

堰塞湖概論

陳昆廷

甚麼是堰塞湖？

是指山崩（落石）或熔岩堵塞河谷或河床，儲水到一定程度便形成的湖泊，通常為地震、風災、火山爆發等自然原因所造成，也有人為因素所造就出的堰塞湖，例如：炸藥擊發、工程挖掘等。

堰塞湖的形成，通常是不穩定的地質狀況所構成，當堰塞湖構體受到沖刷、侵蝕、溶解、崩塌等作用，堰塞湖便會出現「溢壩」，最終會因為堰塞湖構體處於極差地質狀況，演變「潰堤」而瞬間發生山洪爆發的洪災，對下游地區有著毀滅性破壞。

因地震、降雨使邊坡材料堆積，導致河道偏移並阻擋水流形成堵塞的時候，可稱為堰塞壩。

當水體在壩後蓄積，形成湖泊，該湖可稱為滑坡堰塞湖。

資料來源 <https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A0%B0%E5%A1%9E%E6%B9%96>



堰塞湖的形成

在台灣主要是因為降雨跟地震，使得山坡崩塌、地滑、土石流…等等，最後導致土石材料阻塞河道，形成堰塞湖。

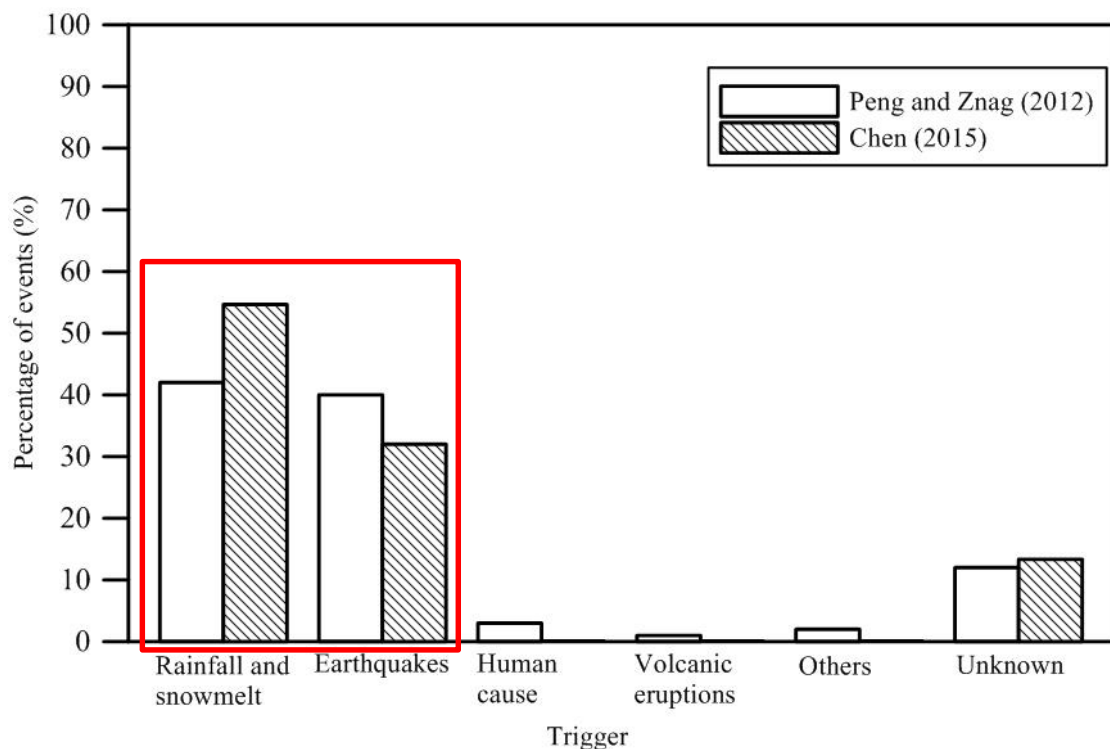
發生堰塞湖的案例

在 1999 年，因集集大地震形成 13 個堰塞湖。

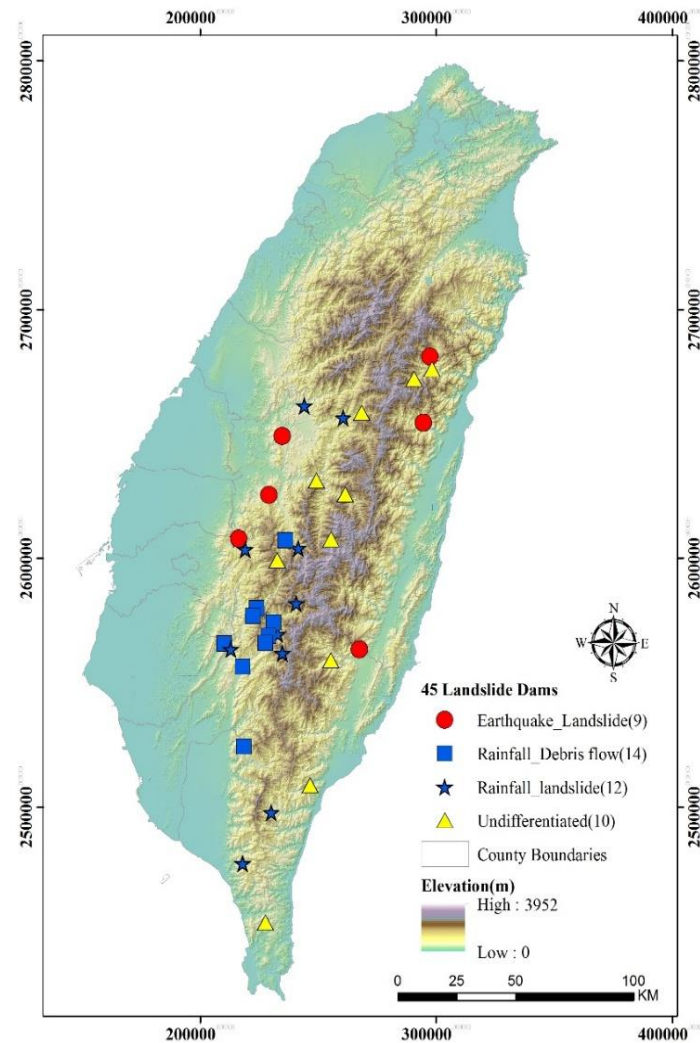
在 2008 年，因汶川大地震形成 256 個堰塞湖。

在 2009 年，因莫拉克颱風形成 17 個堰塞湖。

由這張圖可以知道全世界大部分發生堰塞湖的情形都是因為地震跟降雨。



這張圖是台灣歷年形成堰塞湖的原因，共有 45 處，可以看出因地震跟降雨的原因形成堰塞湖的比例較大，跟世界上形成堰塞湖的情況相近。



●=Earthquake Landslide

■=Rainfall Debris

★= Rainfall Landslide

▲=Undifferentiated

堰塞湖的危害

在山區可能會形成多個堰塞壩，並對該下游地區構成額外的潛在危險。

當堰塞壩突然倒塌時，原本因堰塞壩堵塞的材料及水流會迅速的向下游輸送，短時間將材料及水流直接對下游進行沖刷，勢必會造成嚴重的損害。

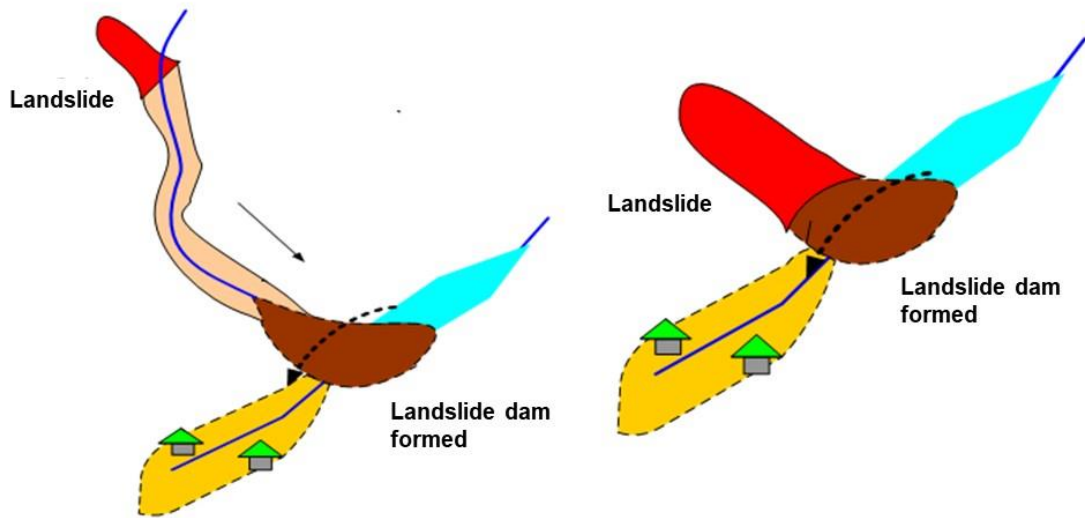
且堰塞壩的形成時間短，一旦崩壞往往會引發突發性大的災害，越大面積的堰塞湖，儲存的水就越多，下游的居民生命財產安全也會受到更嚴重的威脅，因此，必須了解其形成機制，進一步完善防災減災對策。

台灣最嚴重的堰塞湖危害事件，就屬位在高雄甲仙的小林村，因 2009 年莫拉克颱風帶來的豪大雨量，導致獻肚山走山，並帶著大量土石進入楠梓仙溪，楠梓仙溪河道被土石擋住形成大型堰塞湖，堰塞湖潰堤後也造成該村被土石流掩埋，491 人死亡。

堰塞湖形成機制

滑坡壩的形成機制主要分為兩部分：

1. 崩塌土體轉化為泥石流堆積在河道，形成堰塞湖。
2. 崩塌土體直接堆積在河道成為堰塞湖。



https://246.swcb.gov.tw/Landslide/Landslide_Introduction

崩塌土體沒堵塞住河道，故沒形成堰塞湖



崩塌土體堵塞住河道，故形成堰塞湖



Photos provided by DPRC, NCKU

崩塌土體沒堵塞住河道，故沒形成堰塞湖



崩塌土體堵塞住河道，故形成堰塞湖



Photos provided by DPRC, NCKU

所以由這兩張圖可以知道堰塞湖的形成受地貌和水文條件的控制。

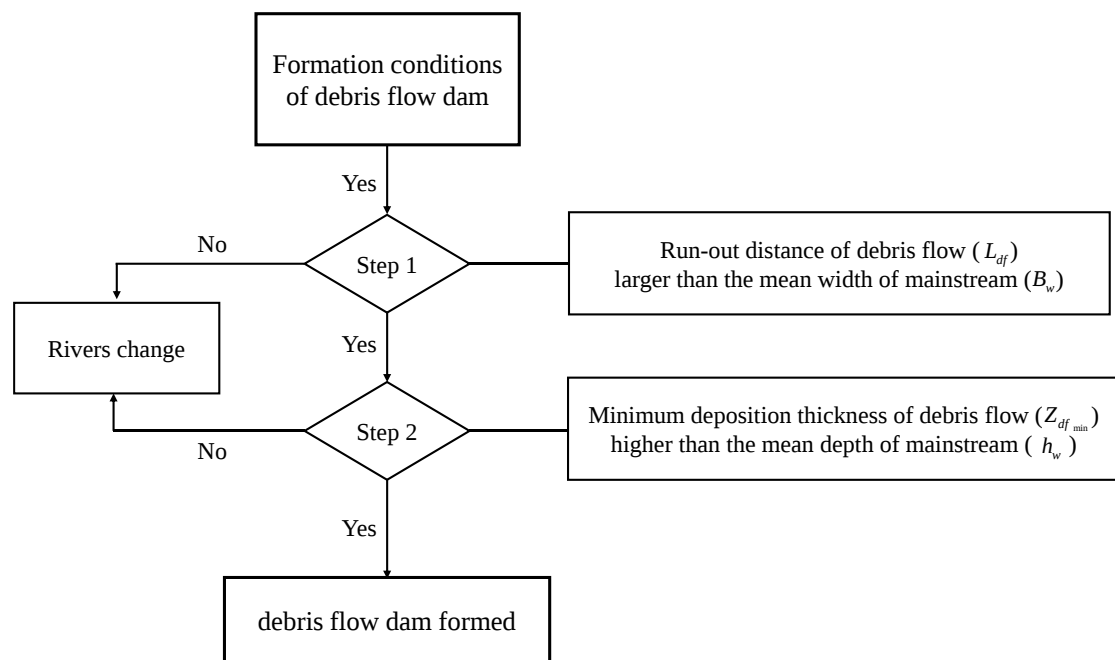
在山坡陡峭、河流狹窄的山谷中，山崩土石의動量往往足以到達谷底。如果沉積在河流中的滑坡碎片不能立即被溪流或河水冲刷掉，水流就會受阻，導致堰塞壩的形成。

堰塞壩的形成有三個條件：

1. 土石材料需要橫穿溪流才能造成堵塞。
2. 形成堵塞後，土石材料的厚度必須大於當時的水深。
3. 崩塌堆積速率必須大於河流的侵蝕能力。



利用土石流形成機制，經過計算來判別該區的土石是否會堵塞河道，掌握兩大要點，一、泥石流跳動距離是否大於河道寬度，二、泥石流壩的沉積厚度是否泥石流大於原位水深，若兩者都符合則代表會形成土石流型堰塞湖，若不符合則會造成河道改變方向而已。

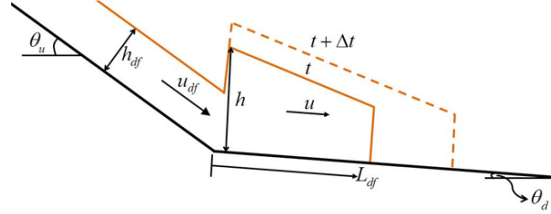


土石流運動距離

土石流運動距離計算方式

$$L_{df} > B_w$$

$$L_{df} = \frac{U^2}{G}$$



$$U = u_{df} \cos(\theta_u - \theta_d) \left\{ 1 + \frac{[(\sigma - \rho)C_{df}K_a + \rho] \cos \theta_u}{2[(\sigma - \rho)C_{df} + \rho]} \frac{gh_{df}}{u_{df}^2} \right\}$$

Takahashi (1977)

$$G = \frac{(\sigma - \rho)gC_{df} \cos \theta_d \tan \phi_k}{(\sigma - \rho)C_{df} + \rho} - g \sin \theta_d$$

Takahashi (1977)

$$C_{df\infty} \equiv C_{df} = \frac{\rho \tan \theta_u}{(\sigma - \rho)(\tan \phi_{df} - \tan \theta_u)}$$

Takahashi (1977)

$$u_{df} = \frac{2}{5d_{50}} \left\{ \frac{g \sin \theta_u}{a \sin \phi_k} \left[C_{df} + (1 - C_{df}) \frac{\rho}{\sigma} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{C_*}{C_{df}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] h_{df}^{\frac{3}{2}}$$

Takahashi (1974)

$$Q_{df} = \frac{1}{360} \frac{C_*}{C_* - C_{df}} C I A_{df}$$

Tsai (2006)

$$Q_{df} = B_u q_{df} = B_u h_{df} u_{df}$$

Tsai (2006)

土石流堆積厚度與水深關係

土石流堆積厚度與水深計算方式

$$Z_{df_{min}} > h_w$$

$$Z_{df_{max}} = L_{df} \tan(\theta_{df} - \theta_d)$$

$$Z_{df_{min}} = (L_{df} - B_w) \times \tan(\theta_{df} - \theta_d)$$

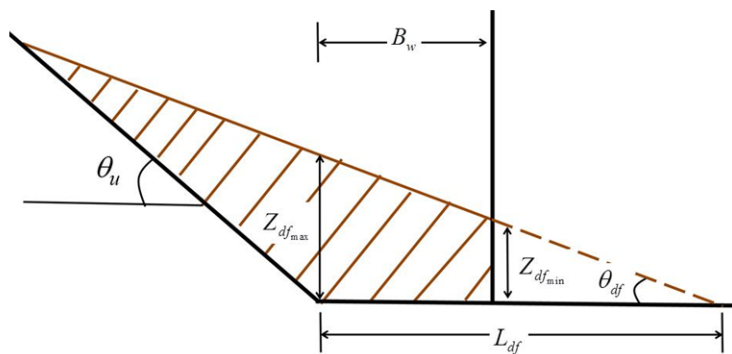
Tsai et al. (2006)

$$\tan \theta_{df} = \frac{C_* (\sigma - \rho) \tan \phi_{df}}{C_* (\sigma - \rho) + \rho \left[1 + 4.5 \times 10^{-4} C_{df}^{-6} \left(\frac{q_{df}^2}{g d_{50}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}$$

Tsai et al. (2006)

$$Q_w = \frac{A_w}{A_{w1}} Q_{w1}$$

$$Q_w = \frac{1}{n} \frac{(B_w h_w)^{\frac{5}{3}}}{(B_w + 2h_w)^{\frac{2}{3}}} \theta_w^{\frac{1}{2}}$$



土石流與河道堆積情形

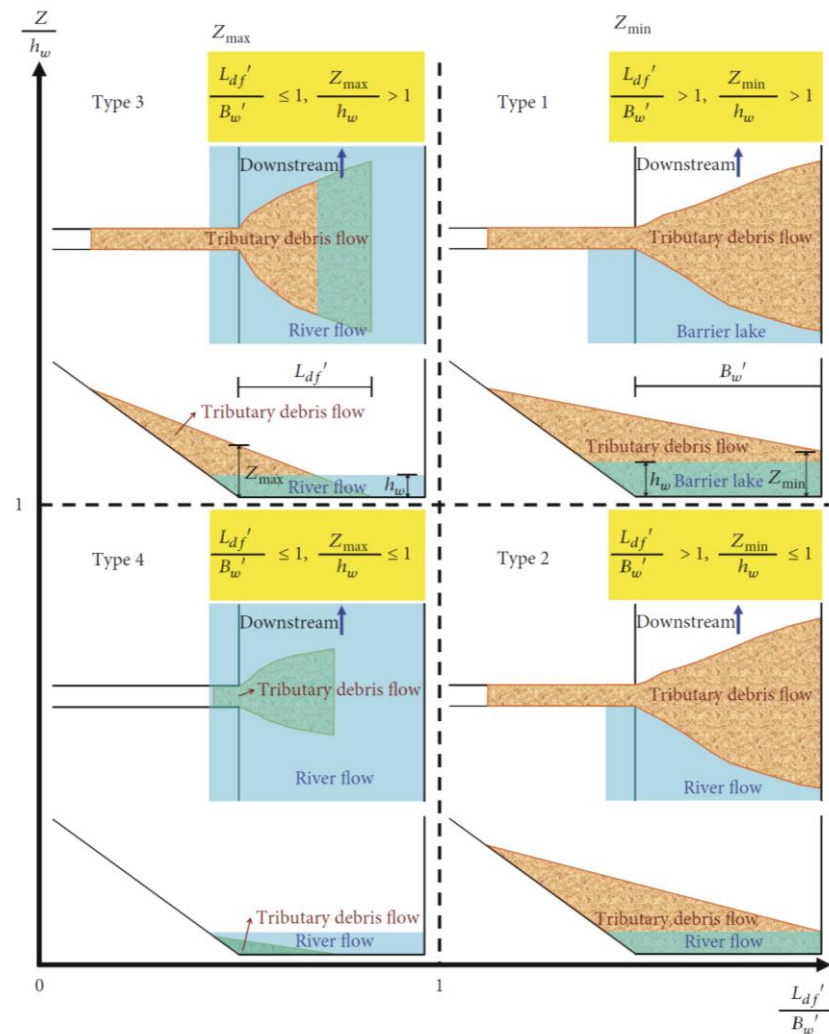
X 軸運動距離與河道寬度的比值，Y 軸是堆積厚度與水深的比值。

(type 1) 完全堵住河道且堆積厚度 > 水深

(type 2) 完全堵住河道且堆積厚度接近於水深

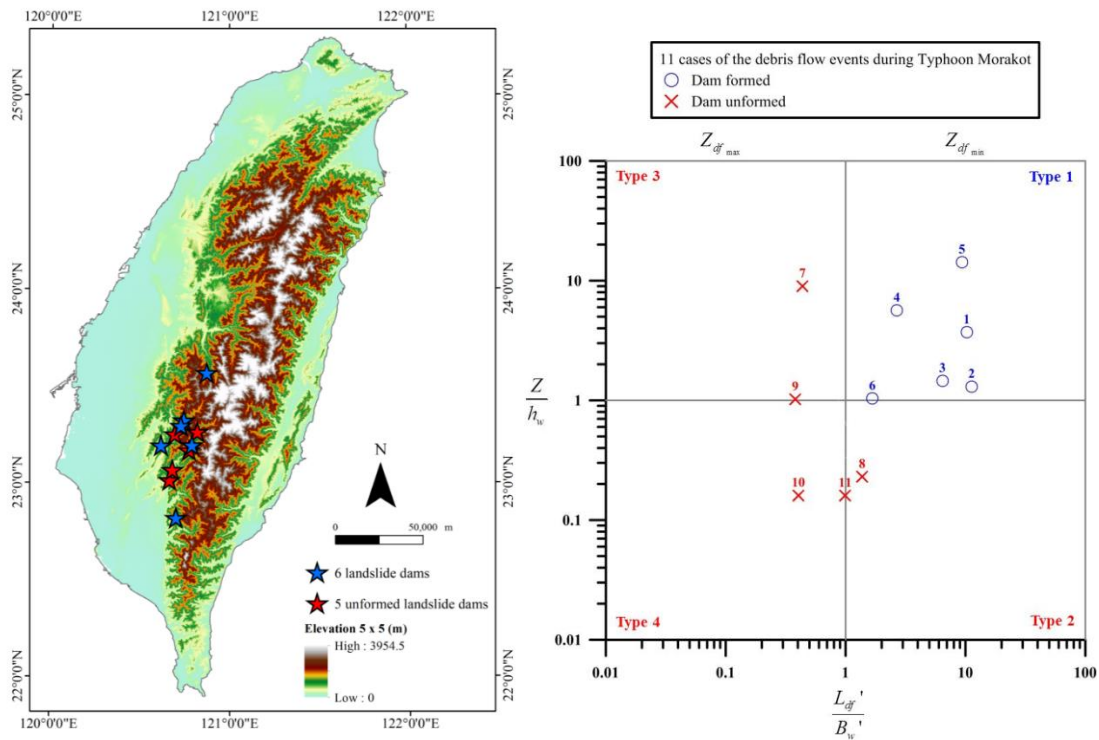
(type 3) 無法到達河道對岸，只形成一半的堆積，故無法形成堵塞

(type 4) 無法到達河道對岸，也沒造成堆積



台灣土石流案例

利用上述的方法評估堰塞壩的形成，發現在莫拉克颱風期間有 11 次土石流事件，其中 6 處為土石流型堰塞壩被分配至 Type1，其餘未發生石流型堰塞壩 5 處分別落在 Type2~ Type4，由此可見，此方法是可以用來驗證堰塞壩形成與否。

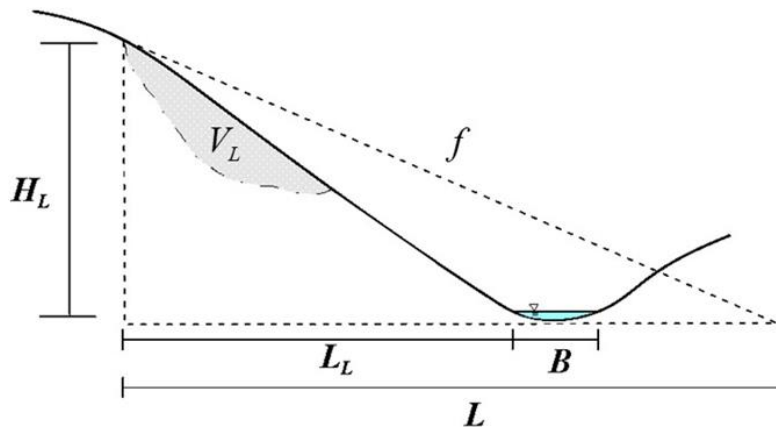


崩塌型堰塞壩

我們還考慮了河流阻塞的兩個特徵。

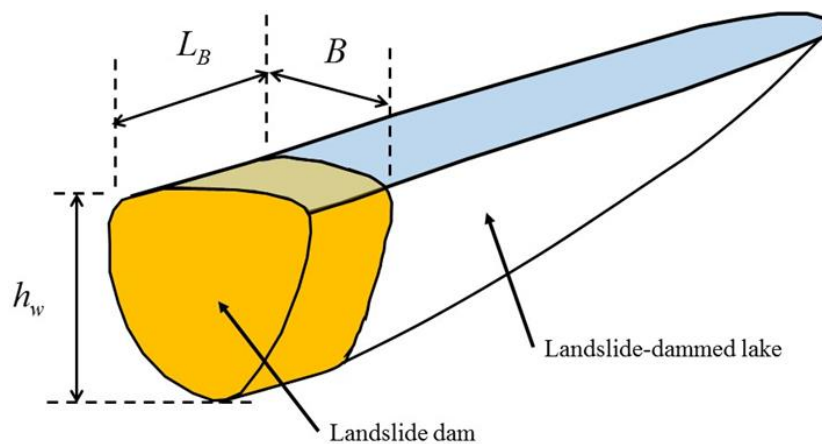
1. 崩塌土體的寬度需要橫穿溪流或河流，才有機會能堵塞河道。
2. 溪流或河流中崩塌土體的堆積厚度必須大於水深。所以，我們進一步將其視為崩塌的土體體積。

1. 崩塌土體的運動距離



Heim (1932)

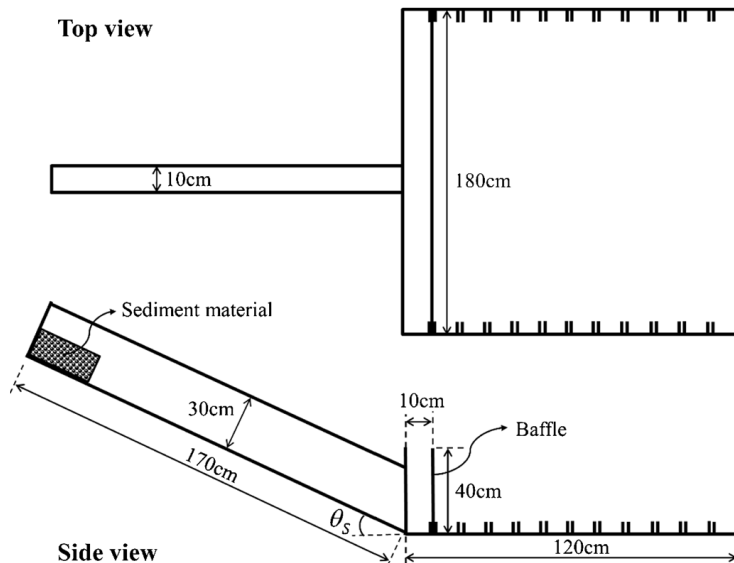
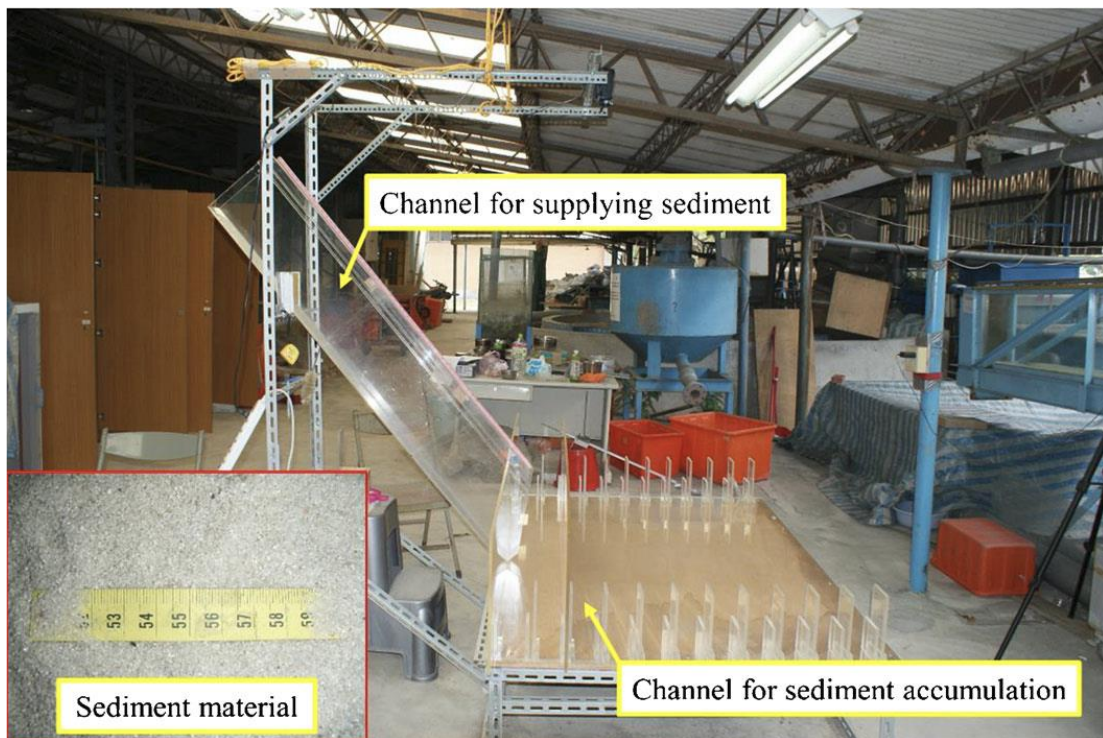
2. 崩塌厚度與水深



Tabata et al. (2002)

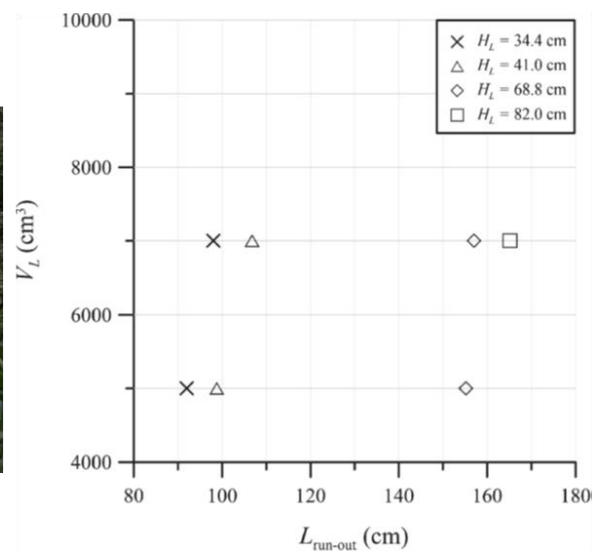
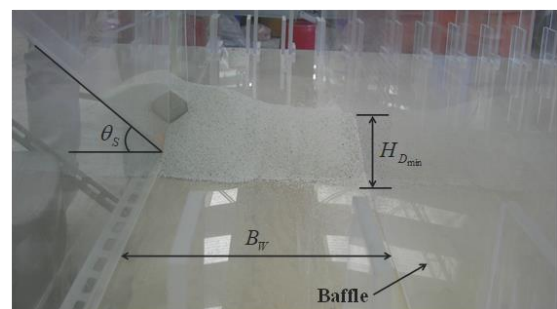
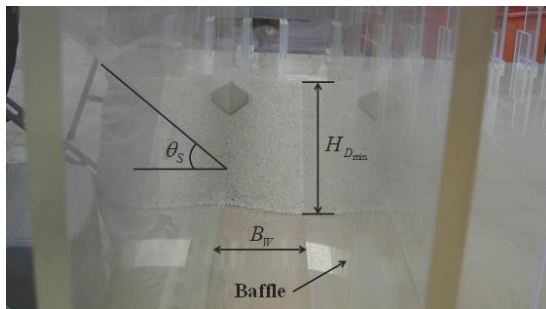
崩塌型堰塞壩室內實驗

我們通過實驗室室內試驗堰塞湖不同距離，跟不同河道寬度的比較分析，初步了解距離河道越遠，壩體高度越矮，在試驗的同時紀錄崩塌體積、運動距離、坡度角、滑坡最大高度、河道寬度等參數，想了解，這些參數彼此之間的關係。



由上兩張的圖可以知道，當崩塌土體在較窄的河道會形成較高的壩體高度，而在較寬的河道會形成較低的壩體高度。

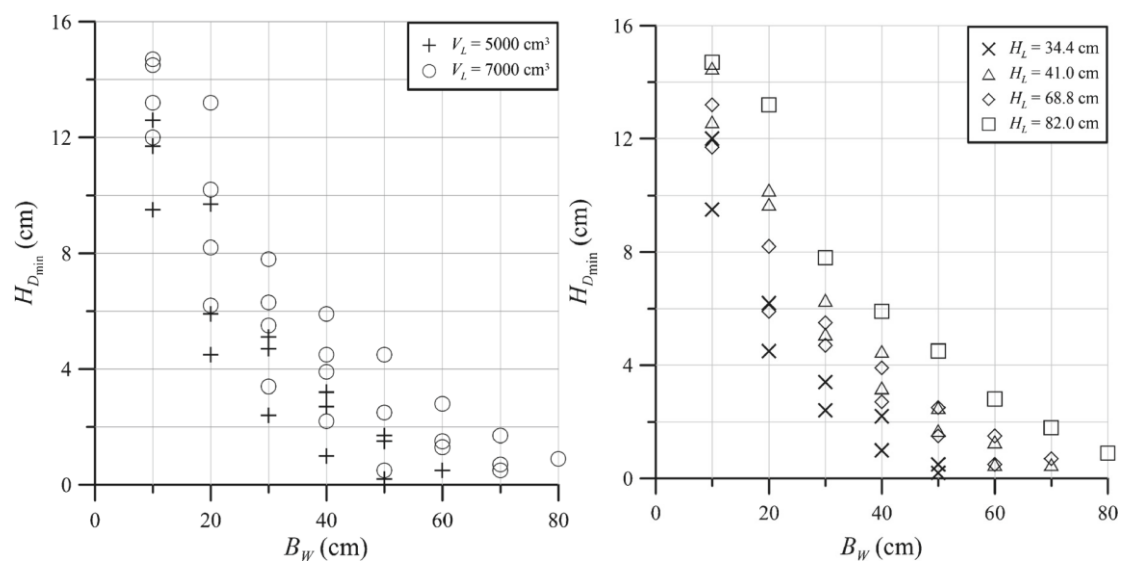
然而由下兩張圖可以知道土體體積跟運動距離的關係，當土體體積越大運動距離就越遠，土體體積越小運動距離就越短。



根據這些實驗的結果，相同的土體體積隨著河流寬度的增加，壩體高度會逐漸降低，兩者呈負相關。

而河寬相同但土體體積不同時，土體體積越大，堰塞壩的高度越高，這代表土體體積和壩體高度的變化趨勢是一致的。兩者呈正相關。

隨著土體體積和土體落高的高度增加，土體的運動距離也增加，因此，崩塌土體因移動的距離增加能夠阻塞河道的機率變高。隨著土體落高的高度越大，土體速度也跟著變快，對於狹窄的河道，崩塌土體可移動的距離有限，導致土體完全堵塞河道，增加了堰塞壩的高度。相反，當勢能減小時，崩塌土體的速度減小，即使是狹窄的河道，滑坡體也不能完全堵塞河道，堰塞壩的高度也較低。



無因次分析

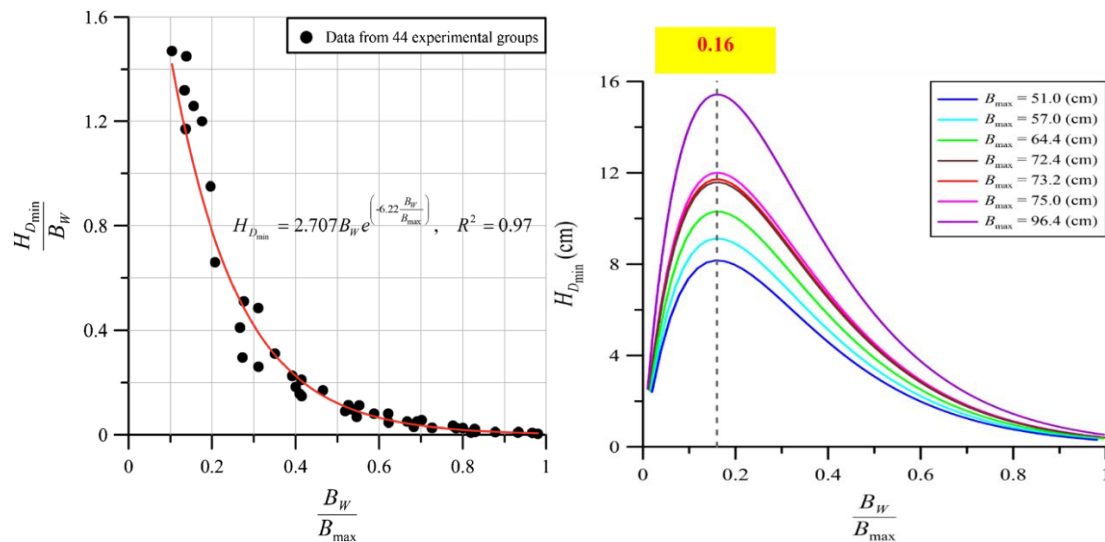
崩塌土體能否穿越並堵塞河道取決於河道寬度和土體運動距離。此外，堰塞壩的高度隨著河流寬度的增加而降低。

因此，當土體運動距離小於河道寬度時，崩塌土體不會到達河道對岸，土體不會完全堵塞河道或形成堰塞壩。

我們在本研究中定義了兩個無因次參數，分別是堰塞壩的高度和河流寬度，河流寬度和運動距離。

當河道寬度跟運動距離的比值大於 1 的時候，就表示崩塌土體無法跳到對岸，表示無法形成堰塞壩。

$\frac{H_{D_{\min}}}{B_W}$ and $\frac{B_W}{B_{\max}}$, when $\frac{B_W}{B_{\max}} > 1$, the minimum height is 0.



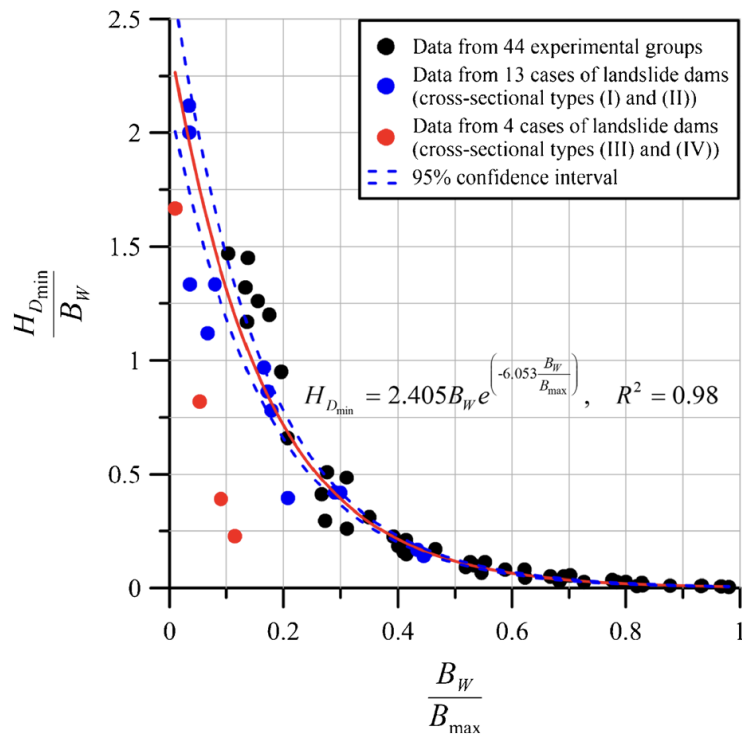
台灣堰塞壩案例

本研究收集了 17 個堰塞壩案例，將這 17 個堰塞壩的形成的參數做收集分析，就可了解形成堰塞壩的因素。

分析後，了解無論該堰塞壩是由地震還是降雨引起的，堰塞壩的壩體高度是受運動距離和河道寬度的影響。



Photos provided by DPRC, NCKU

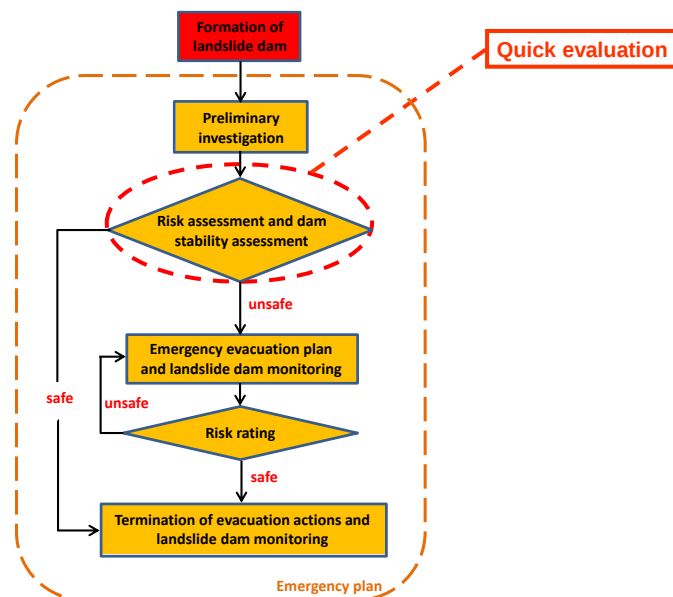


堰塞壩的幾何形狀

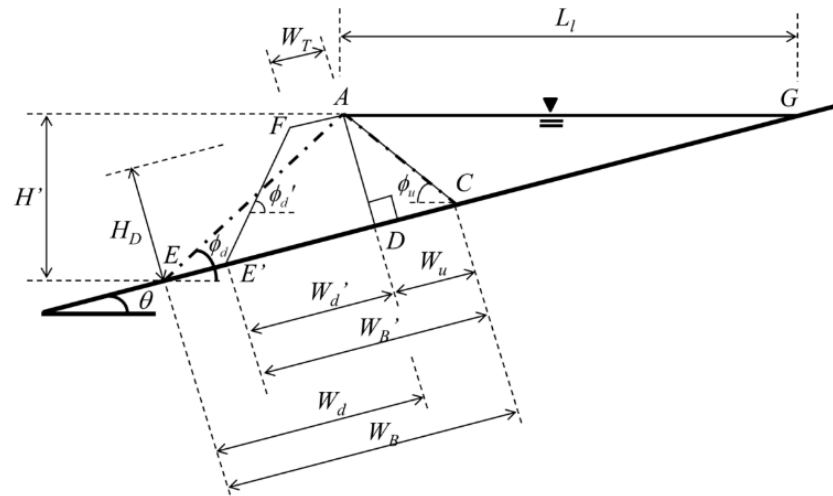
當堰塞湖形成時，我們需要一個緊急的應變對策。而在風險評估和壩體穩定性評估是緊急應變的重要內容，所以了解堰塞壩的幾何形狀才如此重要。

基於形態和流域特徵的大壩穩定性初步評估和風險評估的幾種方法，包括大壩高度和壩體體積、集水區面積、蓄水量、流域面積和地勢，所有這些方法都需要大壩的幾何參數，然而堰塞湖形成的地方通常位在較偏遠山區，導致實地調查這些參數需要三天或更長時間才能獲得，特別是當堰塞壩位於更不易接近的位置時，調查上又更加困難。

因此，本研究基於台灣地區的統計分析和實測數據，開發了一種針對降雨或地震事件誘發的滑坡壩幾何形狀的快速評估方法。



我們用以下幾何形狀參數來評估堰塞壩

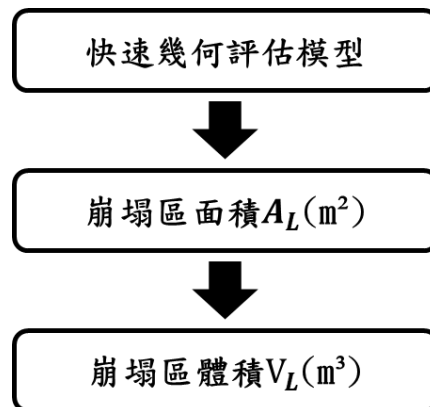


geometry parameters	Definitions
H_D	Height of landslide dam, from river bed to overflow point, $\overline{AD}$
H'	Characteristic height of dam, from toe of the dam to overflow point
W_d	The width of the triangular dam in downstream direction, $\overline{ED}$
W_d'	The width of the trapezoidal dam in downstream direction, $\overline{E'D}$
W_u	The width of the triangular and trapezoidal dam in upstream direction, $\overline{DC}$
W_B	The width of the triangular dam bottom, $\overline{EC}$
W_B'	The width of the trapezoidal dam bottom, $\overline{E'C}$
W_T	The width of the trapezoidal dam top, $\overline{FA}$
L_l	Maximum length of landslide-dammed lake, $\overline{AG}$
θ	River bed slope
ϕ_u	The angle of the triangular and trapezoidal dam in upstream direction
ϕ_d	The angle of the triangular dam in downstream direction
ϕ_d'	The angle of the trapezoidal dam in downstream direction
$\triangle ACE$	The area of the triangular dam
$\square ACE'F$	The area of the trapezoidal dam

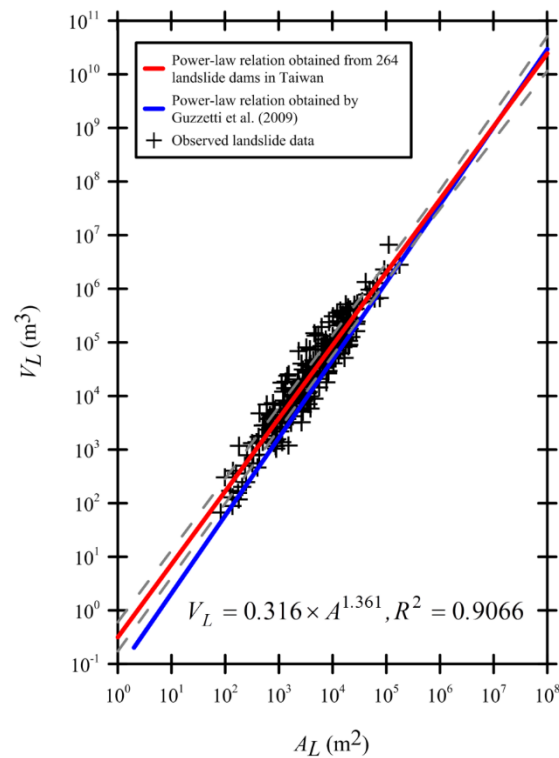
堰塞壩幾何模型建立過程

本研究提出了一種堰塞壩幾何模型來分析堰塞壩的幾何形狀，包括在數據有限的早期階段的降雨誘發和地震誘發的大壩。

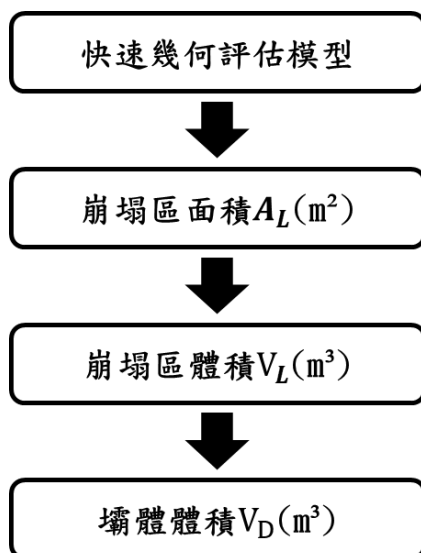
一、用崩塌面積計算成崩塌體積，即可取得兩者關係。



$$V_L = 0.316A_L^{1.361}, R^2 = 0.9066$$

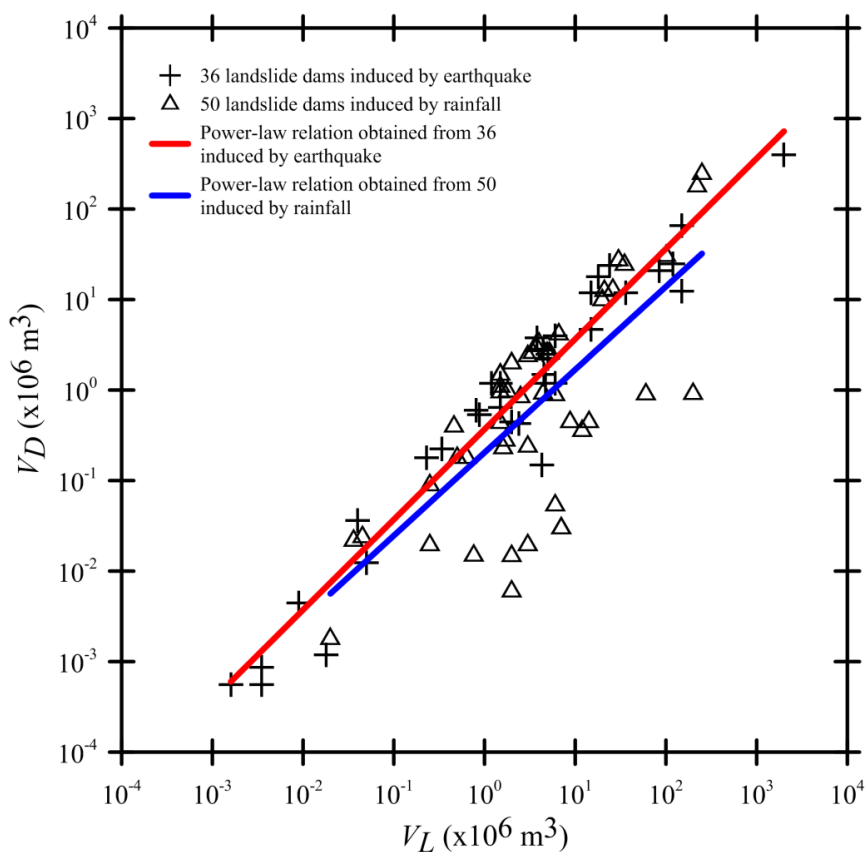


二、用崩塌體積計算壩體體積。我們可以選擇降雨或地震情景。

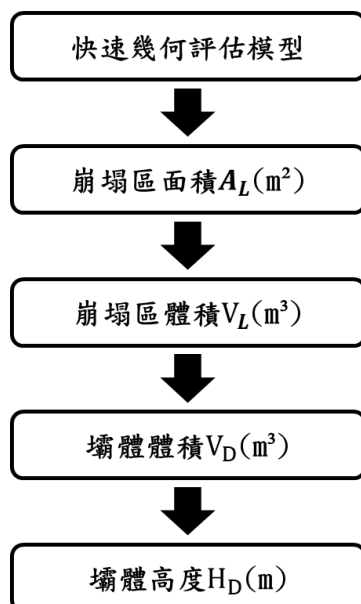


地震： $V_D = 0.368V_L^{0.998}, R^2 = 0.9430$

降雨： $V_D = 0.204V_L^{0.917}, R^2 = 0.5124$

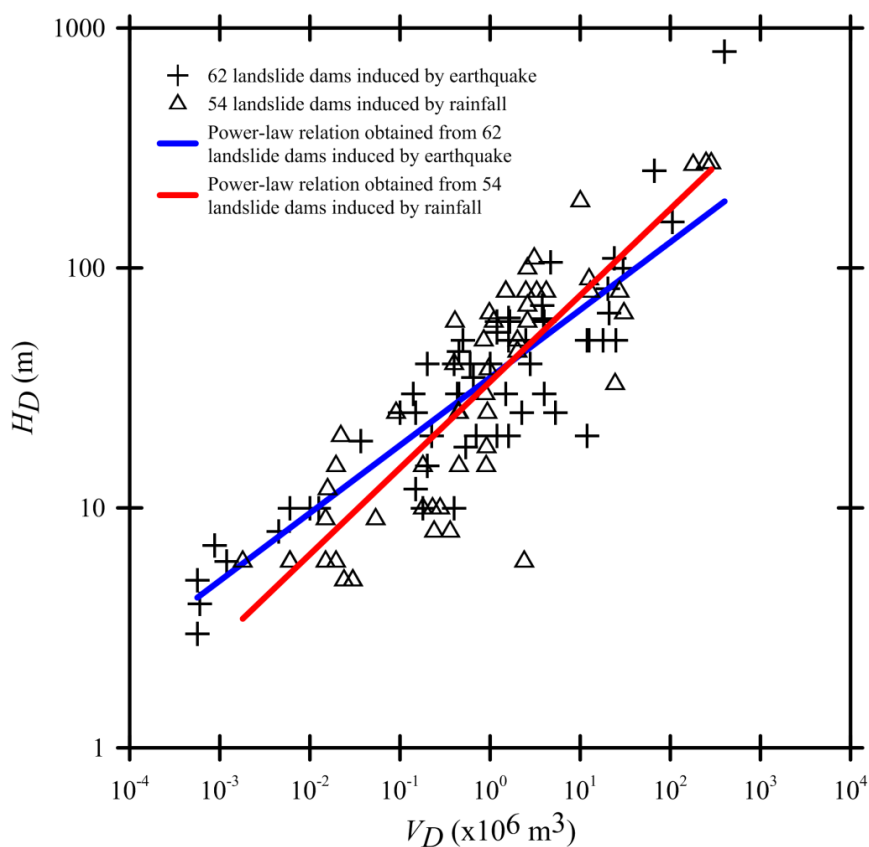


三、用壩體體積計算壩體高度。我們可以選擇降雨或地震情景。



地震： $H_D = 34.921V_D^{0.282}, R^2 = 0.7648$

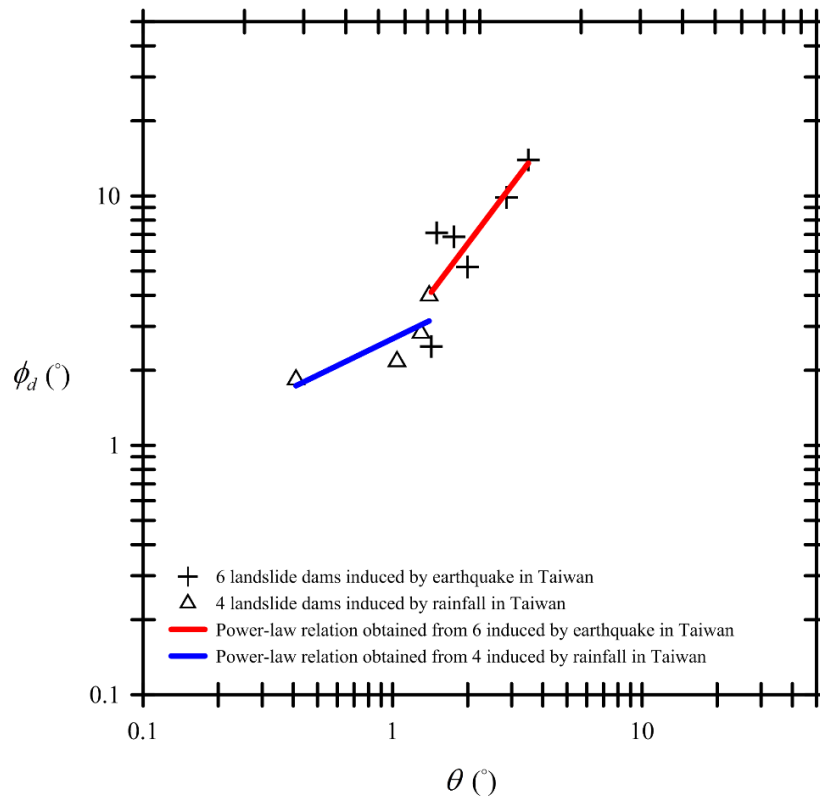
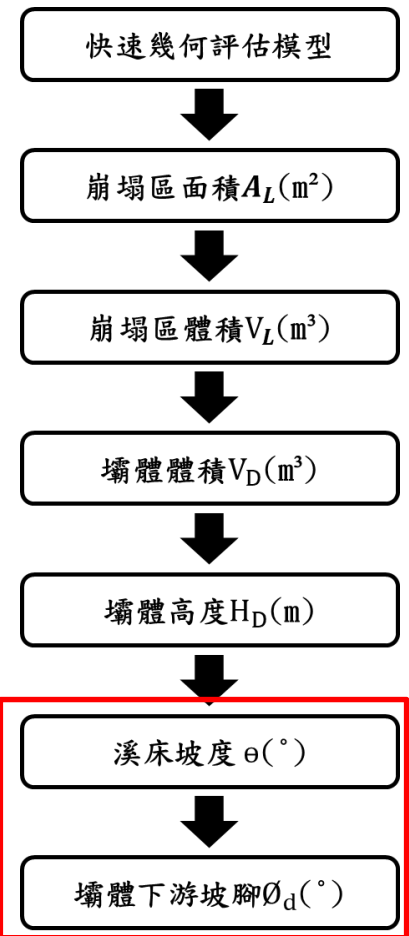
降雨： $H_D = 33.570V_D^{0.360}, R^2 = 0.7207$



四、用溪床坡度計算壩體上游坡腳角度，我們可以選擇降雨或地震情景。

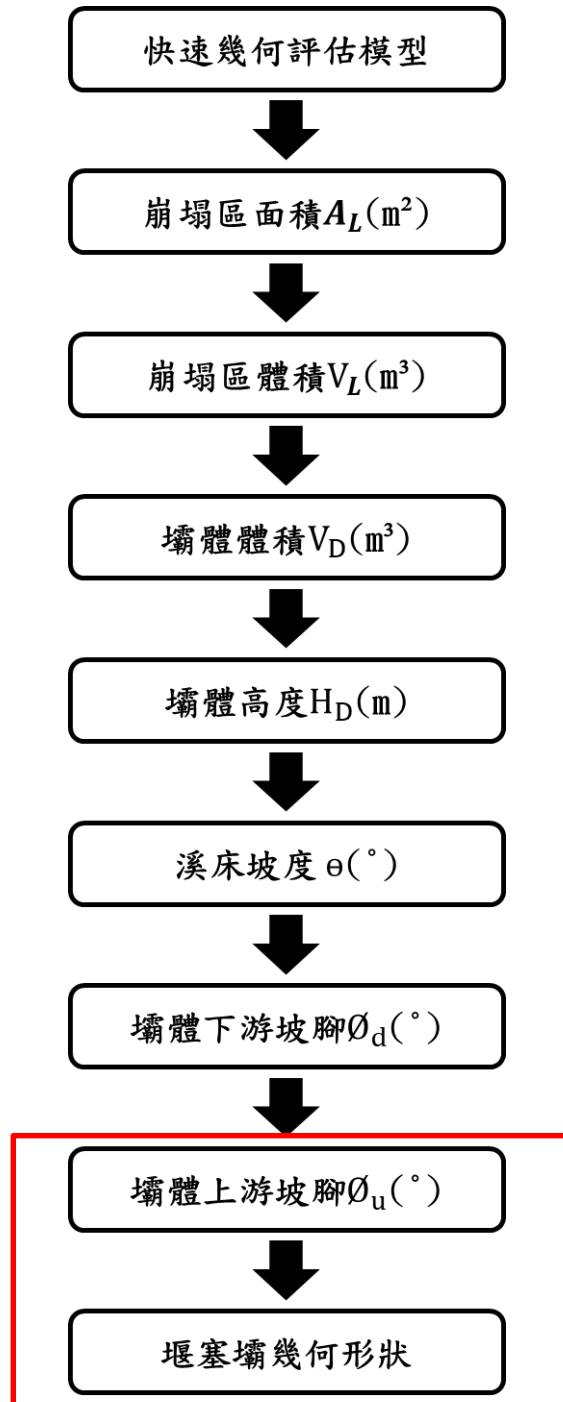
地震： $\phi_d = 2.559\theta^{1.330}, R^2 = 0.6601$

降雨： $\phi_d = 2.677\theta^{0.486}, R^2 = 0.6632$



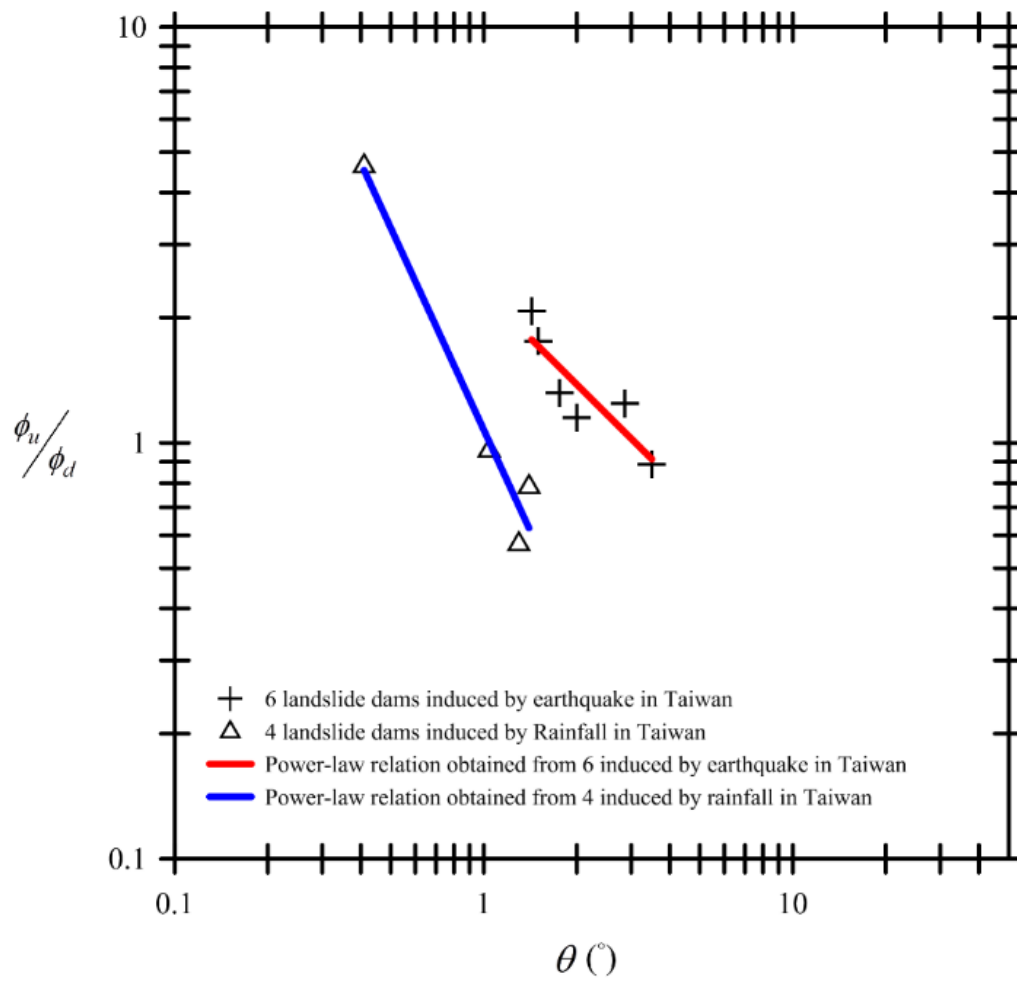
五、用溪床坡度計算壩體下游角度。

最後我們有了這些角度將能夠繪製大壩的形狀。



地震： $\phi_u = 2.308\phi_d\theta^{(-0.739)}, R^2 = 0.7719$

降雨： $\phi_u = 1.075\phi_d\theta^{(-1.613)}, R^2 = 0.9625$

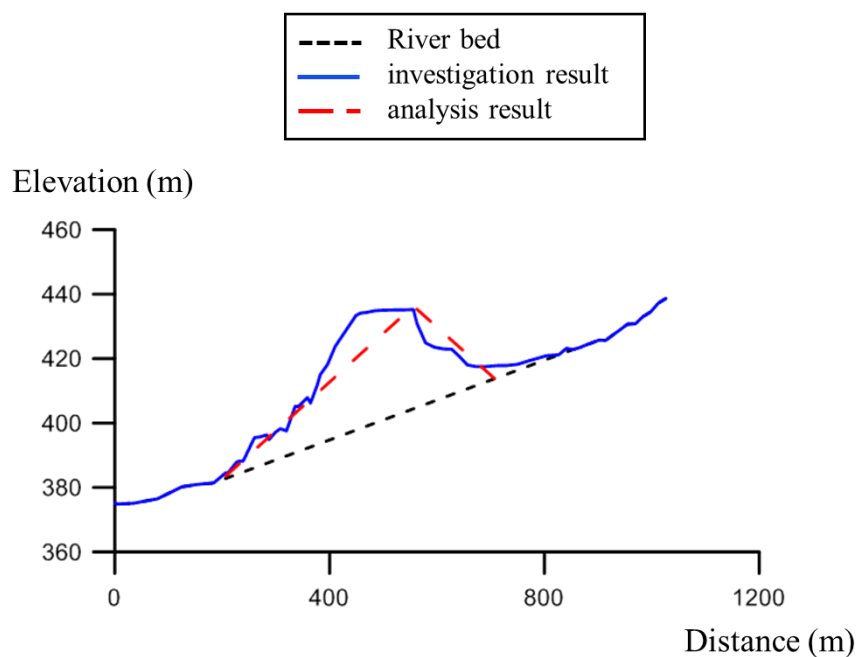


- ✚ 時間：2006 年 7 月 16 日
- ✚ 位置：Lung-Chuian river (台東)
- ✚ 誘因：地震
- ✚ 崩塌面積： $160 \times 10^3 \text{ m}^2$
- ✚ 崩塌體積： $600 \times 10^3 \text{ m}^3$
- ✚ 堰塞壩高度：35 m
- ✚ 堰塞湖體積： $800 \times 10^3 \text{ m}^3$
- ✚ 潰壩類型：Overtopping

Chen et al. (2014)

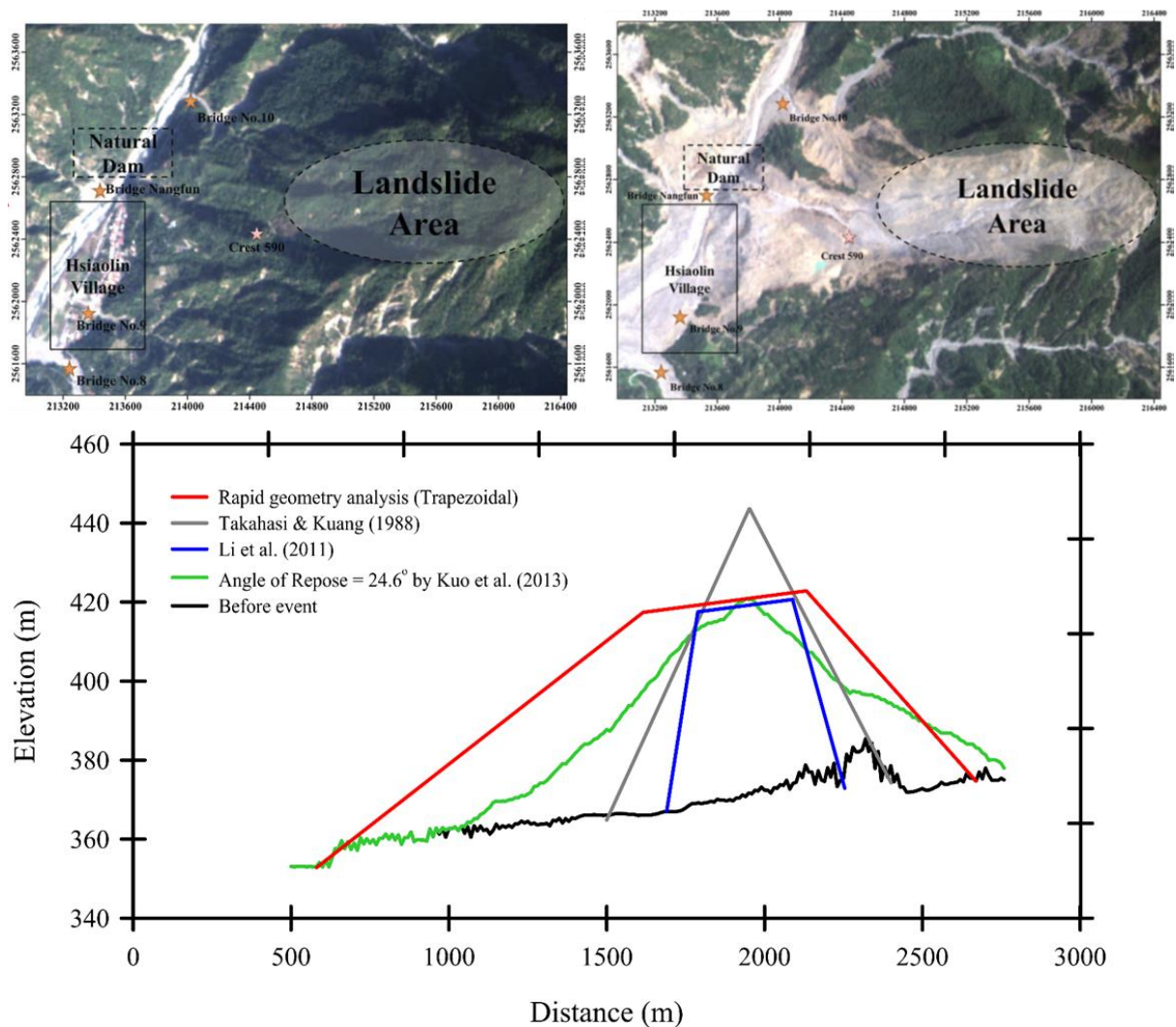


Photos provided by DPRC, NCKU



- ✚ 時間 : 2009 年 8 月 8 號
- ✚ 地點 : Hsiaolin Village (高雄)
- ✚ 誘因 : 降雨
- ✚ 崩塌面積 : $609 \times 10^3 \text{ m}^2$
- ✚ 崩塌體積 : $23580 \times 10^3 \text{ m}^3$
- ✚ 堰塞壩高度 : 50 m
- ✚ 潰壩類型 : undefined

Kuo et al. (2013)



結論

對於堰塞壩或堰塞湖，一旦潰堤都是會對下游造成相當重大的危害，尤其是在河道兩岸的居民或是交通用的橋樑、道路…等等，這些都是我們需要保護的對象。

所以建立一個堰塞壩可能發生的潛在位置以及預測壩體的幾何形狀，都是非常重要的資訊。

有了這些資訊即可對堰塞壩作為重要的參考依據，像是可以進行穩定性分析，或者緊急防災對策的擬定。

在未來，我們仍然需要努力去突破以下資訊

1. 堰塞壩潰決的機制
2. 潰堤後致災的影響範圍
3. 如何對堰塞湖進行防災或減災
4. 早期識別堰塞湖，達到預警目的

堰塞壩的危害

一般在山區的河道，會受到地震或降雨的影響，進而誘發崩塌地滑土石流…等等坡地災害。那這些崩塌的土體，如果不能在短時間內被水流往下游夾帶的話，他就會在河道上形成堆積，堆積的土體就可能形成一個壩體(堰塞壩)。

那往往在一個山區裡面，可能會一次性的形成多個堰塞湖，這樣就會對該地區形成一個潛在災害，而堰塞壩形成後也會使壩體上游一直蓄積水體，蓄積水體會造成上游道路、土地或農田被淹沒。

但堰塞壩的崩壞預測是相當困難的，尤其是潰堤時間，所以發生堰塞壩潰堤總是相當突然的，一旦潰堤影響範圍相當大，嚴重的話還會危害下游人民或財產安全，甚至還會導致交通路線損壞，導致搭救困難。

堰塞壩形成時間非常短暫，他具備突發性強、影響範圍廣，往往造成嚴重的災害。

當堰塞壩發生潰堤後，本來留在堰塞壩後面的所有水量，一下子輸出後，造成相當大的流量，潰壩後的流量混和土體材料，快速地往下游輸送，由於速度和流量都是相當大且高，

也就表示他的破壞力相當大，所以一股腦地沖刷下來後，對下游造成的危害也很大。

因此我們想先了解壩體潰壩機制，才能進一步針對潰壩機制提出可能的預防跟防治防災措施。

因崩塌導致土體堆積在河道後形成的堰塞湖
堰塞壩形成



壩體上方蓄水



壩體後面蓄水過多後潰堤，潰堤後流量越來越快



在台東地區大楠溪上游堰塞湖潰壩後情形

水流突然變湍急、水位也持續升高



開始有漂流木流出

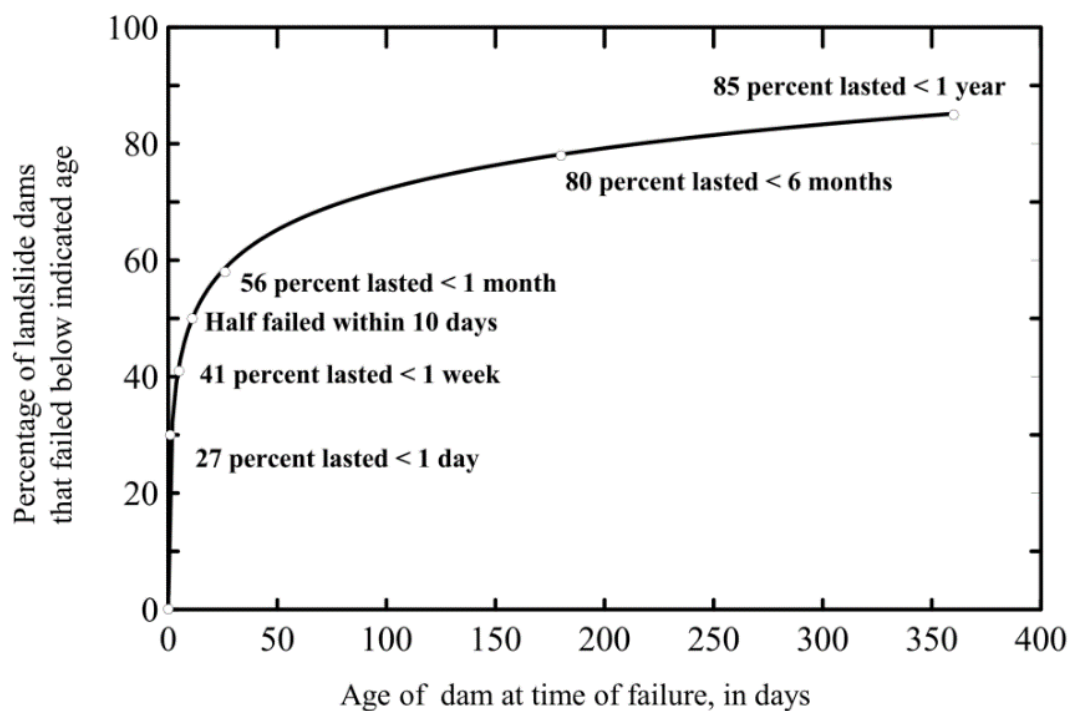


河道整個被淹沒



Costa 和 Schuster(1988) 兩個學者，在世界各地研究 73 個堰塞壩。由他們的分析結果指出，大部分的壩有 27%在一天以內就會消失，有 41%在一周以內就會消失，有 56%會在一個月內消失，80%以上在 6 個月內消失，85%不會超過一年。

而彭學者跟張學者(2012)這兩位學者，研究 204 處的堰塞壩，也提出大部分的壩大概有 34%會在一天內消失，51%會在一周內消失，71%會在一個月內消失，87%會在一年內消失，所以大部分的壩幾乎不會存在超過一年



Costa & Schuster (1988)

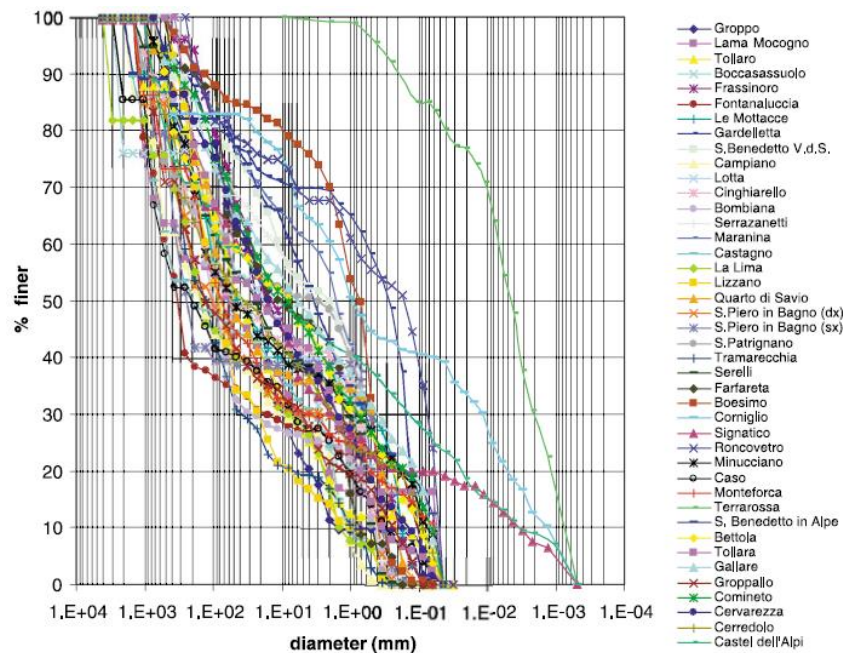
Costa 和 Schuster 也建議當堰塞壩發生時，主要可以透過壩體體積、壩體幾何形狀、材料性質、組成顆粒尺寸、入滲大小、壩體後面蓄積的水體總量…等等資訊，對該壩若潰堤後會造成的危害進行評估。

其中有三個最重要的因素對壩體存活時間的影響較大。

1. 上游入流量對壩後蓄水大小有關
2. 壩體的形狀和規模
3. 崩塌土體內部材料組成有關

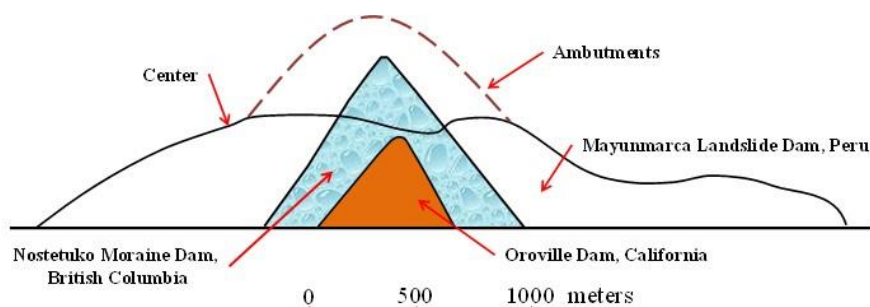
堰塞壩材料特性

堰塞壩顆粒尺寸分布很廣，範圍小至釐米(mm)大至公尺(m)，也因材料分布不均勻造成堆積型態和破壞型態的不同。



Casagli et al. (2003)

人工壩和堰塞壩相比，人工壩因會壓實相對較緊密，且顆粒經過人為篩選使得顆粒都較為接近，但堰塞壩因為是自然崩塌堆積所形成，所以堰塞壩的顆粒大小都較為不均勻，整個壩體因不會另外壓實也顯得較為鬆散。此外人工壩的體積和量體都會比堰塞壩來的大。



學者將堰塞壩分為三個誘發的因素

1. 地震形成的崩塌型堰塞壩

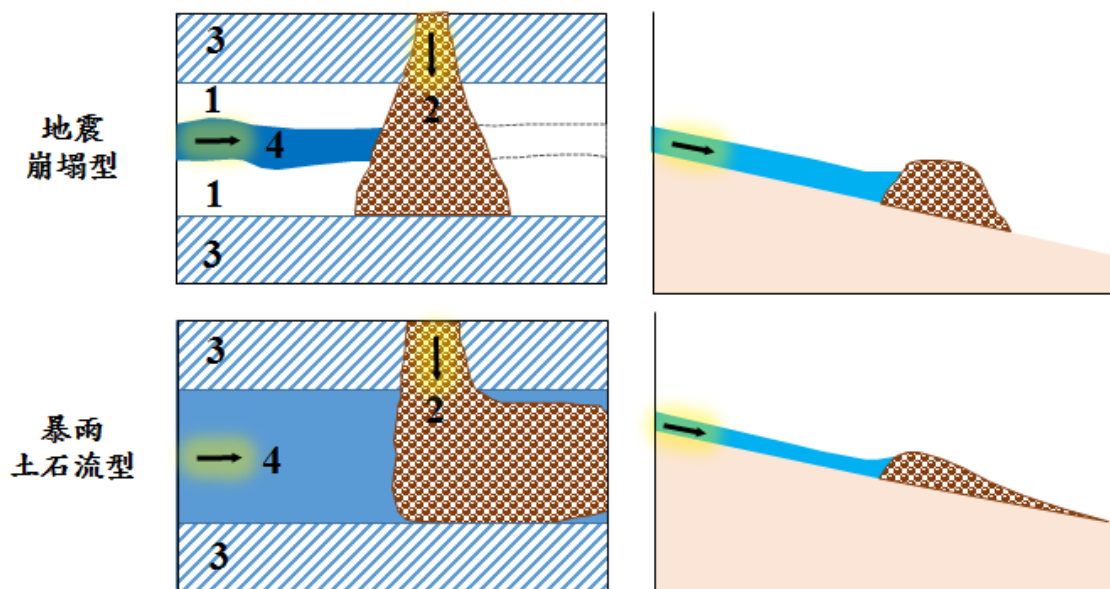
特性：壩體結構較鬆散，含水量較低，孔隙率較高，凝聚力低，各個粒徑相差較大。

2. 降雨形成的崩塌型堰塞壩

特性：含水量較高，孔隙率較低，內摩擦較小，黏性較高，各個粒徑相差較大。

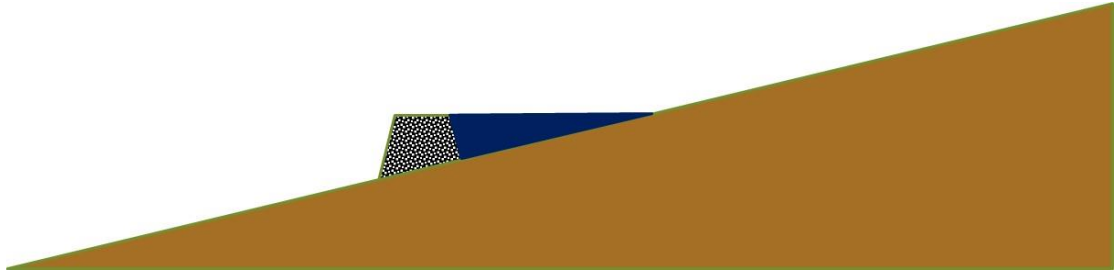
3. 降雨形成的土石流型堰塞壩

特性：含水量較高，孔隙率較低，滲透性低，黏性較高，各個粒徑相差較大。

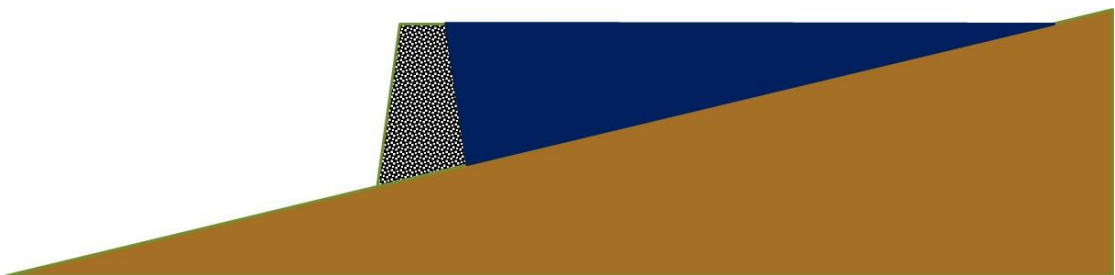


不同堰塞壩高度對下游的影響

固定坡度的條件下，當壩比較矮小的時候，基本上蓄積的水體是有限的，也因蓄積的水體有限即使潰壩對下游來說也不會造成相當大的危害



當壩越來越高的時候，蓄積的水體就相當的多，一旦水體蓄積到一定程度，產生潰壩，潰壩的水體伴隨著壩體的材料混雜再一起向下游輸送，就會造成相當嚴重的洪水災害，甚至是側岸的侵蝕災害而影響到下游的保護對象。

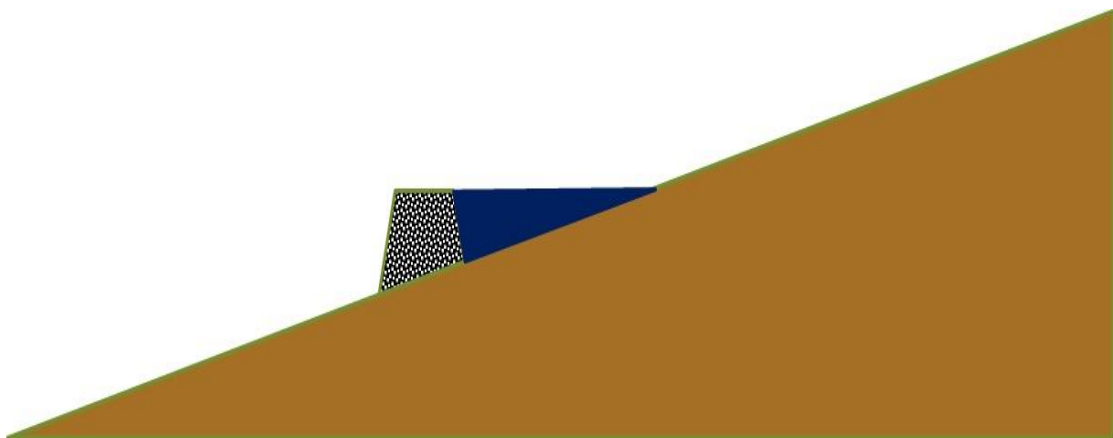


不同堰塞壩溪床坡度對下游的影響

固定壩體高度的條件，而調整溪床坡度的時候，可以看到當上游溪床坡度比較緩的時候，即使壩體不高，也能蓄積相當大規模的水體，那蓄積的水體對壩體產生破壞的話，龐大的水體就會夾雜壩體的材料往下游輸送，造成相當大的洪峰流量，進一步影響到下游的保全對象。



溪床坡度比較陡的時候，因壩體較高，基本上蓄積的水體有限，而在蓄積水體有限的情況下，即使潰壩導致下游能產生的流量也不會太大，所以並不會對下游產生較大危害。

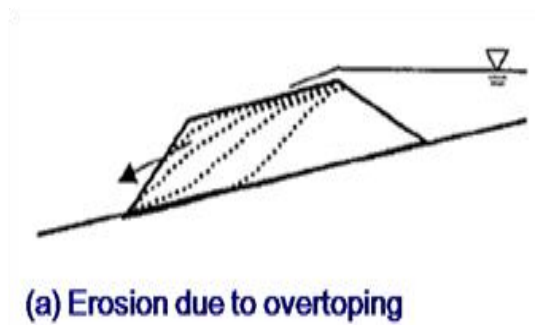


堰塞壩破壞型態

Takahashi 和 Kuang 學者在 1988 年提出，壩體破壞分為三個部分。

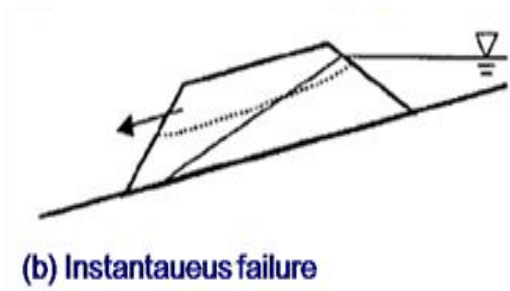
1. 溢流式破壞

溢流破壞主要是由於壩體蓄水滿了，那這個蓄水溢過壩頂以後開始對這個壩體產生侵蝕，隨著壩體侵蝕程度越來越加劇就會將壩體持續的掏刷，掏刷到最後這個壩體就會消失殆盡，最後導致壩體破壞。



2. 驟然式破壞

驟然式破壞主要是因為滲流所引起，當滲流在壩體內部持續滲入，一直發生滲流的地方跟壩體本身形成一個軟弱的交界面，上面不安定的土體因這個介面形成一個滑動面，最終導致這個壩體的破壞。



3. 漸進式破壞

漸進式破壞主要是因為壩體滲流情況較佳，滲流的水持續侵蝕壩址，隨著壩址被侵蝕的越來越嚴重，就會導致壩體產生一層一層破壞。



其他學者也提出不同的看法，針對破壞的機制來分成三個破壞型態。

1. 溢流破壞

因為後方蓄積的水體滿出造成溢流，而溢流的水體去侵蝕壩體體積，因此形成溢流破壞。

2. 管湧破壞

因滲流水一直將壩體內部較細小的顆粒帶走，使得壩體內部形成較大孔隙，最後導致整個壩體崩塌瓦解。

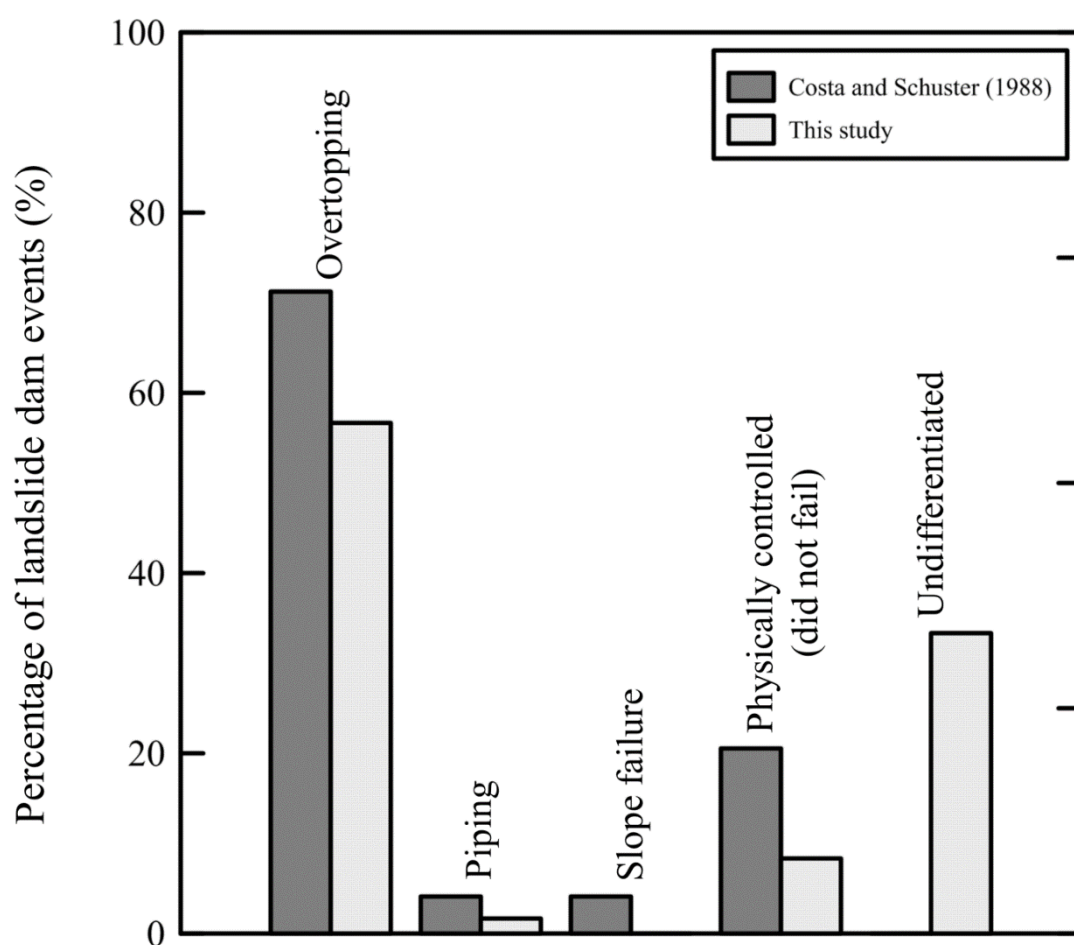
3. 邊坡破壞

跟前述的驟然式破壞較接近，因壩體河床坡度較陡峭，導致滲流水的力量較大，所以會對內部產生較大的滲流力，而滲流力又跟壩體內部形成一個滑動面，最終造成邊坡破壞。

Costa 和 Suhuster 兩個學者分析世界各地 55 處的堰塞壩，分成四個型態，分別是溢流破壞、管湧破壞、邊坡破壞、人為控制。

其中以溢流破壞最多，因堰塞壩形成後，上方的流量通常來的快且大，因此在滲流發展還未較全面的時候，水體已經開始蓄水甚至產生溢流的情形，而當他發生溢流破壞的時候，也沒辦法用人為控制，像是溢流口的設置，或是壩後蓄水區用抽水機抽出多餘水量，因無法人為介入，才會導致溢流，所以溢流破壞才會占大多數。

滲流破壞跟邊坡破壞情況就比較少，因滲流還來不及發育就產生了溢流破壞。



Costa & Schuster (1988)

溢流破壞過程

堰塞湖形成後後方蓄水量不斷增加，也開始滲透壩體內部



水溢過壩頂後，開始侵蝕壩體本身



最後導致壩體破壞



壩體穩定性評估

壩體風險評估一般主要可以分為兩個部分，一個是針對壩體穩定性評估，另一個是潰壩流量評估。

壩體穩定性的評估，幾個學者都提出不一樣的方法，包含從地貌、地形的角度，或者是從集水區的水文特性進行評估。而在潰壩流量評估，學者提出從地貌特徵、水文參數來針對堰塞壩建立相關經驗式，利用經驗式評估潰壩流量的大小進行估算。

無量剛指數

DBI 是由 Ermini 和 Casagli 在 2003 年所提出，利用地形地貌參數，像是集水區面積、壩體高度、壩體體積來進行穩定性分析。兩位學者蒐集世界各地的堰塞壩，將其進行兩個分類，一為穩定性壩，二為不穩定性壩。

穩定性壩：當崩塌形成的壩推積在河道上，並且不會受河道影響產生破壞。

不穩定性壩：當崩塌形成的壩推積在河道上，容易受到上游集水區的水流流量影響壩體本身，且產生不穩定進而破壞。

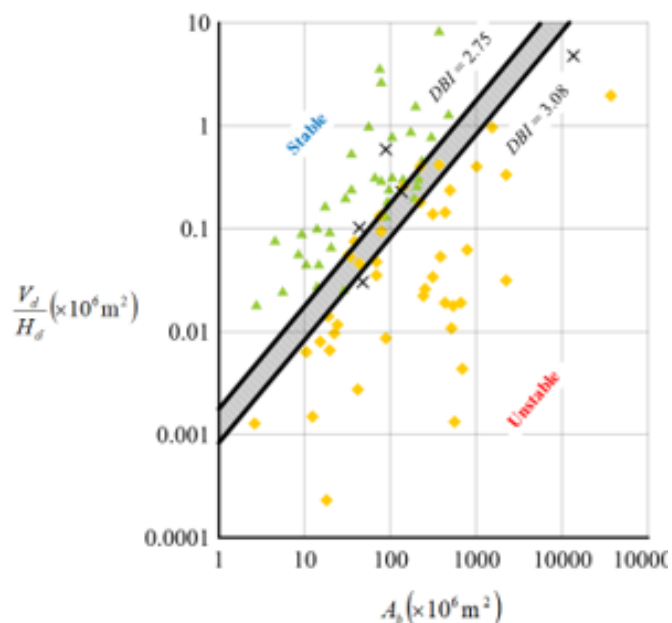
用這些多個堰塞壩案例作分析後，發現 DBI 小於 2.75，就是屬於穩定性壩體，DBI 大於 3.08 就是屬於不穩定性壩體，若 DBI 在 2.75 和 3.08 之間就是屬於不確定的區間。

$$DBI = \log \left(\frac{A_b \times H_d}{V_d} \right)$$
$$DBI \begin{cases} < 2.75 & \text{stable} \\ > 3.08 & \text{unstable} \end{cases}$$

A_b : watershed area (m^2)

H_d : dam height (m)

V_d : dam volume (m^3)



判別分析法與邏輯斯迴歸分析法

董學者使用 43 處在日本形成的堰塞壩進行穩定性分析，他分別使用了判別分析法和邏輯斯迴歸分析法，來建立評估指標，他利用集水區面積、壩體高度、壩體體積、壩體長度、壩體寬度，使用判別分析法和邏輯斯迴歸分析法，分析後結果都差不多，當兩個方法的結果小於 0 的時候，該堰塞壩屬於不穩定壩，結果大於 0 的時候，該堰塞壩屬於穩定壩。

判別分析法

$$AHLW_Dis = -2.62 \log(A_b) - 4.67 \log(H_d) + 4.57 \log(L) + 2.67 \log(W) + 8.26$$

$$AHV_Dis = -2.13 \log(A_b) - 4.08 \log(H_d) + 2.94 \log(V_d) + 4.09$$

$AHLW_Dis$ & $AHV_Dis < 0$ 不穩定壩

邏輯斯迴歸分析法

$$AHLW_Log = -2.22 \log(A_b) - 3.76 \log(H_d) + 3.17 \log(L) + 2.85 \log(W) + 5.93$$

$$AHV_Log = -4.48 \log(A_b) - 9.31 \log(H_d) + 6.61 \log(V_d) + 6.39$$

$AHLW_Log$ & $AHV_Log < 0$ 不穩定壩

A_b ：集水區面積 (m^2)

L ：壩體長度 (m)

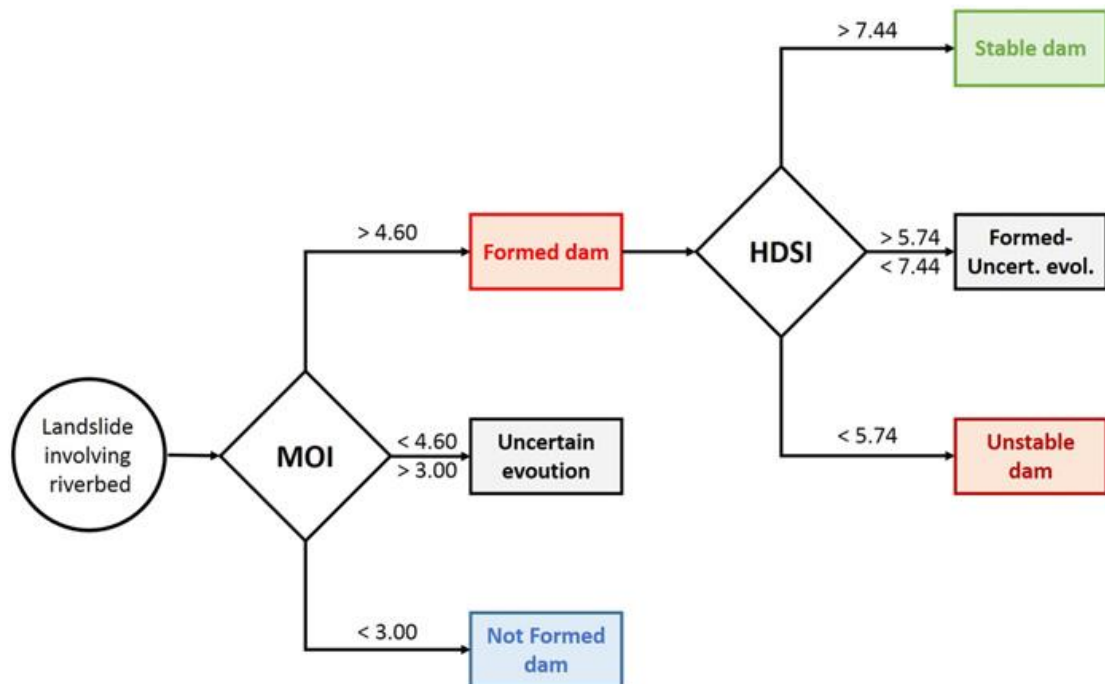
H_d ：壩體高度 (m)

W ：壩體寬度 (m)

V_d ：壩體體度 (m^3)

大壩穩定指數-1

Stefanelli 學者在 2016 年提出結合堰塞壩形成指標(MOI)以及穩定性評估指標(HDSI)，首先當崩塌堆積在河道裡面，當 MOI 大於 4.6 的時候會形成堰塞壩，當 MOI 小於 3 的時候則不會形成堰塞壩，MOI 介於 3~4.6 是屬於不確定區間。而在判別 MOI 大於 4.6 的時候就表示堰塞壩已形成，即可進一步進到 HDSI 進行堰塞壩穩定性評估，當 HDSI 大於 7.44 的時候是屬於穩定性壩，當 HDSI 小於 5.74 的時候屬於不穩定性壩，HDSI 介於 5.74~7.44 是屬於不確定區間。



大壩穩定指數-2

MOI 指標主要參考兩個參數，一個是壩體體積另一個是溪床河道寬度，用這兩個指標來評估當崩塌堆積在河道的時候能不能形成堰塞壩，當 MOI 小於 3 時就不會形成堰塞壩，若當 MOI 大於 4.6 則會形成堰塞壩。

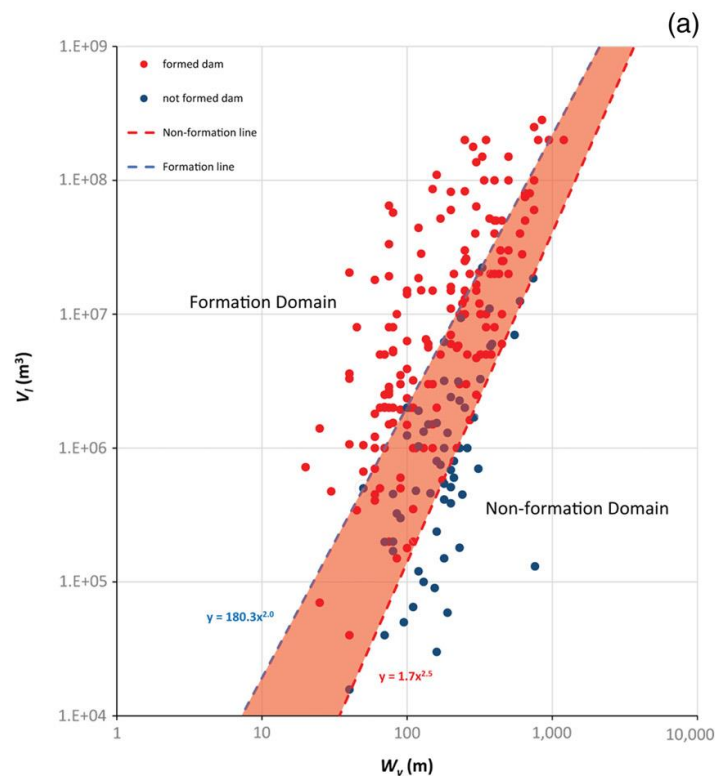
$$\text{MOI} = \log\left(\frac{V_L}{W_V}\right)$$

MOI < 3.00 不會形成堰塞壩

MOI > 4.60 會形成堰塞壩

V_L ：壩體體積 (m^3)

W_V ：河道寬度 (m)



大壩穩定指數-3

用 MOI 評估出來發現會形成堰塞壩後，再接著用 HDSI 來進行穩定性評估，所使用的參數有壩體體積、集水區面積及溪床坡度。當 HDSI 小於 5.74 的時候表示該壩屬於穩定的，若大於 7.44 則表示該壩屬於不穩定的。

$$\text{HDSI} = \log \left(\frac{V_L}{A_b S} \right)$$

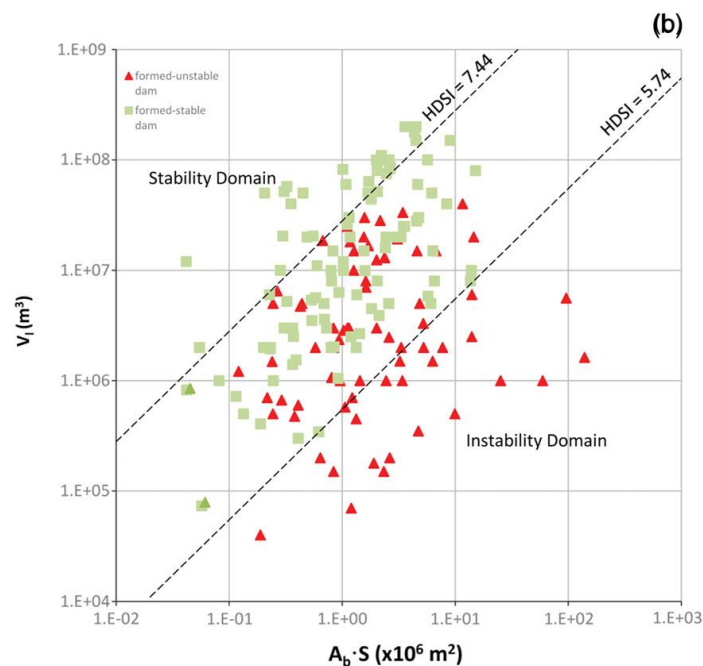
$\text{HDSI} < 5.74$ 穩定

$\text{HDSI} > 7.44$ 不穩定

V_L ：壩體體積 (m^3)

A_b ：集水區面積 (m^2)

S ：溪床坡度 ($^\circ$)



結論

- ◇ 堰塞壩仍然是一個尚未被很好理解的物理過程，因為有許多因素影響堰塞壩的形成，像是主流河道、兩側崩塌、支流的交會點…等等，這些複雜相互作用都會影響堰塞壩的形成及破壞。所以堰塞壩充滿了許多不確定性。
- ◇ 通常，地震引發的堰塞壩，因能夠將更多的崩塌土石帶到河道，從而形成更大、更堅固的堰塞壩。
- ◇ 堰塞壩的破壞通常由三種破壞機制引起，包括溢流破壞、滲流破壞和壩體產生滑動破壞。
- ◇ 只有了解堰塞壩的潛在破壞規律，有利於製定防災救災策略擬定，有利於提高防災救災能力。