



## 出國報告(出國類別：考察)

# 水文水理演算實務研習

服務機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

姓名職稱：顧玉蓉工程員

派赴國家：美國

出國期間：101年5月19日至5月28日

報告日期：101年8月



## 謝 誌

本次參訪感謝經濟部水利署 101 年度水資源作業基金出國計畫經費支助與經濟部水利署水利規劃試驗所推薦，並特別感謝美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers, USACE)轄下之水利工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)組長 David J. Harris 行前資訊提供、參訪行程建議及說明，感謝研習課程教師 Matthew McPerson、David Ford 與 Beth Faber 等教授「Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects」課程。並感謝 HEC 主任 Christopher N. Dunn 與工程師 Woody Fields 等提供許多寶貴的經驗與觀念。最後感謝本組小組成員工兵團 Lisa Shaff (CESPA-PM-LH)及 Osamu Itagaki 於課程討論及生活上的分享與協助。



# 目 錄

謝誌.....	1
目錄.....	I
表目錄.....	III
圖目錄.....	III
照片目錄.....	IV
摘要.....	i
第壹章 目的.....	1
第貳章 過程.....	3
一、 行程.....	3
二、 參訪機關介紹.....	4
三、 洪災減損風險管理分析技術研習.....	7
(一) 風險概念的應用.....	7
(二) 洪災分析常遭遇困難及處理方式.....	9
四、 Sacramento River 參訪.....	16
(一) 沙加緬度堰(Sacramento Weir).....	16
(二) Yolo 野生動植物保留區(Yolo Bypass Wildlife Area).....	21
第參章 心得與建議.....	25
一、 心得.....	25
(一) 洪災風險評估方法比較.....	25
(二) 洪災風險評估工具的應用.....	25
(三) 不定期調整防洪策略.....	26
(四) 現有生態資料統整以利後續應用.....	27
二、 建議.....	28
(一) Sacramento River 防洪計畫經驗應用於本署相關研究或規 劃.....	28

(二) 現有規劃報告生態資料彙整以提高資料再利用性 .....	28
(三) 未來參加研習人員建議事項 .....	29
第肆章 參訪照片 .....	30
附錄 參考文獻 .....	35

## 表 目 錄

表 1 參訪行程表 .....	3
-----------------	---

## 圖 目 錄

圖 1 HEC 外觀照片 .....	4
圖 2 HEC 內部陳設及研習照片 .....	5
圖 3 HEC-EMF Plotter 界面圖 .....	6
圖 4 估計災害損失的概念圖(不考慮不確定性).....	8
圖 5 估計災害損失的概念圖(考慮不確定性).....	9
圖 6 Sacramento River 堤防照片及橫斷面示意圖.....	10
圖 7 修正淹水頻率曲線示意圖 .....	10
圖 8 水庫系統之流量調整 .....	11
圖 9 流量頻率曲線修正圖(滯洪設施).....	11
圖 10 HEC-FDA 方案輸入資料調整示意圖(1) .....	12
圖 11 HEC-FDA 方案輸入資料調整示意圖(2).....	13
圖 12 潰堤機率圖 .....	13
圖 13 研究範例位置圖(a)及指標位置調整圖(b) .....	15
圖 14 減災比率與預警時間圖 .....	16
圖 15 Sacramento River 保護標準與其他河系之比較圖.....	17
圖 16 沙加緬度河系及沙加緬度堰位置圖 .....	18
圖 17 Sacramento River 及 American River 匯流處 .....	19
圖 18 Sacramento Weir 排洪照片 .....	21
圖 19 Yolo Bypass Wildlife Area 平面佈置圖 .....	22
圖 20 YBWA 洪水通過前(a)後(b)之照片 .....	23

## 照片目錄

照片 1 「Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects」課程授課情形 .....	30
照片 2 與 HEC 工程師合影 .....	30
照片 3 與 HEC 及本次與會研討工程師合影 .....	31
照片 4 本小組與 HEC 工程師討論情形 .....	31
照片 5 參訪 Sacramento Weir.....	32
照片 6 參訪 Yolo Bypass Wildlife Area .....	33





## 摘 要

本計畫主要是參加美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers, USACE)於 101 年 5 月 21 日至 5 月 25 日於美國加州 Davis 舉辦「洪災減損風險管理分析技術研習」，以學習美國洪災管理觀念與技術。此外，本計畫除了參訪美國陸軍工兵團轄下之水利工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)之外，並參訪 HEC 參與研究多年的 Sacramento River 防洪管理計畫中的操作單元，以瞭解 HEC 進行防洪管理的經驗。

Sacramento River 防洪計畫已有多年歷史，因其詳盡的歷史及調查資料，使每一次的防洪策略與方法都有因應調適的依據，令農業發展及生態環境的需求亦能在防洪操作下獲得保障甚至受益，然由於早期已設定防洪保護標準而限制防洪的可用策略，且極端水文事件的頻仍發生，未來防洪操作策略應可考量系統性風險分析及兼顧生態環境等需求的方式，值得我國借鏡。因此，除水文地文資料外，亦應統整生態環境圖資做為背景資訊，以利後續監測及計畫調適之用。

*關鍵字：洪災、風險管理、Sacramento River 防洪計畫*



## 第壹章 目的

近來，國內外頻繁的洪水事件顯示，洪災的有形及無形損失並未因工程技術及品質的提升而降低，因此洪災風險評估為一重要研究課題。由於洪災的發生與影響具隨機性與不確定性，其風險之評估常採用機率性風險分析，藉由風險與損失函數的建立，瞭解洪災發生特性、區域可承擔的最大災害規模、經濟與保險損失風險等洪災後果；當管理者或決策者面對發生重現機率小，但可能損害大的洪災時，更亟需快速掌握上述風險資訊，同時並考量以風險減輕或轉移等風險管理作為洪災的因應對策。美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers, USACE)轄下之水利工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)主要研究領域為地表與地下水水文、河川水力與傳輸、水文統計與風險分析、水庫系統分析、規劃分析、及時控制與管理與其他相關之技術，為享譽國際且兼具實務應用與研究的水利工程單位。HEC 在美國各主要河川進行多年的洪災管理，具豐富實務經驗，並研發洪災風險評估工具，為值得學習之對象。

爰此，本(101)年度經濟部水利署水資源作業基金出國計畫項下「水文水理演算實務研習」出國計畫案，特選定美國陸軍工兵團 101 年 5 月 21 日至 5 月 25 日於美國加州 Davis 舉辦之「洪災減損風險管理分析技術研習」作為本此出國研習的主要項目，並經由 HEC 建議參訪地點，期瞭解洪災風險管理觀念與技術，實為學習美國最新洪災風險管理觀念與技術之良好機會。

研習課程的目的主要是將傳統水文、水理分析模組納入風險管理的概念，結合災害損失函數，並在空間中結合地文、防洪結構物、建築物等資訊，建立災害損失模組，最後透過經濟分析模組，以經濟的觀點評估各種洪災管理方案的最可能風險程度。故透過此次課程的學習，可將風險分析的觀念應用於防洪工程。



## 第貳章 過程

### 一、行程

本次赴美國加州 Davis 市參加 USACE 舉辦之「洪災減損風險管理分析技術研習」及參訪行程，其往返程搭機時間共計 10 天。研習地點主要在 Davis 市，然參訪行程因行前準備及聯絡時間稍嫌不足，且課程結束時又適逢美國三大節日之一——國殤日，僅能以 Davis 市附近的 Sacramento River 為對象，實地參訪防洪減災工程及相關設施；另外，因 HEC 成立初期即隸屬於 Sacramento 分區轄下的工程部，對於 Sacramento River 的防洪工程及管理計畫已參與數十年之久，經驗非常豐富，且本次研習課程中也常以 Sacramento River 防洪計畫作為案例，因此 HEC 工程師非常建議前往參訪地點包括 Sacramento Weir 及 Yolo Bypass Wildlife Area。本次赴美國行程除學習美方洪災風險管理技術外，期配合現地參訪並與來自美國各單位的專家進行技術交流與經驗交換，提供未來風險管理之用。參訪行程如表 1。

表 1 參訪行程表

訓練進修日期及時間 (Visiting Time)	訓練進修地點 (Location)	訓練進修機構及訪談對象 (Institutions & Persons to be visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for Discussion)
5/19-5/20	啟程(台北→舊金山→Davis)		19 日飛機啟程到達舊金山，19 日夜宿舊金山。20 日轉搭捷運及火車抵達 Davis。
5/21-5/26	Davis	Hydrologic Engineering Center	1、參加洪災減損風險管理分析技術研習。 2、Sacramento Weir 及 Yolo Bypass Wildlife Area 參訪。 3、與美國 HEC 進行技術交流與經驗交換。
5/27-5/28	返程(Davis→舊金山→台北)		27 日飛機由舊金山啟程回台北，28 日飛抵台北。

## 二、參訪機關介紹

HEC 歷經多次組織調整，目前隸屬於美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers, USACE)轄下的水資源研究所(Institute for Water Resources, IWR)，其主要任務包含水利相關研究、技術支援、軟體研發及教育訓練等四大領域，提供 USACE 在地表及地下水、河道水理輸砂、水文統計及風險分析、水庫系統分析、即時水資源管理系統等各方面的技術協助。其位於北加州 Davis 市的研究中心外觀及內部陳設，分別如圖 1 及圖 2 所示。



圖 1 HEC 外觀照片



圖 2 HEC 內部陳設及研習照片

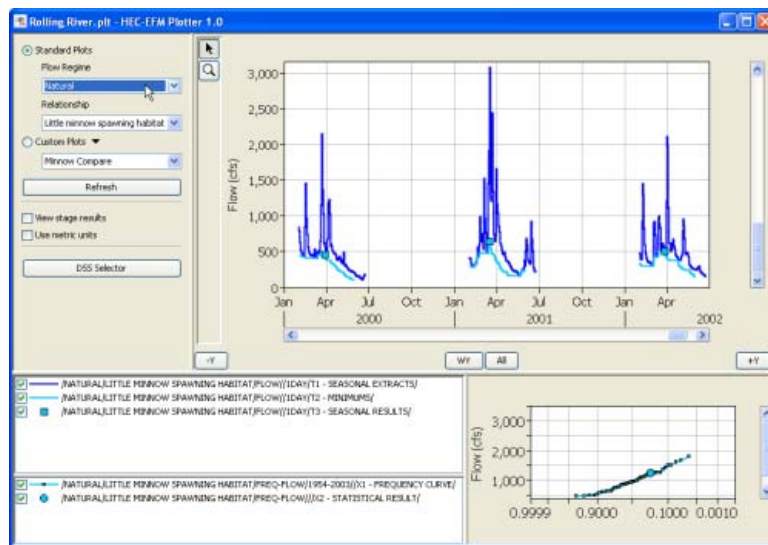
早期 HEC 發展的著名軟體包含 HEC-1 (集水區水文)、HEC-2 (河道水理)、HEC-3 (水庫系統分析管理)、HEC-4 (隨機河流產生程式)、HEC-5(防洪及水庫系統聯合運轉模式)及 HEC-6(河道輸砂模式)等，這些軟體及出版文件除提供 USACE 使用外，亦提供國際上水利相關從業人員免費下載使用，並得到使用者極佳迴響，使之享譽國際。

隨著硬體更新與人性化界面需求的增加，圖像化使用者界面逐漸取代指令式界面，HEC 也順應趨勢研發出 HEC-HMS、HEC-RAS、HEC-FDA、HEC-SSP、HEC-ResSim 等圖形界面模式，讓使用者更容易藉由視覺化操作提高其實用性；而在各模式的建模過程中，地文資料的建置往往需要耗費需許多人力與時間，因此 HEC 亦在各模式之前端，配合地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)強大的空間資訊分析及展示能力，研發功能強大的前端地文資料處理器，大幅提高模式輸入地文資料的便利性及精確度，如 HEC-HMS、HEC-RAS、HEC-EFM 的前端



處理器 HEC-GeoHMS、HEC-GeoRAS、HEC-GeoEFM 等。

另外，針對部分有圖層空間展示及套疊等需求的模式，HEC 亦研發模式後端處理器，協助模式成果進行可視化展示，提高演算結果的判讀能力及分析效率，如 HEC-RAS 及 HEC-EFM 的後端處理器 RASMapper 及 HEC-EMF Plotter(界面如圖 3 所示)等。



資料來源：Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

圖 3 HEC-EMF Plotter 界面圖

### 三、洪災減損風險管理分析技術研習

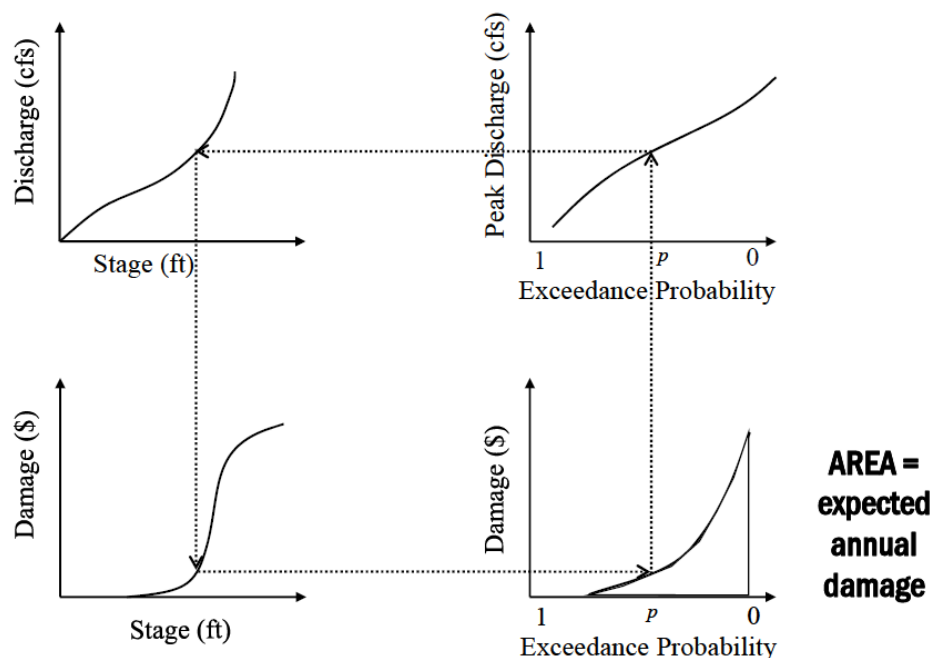
#### (一)風險概念的應用

一般水工結構物的防洪設計標準基準是依據過去長期歷史降雨記錄，經過水文頻率分析、降雨-逕流演算、河道水理演算，最後在設計水位上再加上出水高，以決定設計堤頂高程；設計時只需要針對預期可能發生最大規模的單一事件(如設計保護標準)進行設計，則防洪工程的規模即可以抵禦此最大規模的事件，因此即可抵禦小於及等於此最大規模事件之所有事件。惟在臺灣所謂「過去長期歷史降雨記錄」最多也不過百年，大部分水文站可用降雨記錄年限皆不足以顯現水文歷程的時間及空間隨機特性；且各模式推衍過程中包含模式參數檢定、上下游邊界條件、物理過程簡化的不確定性等；另外，由於只能在過去渠道及集水區治理措施與都市發展等現有人為設施的限制下，進行洪水災害的範圍及規模等評估，增加河川或排水的內外水交換的複雜機制，更提高洪水災害整體風險的不確定性。而設計時採用出水高之意義雖隱含前述過程中種種的隨機性及不確定性，但卻無法估計各種不同防洪管理措施的整體風險。

另外，因為決策者所需要的災害損失資訊，不僅止於超過某特定規模事件或設計標準(如 200 年降雨頻率)時所造成的損失，更需要知道其他各種規模較小、發生機率較頻繁的災害所造成的年度平均損失，並計算所有可能發生的各種不同規模(或發生頻率)災害所可能造成的總年度平均損失。不考慮不確定性(uncertainty)與納入不確定性的洪水災害評估流程分別表示如圖 4 及圖 5。年期望損失(Expected Annual Damage, EAD)等於損失超越機率曲線下的面積。

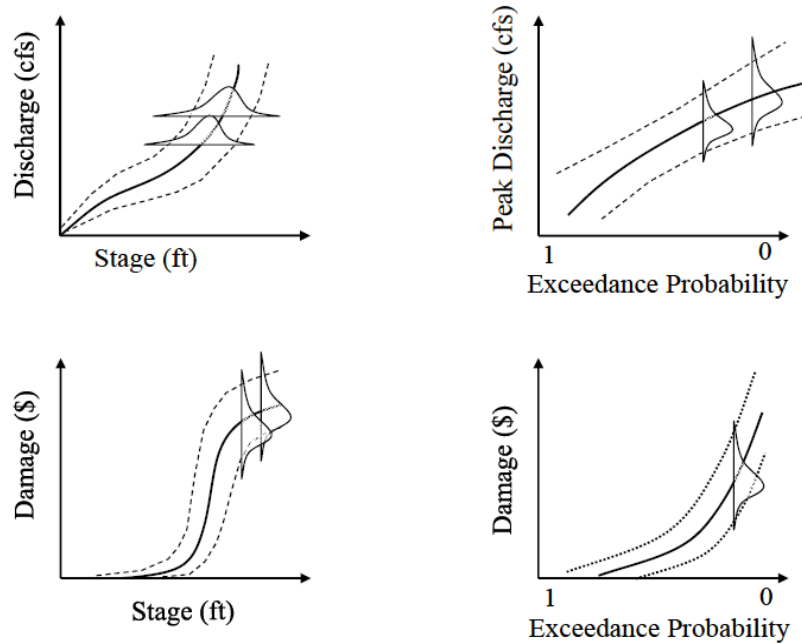
而 HEC 研發的 HEC-FDA(Flood Damage Reduction Analysis)則以圖 5 為計算概念，主要用於洪災風險管理計畫的擬定與評估時可以執行整體水利工程與經濟分析。HEC-FDA 可以透過流量-頻率曲線、水位-流量關係與水位-災害函數，得到災害-頻率曲線，而災害-頻率曲線的平均值即年平均損失。其模擬最可能發生情況則以蒙地卡羅演算法(Monte Carlo Algorithm)進行計算，蒙地卡羅演算法是一種數值方法，是一種利用亂數隨機抽樣的方式，去模擬未來實際洪災發生時所可能會產生的各種機率曲線。

目前最新的版本為 2010 年 10 月所發佈的 HEC-FDA 1.2.5。預計於 2012 年底推出 HEC-FDA 2.0。



資料來源：Beth Faber, 2012, Incorporating Uncertainty into EDA Computation. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

圖 4 估計災害損失的概念圖(不考慮不確定性)



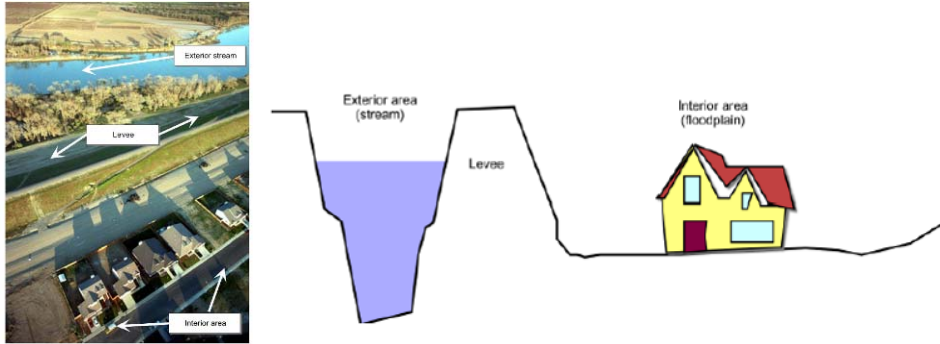
資料來源：Beth Faber, 2012, Incorporating Uncertainty into EDA Computation. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers

圖 5 估計災害損失的概念圖(考慮不確定性)

## (二) 洪災分析常遭遇困難及處理方式

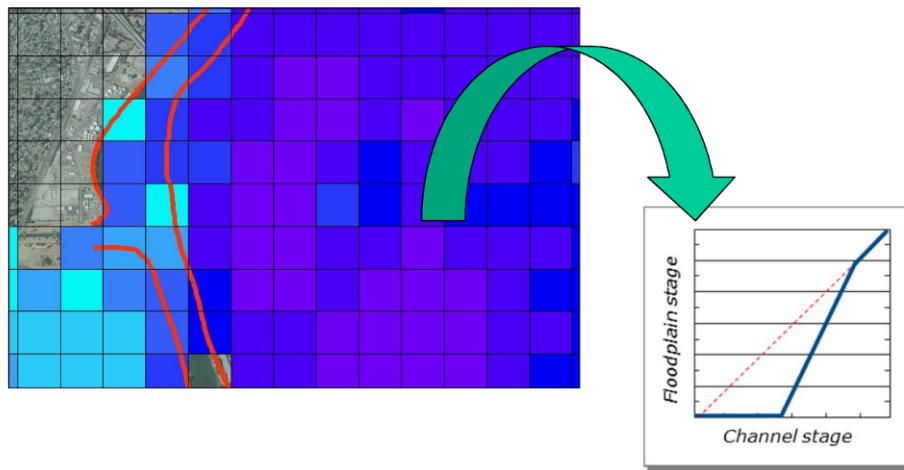
研討過程中，專家們對於計算洪水災害損失評估常面對的困難及其處理方式說明如下，不過專家們也特別提示，這些是他們目前面對問題的處理技巧及經驗，他們也持續在調整處理方式，期望未來能夠更完備的處理洪水災害風險的評估。

1. Sacramento River 沿河多數城鎮因設置堤防才能使居民的生命財產安全的獲得保障，但在很多區域堤頂高程遠遠高過堤內地面高程(如圖 6)，因此堤外的洪水頻率及堤內淹水頻率並不相同。實際執行時，須先將堤外、堤內進行劃分及格網化，並依歷史淹水資料及淹水模擬圖等修改堤內的淹水頻率曲線(如圖 7)，修改後之堤內淹水頻率曲線如圖 7 藍線所示。



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

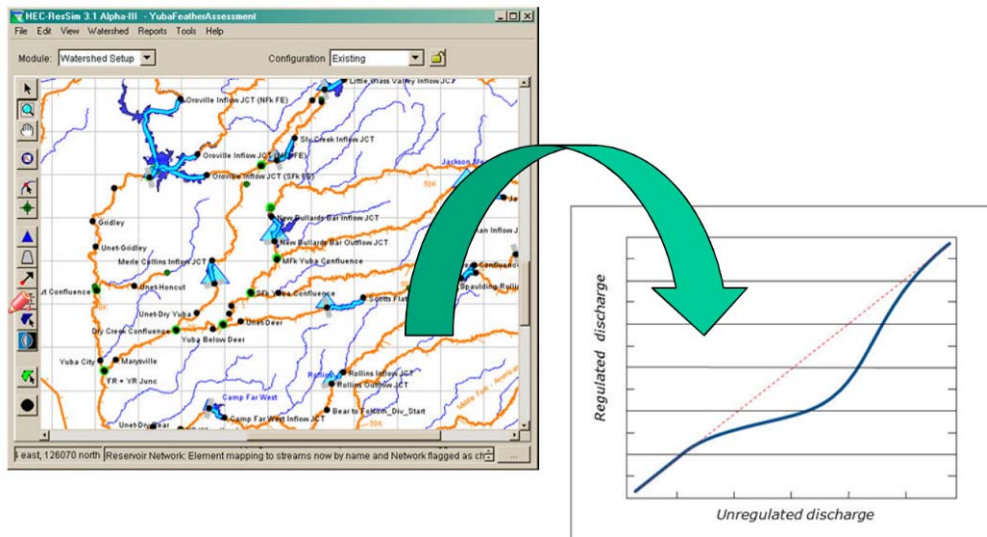
**圖 6 Sacramento River 堤防照片及橫斷面示意圖**



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

**圖 7 修正淹水頻率曲線示意圖**

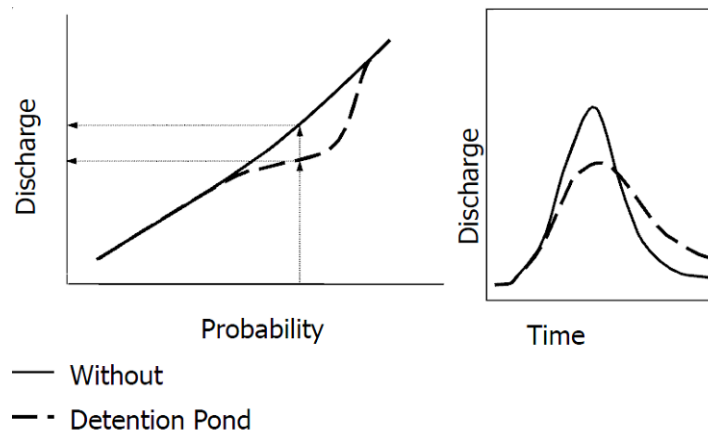
2. 為因應農業、工業、民生及防洪等各種需求，常於集水區中上游設立水庫，水庫操作方式將影響河川洪水頻率曲線。實際計算時，HEC 工程師透過 HEC-ResSim 推估下游各指標位置的扣除蓄水體積及流量。



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

**圖 8 水庫系統之流量調整**

3. 集水區中常設立各種分洪、排洪、蓄洪、滯洪等設施，若方案包含滯洪設施(Detention Pond)時，流量歷線及流量頻率曲線均會需要調整，調整後之流量歷線及流量頻率曲線詳圖 9。

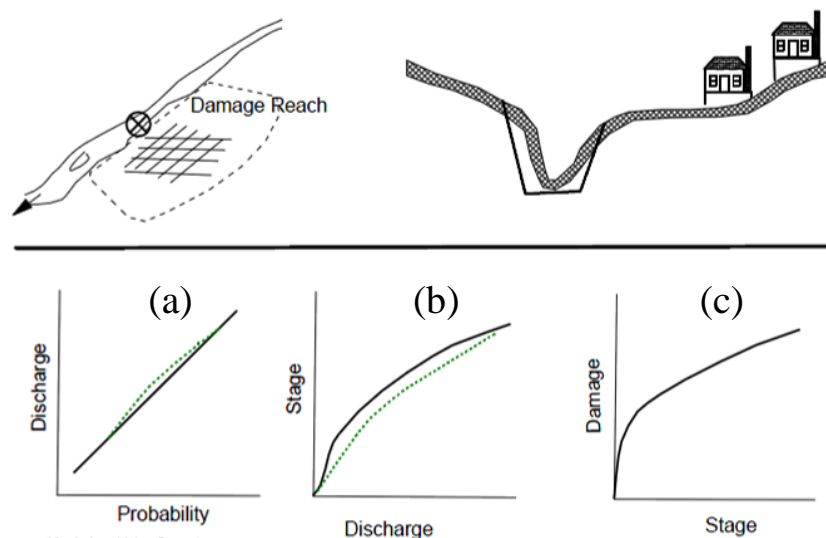


資料來源：US Army Corps of Engineers, 2012, Risk Analyses for Flood Damage Reduction Studies.

**圖 9 流量頻率曲線修正圖(滯洪設施)**

若方案中之治理措施同時包含滯洪設施、渠道整治(不增加提頂高程)及建築物基礎不調整時，亦須修正流量頻率

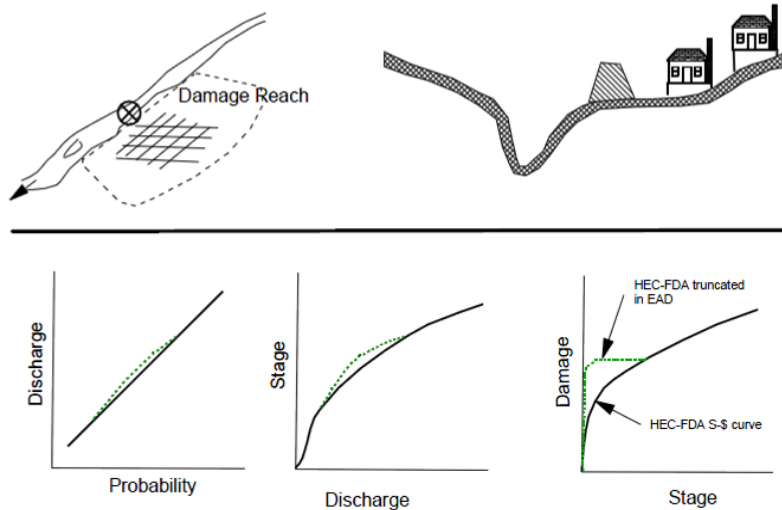
曲線、水位流量關係等。若僅進行渠道整治時，因可增加渠道排洪能力則流量頻率曲線可能如圖 10(a)所示，但同時配置滯洪措施時，則需考量指標位置、渠道排洪增減量等因素，修正流量頻率曲線及水位流量關係(如圖 9(a)、(b))，這些修正曲線需由其他水文水理模式計算後，作為 HEC-FDA 的輸入檔。若方案中亦包含建築物基礎抬高時，則水位災害函數應一併調整。



資料來源：US Army Corps of Engineers, 2012, Risk Analyses for Flood Damage Reduction Studies.

**圖 10 HEC-FDA 方案輸入資料調整示意圖(1)**

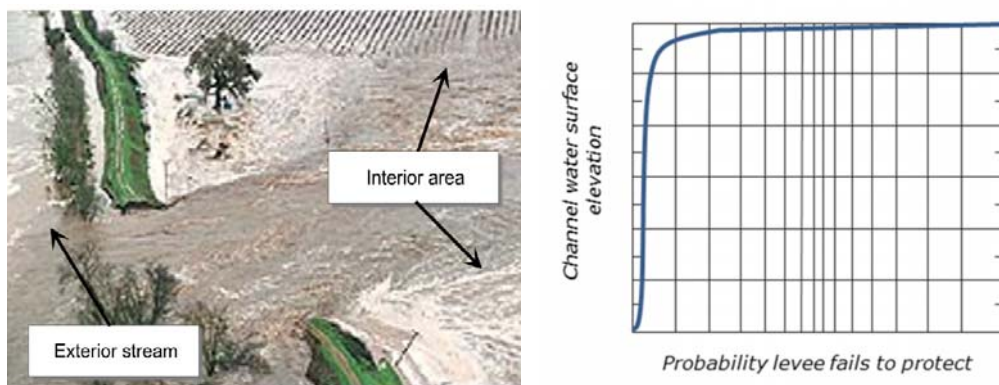
若方案中之治理措施同時包含滯洪設施、堤頂加高或防洪牆(不進行渠道整治)、建築物基礎不調整時，需修正流量頻率曲線、水位流量關係、水位災害函數等(如圖 11)。其中水位災害函數在水位超過堤防或防洪牆高度後，災害損失及急遽升高，並趨近原未堤頂加高或未設置防洪牆之災損。



資料來源：US Army Corps of Engineers, 2012, Risk Analyses for Flood Damage Reduction Studies.

**圖 11 HEC-FDA 方案輸入資料調整示意圖(2)**

4. 潰堤為造成嚴重淹水災害的重要原因之一，但由於潰堤位置、規模及型式無法事前確切預知，因此需在參考點(index point)以外輔以更多更頻繁的地質探勘、鑽孔等試驗及監測。如圖 12 為渠道水位與潰堤機率關係圖，然此關係並無法涵蓋所有發生潰堤原因。



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

**圖 12 潰堤機率圖**

5. 對於防洪目標的擬定，需羅列各種可能發生之情境，依專家意見踢除較不可能發生之情境，選出最可能發生之情



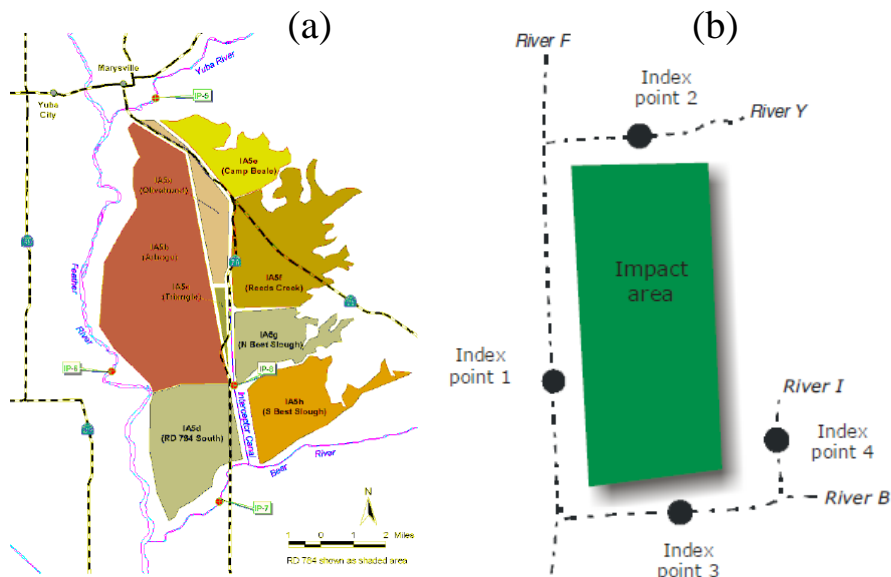
境。如美國聯邦緊急事務管理署（Federal Emergency Management Agency, FEMA）則選定可能發生之最糟情境作為防禦對象，然如此卻失去風險分析的意義，而最後選擇以何種情境作為假想對象，則常與其所需經濟規模息息相關。

6. 某些區域的洪水災害成因，並非只是該區段堤防保護能力不足所致，而有其他多種綜合原因，因此造成淹水發生機率較難估算。以 Sacramento River 為例，在 Yuba River 及 Bear River 分別匯入 Father River 的左岸區域(如圖 13(a))，其淹水原因除前述三河川本身所造成的問題之外，還有內部截流溝溢堤，所造成的淹水問題，但這 4 個造成淹水原因的區段，因 HEC-FDA 計算所需，分屬不同河段及有其所屬指標位置(index point, IP)，其發生淹水情境組合有非常多種，因此就淹水區域而言的發生機率，並不單純是每一區段獨立時的發生機率。面對這些問題，HEC 工程師提供了一個有趣的答案：腦力激盪(Brainstorm)。

目前他們建議的處理方式為依實際淹水災害調整劃分區域(如圖 13(a))，再分別針對所有可能造成淹水原因的區段調整其對應的指標位置(如圖 13(b))，計算各指標位置的水位-頻率關係，再建立渠道內外水的交互影響關係，之後再計算各指標位置的 AEP 及 EAD，由於各 IP 與淹水區域皆會有影響，因此需重覆計算各指標位置的 AEP 及 EAD，藉此決定各指標位置的 AEP 權重，並以最小的 AEP 作為計算值。

但在這個調整過程中，其實還是有幾個不甚合理的假設條件，如每個 IP 的出像(outcome)是獨立的；各 IP 間之相

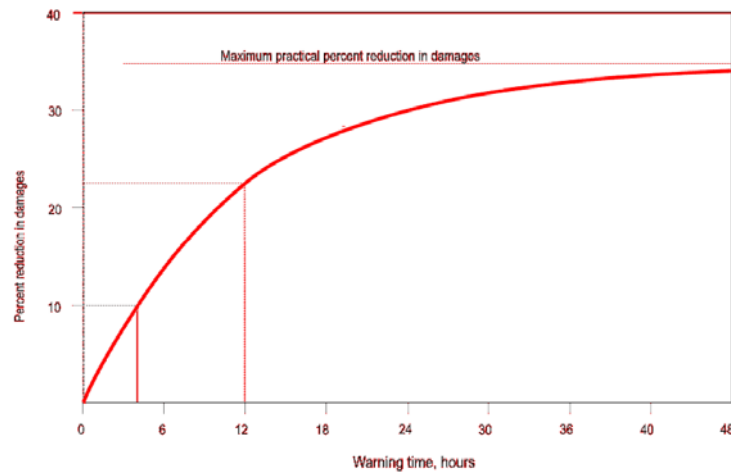
關具一致性等。而工程師的責任是面對不可知的自然環境儘可能的解決問題，所以腦力激盪、集思廣益是未來面對防洪問題必需持續進行的工作之一。



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

圖 13 研究範例位置圖(a)及指標位置調整圖(b)

7. 政治因素也常是風險分析中難以評估的部份。HEC 工程師認為充分的說明及溝通是必要的手段。
8. 工程結構物使用年限的風險分析。這是個較易被忽略的風險。
9. 避難所需時間與災害發生時間、類型與規模、人口組成與結構、疏散及曝險程度有關，因此確實避難人數常難以確定，減災比率與預警時間如圖 14 所示。



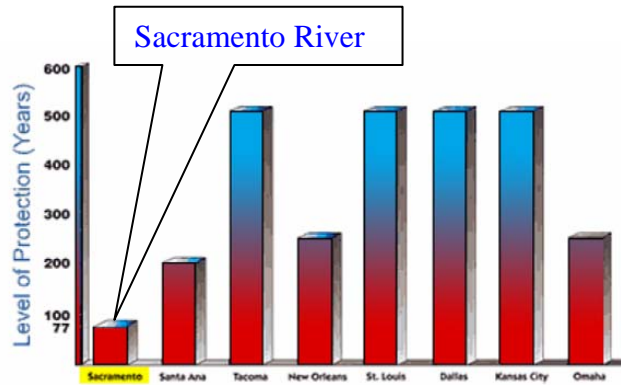
資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

圖 14 減災比率與預警時間圖

#### 四、Sacramento River 參訪

##### (一)沙加緬度堰(Sacramento Weir)

沙加緬度堰位於本次造訪的水利工程中心(HEC)東方約 13 mile (20km)處，是沙加緬度河系(Sacramento River)防洪系統中歷史悠久的結構物，HEC 工程師非常建議前往參訪，且因本次行前準備時間極短，頗難安排增加遠距行程，因此參訪行程則著重在 HEC 附近的沙加緬度河系。由於沙加緬度河是北加州中央河谷地區(Central Valley)主要河川，面積約 26,300 mile<sup>2</sup>，河谷地區地形平坦，是重要農業生產區，該河川提供北加農業、工業、民生、航運、生態及遊憩等多樣之供水用途。由於該區冬季降雨常造成重大洪水災害，故成立沙加緬度河防洪管理計畫(Sacramento River Flood Control Project)，該計畫因須滿足多樣之各種需求，而相當複雜且龐大，是北加州最大的防洪計畫。但 Sacramento River 的防洪保護標準(100 年重現期距)與其他河系相較是較低的(如圖 15 所示)，在 1986 年及 1997 年的洪水災害損失估計分別達 187 及 524 百萬美元。



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

**圖 15 Sacramento River 保護標準與其他河系之比較圖**

加州首府沙加緬度城則位於沙加緬度河中下游，里程約 60mile 處，而沙加緬度堰位於沙加緬度河右岸，里程約 63mile 處，即沙加緬度河及其主要支流美國河(American River)匯流處上游約 2mile(3km)處(相關位置圖詳圖 16 及圖 17)。HEC 所在的 Davis 市與西沙加緬度城則以 Yolo 漫淹區分隔於東西兩側，溝通兩地的鐵公路皆採用高架方式設立(詳 Yolo Bypass Wildlife Area 參訪照片 6(d))。

沙加緬度堰興建於 1916 年，是沙加緬度河系中唯一可進行操作的放流堰(其餘放流堰則皆藉由重力於水位到達堰頂時自然溢流)，其主要功能為用以調節流經沙加緬度市區的美國河及沙加緬度河的洪水，達到保護沙加緬度市區及其沿岸城市的目的。

堰頂上方是沙加緬度河右岸的防汛道路及鐵路(詳參訪照片 5(a)、(c))，堰體由 48 個混凝土放流堰組合而成，每單一堰體長度為 40 ft，總堰長度為 1,920 ft (詳參訪照片 5(e)、(f))，設計總放流量為 112,000cfs。

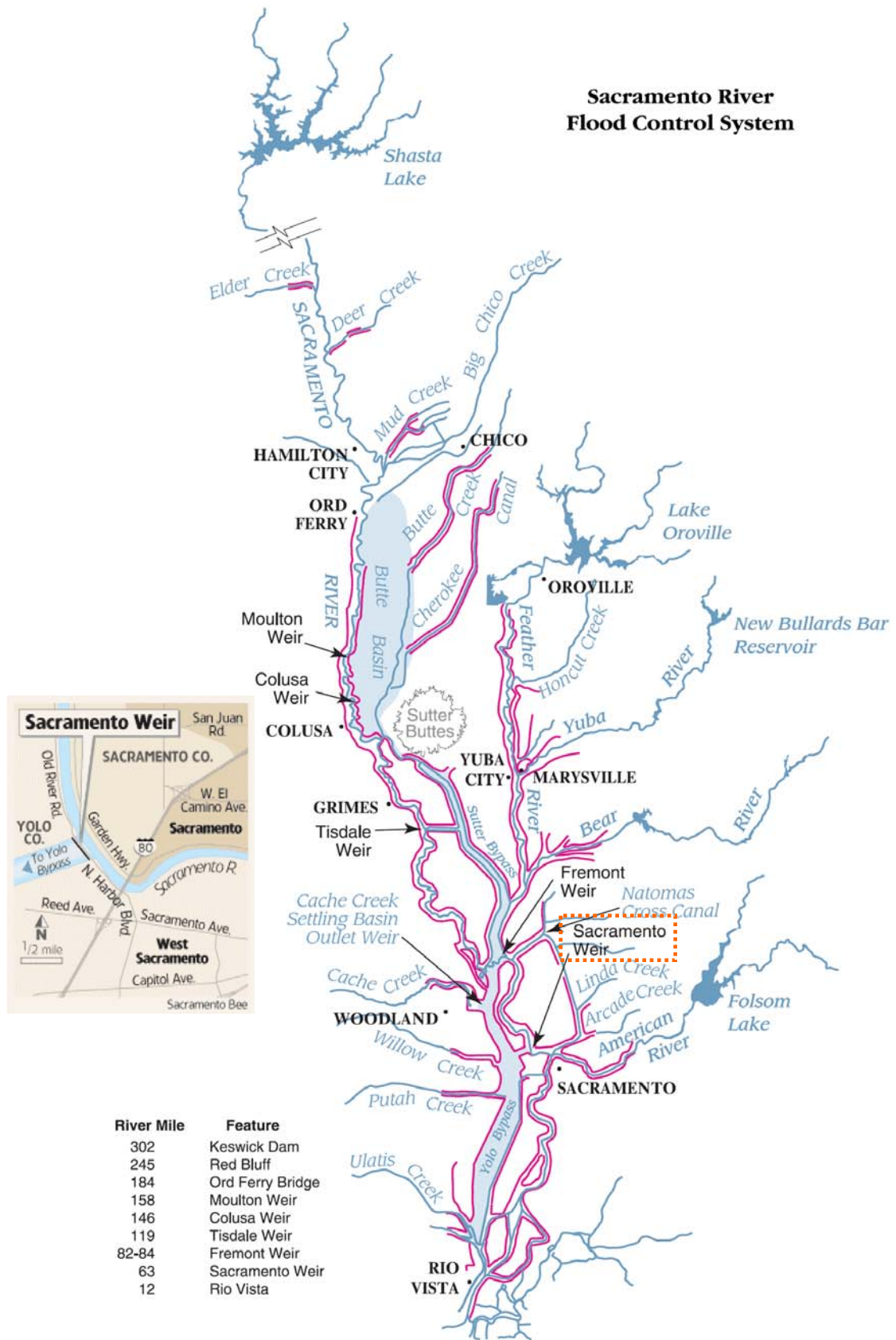


圖 16 沙加緬度河系及沙加緬度堰位置圖



資料來源：David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.

**圖 17 Sacramento River 及 American River 匯流處**

該堰可進行操作的原因在於堰體上方另設有高度為 6 ft 的木製閘門，當沙加緬度堰下游約 4 mile 的一號橋水位站水位達 27.5 ft 時，即以人為操作方式將木製閘門開啟，將沙加緬度河的洪水排放至 Yolo 繞流系統(Yolo Bypass)；其操作規則由美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers)負責擬定，操作與管理則由加州水資源管理局(Department of Water Resources)負責執行。水資源管理局則根據以下 2 個目的，決定木製閘門的開關時機及開關個數，

(1) 防洪目的：當預期一號橋水位站之水位仍會持續上升，且一號橋水位已達 27.5ft 時即須開啟，開啟閘門個數則依據加州水資源管理局針對河川水位預報決定；

(2) 灌溉及濕地維護目的：當由上游 Fremont Weir 流入水量尚不足以完全灌溉 Yolo 繞流系統中的農地或維持濕地水量不足時，則沙加緬度堰亦需開啟。

在沙加緬度河系中除 Yolo 繞流系統外，另一繞流系統為

Sutter 繞流系統(Sutter Bypass)，是沙加緬度河系中 2 個主要的繞流系統，其中又以下游的 Yolo 繞流系統，將極可能釀災的洪水，及時以緩慢且安全的漫淹方式，排到 Yolo 漫淹區中，以供灌溉、保育等之用，其剩餘水量再於沙加緬度河下游 Rio Vista 地區安全的回流至沙加緬度河，進而提高沙加緬度河系的防洪安全值。Yolo 漫淹區的主要入流水源，由上游往下游依序為 Fremont Weir、Cache Creek 及沙加緬度堰；Yolo 漫淹區主要藉由調控上游 Fremont Weir 及中游沙加緬度堰的入流，增加漫淹區的浸淹頻率及延時，進而滿足其原有洪水平原所具有之水砂調控及生態功能。

沙加緬度堰下游側連接沙加緬度河與 Yolo 漫淹區的 Yolo 繞流渠道長 40mile、寬 3mile(詳參訪照片 5(b))，Yolo 漫淹區係沿沙加緬度河右岸設立，在 Yolo 繞流系統尚未設立前，沙加緬度城(加州首府)曾遭受多次嚴重洪水災害的襲擊；設立後，就歷史資料而言，Yolo 漫淹區一半以上水文年都有受到洪水浸淹的紀錄(圖 18(a)、(b)分別為 1997 年 1 月及 1995 年 3 月沙加緬度堰進行操作，洪水經 Yolo 繞流渠道排入 Yolo 漫淹區之照片)，一般而言，浸淹區之平均浸淹水深約為 6ft，洪泛較為嚴重時水深可達 10ft(極端洪水事件的極限值)。

1986 年 2 月 11 日及 1997 年 1 月 3 日的 2 次洪水操作中，Yolo 繞流系統負擔近 500,000cfs 流量，其中 Fremont Weir (343,000cfs)、Cache Creek (30,000cfs)及沙加緬度堰 (112,000cfs)都達到最大設計流量，而沙加緬度河堤防及 Yolo 繞流系統整體最大排洪量為 600,000cfs，而僅約 1/6(110,000 cfs)由沙加緬度河自身河道排出，近 5/6 (500,000cfs)則由 Yolo 繞流系統排出，可見其在防洪操作上的重要性。



(a)

(b)

資料來源：2010, Sacramento River Flood Project, Department of Water Resources Division of Flood Management. State of California.

**圖 18 Sacramento Weir 排洪照片**

## (二) Yolo 野生動植物保留區(Yolo Bypass Wildlife Area)

以往中央河谷地區於冬季降雨造成該區面積極廣的洪氾平原及溼地，是美國北部 4 個重要候鳥遷徙必經地之一，每到秋冬季總有大量候鳥過境及停留，但據估計目前存在之溼地面積僅剩餘約 5%，嚴重壓縮候鳥及濕地生物的可用棲地，故在各繞流系統中，目前大都設立與生態保護相關的保留區或保護區。

經過民間多方努力後，Yolo 漫淹區則在 1989 年設立一處野生動植物保留區(Yolo Bypass Wildlife Area, YBWA) (現況詳參訪照片 6)，位置約在 Davis 市與沙加緬度城之間，面積約 16,700 acre(平面配置詳圖 19)，保留區兩側以堤防作為邊界，北方則以鐵路為邊界，洪水溢淹時則洪水由鐵路或高速公路下方可透過性樁基通過(詳參訪照片 6(e)、圖 20 為 2006 年洪水通過前(a)後(b)之照片)，整個區域基本上除農耕地外，大都維持低度人工設施的狀況，呈現水、土及植物構成的自然地景(詳照片 6)。YBWA 主要功能包含洪水調控、野生物保護及其棲地



保留、休閒遊憩及生態教育使用等 3 項，目前由加州漁業及遊憩管理局(California Department of Fish and Game)負責管理，非營利組織 Yolo Basin 基金會(Yolo Basin Foundation)協助辦理生態教育及各類型活動，此基金會也是推動成立該保留區的主要團體，經常針對各種不同對象辦理生態教育研習活動，同時亦針對 YBWA 特色販賣各類商品，如水禽手冊、水禽服飾等，以增加其財源。



資料來源：Yolo Basin Foundation Website [www.yolobasin.org](http://www.yolobasin.org)

圖 19 Yolo Bypass Wildlife Area 平面佈置圖



資料來源：Yolo Basin Foundation Website [www.yolobasin.org](http://www.yolobasin.org)  
(蒐集自 Wildlife Area Manager Dave Feliz)

**圖 20 YBWA 洪水通過前(a)後(b)之照片**

保留區內生物相非常豐富，除了多樣的植物營造出不同地景外，也有各種鳥類、魚類、爬蟲類及哺乳動物等，其中已記錄之鳥類已近 200 種。其最佳參訪時機是每年九月至翌年一月間，本次參訪時間雖非候鳥遷徙停留的季節，但參訪過程中即可輕易看到許多鳥類及哺乳類(詳照片 6(c)、(d))。經研究發現，其豐富的生物相與區內多樣的棲地有關，也與不定期洪水浸淹，並提供水文量的變化及營養源的更新有關，此區棲地大致

可分為永久性濕地、季節性濕地、河濱林及草生地等(詳照片 6)。

以 Yolo Bypass Wildlife Area 而言，在 Sacramento Valley 所有放流堰都完成並進行操作後，由將近 30 年的歷史月流量資料與農業使用需求及野生物(主要是遷移性水禽跟魚類)棲地需求調查發現，當平均月流量小於 100 cfs (乾季)時，魚類會被困在面積僅剩下不到 5% 的水體(流路及水塘)中，而限制其生存；農耕時機則依洪水操作多於晚春到夏初進行種植，使防洪及農業需水目的，都同時獲得滿足。

野生物也因符合該地特性之週期性洪泛而使其生活史中各種棲地與需求都獲得滿足，所以只要具備生物生活史及關鍵棲地的限制條件，配合合理化的防洪操作，野生物也能在防洪操作中受益，如瀕危魚類(Splittail)因洪泛而獲得產卵及幼魚成長的棲地，而被加州州政府列為瀕危的鳥類也因此得到覓食棲地，而增加其數量。依據多年觀察顯示，由上游到下游利用數個放流堰及繞流系統將洪水放流，可將原本的洪水平原週期性浸淹之功能恢復，並不需要過多的工程介入，其生態功能就因此獲得維持，而達到生態復育的目的。

當局對於區內生物的調查資料很詳盡，亦公開於網站上供民眾查詢，於每年特定期間，有條件的開放民眾收費狩獵(水禽)，並於網頁上隨時公佈與更新狩獵物種、體型、數量、時間等詳盡資料，此有限度之開放，除增加管理經費之外，狩獵資料透明化也可同時用於生態環境之監測。

## 第參章 心得與建議

### 一、心得

#### (一) 洪災風險評估方法比較

洪災風險評估係為取得洪災特性及其發生後果之評鑑方法，目前台灣區域排水或河川之最廣泛應用之分析方式是透過水文頻率分析進行風險描述。例如區域排水規劃之排水路整治以可排除 10 年降雨頻率之流量、25 年降雨頻率不溢堤為保護標準，據此進行堤防、防洪牆等結構物之高度設計，同時也設定洪水災害保護規模(或洪災風險)，美國在分析概念上跟我國相似。

而洪災風險評估除設定洪水災害保護規模外，更期望提供如果超過保護標準之後的資訊，如洪災可能產生的總損失等，因此需知道可能發生洪災之所有事件，在某期間內所有可能的發生次數及機率，同時因水文事件具有高度不確定性，傳統模擬過程冗長，HEC-FDA 則透過蒙地卡羅模擬法，將降雨量的不確定性納入洪災風險評估。

#### (二) 洪災風險評估工具的應用

HEC-FDA 可針對集水區中各種不同整治措施，設定不同方案進行洪災損失比較，其中水文水理模組可由 HEC-HMS、HEC-RAS 等國內常用模式計算後，作為輸入資料，然有些軟體(如 HEC-ResSim)是國內較不常用軟體，因此若直接應用 HEC-FDA 時，需考量水文水理分析後之輸出格式。HEC-FDA 無法模擬潰堤、匯流災害重複計算等問題，HEC 工程師提供他們面對這些問題的處理技術，但同時他們也認為由於統計模式或水文水理模式都有其假設(如事件獨立)及適用範圍(如坡度

限制等)，是應用時須特別注意的，而且這些處理技術是可以根據問題屬性進行討論並調整的。

另外，由於 HEC 係系統性發展各項軟體，因此各軟體間之圖文輸出輸入檔案皆可相互承接，未來我國若要建立整體性的水資源分析模式，可參考 HEC 發展程式之系統架構，同時針對洪災風險分析各模組所需基本資訊(如潰堤機率分析、災害損失資訊、水位-損失函數、避難措施減損分析等)都需進行研究或蒐集，以提高洪災風險損失分析的可行性。

### (三)不定期調整防洪策略

Sacramento River 蜿蜒於河谷沖積平原上，周邊聚落及都市因應而生，因此跟所有大都會區一樣，都有現有河道拓寬不易實施的困擾，所以 Sacramento River 防洪計畫中，由上游到下游陸續完成系列溢流堰及繞流系統；但 1997 年的洪水仍造成加州重大損失(估計損失超過 10 億美元)，因洪水撤離的人數也超過 12,000 人，加州州政府進行全面性防洪計畫檢討(2012 Central Valley Flood Protection Plan)，預計未來 5 年，除了基礎公共建設(下水道、鐵路、公路排水等)改善外，高風險都市區域之堤防也進行加強加高，如因現有地形或土地利用無法達成保護者，則以避洪規劃等非工程措施因應，此與我國不定期針對各河系進行計畫檢討及推動非工程措施的作法相同。1851 年起 Sacramento River 即於 Sacramento 建造第 1 座堤防，雖然次年就損毀了，但 Sacramento River 相關歷史紀錄齊全，而能迅速調整防洪策略，隨著數位儲存便利性及應用性提高，我國亦應持續彙整水利、水資源圖資，並公開供應，將有助於水利技術之提升。

#### (四)現有生態資料統整以利後續應用

Sacramento River 防洪計畫檢討(2012)的三大主要目標是提升公共安全、友善生態環境及長期的經濟穩定。這是目前國際水資源管理的主要趨勢，與我國永續發展、生態環境、氣候變遷調適、全民防災等議題相符。其中以友善生態環境來說，需先瞭解生態環境的變化、致變因素、關鍵物種、生物生活史等先備知識，在這些背景資訊都匱乏的情況下，要維持生態現況不致繼續劣化都顯困難，更遑論後續生態保育及復育工作的推動。

由於生態保育意識提升，本署近期區域排水治理規劃報告中皆會納入環境營造一節，包含水質、生態調查等資料，雖然各報告之調查頻度、方法可能不一致，但若配合 GIS 建立完整圖文資料庫，對生態環境背景資料的品質提升應有所助益，對於未來本署進行水資源及生態環境相關規劃時之背景資料取得或參考樣區(Reference Site)建立頗有助益，亦能作為排水整治後環境監測之評估基準。

## 二、建議

### (一) Sacramento River 防洪計畫經驗應用於本署相關研究或規劃

Sacramento River 堤防工程已實施超過百年，隨都市發展防洪保護標準日顯不足，堤防加高也增加堤內淹水機率及淹水程度，我國也面對相似防洪風險增加的問題。Sacramento River 的工程處理方式，則在大都會區的上游、中游主支流建造數個大規模的繞流系統，以降低大都會區的洪災風險；但台灣地形特性及都市發展現況較無法提供大面積土地作為繞流系統，但若學習 Sacramento River 經驗並配合國內正推行國土復育及永續發展規劃，將繞流系統內土地的種植作物、種植時機等，依浸淹水文歷程調整(Sacramento River 的調整依據是浸淹區 30 年的月平均流量及浸淹水深等資料)，則農業生產亦能因農地浸淹獲取有機質及適當灌溉水源而提高，因此本署未來進行國土復育時，若能提供防洪操作過程可能對農地水文歷程影響資料應有助於計畫推動，惟這些資料可能需要多年累積。

此外，由於文化背景不同，Sacramento River 繞流區內可以有條件開放狩獵增加財源，再以此財源挹注濕地管理；針對本署濕地管理而言，若能設備硬體由本署負責執行，維護及管理委由民間團體長期辦理，財源部分可依濕地特色推出不同產品而獲得增加，減少政府維護管理的負擔；而配合環境教育法的實施，此類特色濕地未來或許可以成為本署環境教育之理想場所，鑑此本所亦應積極培養環境教育人員。

### (二) 現有規劃報告生態資料彙整以提高資料再利用性

臺灣現階段的河川與排水規劃，大都包含水質與生態調查及生態資料回顧等，是非常珍貴的生態環境背景資料。惟這些資料因未統整，尚無法與水文、地文、水理參數進行連結，致

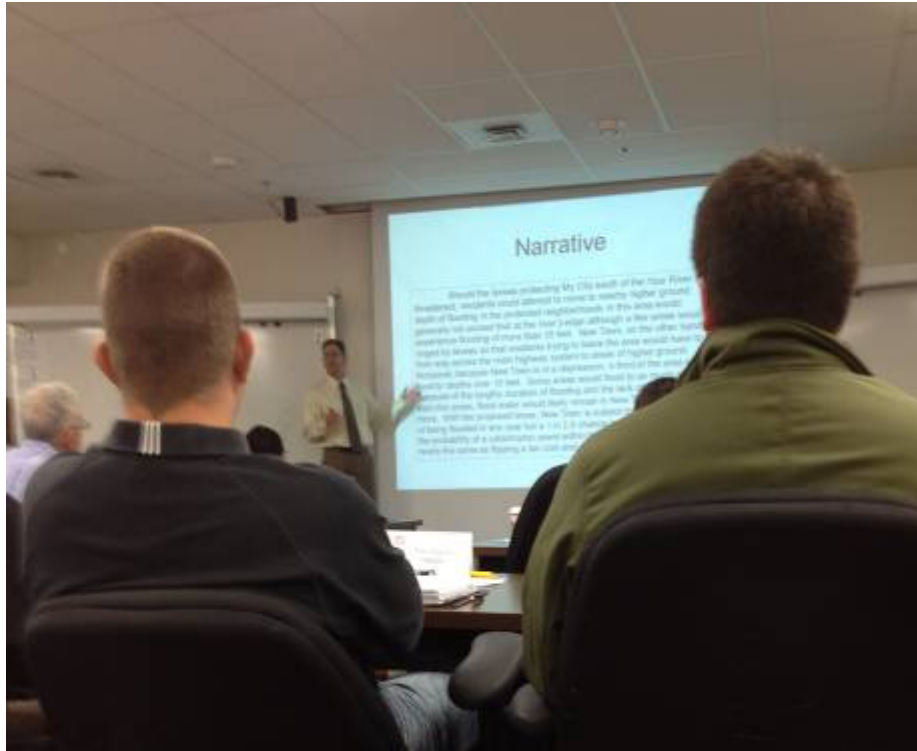
其可應用性降低，實為可惜。因此，將已完成之河川與排水規劃生態調查資料建置公開查詢及使用系統，或將資料納入全球生物多樣性資訊機構(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)或許都是可行方法之一，希冀可以提高生態調查資料的再利用率及不同時間及空間尺度的生態環境變化資訊。

### (三)未來參加研習人員建議事項

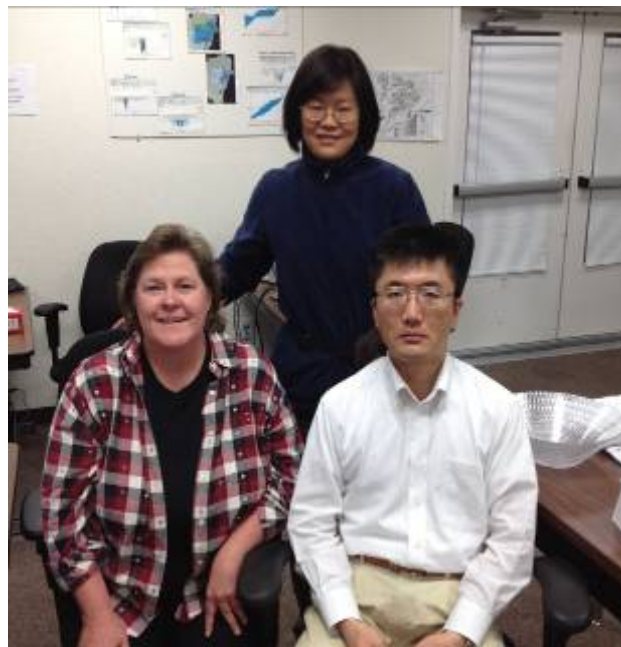
美國加州公路系統發達，且假日之公共運輸班次與平日不同，常增加旅途不便，因此通常往來各地以自備車輛較為方便，但加州的公共運輸交通資訊出國前皆可由網路取得完整資訊，因此搭乘公共運輸工具前往加州 Davis 市的 HEC 堪稱便利，惟交通工具轉換需花費較多時間。另本次參加之研習課程係美國國內課程，學員幾乎都是 USACE 的工程師，因此授課期間不論是講師或是學員說英文的速度均非常的快，建議未來參加的人員應具備一定程度以上之英語能力，並事先預習課程內容，可使學習效果更佳。研習過程中安排分組討論，除可增加對課程之了解外，更能與其他學員分享工作及生活環境之差異，是研習外的另一種收穫。此外，北加州洪災主要來源係冬季降雨及融雪，每年 5、6 月通常是洪水災害較少的季節，USACE 工程師常於此期間安排休假，建議未來參加的人員應儘可能提早確認課程以利安排出國行程。



## 第肆章 參訪照片



照片 1 「Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects」課程授課情形



照片 2 與 HEC 工程師合影



Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects  
Davis, CA  
21—25 May 2012



Third Row from Left to Right: Joe Rocks, Mindy Grupe, Jack Camp, Stephen Schlenker, Rick Andre, Lisa Shoaff, Chad Dulaney, Troy Ingram, Matthew Nelson, Justin Brewer, Yuh-Rong Guh, Robert Gambill, Greg Karlovits, Osamu Itagaki, Cameron Cornett, Kelly Baxter, Tyler Hatch, Catherine Donohue, Ray Schembri

Middle Row from Left to Right: Amanda Waller, Kim Gilbert, Cynthia Wong, Sharon Garcia, Hugues Louis-Jacques, MD M. Haque, Blaine Remmick, Jennifer Savitz, Kristen Gilroy, Jennifer P. Davis, Lisa Andes, Marchia Bond

Front Row from Left to Right: Sara Hillegas, Courtney Reed, Woody Fields, Beth Faber

照片 3 與 HEC 及本次與會研討工程師合影



照片 4 本小組與 HEC 工程師討論情形



(a) Sacramento Weir 下游面



(b) Sacramento Weir 下游 Yolo Bypass 內的濕地



(c) Sacramento Weir 下游溢流口



(d) Sacramento Weir 下游面的 Sacramento River



(e) Sacramento Weir 下游面全景



(f) Sacramento Weir 上游面(入流)

### 照片 5 參訪 Sacramento Weir



(a) Yolo Bypass Wildlife Area 堤頂入口



(b) Yolo Bypass Wildlife Area 入口



(c) 野生鳥類



(d) 野生動物



(e) 橫跨 Yolo Bypass Wildlife Area 的高速公路及鐵路



(f) 保留區內的草生地及車道



(g) 保留區內的灌木叢



(h) YBWA 西側堤坊

## 照片 6 參訪 Yolo Bypass Wildlife Area



## 附錄 參考文獻

- Beth Faber, 2012, Incorporating Uncertainty into EDA Computation. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers
- David Ford, 2012, Risk Analyses in a Complex Interconnected System: Sacramento River. Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
- Department of Water Resources Division of Flood Management, 2010, Sacramento River Flood Project. State of California.  
<http://www.hec.usace.army.mil/>
- Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 2008, HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis – User’s Manual.
- Lehman, William, 2011, Consequence Estimation with HEC-FDA, Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
- Mitch Russo, 2010, Sacramento River Flood Control Project : Weirs and Flood Relief Structures, Water Resources Engineer Flood Operations Branch
- Moyle, P. B. 2001. Inland fishes of California. University of California Press, Berkeley.
- Sommer, T. R., M. L. Nobriga, W. C. Harrell, W. Batham, and W. J. Kimmerer. 2001. Floodplain rearing of juvenile chinook salmon: evidence of enhanced growth and survival. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58(2):325-333.
- Yolo Basin Foundation Website <http://www.yolobasin.org>





廉潔、效能、便民



經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：台中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

網址：<http://www.wrap.gov.tw/>

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282