

# 地工織布保護工法沖刷試驗規劃及運用無人飛行載具觀測保護成效

賴瑞應<sup>1</sup> 胡啟文<sup>2</sup> 鄭登鍵<sup>3</sup> 饒書安<sup>4</sup> 吳松旺<sup>5</sup> 林哲詠<sup>5</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心簡任研究員兼科長

<sup>2</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

<sup>3</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

<sup>4</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段段長

<sup>5</sup>交通部高速公路局中區養護工程分局大甲工務段副段長

<sup>6</sup>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

國道三號大甲溪橋，近年在颱風作用下，河道深槽區之橋墩基礎樁帽有裸露之情況發生，國道高速公路局大甲工務段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，鼎型塊有流失破壞的狀況發生，導致大甲工務段於每年汛期過後要針對流失的鼎型塊加以補鋪，以確保橋墩基礎的安全。

爰此，本計畫針對本所過去研擬之地工織布結合鼎型塊保護工法，選擇以大甲溪下游國道三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，其中室內水工模型試驗成果顯示，鼎型塊降階搭配地工織布方案能有效減緩沖刷情形，並據以做為現地沖刷試驗鋪設之選用方案，而現地沖刷試驗之觀測方式係運用無人飛行載具(UAV)結合攝影測量技術，利用其可快速進行大範圍面狀地表地形量測之優勢，評估地工織布現地保護成效，經 110 年度試驗結果初判地工織布應能有效阻斷向下滲流掏刷作用，將持續觀察並驗證地工織布保護成效，以供相關橋梁管理單位維管之應用。

## 一、前言

國道三號大甲溪橋位處臺中市，北接臺中市外埔區，南接臺中市清水區，橋長約 2,850 公尺，於民國 92 年竣工，除民國 93 年間之艾利颱風及民國 102 年潭美颱風豪雨沖刷下，使南側之數座橋墩樁帽有裸露之情形外，竣工至今尚無嚴重的沖刷災害。

近年國道高速公路局大甲工務段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，鼎型塊有流失破壞的狀況發生，導致大甲工務段於每年汛期過後要針對流失的鼎型塊加以補鋪，以確保橋墩基礎的安全。

本計畫針對本所過去地工織布應用於橋墩基礎保護之室內水工模型試驗成果<sup>[6][7][8]</sup>，研提改善鼎型塊流失的橋基保護工法，並實際規劃應用於大甲溪下游河段之國道三號大甲溪橋，驗證

土工織布保護工法之施工可行性及保護成效，期透過強化鼎型塊基底穩定性，進而提升橋墩基礎抗沖刷之能力。另外，本計畫規劃以無人飛行載具觀測研提工法保護成效之方法，亦可做為橋管機關記錄橋基保護工及周圍地形變化之參考。

## 二、室內水工模型試驗

### 2.1 試驗規劃

本計畫以長 15 公尺、寬 0.8 公尺、深 0.8 公尺之試驗水槽(如圖 1)，鋪設試驗底床質及橋墩基礎，進行渠槽水工模型沖刷試驗。

渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於試驗進行時之觀測，渠槽尾端有一小型沉砂池用以避免試驗砂流入尾水池，後設尾水閘門(tailwater gate)，用以控制試驗水深(如圖 2)。

供水系統以  $16\text{m}^3/\text{min}$  之抽水馬達從蓄水池中抽水，經由給水管送至定水頭箱，供應水量至渠槽中，定水頭箱至渠槽間設有一顯示式管路手動矩形閘閥，可控制流量流至渠槽中。水流經渠槽後流入尾水池，再經由排水道流進蓄水池，形成一供水循環系統(如圖 3)。

本試驗橋墩模型依據國道三號大甲溪橋的實際尺寸，以縮尺 100 分之 1 製作(如圖 4)。



圖 1 渠槽斷面圖



圖 2 渠槽尾水控制閘門

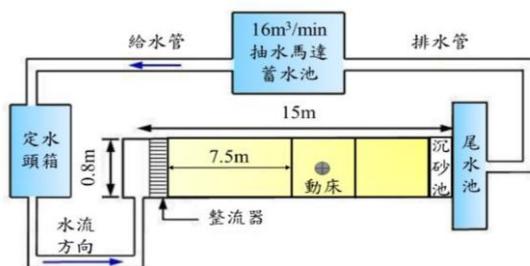


圖 3 試驗渠槽配置示意圖

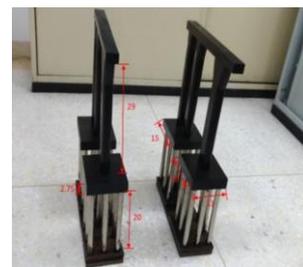


圖 4 試驗橋墩模型尺寸

### 2.2 試驗成果

不同方案下最大沖刷深度及鼎型塊穩定度之試驗結果(如表 1 及圖 5~圖 9 所示)，顯示鼎型塊降階結合土工織布圍繞橋墩基礎保護方案，橋墩基礎的最大沖刷深度大幅減少至約 1.6cm，且鼎型塊嚴重流失的問題也有改善，顯示鼎型塊降階結合土工織布圍繞橋墩基礎保護方案為最優的保護方案。

另外，礙於室內試驗無法模擬水流沖擊力長時間對土工織布材料之磨損破壞及連續性破壞，試驗結果可能與現況之破壞機制或許有差異，爰以規劃現地試驗方式來驗證保護成效。

**表 1 不同方案最大沖刷深度及鼎型塊穩定度比較**

方案	方案說明	最大沖刷深度	鼎型塊穩定度	備註
1	無保護工方案	9.4 cm	-	圖 5
2	鼎型塊保護工方案	2.8 cm	鼎型塊嚴重流失	圖 6
3	鼎型塊保護工(降階排列)方案	1.9 cm	鼎型塊輕微流失	圖 7
4	鼎型塊+織布保護工方案	2.7 cm	鼎型塊明顯流失	圖 8
5	鼎型塊降階+織布保護工方案	1.6 cm	鼎型塊輕微流失	圖 9



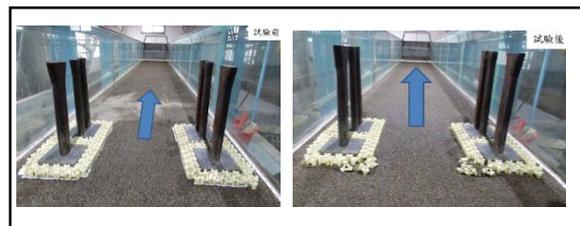
**圖 5 無保護工方案沖刷情形**



**圖 6 鼎型塊保護工方案沖刷情形**



**圖 7 鼎型塊保護工(降階排列)方案沖刷情形**



**圖 8 鼎型塊+織布保護工方案沖刷情形**



**圖 9 鼎型塊降階+織布保護工方案沖刷情形**

### 三、現地試驗鋪設規劃與施工

#### 3.1 現地試驗鋪設區域

依循前述試驗成果，並與高速公路局、設計監造及施工單位等研商鋪設地點及方式後，決定配合國道三號大甲溪橋橋梁基礎補強工程，於橋墩 P24L(P27R)鋪設織布，並以鄰近未施作保護工之橋墩基礎，做為對照組來進行比對，位置如圖 16 所示，據以後續保護成效觀測之規劃。

#### 3.2 高強度織布材料

原則上應用於橋基保護工的織布其物理特性要能抵抗河水及泥沙的沖刷，所以需具有一定之材料強度；另為減少細粒料的流失，織布孔徑不能太大，並保有一定之透水性。依過去的研

究顯示，聚丙烯纖維(PP)較聚酯纖維(PET)耐久性佳，另外，紫外線照射亦會影響織布的強度，施工過程及施工後織布均有可能外露遭紫外線照射，所以材質需有抗紫外線功能，綜合考量上述因素及國內織布廠商生產的規格後，依需要採購高強度織布。

### 3.3 現地鋪設施工規劃

透過高強度織布發包採購，並通過材料尺寸的相關抽驗後，即進場至國道三號大甲溪橋進行現地織布鋪設，施工流程規劃分述如後。

#### 3.3.1 現場整地

整個施工流程首先是進行橋墩基礎周圍之鋪設範圍整地，如圖 10 所示，範圍依規劃的鼎型塊排置的寬度(本計畫規劃 2 排)，深度原則上以既有河床高程為基準，往下開挖約一個鼎型塊高度為宜，另外，下游側考量減少跌水沖刷效應，採降階地形整地。

#### 3.3.2 高強度織布及防護層織布鋪設

於整地完成後，接著進行高強度織布之鋪設，由樁帽頂往下鋪設至覆蓋整個開挖面的底部，如圖 11 所示。防護層織布覆蓋於高強度織布上，覆蓋範圍同高強度織布，如圖 12 所示。高強度織布施工搭接如圖 13 所示。

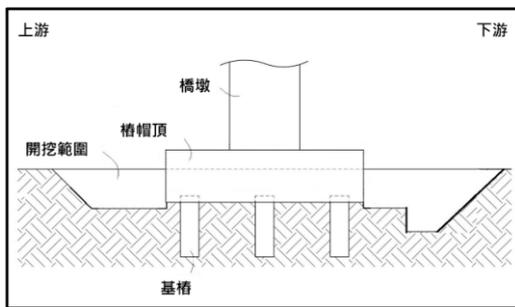


圖 10 橋墩基礎周圍整地範圍示意圖

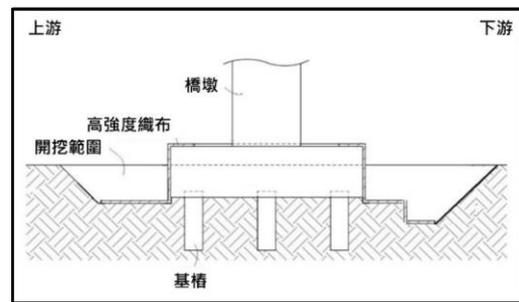


圖 11 高強度織布鋪設覆蓋示意圖

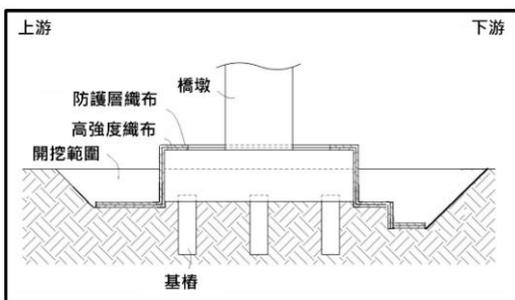


圖 12 防護層與高強度織布覆蓋示意圖

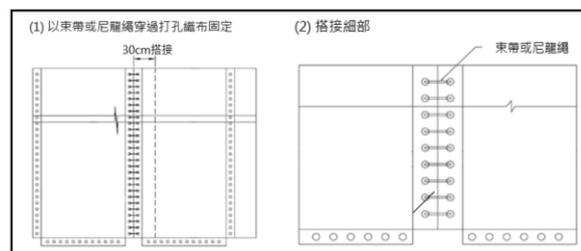


圖 13 高強度織布施工搭接示意圖

### 3.3.3 鼎型塊排置

最後將鼎型塊吊放至防護層織布上，進行排置，如圖 14 所示，以及必要之回填。

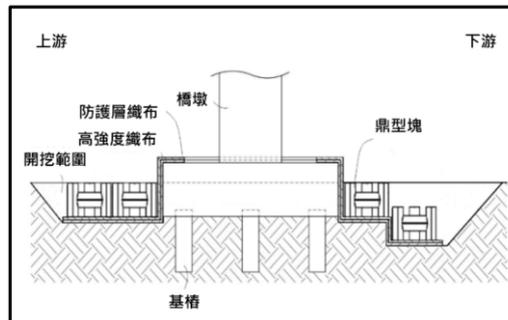


圖 14 鼎型塊吊放排置示意圖

### 3.4 現場施工

現地施工依上節規劃進行，施工前、中、後之相關照片，如圖 15 所示。

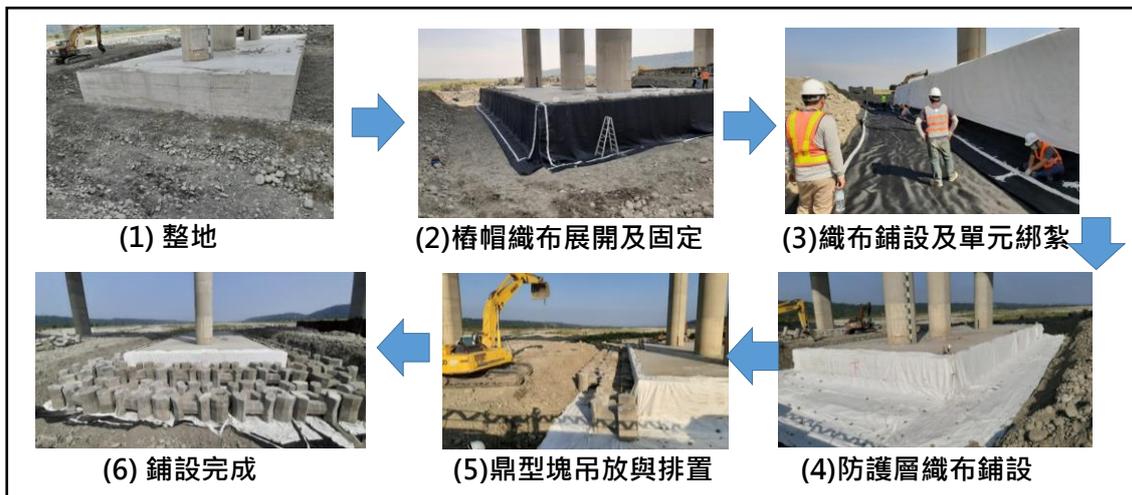


圖 15 現地試驗鋪設施工過程

## 四、無人飛行載具觀測及分析

### 4.1 航拍觀測規劃

本計畫採無人飛行載具(UAV)取得試驗場址影像資料，利用攝影測量技術取得數值三維表面地形資料，透過不同時期地形資料進行套疊比對，可快速詳細地得知鼎型塊的變位量與流失情形、橋墩間河槽區冲刷變化量，據以評估現地試驗之保護成效。

如 3.1 節所述，本計畫分為試驗組及對照組來比較地工織布之保護成效，因此，航拍觀測將配合現地河道地形，以試驗組為中心，向右及左岸至兩側高灘地為拍攝範圍，若以國 3 大甲溪橋橋墩編號來界定範圍，則為 P22L~P26L(上游側編號)或 P25R~P29R (下游側編號)，共涵蓋 5

座橋墩基礎為航拍觀測範圍，如圖 16 所示。當遇豪大雨或颱風事件等重要降雨事件後，即進行 UAV 航拍觀測以記錄地形變化。

## 4.2 航線規劃及拍攝原則

繞行橋墩(單一航線單向拍攝)及於上下游側平行橋面車行方向(單一航線來回拍攝)進行橋墩基礎影像拍攝(如圖 17)，原則以完整拍攝到圖 16 範圍內橋梁基礎與上下游及橋墩間保護工影像為主，航線上每張照片之重疊率需至少 80%左右，以鏡頭垂直朝下方式取得正交影像。



圖 16 航拍範圍示意圖

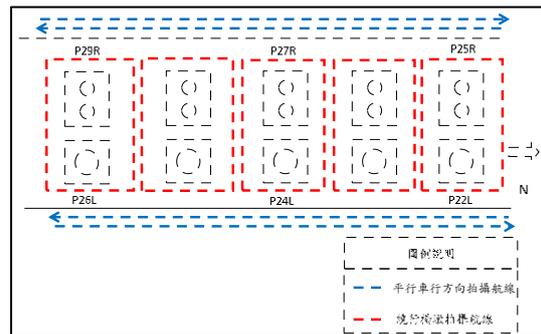


圖 17 航線規劃示意圖

## 4.3 航拍申請

因本試驗場址位於中部國際機場之航道上，屬禁航區，爰依「遙控無人機管理規則」第 31 條第一項規定於航拍活動 15 日前，檢附計畫書提出申請，報請民航局會商目的事業主管機關同意，取得民航局同意後(如圖 18)始得進行試驗場址航空拍攝測量作業。

申請號碼	帳號 單位名稱	作業名稱	活動日期	狀態	功能
AB2103250002	54521040 動控科技有限 公司	配合交通部運輸研究所執行國道3號大甲溪橋橋墩基礎影像拍攝	2021/04/05 ~ 2021/06/04	審核通 過	<a href="#">明細</a>

資料來源:交通部民用航空局遙控無人機管理資訊系統

圖 18 民航局同意航拍活動申請

## 4.4 控制測量

施作控制測量之目的在於使拍攝後之影像可進行尺度及座標基準校正，將相對三維空間資料轉換為絕對空間資料，並透過控制點之約制，方能確保不同時期數值三維模型於同一座標系統上進行套疊分析比對，以瞭解試驗區鼎型塊及河道表面地形變化趨勢。

而控制點之位置及數量，則以須佈設於穩定不動處並均勻分佈於試驗區為原則，就本試驗拍攝範圍內來看，橋墩基礎版之角點為適合上述之佈設條件，控制測量作業及控制點分布情形，如圖 19 及 20 所示。



圖 19 控制測量作業情形

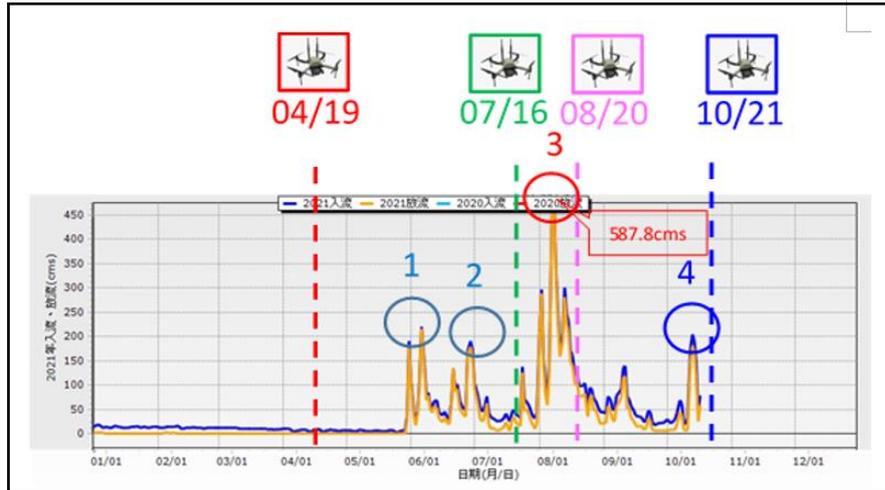


圖 20 控制點分布情形

#### 4.5 航拍觀測時機

本計畫於 110/04/19、110/07/16、110/08/20 及 110/10/21 共計進行 4 次航拍觀測作業(如圖 21)，並透過歷次觀測所得之數值三維模型進行套疊比對分析，據以瞭解地工織布之保護成效，說明如下：

1. 第 1 次航拍觀測(110/04/19)：本次拍攝時間正逢旱災時間，石岡壩放流量甚少，目的為取得汛期前之初始地形資料。
2. 第 2 次航拍觀測(110/07/16)：本次作業係為觀測 6~7 月梅雨季節間，共有 2 次重要之降雨事件對於現場之影響，惟當時正逢國內 COVID-19 疫情三級警戒之故，民航局停止 UAV 活動塔台進駐作業，故未能及時於此 2 次降雨事件後進場觀測，後嗣因國內疫情趨緩，民航局逐步解禁，方於 110/07/16 進場進行第 2 次航拍觀測作業。
3. 第 3 次航拍觀測(110/08/20)：本次作業係因盧碧颱風帶來強烈西南氣流影響，石岡壩放流量達 587.8cms，為 110 年最大放流量，俟颱風過境後隨即於 110/08/20 進場進行第 3 次航拍觀測作業。
4. 第 4 次航拍觀測(110/10/21)：本次作業係因圓規颱風外圍環流影響，災後雖未對中部帶來強降雨及重大災情，但石岡壩為壩體安全考量，進行預警性之調節性放流，俟颱風過境後隨即於 110/10/21 進場進行第 4 次航拍觀測作業。



底圖資料來源:經濟部水利署石岡壩管理中心網頁。

圖 21 航拍觀測時間與石岡壩放流歷線之關係

## 4.6 歷次觀測比對分析

### 4.6.1 04/19 與 07/16

本次比對係為瞭解 6-7 月間梅雨事件對於試驗場址之影響，透過前後期數值三維點雲模型(如圖 22)進行套疊差異比較(如圖 23)後，比對分析結果說明如下：

1. 橋基間河床區：透過兩期數值地形套疊可觀察 P24L~P25L 及 P25L~P26L 皆有變化色塊現象(如圖 23)，再藉由圖 22 及圖 24 之影像輔助，可判釋其結果係因 P24L~P25L 間為本計畫試驗區，河床區佈有鼎型塊及土工織布加固，僅表層粒料被沖蝕；反觀 P25L~P26L 間河床區因無鼎型塊加固，鬆散粒料被沖蝕而逐漸形成深槽區(如圖 22(b)、圖 25)。
2. 橋基周圍保護工：因應汛期整備，期間養護單位已將 P23L~P25L 之鼎型塊進行疊層及整理，套疊後等深圖高程變化深受人為因素干擾(如圖 23)，已無參考價值，故需藉由現場相片來輔助判釋(如圖 24、25)，經初步目視比對，此次降雨事件對試驗區鼎型塊並無太大變化。



圖 22 兩期(04/19、07/16)數值三維點雲模型

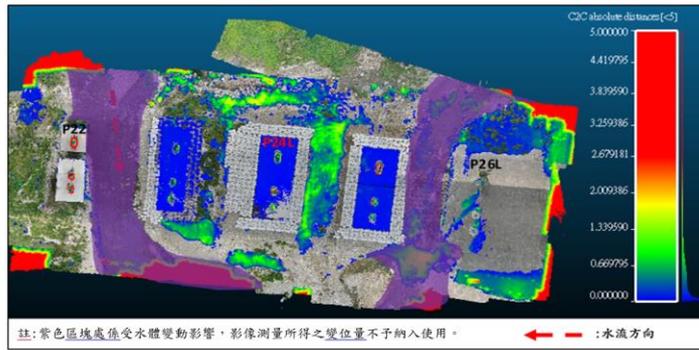


圖 23 兩期數值地形差異等深圖(04/19 與 07/16)

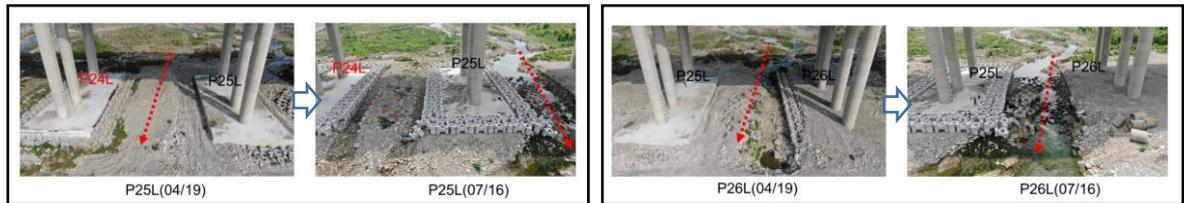


圖 24 04/19 與 07/16 (P25L)

圖 25 04/19 與 07/16 (P26L)

#### 4.6.2 07/16 與 08/20

本次比對係為瞭解盧碧颱風事件對於試驗場址之影響，透過前後期數值三維點雲模型(如圖 26)進行套疊差異比較(如圖 27)後，比對分析結果說明如下：

1. 因石岡壩放流量已達 587.8cms(如圖 21)，為前 2 次事件之 2 倍流量，使得河床粒料被推移掏空，造成 P23L、P24L(下游局部)及 P25L 周圍鼎型塊側傾及流失之現象(如圖 27 及圖 29、30、31 紅圈處所示)，其鼎型塊流失、傾倒面積及最大傾倒量，如表 2 所示。
2. 因河道深槽區位置改變，使得未施作鼎型塊保護之 P22L 橋墩基礎周圍較有明顯之沖刷現象，並已呈現基樁局部裸露之現象(如圖 28)，與盧碧颱風事件前高程相比，此次降雨事件後造成約 0.8m 之沖刷深度，如圖 32 所示。
3. 查閱 7 月梅雨事件及盧碧颱風降雨事件現場河川水位影像(如圖 33)及鄰近本試驗場址鄰近之臺 1 線大甲溪橋水位歷線圖(如圖 34 紅圈處)，本次事件相較於前 2 次河床水位明顯抬高許多，水位亦已漫淹至 P23L~P25L 間，造成沖刷現象，透過兩期數值地形套疊比對 P23L~P24L 及 P24L~P25L 間之河道(如圖 27)，亦呈現色塊變化，沖刷深度約為 0.3~1.5m 左右，觀察影像該變化係為表層粒料被沖刷所致，(如圖 26 及圖 30、31)，而 P24L~P25L 間鼎型塊之排列依舊整齊，僅於 P24L~P25L 河道固床鼎型塊與 P24L 基礎鼎型塊間形成一局部沖刷河槽，並因河槽側刷作用導致 P24L 下游側局部鼎型塊側傾(如圖 30 紅圈處)。



圖 26 兩期(07/16、08/20)數值三維點雲模型

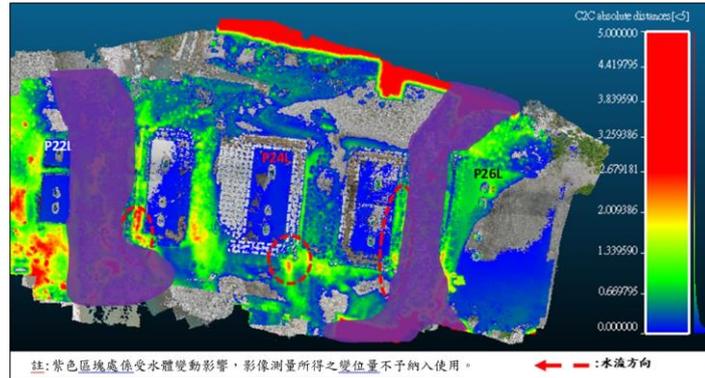


圖 27 兩期數值地形差異等深圖(07/16 與 08/20)

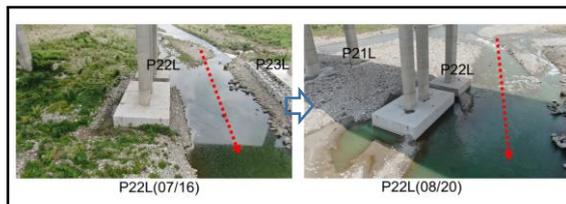


圖 28 07/16 與 08/20 (P22L)

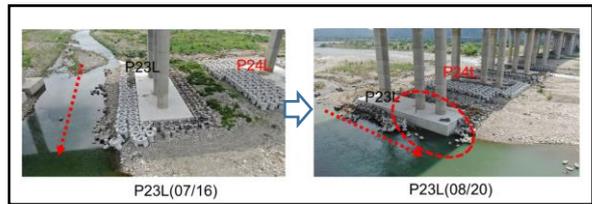


圖 29 07/16 與 08/20 (P23L)

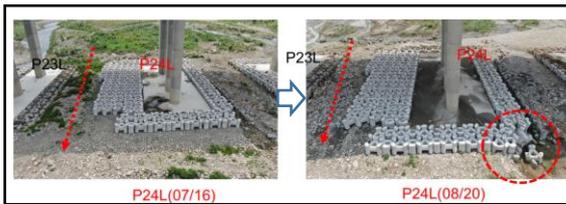


圖 30 07/16 與 08/20 (P24L)

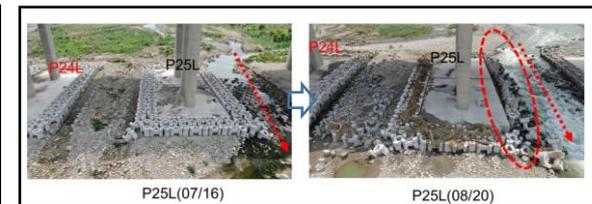


圖 31 07/16 與 08/20 (P25L)

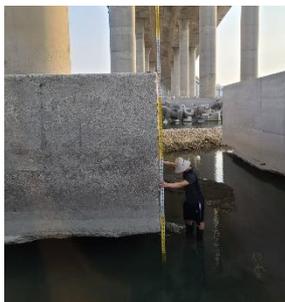
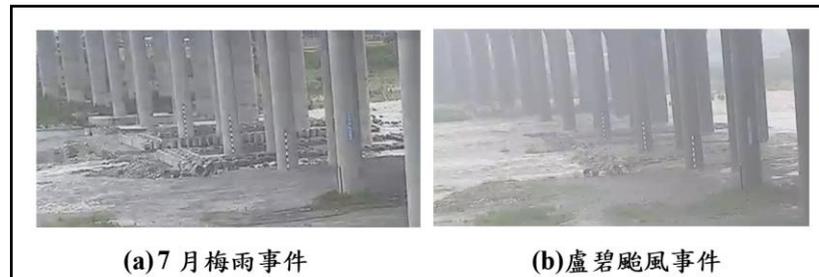


圖 32 P22L 沖刷裸露情形



(a) 7月梅雨事件

(b) 盧碧颱風事件

資料來源:交通部國道高速公路局交通控制中心

圖 33 降雨事件試驗現場流況影像



資料來源:經濟部水利署水文資訊網整合服務系統。

圖 34 臺 1 線大甲溪橋水位歷線圖

表 2 盧碧颱風事件後試驗場址鼎型塊變化情形

	鋪設面積(m <sup>2</sup> )	流失面積(m <sup>2</sup> )	流失比(%)	傾倒面積(m <sup>2</sup> )	傾倒比(%)	備註
P23L	567	197	34.74	93	16.40	
P24L	1,087	N/A	N/A	25	2.30	鋪設土工織布
P25L	694	92	13.26	141	20.32	

#### 4.6.3 08/21 與 10/21

本次比對係為瞭解圓規颱風事件對於試驗場址之影響，透過前後期數值三維點雲模型(如圖 35) 進行套疊差異比較(如圖 36) 以及各橋墩前後期影像比較(如圖 37~圖 41)，因本次事件石岡壩放流量(如圖 21)與河床水位高(圖 34 藍圈處)與 6-7 月間梅雨事件(圖 34 綠圈處)相似，觀察點雲套疊(如圖 36)及現場拍攝影像(如圖 37~圖 41)發現，本次降雨事件對河床沖刷及鼎型塊並無太大影響。

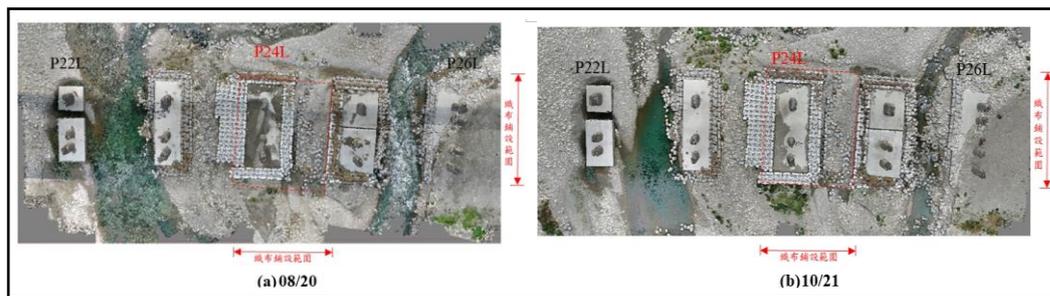


圖 35 兩期(08/20、10/21)數值三維點雲模型

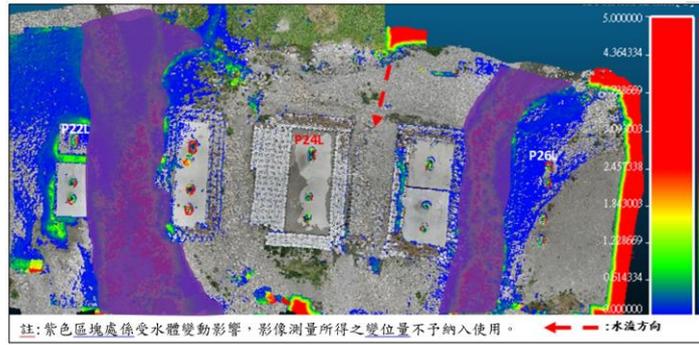


圖 36 兩期數值地形差異等深圖(08/20 與 10/21)



圖 37 08/20 與 10/21 (P22L)

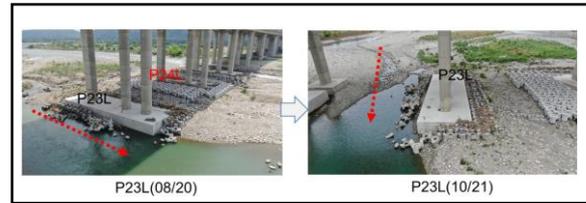


圖 38 08/20 與 10/21 (P23L)

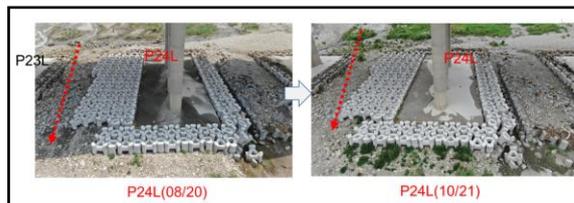


圖 39 08/20 與 10/21 (P24L)

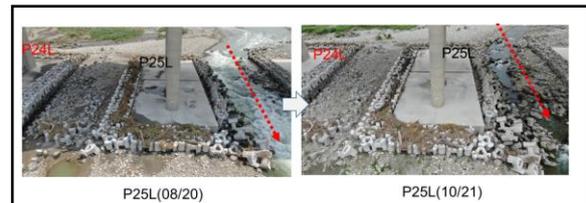


圖 40 08/20 與 10/21 (P25L)

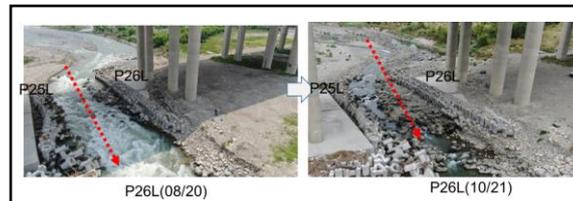


圖 41 08/20 與 10/21 (P26L)

## 五、成效評估

針對 110 年重要降雨事件過後，本計畫共進行 4 次之現場 UAV 測量及觀測作業，考量第 1 次初始地形 UAV 觀測作業後，因養護單位已進行表面地形整理，初始地形已受人為因素干擾，致三維模型套疊後之結果較無參考價值之因素外，另經檢視 8 月份盧碧颱風之降雨事件後，石岡壩放流量已達 587.8cms，為其他 3 次事件之 2 倍流量，對於試驗區河道及保護工亦有明顯之變化，故以 8 月份盧碧颱風事件做為成效評估之主要探討對象，說明如下：

### 5.1 試驗組(鼎型塊+土工織布)

1. **P24L~P25L**：查閱盧碧颱風降雨事件現場河川水位影像，本次事件相較於前 2 次河床水位明顯抬高許多，觀察河川水位影像亦已漫淹至 P23L~P25L 間，造成沖刷現象，透過數值三

維模型套疊比對試驗位置(P24L~P25L)，呈現色塊變化，觀察影像該變化係為表層粒料被沖刷所致，沖刷深度約為 0.3~1.5m 左右，深度未能持續加深，而底下鼎型塊之排列依舊整齊。

2. **P24L**：下游側局部鼎型塊有側傾之現象(如圖 30 紅圈處)，係因 P24L~P25L 河道固床鼎型塊與 P24L 基礎鼎型塊間存在一粒料回填區(施工間隙)，為相對較為軟弱之河床粒料，因而形成一沖刷河槽並引起側刷作用所致。

## 5.2 對照組

1. 因河道深槽區位置改變，使得未施作鼎型塊保護之 P22L 橋墩基礎周圍較有明顯之沖刷現象，約造成 0.8m 之沖刷深度，並已呈現基樁裸露之現象。
2. 因本次事件放流量為前 2 次事件之 2 倍，使得河床粒料被推移掏空，而造成 P23L 及 P25L 周圍鼎型塊側傾及流失之明顯沖刷現象。
3. P22L~P23L 為原河道主深槽區，P25L~P26L 則因 5-6 月間梅雨事件後而開始形成另一深槽區，並於 8 月份盧碧颱風事件後有擴大之趨勢，相較此兩深槽區，P25L~P26L 間之深槽區因坡度較陡，流速快而具沖刷潛勢，周圍之鼎型塊逐漸開始有側傾及流失之情形。

## 六、結論與建議

1. 經前述試驗組與對照組結果比較，觀察本計畫試驗區之河床及基礎周圍鼎型塊變化情形，除 P24L 下游側因施工所產生之間隙，而造成局部鼎型塊側傾之現象外，其餘鼎型塊皆未產生明顯之位移現象，以目前所觀測之資料(表 2)來分析，P23L 及 P25L(未鋪設地工織布)於鼎型塊之流失比及傾倒比皆明顯高於 P24L(已鋪設地工織布)，初判應與地工織布能有效阻斷向下滲流掏刷作用有關，後續將持續進行觀察，進一步驗證地工織布之效用。
2. 本計畫運用無人飛行載具結合攝影測量技術，協助於每次重要降雨事件後快速量化記錄鼎型塊變化情形，並據以評估地工織布保護工法之保護成效。經實際測試結果顯示，本計畫所規劃之橋基保護工觀測方式具有可行性，將可提供相關橋管機關於執行檢測作業時，可運用工具之參考方案；此外，相較傳統地面測量，其量測成果可由「點」提升至「面」，減少人力支出及提升工作效率。
3. P24L 下游側有局部鼎型塊側傾之現象，係因疊放河床間鼎型塊所留施工間隙沖刷所造成，建議養護管理單位施工時可預先丈量規劃河道間可佈放之最大鼎型塊排數，若存有施工間隙之虞時，於保有鼎型塊間互鎖之原則下，適當的調整增加鼎型塊間之距離，以減少或消除間隙沖刷問題。

## 七、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. 潘坤亮(2003)，「地工織布於海洋環境中之工程特性」，屏東科技大學土木工程系碩士論文。
2. 邱永芳、胡啟文、李良輝、張庭榮(2014)，「道路邊坡滑動自動攝影監測系統之研究」，交通部運輸研究所。
3. 邱永芳、胡啟文、李良輝、張庭榮(2015)，「近景攝影運用於港灣構造物監測之研究」，交通部運輸研究所。
4. 經濟部水利署(2016)「大甲河流域整體治理綱要計畫(101~104 年) 執行檢討及改善策略研擬總報告」。
5. 邱永芳、賴瑞應、胡啟文(2017)，「近景攝影測量應用於渠槽試驗底床量測之探討」，中國土木工程學刊，44(6)，59-69 頁。
6. 賴瑞應、胡啟文、曾文傑(2019)，「國道三號大甲溪橋橋墩保護工法研究」，交通部運輸研究所。
7. 賴瑞應、胡啟文、曾文傑(2020)，「地工織物應用於橋墩基礎保護之可行性研究」，交通部運輸研究所。
8. 賴瑞應、黃宇謙、莊凱迪、林佳欣(2021)，「地工織布應用於橋墩基礎保護之沖刷模擬研究」，交通部運輸研究所。
9. Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1977). Effects of sediment gradation on clear water scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.103, No.10, 1209-1212.
10. Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.125, No.1, 59-65.