

嘉南管理處

虎頭埤強化壩體脆弱區 培厚工程通過強震考驗

¹ 張朱明 ² 陳奕斌

一、虎頭埤水庫：臺灣首座水庫 如何影響台南新化地區灌溉 命脈？

雖然嘉南管理處轄下有多座歷史悠久的水庫，但虎頭埤作為臺灣第一座水庫，其影響力遠超規模所能說明。它不僅在歷史上導入灌溉制度，更見證了臺灣南部農業從清代至今的演變與挑戰。然而，這座超過180年的水庫正面臨地震風險與設施老化等問題，亟需透過耐震補強與設施升級以確保其永續功能。

虎頭埤水庫位於臺南新化丘陵，自1841年啟用以來便承擔灌溉約400公頃良田的重要任務。如今，除了水資源角色，它也成為地方觀光與歷史教育的場域。近年來，嘉南管理處積極推動壩體結構補強工程，並優化周邊附屬設施，確保這座水庫能在未來繼續發揮關鍵影響力。

二、水庫的誕生與灌溉制度化

虎頭埤的歷史不僅是堤壩的興建紀錄，

亦是一段反映臺灣治理與農業制度轉變的歷程。依據文獻紀載，虎頭埤水庫最初興建於西元1841年(清道光21年)，由新化地方士紳歐安陽與鄭井等人合資興建，用以蓄水養殖與農田灌溉，迄今已逾180年，象徵民間自發興修水利設施典範。水庫初期設施簡易且規模小，但隨後的歷次擴建與政策介入，逐步將其納入官方管理體系，轉為公共埤圳水庫，灌溉面積也由初期的220公頃擴大至400公頃，奠定虎頭埤成為臺灣第一座水庫的基礎。

三、結構限制與自然衝擊：虎頭 埤的風險與歷年災害警示了 什麼？

虎頭埤水庫採用早期技術建構，壩體屬於均質壩，主要使用中等塑性的粉質細砂(SM、ML類)作為壩體填充材料。但未具備現代對土壤壓密與滲透力的完整掌握，及施工設備條件等受限，這使得壩體在地震與豪雨中顯得脆弱，屢次歷經破壞，凸顯出歷史水利設施面對自然災害的脆弱性。

¹ 張朱明：嘉南管理處 水庫暨設施維護股股長

² 陳奕斌：嘉南管理處水庫暨設施維護股三等助理工程師

(一) 歷史洪水災害：

- 依據《台灣府志》記載，西元1846年（清道光26年）連續暴雨，導致「水勢漫延，田廬蕩然」，虎頭埤壩體首次受損。
- 1867年更劇烈水患，不僅再度沖毀壩體，更造成大量災民流離失所，社會秩序混亂，顯示基礎設施對整體社會穩定的重要性。

(二) 歷史地震災害：

- 1906年嘉義梅山大地震，造成虎頭埤壩體潰堤，波及下游的農田和建築物，經緊急修護後在溢洪道旁設立重建紀念碑。
- 1946年12月5日發生臺南大地震(新化大地震)，此次地震再次重創壩體。
- 2010年甲仙地震（規模6.4），依據鄰近測站測得的地震強度（PGA值）為0.393g(口埤國小站)，壩體在曲率轉折區段處出現主要橫向裂縫，並且上游混凝土坡面也發生縱向裂縫。
- 2016年美濃地震（規模6.4），此次地震強度高達0.425g (口埤國小站)，使得上游邊坡的混凝土嚴重龜裂並凹陷，甚至形成局部錯動的塊體，同樣在曲率轉折區段處再次出現裂縫與擠壓隆起，嚴重影響相關設施的安全性。

四、地震威脅下的結構挑戰：虎頭埤水庫壩體安全的警訊與對策

(一) 動態模擬揭示轉折處脆弱性，突顯強震衝擊下的潛在風險

由於壩體轉折處的多次修復歷經強震後仍造成壩體裂縫，嘉南管理處於辦理「虎頭埤水庫第五次安全評估」時以動態分析模擬當壩體遭遇「最大可能地震 (MCE)」時 ($PGA=0.51g$)，其結果顯示大壩轉折處可能沉陷8.48公分，並出現76.2公分深的橫向裂縫，此一結果與前兩次地震的損壞情況相似。報告中建議加強壩體培厚，以改善壩體之受震後變形行為，並同時改善壩體上游坡面的狀況，提高水庫大壩整體安全性。

為評估地震對水庫壩體可能造成的危害分析，目前主要有定值法和機率法兩種關鍵分析工具：

● 定值法(Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA)：

此法是基於假設遭遇最壞情況，即假設某個地區可能發生的最大地震，並計算它可能帶來的影響。依據水庫附近最大的斷層，假設當它產生最大震級的地震，計算地震對地表的影響，如尖峰地動加速度(PGA)。這種方式偏向「保守估計」，但確保重要設施設計的安全性。

● 機率法(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)：

此法考慮各種地震可能性，並根據歷史地震資料、斷層活動等因素來估算未來幾年內，該地區發生強烈地震（如 PGA 超過 $0.4g$ ）的機率。相對於定值法分析 (DSHA)，機

率法分析(PSHA)考慮地震發生的機率，可提供更全面的風險輪廓，輔助決策者進行資源配置與優先順序判斷。

(二) 壩體受震模擬成果

虎頭埤以鄰近新化斷層為控制斷層，相關參數包含：斷層長度6km、傾角80° E、距壩址距離3.6km等，分別以上述定值法及機率法進行設計地震評析，分析成果如下表。

虎頭埤水庫第5次安全評估設計地震分析成果表

分析方法	控制震源	控制震源最短距離	設計地震規模		水平向地動加速度(g)	再現期(年)	設計地震係數	
							水平向	垂直向
定值法	新化斷層	3.6km	MCE	5.95	0.37	—	0.12	0.08
機率法	—	—	MCE	—	0.51	10,000	0.16	0.11
			DBE		0.42	950	0.13	0.09
			OBE		0.38	475	0.12	0.08
—			MDE	—	0.51	10,000	0.16	0.11

※資料來源：「虎頭埤水庫第五次定期安全評估」，(農水署嘉南管理處，民國110年12月)。

綜合分析，採用PGA=0.51g作為虎頭埤水庫之設計地震水平加速度值。

五、因應壩體脆弱區：壩體培厚方案的研擬決策與施工

(一) 壩體培厚方案擇定

為提升大壩整體耐震強度，顧問公司團隊研擬A、B二培厚方案：

- 方案A採傳統壩體下游培厚方式，此施工技術成熟，難度低。惟無法改變壩體轉彎處之曲率，且較受用地限制。

- 方案B則採於壩體上游培厚，因虎頭埤需供灌下游農田用水，無法放乾施工，且需在水上施工，施工具不確定性。

方案A於壩體下游以拋石壓重、壩體培厚施工，可改善壩體受震後變形行為，提高水庫大壩之安全，符合耐震規範；然壩體轉折處之曲率仍無有效改善。因此，嘉南管理處採用方案B，並配合低水位時期施工，降低施工環境不確定因素，以改變壩體曲率，進一步改善該處地震來時應力集中之問題。

虎頭埤水庫壩體培厚方案比較表

方案選擇	施工方式	可能影響因素
方案A	<ul style="list-style-type: none"> ■ 傳統大壩培厚方式。 ■ 在下游坡面進行培厚，刨除表面後回填瀝層、河床料及塊石，施工技術成熟，難度低。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 可能影響台電電線桿，需協調遷移，增加額外費用。 ■ 壩體鄰近南168線道，培厚後可能延伸至道路，需改線或設擋土牆。 ■ 下游的排水系統與監測儀器需復原。 ■ 上游坡面也需改善，所用材料與下游培厚一致，改善範圍較大。
方案B	<ul style="list-style-type: none"> ■ 在上游坡面培厚，可改變壩體曲率，有效減少應力集中。 ■ 但因水庫有灌溉需求，無法進行空庫施工，需在水上施工，增加不確定性與安全風險。 ■ 需先施作基礎層回填至 EL.34.6m，再進行培厚。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 需在水上施工，增加不確定性與安全風險。 ■ 培厚材料與礫石基礎層不同，需額外混合土壤，施工工序複雜。
綜合比較	<ul style="list-style-type: none"> ■ 方案A影響範圍較大，需協調電線桿遷移、道路改線，及購置土地等問題，但施工技術成熟。 ■ 方案B上游培厚方案範圍較小，不影響下游設施，且可改變壩體曲率以免受震時應力集中於轉彎處；但施工工序較為複雜，且需要在水上進行，但無需土地徵收，可掌握施工時程。 	

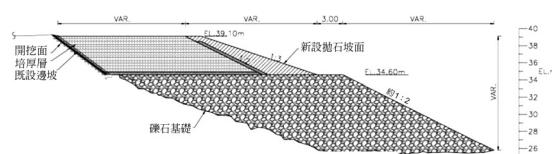
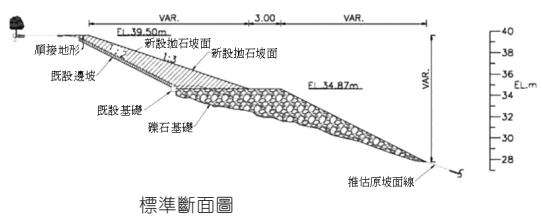
(二) 壩體安全改善工程主要工項

本工程於民國112年12月開工，民國113年9月完工。主要工作項目涵蓋大壩培厚工程、上游坡面改善工程，及周邊附屬設施遷移及復舊工程等等。關於轉折處培厚區段關鍵課題施工方法，概述如下：

- 將轉折段部分壩體先刨除，置換為2016年美濃地震緊急修復工程同材質，以利維持大壩穩定性。
- 培厚區段內部採1：2坡度填築培厚，再以1：3坡度拋石層覆蓋。

其他工項，例如西元1906年壩體重修碑、壩頂欄杆及壩頂路燈等具有富有歷史文化紀念價值之設施，均予

以保留。嘉南管理處特別與臺南市政府觀光旅遊局共同開會商議，決定後續保留方式及復舊。



農政專區



虎頭埤水庫(施工前)



壩體安全改善工程(轉折處施工中)



壩體安全改善工程(施工後)

六、實測檢驗：虎頭埤壩體耐震能力的驗證

2025年1月21日嘉義地區發生芮氏規模6.4地震，臺南市新化地區觀測到最大震度達5弱。此次地震壩體結構經受強震考驗，表現出良好的耐震行為。受震後觀測結果顯示，壩頂僅於新舊填築料交界處出現輕微不均勻沉陷，推測為因材料性質差異及密實度變異所致，屬可接受範圍內之局部變形。

至於最受關注之壩體轉折段則未發現剪裂跡象或張力裂縫，顯示已具良好改善。綜合研判，壩體具備良好之抗震設計與施工品質，在地震作用下仍具高度結構完整性與安全性，對虎頭埤水庫壩體安全提升一項重要的里程碑。

七、從補強完成走向治理：虎頭埤水庫的未來進程與挑戰

虎頭埤水庫於完成壩體安全改善工程後，已具備因應如「0121嘉義大地震」等級強震之能力，展現耐震補強策略的實質驗證。然而，這並非終點，而是開啟水庫永續治理新階段的起點。

本次壩體補強自規劃、設計至施工的全程經驗，已由嘉南管理處與顧問團隊系統性彙整成報告，並投稿至國內外專業期刊，不僅分享技術成果，更傳遞一項觀念：在極端氣候威脅下，傳統水利設施需要策略性轉型，重構安全與功能的平衡關係。

展望未來，嘉南管理處除可將此壩體技術成果提供給國內外工程師與學生參訪，透過深入淺出介紹壩體補強技術；此外，亦將持續強化壩體安全監測與智慧化管理，致力打造安全且具韌性的農田水利設施，承載穩健、導入創新，續寫水庫百年永續願景。

(作者均現任職於農田水利署嘉南管理處) ■