 上邊坡左翼蝕溝兩側的崩坍地最為嚴重,最深滑動深度與平均 滑動深度分別為 22.2m 及 15.6m,顯示滑動面皆以切穿崩積土層達到岩盤(片岩 GSI 為 35 區 域),與一般分析認知的滑動面位於土岩交界面有所不同,屬於深層的岩體滑動,分析結果上 邊坡主要坍塌面積與崩落體積約 1.56×10<sup>-1</sup>km<sup>2</sup> 與 3.56×10<sup>-3</sup>km<sup>3</sup>。

模擬結果套疊比對災後航照圖如圖 8,邊坡模擬滑動位置與實際崩坍位置大致相近,而 上邊坡右翼現場調查發現的一些破壞機制,在分析模擬中已達到破壞條件,故整體分析結果 較實際狀況顯得保守,崩坍面積及量體略大於實際 1×10<sup>-1</sup>km<sup>2</sup>與 2.1×10<sup>-3</sup>km<sup>3</sup>的狀況,破壞區 域大致分佈於地形變化較劇烈的蝕溝兩側或道路周緣,惟蝕溝雙溝同源及下切側蝕的破壞機 制較難反映在此邊坡穩定分析中。



圖 7 數值分析結果與主要滑動面深度評估圖



圖 8 道路周緣破壞區域災後航照影像(左)與數值模擬結果(右)比對

儘管分析結果較實際狀況顯得保守,但梅姬颱風事件發生至今,幾次的現地調查照片如 圖 9 比對可發現,上邊坡左翼的兩條主要蝕溝雙溝同源及側蝕下切的現象越來越明顯,兩蝕 溝間的塊體已處於不穩定狀態,道路周緣下邊坡路基淘空的跡象亦屬明顯,而上邊坡攔砂工 程的整治,攔砂壩亦在 5 月 12 日的豪雨事件淤滿,可進一步說明此研究數值分析成果屬於保 守的狀況。



圖 9 蘇花公路 115.9k 災損持續發生跡象時間對照圖

## 四、結論與後續應用方向

關於本研究所建立之全尺度數值模型,係針對蘇花公路 115.9k 周緣邊坡為對象進行模型 建置,透過歷史致災區域進行現地調查及數值模擬分析驗證,結果可得到較為保守之山崩估 計,以及模擬出切穿岩盤的岩體滑動行為,並可劃定出屬於山崩高潛勢的範圍及深度,可看 出除了已發生破壞的區域外,蝕溝遍佈的上邊坡右翼亦是後續調查及監測的重點區域,其後 續相關應用如下:

- 山區道路邊坡滑動之危害範圍劃設:本研究推估出邊坡可能坍滑的危險區域及量體,可 利用此方式將坡面滑動料材透過分離元素法進行運移堆積影響範圍的模擬。藉此劃設可 能的危害影響範圍,再參考國外相關道路邊坡岩屑崩滑危害範圍評估方法(Jaboyedoff et al., 2005),以數值模擬之運移速度、動能、運動路徑、堆積範圍等,區分危害範圍內之 高、中、低潛能。
- 災前情境模擬展示及預警系統規劃:除道路危害範圍劃設外,其數值模型亦可搭配邊坡 監測與穩定分析成果,提供災前情境模擬展示,除可提供災防單位參考外,亦可將其情 境模擬成果發布至網路平台,增加山區道路封路前警示之作用。

## 参考文獻

- 交通部公路總局(2010),臺9線蘇花公路山區道路改善計畫可行性研究與工程規劃暨優先 路段工程設計工作-大地工程調查紀實報告。
- 2. 交通部運輸研究所(2011),蘇花公路 115.9K 邊坡崩塌監測預警模式之建立研究。
- 3. 交通部公路防救災資訊系統(2012): <u>http://bobe.thb.gov.tw</u>
- 吴明惠(2008),山區蝕溝形成對道路災損潛勢之研究,國立宜蘭大學土木工程研究所碩士 論文。
- 5. 李彦良(2010),「蘇花公路沿線地質災害空中勘查」,地質,29(4):21-25。
- 6. 李春生(1987),「臺灣北部十條地質實習考察路線沿線地質簡介-第九條路線:蘇花公路 蘇澳至南澳段沿線附近地質簡介」,臺灣地質野外實習指導手冊(一),第141-156。
- 7. 林伯勳、許振崑、冀樹勇(2011),集水區土壤厚度經驗式應用分析,中興工程,111:35-45。
- 林淑媛(2003),地震誘發山崩之因子探討-以集集地震為例,國立中央大學應用地質研究 所碩士論文。
- 9. E. Hoek, M.S. Diederichs(2006). "Empirical estimation of rock mass modulus." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (2006) 203–215.
- 10. H.T. Chou, C.F. Le, C.M. Lo, Z.P. Lin (2012). "Landslide and alluvial fan caused by an extreme rainfall in Suao, Taiwan." 11th International Symposium on Landslides (ISL) and the 2nd North American Symposium on Landslides, Banff, Alberta, Canada.
- 11. Jaboyedoff, M., Dudt, J. P., Labiouse, V. (2005) . "An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree." Natural Hazards and Earth System Sciences, (5):621–632.

## ABSTRACT

Su-Ao to Nan-Ao section of Su-Hua highway which causing serious damage in slope of the mountains during the heavy rains of typhoon Maggie. In mileage 115.9k, which is the maximum curvature of highway route and it is the most serious debris slump event by rainfall-induced. Landslide volume and its sphere of influence is the key to disaster prevention issues in mountain roads. It is also the focus of development in present study. In this study, use finite element software(midas/GTS) to establish three-dimensional slope stability numerical model of mileage 115.9k in Su-Hua highway through field investigation and reasonable assumptions. In order to describe the landslide failure mechanism and to clarify the collapse of the scope and sliding depth. As a reference for disaster prevention of the mountain road high potential disaster sections.

Keywords: Slope stability of Su-Hua highway, Engineering geology, Numerical model.