

舊壩安全監測系統之改善～以新山水庫為例

高憲彰^{1,*}、林金成¹、邱顯晉¹、陳春泉²、莊志勤²、樓漸逵³
¹財團法人中興工程顧問社 ²臺灣自來水公司第一區管理處 ³大壩安全國際顧問

摘要

水庫為臺灣最重要之水資源設施，水庫之安全與否除對於水資源調度有重大之影響外，其所蓄積之龐大水體對下游亦是重要的風險來源，故許多水庫均設置儀器以監測大壩的行為。以往蓄水壩監測儀器之設置多著重於驗證設計或與規範比較，因此儀器之佈設多選在壩、堰之最大或特定斷面上，且多採均勻佈置方式。惟隨著蓄水壩潰決事故經驗之累積，國際壩工界發現傳統之監測儀器佈設方式無法確保大壩之安全，故近年來蓄水壩之安全監測開始導入風險概念，藉由壩可能破壞模式之鑑別找出壩的薄弱部位，據以規劃或改善壩的安全監測系統。本文主要介紹目前國際壩工界廣泛採用之風險告知壩安全監測理念，並以新山水庫大壩安全監測系統之改善為例，說明如何將此觀念應用於舊壩安全監測系統之改善及監測效能之提升。

關鍵字：蓄水壩、風險告知、安全監測。

Improvement of Safety Monitoring System of Existed Dam ~ Taking Xinshan Reservoir as an Example

H. C. Kao^{1,*}, C. C. Lin¹, S. J. Chiou¹, C. C. Chen², C. C. Chuang², and J. K. Lou³

¹Sinotech Engineering Consultants, Inc. ²Taiwan Water Corporation ³International Dam Safety Consultant

Abstract

Reservoirs are the most important water resources facilities in Taiwan. Reservoir safety not only has a major impact on water resources management, the huge amount of water behind the dams also imposes a potential major risk to the downstream area. Therefore, many dams are instrumented to monitor the performance of dam. Traditionally, the installation of dam monitoring instruments was mainly to verify the design or to compare with the design specifications. Most of the instruments are installed in the largest or specific cross-section of the dam or weir. However, with the accumulation of experiences learned from dam failures and accidents, it has been found that traditional instrumentation design cannot guarantee the safety of the dam. Therefore, the safety monitoring of dams has begun to introduce the concept of risk, by identifying the potential failure modes of the dam to find out the weak parts of the dam, and planning or improving the safety monitoring system of the dam accordingly. This article introduces the risk-informed dam safety monitoring concept widely used in the world, and takes the safety monitoring system of Xinshan dam as an example to show how to apply this concept to improve the safety monitoring system of existed dam.

Key Words : dam, risk informed, safety monitoring.

一、前言

臺灣雖然雨量豐沛，惟由於豐枯水期分配不均，加上本島地勢陡峭，川短流急，使

得水源涵養十分不易，因此有賴各大小型之蓄水建造物調蓄水源，以滿足農業、民生及工業等用水需求。目前臺灣興建之大小壩及攔河堰等蓄水建造物已超過一百座，分別由中央或地方政府、公營事業機構、地方農田

*通訊作者(Corresponding author) : hckao@sinotech.org.tw

水利會等單位經營管理。但由於受地形限制，臺灣之水壩多建造於平地與山區交界處，而近年來隨著經濟建設之發展，水庫下游地區之開發密度逐年增高，因此，水壩之安全除關係各標的用水之供應外，並與下游產業及人民生命財產安全息息相關。雖然臺灣至今並未發生過潰壩案例，但是考慮到水壩一旦潰決，勢必造成難以想像之重大損失，因此仍必須正視此一問題。

每一座水壩由於受到先天條件、設計方法、施工技術等限制，以及後續維護及操作之影響，基本上都有其不確定性存在；另一方面，隨著使用年限的增加，不僅壩體材料及受力情況隨時在變，外在條件(諸如地震規模、氣候條件等)亦可能變動，因此，水壩的安全是一個動態的問題，如僅經由規範要求或幾年一次的安全評估來把關，在實務上實難以確保下游地區民眾生命財產之安全。

由國際蓄水壩事故案例顯示，多數事故在發生前即有跡可循，但卻因未能及早警覺而導致事故發生，如果有適當之檢查及監測計畫(Surveillance Program) 或可防患於未然。監測儀器因可協助工程師探查目視檢查所不能及的部位，且配合自動觀測及警戒值之設定時亦可發揮即時預警功能，更為蓄水壩安全管理不可或缺之一環。

臺灣地區蓄水壩之建設最早可以溯至清朝，如位於臺南市新化區之虎頭埤水庫，其後在日治時代及光復至今仍陸續興建，因此壩齡自百年以上至數年不等，其中許多早期興建之水壩因時代背景，興建之時並未設置監測儀器，其後隨著監測技術之發展及壩工知識之累積，才開始在水壩興建之同時裝設監測儀器，但隨著壩齡逐漸增加，這些水壩早期建置之監測儀器亦屆齡損壞，面臨改善更新問題。

有鑑於監測系統之有效與否與大壩安全息息相關，因此新建壩安全監測效能之提升及既有壩監測儀器損壞及更新改善等議題已成為世界各國壩安全管理須正視之問題，而風險觀念的導入則是近年來各國用以解決此一議題之有效手段。因應國際壩工界之新趨勢，目前國內蓄水壩監測系統之規劃設計、

更新改善、監測資料評析與預警管理等亦開始引入風險思維，期能提升蓄水壩安全監測之成效。有鑒於此，本文除介紹目前國際上先進之風險告知(risk informed)監測概念外，並透過新山水庫大壩安全監測系統改善案例說明實際應用情形。

二、蓄水壩安全監測觀念演進

早期蓄水壩之安全管理主要從「確保壩體結構完整」之角度出發，著重於設計值與規範之比較，較少從構件間之關聯性探討壩體因單一構件失效(或破壞)引發連鎖效應而導致壩體潰決之可能性，因此在監測系統之規畫上多偏重於蒐集壩體之受力反應，而儀器主要均勻佈設在水壩之特定(或最大)斷面上，或是設於學理上較為關鍵之部位。

惟隨著世界各地壩事故經驗之累積，國際壩工界逐漸發現許多壩的破壞並非肇因於傳統所認知之破壞模式(failure modes)，亦非發生於壩體最大斷面上，此為早期儀器規劃時壩工界尚未認知之問題，因此，當破壞模式開始發展時，先前裝設之監測儀器往往難以有效偵測出壩體之異常狀況，或只能在異常狀況發展到一定程度才能反映出徵兆，無法及早提出預警而錯失處置之先機。

例如美國1975年完工的提頓壩(Teton Dam)在完工後隔年的初次蓄水(first filling)期間於壩體與右壩座交界處發生管湧並迅速擴大，最終導致壩體潰決。該壩確切之破壞機制雖經多組國際壩工專家調查研究後仍難獲得一致結果，惟所有專家普遍同意該壩之管湧應係肇因於右壩座節理發達岩盤之處理不當、心層與岩盤交界處設計及施工不良、心層下游未設置反濾層等諸多原因所導致。由於潰壩前設於壩體之諸多監測儀器均未偵測到異狀，因此，該案例於美國壩工界掀起檢討之聲浪，迫使負責設計施工之美國墾務局(USBR)改組，並重新檢討壩的設計及監測理念。依據事後之檢討，認為若於設計階段即能認知該處為關鍵部位而設置適當之儀器監測，則於異常滲漏發生之初或可及早得知並加以因應，也許可避免潰決之

發生，就算最後潰決仍無法避免，但是卻有機會減少潰壩造成之後果。

Teton Dam潰壩之後，壩工界開始注意到安全監測的重要性，惟此階段主要著重於監測儀器佈置及裝設技術之改善，並開始注意到儀器之不良設置亦可能影響壩體之安全，但風險觀念仍比較薄弱；1990年代後，國際壩工界進一步體認到壩安全是一個動態的問題，因此開始將風險概念導入壩安全管理實務中，提出壩安全風險管理之目的應在於讓水壩業主在充分了解其所面臨之風險下進行決策，以達到安全與成本兼顧的局面，此即所謂風險告知決策(risk informed decision making, RIDM)概念。

將RIDM概念應用於壩安全監測，即意味著監測成果要能確實反映出壩可能面臨的安全風險，因此每個儀器之設置目的、與壩體安全相關性(即能否反映壩的可能破壞模式)以及在破壞模式發展過程之預期反應均須詳加探討，特別是對增設儀器之評估時，除了上述要求外，尚須就增設儀器對壩體可能造成之影響、未來資料之處理及其警戒模式等詳加評估並留下書面紀錄。此種做法除可提供後續監測系統有效性檢討所需之資料外，管理單位或辦理安全評估之工程師亦可充分了解原監測系統之布置理念，避免不必要之猜測與誤判(USACE, 2020)。

以下分別以美國大壩協會(United States Society on Dams, USSD)及美國聯邦能源管理委員會(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)、加拿大卑詩省水電公司(BC Hydro)為例，說明目前國際上如何將風險告知概念應用於壩安全監測實務上。

2.1 美國大壩協會(USSD)及美國聯邦能源管理委員會(FERC)

美國大壩協會之大壩及基礎檢監測委員會(Committee on Monitoring of Dams and Their Foundations)於2008年11月提出壩安全監測作業白皮書(USSD, 2008)，闡述監測儀器在壩安全監控作業之重要性。該白皮書認為：1.在壩的生命週期中，因階段性任務之不同，對於監測的需求亦有所差

異，因此必須定期檢討監測計畫(系統)能否確實反映壩的實際狀況，提供安全性評估所需之資訊；2.不當監測項目所得之資訊不僅無法提供評估壩行為之所需，更可能因大量無用資料之累積而造成壩體安全之假象，導致管理單位或工程師忽略壩潛在之危險；3.除非有明顯之缺陷(deficiency)或潛在之危險必須進一步監控，不建議花太多經費或藉由高風險性手段設置監測儀器(例如於分區型土壩之止水心層內鑽孔)，而其目的僅為多瞭解一些壩的行為。

為評估現有檢監測計畫之合宜性，USSD及FERC(FERC, 2017)均建議採用可能破壞模式分析(potential failure modes analysis, PFMA)來協助評估，其流程如下：1.利用現有之資料判釋出壩現階段之可能破壞模式(potential failure modes, PFMs)；2.依據各可能破壞模式之發展過程，找出可監控之方法，包括時機、位置及其功效，必要時應就監控所需之費用與其失敗可能造成之損失進行經濟性評估；3.擬訂各儀器之測讀頻率、方式、資料蒐集研判、人員訓練計畫以及當偵測到可能破壞模式發展時之處置流程等；4.訂定各監測項目於相對應可能破壞模式下可能產生之反應值，以作為管理者快速評估監測值是否正常之參考。

上述檢監測計畫除涵蓋重點項目之儀器監測外，通常還包括水庫管理人員日常目視檢查之要求，且可能破壞模式之考量不僅針對正常運轉情況，亦須考慮於極端狀況(如地震及洪水)下發生之可能性。

2.2 加拿大卑詩省水電公司(BC Hydro)

BC Hydro擁有80餘座蓄水壩，包括庫容達740億立方公尺之貝內特壩(Bennett Dam)、庫容248億立方公尺之米卡壩(Mica Dam)及庫容15億立方公尺之雷夫爾斯托克壩(Revelstoke Dam)等，該公司為降低其所轄壩之風險，自1990年代起率先採用風險概念檢討及改善所轄壩監測系統之效能，其基本原則為"安全監測儀器之裝設沒有絕對性，只問必要性，其最終目的在於提供足夠之風險告知資訊"。例如就分區型土

壩而言，雖然一般不考慮在阻水心層內增設儀器，避免因鑽孔而增加心層破壞之風險，但如新增儀器所獲得之資訊對壩風險管理的助益高過對壩體造成的破壞性，仍可安裝儀器。

依據上述原則，其對於監測系統合宜性評估之工作流程為：1.採用失效模式與影響及關鍵度分析(failure mode, effects, and criticality analysis, FMECA)方式來分析壩系統中每一個元件對整個系統性能的關鍵性，並作為壩可能破壞模式鑑別之參考；2.依據各可能破壞模式之發展過程，檢討目前監測系統之有效性；3.如欲新增儀器時，必須就新增儀器的必要性及其對壩體或現有系統可能產生的影響等進行風險評估，以確認新增儀器之必要性；4.訂定各監測項目於相對應可能破壞模式下可能產生之反應值；5.擬訂各儀器之測讀頻率、方式、資料蒐集研判、人員訓練計畫以及可能破壞模式發現後之處置流程等(高與樓，2015)。

由前述之討論可知BC Hydro採用之方法與USSD及FERC相當一致，顯見基於壩生命週期考量與可能破壞模式分析之監測系統設計理念已成為國際壩工界之主流。

三、風險告知安全監測之導入

為有效提升國內蓄水壩安全監測之效能，經濟部水利署自2005年開始導入壩可能破壞模式分析技術，其最終目的在於協助工程人員：1.識別與大壩安全相關之關鍵部位；2.評估現有監測系統之合宜性及新增儀器之必要性；3.檢討觀測頻率之適當性及自動化量測之必要性。

而在實務工作上，近來國內已有部分水庫藉由壩可能破壞模式分析辦理既有監測系統有效性檢討及監測儀器新增(或停用)必要性評估，並獲致良好之成果。例如：

1. 新山水庫大壩監測系統改善:本水庫位於基隆地區，於2000年完成第二期工程。大壩為一66公尺高之斜心牆分區滾壓式土石壩，於年度大壩安全檢查及監測工作中辦理壩可能破壞模式分析，發現既有之監測系

統無法充分反映大壩之風險，故應用RIDM概念提出大壩監測系統改善計畫，有效提升該壩之安全監測效能。

2. 寶山第二水庫大壩監測系統改善:本水庫位於新竹地區，於2006年完工啟用，大壩為一61公尺高之中央不透水心層分區滾壓式土石壩，於年度安全檢查及監測工作中針對壩體心層內部既存豎管之存廢進行風險評估，經評估後認為其所獲得之資訊已低於其對心層阻水功可能產生之風險，因此建議將其封堵。

3. 翡翠水庫大壩安全風險鑑別:本水庫位於臺北地區，於1987年完工啟用，大壩為一122.5公尺高之三心雙向彎曲變厚混凝土薄拱壩，管理單位於營運多年後導入風險管理概念，針對大壩之可能破壞模式進行檢討，並據以評估及改進既有檢監測計畫之合宜性，有效提升壩之安全監測效能。

4. 湖山水庫大壩安全監測系統設計改善:本水庫位於雲林地區，由三座中央黏土心牆分區型土石壩所構成，2016年完工啟用，壩之監測系統設計原採用傳統作法，於壩體內佈設大量之儀器，然經參考中興工程顧問社國際顧問和美國墾務局(United States Bureau of Reclamation, USBR)之建議，從破壞模式和風險告知角度重新檢討各儀器之必要性後，大幅減少儀器數量，降低非必要性儀器安裝對施工可能造成之影響及未來資料詮釋之困擾，並於關鍵部位設置2組儀器以避免失效。

上述案例顯示新一代考量風險之監測觀念已在國內開展(高等人，2019)。

四、應用案例介紹

本文以前述新山大壩監測系統改善工程為案例，說明如何應用風險告知決策概念於舊壩安全監測系統有效性評估及改善工作。

4.1 新山水庫簡介

新山水庫位於基隆河支流大武崙溪上游，距基隆市中心約三公里，為自來水標之單目標離槽調蓄水庫，目前係由臺灣自來

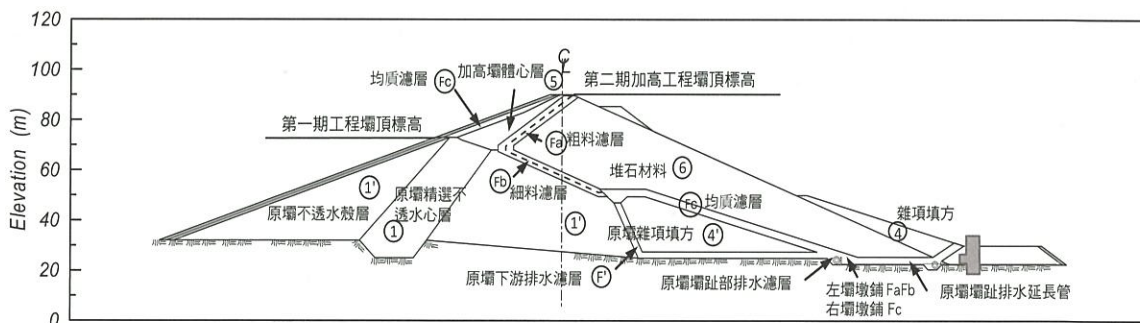
水公司第一區管理處負責營運管理。本水庫工程分兩期完成，1980年完成第一期工程，壩頂標高EL.75公尺，蓄水量400萬立方公尺；2000年完成第二期壩體加高工程，壩頂標高EL.90公尺，蓄水量增至1,000萬立方公尺。由於本水庫為離槽之備源水庫，因此水位變化不大。

新山大壩為斜心牆分區滾壓式土壩，加高後之壩高為66公尺，壩長262公尺。壩體主要由上游殼層，不透水黏土心層及下游殼層所形成。二期壩體加高工程係自原壩頂順一期壩體上游殼層坡度向上延伸至標高EL.90公尺，在兩期壩體間設置有兩道濾層(2-stage filter)。有關新山壩之標準剖面如圖一所示。

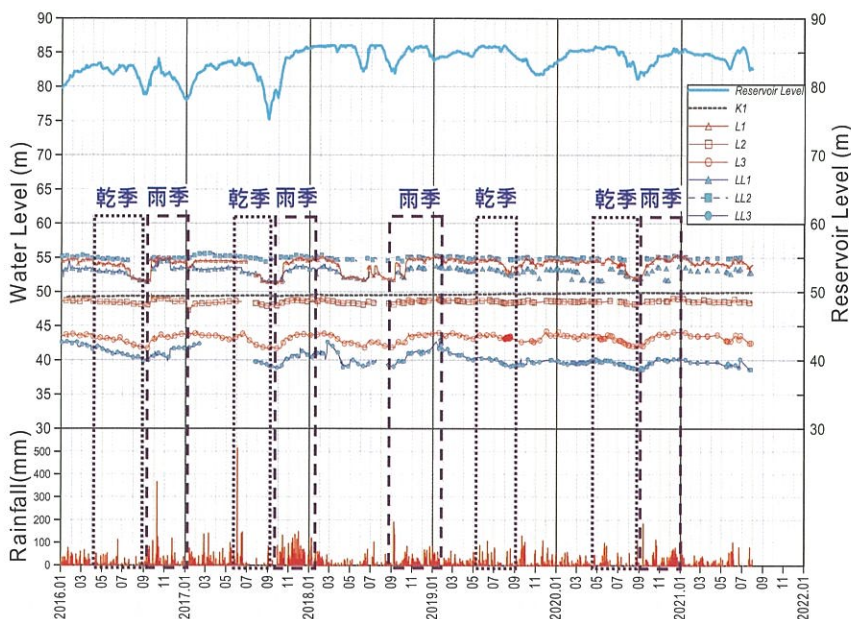
二期工程完工後，因大壩施工期間裝設之監測儀器陸續發生故障，為加強壩體滲流行為

之觀測，管理單位分別於2000及2004年在下游殼層內鑽孔設置水位觀測井及水壓計，惟其孔底標高均高於新舊壩體間之新設濾層。然因長期觀測結果顯示上述新設殼層水位觀測井及水壓計之觀測值與降雨之相關性遠高於庫水位且常受乾季、雨季所影響(如圖二所示)，而壩區每年之降雨天數又高達200天左右，故這些新設儀器之觀測結果非但難以釐清所觀測到之水位係來自水庫之異常滲漏水或是降雨產生之棲止水，反而因為資料的不確定性造成安全控管上之困擾。

為提升水庫之安全管理效能，管理單位乃於2011年委辦之「新山水庫大壩安全檢監測分析暨風險管控研擬」計畫中對新山壩主要安全風險來源進行檢討，並據以評估既有監測系統之合宜性與有效性(臺灣自來水公司第一區管理處，2013)。



圖一 新山壩標準剖面及壩體分區示意圖



圖二 殼層水位、雨量與庫水位之歷時變化

鑒於新山壩仍有為數眾多之監測儀器持續觀測中，因此，本項監測系統合宜性評估工作包括既有儀器有效性之檢討及新增儀器必要性之探討，其作業流程包括：

1.壩可能破壞模式分析：藉由設計、施工及營運期間資料的彙整，鑑別出壩的主要安全風險來源，據以探討其可能衍生之破壞模式，並進一步分析各可能破壞模式的發展過程及被偵測之可能性。

2.既有監測儀器有效性檢討：釐清既有監測儀器之裝設目的，對於已故障儀器，若屬於驗證設計或已達成階段性任務者，建議予以報廢；對於功能仍屬正常之儀器，則進一步評估其是否可有效偵測可能破壞模式之肇始或發展過程，對於與可能破壞模式相關性低或已完成階段性任務之儀器，則建議可停止觀測或降低觀測頻率。

3.新增儀器必要性評估：若現有儀器對可能破壞模式偵測能力不足時，則進行新增儀器必要性評估。首先依據檢討結果擬訂新增儀器構想，包括儀器種類、安裝位置及施工方式、觀測方式及頻率、後續維護工作等；其次，就各新增儀器對大壩安全研判之助益(正面)、安裝維護經費及對壩體安全可能產生之風險(負面)等因素，權衡各儀器是否有安裝的必要。

4.監測系統改善建議：綜合前述壩可能破壞模式分析、既有儀器有效性檢討及新增儀器必要性評估結果，提出監測系統改善建議，包括新增儀器種類、裝設位置及觀測目的(對應的可能破壞模式)，各儀器監測方式(人工或自動化)及警戒值設定原則等。

4.2 壩可能破壞模式分析

依據新山壩之設計、施工資料及現況，初步歸納出新山壩可能之安全風險來源，包括：

模式1：沿新壩加高心層的水平 and 垂直管(纜)線路徑形成優先滲流路徑，濾層反濾能力不足導致心層料逐漸流失，最終導致管湧破壞。

模式2：二期加高之壩體因壓密作用或受地震侵襲發生過量沈陷，壩體向下游變形

導致新舊心層交接面承受張力發生開裂漏水，最終導致管湧破壞。

模式3：庫水流經左壩座較透水岩層及節理，於下游殼層淺覆蓋處湧出，造成左側壩體局部失穩破壞。

模式4：濾層遭下游殼層細料堵塞導致排水能力不足，滲流面延伸至下游殼層後受震安定性不足，於強震侵襲下發生滑坡破壞。

模式5：心層材料沿右壩座剪裂帶及鄰近基岩節理流失，最終導致管湧破壞。

模式6：加高之薄心層和左右壩座岩盤接觸面積相對較小，庫水沿接觸面形成優先滲徑，濾層反濾能力不足導致心層料逐漸流失，最終導致管湧破壞。

依上述可能風險來源進一步探討可能衍生之破壞模式及其發展過程後，研判新山壩之主要安全風險為管湧破壞，而其關鍵部位為新舊壩體間新設之濾層，如濾層能發揮預期之反濾及排水功效，則發生管湧破壞的風險將大幅降低，因此必須加強對濾層水位(排水功能)及滲流水質(反濾功能)之監測。

4.3 新增儀器佈設規畫

鑒於新山壩下游殼層內既有之水位觀測井及水壓計均位於濾層上方，均無法發揮監測濾層功能之效用，因此必須進行新增儀器必要性評估，儀器預設目標分兩階段，第一階段為釐清大壩滲流面位置是否已延伸至下游殼層；第二階段為滿足營運期間安全監測需求。

依上述目標，其規畫原則為：1.監測項目以濾層水壓觀測為主，部分鑽孔位置需鄰近先前設置之水位觀測井以供比對；2.部分鑽孔深度需貫穿一期壩體內部，以釐清壩實際滲流水位；3.關鍵部位之儀器採自動化觀測，並可即時收錄資料及分析；4.依據可能破壞模式之發展過程訂定儀器之警戒值；5.強化壩體及壩座之變形量測。

依據上述原則擬訂新增儀器之種類、數量及位置，包括：1.於壩體下游殼層內新鑽設12孔觀測井(F1~F12)，其中F9及F10穿越新舊壩體間之新設濾層至舊壩體，除F10外，其餘觀測井之開篩位置均設於濾層

內；2.增設22個壩頂-壩座相對位移觀測點及增設6個壩座固定觀測點；3.增設14個壩體沉陷位移觀測點等。新設之觀測井及相關儀器對可能破壞模式偵測能力評估之範例如表一及表二，安裝位置及設計詳如圖三，此種設計方式除可於井內放置電子式水壓計進行自動化觀測外，亦有利於未來之維修，且可藉由人工測讀方式校核數據之正確性。

4.4 新增儀器必要性評估

考量上述儀器之安裝對於釐清大壩滲流行為及壩體安全之研判有相當大之助益；而鑽孔位置均位於下游殼層內，未穿越大壩心層，對壩體安全之影響極微。經衡量新增儀器必要性之利弊及風險後，乃決定依據上述構想辦理後續之監測系統改善計畫，並於2013年完成安全監測系統之改善工程。新增12孔水壓計均採用即時連線觀測之自動化監測系統，並可定期以人工量測方式進行檢核比對，以確認監測結果的正確性。

4.5 新增水壓計觀測結果

於監測系統改善完成後，依據2013年至今各儀器之監測成果，期間各舊有水位觀測井之水位仍無變動，但新增水壓計(F1~F12)均僅觀測到微量之水壓(如圖四至圖六)，經

換算其水位高程(water level)均維持位於濾層內，遠低於前述舊有水位觀測井之水位；再者，經比對壩體下游滲流量水堰之監測結果，滲流量之整體趨勢亦與往年大致相符，並無異常變化(圖七)。顯示壩體滲流之控制符合原設計要求，同時釐清各舊有觀測井所觀測到之水位並非真正之滲流面，應為降雨入滲產生之棲止水。綜合新設水壓計之觀測成果以及歷年多項研究調查及評估分析結果，本水庫終於2018年4月順利達成提升滿水位至標高86公尺之階段性任務(臺灣自來水公司第一區管理處，2019)。

至此，各新增水壓計已完成釐清壩體濾層功能是否能符合原設計需求之第一階段目標。在其後之營運期間，各水壓計將發揮第二階段安全監測之功能，持續監測壩體內部滲流面是否仍依設計控制於濾層內。

至於水壓計警戒值之設定，考量壩體材料參數之高度不確定性，若貿然採用數值模擬方式訂定警戒值，恐造成管理上之困擾並誤導工程師的研判，因此乃先依據各破壞模式過程推演結果，以各儀器所在位置之濾層頂部高程作為訂定之依據，一旦發現水頭超過警戒值時，即必須採取適當之因應措施來降低風險，其後再依據長期觀測結果調整警戒值並定期檢討，以符合實際需求。

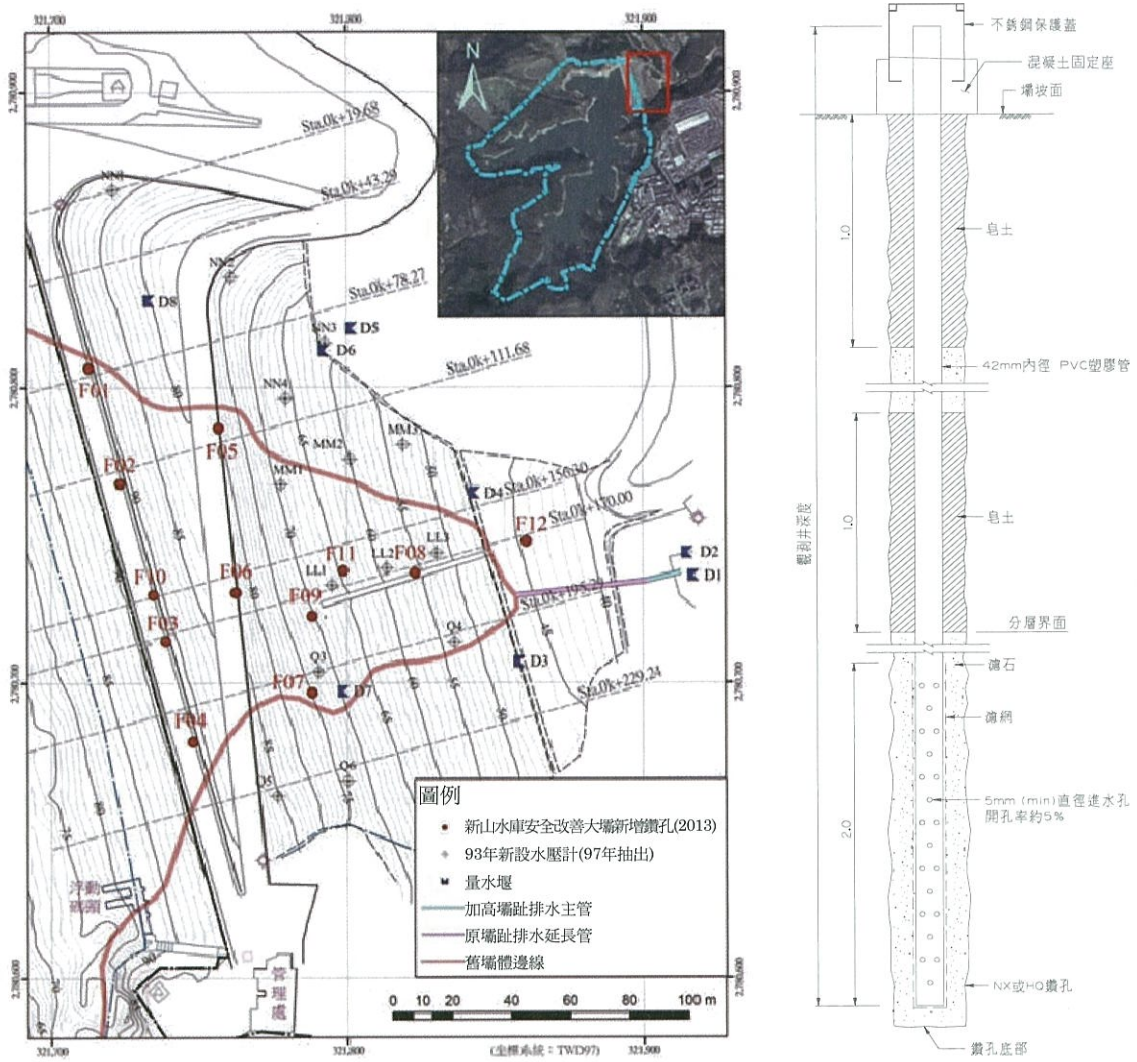
表一 新設水壓計與可能破壞模式偵測之相關性

可能破壞模式	模式1	模式2	模式3	模式4	模式5	模式6
偵測最早發展階段	水壓計F3	水壓計F1~4	水壓計F1, F5	水壓計F1~12	水壓計F4, F7	水壓計F1, F4
後續破壞發展	水壓計F3, F6, F8, F9, F11, F12	水壓計F1~9, F11~12	水壓計F1, F5	水壓計F1~12	水壓計F4, F7, F8, F12	F1~9, F11~12

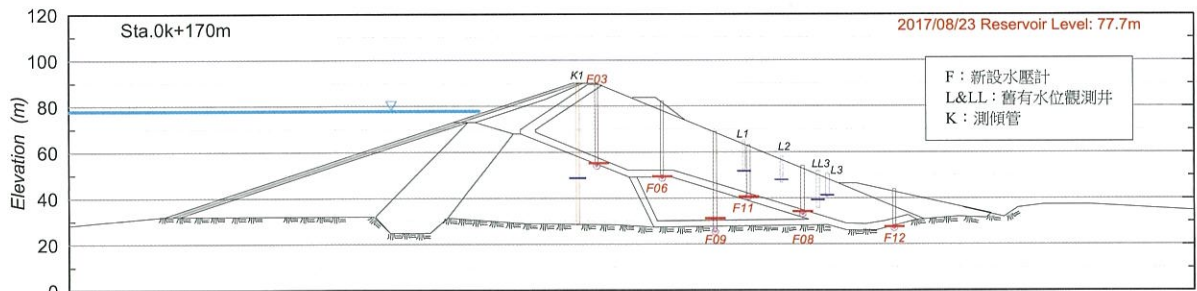
表二 新山壩可能破壞模式分析範例

階段	1	2	3	4	5	6	7	8
破壞模式發展描述	壩體因長期壓密或受震導致壩體過度沈陷	壩體新舊心層交界處彎曲並沿上下游方向開裂	庫水沿開裂處滲漏，高水力梯度使裂縫邊緣之心層料開始向濾層遷移	濾層反濾能力不足，心層料逐漸流失並形成管湧通道，滲漏增加	心層料大量流失，管湧通道逐漸擴大並繼續向上游發展	滲漏增加伴隨混濁並超出排水層容量，導致滲流面逐漸升高	滲流面高過雜項填方，水自下游坡面滲出並攜出細料	管湧路徑崩解擴散至壩面，壩體潰壞，庫水大量外洩
原有儀器偵測能力	壩面沈陷點	壩面沈陷點	量水堰D1&D2	量水堰D1&D2	量水堰D1&D2	量水堰D1&D2	目視檢查	
新增設儀器監測能力	壩面沈陷點	壩面沈陷點	水壓計F1~4	水壓計F1~9, F11~12	水壓計F1~9, F11~12			
干預時機			依破壞模式發展，最早可能於本階段開始					
緩解措施			降低水庫水位、鑽孔調查並灌漿修補					
監測重點			濾層水壓 滲流量及水質	濾層水壓 滲流量及水質	濾層水壓 滲流量及水質	滲流量及 滲流水質		

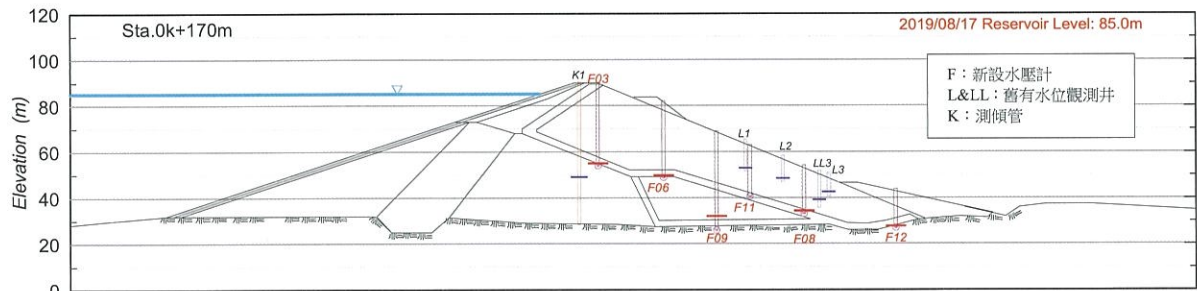
模式2：壩體發生過量沈陷造成新舊心層交接面開裂漏水導致管湧破壞 (詳4.2節)



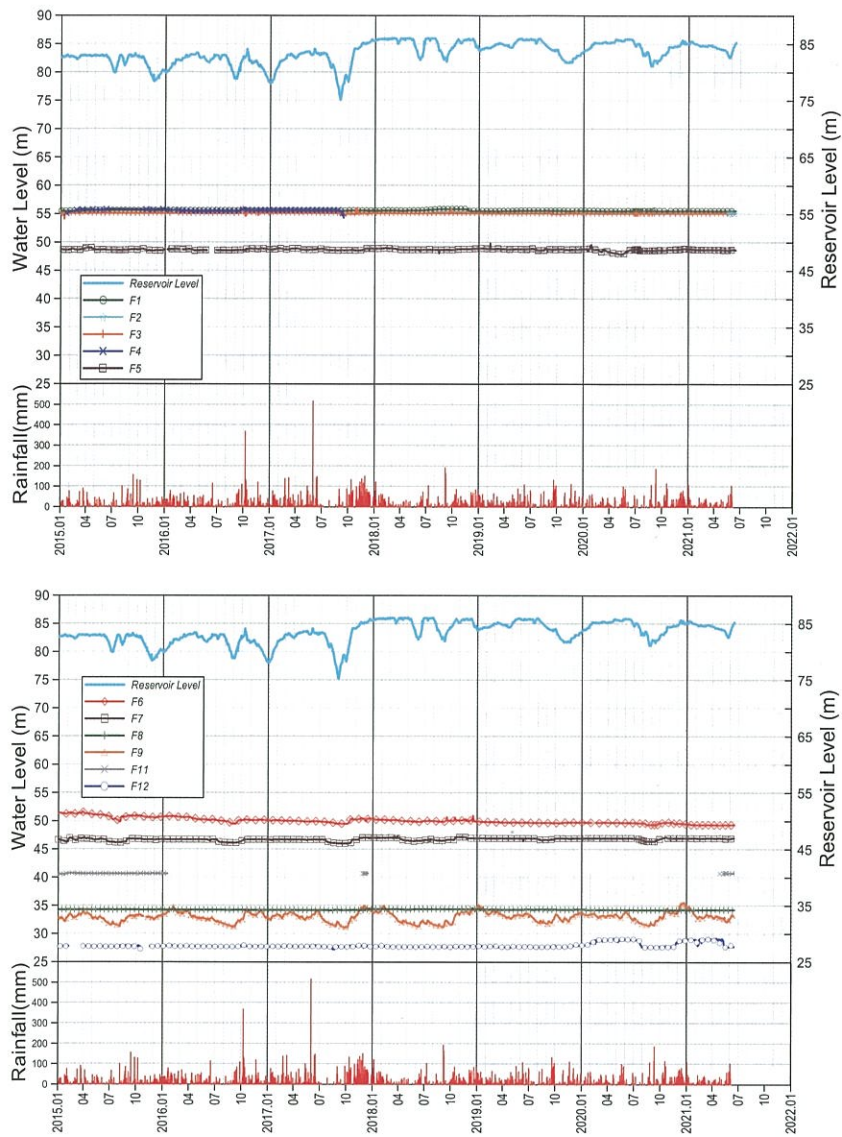
圖三 新增水壓計布置及設計示意圖 (臺灣自來水公司第一區管理處, 2013)



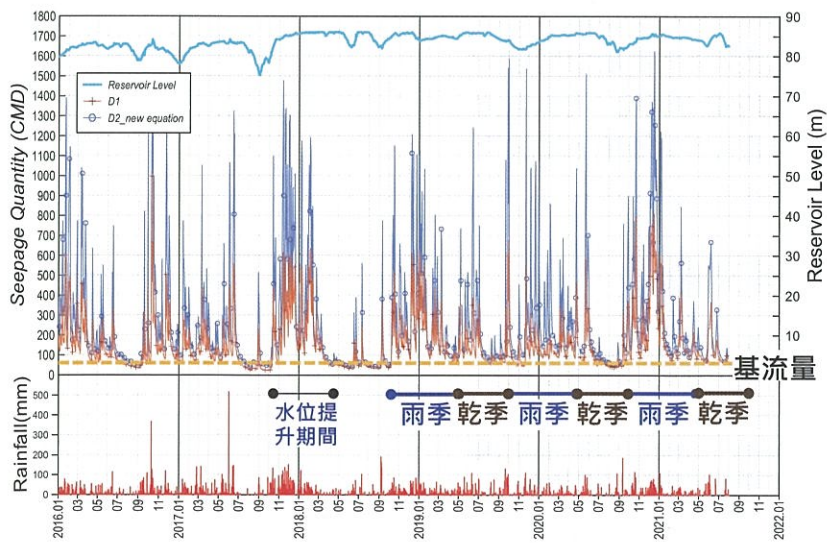
圖四 庫水位蓄升至滿水位前新設水壓計及舊有水位井觀測結果比較



圖五 庫水位蓄升至滿水位後新設水壓計及舊有水位井觀測結果比較



圖六 新山壩新設水壓計長期觀測結果



圖七 新山壩滲流量水堰長期觀測結果

五、結論

隨著全球氣候變遷加劇，加上社會大眾對於水庫安全之要求提高，風險管理之觀念逐漸受到重視及應用，故國際壩工先進國家在水庫安全管理工作中紛紛導入風險之概念。惟依據世界銀行之研究，早期許多壩之監測計畫在規劃時並未針對可能導致該壩潰決之設計、施工或地質等獨特因素加以考量，而一般之監測規畫亦可能著重於與壩可能破壞模式無關之區域，甚至完全忽略與壩安全息息相關之區域，因而無法有效控管壩之安全風險。

為提升壩安全監測之效能，完整之檢監測計畫應從壩可能破壞模式分析著手，並與監測作業進行連結，於關鍵部位設置儀器，除可降低經費需求並有效監控壩之安全外，亦可避免不必要之儀器裝設形成額外之風險來源；此外，在安全監測管理及預警方面也考量新的思維及作業模式以降低整體之風險(World Bank, 2021)。

本文除介紹國際水壩風險告知之監測作業模式外，亦考量臺灣水壩安全管理及監測作業現況進行適當之調整，使符合國內之需求，並實際應用於新山壩安全監測作業之改善。由新山壩之經驗顯示，藉由壩可能破壞模式鑑別及風險告知概念之應用，可有效提升壩的安全檢監測效能，並解決以往老舊壩常見的監測資料意義不明、儀器故障後處置方式難以決定及新增儀器必要性檢討爭議等困境，可做為未來新建水壩檢監測計畫設計或既有水壩安全監測系統改善之參考。

參考文獻

- 臺灣自來水公司第一區管理處 (2012)，「100-101年新山水庫大壩安全檢監測分析暨風險管控研擬委託專業服務(1/2) 100年度期末報告」。
- 臺灣自來水公司第一區管理處 (2013)，「新山水庫大壩安全改善-補充調查與監測儀器改善成果報告」。
- 臺灣自來水公司第一區管理處 (2019)，「106-107年新山水庫大壩安全檢監測分析暨風險管控研擬委託專業服務(2/2) 107年度期末報告」。

高憲彰、樓漸遠 (2015)，「壩安全監測新思維」，*三聯技術*，第96期，第9-17頁。

高憲彰、林金成、邱顯晉、彭南弘、溫琮盟、樓漸遠 (2019)，「蓄水壩安全監測新思維」，*中國防汛抗旱*，第29期，第6卷，第46-51頁。

FERC (2017). "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects Chapter 14 - Dam Safety Performance Monitoring Program", FERC.

UASCE (2020). "Instrumentation of Embankment Dams and Levees", EM 1110-2-1908, UASCE.

USSD (2008). "Why Include Instrumentation in Dam Monitoring Programs?", Committee on Monitoring of Dams and Their Foundations, USSD.

World Bank (2021). "Good Practice Note on Dam Safety – Appendix 2: Instrumentation Plan (Sample Framework)." World Bank, Washington, DC.