

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

運用二維模式於靜水池消能效率之探討

The Investigation of a Two-Dimensional Numerical
Model for Characterizing Energy Dissipation Efficiency in
Stilling Basins

林柏任

Po-Jen Lin

指導教授：游景雲 博士

Advisor: Gene Jiing-Yun You, Ph.D.

中華民國 114 年 8 月

August 2025



誌謝

兩年的學習時光轉瞬即逝，馬上就將與充實的研究所的生活告別。在學期間與聰慧的同學們互相砥礪，使我更加成長，如今回顧過往，感恩之情常存於心。

本論文能夠順利完成，真的受到了許多人的幫忙。首先，我必須向我的指導教授游景雲老師獻上誠摯的謝意。謝謝老師這兩年來的指導與鼓勵，讓我在研究上少走許多彎路；此外，也感謝教授讓我有出國參加研討會的機會，讓我發現需要增進的部分。謝謝我的口試委員石棟鑫老師在口試期間給予的建議與大學時代的照顧，還有謝謝孫建平老師、陳憲宗老師與胡明哲老師，在檢查完我的論文後，給予許多建議，讓我的論文變得更加完整。謝謝實驗室的溫俊達學長、曾承俊學長、郭柏璿學長、許尹懷學長在學業上與研究上給我的建議，也願意耐心的陪我一起思考問題，讓我可以研究與學業上都可以穩步前進。

謝謝 815 的研究室的夥伴們與水利組的同學們，魯翀、冠頤、証惟、光輝、品靜、姿渝、品翰、煌全、宥弘，離開土研後我會想起一同在研究室奮戰中流到早上時光，謝謝魯翀跟我一同處理研究室的各種事務，並修好我的簡報，謝謝冠頤、証惟、光輝與我一起研究與探討模式的模擬結果。也謝謝實驗室的雨璇學姊、Novi 學姊、承恩、齊悅、宇棠學弟妹們，讓研究室充滿活力，很高興認識你們，同時，也感謝怡君學姊為我們處理行政及報帳事宜。最後，我衷心感謝我的家人們。總是不遺餘力地支持我，成為我最堅實的後盾，讓我能夠毫無後顧之憂地前行。同時，我也要謝謝自己從未放棄，堅持到了現在，凡事都需要試過了才知道，勇敢的走出自己的路。

摘要



在水利工程中，靜水池作為一種水力消能設施，主要透過水躍和紊流作用，將溢洪道排出的大量動能與位能轉化並消散。水躍是在消能池內影響消能的重要因素。傳統上，儘管水躍為三維(3D)現象，研究卻多採一維(1D)或 3D 模型。3D 模型精度高但計算成本高，1D 模型則無法捕捉水躍的渦流與側向流動。考量計算效率與準確性，二維(2D)模型提供了一個有潛力的替代方案。本研究旨在評估 2D 水力模型在模擬突擴、漸擴式消能靜水池實驗中的應用能力及局限性。研究核心為透過模擬不同上下游寬度比、入流擴張角度和入流偏心率等幾何設計參數組合，以找出能最大化能量消散效率的最佳設計。入流擴張角度和入流偏心率與水躍後水深(h_2)的模擬與實驗數據的誤差率呈正比，而與上下游寬度比呈反比。上下游寬度比對消能效率有顯著影響，但當寬度比達到一定值後，消能效率存在極限，不再顯著提升。擴張角度未在消能效率上呈現明確趨勢，其特性隨尾水條件變化而異。偏心率在消能效率的特性上與擴張角度類似，其特性同樣隨尾水條件變化而變化，但當入流的側牆與擴張後的側牆重合時，消能效率會降低，這可能與其「與 h_2 誤差率呈正相關」的驗證結果有關。最後進行了混合幾何因子之設計，確認會有疊加效應，但疊加後的因子特性會有些許改變。

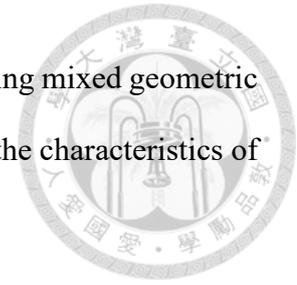
關鍵字：二維水力模式、突擴消能池、突擴水躍、SRH-2D、消能效率

Abstract



In hydraulic engineering, stilling basins serve as crucial energy dissipators, primarily transforming and dissipating the significant kinetic and potential energy discharged from spillways through hydraulic jumps and turbulent action. Hydraulic jumps are a key factor influencing energy dissipation within these basins. Traditionally, despite hydraulic jumps being a three-dimensional (3D) phenomenon, most research has employed one-dimensional (1D) or 3D models. While 3D models offer high accuracy, they come with substantial computational costs. Conversely, 1D models fail to capture the complex vortex and lateral flows inherent in hydraulic jumps. Considering both computational efficiency and accuracy, two-dimensional (2D) models present a promising alternative. This study aims to evaluate the applicability and limitations of 2D hydraulic models in simulating experimental cases of abrupt and gradual expansion stilling basins. The core of this research revolves around identifying optimal geometric design parameters, including various expansion width ratios, expansion angles, and inflow eccentricities, to maximize energy dissipation efficiency. Our findings indicate that the error rate between simulated and experimental data for the tailwater depth (h_2) after a hydraulic jump is directly proportional to the expansion angle and inflow eccentricity, but inversely proportional to the expansion width ratio. The expansion width ratio significantly impacts energy dissipation efficiency; however, there's a limit to this enhancement, beyond which further increases in the ratio do not lead to substantial improvements in efficiency. The expansion angle did not show a clear trend in energy dissipation efficiency, with its characteristics varying depending on tailwater conditions. Similarly, eccentricity exhibited characteristics in energy dissipation efficiency akin to the expansion angle, also changing with tailwater conditions. Notably, when the inflow's sidewall aligns with the expanded sidewall, energy dissipation efficiency decreases, which may be related to its

positive correlation with the h_2 error rate. Finally, a design incorporating mixed geometric factors was implemented, confirming a superposition effect, though the characteristics of the superimposed factors exhibited slight alterations.



Key words: Two-dimensional hydraulic model, abrupt expansion stilling basin, abrupt expansion hydraulic jump, SRH-2D, energy dissipation efficiency

目次

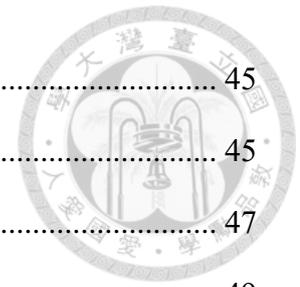


誌謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目次	v
圖次	viii
表次	xi
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究流程及架構	3
1.3.1 研究流程	3
1.3.2 研究架構	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 能量定義	6
2.2 突擴與漸擴之水躍種類	7
2.2.1 Repelled jump(R-jump).....	7
2.2.2 Spatial jump(S-jump)	7
2.2.3 Transitional jump(T-jump).....	7
2.3 消能池的幾何因子	8
2.3.1 上下游寬度比	8
2.3.2 擴張角度	8
2.3.3 入流偏心率	10
2.4 模式方法	12



2.4.1 模式介紹	12
第三章 研究方法	14
3.1 模式選擇	14
3.1.1 HEC-RAS 2D	14
3.1.2 SRH-2D	16
3.1.3 簡易案例測試與模式選擇	17
3.2 模式驗證	17
3.2.1 尾水折減參數決定	18
3.2.2 實驗一	19
3.2.3 實驗二	21
3.2.4 實驗三	21
3.3 幾何因子模擬	22
3.3.1 上下游寬度比	23
3.3.2 擴張角度	24
3.3.3 入流偏心率	25
3.3.4 混合模擬	25
第四章 模式模擬結果分析	26
4.1 模式選擇	26
4.1.1 HEC-RAS-2D	26
4.1.2 SRH-2D	33
4.1.3 結論	34
4.2 模式驗證	34
4.2.1 尾水折減參數決定	34
4.2.2 實驗一、二、三結果(z 方向)	37
4.2.3 實驗一結果(x 方向)	40
4.2.4 模擬結果原因推測	44

4.3 幾何因子模擬結果	45
4.3.1 上下游寬度比	45
4.3.2 擴張角度	47
4.3.3 入流偏心率	49
4.3.4 混合測試結果	50
第五章 結論與建議	54
5.1 結論	54
5.2 建議	55
5.2.1 對未來研究的建議	55
5.2.2 對實務應用的建議	57
參考文獻	58



圖次

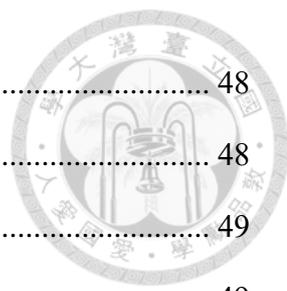


圖 1-1 研究流程.....	3
圖 2-1 突擴渠道的水躍類型，a. R-jump, b. S-jump, c. T-jump, d. classical jump (Bremen、Hager，1993)	8
圖 2-2 二維逐漸擴張之消能池的流動模式 Kline (1959)	10
圖 2-3 模型示意圖 (Masuda、Tagawa，2021)	11
圖 2-4 再附著點與剝離點之間的距離，XR1-XR4 (Masuda、Tagawa，2021) .	11
圖 3-1 ΔY 、 $X1$ 圖 (Bremen、Sinniger，1990)	18
圖 3-2 實驗一對稱突擴之渠道相關標註.....	20
圖 3-3 實驗一之入流渠道配置.....	20
圖 3-4 實驗二渠道俯視圖 (Nasrin Hassanpour 等人，2017)	21
圖 3-5 實驗三渠道俯視、側視圖 (Torkamanzad 等人，2019)	22
圖 3-6 各渠道之段面定義.....	23
圖 3-7 建模測試的範圍.....	23
圖 3-8 擴張角度示意圖.....	24
圖 4-1 Diffusion Wave 的福祿數模擬結果.....	27
圖 4-2 Diffusion Wave 的水深模擬結果.....	27
圖 4-3 SWE-ELM(original/faster)的福祿數模擬結果.....	28
圖 4-4 SWE-ELM(original/faster)的水深模擬結果.....	29
圖 4-5 SWE-ELM(original/faster)的水深模擬結果.....	29
圖 4-6 SWE-LIA(local inertia)的福祿數模擬結果.....	30
圖 4-7 SWE-LIA(local inertia)的水深模擬結果.....	31
圖 4-8 SWE-LIA(local inertia)的水深模擬結果(放大入流部分).....	31
圖 4-9 SWE-EM(stricter momentum) 的福祿數模擬結果	32
圖 4-10 SWE-EM(stricter momentum)的水深模擬結果	33



圖 4-11 SRH-2D 的福祿數模擬結果.....	33
圖 4-12 SRH-2D 的水深模擬結果.....	34
圖 4-13 對共軛水深折減 3%與回歸公式(3-15)點位之比較.....	35
圖 4-14 對共軛水深折減 10%與回歸公式(3-15)點位之比較.....	35
圖 4-15 對共軛水深折減 20%與回歸公式(3-15)點位之比較.....	36
圖 4-16 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 B 對 h_2 差值比率盒鬚圖.....	37
圖 4-17 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 e 對 h_2 差值比率盒鬚圖.....	38
圖 4-18 $e=0$ ，擴張角度 90 度的 B 對 h_2 差值比率盒鬚圖.....	38
圖 4-19 $e=0$ ，多種 B 的擴張角度對 h_2 差值比率盒鬚圖.....	39
圖 4-20 $e=0$ ， $B=1.25$ ，擴張角度 1.35 度之福祿數模擬圖.....	39
圖 4-21 $e=0$ ， $B=1.67$ ，擴張角度 2.7167 度之福祿數模擬圖.....	39
圖 4-22 $e=0$ ， $B=2.5$ ，擴張角度 4.0833 度之福祿數模擬圖.....	40
圖 4-23 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 B 對 x_2 差值比率盒鬚圖.....	41
圖 4-24 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 B 對 x_2 差值盒鬚圖.....	41
圖 4-25 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 e 對 x_2 差值比率盒鬚圖.....	42
圖 4-26 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 e 對 x_2 差值盒鬚圖.....	42
圖 4-27 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 x_2 差值對 h_2 差值比率散佈圖.....	43
圖 4-28 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 x_2 差值對 h_2 差值比率散佈圖.....	43
圖 4-29 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 x_2 差值比率對 h_2 差值比率散佈圖.....	44
圖 4-30 B 對消能效率之關係(基於經典水躍公式，式 3-23).....	45
圖 4-31 B 對消能效率之關係(基於式 3-24).....	45
圖 4-32 B 對消能效率之關係(基於式 3-25).....	46
圖 4-33 B 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26).....	46
圖 4-34 B 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27).....	46
圖 4-35 B 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度).....	47
圖 4-36 擴張角度 ϕ 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26).....	47

圖 4-37 擴張角度 φ 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27).....	48
圖 4-38 擴張角度 φ 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度).....	48
圖 4-39 偏心率 e 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26).....	49
圖 4-40 偏心率 e 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27).....	49
圖 4-41 偏心率 e 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度).....	49
圖 4-42 階段一之 B 對消能效率圖.....	51
圖 4-43 階段二之 φ 對消能效率圖.....	51
圖 4-44 階段三之 e 對消能效率圖.....	52



表次

表 4-1 僅變動 B 之消能效率變動	52
表 4-2 僅變動 φ 之消能效率變動	52
表 4-3 僅變動 e 之消能效率變動	53



第一章 緒論



1.1 研究背景

水躍是一種發生於明渠流中的現象，此現象為當水流從超臨界流到亞臨界流在短距離內發生的快速轉變，且水深也從低水位快速轉變成高水位，在水躍現象發生時，水流的上部分會與空氣發生作用產生夾氣與逆流，使得水流的能量於短距離內大量削減。因為擁有這種可以在短距離內削減大量能量的特性，因此常常設計於消能池與各種消能設施內。

三維的模式可根據各三維網格進行計算，從而模擬出較真實的水流狀況，相對應的會需要更多的計算時間。一維的模式是沿著 X 方向對水深的模擬，不會計算水流往 Y 方向的行為，寬度變化部分常使用收縮/膨脹係數乘以速度水頭去進行能量損失的評估。二維的模式是在 X-Y 平面的網格上，以深度平均(depth-averaged)概念對各網格上的速度與紊流應力(turbulent stress) 等參數進行計算。模擬運算速度較三維模式快速，相較一維模式增加了 Y 方向速度的計算，因此二維 (2D) 模型在計算效率和準確性之間提供了一個平衡，使其成為一種具潛力的替代方法。

水躍是一種包含了三維行為的現象，回顧先前之研究通常會使用三維模式或簡化成一維來研究，而二維的模式與此相關的研究較少，且對於寬度改變時的水躍現象在二維模式上的相關表現，與將水躍與消能池合併，嘗試對消能池進行簡易的設計。



1.2 研究目的

本研究欲先探討二維模式與實驗數據之間的差異，確認二維模式在哪些方面可以重現實驗結果。之後使用二維模式在相同入流狀態下對消能池的各種幾何特徵進行測試，找出可以最大化削減能量的幾何組合。

本研究主要可分二個部分，敘述如下：

建置根據實驗數據之尺度放大 10 倍大小的二維模型，分析渦流長度之差異、邊界水位數值差異：

因實驗之尺寸過小，模式無法設定過小數值，而建置根據實驗數據之尺度放大 10 倍大小的二維模型，尺度更動後依據福祿數不變的原則變更流量條件，確立渦流長度定義後獲得渦流長度數值與各位置之水深值，根據其結果推定模式於各方面之可信程度。

建置「突擴消能池」之三種常見幾何特徵模型，之後將三種幾何特徵混合以找出突擴消能池之最佳解，與尾水高公式之最佳解：

首先對「突擴消能池」進行三種幾何特徵建模，分別為「上下游寬度比」、「擴張角度」、「入流偏心率」，按照相同之進水條件與不同的尾水條件在各種突擴消能池下進行比較，選定消能效率較好之尾水公式與幾何特徵，最後選定各消能表現較好之幾何特徵組合成一突擴消能池後對各項幾何特徵做變動，確定最終之突擴消能池方案。



1.3 研究流程及架構

1.3.1 研究流程

本研究之流程，如圖 1-1 所示：

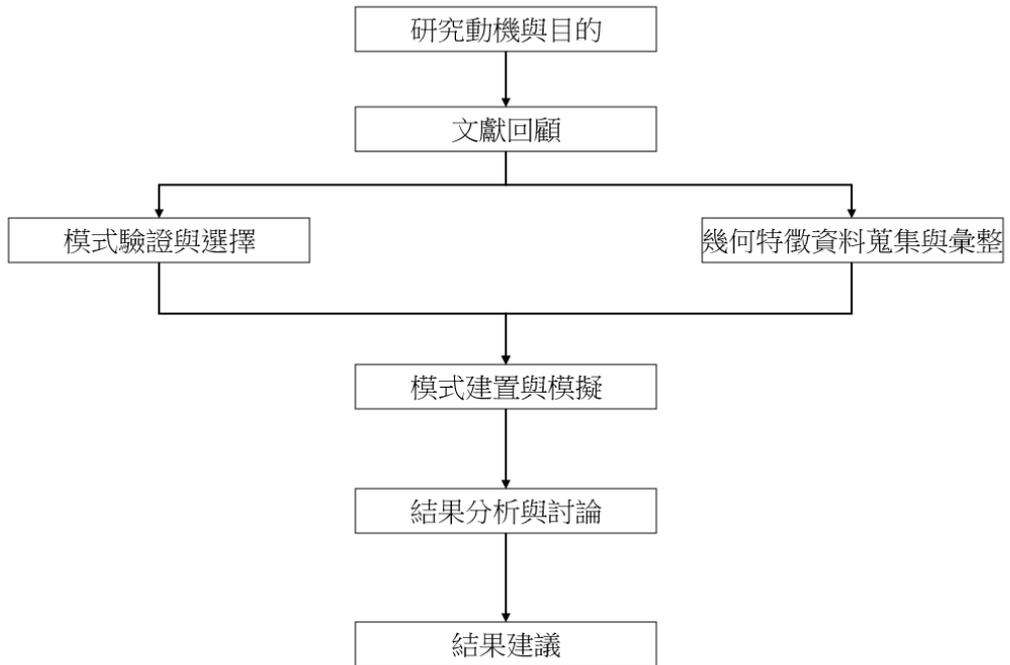


圖 1-1 研究流程



1.3.2 研究架構

依照前述之研究流程，本研究架構主要分為六大部分，將分別於後續各章節進行探討，各章概述如下：

第一章、緒論：

敘述本研究之動機、目的與流程架構。

第二章、文獻回顧：

針對能量定義、突擴與漸擴之水躍種類、消能池的幾何因子與模式方法進行文獻回顧。

第三章、研究方法：

針對由美國陸軍工程兵團(United States Army Corps of Engineers)所開發之河流分析系統(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, HEC-RAS)與由美國內政部墾務局(Bureau of Reclamation)所開發的二維河川水理動床模式(Sedimentation and River Hydraulics – Two-Dimensional River Flow Modeling, SRH-2D)進行其基本控制方程式與相關計算方法之說明，之後使用 HEC-RAS 2D 與 SRH-2D 雙模式建置一簡單矩形渠道進行一簡易之水躍之模擬，比對二者之運算結果後選定運用於本研究之模式。運用選定之 SRH-2D 之模式對突擴消能池各幾何特徵之實驗數據進行模擬，最後對各種突擴消能池之幾何特徵進行詳細說明。

第四章、模式模擬與結果分析：

對第三章模式模擬之結果進行分析與探討。

第五章、結論與建議：

根據分析之結果做結論，並對可優化處給予建議，提出後續可行之研究方向。

第二章 文獻回顧



美國墾務局於 1958 年公布了關於各式消能池的設計方法，並針對等寬矩形渠道進行了大量水躍實驗與各式消能池之試驗研究(Peterka, 1984)。Herbrand(1973)基於突擴水躍的實驗數據提出了適用於突擴渠道的水躍尾水水深經驗公式。Wang、Chonbienchob (1985)則進行了等寬矩形渠道中逆坡水躍的實驗研究並推導相關公式，Nashta、Garde (1988)針對上下游寬度比介於 1.33 到 3.0 之間的突擴渠道進行實驗，探討側渦流的長度關係與突擴段的速度剖面。

Bremen、Sinniger (1990)在其著作中彙整並呈現了大量與突擴渠道相關的實驗資料，其中包含他們自身進行之試驗成果。該書所引用之資料多出自德國文獻，但因年代久遠且多為德語文獻，資料取得與解讀上具一定困難。

Mossa 等人(2003)對等寬渠道的跌水水躍進行實驗數據紀錄；Omid 等人(2010)則進行了梯形漸擴渠道的水躍實驗並探討其行為；Nasrin Hassanpour 等人 (2017)亦進行了漸擴渠道中不同底床條件下的水躍實驗，此實驗將於後續第 3.2.3 節進行接續探討。Torkamanzad 等人 (2019)則研究了突擴渠道偏心率對水躍的影響，並同樣考慮不同底床條件，此實驗將於後續第 3.2.4 節進行接續探討。

此外，Haghdoost 等人 (2022)進行了突擴渠道的水躍實驗，並記錄在擴張段底部設置射流結構後的流況變化。He 等人 (2022)則針對一實際案例進行漸擴消能池設計之實驗與 Flow-3D 三維數值模擬分析。

綜合上述研究可知，水躍特性與消能效果受到多項因素影響，其中幾何構造（如寬度比、擴張角度與偏心率）對水躍發展與能量耗散有關鍵作用。有鑑於此，為釐清相關影響機制與研究脈絡，本文文獻回顧將聚焦於四個主題進行探討，分別為：「能量定義」、「突擴與漸擴之水躍種類」、「消能池的幾何因子」以及「模式方法」。



2.1 能量定義

傳統一維能量高的定義（即白努力定律）應用於二維流場時存在一定侷限，特別是在入流與出流斷面寬度不一致的情況下，為了更加準確描述能量，於是有人為此定義新的二維斷面能量高，將其積分成為本研究將使用之能量定義。

在一維的明渠中，因為必須遵守能量守恆定律，上游斷面的能量為下游斷面的能量加上能量差，此能量差即定義為能量耗散（Chow，1959）。

比能在一渠道截面之定義為相對於渠道底部，在任意斷面處每磅水所具有的能量值，因此比能之公式為(2-1)（Chow，1959）

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (2-1)$$

y 為水深， V 為流速， g 為重力加速度。而上下游之比能差 E_L 為上游之比能 E_1 減去下游之比能 E_2 ，如公式(2-2)（Torkamanzad 等人，2019）

$$E_L = E_1 - E_2 = (y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (y_2 + \frac{V_2^2}{2g}) \quad (2-2)$$

Schröder 參考 Jaeger (1949)的方法，考慮不均勻速度分布和流線曲率的影響，提出了能量和動量方程式，(2-3)、(2-4)、(2-5)為均質流體的一維能量水頭的關係（Bremen、Sinniger，1990）。

$$H_m = \alpha \frac{V_m^2}{2g} + \beta \frac{p_m}{\rho g} + z \quad (2-3)$$

$$\alpha = \frac{1}{QV_m^2/2g} \int \frac{V^2}{2g} u dy dz \quad (2-4)$$

$$\beta = 1 + \frac{1}{Qp_m/\rho g} \int \frac{p}{\rho g} u dy dz \quad (2-5)$$

V_m 為平均橫截面速度， p_m 為平均壓力， z 為局部垂直座標， Q 為流量， V 是流速， u 為沿流動方向的分量， ρ 為流體密度，且將壓力 p 假設為靜水壓。此計算方式為針對進入一控制體積的橫截面之一維能量水頭。而在本研究中模式模擬進行二維之模擬，將一維之能量水頭進行積分獲得一橫截面之能量，由公式(2-3)轉換成公式(2-6)。



$$E_{in} \& E_{out} = \int \left(\frac{v^2 \times h \times v_x}{2g} + h^2 \times v_x \right) dx \quad (2-6)$$

式中 v_x 為沿流動方向的分量， h 為水深。

2.2 突擴與漸擴之水躍種類

在突擴水躍相關實驗中，有研究者依據水躍的發展形態進行分類。Bremen、Hager (1993) 提出的水躍分類系統，包含三種本研究中較有可能出現之主要形式，本章將予以簡要介紹。

2.2.1 Repelled jump(R-jump)

R-jump 的水躍開始發生的位置位於下游擴張段，在兩側交叉波(cross-waves)交會點(P 點)的下游。R-jump 的極限狀態為水躍開始位置位於 P 點稍微下游的位置，在此狀況下若尾水位稍微提高，則 R-jump 會崩潰，參考圖 2-1 a (Bremen、Hager，1993)。

2.2.2 Spatial jump(S-jump)

S-jump 的水躍開始發生的位置位於擴張段與 P 點之間且不明顯，與 R-jump 相比更接近射流現象。在順向流區域(forward flow regions)與逆向流區域(backward flow regions)之間存在長波面(long fronts)。S-jump 為不對稱，且可能為震盪或穩定不對稱的，這與加壓擴散段(pressurized diffuser)的流況相似。可能會週期性產生流動不穩，形成 R-jump 然後分解並重新產生 S-jump，參考圖 2-1 b (Bremen、Hager，1993)。

2.2.3 Transitional jump(T-jump)

T-jump 的水躍開始發生的位置位於未擴張段(上游)，在上游渠道出現表面渦流(surface roller)。T-jump 的前緣幾乎筆直垂直於渠道軸心，在下游部分可能為不對稱或對稱的，取決於水躍起跳位置相對於擴張開始點位置的情況，參考圖 2-1 c (Bremen、Hager，1993)。

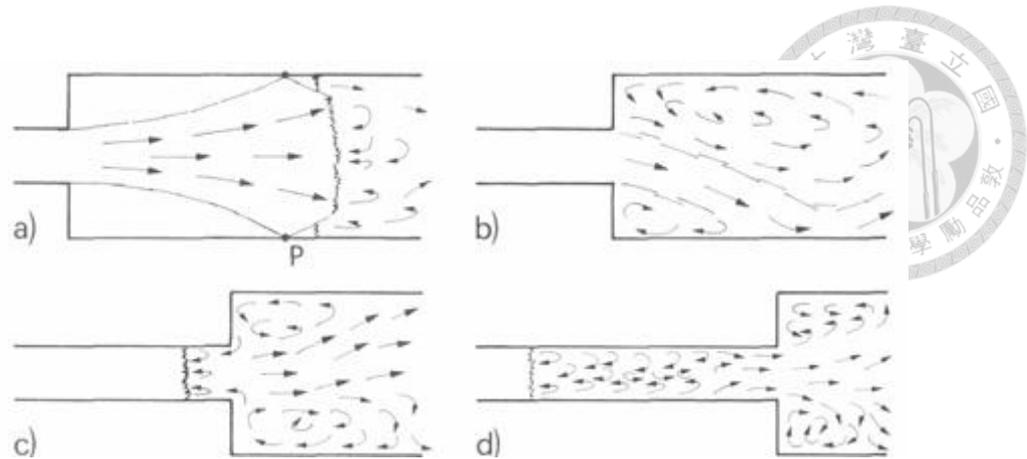


圖 2-1 突擴渠道的水躍類型，a. R-jump, b. S-jump, c. T-jump, d. classical jump (Bremen、Hager, 1993)

2.3 消能池的幾何因子

在前述的實驗中選定特定的幾何因子作為研究變數，本章將說明三種幾何因子：「上下游寬度比」、「擴張角度」、「入流偏心率」各別的消能特性。

2.3.1 上下游寬度比

下游寬度 b_2 除以上游寬度 b_1 為上下游寬度比 $B=b_2/b_1$ 。當 B 等於或大於1.5時，會產生因流量的非對稱性而導致兩側渦流長度不同，且中央線與射流之間的角度隨著 B 增加而增加 (Nashta、Garde, 1988)。

實驗結果顯示，當 B 的範圍於1到3.33之間，當 B 越大上下游之比能差 E_L 除以上游之比能 E_1 越大，且當入流福祿數 Fr_1 越大上下游之比能差 E_L 除以上游之比能 E_1 越大 (Torkamanzad 等人, 2019)。

2.3.2 擴張角度

擴張角度定義為入流之側壁與擴張段之側壁之夾角，同圖 2-2 右上之 θ 定義。

根據 Herbrand 的實驗結果，Herbrand 發現是否加入抑制側向渦流的元件對於持續水深比(sequent depth ratio) $Y = y_2/y_1$ 之差異僅為 3.5% (Bremen、Sinniger, 1990)。

Schröder 觀察到突擴消能池於擴張段若為負斜率可以使流動保持對稱於渠道軸心。每單位寬度的能量水頭損失隨著速度分布的不均勻性增加而增加。此與 Oosterholt (1947) 研究發現浸沒式水躍之表面渦流對能量耗散的結論相同，均認

為渦流對於能量耗散有顯著影響，無論是表面渦流還是側向渦流(Bremen、Sinniger, 1990)。

逐漸擴張之渠道中，當寬度變化過快時流線會與側壁剝離，在圖 2-2 中，在線 a-a 以下不會產生流線與側壁剝離，在線 a-a 與線 b-b 之間則會產生暫時性的流線與側壁剝離，在線 b-b 與線 c-c 之間會產生不對稱的完全發展的穩定剝離，在線 c-c 與線 d-d 之間產生遲滯區域，增加擴張角度至線 c-c 以上會從完全發展的穩定剝離流況轉換成射流，減少擴張角度會在線 d-d 處發生從射流到完全發展的穩定剝離的轉變 (Kline, 1959)。

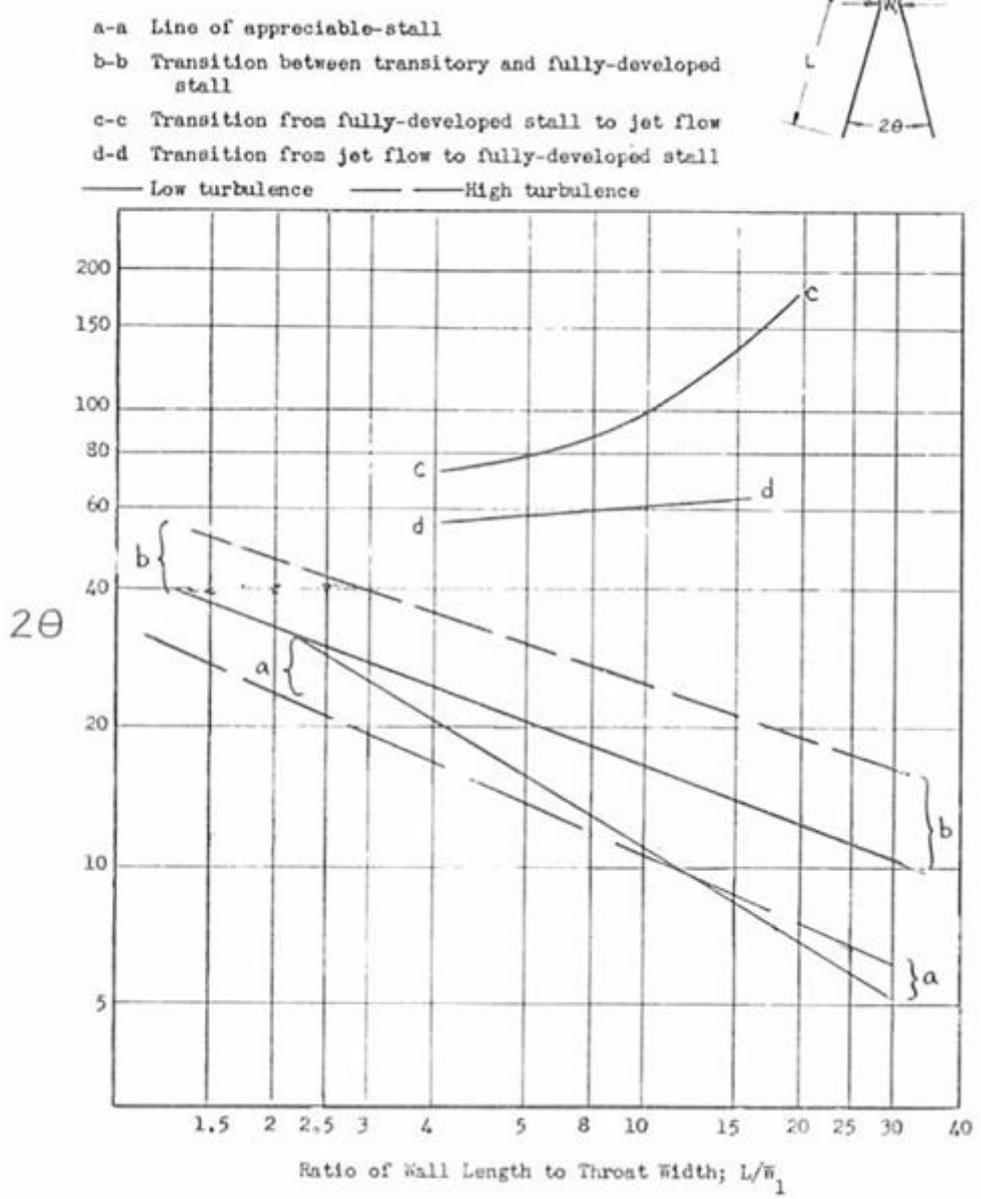
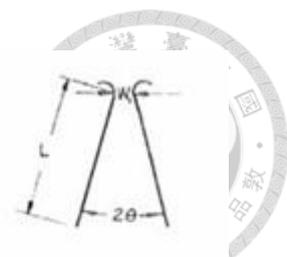


圖 2-2 二維逐漸擴張之消能池的流動模式 Kline (1959)

2.3.3 入流偏心率

在有較高之入流水深的前提下，入流雷諾數產生之黏度影響可以被忽略不計 (Hager、Bremen, 1989)。

在 Masuda、Tagawa (2021) 的文章中，偏心率定義為 S ，意義同本文定義之 e ；上游寬度定義為 h ，意義同本文定義之 b_1 。根據圖 2-4 之結論，對於第一個再附著點 X_{R1} ，隨偏心率 e 增大而減少；第二個再附著點 X_{R2} 於各偏心率 e 之變化不大； X_{R3} 和 X_{R4} 的差異隨偏心率增加而減少。



$$e = S = \frac{2s}{(B-1)b_1} \quad (2-7)$$

式中：s 為圖 2-3 中之上游渠道中心線與下游渠道中心線之距離； b_1 為上游渠道寬，同圖 2-3 中之 h；B 為上下游渠道寬度比；e 為入流偏心率。

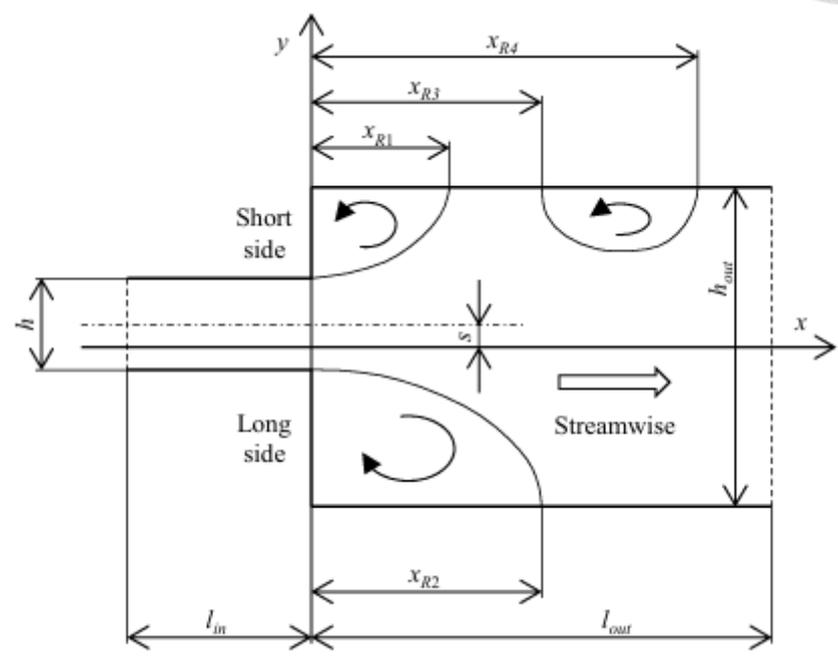


圖 2-3 模型示意圖 (Masuda、Tagawa, 2021)

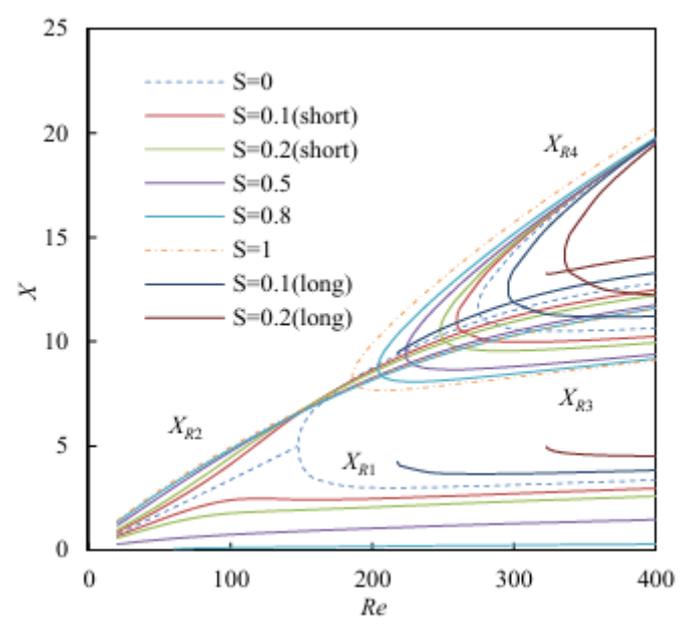


圖 2-4 再附著點與剝離點之間的距離， $X_{R1}-X_{R4}$ (Masuda、Tagawa, 2021)



2.4 模式方法

自 1970 年 MIKE 21 發布，該模式最初僅具備 2D 直角網格的模擬功能；至 1990 年發布的曲線網格版本解決了此問題 (DHI, 2004)。HEC-RAS 於 1995 年推出 1D 模式版本 (Brunner, 2020)，Zhou、Stansby (1999) 則探討使用速度採深度平均的 2D 模式可以呈現水躍現象。

OpenFOAM 於 2004 年正式發布 (官方網站資訊) (Greenshields, 2024)。SRH-2D 於 2008 年發布 (Lai, 2008)；TELEMAC-2D 於 2010 年轉成開源，逐漸成為國際廣泛應用的模式之一 (Ata 等人, 2014)。

Asnaashari 等人 (2016) 進行了上、下游分別為梯形、矩形的漸擴渠道的實驗與自行開發的三維模式進行比較。HEC-RAS-2D 於 2016 年發布 (Brunner、CEIWR-HEC, 2016)，之後 Deal 等人 (2017) 對 HEC-RAS-1D、HEC-RAS-2D 與 SRH-2D 進行比較，說明了這三種模式的特性與優缺點。

Zabaleta 等人 (2022) 進一步應用 OpenFOAM 進行三維消能池模擬，其中包含了漸擴段的消能塊的建模，展現其在處理複雜水力現象中的應用潛力。

2.4.1 模式介紹

隨著電腦技術的進步，各式各樣的水力模式被開發出來，以下將列舉一些常見的二維水力模式作為介紹。

TELEMAC-2D 是由法國電力公司 (French Electricity Board, EDF-R&D) 研發部門下屬的國家水力實驗室 (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE) 開發。該模式使用有限元素法 (finite-element method) 或有限體積法 (finite-volume method)，並基於三角形單元的計算網格來求解聖維南方程式 (Saint-Venant equations)，可以考慮底床摩擦、湍流等 (Ata 等人, 2014)。

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM 是由丹麥水利研究所 (DHI Water & Environment) 所研發。該模式基於二/三維不可壓縮雷諾平均 Navier-Stokes 方程式的數值解，並遵守 Boussinesq 與靜水壓的假設，可以考慮動量擴散、底部剪應力等 (Environment, 2007)。



Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS)是由美國陸軍工兵團(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)的水資源研究所(Institute for Water Resources, IWR)的水文工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)所研發。該模式基於有限體積法對 Full Saint Venant 方程式或 Diffusion wave 方程式，將於第 3.1.1 節進行後續探討 (Brunner, 2020)。

Sedimentation and River Hydraulics – Two-Dimensional River Flow Modeling (SRH-2D)是由美國墾務局(Bureau of Reclamation)所研發。該模式使用有限體積法求解 2D 深度平均動態波方程式也就是標準 St. Venant 方程式，將於第 3.1.2 節進行後續探討 (Lai, 2008)。

第三章 研究方法



3.1 模式選擇

參考 Deal 等人 (2017) 的研究，得知 HEC-RAS 2D 與 SRH-2D 已被驗證可用於二維狀態呈現水躍的現象，因此從此二者模式中選擇將於本研究中使用之二維模式。

3.1.1 HEC-RAS 2D

3.1.1.1 控制方程式(Governing Equation)

於 HEC-RAS-2D 主要使用以下四種控制方程式：

1. 質量守恆(Mass Conservation)

假設流體為不可壓縮，則質量守恆式為

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (hV) = q \quad (3-1)$$

式中 t 為時間， u 、 v 為 x 、 y 方向的速度分量， q 為源/匯通量項， $V = (u, v)^T$

為速度向量， $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})^T$ 為梯度運算子。

2. 動量守恆(Momentum Conservation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v \\ &= -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f_c u \\ &= -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} \end{aligned} \quad (3-3)$$

式中：

u, v 為直角座標系中的速度 [L/T]

g 為重力加速度 [L/T²]

z_s 為水面高程 [L]

$v_{t,xx}, v_{t,yy}$ 為 x 、 y 方向上的水平渦流黏滯係數 [L²/T]



$\tau_{b,x}$, $\tau_{s,y}$ 為 x 、 y 方向上的底部剪應力 [M/L/T²]

R 為水力半徑 [L]

$\tau_{s,x}$, $\tau_{s,y}$ 分別作用於 x 與 y 方向的表面風應力 [M/L/T²]

h 為水深 [L]

f_c 為科氏力參數 [1/T]

p_a 為大氣壓 [M/L/T²]

以向量對動量守恆進行描述可以將方程式簡化更易於閱讀：

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + f_c \mathbf{k} \times \mathbf{V} = -g \nabla z_s + \frac{1}{h} \nabla \cdot (\mathbf{v}_t h \nabla \mathbf{V}) - \frac{\tau_b}{\rho R} + \frac{\tau_s}{\rho h} - \frac{1}{\rho} \nabla p_a \quad (3-4)$$

式中：

$\mathbf{V} = (u, v)^T$ 為速度向量， \mathbf{v}_t 為渦流黏滯張量， \mathbf{k} 為垂直方向之單位向量， τ_s 為表面風應力向量。

3. 湍流模型(Turbulence Modeling)

$$\mathbf{v}_t = D u_* h + (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (3-5)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} \quad (3-6)$$

式中：

D 為混合效應之係數張量、 u_* 為剪切速度， C_s 為 Smagorinsky 係數(大約介於 0.05 和 0.2 之間)， Δ 為濾波器寬度(filter width)其數值與與局部網格解析度相同， $|\bar{S}|$ 為應變率。

4. 淺水方程之擴散波近似(Diffusion Wave Approximation to the Shallow Water Equations)

忽略動量方程式中的非穩態項、對流項、湍流項及科氏力項，且當流速由重力位壓梯度與底床摩擦力達平衡時，獲得經典擴散波方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla z_s) + S + q \quad (3-7)$$



$$\beta = \frac{hR^{2/3}}{n} \left| \nabla z_s + \frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho gh} \right|^{-1/2} \quad (3-8)$$

$$S = \nabla \cdot \left[\beta \left(\frac{1}{\rho g} \nabla p_a - \frac{\tau_s}{\rho gh} \right) \right] \quad (3-9)$$

式中 n 為曼寧粗糙度係數。

3.1.2 SRH-2D

3.1.2.1 控制方程式(Governing Equation)

對三維的 Navier-Stokes 方程對流速取深度平均的假設，可以獲得經典的二維 St. Venant 方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = e \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \quad (3-12)$$

式中：

t 為時間， h 為水深， U 與 V 為在 x 、 y 方向之深度平均流速分量， e 為超量降雨率(excess rainfall rate)， g 為重力加速度， T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 為深度平均湍流應力， D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} 為由深度平均而產生的擴散項， $z = z_b + h$ 為水面高， z_b 為底床高， ρ 為水密度， τ_{bx} 、 τ_{by} 為底床剪應力(摩擦力)。

其中底床摩擦力之運用曼寧方程如下：

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} \sqrt{U^2 + V^2}; \quad C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (3-13)$$



依據 Boussinesq 假設，湍流應力可表示為：

$$T_{xx} = 2(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k$$

$$T_{xy} = (v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)$$

$$T_{yy} = 2(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3}k$$

式中：

v 為水的動黏滯係數， v_t 為湍流渦黏性係數， k 為湍流動能

在本研究中使用深度平均的拋物線模型(parabolic model)，湍流渦黏性係數以 $v_t = C_t U_* h$ 計算， U_* 為底床摩擦速度， C_t 取 0.7， k 取 0。

3.1.3 簡易案例測試與模式選擇

參考 Yoosefdoost、Lubitz (2022) 之研究結果，確定各解算方式的誤差狀況。建置一簡易矩形渠道，邊界條件參照 Deal 等人 (2017) 的方式對 HEC-RAS-2D 進行設定，先使用 HEC-RAS-1D 進行模擬，得到入流與出流斷面之 Energy Grade Line(EGL)的斜率，再將入流斷面的 EGL 斜率填入 HEC-RAS-2D 的 Unsteady Flow 的 Inflow 的 EG Slope for distributing flow along BC Line，出流斷面的 EGL 斜率填入 Normal Depth 的斜率。建模方面使用 Excel 對各點位之高度設定後使用 QGIS 進行地形建置後匯入 HEC-RAS，曼寧 n 設定為 0.02。SRH-2D 使用模式內建方式建模，邊界使用同一數據。

3.2 模式驗證

為評估數值模式之準確性與適用性，本研究將採用已發表之實驗數據進行模型驗證。此驗證旨在確認模式在不同條件下與實際觀測值之間的誤差，從而瞭解模式之適用範圍與限制。

本研究規劃三組實驗數據（實驗一、二、三）進行比對，以確認模式在特定幾何條件下的模擬能力：

實驗一：探討入流偏心率與上下游寬度比對模式模擬結果之影響。

實驗二：探討擴張角度與上下游寬度比對模式模擬結果之影響。



實驗三：同樣探討入流偏心率與上下游寬度比之影響，但其入流偏心率之涵蓋範圍較實驗一更廣。

3.2.1 尾水折減參數決定

在邊界條件設定方面，由於實驗渠道均為水平渠道，下游邊界條件（由水躍後高度至出流斷面）考慮 H2 曲線（水平坡度上水深介於臨界水深與無窮大之間之水面線）之特性，參考 Bremen、Sinniger（1990）的 Fig5.9，即圖 3-1，測定當尾水折減多少百分比時會最接近擬合曲線，這個百分比將作為之後尾水邊界的通用折減之數值。

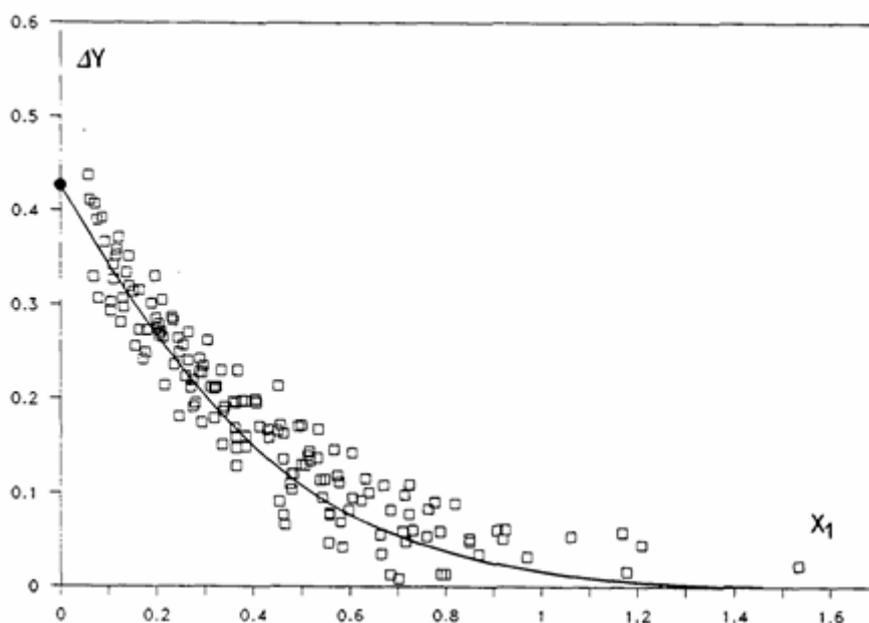


圖 3-1 ΔY 、 X_1 圖（Bremen、Sinniger，1990）

(□) 為實驗點，(—) 為式(3-16)，●為 ΔY_{max} 計算方式為式(3-15)

$$\Delta Y_{max} = 1 - \frac{1}{\sqrt{B}} = 0.442 \quad (3-15)$$

$$\Delta Y = \Delta Y_{max} \cdot f(X_1) \quad (3-16)$$

$$f(X_1) = [1 - th(\bar{C}X_1)] \quad (3-17)$$

$$th(i) = [\exp(i) - \exp(-i)] / [\exp(i) + \exp(-i)] \quad (3-18)$$

$$X_1 = x_1 / Lr^* \quad (3-19)$$

$$Lr^* = (6.29Fr_1 - 3.59) \cdot h_1 \quad (3-20)$$



式中 $\bar{C} = 1.9$ ， x_1 為水躍起跳位置至擴張口的長度，參考圖 3-2， h_1 為入流水深， Fr_1 為入流福祿數。

3.2.2 實驗一

依照 Bremen、Sinniger (1990) 的 Appendix 1 實驗數據進行建模，渠道形狀參照圖 3-2、圖 3-3 進行建模。考量到實驗數據之尺度較小，低於模式所需之最低數值需求，因此本研究遵循長度參數放大 10 倍且福祿數維持不變之原則，調整模型的幾何與水力參數後進行建模與模擬。

由於實驗一對於參數 x_2 較長的側向渦流未進行詳細的定義，僅提及該參數位置為水躍結束之位置與側渦流結束之位置，因此對 x_2 進行用於模式的定義。

參考第 2.2.2 節與第 2.2.3 節之兩種水躍狀況，結合模擬結果，可以發現在側渦流區域會先產生高福祿數且與主流 x 方向流向相反的區域，參考 Kawamura 等人 (2002) 的實驗，比較 $Fr = 0.2$ 、 0.5 、 0.8 的水位高度，可以發現 $Fr = 0.2$ 與 0.5 之間的水位差異不高，而 $Fr = 0.8$ 的水位明顯較前兩者低。假設水躍於 $Fr = 0.5$ 位置大部分已結束。

依據前述假設及側向渦流區的流況特性，對水躍結束位置 x_2 進行定義。由於水躍為一種在短距離內福祿數由超臨界流 ($Fr > 1$) 迅速轉換為亞臨界流 ($Fr < 1$) 的現象，其結束位置應為亞臨界流。

水躍結束位置 x_2 之定義依照側向渦流區之最大福祿數分為兩類：

1. 最大福祿數大於等於 1：直接採用 $Fr=0.5$ 作為水躍結束位置 x_2 。
2. 最大福祿數小於 1：由於最大福祿數未達臨界流，可能無法直接採用 $Fr = 0.5$ 作為絕對判斷標準，故本研究類比前述情形，將 $Fr = 0.5$ 視為最大福祿數的 50% 作為相對標準。亦即，水躍結束位置 x_2 定義為 Fr 降至最大福祿數之 50% 所對應之位置，作為低福祿數區條件下的相對性判斷。

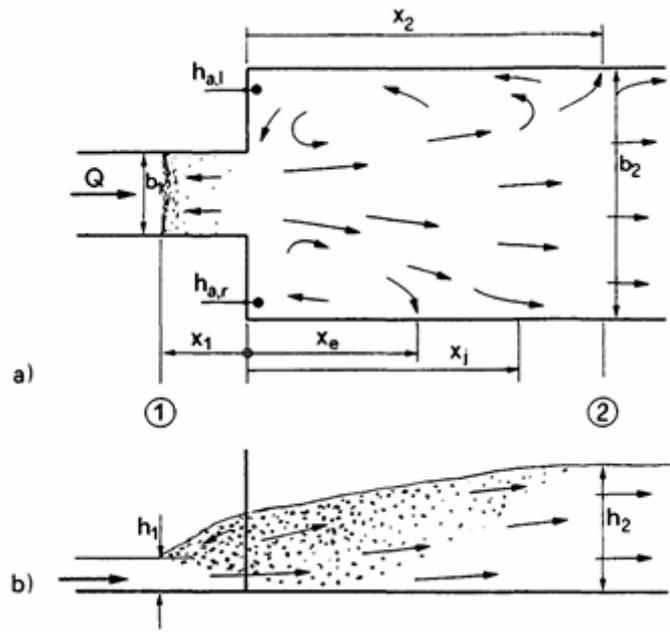


圖 3-2 實驗一對稱突擴之渠道相關標註

a)俯視圖，b)軸向圖 (Bremen、Sinniger，1990)

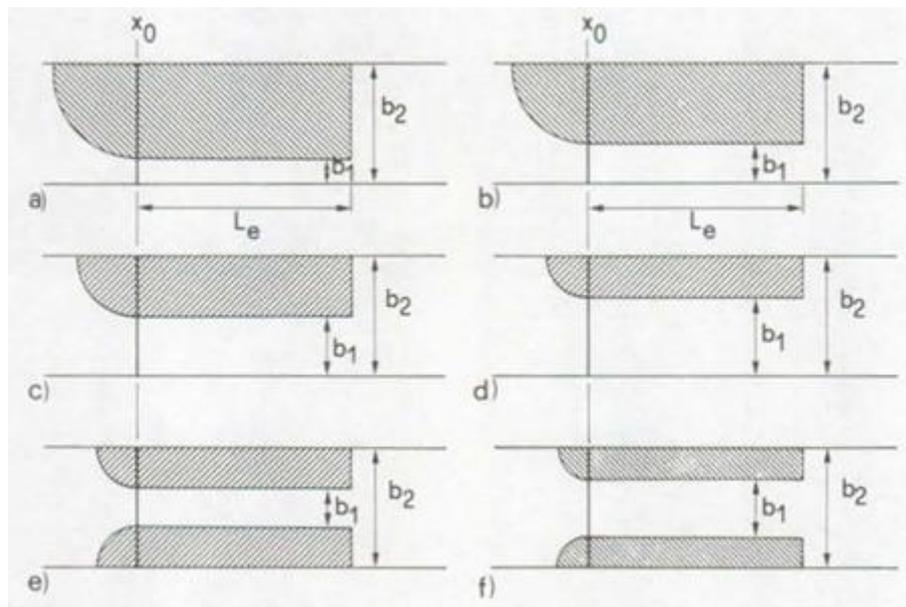


圖 3-3 實驗一之入流渠道配置

$b_2=0.5\text{m}$ ， x_0 為閘門位置；

非對稱：a) $B=5$ ；b) $B=3$ ；c) $B=2$ ；d) $B=1.5$

對稱：e) $B=3$ ；f) $B=2$



3.2.3 實驗二

參照 Nasrin Hassanpour 等人 (2017) 實驗的實驗數據進行建模，渠道形狀參照圖 3-4 進行建模，按研究給定的數值範圍選擇入流條件，而出流條件根據文中提出之尾水經驗公式(3-15)給定尾水高，同 3.2.2 章節考慮 H2 曲線對尾水下修 3% 進行調整。

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.832(Fr_1) + 1.998(B) - 1.250\left(\frac{r}{y_1}\right) + 0.432 \quad (3-21)$$

式中 y_1 為入流的水深高， y_2 為出流的水位高， Fr_1 為入流斷面的福祿數， r 為底部消能物之高度，於本研究中僅採用底部無消能物 (即 $r=0$)。

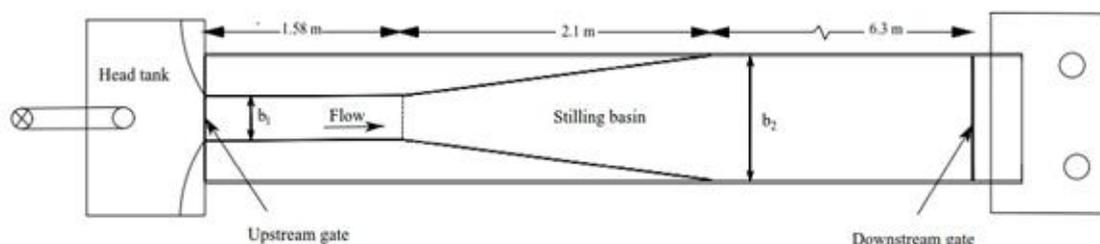


圖 3-4 實驗二渠道俯視圖 (Nasrin Hassanpour 等人, 2017)

3.2.4 實驗三

參照 Torkamanzad 等人 (2019) 實驗的實驗數據進行建模，渠道形狀參照圖 3-5 進行建模，按研究給定的數值範圍選擇入流條件，而出流條件根據文中提出之尾水經驗公式

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.797(Fr_1) - 0.855\left(\frac{h}{y_1}\right) + 4.097(\alpha) - 1.388 \quad (3-22)$$

式中 h 同(3-15)之 r ，於本研究中僅採用底部無消能物 (即 $h=0$)。

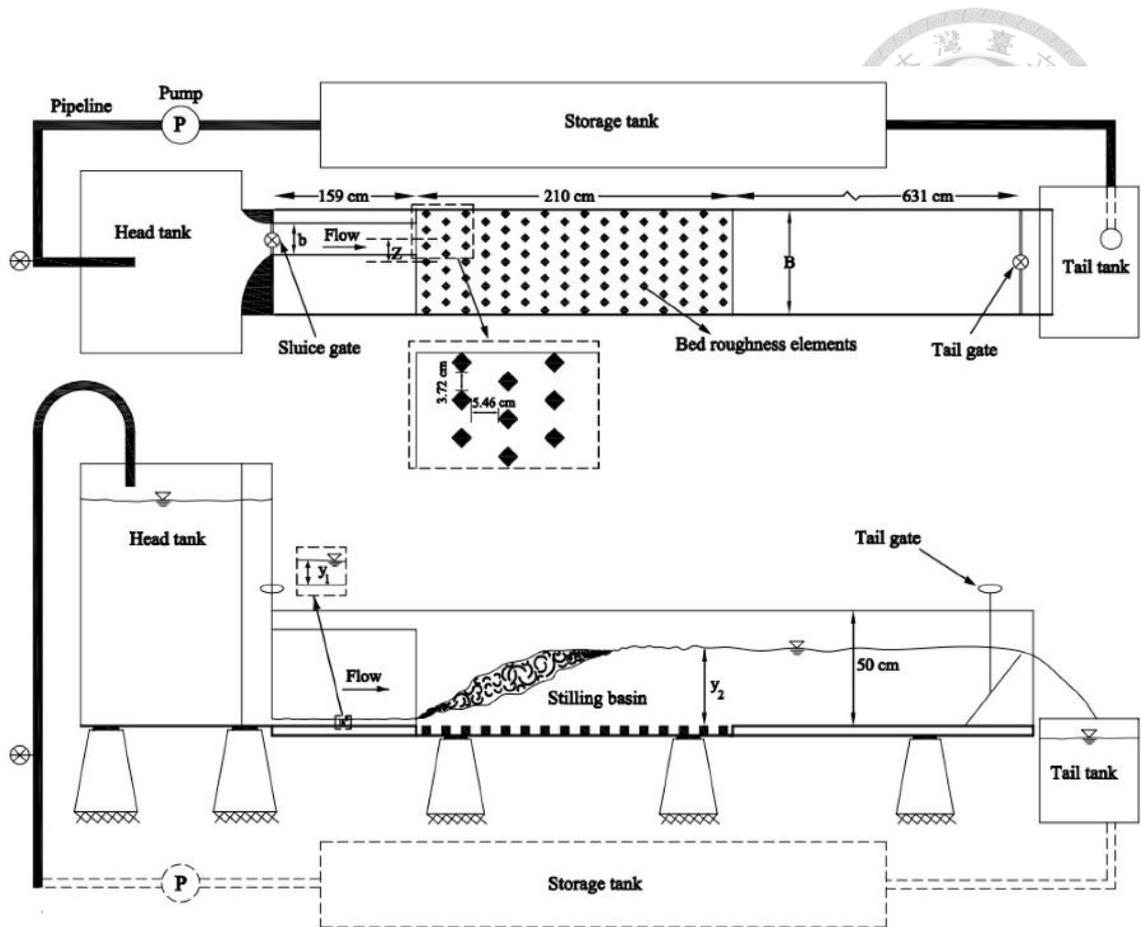


圖 3-5 實驗三渠道俯視、側視圖 (Torkamanzad 等人, 2019)

3.3 幾何因子模擬

本節將針對前述選定的幾何因子進行建模與模擬，旨在找出在同樣的入流條件下，這些因子能達到最大的能量耗散，各渠道段定義參照圖 3-6。預計將進行建模測試的範圍參考圖 3-7。

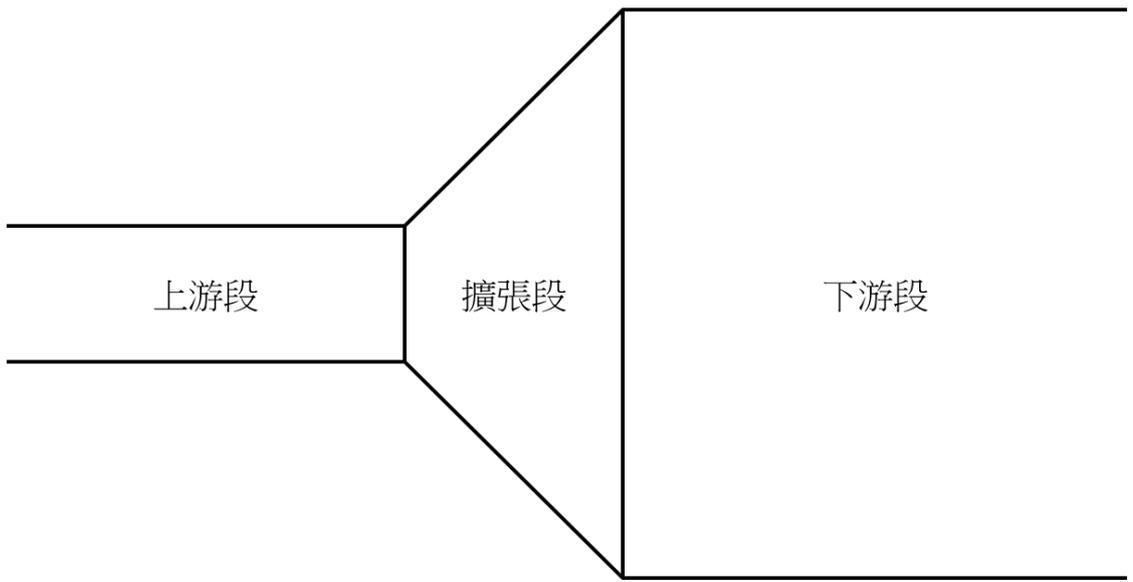


圖 3-6 各渠道之段面定義

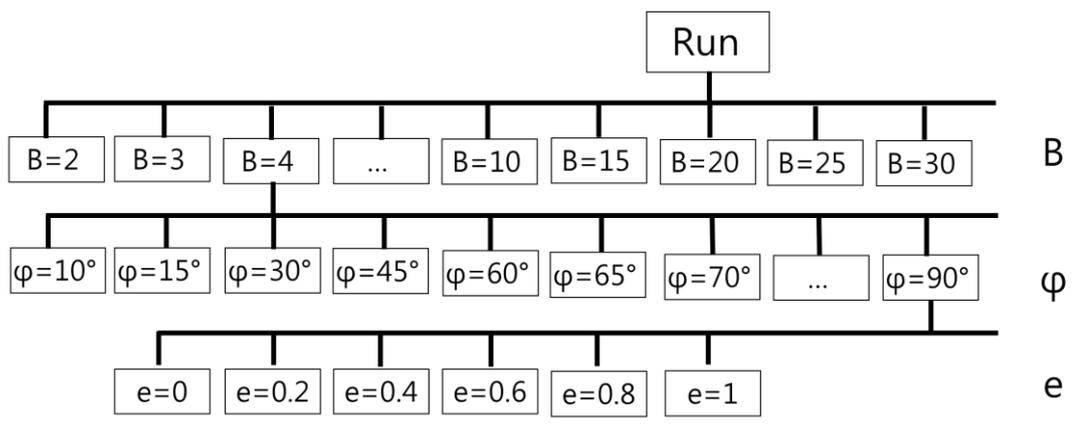


圖 3-7 建模測試的範圍

3.3.1 上下游寬度比

3.3.1.1 建模

上游段長度設定 10 公尺，擴張段為突擴（即擴張段長度趨近於零），上游寬度 5 公尺，坡底斜率為 0.001，下游段長度為 70 公尺，曼寧 n 為 0.02。上下游寬度比 B 為 1 到 10(整數增加)、15、20、25、30。

3.3.1.2 邊界條件

入流之邊界條件設定流量為 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ，入流水深為 1 公尺，入流福祿數為 3.83；因出流條件會大幅影響消能效率（消能效率 = $\frac{\text{入流斷面能量} - \text{出流斷面能量}}{\text{入流斷面能量}}$ ），因此根據六種方式決定出流邊界條件，嘗試找出最好的決定尾水的公式，這些方法分別是：



1. 經典水躍公式，式(3-23)

$$Y = \frac{y_2}{y_1} = 0.5 \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \quad (3-23)$$

2. 參考 Bremen、Sinniger (1990) 中 Rajaratnam、Subramanya (1968) 的公式，同式(3-24)

$$\frac{Y-0.75}{Fr_1-0.85} = \frac{1}{B} + 0.3 \quad (3-24)$$

3. 參考 Herbrand (1973) 的公式，同式(3-25)

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.5 \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \cdot B^{-3/8} \quad (3-25)$$

4. 參考曼寧公式(3-26)，計算獲得的正常水深(normal depth)

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S_f} \quad (3-26)$$

5. 將下游水深固定在當福祿數為 0.1 時需要的水深，參考式(3-27)

$$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy_2}} = 0.1 \quad (3-27)$$

6. 不論 B 如何改變，均設定同樣的尾水高，且為較高之水位

3.3.2 擴張角度

擴張角度 φ 的定義參照圖 3-8

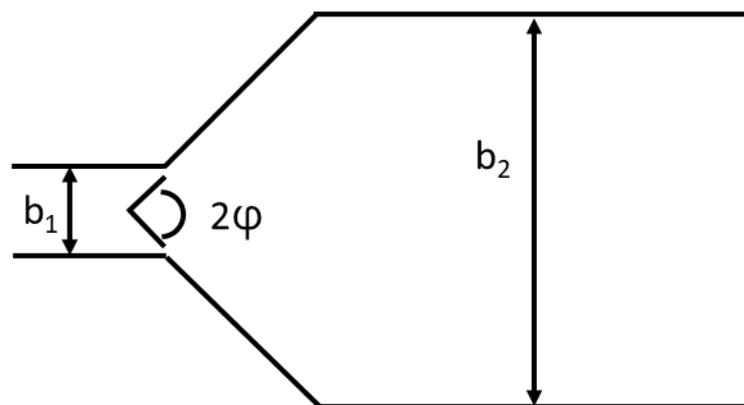


圖 3-8 擴張角度示意圖

3.3.2.1 建模

入流段同 3.3.1.1 之設定，底坡斜率 0.001，曼寧 n 為 0.02，B 為 4， φ 的範圍為 10° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 65° 、 70° 、 75° 、 80° 、 85° 與 90° ，因考慮擴張角度



的初衷是希望可以減少部分的土地佔用，因此不考慮 φ 大於 90° 之設計。下游段同

3.3.1.1，在擴張段後長度 70 公尺。

3.3.2.2 邊界條件

入流條件同 3.3.1.2，出流條件選定：

1. 參考曼寧公式(3-26)，計算獲得的正常水深。
2. 將下游水深固定在當福祿數為 0.1 時需要的水深，同式(3-27)。
3. 不論 φ 如何改變，均設定同樣的尾水高，且為較高之水位。

3.3.3 入流偏心率

入流與出流段同 3.4.1.1 之設定，底坡斜率 0.001，曼寧 n 為 0.02， φ 為 90° (突擴)， B 為 4，入流偏心率 e 的定義，同式(2-7)， e 的範圍在 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1， e 為 0 時代表入流段在中央無偏心。邊界條件的設定同 3.3.2.2。

3.3.4 混合模擬

將第 3.3.1 節、第 3.3.2 節與第 3.3.3 節中確定之最佳參數值進行混合與數值上下變動，確認這些幾何因子是否有疊加效應與是否可以獲得最佳的消能效率。

第四章 模式模擬結果分析



針對第三章所建構之模式的模擬結果進行分析，若參數設定需進行更正也將於本章作進一步的說明。

4.1 模式選擇

使用 HEC-RAS-1D 製作一渠道，長 29 m，寬 2 m，流量為 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ，入流水深為 0.5 m，尾水高 2.168m， $dx = dy = 0.1 \text{ m}$ 。右側均為入流，左側均為出流。

4.1.1 HEC-RAS-2D

初步測試顯示，若將尾水邊界條件設定為「正常水深」(Normal Depth)，則模擬結果無法計算出預期之目標尾水水深，存在顯著差異。因此對前述之邊界參數設定進行修正，將尾水邊界條件改為採用「水位歷線」(Stage Hydrograph)的方式，直接指定尾水處之水面高程（水深與底床高之和）。

HEC-RAS 2D 提供四種 Unsteady Flow 的解算方案，本節將逐一測試這四種解算方案是否可以成功模擬並呈現第 3.1.3 節所設想之水躍：

4.1.1.1 第一種 Diffusion Wave

在圖 4-1 中雖可發現入流（右）有呈現一點高福祿數（即紅色）區域，而圖 4-2 中未顯示入流處（右）與出流處（左）之水深有明顯差異（水深從 2.172 至 2.177），無法認定其出現水躍現象。在入流與出流斷面均無數值缺失，可運用式（2-6）進行入、出流的能量計算。

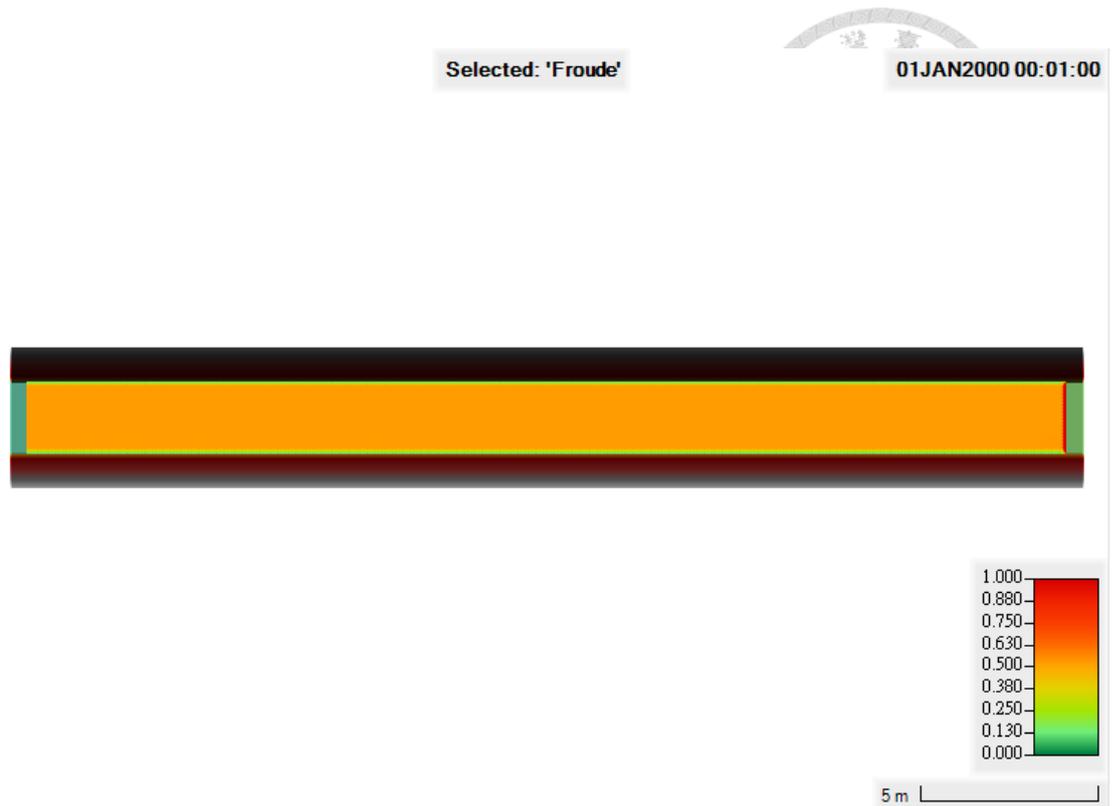


圖 4-1 Diffusion Wave 的福祿數模擬結果

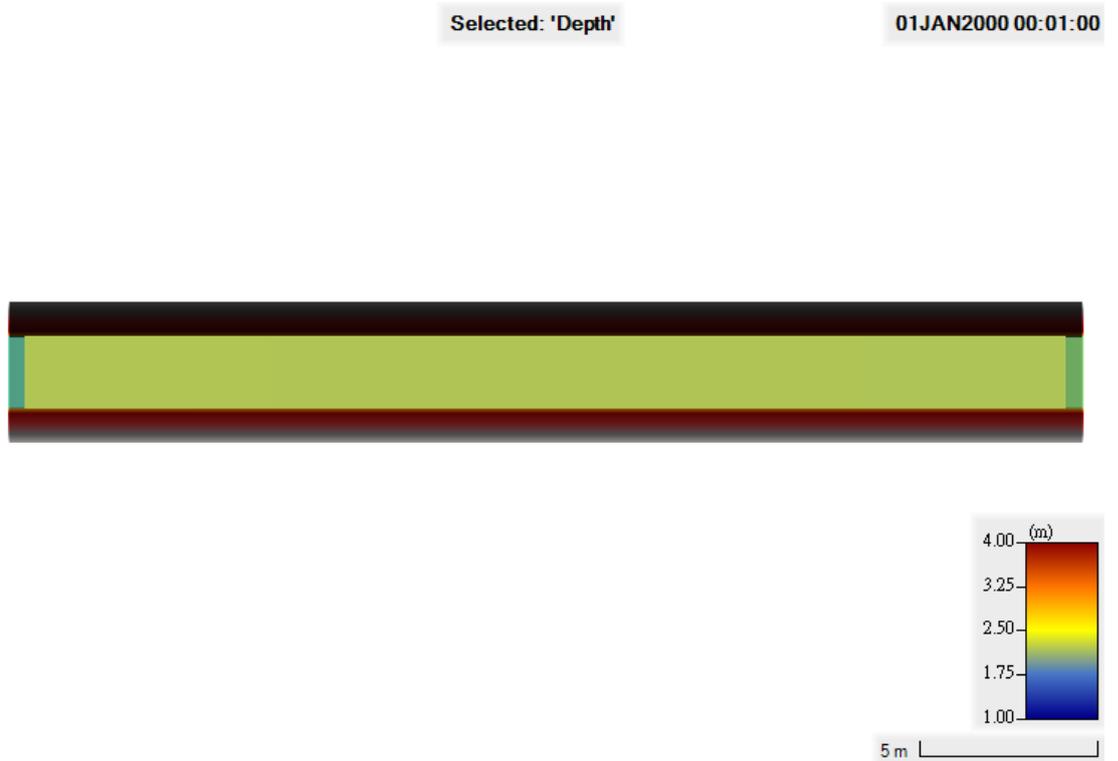


圖 4-2 Diffusion Wave 的水深模擬結果

4.1.1.2 第二種 Eulerian-Lagrangian Shallow Water Equation Solver, SWE-ELM(original/faster)

圖 4-3 與圖 4-4 顯示，入流處呈現高福祿數及低水位特徵，此現象符合設定之入流條件。此外，圖 4-5 亦確認入流斷面存在數值缺失。此缺失將直接導致入流能量依式 (2-6) 計算時產生誤差，故此計算方法並不適用於本研究。

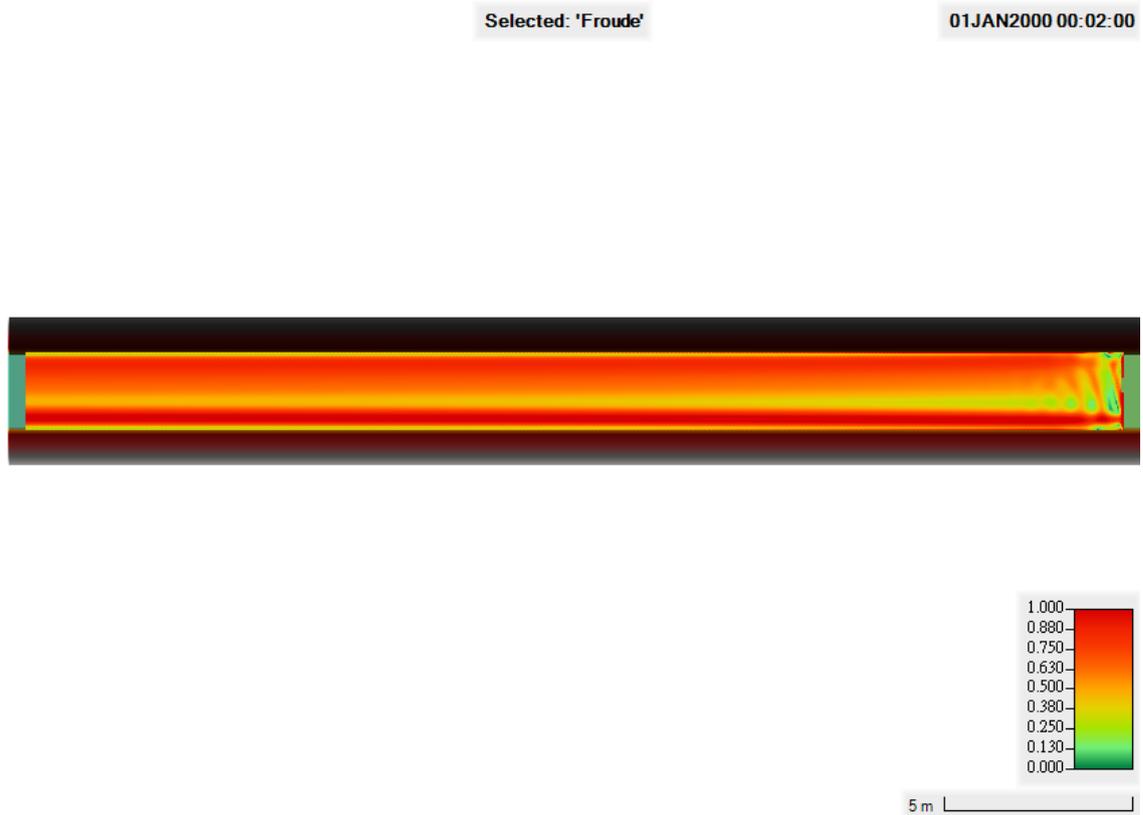


圖 4-3 SWE-ELM(original/faster)的福祿數模擬結果

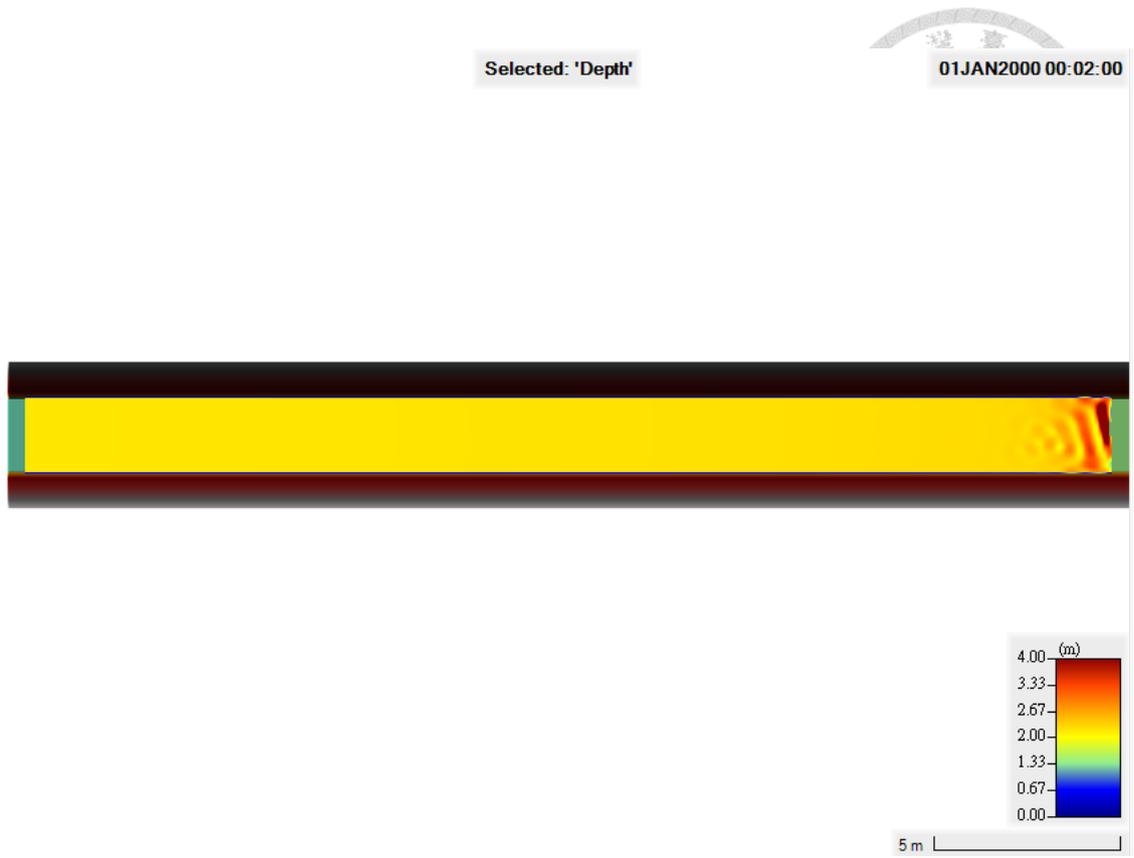


圖 4-4 SWE-ELM(original/faster)的水深模擬結果

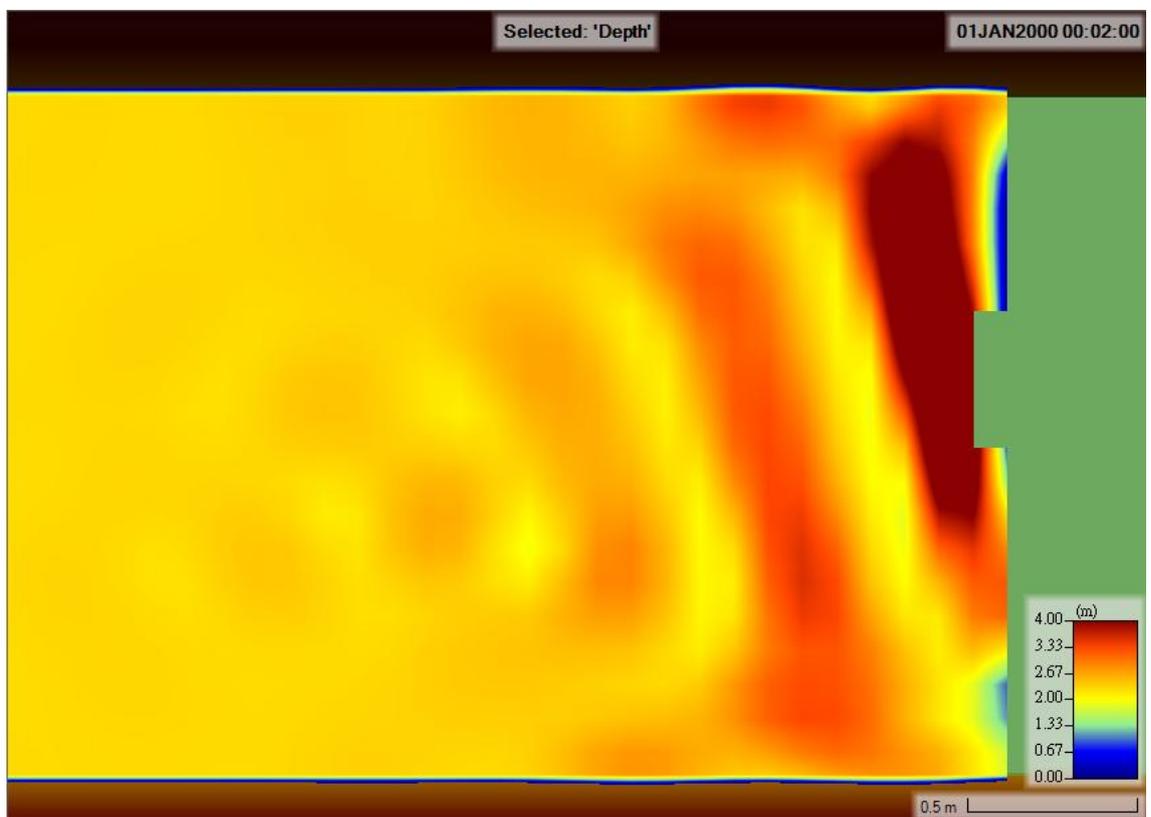


圖 4-5 SWE-ELM(original/faster)的水深模擬結果

4.1.1.3 第三種 Local Inertia Approximation to the Shallow Water Equations, SWE-LIA(local inertia)

圖 4-6 顯示渠道整體流場之福祿數均大於 1，表明水流全程維持超臨界流狀態。僅於出水斷面處，福祿數觀察到下降至 1 以下，呈現亞臨界流特徵。圖 4-7 驗證了模擬所得之尾水水深超過設定值。此外，圖 4-8 亦確認入流斷面存在數值缺失。此缺失將直接導致入流能量依式 (2-6) 計算時產生誤差，故此計算方法並不適用於本研究。

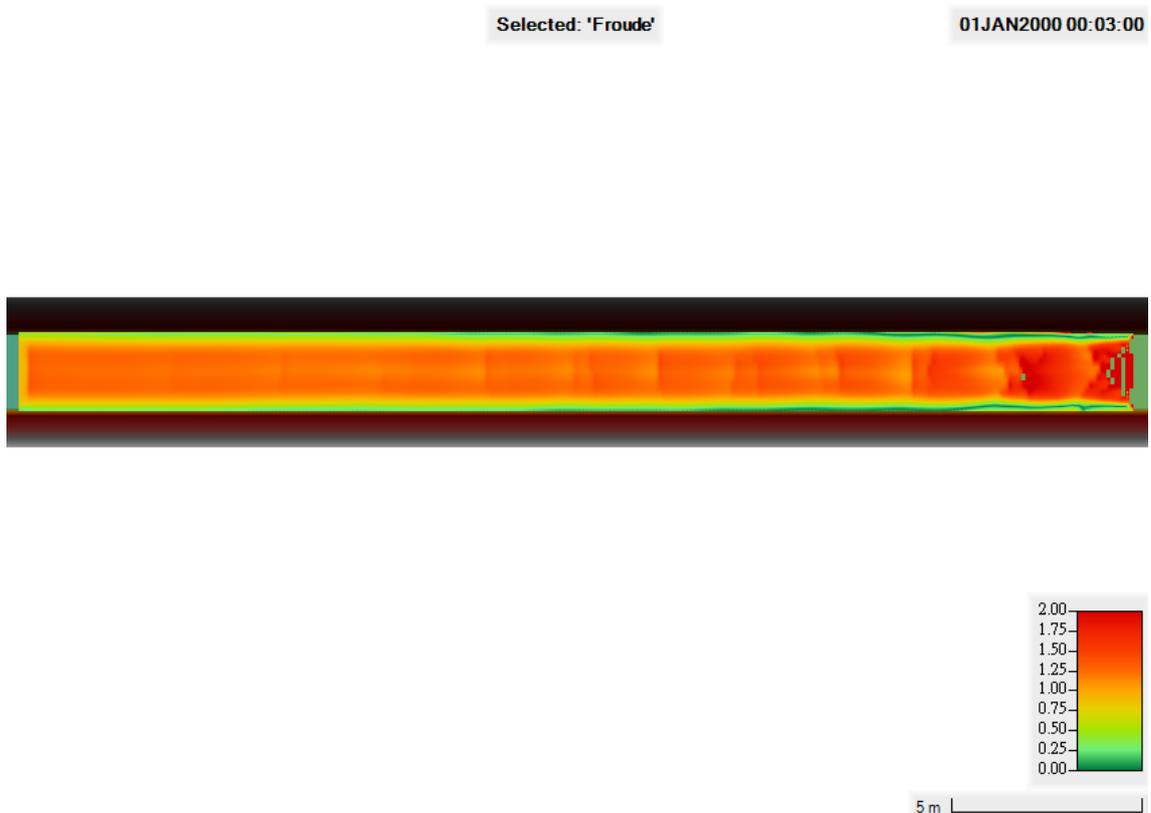


圖 4-6 SWE-LIA(local inertia)的福祿數模擬結果



圖 4-7 SWE-LIA(local inertia)的水深模擬結果

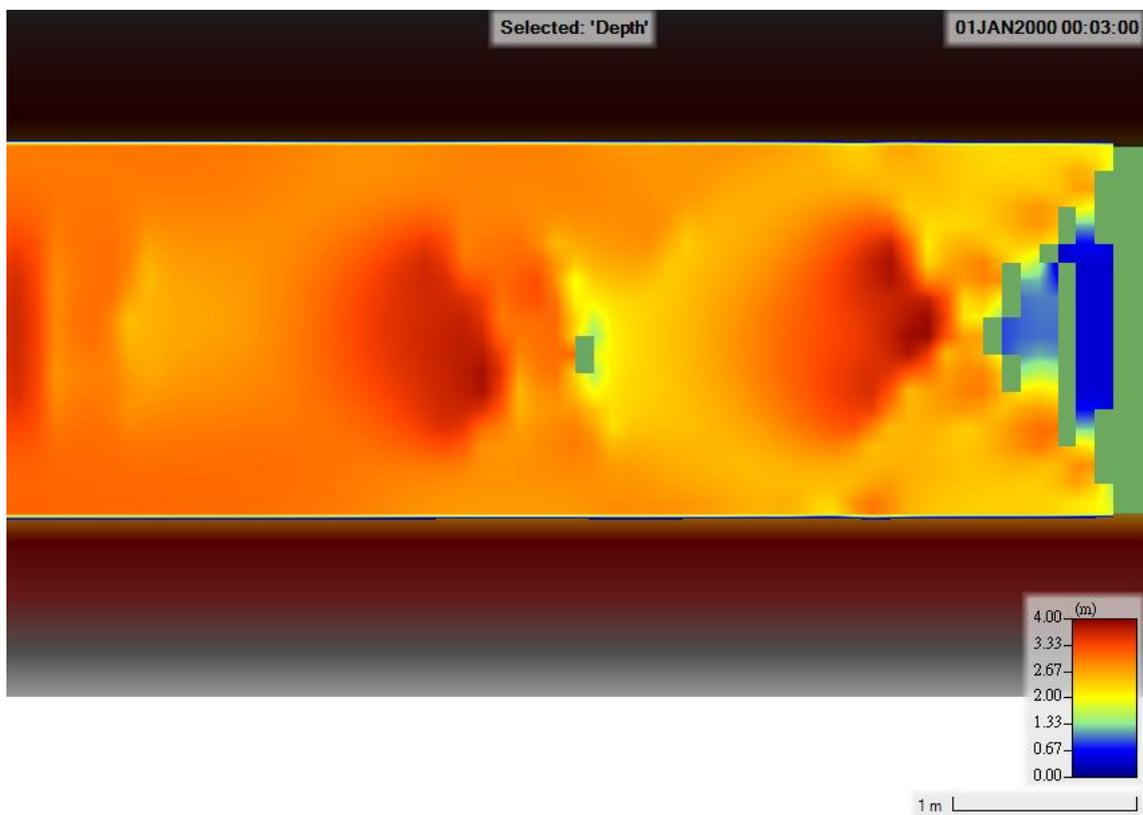


圖 4-8 SWE-LIA(local inertia)的水深模擬結果(放大入流部分)

4.1.1.4 第四種 Eulerian Shallow Water Equation Solver, SWE-EM(stricter momentum)

圖 4-9 顯示了入流斷面有符合設定的高福祿數區域出現，在圖 4-10 中有顯示符合設定之低水位。在入流與出流斷面均無數值缺失，可運用式 (2-6) 進行入、出流的能量計算。



圖 4-9 SWE-EM(stricter momentum) 的福祿數模擬結果



圖 4-10 SWE-EM(stricter momentum)的水深模擬結果

4.1.2 SRH-2D

因原先之尾水高度設定值可能不易穩定，因此對尾水高度進行更改，由 2.168 公尺更改成 2.6 公尺。

圖 4-11 顯示入流處有產生符合設定之高福祿數，圖 4-12 顯示入流處有產生符合設定之低水深，在入流與出流斷面均無數值缺失，可運用式 (2-6) 進行入、出流的能量計算。



圖 4-11 SRH-2D 的福祿數模擬結果



圖 4-12 SRH-2D 的水深模擬結果

4.1.3 結論

使用 HEC-RAS 2D 與 SRH-2D 對同一大小之渠道進行水躍之模擬，兩者皆可以模擬出水躍的結果。然而，考量到 SRH-2D 在建模上的相對簡便，以及其在計算個案時對运算資源的需求顯著較低(經初步評估，約為 HEC-RAS 2D 的五至十倍)，鑒於本研究後續將涉及大量的模擬作業，故最終決定選用 SRH-2D 作為本研究之二維數值模式。

4.2 模式驗證

根據前述之方式，進行建模模擬並確認結果。

4.2.1 尾水折減參數決定

各點位比較呈現於圖 4-13、圖 4-14、圖 4-15，綜合分析此三圖，可發現共軛水深折減 3% 之數據與回歸公式 (3-15) 呈現較高的一致性，因此將固定對共軛水深折減 3% 作為出流斷面之邊界條件設定。

$$Y = \frac{h_2 \text{ 模擬值}}{h_1 \text{ 模擬值}} \quad (4-1)$$

$$\Delta Y = 1 - \frac{(Y-1)}{(Y^*-1)} \quad (4-2)$$

式(4-2)中 Y^* 同式(3-23)之 Y ， h_2 為水躍後的水深， h_1 為入流水深。

式(4-2)為計算實驗數據之 ΔY ，式(3-15)至式(3-20)為計算回歸公式之 ΔY 數值。

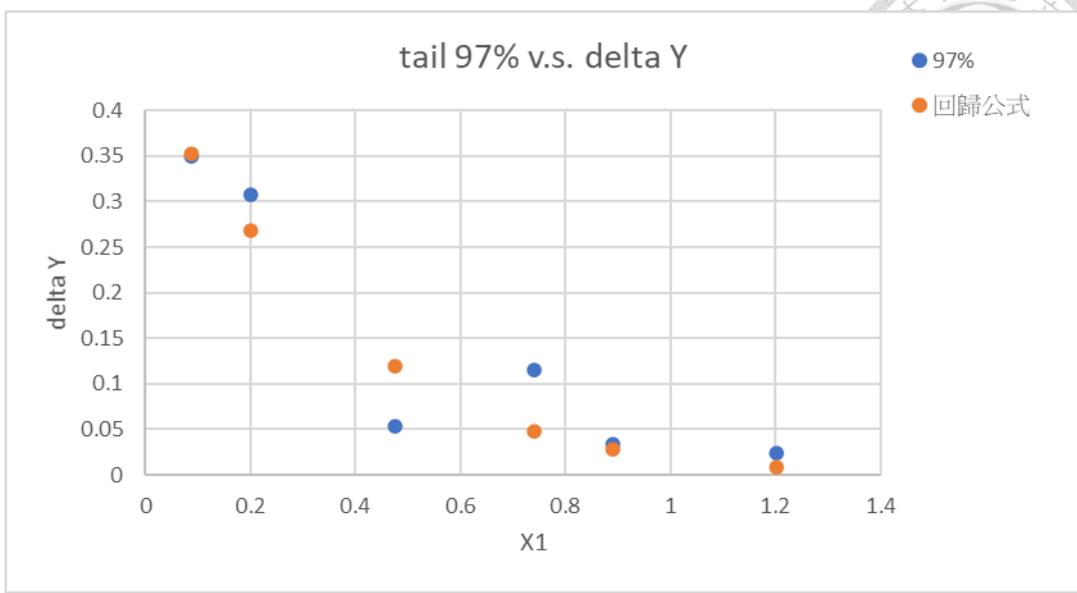
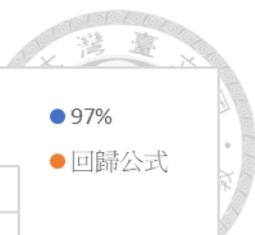


圖 4-13 對共軛水深折減 3%與回歸公式(3-15)點位之比較

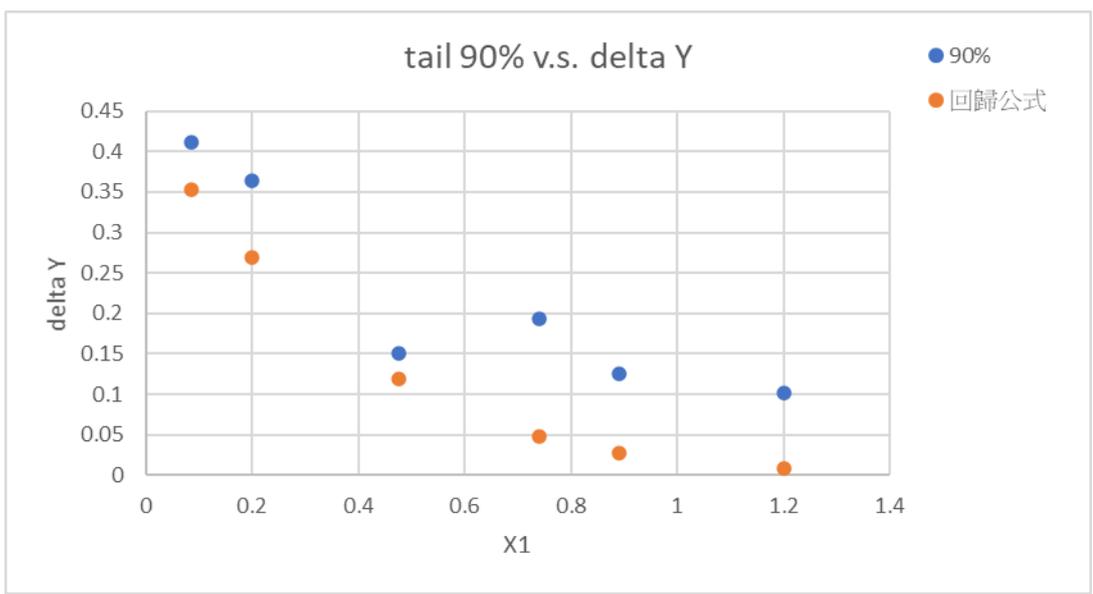


圖 4-14 對共軛水深折減 10%與回歸公式(3-15)點位之比較

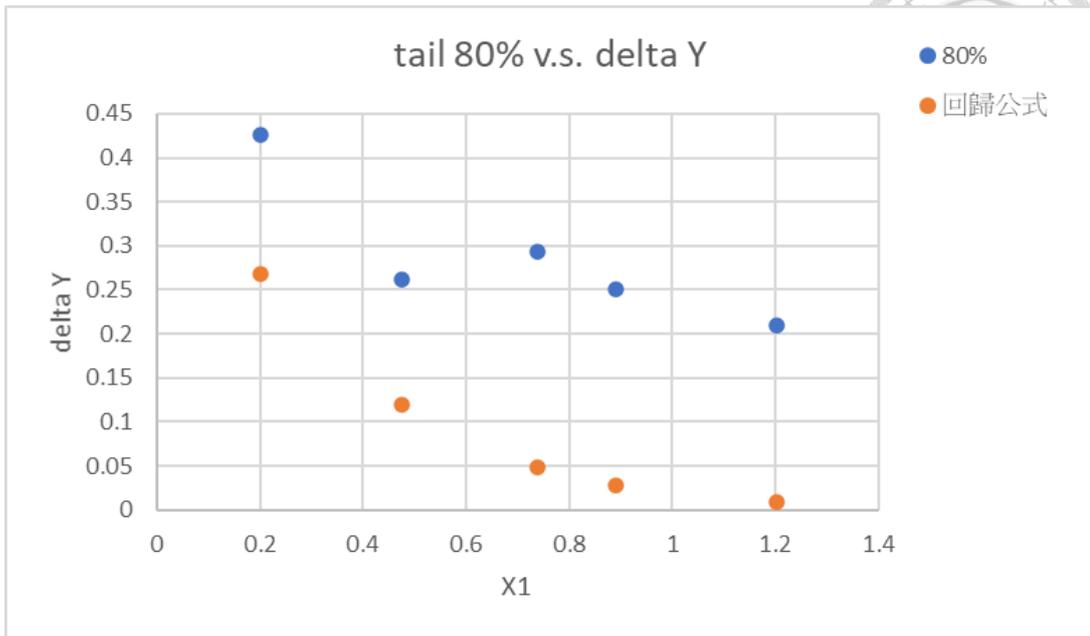


圖 4-15 對共軛水深折減 20%與回歸公式(3-15)點位之比較



4.2.2 實驗一、二、三結果(z 方向)

使用盒鬚圖觀測各幾何特徵對模擬的 h_2 差值比率影響，以確認模式在那些幾何參數下模式與實驗會有多大程度的誤差， h_2 差值比率的計算方式如下：

$$h_2 \text{ 差值比率} = |(h_2 \text{ 實驗值} - h_2 \text{ 模擬值})| / h_2 \text{ 實驗值} \quad (4-3)$$

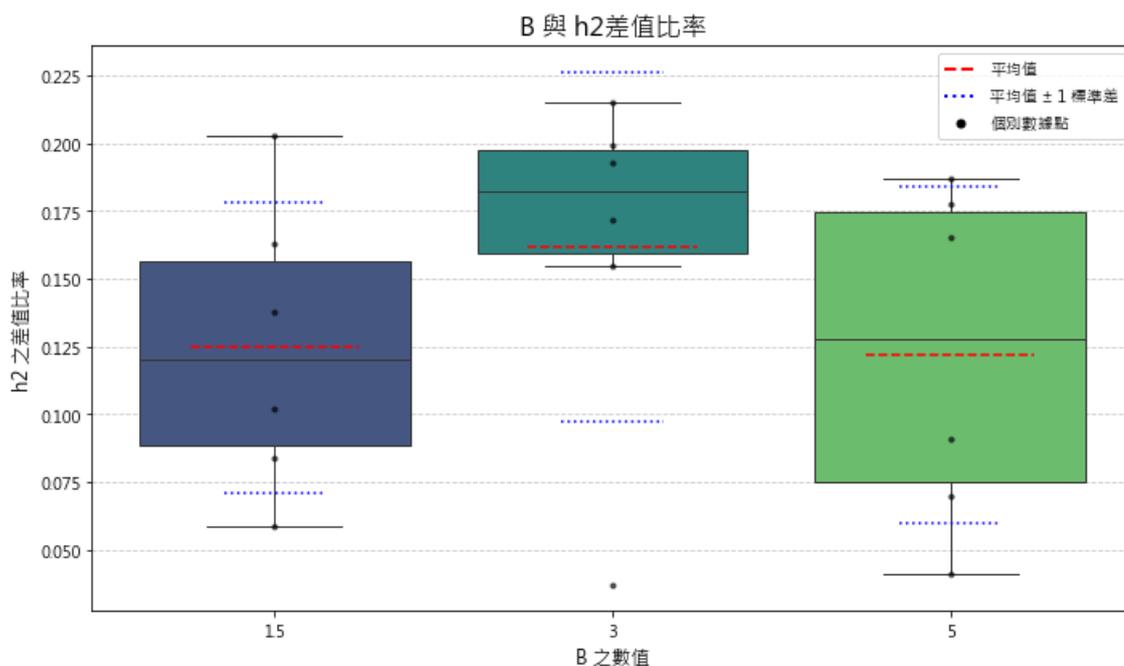


圖 4-16 $e=1$ ，擴張角度 90 度的 B 對 h_2 差值比率盒鬚圖

圖 4-16 顯示當偏心率 $e=1$ 且擴張角度為 90 度時，改變上下游寬度比 B 對 h_2 之差值比率未出現明顯的趨勢，即當入流之一側牆與出流的側牆重合的狀況下，改變上下游寬度比 B 對水躍處的水深誤差無特定影響。

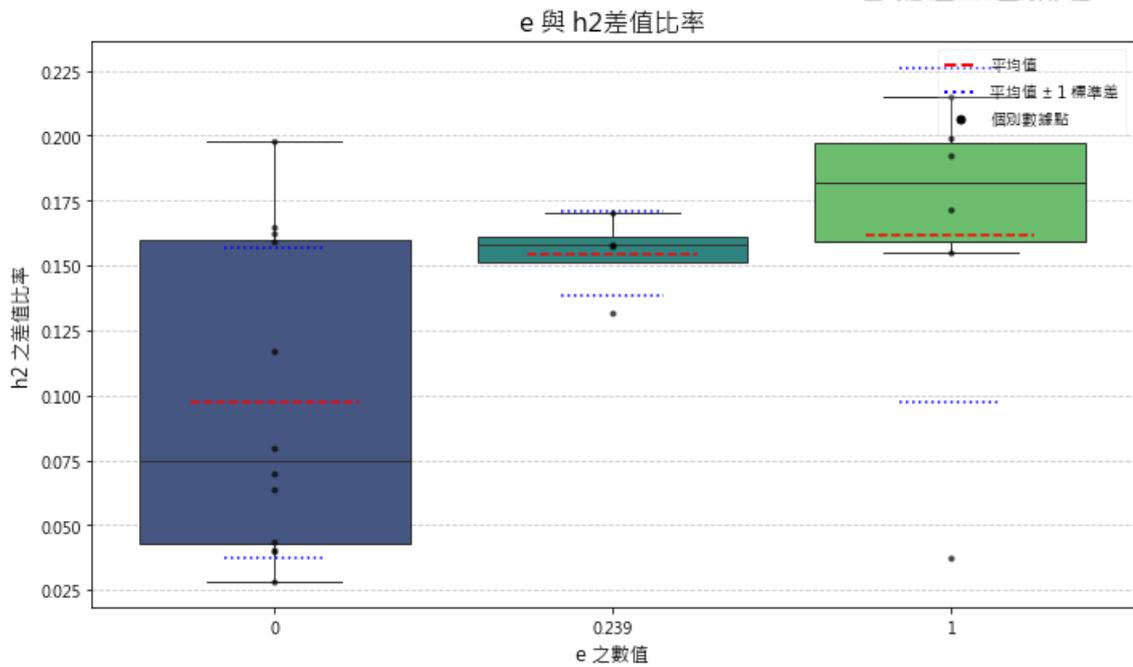


圖 4-17 B=3，擴張角度 90 度的 e 對 h_2 差值比率盒鬚圖

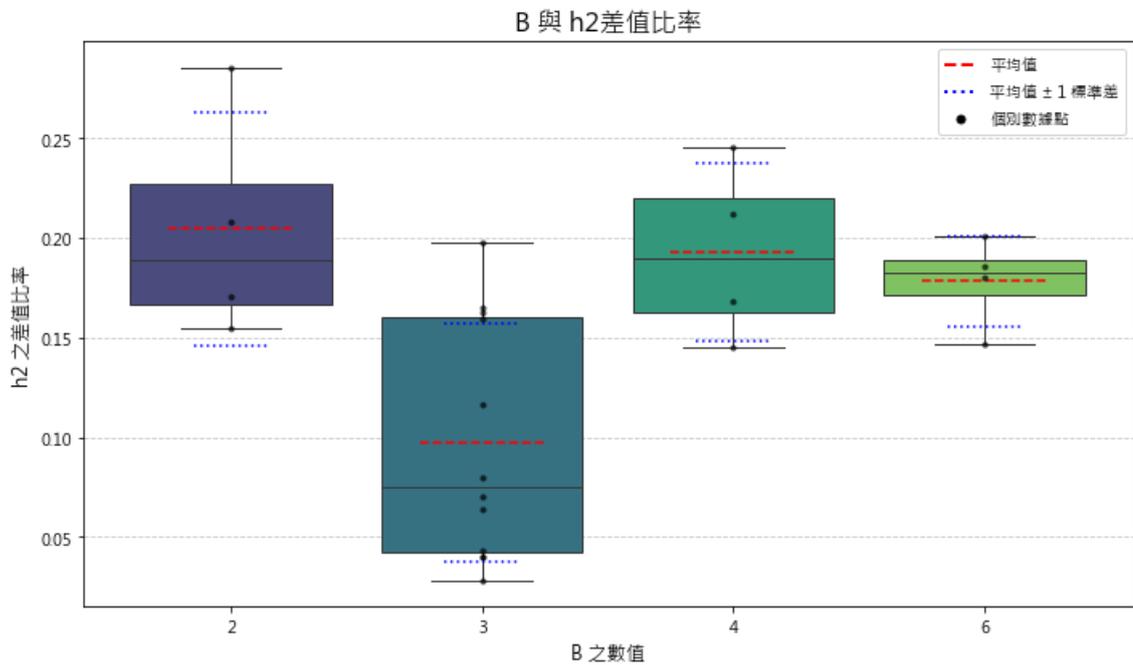


圖 4-18 e=0，擴張角度 90 度的 B 對 h_2 差值比率盒鬚圖

圖 4-17 顯示當 B 相同且均為突擴（90 度）時， h_2 差值比率會隨 e 增加而增加。圖 4-18 中 B 為 3 的資料為使用 Bremen、Sinniger（1990）的實驗資料，剩餘的點位為參考 Bremen、Sinniger（1990）的實驗值的入流量與福祿數與 Herbrand（1973）的尾水公式進行設計的，旨在確認模擬與設定會產生多大的偏差與偏差的



特性。根據趨勢判斷在 e 為 0 且為突擴的狀況下，隨著 B 增加 h_2 差值比率會隨之減少。

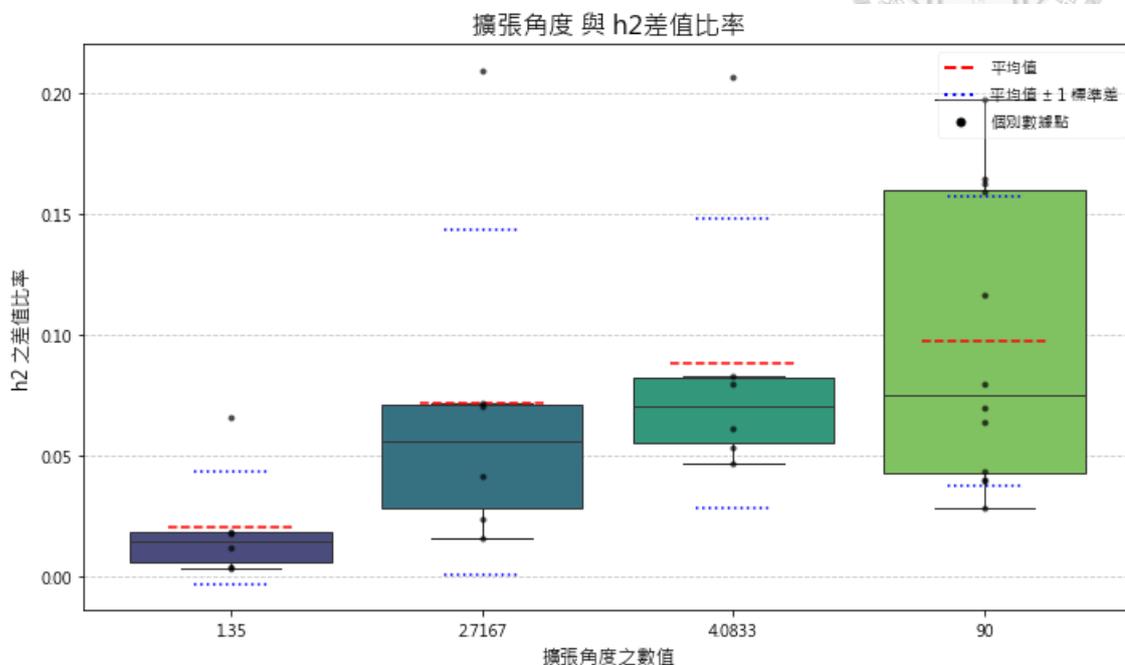


圖 4-19 $e=0$ ，多種 B 的擴張角度對 h_2 差值比率盒鬚圖

圖 4-19 中 B 從小到大為從左至右，然而未顯現出如圖 4-18 中之隨 B 增加 h_2 差值比率隨之減少的現象。反而隨著 B 增加而減少，且當擴張角度增加而隨之增加，因此判斷擴張角度較 B 對 h_2 差值比率的影響強烈。

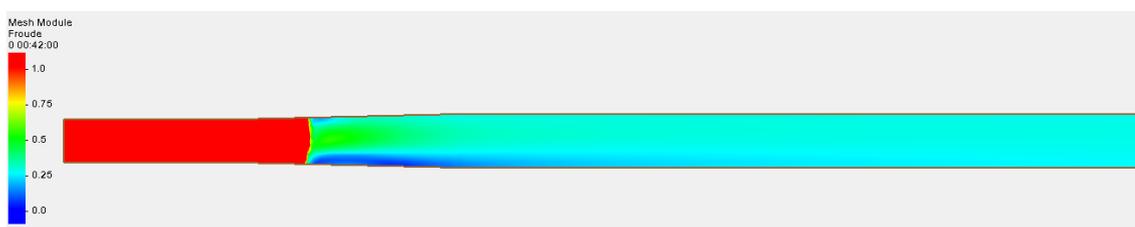


圖 4-20 $e=0$ ， $B=1.25$ ，擴張角度 1.35 度之福祿數模擬圖

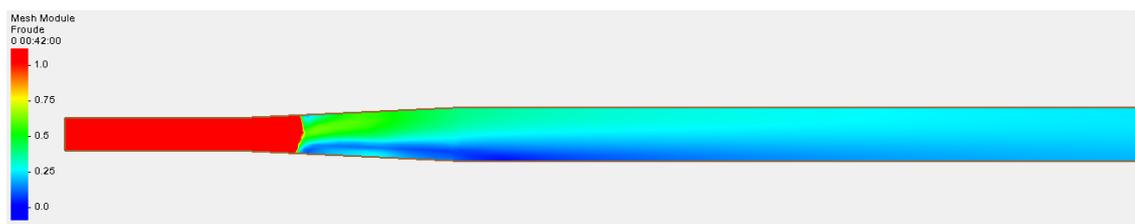


圖 4-21 $e=0$ ， $B=1.67$ ，擴張角度 2.7167 度之福祿數模擬圖

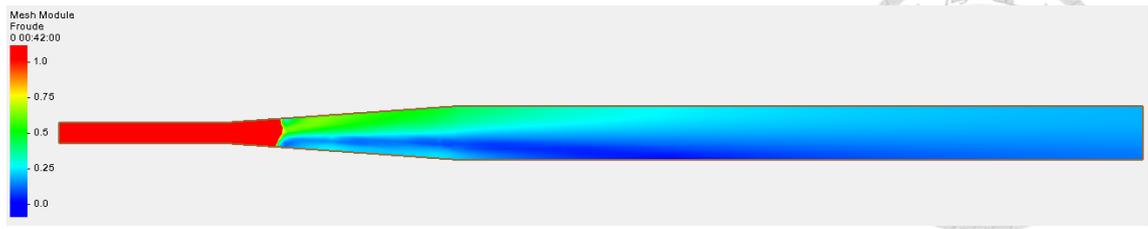


圖 4-22 $e=0$ ， $B=2.5$ ，擴張角度 4.0833 度之福祿數模擬圖

根據模擬的結果（圖 4-20、圖 4-21、圖 4-22）顯示，擴張角度與側渦流大小呈正相關。進一步地，當側渦流的尺寸增大時， h_2 差值比率亦隨之提高。由此推斷側渦流的大小對 h_2 差值比率有顯著影響。

實驗結果顯示，水躍現象中存在表面渦流（surface roller），此為三維流動特性。然而，本研究採用的二維模式將網格內的流速定義為二維方向，因此無法捕捉除 x 、 y 軸以外之流動分量，導致模擬結果未能呈現此表面渦流。此一簡化是造成實驗與模擬之間產生部分差異的原因。

進一步觀察發現，當表面渦流的影響隨 B 值增加而逐漸減弱時，實驗與模擬之間的誤差也隨之降低。這表明表面渦流的存在與否及其強度，確實對二維模式的模擬精確度產生了顯著影響。

綜合上述分析，在以下條件下二維模式對水躍實驗的復現能力會增加：

1. 上下游寬度比 B 應越大越好：這有助於降低表面渦流的影響，進而減少其對二維模擬精度的干擾。
2. 擴張角度應越小越好：較小的擴張角度意味著較弱的側渦流強度，這與二維模式的假設更為吻合。
3. 入流偏心率 e 應越小越好：道理同 1、2，其為表面渦流與側渦流的綜合影響。圖 4-17 呈現 h_2 差值比率會隨 e 增加而增加。

4.2.3 實驗一結果(x 方向)

在所參考的實驗數據中，僅 Bremen、Sinniger（1990）的文獻詳盡記錄了長渦流長度(x_2)的數值，因此本章節所有相關結論均以該實驗結果為主要依據。 x_2 差值比率定義如下：



$$x_2 \text{ 差值比率} = |(x_2 \text{ 實驗值} - x_2 \text{ 模擬值})| / (x_2 \text{ 實驗值}) \quad (4-4)$$

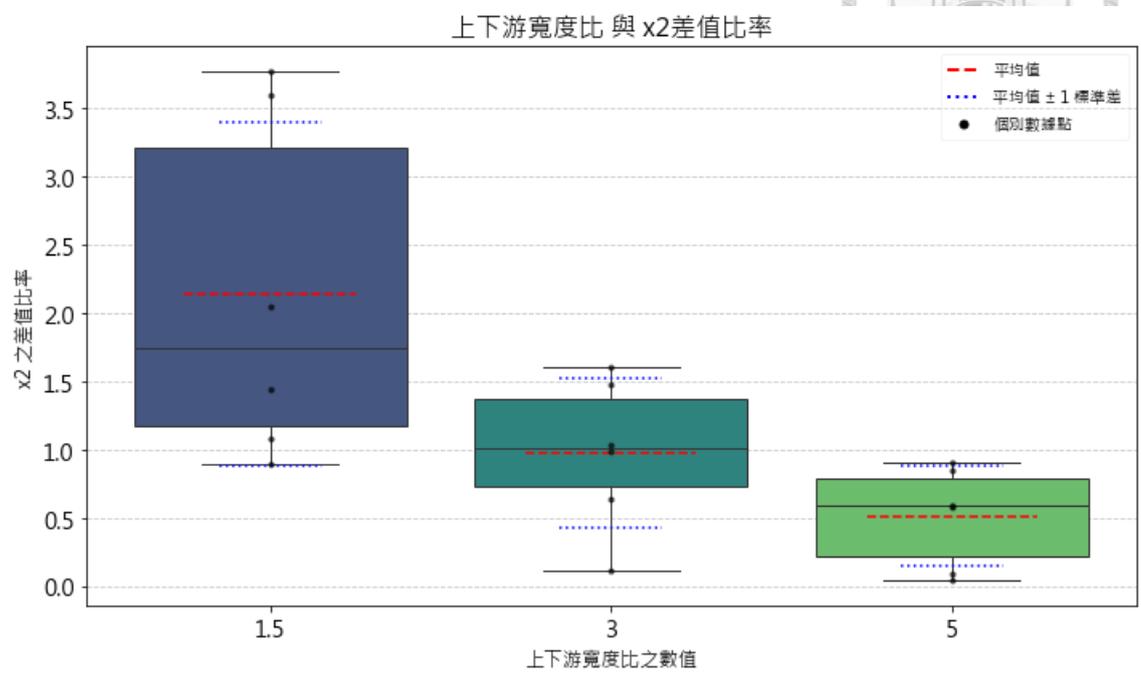


圖 4-23 e=1，擴張角度 90 度的 B 對 x₂ 差值比率盒鬚圖

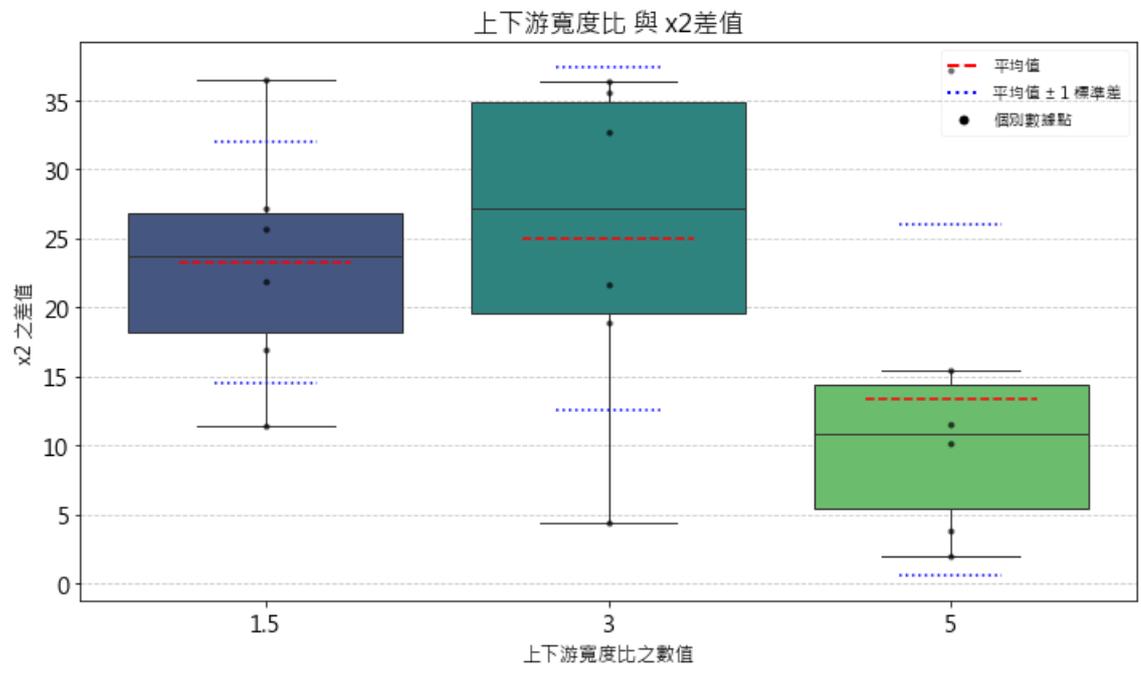


圖 4-24 e=1，擴張角度 90 度的 B 對 x₂ 差值盒鬚圖

根據第 3.2.2 章中對長渦流長度(x₂)的定義，觀察與比較模擬與實驗之數值差值與差值比率，獲得圖 4-23 與圖 4-24。圖 4-23 中顯示在 e=1，擴張角度 90 度下，隨著 B 的增加長渦流長度的差值比率也隨之減少，此與圖 4-18 之結論相近。



圖 4-24 中顯示在 $e=1$ ，擴張角度 90 度下，隨著 B 的增加長渦流長度的差值也有下降的趨勢。

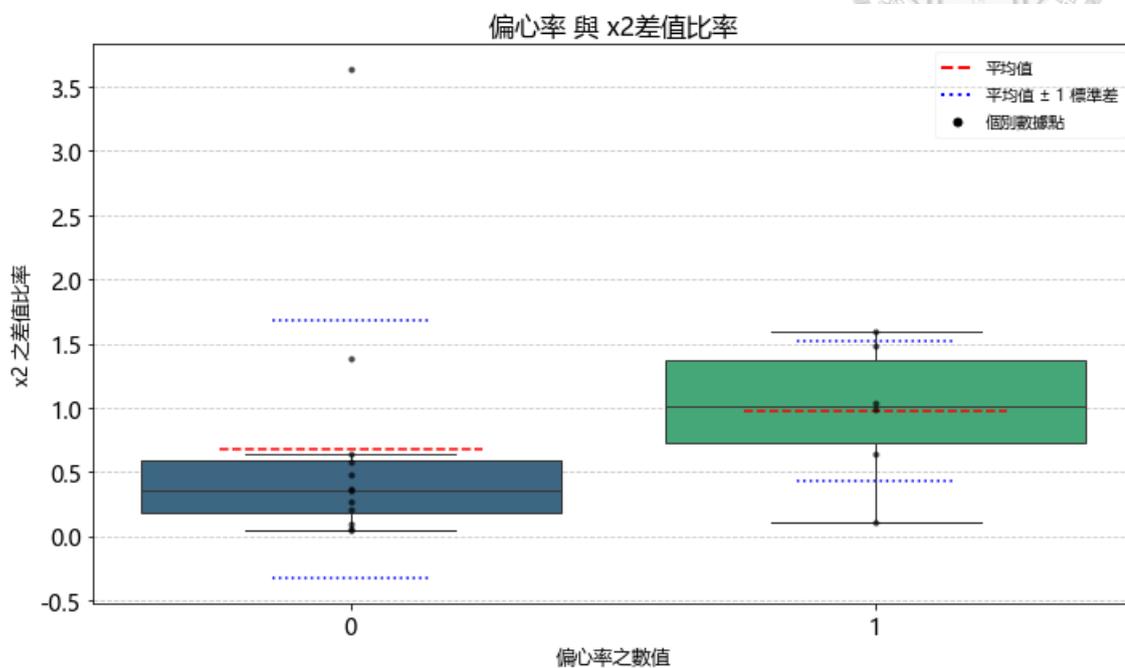


圖 4-25 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 e 對 x_2 差值比率盒鬚圖

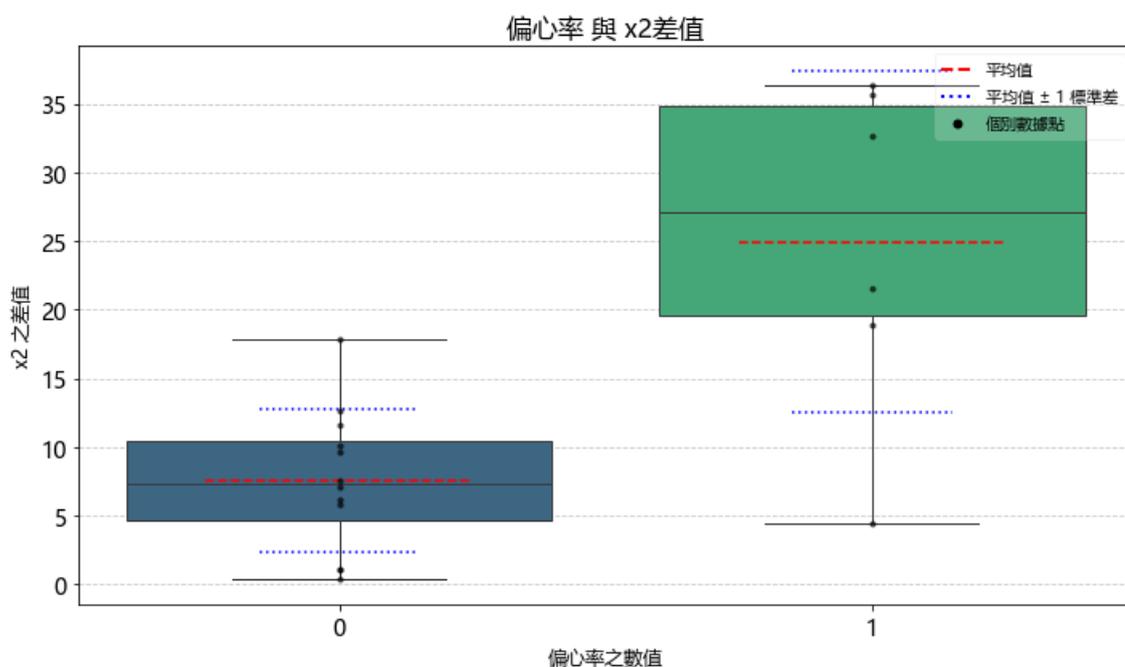


圖 4-26 $B=3$ ，擴張角度 90 度的 e 對 x_2 差值盒鬚圖

圖 4-25、圖 4-26 中顯示在 $B=3$ ，擴張角度 90 度下，長渦流長度的差值與差值比率均隨偏心率 e 增加而增加。此結論與圖 4-17 之趨勢相同，差值比率均隨 e

增加而增加。

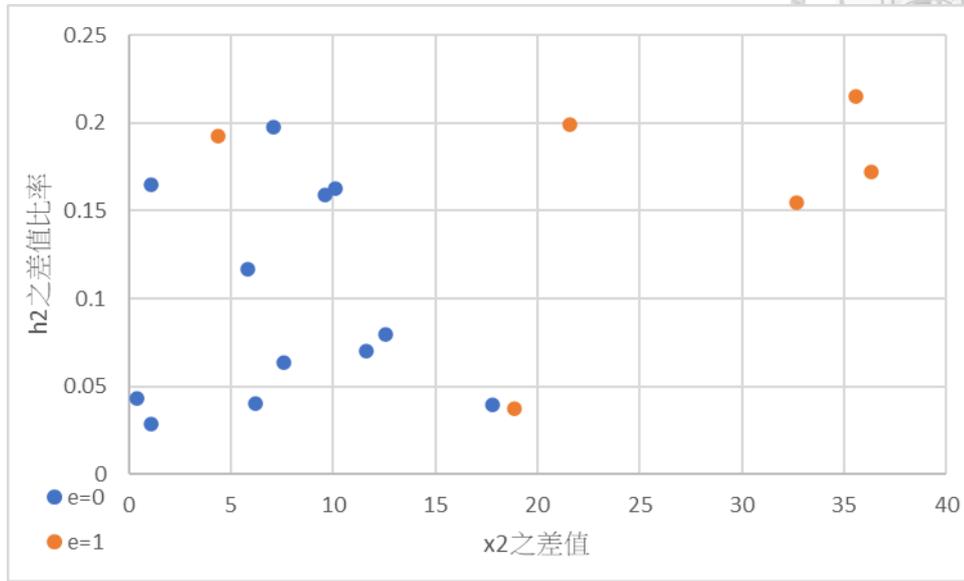


圖 4-27 B=3，擴張角度 90 度的 x2 差值對 h2 差值比率散佈圖

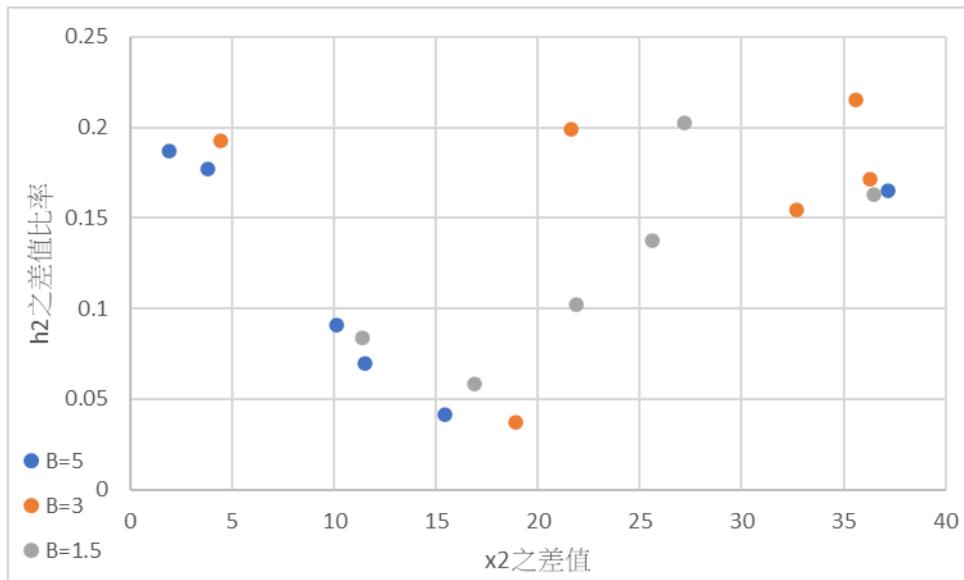


圖 4-28 e=1，擴張角度 90 度的 x2 差值對 h2 差值比率散佈圖

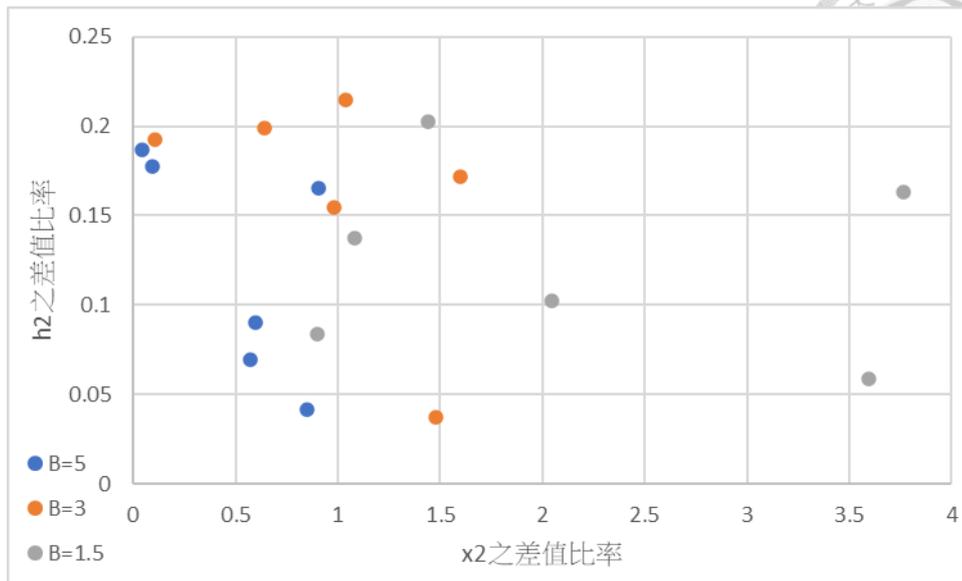


圖 4-29 $c=1$ ，擴張角度 90 度的 x_2 差值比率對 h_2 差值比率散佈圖

圖 4-27 中顯示 h_2 呈隨機分布，未出現明顯趨勢。而圖 4-28 觀察到當模擬與實驗的 x_2 絕對差異為 15 至 20 公尺時， h_2 差值比率顯著降低；此現象在圖 4-29 中未出現，表明該關聯性依賴於 x_2 的絕對數值，而非其比率。

4.2.4 模擬結果原因推測

圖 4-27 與圖 4-28 中顯示的結論造成之原因推測是模式在渦流的部分假設與計算跟事實不相符。在模擬渦流長度與實驗相同的狀況下，通常會發生水躍後的水深與實驗數據相差較大的問題，而模擬渦流長度與實驗相差很大的狀況下，水躍後的水深與實驗數據相差均較大。

本研究推測模型誤差的產生源於多種綜合因素，主要可歸納為以下兩點：

1. 首先，模型在處理渦流現象時的假設可能不夠完善。具體而言，SRH-2D 模式對湍流應力的定義（如方程式 3-14 所示）採用了深度平均假設。此假設是二維（2D）模型的基礎，然而，當應用於存在顯著 Z 軸方向水流移動的現象時，例如水躍，深度平均假設的局限性將導致誤差累積，進而增加模型的整體誤差值。
2. 其次，誤差的產生也可能是因為本研究對長渦流長度的定義與實驗所定義的長渦流長度不完全相符，進而影響模擬結果的準確性。



4.3 幾何因子模擬結果

本章旨在探討各項幾何參數對消能效率的影響。

4.3.1 上下游寬度比

鑑於尾水高度對消能效率具有顯著影響，本章旨在評估不同尾水公式於不同上下游寬度比 B 條件下，對消能效率的影響與關聯性。

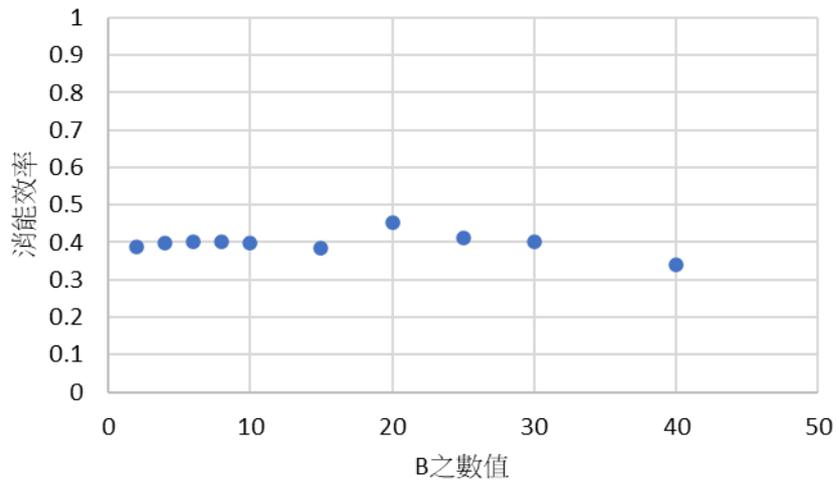


圖 4-30 B 對消能效率之關係(基於經典水躍公式，式 3-23)

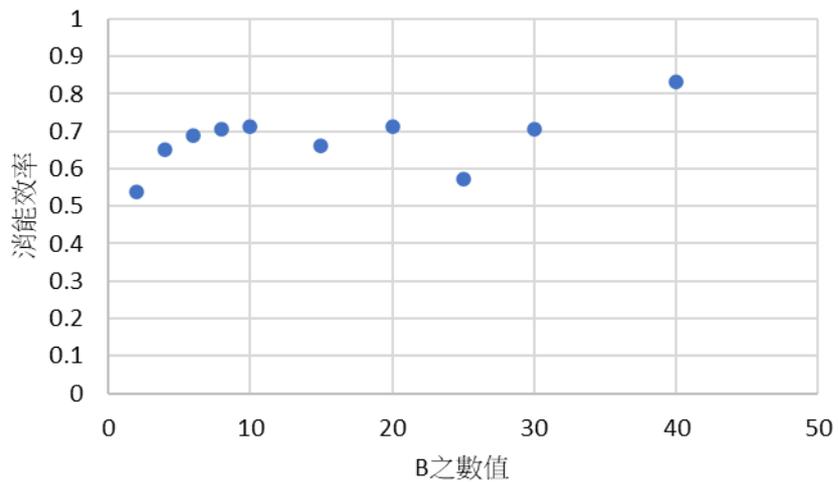


圖 4-31 B 對消能效率之關係(基於式 3-24)

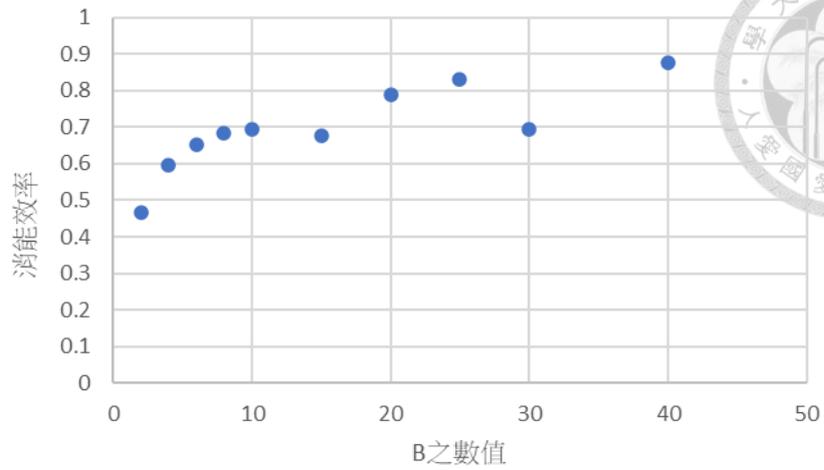


圖 4-32 B 對消能效率之關係(基於式 3-25)

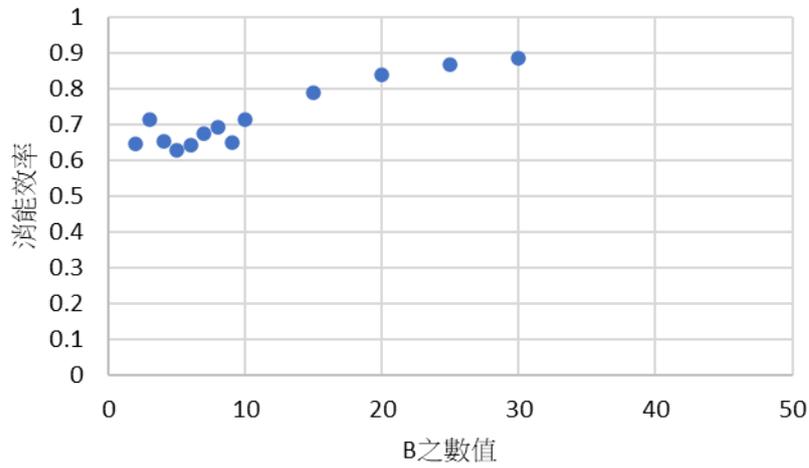


圖 4-33 B 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26)

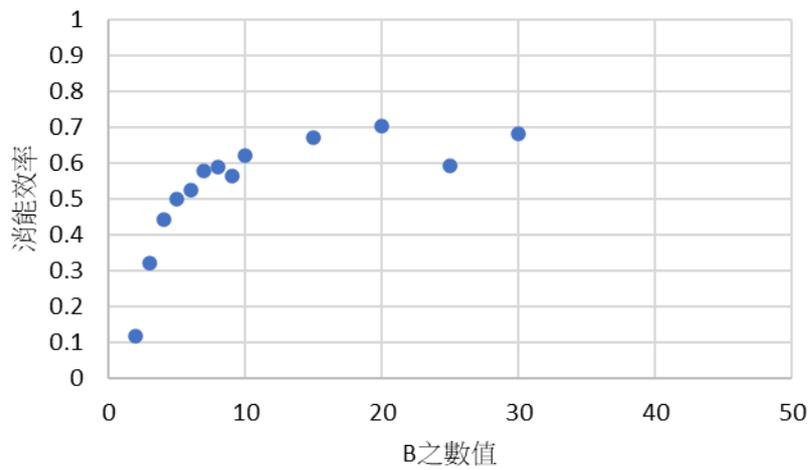


圖 4-34 B 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27)

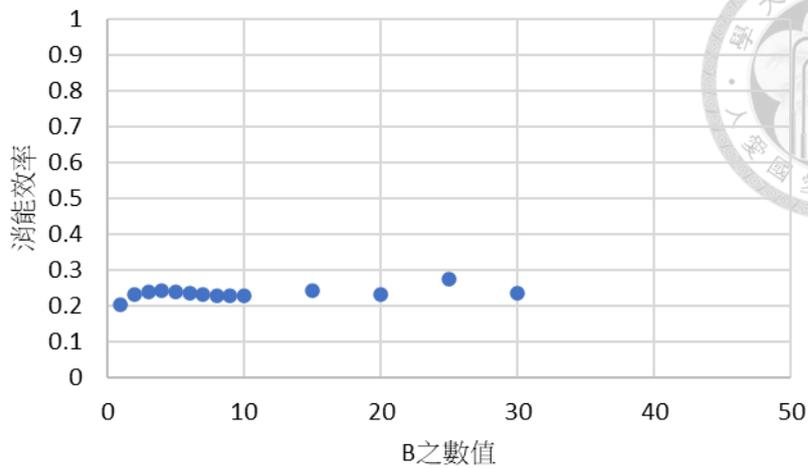


圖 4-35 B 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度)

圖 4-30、圖 4-35 顯示在尾水採公式(3-23)(水躍公式)與相同高度的情況下，改變 B 不會對消能效率產生顯著影響，且消能效率均較低。圖 4-31、圖 4-32、圖 4-33、圖 4-34 出現相同的特性，隨著 B 升至 20 左右，消能效率隨之增加，但當 B 繼續增加，消能效率未出現顯著提升。圖 4-32、圖 4-33 之消能效率較高，因此在式(3-25)與式(3-26)之間選擇，然式(3-26)會隨曼寧 n 改變而改變，而式(3-25)僅與幾何特徵的 B 相關，因此採用式(3-25)作為 4.3.3 之尾水公式。

上圖中出現之消能效率點位在 B 值較大時會出現突然的降低，此現象的發生是因為模擬之結果最終不會達到穩態導致，流況隨時間震盪，而消能效率也因此產生震盪。

4.3.2 擴張角度

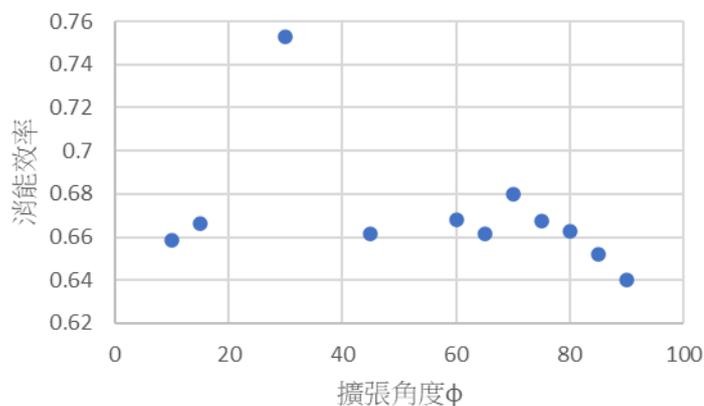


圖 4-36 擴張角度 ϕ 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26)

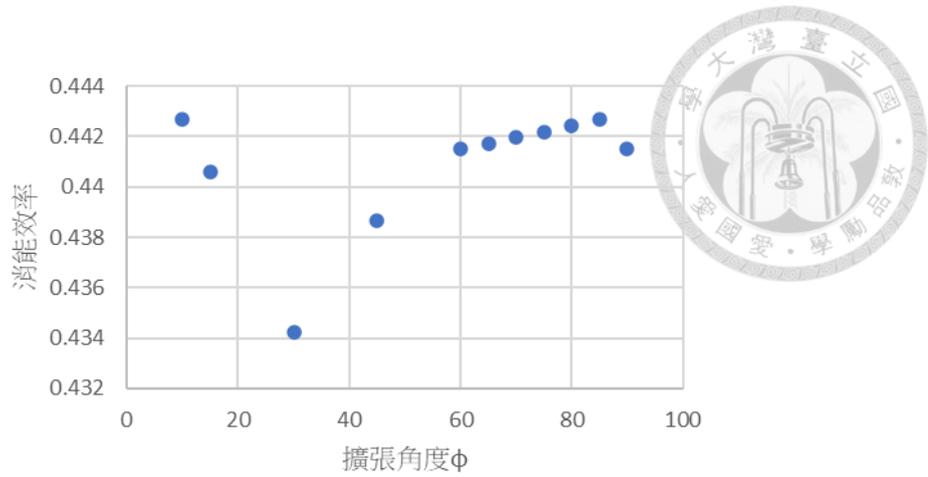


圖 4-37 擴張角度 ϕ 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27)

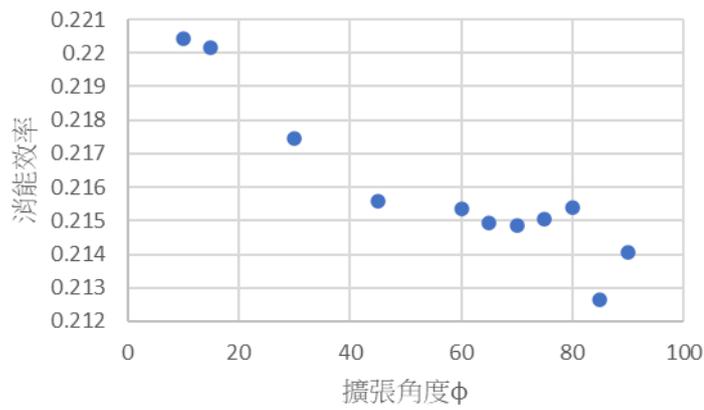


圖 4-38 擴張角度 ϕ 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度)

圖 4-36、圖 4-37、圖 4-38 顯示當擴張角度呈大角度時，並不會對消能效率有特定傾向之表現，也未呈現明顯特性，消能效率受到尾水高度的影響較強烈。

4.3.3 入流偏心率

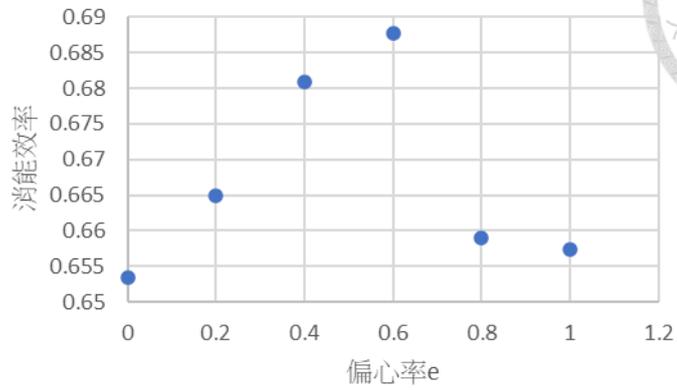


圖 4-39 偏心率 e 對消能效率之關係(基於正常水深，式 3-26)

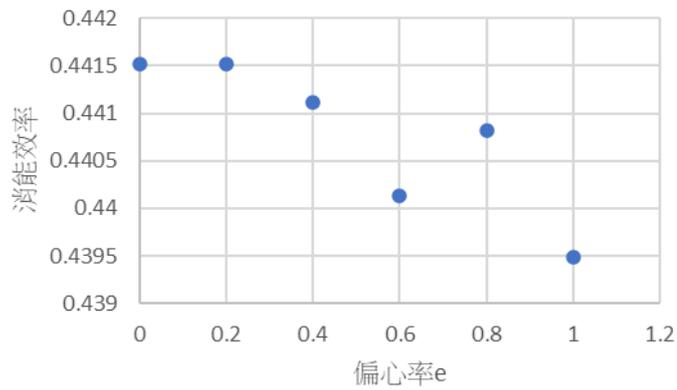


圖 4-40 偏心率 e 對消能效率之關係(基於 $Fr=0.1$ ，式 3-27)

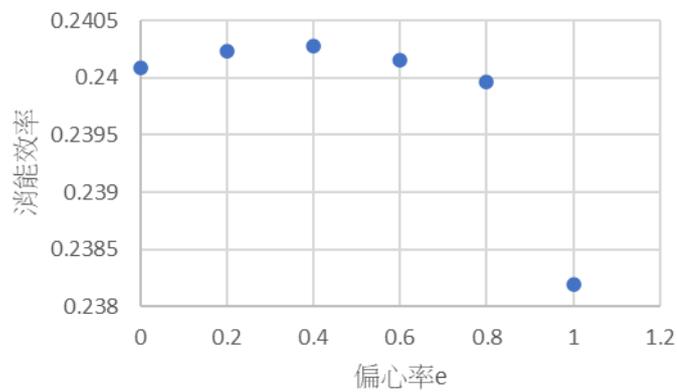


圖 4-41 偏心率 e 對消能效率之關係(基於尾水為相同高度)



圖 4-39、圖 4-40、圖 4-41 之數據分佈雖未呈現顯著趨勢，然其共同指出當偏心率為 1（非對稱）時，消能效率較低。此現象可能歸因於側渦流數量減少，進而導致消能效率的下降；也可能與第 4.2.2 節的結論相同，在表面渦流與側渦流的綜合影響下，模擬值與實驗值產生之誤差較大。

4.3.4 混合測試結果

基於第 4.3.1 節、第 4.3.2 節及第 4.3.3 節之模擬結果，本研究首先選定一組初始幾何參數組合：上下游寬度比 B 為 20、擴張角度 φ 為 10 度、偏心率 e 為 0.4。為探求最佳消能效率之幾何組合，本研究依序對各參數進行優化：

1. 階段一： B 參數優化：在固定 φ 及 e 的前提下，測試 B 值 25、30、15、10，以選定最佳消能效率對應之 B 值。
2. 階段二： φ 參數優化：將所選定之最佳 B 值納入初始設定，並固定 e 值，調整 φ 值為 5、30、60、90 度，以識別最佳消能效率下之 φ 值。
3. 階段三： e 參數優化：結合已獲之最佳 B 值與 φ 值，變動偏心率 e 為 0、0.2、0.6、0.8、1，進而確定能夠實現最佳消能的綜合幾何參數組合。

上游條件均不變動，設定為上游寬度 1 m，入流段長度 20 m，流量 $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ，上游水深為 1 m，上游福祿數為 3.83，渠道總長均為 420 m，曼寧 n 設定 0.01，渠道坡度設定為 0，尾水設定參考式(3-25)折減 3%。

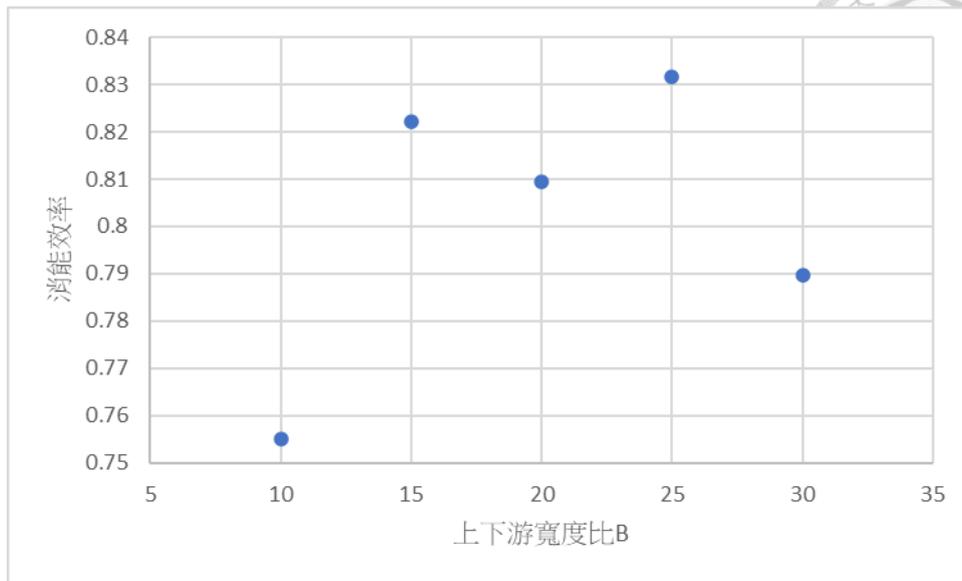


圖 4-42 階段一之 B 對消能效率圖

圖 4-42 顯示消能效率之最大值出現在 B 為 25 的時候，因此將 B 固定在 25 且不改變 e 的狀態下對 φ 進行變動測試。

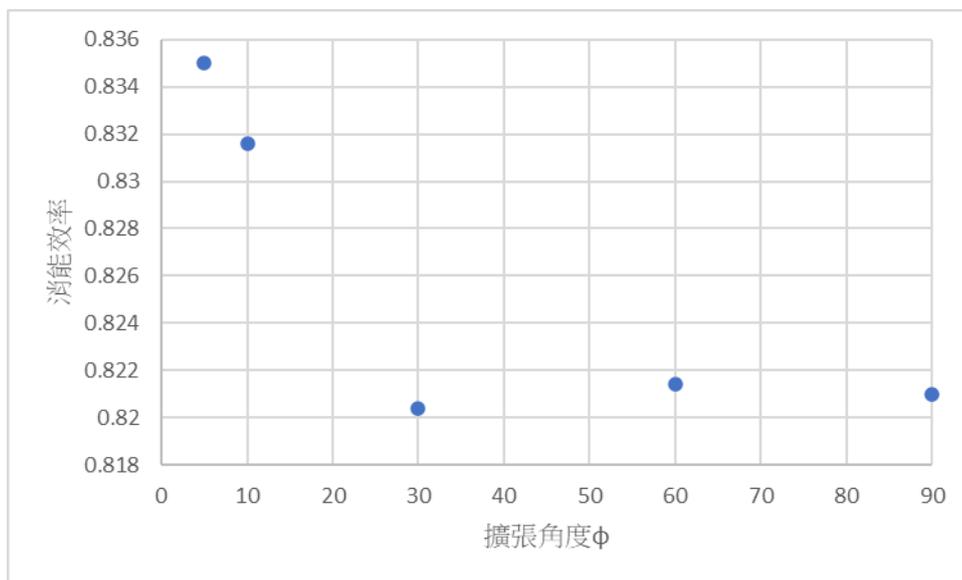


圖 4-43 階段二之 φ 對消能效率圖

圖 4-43 顯示消能效率最大值出現在擴張角度為 5 的時候，因此將 φ 固定在 5 且不改變 B 的狀態下對 e 進行變動測試。

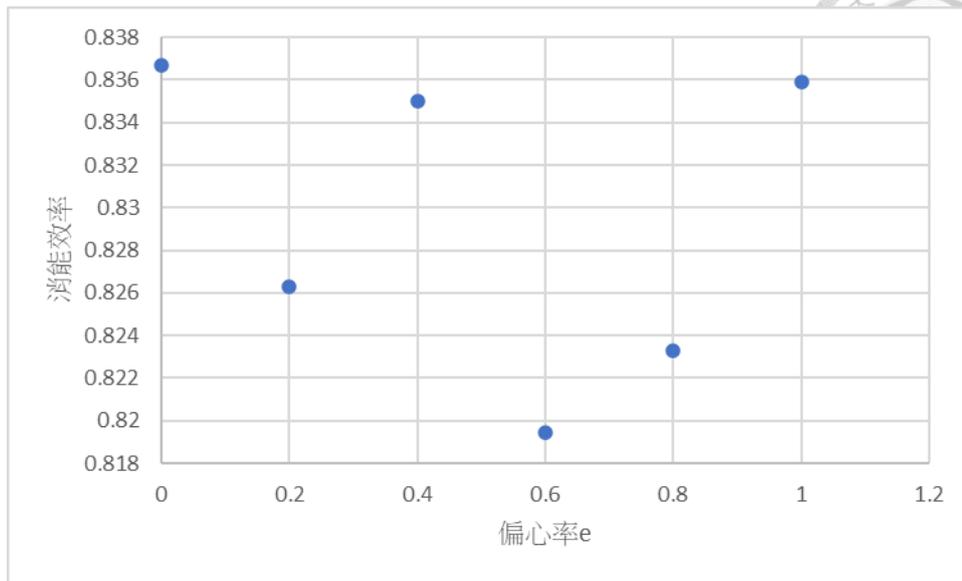


圖 4-44 階段三之 e 對消能效率圖

圖 4-44 顯示消能效率最大值出現在 e 為 0（渠道中央）的時候，因此將此值加入最終的設定。最終的設計方案由初始之 B 為 20 更改成 B 為 25，由 φ 為 10 度更改成 φ 為 5 度，由 e 為 0.4 更改為 e 為 0。

表 4-1 僅變動 B 之消能效率變動

B	擴張角度 φ	偏心率 e	入流能量	出流能量	消能效率
20	10	0.4	99.883	19.034	0.809
25	10	0.4	99.883	16.823	0.832
15	10	0.4	99.883	17.761	0.822
30	10	0.4	99.883	20.993	0.790
10	10	0.4	99.883	24.458	0.755

表 4-2 僅變動 φ 之消能效率變動

B	擴張角度 φ	偏心率 e	入流能量	出流能量	消能效率
25	90	0.4	99.883	17.877	0.821
25	30	0.4	99.883	17.938	0.820
25	60	0.4	99.883	17.835	0.821

25	10	0.4	99.883	16.823	0.832
25	5	0.4	99.883	16.482	0.835

表 4-3 僅變動 e 之消能效率變動

B	擴張角度 φ	偏心率 e	入流能量	出流能量	消能效率
25	5	0	99.883	16.315	0.837
25	5	0.4	99.883	16.482	0.835
25	5	0.6	99.883	18.034	0.819
25	5	0.8	99.883	17.650	0.823
25	5	0.2	99.883	17.349	0.826

參表 4-1、表 4-2 及表 4-3，由最初之消能效率 0.809 更改成最終之消能效率 0.837。最初設計與最終設計在消能效率上的表現僅相差 3%，且幾何設計與最初設計與最終設計差異不大，因此認為第 4.3.1 節、第 4.3.2 節及第 4.3.3 節有一定的參考價值。

第五章 結論與建議



5.1 結論

1. 在 HEC-RAS-2D 與 SRH-2D 之間進行二維模式選擇，因 HEC-RAS-2D 的模擬結果可能產生無數值之網格，此現象若發生於入流斷面或出流斷面會極大幅度的導致入流能量或出流能量產生誤差或錯誤，再加上 HEC-RAS-2D 的運算所需效能較高，無法負荷本研究需要的大量的同時模擬，因此本研究選用 SRH-2D 作為二維模擬的模式。
2. 因考慮了水躍後的位置至出流邊界間的 H2 曲線，因此找出需折減百分之三做為尾水的條件設定較符合。
3. 參考 Bremen、Sinniger(1990)、Nasrin Hassanpour 等人(2017)與 Torkamanzad 等人(2019)的實驗進行建模模擬，加上自行設定之入流條件與 Herbrand(1973)的水躍公式，確認出模式與實驗之間於水躍後的水深的差異。在 z 方向上：最終得出在入流不偏心下，當上下游寬度比越大水躍後的水深越接近實驗值；在相同上下游寬度比且擴張角度為 90 度下，當入流越偏心，水躍後的水深模擬值與實驗值相差越多；在保持入流不偏心的狀況下，同時增加上下游寬度比與擴張角度，發現水躍後的水深模擬與實驗間的誤差值呈增加的現象，判定增加擴張角度會造成水躍後的水深誤差值呈增加，且此幅度大於增加上下游寬度比後的減少量。
4. 在 x 方向上，當偏心率 $e=1$ 且擴張角度為 90 度時，上下游寬度比與長渦流長度的差值及差值比率均呈現負相關，與結論 3 一致。進一步分析顯示，在相同的上下游寬度比和 90 度擴張角度下，當入流越偏心，長渦流長度的差值及其比率越大。當 x_2 的差值介於 15 至 20 之間時， h_2 的差值比率顯示出較低的表現。
5. 根據結論 3、4 得出：當三維的流況越多，二維模式的模擬越不準確。
6. 上下游寬度比的增加會與消能量的增加呈現正相關，因尾水的邊界水深公



式使用上下游寬度比參數 B ，且邊界水深會直接影響消能效率，但參數 B 達到一定的數值後消能效率的增加不明顯。因此選定多大的上下游寬度比與選定哪種尾水公式相關，本研究最終選用式(3-25)，上下游寬度比選在 20 到 25 左右。

7. 擴張角度在本次研究中未出現明顯的特徵，可能歸因於本研究這次測試的角度較大，隨尾水不同展現完全不同之特性，消能效率相差不大，但有幾個消能效率或高或低的數值，分別選用幾個數值進行接下來的消能池設計：5、10、30、60、90 度。
8. 入流偏心率與擴張角度的結論類似，同樣消能效率受尾水高而產生不同的特性，但均呈現偏心率為 1（即入流段與下游段的側牆重合）時，消能效率均降低。此現象或可解釋為側渦流數量減少所致之消能效率降低；亦不排除是如第 4.2.2 節所指，表面渦流與側渦流的複合影響導致模擬與實驗結果間存在較大差異。最後於設計中選用於各種尾水條件均獲得較好表現的 0.4 偏心率作為初始設計之值，但因偏心率的數值不多，因此可以全部測試。
9. 最終設計方案的調整，使最初設定之 B 值由 20 修正為 25， φ 角度由 10 度調整為 5 度， e 值則從 0.4 變為 0。儘管這些幾何參數有所變動，最終的消能效率從 0.809 提升至 0.837，兩者間的差異僅約 3%。這表明，儘管存在微調，本研究在第 4.3.1 節、第 4.3.2 節及第 4.3.3 節中所探討的設計原則與分析結果，仍具有參考價值與一致性。

5.2 建議

本研究針對突擴、漸擴消能池的二維數值模擬進行了深入探討，並獲得了多項結論。基於這些發現以及研究過程中觀察到的限制，本研究提出以下建議，以供未來研究及實務應用參考：

5.2.1 對未來研究的建議

1. 多維模式的應用與比較：



因本研究結論指出「當三維的流況越多，二維模式的模擬越不準確」，而建議與三維數值模式（如：Flow-3D, OpenFOAM 等）進行模擬與比較，以更精確地捕捉水躍後複雜的三維流場特性。

未來可針對本研究發現之二維模式誤差較大的案例（如入流偏心率較大或擴張角度較大的情況），利用三維模式進行模擬，並與二維模式結果進行比較分析，以確認二維模式的適用範圍與其限制。

2. 擴張角度與入流偏心率的參數細化與廣度：

本研究發現擴張角度在本次研究範圍（較大角度）內未出現明顯特徵，且入流偏心率的數值測試較少。建議未來研究可：

- (1) 增加擴張角度的測試範圍，納入更多小角度的測試，以分析在二維模式下擴張角度對消能效率及水深特性的影響。
- (2) 細化入流偏心率的取值間距，以更精確地掌握其對流場結構和消能效率的影響機制，尤其是在偏心率為 1（即入流段與下游段側牆重合）導致消能效率顯著降低的現象，可深入探討其物理機制。

3. 上下游寬度比參數的最佳化：

本研究指出上下游寬度比 B 在達到一定數值後，消能效率的增加趨於不明顯。建議未來研究可針對 B 值達到飽和點後，進行更密集的參數測試，以確定最佳的 B 值範圍，並評估其成本效益。

4. 更多幾何參數的探討：

受限於各式原因，本研究未能涵蓋所有可能影響消能效果的幾何參數。建議未來研究可進一步探討其他潛在的重要幾何參數對消能池性能的影響，例如：

- (1) 入流段中心線與擴張段中心線的夾角。
- (2) 下游段在經過一段距離後再次更改寬度（例如分段式擴張或收縮）。

(3) 其他可能影響流場特性的消能池內部結構或出口形式。

5. 實驗數據的驗證與擴展：

本研究確認模擬值與實驗值在水躍後水深存在差異。建議未來研究可進一步收集或進行更多不同入流偏心、擴張角度及上下游寬度比組合下的實驗數據，以更全面地驗證數值模式的準確性，並為模式校準提供更堅實的基礎。

5.2.2 對實務應用的建議

1. 突擴、漸擴消能池之參考：

本研究提供的設計原則(如上下游寬度比與消能效率的正相關，以及入流不偏心下寬度比越大水深越接近實驗值)可作為工程實務中消能池初步設計的參考。

儘管最終設計經過微調，本研究在第 4.3.1 節、第 4.3.2 節及第 4.3.3 節所探討的參數化分析與設計原則，已證實具有部分參考價值與一致性，可作為初步設計與參數選取的依據。

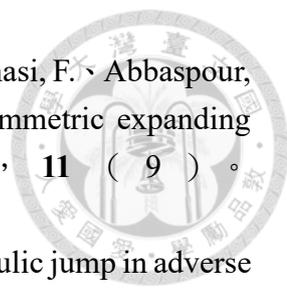
2. 尾水條件設定的實務考量：

本研究提出需「折減百分之三做為尾水的條件設定」較符合實際情況，此一經驗參數可供工程實務中進行消能池設計時，在尾水條件設定方面提供參考，以期獲得更接近實際的水躍表現。

參考文獻

1. Asnaashari, A. 、 Akhtari, A. A. 、 Dehghani, A. A. 、 Bonakdari, H. (2016) 。 Experimental and numerical investigation of the flow field in the gradual transition of rectangular to trapezoidal open channels 。 **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics** , **10** (1) , 272-282 。 <https://doi.org/10.1080/19942060.2016.1149102>
2. Ata, R. 、 Goeury, C. 、 Hervouet, J. M. (2014) 。 **Telemac-2d software user manual** (研究計劃編號 Release 7.0)
3. Bremen, R. 、 Hager, W. H. (1993) 。 T-jump in abruptly expanding channel 。 **Journal of Hydraulic Research** , **31** (1) , 61-78 。 <https://doi.org/10.1080/00221689309498860>
4. Bremen, R. 、 Sinniger, R. (1990) 。 Expanding stilling basin 。 **106** 。
5. Brunner, G. W. (2020) 。 **Hec-ras, river analysis system hydraulic reference manual** (研究計劃編號 CPD-69) 。 US Army Corps of Engineers, H. E. C. H. 。
6. Brunner, G. W. 、 CEIWR-HEC (2016) 。 **River analysis system, 2d modeling user's manual** (研究計劃編號 CPD-68A) 。 US Army Corps of Engineers, I. f. W. R., Hydrologic Engineering Center (HEC) 。
7. Chow, V. T. (1959) 。 **Open-channel hydraulics**
8. Deal, E. C. 、 Parr, A. D. 、 Young, C. B. (2017) 。 **A comparison study of one- and two-dimensional hydraulic models for river environments** (研究計劃編號 KS-17-02)
9. DHI (2004) 。 **Mike 21c river morphology** 。 Environment, D. W. 。 https://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/wr/m21c_short_2004.pdf
10. Environment, D. W. (2007) 。 **Mike 21 & mike 3 flow model fm - hydrodynamic module - short description** 。 DHI 。 www.dhigroup.com
11. Greenshields, C. J. (2024) 。 **User guide , OpenFOAM** (第 12 版 ,) 。 The OpenFOAM Foundation 。
12. Hager, W. H. 、 Bremen, R. (1989) 。 Classical hydraulic jump: Sequent depths 。 **Journal of Hydraulic Research** , **27** (5) , 565-585 。 <https://doi.org/10.1080/00221688909499111>
13. Haghdoost, M. 、 Sajjadi, S. 、 Fathi Moghadam, M. 、 Ahadiyan, J. (2022) 。 Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow 。 **Water Supply** , **22** (11) , 8337-8352 。

- 
- <https://doi.org/10.2166/ws.2022.376>
14. He, Z.-y. 、Xiang, P.-p. 、Hong, Z.-h. 、Liu, W.-c. (2022) 。 Research on the optimization of gradual expanding stilling basin 。
 15. Herbrand, K. (1973) 。 The spatial hydraulic jump 。 **Journal of Hydraulic Research** , 11 (3) , 205-218 。
<https://doi.org/10.1080/00221687309499774>
 16. Kawamura, T. 、Mayer, S. 、Garapon, A. 、Sørensen, L. (2002) 。 Large eddy simulation of a flow past a free surface piercing circular cylinder 。 **ASME. J. Fluids Eng.** ,
 17. Kline, S. J. (1959) 。 On the nature of stall 。 **Journal of Basic Engineering** , , 305-319 。
 18. Lai, Y. G. (2008) 。 **Srh-2d version 2: Theory and user's manual.**
 19. Masuda, T. 、Tagawa, T. (2021) 。 Effect of asymmetry of channels on flows in parallel plates with a sudden expansion 。 **Symmetry** , 13 (10) 。 <https://doi.org/10.3390/sym13101857>
 20. Mossa, M. 、Petrillo, A. 、Chanson, H. (2003) 。 Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop 。 **Journal of Hydraulic Research** , 41 (1) , 39-51 。
 21. Nashta, C. F. 、Garde, R. J. (1988) 。 Subcritical flow in rigid-bed open channel expansions 。 **Journal of Hydraulic Research** , 26(1) , 49-65 。 <https://doi.org/10.1080/00221688809499234>
 22. Nasrin Hassanpour 、Ali Hosseinzadeh Dalir 、Davod Farsadizadeh 、Gualtieri, C. (2017) 。 An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed 。 **Water** , 9 (12) 。 <https://doi.org/10.3390/w9120945>
 23. Omid, M. H. 、Esmaeeli Varaki, M. 、Narayanan, R. (2010) 。 Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel 。 **Journal of Hydraulic Research** , 45 (4) , 512-518 。
 24. Oosterholt, G. A. (1947) 。 An investigation of the energy dissipated in a surface roller 。 **Applied Scientific Research** , A1 , 107-130 。
 25. Peterka, A. J. (1984) 。 **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators** (研究計劃編號 25) 。 United States Department of the Interior, B. o. R. 。
 26. Rajaratnam, N. 、Subramanya, K. (1968) 。 Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions 。 **Proc. ASCE, J. Hydraulics Division** , 94 (HY2) , 481-503 。

- 
27. Torkamanzad, N. 、Hosseinzadeh Dalir, A. 、Salmasi, F. 、Abbaspour, A. (2019) 。 Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed 。 **Water** , **11** (9) 。
<https://doi.org/10.3390/w11091756>
28. Wang, T.-W. 、Chonbientob, T. (1985) 。 Hydraulic jump in adverse sloping channels 。 **33** (4) , 9-30 。
29. Yoosefdoost, A. 、Lubitz, W. D. (2022) 。 Sluice gate design and calibration: Simplified models to distinguish flow conditions and estimate discharge coefficient and flow rate 。 **Water** , **14** (8) 。
- <https://doi.org/10.3390/w14081215>
30. Zabaleta, F. 、Bombardelli, F. A. 、Valbuena, S. A. (2022 年 Oct 26th) 。 **Preliminary evaluation and design of a new energy dissipation stilling basin via numerical and experimental modeling** 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures , Roorkee, Roorkee, India 。 <https://digitalcommons.usu.edu/ishs>
31. Zhou, J. G. 、Stansby, P. K. (1999) 。 2d shallow water flow model for the hydraulic jump 。 **International Journal for Numerical Methods in Fluids** , **29** , 375-387 。