

石門水庫集水區白石大崩塌治理評估

文/圖 許振崑 ■ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組副工程師(通訊作者)
蕭震洋 ■ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組副研究員
陳俊愷 ■ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組副研究員
林伯勳 ■ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組正研究員兼組長
黃光賢 ■ 水利署第二河川局副工程司
張綸織 ■ 林務局新竹林管處治山課技士
李膺讚 ■ 林務局集水區治理組治山科科長

一、前言

石門水庫集水區整體地質岩性脆弱，加上區內人為開發活動頻繁，導致土地超限利用，且受到歷年颱風、豪大雨以及極端事件之影響，造成集水區內許多嚴重崩塌及土石流等災害問題；其中，於民國93年艾利颱風時，西南隅白石集水區國有第134林班地，鄰近白石溪上游源頭處，生成面積44.43ha之白石大崩塌，且歷經海棠、柯羅莎及莫拉克等颱風侵襲，導致崩塌面積仍有持續擴大之跡象，並使得上述颱風侵襲期間白石溪泥砂濃度與濁度測站所測數值均明顯上升，直至民國99年梅姬颱風後其崩塌面積持續擴大達58.7ha，崩塌地面積大小為石門水庫集水區之冠，且為林務局轄管上游林班地工程進駐與其成效關注重點，相關地理位置分布以及現場崩塌全景照片如圖1以及圖2所示。

然而，配合民國95至100年度期間執行之「石門水庫及其集水區整治計畫」，林務局針對上述國有林之白石大崩場地進行災害處理，因其地處偏僻，且人力機具不易到達，故於95年至98年間，利用航空機具進行工程材料空投以及人力方式，採用打樁編柵、噴植草種以及草袋排水構設置等柔性工法，進行崩塌坡面處理，以能有效控制崩塌發展與提升坡面植生復育效果，相關整治工程內容詳如表1。鑑此，為完整有效呈現整治工程進駐後崩塌治理成效，本研究透過蒐集白石大崩塌環境資料，另藉由過去歷史航照影像資料、崩塌判釋及工程治理前後數值高程模型資訊，用以作為治理成效評估及歷年重大土砂災害後地形貌變遷分析應用基礎。此外，透過已進行保育治理工程區與鄰近未進行保育治理工程區，進行數值地形比對，並進一步確切瞭解工程治理成效。



圖1 國有第134林班地地理位置圖



圖2 白石大崩塌全景圖(95年3月28日拍攝)

表1 國有第134林班地整治工程內容表

年度	工程名稱	工程內容
95	大溪區第134林班崩塌地復育工程	打樁編柵、綠化植生、植栽樹苗、撒播覆蓋及截排水工作(30.00ha)
96	96年度石門水庫及其集水區計畫第復1號崩塌地復育造林	打樁編柵、縱橫向截排水、撒播草籽及造林等復育工作(14.5ha)
97	97年度石門水庫及其集水區計畫第復1號崩塌地復育造林	打樁編柵、縱橫向截排水、撒播草籽及造林等復育工作(33ha)

二、資料蒐集建置

本研究利用歷史衛星影像及崩塌地判釋圖層蒐集、歷年數值高程資料蒐集及建置等方式，瞭解白石大崩塌之現場環境以及基礎資訊，以提供治理成效分析之用，並進一步得知崩塌地砂源供應情況，加以具體化說明保育治理措施土砂控制與環境復育情形。

(一)歷史衛星影像及崩塌地判釋圖層蒐集

針對白石大崩塌範圍蒐集自1996年至2010年內，賀伯颱風等7場主要影響災害事件進行崩塌歷程分析(如表2)，並納入林務局100年度汛期前、後崩塌地判釋成果(共計9場)，以完整並通盤瞭解白石大崩塌土砂災害演變歷程，輔以說明保育治理成效。

表2 白石大崩塌歷史颱風事件表

項次	事件	蒐集期間	分析事件說明
1	賀伯颱風	1996/07/29-08/01	白石大崩塌新生成
2	艾利颱風	2004/08/23-08/26	白石大崩塌面積擴大
3	海棠颱風	2005/07/16-07/20	1.保育治理工程進駐 2.白石大崩塌面積擴大
4	柯羅莎颱風	2007/10/04-10/07	1.保育治理工程進駐 2.水庫淤積量飆高
5	如麗颱風	2008/09/11-09/16	白石大崩塌復育情況良好
6	莫拉克颱風	2009/08/05-08/10	白石大崩塌面積擴大
7	凡那比颱風	2010/09/17-09/20	延續前場分析時程連續性，以分年監測崩塌地變化
8	100年汛期前	2011/04/19-04/20	100年汛期前崩塌地面積之變化
9	100年汛期後	2011/12/04-04/28	瞭解整治計畫結束後崩塌地覆育情形

(二)歷年數值高程資料蒐集及建置

針對白石崩塌地範圍，蒐集內政部地政司早期5m×5m數值高程模型以及水土保持局空載LiDAR施測成果，此外，另透過林務局農林航測

所於此區域範圍內遙測影像資料，編修產製4期白石大崩地數值高程(每期為4幅1/5,000圖幅，計16圖幅)，共計有6期數值高程資料(林務局，2012)，供分析參用，如表3；然而，透過上述蒐集之歷年數值高程資料，再配合本區工程治理時間界點，可確切估算治理前及治理後代表之土砂產量，進而探討人為治理對白石大崩地產量的影響。

表3 蒐集之數值地形一覽表

項次	時間	資料來源
1	94年1月1日	內政部地政司
2	94年9月17日	林務局
3	95年11月12日	林務局
4	96年11月15日	林務局
5	97年12月1日	林務局
6	99年11月12日	水土保持局

三、評估方法

為瞭解崩塌治理成效，將評估方法分成兩類，分就「崩塌地面積變動量」及「崩塌地土砂產出量」等不同面相，量化說明白石大崩塌工程土砂防治成效，進而瞭解工程進駐後是否有利於降低崩塌之深度以及土砂產出量是否可相對下降，並藉以分析已治理及未治理區之差異及證實其治理成效。針對各項工作分析方法，以下依序說明如下：

(一)崩塌地面積變動量

本研究依據蒐集各期重大災害事件崩塌地判釋成果，針對各期事件後之崩塌地面積、事件前之崩塌復育地面積進行統計估算，以瞭解內之白石大崩塌之崩塌變化情形分析流程如圖3所示。

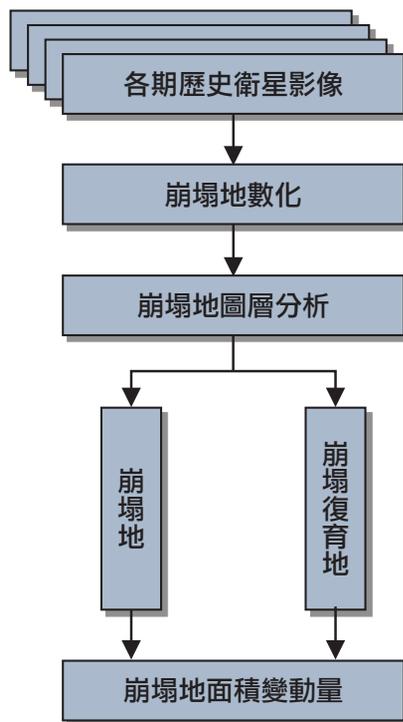


圖3 崩塌地面積變動量分析流程圖

(二)崩塌地土砂產出量

本研究為瞭解工程進駐治理後崩塌治理成效，能否有效降低研究區域土砂來源之土砂產量，故主要依據白石大崩塌分析區域之集水區單元，並參考崩塌地之工程資料開工、竣工時間以及各期航照判釋治理時間界點，透過實驗組及對照組試驗比較，瞭解工程進駐是否有利於降低坡面崩塌深度。遂此，於白石集水區以白石大崩場所屬集水區第134號林班地做為實驗組(已治理崩塌)；並挑選無治理工程進駐且地理位置接近之小型集水區，以相鄰第133號林班地為對照組(未治理崩塌)，做為比較對象。圖4為白石大崩塌治理成效評估實驗組及對照組地理位置圖，以下針對崩塌治理評估方式及執行步驟做說明：

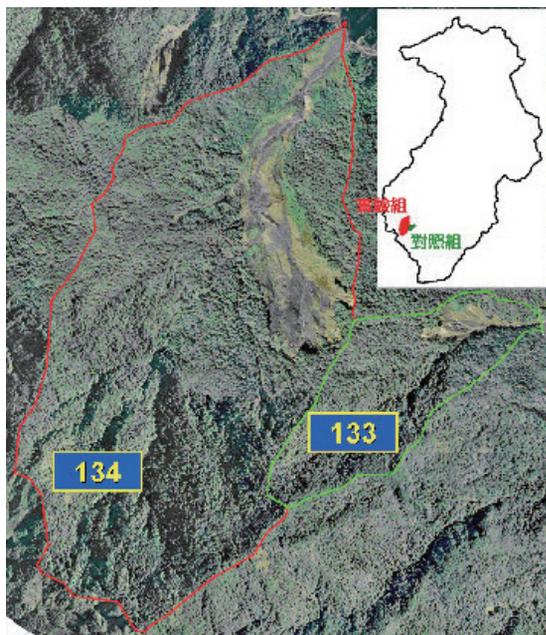


圖4 白石大崩塌治理成效評估之實驗組及對照組地理位置圖

本項評估假設未治理區域崩塌平均累積深度為評估治理成效之參考標準量，藉以評估已治理相對未治理區域之崩塌平均累積深度降低比例，亦稱為「崩塌深度抑制百分比」。首先，透過蒐集與編修數值高程進行各期實驗及對照組之崩塌土砂產量分析；接著，因考量兩者投影崩塌面積並非一致，且各時期崩塌面積皆不相同，故將前述兩者各時期崩塌土砂產量除以各自的崩塌裸露地投影面積，藉以獲得各評估時期實驗及對照組平均崩塌深度，再將治理後各評估時期崩塌平均深度進行加總，則可獲得兩集水區分別之累積崩塌平均深度；最後，以未治理之對照組累積崩塌平均深度為分母，而以對照組減去實驗組累積崩塌平均深度為分子，則可得知集水區治理後，已治理區域相較未治理區域之減少崩塌深度比例，亦為治

理成效之表現，若該值越大，則代表工程復育效果越顯良好。計算方式如式(1)：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{133i} / A_{133i} - \sum_{i=1}^n Y_{134i} / A_{134i}}{\sum_{i=1}^n Y_{133i} / A_{133i}} \times 100(\%) \quad (1)$$

其中 Y_{133} ：林班地編號133對照組崩塌土砂產量 (m^3)

A_{133} ：林班地編號133對照組崩塌地投影面積 (m^2)

Y_{134} ：林班地編號134實驗組白石大崩塌土砂產量 (m^3)

A_{134} ：林班地編號134實驗組白石大崩塌地投影面積 (m^2)

D ：崩塌深度抑制百分比(%)

n ：比較總期數

四、成效評估成果

本研究主要針對白石大崩塌以及所在國有第134林班地範圍，利用歷年崩塌地變遷，說明崩塌變化歷程以及復育成效。另一方面，經環境監測之實驗組與對照組比較，透過集水區土砂產量分析，用以量化說明崩塌保育治理效果，以下分就「崩塌地面積變動量評估」以及「崩塌地土砂產出量評估」兩面向，分項呈現整治執行成果。

(一)崩塌地面積變動量評估

本研究透過各期事件之崩塌地分布及增減趨勢瞭解第134林班地崩塌地面積變動情形，並加以單獨評析白石大崩塌崩塌地變遷歷程。茲將相關評估結果說明如下：

1. 崩塌地面積

艾利颱風後，於134林班地集水區引致大規模崩塌且白石大崩塌地產生，總計達至51.29ha，其對應崩塌比為6.93%；95年至96年間，整體崩塌面積仍持續增加，最大崩壞比為11.45%；直至如麗颱風後，整體崩塌面積下降至60.93ha；之後，98年莫拉克颱風及99年梅姬颱風後崩塌地又再度攀升至77.68ha；至100年12月之防汛期後影像之判釋統計結果，134林班地集

水區範圍之崩塌地面積降至36.05ha，崩塌比約為4.87%。林務局於凡那比颱風前完成第一階段整治計畫，由凡那比颱風後崩塌地面積統計後，可以發現第134林班地集水區範圍崩塌地面積明顯變少，顯見林班地治理確有成效。因林務局於第二階段整治計畫以自然復育為主，經100年12月防汛期後衛星影像及判釋崩塌地成果評析得知，顯示林班地崩塌狀況已被控制、無擴大跡象，具良好植生復育成效。

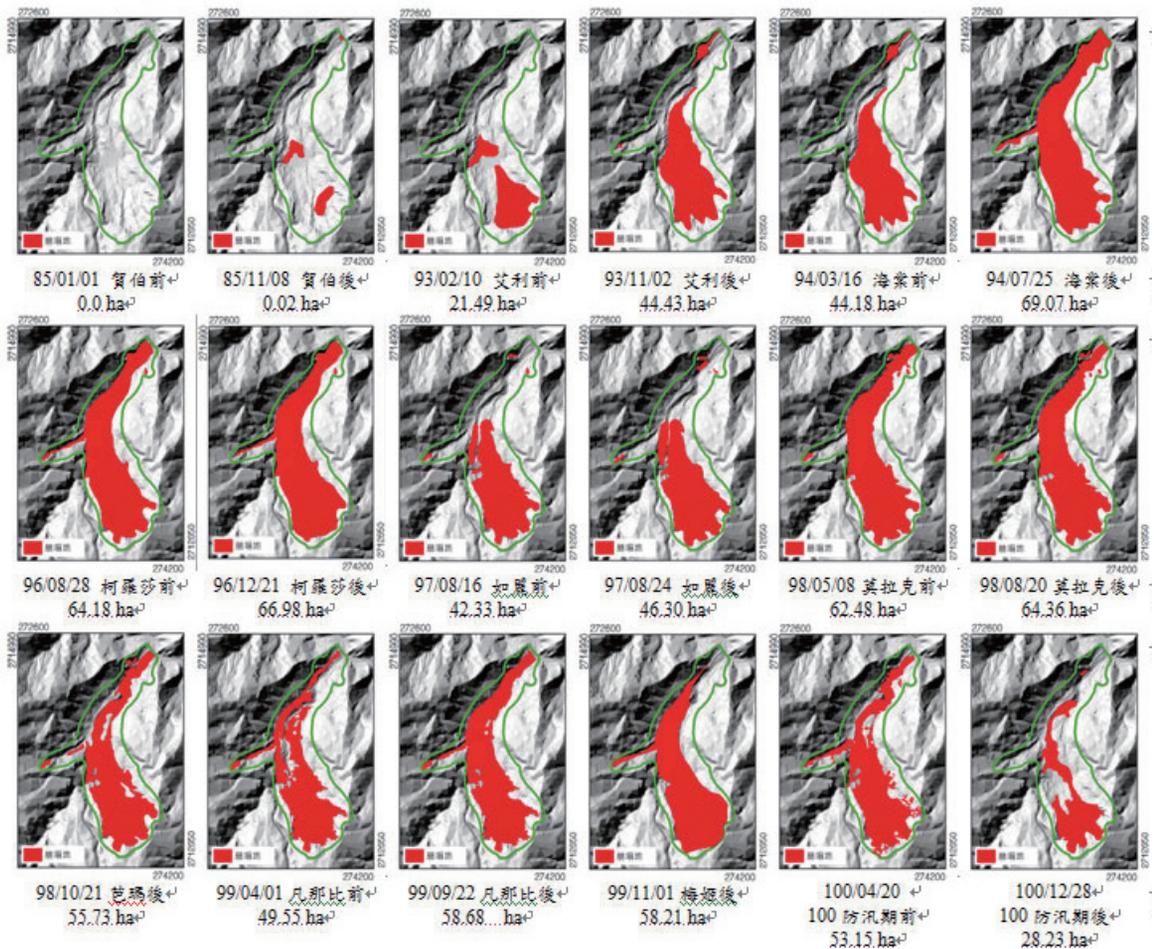


圖5 白石大崩塌歷史變遷歷程

此外針對白石大崩塌，本研究以艾利颱風後白石大崩塌範圍為基礎，觀察歷年崩場地進行變遷歷程評析，彙整歷年衛星影像崩場地判釋成果。結果發現，白石於治理工程進駐後，崩塌地面積有持續下降的趨勢，由最大的64.18ha下降至100年防汛期後28.23ha，顯示崩塌經人為治理與長時間穩定復育後，確實可有效降低崩塌裸露面積，並增加崩塌復育效果。白石大崩塌面積變遷如圖5所示。

2.崩塌復育地與崩塌復育比

圖6為第134林班地集水區範圍之崩塌復育面積、崩塌復育比與水利署白石集水區雨量測站之累積雨量統計圖。由圖可知，第134林班地集水區範圍於96年8月，其崩塌復育地面積約達5ha；於97年8月，其崩塌復育地面積約達28.74ha；98年5月，其崩塌復育地面積僅有3.17ha，前述平均崩塌復育比1.29%；另第二階段整治計畫開始至99年10月，採用自然復育方式，其崩塌復育地面積約達18.31ha。99年11月梅姬颱風後至100年4月間，崩塌復育地面積為26.74ha，崩塌復育比為3.65%。至100年12月時，崩塌復育地面積為37.74ha，崩塌復育比達5.10%，顯示植生復育情況良好。整體而言，崩場地之復育狀況經整治計畫進駐後，復育成效隨時間越趨明顯，另經近年雨量考驗，發現崩塌復育面積及復育比維持穩定上昇，顯示整體崩塌環境抗災能力均可有效提升；此外，除根據崩塌復育地面積及復育比瞭解復育狀況外，另可透過崩塌深度抑制指

標以及土砂產量控制等，進一步量化說明崩塌狀況，以長期觀測、掌握其整體崩塌變遷情況，相關說明如下：

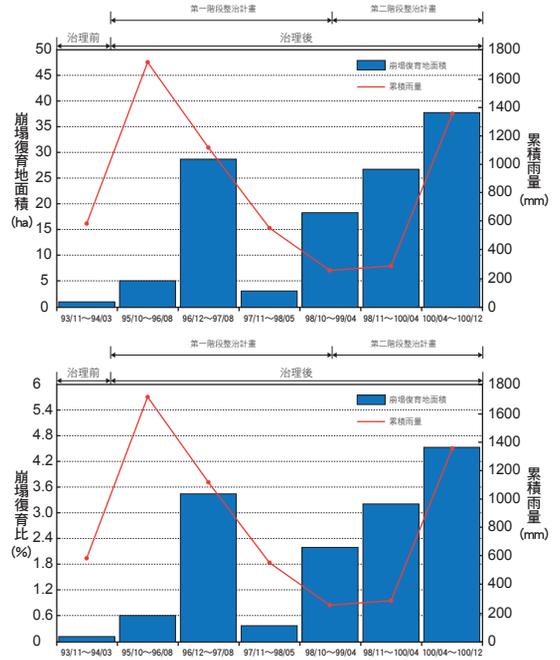


圖6 134林班地集水區之崩塌復育面積與崩塌復育比統計圖

(二) 崩場地土砂產出量評估

本研究於白石集水區內選取鄰近兩個小型集水區，其一做為實驗組(已治理崩塌)，其二做為對照組(未治理崩塌)，以供比較探討治理成效。依此，以白石大崩場所屬集水區第134號林班地做為實驗組；對照組則以94年工程整治前最後乙場颱風事件(亦即龍王颱風)之崩場地判釋成果為候選背景資料，其原則為挑選崩塌規模、水文條件相似、無治理工程進駐且地理位置接近之小型集水區(第133號林班地)，並主要利用6期數值高程資料，進行前後兩期間數值高程崩塌土砂產量計算，接著計算累積平均崩塌

深度，透過崩塌深度抑制百分比之參考指標，進而評估治理成效，表4為各期間數值高程變化量分析成果。結果顯示，經本研究以95年11月12日作為治理時間界點，計算自95年11月12日至99年11月12日之崩塌深度抑制百分比，其數值高達82%(計算式參見式(2))，顯示治理有其成效。

$$\text{崩塌深度抑制百分比 (D)} \quad (2)$$

$$= \frac{(1.82 + 0.31 + 1.16) - (0.13 + 0.17 + 0.30)}{(1.82 + 0.31 + 1.16)} \times 100\% = 82\%$$

各期間數值高程變化量分析成果，主要受到各分析期間颱風或汛期降雨事件影響，石門水庫國有林班地白石大崩塌之土砂產量，民國95年治理前總體土砂生產量約為8,870,470 m³，而經95年至99年治理後土砂產量約為344,988 m³，其治理後相較於治理前土砂產量，約可相差8,525,482 m³。圖7為各期高程差量空間分布圖，圖中高程變化量屬正值為土方堆積區，亦為殘留土方區位，分析成果可說明白石大崩塌於99年11月12日後，其崩塌殘留土

表4 白石大崩塌實驗組與對照組分析成果表

治理階段	項次	統計期間及數量		實驗組 (白石大崩塌)	對照組	
治理前	1	94年1月1日至 94年9月17日	A1.	崩塌裸露地投影面積(m ²)	711,653	95,639
			B1.	土砂產量(m ³)	8,849,424	1,507,828
			C1.	平均崩塌深度(m)=(B1/A1)	12	15
	2	94年9月17日至 95年11月12日	A2.	崩塌裸露地投影面積(m ²)	681,765	85,187
			B2.	土砂產量(m ³)	21,046	4,475
			C2.	平均崩塌深度(m)=(B2/A2)	0.03	0.05
治理後	3	95年11月12日至 96年11月15日	A3.	崩塌裸露地投影面積(m ²)	633,923	68,862
			B3.	土砂產量(m ³)	81,797	125,319
			C3.	平均崩塌深度(m)=(B3/A3)	0.13	1.82
	4	96年11月15日至 97年12月01日	A4.	崩塌裸露地投影面積(m ²)	624,977	51,605
			B4.	土砂產量(m ³)	103,993	15,865
			C4.	平均崩塌深度(m)=(B4/A4)	0.17	0.31
	5	97年12月01日至 99年11月12日	A5.	崩塌裸露地投影面積(m ²)	528,342	62,244
			B5.	土砂產量(m ³)	159,198.	71,923
			C5.	平均崩塌深度(m)=(B5/A5)	0.30	1.16

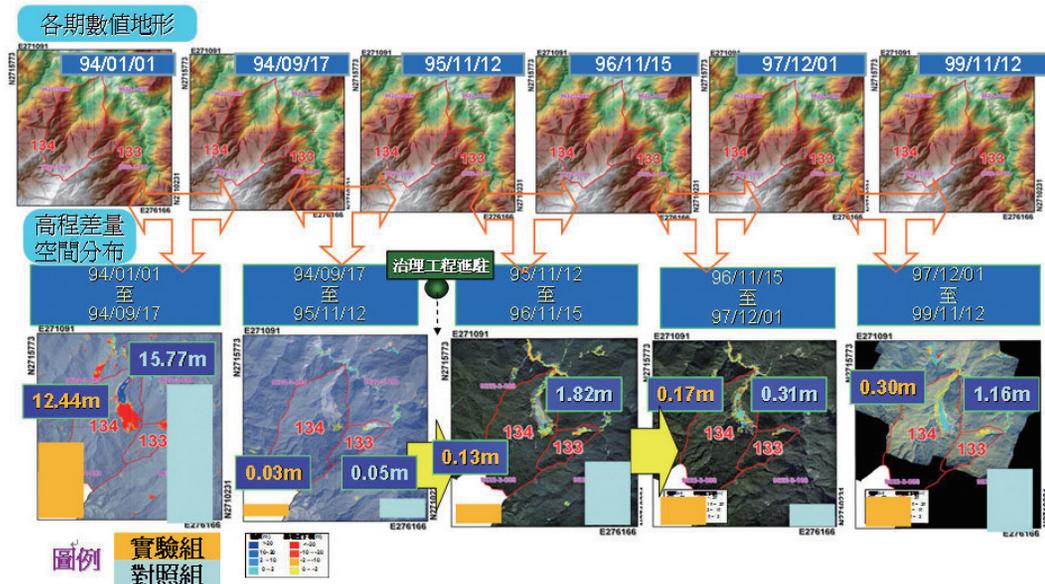


圖7 白石大崩塌實驗及對照組各期高程差量空間分布圖

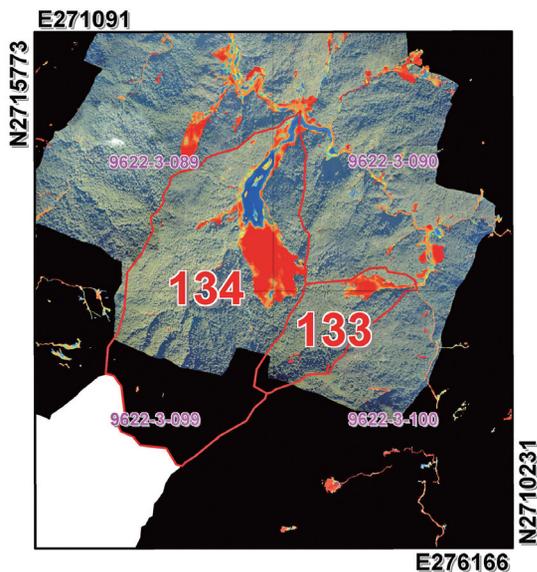


圖8 各期高程差量累計空間分布圖(底圖拍攝時間：99年11月12日)

方主要堆積在崩塌坡腹，堆積土方高度超過20m，其次為崩塌坡趾鄰近白石溪主流邊，堆積土方高度也超過10m，而針對各期高程差量累計統計展繪如圖8，此一分析成果與本研究於100

年11月25日至崩塌地現場進行調查所觀測之土砂堆積情況吻合。此兩區域殘留土方屬於不穩定之鬆散材料，若未來遭遇大型降雨事件，仍可能運移至主河道並影響下游河床及設施，除建議持續進行監測外，若能配合各權屬單位合力針對集水區水、砂環境進行災害分區治理，將有助於減緩白石大崩塌不穩定土方下移至石門水庫庫區之速率並維護水庫庫容與蓄水能力。

五、結論

本文透過白石崩場地工程整治進駐時間、多時期歷史衛星影像、崩場地判釋及歷年數值高程資料，再透過土砂產量推估，進而合理並實質量化國有林班地白石大崩塌治理成效。相關結論如下：

- (一)根據白石大崩塌6期間數值高程變化量分析成果，經比較白石大崩塌與鄰近第133國有林班地內地形劇烈變化區之平均崩塌深度，

發現經治理後崩塌深度抑制百分比，其數值高達82%，顯示治理有其成效。

(二)根據6期間數值高程變化量分析成果發現，石門水庫國有林班地白石大崩塌之土砂產量，民國95年治理前總體土砂生產量約為8,870,470 m³，而經95年至99年治理後土砂產量約為344,988 m³，其治理後相較於治理

前土砂產量，約可相差8,525,482 m³，土砂產量已可有效控制。

(三)白石於治理工程進駐後，崩塌地面積有持續下降的趨勢，由最大的64.18ha下降至100年防汛期後28.23ha，顯示崩塌經人為介入治理與長時間穩定復育後，確實可有效降低崩塌裸露面積，並增加崩塌坡面植生復育效果。⚠️