

# 放水路閘門靜水壓及放流負荷之應力分析

\*余振順\*\*王柏村

\*經濟部水利處南區水資源局 屏東市建國路 291 號

\*\* 國立屏東科技大學機械工程系 屏東縣內埔鄉學府路 1 號

## 摘要

本文主要是對高屏溪攔河堰放水路閘門實際作業環境進行模型驗證，運用前經實驗模態分析所得之自由邊界狀態結構系統模態參數，包括自然頻率、阻尼比及振型等，與理論模態分析之驗證結果，進行含實際邊界條件結構之有限元素模型驗證。並分別進行放水路閘門在全閉受靜水壓之有限元素分析，及實測閘門上游承受水壓力之應力、應變值，另外也進行量測閘門在不同開度放流時之閘門應力變動情形。本研究結果顯示在閘門全閉情形下閘門底部水流方向模擬邊界之彈簧常數介於  $0\sim\infty$  之間，傳統理論計算及有限元素分析結果之應力趨勢與實驗量測之應力趨勢一致，以中間橫樑應力值最大，頂部橫樑應力值最小。在不同開度之放流試驗部分發現閘門在開度 90 公分(約 40%開度)時有最大動態振幅。綜合整體之放流試驗結果，將可準確的模擬結構體之有限元素模型，對於評估系統結構之應力行為等將有長足之幫助，所得到之模態參數亦可運用於建立線上非破壞檢測系統。

關鍵字：高屏溪攔河堰、實驗模態分析、閘門、有限元素分析

## 一、前言

政府為滿足屏東、高雄、台南地區公共用水之殷切，並改善大高雄用水之水質。於民國 76 年起陸續動工興建南化水庫、牡丹水庫、高屏溪攔河堰等水利設施。上述建設相繼完成後，將可暫時滿足用水標的。

高屏溪攔河堰位於高屏溪下游，距離高屏大橋上游約 6 公里處，其主要功能係抬高高屏溪河床水位約 2 公尺，保持水位高程在 EL16.0M 至 EL16.4M 之間，河水經側槽取水路引至沉砂池，供應自來水公司抽水站之穩定取水。攔河堰之主要設施：包括固定堰、橡皮壩活動堰、取水路閘門、放水路閘門等，其示意圖如圖 1 所示。其中放水路閘門如圖 2 所示，是排放部份所攔截之河水於攔河堰下游之河道。同時，放水路閘門也是控制下游水權量之重要設施，配合自來水公司抽水站抽水狀況，決定放水路閘門之開度〔4〕，放水路閘門放流情形如圖 3 所示。

為配合自來水公司抽水站之運轉需求，放水路閘門必須經常調整開度。閘門在開啟過程中及停留在某一開度時，因水流衝擊閘門將造成閘門震動，此震動對閘門將產生覆變應力，是否有疲勞破壞之虞，及

對閘門使用壽命是否有影響，是值得探討的課題。如果放水路閘門破壞，則失去調節流量之功能，攔河堰無法抬高河床水位至取水高度，導致抽水站抽不到水，將造成南部地區嚴重缺水，對社會影響甚鉅。遂運用應變實驗量測及有限元素分析之方法，進行閘門承受靜水壓及放流負荷之應力分析，藉由比較實驗量測結果，將可確認閘門有限元素模型，進而推估閘門承受高水位時之安全性，其分析流程如圖 4 所示。所得之確認後之模型後續可作為相關安全評估之運用。

## 文獻回顧

目前國內水庫之水門設計均採用傳統計算方法〔6、7〕，所以，對於閘門整體結構之應變行為無法了解。周春禧等〔6〕以有限元素方法分析，水庫輸水隧道末端之高壓滑動閘門靜態結構之應變與應力，研究成果顯示傳統計算頗為保守。Chou and Lou〔10〕，採用有限元素方法與現場量測，分析南化水庫現有的高壓滑動閘門，是否能夠承受水庫加高之負荷〔5〕研究成果顯示有限元素分析結果與現場量測數據，在定性與定量方面比對，皆十分地接近。陳榮亮〔8〕採用實驗模態分析方法，分析簡支板之模態參數，經由理論與實驗之結構相驗證，簡支板結構之模擬結果與理論相吻合，該簡支板結構可以作為實驗模態分析之示範教具。Wada and Ishida〔12〕對水力發電設備之診斷與復原技術之近來進展作整體整理，文中介紹此種診斷設備壽命之技巧，又針對每一種水力設備提出利用先進的電子科技、材料科學來改善設備性能及壽命。

日聖工程公司之「高屏溪攔河堰放水路閘門結構計算書」〔3〕，係依據施工規範〔4〕採用傳統計算方法，僅對主結構靜力分析，無動態整體之解析。

王柏村等運用實驗模態分析與有限元素分析方法驗證有限元素模型〔2〕，本文係該文之後續研究。

## 全文概述

目前尚少有針對水閘門實驗模態分析及放流負荷應力分析之相關論文，本研究將使用應力量測實驗分析方法及有限元素方法分析，並進行比較實驗量測方法及有限元素方法分析結果之應力值，藉以確認有限元素模型，並推估高水位時之響應。

本文主要在說明放水路閘門以應力實驗量測分析方法，得到閘門承受靜水壓力及放流負荷時之應力，並以有限元素方法進行理論分析，模擬閘門邊

界，並與原始設計計算書進行比較，並預測閘門承受高水位時之受力情形，進而以巨觀方式評估閘門之壽命。

## 二、放水路閘門靜態負荷響應預測

本章將引用前所得確認之有限元素模型〔2〕進行閘門承受靜態負荷之應力響應預測。

本單元共分3節，2.1節以分析流程說明問題定義及分析目標，主要在以實驗量測及有限元素方法比對應力，得到預測高水位之應力響應。2.2節說明閘門靜態實驗量測，以閘門在全閉狀態下靜態負荷之應變及應力響應。2.3節為應用有限元素法之靜力分析，採用前確認之有限元素模型，分析閘門承受靜態實驗量測時水位之應力響應。2.4節預測閘門承受高水位受力情形之閘門應力響應，並與原始設計計算書作比較。

### 2.1 問題定義與分析目標

放水路閘門外型尺寸為 4815mm×2200mm×410mm（長×高×寬）其詳細結構如圖 5 所示，閘門主要功能係調節側槽取水路水位（水位須高於標高 15.50 公尺），若放水路閘門損壞則側槽取水路水位無法抬昇，攔河堰取水路水位不足，無法供給足夠水源，水公司抽不到水將嚴重影響攔河堰功能。

#### 分析目標

1. 在量測閘門於全閉狀態下，模擬閘門承受低水位高度下之靜態負荷之條件，進行靜態負荷應變響應量測，以測得之應變值經計算可得應力，並與有限元素分析預測之應力響應比對。
2. 閘門有限元素分析之應力響應預測，採用前已確認之有限元素模型〔2〕，施加量測實驗時高屏溪攔河堰堰址河川水位之靜態負荷，進行應力靜態負荷下應力響應預測，響應預測值與實驗量測結果比較，並進行邊界條件修正，以得到合理之有限元素模型。
3. 以經由實驗模擬分析及靜態負荷之有限元素模型，施加設計高水位（4 公尺水頭及 1 公尺深泥壓）進行有限元素分析，以推估閘門承受高水位之應力響應。放水路閘門靜態負荷響應預測分析流程圖如圖 4 所示。

### 2.2 閘門靜態實驗量測

本節共分 3 小節說明，2.2.1 節實驗架構及實驗儀器，說明閘門測點佈置及實驗架構與使用儀器規格。2.2.2 說明實驗方法及步驟，包括應變計之黏貼及操作周邊閘門，模擬試驗之閘門下游側無水、上游側為河川水位之條件，進行量測等步驟。2.2.3 節為靜態應變量測結果。

#### 2.2.1 實驗架構及使用設備

本實驗為量測放水路閘門承受靜態負荷下之應力行為，測點以垂直向於閘門三支橫樑上近中央位置，設置雙軸向應變計，以分析閘門不同高度位置之應力分佈趨勢，閘門承受靜態負荷分析測點佈置如圖 6 所示。使用之儀器有雙軸向應變計、錄訊器、應變指示器、應變放大器及訊號分析儀等詳如表 1 所示。

#### 2.2.2 實驗方法與步驟

閘門靜態實驗量測，首先將閘門以吊門機懸吊於維修平台工作位置，標定測點位置後進行應變計之黏貼，首先以砂輪機及砂紙磨平後將應變計以強力接著膠水將應變計確實緊密的黏貼於門體上，黏貼後以應變指示器先行確認黏貼是否正常，確認方法為以手指施加力於黏貼完成之應變計上後放開，觀察應變指示器上之回復數值，應變是否在  $10 \times 10^{-6}$  之內，若黏貼不良即廢除重新裝設。應變計黏貼完成後以防水黏土覆蓋在應變計上，再以砂膠及熱融膠等加以固定，應變計之防水處理後進行應變計導線之佈置，以勞固、整齊、安全不影響閘門操作為原則。應變計黏貼及佈線完成後，再以應變指示器確定訊號是否正常，確認後接上惠斯頓電橋及應變訊號放大器、錄訊器等，量測時應變訊號放大器之靈敏度設定為  $100 \frac{\mu\epsilon}{2V}$ ，實驗量測架構示意圖如圖 7 所示。

實驗時因攔河堰已完成啟用營運，放水路閘門上下游側均有水，單獨操作中央之第二號實驗閘門無法使下游側無水，模擬上游側有水、下游側無水之情形。本試驗係利用量測門兩側之第一、三號放水路閘門，調節至適當開度，使第二號閘門全閉時下游側無水之狀態下進行實驗量測。

現場量測後於室內以錄訊器錄得之時域應變訊號重新播放，以訊號博士解析其訊號，解析頻寬 200Hz、解析條數 800 條、取樣平均次數 100 次以得到閘門之平均應變值。

#### 2.2.3 靜水壓應力量測結果

閘門靜態量測主要量測第 A1、A2、A3 點，量測後初始量測應變值以下式計算  $x$  面上  $x$  方向正向應力

$$\sigma_{xx} = E \frac{\epsilon_x + \nu \epsilon_y}{1 - \nu^2} \quad (2-1)$$

式中， $\sigma_{xx}$  為  $x$  面上  $x$  方向正向應力， $\nu$  與  $E$  分別表示浦松比與楊氏係數，量測結果可運用與有限元素分析結果比對，藉以確認有限元素模型之正確性，推估高水位之應力。

表 2 為量測結果以 A1 點應力值最小，A2 點最大，A3 點居中，其中 A1 點為閘門結構最底部之橫樑，閘門全閉時門體底部與門框底水封座接觸，重力方向（ $y$  方向）及水流方向（ $z$  方向）受到限制，故接近底部處得到良好之限制，使得底部橫樑之應力值較中央及頂部橫樑為低應屬合理。而 A2 點因屬中央橫樑已具底部 0.86 公尺之距離，受底部限制之效應已不明顯故應力最大。量測得到之應變及計算所得之應力值如表 2 所示。表中  $\epsilon_x$  為  $x$  方向應變值， $\epsilon_y$  為  $y$  方向應變值， $\sigma_{xx}$  為  $x$  面上  $x$  方向之應力。

其中  $\sigma_{xx}$  以 (2-1) 式之計算式計算求得，楊氏係數  $E$  採用前經實驗模擬分析及有限元素分析確認之  $1.218 \times 10^{11} \frac{N}{m^2}$ 〔2〕、 $\nu$  採用 0.3、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  使用中量測值。本節之量測結果作為第 2.3 節有限元素分析比較及修正邊界條件之依據。

### 2.3 閘門受靜態負荷之有限元素分析

本單元依前確認之有限元素模型〔2〕施加 2.2

公尺水頭之水壓力於閘門面板上，進行靜態有限元素模型分析。第 2.3.1 節說明有限元素模型之建立，描述幾何形狀、元素選用、邊界及負載情形。第 2.3.2 節收斂性分析，描述網格密度之決定過程，結果以節點數 7469Nodes 為分析模型。第 2.3.3 有限元素靜態分析結果之討論，討論有限元素靜態分析結果應力分佈情形，並與實驗量測應力值比較。

### 2.3.1 有限元素模型

本節採用確認之有限元素模型進行分析，門體為對稱結構，所以取半模型， $\frac{1}{2}$  閘門門體之網格化有限元素模型如圖 8 所示。本研究之元素採用 MASS21 質量元素及薄殼元素 SHELL91，其中 MASS21 質量元素為 3 個自由度之質點，SHELL91 為 16 層之薄殼結構，每個元素 8 個節點，每個節點有 6 個自由度。

### 邊界條件設定

水壓負載以放水路閘門實驗量測時之上游水頭如圖 9 所示之  $h=2.2$  公尺為模型之負載。

閘門門體邊界受限狀況：(1) 閘門門體下游側以四個主輪與主輪導軌接觸，並且支撐作用於門體上游側之水壓力；(2) 閘門底部與門框底水封座接觸，因此假設閘門底部之  $y$  方向位移  $u_y$  為 0、 $u_z = k$ ， $k$  為彈簧常數；閘門主輪在  $z$  方向之位移  $u_z$  為 0；閘門門體對稱  $y$  (i.e.  $u_x = 0, \theta_y = \theta_z = 0$ )。又上述閘門底部之邊界條件考慮三種狀態，假設  $z$  方向為彈簧之邊界條件，彈簧常數為  $k$ ，模擬閘門底部邊界條件如 10 圖所示，model A： $u_y = 0, u_z = free$  (即  $k = 0$ )；model B： $u_y = 0, u_z = 0$  (即  $k = \infty$ )；model C： $u_y = 0, k = \text{某常數}$ ；

### 2.3.2 收斂性分析

收斂性分析主要是要確認網格密度是否夠密，確認分析結果之正確性，網格密度愈密則節點數愈多，其解析結果愈正確，但須較長之解析時間則效率差，故兩者須取得一平衡點，而確認是否為最佳網格之方法即為收斂性分析，若分析節點數加倍，而誤差值在 5% 以內，既認為已收斂，該網格密度是可行的，本文為避免假性收斂，以最網格最密之分析結果為基準進行比對，可得較正確之收斂情形，前述之誤差值是以密網格之解析值減去粗網格解析值之差值與密網格解析值之比即為誤差值，如下式所示。

$$\text{收斂誤差} = \frac{x_1 - x_2}{x_2} \quad (2-2)$$

式中； $x_2$  為基準值指密網格之解析值； $x_1$  為粗網格之解析值

本單元計分別對模型之分割成 9 種 case，節點數 1896 個節點至 12538 個節點，分析結果在 case7 節點數 6000 以上時既得到良好的收斂，誤差在 2.05% 以內，如表 3 所示，由本分析決定採用 case8 之網格密度 7469 個節點之 case 進行後續分析。

### 2.3.3 有限元素分析結果

有限元素分析依收斂分析結果及模態分析、靜態實驗量測結果，分析比較自然頻率、振型、應力值等，以前修正確認後之有限元素模型〔2〕，進行解析。以圖 10 之模型邊界 Model A 進行分析結果如表 4

所示，分析說明如下：

1. 比較  $\sigma_{eqv}$  組合應力、 $\sigma_1$  最大主應力、 $\sigma_{xx}$  為  $x$  方向應力，發現  $\sigma_{xx}$  與  $\sigma_{eqv}$ 、 $\sigma_1$  應力值極為相近，表示  $\sigma_{eqv}$  及  $\sigma_1$  之應力主要由  $\sigma_{xx}$  主導，所以本文以  $\sigma_{xx}$  作為後續應力分析及壽命評估是可行的。
2. 由誤差比較發現，有限元素法解析值明顯比實驗量測值高，顯示邊界條件必須修正。

### 模型修正

以圖 10 所示，閘門底部與門框水封座接觸面之邊界條件分 3 種情形進行分析 Model A： $u_y = 0, u_z = free$  ( $k = 0$ )；Model B： $u_y = 0, u_z = 0$  ( $k = \infty$ )；Model C： $u_y = 0, u_z = c$  ( $k = \text{常數}$ )，分析結果如表 5 所示，綜合討論如下：

1. Model A 之解析因閘門底部之邊界條件為  $u_y = 0$ ， $z$  方向並未限制，故有限元素模型之與實體比較少了  $k$  值，分析之結果有限元素分析之應力值明顯比實驗值高。
2. Model B 之解析因閘門底部之邊界條件為  $u_y = u_z = 0$ ， $y$ 、 $z$  方向均受完全限制，故有限元素模型較實體鋼性強，分析之結果有限元素分析之應力值明顯比實驗值低。
3. 由前述之分析發現量測結果介於 Model A 與 Model B 之間，可確認實際之邊界為 Model C 即  $u_y = 0, k = \text{常數}$ ，其中  $0 < k < \infty$ 。
4. 若要求得正確之邊界必須求得真正之  $k$  值，本文未繼續探求，係因要確認邊界條件必須要有足夠的實驗值，方能確認其正確性，本文實驗部份僅 3 點尚不足夠比對，故未進一步分析，值得未來對真實邊界 Model C 之彈簧係數  $k$  作分析，並配合於垂直向及水平向增設雙軸向應變計，以確認真實之有限元素模型。
5. Model A 為三種狀況中使得 A1、A2、A3 有最高應力之邊界，以 Model A 為模型進行分析，雖不完全正確，但為推估高水位之應力情形之保守方法。

## 2.4 預測高水位之受力情形

本節預測高水位之應力響應預測，以實驗模態分析及靜態響應量測之結果，經與有限元素法比對，修正確認之有限元素模型，預測放水路承受高水位狀態下之應力響應，並與原始設計計算書比較。

### 2.4.1 高水位之受力條件說明

放水路閘門設計需能承受 4 公尺不平衡水頭及 1 公尺之泥壓，本節所指高水位既閘承受前述之最大負載。邊界條件及材料性質同前節即楊氏係數  $1.218 \times 10^{11} \frac{N}{m^2}$ ，材料密度  $8030 \frac{kg}{m^3}$ ，浦松比 0.3，主輪限制  $z$  方向位移，閘門底部限制  $y$  方向位移，水封處每公尺 400 公斤之壓力，水壓及泥壓係條件設定。

### 2.4.2 有限元素分析結果

分析結果  $x$  方向之應力圖如圖 11 圖(a)所示，最大值為橫量一近門體中央位置； $\sigma_1$  最大主應力圖

如圖 11 圖(b)所示， $\sigma_{eqv}$  組合應力圖如圖 11 圖(c)所示， $\sigma_1$  及  $\sigma_{eqv}$  最大應力點並不在底部橫樑上，而於主輪支稱處，應與應力集中有關。

各橫樑應力  $\sigma_{xx}$  數值如表 6，由表中  $\sigma_{xx}$  為  $x$  方向正向應力與  $\sigma_1$  最大主應力及  $\sigma_{eqv}$  值極相近，乃因閘門只承受水流向 ( $z$  方向) 之力，故最大應力與  $x$  方向正向應力相當，故以量測所得之  $x$  方向應力值進行各項評估，有其代表性且合理。

### 2.4.3 與原傳統計算結果比較

以有限元素法解析高水位負載狀態下閘門之應力情形發現，由前節有限元素靜態負荷分析與實驗量測值比較，印證了實際邊界模型為 Model C 之型式，再由表 6 比較顯示，原始設計計算書除 A3 點外其於之應力值均介於 Model A 與 Model B 之邊界條件解析之應力值內。此結果印證了原始計算書之合理性。

## 三、放流實驗量測

本單元在探討放水路閘門放流時，閘門振動產生之覆變應力恐有疲勞破壞之虞，利用實地量測之方法求得閘門放流中因振動所產生之應力振幅，以了解閘門之應力行為，並以巨觀方式評估疲勞破壞及對閘門壽命之評估。

### 3.1 問題定義與分析目標

閘門動態量測主要量測閘門放流時之應力變動情形，利用錄訊器記錄閘門放流時時間域之應變真實值，分析目標分述如後：

1. 利用訊號分析儀計、解析閘門在不同開度放流下之應力行為。
  2. 結合前有限元素分析結果〔2〕，推估高水位放流時之閘門應力變動情形。
- 利用古德曼之壽命評估方法進行閘門簡易壽命評估。

### 3.2 放流實驗量測

本單元分實驗架構及使用儀器與放流實驗結果進行說明，實驗架構部分說明儀器架構、量測位置、量測方法說明等。量測結果部分由時間域之真實應變之均方根值、最大值、最小值了解其閘門放流狀態下之應力行為。

#### 3.2.1 實驗架構及使用儀器

動態放流試驗之時實驗架構及使用儀器與第二節閘門靜態響應預測同，不同處為靜態乃操作閘門於全關位置進行量測，模擬閘門關閉之狀態下，無水流通過之靜態。測點除圖 6 縱向配置之 3 點 (A1~A3) 雙軸向應變計外再加底部橫量水平向配置 B1~B7 之 7 點單軸向應變計，其中 B3 點係共同使用 A1 點雙軸向應變計中之  $x$  方向應變計，如圖 12 所示。

本單元之動態方法係分別操作閘門在 15 公分、30 公分、60 公分、90 公分、120 公分等不同開度下進行量測，每一開度每量測點量測約 2 分鐘，使用錄訊器將時間域之應變訊號記錄。量測後再將錄訊器錄得之時間域之應變訊號播放，使用訊號分析儀進行後續訊號處理分析。

#### 3.2.2 實驗量測結果

此單元分別說明 B1~B7 單軸向應變計在不同開

度放流試驗之量測結果解析，及 A1~A3 之雙軸向應變計在不同開度放流試驗之量測結果解析。

典型之放流試驗量測結果時間域之應變量如圖 13 所示，運用各點之均方根值、最大值、最小值、應變幅等，解析分析其特性，得到最小應力  $\sigma_{min}$ 、平均應力  $\sigma_m$ 、最大應力  $\sigma_{max}$  並藉以進行壽命評估。

### 水平配置之單軸向應變計

水平配置之 B1~B7 為單軸向應變計計 7 個點量測結果如表 7(a)所示，由表數值發現多數點在 0 開度時有最大應變量，僅第 1、6 點在開度 15 公分時較 0 開度略大約 1.7MPa，整體而言，閘門開度在 0~15 公分之間有最大應變量。假設  $y$  方向之應變為 0 即  $\epsilon_y = 0$ ，經以(2-1)式計算整理如表 7(b)所示，各點應變關係圖如圖 14 所示，由圖 14 (b) 應變/開度之關係圖，顯示閘門之應變值與開度成反比，開度愈大應變愈小，顯示實驗值與實際物理現像相符，顯示實驗之合理性。

### 縱向配置之雙軸向應變計

縱向配置之應變計量測之應變值結果，經計算式(2-1)求得其  $x$  方向之平均應力、最大值、最小值、應力振幅等如表 8 所示。以開度 15 公分例由圖 15 可明顯看出，閘門放流時門體承受最大值及最小值間之覆變應力。

### 3.3 壽命評估

本單元分實驗量測之應力值及高水位之推估應力，分二部分進行分析閘門壽命評估，依據古德曼壽命評估圖進行評估。

1. 實驗量測之平均應力及變動應力如表 8 所示，其中閘門之材料為 SUS304 抗拉強度為  $53 \frac{kgf}{mm^2}$  (519.75MPa)，疲勞限為 0.4 倍抗拉強度為 205MPa〔1〕。將平均應力及應力振幅繪製古德曼圖如圖 16 所示，閘門放流之應力遠小於古德曼線，顯示閘門安全無虞。
2. 推估高水位之應力值以有限元素法求得閘門承受高水位負載之應力如表 9 所示，其中應力振幅係以實驗量測值之應力振幅比照組合應力之於量測值之比值約為 0.7MPa 之 6 倍，約為 4.2MPa，將組合應力及應力振幅繪製古德曼圖如圖 17 所示，閘門高水位負載放流之應力亦遠小於古德曼線，以巨觀方式分析閘門，未考慮局部可能破壞及疲勞破壞，顯示閘門安全無虞，門體結構壽命無窮大。

## 四、結論

本文主要目標在分析放水路閘門承受靜態負荷下之應力響應預測及運用放流狀態下閘門振動之應力行為，以實驗量測方法掌握閘門應力變動特性，並以巨觀方式進行壽命評估得到之結論分述如後：

1. 得到確認有限元素模型之閘門底部之邊界條件為  $u_y = 0$ 、 $z$  方向之彈簧係數為  $k$  之邊界條件， $k$  為介於  $0 \sim \infty$  之間的常數，若要求得正確之邊界必須求得真正之  $k$  值，本文未繼續探求之

原因為，要確認邊界條件必須要有足夠的實驗值，方能確認其正確性，本文實驗部份縱向配置僅3點尚不足夠比對，故未進一步分析。

2. 採用確認之邊界條件  $u_y = 0$ 、 $z$  方向之彈簧係數為  $k$  之邊界條件，以較嚴格之邊界條件以  $k = 0$  之條件進行高水位應力推估，發現有限元素分析法之應力值比原始計算值高，但若以  $k = \infty$  之邊界條件進行解析，則原始計算應力值，介於閘門底部邊界條件  $u_y = 0$ 、 $u_z = 0$  與邊界條件  $u_y = 0$ 、 $u_z = \infty$  之間，顯示原始計算之尚稱合理。
3. 放流實驗量測以訊號分析儀解析求得真實應變值及均方根值、最大值、最小值等數據，經計算求得之最大應力值、最小應力值得到其應力振幅、平均應力，以巨觀方式進行壽命評估發現無疲勞破壞之虞，亦無靜力破壞之虞。
4. 由放流實驗結果發現閘門之平均應力在開度 0~15 公分之間有最大值，而在開度 90 公分附近有最大應力振幅，建議管理單位應儘量避開 0~15 公分及 90 公分之開度。

未來若要確認閘門底部  $z$  方向邊界條件之  $k$  值，需增設水平向配置雙軸向應變計以得較多之實驗量測點，並利用修正邊界方法及接觸元素之使用，以做較明確之比對驗證。

### 參考文獻

1. 王柏村，1999，*振動學*，全華書局。
2. 王柏村，余振順，2000，「應用實驗模態分析於閘門結構之模型驗證」，中國機械工程學會第十七屆全國學術研討會論文集，第三冊上集固力與設計，第 1~8 頁。
3. 日聖工程有限公司，1997，「高屏溪攔河堰放水路閘門結構設計計算書」，台灣省南區水資源局。
4. 台灣省水利局，1995，「高屏溪攔河堰工程（機電部份）施工規範」，台灣省水利局。
5. 台灣省南區水資源局，1997，「水庫加高工程研究報告」。
6. 周春禧，羅守枝，1997，「高壓滑動閘門門體結構之有限元素分析」，*台灣水利季刊*，第四十五卷，第四期，第 73~81 頁。
7. 周春禧，羅守枝，李佳明，賴維順，1998，「水庫輸水隧道壓力鋼管靜態結構之有限元素分析及實驗量測」，*台灣水利季刊*，第四十六卷，第四期，第 90~98 頁。
8. 陳榮亮，1996，「應用壓電材料於簡支板之實驗模態分析」，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東。
9. ANSYS, INC., 1996, *Expanded ANSYS Workbook Revision 5.2*, ANSYS, INC. U.S.A.
10. Chou, C. S., and Lou, S. C., 1999, "Experimental Measurement and FEM Analysis of the Deformation of a High-Pressure sluice Gate," *Submitted to Canadian Journal of Civil Engineering, Revised: October 1999*.
11. Trethewey, M. W., and Cafeo, J. A., 1992, "Tutorial: Signal Processing Aspects of Structural Impact Testing," *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 7, No.2, pp.129-149.
12. Wada, Y., and Ishida, I., 1988, "Recent Advances in

Diagnostic and Rehabilitation Technologies for Hydroelectric Generating Equipment," *Hitachi Review*, Vol. 37, No. 2, pp. 95-104.

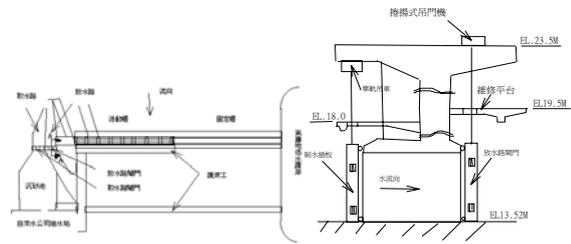


圖 1 高屏溪攔河堰工程主要設施之鳥瞰示意圖

圖 2 放水路剖視圖



圖 3 放水路閘門放流情形

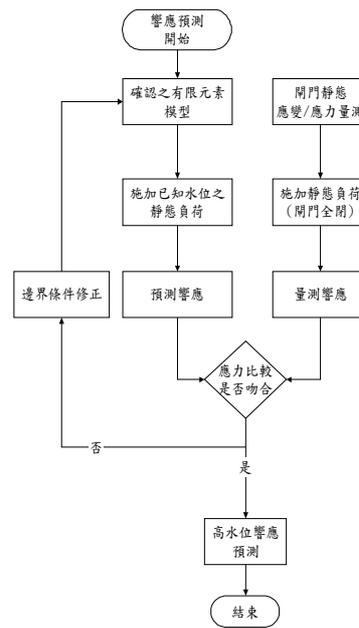


圖 4 高屏溪攔河堰放水路閘門模型驗證分析流程圖

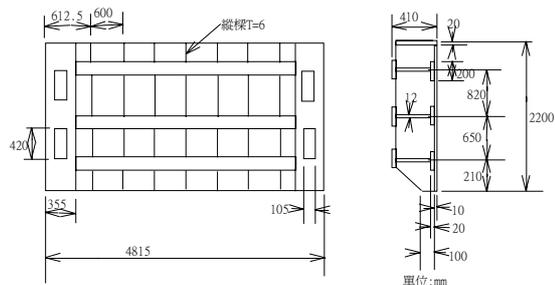


圖 5 放水路閘門外型尺寸圖

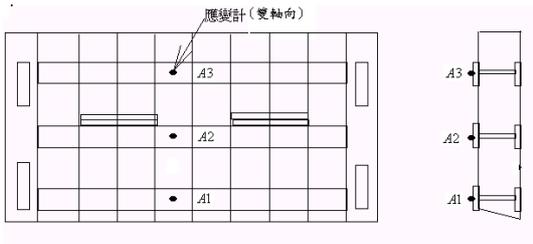


圖 6 閘門靜態分析應變計測點佈置圖

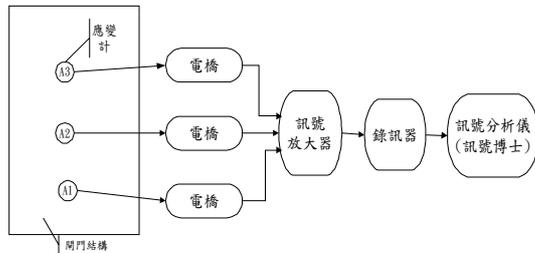
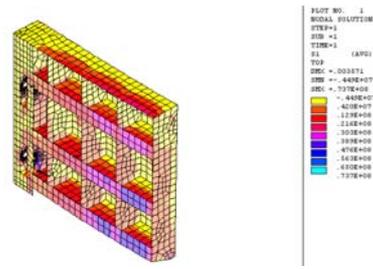
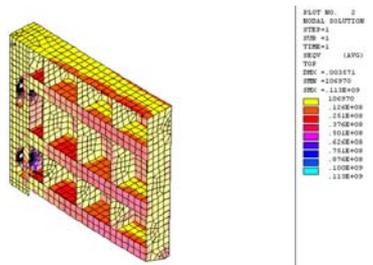


圖 7 閘門靜態及放流試驗儀器架構示意圖



(b)  $\sigma_1$  最大主應力



(c)  $\sigma_{eqv}$  組合應力

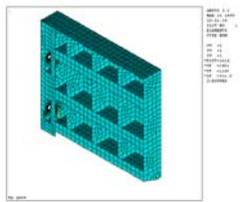


圖 8  $\frac{1}{2}$  閘門體之有限元素模型

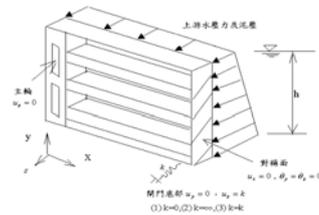


圖 9 放水路閘門門體承受負荷及位移限制示意圖

圖 11 閘門承受高水位負載之應力圖

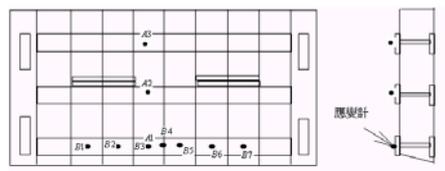
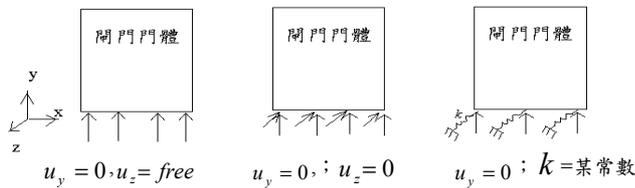


圖 12 動態放流實驗應變計測點佈置圖



(即  $k = 0$ )

(即  $k = \infty$ )

(a) Model A

(b) Model B

(c) Model C

圖 10 閘門門體底部邊界條件示意圖

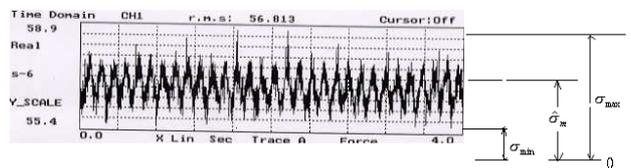
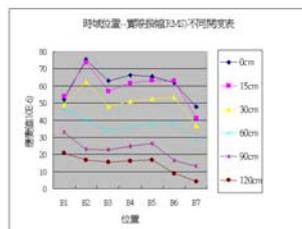
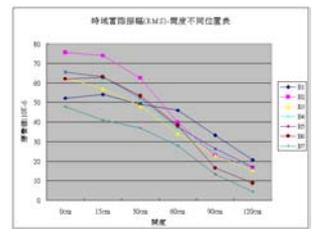


圖 13 放流實驗量測時間域之應變/應力振幅

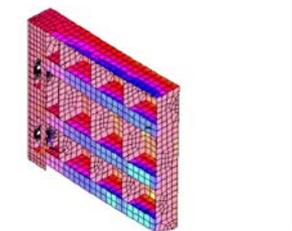


(a) 應變/位置



(b) 應變/開度

圖 14 水平向配置之應變計放流試驗應變關係圖



(a)  $\sigma_{xx}$   $x$  面上  $x$  方向正向應力

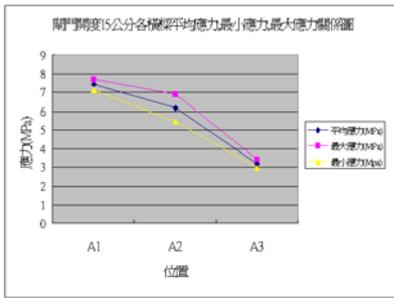


圖15 閘門放流(開度15公分)時平均應力、最大應力、最小應力關係圖

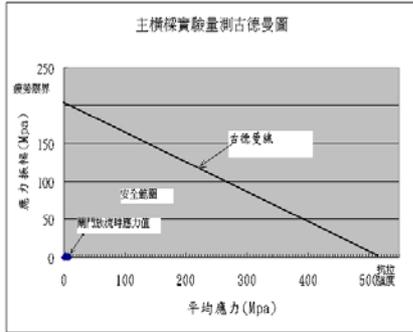


圖16 閘門實驗量測應力值壽命評估

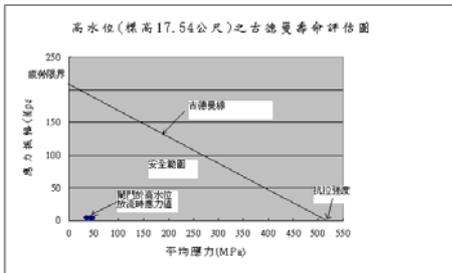


圖17 閘門承受高水位時應力值壽命評估

表1 靜態及放流實驗量測使用儀器

設備名稱	型號	規格	備註
單軸向 strain gage	KFG-5-120C1-11L3M3R	靈敏度 0.4% 電阻值 $119.6 \pm 0.4 \Omega$	KYOWA
雙軸向 strain gage	KFG-5-120-D1-6-11L3M3S	靈敏度 0.4% 電阻值 $120 \pm 0.4 \Omega$	KYOWA
錄訊器	RTD-670A		KYOWA
應變指示器 (INDICATOR)	SDB410C	量測精度 $\pm 0.2\%$ *讀數 量測範圍 $0 \sim 19999 \times 10^{-6}$ 應變	KYOWA
應變放大器	DPM-711B		
訊號分析儀	訊號博士	SD1.96 版	

表2 閘門靜態實驗量測結果

位置	A1	A2	A3
$\epsilon_x (10^{-6})$	60.063	63.66	59.96
$\epsilon_y (10^{-6})$	-21.916	-13.69	-17.519
$\sigma_{xx}$ (MPa)	7.15919	7.97094	7.32196

表3 節點數、應力收斂誤差比較表

組別	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
節點數	1896	2241	2332	2613	3715	4435	6028	7469	12538
A3 應力 (MPa)	14.204	14.01	14.11	14.26	16.19	18.59	17.59	17.99	17.96
比較誤差 %	-20.9	-22.01	-21.46	-20.58	-9.87	3.50	-2.05	0.15	0
A2 應力 (MPa)	19.31	19.21	19.35	19.36	21.12	22.03	21.11	21.19	21.18
比較誤差 %	-8.81	-9.299	-8.68	-8.59	-0.32	4.011	-0.35	0.042	0
A1 應力 (MPa)	19.93	19.96	20.46	19.96	22.87	23.07	21.32	21.32	21.21
比較誤差 %	-6.49	-5.887	-5.36	-5.87	7.832	8.798	0.504	0.536	0

表4 閘門靜態實驗量測與有限元素分析應力比較表 (MPa)

位置	有限元素法 (model A)		實驗量測		比較誤差 %	備註
	$\sigma_{eqv}$	$\sigma_1$	$\sigma_{xx}$	$\hat{\sigma}_{xx}$		
A3	11.81	11.93	11.83	7.32	61.63	$\sigma_{eqv}$ : 組合應力 $\sigma_1$ : 最大主應力 $\sigma_{xx}$ : 為x面上x方向應力 $\hat{\sigma}_{xx}$ : 實驗量測應力 $\delta = \frac{\sigma_{xx} - \hat{\sigma}_{xx}}{\hat{\sigma}_{xx}}$ 為誤差值
A2	17.45	17.49	17.49	7.97	119.45	
A1	21.72	21.80	21.80	7.16	204.48	

表5 不同邊界條件應力解析值 (MPa)

邊界條件	Model A	Model B	Model C
	$u_y = 0$ $(k = 0)$		$u_y = u_z = 0$ $(k = \infty)$
A3	11.831	11.004	7.32
A2	17.49	7.8764	7.97
A1	21.801	1.9862	7.16

表6 閘門承受4公尺水頭橫樑靜態負荷有限元素解與原始計算比較表

單位: MPa

橫樑位置	模型邊界	有限元素法				傳統計算	容許應力 (3、5)
		$\sigma_{eqv}$	$\sigma_1$	$\sigma_{xx}$	$\hat{\sigma}_{xx}$		
A3	Model A	36.536	36.508	<b>36.507</b>	<b>30.71</b>	102.97	
	Model B	34.721	34.593	<b>34.589</b>			
A2	Model A	44.581	44.621	<b>44.62</b>	<b>33.49</b>	102.97	
	Model B	22.796	22.816	<b>22.814</b>	<b>8</b>		
A1	Model A	49.749	49.859	<b>49.855</b>	<b>31.83</b>	102.97	
	Model B	4.6933	5.0027	<b>4.9896</b>			

表7水平向配置放流量測應變、應力值

(a)量測原始應變值 (單位:  $10^{-6}$ )

開度	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
0公分	<b>52.163</b>	<b>75.323</b>	<b>62.724</b>	<b>66.024</b>	<b>65.382</b>	<b>62.002</b>	<b>47.813</b>
15公分	<b>53.866</b>	<b>73.814</b>	<b>56.813</b>	<b>61.458</b>	<b>63.198</b>	<b>62.755</b>	<b>40.997</b>
30公分	48.917	62.309	48.209	51.127	52.256	53.299	36.722
60公分	46.028	39.71	34.03	36.214	37.557	38.157	27.926
90公分	33.051	22.887	22.631	24.736	26.336	16.459	13.245
120公分	20.624	16.627	15.406	16.073	16.933	8.774	4.317

(b)量測應力值  $\hat{\sigma}_{xx}$  (單位: MPa)

開度	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
0公分	6.98	10.08	8.40	8.84	8.75	8.30	6.40
15公分	7.21	9.88	7.60	8.23	8.46	8.40	5.49
30公分	6.55	8.34	6.45	6.84	6.99	7.13	4.92
60公分	6.16	5.32	4.55	4.85	5.03	5.11	3.74
90公分	4.42	3.06	3.03	3.31	3.52	2.20	1.77
120公分	2.76	2.23	2.06	2.15	2.27	1.17	0.58

表8縱向配置測點開度平均應力、應力振幅詳表

開度 (公分)	位置	$\hat{\sigma}_m$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)
0	A1	<b>7.159</b>	7.376	6.944	7.16	0.216
0	A2	<b>7.971</b>	8.657	7.224	7.9405	0.7165
0	A3	<b>7.322</b>	7.577	7.052	7.3145	0.2625
15	A1	<b>7.44</b>	7.722	7.138	7.43	0.0046
15	A2	<b>6.17</b>	6.894	5.46	6.177	0.717
15	A3	<b>3.199</b>	3.436	2.963	3.1995	0.2365
30	A1	6.745	7.023	6.465	6.744	0.279
30	A2	5.277	6.002	4.556	5.279	0.723
30	A3	2.543	2.812	2.289	2.5505	0.2615
60	A1	5.33	5.556	5.096	5.326	0.23
60	A2	3.763	4.484	3.052	3.768	0.716
60	A3	1.716	1.633	1.164	1.3985	0.2345
90	A1	3.86	4.188	3.439	3.8135	<b>0.3745</b>
90	A2	2.348	3.544	2.037	2.7905	<b>0.7535</b>
90	A3	0.587	0.877	0.316	0.5965	<b>0.2805</b>
120	A1	2.3	2.57	2.008	2.289	0.281
120	A2	1.291	1.934	0.404	1.169	0.765
120	A3	2.431	0.376	-0.011	0.1825	0.1935

註:  $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$  為應力振幅,  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

為平均應力

表9高水位負載下應力行為 (4公尺水頭)

橫樑位置	平均應力(MPa)	應力振幅(MPa)
A3	35.667	4.2
A2	42.306	4.2
A1	46.152	4.2

### Stress Analysis of Water Gate Structure Subject to Static Pressures and Discharge Flow Loads

\* Jan-Shon Yu \*\* Bor-Tsuen Wang

\* South Water Resources Bureau, WCA, MOEA

\*\* Department of Mechanical Eng., National Pingtung University of Science and University

### Abstract

This work presents the stress analysis of water gate structure in static and operational conditions by finite element method and experimental measurement. First, the finite element model of the water gate is constructed and validated to reveal the actual boundary conditions by the comparisons of static stresses between the predicted and experimentally measured response. The stress variation characteristics of the gate during discharging conditions, i.e. the gate is subject to flow-induced vibration, is also experimentally studied. The spring element is adopted to simulate the boundaries for the interface between the gate and concrete surfaces and found that the spring constant is between zero and infinity. For static pressure loads on the gate, both the predicted and experimentally measured stresses are consistence as well as the conventional design values. The middle beam of the gate appears the maximum stresses, while the top one is the minimum. When the gate is opened at different levels to discharge the river water, the amplitude and averaged of the gate stresses can be measured. The maximum resultant gate stress is observed at about 40% open or 90 cm lift. In conjunction with the developed finite element model, the induced stresses at high water level can be predicted and used to evaluate the possible fatigue damage. This work is beneficial to understand the structural response of the gate and leads to developing the health monitoring system for the gate in the future.

Keywords: Kaoping River Diversion Weir, experimental modal analysis, gate, finite element analysis