

土石壩心層內垂直立管之行為觀察 與對壩體影響探討

蔡明欣* 王國樑** 林生榮*** 樓漸達****

摘要

本文考慮土石壩心層內埋設的傾斜儀或沉陷鉞觀測井等垂直立管所可能衍生的問題，透過立管內水位的長期觀測，探討立管存在於心層內部對土石壩蓄水功能的影響及可能導致的破壞模式。研究結果顯示，由於立管的管節接頭並無水密，立管的存在相當於擋水心層內存在一上下連通的水位井，再加上心層內垂直立管與心層的材料差異、立管周圍的土體夯實較為困難等因素，在管內高水柱壓力加載於底部管外土體的不利滲流條件下，長期容易導致立管周圍土壤結構形成局部缺陷，沿立管周圍形成優先滲流或滲漏路徑。若鄰近的心層內部有儀器管線槽溝構造或其他施工不確定因素導致的缺陷，即可能逐漸發展連結形成影響心層擋水功能及威脅壩體蓄水安全的破壞模式，增加水庫蓄水安全的風險。建議有關單位針對國內於心層內有埋設垂直立管的中央心層分區型土石壩進行檢討，若經檢討所設立管的功效有限且具有潛在風險，應予以封堵處置以確保水庫蓄水安全。

關鍵字：土石壩、心層、垂直立管、破壞模式

一、前言

(一) 問題概述

以往土石壩在設計時，考慮壩體監測及施工作業需求，經常於壩體內部設置直立的管狀構造物（簡稱立管），例如：用以觀測壩體邊坡是否有滑移的傾斜儀觀測井；觀測壩體內部壓密沉陷行為的沉陷鉞觀測井；施工期間便利壩體填築高程控制的高程控制桿等。

所設的立管係由一段段固定規格長度的管材相接而成，考慮填築土體的壓密沉陷行為，管節的接頭通常做成可伸縮機構，且並無特別的阻水

機制，因此立管裝設於以擋水為主要功能的心層內，即於心層提供一上下連通管道，局部縮短庫水在心層的滲流路徑。

另外，立管周圍土壤夯實時，受空間限制僅能以小型夯實機具沿立管周圍謹慎夯實，困難度較高，加上立管材質和土壤材料特性的差異，若於介面產生間隙，容易形成優先滲流路徑。

由上述條件，水庫蓄水後心層內的滲流水會經由管節接頭流入管內，於管內形成持續且變動的水柱壓力，容易導致管底部周圍的材料承受高水壓引致水力破裂（Hydraulic Fracture），造成心層的局部破壞。若壩體及壩基介面因施工或地

* 中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員

** 經濟部水利署北區水資源局副局長

*** 經濟部水利署北區水資源局寶山第二水庫管理中心主任

**** 世界銀行水壩工程國際專家

質的不確定因素存在其他缺陷，即可能沿介面形成優先滲流路徑造成心層細料流失威脅壩體安全。

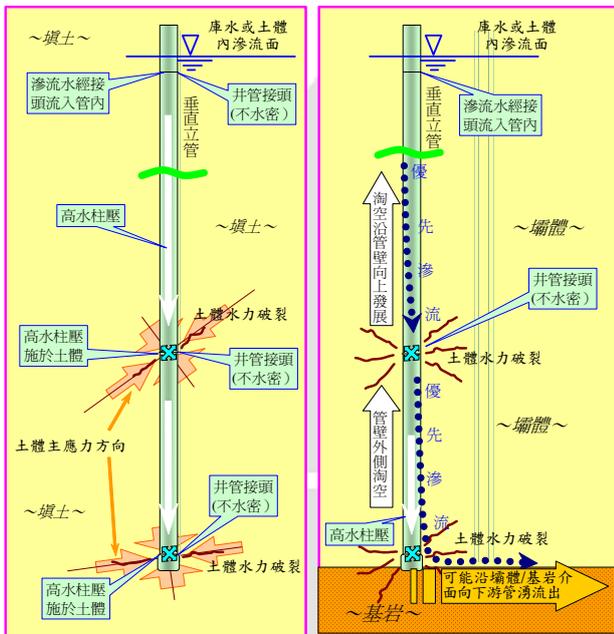
上述立管問題示意圖如圖 1 所示。

(二) 相關事故案例

1996 年加拿大庫容 740 億立方公尺、壩高 186 公尺的 W.A.C. Bennett 壩發生陷孔事件，險造成潰壩事件（圖 2）。事故後調查發現兩個陷孔位置恰位於施工期設置的高程控制桿的上方（圖 3），心層破壞自立管深處沿管周邊向上發展，鑽孔並發現百餘公尺的立管周圍心層材料均已淘空鬆弛。



圖 3 W.A.C. Bennett 陷孔處下方垂直立管



(a) 管內水壓加載 (b) 發展形成優先滲徑

圖 1 心層內立管可能導致問題機制



圖 2 1996 年 6 月 W.A.C. Bennett 壩頂陷孔

(三) 心層內埋設管線相關規範

目前國內並無針對心層埋設立管的相關限制或規定。而美國工兵團及美國墾務局（USBR）的堆填壩規範，均禁止在心層內部裝設垂直的立管或沿垂直方向埋設纜線。

(四) 國內壩體設置立管的現況

國內大型堆填壩主要設計興建於 1970 至 2000 年代，依各壩興建當年代的築壩觀念及監測目的，於部分壩體心層內設有垂直立管，作為壩坡滑移及內部沉陷觀測，或預留供壩體剪力波速度量測等用途。

然而目前施工中的湖山水庫，原基本設計階段於心層內預定設置傾斜儀及沉陷觀測井。民國 96 年 USBR 顧問團技術諮詢時，特別建議將心層內該等立管式的觀測井取消。負責設計及施工的經濟部中區水資源局依其建議辦理變更設計，將預定設置於心層的傾斜儀及沉陷觀測井取消。

(五) 本文研究方法

考慮心層內垂直立管可能造成壩體心層內局部破壞，影響壩體心層的擋水功能，對蓄水安全造成潛在風險，本文以新竹縣寶山第二水庫（簡稱寶二水庫）為例，藉由其心層立管內水位行為的觀測，探討評估立管存在對心層可能的影響及建議處置對策。

二、研究案例簡介

寶二水庫位於新竹縣寶山鄉，集水面積約 2.88 平方公里，蓄水容量 3,218 萬立方公尺，水源引自上坪溪攔河堰，為離槽水庫，主要設施包括大壩、溢洪道、取出水工等設施。其中大壩為中央心層分區型滾壓土壩，壩頂標高 154 公尺，正常滿水位標高 150 公尺，壩高 61 公尺，壩頂長 345 公尺。心層材料為塑性指數 (PI) 9~15 之 CL 或 ML，透水係數約 8×10^{-8} 公尺/秒；上、下游殼層材料以 ML 或 SM 為主，透水係數約 2×10^{-7} 公尺/秒。心層與上游殼層的透水係數相近，均屬透水性低的材料。壩體及壩基內設有孔隙水壓計觀測壩體滲流行為，壩體剖面及孔隙水壓計佈置如圖 4 所示。

寶二水庫大壩心層內共埋設 4 支垂直立管，分別埋設於 0K+195 及 0K+155 剖面，包括：傾斜儀觀測井 1 支、沉陷鉸觀測井 1 支及供剪力波速度量測觀測井 2 支。各立管基本資料如表 1 及圖 5 所示。

表 1 壩體埋設之立管基本資料

編號	埋設位置	孔底高程 (公尺)	原設置用途
K1	Sta.0k+194, U/S 10.0	93	傾斜儀觀測井
A1	Sta.0k+195, U/S 10.0	93	沉陷鉸觀測井
IM2	Sta.0k+155, U/S 15.0	104	供壩體剪力波速度量測
IM3	Sta.0k+155, U/S 5.0	104	供壩體剪力波速度量測

三、觀測探查及分析

為瞭解立管的存在對壩體的影響，本文自民國 98 年起開始觀測立管內水位變化，根據觀測結果研判分析，並辦理管內攝影、水質檢查及數值模擬分析等。相關成果分別說明如下：

(一) 立管內水位及鄰近儀器行為

由立管內水位觀測結果，顯示立管內水位除常規性地受水庫水位影響外，尚觀察得知一些特別的行為，分別說明及探討如下：

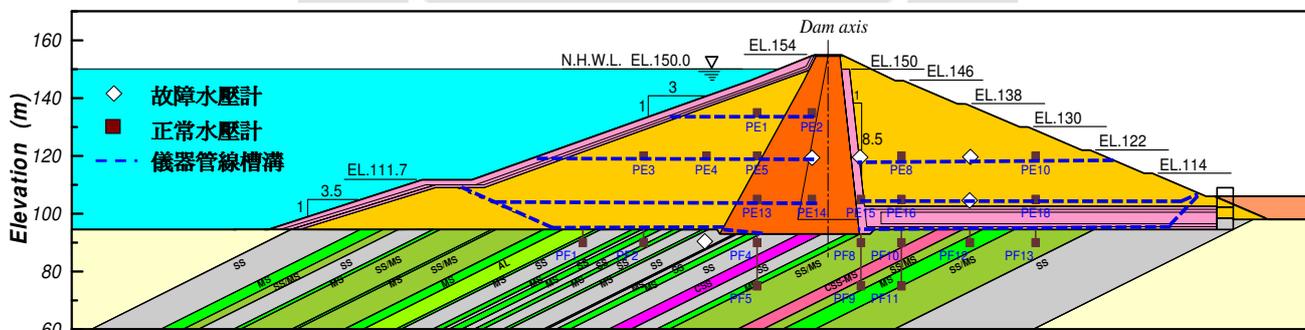
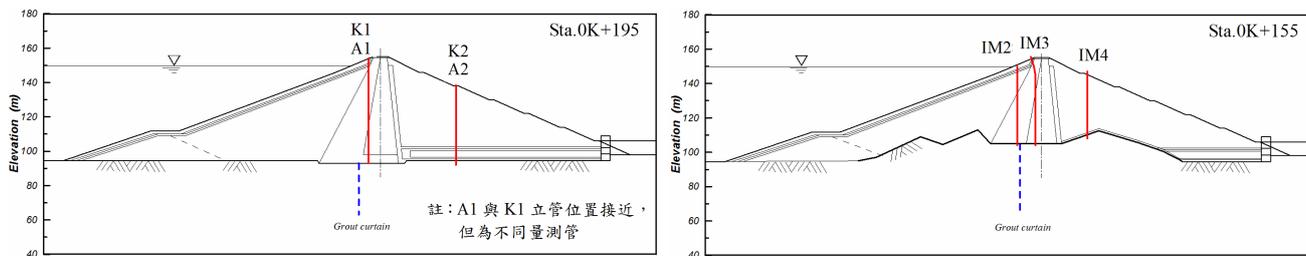


圖 4 寶二水庫大壩剖面圖



(a) 壩體最大剖面 (Sta.0K+195)

(b) 壩體剖面 (Sta.0K+155)

圖 5 壩體心層內部垂直立管裝設位置

1. 立管管節接頭水密情形

各立管內水位自觀測以來均有起伏行為（圖 6），顯示各管的管內水與管外壩體的滲流水並非完全隔離。由於各立管均由多段管材於管節處相接，管節所使用的伸縮機構並無阻水的機制，故研判各立管的管節接頭並不水密。

2. 庫水補注流入立管情形

0K+155 剖面心層上游側 IM2 立管內水位觀測（圖 6）顯示，當水庫水位上升超過特定高程（146.6 公尺）時，管內水位即快速上升接近水庫水位並隨之變化；當水庫水位下降低於同一高程時，管內水位即於短期內降低恢復較緩的起伏行為。0K+195 剖面的 K1 立管於水庫水位變化超越高程 149.3 公尺時亦有類似行為（圖 7）。

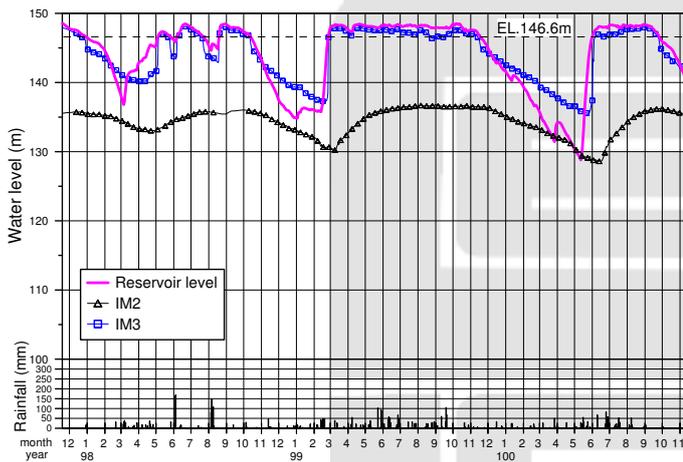


圖 6 0K+155 剖面立管水位變化歷時曲線

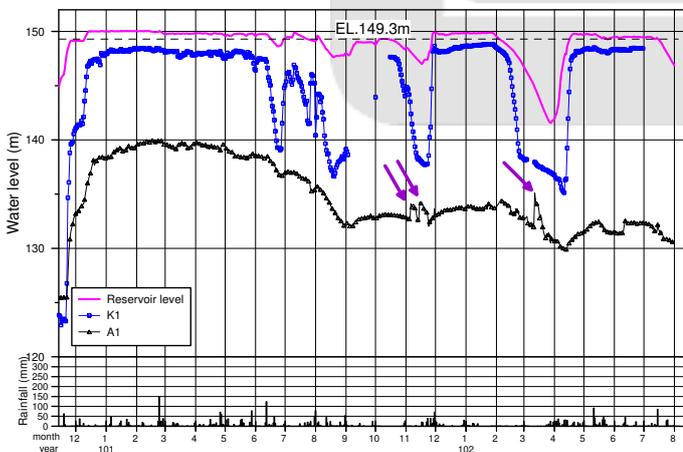


圖 7 0K+195 剖面立管水位變化歷時曲線

由壩體剖面（圖 8）研判，該現象應為水庫水位上升超過立管位於低透水性土層（如心層及上游殼層）的頂部後，沿較短滲流路徑或管壁外孔隙經管節進出管內外，致管內水位接近水庫水位變化。當水庫水位低於該高程時，管內水位即受到管外的土體滲流水主控，隨滲流行為起伏。

由於高水位時管內水位受到庫水補注，代表庫水的水壓可經由立管傳遞至管底部旁的土體或基礎，若水壓過大或土體有局部缺陷即可能導致局部水力破裂（Hydraulic Fracture）。且高水位時管內水持續由庫水補注，若發生水力破裂導致管內水突然流失，亦無法由管內水位變化得知。

3. A1 立管內水位不明原因起伏

0K+195 剖面 A1 立管內水位長期行為大致受水庫水位的趨勢影響起伏，但曾數次測得水位突然上升又下降的不明變化（如圖 7 箭頭標示）。其發生時機並不規律，經檢視與水庫水位及雨量變化無明顯關連，鄰近的壩體水壓計及壩內立管亦無類似行為。其水位歷時變化線形與典型水力破裂行為（圖 9）並不相同，研判並非管內高水壓導致管外土體水力破裂的行為。

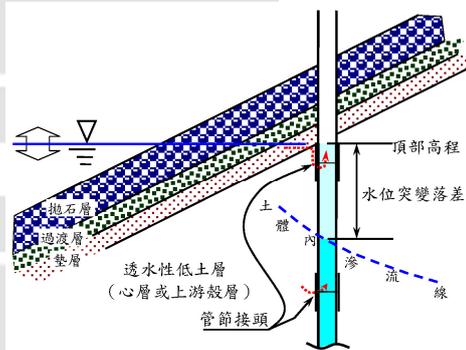


圖 8 水庫水位較高時立管水由庫水補注示意圖

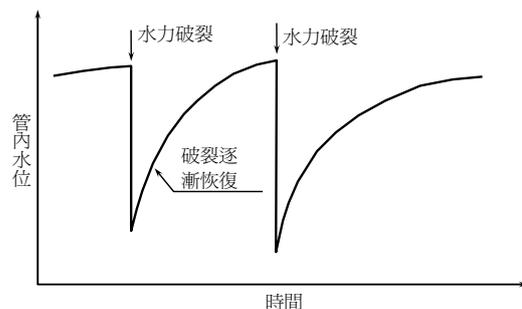


圖 9 立管導致管底周圍土體水力破裂典型行為

圖 10 為 0K+195 剖面各立管與壩體水壓計分布，其中 A1 立管與佈設水壓計的管線槽溝於三度空間相距僅約 1 公尺（圖 11），而自水庫蓄水以來，高程 120 公尺管線槽溝內的各水壓計曾測得總水頭與水庫水位起伏相近，研判應為管線槽溝透水性偏高所致，因此 A1 管內水位的突然起伏是否為管線槽溝較高水頭的滲流水影響所致，限於既有資訊不足尚難以確認。然而，立管內水位的突然變化代表立管旁的壩體有不明原因的突然水流進出，若一再發生，可能對水流經的壩體構造有不良影響。

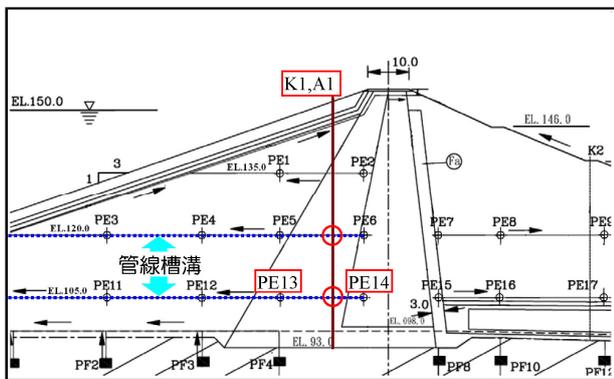


圖 10 立管 A1、K1 與壩體水壓計相關位置

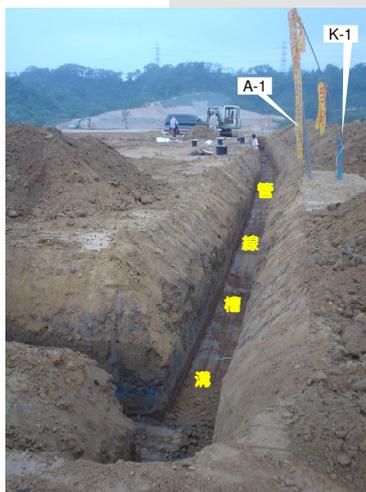


圖 11 高程 120 公尺管線槽溝施工照片

4. 鄰近的壩體監測儀器行為反應

民國 100 年 12 月至 101 年 2 月寶二水庫蓄至滿水位期間，心層內壩體水壓計 PE14 測得總水頭上升幅度明顯較上游側 PE13 為高的情形，與一般壩體越下游側受庫水起伏變化越不明顯的

滲流經驗有明顯差異，初步研判可能受其他較高水位的邊界條件或滲流路徑所導致。

根據圖 10 的剖面構造，PE14 位於 K1 及 A1 立管的下游側，比 PE13 更接近立管，是否為立管內的高水位，經由透水性較高的管線槽溝影響，導致 PE14 總水頭大幅上升。圖 12 為 PE14 總水頭與 A1 及 K1 立管內水位變化的關係，由圖可見 PE14 總水頭與 A1 立管內水位變化的關連性明顯，研判 PE14 總水頭為 A1 立管內水位所影響，顯示壩體立管的存在已經影響到壩體內部的滲流行為。

至於其他壩體內埋設的滲流監測儀器，包括：壩基及壩體水壓計、壩體滲流量水堰水量變化等，均未發現與壩體立管有關連的行為。

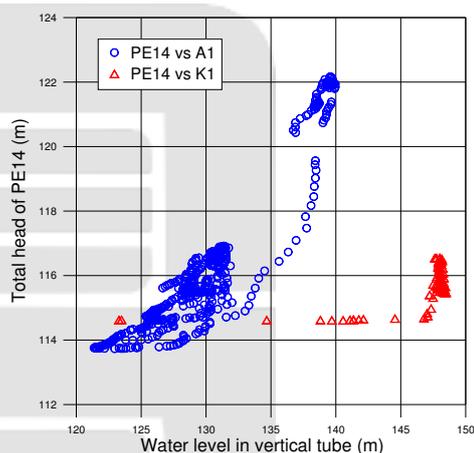


圖 12 PE14 總水頭與 A1 及 K1 水位關係

(二) 抽降水測試及管內檢查

為進一步瞭解立管狀況及其行為的原因機制，本文嘗試於 0K+195 剖面的 K1 管內辦理抽降水測試觀測鄰近 A1 管內的水位反應，並將孔內攝影鏡頭置入管內檢查水流補注狀況。另為確認管內外的水流進出是否將部分管外的土壤材料攜入管內，嘗試採取孔底的水樣以檢查立管底部的水質狀況，相關測試及觀察結果說明如下：

1. 抽降水測試

抽降水測試於水庫水位高程 149.8 公尺時辦理，當時 K1 管內水位約高程 147.9 公尺；A1 水位約 138.6 公尺，二相鄰管內的水位差應為不同

型式的管節接頭水密性及管節位置的差異所致。抽水作業採用抽水泵將 K1 管內的水抽出使水位降低約 3 公尺，任其水位自然回補恢復，同時觀測 K1 及 A1 管內的水位變化，並觀察鄰近管內水位的互動影響關係。

圖 13 為抽降水期間 K1 及 A1 管內水位變化歷時曲線。由圖可見，K1 管內水位降低之後，K1 管內水位約於 4 至 5 小時左右恢復至原水位。由恢復的速率估算，外水流入管內的速率約每分鐘 40 毫升，速率尚屬緩慢，研判短期內應不致於將管外土壤材料淘蝕。另外，鄰近的 A1 立管內水位於同一時間亦觀測到些微降低，最大降低幅度接近 1 公尺，降低及恢復的速率明顯較 K1 緩和，約 2 小時降至最低水位，20 小時後恢復原有水位，研判可能係 K1 水位降低後影響其管外滲流條件，繼而導致鄰近 A1 管內水的補注減少或流出增加所致。

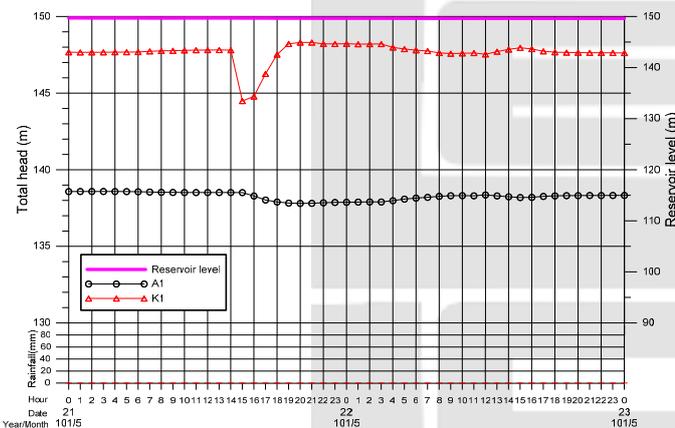


圖 13 K1 立管抽水時鄰近立管水位變化

至於 A1 水位變化較遲緩可能為其管節接頭位置差異或其管節接頭較具水密性，亦可解釋 A1 管內水位較 K1 水位低的現象。

2. 抽降水期間攝影檢查

本文現場抽水測試時使用孔內攝影器材進入孔內觀察，圖 14 為孔內攝影器材於抽降水測試時所觀察到主要流入水的管節接頭位置，約位於高程 147.6 公尺，較上游殼層頂面與 K1 立管交界處高程 149.3 公尺為低，可證實圖 8 立管內水位於高水庫水位時的流入機制。



圖 14 抽水測試時 K1 管節接頭出水情形

3. 立管底部水質檢查

為確認管內外的水流進出是否將部分管外的土壤材料攜入管內，孔內攝影檢查時曾嘗試直接以攝影機檢視立管底部是否有土壤細料沉積，但檢查結果管底疑因生物膜或礦物氧化呈黑色，攝影機無法辨識是否有沉積物。為此，本文採用貝勒管 (Bailers) 置入立管底部，嘗試採取管底的水樣確認水質狀況。取樣結果顯示孔底水樣非常乾淨，並未發現水質混濁及任何土壤細料沉積的跡象 (圖 15)。



圖 15 K1 孔底抽取水樣清澈無雜物

(三) 滲流數值模型分析

本文透過滲流數值模型分析壩體的滲流行為，以輔助瞭解壩體立管存在於心層內對壩體滲流行為的影響。

1. 分析模型

滲流數值分析採二維的有限元素法程式 SEEP/W 辦理，假設壩體內的立管相當於透水性高的材料設於壩體內部，代表滲流水可自由進出立管管節接頭，連通上下方心層的機制。另外假設立管所在剖面的行為，符合二維滲流模型，分析所得的水壓、等勢能線及水力坡降等，僅代表該剖面的行為，建構模型網格如圖 16 所示，為

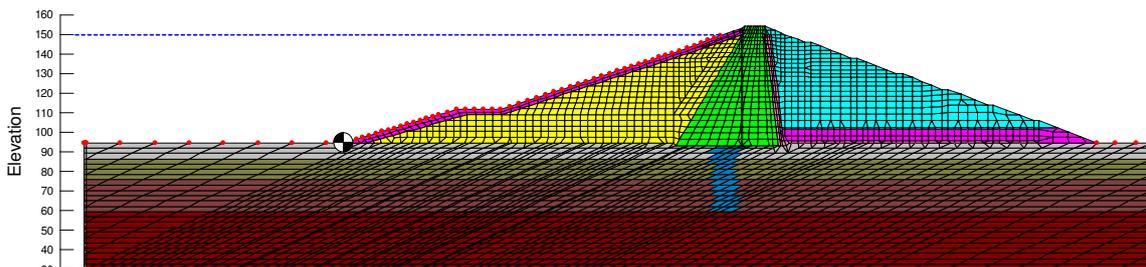


圖 16 0K+195 斷面滲流數值模型網格

探討立管存在的影響，同時分析相同網格但無立管存在的模型作為對照比較。

分析所採用之材料參數根據設計階段材料調查、施工期現地透水試驗，及蓄水初期滲流反算分析所得的材料滲透係數，如表 2 所示。

表 2 滲流模型分析採用材料滲透係數

材料分區		滲透係數 (公尺/秒)	k_h/k_v	備註
壩體	上游面拋石層/過渡層	3.2×10^{-4}	1.0	根據設計階段調查、現地透水試驗及蓄水初期滲流反算分析成果
	上游殼層	2.2×10^{-7}	2.0	
	下游殼層	2.2×10^{-7}	2.0	
	心層	8.5×10^{-8}	4.0	
	垂直濾層 Fa	2.0×10^{-5}	1.0	
	水平濾層 Fb 及 Fc	3.2×10^{-4}	1.0	
壩內立管		3.2×10^{-4}	1.0	假設同上游面拋石層/過渡層
壩基岩盤	高程 86 公尺以上	1.2×10^{-6}	1.0	根據設計階段調查、現地透水試驗及蓄水初期滲流反算分析成果
	高程 76~86 公尺	1.2×10^{-6}	1.0	
	高程 60~76 公尺	6.0×10^{-7}	1.0	
	高程 30~60 公尺	1.6×10^{-7}	1.0	
	隔幕灌漿	1.2×10^{-6}	1.0	

2. 分析結果探討

根據數值分析結果，水庫正常滿水位達穩態滲流時的壩體於水壓分布如圖 17 所示，總水頭分布如圖 18 所示，水力坡降分布如圖 19 所示。

分析結果顯示，庫水可經由透水性高的拋石/過渡層直接到達較靠心層上游側的立管，導致其管內水位與水庫水位一致，此現象與 IM2 及 K1 立管內水位所觀測到的行為大致相同。

由分析得水壓及滲流線分布可見，立管存在導致滲流線更靠近下游垂直濾層，且等水壓線分布較為緊密。等勢能線分布方面，心層內部受到立管存在的影響，等勢能線呈現較混亂的分布，研判為立管內總水頭與水庫水位相當所導致。

水力坡降方面，無立管存在時心層內水力坡降最大約 1.0~1.5 左右，符合一般心層設計將水力坡降控制於 2 以下的要求。但當立管存在時，心層內滲流水因局部垂直向的連通，導致水力坡降分布極不均勻，於立管底部及靠近下游垂直濾層附近呈較大的水力坡降，數值甚至高達 6 以上，高達 6 的水力坡降可能導致心層或軟岩壩基呈不穩定滲流條件，容易發生局部水力破裂。

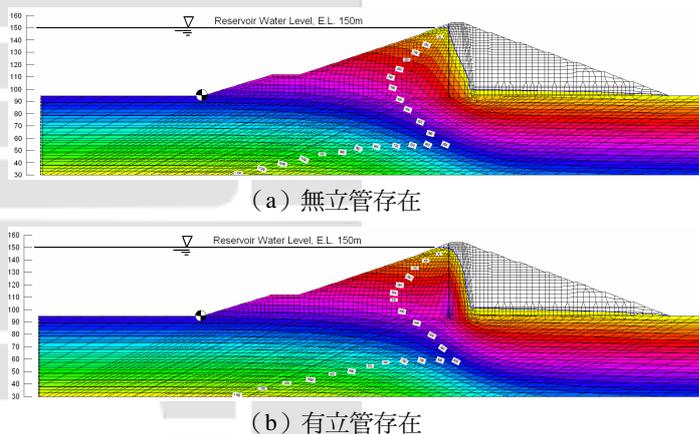


圖 17 0K+195 剖面滲流分析得壩體水壓分布

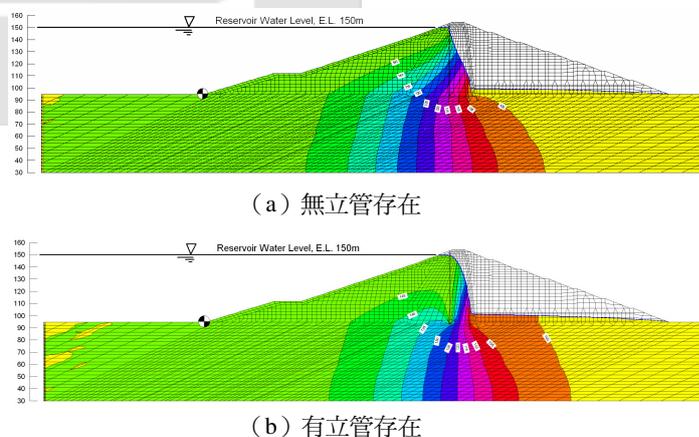


圖 18 0K+195 滲流分析得壩體等勢能線分布

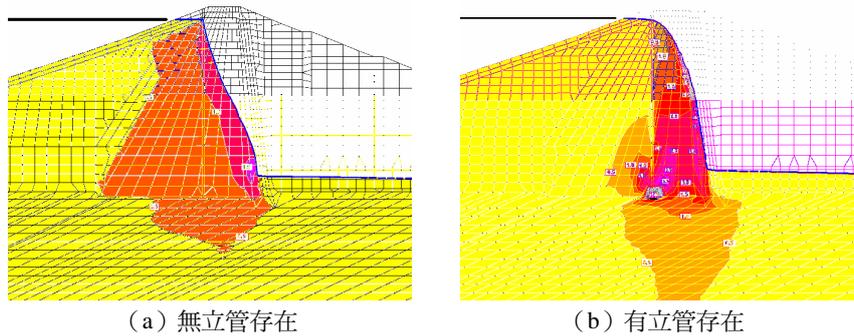


圖 19 0K+195 滲流分析得壩體水力坡降分布

綜合滲流分析結果，立管的存在導致水庫水壓直接加載於心層之內，形同原本透水性極低的心層內存在一條垂直向的水流通路，大幅縮短立管所在斷面的心層滲流路徑，降低原本完整心層的擋水功效，並增加所在剖面立管底部及心層下游側的滲流壓力，形成局部區域不利的滲流條件。

四、潛在破壞模式評估及改善對策

(一) 潛在破壞模式評估

根據前述的觀察及分析結果，土石壩心層內立管的存在可能縮短所在剖面心層滲流水的滲流路徑，形成不利的滲流條件，長期可能造成壩體心層內的局部破壞，且由於其對壩體的影響為長期且持續，若壩體內有其他的缺陷或構造與立管相關連，即有可能逐漸發展連結形成影響壩體安全的破壞模式，增加水庫蓄水安全的風險。

以寶二水庫大壩的案例而言，0K+155 剖面的 IM2 與 IM3 立管之鄰近區域並無其他心層土體以外的構造存在，與立管底部相接觸的壩基岩盤亦均屬節理不發達的軟岩，且基礎處理有施以 6 至 8 公尺深的固結灌漿及表面處理將基岩與壩體鑲接面的縫隙予以填補，使基礎岩盤幾乎無可供心層土壤顆粒攜出的途徑，因此與該二立管相連結形成破壞模式的可能性較低。

0K+195 剖面方面，由於 A1 和 K1 立管同一剖面尚有設置壩體土壓計、水壓計和佈設儀器纜線的管線槽溝，且位於高程 120 公尺的管線槽溝於蓄水初期曾觀測得透水性偏高的情形。目前已觀察得心層內 PE14 水壓計於水庫滿水位受立管

內水位影響的行為，若立管的水流進出現象和高水柱壓狀況仍持續存在，長期可能與管線槽溝內的滲流水的相互影響，逐漸影響心層功能。然而，目前壩體管線槽溝並未貫穿壩體心層，且立管底部及儀器纜線槽溝末端至下游濾層尚有數十公尺的距離，下游濾層材料亦符合過濾及排水的功能要求，再者，即使立管與鄰近的管線槽溝形成優先滲流路徑，心層基礎的岩盤仍無可供心層土壤顆粒攜出的途徑，心層仍可保有擋水功效。整體而言，0K+195 剖面雖可能因立管存在縮短滲流路徑及局部破壞的潛在問題，但尚不具備形成完整破壞模式的條件（圖 20）。

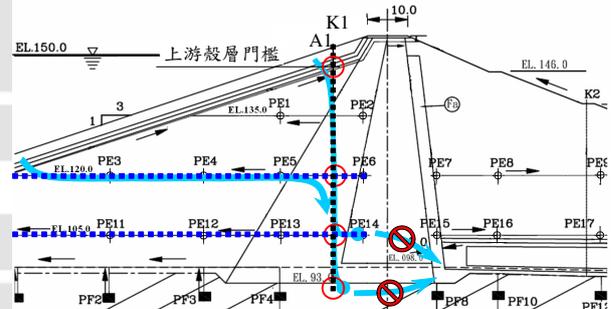


圖 20 0K+195 剖面潛在破壞模式探討

雖然單獨的立管存在心層內並不具備形成完整破壞模式的條件，但心層因立管存在導致心層僅餘一半的有效擋水厚度，若因施工不確定性或其他未能掌握的狀況，例如地震造成壩體心層形成局部裂隙，因滲流水侵蝕逐漸擴大，仍可能因缺陷發展威脅壩體安全，即使無其他相關條件可形成完整的破壞模式，但以風險角度而論，持續存在的壩體內部缺陷在蓄水壩安全管理上仍為長期隱憂，因此若於發現異常情形的初期即予以處

置，可阻止缺陷的進一步發展，降低形成破壞模式的可能。

(二) 改善對策

立管自壩體心層施工填築時即以特別碾壓方式埋設於壩體內部，管體外側與土壤接觸的介面非常難以改良處置，除非已發現管體外側土壤有明顯的淘空情形，否則改良管體外側的土體將擾動管體外側心層材料的完整性。

由於立管管內的水可與管壁外的滲流孔隙水相連通，將管內的水壓加載於管外土體，且管內的空間提供心層內上下連通的管路，因此若將管內的空間封堵，可直接阻斷立管存在造成心層缺陷的機制，停止管內高水柱壓及管內外水流進出對壩體心層影響的發展。

封堵立管的材料，根據美國墾務局的建議可採用接近心層材料特性的皂土水泥漿，其配比可參照行政院環境保護署所訂定的廢井作業規範辦理。

(三) 立管存廢評估

雖目前國內新建堆填壩的設計已不在心層內設置立管，但既有壩內的立管已經存在，當時設置立管的目的自有其功用及考量，因此若考慮將立管封堵，應先評估立管停用對原裝設目的影響。目前寶二水庫大壩心層內設置的立管包括：傾斜儀觀測井、沉陷鉞觀測井及剪力波速量測井等。各立管的目的及目前功效存廢評估如下：

1. 傾斜儀觀測井

傾斜儀觀測井的原設置目的在觀測壩體邊坡因地震急洩降事件導致的滑坡行為，其中急洩降的條件於設計階段經充分分析已符合安定性要求。地震事件方面，世界大壩協會（ICOLD）於2001年布告，堆填壩體受震發生滑坡並非主要破壞模式，根據大壩受地震侵襲事故案例的統計，以現代機具分層碾壓填築的堆填壩，在承受強烈地震後壩體發生滑坡破壞的案例非常稀少，由於滑坡並非現代堆填壩的主要破壞模式，因此傾斜儀觀測所能提供壩的安全資訊有限，其觀測井存在的必要性低。

美國墾務局顧問團於2012年針對寶二水庫立管問題的技術諮詢提出：寶二水庫大壩為現代壩工技術設計且施工良好的壩，壩體經由良好碾壓及品質控制，並無任何明顯的理由可質疑上游壩坡的安定性，顧問團建議放棄傾斜儀觀測井等的功能，並將立管封堵。

根據堆填壩受震案例經驗，地震事件過後主要關切問題在於壩頂是否因過大沉陷導致溢頂、是否發生壩體橫向或縱向裂縫繼而造成壩管湧或漏水。因此常規地觀測壩體孔隙水壓行為，地震事件後的沉陷觀測及目視檢查，關注壩面裂縫、沉陷或隆起等，比傾斜儀更能掌握壩體狀況。

2. 沉陷鉞觀測井

沉陷鉞觀測井係為量測施工期間壩體內部的沉陷所設置，以瞭解碾壓壩體材料的壓密行為，回饋築壩材料施工含水量控制的參考。該觀測項目於民國70至90年代普遍運用於大型土石壩的施工實務，目前壩工界對築壩的壓密沉陷控制已累積相當豐富的經驗，對施工期間及壩體完工運轉後的內部沉陷已能透過設計時充分的材料調查及試驗予以有效掌握。以既有壩而言，沉陷鉞觀測井於壩體完工之後已達成施工期間觀測壩體內部沉陷的階段性任務，繼續觀測的監測效能低，若封堵對壩的安全監測作業並無損失。

3. 壩體剪力波速量測管

國內僅寶二水庫有設置壩體剪力波速量測管，係考慮剪力波速為壩體動態反應分析的重要參數，故設置供量測壩體的剪力波速，由於該量測管於觀測之後即無其他用途，將其封堵並無不利影響。

目前寶二水庫大壩心層內的各類立管均已達其階段性功能任務，繼續觀測的功效有限，且部分立管已觀察得異於尋常的行為，雖尚未發現影響壩體蓄水安全的破壞情形，但及早予以封堵處置應可改善心層內部不平衡的條件，阻止進一步破壞的發展及整體破壞模式的形成。各立管存廢評估如表3所示。

表 3 心層所設各立管原設置用途及存廢評估

謝 誌

立管種類	編號	原設置用途	封堵優缺點探討
傾斜儀觀測井	K1	壩體邊坡滑移觀測	優：阻斷立管存在的不利條件，降低壩體破壞的風險。 缺：封堵後傾斜儀觀測井無法使用，但根據案例經驗，現代堆填壩的壩坡滑移並非主要破壞模式，傾斜儀所能提供壩的安全資訊有限，封堵停用對壩的安全監測影響有限。
沉陷鉸觀測井	A1	施工壩體內部沉陷量監控，回饋施工控制參考	優：阻斷立管存在的不利條件，降低壩體破壞的風險。 缺：封堵後沉陷鉸將無法使用，但沉陷鉸施工期間的階段性任務已完成，繼續觀測功效有限，故封堵停用對壩的安全監測並無影響。
壩體剪力波速度測管	IM2 IM3	預留供量測壩體剪力波速作為壩動態分析參數	優：阻斷立管存在的不利條件，降低壩體破壞的風險。 缺：封堵後無法再供剪力波速度量測，但剪力波速仍可採其他方式（諸如受震反應或 SASW 法）取得或驗證，封堵影響有限。

本文感謝中興工程顧問社派駐現場的施喬馨、陳家豪及盧俊彥三位前工程師，於本議題調查期間辛勤協助蒐集各項監測資訊及辦理測試。

參考文獻

經濟部水利署中區水資源局（2006）寶山第二水庫土壩工程施工中填方材料試驗壩體安全性評估報告
 經濟部水利署北區水資源局（2009）寶山第二水庫大壩監測分析及設施檢查—97年度安全監測分析報告
 經濟部水利署北區水資源局（2007）寶山第二水庫蓄水前安全複核計畫總報告
 經濟部水利署北區水資源局（2012）寶山第二水庫初次使用安全評估計畫總報告
 行政院環境保護署環署（2000）地下水水質監測井廢井作業規範土字第 0990036371 號函訂定
 Garner S. J. (2006) Detection and Assessment of Internal Erosion at WAC Bennett Dam, BC Hydro, Available: <http://www.swedcold.org/Text/WORKSHOP%202006/Session%201/1420%202006-09-11-WORKSHOP-Steve GARNER.pdf>
 GEO-SLOPE International Ltd. (2009) Seepage Modeling with SEEP/W 2007, An Engineering Methodology Fourth Edition
 ICOLD (2001) Design Features of Dams to Resist Seismic Ground Motion, Bulletin 120, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams, Paris
 John Dunicliff (1993) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley-Interscience
 Stewart, R. A. Gaffran, P. C., Watts, B. D., Sobkowicz, J. C., Kupper, A. G. (1998) WAC Bennett Dam – The Characterization of a Crest Sinkhole, ETDEWEB – Leading the Way to Worldwide Energy Technology Discoveries, Nov. 1998, pp. 1-19
 Stewart R. A. and Garner S. J. (2000) Performance and Safety of WAC Bennett Dam—A Seven Year Update, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal
 Swaisgood, P. E. (2003) Embankment Dam Deformations Caused by Earthquakes, Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 14
 U. S. Department of Interior Bureau of Reclamation Technical Service Central (2007) Technical Review of Hu Shan Reservoir Project, Prepared for Taiwan Water Resources Agency Central Resources Bureau
 U. S. Army Corps of Engineers (1995) Instrumentation of Embankment Dams and Levees, Engineer Manual EM 1110-2-1908, Engineering and Design, Washington, DC 20314-1000
 U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center (2012) 2012 Work Scope Under Appendix No. 6: Findings of the Technical Review Team, Technical Review Report, Denver, Colorado

(四) 立管封堵後的觀測

目前寶二水庫大壩因立管存在所觀察得較異常現象主要為位於 0K+195 斷面的 K1 及 A1，將其封堵後管內水位將無法繼續觀測，故未來水庫水位達滿水位期間，該水壓計是否仍有類似行為，為驗證立管封堵成效的觀察重點。此外，壩體及壩基水壓計及滲流水的持續觀測，為確保壩體滲流安全的必要作為。

五、結論與建議

根據本文探討堆填壩心層內立管對壩體滲流影響的成果，壩體心層立管的存在可能導致立管的管節接頭有不穩定的水流進出，影響管節旁土體的安定，且立管存在所形成的滲流條件將導致所在剖面的心層擋水厚度減少，形成不利的滲流條件，若鄰近位置有其他壩體構造或施工不確定因素導致的缺陷，即可能發展連結形成影響心層擋水功能及威脅壩體蓄水安全的破壞模式，增加水庫蓄水安全的風險。

建議有關單位針對國內於心層內有埋設垂直立管的中央心層分區型土石壩進行檢討，若經檢討所設立管的功效有限且具有潛在風險，應予以封堵處置以確保水庫蓄水安全。