

鼎型塊織布橋基保護工法試驗場址二維數模建置及觀測評估

胡啟文¹ 賴瑞應² 黃烟宏³ 吳松旺⁴ 林哲詠⁵

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心研究員兼科長

³交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

⁴交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段段長

⁵交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段幫工程司

摘要

近年在颱風作用下，跨河橋梁河道深槽區橋墩基礎常有裸露之情況發生，橋梁管理機關採用鼎型塊排置工法來保護橋墩基礎，雖頗有成效，然於河水長期沖刷下，鼎型塊仍有流失破壞的狀況發生，導致橋梁管理機關於每年汛期過後，仍需針對流失的鼎型塊及裸露之橋基進行整理維護，以確保橋墩基礎的安全。爰此，本研究針對交通部運輸研究所(以下簡稱本所)過去研擬之地工織布結合鼎型塊保護工法(以下簡稱本工法)，選擇以大甲溪下游國道 3 號大甲溪橋為研究對象，規劃進行室內水工模型及現地沖刷試驗，持續觀測試驗橋址鼎型塊的穩定性，藉以評估保護成效，並另以 CCHE2D 建置大甲溪流域石岡壩至河口段之二維水理模型，做為後續年度於現地保護工三維局部沖刷數值模擬時所需之水理資料，以合理模擬分析及評估現地保護工之成效。

113 年度凱米颱風帶來豐沛之降雨量，使石岡壩放流量達本研究自 110 年起觀測以來之最(5 年重現期洪水量)，而進一步驗證本工法之耐洪性及更新保護成效數據，在試驗組(有鋪設織布)之損壞比約 4%，對照組(未鋪設織布)之損壞比約 38%，益本比(BCR)約達 3.36。以目前 110~113 年 4 年期觀測之結果，顯示本工法可提升保護工之耐洪性，可達延長保護橋基壽命，減少維修頻率及維護經費。

一、前言

臺灣河川多屬坡陡流急，洪水期間，橋墩或橋墩基礎附近河床受到劇烈的沖刷，常導致橋梁崩塌斷裂，甚而造成交通中斷。例如，89 年 8 月 27 日碧利斯颱風使高屏溪之高屏大橋第 22 號橋墩基礎受側向洪流淘空下陷，導致橋面塌落，造成 22 人輕重傷及交通中斷數月事故；90 年 9 月 17 日納莉颱風造成八堵鐵路橋、筏子溪鐵路橋損壞，南崁溪坎下橋、田底寮橋斷橋及大漢溪武嶺橋下陷等災情；97 年 9 月 14 日辛樂克颱風造成后豐橋斷橋事件，致兩輛汽車墜落大甲溪；98 年 8 月 7 日莫拉克颱風帶來之豪雨，造成中南部約 31 座橋梁沖毀。由以上案例顯示，洪流沖刷導致橋墩基礎毀壞淘空，實為橋梁破壞之主因。

橋梁管理機關經常於橋基周圍排置鼎型塊方式來延緩冲刷，藉以保護橋墩基礎，然於河水長期冲刷下，仍有鼎型塊傾倒或流失破壞的狀況發生，致需編列維護經費進行整理。為改善此一問題，本所參考港灣構造物之沉箱式碼頭設計，以地工織布避免背填粒料流失之構想，研擬於鼎型塊下增加一層地工織布之方式來減緩冲刷(圖 1)，藉以穩固鼎型塊基底粒料，減少鼎型塊流失之問題，提升保護橋基之成效及耐久性，達保護工延壽並節省公帑之效果。

除透過現場試驗方式來驗證外，本研究嘗試以 CCHE2D 建置試驗場址二維數值水力分析模型，以石岡壩放流量為主要輸入邊界，出海口為輸出邊界，進行大甲溪石岡壩至河口段之水力演算，並以台 1 線大甲溪橋水位站資料進行驗證，以做為後續試驗場址局部冲刷數值模擬使用及分析之依據，合理模擬分析及評估現地保護工之成效。

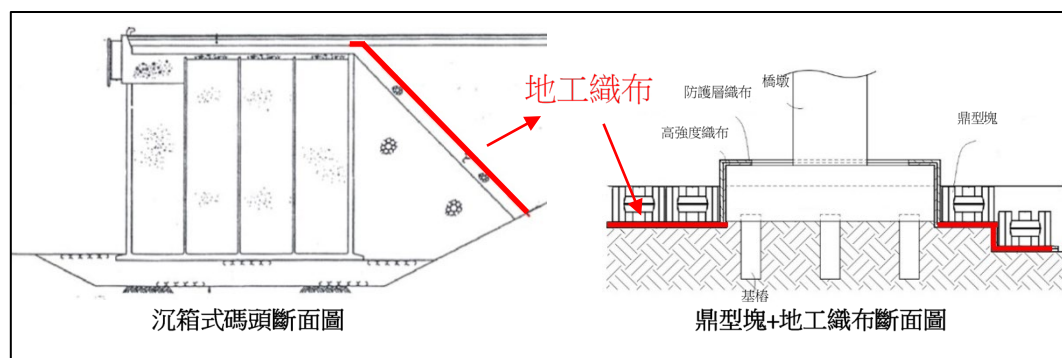


圖 1 本工法構想來源

二、文獻回顧

本所於 100 年執行「跨河橋梁保護工法之研究」^[5]，透過數值模擬分析及渠槽試驗，瞭解橋墩及河道保護工法受水流冲刷破壞成因及規模程度，進而透過水工模型試驗提出橋河共治區橋墩保護工法及其施設方式之建議。整體工作執行內容係由國內、外橋梁保護工法相關研究文獻及橋墩冲刷理論蒐集分析出發，並執行砂質河道橋墩冲刷及石塊衝擊力試驗，深入探討橋河共治區水流流動過程與橋墩冲刷之互制現象，最後以水工模型試驗輔以數值模擬加以驗證，提出橋河共治區橋墩保護工法及其施設方式之建議，做為相關單位設計橋墩保護工法參考。

該研究數值模擬係採用美國國家計算水科學中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)發展的二維河川水力演算模式 CCHE2D 做為數值模式分析工具。其檢定與驗證的作法係以 95 年的 0609 豪雨做為檢定，98 年莫拉克颱風做為驗證(如圖 2)。進行河道數值模擬需要設定邊界條件，邊界條件又可分為上游邊界與下游邊界：上游邊界條件係給定流量歷線，下游邊界條件係給定水位歷線。為了比對模擬的水位是否與實際水位一致，通常也必須要蒐集特定斷面的水位紀錄。颱風事件的流量可採用石岡壩實際放流量做為上游邊界的流量設定，而大甲溪石岡壩到河口之間，有完整水位資料紀錄者為台 1 線大甲溪橋站，藉由該實測水位與模擬的水位進行比對，以分析模擬結果與實際情況的吻合程度。

依前述文獻應用案例，可知 CCHE2D 使用於河道數值水力分析，可獲得穩定合理的模擬結果或趨勢，適合做為本研究分析工具使用。

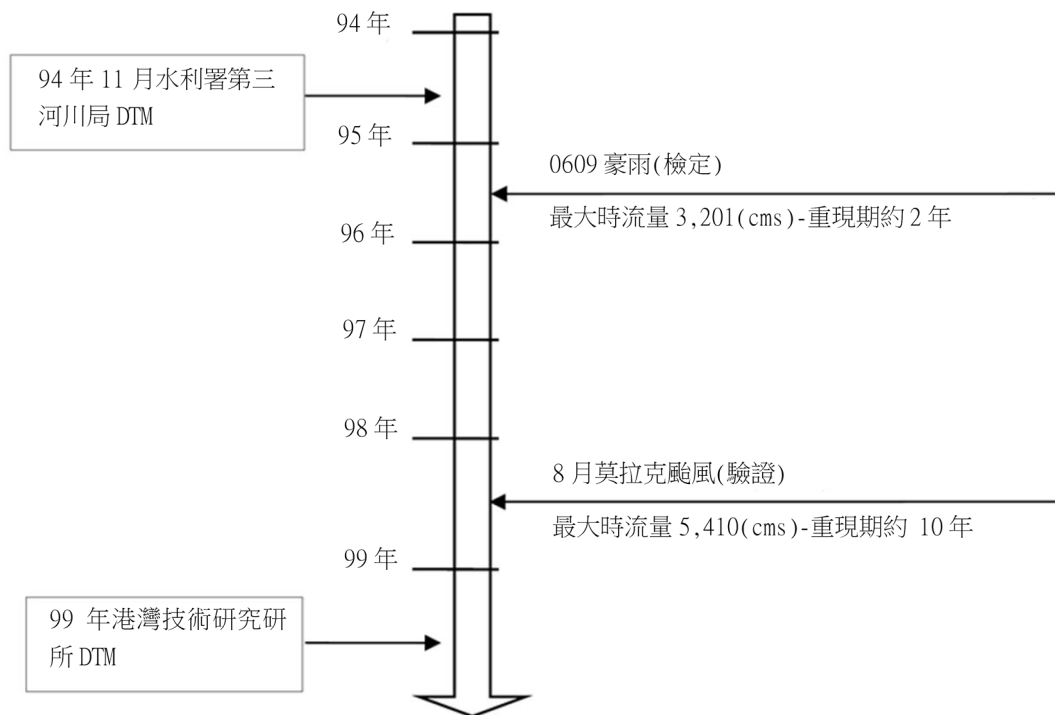


圖 2 檢定與驗證事件選取圖

三、研究方法

3.1 數值分析軟體

本研究採用美國國家計算水科學及工程中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)所開發之水平二維明渠流動床模式 CCHE2D，其模式包含 Mesh Generator 與 CCHE2D 主程式兩部分。Mesh Generator 功能為形成模擬河道的數值網格(Numerical Mesh)為主，包含多種整合性的網格形成方法。CCHE2D 主程式功能為設定河道模擬之基本資料(模擬時間、計算時間間距、紀錄時間間距)、起始條件、上下游邊界條件、水力條件參數、泥沙特性、粒徑分布曲線及輸砂模式等，並納入河道數值地形網格資料後執行模擬，最後模擬結果以二維分布的方式展現。

3.1.1 二維數值模型建置條件與方式

二維水力模式模擬方法流程如圖 3 所示。將所需要的河床地形資料、上下游邊界條件、水力及泥沙參數分布建檔，輸入 CCHE2D 中，調整曼寧粗糙係數 n 值，對河道水力現象及輸砂進行模擬。將模擬結果與實測的橋梁水位相比較，於合理範圍內調整參數至與實測結果相符，再以此率定之參數進行其他颱風事件模擬及驗證。

二維數值係以石岡壩至大甲溪河口區段做為模擬範圍，參考「大甲溪河段輸砂特性試驗研究總報告」^[3]，於模擬區段內無重要匯入支流，故邊界條件僅以石岡壩放流量為主要輸入邊界，出海口為輸出邊界。

二維數值模擬在本研究之重點，係以水理演算河道水理特性(全域)，如試驗橋址(國道 3 號大甲溪河川橋)上下游水深分布、流速變化…等，並據以提供後續三維數值模式本工法沖刷模擬分析時之邊界條件(局部)，再以大甲溪流域所公告之不同重現期(2、5、10 年…)流量模擬分析(圖 4)，並據以評估本工法之成效。

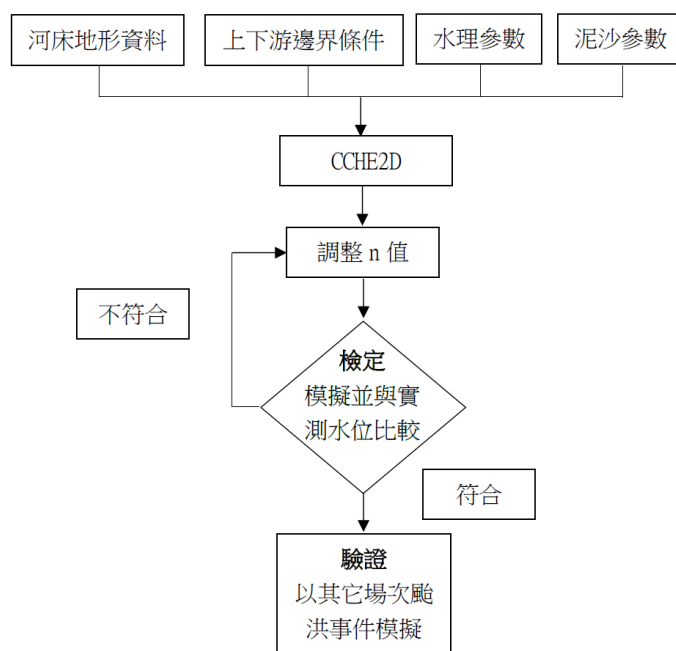


圖 3 二維橋梁數值模擬方法流程圖



圖 4 數值模擬分析流程示意圖

3.1.2 檢定與驗證的作法概述(二維水理演算)

本研究蒐集建構模擬所需的相關項目包括流量資料、水位資料及河道地形，分述如下：

1. 流量資料

流量資料包含 108 年的 0611 豪雨做為檢定，110 及 113 年盧碧颱風及凱米颱風的流量，以及大甲溪治理規劃檢討報告所公告的流量資料(表 1)。

2. 水位資料

模擬範圍內，大甲溪治理規劃檢討報告所公告的水位資料(表 2)，以及台 1 線大甲溪橋水位監測站資料(圖 5)。

表 1 大甲溪流域各控制點不同重現期距下之流量

控制點	集水區面積 (km ²)	重現期距(年)							
		2 年	5 年	10 年	20 年	25 年	50 年	100 年	200 年
河口	1,244.1	2,600	4,500	5,900	7,300	7,570	8,900	10,300	11,500
石岡壩	1,095.4	2,200	3,800	5,000	6,200	6,430	7,600	8,800	9,800
天冷	955.5	1,980	3,400	4,500	5,600	5,820	6,900	8,000	8,840
橫流溪匯流前	907.4	1,910	3,290	4,330	5,370	5,570	6,590	7,630	8,490
東卯溪匯流前	877.6	1,840	3,180	4,180	5,190	5,380	6,370	7,380	8,210
裡冷溪匯流前	848.4	1,780	3,080	4,040	5,020	5,210	6,160	7,130	7,940
十文溪匯流前	784.8	1,700	2,930	3,850	4,780	4,960	5,870	6,790	7,560

資料來源：「大甲溪流域整體治理計畫(101-104 年)執行檢討及改善策略研擬」

表 2 模擬範圍內斷面各重現期的水位

斷面	100 年	50 年	25 年	20 年	10 年	5 年	2 年
5	38.03	37.69	37.31	37.22	36.78	36.14	35.10
6	46.14	45.83	45.61	45.55	45.32	45.03	44.45
7	54.23	54.01	53.65	53.59	53.26	52.85	52.23
7-1 大甲溪公路橋(下)	58.08	57.77	57.45	57.39	57.06	56.67	56.07
7-1 大甲溪公路橋(上)	59.42	59.05	58.67	58.59	58.14	57.65	56.86
7-2 海線鐵路橋(下)	59.65	59.39	59.06	58.99	58.62	58.30	57.65
7-2 海線鐵路橋(上)	61.36	60.75	60.38	60.30	59.84	59.34	58.55
8	62.01	61.57	61.26	61.18	60.73	60.28	59.59
9	68.33	68.19	67.98	67.93	67.64	67.28	66.42
9-1 第二高速公路橋(下)	73.50	73.26	73.00	72.92	72.60	72.15	71.19
9-1 第二高速公路橋(上)	75.63	75.26	74.88	74.80	74.21	73.72	72.60
10	75.71	75.34	74.98	74.90	74.36	73.89	72.80
11	79.37	79.07	78.77	78.71	78.31	77.78	77.41
12	84.91	84.39	83.65	83.51	82.81	82.26	81.61
13	93.45	93.45	93.45	93.45	93.45	93.45	93.45

資料來源：大甲溪治理規劃檢討(天輪壩下游至河口河段)



資料來源：經濟部水利署水利資訊網整合服務系統

圖 5 台 1 線大甲溪橋水位監測站資料查詢

3. 河道地形

地形分別採用內政部「112 年及 113 年水利數值地形資料測製工作採購案（第 1 作業區）」^[9]1m x 1m 數值水理地形(HyDEM)(基於「108 年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果檢核與監審工作案」dem 底圖再製)^[8]為本研究採用之地形資料。模擬區域之位置圖(石岡壩至河口)及數值水理地形圖(HyDEM)，如圖 6 及圖 7 所示。



圖 6 本研究模擬區域位置圖

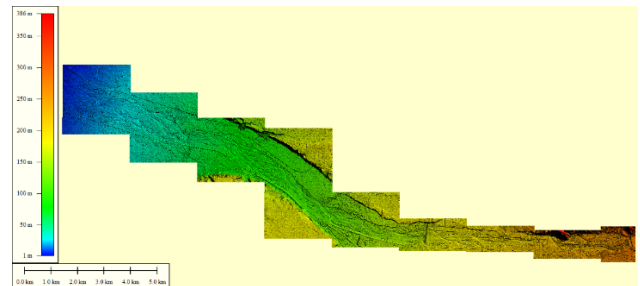


圖 7 本研究模擬區域數值水理地形圖 (HyDEM)

3.1.3 參數設定

包含水理演算參數、泥砂參數及邊界條件 3 項，分述如下：

1. 水理參數設定(Flow Parameters)

CCHE2D 模式的起始條件包含底床高程、水位，以及曼寧 n 值(河床糙度, Bed Roughness)等。底床高程水理參數之設定，包含計算時間、記錄時間、時間間隔、紊流模式，以及流體特性等如表 3 所示。

一般而言，水理演算參數的曼寧 n 值會直接反應水流阻力；因糙度(n 值)越大，河床阻力越大，流速減低，而水位抬升。因此，在模式檢定中，可調整河床糙度，使得模擬水位能夠趨近合理的水位值。

過去大甲溪設定河床糙度的相關計畫，如「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究」^[4]河床糙度率定驗證結果，曼寧 n 值分佈在 0.03~0.045 之間，而「跨河橋梁保護工法之研究」^[5]以曼寧 n 值為 0.04，做為檢定參考，並考量河床大多由礫石、砂土等粗顆粒所組成，因此，再酌以增加曼寧 n 值為 0.05 進行檢定測試。爰此，本研究參考上述參數資料，以曼寧 n 值為 0.03、0.04、0.05 共 3 組參數值進行檢定。

2. 泥砂參數

泥砂參數如表 4 所示，部分參數亦依據現有資料或考慮的模擬現象加以設定，如輸砂模式採用同時考量推移質與懸浮質輸砂的模組、泥砂比重固定 2.65、最大淤積與沖刷限制在 ± 90 公尺等。

動床模擬過程中，當河床受到沖刷或淤積所造成的地形改變，會立即反應在水位的模擬值；因此，在模式檢定中，可調整與河床變化有關的參數，使得模擬水位能夠趨近合理的水位值。依據「CCHE2D Sediment Transport Model」(Weiming Wu, 2001)推移質與懸浮質對於河床的改變可表示為：

$$(1 - p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L_b} (q_{bk} - q_{b* k})$$

式中： p' 為孔隙率； $\partial z_{bk} / \partial t$ 為底床隨時間的改變量； ω_{sk} 為泥砂沉降速度； C_k 為深度平均的懸移質濃度； C_{*k} 為深度平均的懸移質平衡濃度； q_{bk} 為推移質的輸砂率； $q_{b* k}$ 為推移質的平衡輸砂率； α 為 Adaptation Factor for suspended load； L_b 為 Adaptation Length of bedload。

上式可看出對於懸移質濃度變化造成底床改變，係由 α 值所調控；而推移質輸砂率變化造成底床改變，係由 L_b 值所調控。此外，針對 α 值與 L_b 值，過去相關模擬已得到應用的經驗。依據「CCHE2D Sediment Transport Model」(Weiming Wu, 2001)， L_b 值應為泥砂運移、床型與渠道幾何型態的函數；若床型主要為砂丘(sand dune)的型態，則 L_b 值採用砂丘的長度，約為 7.3 倍的水深。若床型主要為交互沙洲(alternate bar)的型態， L_b 值採用交互沙洲的長度，大約是 6.3 倍的渠道寬度。對於 α 值，過去通過理論公式計算， α 值通常會大於 1；然而，實際應用的 α 值多小於 1。例如 Hanet et al.(1980)與 Wu and Li(1992)建議，沖刷強烈 α 值可採用 1，淤積強烈 α 值可採用 0.25，弱的沖刷與淤積可採用 0.5。

表 3 水力演算參數設定

項目	設定值	說明
Simulation times(sec)	模擬時間，依據流量歷線時間設定	如採用 110 年盧碧颱風事件石岡壩放流量歷線。
Time steps (sec)	10	演算時間間距 $\Delta t = 10(\text{sec})$
History file	360	每演算 360 個步驟(step)(1 小時)，自動記錄模擬結果。 $360(\text{step}) \times 10(\text{sec}/\text{step}) \times 3600(\text{sec}) = 1(\text{hr})$ 。

Bed Roughness	檢定 0.03、0.04 與 0.05	河床糙度會直接反應水流阻力；糙度越高，河床阻力越大，流速減低，而水位抬升。
Turbulence Model	Parabolic Eddy Viscosity Model	拋物線渦流粘滯係數公式。
Turbulent viscosity	1.0	設定 5 就代表由前項 Parabolic Eddy Viscosity Model 算出來結果，再乘上 5 倍，放大紊流效應。通常可設為 1。
Wall slipness coefficient	0.7	建議值
Depth to consider dry(m)	0.15	此為乾點與濕點的水深分界，當節點水深高於 0.15(m)，則以濕點的方式進行計算。
Time Iteration Method	Method 1	Method 1、Method 2、Method 3，分別代表低、中、高的疊代數目。當第二項的 Δt 越大，則此值也隨之加大
重力加速度(m/sec ²)	9.8	建議值
Von Karman constant	0.41	建議值
運動黏滯係數(m ² /sec)	0.000001	建議值

表 4 泥砂相關參數設定值

項目	設定值	說明
Number of Bed Layers	3	建議值
Minimum Mixing Layer Thickness	0.2	建議值
輸砂模式 (Transport Model)	Total load as Bed load plus Suspended Model	同時考量推移質與懸浮質輸砂的模式
Sediment Simulation Mode	Fast bed change with unsteady flow	變量流情況下的輸砂計算
Adaptation Length for Bedload (L_b)	1000	此值與推移質輸砂量變化，所造成的底床變化有關
Adaptation Factor for suspended load (α)	1.0	沖刷強烈 α 值可採用 1.0
Schmidt number	1.0	與泥砂的紊流擴散項有關
泥砂比重	2.65	建議值
Time steps to adjust flow	1	
Erosion/Deposition limit	0.01	為避免泥砂沖淤過於劇烈的設定值
Erodibility	YES	底床沖刷
最大沖刷厚度	-90(m)	
最大淤積厚度	+90(m)	

3.1.4 檢定工作(108 年 0611 豪雨)

以 106 年 0611 豪雨做為模式檢定案例，檢定前述 3 組參數，找出符合實際水位變化趨勢者。如圖 8 所示，108 年 0611 豪雨石岡壩放流量大多集中在 600~1,500 (cms)之間，將各組參數的模擬水位與實測水位比對，表示於圖 9。以下說明相關特性：

1. 圖 8 為石岡壩實際放流量歷線，圖 9 黑線為台 1 線大甲溪橋的實測水位歷線。整體而言，實測水位會隨著放流量起伏變化。

2. 各組參數的模擬水位有下列特性：

(1) 不同 n 值下，實測水位共有 3 次壅高現象，模擬水位對於放流量增加而使水位上升的特性，皆有掌握。

(2) 不同 n 值下，模擬水位與實測水位趨勢相似，但模擬值的部分則有所差異，模擬值如表 3 所示，因河床糙度(n 值)會直接反應水流阻力；糙度越高，河床阻力越大，流速減低，而水位抬升，圖 9 則反映出此一物理特性， $n=0.03$ 時(橘線)整體模擬水位偏低； $n=0.05$ 時(藍線)模擬水位在第 2 峰值較為吻合外，其餘皆有偏高之趨勢； $n=0.04$ 時(紅線)第 2 峰值模擬水位未較 $n=0.05$ 佳外，其整體之吻合度則有不錯之表現，故本研究將採 $n=0.04$ 做為後續驗證分析之選用參數。



圖 8 108 年 0611 豪雨石岡壩放流歷線

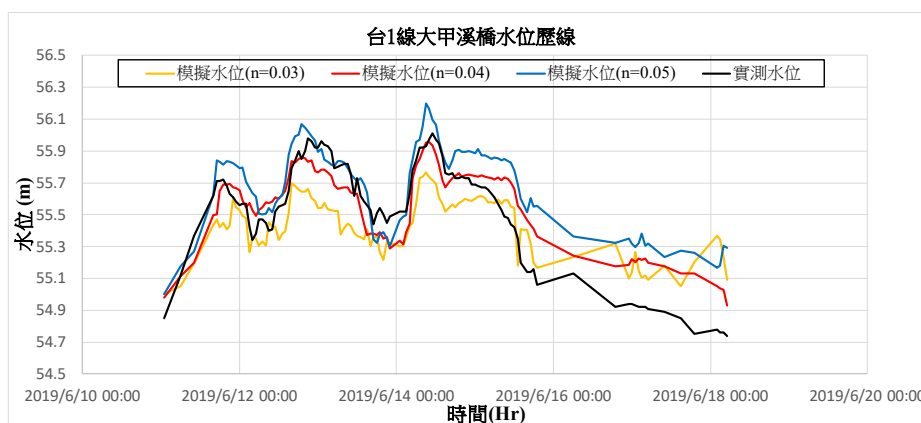


圖 9 不同 n 值下模擬水位與實測水位比對

3.1.5 驗證結果

以 110 年盧碧颱風及 113 年凱米颱風做為模式驗證案例，以前述所檢定的參數進行設定，模擬水位變化，再以盧碧颱風期間台 1 線大甲溪橋水位站實測水位來進行驗證，來評估本研究所建置之分析模型之合理性，結果分述如下：

1. 110 年盧碧颱風事件

如圖 10 所示，110 年盧碧颱風石岡壩放流量大多集中於 1,000~2,200(cms)之間；110 年 8 月 7 日上午 10 時出現時流量的最大值 2,195(cms)，該流量大約為大甲溪流域公告之 2 年重現期洪水量。圖 11 黑點為台 1 線大甲溪橋的實測水位歷線，整體而言，實測水位會隨著流量起伏變化。

圖 11 橘線係採用 n 值為 0.04 的水位模擬結果，並與實測水位比對，模擬水位仍符合實際流量與實測水位的起伏變化趨勢。實測水位最大值為 56.15(m)，模擬水位最大值為 56.07(m)，誤差為 0.08(m)。



圖 10 110 年盧碧颱風石岡壩實際放流歷線

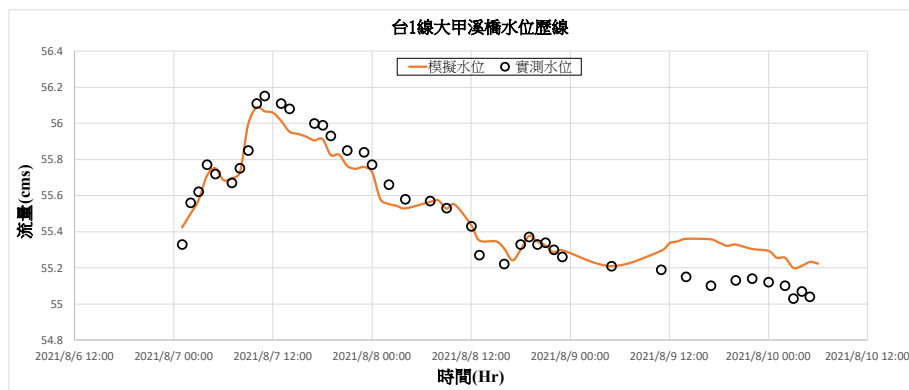


圖 11 110 年盧碧颱風下模擬水位與實測水位比對

2. 113 年凱米颱風事件

如圖 12 所示，113 年凱米颱風石岡壩放流量大多集中於 1,000~3,900(cms)之間；113 年 7 月 25 日下午 5 時出現時流量的最大值 3,867(cms)，該流量達大甲溪流域公告之 5 年重現期洪水量。圖 13 黑點為台 1 線大甲溪橋的實測水位歷線，整體趨勢上實測水位會隨著流量起伏變化。

圖 13 橘線係採用 n 值為 0.04 的水位模擬結果，並與實測水位比對，模擬水位與 110 年盧碧颱風事件結果相似，亦符合實際流量與實測水位的起伏變化趨勢。實測水位最大值為 56.57(m)，模擬水位最大值為 56.56(m)，誤差為 0.01(m)。

綜上所述，本研究二維水理分析模式經 110 年盧碧颱風及 113 年凱米颱風事件，已驗證採用 n 值為 0.04 的模擬結果，可符合實際水位變化情況，將採用此二維模型進行演算，提供後續研究局部冲刷三維數值模擬時所需之邊界條件及相關參數設定之參考。



圖 12 113 年凱米颱風石岡壩實際放流歷線

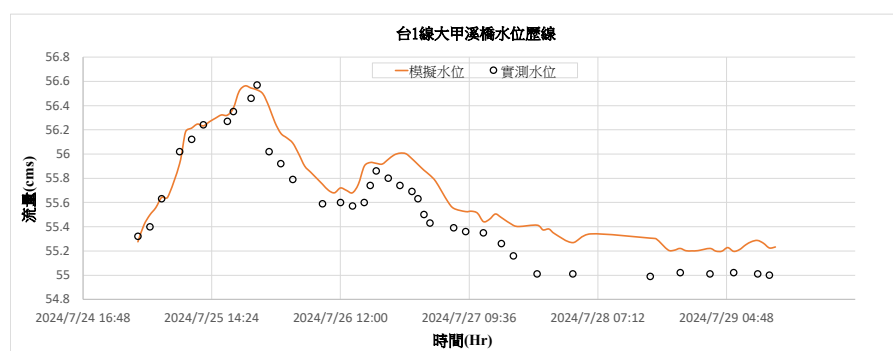


圖 13 113 年凱米颱風下模擬水位與實測水位比對

3.2 試驗場址保護成效觀測與評估

3.2.1 航拍觀測

1. 航拍範圍

原以 P24L~P25L 間河道及 P24L 基礎周圍布設鼎型塊結合地工織布保護工法做為試驗組，並將相鄰鼎型塊(無鋪設地工織布)及未施作保護工之橋墩基礎做為對照組來進行比對，因交通部高速公路局於 111 年度運用本研究工法於 P21L~P22L 基礎進行保護工作，相較於前期計畫試驗組區域擴大，因此兩側拍攝範圍也隨之擴大，右岸增加 1 跨距的拍攝範圍，若以國 3 大甲溪橋橋墩編號標記，則為上游側 21L~26L(下游側 24R~29R)，共計涵蓋 6 座橋墩基礎範圍，如圖 14 所示，地工織布鋪設範圍，如圖 15 所示。

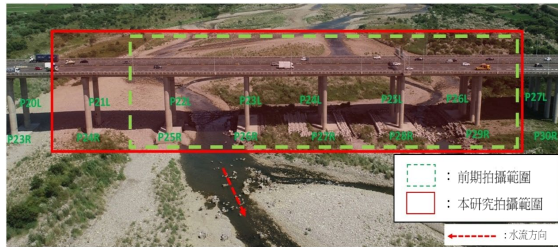


圖 14 航拍範圍示意圖

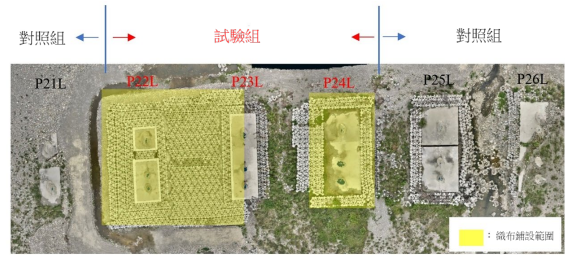


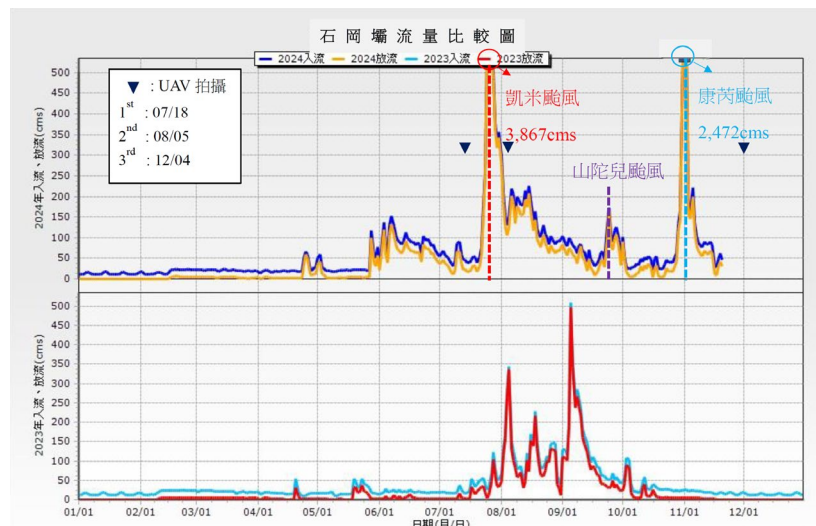
圖 15 土工織布鋪設範圍

2. 航拍時機

於汛期前拍攝一次做為原始地形資料，因本試驗橋址位處於大甲溪石岡壩下游區段，其河床水位及流量深受石岡壩壩體安全操作有關，爰每遇豪大雨或颱風事件等重要降雨事件後，將視石岡壩放流情形進場進行航拍觀測，記錄於降雨事件後試驗區表面地形變化情形。

3.2.2 成效觀測

依前述航拍觀測規劃原則，113 年共計進行 2 次航拍觀測作業(如圖 16)，並透過歷次觀測所得之數值三維模型進行套疊比對分析，據以瞭解土工織布之保護成效，說明如下：



資料來源：經濟部水利署中區水資源分署石岡壩管理中心

圖 16 本研究航拍觀測時間與石岡壩放流歷線之關係(上：113 年；下 112 年)

1. 觀測作業時間說明

(1) 第 1 次航拍觀測(113 年 7 月 18 日)：於颱風季前進行第 1 次航拍觀測作業記錄初始地形，以供後續降雨事件過後地形套疊分析之基準。

(2) 第 2 次航拍觀測(113 年 08 月 5 日)：因 7 月凱米颱風襲臺，帶來可觀降雨量，使得石岡壩自本研究執行以來所觀測到之最大放流量，查詢經濟部水利署防災資訊網最大放流量達 3,867cms，對應大甲溪治理規劃檢討報告所公告的流量(表 1)，該流量約為 5 年重現期的洪水量(與近 10 年重要颱風事件下石岡壩最大放流量之比較，如：97 年辛樂克颱風造成台 13 線后豐大

橋斷橋，石岡壩最大放流量 4,225cms，達 5 年重現期的洪水量；98 年莫拉克颱風，石岡壩最大放流量 5,410cms，達 10 年重現期的洪水量)，且本次洪水量為本研究自 110 年起觀測以來之最，將可進一步驗證本研究工法之耐洪性，並據以更新保護成效數據，故於災後 113 年 8 月 5 日進場進行第 2 次航拍觀測作業，以觀測此次降雨事件對試驗區保護工之影響。

(3) 第 3 次航拍觀測(113 年 12 月 4 日)：因 11 月初康芮颱風過境，亦帶來豐沛之降雨量，查詢經濟部水利署防災資訊網石岡壩最大放流量達 2,472cms 的放流事件，對應大甲溪治理規劃檢討報告所公告的流量(表 1)，該流量約為 2 年重現期的洪水量，因此時太平洋上接連幾個颱風生成，加上東北季風影響，使得天候條件及試驗場址河川水位不適合觀測，為維觀測品質，俟天候條件良好及現場河床恢復低水位後，始進場進行第 3 次航拍觀測作業，遂於 113 年 12 月 4 日進場拍攝以觀測此次降雨事件對試驗區保護工之影響。

2. 凱米颱風事件前後兩期地形套疊比較(113 年 7 月 18 日 vs 113 年 8 月 5 日)

凱米颱風係為 113 年度最大之降雨事件，對於試驗場址影響最鉅，因此本文主要以該次事件進行探討，圖 17 及圖 18 分別為往上游及往下游方向所拍攝之照片，比對照片可初步得知該次洪水量已使試驗橋址周圍河床地形發生極大變化，凱米颱風過境使得石岡壩最大放流量約為 3,867cms(圖 16)，達大甲溪 5 年重現期的洪水量，相較於 110 年盧碧颱風過境石岡壩最大放流量 1,280cms 約為 3 倍之流量，可更新本研究執行觀測以來之保護成效數據，透過兩期數值三維模型(如圖 19)、點雲地形套疊之等深圖(如圖 20)、各橋墩兩期拍攝影像比較(如圖 21~圖 25)及鼎型塊損壞範圍及面積(如圖 26)，其結果說明如下：

(1) 織布無鋪設區：河床粒料產生大量推移現象，P23L(南側)及 P23~P24L 間之鼎型塊有傾倒之情形(如圖 22)，P25L(南側) (如圖 24)、P26L 及 P25L~P26L(如圖 25)間之鼎型塊皆已流失。

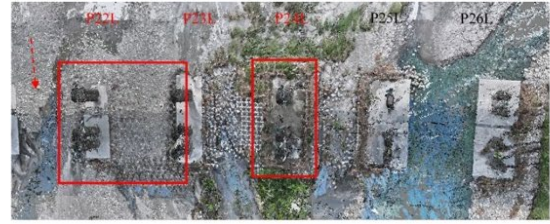
(2) 織布鋪設區：僅 P22L 下游局部有流失之情形(如圖 21 透明紅圈處)，其餘排列完整或淤積掩埋，P24L 亦排列完整(如圖 23)，顯示在該次颱風事件下，本研究工法可發揮其固床效果，並於 P22L~P24L 橋墩下游側有回淤之現象，相對於未鋪設織布之鼎型塊保護工較具耐洪性。



圖 17 凱米颱風前後現場情形(往上游拍攝) 圖 18 凱米颱風前後現場情形(往下游拍攝)



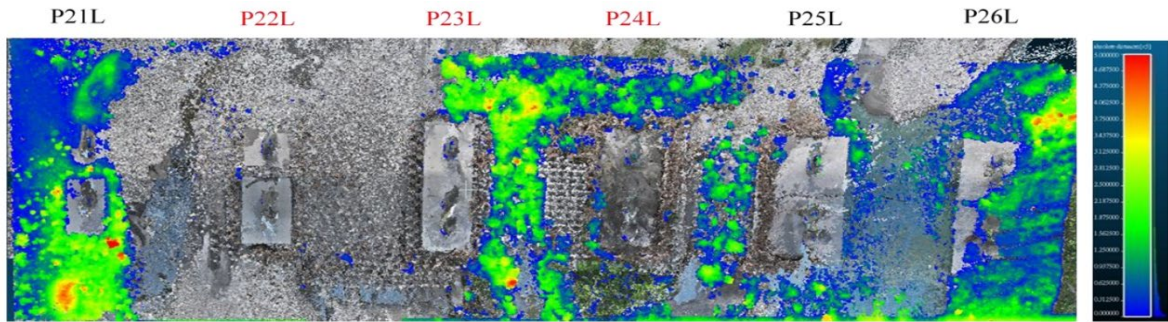
(a) 113/07/18



(b) 113/08/05

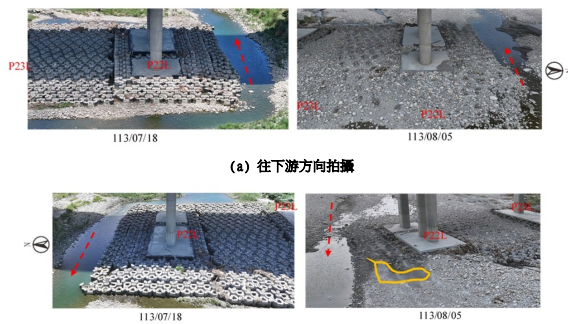
圖 19 兩期數值三維模型(113 年 7 月 18 日 vs 113 年 8 月 5 日)

*紅框處為織布鋪設位置；-->水流方向

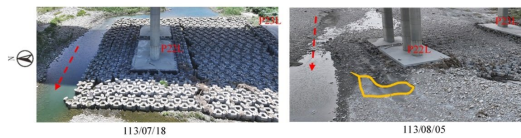


*色塊為淘刷處；實像為淤積處

圖 20 113 年 7 月 18 日與 113 年 8 月 5 日兩期數值三維模型套疊結果(單位：m)

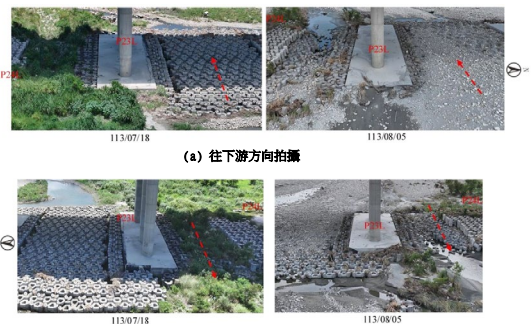


(a) 往下游方向拍攝



(b) 往上游方向拍攝

圖 21 P22L 凱米颱風前後期拍攝影像

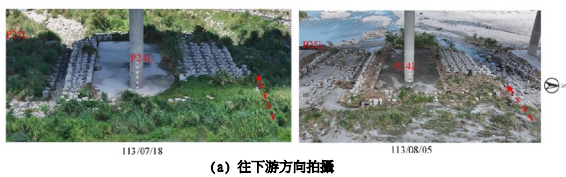


(a) 往下游方向拍攝



(b) 往上游方向拍攝

圖 22 P23L 凱米颱風前後期拍攝影像

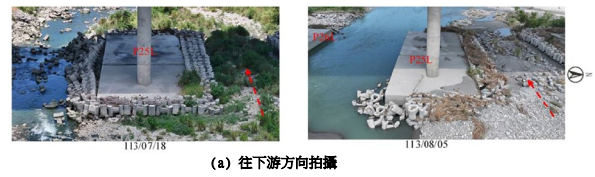


(a) 往下游方向拍攝



(b) 往上游方向拍攝

圖 23 P24L 凱米颱風前後期拍攝影像



(a) 往下游方向拍攝



(b) 往上游方向拍攝

圖 24 P25L 凱米颱風前後期拍攝影像

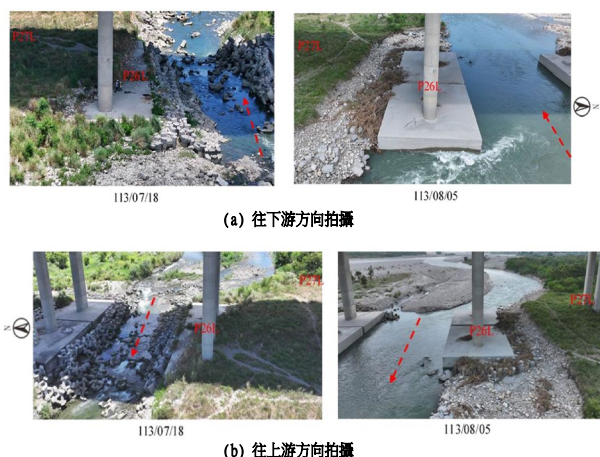


圖 25 P26L 凱米颱風前後期拍攝影像

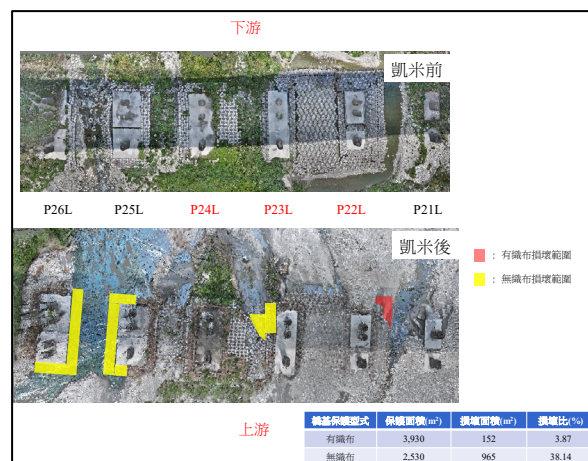


圖 26 凱米颱風後試驗場址鼎型塊損壞範圍及面積

3.2.3 成效評估

因 113 年度侵臺之颱風造成石岡壩之放流量，為本研究執行觀測以來之最，最大可達大甲溪 5 年重現期之洪水量，爰據以更新本研究工法對於橋梁基礎保護效果之數據。

1. 增加成本：

本研究工法現場施工之流程，如圖 27 所示，相較於既有的鼎型塊保護工法施作工序，僅於整地完成後增加鋪設地工織布的工序，整體施工方式並無太大改變，因此，對於施工廠商技術門檻要求不高。

經 109 年實際鋪設施作於國 3 大甲溪橋 P24L 橋墩基礎之結果，鋪設地工織布所需之時間為 1 個工作天，而鼎型塊保護工法施作所需時間約為 8 工作天，增加織布鋪設工序約占整體工期 12.5% 左右，透過經實際鋪設施作後，證明本工法具可施工性，而所增加之施工成本約 10% (織布及鋪設費用 / 鼎型塊工法費用) 左右。

另 111 年底擴增試驗區於國 3 大甲溪橋 P22L~P23L 橋墩基礎，整體工期 30 天，織布施工 5 天(5/30=16.7%)，整體工程經費約新臺幣 1,480 萬元(以下費用皆為新臺幣計價)，織布工項約為 183 萬元(183/1480=12%)，因增加鋪設織布層所增加之成本與工期與第 1 期施作之佔比相近。

綜上，本研究工法因鋪設織布層所需增加之成本，整理如下：

(1) 工期：僅增加於鼎型塊吊放前以人工進行柔性織布鋪設及搭接工項，因施作簡易、速度快，無需專業技術工人，施工技術門檻不高，工期約增加 12~17% 左右。

(2) 經費：僅增加織布材料費用及對應之鋪設工費用，因施工速度快、材料相對便宜，經費約增加 10~12% 左右。



圖 27 鼎型塊織布橋基保護工法施工流程

2. 保護效果：

本研究工法之施作，對於橋基可發揮固床效果，進而對河道產生阻水影響，為瞭解施作後對於河道變遷之影響，將以 109 年及 111 年 2 期計畫工法為時間點進行說明：

(1) 未施作階段：如圖 28 所示，此時為尚未施作本研究工法，此時 P24L 位於深槽區，故 109 年時選擇以該橋基做為試驗橋址進行鋪設。

(2) P24L 施作階段(第 1 期)：圖 29 為鋪設後第 2 年之情形，因本工法發揮固床效果，原通過 P24L 之主深槽往兩旁分開，形成 2 條流路(P22L~P23L 及 P25L~P26L)，致 P23L~P25L 間上游側產生淤積並開始有植生生長。

(3) P22L~P23L 施作階段(第 2 期)：圖 30 為 111 年擴增試驗區後 2 年之情形，仍為 2 條流路，但原通過 P22L~P23L 間之流路因施作本工法之故，往北側移動至 P21L~P22L。

(4) 113 年凱米颱風後階段：如圖 31 所示，因 P22L~P23L 及 P24L 施作本工法後發揮固床效果，仍維持 2 條流路，但原通過 P21L~P22L 間之流路往北側移動至 P19L~P20L，上游側淤積範圍從 P23L~P25L 擴大至 P22L~P25L 間。



圖 28 試驗場址空拍圖(108 年)



圖 29 試驗場址空拍圖(110 年)



圖 30 試驗場址空拍圖(113 年凱米颱風前) 圖 31 試驗場址空拍圖(113 年凱米颱風後)

綜整颱風事件下石岡壩之最大放流量紀錄，110 年 8 月盧碧颱風(1,280cms)、111 年 5~6 月梅雨事件(825cms)、112 年蘇拉颱風(510cms)、至 113 年度始有凱米(3,867 cms)及康芮颱風(2,472cms)帶來豐沛降雨量，分別達大甲溪 5 年及 2 年重現期洪水量，得以進一步驗證及評估本研究工法之保護成效。

以 113 年度凱米颱風事件進行探討，最大洪峰到達本試驗橋址之現場水位情形，如圖 32，洪水已漫淹整個試驗區。俟洪水消退後，觀察保護工留存狀況，試驗組(織布鋪設區)之部分，僅 P22L 下游局部有流失之情形(如圖 21(b)橘圈處)，其餘排列完整或淤積掩埋；而對照組部分 P23L(南側)及 P23~P24L 間之鼎型塊有傾倒之情形，P25L(南側)、P26L 及 P25L~P26L 間之鼎型塊皆已流失，顯示在本次達 5 年重現期颱風洪事件下，本研究工法仍可發揮其固床效果，相對於未鋪設織布之鼎型塊保護工較具耐洪性。對於試驗區鼎型塊損壞情形及維修費用，整理如表 5。

因此，整體效益成本比(BCR)計算如下：

(1) 織布方案成本

以 2 期(109 年 P24L、111 年 P22L~P23L)所執行之工程總經費為 2,180 萬元(109 年 700 萬元+111 年 1,480 萬元)。

(2) 增加的成本

織布方案的成本會比傳統方案增加 242 萬元(109 年 60 萬元+111 年 183 萬元)。

(3) 節省之維修經費

與未鋪設織布對照組相比可減少維修費用 813 萬元/次以上(對照組維修費 965 萬元-試驗組維修費 152 萬元)。

(4) 效益成本比(BCR)

效益成本比(BCR)可以用來衡量織布方案相對於傳統方案的成本效益，BCR 計算公式為：

$$BCR = \text{節省的效益} / \text{增加的成本} = 813 / 242 \approx 3.36$$

以目前 110~113 年 4 年期觀測之結果，效益成本比約達 3.36，本研究工法之應用可具相當之保護作用，可達延長保護橋基壽命，減少維修頻率及維護經費之目的。



資料來源：交通部高速公路局中區交通控制中心

圖 32 數值模擬結果與試驗結果之比較

表 5 113 年凱米颱風事件後成效評估表

橋墩編號	放置鼎型塊面積 (m ²)	損壞面積 (m ²)	損壞比 (%)	維修費用 (萬元)	有無鋪設地 工織布
試驗組	3,930	152	3.87	152	有
對照組	2,530	965	38.14	965	無

**註： 1.鼎型塊維護單價(A)係以 1 萬/m² 估算，故試驗組維護費用(B)為損壞面積*(A)=152*1=152 萬元，
對照組維護費用(C)為損壞面積*(A)=965*1=965 萬元。
2.試驗組總工程經費(D)為 2,180 萬元，相較傳統保護工法，所增加之織布鋪設費用(E)為 242 萬元，
所增加成本佔比為 E/D*100%=242/2,180*100%≈11.1%。

四、結論與建議

1. 本研究工法係為改良既有的鼎型塊保護工法，於施作工序上僅於整地後增加鋪設地工織布的工序，對於整體施工方式並無太大改變，因此，施工廠商技術門檻要求不高且具可施工性，而經過 109 年及 111 年底實際施作之經驗，因鋪設織布層所需增加之成本，在工期約增加 12~17%左右，經費約增加 10~12%左右。
2. 113 年度凱米颱風帶來豐沛之降雨量，使石岡壩放流量達本研究自 110 年起觀測以來之最(5 年重現期洪水量)，而進一步驗證本工法之耐洪性及更新保護成效數據，在試驗組(有鋪設織布)之損壞比約 4%，對照組(未鋪設織布)之損壞比約 38%，顯示本工法可提升保護工之耐洪性。
3. 整體而言，本工法以 2 期(109 年 P24L、111 年 P22L~P23L)所執行之工程總經費約為 2,180 萬元，其相對於傳統鼎型塊保護工法，所衍生增加之織布鋪設費用約為 242 萬

元，但可減少鼎型塊流失或傾斜之現象，與未鋪設織布對照組相比可減少維修費用 813 萬元/次以上，益本比(BCR)約達 3.36。以目前 110~113 年 4 年期觀測之結果，本研究工法之應用可具相當之保護作用，可達延長保護橋基壽命，減少維修頻率及維護經費之目的。

4. 113 年已完成大甲溪流域石岡壩至河口段之二維水理模型建置，將可提供後續三維數值局部冲刷模擬分析時之邊界條件，再以不同重現期流量模擬分析，評估本工法之保護成效，配合現場試驗觀測結果，提供多元分析驗證之成果。
5. 大甲溪流域於 97 年辛樂克颱風(石岡壩放流量 4,225cms，5 年重現期)造成后豐大橋斷橋事件；98 年莫拉克颱風(石岡壩放流量 5,410cms，10 年重現期)，而本研究自 110 年觀測以來，113 年度凱米颱風為最大觀測事件(石岡壩放流量 3,867cms，5 年重現期)，其與 98 年莫拉克颱風事件仍有差距，後續有待超大豪雨事件(10 年重現期)及擴增試驗區來進一步評估及驗證。
6. 本研究工法雖經現場試驗結果驗證在 2 年及 5 年重現期洪水量下，能提升保護能力，但對於超大豪雨事件(10 年重現期以上)之耐洪性為何，尚有賴天候狀況來驗證，屬人為不可控之因素，故將以先前年度計畫之數值分析經驗及成果為基礎，於後續年度應用於現地試驗數值模擬分析，以在沒有超大豪雨事件發生之情形下，提供另一合理之分析方式來進一步評估耐洪性。

五、謝誌

感謝交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段於研究期間提供參考資料、試驗橋址及現場施工之協助。

參考文獻

1. Wu, W. M.(2001). CCHE2D sediment transport model, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-3 .
2. Jia, Y., Wang, S.,(2001). CCHE2D: two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel Flows over loose bed. , Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1, February .
3. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2010)，大甲溪河段輸砂特性試驗研究總報告。
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2011)，大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究總報告。
5. 邱永芳、謝明志、賴瑞應、林雅雯、廖清標、陳祖憲、林秉賢、張慶民、李仲強、黃進國、蔡明邑、羅冠顯 (2011)，跨河橋梁保護工法之研究。
6. 邱永芳、謝明志、林雅雯、游保杉、呂珍謀、楊道昌、詹勳全、陳薇伊、馮芳郡、周容辰、陳潔、黃進國、羅冠顯、陳家隆 (2011)，河道水位與橋墩冲刷推估模式之建立研究。
7. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2016)，大甲溪流域整體治理網要計畫(101-104 年)執行檢討

及改善策略研擬。

8. 內政部國土測繪中心 (2020)，108 年度 LiDAR 技術更新數值地形模型成果檢核與監審工作案，109 年度工作總報告。
9. 內政部國土測繪中心 (2023)，112 年及 113 年水利數值地形資料測製工作（第 1 作業區），112 年度工作總報告。