

國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所

碩士論文



Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

以數值模型進行調整型防砂壩經營管理分析、操作矩

陣應用與調整策略設計

Sustainable Management Analysis, Operation Matrix

Application and Adjustment Strategy Design for

Adjustable Check Dam via Numerical Simulation

李嘉揚

Chia-Yang Lee

指導教授：廖國偉 教授

Advisor: Professor Kuo-Wei Liao

中華民國 112 年 7 月

July 2023



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

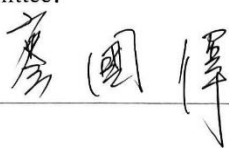
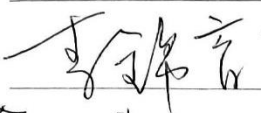
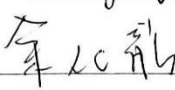
以數值模型進行調整型防砂壩經營管理分析、操作矩陣應用
與調整策略設計

Sustainable Management Analysis, Operation Matrix Application
and Adjustment Strategy Design for Adjustable Check Dam via
Numerical Simulation

本論文係李嘉揚(學號 R10622023)在國立臺灣大學生物環境系統工程
學系、所完成之碩士學位論文，於民國 112 年 07 月 31 日承下列考試
委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Bioenvironmental Systems Engineering
on 31th July 2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by LEE, CHIA YANG
(student ID: R10622023) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

廖國偉		
(指導教授 Advisor)		
范正成		
李錦育		
系主任/所長 Director:		

誌謝

韶光荏苒，兩年的碩士生活進入尾聲了。特別感謝廖國偉教授兩年來仁慈地悉心指導，給予我在研究上無限的幫助及參加各式國際研討會的機會，使我在求學期間培養研究能力的同時，也創造了許多難以忘懷的美好經歷。廖老師在研究方面從不會對我加以設限，讓我可以放膽去嘗試許多天馬行空的想法，也時常與我討論並給予許多寶貴的建議，謝謝您一路以來的支持與鼓勵。此外，也非常感謝口試委員范正成教授及李錦育教授仔細審閱這份研究，並提供我許多寶貴的建議，使我的論文更加完整且嚴謹。

在研究的過程，非常謝謝研究室的學長楨智、柏年、John 及學姊筱柔、尹婷，在研究方面毫不吝嗇的指導我們；也謝謝隔壁研究室的打球好夥伴傑哥學長，總是熱情的邀請我們一起打球；同時感謝台大幫的好夥伴暉珉、祥玲、品樺，在我們有需要的時候提供有效的協助，也常一起吃飯分享研究生活；也感謝成大幫的征暉、柏勳，互相討論研究與趣事；也祝福學弟妹伯軒、宗祐、冠余、楷倫、語晞在未來的研究生活一帆風順。在台大的兩年，最感謝我戰友浚哲、佳宏及思叡，我們在這兩年共同經歷的酸甜苦辣將永遠烙印在我心中，一起在研究室趕計畫看日出、一起嘴砲搞笑、一起漫步在雪梨街頭，海因浪花而絢麗，人因友誼而充實，因為有你們才造就了此段美好的碩士生活，然而聚散離別終有時，願未來的你們一切皆好，有朝一日再一起去吃好食。此外，也很感謝常常陪我吃飯的嘉倫、明達每週按時關心我的進度以及嘻哈圈的大小事；感謝木柵 homies 的代表治雲、柏慶、品諭，你們長期給予的支持、鼓勵與歡笑是我最大的動力；也謝謝水保的麻吉、成生的好夥伴、成功高中的兄弟對我的照顧；特別感謝雅臨一路以來的陪伴，使我得以順利完成碩士學位，也讓我有勇氣不畏懼任何挑戰，感謝在年華與你的遇見。

最後，感謝我所有的家人，給我一個無憂無慮的環境，對我百般呵護關心，並提供所需的一切資源與照料，讓我能夠全心專注於學業。謝謝父母為我所做的犧牲與栽培，你們讓我瞭解親情如太陽，它帶走了我成長路上的黑暗，使我安然地成長茁壯，有你們的陪伴與支持，才有今天的我。願我摯愛的家人們保持健康、平安快樂。

摘要



傳統型防砂壩作為目前國內外常見之溪流、河川工法，主要目的在於降低土砂災害的風險及保護下游保全對象與居民生命財產的安全，但近年來氣候變遷使得極端降雨事件之發生頻率提高，也導致了傳統型防砂壩經常面臨壩體上游淤砂過量、壩體下游沖刷嚴重之問題。調整型防砂壩的出現，雖然有效地提供了解決之道，但是如何長期永續經營與使用調整型防砂壩這項有利的工具，是目前學界與業界最關心的研究議題。

有鑑於調整型防砂壩目前缺乏一套完整的經營管理與操作策略，因此本研究將使用 HEC-RAS 2D 水理輸砂數值模型作為工具，並以台中市廊仔溪為案例，研擬出完整的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之應用規則及防砂壩調整策略，冀望提供使用者可以針對不同溪流現地狀況以及上、下游土砂狀態選擇適合的防砂壩調整策略配合矩陣進行應用，在確保各式保全對象安全之前提下，同時解決上游淤積過量、下游沖刷嚴重之問題，使溪流恢復平衡穩定之狀態，並且延長防砂壩之使用年限。

本研究透過四階段的模擬試驗，最終提出兩套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，分別為最終策略保守型與最終策略成效型。其中，最終策略保守型經過七步驟之壩體調整策略及洪水事件模擬，成功使防砂壩上游溪床坡度降低，由原先的 5.4%改善至 3.5%，且原先沖刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑，其全斷面淤積總量共增加 54.56 平方公尺，該處河道平均沖刷深度由原始地形之 2.85 公尺降低至 0.7 公尺，本調整策略有效地延長了防砂壩之壽命，使其平均使用年限達 195 年。

此外，最終策略成效型經過五步驟之壩體調整策略及洪水事件模擬，最終成功使防砂壩上游溪床坡度由原先的 5.4%改善至 3.8%，保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之全斷面淤積總量共增加 50.74 平方公尺，該處河道平均沖刷深度則同樣由原先之 2.85 公尺降低至 0.7 公尺，且經過本調整策略操作，有效地延長了防砂壩之壽命，使其平均使用年限達 70 年。

依據本研究模擬結果，結論如下：最終策略保守型適用於防砂壩下游有鄰近生命財產之保全對象時，此方案能夠最大化防砂壩攔阻土砂之功效，同時解決上游淤積過量、下游沖刷嚴重之問題，使溪流恢復平衡穩定之狀態。最終策略成效型

適用於防砂壩下游鄰近區段僅存在構造物保全對象，並無生命財產保全對象，且須盡快處理壩體上游淤積嚴重、下游沖刷劇烈之問題時，此方案能夠使防砂壩在確保一定的安全前提下，有效率地解決土砂沖淤不平衡之問題，使溪流快速恢復穩定狀態。

關鍵字：永續、防砂壩、調整型、經營管理與操作、HEC-RAS 2D、數值模型

Abstract

Traditional check dams, as a common stream engineering method, are mainly designed to reduce the risk of soil and sand disasters and to protect downstream protection targets. However, in recent years, climate change has led to an increase in the frequency of extreme rainfall events, which has resulted in the traditional check dams often facing excessive sediment accumulation in upstream and severe scouring in downstream of the dams. Although the invention of the adjustable check dam is an effective solution to the problem, how to long-term sustainable management and use adjustable check dams as a beneficial tool is currently the most concerned research topic.

Due to the lack of a complete sustainable management and operation strategy for adjustable dams, this study will use the HEC-RAS 2D numerical model as a tool, and the Buzi Stream in Taichung as the study area, to develop complete rules for the application of the "Adjustable check dam management and operation matrix" and dam adjustment strategies. It's expected to provide users to select the suitable dam adjustment strategies for different streams and sand conditions in conjunction with the application of the matrix. Through the dam adjustment strategy, the problem of excessive sediment accumulation in upstream and severe scouring in downstream can be solved under the premise of ensuring the safety of the protection targets, restoring the balance and stability of the stream, and extending the service life of the dams.

Through the four-stage simulation test, this study finally proposed two complete sets of management and operation strategies for adjustable check dams, namely, the conservative final strategy and the effective final strategy. After seven steps of dam adjustment and flood event simulation, the conservative final strategy successfully reduced the upstream slope from 5.4% to 3.5%, increased the cross-section siltation of the protection target, 5K+065 scouring pit, by 54.56 m², and lowered the average scouring depth of the river from 2.85 m to 0.7 m. It also extended the average service life of the check dam to 195 years. In addition, after five steps of dam adjustment and flood event simulation, the effective final strategy successfully improved the upstream slope from 5.4% to 3.8%, increased the cross-section siltation of the 5K+065 scouring pit by 50.74 m². The average scouring depth of the river was also reduced from 2.85 meters to 0.7 meters and the average service life of the dam was extended to 70 years.

Based on the results of this study, the conservative final strategy is recommended to be used when there are life and property protection targets in the downstream of the river,

which can effectively reduce the risk of sediment disasters while solving the problem of sediment imbalance, and restoring the stream to a balanced and stable condition. On the other hand, the effective final strategy is recommended to be used when there are only structural preservation targets in the downstream of the river, and at the same time, there are problems of excessive sediment accumulation in upstream and severe scouring in downstream of the dams, which can efficiently solve the problem of sediment imbalance under the premise of ensuring the safety and quickly restoring the stream to a stable condition.

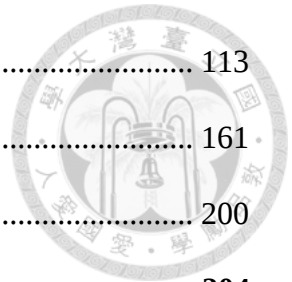
Keywords: Sustainable, Check dam, Adjustable, Management and Operation, HEC-RAS 2D, Numerical model

目錄



誌謝	II
摘要	III
Abstract	V
目錄	VII
圖目錄	IX
表目錄	XVI
符號說明表	XVIII
第一章、緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究流程	3
1.3 論文架構	5
第二章、文獻回顧	6
2.1 國內外調整型防砂壩研究	6
2.2 水理數值模型模擬防砂壩土砂沖淤相關研究	8
2.3 小結	9
第三章、研究方法	10
3.1 研究區域與資料	10
3.2 HEC-RAS 2D 水理數值模型	15
3.3 調整型防砂壩經營管理與操作矩陣	38
3.4 小結	49
第四章、結果與討論	50
4.1 第一階段模擬	50
4.2 第二階段模擬	68

4.3 最終階段模擬(保守型).....	113
4.4 最終階段模擬(成效型).....	161
4.5 最終策略之保守型與成效型比較	200
第五章、結論與建議	204
5.1 結論	204
5.2 建議	206
參考文獻	207



圖目錄



圖 1-1 本研究之研究流程圖	4
圖 3-1 廊仔溪集水區地理位置圖	11
圖 3-2 廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩位置圖	11
圖 3-3 5K+120 調整型防砂壩工程俯視圖	12
圖 3-4 5K+120 調整型防砂壩工程正視圖	12
圖 3-5 工程側視圖	13
圖 3-6 預鑄混凝土調整塊工程圖	13
圖 3-7 防砂壩及其周圍現況照片	15
圖 3-8 本試區之粒徑分布曲線	18
圖 3-9 大坑(C0F970)雨量站 25 年重現期一日暴雨設計雨型分布圖	22
圖 3-10 大坑(C0F970)雨量站 25 年重現期設計降雨組體圖	23
圖 3-11 廊仔溪 5K+350 上游集水區五分鐘單位歷線	25
圖 3-12 旱溪上游集水區五分鐘單位歷線	25
圖 3-13 廊仔溪 5K+350 上游集水區 25 年重現期之流量歷線	26
圖 3-14 旱溪集水區 25 年重現期之流量歷線	27
圖 3-15 模擬試區網格繪製範圍	28
圖 3-16 防砂壩體及下游兩支固床工周圍網格繪製	29
圖 3-17 入流邊界條件位置圖	30
圖 3-18 整體廊子溪集水區各期數值地形分析溪床縱剖面	30
圖 3-19 調整型防砂壩繪製圖	31
圖 3-20 調整型防砂壩及固床工繪製完成圖	31
圖 3-21 模型中防砂壩建置之縱剖面	32
圖 3-22 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面圖	33
圖 3-23 本研究目標設施 5K+120 防砂壩與各保全對象之位置	34
圖 3-24 本研究目標設施 5K+120 防砂壩與各保全對象之縱剖面位置圖	34
圖 3-25 4K+350 擋土牆、4K+200 擋土牆現地照片	35
圖 3-26 4K+350 擋土牆於模型中之橫剖面	36
圖 3-27 4K+200 擋土牆於模型中之橫剖面	36

圖 3-28 廊仔溪流速模擬結果.....	37
圖 3-29 原始地形模擬示意圖	41
圖 3-30 Step1 調降模擬示意圖	42
圖 3-31 Step2 調升模擬示意圖	43
圖 3-32 Step3 調降模擬示意圖	44
圖 3-33 Step4 調升模擬示意圖	45
圖 3-34 Step5 調降模擬示意圖	46
圖 3-35 Step6 調升模擬示意圖	47
圖 3-36 Step7 最終模擬示意圖	49
圖 4-1 第一階段模擬流程圖	50
圖 4-2 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比	52
圖 4-3 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比	53
圖 4-4 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比	53
圖 4-5 Step1 地形與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比	54
圖 4-6 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比	55
圖 4-7 Step2 地形與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比	56
圖 4-8 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比	56
圖 4-9 Step3 地形與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比	57
圖 4-10 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比	58
圖 4-11 Step4 地形與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比	59
圖 4-12 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比	59
圖 4-13 Step5 地形與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比	60
圖 4-14 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比	61
圖 4-15 Step6 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	61
圖 4-16 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	62
圖 4-17 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	63
圖 4-18 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	64
圖 4-19 原始地形與最終成果之縱剖面對比	66
圖 4-20 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	67

圖 4-21 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	67
圖 4-22 第二階段模擬流程圖	69
圖 4-23 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	70
圖 4-24 原始地形之保全對象橫剖面圖	71
圖 4-25 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面	73
圖 4-26 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	73
圖 4-27 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比	74
圖 4-28 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比	75
圖 4-29 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面	76
圖 4-30 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	77
圖 4-31 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比	78
圖 4-32 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比	79
圖 4-33 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	80
圖 4-34 Step2 地形之保全對象橫剖面圖	81
圖 4-35 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面	83
圖 4-36 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	83
圖 4-37 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比	84
圖 4-38 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比	85
圖 4-39 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面	86
圖 4-40 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	87
圖 4-41 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比	88
圖 4-42 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比	89
圖 4-43 Step4 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	90
圖 4-44 Step4 地形之保全對象橫剖面圖	91
圖 4-45 Step5 各重現期流量模擬之縱剖面	93
圖 4-46 Step5 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	93
圖 4-47 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比	94
圖 4-48 Step4 與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比	95
圖 4-49 Step6 各重現期流量模擬之縱剖面	96

圖 4-50 Step6 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	97
圖 4-51 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比	98
圖 4-52 Step5 與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比	99
圖 4-53 Step6 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	100
圖 4-54 Step6 地形之保全對象橫剖面圖	101
圖 4-55 Step7 各重現期流量模擬之縱剖面	103
圖 4-56 Step7 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	103
圖 4-57 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比	104
圖 4-58 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	105
圖 4-59 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	106
圖 4-60 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	107
圖 4-61 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	108
圖 4-62 原始地形與最終成果之縱剖面對比	110
圖 4-63 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	111
圖 4-64 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	111
圖 4-65 調整時機判定流程圖	115
圖 4-66 最終階段模擬(保守型)流程圖	117
圖 4-67 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	118
圖 4-68 原始地形之保全對象橫剖面圖	119
圖 4-69 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面	121
圖 4-70 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	121
圖 4-71 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比	123
圖 4-72 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比	123
圖 4-73 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面	125
圖 4-74 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	125
圖 4-75 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比	127
圖 4-76 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比	127
圖 4-77 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	128
圖 4-78 Step2 地形之保全對象橫剖面圖	129

圖 4-79 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面	131
圖 4-80 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	131
圖 4-81 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比	133
圖 4-82 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比	133
圖 4-83 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面	135
圖 4-84 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	135
圖 4-85 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比	137
圖 4-86 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比	137
圖 4-87 Step4 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	138
圖 4-88 Step4 地形之保全對象橫剖面圖	139
圖 4-89 Step5 各重現期流量模擬之縱剖面	141
圖 4-90 Step5 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	141
圖 4-91 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比	143
圖 4-92 Step4 與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比	143
圖 4-93 Step6 各重現期流量模擬之縱剖面	145
圖 4-94 Step6 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	145
圖 4-95 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比	147
圖 4-96 Step5 與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比	147
圖 4-97 Step6 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	148
圖 4-98 Step6 地形之保全對象橫剖面圖	149
圖 4-99 Step7 各重現期流量模擬之縱剖面	151
圖 4-100 Step7 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	151
圖 4-101 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比	153
圖 4-102 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	153
圖 4-103 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	154
圖 4-104 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	155
圖 4-105 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	155
圖 4-106 原始地形與最終成果之縱剖面對比	158
圖 4-107 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	159

圖 4-108 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	159
圖 4-109 先前階段調整策略示意圖	162
圖 4-110 本階段調整策略示意圖	162
圖 4-111 調整時機判定流程圖	163
圖 4-112 最終階段模擬(成效型)流程圖	164
圖 4-113 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	165
圖 4-114 原始地形之保全對象橫剖面圖	166
圖 4-115 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面	168
圖 4-116 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	168
圖 4-117 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比	170
圖 4-118 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比	170
圖 4-119 Step1 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	171
圖 4-120 Step1 地形之保全對象橫剖面圖	172
圖 4-121 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面	174
圖 4-122 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	174
圖 4-123 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比	176
圖 4-124 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比	176
圖 4-125 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	177
圖 4-126 Step2 地形之保全對象橫剖面圖	178
圖 4-127 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面	180
圖 4-128 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	180
圖 4-129 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比	182
圖 4-130 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比	182
圖 4-131 Step3 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	183
圖 4-132 Step3 地形之保全對象橫剖面圖	184
圖 4-133 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面	186
圖 4-134 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	186
圖 4-135 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比	188
圖 4-136 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比	188

圖 4-137 Step3 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程	189
圖 4-138 Step3 地形之保全對象橫剖面圖	190
圖 4-139 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面	192
圖 4-140 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面	192
圖 4-141 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比	194
圖 4-142 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比	194
圖 4-143 原始地形與最終成果之縱剖面對比	196
圖 4-144 原始地形與最終成果之保全對象橫剖面對比	197
圖 4-145 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	198
圖 4-146 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖	198

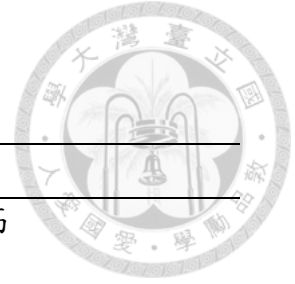
表目錄



表 3-1 採樣坑粒徑資料	17
表 3-2 模式土砂粒徑參數	18
表 3-3 Wu et al's 參數適用範圍表	20
表 3-4 Van Rijn 參數適用範圍表	20
表 3-5 大坑(C0F970)雨量站一日暴雨頻率分析結果表(單位:mm)	21
表 3-6 大坑(C0F970)雨量站統計檢定總覽表(單位:mm)	22
表 3-7 廊仔溪集流時間推估表	24
表 3-8 單位歷線洪峰流量計算表	25
表 3-9 各重現期洪峰流量計算表	26
表 3-10 調整型防砂壩經營管理與操作矩陣	40
表 3-11 經營管理與操作矩陣情境模擬 step1 調降	42
表 3-12 經營管理與操作矩陣情境模擬 step3 調降	44
表 3-13 經營管理與操作矩陣情境模擬 step5 調降	46
表 3-14 經營管理與操作矩陣情境模擬 step7 調降	48
表 4-1 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料	65
表 4-2 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇	72
表 4-3 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	74
表 4-4 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	77
表 4-5 Step3 經營管理與操作矩陣策略選擇	82
表 4-6 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	84
表 4-7 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	87
表 4-8 Step5 經營管理與操作矩陣策略選擇	92
表 4-9 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	94
表 4-10 保全對象斷面 Step6 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	97
表 4-11 Step7 經營管理與操作矩陣策略選擇	102
表 4-12 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程	104
表 4-13 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料	109
表 4-14 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇	120

表 4-15 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬數據.....	122
表 4-16 Step2 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程.....	126
表 4-17 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬數據.....	126
表 4-18 Step3 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	130
表 4-19 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬數據.....	132
表 4-20 Step4 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程.....	136
表 4-21 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬數據.....	136
表 4-22 Step5 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	140
表 4-23 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬數據.....	142
表 4-24 Step6 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程.....	146
表 4-25 保全對象斷面 Step6 各重現期洪水事件模擬數據.....	146
表 4-26 Step7 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	150
表 4-27 保全對象斷面 Step7 各重現期洪水事件模擬數據.....	152
表 4-28 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料.....	157
表 4-29 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	167
表 4-30 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬數據.....	169
表 4-31 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	173
表 4-32 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬數據.....	175
表 4-33 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	179
表 4-34 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬數據.....	181
表 4-35 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	185
表 4-36 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬數據.....	187
表 4-37 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇.....	191
表 4-38 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬數據.....	193
表 4-39 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料.....	195
表 4-40 廊仔溪經營管理與操作矩陣.....	200
表 4-41 最終策略保守型與最終策略成效型比較表.....	203

符號說明表



符號	說明
H	水位高
h_w	水深
z	底床高程
u	x 方向平均流速
v	y 方向之平均流速
q	外部通量
t	時間
g	重力加速度
C_f	底床摩擦係數
f	科氏力參數
T_c	集流時間
L_c	排水路最上游點至控制點之水平距離
S_c	平均坡度
ε	修正係數
ΔH	排水路最上游點至控制點之高程差
A	流域面積
R_e	超滲降雨量
T_p	開始漲水至洪峰發生之時間
D	單位降雨時間
T_b	洪峰流量發生至歷線終端之時間
ΔT	模式計算時間步長
ΔX	網格大小
V	流速大小
ℓ	防砂壩影響範圍
H_e	壩體有效高度
S_0	原始溪床坡度
S_e	計畫淤砂坡度
S	防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度
h	兩點間高程差
L	兩點間之水平距離

第一章、緒論



1.1 研究動機與目的

為了防止土砂災害的發生危及下游保全對象與居民生命財產的安全，興建防砂壩為國內外溪流及河川廣泛採用的工程方法。根據水土保持手冊(2017)之定義，防砂壩是一種橫向阻水構造物，具有調節溪流土砂、減緩溪床坡度、穩定流心、防止侵蝕、崩塌或抑止土石流等功能。然而，溪流中的土砂運移為一個動態的過程，傳統、完全封閉且固定型式的防砂壩往往會造成壩體下游嚴重沖刷以及下游河段土砂料源不足等問題，最終導致下游保全對象構造物過度掏刷、傾倒等問題頻繁發生(奧山悠木、水山高久，2011)。此外，溪流生態的連續性、河川自然營力等議題日漸受到重視，傳統型防砂壩所造成的嚴重問題也受到各界放大檢視。因此，近年來可以依據現況土砂運移量之變化進行調整，同時又可以保持河道土砂平衡穩定以及溪流生態之連續性的可調整型防砂壩，已成為各界關注的焦點，並且漸漸取代傳統型防砂壩，成為目前防砂壩興建及設計的主流。儘管調整型防砂壩之興建已經成為各界的共識，但目前研究大多聚焦在壩體調整塊或橫桿移除對下游河段的沖淤影響、開口型式的不同所造成沖淤變化等等，由於實際案例施作時間不長，且學術研究資料量較少，缺乏一套完整的調整型防砂壩經營管理與操作規則是目前相關管理單位與決策者所面臨的最大問題。

因此本研究將透過 HEC-RAS 2D 水理數值模型，結合調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之應用，探討在不同上游淤砂坡度和下游沖刷深度的情境下，通過不同的降壩及升壩操作，研究土砂在河道上、下游的運移趨勢。透過水理輸砂數值模擬，評估經歷各種重現期洪水事件的狀況下，不同降、升壩時機和調整型預鑄塊調降支數的影響，以確定合理的操作策略。最終本研究將提出完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，以實現以下目標：



(1) 提出完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略:

透過數值模型分析，模擬不同土砂情境下的各種狀況，最終提出一套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略。

(2) 確保下游保全對象的安全：

保全對象不僅僅是居民與生命財產，也包含各式水工構造物及水土保持設施。本研究將分析出合理調整型防砂壩操作時機與策略，確保下游所有保全對象的安全，降低災害發生之風險。

(3) 平衡壩體上、下游土砂沖淤狀況:

藉由本研究提出的調整型防砂壩經營管理與操作規則，使溪流在抵禦大型洪水事件的同時，也達到上下游土砂沖淤平衡的目標，解決壩體上游土砂過量、下游沖刷嚴重之問題。

(4) 延長防砂壩的使用壽命：

本研究將根據最終之模擬結果，計算出調整型防砂壩經過一系列的調整策略以及洪水事件的模擬，其延長之防砂壩使用壽命。

本研究期望在確保下游保全對象之安全前提下，同時達到減緩壩體上、下游土砂沖淤不平衡之問題、增加溪流生態連續性、延長防砂壩的使用壽命等效益。將調整型防砂壩在時間與空間的經營管理概念轉為落地實際應用之技術，並且期許此經營與管理操作原則可以適用於台灣大部分溪流的調整型防砂壩，提供相關管理單位實際工程應用上之參考依據。

1.2 研究流程

本研究主要目的在於透過水理數值模型分析，最終提出完整之調整型防砂壩經營管理與操作策略，提使用者能夠應用至各地不同溪流土砂狀況之調整型防砂壩，使防砂壩在確保一定之安全前提下，同時解決溪流土砂上、下游沖淤不平衡的問題。為了達成此目標，本研究首先進行一系列之文獻回顧，其主要包含現有之國內、外防砂壩研究，以及應用水理數值模型模擬壩體土砂沖淤現象之相關研究。透過一系列的文獻蒐集與回顧，瞭解目前調整型防砂壩相關研究之進程及貢獻，並作為本研究之研究基礎，以利制定後續研究方法及策略研擬。

本研究選定廊仔溪作為研究試區，並蒐集相關地文、水文參數、防砂壩竣工圖以及進行實地現況調查，作為數值模型建立之基礎，後續建置出完整的廊仔溪 HEC-RAS 2D 數值模型。接續，研擬初步之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣，以及防砂壩調整策略，並設計完整模擬試驗流程，根據每一階段模擬之結果進行改良與修正，經歷四階段之模擬試驗後，最終提出完整的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣制定規則，及兩套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，分別為最終策略保守型與最終策略成效型，提供使用者可以針對不同現地狀況以及上、下游土砂狀態選擇適合的防砂壩調整策略配合矩陣進行應用。依據上述之研究設計理念，繪製出完整研究流程如下圖 1-1 所示。

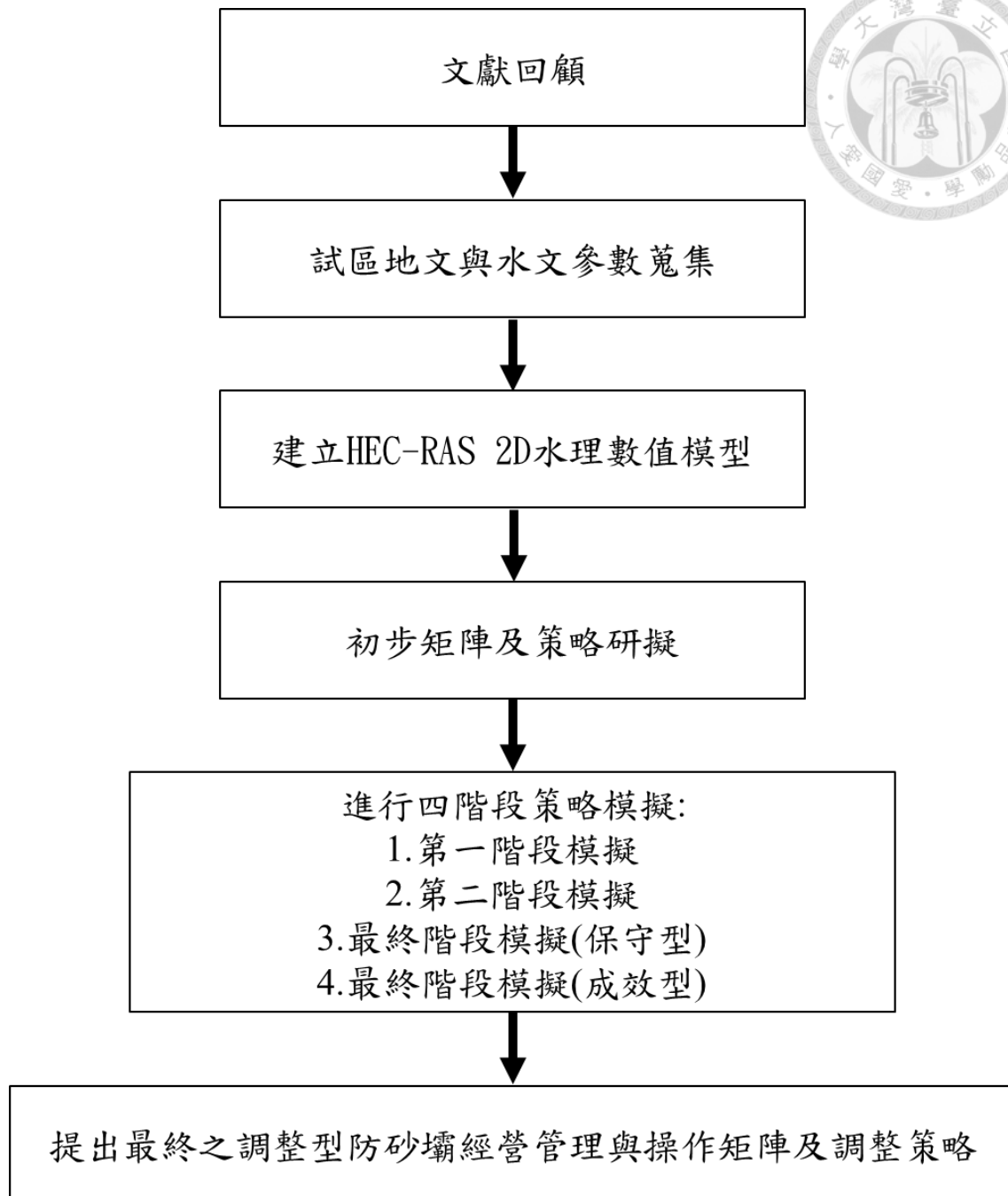
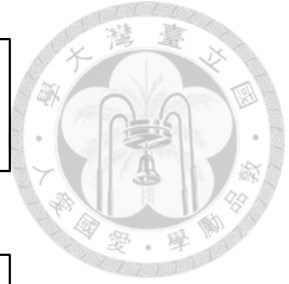


圖 1-1 本研究之研究流程圖

1.3 論文架構

本研究共分為五大章節，再依其內容下分為節與小節，以下將針對各章節編排及內容進行簡易說明：

1. 第一章、緒論：

說明本研究之研究動機與研究目標，以及相關研究流程與整體論文架構形式。

2. 第二章、文獻回顧：

此章將整理蒐集國內外相關調整型防砂壩與數值模型模擬之文獻及研究，透過蒐集彙整及分析過往相關研究，作為本文後續研究進行之基礎。

3. 第三章、研究方法：

詳述本研究之試區選定、數值模型建置過程、各式參數設定以及調整型防砂壩經營管理與操作矩陣概念說明。

4. 第四章、結果與討論：

詳細說明本研究之四階段模擬試驗過程與結果，並依據結果分析，最終提出完整的防砂壩經營管理與操作策略。

5. 第五章、結論與建議：

針對本研究之成果提出總結與未來相關研究之建議。



第二章、文獻回顧

本章節將整理蒐集國內外關於調整型防砂壩之文獻及研究，透過蒐集彙整及分析過往相關研究，作為本文之研究基礎，以利制定後續研究方法及策略研擬。本研究將使用 HEC-RAS 2D 水理輸砂數值模型作為工具，來進行調整型防砂壩的相關操作策略的擬定。因此，除了蒐集國內外關於調整型防砂壩的相關研究外，也將進一步收集國內外使用 HEC-RAS 及 HEC-RAS 2D 水理數值軟體進行輸砂模擬研究的相關文獻，以建立模型相關功能、參數設定及可行性等研究基礎。

2.1 國內外調整型防砂壩研究

1. 奥山悠木、水山高久(2011)

日本國內的 Shutter Sabo Dams 為一種具有可開啟及關閉攔阻橫桿的防砂壩，可以根據現地水砂狀況，來進行攔阻塊或橫桿的調整以達到保護下游保全對象以及平衡上下游土砂的目的。此文獻針對日本國內 Shutter Sabo Dams 之適用條件以及開啟或關閉攔阻橫桿的時機進行探討，結果顯示管理單位可以將一年劃分為枯水期與豐水期，僅在豐水期時使用防砂壩攔阻橫桿，然而這個方法可能導致阻攔一些非必要的中小型土砂事件。另一種方案則是透過建立即時監測體系，以管理監測的方式，根據每次降雨及土砂事件的情況來判斷是否使用防砂壩攔阻橫桿，並且於洪水事件結束後將橫桿移除，然而使用攔阻橫桿的時機判斷與標準需要做進一步的研究。因應土砂連續性以及溪流環境保育的概念提升，可調整型的防砂壩是必然的變革，需要有更多研究的投入。

2. 中谷加奈、井元大希、里深好文、水山高久(2011)

2004 年 Mizuyama 先生於日本岐阜縣高山市的足洗谷流域設計了一座 Shutter Sabo Dam 可調式的防砂壩，此研究以 Hyper KANAKO 數值水砂模擬軟體為工具，模擬該可調式防砂壩之閘門關閉時間不同的情況下，對上下游土砂沖淤現象的影響。結果顯示關閉該防砂壩之攔阻閘門後可以有效地攔阻土砂，減少土砂向下游移動，然而卻也會造成壩體下游有明顯沖刷的趨勢，因此同時考慮土砂下移量與河床高程變動運營方式是必要的。目前雖然難以精準地在洪水來臨之前，使用防砂壩攔阻閘門，但可以考慮根據豪雨預測及颱風預報，並且配合河川土砂流量監測方法，來進行防砂壩攔阻閘門的開關運營。

3. 陳樹群(2016)

以惠蓀林場蘭島溪的兩個開口型防砂壩作為研究基礎，進行兩個不同案例的比較。案例一於已淤滿的梳子壩降低中間兩支墩柱，並觀察其土砂變化及河相演變，提供未來土砂管理的參考。案例二為興建一座模組化鋼管壩，長期觀測其攔阻土砂及漂流木的功能，並記錄土砂變化趨勢且研擬壩體調整方式。其中，案例二之模組化鋼管壩為調整型防砂壩，可以依不同時期的輸砂量改變其型式，也可以依輸砂量由大到小不斷的拆解，具有保持泥砂量的均衡性以及溪流生態的連續性之功能，稱之為「會呼吸的防砂壩」。此二案例皆在強調在面對土砂情況多變的野溪時，管理單位需要常態性地進行防砂壩的經營調整、配合長期監測並且記錄土砂變化趨勢，擬定相關壩體調整措施，並且以回歸自然野溪為最終原則。

4. 劉宜君(2019)

利用室內渠槽試驗，模擬恆春東門溪之可調式防砂壩在不同壩體調降方式的操作下，河道的變化趨勢，並探討各調降階段對河床地形和土砂運移的影響。研究結果顯示，雖然實驗是採用每次下降一橫桿的等距降壩方式，但土砂的運移量並非等量，初期調降時土砂運移量變化較大，而後調整之土砂流出量呈現遞減狀態，且當壩體調降至一半時，土砂運移及二號壩上下游坡度近乎相等，且壩體開口處的高程差趨近於零，已達到河床上下游的平整化。因此建議逐步移除部分壩體組件可以穩定控制土砂的流出量，實現上游土砂的運移，同時確保下游保全對象的安全。

5. 行政院農委會水土保持局(2021)

以 CCHE2D 水砂數值模式為工具，模擬台中廊仔溪之 5K+120 調整型防砂壩在半開、全開時土砂沖淤表現，並且搭配模擬移除 4K+560 受嚴重掏刷影響之防砂壩，作為兩種不同之後續方案比較。結果顯示 4K+560 防砂壩移除後，經過近五年(2017-2021)之洪水事件，上游 5K+120 調整型防砂壩半開及全開方案，沖刷深度皆大多低於 1 公尺，顯示下游沖刷現象趨緩，就長期河道變遷觀點而言，4K+560 處原受掏刷影響之防砂壩拆除後，確實能使河道自然調解土砂之目的。兩方案於 3K+120 至 4K+560 區段已達到計畫預期之淤砂坡度(溪床坡度 4%)，結果顯示半開方案之調節土砂量已能使下游河段達到穩定狀態，仍須留意未來之大

型降雨事件所帶來的影響，建議透過滾動式調整該河段之治理策略以進行土砂調節。



2.2 水理數值模型模擬防砂壩土砂沖淤相關研究

1. Mohammad (2016)

以 HEC-RAS 數值模型為工具，模擬位於伊拉克北部的 Tigris River 中的 Mosul 大壩從 1986 年至 2011 年之泥砂淤積問題，並針對其泥砂淤積結果進行分析。研究結果顯示，最終的模擬結果泥砂累積總體積為 1.13 立方公里，此模擬數據非常接近 2011 年先前研究透過水深調查結果得到的觀測值 1.143 立方公里，這顯示 HEC-RAS 數值模型在輸砂模擬的結果與實際觀測值高度相符，具有一定的參考價值。此研究也有將數值型進行校準驗證，於 Mosul 大壩沿岸增設了 54 個斷面，針對水庫底床高程的模擬值與觀測值進行比較，其結果顯示模擬值與觀測值的平均絕對偏差(MAD)為 0.95、決定係數(r^2)為 0.98，這表明 HEC-RAS 數值模型在土砂的沉積、分離與運輸的模擬具有良好的表現。

2. Ulfiana, Wulandari, Parmantoro, Susilowati (2020)

以 HEC-RAS 數值模型為工具，模擬位於印度尼西亞的 Mrica 水庫泥沙淤積嚴重的問題。Mrica 水庫長期有淤砂量過大之問題，雖然相關單位有進行水庫疏濬、清淤、於水庫上游興建防砂壩等工程，但效果仍然不理想。此研究以 HEC-RAS 數值模型模擬將防砂壩與水庫間的河道拓寬，並探討其對水庫泥沙淤積的變化。研究結果顯示將防砂壩下游河道拓寬 20%時可以使河道泥沙淤積增加 19.4%，透過拓寬水庫上游河道的方式可以有效地降低泥沙進入水庫造成泥沙淤積。

3. 吳瑞鵬(2023)

以 HEC-RAS 2D 水理數值模型為工具，針對眉溪集水區的問題進行探討。該集水區因上游南山溪及東眼溪的防砂壩過度攔阻土砂，導致眉溪發生嚴重的沖刷現象。此研究旨在模擬防砂壩降壩改善調適策略對恢復溪流的自然營利能力以及改善流域環境的影響。研究結果顯示，當上游防砂壩進行降壩後，土砂於下游沖刷區域發生落淤現象，使眉溪主河道的沙洲面積可以增加 3192.3 平方公尺，從而減緩沖刷現象的發生，同時改善棲地環境並增加生態多樣性，對於恢復溪流的自然營利能力以及改善流域環境具有正向的影響。

2.3 小結

調整型防砂壩近年來因為溪床生態連續性、土砂沖淤平衡、恢復野溪自然營力等概念受到重視，而漸漸取代傳統型防砂壩，透過文獻的蒐集可以理解到調整型防砂壩在減緩河道沖刷、改善溪流生態環境、提升河川連續性、延長防砂壩使用年限等方面皆具有無限潛力，然而建有調整型防砂壩之溪流經過長期的土砂運移，上游遊河段坡度日漸趨緩，土砂沖淤達到平衡且漸漸穩定，如何在恢復溪流自然營力及預防未來暴雨事件造成災害之間做平衡與取捨，以及調整型防砂壩的經營管理與操作的完整策略仍然是相關管理單位或決策者面臨的重大課題。因此本研究將以透過式調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之應用，提供未來相關管理單位完整的調整型防砂壩經營管理與操作及調整策略。

依據文獻中提到 HEC-RAS 相關水理數值模型於土砂的沉積、分離與運輸的模擬具有高精準度的表現。透過關的應用案例，可以了解其在輸砂模擬方面的優點和可行性以及該數值模型在調整型防砂壩研究中的應用情況。因此本研究將採用 HEC-RAS 2D 做為數值模擬建立之工具，進行後續策略的擬定和輸砂模擬研究。透過數值模型可以更加深入地理解調整型防砂壩的運作原理、效果評估方法以及各種調整策略對整體河道沖淤不平衡的改善效果，最終提出完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，供未來相關管理單位或學術研究作為參考

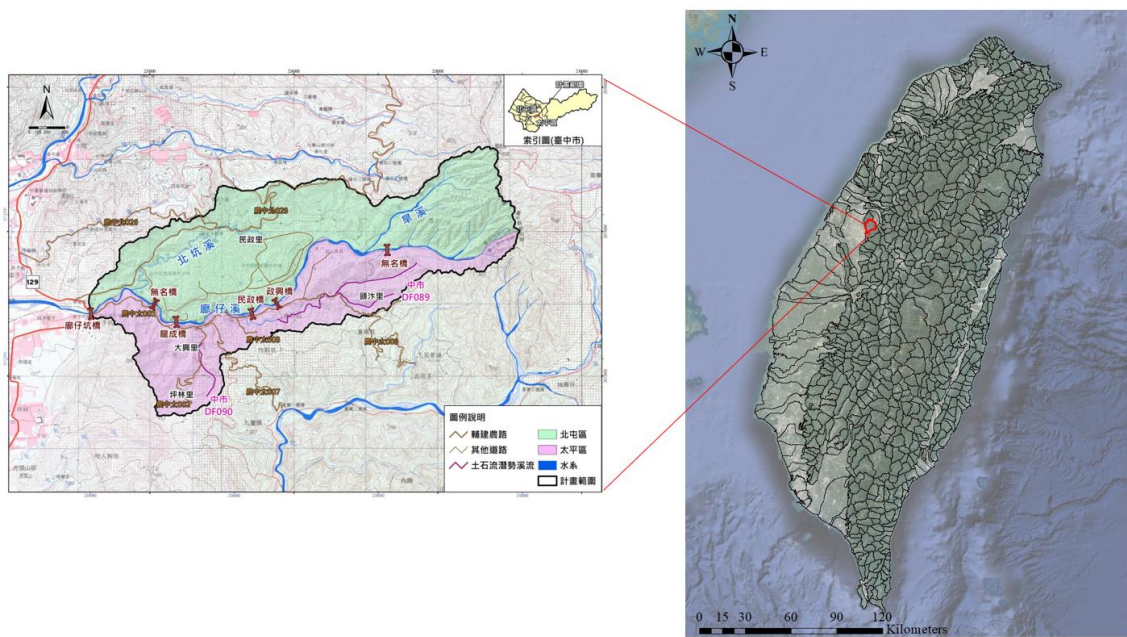
第三章、研究方法

本章節將針對研究試區的選定、集水區概況、防砂壩現況等進行說明，並介紹本研究使用之 HEC-RAS 2D 水理數值模型，包含模型其中的各式相關參數設定，如雨型設計、單位歷線計算、逕流量歷線計算、土砂參數蒐集、模型建置步驟等，以下為各階段之分述。

3.1 研究區域與資料

3.1.1 研究試區選定及概述

廊仔溪集水區位於了台中市太平區與北屯區境內，屬於烏溪水系上游大里溪支流之一，且屬於三角埔子集水區，地理位置如圖 3-1。廊仔溪溪流全長約 6.54 公里，集水區面積為 1047.78 公頃。廊仔溪集水區包含兩條土石流潛勢溪流，分別為中市 DF089 及中市 DF090，具有不穩定土砂之潛勢，歷年來經歷多次颱風及豪雨事件，如：民國 93 年敏督利颱風、97 年卡玫基颱風及辛樂克颱風、102 年蘇力颱風等，造成多起土砂災害，並且導致野溪土砂失衡及構造物損壞等情形。根據行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020)「廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃」中提到廊仔溪 5K+120 處具有一座老舊傳統型防砂壩，該舊壩以上區段河道具有大量土砂堆積，下游區段因泥砂料源不足而呈現沖刷劇烈之現象，且維持舊壩將其復健修復的方式在實際執行上極為困難，也無法因應各種河道變遷的趨勢。因此，行政院農業委員會水土保持局臺中分局於民國 110 年將原先 5K+120 老舊傳統型防砂壩拆除，並且增建廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩，以達到調節河道輸砂量、提升永續性防砂壩使用年限、增加溪流生態連續性等目的。雖然目前該工程已經完成，不過調整型防砂壩未來需如何進行調整，仍需要有進一步的參考依據，因此本研究選定台中市廊仔溪作為本研究之試區，廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩為本研究之目標設施，該壩位於旱溪與廊仔溪主流匯流口處下游約 100 公尺處，其位置圖可見圖 3-2。



資料來源: 廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃、本研究產製

圖 3-1 廊仔溪集水區地理位置圖



資料來源: 水土保持局臺中分局、本研究產製

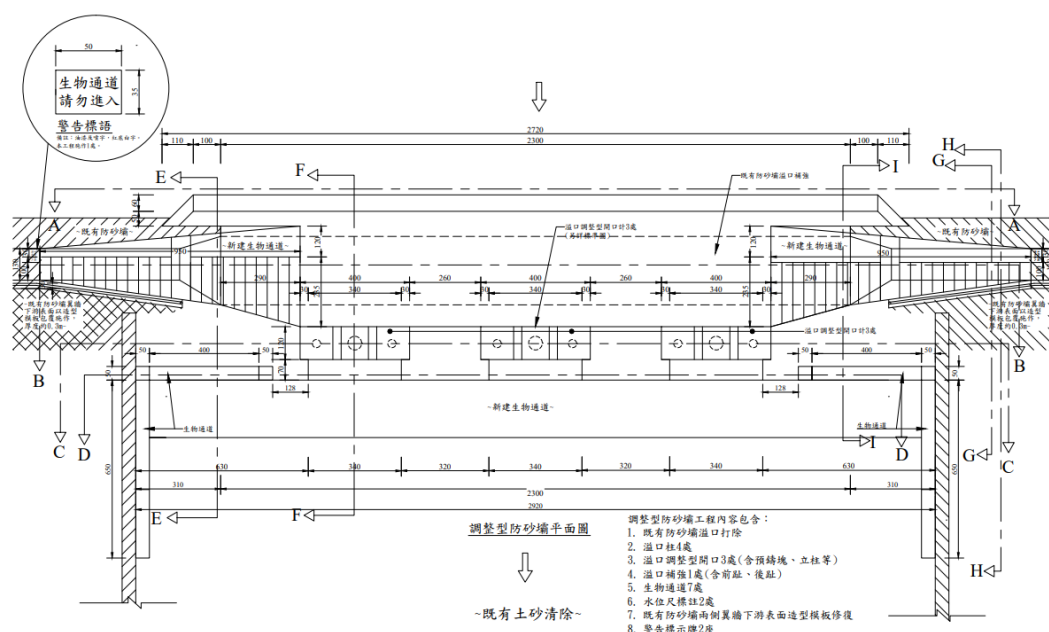
圖 3-2 廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩位置圖



3.1.2 廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩

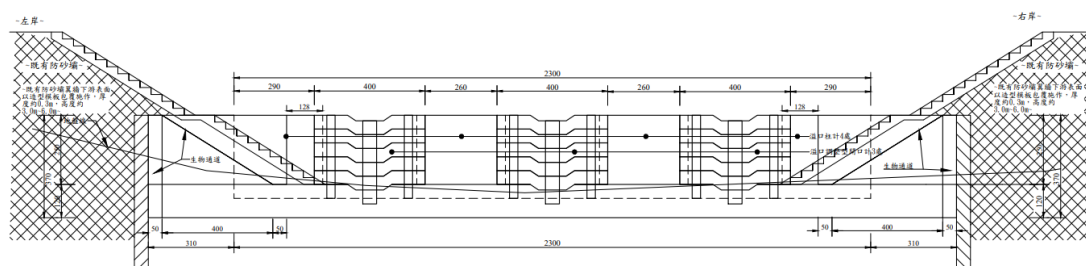
5K+120 調整型防砂壩為具有三處調整開口之透過式調整型防砂壩，其中每處開口具有五塊預鑄混凝土調整塊，每塊調整塊尺寸長、寬、高分別為：4 公尺、1.2 公尺、0.5 公尺。

防砂壩整體寬度約 23 公尺，厚度約 2 公尺，壩高約 4.5 公尺，細部工程圖如圖 3-3 至圖 3-6。



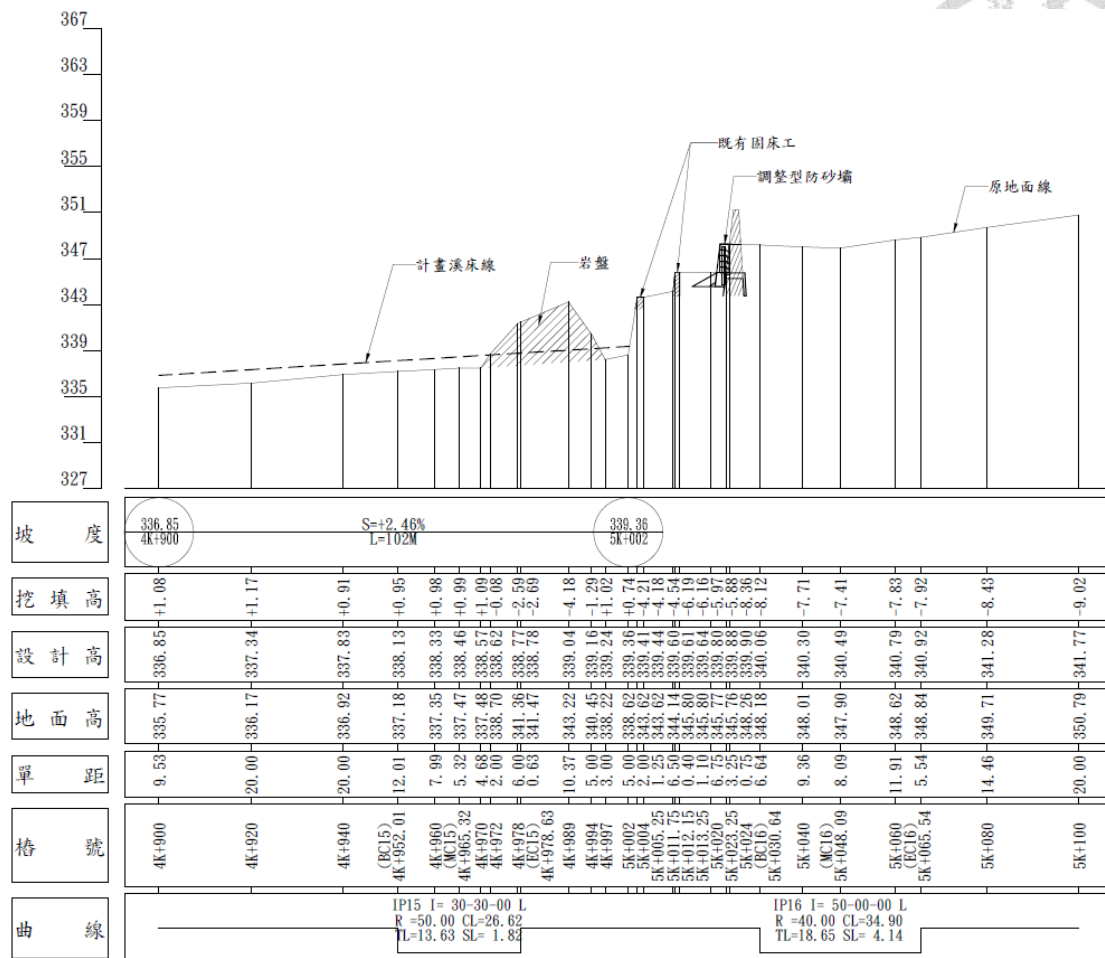
資料來源：廊仔溪上游 4K 附近災害復建工程竣工圖

圖 3-3 5K+120 調整型防砂壩工程俯視圖



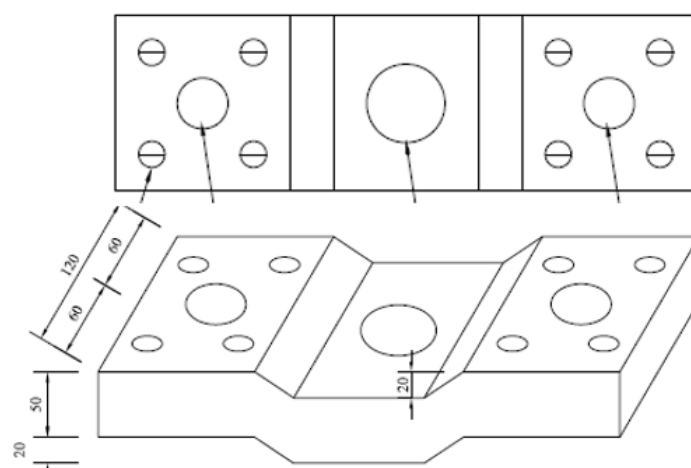
資料來源：廊仔溪上游 4K 附近災害復建工程竣工圖

圖 3-4 5K+120 調整型防砂壩工程正視圖



資料來源：廊仔溪上游 4K 附近災害復建工程竣工圖

圖 3-5 工程側視圖



資料來源：廊仔溪上游 4K 附近災害復建工程竣工圖

圖 3-6 預鑄混凝土調整塊工程圖

3.1.3 現況調查

本研究目標設施調整型防砂壩位於廊仔溪 5K+120 處，由於本調整型防砂壩為近期完工之工程，因此主壩、右壩翼、左壩翼、預備之預鑄塊現況皆良好，無任何破壞情形，如圖 3-7 (A)至(F)所示。然而防砂壩下游處有兩支既有固床工，其中位於壩體下游第一支固床工狀況良好，但壩體下游第二支固床工(5K+065 固床工)的下游具有嚴重冲刷趨勢，目視約有大於 4 公尺之落差，顯示過去傳統封閉型防砂壩過度攔阻土砂料源，導致壩體下游固床工呈現嚴重冲刷之現象，如圖 3-7 (G)、(H)所示。



(A)主壩現況良好



(B)右岸壩翼現況良好



(C)左岸壩翼現況良好



(D)調整型預鑄塊現況良好



(E)備用預鑄塊現況良好



(F)主壩上游土砂狀況



(G)壩體下游第一支固床工



(H)壩體下游第二支固床工
(5K+065 固床工)

圖 3-7 防砂壩及其周圍現況照片

3.2 HEC-RAS 2D 水理數值模型

HEC-RAS 2D 是一款由美國陸軍工兵團水文工程中心(Hydrologic Engineering Center)所開發的河川分析模擬系統(River Analysis System)，目前已有廣大的使用者運用這套模擬系統進行各種的演算，無論是天然溪流、人工渠道、網狀河川或是複雜的河道斷面皆可以進行各式水理運算。HEC-RAS 提供一維(One-dimensional, 1D)、二維(Two-dimensional, 2D)、定量流(Steady flow)、變量流(Unsteady flow)以及動床輸砂(Mobile-bed sediment transport)等計算，並且使用者可以在模擬區域內自行設計任意水工構造物或障礙物，如:防砂壩、固床工、護岸、堰、橋梁、閘門、涵管等等，以進行各式水文水理模擬，例如:潰壩模擬、都市洪水模擬、溪流動床輸砂模擬等，皆有良好的成效。

美國陸軍工兵團水文工程中心於 2016 年發布了 HEC-RAS 程式 5.0.1 版本，修正了過去本版的錯誤，並且新增了二維變量流模擬等的功能。2021 年更發布了 HEC-RAS 程式 6.1 版本，該版本提供了二維模型輸砂模擬、土石流模擬等強大功能，並且美國陸軍工兵團水文工程中心已對該模式做了基準測試及驗證，結果都顯示本軟體之模擬成效不輸其他現有模擬軟體，且有更精準的表現。本研究係使用目前所發行之 HEC-RAS 最新 6.3.1 版本，使用者可以透過 Ras Mapper 圖台的操作畫面，大量簡化各式參數的輸入以及防砂壩構造物的建置，更加簡單快速地執行模擬區域的二維變量流動床輸砂模擬。

3.2.1 模式介紹

HEC-RAS 2D 之模式控制方程式為二維聖維南淺水波方程式(Saint Venant of the Shallow Water Equation) 以及二維擴散波方程式(Diffusion Wave Approximation)，使用者可以依造精度之需求進行選擇。其中，二維聖維南淺水波方程式考慮了重力、摩擦力、水壓力、渦流擴散、科氏力等項目，而二維擴散波方程式僅考慮重力、摩擦力及水壓力三項，因此本研究將採用較高精度之二維聖維南淺水波方程式作為控制方程式進行模擬之運算，以下將針對二維聖維南淺水波方程式進行說明，其連續方程式及動量方程式如下式 3-1 至式 3-4。

1. 連續方程式

假設流動為不可壓縮，非穩態之連續方程式如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{式 3-1}$$

$$H = h_w + z \quad \text{式 3-2}$$

上述公式中， H 為水位高(m)， h_w 為水深(m)， z 為底床高程(m)。 u 、 v 分別表示 x 方向及 y 方向之平均流速(m/s)， t 為時間(s)， q 則為外部通量(m/s)。

2. 動量方程式

二維變量流採用之淺水動量方程式如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - C_{fu} + fv \quad \text{式 3-3}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - C_{fv} + fu \quad \text{式 3-4}$$

上述公式中， H 為水位高(m)， u 、 v 分別表示 x 方向及 y 方向之平均流速(m/s)， t 為時間(s)， g 為重力加速度(m/s²)， C_f 為底床摩擦係數， f 為科氏力參數。

關於此二公式，位於方程式等號左邊為對流加速度項及局部加速度項，位於方程式等號右邊為水壓力項、渦流擴散項、底床摩擦項、科氏力項。

3.2.2 模式相關參數設定

本節將介紹進行 HEC-RAS 2D 水理輸砂模擬中，所需之相關參數設定，其中包括：溪床坡度、粒徑資料、水文頻率分析等參數資料蒐集計算，此外也有針對輸砂公式之選定進行說明，如下分述。

1. 粒徑資料

本研究參考行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020)「廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃」，根據本研究確切試區位置，選擇使用鄰近之旱溪與廊仔溪交會口採樣坑資料，其代表粒徑為詳表 3-1，粒徑分布曲線可見圖 3-8。依照 HEC-RAS 2D 水理數值模型之土砂粒徑百分比輸入格式，需將採樣坑粒徑資料內插求得限定之代表粒徑，如：32mm、64mm、128mm、256mm、512mm，即可得到符合模式輸入格式之土砂粒徑參數，如表 3-2 所示。

表 3-1 採樣坑粒徑資料

代表粒徑	粒徑尺寸 (mm)
D_{10}	74.48
D_{20}	98.15
D_{30}	121.46
D_{40}	145.48
D_{50}	161.24
D_{65}	188.24
D_{75}	206.47
D_{90}	232.46
D_{95}	277.26

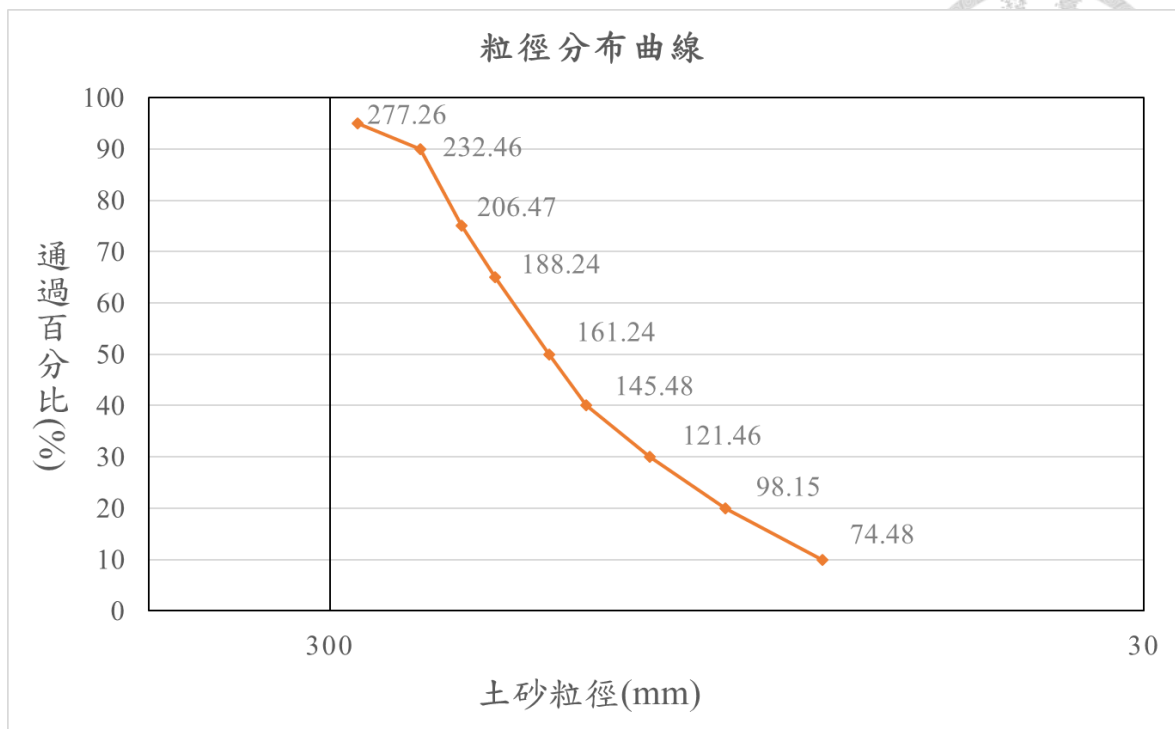


圖 3-8 本試區之粒徑分布曲線

表 3-2 模式土砂粒徑參數

代表粒徑(mm)	通過百分比(%)
32	0
64	9
128	33
256	93
512	100

2. 輸砂邊界條件設定

HEC-RAS 2D 水理數值模型於輸砂模擬大致上具有五種土砂輸入邊界條件的選項可以供使用者選擇，分別為: Rating Curve、Sediment Load Series、Equilibrium Load、Clear Water (no sediment)以及 Capacity Ratio，以下將進行分述。

(1) Rating Curve:

Rating Curve 選項可以輸入每日的土砂總量(tons/day)或是水中含砂濃度(mg/l)與流量間的函數關係，並且可以輸入不同粒徑分布曲線的土砂，作為含砂水流的輸入設定。



(2) Sediment Load Series:

跟 Rating Curve 選項相似，可以輸入每日的土砂總量(tons/day)或是水中含砂濃度(mg/l)與流量間的函數關係，但是 Sediment Load Series 更增加了在不同模擬時間可以增加額外土砂量的功能，提供給使用者在更多元的土砂變化量情況下，有更精確的模擬選項。

(3) Equilibrium Load:

選擇 Equilibrium Load 選項時，模式將自動依據使用者輸入之流量大小和底床級配計算入流邊界的土砂輸送能力作為水流含砂量，在試區土砂資料不易取得或是初次建模缺乏驗證時，能快速且較精確地模擬出水流含砂量的變化。

(4) Clear Water (no sediment):

選擇 Clear water (no sediment) 選項時，模式會將入流邊界處的水流含砂濃度為零，模擬完全清水流在河道內的土砂運移。

(5) Capacity Ratio:

本選項為使用者可以輸入一組 Equilibrium Load 的調整比例，模式會根據這個比例進行運算，整體運算方式與 Equilibrium Load 選項相近，但使用者可根據不同模擬情況進行比例之調整。

本研究之試區為臺中市廬仔溪 5K+120 防砂壩河段，經過文獻蒐集，先前並無相關研究使用 HEC-RAS 2D 進行本區之輸砂數值模擬，且在缺乏較水中含砂濃度(mg/l)、土砂量與流量間的函數關係以及隨時間變化之土砂產量等土砂資料時，Equilibrium Load 為最適合 HEC-RAS 2D 水理數值模式輸砂功能之選項 (Brunner, G. W., 2016)。因此本研究將採用 Equilibrium Load 作為土砂輸入之邊界條件設定，若未來獲得完整之水流含砂量資料時，可再加以驗證。

3. 輸砂公式選定

HEC-RAS 模式在一為輸砂模擬中有多種輸砂公式可以選擇，包括 Yang、Ackers-White、Wilcock-Crowe 等。於近年新增了二維水理輸砂功能後，二維水理數值模型所適合的公式為以下三種，分別為: Wu et al's、Van Rijn 及 Soulsby-Van Rijn，此三個公式為設計適用於 HEC-RAS 二維水理輸砂模式，具一定之可信度

(Brunner, G. W., 2016)。以下將會針對此三種輸砂公式說明其適用情況，並針對本研究挑選適合之輸砂公式。

(1) Wu et al's :

Wu et al's(2000)考慮了非均勻輸砂傳輸之特性，在土砂運移的過程中不同粒徑的砂粒會有互相隱蔽及顯露的作用，因此 Wu 等人加入了隱顯參數(hiding and exposure factor)來作為調節參數。本公式於河床載的部分，Wu et al's(2000)參考 Meyer-Peter and Mueller (1948)及 Engelund and Fredsoe (1976)提出無因次非均勻質河床載傳輸率，並透過大量實驗室、實測資料進行比對及驗證後提出相關經驗公式。而在懸浮載的部分，Wu et al's(2000)結合 Bagnold (1966)的概念將底床泥砂傳輸率應用在河道傳輸功率中，並且結合當時的現地資料做對比，提出無因次懸浮載傳輸率公式。根據陳思廷(2008)文獻歸納整理後，彙整出本公式之適用範圍，如下表 3-3 所示。

表 3-3 Wu et al's 參數適用範圍表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.088~28.7
流速(m/s)	0.086~2.88
能量坡降	1/13605 ~ 1/27
水深(m)	0.01~17.5

(2) Van Rijn

Van Rijn(1984)針對了單一土砂砂粒於非均勻輸砂傳輸中所受之外力進行探討，並推導其運動軌跡方程式，該公式考慮了不同流況與運動機制，如跳躍(Saltation)高度、跳躍時的水平速度分量等參數，最終將利用無因次參數，將輸砂率以精確而簡潔的方式呈現。據陳思廷(2008)文獻歸納整理後，彙整出本公式之參數適用範圍數據表，如下表 3-4 所示。

表 3-4 Van Rijn 參數適用範圍表

試驗參數	參數範圍
泥砂粒徑(mm)	0.2~2
流場福祿數	<0.9
水深(m)	>0.1



(3) Soulsby-Van Rijn

Soulsby-Van Rijn 公式是將 Van Rijn (1993) 之輸砂模型進行公式的校正並加以改良，透過完整的徑分布，取代原本公式的中值粒徑尺寸，並將臨界深度之平均流速乘以隱藏和顯露校正因子，進而推導出總輸砂率之公式並且於 1997 年提出。關於本公式之適用範圍問題，由於本公式之相關文獻並未提出較明確之參數適用範圍，但本公式之研究大量參考 Van Rijn (1993) 文獻，因此推論本公式參數相關適用範圍與 Van Rijn (1993) 公式相近。

本研究試區為臺中市廬仔溪 5K+120 防砂壩河段，根據行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020)「廬仔溪中上游集水區(廬仔坑橋以上)整體治理調查規劃」文獻資料顯示，該河段水深約為 0.5~2 公尺，土砂之平均粒徑為 146.27mm，流速約為 2.49~15.71(m/s)，整體適用範圍較符合 Wu et al's 輸砂公式。根據葉克家(2011)針對曾文溪流域河道沖淤變化模擬，比較多種不同輸砂公式與實際觀測質之差異，文獻中顯示該區域民國 94 年到 100 上游至下游平均粒徑涵蓋範圍廣，包含 0.011mm~253.94mm，最終模擬結果顯示 Wu et al's 輸砂公式與實測值最為相近，擁有最小誤差且較能反應現場沖淤情形，最具備可供應用之可靠度。因此將選用 Wu et al's 輸砂公式作為本研究之輸砂公式。

4. 水文頻率分析資料

本研究根據水利署水利防災中心雨量站各延時降雨及頻率分析網站，以鄰近本研究試區之大坑(C0F970)雨量站為主要依據，統計由 1993 年至 2020 年之降雨資料，並彙整計算出不同機率分布下各重現期之最大一日暴雨量，如下表 3-5 所示，以及不同機率分布之統計檢定表，如下表 3-6，其中選擇同時通過 KS 檢定與卡方檢定且 SSE 值最低之對數皮爾森第三類作為頻率分析資料依據。

表 3-5 大坑(C0F970)雨量站一日暴雨頻率分析結果表(單位:mm)

重現期距(年)		1.11	2	5	10	20	25	50	100	200	500	SSE
一日暴雨	常態	49.3	234.1	354.9	418.1	470.3	485.5	529.0	568.2	604.0	647.4	60.92
	二參數對數常態	101.0	201.5	316.5	400.9	487.3	515.8	606.9	702.5	803.1	944.6	42.25
	皮爾森第三類	85.1	201.9	333.8	424.3	511.4	539.0	623.9	707.9	791.4	901.5	35.79
	對數皮爾森第三類	105.8	190.8	308.9	410.9	529.6	572.0	719.1	892.6	1097.4	1426.2	34.82
	極端值第一類	75.6	210.5	337.4	421.4	502.0	527.5	606.3	684.4	762.3	865.1	41.45

表 3-6 大坑(C0F970)雨量站統計檢定總覽表(單位:mm)

機率分布	KS 檢定	卡方檢定	SSE
常態	未通過	未通過	60.92
二參數對數常態	通過	通過	42.25
皮爾森第三類	通過	未通過	35.79
對數皮爾森第三類	通過	通過	34.82
極端值第一類	通過	通過	41.45

接續前述，本研究參考經濟部水利署第三河川局(2020)「烏溪水系逕流分擔評估規劃(1/2)」之大坑(C0F970)雨量站 24 小時暴雨設計雨型。以 25 年重現期暴雨為例，其設計雨型分布圖如下圖 3-9 所示，將 25 年重現期之一日雨量 572.0mm 乘上該設計雨型分布圖，可以得到 25 年重現期之一日暴雨設計降雨組體圖，如圖 3-10 所示。

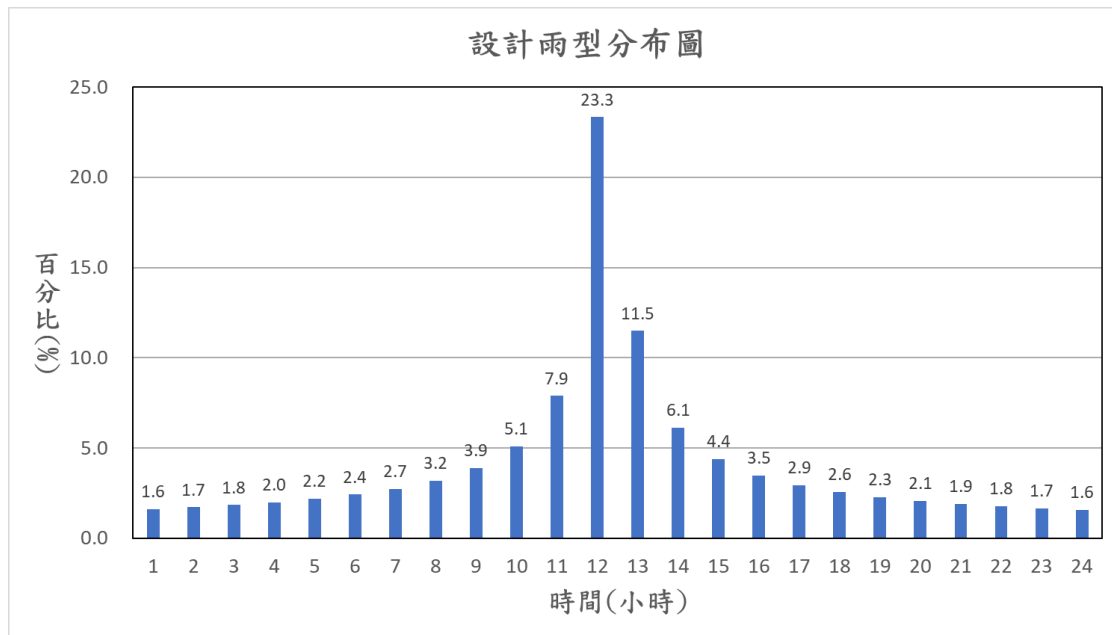


圖 3-9 大坑(C0F970)雨量站 25 年重現期一日暴雨設計雨型分布圖

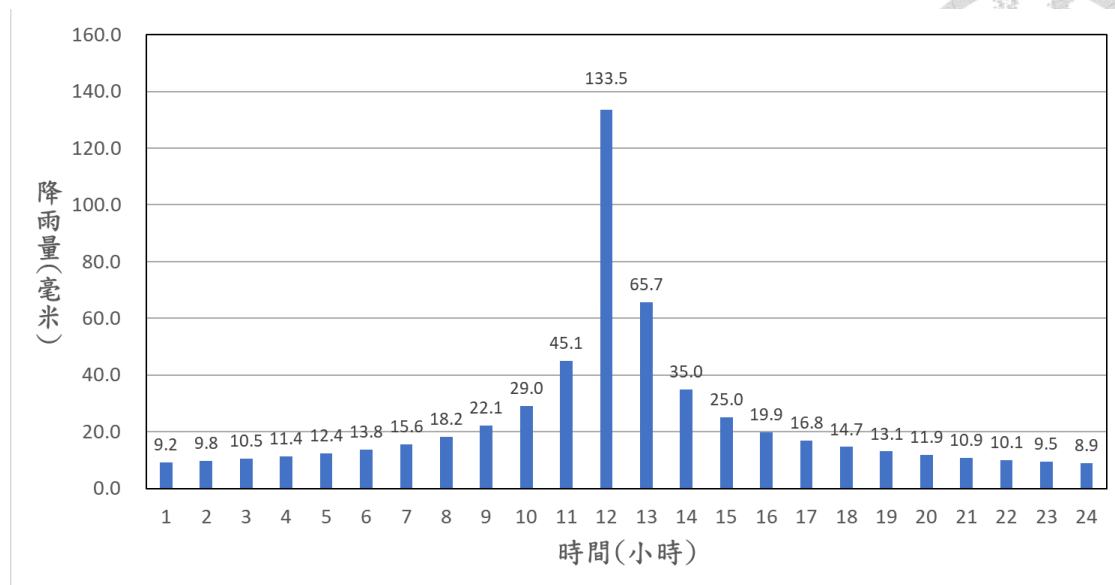


圖 3-10 大坑(C0F970)雨量站 25 年重現期設計降雨組體圖

5. 單位歷線及流量歷線計算

本研究根據水土保持手冊(2017)基本資料調查與分析篇中的三角形單位歷線計算方法，並且採用「美國加州公路 Kirpich 公式(1940)」進行及流時間之計算，如下式 3-5，經過單位轉換成公制後為式 3-6。

$$T_c = 0.0078 \varepsilon L_c^{0.77} S_c^{-0.385} \quad \text{式 3-5}$$

上式中， T_c 為集流時間(min)； L_c 為集水區內排水路最上游點至控制點之水平距離(ft)； S_c 為平均坡度(ft/ft)； ε 為修正係數，於本試區採用 1.0 進行計算。

$$T_c = \left(\frac{0.87 L_c^3}{\Delta H} \right)^{0.385} \quad \text{式 3-6}$$

式 3-6 為式 3-5 經過單位換算成公制單位後之公式，其中 T_c 為集流時間(hr)； L_c 為集水區內排水路最上游點至控制點之水平距離(km)； ΔH 為集水區內排水路最上游點至控制點之高程差(m)。

本研究將模擬試區之入流分為廊仔溪主流以及旱溪兩個入流口，並且根據行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020)「廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃」中蒐集分別之集水區資料，帶入式 3-6 得到集流時間數據，如下表 3-7。

表 3-7 廊仔溪集流時間推估表

本模擬試區集水區	集水面積 A (ha)	流路長 L_c (m)	高程差 ΔH (m)	集流時間 (min)
廊仔溪 5K+350 上游	114.63	1862	215	14.74
旱溪	106.03	1821	254	13.48

接續上述，依據美國水土保持局所提出之單位降雨延時內，單位超滲降雨(R_e)所產生的三角形單位歷線公式，如下式 3-7 至式 3-9，可以計算出單位歷線以及洪峰流量，如表 3-8。並且可以分別繪製出廊仔溪 5K+350 上游集水區五分鐘單位歷線與旱溪上游集水區五分鐘單位歷線，如圖 3-11 與圖 3-12。

$$Q_p = 0.208 \times A \times \left(\frac{R_e}{T_p} \right) \quad \text{式 3-7}$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0.6 \times T_c \quad \text{式 3-8}$$

$$T_b = 2.67T_p \quad \text{式 3-9}$$

上式中， Q_p ：洪峰流量(cms)

A ：流域面積(km²)

R_e ：超滲降雨量(mm)

T_p ：開始漲水至洪峰發生之時間(hr)

T_c ：集流時間(hr)

D ：單位降雨時間(hr)

T_b ：洪峰流量發生至歷線終端之時間(hr)

表 3-8 單位歷線洪峰流量計算表

本模擬試區集水區	A (km ²)	R_e (mm)	D (hr)	T_p (hr)	T_b (hr)	Q_p 洪峰流量 (cms)
廊仔溪 5K+350 上游	1.1463	10	0.0833	0.189	0.505	12.608
旱溪	1.0603	10	0.0833	0.176	0.470	12.499

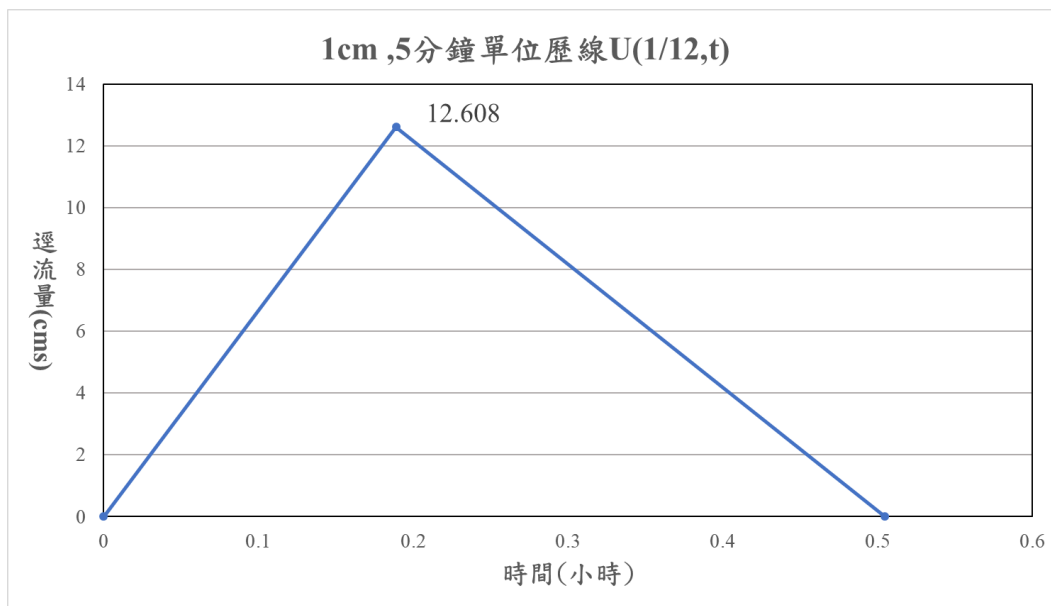


圖 3-11 廊仔溪 5K+350 上游集水區五分鐘單位歷線

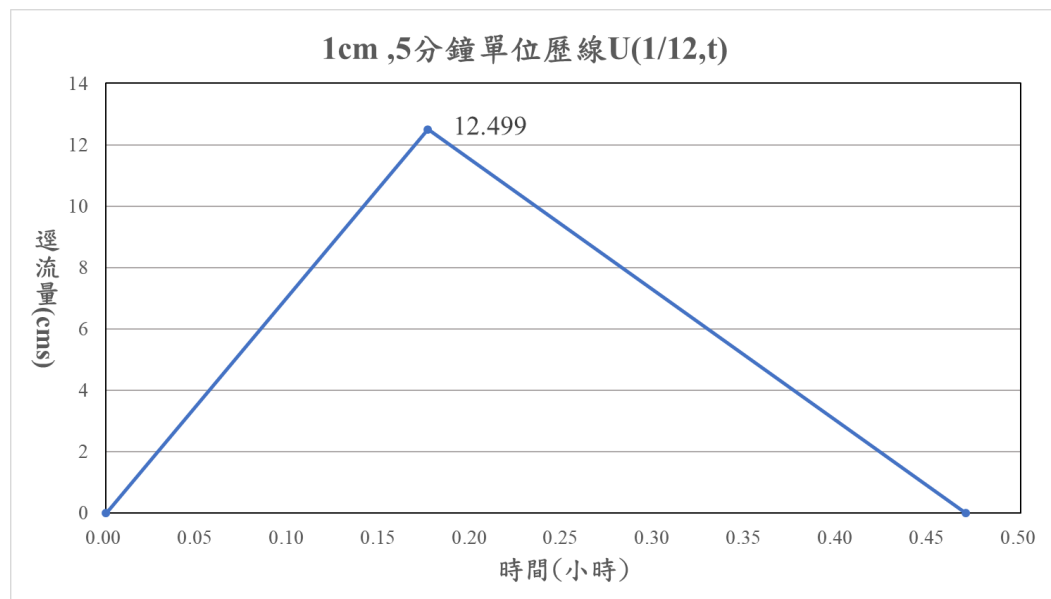


圖 3-12 旱溪上游集水區五分鐘單位歷線

延續前述步驟，將各重現期雨量組體圖與單位歷線相乘疊加後，可以推算出廊仔溪 5K+350 上游集水區及早溪集水區兩個入流口之各重現期洪峰流量，如表 3-9。亦可算出各重現期之一日暴雨逕流量歷線，以 25 年重現期為例，廊仔溪 5K+350 上游集水區及早溪集水區兩個入流口之流量歷線，如圖 3-13 及圖 3-14。

表 3-9 各重現期洪峰流量計算表

集水區	集水面積 (ha)	1.11 年	2 年	5 年	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年	500 年
廊仔溪 5K+350	114.63	11.27	18.79	27.43	32.92	41.53	52.23	64.86	79.76	103.69
早溪	106.03	9.76	17.67	25.79	30.94	39.04	49.10	60.97	74.98	97.48

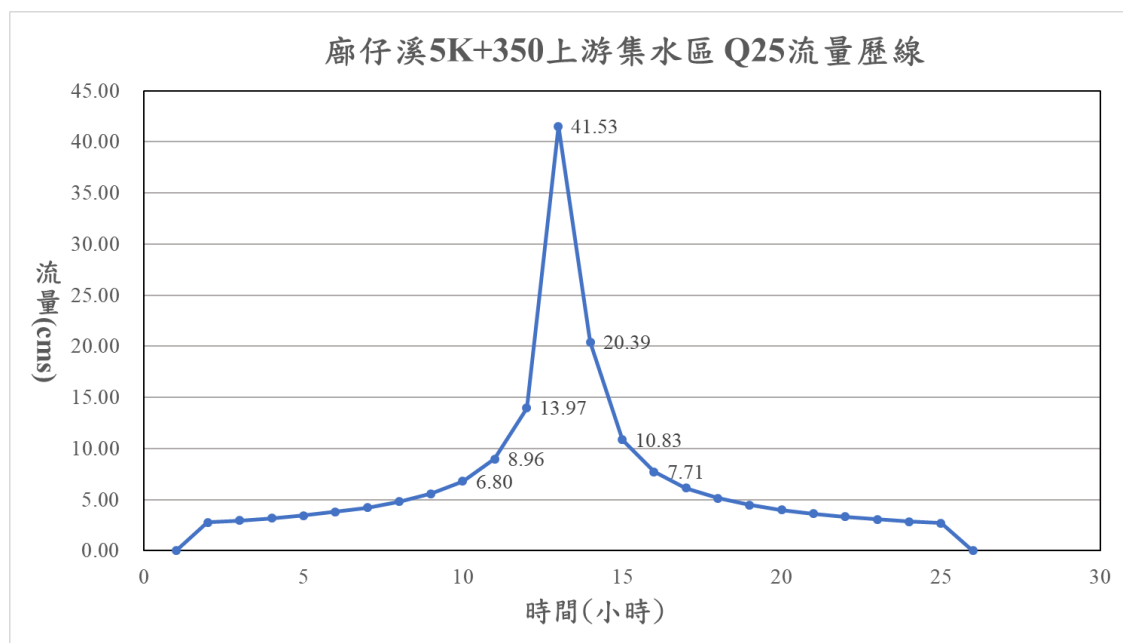


圖 3-13 廊仔溪 5K+350 上游集水區 25 年重現期之流量歷線

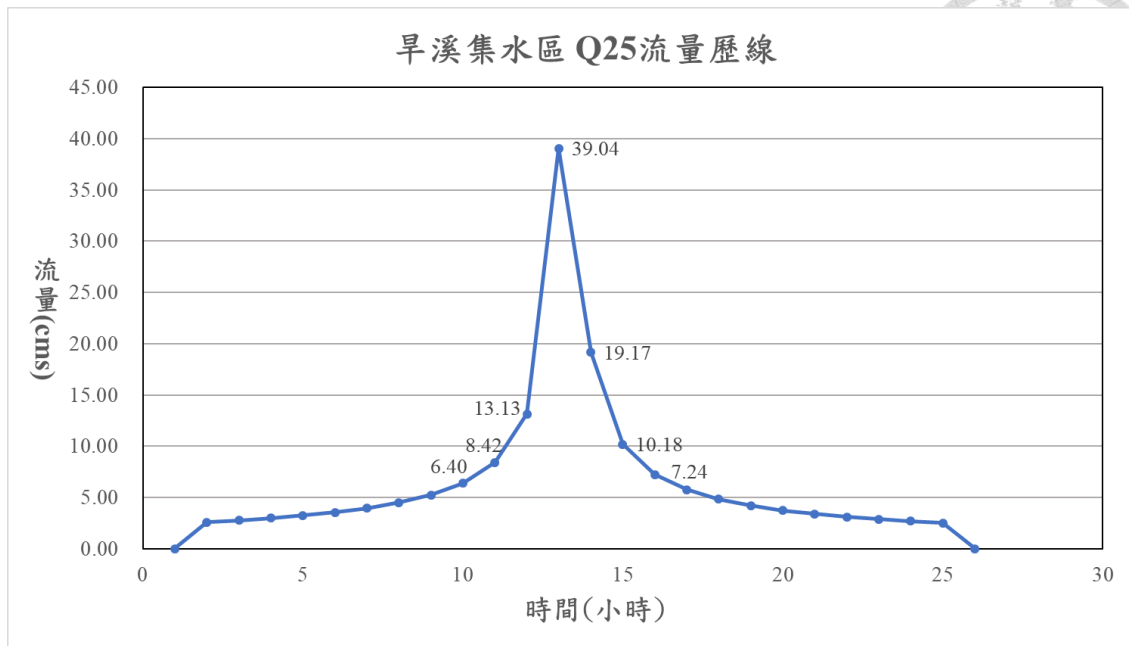


圖 3-14 旱溪集水區 25 年重現期之流量歷線

6. 模型建置設定

本研究之 HEC-RAS 2D 數值模型建置大致可以分為六個步驟，分別為單位及數值高程模型(DEM)輸入、幾何模型網格設定、邊界條件輸入、人工構造物繪製、選定保全對象、輸出資料設定，以下將針對各步驟進行說明。

(1) 單位設置及數值高程模型

本階段為模型建置之前置作業，包含單位設定、地理座標系統設定、數值高程模型輸入等等。本研究數值模型單位採用 SI 制，地理座標系統採用橫麥卡托二度分帶 TM2 (TWD97、中央經線 121 度)。數值高程模型(DEM)之精細度選用將影響後續模擬之準確度，本研究關注壩體下游沖淤行為以及上游淤砂坡度的變化，為避免解析度不足導致誤差，因此數值高程模型(DEM)圖資將使用內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型資料。

(2) 幾何模型網格建立

將模擬試區於數值高程模型(DEM)上繪出，並且設定網格大小，HEC-RAS 2D 數值模型軟體中，網格即代表計算單元，因此可以於重點關注或畫設人工構造物之區域，如堤防、防砂壩、固床工等，進行網格加密計算，除了增加準確度也可以提高模式品質及穩定性，然而加密計算的網格數量過多可能導致計算時間過長之問題。

本研究之模擬試區模型網格劃定範圍約位於廊仔溪 4K+540 至 5K+540 之河段，其中包含 4K+560 毀損防砂壩區域嚴重沖淤段，以及上游旱溪與廊仔溪主流匯流口，如下圖 3-15 所示，考量集水區模擬面積及計算時長，本試區選擇以 3 公尺*3 公尺網格大小為主，廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩壩體周圍採用 2 公尺*2 公尺之網格大小，下游兩支固床工由於較為鄰近，因此其周圍採用 1.5 公尺*1.5 公尺之網格大小，以加強輸砂模型穩定性、精準化其沖淤表現，網格繪製細部圖可參考圖 3-16。

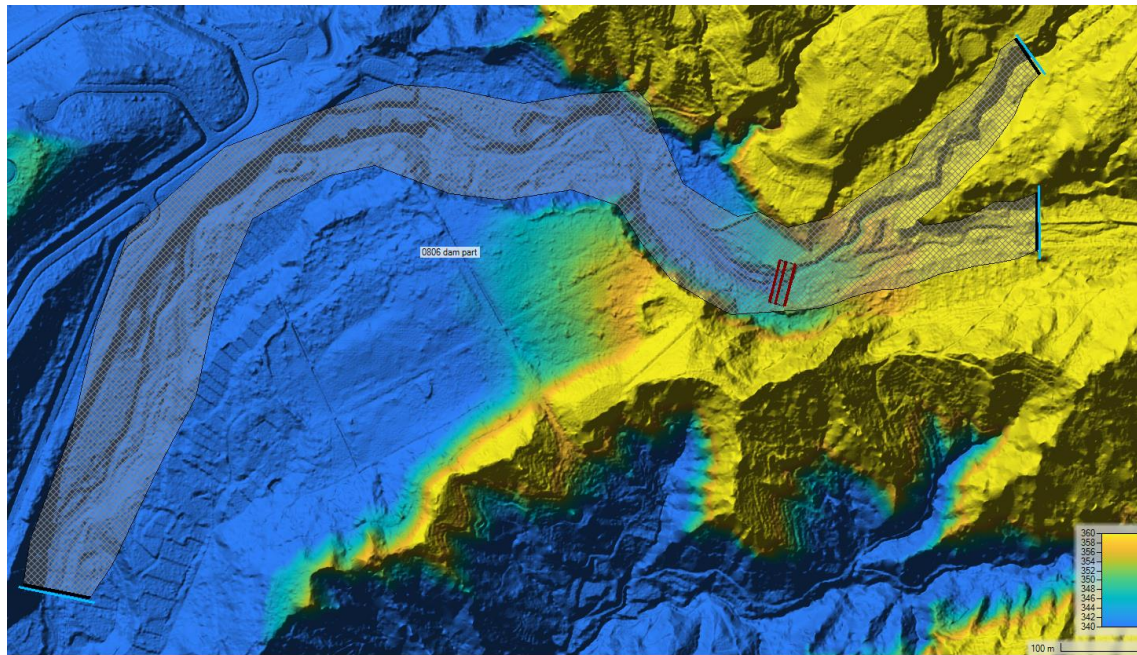


圖 3-15 模擬試區網格繪製範圍



圖 3-16 防砂壩體及下游兩支固床工周圍網格繪製

(3) 邊界條件輸入

本研究試區將設定廊仔溪 5K+350 上游集水區及早溪集水區兩個入流口，因此邊界條件將繪於廊仔溪 5K+540 以及早溪匯流口上游約 350 尺處，如圖 3-17 藍色線段所示。本研究為採用變量流分析(Unsteady flow analysis)，並且根據前述章節計算之各重現期流量歷線結果進行輸入。

坡度資料參數方面，參考行政院農業委員會水土保持局(2021)「110 年臺中分局轄區重要治理區土砂高變動性調查評估及治理策略研擬成果報告書」，政興橋至廊仔溪 4K+560 區段之整體溪床坡度約為 4%；而溪床坡度自 5K+120 後提高至 7%，整體縱剖面如下圖 3-18 所示。因此本研究入流口之溪床坡度將設定為 0.07，流出口溪床坡度將設定為 0.04，作為後續模擬之參數設定。



圖 3-17 入流邊界條件位置圖

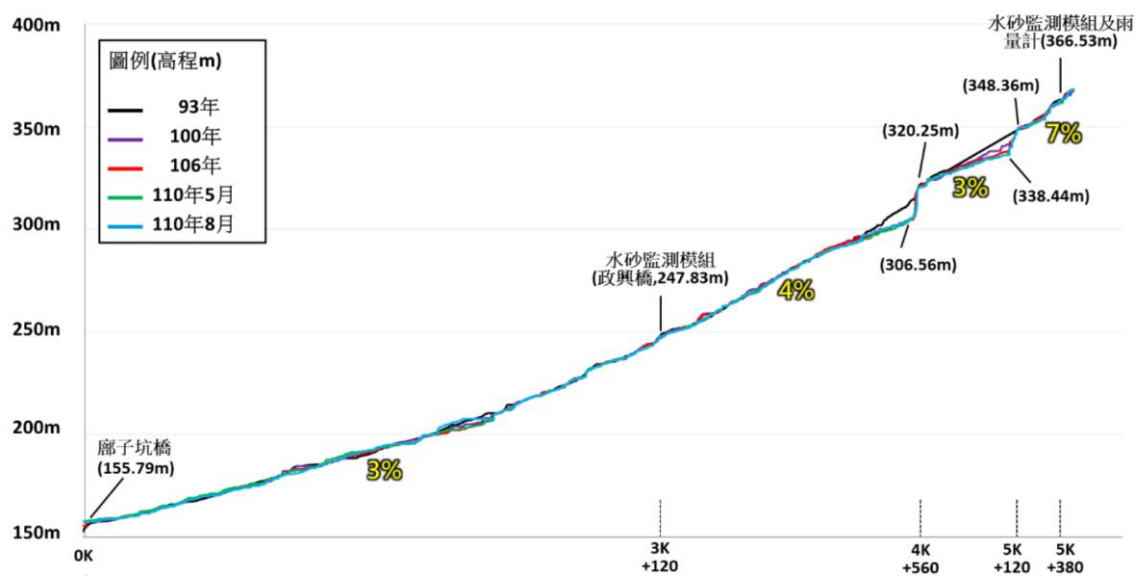


圖 3-18 整體廊子溪集水區各期數值地形分析溪床縱剖面

(4) 人工構造物繪製

HEC-RAS 2D 數值模型軟體可以透過 RAS Mapper 圖台繪製人工構造物於模型中，可以直接於數值高程模型(DEM)上進行編輯，輸入構造物各斷面的長、寬、高以及高程數值資料，如圖 3-19 所示，即可建構出如開口壩、梳子壩、堤坊等等構造物。

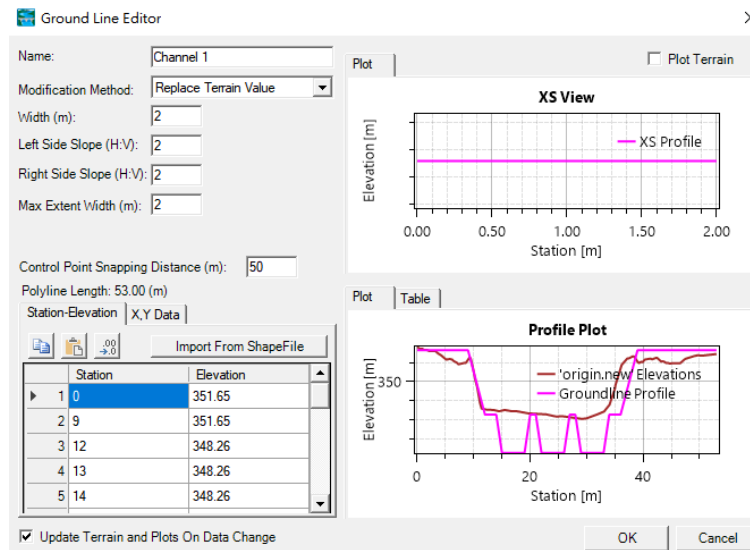


圖 3-19 調整型防砂壩繪製圖

本研究依據工程竣工圖及縱剖面資料，於內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型(DEM)中繪製 5K+120 調整型防砂壩及其下游固床工，繪製完成圖如下圖 3-20。經過竣工圖比對後，發現壩頂之高程低於地表，顯示 5K+120 調整型防砂壩建於此 DEM 呈現淤滿狀態，如圖 3-21 所示，具有上游嚴重淤積、下游嚴重冲刷的情況，本研究將針對此現象進行後續的一系列調整策略模擬。

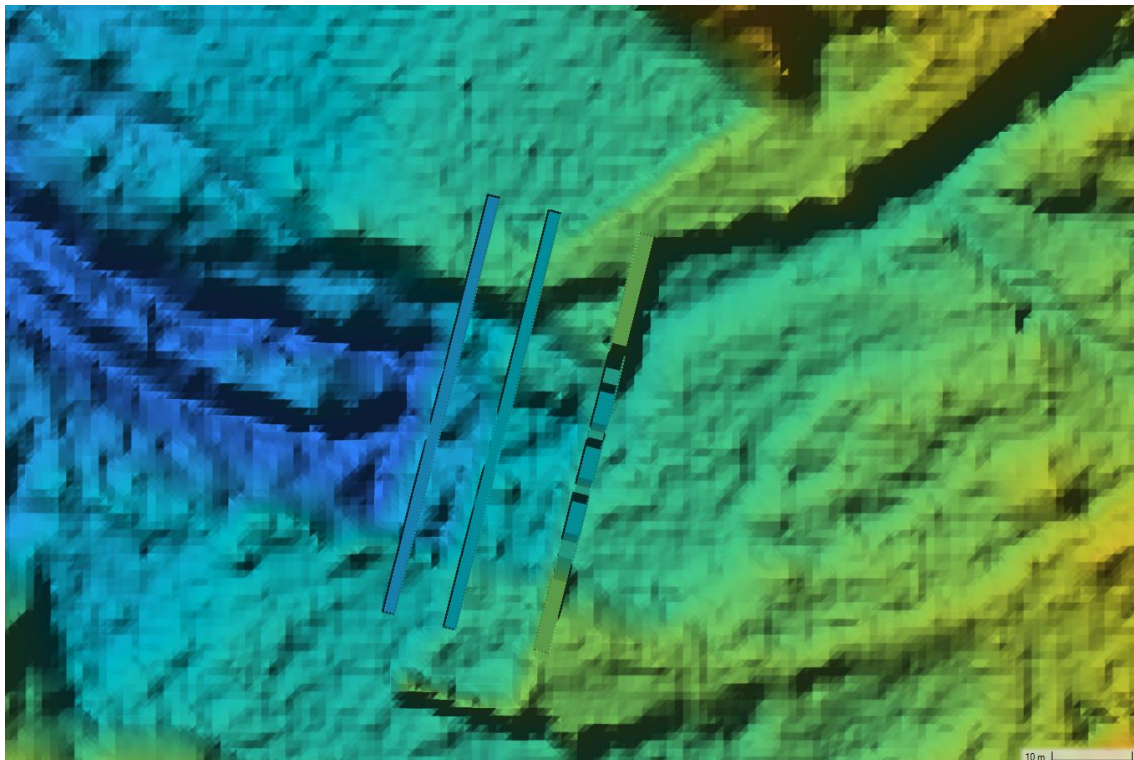


圖 3-20 調整型防砂壩及固床工繪製完成圖

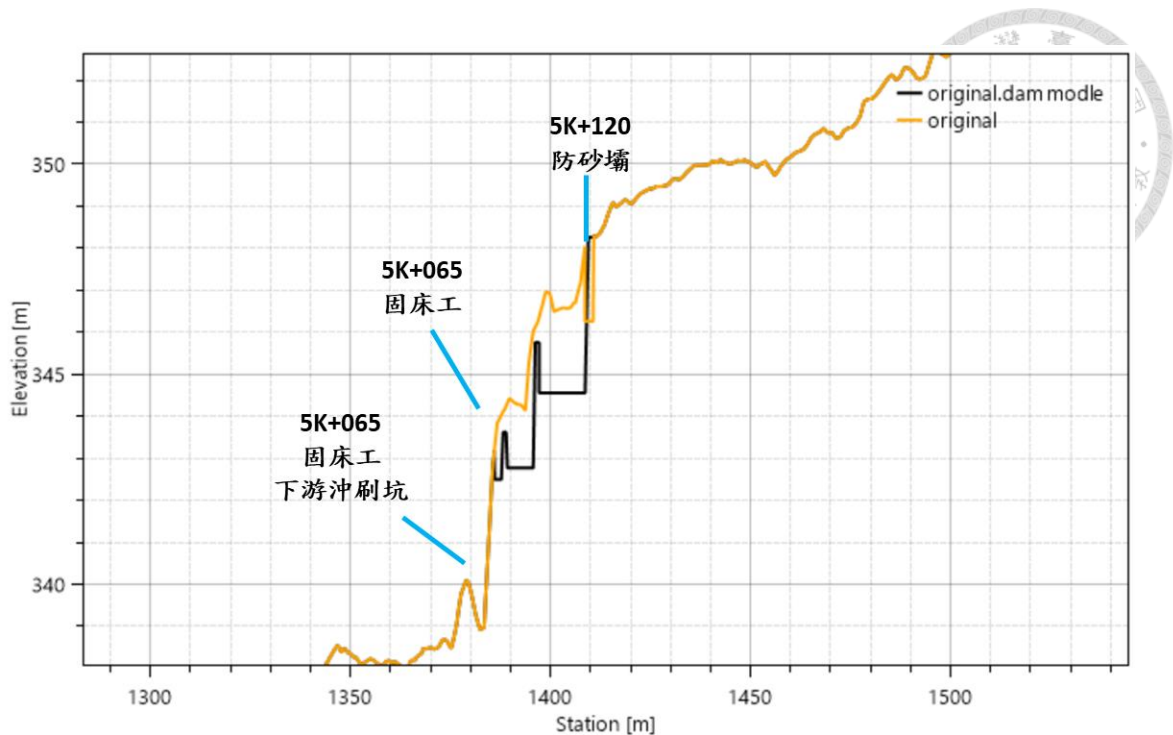


圖 3-21 模型中防砂壩建置之縱剖面

(5) 保全對象選定

本研究將選擇具有嚴重掏刷問題及溪床沖淤潛勢之位置作為下游保全對象，經過現況調查以及數值高程模型 DEM 比對，發現壩體下游第二支固床工(5K+065 固床工)的下游具有嚴重冲刷趨勢，目視約有大於 4 公尺之落差，顯示過去傳統封閉型防砂壩過度攔阻土砂料源，導致壩體下游固床工呈現嚴重冲刷之現象。因此本研究選定 5K+065 固床工下游之冲刷坑作為主要保全對象，期望通過一系列的升、降壩策略模擬，使得土砂逐漸回填，5K+065 固床工下游冲刷坑之橫剖面如下圖 3-22 所示，現地探勘照片如先前圖 3-7(H)所呈現。由橫剖面可以看出冲刷坑最低高程僅 338.5 公尺，而對照 5K+120 調整型防砂壩竣工圖可得 5K+065 固床工高程為 343.62 公尺，固床工高約 1.1 公尺，本研究預期一系列升、降壩策略可使冲刷坑回填至固床工基礎高度，因此設定本研究之保全對象目標淤積高程為 342.5 公尺。

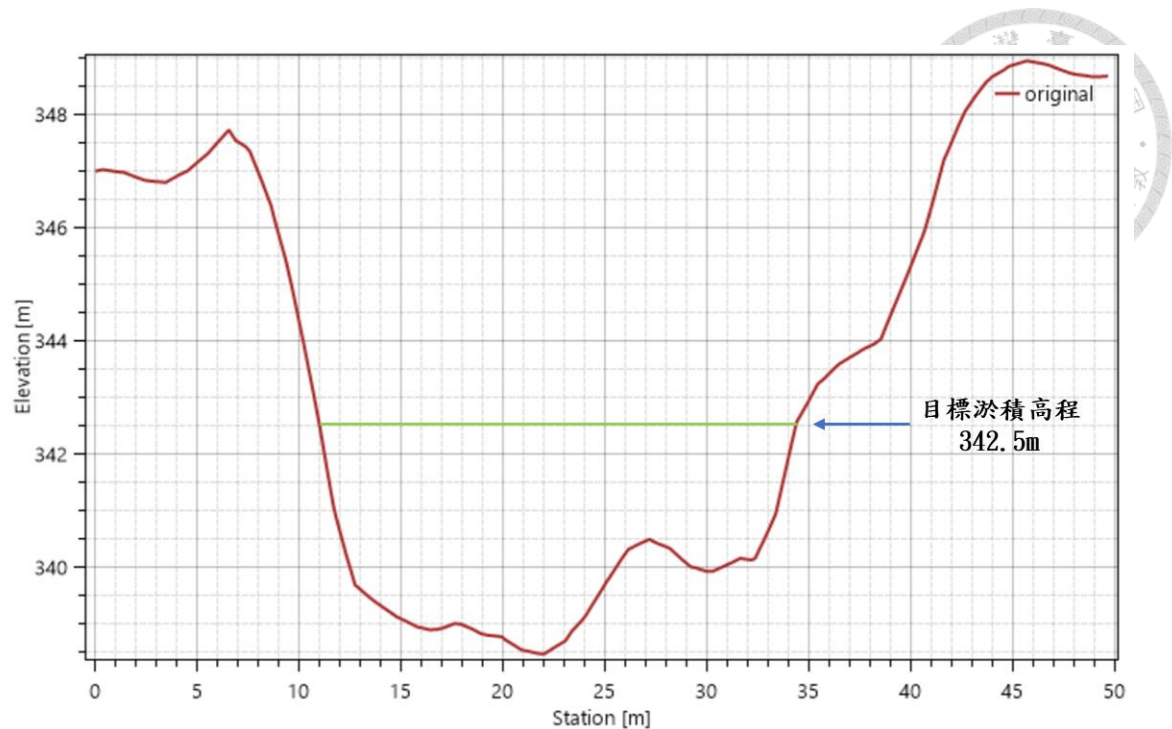


圖 3-22 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面圖

本研究除了主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑外，也包含更下游區段之 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆，新增此二保全對象的目的在於確保本研究之升、降操作策略對於防砂壩下游區段的擋土牆、護岸等保全設施在歷經洪水時是否會造成過量淤積而產生安全性疑慮。且根據行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020)「廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃」中提到該兩座擋土牆具有基礎掏空、傾倒的狀況，也希望透過本研究之升、降操作策略，提供該處充足的土砂料源補注，同時不影響保全對象之安全性。上述包含保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑、4K+350 擋土牆、4K+200 擋土牆之位置圖如下圖 3-23 所示；於模型中之縱剖面圖，如圖 3-24 所示；4K+350 擋土牆、4K+200 擋土牆現地照片如圖 3-25 所示，於本研究數值模型中之橫剖面如圖 3-26、圖 3-27 所示。



圖 3-23 本研究目標設施 5K+120 防砂壩與各保全對象之位置

資料來源: 水土保持局臺中分局、本研究產製

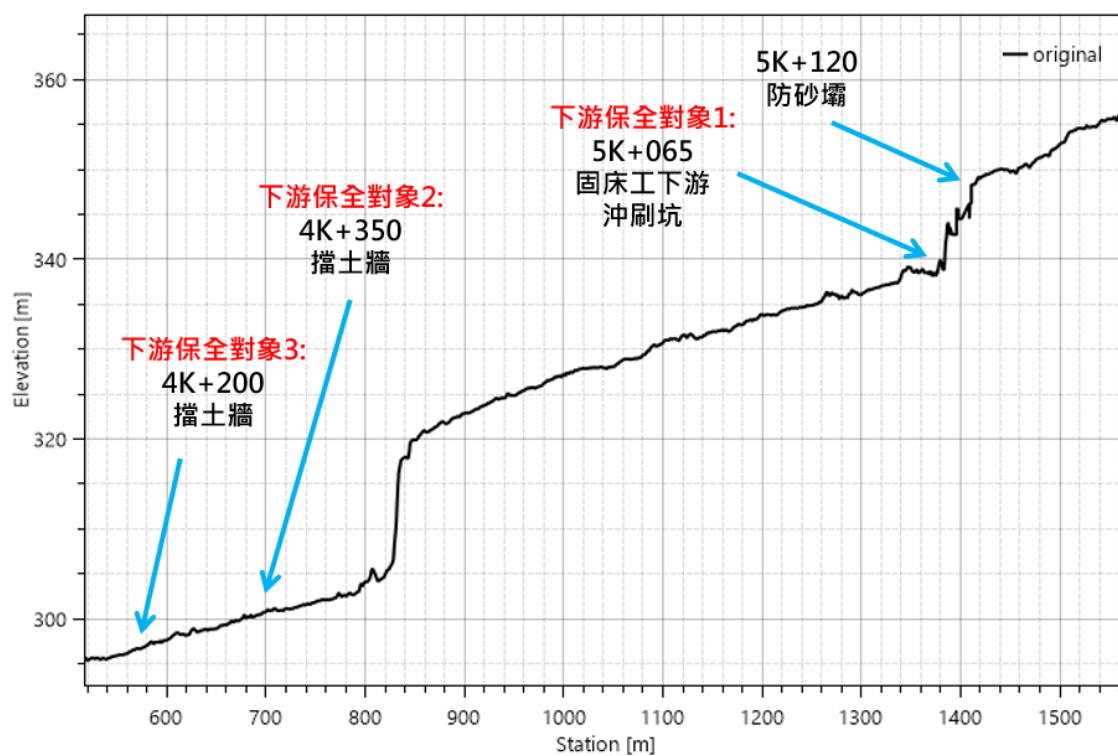
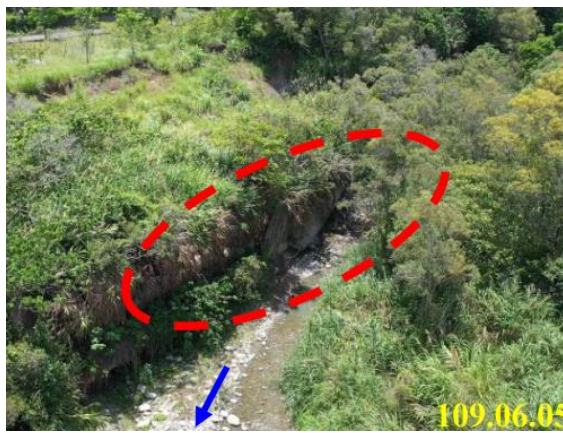


圖 3-24 本研究目標設施 5K+120 防砂壩與各保全對象之縱剖面位置圖



(A) 4K+350 右岸擋土牆基礎淘空



(B) 4K+200 右岸擋土牆傾倒

圖 3-25 4K+350 擋土牆、4K+200 擋土牆現地照片

資料來源：廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃

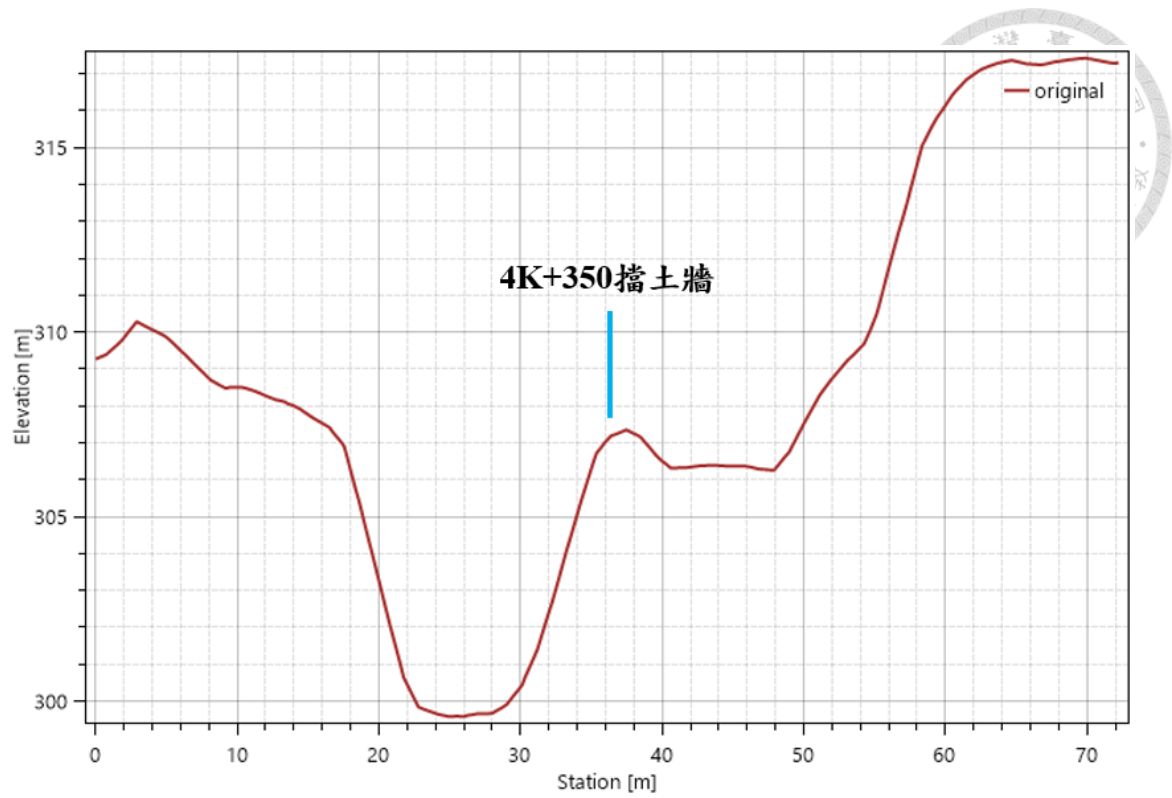


圖 3-26 4K+350 擋土牆於模型中之橫剖面

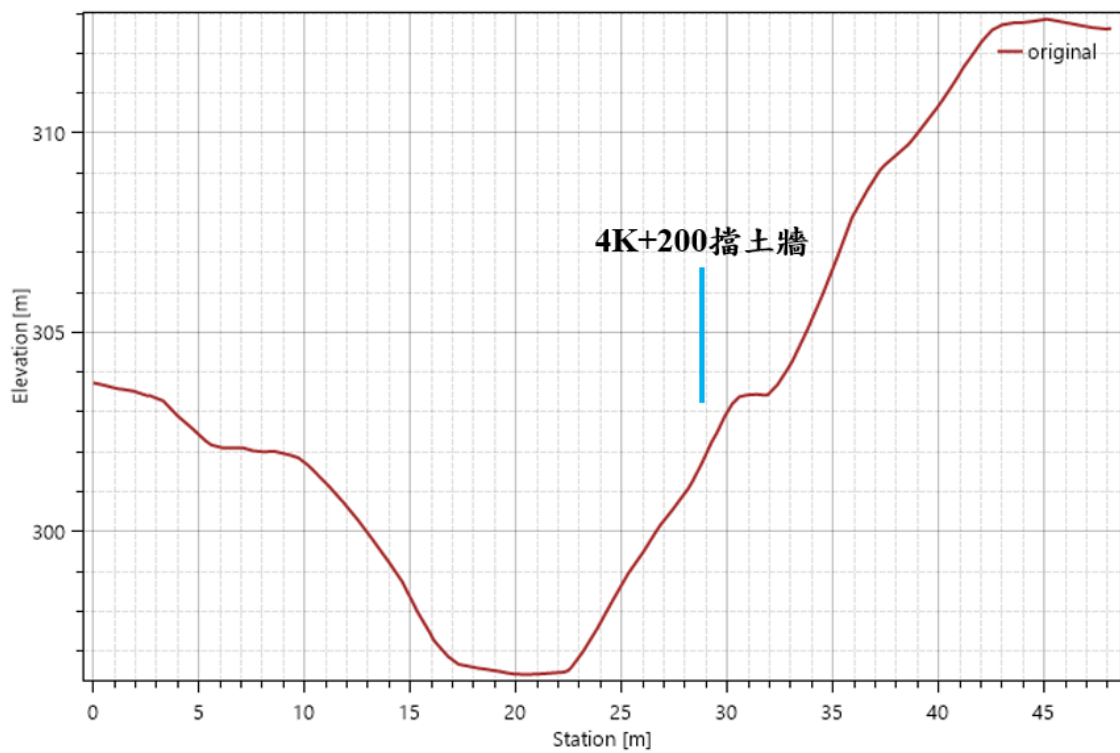


圖 3-27 4K+200 擋土牆於模型中之橫剖面

(6) 輸出資料設定

本步驟為模擬運算前的設定。其中包含計算時間步長(Computational time step)之設定，本研究參考 HEC-RAS 2D 官方操作手冊，其針對計算時間步長有提供相關建議公式，如下式 3-10。本試區廊仔溪流速模擬大部分區域為 2~5(m/s)，如圖 3-28，配合本研究之網格大小設定(3 公尺*3 公尺)，帶入式 3-10 可以得到本數值模型之計算時間步長需要小於 0.6 秒，考量計算時間成本以及模擬結果之精準度，本研究採用 0.5 秒作為計算時間步長設定。

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \quad \text{式 3-10}$$

其中， ΔT 為計算時間步長(s)； ΔX 為網格大小(m)； V 為流速大小(m/s)。

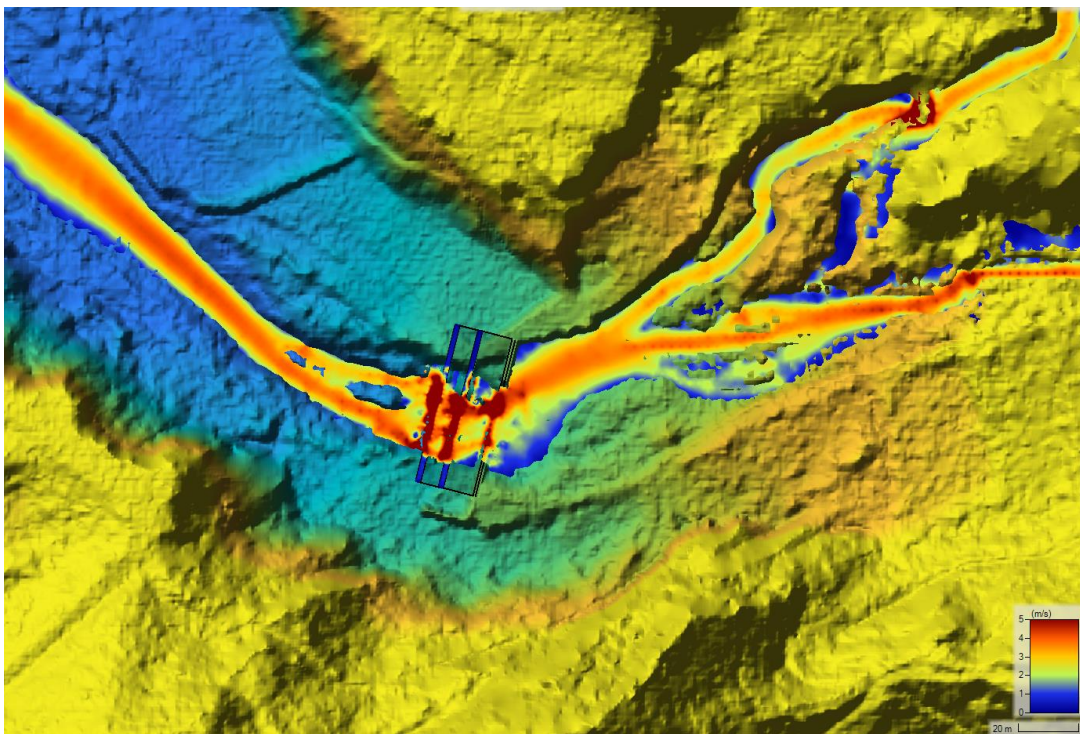
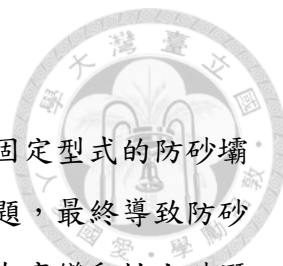


圖 3-28 廊仔溪流速模擬結果



3.3 調整型防砂壩經營管理與操作矩陣

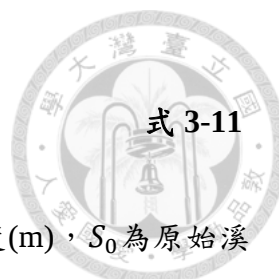
溪流中的土砂運移為一個動態的過程，傳統且完全封閉且固定型式的防砂壩往往會造成壩體下游嚴重沖刷以及下游河段土砂料源不足等問題，最終導致防砂壩下游之構造物過度掏刷、傾倒等問題頻繁發生。然而，於具有高變動性土砂潛勢的溪流過度調降或拆除防砂壩壩體，也容易導致嚴重土砂災害的產生，從而造成防砂壩下游保全對象的生命財產安全。

調整型防砂壩最大優勢之一在於預防土砂災害發生之餘，可以有效地透過調整壩體來解決下游河段缺乏土砂料源補注而產生的過度沖刷問題。因此，本研究將此優勢結合土砂料源的供需法則概念，將溪流以防砂壩為中心進行分隔，壩體上游河段為土砂料源供給區，壩體下游河段為土砂需求區，設計出調整型防砂壩之「經營管理與操作矩陣」。相關管理單位可依據不同上、下游的土砂現況，對照矩陣提供之調整方式，進行相對應的防砂壩壩體調整，如此一來在有效地預防土砂災害發生的同時，也達到溪流上下游土砂連續性、沖淤平衡的優點。以下將針對矩陣概念進行說明。

3.3.1 經營管理與操作矩陣概念說明

表 3-10 為調整型防砂壩經營管理與操作矩陣，其核心概念將以「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二因子作為調整策略變動之依據，且分別將這兩個因子以高、中、低做區間的劃分，其目的在於讓相關管理單位能夠更清楚地透過當下調整型防砂壩的現狀，找到矩陣中相對應之操作。

矩陣之縱軸為「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」其數值的高低代表著防砂壩上游土砂淤積量的多寡，也意味著當管理單位調降壩體時，會補注到防砂壩下游區段的土砂量多寡，一旦忽略此數值而過度調降，可能會直接地影響下游保全對象的安全，導致土砂災害的產生；相對地，過度封閉壩體也可能會影響下游保全對象及河道的安全，導致掏刷、掏空的狀況發生。其中，「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」將根據水土保持手冊(2017)之砂壩影響範圍(ℓ)推估公式，如下式 3-11。



$$\ell = \frac{H_e}{S_0 - S_e}$$

上述公式中， ℓ 為防砂壩影響範圍(m)， H_e 為壩體有效高度(m)， S_0 為原始溪床坡度， S_e 為計畫淤砂坡度。以本計畫試區之廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩為例，參考廊仔溪上游 4K 附近災害復建工程竣工圖、行政院農業委員會水土保持局(2021)「110 年臺中分局轄區重要治理區土砂高變動性調查評估及治理策略研擬成果報告書」，得到壩體有效高(H_e)為 4 公尺、原溪床坡度(S_0)為 7%、計畫淤砂坡度(S_e)為 4%，代入式 3-11 後得到防砂壩之影響範圍約為 133.33 公尺。

矩陣之橫軸為「下游保全對象之冲刷深度」，首先，管理單位需選定防砂壩下游之特定保全對象或構造物，該處通常可以選擇已具有嚴重掏刷問題或能夠充分代表溪床冲淤潛勢之位置。「下游保全對象之冲刷深度」此數據直接地表示目前下游保全對象的冲淤狀況，當此因子屬於「高」的階段，則代表防砂壩下游需要更多的土砂補注量，管理單位可能就需要調降更多的預鑄塊，使土砂能夠順利的下移；相對地，若此因子屬於「低」的階段，則代表下游保全對象並無掏刷的狀況，需要注意不要過度的調降，避免過量土砂淤積造成危害。

其中縱、橫軸之高、中、低的數值範圍會因應用於不同之集水區及野溪而有所變動，本研究將針對不同數值範圍進行相關模擬試驗，比較其結果差異，並於後續章節提出。

例如：目前現況調整型防砂壩上游影響範圍內的淤砂坡度為「低」、下游保全對象構造物之冲刷深度為「高」，則代表此時壩體下游保全對象面臨過度的掏刷，需要大量的土砂料源補注來緩解此問題，然而壩體上游影響範圍內之淤砂坡度處於「低」的狀態，並沒有相對應的土砂料源補注量，經過查考本研究之經營管理與操作矩陣，應將調整型防砂壩之預鑄塊調降至最低，也就是調降 100%之預鑄塊，藉由降壩的調整使上游土砂能夠有效地運移至下游。

表 3-10 調整型防砂壩經營管理與操作矩陣



經營管理與操作矩陣		下游保全對象之沖刷深度		
		高	中	低
上游影響範圍內 之淤砂坡度	低	調降 100% 預鑄塊	調降 80% 預鑄塊	調降 60% 預鑄塊
	中	調降 80% 預鑄塊	調降 60% 預鑄塊	調降 40% 預鑄塊
	高	調降 60% 預鑄塊	調降 40% 預鑄塊	調降 20% 預鑄塊

以上提出之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣，希望提供管理單位與決策者一套完整的調整型防砂壩操作依據，其中降壩操作即「可依現地上、下游土砂狀況比對矩陣做出對應調整」，當下游土砂填補充足達到一定的標準或是遇到超過特定雨量的豪雨事件後，則需要進行升壩操作，使其發揮攔阻土砂的作用，直到防砂壩再度淤滿或是下游保全對象沖刷深度達一定的標準後，則再次依照當下土砂狀況做矩陣的對應，進行降壩。

藉由一系列的升、降壩操作，使原本不穩定之溪床漸漸地往上游影響範圍內之淤砂坡度「低」、下游保全對象之沖刷深度「低」之位置移動(即矩陣中右上角之情境)，最終達到穩定溪床坡度、減緩下游掏刷之溪流土砂平衡狀態。

3.3.2 調整情境模擬說明

本小結將以假定情境配合示意圖搭配文字敘述進行情境示意模擬，說明調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之概念。

1. Step 0

以廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩為例，假設目前原始地形經歷了多場降雨事件，導致防砂壩上游已淤滿，且影響範圍內之淤砂坡度為「中」，下游保全對象沖刷程度為「高」如圖 3-29 所示。

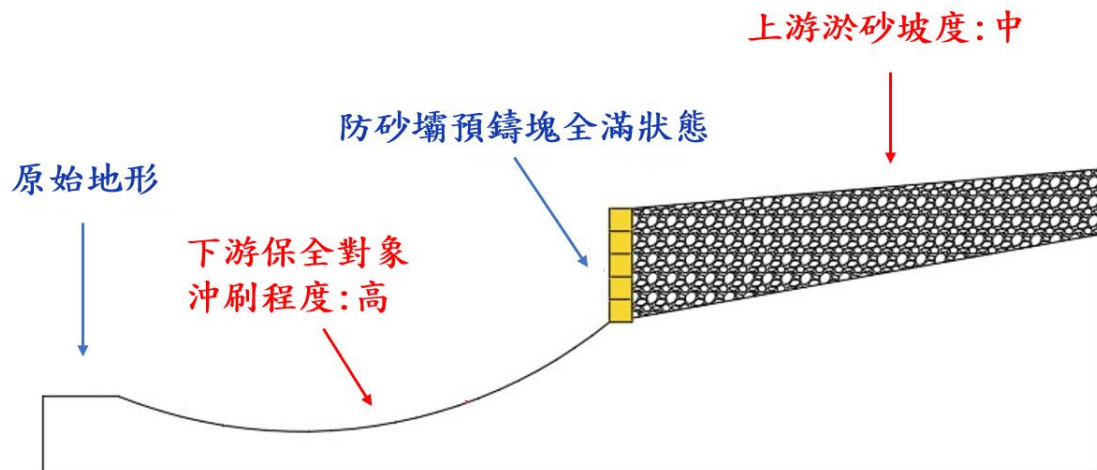


圖 3-29 原始地形模擬示意圖

2. Step 1

此時管理單位對照矩陣，發現此一現地狀況需要進行調降壩體 80%之預鑄塊，也就是 4 支廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩預鑄塊，如表 3-11 之矩陣中左、中位置粗體字。進行降壩後的情境示意圖如圖 3-30 所示。

表 3-11 經營管理與操作矩陣情境模擬 step1 調降

經營管理與操作矩陣		下游保全對象之沖刷深度		
		高	中	低
上游影響範圍內之淤砂坡度	低	調降 5 支 預鑄塊	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊
	中	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊
	高	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊	調降 1 支 預鑄塊

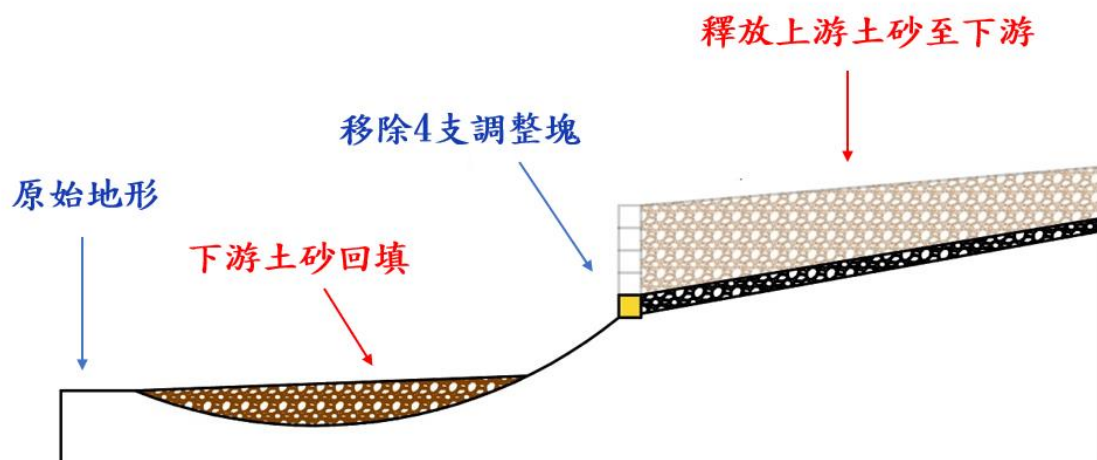


圖 3-30 Step1 調降模擬示意圖

3. Step 2

接續 Step 1，當遇到特定豪雨事件或是下游保全對象達一定的淤積深度後，再次將防砂壩預鑄塊升回至 5 支的原始高度，使其發揮攔阻土砂的作用。

經過時間累積，防砂壩再度淤滿或是遇到超過特定雨量的豪雨事件導致下游達到一定的沖刷深度，如圖 3-31 所示，假設此時壩體上游因先前豪雨事件使其土砂料源減少，且升壩操作使得土砂淤積，上游淤砂坡度降為「低」；而下游因原先嚴重的掏刷，雖然有土砂有順利下移，但下游保全對象沖刷深度仍為「高」。

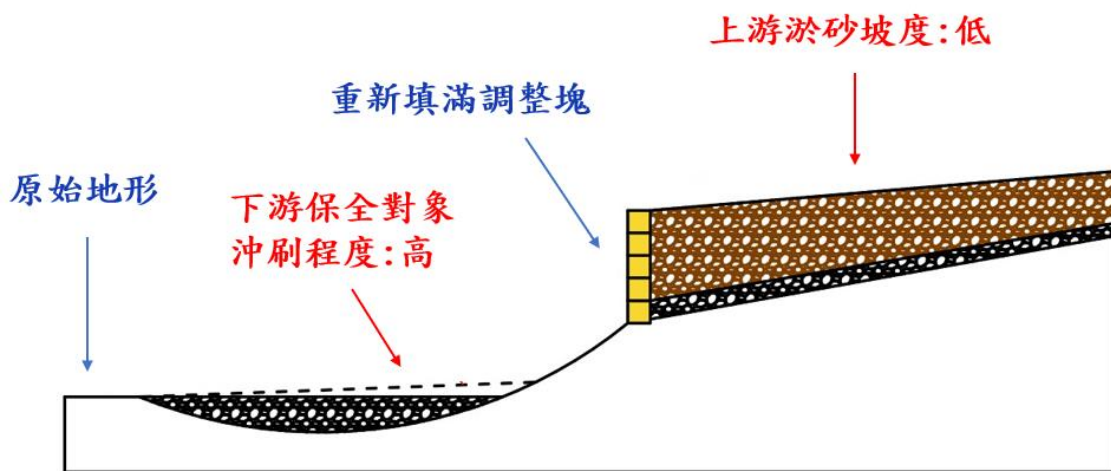


圖 3-31 Step2 調升模擬示意圖

4. Step 3

接續 Step 2，此時管理單位根據現地狀況之上游淤砂坡度為「低」，下游保全對象沖刷程度為「高」，進行矩陣對照，發現此一現地狀況需要進行調降壩體 100%之預鑄塊，也就是 5 支廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩預鑄塊，如表 3-12 之矩陣左、上位置粗體字。進行降壩後的情境示意圖如圖 3-32 所示。

表 3-12 經營管理與操作矩陣情境模擬 step3 調降

經營管理與操作矩陣		下游保全對象之沖刷深度		
		高	中	低
上游影響範圍內 之淤砂坡度	低	調降 5 支 預鑄塊	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊
	中	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊
	高	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊	調降 1 支 預鑄塊

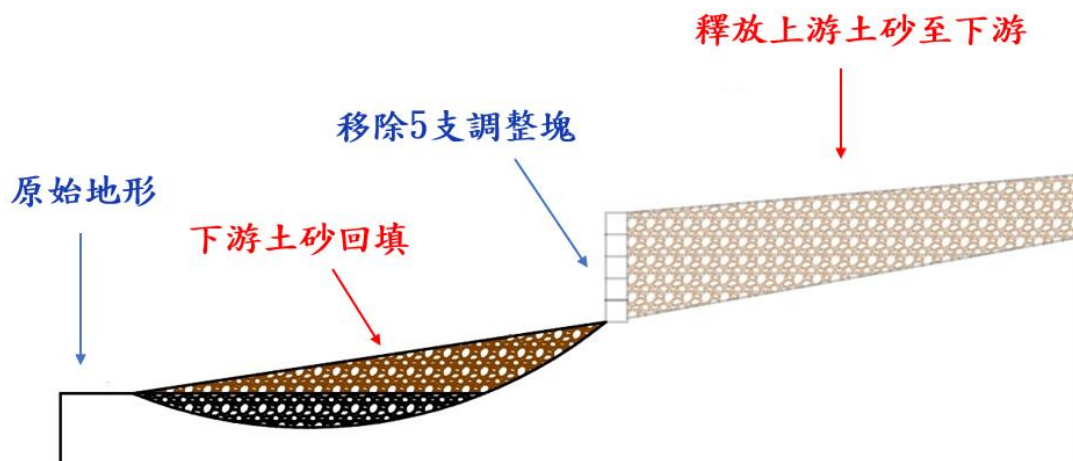


圖 3-32 Step3 調降模擬示意圖

5. Step 4

接續 Step 3，當遇到超過特定豪雨事件或是下游保全對象達一定的淤積深度後，再次將防砂壩預鑄塊升回至 5 支的原始高度，使其發揮攔阻土砂的作用。

經過時間累積，防砂壩再度淤滿或是遇到超過特定雨量的豪雨事件導致下游達到一定的冲刷深度，如圖 3-33 所示，假設此時壩體上游淤砂坡度仍為「低」；下游因為先前持續的升、降壩操作，使土砂順利下移補注，下游保全對象冲刷深度降為「中」。

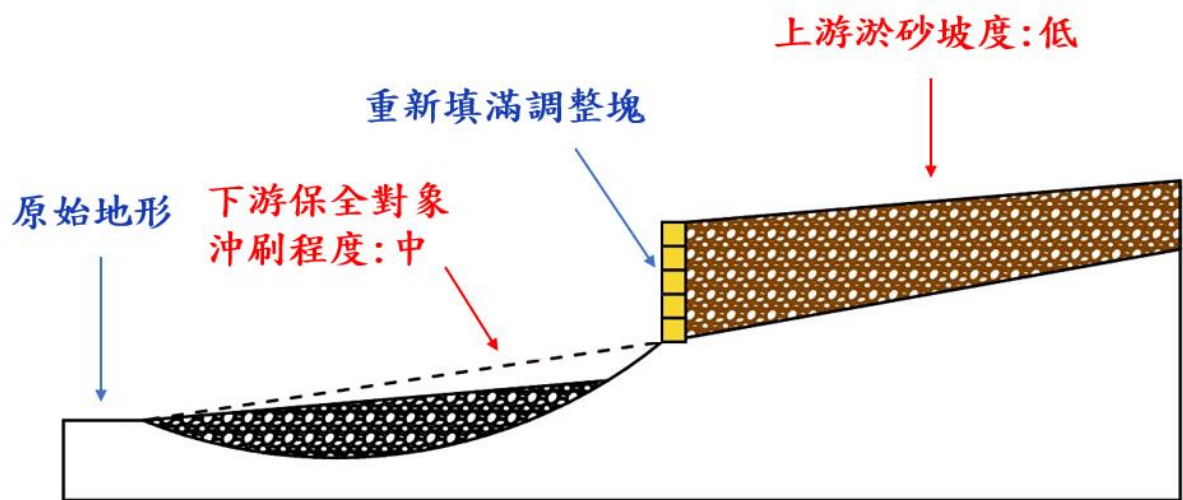


圖 3-33 Step4 調升模擬示意圖

6. Step 5

接續 Step 4，此時管理單位根據現地狀況之上游淤砂坡度為「低」，下游保全對象沖刷程度為「中」，進行矩陣對照，發現此一現地狀況需要進行調降壩體 80%之預鑄塊，也就是 4 支廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩預鑄塊，如表 3-13 之矩陣上、中位置粗體字。進行降壩後的情境示意圖如圖 3-34 所示。

表 3-13 經營管理與操作矩陣情境模擬 step5 調降

經營管理與操作矩陣		下游保全對象之沖刷深度		
		高	中	低
上游影響範圍內之淤砂坡度	低	調降 5 支 預鑄塊	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊
	中	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊
	高	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊	調降 1 支 預鑄塊

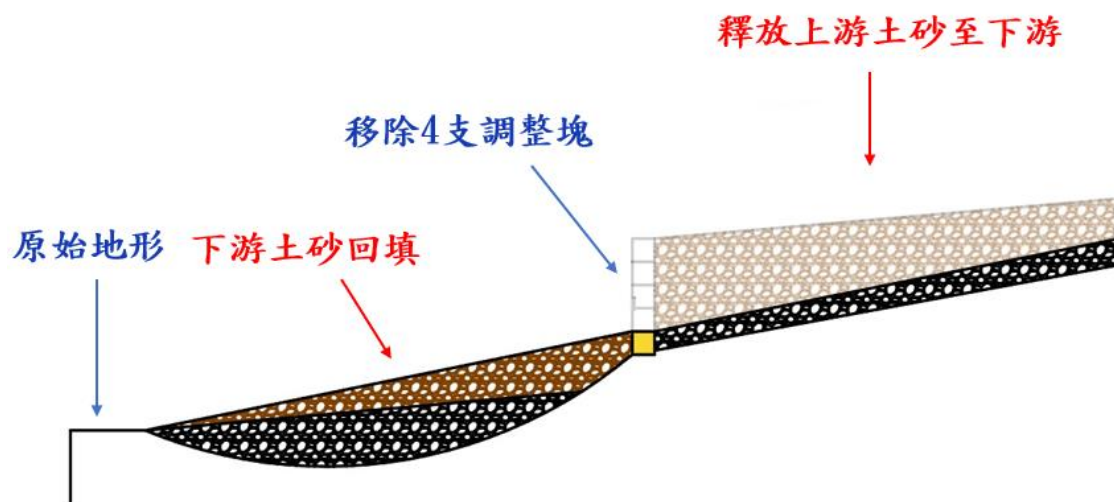


圖 3-34 Step5 調降模擬示意圖

7. Step 6

接續 Step 5，當遇到超過特定豪雨事件或是下游保全對象達一定的淤積深度後，再次將防砂壩預鑄塊升回至 5 支的原始高度，使其發揮攔阻土砂的作用。

經過時間累積，防砂壩再度淤滿或是遇到超過特定雨量的豪雨事件導致下游到達一定的冲刷深度，如圖 3-35 所示，假設此時壩體上游淤砂坡度仍為「低」，且持續降低；而下游也因為一系列的升、降壩操作，使得原先掏刷嚴重冲刷坑逐漸改善，下游保全對象冲刷深度成功降為「低」。

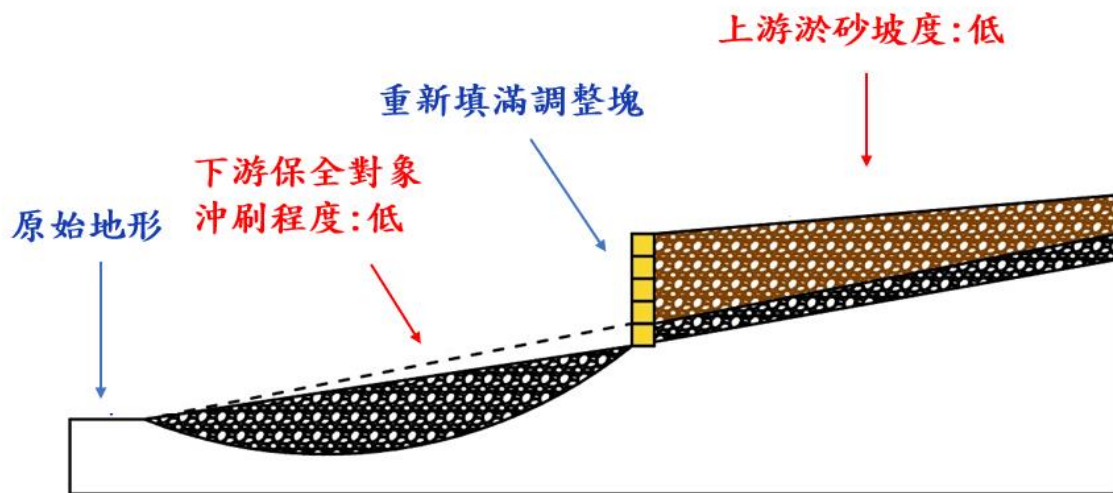
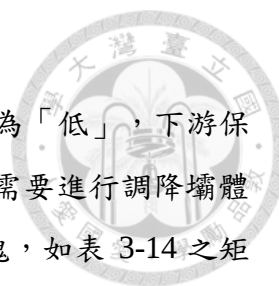


圖 3-35 Step6 調升模擬示意圖



8. Step 7

接續 Step 6，此時管理單位根據現地狀況之上游淤砂坡度為「低」，下游保全對象沖刷程度為「低」，進行矩陣對照，發現此一現地狀況需要進行調降壩體 60%之預鑄塊，也就是 3 支廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩預鑄塊，如表 3-14 之矩陣中上、中位置粗體字。

經過一系列的升、降壩調整後，整體溪段成為連續波段，上游淤砂坡度減緩、下游嚴重沖刷問題也成功解決，達到土砂收支平衡的效果，也成功延長防砂壩的使用年限。最終的情境示意圖如圖 3-36 所示。

表 3-14 經營管理與操作矩陣情境模擬 step7 調降

經營管理與操作矩陣		下游保全對象之沖刷深度		
		高	中	低
上游影響範圍內 之淤砂坡度	低	調降 5 支 預鑄塊	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊
	中	調降 4 支 預鑄塊	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊
	高	調降 3 支 預鑄塊	調降 2 支 預鑄塊	調降 1 支 預鑄塊

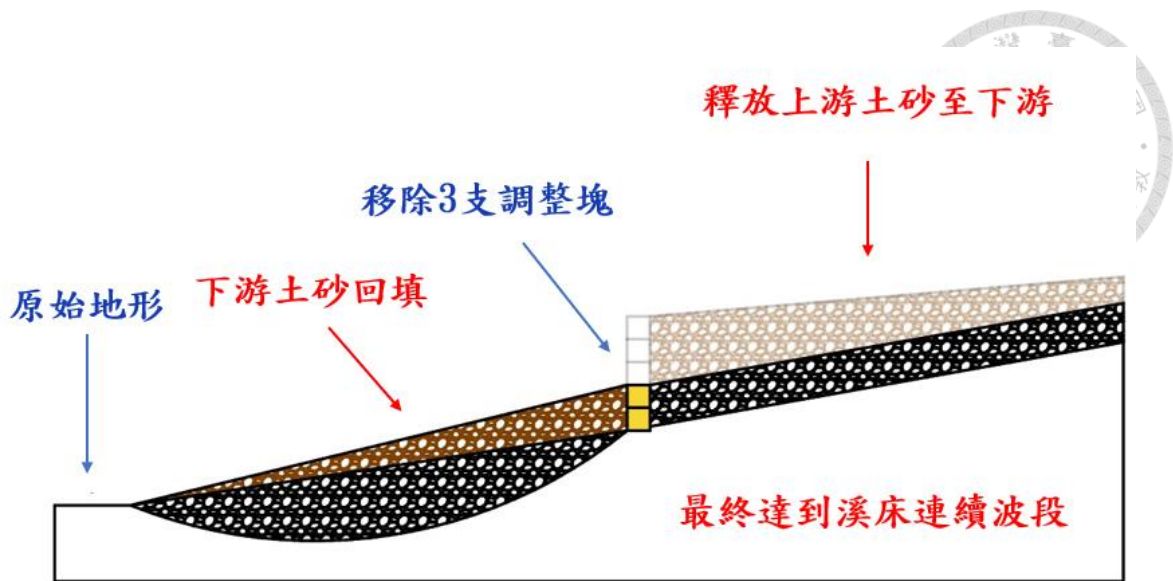


圖 3-36 Step7 最終模擬示意圖

3.4 小結

綜合上述說明，本研究將利用 HEC-RAS 2D 水理數值模型，匯入本研究試區廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩之資料，針對不同之「調整型防砂壩經營管理與操作矩陣」縱、橫軸範圍標準、壩體調整時機以及升、降壩標準制定，總共將進行 4 階段的數值模型試驗，最終彙整出完整之調整型防砂壩經營管理操作策略，詳細模擬結果可見第四章、結果與討論:。

第四章、結果與討論



4.1 第一階段模擬

本人先前與夏佳宏同學於 2022 年共同執行水保局創新型研究計畫「透過式調整型防砂壩土砂運移之經營管理與操作」，於該計畫期間曾進行初步調整型防砂壩經營管理與操作策略模擬，本階段模擬主要希望初步找出矩陣縱、橫軸之高、中、低範圍標準。本節將針對此第一階段模擬成果進行簡要說明，詳細此階段之操作模擬內容請見夏佳宏(2023)「透過式調整型防砂壩經營管理及土砂密實度之縮尺試驗研究」。

4.1.1 整體模擬流程

本階段模擬使用內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型(DEM)作為原始地形，依照各步驟地形狀況進行防砂壩預鑄塊調整，總共進行 7 步驟升、降壩調整，最終使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本階段於經營管理與操作矩陣中之模擬流程如圖 4-1 所示。

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.3m (高程: < 341.2)	中 沖刷深度: 0.8~1.3m (高程: 341.2~341.7)	低 沖刷深度: < 0.8m (高程: > 341.7)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊 Step 3、4	調降 4 支預鑄塊 Step 5、6	調降 3 支預鑄塊 Step 7
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊 Step 1、2	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

圖 4-1 第一階段模擬流程圖

本階段矩陣之縱軸參考行政院農業委員會水土保持局(2021)「110 年臺中分局轄區重要治理區土砂高變動性調查評估及治理策略研擬成果報告書」中提到 5K+120 溪段上游坡度可達 7%、整體溪床坡度為 4% ，暫時設定高、中、低標準。本階段矩陣之橫軸則考慮保全對象之最低高程 338.5 公尺、目標淤積高程 342.5 公尺，以此作為區間，並依照模擬結果暫時設定高、中、低標準。本階段模擬主要希望初步找出矩陣縱、橫軸之高、中、低範圍標準及調整時機，並於後續三階段的模擬進行改良與修正，最終提出更加完整的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣制定規則，以及防砂壩調整策略。

4.1.2 各步驟結果前後對比

本節將呈現第一階段模擬之各步驟模擬結果，將每一步升、降壩操作後經過洪水事件模擬之地形，與前一步驟之地形進行對比分析，如下所示。

1. Step1

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，對照矩陣調整策略，進行調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-2 中黑色線，後續進行 50 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-2 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂順利下移，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度明顯降低，坡度由原先 5.2% 降至 4.2%，且壩體下游溪段產生淤積。

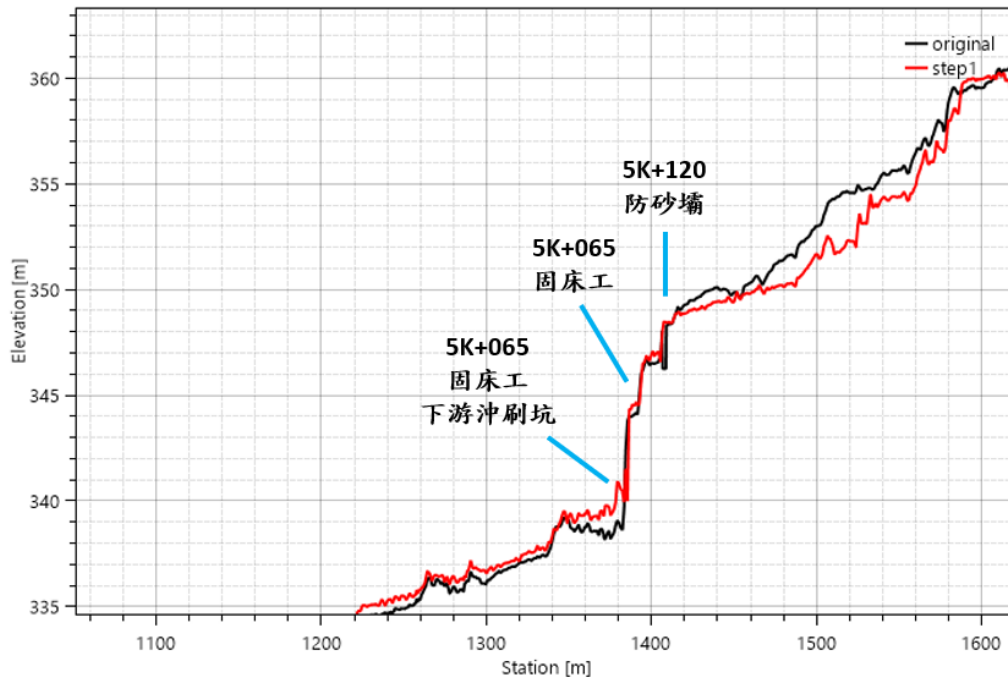


圖 4-2 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-3 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為原始地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟操作，淤積量有明顯增加，此斷面淤積量較原始地形增加了 33.58 平方公尺。其平均高程由原先 339.65 公尺上升至 341.08 公尺，逐漸接近本研究設定之預期回填高程 342.5 公尺，河道平均淤積深度約為 1.45 公尺，顯示經過本步驟調降後防砂壩上游土砂有順利填補至冲刷坑。

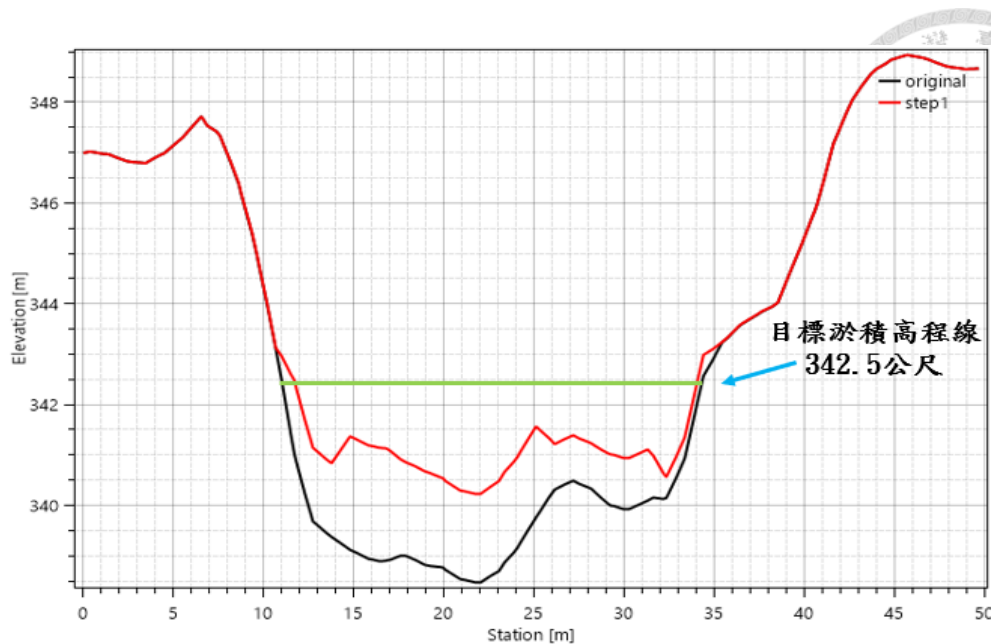


圖 4-3 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比

2. Step2

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-4 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-4 中紅色線。可以觀察到受到調升策略的影響，防砂壩上游有淤砂的現象，防砂壩上游影響範圍內淤砂坡度由原先 4.2%降為 4%。壩體下游因為防砂壩阻攔土砂的緣故，而有些許沖刷的現象。

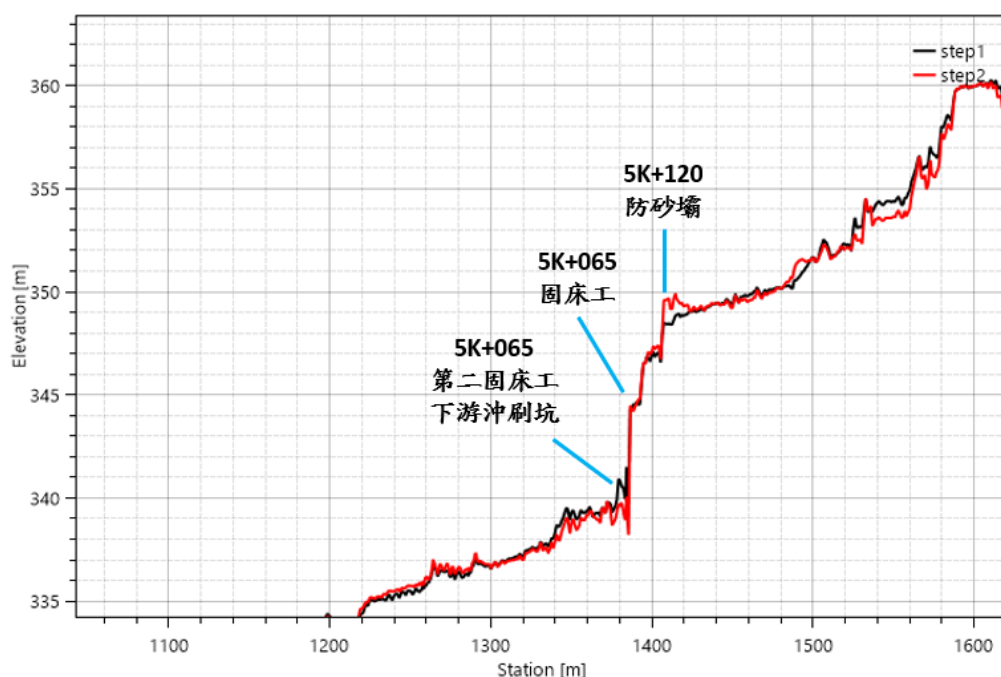


圖 4-4 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-5 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step1 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出由於升壩操作策略，使得土砂下移不明顯，但平均高程仍由上一步的 341.08 公尺上升至 341.2 公尺，推論是由於原先壩體上游淤滿之土砂量大，因此即使為升壩操作，洪水依然會帶來些許土砂補注量。

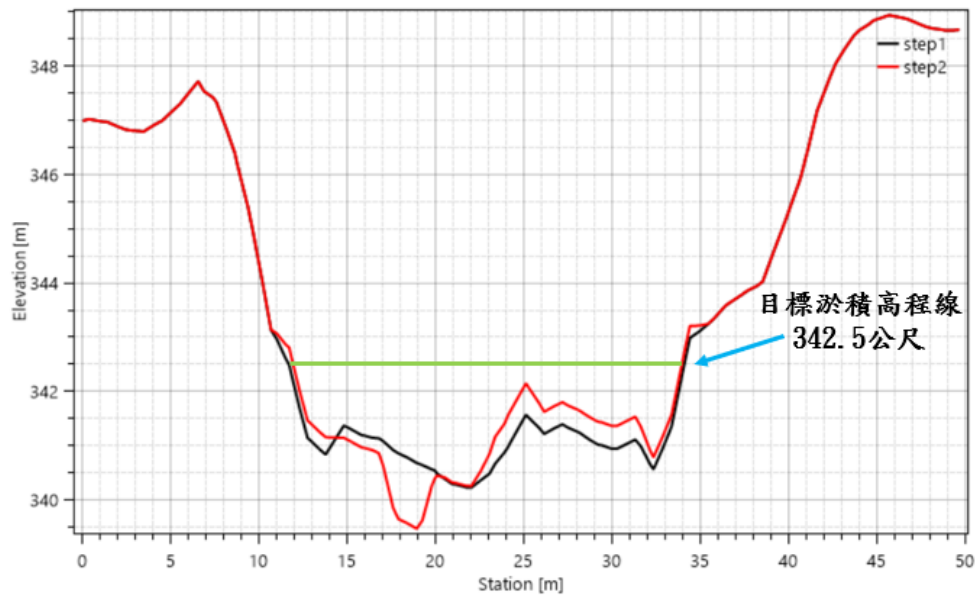


圖 4-5 Step1 地形與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比

3. Step3

本步驟接續上一步驟之地形，並對照矩陣調整策略後，進行調降 5 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-6 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-6 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂順利下移，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由原先 4% 降至 3.6%，但緊鄰 5K+065 固床工下游落差處之冲刷有冲刷加深的潛勢。

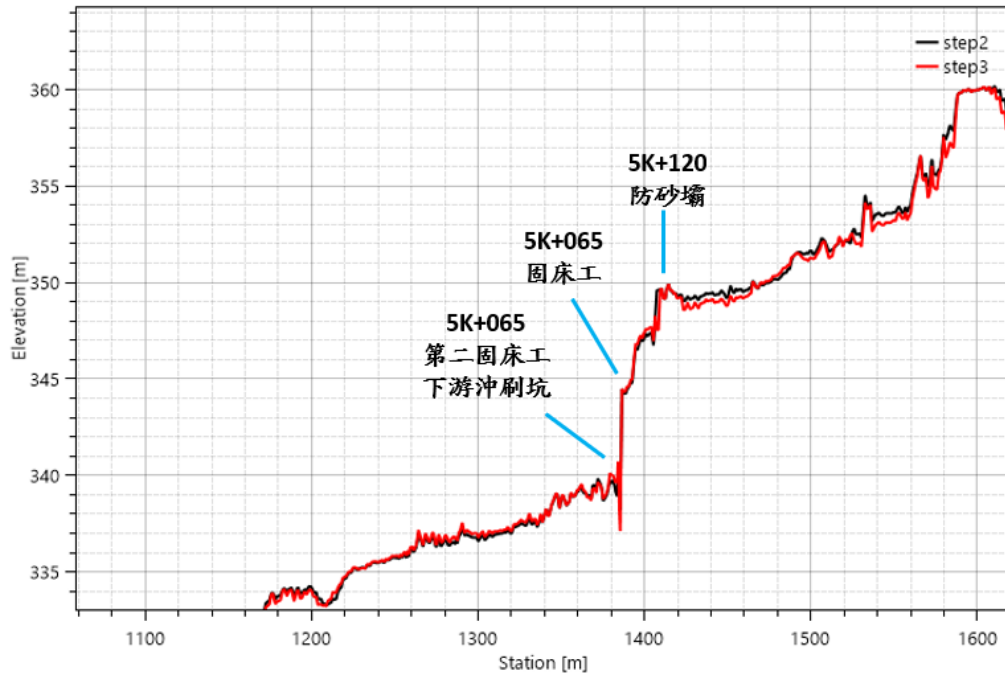


圖 4-6 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-7 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step2 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出保全對象在降壩操作後有預期的淤積表現，此斷面相較於上一步增加了 10.29 平方公尺的淤積量，平均高程由原先 341.2 公尺上升至 341.63 公尺，平均淤積深度上升至 2.01 公尺，顯示經過本步驟調降後防砂壩上游土砂有順利填補至冲刷坑。

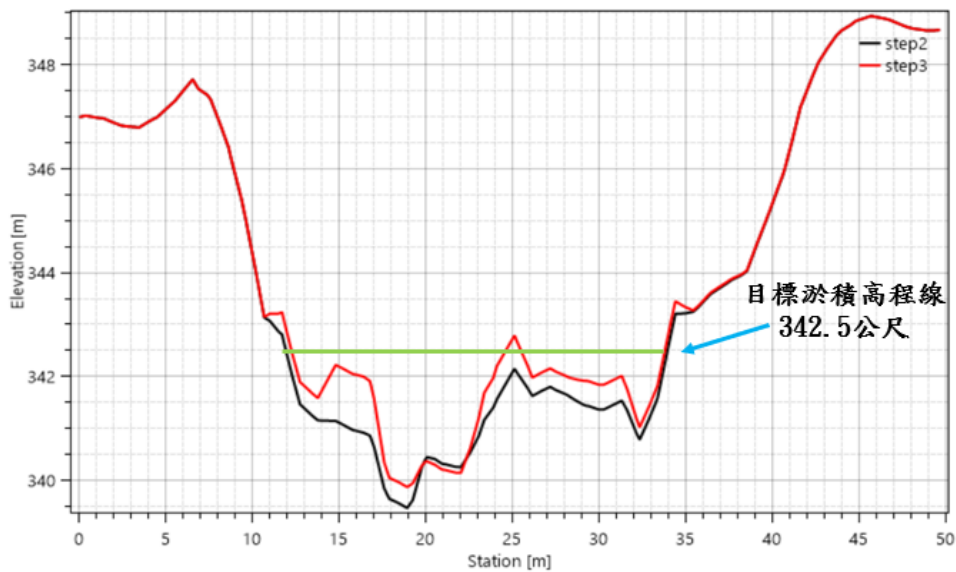


圖 4-7 Step2 地形與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比

4. Step4

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-8 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-8 中紅色線。可以觀察到防砂壩上游因壩體調升策略而有淤砂的現象，防砂壩上游影響範圍內淤砂坡度由原先 3.6%降為 3.3%。但緊鄰 5K+065 固床工下游的地形落差處有產生約 5 公尺的沖刷現象，需要進行後續調整改善此問題，且整體下游溪段因升壩策略呈現些許之沖刷現象。

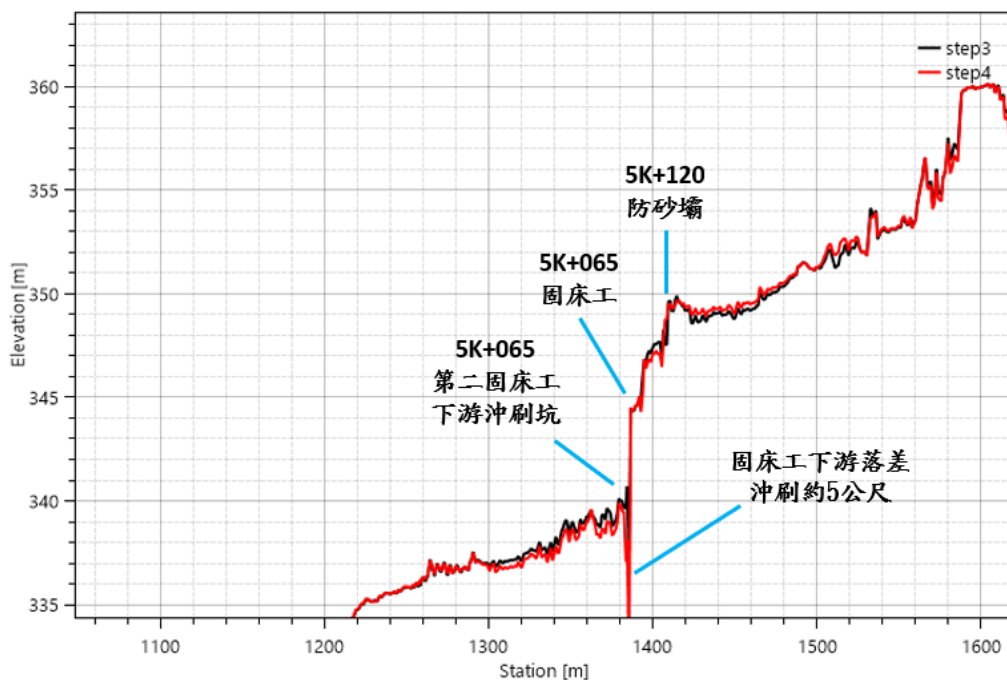


圖 4-8 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-9 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step3 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出由於升壩操作策略，使得本斷面有些許沖刷的現象，河道平均高程由原本的 341.63 公尺降低到 341.5 公尺，斷面淤積量較上一步降低了 1.77 平方公尺。顯示經過前幾步的操作，原先防砂壩上游淤滿的過量土砂量已經清淤許多，因此相較於 Step2 即使升壩仍然造成淤積，本輪的升壩操作後之結果符合預期，使下游沖刷坑產生些許沖刷，河道平均淤積深度降低 0.13 公尺。

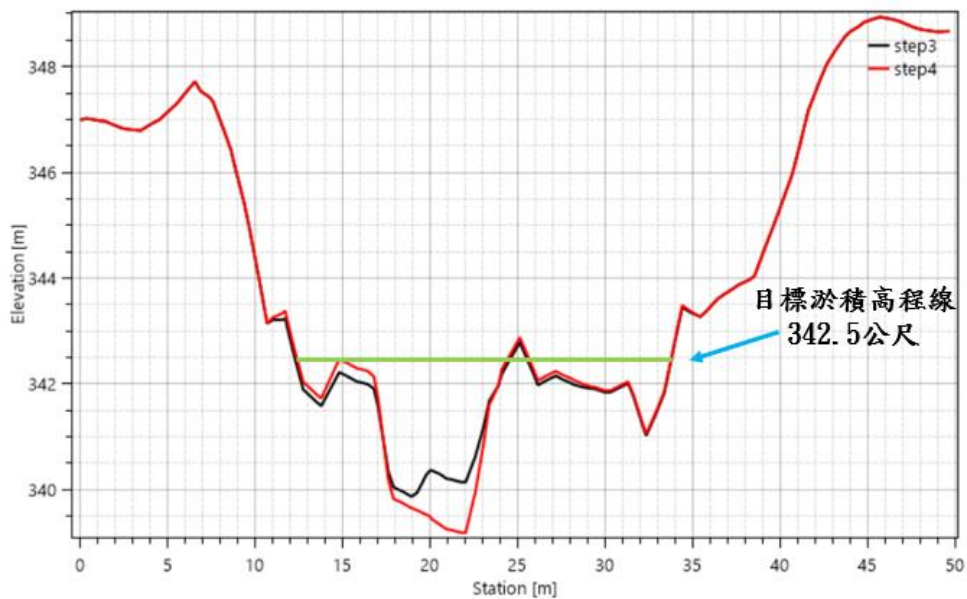


圖 4-9 Step3 地形與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比

5. Step5

本步驟接續上一步驟之地形，並對照矩陣調整策略後，進行調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-10 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-10 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂持續有向下運移趨勢，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由原先 3.3% 降至 2.9%。而防砂壩下游溪段整體呈現淤積現象，且上一步造成固床工落差處嚴重的沖刷現象，於本步驟有明顯土砂回填現象，整體防砂壩下游區段也有良好回淤狀況。

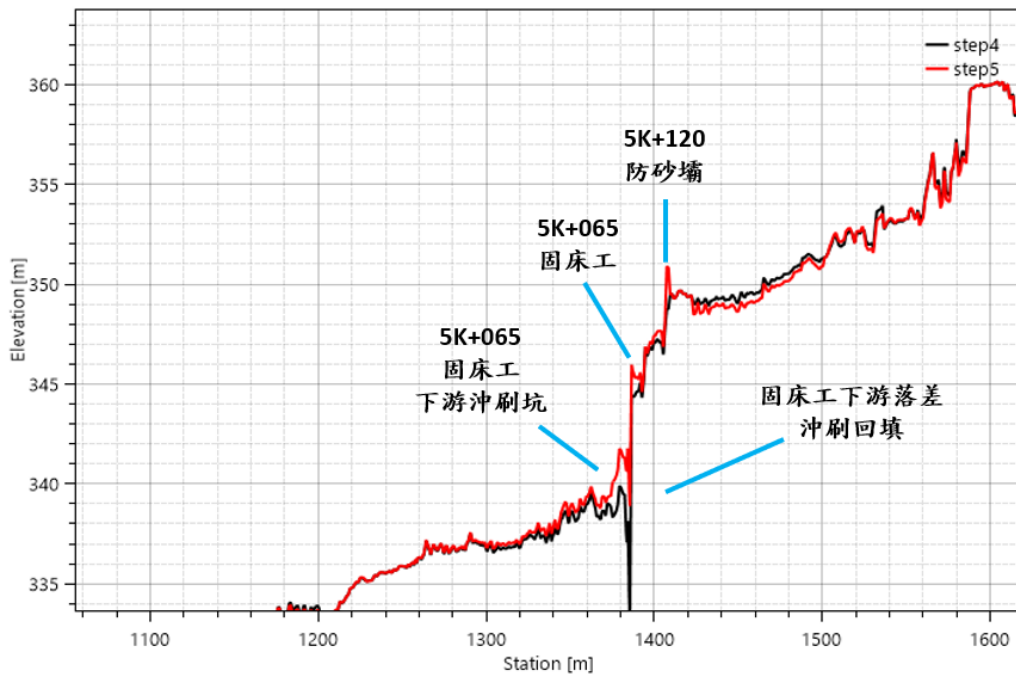


圖 4-10 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-11 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step4 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出保全對象在降壩操作後有良好的淤積效果，平均高程由上一步的 341.5 公尺上升至 341.87 公尺，平均淤積深度由上一步的 1.85 公尺上升至 2.22 公尺，經過本步驟調降後防砂壩上游土砂有順利填補至此沖刷坑斷面。

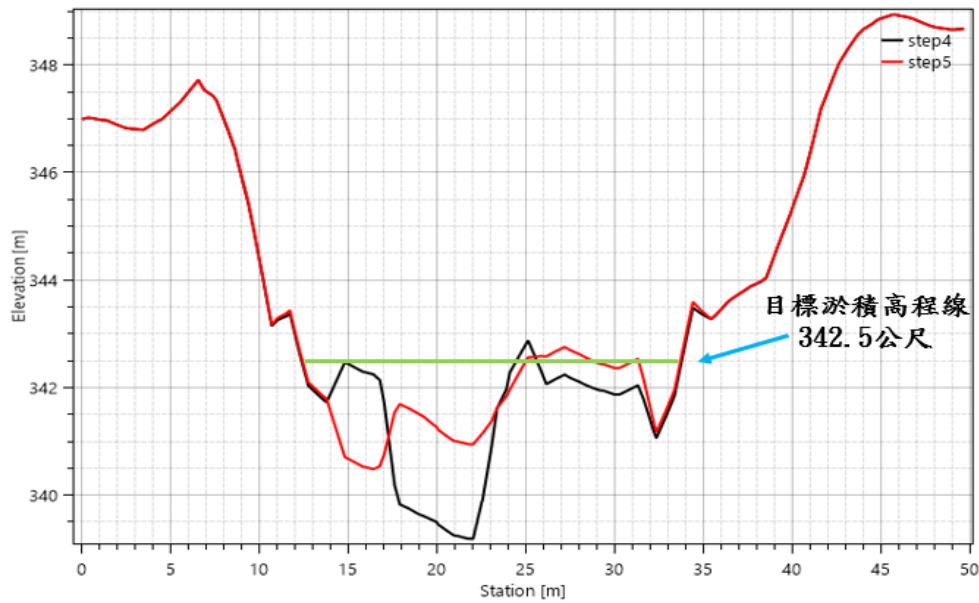


圖 4-11 Step4 地形與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比

6. Step6

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-12 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-12 中紅色線。可以觀察到通過一系列的調整策略，上游坡度逐漸趨緩，土砂料源漸漸降低，因此本步驟升壩操作於壩體上游僅有些淤砂現象，防砂壩上游影響範圍內淤砂坡度由原先 2.9%降為 2.8%，與先前步驟的坡度變化比較可以看出上游淤砂坡度漸漸達到收斂的現象。整體防砂壩下游溪段因升壩策略呈現些沖刷趨勢。

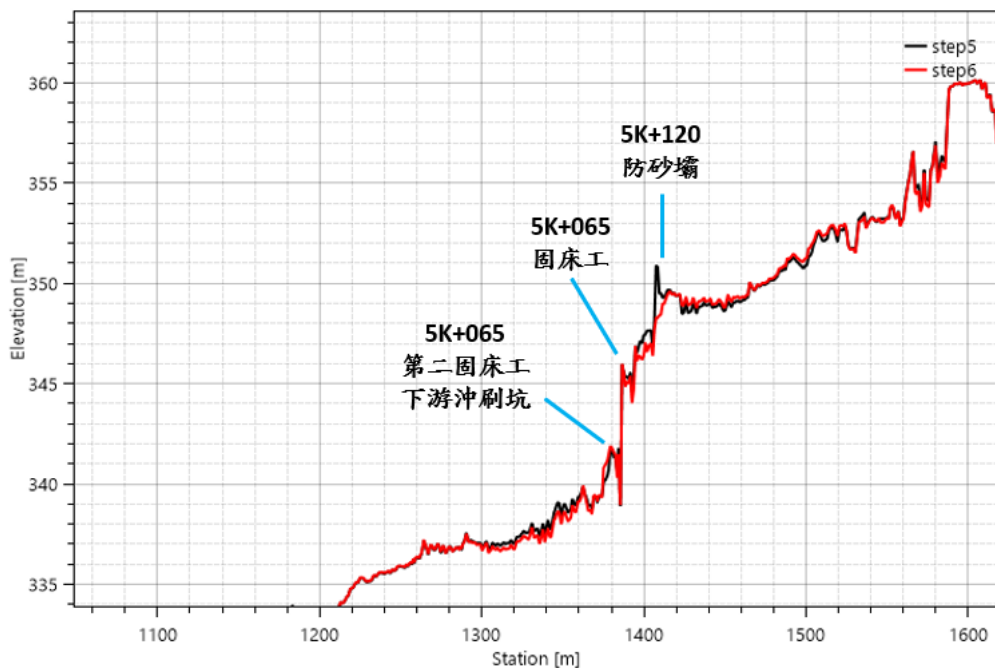


圖 4-12 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-13 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step5 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出由於升壩操作策略，使得本斷面有沖刷現象產生，且流心偏向左岸，河道平均高程由原本的 341.87 公尺降低到 341.69 公尺，斷面淤積量較上一步降低了 3.48 平方公尺，平均淤積深度降低至 2.04 公尺。

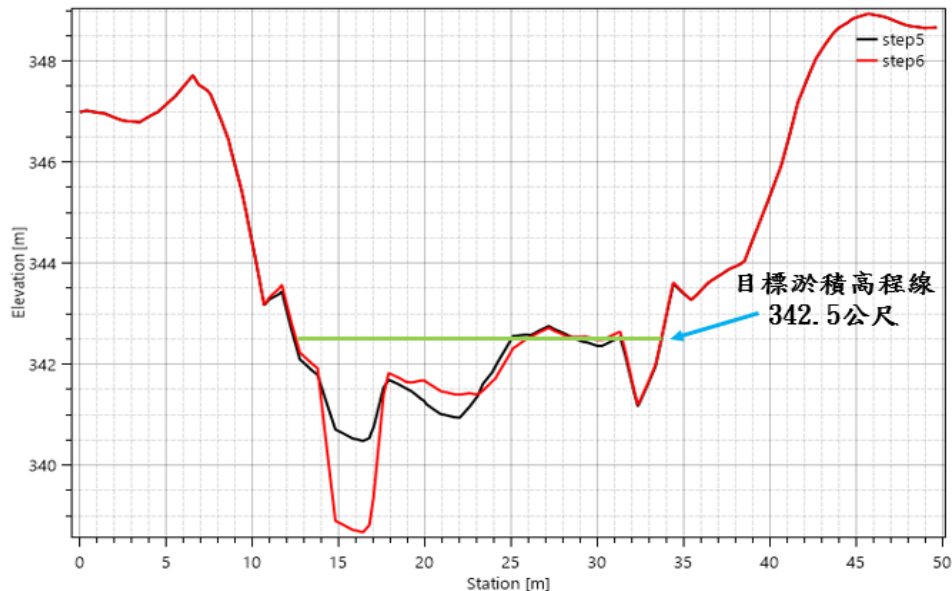


圖 4-13 Step5 地形與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比

7. Step7

本步驟接續上一步驟之地形，並對照矩陣調整策略後，進行調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-14 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-14 中紅色線。可以觀察到防砂壩上游土砂，因為降壩的操作而有向下運移的趨勢，影響範圍內的淤砂坡度由原先 2.8%降低為 2.7%，上游淤砂波度變化已達到收斂。防砂壩下游區段也有產生些許淤積，且緊鄰 5K+065 固床工下游落差處先前產生的嚴重沖刷有明顯的回填現象，土砂回填效果良好，整體溪流趨於穩定狀態。



圖 4-14 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-15 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step6 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察出本步驟調降後，淤積現象不明顯，平均高程由上一步的 341.69 公尺上升至 341.72 公尺，平均淤積深度由上一步的 2.04 公尺上升至 2.07 公尺，顯示溪流土砂逐漸達收支平衡狀態。

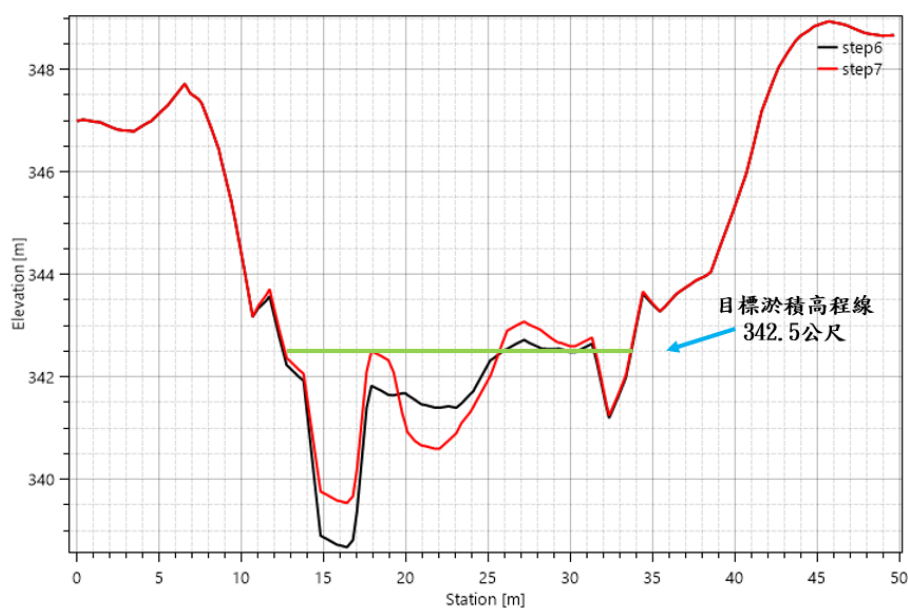


圖 4-15 Step6 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

4.1.3 整體成效分析

1. 調降階段步驟對比

本節將針對本階段模擬之降壩策略步驟(Step1、Step3、Step5、Step7)與原始地形進行對比，觀察每輪降壩操作對保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑之影響，該處橫剖面對比圖呈現如下。

本階段模擬初次降壩為 Step1 調降 4 支防砂壩預鑄塊，圖 4-16 為原始地形(黑色線)、初次降壩模擬地形 Step1 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察到初次降壩操作後經洪水模擬，其產生的斷面淤積量非常大，共 33.58 平方公尺，顯示溪流仍處於不穩定狀態。

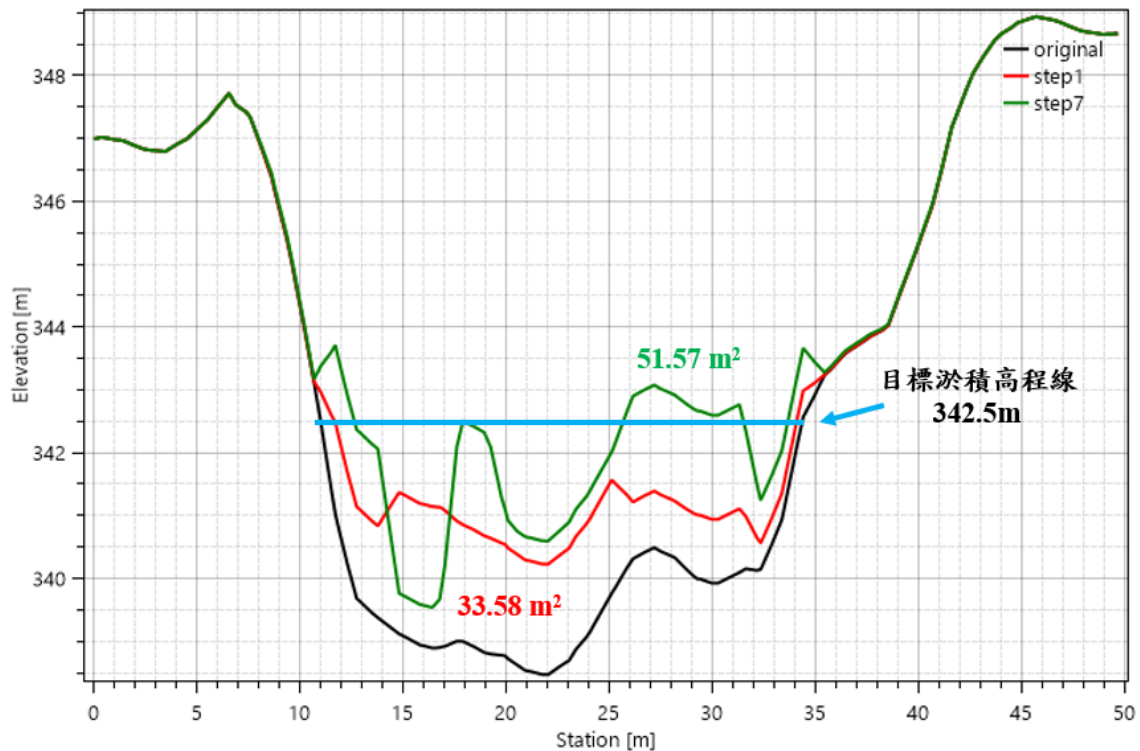


圖 4-16 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第二次降壩操作為 Step3 調降 5 支砂壩預鑄塊，圖 4-17 為原始地形(黑色線)、第二次降壩模擬地形 Step3 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察本輪降壩操作後經過洪水模擬，斷面淤積量結果為 46.33 平方公尺，與初次降壩步驟相比，僅增加 12.75 平方公尺，顯示土砂下移趨勢減緩，溪流土砂狀態漸漸穩定。

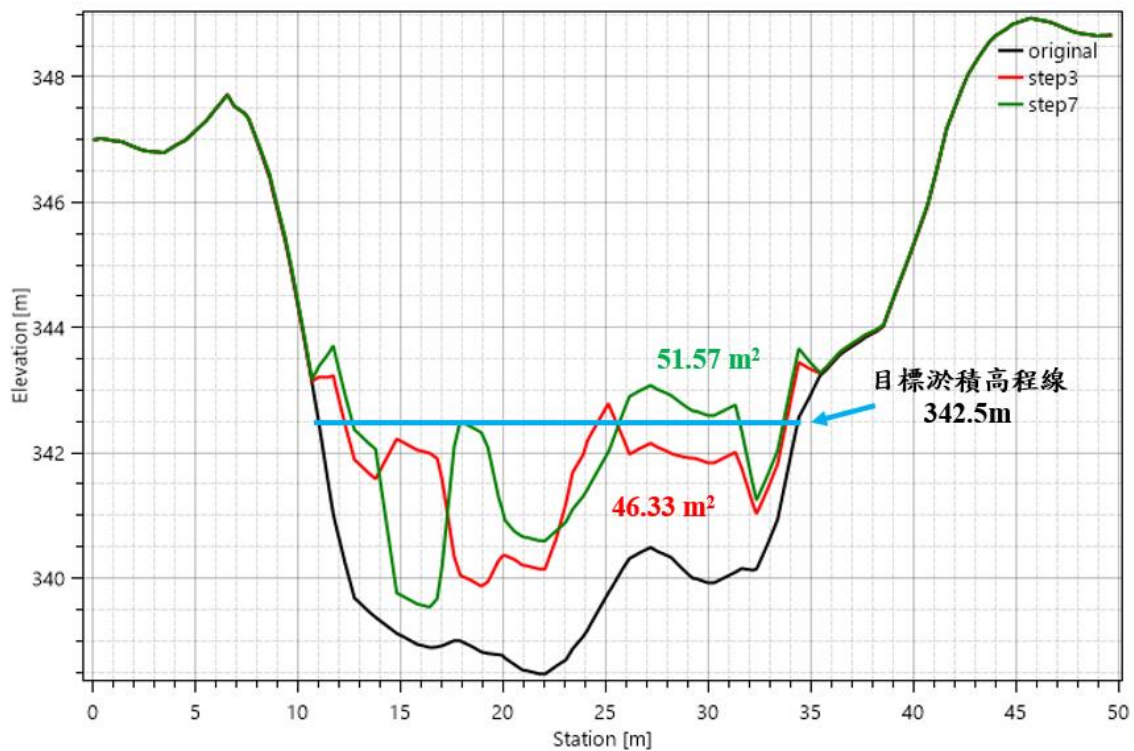


圖 4-17 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第三次降壩操作為 Step5 調降 4 支砂壩預鑄塊，圖 4-18 為原始地形(黑色線)、第三次降壩模擬地形 Step5 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察本輪降壩操作後經過洪水模擬，斷面淤積量結果為 52.37 平方公尺，與上次降壩步驟相比，僅增加 6.04 平方公尺，且與最終結果 Step7 地形之淤積量幾乎無差異。此結果顯示土砂下移趨勢漸漸達到收斂，整體河道達到土砂收支平衡的狀態，且下游沖刷坑逐漸淤積達目標高程線。

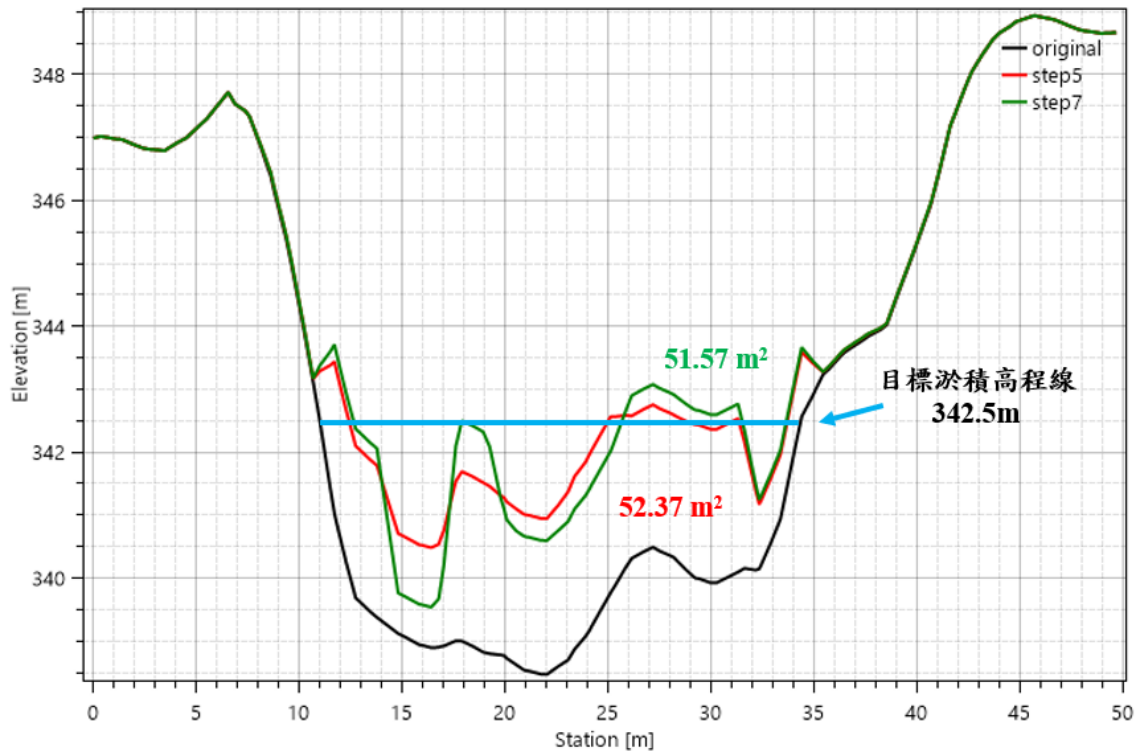


圖 4-18 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

2. 各步驟調整策略數據彙整

本節將針對各步驟調整策略模擬之數據進行彙整，其中包含主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之各步驟調整後的平均高程、平均沖刷深度、總淤積量、與上一步之淤積相差量、與上一步調整之最大沖淤變化量等資料彙整，如下表 4-1 所示。

表 4-1 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料

	平均高程 (m)	平均沖刷 深度(m)	總淤積量 (m ²)	與上一步操作 之淤積相差量 (m ²)	與上一步操作 之最大沖淤變 化量(m)
原始地形	339.65	2.85	0		
Step1 (降 4 支)	341.08	1.42	33.58	+33.58	+2.25
Step2 (升壩)	341.20	1.30	36.03	+2.45	-1.22
Step3 (降 5 支)	341.63	0.87	46.33	+10.29	+1.08
Step4 (升壩)	341.50	1.00	44.55	-1.77	-0.96
Step5 (降 4 支)	341.87	0.63	52.37	+7.82	+1.76
Step6 (升壩)	341.69	0.81	48.89	-3.48	-1.81
Step7 (降 3 支)	341.72	0.78	51.57	+2.68	+0.86

3. 本階段成果呈現

經過本輪一系列調整策略步驟，最終成果之縱剖面圖如下圖 4-19 所示，其中黑色線為原始地形，紅色線為經過七步調整步驟之地形。可以觀察到透過一系列的升、降壩調整，成功使防砂壩上游溪床坡度降低，且原先沖刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑有明顯的土砂料源補注，最終整體河道逐漸達到穩定溪床坡度、減緩下游掏刷之溪流土砂平衡狀態。

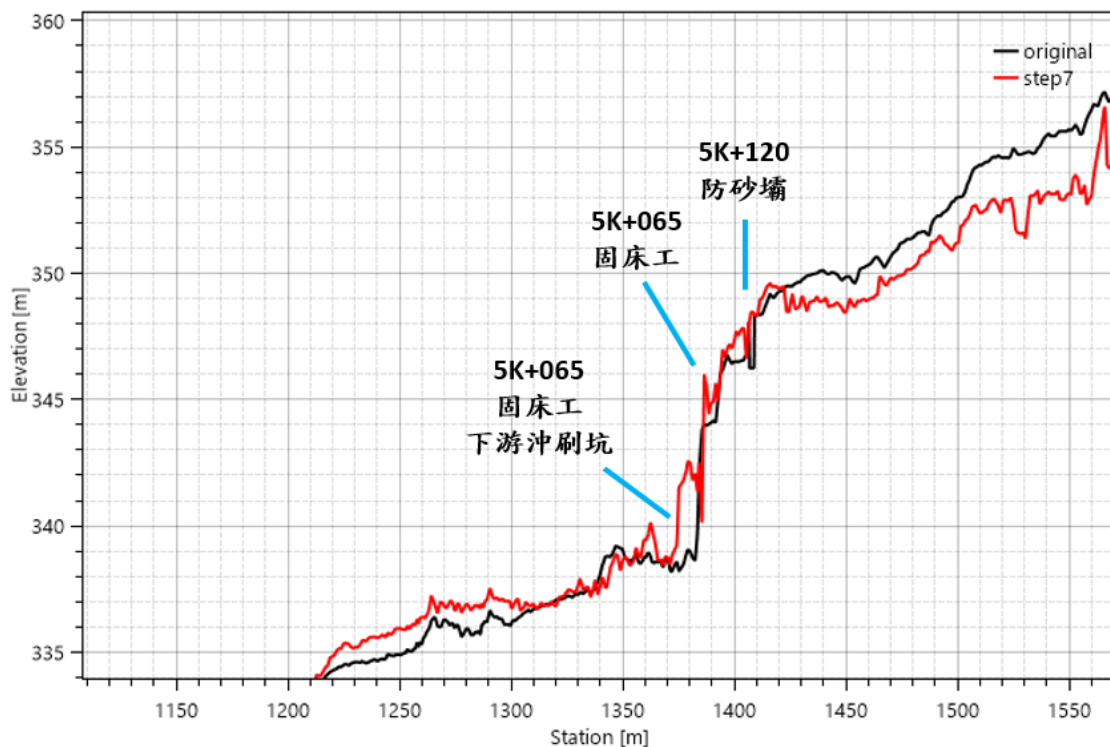


圖 4-19 原始地形與最終成果之縱剖面對比

本研究除了主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑外，也有為了確保升、降壩之操作策略不會對更下游區段造成危害而設立的 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，其經過一系列調整策略模擬之結果如下圖 4-20、圖 4-21，可以觀察到本輪一系列的升、降壩操作最終產生約 2 公尺以內之淤積，不會對壩體下游區段造成土砂危害，同時提供該二處充足的土砂料源補注。

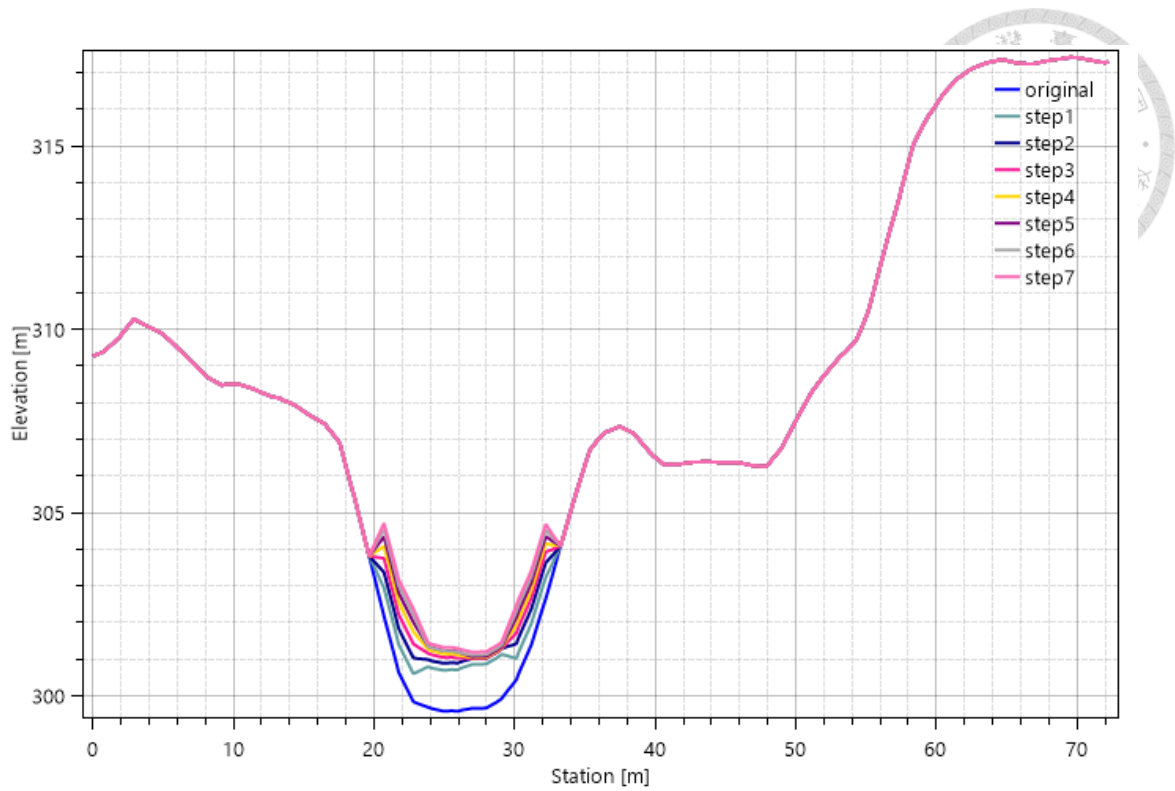


圖 4-20 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

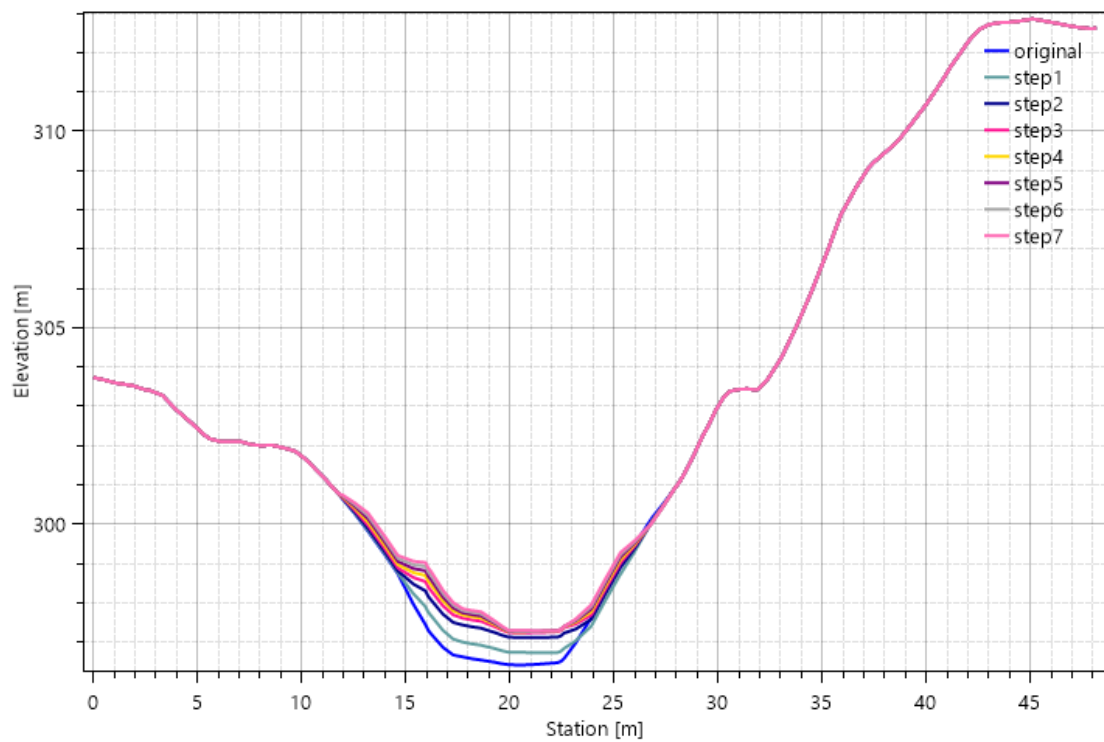


圖 4-21 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖



4.1.4 小結

經過本輪的模擬分析，初步得出若經歷 25 年重現期以上之洪水事件，上、下游土砂會產生較明顯變化，因此調整防砂壩之時機可以設定為發生 25 年重現期洪水事件時，則需做出防砂壩調整操作。

此外，目前調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之橫軸：「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低範圍標準為本階段模擬結果推算而得。為了提供使用者一個明確的標準且能應用於不同溪流環境與現地情況，通過本次的模擬結果分析，本研究發現或許可以使用「最嚴重沖刷時溪床高程」與「預期溪床高程」此二值作為上下界，將其三等分做為矩陣橫軸高、中、低三個範圍值，其中「最嚴重沖刷時溪床高程」定義為該保全對象斷面歷史最低之平均高程，而「預期溪床高程」則定義為該保全對象斷面經調整後期望達到之平均高程數值。因此，下一階段模擬將採用上述調整時機以及新的橫軸標準，做一系列之防砂壩調整策略模擬分析。

4.2 第二階段模擬

根據前述的研究經驗及模擬成果，本階段將一律採用 25 年重現期以上之洪水事件作為防砂壩調整時機。此外，本階段期望訂出橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之標準，提供使用者一個明確的標準且能應用於不同溪流環境與現地情況。橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低數值範圍制定標準，使用者可以依據該保全對象之「最嚴重沖刷時溪床高程」與「預期溪床高程」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍。以本研究試區保全對象:5K+065 固床工下沖刷坑為例，最嚴重沖刷狀況溪床高程為: 339.65 公尺，預期溪床高程為:342.5 公尺，兩者相差 2.85 公尺，三等分後之高程差為 0.95 公尺。因此本試區之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」高:溪床高程為 339.65 公尺至 340.6 公尺、中:高程為 340.6 公尺至 341.55 公尺、低:高程為 341.55 公尺至 342.5 公尺。

使用者可以依上述方式根據不同溪流現地狀況及沖淤情況，訂出合適之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」高、中、低範圍標準。本階段模擬成果及詳細操作模擬內容如下。

4.2.1 整體模擬流程

本階段模擬同樣使用內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型(DEM)作為原始地形，依照各步驟地形狀況進行防砂壩預鑄塊調整，並且加入了全新的橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低數值範圍制定標準，且每次皆以 25 年重現期以上之洪水事件作為防砂壩調整時機。總共進行 7 步驟升、降壩調整，最終使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本階段於經營管理與操作矩陣中之模擬流程如圖 4-22 所示。

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊 Step 7
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊 Step 1、2	調降 3 支預鑄塊 Step 3、4 Step 5、6	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

圖 4-22 第二階段模擬流程圖

4.2.2 各步驟細部操作說明

本小節將呈現第二階段模擬之各步驟防砂壩調整策略說明，以及模擬結果展示，包含:每一步驟進行各流量重現期模擬結果、每一步驟操作後前後對比分析、保全對象模擬結果分析等，詳細說明如下。



1. Step1

(1) 調整策略選擇

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，並且計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之冲刷深度」二數值，計算結果如下：

防砂壩上游影響範圍將採用 3.3.1 節式 3-11 計算之 133.33 公尺，且對照模型中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409，348.26m)、(1542，355.55m)，如下圖 4-23 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-1。

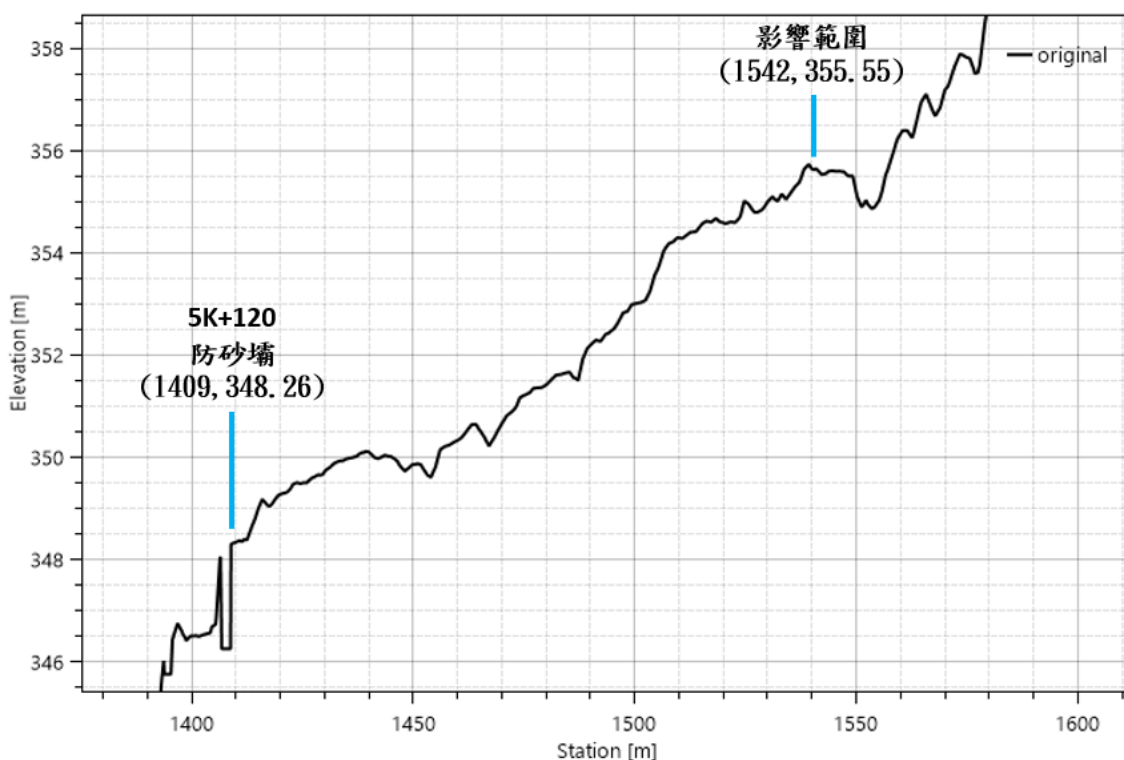


圖 4-23 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{355.55 - 348.26}{133.33} \cong 0.054 \quad \text{式 4-1}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.4%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑，其原始地形冲刷嚴重，斷面平均高程為 339.65 公尺，冲刷深度約為 2.85 公尺，如下圖 4-24 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之冲刷深度」屬於「高」。

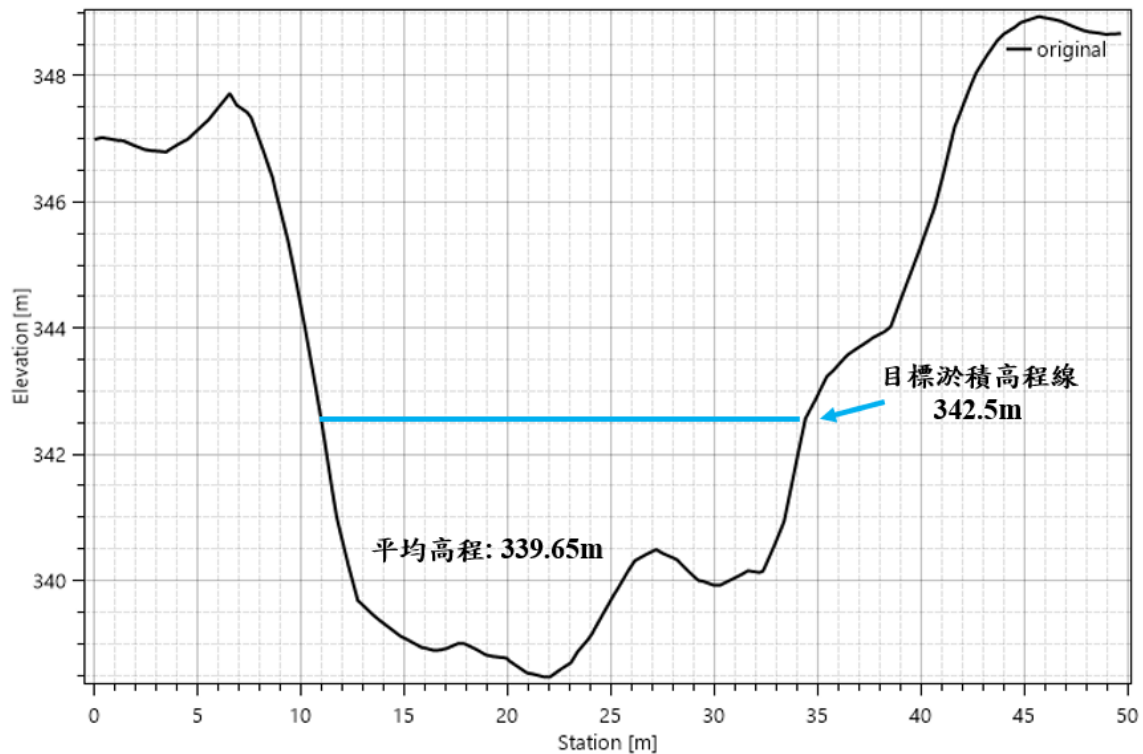


圖 4-24 原始地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析原始地形之情況，以及對應經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 4 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-2 中粗體字所示。

表 4-2 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-25 為整體試區縱剖面圖，圖 4-26 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-3 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之土砂總量、淤積量與平均高程，本研究之土砂總量為地形橫斷面線下之土砂面積，本步驟之淤積量為各重現期洪水模擬與上一步驟的土砂總量差，平均高程為主河道寬(Station:10.987m~34.070m)之平均高程。可以觀察到以縱剖面來看，25 年以上洪水事件會對壩體上游造成比較大的地形變化，壩體下游則是 100 年重現期洪水會對 5K+065 固床工下游落差處形成較深的沖刷。依據本階段模擬設定，將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

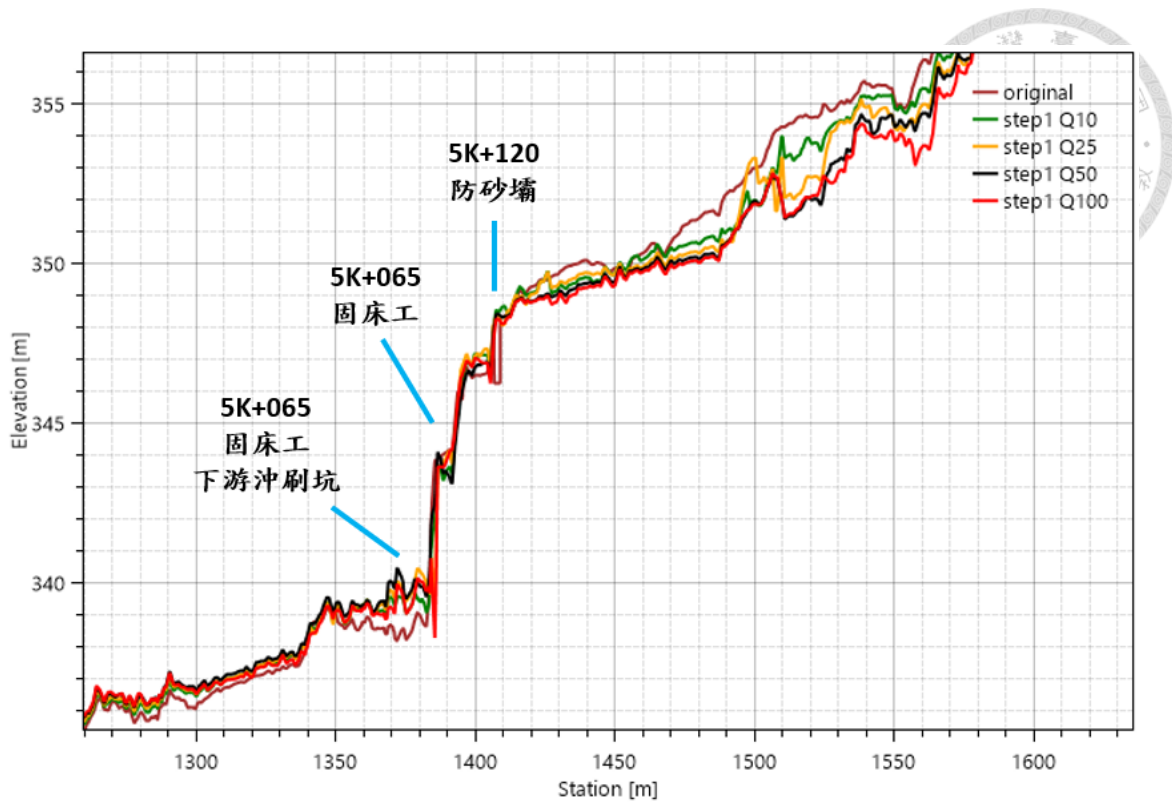


圖 4-25 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面

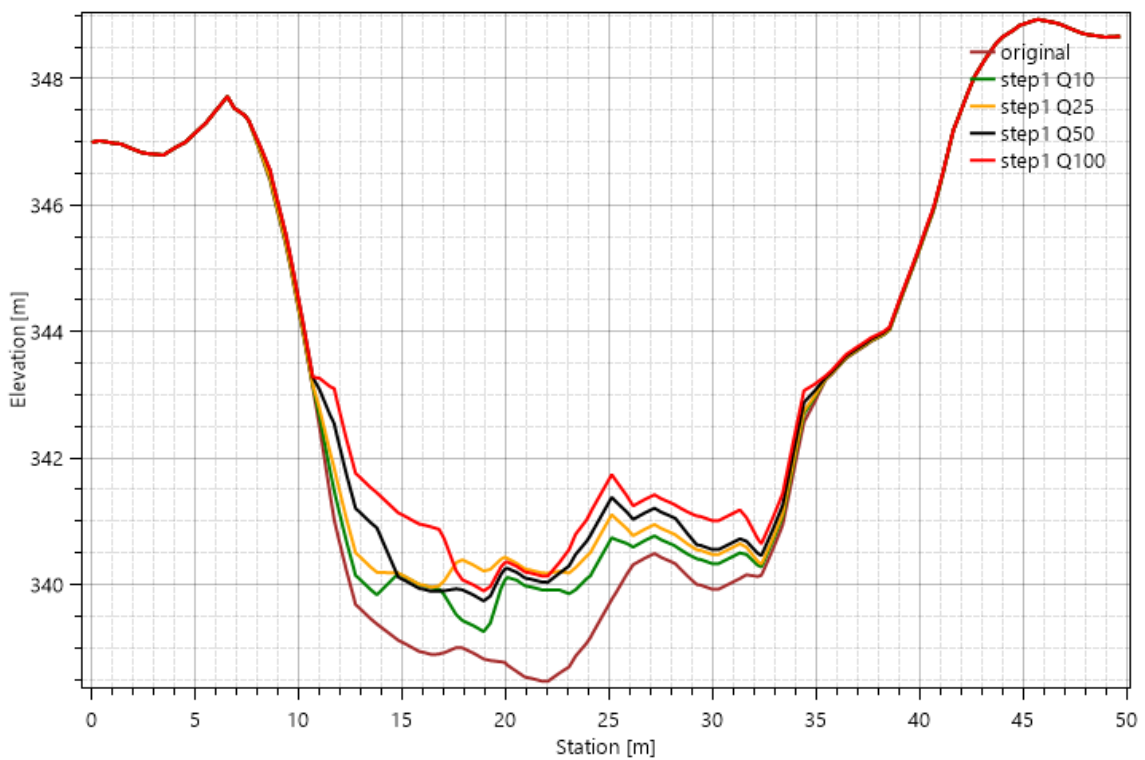


圖 4-26 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-3 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
原始地形	17040.12		339.65
Q10	17055.81	+15.69	340.33
Q25	17062.29	+22.17	340.60
Q50	17065.38	+25.25	340.70
Q100	17074.58	+34.46	341.09

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，對照矩陣調整策略，進行調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-27 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-27 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂順利下移，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度降低，且壩體下游溪段產生淤積。

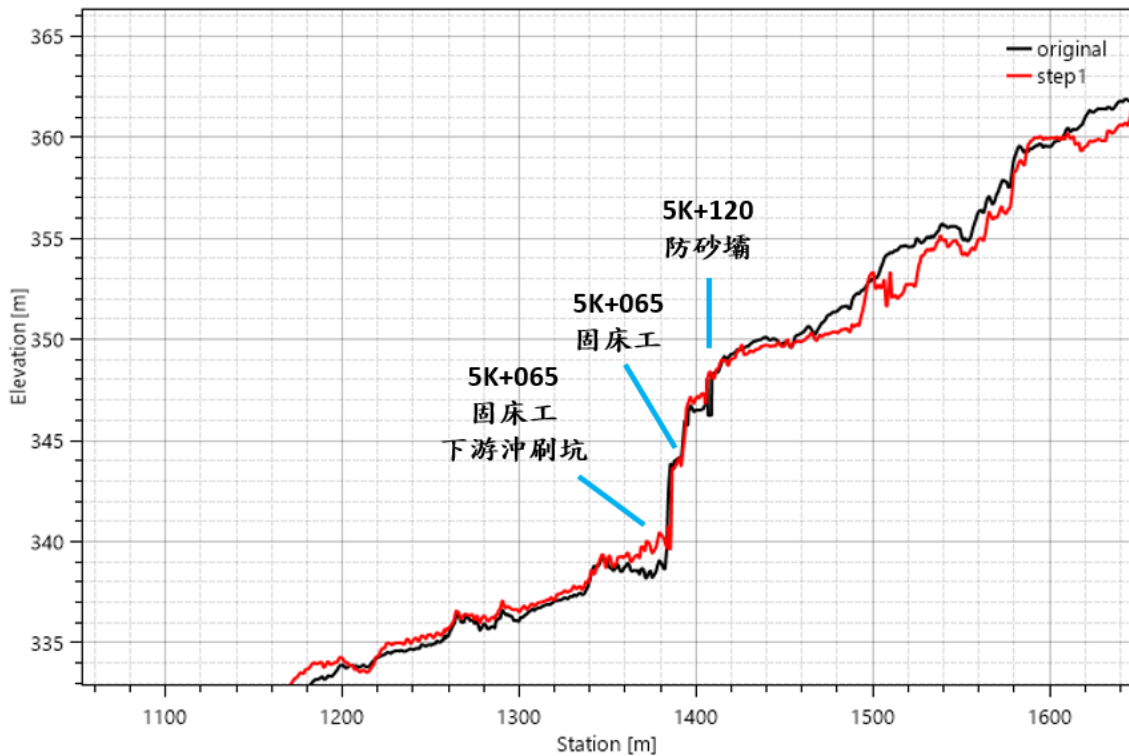


圖 4-27 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-28 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為原始地形，紅色線為本步驟模擬後地形，藍色線為本研究之最終目標淤積高程。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，淤積量有明顯增加，此保全對象斷面淤積量較原始地形增加了 22.17 平方公尺，平均高程由原先 339.65 公尺上升至 340.60 公尺，顯示本步驟調降策略有使壩體上游淤積過量之土砂順利填補至沖刷坑。

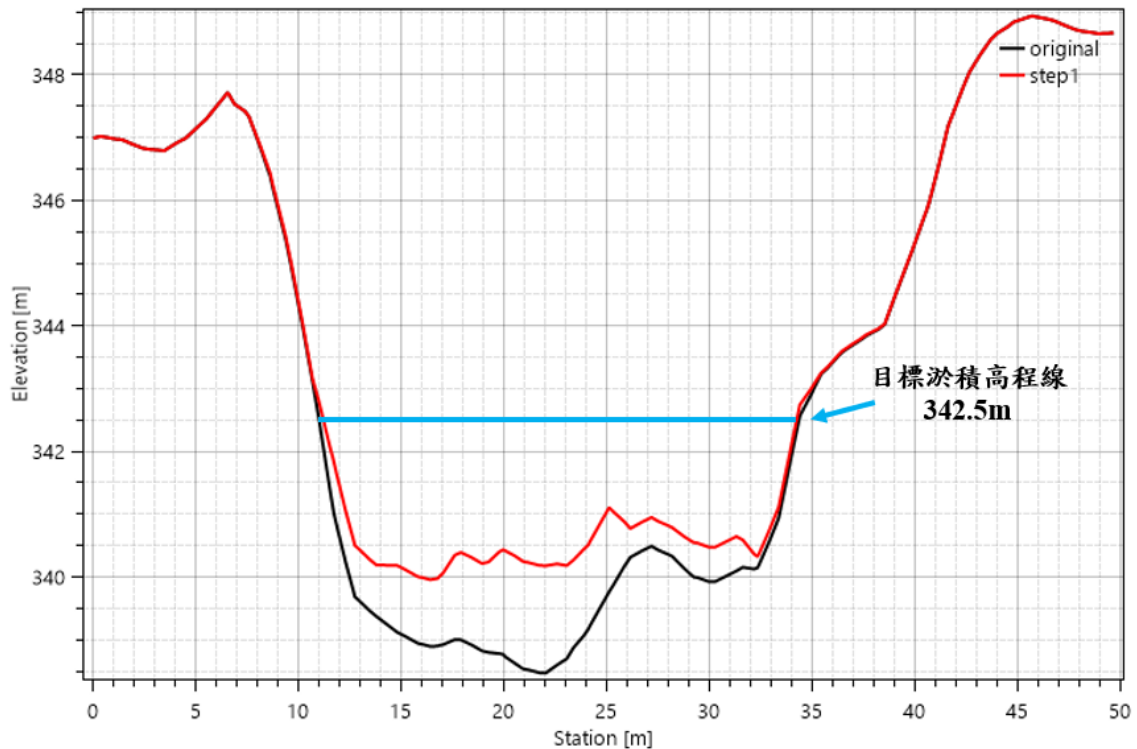


圖 4-28 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比



2. Step2

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

(1) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-29 為整體試區縱剖面圖，圖 4-30 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-4 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到本步驟各重現期洪水事件模擬整體結果差異不大，以全區縱剖面來看，25 年重現期洪水對 5K+065 固床工下游落差處造成較深的沖刷。以保全對象橫剖面為例，25 年以上重現期洪水會有較明顯的沖淤變化，且依據本階段模擬設定將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

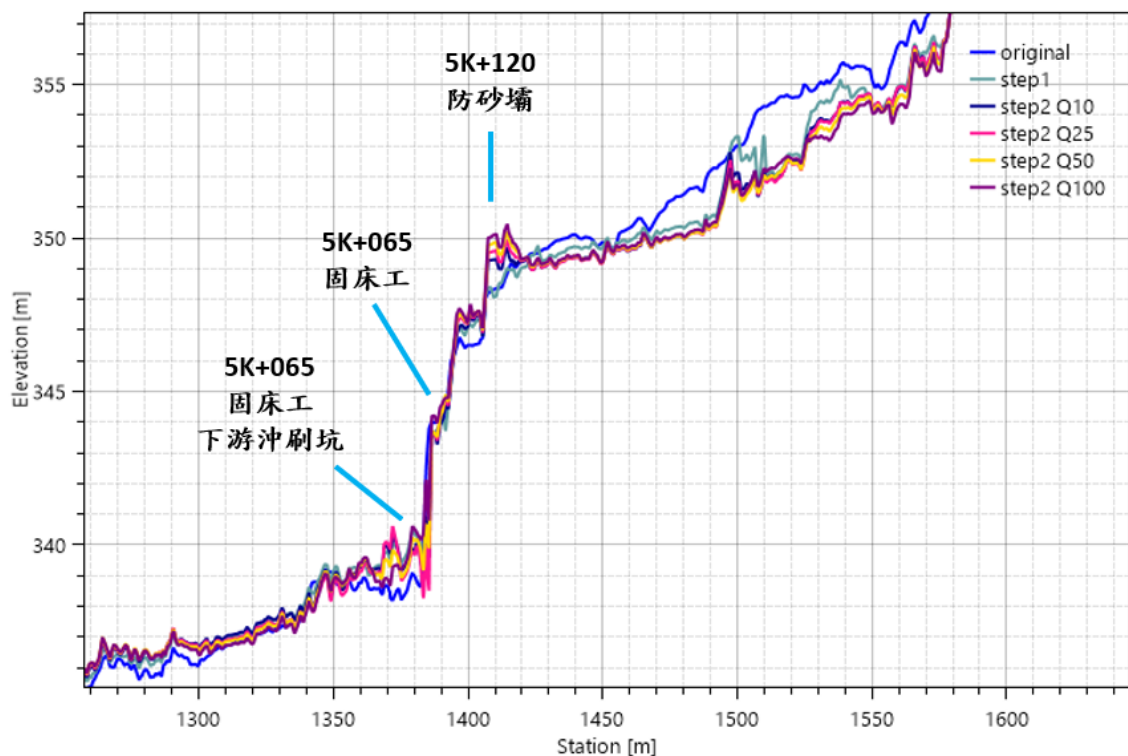


圖 4-29 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面

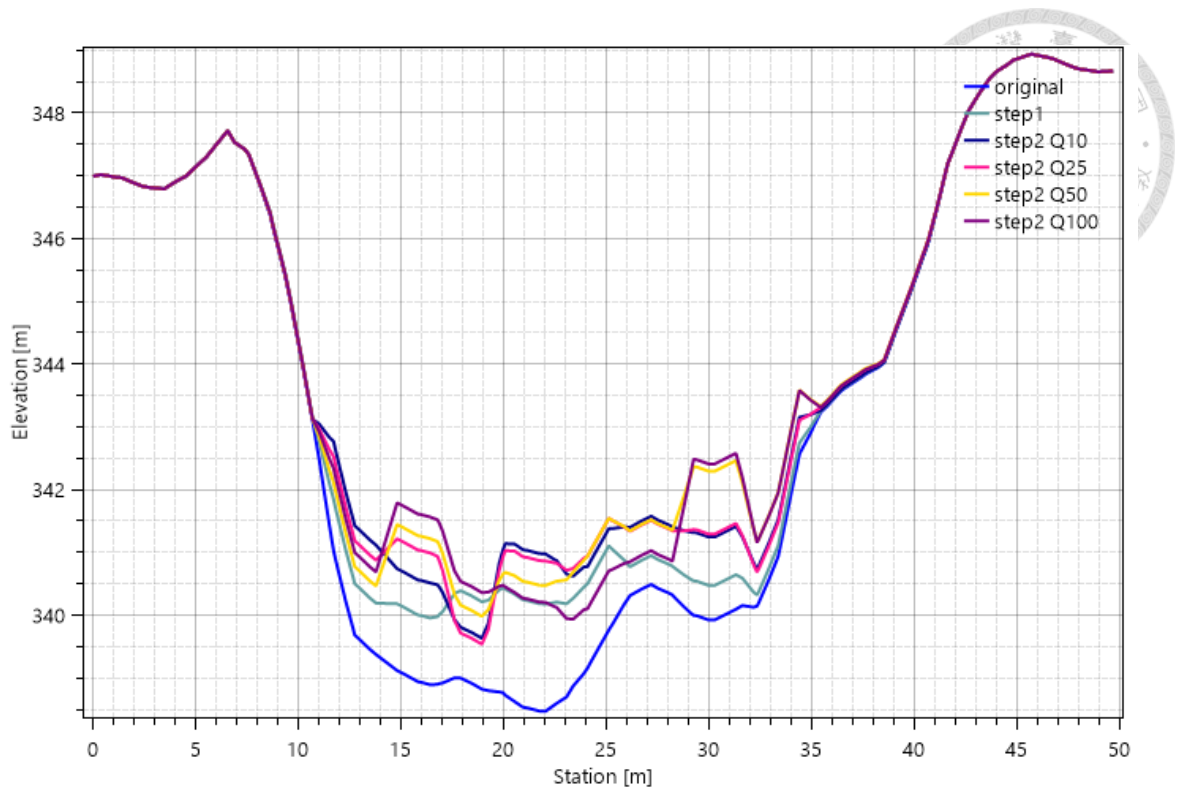


圖 4-30 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-4 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step1 模擬後地形	17062.29		340.60
Q10	17074.39	+12.09	341.10
Q25	17074.97	+12.68	341.13
Q50	17078.81	+16.52	341.27
Q100	17077.00	+14.71	341.22

(2) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-31 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-31 中紅色線。可以觀察到受到調升策略的影響，防砂壩上游有些許淤砂的現象，但由於原始地形壩體上游淤砂量過大，因此經洪水模擬土砂仍有持續下移趨勢，防砂壩上游影響範圍內淤砂坡度降低。壩體下游因為防砂壩阻攔土砂的緣故，呈現些許沖刷的現象。

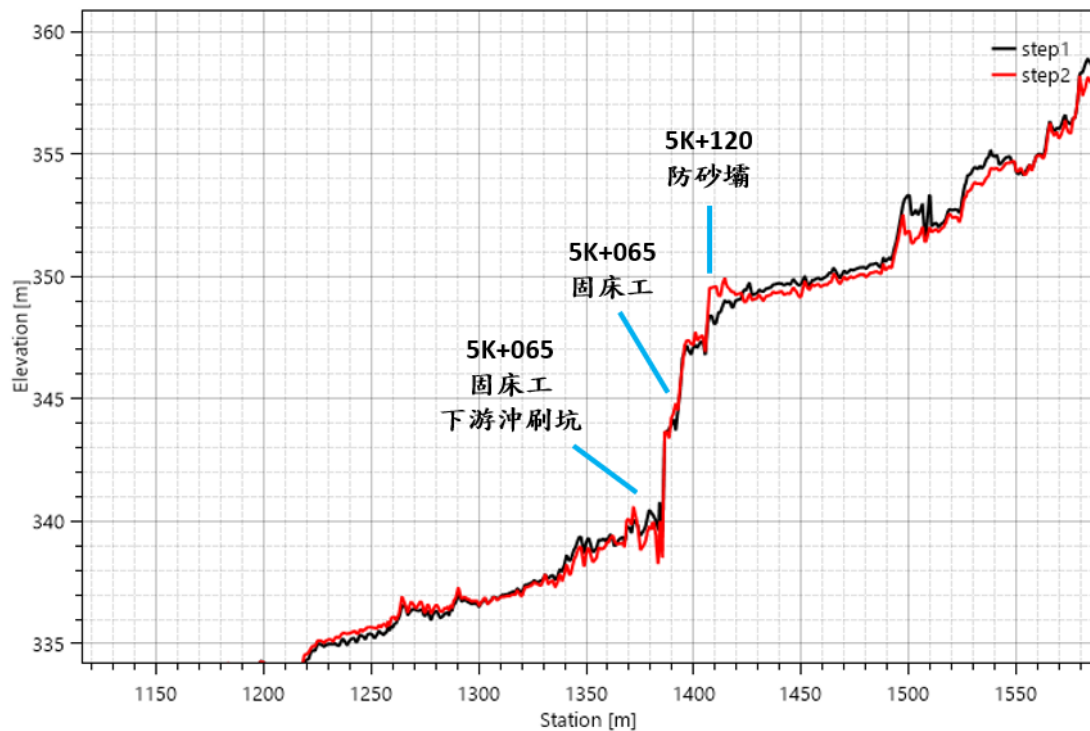


圖 4-31 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-32 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step1 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到即使本步驟為升壩操作，仍有產生不少土砂淤積現象，推論為原始地形壩體上游淤砂量過大，因此即使為升壩的狀態，經過洪水模擬後仍有一定量之土砂下移趨勢。此保全對象斷面淤積量較上一步驟之地形增加了 12.68 平方公尺，平均高程由 340.6 公尺上升至 341.13 公尺。

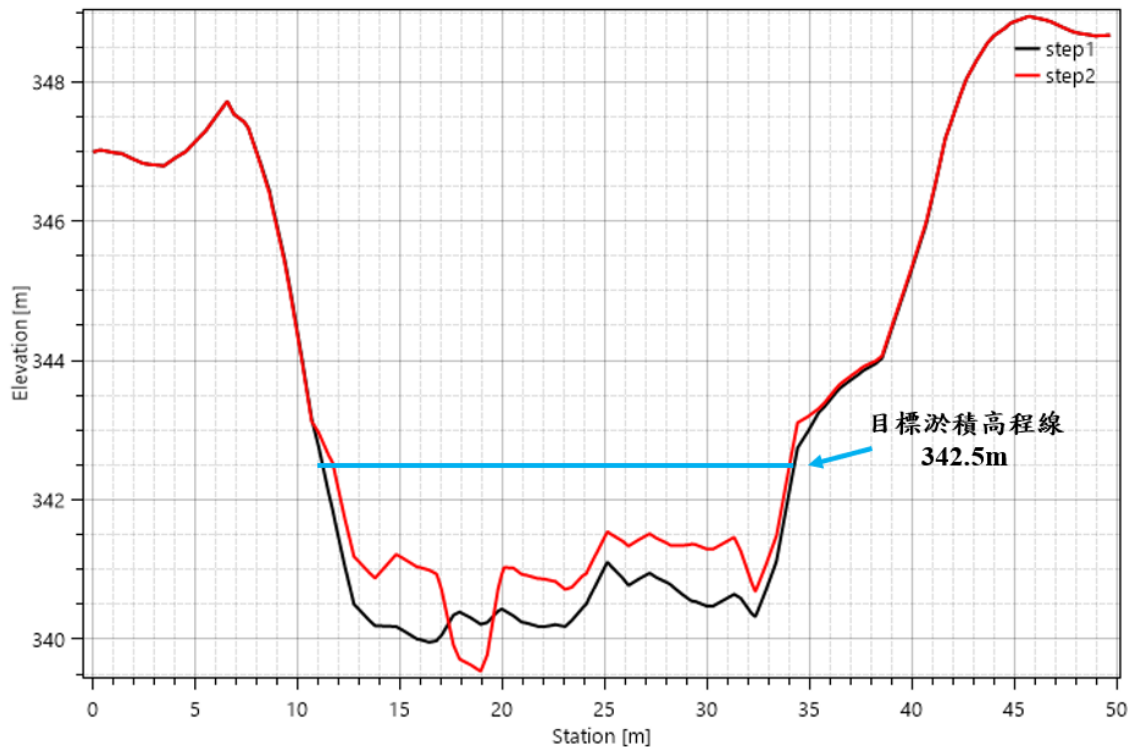


圖 4-32 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比



3. Step3

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為 (1409, 348.26m)、(1542, 354.34m)，如下圖 4-33 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-2。

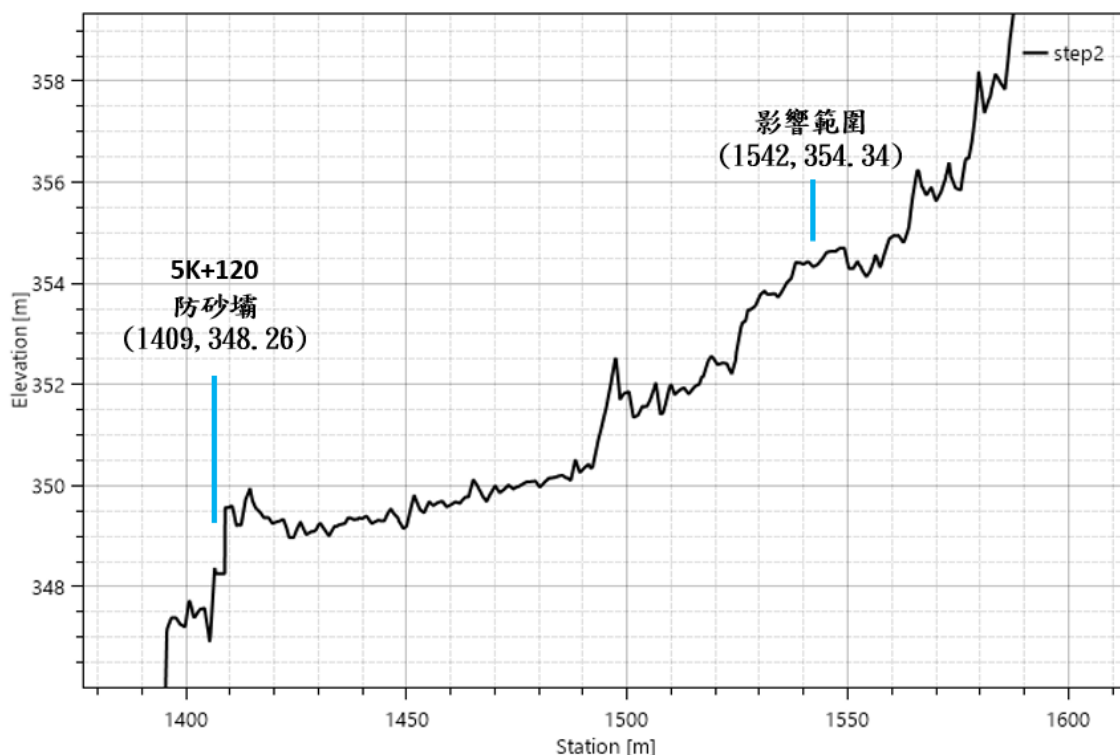


圖 4-33 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{354.34 - 348.26}{133.33} \cong 0.046 \quad \text{式 4-2}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 4.6%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.13 公尺，平均沖刷深度約為 1.37 公尺，如下圖 4-34 所示，對應

本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」，經過前述兩步驟操作，掏刷明顯之現象有加以改善。

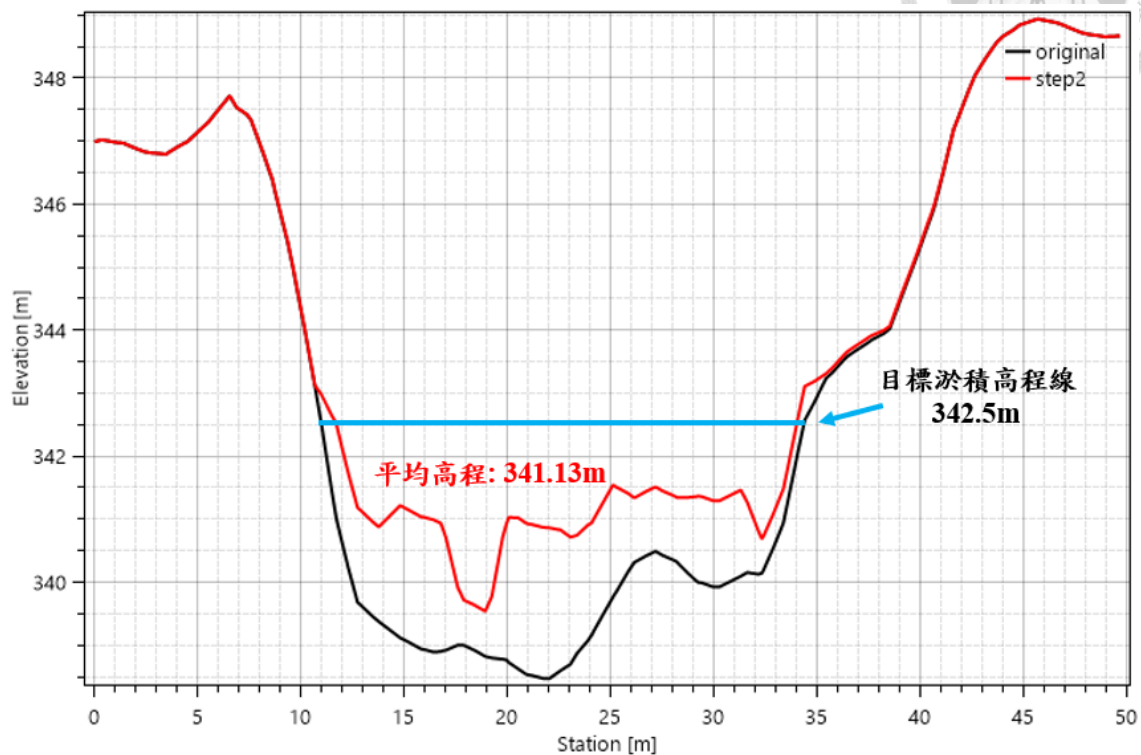


圖 4-34 Step2 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step2 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 3 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-5 中粗體字所示。

表 4-5 Step3 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-35 為整體試區縱剖面圖，圖 4-36 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-6 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到以整體縱斷面來看，各重現期洪水事件皆可以提供良好的土砂運移效果，且 50 年、100 年重現期洪水會產生較大量的淤積。以保全對象橫剖面來看，25 年以上重現期洪水會有較明顯的沖淤變化，靠近右岸處會有沖刷現象。依據本階段模擬設定將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

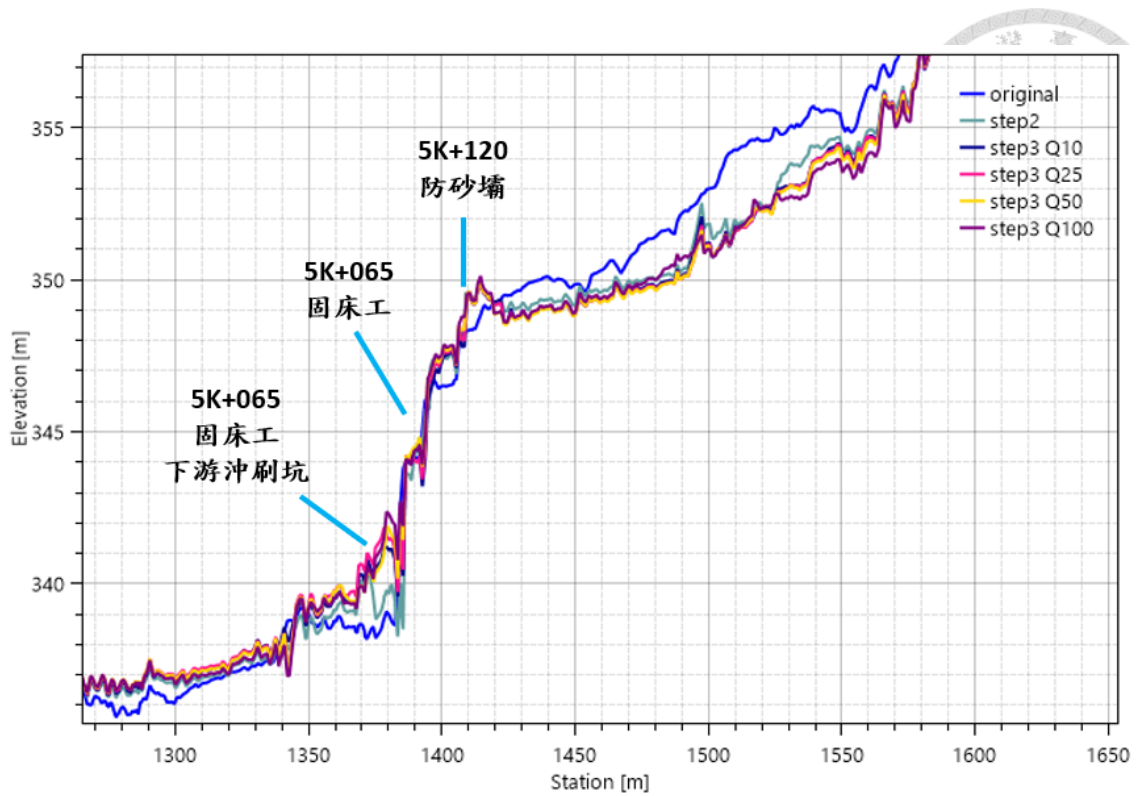


圖 4-35 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面

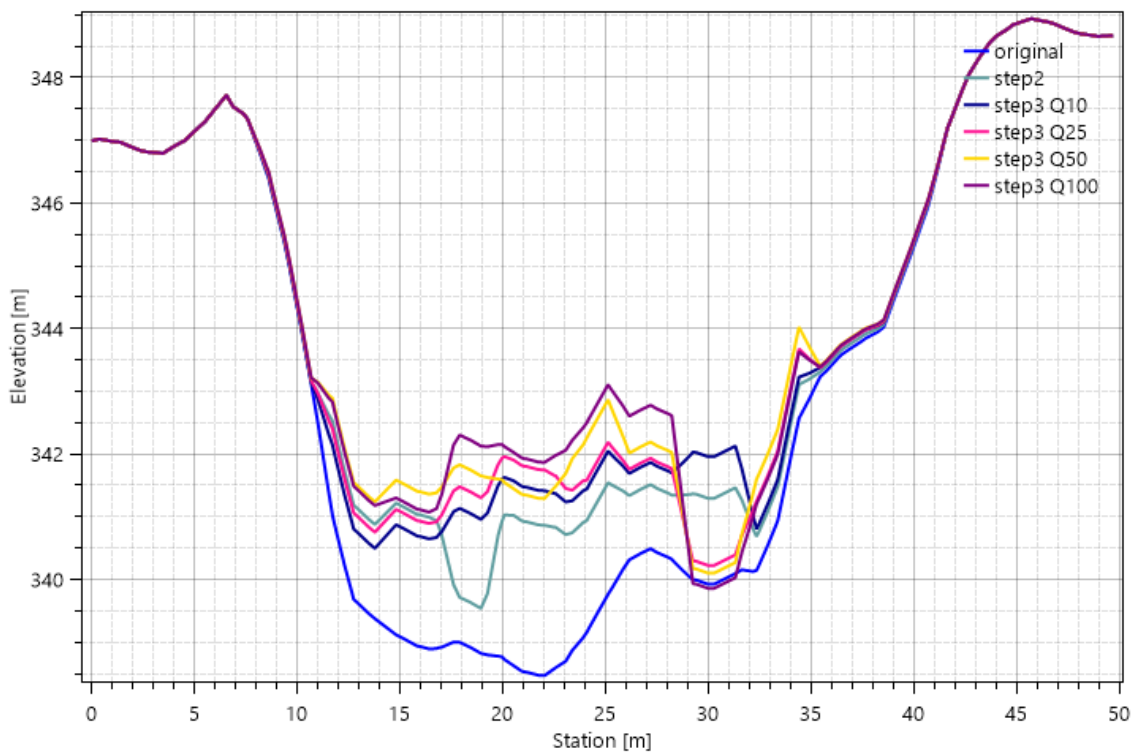


圖 4-36 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-6 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step2 模擬後地形	17074.97		341.13
Q10	17083.16	+8.19	341.44
Q25	17083.28	+8.31	341.45
Q50	17089.06	+14.09	341.71
Q100	17091.54	+16.58	341.85

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-37 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-37 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂顯向下游移動，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度降低，且壩體下游溪段產生足量淤積，固床工下游因上一步驟所造成的沖刷現象有被下移的土砂補回。

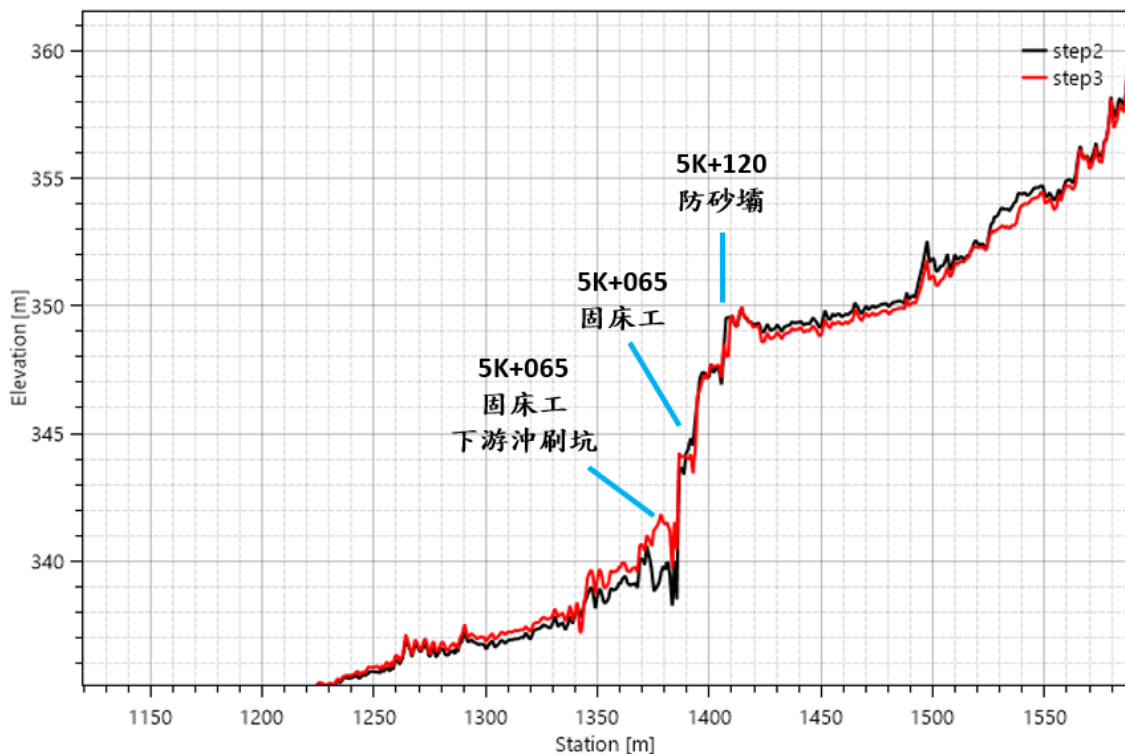


圖 4-37 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-38 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step2 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，整體淤積量有增加，但由於先前調整步驟，上游土砂料源逐漸降低，此保全對象斷面淤積量較上一步地形僅增加了 8.31 平方公尺，平均高程由原先 341.13 公尺上升至 341.45 公尺，持續將土砂填補至沖刷坑中。

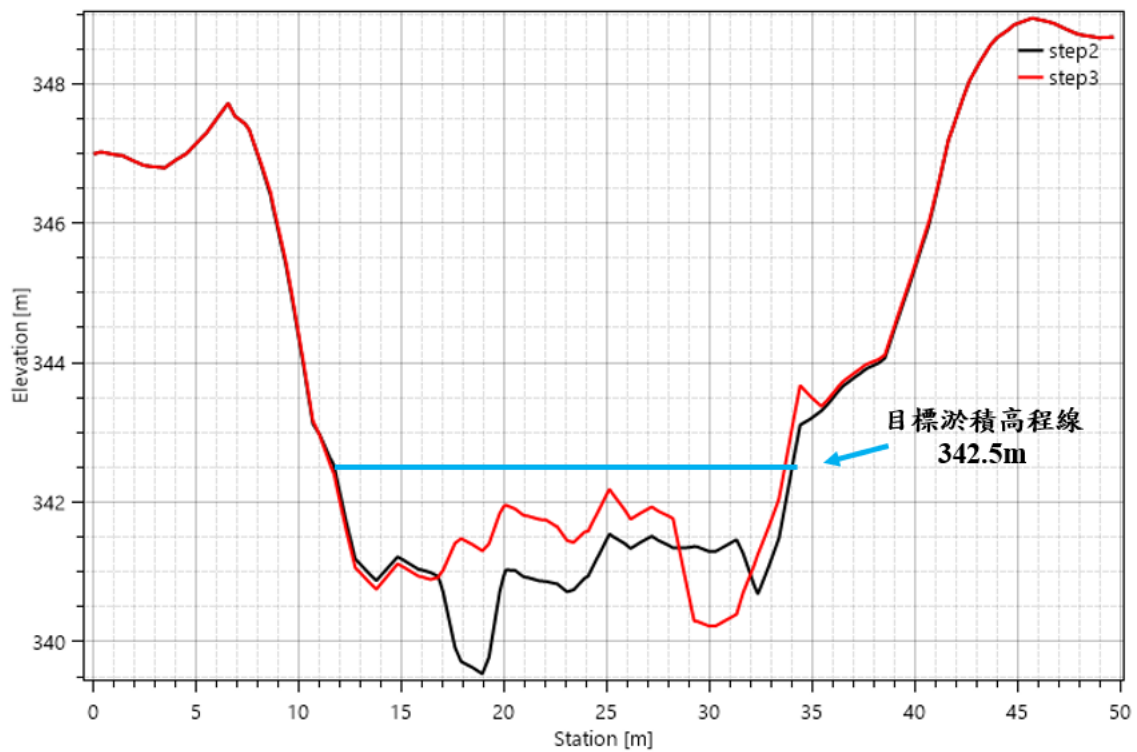


圖 4-38 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比



4. Step4

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

(1) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-39 為整體試區縱剖面圖，圖 4-40 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-7 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到本步驟各重現期洪水事件模擬整體結果差異不大，相較於先前步驟，本步驟各重現期洪水事件模擬沖淤變化降不明顯，這也顯示土砂狀況漸漸達到平衡穩定狀態。依據本階段模擬設定，將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

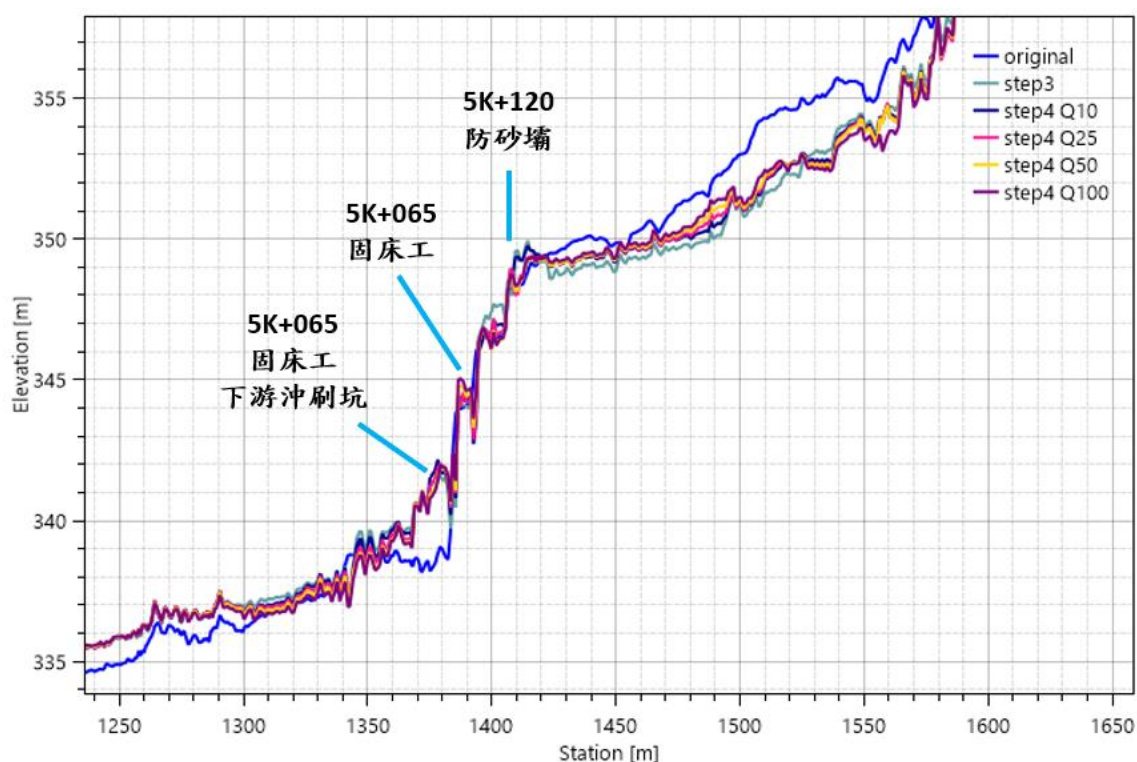


圖 4-39 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面

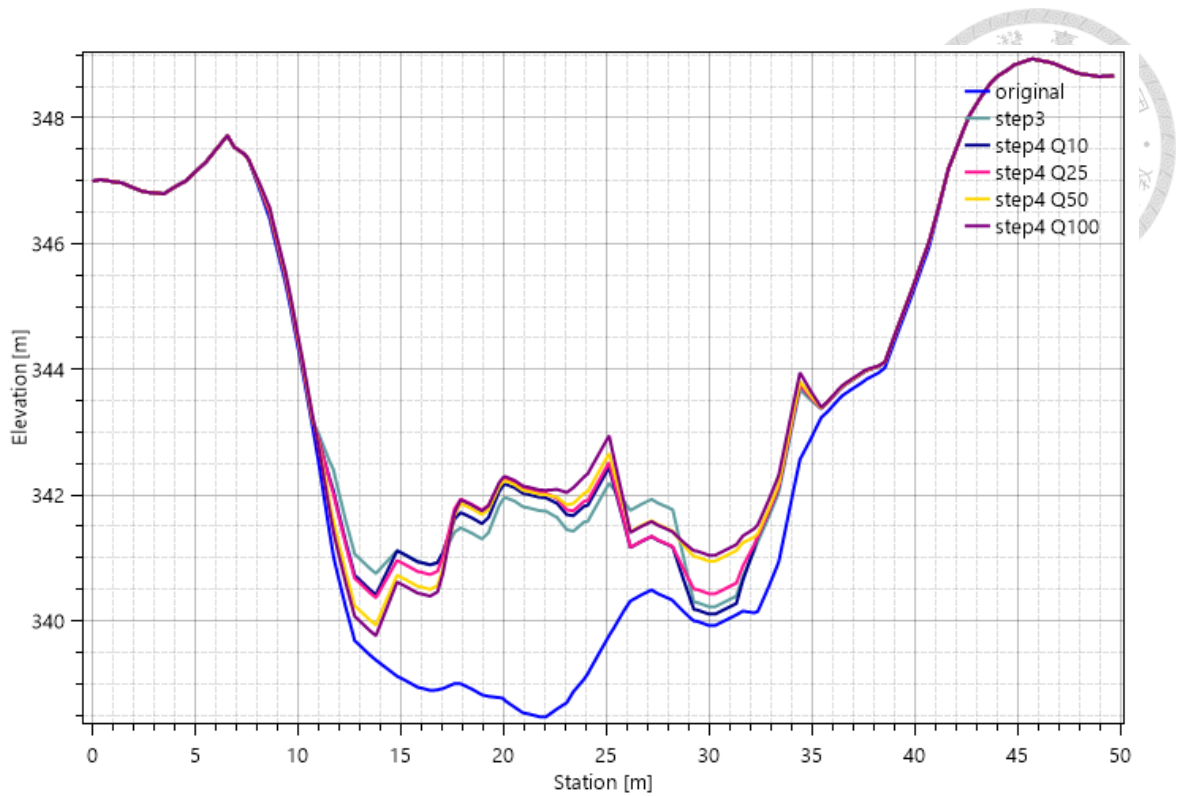


圖 4-40 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-7 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step3 模擬後地形	17083.28		341.45
Q10	17082.30	-0.98	341.38
Q25	17083.78	+0.49	341.49
Q50	17084.57	+1.28	341.49
Q100	17085.65	+2.37	341.52

(2) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-41 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-41 中紅色線。可以觀察到本步驟調升壩體的操作，壩體下游區段呈現部分沖刷現象，且防砂壩上游產生明顯的土砂淤積，成功達到其攔阻土砂之功效。

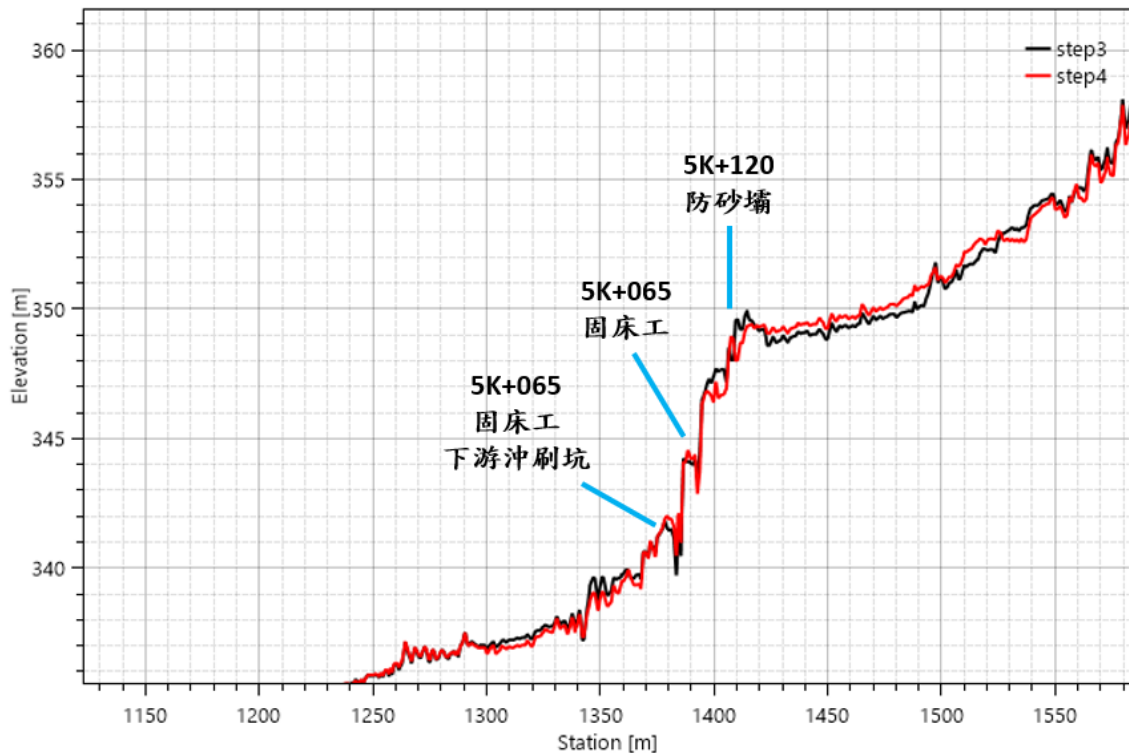


圖 4-41 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-42 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step3 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過先前調整策略步驟，本試區土砂狀態漸漸穩定，因此在本步驟壩體全升的操作下，經歷 25 年重現期洪水事件模擬並不會對下游保全對象產生土砂淤積現象，此保全對象斷面淤積量較上一步驟之地形僅增加了 0.49 平方公尺，平均高程由 341.45 公尺改變為 341.49 公尺。

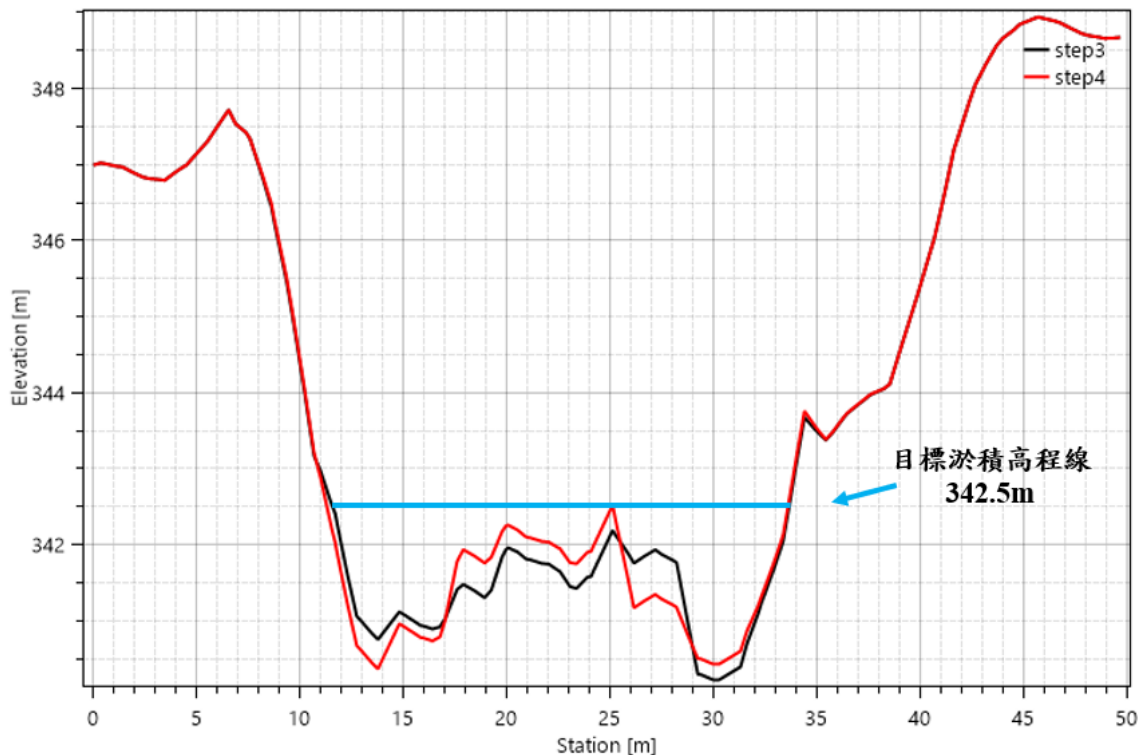


圖 4-42 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比



5. Step5

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，首先計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之冲刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 353.74m)，如下圖 4-43 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-3。

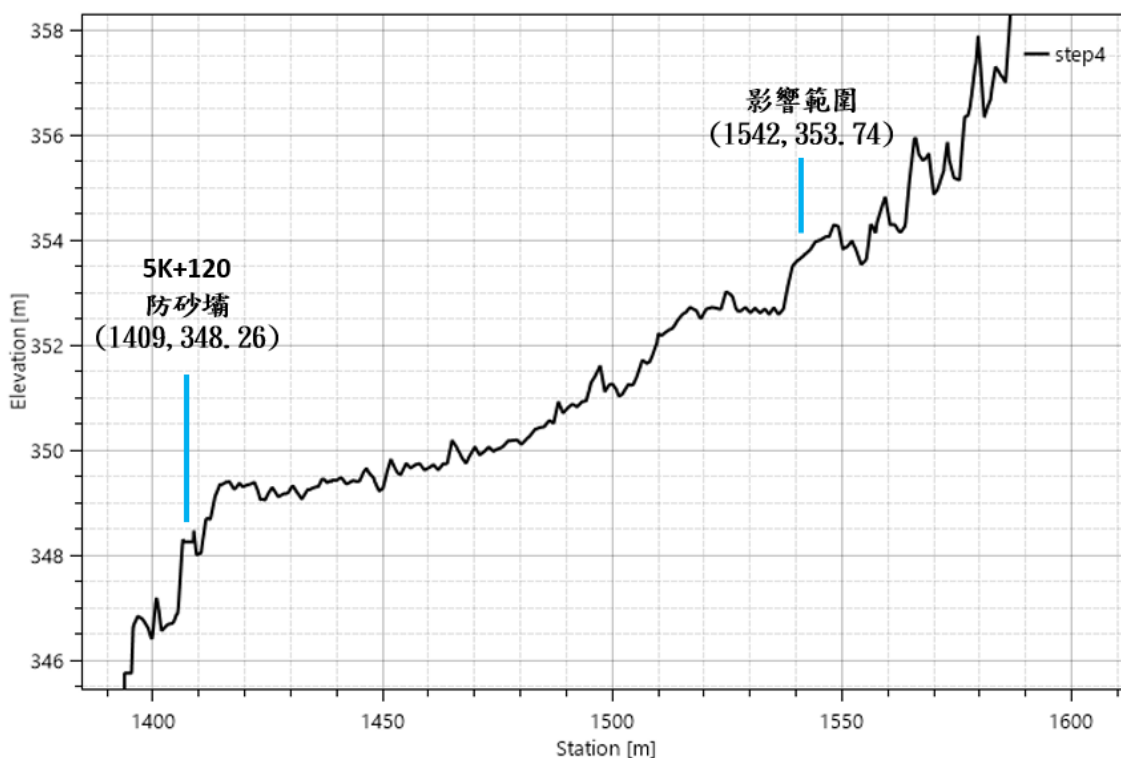


圖 4-43 Step4 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{353.74 - 348.26}{133.33} \cong 0.041 \quad \text{式 4-3}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 4.1%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.49 公尺，平均沖刷深度約為 1.01 公尺，如下圖 4-44 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」。

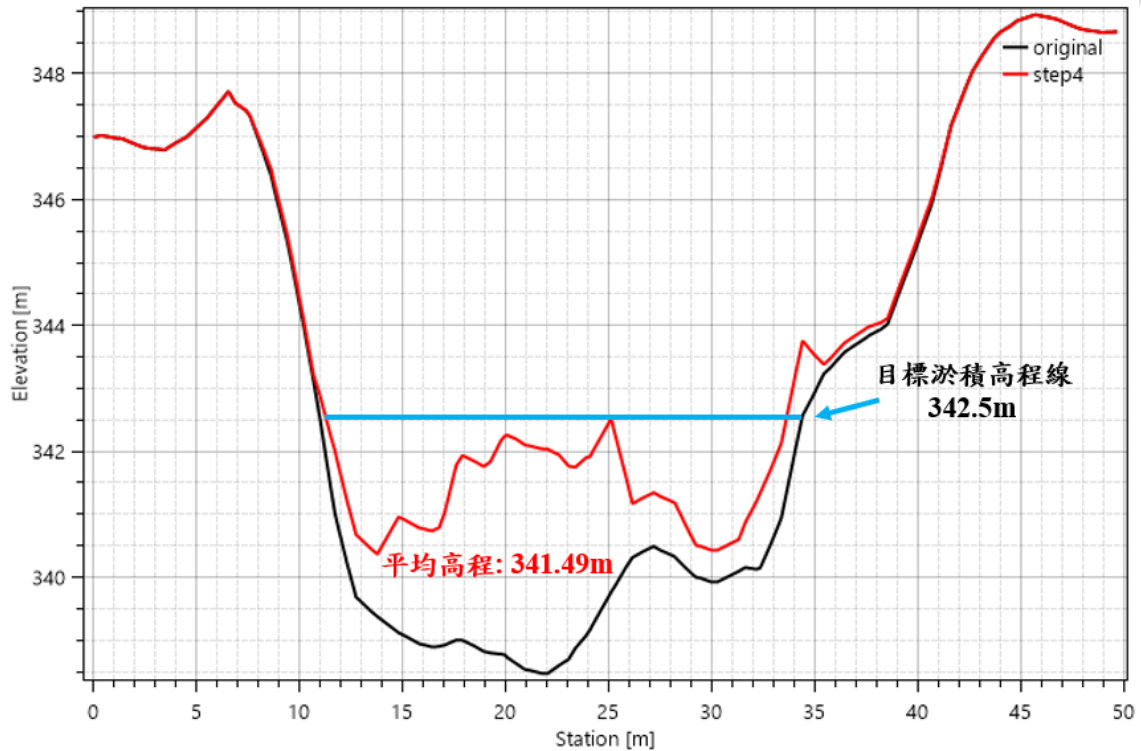


圖 4-44 Step4 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step4 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 3 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-8 中粗體字所示。

表 4-8 Step5 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-45 為整體試區縱剖面圖，圖 4-46 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-9 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到以縱剖面來看，各流量模擬整體結果差異不大。以保全對象橫剖面來看，50 年、100 年重現期洪水會產生較顯得土砂沖淤變化，如 100 年重現期洪水雖然在左岸造成大量淤積，卻也對右岸造成嚴重的沖刷現象。依據本階段模擬設定，將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

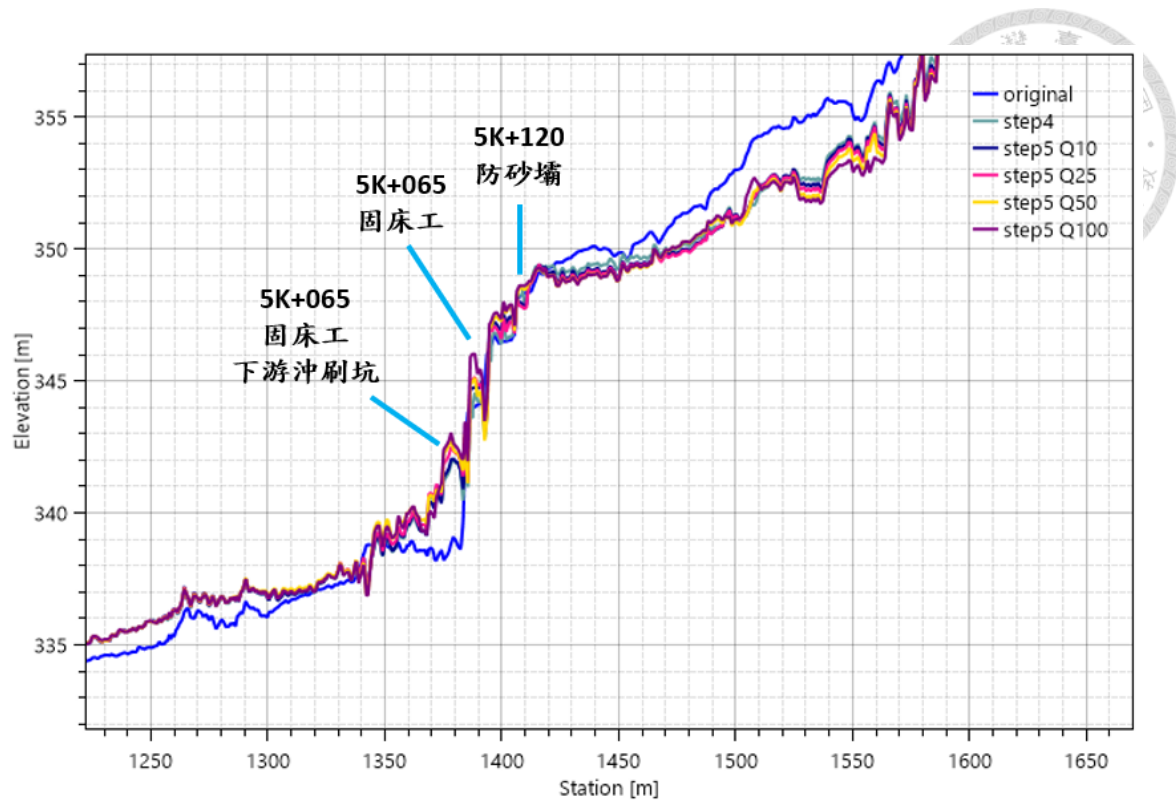


圖 4-45 Step5 各重現期流量模擬之縱剖面

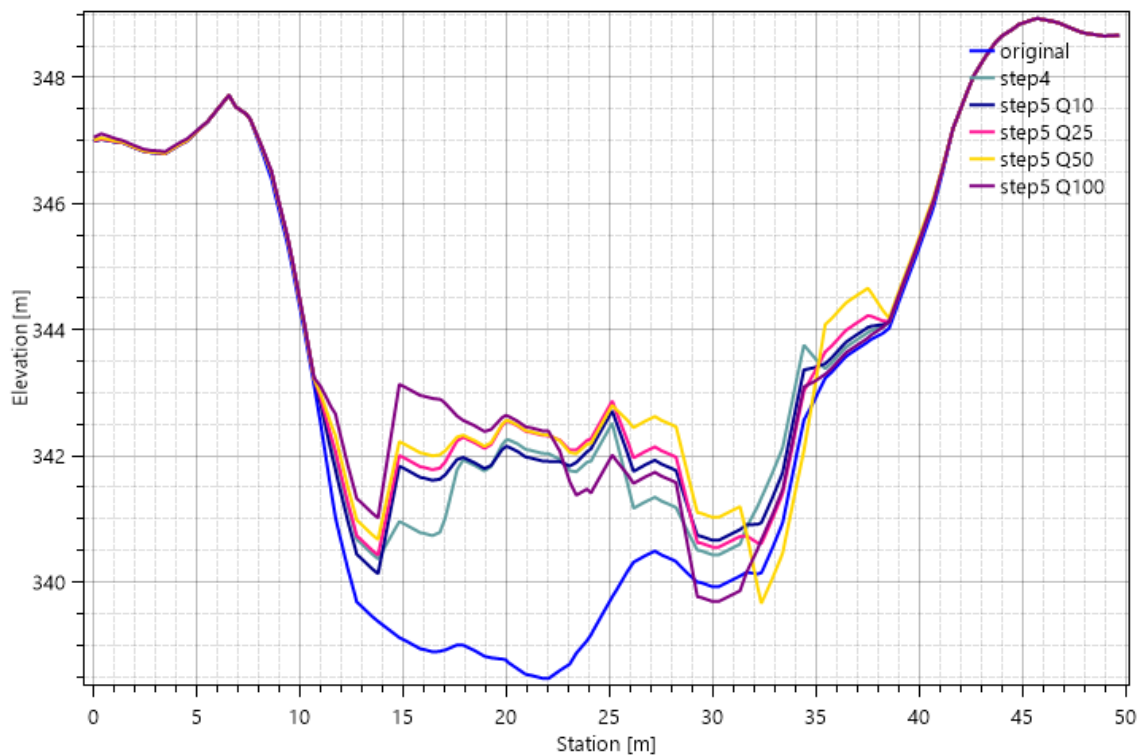


圖 4-46 Step5 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-9 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step4 模擬後地形	17083.28		341.45
Q10	17087.52	+3.75	341.57
Q25	17091.35	+7.58	341.79
Q50	17094.26	+10.49	341.90
Q100	17090.52	+6.74	341.81

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-47 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-47 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，上一步驟中壩體上游累積的土砂有成功向下移動，整體防砂壩上游之淤砂坡度降低，且壩體下游溪段整體皆有些許淤積現象，持續補注下游土砂料源。

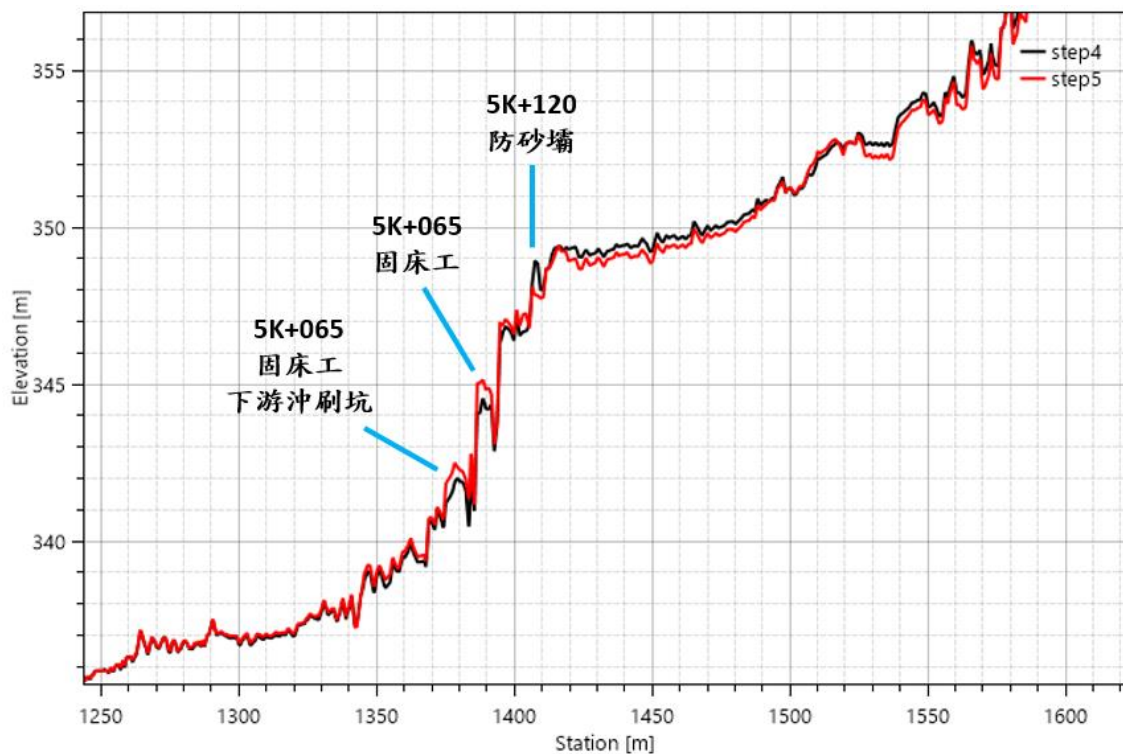


圖 4-47 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-48 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step4 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，整體淤積量有增加，此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 7.58 平方公尺，平均高程由原先 341.45 公尺上升至 341.79 公尺，持續往目標淤積高程線靠近。

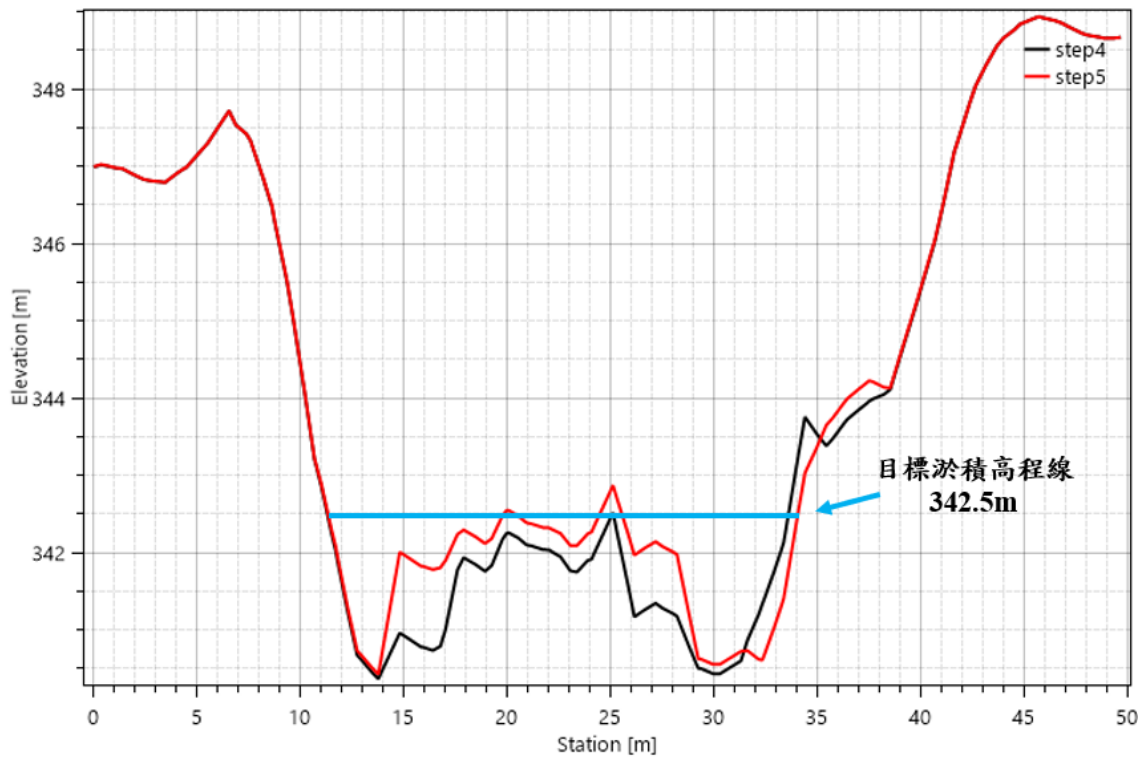


圖 4-48 Step4 與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比



6. Step6

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

(1) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-49 為整體試區縱剖面圖，圖 4-50 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-10 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到隨著重現期越大之洪水事件，其對壩體下游造成的沖刷量也越高，其中 100 年重現期洪水會對保全對象帶來嚴重的沖刷現象。依據本階段模擬設定，將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

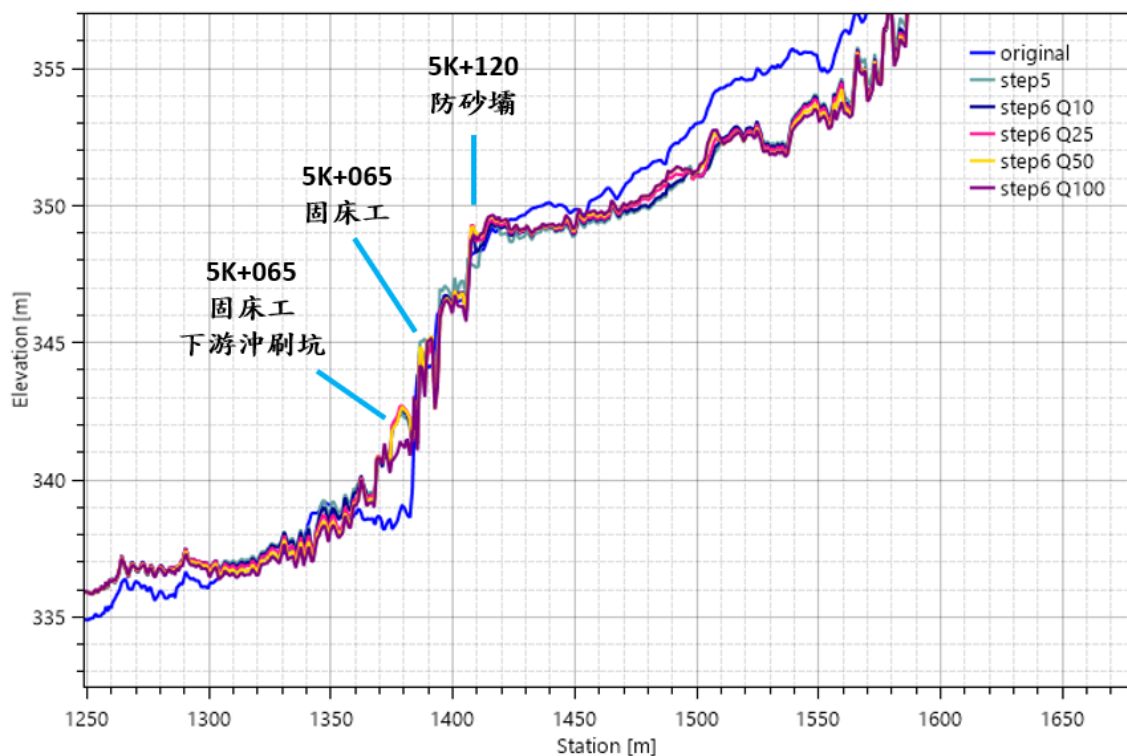


圖 4-49 Step6 各重現期流量模擬之縱剖面

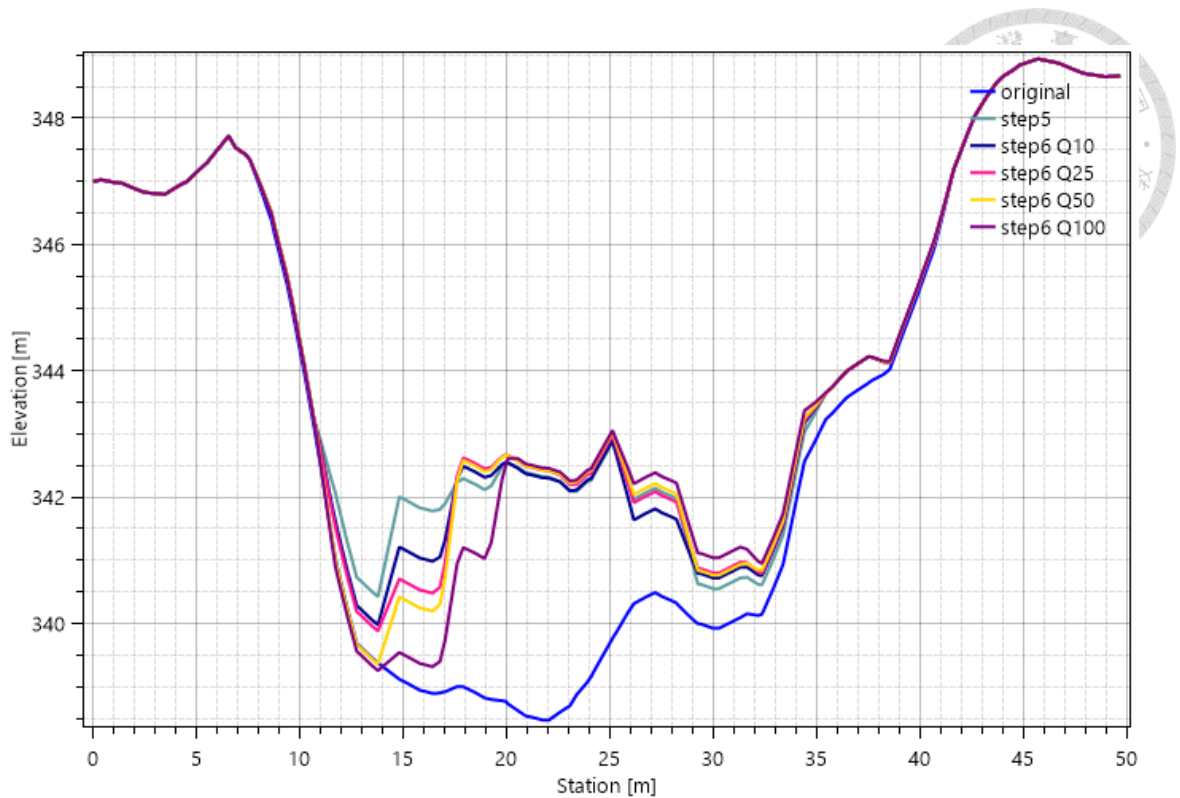


圖 4-50 Step6 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-10 保全對象斷面 Step6 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step5 模擬後地形	17091.35		341.79
Q10	17088.04	-3.31	341.57
Q25	17088.42	-2.93	341.57
Q50	17086.45	-4.90	341.56
Q100	17082.20	-9.16	341.37

(2) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-51 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-51 中紅色線。可以觀察到經過先前一系列的調整策略，原先上游淤積過多的土砂料源逐漸減少，壩體上游淤砂坡度降低，壩體下游則因升壩操作的關係呈現些許沖刷趨勢，顯示可能面臨後續土砂料源不足之問題。

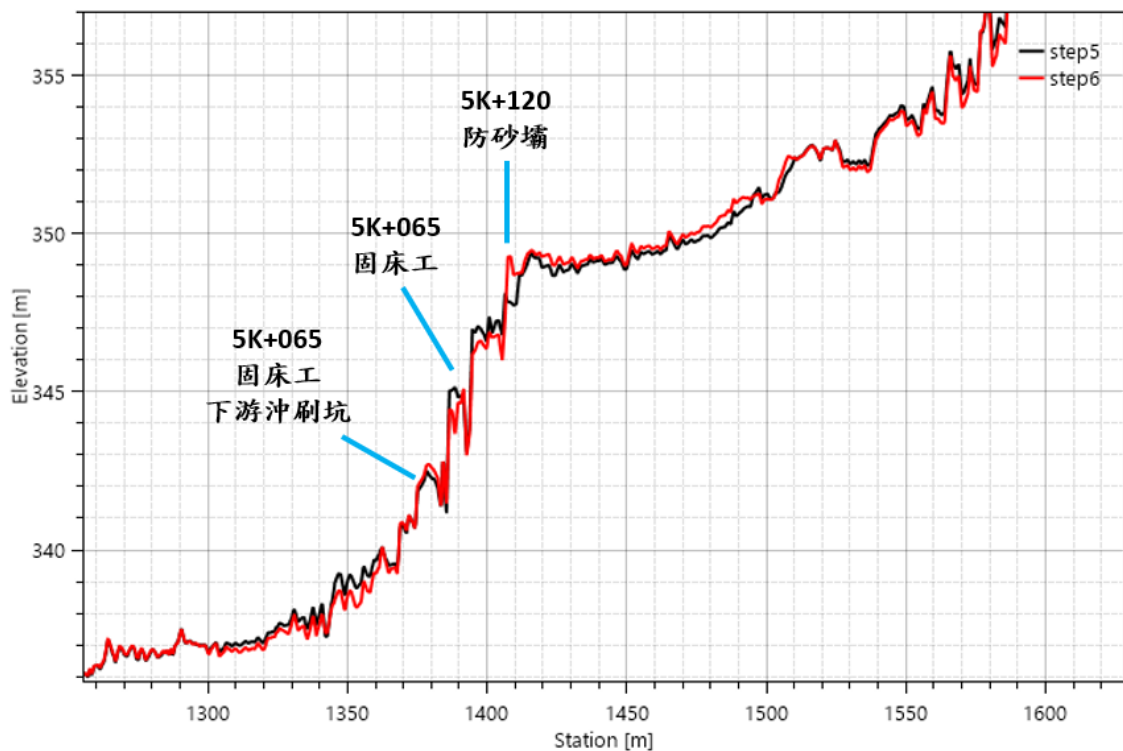


圖 4-51 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-52 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step5 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到由於整體上游土砂料源的逐漸降低，且經過本步驟的升壩操作，此保全對象斷面左岸出現較嚴重的沖刷現象。整體斷面沖刷約 2.93 平方公尺，平均高程由 341.79 公尺改變為 341.57 公尺。

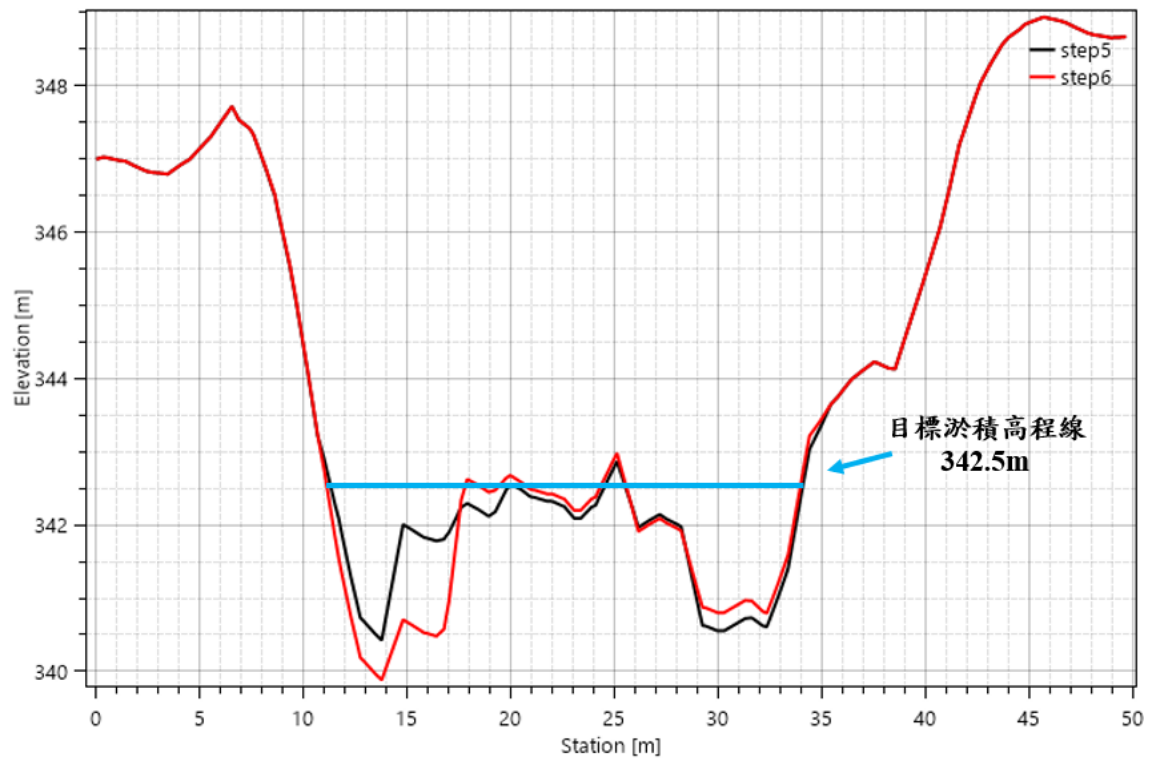


圖 4-52 Step5 與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比



7. Step7

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，首先計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之冲刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 353.36m)，如下圖 4-53 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-4。

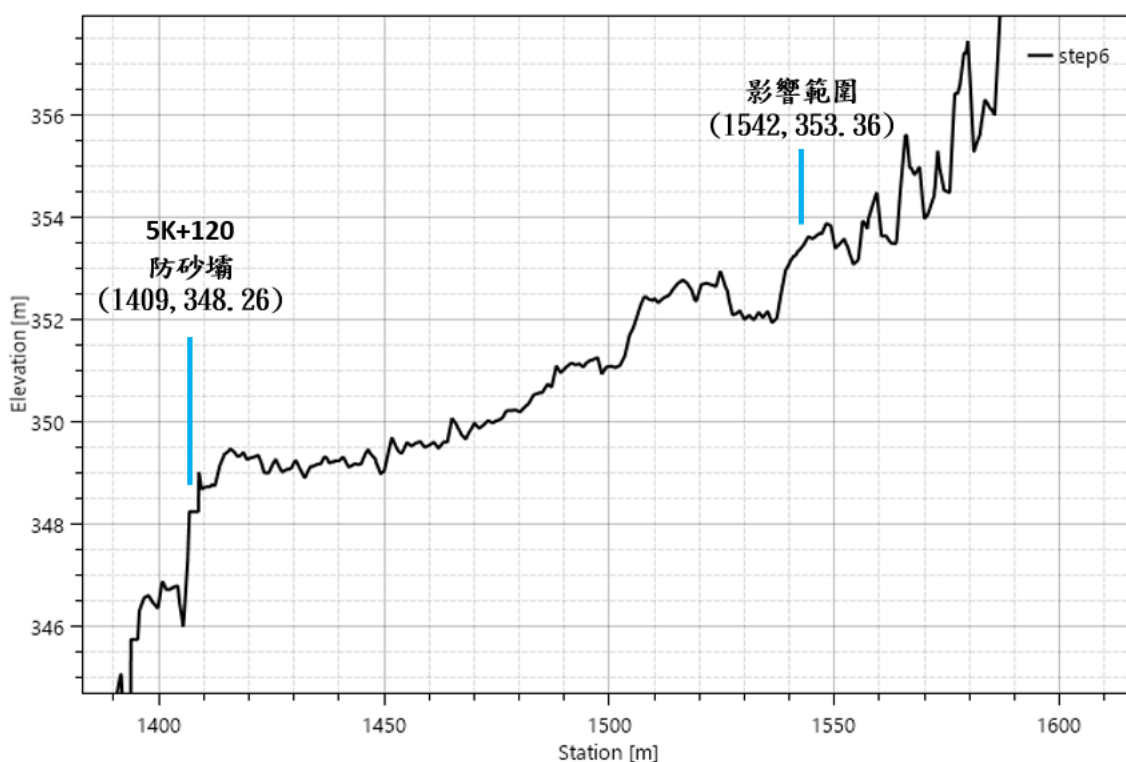


圖 4-53 Step6 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{353.36 - 348.26}{133.33} \cong 0.038 \quad \text{式 4-4}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 3.8%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「低」，經過先前一系列的操作步驟，成功使防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度改善至「低」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過先前步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.57 公尺，平均沖刷深度約為 0.93 公尺，如下圖 4-54 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「低」，經過先前一系列的操作步驟，成功使下游保全對象之沖刷深度改善至「低」。

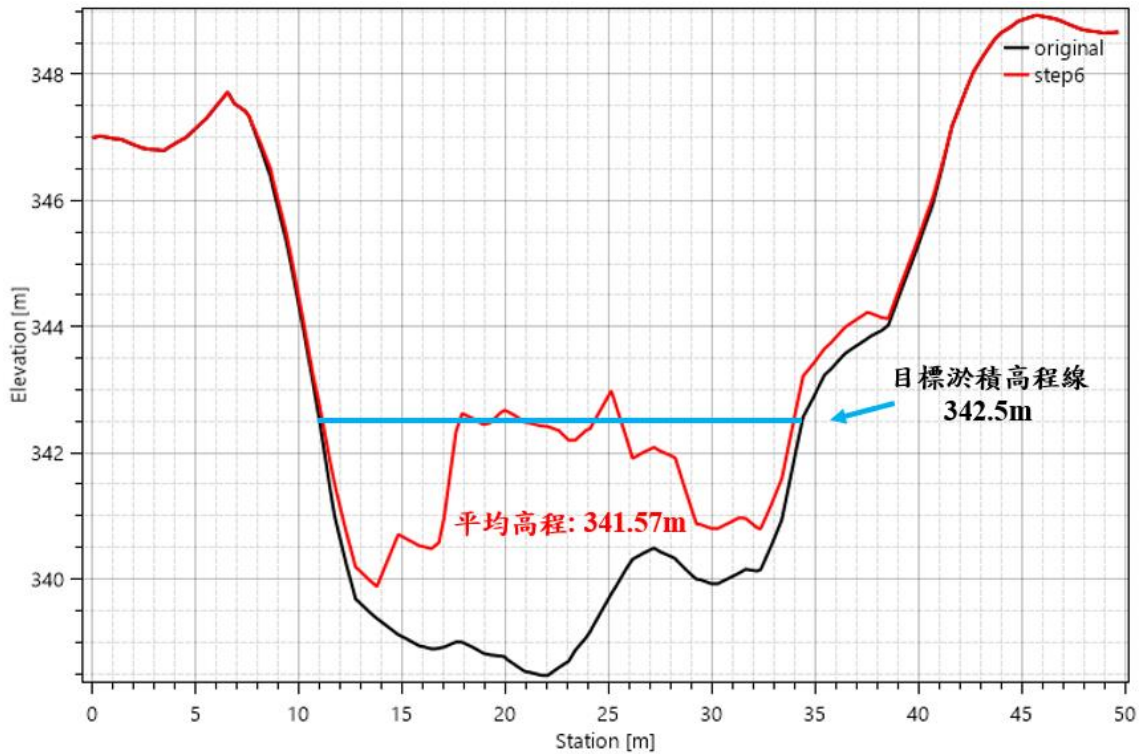


圖 4-54 Step6 地形之保全對象橫剖面圖

經過先前一系列的調整策略步驟，成功使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低。根據上述分析 Step6 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟將以降低 3 支防砂壩預鑄塊，作為最終的調整策略，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-11 中粗體字所示。

表 4-11 Step7 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<4%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (4%~7%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>7%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-55 為整體試區縱剖面圖，圖 4-56 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-12 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程。可以觀察到以縱剖面來看，各重現期洪水事件在壩體上游淤砂坡度及下游沖砂深度之結果差異不大，但 25 年重現期洪水事件會對固床工周圍產生較明顯的沖刷坑，推論為上游土砂料源不足，導致此現象產生。以保全對象橫剖面來看，50 年以上重現期洪水事件會對流心位置造成較明顯之沖淤變化，平均淤積量則差異不大。

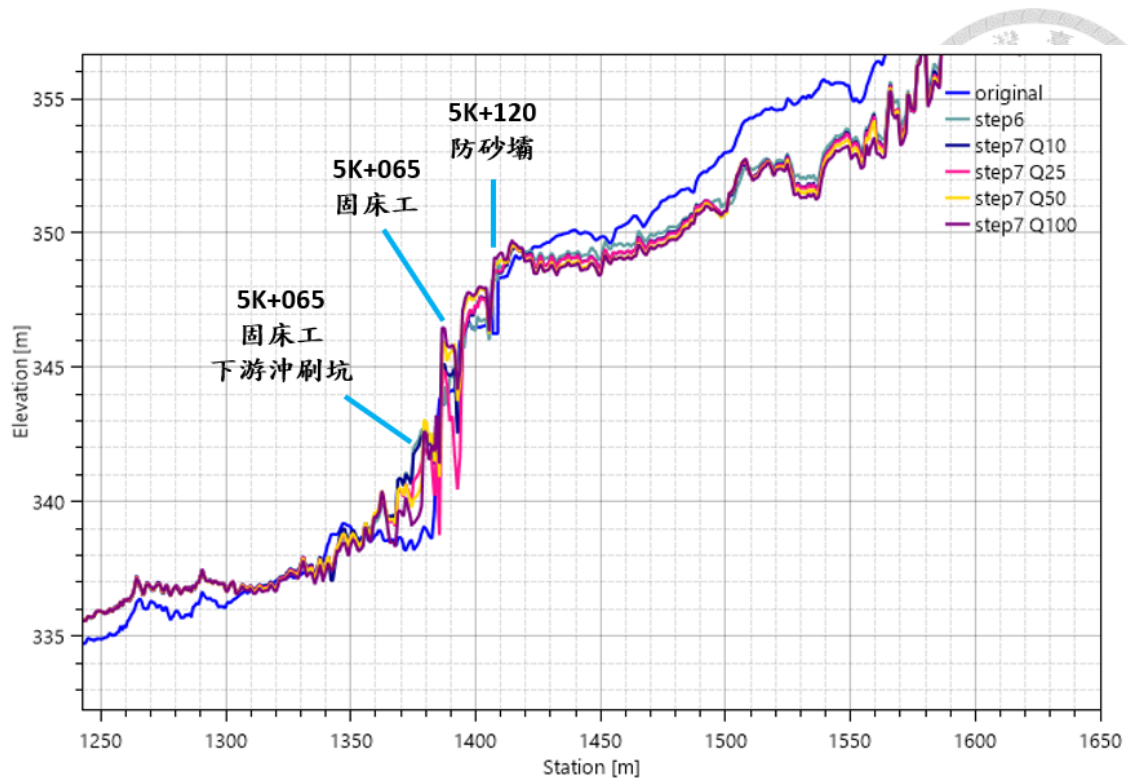


圖 4-55 Step7 各重現期流量模擬之縱剖面

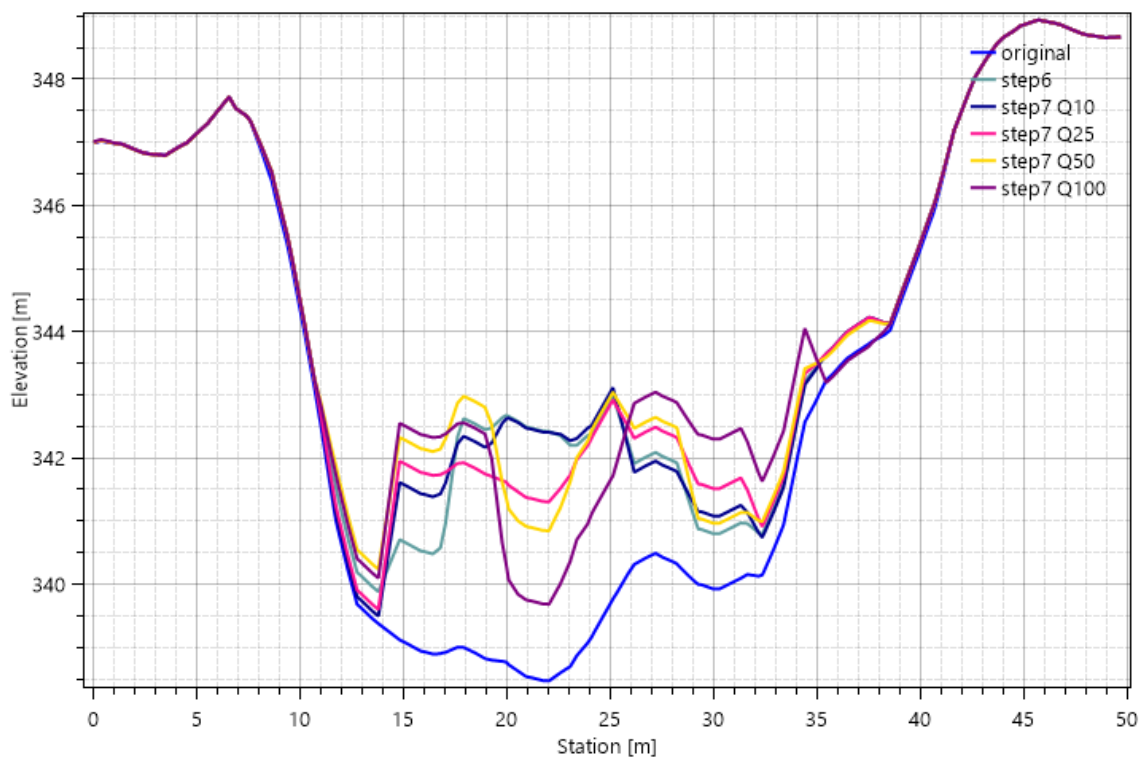


圖 4-56 Step7 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-12 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬之淤積量與平均高程

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)
Step6 模擬後地形	17088.42		341.57
Q10	17089.89	+1.47	341.68
Q25	17089.58	+1.15	341.68
Q50	17092.78	+4.35	341.82
Q100	17090.58	+2.16	341.71

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現最終步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行最終降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-57 中黑色線，後續進行各重現期洪水事件模擬，並以 25 年重現期洪水事件模擬為例作說明，其結果如圖 4-57 中紅色線。可以觀察到，雖然本步驟為降壩操作，但由於上游土砂料源經過先前一系列調整步驟而逐漸降低，因此固床工周圍具有明顯刷現象。

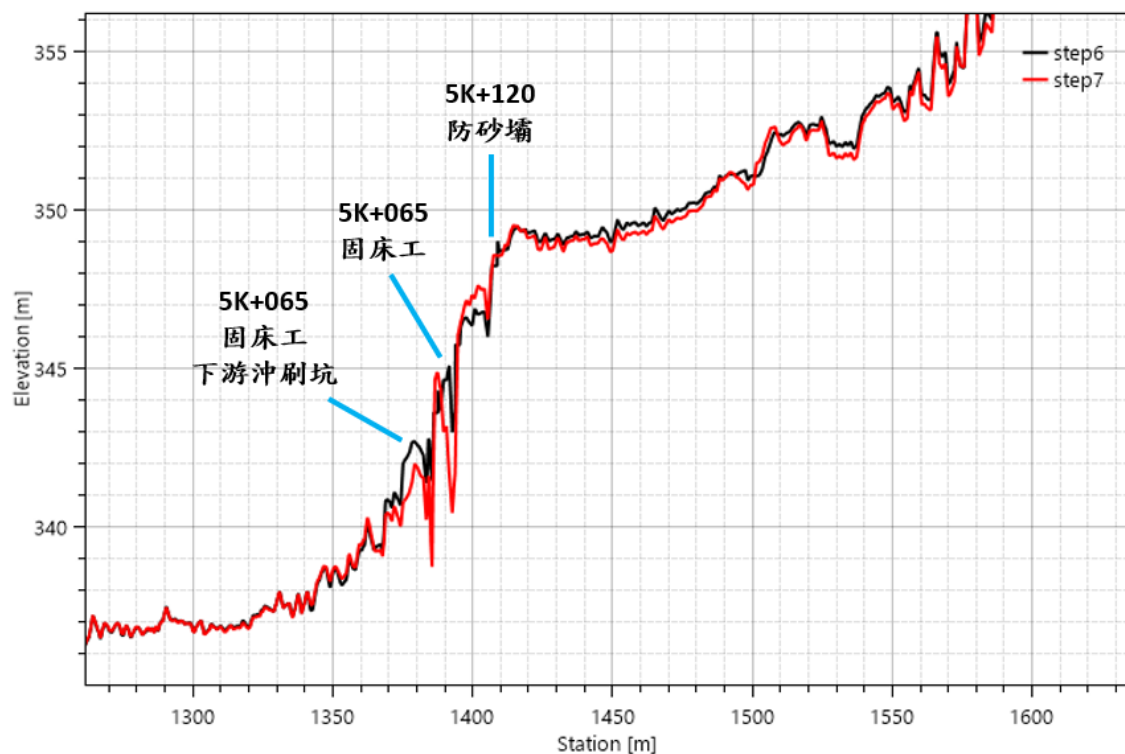


圖 4-57 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-58 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step6 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過一系列的調整策略，本斷面之土砂已達一定的平衡穩定狀態，因此本步驟之降壩操作對整體淤積量增加不明顯，且流心位置有些許沖刷現象，此保全對象斷面淤積量較上一步地形僅增加了 1.15 平方公尺，平均高程由原先 341.57 公尺上升至 341.68 公尺，最終與目標淤積高程僅差距 0.82 公尺。

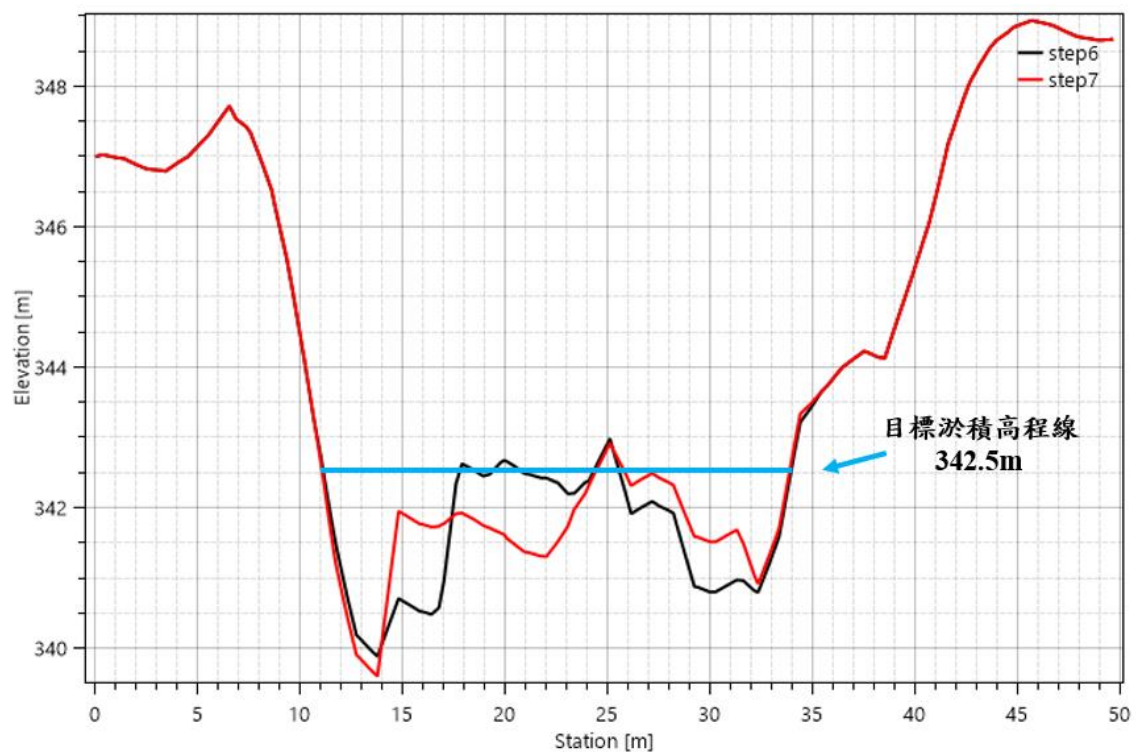


圖 4-58 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比



4.2.3 整體成效分析

1. 調降階段步驟對比

本節將針對本階段模擬之降壩策略步驟(Step1、Step3、Step5、Step7)與原始地形進行對比，觀察每輪降壩操作對保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑之影響，該處橫剖面對比圖呈現如下。

本階段模擬初次降壩為 Step1 調降 4 支防砂壩預鑄塊，圖 4-59 為原始地形(黑色線)、初次降壩模擬地形 Step1 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察到初次降壩操作後經洪水模擬，其產生的斷面淤積量為 22.17 平方公尺，土砂下移量大，顯示溪流仍處於不穩定狀態。

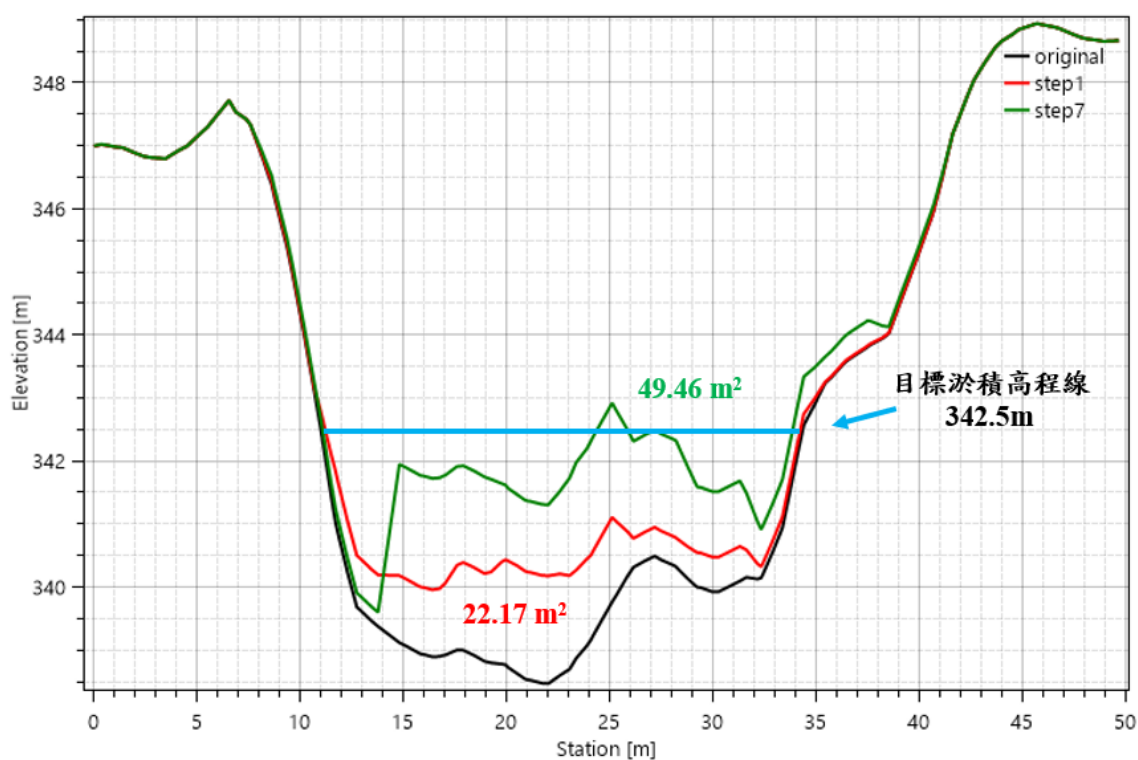


圖 4-59 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第二次降壩操作為 Step3 調降 3 支砂壩預鑄塊，圖 4-60 為原始地形(黑色線)、第二次降壩模擬地形 Step3 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察本輪降壩操作後經過洪水模擬，斷面淤積量結果為 43.16 平方公尺，與初次降壩步驟相比，增加 20.99 平方公尺，與初次降壩的 22.17 平方公尺淤積量差距不大，這也顯示溪流土砂狀態仍處於降不穩定的情況。

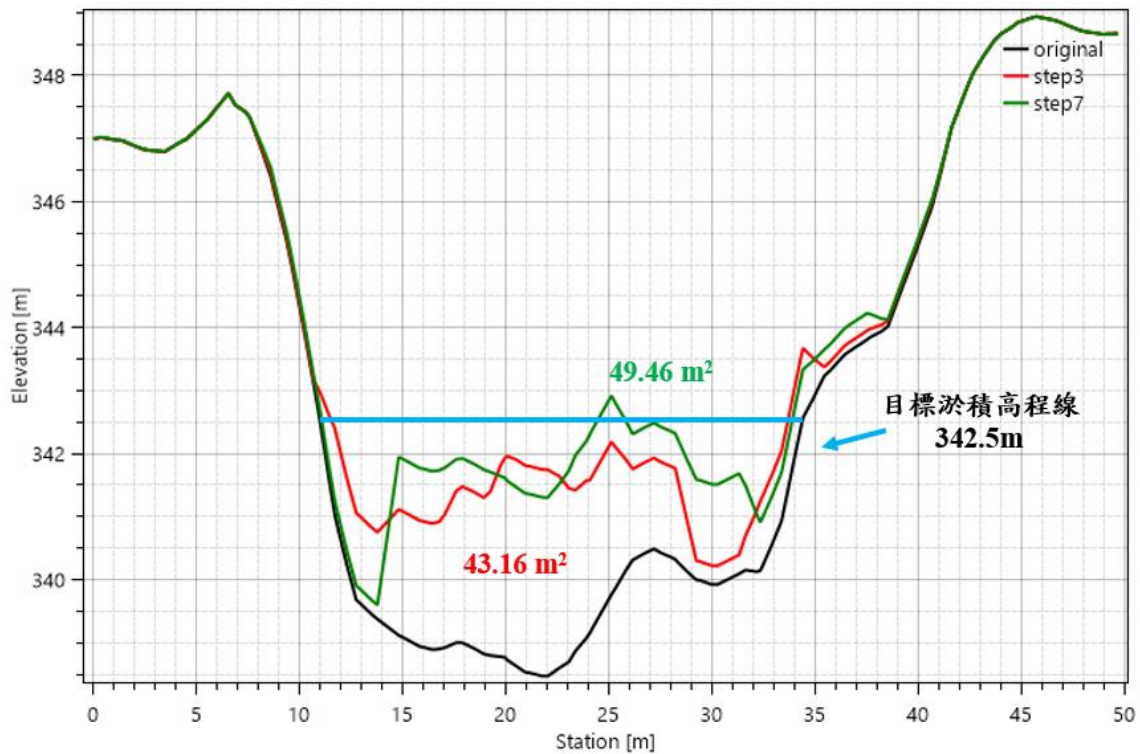


圖 4-60 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第三次降壩操作為 Step5 調降 3 支砂壩預鑄塊，圖 4-61 為原始地形(黑色線)、第三次降壩模擬地形 Step5 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察本輪降壩操作後經過洪水模擬，斷面淤積量結果為 51.24 平方公尺，與上次降壩步驟相比，僅增加 8.08 平方公尺，且與最終結果 Step7 地形之淤積量相比有略高一些，此結果顯示雖然土砂下移趨勢漸漸達到收斂，但上游土砂料源在後期調整階段可能會有不足的情形發生，將以針對此問題，在後續階段模擬進行調整策略改進。

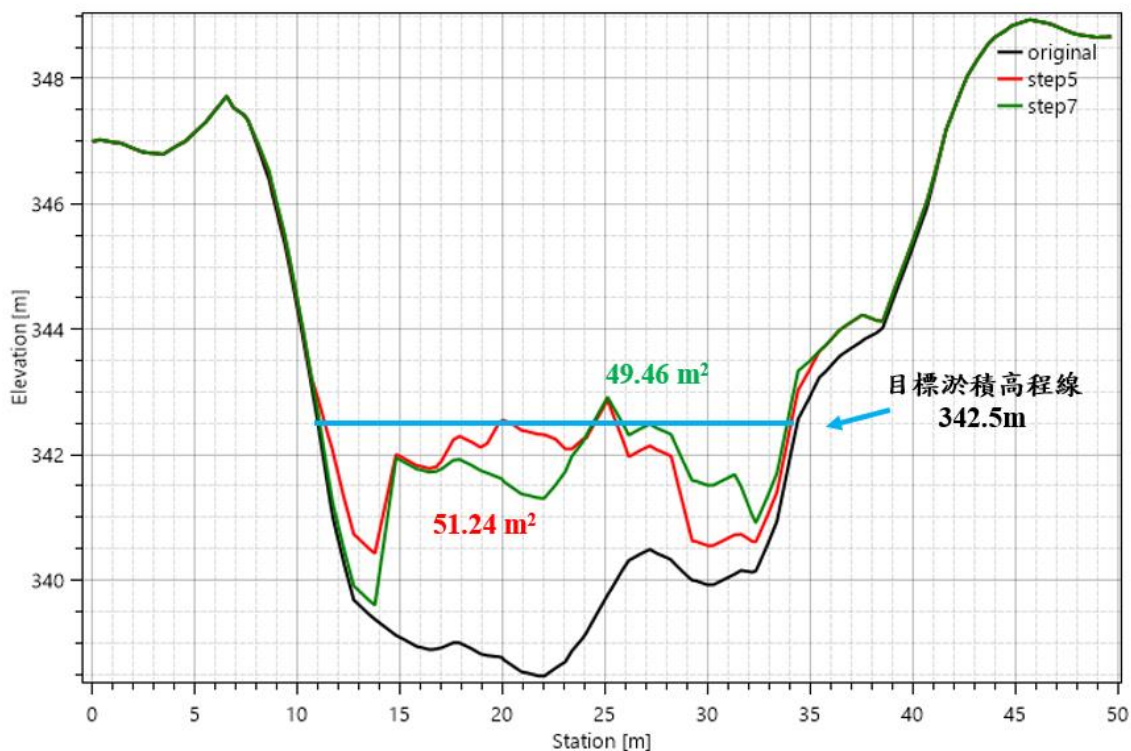


圖 4-61 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

2. 各步驟調整策略數據彙整

本節將針對各步驟調整策略模擬之數據進行彙整，其中包含主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之各步驟調整後的平均高程、平均沖刷深度、總淤積量、與上一步之淤積相差量、與上一步操作之最大沖淤變化量等資料彙整，如下表 4-13 所示。可以由表中數據觀察到，會隨著升、降壩操作有明顯改變的因子為「與上一步操作之最大沖淤變化量」，降壩階段分別為淤積 1.71、1.76、1.05、1.24 公尺可以觀察到前兩次降壩因土砂仍處於不穩定階段，因此最大沖淤變化量高，後期兩次降壩操作則為溪流土砂狀態漸漸穩定，因此其最大沖淤變化量較

低。升壩階段則分別為沖刷 0.83、0.59、1.3 公尺，前兩次升壩操作，由於上游土砂料源仍十分充足，其最大沖淤變化量較低，最後一次升壩操作則因上游土砂料源不足，無法提供下游足量的土砂補注，使其最大沖淤變化量達沖刷 1.3 公尺。經過本階段模擬，發現後續階段模擬或許可以將「與上一步操作之最大沖淤變化量」作為調整時機的判斷。

表 4-13 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料

	平均高程 (m)	平均沖刷 深度(m)	總淤積量 (m ²)	與上一步操作 之淤積相差量 (m ²)	與上一步操作 之最大沖淤變 化量(m)
原始地形	339.65	2.85	0		
Step1 (降 4 支)	340.60	1.9	22.17	+22.17	+1.71
Step2 (升壩)	341.13	1.37	34.85	+12.68	-0.83
Step3 (降 3 支)	341.45	1.05	43.16	+8.31	+1.76
Step4 (升壩)	341.49	1.01	43.66	+0.49	-0.59
Step5 (降 3 支)	341.79	0.71	51.24	+7.58	+1.05
Step6 (升壩)	341.57	0.93	48.31	-2.93	-1.3
Step7 (降 3 支)	341.68	0.82	49.46	+1.15	+1.24

3. 本階段成果呈現

經過本輪一系列調整策略步驟，最終成果之縱剖面圖如下圖 4-62 所示，其中黑色線為原始地形，紅色線為經過七步調整步驟之地形。可以觀察經過本階段共七部的升、降壩調整，雖然成功使防砂壩上游溪床坡度降低，且原先沖刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑有明顯的土砂料源補注，但在 5K+065 固床工的周圍於最終步驟有產生嚴重的沖刷趨勢，推論為調整步驟後期上游土砂料源不足所導致，因此後續階段模擬將針對此問題做出調整改善。

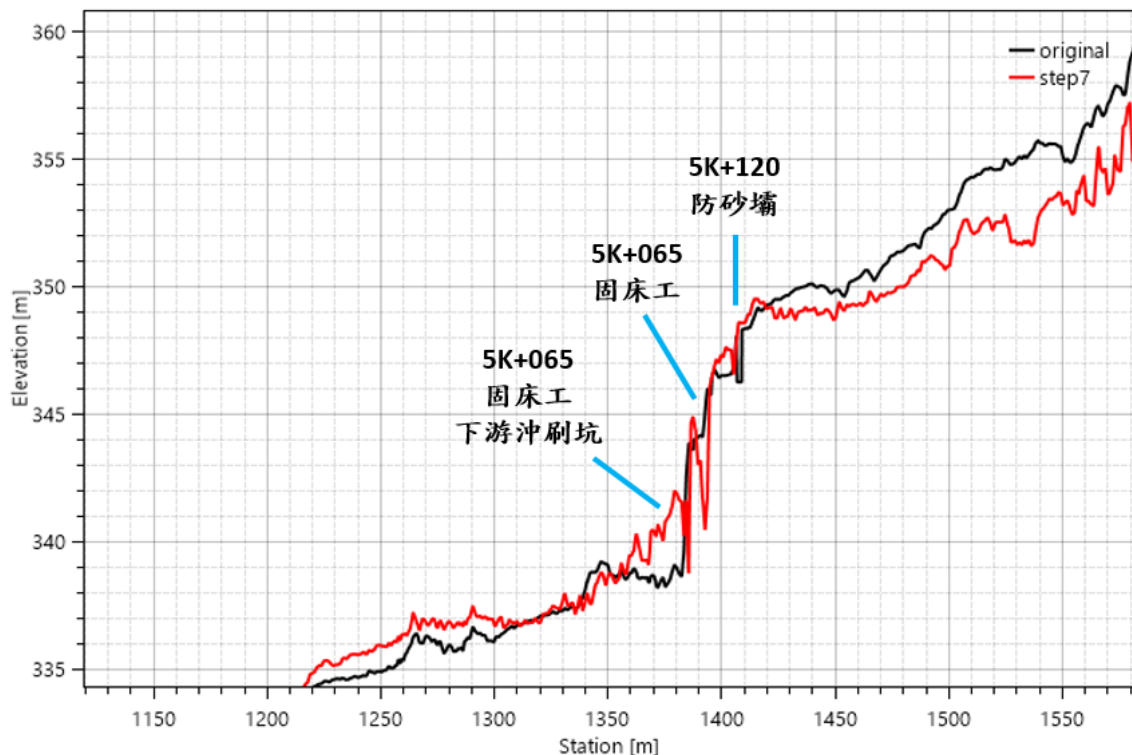


圖 4-62 原始地形與最終成果之縱剖面對比

本研究除了主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑外，也有為了確保升、降壩之操作策略不會對更下游區段造成危害而設立的 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，其經過一系列調整策略模擬之結果如下圖 4-63、圖 4-64，可以觀察到本輪一系列的升、降壩操作，最終產生約 1 至 2 公尺的淤積，顯示調整策略並不會對壩體更下游之區段造成土砂危害，且同時提供土砂料源補注。

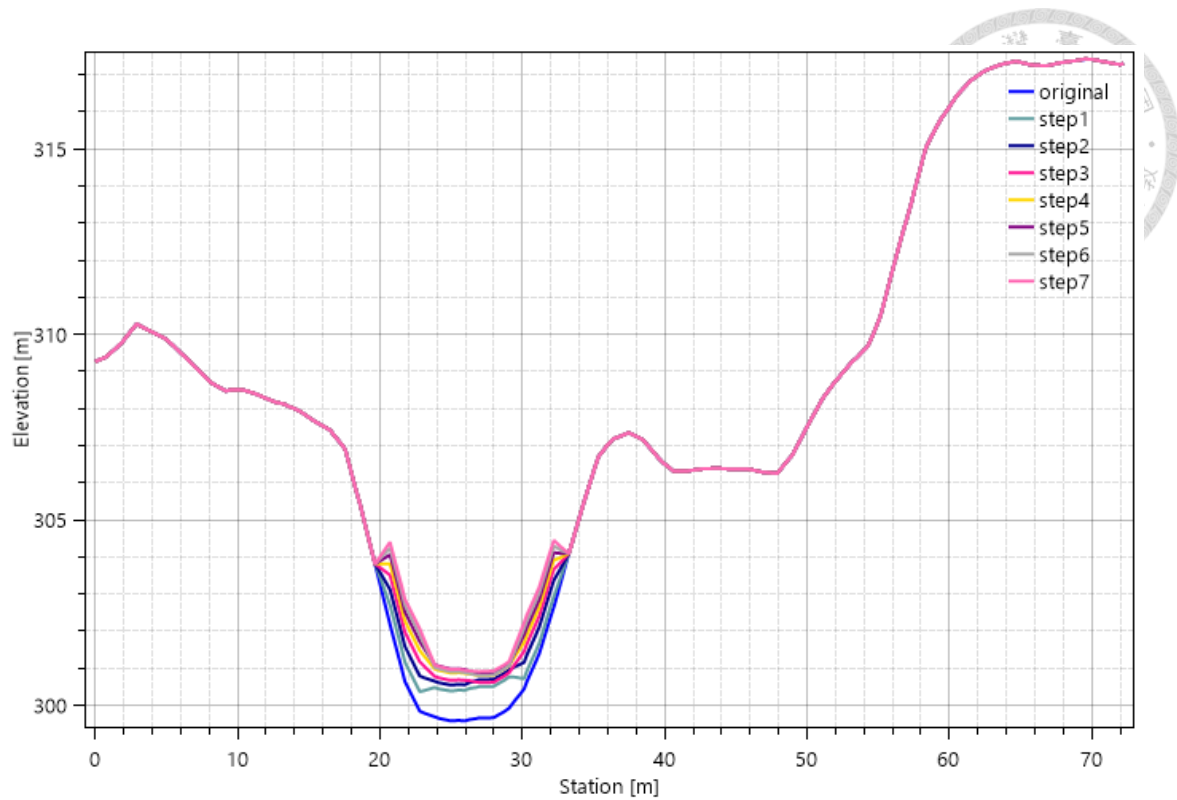


圖 4-63 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

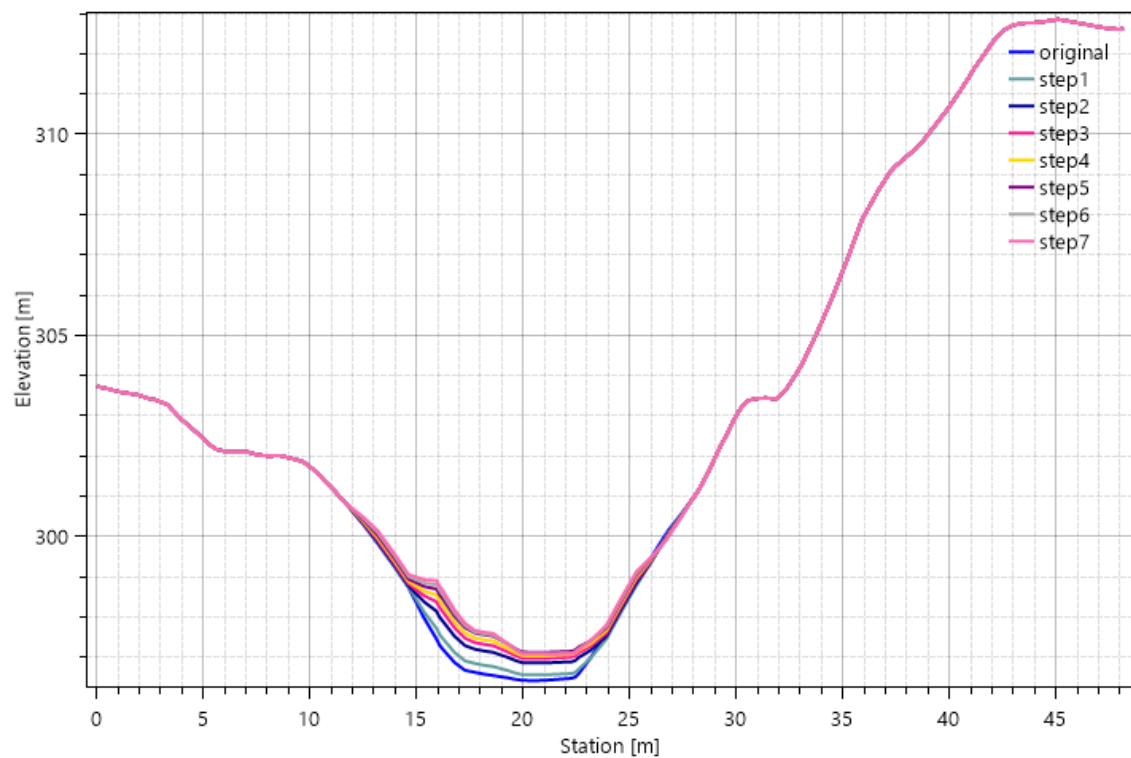


圖 4-64 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

4.2.4 小結

經過本階段模擬結果的分析，目前之調整策略主要問題為前期溪流土砂運移量大，而後期則會有上游土砂料源不足導致下游沖刷之問題，顯示出溪流的土砂變動量是會隨時間慢慢遞減的。本階段模擬發現若單以 25 年重現期洪水事件作為調整時機依據，將無法滿足變動的土砂運移量。然而，根據前述各步驟調整策略數據彙整分析，得知「與上一步操作之最大沖淤變化量」會隨著升、降壩操作而有明顯改變，且其符合自然溪流隨時間變動的土砂運移潛勢，若以其取代 25 年重現期洪水事件作為調整時機依據，將可以使防砂壩調整策略更加貼近實際溪流、河川的土砂演替樣貌。

此外，本階段模擬整體流程如圖 4-22 圖，可以觀察到 Step3、4 以及 Step5、6 皆為「下游保全對象之沖刷深度」：中、「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」：中之狀況，此結果顯示「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」：中的數值範圍可能過大，因此將改變矩陣縱軸之高、中、低數值範圍制定標準，與橫軸概念相同，使用者可以依據該試區之「歷史最陡溪床坡度」與「計畫淤砂坡度」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍，其中「歷史最陡溪床坡度」定義為該防砂壩上游之歷史最陡溪床坡度，而「計畫淤砂坡度」則定義為該防砂壩上游經調整後期望達到之計畫淤砂坡度。如此一來，也可以避免最終步驟之防砂壩上游淤砂坡度低於計畫淤砂坡度，使土砂料源至調整後期仍有一定之補注量。因此，下一階段模擬將採用上述新的調整時機以及全新的縱軸標準，做一系列之防砂壩調整策略模擬分析。

4.3 最終階段模擬(保守型)

根據前述的研究經驗及模擬成果，本輪期望定出全新之防砂壩調整時機，以及新的經營管理與操作矩陣縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」之高、中、低數值範圍標準，經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低數值範圍則沿用第二階段模擬所制定之標準，以提供使用者能應用於不同溪流環境與現地情況。以下分述說明。

1. 防砂壩調整時機說明

根據前一階段各步驟調整策略數據彙整分析，得知「與上一步操作之最大沖淤變化量」會隨著升、降壩操作而有明顯改變，且其符合自然溪流隨時間變動的土砂運移潛勢，因此本階段使用「與上一步操作之最大沖淤變化量」做為新的調整時機標準依據。若本步驟為降壩操作，則以「與上一步操作之最大淤積變化量」為依據，若本步驟為升壩操作，則以「與上一步操作之最大沖刷變化量」為依據。參考先前階段的模擬數據，使用者可以依據該保全對象之「最嚴重沖刷時溪床高程」與「預期溪床高程」此二值之差值作為「整體最大沖淤變化量」，並將「與上一步操作之最大沖淤變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一時作為防砂壩調整時機。然而根據多次模擬經驗，當下游沖刷嚴重且為降壩操作時，其可容許的淤積量較大，尤其初期調整步驟之土砂運移量非常大，若能於下游沖刷嚴重時提高防砂壩調整時機標準，將可以減少壩體調整頻率、降低工程成本，同時緩解初期土砂運移量過大之問題。因此當「下游保全對象之沖刷深度」屬於高的數值範圍且該輪為降壩操作時，則調整時機將設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之二時作為後續防砂壩調整時機，如此一來不但可以減少進行調整壩體工程的頻率，同時補足下游保全對象之嚴重沖刷現象。

以本研究試區保全對象:5K+065 固床工下沖刷坑為例，最嚴重沖刷狀況溪床高程為: 339.65 公尺，預期溪床高程為:342.5 公尺，兩者差值為 2.85 公尺，因此本區整體最大沖淤變化量即為 2.85 公尺。防砂壩調整時機為「與上一步操作之最大沖淤變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一時，即「與上一步操作之最大沖淤變化量」超過 0.95 公尺時則要進行下一步防砂壩調整策略。但當「下游保全對象之沖刷深度」屬於高的數值範圍且該輪為降壩操作時，下一次防砂壩調整時

機則為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之二時，即「與上一步操作之最大淤積變化量」超過 1.9 公尺時則要進行下一步防砂壩調整策略。

此外，根據多次模擬經驗，觀察到若防砂壩體發生淤滿之情形，會使其失去攔阻土砂之功能，發生較大的洪水事件會使過量土砂向下游移動，無法保護下游保全對象安全，因此額外設定一項防砂壩調整時機，即為若因升壩操作使壩體淤滿時，則需進行下一步防砂壩調整策略。以本研究試區為例，淤滿之判定將以廊仔溪 5K+120 調整型防砂壩上游 1 公尺之橫斷面平均高程，作為淤滿判定位置，且依本研究之原始地形數值高程模型設定，該淤滿判定位置之平均高程為 348.50 公尺，若後續模擬地形之淤滿判定位置超過此平均高程，則視為壩體呈現淤滿狀態。

總結來說，此階段模擬之防砂壩調整時機判斷為：

- (1) 判斷本輪是否屬於降壩操作，若是，則再判斷是否「下游保全對象之沖刷深度」屬於高的數值範圍，若亦是，則下一次防砂壩調整時機為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之二時。
- (2) 若本輪為降壩操作，但「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，則下一次防砂壩調整時機為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一時。
- (3) 若本輪為升壩操作，則下一次防砂壩調整時機為：壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一時。滿足任一項以上則需進行防砂壩調整。

如以下圖 4-65 調整時機判定流程圖所示，使用者可以根據當下現地之情況做出下一次調整時機的對應。

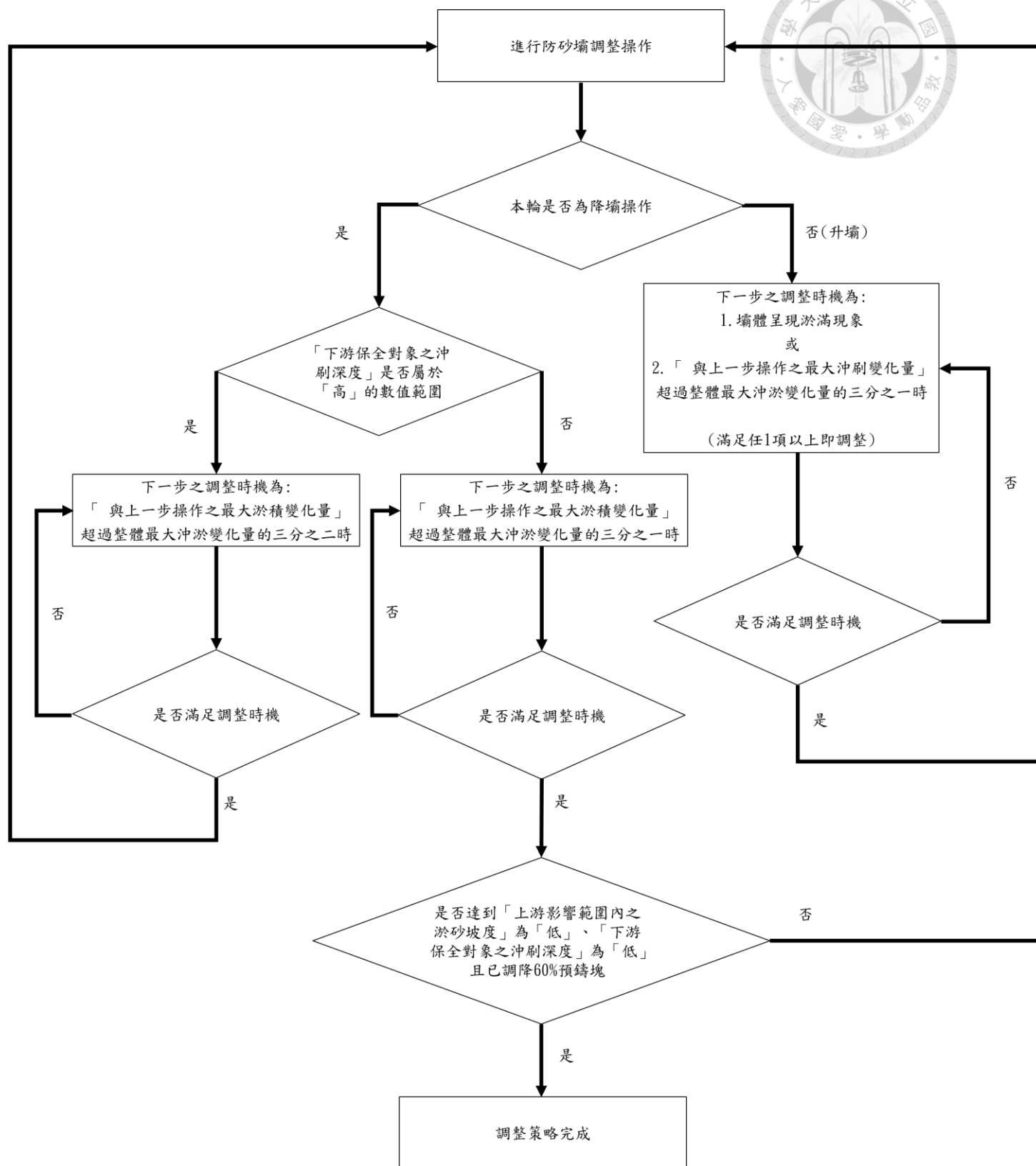
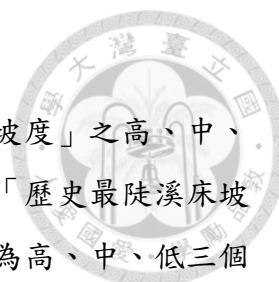


圖 4-65 調整時機判定流程圖



2. 經營管理與操作矩陣之縱軸標準說明

經營管理與操作矩陣縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」之高、中、低數值範圍標準，使用者可以依據該防砂壩上游影響範圍內之「歷史最陡溪床坡度」、「計畫淤砂坡度」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍。以本研究試區為例，參考行政院農業委員會水土保持局(2021)「110 年臺中分局轄區重要治理區土砂高變動性調查評估及治理策略研擬成果報告書」，5K+120 溪段上游坡度可達 7%，整體溪床坡度為 4%，因此「歷史最陡溪床坡度」及設定為 7%、「計畫淤砂坡度」設定為 4%，兩者相值為 3%，三等分後之坡度差為 1%。因此本試區之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」高:淤砂坡度為大於 6%、中:淤砂坡度為 5%至 6%、低:淤砂坡度為低於 5%。

使用者可以依上述方式根據不同溪流現地狀況及沖淤情況，訂出合適之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」之高、中、低範圍標準。

3. 經營管理與操作矩陣之橫軸標準說明

經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之標準，則與第二段模擬相同。橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低數值範圍制定標準，使用者可以依據該保全對象之「最嚴重沖刷時溪床高程」與「預期溪床高程」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍。以本研究試區保全對象:5K+065 固床工下沖刷坑為例，最嚴重沖刷狀況溪床高程為: 339.65 公尺，預期溪床高程為:342.5 公尺，兩者相差 2.85 公尺，三等分後之高程差為 0.95 公尺。因此本試區之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」高:溪床高程為 339.65 公尺至 340.6 公尺、中:高程為 340.6 公尺至 341.55 公尺、低:高程為 341.55 公尺至 342.5 公尺。

使用者可以依上述方式根據不同溪流現地狀況及沖淤情況，訂出合適之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」高、中、低範圍標準。本階段模擬成果及詳細操作模擬內容如下。

4.3.1 整體模擬流程

本階段模擬同樣使用內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型(DEM)作為原始地形，依照各步驟地形狀況進行防砂壩預鑄塊調整，並且加入了全新的縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」之高、中、低數值範圍標準，以及全新的防砂壩調整時機，橫軸「下游保全對象之沖刷深度」之高、中、低數值範圍則沿用第二階段模擬所制定之標準。本階段總共進行 7 步驟升、降壩調整，最終使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本階段之經營管理與操作矩陣及模擬流程如圖 4-66 所示。

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊 Step 5、6	調降 3 支預鑄塊 Step 7
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊 Step 1、2	調降 3 支預鑄塊 Step 3、4	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

圖 4-66 最終階段模擬(保守型)流程圖

4.3.2 各步驟細部操作說明

本小節將呈現本模擬之各步驟防砂壩調整策略說明，以及模擬結果展示，包含:防砂壩調整策略選定、各步驟調整時機判定、各步驟進行不同流量重現期模擬結果、各步驟操作前後對比分析、保全對象模擬結果分析等，詳細說明如下。



1. Step1

(1) 調整策略選擇

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，並且計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之冲刷深度」二數值，計算結果如下：

防砂壩上游影響範圍將採用 3.3.1 節式 3-11 計算之 133.33 公尺，且對照模型中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 355.55m)，如下圖 4-67 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-5。

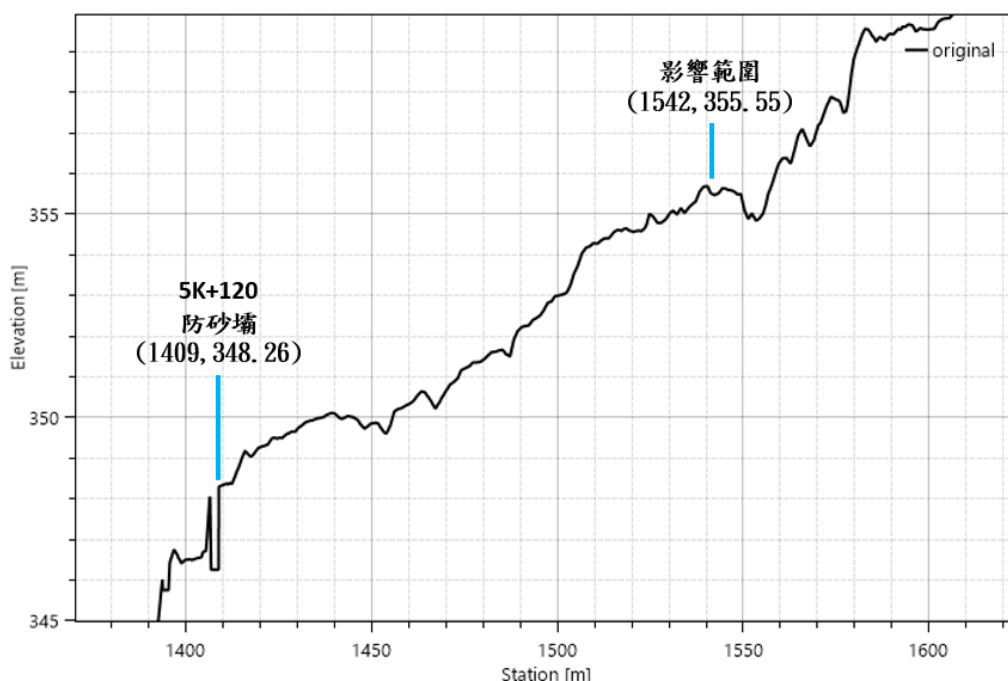


圖 4-67 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{355.55 - 348.26}{133.33} \cong 0.054 \quad \text{式 4-5}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.4%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑，其原始地形沖刷嚴重，斷面平均高程為 339.65 公尺，沖刷深度約為 2.85 公尺，如下圖 4-68 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「高」。

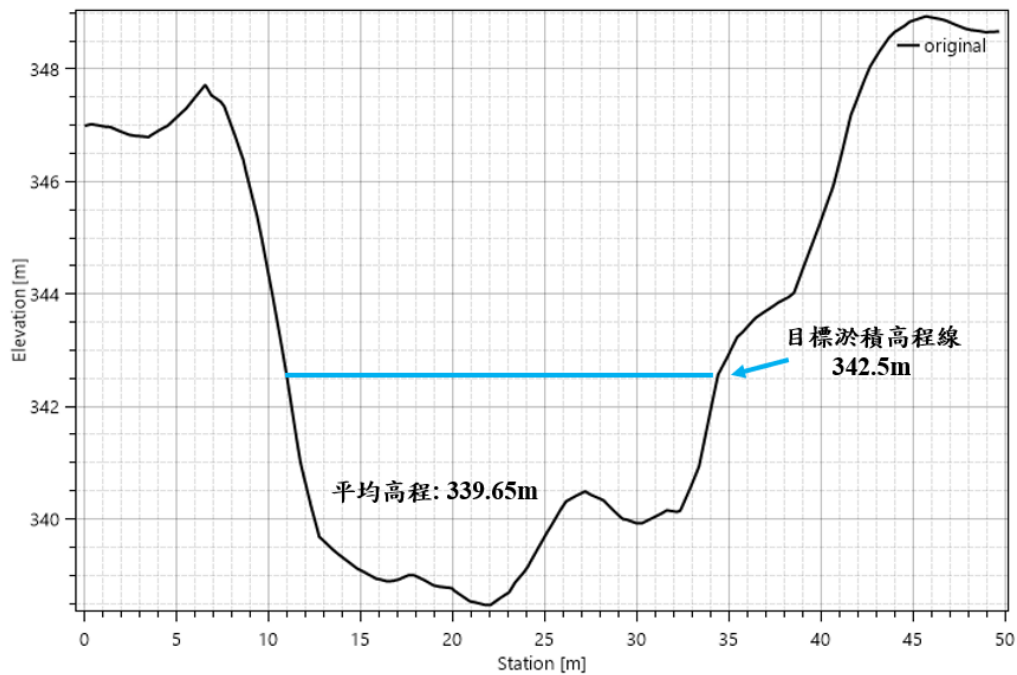


圖 4-68 原始地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析原始地形之情況，以及對應本階段之經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 4 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-14 中粗體字所示。

表 4-14 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為降壩操作，且「下游保全對象之沖刷深度」屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之二(1.9 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-69 為整體試區縱剖面圖，圖 4-70 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-15 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面來看，對壩體下游整體區段各重現期的結果差異不大，壩體上游則是 25 年重現期以上洪水事件會造成比較明顯的地形變化。以保全對象橫剖面來看，由於本步驟屬於初期降壩階段，溪流土砂尚處於不穩定狀態，因此 10 年重現期以上洪水

事件就會造成大量的淤積情況發生。且根據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之二(1.9 公尺)，對照表 4-15 後，將選用經過 10 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

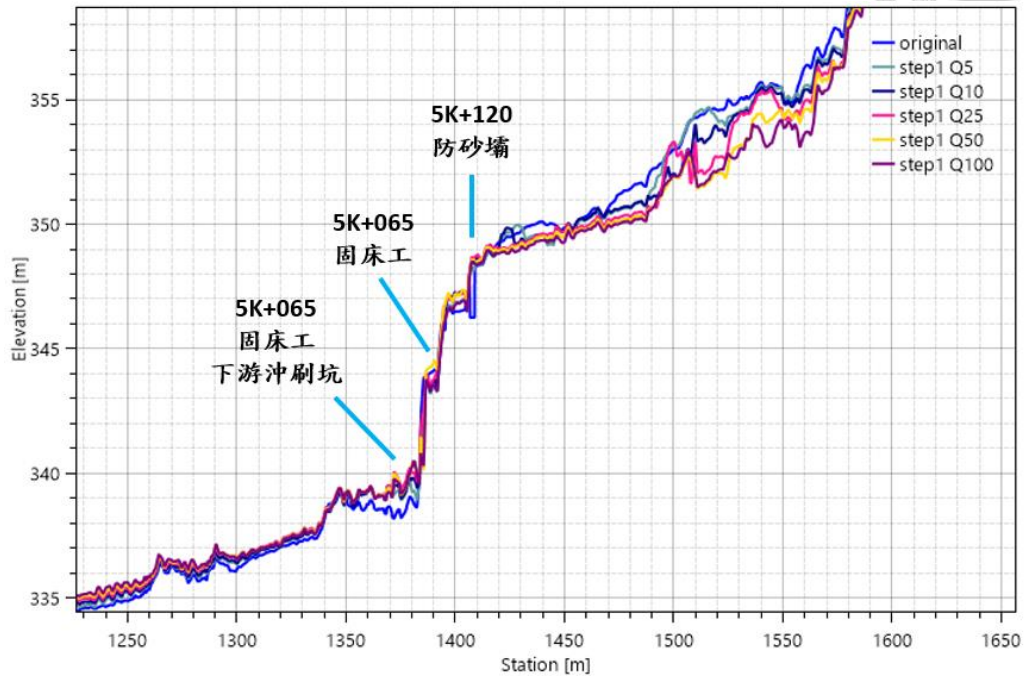


圖 4-69 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面

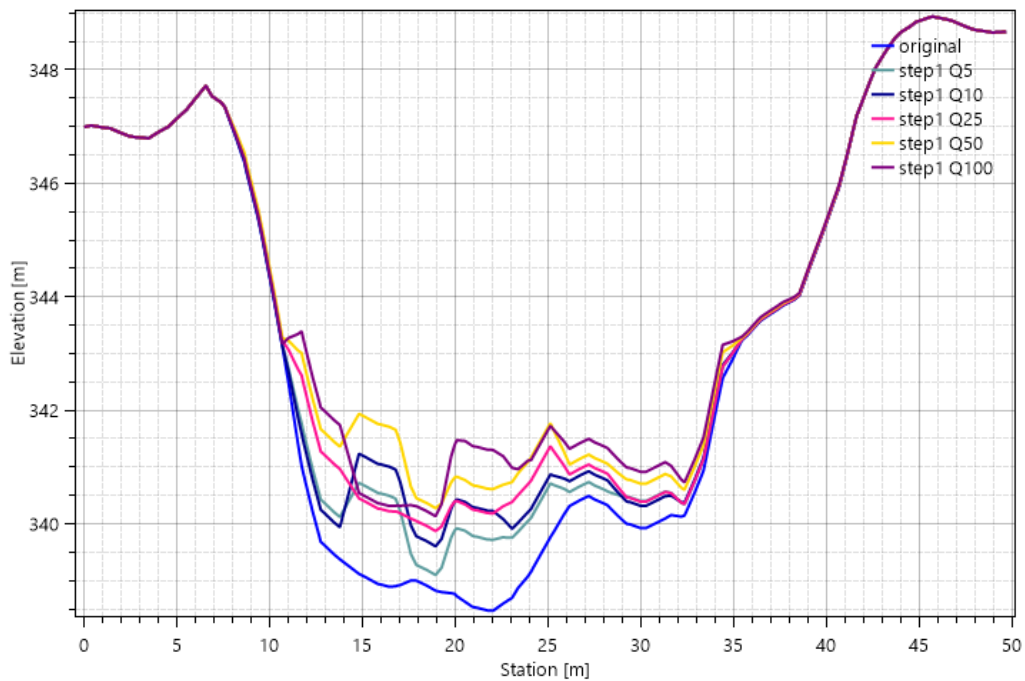


圖 4-70 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-15 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)
原始地形	17040.12		339.65	
Q5	17057.56	+17.44	340.40	+1.6
Q10	17062.11	+21.98	340.60	+2.13
Q25	17065.77	+25.65	340.75	+1.72
Q50	17077.43	+37.31	341.23	+2.82
Q100	17077.98	+37.86	341.26	+2.83

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之原始地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，對照矩陣調整策略，進行調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-71 中黑色線，後續進行 10 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-71 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂順利下移，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度降低，且壩體下游整體溪段產生淤積現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-72 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為原始地形，紅色線為本步驟模擬後地形，藍色線為本研究之最終目標淤積高程。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，淤積量有明顯增加，此保全對象斷面淤積量較原始地形增加了 21.98 平方公尺，平均高程由原先 339.65 公尺上升至 340.60 公尺，顯示本步驟調降策略有使壩體上游淤積過量之土砂順利填補至冲刷坑。

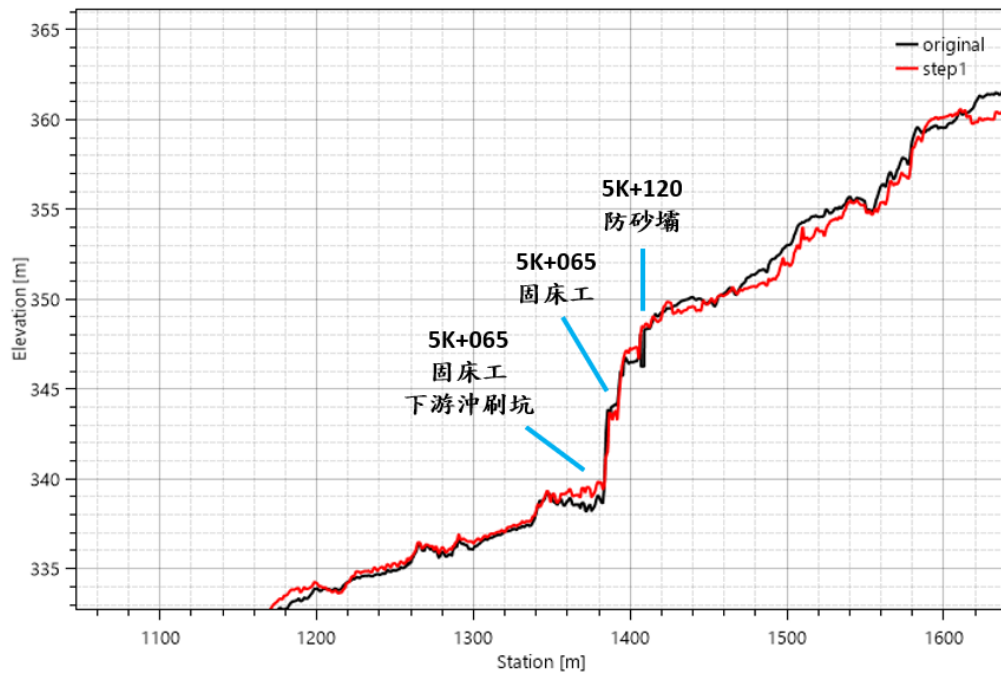


圖 4-71 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比

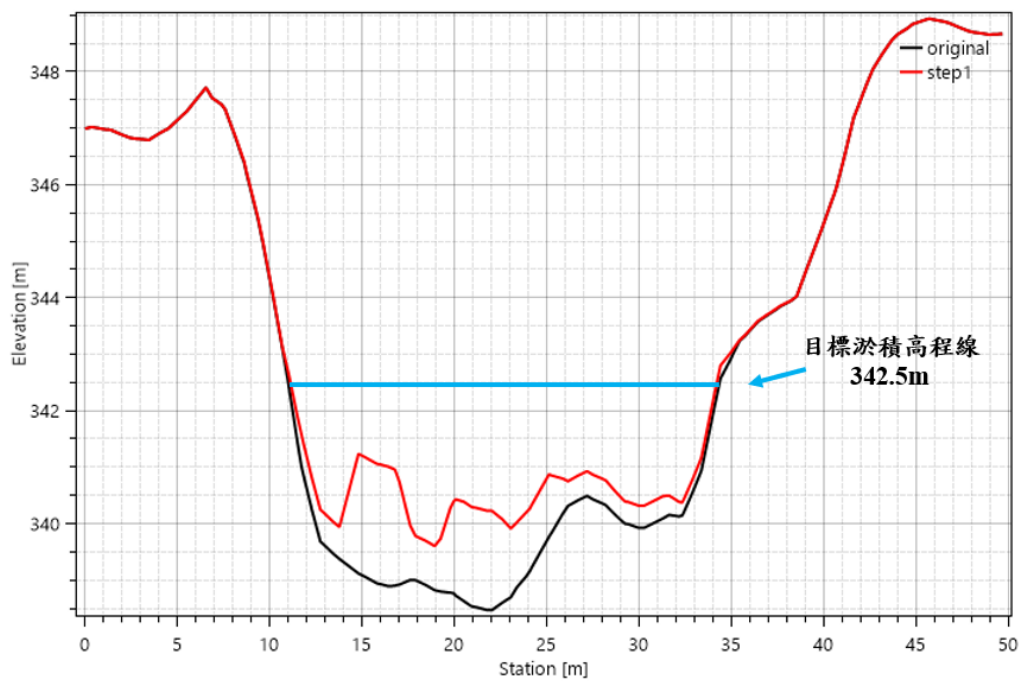


圖 4-72 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比



2. Step2

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為升壩操作，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-73 為整體試區縱剖面圖，圖 4-74 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-16 為各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程，表 4-17 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面來看，50 年重現期以上洪水事件會對壩體上、下游造成比較明顯的地形變化。以保全對象橫剖面來看，因此即使本步驟為升壩操作，各重現期洪水事件仍造成不少的淤積情況。且根據本階段模擬設定，若淤滿判定位置之高程大於 348.50 公尺，則視為達到壩體淤滿狀態，依據本步驟各重現期模擬結果顯示，發生 5 年重現期以上洪水事件即會使壩體呈現淤滿狀態，如表 4-16 所示。以上結果皆顯示，由於本步驟屬於初期調整階段，溪流土砂尚處於不穩定狀態，仍需進行後續一系列調整策略使土砂恢復平衡穩定狀態。根據本步驟的防砂壩調整時機設定，由於 5 年重現期洪水事件使壩體呈現淤滿狀態，因此將選用經過 5 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

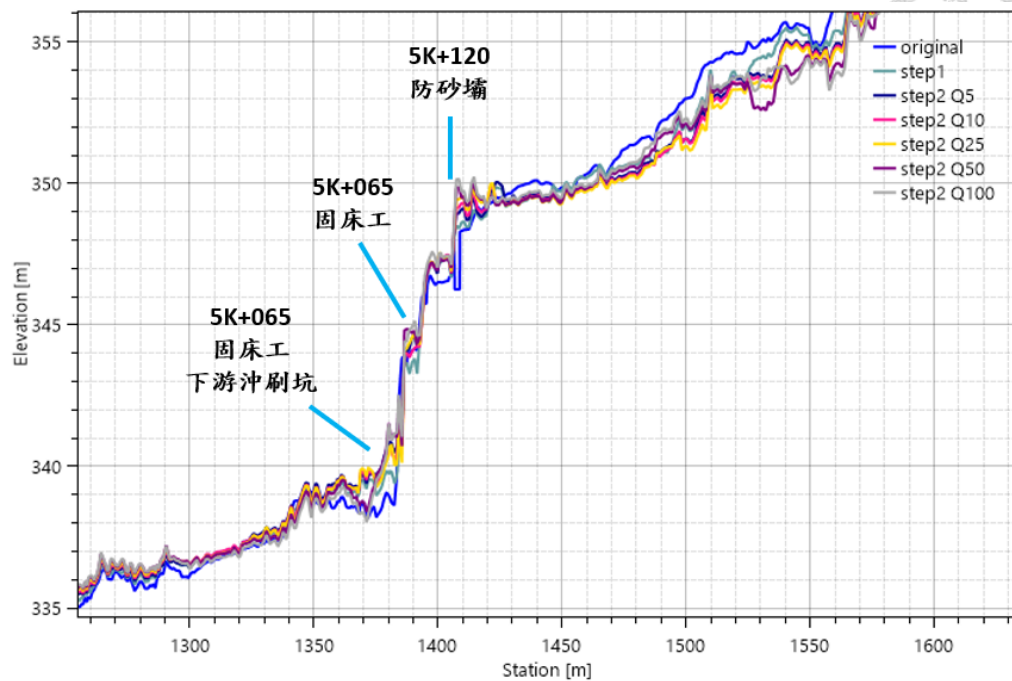


圖 4-73 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面

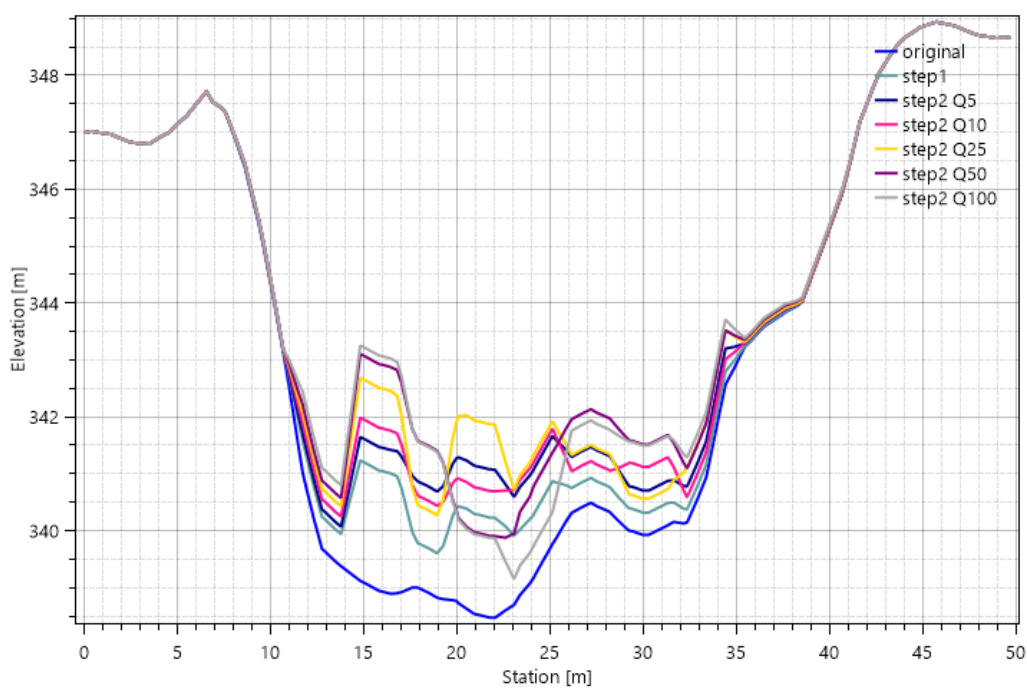


圖 4-74 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-16 Step2 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程

淤滿判定位置之平均高程(m) (大於 348.5 公尺判定為淤滿)	
Q5	348.68
Q10	348.74
Q25	348.76
Q50	348.84
Q100	348.98

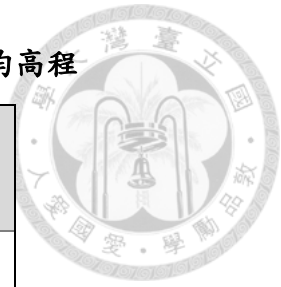


表 4-17 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大冲刷 變化量(m)
Step1 模擬後地形	17062.11		340.60	
Q5	17075.45	+13.35	341.15	-0
Q10	17075.70	+13.59	341.15	-0
Q25	17082.51	+20.41	341.46	-0
Q50	17084.25	+22.15	341.47	-0.32
Q100	17082.33	+20.23	341.40	-0.55

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-75 中黑色線，後續進行 5 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-75 中紅色線。可以觀察到經過本步驟之升壩操作，洪水使壩體上游呈現淤滿的狀況，造成土砂持續下移趨勢，使壩體下游有些許土砂淤積現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-76 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step1 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到即使本

步驟為升壩操作，仍有產生不少土砂淤積現象，推論為原始地形壩體上游淤砂量過大，洪水夾帶土砂易使得壩體呈現淤滿狀態，因此經過洪水模擬後仍有一定量之土砂下移趨勢。此保全對象斷面淤積量較上一步驟之地形增加了 13.35 平方公尺，平均高程由 340.6 公尺上升至 341.15 公尺。

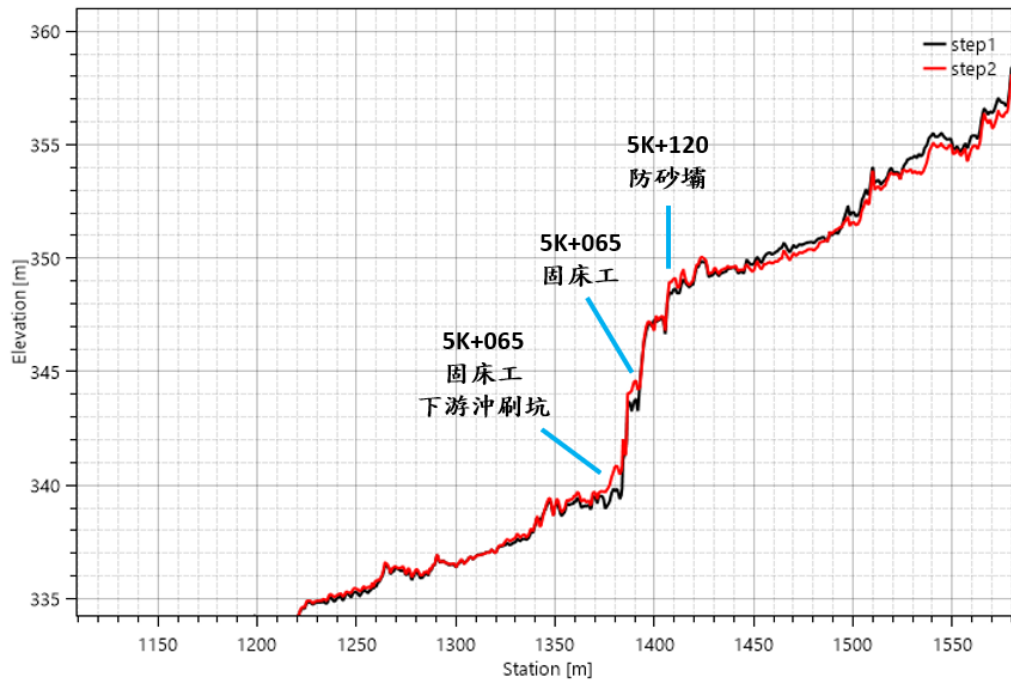


圖 4-75 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比

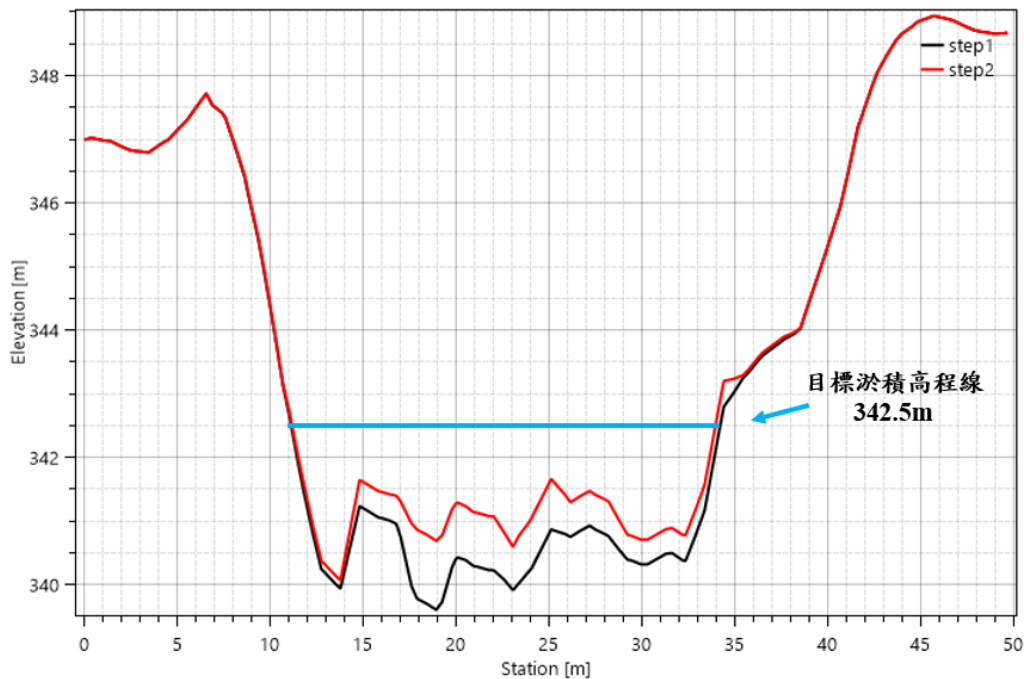


圖 4-76 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比



3. Step3

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 354.93m)，如下圖 4-77 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-6。

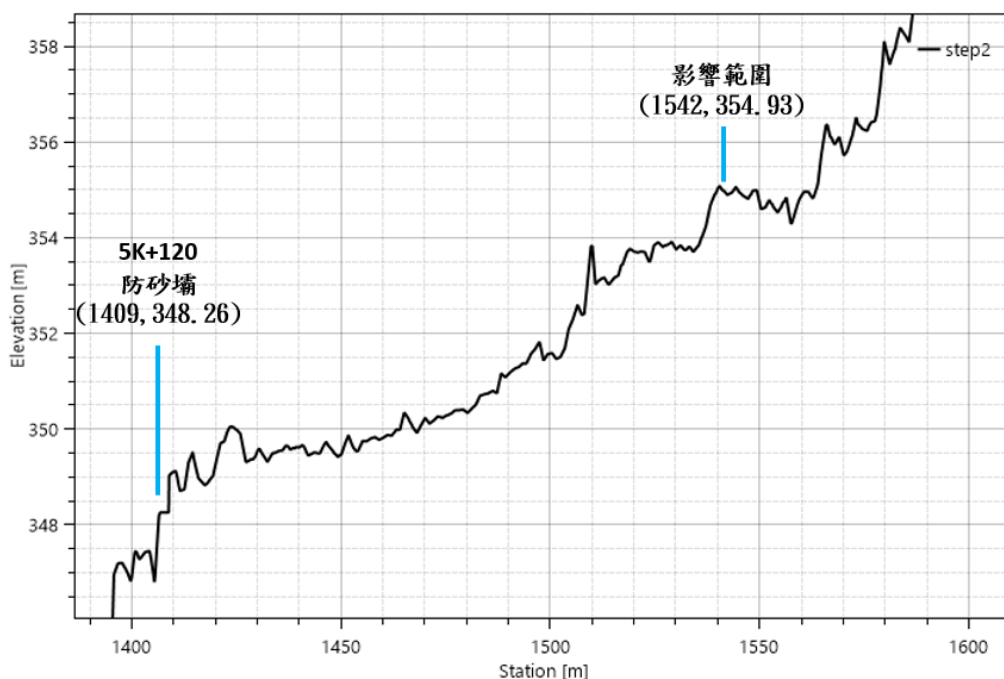


圖 4-77 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{354.93 - 348.26}{133.33} \cong 0.050 \quad \text{式 4-6}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.0%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.15 公尺，平均沖刷深度約為 1.35 公尺，如下圖 4-78 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」，經過前述兩步驟操作，原先保全對象沖刷嚴重之問題有明顯改善。

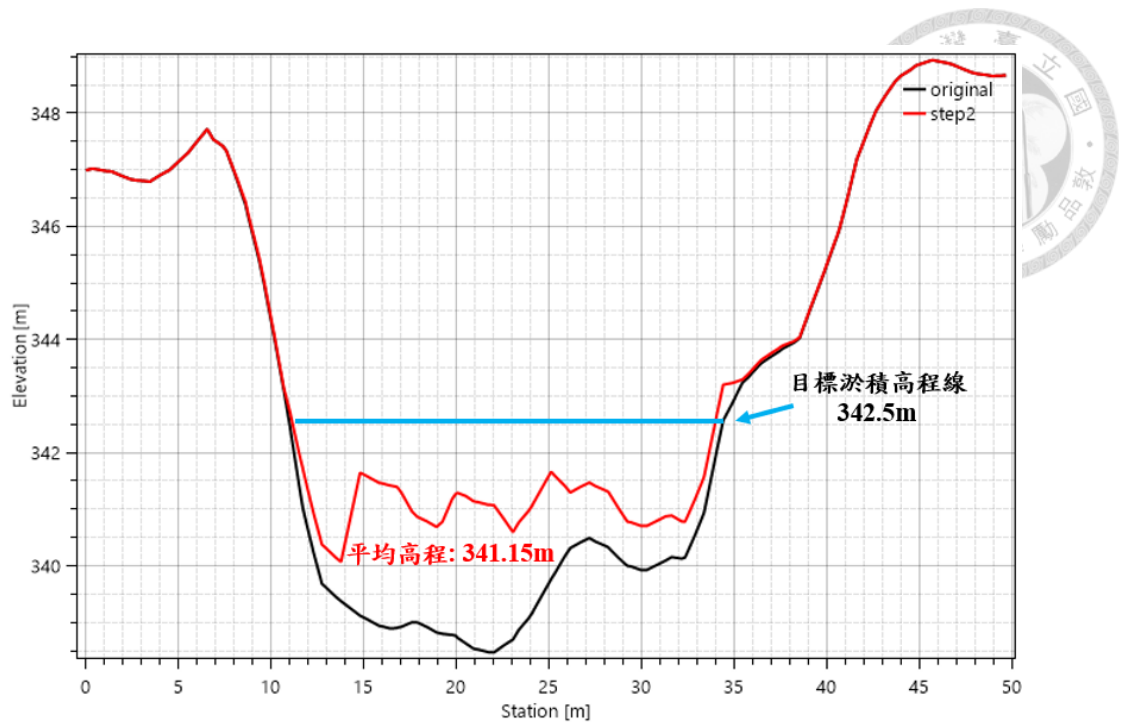


圖 4-78 Step2 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step2 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 3 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-18 中粗體字所示。

表 4-18 Step3 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為降壩操作，但「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-79 為整體試區縱剖面圖，圖 4-80 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-19 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。以整體縱剖面來看，25 年重現期以上洪水事件會造成上、下游出現比較明顯的地形變化。以保全對象橫剖面來看，各重現期洪水事件造成的總土砂淤積量差異不大，造成這樣的結果推論為 25 年以上洪水事件雖然帶來了大量土砂，但同時也在流心位置造成了

較大的冲刷現象，這也可以從「與上一步操作之最大淤積變化量」看出來，25 年以上洪水事件之「與上一步操作之最大淤積變化量」明顯大增，但各重現期流量之平均高程卻差異不大。根據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)，對照表 4-19 後，將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

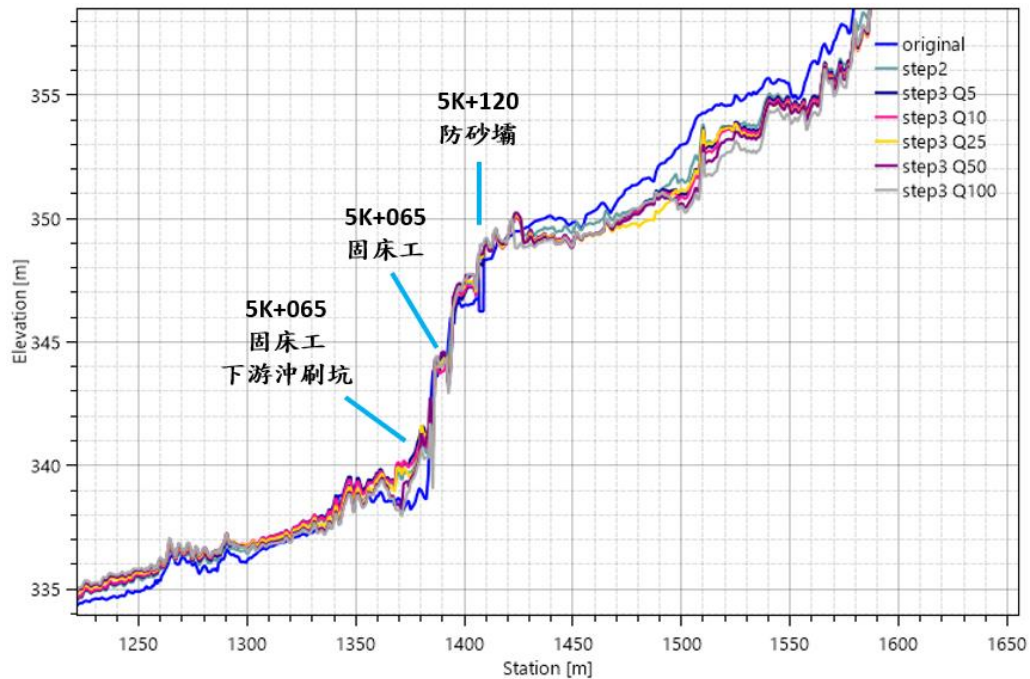


圖 4-79 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面

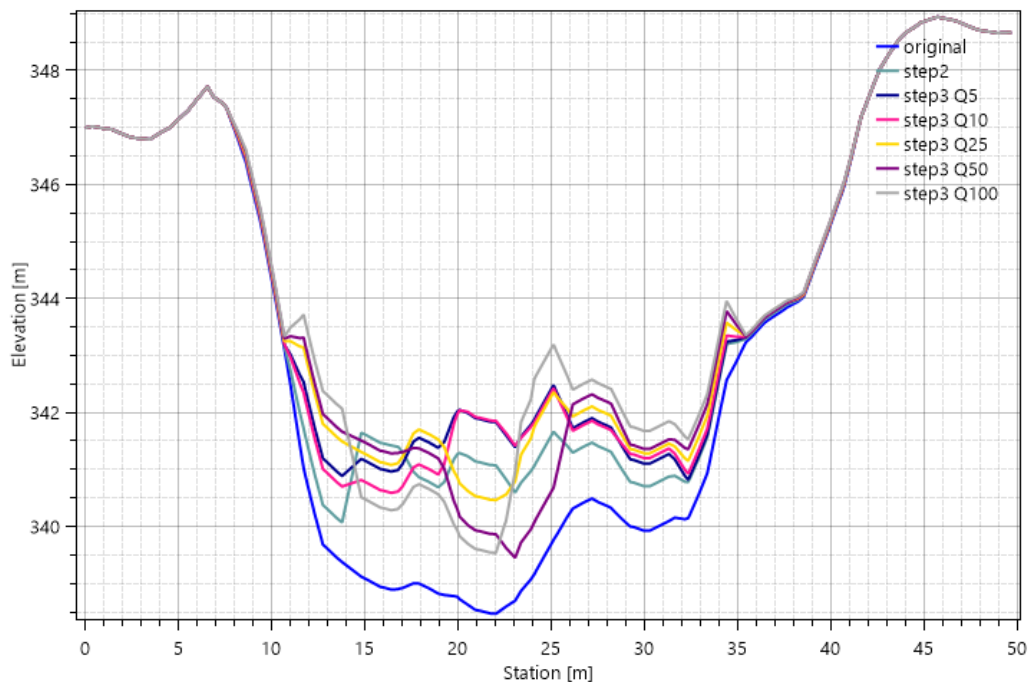


圖 4-80 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-19 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)
Step2 模擬後地形	17075.45		341.15	
Q5	17085.88	+10.43	341.62	+0.82
Q10	17083.67	+8.22	341.51	+0.78
Q25	17086.08	+10.63	341.57	+1.42
Q50	17081.52	+6.07	341.34	+1.59
Q100	17086.70	+11.25	341.58	+2.00

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-81 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-81 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度明顯降低，土砂順利向下運移，整體壩下游區段呈現淤積情況。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-82 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step2 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，整體淤積量有增加，但由於先前調整步驟，上游土砂料源逐漸降低，這也造成河心位置有些許的沖刷現象產生，此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 10.63 平方公尺，平均高程由原先 341.15 公尺上升至 341.57 公尺，持續將土砂填補至保全對象沖刷坑中。

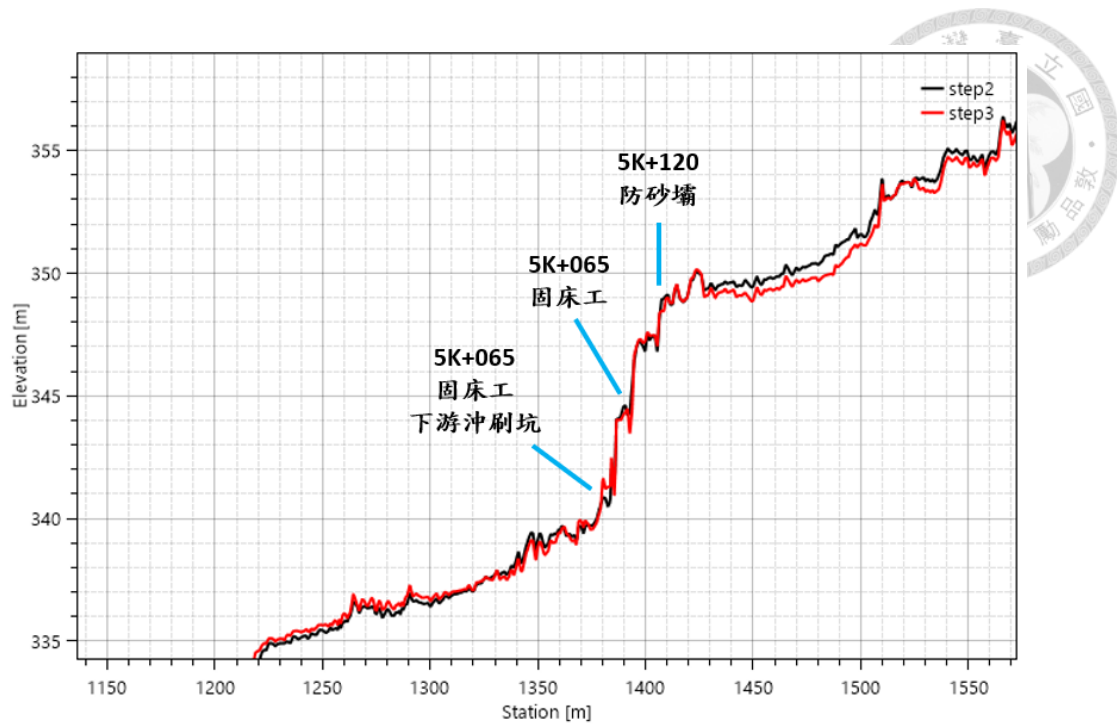


圖 4-81 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比

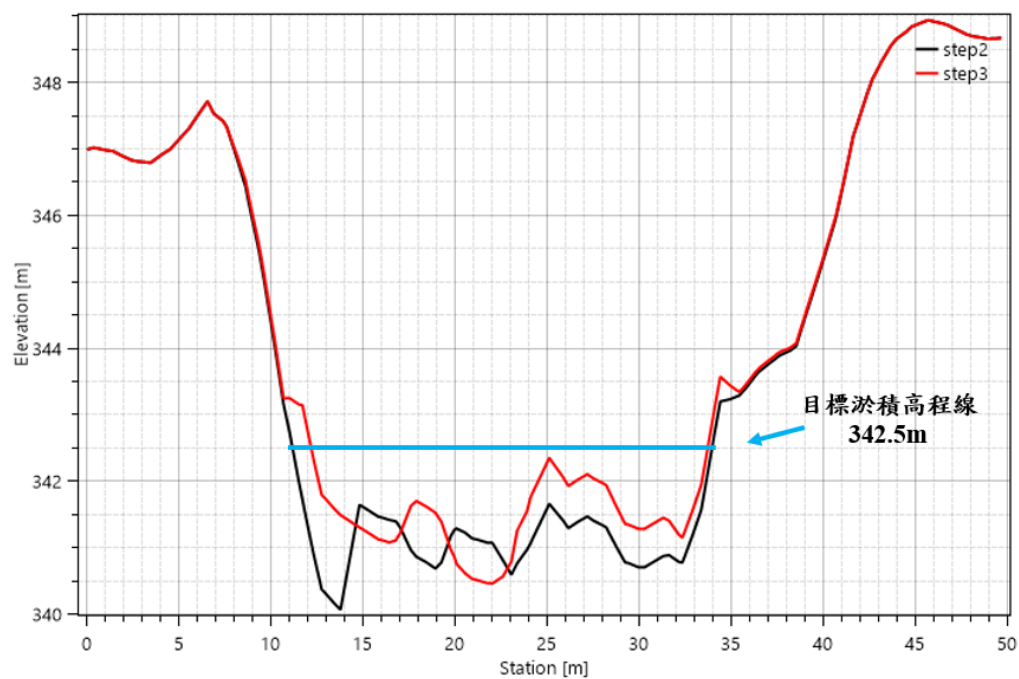


圖 4-82 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比



4. Step4

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為升壩操作，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-83 為整體試區縱剖面圖，圖 4-84 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-20 為各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程，表 4-21 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面、保全對象橫剖面來看，10 年重現期以下洪水事件夾帶之土砂量較低，會造成固床工周圍些許沖刷現象，但各重現期洪水事件的整體沖淤模擬結果差異不大，主要原因為通過先前一系列的調整策略步驟，土砂漸漸回到平衡穩定狀態。且根據本步驟的防砂壩調整時機設定為：壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)，對照表 4-20、表 4-21 後，25 年重現期洪水會使壩呈現淤滿狀況，但 5 年重現期洪水之「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過 0.95 公尺，因此本步驟將選用經過 5 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

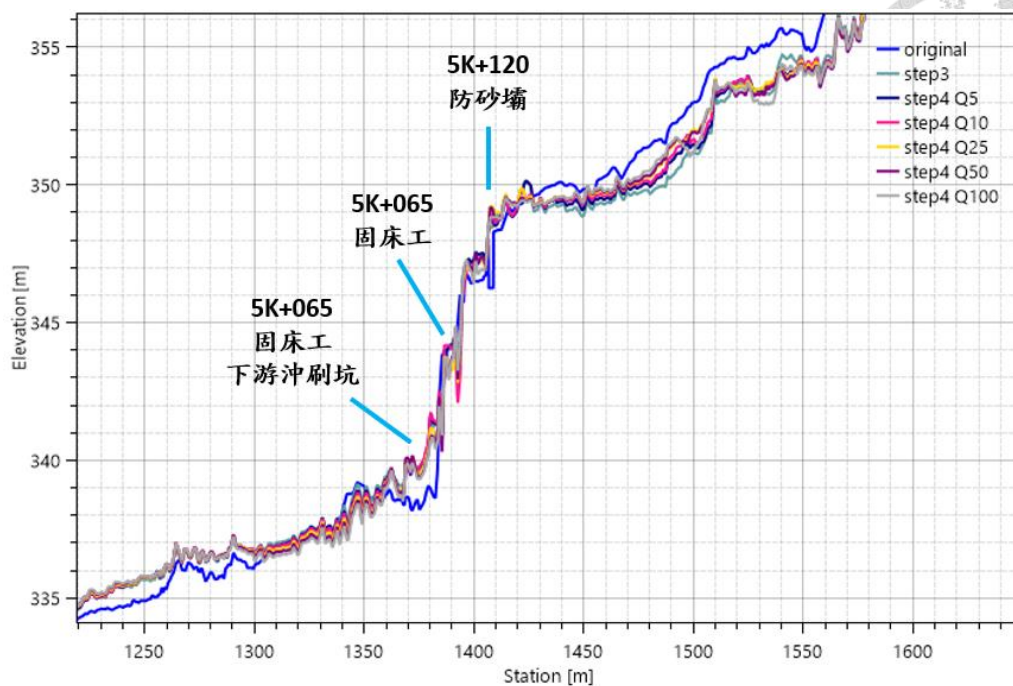


圖 4-83 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面

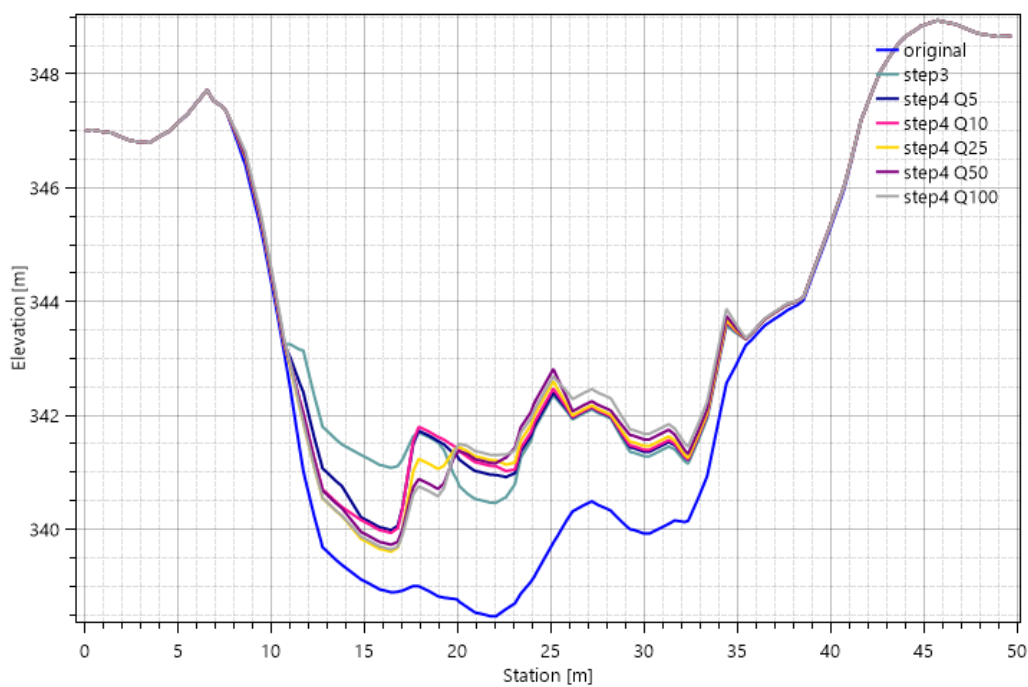


圖 4-84 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

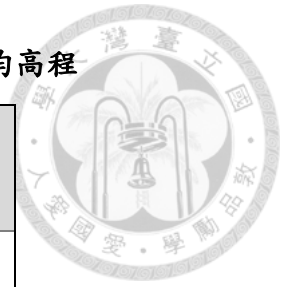


表 4-20 Step4 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程

淤滿判定位置之平均高程(m) (大於 348.5 公尺判定為淤滿)	
Q5	348.36
Q10	348.44
Q25	348.80
Q50	348.81
Q100	348.95

表 4-21 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大冲刷 變化量(m)
Step3 模擬後地形	17086.08		341.57	
Q5	17082.94	-3.14	341.39	-1.10
Q10	17082.65	-3.44	341.39	-1.14
Q25	17080.95	-5.13	341.35	-1.48
Q50	17082.39	-3.7	341.38	-1.35
Q100	17083.14	-2.94	341.47	-1.44

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-85 中黑色線，後續進行 5 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-85 中紅色線。可以觀察到經過本步驟之升壩操作，成功使壩體上游累積土砂量，坡度有上升趨勢，壩體下游因升壩關係有些許冲刷產生。可以發現經過先前一系列的調整策略，本試區土砂逐漸恢復穩定狀態，不會再有過量土砂下移之情況。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-86 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step3 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到因本步

驟為升壩操作，且經過先前調整策略，上游已沒有過量的土砂下移，使得此保全對象斷面靠近左岸處有沖刷的現象，斷面整體淤積量較上一步驟之地形減少了 3.14 平方公尺，平均高程由 341.57 公尺下降至 341.39 公尺。

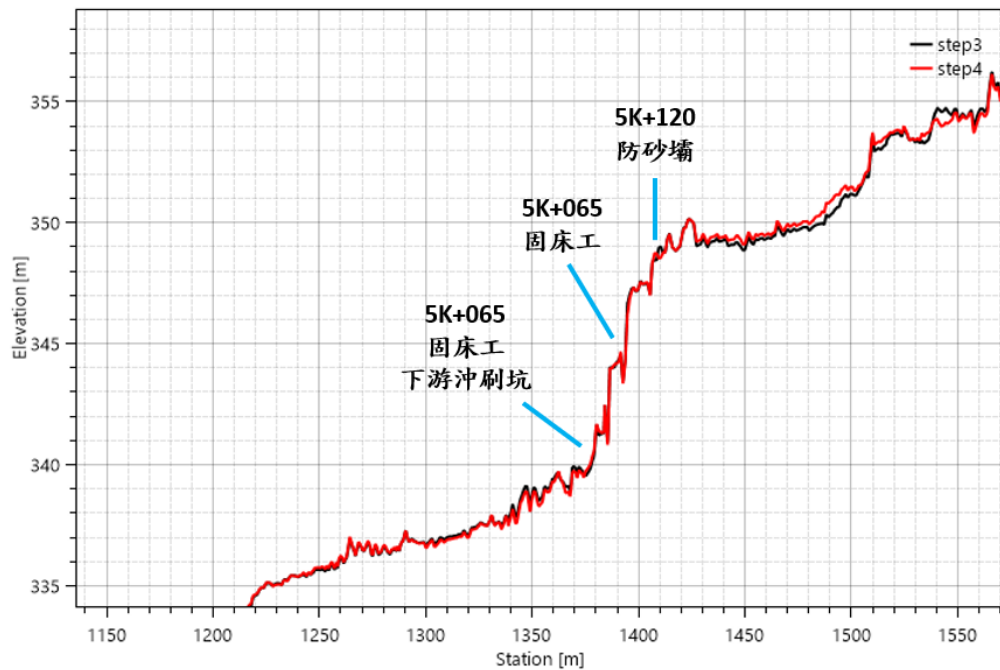


圖 4-85 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比

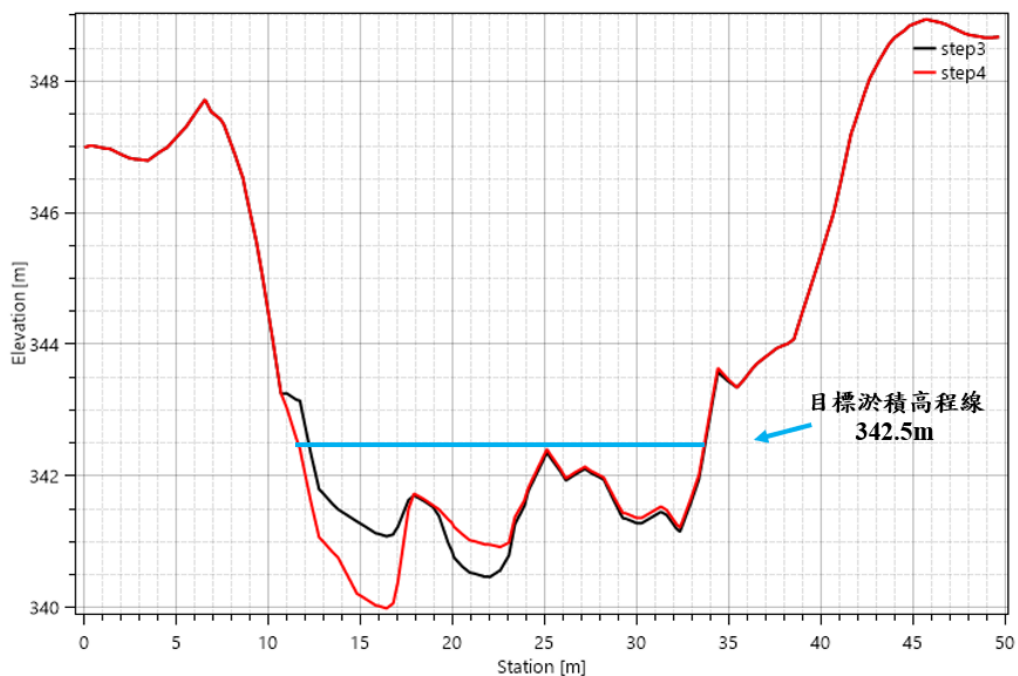


圖 4-86 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比



5. Step5

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之冲刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 354.02m)，如下圖 4-87 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-7。

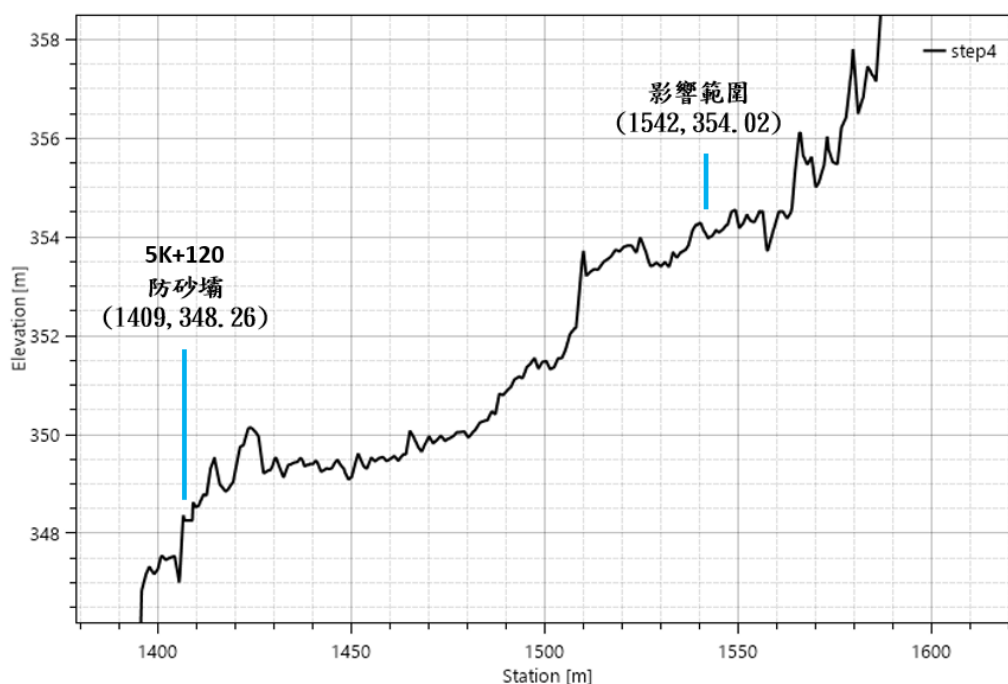


圖 4-87 Step4 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{354.02 - 348.26}{133.33} \cong 0.043 \quad \text{式 4-7}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 4.3%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「低」，經過先前一系列的操作步驟，成功使防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度改善至「低」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.39 公尺，平均沖刷深度約為 1.11 公尺，如下圖 4-88 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」，經過前述兩步驟操作，原先保全對象沖刷嚴重之問題有明顯改善。

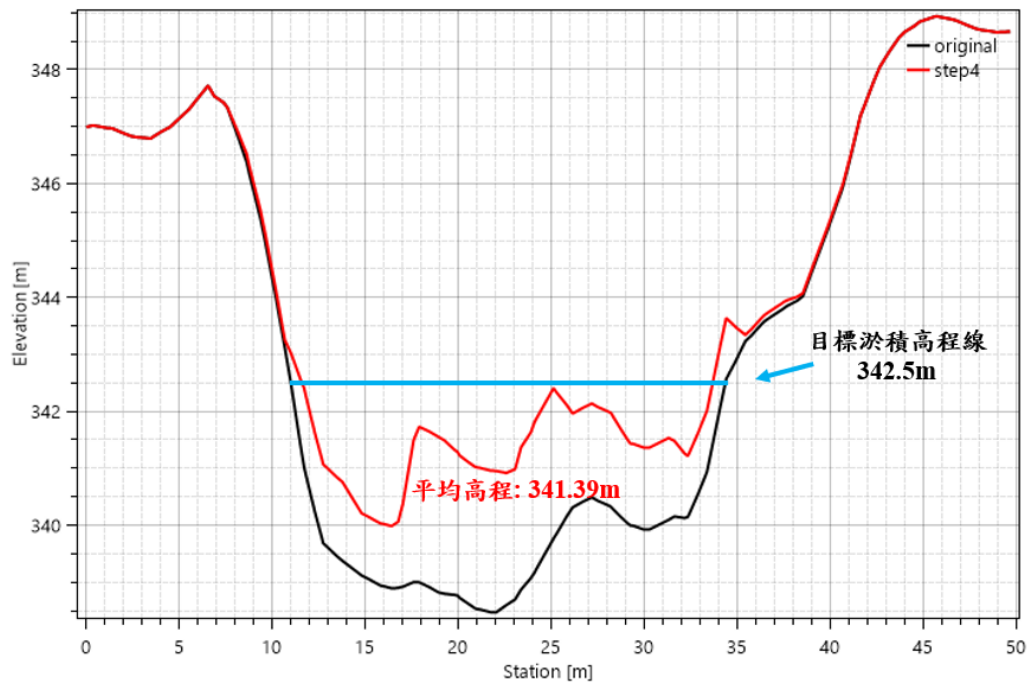


圖 4-88 Step4 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step4 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 4 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-22 中粗體字所示。

表 4-22 Step5 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為降壩操作，但「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-89 為整體試區縱剖面圖，圖 4-90 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-23 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以整體縱剖面來看，各重現期模擬結果差異不大，但 10 年以下重現期洪水會對固床工周圍產生些許沖刷，推論原因為 5 年、10 年重現期洪水具有一定的沖刷能力，但卻無法夾帶足量土砂運移至下游。以保全對象橫剖面來看，100 年重現期洪水可

以有效地填補上一部所造成之靠近左岸處的沖刷，這也可以從「與上一步操作之最大淤積變化量」看出來，100 年以上洪水事件之「與上一步操作之最大淤積變化量」明顯大增。且據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大淤積變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)，對照表 4-23 後，將選用經過 100 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

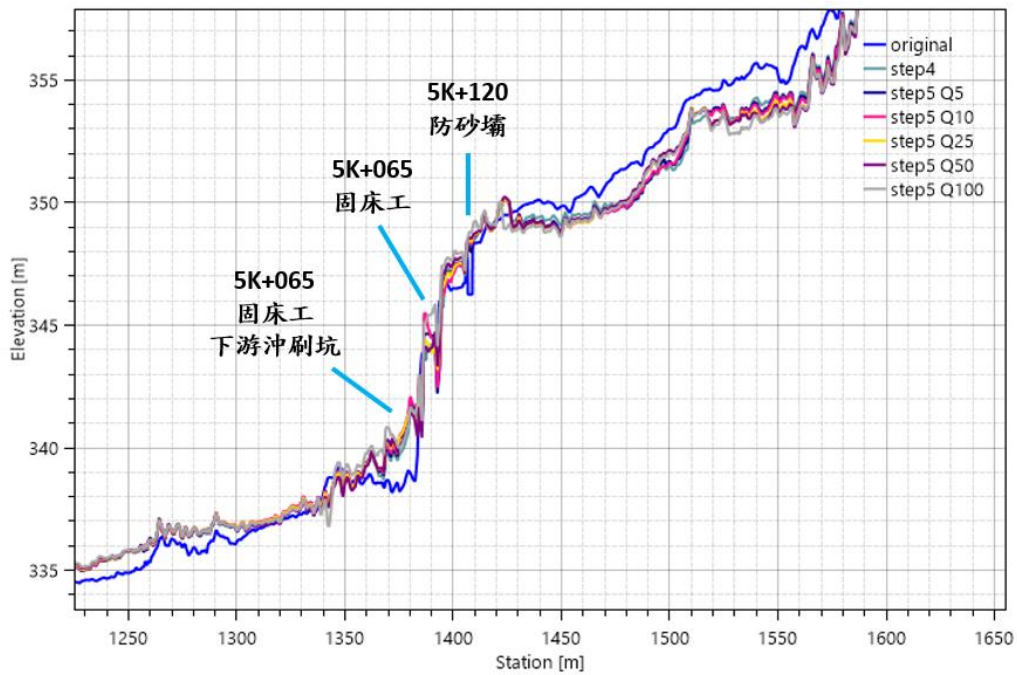


圖 4-89 Step5 各重現期流量模擬之縱剖面

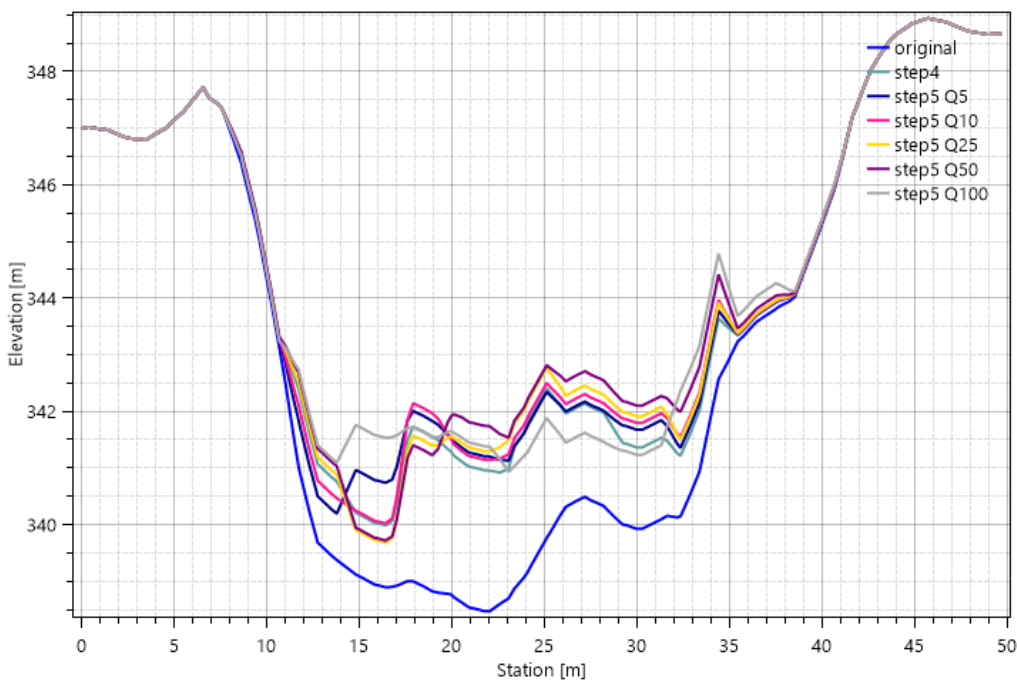


圖 4-90 Step5 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-23 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)
Step4 模擬後地形	17082.94		341.39	
Q5	17086.39	+3.46	341.59	+0.75
Q10	17087.07	+4.14	341.60	+0.43
Q25	17088.07	+5.13	341.61	+0.55
Q50	17093.02	+10.09	341.79	+0.78
Q100	17091.36	+8.42	341.73	+1.55

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行降壩調整策略，調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-91 中黑色線，後續進行 100 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-91 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，上一步驟中壩體上游累積的土砂有成功向下移動，整體防砂壩上游之淤砂坡度降低，且壩體下游整體皆有淤積現象產生，持續補注下游土砂料源，同時可觀察到經過一系列的調整策略，土砂漸漸回到平衡穩定狀態，即使發生 100 年重現期洪水事件，也不會有過量土砂下移現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-92 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step4 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，整體淤積量有增加，且淤積斷面平整，補足了上一步驟造成之靠近左岸的沖刷現象。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 8.42 平方公尺，平均高程由原先 341.39 公尺上升至 341.73 公尺，持續向目標淤積高程邁進。

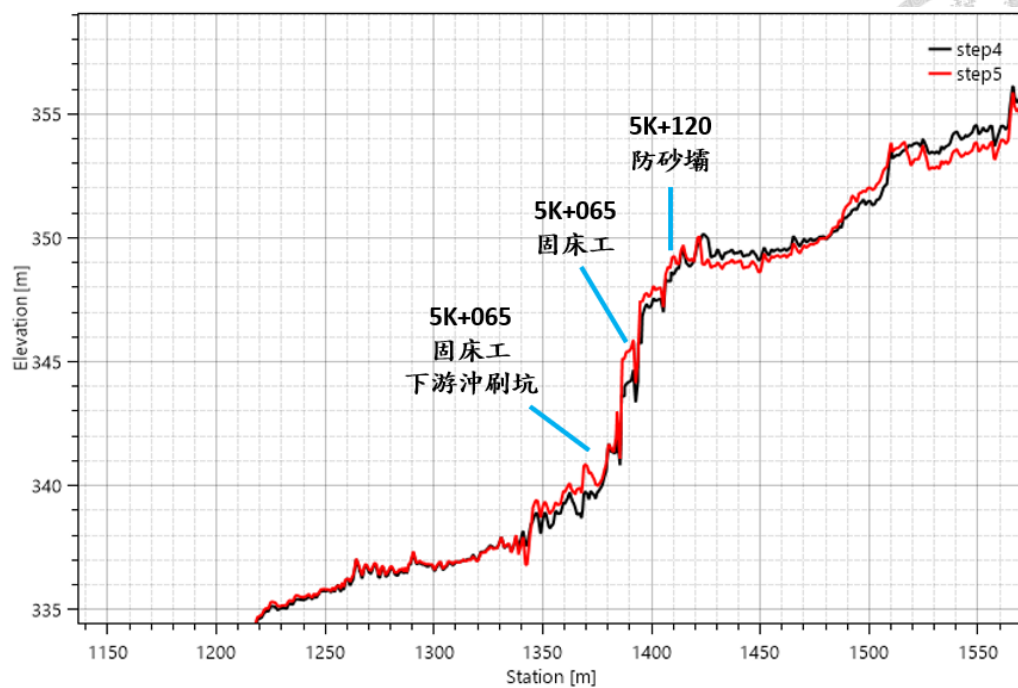


圖 4-91 Step4 地形與 Step5 地形之縱剖面對比

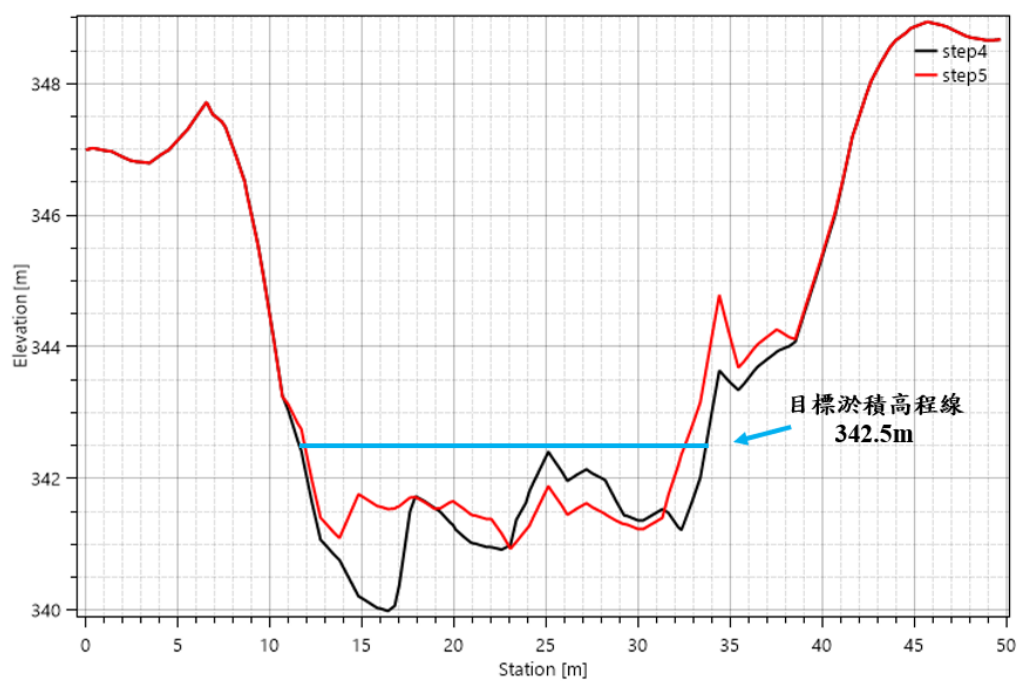


圖 4-92 Step4 與 Step5 地形之保全對象橫剖面對比



6. Step6

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，使其發揮攔阻土砂之功效，並進行洪水試驗模擬，觀察其上游坡度改變及下游保全對象之沖淤變化。

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-65。由於本步驟為升壩操作，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-93 為整體試區縱剖面圖，圖 4-94 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-24 為各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程，表 4-25 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面縱剖面、保全對象橫剖面來看，除了 100 年重現期洪水事件會造成固床工周圍及下游區段產生比較嚴重的沖刷外，其餘各重現期水事件的模擬結果差異不大，顯示本試區土砂已達平衡穩定狀態，因此 100 年以下重現期洪水不會對溪床地形產生太明顯的變化。且根據本步驟的防砂壩調整時機設定為：壩體呈現淤滿現象或「與上一步操作之最大沖刷變化量」超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)，對照表 4-24、表 4-25 後，25 年重現期洪水會使壩呈現淤滿狀況，且 50 年重現期洪水之「與上一步操作之最大沖刷變化量」會超過 0.95 公尺，因此本步驟將選用經過 25 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

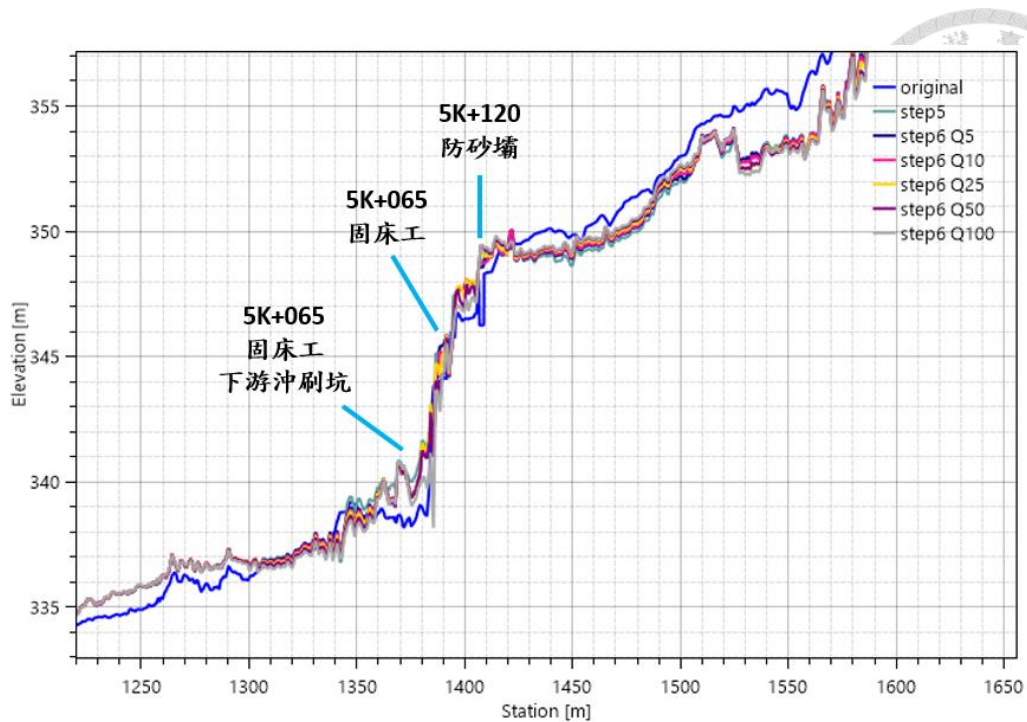


圖 4-93 Step6 各重現期流量模擬之縱剖面

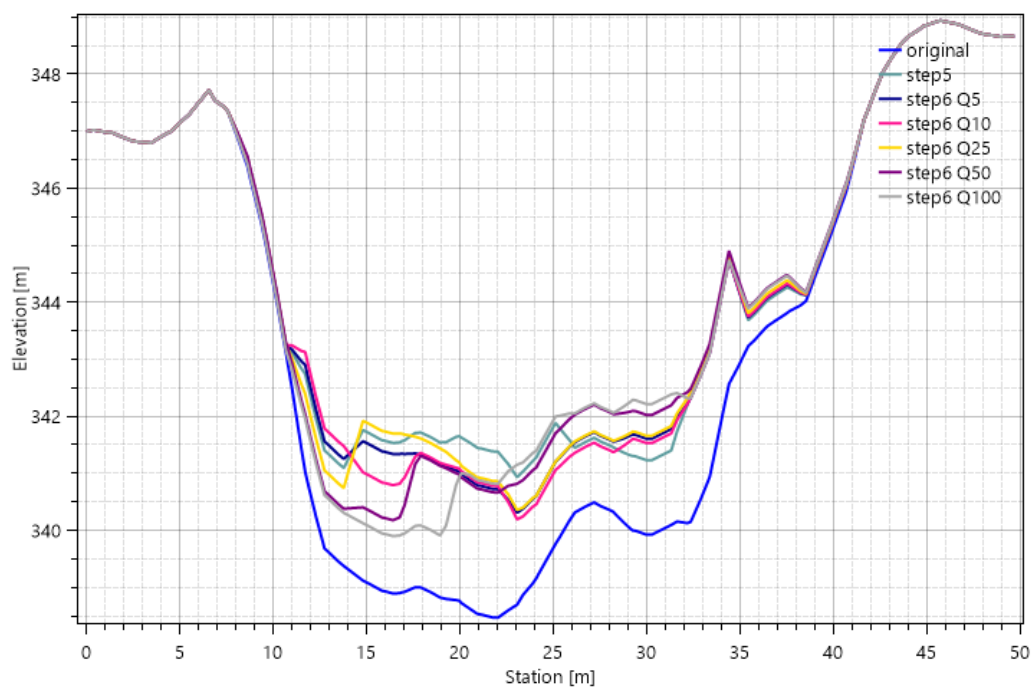


圖 4-94 Step6 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-24 Step6 各重現期洪水事件之淤滿判定位置平均高程

淤滿判定位置之平均高程(m) (大於 348.5 公尺判定為淤滿)	
Q5	348.46
Q10	348.49
Q25	348.71
Q50	348.92
Q100	349.03

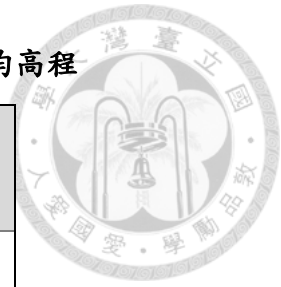


表 4-25 保全對象斷面 Step6 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大冲刷 變化量(m)
Step5 模擬後地形	17091.36		341.73	
Q5	17087.93	-3.43	341.55	-0.68
Q10	17086.07	-5.29	341.47	-0.82
Q25	17089.37	-1.99	341.61	-0.67
Q50	17087.18	-4.17	341.49	-1.36
Q100	17084.35	-7.01	341.38	-1.63

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行升壩調整策略，將防砂壩預鑄塊全數升回，如圖 4-95 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-95 中紅色線。可以觀察到由於本步驟為升壩操作，壩體上游持續累積土砂量，坡度有上升趨勢，壩體下游區段也呈現整體些許冲刷的趨勢。但相較於前述階段的模擬，並不會因為調整步驟到了後期而出現土砂料不足、產生大型冲刷坑的現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-96 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step5 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到因本步驟為升壩操作，河心位置有些許沖刷產生，但斷面整體淤積量較上一步驟之地形僅減少了 1.99 平方公尺，平均高程由 341.73 公尺下降至 341.61 公尺。

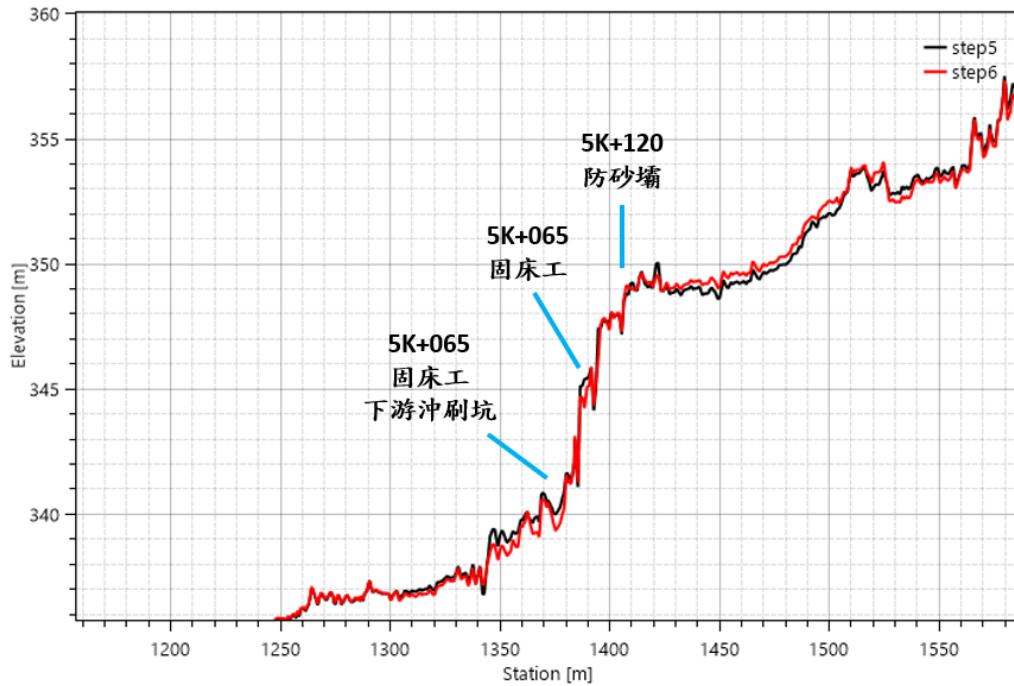


圖 4-95 Step5 地形與 Step6 地形之縱剖面對比

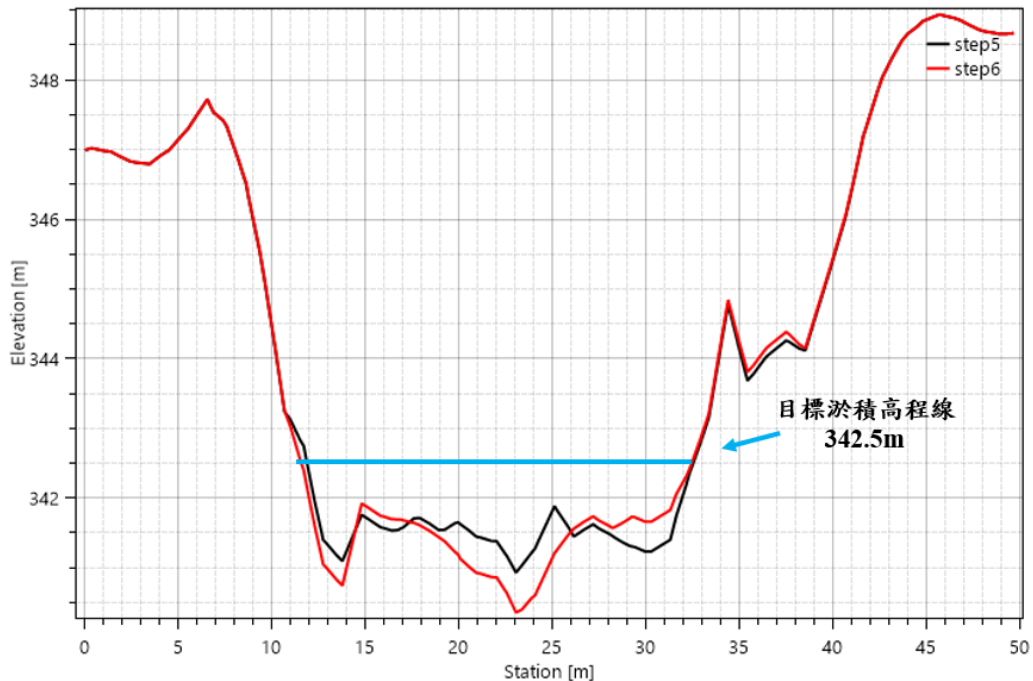


圖 4-96 Step5 與 Step6 地形之保全對象橫剖面對比



7. Step7

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續降壩策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為 (1409, 348.26m)、(1542, 353.21m)，如下圖 4-97 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-8。

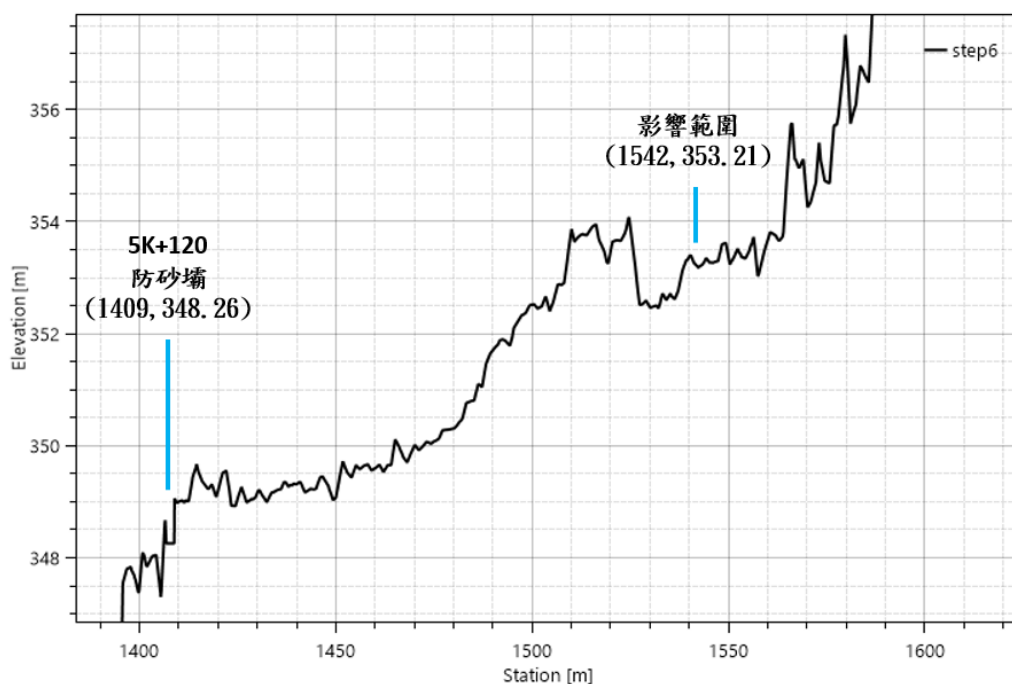


圖 4-97 Step6 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{353.21 - 348.26}{133.33} \cong 0.037 \quad \text{式 4-8}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 3.7%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「低」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.61 公尺，平均沖刷深度約為 0.89 公尺，如下圖 4-98 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「低」，經過先前一系列的操作步驟，成功使下游保全對象之沖刷深度改善至「低」。

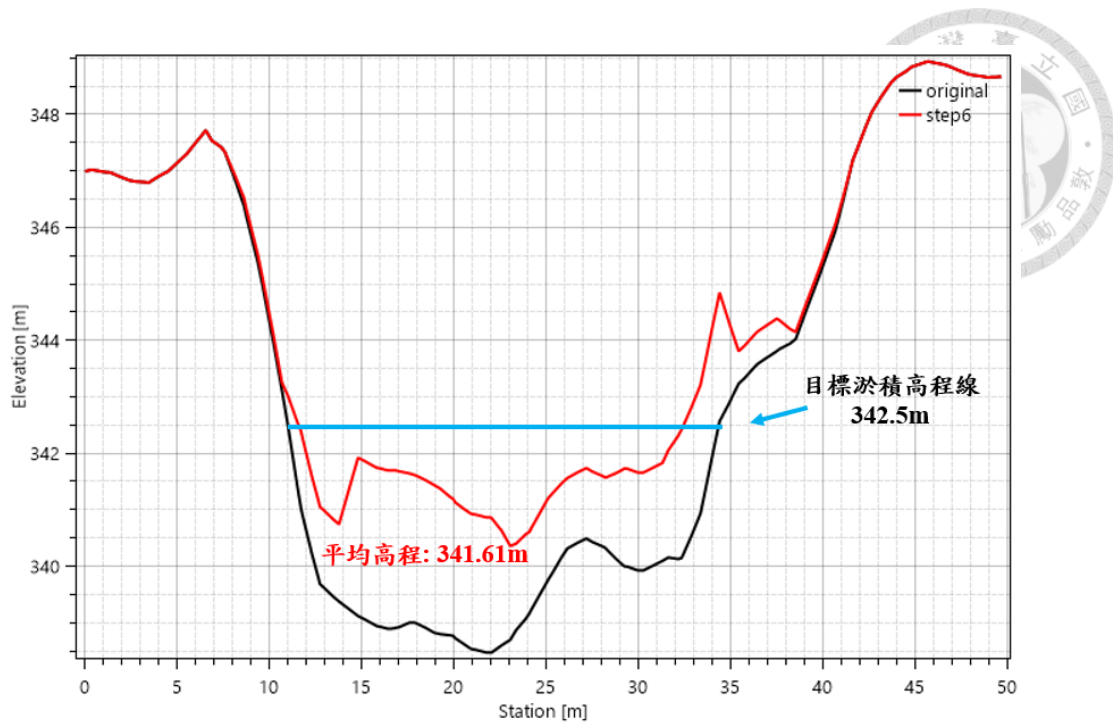


圖 4-98 Step6 地形之保全對象橫剖面圖

經過先前一系列的調整策略步驟，成功使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本試區土砂最終回歸平衡穩定狀態。根據上述分析 Step6 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟將以降低 3 支防砂壩預鑄塊，作為最終的調整策略，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-26 中粗體字所示。

表 4-26 Step7 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本階段最終步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-99 為整體試區縱剖面圖，圖 4-100 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-27 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面來看，各重現期模擬結果差異不大，僅 100 年重現期洪水事件會對壩體上游造成較大的土砂運移變化。以保全對象橫剖面來看，25 年以上重現期洪水事件會對靠近左岸處產生較明顯沖刷，除此之外各重現期模擬結果差異不大。與先前階段之模擬相比，本階段到最終步驟仍有充足土砂料源能夠提供至下游，各重現期洪水事件所產生的淤積量都較先前階段之模擬高，顯示前階段模擬於後期會有上游土砂料源不足而導致下游嚴重沖刷之問題，於本階段模擬得到明顯的改善。

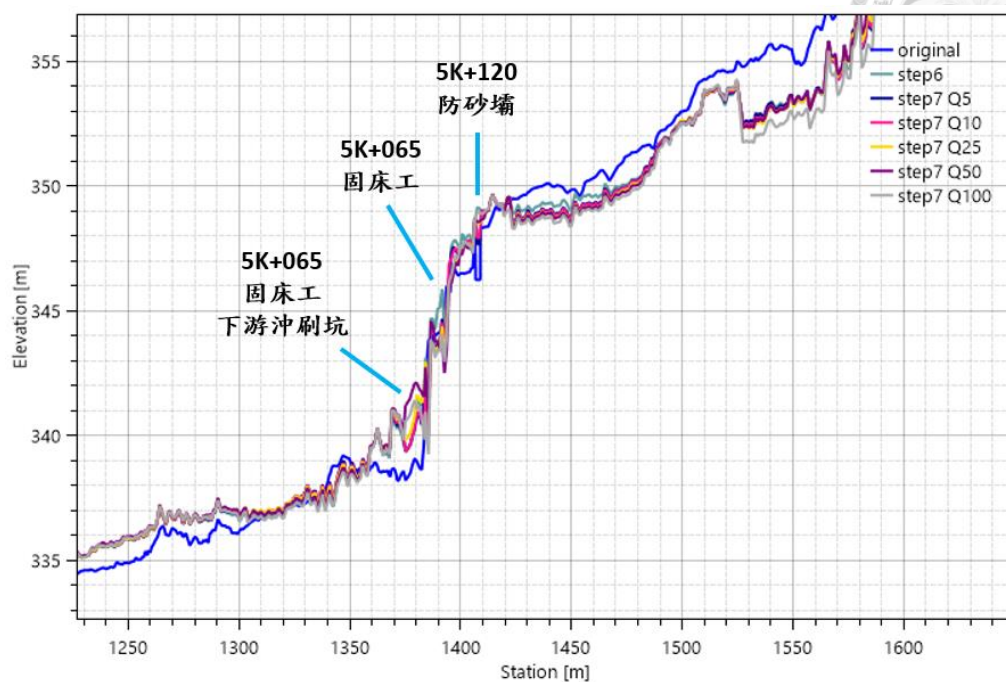


圖 4-99 Step7 各重現期流量模擬之縱剖面

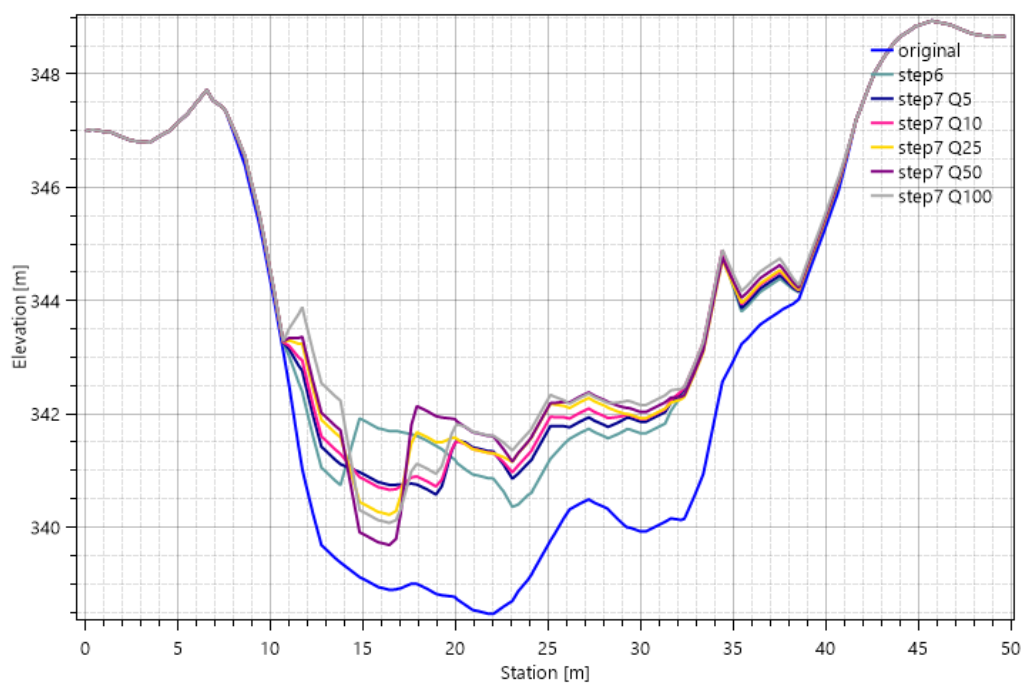


圖 4-100 Step7 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-27 保全對象斷面 Step7 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)
Step6 模擬後地形	17089.37		341.61	
Q5	17090.39	+1.03	341.66	+0.58
Q10	17092.39	+3.02	341.71	+0.74
Q25	17094.67	+5.31	341.80	+0.97
Q50	17096.57	+7.21	341.88	+0.98
Q100	17098.82	+9.46	341.94	+1.49

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現最終步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行最終降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-101 中黑色線，並以 25 年重現期洪水事件模擬為例作說明，其結果如圖 4-101 中紅色線。可以觀察到經過最終步驟的降壩操作，土砂有持續下移填補至下游區段，與先前階段模擬相比，改善了到調整後期上游土砂料源不足的問題。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-102 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step6 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到雖然靠近左岸處有沖刷的產生，但整體斷面皆有穩定淤積的情況，上一步驟造成的河心位置沖刷也於本步驟回填改善。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 5.31 平方公尺，平均高程由原先 341.61 公尺上升至 341.80 公尺，最終與目標淤積高程僅差距 0.7 公尺。

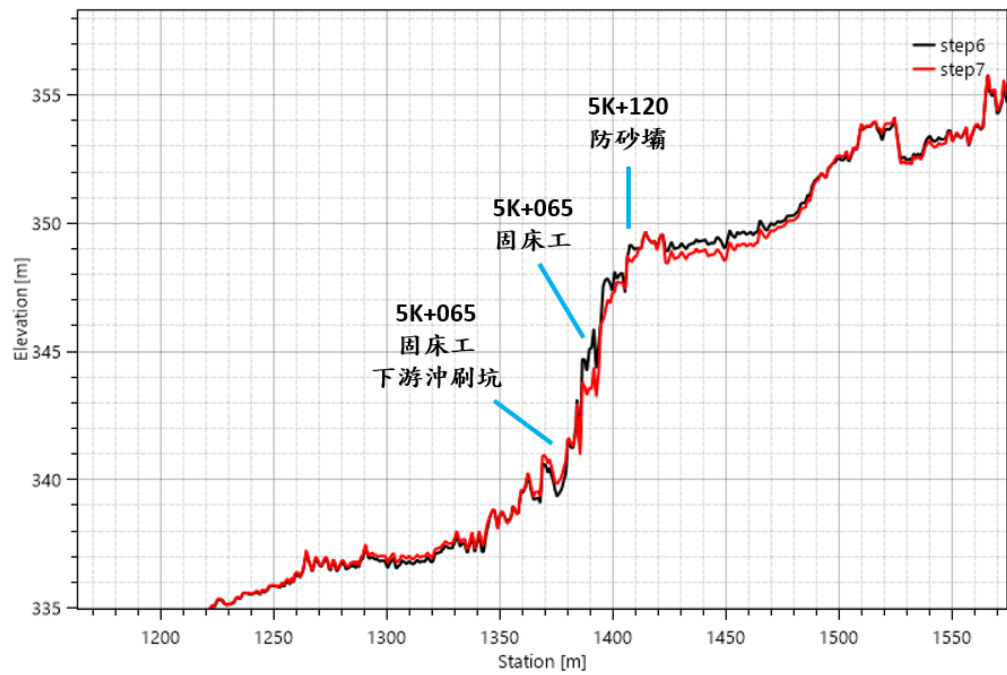


圖 4-101 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比

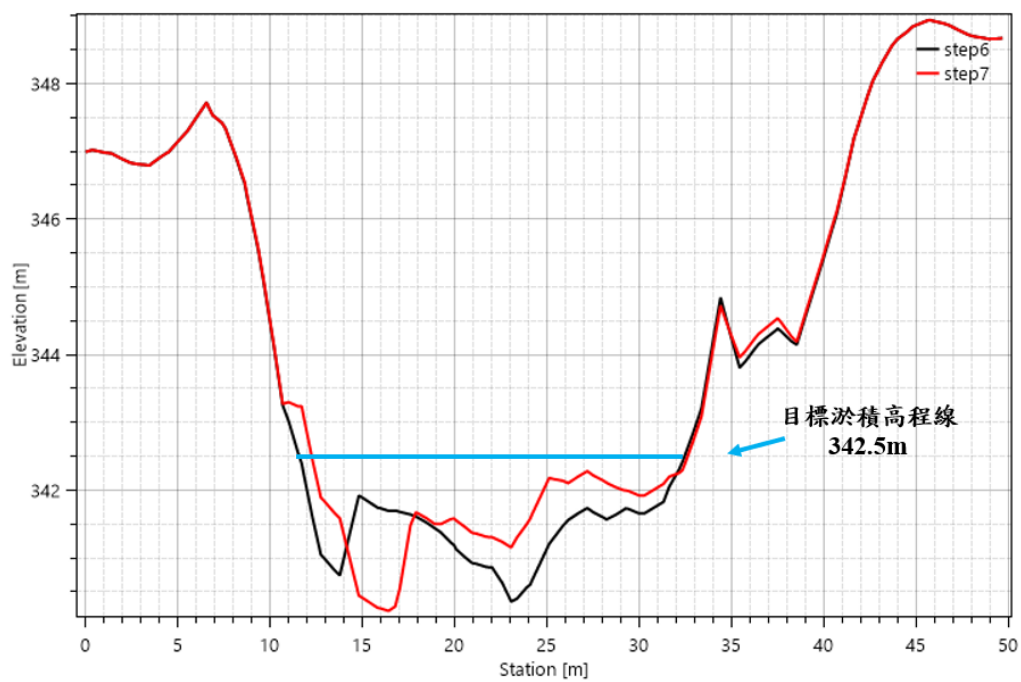


圖 4-102 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比



4.3.3 整體成效分析

1. 調降階段步驟對比

本節將針對本階段模擬之降壩策略步驟(Step1、Step3、Step5、Step7)與原始地形進行對比，觀察每輪降壩操作對保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑之影響，該處橫剖面對比圖呈現如下。

本階段模擬初次降壩為 Step1 調降 4 支防砂壩預鑄塊，圖 4-103 為原始地形(黑色線)、初次降壩模擬地形 Step1 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察到初次降壩操作後經洪水模擬，其產生的斷面淤積量為 21.98 平方公尺，土砂下移量大，顯示溪流仍處於不穩定狀態。

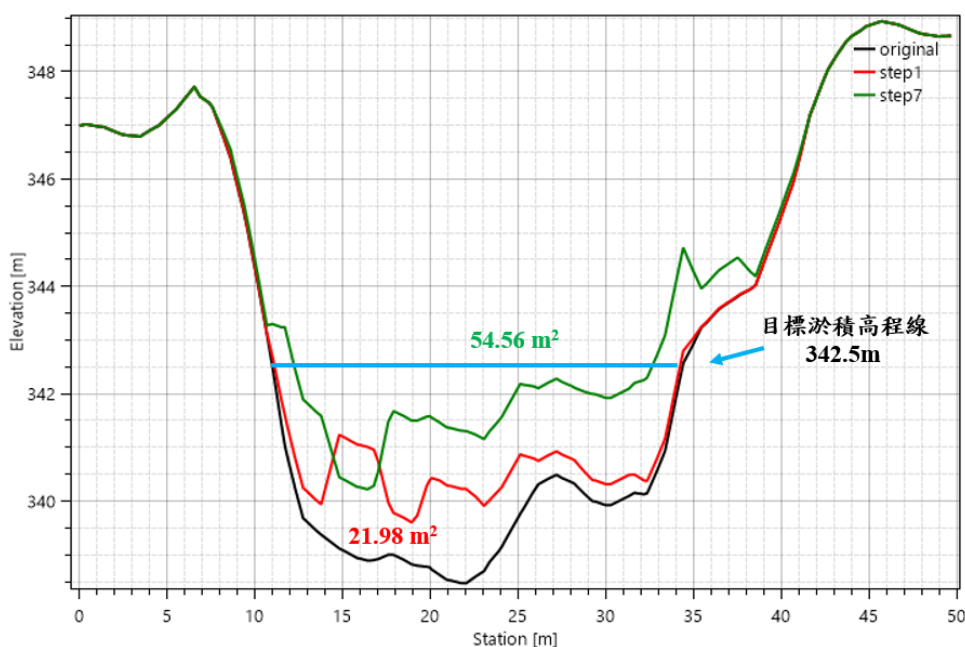


圖 4-103 原始地形、Step1 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第二次降壩操作為 Step3 調降 3 支砂壩預鑄塊，圖 4-104 為原始地形(黑色線)、第二次降壩模擬地形 Step3 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。可以觀察本輪降壩操作後經過洪水模擬，斷面總淤積量結果為 45.96 平方公尺，與初次降壩步驟相比，增加 23.98 平方公尺，這也顯示溪流土砂狀態仍處於降不穩定的情況。

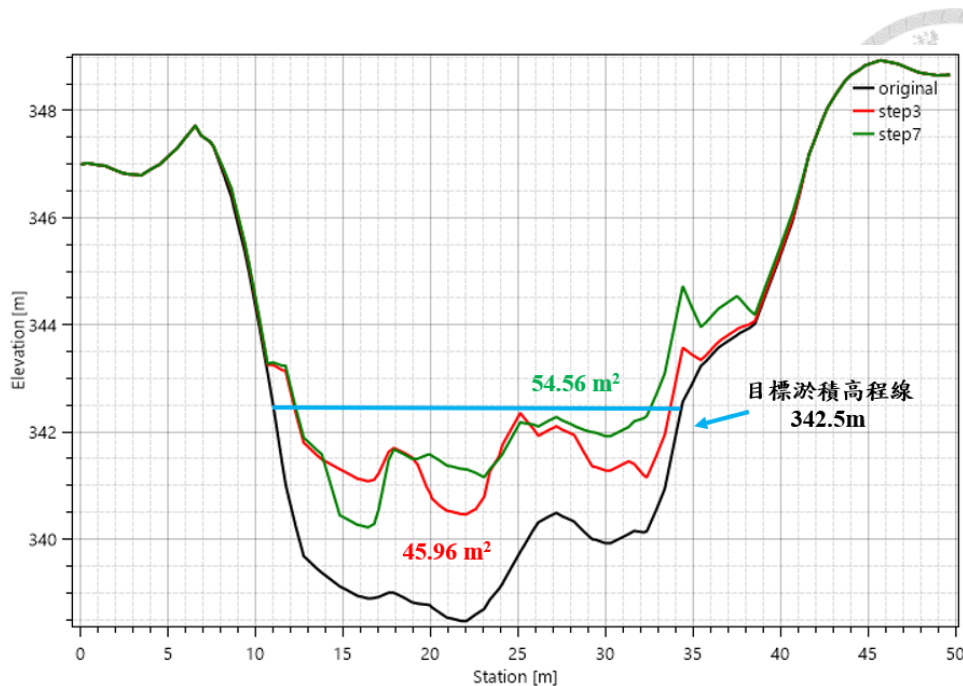


圖 4-104 原始地形、Step3 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

本階段模擬第三次降壩操作為 Step5 調降 3 支砂壩預鑄塊，圖 4-105 為原始地形(黑色線)、第三次降壩模擬地形 Step5 (紅色線)、最終結果地形 Step7(綠色線)之對比圖。經第三次降壩後，斷面淤積量結果為 51.24 平方公尺，與上次降壩步驟相比，雖然僅增加 5.28 平方公尺，但其總淤積量較最終結果地形 Step7 低，顯示透過本階段一系列的調整模擬策略，第三次降壩到最終步驟仍有足夠的土砂料源避免下游過度沖刷現象，改善了先前階段模擬後期上游土砂料源不足之問題。

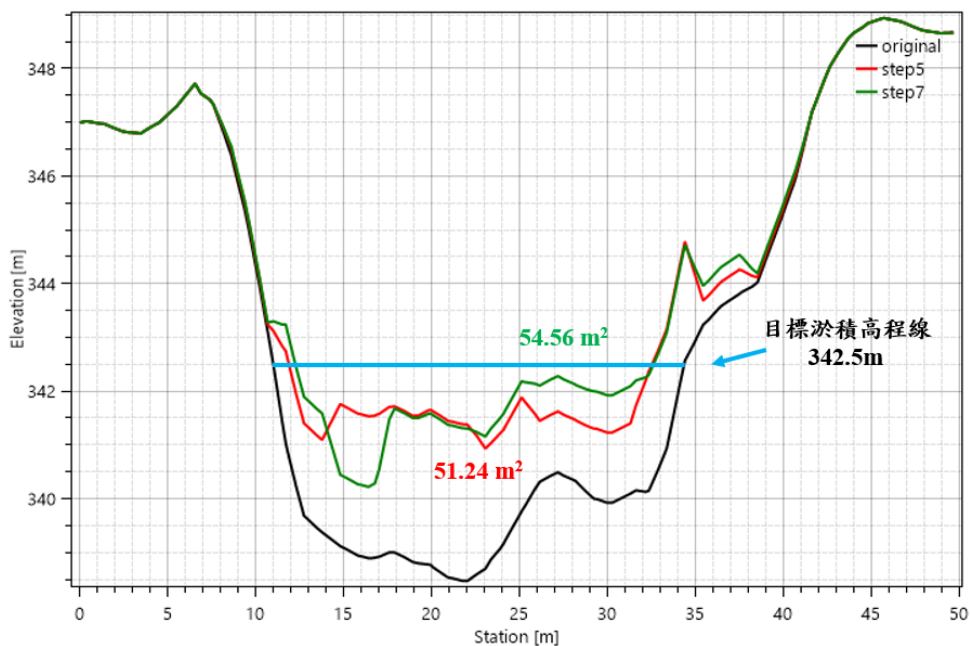


圖 4-105 原始地形、Step5 地形與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比

2. 各步驟調整策略數據彙整

本節將針對各步驟調整策略模擬之數據進行彙整，其中包含主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之各步驟調整後的平均高程、平均沖刷深度、總淤積量、與上一步之淤積相差量、與上一步操作之最大沖淤變化量等資料彙整，如下表 4-28 所示。可以由表中數據看到，本階段模擬使用全新的縱、橫軸與防砂壩調整時機，最終成果之保全對象橫斷面淤積高程為 341.8 公尺，相較於前兩階段更接近目標淤積高程，且亦改善了後期上由土砂料源不足之問題。

此外，觀察降壩步驟(Step1、Step3、Step5)之調整時機分別為: 10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、100 年重現期洪水，升壩步驟(Step2、Step4、Step6)之調整時機分別為: 5 年重現期洪水、5 年重現期洪水、25 年重現期洪水，若根據重現期距之定義為大於或等於該降雨量所需要的平均年數，可以發現本階段模擬之防砂壩調整時距越來越長，符合溪流土砂逐漸達到平衡穩定狀態之預期。同時，可以觀察到升壩步驟之時距較短，推論為本試區廊仔溪 5K+120 溪段之土砂量非常大，升壩操作容易使防砂壩呈現淤滿狀態，且下游容易產生沖刷現象，因此藉由本階段模擬經驗，得到不須將防砂壩進行全升動作之想法，將於下一階段:最終階段模擬(成效型)進行模擬說明，旨在提供使用者視不同溪流土砂狀態及上、下游現地狀況可以作調整策略之選定。

表 4-28 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料

	平均高程 (m)	平均沖刷 深度(m)	總淤積量 (m ²)	與上一步操作 之淤積相差量 (m ²)	與上一步操作 之最大沖淤變 化量(m)
原始地形	339.65	2.85	0		
Step1 Q10 (降 4 支)	340.60	1.9	21.98	+21.98	+2.13
Step2 Q5 (升壩)	341.15	1.35	35.33	+13.35	-0
Step3 Q25 (降 3 支)	341.57	0.93	45.96	+10.63	+1.42
Step4 Q5 (升壩)	341.39	1.11	42.82	-3.14	-1.1
Step5 Q100 (降 4 支)	341.73	0.77	51.24	+8.42	+1.55
Step6 Q25 (升壩)	341.61	0.89	49.25	-1.99	-0.67
Step7 Q25 (降 3 支)	341.80	0.70	54.56	+5.31	+0.97

3. 本階段成果呈現

經過本階段一系列調整策略步驟，最終成果之縱剖面圖如下圖 4-106 所示，其中黑色線為原始地形，紅色線為經過七步調整步驟之地形。可以觀察到經過七步的防砂壩調整策略，成功使防砂壩上游溪床坡度降低，由原始地形的 5.4%改善至 3.5%，且原先沖刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑有明顯的土砂料源補注，沖刷深度由原始地形之 2.85 公尺降低至 0.7 公尺。同時也改善了先前模

擬階段到後期上游土砂料源不足之問題，可以看到最終成果之地形並無明顯沖刷現象的產生。

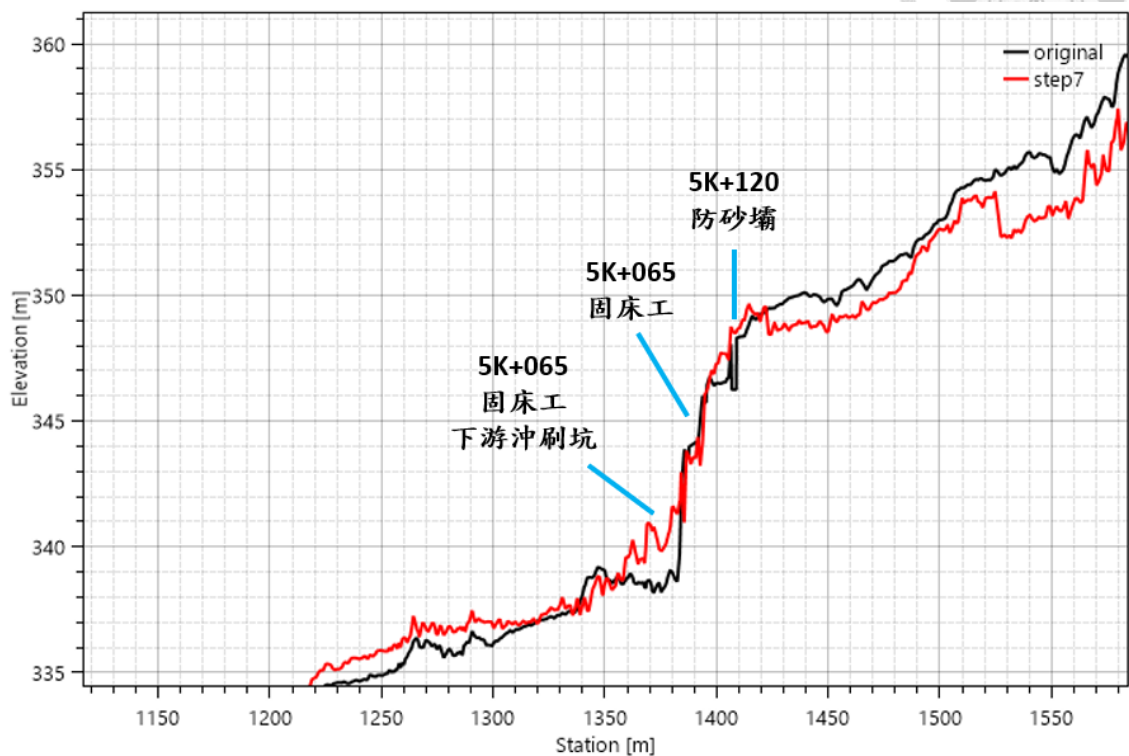


圖 4-106 原始地形與最終成果之縱剖面對比

本研究除了主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑外，也有為了確保升、降壩之操作策略不會對更下游區段造成危害而設立的 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，其經過一系列調整策略模擬之結果如下圖 4-107、圖 4-108。可以觀察到經本階段一系列的模擬，最終使 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，分別產生最大約 1.89 公尺、1.26 公尺淤積，顯示整體調整策略並不會對壩體更下游之區段造成過量土砂危害，且同時提供土砂料源補注，避免擋土牆之傾倒及掏刷。

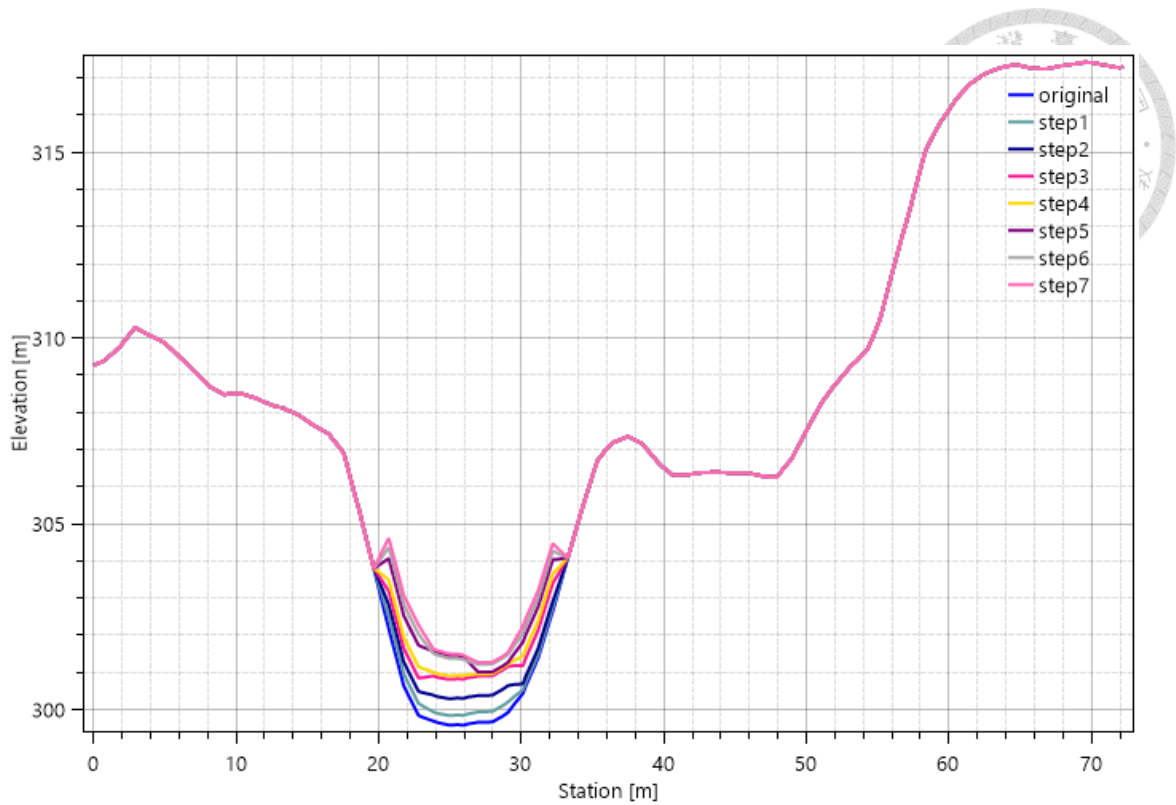


圖 4-107 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

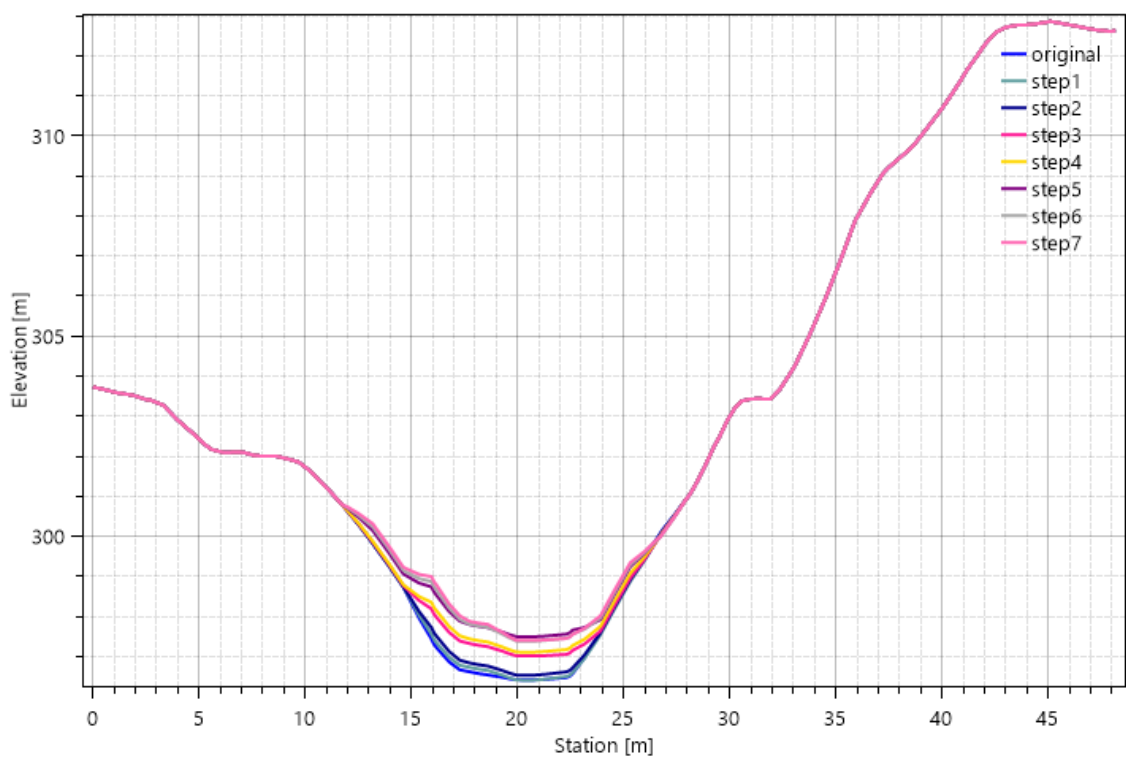


圖 4-108 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

4.2.4 小結

經過本階段全新的經營管理與操作矩陣與防砂壩調整時機，改善了先前模擬階段之調整後期上游土砂料源不足導致下游沖刷的問題，同時藉由本階段模擬結果觀察到防砂壩之調整時距有越來越長的趨勢，符合本研究溪流土砂逐漸達到平衡穩定狀態之預期。

此外，可以觀察到升壩步驟之時距較短，推論為本試區廊仔溪 5K+120 溪段之土砂量非常大，升壩操作容易使防砂壩呈現淤滿狀態，且下游容易產生沖刷現象，因此藉由本階段模擬經驗，得到不須將防砂壩進行全升動作之想法，且由於台灣山區地形坡陡流急，溪流土砂運移量大(行政院農業委員會水土保持局，2021)，許多野溪在蓋了傳統型防砂壩後容易產生上游淤滿、下游嚴重沖刷之危險，存在與廊仔溪相同之土砂情形。因此本研究將於下一階段調整升壩操作的設定，目的在於提供使用者針對溪流土砂狀態以及上、下游現地情況可以作調整策略之選擇，詳細請見下一階段:最終階段模擬(成效型)。

4.4 最終階段模擬(成效型)

根據前述的研究經驗及模擬成果，本輪期望提出另一套防砂壩調整策略，目的為解決土砂運移量過大，升壩操作容易使防砂壩呈現淤滿狀態，且下游容易產生沖刷現象之問題，提供使用者針對不同溪流土砂狀態以及上、下游現地情況可以作調整策略之選擇。本階段模擬所採用之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣與最終模擬階段(保守型)完全相同，主要差別在於對於矩陣之應用：本階段移除將壩體全升之步驟，同時調整時機之判定也將簡化。以下將分述說明。

1. 本階段調整策略說明

根據前一階段之模擬結果分析，本階段模擬將移除將壩體全升之步驟，在確保安全的前提下，使土砂能更有效率的補注至下游。以下將以簡易示意圖說明，比較與先前調整策略之不同如圖 4-109、圖 4-110。先前階段之模擬調整策略為，每次降壩操作步驟後，下一步驟則將壩體預鑄塊全數升滿，使防砂壩發揮攔阻土砂的作用，抵擋大量上游土砂，雖然能降低土砂災害的發生，但同時也可能造成下游部分區域有沖刷現象。而本階段模擬之調整策略為，移除將壩體預鑄塊全升之步驟，每一步皆對照矩陣作調整策略的選擇，使每一步驟之調整皆有部分土砂運移至下游，改善下游沖刷嚴重之問題的同時，也能快速減少上游過剩的土砂料源，減少調整步驟及工程經費。

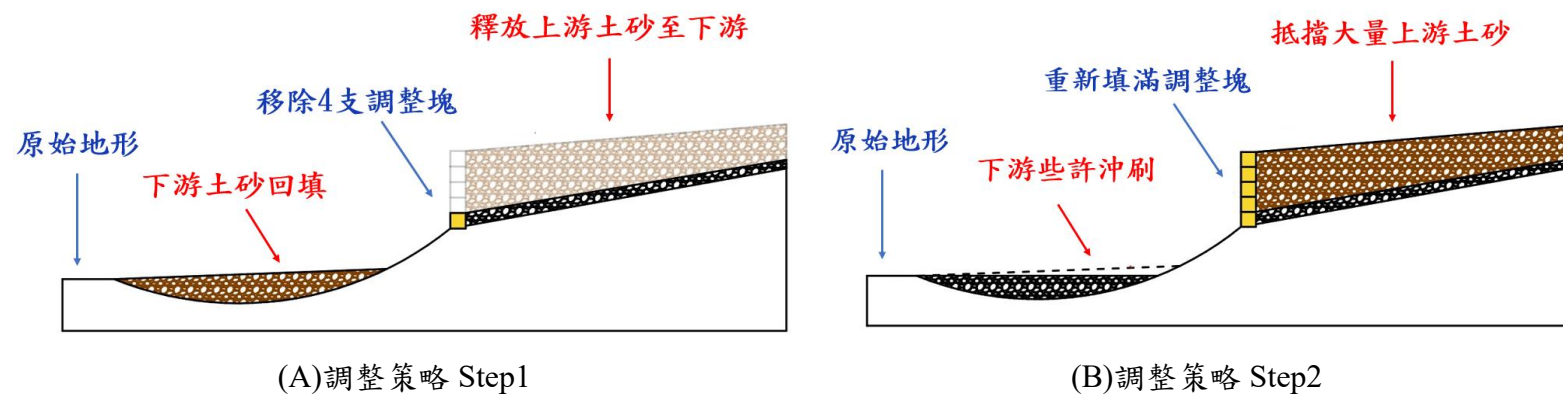


圖 4-109 先前階段調整策略示意圖

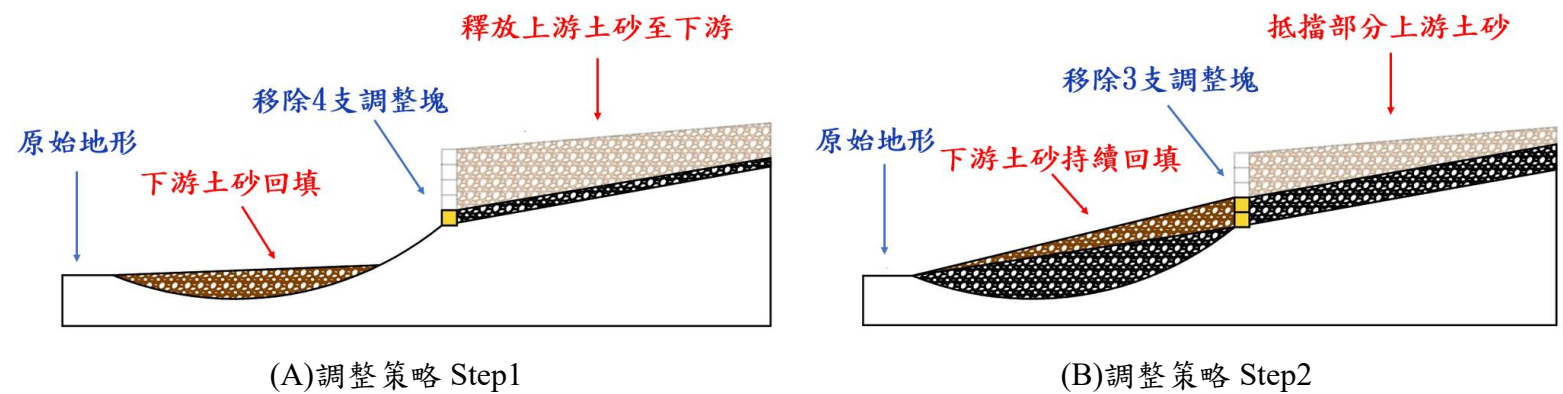


圖 4-110 本階段調整策略示意圖

2. 防砂壩調整時機說明

由於本階段移除了將壩體全升步驟之設定，即沒有明確的降壩、操壩操作步驟，因此本階段將會記錄每一步之「與上一步操作之最大淤積變化量」、「與上一步操作之最大沖刷變化量」數據，且移除原先升壩操作時之淤滿判定。整體調整時機大致上與最終階段模擬(保守型)類似，同樣以「與上一步操作之最大沖淤變化量」做為調整時機標準依據。先判斷「下游保全對象之沖刷深度」是否屬於高的數值範圍，若是，則下一次防砂壩調整時機為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之二時。若「下游保全對象之沖刷深度」屬於中、低的數值範圍，則下一次防砂壩調整時機為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一時。

如以下圖 4-111 調整時機判定流程圖所示，使用者可以根據當下現地之情況做出下一次調整時機的對應。

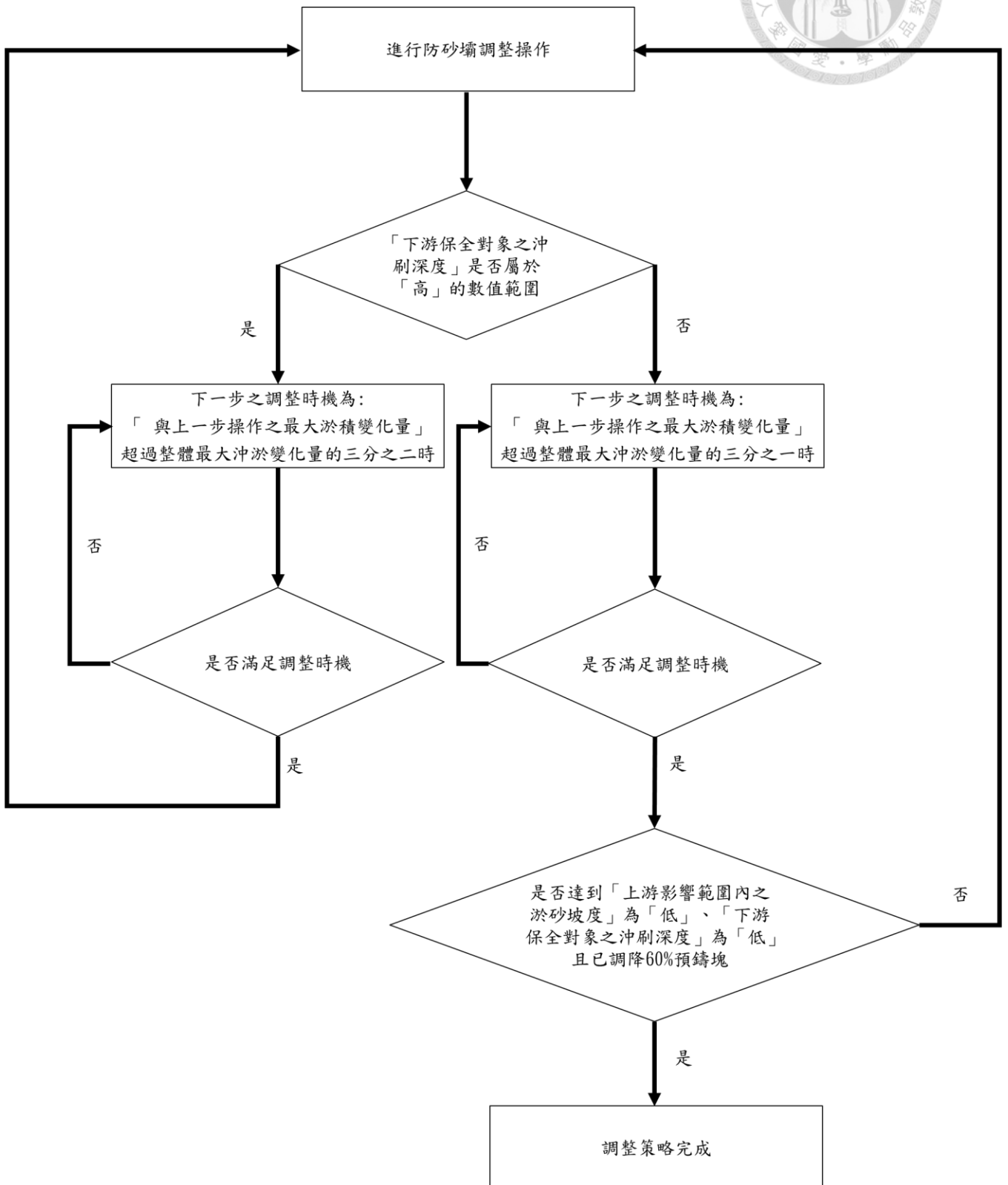


圖 4-111 調整時機判定流程圖

4.4.1 整體模擬流程

本階段模擬同樣使用內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型(DEM)作為原始地形，採用與最終模擬階段(保守型)完全相同之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣，並移除了將壩體全升步驟之設定，搭配簡化過後之防砂壩調整時機判定，使調整策略完全依照各步驟地形狀況對應矩陣進行防砂壩預鑄塊調整。本階段總共進行 5 步驟，即成功使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本階段之經營管理與操作矩陣及模擬流程如圖 4-112 所示。

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊 Step 4	調降 3 支預鑄塊 Step 5
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊 Step 1	調降 3 支預鑄塊 Step 2、3	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

圖 4-112 最終階段模擬(成效型)流程圖

4.4.2 各步驟細部操作說明

本小節將呈現本模擬之各步驟防砂壩調整策略說明，以及模擬結果展示，包含:防砂壩調整策略選定、各步驟調整時機判定、各步驟進行不同流量重現期模擬結果、各步驟操作前後對比分析、保全對象模擬結果分析等，詳細說明如下。



1. Step1

本步驟由於各設定及調整策略選與前階段之 Step1 相同，唯調整時機略有不同，因此本步驟將沿用上一階段之 Step1 模擬結果，如下說明。

(1) 調整策略選擇

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，並且計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

防砂壩上游影響範圍將採用 3.3.1 節式 3-11 計算之 133.33 公尺，且對照模型中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 355.55m)，如下圖 4-113 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-9。

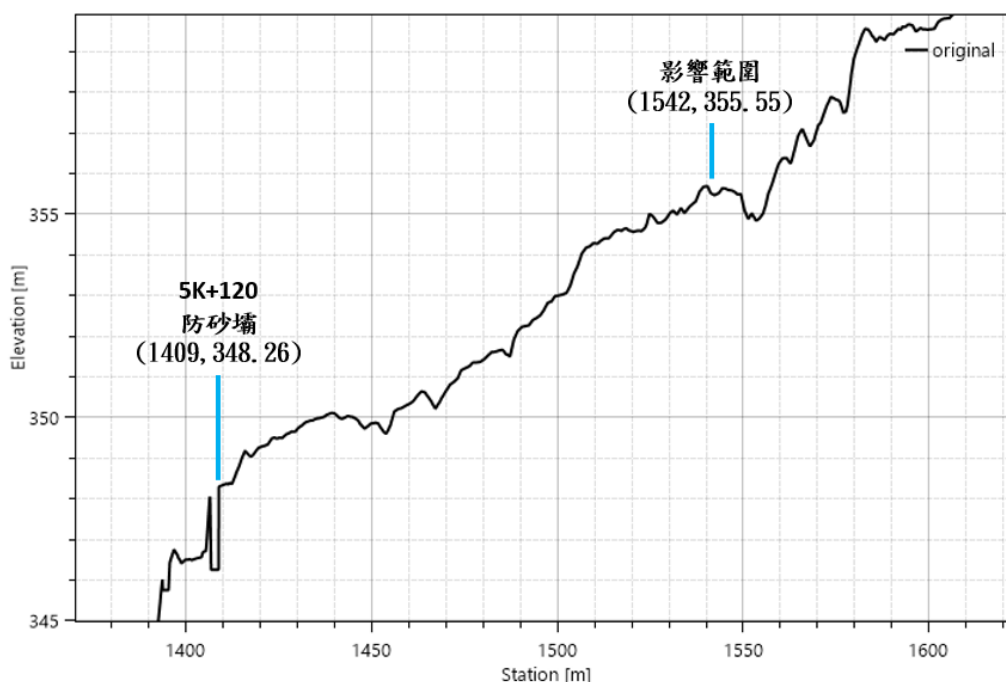


圖 4-113 原始地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{355.55 - 348.26}{133.33} \cong 0.054 \quad \text{式 4-9}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.4%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑，其原始地形沖刷嚴重，斷面平均高程為 339.65 公尺，沖刷深度約為 2.85 公尺，如下圖 4-114 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「高」。

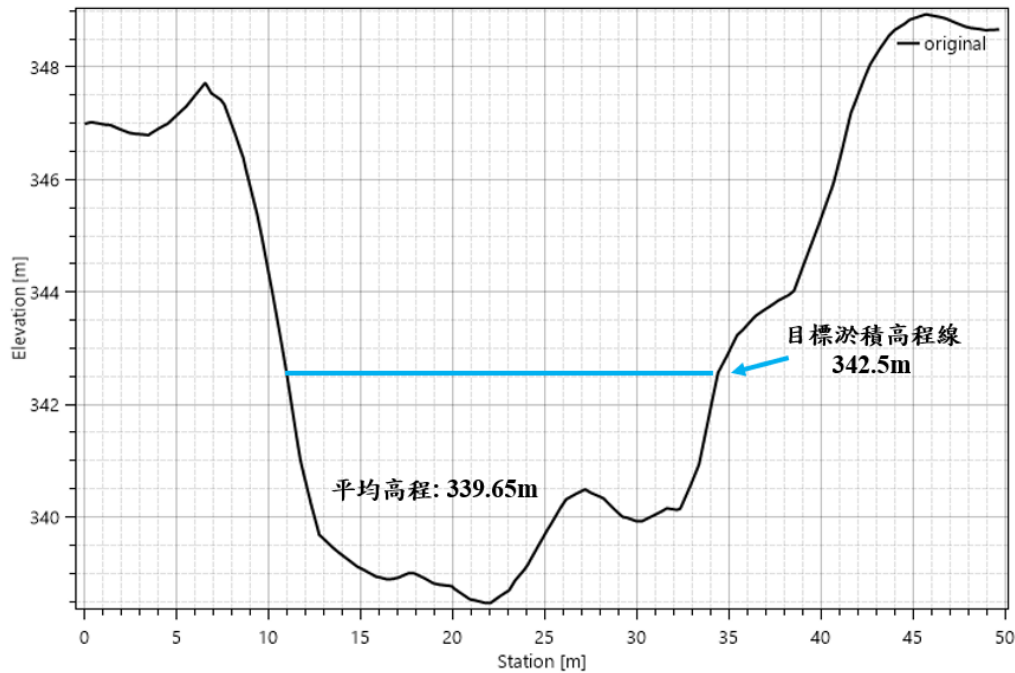


圖 4-114 原始地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析原始地形之情況，以及對應本階段之經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 4 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-29 中粗體字所示。

表 4-29 Step1 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-111。由於本步驟之「下游保全對象之沖刷深度」屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之二(1.9 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-115 為整體試區縱剖面圖，圖 4-116 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-30 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。可以觀察到以縱剖面來看，各重現期洪水事件造成的土砂運移效果差異很大，且 25 年重現期以上洪水事件會造成非常明顯的地形變化，顯示整體土砂呈現不穩定的狀態。以保全對象橫剖面來看，由於本步驟為初期調整階段，土砂下移量大，因此 10 年重現

期以上洪水事件就會造成大量的淤積情況發生。且根據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大冲刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之二(1.9 公尺)時，則需進行防砂壩調整，對照表 4-30 後，將選用經過 10 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

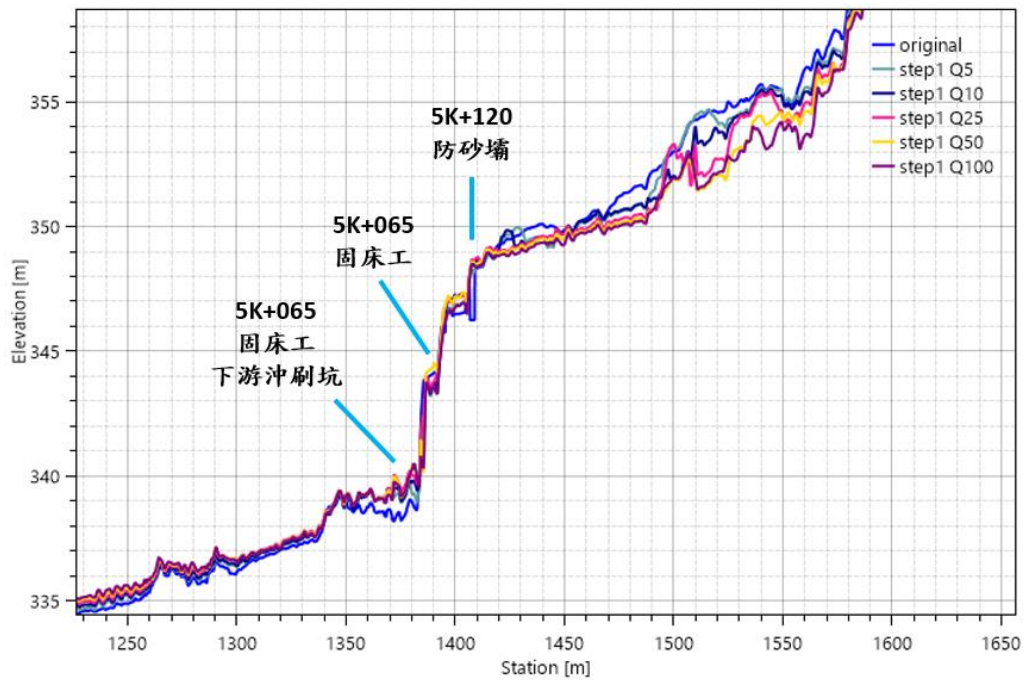


圖 4-115 Step1 各重現期流量模擬之縱剖面

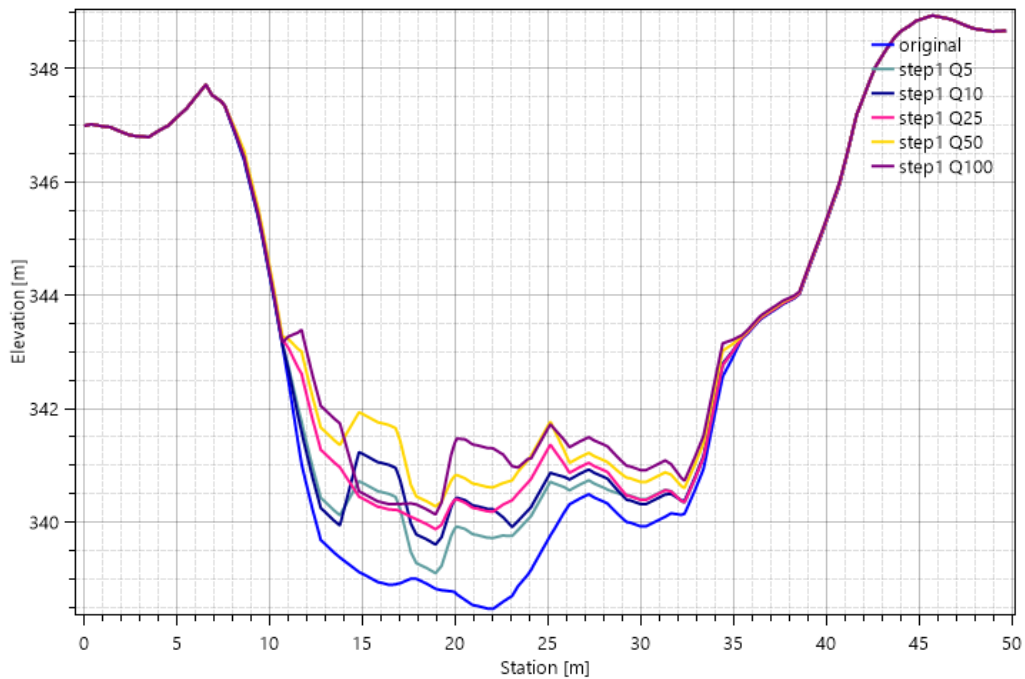


圖 4-116 Step1 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-30 保全對象斷面 Step1 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大冲刷 變化量(m)
原始地形	17040.12		339.65		
Q5	17057.56	+17.44	340.40	+1.6	-0
Q10	17062.11	+21.98	340.60	+2.13	-0
Q25	17065.77	+25.65	340.75	+1.72	-0
Q50	17077.43	+37.31	341.23	+2.82	-0
Q100	17077.98	+37.86	341.26	+2.83	-0

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之原始地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟以內政部 105 年 1 公尺*1 公尺網格數值高程模型作為原始地形，對照矩陣調整策略，進行調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-117 中黑色線，後續進行 10 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-117 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，土砂順利下移，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度降低，且壩體下游整體溪段產生淤積現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑為例，圖 4-118 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為原始地形，紅色線為本步驟模擬後地形，藍色線為本研究之最終目標淤積高程。可以觀察到經過本步驟之降壩操作，淤積量有明顯增加，此保全對象斷面淤積量較原始地形增加了 21.98 平方公尺，平均高程由原先 339.65 公尺上升至 340.60 公尺，顯示本步驟調降策略有使壩體上游淤積過量之土砂順利填補至冲刷坑。

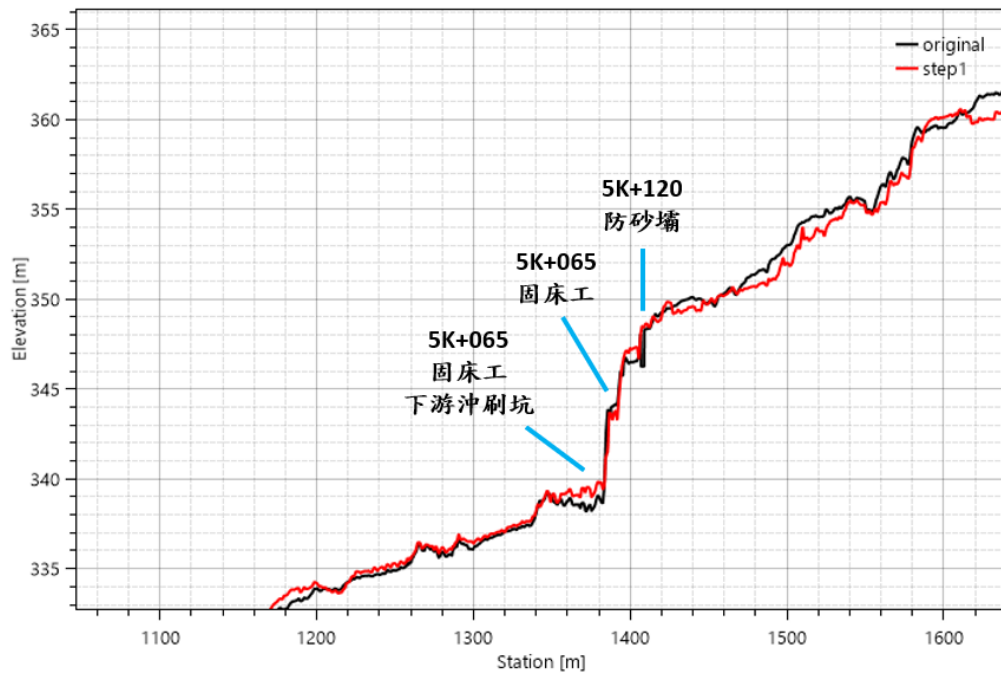


圖 4-117 原始地形與 Step1 地形之縱剖面對比

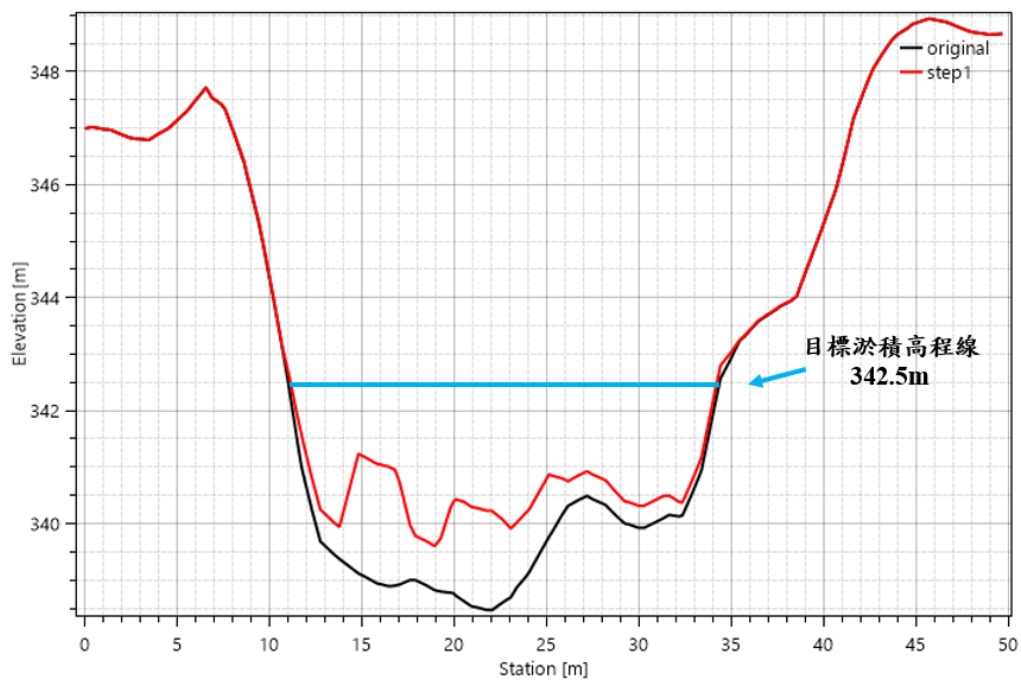


圖 4-118 原始地形與 Step1 地形之保全對象橫剖面對比



2. Step2

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續調整策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為(1409, 348.26m)、(1542, 355.36m)，如下圖 4-119 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-10。

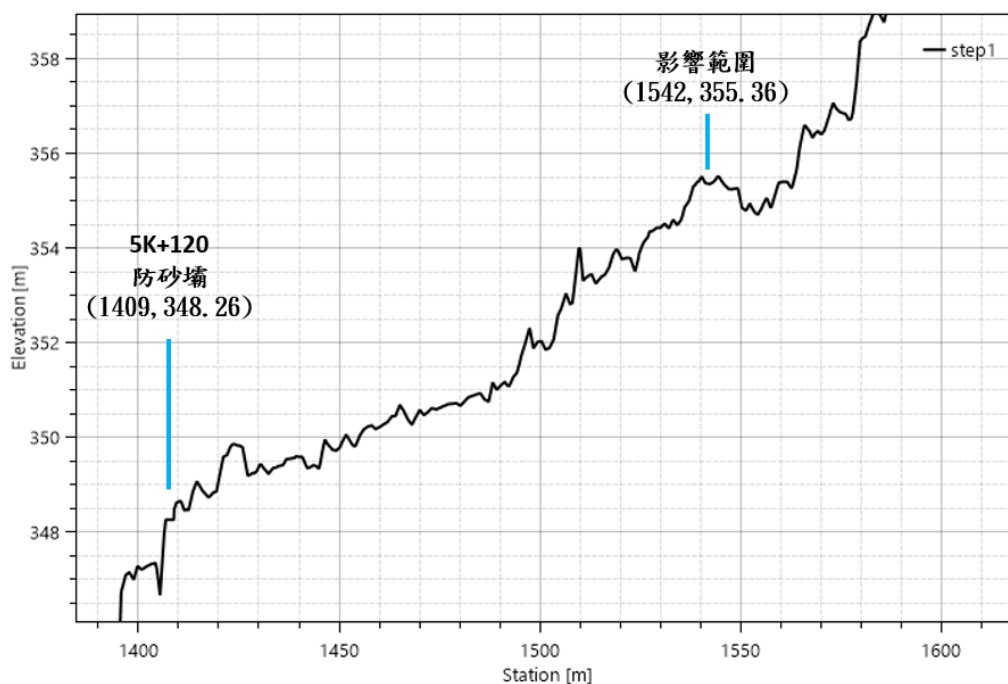


圖 4-119 Step1 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{355.36 - 348.26}{133.33} \cong 0.053 \quad \text{式 4-10}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.3%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 340.6 公尺，平均沖刷深度約為 1.9 公尺，如下圖 4-120 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」，原先保全對象沖刷嚴重之問題有改善。

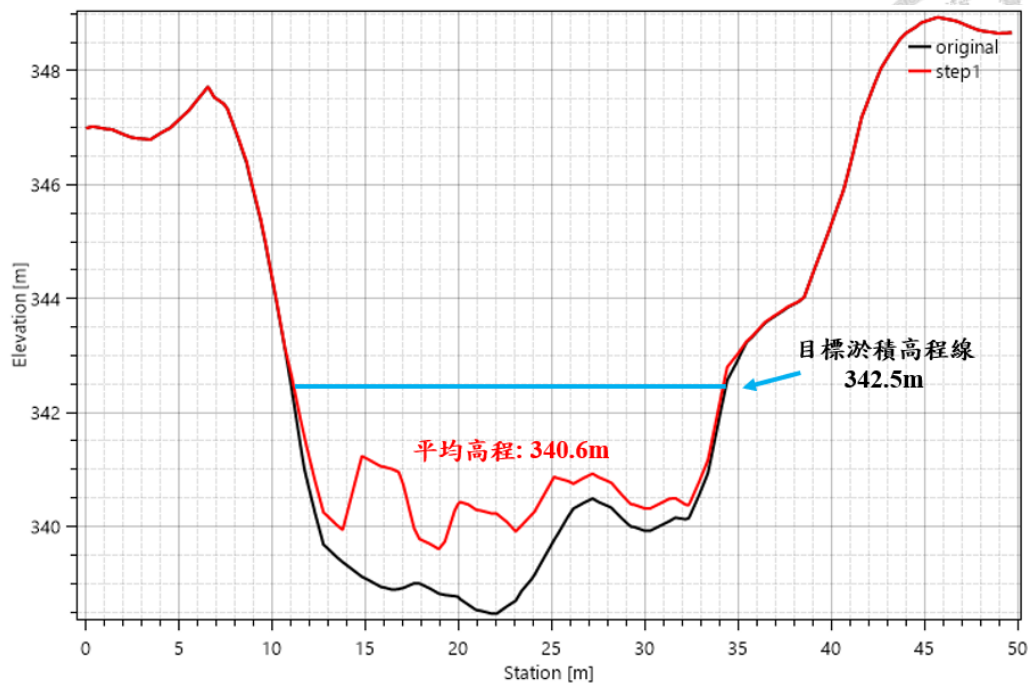


圖 4-120 Step1 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step1 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 3 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-31 中粗體字所示。

表 4-31 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-111。由於本步驟之「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-121 為整體試區縱剖面圖，圖 4-122 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-32 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。以整體縱剖面來看，50 年重現期以上洪水事件，特別是 100 年重現期洪水事件會造成上、下游出現比較明顯的地形變化，25 年以下之重現期洪水則模擬結果差異不大。以保全對象橫剖面來看，同樣是 100 年重現期會造成明顯的淤積情況，50 年以下重現期

洪水事件模擬結果差異不大，但各重現期洪水事件皆使平均高程增加 0.5 公尺以上的土砂量，與上一步操作之最大淤積變化量也較高，顯示此時之溪流上游土砂料源仍非常充足，需進行後續一系列調整策略使土砂恢復平衡穩定狀態。且根據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整，對照表 4-32 後，將選用經過 5 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

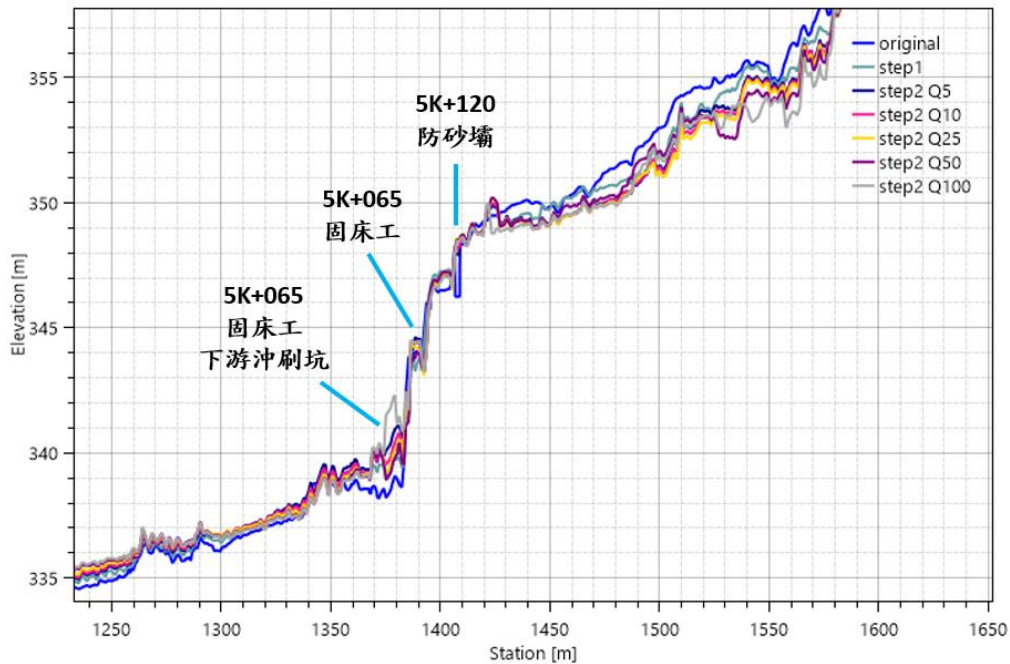


圖 4-121 Step2 各重現期流量模擬之縱剖面

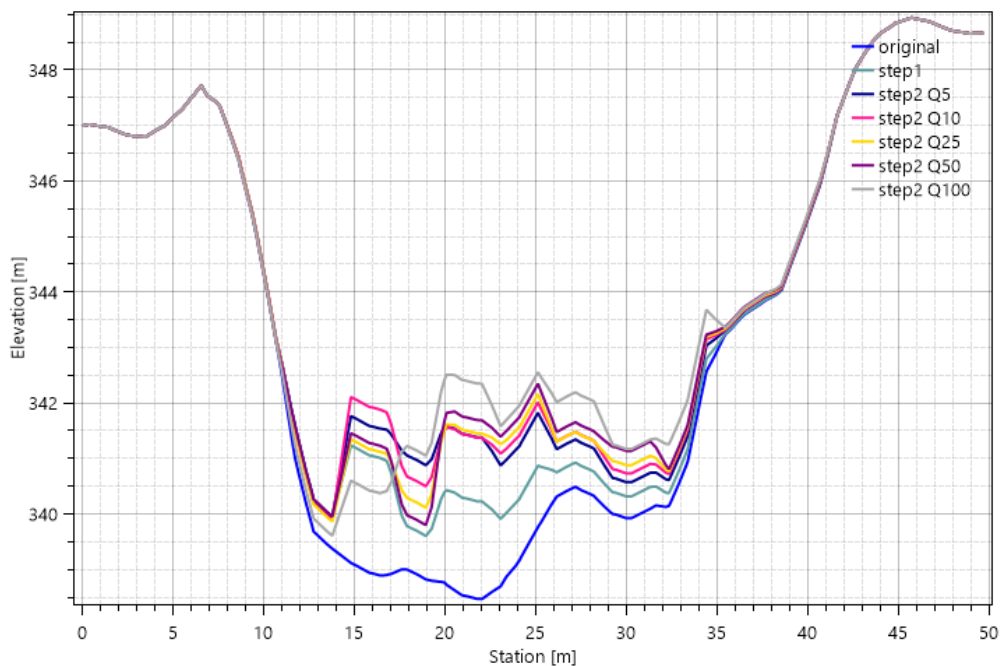


圖 4-122 Step2 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-32 保全對象斷面 Step2 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大沖刷 變化量(m)
Step1 模擬後地形	17062.11		340.60		
Q5	17076.17	+14.06	341.18	+1.27	-0
Q10	17078.05	+15.94	341.30	+1.15	-0.05
Q25	17076.17	+14.06	341.18	+1.29	-0.08
Q50	17078.77	+16.67	341.32	+1.47	-0.04
Q100	17083.81	+21.70	341.53	+2.12	-0.63

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行壩體調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-123 中黑色線，後續進行 5 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-123 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度明顯降低，持續將上游過量之土砂向下運移，而整體壩下游區段則呈現淤積情況。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-124 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step1 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之調整策略，整體淤積量有持續增加，且並未出現任何沖刷潛勢，顯示壩體上游之土砂料源仍非常充足。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 14.06 平方公尺，平均高程由原先 340.6 公尺上升至 341.18 公尺，持續將上游土砂填補至保全對象沖刷坑中。

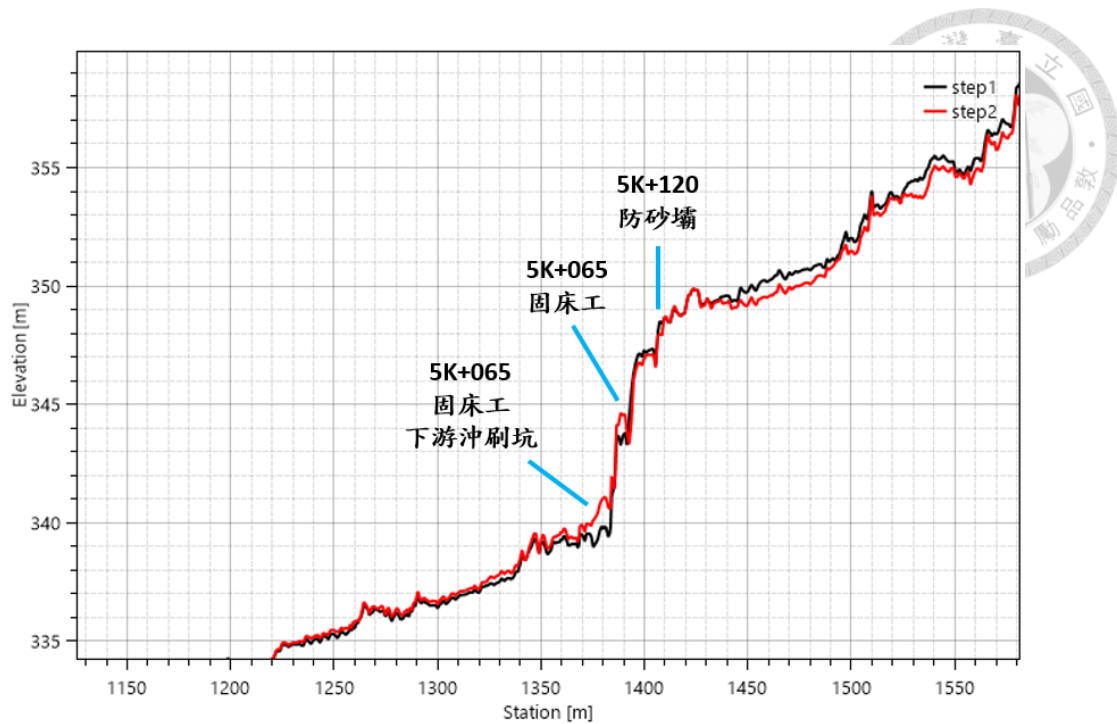


圖 4-123 Step1 地形與 Step2 地形之縱剖面對比

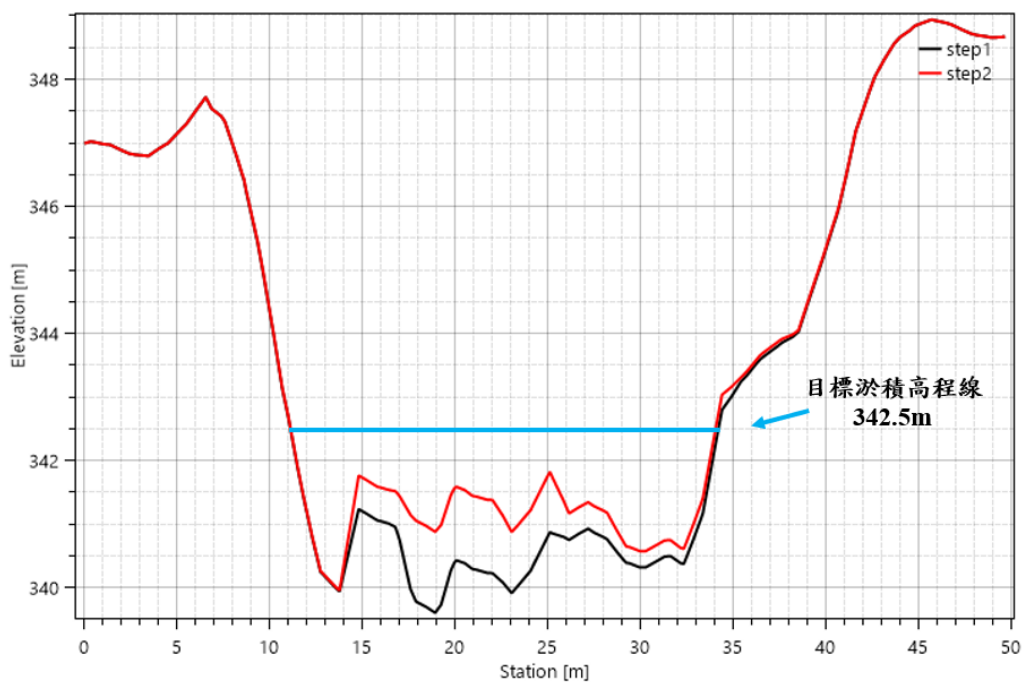


圖 4-124 Step1 與 Step2 地形之保全對象橫剖面對比



3. Step3

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續調整策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為 (1409, 348.26m)、(1542, 354.96m)，如下圖 4-125 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-11。

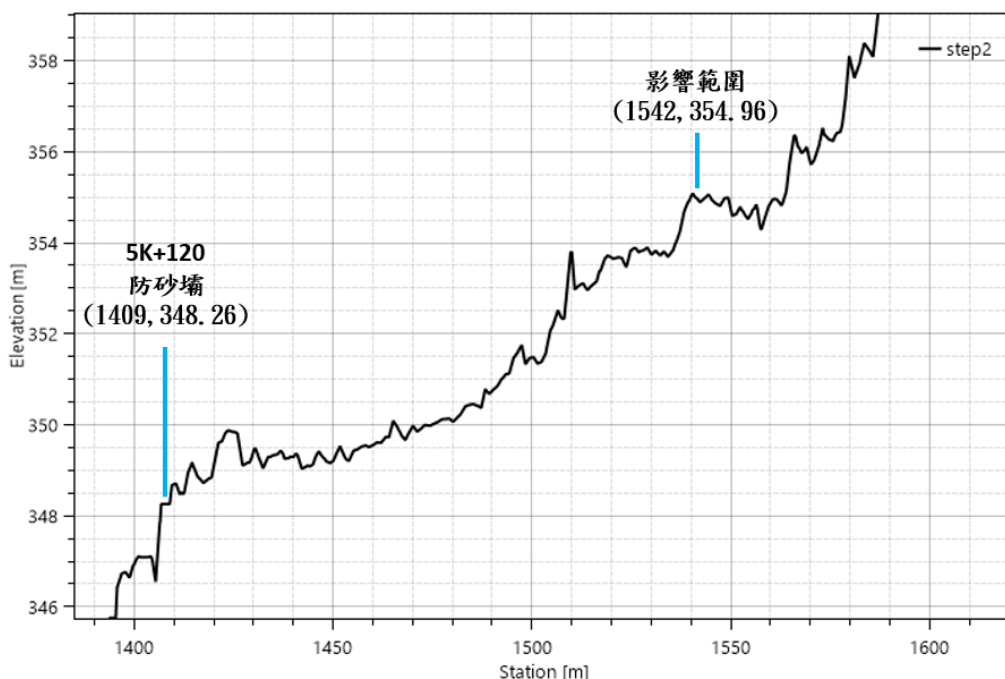


圖 4-125 Step2 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{354.96 - 348.26}{133.33} \cong 0.050 \quad \text{式 4-11}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 5.0%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「中」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，經過兩步驟的調整，斷面平均高程上升至 341.18 公尺，平均沖刷深度約為 1.32 公尺，如下圖 4-126 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「中」。

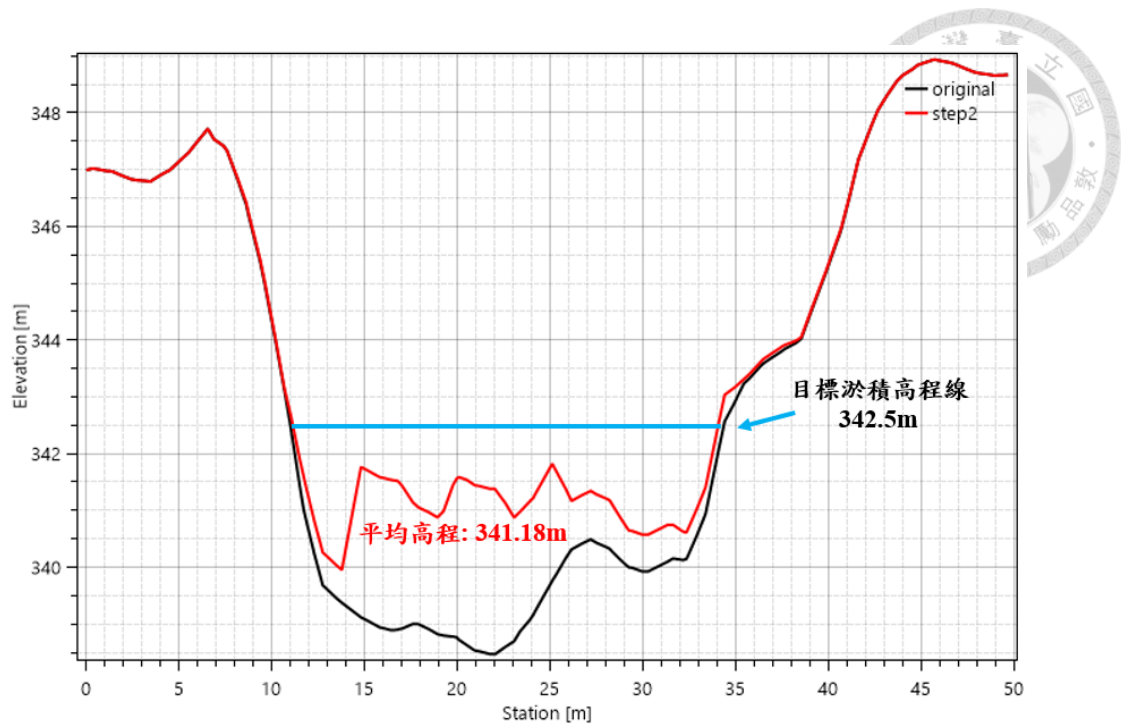


圖 4-126 Step2 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step2 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟之防砂壩調整策略為降低 3 支防砂壩預鑄塊，而上一步驟之調整策略同樣為降低 3 支防砂壩預鑄塊，與目前的調整策略完全相同，因此本步驟不需進行任何壩體調整操作，直接進行後續洪水模擬分析，如下表 4-33 中粗體字所示。



表 4-33 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-111。由於本步驟之「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-127 為整體試區縱剖面圖，圖 4-128 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-34 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。以整體縱剖面來看，25 年重現期以上洪水事件會對地形造成較大的沖淤變化，其餘各重現期洪水則模擬結果差異不大。以保全對象橫剖面來看，則是 50 年以上重現期洪水會產

生更大的淤積，但同時也於河心位置造成比較嚴重之沖刷現象。整體除了 100 年重現期洪水事件會使平均高程大增之外，各重現期洪水模擬之平均高程皆大約落在 341.4 公尺至 341.5 公尺左右。根據本步驟的防砂壩調整時機設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整，對照表 4-34 後，將選用經過 5 年重現期洪水之地形，進行後續步驟模擬分析。

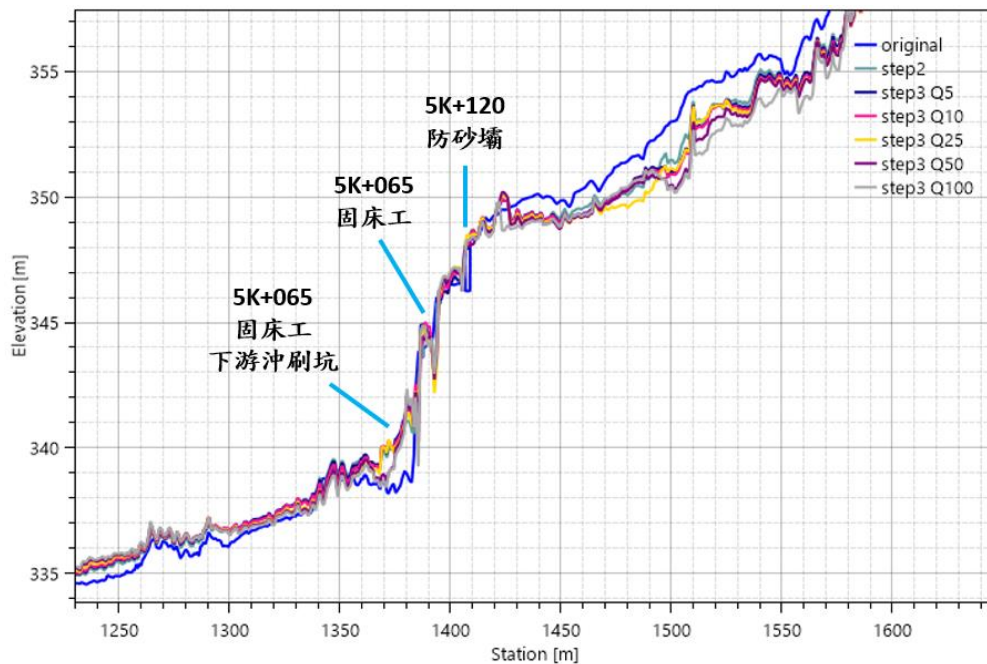


圖 4-127 Step3 各重現期流量模擬之縱剖面

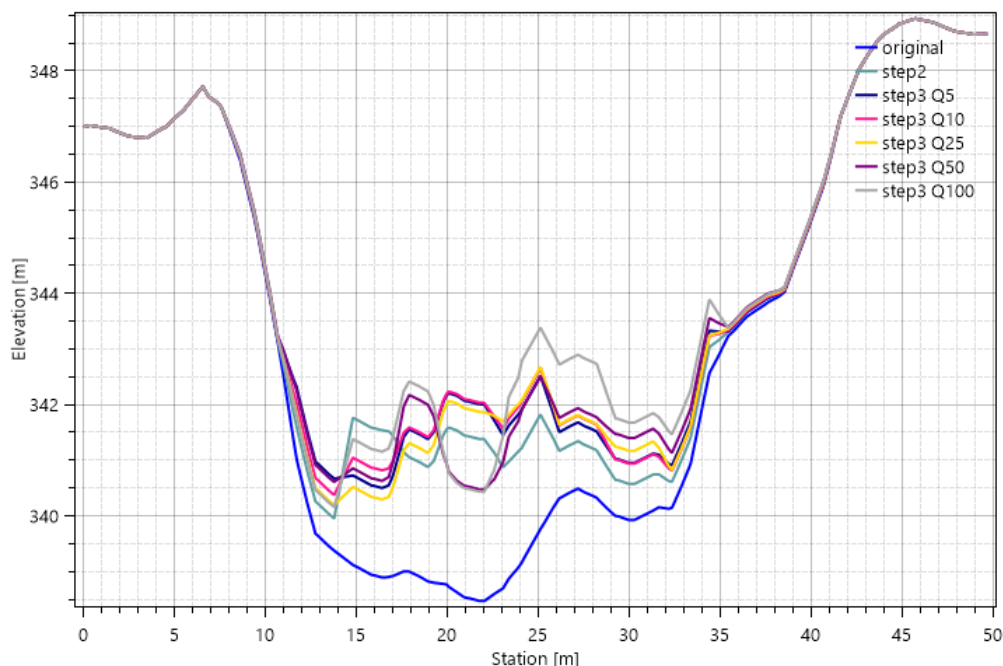


圖 4-128 Step3 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-34 保全對象斷面 Step3 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大沖刷 變化量(m)
Step2 模擬後地形	17076.17		341.18		
Q5	17083.53	+7.36	341.51	+0.71	-1.04
Q10	17084.33	+8.17	341.51	+0.83	-0.72
Q25	17082.21	+6.04	341.43	+0.85	-1.24
Q50	17083.60	+7.44	341.43	+1.12	-0.91
Q100	17091.28	+15.11	341.77	+1.56	-0.95

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，由於對應矩陣後之調整策略與上一步驟完全相同，因此不需進行任何壩體調整操作，上一步驟之地形為圖 4-129 中黑色線，本步驟為進行 5 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-129 中紅色線。可以觀察到相較於上一步驟，本步驟上游土砂下移量明顯下降，5K+065 固床工周圍也有產生些許沖刷現象，顯示原先上游過剩的土砂料源漸漸降低，本試區土砂逐漸恢復穩定狀態。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-130 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step2 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到經過本步驟之調整策略，雖然有持續將上游土砂填補至保全對象沖刷坑中，但同時也對靠近左岸處造成了些許沖刷現象，顯示上游土砂料源慢慢降低，需持續進行後續調整策略，使土砂維持穩定平衡狀態。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 7.36 平方公尺，平均高程由原先 341.18 公尺上升至 341.51 公尺。

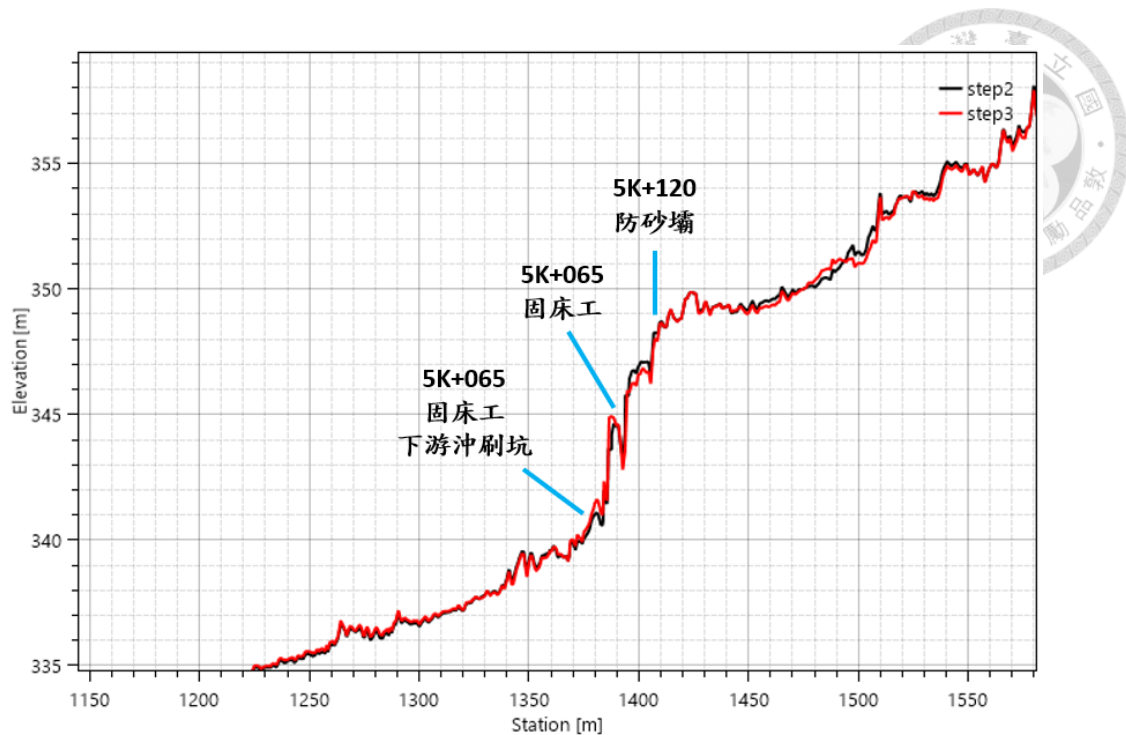


圖 4-129 Step2 地形與 Step3 地形之縱剖面對比

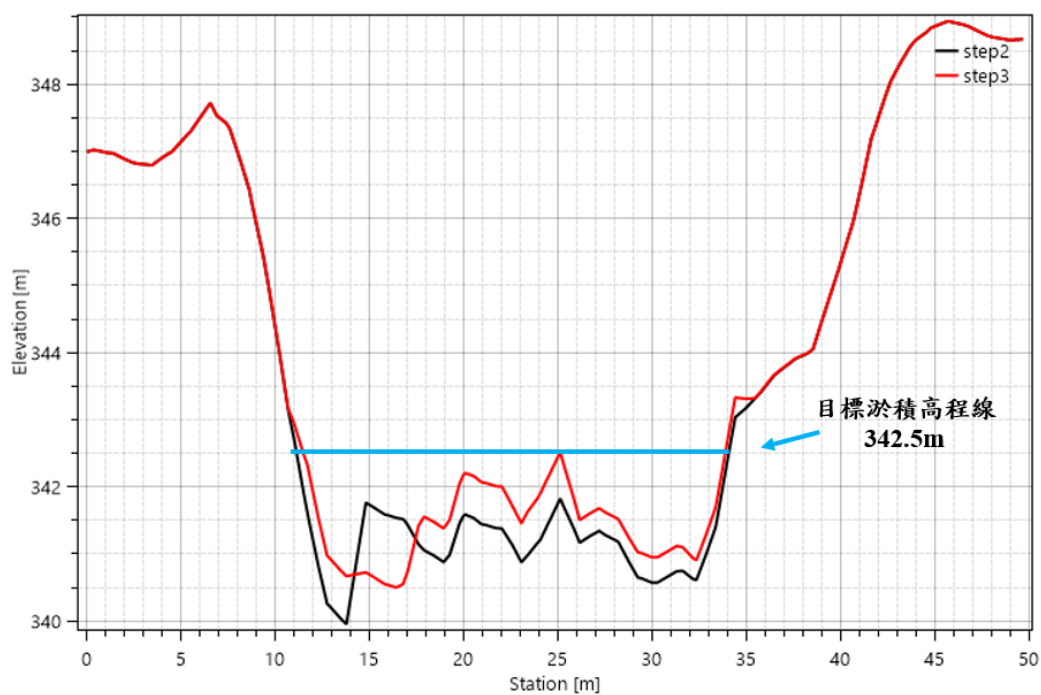


圖 4-130 Step2 與 Step3 地形之保全對象橫剖面對比



4. Step4

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續調整策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為 (1409, 348.26m)、(1542, 354.79m)，如下圖 4-131 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-12。

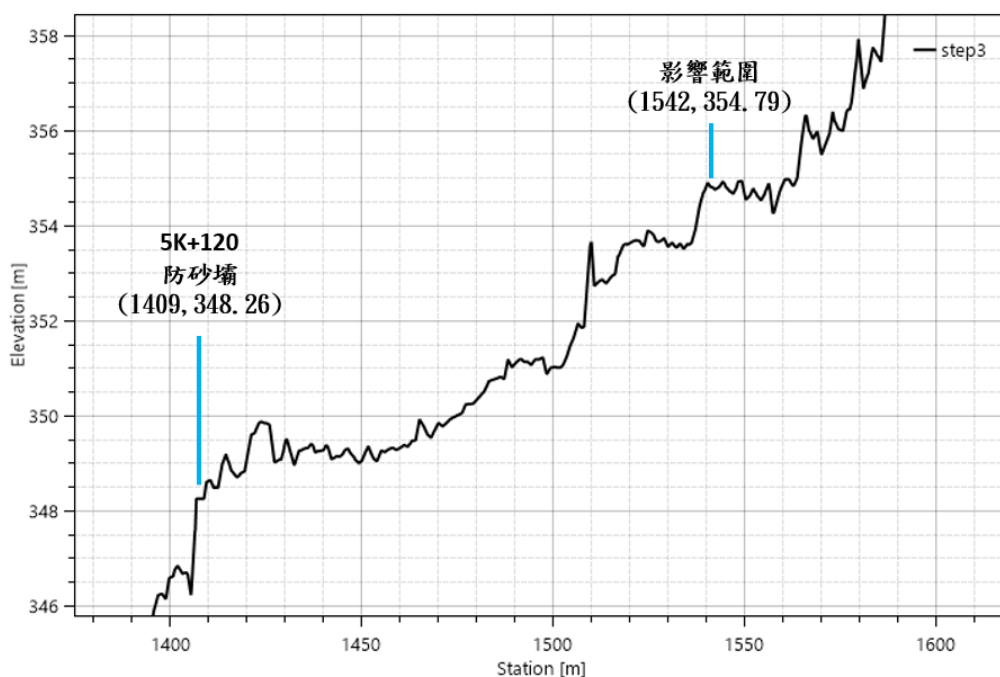


圖 4-131 Step3 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{354.79 - 348.26}{133.33} \cong 0.049 \quad \text{式 4-12}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 4.9%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「低」，經過前述三步驟之調整策略，成功將防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度改善至「低」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，斷面平均高程上升至 341.51 公尺，平均沖刷深度約為 0.99 公尺，如下圖 4-132 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」仍屬於「中」之範圍。

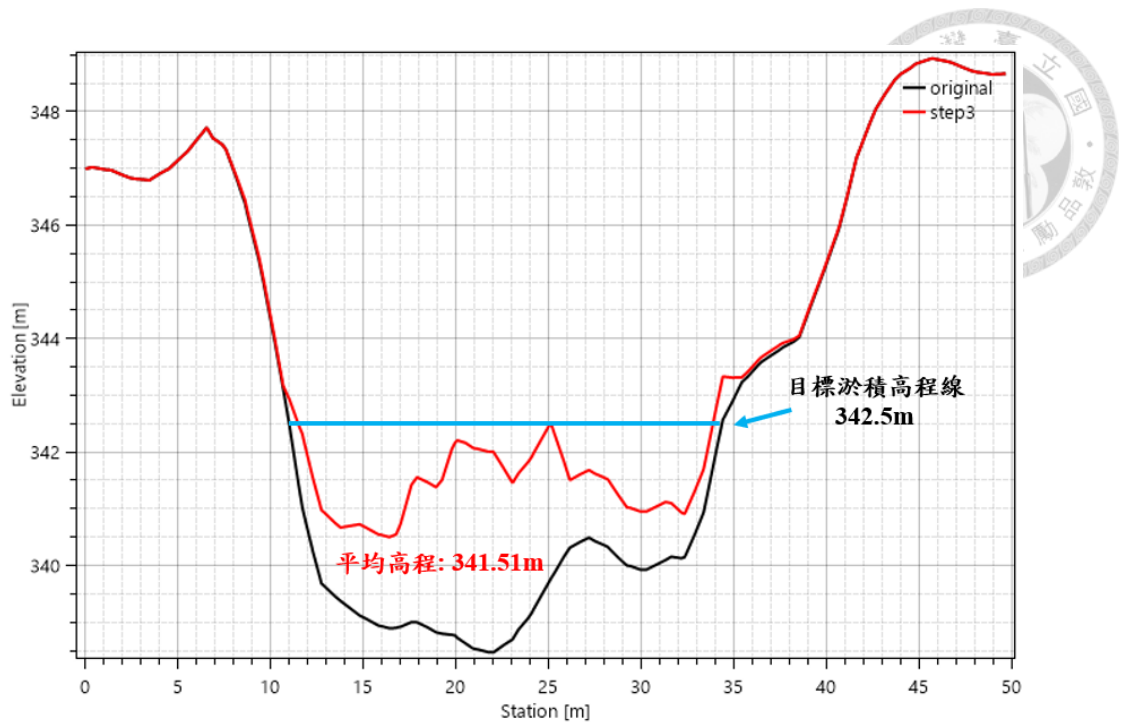


圖 4-132 Step3 地形之保全對象橫剖面圖

根據上述分析 Step3 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟選擇的防砂壩調整策略為降低 4 支防砂壩預鑄塊，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-35 中粗體字所示。

表 4-35 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

而關於下一步的調整時機判定，將比照前述之說明，本階段模擬之防砂壩調整時機判定流程圖如圖 4-111。由於本步驟之「下游保全對象之沖刷深度」不屬於高的數值範圍，因此下一次的防砂壩調整時機將設定為「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」任一項超過整體最大沖淤變化量的三分之一(0.95 公尺)時，則需進行防砂壩調整。

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-133 為整體試區縱剖面圖，圖 4-134 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-36 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。以整體縱剖面來看，各重現期洪水之模擬結果差異不大，可以觀察到上一步驟產生之固床工周圍沖刷現象，於本步驟各重現期洪水皆無法成功填回，顯示上游土砂量有逐漸減少之現象。以保全對象橫剖面來看，可以觀察到重現期距越大的洪水事件，其

「與上一步操作之最大沖刷、淤積變化量」浮動越明顯，且 25 年以上重現期之洪水對河心處會造成些許沖刷，但各重現期洪水所產生之整體土砂淤積量差異不大，平均高程皆在 341.6 公尺至 341.8 公尺之間，顯示上游土砂料源逐漸穩定，不會再有過量土砂下移的趨勢。

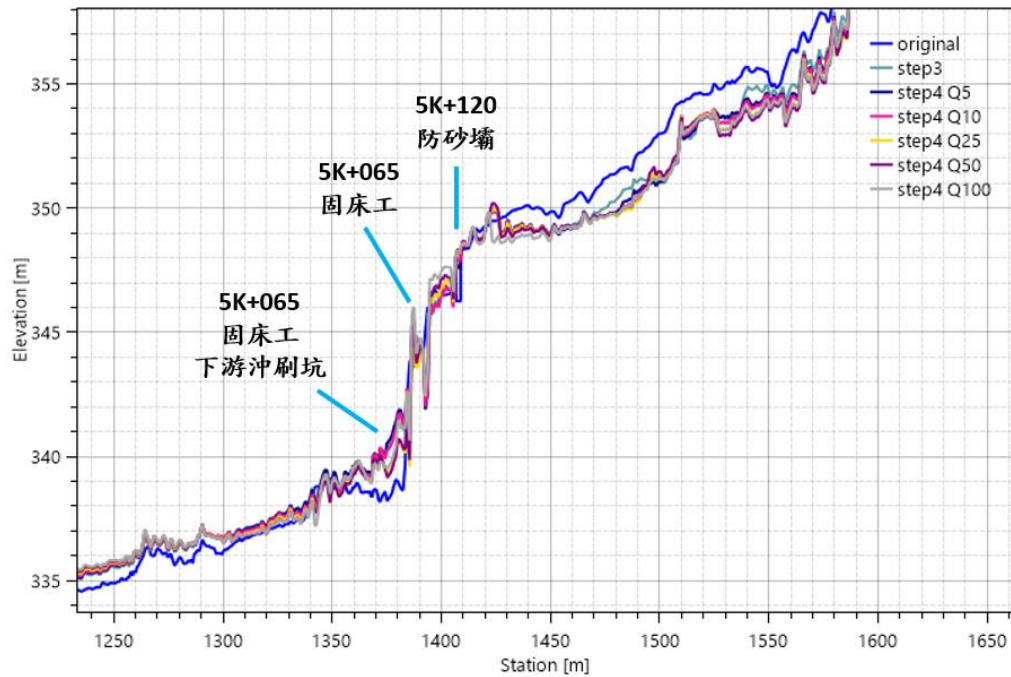


圖 4-133 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面

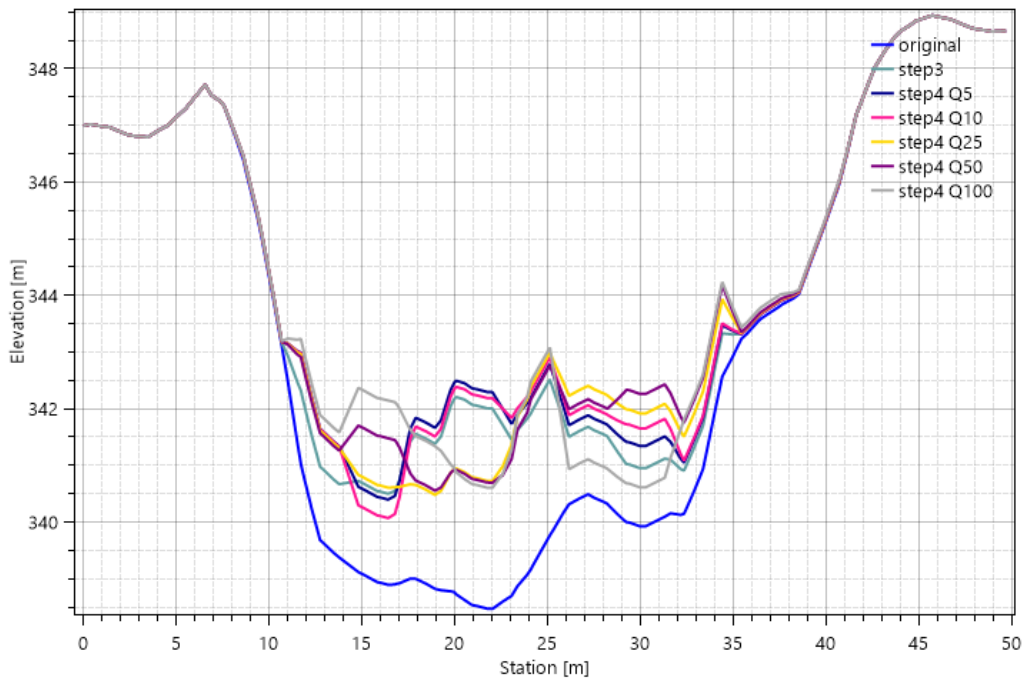


圖 4-134 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-36 保全對象斷面 Step4 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大沖刷 變化量(m)
Step3 模擬後地形	17083.53		341.51		
Q5	17089.95	+6.43	341.75	+0.67	-0.1
Q10	17090.26	+6.73	341.79	+0.7	-0.43
Q25	17088.06	+4.54	341.66	+0.97	-1.28
Q50	17091.07	+7.55	341.76	+1.31	-1.31
Q100	17088.54	+5.02	341.69	+1.64	-1.4

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現本步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行壩體調整策略，調降 4 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-135 中黑色線，後續進行 25 年重現期洪水事件模擬，其結果如圖 4-135 中紅色線。可以觀察到經過本步驟調整策略，防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度有降低，由於上游土砂料源減少，且本研究之試區縱剖面線為以河心位置做繪製，因此下游保全對象區段顯示為沖刷現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-136 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step3 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。經過本步驟之調整策略，雖然河心位置較上一步驟之地形有沖刷的產生，但靠近右岸區域土砂淤積量也有明顯增加的趨勢，顯示整體土砂狀態逐漸平衡。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 4.54 平方公尺，平均高程由原先 341.51 公尺上升至 341.66 公尺，持續接近目標淤積高程。

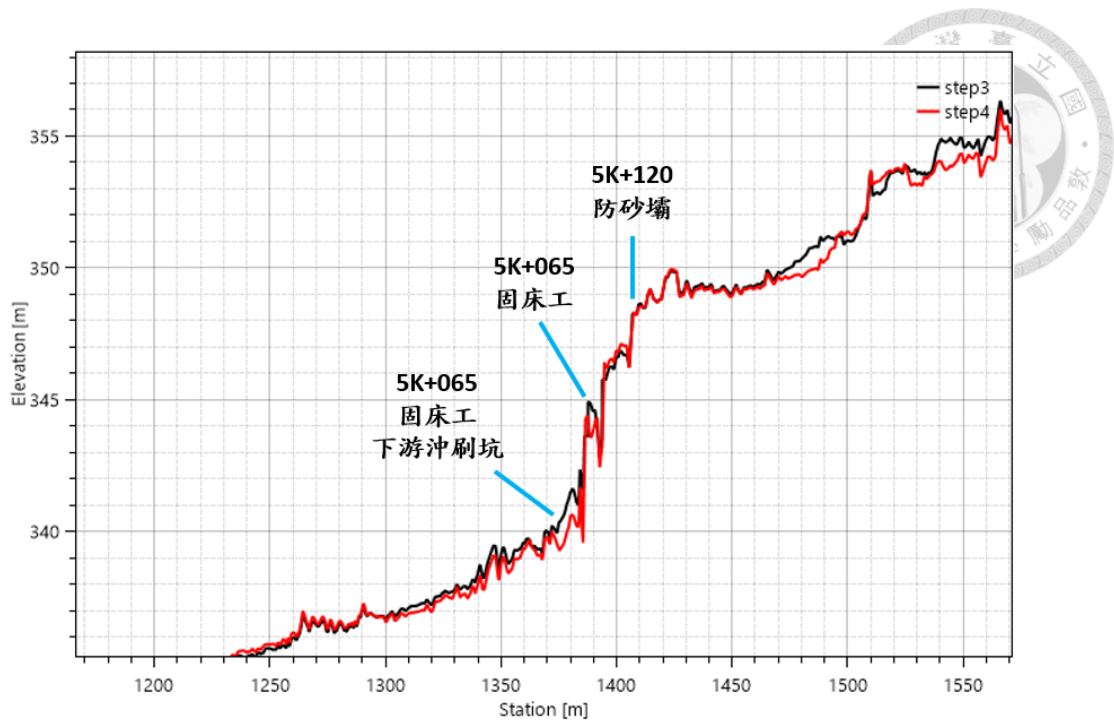


圖 4-135 Step3 地形與 Step4 地形之縱剖面對比

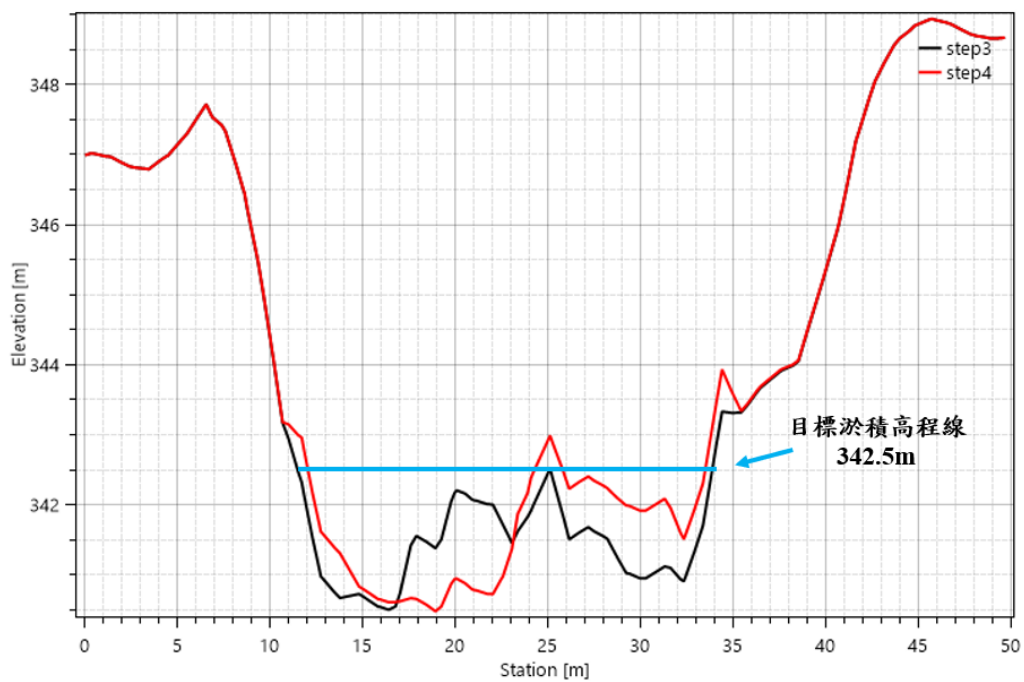


圖 4-136 Step3 與 Step4 地形之保全對象橫剖面對比



5. Step5

(1) 調整策略選擇

本步驟接續上一步之地形，擬定後續調整策略，計算其「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」、「下游保全對象之沖刷深度」二數值，計算結果如下：

對照上一步驟地形中防砂壩位置及其影響範圍控制點之位置及高程分別為 (1409, 348.26m)、(1542, 353.76m)，如下圖 4-137 所示。並以坡度計算公式，計算防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度，如下式 4-13。

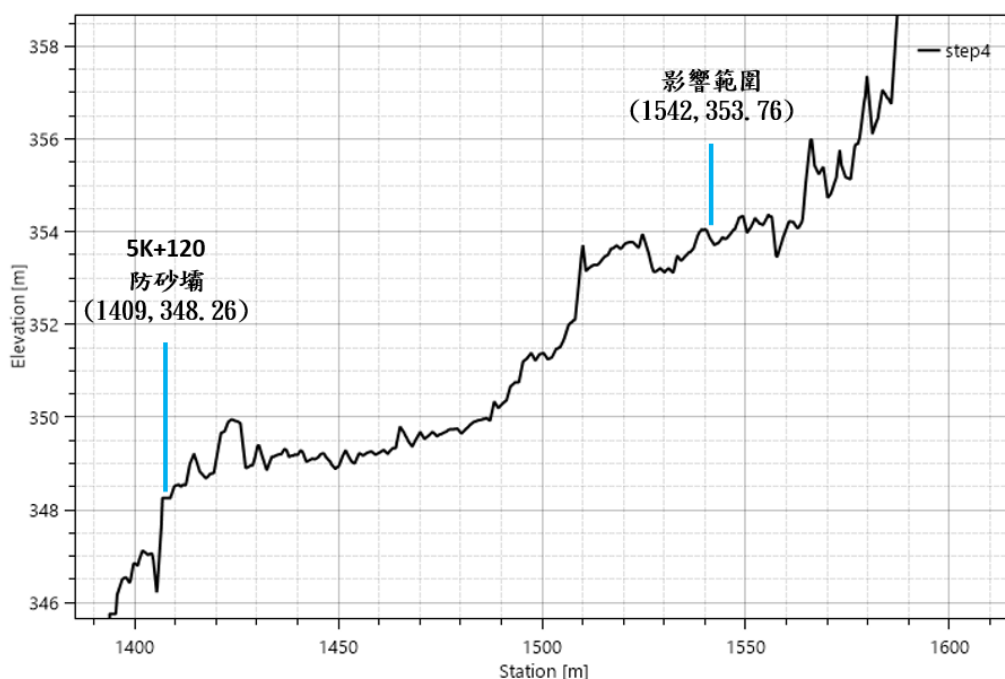


圖 4-137 Step3 地形之防砂壩及其影響範圍控制點高程

$$S(\%) = \frac{h}{L} = \frac{353.76 - 348.26}{133.33} \cong 0.041 \quad \text{式 4-13}$$

上述公式中， h 為兩點間高程差(m)， L 為兩點間之水平距離(m)， S 為防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度。計算過後得坡度為 4.1%，對應本階段之經營管理與操作矩陣縱軸屬於「低」。

以下游保全對象 5K+065 固床工下游刷坑來看，斷面平均高程上升至 341.66 公尺，平均沖刷深度約為 0.84 公尺，如下圖 4-138 所示，對應本階段之經營管理與操作矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」屬於「低」之範圍，經過前述之防砂壩調整策略步驟，成功將下游保全對象之沖刷深度改善至「低」。

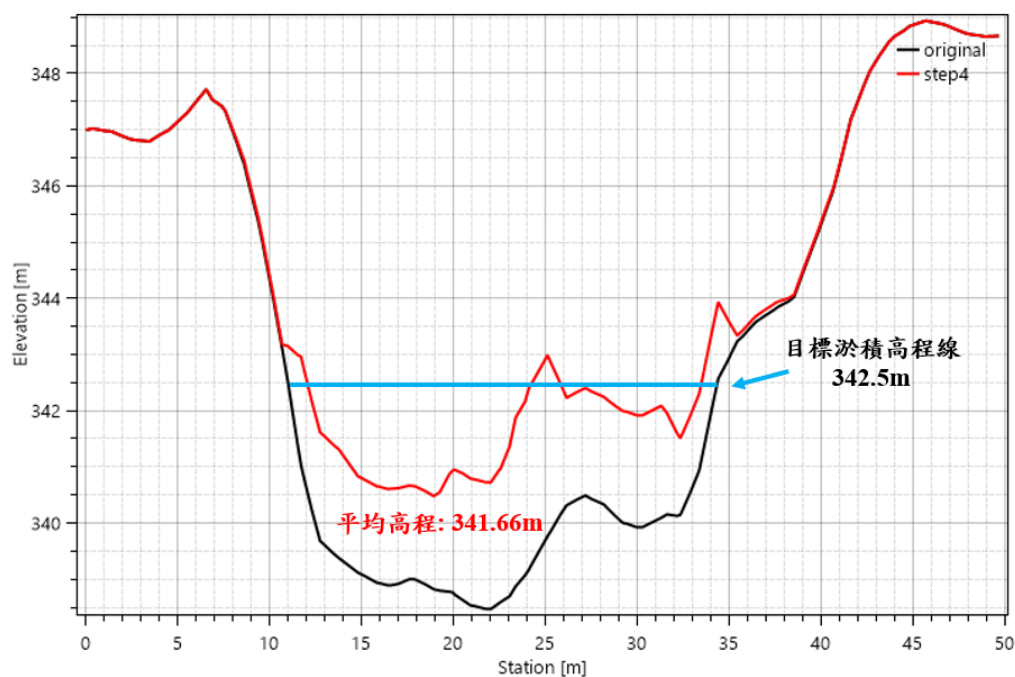


圖 4-138 Step3 地形之保全對象橫剖面圖

經過先前一系列的調整策略步驟，成功使原先下游保全對象之沖刷深度由高改善至低、防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度由中改善至低，本試區土砂最終回歸平衡穩定狀態。根據上述分析 Step4 地形之情況，以及對應本階段經營管理與操作矩陣，本步驟將以降低 3 支防砂壩預鑄塊，作為最終的調整策略，進行後續洪水模擬分析，如下表 4-37 中粗體字所示。

表 4-37 Step2 經營管理與操作矩陣策略選擇



經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

(2) 各重現期流量模擬

此節將展示本步驟進行各重現期洪水事件模擬之結果，包含 5 年重現期洪水、10 年重現期洪水、25 年重現期洪水、50 年重現期洪水、100 年重現期洪水。圖 4-139 為整體試區縱剖面圖，圖 4-140 為保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之橫剖面圖，表 4-38 為保全對象斷面各重現期洪水事件模擬之數據。以整體縱剖面來看，重現期距越大的洪水可以對上一步驟固床工周圍產生的沖刷有填補的作用，但整體各重現期洪水之模擬結果差異不大，顯示本試區土砂狀態逐漸穩定。以保全對象橫剖面來看，25 年以上重現期洪水事件會對河心位置造成些許沖刷，且各重現期皆會對靠近右岸之位置造成比較明顯的淤積現象，這也顯示本階段到最終步驟仍有充足土砂料源能夠提供至下游，並沒有因到調整後期土砂料源不足而產生嚴重沖刷的現象。

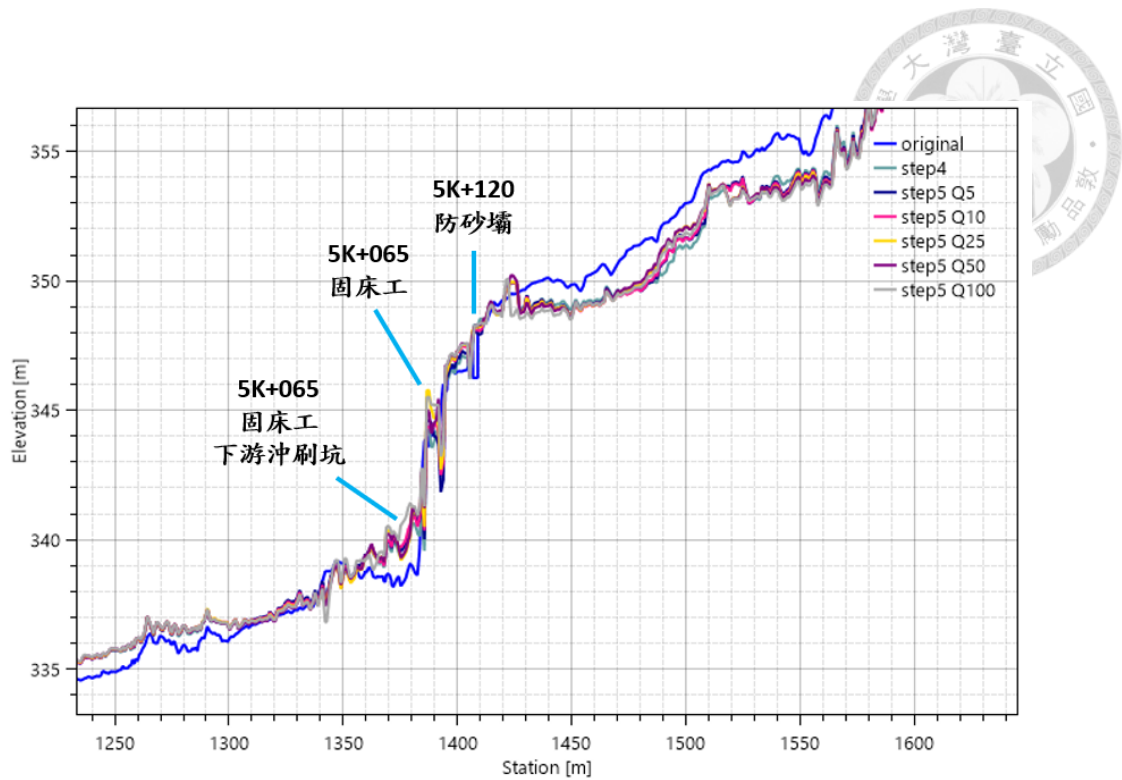


圖 4-139 Step4 各重現期流量模擬之縱剖面

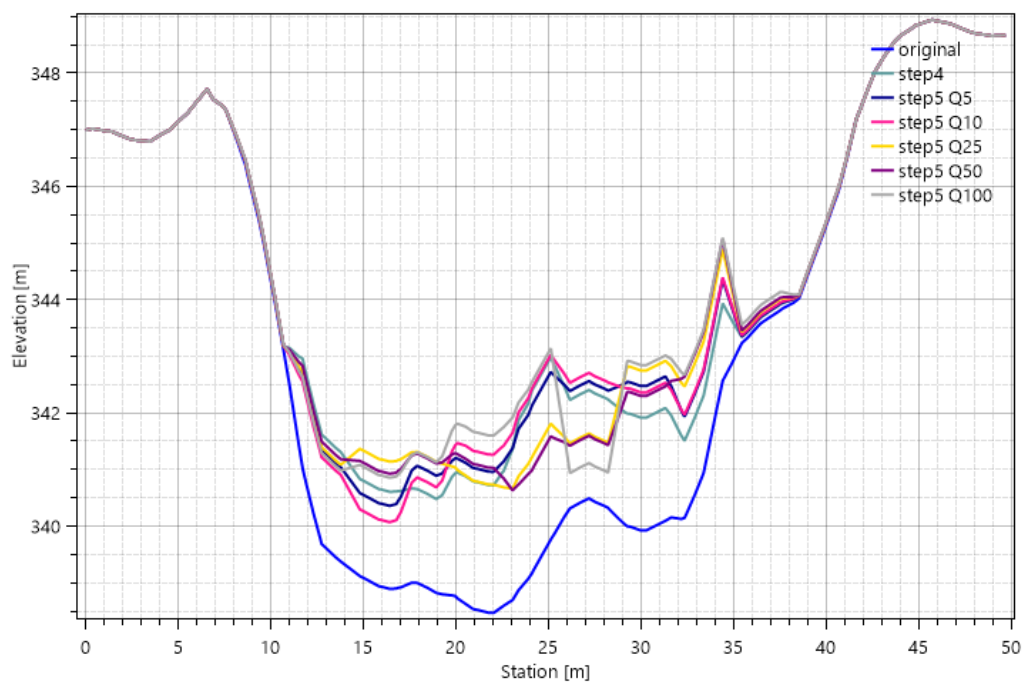


圖 4-140 Step4 各重現期流量模擬之保全對象橫剖面

表 4-38 保全對象斷面 Step5 各重現期洪水事件模擬數據

	土砂總量 (m ²)	本步驟之淤積量 (m ²)	平均高程 (m)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大沖刷 變化量(m)
Step4 模擬後地形	17088.06		341.66		
Q5	17091.19	+3.12	341.80	+0.56	-0.27
Q10	17091.54	+3.47	341.77	+0.57	-0.54
Q25	17090.86	+2.80	341.80	+0.96	-1.28
Q50	17089.96	+1.89	341.68	+1.13	-1.4
Q100	17096.09	+8.03	341.91	+1.16	-1.29

(3) 本步驟前後對比結果

本節將呈現最終步驟模擬結果，與前一步驟之地形進行對比分析，包含整體試區縱剖面、保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面，如下說明。

本步驟接續上一步之地形，進行最終降壩調整策略，調降 3 支防砂壩預鑄塊，如圖 4-141 中黑色線，並以 25 年重現期洪水事件模擬為例作說明，其結果如圖 4-141 中紅色線。可以觀察到經過最終步驟的調整操作，土砂有持續下移至下游區段，且填補了上一步驟造成之固床工周圍及下游的沖刷現象。

以主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，圖 4-142 為該處橫剖面對比圖，圖中黑色線為 Step4 地形，紅色線為本步驟模擬後地形。可以觀察到雖然河心位置有些許沖刷，但左岸及右岸都有穩定淤積的情況。此保全對象斷面淤積量較上一步地形增加了 2.8 平方公尺，平均高程由原先 341.66 公尺上升至 341.80 公尺，最終與目標淤積高程僅差距 0.7 公尺。

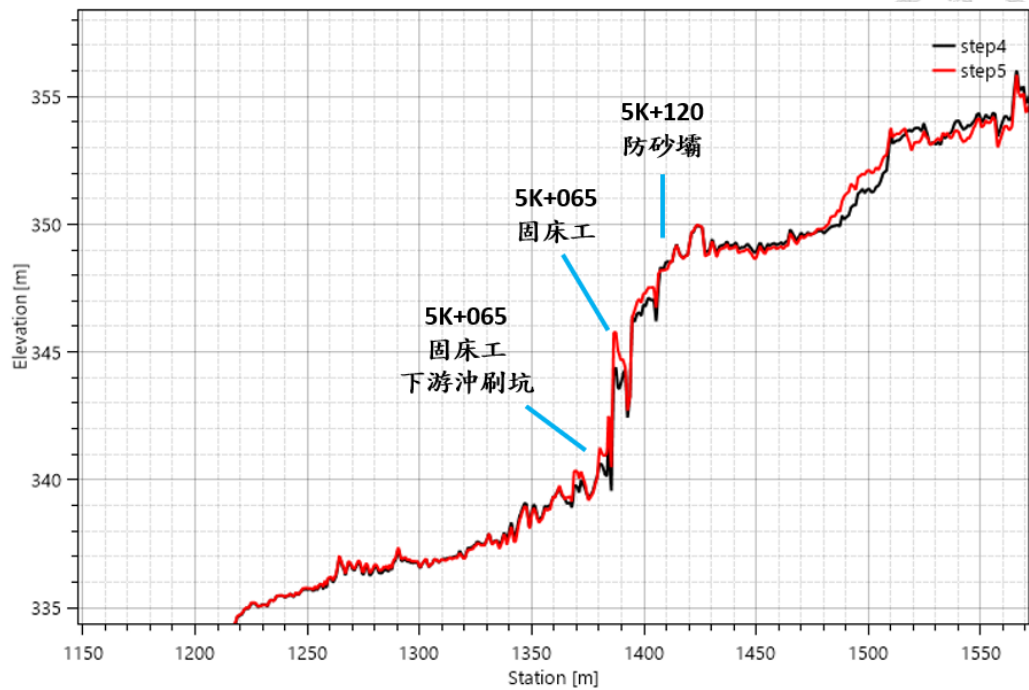


圖 4-141 Step6 地形與 Step7 地形之縱剖面對比

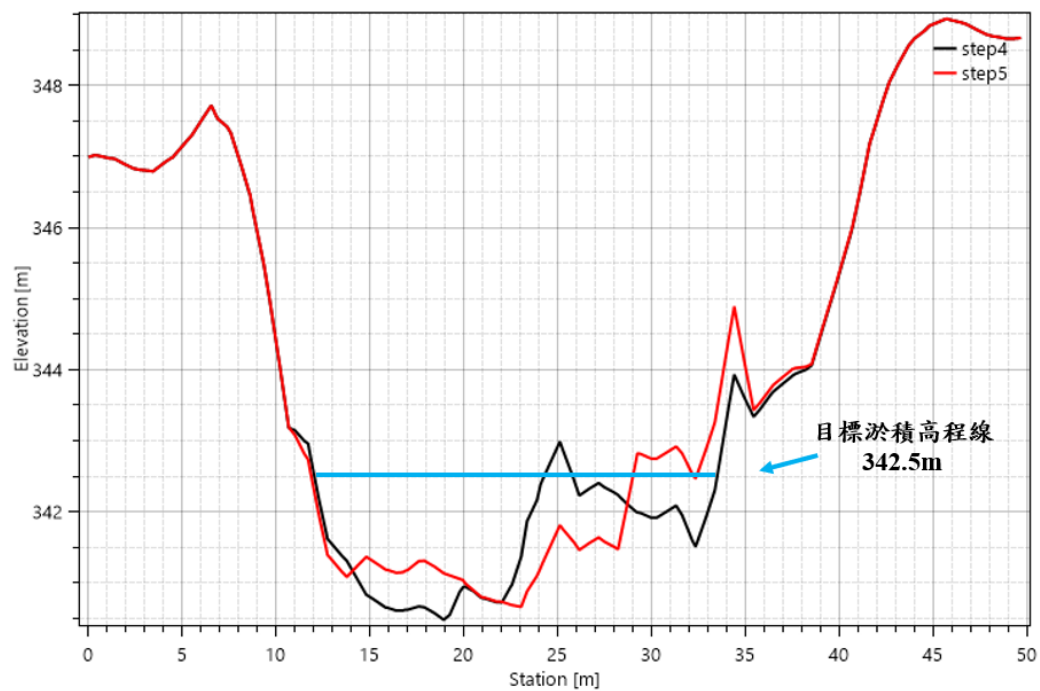


圖 4-142 Step6 與 Step7 地形之保全對象橫剖面對比



4.4.3 整體成效分析

1. 各步驟調整策略數據彙整

本節將針對各步驟調整策略模擬之數據進行彙整，其中包含主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑之各步驟調整後的平均高程、平均沖刷深度、總淤積量、與上一步之淤積相差量、與上一步操作之最大沖淤變化量等資料彙整，如下表 4-39 所示。本階段使用全新的防砂壩調整策略，移除將壩體全升之步驟，使每一步之策略皆以矩陣作判斷，同時調整時機之判定也將簡化。可以由表中數據觀察到，經過五步驟的調整，成功使上、下游土砂恢復穩定狀態，最終成果之保全對象橫斷面淤積高程為 341.8 公尺，與前一階段：最終階段模擬(保守型)之高程結果完全相同，同時簡化了操作步驟及調整時距，且調整後期「與上一步操作之最大沖淤變化量」逐漸達到穩定收斂之狀態。

表 4-39 各步驟調整 5K+065 固床工下游沖刷坑橫剖面資料

	平均高程 (m)	總淤積量 (m ²)	與上一步 操作之淤 積相差量 (m ²)	與上一步操作 之最大淤積 變化量(m)	與上一步操作 之最大沖刷 變化量(m)
原始地形	339.65	0			
Step1 Q10 (降 4 支)	340.60	21.98	+21.98	+2.13	-0
Step2 Q5 (降 3 支)	341.18	36.04	+14.06	+1.27	-0
Step3 Q5 (降 3 支)	341.51	43.40	+7.36	+0.71	-1.04
Step4 Q25 (降 4 支)	341.66	47.94	+4.54	+0.97	-1.28
Step5 Q25 (降 3 支)	341.80	50.74	+2.8	+0.96	-1.28

2. 本階段成果呈現

經過本階段一系列調整策略步驟，最終成果之縱剖面圖如下圖 4-143 所示，其中黑色線為原始地形，紅色線為經過五步驟調整後之地形。可以觀察到經過五步的防砂壩調整策略，成功使防砂壩上游溪床坡度降低，由原始地形的 5.4%改善至 3.8%，且原先沖刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑有明顯的土砂料源補注，沖刷深度由原始地形之 2.85 公尺降低至 0.7 公尺。但可以觀察到相較於前一階段模擬，本階段於固床工周圍會有較明顯的沖淤變化，推論為快速釋放上游土砂至下游會造成落差處會有較明顯的地形變化產生。詳細兩種最終階段模擬之比較說明，將呈現於下一小節。

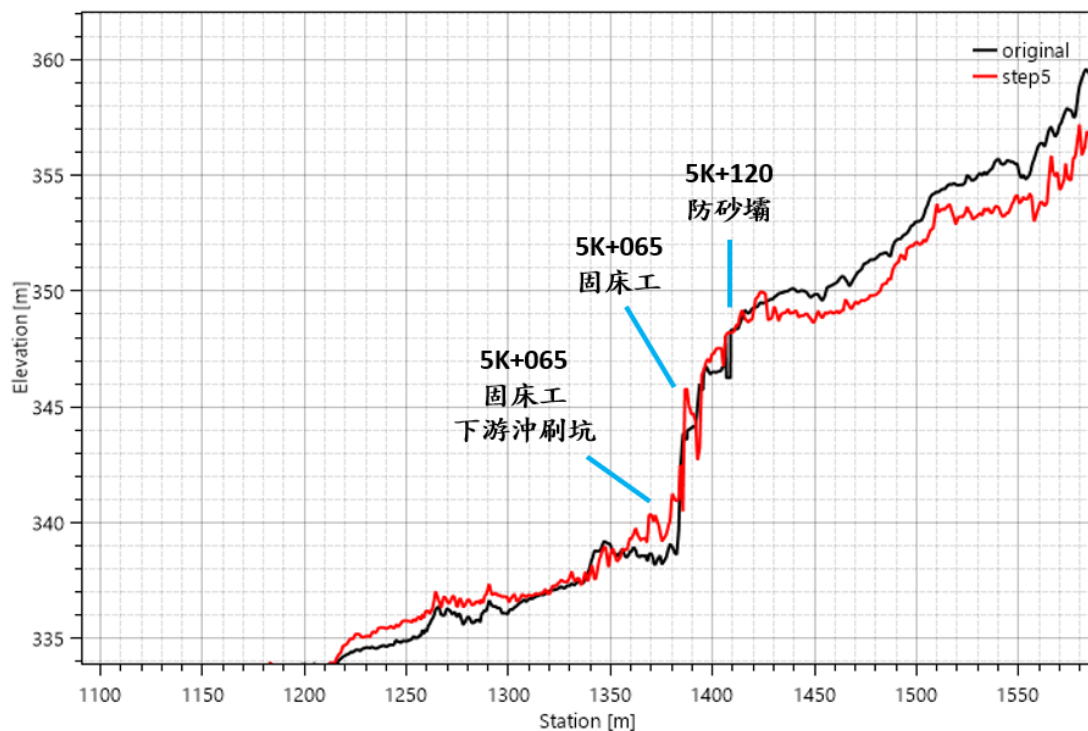


圖 4-143 原始地形與最終成果之縱剖面對比

以本研究之主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑為例，其最終成果與原始地形之橫剖面圖如下圖 4-144 所示，可以觀察到經過五步驟的壩體調整策略，原先嚴重沖刷的沖刷坑有明顯的回淤，平均高程由原本的 339.65 公尺上升至 341.8 公尺，且整體剖面並無明顯沖刷之處，顯示本階段調整策略具有良好的成效。

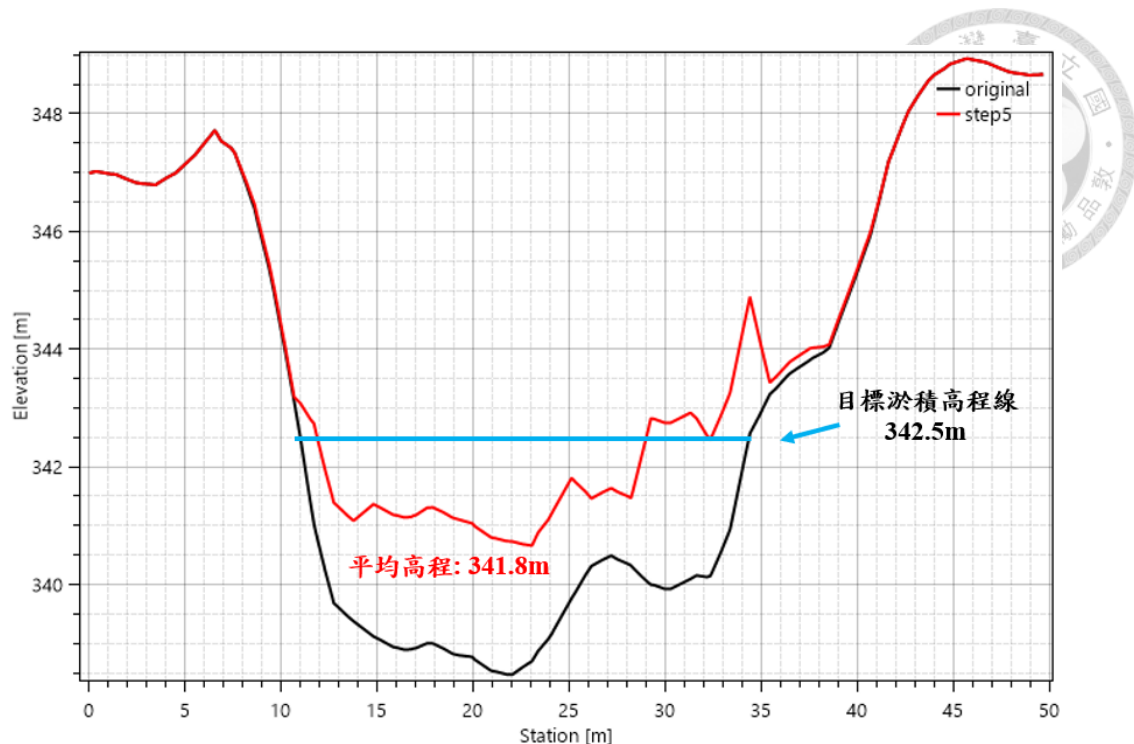


圖 4-144 原始地形與最終成果之保全對象橫剖面對比

本研究除了主要保全對象 5K+065 固床工下游沖刷坑外，也有為了確保升、降壩之操作策略不會對更下游區段造成危害而設立的 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，其經過一系列調整策略模擬之結果如下圖 4-145、圖 4-146。可以觀察到經本階段一系列的模擬，最終使 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆兩處保全對象，分別產生最大約 1.55 公尺、0.98 公尺的淤積，較上一階段模擬來得低，同時顯示整體調整策略並不會對壩體更下游之區段造成過量土砂危害，且同時提供土砂料源補注，降低擋土牆發生傾倒及掏刷的風險。

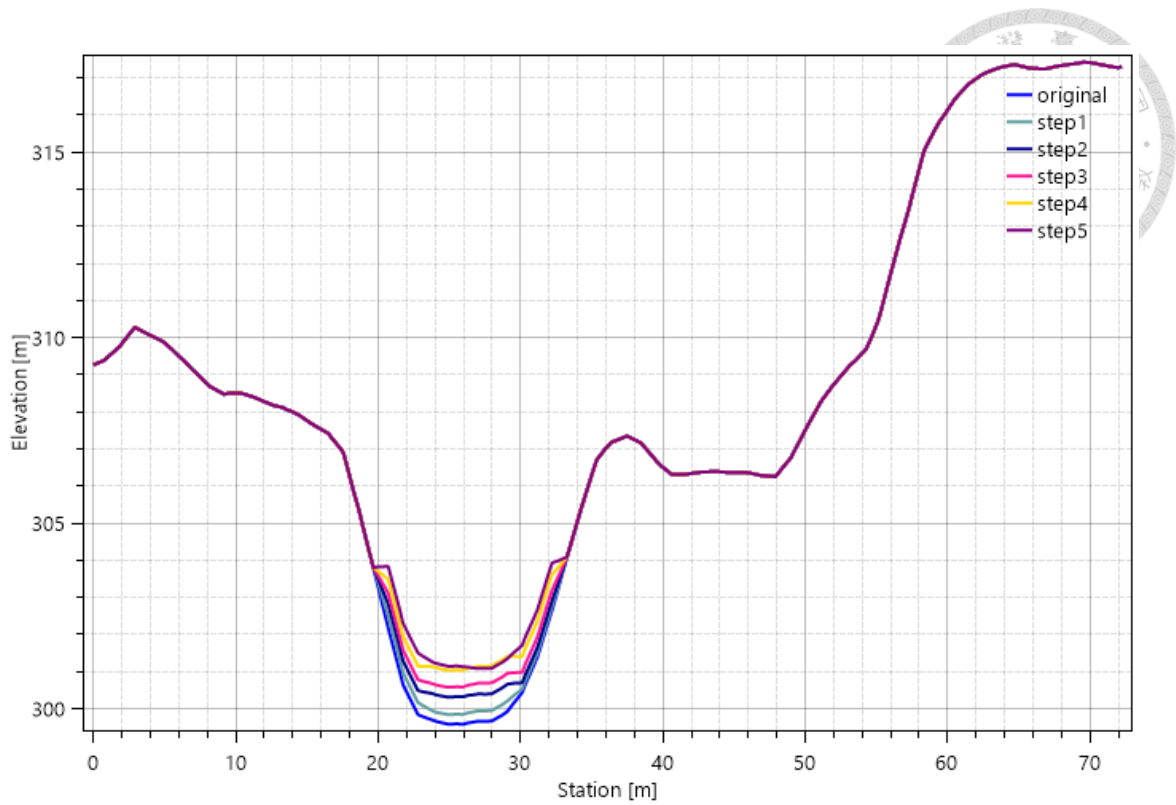


圖 4-145 4K+350 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

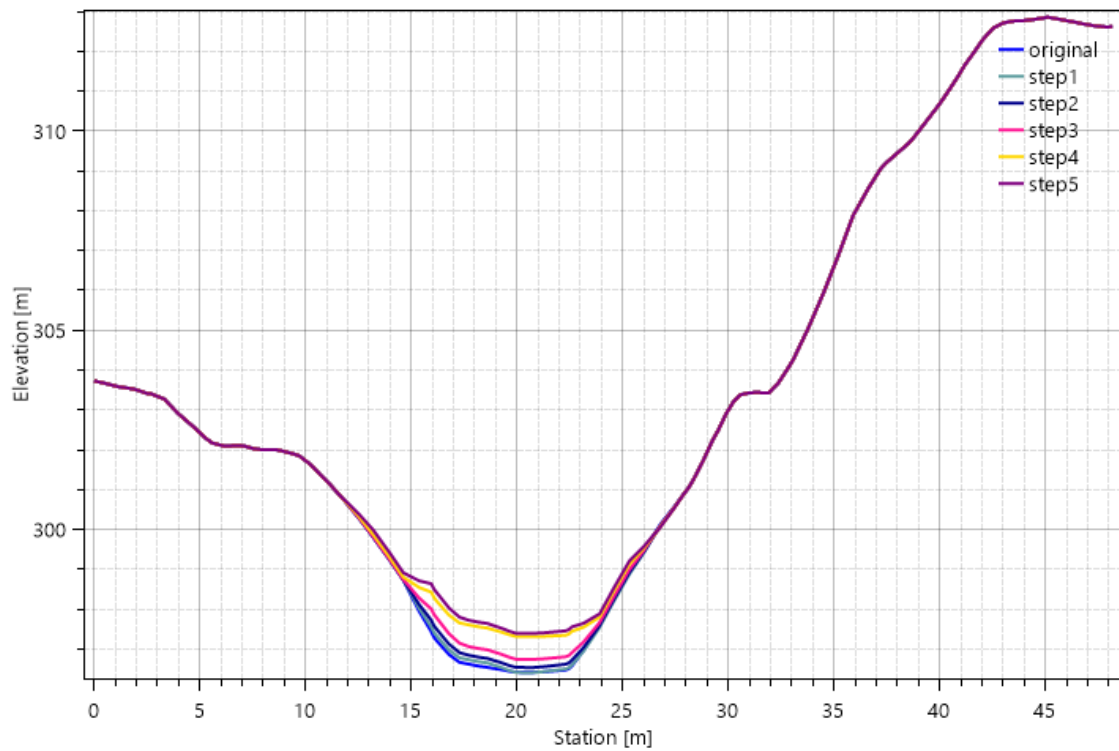


圖 4-146 4K+200 擋土牆之各步驟模擬結果橫剖面圖

4.4.4 小結

經過本階段模擬經驗，證實了不須將防砂壩進行全升動作之想法，可以快速解決防砂壩上游容易淤滿、下游嚴重沖刷之問題，提供使用者多一種調整策略之選擇，可以依照不同現地狀況以及上、下游土砂狀態選擇適合的防砂壩調整策略。下一節將針對最終階段模擬(保守型)、最終階段模擬(成效型)進行詳細比較兩策略之優、缺點及建議適用條件，請見 4.5 最終策略之保守型與成效型比較節。

4.5 最終策略之保守型與成效型比較

經過本研究以廊仔溪為案例，提出之經營管理與操作矩陣如下表 4-40，使用者可以根據不同溪流的現地情況，參考本研究並制定出該溪流專屬的經營管理與操作矩陣。為了使矩陣可以更廣泛適用於各種情況的溪流，本研究最終將提出兩套防砂壩經營管理與操作策略，分別為最終策略保守型、最終策略成效型，提供使用者可以針對不同現地狀況以及上、下游土砂狀態選擇適合的防砂壩調整策略，以下將分述說明兩者操作流程、優缺點及建議適用條件：

表 4-40 廊仔溪經營管理與操作矩陣

經營管理與操作矩陣		5K+065 固床工下游沖刷坑之沖刷深度		
		高 沖刷深度: > 1.9m (高程: < 340.6)	中 沖刷深度: 0.95~1.9m (高程: 340.6~341.55)	低 沖刷深度: < 0.95m (高程: > 341.55)
上游影響範圍 內之淤砂坡度	低 (<5%)	調降 5 支預鑄塊	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊
	中 (5%~6%)	調降 4 支預鑄塊	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊
	高 (>6%)	調降 3 支預鑄塊	調降 2 支預鑄塊	調降 1 支預鑄塊

4.5.1 最終策略保守型

本調整策略為具有明確的升、降壩步驟，降壩操作為根據當下之上、下游現地情況對照矩陣選擇對應之調降方針。升壩步驟為將壩體預鑄塊升至全滿，使防砂壩發揮攔阻土砂之功效，本調整策略各步驟之調整時機判定流程圖如圖 4-65。

1. 優點

- (1) 本策略由於壩體升滿期間較長，能夠承受洪水事件的能力較高，因此對於下游保全對象之保護能力較強。
- (2) 本策略具有明確之升、降壩操作步驟，能穩定調整釋放上游土砂至下游，因此較不易出現過於明顯的地形沖淤變化。

2. 缺點

- (1) 由於本策略完全改善溪流土砂狀況所需之時間較長，需長期監測溪流洪水、土砂狀況。
- (2) 本策略之升、降壩操作步驟較多，因此較耗費工程經費及人力成本。

3. 建議適用條件

當防砂壩下游鄰近生命財產之保全對象，或上游邊坡具有不穩定潛勢時，為降低洪水發生嚴重土砂災害之風險，建議以最終策略保守型作為調整策略，其可以最大化防砂壩攔阻土砂之功效，同時解決上游淤積過量、下游沖刷嚴重之問題，使溪流恢復平衡穩定之狀態。

4.5.2 最終策略成效型

本調整策略並無明確的升、降壩步驟，每一步皆根據當下的上、下游現地情況對照矩陣選擇對應之調降方針，本調整策略各步驟之調整時機判定流程圖如圖4-111。



1. 優點:

- (1) 本策略完全改善溪流土砂狀況所需之時間較短，可以快速解決上游過度淤積、下游嚴重沖刷之問題。
- (2) 由於本策略之升、降壩操作步驟較少，可大量節省工程經費、人力成本。

2. 缺點:

- (1) 本策略相較於保守型策略，由於並沒有明確之升壩步驟，因此承受洪水事件的能力較低。
- (2) 本策略縮短了整體調整時距與步驟，快速使上游土砂運移至下游，可能會造成較明顯的地形沖淤變化。

3. 建議適用條件

當防砂壩下游鄰近區段僅存在構造物保全對象，並無生命財產保全對象，且須盡快處理壩體上游淤積嚴重、下游沖刷劇烈之問題時，建議以最終策略成效型作為調整策略，使防砂壩可以在確保一定的安全前提下，有效率地解決土砂沖淤不平衡之問題，使溪流快速恢復穩定狀態。

兩套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略之詳細比較表如下表 4-41。使用者可以根據優、缺點分析及適用條件選擇合適的防砂壩調整策略配合矩陣進行應用。

表 4-41 最終策略保守型與最終策略成效型比較表

	最終策略保守型	最終策略成效型
優點	1. 壩體升滿期間較長，能夠承受洪水事件的能力較高，因此對於下游保全對象之保護能力較強。 2. 具有明確之升、降壩操作步驟，能穩定調整釋放上游土砂至下游，因此較不易出現過於明顯的地形沖淤變化。	1. 完全改善溪流土砂狀況所需之時間較短，可以快速解決上游過度淤積、下游嚴重沖刷之問題。 2. 升、降壩操作步驟較少，可大量節省工程經費、人力成本。
缺點	1. 完全改善溪流土砂狀況所需之時間較長，需長期監測溪流洪水、土砂狀況。 2. 升、降壩操作步驟多，因此較耗費工程經費及人力成本。	1. 沒有明確之升壩步驟，因此承受洪水事件的能力較低。 2. 縮短了整體調整時距與步驟，快速使上游土砂運移至下游，可能會造成較明顯的地形沖淤變化。
適用條件	當防砂壩下游鄰近生命財產之保全對象時，或上游邊坡具有不穩定潛勢時，可以最大化防砂壩攔阻土砂之功效，同時解決上游淤積過量、下游沖刷嚴重之問題，使溪流恢復平衡穩定之狀態。	當防砂壩下游鄰近區段僅存在構造物保全對象，並無生命財產保全對象，且須盡快處理壩體上游淤積嚴重、下游沖刷劇烈之問題時。

第五章、結論與建議



5.1 結論

有鑑於先前調整型防砂壩之相關研究多聚焦於壩體調降與開口型式對下游沖淤變化的影響，缺乏完整的調整型防砂壩經營管理與操作準則。因此本研究以 HEC-RAS 2D 水理輸砂數值模型作為工具，並透過四階段的模擬試驗，最終提出兩套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，分別為最終策略保守型與最終策略成效型。目的在於提供使用者完整的調整型防砂壩經營管理與操作方針，確保保全對象安全之前提下，能夠解決上游淤積過量、下游沖刷嚴重之問題，使溪流恢復平衡穩定之狀態，同時延長防砂壩之使用年限。本節將根據最終結果分析，歸納出以下結論：

1. 本研究提出完整的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣制定規則，使用者可以依據防砂壩上游影響範圍內之「歷史最陡溪床坡度」、「計畫淤砂坡度」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍，即可制定出矩陣縱軸「防砂壩上游影響範圍內之淤砂坡度」。並依據選定之保全對象的「最嚴重沖刷時溪床高程」與「預期溪床高程」此二值作為上下界，將其差值三等分為高、中、低三個範圍，即可制定出矩陣橫軸「下游保全對象之沖刷深度」。通過以上規則，使用者可以設計出專屬的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣。
2. 本研究最終提出之兩套完整的調整型防砂壩經營管理與操作策略，其中最終策略保守型適合用於防砂壩下游鄰近生命財產之保全對象，或上游邊坡具有不穩定潛勢之溪流。最終策略成效型則適合用於防砂壩下游鄰近區段僅存在構造物保全對象，並無生命財產保全對象，且須盡快處理壩體上游淤積嚴重、下游沖刷劇烈之問題之溪流。使用者可以針對不同現地狀況以及上、下游土砂狀態選擇適合的防砂壩調整策略配合矩陣進行應用。
3. 本研究最終提出之最終策略保守型與最終策略成效型兩套防砂壩調整策略，分別經歷過七次及五次之洪水模擬試驗，皆不會對壩體下游固床工產生過度沖淤現象，且根據更下游的保全對象 4K+350 擋土牆及 4K+200 擋土牆之模擬結果，最終策略保守型之結果分別產生最大 1.89 公尺及 1.26 公尺的淤積，另，最終策略成效型之結果分別產生最大 1.55 公尺及 0.98 公尺的淤積，此結

果顯示本研究提出之兩種最終策略皆不會對整體河段造成過度淤積及冲刷的現象，同時適量的補注土砂至下游區段，避免擋土牆發生掏刷、傾倒之危害。

4. 本研究以廊仔溪為例，使用最終策略保守型進行防砂壩調整策略，經過七步驟之升、降壩操作，成功使防砂壩上游溪床坡度降低，由原始地形的 5.4% 改善至 3.5%，且原先冲刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑有明顯的土砂料源補注，全斷面淤積總量共增加 54.56 平方公尺，河道平均冲刷深度由原始地形之 2.85 公尺降低至 0.7 公尺。另，使用最終策略成效型進行防砂壩調整策略，共進行五步驟之壩體調整操作，成功使防砂壩上游溪床坡度由原先 5.4% 改善至 3.8%，同時原先冲刷嚴重的保全對象 5K+065 固床工下游冲刷坑也有明顯改善，全斷面淤積總量共增加 50.74 平方公尺，其河道平均冲刷深度由原始地形之 2.85 公尺同樣降低至 0.7 公尺。顯示本研究提出之防砂壩經營管理與調整策略具有一定之參考價值。
5. 本研究以廊仔溪為例進行最終兩種調整策略模擬，其中使用最終策略保守型，在達到上、下游土砂沖淤平衡，解決壩體上游過度淤積、下游嚴重冲刷之問題的同時，共抵禦了七次洪水事件，分別為:10 年、5 年、25 年、5 年、100 年、25 年、25 年重現期距之洪水事件，若根據重現期距之定義為大於或等於該降雨量所需要的平均年數，本調整策略有效地延長了防砂壩之壽命，使其平均使用年限達 195 年。另，使用最終策略成效型進行模擬試驗，在達到溪流土砂恢復穩定狀態並解決上、下游沖淤問題的同時，一共抵禦了五次洪水事件，分別為:10 年、5 年、5 年、25 年、25 年重現期距之洪水事件，本調整策略有效地延長了防砂壩之壽命，使其平均使用年限達 70 年。

5.2 建議

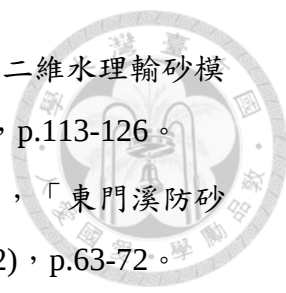
本研究通過一系列之模擬試驗，以台中市廬仔溪為案例，制定出完整的調整型防砂壩經營管理與操作矩陣之應用規則及防砂壩調整策略，並期望於未來更完整地應用至不同現地狀況以及上、下游土砂狀態之溪流。本節將針對研究過程及最終模擬結果，提供未來之相關研究建議如下：

1. 本研究目標設施廬仔溪 5K+120 調整型防砂壩，為具有三處調整開口之透過式調整型防砂壩，其中每處開口具有五塊預鑄混凝土調整塊，且本研究最終提出之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣，為了能符合所有開口型態之調整型防砂壩，因此調整策略方針設定為降低整體預鑄塊百分比，以本試區調降 80% 預鑄塊之策略方針為例，即為各開口皆降低 4 支預鑄塊，建議未來若有相關研究，可以針對各處開口進行不同調降策略分析，觀察其對流心、河道沖淤、邊坡影響之變化。
2. 本研究使用三角形單位歷線法作為各重現期洪水流量歷線推估，若未來本研究之防砂壩調整策略能真實應用於廬仔溪，則可以使用調整壩體後發生之洪水事件的流量歷線，進行數值模型模擬分析，驗證實地情況與數值模型上之誤差。
3. 本研究所提出之調整型防砂壩經營管理與操作矩陣與兩種最終策略，目的在於可以應用至各地不同溪流土砂狀況之調整型防砂壩，本研究目前以廬仔溪作為研究案例，建議未來若有相關研究可以應用至其他河川溪流。
4. 本研究之數值模型採用固定之入流口溪床坡度、出流口溪床坡度及土砂粒徑分布曲線，然而自然溪流環境具有多變動性，各式參數會隨著降雨、地形沖淤、長期夯實而有所變動，建議未來若有相關研究，可以加入更多考量參數，取得更貼近真實溪流現況之模擬結果。

參考文獻



1. 王楨智(2022),「氣泡與水泡工法對於減緩壩體下游沖刷之探討」,國立臺灣大學碩士論文。
2. 行政院農業委員會水土保持局(2017),「水土保持手冊」。
3. 行政院農業委員會水土保持局(2019),「水土保持單元叢書-非透過性防砂壩」。
4. 行政院農業委員會水土保持局(2019),「水土保持單元叢書-透過性防砂壩」。
5. 行政院農業委員會水土保持局(2021),「110年臺中分局轄區重要治理區土砂高變動性調查評估及治理策略研擬」。
6. 行政院農業委員會水土保持局臺中分局(2020),「廊仔溪中上游集水區(廊仔坑橋以上)整體治理調查規劃」。
7. 吳瑞鵬、黃爾強、陳柏宏、藍尹圻(2023),「防砂壩改善調適策略對流域環境影響評估-以眉溪集水區為例」,中華水土保持學報,53(1),p.3135-3154。
8. 林彥慈(2020),「拱型固床工之沖刷機制探討」,國立臺灣大學碩士論文。
9. 林家興、吳振佑、蔡元融、陳振宇(2019),「HEC-RAS 2D 於天然壩潰決模擬評估」,中華防災學刊,11(2),p.137-150。
10. 夏佳宏(2023),「透過式調整型防砂壩經營管理及土砂密實度之縮尺試驗研究」,國立臺灣大學碩士論文。
11. 陳思廷(2008),「不同輸砂公式對河道沖淤影響之研究」,國立交通大學碩士論文。
12. 陳瑞宗(2003),「結合 HEC-RAS 模式與 GIS 模擬洪災之研究-以筏子溪為例」,國立中興大學碩士論文。
13. 陳樹群、安軒霈、國領ひろし、林永欣(2016),「野溪高土砂災害之模組化防砂壩管理」,中華水土保持學報,47(3),p.111-121。
14. 經濟部水利署第三河川局(2020),「烏溪水系逕流分擔評估規劃(1/2)」。
15. 葉克家(2011),「流域水情模擬與預報模式精度與效能提升之研究-總計畫暨子計畫:河道動床沖淤對防洪水位之影響(I)」。

- 
16. 詹勳全、邱亮鈞、彭振捷、張承遠、郭炳榮(2017)，「應用二維水理輸砂模式評估野溪清疏成效之研究」，中華水土保持學報，48(3)，p.113-126。
 17. 劉宜君、許詠晴、邱渝方、李正鈞、廖雯慧、陳樹群(2019)，「東門溪防砂壩調降對河床沖淤變化之影響」，中華水土保持學報，50(2)，p.63-72。
 18. 鄭雅臨(2022)，「可調式防砂壩縱材間距對土石流及漂流木之攔阻效率」，國立中興大學碩士論文。
 19. 賴桂文(2016)，「HEC-RAS 水理模式 2D 模組介紹及應用」。
 20. 闕帝旺(2013)，「野溪淤積土砂清疏之數值模擬-以來社溪為例」，逢甲大學碩士論文。
 21. 蘇語乾(2021)，「應用 UAV 空拍技術及 HEC-RAS 2D 水理模式於河川高灘地植生管理」，國立臺灣大學碩士論文。
 22. 中谷加奈, 井元大希, 里深好文, & 水山高久. (2011). 数値シミュレーションを用いたシャッター付砂防堰堤の土砂調節効果の検討. 砂防学会誌, 63(6), 43-51.
 23. 井元大希, 中谷加奈, 水山高久, & 里深好文. (2009). シャッター付砂防えん堤による土砂調節効果の検討. 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集, 300-301.
 24. 梅津健一, & 戸松修. (2007). 改修後の多自然型溪流保全工における河床礫の評価. 砂防学会誌, 60(3), 3-10.
 25. 奥山悠木, & 水山高久. (2011). シャッター砂防堰堤の適用条件に関する考察. 砂防学会誌, 64(2), 24-26.
 26. Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. US government printing office.
 27. Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS river analysis system 2D modeling user's manual. US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center, 1-171.
 28. Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0. US Army Corps of Engineers—Hydrologic Engineering Center, 547.
 29. Das, B., & Senthil Vadivel, T. (2022). Sediment Transport Modelling in Stream Flow by HEC-RAS Model—A State-of-the-Art. In *Recent Advances in Civil Engineering: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable*

Construction Technologies and Advancements in Civil Engineering (ScTACE 2021) (pp. 481-491). Singapore: Springer Nature Singapore.

30. Engelund, F., & Fredsøe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Hydrology Research*, 7(5), 293-306.
31. Hussain, K., & Shahab, M. (2020). Sustainable sediment management in a reservoir through flushing using HEC-RAS model: case study of Thakot Hydropower Project (D-3) on the Indus river. *Water Supply*, 20(2), 448-458.
32. Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR.
33. Mikami, K., Koshino, M., Okui, J., Nagayama, T., Tagata, S., Miyamoto, K., ... & Mizuyama, T. (2014). Install of a movable shutter in Myo-Jyu sabo dam and longitudinal bedload monitoring in Jyo-Gan-Ji River. In *Proceedings of the Interpraevent* (pp. 25-28).
34. Mohammad, M. E., Al-Ansari, N., Issa, I. E., & Knutsson, S. (2016). Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 21(3), 235-244.
35. Ulfiana, D., Wulandari, D. A., & Parmantoro, P. N. (2020, March). Effect of change of channel width in the downstream of the check dam on controlling sedimentation in Mrica Reservoir. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 771, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
36. Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(10), 1431-1456.
37. Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(11), 1613-1641.
38. Van Rijn, L. C., & Kroon, A. (1993). Sediment transport by currents and waves. In *Coastal Engineering 1992* (pp. 2613-2628).
39. Wu, W., & Wang, S. S. (2007). One-dimensional modeling of dam-break flow over movable beds. *Journal of hydraulic engineering*, 133(1), 48-58.
40. Wu, W., Wang, S. S., & Jia, Y. (2000). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of hydraulic research*, 38(6), 427-434.