

土壩暫態滲流及壩體振動頻率之分析與模擬

馮正一^[1*] 李承祐^[2] 吳威廷^[2] 許冠羿^[2] 文雋亞^[2]

摘要 本研究旨在透過數值模型模擬壩體在蓄水過程中的暫態滲流現象，並倒算壩體的滲透係數。本研究亦分析壩體在蓄水過程中的震動頻率是否有下降的趨勢，並將結果與現地量測的震動訊號進行比對。研究方法採用 FLAC2D 有限差分程式進行數值模擬，模擬蓄水過程時，以階段性水位上升來進行。壩體的自然震動頻率則透過初步變頻掃描與細部定頻共振計算方法來確定。本研究在這大型雙壩潰壩現場試驗中，測量了第一個壩體內的水位和震動訊號，並將結果與模擬結果進行比較。經倒算模擬後，土壩的滲透係數為 0.008 m/s。本研究也證實了壩體的自然震動頻率隨著蓄水位升高而下降，這一趨勢與現場監測到的震動頻率變化一致。

關鍵字：潰壩、暫態滲流、震動頻率、FLAC2D、倒算

Analysis and Simulation of Transient Seepage and Vibration Frequency in an Earth Dam

Zheng-Yi Feng^[1*] Cheng-Yu Lee^[2] Wei-Ting Wu^[2] Kuan-Yi Hsu^[2] Chun-Ya Wen^[2]

ABSTRACT This study investigated the transient seepage of an earth dam during reservoir impounding through numerical modeling and back-calculated the dam's permeability coefficient. Additionally, the potential trend of decreasing natural vibration frequency with increasing water level in the reservoir was explored through a comparative evaluation of the numerical results against field-measured vibration signals. The FLAC2D finite difference code was used to conduct the numerical simulations; the reservoir filling process was modeled in a staged manner by incrementally increasing the water level. The natural vibration frequency of the dam was identified using a combination of preliminary frequency sweep techniques and detailed resonance calculation methods.

The water levels and vibration signals of the dam were measured during a large-scale double breach field test, and the results were systematically compared with those obtained from the numerical simulations. Through back-calculation, the permeability coefficient of the earth dam was estimated to be 0.008 m/s. The results also confirmed that the natural vibration frequency of the dam decreased as the reservoir water level increased, a trend consistent with the changes in vibration frequency observed during field monitoring.

Key Words: dam breach, transient seepage, vibration frequency, FLAC2D, back-calculation

前 言

堰塞壩和土壩的潰決事件對生命財產安全構成嚴重威脅，例如 2009 年莫拉克颱風導致小林村的崩塌形成堰塞壩，最終潰決，重創下游設施。根據 Zhong, et al. (2021) 的研究，壩體潰決主要由溢頂、滲流及結構性破壞引發，其中水流對壩體或地基的侵蝕是關鍵因素。土壩潰決可能由滲流導致管湧而發生，滲透性高的土壩和蓄水位上升會加劇這一風險，進而導致潰壩。

過去的研究中，學者們普遍專注於土壤穩態滲流研究，而對於暫態滲流的研究相對較少。例如：Feng, et al. (2006) 以 FLAC2D 程式模擬鯉魚潭土石壩築壩過程之壩體受力行為，並計算壩體蓄水穩態滲流後之靜態起始應力也進行了壩體

受集集地震作用之動態反應分析，但是該研究並未探討壩體的暫態滲流。Kheiri, et al. (2020) 使用有限元素法 SEEP/W 程式對堤壩進行了建模，模擬了堤壩內滲流場的分佈和動態變化，以評估壩體和基礎材料的滲流特性。該研究比較了數值模擬與物理模型的結果，證明了數值模擬在評估滲流量和滲透性等的精確度。Ventini, et al. (2021) 以室內縮尺試驗與 SEEP/W 模擬河堤的暫態滲流行為，研究成果包括不同階段的暫態孔隙水壓力分佈等。此研究發現當河堤在高水位階段發生急洩降時，河堤仍接近飽和狀態，但不再存在圍壓來抵抗河堤剪切強度的降低，這導致河堤的穩定性快速衰減，此研究強調了暫態滲流分析的重要性。

Okeke, et al. (2016) 提及滲流管湧現象對於壩體潰決的風險相當重要，而壩體滲流行為與滲透係數密切相關。因此

[1] 國立中興大學水土保持學系教授
Professor, Dept. Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taiwan

[2] 國立中興大學水土保持學系研究生
Graduate Student, Dept. Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taiwan

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

掌握滲透係數能夠幫助判斷壩體是否會因為滲透係數過高而導致該現象。但由於本研究的壩體夯實程度存在差異，築壩過程中因大型機具施工無法進行現地透水試驗，又現場土壤的粒徑較大，取樣至試驗室進行試驗也相較困難，因此無法以現場或試驗室試驗來獲得滲透係數。故本研究建立數值模型倒算滲透係數，以現場壩體內所量測的水壓來比對，完成壩體滲透係數的倒算。

梁正育 (2008) 使用有限差分 FLAC3D 程式，對寶山第二水庫築壩的過程進行模擬，探討壩體在施工過程中的受力行為與蓄水後的壩體滲流、力學特性。梁正育 (2008) 為了瞭解壩體的自然振動頻率，其研究中在壩體數值模型底部施加多頻率的外力正弦震波，紀錄壩體的歷時反應。隨後進行快速傅立葉轉換(FFT)，以確定其振動頻率。

Feng, et al. (2020) 於大型潰壩試驗中收錄崩塌與洪水產生之震動訊號與聲波訊號，利用希爾伯特-黃轉換(HHT)對震動訊號與聲波訊號進行時頻分析，並對其訊號特徵潰壩過程進行討論。該研究並未探討水體入滲後壩體震動訊號的分析。因此本研究在現場土壩模型上安裝了加速度規，用於記錄潰壩試驗過程中產生的震動訊號，以分析水體入滲壩體後震動頻率的變化趨勢。

本研究目的有二：(1) 以 FLAC 有限差分程式模擬壩體內暫態滲流，再與實際監測的水位進行比對，倒算出壩體的滲透係數，再計算壩體暫態滲流下的變形。(2) 以 FLAC 分析壩體在蓄水水位上升過程中之震動頻率變化情形，並與現地量測之震動訊號進行比對，以確認壩體在蓄水過程中，震動頻率是否有下降的趨勢。本研究資料來自一場大型雙壩潰壩試驗的結果，同時進行現場試驗結果分析與數值模擬比對。

研究方法

1. 現場試驗監測儀器配置

本研究於 2021 年 11 月 04 日在南投縣仁愛鄉惠蓀林場二號橋下的蘭島溪床進行了雙壩潰壩試驗，壩體之間間距約為 30 公尺，溪床坡度約 6°。我們僅針對第一個壩 (Dam 1) 進行研究與量測。該壩體所使用的材料為現場溪床的礫石，形成一個高度約 3.53 公尺、壩軸長約 22 公尺、壩頂寬約 3 公尺的壩體，並在壩頂預留了一個寬約 3.6 公尺、深約 0.5 公尺的溢流口。當試驗開始時，蘭島溪上游的能高大圳開始放水，水流經過數分鐘後會到達 Dam 1 的上游面並開始蓄水，試驗場空拍上視圖如圖 1。當蓄水高度達到壩體頂部時，壩體將發生溢頂，進而引發溢頂潰壩現象，導致 Dam 1 破壞，水流將流向第二個壩 (Dam 2)。主要的研究標的 Dam 1 之儀器配置如圖 2 所示。加速度規 d1ch1 測量平行水流 X 方向的震動訊號；加速度規 d1ch2 與 d1ch3 則是測量垂直水流 Y 方向的震動訊號。主要裝設的儀器如下：

1. 731A 型加速度規：此類加速度規之影響範圍為 0.05~450 Hz，靈敏度為 10 V/g。目的為記錄壩體受滲流影響所產生的震動訊號。
2. Geostar 9590 自記式水壓計：使用電池供電，通過設定讀

取頻率，可以連續記錄壓力的變化。其目的是量測水體抵達該處時之水壓後，再換算該處之水位。

3. HOBO U20-U20L 壓力式水位計 (Water level logger)：為 Onset 公司之產品，量測範圍為 0~9 m。最後再把水壓數據轉換成水位。



圖 1 試驗場空拍上視圖 (拍攝日期：2021/11/04)

Fig.1 Aerial view of the test site

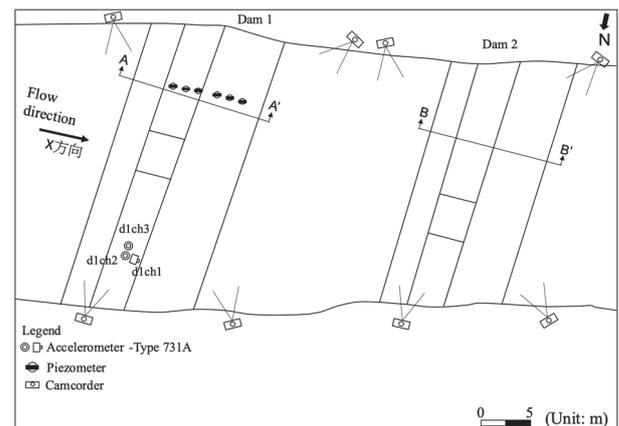


圖 2 現場試驗儀器配置圖

Fig.2 Layout of field test equipment

2. FLAC 2D 有限差分程式簡介

Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) 是一種基於有限差分法為理論的數值模擬工具，透過力平衡方程式、柯西公式 (Cauchy formula) 及高斯散度定理 (Gauss divergence theorem) 來計算節點的力與速度 (Itasca, 2016)。FLAC 考慮物質的物理特性、邊界條件和外部載重，以時階 (time step) 求解每一個節點的動量平衡，用來預測土體的力學行為。

FLAC 中滲流原理是根據運動學定律和 Darcy 定律來描述水的運動行為，其方程式如下：

$$q_i = -k_{ij}k(s) \frac{\partial}{\partial x_j} (P - \rho_w g_k x_k) \quad (1)$$

公式中之 q_i 為流體之流量， k_{ij} 為流動係數 (mobility coefficient)， $k(s)$ 為相對滲透性， P 為流體壓力， ρ_w 為流體質量密度。

在滲流分析中，FLAC 假設土壤是一個多孔介質，水分

子則可在多孔介質中運動。因此可以用運動學定律來描述水的運動。根據 Darcy 定律, 水的運動速度與滲透壓梯度成正比, 與孔隙率和滲透率成反比。所以, FLAC 模型中的滲流速度可以通過求解方程式得到。

3. 數值模擬壩體暫態滲流

FLAC 中一個網格單位稱為元素 (zone), 每次計算以時階 (time step) 為一個單位。滲流計算可與力學計算無關, 也可一起耦合計算。本研究採用非耦合 (uncouple fluid-mechanical calculation) 的方法數值模擬壩體的暫態滲流行為。全耦合 (couple fluid-mechanical calculation) 的數值模擬方案具有較高的精度, 但需要較長的計算時間。相比之下, 非耦合的數值模擬方案可以在較短的時間內獲得壩體內部滲流情況, 並且與全耦合的模擬結果相差不大。

本研究首先建立壩體和河床的有限差分網格。分析模式則採用「莫爾庫倫模式」。壩體模型的尺寸平均約高 4 m、壩頂寬度 3.5 m、壩底 15 m (圖 3)。圖 3 也顯示本研究對邊界條件的設定, 模型底部為不透水邊界, 地表為自由表面邊界 (Free surface), 兩側為“Pore pressure fixed”的邊界。本研究指定了壩體材料和河床的滲透係數, 假設地下水位靠近溪床表面, 再計算此滲流模型達到平衡狀態, 即完成地下水位初始條件的設定。本研究基準面(Datum)的水位高程是在 FLAC 座標軸為 (0,0) 的地方, 同時設定“Height of Water Retained” (H.W.R.) 是從壩體上游壩趾為基準點。接下來本研究根據現場試驗監測到的水位來指定壩體上游面的水位, 以計算壩體內水位上升和下降的暫態滲流現象。

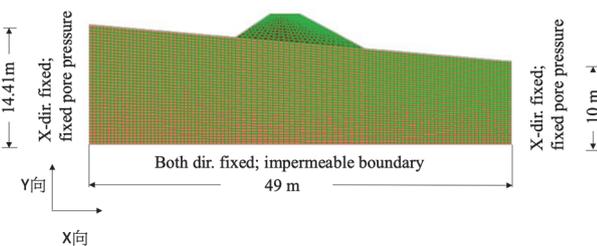


圖 3 滲流計算網格與邊界條件設定

Fig.3 Seepage calculation mesh and boundary condition setup for dam and riverbed

4. 震動訊號分析方法

根據動力學方程式如公式 (2), 質量 (m) 的上升與勁度 (k) 的下降皆會造成角頻率 (ω) 的下降。壩體在蓄水時水會滲入壩體, 此時壩體質量會上升。另一方面, 水同時會軟化土壤顆粒, 使得土壤的勁度下降。因此, 依照此方程式, 壩體的震動頻率會隨著壩體內部滲流水位的上升而下降。

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

其中, ω 為角頻率; k 為勁度; m 為質量。

在現場試驗震動訊號處理上, 本研究採用 Visual Signal

v1.6 (AnCAD, Inc., 2018) 來進行原始訊號之濾波及傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform)。因考慮到壩體的自然震動頻率主要位在低頻, 本研究濾除掉頻域較高的原始訊號 (40 Hz 以上)。將濾波後之原始訊號進行傅立葉轉換以找出震動能量集中的頻率處, 再對 FFT 圖進行一次慣性矩計算, 即可獲得平均頻率(能量較強的頻率位置), 以進行平均頻率 (f) 與蓄水位比較。本研究將現場試驗蓄水時量測的原始訊號分為多個階段, 分別對應壩體上游水位達到 1 m、1.25 m、1.5 m、1.75 m、2 m、2.25 m 和 2.5 m。這是為了去除掉蓄水初期工作人員於壩頂走動的時段。每個水位階段皆取 50 秒進行分析, 以判斷在蓄水高度上升的情況下, 震動能量集中的頻率是否有下降的趨勢。

5. 壩體之自然頻率計算

本研究根據動力學的原理 (公式 2) 推測壩體在暫態滲流中, 壩體之自然頻率會有慢慢降低的趨勢。為了驗證這一點, 此項研究建立壩體的動態數值模型分成 A、B 兩步驟進行分析 (如圖 4), 計算在不同滲流階段壩體的自然頻率。

當壩體的自然頻率與強迫振動的頻率相近時, 壩體將產生共振, 使得振幅增加, 進而產生更大的位移量。根據上述原理, 本項研究使用 FLAC 中的 FISH 語言來撰寫速度函數, 以正弦波來指定:

$$v(t) = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

其中, A 為振幅, ω 為角頻率 ($\omega = 2\pi f$), 而 f 為強迫振動的頻率。

為確保土壩能維持在彈性範圍內, 本研究將速度振幅設為 1×10^{-6} m/sec。再把不同頻率的速度函數輸入到模型底部, 藉此對壩體產生強迫振動。

本研究的 A 步驟建立了一個迴圈副程式, 設定強迫振動頻率範圍 10 Hz 到 14 Hz, 每組頻率間的增量為 0.025 Hz, 總共 160 組頻率。每組頻率的速度函數皆施加在壩底 3 秒鐘。通過監測壩體模型頂部節點的位移量 (水平 X 座標方向), 尋找出最大位移出現的時間點。在該時間點, 正弦波使用的輸入頻率 (f) 與壩體的自然頻率可能非常接近。這個方法可以快速判定壩體可能發生共振現象的頻率範圍。

接著進行 B 步驟驗證該輸入頻率是否為壩體發生共振的自然頻率, 此步驟改以單一頻率的正弦波, 施加到壩底進行 100 秒的動態分析。當物體在特定頻率下產生共振, 物體的振幅會不斷增大。因此, 可以觀察壩體頂部的位移量是否符合這一物理現象。如果數值模擬結果不符合共振特性, 可調整該頻率並重新以單一頻率的速度函數輸入至壩底, 再以試誤法找到壩體的共振頻率。

本研究自然頻率計算網格如圖 5 所示。在進行動態分析以前, 先使壩體達到靜力平衡。底部邊界設為固定 (fixed), 壩體材料設為彈性無阻尼係數。本研究設定了壩體上游水面的水位為三種不同情況, 包括無水位、低水位 (1.5 m) 和高水位 (2.25 m)。藉此觀察水流入滲後壩體自然頻率的變化, 以佐證現場監測到的震動頻率趨勢。

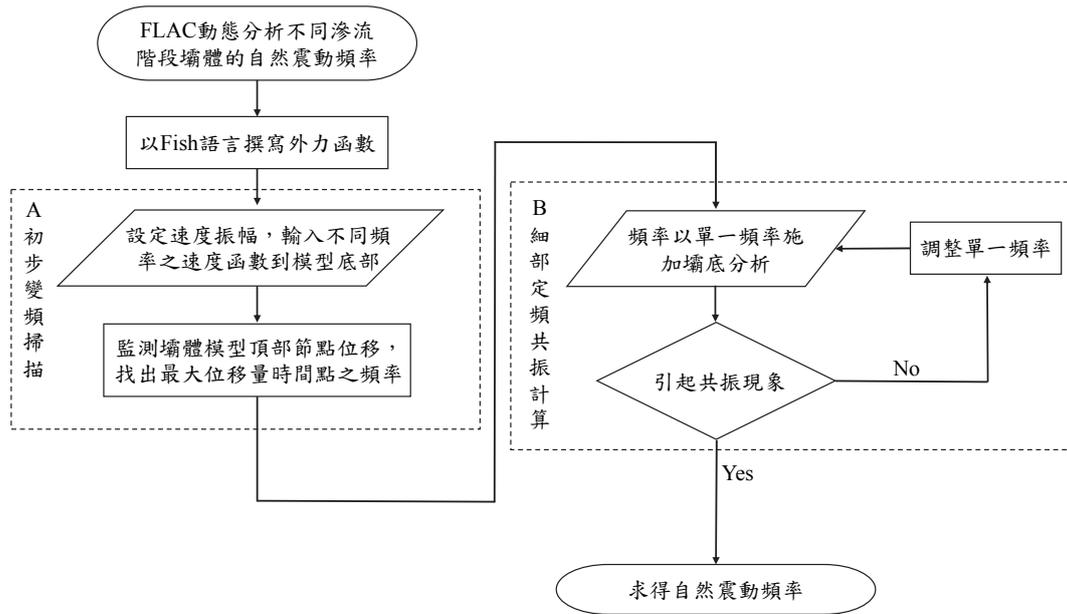


圖 4 自然頻率計算流程

Fig.4 Procedures of natural frequency calculation

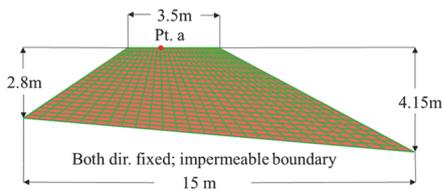


圖 5 自然頻率計算網格- 壩體之 FLAC 數值模型與邊界條件設定

Fig.5 Natural frequency calculation mesh - FLAC numerical model and boundary condition setup for the dam

6. 材料及參數設定

本研究在 FLAC 程式中建置了惠蓀林場人工壩體及天然河床的數值模型，網格數採 104×50=5200 個網格。輸入地層之材料參數包括體積模數 (Bulk modulus)、密度、滲透係數、剪力模數 (shear modulus)、凝聚力、柏松比、摩擦角等 (如表 1)。

本研究在滲流模擬中假設壩體之剪力波速為 150 m/s，

表 1 FLAC 數值模擬之材料參數

Table 1 Material parameters for FLAC simulation

| | Dam (Baseline) | Riverbed | Dam (Case1) | Dam (Case2) |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Bulk modulus (N/m ²) | 2.1 × 10 ⁷ | 5.22 × 10 ⁷ | 1.89 × 10 ⁸ | 5.25 × 10 ⁸ |
| Density (Kg/m ³) | 1800 | 2000 | 1800 | 1800 |
| Shear modulus (N/m ²) | 4.5 × 10 ⁶ | 2 × 10 ⁷ | 4.05 × 10 ⁷ | 1.13 × 10 ⁸ |
| Cohesion (kPa) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Poisson's ratio | 0.4 | 0.33 | 0.4 | 0.4 |
| Friction angle | 34 | 40 | 34 | 34 |
| Permeability (m/sec) | 8 × 10 ⁻³ | 8 × 10 ⁻³ | 8 × 10 ⁻³ | 8 × 10 ⁻³ |
| Porosity | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

柏松比則設定為 0.4；河床的剪力波速則為 150 m/s，柏松比則設定為 0.33，體積模數與剪力模數由剪力波速之公式推估，如下所示：

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{4}$$

$$K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \tag{5}$$

上述公式中，V_s 為剪力波速 (m/s)，G 為剪力模數 (N/m²)，ρ 為單位重 (kg/m³)，K 為體積模數 (N/m²)，ν 為柏松比 (Poisson's ratio)。

而在模擬壩體在暫態滲流中之自然頻率變化中，本研究假設了不同的剪力波速情境。基線案例的剪力波速為 150 m/s，Case 1 的剪力波速為 50 m/s，而 Case 2 的剪力波速為 250 m/s，且柏松比皆設定為 0.4。以便進行後續比較和評估壩體在不同剪力波速度下的自然頻率變化。本研究壩體的材料參數的指定，也參考了 Feng et al. (2021) 說採用之參數，該研究之場子，也是在惠蓀林場的蘭島溪。

結果與討論

1. 現地暫態滲流試驗與 FLAC 數值模擬分析結果

(1) 現場試驗壩體暫態滲流情形

我們在 2021 年 11 月 04 日在蘭島溪進行現場雙壩潰壩試驗，針對第一個壩 (Dam 1)，安裝了水壓計量測蓄水過程中壩內暫態滲流情形，以倒算壩體之滲透係數。監測結果如圖 6 所示。

圖 6(a) 顯示 1280 s 至 1880 s 壩體蓄水達到壩體上游面的最高點 (水位上升階段) 的水位面變化。圖 6(b) 顯示 1880 s 至 2280 s 潰壩過程中壩體上游水位下降階段的水位面變化，亦可見壩體上游水位下降的速度很快，壩體內水位面也隨著時間下降，水體主要由壩體上游面滲出。圖 6(c) 為 2280 s 至 2680 s 壩體內水位面下降速率變慢、漸漸趨於穩定。這是因為壩體上游面水位變化已經很小。

(2) 壩體暫態滲流數值模擬分析

FLAC 模擬結果包含孔隙水壓力分佈(含水位線)、等勢能線，如圖 7 所示。這些圖顯示在壩體上游面達到 1 m、1.75 m、2.63 m (最高水位) 時的數值模擬結果。本研究將數值模擬與現場實測的水位分佈進行比較 (圖 8)，倒算壩體的滲透係數為 0.008 m/s 時為最佳擬合結果。

這個滲透係數 (0.008 m/s) 雖然偏大，但因壩體的材料是由溪床既有的粗顆粒板岩碎屑所堆積而成，故本研究認為這滲透係數尚屬合理。這也使得水體快速進入壩體後，上游面退水之後，水迅速滲出壩體上游面。

經過本數值模擬水位設定為 (1 m, 1.75 m, 2.63 m) 分階段增高的水位下，壩體的最大位移量顯示在圖 9。隨著水位上升，壩體的變形逐漸增加，網格內最大的變形為 1.604×10^{-3} m (圖 9c)，可見地下水位在滲流

階段導致壩體變形量非常小，在蓄水階段如此小的變形量不會對壩體造成穩定性問題。

我們繼續討論一個情境，就是如果該數值模型繼續進行較長時間的滲流計算。地下水位將在壩體下游坡面出露，代表水流滲出了下游壩趾。這也將導致壩趾處的網格有效應力成為零，使得數值計算無法收斂、數值不穩定計算而終止。這情境可以讓我們理解到實際情況下 (real world)，一般壩體下游面如有水流滲出，有可能導致下游面土體漸漸流失、侵蝕。

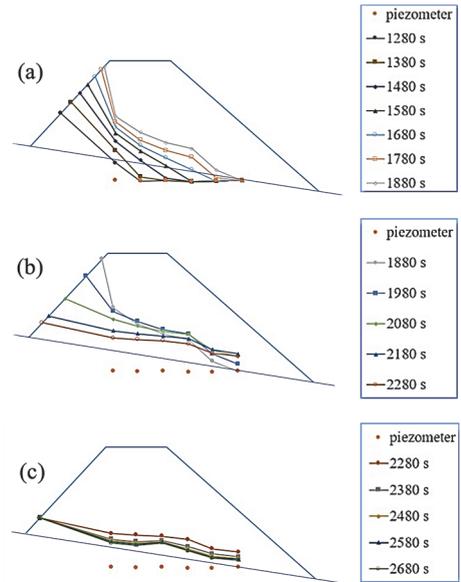


圖 6 (a) 壩體內部 1280-1880s 水位變化 (b) 壩體內部 1880-2280s 水位變化 (c) 壩體內部 2280-2680s 水位變化 (註：水抵達壩上游面坡趾的時間 t=1096 s)

Fig.6 (a) Variation of water level inside the dam from 1280 to 1880s (b) Variation of water level inside the dam from 1880 to 2280s (c) Variation of water level inside the dam from 2280 to 2680s (Note: The water reached the toe of the upstream slope of the dam at time t = 1096 s.)

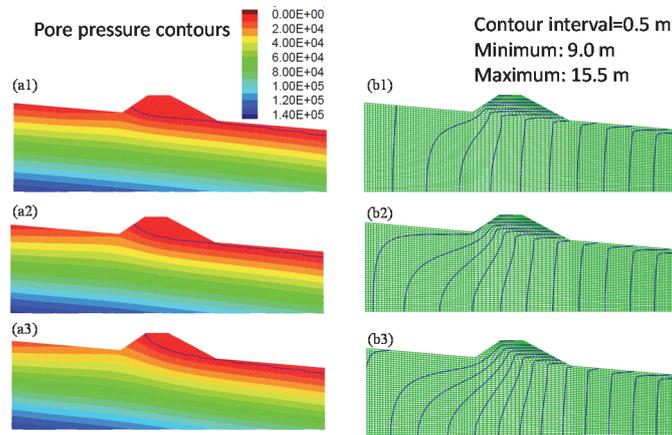


圖 7 孔隙水壓力分佈：上游水位(a1) 1 m, (a2) 1.75 m, (a3) 2.63 m；與等勢能線分佈：上游水位(b1) 1 m, (b2) 1.75 m, (b3) 2.63 m

Fig.7 Pore water pressure distribution: Upstream water levels (a1) 1 m, (a2) 1.75 m, (a3) 2.63 m; Equipotential line distribution: Upstream water levels (b1) 1 m, (b2) 1.75 m, (b3) 2.63 m

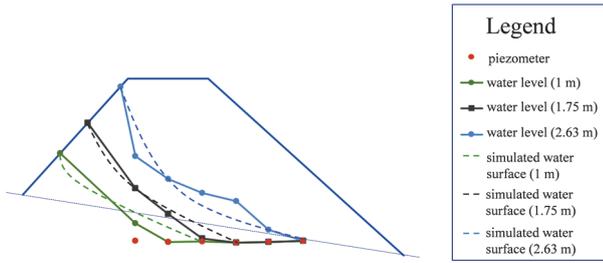


圖 8 量測水位面與模擬水位面比較
Fig.8 Comparison of the measured water level and simulated water level

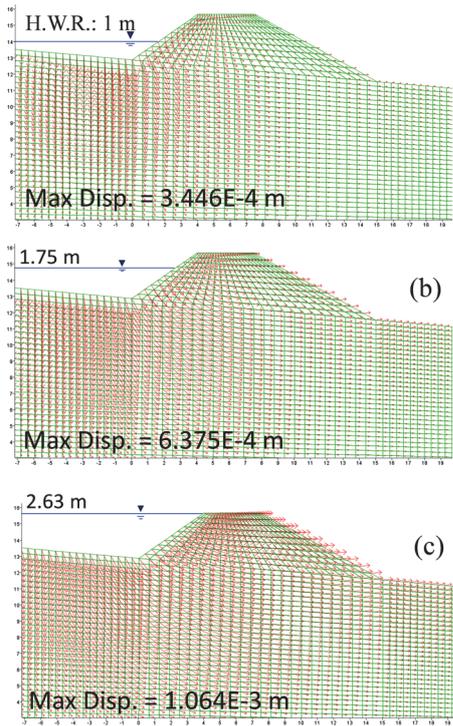


圖 9 (a)上游面達 1 m 時之位移向量 (b) 上游面達 1.75 m 時之位移向量 (c) 上游面達 2.63 m(最高水位) 時之位移向量 (註 H.W.R.: Height of Water Retained)
Fig.9 (a) Displacement vector when the upstream water level reached 1 m (b) Displacement vector when the upstream water level reached 1.75 m (c) Displacement vector when the upstream water level reached 2.63 m (highest water level) (Note: The H.W.R. stands for height of water retained)

2. 現地壩體震動試驗與 FLAC 數值模擬結果

(1) 現場試驗壩體振動頻率

本試驗將壩體 Dam 1 蓄水時段中的震動訊號以不同水位高度進行傅立葉轉換分析以獲得 FFT 圖 (透過 FFT 圖可得知能量在不同頻率上的分佈情形), 再對 FFT 圖進行形心 (centroid) 計算獲得平均頻率 (能量較強的頻率位置), 便可比較平均頻率 (f) 與壩體蓄水水位的關係。從中可觀察是否壩體內因滲流水體的增加, 而使得壩體的平均頻率降低。

圖 10 為 Dam 1 壩頂加速度規 d1ch1 在蓄水時各

時段震動訊號之 FFT 圖。加速度規 d1ch1 量測 x 向震動, 即平行於水流方向之震動。圖 10 內之震動訊號選定 0~40 Hz 進行的分析, 主要是為了避開雜訊干擾。最後把所獲得之各階段平均頻率呈現於圖 11。

根據圖 11, 本研究觀察到壩體 Dam 1 在蓄水狀態下, 各時段的平均頻率大致呈下降趨勢。然而, 在上游水位達到 2.5 m 時的平均頻率卻呈上升趨勢。本研究推斷, 當水位達到 2.5 m 時, 水流已經接近穩定狀態, 且部分上游面土體開始崩落、壩頂也發展出縱向裂縫產生諸多雜訊, 可能影響到此時的震動反應與頻率, 導致在 2.5 m 水位下平均頻率上升的現象。總體而言, 在蓄水過程中平均頻率仍然呈下降趨勢。又水位在 1 m 左右時, 現場水流激烈衝擊上游面壩趾, 可能因此導致振動頻率上升, 約 28 Hz (圖 11)。如果去除 1 m 與 2.5 m 水位資料點來比較, 僅考慮 1.25 m 至 2.25 m 水位之資料點, 震動頻率大約下降為 97.1%(23.816 Hz/24.52 Hz)。

綜合以上結果可得知, 震動訊號在蓄水過程中的平均頻率呈現下降趨勢。這種頻率下降的現象, 一般被視為壩體的一種弱化指標。

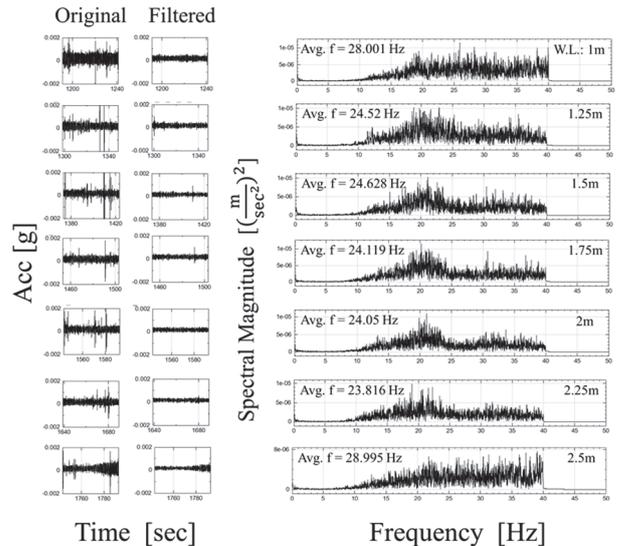


圖 10 蓄水時 x 向震動訊號分析 (原始訊號、濾波後訊號 (<40 Hz) 與 FFT 頻譜圖)

Fig.10 Analysis of x-direction vibration signal during water impounding (original signals, filtered signals (<40 Hz) and the FFT spectra)

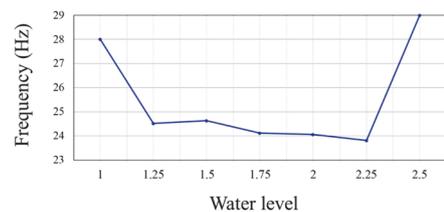


圖 11 不同蓄水水位下之壩體平均頻率變化
Fig.11 Average frequency variation of the dam under various impounding water levels

(2) 數值模擬壩體振動頻率變化趨勢

圖 12 顯示了壩體無水位案例的頂部位移量歷時圖。在動態分析中，本研究使用了多頻率的迴圈副程式，初始頻率設定為 10 Hz，每組頻率間的增量為 0.025 Hz，並在最終頻率達到 14 Hz 時結束。總共進行了 160 組頻率的模擬，每組速度函數均在壩底施加並持續作用 3 秒鐘，整體模擬時間長達 480 秒。分析結果發現使用 13.625 Hz 頻率的速度函數時，壩體頂部的位移達到了最大值。這表示壩體在此頻率下可能會產生共振現象。

為了驗證壩體自然頻率是否為 13.625 Hz，改用單一頻率的速度函數，並將其施加到壩體底部，進行了長達 100 秒的模擬。然而，數值模擬結果並未呈現出共振的特性。也就是將 13.625 Hz 的強迫振動頻率施加到壩體時，壩頂的位移向量並未隨著時間的增加而逐漸增大，這與共振特性相悖。因此，本研究對微調了速度函數的頻率，再進行計算。最終獲得在無水位的情況下，壩體的自然頻率為 13.61 Hz。

圖 13 為壩體上游面無水位、1.5 m、2.25 m 時的孔隙水壓分布圖與壩頂監測點位移的變化情況。根據數值模擬的結果顯示，在壩體上游面水位達到 1.5 m 時，其自然頻率為 13.565 Hz；而當壩體上游面水位達

到 2.25 m 時，其自然頻率則為 13.295 Hz。根據模擬結果，可以看到壩體在所選定的頻率下呈現出共振特性。這表示當強迫震動的頻率為壩體的自然頻率時，振幅會隨著時間的增加而逐漸增大。

根據以上數值模擬結果得以下結論：當壩體內部水位上升時，壩體的自然頻率會下降。這一頻率變化在圖 13 中呈現。最高水位之自然頻率相較於最低水位時，下降成為 13.295 Hz/13.61 Hz=97.69%。然而，需要注意的是數值模擬是倒算壩體的自然頻率，而現地試驗所量測的是壩體在蓄水過程中的微震頻率，兩者物理條件存在差異，但是同樣都呈現震動頻率下降的趨勢。

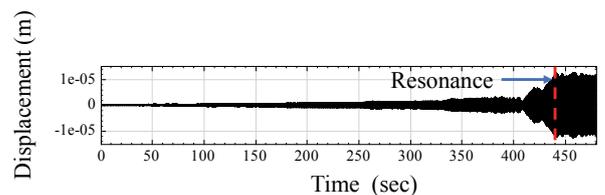


圖 12 壩頂監測點(Pt. a)之位移歷時曲線 (f=10~14 Hz, t=480 s)

Fig.12 Displacement history at the dam crest monitoring point (f = 10~14 Hz, t = 480 s)

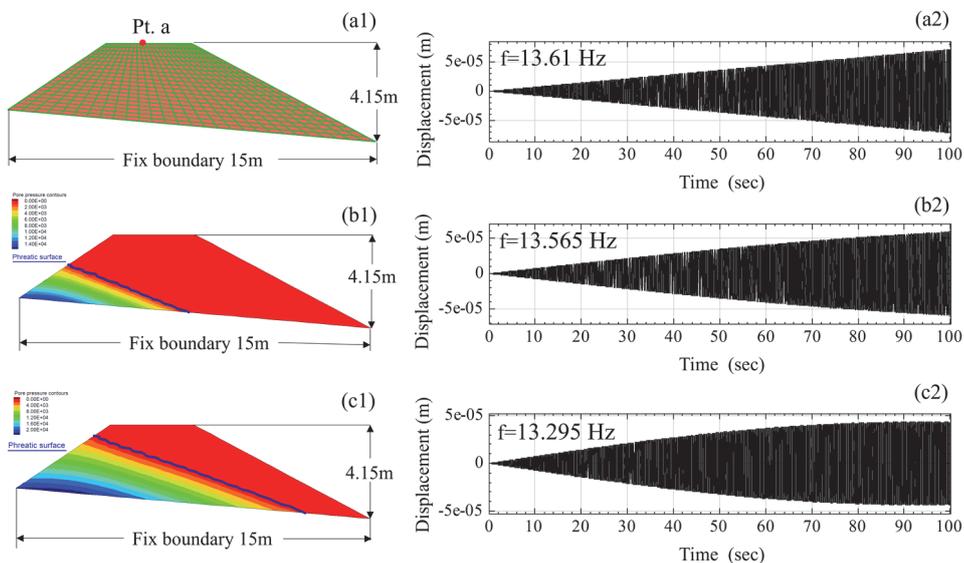


圖 13 自由水位面與孔隙水壓分布 (a1) 無水位 (a2) 上游水位 1.5 m (a3) 上游水位 2.25 m ; Pt. a 之位移量歷時曲線 (b1) 無水位 (b2) 上游水位 1.5 m (b3) 上游水位 2.25 m

Fig.13 Phreatic surface and pore water pressure distribution: (a1) No water level (a2) Upstream water level: 1.5 m (a3) Upstream water level: 2.25 m; Displacement time history curve of Pt. a: (b1) No water level (b2) Upstream water level: 1.5 m (b3) Upstream water level: 2.25 m

3. 參數分析結果

為了比較壩體材料在不同勁度的指定之下，其自然頻率之差異。本研究指定了三個剪力波速 (Case 1: 50 m/s, Base-line Case: 150 m/s 及 Case 2: 250 m/s) 來計算壩體材料的彈性模數(Shear modulus, G; bulk modulus, K)。計算結果顯示，

當壩體材料的剪力波速越高，勁度就越高，其自然頻率也越高 (圖 14a)。不論壩體剪力波速高低，當壩體上游面的水位高時，壩體自然頻率皆較低。這可由圖 14a 正規化為圖 14b 中來判讀，亦可得知在這三種剪力波速下，自然頻率下降的幅度很接近。

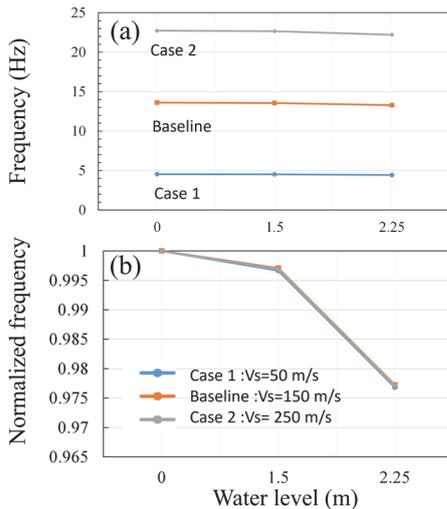


圖 14 壩體在蓄水時振動頻率計算結果 (a) 自然頻率變化對應水位；(b) 正規化頻率對應水位

Fig.14 The calculated vibration frequencies of the dam during water impoundment: (a) Variation of natural frequency versus water level; (b) Normalized frequency versus water level.

結論與建議

本研究建立了 FLAC 數值模型分析壩體暫態滲流行為及振動頻率變化，並將數值模擬結果與現場實測結果進行了比較。歸納以下之重點結論：

1. 本研究完成壩體在蓄水過程中的暫態滲流行為模擬。我們建立了 FLAC 數值模型，並將暫態滲流行為的分析結果與現地實測水位比對。模擬結果包括孔隙水壓力分佈圖、等勢能線、飽和度分佈圖等。經倒算分析後獲得壩體滲透係數最佳值約為 0.008 m/s。
2. 若地下水位在壩體下游面滲出土體，將導致下游面的數值網格內有效應力趨近於零，造成數值不穩定無法繼續計算。
3. 根據現場震動監測資料分析，土壩在蓄水過程中的平均振動頻率大約下降 2.9%。這反應壩體因水體入滲，造成壩體的剪力強度降低與勁度下降。這壩體振動頻率下降的現象可反映壩體逐漸弱化，可作為一種預警的指標。
4. 本研究提出壩體自然頻率計算的方法，包括含初步變頻掃描與細部定頻共振計算等二步驟，方法可行。
5. 由 FLAC 動態分析求得土壩在蓄水中，自然頻率亦逐漸下降。由參數分析結果顯示，壩體在指定三種不同的剪力波速條件下，壩體蓄水中自然頻率下降的幅度均相近。

致 謝

感謝國科會計畫 (111-2625-M-005-009-) 給予本研究經費支持，使得本研究能順利進行。感謝中興大學水土保持學系陳樹群教授提供潰壩試驗中壩體內水壓計監測資料。蔡

佩勳教授對壩體自然頻率數值計算的協助，在此一併致謝。

參考文獻

- [1] 梁正育 (2008), 「土石壩幾何條件對其力學行為影響之研究」, 碩士論文, 朝陽科技大學營建工程系, 台灣。(Liang, C.Y. (2008). *Effects of the Geometrical Parameters on the Mechanical Behaviors of Earth Dam*, Master's thesis, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Science and Technology, Taiwan. <https://hdl.handle.net/11296/436a84>. (in Chinese))
- [2] 馮正一、蔡佩勳、李俊男 (2006), 「鯉魚潭土石壩受到集集地震作用之動態反應分析」, 中華水土保持學報, 37(3), 271-289。(Feng, Z.Y., Tsai, P.H., and Li, J.N. (2006). "Analyses of the Dynamic Responses of Li-yu-tan Earthdam Subjected to Chi Chi Earthquake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 37(3), 271-289.(in Chinese))
- [3] AnCAD, Inc., (2018) Visual Signal Reference Guide. Version 1.6. <http://www.ancad.com.tw/VisualSignal/doc/1.6/RefGuide.html>
- [4] 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(7), 1605-1618. doi:10.1007/s10346-020-01390-x
- [5] Feng, Z.Y., Shen, Z.R., and Zhuang, R.C. (2021). A Numerical Investigation of the Characteristics of Seismic Signals Induced by Rockfalls. *Front. Earth Sci.* 9:761455. doi: 10.3389/feart.2021.761455
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. (2016). Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 8.0, User's Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [7] Kheiri, G., Javdani, H., and Shams, G. (2020). A numerical modeling study on the seepage under embankment dams. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1075-1087.
- [8] Okeke, A.C.U., and Wang, F. (2016). Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams. *Geoenvironmental Disasters*, 3, 1-22.
- [9] Ventini, R., Dodaro, E., Gragnano, C.G., Giretti, D., and Pirone, M. (2021). Experimental and numerical investigations of a river embankment model under transient seepage conditions. *Geosciences*, 11(5), 192.
- [10] Zhong, Q., Wang, L., Chen, S., Chen, Z., Shan, Y., Zhang, Q., Liu, J. (2021). Breaches of embankment and landslide dams-State of the art review. *Earth-Science Reviews*, 216, 103597.

2024 年 09 月 06 日 收稿

2024 年 09 月 27 日 修正

2024 年 10 月 21 日 接受