
**氣泡柔性工法對水保工程減緩沖刷效能之
可行性評估**

**Feasibility of the Air-Bubble Screens for
Reducing Scour in Soil and Water
Conservation Structures
(成果報告書)**

執行單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系

執行期間：中華民國 110 年 1 月 27 日至中華民國 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：廖國偉 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

氣泡柔性工法對水保工程減緩沖刷效能之可行性評估

摘要

防砂壩及其下游之鋼筋混凝土等剛性消能設施，經常遭遇沖刷問題，本計畫提出創新之氣泡柔性工法，探討該工法對於解決或減緩下游沖刷問題的可行性，氣泡柔性工法可減輕對生態景觀之衝擊，冀望在確保安全無虞的條件下，同時符合生態平衡的治理之道。執行時首先建立縮尺寸模型進行水工試驗，並進行最佳設計。模擬的對象為寒溪(翻社坑溪)之寒溪壩，寒溪壩曾遭遇 2016 年梅姬颱風與 2019 年米塔颱風襲擊，颱風期間導致河道下游刷深，故選取為此次計劃案分析的對象。進行時利用臺灣大學水工試驗所之多功能渠槽進行縮尺試驗，同時以 FLOW-3D 進行數值模擬，評估氣泡工法對於減低沖刷坑深度與範圍(或量體)的成效，並將試驗結果，彙整分析後提出氣泡工法設計原則，以作為未來實際工程上之參考依據。

關鍵詞：沖刷坑、FLOW-3D、氣泡工法、縮尺實驗

Feasibility of the Air-Bubble Screens for Reducing Scour in Soil and Water Conservation Structures

Abstract

Most reinforced concrete energy dissipation facilities, located downstream of the check dam, have the issue of scouring. This project proposes an innovative idea to reduce scour in soil and water conservation structures with the air-bubble screens, to achieve a safe and beautiful governance approach in a way that does not impact the ecological landscape. The Hanxi check dam was attacked by the 2016 Meji Typhoon and the 2019 Mita Typhoon, resulting in scouring in the downstream of the river. Thus, it is selected as the analysis target. Scale-model using flume channel at Hydrotech Research Institute in NTU is firstly conducted, and then the FLOW-3D is used to carry out numerical simulation to evaluate the effectiveness of the air-bubble screens in reducing the depth and range (or volume) of the scours. Based on results from experiments and simulations, the air-bubble screens design principles are provided as a reference for future practice.

Keywords: Scour, FLOW-3D, Air-Bubble Screens, flume experiment

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	I
表目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
符號表.....	XII
第一章 前言	1
第一節 緣起與目的	1
第二節 工作方法與項目	3
一、 工作方法	3
二、 工作項目	4
第二章 相關文獻整理	7
第一節 沖擊行為	7
第二節 沖刷坑特徵	10
一、 穩定沖刷坑最大深度	10
二、 穩定沖刷坑長度	13
第三節 FLOW-3D 模式相關文獻	14
第四節 氣泡工法	18

第五節	小結	21
第三章	室內渠槽試驗結果	22
第一節	試驗佈置	22
一、	渠槽設備	22
二、	試驗儀器	23
第二節	試驗內容	29
一、	目標設施選定	29
二、	實驗縮尺比例	31
三、	實驗配置	34
第三節	試驗結果與討論	40
一、	無氣泡工法實驗之結果	40
二、	氣泡工法實驗之結果	45
三、	實驗結果與討論	56
第四章	FLOW-3D 模擬結果	58
第一節	FLOW-3D 模式介紹	58
一、	控制方程式	58
二、	數值方法	60
第二節	模式相關參數設定	64
一、	泥砂沖刷設定 - 土砂參數	64

二、 模型建置設定	71
第三節 數值模擬結果與討論	77
一、 無氣泡工法模擬之結果	77
二、 氣泡工法模擬之結果	80
三、 數值模擬結果與討論	82
第五章 結果與討論	85
第一節 無氣泡工法之實驗與數值模擬比較	85
一、 上游流速比較	85
二、 沖刷變化剖面比較	86
第二節 氣泡工法之實驗與數值模擬比較	88
第三節 流場變化	92
第四節 以水流取代氣泡之數值模擬	95
第五節 小結	98
第六章 結論與建議	101
第一節 結論	101
第二節 建議	102
第七章 工作進度與交付項目	105
第一節 計畫甘特圖	105
第二節 計畫交付項目	105

第三節 參與人員學經歷及人力配置.....	106
參考文獻.....	107
附錄一 期中審查意見與回覆	110
附錄二 期末審查意見與回覆	113

表目錄

表 3-1 寒溪壩 103 年至 109 年沖淤情況.....	31
表 3-2 現地流量與縮尺流量對照表	33
表 3-3 現地泥砂粒徑分布	34
表 3-4 試驗流量與馬達赫茲對應表	35
表 3-5 氣泡工法設計參數	38
表 3-6 沖刷深度之比較表	44
表 3-7 空氣與水流量比(QA/QW)編號對照表	45
表 3-8 重現期距 2 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度.	48
表 3-9 重現期距 5 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度.	48
表 3-10 重現期距 10 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度	49
表 3-11 重現期距 25 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度	49
表 3-12 重現期距 50 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度	50
表 3-13 氣泡孔入射角度編號對照表	54
表 4-1 RNG 模式係數表	64
表 4-2 模擬土砂粒徑表	65
表 4-3 土壤比重試驗數據表	65

表 4-4 土壤含水量試驗數據表	66
表 4-5 Meyer-Peter & Muller 試驗數據表	67
表 4-6 Nielse 試驗數據表	67
表 4-7 Van Rijn 試驗數據表	68
表 4-8 θ_{cri} 推估計算表	69
表 4-9 河床面粗糙度(k_s)與代表粒徑尺寸關係式之比較表	70
表 4-10 網格參數設定表	73
表 4-11 邊界條件設定表	74
表 4-12 上游入流參數設定表	74
表 4-13 數值控制參數設定表	76
表 4-14 FLOW-3D 模擬之沖刷深度表	79
表 5-1 實驗與數模流速比較表	85
表 5-2 實驗與數模沖刷深度比較表	88
表 5-3 水流流量換算表	96
表 5-4 重現期距 2 年之各情境模擬結果	98
表 5-5 重現期距 5 年之各情境模擬結果	99
表 5-6 重現期距 2 年之各情境模擬之減緩程度	99
表 5-7 重現期距 5 年之各情境模擬之減緩程度	100
表 7-1 工作項目與經費表	105

表 7-2 參與人員學經歷及人力配置表	106
---------------------------	-----

圖目錄

圖 1-1 本計畫分析標的之水土保持設施(寒溪防砂壩).....	2
圖 1-2 氣泡防坡堤示意圖	3
圖 1-3 氣泡工法實驗設計示意圖	4
圖 1-4 執行步驟流程圖	6
圖 2-1 沖刷體積與垂直沖擊力之關係圖(陳佳裕，2007).....	8
圖 2-2 實驗及模擬之沖刷坑深度隨時間變化圖(何皓愷，2017).....	16
圖 2-3 實驗配置圖(Rachael R. Barlock, 2013).....	19
圖 3-1 渠槽尺寸圖	22
圖 3-2 馬達設備圖	23
圖 3-3 蜂巢整流設備架設圖	24
圖 3-4 超音波水位計設施圖	25
圖 3-5 尺規儀器圖	26
圖 3-6 表面流速量測使用之保麗龍圖	26
圖 3-7 表面流速測量示意圖	27
圖 3-8 渠槽控制點設置	29
圖 3-9 打氣幫浦儀器圖	29
圖 3-10 本計畫之分析標的物之位置示意圖(何皓愷，2017).....	30
圖 3-11 寒溪壩縱向沖淤變化圖	30

圖 3-12 多功能渠槽流量與馬達頻率率定曲線圖	34
圖 3-13 壓克製作之主副壩模型圖	35
圖 3-14 粒徑分布圖	36
圖 3-15 氣泡工法設計示意圖	37
圖 3-16 入射角度之示意圖	38
圖 3-17 渠槽儀器設施配置圖	39
圖 3-18 下游木板排水孔配置圖	39
圖 3-19 沖刷坑積水情況圖	39
圖 3-20 未沖刷前之地形圖	40
圖 3-21 不同情境模擬之沖刷地形圖	42
圖 3-22 不同情境模擬之刷深情況	44
圖 3-23 不同情境模擬之沖刷深度比較圖	45
圖 3-24 不同空氣與水流量比(QA/QW)之實驗結果	47
圖 3-25 不同空氣與水流量比(QA/QW)下壩基沖刷減緩程度趨勢圖	51
圖 3-26 不同空氣與水流量比(QA/QW)下壩基沖刷減緩平均效益圖	51
圖 3-27 水流流況示意圖	52
圖 3-28 不同空氣與水流量比(QA/QW)下最大沖刷減緩程度趨勢圖	

.....	53
圖 3-29 流量 Q10、Q25、Q50 各情況下之實際最大沖刷深度圖	53
圖 3-30 不同空氣與水流量比(QA/QW)下最大沖刷減緩平均效益圖	54
圖 3-31 不同氣泡孔入射角度之實驗結果	56
圖 4-1 FAVOR 技術邊界定義示意圖	61
圖 4-2 Shields 曲線及其有效範圍(黃林願, 2017)	69
圖 4-3 模型幾何示意圖	73
圖 4-4 模擬邊界條件示意圖	74
圖 4-5 氣泡孔口設計示意圖	75
圖 4-6 FLOW-3D 模擬無氣泡工法之結果圖	79
圖 4-7 FLOW-3D 模擬氣泡工法(QA/QW=0.35)之結果圖	81
圖 4-8 FLOW-3D 模擬氣泡工法(入射角度=30 度)之結果圖	82
圖 4-9 FLOW-3D 氣泡工法入射角為 0°之比對結果圖	83
圖 4-10 FLOW-3D 氣泡工法入射角為 30°之比對結果圖	84
圖 5-1 FLOW-3D 流速資料擷取示意圖	85
圖 5-2 無氣泡工法之數模與實驗對沖刷變化比較圖	87
圖 5-3 氣泡工法(入射角為 0°)數模與實驗對沖刷變化比較圖	89
圖 5-4 氣泡工法(入射角為 30°)數模與實驗對沖刷變化比較	90

圖 5-5 重現期距 5 年流量下數模水流流況圖	91
圖 5-6 各情境數值模擬之空氣分布圖	93
圖 5-7 各情境數值模擬之 Z 方向流速分布圖	95
圖 5-8 以水流模擬之下游沖刷情況圖	97
圖 5-9 各情境數值模擬之 Z 方向流速	98
圖 7-1 本計畫之甘特圖	105

符號表

渠床坡度： S_0

單寬沖擊力： F_d [LT^{-2}]

單寬垂直沖擊力： F_v [LT^{-2}]

壓力水頭： H_{pd} [L]

壩高、堰高： H [L]

單寬流量： q [L^2T^{-1}]

流量： Q [L^3T^{-1}]

跌水常數： $D = q^2/(gH^3)$

沖刷深度： y_{se} [L]

尾水深： y_t [L]

堰流水深： y_0 [L]

臨界水流： y_c [L]

水舌厚度： y_D [L]

上下游水面差： Δy [L]

渠道寬： B [L]

堰寬： b [L]

土砂粒徑： d_s [L]

堰頂流速： u_0 [LT^{-1}]

臨界流速： u_c [LT^{-1}]

平均入射流速： u_i [LT^{-1}]

摩擦係數： f_b

水流沖擊位置： L_s [LT^{-1}]

水流密度： ρ [ML^{-3}]

泥砂密度： ρ_s [ML^{-3}]

重力加速度： g [L^1T^{-2}]

第一章 前言

河溪治理工程之防砂壩，雖然能夠抑制上游之土砂、保護上游坡面之坡腳、減緩河床，卻可能造成下游沖淤平衡問題，河川經由溢洪口之束縮，成為具有極大沖擊力之水流，導致下游渠床往往遭受到沖刷之問題，現今已有許多學者以透過水工實驗來探討此問題，並透過許多經驗公式，來了解沖刷坑之規模。

面對防砂壩下游沖刷問題，透過設置消能設施來削減下射水流之沖擊力，以來保護溪床及防砂壩等構造之基礎免於受掏刷而破壞之，現今常採用之消能設施，如靜水池、護坦、副壩等，其採用之材料多為鋼筋混凝土，然而近年來生態意識抬頭，傳統的剛性工法常造成生態環境之衝擊，衍生不可逆之負面影響。

本計畫為係第一年(次)提出，非水保局內之延續計畫，今年所提之計畫，主要係探討利用氣泡柔性工法減緩水土保持設施之沖刷潛勢，確保該設施及其所保護之保全對象之安全的可行性。

第一節 緣起與目的

基於現今許多防砂壩其下游消能設施多為以鋼筋混凝土為材料之硬式設施，故本計畫提出創新的氣泡工法，以生態友善的柔性方式，減緩下游河床沖刷之問題及保護防砂壩等水土保持設施基礎免受於沖刷之破壞。

傳統的河道水工構造物在不斷變化的溪流中並非毫無弱點，結構劣化、基礎沖刷(淘刷)均為潛在的問題。尤其局部沖刷是造成防砂壩穩定性的主要問題，雖然現今有許多針對結構補強的相關對策，以為處理局部沖刷的問題，但因台灣河川多坡度陡、流量變化大，且水路

不穩定，仍造成這些設施容易受到移動或破壞，故期望能以柔性工法——氣泡工法，減緩下游沖刷，以不衝擊生態景觀之方式，來取得既安全兼具美觀之解決之道。

依據「107 年度防砂設施安全感測與分析應用委託專業服務」該份報告書中所述，寒溪(翻社坑溪)之寒溪壩因位於上游彎道之隘口，且溢洪口為切口壩之設計型式，導致寒溪壩與系列固床工間沖刷坑持續發展，如：105 年間受梅姬颱風影響，寒溪壩與下游三座連續固床工間，刷深約 1 公尺，108 年 9 月米塔颱風，亦導致河道整體有明顯刷深情形。為配合未來進一步之分析，故本團隊將選取寒溪(翻社坑溪)之寒溪壩，如圖 1-1 所示，作為縮尺模型之建立之結構物。

本計畫設定以縮尺模型與數值模型評估氣泡工法對於減低沖刷坑深度與範圍(或量體)的成效，並冀望可應用於實際構造物為本次計畫之終極目標。



圖 1-1 本計畫分析標的之水土保持設施(寒溪防砂壩)

資料來源：107 年度防砂設施安全感測與分析應用委託專業服務

第二節 工作方法與項目

一、工作方法

氣泡工法的濫觴可能是海岸工程，由 Brasher 於 1907 年首次提出氣泡防坡堤(bubble breakwater)設計，其設計於海床上架設氣泡孔管，並由岸上馬達提供空氣，形成一垂直海浪面的氣泡屏幕，而海水隨著氣泡上升而被吸入後於表面擴散，形成與海浪對立的水平水流，進而削減海浪之動能，減緩岸邊之沖刷，如圖 1-2 為氣泡防坡堤示意圖。近年來諸位專家學者透過於流體內引入氣泡之作用，帶動流體的上昇運動，改變水流樣態與流速，進而改變底床的型態與改善沖刷情形，如 Violaine Dugué(2013)的團隊在彎曲河道中，將氣泡屏幕設置在凹岸側，藉其產生的氣泡二次流將沖刷坑移往水流中心線，有效的改善水流沖刷情形；美國密西根科技大學團隊(Champagne et al. 2017)則應用氣泡工法於改善靜水池尾堰的沖刷問題。

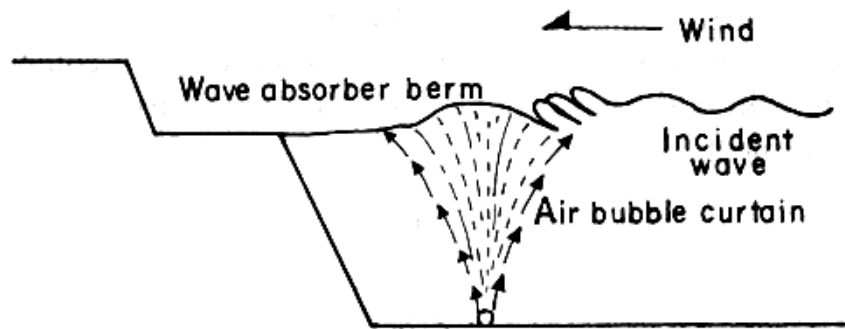


圖 1-2 氣泡防坡堤示意圖

資料來源：<http://www.fao.org/3/AB772E/AB772E09.htm>

氣泡工法為在水流中設置氣泡管打入空氣削減水流動能，主要為透過打入空氣後，增加了水中空氣濃度，藉由兩者密度差異產生一股以浮力作為原動力的流動，使空氣在水中形成羽流(plume)，在水流向下游射流時，由氣泡產生之浮力提供一上之推力，達到削減水流下沖擊

力，進而降低水流向下之動能，達到減緩沖刷之情況。

如下圖 1-3 所示，為本團隊實驗設計之示意圖，因認為設置於河床較易被土砂堵住且建置較不易，故選擇將氣泡管布置於防砂壩之溢流口下方，並探討其下游處沖刷坑之變化。

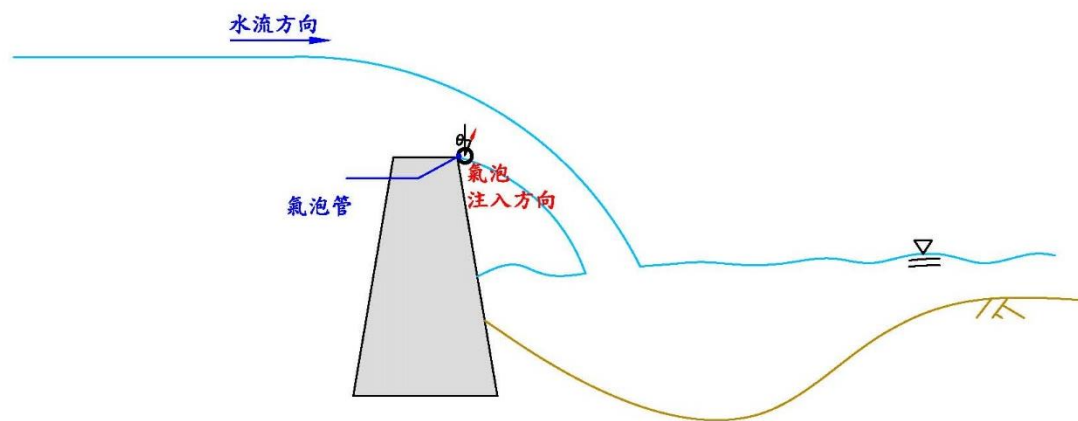


圖 1-3 氣泡工法實驗設計示意圖

依據水土保持技術規範第 168 條：「水土保持之處理與維護除應符合安全、經濟外，並應考慮與自然生態工法之配合運用。」，故本團隊以營造永續性的環境之精神，提出以柔性工法之方式，透過氣泡削弱溢洪口水流之動能，間接減緩防砂壩下游沖刷之情形，同時兼具減少對生態環境的衝擊。

二、工作項目

(一) 工作項目

本計畫的工作項目，如下所列：

1. 相關文獻蒐集
2. 進行無氣泡工法縮尺模型沖刷試驗

- (1) 選定目標水土保持設施
- (2) 進行縮尺寸模型製作
- (3) 不同情境下進行試驗
- (4) 釐清各種情境之沖刷坑規模
3. 建立無氣泡工法縮尺實驗之 FLOW-3D 模型
4. 進行含氣泡工法之縮尺模型沖刷試驗
 - (1) 不同情境下進行試驗
 - (2) 釐清各種情境之沖刷坑規模
5. 建立氣泡工法縮尺實驗之 FLOW-3D 模型
6. 提出氣泡工法設計原則

(二) 執行步驟

本計畫將透過蒐集國內外相關的實驗資料，進行參考建立實驗設計基礎，並為比較氣泡工法的可行性，並且期望其可施作於現地，為了確保數值模擬之正確性，先行進行無氣泡工法之縮尺實驗，以作為無氣泡工法數模建立之參考依據；之後參考國外學者提出之氣泡工法設計原則，進行具有氣泡工法之縮尺時驗，並於實驗後建立該數值模擬，並依據最後率定的數模參數，比較有無氣泡工法下，下游沖刷坑的變化情形，並提出先關的設計原則，如圖 1-4 所示，為本團隊的工作執行流程圖。

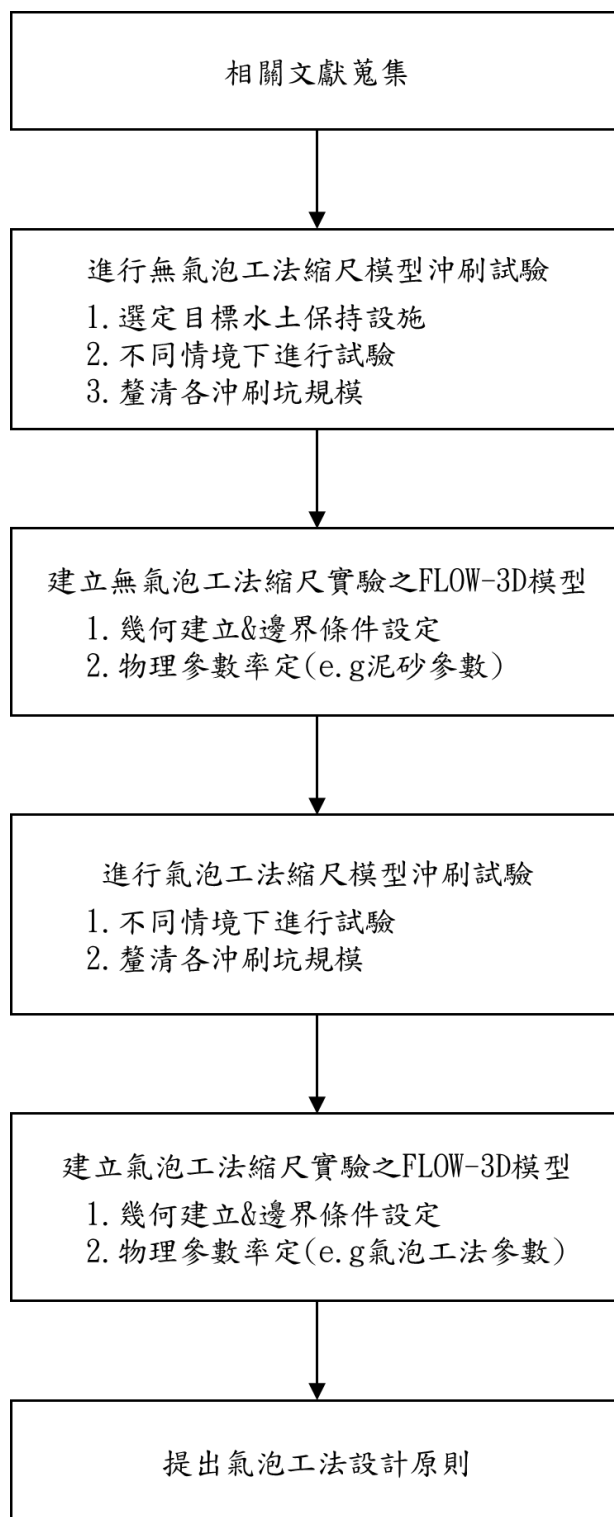


圖 1-4 執行步驟流程圖

第二章 相關文獻整理

透過蒐集整理國內外專家學者相關的文獻資料，並以水流沖擊行為、沖刷坑之特徵、FLOW-3D 模式進行沖刷模擬研究、氣泡工法等層面進行文獻分類，作為本次計畫的研究基礎。

第一節 沖擊行為

(一) 陳正炎、蔡建文(1995)

依據能量守恆、動量守恆與牛頓運動方程式，結合渠槽試驗，推導得出當水流流經上游矩形水平渠床($S_0 = 0$)之渠道，經跌流後之單寬垂直沖擊力 F_v ，為下式：

$$F_v = \rho g [2gy_0 + 3(gq)^{2/3}]^{1/2} \left\{ 1 - \left\{ \frac{1.5(gq)^{1/3}}{[2gy_0 + 3(gq)^{2/3}]^{1/2}} \right\}^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{式 2.1})$$

式中 ρ 為水流密度； g 為重力加速度； y_0 為堰流水深； q 為單寬流量。係了解水流之沖擊位置與作用力大小對於壩體下游局部沖刷之影響，在水平之定床渠槽中，於流場內設置壓力計，並透過五種不同壩高(H)之銳緣堰，來量測壓力之變化情形。根據實驗結果取得無因次化之沖擊位置($\bar{L}_s = L_s/H$)與跌水常數($D = q^2/gH^3$)之關係式，如下式：

$$\bar{L}_s = 1.82D^{0.17} \quad (\text{式 2.2})$$

(二) 陳聖文(2000)

其根據蔡建文(1995)以能量守恆、動量守恆與牛頓運動方程式推導之單寬垂直沖擊力(F_v)，並加以考量渠床坡度(S_0)效應對於沖擊力以及沖刷坑之影響，進行有無下游保護工之沖擊力試驗比對，並獲得有無保護工之沖擊力經驗式如下：

$$F_{v1} = 879.9D^{0.522}e^{0.199S_0} \quad (\text{式 2.3})$$

$$F_{v2} = 619.75D^{0.522}e^{0.671S_0}\varepsilon^{0.0518} \quad (\text{式 2.4})$$

$$D = q^2/(gH^3) \quad (\text{式 2.5})$$

F_{v1} 為無保護工佈置之單寬垂直沖擊力(N/m), F_{v2} 為有帶工佈置之單寬垂直沖擊力(N/m), ε 為保護工長度(L_B)與水流沖擊位置(L_S)之比值, 水流沖擊力會隨跌水常數(D)增大而增強, 在相同流量下, 水流沖擊力會隨其渠床之坡度變陡而增大之趨勢。

(三) 陳佳裕(2007)

探討不同壩高之情況下, 對下游渠床之影響, 以為了解在防砂壩或潛壩所造成的高差下, 水流沖刷對壩體安全危害性之研究。透過 4 種不同之壩體模型, 及 2 種不同渠床粒徑進行相關渠槽試驗。

由圖 2-1 所示, 在相同水流沖擊力下, 水流具有相同的夾砂能力, 由於底床粒徑不同, 土砂沉降速度不同, 導致沖刷量結果不同, 越大粒徑之底床被夾帶之顆粒越少。

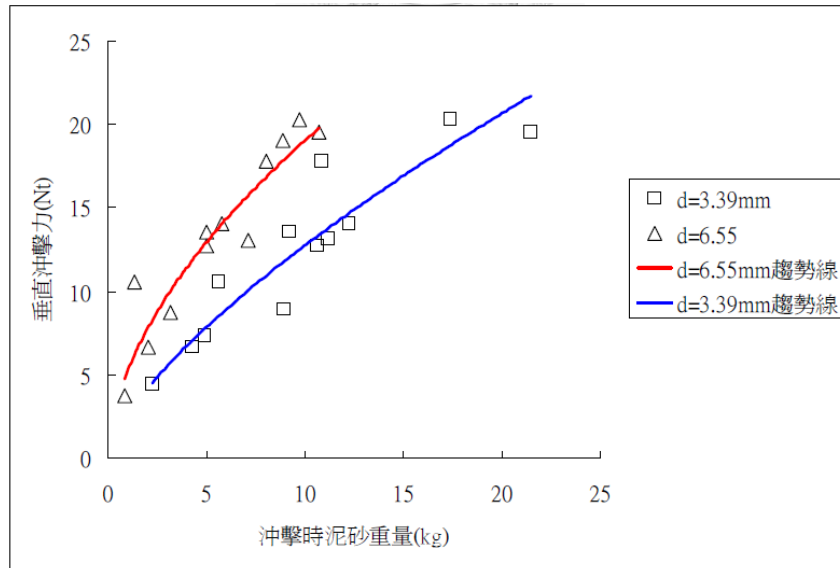


圖 2-1 沖刷體積與垂直沖擊力之關係圖(陳佳裕, 2007)

(四) 徐堯鉉(2010)

係以上游渠床變化作為變化參數，探討自由水自由跌流沖擊流場特性及水流沖擊力，以牛頓力學原理推倒水流沖擊之為置，假設當水流離開上游跌水工時，且上游渠道為矩形渠道且臨界水深為 y_c 的情況下，跌流沖擊位置(L_s)為下式：

$$L_s = \frac{q^{2/3}(-S_0 + \sqrt{S_0^2 + \bar{Y}_b^2 (\frac{2Hg^{1/3}}{q^{2/3}} + \bar{Y}_b)(1+S_0^2)}}{\bar{Y}_b^2 g^{1/3}(1+S_0^2)} \quad (\text{式 2.6})$$

$$\bar{Y}_b = \frac{y_0}{y_c} = \frac{u_c}{u_0} \quad (\text{式 2.7})$$

式中， q 為單寬流量； S_0 為渠床坡度； H 為壩高； g 為重力加速度； y_c 為臨界水流； y_0 為堰流水深； u_c 為臨界流速； u_0 為堰頂流速。透過實驗數據進行迴歸分析取得經驗公式。將試驗取得無因次化之沖擊位置($\bar{L}_s = L_s/H$)，並與跌水數(D)及上游渠床坡度(S_0)進行迴歸分析，並得知隨跌水常數(D)增加時，沖擊位置將距離壩體越遠，關係式如下式：

$$\bar{L}_s = 1.5303D^{0.1262}e^{6.6268S_0} \quad (\text{式 2.8})$$

(五) 宋狄晉、許錫鑫、陳正炎(2013)

為剖析非水平式跌流工其下游沖刷之影響，於渠床設置不同粒徑之土砂，透過渠槽試驗，對於沖刷坑變化加以了解。經實驗證明，在跌水數(D)越大，及上游渠床坡度(S_0)越陡的情況下，皆會導致水流之單寬沖擊力(F_d)增加，無因次化單寬沖擊力後，經迴歸取得相關變化趨勢，關係式如下式：

$$\bar{F}_d = F_d/\rho g H^2 = 1.84D^{0.525}e^{1.263S_0} \quad (\text{式 2.9})$$

第二節 冲刷坑特徵

一、穩定冲刷坑最大深度

(一)Schoklitsch(1932)

藉由模型實驗，探討靜水池其下游之冲刷情形，並經由實驗結果取得最大冲刷深度(y_{se})之經驗公式如下：

$$y_{se} = \frac{4.75(\Delta y^{1/5} q^{1/2})}{d_{90}^{8/25}} - y_t \quad (\text{式 2. 10})$$

上式中，透過上下游之水頭差異(Δy)、單寬流量(q)、尾水深(y_t)等水理參數，及土砂參數 d_{90} ，來表示冲刷坑之最大冲刷深度。

(二)連惠邦、陳昶憲、林昆志(1992)

自由冲射流流速衰減理論做為基礎，求得在清水流作用下，冲刷坑的最大冲刷深度之公式，並以渠道試驗，透過不同之流量、土砂粒徑、壩高來驗證公式，及推得摩擦係數(f_b)與綜合係數(φ)與泥砂顆粒之相關經驗式。

$$\frac{y_{se}}{y_D} = \frac{1}{f_b} \ln \frac{u_i}{u_c} = \frac{1}{f_b} \ln \frac{u_i}{\varphi \sqrt{(\rho_s - \rho) / \rho g d_s}} \quad (\text{式 2. 11})$$

$$f_b = 0.0255 + 0.019 d_s \quad (\text{式 2. 12})$$

$$\varphi = 1.95 - 0.72 \ln d_s \quad (\text{式 2. 13})$$

式中， y_{se} 為冲刷深度； y_D 為水舌厚度； u_i 為平均入射流速； u_c 為臨界流速； ρ 為水流密度； g 為重力加速度； d_s 為土砂粒徑。

(三)陳正炎、彭思顯、鐘文傳(1994)

經由數次冲刷實驗，了解投潭水流作用下，其下游局部冲刷之情況及其變化，經回歸分析得出下式，為穩定最大冲刷深度($\bar{Y}_{se} = y_{se}/H$)，與跌水常數(D)、相對尾水深($\bar{Y}_1 = y_t/H$)之關係式：

$$\overline{Y_{se}} = 7.894D^{0.254}\overline{Y_1}^{0.214} \quad (\text{式 2.14})$$

若在尾水深為未知情況下，僅利用跌水常數進行回歸，可得出下式為穩定最大沖刷深度($\overline{Y_{se}} = y_{se}/H$)與跌水常數(D)之簡單經驗式：

$$\overline{Y_{se}} = 10.22D^{0.361} \quad (\text{式 2.15})$$

(四)陳聖文(2000)

以因次分析並透過渠槽試驗，得到相對沖刷坑深度($\overline{Y_{se}}$)與跌水數(D)及坡度(S_0)之無因次迴歸式，並得出不論渠床的坡度為何，渠床在設置無保護工下的最大沖刷坑深度會較有設置保護工者大上許多，推導得到之無因次迴歸式如下所示：

$$\overline{Y_{se1}} = 12.46D^{0.461}e^{5.332S_0} \quad (\text{式 2.16})$$

$$\overline{Y_{se2}} = 2.79D^{0.455}e^{16.625S_0}\epsilon^{-0.0188} \quad (\text{式 2.17})$$

$\overline{Y_{se1}}$ 為無保護工沖刷坑之最大沖刷深度， $\overline{Y_{se2}}$ 為有保護工沖刷坑之最大沖刷深度， ϵ 為保護工長度(L_B)與水流沖擊位置(L_s)之比值，由於有保護工設施之佈置，使土砂受沖水流沖刷之情況減小，且沖刷現象遠離壩址，相較於無設置者其最大沖刷量減少 58%。

(五)Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V(2000)

係以清水定量流進行實驗，針對連續跌水結構物之設置下，研究水檻下游側之沖刷深度與沖刷坑長度變化。認為渠床坡度變化(morphological jump)為沖刷深度及沖刷坑的長度之影響因子，故定義其為參數 a_1 ，可表示為下式：

$$a_1 = (S_0 - S_{eq})L_{sills} \quad (\text{式 2.18})$$

式中 S_0 為初始渠床坡度， S_{eq} 為沖刷後平均渠床坡度， L_{sills} 兩水檻間距離。經因次分析後，利用渠槽試驗之結果回歸經驗公式，透過 a_1

參數取得最大冲刷深度($\overline{Y_{se}}$)為下式：

$$\overline{Y_{se}} = 0.189 \frac{a_1}{\Delta d_{50}} + 0.266 \quad (\text{式 2.19})$$

上式中 $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ； ρ_s 為泥砂密度； ρ 為水流密度； d_{50} 為代表中值粒徑，適用於 $1.3 \leq \frac{a_1}{\Delta d_{50}} \leq 9.1$ 之情況下。

(六) Vincenzo D' Agostino、Vito Ferro(2004)

利用先前學者以不完全自相似理論(incomplete self-similarity theory)進行推求最大冲刷深度與數種無因次參數的關係式，作為實驗結果之基礎。透過收集實驗數據，其中包含不同尺度及不同底床粒徑分布之實驗，進行分析及交叉比對後，回歸出無因次最大冲刷深度 $\overline{Y_{se}}$ 之關係式，如下式：

$$\overline{Y_{se}} = 0.540 \left(\frac{b}{H}\right)^{0.593} \left(\frac{b}{\Delta y}\right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751} \quad (\text{式 2.20})$$

$$A_{50} = \frac{Q}{bH[g d_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)]^{1/2}} \quad (\text{式 2.21})$$

式中， b 為堰寬； Δy 為上下游水面差； H 為堰高； B 為渠道寬； Q 為流量； ρ_s 為泥砂密度； ρ 為水流密度； g 為重力加速度； d_{50} 為中值粒徑。

此外依據數據統計結果，可發現無因次化之冲刷深度 $\overline{Y_{se}}$ 與堰流水深具有高度相關，其關係式如下：

$$\overline{Y_{se}} = 0.975 \left(\frac{y_0}{H}\right)^{0.863}, R = 0.961 \quad (\text{式 2.22})$$

(七) 陳佳裕(2007)

經 4 種壩高與 2 種渠床粒徑，進行渠槽試驗，了解壩體下游冲刷之情形。以因次分析之結果，經回歸實驗數據取得相對冲刷坑深度(經 4 種壩高與 2 種渠床粒徑，進行渠槽試驗，了解壩體下游冲刷之情形。

以因次分析之結果，經回歸實驗數據取得相對沖刷坑深度($\overline{Y_{se}}$)與相對堰流水深 y_0/H 及相對粒徑 $G = d_s/H$ 之關係式。

$$\overline{Y_{se}} = 60.34 \left(\frac{y_0}{H} \right)^{1.9} G^{-0.707} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{-4.3} \quad (\text{式 2.23})$$

ρ_s/ρ 在式為定值之情況下，可經上式整理為

$$\overline{Y_{se}} = 0.913 \left(\frac{y_0}{H} \right)^{1.9} G^{-0.707} \quad (\text{式 2.24})$$

上式中， ρ_s 為泥砂密度； ρ 為水流密度。在粒徑越大之情況下，且跌水高度越矮，其沖刷坑相對沖刷坑深度較淺。

(八) 宋狄晉、許錫鑫、陳正炎(2013)

利用調整渠槽之上游坡度、單寬流量及跌流高度組合數組實驗，分析非水平跌流工，其下游沖刷之情況，並經由數據回歸取得相關經驗公式。

$$\overline{Y_{se}} = 6.02 D^{0.394} e^{-1.631 S_0} G^{-0.129} \quad (\text{式 2.25})$$

上式為穩定最大沖刷深度之經驗式，穩定最大沖刷深度($\overline{Y_{se}} = y_{se}/H$)，相對粒徑($G = d_s/H$)。

二、 穩定沖刷坑長度

(一) 陳聖文(2000)

透過渠槽試驗進行分析沖刷，並經實驗結果以因次分析做為經驗式之基礎，取得無因次之沖刷坑長($\overline{L_{se}} = L_{se}/H$)與跌水數(D)及坡度(S_0)之無因次迴歸式，具有保護工者，因其水流剩餘沖擊力小，導致其沖刷坑雖深度小，但沖刷坑長度會較無保護工者來的長。

$$\overline{L_{se}} = 29.99 D^{0.442} e^{3.042 S_0} \quad (\text{式 2.26})$$

(二) Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V(2000)

認為渠床坡度變化作為沖刷坑描述之一項因素，故假設其為一參

數 $a_1 = (S_0 - S_{eq})L_{sills}$ ，式中 S_0 為初始渠床坡度， S_{eq} 為沖刷後平均渠床坡度， L_{sills} 兩水檻間距離。

經透過渠槽試驗之結果取得沖刷坑長度與參數 a_1 之相關公式，無因次沖刷坑長($\overline{L_{se}} = L_{se}/H$)之經驗式入下：

$$\overline{L_{se}} = 1.87 \frac{a_1}{\Delta d_{50}} + 4.02 \quad (\text{式 2. 27})$$

上式中 $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ； ρ_s 為泥砂密度； ρ 為水流密度； d_{50} 為代表中值粒徑，適用於 $1.3 \leq \frac{a_1}{\Delta d_{50}} \leq 9.1$ 之情況下。

(三) Vincenzo D' Agostino、Vito Ferro(2004)

利用先前學者以不完全自相似理論(incomplete self-similarity theory)進行推求，配合因次分析及實驗數據量測之結果，回歸推求無因次沖刷坑長($\overline{L_{se}} = L_{se}/H$)之經驗式：

$$\overline{L_{se}} = 5.828 \left(\frac{b}{H}\right)^{0.241} \left(\frac{b}{\Delta y}\right)^{0.041} (A_{50})^{0.508} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-1.077} \left(\frac{b}{B}\right)^{0.057} \quad (\text{式 2. 28})$$

$$A_{50} = \frac{Q}{bH[g d_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)]^{1/2}} \quad (\text{式 2. 29})$$

式中， b 為堰寬； Δy 為上下游水面差； H 為堰高； B 為渠道寬； Q 為流量； ρ_s 為泥砂密度； ρ 為水流密度； g 為重力加速度； d_{50} 為中值粒徑。

第三節 FLOW-3D 模式相關文獻

(一)Shahrokh Amiraslani 等(2010)

透過 FLOW-3D 模式模擬之沖刷坑型態及下游堆積丘高度，並比對水槽實驗結果，發現兩者十分相似，沖刷坑生成過程整體在前 10 秒發展迅速，而後緩慢發展逐漸趨於穩定。沖刷坑深度於一開始發展

後便達到一個定值，但長度與寬度會持續增加，且若提高模型區塊的網格密度會得到較好的模擬結果。

(二) Gaël Epely-Chauvin 、 Giovanni De Cesare 、 Sebastian Schwindt(2014)

學者透過水槽實驗與 FLOW-3D 來探討模擬衝擊射流(impinging jets)造成之沖刷坑，而模擬結果具有良好的吻合度。此外發現在入射流角度越陡之情況下，沖刷坑深度達平衡之時間較短，但堆積處需較長的實驗時間才容易達到平衡。反之在入射流角度較緩，則堆積處可較快達到平衡，而沖刷坑之深度需較長的作用時間。

雖然 Gaël Epely-Chauvin 認為 FLOW-3D 為一項良好的數模工具，但在參數設定上如網格大小、紊流模式選擇都將可能影響數模之結果，另外在非均勻的底床及粒徑分布差異大之情況下，可能為潛在的問題。

(三) 林義復、李忠潘、曾以帆、邱永芳、何良勝(2015)

藉由 FLOW-3D 以台中港為例，針對該區域之海域以台中港外海現場觀測之實時潮位作為開放水域邊界條件，以實測水深建立定床邊界，港口實體物理模型為封閉邊界，進行三維潮流流場數值模擬，評估底床潛勢淘刷區範圍。本模擬計算結果，在潮位變化或式潮流流速推估，經與實測數據相比擬，趨勢一致且高度相符。

(四) 黃林願(2017)

藉由渠槽實驗與 FLOW-3D 模擬階梯深潭形成對河道影響之研究，結果顯示 FLOW-3D 具有良好的模擬能力，可用於模擬階梯池水流和泥砂輸送，透過人工製造之階梯能使摩擦係數增加並使流速顯著下降，有助於穩定河道並減少河床侵蝕，同時，階梯之密度越高，能

量耗散和產生流動阻力的效果越好。

(五) 何皓愷(2017)

探討防砂壩跌水後，因位能與動能轉換後造成衝擊河床，進而使下游處形成冲刷坑，而有損壩體基礎之穩定性，危害結構物之安全。係以寒溪壩作為縮尺實驗之設施，並以 3 種流量、5 種跌水高、5 種底床粒徑等多中變化參數進行實驗設計，以清水流作為實驗條件，進行冲刷坑之探討。

透過 FLOW-3D 數值模擬垂直跌水之冲刷，以冲刷坑深度變化率為 0.003cm/s 作為達平衡狀態之條件，因模擬時間太短將會低估冲刷深度，故以冲刷坑深度變化率作為平衡條件，來決定模擬是否達到穩定收斂。發現在模擬 2000 秒後逐漸接近水槽試驗結果，約至 5000 秒後，冲刷深度變化率已小於 0.003cm/s ，冲刷坑深度趨於平衡狀態，模擬出的之最大冲刷坑深度雖稍大於水槽試驗結果，但相差並不大，如下圖 2-2。

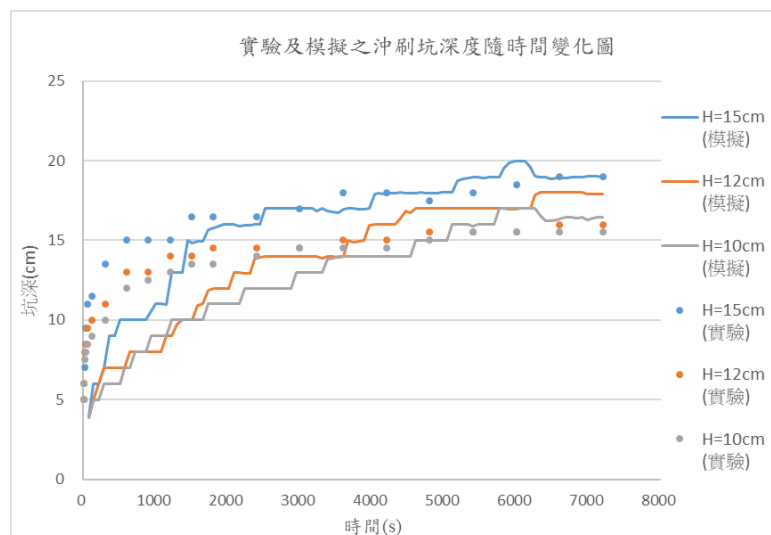


圖 2-2 實驗及模擬之冲刷坑深度隨時間變化圖(何皓愷，2017)

FLOW-3D 模擬寒溪壩於 2016 年 9 月 17 日馬勒卡颱風、2016 年

9 月 27 日梅姬颱風之降雨事件，其模擬結果之最大沖刷坑深度分別為 3.71 公尺、3.13 公尺，經與觀測資料比對後，模擬之坑深將些微高估於實際情形，其原因可能是因為以清水流進行模擬，而現實河道中有泥砂輸送，上游來砂將會補注於坑內，因此模擬結果高估於實際情。

整體而言，FLOW-3D 能調整坡度(地形)、人工構造物、變量流、含砂量、沖刷時間等多種參數，進而可以取得可能發生之沖刷坑深度，未來藉 FLOW-3D 可作為預測沖刷坑之規模預估，及設計消能設施之參考依據，此外可考量壩體本身基出深度，以避免構造物受沖刷而破壞，但其高估之結果仍需注意。

(六) Halah Kais Jalal (2020)

透過 Flow-3D 進行評估圓形橋墩的沖刷深度，並透過室內實驗來驗證其數模結果。模擬經 30 分鐘後橋墩的被沖刷之深度，Flow-3D 模擬結果最大沖刷深度為 3.6cm，而透過室內模型實測結果為 4cm，誤差僅為 10%，經實驗驗證，認定 Flow-3D 的數值模型可被視為一項模擬和預測橋墩周圍沖刷深度和流場的良好工具。

(七) 侯宥任(2021)

探討將氣泡工法應用於水工構造物的減緩沖刷研究中，以 FLOW-3D 作為模擬軟體，分析在氣泡管之作用下，防砂設施下游處沖刷之情形，以 5 種流量、5 種壩高、5 種管仰角、5 種管高度、5 種氣泡流量作為模擬變量參數，透過拉丁超立方抽樣進行參數選取，在每一組參數均隨機從五種數值中隨機取一樣分配於該次模擬中，共進行 25 組，後利用 SVR、Adaboost 兩種機器學習方法對最大沖刷深度以及各項變數進行完訓練，將完成之模式帶入 PSO 中進行最佳化求解，取得之防砂壩最佳之氣泡管設置為角度 45 度左右，高度為 1 公

尺高，管徑為 30 公分，氣泡流速為 7(m/s)左右，後以 50 年重現期流量 209cms，溢流口高度 2.65m 情況下，進行之 Flow-3D 模擬顯示沖刷深度約為 2.46m 左右，與原始沖刷深度相比其可減緩沖刷深度平均達 1.164m 減緩程度達 32.12%，能有效減緩沖刷深度。

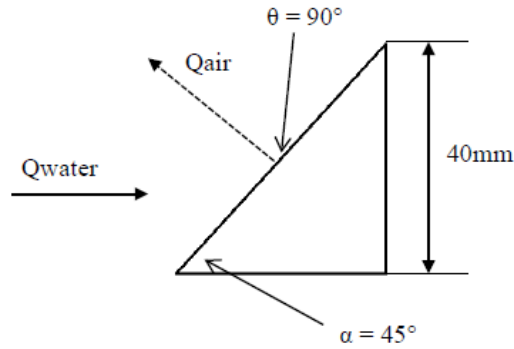
第四節 氣泡工法

(一)Violaine DUGUÉ(2012)

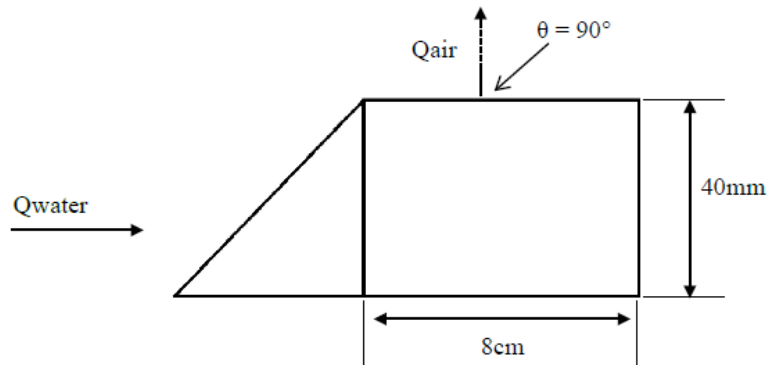
透過在彎曲的室內渠道試驗，在彎道外側架設多孔氣泡管，以研究發現在氣泡管的作用下，水流的流場變化與河床型態的演變。結果顯示在氣泡的作用下，可以透過引起二次流(secondary flow)，使第二沖刷坑(較下游)深度減小，沖刷坑移往水流中心線，有效的改善水流沖刷情形。但因氣泡孔之作用仍無法完全抵抗上游水流之沖擊力，故對於彎道入口處之第一沖刷坑(較上游)，氣泡孔的影響不大，故認為氣泡工法適合用於輕度與中度彎曲之渠道，此外建議考量河床粒徑大小與分布、河道的橫斷面之幾何形狀、河道曲率及寬深比等因素。

(二) Rachael R. Barlock(2013)

係以 Champagne(2011)做為實驗設計基礎，在三角形尾檻設計五種氣泡孔數(70、140、210、280、350)與兩種的氣孔裝設位置，分別為上游面入射角 45 度角、下游處入射角 90 度兩種方式，如所示，透過 10 組實驗探討氣泡工法作用下，對沖刷的影響。結果顯示，在下游處設置 70 孔其抗沖刷量相較於在上游處 140、210 孔之效果，其中又以在下游處孔數 350 的效果最佳，因此設置在下游處的配置，其減緩的沖刷量較在上游來的佳。



(A) 氣泡孔設置於上游面，入射角 45 度角



(B) 氣泡孔設置於下游處，入射角 90 度角

圖 2-3 實驗配置圖(Rachael R. Barlock, 2013)

透過實驗結果，可以證明氣泡工法之效果，並認為氣泡工法是透過空氣注入，對水流產生回水效應，縱而使水流水深提高、減緩流速，進而削減水流溢流的能量，進而減少沖刷深度。

(三) Ted M. Champagne(2016)

透過 120 組實驗下，了解氣泡在不同條件下影響尾檻設施下游沖刷之情形，探討因子包含：空氣速率、噴射角度、氣泡管儀器其高程與寬度、氣泡孔的大小與間距，並結論出下列五項結果：

1. 在空氣與水流流速比為(V_a/V_w) 251 倍
2. 氣泡以垂直入射角入射
3. 氣泡孔應設置於尾檻之頂部

4. 氣泡孔之佈設長度應與尾檻之寬度相同
5. 氣泡孔之間距為氣泡孔長度(即為尾檻之寬度)0.04 倍

在上述之結論，能有最佳之減緩沖刷效果，在較靠近結構物之下游位置能減少約 59%之沖刷程度，在遠離構造物較遠之位置則能減少約 37%之沖刷程度。

(四) Ravi Teja Reddy Tippireddy (2017)

藉由實驗驗證氣泡工法之作用下減少圓形橋墩的基礎沖刷能力，並引用 Ted M. Champagne(2016)最佳的氣泡孔設置方式，在水流之流況不變條件下，設計 14 種空氣流量，實驗結果分析最佳的空氣與水流流速比，並得出下列幾項結論：

1. 發現在 V_a/V_w 比值為 57.1 的情況下，可有最好的減緩沖刷結果，相較於無氣泡作用下，減少了 33%之沖刷。
2. 隨著空氣與水流流速比增加($V_a/V_w > 71.37$)，會導致沖刷情況增加。
3. 隨著空氣與水流流速比增加，沖刷坑的平衡時間(t_e)縮短，並經過 Tippireddy (2017)之經驗式確認，如下式

$$t_e(\min) = 0.4603(V_a/V_w)^2 - 104.95(V_a/V_w) + 6648.2$$

(五) Zeinab Tamoradi(2019)

藉由在彎道外側設置氣泡管或是水管，已達到物理屏障，使沖刷坑之深度及位置改變，其實驗結果顯示氣泡及水流皆能使最大沖刷深度下降，其中孔口間距 5 公分為最佳設置，在氣泡管作用可使，彎道 90 度之剖面其沖刷深度下降 85%，彎道 170 度之剖面其沖刷深度下降 79%，而在水流屏障作用下，彎道 90 度其沖刷深度下降 91%，彎

道 170 度其沖刷深度下降 86%。

第五節 小結

由沖刷文獻可以得知，由於水流經過壩體下游河床時，因水流之剪應力作用於河床面，導致河床產生劇烈沖刷，隨值著水流挾砂能力變化，沖刷速度呈下降之趨勢，最終當水流穩定之情況下，沖刷坑發展將不再隨時間變化，達到沖淤穩定平衡。

在數值模擬模式選擇上，係了解氣跑工法應用於現地之情況，而考量工程上施作後不易進行更改，故以目標設施之實際尺寸進行模擬，以探討氣泡工法對於現地之影響。透過對於 FLOW-3D 之文獻蒐集，可得知其為一項模擬沖刷深度和流場的良好工具，以獨有之 FAVOR 技術能針對交界處提供更加之高精度，因此本計畫將採用 FLOW-3D 做為數值模擬建立。

由氣泡工法之文獻蒐集得知，目前該工法多仍處於研究之階段，若需應用在現地待多方面之評估。現階段國際間以兩個研究團隊為主，分別為維也納科技大學對於彎形渠道進行探討凹岸之沖刷情況，及密西根科技大學對於直線渠道上之河工構造物其沖刷變化，尤以 Ted M. Champagne(2016)對於渠道下游三角形尾檻之研究，與本計畫之目標水工溝造物類似，皆為橫向水工構造物，故關於氣泡工法之實驗設計，將會參考其研究結果，作為設計基礎。

第三章 室內渠槽試驗結果

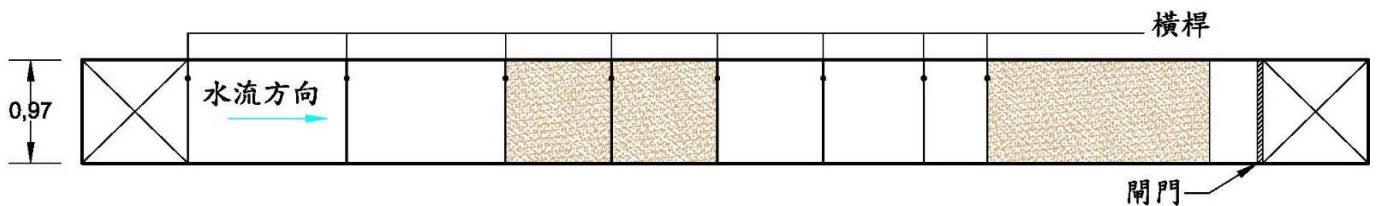
先前許多學者以透過室內渠槽試驗，進行探討防砂壩溢洪口形成之射流，導致下游沖刷之問題；而氣泡工法現階段在國際間以兩個研究團隊為主，分別為維也納科技大學與密西根科技大學，其針對不同渠道形式提出不同設計參數，本團隊將以蒐集之文獻作為此次實驗之基礎，如氣泡工法之設計參數，進行相關實驗設計。

第一節 試驗佈置

本團隊將利用臺灣大學水工試驗所的多功能渠槽，進行室內縮尺試驗，渠槽相關設計與資料如下：

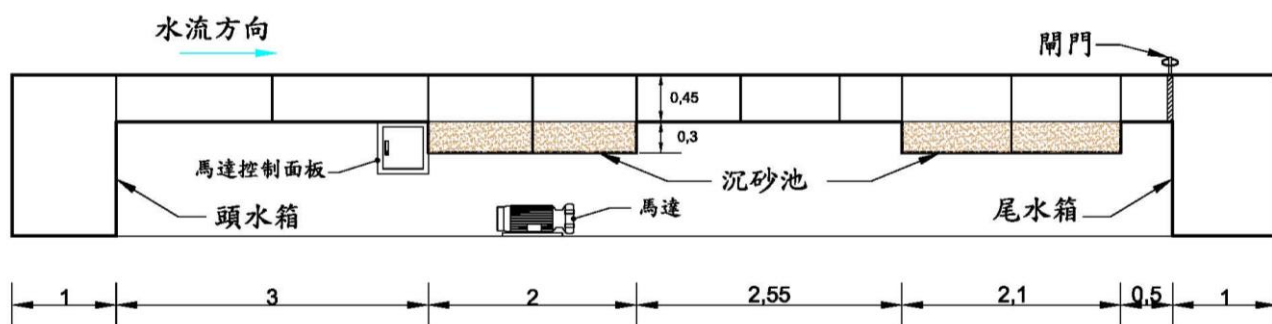
一、渠槽設備

本次試驗採用之多功能渠槽，其可分為頭水箱、尾水箱、試驗段、沉砂池等四部分，其相關配置圖如圖 3-1 所示，此渠槽為一循環式之渠道，透過渠槽底部馬達來進行控制流量，流量大小可透過渠槽側邊之控制面板來進行調整，如圖 3-2 所示，此座渠槽總長約 12.15 公尺，本次沖刷坑試驗段約為 0.30 公尺，並設置在第一沉砂池。



(A)俯視圖 (unit:m)

圖 3-1 渠槽尺寸圖



(B)側視圖 (unit:m)

圖 3-1 渠槽尺寸圖



(A)步進馬達



(B)步進馬達控制面板

圖 3-2 馬達設備圖

二、試驗儀器

本團隊將採用相關儀器，進行實驗數據之量測，如下：

(一)蜂巢整流設備

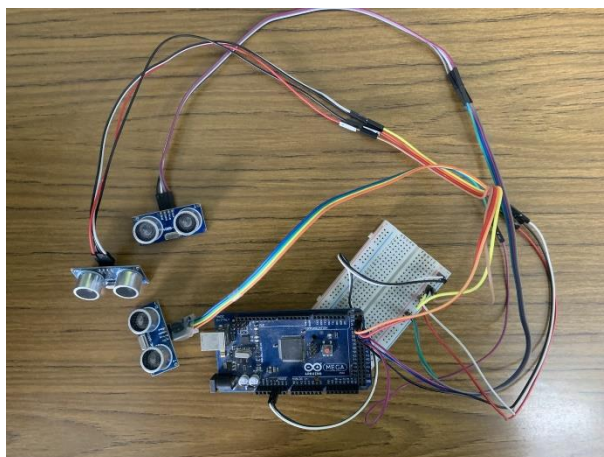
本次選用之渠槽雖為一循環式之渠槽，將尾水箱之水流抽取至頭水箱時，水流流出時常出現亂流且流況較複雜，為減少渦流之影響，故在試驗段上游設置一以直徑 1.2cm 粗行吸管製成之整流設備，如圖 3-3 所示，使水流流進試驗段時能達到平順且穩定。



圖 3-3 蜂巢整流設備架設圖

(二) 超音波水位計

本團隊採用自製超音波水位計，超音波測距器型號採用 HC-SR04，測量範圍從 2 公分至 450 公分，而精度為 0.3 公分，測量方式透過前端超音波感測器進行距離資料之擷取，將擷取之資料存於 SD 卡中，並使用 LabVIEW 開發程式，將其程式寫入 Arduino 之微處理器，儀器如圖 3-4 所示。



(A) 超音波水位計儀器圖



(B) 超音波水位計架設圖

圖 3-4 超音波水位計設施圖

(三) 尺規

透過尺規大致量測沖刷坑之深度，作為確認三維模型之準確性，此外實驗時透過尺規確認沖刷坑達穩定之狀況，判斷是否呈現平衡，如下圖 3-5 為儀器相關圖片。



圖 3-5 尺規儀器圖

(四) 保麗龍球

此次實驗之流速，透過投擲小型保力龍球作為表面流速量測之方式，如下為圖 3-6 採用保麗龍之圖片，而為求保力龍球能穩定，將投擲處設置於整流設施下游處，並以固定長度(0.5 公尺)透過碼表計時進行觀測，其觀測起始點為水位計設置處，當保麗龍球流過時，則開始計時，測量示意圖如圖 3-7 所示。

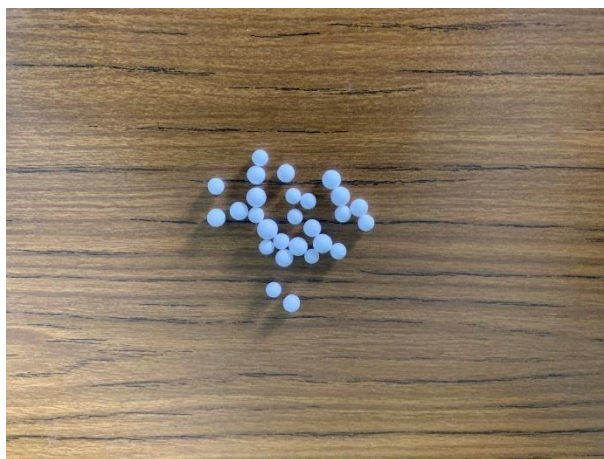


圖 3-6 表面流速量測使用之保麗龍圖

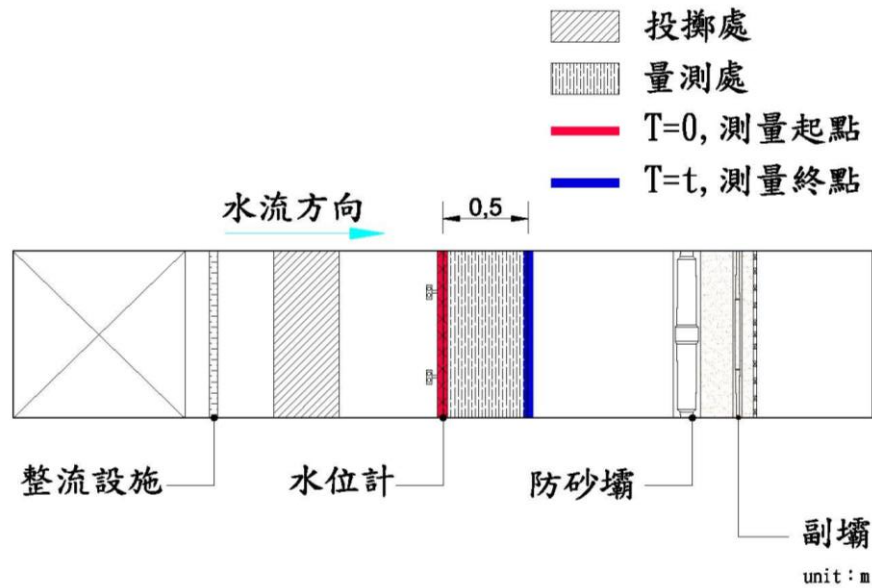


圖 3-7 表面流速測量示意圖

(五) Agisoft Metashape

本團隊為探討氣泡工法是否有效減緩沖刷，故為取得完整完整之沖刷坑形貌，故本團隊將採用 Agisoft Metashape 進行建置 3D 立體模型，以取得沖刷前後地形之差異，及了解沖刷坑之深度與規模。

Agisoft Metashape 為三維模型重建之軟體，透過強大的照片自動辨識校列功能，無須對目標物件進行編碼，或特定要求的拍攝條件，即可利用相片之重疊性，簡單且快速地建立具有色彩和紋理的 3D 模型。其主要操作流程如以下五個步驟：

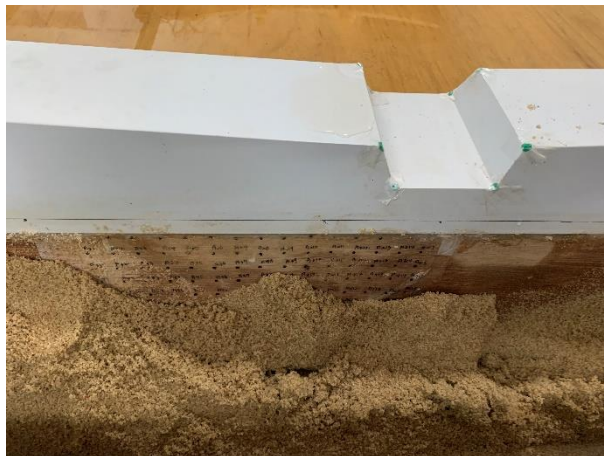
1. 校正相片位置
2. 於相片標記控制點，並標示其座標值
3. 相片位置重新校正
4. 建立產生密集點
5. 建立及輸出數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。

利用輸入互相重疊且連續的照片，校正相片位置會運算出每張影像拍攝時的深度及角度，可透過正確設置地面控制點，進行模型座標

系統修正，模型將依靠相片中的特徵點建立稀疏點雲，產生稀疏點雲後，可利用刪除部分離群值 (outlier) 提高後續三維模型建立的準確度，確認後可進行密集點雲的運算，產生立體模型及輸出數值高程模型。為確保 3D 模型之準確性，故本團隊在渠槽兩側與壩體上進行控制點之設置，如圖 3-8 所示，以確保三維模型輸出結果之準確性。



(A) 為渠槽右側控制點設置



(B) 為壩體及其底下控制點設置

圖 3-8 渠槽控制點設置



(C) 為渠槽左側控制點設置

圖 3-8 渠槽控制點設置

(六)空氣幫浦

此幫浦為固定出氣量之空氣壓縮機，其排氣量為 220(公升/min)，可做為水產養殖之使用，透過分氣閥以達到設計之空氣流量，如圖 3-9 所示，為本計畫所採用之儀器。



圖 3-9 打氣幫浦儀器圖

第二節 試驗內容

一、目標設施選定

如圖 3-10 所示，為本計畫預計分析壩體的基地位置圖。本計畫藉由創聚環境管理顧問股份有限公司所提供之寒溪壩歷年監測的資

料，如圖 3-11 所示，了解近年來壩址地形之沖淤變化，另外本團隊將先前資料彙整如表 3-1，經 103 年至 109 年 10 月間持續觀察後發現，壩體下游至連續固床工間累積沖刷深度約 4.6 公尺。故以寒溪壩作為此次模型建置之基礎，並以該壩址之相關資料進行後續室內渠槽試驗及數值模型參數參考依據。

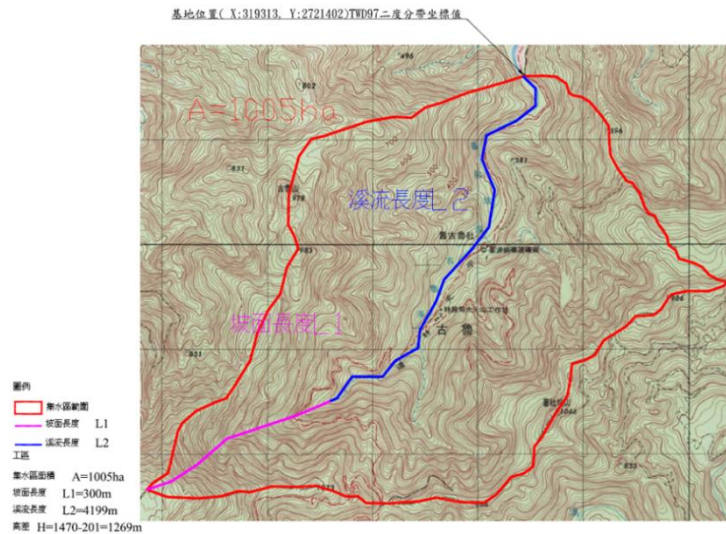


圖 3-10 本計畫之分析標的物之位置示意圖(何皓愷，2017)

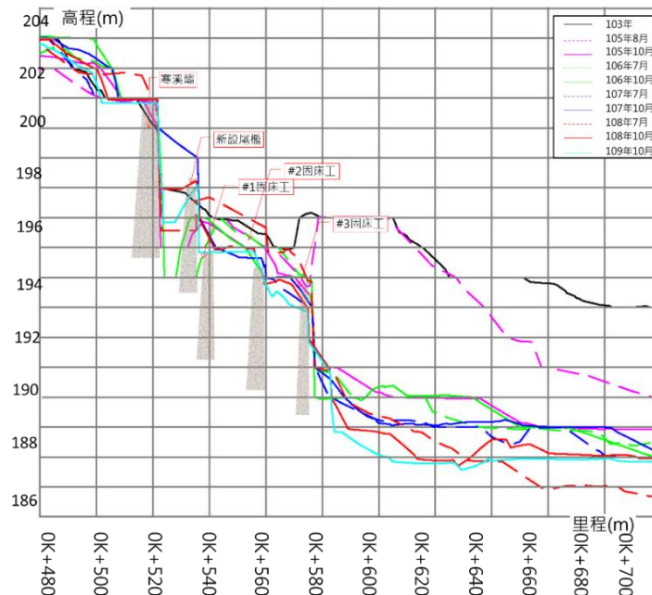


圖 3-11 寒溪壩縱向沖淤變化圖

(創聚環境管理顧問股份有限公司)

表 3-1 寒溪壩 103 年至 109 年沖淤情況

時間	沖刷情況	備註
103~105/08	下游沖刷 0.8m	-
105/08~105/10	下游沖刷 1.0m	受梅姬颱風影響，導致下游沖刷
105/10~106/07	下游持續沖刷 1.0m	-
106/07~106/10	下游無持續沖刷	-
106/10~107/07	下游無持續沖刷	寒溪壩至下游三座連續固床工間，因新增一座固床工，使壩體下游沖刷情況減緩。
107/07~107/10	下游於汛期後形成一水坑	於下游新設消能階梯，且該時段豪雨事件均低於重現期 1.1 年
107/10~108/07	下游有明顯淤積之情形	-
108/07~108/10	下游平均沖刷 1m	受米塔颱風影響，最大時雨量為 72mm/hr，約 2~5 年重現期距，導致河床沖刷問題
108/10~109/10	下游淤積 0.2m	無重大颱風豪雨事件

二、實驗縮尺比例

由於受限於渠槽寬度僅 0.97 公尺，且為配合未來氣泡工法設計，如溢洪口寬度過小之況下，氣泡孔可設置之數量太少，且能採用之孔徑範圍少，故幾何縮尺比例(λ)為 1/62，作為水工構造物模型的設計依據。

因本次水工模型試驗所探討之水流現象，其物理機制為以重力主導，故本次模型將採用福祿數相似，推估各實驗之參數值，如下：

(一)長度縮尺

由於考量渠槽寬度及未來氣泡工法之設置，故以採用溢洪口長除上渠槽寬作為此次長度縮尺比例。

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{0.97}{60} \approx \frac{1}{62} = \lambda \quad (\text{式 3.1})$$

上式中 L_m ：模型長度尺寸； L_p ：原型長度尺寸； λ ：幾何縮尺比

例

(二) 速度縮尺

因採用福祿數相似原理，可推求速度縮尺比例(λ_v)，如下式：

$$\begin{aligned} F_{r_m} &= F_{r_p} \\ \rightarrow \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}} &= \frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} \quad ; \quad \because g_m = g_p \\ \rightarrow \frac{v_m}{v_p} &= \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = \lambda_v = \lambda^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{式 3.2})$$

上式中 v_m ：模型速度尺寸； v_p ：原型速度尺寸； g_m ：模型重力加速度； g_p ：原型重力加速度。

(三) 流量縮尺

流量透過速度(v)與斷面積(A)相乘而得，故透過已知速度縮尺比例(λ_v)與幾何縮尺比例(λ)進行縮尺計算流量縮尺比例(λ_Q)，如下式：

$$\begin{aligned} Q &= Av \quad ; \quad \because A \text{ 為長度尺寸之平方，故 } A = L^2 \\ \frac{Q_m}{Q_p} &= \frac{L_m^2 v_m}{L_p^2 v_p} = \lambda^2 \cdot \lambda_v = \lambda^{5/2} = \lambda_Q \end{aligned} \quad (\text{式 3.3})$$

上式中 Q_m ：模型流量尺寸； Q_p ：原型流量尺寸

並依據「寒溪吊橋上游及四方林橋下游土砂災害防治工程」其洪水流量分析取得重現期距為 2、5、10、25、50 之流量，透過流量縮

尺比例(λ_Q)換算出各縮尺流量，如下表 3-2 所示。

表 3-2 現地流量與縮尺流量對照表

重現期距(年)	流量(cms)	縮尺流量(cms)
2	51	0.00168
5	79	0.00261
10	102	0.00337
25	180	0.00595
50	209	0.00691

(四) 泥砂粒徑縮尺

泥砂粒徑可透過泥砂起動相似可以 Shields(1936)所建議之底床顆粒起動參數關係來建立，利用相似律原理，Shields 參數無因次臨界剪應力(τ_c^*)其在原型與模型應相同，故可得下式：

$$\begin{cases} \lambda_{\tau_c^*} = \frac{\lambda_{\tau_c}}{\lambda_{(\rho_s - \rho)} \lambda_g \lambda_d} = 1 \\ \tau_c^* = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho) g d} \\ \tau_c = \rho g R S_f = \rho g y S_0 \end{cases}$$

$$\rightarrow \lambda_d = \lambda_y^2 \lambda_L^{-1} \lambda_{(\rho_s - \rho)} \lambda_\rho \quad (\text{式 3.4})$$

τ_c 為泥砂起動之臨界剪力， d 為底床粒徑， ρ_s 、 ρ 分別為水與泥砂顆粒之密度， y 為水深， S_0 為渠道坡度 $S_0 = y/L$ 。在等比條件下，在模型水流與泥砂顆粒之密度與原型相同情況，泥砂顆粒縮尺比例(λ_d)將與幾何縮尺比例相同。

$$\lambda_d = \lambda_y^2 \lambda_L^{-1} \lambda_{(\rho_s - \rho)} \lambda_\rho = \lambda \quad (\text{式 3.5})$$

依據現地土砂粒徑分布與泥砂顆粒縮尺比例(λ_d)可推算出泥砂粒徑之縮尺大小，如下表 3-3 所示。

表 3-3

泥砂粒徑 (m)	縮尺粒徑 (mm)	比例
0.11	1.77	10%
0.057	0.92	55%
0.02	0.32	25%
0.005	0.08	10%

三、實驗配置

(一)實驗設計

1. 流量

如圖 3-12 下所示，為渠槽率定曲線，可透過計算出的 Q_m ，利用渠槽之率定曲線取得所需之馬達頻率，以作為後續實驗使用，而計算結果如下表 3-4 所示，而本計畫之水流皆以清水流作為試驗流體。

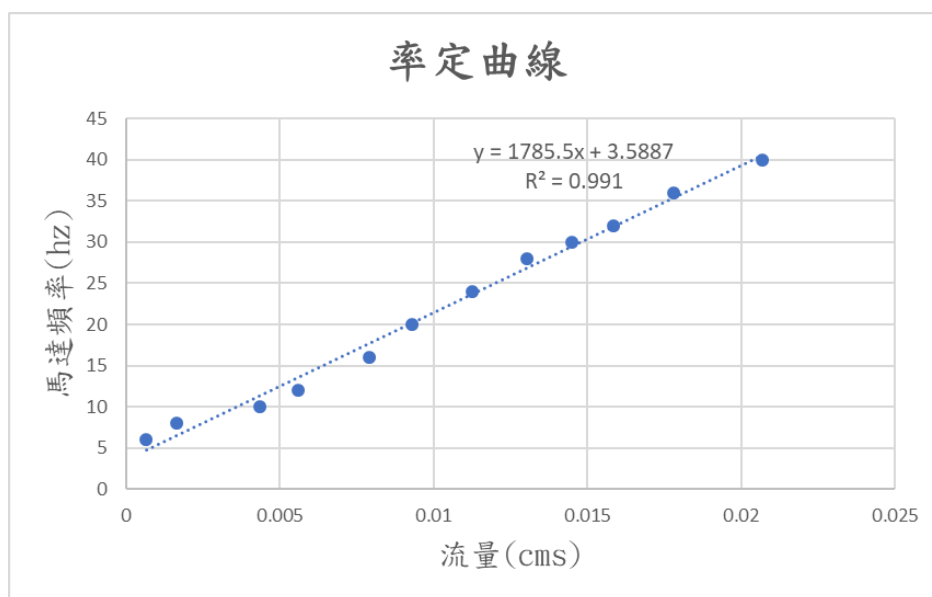


圖 3-12 多功能渠槽流量與馬達頻率率定曲線圖

表 3-4 試驗流量與馬達赫茲對應表

縮尺流量(cms)	馬達(Hz)
0.00168	6.60
0.00261	8.25
0.00337	9.61
0.00595	14.21
0.00691	15.92

2. 壩體尺寸

透過設計之幾何縮尺比例(λ)為 1/62 之情況下，並配合實際寒溪壩之竣工圖，利用壓克力製作出實驗用之壩體，其主壩長寬高約 96.5cm × 15.9cm × 14.5cm，副壩 96.5cm × 5.1cm × 5.8cm，如圖 3-13 所示。

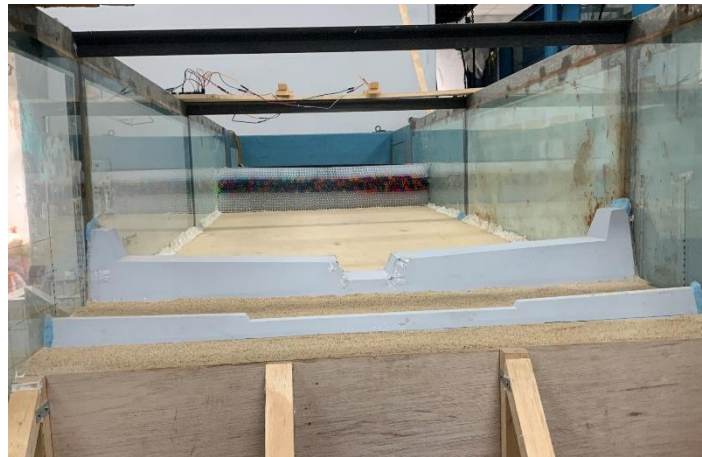


圖 3-13 壓克製作之主副壩模型圖

3. 粒徑

依據現地之泥砂粒徑分布 0.005~0.11m，並經縮尺比例計算出等效之粒徑範圍為 0.08~1.77mm，因石英砂販賣規格固定，故選取 0.8~1.5(mm)與 0.21~0.841(mm)進行混合作為試驗所使用之石英砂，其土砂粒徑分布如圖 3-13 所示， d_{60} 、 d_{50} 、 d_{10} 分別為 0.734、0.685、0.503mm，其均勻係數為 1.461。

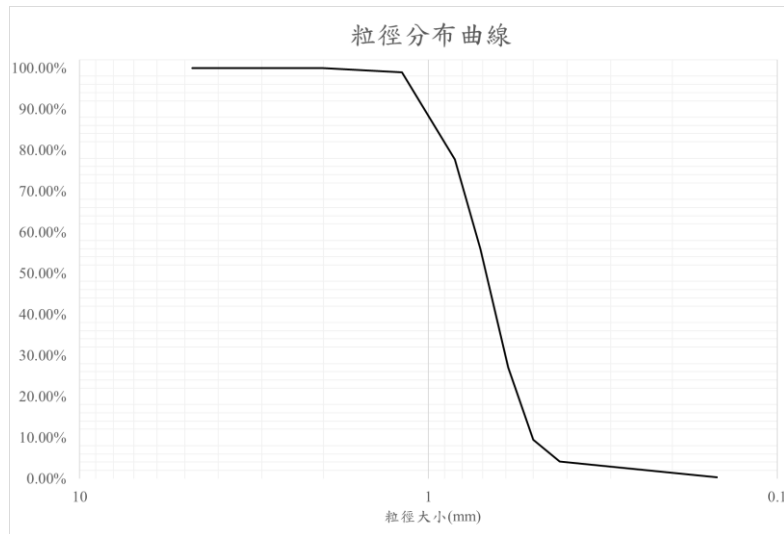


圖 3-14 粒徑分布圖

4. 時間

根據文獻，沖刷坑生成過程整體在一開始沖刷時發展迅速，而後緩慢發展逐漸趨於穩定，沖刷坑之最大深度幾乎不再改變，沖刷坑之特徵已大致形成，故為確認沖刷坑達穩定階段，是以最深沖刷位置在 2 小時內沖刷深度的變化小於 0.5% 作為判斷條件。

實際實驗測量為水流開始沖刷後，每一小時進行壩基處量測，以確保該實驗已達沖淤平衡，當連續兩次測量結果變化小於 0.5% 時，則會認定為該水流條件下，沖刷坑已達平衡。

5. 氣泡工法

根據參考文獻 Ted M. Champagne(2016)該名學者提出的最佳設計參數，作為實驗設計的基礎，進行氣泡工法實驗設計，並將氣泡孔間距、氣泡孔範圍長、氣泡孔之高度等設計參數設為定值，其設計方式為氣泡孔間距採用 0.04 倍之溢洪口長(約為 0.3 公分)，氣泡孔範圍長、氣泡孔之高度將會與溢洪口長相同並緊鄰其下游面，其設計示意圖如圖 3-15 所示。

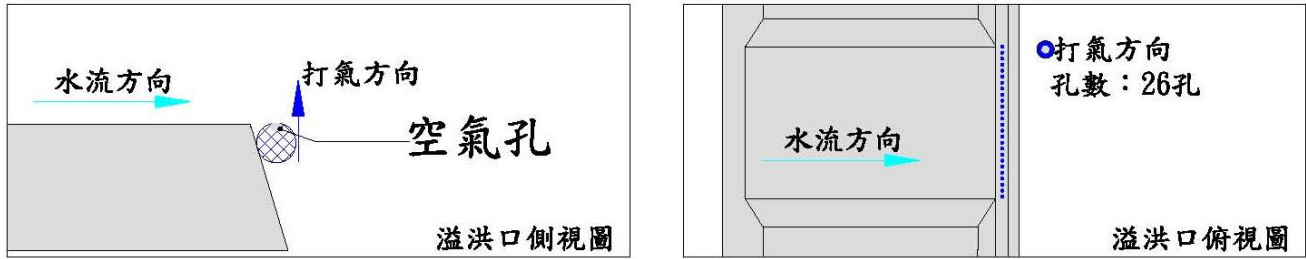


圖 3-15 氣泡工法設計示意圖

氣泡孔口大小是直徑約為 0.11 公分之鐵釘進行鑽洞，並依據間距 0.3 公分與溢洪口約長 8cm 得到孔數為 26 個。氣泡噴射速度較難測量，故透過排氣孔大小之固定，因此透過空氣流量上之設定，以空氣流量取代氣泡噴射速度之設計參數，故本計畫氣泡工法之設計參數分為：空氣與水流量比(QA/QW)、氣泡孔入射角度兩種參數進行實驗設計，並透過實驗與數值模擬的比對，決定其最佳之參數設計。

本計畫之空氣與水流量比(QA/QW)為以 Ted M. Champagne(2016)之研究做為基礎，透過文獻中提出最佳設計參數估算出本計畫之各流量之最佳空氣與水流量比約為 0.27~0.28，故以 0.28 為中心以 ± 0.07 、 ± 0.14 、 ± 0.21 ，進行 7 組不同流量比之設計，而各流量比值如表 3-5 所示。

將打氣幫浦設置於壩體上游處，並透過塑膠軟管銜接打氣閥來調節空氣流量，以達到不同之空氣與水流量比(QA/QW)，可透過比值與水流量取得個情境之空氣流量，而氣泡孔入射角度，已垂直向上打出為 0 度，並往下游處旋轉，旋轉角度依據表 3-5 所示，如圖 3-16 所示，為入射角度之示意圖。

表 3-5 氣泡工法設計參數

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
空氣與水流量比 (QA/QW)	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49
入射角度(度)	0	30	60	90			

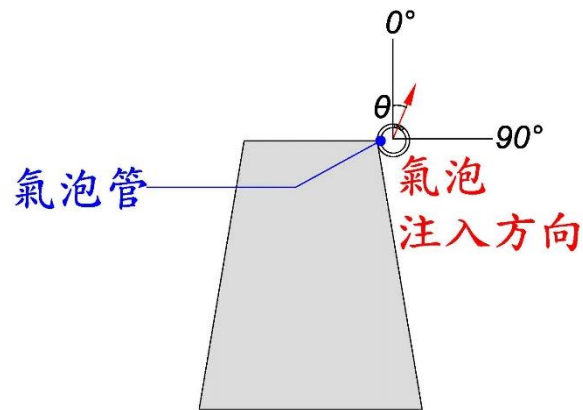
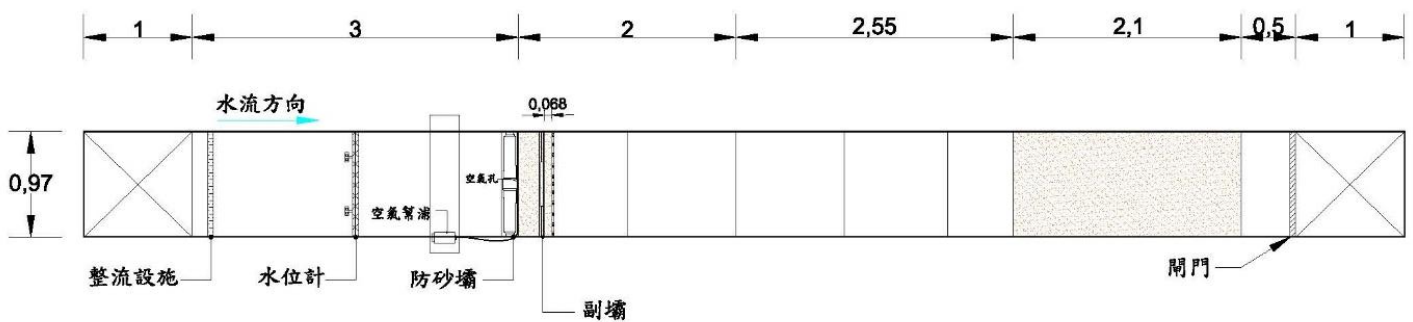


圖 3-16 入射角度之示意圖

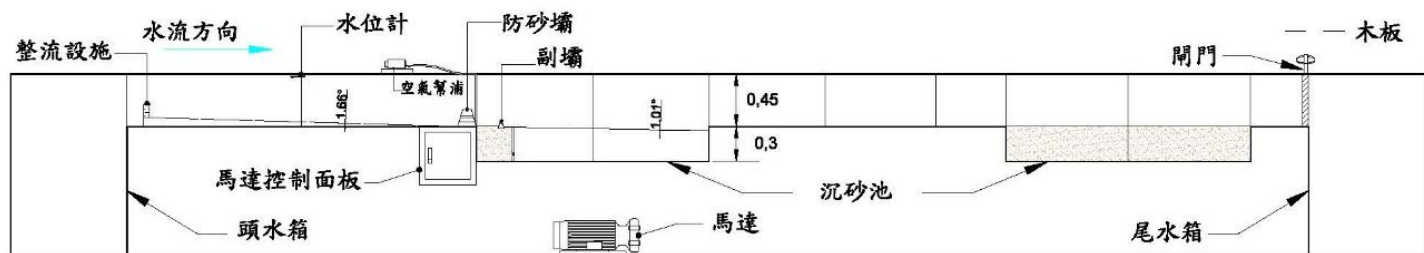
(二) 儀器設施配置

依據渠槽既有設置，並配合數值模擬所需之參數，進行相關的儀器架設，如下圖 3-17 所示，蜂巢整流設備，超音波水位計、空氣幫浦架設於渠道的上游處，而主要之實驗段設置在整座渠槽中間段之沉砂池，並於實驗段下游處利用木板設置擋砂設施，而在木板上設置相關的排水孔，如圖 3-18 所示，作為實驗結束後，排除沖刷坑之積水，如圖 3-19 所示為沖刷坑積水之情況，以利後續拍攝建立三維模型使用。



(A) 設施配置俯視圖 (unit:m)

圖 3-17 渠槽儀器設施配置圖



(B) 設施配置側視圖 (unit:m)

圖 3-17 渠槽儀器設施配置圖



圖 3-18 下游木板排水孔配置圖



圖 3-19 沖刷坑積水情況圖

(三) 不同情境模擬

作為氣泡工法設置的對照組比較，進行五種不同流量之情境模擬，並利用 Agisoft Metashape 建立時候後沖刷坑之三為模型，了解在氣泡工法作用下，其沖刷深度的變化趨勢。

而五種流量分別為重現期距為 2、5、10、25、50 之流量，而流量大小如表 3-2 計算結果。而氣泡工法之設計參數如表 3-5 所示，僅以空氣與水流量比(QA/QW)、氣泡孔入射角度作為不同情境模擬之變化參數。

第三節 試驗結果與討論

一、無氣泡工法實驗之結果

五種不同流量之情境，將會於實驗前進行未沖刷之地形建置，如圖 3-20 所示，x 軸為水流流向，上游為座標點為 0 處，往正放向為實驗段下游；y 軸為垂直水流方向，座標點為 0 則為渠槽右岸；z 軸則為河床高程，透過沖刷前之地形圖，以作為後續評估沖刷深度。

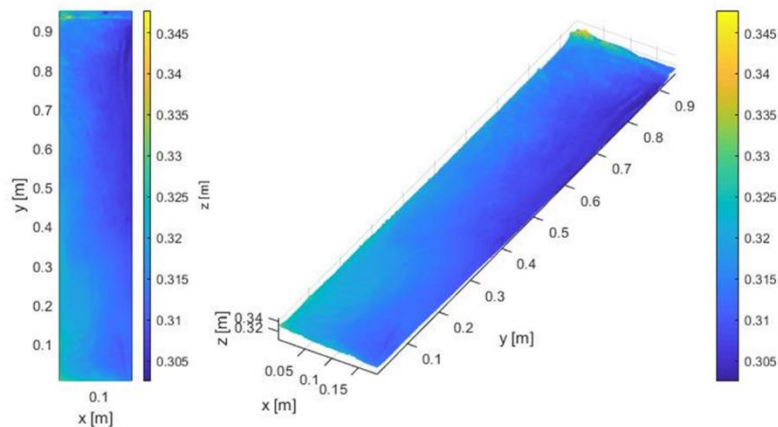
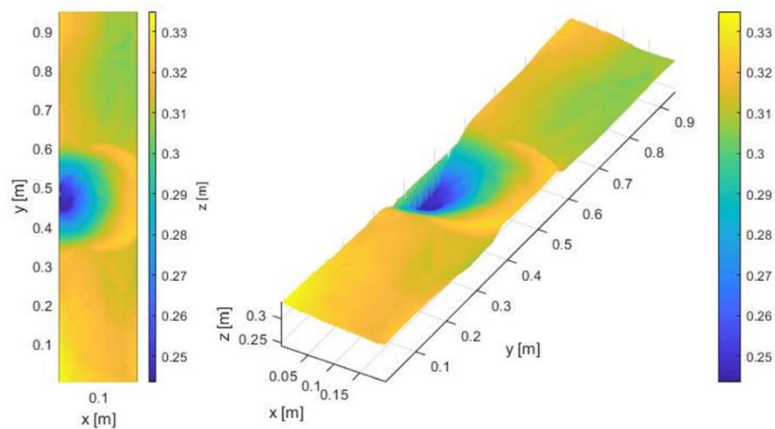


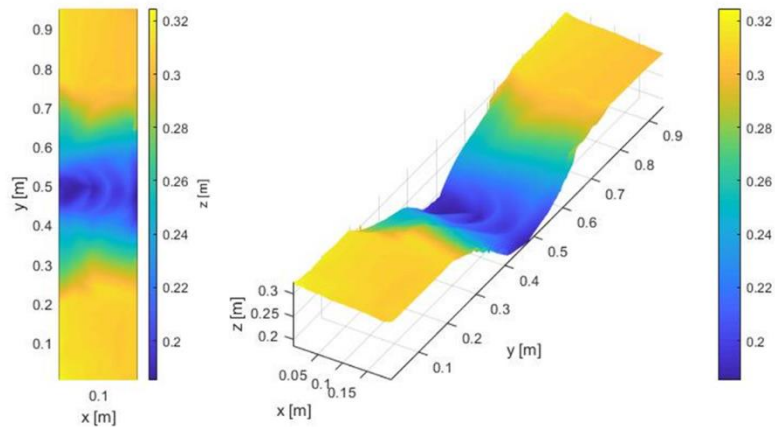
圖 3-20 未沖刷前之地形圖

將依據表 3-4 之計算結果，進行步進馬達之調整，並以定流量形式進行清水沖刷實驗。如圖 3-21 所示，其為各情境模擬實驗結果，其

座標軸定義與圖 3-20 相同，分別為 x 軸為水流流向 y 軸為垂直水流方向，可發現隨著流量變大，壩體下游處之沖刷深度增加，且沖刷範圍隨著變大。圖 3-21(A)重現期距 2 年流量結果，由於流量較小，土砂被水流挾帶後，隨即堆積於下游處，而隨著流量變大，水流將會在河床形成一明顯之河道，而其河道寬度隨著流量變大，亦有增加之趨勢。

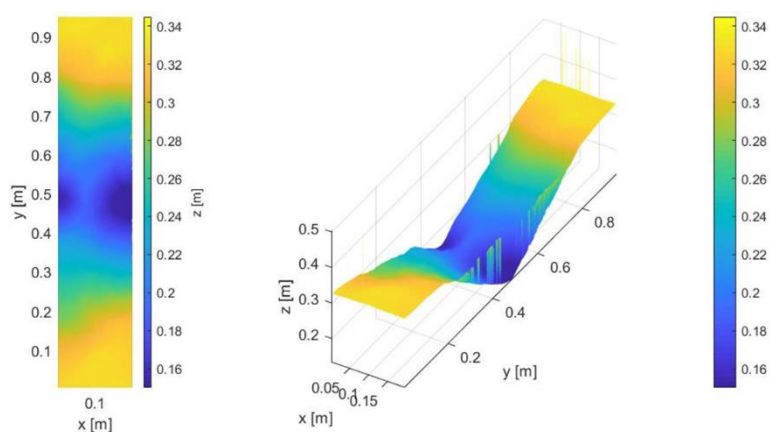


(A)重現期距 2 年流量之沖刷地形

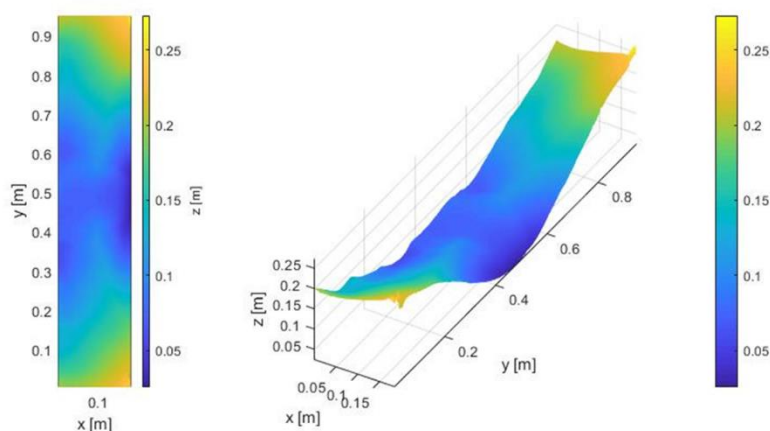


(B)重現期距 5 年流量之沖刷地形

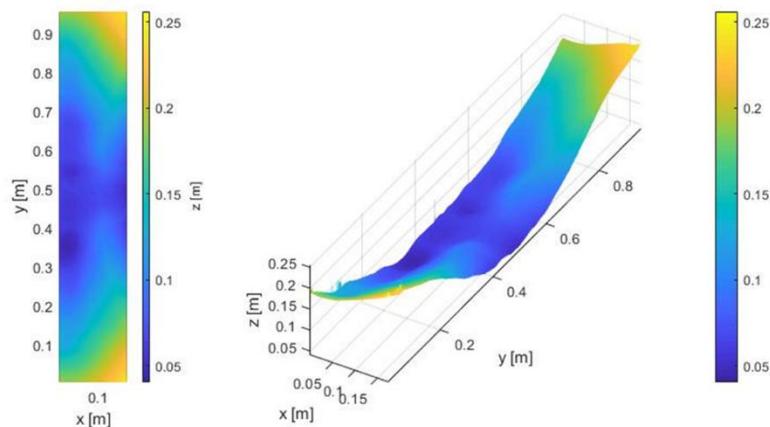
圖 3-21 不同情境模擬之沖刷地形圖



(C)重現期距 10 年流量之冲刷地形



(D)重現期距 25 年流量之冲刷地形

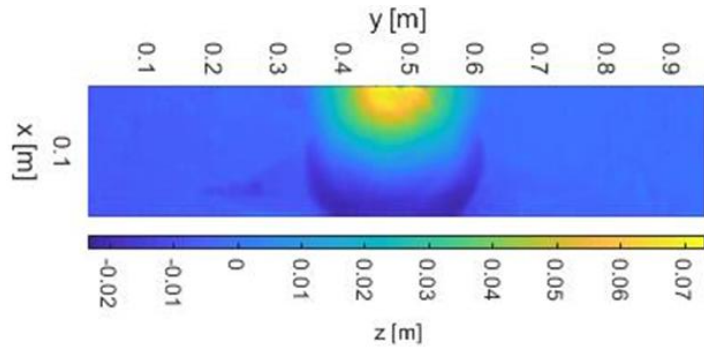


(E)重現期距 50 年流量之冲刷地形

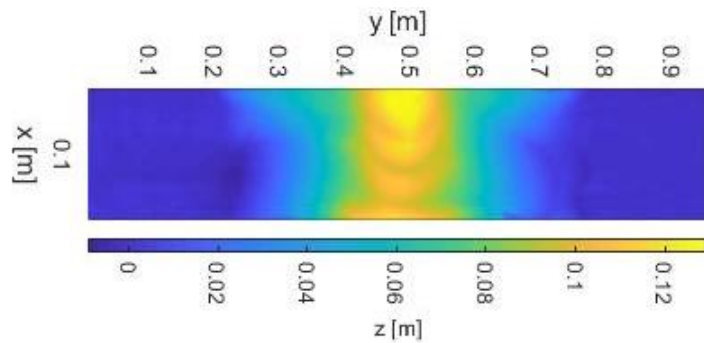
圖 3-21 不同情境模擬之冲刷地形圖

依據各實驗結果，進行冲刷深度之分析，可以看出隨著流量之變

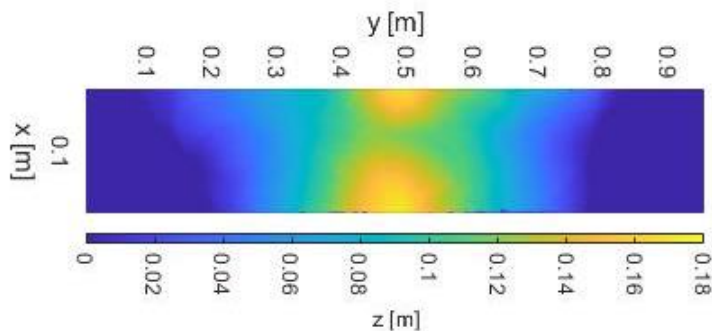
化，沖刷加深外，尤以溢洪口下游處，其壩基具有明顯的沖刷情況。而依據圖 3-22 所示，為各情境模擬後之最終地形，減去初始地形所取得之高程變化圖，其各座標軸定為 x 軸為水流流向、 y 軸為垂直水流方向及 z 軸高程變化量，而當流量大於溢洪口而由複式斷面溢流時，則壩體基礎刷深範圍加大。



(A)重現期距 2 年流量下刷深情況

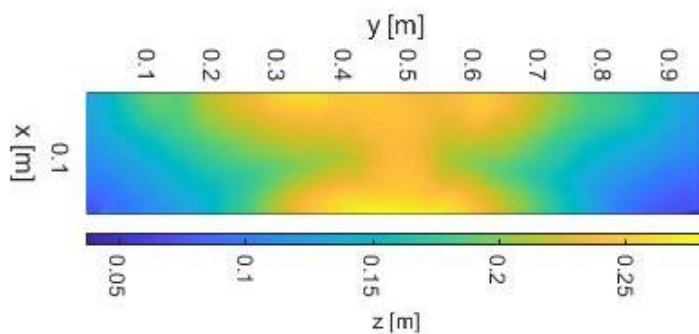


(B)重現期距 5 年流量下刷深情況

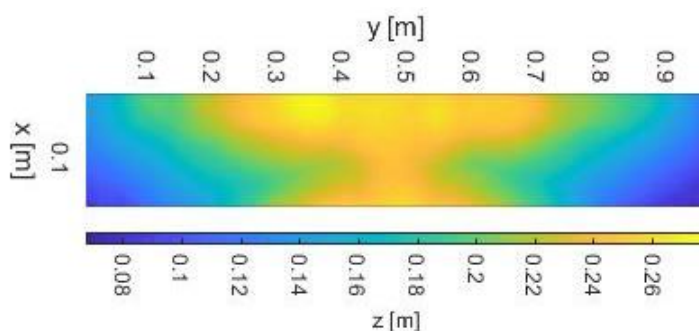


(C)重現期距 10 年流量下刷深情況

圖 3-22 不同情境模擬之刷深情況



(D)重現期距 25 年流量下刷深情況



(E)重現期距 50 年流量下刷深情況

圖 3-22 不同情境模擬之刷深情況

依據表 3-6 所示，可看出隨著流量變大壩基沖刷情況顯著，深度越大，當流量過大時，容易導致壩體基礎完險之疑慮，因此希望藉由氣泡工法之設置後，改善壩體基礎沖刷之現象；最大沖刷深度隨著流量變大，其距離壩體之基礎越遠，主要為因流速增加，導致水流自由射流之衝擊位置，距離壩體較遠，進而使最大沖刷坑之位置遠離壩體基礎。

表 3-6 沖刷深度之比較表

水流量	壩基沖刷深(m)	最大沖刷深(m)
Q_{50}	0.256	0.277
Q_{25}	0.236	0.281
Q_{10}	0.164	0.172
Q_5	0.126	0.129
Q_2	0.073	0.073

依據表 3-6 所示， Q_{25} 有較大的最大沖刷深度，但是整體刷深情況來看， Q_{50} 整體上淘刷情況仍較 Q_{25} 大，如圖 3-23 所示。

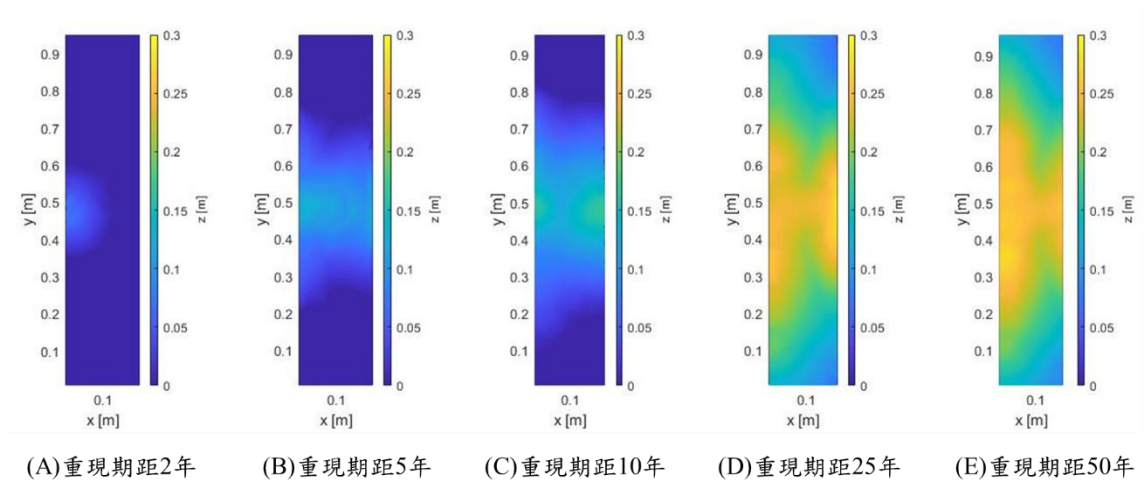


圖 3-23 不同情境模擬之沖刷深度比較圖

二、氣泡工法實驗之結果

依據表 3-5 設計的參數進行實驗模擬，而將各實驗數據分為空氣與水流量比(Q_A/Q_W)、氣泡孔入射角度兩種不同參數之實驗結果進行探討。

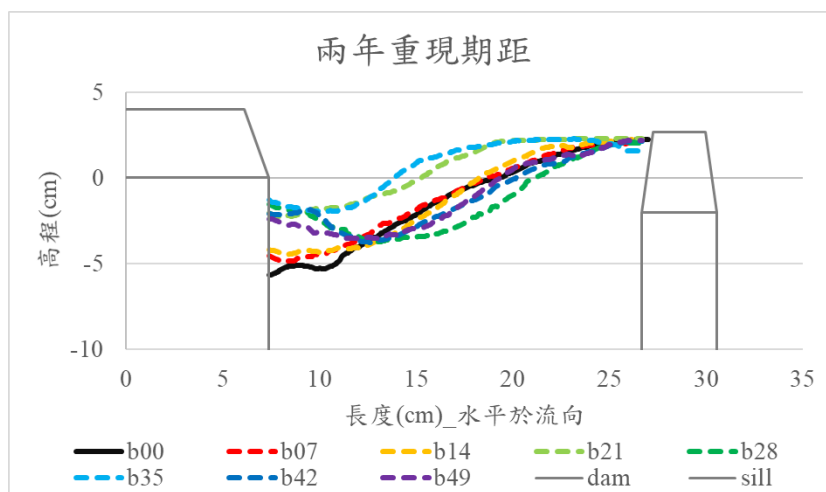
(一)空氣與水流量比(Q_A/Q_W)實驗結果

本計畫之空氣與水流量比(Q_A/Q_W)為 7 組及未含有氣泡之實驗 1 組，共計 8 組實驗，各實驗編號將如表 3-7 所示。

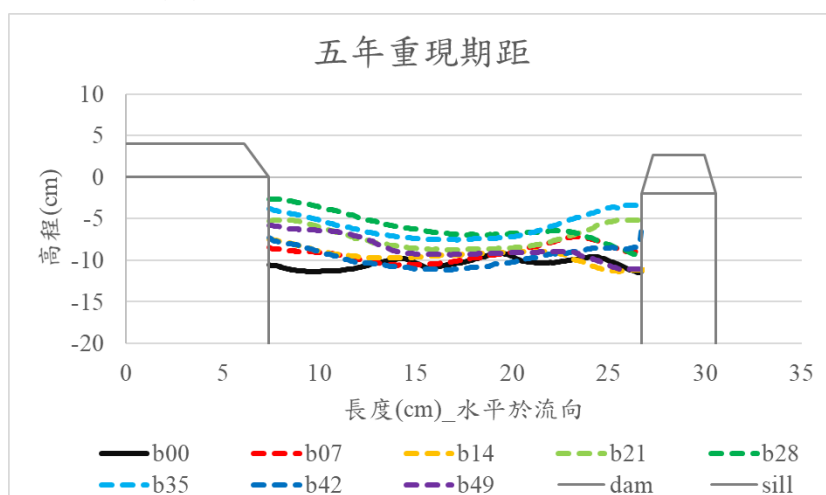
表 3-7 空氣與水流量比(Q_A/Q_W)編號對照表

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	對照組
空氣與水流量比(Q_A/Q_W)	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	X
入射角度(度)	0	0	0	0	0	0	0	X
編號	b07	b14	b21	b28	b35	b42	b49	b00

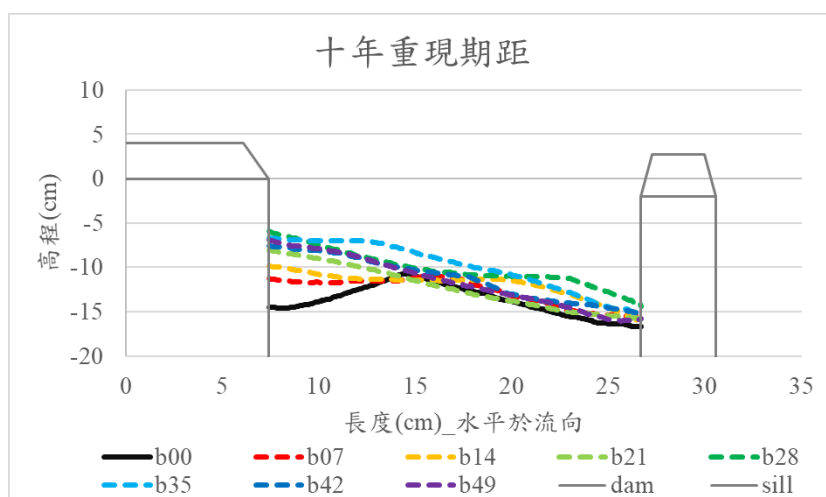
各不同流量情境，將依據比值及既有之水流量推估出該流量情境所需之空氣量，並透過調節氣閥來達到所需之空氣量，而各實驗皆以當氣泡角度為 0 度下進行模擬，各實驗結果如圖 3-24 所示。



(A)重現期距 2 年流量下冲刷地形

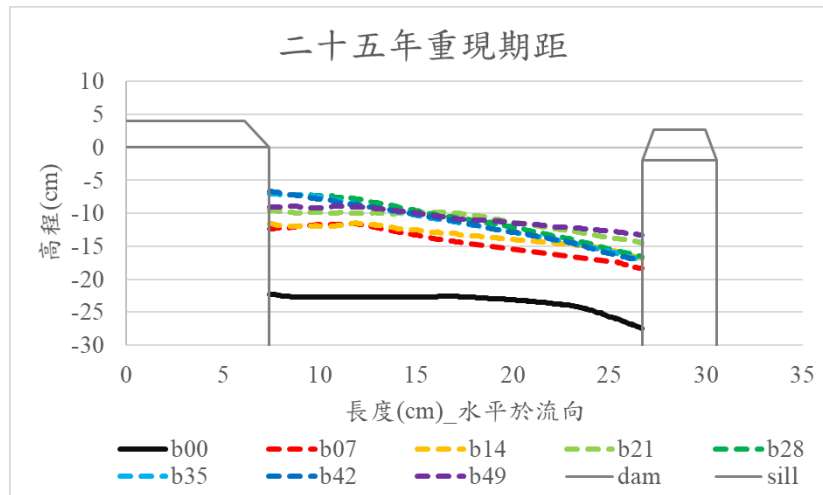


(B)重現期距 5 年流量下冲刷地形

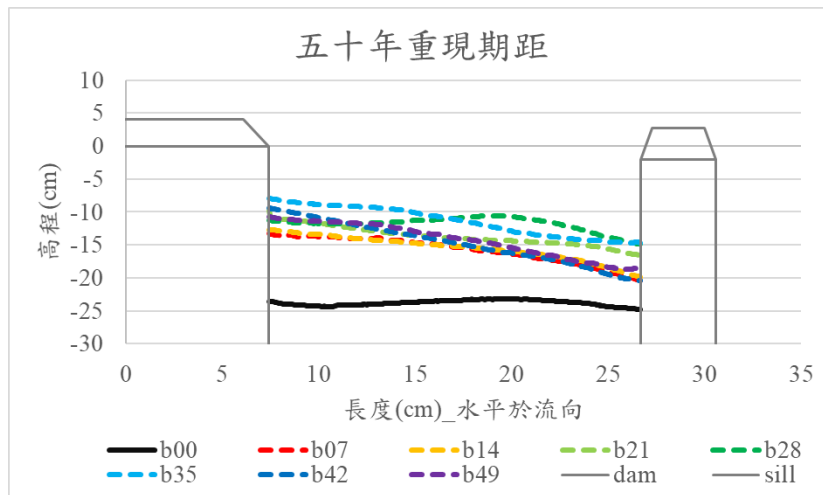


(C)重現期距 10 年流量下冲刷地形

圖 3-24 不同空氣與水流量比(QA/QW)之實驗結果



(D)重現期距 25 年流量下沖刷地形



(E)重現期距 50 年流量下沖刷地形

圖 3-24 不同空氣與水流量比(QA/QW)之實驗結果

由圖 3-24 可看出，氣泡工法在不同空氣與水流量比(QA/QW)下，各組剖面高程皆高於對照組之高程，可得知最終沖刷程度皆趨緩於原先無設置氣跑工法之沖刷情況，透過氣泡工法的設置後，相較於對照組不管在壩基沖刷，抑或是最大沖刷深度，皆有減緩沖刷的現象，而各組的沖刷減緩程度由表 3-8 至表 3-12 所示。

表 3-8 重現期距 2 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度

	壩基沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)	最大沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)
b00	0.073	-	0.073	-
b07	0.063	13.70%	0.065	11.60%
b14	0.059	19.18%	0.063	14.73%
b21	0.034	53.42%	0.044	40.11%
b28	0.031	57.53%	0.051	30.79%
b35	0.030	58.90%	0.033	54.71%
b42	0.041	43.84%	0.051	30.56%
b49	0.041	43.84%	0.049	32.88%

表 3-9 重現期距 5 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度

	壩基沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)	最大沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)
b00	0.126	-	0.129	-
b07	0.104	17.46%	0.117	9.52%
b14	0.094	25.40%	0.119	7.89%
b21	0.073	42.06%	0.097	24.92%
b28	0.054	57.14%	0.098	24.07%
b35	0.057	54.76%	0.084	34.75%
b42	0.077	38.89%	0.112	13.39%
b49	0.076	39.68%	0.116	10.60%

表 3-10 重現期距 10 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度

	壩基沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)	最大沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)
b00	0.164	-	0.172	-
b07	0.133	18.90%	0.161	6.06%
b14	0.119	27.44%	0.166	3.38%
b21	0.099	39.63%	0.153	10.84%
b28	0.077	53.05%	0.143	16.78%
b35	0.090	45.12%	0.156	8.92%
b42	0.094	42.68%	0.157	8.62%
b49	0.103	37.20%	0.158	7.93%

表 3-11 重現期距 25 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度

	壩基沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)	最大沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)
b00	0.236	-	0.281	-
b07	0.143	39.41%	0.180	36.02%
b14	0.136	42.37%	0.177	37.01%
b21	0.103	56.36%	0.156	44.42%
b28	0.092	61.02%	0.173	38.26%
b35	0.091	61.44%	0.181	35.48%
b42	0.085	63.98%	0.180	35.80%
b49	0.111	52.97%	0.185	34.20%

表 3-12 重現期距 50 年不同空氣與水流量比(QA/QW)下之減緩程度

	壩基沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)	最大沖刷 深度(m)	減緩程度 (%)
b00	0.256	-	0.277	-
b07	0.160	37.50%	0.213	23.32%
b14	0.146	42.97%	0.207	25.38%
b21	0.130	49.22%	0.177	36.34%
b28	0.133	48.05%	0.166	40.16%
b35	0.099	61.33%	0.157	43.55%
b42	0.114	55.47%	0.214	22.96%
b49	0.127	50.39%	0.205	26.10%

在壩基沖刷的部分，將表 3-8 ~ 表 3-12 各組減緩程度繪製如圖 3-25 所示，可得知在不同流量的情況下，皆有呈現起初隨著氣泡工法的設置，可以使沖刷減緩，但隨著氣泡量持續增加，減緩程度卻有下降之趨勢，主要隨著氣泡流量增大，增加水流上升流速，而在跌水時具有較之能量，進而導致沖刷情況增加之現象。而將五種不同流量之減緩程度進行平均，如圖 3-26 所示，可發現在空氣與水流量比為 0.35 下，壩基沖刷呈現最好的減緩效益，減緩程度可達 56.31%。

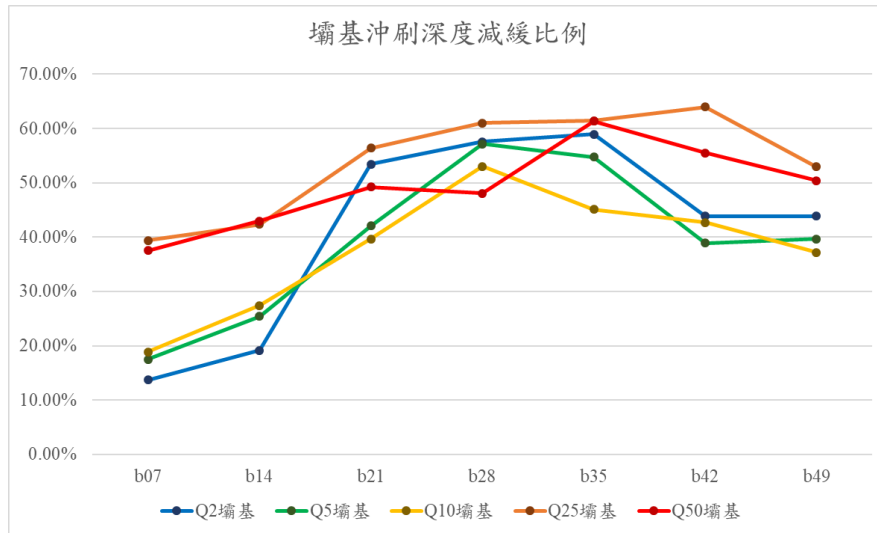


圖 3-25 不同空氣與水流量比(QA/QW)下壩基冲刷減緩程度趨勢圖

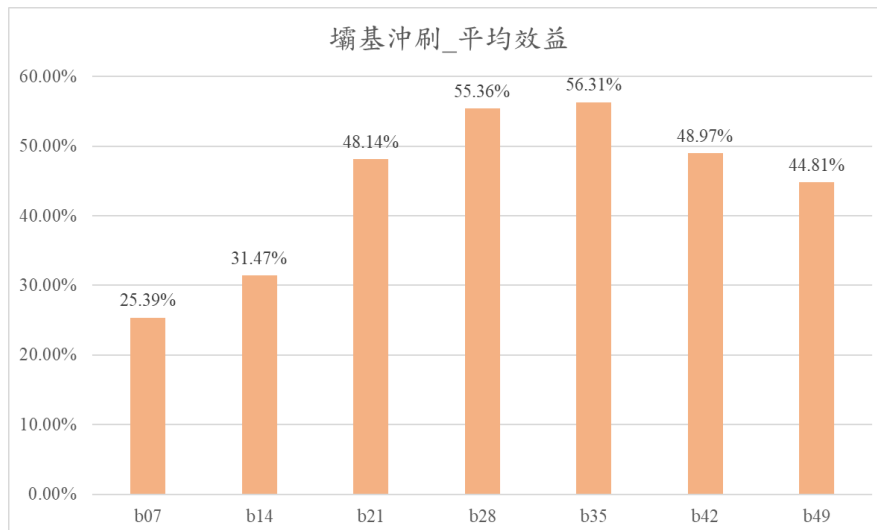
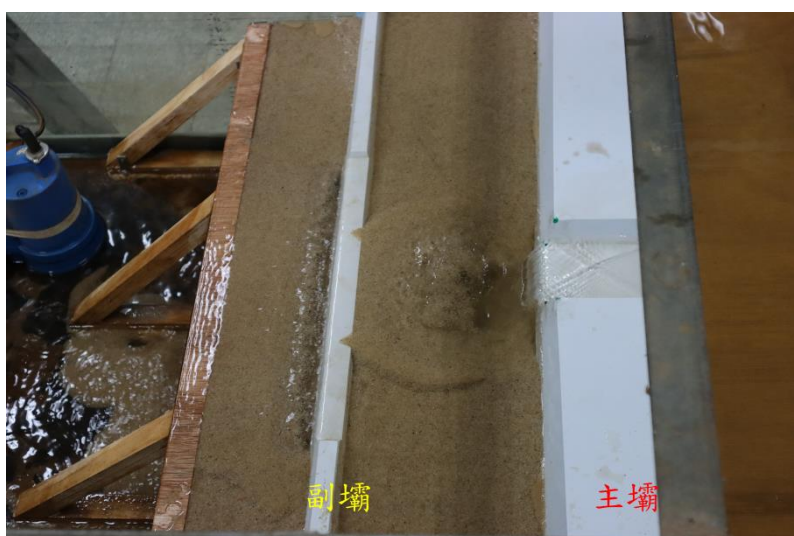


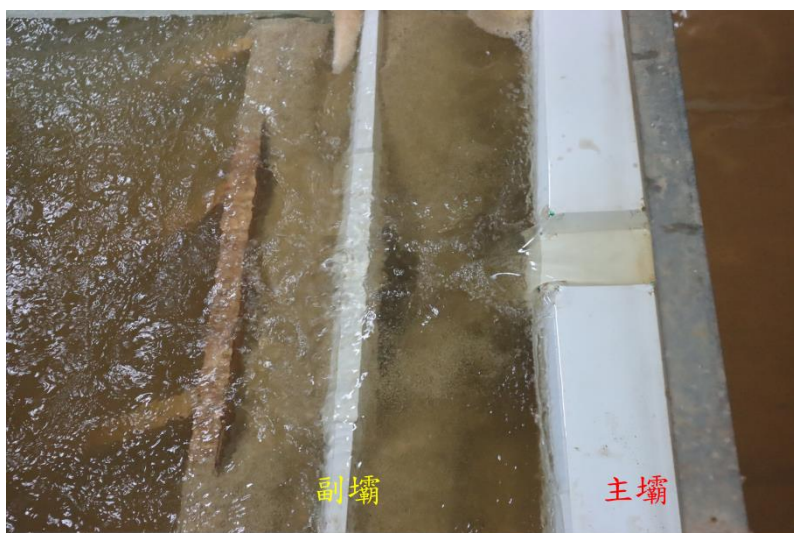
圖 3-26 不同空氣與水流量比(QA/QW)下壩基冲刷減緩平均效益圖

在最大冲刷深度的部分，並非如壩基冲刷之結果，在各流量都有有明顯之減緩趨勢，僅在重現期距 2 年與 5 年之流量有最大效益的變化，推測為本次計畫氣泡工法僅設置於溢洪口，而此兩種流量未溢流至複式斷面，如圖 3-27A 所示，因此氣泡工法對於水流最具影響力，但隨著流量的增加，水流不在將限於溢洪口，而會溢流至複式斷面，如圖 3-27B 所示，雖空氣與水流量比(QA/QW)相同，但非全部水流皆受氣泡工法之作用，造成重現期距 10 年、25 年及 50 年在最大冲刷

深度其減緩程度上，沒有明顯得變化趨勢，如圖 3-28 所示，此外亦可發現其三種流量之最大沖刷深度實際值在各情況下皆沒有明顯變化，如圖 3-29 所示，而在整體平均效益來看，如圖 3-30 所示，主要呈現的為小流量上的變化，而在空氣與水流量比(Q_A/Q_W)為 0.35 時最佳，減緩比例可達到 35.48%。



(A) 小流量之水流流況(重現期距 2 年與 5 年)



(B) 大流量之水流流況(重現期距 10 年、25 年與 50 年)

圖 3-27 水流流況示意圖

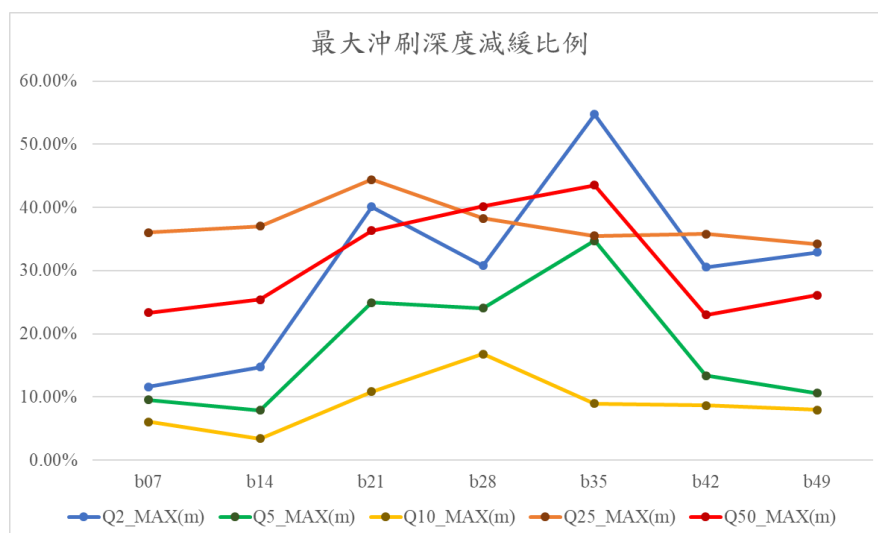


圖 3-28 不同空氣與水流量比(QA/QW)下最大沖刷減緩程度趨勢圖

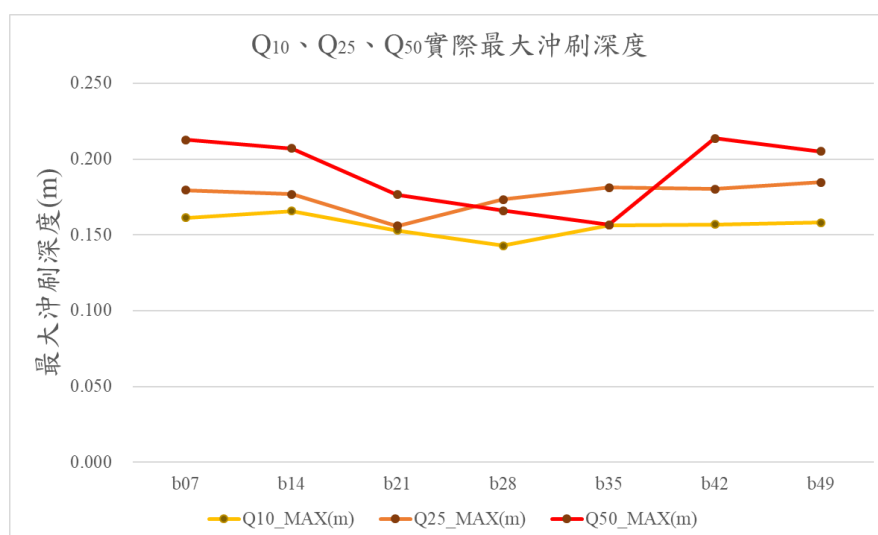


圖 3-29 流量 Q10、Q25、Q50 各情況下之實際最大沖刷深度圖

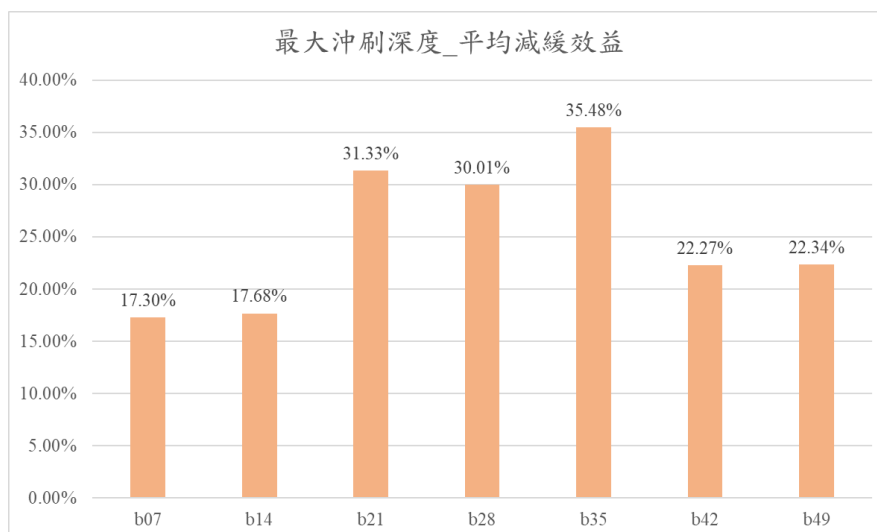


圖 3-30 不同空氣與水流量比(QA/QW)下最大冲刷減緩平均效益圖

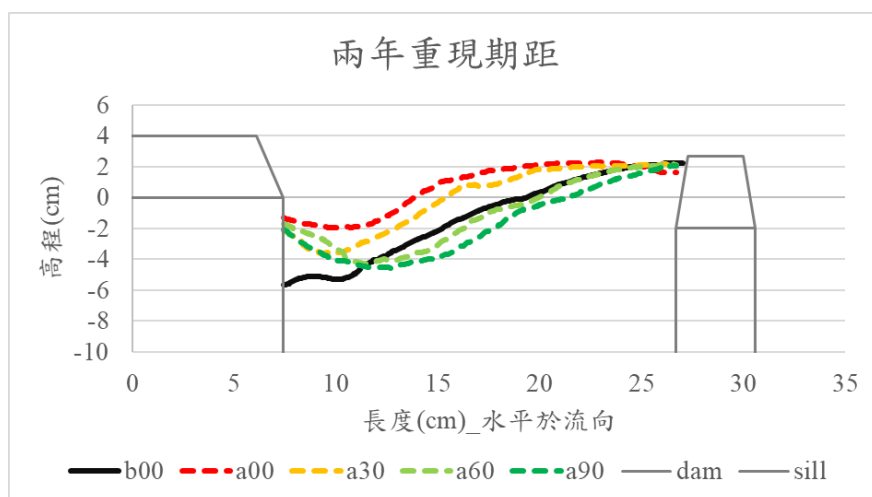
(二) 氣泡孔入射角度實驗結果

本計畫以 4 種不同之氣泡孔入射角度及未含有氣泡之實驗 1 組，共計 5 組實驗，各實驗編號將如表 3-13 所示。

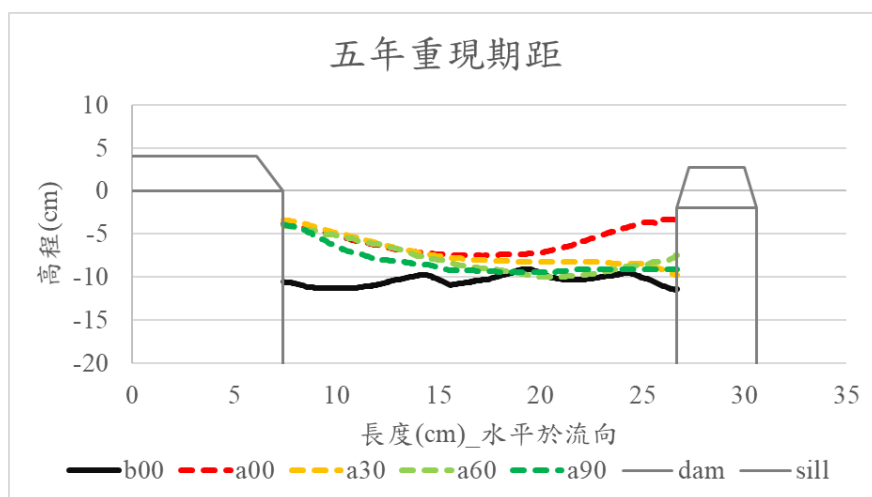
表 3-13 氣泡孔入射角度編號對照表

	#1	#2	#3	#4	對照組
空氣與水流量比 (QA/QW)	0.35	0.35	0.35	0.35	X
入射角度(度)	0	30	60	90	X
編號	a00	a30	a60	a90	b00

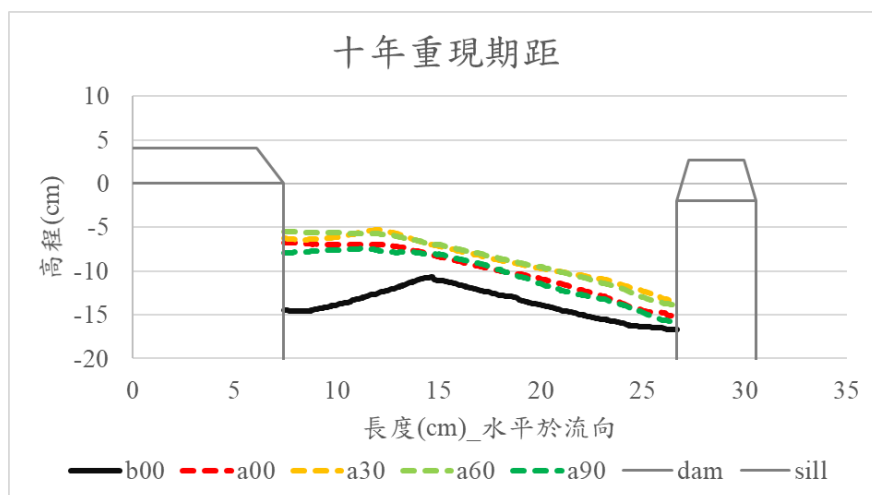
依據前一小節得到最佳之空氣與水流量比(QA/QW)為 0.35，以其作為空氣與水流量比(QA/QW)之固定值，進行氣泡孔入射角度對於防砂壩下游冲刷影響之實驗，各實驗結果如圖 3-31 所示。



(A)重現期距 2 年流量下刷深情況

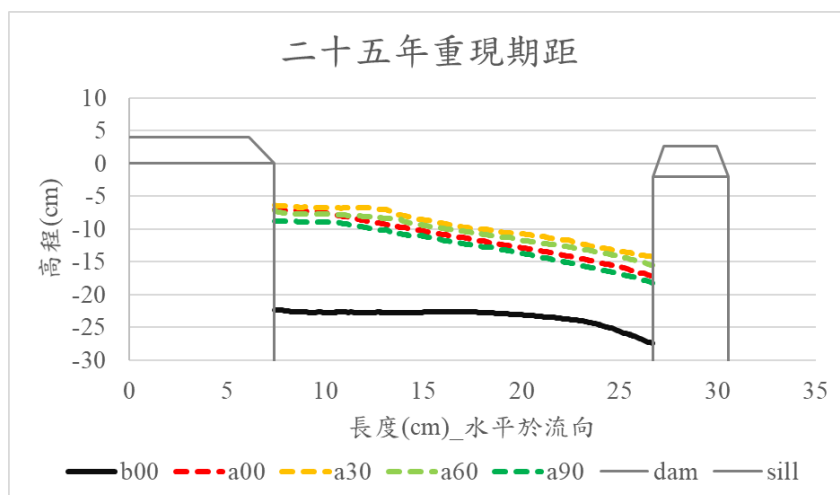


(B)重現期距 5 年流量下刷深情況

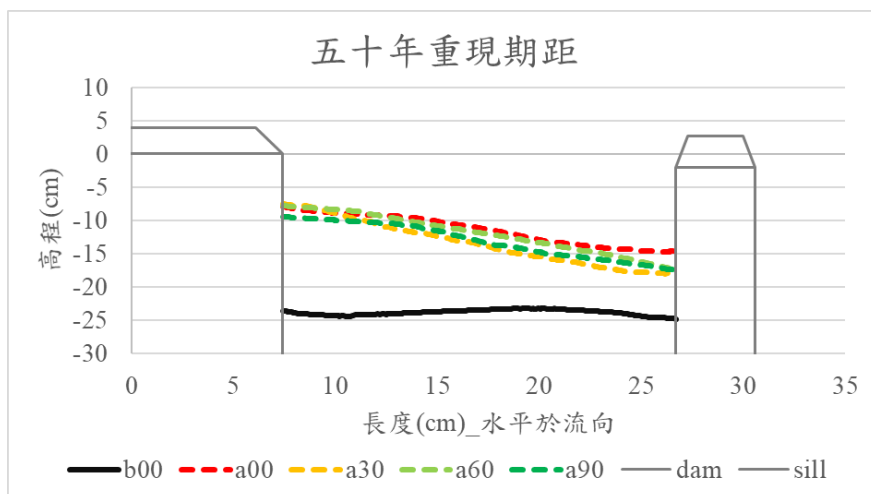


(C)重現期距 10 年流量下刷深情況

圖 3-31 不同氣泡孔入射角度之實驗結果



(D)重現期距 25 年流量下刷深情況



(E)重現期距 50 年流量下刷深情況

圖 3-31 不同氣泡孔入射角度之實驗結果

如圖 3-31 各流量之剖面顯示，在不同角度之沖刷情況，僅在重現期距 2 年與 5 年之流量下有明顯變化，可看出隨著角度的變化，最大沖刷深度有越遠離壩基之現象，此外因入射角度的增加，氣泡工法提供的向上浮力減小，進而使最大沖刷深度有增加之趨勢，而當重現期距 10 年、25 年及 50 年之水流，因溢流至複式斷面之情況，故無明顯之變化。

三、實驗結果與討論

氣泡工法根據不同空氣與水流量比(QA/QW)與氣泡孔入射角度

兩種變化參數進行實驗模擬，比對無氣泡工法的結果顯示，各種關於氣泡工法的設計皆顯示防砂壩下游沖刷均有減緩之作用。

在空氣與水流量比(QA/QW)實驗中，可以得知隨著空氣流量增加到一定比例時，減緩壩基沖刷之作用並不顯著，甚至有下降之趨勢，推測為當空氣流量增大時，增加河道水流上升流速，在跌水後又較大之衝力，造成其沖刷現象增加，而在最大沖刷深度的部分，由於氣泡口僅設置於溢洪口，當流量大於溢洪口時，部分水流將不受到氣泡工法之作用，故減緩程度趨於一個定值，因此可由圖 3-28 中得知重現期距 2 年、5 年減緩趨勢，與圖 3-30 平均效益呈現趨勢相同，而在整體結果呈現上不管是壩基沖刷，抑或是最大沖刷深度，在空氣與水流量比(QA/QW)為 0.35 時效果最佳，在壩基減緩可達 56.31%，在最大沖刷深度也有減緩 35.48%之效果。

在氣泡孔入射角度實驗中，可得知在流量為重現期距 2 年與 5 年下，隨著角度的變化，沖刷深度與最大沖刷深度得位置都在改變，當角度增加時垂直之作用力逐漸減小且增加了水平作用力，因此最大深度因垂直之作用力減小而增加，而最大沖刷深度得位置隨著水平作用力有遠離壩基之現象，其中本團隊認為在角度 30 度其減緩程度與壩基保護作用的效果最為合適，主要為對於減緩程度佳，且若未來將設計於現地時，當上游水流具有含砂時，透過角度的設置，可以減少水中泥砂滯留於氣泡孔之可能性，進而對於管線或是儀器維護上，能達到更長久之利用。

透過兩種參數之實驗結果，將發現，由於氣泡工法設置於溢洪口，導致在重現期距 2 年與 5 年兩種情境模擬較具有代表性，因此氣泡工法之數值模擬與分析，將以重現期距 2 年與 5 年兩種流量進行探討。

第四章 FLOW-3D 模擬結果

隨著電腦運算能力的提升，水理數值模型演算涵蓋的範圍已由早期較簡單的一維模式，逐漸發展至更為複雜的二維以及三維空間模式，雖然數值模式具有計算時間短、人力成本較少之優點；然而對於尺度較小的局部沖刷問題如本計畫案，仍有些因素並不容易完全掌握如防砂壩地形及邊界條件等，因此建立的數值模型需要進行驗證，驗證所需的資料則由先前渠槽試驗取得。

本計畫擬採用 FLOW-3D 建立數值模型，FLOW-3D 是一套算流體力學商業軟體，以有限差分法與控制體積之觀念，利用多區塊網格、流體體積分法等技術，解決三維流體的控制方程式。綜合上述，FLOW-3D 雖具有優點，仍需透過相關試驗數據進行驗證；為求氣泡工法之最佳設計參數，本計畫研擬以驗證後之縮尺模型，進行預測氣泡工法作用下防砂壩下游之沖刷坑變化，透過最佳之設計參數組合，選擇減緩沖刷效果比較良好的參數組合。

第一節 FLOW-3D 模式介紹

FLOW-3D 為一開發計算流體動力學之軟體，由 FLOW SCIENCE, INC 所研發，採用專門開發的數值技術來求解流體中的運動方程式，並以有限差分法與控制體積法將流體與固體之交界面結合至方程式中，並利用多區塊網格、流體體積分法等技術來求得瞬態的三維解，以解決多尺度，多物理場的流動問題。

一、控制方程式

1. 連續方程式

對於三維穩態不可壓縮黏性流體，FLOW-3D 之質量連續方程式

如下所示：

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (\text{式 4.1})$$

上式中， V_F 為流體通過網格的通量體積分率， ρ 為流體密度， A_x 、 A_y 、 A_z 為 x 、 y 、 z 方向流體通過的面積分率， $(u、v、w)$ 為 x 、 y 、 z 坐標方向的流體速度， R_{DIF} 為紊流擴散項， R_{SOR} 為質量源項， ξ 和 R 為座標轉換係數。

2. 動量方程式

對於三維穩態不可壓縮黏性流體，FLOW-3D 之動量方程式為 Navier-Stokes Equations，在直角坐標系統下之形式如下所示：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{式 4.2})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{式 4.3})$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (\text{式 4.4})$$

將上述 Navier-Stokes Equations 以及其他添加之附加項展開可得方程式如下所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned} \quad (\text{式 4.5})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \end{aligned} \quad (式 4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (式 4.7)$$

上式中， $(u、v、w)$ 為 $x、y、z$ 坐標方向的流體速度， (G_x, G_y, G_z) 為物體之總體加速度， $(f_x、f_y、f_z)$ 為 $x、y、z$ 方向之黏滯加速度， (b_x, b_y, b_z) 為通過多孔隙介質或閘板時的水流耗損， (u_w, v_w, w_w) 為流場中模擬物體之速度， (u_s, v_s, w_s) 為流體表面速度， δ 為壓力源項指標，若為靜壓力時， $\delta=1$ ，若為停滯壓力時， $\delta=0$ 。

二、數值方法

(一)多重區塊結構性網格(Multi-Block Structure Grids)

模式中可透過不同大小網格進行相互連接，將模擬範圍分割為不同大小之區塊，進而增加對複雜流動區域的靈敏度與準確度，增加重要流動段的計算，提高模式計算效率，能夠加有效的使用網格，如彎曲流動區域或小區域需要高分辨率的問題，可透過更精細的網格描述數，使 Flow-3D 能有更精準的模擬結果。

(二)FAVOR 技術(Fraction Area/Volume Obstacle Representation Method)

為完整描述複雜邊界之形貌，傳統的 FDM (Finite Difference Method) 技術需要透過較小且較多之網格進行編制才容易描述，但其結果往往仍產生鋸齒狀邊界，透過 FAVOR 技術可避免這問題，此技

術原理為定義網格的六面其流通面積比例，及可自由通過之體積比率，這些部分面積與體積將會結合到有限體積法所使用的運動方程式中，作為流體與其他物質其交界面面積的決定方法，對於其計算結果能夠達到更高精度。如下圖 4-1 所示，傳統的 FDM (Finite Difference Method) 須經較多網格數才容易達到相同要求，而 FAVOR 技術僅須透過少數網格，即能表示且結構簡單及精確。

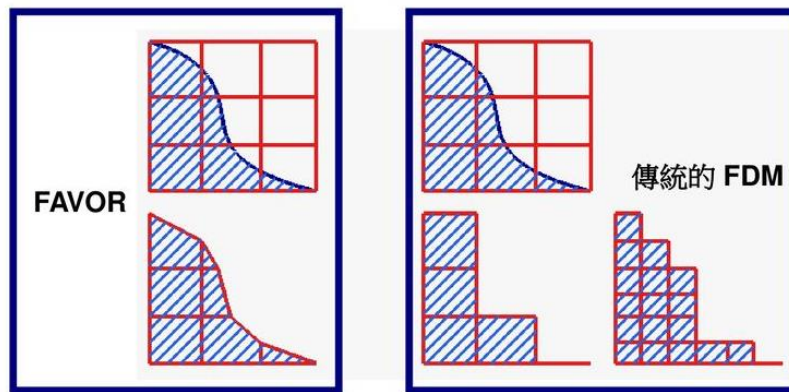


圖 4-1 FAVOR 技術邊界定義示意圖

(三)流體體積法(Volume of Fluid Method)

流體體積法為 Hirt and Nichols 二人於 1981 年所提倡，為針對自由表面或兩種不相容之流體交界之數值處理計算方式，此方法可以準確處理介面之問題，並可得知該分離介面之運動情形，並使得網格可以較有效符合一般幾何形狀。

流體體積法透過函數 F 來表示，函數 F 定義為每單位體積內某流體之體積分率，當 $F=1$ 時表示單位體積內充滿流體；當 $0<F<1$ 時，表示單位體積內有自由液面存在；而當 $F=0$ 時則表示單位體積內為氣體。模式中自由液面追蹤以體積函數 F 定義，而 VOF 理論方程式如下所示：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (\text{式 4.8})$$

V_F 為流體通過的體積分率， $(A_x、A_y、A_z)$ 分別為 x、y、z 方向流體通過的面積比率(Fractional area)， F_{DIF} 、 F_{SOR} 分別為流體體積的擴散項與質量源。

(四) RNG (Renormalization Group) 紊流傳輸模式

非層流之流況中，有許多種描述紊流流況之模式，在 FLOW-3D 軟體中提供包含 RNG 模式(Renormalized group model)、普朗特混合長度模式(Prandtl mixing length model)、單一方程紊流能量模式(One equation, turbulent energy model)、雙方程 k- ϵ 模式(Two equations k- ϵ model)與大型渦流模擬模式(Large eddy simulation model)共五種紊流模式。而普朗特混合長度模式、k- ϵ 與 RNG 模式適合用於河段無構造物，k- ϵ 與 RNG 模式在結構物後方的迴流會解的較不佳，但於時間上比大型渦流模擬模式迅速。

研究之流動屬紊流流動，考慮到底床沖刷之模擬會有較大之變化，因此使用修正紊流模式(RNG k- ϵ)，此模式是由標準 k- ϵ 模式修正而來，此方法是應用適當之統計方法推導出平均紊流數量、紊流動能與其耗散率，相較於標準 k- ϵ 模式更能精準的描述複雜之剪切流動問題，以及具有高應變率、渦流之區域及低雷諾數之流況。

在 FLOW-3D 中，RNG 紊流傳輸模式之紊流動能與紊流動能消散方程式形式如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} \\ = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \epsilon_T \end{aligned} \quad (\text{式 4.9})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} \\ = \frac{CDIS1 * \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 * G_T) + Diff_{\varepsilon} \\ - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \end{aligned} \quad (式 4.10)$$

其中 k_T 為紊流動能， P_T 為紊流動能產生項，在直角坐標下可表

示如下：

$$\begin{aligned} P_T = CSPRO \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right. \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left[A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ + \left. \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left[A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (式 4.11)$$

上式中， $CSPRO$ 紊流參數其值設定為 1.0， G_T 為浮力產生項並可

表示如下：

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (式 4.12)$$

$CHRO$ 為另一個紊流參數，其預設值為 0，但當模擬與熱浮

力流體有關的問題時，其預設值為 2.5。擴散項形式如下：

$$Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) \right\} \quad (式 4.13)$$

其中 α 為擴散係數。

由於紊流增加了動量的擴散，因此黏度也會增加，可表示如下：

$$\mu = \rho(v + v_T) \quad (式 4.14)$$

其中運動紊流黏度 v_T 為：

$$v_T = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (\text{式 4.15})$$

表 4-1 RNG 模式係數表

	RNG 模式
<i>CDIS1</i>	1.42
<i>CDIS2</i>	1.92
<i>CDIS3</i>	0.23
<i>CNU</i>	0.85
α	1.39

第二節 模式相關參數設定

一、泥砂沖刷設定－土砂參數

FLOW-3D 在泥砂沖刷模式設定中，可透過多種參數設定進行模擬不同屬性之土砂，包括屬土砂粒徑、密度等，此外可依據不同模擬情境，選擇適當之輸砂公式，透過選擇之經驗公式進行模擬泥砂之沖刷、搬運及堆積之情況。

(一)土砂基本參數設定

1. 土砂粒徑

依據混合後之石英砂其粒徑分布曲線，並將土砂分為 4 個區間，故分別採用 $D_{12.5}$ 、 $D_{37.5}$ 、 $D_{62.5}$ 、 $D_{87.5}$ 作為 0~25%、25~50%、50~75%、75~100% 的代表粒徑，其粒徑大小與所占百分比於表 4-2 所示。

表 4-2 模擬土砂粒徑表

代表粒徑	粒徑大小(mm)	所佔百分比(%)
$D_{12.5}$	0.515	25
$D_{37.5}$	0.633	25
$D_{62.5}$	0.749	25
$D_{87.5}$	1.002	25

2. 土砂密度

將購買石英砂進行土壤比重試驗，取的土砂比重為 2.622，經換算取得土砂密度為 $2622(\text{kg/m}^3)$ ，土壤比重試驗數據如下所示。

表 4-3 土壤比重試驗數據表

項目	數值
比重瓶重， $W_f(\text{g})$	164.040
29°C 下，比重瓶重+水重， $W_x(\text{g})$	661.090
30°C 下，比重瓶重+水重， $W_a(\text{g})$	661.240
乾土重， $W_s(\text{g})$	125.120
30°C 下，乾土重+比重瓶重+水重， $W_b(\text{g})$	738.760
30°C 下，土壤比重， $G_{s1} = \frac{W_s}{W_s + W_a - W_b}$	2.628
20°C 下，土壤比重， G_s	2.622

3. 靜止土體最大泥砂體積濃度(Maximum packing fraction)

該參數未考慮泥砂的孔隙特性，使泥砂運動的模擬結果能夠更精確，應實際的情況中，單位體積內實際土砂顆粒僅佔一部份，其餘為空氣或水，因此靜止土體最大泥砂體積濃度應參考土壤孔隙率(n)取得該參數值，其計算值為 $(1 - n)$ ，因此經過土壤含水量試驗可以推求孔隙率，間接推求此參數。如下表 4-4 實驗數據，取得孔隙率 $n = 0.438$ ，靜止土體最大泥砂體積濃度 $= 0.562$ 。

表 4-4 土壤含水量試驗數據表

項目	數值
土壤比重， G_s	2.622
容器重+乾土重， $W_a(g)$	175.840
容器重， $W_b(g)$	15.310
容器體積， V_b (cm^3)	108.880
乾土單位重， $\gamma_d = \frac{W_a - W_b}{V_b} (\text{g/cm}^3)$	1.474
孔隙比， e	0.778
孔隙度， n	0.438
靜止土體最大泥砂體積濃度	0.562

(二)輸砂公式選定

河床泥砂之沖淤為河川形貌變化的過程，其造就河川的底床變化，此外亦為維持河道動態幾何形狀的穩定，FLOW-3D 模式中，提供三個推移載泥砂輸砂公式分別為 Meyer-Peter Muller、Nielsen 以及 Van Rijn。推移載泥砂輸砂方程式為計算河床面上的泥砂以滾動(Rolling)、滑動(Sliding)、或是跳躍(Saltation)方式運動之輸砂量。

1. Meyer-Peter & Muller

此公式在歐洲地區曾經被廣泛利用於評估河道中推移載的輸砂量，該公式之建立是透過大量實驗資料所完成的，下表為試驗資料的範圍。

表 4-5 Meyer-Peter & Muller 試驗數據表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.4~30
泥砂比重	1.25~4
坡降(%)	0.4~2
水深(m)	0.01~1.2
應用地區	山區河流或海岸

2. Nielsen

Nielsen 於 1992 年進行試驗，其研究主要為探討沿岸沉積物輸砂的情形，包括波浪與沿海底床其邊界層之交互作用，其輸砂公式多半應用於沿海地區其底床載之輸砂量之推估。

表 4-6 Nielse 試驗數據表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.69~28.65
泥砂比重	1.25~4.22
坡降(%)	0.001~0.01
應用地區	海岸

3. Van Rijn

主要研究為以水流強度與泥砂顆粒大小做為參數，表示出泥砂顆粒流速與推移載跳躍(Saltation)之運動特性，並在平面渠床條件下，透過數值方法探討底床泥砂顆粒之運動方程式，將輸砂率以無因次參數推得。

表 4-7 Van Rijn 試驗數據表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.2~2
坡降(%)	0
福祿數(Fr)	<0.9
應用地區	平原河流或海岸

此次研究選擇的是 Meyer-Peter&Muller 提出的方程式，由於他們的研究區域是位於瑞士山區，其提出輸砂公式為針對山區溪流的泥砂輸送所迴歸出的推移載運輸方程，而本研究此次的模擬區域亦位於山區河川，因此選擇 Meyer-Peter&Muller 作為模擬用之輸砂公式較 Nielsen、Van Rijn 更為合適。

(三)常規化臨界剪應力參數 θ_{cri} (Critical Shield number)

對於非黏性沉積物，常規化臨界剪應力參數為評估推移載受河床剪應力後是否足以開始運動，此參數為泥砂顆粒被啟動之臨界值，當河床剪應力大於臨界剪應力時，則泥砂將開始運動。

根據圖 4-2 中紅線所示，由 Soulsby-Whitehouse 於 1997 年所提出，其為估算 θ_{cri} 之方程式，在相同粒徑範圍中，相較 Guo 於 2002 年透過實驗得出的經驗公式更為準確，因此將透過其經驗公式估算 θ_{cri} 參數值，透過 $D_{12.5}$ 、 $D_{37.5}$ 、 $D_{62.5}$ 、 $D_{87.5}$ 之粒徑大小推估而得，各粒徑分段之 θ_{cri} 計算如所示。

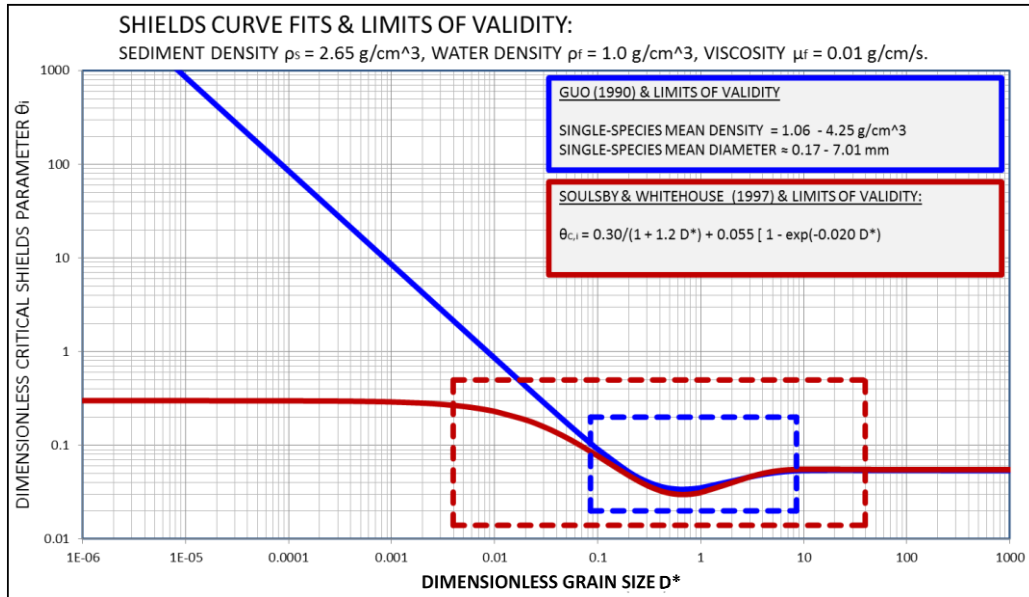


圖 4-2 Shields 曲線及其有效範圍(黃林願, 2017)

表 4-8 θ_{cri} 推估計算表

代表粒徑	粒徑大小(mm)	D^*	θ_{cri}
$D_{12.5}$	0.515	25.135	0.031
$D_{37.5}$	0.633	18.798	0.030
$D_{62.5}$	0.749	15.892	0.030
$D_{87.5}$	1.002	12.934	0.031

(四)河床面粗糙度/ d_{50} 比

在 FLOW-3D 中為了完整計算泥砂輸送的情況，需計算床界面之剪應力，以便得知目標粒子是否足以被移動。床界面之剪應力可利用壁面定律(standard wall functions)進行推算，與河床面粗糙度(k_s)與 D_{50} 比值有關。

而由於河床面粗糙度(k_s)較無法直接觀測或計算，因此採用過去研究之經驗方程式來了解 k_s 與代表粒徑尺寸之間的相關性。為 Cheng 於 2016 年所列出之 k_s 與 D 之間的經驗關係，如表 4-9 所示。

表 4-9 河床面粗糙度(ks)與代表粒徑尺寸關係式之比較表

Reference	河床面粗糙度(ks)
Meyer, Peter & Muller (1948)	D_{90}
Kamphuis (1974)	$2D_{90}$
Hey (1979)	$3.5D_{84}$
Van Rijn(1982)	$3D_{90}$
Whiting and Dietrich (1990)	$2.95D_{84}$
Ferguson (2007)	$3.1\sim4.0 D_{84}$
Ferguson (2013)	$2.8\sim3.5 D_{90}$

資料來源:Cheng, 2016

由於本次研究採用 Meyer-Peter&Muller 作為模擬用之輸砂公式，故根據 Meyer-Peter&Muller 之河床面粗糙度經驗式得知 ks 等於 D_{90} 。因此依據實驗用之土砂其粒徑分布曲線得知 D_{50} 和 D_{90} 值（分別為 0.685mm 和 1.043mm），故於 FLOW-3D 模式將河床面粗糙度/ d_{50} 比設為 1.522。

(五)挾帶係數(Entrainment Coefficient) &河床載係數(Bed Load Coefficient)

參考黃林願於 2017 年所進行之試驗以及模擬，針對彼此間完全獨立的常規化臨界剪應力參數(Critical Shield number)、挾帶係數(Entrainment Coefficient)、河床載係數(Bed Load Coefficient)組成的三個參數進行敏感性分析，依據其成果，常規化臨界剪應力參數(Critical Shield number)對沖刷成果最為敏感，其次為河床載係數(Bed Load Coefficient)，而挾帶係數(Entrainment Coefficient)相較前面兩者較不敏感，因此本研究在挾帶係數(Entrainment Coefficient)上採用預設值 0.018，而河床載係數(Bed Load Coefficient)參考 FLOW-3D 之使用手

冊表示，對於 Meyer-Peter&Muller 輸砂公式中，建議的參數值為 5.0~13.0，而 5.0 為低運移之土砂，相反的 13.0 為具有高輸砂性之土砂，而其中 5.7 是砂礫石的典型採用值，而本次實驗採用非凝聚性之石英砂，容易受水流沖刷故採用 13.0 做為此次模擬之參數值。

二、模型建置設定

FLOW-3D 建立渠槽沖刷實驗之數值模擬，模型設定區分為六個階段進行參數輸入與調整，而六個階段分別為基礎設定、物理性質設定、流體性質設定、幾何模型網格與邊界條件設定、輸出資料設定、模式執行方法設定，以下為各階段之分述：

(一)基礎設定

該階段為指定一些基本參數，如模擬時間、單位設定、模擬流體壓縮性等，以使後續模擬具有一致性的標準。而此次數值模擬時間採用時間完成之時間約為 4-5 小時，整體單位設置採用 SI 制，流體設為不可壓縮流之流體。

(二)物理性質設定

FLOW-3D 包含多種模型，可用於在模擬中設置不同的物理機制。根據實際案例中出現的物理現象，在此階段選項中將會調整四個物理性質參數，包括密度估算(Density Evaluation)、重力和非慣性參考坐標(Gravity and Non-inertial reference frame)，泥砂沖刷設定(Sediment Scour)以及黏滯性和紊流(Viscosity and Turbulence)。密度估算，由於水槽中流體與沉積物之間的物理相互作用，當流體挾帶泥砂時，流體的密度將發生變化，因此設定密度為其他變量函數(如溫度、泥砂濃度等)；重力和非慣性參考坐標、黏滯性和紊流分別選擇重力加速度 $9.81(\text{m/s}^2)$ 與 RNG 紊流傳輸模式。

(三)流體性質設定

FLOW-3D 可依據不同流體屬性，進行其屬性參數設定，在此次模擬分別選擇模式預設之流體參數，分別為 20°C 的水以及 15°C 空氣，做為模擬之流體。

(四)幾何模型網格與邊界條件設定

1. 幾何模型網格

透過建立幾何，指定網格大小，以及設定個幾何形狀之性質，若性質為底床泥砂(packed sediment)，則需額外輸入各區間泥砂粒徑所佔之百分比。

依據實驗配置之壩體與渠道幾何大小，制定試驗段為長約 1.82m，寬為 0.97m，而壩體大小，主壩長寬高約 0.97m × 0.159m × 0.145m，副壩 0.97m × 0.51m × 0.58m，模型材質設定為 solid。鋪砂位置為兩壩體間與副壩下游處，長度分別約為 0.194m 與 0.068m，材質設定為 packed sediment，如下圖 4-3 為模型幾何示意圖，並將 $D_{12.5}$ 、 $D_{37.5}$ 、 $D_{62.5}$ 、 $D_{87.5}$ 各佔四分之一輸入。

為節省數值模擬運算上的時間，將模型區分為兩種網格設置，並依據 FLOW-3D 使用手冊建議，多個網格區塊劃分(Multi-Block Gridding Technique)建議避免兩個相鄰區塊差異大，其兩網格比例為 2:1 下視為可接受的最大值，而由於考量小流量之沖刷變化較小，故採用較小之網格，以更能接近實驗變化，本計畫網格參數如表 4-10 所示。

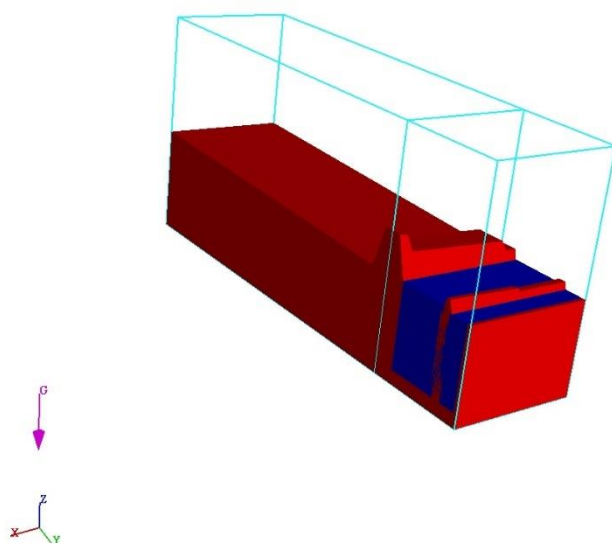


圖 4-3 模型幾何示意圖

表 4-10 網格參數設定表

流量編號	Mesh block1	Mesh block2
Q_2, Q_5, Q_{10}	$0.025 \times 0.025 \times 0.025$	$0.015 \times 0.015 \times 0.015$
Q_{25}, Q_{50}	$0.05 \times 0.05 \times 0.05$	$0.025 \times 0.025 \times 0.025$

2. 邊界條件

上游邊界條件設定為定量入流 Volume flow rate，為使溢流之流體與粒子能順利排出，避免影響模擬結果，將下游邊界設為出流邊界 Outflow，而下游處網格區塊連接面設定為 Symmetry，底部、邊壁採用邊牆 Wall，由於河道以及防砂壩為對稱，為了節省計算時間，將模型裁切為一半並定義中間處之邊界條件為 Symmetry，頂部邊界則採用預設項 Specified pressure，並定義含流體-水的體積分率為零，意旨流體-空氣則為百分之百，代表此邊界只會有空氣存在，邊界設定如表 4-11、圖 4-4 所示。

表 4-11 邊界條件設定表

邊界名稱	Mesh block1	Mesh block2
$X_{\min}$	Wall	Wall
$X_{\max}$	Symmetry	Symmetry
$Y_{\min}$	Volume flow rate	Symmetry
$Y_{\max}$	Outflow	Outflow
$Z_{\min}$	Wall	Wall
$Z_{\max}$	Specified pressure	Specified pressure

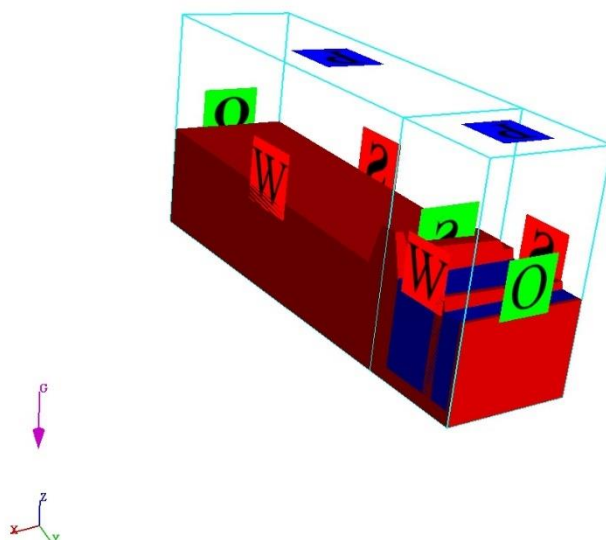


圖 4-4 模擬邊界條件示意圖

而上游處之流量與水位設定，將依據各組實驗之觀察值作為輸入條件，輸入之流量與設定的水位如所示。

表 4-12 上游入流參數設定表

編號	水流量(cms)	水位(m)
Q_{50}	0.00691	0.0630
Q_{25}	0.00595	0.0622
Q_{10}	0.00337	0.0476
Q_5	0.00261	0.0358
Q_2	0.00168	0.0159

3. 氣泡參數設計

氣泡孔大小是以直徑 0.11 公分之鐵釘鑽取，其大小小於網格之設計，而過小的網格所耗時之模擬時間過長，故本次模擬採用近似的方式進行氣泡孔口之設計，將各單一之氣泡孔，假設為一連續之長條形之氣泡孔，長寬為 4cm x 0.11cm，如圖 4-5 所示，並將該面積設為一持續供應氣體之斷面，而斷面以固定流量來產生氣體。

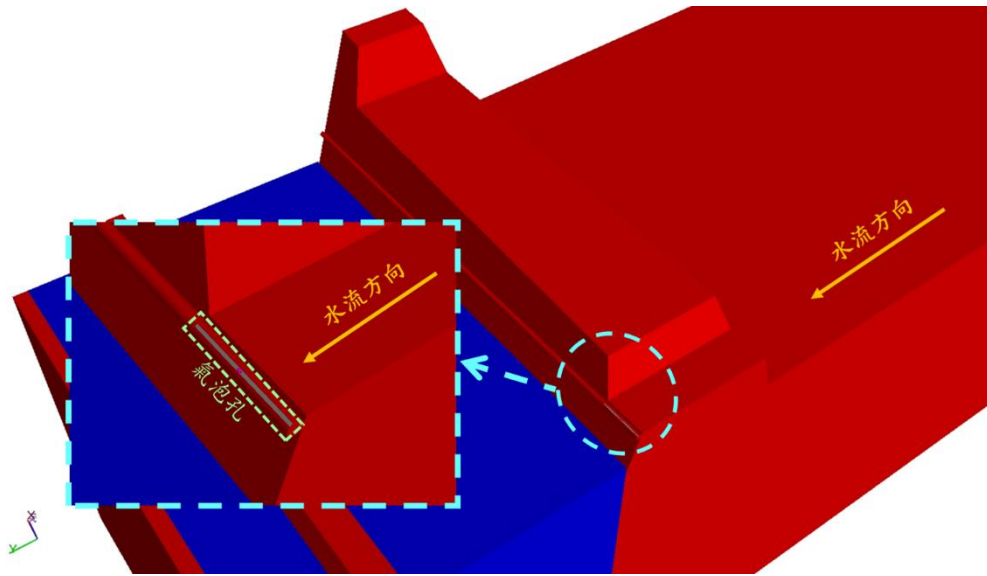


圖 4-5 氣泡孔口設計示意圖

依據實驗結果，提出將之最佳的空氣與水流量比(QA/QW)與建議之氣泡孔入射角度進行數值模擬，而氣泡設置，因已知氣泡孔斷面大小，可透過制定該斷面之座標點位，並定義該斷面會持續產生氣泡，而氣泡量為實驗設計之氣泡流量，進而模擬氣泡工法。

(五)輸出資料設定

該處設定系主要為，數值模擬結果輸出資料設定。首先選擇資料的輸出時間，由於模擬時間設定為 4-5 小時，故設定每 2 秒產生一個輸出檔案以利觀察其變化情形。其次在數據輸出資料性質上，可依據所需勾選泥砂濃度、水流水理資料等資料。

(六)模式執行方法設定

此步驟為設定前述之方程式以及壓力和黏性應力解析的數值解。依據 FLOW-3D 操作手冊建議，當時間步長(time step)過大，導致收斂誤差呈現變大時，則會自動調整縮小時間步長，故起步時間步長為 0.001~0.0001 秒，依據不同流量進行調置整；壓力求解以 GMRES(Generalized Minimum Residual)法，因 GMRES 法具有良好的收斂性及對稱性，適用於大部份之流動問題；而黏性應力設定為顯性，需限制在每個週期的時間步長以保持穩定，其餘求解設定如下表 4-13 表 4-13 所示。

表 4-13 數值控制參數設定表

時間步長控制	
Time-step controlled	
起步時間步長	0.001~0.0001
Initial time step	
最小時間步長	10e-8
Minimum time step	
時間步長控制	穩定性及收斂性
Time-step size controlled by	Stability and convergence
壓力求解選項	
Pressure solver options	
隱性求解	廣益最小剩餘法
Implicit	GMRES(Generalized Minimum Residual Method)

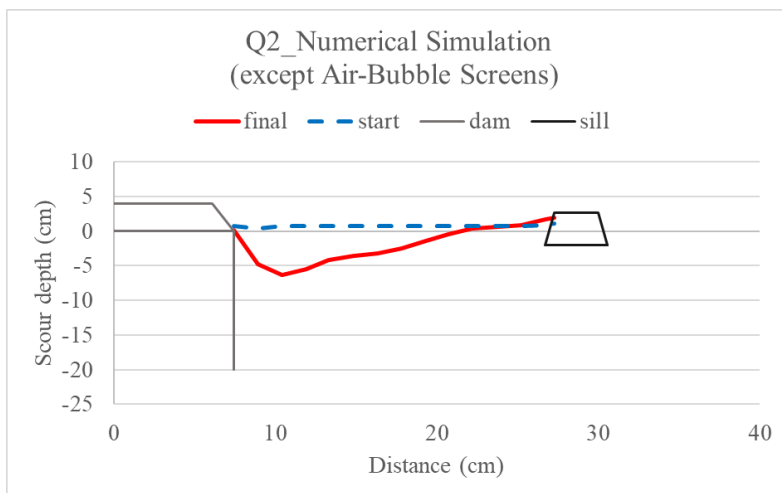
表 4-13 數值控制參數設定表(續)

顯性/隱性求解選項	
Explicit/Implicit solver options	
黏性應力	顯性
Viscous stress	Explicit
對流	顯性
Advection	Explicit
自由表面壓力	顯性
Free surface stress	Explicit
流體體積對流項	自動設定
Volume-of –fluid advection	Automatic
動量對流項	一階
Momentum advection	Frist order
流體求解項	解動量與連續方程式
Fluid flow solver option	Solve momentum and continuity equations

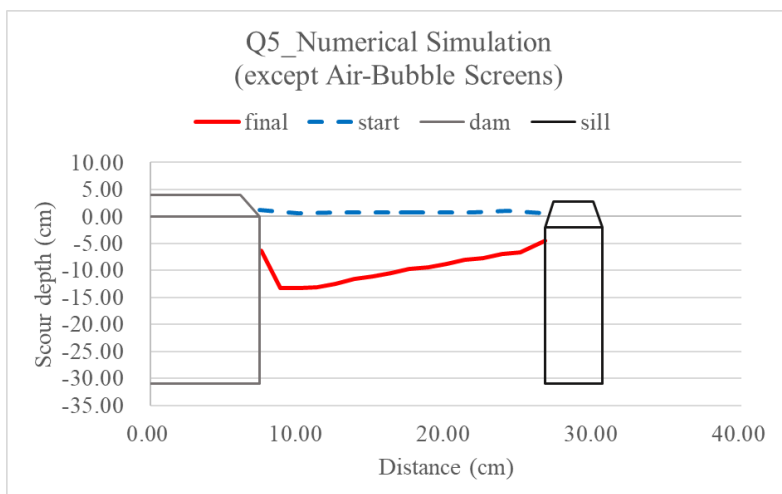
第三節 數值模擬結果與討論

一、 無氣泡工法模擬之結果

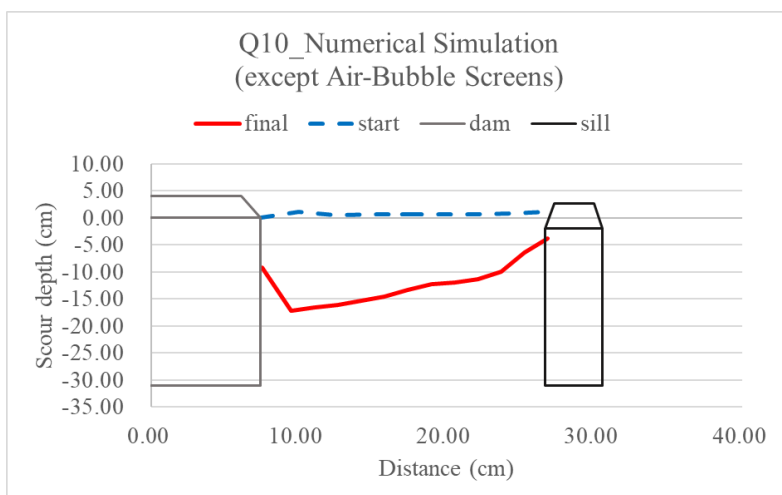
依據前節參數設定，隨著水流流量增大，FLOW-3D 模擬下游沖刷情況，其沖刷坑的深度隨流量加深，如圖 4-6 所示，以藍虛線表示初始沖刷地形，以紅實線表示模擬沖刷結果之地形，結果顯示在 Q_2 之結果，下游有堆積之情況，與縮尺實驗結果相同；在 Q_{50} 與 Q_{25} 之模擬結果看出，因水流本身流量較大，且實驗之土砂本身為不具凝聚力且具高輸砂性之石英砂，故模擬出之結果，壩體溢洪口處下游之土砂皆被水流嚴重沖刷，而導致壩基沖刷嚴重。



(A) 重現期距 2 年流量之模擬結果

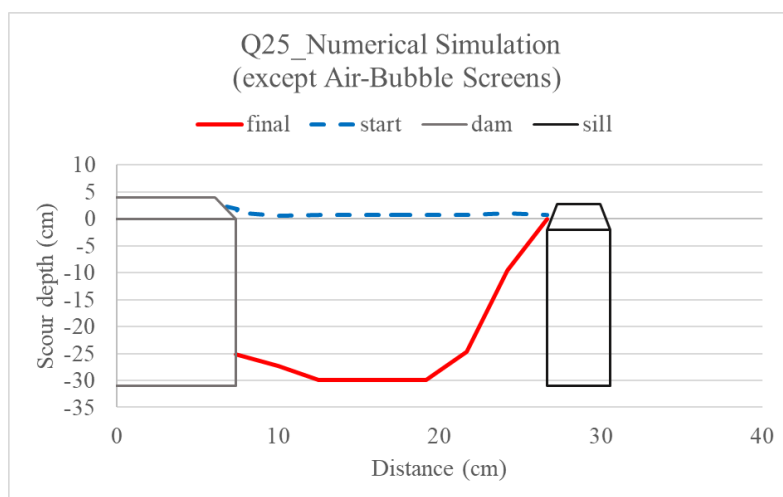


(B) 重現期距 5 年流量之模擬結果

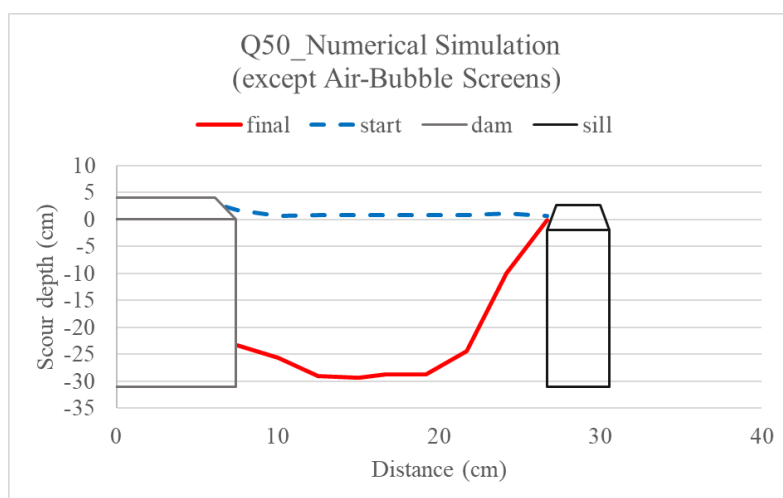


(C) 重現期距 10 年流量之模擬結果

圖 4-6 FLOW-3D 模擬無氣泡工法之結果圖



(D) 重現期距 25 年流量之模擬結果



(E) 重現期距 50 年流量之模擬結果

圖 4-6 FLOW-3D 模擬無氣泡工法之結果圖

依據模擬結果顯示，最大沖刷深度隨著流量的變化呈現增加之趨勢，而壩基的沖刷情況亦受流量之影響，當情境模擬之流量變大時，則有明顯之變化，如表 4-14 所示。

表 4-14 FLOW-3D 模擬之沖刷深度表

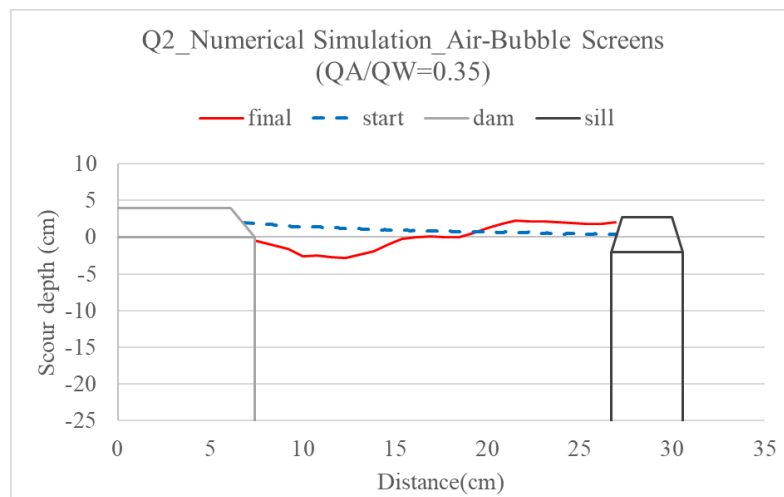
水流量	壩基沖刷深(m)	最大沖刷深(m)
Q_{50}	0.234	0.307
Q_{25}	0.251	0.307
Q_{10}	0.093	0.197
Q_5	0.073	0.141
Q_2	0.032	0.074

二、氣泡工法模擬之結果

由氣泡工法之實驗結果顯示，由於當模擬重現期距為 10、25 與 50 年時都因流量較大而導致水流溢至複式斷面，進而使其實驗結果趨於一致，並非因氣泡工法參數變化有明顯改變，故本計畫在數值模型建立上，將僅對於重現期距 2 與 5 年的實驗進行模擬，此外依據實驗結果及未來工法設計上，在空氣與水流量比(QA/QW)部分將模擬，當流量比為 0.35 時之情況，而在氣泡孔入射角度之實驗，則會選擇以 30 度進行模型建立。

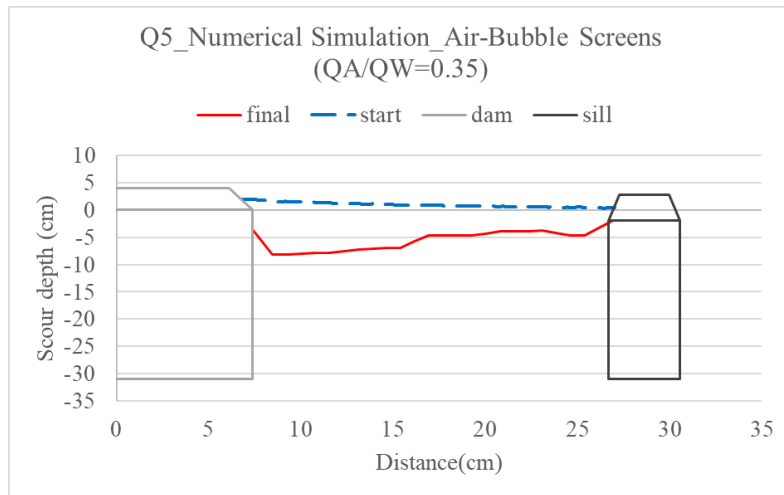
(一)空氣與水流量比(QA/QW)數值模擬結果

根據先前建立無氣泡工法模型，透過將氣泡工法之氣泡孔設置於溢洪口處且垂直打入，並依據先前實驗設計之空氣流量進行參數輸入後模擬實驗，而模擬結果顯示如圖 4-7 所示。



(A)重現期距 2 年流量之模擬結果

圖 4-7 FLOW-3D 模擬氣泡工法(QA/QW=0.35)之結果圖



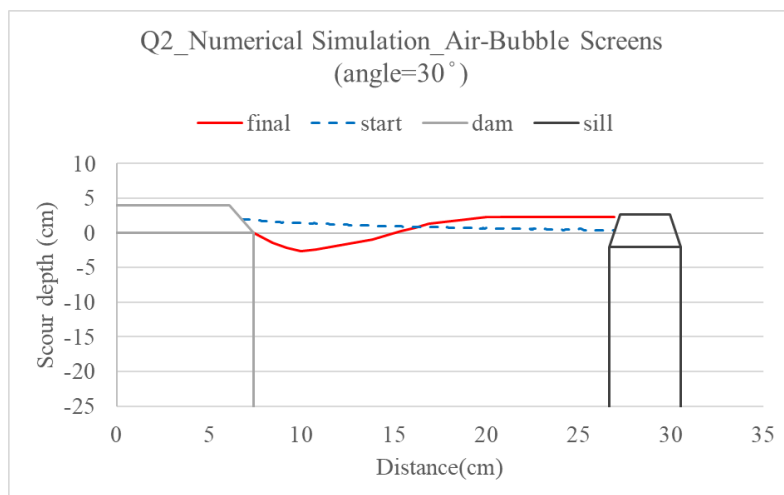
(B)重現期距 5 年流量之模擬結果

圖 4-7 FLOW-3D 模擬氣泡工法(QA/QW=0.35)之結果圖

結果顯示隨著流量變大而深度增加，而在重現期距 2 年流量其因為流量較小且水流強度因氣泡工法之作用，導致下游泥砂受沖刷後但水流強度減弱而於副壩前堆積。

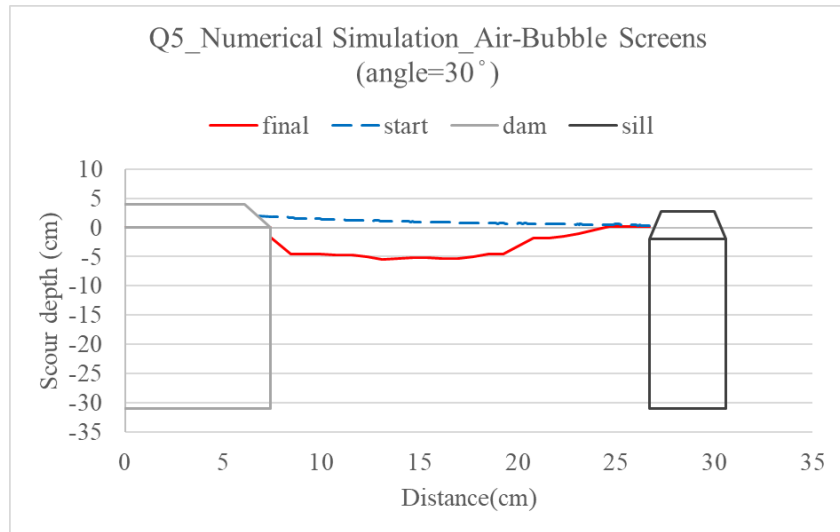
(二)氣泡孔入射角度數值模擬結果

依據實驗結果，進行氣泡孔入射角度為 30 度之數值模擬建立，其空氣與水流量比(QA/QW)亦為 0.35，主要改變的為將溢洪口的氣泡孔旋轉 30 度，以達到不同之入射角度，而實驗結果如圖 4-8 所示。



(A)重現期距 2 年流量之模擬結果

圖 4-8 FLOW-3D 模擬氣泡工法(入射角度=30 度)之結果圖



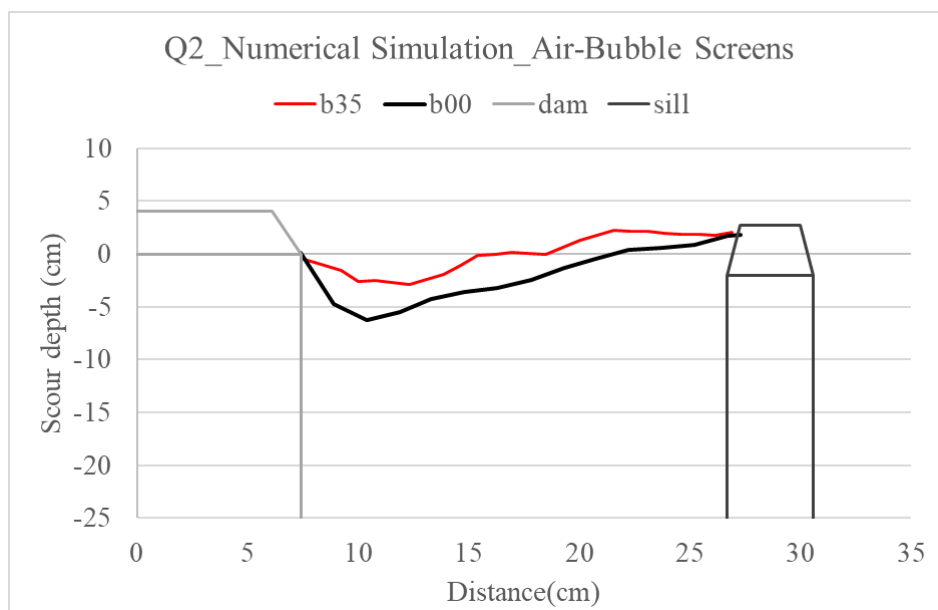
(B)重現期距 5 年流量之模擬結果

圖 4-8 FLOW-3D 模擬氣泡工法(入射角度=30 度)之結果圖

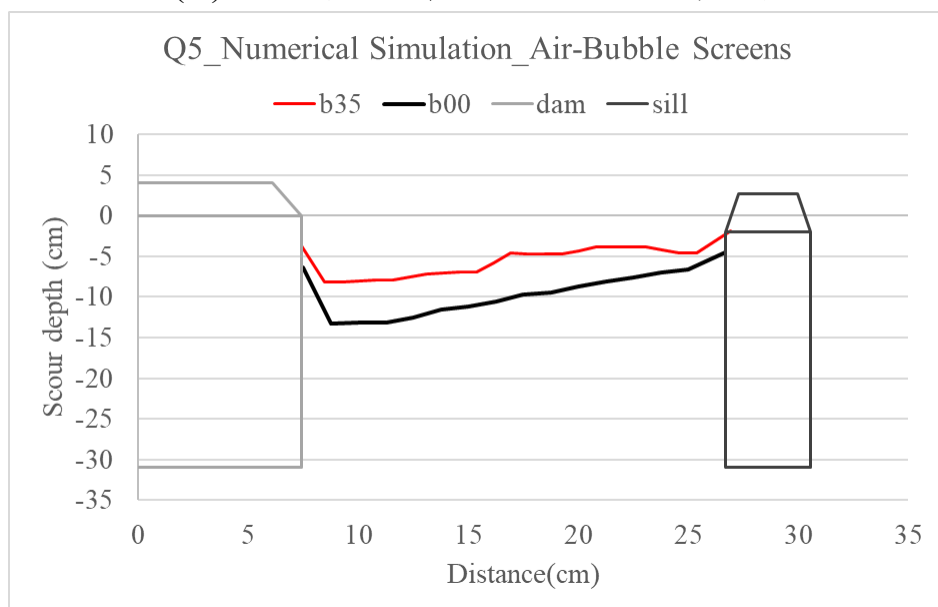
大致模擬出之現象結果皆類似於垂直打入之結果，與無氣泡工法之模擬比對後，沖刷情況皆有改善。

三、 數值模擬結果與討論

模擬結果皆能看出，透過氣泡工法之設計，下游沖刷深度皆有減緩之趨勢。透過空氣的打入，減弱水流之動能，以達到減緩沖刷之情況，而依據圖 4-9、圖 4-10 所示，透過氣泡工法的設計，最後的沖刷地形確實因此改善，且與實驗的結果雷同，都具有減緩壩基與最大沖刷深度的作用。

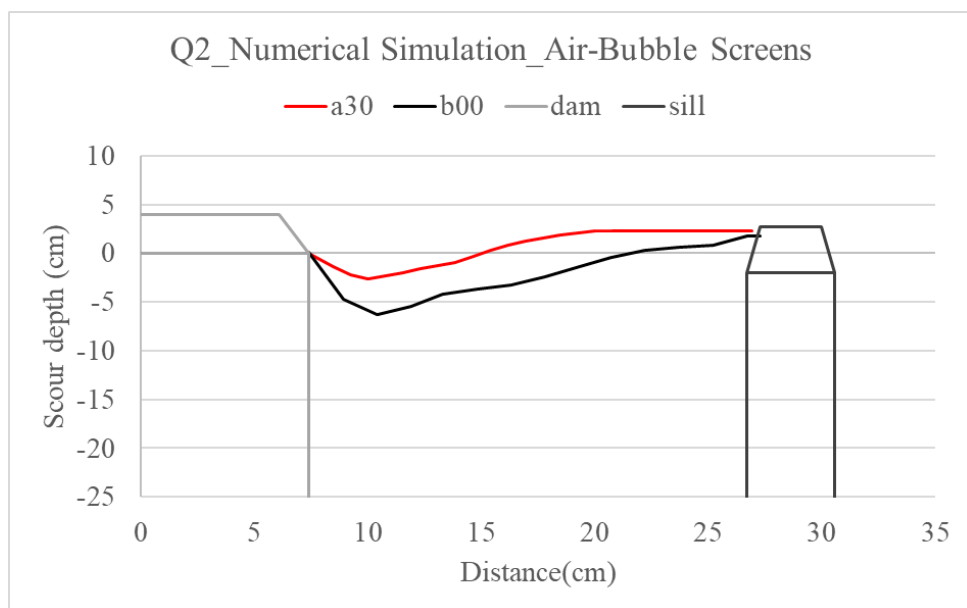


(A)重現期距 2 年流量之模擬比對結果

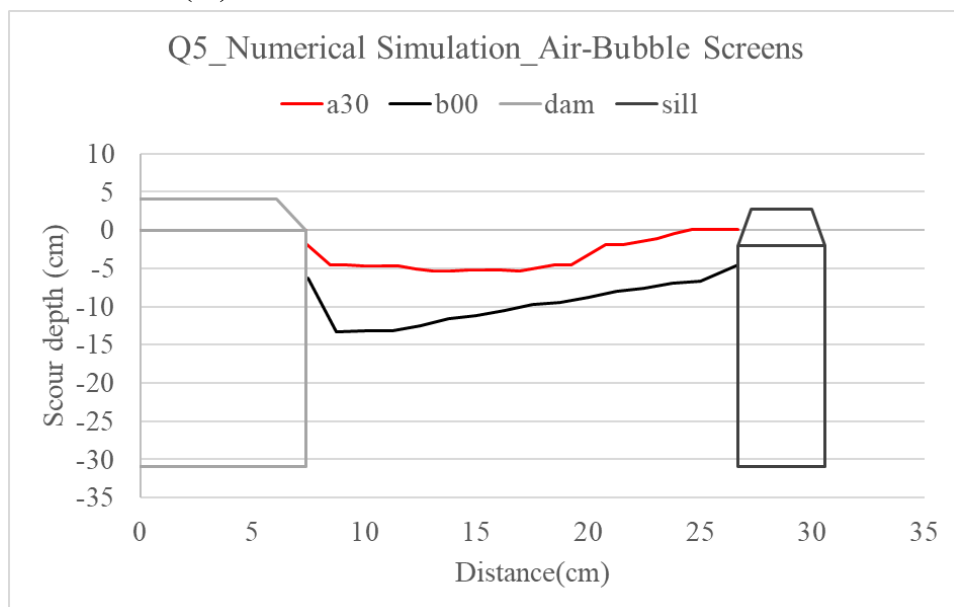


(B)重現期距 5 年流量之模擬比對結果

圖 4-9 FLOW-3D 氣泡工法入射角為 0° 之比對結果圖



(A)重現期距 2 年流量之模擬比對結果



(B)重現期距 5 年流量之模擬比對結果

圖 4-10 FLOW-3D 氣泡工法入射角為 30° 之比對結果圖

第五章 結果與討論

第一節 無氣泡工法之實驗與數值模擬比較

本計劃為了確保數值模擬之結果是否符合與實驗相符，將會對於壩體溢洪口中心處之下游沖刷深度變化進行比較，以及對於壩體上游處之平均流速進行比對，以確認 FLOW-3D 之模擬結果符合實驗。

一、上游流速比較

透過擷取模式上游段之表面流速，如下圖 5-1，圖中箭頭為資料選取處，比對縮尺實驗中所量測之結果。如表 5-1 所示，兩者流速之差異上，模擬結果多半大於實驗測量，但差異性不大。

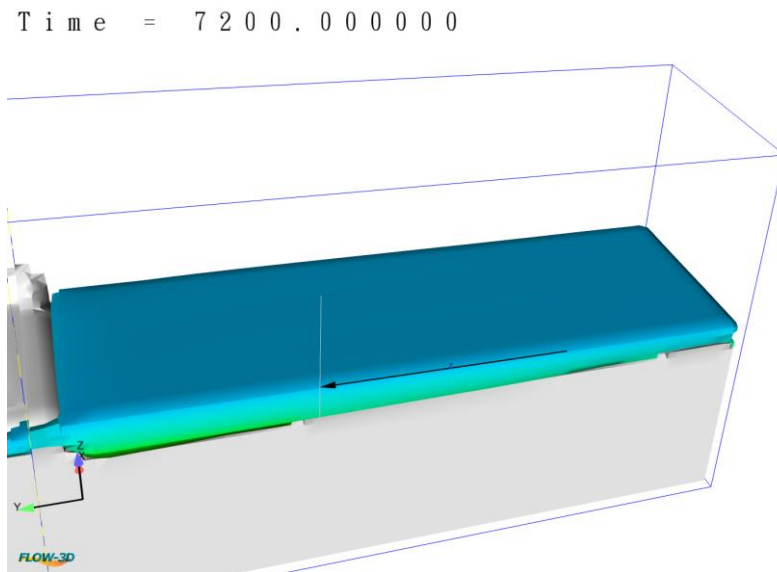


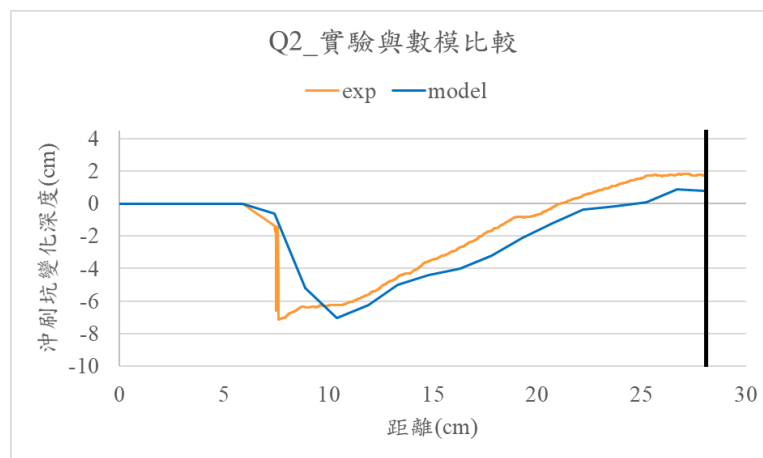
圖 5-1 FLOW-3D 流速資料擷取示意圖

表 5-1 實驗與數模流速比較表

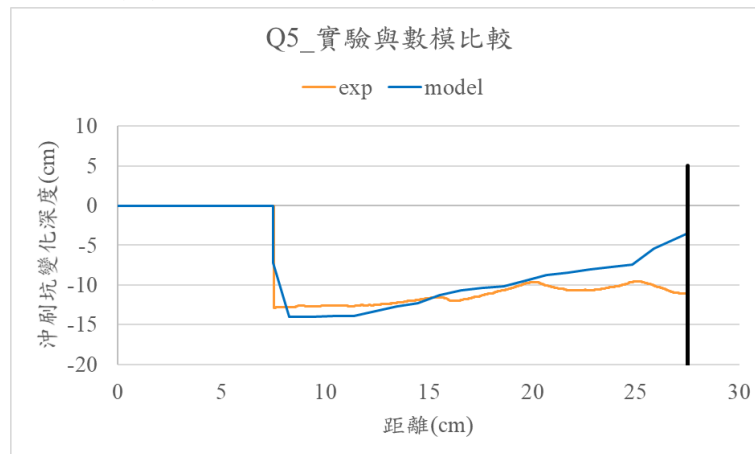
水流量	實驗流速(m/s)	數模流速(m/s)
Q_{50}	0.086	0.090
Q_{25}	0.076	0.086
Q_{10}	0.063	0.062
Q_5	0.062	0.078
Q_2	0.057	0.051

二、沖刷變化剖面比較

依據 Agisoft Metashap 所建立之前後地形相減後，取得淨高程變化，另擷取 FLOW-3D 中各不同情境之沖刷變化深，透過兩組數據，進行地形變化之比較，如圖 5-2 所示，可看出對於較小流量之結果，較相近於實驗，而在大流量上，沖刷有稍微高估之現象，可由流速比較得知，因水流速有較高之趨勢，導致沖刷深度略大於縮尺實驗之結果，如表 5-2 所示，但整體上，數模之沖刷結果與實驗近似。

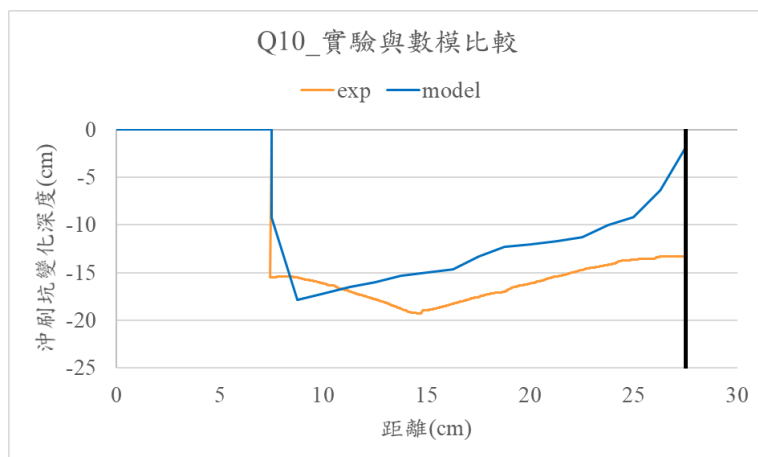


(A) 重現期距 2 年流量下沖刷變化

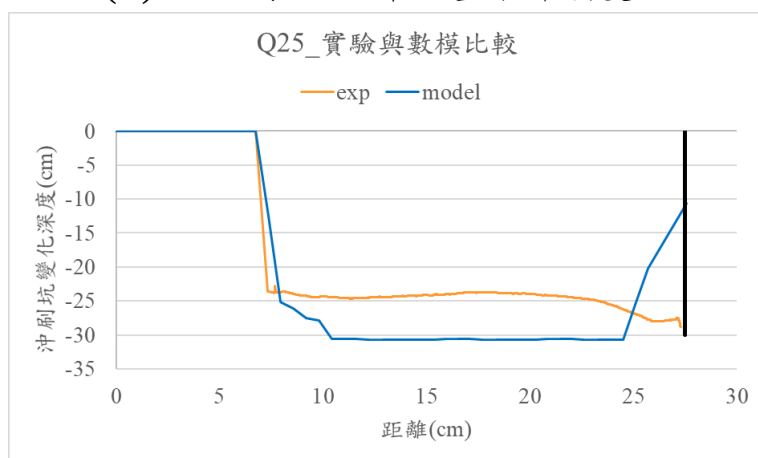


(B) 重現期距 5 年流量下沖刷變化

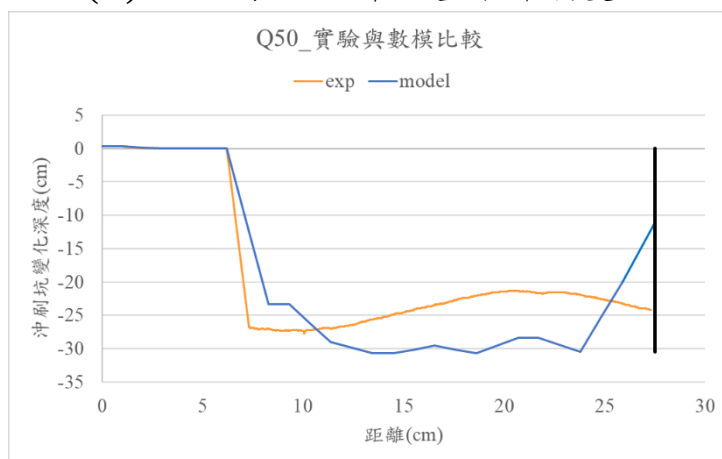
圖 5-2 無氣泡工法之數模與實驗對沖刷變化比較圖



(C) 重現期距 10 年流量下沖刷變化



(D) 重現期距 25 年流量下沖刷變化



(E) 重現期距 50 年流量下沖刷變化

圖 5-2 無氣泡工法之數模與實驗對沖刷變化比較圖

表 5-2 實驗與數模沖刷深度比較表

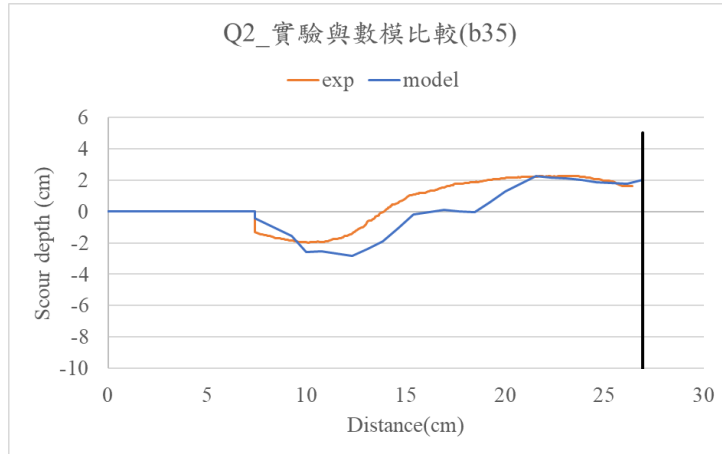
水流量	Experiment			Model		
	壩基沖刷深度 (m)	最大沖刷深度 (m)	壩基沖刷深度 (m)	誤差百分率 (%)	最大沖刷深度 (m)	誤差百分率 (%)
Q_{50}	0.256	0.277	0.234	-55.75%	0.307	1.04%
Q_{25}	0.236	0.281	0.251	-42.46%	0.307	9.20%
Q_{10}	0.164	0.172	0.093	-43.60%	0.197	14.86%
Q_5	0.126	0.129	0.073	6.48%	0.141	9.51%
Q_2	0.073	0.073	0.032	-8.67%	0.074	10.82%

依據上游流速與沖刷變化剖面比較，可以了解 FLOW-3D 對於此次縮尺實驗之模擬，雖然沖刷深度模擬結果略深於縮尺實驗，但整體之趨勢是相當接近的，因此未來在流場變化之觀測上，係依據其模擬結果進行觀察。

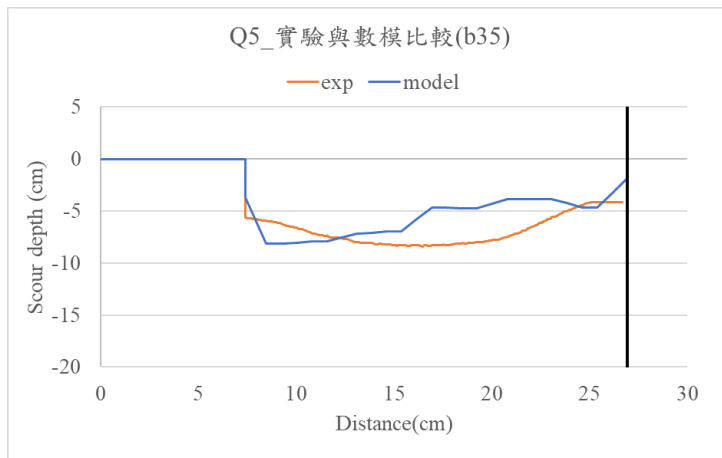
第二節 氣泡工法之實驗與數值模擬比較

依據實驗之參數設計，將其輸入於數值模擬，而將各模擬結果比對實際縮尺實驗結果，來確認該模擬結果與實驗的相似性，以利後續流場變化上的觀測數據的擷取使用。

為氣泡工法實驗的第一部分，設空氣與水流量比(QA/QW)為變化參數，並根據實驗結果取得最佳空氣與水流量比為 0.35，輸入於 FLOW-3D 模式中，而模擬結果如圖 5-3 所示。



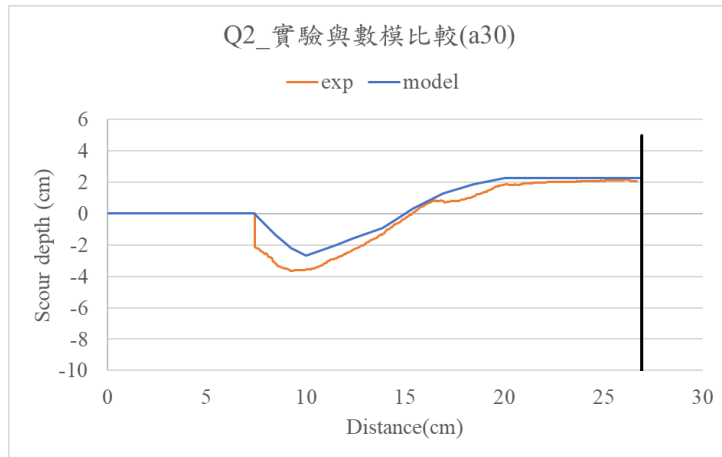
(A)重現期距 2 年流量下沖刷變化



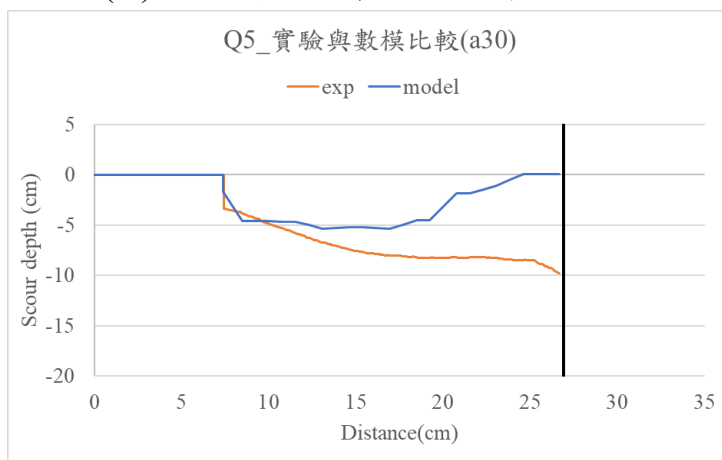
(B)重現期距 5 年流量下沖刷變化

圖 5-3 氣泡工法(入射角為 0°)數模與實驗對沖刷變化比較圖

為氣泡工法實驗的第二部分，依據第一部分實驗得出最佳空氣與水流量比之條件下，透過旋轉入射角度來探討入射角度對於下游沖刷之變化，並量未來設置現地時，上游水流皆為含沙水流，透過旋轉小角度，來避免土砂直接接觸到氣泡孔而阻塞，因此選擇 30 度進行數值模擬探討，而模擬結果與實驗結果比對圖如圖 5-4 所示。



(A)重現期距 2 年流量下冲刷變化

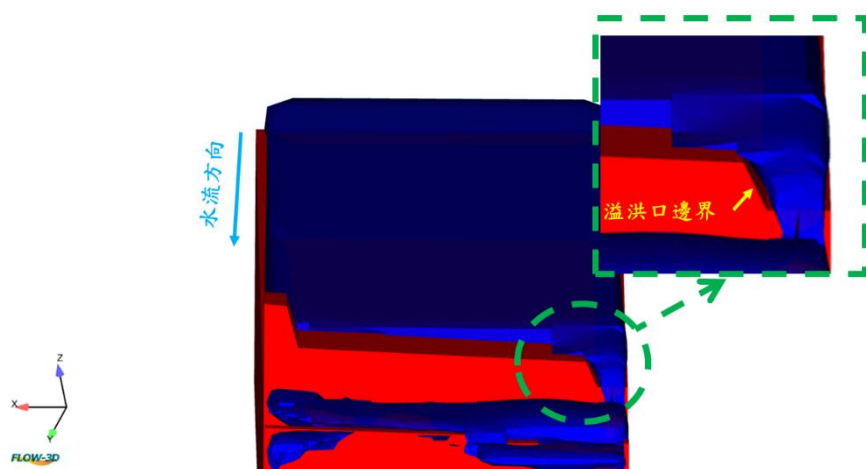


(B)重現期距 5 年流量下冲刷變化

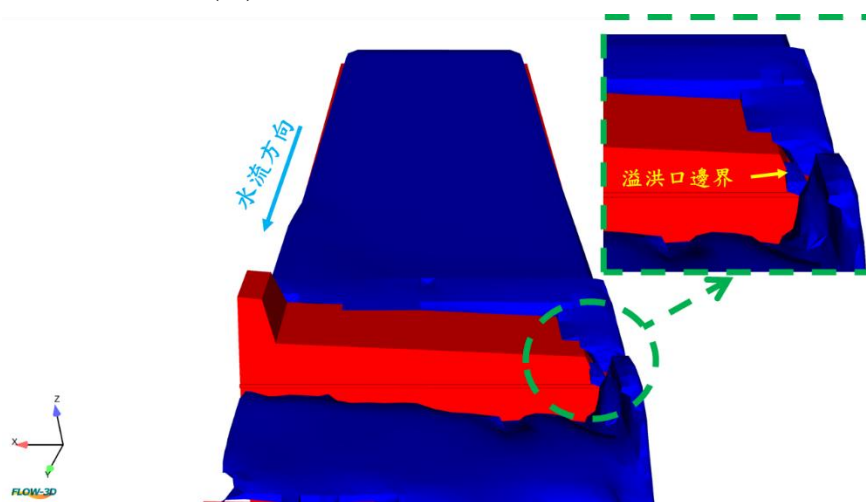
圖 5-4 氣泡工法(入射角為 30°)數模與實驗對冲刷變化比較

而在比對數模與縮尺實驗下游冲刷剖面後，可確認數值模擬期模擬結果與實驗結果趨於一致，僅在重現期距 5 年時且氣泡入射角為 30° 度之情境下，最終冲刷地形較為不同外，推測原因為當旋轉入射角時，氣泡孔口將不在完全的貼近於壩口，加上隨著水深加深壩口漸寬，此時數值模擬是氣泡工法成一屏障，造成部分水流沿著未設置氣泡工法之縫隙流出，因此溢洪口之水流量降低進而造成模擬結果有低估冲刷之情況，如圖 5-5C 所示，而相較於未設計氣泡工法之情境與垂直打入之情境下，由於未有空隙使水流流過，故水流仍較為集中，而未有圖 5-5C 之情況，其他情境水流流況如圖 5-5A、B 所示，皆明顯看出

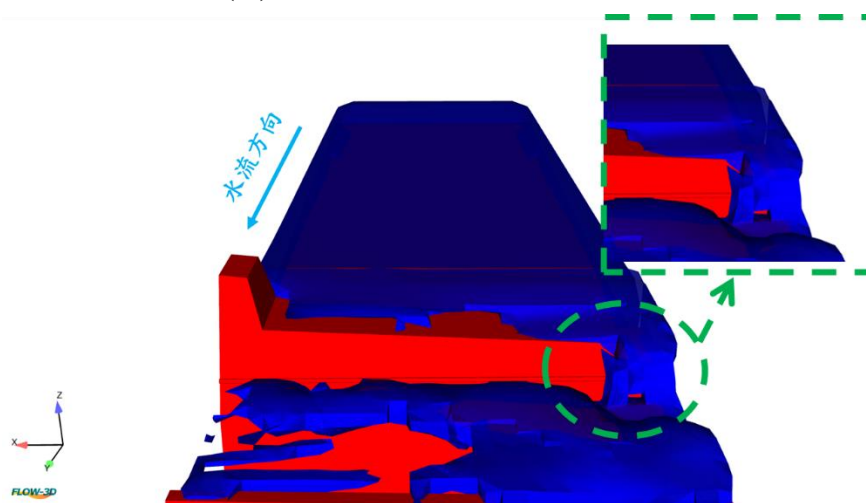
溢洪口邊界，意旨水流皆都集中於溢洪口，而未有分散之水流。



(A)未設氣泡工法之水流流況



(B)入射角為 0° 之水流流況



(C)入射角為 30° 之水流流況

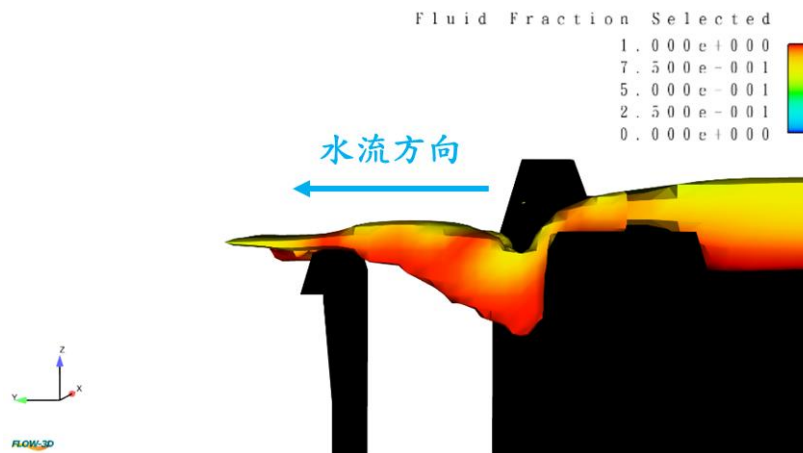
圖 5-5 重現期距 5 年流量下數模水流流況圖

第三節 流場變化

由於考量渠槽實驗時流場量測不易，故透過律定完成之數值模型探討流場變化，主要分為兩項進行觀測，一為水流中空氣含量，另一為 z 軸方向之流速大小。

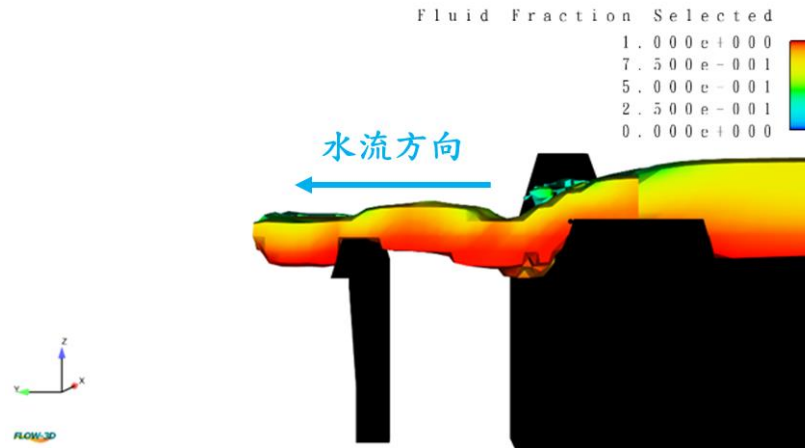
(一) 水流中空氣含量

氣泡工法為透過打入空氣後，增加了水中空氣濃度，由氣泡產生之浮力提供一上之推力，達到削減水流下沖擊力，進而降低水流向下之動能，達到減緩沖刷之情況，故透過水流中空氣含量來了解氣泡分布情況，當空氣含量分布集中時，能使沖刷情況得以減緩，而各實驗模擬結果如圖 5-6 所示。

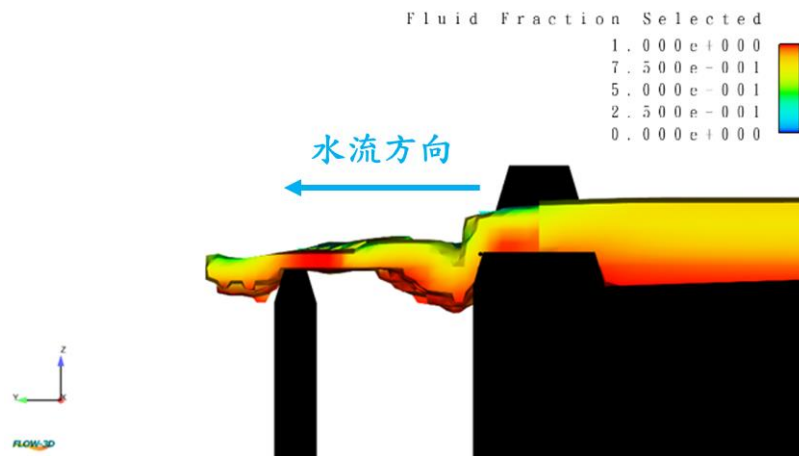


(A) 無氣泡工法之空氣分布情況

圖 5-6 各情境數值模擬之空氣分布圖



(B)氣泡工法以垂直打入之空氣分布情況



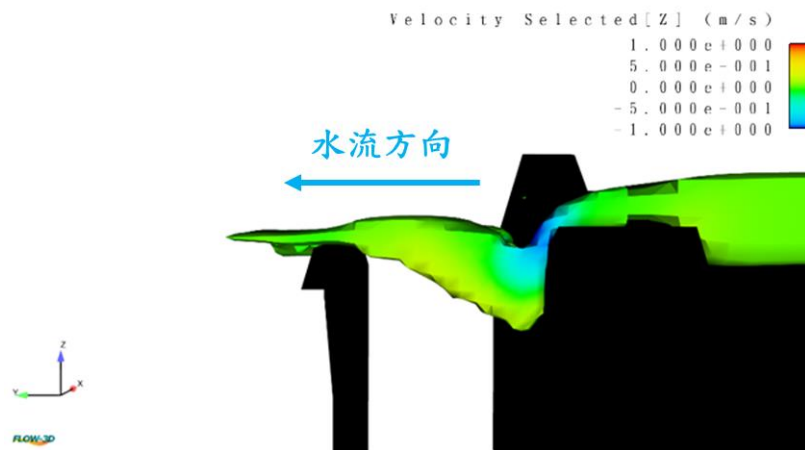
(C)氣泡工法以 30 度打入之空氣分布情況

圖 5-6 各情境數值模擬之空氣分布圖

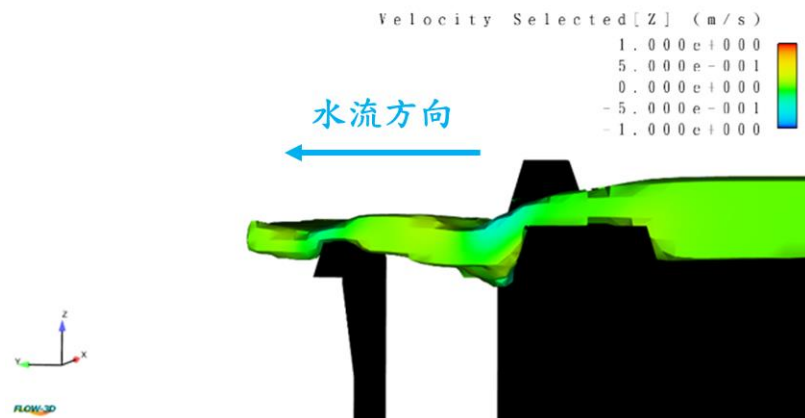
由圖 5-6 所示，當流體呈現越靠近紅色為該空氣含量較小，而越靠近綠色為空氣含量較大，圖 5-6A 為未設置氣泡工法之情境，整體水流多呈紅色，而部分黃色地區為跌水時將空氣捲入導致，而圖 5-6B 中可以看出其為垂直打入空氣，故在溢洪口處流體呈現綠色，而空氣提供之推力僅有垂直推力，因此削減水流動能較佳，在圖 5-6C 的部分為以 30 度打入空氣，可看出此時空氣之推力部分分為水平推力，因此空氣在水平方向之含量分布廣，故該流體呈現出較大面積之黃綠色，而非如圖 5-6B 集中於溢洪口。

(二) Z 方向上之流速變化

透過空氣來削減水流之動力，可透過 Z 方向之流速變化看出，當垂直之流速較大時，對於下游之沖刷能力較大，故如圖 5-7 所示，透過比對各情境之 Z 方向流速變化，來了解流場變化。

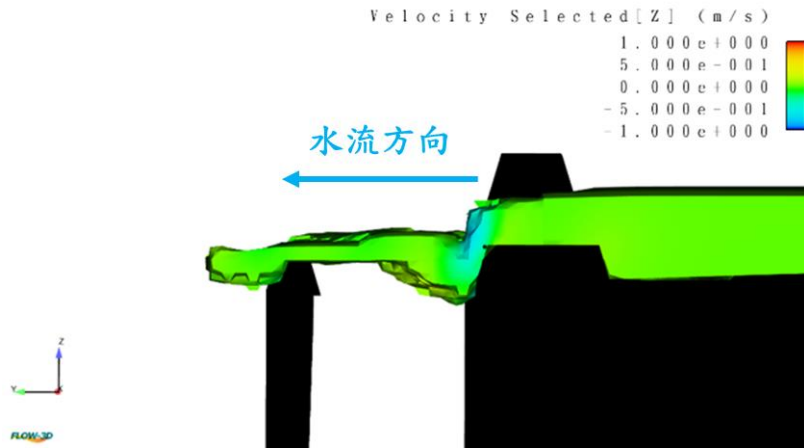


(A) 無氣泡工法之 Z 方向流速



(B) 氣泡工法以垂直打入之 Z 方向流速

圖 5-7 各情境數值模擬之 Z 方向流速分布圖



(C)氣泡工法以 30 度打入之 Z 方向流速

圖 5-7 各情境數值模擬之 Z 方向流速分布圖

由圖 5-7 所示，當流體呈現藍色時表示該流速較大。由圖 5-7A 可以看出，該情境為未設置氣泡工法，故其流體在 Z 方向上之流速呈現明顯的藍色，因而其沖刷情況較明顯，而在圖 5-7C 可得知因其空氣打入為 30 度，空氣推力被分為水平及垂直分力，故對於 Z 方向之流速減緩，相較於圖 5-7B 垂直打入之情況來的較為不佳，因此圖 5-7C 中流體呈現藍色部分較圖 5-7B 來的多。

依據空氣含量與 Z 方向之流速分布情況可以了解，氣泡工法之打入，增加了流體中空氣含量，減少 Z 方向之流速大小，達到減緩下游沖刷之情況。

第四節 以水流取代氣泡之數值模擬

由於考量打氣設備未必容易設置，因此透過改變流體性質，將模擬入射角為 30° 並把原先氣泡工法之空氣，設定為水流，來探討若將氣泡工法以水流代替的話，是減緩原先渠道水流之動能。

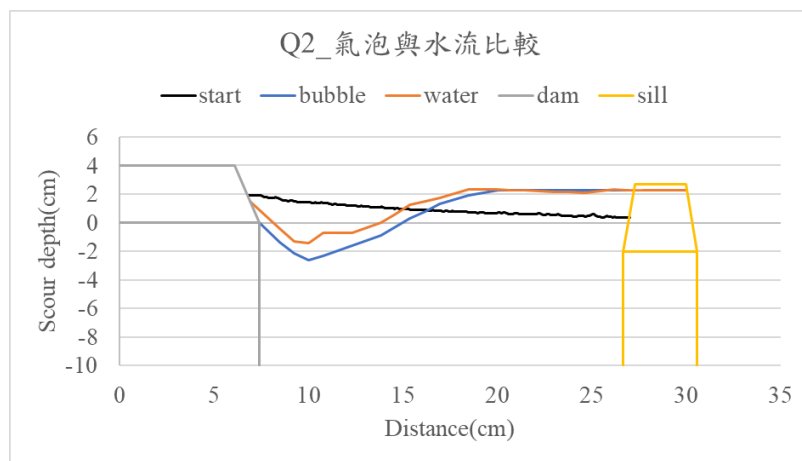
而此模擬為不改變氣泡工法之出氣斷面，僅透過改變流體性質及水流流量兩種參數，進行數值模型建立。流體性質為將空氣修改為水流，而流量將透過假設製造相同動能之情況下進行推估水流之流量，

假設空氣密度為 1.225 kg/m^3 、水流密度為 1000 kg/m^3 ，而流量換算結果如表 5-3 所示。

表 5-3 水流流量換算表

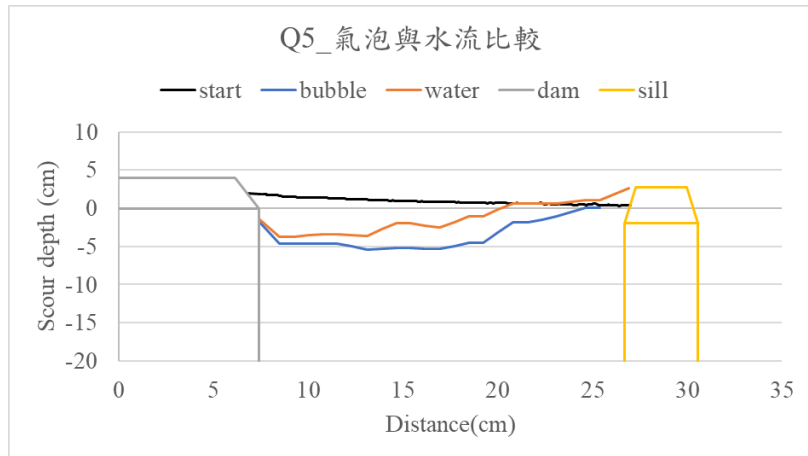
項目	Q_2	Q_5
空氣流速(m/s)	24.23	37.10
水流流速(m/s)	0.85	1.30
水流流量(cms)	2.10×10^{-5}	3.21×10^{-5}

而依據上述之計算表格，其模擬結果，如圖 5-8 所示，此次模擬結果與學者 Zeinab Tamoradi 在 2019 年提出之文獻中之結論雷同，雖然該篇文獻使用之渠道為彎形渠道，但皆為透過打入水流取代打入空氣後，得到具有更佳的減緩效果，主要原因為打入的水流其流體性質，與原先渠道中之水流具有類似之流體性質，因此在能量上更能有效削減，達到減換沖刷之作用。



(A)重現期距 2 年流量下沖刷變化

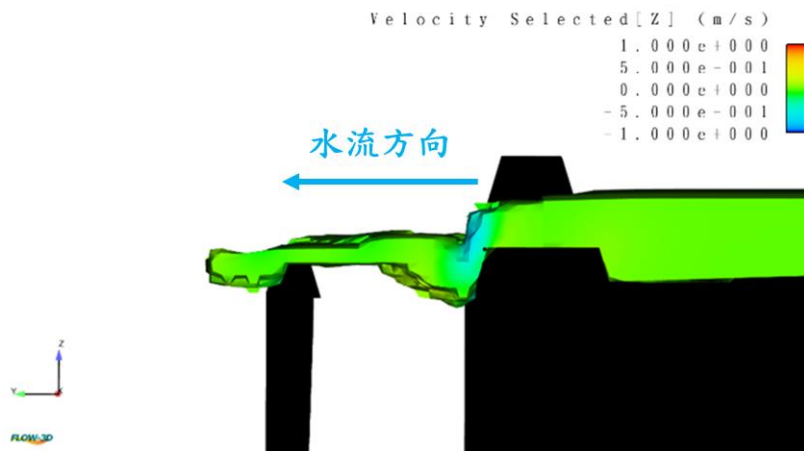
圖 5-8 以水流模擬之下游沖刷情況圖



(B)重現期距 5 年流量下沖刷變化

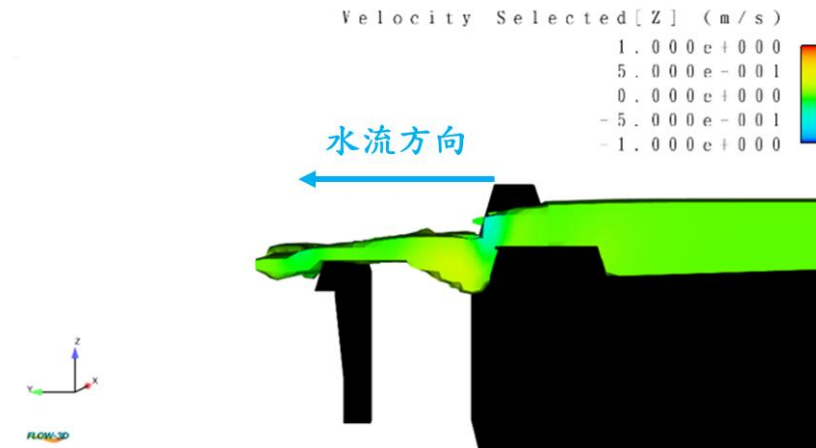
圖 5-8 以水流模擬之下游沖刷情況圖

從流速變化上看出，當打入水流取代打入空氣後，其流速之變化，可看出相較於打入空氣，打入水流之流速上有明顯減弱之趨勢，在圖 5-9(B)中，流體中藍色的部分少於圖 5-9(A)中，亦可佐證打入水流具有更佳的減緩效果。



(A)氣泡工法之 Z 方向流速

圖 5-9 各情境數值模擬之 Z 方向流速



(B)水流代替氣泡工法之 Z 方向流速

圖 5-9 各情境數值模擬之 Z 方向流速

第五節 小結

透過實驗與數值模型之建立，都可看出氣泡工法在減緩沖刷上，均都是具有一定的效用的，透過打入空氣之作用，來減緩水流動能，達到保護下游沖刷之作用，而整體結果如表 5-4 與表 5-5 所表示。

表 5-4 重現期距 2 年之各情境模擬結果

編號	Experiment			Model		
	壩基沖 刷深度	最大沖 刷深度	壩基沖 刷深度	誤差百 分率	最大沖 刷深度	誤差百 分率
	(m)	(m)	(m)	(%)	(m)	(%)
b00	0.073	0.073	0.032	-55.75%	0.074	1.04%
b35	0.030	0.033	0.019	-35.20%	0.034	2.11%
a30	0.041	0.051	0.019	-53.92%	0.036	-30.29%
water			0.004		0.022	

表 5-5 重現期距 5 年之各情境模擬結果

編號	Experiment		Model			
	壩基沖 刷深度	最大沖 刷深度	壩基沖 刷深度	誤差百 分率	最大沖 刷深度	誤差百 分率
	(m)	(m)	(m)	(%)	(m)	(%)
b00	0.126	0.129	0.073	-42.46%	0.141	9.20%
b35	0.057	0.084	0.056	-1.15%	0.089	5.77%
a30	0.053	0.101	0.036	-31.50%	0.061	-39.39%
water			0.033		0.045	

實驗與數值模擬差異性上，雖然在表 5-4 與表 5-5 中其部分誤差百分率較大，在單點資料上誤差性可能較大，但若以各實驗之剖面圖來觀察，如圖 5-3~圖 5-5 所示，除了在重現期距 5 年之入射角為 30 度之情境有較不同外，其餘縮尺實驗與數值模擬結果都較為接近。依據表 5-4 與表 5-5 結果可計算出各實驗之減緩程度，如表 5-6 表 5-7 所示。

表 5-6 重現期距 2 年之各情境模擬之減緩程度

編號	Experiment				Model			
	壩基沖 刷深度	減緩程 度(%)	最大沖 刷深度	減緩程 度(%)	壩基沖 刷深度	減緩程 度(%)	最大沖 刷深度	減緩程 度(%)
	(m)		(m)		(m)		(m)	
b00	0.073	-	0.073		0.032		0.074	
b35	0.030	58.90%	0.033	54.71%	0.019	39.81%	0.034	54.23%
a30	0.041	44.32%	0.051	29.74%	0.019	42.01%	0.036	51.53%
water					0.004	87.88%	0.022	70.36%

表 5-7 重現期距 5 年之各情境模擬之減緩程度

編號	Experiment				Model			
	壩基沖 刷深度 (m)	減緩程 度(%)	最大沖 刷深度 (m)	減緩程 度(%)	壩基沖 刷深度 (m)	減緩程 度(%)	最大沖 刷深度 (m)	減緩程 度(%)
b00	0.126	-	0.129	-	0.073	-	0.141	-
b35	0.057	54.76%	0.084	34.75%	0.056	22.29%	0.089	36.80%
a30	0.053	58.02%	0.101	21.72%	0.036	50.02%	0.061	56.55%
water					0.033	54.30%	0.045	68.11%

在氣泡工法設置後，最後沖刷坑之沖刷深度具有減緩之效用。此外，在打入水流之數值模擬上，雖未實際進行實驗驗證，但透過先前學者之文獻可得知以水流取代氣泡，確實可以達到更好之效益。

第六章 結論與建議

第一節 結論

防砂壩下游沖刷坑的沖刷情況，往往影響壩體之安全，現階段許多消能設施仍多採用傳統工法，透過如鋼筋混凝土等材料進行製作，為了達到永續環境且同時顧及壩體安全下，本計畫提出以氣泡工法進行消能，在削減水流動能同時，以不破壞生態景觀之方式，來取得既安全兼具美觀之解決之道。

本計畫透過縮尺實驗及 FLOW-3D 之數值模擬建立，以清水流之型式，探討防砂壩下游沖刷坑深與氣泡工法減緩之程度。實驗設計情境模擬為：重現期距 2~50 年、空氣與水流量比 7 種、氣泡孔入射角度 4 種，而數值模擬部分除了實驗之情境外，亦建立以水流取代空氣之方式來探討沖刷情況，而根據最終結果分析，歸納出以下結論：

1. 透過氣泡工法之設計，壩基沖刷深度與最大沖刷深度均有下降，顯示氣泡工法確實具有消能之作用，達到減緩沖刷的目的。
2. 依據不同空氣與水流量比之實驗結果，得知氣泡工法之空氣與水流量比為 0.35 時，具有最佳得減緩效果。在壩基沖刷部分，5 種流量之實驗結果皆為雷同，在空氣與水流量比為 0.35 時，均具有最佳之減緩作用，減緩程度可達 56.31%。而在最大沖刷深度部分，當流量為重現期 2、5 年時，流量較小水流不會溢流至複式斷面，因此氣泡工法減緩效用最佳之流量比亦為 0.35，當流量為重現期 10、25、50 年時，流量大於主深槽而溢流至複式斷面時，因部分水流未受氣泡工法之作用，

故氣泡工法之效用趨於一致，整體上減緩程度可達 35.48%。

3. 不同氣泡孔入射角度之實驗結果顯示，在重現期 2、5 年時，最大沖刷深度隨著角度增加，雖沖刷深度增加，但有遠離壩基礎的趨勢。考量上游為含砂水流時，可透過旋轉角度達到防止土砂影響氣泡工法，考量角度 30 度時，既可使達到減緩之作用，亦能達到維護設備的目的，可以作為未來工程設計之參考。
4. 透過 FLOW-3D 建立之數值模型，其模擬結果與縮尺實驗比對後，由各剖面圖可看出其模擬結果多與實驗雷同，因此透過 FLOW-3D 來進行實驗模擬具有一定得參考價值。
5. 由於實驗中流場變化較不易測量，故透過數值模行建立，來進行探討，可發現在水流空氣含量多寡來達到減緩水流動能之影響，此外亦可從水流之 Z 方向上流速變化可看出，在氣泡工法之作用下，可減小跌水之流速，來達到減緩沖刷之作用。
6. 若以水流取代空氣時，透過數值模型結果得知，相較於空氣氣泡，具有更好的減緩作用。推測因為打入的水流性質，與原先渠道中之水流具有相同流體性質，因此在能量上更能有效削減，達到減緩沖刷之作用。

第二節 建議

本計畫最初為確認氣泡工法之可行性，而期望透過縮尺實驗與數值模擬，了解該工法是否對於沖刷有減緩之效用，實驗結果顯示對於沖刷坑之沖刷，確實可透過氣泡工法之設計來達到減緩之作用，但在

實驗設計上考量儀器設備之因素，因次透過文獻蒐集取得先前學者們的建議值，將該建議值設為部分參數之假設值方式來進行實驗，以下提出幾項建議，包含本計畫實驗結果之建議條件或是限制條件，以及此研究未來可更深入探討之參考建議。

1. 經實驗結果顯示，下列條件為本計畫提出氣泡工法之限制條件：
 - (1) 氣泡孔設計長度，應與水流溢流時之長度相同，才能得到最好的減緩效益。
 - (2) 以清水流作為主要防治對象。
 - (3) 下游泥砂粒徑分布 0.005~0.11m。
2. 本計畫於氣泡工法設定之參數為空氣與水流量比 7 種與氣泡孔入射角度 4 種，建議未來若有相關之研究可以增加變數進行探討，如氣泡孔間距、氣泡管高度等。
3. 本計畫現地條件為採用固定之上游坡度，及下游土砂粒徑固定，在多變的自然中隨著沖淤現象的發生，土砂參數與地形變化，為經常性變動，故可透過多種參數，進行更擬真之縮尺實驗。
4. 此次計畫因無實際寒溪現地之土砂濃度參數，故仍以清水流之形式進行實驗探討，若為更貼近現地之研究可透過現地水流之泥砂含量，進行含砂水流之沖刷實驗，來評估氣泡工法。
5. 以水流減緩沖刷之模型上，可透過實際之渠道縮尺實驗來驗證取得數值模型上得誤差值。
6. 以水流取代氣泡工法之情境模擬，考量現地若需製造氣體，可能需透過電力才易提供，但水土保持設施周遭多為人煙罕

至之地區，未必具有電力系統供應，故提出以水流達到減緩冲刷，並且寄望透過上游取水，以位能轉換動能之方式，進行改善設施冲刷之情況，可透過更詳細計算如所需水頭差、水流中土砂量限制等，來評估此工法之可行性。

第七章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

依據期初報告所提出之甘特圖，本預計於9月完成「建立無氣泡縮尺實驗之 FLOW-3D 模型」，現階段已完成此項目，並進行氣泡工法之相關設計，另新增「建立氣泡工法縮尺實驗之 FLOW-3D 模型」，工作項目，以確保數值模擬之準確性，如圖 7-1 所示，為修正後之甘特圖。圖中顯示各交付項目均已完成。

圖 7-1 本計畫之甘特圖

	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
相關文獻蒐集											
進行無氣泡縮尺模型沖刷試驗											
期中報告書撰寫											
建立無氣泡縮尺實驗之 FLOW-3D 模型											
進行含氣泡工法之縮尺模型沖刷試驗											
建立氣泡工法縮尺實驗之 FLOW-3D 模型											
提出氣泡工法之相關設計原則											
期末報告書撰寫											

第二節 計畫交付項目

本計畫重要交付工作項目與經費如表 7-1 所示。

表 7-1 工作項目與經費表

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點
	單位	108/01~ 108/12	累計 成果	本年度 預定目 標	水保局 經費	其他 經費	
進行無氣泡縮尺模型沖刷試驗	式	1	0%	100%	143.488	0	臺灣大學水工試驗所

建立 FLOW3D 模型並驗證其準確性	式	1	0%	100%	215.289	0	臺大生工系研究室
進行含氣泡之縮尺模型沖刷試驗	式	1	0%	100%	143.488	0	臺灣大學水工試驗所
提出氣泡工法之相關設計原則	式	1	0%	100%	221.735	0	臺大生工系研究室

第三節 參與人員學經歷及人力配置

本計畫參與人員學經歷及人力配置如表 7-2 所示。

表 7-2 參與人員學經歷及人力配置表

單位	姓名	相關經歷與專長	本案負責工作內容
臺灣大學	廖國偉教授 計畫主持人 (美國伊利諾香檳大學—土木工程 博士)	(土木、水利、結構) 1. 坡地智慧防災 2. 水土保持工程 3. 最佳化設計	1. 統籌計畫執行 2. 研擬實驗架構與檢討 3. 控制工作進度 4. 品質管控
	王楨智 研究助理 (國立臺灣大學—生物環境系統工程學系碩士班)	(水利、水保) 1. 資料分析 2. 水土保持工程	1. 執行實驗與資料蒐集 2. 數值模型建立 3. 數據資料分析
	梁筱柔 研究助理 (國立臺灣大學—生物環境系統工程學系碩士班)	(水利、水保) 1. 資料分析 2. 水土保持工程	1. 執行實驗與資料蒐集 2. 數值模型建立 3. 數據資料分析

參考文獻

1. 陳聖文，碩士論文，防砂壩下游帶工佈置之試驗研究，國立中興大學，2000。
2. 陳佳裕，碩士論文，防砂壩下游水流沖擊力與局部沖刷現象之探討，國立臺灣大學，2007。
3. 徐堯鉉，碩士論文，超臨界自由跌流沖擊水力特性之研究，國立中興大學，2010
4. 田愷捷，碩士論文，應用 FLOW-3D 模擬明水流流經複合銳緣堰之流場特性，國立成功大學，2014。
5. 何皓愷，碩士論文，垂直跌水之沖刷探討，國立臺灣大學，2017。
6. 黃林願，碩士論文，階梯深潭形成對河道影響之研究，國立成功大學，2017。
7. 侯宥任，碩士論文，氣泡工法應用於減緩沖刷之研究，國立臺灣大學，2021。
8. 連惠邦、陳昶憲、林昆志，防砂壩下游河床沖刷特性之研究，中華水土保持學報，1992。
9. 陳正炎、彭思顯、鐘文傳，投潭水作用下局部沖刷之沖刷率研究，中華水土保持學報，1994。
10. 陳正炎、蔡建文，堰壩投潭水流沖擊力之研究，中華水土保持學報，1995。
11. 宋狄晉、許錫鑫、陳正炎，非水平式跌流工下游不同渠床粒徑穩定沖刷坑之探討，水保技術 8(4)，p188-195，2013。

12. 林義復、李忠潘、曾以帆、邱永芳、何良勝，台中港防波堤頭附近海床淘刷潛勢之三維潮流數值模擬，海洋工程學刊，2015。
13. 昕傳科技股份有限公司，107 年度防砂設施安全感測與分析應用委託專業服務，2019。
14. Dugué V., Blanckaert K., Chen Q., Schleiss A. J., Reduction of bend scour with an air-bubble screen: morphology and flow patterns, *International Journal of Sediment Research* 28 (1), 15 – 23, 2013.
15. Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V . “Morphological Effects of Bed Sills in Degrading Rivers,” *Journal of Hydraulic Research* , IAHR, 38(2) , 89-95, 2000.
16. Gaël Epely-Chauvin, Giovanni De Cesare, Sebastian Schwindt. (2014) “Numerical modelling of plunge pool scour evolution in non-cohesive sediments,” *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* Vol. 8, No. 4, pp. 477-487.
17. Halah Kais Jalal, Waqed H. Hassan. Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 745, 2020.
18. Rachael R. Barlock ,Stilling Basin Scour Remediation Using Air Injection and Flat Plate Extension ,2013.
19. Ravi T. R. Tipireddy and Brian D. Barkdoll, Scour Reduction by Air Injection at a Cylindrical Bridge Pier: Experimental Determination of Optimal Configuration , *ASCE HY.1943-7900.0001555* , 2018.

20. Schoklitsch, A. “Kolkbildung Unter Überfallstrahlen,” Die Wasserwirtschaft , No.24 ,341-343, 1932 .
21. Shahrokh Amiraslani, Jafar Fahimi, Hossein Mehdinezhad. “The Numerical Investigation of Free Falling Jet’ s Effect On the Scour of Plunge Pool,” XVIII International Conference on Water Resources, 2010.
22. Champagne, T. M., Barlock, R. R., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Gonzalez-Castro, J. A., & Deaton, L. (2016). Scour reduction by air injection downstream of Stilling Basins: Optimal configuration determination by experimentation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(12), 04016067.
23. Vincenzo D’ Agostino¹ ,Vito Ferro , Scour on Alluvial Bed Downstream of Grade-Control Structures , Journal of Hydraulic Engineering ,2004
24. Z Tamoradi, J Ahadiyan, M Najarchi, H Hasounizadeh, MM Najafizadeh, Reducing bend scour using in-phase and out-of-phase hydraulic jets, Water Supply 19 (5), 1446-1453, 2019.

附錄一 期中審查意見與回覆

	審 查 意 見	意 見 回 覆
1	符號表內各符號請增加其單位或維度。	感謝委員意見，由於各文獻所使用單位被非相同，故無相同之單位，因此各符號將補充上各參數之因次，再煩請詳見符號表。
2	P4 圖 1-3 所示氣泡管位置是否能於溢流內注入氣流？而實際現場施作時如何避免砂石衝擊。	感謝委員意見，原先圖是可能較不恰當，已修改圖面作為說明，而本計畫之氣泡孔將貼近於壩口處故將與水流接觸，使氣泡達到消能之作用，新示意圖可詳見 P4。 另外本計畫由於考量現地泥砂可能阻塞氣泡孔，故提出旋轉不同入射角度之方式，來減少土砂阻礙氣泡孔之可能性，可詳見 P56。
3	P7(一)陳正炎、蔡建文 (1995) 之跌水常數 D 請增列公式或說明。	感謝委員意見，已將相關公式補充於文獻回顧之章節，再煩請詳見 P7。
4	P17 起各文獻皆以清水流進行試驗或模擬，對於多處山區之水保工程溪溝降雨時，含砂流況下是否仍具參考功效。	感謝委員意見，由於本次計畫起初為探討該工法之可行性，故在探討期間進行相關假設來探討，此外缺乏現地水流之含砂濃度，故本計畫之實驗以清水流進行模擬，若未來能進更詳細之探討，將可採用含砂水流進行縮尺寸之實驗，詳細建議可見 P102。
5	P 24 請說明自製水位計之精確度檢核結果如何？	感謝委員意見，本計畫採用之超音波水位計其型號為 HC-SR04，而儀器精度為 0.3 公分，詳細資料可見 P24。
6	P26 利用保麗龍球推算表面流速如何進行？以錄影結果	感謝委員意見，將採用固定長度之條件下，測量其流經過之時

	推算或其他方式。	間，來推該流量之流速，詳細資訊可詳見 P26。
7	P35 如何獲得 2 小時內沖刷深度變化小於 0.5%之成果，定時觀測間距為何。	感謝委員意見，在實驗開始後，則將會每一小時進行觀測沖刷坑深度變化，當連續測量兩次結果變化小於 0.5%時，則會認定為該水流條件下，沖刷坑已達平衡，可詳見 P36。
8	P69 圖 5-2 請增繪下游邊界(如圖 4-5)以利判斷(A)圖出現淤積堆。	感謝委員意見，已將圖 5-2 各圖面補上下游邊界，詳細圖資可見 P87。
9	P71 表 5-2 建議增列一欄顯示模式之誤差百分率。	感謝委員意見，已補充數值模擬之誤差百分率，可詳見 P88。
10	縮尺度試驗是否有泥砂堵塞氣泡孔的問題。	感謝委員意見，本次縮尺實驗都以清水流作為試驗，而氣泡管也設於壩口，故無泥阻塞氣泡孔之問題。
11	P.71 提及「當含砂量過大時，氣泡工法可能不適當」，那此含砂量的臨界值為何？野溪在颱風事件下大多為含砂水流，除在集水區上游處且河床為礫石型式者含砂濃度較低。	感謝委員意見，由於本計畫仍未有實際的水流含砂濃度，故在實驗設計上，仍採用清水流之模式進行實驗，但由於考量可能現地泥砂可能之影響，故於氣泡工法參數設計時，提出改變入射角度之方式，藉由改變氣泡孔之位置，來避免直接與上游土砂接觸之方式，相關原因可見 P56。
12	如何在數值模型產製氣泡？請在期末報告書補充。	感謝委員意見，數值模型將在溢洪口處設計一斷面，並設其為以固定流量之型式，持續提供氣體之方式來做為氣泡之產生，以達到氣泡工法之作用，詳細資訊可詳見 P75。
13	建議在成果報告書說明應用此氣泡工法的限制條件。	感謝委員意見，由於本計畫之實驗仍有部分條件固定，故在此條件下提出氣泡工法之限制條件，

		如清水流作為防治對象，下游土砂之粒徑範圍等，詳細資訊可見P102。
--	--	-----------------------------------

附錄二 期末審查意見與回覆

	審 查 意 見	意 見 回 覆
1	創新氣泡工法研究能有效減少壩基刷深深度及最大刷深深度，提供未來台灣山坡地實務採納很好的選擇。	感謝委員意見，對於此工法之認同，也期盼此工法未來能實踐於現地，在水土保持設施尚能達到減緩沖刷，亦能維護生態與景觀，成為一項既安全兼具美觀之維護工法。
2	溪流中要打氣泡或打水在現地實務上如何處理？其對一般水理分析的影響如何？	感謝委員意見，應考量現地未必具有電力系統供應製造氣泡，故透過數值模擬之型式，將以水流取代氣泡之方式進行實驗模擬，而模擬結果減緩沖刷情況佳，可詳見 P95，而認為若能透過上游取水之型式，透過位能轉換動能，進行該工法之應用，則可解決電力系統供應之問題，達到本計畫工法之應用，可詳見 102。可透過數值模擬之結果顯示，由於空氣打入水流減緩水流之動能，進而削減水流向下之流速，達到沖刷減緩之趨勢，可詳見 P94。
3	氣泡柔性工法是否已將水流組成成份納入考量？已有實際運用案例？管理維護容易嗎？成本效益可行？	感謝委員意見，本計畫僅對於清水流進行相關實驗與評估，尚未考量現地水中含砂濃度之情形，若未來能有機會進行更深入之探討，則可考量現地含砂水流之流況進行相關之探討，可詳見 P34。本次計畫提出之氣泡工法，現階段蒐集文獻尚無實際應用於現地之情形，仍多半在水槽試驗之階段，可詳見 P21。由於考量現地為含砂水流故對於其現

		況提出旋轉氣泡孔之概念，來減少泥阻塞氣泡孔之情況，若未來可將此工法實踐於現地之時，可透過含砂水流試驗進行更縝密之評估其在維護上所見之問題，可詳見 P102。本計畫主要評估該工法之可行性，而其施作之成本效益上，尚無相關評估，若未來能實踐之時，可與相關工程顧問合作評估，了解最實際之成本效益。
--	--	---