

花蓮縣秀林鄉瓦黑爾溪堰塞湖之穩定性評估

文/圖 郭玉樹 ■ 國立成功大學水利及海洋工程學系助理教授
陳昆廷 ■ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人
李心平 ■ 國立成功大學防災研究中心副主任(通訊作者)
蘇意筑 ■ 國立成功大學防災研究中心監測組工程師
王曉明 ■ 林務局花蓮林區管理處治山課課長
劉政儒 ■ 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生
黃彥融 ■ 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生
謝正倫 ■ 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

一、前言

花蓮地區地形地勢陡峭、地質構造發達且脆弱，境內因屬板塊交界處，地震更加頻繁，加以颱風豪雨季節所帶來之集中性豪雨，常誘發山區之崩塌與土石流等坡地災害，若崩塌或土石流所產生的土砂材料運移至河道則可能阻斷河水而形成堰塞湖。2014年3月11日，位於花蓮縣秀林鄉富世村之饅頭山發生崩塌，崩塌土體運移至瓦黑爾溪並阻斷河道而形成堰塞湖(TWD97-X：298,239；Y：2,676,206)，因堰塞湖位於林務局花蓮林區管理處之轄管林班地第54林班15小班及第60林班12小班，林務局花蓮林管處於3月12日接獲通報後，立即聯繫崩塌災害勘災協力團隊國立成功大學防災研究中心，並於3月13日進行堰塞湖緊急調查初步現勘，於初步現勘結果確定堰塞湖並無立即危險後，即

組成堰塞湖現場調查小組，於3月18日進行堰塞湖細部調查，透過現場調查與測量之成果，進行堰塞湖之穩定性評估，由細部調查結果顯示瓦黑爾溪堰塞湖已發生溢流但河道中仍有大量的土體堆積，後續於颱風及豪雨事件發生時，堰塞湖上游流量之增加將可能導致堰塞湖天然壩之溢流侵蝕而潰決。此現地調查與評估作業流程可提供林務局相關單位對於堰塞湖防救災處置對策之重要參考依據。

二、瓦黑爾溪堰塞湖區域環境說明

瓦黑爾溪位於花蓮縣秀林鄉富世村，源於畢祿山北支稜及無明東山之間，全長16.5公里，流域面積為5,736ha，境內高程分布於560-1,180m間，聯外交通道路為台8線，與陶塞溪、

慈恩溪及托博潤溪等支流匯入立霧溪，屬立霧溪流域(圖1)。在坡度方面，因河川長年切割作用，形成河道狹窄且側岸陡峭之峽谷地形，平均坡度為 37.27° ，依水土保持技術規範(2012)界定為六級坡，屬易發生嚴重沖蝕、崩塌、地滑等坡地災害。而在瓦黑爾溪集水區內之年平均雨量約2,093mm，降雨量集中於7至10月(表1)。在地質方面，依中央地質調查所五萬分之一流域地質圖(2012)可知(圖2)，立霧溪流域內之岩層多以大南澳片岩為主，屬變質岩類，其組成主要為片岩及大理岩，受大地應力影響，岩層褶曲構造發達，且劈理將岩體切割得相當破碎，致使雨水易沿弱面滲入邊坡，加速岩體風化，往往成為發生崩塌之誘因之一。此外，因台灣位於地震帶上，常因地震而造成崩塌。在雨量充沛、岩體破碎與地震頻繁等因素下，使得立霧溪流域內崩塌頻仍，加上峽谷地形影響，崩塌之土石運移至溪床後易阻塞河道並形成堰塞湖，如1977年托博潤溪堰塞

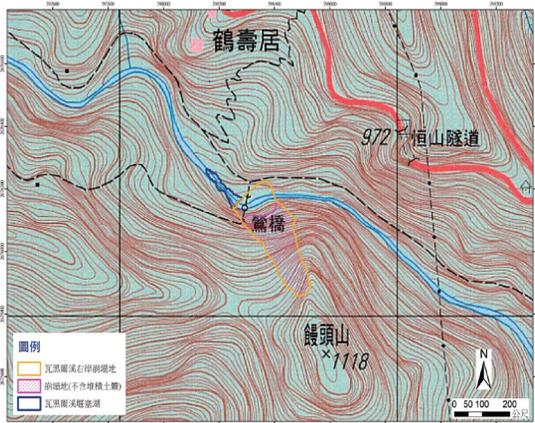


圖1 研究區域地理地形圖

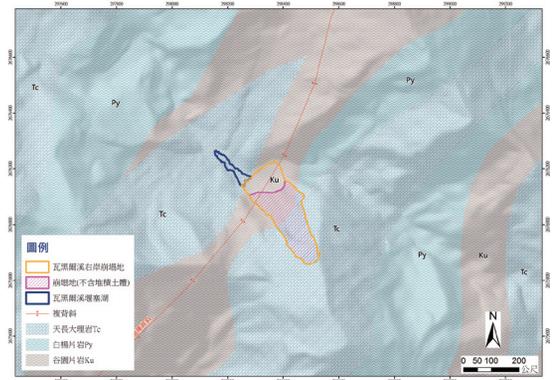


圖2 研究區域地質分布圖

湖(簡桐煙, 1978)、2009年陶塞溪堰塞湖(林務局, 2011)等，皆為崩塌引致堰塞湖形成之歷史案例。

三、瓦黑爾溪堰塞湖穩定性評估

(一)堰塞湖現場調查

2014年03月11日，位於花蓮縣秀林鄉富世村之饅頭山西北坡面發生崩塌，崩塌土體從瓦黑爾溪右岸運移至溪床並阻塞河道而形成堰塞湖。由災前2006年航空照片研判，該崩塌坡面於崩塌前即有三條蝕溝發育，顯示該坡面於崩塌發生前即有蝕溝沖蝕之現象(圖3)。另配合UAV正射拼接影像及現地測量，崩塌地縱長約298m，最大寬度約為150m(不含崩塌土體及崖錐堆積範圍，圖4)，最大崩塌深度約為7-10m(圖5)，平均崩塌深度約為4m，崩塌面積約為 $32,800\text{m}^2$ (不含崩塌土體及崖錐堆積範圍)，

表1 洛韶雨量站1986-2012年歷年平均降雨紀錄(台灣水文年報, 2012)

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均年降雨量
平均雨量(mm)	73	130	117	125	165	195	256	322	357	243	92	81	2,093

總崩塌土體體積為131,200m³(表2)。崩塌地出露之岩層為大南澳片岩系中的谷園片岩，屬於綠色片岩(綠泥片岩)，岩層中夾有石英岩脈，岩體破碎。從現地崩塌岩塊並無觀察到深褐色水痕，僅有少數岩塊有淺褐色水痕，推測該坡面之岩體風化程度為中等風化。崩塌地下部側面崩塌剖面，該土體材料由黑色土壤夾雜大型岩塊組成，而岩塊本身並沒有風化之跡象，證明了該土體為崩場所產生，其厚度約7公尺(圖6)。崩塌地上部則為新鮮岩盤，主要由綠色片岩組成，且岩層雲母含量極高，遠觀呈現亮白色，雲母礦物的含量決定片岩弱面強度，本坡面之岩層雲母含量高則代表崩塌地上部岩層劈理面

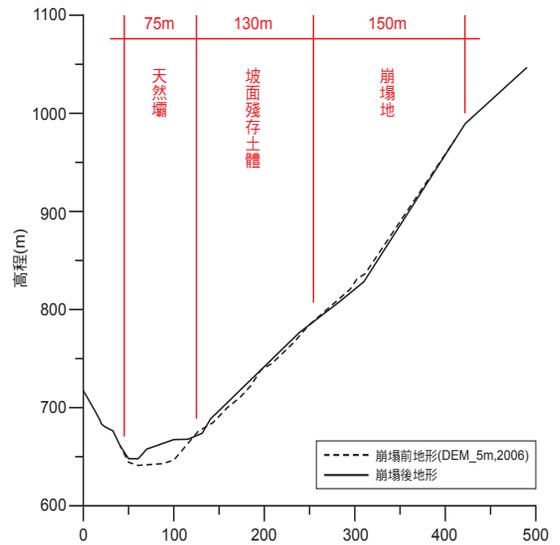


圖5 瓦黑爾溪右岸崩塌地剖面



圖3 瓦黑爾溪右岸崩塌地災前2009年航空照片



圖6 崩塌土體堆積厚度(2014年3月18日拍攝)

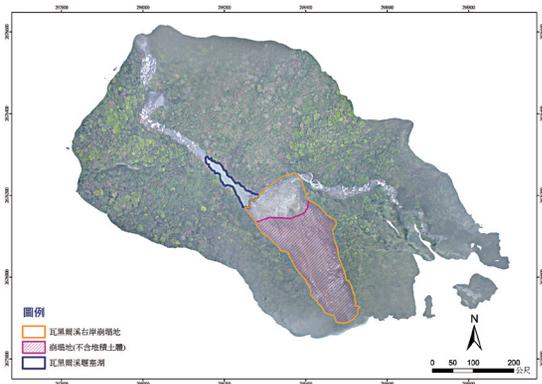


圖4 瓦黑爾溪右岸崩塌地UAV正射拼接影像



圖7 瓦黑爾溪右岸崩塌地坡腹背斜(2014年3月25日無人載具空拍照片)

及層面抗剪強度很低。瓦黑爾溪崩塌地鄰近地區並無斷層通過，但崩塌地坡腹有谷圓背斜之背斜軸經過，從災後空拍影像及現地調查發現，崩塌地坡腹可見明顯背斜構造、地層張力裂紋等褶皺構造特徵(圖7)。褶皺構造之通過應力集中於岩層下緣，於岩層上緣形成張力裂紋，雨水容易沿其裂縫滲入岩盤，加速岩體風化，降低邊坡塊體抗剪強度，利於山崩發育。崩塌地崖錐坡度約為 35° ，崩塌地地下水狀況不明顯，目前持續有落石跡象。

瓦黑爾溪右岸坡面發生崩塌後，崩塌地遷移至溪床並阻塞河道而形成堰塞湖天然壩，天然壩上游集水面積為 $56,300,000\text{m}^2$ 。於2014年3月18日現地調查時，堰塞湖天然壩壩體已從左側發生溢流破壞，溢流水道寬度約10m，而壩

體下游因溢流破壞而有細顆粒土砂堆積於此(圖8)。量測上游水流通過溢流水道之流速約 0.26m/s ，流量約 $1.56\text{m}^3/\text{s}$ ，因流量甚小，僅細顆粒能被水流帶走，因此溢流水道出露之土砂尺寸皆為大於1m之塊石(圖9)。經現地地形測量結果，未發生溢流破壞前之壩體高度約10m，目前壩體高度約7m，壩寬(平行河道方向)約158m，壩長(垂直河道方向)約75m，由地形測



圖8 瓦黑爾溪堰塞湖溢流破壞後之下游土砂堆積情形(2014年3月18日拍攝)

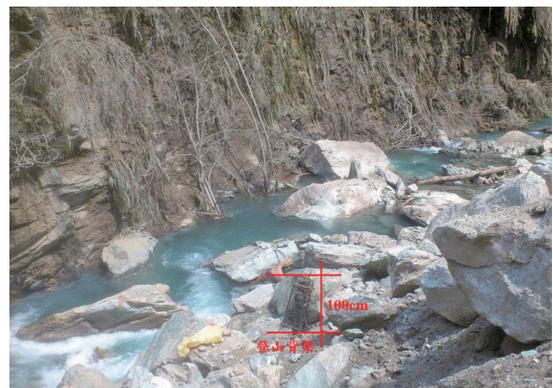


圖9 瓦黑爾溪堰塞湖溢流水道現況(2014年3月18日拍攝)

表2 瓦黑爾溪堰塞湖相關基本資料

區位	參數	數值
崩塌地	最大崩塌地寬度(m)	150
	最大崩塌地長度(不含崩塌土體及崖錐堆積範圍, m)	298
	崩塌面積(不含崩塌土體及崖錐堆積範圍, m^2)	32,800
	最大崩塌深度(m)	7-10
	平均崩塌深度(m)	4
	崩塌土體體積(m^3)	13,1200
天然壩	上游集水區面積(m^2)	56,300,000
	壩高(m)	10 (原始壩高) / 7 (目前壩高)
	壩長(垂直河道方向, m)	75
	壩寬(平行河道方向, m)	158
	壩體體積(m^3)	82,000
	最大表面粒徑(m)	6
	平均表面粒徑(m)	0.17
	溢流水道寬度(m)	10
	溢流流量(m^3/s)	1.56
	最大水深(m)	4.6
堰塞湖	最大迴水長度(m)	180
	蓄水體積(m^3)	9,500

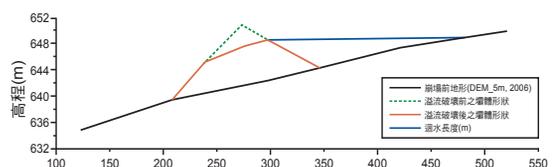


圖10 瓦黑爾溪堰塞湖縱剖面

量結果計算壩體體積約82,000m³，現場壩體材料最大粒徑為6m，平均粒徑為0.17m(表2)。堰塞湖最大水深為4.6m，迴水長度約180m(圖10)，配合2006年前期DEM地形與地形測量結果，估算蓄水體積為9,500m³。

(二)堰塞湖天然壩穩定性分析

目前國內外學者提出許多快速評估天然壩壩體穩定性之建議方法。Ermini and Casagli (2003)利用天然壩上游集水區面積、壩高及壩體體積等三項因子進行評估，Dong *et al.* (2009&2011)則考慮尖峰流量、天然壩上游集水區面積、壩高、壩寬及壩長等五項因子快速評估天然壩壩體穩定性。茲將上述各評估方法說明如下：

1.無因次阻塞指標

Ermini and Casagli(2003)以義大利、日本、美加等國家之84個堰塞湖案例資料，利用統計方法歸納出堰塞湖天然壩穩定性研判指標，稱為無因次阻塞指標(Dimensionless Blockage Index, *DBI*)，*DBI* < 2.75則堰塞湖天然壩為穩定(壽命較長)，而*DBI* > 3.08則為不穩定(壽命較短)，介於2.75與3.08之間則為過渡區(圖11)。此方法為目前國內外針對堰塞湖穩定性緊急評估最常使用之方法。*DBI*其定義如下：

$$DBI = \log \left(\frac{A \times H}{V} \right)$$

其中A為天然壩上游集水區面積(x10⁶m²)，H為天然壩壩高(m)，V為天然壩壩體體積(x10⁶m³)。

2.鑑別分析模式

Dong *et al.*, (2009)參考日本43處堰塞湖案例之地形資料(Tabata *et al.*, 2002)，以鑑別分析方法尋找影響堰塞湖天然壩體穩定性之參數，

分別以天然壩上游集水區面積、壩高、壩寬及壩長等四項因子，建立預測堰塞湖天然壩穩定性之多變量分析模式(*AHWL_Dis*)，如式2所示。此外，亦利用Ermini and Casagli (2003)之案例建立鑑別分析統計模式(*AHV_Dis*)，如式3所示：

$$AHWL_Dis = -2.62\log(A) - 4.67(H) + 4.57\log(W) + 2.67(L) + 8.26$$

式2

$$AHV_Dis = -2.13\log(A) - 4.08(H) + 2.94\log(V) + 4.09$$

式3

其中A為天然壩上游集水區面積(m²)，H為天然壩壩高(m)，W為天然壩壩寬(平行河道方向，m)，L為天然壩壩長(垂直河道方向，m)，V為天然壩壩體積(m³)，當*AHWL_Dis*及*AHV_Dis*小於0時，天然壩為不穩定。

3.邏輯斯迴歸模式

Dong *et al.* (2011)以相同之堰塞湖案例資料建立邏輯斯迴歸模式(*AHWL_Log*)及邏輯斯迴歸統計模式(*AHV_Log*)，如式4及式5：

$$AHWL_Log = -2.22\log(A) - 3.76\log(H) + 3.17\log(W) + 2.85\log(L) + 5.93$$

式4

$$AHV_Log = -4.48\log(A) - 9.31\log(H) + 6.61\log(V) + 6.39$$

式5

表3 瓦黑爾溪堰塞湖天然壩壩體穩定性評估

天然壩壩體穩定性評估方法	評估值	評估結果
<i>DBI</i>	3.68 (>3.08)	不穩定
<i>AHWL_Dis</i>	-1.55 (<0)	不穩定
<i>AHV_Dis</i>	-1.42 (<0)	不穩定
<i>AHWL_Log</i>	-2.24 (<0)	不穩定
<i>AHV_Log</i>	-3.72 (<0)	不穩定

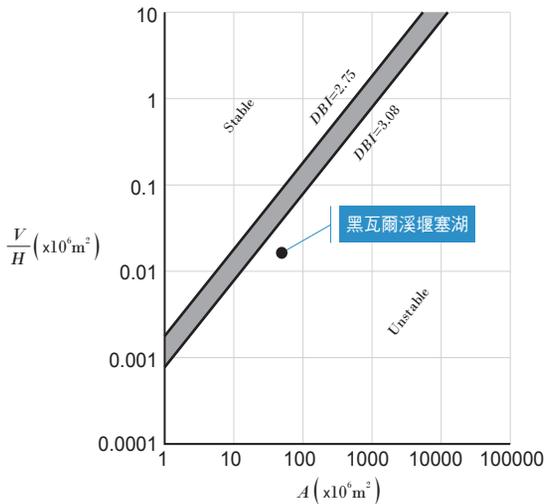


圖11 瓦黑爾溪堰塞湖無因次阻塞指標之評估結果

當 $AHWL_Log$ 及 AHV_Log 小於0時，天然壩為不穩定。

依據現場調查結果(表2)配合上述三種堰塞湖天然壩壩體穩定性評估方法，瓦黑爾溪堰塞湖之壩體穩定性評估結果皆為不穩定(表3)。

(三)保全對象影響範圍

由於瓦黑爾溪堰塞湖天然壩壩體後方蓄積水體，若壩體持續溢流冲刷破壞，壩體溢流口將逐漸擴大(加寬加深)，壩高並逐漸冲刷降低，在溢流口及壩體高度變化過程中，壩體後方之水體將因潰口增大及壩高降低導致流出水量增加，並造成下游河川水位增高，河川流量或水位增高均可能導致下游鄰近河岸之社區、道路及相關重要設施發生洪水或土砂沖淤災害。故堰塞湖壩體潰決破壞對於下游社區與重要設施之影響範圍與程度，取決於潰壩洪水之尖峰流量(最大瞬時流量)。

瓦黑爾溪堰塞湖下游之主要保全對象為天祥地區之白楊步道，白楊步道路橋之河寬為

23m，橋面至溪床約17m，假設山區之流速約為3m/s，以堰塞湖蓄水體積9,500m³進行潰壩之尖峰流量計算，可透過三角形單位歷線推估尖峰流量(式6)，而瞬時淹水高度可由式7求得：

$$Q=(T \cdot Q_p)/2 \quad \text{式6}$$

$$h=Q_p/(VB) \quad \text{式7}$$

其中，Q為總流量(m³)，T為時間(s)，QP為尖峰流量(m³/s)，h為瞬時淹水高度(m)，V為山區之流速(m/s)，B為河寬(m)。

表4為假設5種潰壩情形，計算不同尖峰流量條件下，白楊步道路橋之瞬時淹水高度。

表4 不同尖峰流量條件下之瞬時淹水高度

案例	T (s)	Q (m ³)	Q _p (m ³ /s)	V(m/s)	B(m)	h(m)
Case 1	蓄水體積於60分鐘(3,600秒)內消散	9,500	5.27	3	23	0.07
Case 2	蓄水體積於45分鐘(2,700秒)內消散		7.04			0.10
Case 3	蓄水體積於30分鐘(1,800秒)內消散		10.56			0.15
Case 4	蓄水體積於15分鐘(900秒)內消散		21.11			0.31
Case 5	蓄水體積於5分鐘(300秒)內消散		63.33			0.92

四、結論與建議

目前瓦黑爾溪崩場地坡頂(饅頭山)之西側稜線，仍殘存有不穩定岩體分布，不排除有再度崩塌之可能，唯崩塌之主要土方來源為現有崩場地至稜線之殘存表土，由於現有崩塌區至坡

頂稜線約40公尺，且接近稜線部分風化層表土相對薄，因此未來如有崩塌發生時，可能崩落的崩塌土體相當有限，崩塌土體再度阻塞河道或為堰塞湖之可能性對較低。

根據瓦黑爾溪堰塞湖天然壩穩定性分析之結果，天然壩壩體屬不穩定壩體，由現場調查結果可知，天然壩壩體已發生溢流破壞，壩體後續將因豪雨或颱風期間之降雨持續沖刷而有可能完全的潰決；此外，瓦黑爾溪堰塞湖得規模與潰決後的可能影響，現階段堰塞湖對下游地區無立即性之致災危險，經現地評估後無工程處置之必要性，且堰塞湖周邊均為陡坡地形，工程機具與人員皆不易到達，工程整治可行性相對較低。建議後續應定期派員由中橫公

路158K處對崩場地及堰塞湖進行目視監測，並於颱風豪雨事件後，以無人載具對堰塞湖天然壩進行空拍作業，以隨時掌握堰塞湖天然壩之情形。

瓦黑爾溪堰塞湖對下游地區河岸周邊現有的住戶並無立即致災的風險，但堰塞湖天然壩一旦驟然潰決，仍將造成下游河床水位快速上升，如有人員在堰塞湖下游河道活動則仍將有致災的可能，因此建議於對堰塞湖下游(匯流至立霧溪處)河床周邊進行管制，避免民眾在此一河段進行活動減低致災的風險，同時於颱風豪雨期間(即中央氣象局發布警報期間)，應提醒周邊民眾並加強守視禁止人員進入河床，以避免瓦黑爾溪因降雨或堰塞湖潰決所可能引致的災害。⚠