

石門水庫集水區國有林班地艾利颱風 災後崩塌地人為及自然復育評估

陳俊愷* 林伯勳** 冀樹勇***

摘要

為評估石門水庫集水區遭受艾利颱風災害所引致國有林班地內之崩塌地，經民國 95 年至 100 年六年整治計畫，以自然復育及人工加速復育等相關手段對於崩塌地環境變遷及復育成效；本文藉由蒐集歷史重大災害事件之衛星影像崩塌地判釋成果，依時間發生順序，逐一探討追蹤評估崩塌地之變遷；經分析顯示民國 93 年艾利颱風後於國有林班地內之崩塌地，至民國 100 年防汛期後已恢復至 90% 以上；另值得注意的是，針對直接危及保全對象之崩塌災害區域，當人為治理介入後相較於自然植生，確實能有效縮短復育時間及增加環境復育範圍，且具較佳耐災能力。

關鍵字：石門水庫集水區、崩塌地、植生復育

一、前言

國有林地常位於偏僻之陡峻山區，每遇颱風豪雨其雨量值達到極限後常會發生大小不一之崩塌與災情；甚至影響當地聚落之生命財產安全與水庫水質。由於林地崩塌所產生之土砂常會造成土地裸露、土壤沖蝕、堰塞湖、水質混濁、道路中斷等與一般山坡地崩塌災害相同之類型。然而，國有林地之崩塌地處理，因其特性地處偏僻，人力機具不易到達，且因海拔高聳、坡度陡峻、地形、地質條件欠佳，其與一般山坡地崩塌地處理難易及方式，並非完全一致（林務局，2012）。民國 93 年度艾利颱風侵台影響，造成全國災情嚴重，尤以石門水庫因濁度上升、漂流木、土砂等因素，造成長時間停止供應水源，使

得大桃園地區民眾生計遭受嚴重損失，林務局依據民國 95 年 1 月公告之「石門水庫及其集水區整治特別條例」，依該條例第三條研擬「石門水庫及其集水區整治計畫」（以下簡稱「石門水庫整治計畫」），自民國 95 年至 100 年間辦理多處國有林班地崩塌地處理、坑溝整治、維護及緊急處理工程，以消弭土砂災害風險，加速林班地復育。

鑑此，本文蒐集歷年多時期衛星影像及崩塌地之判釋成果，以艾利颱風事件作為治理分界點，探究經六年整治後對於國有林班地內之崩塌裸露地面積復育影響，再細究、釐清自然復育及人為治理區域對於國有林環境復育效益，以供未來其他水庫集水區國有林地保育治理之參考。

* 中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員

** 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心主任

二、石門水庫整治計畫背景

(一) 計畫執行內容

「石門水庫及其集水區整治計畫」中上游集水區以土地使用管理與防災監測之非工程手段為主、山坡地治理為輔，實施計畫目標為延長水庫壽命、降低缺水風險。整治計畫共分成兩階段進行，第一階段施行期間為民國 95 年至 98 年，而林務局水庫集水區保育計畫分項計畫下，其工程執行上主要以設置防砂設施及崩塌裸露地治理為主，第一階段完成後預計可防治 120 萬立方公尺之土砂量下移至主河道，而河道年平均可控制土砂量約 40 萬立方公尺及崩場地整治減少坡面沖蝕之年平均土砂量約 2 萬立方公尺為標的，總計約可控制 42 萬立方公尺年平均土砂量下移至主河道；第二階段施行期間為民國 98 年至 100 年，工程執行上主要以崩場地植生復育為主，預期控制下移至主河道成為推移質來源之土砂量約為 16.3 萬立方公尺，年平均可控制土砂量約為 5.4 萬立方公尺，另崩場地整治恢復坡面植生將可減少坡面沖蝕至主河道之年平均土砂量約為 1.2 萬立方公尺，總計可控制約 19.9 萬立方公尺年平均土砂量下移至主河道，兩階段合計以防治 136.3 萬立方公尺土砂量為目標。

(二) 林班地治理工程

以石門水庫上游集水區境內之國有林班地為治理範圍，石門水庫集水面積為 76,340 公頃，而國有林班地範圍為 53,860 公頃，占石門水庫集水面積 70.5%。該區海拔高自 135m（石門水庫壩址）至 3,529m 之間，全區地質條件為自東南向西北傾斜，呈南北向之狹長地形。坡度大於 55% 之地區，約占集水區之 60.6%。地質構造非常複雜，區內一般岩石之情況多屬脆弱、劈理、節理及裂隙發達，復經地殼變動，強力擠壓破壞，加上地形陡峻，雨水充沛，岩石重力滾落及沖蝕現象特別顯著。集水區年平均降雨量約在 2,200mm~2,800mm，雨季多集中於五月至九月

期間，其主要原因乃颱風所造成，另外尚有西南氣流所造成之雷陣雨，及熱帶性低氣壓所挾帶豪雨。

依據上述特別條例第三條研擬「石門水庫及其集水區整治計畫」，針對國有林班地分年分期進行多件崩塌治理及植生復育工程，以消弭土砂災害風險，加速林班地復育。由民國 95 年實施迄今，近年工程主要以崩塌裸露地自然復育及人工加速復育（打樁編柵、掛網植生、撒播草籽、格框客土）等軟性措施為主（如圖 1），而坑溝治理及防砂設施之建置等硬體措施為輔，且近年治理面積與規模亦較往年減小許多，相關治理措施業已陸續完成，整理林務局民國 95 至 100 年間共計有 47 件治理工程，工程類別含「崩場地處理」、「坑溝整治」以及「維護及緊急處理工程」等三種，主要分布於上游泰崗集水區中；其中第 1 階段（民國 95 年至 98 年）工程有 34 件，以民國 95 年度工程最多，並以崩場地處理工程為主；第 2 階段（民國 98 年至 100 年）工程有 13 件，仍以崩場地處理工程數量較多，另有 2 件維護及緊急處理工程（圖 2）。整體而言，石門水庫集水區第 2 階段整治工程數量相較第 1 階段明顯縮減。分布如圖 3 所示。



(a) 打樁編柵法

(b) 掛網植生工法



(c) 撒播草籽及稻草蓆敷工法

(d) 格框客土工法

圖 1 國有林班地人工加速植生復育工法示意圖

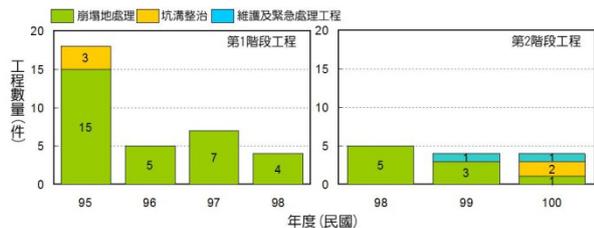


圖 2 林務局民國 95 至 100 年整治工程數量圖

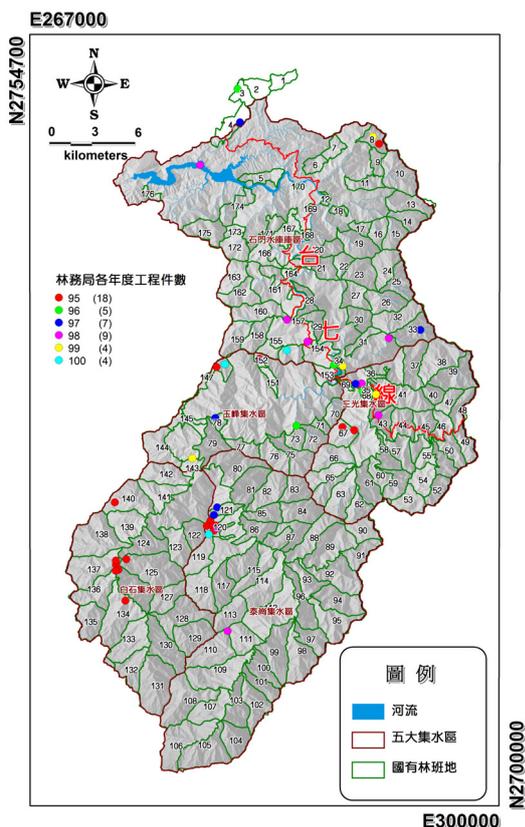


圖 3 林務局石門水庫集水區整治工程分布圖

鑑此，為確實探討六年整治計畫對石門水庫國有林班地環境復育之成效，本文蒐集艾利颱風前後歷史衛星影像，透過遙測技術進行分析，探討崩塌地時空演變，再細究、釐清自然復育及人為治理區域對於國有林崩塌地縮減速率及環境復育效益。詳細資料蒐集、評估方法，以及評估結果，分述於以下各節。

三、事件型崩塌地遙測影像判釋成果

近年來隨著衛星遙測技術、影像處理與科技資訊的快速進步，遙測影像可提供土地現況調查（供國土規劃參考，並可遏止侵占國土、非法開

發等不法行為）與災情監測（利用災害事件之遙測影像，掌握事件所造成自然環境、地形貌變化、公共設施或人工結構物損壞評估）。若有多時期影像資料，更可研判出地表地形貌隨時間的變化。對於廣域之崩塌地調查可達事半功倍之效。衛星遙測技術具有長時間、大範圍拍攝的特性，能夠定時、定域觀察，資料具時間與空間連續性與保存性，多波段影像資訊提供不同於可見光之分析指標，如分辨植生、裸露地等，可成功掌握大範圍現況。

依此，為能有效掌握石門水庫集水區國有林班地經艾利颱風災害治理後崩塌地時空演變，本文蒐集民國 85 年賀伯颱風至民國 99 年梅姬颱風，共 18 期歷史災害事件及衛星影像（水保局，2011），如表 1 所示，其影像選用原則以解像力較高之衛星影像為優先，包含如下：

1. SPOT1~SPOT4 衛星 (SP1~SP4) 從 1986 年開始陸續發射。黑白影像 (PAN) 解析度為 10m，彩色多波段影像 (綠光/紅光/近紅外光) 解析度 20m，其中 SPOT3 已失聯。
2. SPOT5 衛星 (SP5) 於 2002 年 5 月 4 日發射升空，黑白影像 (PAN) 與彩色多波段影像 (綠光/紅光/近紅外光) 解析度分別為 2.5m 與 5m。
3. 福衛二號 (FS2) 於 2004 年 5 月 21 日發射升空。黑白影像 (PAN) 與彩色多波段影像 (藍光段、綠光段、紅光段及近紅外光段) 解析度分別為 2m 與 8m，經影像正射糾正與影像融合等技術，將影像提升至 2m 多波段影像。

藉由影像分類技術可從影像中萃取各種土地覆蓋類型，水保局 (2009、2010、2011) 曾採用德國 Definiens 物件導向式專業影像分類軟體進行崩塌地自動化判釋，並指出自動化判釋可縮短判釋時間，增進分析效率，且降低人工判釋與崩塌地數化之主觀誤差，故本文採用陳俊愷等人 (2012) 建議分析流程進行影像分類，為確保電腦自動判釋於崩塌地區域範圍之可靠度，於自動化判釋後再經人工檢核 (如圖 4)，配合相關資料進行崩塌地範圍最後判讀，可提高整體成果之可靠度。

表 1 蒐集歷史災害事件衛星影像列表

項次	災害事件 (災害期間)	相關事件與拍攝日期	載具 種類	地面 解析度 (m)
1	賀伯颱風 (1996/07/29~08/01)	賀伯颱風前拍攝 (1996/01/01)	SP2	10
		賀伯颱風後拍攝 (1996/11/08)	SP2	10
2	九二一集集地震 (1999/09/21)	921 集集地震前拍攝 (1999/02/18)	SP4	10
		921 集集地震前拍攝 (1999/04/01)	SP2	10
		921 集集地震前拍攝 (1999/08/17)	SP1	10
		921 集集地震後拍攝 (2000/01/02)	SP2	10
		921 集集地震後拍攝 (2000/01/29)	SP1	10
3	象神颱風 (2000/10/30~11/01)	象神颱風前拍攝 (2000/10/11)	SP1	10
		象神颱風後拍攝 (2001/03/05)	SP1	10
		象神颱風後拍攝 (2001/03/15)	SP2	10
4	桃芝颱風 (2001/07/28~07/31)	桃芝颱風前拍攝 (2001/03/05)	SP1	10
		桃芝颱風前拍攝 (2001/03/15)	SP2	10
		桃芝颱風後拍攝 (2001/08/22)	SP2	10
5	納莉颱風 (2001/09/08~09/10)	納莉颱風前拍攝 (2001/08/22)	SP2	10
		納莉颱風後拍攝 (2001/10/13)	SP2	10
6	艾利颱風 (2004/08/23~08/26)	艾利颱風前拍攝 (2004/02/10)	SP5	2.5
		艾利颱風後拍攝 (2004/11/02)	SP5	2.5
7	海棠颱風 (2005/07/16~07/20)	海棠颱風前拍攝 (2005/03/16)	SP5	2.5
		海棠颱風後拍攝 (2005/07/25)	FS2	2
8	馬莎颱風 (2005/08/03~08/06)	馬莎颱風前拍攝 (2005/07/25)	FS2	2
		馬莎颱風後拍攝 (2005/08/07)	FS2	2
		馬莎颱風後拍攝 (2005/08/16)	FS2	2
9	泰利颱風 (2005/08/30~09/01)	泰利颱風前拍攝 (2005/08/07)	FS2	2
		泰利颱風前拍攝 (2005/08/16)	FS2	2
		泰利颱風後拍攝 (2005/09/03)	FS2	2
		泰利颱風後拍攝 (2005/09/09)	FS2	2
10	龍王颱風 (2005/09/30~10/03)	龍王颱風前拍攝 (2005/09/03)	FS2	2
		龍王颱風前拍攝 (2005/09/09)	FS2	2
		龍王颱風前拍攝 (2005/09/21)	FS2	2
		龍王颱風後拍攝 (2005/11/11)	SP5	2.5
11	民國 95 年度汛期後 (2006/09/16~10/20)	珊珊颱風後拍攝 (2006/10/20)	SP5	2.5
12	柯羅莎颱風 (2007/10/04~10/07)	柯羅莎颱風前拍攝 (2007/08/28)	SP5	2.5
		柯羅莎颱風後拍攝 (2007/12/21)	SP5	2.5
13	如麗颱風 (2008/09/11~16)	如麗颱風前拍攝 (2008/08/16)	SP5	2.5
		如麗颱風後拍攝 (2008/08/24)	FS2	2
14	辛樂克、薔蜜颱風 (2008/09/11~26)	如麗颱風後拍攝 (2008/08/24)	FS2	2
		薔蜜颱風後拍攝 (2008/11/02)	SP5	2.5
15	莫拉克颱風 (2009/08/05~08/10)	莫拉克颱風前拍攝 (2009/05/08)	SP5	2.5
		莫拉克颱風後拍攝 (2009/08/20)	SP5	2.5
16	芭瑪颱風 (2009/10/03~10/06)	芭瑪颱風前拍攝 (2009/08/20)	SP5	2.5
		芭瑪颱風後拍攝 (2009/10/21)	SP5	2.5
17	凡那比颱風 (2010/09/17~09/20)	凡那比颱風前拍攝 (2010/04/01)	SP5	2.5
		凡那比颱風後拍攝 (2010/09/22)	FS2	2
18	梅姬颱風 (2010/10/21~10/23)	梅姬颱風後拍攝 (2010/11/01)	FS2	2
19	民國 100 年防汛期	100 年防汛期前 (2011/04/20)	FS2	2
		100 年防汛期後 (2011/12/4)	FS2	2

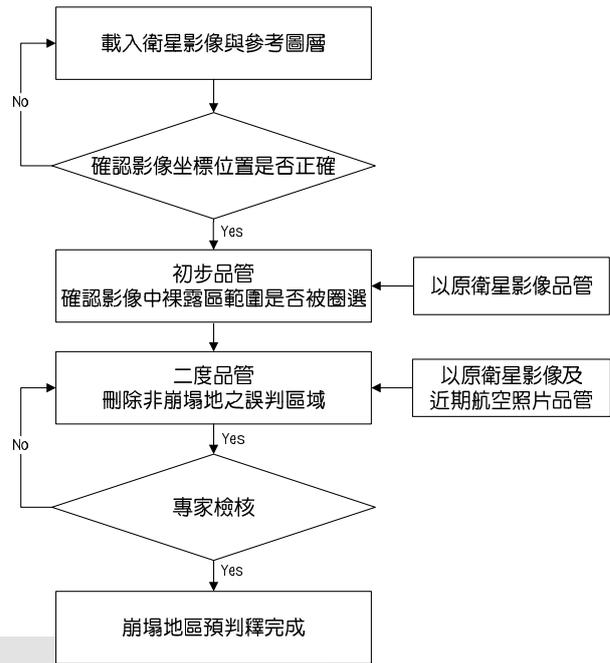


圖 4 崩塌地自動化判釋品管流程圖

四、崩塌地變遷評估

本文依前述各期災害事件崩塌地判釋成果，針對崩塌地面積、事件後之新增崩塌地面積、事件前之崩塌復育地面積及對應其集水區面積之崩壞比、新增崩壞比、崩塌復育比進行統計估算；透過討論各期事件之崩塌地分布及增減趨勢，進而瞭解近年集水區保育治理成效。有關影像判釋後之新增崩塌地區域及復育地示意圖參見圖 5。相關名詞定義及公式，說明如下：

1. 崩塌地：當期衛星影像經判釋為發生崩塌之範圍。
2. 新增崩塌地：前一期衛星影像未發生崩塌但後一期有發生崩塌之範圍。
3. 崩塌復育地：前一期衛星影像有發生崩塌但後一期未發生崩塌之範圍。

經統計石門水庫集水區林班地範圍內 19 場歷史事件之崩塌地面積、新增崩塌地面積、崩塌復育地面積統計，以及所對應之崩壞比、新增崩壞比、崩塌復育比，繪製如圖 6 至 8 所示，各別說明如后。

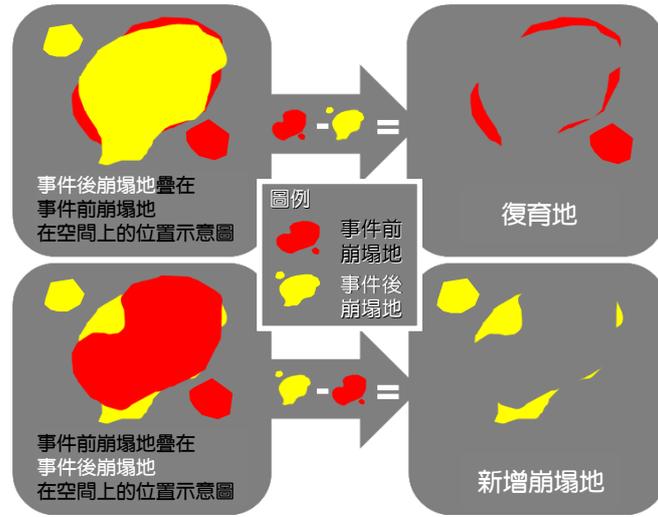


圖 5 新增崩塌地與復育地示意圖

$$\text{崩壞比}(\%) = \frac{\text{颱風豪雨事件後各集水區之崩塌地面積}}{\text{各集水區面積}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{新增崩壞比}(\%) = \frac{\text{颱風豪雨事件後各集水區之新發生崩塌地面積}}{\text{各集水區面積}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{崩塌復育比}(\%) = \frac{\text{各集水區颱風豪雨事件後之崩塌地縮減面積}}{\text{各集水區面積}} \times 100\% \quad (3)$$

(一) 崩塌地面積與崩壞比

石門水庫集水區經 19 場災害統計崩塌地面積資料如圖 6。由圖可知，艾利颱風前之颱風，以象神颱風造成石門水庫集水區林班地內之崩塌地最大，約達 434.5ha。自艾利颱風後，以民國 94 年間之馬莎、泰利及龍王颱風最為嚴重，約為 500ha 左右之崩塌地。由民國 98 年 10 月芭瑪颱風後至民國 99 年 9 月凡那比颱風前，可以發現崩塌地面積明顯減少約 147.4ha，顯見林班地治理確有成效；圖 6 顯示石門水庫集水區林班地範圍內崩壞比最大達 1.13%，發生於莫拉克颱風後。艾利颱風以前約介於 0.20 至 0.80% 之間；民國 98 年莫拉克颱風致使崩塌地面積由蓄蜜颱風後（約 500.3ha）至莫拉克颱風後（約 622.4ha），上升約計 122.1ha，且崩壞比為歷年最大。艾利颱風以後至民國 100 年防汛期前則介於 0.63 至 1.13% 之間，整體約提高 0.28%；直至民國 100 年 4 月防汛期前影像判釋結果顯示，崩塌地面積下降至 347.3ha，崩壞比降至 0.64%，相較前年崩壞

程度已有明顯改變。於民國 100 年 12 月汛期後購置衛星影像及崩塌地判釋成果，發現崩塌地面積下降至 256.52ha，崩壞比降至 0.45%，顯示林班地整體崩塌狀況漸已趨緩，呈現穩定復育中。

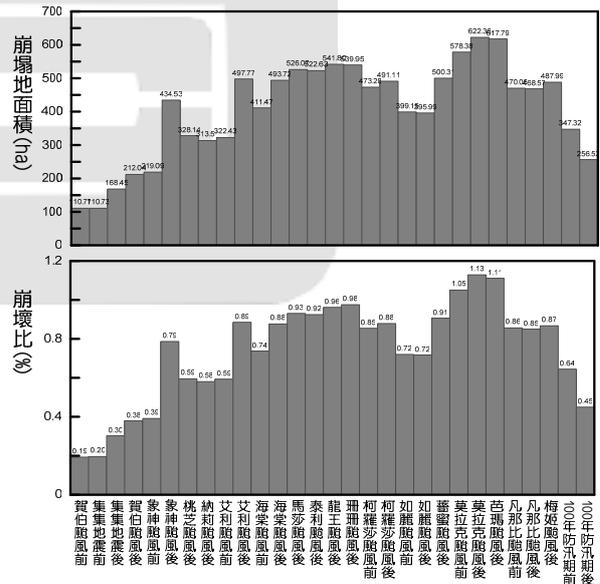


圖 6 石門水庫集水區林班地範圍內之崩塌地面積與崩壞比歷程統計圖

(二) 新增崩塌地面積與新增崩壞比

圖 7 為石門水庫集水區林班地範圍內之新增崩塌地面積與新增崩壞比統計圖。由圖可知，艾利颱風後於林班地引致新增崩塌地面積最大，約為 339.2ha；賀伯颱風後引致新增崩塌地面積最小，約為 53.1ha，相差約 6.4 倍。大致上，艾利颱風後之新增崩塌地面積逐漸下降，約控制於 180ha 以下；民國 97 年度蓄蜜颱風後，新增崩塌地面積約為 187.7ha；民國 98 年芭瑪颱風後，新增崩塌地面積僅為 51.8ha，相較於民國 97 年已減少許多。若探討新增崩壞比，艾利颱風後最高，達 0.62%。隨後，逐年下降至民國 100 年防汛期後，新增崩塌地面積僅為 63.05ha、新增崩壞比為 0.12%，顯見林班地工程整治進駐後有明顯抑制崩塌地生成之情形。

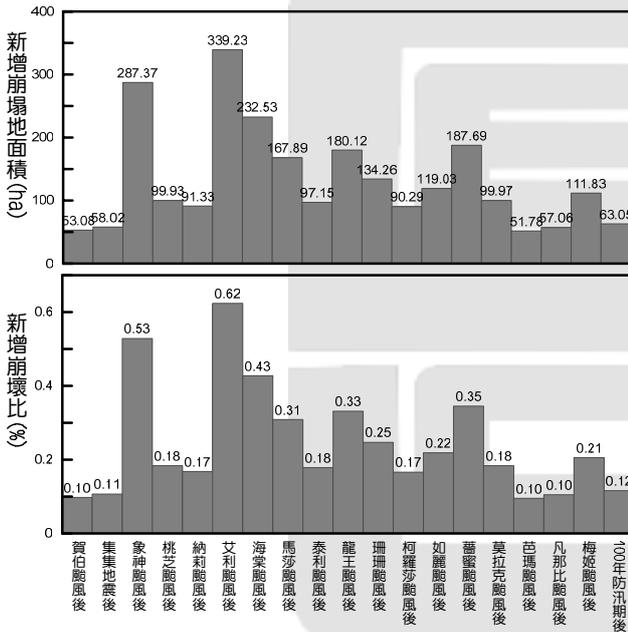


圖 7 石門水庫集水區林班地範圍內之新增崩塌地面積與新增崩壞比歷程統計圖

(三) 崩塌復育地面積與崩塌復育比

圖 8 為石門水庫集水區林班地範圍內各期災害前之崩塌復育面積統計圖；民國 95 年林務局始投入第 1 階段石門水庫集水區林班地整治計畫，挹注大量人力進行崩塌治理及加速植生復育工程，可以發現民國 96 年 8 月柯羅莎颱風前之

崩塌復育面積已達 177.8ha，且崩塌復育比為 0.33%；再次顯示治理工程確實能大幅加快復育速度；觀察民國 98 年 10 月至 99 年間林班地整體復育比提升至 0.45%，民國 99 年 11 月至 100 年 4 月前，崩塌復育地面積為 298.5ha，崩塌復育比達 0.55%，屬於現階段整治期間最高；至民國 100 年 12 月，崩塌復育地面積為 117.1ha，崩塌復育比為 0.22%。與前期崩塌復育狀況差異不大，亦即說明第 2 階段整治計畫後，其林班地復育狀況持續穩定發展，逐年達成預期整治標的。

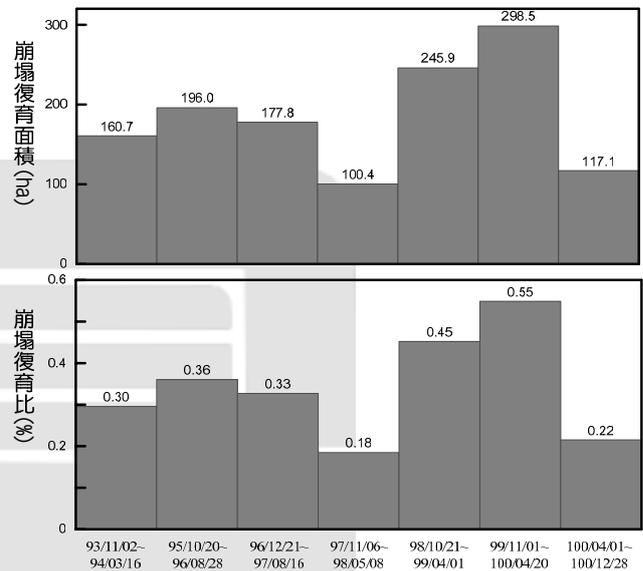


圖 8 石門水庫集水區林班地範圍內之崩塌復育面積與崩塌復育比歷程統計圖

五、國有林班地崩塌地受自然復育及人為治理減少變化評估

前述主要係瞭解整體崩塌地變動狀況，本文為進一步釐清於艾利颱風後，國有林班地範圍內發生之崩塌地經六年（民國 95~100 年）自然復育及人為治理，對於國有林班地崩塌地減少情況，故蒐集林務局工程資料進行數化，用以區分人為治理及自然復育區域。依各工程施作年度蒐集各期航照，進行工程施作點位與項目之比對，並參考治理工程設計圖之坐標及開竣工時間，挑選適當時期之航照作為數化參考底圖，並根據工

程設計圖中空間特徵（如道路、橋梁）等參考物，於航照中找尋對應之控制參考點，建立空間對應關係，以完成工程設計圖對位工作。經上述步驟完成後，針對工程治理範圍進行圈繪，並將工程資料登錄於屬性表內，以利後續評估。當上述治理區域圈繪後，再將林班地面積扣除之，即為自然復育區。

本文以艾利颱風事件引致崩塌裸露地作為分析基期，並透過歷史航照及早期現地調查資料扣除岩盤等無法復育之裸露邊坡，進而加以追蹤及釐清自然復育與人為治理兩者對環境復原程度貢獻，其分析流程如圖 9。

以下針對分析流程中各項步驟，分述如下：

1. 扣除限制條件：藉由歷史航照、現地調查資料加以扣除無法復育之裸露邊坡（如岩盤等）；
2. 分析範圍劃設：以空間分析建立 5 公尺環域區域，作為後續分析範圍基礎，用以濾除可能會受影像處理、崩塌地判釋等處理過程影響、套疊位移量小於 5 公尺（衛星影像像元之大小）之崩塌地區塊；
3. 空間套疊分析：套疊民國 95 年後各颱風豪雨事件衛星影像判釋所得之崩塌地並加以統計其面積總和；
4. 崩塌地減少面積及比例估算：依國有林班地、人為治理與自然復育區分並加總計算各期崩塌地減少面積，計算其所占比例（如式 4~式 6）；該區域若經判定為復育，則代表艾利颱風事件後該區域已復育完成，即不考慮崩塌復發或其他情況之影響。若崩塌裸露地減少比達至 100%，則代表該崩塌地完全復育。

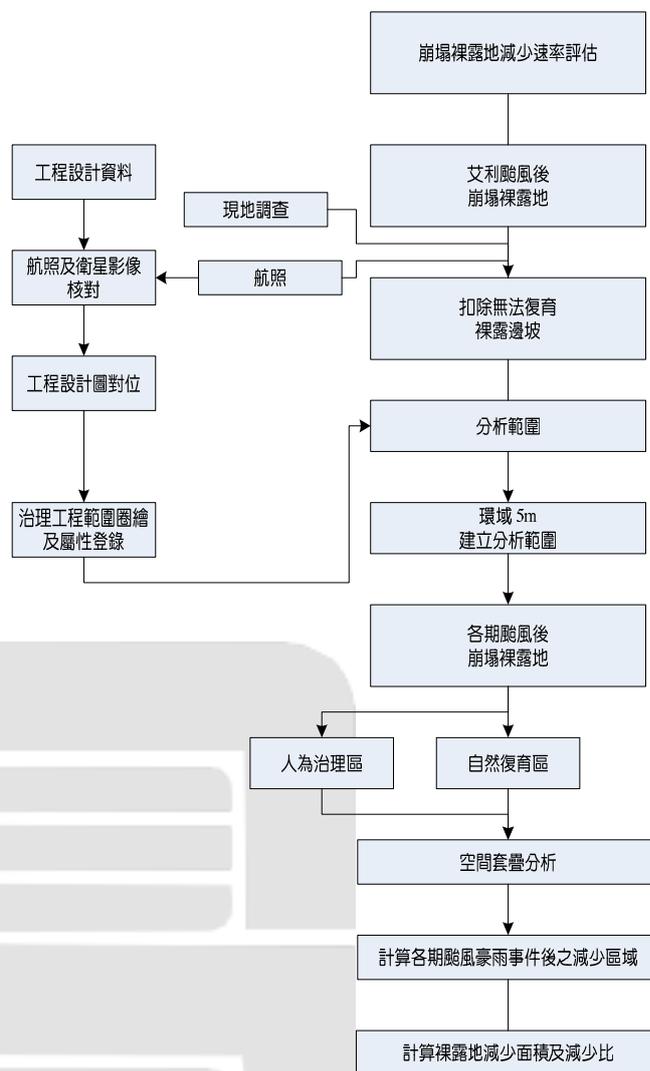


圖 9 崩塌裸露地減少速率分析流程圖

透過上述分析後可發現民國 93 年艾利颱風後於國有林班地內之崩塌裸露地，至民國 96 年柯羅莎颱風前已復育達 50%，至民國 97 年薔蜜颱風後復育狀況達 70%，至民國 100 年防汛期後已恢復至 90%以上，如圖 10 所示。

$$\text{國有林班地崩塌地面積減少比(\%)} = \frac{\text{艾利颱風後崩塌地於各期颱風豪雨事件後之減少面積}}{\text{艾利颱風後國有林班地範圍內崩塌地面積}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{人為治理區域崩塌地面積減少比(\%)} = \frac{\text{人為治理範圍內崩塌地於各期颱風豪雨事件後之減少面積}}{\text{艾利颱風後人為治理範圍內崩塌地面積}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{自然復育區域崩塌地面積減少比(\%)} = \frac{\text{自然復育範圍內崩塌地於各期颱風豪雨事件後之減少面積}}{\text{艾利颱風後自然復育範圍內崩塌地面積}} \times 100\% \quad (6)$$

然後，再細究經六年（民國 95~100 年）自然復育及人為治理等區域之艾利颱風引致崩場地減少變化歷程，茲將觀察結果分別說明如下：

1. 自然復育：自然復育常用於不直接影響保全對象或崩塌較易自然復育之崩場地。艾利颱風經歷 2 年後，崩場地經自然植生約可恢復 60% 以上。
2. 人為治理：人為治理針對直接危及保全對象、道路可及度及崩塌較難自然復育之崩場地。經空間分析後得知，人為治理在治理工程大量投入 1 年後，崩場地減少比由 30% 上升至 75% 以上（民國 96 年至 97 年），顯見人為治理介入後確實能有效加速復育，如圖 11 所示。

另外，為釐清自然復育及人為治理區域在災害事件後之新增崩塌量與降雨量關聯性，運用民國 85 年至 100 年期間總計 19 場颱風事件之累積雨量資訊，針對國有林班地範圍內，以統計結合迴歸分析估算自然復育及人為治理區域之新增崩壞比成果，建置新增崩壞比與雨量關係式。分析成果顯示，自然復育及人為治理區域之新增崩壞比上升速率劇增點，其累積雨量約為 400mm 至 600mm 之間；且由此推算未來石門水庫集水區內，若發生一場累積降雨量為 100mm 至 1,000mm 之降雨事件時，自然復育及人為治理區域之新增崩壞比最多可達 3.5 倍，顯示經人為治理後之區域有較佳耐災能力，如圖 12。

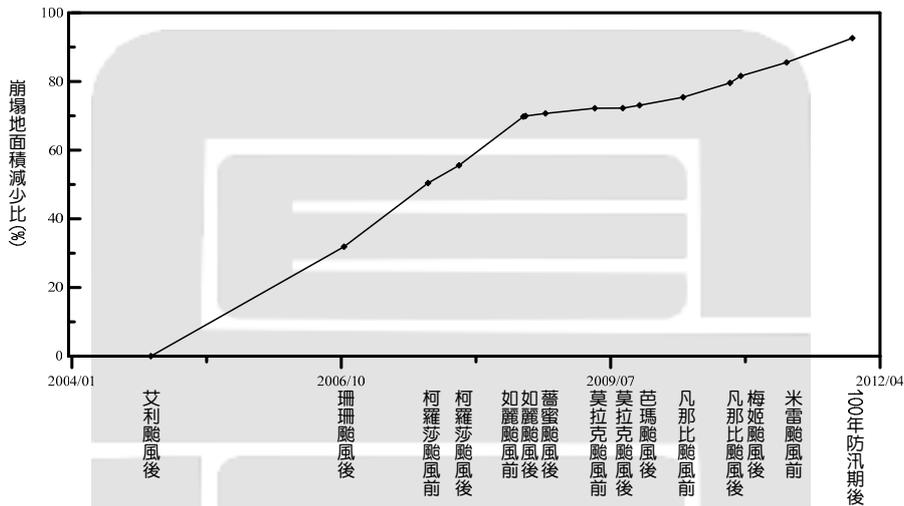


圖 10 國有林班地崩塌地面積減少歷程

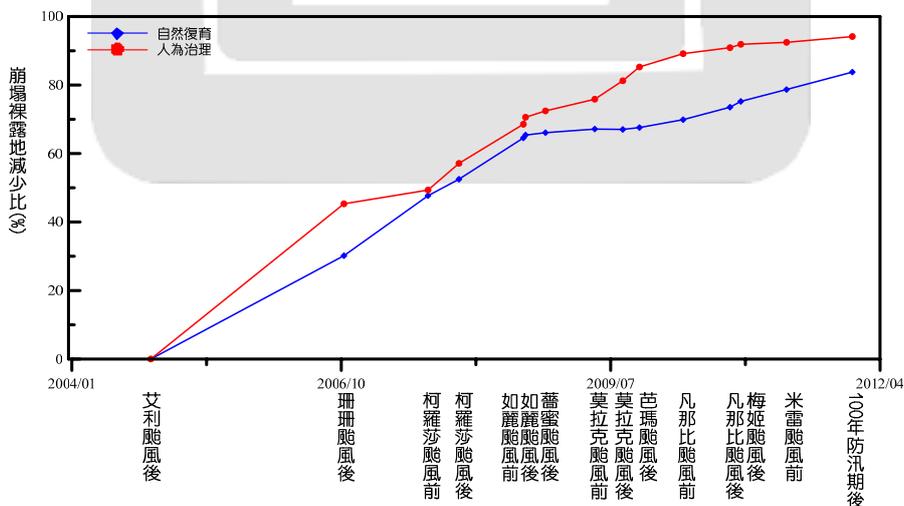


圖 11 國有林班地自然復育及人為治理區域崩塌地減少歷程

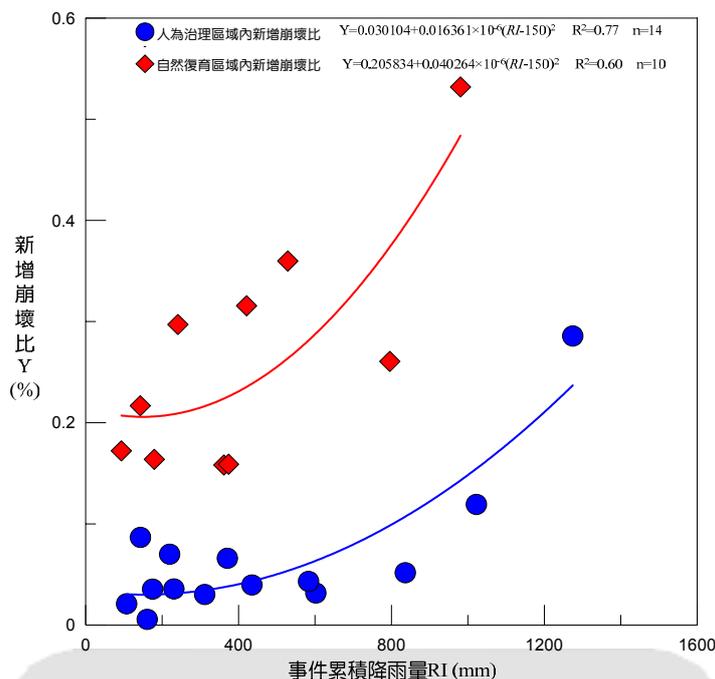


圖 12 林班地自然復育及人為治理區域新增崩壞比與雨量關聯性統計圖

六、結論與建議

本文藉由蒐集歷史重大災害事件崩場地衛星影像判釋成果，依時間發生順序，逐一探討追蹤評估崩場地變遷；經分析顯示民國 93 年艾利颱風後於國有林班地內之崩塌裸露地，至民國 100 年防汛期後恢復至 90% 以上；另值得注意的是，針對直接危及保全對象之崩塌災害區域，當人為治理介入後相較於自然植生，確實能有效縮減復育時間及環境復育範圍，且經人為治理後之區域在等效降雨條件下，具有較佳耐災能力。由於全臺國有林班地分布幅員遼闊，若發生重大災害事件，囿於工程預算及時效性，採用人為治理恐有其限度，故未來建議平時應針對國有林班地大規模且具高土砂潛勢區域瞭解其發生機制，並調查可能影響範圍內保全暴露量，並進行整體風險管理評估；災時利用搭配現地即時雨量及相關監測儀器資訊，進行災害事前預警或災害事後速報，強化民眾疏散避難機制，以有效降低災害損失。

謝 誌

感謝行政院農業委員會林務局新竹林管處提供計畫（編號 100B033-V8）經費補助，李膺贊課長與張綸織技士等人於執行過程提供相關協助，作者謹申謝忱。

參考文獻

- 行政院農業委員會水土保持局（2009）石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究
- 行政院農業委員會水土保持局（2010）石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討
- 行政院農業委員會水土保持局（2011）石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估
- 林伯勳、梁惠儀、蕭震洋、龔樹勇、王晉倫、鍾啟榮、邱世宜（2011）石門水庫集水區土砂監測與治理成效評估，地工技術，第 129 期，第 109-114 頁
- 行政院農業委員會林務局（2012）新竹處轄國有林班地上游集水區土砂產量調查與防治成效評估
- 國家災害防救科技中心（2004）石門水庫淤積及上游集水區崩塌分析評估報告
- Chun-Kai Chen, Cheng-Yang Hsiao, Bor-Shiun Lin, Chin-Tung Cheng（2012）Utilizing Multi-Scale Remote Sensing Technology for Evaluating Sediment Disaster in the Catchment Area, 2012 International Conference on Earth Science and Remote Sensing