

# 不同流況下自動閘門水力特性試驗分析

## Experimental Study on Hydraulic Characteristics of Flap Gate Under Various Flow Conditions

國立中興大學  
水土保持學系  
副教授

**詹勳全**

Hsun-Chuan Chan

國立中興大學  
水土保持學系  
碩士班研究生

**柯柏睿**

Bo-Ruei Ke

國立中興大學  
水土保持學系  
碩士

**詹翔屹**

Siung-Yi Jhan

國立中興大學  
水土保持學系  
博士班研究生

**陳右錚\***

You-Cheng Chen

### 摘 要

自動閘門作用原理乃利用內外水位差使閘門進行自動啟閉，無需電動機械啟閉設備，使操作成本大幅降低。為了解不同流況下自動閘門之起閉情況，及其對閘門過流影響，本文遂利用水工試驗進行不同流量與不同水位影響下自動閘門啟閉情況之分析，針對自動閘門在不同流況及單位面積重之開度變化、流量係數與力矩平衡進行研究。結果顯示通過閘門之流況可概分為自由流與潛沒流兩類；自動閘門開度受到內水位、外水位及單位面積重影響，在相同流量及重量下，開度隨著潛沒程度升高而變大，並在反曲點後成反比，而在不同單位面積重之開度變化則明顯呈現反比現象；其開度變化亦可透過力矩平衡分析瞭解，水流作用於閘門之力矩主要為內水動壓所造成，而潛沒流時則會增加外水靜水壓之影響，透過動量方程式可概估作用於閘門上之動壓力，並利用力矩平衡公式分析閘門啟閉之機制；自動閘門之流量係數與潛沒程度關係呈現二次曲線，在不同流量時流量係數變化趨勢及區間皆相同。透過本研究對自動閘門的流量及其相關影響因子之分析瞭解，將有助於未來自動閘門設計分析之參考。

**關鍵詞：**自動閘門，流量係數，水工試驗。

### ABSTRACT

The difference between inside and outside water level is the principle of automatically controlling the flap gate. This study used hydraulic experiment to analyze how the flap gate act under different flow situation, opening angle, discharge coefficient and moment balancing. According to the results, the flow situations were divided into

\*通訊作者，國立中興大學水土保持系博士班研究生，40227 台中市南區國光路 250 號，mozenpee7@yahoo.com.tw

free flow and submerged flow. The opening angle of the flap gate was effected by inside water level, outside water level, and per unit weight. In submerged case, the angle was proportioned to the degree of immersion, and turning into inverse after the inflection point. In addition, the opening angle was decreased with the area per unit weight increased. Moment equilibrium was used to analyze the flap gate mechanics. Torques induced by flows on the flap gate was introduced by inside water dynamic pressure in free flow situation, and the outside water dynamic pressure was appended in submerged flow situation. As a result, momentum equation could evaluate the dynamic pressure of the flow on flap gate. In addition, relationships between discharge coefficient and the degree of immersion of gate were the same at each discharge condition, and showed quadratic curve. Through the analysis of the discharge of flap gate and related factors, these results will benefit design and analysis of flap gate in the future.

**Keywords:** Flap gate, Discharge coefficient, Hydraulic experiment.

## 一、前 言

台灣常受颱風豪雨侵襲而發生洪水或海水暴潮，使得排水路常因外水過高侵入造成淹水，因此排水路出口通常會設置閘門，其設置目的在於有排水需求時即可開啟閘門，當外在因素使外水位過高時則必須關閉閘門阻擋外水侵入，避免因外水位升高而侵入堤內造成淹水災情。傳統人工啟閉式閘門需人力適時操縱啟閉，颱風豪雨期間操作人員必需涉險進行閘門操作，而電動啟閉之機具其設備製造成本較高，當閘門啟閉設備之機件發生故障時，易造成附近淹水導致人民之生命財產受重大損失，自動型閘門則無電動機件故障問題，相對造價亦較低，平時只需定期保養及清除雜物即可，且自動型閘門無須人力操作，其人事成本相對較低廉，比起人力操作之機械式閘門較具經濟效益。

自動閘門(Flap Gate)設置於不同地點而各有不同目的，常見之自動閘門設置目的如防洪、排水及禦潮等用途，當有排水需求時自動閘門即自動開啟，於防洪或禦潮等抵禦外水時則自動關閉，為增強自動閘門門體強度藉以抵抗啟閉過程門體自體撞擊或漂流物等外物撞擊，自動閘門結構多為金屬製做的門體及吊耳，並將門體懸吊於

出水口處，圖 1 為曾文溪下游西港堤防 5 號所設置之自動閘門。自動閘門作用方式為利用內外水位差自動啟閉，並隨水位差自動調整開度，當內水高於外水時，壓力差致使閘門打開以排出內水，而當外水高於內水時，外水之壓力水頭大於內水則使閘門關閉。由於閘門開度會隨著內外水位差自動調整，而開度及內外水位變化將影響通水斷面積，導致水流通過閘門之流量係數亦隨著閘門開度而變化。

針對自動閘門之水力特性，Burt *et al.*(2001) 曾以 Begemann 閘門進行研究分析，針對 Begemann 閘門進行水壓、配重等力矩分析找出其關係式，提供閘門規劃設計之參考。其中



圖 1 自動閘門（曾文溪下游西港堤防 5 號）

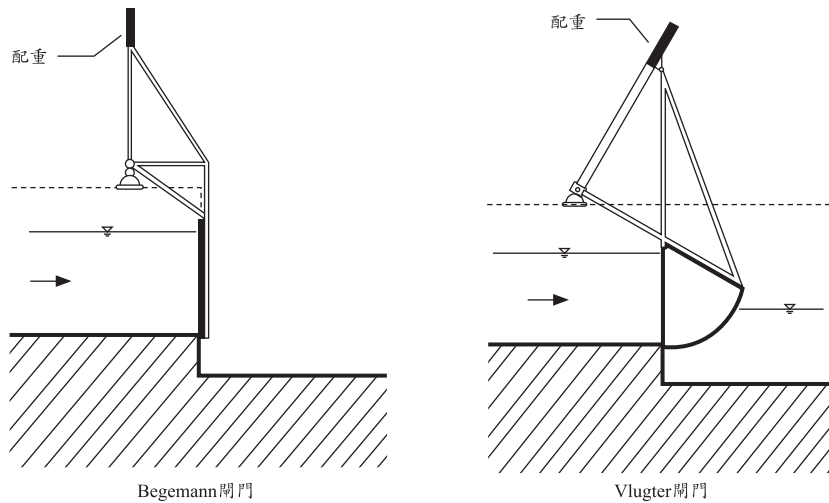


圖 2 Begemann 閘門與 Vlugter 閘門示意圖

Begemann 閘門以閘門自重為關閉之作用力來源，水流為開啟之動力來源，再以閘門上方配重調整水流開啟閘門之難易程度，藉此自動調整內外水位差，Begemann 閘門示意圖繪如圖 2。Litrico *et al.* (2005)亦建立 Begemann 閘門之數學模式，對閘門未浸沒情況提出動量方程式之推導及力矩平衡計算，但其研究僅針對自由出流之情況。Litrico *et al.*(2008)等人再對 Vlugter 閘門進行研究，其改良自 Begemann 閘門，將閘門下游面改為弧面，使之在潛沒流況時同樣可控制上游水位，其結構如圖 2 所示，文中推導 vlugter 閘門潛沒流況之動量方程式及力矩計算，分析 Vlugter 閘門啟閉行為。Frizzell (2006)利用 1/4 縮尺模擬現地自動閘門及箱涵之水力模型試驗，閘門可安裝移動式浮塊，分析不同數量浮塊及不同單位重對於水頭損失及開度的影響，結果顯示閘門單位重較重將造成更大水頭損失，且開度變小。

排水設施在設計過程中其流量推估方式非常重要，可藉此推估排水量，並分析其排水能力，Pethick and Harrison (1981)推導出自動閘門之能量方程式及動量方程式，並將兩方程式無因次化後找出自動閘門之重量無因次參數及流量無因次參數，將兩參數繪製關係圖，其成果可供自動閘門之設計參考，設計者選定閘門重量後，可利用查圖找出相對應之水位及流量關係。

Burrows and Emmonds (1988)提出在排污管道出口設置自動閘門可達到排水及防止外水湧入之效果，並利用水力模型試驗進行排污管出口圓形閘門之研究，結果顯示閘門之排水及阻水能力與其能量損失有關，並以其試驗數據歸納閘門重對排水效益的影響。Burrows *et al.* (1997)延續前述圓形自動閘門水力模型試驗之研究，提出利用角動量方程式推估閘門出流流量，以給定閘門重量、開度及內外水位便可概估出流量，並佐以試驗結果驗證，其結果顯示誤差百分比約 20%到 30%，須以修正係數修正推估值，修正係數 C 值平均約 0.8，試驗條件區間內 C 值約 0.39 到 1.35 之間。de Graaff(1998)以 Vlugter 閘門進行穩定性分析，並建立自由流及潛沒流情況之數學模式，利用能量方程式推導穩流狀況下之流量公式。其認為閘門出流時，閘門底部與兩側之流況不同，因此將流量公式分為閘門底部及兩側分開作計算，最後相加得出總流量，並利用水力模型試驗率定公式中之各項係數，最後建立 Vlugter 閘門之設計原則。前台灣省政府水利處(1998)於「區域排水規畫」中針對排水路之通水能力進行檢討及淹水分析，文中提到排水路造成淹水成因多與閘門之排水能力及啟閉不良有關，對於自動閘門出口排水量之推估方式，乃利用自動閘門之流量公式進行計算，其流量公式形式近似堰流流量公

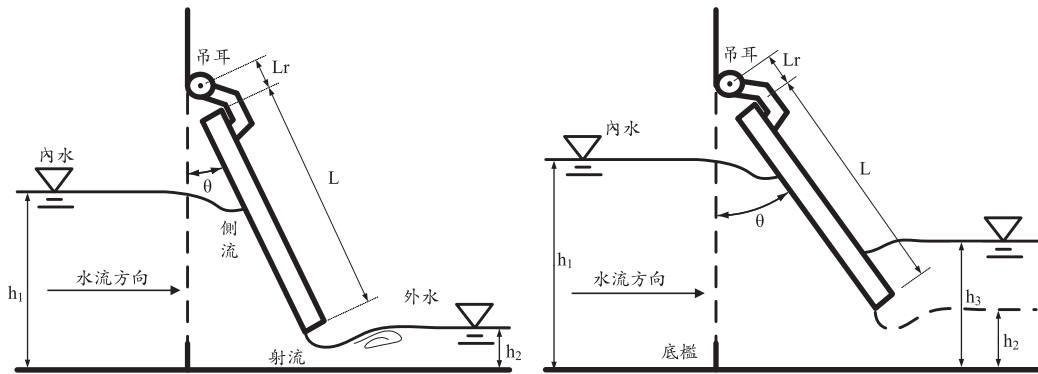


圖 3 閘門自由流與潛沒流示意圖

式，並以流況區分為自由流及潛沒流兩種。

由前述討論之自動閘門相關研究可知，目前關於針對自動閘門的研究文獻，相較於其它水工構造物，可供參考之報告較為匱乏，且許多國內外文獻並無針對流量係數進行分析，工程師在自動閘門之設計上通常以經驗判斷選用，缺乏學理依據，且力學分析亦較少針對懸吊式自動閘門進行研究。本文將利用水工試驗，以多組流量及不同單位面積重，進行懸吊式自動閘門流量公式與力矩平衡分析，研究成果將有助於更瞭解自動閘門之啟閉機制。另外，Begemann 閘門與 Vlugter 閘門型式雖與懸吊式自動閘門有所差異，然而其原理皆為以配重改變推開閘門所需之力矩，藉以控制閘門自動調整內外水位差，故期本研究結果可供後續研究或設計之參考。

## 二、理論分析

### 2.1 流量公式

推估流量時，依外水水位將流況分為自由流及潛沒流兩種，如圖 3 所示。閘門排水時，外水位低於閘門底部稱為自由流；當外水位高於閘門底部，使閘門部分遭浸沒時，則稱為潛沒流。由於自由流與潛沒流流況差異須以不同方式計算，實務應用上需要先判斷屬何種流況再代入對應公式。「區域排水規畫」中提出自由流流況之流量公式為式(1)：

$$Q = C_{d1} A (1.704 \times h_1^{0.5}) \dots\dots\dots (1)$$

其中，Q：流量(cms)； $C_{d1}$ ：自由流流量係數；A：通水斷面積(m<sup>2</sup>)； $h_1$ ：內水深(m)。

當外水位高於閘門底部時，外水將影響到內水之出流，使內水位壅高形成潛沒出流的流況，流量必須以閘門內外水位差計算，根據「區域排水規畫」中提出潛沒流流況之流量公式為式(2)：

$$Q = C_{d2} A [\sqrt{2g\Delta h} (1 - \Delta h / h_1)] \dots\dots\dots (2)$$

式中 g：重力加速度(m/s<sup>2</sup>)； $C_{d2}$ ：潛沒流流量係數。； $\Delta h$ ：內外水位差( $\Delta h = h_1 - h_3$ )，當尾水堰板抬高使外水壅高形成潛沒流況時，外水位必須以  $h_3$  計算，如圖 3 右圖所示。

### 2.2 通水斷面積

傳統通水斷面積計算方式通常以內水深及閘門寬計算，但水流實際通過閘門時分由閘門兩側及底部開口出流，圖 4 為通水斷面積示意圖。當閘門開啟時兩側呈三角形開口，其側邊通水斷面積為底部至上游水面線形成之四邊形，計算方式如式(3)，首先計算兩側開啟時三角形面積，再扣除水面線以上三角形面積則得出兩側通水斷面積  $A_{side}$ ；底部通水斷面積  $A_{under}$  則為閘門開啟時底部形成之矩形，計算方式為閘孔底部至閘門底部距離乘上閘門寬度，如式(4)。因此得出總通水斷面積  $A = 2A_{side} + A_{under}$ ，而後再將 A 代入式(1)及式(2)內。

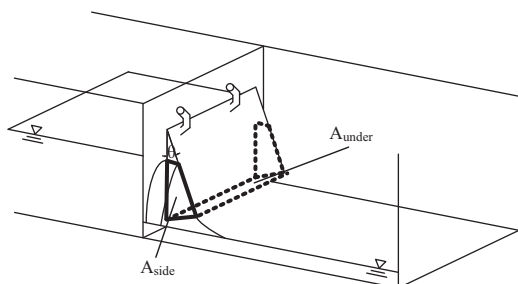


圖 4 自動閘門通水面積示意圖

$$A_{side} = \frac{1}{2}((L + L_r)^2 \sin \theta \cos \theta) - \frac{1}{2}[(L + L_r - h_1)^2 \tan \theta] \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$A_{under} = 2(L + L_r) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) B \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中，L：閘門長度(m)；L<sub>r</sub>：吊耳長度(m)；B：閘門寬度(m)；θ：閘門開度(°)。

### 2.3 力矩平衡

以動量方程式推估水流作用於閘門上之力 F，即閘門板上總水壓力，而水流通過閘門時，由於底部及側邊皆有洩流使其動壓力分佈為一曲面，其分佈如圖 5 所示，此時壓力無法以靜水壓計算，必須利用動量方程式推估，控制體積取斷面 1 至斷面 3，如圖 5 中虛線所圈之範圍，假設流體為穩態及不可壓縮流，且流體方向無改變，控制體積內之動量通量可寫作式(5)。

$$\sum F = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中，ρ：水體單位重(kg/m<sup>3</sup>)；V<sub>1</sub>：內水流速(m/s)；V<sub>2</sub>：外水流速(m/s)；∑F：通過控制體積內總力(N)。

若忽略摩擦阻力及底床坡度，控制體積內之動量通量則等於兩斷面水壓力差及構造物上之動壓分佈 F，可推導出動量方程式如式(6)。

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - F = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中，P<sub>1</sub>：內水水壓力(N/m<sup>2</sup>)；P<sub>2</sub>：外水水壓力(N/m<sup>2</sup>)；A<sub>1</sub>：內水通水斷面積(m<sup>2</sup>)；A<sub>2</sub>：外水通

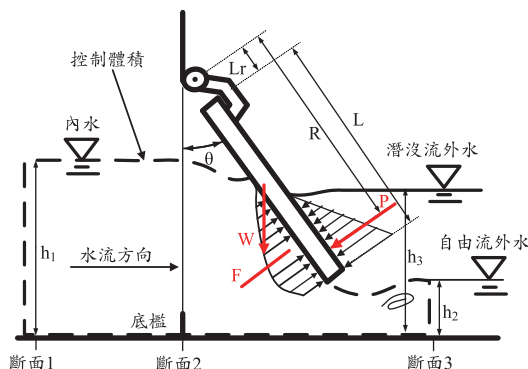


圖 5 動壓分佈示意圖

水斷面積(m<sup>2</sup>)；F：水流動壓作用力(N)。

考量為矩形渠道，將動量方程式改寫如式(7)，潛沒時不論外水深實際多少，h<sub>2</sub>皆須以外水自由出流不受尾水堰板影響之正常水深計算。式(7)中前兩項為控制體積之壓力項，等號右邊為動量通量，第三項 F 為斷面二作用在閘門上之動壓力，如圖 5 中曲線壓力分佈，其合力點約為水深下三分之二處，位於圖 5 中所標示 F。

$$\frac{1}{2} \rho g B_1 h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g B_2 h_2^2 - F = \frac{\rho Q^2}{B_2 h_2} - \frac{\rho Q^2}{B_1 h_1} \quad \dots\dots(7)$$

式中，h<sub>2</sub>：外水自由出流水深(m)，F：水流動壓作用力(N)，B<sub>1</sub>：內水渠寬(m)，B<sub>2</sub>：外水渠寬。

假設水流穩定且為定量流情況下，當內水位高於外水位使閘門開啟並穩定後，閘門開度將固定不動，此時自動閘門與水流達到平衡狀態，便可以吊耳為支點計算力矩平衡。其中作用於閘門之動壓合力位於水面下三分之二水深處，因此水流產生之力矩 M<sub>1</sub> 可表示為式(8)。

$$M_1 = F \times \left[ L - \left( \frac{h_1 - a}{3 \times \cos(\theta)} \right) + L_r \right] / \cos(\theta) \quad \dots\dots(8)$$

水流出閘門為自由出流時水流作用於閘門上之力矩將等於閘門本身自重所產生之反力矩，假設閘門為均質之矩形門板，則重心點位於門板中央，重量產生之力矩 M<sub>2</sub> 可寫為式(9)。

$$M_2 = W \times 9.81 \times \left( \frac{L}{2} + L_r \right) \times \sin(\theta) \quad \dots\dots\dots(9)$$

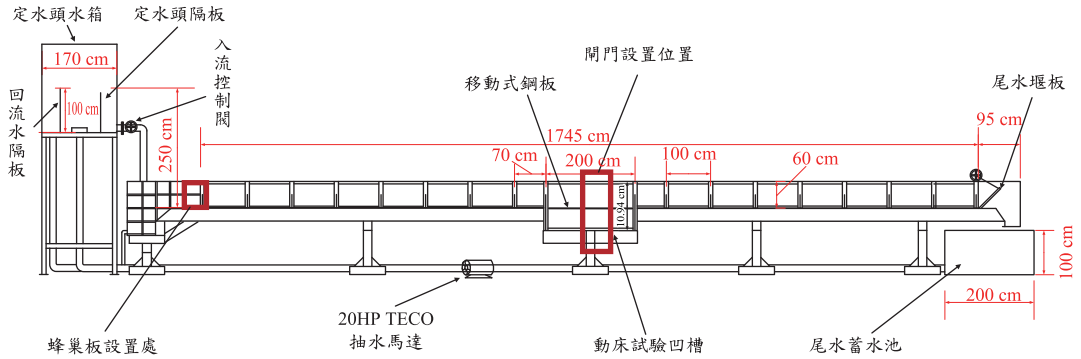


圖 6 試驗渠道側視圖

當外水位高於閘門底部時將使閘門部份浸沒於水中，此時必須計算外水壓力作用於閘門之作用力，如圖 5 所示，其作用力與水流動壓方向相反。此區域流速甚低，其壓力以靜水壓估算，力矩計算方向同  $M_2$ ，合力點 P 位於水面下三分之二處，外水靜水壓力矩  $M_3$  如式(10)。在水流為自由出流時，式(10)為 0，潛沒流流況才須計算， $M_3$  因此計算時當  $h_3 < a$  則  $(h_3 - a)$  以 0 計算。綜合以上敘述，可得到自由出流時力矩平衡公式為式(11)，而潛沒時需考慮外水靜水壓力，因此力矩平衡公式為式(12)。

$$M_3 = \left[ \frac{1}{2} \rho g B_2 (h_3 - a)^2 / \cos(\theta) \right] * R \dots\dots\dots(10)$$

$$M_1 = M_2 \dots\dots\dots(11)$$

$$M_1 = M_2 + M_3 \dots\dots\dots(12)$$

式中，W：閘門重(kg)；R：外水靜水壓力臂(m)；a：閘門底部開啟高度(m)。

### 三、試驗方法與步驟

本研究利用水工模型試驗針對自動閘門在不同流況下，其閘門開度、力矩平衡及流量係數之變化進行研究。此處針對試驗模型、試驗流程、控制條件以及試驗儀器的率定與校正作以下描述：

#### 3.1 試驗場地與佈置

試驗場地位於台中市霧峰區的國立中興大學農業試驗場內，試驗渠槽為一寬 1 m、深 0.6 m、長 20 m 之定水頭循環式水流玻璃試驗水槽，如圖 6 所示，試驗水槽包括：定水頭供水箱、水槽主體及蓄水箱等三大部分。

定水頭供水箱至水槽入口處由一鋼管連接，並設置有手動控制閘門，可控制入流流量，水槽入口處加裝蜂巢板整流器，可有效減低水流由供水箱流至水槽入口之不穩定及大尺度渦流，使入流流況接近均勻流。試驗水槽末端設有可調式尾水堰板，用以控制試驗之水位、雷諾數等水流條件。試驗水流流經水槽後以跌水方式進入蓄水箱，蓄水箱內設置不銹鋼網，以整流及消除水中氣泡，亦可穩定水流減少水面波動。蓄水箱經由入流管以 20 hp 渦流馬達送至供水箱入口，完成此循環式水流系統。

水流進入渠道流經一段距離後，流況會形成週期性之完全發展流，為確保閘門上下游為完全發展且避開尾水效應之影響，將自動閘門模型設置於渠道中下游位置，約距離蜂巢板 10.5 公尺，閘門設置位置如圖 6 所示。

一般常見之閘門形狀有圓形及矩形，圓形常用於污水排放系統中之污水管出口，水利設施中排水路則較常使用矩形閘門，本研究為探討排水及防潮用途之自動閘門，並考量渠槽之尺寸且需保留底檻及頂部高度，將閘門模型製作為 45 cm × 45 cm 之矩形閘門，底檻 6 cm，以模擬自由流及潛沒流流況。閘門模型材料採與實際自動閘門相

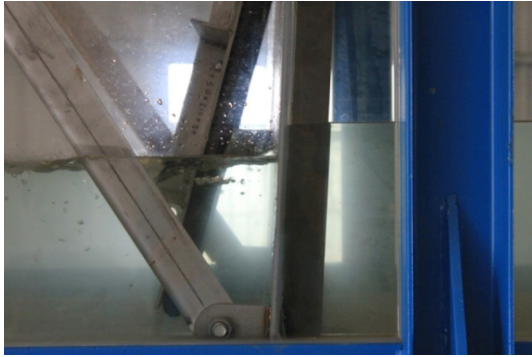


圖 7 閘門模型設置於渠道中實驗情況

同，以不銹鋼板及黑色橡膠墊製作，橡膠墊之作用為閘門起閉時之緩衝及閘門關閉時之水密性。閘門上設置有兩道橫樑，中間以一道縱樑連接，可增加閘門強度，閘門總重約為 18.71 kg，單位面積重約為 92.4 kg/m<sup>2</sup>，所有鋼板厚度皆為 5 mm，自動閘門模型則利用吊耳懸吊於一 60 cm

× 100 cm 之鋼板上，吊耳中心距閘門頂 4 cm，鋼板則利用 L 型支架固定於試驗渠槽內，試驗情況如圖 7，其中鋼板與玻璃及底床接縫處用矽利康密封，防止試驗過程之滲漏影響結果數據。

自動閘門模型架設於一寬 1 公尺平板上，且底部有 6 cm 之底檻，如圖 8 中斷面 2 底部，其壓力分佈為梯型，依前述，此兩部份皆包含在控制體積內，因此式(7)計算結果將包含所有構造物上之水壓，即斷面 2 之壓力分佈於垂向須扣除作用在底檻上之水壓  $\rho g B_1(2h_1 - d)d/2$ ；而橫向壓力由於有側邊洩流，其動壓力分佈如圖 9 所示，必須扣除作用於斷面 2 兩側平板之水壓，平板寬 1 m，而中央閘孔寬 0.4 m，假設中央閘孔之動壓完全作用於閘門上，且恰等於整個橫向水壓之 0.4 倍，計算出之動壓作用力必需再乘上 0.4，才會近似閘門上之動壓作用力  $F_g$ ，因此將式(7)改寫為式(13)：

$$F_g = 0.4 \times \left[ \frac{1}{2} \rho g B_1 h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g B_2 h_2^2 - \frac{1}{2} \rho g B_1 (2h_1 - d)d \right] + \frac{\rho Q^2}{B_1 h_1} - \frac{\rho Q^2}{B_2 h_2} \dots\dots\dots (13)$$

式中，d：底檻高(m)； $F_g$ ：作用在閘門上動壓作用力(N)。

### 3.2 試驗條件

渠床坡度為 0.001，利用尾水堰板調整，使

外水升高形成不同流況，外水位控制同一流量下由 0.06 m 逐漸升高，外水位低於閘門底部且不影響到閘孔出流時為自由出流流況，當水位抬升至影響到閘孔出流及閘門時則轉變為潛沒流況，外水位每 0.02 m 作為一組試驗條件並記錄相關量

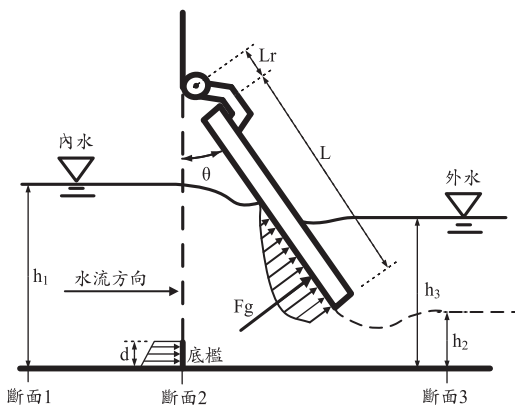


圖 8 潛沒流況動量方程式計算

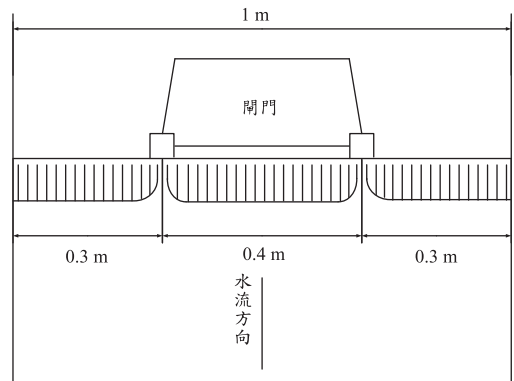


圖 9 橫向壓力分佈(俯視圖)

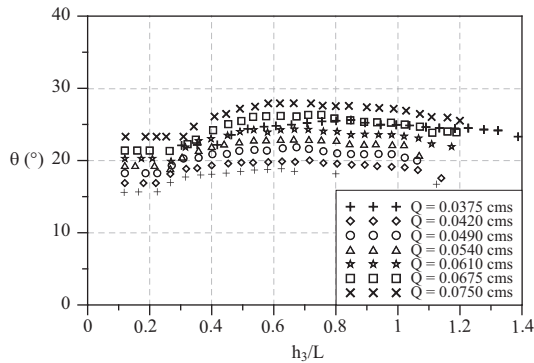


圖 10 外水位與開度關係(單位面積重：92.4 kg/m<sup>2</sup>)

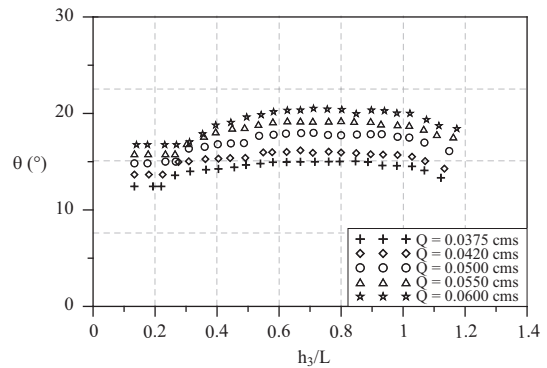


圖 11 外水位與開度關係(單位面積重：112.1 kg/m<sup>2</sup>)

測結果，紀錄水流流出狀況由自由出流到完全潛沒流之水位變化及閘門開度，並以不同流量 0.0375 cms 至 0.75 cms 共七組進行試驗，探討閘門於不同內外水位差下之流量係數。

另外利用加重塊置於閘門上，增加閘門重量，以兩塊各 2 公斤加重塊平均置於閘門上，總加重 4 公斤，加重位置位於閘門中央橫樑上，將閘門單位面積重由 92.4 kg/m<sup>2</sup> 增加至 112.1 kg/m<sup>2</sup>，同樣利用上述試驗條件，共進行 5 組加載試驗。

#### 四、結果分析與討論

為探討自動閘門在不同流況下之水力狀況，本研究利用水工試驗分析在不同流量下自動閘門開度及水位變化，實驗過程以針尺式水位計量測自動閘門模型上下游水深，並以攝影機拍攝進行閘門開度影像判釋。此處將針對自動閘門開度變化，利用動量方程式計算閘門之作用力及力矩平衡，再進行流量係數分析。

##### 4.1 自動閘門開度變化

圖 10 為單位面積重 92.4 kg/m<sup>2</sup> 時，各流量條件下閘門開度隨內水位與外水位變化之情形，圖中顯示在自由出流時，各流量測組開度並不會隨著外水位變化，因外水位並無影響閘門及出流，因此呈現水平無變化。而不同流量條件下，因流量越大則動量越大，水流作用於閘門上之力也越大，開度與流量呈現正相關，流量越大

則開度越大。

當外水位逐漸升高至閘門底部，閘門出流受到影響，此時流況由自由出流過渡到潛沒流，由於水面波動造成流況不斷於自由流及潛沒流間來回轉變，導致閘門開度震盪而使此過渡段的數據量測容易產生些許誤差。相同流量條件時，潛沒流之閘門開度變化有兩階段，當開始潛沒時因外水位影響到部份開孔出流而造成阻水效應，使得潛沒段的流量變小，因此需要更大通水斷面積而使閘門開度變大，此時閘門開度隨水位升高而變大。當潛沒超過一定程度後，閘門出流受到外水影響變大，如圖 10 中靠近右側之情況，此階段開度則隨著外水位升高而變小，因內水位壅高使兩側通水斷面積增加，且受到外水壓力影響，因此閘門開度將隨水位升高而變小。潛沒流在不同流量條件下，其開度介於 17 到 26 度之間，開度變化隨著流量增加而變大，受到動量影響使開度與流量有著線性關係。

圖 11 為將單位面積重增加至 112.1 kg/m<sup>2</sup> 時外水位與開度關係圖，自由流況時開度不受外水影響，潛沒流況時開度介於 12 到 20 度之間，其變化與未加載重之試驗案例相同，潛沒時開度隨外水位升高而變大，但潛沒至一定程度後則呈相反變化。開度變化與未加載時比較可明顯看出，在相同流量條件區間內開度皆較低，而加載重與未加載時開度變化趨勢一致，顯示自動閘門重量之影響於不同流況時皆相同，重量增加使下壓力矩變大導致開度變小，且將使內水位壅高。而



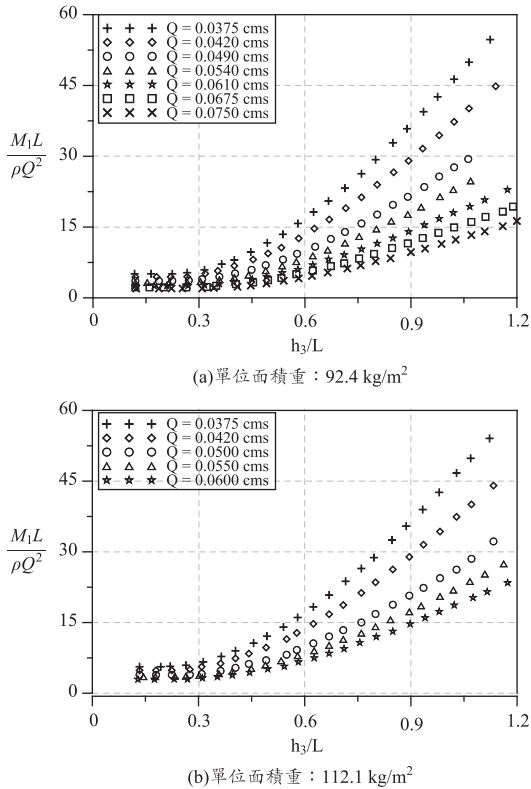


圖 12 動壓力矩與外水位關係

相同水流條件因單位面積重的不同，而有不同的開度及內水位，實務設計時應考慮其影響。

#### 4.2 力矩平衡

水流通過閘門時其推動閘門之動力來源為內外水位差產生之壓應力，閘門內側之動壓分佈不同於靜水壓，透過動量方程式及力矩平衡公式分析作用於閘門上各種作用力，可了解水流使閘門開起之作動機制。將實驗數據代入前述推導之動量方程式(13)，即可計算出各組實驗中水流作用於閘門上之動壓力  $F$ ，假設合力點約在水面下三分之二處，因此利用內水位推求合力點後，再以吊耳為支點計算出合力作用於閘門上產生之力矩  $M_1$ 。

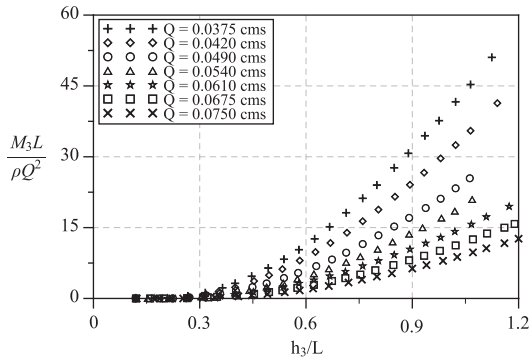
圖 12 為閘門於不同流量測組時外水位與動壓力矩之關係，將各流量條件之力矩無因次參數與外水位無因次參數繪製而成。圖 a 中顯示動壓合力產生之力矩會隨著潛沒程度越大而升高，各

流量組外水位與動壓力矩之關係呈現拋物線。自由流況時由於內水並無受到外水影響，動壓並不會受到外水抬升影響，因此各流量組自由出流時皆為水平無變化。自由出流時動壓力矩在試驗流量組變化時，其值為 15.9 N·m 至 24.1 N·m 之間。潛沒流況時動壓力矩隨潛沒程度升高而呈拋物線上升，內水壅高幅度隨著潛沒程度越高而增大，閘門內側產生之壓力變化幅度也越大。

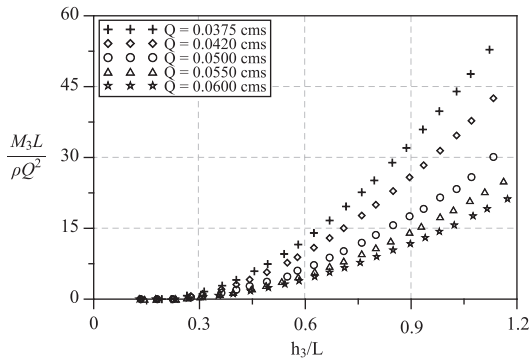
圖 b 為閘門加載後(單位面積重 112 kg/m<sup>2</sup>)於不同流量測組時外水位與動壓力矩之無因次關係。圖中動壓合力力矩同樣隨潛沒程度越大而升高。兩種不同單位面積重之測組比較，同樣流量下動壓力矩差異不大，當加載後使單位面積重改變，同流量下自動閘門開度將變低。然而在同流量下之力矩差異不大，相對的動壓產生之力矩差異也不大，顯然自動閘門將自動調整至適合當時流量之開度。

由上述試驗結果可知，同流量下動壓產生之力矩會隨著潛沒程度變大而升高，但是實際開度變化還必須考慮其他因素，除潛沒時流速改變影響動壓分佈外，當外水高於閘門底部時，閘門外側面會產生壓力，緩慢之流速可假設其為靜水壓，因此潛沒流況時必須考慮外水壓力力矩，其方向與水流方向之動壓力矩相反。將外水潛沒高度以靜水壓方式計算作用於閘門外側斜面上壓力，以吊耳為支點計算力矩，將相關數據代入式(10)可計算出各流量測組之  $M_3$ 。其中當  $h_3 < a$  時  $M_3$  為 0，表示自由出流時閘門未浸沒於水中，因此自由出流時  $M_3$  皆為 0，將外水壓力力矩  $M_3$  計算結果與外水位無因次化後繪成圖 13，其中圖 a 顯示自由出流流況無外水壓力，潛沒流況時外水壓力力矩隨潛沒程度升高而呈線性關係。

圖 b 為加載至單位面積重為 112 kg/m<sup>2</sup>，外水壓力力矩  $M_3$  與外水關係同樣隨著潛沒程度升高而變大，因外水位逐漸升高使壓力增加，自由出流時外水無淹沒閘門，因此自由出流時  $M_3$  均為 0，潛沒流則隨潛沒程度升高呈線性關係，趨勢與未加載時相同，而相同流量不同單位面積重相比則差異不大，因閘門自動調整開度使每個流量皆有其適合之力矩。



(a)單位面積重：92.4 kg/m<sup>3</sup>



(b)單位面積重：112.1 kg/m<sup>3</sup>

圖 13 外水壓力矩與外水位關係

根據式(11)及式(12)可得知，自由出流時  $M_1$  將等於  $M_2$ ，潛沒流況時  $M_1$  將等於  $M_2 + M_3$ ，利用閘門重量及開度計算出不同流量條件之  $M_2$  值，並加上前述計算之結果，將式(11)及式(12)等號左右進行比較繪製於圖上，如圖 14 所示。圖中顯示大部分計算結果均靠近 45 度線，且幾乎皆在信賴區間內，惟低潛沒時有部份超出誤差 10%，其原因為當外水位恰好接觸到閘門底部時，閘門出流處水流不穩，水面波動造成流況在自由流及潛沒流來回變換，閘門因而上下震盪影響觀測，使此時之誤差較大。其結果顯示，動量方程式可概略推估出水流作用於閘門上之動壓力，潛沒時則必須加上外水施於閘門上之靜水壓力，才能使力矩平衡，這也說明了當內外水位接近時，閘門開度逐漸變小的原因，並證明自動閘門之起閉機制，主要受到閘門內外水位差之影響。

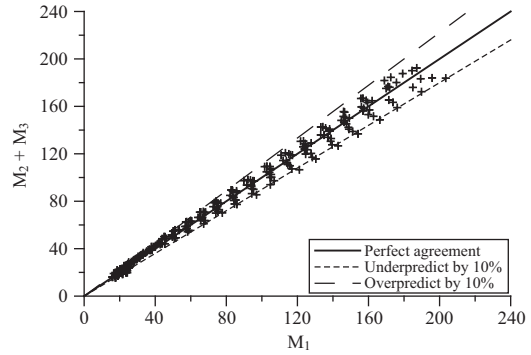
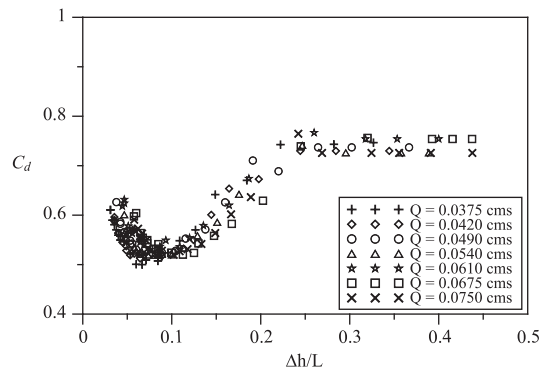
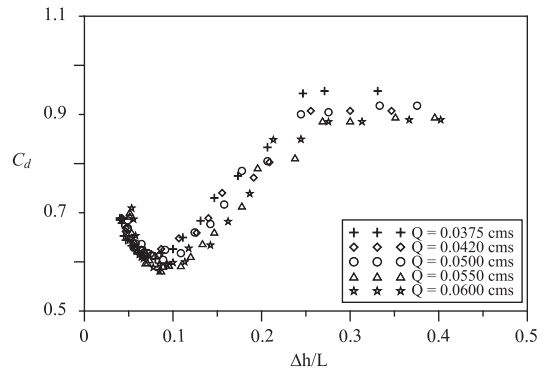


圖 14 動壓力矩與其反向力矩關係



(a)單位面積重：92.4 kg/m<sup>3</sup>



(b)單位面積重：112.1 kg/m<sup>3</sup>

圖 15 流量係數與內外水位差之關係

### 4.3 流量係數

圖 15 為流量係數與無因次內外水位差之關係，圖中內外水位差與閘門長度比值( $\Delta h/L$ )約在 0.23 以上之案例流況為自由出流，其結果顯示在自由出流情況下，同一流量而言，流量係數不會隨著水位差改變，意即此條件下，水位改變並不

影響理論預估流量與實際流量之比例，而渠道中摩擦效應對水流之影響程度為固定。此時因為外水位並無影響到內水位或閘門，自由流之流量係數在各流量測組皆相差不大。

當 $\Delta h/L$  約在 0.23 以下時，即發生潛沒流，處於低潛沒情況，流量係數隨著潛沒程度升高而變小，此時渠道摩擦效應增加，實際流量與理論預測流量間差異變大。閘門開度隨外水位升高而變大，且內水位也隨著外水位升高而變大，因此通水斷面積越大則使理論流量越大而流量係數越小。當 $\Delta h/L$  到達約 0.1 以下，即為高潛沒流況，水流受閘門、底床、邊壁影響較小，流量係數便開始回升，實際流量與理論預測流量間差距開始變小，潛沒流況時流量係數明顯隨著開度變化，介於 0.5~0.78，且各流量組不僅變化趨勢相同，且與內外水位差之關係幾乎重疊，表示不同流量之變化與內外水位差有關。流量係數在自由出流時最大，約 0.72 到 0.75 之間，且自由出流時開度亦最小，表示自由出流時通水能力最佳。低潛沒時由於受到外水阻水影響，需要更大通水能力而迫使閘門開度變大且流量係數變小，當內水升高至一定程度使通水能力足夠後，則閘門開度變小且流量係數變大。

圖 15b 為加載後(單位面積重  $112 \text{ kg/m}^2$ )流量係數與無因次內外水位差之關係， $\Delta h/L$  約在 0.23 以上水流為自由出流情況，相同流量之流量係數不會隨著水位差改變，因為外水位對內水位或閘門無影響，自由出流之流量係數中最大與最小僅差異百分之五，在單位面積重  $112 \text{ kg/m}^2$  的流量測組下約介於 0.88~0.94 之間，與單位面積重  $92.4 \text{ kg/m}^2$  相比明顯較大。流量係數因閘門重量增加導致開度變小而升高，其變化情形與開度減小時相似，皆因通水斷面積減小而使流量係數變大。由此可見，通水斷面積較小時，實際流量與理論流量較為接近。

潛沒流情況與未加載時趨勢相同，低潛沒時隨著潛沒程度升高而降低，當潛沒達一定程度後則呈現相反趨勢，但整體亦因通水斷面積減小使流量係數提高。試驗結果顯示，在相同流量條件下，加載將導致流量係數提高約 20%，實際應用

時應考慮單位面積重量的影響。

## 五、結論與建議

本研究利用水工試驗，進行多組流量及不同尾水高之試驗，探討自動閘門內外水深對開度之影響，並以試驗數據驗證理論推導出之力矩平衡方程式及率定流量係數，研究結果得出以下幾點結論：

1. 閘門受水流作用力可以動量方程式推估，透過試驗驗證結果可概略推估出矩形閘門在已知尺寸、重量及流量下之動壓力矩。
2. 潛沒情況外水水位將對內水與閘門造成影響，因此閘門開度也受到外水位產生之靜水壓影響，因此必須考慮到潛沒程度所造成的下壓力矩，這也說明了影響自動閘門起閉的因素主要為內外水位差產生之壓力。
3. 閘門重量將影響閘門開啟角度，並間接影響內水位使內水壅高，若閘門重量過重則可能導致低窪地區淹水。
4. 流量係數在自由出流情況下其值較大，潛沒流時則有變小的趨勢，主要受到閘門開度變化影響，因此閘門尺寸及重量皆對流量係數大小有所影響。

## 參考文獻

1. 台灣省水利規劃試驗所，區域排水規劃，1998。
2. Burrows, R. and Emmonds, J., "Energy head implications of the installation of circular flap gates on drainage outfalls," *Journal of Hydraulic Research*, 26(2), pp.131~142, 1988.
3. Burrows, R., Ockleston, G.A., and Ali, K.H.M., "Flow estimation from flap-gate monitoring," *Journal of The Chartered Institution of Water and Environmental Management*, vol. 11 issue 5, pp.346~356, 1997
4. Burt, C., Angold, R., Lehmkuhl, M., and Styles, S., "Flap gate design for automatic upstream canal water level control," *J. Irrig. Drain. Eng.*, 127(2), pp.84~91, 2001.
5. de Graaff, B, Stability analysis of the Vlugter

- gate, MS thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 1998.
6. Frizell, K.W., CS-29 Black Bayou Culverts, Calcasieu Parish, Louisiana 1:4 Scale Model Study of Culvert Flap Gate, Bureau of Reclamation Water Resources Research Laboratory, Natural Resources Conservation Service, 2006.
  7. Litrico, X., Belaud, G., Baume, J.P., and Jose, R.B., "Hydraulic Modeling of an Automatic upstream water-level control gate," *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 176~189, 2005.
  8. Litrico, X., Belaud, G., Baume, J.P., and Jose, R.B., "Hydraulic Modeling of an Automatic upstream water-level control gate for submerged flow condition," *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 134, No. 3, pp. 315~126, 2008.
  9. Pethick, R.W., and Harrison, A.J.M., "The theoretical treatment of the hydraulics of rectangular flap gates," Pages 247~254 in *Proceedings, 19th congress, International Association for Hydraulic Research*, New Delhi, India 1-7 February, 1981.

收稿日期：民國 102 年 8 月 29 日

修正日期：民國 102 年 12 月 11 日

接受日期：民國 102 年 12 月 25 日