

# 中國機械工程學會 第十七屆全國學術研討會論文集



Proceedings  
of the 17th National  
Conference  
on Mechanical Engineering  
The Chinese Society  
of Mechanical Engineers

第三冊上

高雄市國立高雄第一科技大學  
民國八十九年十二月八、九日

National Kaohsiung First University of Science and Technology  
Kaohsiung  
December 8-9, 2000

## 應用實驗模態分析於閘門結構之模型驗證

\*王柏村 \*\*余振順

\*國立屏東科技大學機械工程系 屏東縣內埔鄉學府路1號

\*\*經濟部水利處南區水資源局 屏東市建國路291號

### 摘要

本文主要是對高屏溪攔河堰放水路閘門進行模型驗證，首先對放水路閘門進行實驗模態分析以得到結構系統模態參數，包括自然頻率、阻尼比及振型等，再以 ANSYS 有限元素分析軟體進行理論模態分析，求解自然頻率及振型，然後，比較實驗與理論解之自然頻率及振型，若不吻合，則修正有限元素模型，直到吻合為止，以驗證有限元素模型，經本研究結果，修正後之有限元素模型，因閘門為局部焊接組合之結構，材料楊氏系數修正為原鋼材的 58%，即由原設計之  $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$  降為  $1.218 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，得到了放水路閘門低頻之理論自然頻率、振型，與實驗模態分析之自然頻率、振型有良好之吻合，驗證到正確之有限元素模型，本文驗證結構體有限元素模型之方法可運用在其它類似結構之系統模型驗證，後續更可結合應變應力之量測確認其邊界，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〔3〕，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。遂運用實驗模態分析及有限元素分析之方法，進行閘門之模型驗證，藉由比較閘門之模態參數，進而確認閘門之模型，其分析流程如圖 4 所示，所得到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〔5、6〕，所以，對於閘門整體結構之應變行為無法了解。周春禧等〔5〕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〔9〕，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〔4〕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〔7〕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 (11) 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」(2)，係依據施工規範(3)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。

### 全文概述

目前尚少有針對水閘門實驗模態分析之相關論文，本研究將使用實驗模態分析及有限元素方法分析理論模態分析，並進行比較實驗模態分析及有限元素方法分析理論模態分析結果之模態參數，藉以確認有限元素模型。

本文主要在說明放水路閘門以實驗模態分析方法，得到之模態參數，包括自然頻率、阻尼比、振型等，並以有限元素方法進行理論模態分析，求得閘門之結構模態參數，包括自然頻率、振型等。再比對實驗模態分析與理論模態分析所得之模態參數，若自然頻率、振型不吻合則修正有限元素模型，重新求解後再進行比對，最後求得吻合之振型及自然頻率，有限元素模型即得到了驗證。

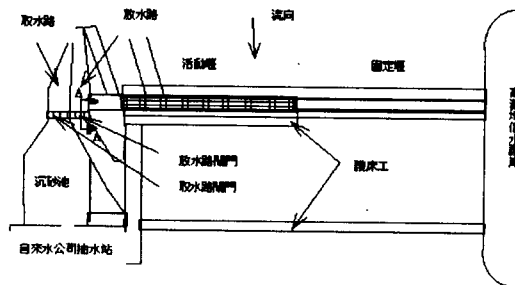


圖 1 高屏溪攔河堰工程主要設施之鳥瞰示意圖

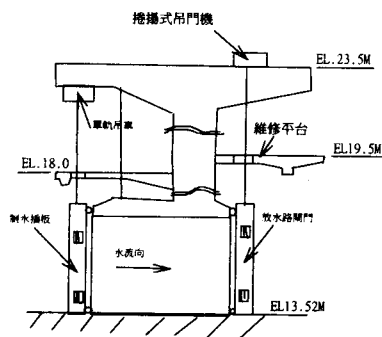


圖 2 放水路剖視圖

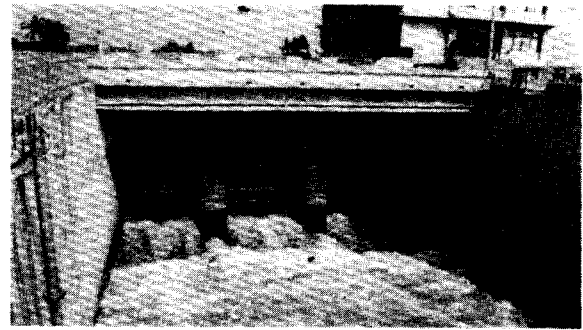


圖 3 放水路閘門放流情形

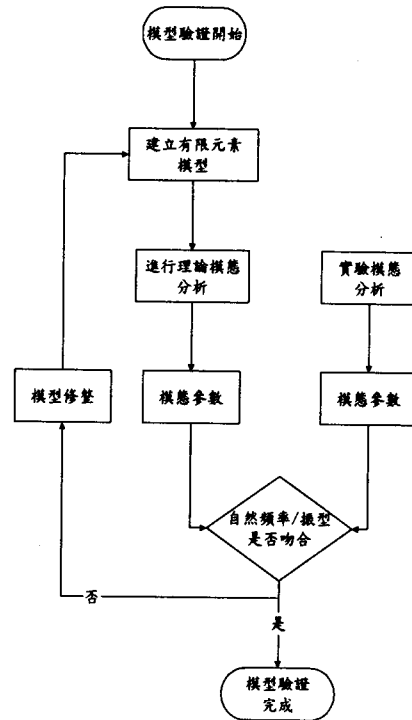


圖 4 高屏溪攔河堰放水路閘門模型驗證分析流程圖

## 二、問題定義與分析目標

高屏溪攔河堰放水路共有三道閘門，閘門之示意圖如圖 5 所示，各閘門可單獨操作，本研究之實驗量測係量測位於放水路中間位置之閘門。放水路閘門之設計採用捲揚式閘門，每一道閘門之開啟與關閉，由一具捲揚機操控。閘門門體包括：3 根主橫量（材質 JIS SUS304）、7 根次縱樑（材質 JIS SUS304）、支承豎樑（材質 JIS SUS304）、4 個軛輪（材質 JIS SUS304）等構件，閘門之詳細外型尺寸圖如圖 6 所示，為一完整之結構體，故有其固有之模態特性。

本文分析目標在進行放水路閘門之有限元素模型驗證，主要工作項目如下：

1. 以既設之固定型鋼索捲揚式電動吊門機將閘門吊於維修位置使閘門自由懸吊狀態，以進行實

驗模態分析，可求得閘門結構模態參數，包括自然頻率、阻尼比、振型。

2. 又架設放水路閘門之有限元素模型，並進行理論模態分析，以求得結構之正確振型及自然頻率。
3. 比較理論與實驗模態分析所得之自然頻率及振型是否吻合，若不吻合，則對有限元素模型進行模型修整，若吻合則完成模型驗證。

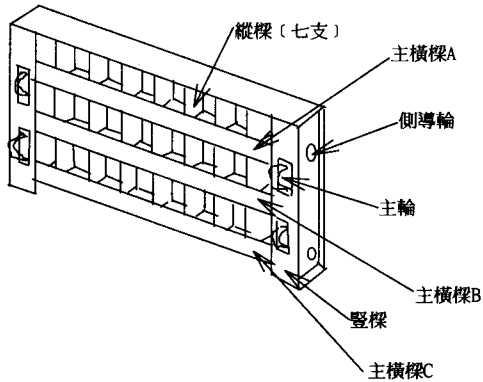


圖 5 放水路閘門結構示意圖

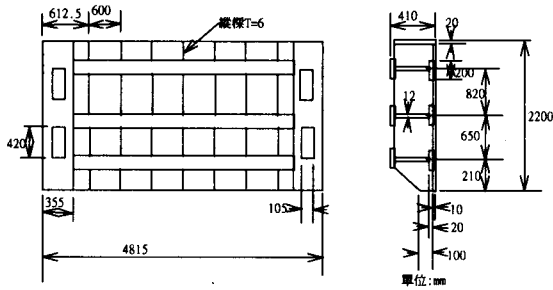


圖 6 放水路閘門外型尺寸圖

### 三、實驗模態分析

本節主要對放水路閘門進行實驗模態分析，先說明實驗模型及實驗儀器之架構，再說明實驗方法與步驟，所得之模態參數，包括自然頻率、振型等，可運用作為後續之有限元素模型驗證之用。

#### 3.1 實驗模型架構及實驗儀器

放水路閘門為矩形結構由 3 支主橫樑及 7 處加強隔板所焊接而成之結構，量測點計網格 112 點(水平方向 16 點、垂直方向 7 點)如圖 7 所示，以吊門機將閘門懸吊於維修位置，模擬成 Free-Free 狀態進行模態分析，實驗模態分析之驅動器係使用衝擊錘，感測器係採用加速度計，訊號分析儀採用訊號博士 SD1.96 版，曲線拟合軟體係使用 STAR 5.2 版之軟

體，實驗模態分析使用儀器詳細規格如表 1 所示。

表 1 實驗模態分析使用儀器

設備名稱	型號	規格
衝擊錘	ICP086C2	振幅範圍：5000lb 靈敏度：1mV/lb 頻率範圍：1kHz 衝擊錘質量：3lb
加速度計	ICP352C65	0.3~12KHz 100mv/g
訊號分析儀	訊號博士	SD1.96 版
訊號拟合軟體	STAR5.2 版	

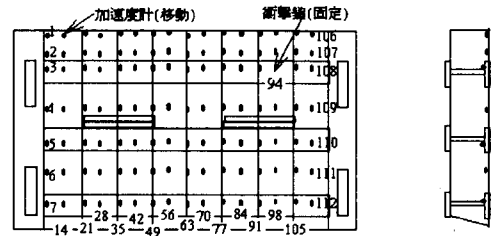


圖 7 實驗模態分析測點佈置示意圖

#### 3.2 實驗模態分析方法與步驟

本文之分析方法是基於，一個結構之材料勁度，質量決定後，則結構之系統既已決定，輸入與輸出必有一關係，利用此特性以實驗模態分析之方法，得到結構系統之特性(自然頻率、阻尼比、振型)，以驗證有限元素模型，此方法有別於單純以應力、應變等單位之輸出反應作為比對修正之依據，本方法直接確認系統特性(自然頻率、阻尼比、振型)，將更準確快速得到正確之修正模型。其系統示意如圖 8 所示。

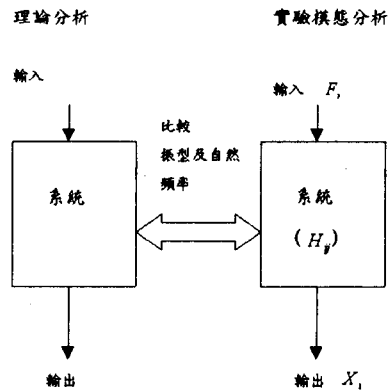


圖 8 實驗模態分析系統架構圖

由圖 8 系統可以下式表示〔1〕：

$$H_{ij} = \frac{X_i}{F_j} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{r,i}\phi_{r,j}}{(\omega_r^2 - \omega^2) + i(2\xi_r\omega_r\omega)} \quad (1)$$

式中， $H_{ij}$  為系統頻率響應函數，為  $\omega_r$ 、 $\phi_r$ 、 $\xi_r$  的函數。 $F_j$  為輸入系統之激振器，本文使用衝擊錘為 Force

$\phi_{r,i}$  加速度計振型在  $i$  位置的值

$\phi_{r,j}$  點力振型在  $j$  位置的值

$X_i$  為系統輸出之感測器，本文使用加速度計，以

$A_i$  表示。可得下式：

$$H_{ij} = \frac{A_i}{F_j} = -\omega^2 \frac{x_i}{F_j} \quad (2)$$

在實驗模態分析實驗方式一般分二種，第一種為移動驅動器固定感測器，可得到頻率響應函數矩陣之一列 (row)，第二種為移動感測器固定驅動器，可得到頻率響應函數矩陣之一行 (column)，所量得之一列或一行之頻率響應函數，可經由曲線拟合軟體擷取模態參數，包括自然頻率、阻尼比、振型，當以第一種方式實驗可得驅動器之模態振型，當以第二種方式可得感測器之模態振型，本實驗係以第二種方式進行實驗可得感測器之模態振型。

本實驗首先將放水路閘門上之雜物污泥清理乾淨，標定量測網格點，並將標定之位置之灰塵以濕布澈底清潔乾淨，以利加速度計之黏貼固定，得到良好之響應。

放水路閘門為一多處加強隔板及橫樑構成之格狀結構，適於衝擊錘敲擊之位置有限，為工作方便性及得到正確之響應，本實驗採用固定衝擊錘敲擊位置於第 94 點(如圖 7 所示)，移動加速度計之方式進行，加速度計之固定以蜂膠固定，實驗模態分析時訊號博士之設定 A Channel 為衝擊錘，B Channel 為加速度計，A Channel 加力加權函數，B Channel 加指數加權函數，頻寬設定 2000Hz、解析條數 800 條，平均次數 3 次。現場量測後將頻率響應函數 (Frequency Response Function, FRF) 以訊號博士內建之功能轉成 STAR 格式，轉檔後使用 STAR 曲線拟合軟體，進行曲線拟合，實驗模態分析流程方塊圖如圖 9 所示。



圖 9 實驗模態分析流程圖

#### 四、有限元素分析

有限元素分析採用 ANSYS 有限元素分析軟體 [8] 進行分析，本節首先就閘門之幾何形狀、元素選用、網格密度、邊界條件等，說明有限元素模型之建立，再說明有限元素分析方法及步驟。

本文放水路閘門之理論模態分析，系統運動方程式可以下式表示 (1)：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (3)$$

假設放水路閘門為不具阻尼之結構，則自由振動分析之系統運動方程式(3)式，簡化如下：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (4)$$

經分離變數令

$$\{x(t)\} = \{u\}g(t) \quad (5)$$

其中  $\{u\}$  為不含時間變數之函數； $g(t)$  為僅含時間變數之函數，經數學處理得(4)式為一般化特徵值問題表示式

$$([K] - \omega^2[M])\{u\} = \{0\} \quad (6)$$

為求得  $\{u\}$  為非零之解，必使

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (7)$$

式(4-5)稱為特徵值行列式，展開上式可得到一個具

$(\omega^2)^n$  次方之多項式方程式，稱之特徵值方程式，可求得  $n$  個  $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ ， $\omega_i^2$  稱為特徵值，在振動

系統  $\omega_i$  之物理意義為系統之第  $i$  個自然頻率，對應於

特徵值  $\omega_i^2$  之特徵向量  $\{u\}_i$  必須滿足下式：

$$([K] - \omega_i^2[M])\{u\}_i = \{0\} \quad (8)$$

$\{u\}_i$  在振動系統之物理意義稱為第  $i$  個模態(mode

shape),  $[K]$  為結構之勁度矩陣, 本文驗證有限元素模型, 即修正  $K$  值使得理論模態分析之自然頻率、振型與實驗模態分析之自然頻率、振型相符。

#### 4.1 有限元素模型 幾何形狀

放水路閘門外型尺寸為 4815mmx 2200mmx 410mm(長x 高x 寬)如第二節圖 6 所示。為分析閘門, 將部份尺寸作適當修正及簡化例如:

1. 部分豎樑之間隔板配合主橫樑腹板位置適當修正。
2. 各接合處之焊道均視為結合良好一體結構。
3. 排水孔、螺栓孔等均忽略)。

#### 元素選用

為模擬閘門結構本研究使用 MASS21 及 SHELL91 二種元素, 其中 MASS21 為 3D 結構質量元素, 用於閘門之配重, 其元素示意圖如圖 10 所示。

閘門門體之整體結構元素選用殼元素 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。其元素示意圖如圖 11 所示, 架構有限元素模型時, 依據放水路閘門各部位之不同, 分別將節點位置分別定義為 Middle Surface、Bottom Surface 及 Top Surface。以 SHELL91 為例, 面板與橫樑上游側接合處依實際尺寸架構, 其 key-point 係採 Bottom Surface 架構, 對稱邊係以 Top Surface 架構。其餘則均採 Middle Surface 架構, 其示意如圖 12 所示。

#### 材料性質

放水路閘門之材料為 SUS304 楊性氏係數為  $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 、材料密度為  $8030 \text{kg/m}^3$ 、浦松比 0.3, 在門體橫樑處以 MASS21 配重 48 個質點每點 20 kg, 描述實體 980 kg 之配重, MASS21 之質量為  $M_x=M_y=M_z=20 \text{kg}$ , 質量慣性距為  $I_{xx}=190.406 \times 10^{-6} \text{m}^4$ 、 $I_{yy}=7.3125 \times 10^{-6} \text{m}^4$ 、 $I_{zz}=219.7 \times 10^{-6} \text{m}^4$ 。質量慣性距, 因配重鉛塊之尺寸為近似矩形截面以  $I=bh^3/12$  求得。

#### 邊界條件之設定

由於是自由振動分析, 邊界條件均未限制, 藉以模擬 FREE-FREE 之狀態, 有限元素模型如圖 13

所示。

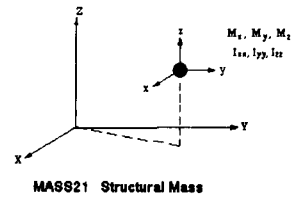


圖 10 元素 MASS21 示意圖

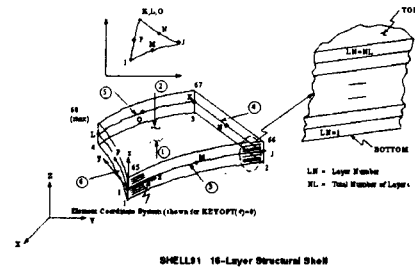


圖 11 SHELL91 元素示意圖

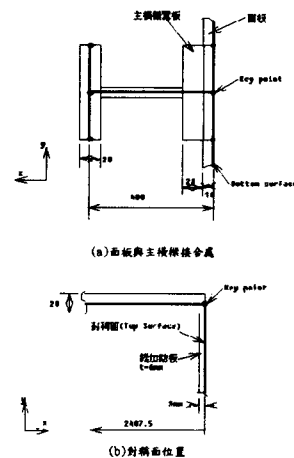


圖 12 Shell91 架構模型時, 節點位置之示意圖

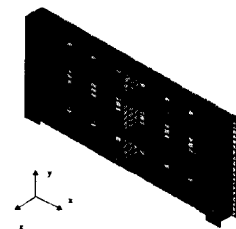


圖 13 模態分析有限元素模型

#### 4.2 有限元素分析方法與步驟

本單元係以有限元素法進行放水路閘門之模態分析, 建立幾何模型後, 在求解階段選用 Modal 之分析模式, 求解方法選用 Reduce、主自由度(master DOF)選定三支橫樑之面板側翼板與加強板交接點為主自由度之選定點, 計 33 點每點 6 個自由度共計 198

個自由度，進行分析，分析設定求解前 30 個模態，以得到振型及自然頻率，若分析結果，振型及自然頻率與實驗模態之自然頻率與實驗模態不吻合，則修正有限元素模型之楊氏係數，直到兩者相吻合則該有限元素模型可視為與實物有等效性之分析模型。

## 五、結果與討論

本節依分析流程進行分析得到最後正確之模型楊氏係數修正為  $1.218 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，為原材料性質  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  之 58%，經檢討其原因，實體結構在橫樑與面板之接合方式為焊接，而焊接僅是橫樑之翼板二側與面板焊合，並無整面接合，如圖 14 所示，而有限元素模型係假設該處為接續良好之結構，應為楊氏係數降低為原設計的 58% 之主要原因。本節以確認之有限元素模型進行解析得到之自然頻率及振型進行分析比較，分別就模態參數 (Modal parameter) 之自然頻率、阻尼比、振型等說明如後。

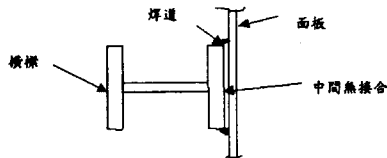


圖 14 面板與橫樑焊接不完全示意圖

### 自然頻率

有限元素分析求解所得前 30 個模態及實驗模態分析得到之前 17 個模態，詳如表 2 所示。由表 2(b) 有限元素分析所得之 30 個模態，前 6 個為剛體運動，其餘 24 個經比對其振型，得到 18 個模態，為  $xy$  平面  $z$  方向表現較明顯之模態，整理如表 3 所示，由表中明顯看出 (2,2)、(3,2) 之有限元素理論分析結果為 16.023Hz 及 76.11Hz，與實驗模態分析結果之 16.0Hz 及 79.797Hz 自然頻率極為相近，而且振型也完全一致，振型比較將在後面詳細說明，表示有限元素模型已完整表達實體結構。

依振型之相關位置，重新整理表 2(b) 得到放水路閘門結構前 18 個模態之自然頻率如表 3 所示，其中 (2,2)、(3,2) 分別為 16.023Hz 及 79.797Hz 為除 Rigid Body Motion 外之最低頻之二個自然頻率，與實驗模態分析之比較可得到 (2,2) 及 (3,2) 之頻率相當吻合，實驗模態分析之前 2 個自然頻率分別為 16.0Hz、76.11Hz，(3,1) 實驗模態未被解析出之原因為 close mode 之關係，76.11Hz 以上之自然頻率因衝擊能量不足之原因並無法解析得到，由得到之前二個自然頻率

誤差均在 5% 以內，以閘門之複雜結構而言，得到前二個自然頻率及其振型吻合性應可判斷閘門實驗模態之正確性。

又由有限元素分析自然頻率 188.81Hz、193.77Hz、200.6Hz 與實驗模態分析 170.54Hz、193.51Hz、208.11Hz 之頻率相近情形為 close mode，顯示有模態干涉(modal interference)情形，有限元素分析及實驗模態分析很難辨識，尤其是實驗模態分析之分割點數不足。

表 2 實驗模態分析與有限元素分析自然頻率比較表  
(a) 實驗量測曲線嵌合結果 (b) 有限元素分析結果

Mode	自然振頻 Hz	振型	Mo de	自然振頻 Hz	振型
1	16	(2,2)	1	0.057847	剛體運動
2	76.47	--	2	0.05784	剛體運動
3	76.11	(3,2)	3	0.05784	剛體運動
4	130.59	--	4	0.05784	剛體運動
5	137	--	5	0.05784	剛體運動
6	170.54	--	6	0.09569	剛體運動
7	193.51	--	7	16.023	(2,2)
8	208.11	--	8	72.8	(3,1)
9	224.88	--	9	79.797	(3,2)
10	242.23	--	10	188.81	(4,1)
11	259.52	--	11	193.77	(1,3)
12	279.24	--	12	200.6	(4,2)
13	286.61	--	13	208.48	(3,2,1)
14	331.32	--	14	256.64	(2,3)
15	348.75	--	15	291.55	(4,2,1)
16	366.23	--	16	324.42	(3,3)
17	370.58	--	17	341.58	(5,1)
			18	378.67	(5,2)
			19	389.04	(5,2)
			20	418.97	(4,3)
			21	423.68	(4,2,2)
			22	501.1	(6,1)
			23	510.68	---
			24	540.99	(5,3)
			25	565.15	(6,2)
			26	630.19	---
			27	631.44	(6,3)
			28	663.49	(7,1)
			29	690.82	---
			30	694.79	---

表 3 自然頻率比較

n \ m	1	2	3
1			193.77
2		16.023 (16.0)	256.64
3	72.8	79.797 (76.11)	324.42
4	188.81	200.6	418.97
5	341.58	389.04	540.79
6	501.1	565.15	631.44

表中 ( ) 為實驗模態分析結果

### 阻尼比修正

由於理論分析並無法求得阻尼比因此理論分析中求頻率響應函數時，阻尼比一律假設為 0.01 但是實驗上可以藉由參數估測方法求得阻尼比，實驗量測中，如果感測器響應加入對數函數(Exponential function)之加權函數(Weighting function)，感測器所量之訊號會有加重阻尼之效應，因此實驗所得到之阻尼比並非結構真正之阻尼比，所以必須加以修正〔10〕，阻尼比修正值以式修正

$$\xi_n \omega_n + \sigma = \overline{\xi}_n \omega_n \quad (9)$$

式中， $\omega_n$  表示自然頻率， $\xi_n$  表示修正之實際結構阻尼比， $\overline{\xi}_n$  表示實驗之阻尼比

$$\sigma = \frac{1}{\tau} \quad (10)$$

式中， $\sigma$  表示衰減率(Decay Rate)， $\tau$  表示加權函數長度(約為時間域總時間長度(T)之 1/3 倍)

實驗所得之各模態修正阻尼比如表 4 所示，大約都在 1% 上下，比一般鋼材料約 0.1~0.5%，略高可能因平板焊接結構所致；又少數幾個模態是不合理負值，應是結構之模態干涉，致使曲線嵌合不準所導致之誤差所致。惟在低頻之(2,2)、(3,2)等振型為正值應屬合理。

表4實驗模態分析阻尼比修正

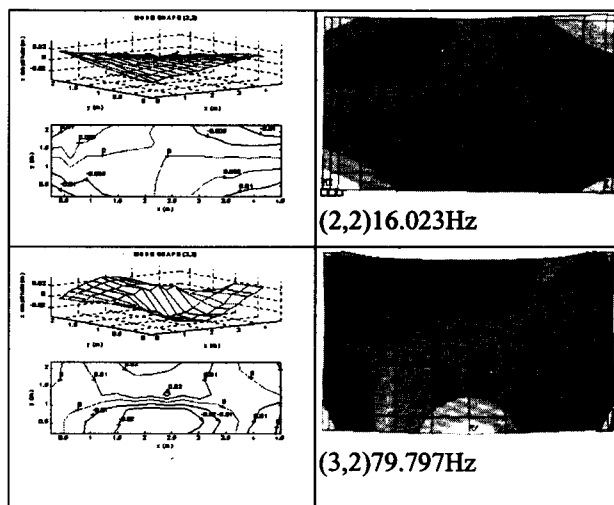
Mode	自然頻率 (Hz)	實驗值(%)	修正值 (%) (5-1式)
(2,2)1	16	8.34	4.61
2	76.47	1.26	0.48
(3,2)3	76.11	2.74	1.96
4	130.59	2.51	2.05
5	137	-0.68034	-1.12
6	170.54	2.66	2.31
7	193.51	1.04	0.73
8	208.11	0.4893	0.20
9	224.88	0.90425	0.64
10	242.23	0.88797	0.64
11	259.52	1.7	1.47
12	279.24	0.17222	-0.04
13	286.61	1.29	1.08
14	331.32	1.81	1.63
15	348.75	0.48272	0.31
16	366.23	0.06174	-0.10
17	370.58	0.71919	0.56

### 振型比較

理論分析以有限元素方法求得閉門結構(2,2)、(3,2)模態振型如圖 15(b)所示，實驗模態分析之(2,2)、(3,2)模態振型如圖 15(a)所示，綜合分析比

較，總體說明如下：

1. 有限元素分析及實驗模態分析之(2,2)、(3,2)兩個模態之振型有相當之吻合性。
2. 另實驗模態分析之自然頻率之 193.5Hz 及 208.11Hz 與有限元素分析之自然頻率 193.77Hz 及 200.6Hz 有其對應性，唯因實驗模態分析之能量太小，高頻部分並沒有明顯得到振型。
3. 對較高頻率之模態，因為進行實驗模態分析所分割之點數不夠，或因結構複雜衝擊能量不易激出，所以未能明確得到應有之振型。
4. 由於各模態均相當接近，故模態干涉效應大，可能是實驗模態分析振型不佳之原因。
5. 低頻處之模態得到完整之比對，對大型結構而言，有限元素模型已能充分表達放水路閉門。



(a)實驗振型

(b)理論振型

圖 15 模態分析振型圖

### 六、結論

本文主要目標在驗證有限元素模型，主要結論如下：

1. 運用實驗模態分析之技術，得到模態參數自然頻率、振型等與有限元素分析之自然頻率、振型結果比對，並經模型修正，得到低頻(2,2)、(3,2)振型、自然頻率相符合，驗證了有限元素模型之正確性。
2. 本文之模型驗證以實驗模態分析之模態參數結果為基準，與有限元素分析比較，修正有限元素模型之方法，可得到系統真實模型，爾後可運用作為模型驗證之方法。
3. 模型驗證結果修正材料楊氏係數為原材料之



58%，其原因為橫樑與面板接觸面，實體為接觸面非固接良好之面，但有限元素以固接良好之方式處理，故若要更準確模擬實體結構，有限元素模型對該橫樑與面板之接觸面應加以修正。後續該接處面可以接觸元件等方式架構，應可更準確模擬開門結構。

4. 此經驗證之有限元素模型可運用作為後續靜態及動態分析之依據。
5. 實驗模態分析得到之振型及自然頻率，將可運用作為後續定期維護檢查及安全檢測評估之資料庫。

### 參考文獻

1. 王柏村，1999，*振動學*，全華書局。
2. 日聖工程有限公司，1997，「高屏溪攔河堰放水路開門結構設計計算書」，台灣省南區水資源局。
3. 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。
4. 台灣省南區水資源局，1997，「水庫加高工程研究報告」。
5. 周春禧，羅守枝，1997，「高壓滑動開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。
6. 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。
7. 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。
8. ANSYS, INC., 1996, *Expanded ANSYS Workbook Revision 5.2*, ANSYS, INC. U.S.A.
9. 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* .
10. 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.
11. 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.

### Application of Experimental Modal Analysis to Model Verification of Gate Structure

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

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

\*\*South Water Resources Bureau, WCA, MOEA

### Abstract

This work is to conduct experimental modal analysis on the water gate of Kaoping River Diversion Weir and so forth to validate the finite element model of the gate structure. First, the gate is performed experimental modal analysis (EMA) to obtain the structural modal parameters, including natural frequencies, damping ratios and mode shapes. ANSYS, a finite element analysis software, is then adopted to carry out theoretical modal analysis (TMA) and obtain modal parameters. The material Young's modulus of the finite element model is adjusted to fit the natural frequencies and mode shapes in comply with those extracted from EMA. Results show that both natural frequencies and mode shapes are to be agreement between EMA and TMA, when the material Young's modulus is adjusted to be  $1.218 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ . The value is about 58% of the original material Young's modulus  $2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$  because of the welding components in the structure. The validated finite element model for the gate structure can then be adopted to perform the structural stress analysis. The extracted modal parameters can also be used as the reference to build up the non-destructive evaluation system. The model verification procedure can be applied to other structures.

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