

蘇花公路因雨致災崩塌機率模式之建立與防災應用

陳進發
公路總局副總工程師

林意晴
公路總局副工程師

陳文信
公路總局西濱北工處段長

摘要

本文藉由統計公路常發生之災情種類，進而由致災成因之源頭探討防災管理策略，主要說明如何導入風險控制概念研析山區公路之防災，並採用聯合國減災組織對於風險之定義，亦即「在特定場景下，因標的物崩壞造成用路人罹災的風險」。研究過程中運用蘇花公路近10年因雨致災之記錄，篩出453筆資料，逐筆依其發生里程位置及當次降雨事件總累積雨量繪製統計圖，取得不同崩塌機率值在蘇花公路上所對應之事件總累積雨量。本文並分析173場降雨事件，藉由統計軟體SPSS運算災害與降雨因子之相關性，找出較具敏感性之降雨因子組合視為降雨觀測指標，再透過SPSS軟體應用邏輯式回歸模型評估蘇花公路崩塌潛勢模式，獲得統計年限中雙重降雨指標下之崩塌機率。經由實例驗證本文所建立之崩塌機率模式圖提供有效且具體可行之防災管理決策支援。

關鍵字：邊坡、崩塌機率、風險、防災

一、前言

公路災害往往就發生於「水」由高處往低處流動的過程中。舉例而言，天上一朵雲在山上分水嶺下雨，降雨初期雨水會入滲土壤內部，直至土體飽和後產生漫流，再匯積水路成集中逕流，過程中開始有能量沖刷土壤表面，因此落石或淺層崩塌機率增，於經過公路時，如無適當導流，極易漫溢至路面，形成路面逕流水順著公路縱坡及超高或左或右流下，直到路側相對低點流洩而下，單點沖刷公路下邊坡，路基缺口或流失機率大增，而在匯流入溪流之前，因水量及其沖刷能量過大，極易造成向源侵蝕或野溪擴張，匯流入溪流後，如降雨強度持續增高則易形成洪峰，造成曲流攻擊或是中下游之橋梁淘刷崩塌。因此，探討源頭之降雨強度與延時確實是影響公路災害發生與否及規模的主要因素。所以本文運用災害發生成因之敏感性因子-降雨強度與延時之統計資料，當成關鍵觀測指標，律定預警、警戒及行動等3級門檻值並搭配於事前規劃之各級應變計劃，於災害可能發生前啟動防災管理，於災中再盤點加碼部署，於災後提前啟動搶災作業，觀念的改變催生了新的制度，不同於2011年以前之「守株待兔」的被動防禦策略，真正落實主動積極之防災管理策略。本文主要介紹如何運用蘇花公路因雨致災之崩塌機率與用路人通行曝露度所組合之風險值，於災前控制通行交通量降低人員罹災風險。

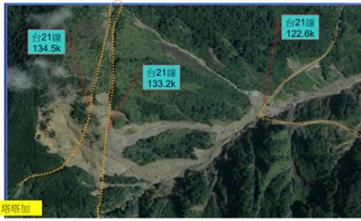
二、公路因雨致災類型與特徵

公路上發生的天然災害驅動因子可能來自降雨、地震、風蝕或潛移等等因素，本文係針對降雨造成之災害作分析整理，茲以公路管理單位慣常使用之重大災害通報術語，概可分為；上邊坡崩塌、路基缺口、路基流失、土石流淹埋、零星落石、橋梁斷裂等6大類型，均曾造成用路人罹災，爰將各類型特徵及其致災成因分述如下；

2.1 上邊坡崩塌

此類型崩塌依其地盤種類之不同，又可分為岩坡(如圖一)、土坡或是土壤礫石混雜(如圖二)，如係純岩坡則常見其節理面發達、或是風化程度高，此種路段通常在山區公路上路寬會比較狹窄，如係土坡則在崩塌前會於坡頂處形成張力裂縫，並不易查覺，或為淺層或為深層破壞，最常見的就是土礫混雜之邊坡破壞，而其破壞成因主要係因雨水入滲，造成土體含水飽和增加自重，且增加裂縫內之孔隙水壓力直至驅動力與抗剪力比值之臨界點而破壞崩塌，最典型之案例猶如台21線新中橫公路91K+600(豐丘明隧道附近)，如圖三所示，上邊坡之部份地層材料主要由塊石夾雜砂土及粉土所組成，可能是野溪沖刷而崩塌的崩積土，此等地層因係崩塌堆積而成，故組織鬆軟，並導致邊坡之不穩定現象，而最後坡頂逕流水滲入坡頂張力裂縫終至崩塌，如圖四所示。

圖九:下邊坡野溪擴張致掏蝕邊坡



圖十:向源侵蝕

2.4 土石流淹埋

此類型災害發生地常距離公路甚遠，發生成因可能來自於遠方邊坡崩塌於源頭聚積土石材料，於坡度足夠的狀況下遭逢降雨驅動，進而淹埋下游之公路(如圖十一)。源頭如無適當的整治復育，單靠公路管理單位以清開道路範圍方式，事實上僅是短期治標而非治本。



圖十一：土石流淹埋公路

2.5 零星落石

就公路管理單位的認定，係以平鋪路面之落石，而無堆疊現象稱之(如圖十二)，主要常發生於前期降雨或地震，因節理面受溫差熱漲冷縮效應而開裂落下，慣常採用防落石網釘掛方式保護。



圖十二:零星落石

三、應用於防災之風險控制策略

依據聯合國氣候變遷政府間專家委員會(簡稱IPCC)對於風險之定義如公式(1)，套用於本文亦即「在特定場景下，標的物崩壞的風險」。另外聯合國減災組織(簡稱UNDRO)及世界銀行對於風險之定義如公式(2)，套用於本文亦即「在特定

場景下，因標的物崩壞造成用路人罹災的風險」。兩相比較，差異在於曝露度，本文因係研析公路風險，主要控制策略為降低用路人罹災機率，爰其主體仍應聚焦於通行於公路上用路人之分佈多寡，亦即以用路人之車流量當成曝露度，如此方能客觀且即時呈現公路風險程度。舉例而言，當蘇花公路尖峰車流量與離峰車流量比較，在同一路段發生之崩塌，用路人罹災機率就明顯不同，因此本文係用公式(2)對於風險之定義，運算蘇花公路各路段之即時風險，進而利用2011~2015年劇烈天候下之封路管制實務操作經驗值，律定蘇花公路於劇烈天候下應封路管制之風險值，該經驗值歷經5年於蘇花公路之操作，期間不乏連續假期返鄉車潮等重要節日必需封路，因此已內含相當程度之社會經濟風險。

風險=危害度 x 脆弱度...公式(1) (IPCC、我國國發會、水利署、NCDR等採用)

風險=危害度 x 脆弱度 x 曝露度...公式(2) (本文、UNDRO、世界銀行等採用)

危害度：災害性暴雨規模出現之機率

脆弱度：特定降雨場景下之崩塌機率

曝露度：小時交通量/交通容量

根據公式(2)風險定義，係由危害度、脆弱度、曝露度等3項元素所構成，式中之危害度，經蘇花公路10年之實際災害調查統計，定義為災害性暴雨規模出現之機率，脆弱度則是特定降雨場景下之崩塌機率，而曝露度則定義為以各道路容量下，暴露於災害路段之每小時之交通量，即小時交通量/交通容量。

四、蘇花公路崩塌機率模式之建立

4.1 研究流程

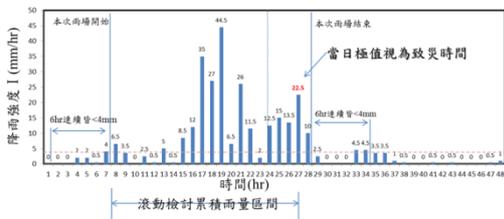
本文擇定交通量最大且無替代道路之重要風景觀光軸線，台9線蘇花公路為研究範圍，辦理風險分析。資料庫係針對台9線蘇花公路，蒐集近10年(2004年至2014年8月止)約1327筆之歷史災情，其資料來源包含公路總局轄管工程處(段)提供之災害通報單、每日道路巡查紀錄表以及登錄於公路防救災資訊系統等。經彙整並建立數據檔後，進一步篩除非因天然災害造成之事件(例：交通事故)。研究流程可分為降雨事件分類、歷年災害蒐集與

分類、脆弱度分析、曝露度分析、風險分析等6個階段，除了統計災害外，並利用蘇花公路沿線氣象局所設置之5座雨量站所記錄之歷史降雨資料為降雨事件，將歷次降雨事件中有無發生公路災害比對分類，如在降雨事件中發生災害，則再篩出各降雨延時之最大累積值。運用統計軟體SPSS運算災害與降雨因子之相關性，並找出較具敏感性之降雨因子組合視為降雨觀測指標，再透過SPSS軟體應用邏輯式回歸模型評估蘇花公路崩塌潛勢模式，即可獲得統計年限中雙重降雨指標下之崩塌機率。而曝露度分析則是運用實際交通量與「102年台灣地區公路整體規劃」報告中蘇花公路之道路容量之比值當成曝露度。危害度分析則是依據氣象局所公佈的6小時定量降水預報，及風雨預報單中之24小時與事件總累積雨量，研判未來蘇花公路可能出現或超越所律定之降雨觀測指標門檻值之發生機率。最後將危害度 x 脆弱度 x 曝露度即可得風險，並以時間為橫軸，風險(%)為豎軸，即可繪製風險之歷時圖，提供於災前何時啟動防災預警應變決策支援使用。

4.2 資料蒐集

考量本文蒐集之歷史災害資料係以年度及中央氣象局建置雨量站觀測紀錄其起始時間須具一致性，故選擇台9線蘇花公路沿線之蘇澳、東澳、南澳、和中之及富世等作為特徵雨量站。為進行災害與降雨因子對道路致災風險之分析，首先需擷取災害發生所在之降雨事件及其雨場資料，並初步進行雨量分級。

雨場之定義係根據行政院水土保持局於91年委託國立成功大學辦理「土石流發生降雨警戒值之研究」研究報告中提出之方法（圖十三）。



圖十三:雨場切割示意圖

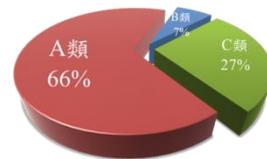
雨量分類原則乃採用中央氣象局104年9月1日前之雨量分級，將累積24小時雨量區分為A、B、C類，各類別之雨量原則如下：

A類：24hr ≥ 130mm。

B類：130mm ≥ 24hr ≥ 50mm，且1hr,max ≥ 15mm

C類：非屬以上二類者。

依前述雨場切割方式及雨量分類原則，搜集各雨量站歷年之降雨紀錄，進一步比對歷史災情所在之雨場資料並區分降雨事件是否發生災害。經統計近10年共計1327筆災害資料，其中零星落石資料數計781筆，就零星落石資料樣本數中，因降雨而發生落石者僅佔總資料數4%，其餘96%之零星落石與降雨尚難連結，亦即以現今科技尚難預警，爰本文扣除零星落石事件後，採用約546筆災害樣本數為有效樣本數。546件樣本數約73%係因歷經降雨事件而發生災害(圖十四:災害與降雨因子分析)，另因蘇花公路歷年災害復建已完成，防災能力提高，若以時間較久遠之災情分析其雨量資料，則易低估其防災能力，故採用2011年後之災情資料及雨量紀錄進行邏輯研究分析，以求得於不同短延時累積雨量值對應於長延時累積雨量值之崩塌機率，本報告所定義之短延時為1小時、3小時、6小時，長延時為24小時及總雨量累積值。本報告共統計173場降雨事件，其中57場降雨事件中蘇花公路發生公路災害。

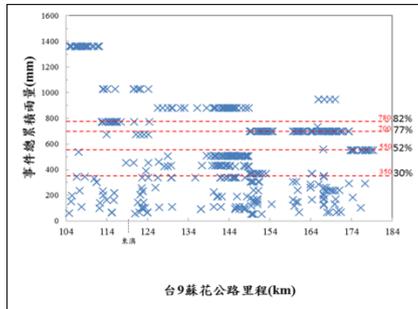


圖十四:災害與降雨因子分析

4.3 崩塌機率分析

一場降雨事件中，不同的降雨強度（即短延時降雨累積值）必然對山區公路造成不同的衝擊影響，惟以目前氣象科技之預測能力，事件總累積雨量在時間的排程上，是最先被估算出來的，因此統計事件總累積雨量之崩塌機率在防災情資研判初期是決策支援所必需具備的。本文運用蘇花公路近10年因雨致災之記錄，篩出453筆資料（含零星落石），逐筆依其發生里程位置及當次降雨事件總累積雨量繪製態態圖，並分析不同崩塌機率值在蘇花公路上所對應之事件總累積雨量，如圖十五，統計結果顯示：事件總累積雨量達350mm時，蘇花公路具中度崩塌潛勢能。達550mm時，蘇花公路具高度崩塌潛勢能。事件總累積雨量達700mm時，蘇花公路具高度崩塌潛勢能。此數值對於防災初期之部署規模具有相當大之影響力，舉例而言，某颱風於級暴風圈接觸陸地

前18小時發布陸上颱風警報，同時中央氣象局會發布風雨預報單，內容即預測有各地區之事件總累積雨量，期間雖仍會視情況上修或下修，但防災人員即可針對預測值判斷公路崩塌潛勢能之高低而部署。



圖十五:不同崩塌機率在蘇花公路上所對應之事件總累積雨量

為建立評估蘇花公路於強烈天後下之崩塌模式，採用2011年後173場降雨事件，找出蘇花公路沿線代表之特徵雨量站其對應之降雨資料(累積1hr,max、3hr,max、6hr,max、12hr,max、24hr,max及事件總累積雨量)，進一步區分於降雨事件下區分發生災害與否，而後藉由SPSS統計分析軟體將前述降雨資料進行有無災害發生及發生災害次數之相關性分析。分析結果詳如表一：影響災害之降雨因子相關係數及排序，結果顯示影響是否發生災害之降雨因子以6小時最為顯著，而發生災害後影響災害次數的降雨因子以總累積雨量最為顯著。因此若將2者搭配組成關鍵降雨觀測指標，理論上應係判斷災害之最佳組合，惟後續仍需更多實例驗證。

表一 影響災害之降雨因子相關係數及排序

相關性因子	總累積雨量	一小時	三小時	六小時	十二小時	二十四小時
有無災害	0.57	0.549	0.56	0.573	0.571	0.553
是否發生災害相關性排序	3	6	4	1	2	5
災害次數	0.582	0.535	0.546	0.558	0.557	0.543
影響災害次數相關性排序	1	6	4	2	3	5

本文為於每一次降雨事件中，在公路防災預警應變流程中取得合理的通告及前置動員應變時間，特評估長延時降雨累積值下不同降雨強度之崩塌模式，主要就是透過長延時的累積雨量過程中透過短延時的降雨強度循序啟動注意、警戒進而行動等3階段，因此定義短延時為1小時、3小時、6小時，長延時為24小時及總累積雨量值，透過所得2項降雨指標之不同組合，藉由SPSS統計分析軟體獲得其各項係數及常數邏輯迴歸式。道路致災機率邏輯迴歸模型〔1〕如公式(3)；

$$\ln(P/(1-P))=b_1x_1+b_2x_2+a \cdots \text{公式(3)}$$

其中P為因變數即崩塌機率， x_1 及 x_2 為自變數， x_1 為長延時之總雨量累積值、24小時雨量累積值， x_2 為短延時之1小時、3小時、6小時， b_1 及 b_2 為其係數，a為常數，運算結果如表二及表三：總24小時累積雨量與短延時累積雨量之各項係數及常數值。

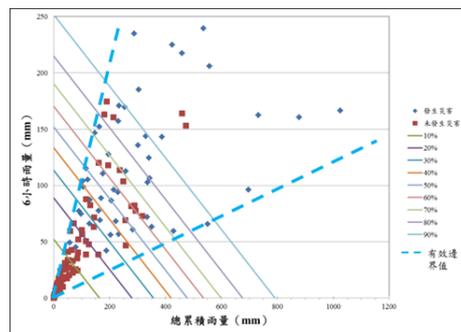
表二 總累積雨量與短延時累積雨量之各項係數及常數值

	a	b1	b2
總累積雨量Vs.時雨量	-3.611	0.008	0.065
總累積雨量Vs.3小時雨量	-3.314	0.008	0.026
總累積雨量Vs.6小時雨量	-3.341	0.007	0.022

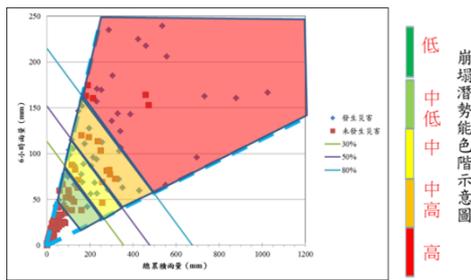
表三 24小時累積雨量與短延時累積雨量之各項係數及常數值

	a	b1	b2
24小時累積雨量Vs.時雨量	-3.261	0.008	0.067
24小時累積雨量Vs.3小時雨量	-2.983	0.008	0.028
24小時累積雨量Vs.6小時雨量	-3.068	0.00001	0.033

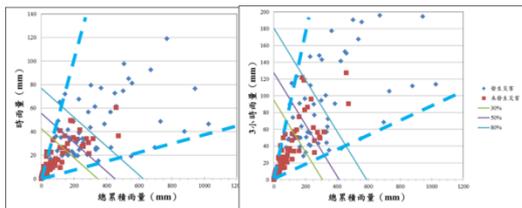
藉由表二之邏輯迴歸公式，可針對總累積雨量與短延時累積雨量建立蘇花公路崩塌機率模式圖，以6小時累積雨量為例，如圖十六，另以統計資料值出現之範圍為模式之上下邊界值，較符實際，以避免小雨高風險或坐標數據值不存在之情形。再進一步定義崩塌機率潛勢能；20%以下為低度潛勢能、20%~30%為中低潛勢能、30%~50%為中度潛勢能、50%~80%為中高潛勢能、80%以上為高潛勢能等5種等級，並分別以綠、淺綠、黃、橙、紅等不同色階代表，其中黃、橙、紅等3種色階與本報告公路防災預警機制中之注意、警戒、行動應變等級一致。詳如圖十七及圖十八蘇花公路崩塌潛勢能圖。



圖十六:總累積雨量Vs.6小時雨量下蘇花公路崩塌機率模式圖



圖十七：蘇花公路總累積雨量Vs.6小時雨量崩塌潛勢能圖

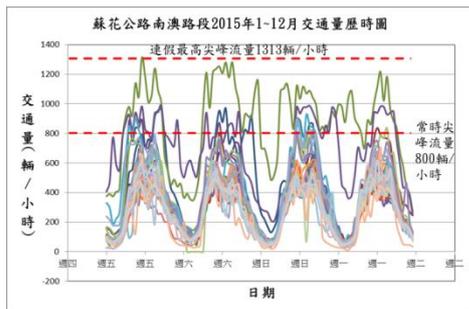


圖十八：蘇花公路總累積雨量Vs.1及3小時雨量崩塌潛勢能圖

五、蘇花公路通行暴露度分析

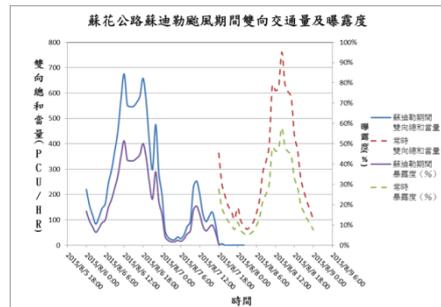
依2011年台灣公路容量手冊，在不短於15分鐘之時段內，經常能通過某一雙車道公路路段之雙向合計最大流率，即為該路段之容量，於基本狀況下雙車道公路容量為2900PCU/HR，但尚需考量車道及橫向淨距及山嶺區之車種等因子折減。蘇花公路以車道3.5M寬，路肩0.5M估計，車道及橫向淨距調整=0.75；山嶺區計算車種調整，全小客車折減係數1/1.5，全大/客車折減係數1/5，因此蘇花公路容量最高應不大於1450PCU/HR (2900x0.75/1.5)。

以蘇花公路南澳路段路面車輛偵測器統計2015年1~12月週五~週一交通量歷時圖(詳如圖十九)顯示，2015年2月春節連假期間於大年初二尖峰流量1313輛/小時，估小客車87%，大/客車佔13%。尚稱合理，爰採1313輛/小時為蘇花公路之實際公路容量。另常時尖峰流量則依圖19設定為800輛/小時，尖峰流量約出現在每日10:00~15:00。



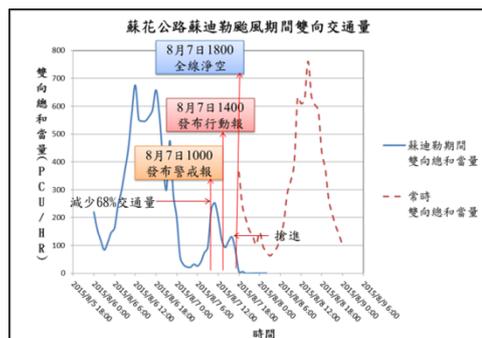
圖十九：蘇花公路南澳路段2015年1~12月週五~週一交通量歷時圖

為分析蘇花公路即時暴露度，定義暴露度=小時交通量/公路容量，亦即公路小時交通量達公路容量時，流量達飽合呈現100%暴露度。本報告以2015年全年出現之最大尖峰流量1313輛/小時為蘇花公路實際公路容量，以蘇花公路上之路面車輛偵測器所統計之數字為小時交通量，即可即時獲得公路之暴露度，以2015年8月6日~9日蘇迪勒颱風期間為例，交通量與暴露度歷時曲線詳如圖二十。



圖二十：2015年8月6日~9日蘇迪勒颱風期間交通量與暴露度歷時曲線

如前所述蘇花公路常時尖峰流量為800輛/小時，尖峰流量約出現在每日10:00~15:00，圖5.13中顯示於8月7日尖峰流量僅253輛/小時，出現於早上11:00，主要原因在於公路管理單位實施了公路防災預警應變機制，於是日早上10:00透過電子媒體、警廣、災害緊急廣播簡訊服務(LBS)等推播管道，發布蘇花公路警戒報，說明風險已達警戒層級建請勿入，尖峰小時交通量驟減68% (暴露度減少40%)，另再於是日14:00發布行動報公告16:00只出不進，18:00全線封閉訊息，交通量由93輛/小時小幅增加增進車輛至130輛/小時。透過交通量數據之消長顯見公路管理單位依據風險推估所實施之預警訊息推播相當具有成效(詳如圖二十一蘇花公路蘇迪勒颱風期間交通量消長及預警應變作為關係圖)，可顯著的降低災前之暴露度，降低未封路前之罹災風險。

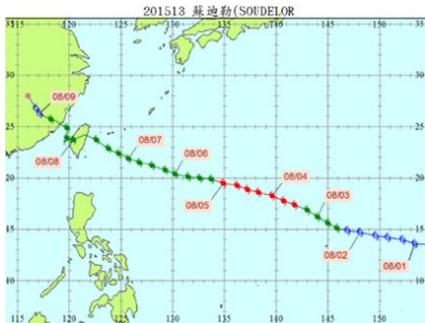


圖二十一:蘇花公路蘇迪勒颱風期間交通量消長及預警應變作為關係

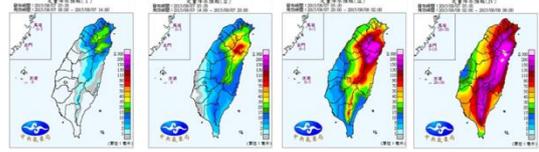
六、應用案例-蘇花公路通行風險控制

本文所採用風險之定義為「在特定場景下，因標的物崩壞造成用路人罹災的風險」，因此除了危害度（特定場景）外，脆弱度及曝露度均於前節說明，而本文所探討的風險範圍係於劇烈天候發生期間，如何控制通行風險，並非全年度可能發生之風險大小，因此目前為簡化流程，特將每一場劇烈天候情境將危害度假設為1，計算脆弱度及曝露度組成之通行風險機率。

以2015年8月8日蘇迪勒颱風為例，侵台路徑圖如圖二十二所示，路徑沿太平洋高壓邊緣朝西轉西北西直撲台灣本島而來，此次颱風路徑為第三號路徑，自花蓮秀林登陸後，從雲林臺西出海，移動速度快，影響台灣時維持中度颱風的等級，中央氣象局於8月6日上午11時30分發布海上颱風警報，並於同日晚間20時30分發布海上陸上颱風警報，因此於發布陸上颱風警報後，有2項重要之氣象情資幫助防災單位計算未來之風險程度，藉以調整原本於預判階段所預排之警戒、行動報發布之時間，其中災前6小時定量降水預報圖（詳如圖二十三）預告未來每6小時雨量可能累積值及降雨熱區，因此可依圖估算蘇花公路未來6小時累積雨量值如表四，再搭配另一項預測資料風雨預報單（詳如圖二十四）預告本次降雨事件各地區可能之總累積雨量值，套入以總累積雨量與6小時累積雨量之崩塌潛勢圖中（詳如圖二十五），即可推測未來面臨劇烈天候之崩塌機率，並進而檢討調整預警通告及封路管制排程，詳如圖二十六。



圖二十二:2015年蘇迪勒颱風侵台路徑圖(資料來源:氣象局)



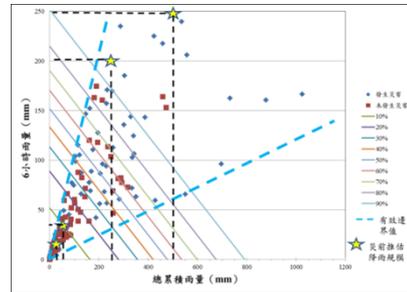
圖二十三:災前6小時定量降水預報圖(資料來源:氣象局)

表四蘇花公路預估未來6小時累積雨量值

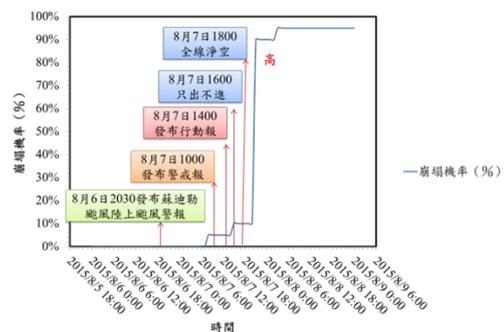
時間	預估6小時累積雨量mm
8月7日08-14時	10
8月7日14-20時	40
8月7日20-8日02時	200
8月8日02-08時	250



圖二十四:災前風雨預報單(資料來源:氣象局)



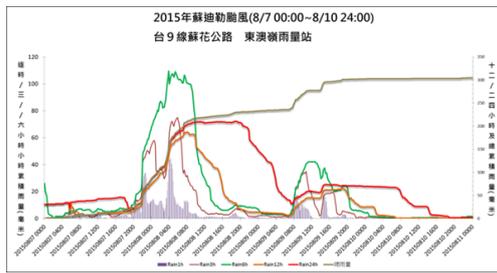
圖二十五:總累積雨量Vs.6小時雨量下蘇花公路未來崩塌機率



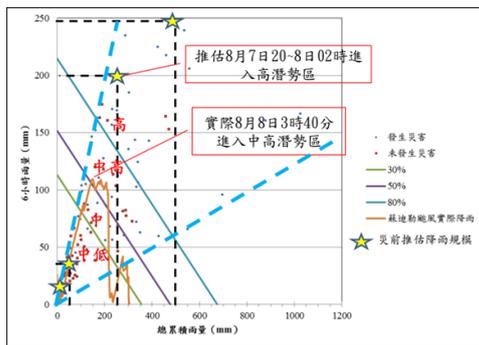
圖二十六:蘇花公路依災前情資崩塌潛勢能排訂應變時程

實際進入災中，雨量規模可能不如或超越預測資料，因此必需要隨時於崩塌模式圖上套入即時

雨情監控，並作必要之應變修正，如圖二十七:2015年蘇迪勒颱風於台9線蘇花公路東澳嶺雨量站實測雨量資料，即時套入崩塌模式圖中，即可獲得蘇迪勒颱風期間蘇花公路推估崩塌機率圖（詳如圖二十八），圖中顯示推估8月7日20~8日02時進入崩塌高潛勢區，實際上因颱風路徑北抬影響，降雨規模下修，依實際雨量規模顯示8月8日3時40分進入崩塌中高潛勢區，對於整體防災預警應變作為是偏安全側，且在進入崩塌中高潛勢區時程安排上相差不到2小時，經驗證有效且具體可行。

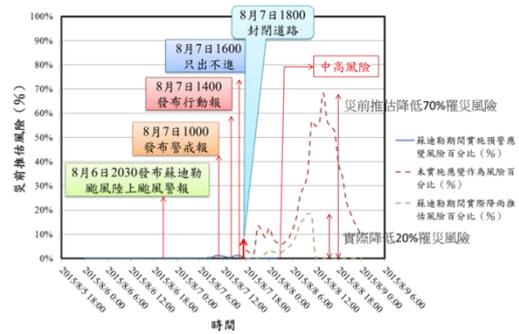


圖二十七: 2015年蘇迪勒颱風於東澳嶺雨量站實測雨量資料



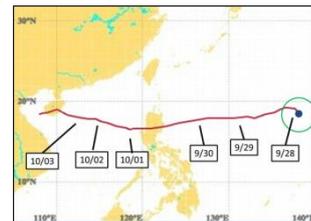
圖二十八:蘇迪勒颱風期間蘇花公路推估崩塌機率圖

為探討風險規模，以蘇花公路常時交通量為封路管制後之虛擬交通量，換算曝露度後，即可與圖二十八蘇迪勒颱風期間蘇花公路推估崩塌機率圖，運算蘇迪勒颱風期間於蘇花公路上如未實施預警應變作為之災前與災中風險值，詳如圖二十九，如該圖所示，於災前依預測資料及本文所提供之崩塌模式實施預警應變作為，就災前推估可降低70%可能罹災風險，而就實際所發生之雨情而言，亦降低20%之可能罹災風險。



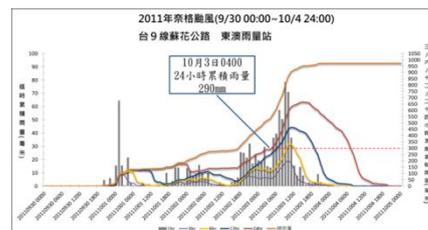
圖二十九:蘇花公路災前及災後推估風險比較圖

第2案例為無預警強降雨，以2011年10月之奈格颱風為例，奈格颱風並無直接影響台灣，且最近台灣之距離仍有500多公里，但因為北方冷高壓南下帶來東北風，加上颱風環流北端帶來東風，兩者產生共伴效應，造成連續之強降雨現象，並累積成超大豪雨氣象事件，10/2日至10/3日為共伴效應影響最大的期間，詳如圖三十奈格颱風路徑圖。



圖三十 2011年10月3日奈格颱風路徑圖

當次降雨事件詳如圖三十一：2011年奈格颱風於台9線蘇花公路東澳雨量站實測資料，以當時防災預警機制之降雨觀測指標僅律定24小時累積雨量值320mm為行動值，遂於10月3日04:00當24小時累積雨量值超過290mm時，公路管理單位決定06:20發行動報只出不進，08:00全線封閉，惟當時實測雨量強度有越來越大之跡象，且蘇花公路沿線亦已有零星落石發生，於09:00以後蘇花公路沿線山洪爆發，陸續發生崩塌事件，詳如圖三十二：格颱風共伴效應期間於蘇花公路封路後發生公路災情照片集。



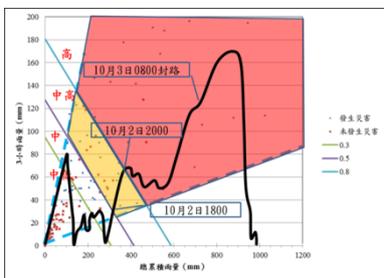
圖三十一: 2011年奈格颱風於東澳雨量站實測資料



圖三十二:封路後發生公路災情照片集

回顧本次管制應變因僅律定單一觀測指標，致應變管制作業突顯出前置通告作業不及與未能反應實際降雨強度，爰將降雨資料套入本文蘇花公路崩塌機率模式圖中，詳如圖三十三，圖中顯示10月2日18：00崩塌機率已超過50%，達到本文所定義之中高潛勢區，應發布警戒報推播蘇花公路未來數小時內不排除進行封閉管制作業。而10月2日20：00崩塌機率已超過80%，達到本文所定義之高潛勢區，應發布行動報確認只出不進及封閉作業。

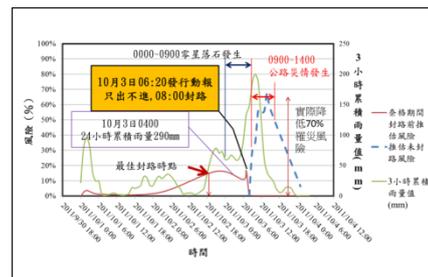
事後分析結果再與當時無預警強降雨情境及應變中心監控狀況相比對，本文所提供之崩塌機率模式圖確實能真實反應出何時該警戒、行動，且因有前置通告作業時間，爰具有高度可操作性。



圖三十三:實際降雨造成蘇花公路崩塌機率圖

同樣將崩塌機率所代表之脆弱度，再加乘虛擬常時交通量所換算之曝露度，即可獲知奈格颱風發生共伴效應期間，蘇花公路之風險變化，詳如圖三十四：2011年奈格颱風共伴效應蘇花公路依實際降雨推估致災風險值，顯示執行封路管制降低70%可能發生罹災風險值。可是值得探討的是未封路前仍有17%之罹災風險尚待控管，其崩塌機率雖介於30%~50%間，屬中潛勢區，惟因曝露度高導致罹災風險值相對高。當次強降雨事件屬無預警，

所以公路管理單位尚無法逕自發布注意報，提醒用路人注意，反觀有颱風警報單之降雨事件，透過各種傳播媒體不斷推播警戒訊息，確實能於未實施封路前降低交通量，如前節所統計，2015年蘇迪勒颱風期間，於未封路前就降低了68%之交通量。因此，實施封路管制雖是降低風險最有效之方法，然於未封路前風險仍存在著，而本報告經由實測交通量驗證，藉由全面傳遞警戒訊息來降低交通量，則是最有效方法之一。

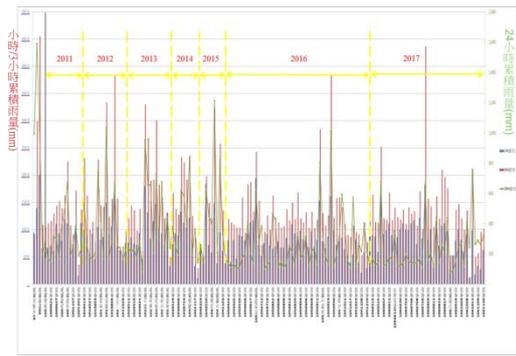


圖三十四:依實際降雨推估罹災風險值

七、結論

1. 本文研究顯示，於蘇花公路降雨事件總累積雨量達350mm時，蘇花公路具中度崩塌潛勢能，達550mm時，蘇花公路具中高度崩塌潛勢能，事件總累積雨量達700mm時，蘇花公路具高度崩塌潛勢能，此數值對於防災初期之部署規模具有相當高的決策支援價值。

2. 經由2011~2017年總計147場劇烈天候實務經驗驗證（如圖三十五:2011~2017年各劇烈天候事件與辛樂克、莫拉克、梅姬颱風之1、3、24小時累積雨量值比較圖），本文所提供蘇花公路之崩塌模式中，區分崩塌機率於20%以下為低度潛勢能、20%~30%為中低潛勢能、30%~50%為中度潛勢能、50%~80%為中高潛勢能、80%以上為高潛勢能等5種等級，其中中度潛勢能、中高潛勢能、高潛勢能分別與蘇花公路防災預警機制中之黃、橙、紅等3種色階所代表之注意、警戒、行動應變等級一致，且經實務驗證藉由推估或實測雨量套入崩塌模式中，所獲得之決策支援是有效且具體可行，解決了以往單一或多重降雨指標門檻值未能考量之短延時降雨或長延時累積雨量之影響。



圖三十五:近7年各劇烈天候事件之累積雨量值比較圖

3.以2015年蘇迪勒颱風為例，蘇花公路於崩塌機率達50%~80%時，應發布警戒報建請勿入，依實測交通量資料顯示警戒報發布後，該路段尖峰小時交通量瞬間減少68%（曝露度減少40%），直接降低未封路前之風險值20%~32%，顯見歷年來導入風險管理之防災策略與宣導，成效顯著。

4.本文研究顯示，災害發生與否及次數多寡之關鍵因子為6小時與總累積雨量，後續公路管理單位之降雨觀測指標可逐步將總累積雨量替換現行24小時累積雨量，再搭配組合1、3、6小時累積雨量。

誌謝

本文研究撰寫期間，承蒙公路總局第四區養護工程處提供蘇花公路交通量資料，及國家災害防救科技中心陳韻如博士寶貴意見，特此誌謝。

參考文獻

- [1] 陳韻如、林聖琪、王俞婷、李宗融等，2011年1月:”山區道路崩塌災害潛勢評估”，臺灣公路工程, 37卷, 1期, 5-22。
- [2] 牛山素行，2008年，豪雨の災害情報學，第2章，古今書局，日本東京，p39。
- [3] 陳進發，2011年6月:”從橋梁之流域管理與山區公路之風險管理談公路總局之百年防汛”，臺灣公路工程，第37卷第6期，P2-21。
- [4] 陳進發，2015年10月:”談臺灣公路防災之演進與降雨訊息之應用”，中國工程司學會會刊，Vol.88，No.5，ISSN:1015-0773，P31-42。

