
**築壩式農塘方形豎井(垂直涵洞式)溢洪道
流量公式及滯洪設計之試驗研究
Experimental study on dam-type
agricultural vertical flow culvert spillway
flow formula and flood detention design
expansion
成果報告書**

執行單位：逢甲大學

執行期間：109年02月06日至109年12月31日

計畫主持人：吳銘順 研究助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

目次

目次.....	I
表次.....	II
圖次.....	III
第一章 緒論.....	1-1
第一節 前言	1-1
第二節 現況問題分析	1-2
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法與步驟	2-1
第二節 文獻回顧	2-2
第三章 室內試驗	3-1
第一節 試驗目的	3-1
第二節 試驗裝置與條件	3-1
第四章 分析與討論	4-1
第一節 試驗數據	4-1
第二節 方形豎井溢洪道溢流量公式分析	4-1
第三節 矩形出水口流量公式	4-11
第四節 方形豎井溢洪道與矩形出水口共構之溢流 量公式	4-12
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄一.....	附錄-1

表次

表 3-1 各部尺寸一覽表	3-2
表 4-1 方形豎井溢洪道試驗數據表	4-2
表 4-2 矩形出水口試驗數據表	4-3
表 4-3 方形豎井溢洪道與矩形出水口共構試驗數據表	4-5
表 4-4 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量	4-13

(以下略)

圖次

圖 1-1 築壩式農塘	1-2
圖 1-2 豎井式溢洪道滯洪設施示意圖	1-3
圖 2-1 研究步驟流程圖	2-1
圖 2-2 豎井式溢洪斷面示意圖	2-2
圖 2-3 豎井式溢流道流況示意圖	2-3
圖 2-4 各種豎井入口斷面形狀示意圖	2-3
圖 2-5 圓形豎井溢洪道流量係數(C_0)	2-4
圖 2-6 方形豎井流量係數與相對深度之關係圖	2-6
圖 2-7 孔口流出水口斷面示意圖	2-8
圖 2-8 滯洪壩示意圖	2-9
圖 2-9 比例堰示意圖	2-10
圖 2-10 各種形狀銳緣堰示意圖	2-12
圖 2-11 寬頂堰示意圖	2-13
圖 2-12 以堰牆相對厚度區分堰流類型	2-14
圖 2-13 明渠式溢洪道示意圖	2-16
圖 2-14 溢流堰示意圖	2-17
圖 3-1 室內試驗裝置三維示意圖	3-2
圖 3-2 矩形出水口流量公式試驗	3-3
圖 3-3 本研究各項試驗項目示意圖	3-4
圖 3-4 研究試驗流程圖	3-6
圖 3-5 流量量測裝置	3-7
圖 3-6 探針式水位量測裝置	3-8
圖 4-1 斷面 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖	4-8
圖 4-2 斷面 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖	4-8

圖 4-3 斷面 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖	4-9
圖 4-4 於 $H/B \leq 0.9$ 時方形豎井溢洪道溢流量分布圖	4-10
圖 4-5 於 $H/B > 0.9$ 時方形豎井排洪量分布圖	4-11
圖 4-6 矩形出水口排洪量公式	4-12
圖 4-7 溢流水流流線分布示意圖	4-13
圖 4-8 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量	4-17
圖 4-9 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量	4-18

(以下略)

第一章 緒論

第一節 前言

農塘(farming pond)是台灣人文和自然環境交織而成的特殊地景，就台灣歷史文化的發展來說，具有特殊的人文意義，同時也凸顯了先民在這片土地奮鬥發展的歷程。但是，隨著土地利用型態的急遽改變，位於山坡地的一些農塘常因灌溉需求降低、缺乏管理維護或水質惡化等各種因素之影響，導致荒廢或填平移作他用，使得農塘數量急遽減少。根據水土保持局於 2018 年調查苗栗、台北、花蓮及台東等地之農塘運作狀況，結果顯示 290 座農塘中，荒廢或移作他用者就高達 103 座，約佔調查農塘之 35.5%，比例相當地可觀。

坡地農塘荒廢或移作他用，表面上只是導致坡地非灌區灌溉用水之長期缺乏問題，其產生的後果並沒有工業缺水來得嚴重，因而沒有獲得社會各界的較大關注和重視。不過，坡地農塘不僅提供灌溉用水之功能，對於生態、地景、微氣候、山林火災等，甚至緩減下游地區淹水危害，均具有一定的功能和影響。於是，農塘作為山坡地儲蓄水源之一種設施，必須因應時代需求而賦予新的任務和挑戰，跳脫以灌溉為主之思維，提供更多元的服務功能。例如，因為降雨分布與地形等因素，臺中市大肚山台地上之農地經常性地缺水灌溉，而在豐水期時，台地下游低窪地區卻又常因雨成災，冬季枯水期時，更常因焚風造成山林火災，且發生森林火災時，因水源缺乏而導致災情難以控制。因此，維持並活化坡地農塘就成為緩解灌溉水源、遲滯洪水、生態景觀及防災用水等最簡易且有效的措施之一。

鑑此，自 2016 年起行政院農業委員會水土保持局大力推動全臺六個分局轄區坡地農塘之改善及活化工程，其中以滯洪(detention)功能為首要，其他包括淤泥清除、防滲處理、引進水設施改善、改善環

境等。

第二節 現況問題分析

坡地農塘係指在低窪地區或溪流流路選擇適當地點，構築堤壩攔蓄地表逕流，以提供農業等用水及改進生態環境，並提供休閒遊憩之設施。其中，築壩式農塘(dam-building type of farming pond)為於溪流適當地點填土築壩，以攔蓄地表逕流之設施，因蓄水型態類似水庫，故亦稱之為小型水庫(small reservior)，是台灣南部地區山坡地相當普遍且重要的灌溉水源之一，如圖所示。通常，築壩式農塘多數位於野溪坑溝之適當地點，但也有部分是利用坡地束狹地形築壩蓄水。依據築壩材料及型式，壩體可區分為土石壩（土壩、堆石壩、砌石壩）、混凝土壩、鋼筋混凝土壩、橡膠壩等類型，其中山坡地農塘設施以構築土壩(earth dam)為主。

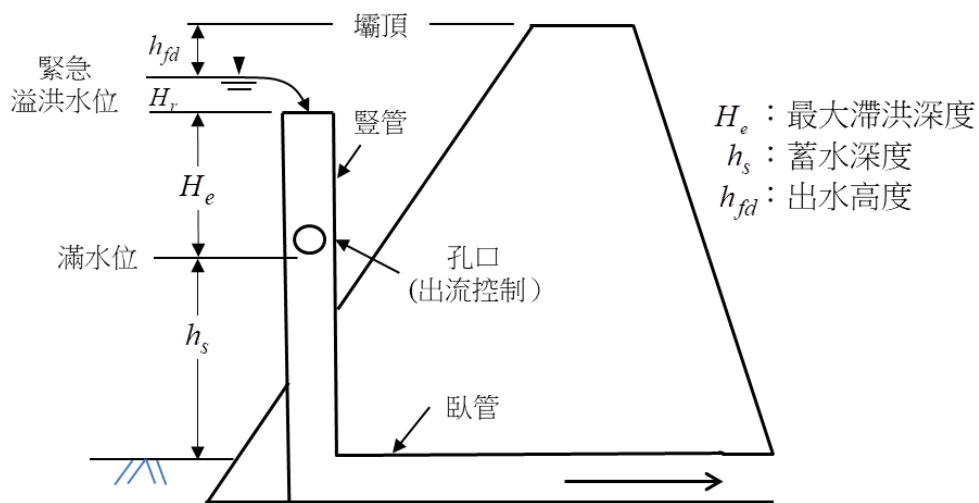


資料來源：農塘設計與施工單元叢書(稿)，2020

圖 1-1 築壩式農塘

早期築壩式農塘之營運目標，係以提供附近坡地農作灌溉水源為主，不僅規模遠小於水庫，且均設置方形豎井(riser)作為緊急溢洪道，以避免洪水漫溢而導致壩體潰決，危害下游地區保全對象之安全。但是，受到氣候變遷極端降雨之衝擊，平原地區淹積水發生頻率及規模日益嚴重，使得坡地滯洪議題逐漸被重視和期待，於是賦予築壩式農塘滯洪功能就成為山坡地水土保持工程之重點工作之一。

在傳統築壩式農塘建構滯洪效能之先決條件，必須設計建造適當之出流控制措施，包括出水口(outlet)及緊急溢洪道(emergency spillway)，如圖 1-2 所示。其中，出水口可以採用孔口流(orifice flow)、滯洪壩(detention dam)或比例堰(proportional weir)等設施，而緊急溢洪道則以方形豎井(square riser)為主。不過，根據初步調查結果顯示，築壩式農塘存在以下三個問題，包括：



資料來源：修改自 NJDEP, 2016

圖 1-2 豎井式溢洪道滯洪設施示意圖

一、豎井(垂流涵洞式)溢洪道流量公式之適合性問題

一般，築壩式農塘主溢洪道多採用正方形、矩形、圓形、喇叭形等之豎井排洩洪水，其流量為依據美國小型壩工設計 (Design of Small Dams) 之喇叭形堰流公式計算(水土保持手冊，2017)。但是，在實務上因考量施工簡便因素，現況均以構築方形

斷面為主，惟其流量公式仍然沿用喇叭形堰流公式。

由於方形排洪斷面之形狀阻力大於喇叭形斷面，使得其排洩流量效率低於喇叭形斷面，即在相同斷面條件時，通過方形斷面之流量小於喇叭形斷面，導致在設計入流洪峰流量下，農塘內之洪水位會高於設計洪水位，從而可能有引發洪流溢堤潰壩之虞。

二、緊急溢洪道設置問題

除了採用豎井作為主溢洪道外，築壩式農塘亦應設置緊急溢洪道，其設計洪水量根據水土保持技術規範第115條規定應達重現期十年以上之降雨強度。但是，實務上因土壩上甚難構築緊急溢洪道，故多數築壩式農塘並無緊急溢洪道之設置。

三、築壩式農塘滯洪功能改善問題

近年來，土保持局全力推動改善既有農塘，使其成為兼具蓄水及滯洪功能之滯洪農塘。其中，滯洪功能係在已知之設計入流量及滯洪體積下，經由出水口及緊急溢洪道之設計，達到最大滯洪量。因此，在方形豎井溢洪道之側邊設置出水口，而以豎井作為緊急溢洪道，以實現農塘之滯洪及排洪功能，已屬當前農塘改善活化之重要政策。

綜上所述，築壩式農塘之豎井溢洪道設計，必須兼取排洪及滯洪功能，而這些功能因均與豎井溢洪道斷面及出水口之流量公式密切有關，實有必要深入研究，以供築壩式滯洪農塘設計之參採。換言之，本研究主要任務有二：

一、方形豎井溢洪道之流量公式。

二、方形豎井溢洪道上設置矩形出水口之流量公式。

三、方形豎井溢洪道與矩形出水共構情況下之流量公式。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法與步驟

本研究係以方形豎井溢洪道之相關流量公式為主要任務，故研究方法為以室內試驗及其相關數據歸納分析為主軸，如圖2-1為本研究實施步驟。圖中，除了蒐集相關研究文獻作為實驗設計與分析之參採外，就以方形豎井溢洪道模型設計和相關試驗為首要，其目的在於建立方形豎井溢洪道(緊急排洪)、矩形出水口(滯洪)、方形豎井溢洪道與矩形出水口共構等狀況下之流量公式。

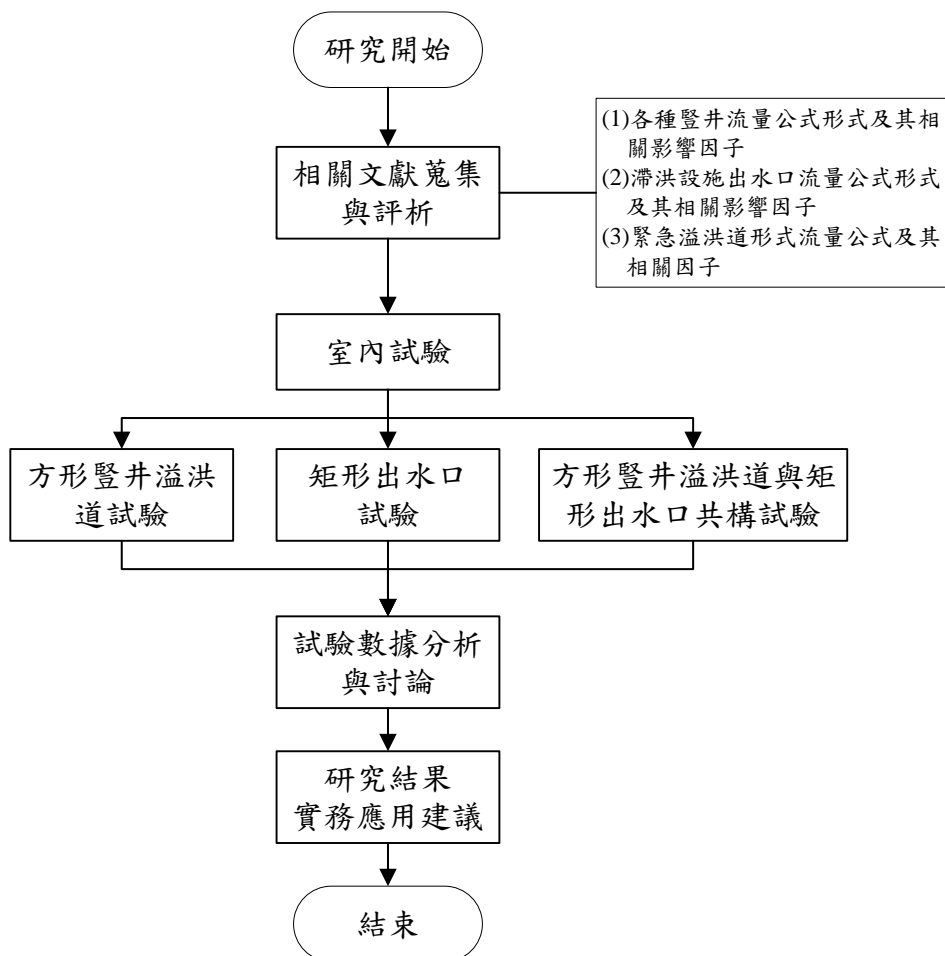


圖 2-1 研究步驟流程圖

第二節 文獻回顧

茲就本研究所要解決問題之內涵，蒐集以往相關研究成果，以作為實驗設計及分析之參採。

一、豎井溢洪道流量公式

豎井式溢洪道(riser-type spillway)係由喇叭形溢流堰、漸變段、豎井、彎道、水平臥管及靜水池等組成，為臺灣地區築壩式農塘採用的溢洪道型式，如圖所示。當河谷狹窄，岸坡陡峻，沒有足夠的空間構築其他形式溢洪道時，採用豎井式溢洪道的造價有時會較其他形式溢洪道為低。

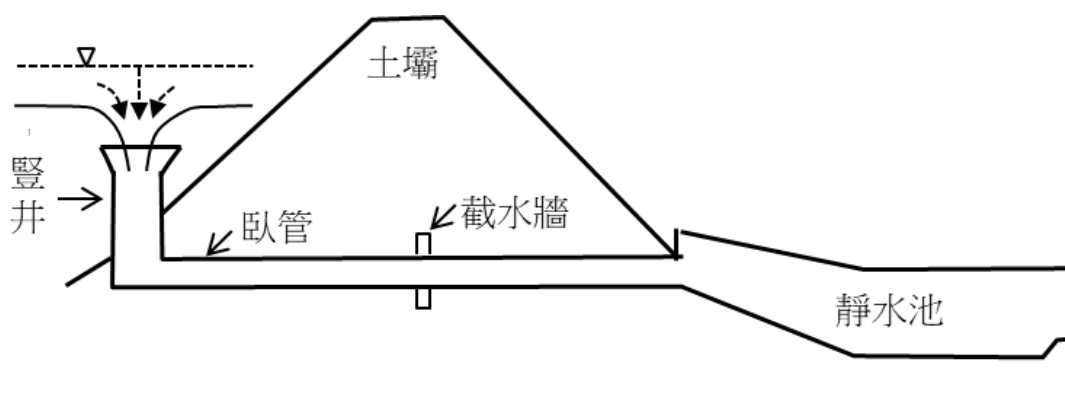


圖 2-2 豎井式溢洪斷面示意圖

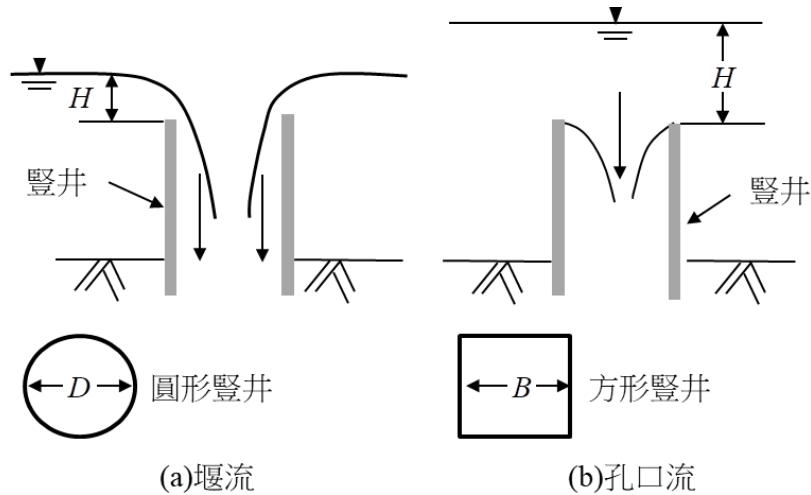
豎井式溢洪道洩流能力與其水位密切相關，如資料來源：
Humphreys et al., 1970

圖所示。圖中，當水位上升而使溢流堰淹沒時，洩流條件即由堰流轉變為孔口流，其洩流量與水位關係將產生變化。

依據堰流流量公式，豎井式溢洪道流量公式可表為

$$Q = C_o \sqrt{2g} L_c H^{3/2} \quad (2-1)$$

式中， Q =溢流量(cms)； L_c =豎井頂部周長(m)，對圓形溢流堰 $L_c = \pi D$ ，如屬方形溢流堰，則 $L_c = 4B$ ； D =圓形溢流堰直徑(m)，與洩流量有關； B =寬度(m)； C_o =流量係數，與豎井形狀和溢流水位相關。



資料來源：Humphreys et al., 1970

圖 2-3 豎井式溢流道流況示意圖

(一) 圓形喇叭口豎井(USBR, 1987)

採用圓形喇叭口作為入口的豎井，由於入口能量損失較低，具有較好的排洪效果，惟施工較為不易，甚少運用於山坡地農塘，其入口斷面形狀如圖 2-4(a)所示。

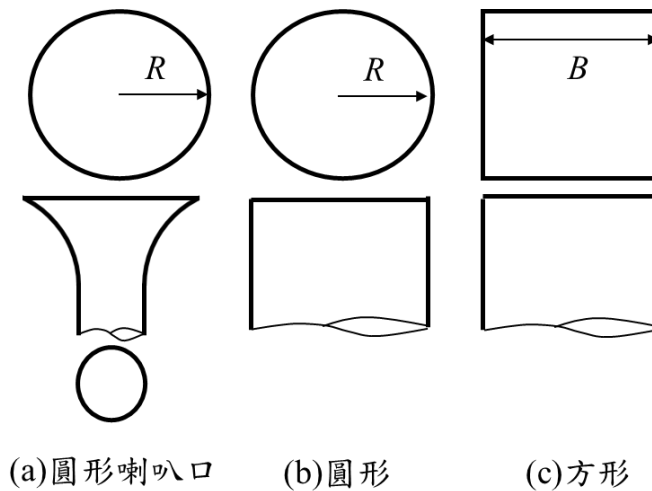


圖 2-4 各種豎井入口斷面形狀示意圖

1. 堰流流況：

(1) 當 $H/R < 0.5$ 時(R =豎井半徑)，屬低溢流水位，其流量係數可表為

$$C_o = 3.4 - 0.5 \frac{H}{R} \quad (2-2)$$

一般，在較低的溢流水位下(即 $H/R < 0.5$)， $C_o = 0.33$ 。

(2) 當 $H/R > 0.5$ 時，屬高溢流水位，其流量係數可表為

$$C_o = 3.15 - 2.3 \left(\frac{H}{R} - 0.5 \right) \quad (2-3)$$

2. 孔口流流況

當 $H/R > 1.0$ 時，豎井式溢洪道即由堰流轉變成孔口流，其流量公式可表為

$$Q = 2.2 C_o A (2gH)^{0.5} \quad (2-4)$$

式中， C_o = 流量係數(=0.6)。流量係數(C_o)亦可以查圖方式取得，如圖 2-5 所示。

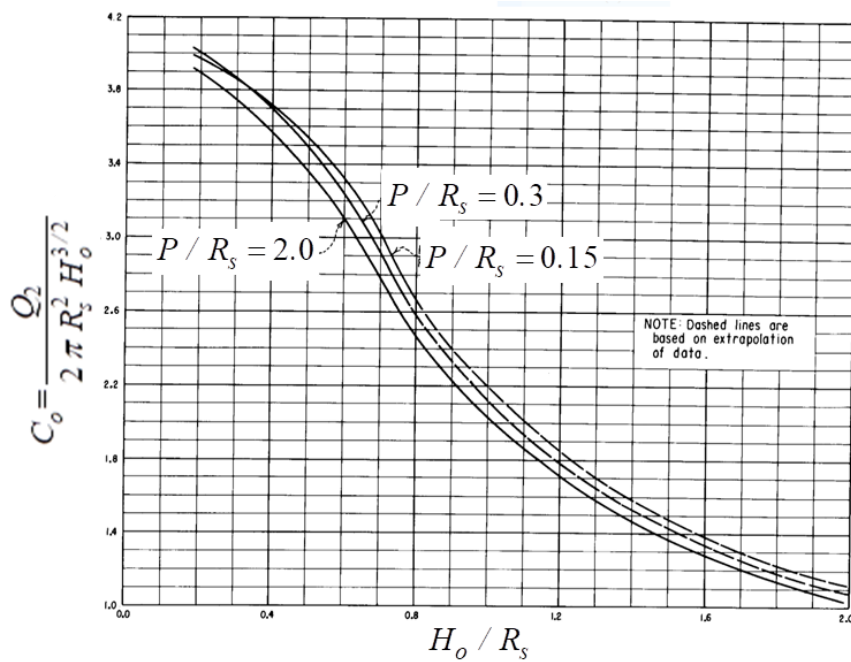


圖 2-5 圓形豎井溢洪道流量係數(C_o)

(二) 圓形豎井(Humphreys et al., 1970)

圓形喇叭口豎井因具有圓滑的入口，可以發揮較高的排洪效益，惟因施工不易，故多改以圓形或方形斷面，如圖 2-4(b)所示。

1. 當 $H/R \geq 0.95$ 時

$$C_o = 1.12 \left[1 - \frac{0.17}{H / (2R)} \right]^{1.5} \quad (2-5)$$

2. 當 $0.1 \leq H / R < 0.95$ 時

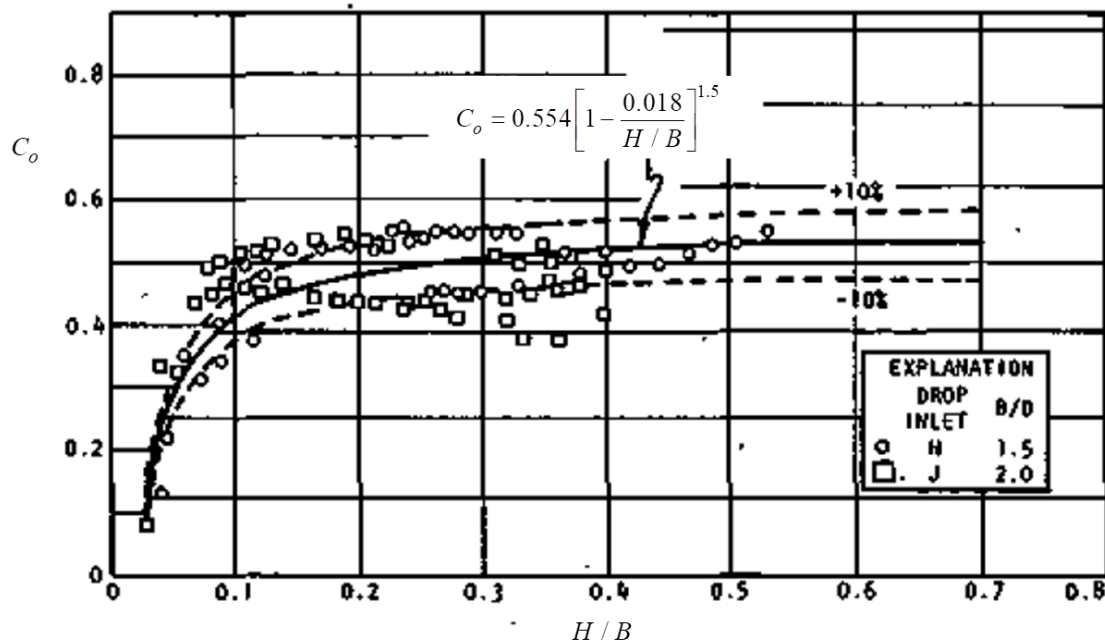
$$C_o = 0.638 \left[1 - \frac{0.027}{H / (2R)} \right]^{1.5} \quad (2-6)$$

(三) 方形豎井(Humphreys et al., 1970)

方形豎井屬於排洪效率最低的一種入口斷面形狀，但卻屬最容易施工的一種形狀，故已被廣泛地運用於臺灣山坡地築壩式農塘中，如圖 2-4(c)所示。由於此種入口形狀可資參考的流量計算公式極少，根據 Humphreys et al.(1970)的模型試驗結果，其流量係數可表為

$$C_o = 0.554 \left[1 - \frac{0.018}{H / B} \right]^{1.5} \quad (2-7)$$

上式， $H / B = 0.02 \sim 0.52$ 。不過從 Humphreys et al.(1970)的實驗數據所繪製流量係數(C_o)與相對深度(H / B)的關係圖來看，雖然具有一定變化趨勢，惟數據間顯得頗為分散，如圖 2-6 所示。



資料來源：Humphreys et al., 1970

圖 2-6 方形豎井流量係數與相對深度之關係圖

三、滯洪設施出水口流量公式

出水口係控制農塘出流洪峰流量之首要設施，其作用原理是讓出流洪峰流量小於進流洪峰流量，達成遲滯洪水之目的。根據出水口形式可概分為孔口流、滯洪壩及比例堰等。

(一)孔口流

水由儲水設施薄壁上的孔口出流，稱為孔口流(orifice flow)；惟若側壁厚度約惟孔口直徑的 3-4 倍，相當於在薄壁孔口外接一段管長約 3-4 倍的短管，則稱之為管嘴出流(short tube flow)。包括取水孔、洩水孔及某些以孔口流原理設計的量測流量設施的出流，均屬孔口流或管嘴流。

孔口流(含管嘴出流)主要的關鍵是流量計算，其基本公式形式可表為

$$Q_e = C_d A_e \sqrt{2 g H_e} \quad (2-8)$$

式中， H_e =孔口中心至水面之高度； A_e =孔口斷面積； C_d =

流量係數，在不考量其下游水位淹沒之影響，孔口流流量與入口形狀和長度有關。

1.銳緣孔口流：按孔口形狀區分，主要包括圓形、方形及矩形等。

(1)圓形：如圖 2- (a)所示，孔口直徑與出流量之關係可表為

$$O_o = C_d \frac{\pi D_e^2}{4} \sqrt{2g(H_e - D_e/2)} \quad (2-9)$$

式中， D_e =孔口直徑； C_d =流量係數，取 0.6。

2.方形：如圖 2- (b)所示，孔口斷面與出流量之關係可表為

$$Q_o = C_d B_e^2 \sqrt{2g(H_e - B_e/2)} \quad (2-10)$$

式中， B_e =孔口寬度。

3.矩形：如圖 2- (c)所示，孔口斷面與出流量之關係可表為

$$Q_o = C_d B_c B_e \sqrt{2g(H_e - B_e/2)} \quad (2-11)$$

式中， B_c =孔口底寬； B_e =孔口高度。

4.管嘴孔口流：如 2-5(d)為圓柱形外伸管嘴上，通過水流流量可表為

$$Q_o = C_d \frac{\pi D_e^2}{4} \sqrt{2g(H_e - D_e/2)} \quad (2-12)$$

式中， C_d =流量係數，取 0.8。

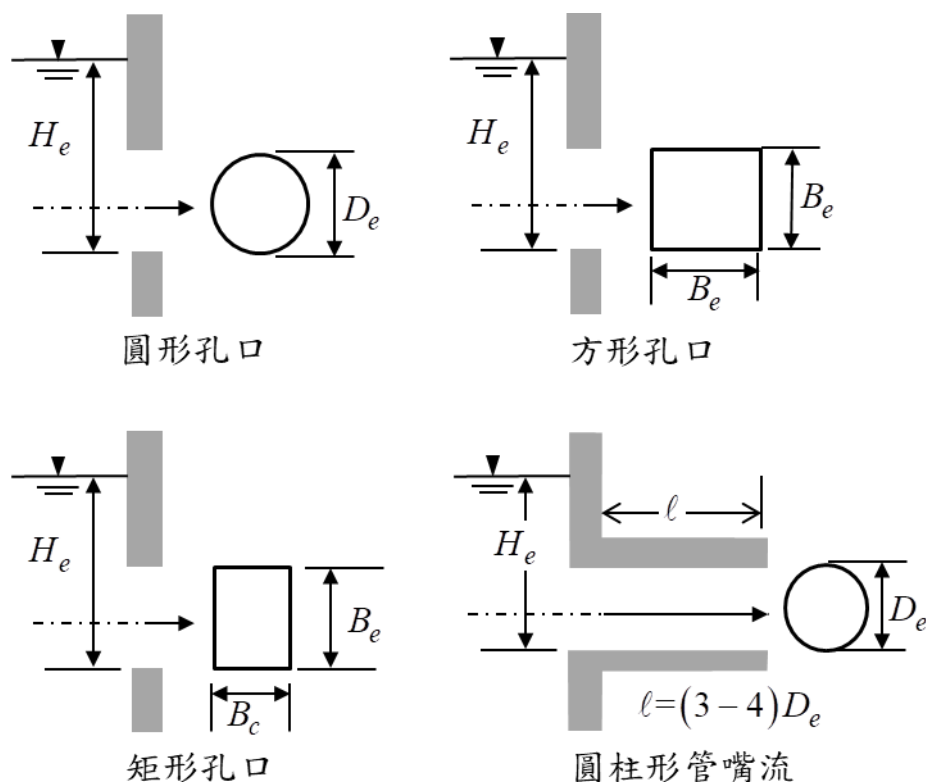


圖 2-7 孔口流出水口斷面示意圖

(二)滯洪壩(水土保持手冊，2017)

係指於懸臂式壩或重力式壩上留出長條狀之矩形切口，以作為滯洪出水口，如圖 2-所示。

1.重力式壩體：

$$Q = 2.09BH^{1.73} \quad (2-13)$$

式中， Q =流量(m^3/s)； B =開口寬度(m)； H =開口以上之水深(m)。上式適用於 $B/W=0.061\sim0.318$ (W =壩址平均寬度)，以及壩體下游面坡度 1：0.3，上游坡面坡度 1：0.5。

2. 懸臂式壩體：

$$Q = 2.36B^{1.13}H^{1.53} \quad (2-14)$$

上式適用條件： $S=5\%$ ；相對出流口寬度： $B/W=0.033\sim0.175$ 。

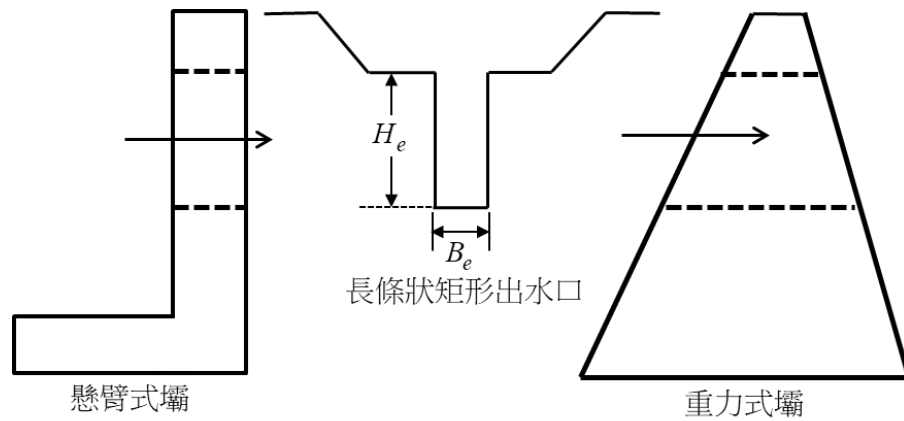


圖 2-8 滯洪壩示意圖

(三)比例堰(proportional weir)

此為出流量與水頭間呈非線性變化的一種堰，如資料來源：Sandvik, 1985

圖 2-所示。圖中，低流量時因有較大通水斷面，使水位上升較慢，得以保留更多的滯洪容積，以遲滯較大的洪水量。

比例堰流量公式可表為

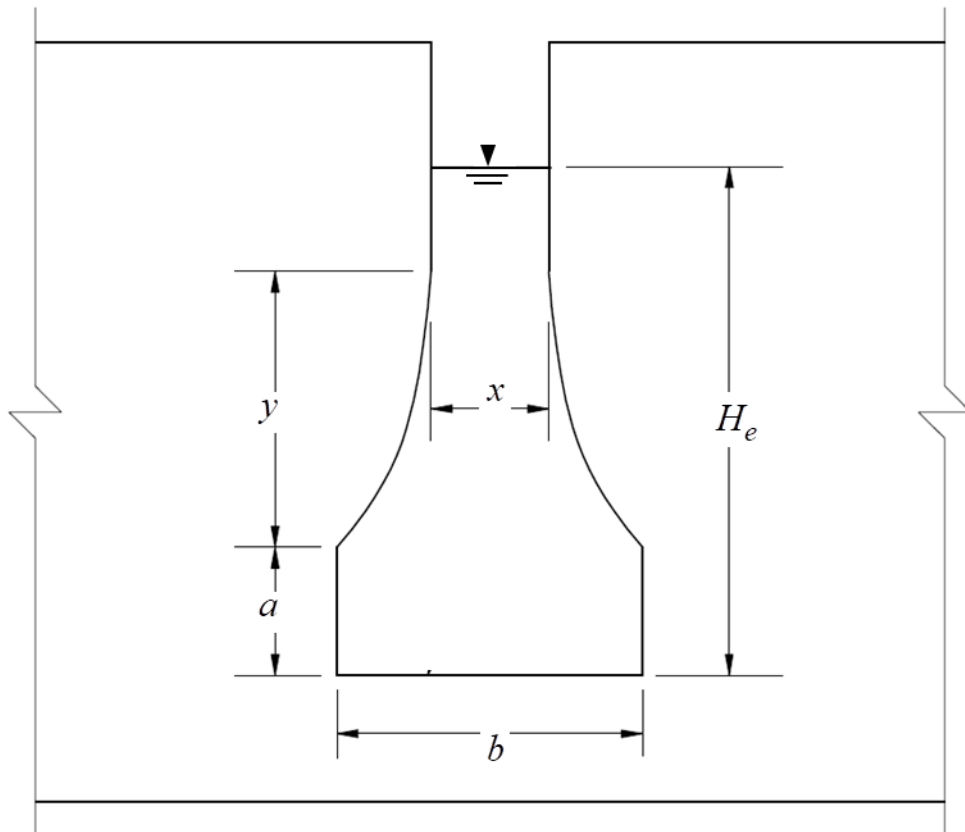
$$Q_o = 0.14a^{0.5}b \left(H_e - \frac{a}{3} \right) \quad (2-15)$$

$$\frac{x}{b} = 1 - 0.315 \tan^{-1} \left(\frac{y}{a} \right)^{0.5} \quad (2-16)$$

式中， a 、 b 、 x 及 y 為比例堰之相關尺寸，單位為 m，

如資料來源：Sandvik, 1985

圖 2-所示。



資料來源：Sandvik, 1985

圖 2-9 比例堰示意圖

四、緊急溢洪道形式流量公式

緊急溢洪道(口)係為防止進流洪峰流量超過設計標準值時，過量的洪流溢過壩頂而導致壩體潰決，故屬於一種風險控制之安全設施。依據作用原理可以作為緊急溢洪道(口)之設施類型，有堰流、明渠式溢洪道及豎井溢洪道等三種主要類型。

(一)堰流(weir flow)

水流受到垂直於水流流動方向之堰牆或兩側邊牆束窄阻礙時，在阻礙物的上游側形成水位壅高，水流經堰頂溢流下洩，其水面上緣不受任何約束而為連續的自由降落水面，稱之為堰流。

當亞臨界流遇有堰體，在堰體的上游面形成水位壅高，而經堰體流出的水流發生束縮及跌落的水流現象，其水力特

徵可以概括為以下幾點：

- 1.堰上游水流受阻，水位壅高，勢能增大。
- 2.在重力作用下，流經堰的水流產生自由跌落；同時，在離心慣性力作用下，水流斷面產生束縮。
- 3.整個堰流過程是勢能積聚並重新轉化為動能的過程。
- 4.亞臨界流在短距離內轉化為超臨界流，流線發生顯著彎曲，水流內部存在離心慣心力。
- 5.堰流中以局部水頭損失為主，很小的沿程水頭損失可以忽略不計。

由於堰流流量與其上游水流水頭有固定之關係，故堰常被視為渠道之一種控制構造物，同時亦可視為量測流量之一種裝置，其基本方程式可表為

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} \left[\left(H_1 + \frac{V_o^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_o^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad (2-17)$$

上式表明，過堰流量與堰上水頭的 $3/2$ 次方成正比。流量係數 C_d 值係反映水頭損失，並隨堰之幾何邊界條件而改變。上述分析方法及所得流量公式對銳緣堰，溢流堰和寬頂堰均適用，只是不同幾何形狀的堰，各有不同的流量係數值。

1.銳緣堰

銳緣堰 (sharp-crested weir) 溢流具有穩定的水頭與流量關係、製作簡單及使用方便等特點，故常被用於試驗室和野外的流量量測。通常，按堰口形狀之不同，銳緣堰可分為矩形、三角形和梯形等，其中三角形銳緣堰多用於量測較小的流量，而矩形和梯形則用於量測較大之流量，如圖 2-所示。根據水土保持手冊(2017)梯形銳緣堰流量公式

可表為

$$Q = 0.354(5b_o + 4ZH)H^{1.5} \quad (2-18)$$

式中， Q =過堰流量； b_o =溢洪口斷面頂寬(m)； Z =斜面斜率 $[\tan(\theta/2)]$ 。將上式展開可得

$$Q = 1.77b_oH^{1.5} + 1.416ZH^{2.5} \quad (2-19)$$

= 矩形斷面流量 + 三角形斷面流量

由上式得知，梯形銳緣堰流量等於矩形與三角形銳緣堰流量之和。

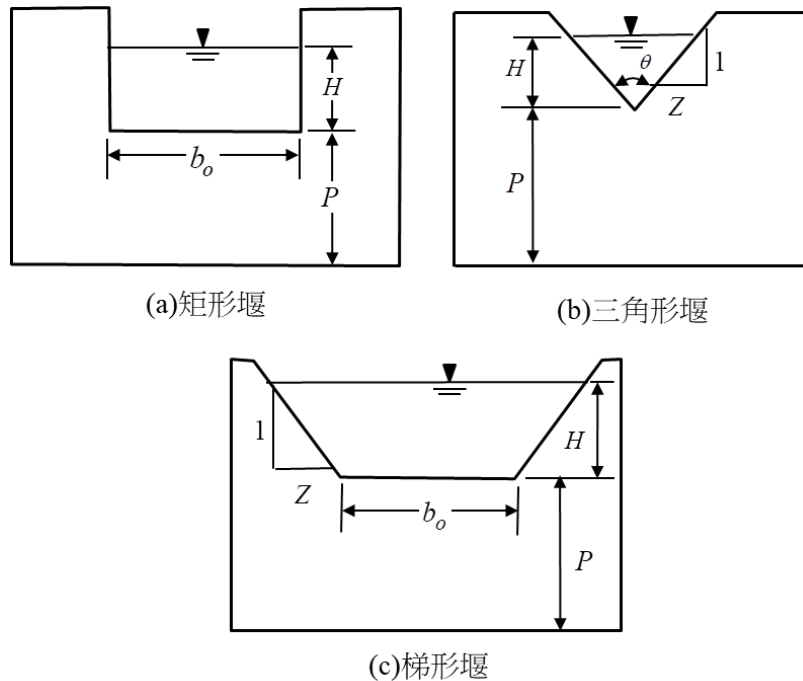


圖 2-10 各種形狀銳緣堰示意圖

2. 寬頂堰

自由溢流寬頂堰(broad-crested weir)，如圖 2-所示。水流經堰坎進口後，在堰上發生自由水面跌落現象。這是因為水流在垂直方向受到堰坎邊界的約束，堰頂上的過流斷面小於堰前渠道斷面，故堰頂上水流速度增加，動能增大；同時堰坎前後將產生局部水頭損失。因此，堰頂上的水流

勢能必然減小。水面在收縮斷面 $c'-c'$ 處發生最大跌落，該處水深 $y_{co} < y_c$ 。此後，堰頂水流保持急流狀態，並在出口後產生第二次水面跌落。

在實用上，寬頂堰流量公式可表為

$$O = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad (2-20)$$

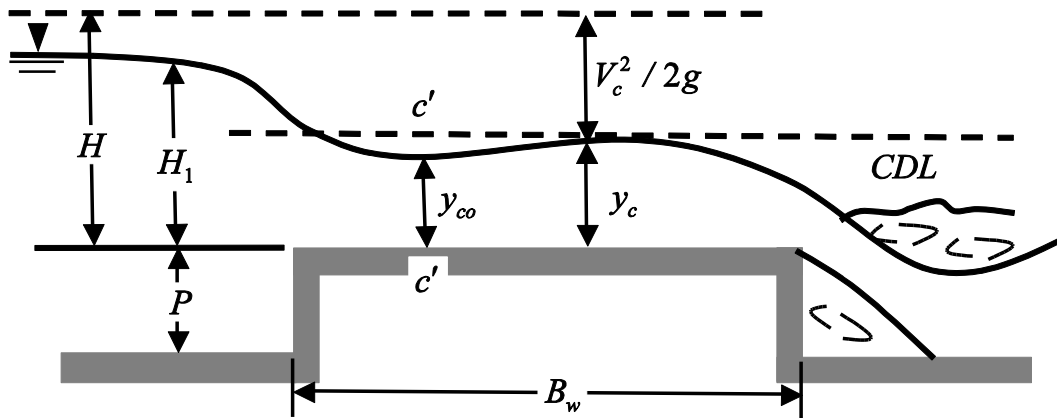


圖 2-11 寬頂堰示意圖

(1) 寬頂堰類型

基於水流通過寬頂堰上方之水深與堰體長度之比值 (H_1 / B_w)，可以將寬頂堰區分為以下四種類型，如圖 2-所示，包括：(連惠邦，2019)

A. $H / B_w > 1.5$

當水流行近堰牆時，由於受堰牆阻擋，底部水流向上收縮，水面逐漸下降，使過堰水流形如舌狀，謂之水舌 (nappe)。當堰頂厚度 δ 很薄時，堰頂水舌之下緣向上彎曲。根據實驗顯示，堰牆相對厚度為 $H / B_w > 1.5$ 時，堰頂厚度之變化不致影響水舌形狀，因而不影響堰之過流能力，這種堰稱為銳緣堰，如圖 2- (a) 所示。

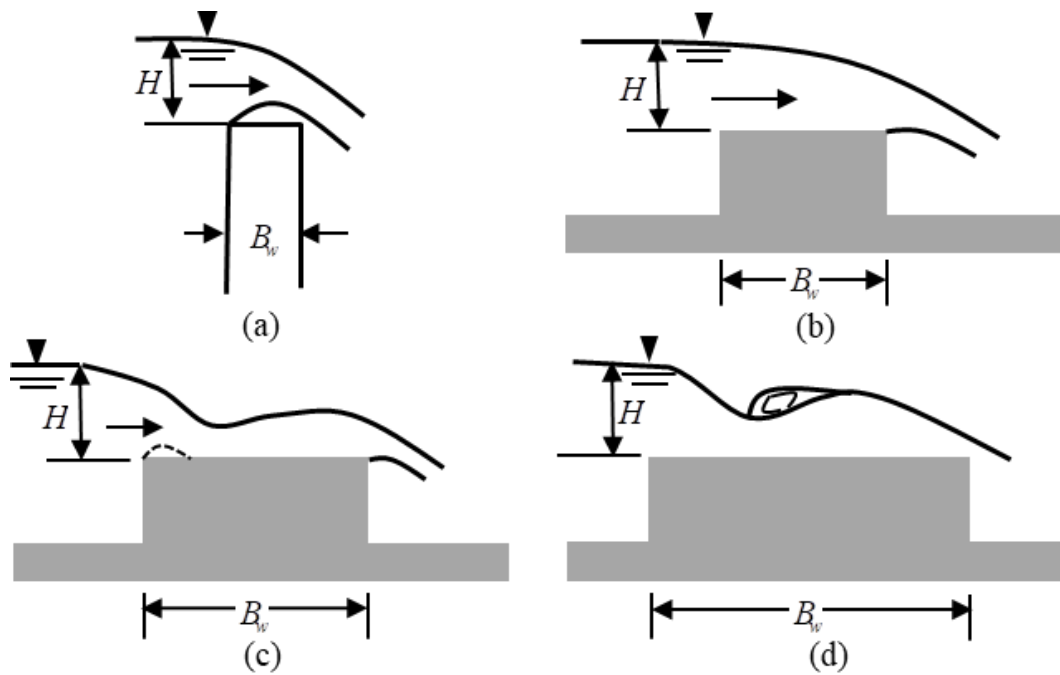


圖 2-12 以堰牆相對厚度區分堰流類型

B. $0.35 < H / B_w \leq 1.5$

當堰牆稍厚，堰牆相對厚度為 $0.35 < H / B_w \leq 1.5$ ，稱為溢流堰 (overflow spillway)。這種堰雖然具有如銳緣堰水流表面類似得彎曲形狀，惟因堰頂加厚，水舌下緣與堰頂呈面之接觸，而受有一定程度的約束和頂托，從而影響其過流能力。為了使堰頂形狀與銳緣堰之水蛇下緣形狀相吻合，以減少堰頂對水流之阻力和增加堰之過流能力，如圖 2-(b) 為曲線溢流堰 (curve profile weir)。

C. $0.1 < H / B_w \leq 0.35$

當堰牆厚度較大，堰牆相對厚度為 $0.1 < H / B_w \leq 0.35$ ，稱為寬頂堰 (broad-crested weir)，如圖 2-(c) 所示。當水流進入堰頂，受到堰頂垂直方向的約束，通水斷面漸小，流速加大，

由於動能增加，勢能必然減小；再加上水流進入堰頂時產生局部能量的損失，使進口處水面發生跌落。之後，由於堰頂對水流的頂托作用，有一段水面與堰頂發生成近似平行的流動。當下游水位較低時，出堰水流又產生第二次水面跌落。

$$D. H / B_w \leq 0.1$$

如果堰坎厚度繼續增加，達到 $H / B_w \leq 0.1$ 時，沿程水頭損失已經不能略去，水流特性不再屬於堰流，而是明渠水流，如圖 2- (d) 所示。

(2)流量係數

因影響流量係數之因素較為複雜，在實用上均採用經驗公式計算。例如，Govinda 及 Muralidhar 於 $0.1 \leq H / B_w \leq 2.0$ 及 $0 \leq H / P \leq 1.0$ 等條件下進行實驗，並獲得如下流量係數公式，包括：

$$A. H / B_w \leq 0.1$$

$$C_d = 0.561 \left(\frac{H}{B_w} \right)^{0.022} \quad (2-21)$$

$$B. 0.1 < H / B_w \leq 0.35$$

$$C_d = 0.028 \frac{H}{B_w} + 0.521 \quad (2-22)$$

$$C. 0.35 < H / B_w \leq 1.5$$

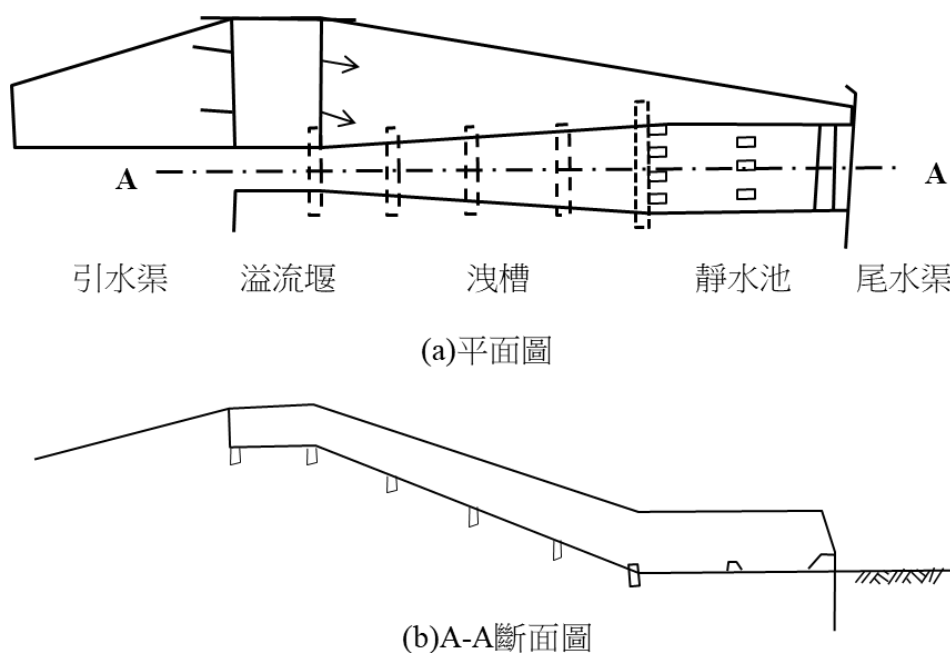
$$C_d = 0.120 \frac{H}{B_w} + 0.492 \quad (2-23)$$

(二)明渠式溢洪道

明渠式溢流道係指通過溢流堰的水流與溢洪道洩槽的軸線

方向一致者，此為應用最普遍的溢洪道型式，如資料來源：水土保持手冊，2017

圖 2-1 所示。圖中，明渠式溢流道係由引水渠、溢流堰、泄槽、靜水池及尾水渠等所組成。其中，溢流堰通常採用寬頂堰或臥箕式溢流堰(Ogee overflow weir)，前者是結構簡單，施工方便，但流量係數較低，適用於中小型工程，而後者的優點是流量係數較寬頂堰大，但施工複雜。



資料來源：水土保持手冊，2017

圖 2-1 明渠式溢洪道示意圖

寬頂堰流量公式已如前述，故本節則以臥箕式溢流堰流量公式為主。臥箕式溢流堰是水利工程中最常見的堰型之一，如圖 2-2(a) 所示。一般，臥箕式溢流堰堰頂及其下游剖面係按銳緣堰下緣水舌型態製成適合水流情況的曲線形，故亦稱之為曲線形溢流堰，如圖 2-2(b) 所示。溢流堰的流量公式，可按分析寬頂堰的方法得出和式(2-20)相同的形式，即

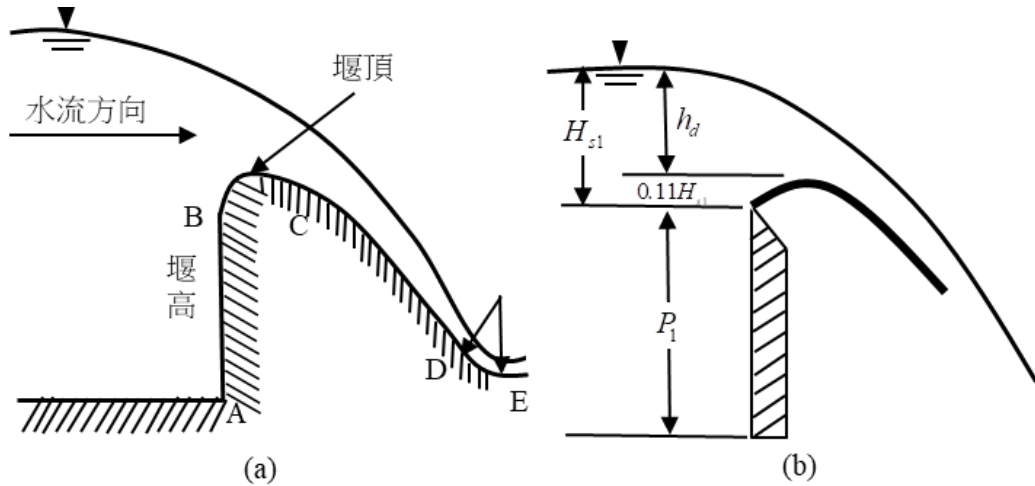


圖 2-2 溢流堰示意圖

$$q = \frac{2}{3} C_{d1} \sqrt{2g} h_d^{3/2} \quad (2-24)$$

式中， C_{d1} = 溢流堰流量係數。根據實驗分析，影響溢流堰過流能力主要有兩個方面：一是溢流堰的幾何邊界條件，包括堰剖面形狀和堰高 P 等；另一是堰流的水力要素，包括堰上水頭 h_d 和下游水深等。

四十年代以來，美國陸軍工程兵團研究成功的 WES (Waterways Experiment Station) 剖面堰，在世界各地得到了廣泛的採用。WES 剖面堰具有流量係數稍大、堰（壩）體剖面較瘦、工程量較省、堰面負壓也較小（ $H_{s1}/h_d \leq 1.0$ 時，堰面無負壓）、對穩定安全較有利等優點；另外，堰的剖面可以直接由曲線方程控制，設計施工比較方便。

第三章 室內試驗

第一節 試驗目的

本試驗係利用自行設計之設施從事內室驗工作，其主要目的有三：
(1)建立方形豎井溢洪道溢流量及其水深之關係式；(2)矩形出水口排洪量與水深之關係式；及(3)方形豎井溢洪道與矩形出水口共構下，溢流量及其溢流水深之關係式。

第二節 試驗裝置與條件

本研究室內試驗係於逢甲大學水土環境實驗室內採用自行設計之試驗裝置進行相關試驗。

一、試驗裝置

本試驗主要是由3.0mm的壓克力板所製成，如圖3-1所示。圖中，試驗裝置係由蓄水池、可更換式方形豎井、可調式定水頭溢流堰、豎井溢流水深量測台架、進水口及出流口等所組成。其中，可調式訂水溢流堰為控制蓄水池內維持固定水位之裝置，亦即其作用在於控制豎井溢流水深。

二、試驗裝置各部尺寸

為配合各種試驗條件之需求，本裝置應配置幾種方形豎井入口斷面及豎井側面上出水口之尺寸，如表3-1所示。其中，方形豎井及其側面出水口，如圖3-2所示。

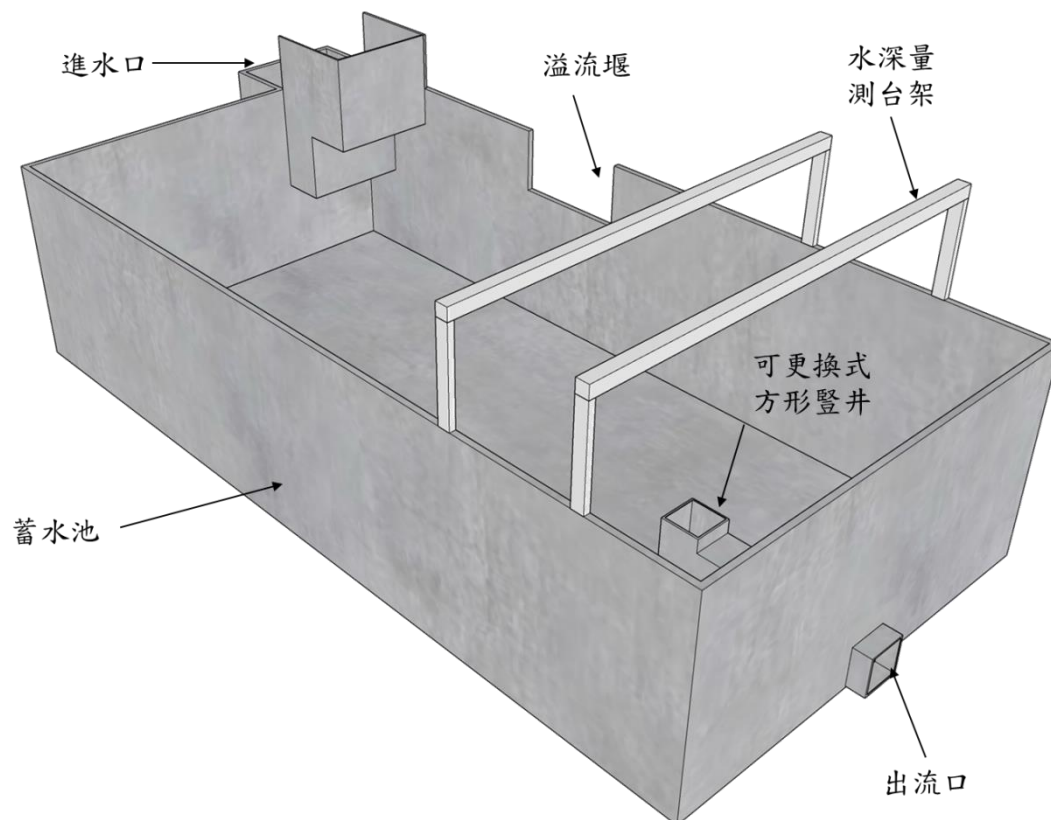


圖 3-1 室內試驗裝置三維示意圖

表 3-1 各部尺寸一覽表

蓄水池(cm)	長：144；寬：72；高：36	
方形豎井斷面(cm)	2.0；4.0；6.0	
方形豎井高度(cm)	11	
出水口($b \times h$)(cm)	豎井斷面 2.0cm	1.0×7；1.2×7；1.4×7
	豎井斷面 4.0 cm	2.0×7；2.4×7；2.8×7
	豎井斷面 6.0 cm	3.0×7；3.5×7；4.0×7
方形臥管斷面(cm)	6.0	

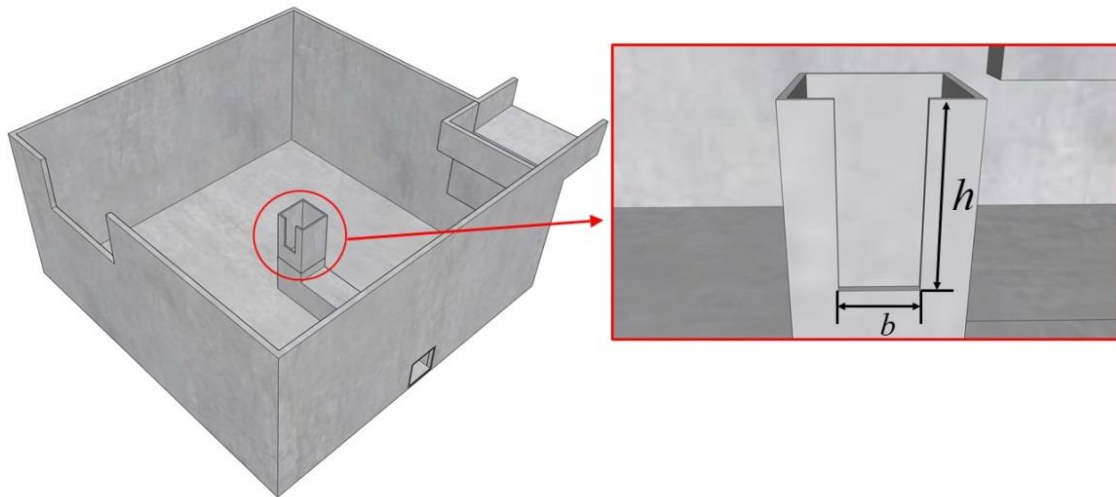


圖 3-2 矩形出水口流量公式試驗

三、試驗項目

根據本研究之目的，室內試驗項目包括：

(一) 方形豎井溢洪道流量公式試驗

本項試驗係在蓄水池(或農塘)水位超過豎井溢洪道頂部之條件下，建立自方形豎井溢洪道所排出之流量公式，在實務上屬於緊急溢洪流量估算。本項試驗相變數包括方形豎井溢洪道三種斷面尺寸及其相應之溢流水深(水頭高度)，如圖 3-3(a)所示。

(二) 矩形出水口流量公式試驗

由於方形豎井溢洪道側面所切出的矩形出水口(參見圖 3-2)，其作用在於遲滯洪水之用，故必須建立一水深與流量之關係式，以為滯洪設計之使用，相當重要。因此，本項試驗變數包括九種出水口斷面尺寸(參考表 3-1)及其溢流水深，如圖 3-3(b)所示。

(三) 方形豎井溢洪道與矩形出水口共構下之排洪量公式試驗

方形豎井溢洪道側面具有矩形出水口係農塘出流控制的

必要設施，其中矩形出水口作為遲滯洪水之用，而豎井溢洪道則具有緊急溢洪功能。因此，本項試驗即在農塘處於滿水位的條件下，模擬水流自矩形出水口排出，並逐漸增加水位，直到水流從方形豎井頂部溢出的全部過程。其相關試驗變數包括三種方形豎井溢洪道斷面(含九種矩形出水口)排洪量與其溢流水深(含高出豎井者)，如圖 3-3(c)所示。

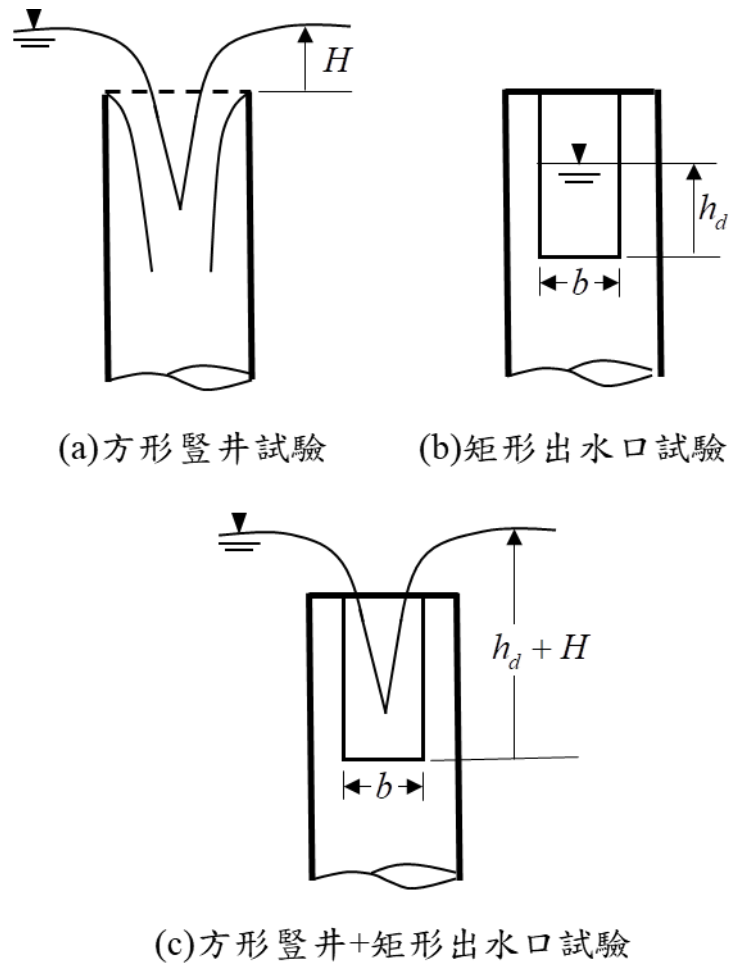


圖 3-3 本研究各項試驗項目示意圖

四、試驗流程

根據前述試驗條件，可以架構本研究之試驗流程，如

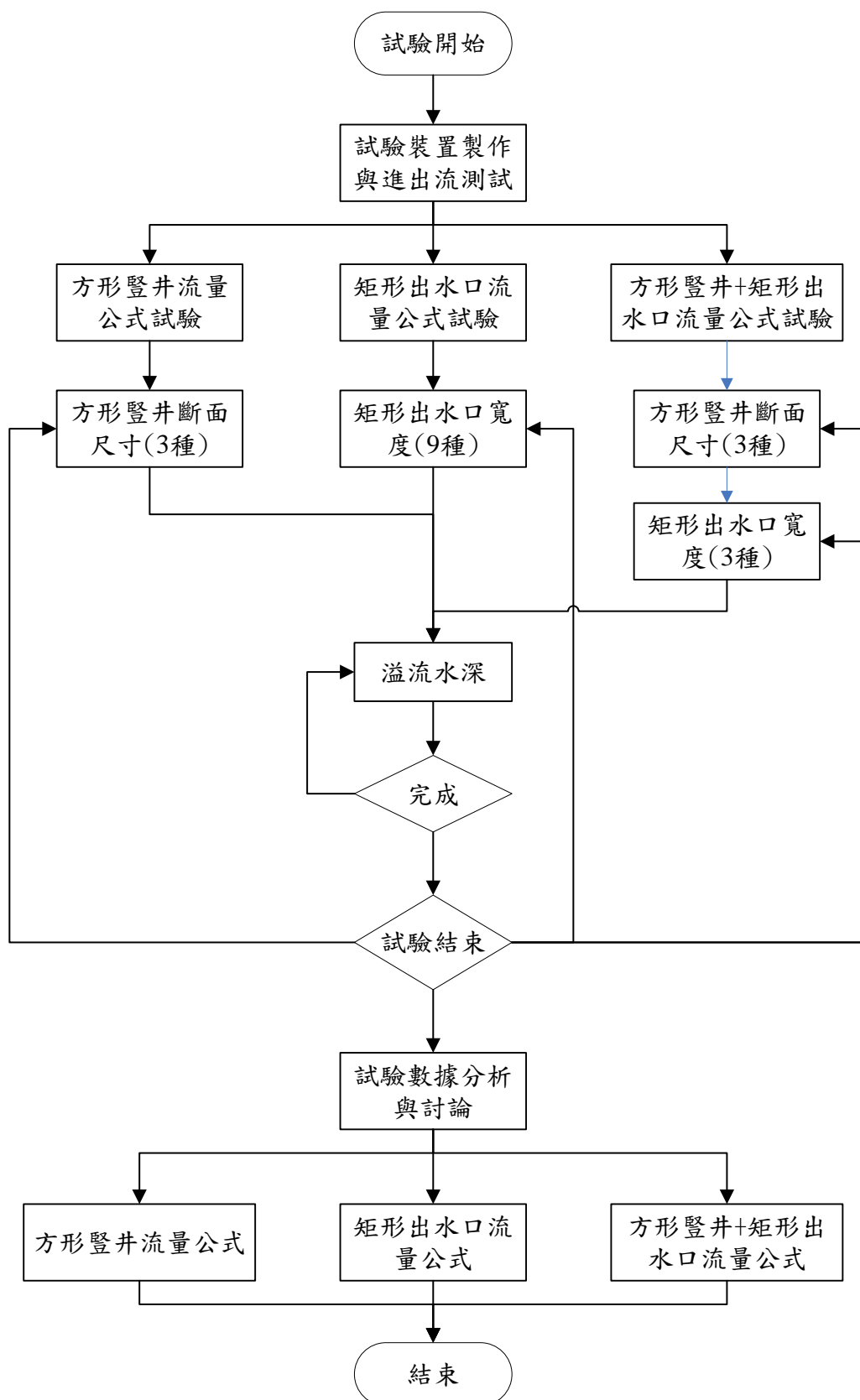


圖3-所示。

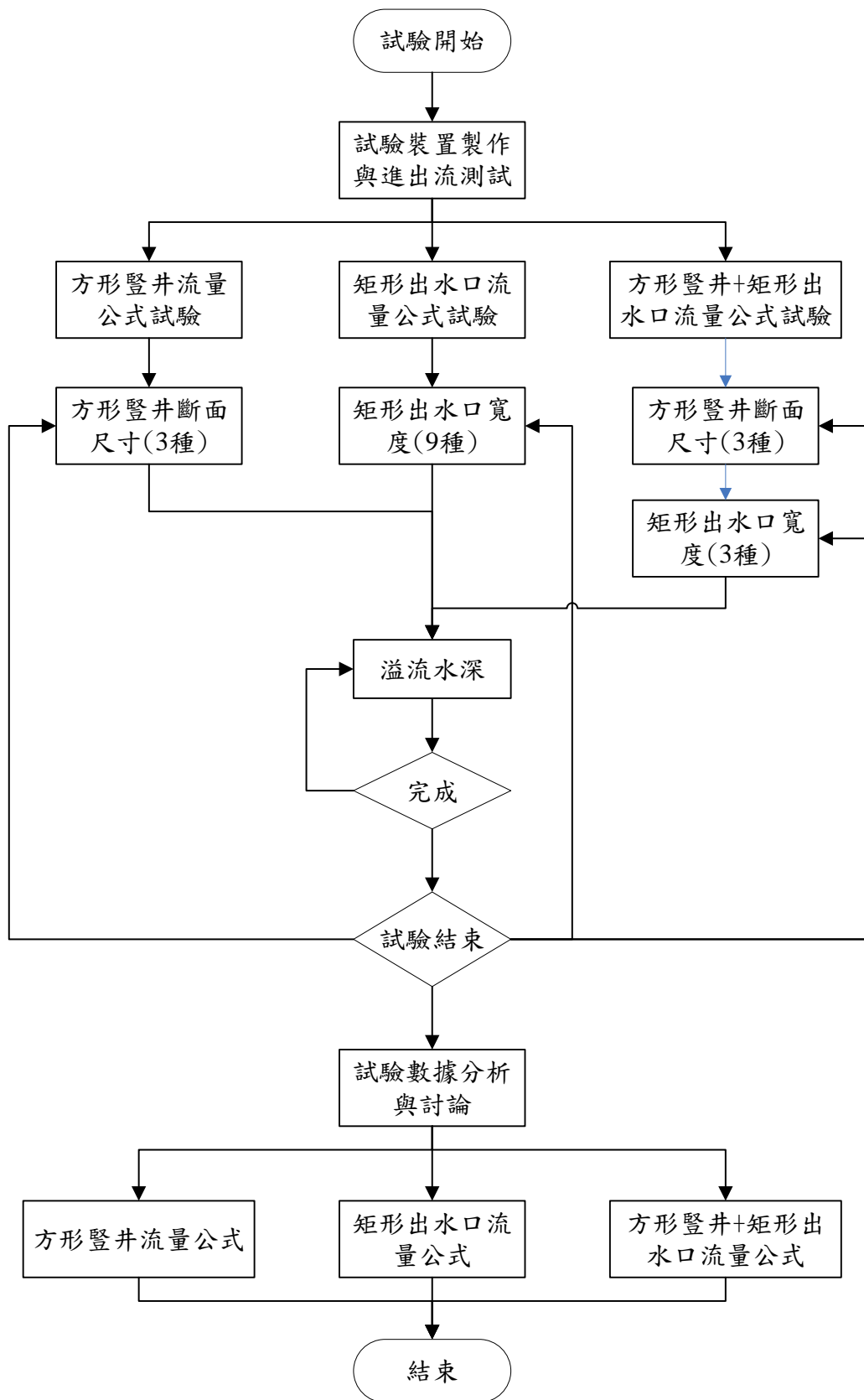


圖 3-4 研究試驗流程圖

五、試驗量測及照片

本研究主要目的在於建立方形豎井矩形出水口及兩者共構時排洪量與溢流水深之關係，故試驗量測應以流量與溢流水深為主要。

(一)流量量測

流量係指單位時間通過某已知斷面之水體積，其單位常以 m^3/s (cms) 或 cm^3/s 計。流量量測方法頗多，對於流量較小的室內實驗，可以採用直接量測法(direct measure method)；它是由一已知容積的容器承接水流，記錄其經過時間，由容器中水的容量除以時間，即為該時間內的平均流量，如圖 3-5 所示。圖中，本計畫係採用長=50cm：、寬=35cm：及高=28cm 之 45 公升塑膠桶，置於出流口正下方，直接承接由豎井溢流出的水體，原則上每組試驗均量測蓄滿塑膠桶(水體積已知)時之所需時間(t)，這樣就可以獲得該組試驗的流量，即

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3-1)$$

式中， Q =流量； V =塑膠桶容積或蓄滿塑膠桶之水體積； t =蓄滿塑膠桶所需時間。



圖 3-5 流量量測裝置

(二)溢流水深量測

本研究所指溢流水深依據試驗項目而略有差異，如圖 3-3 所示。圖中， H 係指自方形豎井頂部以上之溢流水深，而 h_d 則為自矩形出水口之溢流水深。

溢流水深係採用探針式水深計進行量測，如圖 3-6 所示。圖中，探針式水深計係由支架、游標尺(精度為 0.05 mm)及探針等所組成。量測前，先將水深計水平固定於蓄水池上方支架上，接著測定水深基準面(即 0 點位置)，其中水深 H 之基準面為豎井頂部，而水深 h_d 之基準面為出水口底部，並分別將探針固定於豎井寬度(B)的中點及距離出水口 0.5mm 作為水深量測位置，當水流溢流且達穩定時，則開始量測其相應水深。












圖 3-6 探針式水位量測裝置

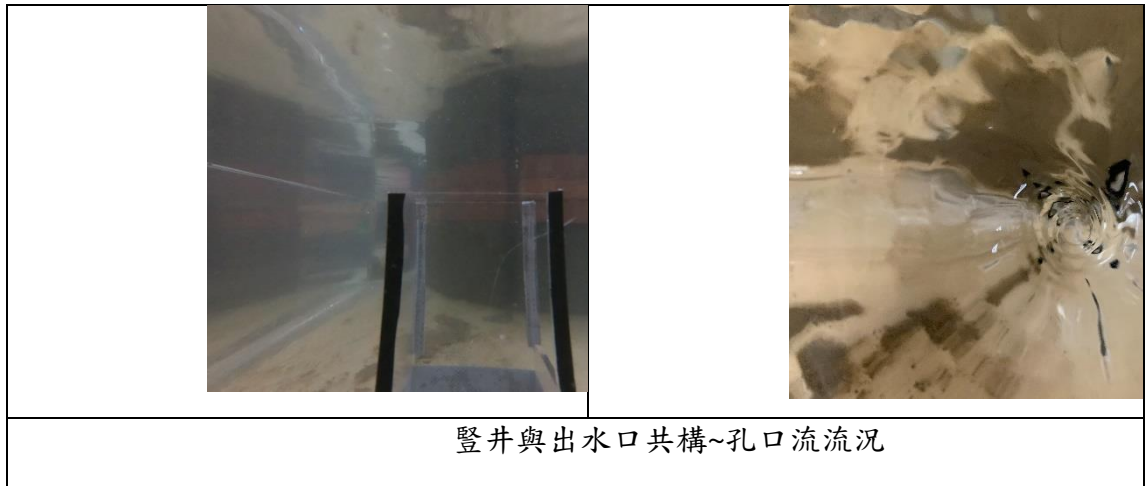
(三) 試驗照片

經由上述試驗流程，本研究已完成所有試驗工作，如表 3-2 為各項試驗現況照片彙整。

表 3-2 試驗照片彙整

	
豎井溢洪~堰流流況	
	
豎井溢洪~堰流與孔口流過渡流況	
	
豎井溢洪~孔口流流況	

	
<p>矩形出水口</p>	
	
<p>豎井與出水口共構~堰流流況</p>	
	
<p>豎井與出水口共構~堰流與孔口流過渡流況</p>	



第四章 分析與討論

第一節 試驗數據

根據室內試驗流程，本研究業已完成所有試驗工作，其相關數據經彙整如表 4-1～表 4-3 所示。表中，本研究合計進行 210 組試驗。

第二節 方形豎井溢洪道溢流量公式分析

在不設置矩形出水口的情況下，應用試驗相關數據建立方形豎井之流量公式。

一、試驗數據分析

依據各項試驗結果，本研究分別就豎井溢洪道溢流量及出水口流量進行分析說明。

(一) 方形豎井溢洪道溢流量與溢流水深之關係

1. 斷面 2cm×2cm 方形豎井溢洪道

根據表 4-1 相關數據繪於垂直座標上，如圖 4-1 所示。

圖中，當溢流水深與豎井寬度比 $H/B > 0.9 \sim 1.0$ 時，豎井溢流量隨著溢流水深之上升斜率突然趨緩，表明當 $H/B > 0.9 \sim 1.0$ 時，水流轉換成為孔口流，洩洪效率降低。

2. 4cm×4cm 方形豎井溢洪道

根據表 4-1 相關數據繪於垂直座標上，如圖 4-2 所示。

圖中，當溢流水深與豎井寬度比 $H/B > 1.0$ 時，方形豎井溢洪道溢流量隨著溢流水深略有趨緩，表明當 $H/B > 1.0$ 時，水流轉換成為孔口流，洩洪效率降低。

表 4-1 方形豎井溢洪道試驗數據表

2cm×2cm			4cm×4cm			6cm×6cm		
溢流水深(H)	H/B	流量(Q)	溢流水深(H)	H/B	流量(Q)	溢流水深(H)	H/B	流量(Q)
0.87	0.44	56	0.8	0.2	280	0.9	0.15	390
0.91	0.46	85	1.5	0.38	798	1.32	0.22	900
1.21	0.61	133	2.3	0.58	960	1.51	0.25	1,213
1.63	0.82	166	3.86	0.97	1,229	1.97	0.33	1,703
1.77	0.89	180	4.95	1.24	1,616	3.42	0.57	2,411
2.44	1.22	258	5.93	1.48	1,755	3.8	0.63	2,674
3.56	1.78	290	6.91	1.73	1,943	5.68	0.95	3,162
5.19	2.6	571	7.74	1.94	2,784	6.93	1.16	3,553
5.96	2.98	601	8.88	2.22	2,901	8.71	1.45	3,889
7.44	3.72	635	9.82	2.46	2,914	10.89	1.82	4,453
8.13	4.07	652	10.91	2.73	2,935	12.02	2	4,727
9.96	4.98	692	11.91	2.98	3,020	13.39	2.23	4,917
-	-	-	12.87	3.22	3,148	14.32	2.39	5,034
-	-	-	13.82	3.46	3,197	-	-	-
-	-	-	14.66	3.67	3,226	-	-	-

表 4-2 矩形出水口試驗數據表

2cm×2cm				4cm×4cm				6cm×6cm			
溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)	溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)	溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)
0.81	1.0	0.81	14	1.24	2.0	0.62	90	1.22	3.0	0.41	122
1.74	1.0	1.74	57	2.15	2.0	1.08	114	2.4	3.0	0.8	316
2.68	1.0	2.68	119	2.94	2.0	1.47	190	3.31	3.0	1.1	475
3.79	1.0	3.79	225	3.56	2.0	1.78	250	4.53	3.0	1.51	644
4.95	1.0	4.95	336	5.06	2.0	2.53	477	5.41	3.0	1.8	824
5.99	1.0	5.99	387	6.32	2.0	3.16	648	6.51	3.0	2.17	989
0.87	1.2	0.73	27	1.3	2.5	0.52	71	1.38	3.5	0.39	128
1.44	1.2	1.2	50	2.67	2.5	1.07	294	2.56	3.5	0.73	343
2.46	1.2	2.05	105	3.85	2.5	1.54	356	3.39	3.5	0.97	478
3.45	1.2	2.88	183	4.91	2.5	1.96	503	4.38	3.5	1.25	652
4.78	1.2	3.98	349	5.6	2.5	2.24	632	5.67	3.5	1.62	953
5.66	1.2	4.72	396	6.8	2.5	2.72	852	6.47	3.5	1.85	1,156
6.63	1.2	5.53	420	1.13	3.0	0.38	71	1.21	4.0	0.3	165
0.33	1.5	0.22	9	2.4	3.0	0.8	193	2.02	4.0	0.51	306
1.71	1.5	1.14	66	3.55	3.0	1.18	351	3.11	4.0	0.78	461

2cm×2cm				4cm×4cm				6cm×6cm			
溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)	溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)	溢流水深 (h)	出水 口寬 (b)	h/b	流量(Q)
2.51	1.5	1.67	141	4.96	3.0	1.65	569	3.99	4.0	1	721
3.82	1.5	2.55	323	5.62	3.0	1.87	692	4.4	4.0	1.1	824
4.86	1.5	3.24	369	6.84	3.0	2.28	910	5	4.0	1.25	944
6.62	1.5	4.41	446	-	-	-	-	6.18	4.0	1.55	1,284

表 4-3 方形豎井溢洪道與矩形出水口共構試驗數據表

2cm×2cm				4cm×4cm				6cm×6cm			
溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)
0.77	1	0.385	446	0.44	2.0	0.11	874	1.51	3.0	0.25	2,071
1.32	1	0.660	476	0.9	2.0	0.23	1,172	2.1	3.0	0.35	3,197
1.58	1	0.790	480	1.51	2.0	0.38	1,421	2.47	3.0	0.41	3,395
2.84	1	1.420	502	3.66	2.0	0.91	1,625	2.99	3.0	0.5	3,574
3.2	1	1.600	507	4.9	2.0	1.23	1,957	4.18	3.0	0.7	3,952
4.54	1	2.270	535	6.01	2.0	1.5	2,133	5.1	3.0	0.85	4,032
5.58	1	2.790	551	6.92	2.0	1.73	2,256	6.31	3.0	1.05	4,125
6.5	1	3.250	565	8.69	2.0	2.17	2,406	7.66	3.0	1.28	4,212
7.51	1	3.755	582	9.78	2.0	2.45	2,534	8.4	3.0	1.4	4,331
0.22	1.2	0.110	431	10.1	2.0	2.53	2,609	9.37	3.0	1.56	4,448
0.32	1.2	0.160	444	10.35	2.0	2.59	2,762	10.85	3.0	1.81	4,660
0.72	1.2	0.360	463	0.67	2.5	0.17	1,324	11.85	3.0	1.98	4,784
0.96	1.2	0.480	468	0.79	2.5	0.2	1,446	12.26	3.0	2.04	4,907
1.6	1.2	0.800	479	1.65	2.5	0.41	1,788	13.34	3.0	2.22	4,996
2.34	1.2	1.170	498	2.66	2.5	0.67	1,965	0.76	3.5	0.13	1,920

2cm×2cm				4cm×4cm				6cm×6cm			
溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)
2.44	1.2	1.220	505	3.67	2.5	0.92	2,028	1.12	3.5	0.19	2,060
2.67	1.2	1.335	509	4.45	2.5	1.11	2,128	1.36	3.5	0.23	2,207
3.74	1.2	1.870	521	5.67	2.5	1.42	2,157	2.03	3.5	0.34	3,213
3.91	1.2	1.955	533	6.68	2.5	1.67	2,250	3.68	3.5	0.61	3,619
5.77	1.2	2.885	569	7.66	2.5	1.92	2,370	4.78	3.5	0.8	3,799
6.72	1.2	3.360	582	8.67	2.5	2.17	2,585	6.4	3.5	1.07	4,043
0.16	1.4	0.080	473	9.77	2.5	2.44	2,694	7.76	3.5	1.29	4,232
0.63	1.4	0.315	495	10.6	2.5	2.65	2,858	8.7	3.5	1.45	4,359
0.89	1.4	0.445	508	11.69	2.5	2.92	3,100	9.71	3.5	1.62	4,453
1.58	1.4	0.790	517	12.21	2.5	3.05	3,171	10.78	3.5	1.8	4,575
2.12	1.4	1.060	526	13.68	2.5	3.42	3,237	11.64	3.5	1.94	4,779
2.48	1.4	1.240	532	0.73	3.0	0.18	1,161	12.67	3.5	2.11	4,954
2.99	1.4	1.495	539	1.72	3.0	0.43	1,909	13.59	3.5	2.27	5,043
3.75	1.4	1.875	547	2.64	3.0	0.66	1,991	0.45	4.0	0.08	1,707
5.27	1.4	2.635	560	3.59	3.0	0.9	2,028	0.66	4.0	0.11	1,899
7.54	1.4	3.770	585	4.74	3.0	1.19	2,130	1.22	4.0	0.2	2,573

2cm×2cm				4cm×4cm				6cm×6cm			
溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)	溢流水深 (H)	出水 口寬 (b)	H/B	流量(Q)
-	-	-	-	5.63	3.0	1.41	2,263	2.95	4.0	0.49	3,947
-	-	-	-	6.68	3.0	1.67	2,352	4.03	4.0	0.67	4,028
-	-	-	-	7.71	3.0	1.93	2,401	5.3	4.0	0.88	4,142
-	-	-	-	8.69	3.0	2.17	2,557	6.99	4.0	1.17	4,450
-	-	-	-	9.75	3.0	2.44	2,676	8.57	4.0	1.43	4,797
-	-	-	-	10.64	3.0	2.66	2,805	9.11	4.0	1.52	4,929
-	-	-	-	11.63	3.0	2.91	3,144	10.56	4.0	1.76	5,106
-	-	-	-	12.63	3.0	3.16	3,260	11.39	4.0	1.9	5,247
-	-	-	-	13.71	3.0	3.43	3,362	12.27	4.0	2.05	5,412
-	-	-	-	-	-	-	-	13.6	4.0	2.27	5,580
-	-	-	-	-	-	-	-	14.42	4.0	2.4	5,757

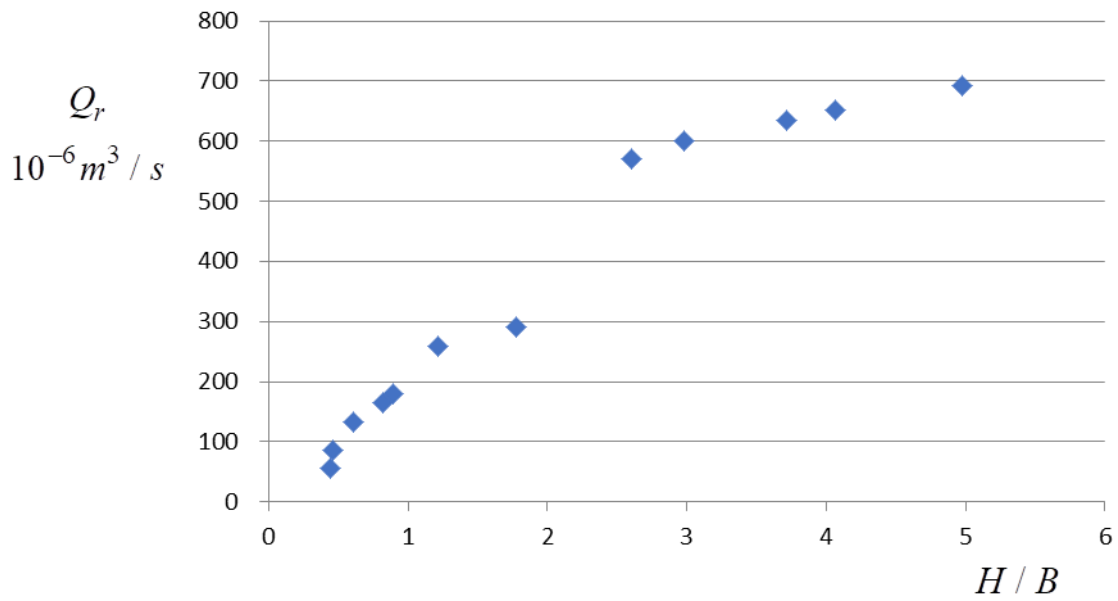


圖 4-1 斷面 2cm×2cm 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖

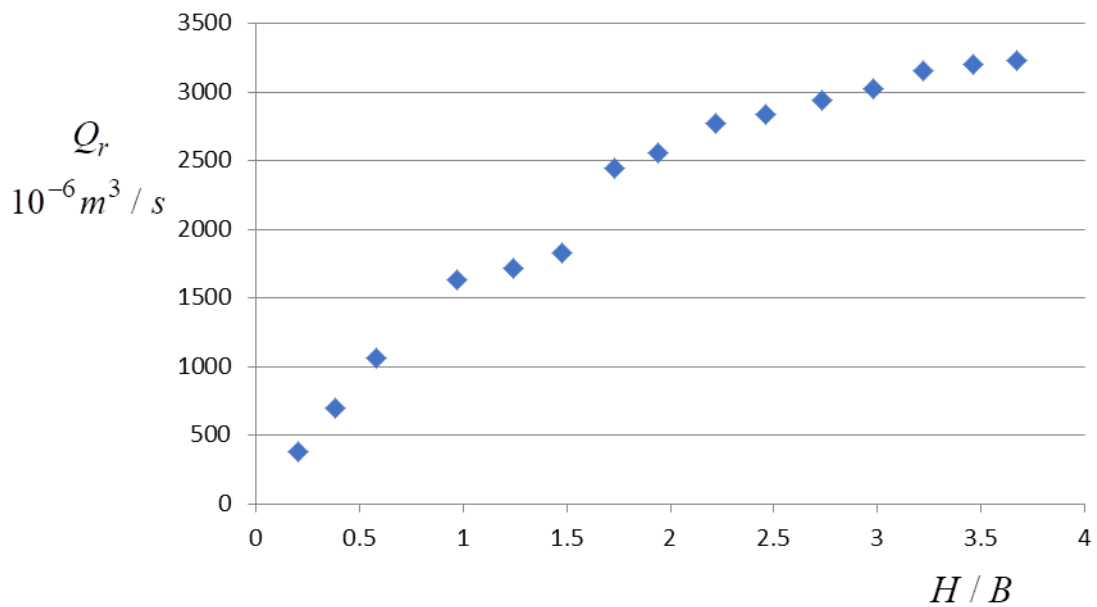


圖 4-2 斷面 4cm×4cm 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖

3. 斷面 6cm×6cm 方形豎井溢洪道

根據表 3-1 相關數據繪於垂直座標上，如圖 4-3 所示。圖中，整體趨勢與斷面 4cm×4cm 方形豎井溢洪道溢流量與溢流水深關係相當略似，只是當溢流水深與豎井寬度比 $H/B=1.0$ 時，其溢流量與溢流水深之關係似乎不同，呈

現兩種不同變化趨勢和規律。

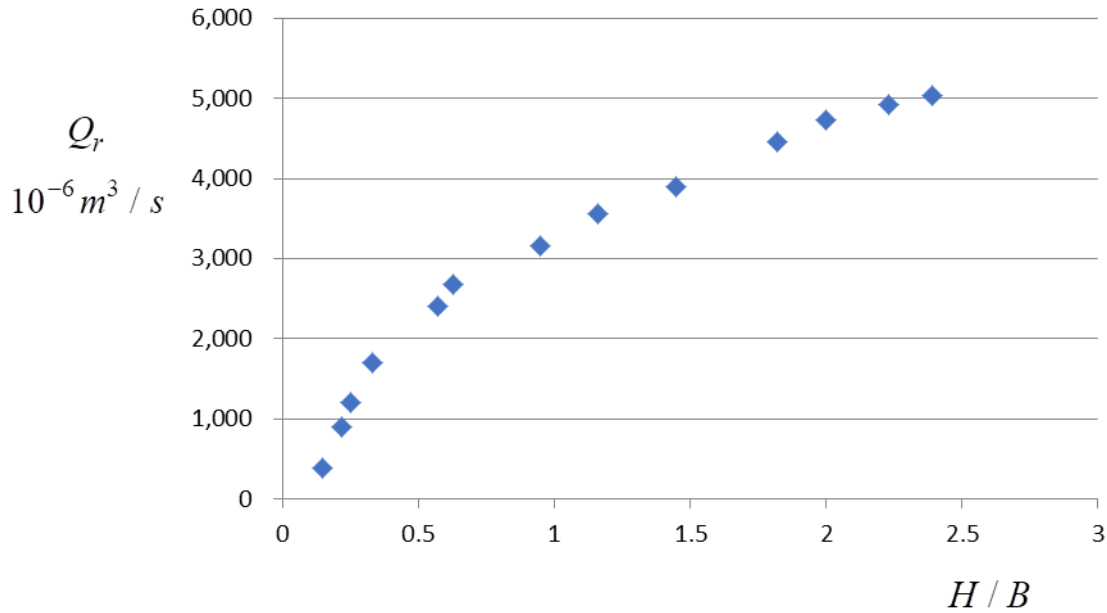


圖 4-3 斷面 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 方形豎井溢流量與溢流水深之關係圖

二、溢流量公式建立

根據相關數據分析結果顯示，方形豎井溢洪道溢流量的變化規律，隨著溢流水深之增加，而有呈現出不同的變化趨勢。當溢流水深與豎井寬度比小於 0.9 時，溢流量隨著溢流水深的增加呈現快速地提高；反之，當溢流水深與豎井寬度比大於 0.9 時，則溢流量隨著溢流水深上升的增加幅度略有降低。這表徵，方形豎井溢流量從初期的堰流流況，隨著溢流水深的增加，而轉變為孔口流流況，這也可以從表 3-2 試驗實況獲得證實。因此，本計畫參考前人研究成果及試驗數據的變化趨勢，運用表 4-1 之試驗數據通過回歸分析分別獲得：

(一) 當 $H/B \leq 0.9$ 時，屬於堰流流況，故溢流量可表為

$$Q_r = 152 \left(1 - \frac{H}{B} \right) B H^{1.5} \quad (4.1)$$

式中， Q_r = 方形豎井溢洪道量 (cms)； H = 溢流水深 (m)； B = 方形豎井寬度 (m)； $H/B = 0.15 \sim 0.9$ 。上式相關係數達

$r^2 = 0.98$ ，如圖 4-4 所示。根據以往研究得知，方形豎井溢流量於堰流流況時，其溢流量與溢流水深關係遵循堰流基本規律，可表為

$$Q_r = \frac{2}{3} C_w \sqrt{2g} (4B) H^{1.5} \quad (4-2)$$

比較式(4-1)及式(4-2)可得方形豎井溢洪道之流量係數

$$C_w = \frac{161.2}{g^{0.5}} (1 - H/B) \quad (4-3)$$

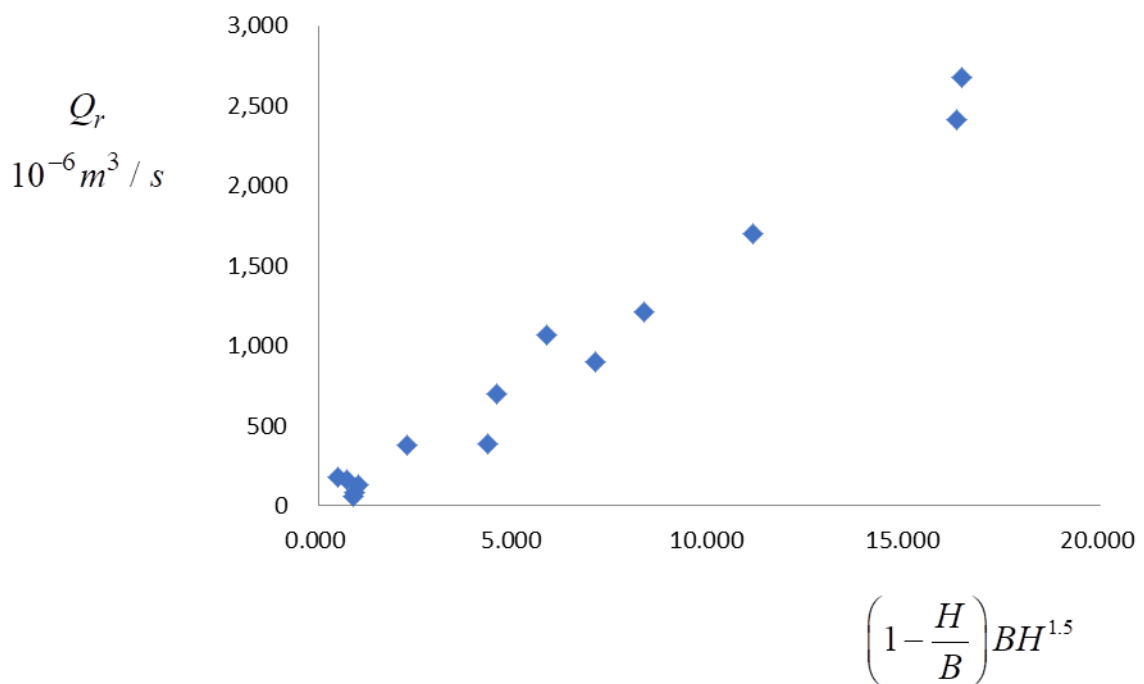


圖 4-4 於 $H/B \leq 0.9$ 時方形豎井溢洪道溢流量分布圖

(二) 當 $H/B > 0.9$ 時，屬於孔口流流況，故溢流量可表為

$$Q = 41.4 B^2 H^{0.5} \quad (4-4)$$

上式相關係數達 $r^2 = 0.97$ ，適用於 $H/B = 0.9 \sim 5.0$ ，如圖 4-5 所示。根據孔口流流量基本公式

$$Q = C_o A \sqrt{2g} H^{1.5} \quad (4-5)$$

比較式(4-4)及式(4-5)可得方形豎井溢洪道之流量係數

$$C_o = \frac{29.27}{g^{0.5}} \quad (4-6)$$

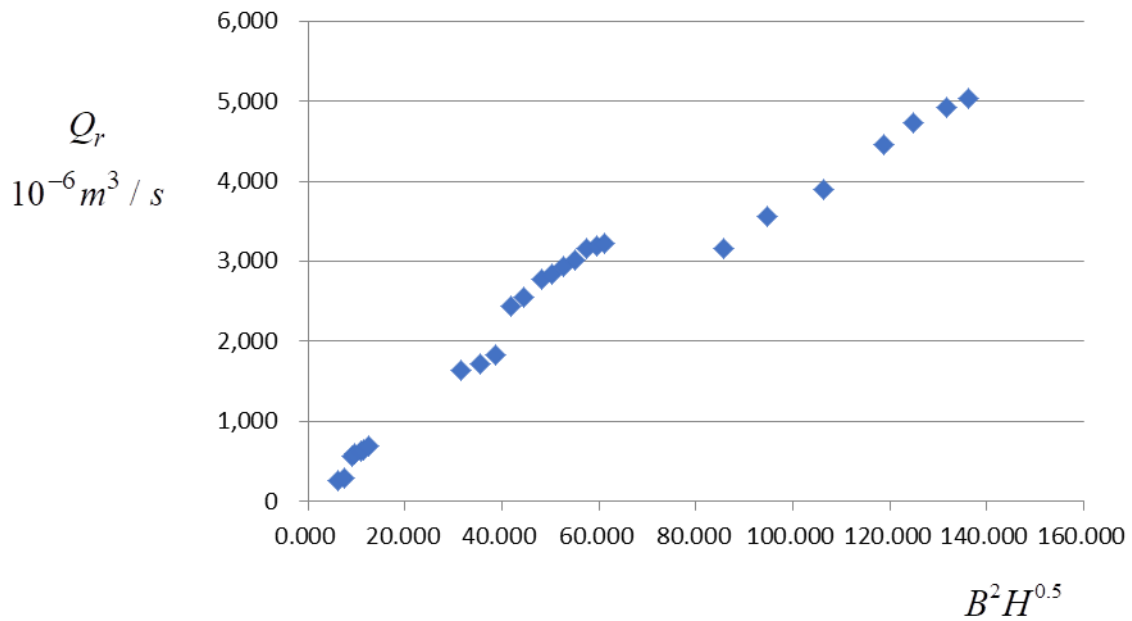


圖 4-5 於 $H/B > 0.9$ 時方形豎井排洪量分布圖

第三節 矩形出水口流量公式

根據以往研究得知，矩形出水口排洪量係屬堰流，其流量與溢流水深關係遵循堰流基本規律，可表為

$$Q_d = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} b h_d^{1.5} \quad (4-7)$$

故利用表 4-2 中 56 組試驗數據通過迴歸分析，可得排洪量公式：

$$Q_d = 20.3 b h_d^{1.5} \quad (4-8)$$

式中， Q_d =矩形出水口排洪量(cms)； h_d =溢流水深(m)； b =方形豎井寬度(m)； $h_d / b = 0.2 \sim 6.0$ 。上式相關係數達 $r^2 = 0.97$ ，如圖 4-6 所示。

將式(4-7)表為無因次形式，可得

$$\frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{2g} b h_d^{1.5}} = C_d \quad (4-9)$$

式中， C_d =流量係數； g =重力加速度。比較式(4.7)及式(4.8)可得流量係數

$$C_d = \frac{3 \times 20.3}{2 \times \sqrt{2} g} = \frac{21.53}{g^{0.5}} \quad (4-10)$$

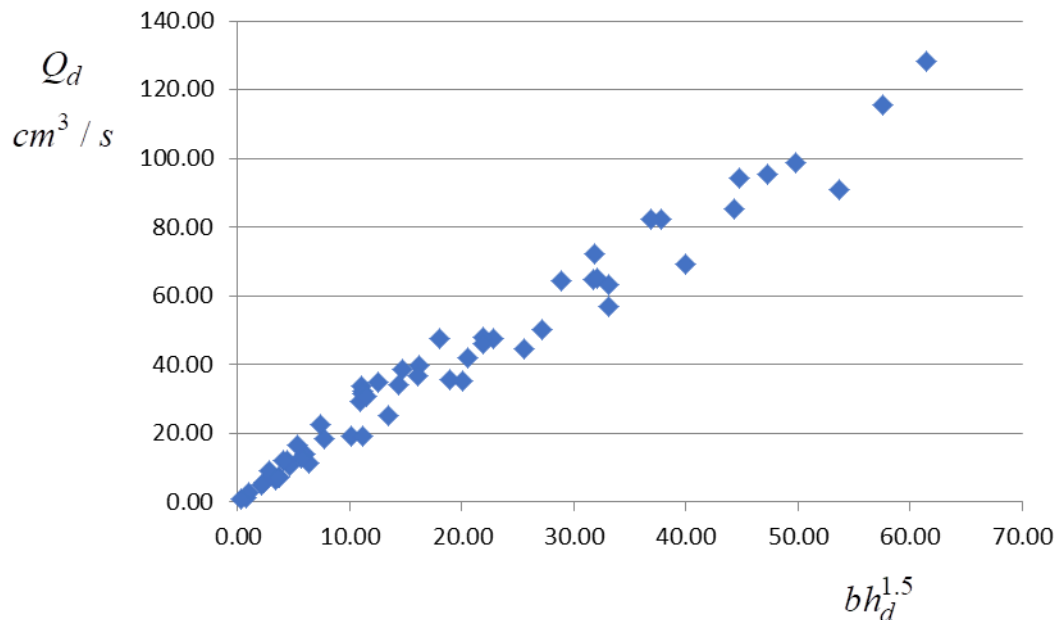


圖 4-6 矩形出水口排洪量公式

第四節 方形豎井溢洪道與矩形出水口共構之溢流量公式

在滯洪設施中，方形豎井與矩形出水口合稱為出流控制設施，其中矩形出水口工作條件係以滯洪為主，而方形豎井溢洪道則是作為緊急溢洪。理論上，於方形豎井溢洪道側面切出矩形出水口形成兩者共構在一個構造物上，當水流高出豎井頂部時，其總溢流量應等於風行豎井溢流量與矩形出水口溢流量之和，如圖 3-3(c)所示。但是，方形豎井溢洪道之一邊界切出矩形出水口後，因改變了豎井頂部溢流水流之阻抗及溢流流線分布，並因此改變豎井溢洪道之流量係數及溢流量，而這種改變的影響程度是推估溢流量的關鍵，如圖 4-7 所示。

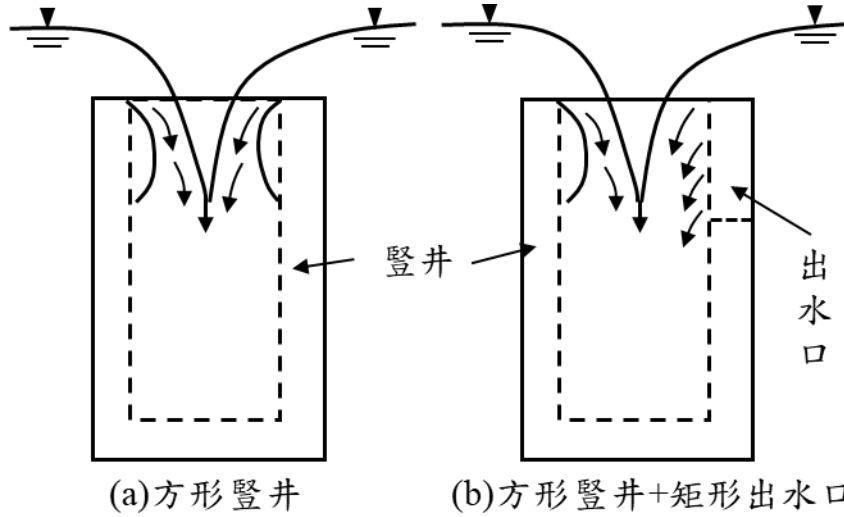


圖 4-7 溢流水流流線分布示意圖

從實驗過程發現，於方形豎井溢洪道與矩形出水口共構的水流流況相當的不穩定，方形豎井溢洪道之上的溢流水深上下調動頗為顯著，使得在溢流水深必須採取一定時間的平均值加以測定。因此，為簡化分析起見，本研究假定在方形豎井溢洪道與矩形出水口共構之情況下，矩形出水口可以沿用式(4-8)計算，故將表 4-3 各條件下之流量(Q_t)扣除矩形出水口最大流量($Q_{d\max}$)，可得方形豎井溢洪道溢流量(Q_r'')，即

$$Q_r'' = Q_t - Q_{d\max} \quad (4-11)$$

如表 4-4 所示。表中，比較 Q_r'' 及 Q_r ，各條件下之溢流量呈現不規則的變動趨勢，表明難以適用式(4-1)及式(4-4)。因此，本研究參考式(4-1)及式(4-4)的基本型式及適用範圍，將表 4-4 相關試驗數據進行回歸分析，分別可得

$$Q_r = 160.8 \left(1 - \frac{H}{B}\right) B H^{1.5} \quad \frac{H}{B} \leq 0.9 \quad r^2 = 0.98 \quad (4-12)$$

$$Q_r = 30.7 B^2 H^{0.5} \quad \frac{H}{B} > 0.9 \quad r^2 = 0.99 \quad (4-13)$$

如圖 4-8 及圖 4-9 所示。

表 4-4 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量

H (m)	b (cm)	B (cm)	H / B	Q_t (cm^3 / s)	Q_r'' (cm^3 / s)	Q_r (cm^3 / s)
0.77	1	2	0.385	446	70	126.32
1.32	1	2	0.660	476	100	156.75
1.58	1	2	0.790	480	104	126.79
2.84	1	2	1.420	502	126	655.04
3.2	1	2	1.600	507	131	672.20
4.54	1	2	2.270	535	159	728.81
5.58	1	2	2.790	551	175	767.14
6.5	1	2	3.250	565	189	798.16
7.51	1	2	3.755	582	206	829.78
0.22	1.2	2	0.110	431	20	27.92
0.32	1.2	2	0.160	444	7	46.23
0.72	1.2	2	0.360	463	12	118.86
0.96	1.2	2	0.480	468	17	148.69
1.6	1.2	2	0.800	479	28	123.05
2.34	1.2	2	1.170	498	47	794.70
2.44	1.2	2	1.220	505	54	800.06
2.67	1.2	2	1.335	509	58	811.98
3.74	1.2	2	1.870	521	70	861.64
3.91	1.2	2	1.955	533	82	868.84
5.77	1.2	2	2.885	569	118	939.17
6.72	1.2	2	3.360	582	131	970.67
0.16	1.4	2	0.080	473	53	17.90
0.63	1.4	2	0.315	495	31	104.13
0.89	1.4	2	0.445	508	18	141.66
1.58	1.4	2	0.790	517	9	126.79
2.12	1.4	2	1.060	526	0	978.00
2.48	1.4	2	1.240	532	6	997.67
2.99	1.4	2	1.495	539	13	1023.23
3.75	1.4	2	1.875	547	21	1057.57
5.27	1.4	2	2.635	560	34	1117.04
7.54	1.4	2	3.770	585	59	1191.61
0.44	2	4	0.110	874	122	157.93

H (m)	b (cm)	B (cm)	H / B	Q_t (cm^3 / s)	Q_r'' (cm^3 / s)	Q_r (cm^3 / s)
0.9	2	4	0.225	1,172	420	402.32
1.51	2	4	0.378	1,421	669	702.28
3.66	2	4	0.915	1,625	873	2771.09
4.9	2	4	1.225	1,957	1,205	2970.13
6.01	2	4	1.503	2,133	1,381	3127.74
6.92	2	4	1.730	2,256	1,504	3246.35
8.69	2	4	2.173	2,406	1,654	3456.52
9.78	2	4	2.445	2,534	1,782	3575.37
10.1	2	4	2.525	2,609	1,857	3608.99
10.35	2	4	2.588	2,762	2,010	3634.88
0.67	2.5	4	0.168	1,324	384	277.59
0.79	2.5	4	0.198	1,446	506	342.60
1.65	2.5	4	0.413	1,788	848	757.07
2.66	2.5	4	0.665	1,965	1,025	883.63
3.67	2.5	4	0.918	2,028	1,088	3618.73
4.45	2.5	4	1.113	2,128	1,188	3747.09
5.67	2.5	4	1.418	2,157	1,217	3927.05
6.68	2.5	4	1.670	2,250	1,310	4061.78
7.66	2.5	4	1.915	2,370	1,430	4183.06
8.67	2.5	4	2.168	2,585	1,645	4300.19
9.77	2.5	4	2.443	2,694	1,754	4420.22
10.6	2.5	4	2.650	2,858	1,918	4506.38
11.69	2.5	4	2.923	3,100	2,160	4614.55
12.21	2.5	4	3.053	3,171	2,231	4664.37
13.68	2.5	4	3.420	3,237	2,297	4799.74
0.73	3	4	0.183	1,161	33	310.01
1.72	3	4	0.430	1,909	781	781.76
2.64	3	4	0.660	1,991	863	886.72
3.59	3	4	0.898	2,028	900	423.91
4.74	3	4	1.185	2,130	1,002	4825.80
5.63	3	4	1.408	2,263	1,135	4955.37
6.68	3	4	1.670	2,352	1,224	5095.67

H (m)	b (cm)	B (cm)	H / B	Q_t (cm^3 / s)	Q_r'' (cm^3 / s)	Q_r (cm^3 / s)
7.71	3	4	1.928	2,401	1,273	5222.93
8.69	3	4	2.173	2,557	1,429	5336.33
9.75	3	4	2.438	2,676	1,548	5451.99
10.64	3	4	2.660	2,805	1,677	5544.33
11.63	3	4	2.908	3,144	2,016	5642.62
12.63	3	4	3.158	3,260	2,132	5737.74
13.71	3	4	3.428	3,362	2,234	5836.32
1.51	3	6	0.252	2,071	943	1266.35
2.1	3	6	0.350	3,197	2,069	1804.00
2.47	3	6	0.412	3,395	2,267	2082.88
2.99	3	6	0.498	3,574	2,446	2365.47
4.18	3	6	0.697	3,952	2,824	2364.17
6.31	3	6	1.052	4,125	2,997	7127.49
7.66	3	6	1.277	4,212	3,084	7508.59
8.4	3	6	1.400	4,331	3,203	7703.24
9.37	3	6	1.562	4,448	3,320	7945.83
10.85	3	6	1.808	4,660	3,532	8292.93
11.85	3	6	1.975	4,784	3,656	8514.18
12.26	3	6	2.043	4,907	3,779	8602.18
13.34	3	6	2.223	4,996	3,868	8827.18
0.76	3.5	6	0.127	1,920	604	527.71
1.12	3.5	6	0.187	2,060	744	879.21
1.36	3.5	6	0.227	2,207	891	1118.59
2.03	3.5	6	0.338	3,213	1,897	1745.33
3.68	3.5	6	0.613	3,619	2,303	2489.45
4.78	3.5	6	0.797	3,799	2,483	1937.96
6.4	3.5	6	1.067	4,043	2,727	8375.97
7.76	3.5	6	1.293	4,232	2,916	8757.30
8.7	3.5	6	1.450	4,359	3,043	9001.57
9.71	3.5	6	1.618	4,453	3,137	9249.74
10.78	3.5	6	1.797	4,575	3,259	9498.94
11.64	3.5	6	1.940	4,779	3,463	9690.39

H (m)	b (cm)	B (cm)	H/B	Q_t (cm^3/s)	Q_r'' (cm^3/s)	Q_r (cm^3/s)
12.67	3.5	6	2.112	4,954	3,638	9910.60
13.59	3.5	6	2.265	5,043	3,727	10099.83
0.45	4	6	0.075	1,707	203	254.66
0.66	4	6	0.110	1,899	395	435.21
1.22	4	6	0.203	2,573	1,069	979.06
2.95	4	6	0.492	3,947	2,443	2348.96
4.03	4	6	0.672	4,028	2,524	2422.52
6.99	4	6	1.165	4,450	2,946	9955.79
8.57	4	6	1.428	4,797	3,293	10378.46
9.11	4	6	1.518	4,929	3,425	10513.82
10.56	4	6	1.760	5,106	3,602	10858.61
11.39	4	6	1.898	5,247	3,743	11045.34
12.27	4	6	2.045	5,412	3,908	11236.04
13.6	4	6	2.267	5,580	4,076	11511.70
14.42	4	6	2.403	5,757	4,253	11674.98

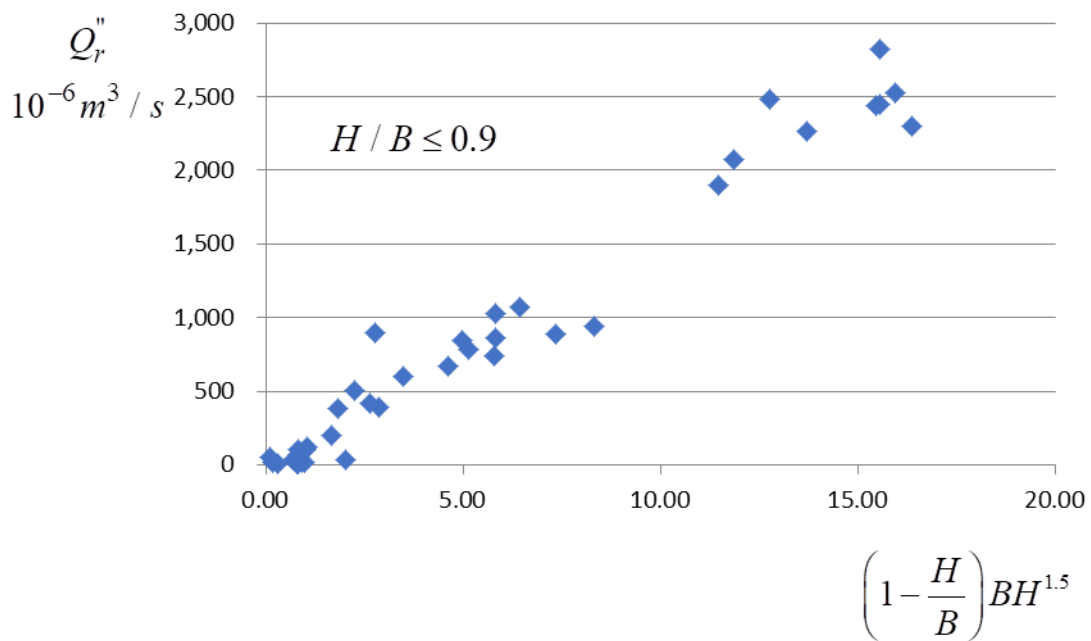


圖 4-8 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量

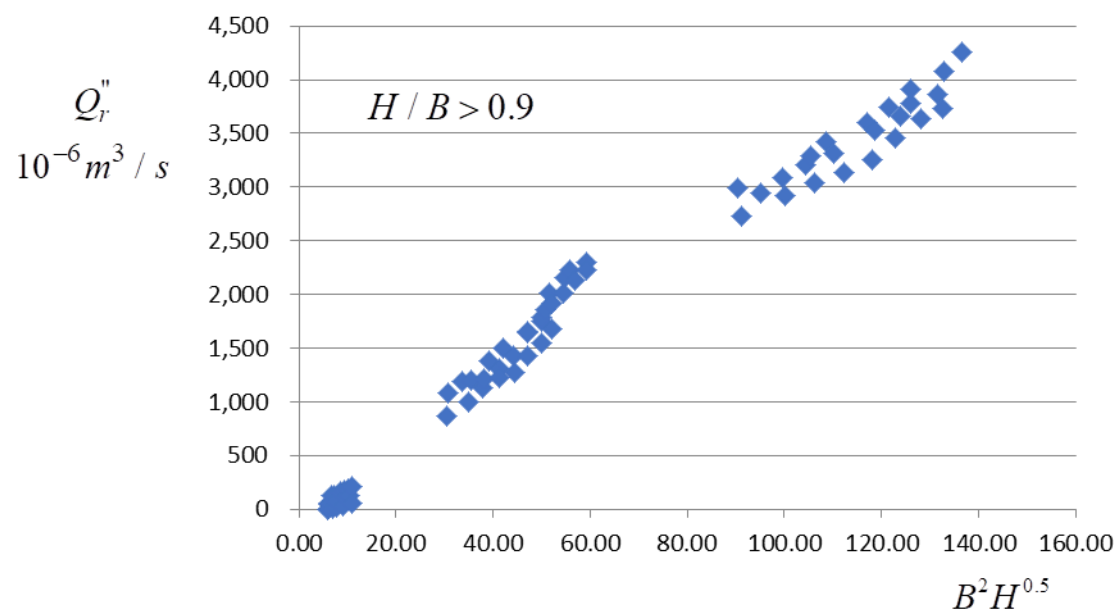


圖 4-9 方形豎井與矩形出水口共構條件下之方形豎井排洪量

第五章 結論與建議

本研究旨在建立築壩式農塘方形豎井溢洪道之溢流量計算公式，同時對於方形豎井溢洪道與矩形出水口共構的情況下，分別建立方形豎井溢洪道與矩形出水口之溢流量公式，以提供實務設計之參採。

一、結論

本研究已完成室內各項試驗數據之分析工作，並取得較好之分析成果。茲將相關成果分述如下：

- (一) 本研究係以室內試驗方式，建立方形豎井之溢流量公式，同時採用方形豎井與矩形出水口共構之設計模型，不僅可以節省工程費用，且能共同發揮滯洪及緊急溢洪之雙重功能。
- (二) 方形豎井溢流量公式

1. 當 H/B (溢流水深與方形豎井寬度比) ≤ 0.9 時，屬於堰流流況，其溢流量公式可表為

$$Q_r = 152 \left(1 - \frac{H}{B} \right) B H^{1.5}$$

式中， Q_r = 方形豎井排洪量 (cms)； H = 溢流水深 (m)； B = 方形豎井寬度 (m)；適用範圍： $H/B = 0.15 \sim 0.9$ 。根據堰流流量基本公式，可得方形豎井堰流流量係數

$$C_w = \frac{161.2}{g^{0.5}} (1 - H/B)$$

式中， g = 重力加速度。

2. 當 $H/B > 0.9$ 時，屬於孔口流流況，其溢流量公式可表為

$$Q_r = 41.4 B^2 H^{0.5}$$

適用範圍： $H/B = 0.9 \sim 5.0$ 。根據孔口流流量基本公式，

可得方形豎井孔口流流量係數

$$C_o = \frac{29.27}{g^{0.5}}$$

(三) 矩形出水口流量公式

矩形出水口過流屬於堰流流況，其流量可表為

$$Q_d = 20.3 b h_d^{1.5}$$

式中， Q_d =矩形出水口排洪量(*cms*)； h_d =溢流水深(m)； b =方形豎井寬度(m)；適用範圍： $h_d / b = 0.2 \sim 6.0$ 。因屬堰流流況，其流量係數可得

$$C_d = \frac{21.53}{g^{0.5}}$$

(四) 方形豎井與矩形出水口共構情況下之方形豎井溢流量公式

1. 當 $H / B \leq 0.9$ 時，屬於堰流流況，其溢流量公式可表為

$$Q_r = 160.8 \left(1 - \frac{H}{B} \right) B H^{1.5}$$

$$\text{流量係數 } C_w = \frac{170.6}{g^{0.5}} (1 - H / B)。$$

2. 當 $H / B > 0.9$ 時，屬於孔口流流況，其溢流量公式可表為

$$Q = 30.7 B^2 H^{0.5}$$

$$\text{流量係數 } C_o = \frac{21.7}{g^{0.5}}。$$

二、建議

方形豎井溢洪道普遍運用於築壩式農塘，但是有關其溢流量之計算，因皆沿用具有較為平滑入口之喇叭型豎井滯洪道，使得有高估溢流量問題，這將影響農塘土壩高度之設計，並恐有發生

洪水漫溢之風險；此外，近年來在推動活化改善農塘時，除了蓄水提供農作灌溉外，特別強調農塘之滯洪功能。為此，本研究已分別完成方形豎井溢洪道、矩形出水口、方形豎井溢洪道與矩形出水口共構等三種情境下之流量計算公式，不僅可供緊急溢洪流量計算，亦能運用於農塘滯洪演算，故建議可以將本研究成果納入「**水土保持手冊**」中，以取代並補充手冊於農塘設計之不足。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局(2017)，「水土保持手冊」。
1. 行政院農業委員會水土保持局(2020)，「農塘設計與施工單元叢書(稿)」。
2. 連惠邦(2019)，「明渠水力學」，高立圖書出版社。
3. ‘Hydraulics Manual’ ,ODOT,2005.
4. Weisbach, J. (1855). Die Experimental Hydraulik. Freiberg, Germany: Engelhardt
5. Azimi, A.H., and Rajaratnam, N. (2009). “Discharge Characteristics of Weirs of Finite Crest Length.” Journal of Hydraulic Engineering, 135(12), 120-125.
6. Rehbock, T. (1929). “Discussion of Precise Weir Measurements.” Journal of Transportation Engineering, 93, 1143- 1162.
7. Sandvik, A.(1985). Proportional Weirs for Stormwater Pond Outlets. Civil Engineering, March 1985, ASCE pp. 54-56.
8. Humphreys, H. W. et al.(1970). “Model Test Results of Circular, Square, and Rectangular Forms of Drop-Inlet Entrance to Closed-Conduit Spillways. Illinois State Water Survey, Urbana, Report of Investigation 65.

附錄一

計畫書意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	在現場築壩式農塘調查部份，僅調查喇叭形溢洪道與矩形溢洪道，建議可增加正方形、圓形等形式豎井之排洪能力。	喇叭形溢洪道即為圓形形式豎井，矩形溢洪道為正方形豎井
2	室內試驗初步選擇不同試驗變數，如方形豎井溢洪道流量公式試驗包括溢洪道斷面尺寸(三種)、溢洪道壁面厚度(三種)及水頭高度(四種)等試驗變數，建議可再根據各種文獻之收集結果進行調整。	目前參考 Model Test Results of Circular, Square, and Rectangular Forms of Drop-Inlet Entrance to Closed-Conduit Spillways. 等，並參考台灣目前常見豎井形式，故以方形豎井及方形豎井加上矩形出水口兩種形式進行研究
3	現場築壩式農塘調查，建議可增加農塘實際流量之量測，以做為室內試驗之驗證。	目前因經費問題，故前期先針對室內試驗為主

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	方形豎井溢洪道流量公式試驗若是在沒有矩形出水口下進行試驗，如何做為含有矩形出水口之緊急溢洪道流量推估參考。	本計畫會針對兩種不同形式進行試驗
5	目前農塘豎井排放口的形狀以方型居多，溢洪口流量採用圓形喇叭開口公式估算，流量推估是有差異，本項研究值得進一步試驗分析，提出方型開口溢流量計算公式，同時建議納入豎井落差高低對豎井底端消能深度之研究。	本計畫先針對水深及流量之關係進行研究。
6	本局目前所採用農塘滯洪演算方式，其設計形式為矩形、方形等，其流量卻依美國小型壩工設計之喇叭形式堰流公式計算，未依實際型式計算流量，未來可能會有農塘內洪水位高於設計洪水位。	本計畫即針對洪水位高與流量之關係，以利設計時，可排出設計流量，而洪水位高於設計洪水位，則會由緊急溢洪道排出。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	水土保持手冊土壩之設計原則，其出水高以 1~2 公尺為原則，本案建議對不同狀況之土壩出水高提出較明確之數據供設計參考。	本計畫會針對各種出水高度進行研究

工作執行計畫書意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	P2-9 表 2-1 第 1,4 列，斷面為面積單位，請再註明尺寸	如表 2-1，單位為平方公分
2	P2-4 實室模型驗分析公式如何應用於現場築壩農塘(P2-4)流量驗證及驗證方法。該項審查意見回復，稱"經費問題"不做，則現地築壩農塘調查，與模型試驗之水力相似條件無相關，與研究目的有落差，請再釐清。	現地農塘流量之量測，需於現地架設堰，並以自動水位計記錄，以本計畫經費並無編列
3	P1-2 說明：築壩式農塘主溢洪道多採用正方型、矩形、圓形、喇叭型等之豎井排洩洪水，而在現場築壩式農塘調查部份，僅調查喇叭形溢洪道與矩形溢洪道，應說明為何排除正方形溢洪道、圓形溢洪道等形式豎井。	現地調查主要有現地之案例，故會以正方型、矩形、圓形各一座進行調查。

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	依照計畫進度，目前應完成相文獻資料蒐集工作，然目前相資料如各種豎井流量公式形式及其相影響因子、滯洪設施出水口流量公式形式及相關影響因子、緊急溢洪道形式流量公式及其相因子等相關文獻仍以水土保持技術規範及水土保持手冊內容為主，建議應增加其他相關文獻資料	已補充文獻理論。
5	P2-8 圖 2-7 中方形豎井流量公式試驗包括方形豎井斷面尺寸(3 種)、方形豎井壁面厚度(3 種)及豎井溢流水頭 4 種等試驗變數，文中缺少 3 種方形豎井壁面厚度之說明	經文獻討論後，針對銳緣堰形式進行實驗，故無壁面厚度之因子。
6	P2-8 圖 2-7 中矩形出水口流量公式試驗包括方形豎井斷面尺寸(3 種)、方形豎井壁面厚度(3 種)及豎井溢流水頭 4 種等試驗變數，文中缺少 3 種方形豎井壁面厚度之說明	經文獻討論後，針對銳緣堰形式進行實驗，故無壁面厚度之因子。

項次	審查意見	回覆辦理情形
7	參考文獻之引用方式建議再修正，如水土保持手冊文中為 2017 年，但參考文獻目錄則列為 2005 年；部份文獻亦未列出	已修正。
8	室內試驗裝置三維示意圖，其方形豎井溢洪道位置比溢流口低，似不合理，請檢視。	試驗裝置中溢流口主要目的在於控制水頭，三維示意圖中不為側視圖，故有角度上之誤差。

期中報告意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	P2-16~P2-17 標題四、方型豎井流量公式，內容中無提及採用何種公式及適用條件	第二章為文獻回顧，將常用之公式進行整理，故於第四章則會採用公式進行公式推導。
2	P3-1~P3-4 實驗模型採透明壓克力材料，不易辨識水流變化，建議開口處貼顏色膠帶和塗色，相片中易於辨認	如表 3-2，將邊緣貼上黑色膠帶
3	<p>(1)本計畫完成 2×2、4×4 方形豎，其尺寸與 P2-22 表 2-1 不一致</p> <p>(2)流量係數大於 1 不符合水力計算原則，請再確認</p> <p>(3)建議迴歸分析分段迴歸，說明轉折點之水位變化臨界值水力特性，圖 3-2、圖 3-4 高水位迴歸直線趨勢再確認</p> <p>(4)建議試用曲線迴歸和對數迴歸分析</p> <p>(5)兩種試驗合併，以單寬流量及水位進行迴歸分析</p>	<p>(1)於期中時完成 2×2、4×4，期末時則將 6×6 全部實驗完成。</p> <p>(2)已重新確認後修正</p> <p>(3)當溢流水深與豎井寬度比等於 0.9 時為介，分段迴歸，這表徵，方形豎井溢流量從初期的堰流流況，隨著溢流水深的增加，而轉變為孔口流流況</p> <p>(4)公式之採用考慮其物理意義，因此以過去之方程式型式，而迴歸出參數</p> <p>(5)因豎井型式不同，故無法合併</p> <p>(6)將溢流水深與豎井寬度進行參數合併後，則可在得知溢流水深與豎井寬度下，推估流量</p>

項次	審查意見	回覆辦理情形
	(6)目前兩種模型試驗結困，水位及流量曲線，如何應用現場豎井尺寸之水位推估流量	
4	P2.2 公式少乘 3600，P2-3, $0.4 < h/L < 2.0$ 請問 h 其定義？ 公式(4)Hr 代表？不清楚其意義。	(1)於期末報告中已將公式刪除 (2) 因本研究無溢洪道之探討，故重新編排文獻回顧

期末報告意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	建議摘要報告應放置三種研究情形之示意圖	將三種研究情形之示意圖於入摘要報告中
2	推估公式用於農塘規劃設計之滯洪演算，是否成熟可行？ 建議可提供不同設計案例，以利規劃設計人員參考	目前公式可針對不同型式之矩形豎井進行流量推估，也可與水保手冊之計算公式比較後取較保守之值進行工程設計
3	建議進行農塘設計參考	本研究之成果可為農塘設計之出水量參考，也可與水保手冊之計算公式比較後取較保守之值進行工程設計
4	由於高水位會產生自由渦流可能發生穴蝕或是夾氣暴震現象，進而影響豎井混凝土強度，建議後續再進行此部份研究	本研究未針對穴蝕現象進行研究，後續可將實驗模型放大後，可進行後續研究