

不同堰塞壩壩體體積估算方法對於壩體穩定性 評估之影響分析

Impact Analysis of Different Landslide Dam Volume Estimation Methods on the Dam Stability Assessment

國立屏東科技大學

水土保持系

學士生

王維琳

Wei-Lin Wang

國立屏東科技大學

水土保持系

學士生

李峻毅

Jyun-Yi Li

國立屏東科技大學

土木工程系

助理教授

陳昆廷*

Kun-Ting Chen

摘 要

堰塞壩與堰塞湖之形成，前者形成主要因為地震或降雨等因素，造成土體崩塌或滑落，崩塌土體造成河道完全或部分被堵塞，而形成一座堰塞壩；後者為堰塞壩形成後，水流無法順利向下游流動而停留於壩後蓄積形成湖水，一般台灣地區較常稱之堰塞湖。隨著氣候變遷之影響，堰塞湖已逐漸成為常態性之天然災害，當堰塞湖發生潰決時，可能造成下游保全對象受到危害，因此，如何有效且即時評估堰塞壩是否影響下游保全對象實屬重要研究議題。由於堰塞湖形成初期相關資訊取得不易，本研究以容易獲取之參數推估堰塞壩壩體體積及堰塞湖水體體積，並且考慮兩種推估方法進行比較，方法一為之單純考慮最小壩高之壩體條件，方法二為國內外較常使用之估算方法，為假設崩塌堆積土體等於壩體之條件。本研究另利用國內外常使用之無因次阻塞指標(Dimensionless blockage index, DBI)進行壩體穩定性評估，選定拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖及士文溪(春日鄉)堰塞湖，評估兩種推估方法對於壩體穩定性之影響。由評估結果得知，拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖之壩體體積與水體體積，方法二分別為方法一之 2 倍與 0.9 倍，而方法一與方法二之 DBI 評估結果分別為 1.66(穩定)與 1.48(穩定)，與實際情況相符；士文溪(春日鄉)堰塞湖之壩體體積與水體體積，方法二分別為方法一之 4 倍與 0.8 倍，而方法一與方法二之 DBI 評估結果分別為 3.22(不穩定)與 2.60(穩定)，實際情況為已潰壩。由上述結果顯示，方法二因包括整體崩塌堆積體積，壩體體積會大於方法一，水體體積則會小於方法一；此外，在利用 DBI 進行壩體穩定性評估時，由於方法二之壩體體積估算結果較大，會有誤判情形發生，因此建議未來在堰塞湖緊急防救災時，可採用方法一估算堰塞壩壩體與水體體積，獲取較為保守之評估值，進一步作為堰塞湖緊急防災應變對策擬定之參考依據。

關鍵詞：堰塞壩、堰塞湖、氣候變遷、無因次阻塞指標

*通訊作者，國立屏東科技大學土木工程系助理教授

ABSTRACT

The formation of landslide dam and landslide-dammed lake, the landslide dam is mainly caused by earthquake or rainfall, resulting in the landslide or rock avalanche, the landslide mass causes the river channel to be completely or partially blocked, and a dam is formed. The upstream discharge cannot flow downstream smoothly and stays behind the dam to accumulate and form a landslide-dammed lake. With the influence of climate change, landslide dam has gradually become a regular natural disaster, and when dam failure, it may cause harm to the residents downstream. Therefore, it is an important research issue to effectively and immediately assess whether the landslide dam affects downstream protection targets. Since it is not easy to obtain information about the landslide dam formation at the early stage, this study uses easily available parameters to estimate the landslide dam volume and the landslide-dammed lake volume, and considers two estimation methods for comparison. The method 1 is a simple consideration of the minimum dam height condition, the method 2 is a more common estimation method used both domestically and internationally, it is assumed that the landslide volume is equal to the landslide dam volume. In addition, the dimensionless blockage index (DBI) was used to assess the stability of the dams by results of the method 1 and the method 2. The results show that the dam volume is larger than that of the method 1 and the lake volume is smaller than that of the method 1 because of the inclusion of the overall landslide volume in the method 2. In addition, when using DBI to evaluate the stability of the dam, there are misjudgments due to the large volume of the dam in the method 2. Therefore, it is suggested that in the future, the method 1 can be used to estimate the dam volume and the lake volume to obtain a more conservative estimate, which can be used as a reference for the preparation of the emergency response to the landslide dam.

Keywords: Landslide dam, Landslide-dammed lake, Climatic change, Dimensionless blockage index

一、前言

台灣處於地震帶且地形陡峭，加上近年來極端降雨事件頻繁發生，山區邊坡土體易受地震或降雨事件等影響而發生崩塌、地滑或土石流。然因崩塌、地滑或土石流材料堵塞在河道上容易形成堰塞壩，蓄積在壩體後方之水體，則形成堰塞湖(Chen et al., 2019; Chen et al., 2021)。堰塞壩形成至潰決時間相當短暫，受到諸多條件限制，未必能在第一時間發現，並且不易取得相關參數(Kuo et al., 2011; Chen et al., 2014)。Costa and Schuster(1988)統計堰塞壩一天內潰壩佔 27%，十天內潰壩佔 50%，半年內潰壩佔 80%，一年內潰壩佔 85%，當壩體潰壩時，容易造成下游保全對象造成危害，為降低潰壩災害

風險，因此需要能夠快速且合理地進行壩體穩定性評估。

近年來，雖然已有多位國內外學者發展出相關之壩體穩定性評估方法(Ermini and Casagli 2003；Dong et al., 2009；Dong et al., 2011；Tacconi Stefanelli et al., 2016；Tacconi Stefanelli et al., 2018；Meng et al., 2021)，目前國內外最常使用之方法仍屬無因次阻塞指標(Dimensionless blockage index, DBI)，因為無因次阻塞指標只需使用上游集水區面積、壩體高度、壩體體積等三項參數，計算較為方便。惟目前在使用上，壩體體積往往多以崩塌堆積土體等於壩體體積進行無因次阻塞指標之計算，使得評估結果與現場實際情況多有差異，此外，河道斷面之 U 型、V 型、梯形等三種類型，亦為影響壩體體積計算之重要因素(Zhou et al., 2022)。

因此，為釐清不同條件下，壩體體積計算結果對於無因次阻塞指標之影響，本研究將壩體體積估算分成兩種方法，方法一為單純考慮最小壩體高度之條件，方法二為目前國內外較常使用之估算方法，假設崩塌堆積土體體積等於壩體體積之條件。本研究初步以河道型態較為普遍之梯形斷面進行兩種方法之壩體體積估算，選定 2009 年莫拉克風災所引致之士文溪(春日鄉)與拉克斯溪(梅蘭村)兩處堰塞湖，分別估算兩種方法之壩體體積與水體體積，探討體積之差異，進一步評估無因次阻塞指標之變化。後續期能將本研究成果進一步提供於堰塞湖緊急防救災對策上，估算壩體體積與水體體積之參考。

二、研究方法

2.1 方法一(僅考慮最小壩體高度條件下之壩體體積估算)

在壩體最小高度 $H_{D_{min}}$ 、壩體下游面坡度 ϕ_d 、溪床坡度 θ_r 已知條件下(Kuo et al., 2011)，利用正切函數求得上下游壩體底部寬度 W_d 、 W_u (Chen et al., 2014)。

$$\frac{H_{D_{min}}}{W_d} = \tan(\phi_d - \theta_r) \Rightarrow W_d = \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \quad (1)$$

$$\frac{H_{D_{min}}}{W_u} = \tan(\phi_u + \theta_r) \Rightarrow W_u = \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \quad (2)$$

$$W_u + W_d = W_D \quad (3)$$

上式中， W_D 為壩體底部寬度， ϕ_u 為壩體上游面坡度，可以 $\phi_u = 2.308\phi_d\theta_r^{-0.739}$ 估算之(Chen et al., 2014)。

因此，在梯形河道條件下之壩體體積 $V_{D_{Trapezoid}}$ 可由式(4)估算(圖 1)：

$$V_{D_{Trapezoid}} = \frac{H_{D_{min}} W_D (L_{D_{Top}} + L_{D_{Bottom}})}{4} \quad (4)$$

上式中， $L_{D_{Top}}$ 為壩頂長度， $L_{D_{Bottom}}$ 為壩底長度，可由衛星影像搭配數值地形進行量測。

2.2 方法一(僅考慮最小壩體高度條件下之水體體積估算)

如圖 1 所示，線段 $\overline{CE}$ 、 $\overline{CB}$ 、 $\overline{BE}$ 可分別表示為：

$$\overline{CE} = \frac{H_{D_{min}}}{\tan \theta_r} \quad (5)$$

$$\overline{CB} = \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \quad (6)$$

$$\overline{BE} = \overline{CE} - \overline{CB} = \frac{H_{D_{min}}}{\tan \theta_r} - \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \quad (7)$$

在梯形河道條件下之水體體積為圖 2 中 ①+②+③之水體體積：

$$\frac{H_{D_{min}} (L_{D_{Top}} + L_{D_{Bottom}})}{4} \left[\frac{H_{D_{min}}}{\tan(\theta_r)} - W_u \right] \quad (8)$$

2.3 方法二(崩塌堆積土體等於壩體條件下之壩體體積估算)

方法二可由衛星影像搭配數值地形進行量測獲得壩體最小高度 $H_{D_{min}}$ 、壩頂長度 $L_{D_{Top}}$ 、壩底長度 $L_{D_{Bottom}}$ 、堆積角 α 以及對岸邊坡角度 θ_l (圖 3)。由圖 3 與圖 4 可推得壩體最大高度 $H_{D_{max}}$ 、上游壩體兩側底部寬度 W_u 與 W_U 、下游壩體兩側底部寬度 W_d 與 W_D 、壩底兩側長度 L_l 與 L_r ，分別如下所示：

$$H_{D_{max}} = H_{D_{min}} + L_{D_{Top}} \tan \alpha \quad (9)$$

$$W_u = \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} = \frac{H_{D_{max}} - L_{D_{Top}} \tan \alpha}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \quad (10)$$

$$W_U = \frac{H_{D_{max}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \quad (11)$$

$$W_d = \frac{H_{D_{min}}}{\tan(\phi_d - \theta_r)} = \frac{H_{D_{max}} - L_{D_{Top}} \tan \alpha}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \quad (12)$$

$$W_D = \frac{H_{D_{\max}}}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \quad (13)$$

$$L_l = \frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_l} = \frac{H_{D_{\max}} - L_{D_{\text{Top}}} \tan \alpha}{\tan \theta_l} \quad (14)$$

$$L_r = L_{D_{\text{Top}}} - L_l - L_{D_{\text{Bottom}}} = L_{D_{\text{Top}}} - \frac{H_{D_{\max}} - L_{D_{\text{Top}}} \tan \alpha}{\tan \theta_l} - L_{D_{\text{Bottom}}} \quad (15)$$

本研究將梯形河道條件下之崩塌堆積土體劃分為 ①、②、③、④ 部分之體積(圖 5)，分別為：

$$\textcircled{1} = \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{L_{D_{\text{Top}}}^2 \tan^2 \alpha}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \right) (L_{D_{\text{Bottom}}}) \quad (16)$$

$$\textcircled{2} = \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \right) \left\{ H_{D_{\min}} (L_{D_{\text{Top}}} + L_{D_{\text{Bottom}}}) + (L_{D_{\text{Top}}} \tan \alpha) \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_l} + 2L_{D_{\text{Bottom}}} \right) \right\} \quad (17)$$

$$\textcircled{3} = \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \right) \left\{ H_{D_{\min}} (L_{D_{\text{Top}}} + L_{D_{\text{Bottom}}}) + (L_{D_{\text{Top}}} \tan \alpha) \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_l} + 2L_{D_{\text{Bottom}}} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\textcircled{4} = \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{L_{D_{\text{Top}}}^2 \tan^2 \alpha}{\tan(\phi_u + \theta_r)} \right) (L_{D_{\text{Bottom}}}) \quad (19)$$

總體積可整理為：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{H_{D_{\min}}}{4} \right) \left(\frac{1}{\tan(\phi_u + \theta_r)} + \frac{1}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \right) \left\{ H_{D_{\min}} (L_{D_{\text{Top}}} + L_{D_{\text{Bottom}}}) + (L_{D_{\text{Top}}} \tan \alpha) \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_l} + 2L_{D_{\text{Bottom}}} \right) \right\} \\ & + \left(\frac{L_{D_{\text{Bottom}}}}{4} \right) \left(\frac{1}{\tan(\phi_u + \theta_r)} + \frac{1}{\tan(\phi_d - \theta_r)} \right) (L_{D_{\text{Top}}}^2 \tan^2 \alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

2.4 方法二(崩塌堆積土體等於壩體條件下之水體體積估算)

由圖 3 可知，崩塌堆積土體等於壩體條件下之水體體積，可採用兩側水體面積以斷面法進行估算：

$$\left[\frac{\left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_r} - W_u \right) H_{D_{\min}} + \left(\frac{H_{D_{\min}}}{\tan \theta_r} - W_U \right) H_{D_{\min}}}{2} \right] \frac{(L_{D_{Top}} + L_{D_{Bottom}})}{4} \quad (21)$$

2.5 士文溪(春日鄉)堰塞湖與拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖

士文溪(春日鄉)堰塞湖位於屏東縣春日鄉，屬潮州層(由硬頁岩或板岩間夾透鏡狀山岩體組成)，附近有中莊斷層通過，且有北湖呂山向斜。因莫拉克颱風引發大規模崩塌，河道右岸土體堵塞士文溪形成堰塞壩並蓄積水體形成堰塞湖，後因水體迅速上升，產生溢流破壞(圖 6)。

由數值地形量測可知壩體最小高度 $H_{D_{\min}}$ 為 31.0m、壩體下游面坡度 ϕ_d 為 6.4° 、溪床坡度 θ_r 為 1.8° 、堆積角 α 為 20.0° 以及對岸邊坡角度 θ_l 為 33.3° ，可分別代入式(4)、(8)、(20)、(21)求得壩體體積及水體體積。

拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖位於高雄縣桃源鄉，位於拉克斯溪上游，屬廬山層與新村層交界，岩性為千枚岩、板岩、夾砂岩、硬頁岩。受莫拉克風災影響而導致河道左岸土體崩塌堵塞於河道，進一步發生滲流，形成後至今仍存在(圖 7)。

由數值地形量測可知壩體最小高度 $H_{D_{\min}}$ 為 70.4m、壩體下游面坡度 ϕ_d 為 21.1° 、溪床坡度 θ_r 為 12.0° 、堆積角 α 為 2.4° 以及對岸邊坡角度 θ_l 為 28.9° ，可分別代入式(4)、(8)、(20)、(21)求得壩體體積及水體體積。

三、結果與討論

方法一為單純考慮最小壩體高度，方法二為假設崩塌堆積土體體積等於壩體體積。方法二中，由於額外考慮最小壩體高度上方之崩塌土體，因此壩體體積相較方法一大。由拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖案例可知，在壩體體積方面，方法二為方法一之 2 倍；在堰塞湖水體體積方面，方法二為方法一之 0.9 倍。由士文溪(春日鄉)堰塞湖案例可知，在壩體體積方面，方法二為方法一之 4 倍；在堰塞湖水體體積方面，方法二為方法一之 0.8 倍(表 1)。

本研究進一步將方法一與方法二之壩體體積估算結果，代入無因次阻塞指標(Dimensionless blockage index, DBI)進行壩體穩定性評估，當評估值若小於 2.75，表示壩體為穩定狀態；評估值若介於 2.75 到 3.08 之間，則處於穩定與不穩定之間；評估值若大於 3.08 則為不穩定。其式如下：

$$DBI = \log \left[\frac{A_U H_{D_{\min}}}{V_D} \right] \quad (22)$$

由評估結果可知，拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖之方法一與方法二之壩體體積，其 DBI 分別為 1.66 與 1.48，而實際值為 1.40，實際值皆小於兩方法之值，其評估結果皆屬穩定。士文溪(春日鄉)堰塞湖之方法一與方法二之壩體體積，其 DBI 分別為 3.22 與 2.60，而實際值為 3.06，屬於穩定與不穩定之間，方法一評估為不穩定，方法二評估為穩定(表 1)。

四、結論與建議

1. 本研究以方法一與方法二分別計算壩體體積，並以拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖及士文溪(春日鄉)堰塞湖兩處案例進行驗證，由結果可知，方法二在估算壩體體積上會有高估之情況，主要原因為考慮了壩體最小高度以上之土體，導致高估壩體穩定性，而方法一為較保守之估算方法，計算結果較接近實際壩體穩定與否之情況，建議未來可使用較保守之方法一進行估算壩體穩定性。
2. 在水體體積估算部分，方法一之結果較方法二高估，以防災觀點而言，可以較大之水體體積估算可能潰壩流量，進一步作為下游洪峰流量水理演算之參考依據。
3. 在台灣形成堰塞湖堰塞壩主要誘發原因為降雨及地震，近年來極端降雨事件發生頻繁，導致山區發生崩塌機率提升，進一步增加堰塞壩形成之可能性，本研究成果可進行壩體體積及水體體積之估算，將有助於堰塞壩及堰塞湖緊急防救災對策之擬訂，以降低及預防潰壩災害所造成之損失與風險。
4. 本研究目前僅使用梯形之河道斷面形式估算壩體體積及水體體積，建議未來可再探討 U 型及 V 型之河道斷面，以探討不同河道斷面形式對於壩體體積及水體體積之差異。

表 1 拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖及士文溪(春日鄉)堰塞湖之評估結果

名稱	拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖 (m ³)	士文溪(春日鄉)堰塞湖 (m ³)	無因次阻塞指標 DBI	
方法一 梯形壩體體積	2,791,158	621,450	1.66	3.22
方法二 梯形壩體體積	4,201,316	2,591,399	1.48	2.60
真實壩體體積	5,024,332	890,000	1.40	3.06
方法一 梯形水體體積	594,103	958,654	N/A	
方法二 梯形水體體積	508,867	756,447		
真實水體體積	321,178	1,220,000		

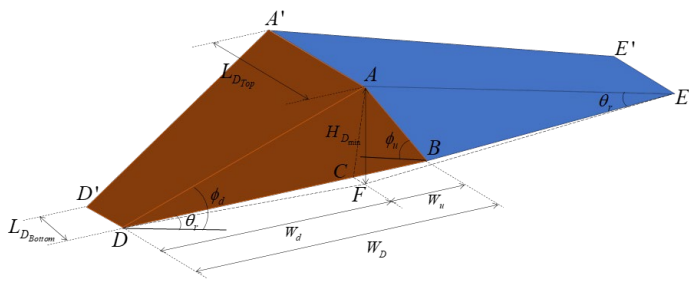


圖 1 方法一之壩體體積與水體體積示意圖

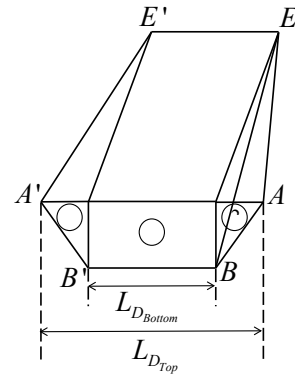


圖 2 方法一之水體體積劃分示意圖

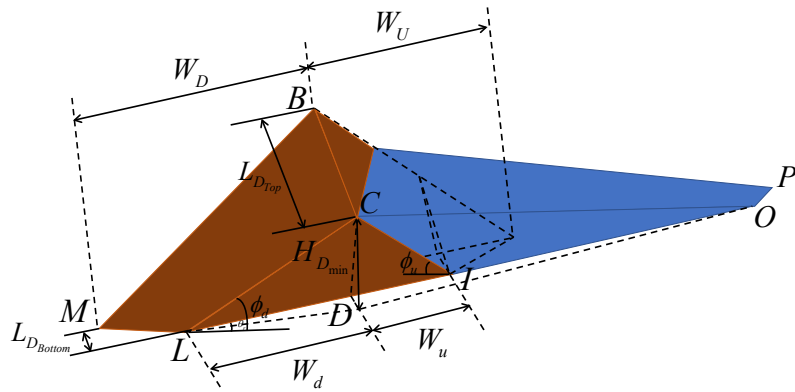


圖 3 方法二之壩體體積與水體體積示意圖

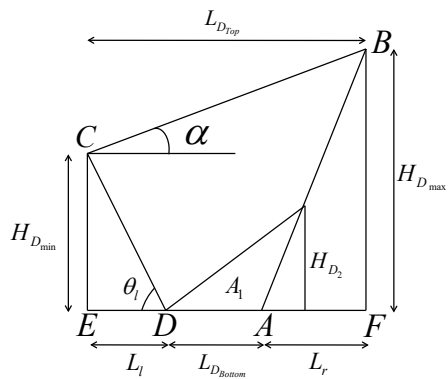


圖 4 方法二之壩體長度方向剖面圖

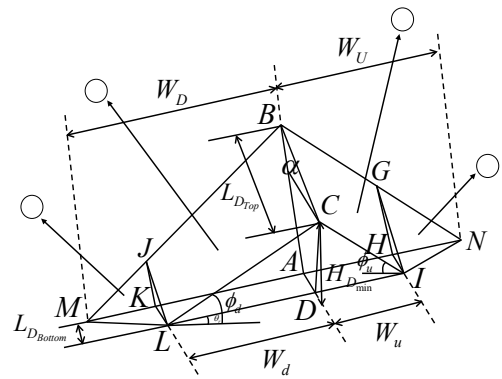


圖 5 方法二之壩體體積劃分示意圖

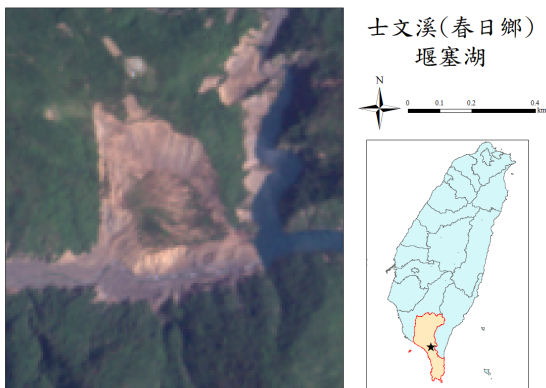


圖 6 士文溪(春日鄉)堰塞湖衛星影像

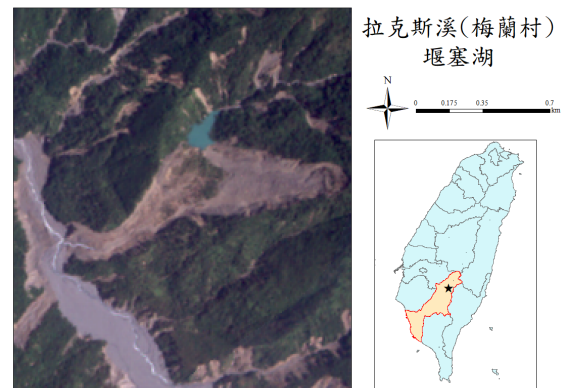


圖 7 拉克斯溪(梅蘭村)堰塞湖衛星影像

五、誌謝

本研究承蒙行政院農業委員會水土保持局 111 年度創新研究計畫經費補助(計畫編號：SWCB-111-050)，謹此致謝。

參考文獻

1. Chen, K.T. Chen, X.Q. Hu, G.S. Kuo, Y.S. and Chen, H.Y., “Effects of river flow velocity on the formation of landslide dams,” *Journal of Mountain Science*, Vol. 16, No. 11, pp. 2502–2518, 2019.
2. Chen, K.T., Chen, T.C., Chen, X.Q., Chen, H.Y., and Zhao, W.Y., “An experimental determination of the relationship between the minimum height of landslide dams and the run-out distance of landslides,” *Landslides*, Vol. 18, pp. 2111–2124, 2021.
3. Kuo, Y.S., Tsang, Y.C., Chen, K.T., and Shieh, C.L., “Analysis of Landslide Dam Geometries,” *Journal of Mountain Science*, Vol. 8, pp.544–550, 2011.
4. Chen, K.T., Kuo, Y.S., and Shieh, C.L., “Rapid geometry analysis for earthquake-induced and rainfall-induced landslide dams in Taiwan,” *Journal of Mountain Science*, Vol. 11, pp. 360–370, 2014.
5. Costa, J.E., and Schuster, R.L., “The formation and failure of natural dams,” *Geological Society of America*, Vol. 100, pp. 1054–1068, 1988.
6. Ermini, L. and Casagli, N., “Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index,” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, pp. 31–47, 2003.
7. Dong, J.J. Tung, Y.H. Chen, C.C. Liao, J.J. and Pan, Y.W., “Discriminant analysis of the geomorphic characteristics and stability of landslide dams,” *Geomorphology*, Vol. 110, No. 3-4, pp. 162–171, 2009.
8. Dong, J.J. Tung, Y.H. Chen, C.C. Liao, J.J. and Pan, Y.W., “Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam,” *Engineering Geology*, Vol. 117, pp. 52–61, 2011.
9. Tacconi Stefanelli, C., Segoni, S., Casagli N. and Catani, F., “Geomorphic indexing of landslide dams evolution,” *Engineering Geology*, Vol. 208, pp. 1–10, 2016.
10. Tacconi Stefanelli, C., Vilímek, V., Emmer, A. and Catani, F., “Morphological analysis and features of the landslide dams in the Cordillera Blanca, Peru,” *Journal of the International Consortium on Landslides*, Vol. 15, pp. 507–521, 2018.
11. Meng, C.K. Chen, K.T. Niu, Z.P. Di B.F. and Ye, Y.J., “Influence of internal structure

on breaking process of short-lived landslide dams,” *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, 604635, 2021.

12. Zhou, Y., Shi, Z., Qiuc, T., Yu, S., Zhang, Q. and Shena, D., “Experimental study on morphological characteristics of landslide dams in different shaped valleys,” *Geomorphology*, Vol. 400, 108081, 2022.