

## 抽水站閘門組之結構安全分析研究

# The Structural Analyses of Watergates for Pumping Stations

黎文龍<sup>1</sup> 及 黃武雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立台北科技大學

<sup>2</sup>台北市政府工務局養工處

聯絡作者：黎文龍 E-mail: [wlli@ntut.edu.tw](mailto:wlli@ntut.edu.tw)

### 摘要

本文探討防洪抽水站閘門安全強度計算方式，一般閘門設計是依照日本水門鐵管技術基準，惟閘門實際受力情形，甚少相關之報告或書籍討論，文中以台北市中山抽水站閘門為例，先依傳統方式計算出各構件應力，再繪製閘門實際尺寸之立體圖，以商用有限元素分析法 COSMOS-DesignSTAR 分析軟體，執行靜力分析，結果發現傳統計算方式之結構應力值有較為保守情形；本研究另再考量颱風時，風浪波壓對閘門結構安全之影響，經動態及壽命評估分析，研究結果顯示，閘門仍安全無虞。本研究同時也提供一種閘門最佳之減重設計方法，可提供閘門設計另一種思考。

**關鍵詞：**抽水站、閘門、有限元素分析、動態分析。

### ABSTRACT

The main objective of the present study is on the structural safety of watergates that have been used in Taipei city pumping stations. The traditional way is to apply the similar code used in Japan. There hardly exists a study report that concerning if the design of gate is structurally adequate. The present report takes a gate that has been used in ZhongShan Pumping station.

For the reason of comparison, the present study first checked the gate by the traditional design way that analyzes the individual components. In addition, the a 3D model for the gate was then established by using a computer software. The static analyses were followed once the model was completed by a commercial package, COSMOS-DesignSTAR. It has been found that the stresses obtained by the traditional way are somewhat more conservative than those of CAE.

In addition to the static analyses, dynamic analysis was also performed by taking the condition under a typhoon into account. The life and dynamic stresses are all within the safe region for the present example. In order to give an optimum design model, the sample watergate has been re-designed by reducing the cross-sectional areas of the structural members. The results are quite promising.

**Keywords:** Pumping Stations, Watergates, Finite-Element Method, Dynamic Analysis.

### 1. 前言

閘門傳統強度計算是依日本水門鐵管技術基準[1]，但閘門實際受力情形是否與傳統計算方式接近，甚少有相關之書籍討論，故實有檢討需要。

雖然目前國內防洪抽水站閘門設計均採用日本水門鐵管技術基準，作為設計基礎，不過，1997 周等[2]以有限元素方法分析，水庫輸水隧道末端之高壓滑動閘門(高壓閘門一般係指門扇上方水頭 25 公尺以上)，靜態結構之應變與應力，研究顯示傳統計算頗為保守；2000 年羅 [3]對南化水庫加高 20 公尺後，取排水閘門可行性研究，初步顯示靜態結構，其最大應力較接近容許應力，可見閘門新建之初實為過設計。2000 年余 [4]高屏溪攔河堰放流水路閘門，於滿水位時靜力分析結果，研究顯示閘門實為過設計，目前對水庫閘門研究顯示傳統計算方式，有頗為保守之結論，以上研究均為對水庫閘門之研究，由於防洪抽水站屬低壓（一般係指門扇上方水頭 25 公尺以下）閘門，另水庫閘門以銅片作為水封而抽水站閘門以橡膠作為水封，所以支撐面也不一樣，目前尚少有對防洪抽水站閘門靜力及動態分析研究之相關論文。

為探討抽水站閘門傳統設計與實際情形，本文針對台北市中山抽水站閘門為實例，先依傳統計算方式各構件應力，再建立 3D 立體模型使用 Solidworks [5]繪圖軟體繪製，應用 COSMOS [6]執行靜力分析，接者建立颱風時閘門受風浪之動態系統，動態分析使用 MATLAB 中 Simulink 功能模擬，再將軟體分析結果與傳統計算比較及分析。

### 2. 閘門傳統計算理論

據了解，台北市抽水站閘門強度都是依日本水門鐵管技術基準，以下簡稱日本水門鐵管技術基準為傳統計算方式，本章舉「中山抽水站閘門結構計算書」[7]說明。

#### 2.1 閘門設計條件

此閘門受水壓之寬 4.175 公尺、高 4.13 公尺，閘門尺寸寬 4.35 公尺、高 4.13 公尺，設計外水位 11.2 公尺，設計內水位 0 公尺 [8]，如圖 1 所示，閘門材料使

用 JIS SUS 304L，依 AISC 鋼構設計規範 SUS 304L，其容許應力值約 105 MPa ( $0.6 S_y$ )，或容許剪應力值 70 MPa ( $0.4 S_y$ )；而[1]規定，兩支點間之容許撓度須滿足 1/800 以下，滾輪使用材質 SUS 304。

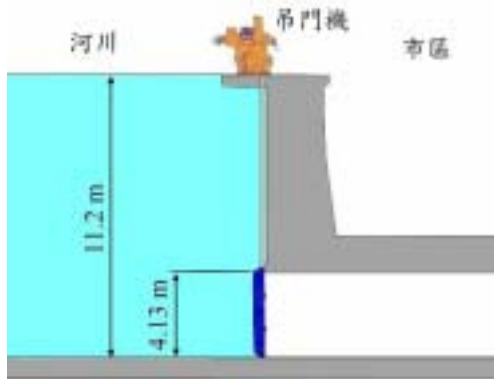


圖 1 中山抽水站閘門示意圖

## 2.2 閘門各構件說明

中山抽水站閘門主要構件為 1 個門板、10 個中間縱樑、2 個側縱樑及 6 個橫樑等組合而成，構件主要材料為 SUS 304L，焊接組合而成，為求水密效果佳四周加以橡膠水封固定，為利水封壓縮量，於閘門兩側加上四個滾輪及門框於對應滾輪位置設置楔塊，以下為各構件說明，如圖 2 所示。

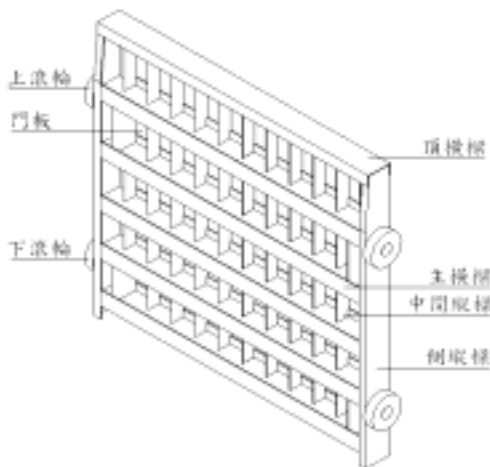


圖 2 閘門各部構造圖

各構件包括：

1. 橫樑：閘門外水平方向橫樑，其中最上面之橫樑稱頂樑樑受應力較小，使用彈性斷面模數 ( $Z$ ) 較小之槽型鋼，其餘橫樑使用相同尺寸 I 型鋼，如圖 3。
2. 中間縱樑：閘門中間垂直方向縱樑，板厚 8 mm、高 200 mm。
3. 門板：閘門面板，板厚 10 mm。

4. 側縱樑：閘門側面兩邊垂直方向縱樑，如圖 4。
5. 上滾輪：閘門兩邊上部滾輪，滾輪寬 128 mm，滾輪直徑 480 mm。
6. 下滾輪：閘門兩邊下部滾輪，滾輪寬 128 mm，滾輪直徑 470 mm。
7. 水封：閘門四周均有水封，材質橡膠，頂部稱頂水封，側部稱側水封，底部稱底水封，側水封及頂水封使用 P 型，底水封使用平板型。

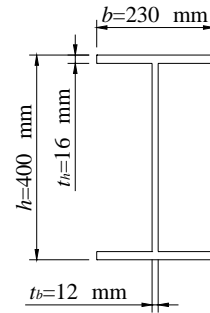


圖 3 橫樑尺寸

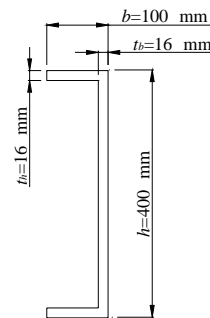


圖 4 側縱樑尺寸

## 2.3 閘門應力計算

中山抽水站閘門各構件所受之最大應力及變形量，如表 1 所示

表 1 中山抽水站閘門各構件受最大應力及變形量

	構件	最大值	發生位置	容許值
1	橫樑應力(MPa)	109	r2	105
	變形量(mm)	5.21	r2	5.43
2	中間縱樑應力(MPa)	52	r6~r7 間	105
3	側縱樑應力(MPa)	103	上滾輪	105
4	門板應力(MPa)	72	r2~r3 間	105
5	滾輪應力(MPa)	677	上滾輪	704

## 3. 有限元素分析

由於閘門左右對稱，分析時只需繪製閘門二分之一的圖，使用 SolidWorks 繪圖軟體繪製，由於水封乃是緊密固定於與閘門板，故對模型之建立必須加入分析，將橫樑、中間縱樑、側縱樑、門板、滾輪及水封繪製如圖 1 所示，惟為簡化分析，將部分尺寸做適當

修正及簡化如下：

1. 水封固定方式直接與門板結合螺栓及螺栓孔等均忽略，因本分析主要求出各構件最大應力值及位置，而水封均為門板四周與門框接觸，以本閘門為例橫樑及中間縱樑最大應力值均位於中間，所以對分析影響是可忽略的。
2. 本閘門受力支撐面為水封面及上下滾輪，由於 COSMOS 軟體支撐面必須為一個面，因 P 型水封及滾輪與門框接觸均為一線而非點，故將 P 型水封及滾輪略為修正，削成有一小平面寬度 4 mm 做為支撐面，如圖 5 所示。

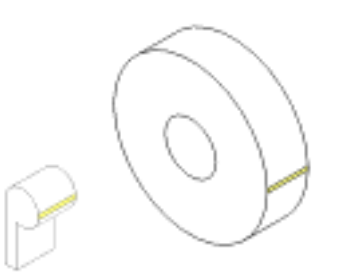


圖 5 P 型水封及滾輪修正圖

### 3.1 負載與邊界條件

因 COSMOS-DesignSTAR 僅有均勻壓力負載，故將門板分成 36 等份，每份受均勻壓力負載(Uniform Pressure)值為該等分上端與下端壓力平均值，如此門板受壓力總和不變，且趨近於實際壓力分佈，如圖 6 所示。

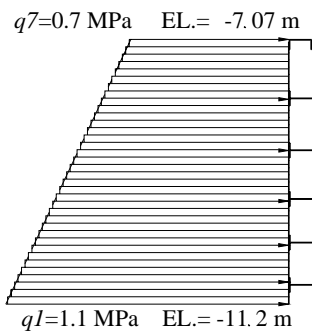


圖 6 閘門近似受壓情形

邊界條件(Restraint)：閘門受水壓時，上、下滾輪、頂水封及側水封受門框支撐，設定為滑動面元、閘門底部受門框底板支撐設定為滑動面元、閘門中心面由於左右對稱設定為對稱面。

### 3.2 分析結果與比較

#### 3.2.1 分析結果

經計算結果應力值如后：(1)橫樑： $r_2$  橫樑所受應力最大，其值發生於中間位置最大應力為 78 MPa， $r_4$  橫樑變形量最大為 3.51 mm，如圖 7 所示；(2)中間縱樑： $r_4$  與  $r_5$  橫樑間之中間縱樑，所受應力

最大為 26 MPa；(3)側縱樑：側縱樑與下滾輪軸接觸面所受應力最大為 51 MPa；(4)門板： $r_2$  與  $r_4$  橫樑間之門板，所受應力最大為 36 MPa；及(5)滾輪：最大應力於下滾輪 307 MPa。

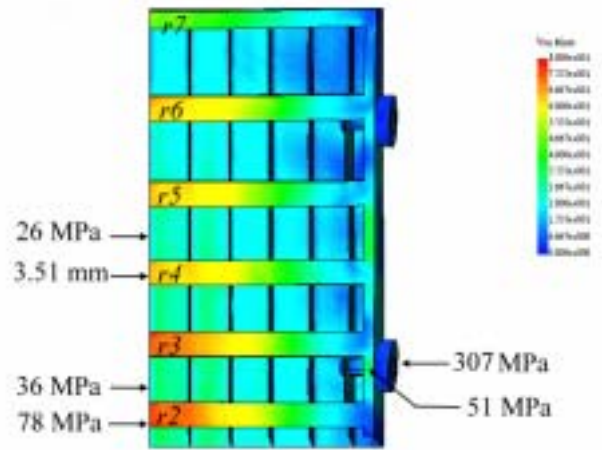


圖 7 CAE 分析結果

#### 3.2.2 傳統與 CAE 結果之比較

應用 COSMOS 分析，其主要橫樑最大應力值發生位置與傳統計算結果相同，惟傳統計算為 109 MPa 較 COSMOS 運算值 78 MPa 大，約高 1.4 倍，但最大變形量發生位置並不一樣，傳統發生於  $r_2$  位置值為 5.21 mm，而 COSMOS 發生於  $r_4$  位置值為 3.51 mm。中間縱樑最大應力值 COSMOS 計算之發生位置於橫樑  $r_4$  及  $r_5$  間與傳統計算於橫樑  $r_6$  及  $r_7$  間，結果也不盡相同，其值傳統計算為 52.4 MPa 較 COSMOS 運算值 26 MPa 大，約高 2 倍。側縱樑最大應力值 COSMOS 計算之發生位置於下滾輪軸接觸面與傳統計算於上滾輪軸接觸面結果不同，其值傳統計算為 103 MPa 較 COSMOS 運算值 51 MPa 大，約高 2 倍。門板最大應力值 COSMOS 計算之發生位置與傳統計算相同，惟值傳統計算為 72.2 MPa 較 COSMOS 運算值 36 MPa 大，約高 2 倍。滾輪最大應力值 COSMOS 計算之發生位置於下滾輪軸接觸面與傳統計算於上滾輪軸接觸面結果不同，其值傳統計算為 677 MPa 較 COSMOS 運算值 307 MPa 大，約高 2.2 倍。

綜觀兩者間差異傳統均較 CAE 高於 1.4 ~ 2.2 倍，且最大應力也有位置上之不同，如表 2 所示。

#### 3.2.3 不同水位時之比較

上述之比較方式乃是考慮閘門於設計水位之計算結果比較，若另以 1/5、2/5、3/5、4/5 及滿水位時，各以 COSMOS 與傳統計算之比較，發現傳統計算方式值也有高於 COSMOS 計算值，如表 2 所示，且應力或變形量發生位置也有略有不同。

表 2 傳統與 CAE 計算結果之比較

構件	傳統		COSMOS		傳統/COSMOS
	最大值	發生位置	最大值	發生位置	
1 主橫樑應力(MPa)	109	r2	78	r2	1.4
變形量(mm)	5.21	r2	3.51	r4	1.5
2 中間縱樑應力(MPa)	52	r6~r7 間	26	r4~r5 間	2.0
3 側縱樑應力(MPa)	103	上滾輪	51	下滾輪	2.0
4 門板應力(MPa)	72	r2~r3 間	36	r2~r3 間	2.0
5 滾輪應力(MPa)	677	上滾輪	307	下滾輪	2.2

### 3.3 討論

探討傳統與 COSMOS 計算不同之因素，有兩主要因素：(1)支撐面不同：傳統設計是以四個滾輪為支撐面，而 CAE 計算時完全依實際狀況模擬邊界條件，除四個滾輪外，還有頂水封及側水封作為支撐面，所以滾輪及側縱樑 COSMOS 計算值會較傳統值小；及(2)計算方式不同：傳統設計於計算橫樑、中間縱樑及門板時都是考量水壓完全由其中一構件承受，並未考量其他構件有承受水壓，所以計算值會大，而 COSMOS 計算方式是將橫樑、中間縱樑及門板尺寸一併考量。

### 3.3 改善之建議

本研究之分析發現，橫樑一般為設計時應力發生最大處，且佔閘門全部重量之百分比亦高，以中山抽水站為例，約佔 39%，其次為門板約佔 24%。由於上述研究顯示，橫樑應力計算時實可與門板一併考量，所以最佳化之減重必須由橫樑開始，將各構件調整尺寸，詳細如下：(1)橫樑尺寸調整其 Z 值減少約 23%，既  $b = 210 \text{ mm}$ ， $h = 360 \text{ mm}$ ， $t_b = 12 \text{ mm}$ ， $t_h = 15 \text{ mm}$ ；(2)門板厚度減少 10%， $t = 9 \text{ mm}$ ；(3)側縱樑配合橫樑調整為  $b = 100 \text{ mm}$ ， $h = 360 \text{ mm}$ ， $t_b = 15 \text{ mm}$ ， $t_h = 15 \text{ mm}$ ；(4)中間縱樑厚度減少 25%， $t = 6 \text{ mm}$ 。

以此減重調整後此寸繪製立體圖，經由 CAE 應力分析後各部應力為，主橫樑 101 MPa，變形量 4.95 mm，門板 44 MPa，中間縱樑 38 MPa，側縱樑 54 MPa，滾輪 409 MPa，詳如表 3 所示。減重前後之 CAE 應力比較，仍符合材料容許應力及變形量，閘門由原先 746 kg 減為 657 kg 約減少 12% 重量，故可依此方式設計閘門，設計出更輕之閘門。

表 3 減重前後之 CAE 應力比較

構件	容許值	減重前	減重後
橫樑應力(MPa)	105	78	101
變形量(mm)	5.43	3.51	4.95
中間縱樑應力(MPa)	105	26	38
側縱樑應力(MPa)	105	50	54
門板應力(MPa)	105	36	44
滾輪應力(MPa)	704	377	409

## 4. 閘門應力之動態分析

前章已經討論了閘門平時各部構件受應力情形，

本章將進一步探討當颱風來臨，河面產生波浪衝擊閘門之動態狀況。研究中，首先推算出颱風來時之波高及週期，以利計算此波浪對閘門之產生之作用力，再將閘門離散化分處理，並以 MATLAB 中 Simulink 模擬閘門受波壓之動態情形。

### 4.1 風浪推估及閘門所受波壓

中山抽水站位於基隆河旁對岸是大直，其該處之河道寬度為 280 公尺，也就是風域為 280 公尺，假設颱風來時風速為每秒 60 公尺，延時三小時，利用 SMB 法推算示性波高和週期，分別為  $H_{1/3} = 0.5131 \text{ m}$ ， $T_{1/3} = 1.5408 \text{ sec}$ ，由分散關係式(Dispersion relation)，求得波長  $L = 3.7 \text{ m}$  [9]。

中山抽水站，護基水深  $h = 11.2 \text{ m}$  因尖銳度  $H/L = 0.138 < 1/7$ ，依重複波理論[10]，波峰出現時波壓分佈為  $A D' B$  線，波谷出現時波壓力分佈為  $G F$ ，閘門所受波壓如圖 8 所示。

1. 波峰出現時之壓力強度

$$p_1 = 5.7 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

$$p_2 = 691.1 \text{ N/m}^2$$

2. 波谷出現時之壓力強度

$$p_2' = 289.7 \text{ N/m}^2$$

$$p_1 = p_1'$$

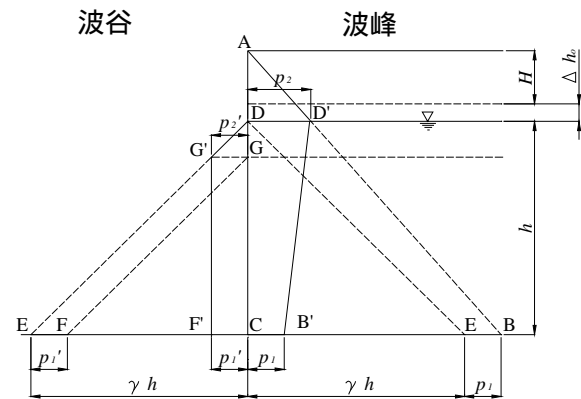


圖 8 Sainflou 重複波之波壓分佈

### 4.2 閘門颱風時之動態方程式

閘門受水壓時由於受門框支撐，變形方向為水壓所指方向，若簡化系統將閘門離散化分割為九個小塊元素切割位置，如圖 4.2 所示，其系統運動方程式可表為：

$$[m]_{9 \times 9} \times [\ddot{x}(t)]_{9 \times 1} + [c]_{9 \times 9} [\dot{x}(t)]_{9 \times 1} + [k]_{9 \times 9} \times [x(t)]_{9 \times 1} = [f(t)]_{9 \times 1} \quad (1)$$

其中之[m]、[c]、及[k]分別質量、阻尼、及閘門之勁度矩陣，動態分析前必須先行適當評估。

#### 4.2.1 質量矩陣

先繪製閘門 Solidwork 立體圖，並將閘門依前述位置分割成九部分，及求出質心位置及質量。如圖 9 所示。

#### 4.2.2 勁度矩陣

可利用 COSMOS-DesignSTAR 來評估閘門之勁度矩陣：例如，於  $m_1$  質心位置施加一力  $f_1$ ，再以 COSMOS-DesignSTAR 計算求出各質心位置處之相對變形量 ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_8, x_9$ )，代入(3)式，並求出所有  $a_{ij}, i = 1, 2, \dots, 9, j = 1, 2, \dots, 9$ 。

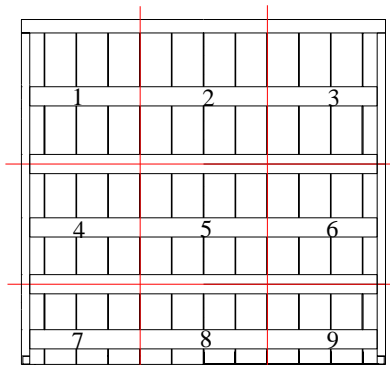


圖 9 閘門分割成九個小塊

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} & a_{1,6} & a_{1,7} & a_{1,8} & a_{1,9} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & a_{2,6} & a_{2,7} & a_{2,8} & a_{2,9} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} & a_{3,6} & a_{3,7} & a_{3,8} & a_{3,9} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} & a_{4,6} & a_{4,7} & a_{4,8} & a_{4,9} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} & a_{5,6} & a_{5,7} & a_{5,8} & a_{5,9} \\ a_{6,1} & a_{6,2} & a_{6,3} & a_{6,4} & a_{6,5} & a_{6,6} & a_{6,7} & a_{6,8} & a_{6,9} \\ a_{7,1} & a_{7,2} & a_{7,3} & a_{7,4} & a_{7,5} & a_{7,6} & a_{7,7} & a_{7,8} & a_{7,9} \\ a_{8,1} & a_{8,2} & a_{8,3} & a_{8,4} & a_{8,5} & a_{8,6} & a_{8,7} & a_{8,8} & a_{8,9} \\ a_{9,1} & a_{9,2} & a_{9,3} & a_{9,4} & a_{9,5} & a_{9,6} & a_{9,7} & a_{9,8} & a_{9,9} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

或

$$x_i = \sum_{j=1}^9 a_{i,j} \times f_j \quad \forall i = 1, 2, \dots, 9 \quad (3)$$

由(2)及(3)兩式，可求出[a]矩陣後，再求出其反矩陣，即為[k]矩陣。

#### 4.2.3 阻尼係數矩陣

本研究考慮各模態之阻尼相等，故阻尼矩陣可由  $[c] = 2\zeta\omega_i \times [m]$  求出， $i=1, 2, \dots, 9$ ，其中， $\zeta$  阻尼比， $\omega_i^2 = \min(\text{eigenvalue}([k]/[m]))$  為系統無阻尼特徵值。本研究考慮  $\xi = 0.05$ ，可得阻尼矩陣[c]。

#### 4.2.4 波壓向量

依 4.1 節所計算出之波壓，再利用圖 9 之閘門分割方式及受力面積，即可計算出各質點之等效受力大小。

### 4.3 閘門颱風時之動態模擬分析

由 4.2 節求出之動態方程式，利用 MATLAB 之

Simulink 當作本研究之模擬工具[11]，模擬時間設定 0 秒至 20 秒，以 ode5 (或 Dormand-Prince 法)，及固定階大小 (Fixed step size) 0.001 秒為模擬條件。

由此建構之 Simulink 圖，系統[f(t)] 輸入一個  $1 \times 10^5$  階梯函數(Step function)以檢視系統情形，由於系統於  $x_5$  位置變形量最大，觀察  $x_5$  之運動情形，使用 Matlab 之快速傅立葉轉換(fft)，將  $x_5(t)$  轉換成  $x_5(\omega)$ ，結果顯示第一個阻尼頻率( $\omega_d$ )約於 55 Hz，這與風浪衝擊波動之頻率 0.65 Hz 相差甚遠，閘門具有足夠之動態強度。

假設颱風來時河川水位於一天內等速漸漸上昇至設計水位 11.2 m，並由於颱風風浪產生間斷性波壓，惟模擬水位上升時間一天，因為計算時間太久，且由於閘門由上述所示系統安定時間僅 0.184 秒，經測試縮短水位上升時間對系統動態分析並無明顯影響，故設定水位上昇至設計水位為 4 秒，並假設於 6.16 秒(4x 波浪週期 T, T = 1.54 sec)時有颱風風浪產生，於 10.78 秒(7x 波浪週期 T)停止，於 12.32 秒(8x 波浪週期 T)時有颱風風浪產生，於 18.48 秒(12x 波浪週期 T)停止，此系統經模擬分析後，得下列結果：

1. 閘門底部受波壓影響最小，愈往上影響越大， $x_2$  產生振幅最大， $x_7$  產生振幅最小，如表 4 所示，即閘門頂上方水頭越高波壓之影響越小。
2. 閘門之自然頻率為 55.3 Hz 遠大於波浪波壓頻率 0.65 Hz，故風浪不會引起共振產生，閘門安全性無虞。
3. 水壓等速漸漸上昇過程，閘門變形量逐漸增加，當水壓停止，閘門變形量趨近於停止增加，僅是非常微量改變，約為穩態值 3.31 mm 之 0.063 %。
4. 由於閘門兩側有上、下支撐滾輪，所以閘門四周變形量較中間小，其中以  $x_1$  變形量最小，中間位置  $x_5$  颱風來時平均變形量 3.31 mm，振幅約 0.83 %。
5. 靜力變形量最大約為 3.51 mm，與使用運動方程式平均變形量 3.31 mm，兩者僅相差 6.5 %。

表 4 閘門受颱風波壓時動態情形

	平均值(mm) A	振幅(mm) B	B/A(%)
$x_1$	1.30	0.0189	1.46%
$x_2$	2.80	0.0396	1.41%
$x_3$	1.30	0.0189	1.46%
$x_4$	1.80	0.0152	0.84%
$x_5$	3.31	0.0275	0.83%
$x_6$	1.80	0.0152	0.84%
$x_7$	1.55	0.0101	0.65%
$x_8$	3.10	0.0151	0.49%
$x_9$	1.55	0.0101	0.65%

### 5. 閘門壽命評估

利用前節已有閘門於颱風來時波峰及波谷之波

壓，再於表 2 得知，橫樑應力最大且逼近容許應力值，故本單元僅考慮  $r_2$  橫樑應力，依據 Soderberg 壽命評估法，進行壽命評估。

經 CAE/COSMOS 計算結果， $r_2$  橫樑波峰及波谷時之應力值，分別為 79.92 及 79.33 MPa，而閘門之材料為 SUS 304L，故最大抗拉強度  $S_u$  為 480 MPa，降伏強度  $S_y$  為 175 MPa，疲勞限為 193 MPa [12]，容許應力  $S_e$  為 105 MPa，或相當於安全係數 1.67，將平均應力及變動應力繪製 Soderberg 壽命評估圖進行評估，如圖 10 所示。圖 10 顯示閘門應力值，完全落於安全範圍內，安全係數依(4)式計算，為 2.19 大於 1.67，顯示閘門於綜合疲勞設計考量下，仍安全無虞。

$$\frac{1}{\text{F.S.}} = \frac{\sigma_{av}}{S_y} + \frac{\sigma_r}{S_e} \quad (4)$$

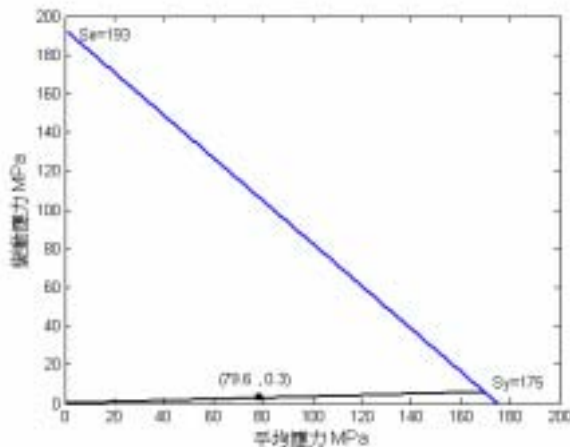


圖 10 閘門之  $r_2$  橫樑 Soderberg 壽命評估曲線

由於波壓對本閘門影響甚少，仍可依 3.4 節之閘門減重建議，將減重閘門亦做之動態分析，結果顯示閘門最低之自然頻率約為 49 Hz，遠大於波浪波壓頻率 0.65 Hz，不會引起波壓共振；中間位置  $x_5$  變形量波壓來時平均值 4.77 mm，振幅 0.04 mm，約平均值 0.83%，前節計算變形量最大 4.95 mm 尚符(相差 3.57%)，均未超過容許值 5.43 mm。再者，在修正閘門之壽命評估方面，研究後，顯示閘門應力值也都落於安全範圍內，顯示閘門安全無虞。

## 6. 結論

本研究首先完成了中山抽水站閘門之 CAD/CAE 分析，3D 繪圖使用 SolidWorks 軟體，再以 COSMOS 有限元素分析軟體作靜力分析，研究後發現傳統計算方式結構應力值有相對保守情形，且預測最大值應力

發生位置，兩者間略有些許不同，其因素有二：(1)傳統計算支撐位置僅有上、下滾輪為支撐面，但實際上仍有頂水封及側水封面有支撐；及(2)傳統計算各構件計算應力時未考慮其他零件尺寸之影響。

本研究並進一步完成了颱風風浪來臨時閘門之動態及壽命分析，研究顯示，中山抽水站閘門自然頻率約 55 Hz，遠大於颱風來時風浪之頻率為約 1 Hz，閘門無共振之慮安全無虞，以最大應力之橫樑應力值為例，經計算其所受變動應力約 0.3 MPa 左右，應力值也都落於 Soderberg 壽命曲線安全範圍內，閘門結構安全無虞。

由本研究所完成之靜力及動態分析研究顯示，閘門傳統設計有過於保守現象。本研究特將中山抽水站閘門部分構件尺寸減重最佳化後，再經 CAE 靜力分析及動態分析後，結果佐證閘門強度仍安全無虞。

由以上研究顯示，傳統計算方式結構應力值確實有保守情形，本研究建議之最佳化設計步驟，可做為未來閘門設計之參考依據。

## 7. 參考文獻

- [1] 水門鐵管技術基準水門扉篇，日本平成 12 年 4 月 (2000 年)。
- [2] 周春禧、羅守枝，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，1997，p73~81。
- [3] 羅守枝，水庫高壓滑動閘門結構及流場分析，屏東科技大學，碩士論文，2000。
- [4] 余振順，高屏溪攔河堰放流水路閘門壽命評估，屏東科技大學，碩士論文，2000。
- [5] 實威科技，<http://www.solidwizard.com.tw/>。
- [6] COSMOS-DesignSTAR Basic User's Guide, 2001。
- [7] 欣泰公司，中山抽水站閘門結構計算書，2003。
- [8] 台北市政府工務局養護工程處中山抽水站閘門改善工程規範，2003。
- [9] 郭金棟，海岸工程，台北：中國土木水利工程協會，2003，p10-74。
- [10] 許泰文，進岸水動力學，中國土木水利工程協會，2003，p11。
- [11] 黎文龍，工程設計與分析，台北：東華書局，2000，第十三章。
- [12] American Society for Metals Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, p. 870, 1990。