
定量流通過消能砥礪流況分析與減災效益評估
Flow Situations and Disaster Mitigation Assessment
Under Steady-Uniform Flow Through Energy-
Dissipating Structures
(成果報告)

執 行 單 位：中原大學

執 行 期 間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：張德鑫 教授

共同主持人：許峪萇 博士

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

定量流通過消能砥礪流況分析與減災效益評估

摘要

本研究針對渠道在不同底床坡度與流量設置條件下，進行消能砥礪之排列間距差異造成流況改變，透過速度削減率與水位抬升率的變化進行討論。首先利用謝冠文(2019)渠槽試驗資料，依照試驗渠槽尺寸採用 Hec-RAS 建模後進行定量流水理分析，經過驗證數值模型演算結果與試驗結果一致後接續數值模型實驗。我們採用玻璃光滑渠道均勻流況做為標準流況，針對不同間距排列的混凝土消能砥礪渠槽，在改變坡度與流量後探討不同設置情境的流況差異。相對於標準流況，我們透過消能砥礪斷面最大與最小的速度削減率與水位抬升率的差異探討不同間距排列的消能砥礪對渠流的影響，並在定量流理論架構藉由等效曼寧係數與動能削減率來檢視不同情境消能砥礪阻力對於渠流的作用。最後，我們利用福祿數動力相似進行數值模型試驗結果還原，以詮釋實體渠流通過消能砥礪流況的變化。

關鍵詞：消能砥礪、速度削減率、水位抬升率、福祿數動力相似、還原分析

Flow Situations and Disaster Mitigation Assessment Under Steady-Uniform Flow Through Energy- Dissipating Structures

Abstract

This study uses the deceleration rate and water level rise rate changes to discuss the flow statement under different arrangement spacing of energy-dissipating structures in different flume slopes and discharges. First, the flume model experiment data of Xie (2019) is applied to the Hec-RAS program quantitative hydraulic analysis modeling and verification. When the Hec-RAS model calculation results are consistent with the experimental results, we continuously use the Hec-RAS model to conduct the numerical test simulation under different flume situation settings. The uniform flow on the glass flume is set for the standard flow conditions of the numerical test, and we change the slopes and discharges of the flume model under different spacing arranged dissipating-energy structures to discuss the flow variations. We employ the differences in the maximum and minimum deceleration rates and water level rise rates of the cross-section in flume model to discuss the activity efficiency of energy-dissipating structures. Based on the theorem of quantitative flow, we define an equivalence Manning coefficient and use a Kinetic dissipating rate to imply the resistance when the flows through the energy-dissipating structures. Ultimately, the dynamic similarity properties of Froude number are used to practicalize the numerical model test results and explain the possible situations under a flow through the energy-dissipating structures in the fields.

Keywords: Energy-dissipating structures, Deceleration rate, Water level rise rate, dynamic similarity properties of Froude number, Practicalize

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 工作目標與工作進度.....	3
第 2 章 文獻回顧	5
2.1 渠槽設計相關研究.....	5
2.2 消能工相關研究.....	7
2.3 相關模型實驗研究.....	9
第 3 章 實驗設計與方法	11
3.1 實驗設計.....	11
3.2 HEC-RAS 數值建模.....	15
3.3 消能效益探討的方法.....	22
第 4 章 渠槽水工模型試驗的模擬驗證	25
4.1 渠槽水工模型試驗與數值模擬驗證說明.....	25
4.2 不同渠槽設置情境之模擬與驗證.....	26
4.3 渠流通過消能砥礪的情境模擬.....	35
4.4 渠流通過消能砥礪的效益探討.....	48
第 5 章 模型還原分析	55

第 6 章 結論	58
參考文獻	62
附錄	附 1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附 1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附 3
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附 4

表次

表 1-1 工作進度表	4
表 3-1 試驗渠道流量及坡度測定	14
表 4-1 數值模擬情境設定(固定坡度 0.012 與間距 5 公分改變流量)	26
表 4-2 坡度 0.012 消能砥礪間距 3 公分數值模擬表	29
表 4-3 坡度 0.012 消能砥礪間距 4 公分數值模擬表	29
表 4-4 坡度 0.012 消能砥礪間距 5 公分數值模擬表	29
表 4-5 坡度 0.012 消能砥礪間距 10 公分數值模擬表	29
表 4-6 情境 1 有效曼寧糙度係數	49
表 4-7 情境 2 有效曼寧糙度係數	49
表 4-8 情境 3 有效曼寧糙度係數	51
表 4-9 情境 1 動能削減率	53
表 4-10 情境 2 動能削減率	53
表 4-11 情境 3 動能削減率	54
表 5-1 情境 1 模擬結果還原	56
表 5-2 情境 2 模擬結果還原	56
表 5-3 情境 3 模擬結果還原	57

圖次

圖 3-1 渠道縱斷面圖	11
圖 3-2 混凝土消能砥礮模型配置平面圖	11
圖 3-3 預鑄混凝土消能砥礮間距 3 公分橫斷面圖	12
圖 3-4 預鑄混凝土消能砥礮間距 4 公分橫斷面圖	12
圖 3-5 預鑄混凝土消能砥礮間距 5 公分斷面圖	13
圖 3-6 預鑄混凝土消能砥礮間距 10 公分斷面圖	13
圖 3-7 能量梯度線、水面線與渠底關係圖：圖中左側代表河川上游， 右側為下游，" $\alpha 2V^2/2g$ " 表示能量線梯度	16
圖 3-8 動量方程式示意圖	16
圖 3-9 模擬砥礮完成圖(無消能砥礮)	17
圖 3-10 斷面設計圖(無消能砥礮)	18
圖 3-11 模擬砥礮完成圖(有消能砥礮)	18
圖 3-12 凸出高度 3 公分斷面	19
圖 3-13 凸出高度 5 公分斷面	19
圖 3-14 邊界條件-上游給定正常水深/坡度 0.012	20
圖 3-15 模擬完成河道縱剖面圖(無消能砥礮)	20
圖 3-16 邊界條件設置:上下游給定正常水深	21
圖 3-17 渠道縱剖面圖(有消能砥礮)	21
圖 3-18 消能砥礮縱斷面配置示意圖	22
圖 4-1 渠道縱斷面圖(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.1276cms)	27
圖 4-2 渠道縱斷面圖(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.1011cms)	27

圖 4-3 渠道縱斷面圖(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0756cms)	27
圖 4-4 渠道縱斷面圖(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0652cms)	28
圖 4-5 渠道縱斷面圖(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0376cms)	28
圖 4-6 砥礮間距與水深關係圖(坡度 0.012 流量 0.1276 cms)	30
圖 4-7 砥礮間距與水深關係圖(坡度 0.012 流量 0.0376 cms)	30
圖 4-8 流量與水深關係圖(坡度 0.012 間距 3 公分)	31
圖 4-9 流量與水深關係圖(坡度 0.012 間距 10 公分)	31
圖 4-10 砥礮間距與水深關係圖(坡度 0.018 流量 0.1276cms)	31
圖 4-11 砥礮間距與水深關係圖(坡度 0.018 流量 0.0376cms)	32
圖 4-12 流量與水深關係圖(坡度 0.018 間距 3 公分)	32
圖 4-13 流量與水深關係圖(坡度 0.018 間距 10 公分)	32
圖 4-14 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.1276cms 間距 3 公分)	33
圖 4-15 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.1276cms 間距 10 公分)	33
圖 4-16 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.0376cms 間距 3 公分)	34
圖 4-17 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.0376cms 間距 10 公分)	34
圖 4-18 渠流斷面流速分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)	36
圖 4-19 渠流斷面水深分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)	36
圖 4-20 渠流斷面流速削減率(均勻斷面流速為 1.38 m/s) (情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)	37
圖 4-21 渠流斷面水位抬升率(均勻斷面水深為 5.44 cm) (情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)	37

圖 4-22 渠流斷面流速分布(情境設定：固定坡度 0.016 與流量 0.0376 cms)	39
圖 4-23 渠流斷面水深分布(情境設定：固定坡度 0.016 與流量 0.0376 cms)	39
圖 4-24 渠流斷面流速分布(情境設定：固定坡度 0.018 與流量 0.0376 cms)	40
圖 4-25 渠流斷面水深分布(情境設定：固定坡度 0.018 與流量 0.0376 cms)	40
圖 4-26 渠流斷面流速削減率(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)	41
圖 4-27 渠流斷面水位抬升率(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)	41
圖 4-28 渠流斷面流速分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0652 cms)	44
圖 4-29 渠流斷面水深分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0652 cms)	44
圖 4-30 渠流斷面流速分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.1276 cms)	45
圖 4-31 渠流斷面水深分布(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.1276 cms)	45
圖 4-30 渠流斷面流速削減率(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)	46
圖 4-31 渠流斷面水位抬升率(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)	46

第 1 章 緒論

1.1 研究動機

水工構造物常因高流速之水流沖刷造成破壞，如何降低河川流速及高流量造成之損壞為水利設施設計的重要考量。一般渠道施作時，為了避免水流在高流速狀態造成結構物的毀損，設計時常採用鼎塊、方塊或拋石塊等固床設施來達成保護效果。現地水流的水理特性除了受到環境水文特徵與渠道本身幾何特徵影響，當水流通過消能設施時，消能設施的形狀、底床凸出高度、前後排列間距以及與流心交錯的方向配置的差異也都會影響到水流的狀況。

謝冠文(2019)曾經使用方形混凝土以高低交錯排列方式製作設施模型進行水工模型試驗，透過模型試驗結果推估水流通過設施時的等效曼寧係數，藉此反應設施對水流的影響。然而，試驗過程對流量穩定性或設施排列間距等常常無法精準控制，渠槽實驗受到樣本數量的限制亦無法充分地詮釋相關的水理現象，除此之外，渠槽設計模型應當與現地環境與設施特徵有匹配性才能夠予以應用。

有鑑於此，本研究構想透過數值模擬方式進行定量流通過消能砥礮的流況分析，利用數值模式避免模型試驗量測誤差的影響，對於數值實驗亦可透過多組建模的方式增加樣本數量並加強數據精準度。

1.2 研究目的

本研究針對渠道在不同底床坡度與流量設置條件下，分析水流通過排列間距差異的消能砥礪時，探討斷面的速度削減率與水位抬升率變化以反映流況的差異性。本研究依據謝冠文(2019)渠槽模型試驗資料，透過 Hec-RAS 程式以試驗渠槽尺寸建立數值模型，經過驗證數值模型模擬的流況與實驗流況一致後，接續利用數值模擬的方式，設定光滑渠道的均勻流況為標準流況，分析渠槽內建置不同間距排列之混凝土消能砥礪對水流狀況的影響，並改變坡度與流量探討不同設置情境的差異性。我們以數值模擬的方式獲得定量流通過消能砥礪的流況之後，進一步利用福祿數動力相似的特性將數值試驗結果進行還原，以提供能被現場消能設施設計與減災效益量化評估等應用數據。針對本研究解決的問題分述如下。

1. 率定流量-坡度-消能砥礪幾何特徵關係：研究先以渠槽水工模型試驗的成果做為數值模型試驗驗證的基礎，完成試驗渠槽模擬驗證之後再以相同的模型進行各種情境的數值試驗，以彌補渠槽水工模型試驗時常出現樣本數不足的問題。研究進行渠槽模型建模，改變渠槽坡度與流量設定並分析均勻流通過不同排列間距的消能砥礪的水流狀況，透過斷面流速削減率與斷面水位抬升率的差異反應流況變化，以及透過多組情境模擬分析的結果率定流量-坡度-消能砥礪間距特徵的無因次關係。
2. 給予消能砥礪工程設計參數之參考：研究利用福祿數動力相似性還原數值模型試驗結果，藉此反應實際環境尺度下水流通過消能砥礪的水理現象與提供消能砥礪工程設計所需要的參數。

1.3 工作目標與工作進度

本研究主要設定目標為：(1)利用數值建模分析定量流通過消能砥墩的流況並完成試驗渠槽模型驗證。(2) 數值模型驗證後進一步進行情境模擬，數值建模分析結果用以率定流量-坡度-消能砥墩排列間距的特徵關係。(3)依照現地設施原型比例與福祿數動力相似性還原數值試驗結果，提供工程設計應用與減災效益評估的參考數據。依據工作目標設定重要的工作項目分述如後。

1. 消能砥墩相關研究文獻蒐集；消能砥墩試驗與理論相關文獻蒐集與資料彙整。
2. 試驗渠槽數值建模與模擬驗證：(1)以謝冠文(2019)的渠槽模型試驗成果做為數值驗證的依據；(2)本項驗證資料將會配合文獻收集成果進行調整。
3. 流量-坡度-消能砥墩幾何特徵率定：(1)本項工作須先完成試驗模型驗證；(2)本項工作在試驗模型尺度下進行；(3)本項工作呈現流量-坡度-消能砥墩排列間距特徵的差異性與對流況的影響。
4. 模型還原分析：(1)本項工作分析將還原試驗模型尺度以符合現實環境應用的需求；(2)本項工作包括渠槽模型還原與流況還原；(3)本項工作提供水流通過不同間距排列的消能砥墩時的測試結果。
5. 消能砥墩設計應用案例詮釋：(1)本項工作整合分析成果建立水流通過消能砥墩之流況-間距特徵的無因次關係。(2)本項工作將蒐集消能砥墩設置的實際工程案例分析探討。

本研究重要工作項目與工作進度如表 1-1 所列。

表1-1 工作進度表

重要工作項目	工作比重 %	預定進度	113 年			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
消能礅墩 相關文獻 蒐集	5	工作內容	文獻彙整 與探討			
		累計百分比	100	100	100	100
試驗渠槽 建模與模 擬驗證	15	工作內容	試驗渠槽 建模	渠槽模型 結果驗證		
		累計百分比	25	100	100	100
流量-坡度- 消能礅墩 特徵率定	30	工作內容	數值試驗設 計與目標確 認	流量-坡度- 消能礅墩幾 何特徵模擬	流量-坡度- 消能礅墩幾 何特徵模擬	
		累計百分比	20	60	100	100
模型還原 分析	35	工作內容		模型還原分 析	流況與幾何 特徵無因次 參數率定	流況與幾何 特徵無因次 參數率定
		累計百分比	0	30	70	100
消能礅墩 設計應用 案例詮釋	15	工作內容				消能礅墩設 計應用案例 詮釋
		累計百分比	0	0	0	100
累計 總進度	百分比		15	49	75	100

第 2 章 文獻回顧

2.1 渠槽設計相關研究

渠道設計時，曼寧係數為重要的設計參數，依據曼寧公式推算水流在渠道或管道內平均速度的經驗公式。曼寧係數會因渠道材質、流速、渠道幾何形狀、河床沖刷、流量等因素產生差異。

吳銘塘(1982)研究渠道糙度 n 值及流量觀測計算，提出糙度 n 值及未知流量計算公式，導出 $n = f(Q, R, d)$ 之關係式，可應用於一般或大型灌溉渠道。

林親義(1984)研究渠道糙度之型態與水流阻抗之探討中提及，影響渠道主要因素包括渠道表面糙度、渠道內植生情形、蜿蜒情形、渠道組合情況、沖淤情形、大小及形狀、河床質與懸浮質。影響水流阻抗主要因素包括流速、水深、能量線坡度、水之密度、動黏滯係數、重力速度、河床相關粒徑、沉澱密度、顆粒形狀係數、渠道伸展之形狀係數、斷面形狀係數等。

謝孟良(1996)應用地理資訊系統探討河川高灘地曼寧係數及其水位之研究，利用地理資訊系統 GIS 對研究區域內高灘地區加以分析，加以記錄完成地理資訊的數位化作業。利用收集整理之資料如高灘地河床材質、河川流勢、灘地分布情形及實測水位進行模擬比對出該斷面綜效曼寧係數，較符合實際河川斷面分布情況。

李銘哲(2006)研究預鑄生態塊對生態影響研究及案例探討，目的

為針對市售之場鑄預鑄混凝土塊探討曼寧係數 n 值。將混凝土塊分成凸面及平面兩種，並對流量變化、增氧率、酸鹼值、生物附著量進行探討。其中，在相同渠坡下，凸面預鑄生態混凝土塊曼寧係數 n_p 值率定為 0.0633~0.0975，隨著渠坡坡度增加而加大。

詹又寧(2006)研究草溝曼寧係數之推估，選用挺水性及沉水性水生植物進行植載流場試驗。根據植載配置密度不同、不同流量及水深比，獲得不同流量及糙度、不同植栽與水深之間關係。並將實驗結果配合阻滯係數與流速、水力半徑乘積曲線，探討曼寧係數與福祿樹間之關係曲線，推估渠道曼寧係數。

洪偉哲(2006)研究在渠床粗糙及有植生披覆下，渠道之阻力係數變化。以三種人工草皮分別進行渠槽試驗，並分析水理特性。經由計算得知渠槽側岸之曼寧 n 值大於綜合 n 值，在常態流況下，渠壁 n 值大小為帶花長草 > 長草 > 短草。

陳麒升(2006)在灌溉渠道生態工程水理研究中研究矩形渠道 U 型化及石樑工法生態化工程，針對灌溉渠道及生態多樣性進行比較。結果得知矩形渠道設置為 U 型有助於增加流速多樣性及歧異度，當渠底兩側堆石的直徑增加為渠寬的 1/4 倍時，水位明顯下降，且上游水位回壅升高，曼寧係數變化不大。當石樑以三角型方式往上游排列較不亦產生淤積，且間距以堆石直徑 16 倍時會有最佳的流況歧異度及防淤積效果。

2.2 消能工相關研究

洪瑞明(1992)於砥礪試驗之新設計及其在渠首工程之應用中提及許多類型攔河堰，其中砥礪式堰具有施工容易、工程費用低等特性。

賴俊程(2006)研究預鑄生態石塊運用在灌溉及排水渠道，採用四種凸出高度進行水工試驗。結果顯示生態石塊模型之曼寧係數介於0.0167~0.0437，值與流量成反比，與坡度成正比。

陳熾如(2010)評估河川生態受水工結構物影響中研究以不同固床工長度建置於河道中，探討棲地可使用面積(WUA)。模擬結果顯示在建置固床工之河道上游水位增高，使水域面積增加，其影響會隨流量大小增減而變化，對棲地有良好的影響，尤其在低流量情況。

許淨淳(2016)研究單階與多階渠道跌水消能之研究內利用數值模擬單階跌水及多階垂直跌水消能率，透過多階跌水結果可得知，消能尾檻具開口的消能效率最佳，並且間隔尾檻設計對比連續尾檻設計更有效，具兩個間隔之尾檻比一個間隔之尾檻提升 7%消能率。

吳凱琳(2019)研究明渠流通過消能式階梯粗糙砥床平均水位變化，採用五種不同坡度，改變消能階梯模型之形狀、大小、間距，並觀察其水位變化。結果顯示消能設施對於過陡的渠坡消能效率皆不佳，且放置消能設施組數越多，消能效率會有顯著提升。

王晨宇、王傳益、邱琨皓、樂凱鈞(2019)研究變量流流況下固床工應用於橋墩冲刷防治，利用不同間距、突出高度設置距離及不同流

量條件進行水工試驗。得出最佳配置為設置距離 $L/b=1$ 與鋸齒間距 $W/b=0.8$ ，對應前鋒型、中鋒型及後鋒型變量流最佳綜合沖刷減緩率為 34%、39.3%及 40.3%。

林伯勳、賴承農、許振崑、謝孟荃、高伯宗(2021)研究系列固床工間距分析與評估中，使用 CCHE2D 二維水理模式進行分析驗證。探討常用固床工間距設計比為 0.67、間距設計安全係數可設定 1.5，可配合水土保持手冊固床工間距公式使用。

鍾采燕(2021)研究溢洪道的消能模擬中，模擬固定流量對 3、4.5、6 公分階梯溢洪道河 3-2、3 排列與 2 排列之礫塊溢洪道進行數值模擬研究。結果顯示礫塊溢洪道會受礫塊排列斷面與水流跳躍距離影響，其中 3-2 排列消能效率最佳。

2.3 相關模型實驗研究

Jarrett (1984,1987)研究曼寧係數與渠道坡度和水力半徑之關係，透過研究科羅拉多州境內 21 條陡坡河川進行分析。發現在坡度 0.002~0.052、水力半徑 R 在 0.12~0.22m 之間，河川曼寧係數與坡度成正比，與水深成反比。

黃文岳(2016)依照實際流速、坡度及現地混凝土砥礪等資訊進行水工模型試驗。利用實驗室水工渠槽調整坡度，針對不同排列、高度及間距進行定床試驗。並經由不同流速及流量等可推算出相對應之曼寧係數，經由因次分析轉換為現地曼寧係數值。由實驗結果可知，在最大曼寧係數發生時，砥礪之凸出高度為最高且排列間距為最小。

許可(2018)利用水工實驗室渠槽做清水流試驗，使用左右交錯排列在不同間距及坡度下，以預鑄混凝土消能砥礪求得其水理性能，其中得到在間距 3 公分及凸出高度 5 公分時會有最大曼寧係數。在水深與平均凸出高度到達一定比值後，曼寧係數逐漸趨於穩定。此實驗發生浸沒情況水深與砥礪平均凸出高度之比值會與曼寧係數呈現反比。

謝冠文(2019)在高低交錯排列消能砥礪於渠道中之水理現象研究中，利用消能砥礪不同排列之組合進行水工模型試驗。試驗渠槽設置以交錯排列情況之高度、間距、流量及渠道坡度等模型進行定床實驗。消能砥礪的排列間距採用 3、4、5 及 10 公分，並以 3、5 公分等不同凸出高度建構消能砥礪模型。實驗結果顯示當消能砥礪排列間距 3 公分時，依相似性轉換原型曼寧係數介於 0.0235~0.0333 之間，曼寧係數與流量變化成反比，與坡度變化則成正比。該研究導出關係式

$$n = 0.0122 + 0.022 \times (1 - e^{-4.6006 \times f_r})$$

當水深與砥礪平均凸出高度比值約為 30 時，曼寧係數變化會逐漸穩定，水深和砥礪平均凸出高度的比值與曼寧係數成反比。

第 3 章 實驗設計與方法

3.1 實驗設計

本研究的模型試驗渠槽縱斷面如圖 3-1，消能砥墩設置的平面如圖 3-2。模型渠槽長度為 22 公尺，試驗在定量流況下進行，在渠槽 10 至 16 公尺設置消能砥墩，且在 11、13、15 公尺處設置數值控制點量測流速，此流速用來提供數值模擬成果與水工模型渠槽試驗結果驗證。

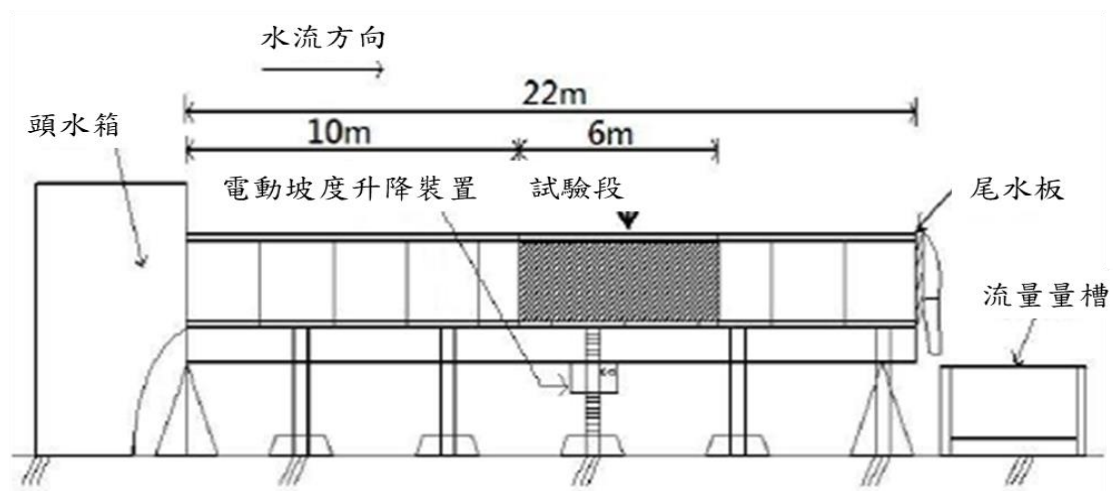


圖 3-1 渠道縱斷面圖

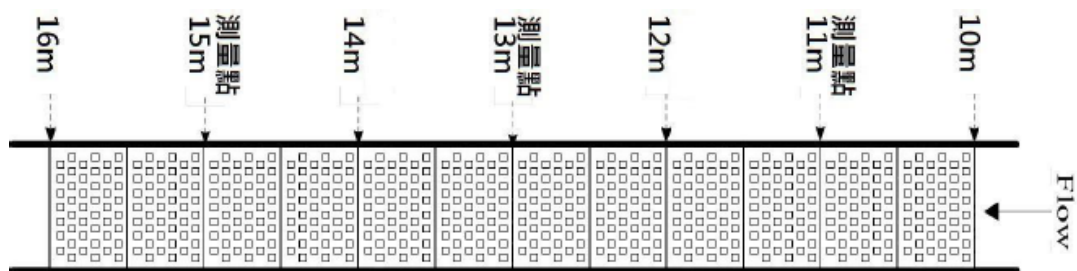


圖 3-2 混凝土消能砥墩模型配置平面圖

參考謝冠文(2019)水工實驗的渠槽模型作為 Hec-RAS 數值模型建置的依據，其中數值渠槽模型中的消能砥墩是採用四種不同設計間

距之混凝土塊以 3cm 與 5cm 高低交錯方式排列固定於方形底板，數值實驗模擬時時依照設定的情境將不同間距的砥礮模型建置於數值渠槽模型中，數值試驗調整不同坡度及流量，模擬水流通過消能砥礮的狀況進行詮釋。數值渠槽模型橫斷面請詳圖 3-3 至圖 3-6。

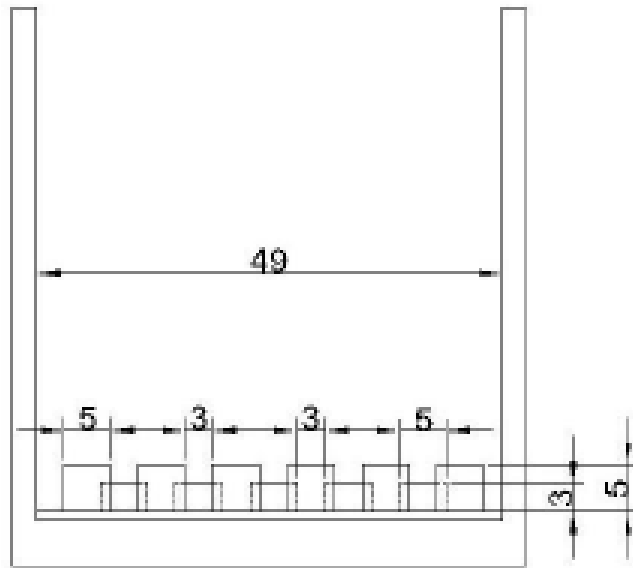


圖 3-3 預鑄混凝土消能砥礮間距 3 公分橫斷面圖

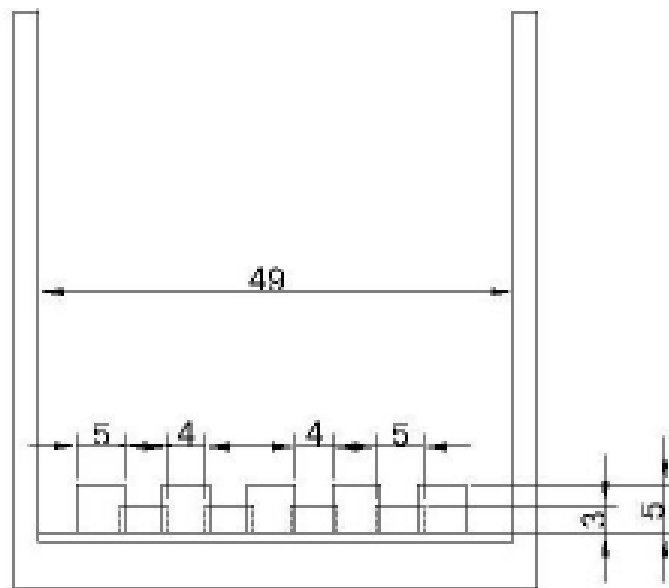


圖 3-4 預鑄混凝土消能砥礮間距 4 公分橫斷面圖

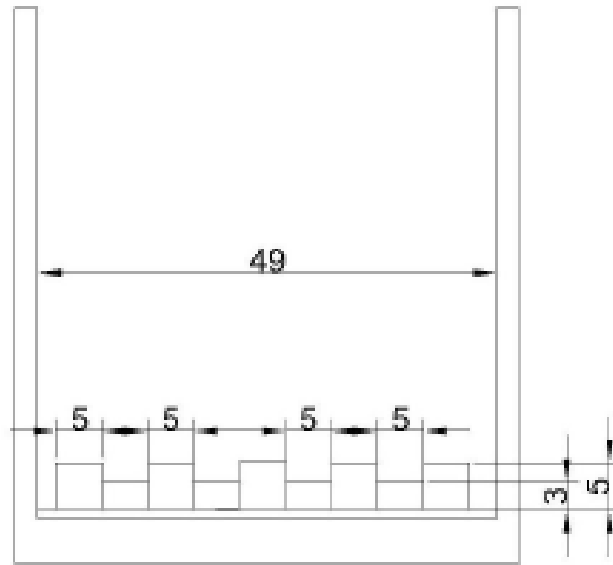


圖 3-5 預鑄混凝土消能砥礮間距 5 公分斷面圖

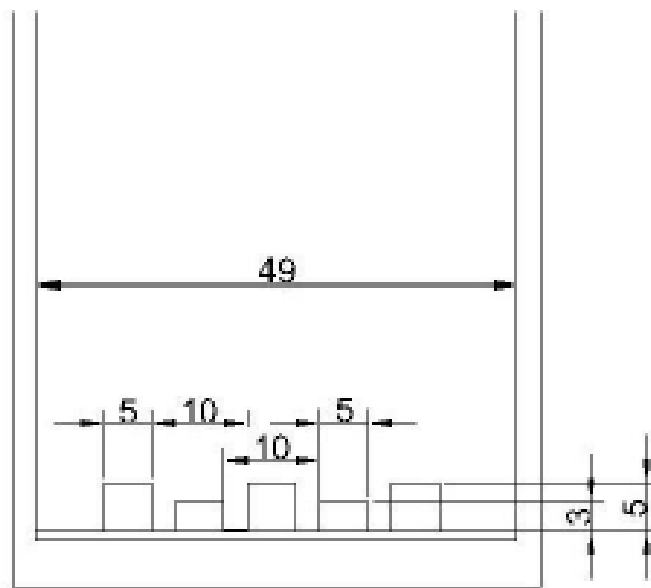


圖 3-6 預鑄混凝土消能砥礮間距 10 公分斷面圖

情境設置是以不同流量以及調整四種模型渠槽坡度(0.012、0.014、0.016、0.018)，模擬水流通過不同間距及固定高低交錯排列的消能砥礮模型時水理現象。依據數值模型試驗計算出的各項水理參數，透過定量流理論分析當等效定量流通過消能砥礮時對應的曼寧糙度係數。

渠槽模型的數值試驗設定五種不同流量、兩種高度交錯、四種不同間距及四種不同坡度變化條件，依據水理計算的結果並分析水流狀況的變化，試驗項目整理如表 3-1。

表 3-1 試驗渠道流量及坡度測定

試驗項目	砥礮凸出高度 3cm、5cm 高低交錯排列			
	砥礮間距 3cm、4cm、5cm、10cm			
坡度 流量(cms)	0.012	0.014	0.016	0.018
0.11	✓	✓	✓	✓
0.09	✓	✓	✓	✓
0.07	✓	✓	✓	✓
0.055	✓	✓	✓	✓
0.035	✓	✓	✓	✓

3.2 HEC-RAS 數值建模

本研究採用 HEC-RAS 模式建模，HEC-RAS 模式是由美國陸軍工兵團的水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center, HEC) 研發出的整合性的水理分析系統程式，常被應用在分析河川水理條件和洪災模擬。無論是單一河道或複雜河道、自然或人工渠道，渠道模型建置完畢後可以快速演算獲得水理成果。HEC-RAS 可以執行一維和二維的渠道水理計算，包含定量流、變量流、動床輸砂等計算，可依據超臨界流、亞臨界流和兩種混合流況設定適合的邊界條件。

本研究採用 HEC-RAS 一維定量流演算模組進行渠槽模型數值實驗的模擬，一維定量流演算原理與基本方程式如下。

(1) 連續方程式(Continuity Equation)

變數 Q 為流量(cms)， A 為渠槽模型的通水面積(m²)， V 為渠槽模型斷面平均流速(m/sec)，連續方程式如下

$$Q = V \times A$$

(2) 能量方程式(Energy Equation)

Y 表示水面線高度(m)， Z 表示河床高程(m)， α 表示能量修正系數， g 表示重力加速度(m/s²)， h_e 表示能量損失水頭(m)。

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

進行適合超臨界流、亞臨界流或兩種混合流況的邊界條件設定後，HEC-RAS 會透過一維能量方程式，依照標準步推法(Standard Step

Method)，進行水面線的運算，如圖 3-7。

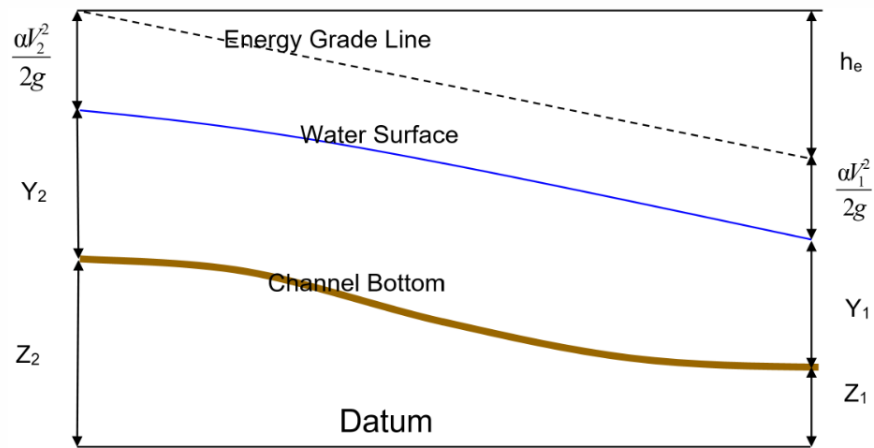


圖 3-7 能量梯度線、水面線與渠底關係圖：

圖中左側代表河川上游，右側為下游， $\frac{a_2^2 V_2}{2g}$ 表示能量線梯度。

(3) 動量方程式(Momentum Equation)

當渠槽模型有水工構造物，如箱涵、匯流口及消能設施等常因通水斷面改變而發生動量損失或亞臨界流與超臨界流交替轉換的情況，HEC-RAS 在模擬時就會採用動量方程式計算，詳圖 3-8。

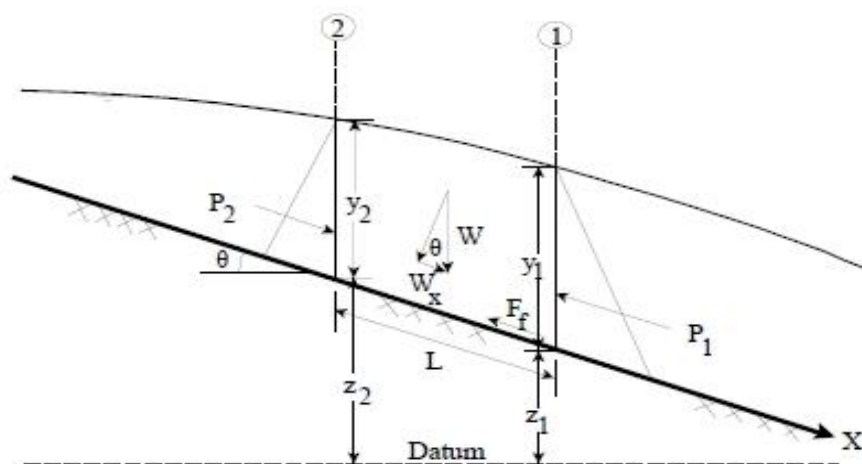


圖 3-8 動量方程式示意圖

圖 3-8 中， P 為控制體積之壓力， W_x 為 x 方向的重力， F_f 為流體

流動時產生的反方向摩擦力， Q 為流量， ρ 為密度， ΔV_x 為兩斷面於 x 方向之流速差。依據牛頓第二運動定律(Newton's second law of motion)，動量方程式表示如下。

$$P_1 - P_2 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$

(4) 能量損失

L 代表河川上下游兩斷面之距離(m)， S_f 表示渠槽模型上下游兩斷面之平均能量坡降， C 代表束縮及擴張能量損失系數。能量損失計算公式可以表示為：

$$h_e = L \times S_f + C \times \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

本研究選用 HEC-RAS 渠道斷面建置模組進行建模，渠道幾何依照謝冠文(2019)實驗渠道進行建模，數值試驗渠槽模型建模因為模型渠槽兩側的材質設定及底床消能砥礪的高程與材質設定的影響，通水斷面積、水位、底床寬度、水力深度、水力半徑、潤周都會受其影響而有變化。為確定模擬流況為均勻穩定流況，因此一開始我們先建立一組無消能砥礪渠道，如圖 3-9 與圖 3-10。

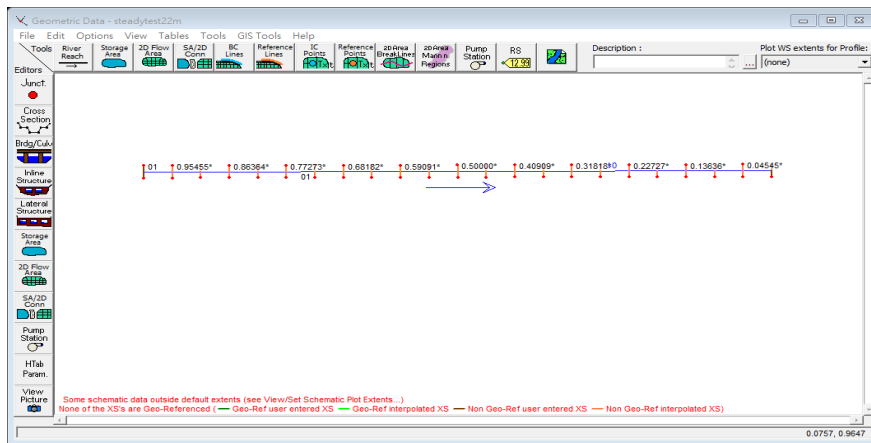


圖 3-9 模擬砥礪完成圖(無消能砥礪)

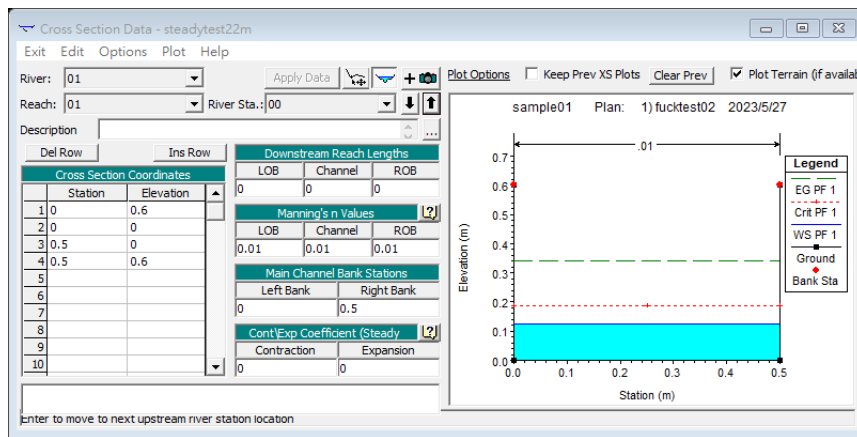


圖 3-10 斷面設計圖(無消能砥礪)

將實驗渠道數值化後，我們依照 4 種坡度(0.012、0.014、0.016、0.018)、五種流量(0.1276 cms、0.1011 cms、0.0765 cms、0.0652 cms、0.0376 cms)及四種間距(3 cm、4 cm、5 cm、10 cm)建立渠道模型。Hec-RAS 模型建置以表格方式填入相關數據，其中左側表格可輸入斷面資料如點位及高程，中間表格輸入渠道基本水理參數如與下一斷面之距離、左岸、右岸與渠底的曼寧係數、左岸與右岸位置及該斷面束縮係數及擴張能量損失係數，詳圖 3-11、圖 3-12、圖 3-13。

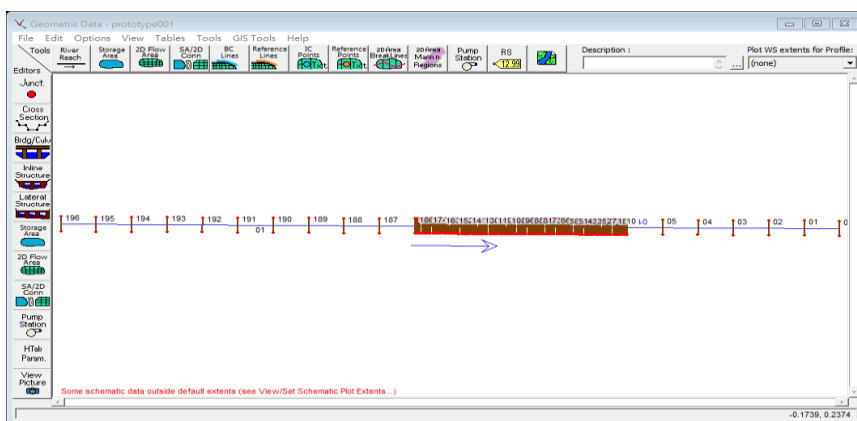


圖 3-11 模擬砥礪完成圖(有消能砥礪)

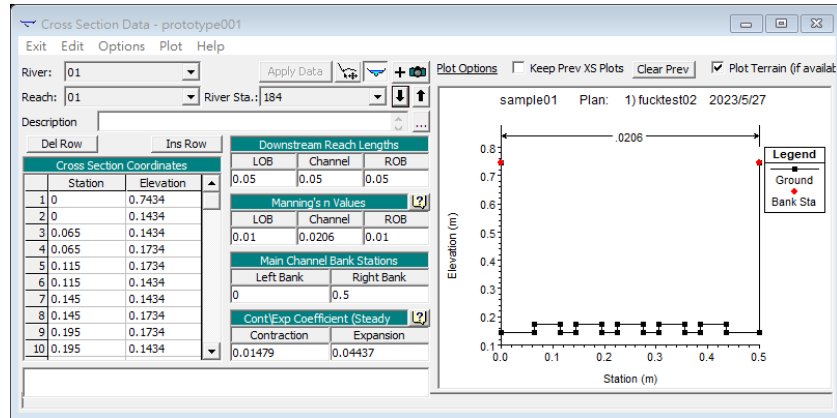


圖 3-12 凸出高度 3 公分斷面

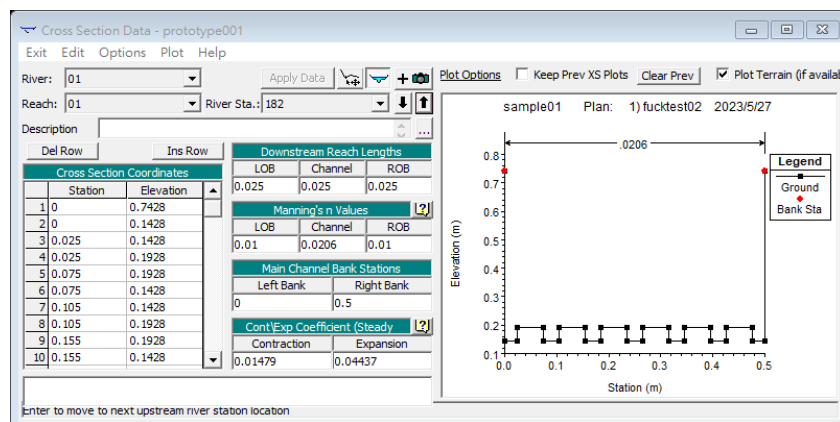


圖 3-13 凸出高度 5 公分斷面

本研究先將數值渠槽模型分為無消能砥礪與有消能砥礪兩組試驗組，無砥礪組分別以改變渠槽坡度 0.012、0.014、0.016、0.018 與控制流量 0.1276 cms、0.1011 cms、0.0756 cms、0.0652 cms 及 0.0376 cms 設定不同的情境。有消能砥礪組則增加四種不同設計間距 3 cm、4 cm、5 cm 及 10 cm，固定採用前後凸出高度 3 cm 及 5 cm 及左右交錯方式排列。

無消能砥礪時流況為超臨界流，水由上往下傳遞，因此邊界條件設置於上游給定正常水深，如圖 3-14 與圖 3-15。

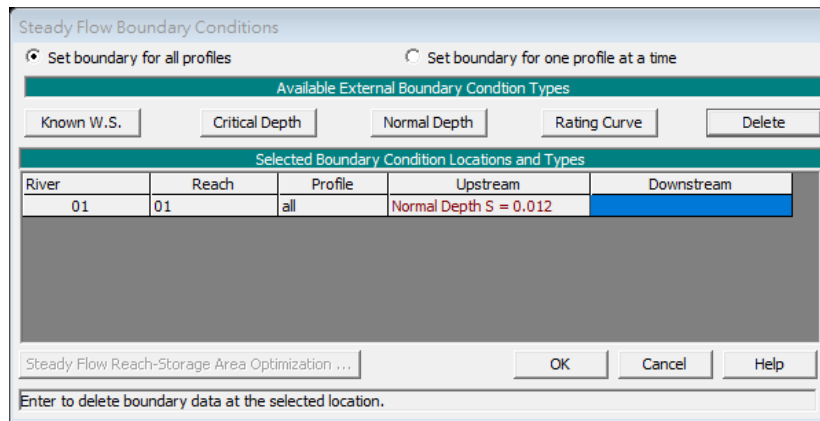


圖 3-14 邊界條件-上游給定正常水深/坡度 0.012

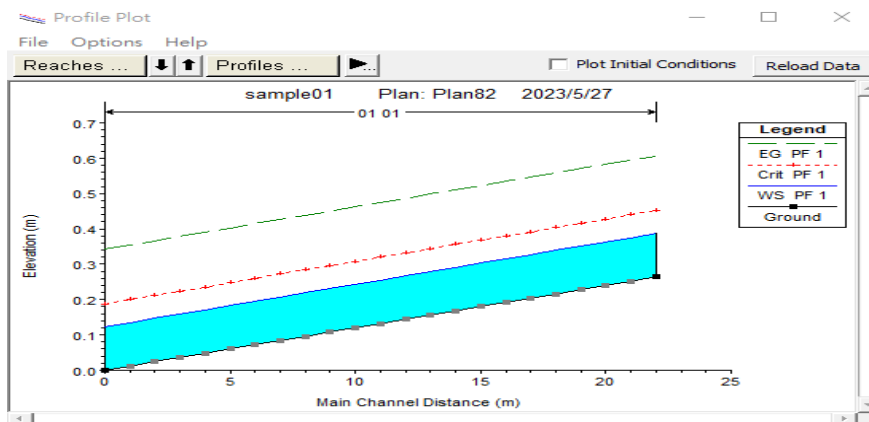


圖 3-15 模擬完成河道縱剖面圖(無消能砥礪)

有消能砥礪時流況在碰撞到消能砥礪時會由超臨界流轉換為亞臨界流，屬於混合流況，水位會產生回壅。為避免水位演算錯誤，需在邊界條件設置上下游，並給定正常水深，如圖 3-16 與圖 3-17。

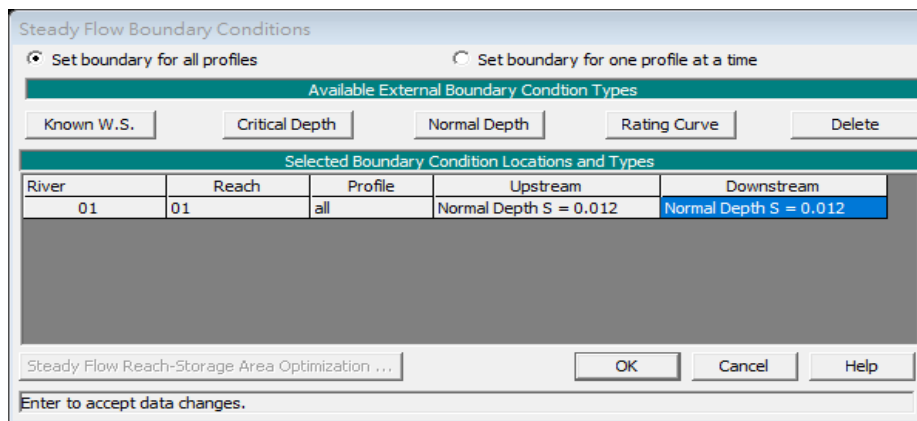


圖 3-16 邊界條件設置:上下游給定正常水深

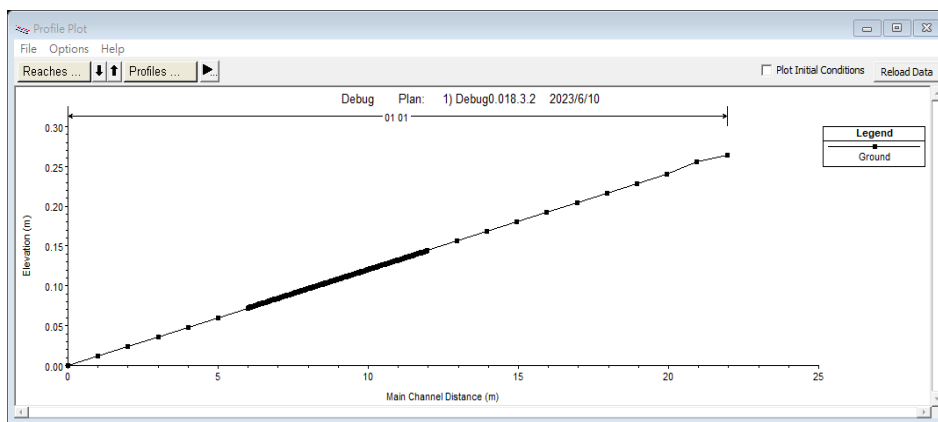


圖 3-17 渠道縱剖面圖(有消能砥礮)

3.3 消能效益探討的方法

我們採用無設置消能砥礪均勻流況及設置消能砥礪後的流況進行比較，確認消能砥礪的消能效益。本研究把最小流深情境的均勻流況設定為標準流況，在調整模型渠槽坡度與增加流量的情境下，探討標準流況的水流通過不同間距排列的消能砥礪後水理現象的差異。不同間距排列的模型渠槽消能砥礪縱斷面配置示意如圖 3-18。

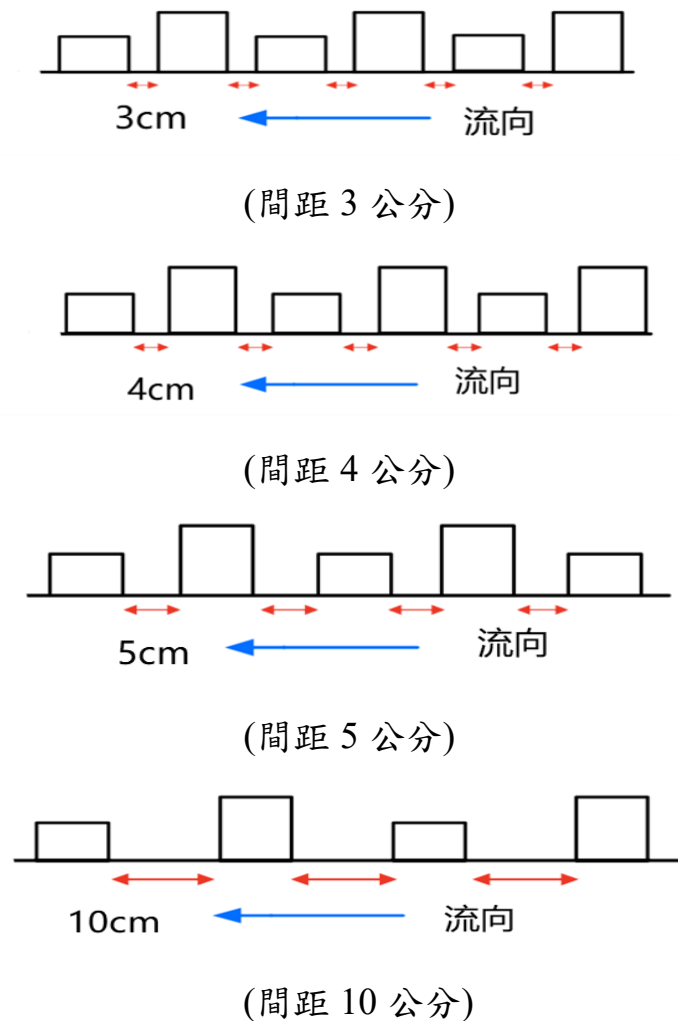


圖 3-18 消能砥礮縱斷面配置示意圖

模型渠槽中配置消能砥礮，會導致通水斷面減少與阻力增加，進而導致水流的斷面流速與斷面水位變化。當水流通過消能砥礮斷面時，

我們定義速度削減率用來展示相對於標準流況最大與最小的斷面速度變化。同時，相對於均勻水深定義水位抬升率呈現最大與最小的斷面水位變化。在定量流理論基礎架構上，利用消能砥礪斷面流速與斷面水位變化的水理計算結果，求出最大與最小的速度削減率與水位變化率後，接續計算斷面的動能變化率與反推斷面的等效曼寧糙度係數，藉此詮釋水流通過消能砥礪時對水流狀況的影響。

1. 砥礪等效糙度與曼寧 n 值關係

以 V 為斷面流速、 R 為水力半徑、 S_f 為摩擦坡降，依據曼寧公式的定義，則曼寧糙度係數 n 可以表示如下。

$$n = \frac{1}{V} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

HEC-RAS 程式提供四種摩擦坡降 S_f 的計算方式，我們選用算數平均坡降法進行模擬，平均坡降法 S_f 表示如下。

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

模型渠槽在定量流條件下，並假設其中消能砥礪渠槽的水力半徑和摩擦坡降皆與無消能砥礪設置的模型渠槽相同。我們把消能砥礪渠槽的斷面流速 V^* 視為等效的標準流況通過曼寧糙度係數較大的渠槽所置，由前述曼寧粗糙係數關係式求得等效曼寧糙度係數 n^* 值。

$$n^* = \frac{1}{V^*} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

2. 設置砥礮改變流速產生動能損失

採用行政院農業委員會於 2021 年推出陡坡坡面排水設施手冊，其中以能量方程式進行設施斷面能量消散效能評估，評估的方式為採用消能設施設置前後斷面的能量變化(E_1-E_2)和相對於設施前斷面能量 E_1 差異變化，定義能量消能率 ΔE 進行分析， ΔE 公式如下。

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1}, \quad E_1 = Z_1 + h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}, \quad E_2 = Z_2 + h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g}$$

式中 E_1 為未設置消能砥礮前總能量水頭(m)； Z_1 為未設置消能砥礮基準面至選定斷面之高程(m)； h_1 為未設置消能砥礮前選定斷面之水深(m)； α_1 未設置消能砥礮前選定斷面之動能修正係數，通常 α 為 1.05 ~ 1.1； V_1 為未設置消能砥礮前選定斷面之流速(m/sec)； E_2 為已設置消能砥礮前總能量(m)； Z_2 為已設置消能砥礮基準面至選定斷面之渠底高程(m)； h_2 為已設置消能砥礮前選定斷面之水深(m)； α_2 已設置消能砥礮前選定斷面之動能修正係數； V_2 為為已設置消能砥礮前選定斷面之流速(m/sec)； $g=9.81(\text{m/sec}^2)$ 為重力加速度(m/sec^2)， ΔE 為能量消散率。

第 4 章 渠槽水工模型試驗的模擬驗證

4.1 渠槽水工模型試驗與數值模擬驗證說明

本研究參照謝冠文(2019)水工模型試驗數據，利用 Hec-RAS 建模後進行水理計算與驗證。我們在水流通過消能砥礪的前、中、後段進行水深的量測。水深量測數據與數值模擬結果數據必須有一致性，因此依照試驗程序，我們須採用水深扣除消能砥礪突出高度後的結果，其中消能砥礪凸出高度以平均值 0.04 m 呈現，再將已扣除的平均凸出高度(0.04 m)相加後再進行比較，使數值模擬水位與模型量測水位有一致性。另外，數值模擬曼寧係數輸入採用渠槽模型實驗計算出曼寧粗糙係數 n 值。本研究建立相同尺寸數值模型並比較並確認不同砥礪設置間距、不同渠槽坡度及不同試驗流量對水深變化的關係。

本章依序改變流量、渠槽坡度與消能砥礪間距，透過定量流模擬成果，藉由消能消減率與等效曼寧係數的探討，陳述當流量、渠槽底床坡度與消能砥礪幾何特徵改變時如何影響渠槽流況的變化。

本章分為渠槽試驗數值模擬驗證與消能砥礪對流況消能的影響探討兩個部分進行說明。第一部分渠槽試驗數值模擬驗證，除了以謝冠文(2019)驗證實驗成果，同時亦透過數值建模的方式加強流量、渠槽底床坡度與消能砥礪幾何特徵變化時的流況進行模擬與說明。第二部份消能砥礪對流況消能的影響探討，主要將造成消能效益影響分別反映至等效曼寧係數及能量消減率，觀察不同砥礪配置對其影響。本項研究在期中報告階段進行渠槽數值模擬成果進行陳述，期末報階段則進一步加強對消能砥礪對消能效益探討。

4.2 不同渠槽設置情境之模擬與驗證

1. 固定渠槽坡度與消能墩間距與改變流量

情境 1 的設定依照謝冠文(2019)渠槽模型試驗，固定渠槽底床坡度為 0.012 與消能墩間距為 5 公分，渠坡與消能墩間距固定的情境下，數值模擬試驗採用 5 種不同流量，分別為 0.1276、0.1011、0.0756、0.0652 與 0.0376 cms。

水理因素變化如表 4-1，相關水位縱斷面模擬結果依序如圖 4-1 至圖 4-5。模擬結果顯示，當水流碰撞砥墩時，會出現流速減緩、水位增高與上游水位壅高的現象。根據模擬結果得知在坡度 0.012、砥墩間距 5 公分、流量為 0.1276 cms 時，渠道回水長度為 0.5-0.6 公尺，與試驗時觀測回水長度一致。

表 4-1 數值模擬情境設定(固定坡度0.012與間距5公分改變流量)

坡度 S (m)	前平 均流 速 (m/s)	中平 均流 速 (m/s)	後平 均流 速 (m/s)	平均 流速 (m/s)	H (m)	P (m)	R (m)	A (m ²)	Q (cms)
0.012	0.91	0.936	1.014	0.953	0.244	1.363	0.1019	0.1333	0.1276
	0.831	0.852	0.923	0.869	0.209	1.292	0.0937	0.1155	0.1011
	0.744	0.760	0.820	0.775	0.1783	1.2162	0.0839	0.0966	0.0756
	0.696	0.711	0.769	0.726	0.1625	1.1828	0.0792	0.0882	0.0652
	0.523	0.535	0.587	0.549	0.1193	1.0832	0.0632	0.0633	0.0376

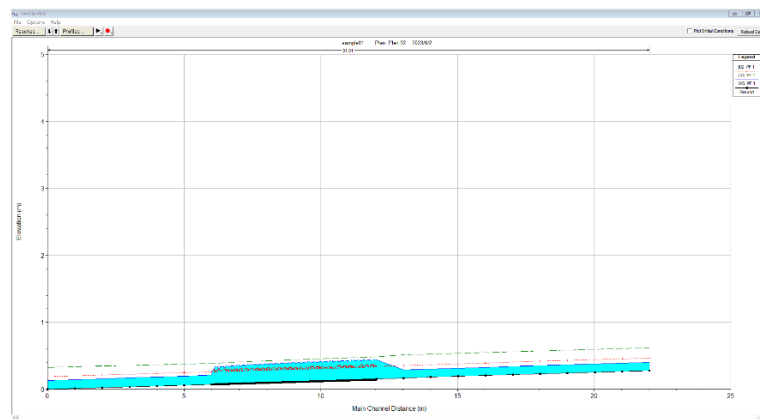


圖 4-1 渠道縱斷面圖
(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.1276cms)

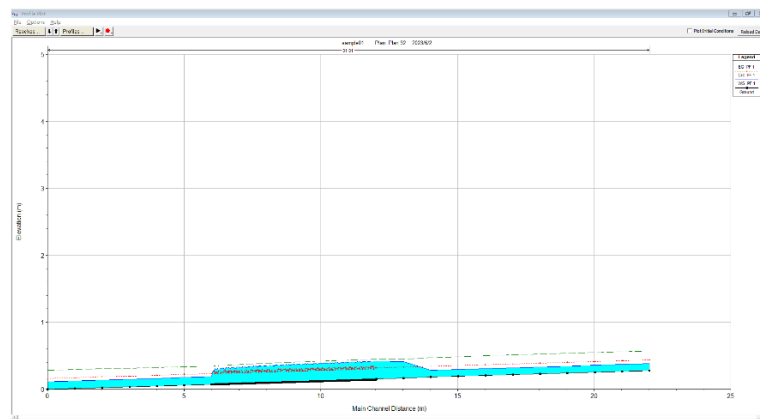


圖 4-2 渠道縱斷面圖
(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.1011cms)

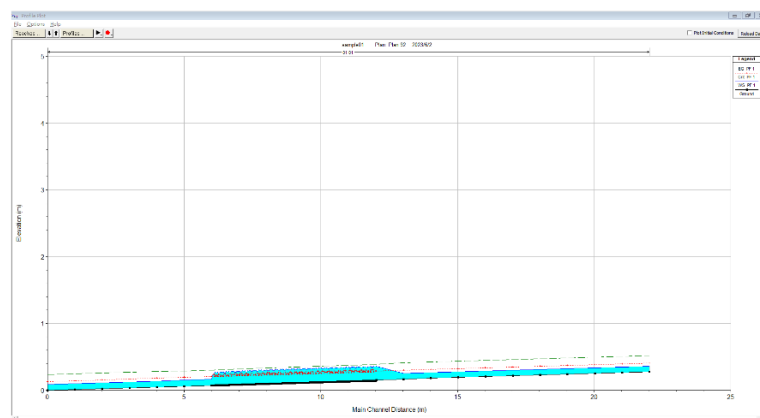


圖 4-3 渠道縱斷面圖
(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0756cms)

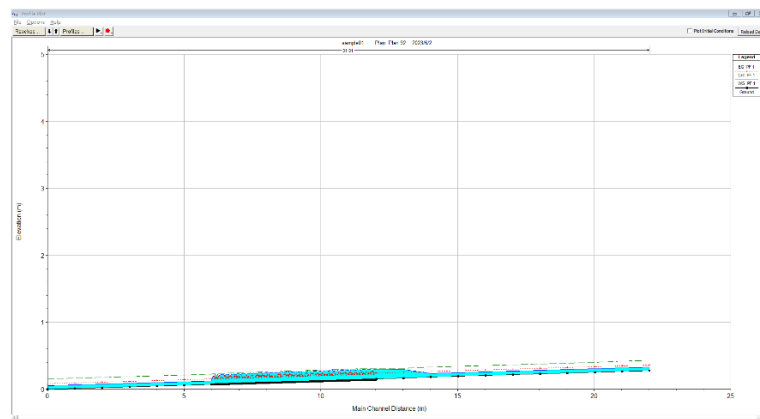


圖 4-4 渠道縱斷面圖
(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0652cms)

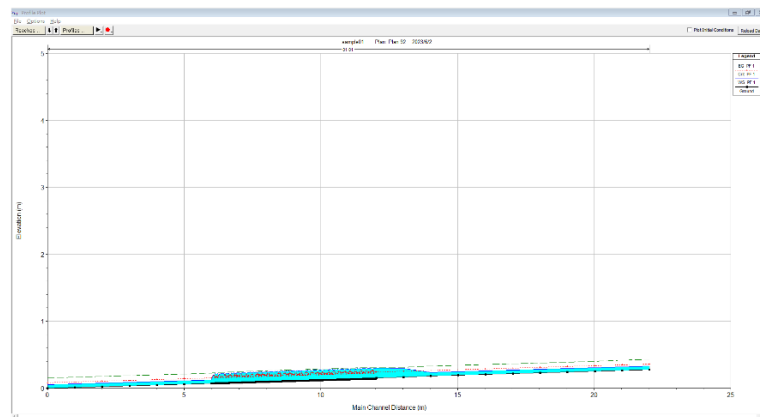


圖 4-5 渠道縱斷面圖
(坡度 0.012/消能砥礮間距 5 公分/流量 0.0376cms)

2. 固定渠坡改變流量同時調整消能礮間距

相對於情境 1，情境 2 在固定渠坡 0.012 的情況下，依序調整消能礮間距為 3、4、5 與 10 公分，分別針對流量為 0.1276、0.1011、0.0756、0.0652 與 0.0376 cms 的情況進行模擬試驗。模擬結果依序如表 4-2、4-3、4-4 與 4-5。

表4-2 坡度0.012消能砥礪間距3公分數值模擬表

坡度 S(m)	前平均 流速 (m/s)	中平均 流速 (m/s)	後平均 流速 (m/s)	平均 流速 (m/s)	H(m)	P(m)	R(m)	A(m ²)	Q(cms)
0.012	1.000	1.021	1.138	1.053	0.266	1.237	0.098	0.1212	0.1276
	0.908	0.926	1.039	0.958	0.235	1.162	0.0908	0.1055	0.1011
	0.767	0.794	0.915	0.825	0.207	1.097	0.0835	0.0916	0.0756
	0.697	0.723	0.855	0.759	0.196	1.085	0.0792	0.0859	0.0652
	0.511	0.531	0.662	0.568	0.157	0.971	0.0682	0.0662	0.0376

表4-3 坡度0.012消能砥礪間距4公分數值模擬表

坡度 S(m)	前平均 流速 (m/s)	中平均 流速 (m/s)	後平均 流速 (m/s)	平均 流速 (m/s)	H(m)	P(m)	R(m)	A(m ²)	Q(cms)
0.012	1.008	1.022	1.051	1.027	0.266	1.268	0.098	0.1242	0.1276
	0.917	0.928	0.955	0.933	0.233	1.196	0.0906	0.1084	0.1011
	0.795	0.807	0.837	0.813	0.202	1.129	0.0824	0.0930	0.0756
	0.791	0.758	0.895	0.795	0.190	1.041	0.0788	0.0820	0.0652
	0.528	0.551	0.705	0.594	0.152	0.942	0.0672	0.0633	0.0376

表4-4 坡度0.012消能砥礪間距5公分數值模擬表

坡度 S(m)	前平均 流速 (m/s)	中平均 流速 (m/s)	後平均 流速 (m/s)	平均 流速 (m/s)	H(m)	P(m)	R(m)	A(m ²)	Q(cms)
0.012	0.91	0.936	1.014	0.948	0.244	1.363	0.1019	0.1333	0.1276
	0.831	0.852	0.923	0.875	0.209	1.292	0.0937	0.1155	0.1011
	0.744	0.760	0.820	0.761	0.178	1.216	0.0839	0.0966	0.0756
	0.696	0.711	0.769	0.723	0.163	1.183	0.0792	0.0882	0.0652
	0.523	0.535	0.587	0.541	0.119	1.083	0.0632	0.0633	0.0376

表4-5 坡度0.012消能砥礪間距10公分數值模擬表

坡度 S(m)	前平均 流速 (m/s)	中平均 流速 (m/s)	後平均 流速 (m/s)	平均 流速 (m/s)	H(m)	P(m)	R(m)	A(m ²)	Q(cms)
0.012	0.944	0.967	1.028	0.980	0.275	1.293	0.1007	0.1302	0.1276
	0.963	0.967	0.982	0.971	0.225	1.180	0.0882	0.1041	0.1011
	0.881	0.882	0.886	0.883	0.189	1.095	0.0782	0.0856	0.0756
	0.826	0.827	0.832	0.829	0.175	1.061	0.0741	0.0786	0.0652
	0.657	0.658	0.659	0.658	0.133	0.956	0.0598	0.0571	0.0376

依據模擬的結果觀察特定流量，當消能墩間距變化時的流況，間距變化對於水深的影響繪製如圖 4-6 與 4-7，圖中橫座標代表砥墩設置間距，縱座標代表模擬水深，分別以實驗數據(藍)及數值模擬成果(橘)表示。圖 4-6 顯示當流量為 0.1276 cms，砥墩間距由 3 公分增加至 5 公分時，水深上升，而繼續將間距增加至 10 公分時，水位反而下降。同樣的情況，當流量減小至 0.0376 cms 時，水深與消能墩間距的變化亦有相同的趨勢(圖 4-7)。當間距小時，水流經過消能砥墩受到的阻力較大，水位上升效應較明顯；當間距較大時，水流有較多的空間流，阻力相對較小。

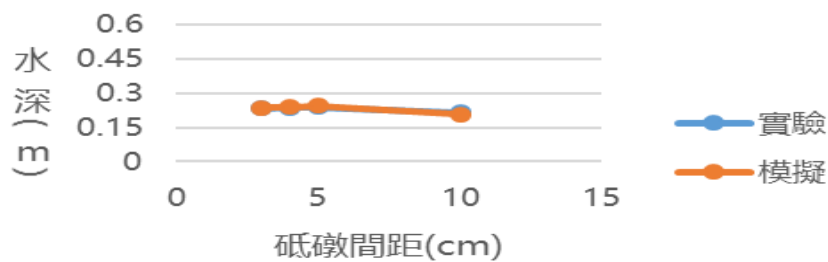


圖 4-6 砥墩間距與水深關係圖(坡度 0.012 流量 0.1276 cms)

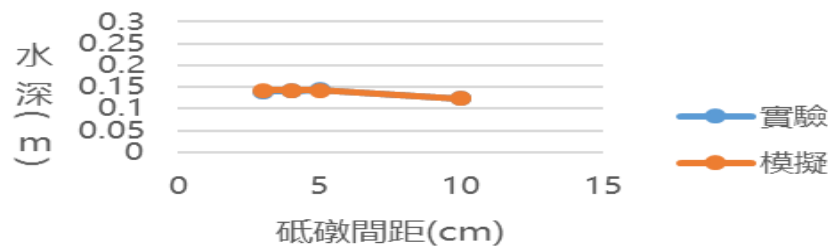


圖 4-7 砥墩間距與水深關係圖(坡度 0.012 流量 0.0376 cms)

當坡度固定為 0.012 時，特定間距下水深對流量的變化如圖 4-8 與 4-9，其中圖 4-8 為間距 3 公分的情況，圖 4-9 為間距 10 公分的情況。依據數值模擬結果顯示，坡度固定為 0.012 時，無論消能墩間距為何，當流量增加渠槽水深也會同時增加，流量與水深變化的趨勢幾乎是線性的關係。

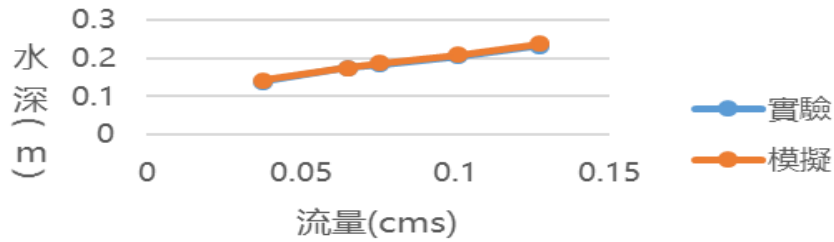


圖 4-8 流量與水深關係圖(坡度 0.012 間距 3 公分)

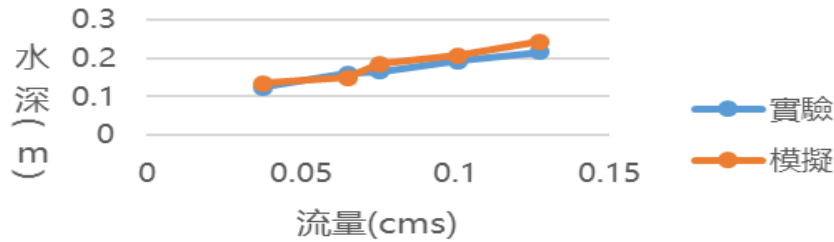


圖 4-9 流量與水深關係圖(坡度 0.012 間距 10 公分)

3. 改變流量調整消能墩間距並增加渠坡坡度

相對於情境 2，情境 3 的設定相對於情境 2 的情況下增加渠槽坡度，觀察流況的變化。圖 4-10 與 4-11 顯示流量分別為 0.1276 與 0.0376 cms 的情況，當坡度為 0.018 時，砥礪間距調整與渠槽水深變化的關係。當坡度由 0.012 增加至 0.018 時，與圖 4-1 與圖 4-2 有相同的趨勢。即當消能墩間距由 3 公分增加至 5 公分時，水深上升，而繼續將間距增加至 10 公分時，水位反而下降

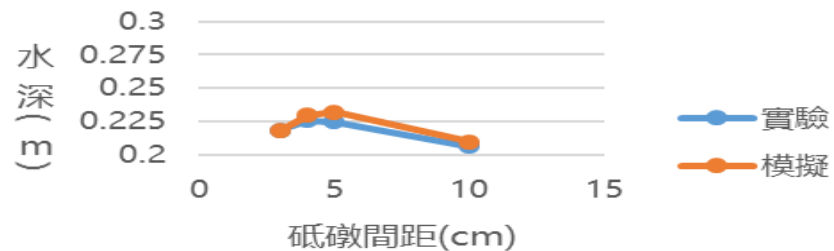


圖 4-10 砥礪間距與水深關係圖(坡度 0.018 流量 0.1276cms)

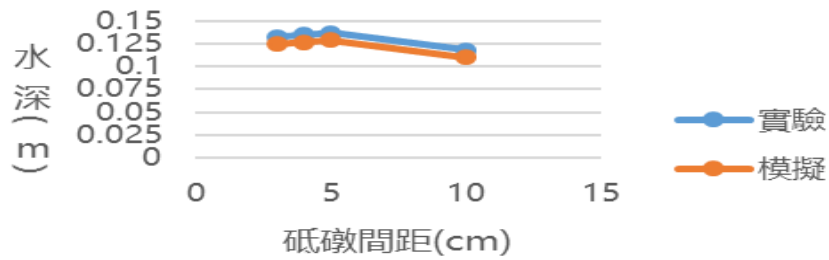


圖 4-11 砥礮間距與水深關係圖(坡度 0.018 流量 0.0376cms)

另外，當渠槽坡度調整為 0.018 時，消能礮在特定間距 3 公分與 10 公分的情境下流量與水深的變化趨勢如圖 4-12 與圖 4-13，相對於圖 4-8 與圖 4-9 有相同的情況，在坡度設定為 0.018 的情況下，不論消能礮間距為 3 公分或是 10 公分，流量與水深都是呈現正比的關係。相對於坡度為 0.012 流量與水深幾乎是線性遞增的情況，在坡度為 0.018 的情境下，模擬的結果顯示消能礮間距縮小時，在流量增大的情境下，流量遞增對於水深的變化會逐漸趨於平緩。

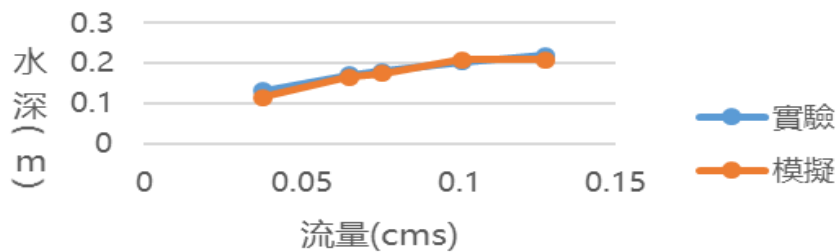


圖 4-12 流量與水深關係圖(坡度 0.018 間距 3 公分)

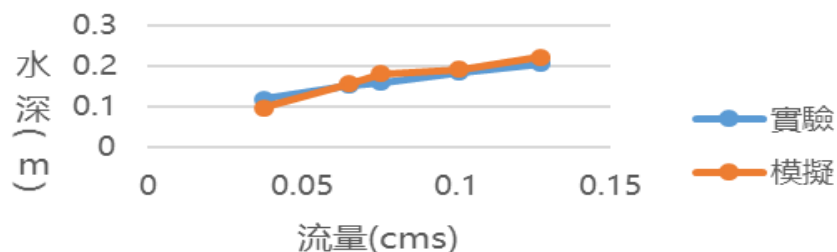


圖 4-13 流量與水深關係圖(坡度 0.018 間距 10 公分)

圖 4-14 至 4-17 顯示特定流量與特定間距的情況，坡度改變對於水深的影響。圖 4-14 與圖 4-15 分別為流量 0.1276 cms 與消能墩間距為 3 公分以及流量為 0.1276 cms 消能墩間距為 10 公分的情境，在流量為 0.1276 的情境下，不論消能墩間距為 3 公分或 10 公分當坡度增加時水深有下降的趨勢。比較圖 4-14 與圖 4-15，消能墩在特定間距為 3 公分的情況下，流量由 0.1276 cms 減少至 0.0376 cms 時，水深隨渠坡增加下降的趨勢逐漸變緩，當渠坡持續增加時這種趨勢越明顯。比較圖 4-16 與圖 4-17，消能墩特定間距為 10 公分的情境下，流量由 0.1276 cms 減少至 0.0376 cms 時，同樣出現水深隨渠坡增加下降的趨勢逐漸變緩，消能墩特定間距為 10 公分與流量為 0.0376 cms 的情境下，水深幾乎不再隨者渠坡增加變化。

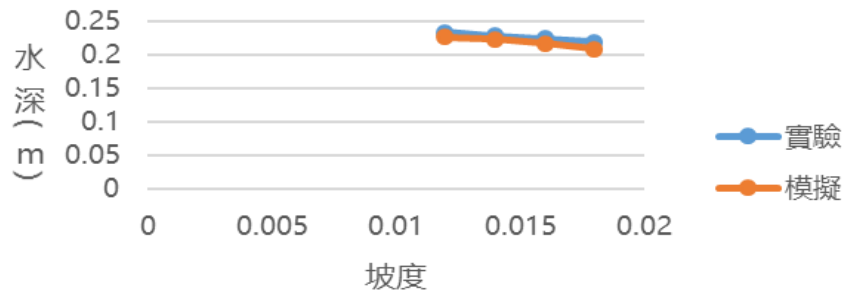


圖 4-14 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.1276cms 間距 3 公分)

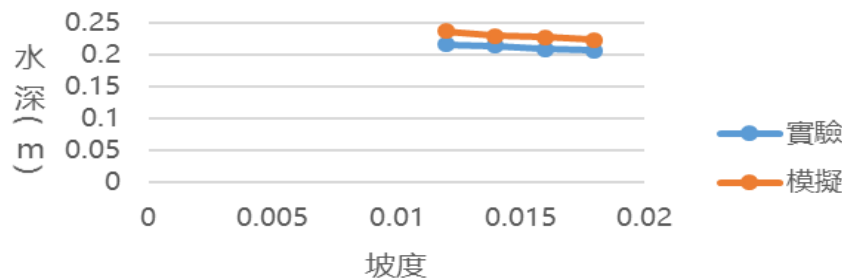


圖 4-15 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.1276cms 間距 10 公分)

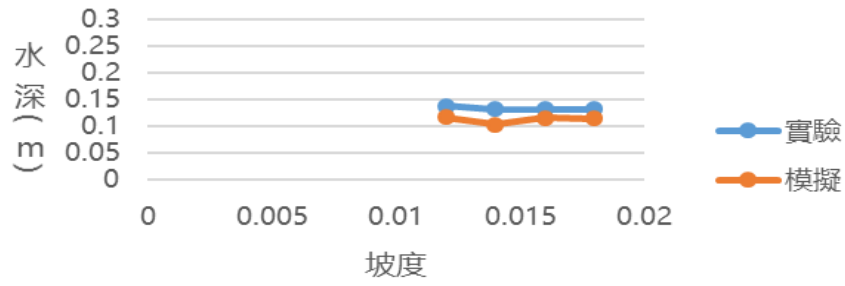


圖 4-16 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.0376cms 間距 3 公分)

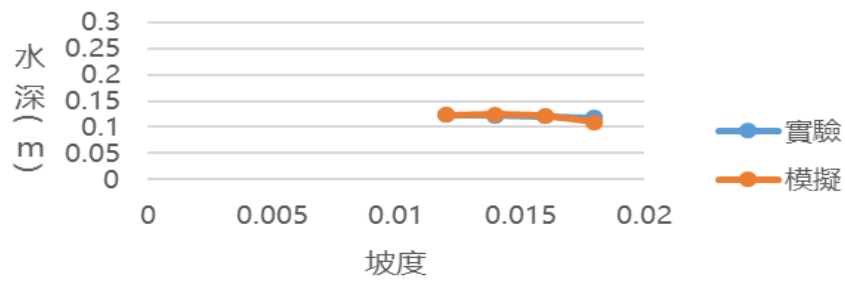


圖 4-17 渠槽坡度與水深關係圖(流量 0.0376cms 間距 10 公分)

4.3 渠流通過消能砥礪的情境模擬

情境 1：固定流量-固定坡度-改變消能砥礪間距

數值試驗情境測試首先以固定流量 0.0376 cms 的渠流以均勻流速 1.38 m/s 在寬度 0.5 m 的渠槽流動，渠流在里程 12 m 的位置流入消能砥礪段，通過消能砥礪後在里程 6.2 m 的位置流出。圖 4-18 與圖 4-19 依序為坡度 0.014，渠流通過消能砥礪間距設置依序為 3cm、5 cm、10 cm 時，渠流斷面流速與渠流斷面水深的分布。

渠流以斷面流速 1.38 m/s 及均勻水深為 5.44 cm 流入渠槽里程 12 m 的位置，當渠流流入渠槽消能砥礪後，斷面流速明顯的呈現急驟跌落且渠流斷面水深急遽抬升，而因為消能砥礪與渠坡重力加速度作用，渠流在通過消能砥礪的過程在斷面流速削減後接續呈現震盪加速的現象，斷面水深在抬升後則呈現震盪緩降的現象。渠流在里程 6.2 m 的位置流出消能砥礪，渠流通過消能砥礪後，斷面流速急速躍升且斷面水深急驟跌落，之後渠流幾乎回復原來的均勻流速與均勻流深。

對於不同的消能砥礪的間距設置情境模擬顯示，在消能砥礪間距設置為 10 cm 的河段，斷面流速削減後介於 0.454 至 0.737 m/s，斷面水深抬升介於 16.6 至 13.1 cm 之間；消能砥礪間距設置間距為 5 cm 的河段，斷面流速削減後介於 0.468 至 0.744 m/s，斷面水深抬升後介於 16.0 至 12.7 cm；消能砥礪間距設置間距為 3 cm 的河段，斷面流速削減後介於 0.493 至 0.750 m/s，斷面水深抬升後介於 15.3 至 12.2 cm。

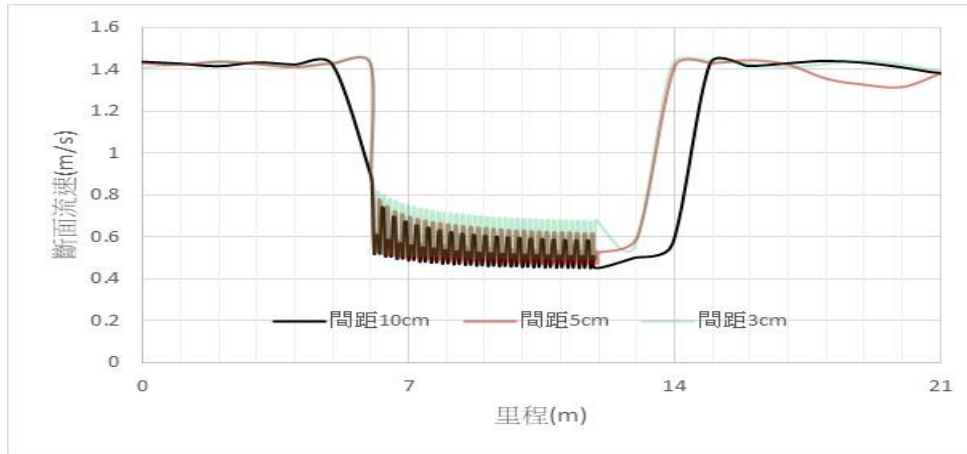


圖 4-18 渠流斷面流速分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)

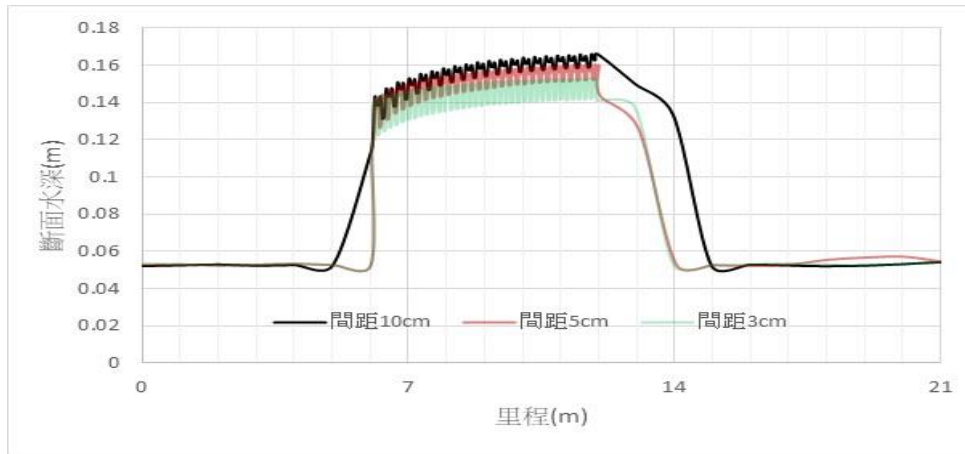


圖 4-19 渠流斷面水深分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)

依據模擬結果顯示，渠流通過消能砥礪時會出現流速減緩、水位抬升的情況。在情境 1 的案例，流況同時受到重力與消能砥礪阻力的作用，而在相同重力條件下(坡度為 0.014)，模擬結果顯示消能砥礪間距越大對於減緩斷面流速的作用越明顯，其相對造成水位抬升的現象也越明顯。

圖 4-20 與圖 4-21 顯示相對於均勻流的標準流況，消能砥礪在不

同間距設置條件下斷面的速度削減率與水位抬升率，其可視為對應消能砥礪在不同間距設置下阻力的指標。

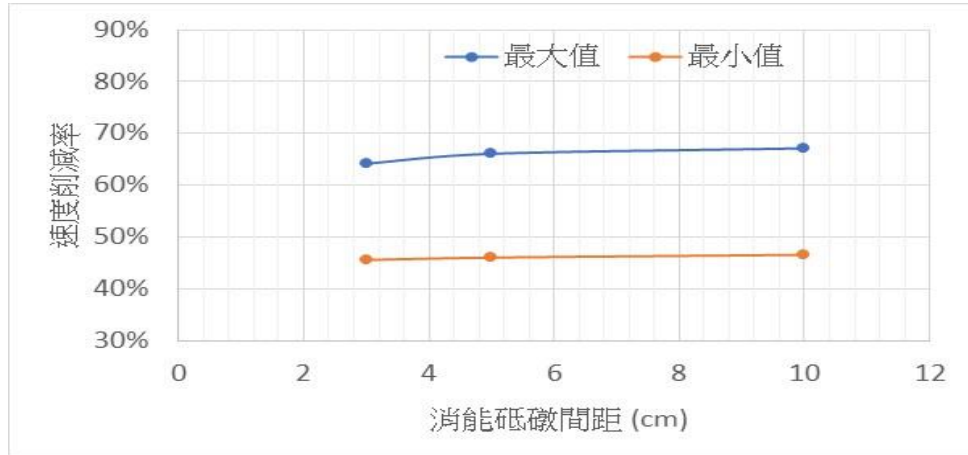


圖 4-20 渠流斷面流速削減率(均勻斷面流速為 1.38 m/s)
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)

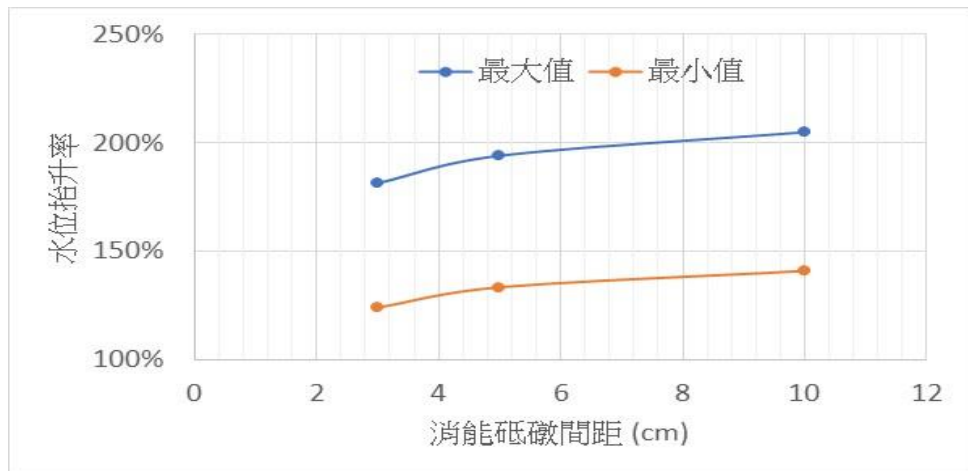


圖 4-21 渠流斷面水位抬升率(均勻斷面水深為 5.44 cm)
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0376 cms)

圖 4-20 顯示，渠流最大速度削減率隨者消能砥礪間距增加而逐漸趨緩，渠流最小速度削減率則幾乎與消能砥礪的間距設置無關。固定流量與坡度條件，我們透過速度削減率反應消能砥礪在不同間距設置條件下對渠流阻力的影響，當間距由 3 cm 增加至 5 cm 時，由渠流

速度削減率增加呈現渠流出現負加速度運動，此即反應渠流阻力明顯增加現象。當消能砥礮間距由 5 cm 持續增加到 10 cm，由於渠流速度削減率並無明顯改變即反應渠流呈現等加速度運動，此即顯示當消能砥礮間距增加到某特定值時渠流阻力不會再增加。圖 4-21 的結果反應渠流斷面流速削減會導致斷面水位抬升，其中水位抬升率隨消能砥礮間距增加遞增，此遞增的趨勢同時隨消能砥礮間距增加而越趨平緩。

情境 2：固定流量-改變坡度-改變消能砥礮間距

情境 2 的設置條件，同樣以斷面均勻流速為 1.38 m/sec 與斷面均勻水深為 5.44 cm 作為標準流況設置，渠流在里程 12 m 的位置流入消能砥礮段，通過消能砥礮後在里程 6.2 m 的位置流出。相對於情境 1 的設置，在情境 2 中增加 0.016 與 0.018 兩種坡度的設置進行模擬流況的討論，此情境增加渠流流況同時受到距消能砥礮在不同間距條件下的阻力與不同大小的重力作用影響的討論。

圖 4-22 與圖 4-23 為渠流通過坡度為 0.016，消能砥礮間距設置為 3cm、5 cm、10 cm 的條件時對應的斷面流速與斷面水深。對於消能砥礮在不同間距設置條件下的模擬結果顯示，消能砥礮間距設置為 10 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.464 m/s 至 0.745 m/s，斷面水深抬升後則介於 15.9 cm 至 13.1 cm。消能砥礮間距設置間距為 5 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.469 m/s 至 0.777 m/s，斷面水深抬升後介於 16.8 cm 至 13.1 cm；消能砥礮間距設置間距為 3 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.454 m/s 至 0.750 m/s，斷面水深抬升後介於 16.3 cm 至 13.0 cm。

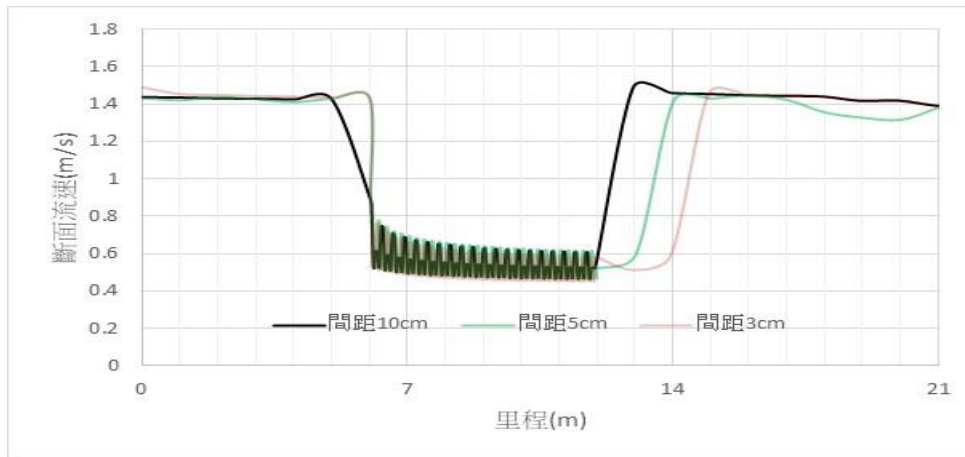


圖 4-22 渠流斷面流速分布
(情境設定：固定坡度 0.016 與流量 0.0376 cms)

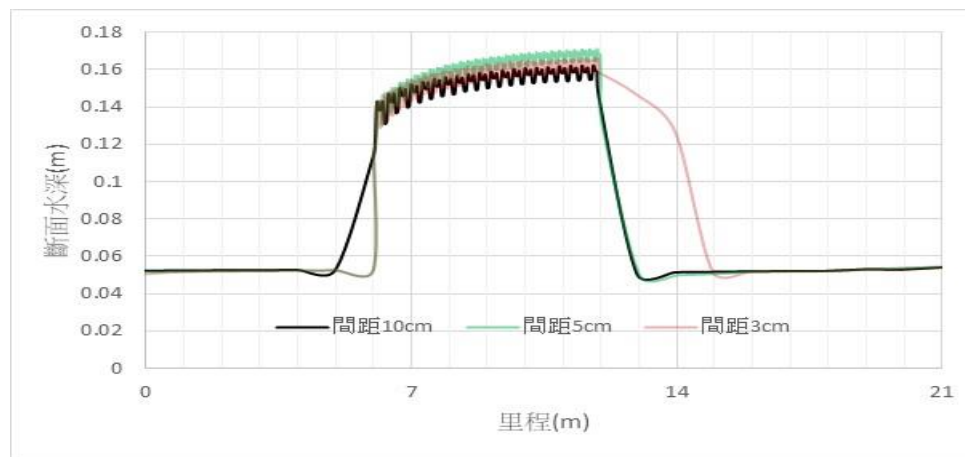


圖 4-23 渠流斷面水深分布
(情境設定：固定坡度 0.016 與流量 0.0376 cms)

圖 4-24 與圖 4-25 渠流通過為坡度 0.018，消能砥礮間距為 3cm、5 cm、10 cm 的設置條件時對應的斷面流速與斷面水深。消能砥礮間距設置為 10 cm 的斷面，流速削減後介於 0.453m/s 至 0.737 m/s，斷面水深抬升後介於 14.6 cm 至 12.4 cm；消能砥礮間距設置間距為 5 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.487 m/s 至 0.771 m/s，斷面水深抬升後介於 15.4 cm 至 12.6 cm；消能砥礮間距設置間距為 3 cm 的斷

面，流速削減後介於 0.510 m/s 至 0.804 m/s，斷面水深抬升後介於 15.0 cm 至 12.5 cm。

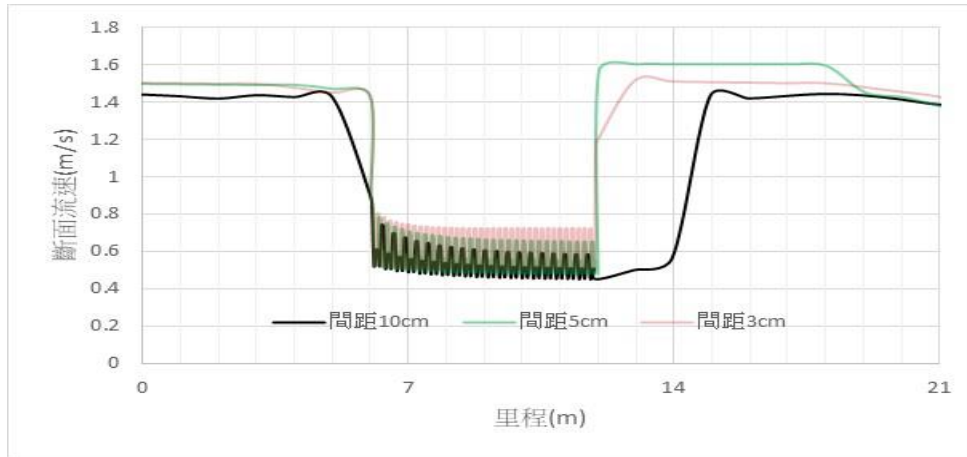


圖 4-24 渠流斷面流速分布
(情境設定：固定坡度 0.018 與流量 0.0376 cms)

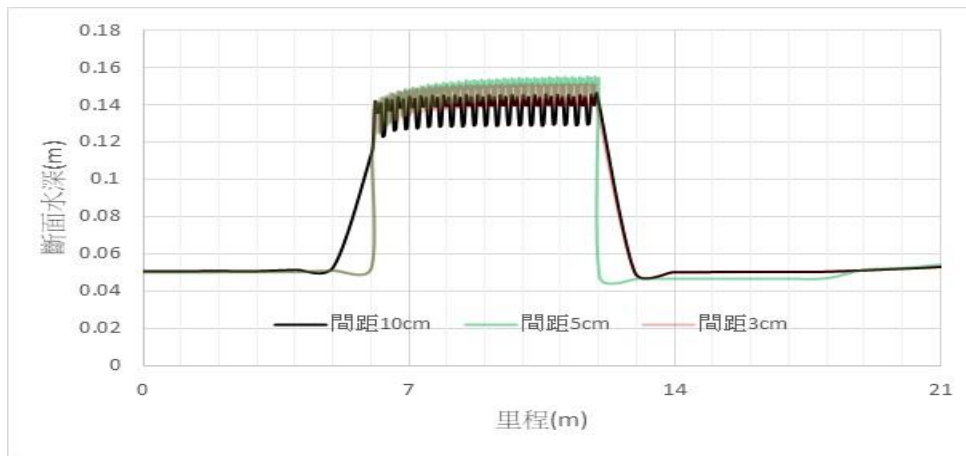


圖 4-25 渠流斷面水深分布
(情境設定：固定坡度 0.018 與流量 0.0376 cms)

圖 4-26 與圖 4-27 依序為流量固定為 0.0376 cms，消能砥礪間距為 10 cm、5 cm、3 cm，以及渠槽坡度 0.018、0.016、0.014 設置條件下，相對於標準流況(均勻流速 1.38 m/sec 與均勻水深 5.44 cm)條件下渠流斷面的速度削減率與水位抬升率。

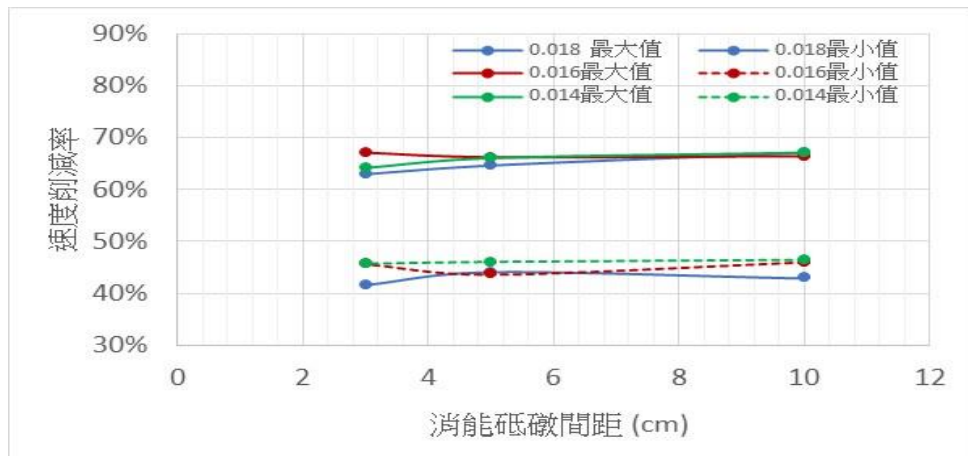


圖 4-26 渠流斷面流速削減率

(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)

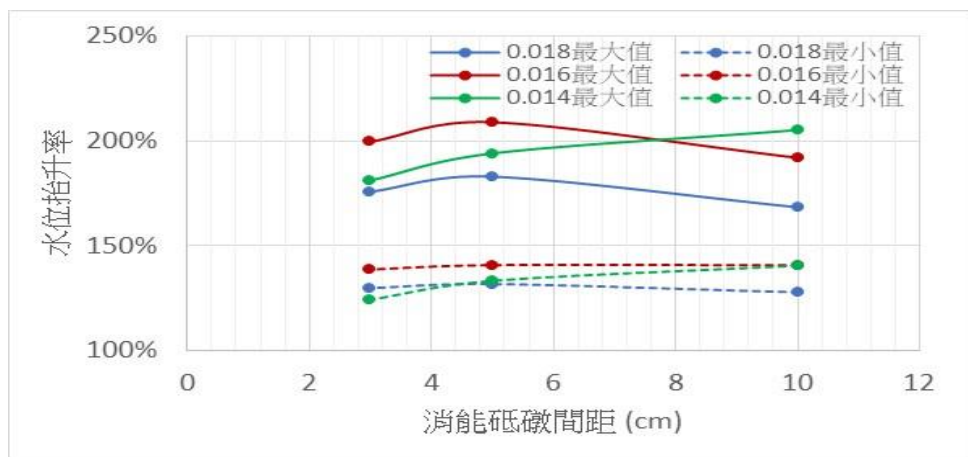


圖 4-27 渠流斷面水位抬升率

(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)

相對於情境 1 的設置條件 (渠槽坡度 0.014)，情境 2 中渠槽坡度改變為 0.018 與 0.016 皆會使重力作用增加。在情境 2，均勻流通過消能砥礪斷面時，速度削減率與水位抬升率即反應阻力與重力作用互相抵銷後渠流的受力行為。重力持續作用會使渠流出現正加速度運動，消能砥礪阻力持續作用則會使得渠流出現減加速度運動。在坡度 0.016 與坡度 0.018 的情境下，模擬結果顯示，渠流進入間距為 10 cm、

5 cm、3 cm 消能砥礪時會明顯有流速減緩與水位抬升的現象，而渠流通過消能砥礪過程會在流速減速後出現震盪緩慢加速的現象，水位則會出現抬升後震盪緩降的現象。相對於均勻流況，當斷面速度削減率增加(或減少)反應均勻流因為阻力增加(或減少)渠流出現變加速度運動的現象，斷面水位抬升率增加(或減少)時則反應均勻流因為阻力增加(或減少)導致勢能變化的現象。

間距設置條件為 3 cm、5 cm 與 10 cm 的消能砥礪，當渠槽坡度為 0.014 時，渠流斷面的最小速度削減率幾乎維持在 47%，渠流斷面的最小水位抬升率依序為 124%、133%與 141%，渠流斷面的最大速度削減率則依序為 64%、66%與 67%，渠流斷面最大水位抬升率依序為 181%、194%與 205%；速度削減率與水位抬升率先遞增後再緩增，即呈現受重力作用與消能砥礪阻力影響後，渠流先呈現負加速度運動再趨向等加速度運動的現象。

間距設置條件為 3 cm、5 cm 與 10 cm 的消能砥礪，當渠槽坡度為 0.016 時，渠流斷面的最小速度削減率依序為 46 %、44%、46%，渠流最小的水位抬升率依序為 139%、141%與 141%，渠流斷面的最大速度削減率則依序為 67%、66%與 66%，渠流斷面的最大水位抬升率依序為 200%、209%與 192%；斷面速度削減率先遞減後趨於平緩，水位抬升率則為先遞增後遞減，其顯示受重力作用與消能砥礪阻力影響渠流呈現正加速度運動後趨向等加速度運動的現象。

間距設置條件為 3 cm、5 cm 與 10 cm 的消能砥礪，當渠槽坡度為 0.018 時，渠流斷面的最小速度削減率依序為 42 %、44%、43%，渠流斷面的最小水位抬升率依序為 130%、132%與 128%，渠流斷面

的最大速度削減率則依序為 63%、65%與 67%，渠流斷面的最大水位抬升率依序為 176%、183%與 128%；速度削減率先遞增後趨於平緩，水位抬升率則為先遞增後遞減，受重力作用與消能砥礪阻力渠流先呈現負加速度運動後逐漸趨向等加速度運動的現象。

情境 3：改變流量-固定坡度-改變消能砥礪間距

在固定渠槽坡度 0.014 的設置條件下，相對於情境 1 流量 0.0376 cms 的設定，情境 3 的條件設定為固定坡度為 0.014，消能砥礪間距為 10 cm、5 cm、3 cm，增加流量為 0.0652 cms 與 0.1276 cms 兩種流量的設定條件。渠流同樣在里程 12 m 的位置流入消能砥礪段，通過消能砥礪後在里程 6.2 m 的位置流出消能砥礪。對於流量為 0.652 cms 的設定，通過消能砥礪前的均勻流速為 1.67 m/sec，均勻水深為 7.8 cm。對於流量為 0.1276 cms 的設定，通過消能砥礪前的均勻流速為 2.07 m/sec，均勻水深為 12.3 cm。

相對於標準流況(坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44 cm)，情境 3 中兩種流量 0.0652 cms 與 0.1276 cms 相對於標準流況流量 0.0376 cms，分別增加了 1.662 倍與 3.394 倍，對於寬度固定的渠槽，進入消能砥礪前斷面流速由 1.38 m/sec 分別增加至 1.67 m/sec (增加 121 %)與 2.07 m/sec (增加 150 %)，斷面流深則由 5.44 cm 分別增加至 38.2 cm (增加 702 %)與 43.1 cm (增加 792 %)。

圖 4-28 與圖 4-29 為流量為 0.0652 cms，渠流通過消能砥礪間距設置依序為 3cm、5 cm、10 cm 時，對應的渠流斷面流速與渠流斷面水深。在消能砥礪間距設置為 10 cm 的斷面，斷面流速削減後介於

0.587 m/s 至 0.897 m/s，斷面水深抬升後介於 22.2 cm 至 17.5 cm；消能砥礪間距設置間距為 5 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.629 m/s 至 0.956 m/s，斷面水深抬升後介於 20.7 cm 至 16.7 cm；消能砥礪間距設置間距為 3 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.587 m/s 至 0.902 m/s 之間，斷面水深抬升後介於 22.2 cm 至 16.8 cm。

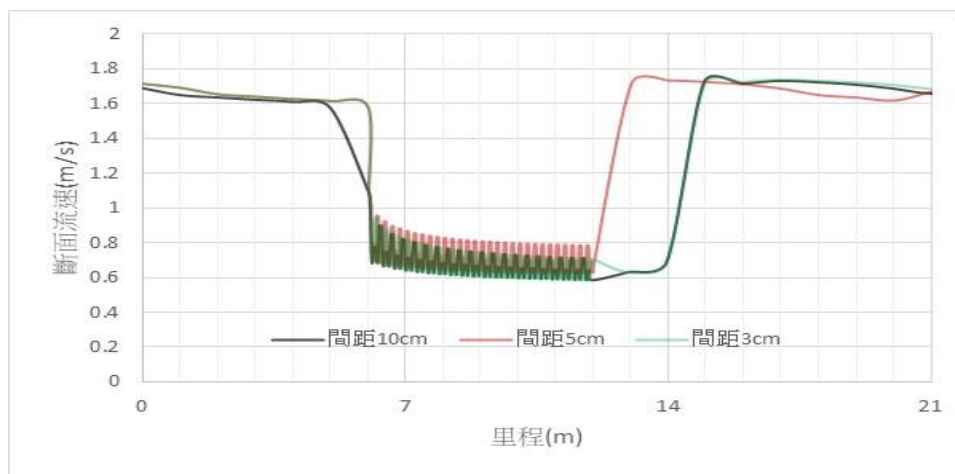


圖 4-28 渠流斷面流速分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0652 cms)

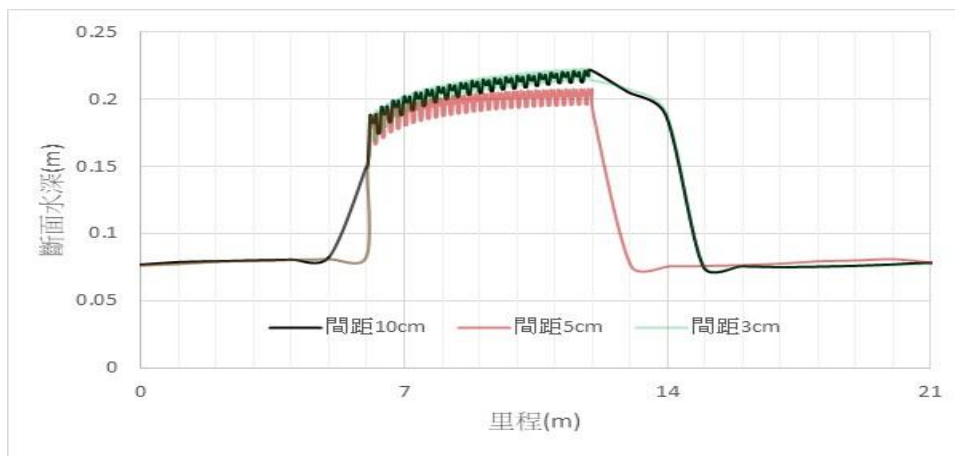


圖 4-29 渠流斷面水深分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.0652 cms)

圖 4-30 與圖 4-31 為流量為 0.1276 cms，渠流通過消能砥礪間距

設置依序為 3cm、5 cm、10 cm 時，對應的渠流斷面流速與斷面水深。在消能砥礪間距設置為 10 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.889 m/s 至 1.180 m/s，斷面水深抬升後介於 28.7 cm 至 23.9 cm；消能砥礪間距設置間距為 5 cm 的斷面，斷面流速削減後介於 0.846 m/s 至 1.203 m/s，斷面水深抬升後介於 29.7 cm 至 24.2 cm；消能砥礪間距設置間距為 3 cm 的斷面，斷面流速削減介於 0.916 m/s 至 1.253 m/s，斷面水深抬升後介於 27.1 cm 至 23.3 cm。

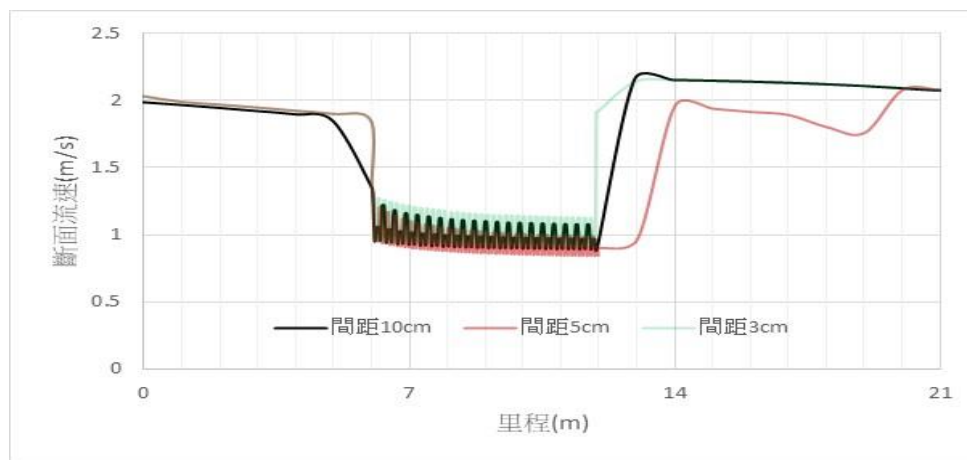


圖 4-30 渠流斷面流速分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.1276 cms)

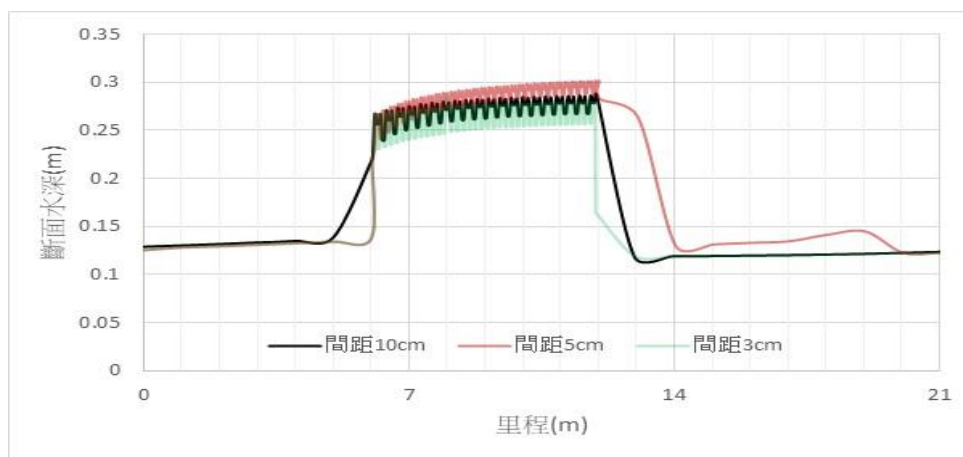


圖 4-31 渠流斷面水深分布
(情境設定：固定坡度 0.014 與流量 0.1276 cms)

圖 4-32 與圖 4-33 依序為流量固定坡度為 0.014，消能砥礪間距為 10 cm、5 cm、3 cm 對應渠槽流量 0.0652 cms 與 0.1276 cms 設置條件下，相對於標準流況(坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44 cm) 的速度削減率與水位抬升率。

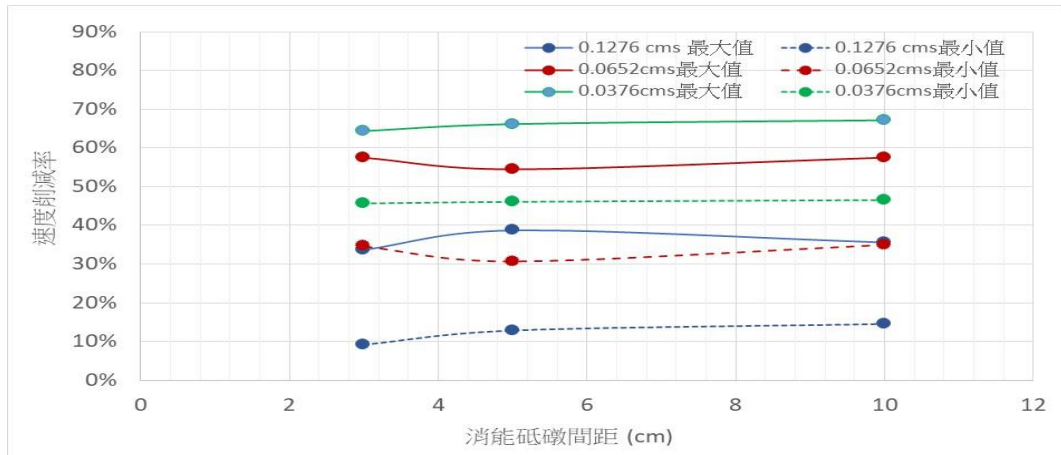


圖 4-30 渠流斷面流速削減率

(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)

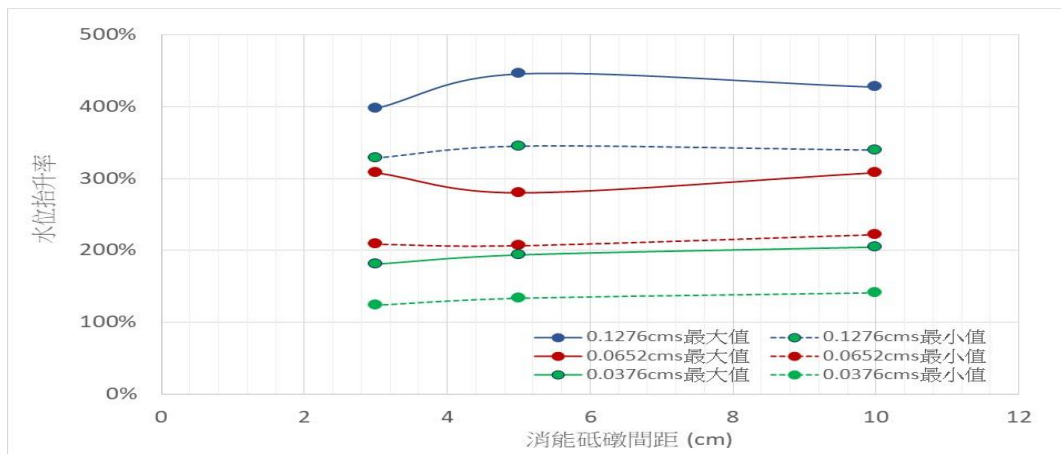


圖 4-31 渠流斷面水位抬升率

(標準流況：坡度 0.014、均勻流速 1.38 m/s、均勻流深 5.44cm)

相對於標準流況，情境 3 的流量增加反應在渠流進入消能砥礪前斷面流速的增加與通水斷面增加，渠流的慣性力與壓力亦因流量增加

而提升。在流入消能砥礪後的過程，渠流當下情境受到消能砥礪阻力與驅動力作用(慣性力、壓力、重力)互相抵銷後的運動行為仍是反應在速度削減率與水位抬升率，趨動力持續作用會使渠流呈現正加速度運動且降低水位，消能砥礪阻力持續作用則會使得渠流呈現負加速度運動並抬升水位。模擬結果顯示，渠流進入間距為 10 cm、5 cm、3 cm 消能砥礪時明顯有流速減緩與水位抬升的情況，而渠流通過消能砥礪過程中皆會在流速減速後出現震盪緩慢加速的現象，水位則會出現抬升後震盪緩降的現象。

相對於標準流況，情境 3 當流量為 0.1276 cms 的條件下，通過消能砥礪間距設置為 3 cm、5 cm、10 cm，渠流最小速度削減率為 9 %、13 %、14 %，最小水位抬升率為 328 %、345 %、339 %，渠流最大速度削減率為 34 %、39 %、36 %，最大水位抬升率為 398 %、446 %、428 %；相對於標準流況，此條件下有較快的流速，同時亦有較大的勢能。此外，當消能砥礪間距由 3 cm 調整至 5 cm，速度削減率為遞增的趨勢，即消能砥礪的阻力增加的現象，渠流為負加速度的運動狀態；當消能砥礪間距由 5 cm 調整至 10 cm，速度削減率為遞減的趨勢，即消能砥礪的阻力減少的現象，渠流為正加速度的運動狀態。

情境 3 當流量為 0.0652 cms 的條件下，通過消能砥礪間距設置為 3 cm、5 cm、10 cm，渠流最小速度削減率為 35 %、31 %、35 %，最小水位抬升率為 209 %、207 %、222 %，渠流最大速度削減率為 57 %、54 %、57 %，最大水位抬升率為 308 %、281 %、308 %；相對於標準流況，此條件下亦存在較快的流速，同時亦有較大的勢能。當消能砥礪間距由 3 cm 調整至 5 cm，速度削減率為遞減的趨勢，即消能砥礪的阻力減少的現象，渠流為正加速度的運動狀態；當消能砥礪間

距由 5 cm 調整至 10 cm，速度削減率為遞增的趨勢，即消能砥礪的阻力增加的現象，渠流為負加速度的運動狀態。

4.4 渠流通過消能砥礪的效益探討

1. 等效曼寧糙度係數探討

v 為流速， S 為坡度， n 為曼寧糙度係數， A 為通水斷面， P 為潤周，曼寧公式表示如下

$$v = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3} S^{1/2},$$

以 B 表示渠底，依據曼寧公式可得

$$v = \frac{(Bh)^{2/3} S^{1/2}}{n(2h + B)^{2/3}},$$

對於標準流況而言， $B=0.5\text{ m}$ ，因此可得

$$v = \frac{(0.5h)^{2/3} S^{1/2}}{n(2h + 0.5)^{2/3}},$$

上式可得標準流況下的曼寧係數為

$$n = n_s = \frac{(0.5h)^{2/3} S^{1/2}}{v(2h + 0.5)^{2/3}}$$

標準流況 $v=1.38\text{ m/sec}$ ， $S=0.014$ ， $h=5.44\text{ cm}$ 帶入上式，可得標準流況的曼寧糙度係數 $n_s = 0.007$ 。

針對間距為 3 cm、5 cm、10 cm 三種消能砥礪的流況，我們先以將有消能砥礪的渠底底寬以參數 α 加權，渠底坡度以參數 β 加權，針

對有消能砥礪的渠槽，斷面流速為 v_m ，有效水深為 h ，曼寧 n 值可表示為下式

$$n = \frac{(\alpha 0.5h)^{2/3} (\beta S)^{1/2}}{v_m (2h + \alpha 0.5)^{2/3}},$$

考慮參數 γ 可使得 $V(2h + \alpha 0.5)^{2/3} = \gamma V(2h + 0.5)^{2/3}$ ，則曼寧糙度係數可寫為

$$n = \frac{\alpha^{5/3} \beta^{1/2}}{\gamma} \frac{(0.5h)^{5/3} (S)^{1/2}}{v_m (2h + 0.5)^{2/3}},$$

上式可得

$$\frac{\gamma n}{\alpha^{5/3} \beta^{1/2}} = \frac{(0.5h)^{5/3} (S)^{1/2}}{v_m (2h + 0.5)^{2/3}},$$

令等效曼寧糙度係數

$$n_e = \frac{\gamma}{\alpha^{5/3} \beta^{1/2}} n$$

依據前述3種情境模擬結果，求得有效曼寧糙度係數，依序如表4-6、表4-7、表4-8。

表4-6 情境1有效曼寧糙度係數

消能砥礪間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.454	0.468	0.493
	Max.	0.737	0.744	0.75
模擬流深 h (cm)	Max.	16.6	16	15.3
	Min.	13.1	12.7	12.2
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.024	0.023	0.022
	Min.	0.015	0.015	0.015
曼寧係數 增加率	Max.	2.42	2.34	2.18
	Min.	1.15	1.13	1.11

表4-7 情境2有效曼寧糙度係數

坡度 S=0.014				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.454	0.468	0.493
	Max.	0.737	0.744	0.75
模擬流深 h (cm)	Max.	16.6	16	15.3
	Min.	13.1	12.7	12.2
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.024	0.023	0.022
	Min.	0.015	0.015	0.015
曼寧係數 增加率	Max.	2.42	2.34	2.18
	Min.	1.15	1.13	1.11
坡度 S=0.016				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.464	0.467	0.454
	Max.	0.745	0.777	0.75
模擬流深 h (cm)	Max.	15.9	16.8	16.3
	Min.	13.1	13.1	13
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.023	0.023	0.024
	Min.	0.015	0.014	0.015
曼寧係數 增加率	Max.	2.37	2.32	2.43
	Min.	1.12	1.04	1.11
坡度 S=0.018				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.453	0.487	0.51
	Max.	0.787	0.771	0.804
模擬流深 h (cm)	Max.	14.6	15.4	15
	Min.	12.4	12.6	12.5
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.024	0.022	0.021
	Min.	0.014	0.014	0.014
曼寧係數 增加率	Max.	2.48	2.22	2.08
	Min.	1.01	1.05	0.97

表4-8 情境3有效曼寧糙度係數

流量 0.0376 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.454	0.468	0.493
	Max.	0.737	0.744	0.75
模擬流深 h (cm)	Max.	16.6	16	15.3
	Min.	13.1	12.7	12.2
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.024	0.023	0.022
	Min.	0.015	0.015	0.015
曼寧係數 增加率	Max.	2.42	2.34	2.18
	Min.	1.15	1.13	1.11
流量 0.0652 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.587	0.629	0.587
	Max.	0.897	0.956	0.902
模擬流深 h (cm)	Max.	22.2	20.7	22.2
	Min.	17.5	16.7	16.8
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.017	0.017	0.017
	Min.	0.012	0.011	0.012
曼寧係數 增加率	Max.	1.50	1.37	1.50
	Min.	0.72	0.62	0.72
流量 0.1276 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
模擬流速 v_m (m/s)	Min.	0.889	0.846	0.916
	Max.	1.18	1.203	1.253
模擬流深 h (cm)	Max.	28.7	29.7	27.1
	Min.	23.9	24.2	23.3
有效曼寧係數 n_e	Max.	0.011	0.011	0.010
	Min.	0.008	0.008	0.008
曼寧係數 增加率	Max.	0.51	0.57	0.50
	Min.	0.22	0.19	0.15

2. 動能削減率探討

均勻渠流通過消能砥礪時，因為通水斷面減少與消能砥礪阻力會導致流量削減與水位抬升，依據前述三個情境模擬結果，標準流況設定為固定流量 0.376 cms 通過試驗渠槽的模擬結果，斷面流速為 1.38 m/sec，斷面水深為 5.44 cm。本研究比較渠流通過砥礪流況與標準流況，透過砥礪前後流速差異與水位差異，計算斷面動能損失。動能計算的方式為

$$E_K = \frac{v^2}{2g}$$

v_s 表示標準流況下的斷面流速， v_d 表示渠流通過消能砥礪的流速，動能損失為

$$\Delta E_K = \frac{v_s^2}{2g} - \frac{v_d^2}{2g}$$

依據前述斷面流速削減率可得

$$R_v = \frac{v_s - v_d}{v_s}$$

因此可得

$$v_d = (1 - R_v)v_s$$

動能損失可得

$$\Delta E_K = [1 - (1 - R_v)^2] \frac{v_s^2}{2g}$$

因此，渠流通過消能砥礪動能削減相對於標準流況動能削減率為

$$\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$$

依據前述三個情境模擬結果計算動能削減率，依序如表 4-9、表 4-10、表 4-11。

表4-9 情境1動能削減率

消能砥礪間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	67.1%	66.1%	64.3%
	Max.	46.6%	46.1%	45.7%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	89.2%	88.5%	87.2%
	Min.	71.5%	70.9%	70.5%

表4-10 情境2動能削減率

坡度 S=0.014				
消能砥礪間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	67.1%	66.1%	64.3%
	Max.	46.6%	46.1%	45.7%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	89.2%	88.5%	87.2%
	Min.	71.5%	70.9%	70.5%
坡度 S=0.016				
消能砥礪間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	66.4%	66.2%	67.1%
	Max.	46.0%	43.7%	45.7%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	88.7%	88.5%	89.2%
	Min.	70.9%	68.3%	70.5%
坡度 S=0.018				
消能砥礪間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	67.2%	64.7%	63.0%
	Max.	43.0%	44.1%	41.7%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	89.2%	87.5%	86.3%
	Min.	67.5%	68.8%	66.1%

表4-11 情境3動能削減率

流量 0.0376 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	67.1%	66.1%	64.3%
	Max.	46.6%	46.1%	45.7%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	89.2%	88.5%	87.2%
	Min.	71.5%	70.9%	70.5%
流量 0.0652 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	57.5%	54.4%	57.5%
	Max.	35.0%	30.7%	34.6%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	81.9%	79.2%	81.9%
	Min.	57.8%	52.0%	57.3%
流量 0.1276 cms				
消能砥礮間距(cm)		10	5	3
速度削減率 R_v	Min.	35.6%	38.7%	33.6%
	Max.	14.5%	12.8%	9.2%
動能削減率 $\Delta \dot{E}_K = 1 - (1 - R_v)^2$	Max.	58.5%	62.4%	55.9%
	Min.	26.9%	24.0%	17.6%

第 5 章 模型還原分析

為了使試驗符合實際消能砥礮設置於河床尺寸與模型試驗渠道之相似，先對試驗模型進行幾何特徵、運動特徵與動力特徵的相似性分析。取下標 m 和 p 代表模型與原型，考慮模式與實體渠流流況之福祿數相似 $(F_r)_m = (F_r)_p$ ，可得

$$(F_r)_m = \frac{v_m}{\sqrt{gl_m}}, \quad (F_r)_p = \frac{v_p}{\sqrt{gl_p}}$$

$$\frac{v_m}{\sqrt{gl_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{gl_p}}, \quad \frac{v_m}{v_p} = \frac{\sqrt{l_m}}{\sqrt{l_p}}, \quad v_r = \sqrt{l_r}$$

$v_r = v_m / v_p$ 與 $Q_r = Q_m / Q_p$ 依序表示原型與模型間相對應點之速度比及流量比，可得實體速度 v_p 還原關係為

$$v_p = v_m / v_r = v_m / \sqrt{l_r}$$

流量比 Q_r 可得

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{v_m A_m}{v_p A_p} = v_r l_r^2 = l_r^{5/2},$$

則可得實體流量 Q_p 還原關係為

$$Q_p = Q_m / l_r^{5/2}$$

考慮現場混凝土消能砥礮實體尺寸為 $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ ，試驗用混凝土消能砥礮尺寸為 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ，故得知混凝土消能砥礮模型與原型尺度比 l_r 為

$$l_r = \frac{l_m}{l_p} = \frac{5}{60} = \frac{1}{12},$$

因此可得實體速度 v_p 與實體流量 Q_p 還原關係為

$$v_p = \sqrt{12}v_m, \quad Q_p = 12^{5/2}Q_m$$

將試驗之標準流況進行實體還原，可得

$$Q_p = 12^{5/2}Q_m = 12^{5/2} \times 0.0376 = 18.756(\text{cms})$$

$$v_p = \sqrt{12}v_m = \sqrt{12} \times 1.38 = 4.78(\text{m/sec})$$

$$h_p = 12h_m = 12 \times 5.44 = 65.28(\text{cm})$$

$$S = 0.014$$

將前述三組數值模型試驗結果進行實體還原，標準流況對應的 3 種情境的模擬結果進行實體還原，如表 5-1、表 5-2 與表 5-3。

表5-1 情境1 模擬結果還原

消能砥礮間距(m)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	1.57	1.62	1.71
	Max.	2.55	2.58	2.60
流深 h_p (m)	Max.	1.99	1.92	1.84
	Min.	1.57	1.52	1.46

表5-2 情境2 模擬結果還原

坡度 $S=0.014$				
消能砥礮間距(m)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	1.57	1.62	1.71
	Max.	2.55	2.58	2.60
流深 h_p (m)	Max.	1.99	1.92	1.84
	Min.	1.57	1.52	1.46

表5-2 情境2 模擬結果還原(續)

坡度 S=0.016				
消能砥礮間距(m)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	1.61	1.62	1.57
	Max.	2.58	2.69	2.60
流深 h_p (m)	Max.	1.91	2.02	1.96
	Min.	1.57	1.57	1.56
坡度 S=0.018				
消能砥礮間距(m)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	1.57	1.69	1.77
	Max.	2.73	2.67	2.79
流深 h_p (m)	Max.	1.75	1.85	1.80
	Min.	1.49	1.51	1.50

表5-3 情境3 模擬結果還原

流量 18.756 cms				
消能砥礮間距(m)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	1.57	1.62	1.71
	Max.	2.55	2.58	2.60
流深 h_p (m)	Max.	1.99	1.92	1.84
	Min.	1.57	1.52	1.46
流量 32.52 cms				
消能砥礮間距(cm)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	2.03	2.18	2.03
	Max.	3.11	3.31	3.12
流深 h_p (m)	Max.	2.66	2.48	2.66
	Min.	2.10	2.00	2.02
流量 63.65 cms				
消能砥礮間距(cm)		1.2	0.6	0.36
流速 v_p (m/s)	Min.	3.08	2.93	3.17
	Max.	4.09	4.17	4.34
流深 h_p (m)	Max.	3.44	3.56	3.25
	Min.	2.87	2.90	2.80

第 6 章 結論

- 一. 本研究以數值模擬的方式探討流量、渠坡與消能礅間距改變時，透過水流通過消能礅之最大流速、最小流速、最大流深與最小流深反映流況的變化。
- 二. 數值模型試驗結果顯示，水流通過消能礅時，會出現流速減緩與水位抬升的現象。數值模型試驗以速度削減率反應流況的變化，當速度削減率增加時渠流為負加速度運動，表示渠流收到消能礅阻力影響減速，反之當速度削減率降低渠流為正加速度運動，表示渠流收到驅動力影響加速。
 1. 情境 1 設定渠槽固定坡度 0.014 的條件，討論標準流況 ($Q=0.0376 \text{ cms}$, $v=1.38 \text{ m/sec}$, $h=5.44 \text{ cm}$) 通過消能礅時，消能礅間距大小對流況的影響。渠流最大速度削減率隨者消能礅間距增加而逐漸趨緩，渠流最小速度削減率則幾乎與消能礅的間距設置無關。當間距由 3 cm 增加至 5 cm 時，由渠流速度削減率增加呈現渠流出現負加速度運動，此即反應渠流阻力明顯增加現象。當消能礅間距由 5 cm 持續增加到 10 cm，由於渠流速度削減率並無明顯改變即反應渠流呈現等加速度運動，此即顯示當消能礅間距增加到某特定值時渠流阻力不會再增加。消能礅渠流斷面流速削減會導致斷面水位抬升，其中水位抬升率隨消能礅間距增加遞增，此遞增的趨勢同時隨消能礅間距增加而越趨平緩。
 2. 情境 2 改變坡度大於設定的標準流況時($s=0.016$ 與 $s=0.018$)，

討論消能砥礪間距大小對流況的影響。由調整坡度的數值模型模擬結果發現，消能砥礪間距為 8 cm 時對流速削減與水深的影響存在一種臨界狀況，使得消能砥礪間距小於此臨界間距 8 cm 時，渠流流速削減率隨消能砥礪間距遞增有遞減趨勢，渠流水位抬升率與消能砥礪間距是正向遞增的趨勢，而消能砥礪間距大於臨界間距 8 cm 時，渠流流速削減率隨消能砥礪間距遞增有遞增趨勢，渠槽水深則會隨消能砥礪間距遞增呈現遞減的趨勢。

3. 情境 3 固定坡度 0.014，改變流量大於設定的標準流況時 ($Q=0.0652$ cms 與 $Q=0.1276$ cms)，討論消能砥礪間距大小對流況的影響。

- (1) 相對於標準流況，情境 3 的流量增加反應在渠流進入消能砥礪前斷面流速的增加與通水斷面增加，渠流的慣性力與壓力亦因流量增加而提升。在流入消能砥礪後的過程，渠流當下情境受到消能砥礪阻力與驅動力作用(慣性力、壓力、重力)互相抵銷後的運動行為仍是反應在速度削減率與水位抬升率，趨動力持續作用會使渠流呈現正加速度運動且降低水位，消能砥礪阻力持續作用則會使得渠流呈現負加速度運動並抬升水位。模擬結果顯示，渠流進入間距為 10 cm、5 cm、3 cm 消能砥礪時明顯有流速減緩與水位抬升的情況，而渠流通過消能砥礪過程中皆會在流速減速後出現震盪緩慢加速的現象，水位則會出現抬升後震盪緩降的現象。

- (2) 相對於標準流況，情境 3 當流量為 0.1276 cms 的條件下，通過消能砥礪間距設置為 3 cm、5 cm、10 cm，渠流最小速

度削減率為 9 %、13 %、14 %，最小水位抬升率為 328 %、345 %、339 %，渠流最大速度削減率為 34 %、39 %、36 %，最大水位抬升率為 398 %、446 %、428 %；相對於標準流況，此條件下有較快的流速，同時亦有較大的勢能。此外，當消能砥礪間距由 3 cm 調整至 5 cm，速度削減率為遞增的趨勢，即消能砥礪的阻力增加的現象，渠流為負加速度的運動狀態；當消能砥礪間距由 5 cm 調整至 10 cm，速度削減率為遞減的趨勢，即消能砥礪的阻力減少的現象，渠流為正加速度的運動狀態。

- (3) 情境 3 當流量為 0.0652 cms 的條件下，通過消能砥礪間距設置為 3 cm、5 cm、10 cm，渠流最小速度削減率為 35 %、31 %、35 %，最小水位抬升率為 209 %、207 %、222 %，渠流最大速度削減率為 57 %、54 %、57 %，最大水位抬升率為 308 %、281 %、308 %；相對於標準流況，此條件下亦存在較快的流速，同時亦有較大的勢能。當消能砥礪間距由 3 cm 調整至 5 cm，速度削減率為遞減的趨勢，即消能砥礪的阻力減少的現象，渠流為正加速度的運動狀態；當消能砥礪間距由 5 cm 調整至 10 cm，速度削減率為遞增的趨勢，即消能砥礪的阻力增加的現象，渠流為負加速度的運動狀態。

三. 本研究在定量流理論基礎上，採用等效曼寧係數與動能削減率探討渠流通過消能砥礪的效益。當等效曼寧糙度係數與動能削減率越大時表示消能砥礪提供渠流的阻力越大。在標準流況的設定下討論消能砥礪間距變化對消能效益造成的影響，其中標準流況的曼寧糙度係數為 0.007。當渠流通過 10 cm 間距的消能砥礪時，曼

寧糙度係數增加 1.15~2.42 倍；渠流通過 5 cm 間距的消能砥礪時，曼寧糙度係數增加 1.13~2.34 倍；渠流通過 3 cm 間距的消能砥礪時，曼寧糙度係數增加 1.11~2.18 倍；此情境設定下，顯示消能砥礪間距越寬阻力越大。當情境設定為坡度增加時，因為渠流的驅動力增加，當坡度為 0.016，10 cm、5 cm、3 cm 間距的消能砥礪曼寧係數依序增加 1.12~2.37 倍、1.04~2.32 倍、1.11~2.43 倍；當坡度為 0.018，10 cm、5 cm、3 cm 間距的消能砥礪曼寧係數依序增加 1.01~2.48 倍、1.05~2.22 倍、0.97~2.08 倍；因為驅動力的增加，由等效曼寧係數顯示消能砥礪的相對阻力有減少的趨勢。當情境設定為流量增加為 0.0672 cms 與 0.1276 cms 時，等效曼寧係數顯示消能砥礪的相對阻力有減少的趨勢更加的明顯，同樣的情況亦反應在動能削減率的變化趨勢。

- 四. 本研究採用福祿數動力相似進行模型還原，使模型數值實驗測試結果可以反應實體流況。以消能砥礪實體 $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ 與消能砥礪模型 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 進行比較，獲得幾何模型還原比為 12，速度模型還原比為 $\sqrt{12}$ ，流量模型還原比為 $12^{5/2}$ 。標準流況還原為 $Q_p = 18.756 \text{ cms}$ ， $v_p = 4.78 \text{ m/sec}$ ， $h_p = 65.28 \text{ cm}$ ， $S = 0.014$ 。消能砥礪間距模型還原依序為 1.2 m、0.6 m、0.36 m。數值模型實驗還原結果詳如表 5-1、表 5-2、表 5-3。

參考文獻

1. 吳銘塘(1982),「渠道之糙度 n 值及流量之觀測計算」, 農業工程學報, 28:2 卷, 頁 62-68。
2. 林親義(1984),「渠道糙度之型態與水流阻抗之探討」, 水土保持學報, 16-17 卷, 頁 21-26。
3. 謝孟良(1996),「應用地理資訊系統探討河川高灘地曼寧係數及其水位之研究」, 中原大學研究所碩士論文。
4. 李銘哲(2006),「預鑄生態塊對生態影響研究及案例探討」, 中原大學研究所碩士論文。
5. 詹又寧(2006),「草溝曼寧係數之推估」, 國立台北科技大學研究所碩士論文。
6. 洪偉哲(2006),「植生護岸渠道粗糙係數之研究」, 中原大學研究所碩士論文。
7. 洪瑞明(1982),「砥礪式堰之新設計及其在渠首工程之應用」, 農業工程學報, 28:1 卷, 頁 43-53。
8. 賴俊程(2006),「預鑄生態石塊運用在灌溉及排水渠道之水理分析」, 中原大學研究所碩士論文。
9. 陳熾如(2010),「評估河川生態棲地受水工結構物影響」, 國立中央大學碩士論文。
10. 許淨淳(2016),「單階與多階渠道跌水消能之研究」, 中原大學研究所碩士論文。
11. 吳凱琳(2019),「明渠流通過消能式階梯粗糙砥床平均水位變化」, 東南科技大學碩士論文。
12. 王晨宇、王傳益、邱琨皓、樂凱鈞(2019),「變量流流況下固床工應用於橋墩冲刷防治之研究」, 水土保持學報, 50 卷 2 期, 頁 2433-2446。
13. 林伯勳、賴承農、許振崑、謝孟荃、高伯宗(2021),「系列固床工間距分析與評估」, 中興工程顧問, 150 期, 頁 31-38。
14. 鍾采燕(2021),「溢洪道的消能模擬」, 中原大學研究所碩士論文。

15. Jarrett, R.D.(1987), 「Error in slope-area computation of peak」, Journal of Hydrology , P.53-67 。
16. 陳麒升(2006), 「灌溉渠道生態工程水理研究」, 中原大學研究所碩士論文。
17. 黃文岳(2016), 「消能檻於渠道中水理現象之探討」, 中原大學研究所碩士論文。
18. 許可(2018), 「交錯排列消能砥礪於渠道中水理現象之探討」, 中原大學研究所碩士論文。
19. 謝冠文(2019), 「高低交錯排列消能砥礪於渠道中水理現象之探討」, 中原大學研究所碩士論文。
20. 行政院農業委員會水土保持局(2021), 「陡坡坡面排水渠道消能設施」。

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	為配合本署業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分：	
1.	為使數值建模分析結果確實可用於工程設計，需先驗證謝冠文(2019)渠槽試驗之正確性、可用性，避免分析成果偏差。	模型成果驗證為工作目標設定之一，工作執行將先行驗證渠槽試驗之正確性、可用性，避免分析成果偏差。
2.	設置渠道消能設施，目的在增加摩擦係數、削減流水動能，請一併檢討動能轉移對墩體及兩側構造物之沖刷影響性。	無論渠模型或數值模型建置均屬於一維模型並不適用於兩側構造物沖淤影響的討論，目前研究係完成本研究設定目標之後再行思考後續精進應用。
3.	本計畫為計畫主持人延續其科技部有關消能砥墩之渠槽試驗成果(謝冠文, 2019)，進一步嘗試以數值模擬方式詮釋定量流通過消能砥墩後的流況，預期研究成果能為渠道消能設施提供設計參考與減災效益量化評估等應用的依據。由於已經有消能砥墩之渠槽試驗成果，加上計畫主持人本身在水利工程、水土保持工程方面的好學養與豐富經驗，本計畫之目標妥適，工作重要，實施方法可行。預期可以建立流況參數-消能砥墩幾何特徵的無因次關係，提供工程設計應用參考的建議。	謝謝委員意見肯定。
4.	主持人在水利工程、水土保持工程方面的好學養與豐富經驗足以勝任本計畫。	謝謝委員意見肯定。
二、	有關計畫書格式及經費審查部分：	
1.	本計畫請以補助經費500仟元調整編列。	修正報告已依照補助經費編列調整。

項次	審查意見	回覆辦理情形
2.	本年度執行期限請修正為自113年2月7日至113年12月31日。(10.9個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限10.9個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。	如實修正執行日期為自113年2月7日至113年12月31日。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，已依照計畫執行期限10.9個月內編列。
三、	主計室審查意見	
1.	(三) 預算明細表：27-20資訊服務費說明請修正，本計畫不得編列購置設備費。	(三) 預算明細表：27-20 資訊服務費說明已依照審查意見移除設備費編列。
2.	補充說明：按日按件計資酬金：兼任助理及按日計工請補列學歷。	補充說明：已依照審查意見補列按日按件計資酬金：兼任助理及按日計工請學歷。
3.	26-10雜支項下會議餐點字樣請修正便當費。	已依照審查意見26-10 雜支項下會議餐點字樣修正為便當費。
4.	附表一金額請列主持人費，助理費須列入，請修正。	附表一編列依系統人事費明細表項目選定後編列主持人研究主持費與兼任助理薪資。
5.	附表三列35-00資訊軟硬體設備與預算明細表列27-20資訊服務費不符，規格、用途別及需求說明，請一併修正。	依審查意見移除資訊軟硬體設備編列，附表三已移除。
6.	餘同保育治理組意見。	相關意見已回覆，請詳 CHK0001

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、	請附摘要，除列出計畫目的與工作項目外，需列出期中完成項目、獲至之初步成果、具體建議及解決對策。	期末報告已補列中英文摘要，請詳報告之中英文摘要。
二、	相關建模分析之成果，請於期末轉換成工程設計可引用之比值、係數、或規範。	本研究透過動力相似進行數值模擬成果還原，以供實體工程應用數據參考，內容請詳第 5 章。

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、	是否有比較消能砥墩與一般消能設施的差異。	感謝委員提問，本研究目前消能砥墩設置主要為討論砥床不同高低間距排列的突出結構，且設置情境違浸沒流況的流況，對應實際設施比較類似設置於常流水野溪或河川橋樑下游的消能鼎塊，與一般水土保持坡地排水設施常見設置於陡坡排水的消能坎或消能墩的非浸沒結構設置，模型建置與流況皆有所差異。
二、	建議可對常用的消能設施進行試驗，可與現地進行驗證及落實應用。	感謝委員建議，目前研究成果僅就設置的流況與模型配置進行詮釋，後續有機會亦將會依據委員見季持續進行相關的設施模型試驗建置。
三、	建議考慮實際工程設計常採用複式斷面進行設計。	感謝委員建議，複式斷面為常見的實際工程施作，惟目前研究的設定僅針對定型結構對於定量流況的擾動進行討論，後續有機會持續相關研究將會納入委員所提的建議建模，進一步討論複式斷面的流況進行分析。