

影響水利建造物（蓄水建造物除外）功能之風險因子 探討與分析程序之建立（1/2）

Evaluation of risk factors affecting the functions of hydraulic structures (except the storage structures) and development of its analysis procedure(1/2)

主管單位：經濟部水利署

楊錦釗

湯有光

Yang, Jinn-Chuang

Tung, Yeou-Koung

國立交通大學防災工程研究中心

摘要

由於水文水理不確定性之存在，可能造成特定頻率之水文量所設計之水利建造物無法達到原先設定的保護標準，而承受了相當大的損壞風險。而台灣近年來水文氣象環境受全球氣候變遷之影響，水文資料可能已與過去有很大變異性，連帶使得水文水理特性（降雨量、逕流量等）產生更大的不確定性。為了確保水利建造物(蓄水建造物除外)安全，本計畫全方位針對水文、水理、地文及其他風險因子進行探討及評估，並建置一套風險分析程序，期使可作為擬定減輕風險策略之參考。

根據失敗樹分析結果，本計畫將影響水利建造物防洪功能之風險因子分別界定為水文風險因子(降雨延時、降雨量、雨型及河口潮位)、地文風險因子(河道糙度係數及土地開發程度(即 Curve Number, CN 值))及其他風險因子(分洪道堰流公式之參數、操作因子(抽水站及水門)、及結構破壞因子(例如地震、地層下陷及管湧等))。並依上述因子建置水利建造物防洪風險分析模式，進而計算水利建造物防洪功能之失敗機率 $\Phi(-\alpha_{H_{\max}})$ 以評估水利建造物是否可達到預期之防洪功能。

本計畫第一年度以水文風險因子為基礎建立風險分析程序，並以基隆河流域為應用案例。

關鍵詞：風險分析、水利建造物、基隆河、不確定性

Abstract

Due to the presence of various uncertainties, in addition to hydrologic inherent randomness, the actual performance reliability associated with the hydraulic infrastructure is less than the anticipated reliability. Climatic change in the foreseeable future might have altered hydro-meteorological environments in Taiwan and introduces more complexity and uncertainty in hydrological and hydraulic characteristics in hydrosystem infrastructural designs.

According to results of the fault-tree analysis, the uncertainty factors affecting flood

protection capability of hydraulic infrastructures are categorized into hydrologic (rainfall duration, amount, pattern, and tide level at river mouth), geomorphologic (channel roughness and land use characteristics represented by curve number), structural (earthquake, subsidence, and piping, etc.), and others (weir coefficients at diversion, operations such as pumping stations and gates). Based on the above risk factors, the flood risk assessment framework for hydraulic infrastructures consists is built to assess the failure probability of flood protection infrastructural systems for risk management.

This project is to be implemented in two phases with one year each. The first phase (year-1) focuses on the consideration of various hydrologic uncertainties in the development of reliability analysis and risk assessment framework. Furthermore, the Keelung River Basin is chosen as the case study for demonstrating and testing the development framework.

Keywords : risk analysis 、hydraulic structures 、Keelung river 、uncertainty

一、前言

台灣地區山脈縱向連綿、坡度陡峻、溪流短促，在氣候上又屬於溫帶與亞熱帶交界區，全年降雨量豐富，但大多集中於夏秋雨季，常造成雨季洪患而旱季缺水之旱澇現象。近年更由於台灣經濟繁榮，高度經濟發展及社會變遷均極為快速，居民對於河川邊際土地與窪地使用之需求激增，原屬洪氾區之土地相繼開發，造成築堤、設置閘門、抽水站等水利建造物成為不得不然之措施。

然而近年來台灣之水文氣象環境受全球氣候變遷影響程度，雖然仍有爭議，但事實上水文資料已與過去有很大變異性，連帶使得水文水理特性（降雨量、逕流量等）產生不確定性，進而造成根據特定水文量所設計之水利建造物，可能已無法達到原先設定的保護標準，而使依其所建構之流域防洪系統承受了相當大的風險。為了確保水利建造物（蓄水建造物除外）安全，全方位針對水文、水理、地文及其他風險因子進行探討及評估，並建置一套風險分析程序作為擬定減輕風險策略之參考，實為當前河川防洪減災工作的重要課題。

為此本研究將提出一套以水利建造物（蓄水建造物除外）功能之風險因子為基礎之風險分析程序，並針對基隆河流域進行檢討應用。

二、國內外水利建造物風險分析相關文獻蒐集

在發展模式之前，須蒐集相關文獻並建立風險分析理論架構。其內容包括水利建造物之範疇、安全檢查相關法令、水利建造物損毀原因之彙整及風險分析模式之彙整。以下將針對各部份做概要的說明：

1. 水利建造物之範疇

水利建造物泛指與公共安全有關之水利設施，主要有以下類型：防水、洩水、引水、蓄水建造物。而由於水利建造物項目相當多，且招標文件中註明蓄水建造物除外，因此本計劃著重於分析河川流域沿岸之具有防洪功能之水利建造物為主，包括堤防、閘門、抽水站及疏(分)洪道等。

2. 安全檢查相關法令

水利建造物安全檢查之相關法令規定主要有三則，分別為水利法、水利法施行細則、水利建造物安全檢查辦法。而其中以水利建造物安全檢查辦法有針對水利建造物檢查及安全評估辦法訂定詳細的適用範圍、檢查範圍、檢查項目、檢查分類、安全評估範圍、細目、分類及報告內容等。

3. 水利建造物損毀原因

在颱風期間，對水利建造物所造成的災害項目，主要有堤防、護岸、抽水站、閘門等。其中又以抽水站失效以及堤防損毀，而導致重大淹水災情最受重視。本計劃中有針對歷年來國內外造成淹水災害的事件中彙整因抽水站失效或堤防損毀而導致重大淹水災害的事件與原因，以及參考經濟部水利署(2007)中水利建造物功能失靈或不足之原因。而由以上資料可發現損毀之成因有些可定量而有些並無法定量，其中可定量因子包含水文分析因不考慮氣候變遷(水文量增加)之影響、集水區水土保持狀況不佳時(入滲量減少而逕流量增加)等，而無法定量因子包括河川型態不穩定、結構物位置失當、結構物外力荷重規劃失當、土砂條件失當、人為開發影響及社經環境等。本研究後續風險因子之界定，將依據損毀之成因，儘量將可定量之因子彙整納入分析。

4. 風險分析模式

風險是一種不確定性之表現，不確定性是指一個事件或一個數據可能有許多不同的結果。因此當事件或數據重覆發生時，其前後結果並不一致。而風險分析方法主要透過風險辨識、評估、分析及處置的過程，來達到降低因不確定因素所造成的損失。

早期計算風險已重現期法為代表，但此法忽略變數的不確定性，且僅能考慮少數的水文因子；雖然有上述的缺點，此法在目前仍廣泛應用於水工結構物的風險計算(Borgman,1963)。其後 Wood (1977) 以直接積分法評估堤防的溢流與結構風險。近年來常見之均值一階二矩法 (Mean Value First-Order Second Moment Method) 由 Meyer 於 1926 年建立,Conell(1969)將此法用到工程系統上; Tung and Mays(1981)在暗渠排水之設計上，以一階近似理論來估計靜態 (static) 與時變 (time-dependent) 性之情形而發展出風險與可靠度之模型，並應用此法於河堤防洪設計上。由於均值一階二矩法對於極端值與非線性問題的處理能力差，故 Rackwitz (1978) 提出將執行變數於破壞點上以 Taylor 級數展開，發展出高等一階二矩法(Advanced First-Order Second Moment Method)，至今廣為應用水利建造物風險分析。黃志元 (1990) 利用 AFOSM (Advanced First-Order Second -Moment Method) 分析壩堤溢流之風險；吳國儒 (1991) 亦利用 AFOSM 法評估堤防之安全性。黃翰林等 (1996)，採用一階二矩法考慮各水文量不確定性，建立河堤溢流風險模式。由於本計畫主要著重於分析水利建造物無法達到預期防洪功能之風險，而影響水利建造物之風險因子不僅多且彼此間會互相影響，屬於複雜問題。根據經驗，拉丁高次取樣法(LHS)可處理此類具有多元變數問題之風險分析，將為本計劃所用。

5. 基隆河流域水利建造物現況瞭解

完成研究基隆河流域之水文地文資料及 95 年河道斷面量測資料之蒐集，並彙整基隆河現有水利建造物相關資料(包括堤防、抽水站、橋樑及員山子分洪道)。

三、水利建造物風險因子之界定與探討

在進行風險分析前，首先需進行風險辨識。本計劃在第一年利用故障樹分析法(Fault-Tree)，針對可能造成水利建造物(蓄水建造物除外)之防洪功能失效之淹水事件進行初步之辨識與分類，以界定風險因子。一般而言，造成淹水之原因主要可區分為外水入侵及內水滯流，其中造成外水入侵之原因主要有溢堤、破堤及防洪閘門失效，而造成內水滯流之原因可能是操作不當、抽水站失效、宣洩不及、下水道阻塞和地層下陷。圖 1 為利用故障樹分析法，針對水利建造物防洪風險來源所做的風險因子分析圖。而再根據圖 1 所示之影響水利建造物防洪風險來源圖中，界定可能影響防洪功能之風險因子，主要可分為：

- (1) 水文風險因子：降雨延時、降雨量、雨型及河口潮位。
- (2) 地文風險因子：河道糙度係數、河道斷面及集水區土地利用程度(即 Curve Number, CN 值)。
- (3) 其他風險因子：操作因子(抽水站及水門)、分洪道堰流公式之參數、跨河構造物之能量損失因子及結構破壞因子(例如地震、地層下陷及管湧等)。

由於地震、河水沖刷、管湧及地層下陷等破壞結構因子，包含過多不確定性因子，目前水利單位所擁有的資料，可能無法研判其破壞地點及發生機率，且限於計畫執行期限及經費之考量，故破壞結構之風險因子不列入本計畫所考量之因子。因此，本計畫採用之風險因子及其相對應影響之變數，彙整於表 1，作為發展風險分析程序之基礎。

四、水利建造物風險分析模式之建置

水利建造物風險分析模式之建置主要可分為以下五步驟，其流程圖如圖 2 所示：

步驟 1、風險因子之衍生：

以各風險因子之統計量為基礎，配合蒙地卡羅模擬法(LHS)衍生各風險因子，包含降雨組體圖(降雨延時、降雨量、雨型)、CN 值及河道糙度係數、河口潮位、分洪量堰流公式參數、抽水站排放水量。

步驟 2、河道不同斷面之最高洪水位之衍生：

將風險因子衍生值代入降雨逕流及水理演算，推估河道不同斷面之最高洪水位。

步驟 3、最高洪水位與風險因子之關係式之建置：

採用資料探勘(Data Mining)中之多變數迴歸分析方法建立最高洪水位與風險因子之關係式，計算改變不同風險因子後之最高洪水位，並確定各風險因子之平均值及變異數。進而採用改良一階二矩近似法(AFOSM)不確定性分析方法，推求得最高洪水位之統計特性(包括平均值 $\mu_{H_{\max}}$ 及變異數 $\sigma_{H_{\max}}^2$)。

步驟 4、可靠度指標 $\alpha_{H_{\max}}$ 與失敗機率 $\Phi(-\alpha_{H_{\max}})$ 之計算：

由於本計畫將水利建造物無法達到預期防洪功能之風險定義為最高洪水位大於水利建造物防洪功能(例如堤防高程)之失敗機率，故可由計算可靠度指

標 $\left(\alpha_{H_{\max}} = \frac{h_0 - \mu_{H_{\max}}}{\sigma_{H_{\max}}}\right)$ 藉以推得失敗機率 $\Phi(-\alpha_{H_{\max}})$ ，下式則為水利建造物防

洪功能失敗機率之推算式。

$$\begin{aligned} \Pr(H_{\max} > h_0) &= \Pr\left(\frac{H_{\max} - \mu_{H_{\max}}}{\sigma_{H_{\max}}} > \frac{h_0 - \mu_{H_{\max}}}{\sigma_{H_{\max}}}\right) \\ &= \Pr(Z > \alpha_{H_{\max}}) = \Phi(-\alpha_{H_{\max}}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\alpha_{H_{\max}}$ 定義為可靠度指標； h_0 為水利建造物之防洪能力(例如堤防高度)； Z 為常態隨機變數；及 $\Phi(\bullet)$ 為標準常態分布(Standard Normal Distribution)。

步驟 5、依據失敗機率計算結果評估水利建造物防洪功能之可靠度：

藉由上步驟所算得失敗機率，以評估水利建造物功能受風險因子之影響程度。例如可靠度指標之機率 $\Phi(-\alpha_{H_{\max}}) = 0.05$ 則代表水利建造物只有 5% 的機率會無法達成預期防洪功能，亦即其可靠度為 95%。

五、水利建造物風險分析程序之初步研析-以基隆河流域為例

第一年主要建置水文風險因子為主之風險分析程序，其模式架構如圖 3 所示。將水文風險因子之探討及最高洪水位之推估，研究成果說明如下：

1. 從基隆河流域平均降雨序列資料選取 326 場降雨延時大於 5 小時且總雨量大於 30mm 之事件。
2. 採用集群分析方法(Cluster Analysis)與上述 326 場降雨事件將基隆河降雨型態分為前進型(Advanced Type)、中央型(Central Type)、均勻型(Uniform Type)及延後型(Delayed Type)。
3. 四種雨型各衍生 100 組有效降雨量及河口(關渡)水位代入單位歷線推估支流入流歷線並經 SOBEK 模式推估各斷面之最高洪水位。
4. 根據四種雨型各 100 組最高洪水位衍生之統計分析結果可知，延後型雨型之最高洪水位比其他三種雨型具有較大變異程度。
5. 根據 100 組最高洪水位，採用多變數迴歸分析法推導最高洪水位與水文風險因子關係式如下式所示。

$$h_{\max,SP} = \alpha(d)^{\beta_1} (t)^{\beta_2} (N_{Rp})^{\beta_3} (h_{TD})^{\beta_4} \quad (2)$$

式中 d 為降雨量(mm)； t 為降雨延時(小時)； N_{R_p} 為無因次最大降雨強度； h_{TD} 為河口(關渡)潮位(m)；及 SP 為特定雨型。由圖 4 可看出大部份斷面之 R^2 達 0.7 以上，顯示本計畫所推得之關係式應可適當反應出水文風險因子與最高洪水位之變化趨勢。

6. 藉由(2)式與改良式一階二距方法(AFOSM)，推求已知水文風險因子統計特性下，最高洪水位之統計特性，進而計算各雨型於不同斷面之失敗機率 $\Phi(-\alpha_{H_{\max, SP}})$ 。因上述所求得失敗機率為個別雨型之分析結果，故水利建造物防洪功能在不同斷面之失敗機率期望值可由下式求得。

$$Risk = P_r(Z \geq \alpha_{H_{\max}} | x, y) = \sum_{SP=1}^4 [\Phi(-\alpha_{H_{\max, SP}}) \times P_r(SP)] \quad (3)$$

式中 $P_r(SP)$ 為四種雨型之發生機率。因上述各斷面最高高程皆採用為位於此斷面之水利建造物設計高程，故該斷面之風險分析結果可作為該水利建造物防洪功能可靠度之評估。

7. 採用九場暴雨事件驗證本計畫所建立之風險分析模式，由圖 5 可發現除了下游斷面 1 至 9 及斷面 16 外，其他斷面之失敗機率趨近於 0，其中斷面 1-9 主要受下游潮位影響，而斷面 16 左岸最高高程，雖僅為 5.8 公尺，但經查閱地圖發現附近另有一較高之垃圾山，故應不會發生淹水。

員山子分洪道完成後之暴雨事件，基隆河水利建造物防洪功能之可靠度接近 100%，由此可證明員山子分洪道之防洪效益很高。因此所得之風險分析結果符合特定水文及地文條件下基隆河防洪能力，顯示模式可適用基隆河水利建造物防洪功能之可靠度分析。

8. 評估基隆河保護標準重現期距 200 年三日降雨量之不確定性對防洪功能之影響。由風險分析結果顯示，堤防增加出水高 1.5 公尺可有效提高防洪功能之可靠度，如圖 6 所示。此外，基隆河防洪功能之可靠度與水文紀錄長度有關，隨紀錄年份增加所推得之重現期距 200 年三日降雨量增加而致使可靠度降低。

五、結語(後續研究工作)

本計畫以傳統水文水理分析模式結合近年來常用於評估風險之不確定性分析方法，成為水利建造物風險分析程序，以應用於分析水利建造物防洪能力是否達到預期效益。而第二年度將以所建置之風險分析程序為基礎，加入其他風險因子，期使所得之水利建造物防洪能力之可靠度符合現況，可有效提供防洪減災策略制定之參考，與提供水利建造物附近城市社區發展計畫及流域整體治理計畫擬定之參考。

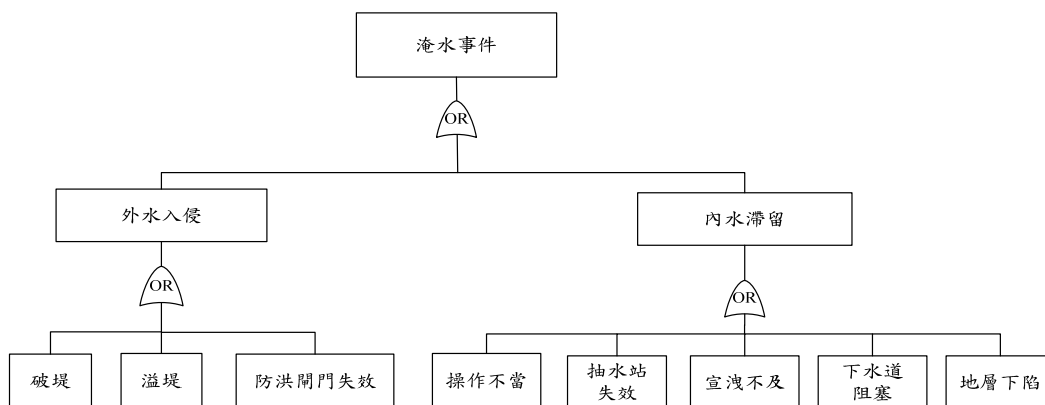
參考文獻

1. 經濟部水利署，「水利建造物工程設計基準之檢討」，民國 96 年 7 月。

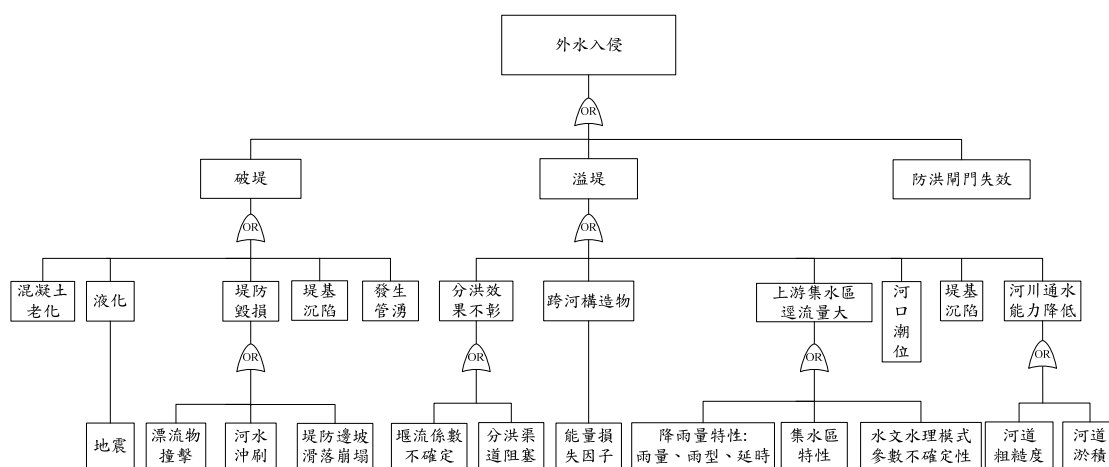
2. 吳國儒,「堤防溢流風險分析」,成功大學水利及海洋工程學研究所碩士論文,民國80年6月。
3. 黃志元,「壩堤洪水溢流之風險及不確定性分析」,成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文,民國79年6月
4. 黃翰林,「河堤溢流之風險可靠度分析」,成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文,民國85年6月。
5. Borgman, L.E. , “Risk Criteria” (Aug.1963), Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 89, No. WW3, pp.1-35 .
6. Cornell, C. A., (Feb.1967) “Bounds on the Reliability of Structural Systems”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.93, No. ST1, pp.171-200.
7. Rackwitz, R., and B. Fiessler, (1978) “Structural reliability and combined random load sequences”, Comput. Struc., 9, 489-494.
8. Tung, Y. K., and Mays, L. W., (Aug., 1981) “Risk Models for Flood Levee Design”, Water Resources Research, Vol.17, No.4, pp.833-841.
9. Wood, E.F., (June.1977) Analysis of Flood Levee Reliability”, Water Resources Research, Vol.13, No.3, pp.665-671.

表 1、風險因子及其相對應影響之變數彙整

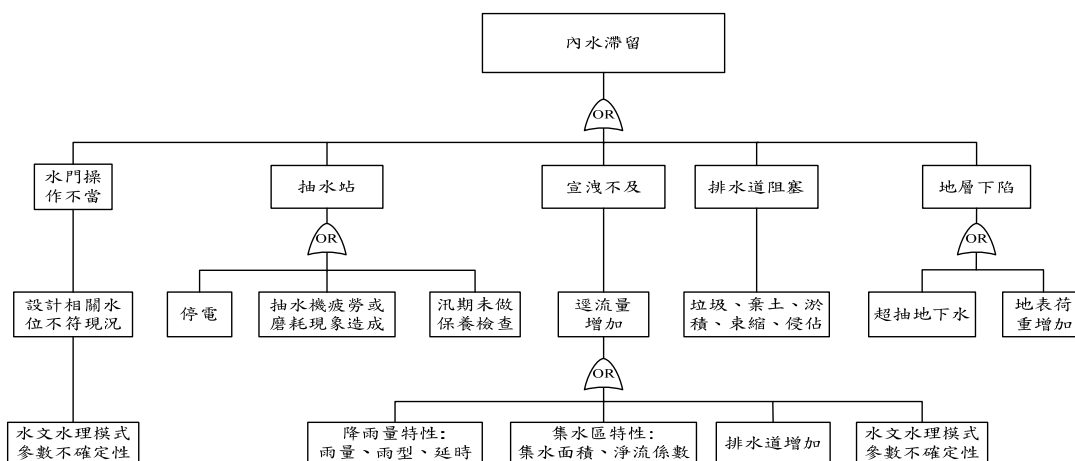
風險因子	代表變數	對應變量
水文因子	降雨組體圖	降雨量、延時及雨型
	河口潮位	水理演算下游邊界值
地文因子	河道糙度係數	曼寧 n 值
	集水區土地利用	入滲量
	河道斷面	不同時間量測之河道斷面資料
其他因子	閘門及抽水站操作	排放水量
	疏(分)洪道	分洪量
	跨河構造物	橋墩束縮係數
	水文水理模式不確定性	水文水理模式參數之不確定性
	破壞結構因子	地震,沖刷,地層下陷等



(1) 淹水事件形成原因



(2) 外水入侵風險因子



(3) 內水滯留風險因子

圖 1、水利建造物防洪風險來源

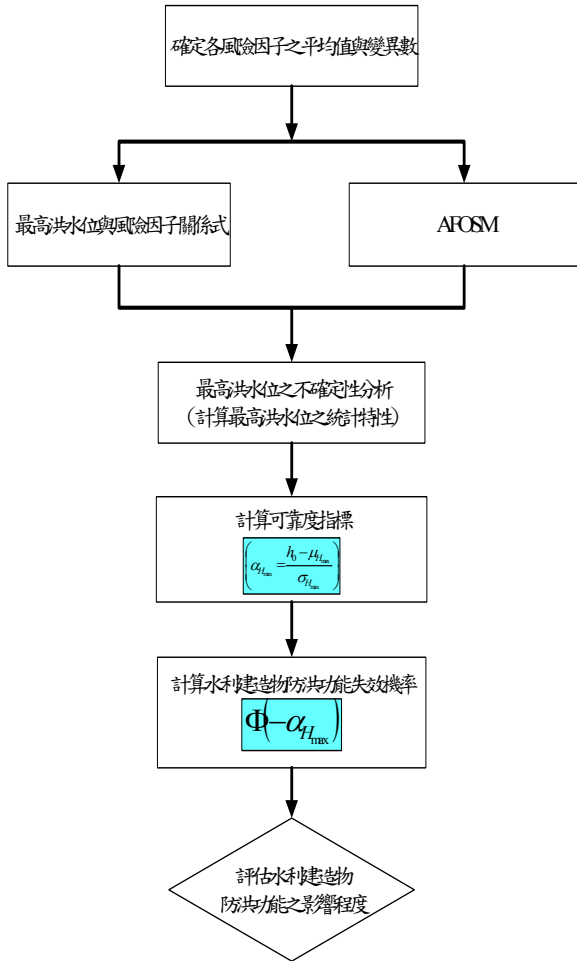


圖 2、風險分析模式之操作步驟

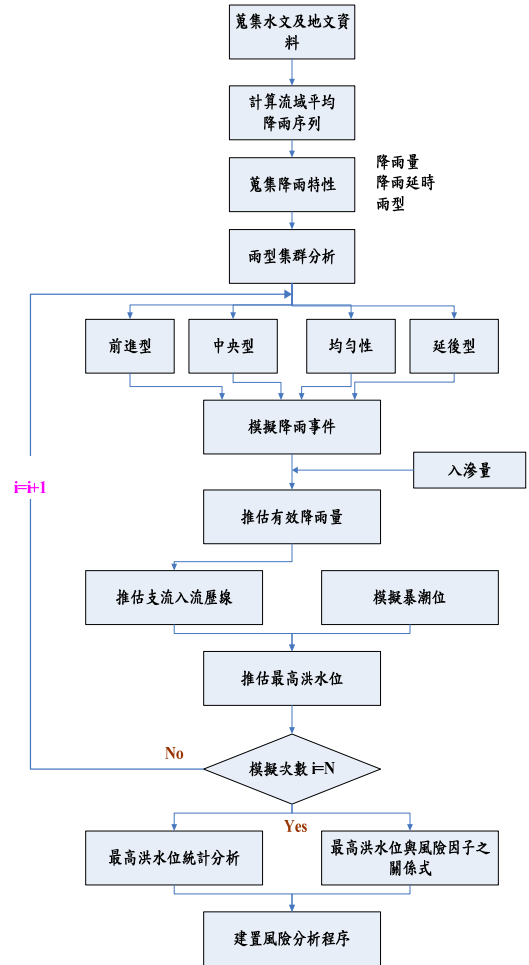


圖 3、以水文風險因子為基礎之水利建築物風險分析模式

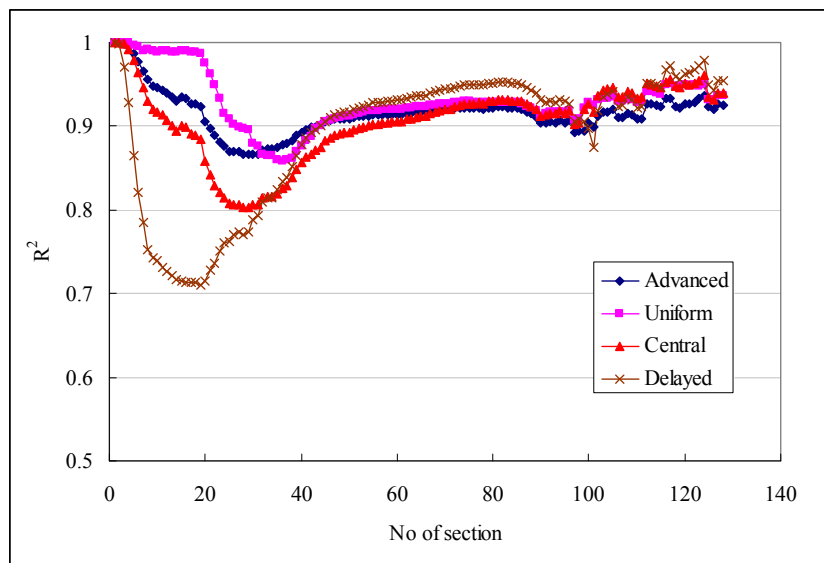
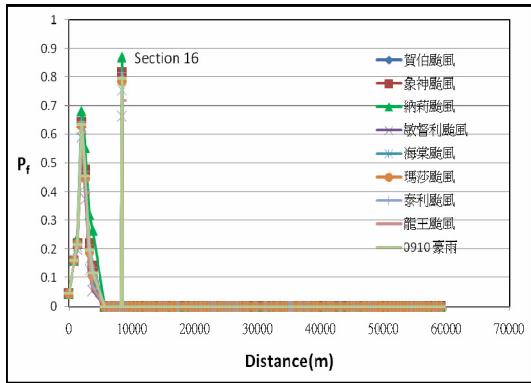
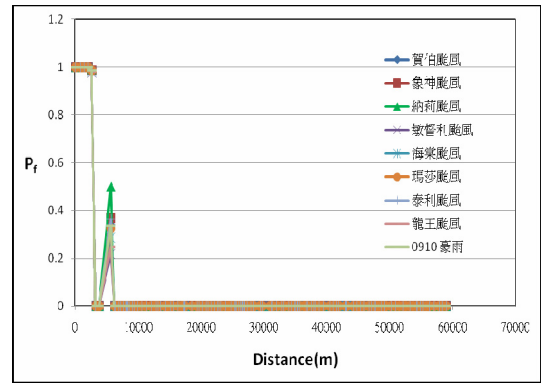


圖 4 不同雨型之各斷面最高洪水位關係式 R2 值

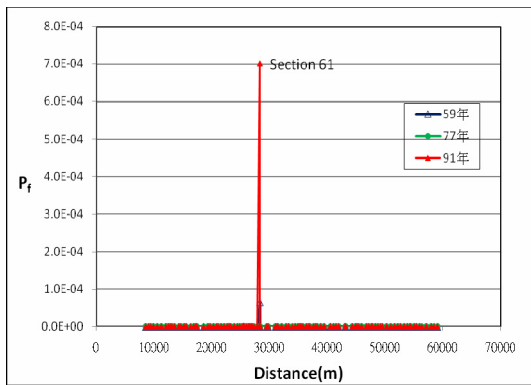


(A) 左岸

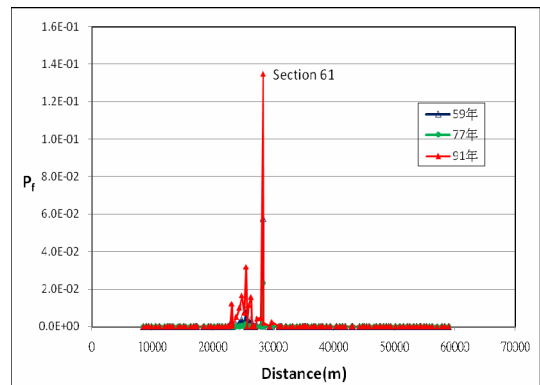


(B) 右岸

圖 5、各斷面失敗機率平均值(實際降雨事件)

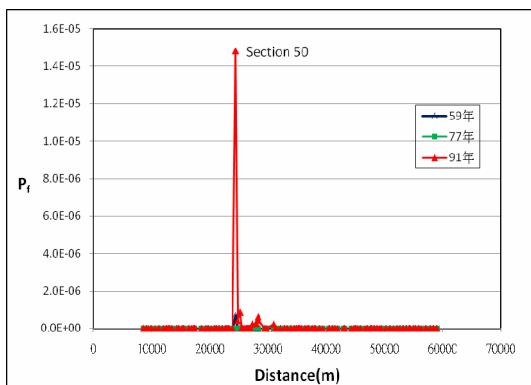


(A) 設計高程為堤防高程

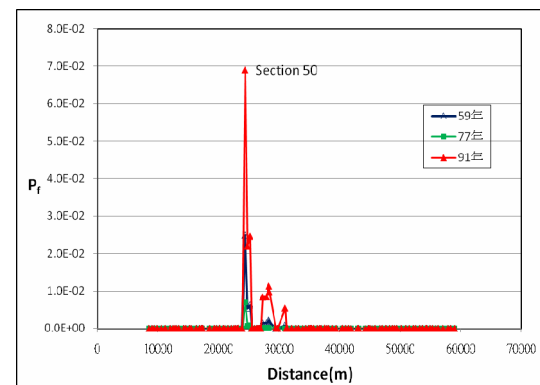


(B) 設計高程為堤防高程扣除出水高

(1) 左岸



(A) 設計高程為堤防高程



(B) 設計高程為堤防高程扣除出水高

(2) 右岸

圖 6、不同年份各斷面失敗機率(重現期距 200 年三日降雨量)