

屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科學科(一)(含機械/能源/光電/物理/資訊)
組 別：國中組



作品名稱：從崩塌到潰決-堰塞湖模擬系統

關鍵詞：堰塞湖、Vibe coding

編號：B6012

目錄

摘要	1
壹、前言	1
一、研究動機	1
二、研究目的	2
三、研究問題	2
四、文獻回顧	3
(一) 堰塞湖的形成原因與真實世界案例	3
(二) 堰塞湖潰決機制與影響因子	3
(三) 防災措施與預警指標	3
(四) Vibe Coding 與 AI 在教育開發的角色	4
貳、研究設備及器材	4
參、研究過程與方法	5
一、研究架構	5
二、研究流程	5
三、研究方法	6
(一) 蒐集堰塞湖相關科學資料與案例	6
(二) 建立模擬系統核心變因	7
(三) 提示詞版本迭代與系統演進 (Vibe Coding)	7
(四) 網站成品觀察與測試方式	14
(五) 情境模擬設計	14
(六) 結果判讀方式	15
肆、研究結果	17
一、模擬系統完成成果	17
二、版本演進成果比較	18
三、不同情境模擬結果	19
四、人工干預（溢洪道）效果比較	19
五、參數敏感度觀察	20
伍、討論	20
一、為什麼孔隙率與抗蝕性會明顯提高潰決風險？	20
二、人工溢洪道的雙面刃與防災教育意義	20
三、AI 提示詞迭代（Vibe Coding）在本研究中的價值	21
四、本作品與真實堰塞湖的差距	21
陸、結論	22
柒、參考文獻	23

摘要

近年來極端氣候頻傳，台灣山區每逢豪雨便面臨嚴峻的土砂災害。本研究旨在運用 Vibe Coding（AI 提示詞輔助編程）技術，開發一套探討「堰塞湖從崩塌到潰決」的互動式物理模擬系統。研究首先蒐集國內外文獻與真實災例（如小林村堰塞湖），篩選出降雨強度、壩高、孔隙率與抗蝕性等核心變因，確保數值設定具備真實依據。在開發歷程中，我們透過與 AI 的反覆對話，使系統經歷了從基礎展示（測試版、1.0 版）、視覺強化（2.0 版）到導入水量守恆與滲透侵蝕機制（3.0 版）的深度迭代。

研究結果顯示，最終版系統能模擬低、中、高風險情境下的溢頂與管湧潰決行為。數據指出，高孔隙率且低抗蝕性的土石組成，是誘發內部管湧並加速連鎖潰堤的關鍵；而適時開啟人工溢洪道，能有效降低壩體水壓並延緩洪峰。本作品不僅展示了非資訊背景學生利用 AI 開發複雜科學軟體的強大潛力，其視覺化的災情預警儀表板與互動操作，更具備高度的國中防災教育價值。

壹、前言

一、研究動機

最近這幾年的天氣真的難以捉摸，跟地理、地科課本上所學的內容，似乎有些不同，明明才剛到春天，有時候中午的太陽卻熱得像夏天一樣，而一到颱風季，那種彷彿要把天空倒下來的暴雨更是讓人心驚膽跳。以前我總覺得，「堰塞湖」不過是地理課本裡的一個專有名詞，或者是新聞畫面上那些距離我很遙遠的災區空拍圖，好像是科學家或政府官員才要煩惱的事。

直到上個學期，地理老師在課堂上播放了去年花蓮馬太鞍溪堰塞湖報導，我才恍然大悟：原來大自然的反撲如此驚人！當龐大的土石崩塌阻塞河道形成堰塞湖，一旦潰堤，蓄積的洪水夾帶土石沖刷而下，短短幾分鐘的潰決，卻留下了家園幾十年都難以復原的創傷。那一刻我突然意識到，這根本不是單純的「下大雨」問題，而是牽涉到複雜物理與地質條件的「連鎖災害」問題。我開始好奇：我們能不能在災害發生前，預先看見它潰決的過程？如果壩體矮一

點、土石硬一點，或者是人工挖一條排水溝，結果會不會不一樣？

剛好，資訊科技老師在課堂上介紹了最新的「Vibe Coding」技術——只要用自然語言給予 AI 精確的指令，AI 就能幫我們寫出複雜的程式碼。這讓我靈機一動：如果我自己不會寫艱深的物理引擎程式，那我能不能發揮尋找科學資料的能力，把真實世界的堰塞湖參數整理出來，然後「指揮」AI 幫我打造一個「堰塞湖模擬器」？寫下一段提示詞似乎不費力，但卻能實實在在地幫助我們用科技看懂災害。身為國中生的我們，未來的氣候挑戰還很長，我希望能透過這個專題，結合資訊工具與地球科學，用實際行動探索防災的科學機制。

二、研究目的

1. **梳理潰決機制與建立參數依據**：蒐集歷史災例（如小林村堰塞湖）與地質學術文獻，確立影響堰塞湖潰決的核心控制參數（如壩體幾何、孔隙率、抗蝕係數等），確保系統設定不流於隨意猜測。
2. **實踐 Vibe Coding 軟體工程歷程**：紀錄並分析如何藉由精確的結構化提示詞，引導 AI 完成從基礎介面到具備複雜物理運算的系統開發（版本 1.0 至 3.0 的技術演進）。
3. **建構與驗證物理邏輯模型**：在網頁模擬中導入簡化的水量守恆、溢頂（Overtopping）與管湧滲透（Piping）機制，觀察不同地質與水文條件下的動態破壞過程。
4. **評估工程防災干預之成效**：透過控制模擬器中的「人工溢洪道」變因，量化分析其在低、中、高風險情境下，對於保護壩體與降低下游瞬間洪峰流量的實際效益。
5. **深化防災教育的視覺化應用**：將深奧的水理數據轉化為直觀的災情動畫與預警儀表板，探討模擬系統應用於國中防災教育的價值。

三、研究問題

1. 影響堰塞湖從穩定蓄水、局部侵蝕到瞬間潰決的關鍵物理變因有哪些？哪些因子組合最具破壞力？
2. AI 提示詞的迭代演進（Vibe Coding），能否有效改善網頁模擬系統的完整度、科學合理性與視覺化表達？
3. 在不同風險情境下，模擬器中的水位變化、壩體侵蝕速率與下游洪峰流量有何差異？
4. 人工溢洪道在什麼樣的環境條件下能發揮最大防災功效？在何種極端條件下仍可能面臨失效？

四、文獻回顧

為了讓模擬系統的參數設定具備科學公信力，本研究在規劃 AI 提示詞前，進行多方文獻探討：

（一）堰塞湖的形成原因與真實世界案例

堰塞湖多發生於地震或強降雨引發的大規模土石崩塌。根據統計，台灣的堰塞湖有 36% 與颱風相關，23% 為地震引起。例如 2009 年莫拉克風災期間，全台至少形成 22 處堰塞湖。其中最著名的案例為小林村上游的獻肚山崩塌，其形成了高達 40 多公尺的壩體，蓄積了超過 2,000 萬立方公尺的土石與水體。令人震驚的是，該堰塞湖在形成後不到一小時內迅速潰決，潰口最大洪峰流量推估高達驚人的 $70,649 \text{ m}^3/\text{s}$ 。這些真實數據成為本系統設定「高風險極端情境」的重要依據。在國際上，2008 年中國汶川地震引發的唐家山堰塞湖，壩高達 103 公尺，則是透過「人工開挖溢洪道」成功化解危機的經典案例。

（二）堰塞湖潰決機制與影響因子

文獻指出，堰塞壩多由未經壓實的鬆散土石組成，其破壞機制主要分為兩種：「溢頂侵蝕（Overtopping）」與「內部管湧滲透（Piping）」。當水位越過壩頂時，水流會開始切削壩體表面；而當水壓過大時，水流則會鑽入土石縫隙，從內部掏空壩體。研究顯示，壩體物質的孔隙率（Porosity）與抗蝕係數（Erosion Resistance, k_d ）是決定潰壩速度的關鍵。當細顆粒黏土含量較高時，孔隙率低且抗蝕性強；反之，若壩體由鬆散的砂礫組成（高孔隙、低抗蝕），水流極易滲透，導致壩體迅速失去結構強度而發生連鎖崩塌。因此，本研究將孔隙率與抗蝕係數這兩項指標列為系統中最核心的互動變因。

（三）防災措施與預警指標

目前處置堰塞湖最常見的人工干預手段是開挖「溢洪道（Spillway）」。透過在壩頂挖掘 V 型或梯形的深溝，能引導湖水提早且平緩地排出，避免水位直接漫過壩頂造成全面崩塌。在災情預警方面，台灣水利署將河川警戒水位依預計到達計畫洪水位的時間分為三級。同時，水利署採用 I_{db} 指標（最大洪流量與河川計畫洪水位的比值）來快速評估下游淹水危害程度；若比值大於 90%（即 $I_{db} > 0.9$ ），則屬於「極高危害」，必須立即撤離。本模擬系統的「三級閃爍警示燈」與「下游淹沒深度」即是參考此概念進行視覺化設計。

（四）Vibe Coding 與 AI 在教育開發的角色

Vibe Coding 是一種新興的軟體開發模式。開發者無需死記硬背程式語法，只需用白話文（自然語言）清楚描述需求、操作邏輯與物理公式，大型語言模型的 AI（如 ChatGPT）便能生成完整的應用程式。這種模式大幅降低了系統開發的門檻，使非工程背景的學生能將心力專注於「科學邏輯的驗證」與「系統流程的設計」，對於推動科學教育與快速原型開發（MVP）具有革命性的價值。

貳、研究設備及器材

為了使本研究的方法適用於一般國中校園，本專題未使用昂貴的專業工程硬體，全數基於普及設備與雲端開源服務進行開發：

1. 硬體設備：

一般文書處理筆記型電腦（具備穩定網路連線與瀏覽器運行能力）。

2. 軟體與開發平台：

作業系統：Windows 11。

瀏覽器：Google Chrome（用於本地端執行 HTML 網頁測試與 Console 除錯）。

3. AI 工具與提示詞環境：

雲端測試平台：利用(<https://www.designarena.ai/>) 平台，作為 Vibe Coding 快速迭代、預覽版本與網頁託管的測試環境。

4. 圖形渲染技術：

前端技術：使用 HTML5 Canvas API 與 p5.js（透過 CDN 引入），處理複雜的地形粒子與流體動畫渲染。

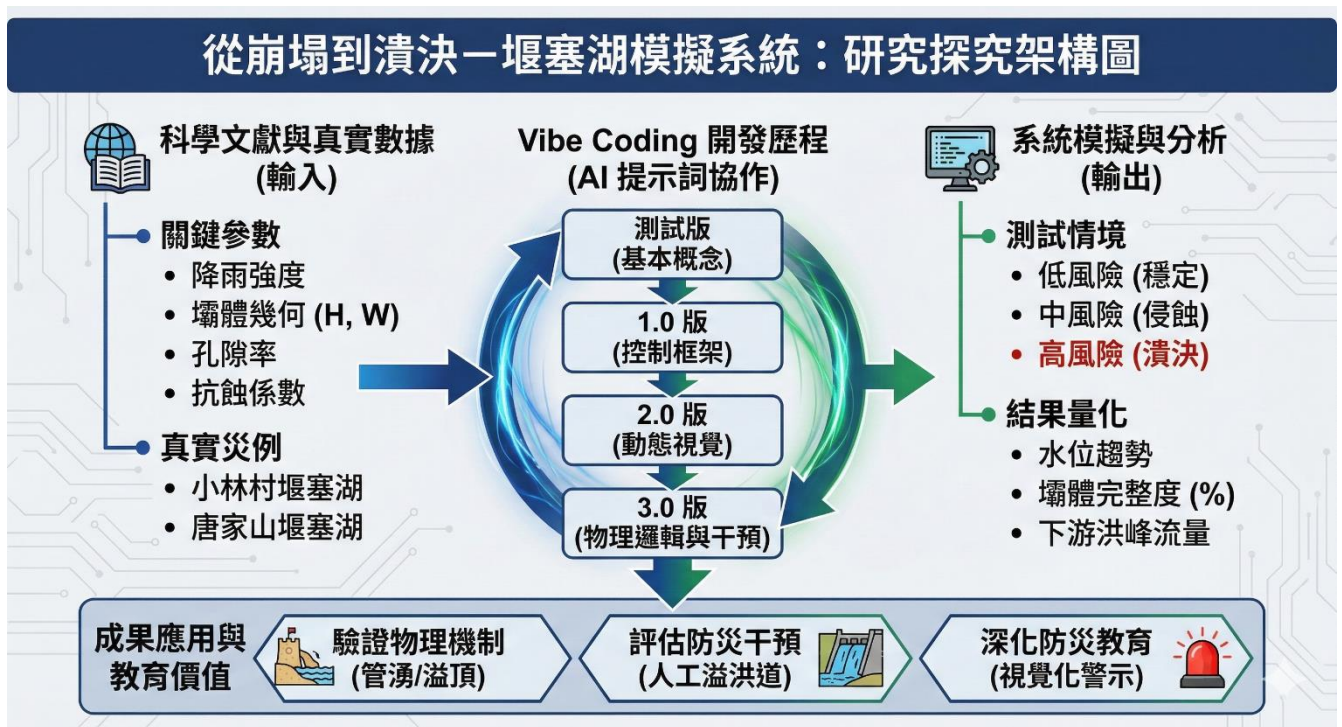
5. 資料來源網站：

經濟部水利署防災資訊網、台灣地球科學學術開源期刊，用於比對歷史災例參數與檢驗模擬結果。

參、研究過程與方法

一、研究架構

本研究的邏輯架構從「現象觀察」出發，結合「文獻數據」，進入「AI 輔助開發」，最後落實於「模擬分析」。我們首先確立堰塞湖潰決的核心物理變因，接著將這些科學條件轉化為結構化的 AI 提示詞（Prompt），運用 Vibe Coding 進行網頁開發。開發過程歷經四個階段，不斷針對前一版的物理缺陷進行除錯與修正。最終，利用完成的 3.0 版本設計低、中、高風險情境，觀察各參數交錯影響下的潰決型態，並探討其教育意義。



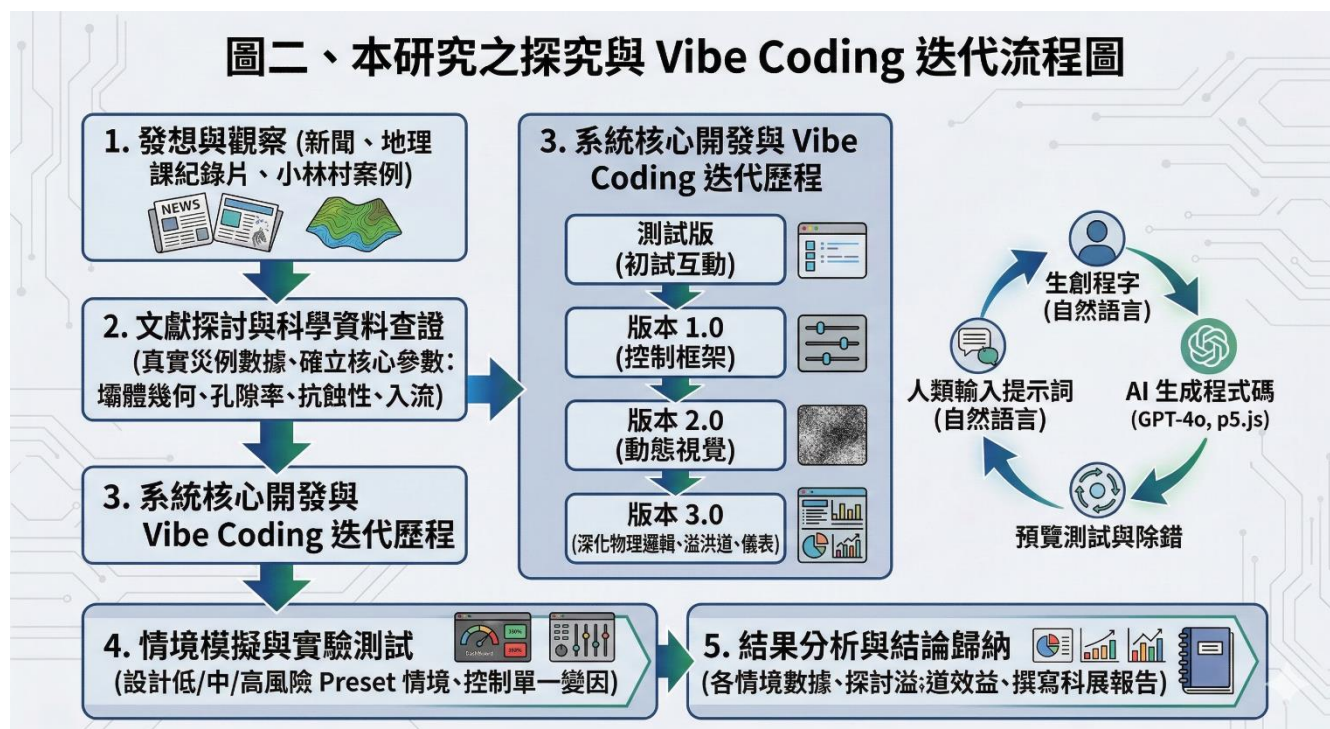
(圖一、本研究之探究架構圖)

二、研究流程

本專題的執行流程分為以下八個步驟：

1. **發想與觀察**：從新聞與地理課的震撼中發掘問題。
2. **文獻與資料查證**：蒐集小林村等災例的真實數據，確立核心參數。
3. **初版提示詞撰寫**：給予 AI 簡單指令，產出測試版網頁。

4. 第一階段修正（版本 1.0）：導入參數滑桿與基礎框架。
5. 第二階段改良（版本 2.0）：加入動態視覺渲染與預警系統。
6. 第三階段深化（版本 3.0）：導入嚴謹物理數學模型、溢洪道干預與即時數據儀表。
7. 情境模擬與測試：設計不同風險情境，記錄水位、侵蝕與洪峰數據。
8. 結果分析與歸納：比對模擬結果與文獻理論，撰寫作品說明書。



(圖二、研究流程圖)

三、研究方法

(一) 蒐集堰塞湖相關科學資料與案例

為了讓模擬系統的參數具有說服力，我查閱了多份報告。例如，小林村堰塞湖的壩高約 44 公尺，蓄水量超過 2000 萬立方公尺，在極端降雨下不到一小時就潰決。另外，唐家山堰塞湖高達 103 公尺，但因為及時開挖了深達 12 公尺的溢洪道而成功減災。雖然專業論文中包含了極其複雜的流體力學（CFD）算式，但為了讓網頁能即時運算且適合國中生理解，我提取了最關鍵的趨勢：降雨入流、壩體幾何、土石的孔隙與抗蝕力。這些真實資料的極值，成為我設定模擬器滑桿上下限的科學依據。

（二）建立模擬系統核心變因

依據文獻，我在系統中設計並向 AI 定義了三大類核心變數：

1. 環境變數：

平均降雨量 (mm/hr) & 上游入流量：決定湖水累積的速度。這是直接對應台灣氣象署豪雨分級的真實指標。

2. 壩體變數：

壩體高度 (H) & 底部寬度 (W)：決定壩體的幾何穩定性。高而窄的壩體承受的側向水壓極大。

孔隙率 ($0 \sim 1$)：模擬土石鬆散程度。數值越高，代表水越容易滲透進入壩體內部，引發管湧。

抗蝕係數 ($0 \sim 100$)：反映土石的黏結度。數值越低，代表越容易被流動的水切削帶走，抗侵蝕能力較差。

3. 干預與結果變數：

人工溢洪道（開關與深度 d ）：模擬工程人員在壩頂開挖的導水溝，測試人為干預的極限。

下游瞬間衝擊流量（洪峰）與淹沒深度：作為判斷災情嚴重程度的依變因，呈現受影響的情況。

（三）提示詞版本迭代與系統演進 (Vibe Coding)

這是本研究最具挑戰性的部分。我發現只對 AI 說「幫我做一個堰塞湖網站」是行不通的。我必須像個軟體工程師兼地科老師，逐步教導 AI。以下是四個階段的演進：

1. 測試版：發想的起點 (版本 0)

設計想法：單純測試 AI 能否理解主題。提示詞僅為：「製作一個可互動的網站來模擬堰塞湖潰堤之前&之後的情況」。

不足之處：產出的網頁 (<https://landslide-dam-simulation-tw.designarena.ai>) 非常簡陋，只有毫無意義的按鈕，缺乏科學邏輯與互動深度。



(圖三、初代測試版本)

2. 版本 1.0：建立控制框架

改良原因：需要有可以調整的科學變數。

具體差異：我利用更完整的提示詞，要求「左側控制面板、右側同步雙視窗（剖面與俯瞰）」，並加入降雨強度、壩高、土壤滲透性等滑桿。

優缺點：網頁 (<https://landslide-dam-simulator.designarena.ai/>) 有了雛形，但水與土石의 互動只是預先寫死的死板動畫，並非即時運算。



(圖四、一代測試版本)

3. 版本 2.0~2.6：從展示走向動態視覺

改良原因：動畫太像積木，無法展現侵蝕的漸進過程。

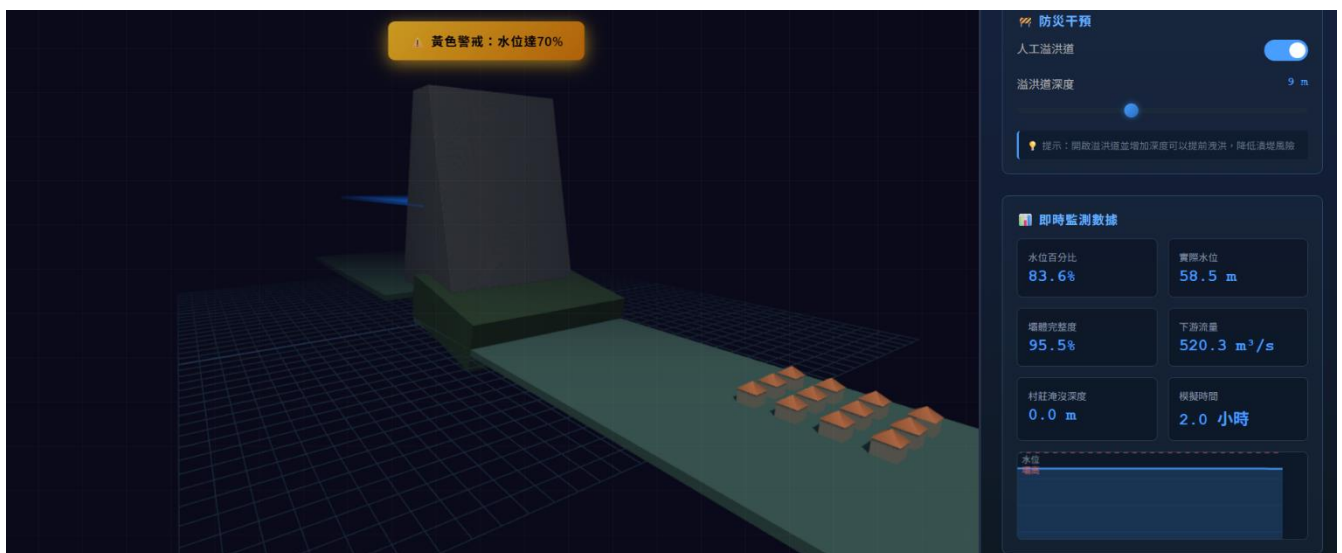
具體差異：提示詞要求「深色科學儀表板風」、「禁止使用簡單幾何方塊，改用 noise() 繪製質感地形」。加入了植被覆蓋率，並開發了「三級預警系統」（黃、橘、紅燈號）。

優缺點：網頁版本 2.0 (<https://dammed-lake-breach-sim.designarena.ai/>) 視覺極具質感，如圖五所示，有洪水波浪前緣。但其背後的侵蝕邏輯仍偏向單純的視覺時間推移，缺乏嚴謹的物理守恆公式。

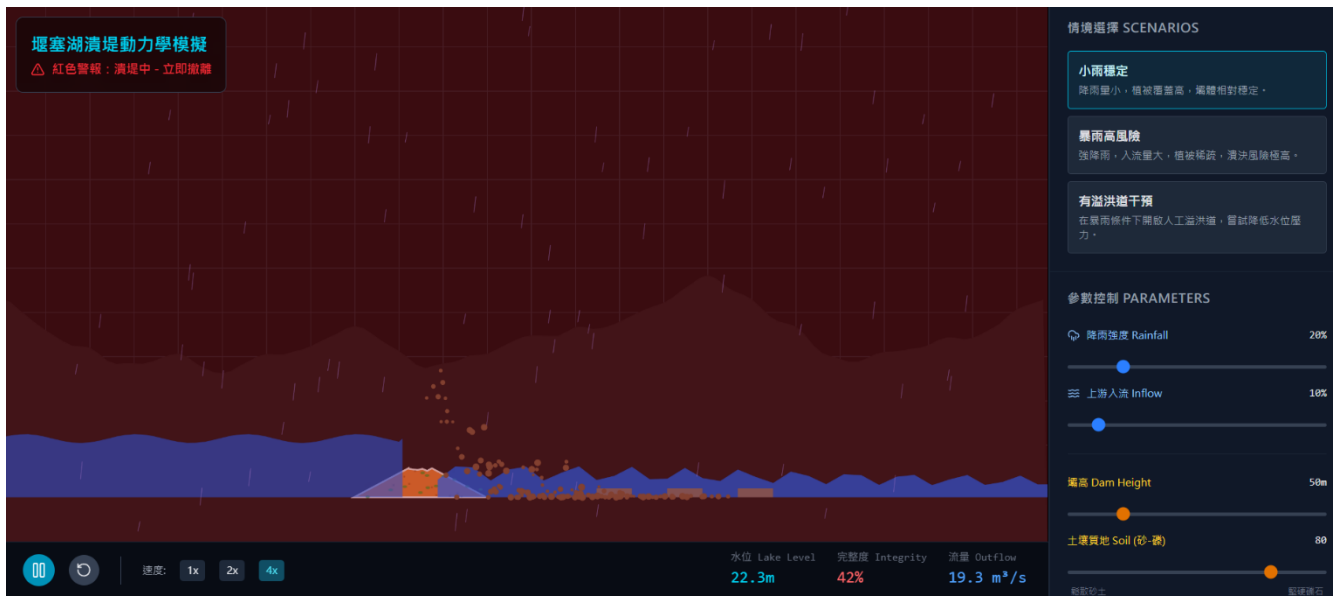
此外，在視覺呈現上我們也做了多方嘗試，其餘二代版本，如圖六~圖十一所示。



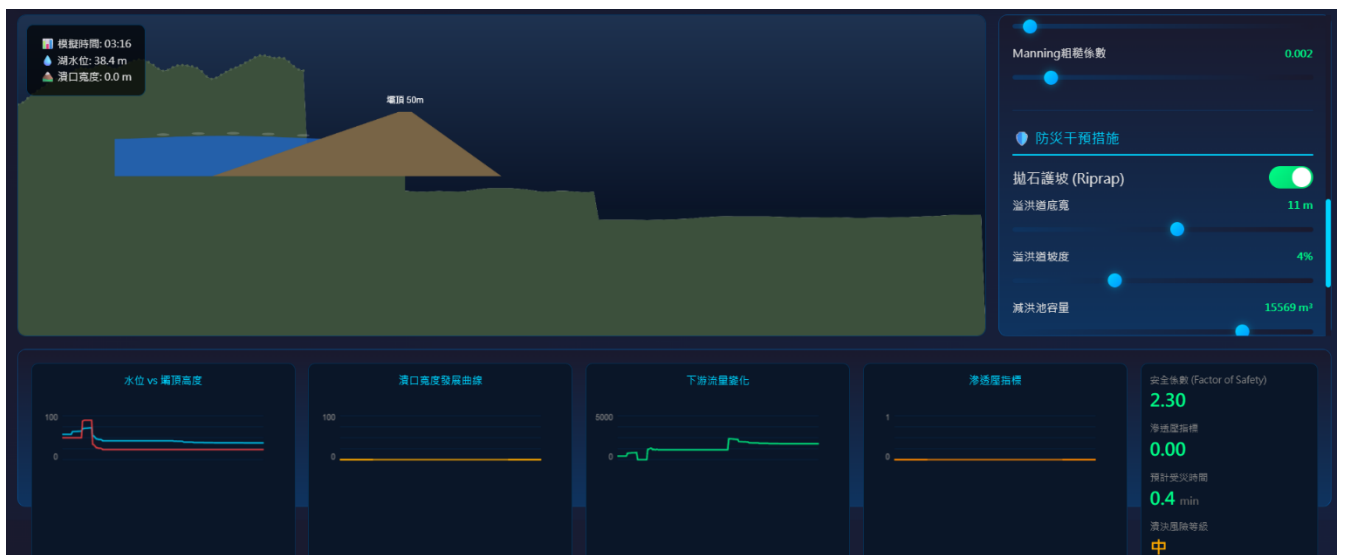
(圖五、二代測試版本)



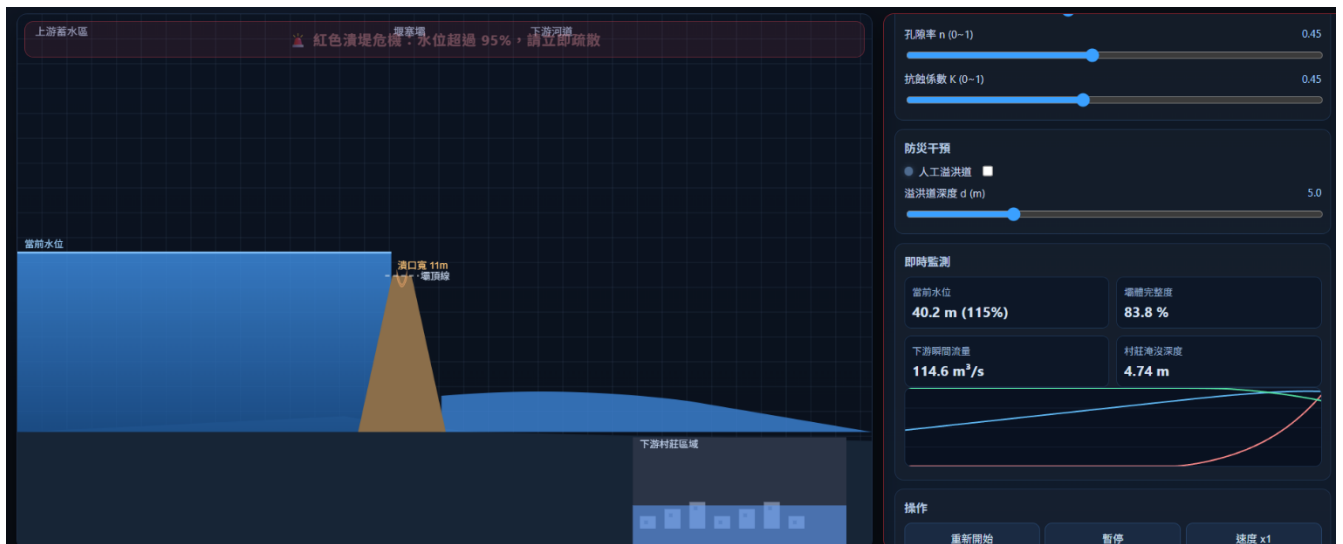
(圖六、版本 2.1 新增繪製圖表，以及引入 3D 動畫，但 3D 的潰堤效果不佳)



(圖七、版本 2.2 動畫為主，具泥沙破碎的粒子效果，但可操作性低)



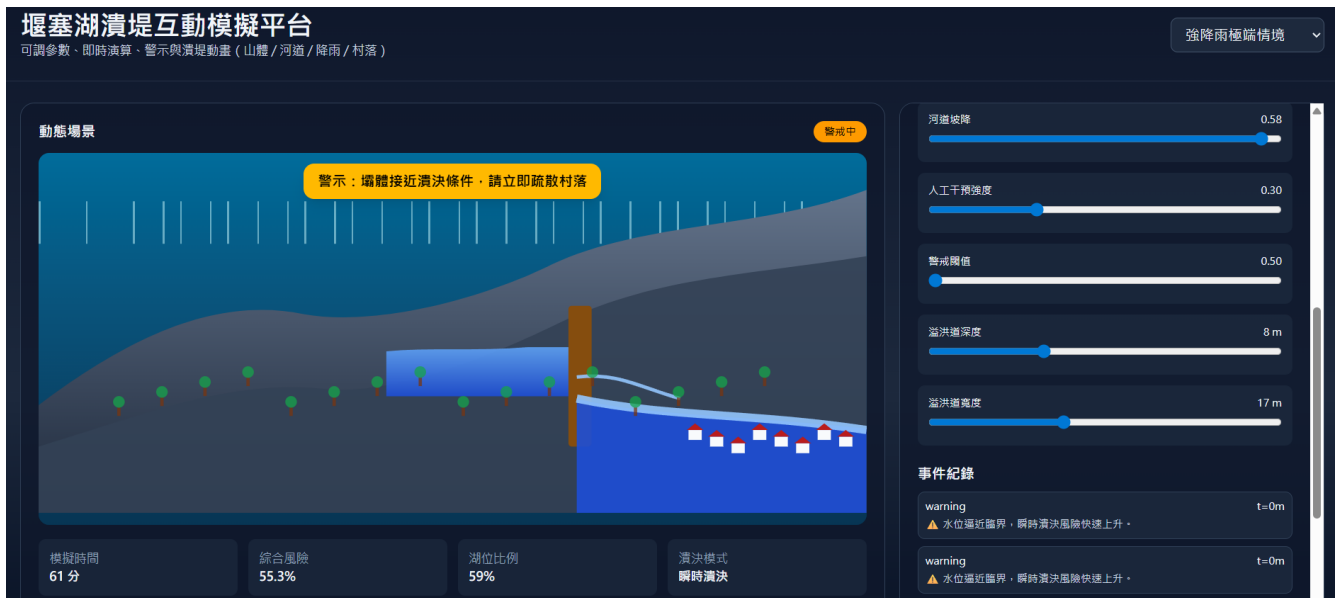
(圖八、版本 2.3 繪製實時圖表，以及引入防護措施改動，但主體堰塞湖動畫效果較差)



(圖九、版本 2.4 動畫效果提升，但可操作性較低，參數過於簡化)



(圖十、版本 2.5 增進動畫效果，以及加入變化圖，但統整資料的實時圖表繪製不出來)



(圖十一、版本 2.6 風險評估、事件紀錄，但動畫效果不佳，太過於幾何，不像山體)

4. 版本 3.0：導入精確物理邏輯與災情監測（最終版）

改良原因：必須讓模擬器真正具備科學教育的價值，符合物理規律。

具體差異：在提示詞中寫入明確的數學邏輯：

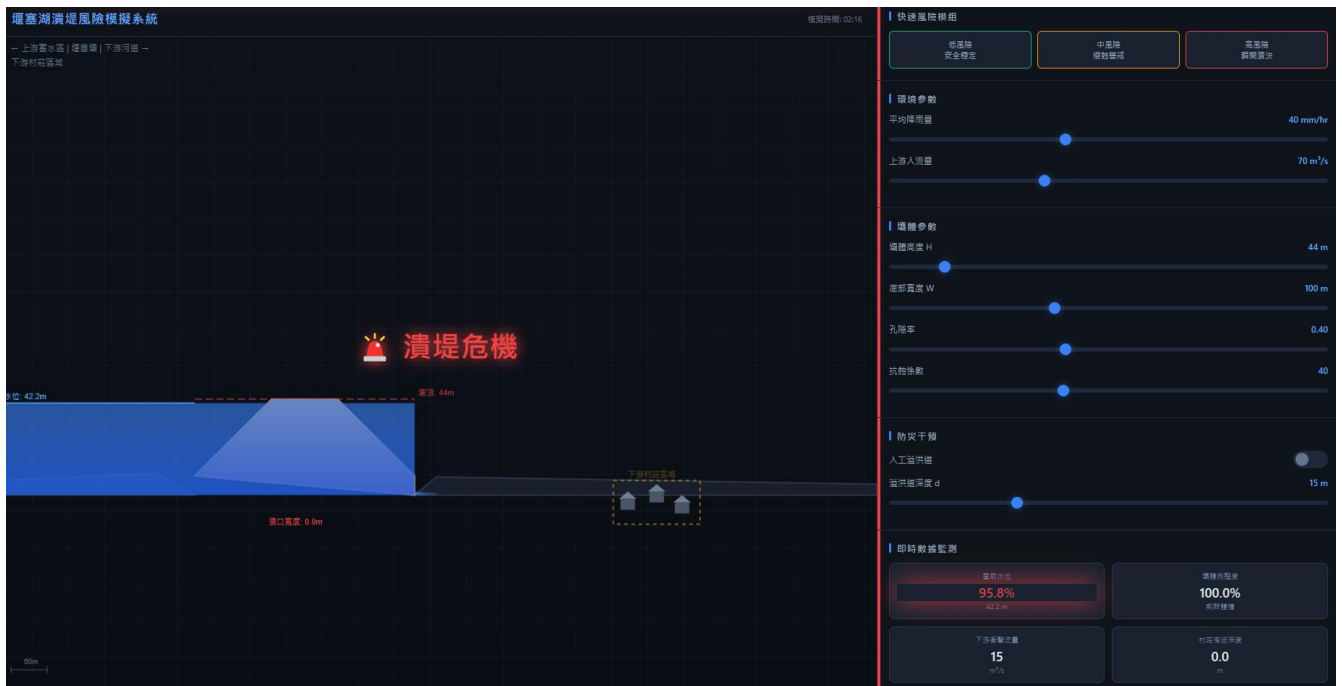
要求「水量守恒」：水位隨入流與出流即時更新。

導入「溢頂（Overtopping）」與「滲透壓力指標（水位 * 孔隙率 / 抗蝕係數）」。

加入即時數據監測，在面板上顯示 60 秒內的「水位趨勢線」與「洪峰流量」。

加入可調整深度的「人工溢洪道」。

優點：網頁 (<https://landslide-dam-simulation.designarena.ai/>) 成為一個合理的物理模擬器，潰口的擴大速度會真實受當下流速與土石阻力影響，並能完全離線運行。



(圖十二、版本 3.0)

(四) 網站成品觀察與測試方式

為驗證最終版 3.0 的準確性，我設計了一套國中科展適用的標準測試流程：

1. 載入網頁後，將時間歸零。
2. 依序固定其他參數，僅調整單一測試變因（如孔隙率）。
3. 觀察下游衝擊流量&村莊淹沒深度並了解到第二點改動的這些參數是如何影響到堰塞湖的潰堤。

(五) 情境模擬設計

為了探討不同變因的交互作用，我利用系統內建的 Preset 概念，設計了三組對應真實世界的測試情境：

1. 低風險穩定情境

參數設定：降雨量低、入流量低；壩體寬厚（**W**大）、高度合理；孔隙率低、抗蝕係數高；開啟深層人工溢洪道。

設定理由：模擬處置得當且地質穩定的理想狀態。

預期現象：水位穩定維持在壩頂之下，水流從溢洪道安全排出，壩體不發生崩塌。

2. 中風險侵蝕警戒情境

參數設定：持續中雨、入流中等；壩體幾何中等；孔隙率中等、抗蝕係數中等；**無溢洪道。**

設定理由：模擬無人為干預、自然溢流的普通堰塞湖。

預期現象：水位會緩慢慢過壩頂（溢頂），產生局部表面切削，但不會瞬間全面潰堤。

3. 高風險瞬間潰決情境

參數設定：極端豪雨、入流極高；壩體高而窄（ H 高、 W 小）；孔隙率極高、抗蝕係數極低；無溢洪道。

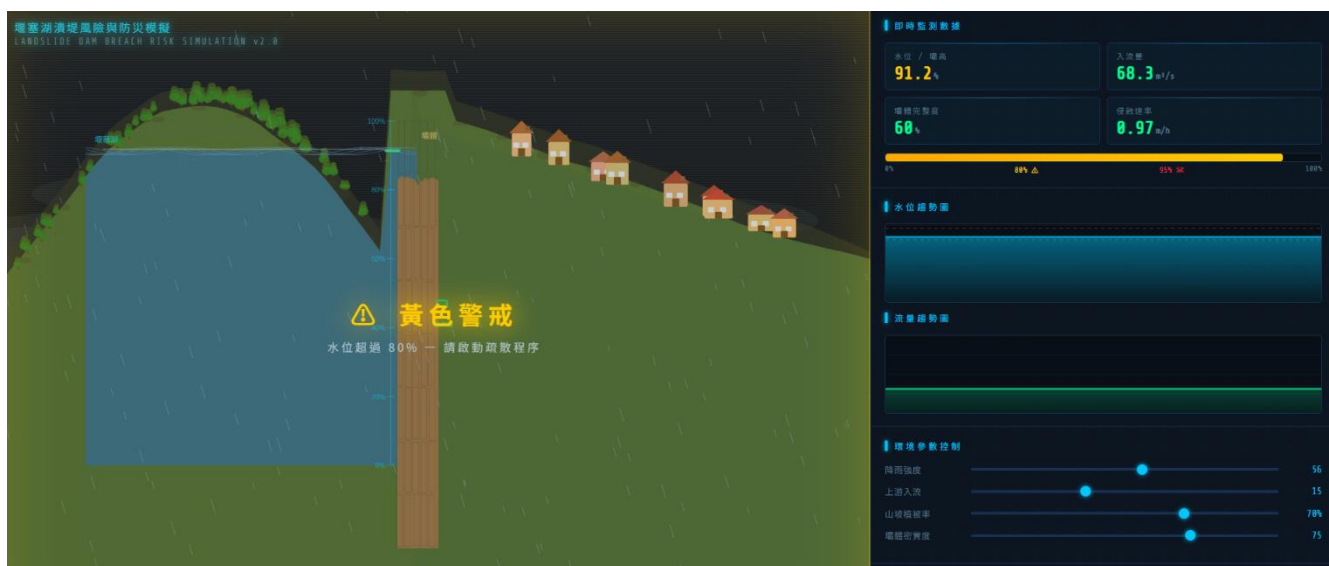
設定理由：對應小林村堰塞湖的極端惡劣狀態。

預期現象：強大水壓加上鬆散土質引發嚴重的「滲透管湧」，壩體瞬間出現巨大潰口連鎖崩解，下游洪峰流量爆衝，觸發紅色撤離警示。

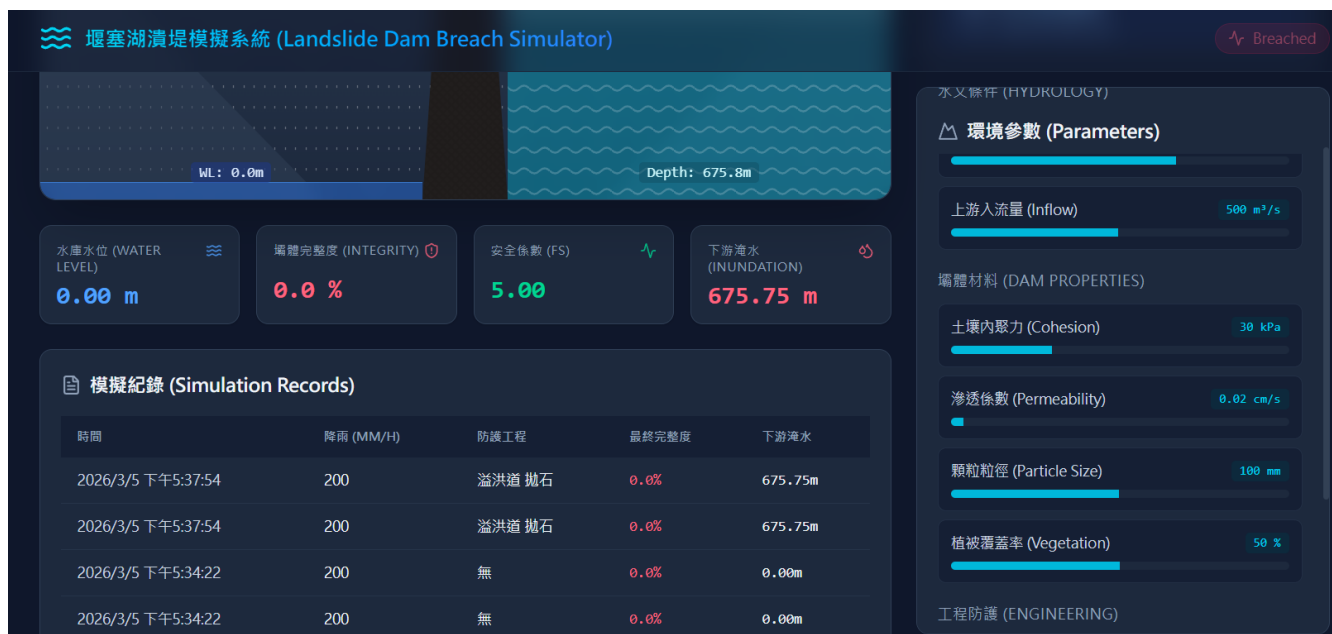
（六）結果判讀方式

我將收集每次情境在 60 秒內的「最高水位比例」、「剩餘體積」與「峰值流量」。判斷標準為：若峰值流量呈現陡峭的尖峰，且剩餘體積在極短時間內歸零，代表發生「瞬間潰決」，危險性極高；若流量平緩上升，則屬於「漸進式溢流」。我們會藉此比較有/無溢洪道的差異，並在後續討論「教育展示模擬」與「專業災害數值模式」之間的簡化限制。

此外，我們將第三代的版本又分為「潰堤情況演練」（版本 3.0，如圖十二所示）、「管湧破壞模擬」（版本 3.1，如圖十三所示）、「越頂侵蝕演算法」（版本 3.2，如圖十四所示）來做分項討論，並製作出一個首頁（如圖十五所示）將這三個版本串接起來，讓一般同學、民眾能從簡單的科普認識、名詞介紹到視覺模擬、潰堤模式分項模擬、數據分析來更進一步全面地認識堰塞湖潰堤這件事情。



(圖十三、版本 3.1 針對管湧破壞的壅塞湖潰堤模擬)



(圖十四、版本 3.2 針對越頂侵蝕的壅塞湖潰堤模擬)



(圖十五、系統首頁，將各項功能整合及科普介紹)

肆、研究結果

一、模擬系統完成成果

本研究成功透過 Vibe Coding 開發出具備高度互動性的「堰塞湖潰堤風險與防災模擬系統」。系統畫面採用星空黑的科學儀表板風格。

左側物理渲染區：顯示由網格與粒子構成的地形剖面、漸層藍色的水體，以及右下角的下游村莊圖示。當發生潰決時，水流會動態穿過 V 型缺口往下游衝擊，村莊會根據流量大小出現藍色淹沒深度動畫。

右側互動控制區：包含環境與壩體參數的拖曳滑桿，皆附有即時單位顯示。最亮眼的是下方的「即時數據監測面板」，具備動態更新的數字儀表與 60 秒微型趨勢線，能精準捕捉洪峰出現的瞬間。

警示系統：系統內建視覺回饋。當水位達到 80% 時，畫面邊框會發出「黃色警戒」閃爍；若水位突破 95% 或發生管湧，則會觸發強烈的「紅色潰堤危機」閃爍，極具臨場感。

二、版本演進成果比較

我們整理了 AI 提示詞迭代帶來的系統進步。從下表可以看出，較精確完善的提示詞能讓程式從「外觀展示」進化為「科學運算」：

演進階段	核心技術與物理邏輯	視覺與預警成果	系統限制
測試版	無物理邏輯，僅有基本框架。	畫面簡陋，無動畫。	無科學意義。
版本 1.0	建立變數滑桿，採雙視窗佈局。	預先寫死的幾何動畫。	無即時交互影響。
版本 2.0~2.6	引入 noise() 地形與粒子效果。	具備波浪前緣與三級燈號預警。	侵蝕仍偏向線性視覺變化。
版本 3.0~3.2	導入水量守恆、溢頂公式與滲透壓力指標。	具備即時趨勢圖、淹沒深度動畫與閃爍警報。	為 2D 簡化模型，非 3D 空間。

三、不同情境模擬結果

我們將三組預設情境輸入系統，觀察 60 秒內的動態變化，結果如下：

評估指標	低風險穩定情境	中風險侵蝕警戒情境	高風險瞬間潰決情境
水位變化	穩定保持在壩高 60% 以下，未觸發警報。	逐漸攀升至 100%，開始溢頂，觸發黃色警報。	極速攀升，內部水壓飆高，觸發紅色閃爍警告。
壩體侵蝕程度	幾乎無切削（完整度 > 95%）。	頂部與下游坡面緩慢被流失剝落（剩餘 60%）。	瞬間產生大潰口，壩體呈連鎖崩解（剩餘 < 20%）。
下游淹沒與潰口	水流由溢洪道平穩排出，無潰口，村莊安全。	頂部出現淺 V 型潰口，洪峰中等，村莊淺層積水。	潰口迅速加寬加深，洪峰流量出現極高尖峰，村莊深色淹沒。

結果明顯指出，在高風險情境中，高孔隙率與低抗蝕性的土石，完全無法抵擋暴雨帶來的水壓，其破壞曲線在趨勢圖上呈現恐怖的「斷崖式下降」，完美重現了真實世界中鬆散堰塞壩易瞬間潰決的科學特徵。

四、人工干預（溢洪道）效果比較

我們針對「高降雨量」條件，單獨測試了「開啟深層溢洪道」與「無溢洪道」的差異：

有幫助的條件：當降雨與入流量的總和，未超過溢洪道的最大排水負荷時，溢洪道發揮了

「洩壓閥」的功用。它將水位牢牢鎖定在壩頂安全線之下，成功保住了壩體主體，下游僅承受常態排水量，未出現致災洪峰。

仍可能失敗的情況：當我們刻意將降雨量拉至極端極大值時，即使開啟了深層溢洪道，水位上升的速度依然大於排水速度。此時溢洪道反而成為了水流集中的破口，加速了兩側土石的崩塌，最終壩體依然潰決。這證明了工程干預有其物理極限。

五、參數敏感度觀察

在反覆操作模擬器的過程中，我們發現了幾個影響風險的關鍵現象：

1. **影響最大的交互變因：**「壩體寬度」與「孔隙率」的組合。即便雨量不大，若壩體過窄且孔隙率極高，水流極易鑽透壩體。此時不用等到水漫過壩頂，壩體就會因內部管湧掏空而從中下層崩塌。
2. **加速潰決的關鍵門檻：**「水位高度」。只要水位未達壩頂或未超過臨界滲透壓，侵蝕圖表幾乎是一條水平線；但只要跨過臨界點（通常在水位 85% 左右），侵蝕速率會呈現指數型的上升。這說明了堰塞湖的崩潰往往是「牽一髮而動全身」的非線性過程。

伍、討論

一、為什麼孔隙率與抗蝕性會明顯提高潰決風險？

在我們的模擬結果中，高風險情境的壩體幾乎是瞬間崩解的。這是為什麼呢？就如同我們在沙灘上堆沙堡，如果沙子很鬆散、孔隙很大（高孔隙率），水很容易鑽進去把內部的沙子掏空；相反地，如果是黏結緊密的黏土（高抗蝕性），水只能在表面緩慢流動。當大水灌入鬆散的堰塞湖時，強大的水壓會在壩體內部尋找最脆弱的縫隙形成水路（管湧效應 Piping）。一旦水路貫穿，就會引發結構瞬間瓦解。我們的系統成功透過數學指標（水位 * 孔隙率 / 抗蝕係數）將這個破壞機制具象化，讓普通人就能一眼看懂複雜的地科原理。

二、人工溢洪道的雙面刃與防災教育意義

實驗證實，溢洪道在多數情況下是非常有效的防護機制。它透過集中導流，避免了水流不受控地大面積漫過壩頂。然而，極端暴雨下溢洪道的失效，帶給我們更深刻的教育意義：「工程手段不是萬靈丹」。當水利署發布 IdB 淹水一級警戒或紅色警示時，代表自然力量已超過工

程設計的保護極限。此時，下游民眾絕對不能抱持「反正有挖排水溝」的僥倖心態，必須果斷撤離。模擬器中的紅色閃爍畫面，正是傳達這個防災核心觀念的最佳工具。

三、AI 提示詞迭代（Vibe Coding）在本研究中的價值

透過撰寫這份專題，我深刻體會到 AI 協作開發的強大力量。

打破技術高牆：如果是以前，一個國中生要寫出包含流體動力學、Canvas 畫布渲染與即時趨勢圖的網頁，可能需要學習好幾年的前端程式語法。但透過 Vibe Coding，我能把時間投資在「研究科學現象」上。當我把《水量守恆公式》用白話文丟給 AI 時，它就能幫我轉成 JavaScript 程式碼。這真正落實了「人人皆可寫程式」的理念，大幅降低了科學科展的門檻。

人類思維仍是核心：儘管 AI 很聰明，但如果提示詞寫得太模糊（就像我們的測試版），AI 就會隨便敷衍了事。你必須比 AI 更了解「核心物理機制」，才能寫出版本 3.0 那樣精準的指令。這說明了，在使用 AI 的時代，人類的「科學知識」與「邏輯架構能力」依然是最不可取代的導航員。

四、本作品與真實堰塞湖的差距

我們必須誠實面對，這個模擬器雖然能展示正確的物理趨勢，但與專業災害防救仍有差距：

1. **維度與複雜度的簡化：**本系統採用的是簡化的 2D 側視圖，而真實災害（如小林村）是在複雜的 3D 山谷地形中發生的，土石流的運動還包含巨石碰撞與非牛頓流體的特性。
2. **定位差異：**我們的系統是為了「教育展示與原理探討」而生，目的是讓大眾快速理解變因之間的關係。它並未實際連結 GIS 地理資訊系統或氣象署的即時雨量，因此不能作為真實災害發布的預警系統。

如果未來要繼續改良，我希望能將政府的 Open Data（如即時雨量 API）串接到網頁中，讓滑桿的數值能直接帶入當天山區的真實雨量，那將會是一個更酷、更貼近生活的即時防災儀表板！

陸、結論

1. **成功實踐 Vibe Coding 開發模式：**本研究證實，透過結構化的自然語言提示詞迭代，無深厚程式背景的國中生也能引導 AI 建構出具備高度互動性與科學邏輯的物理模擬系統。
2. **確立法定物理參數對潰決的影響：**模擬證明，土石「孔隙率高」且「抗蝕性低」的情境，最容易誘發內部管湧破壞，導致壩體瞬間潰決與極大洪峰，驗證了真實災例的力學特徵。
3. **驗證溢洪道的緩衝效益與極限：**人工溢洪道能有效洩壓並延緩水位攀升；但在超過排水極限的極端豪雨下仍會失效。這證明了硬體工程防災必須搭配人員撤離軟體預警。
4. **展現卓越的防災教育視覺化價值：**本模擬器整合了黃橘紅閃爍警示、即時趨勢圖與下游淹沒動畫，將生硬的地科與水理數據轉化為直觀的因果關係，極適合推廣至中學校園，提升學生的氣候災害風險意識。



(圖十六、研究結論一覽表)

柒、參考文獻

1. 行政院經濟部水利署 (2015)。《水利署電子報：堰塞湖對下游淹水危害程度快速評估》（提供本研究 IdB 淹水危害程度分級數據與極高風險 >90% 之設定依據）
2. 行政院經濟部水利署 (2024)。《水利署電子報：河川警戒水位訂定》。擷取自水利署官方網站。（提供本研究三級預警系統與撤離時間之設計參考）
3. 報導者、環境資訊中心 (2020)。《台灣堰塞湖地圖：莫拉克風災與小林村滅村事件分析》。擷取自公開專題報導。（提供本研究台灣堰塞湖成因統計與小林村真實災害背景）
4. Dong, J. J., et al. (2011). The formation and breaching of a short-lived landslide dam at Hsiaolin village, Taiwan. *Engineering Geology*, 123(1-2), 40-59.（提供本研究小林村堰塞湖真實高度、潰決時間與峰值流量 70,649 m³/s 之極端參數依據）
5. Shen, D., et al. (2022). Effects of grain composition on the stability, breach process, and breach parameters of landslide dams. *Geomorphology*, 411, 108307.（提供本研究「孔隙率」與「抗蝕係數」對內部侵蝕與潰決速度影響機制之學術依據）
6. iKala AI Insight (2024)。《Vibe Coding 是什麼？AI 寫程式的未來趨勢與應用》。擷取自 iKala 官方部落格。（提供本研究 Vibe Coding 之定義、MVP 快速原型開發流程與軟體工程價值論述）
7. DesignArena.ai 開發平台。(2024)。作為本研究 Vibe Coding 提示詞迭代與 HTML 網頁測試之雲端執行環境。