

氣候變遷下異常事件對既有水庫安全風險與改善對策

研究(2/2)

Study on Existing Reservoir Safety Risk and Countermeasure of Singular Events under Climate Change (2/2)

主管單位：經濟部水利署

蔡文豪¹ 楊慶宗¹ 袁倫欽¹ 楊銘賢¹ 吳演聲¹ 高憲章² 鍾明劍²

Tsai, Wen-Hao Yang, Ching-Tsung Yuan, Lun-Chin Yang, Ming-Hsien

Wu, Yen-Sheng Kao, Hsien-Chang Chung, Ming-Chien

¹中興工程顧問股份有限公司

²財團法人中興工程顧問社

摘要

本計畫目的主要為探討水文異常事件與氣候變遷關係，並研究制訂異常水文事件對水庫安全風險衝擊之分析方法，透過案例研究評估於假設情境下水庫可能風險，依據水庫條件提出改善對策，俾提供水庫管理單位有效管理之參考。

本案已建立一套因應氣候變遷之水庫定量風險分析程序，採用事件樹方法建立潰決模式發展過程，而其中各組成事件之發生機率則透過定性描述轉換定量機率之方式，利用具體之判定準則決定事件發生可能性後決定機率值，將各事件機率值以事件樹架構進行潰決模式整體之發生機率；這套風險分析方法無需利用太多之統計資料，絕大部份只需利用水庫安全評估報告之成果及專業判斷即可進行風險值之計算。惟氣候變遷之發展具有不確定性，因此對水庫安全風險之衝擊程度評估僅能提供管理單位作為未來管理方向之參考，如果評估結果顯示超過既有設施之保護標準或能力時，其調適方法通常十分昂貴或影響程度大，因此決策者在不確定之衝擊下，因應氣候變遷之衝擊調適應以循序漸進之方式，由加強現況管理與監測等無悔措施為優先，配合各種非工程手段，逐步強化調適能力。

關鍵詞：氣候變遷、異常事件、水庫安全風險管理、衝擊評估、水庫安全改善對策

Abstract

The purpose of this project is taking account of the climate change to study the improving countermeasure of existing reservoirs safety. According to the impact of unusual hydrologic events to reservoir safety, this project will draw a risk management and adaptation countermeasures cope with climate change.

International and domestic researches about climate change adaptation strategies are collected in this study. Besides, global climate change characteristics are also discussed briefly here. Meanwhile, the daily rainfall data measured over 40 years at 46 weather stations in Taiwan are gathered and used to analyze the statistical precipitation characteristics under climate change.

This report can not confirm that probable maximum precipitation estimates will definitely increase under climate change. It is identical to the conclusions from Australian bureau of meteorology (2009) and World Meteorological Organization (2009). Therefore, a sensitivity analysis that incorporates temperature and precipitation trends projected by the further review should be carried out to determine whether the structure has adequate margins available to accommodate anticipated changes in the design flood over the operational life of the reservoir.

The risk-based management is a practical concept that can help to handle various situations with limited resources. The potential problems of the existing reservoirs were identified and studied their possibility of occurrence and induced hazard. Based on the results of the examination and risk identification, a framework and procedure for the risk management was developed. The research achievements of this project could be used for regulator of dam safety of government to find the dams exposed in high risk, and for finding the problems in dams management legislation.

Consideration of the heavy financial burden of the management unit of the case, how to effectively enhance the use of limited funding for domestic reservoir reservoir safety management of critical security issues. To this end, the Water Resources Agency is widely consult to improve reservoir management performance, to further reduce the risk of reservoir safety management, to serve properly in response to the future impact of reservoir operations could suffer.

Moreover, the impact of the climate change may cause more disparity between wet and dry season, more abnormal flood and sediment disaster. Thus, the future reservoir safety measures should draw up specific measures according to their risk mitigation policy.

Keywords : Climate Change, Singular Events, Reservoir Safety and Risk management, Impact Assessment, Countermeasures of Reservoir Safety.

一、前言

鑒於台灣地處西太平洋亞熱帶地區，每年夏秋之際常遭颱風或熱帶性低氣壓帶來之豪雨侵襲，再加以本島天然環境地質條件普遍不佳、地形起伏變化大、山勢陡峻河川短急，蓄水建造物既有設施亦有隨材齡老化逐漸產生局部功能減退現象，彼等潛在風險均可能造成蓄水建造物一定程度的衝擊，如今要面對氣候變遷下降雨強度大、延時長、範圍廣、規模大等所導致的豐枯水期差異大、旱澇加劇之特性，相對增加蓄水建造物安全風險，故有必要了解水文異常事件對水庫安全衝擊，及評鑑水庫安全風險之變化，並提出因應對策及回饋法規技術與管理層面，以控制風險而確保蓄水建造物因應氣候變遷之安全性。

二、研究地區與研究方法

本計畫以台灣地區為研究對象，分2年度發展氣候變遷下異常事件對水庫安全風險影響之通用性評估方法，並以翡翠水庫、石門水庫、明德水庫、鯉魚潭水庫、德基水庫、曾文水庫等六座水庫為案例，進行適用性探討及改善對策研擬。整體計畫架構如圖1，針對本年度研究方法說明如后。

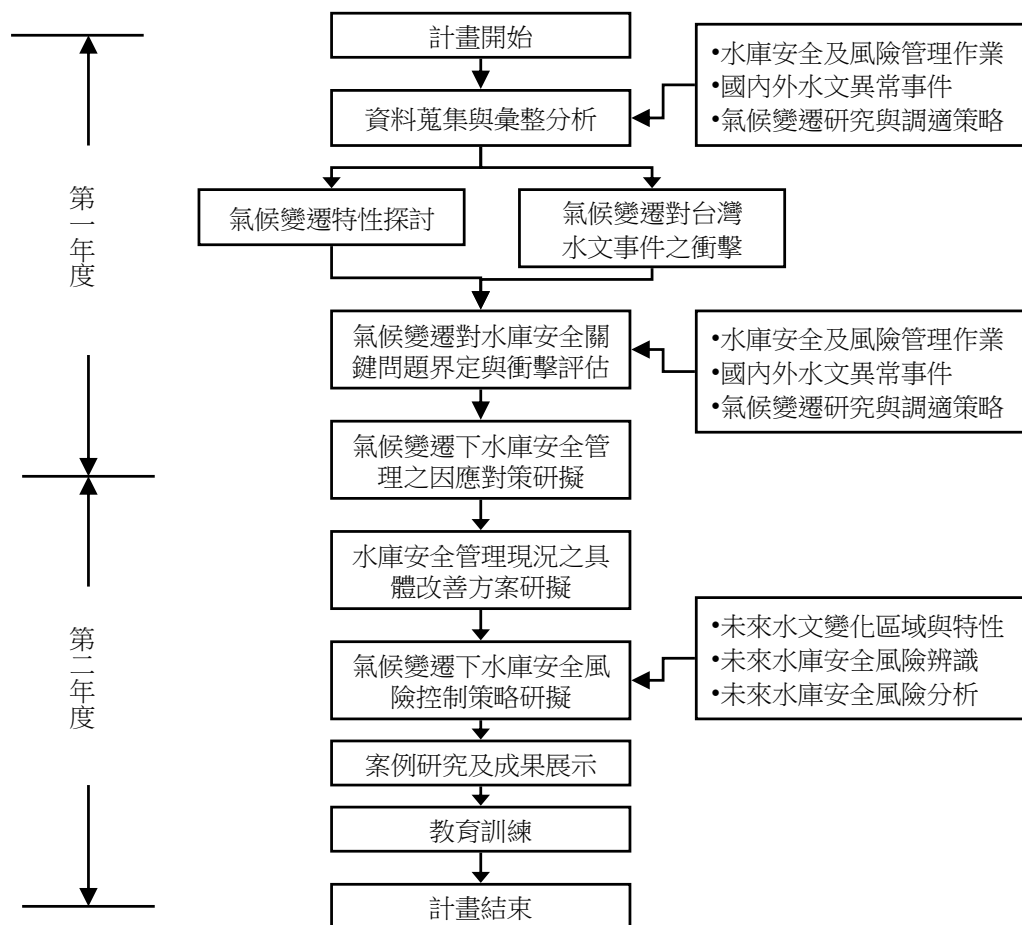


圖1、計畫架構圖

2.1 水庫安全管理現況之具體改善對策研擬

依據案例水庫之現況評析，探討檢監測、安全評估相關法規與機制等之建議改善內容。

2.2 預測未來水文變化趨勢與特性

基於既有水文資料，預測未來水文變化趨勢與特性，並探討準確預測尚需要補充的資料。

2.3 未來水庫安全風險辨識

應用風險分析方法，辨識氣候變遷條件下水庫安全風險因子與破壞模式。

2.4 未來水庫安全風險分析

針對未來水文變化趨勢，分析對水庫安全可能造成之負面影響之可能性與程度。

2.5 未來水庫安全風險控制策略研擬

根據以上分析，提出水庫安全風險控制策略以因應未來氣候變遷。

2.6 案例研究及展示

針對上述工作項目，以翡翠水庫、石門水庫、明德水庫、鯉魚潭水庫、德基水庫、曾文水庫等六座水庫為對象，進行水庫安全風險分析及改善對策研擬。

三、研究成果

3.1 水庫安全管理現況之具體改善對策

3.1.1 檢監測機制改善對策研擬

本案結合水利署於 2002 年、2005 年及 2009 年委託辦理水庫安全監測資料建檔、安全監測問題評析以及安全監測作業系統標準化等相關研究，顯示國內現行檢監測機制應改善之議題包括：(1)檢監測作業相關法規及規範、(2)既有壩安全監測系統偵測能力評估及改善、(3)檢監測作業執行人員專業能力提升、(4)檢監測資料分析及資料異常時之處置。

3.1.2 安全評估法規改善對策

現行水庫安全評估法規應改善之議題包括：(1)權責劃分、(2)分級及風險管理、(3)壩安全檢查人員資格要求、(4)壩管理人員資格要求、(5)檢查及安全評估報告審查、(6)運行、維護和監測手冊。

3.2 預測未來水文變化趨勢與特性

3.2.1 水文境況推估

應用統計分析方法推估近未來 2030 年之水文境況，依據影響可能最大降雨之氣象水文條件，案例水庫水文資料分析結果顯示，僅阿里山 1 站露點溫度有隨時間增

加之趨勢，以其鄰近之曾文水庫為例，經分析該區露點溫度年增率約為 0.015°C ，若以此推估未來 10 年後，露點溫度提升 0.15°C ，若採暴雨移位及露點調整法推估可能最大降雨，將可能導致可能最大洪水略微增加 1.4%，但現階段評估後認為此增幅並不顯著。

各重現期距洪峰流量分析成果顯示，僅曾文、德基及鯉魚潭水庫於納入基期 (1999 年) 以後資料成果較僅分析基期前資料有明顯增加。

3.2.2 氣候變遷對設計洪水之影響

- 1、若大型壩之排洪設施以可能最大洪水進行設計：本報告檢視可能最大降雨、可能最大洪水推估過程中，各項推估計算因子，如水氣含量、颱風半徑、露點溫度、颱風移動速度等，皆無因明顯變化趨勢而需上修設計值，此結果與 2009 年澳洲氣象局及世界氣象組織公佈成果一致。
- 2、若為中、小型水庫，且潰決後對下游之災害潛勢屬輕微或極輕微，而相關建造物係採 100 或 200 年重現期距洪水為設計洪水者：本報告洪峰流量頻率分析結果顯示有增加之可能性，進而可能須檢討上修該水庫原設計洪水。

3.3 台灣既有水庫特性探討

3.3.1 未來水文變化趨勢對水庫安全之影響

由壩安全需求檢討可看出與異常水文事件關係較大者，在壩及重要附屬設施方面，包括：(1)壩之排洪能力是否足夠、(2)排洪或洩水設施是否具有良好之保護、(3)水庫周圍是否有大型不穩定邊坡等；在監測儀器及周邊設施方面，包括：(1)監測儀器是否足以偵測潛在之破壞模式、(2)是否設置有水文監測系統以因應排洪操作、(3)遙控為主之重要操控設備是否設置輔助系統、(4)對於水庫周圍之大型不穩定邊坡是否進行監測等；至於在操作、維護及檢監測方面，包括：(1)排洪操作規則是否定期檢討或修訂、(2)是否建立適當之潰壩緊急應變計畫、(3)排洪設施是否定期維護保養等。

3.2.2 未來水文變化趨勢對水庫供水營運之影響

氣候變遷為長期之影響，未來在氣候變遷衝擊下，不確定的強降雨事件、長期枯水季等異常水文事件發生頻率及其強度可能增加。當強降雨之強度提高時，每次強降雨事件所造成之水庫集水區大量沖蝕將嚴重影響水庫蓄水功能，若水庫蓄水容量快速減少，則連帶影響水庫供水營運操作。另氣候變遷影響下，未來枯水季亦可能拉長，而水庫蓄水容量可能無法滿足枯水季的用水需求，導致缺水問題發生甚至更為嚴重。

3.4 因應氣候變遷之水庫風險管理

因應水庫風險特性不同，水庫風險管理程序(圖 2)需就「水庫安全」及「水庫供水營運」風險個別進行探討。其中「風險辨識」程序主要為針對未來於氣候變遷影響下，水庫可能面臨的潛在安全危害或供水營運衝擊加以研判，並歸類整理；「風險

評估」程序中，水庫安全風險係建立於水庫相關設施之破壞機率(probability of failure)及災害後果(failure consequence)上，評估異常水文變化對水庫相關設施安全產生的風險，而水庫供水營運風險則是建立在水庫淤積危害度(Hazard)與供水脆弱度(Vulnerability)基礎上，評估水庫淤積對水庫供水營運產生的風險；「風險控制」則是應用維持、減輕、轉嫁、規避等漸進方式，來控制水庫安全及降低營運風險。

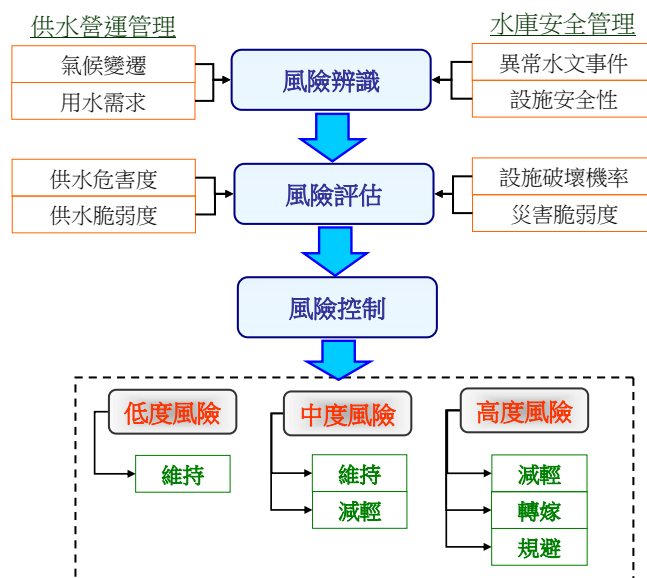


圖2 氣候變遷下水庫風險管理程序圖

3.4.1 風險辨識

1、基於異常事件之水庫安全風險辨識

水庫出現破壞機制之各種成因，亦即水庫安全風險之來源，可歸納為 A.排洪能力、B.結構安全、C.邊坡安定、D.水庫淤積、E.營運管理等 5 個範疇。異常水文事件(如持續降雨導致超額洪水等)可視為洪水危害之極端情形，故其相關之大壩潰決模式與正常洪水情況並無太大差別，惟一差別只在於潰決模式發生可能性及後果嚴重程度較高而已。

2、水庫供水營運安全風險辨識

氣候變遷對水庫供水營運風險之影響包括 A.降雨強度增加、B.淤積量持續增加、C.底孔被淤滿或阻塞、D.渾水現象增加、E.旱季時期變長等，而前述風險因素之連鎖效應則導致水庫蓄水容量大量減少而影響水庫供水營運，因此為降低因氣候變遷衝擊，水庫營運風險管理應以維持水庫容量為主要保全對象。

3.4.2 風險分析

本計畫參考目前各國壩工實務中之作法，以半定量之方式，分就水庫大壩風險及供水營運二部分進行風險分析。

1、基於異常水文事件之水庫大壩風險分析

基於風險識別可分別得到堆填壩及混凝土壩因初始事件發生造成溢頂並導致潰

決之 8 種可能模式，並採用事件樹方法描述各種大壩潰決模式之發展過程。大壩潰決模式中組成事件之發生機率透過定性描述轉換定量機率之方式決定，本章針對主要事件特性提出具體之判定準則協助決定事件發生可能性之定性描述。將各事件之發生機率以事件樹(圖 3)架構並配合區間洪水量之年發生率進行計算，得到大壩潰決模式之年發生率；利用潰壩綜合評價指標代表大壩潰決後果之嚴重度。計算得到之大壩潰決年發生率及潰壩綜合評價指標分別轉換成發生可能性及後果嚴重性之定性等級，透過風險矩陣方式呈現，根據區分為可接受、可容忍及不可容忍程度三個等級之風險準則，決定大壩潰決風險程度是否可接受或需加以控制。

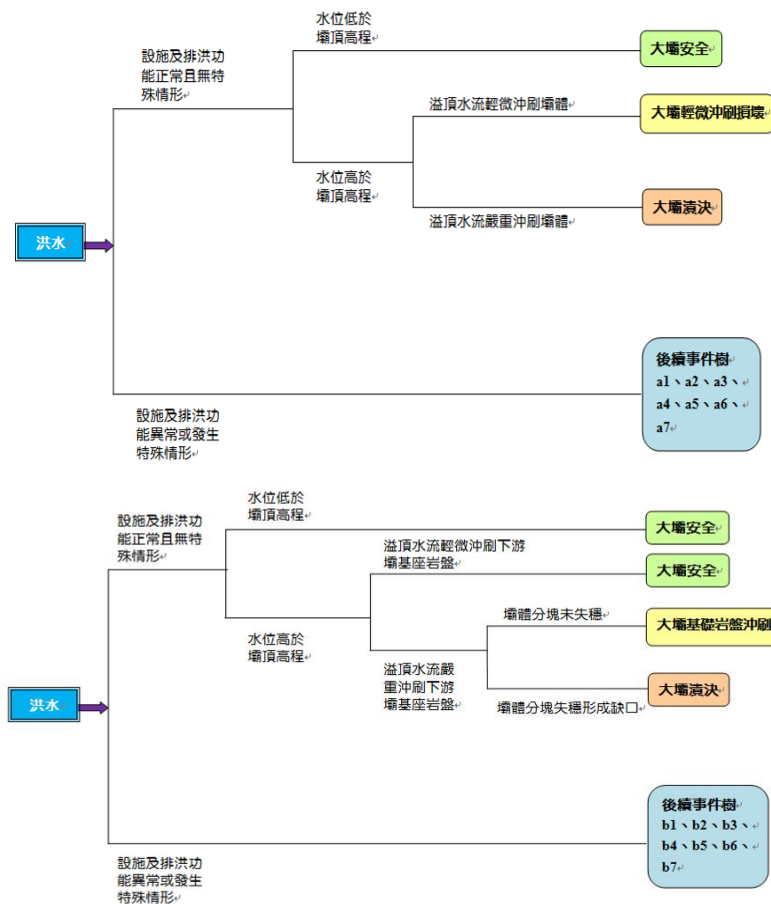


圖3 大壩潰決事件樹分析圖

2、水庫供水營運风险分析

本計畫應用水庫之「淤積危害度」與「供水脆弱度」為指標，評估水庫淤積對水庫供水營運產生的風險。其中「水庫淤積危害度」分級方式採用「有效容量淤積率」及「總容量淤積率」為評估指標，訂定水庫淤積危害度門檻值區分成 5 個等級；「供水脆弱度」則以「主要供水標的」以及「設施水源重要性」為評估指標，區分為 5 個等級。

3.4.3 未來水庫安全風險評價

為整合不同風險因子之影響，以利於水庫安全風險程度之判別，本案採用風險矩陣型式呈現風險評價之成果(圖 4)。

其中風險值等於發生可能性(P)乘以後果嚴重度(S)之關係,可獲得各矩陣元素之風險評級值(R) (=P×S)。並輔以不同顏色呈現,以快速評估各潛在風險項目之風險評級,例如矩陣中綠色表示低度風險 (1~5 分)、黃色表示中度風險 (6~12 分)、紅色表示高度風險 (15~25 分)。惟大壩安全屬於事件破壞型之風險,而供水營運則屬於長期之影響,故二者風險矩陣採用之指標因子須依前述風險指標訂定。

可能性(P) 嚴重度(S)	極低 (1)	低 (2)	中 (3)	高 (4)	極高 (5)
極輕微 (1)	1	2	3	4	5
輕微 (2)	2	4	6	8	10
普通 (3)	3	6	9	12	15
嚴重 (4)	4	8	12	16	20
極嚴重 (5)	5	10	15	20	25

圖4 水庫風險矩陣示意圖

3.4.4 水庫風險控制策略

應用上述矩陣水庫風險可分成高、中、低風險,由低風險到高風險可約略分為保有、減輕、轉嫁和規避等策略。對於大壩安全之風險控制而言,主要可從防止或降低風險因子發生之可能性及降低後果嚴重性著手,其中降低後果嚴重性主要可透過加強潰壩緊急應變計畫演練及下游淹水區域之防救災工作來達成,牽涉到諸多外部因素及行政單位之配合,水庫管理單位能著力處不多。

故本計畫對於風險控制策略之探討著重於降低各項水庫安全風險因子發生之可能性,包括 1.混凝土壩、2.堆填壩、3.附屬結構、4.水工機械、5.邊坡安定、6.水庫淤積等六大項進行探討。另供水營運風險控制對策彙整如表 1。

表1 水庫供水營運風險控制對策

風險控制策略	控制手段	改善措施	適用風險程度
保有對策	不採取新的處理手段	維持(強化)既有管理	低風險 中風險

減輕對策	進行經濟可行之工程與非工程對策	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 新增設施辦理排砂減淤 ◆ 營運操作降低濁水機會 ◆ 活用現有排砂設施 	中風險 高風險
轉嫁對策	透過不同治理管理機關合作之手段減輕災害	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 土砂綜合管理 ◆ 區域用水調配 	高風險
規避對策	透過各項工程手段以提高水庫庫容量	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 水庫加高或更新 ◆ 新水源開發 	高風險

3.4.5 既有水庫大壩風險案例研究及展示

1、依據本案制訂之災害嚴重度、水庫破壞可能性分級方式，並依各案例水庫於假設水文條件下推估未來 2030 年之情境，其水庫大壩安全風險分析結果如圖 5 所示。結果顯示於假設情境下(非真實風險)，曾文及明德二座水庫之大壩溢頂年發生率相對偏高，顯示本模式可適度反應各水庫相對狀況。

情境1：依民國42~88年趨勢推估2030年水文情境(正常洪水情境)

情境2：依民國42~99年趨勢推估2030年水文情境(異常洪水情境)

2、既有水庫供水營運風險案例研究及展示

依據本案制訂之淤積危害度、水庫供水脆弱度分級方式，並依各案例水庫於假設水文條件下推估未來 2030 年之情境，其水庫供水營運風險分析結果如圖 6 所示。整體而言，假設未來水文條件以近 10 年之趨勢持續發展，且各水庫並未辦理各項改善措施之條件下，明德水庫、石門水庫及曾文水庫之供水營運風險相對較高，翡翠水庫、德基水庫及鯉魚潭水庫則相對供水營運風險較低。

可能性 (P) 嚴重度 (S)	極低 (1)	低 (2)	中 (3)	高 (4)	極高 (5)
極輕微 (1)					
輕微 (2)					
普通 (3)	明德水庫 鯉魚潭水庫				
嚴重 (4)	石門水庫	德基水庫 曾文水庫(正常洪水) 曾文水庫(異常洪水-不含莫拉克事件)	曾文水庫 (異常洪水-含莫拉克事件)		
極嚴重 (5)	翡翠水庫				

圖5 案例水庫大壩風險矩陣圖

供水脆弱度(P) 淤積危害度(S)	極低 (1)	低 (2)	中 (3)	高 (4)	極高 (5)
極低危害度 (1)					
低危害度 (2)					翡翠水庫
中危害度 (3)					
高危害度 (4)					明德水庫
極高危害度 (5)		鯉魚潭水庫 德基水庫			石門水庫 曾文水庫

圖6 案例水庫供水營運風險矩陣圖

四、結論與建議

結論

- 1、因應全球氣候變遷的影響，傳統「基於準則式之壩安全管理」已無法因應，本案導入逐漸為國際壩工界所採用之「風險告知之安全管理模式」，提供管理單位從風險角度思考此議題。
- 2、本案已建立一套因應氣候變遷之水庫定量風險分析程序，採用事件樹方法建立潰決模式發展過程，而其中各組成事件之發生機率則透過定性描述轉換定量機率之方式，利用具體之判定準則決定事件發生可能性後決定機率值，將各事件機率值以事件樹架構進行潰決模式整體之發生機率；這套風險分析方法無需利用太多之統計資料，絕大部份只需利用水庫安全評估報告之成果及專業判斷即可進行風險值之計算。
- 3、案例水庫分析結果，顯示本研究所建立之風險評估方法可得到水庫之定量風險尺度並具有合理性，實際應用於水庫之風險評估初步可行，惟分析所需之資料也略有不足而須假設或推估，因此案例分析所得到之結果可能無法確實反映案例水庫之風險程度，現階段僅提供做為管理之參考。另本研究所建立之風險評估方法僅為雛型，尚需進一步之發展與深化，並透過不斷之應用與回饋進行調整與修訂，方能廣泛應用於國內各水庫。

建議

- 1、應用本案發展評估模式則可適度反應出案例水庫供水營運之相對風險，例如翡翠水庫雖土砂災害潛勢不高，但因其為台北地區最重要水源，一旦發生供水中斷將對社經影響甚鉅，故最後風險評估結果顯示為中度風險，反應其供水營運上應有完善之區域供水調度及備援。對照各案例水庫之供水營運風險高低及水庫現況，顯示現況土砂災害潛勢較高之水庫，未來於氣候變遷影響下其土砂災害將更為嚴重，應盡速辦理相關防淤清淤工作，並預先研擬相關因應對策。

- 2、氣候變遷之發展具有不確定性，因此對水庫安全風險之衝擊程度評估僅能提供管理單位作為未來管理方向之參考，如果評估結果顯示超過既有設施之保護標準或能力時，其調適方法通常十分昂貴或影響程度大，因此決策者在不確定之衝擊下，因應氣候變遷之衝擊調適應以循序漸進之方式，由加強現況管理與監測等無悔措施為優先，配合各種非工程手段，逐步強化調適能力。

參考文獻

1. 中興工程顧問股份有限公司，2007~2011，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估，計畫成果報告，經濟部中央地質調查所研究報告。
2. 江志宏，丁裕國，陳威霖，「21 世紀中國極端降水事件預估」，氣候變化研究進展 *Advances in Climate Change Research*, 3(4), 202-207 頁，2007 年。
3. 日本國土交通省防砂部，2001，土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律施行令，日本。
4. 經濟部水利署，民國 99 年 12 月，因應氣候變遷河川流量觀測技術研發及建置先期計畫。
5. 經濟部水利署，民國 99 年 12 月，氣候變遷水文環境風險評估研究(1/2)。
6. 經濟部水利署，民國 100 年 12 月，氣候變遷下水庫排砂對策研究(2/2)。
7. 經濟部水利署南區水資源局，民國 100 年 6 月，曾文水庫第四次定期安全評估計畫。
8. 童慶斌，民國 98 年 12 月，氣候變遷對災害防治衝擊調適與因應策略整合研究--子計畫:水庫系統在變遷氣候中之脆弱度評估與支援決策技術發展(III)，行政院國家科學委員會專題研究計畫。
9. 行政院經濟建設委員會，2008，氣候變遷長期影響評估及因應策略研議委託辦理計畫，行政院經濟建設委員會。
10. 陳憲宗，游保杉，2009，氣候變遷與臺灣極端降雨變異趨勢，水資源管理會刊，12 月號。
11. 黃文政、張守陽、陳孝宇、吳建興、劉欣需、張益家、蘇元風，2003，臺灣地區近 30 年來連續不降雨日數分析與探討，臺灣水利，51(2)，1-9。
12. 游保杉，2007，臺灣地區乾旱變異趨勢與辨識研究(I)，國家科學委員會研究計畫報告。
13. Boo, K.O., Kwon, W.T., Baek, H.J., 2006. Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change. *Geophysical Research Letters* 33(1), L01701, doi: 10.1029/2005GL023378.
14. Cheng, K.S., Hou, J.C., Wu, Y.C., Liou, J.J., 2009. Assessing the impact of climate change on annual typhoon rainfall—a stochastic simulation approach. *Paddy Water Environ* 7, pp.333–340.

15. Duncan, J. M., 2000, "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 307-316.
16. Liu, S.C., Fu, C., Shiu, C.J., Chen, J.P., Wu, F., 2009. Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophysical Research Letters* 36, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
17. Fu, G., Charles, S.P., Yu, J., Liu, C., 2009. Decadal Climatic Variability, Trends, and Future Scenarios for the North China Plain. *Journal of Climate* 22, pp. 2111-2123.
18. IPCC, 2008, *Climate Change 2007 - Synthesis Report (AR4)*.
19. Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., McAneney, J., 2007. Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate* 20(17), pp. 4356-4376, DOI: 10.1175/JCLI4253.1.
20. Semmler, T., Jacob, D., 2004. Modeling extreme precipitation events—a climate change simulation for Europe. *Global and Planetary Change* 44(1-4), pp. 119-127.
21. Solaiman, T. A., Simonovic, S. P., 2011. *Development of Probability Based Intensity-Duration-Frequency Curves under Climate Change*, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
22. Walsh, K., 2002. Tropical cyclones and climate change: Unsolved issues, expanded paper presented at 14th Annual Bureau of Meteorological Research.
23. WMO, 2009, *Manual on estimation of probable maximum precipitation*.
24. WMO, 2009, *Guide to Hydrological Practices*.