

現地小型潰壩試驗震動訊號特性的分析與探討

黃宇辰^[1] 林碩彥^[1, 2] 馮正一^{[1]*}

摘要 本研究著重於探討小型堰塞壩潰決過程中的壩體震動特性，旨在理解不同壩體尺寸與位置其潰決時對震動訊號的影響。本研究於 2023 年 8 月與 11 月在南投惠蓀林場北港溪左岸的灘地進行了 7 組小型試驗，壩的型式規劃為單壩、雙壩及雙壩加丁壩等。透過埋設加速度規蒐集震動訊號，進而使用 Hilbert-Huang Transform 方法進行震動訊號的時頻分析，比較震動能量與頻譜變化。研究結果顯示，蓄水速度與潰決速度呈正相關，蓄水過程中蓄水速度越快，壩體震動訊號變化越劇烈，且潰決後的洪水強度亦隨之增大。本研究結果顯示丁壩(spur dike)可有效降低洪水侵蝕能量，對丁壩後方之邊坡與河道具有保護作用。此研究結果可供對堰壩潰決機制之瞭解及水利工程設計中丁壩應用之參考。

關鍵詞：堰塞壩、丁壩、潰決、洪水、震動訊號、時頻分析

Analysis and Investigation of Seismic Signal Characteristics in On-Site Small-Scale Dam Breach Tests

Yu-Chen Huang^[1] Shuo-Yen Lin^[1, 2] Zheng-Yi Feng^{[1]*}

ABSTRACT This study analyzed the characteristics of seismic signals induced by small dam breaches, with a focus on dam size and location. The research was conducted in August and in November 2023 on the left bank of the Beigang River in Huisun Experimental Forest in Nantou, Taiwan. Single dams, double dams, and double dams with spur dikes were tested. Accelerometers were installed to collect seismic signals, and the Hilbert-Huang Transform method was used for time-frequency analysis, with comparison of changes in seismic energy and spectra. A positive correlation was observed between water impoundment and breach rate; the faster the water impoundment rate was, the more dramatic the changes in dam seismic signals and the greater the flood intensity after breach were. Spur dikes effectively reduce flood erosive energy, offering protection to slopes and river channels behind the spur dikes. These findings can serve as a reference for understanding dam breach mechanisms and the application of spur dikes in hydraulic engineering design.

Key Words: Landslide dam, spur dike, dam breach, flood, seismic signal, time-frequency analysis.

一、前言

Feng, et al (2020) 研究指出當壩體發生潰決或邊坡侵蝕時，會產生一定的震動，這些訊號可以被用來追蹤潰決的進程，通過對震動訊號的分析，可以了解潰壩的速度、侵蝕範圍以及潰決過程中的動態變化。Hung, et al (2021) 則透過實驗室測試和模型模擬，分析溢頂潰決中的地震訊號變化及形態演化，顯示出水流對壩體結構的影響，進而加深對潰壩動態行為的理解。Tabassum et al. (2024) 透過實驗方法系統性探討多重丁壩配置下，丁壩間不同間距與長度對首座丁壩處沖刷深度的時間演化行為。該研究結果顯示，多丁壩配置可有效降低平衡沖刷深度並縮短達到穩定沖刷所需時間。該研究也量化了不同水力條件下的沖刷變化規律，證明丁壩配置對減緩洪流沖擊與穩定河床與提升護岸安全的成效。然而這

些研究主要針對大型試驗，而對小型堰塞壩的研究相對較少。同時在現地進行大型潰壩試驗成本高昂，且需長時間規劃與建構模型，所以本研究規劃了現地小型堰塞壩潰決試驗之研究項目。

本研究以惠蓀林場北左岸溪床為試驗試區並挖掘了一個約 30 公尺長的小型渠道，以進行現地小型堰塞壩潰決試驗。本研究採用 Hilbert-Huang Transform (Huang et al, 1998) 方法進行時頻分析，試驗期間為 2023 年 08 月 30 ~ 31 日及 2023 年 11 月 27 ~ 28 日。分別進行了 4 組和 3 組小型單壩、雙壩與單壩加丁壩潰決試驗，以探討不同壩體尺寸、位置等潰決時的震動訊號差異與丁壩的保護效能，並評估丁壩對潰壩洪水侵蝕能量的減緩效能，並利用 Hilbert-Huang Transform 方法進行壩體蓄水與潰決過程中的震動訊號時頻分析，

[1] 國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

[2] 中興工程顧問股份有限公司

Sinotech Engineering Consultants, Ltd.

* Corresponding Author. E-mail: tonyfeng@nchu.edu.tw

以探討蓄水歷時、壩體位置及丁壩設置對潰壩速度及洪水侵蝕特性的影響。

本研究期望藉由探討壩體潰決與洪水動能之間的關聯性，並驗證丁壩對降低洪水侵蝕能量的實際效能，為未來堰塞壩潰決預測模型與水利工程設計提供參考依據。

二、研究方法

1. 研究試區

本研究試驗區位於南投縣仁愛鄉惠蓀林場北港溪左岸，本研究於溪床挖掘了一條長約 30 公尺、寬約 1 公尺、深約 0.3 公尺的小型試驗渠道，並設置坡度約 6% 以模擬自然溪流環境。此外於試驗區內建造了一座約 6 m × 6 m × 1 m 的頭水池，用以穩定地提供入流水體，模擬自然河川的蓄水與潰決過程。為了精確收集數據，試驗區內的加速度感測器與其他設備均依據壩體和丁壩配置的特點進行佈置，確保試驗條件符合研究目標，研究試區佈置如圖 1。

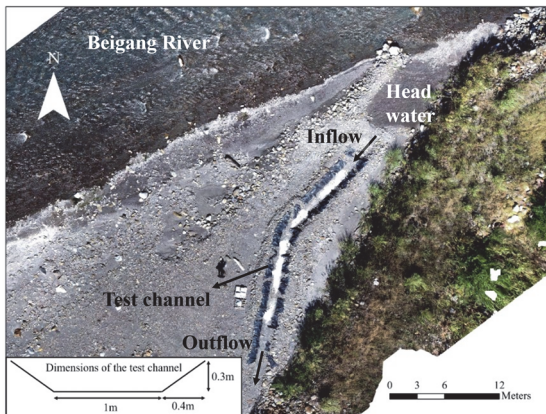


圖 1 試驗區空拍圖 (拍攝於 2023/11/08)

Fig. 1 Aerial photo of the test area (2023/11/08)

2. 模型縮比

本研究使用福祿數相似原理來進行模型設計，確保模型和實地的流體動力學行為相似。因此本研究先進行福祿數相似的縮尺計算後，決定小型堰塞壩之尺寸 (圖 2)。

模型壩尺寸

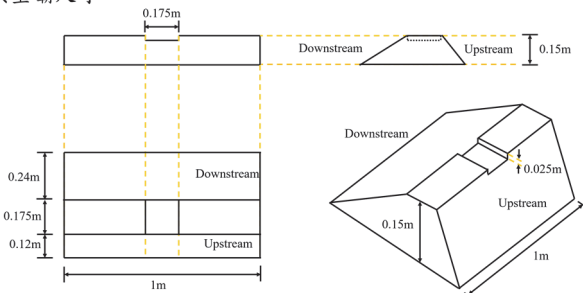


圖 2 小型堰塞壩尺寸圖

Fig.2 Dimensions of the small dam

福祿數 (Froude number, Fr) 是無單位量，在水利工程中用於表示流體運動中慣性力與重力之間的相對強度。在自由

表面的流動動力學研究中 (如河流和海洋波浪)，它在模型實驗中，是確保動態相似性的關鍵指標之一。它的定義為流體流速與重力加速度的比值，如下公式 (1)：

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

其中， v 為流速， g 為重力加速度， h 為特徵長度。本研究以壩體高度作為特徵長度，進行縮尺計算。本研究採用福祿數相似進行現地小型堰塞壩試驗的縮尺計算，以現場進行之大型潰壩試驗之壩體的尺寸進行縮尺，如下公式 (2)：

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p h_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m h_m}} \quad (2)$$

其中， v_m 和 v_p 分別是模型和原型的流速； h_m 和 h_p 分別是模型和原型的壩體高度。

本研究依過去所執行的現地大型潰壩試驗中，其壩體之高度約為 1.5 m、潰口流速為 6 m/s 等，進行縮尺。採用小型潰壩試驗之壩體高度為 0.3 m。

v_m 速度之計算如下公式(3)：

$$v_m = \sqrt{\frac{h_m}{h_p}} \times v_p = \sqrt{\frac{0.3}{1.5}} \times 6 \Rightarrow v_m = 2.68 \text{ m/s} \quad (3)$$

壩體縮尺比例：

假設原型壩體的高度 h_p 為 1.5 m (取自實地測試數據)，而小型堰塞壩的壩體高度 h_m 設定為 0.3 m，則壩體的高度縮尺比為公式(4)：

$$\frac{h_m}{h_p} = \frac{0.3}{1.5} = \frac{1}{5} \quad (4)$$

壩體高度的縮尺比例約為 1/5，即小型堰塞壩的高度縮小了 5 倍。

流速縮尺的推導：

根據壩體高度的縮尺比例 (1/5)，流速縮尺可以通過福祿數相似公式計算得到公式 (5)：

$$\frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\frac{h_m}{h_p}} = \sqrt{\frac{0.3}{1.5}} \approx 0.447 \quad (5)$$

因此，模型中的流速應為現地原型流速的 44.7%。但由於現地試驗條件受限，精密流速計等儀器安裝操作困難且部分設備成本較高，超出本研究經費範圍，因此本試驗未能量測試驗時之水流流速。

3. 探討重點與試驗程序

為了全面了解小型堰塞壩在蓄水與潰壩過程中的震動特性，本研究設定了以下探討重點：(1) 蓄水過程壩體震動訊號變化；(2) 潰壩產生之洪水造成震動訊號之變化；(3) 丁壩在受洪水沖擊時震動訊號變化與沖蝕機制；(4) 入流量大小對於丁壩震動訊號之影響；(5) 入流量大小對於潰壩速度之影響。

針對上述重點，本研究分別於 2023/8/30~31 進行 4 組試驗 (表 1 Test 1~4)，其中包含單壩、雙壩、單壩加丁壩潰決試驗。2023/11/27~28 進行 3 組試驗 (表 2 Test 5~7)，都是單壩加丁壩潰決試驗。試驗以上游至下游的順序施作，壩體「位置」以上游出水口為原點計算。在試驗中，本研究透過設置不同位置、數量、尺寸的壩體及丁壩，模擬潰壩與沖蝕情況，採用的加速度規 731A 型感度高 (頻率響應範圍為

0.05~450 Hz, 感度為 10 V/g), 可精確捕捉小型堰塞壩潰決試驗時的震動訊號。

其中, 2023/11/27~28 之 3 組試驗之小型堰塞壩址設定在與 2023/8/30~31 試驗時之同一渠道。因適逢枯水期, 本研究擴挖了頭水池以確保試驗水流量, 同時設置壩體的方法相同。並針對入流量的變化, 探討其對壩體蓄水時間與丁壩受侵蝕影響的程度。

為探討不同壩型組合對潰壩行為與震動訊號之影響, 本文設計三種壩型組合, 分別為「單壩」、「雙壩」與「單壩加丁壩」。單壩為試驗渠道中設置一座壩體以模擬蓄水與潰決過程; 雙壩為於渠道上下游分別設置兩座壩體, 用以觀察上游潰決洪水對下游壩體的衝擊效應及雙壩間的交互作用; 單壩加丁壩則於主壩下游配置多道丁壩, 以評估丁壩削能效果及對下游的保護效能。

果及對下游的保護效能。

本研究觀察到試驗過程中的壩體破壞現象, 主要包括溢頂破壞 (Overtopping failure) 與滲流破壞 (Seepage failure) 等二種。(1) 溢頂破壞為水體越過壩頂及壩體受到溢頂水流下切侵蝕, 侵蝕面逐漸下降, 同時也導致潰口擴大, 也可能引發湧浪 (surge wave) 之破壞型式。「溢頂時間點」在本研究內定義為水流流過壩頂後, 開始往壩體下游面流下的當下。(2) 滲流破壞 (Seepage failure) 為壩體下游面 (趾部) 受滲流水滲出坡面後, 侵蝕面會從下游坡面上方發展至壩頂的現象。

本研究中所定義之潰壩時間, 是指溢頂開始瞬間。本研究定義以壩體高度受侵蝕達 90% 作為潰壩的停止時間, 輔以震動訊號趨於平穩的時間點進行判釋。

表 1 2023/08/30 ~ 31 試驗配置與潰壩資訊

Table 1 Test setup and dam-breach information (August 30 ~ 31, 2023)

試驗編號與壩體描述	壩體編號	壩體與出水口 距離 (m)	長 (m)	高 (m)	寬 (m)	潰壩時間 (s)	破壞方式
Test 1 單壩	D1	3.00	1.00	0.15	0.58	T1 (394)	溢頂
Test 2 單壩	D2	8.20	1.00	0.33	0.57	T2 (550)	溢頂
Test 3 雙壩	D3	12.90	1.00	0.30	0.73	T3 (490)	滲流破壞
	D4	16.00	1.00	0.25	0.72	T4 (517)	溢頂
Test 4 單壩 & 丁壩	D5	20.60	1.00	0.33	1.10	T5 (883)	滲流破壞
	G1	23.00	0.40	0.24	0.11	T6 (892)	
	G2	25.15	0.50	0.25	0.12	T7 (901)	
	G3	27.40	0.38	0.23	0.11		
	G4	29.70	0.39	0.22	0.09		

表 2 2023/11/27 ~ 28 試驗配置與潰壩資訊

Table 2 Test setup and dam-breach information (November 27 ~ 28, 2023)

試驗編號	壩體編號	壩體與出水口 距離 (m)	長 (m)	高 (m)	寬 (m)	潰壩時間 (s)	洪水抵達丁壩 時間 (s)	蓄水時間 (s)	破壞方式
Test 5 單壩&丁壩	D6	10.20	2.00	0.30	1.07	221	221	76	
	G1	13.00	0.48	0.24	0.10		232		
	G2	15.00	0.50	0.25	0.09				溢頂
	G3	23.00	0.40	0.24	0.08		251		
	G4	25.00	0.45	0.25	0.09				
Test 6 單壩&丁壩	D7	10.20	2.00	0.30	1.07	1257	1257	558	
	G1	13.00	0.51	0.23	0.12		1295		
	G2	15.00	0.48	0.25	0.12				溢頂
	G3	23.00	0.44	0.24	0.10		1346		
	G4	25.00	0.46	0.24	0.09				
Test 7 單壩&丁壩	D8	10.20	2.00	0.30	1.07	673	673	281	
	G1	13.00	0.49	0.24	0.12		703		
	G2	15.00	0.47	0.24	0.11				溢頂
	G3	23.00	0.40	0.25	0.09		755		
	G4	25.00	0.45	0.24	0.08				

4. 震動訊號時頻分析 - Hilbert-Huang Transform (Huang et al, 1998)

Hilbert-Huang Transform (Huang et al, 1998) 是一種強大的非線性時頻分析工具, 適合於捕捉非穩態信號的特徵。此方法允許對震動訊號進行詳細的時頻分析, 以便有效比較不同條件下的震動能量與頻譜變化。因此本研究將收集到的震動訊號利用 Hilbert-Huang Transform 方法進行時頻分析比較能量與頻譜值。HHT 之詳細計算方法可參考 Huang et al.

(1998)

三、結果與討論

1. 單壩、雙壩與單壩加丁壩潰決試驗 (2023/08/30~31)

本項研究於 2023/8/30~31 在惠蓀林場進行了 4 組潰決試驗。2023/8/30~31 試驗配置如圖 3 所示。編號 D 為小型堰塞壩; 編號 G 為模型丁壩。

本研究設置不同的壩體位置、數量、尺寸與丁壩進行試驗，並設置了 731A 型加速度規（響應範圍為 0.05~450 Hz，靈敏度為 10 V/g）以記錄震動訊號。具體試驗配置與潰壩資訊如表 1。

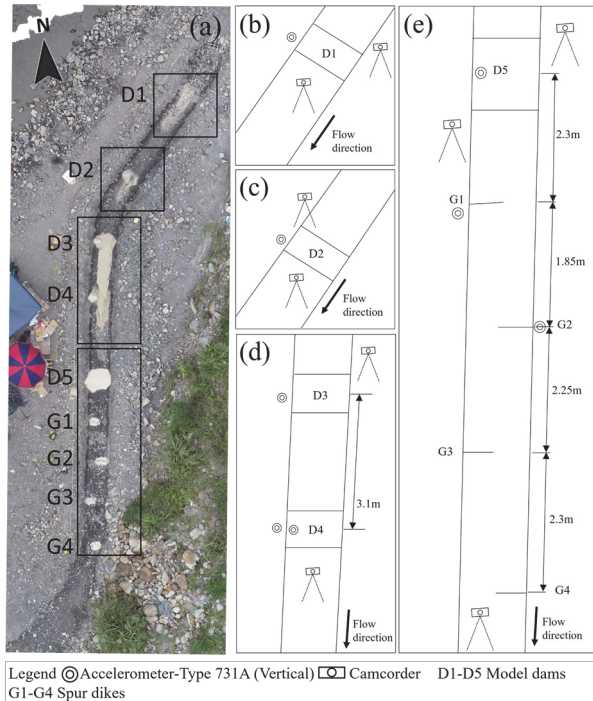


圖 3 2023/08/30 ~ 31 試驗之配置圖 (a) Test 1 ~ 4 上視圖 (b) Test 1 (c) Test 2 (d) Test 3 (e) Test 4 (D) 為小型堰塞壩之編號；G 為模型丁壩之編號)

Fig.3 Setup of the tests conducted on 2023/08/30 ~ 31 (a) Top view of Tests 1 ~ 4, (b) Test 1, (c) Test 2, (d) Test 3, (e) Test 4, (D indicates the model dams; G indicates the model spur dikes)

(1) 蓄水過程壩體震動訊號特性

潰壩前的蓄水過程是影響壩體震動訊號的關鍵階段。本研究透過加速度規記錄不同壩體配置在蓄水階段的震動訊號變化，觀察其頻率和能量特徵，分析水位上升對壩體結構穩定性的影響。以下為 4 組試驗的詳細觀測結果：

① Test 1 單壩設定：

壩 D1 位於上游位置，其蓄水過程中震動訊號主要受到蓄水速率和蓄水體積變化的影響。隨著蓄水速率提升，壩體在短時間內承受更多的水體衝擊，導致震動訊號逐漸增強。在 t_1 (394 秒) 時，蓄水高度超過壩體高度，導致壩體發生溢頂並伴隨部分結構崩解（圖 4），震動訊號在壩體受到急遽下切時，強度明顯提升並達到最高峰值 180.71 Hz（圖 5）。溢頂後，因洪水流動與壩體結構的破壞程度趨於穩定，震動訊號逐漸下降。本研究所指之「蓄水歷時」係指開始蓄水至溢頂所需的時間。蓄水歷時短，即蓄水速度越快之意。綜合本研究多組試驗的觀察結果顯示，蓄水歷時較短的組別相較於蓄水歷時較長的

組別，在溢頂前產生的震動能量較為集中且強烈。這種較高能量表現亦反映於時頻圖中出現較深紅色的區塊。此一現象與 Ghonim et al. (2024) 關於蓄水歷時對潰壩動能影響的觀測結果相符。



圖 4 Test 1 D1 單壩溢頂 (2023/8/30)

Fig.4 Test 1 D1 single dam overflowing (2023/8/30)

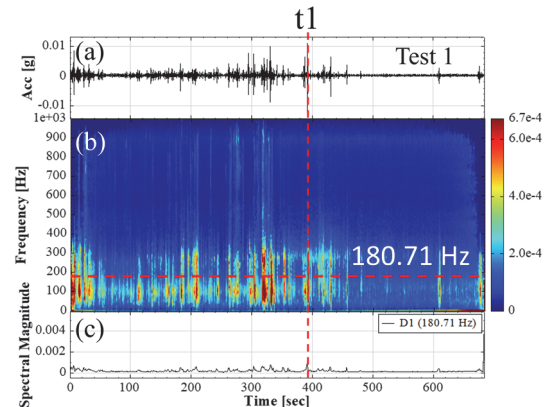


圖 5 Test 1 D1 河岸邊加速度 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 180.71 Hz 頻譜值剖面圖

Fig.5 Test 1 D1 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 180.71 Hz

② Test 2 單壩設定：

壩 D2 位於壩 D1 下游位置，其蓄水過程受到更大體積的上游水體影響，導致壩體承受的衝擊力比 D1 更大，潰決時的震動頻率也較大，同時潰決時間也較 D1 長。在 t_2 (550 秒) 發生溢頂（圖 6），震動訊號達到峰值 245.96 Hz（圖 7）。與 D1 相比 D2 的潰決時間更長，這與壩體蓄水時間相關。該現象驗證了 Feng et al. (2020) 對於壩體潰決前蓄水時間與震動特性的觀察。

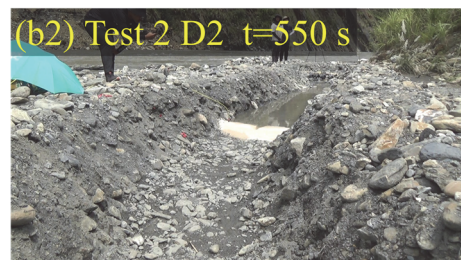


圖 6 Test 2 D2 單壩溢頂 (2023/8/31)

Fig.6 Test 2 D2 single dam overflowing (2023/8/31)

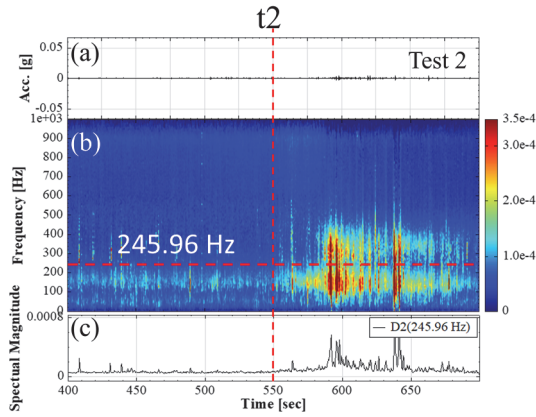


圖 7 Test 2 D2 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 245.96 Hz 頻譜值剖面圖

Fig.7 Test 2 D2 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 245.96 Hz

③ Test 3 雙壩設定：

壩 D3 與 D4 呈上下游配置，其中 D3 蓄水量體大導致在時發生了滲流破壞 (圖 8)。D4 之水體來源為 D3 滲流水體與潰決後洪水，使其僅 27 秒即在 t4 (517 秒) 發生溢頂 (圖 9)。D3 蓄水過程(0 秒 ~ t3)之震動訊號忽高忽低，根據試驗錄影比對為滲流破壞產生之震動訊號，D4 蓄水過程(t3 ~ t4)之震動訊號快速上升，這表明蓄水時間越短，壩體的震動訊號變化越顯著 (圖 10)。結果與 Hanson, et al.(2005) 之研究顯示相符，洪水滲流破壞壩體下游形成潰口當達到峰值後潰口漸漸穩定。該研究指出溢頂會產生與地形抬升後滲流破壞相似的震動特徵，同時此項研究的結果也支持了 Ghonim et al. (2024) 的觀點，即上游流速對侵蝕劇烈程度有直接影響。

本研究設計雙壩配置雖未明確定義壩體之間距，然本研究主要目的在於探討潰壩洪水在通過下游第二道壩體時與第一道壩體所產生之交互作用。對於 D3 與 D4 壩這一組試驗，當上游之 D3 壩發生潰決後，其所釋放之洪水在遇到下游 D4 壩體時，產生明顯的迴水現象，進而造成上游洪水流速與動能的減緩，對 D3 壩之滲流破壞行為產生抑制效果。



圖 8 Test 3 雙壩試驗 (D3,D4); D3 潰決 (2023/8/31)

Fig.8 Test 3 Double dam test (D3, D4); D3 breach (2023/8/31)



圖 9 Test 3 雙壩試驗 (D3, D4); D4 潰決 (2023/8/31)

Fig.9 Test 3 Double dam test (D3, D4); D4 breach (2023/8/31)

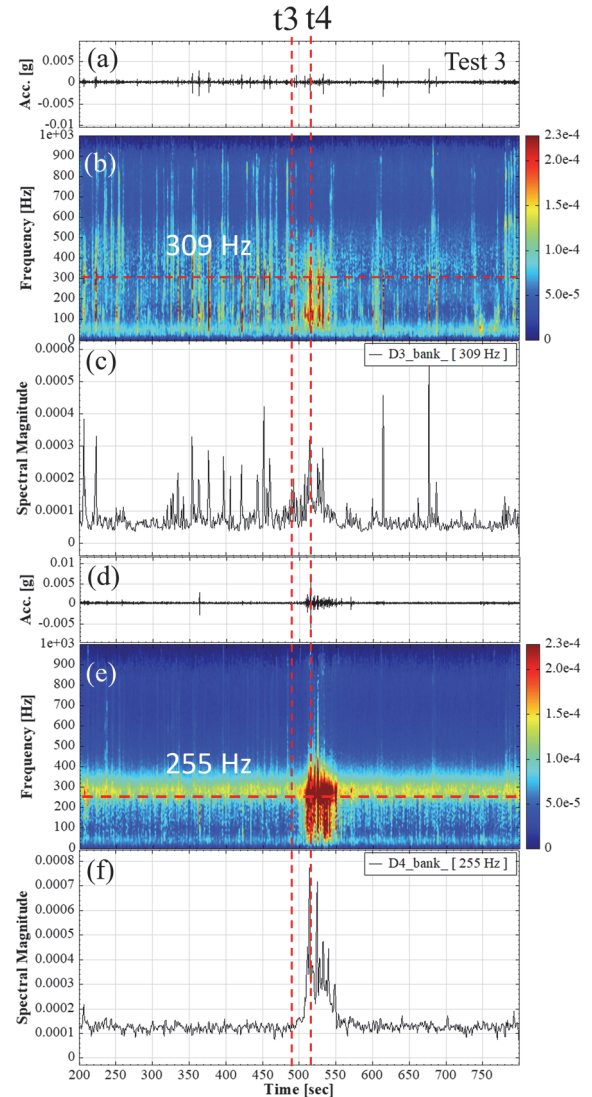


圖 10 Test 3 D3, D4 河岸邊加速度規 (a), (d) 震動訊號 (b), (e) 時頻圖 (c), (f) 頻譜值剖面圖

Fig.10 Test 3 - Acceleration of D3 and D4 at the riverbank: (a) and (d) seismic signals; (b) and (e) time-frequency diagrams; (c) and (f) Spectral value profiles of 309 and 255 Hz

④ Test 4 單壩加丁壩設定：

壩 D5 在蓄水期間出現滲流破壞現象，並於 t5 (883 秒) 發生滲流破壞 (圖 11)。潰壩後的洪水對下游的丁壩 (G1 至 G4) 產生不同程度的衝擊，震動訊號顯示 G1 的震動能量最高，其後依次遞減

(圖 12)。這表明上游丁壩能有效吸收部分洪水能量，對下游丁壩、邊坡與河道供有效保護作用。此外，結果顯示丁壩的防護效能與洪水流速及衝擊強度密切相關，本結果驗證了 Tabassum et al. (2024) 對於丁壩在分散洪水衝擊方面的研究成果。圖 13 為 Test 1 – Test 4 試驗照片彙整圖。



圖 11 Test 4 D5 滲流破壞 (2023/8/31)

Fig.11 Test 4 D5 seepage failure (2023/8/31)

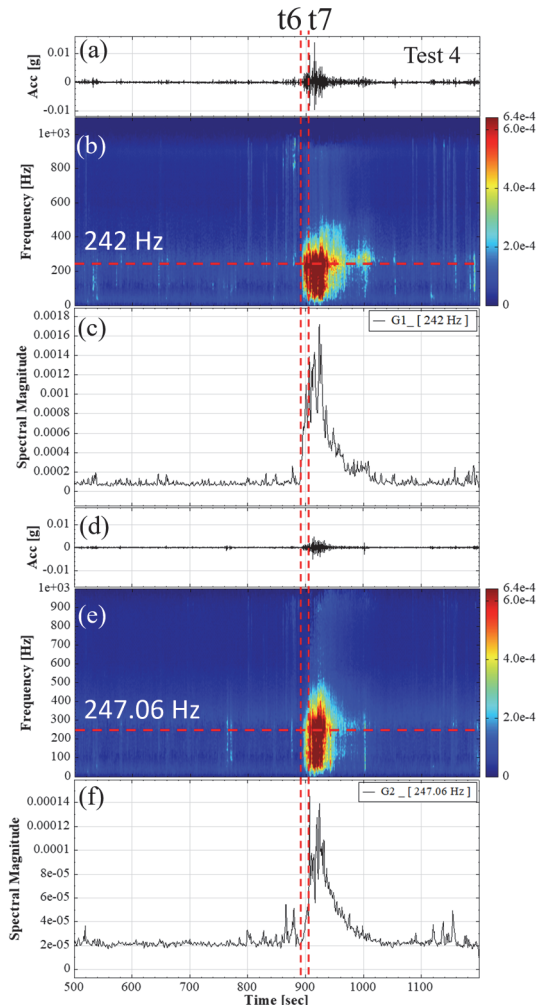


圖 12 Test 4 G1, G2 河岸邊加速度規 (a), (d) 震動訊號 (b), (e) 時頻圖 (c), (f) 頻譜值剖面圖

Fig.12 Test 4 G1, G2 Acceleration of G1 and G2 at the riverbank: (a), (d) Seismic signals; (b) and (e) time-frequency diagrams; (c) and (f) Spectral value profiles of 242 and 247.06 Hz

(2) 潰壩洪水造成的震動訊號特性

潰壩過程中的洪水衝擊，不僅對壩體結構產生重大影響，亦會形成劇烈的震動訊號。本研究探討洪水溢頂或滲流破壞等不同潰壩方式所引起的震動訊號特徵，並分析震動能量的時間與空間分佈。以下為 4 組試驗的具體結果與討論：

① Test 1(壩 D1)：

潰壩時間在 394 秒，發生溢頂。當水體溢出壩頂時，洪水迅速下切，產生劇烈的震動訊號，震動頻率約 180.71 Hz。溢頂後的洪水衝擊迅速且集中，導致震動強度快速上升，峰值出現在溢頂後壩體破壞的瞬間 (圖 5)。這一現象顯示出溢頂水流動能對震動訊號的影響，進一步驗證了 Feng et al. (2020) 提出的觀察，即壩體潰決過程中的洪水流速與震動能量有著正相關關係。

② Test 2(壩 D2)：

潰壩時間在 550 秒，發生溢頂。D2 壩體前方的水體積顯著大於 D1，導致 D2 的侵蝕劇烈程度明顯高於 D1。具體而言，D2 的潰決洪水在 t2 時間 (590 秒) 達到震動訊號的峰值，並伴隨震動能量的顯著提升。此外，D2 的潰決時間比 D1 提前約 50 秒 (D1 的潰決時間為 640 秒)。這表明水體的體積和蓄水時間對潰壩震動能量和潰決速度有直接影響，證實了洪水流速與侵蝕劇烈程度之間的正相關關係 (圖 7)。該現象支持了 Ghonim et al. (2024) 的研究，即蓄水越快、體積越大，潰壩過程中的洪水動能和震動能量也越強。

③ Test 3 (壩 D3 和壩 D4)：

D3 潰壩時間在 490 秒，發生滲流破壞。D4 潰壩時間在 517 秒，發生溢頂。D3 的滲流破壞過程中，震動訊號顯示出急劇波動，可能反映了壩體結構在局部侵蝕早期的不穩定特性。D4 則因上游 D3 潰壩洪水的影響，蓄水時間僅 27 秒便發生溢頂破壞，洪水迅速衝擊 D4，產生劇烈震動訊號，峰值頻率在溢頂時刻顯著上升 (圖 10)。潰壩過程中，震動訊號的強度隨破壞範圍的擴大而增強，與實驗數據一致。

④ Test 4 (壩 D5 和丁壩 G1 - G4)：

D5 潰壩時間在 883 秒，產生滲流破壞。洪水衝擊丁壩時，產生不同程度的震動。丁壩的防護效能受到洪水衝擊強度和上游水流量的顯著影響。根據試驗數據 (表 1)，距離壩體較遠的丁壩，其震動能量較小，這是因為上游的丁壩吸收了部分洪水能量，進而保護了下游丁壩和河岸。特別是在 Test 4 中，G1 丁壩顯示出明顯的減弱能量效果，有效吸收了部分洪水震動能量，對下游的 G2 提供了一定

程度的保護，展現其顯著的防護功能（圖 12）。這一現象可以歸因於丁壩對洪水流速的有效阻擋與減速作用，從而減少了下游的侵蝕能量。這與現有

的防洪結構研究一致參考 Tabassum et al. (2024)，強調了丁壩在分散和減弱洪水衝擊方面的作用。

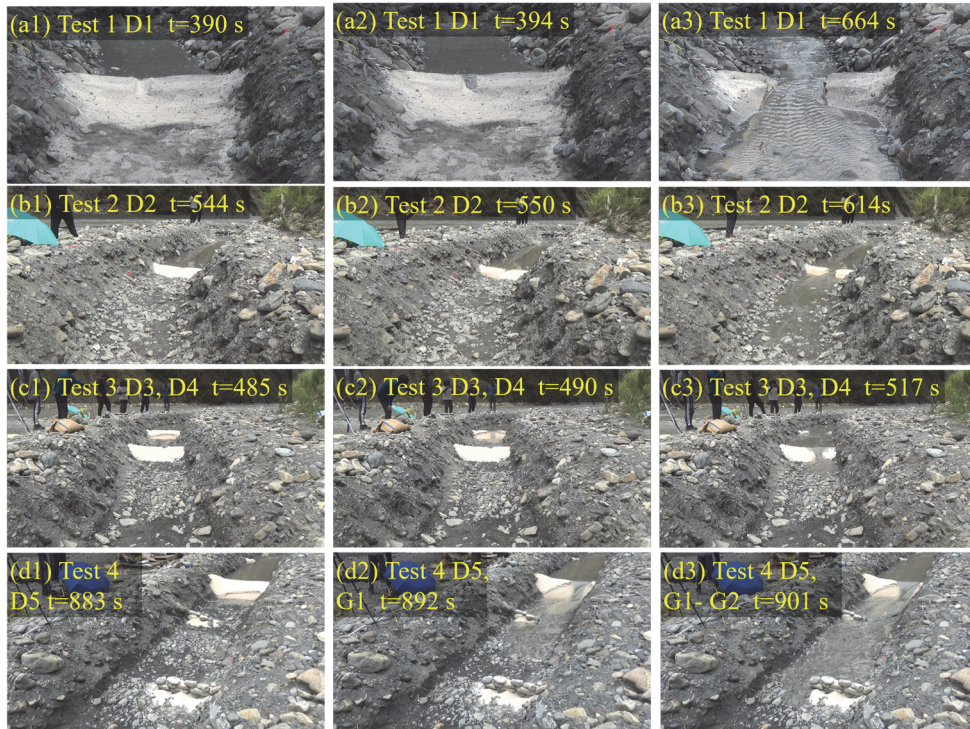


圖 13 Test 1 ~ 4 試驗照片彙整圖 (2023/8/30~31)

Fig.13 Series photos of Test 1 ~ 4 (2023/8/30~31)

(3) 丁壩在受洪水衝擊時之震動訊號與沖蝕情況

在 D5 潰壩後，洪水對後方河道邊坡造成了顯著的沖蝕，因此本研究設置了丁壩以進行保護。試驗結果顯示，丁壩的設置有效減少了沖蝕能量，特別是上游的丁壩對下游丁壩形成了重要的防護作用。這一結果符合 Criss (2024) 提出的洪水能量隨距離減弱理論及 Tabassum et al. (2024) 對於丁壩分散洪水能量的研究結果，證實了丁壩在適當設置下，可有效分散和減弱洪水衝擊，尤其在降低洪水能量和減少沖蝕方面效果顯著。

本試驗使用的材料為砂，其材料顏色較淺能顯示水流方向，因此本研究利用其特性觀察潰壩後洪水對丁壩的沖蝕。本研究以 Test 4 為例討論了洪水衝擊丁壩造成震動訊號變化，與潰壩後洪水沖蝕丁壩的情形。

根據試驗數據（表 1）， t_3 和 t_4 分別為洪水到達 G1 與 G2 的時間。雖然 G1 和 G2 丁壩的震動訊號幾乎無時間差，但 G2 的震動能量明顯小於 G1，顯示 G1 有效減弱了洪水能量使後面的 G2 接收到的震動能量較小，這證實了丁壩確實有防止河岸沖蝕的能力。從圖 14 可知，D5 潰壩後的砂最遠只流到 G3 前之位置，並未影響到 G3 和 G4。這突顯了丁壩的保護功能。

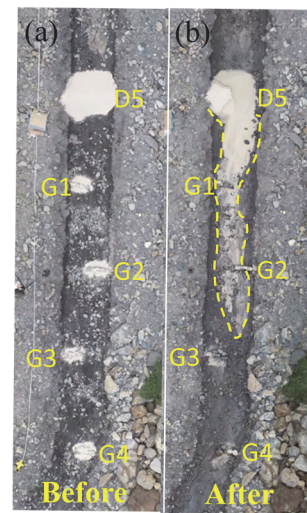


圖 14 Test 4 試驗前後沖蝕情況比較 (a)試驗前 (b)試驗後

Fig.14 Comparison of erosion conditions before and after Test 4 (a) Before the test (b) After the test

2. 單壩加丁壩潰決試驗(2023/11/27~28)

本項研究於 2023 年在惠蓀林場進行了 3 組潰決試驗。2023/11/27~28 之 3 組試驗之小型堰塞壩址設定在與 8 月同一位置（圖 1）。2023/11/27~28 之 3 組試驗配置如圖 15。編號 D 為小型堰塞壩；編號 G 為模型丁壩。

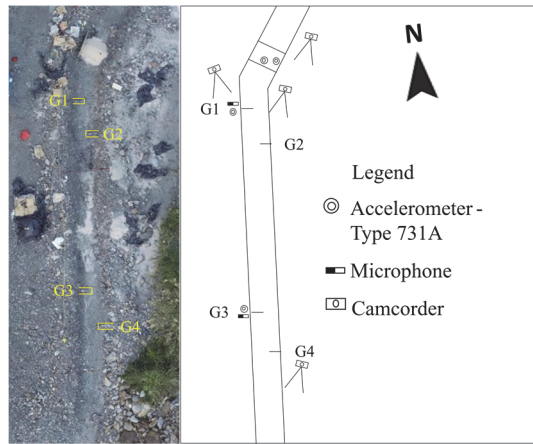


圖 15 2023/11/27~28 試驗之配置圖

Fig.15 Setup of the tests conducted on 2023/11/27 ~ 28

本研究一樣設置了 731A 型加速度規 (響應範圍為 0.05 ~ 450 Hz, 靈敏度為 10 V/g) 以記錄震動訊號, 具體試驗配置與潰壩資訊如表 2。

(1) 上游入流量對於丁壩震動訊號之影響

本項研究為了探討不同入流量對於丁壩震動訊號之影響, 以加速度規蒐集資料, 觀察丁壩減緩潰壩洪水沖蝕能量的效果。

蓄水時間的長短為 Test 6 (558s) > Test 7 (281s) > Test 5 (76s)。由表 2 可知 Test 5 - G1, Test 6 - G1, Test 7 - G1 在渠道中設置的位置相同, Test 5 - G3, Test 6 - G3, Test 7 - G3 亦位於相同的位置, 因此以這些丁壩進行比較分析。

經影像分析, 洪水觸碰到丁壩的時間分別如圖 16 到圖 18, 為 Test 5 - G1 (232s), Test 6 - G1 (1472s), Test 7 - G1 (713s), 結合丁壩旁設置之加速度規記錄到的訊號可知, 當洪水接觸丁壩時震動訊號的持續時間約為 Test 5 - G1 (158s), Test 6 - G1 (100s), Test 7 - G1 (130s)。根據試驗影像判斷, 若 Test 5 - G1 之訊號蒐集時間若加長, 則 Test 5 - G1 與 Test 7 - G1 之震動訊號延時應有更大的差異, 由此可知當上游入流量越大, 震動訊號的能量延時越長。

分析結果顯示, 水流觸碰到丁壩的時間分別如圖 19 到圖 21, 為 Test 5 - G3 (201s), Test 6 - G3 (1133s), Test 7 - G3 (665s)。再由丁壩旁設置之加速度規記錄到的訊號可知, 當洪水接觸丁壩時震動訊號的延時約為 Test 5 - G3 (158s), Test 6 - G3 (110s), Test 7 - G3 (140s)。根據加速度規蒐集到的訊號, 設置於渠道後方之丁壩 (Test 5 - G3, Test 6 - G3, Test 7 - G3) 震動能量較小, 也可觀察到震動訊號的高強度能量延時與蓄水時間呈現反向趨勢。

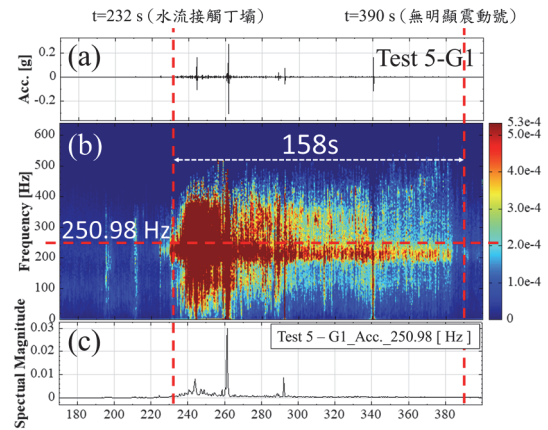


圖 16 Test 5 - G1 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.16 Test 5 - G1 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 250.98 Hz

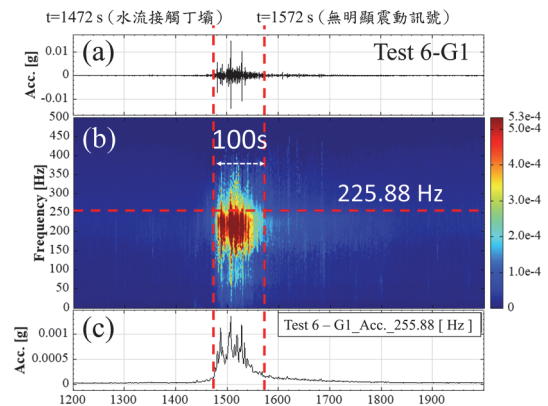


圖 17 Test 6 - G1 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.17 Test 6 - G1 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency spectrogram, (c) Spectral value profile of 225.88 Hz

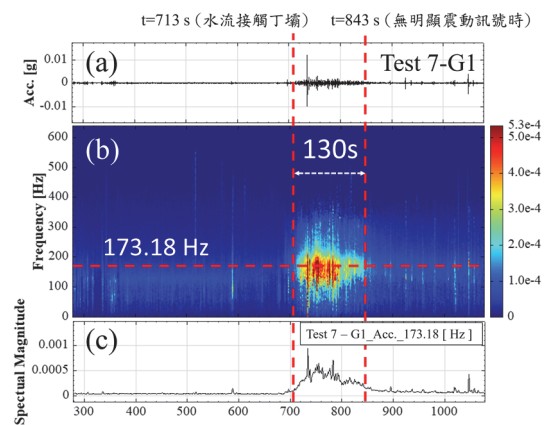


圖 18 Test 7 - G1 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.18 Test 7 - G1 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 173.18 Hz

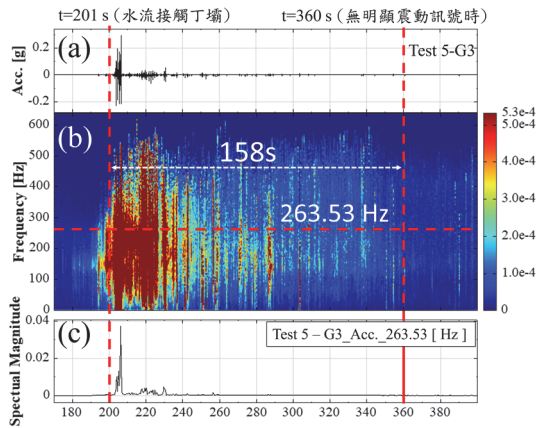


圖 19 Test 5 - G3 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.19 Test 5 - G3 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 263.53 Hz

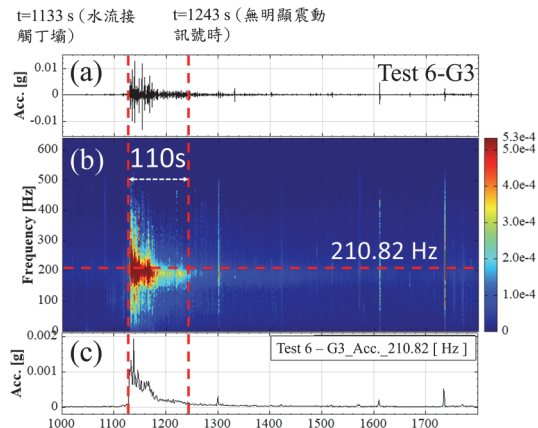


圖 20 Test 6 - G3 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.20 Test 6 - G3 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal, (b) Time-frequency diagram, (c) Spectral value profile of 210.82 Hz

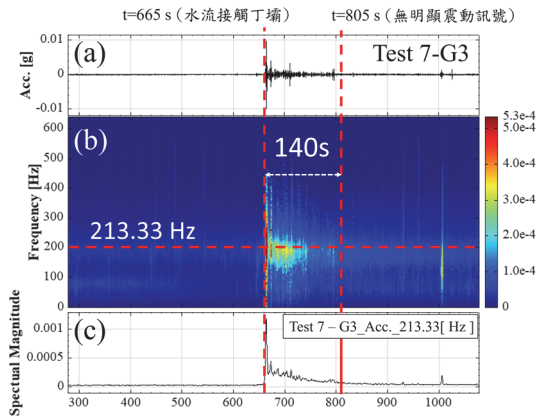


圖 21 Test 7 - G3 河岸邊加速度規 (a) 震動訊號 (b) 時頻圖 (c) 頻譜值剖面圖

Fig.21 Test 7 - G3 acceleration at riverbank: (a) Seismic signal (b) Time-frequency diagram (c) Spectral value profile of 213.33 Hz

(2) 上游入流量對於潰壩速度之影響

本項研究為了探討入流量對於潰壩速度之影響，以加速度規收錄的震動訊號與試驗影像分析上游入流量對於潰壩速度之影響。

蓄水時間的長短依次為 D7 (558 秒) > D8 (281 秒) > D6 (76 秒)。本研究以壩體高度侵蝕程度達到 50% 和 90% 作為潰壩速度的指標。經影像分析後整理出的數據(表 3)顯示，壩體侵蝕程度從 50%至 90%所需的延時依次為 D8 (140 秒) > D6 (88 秒) > D7 (83 秒)。Test 5 至 Test 7 的潰壩速度分別為 D6 (330 秒)、D7 (96 秒)、D8 (250 秒)。

表 3 壩體侵蝕百分比與時間對照表

Table 3 Dam Erosion Percentage vs. Time

壩體編號	侵蝕百分比	侵蝕時間 sec	時間差 sec
D6	50%	240	0
	90%	328	88
D7	50%	1462	0
	90%	1545	83
D8	50%	703	0
	90%	843	140

其中，Test 5 因壩頂發生溢頂，潰壩速度顯著較快，而 Test 6 和 Test 7 僅發生溢頂，因此上游入流量對其潰壩速度的影響較小。由此本研究認為潰壩速度與上游入流量呈正相關關係。當上游蓄水時間從 558 秒(Test 6)縮短至 281 秒 (Test 7) 時，潰壩速度提高了約 25%，潰壩時間從 120 秒減少至 90 秒。這表明上游入流量對潰壩速度具有顯著影響。

然而，當不同試驗組的上游入流量差異較小時，潰壩速度未顯著改變。例如，Test 5 和 Test 6 的上游入流量變化不大，但潰壩速度顯示出相似的趨勢。這可能是因為當流速達到一定閾值後，其對壩體結構的影響趨於「飽和」，難以進一步加快潰壩速度。

就試驗結果顯示，上游入流量在一定範圍內能夠顯著影響潰壩速度，但當入流量的變化幅度有限時，潰壩速度的改變可能受到限制。

四、結 論

本研究共進行 7 組現地試驗，利用 Hilbert-Huang Transform 進行分析獲得震動訊號的時頻圖與頻譜值，用以探討現地小型堰塞壩潰決產生之震動特性。本研究也針對蓄水歷時、壩體位置及丁壩設置對潰壩過程的影響進行了討論。根據七組試驗結果，本研究發現壩體在蓄水過程中的震動主要受蓄水歷時影響。蓄水時間越短，壩體震動訊號變化越劇烈。水體潰決速度越快，震動能量越強。上游入流量大，壩體潰決時間將提早。壩體下游的丁壩震動強度與至潰口的距離成反比關係。本研究也證實因為有丁壩下游的震動能量較小，侵蝕也較小。

本研究也獲得以下重點結論：

1. 當蓄水時間較長與水體量大時，壩體下游更容易發生滲流破壞，震動訊號亦隨之增強。
2. 隨著蓄水體積的增加，潰壩洪水的震動能量增強，尤其是在壩體受到急遽下切時，震動強度明顯提升。
3. 下游丁壩受上游丁壩保護，震動能量逐級減弱。
4. 入流量越大，丁壩受到的衝擊震動能量越大，特別是蓄水時間縮短並於壩頂發生溢頂時，丁壩震動能量的強度和持續時間均增加。
5. 當蓄水歷時越短時，壩體潰壩速度也越快。然而若上游入流量無顯著變化，潰壩速度的變化將受到限制。

本研究僅獲得壩體與丁壩的震動訊號，其數據可為未來小型潰壩模型試驗之參考。建議後續研究可加入量測潰壩試驗中的聲音訊號，進一步探討潰壩機制。此外，可針對不同的丁壩尺寸與配置對潰壩洪水侵蝕的防護成效進行探討，亦可再分析不同入流量條件下壩體材料、結構與破壞機制的關係。

五、致 謝

感謝國科會給予本研究經費支持（計畫編號 112-2625-M-005-012-），使得本研究能順利進行，在此致謝。

參考文獻

- [1] Huang, N., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., and Liu, H.H. (1998). "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903-995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [2] Feng, Z.-Y., Huang, H.-Y., and Chen, S.-C. (2020). "Analysis of the Characteristics of Seismic and Acoustic Signals Produced by a Dam Failure and Slope Erosion Test." *Landslides*, 17(2), 1605-1618. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01390-x>
- [3] Hung, C.-Y., Tseng, I.-F., Chen, S.-C., and Feng, Z.-Y. (2021). On Dam Failure Induced Seismic Signals Using Laboratory Tests and on Breach Morphology due to Overtopping by Modeling. *Water*, 13(19), 2757. <https://doi.org/10.3390/w13192757>
- [4] Hanson, G., Cook, K., and Hunt, S. (2005). "Physical Modeling of Overtopping Erosion and Breach Formation of Cohesive Embankments." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48, 1783-1794. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.20012>
- [5] Ghonim, M., Jatwary, A.A.E.-H., Mowafy, M.H., Zelenakova, M., Abd-Elhamid, H.F., Omara, H., and Eldeeb, H.M. (2024). "Estimating the Peak Outflow and Maximum Erosion Rate During the Breach of Embankment Dam." *Water*, 16(3), 399. <https://doi.org/10.3390/w16030399>
- [6] Criss, R.E. (2024). "Dynamics of River Flood Waves Below Hydropower Dams and Their Relation to Natural Floods." *Water*, 16(8), 1099. <https://doi.org/10.3390/w16081099>
- [7] Tabassum, R., Guguloth, S., Gondu, V.R., and Zakwan, M. (2024). Scour depth dynamics in varied spacing spur dike configurations: A comprehensive analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 135, 103638. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103638>

2025 年 01 月 23 日 收稿

2025 年 03 月 07 日 修正

2025 年 09 月 10 日 接受