

鼎型塊織布橋基保護工法三維數值水槽模型建置

胡啟文¹ 賴瑞應² 賴俊呈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 FLOW-3D 建置三維數值水槽模型，以探討鼎型塊結合織布之設置方式及可模擬程度，做為後續計畫於現地保護工數值模擬使用及分析之依據，以合理模擬分析及評估現地保護工之成效。

本研究利用土中應力傳遞法的方式，改善數值模式中鼎型塊與下方沉積物未能耦合分析之問題，並與室內水工模型試驗結果進行比較，亦呈現不錯之模擬效果，其設置經驗及方式，將可應用於現地保護工之數值模擬使用。最後，本工法透過室內水工模型試驗、現地鋪設試驗及數值水理分析模式之探討，以建立多元分析驗證及成效評估方法，相關成果可供橋梁管理機關維管之應用。

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，南崁溪崁下橋、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沖刷，藉以保護橋墩基礎，然於河水長期沖刷下，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，以土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土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。

本工法經本所過去土工織布應用於橋墩基礎保護之室內水工模型試驗及現場鋪設試驗成果^{[6][8][9][10][11]}，初步驗證可強化鼎型塊基底粒料穩定性，惟仍需透過超大豪雨事件進一步驗證耐洪性。爰除透過現場試驗方式來驗證外，本研究嘗試以 FLOW-3D 建置三維數值水理分析模型，初期先以室內水工模型試驗結果檢定數值模擬所需參數來建置三維數值水槽模型，藉以探討鼎型塊結合織布之條件設置及可模擬程度，以獲取相關設置方式及經驗，做為後期應用於現地試驗場址數值模擬使用及分析之依據，以合理模擬分析及評估現地保護工之成效，期以建立多元分析驗證及成效評估方法。

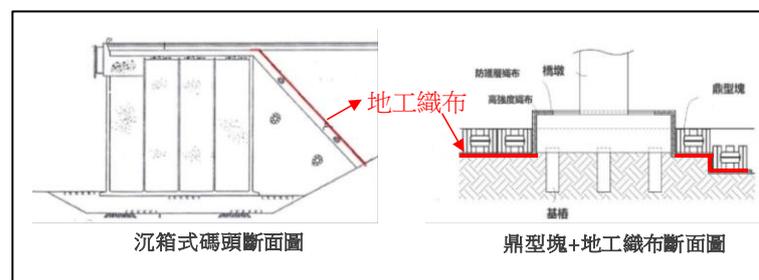


圖 1 本工法構想來源

二、文獻回顧

「應用 FLOW-3D 模擬橋墩周圍流場及底床冲刷之研究」^[5]為成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生劉家齊於民國 104 年發表之碩士論文，係利用 FLOW-3D 模擬橋墩周圍流場及冲刷之情形，於定量流況下，非均勻橋墩冲刷之模型試驗對數值模式進行驗證，結果顯示 FLOW-3D 數值模式可以合理模擬橋墩冲刷情形。

Brian et al.(2019)^[3]參考 Khosronejad(2012)^[2]三維定速水流之圓柱和菱柱橋墩冲刷試驗結果顯示，於相同試驗條件下，利用 FLOW-3D 進行模擬比較，菱柱橋墩模擬的最大冲刷深度為 8.5cm，與試驗值 8.3cm 相差不到 3%，而橋墩下游的沉積模式部分，模擬的最大沉積高度為 6.0cm，與試驗值 5.5cm 相差不到 9%(圖 2)；圓柱橋墩數值模擬的冲刷坑的平均深度約為 7.5cm，接近橋墩前部約 60 度的位置，與最大試驗冲刷深度 6.7cm 相差不到 12%，而在橋墩下游最大沉積高度為 2.9cm，與試驗量測的 4.1cm 相差不到 30%，數值模擬沉積的位置相對於試驗較為向下游偏移(圖 4)，在下游沉積高度及位置模擬上與試驗有些差異。圖 3 及圖 5 分別為菱柱橋墩及圓柱橋墩數值模擬與試驗的最大冲刷深度隨時間變化的情況，整體而言，其模擬值與試驗值之發展，呈現趨勢相近之結果，可合理模擬床載運、搬運、沉降...等型態下之三維動床分析。

依前述文獻應用案例，可知 FLOW-3D 使用於橋墩冲刷數值模擬，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。

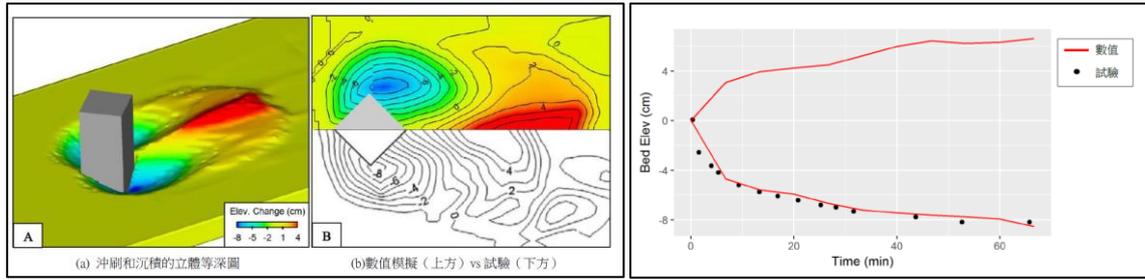


圖 2 菱柱橋墩數值模擬與試驗底床
沖刷結果比較

圖 3 菱柱橋墩數模最大沖刷深度
和沉積高度與試驗數據比較

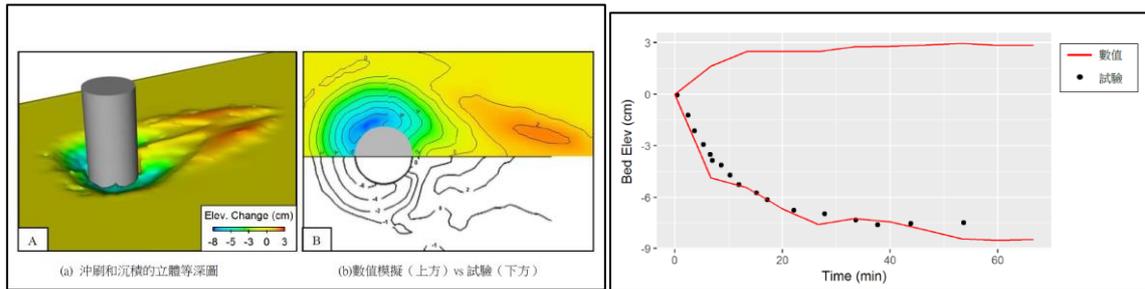


圖 4 圓柱橋墩數值模擬與試驗底床
沖刷結果比較

圖 5 圓柱橋墩數模最大沖刷深度
和沉積高度與試驗數據比較

三、研究方法

3.1 數值分析軟體

本研究以 FLOW-3D 進行模擬分析，係為計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)軟體，以有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) 與控制體積(control volume)之觀念，將流體與障礙物交界面積結合至方程式中，並利用多區塊結構網格(Multi-block Grids)、流體體積法(Volume of Fluid, VOF)等技術，解決複雜之三維物理流體問題。

3.1.1 數值方法

1. 流體體積法(Volume of Fluid, VOF)

自由液面(free surface)會隨著時間改變，在數值方法中處理起來相當不易。流體體積法是對自由表面或二種流體介面的一種數值處理方法，提供經由固定網格追蹤流體介面的方法以準確處理介面。流體體積法為 Hirt and Nichol(1981)^[1]所創，係將計算之網格點另外再定義一個流體比例函數 $F(x,y,z,t)$ ， F 將隨時間變化反映表面變動，其位置與壓力等變數相同，皆位於網格中心點，其值介於 0~1 之間，當 $F=1$ 表示流體完全充填；反之，當 $F=0$ 表示沒有流體；當 F 介於0~1 之間表示部分充填，而其部分充填的元素就是流體介面，如圖 6 所示。

2. 體積分率法(Fractional Area/Volume Obstacle Representation, FAVOR™)

運用控制體積的觀念，使網格與幾何形狀完全獨立，此方法可避開冗長的整理網格與幾何形狀的工作，使結構體保有簡單規則的網格，即使模型非常複雜，也能夠精確的描述外型(圖 7)。FAVOR 定義矩形網格內一般幾何形狀的區域，每一個矩形立方體六個面的流通面積比與自由出入的體積，以此矩形立方體所構成之網格定義複雜的幾何形體。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中，如:在二個元素的共有面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面，以讓流體自由通過的面積當做一個乘數，若沒有可讓流體自由通過的面積，則不可能有對流的通量。

3. 多區塊結構網格

細化網格可增加模擬的精確度，但也易造成系統資源的負擔，故使用者必須在精準度與效率間取得平衡。FLOW-3D 具有多區塊結構網格，可將龐大且多餘的網格數量縮減，以達加速運算效能，減少不必要的資源浪費，使網格可擁有更多元且精準之分配，如圖 8 所示，網格與幾何形狀自動耦合，可以有效的節省網格數目，加快運算的收斂性。

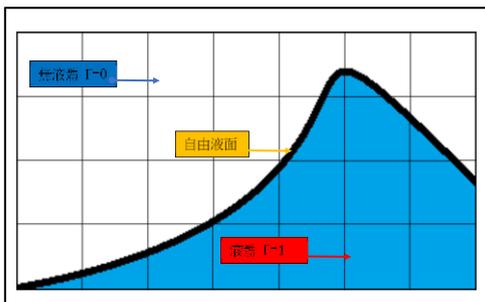


圖 6 流體體積法之自由液面示意圖

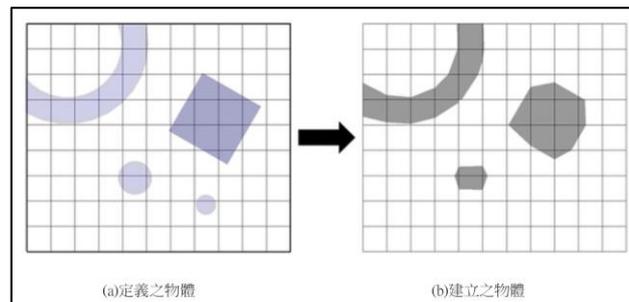
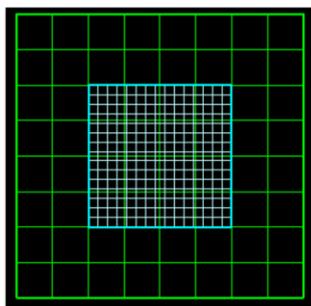
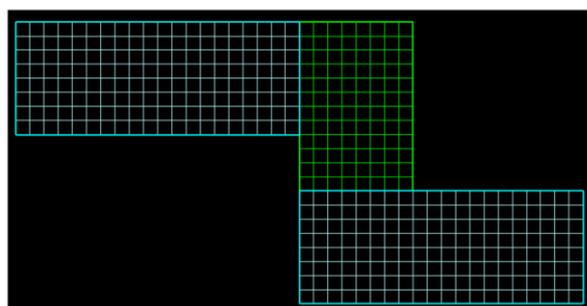


圖 7 FLOW-3D FAVOR 示意圖



(a) 槽狀網格



(b) 鏈結網格

圖 8 多區塊結構網格示意圖

3.1.2 控制方程式

1. 質量連續方程式

質量連續方程式一般形式為:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

其中: V_F :流體體積比、 ρ :流體密度、 R_{DIF} :紊流擴散項、 R_{SOR} :質量源項， (u,v,w) 分別為 xyz 方向的流體速度、 (A_x,A_y,A_z) 分別為 xyz 方向流動的通量面積比。

2. 動量方程式

卡式座標系統整理之動量方程式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $U_w=(u_w, v_w, w_w)$:流場中模擬物體之運動速度、 (b_x, b_y, b_z) 是通過多孔介質或閘板時減少的流動、 (G_x, G_y, G_z) :物體之加速度、 $U_s=(u_s, v_s, w_s)$ 是流體表面速度、 δ :壓力源項形式指標，當為靜壓力時(static pressure)， $\delta=1.0$ ；當為停滯壓力時(stagnation pressure)，流體進入計算領域之流速為 0，則 $\delta=0$ 。 (f_x, f_y, f_z) 為 xyz 方向的黏滯項。

3. 流體剪應力

τ_{ij} 代表流體剪應力(shear stress)，第一下標 i 為作用面，第二下標 j 為作用方向，各流體剪應力分量如下:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\mu \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = -\mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

3.1.3 紊流傳輸模式

FLOW-3D 提供了 5 種紊流模式，分別是 Prandtl 混合長度模式、單一方程，二方程之 $k - \varepsilon$ 和 RNG 模式，以及大渦流模擬模型(LES 模式)。於紊流模式之選擇上，LES 模式則要極細的網格，所占資源與計算時間大，故不考量。RNG 與 $k - \varepsilon$ 模式適合低強度紊流和強剪力流體區域，而本計畫沖刷試驗區位於完全發展的近穩定均勻流區域中，較不適用上述模式之適用情境，而 Prandtl 混合長度模式適合在完全發展的近穩定均勻流使用，較符合本計畫分析情境，故選用該模式進行紊流模式分析，而不選用 FLOW-3D 較為建議的 RNG 模式。

3.1.4 沉積物模式

FLOW-3D 對於流體中含有懸浮沉積之網格，轉換為網格中液體含有之沉積物濃度，如此則有利於模式計算。假設單位網格內濃度、密度與黏度均勻，若要計算出懸浮泥沙濃度，可對不同沉積物求解各自之傳輸方程式，該方程式可表示如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (u_s C) = \nabla \cdot \nabla (A_j C) \quad (5)$$

其中: C :懸浮泥沙濃度(Suspended sediment concentrton)、 u_s 與懸浮載之速度(Suspended sediment velocity)有關。

1. 底床載

底床載遷移率會針對不同沉積物個別計算，會影響底床載變成懸浮載前所受之臨界剪應力，該參數可參考 Meyer-Peter Muller(1948)之方程式決定，預設值為 8.0，建議在低傳輸時調整為 5.0，高傳輸時調整為 13.0

底床載遷移率公式可表示如下:

$$q_b = \phi_B \sqrt{\|g\| \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) d_{50}^3} \quad (6)$$

其中: 無因次項中 ϕ_B 為底床載傳輸率(Dimension bedload transport rate)，可從三種不同情況中挑選。

2. 懸浮載

流體與沉積物之交互作用中，沉積物會有兩種同時發生之微小過程，第一種為沉積物之底床載被淘刷至流體中，第二種為流體中懸浮載沉積成底床載，兩者共同影響著底床載與懸浮載之淨交換率，在淘刷現象中顆粒離開底床之後運動速度會提升，其運動速度變化基於 Mastbergen 和 Van Den Berg(2003)所提出之數值模型，該公式可表示如下:

$$E = \alpha_i n_b d_{50}^{0.3} (\tau - \tau_c)^{1.5} \sqrt{g d_{50} (s - 1)} \quad (7)$$

其中: E :淘刷率、 α_i :淘刷率之係數、預設值為依據 Mastbergen and Von den Berg(2003)數
據設定為 0.018、 n_b :表面曲面法線向量、 d_{50} :沉積物無因次之粒徑、 s :比重、 τ :剪應力(Dimensionless shear stress)、 τ_c :臨界剪應力。

3. 剪應力計算

前節所述之底床載傳輸及淘刷速率均需選擇紊流模式，要定義這兩個方程式需在邊界附近之條件使用對數定律，其方程式可表示如下:

$$\frac{u}{\tau} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{y}{C_s d_{50}} \right) + 8.5 \quad (8)$$

其中: u :近底床處水流流速、 u' :代表剪應力、 k :馮卡門常數(Von Karmen constant)，一般為 0.41、 y :與牆壁之距離、 C_s :粗度乘積。

3.2 水槽試驗

1. 試驗水槽配置說明

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 9)，鋪設試驗底床質及橋墩基礎，進行水工模型沖刷試驗。

水槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於試驗進行時之觀測，水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 10)。

供水系統以 16m³/min 之抽水馬達從蓄水池中抽水，經由給水管送至定水頭箱，供應水量至水槽中，定水頭箱至水槽間設有一顯示式管路手動矩形閘閥，可控制流量流至水槽中。水流經水槽後流入尾水池，再經由排水道流進蓄水池，形成一供水循環系統(如圖 11)。

本試驗橋墩模型依據國道 3 號大甲溪橋的實際尺寸，以縮尺 100 分之 1 製作(如圖 12)。



圖 9 水槽斷面圖



圖 10 水槽尾水控制閘門

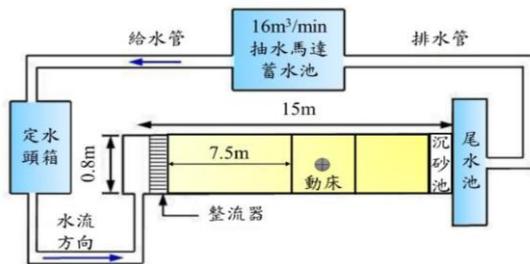


圖 11 試驗水槽配置示意圖



圖 12 試驗橋墩模型尺寸

2. 試驗規劃

本研究參照 Brian Fox(2019)對於菱形及圓形柱之沖刷試驗與數值模擬結果之探討方式，利用本所試驗水槽先以圓形柱及方形基礎版之沖刷試驗，提供建置三維數值模式之參數調整及驗證模型之正確性，待完成前述驗證性測試後，再進行矩形基礎版+鼎型塊，以及矩形基礎版+鼎型塊+織布之沖刷試驗，來探討 FLOW-3D 於模擬鼎型塊+織布之設置方式及可模擬程度(圖 13)。



圖 13 水槽試驗規劃

3.3 數值水理模型建置

1. 網格建置

數值模型建置係依 3.2 節室內水工模型水槽試驗尺寸建置，水槽總長度為 15 公尺、寬度為 0.8 公尺，距入口 7.5m 至 9.5m 之區段為試驗區做為動床沖刷使用，其餘為定床區，橋墩則設置於試驗區內(如圖 11)，動床區內橋墩周圍之水理分析為主要探討範圍，為節省網格使用量並使運算效率化，採漸進式網格方式建立分析模型，將網格由邊界逐漸向橋墩密集化，模型網格設置如圖 14 所示。

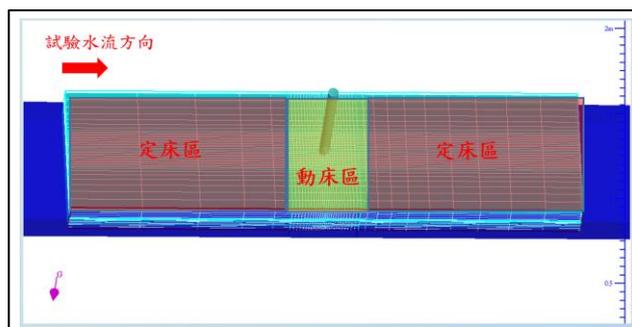


圖 14 數值水理模型網格設置情形

2. 數值分析主要輸入參數

主要輸入參數分為邊界條件及泥砂參數兩大部分，分述如下：

(1) 邊界及初始條件：

本計畫係模擬試驗水槽橋墩模型在定流量下之沖刷分析，初始條件給定固定水位(10.2cm)及標準大氣壓力，上游為固定流量輸入，故以固定體積流率(Volume flow rate, Q)設定邊界條件，左、右及底面為試驗水槽壁體，故將此三面之邊界設定為屏障邊界(Wall, W)；試驗水槽為 open channel，下游放水口為自由流出，係直接與大氣接觸，故以給定壓力(Specified pressure, P)設定為邊界條件，設定情形如表 1 及圖 15 所示。

表 1 數值模擬邊界設定

邊界位置	邊界選項
Xmin	Volume flow rate, Q
Xmax	Specified pressure, P
Ymin	Wall, W
Ymax	Wall, W
Zmin	Wall, W
Zmax	Specified pressure, P

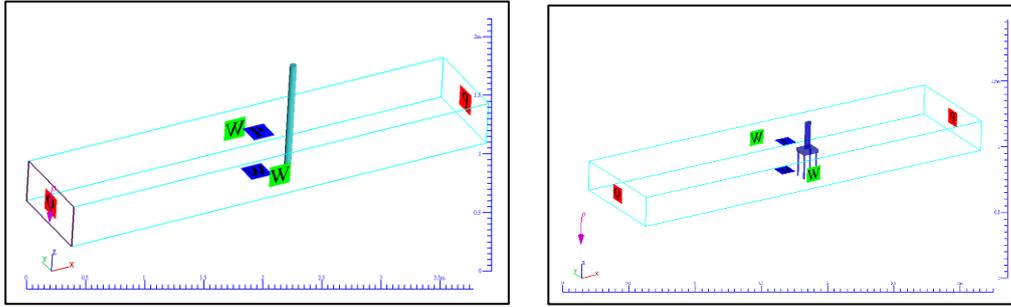


圖 15 邊界條件設定情形

(2) 主要泥砂參數:

有關沉積物沖刷模組所需之主要參數包含粒徑(d_{50})、乾密度(ρ_d)、底床粗糙度/ d_{50} 比(Bed roughness/ d_{50} ratio, n/d_{50})及沖刷公式...等, 透過土壤物理性質試驗結果, d_{50} 取 1.3mm、 ρ_d 取 2.44t/m³, 而 n/d_{50} 及底床載公式(Bedload equation)之選用, 則參考 Brian et al.(2019) [3]利用 FLOW-3D 進行三維定速水流之圓柱和菱柱橋墩沖刷試驗的模擬結果, 在 $n/d_{50}=6$ 及選用 Nielsen 沖刷公式, 有較好之吻合性, 如圖 16 所示, 因本計畫模擬背景與該文獻相近, 故取前述參數進行模擬分析。

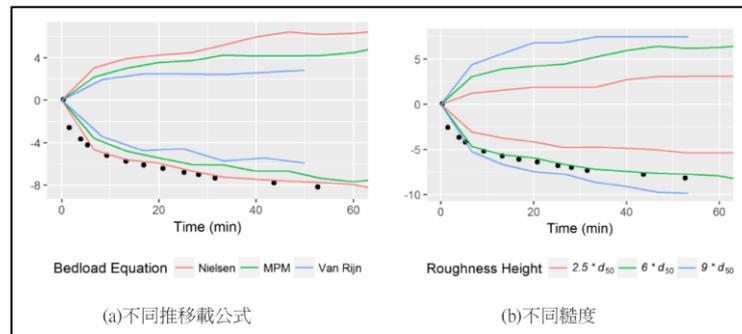


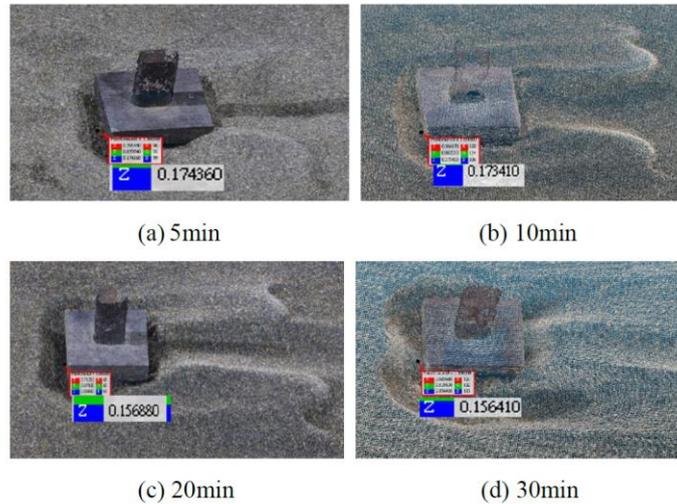
圖 16 數值模擬結果與試驗結果之比較

四、結果與討論

4.1 三維數值模擬矩形版基礎沖刷驗證

應用 FLOW-3D 沉積物模式對矩形版基礎進行模擬, 並參考實際試驗調整數值水槽相關參數後, 進行試驗與數值模擬比較。本計畫水槽試驗共規劃 4 組沖刷時間, 為 5min、10min、20min 及 30min, 並將沖刷情形以攝影測量方式記錄三維地形(DSM), 如圖 17 所示, 5min、10min、20min 及 30min 沖刷時間下最大沖刷深度, 分別為 2.6cm、2.7cm、4.3cm 及 4.4cm, 而數值模擬分析的部分, 因可連續時間輸出結果, 可將該結果製成各時間點所對應之最大沖刷深度之關係, 並將水槽試驗沖刷數據, 併同整理如圖 18 所示, 可觀察出水槽試驗結果與數值模擬之結果, 在最大沖刷深度趨勢及數據呈現上, 有不錯之模擬結果。

利用 FLOW-3D 後處理模組(POST)，將 10min 模擬結果製成沖刷深度之等深圖，並將同樣沖刷時間下之水槽試驗沖刷深度等高線圖，兩者進行比較(如圖 19)，可觀察出最大沖刷位置皆位於上游側角隅處，沖刷坑的形狀皆為圓弧形，整體而言，儘管實驗與數值理論存在一定差距，仍可反應出最大沖刷深度、位置與形狀，對於柱體後方淤積之情形亦有模擬出來。



*註: Z 為最大沖刷深度高程值，底床原始高程(H)為 0.2m，各組最大沖刷深度之計算為(H-Z)

圖 17 水槽試驗不同時間下沖刷結果(矩形版基礎)

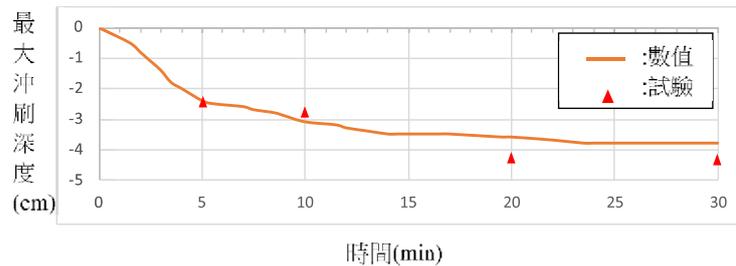


圖 18 水槽試驗與數值模擬在不同時間下沖刷結果比較(矩形版基礎)

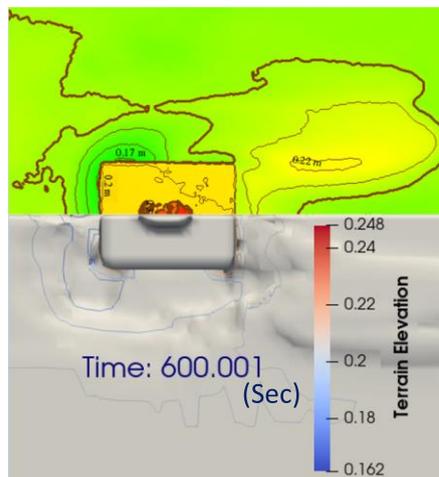
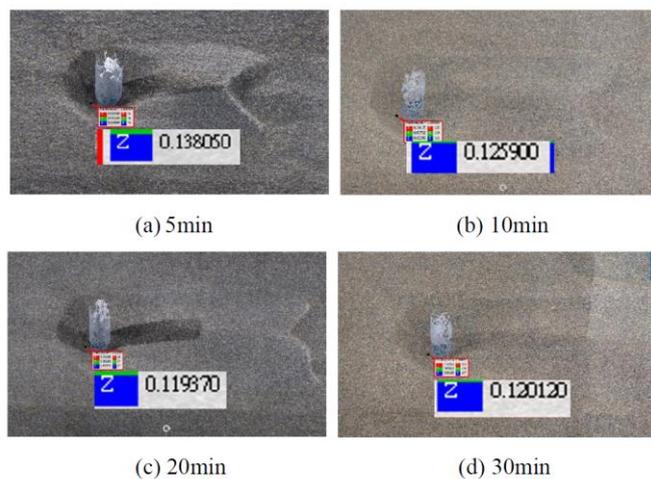


圖 19 水槽試驗(上)與數值模擬(下)沖刷地形比較(10min · 矩形版基礎)

4.2 三維數值模擬圓柱體沖刷驗證

依前述方柱體沖刷驗證之規劃，進行試驗與數值模擬比較，其 5min、10min、20min 及 30min 共 4 組水槽試驗沖刷時間沖刷情形之三維地形(DSM)，如圖 20 所示，5min、10min、20min 及 30min 沖刷時間下最大沖刷深度，分別為 6.2cm、7.4cm、8.1cm 及 8cm，而數值模擬結果所製成各時間點所對應之最大沖刷深度之關係，以及水槽試驗沖刷數據，併同整理如圖 21 所示，可觀察出水槽試驗結果與數值模擬之結果，其在最大沖刷深度趨勢及數據同方柱體模擬結果，皆可模擬出相似之結果。

利用 FLOW-3D 後處理模組(POST)，將 10min 模擬結果製成沖刷深度之等深圖，並將同樣沖刷時間下之水槽試驗沖刷深度等高線圖，兩者進行比較(如圖 22)，可觀察出最大沖刷位置皆位於上游側頂弧處附近，沖刷坑的形狀皆為圓弧形，整體而言，仍可反應出最大沖刷深度、位置與形狀。



*註: Z 為最大沖刷深度高程值，底床原始高程(H)為 0.2m，各組最大沖刷深度之計算為(H-Z)

圖 20 水槽試驗不同時間下沖刷結果(圓柱體)

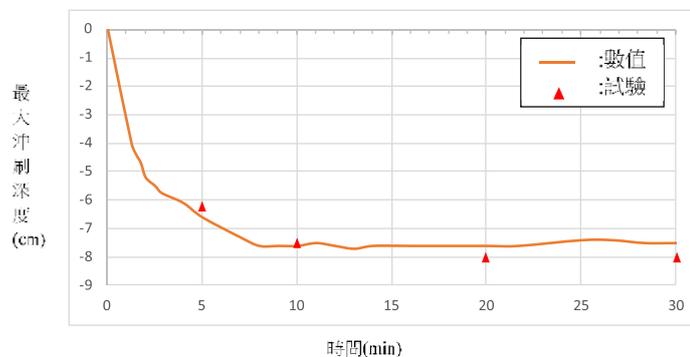


圖 21 水槽試驗與數值模擬在不同時間下沖刷結果比較(圓柱體)

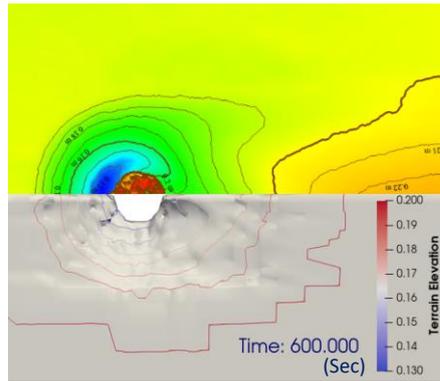


圖 22 水槽試驗(上)與數值模擬(下)沖刷地形比較(10min，圓柱體)

4.3 鼎型塊+織布三維數值沖刷模型建置

經前述利用矩形版基礎及圓柱體進行驗證分析，確認相關初始條件、邊界條件及參數設定適用性後，續以國道 3 號大甲溪橋相同型式之方柱體為橋墩模型，並配置鼎型塊及土工織布保護工進行模擬，以探討 FLOW-3D 於模擬鼎型塊及土工織布保護工之設置及可模擬程度。

1. 鼎型塊保護工三維數值沖刷模擬

(1) 複雜形體模型建置

FLOW-3D 內建簡單的模型可以建置，如球體、圓柱體、圓錐體、立方體及環形體，但對於較複雜的形體，則需借助其它繪圖軟體(如 Autodesk Tinkercad)來建置，並匯出*.stl 文件檔，即可直接匯入至 FLOW-3D 數值模擬圖台上。本研究因有鼎型塊之複雜型體，且多塊並須排列之需求，故透過 Autodesk Tinkercad 免費線上繪圖平台，等比例繪製與排置後(圖 23)，再匯入 FLOW-3D 使用之(圖 24)。

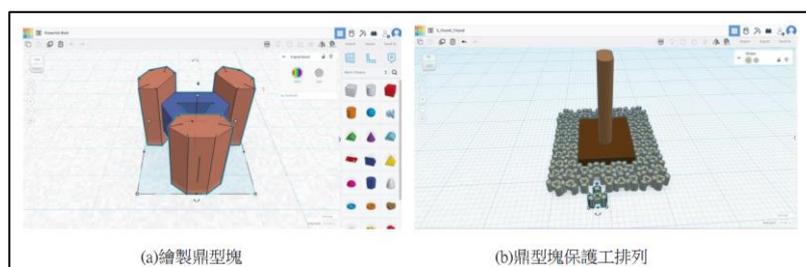


圖 23 利用 Autodesk Tinkercad 繪圖平台製作並排置三維模型

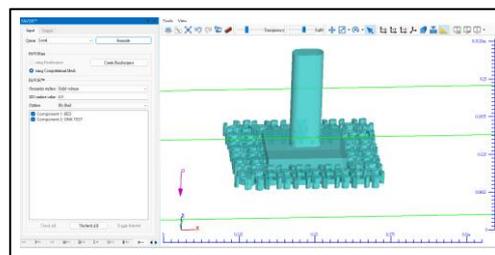


圖 24 模型文件(.stl)匯入至 FLOW-3D

(2) 網格效率化設定

因本模型左右對稱，模擬結果亦為對稱情形下，可沿 X 向取半側模型分析，切割軸之邊界則調整為對稱邊界(Symmetry, S)(圖 26)，減少一半網格之分析量；另鼎型塊屬多邊形複雜形體，雖可利用 FLOW-3D 所提供之 FAVORTM 功能將複雜鼎型塊外型精確的描述，但因鼎型塊體積相較於橋柱體小，需透過加密網格方式，方能將其外型完整數化出來(圖 25)，卻會導致運算量增加而費時，使得模擬效率降低，因此，可運用 FLOW-3D Restart 功能，先以較少網格數進行全域的流況模擬(取得流速、水位等資料)，俟穩定後(圖 27)，再將分析區域縮小並加密網格，進行局部(柱體及保護工區域)冲刷模擬分析(圖 28)，如此，可將全域流況模擬資料做為局部分析之邊界條件，以確保能在完整描述鼎型塊外型下，來增加運算速度，提升分析效率。

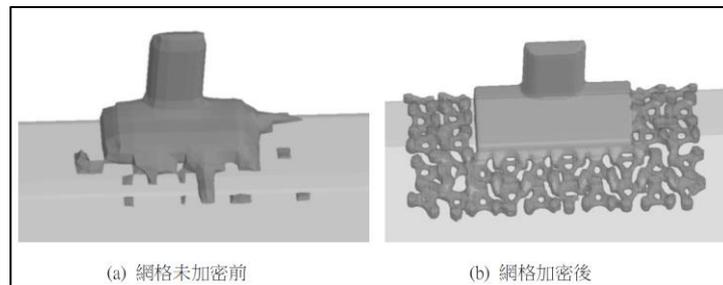


圖 25 鼎型塊數值模型在不同網格下數化情形

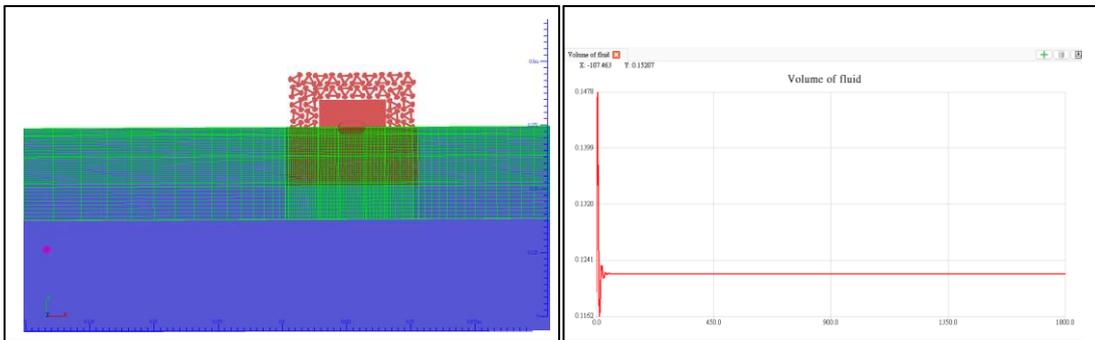


圖 26 數值模型取半對稱分析

圖 27 全域流況分析-流體穩定情形

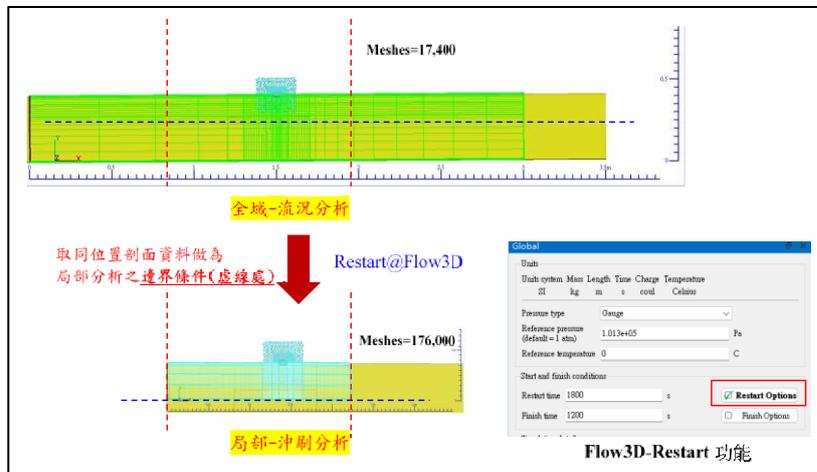


圖 28 局部網格細化模擬分析

(3) 鼎型塊下方沉積物參數設定

FLOW-3D 雖有沉積物模式可進行沖刷模擬，但相關保護工(鼎型塊、土工織布)模擬分析之模組，目前尚未有對應之模組可供應用，因此，未能模擬當鼎型塊基底粒料被沖刷流失後，鼎型塊會隨之下沉之耦合分析情形，而使得分析時鼎型塊與橋墩基礎視為一體，且為無質量狀態之阻水物體。然在實際物理狀態下，鼎型塊保護工法施作後，會因自身重量使得底下粒料單位體積的重量而加大，即粒料密度加大，而地表加載對於土中不同深度應力增量之計算，則參考土壤力學 2:1 應力傳遞法(圖 29)，來換算鼎型塊下方不同深度所對應之密度(表 2)，並據以應用在數值模式鼎型塊下方沉積物參數之設定條件，得到近似模擬之分析效果。

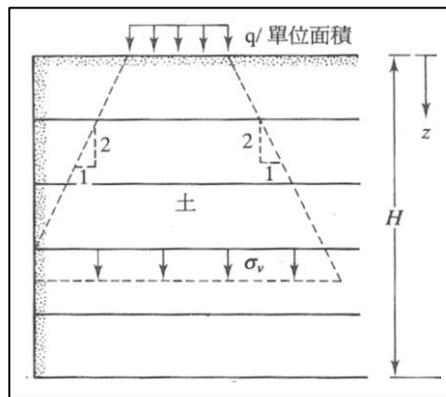


圖 29 2:1 土中應力傳遞法

表 2 依 2:1 傳遞法所得鼎型塊下不同深度所對應之密度

Z(cm)	dq _z (g/cm ²)	平均dq _z (g/cm ³)	Block+dq _z (g/cm ³)
0.1	3.25	2.90	5.34
0.2	3.16		
0.3	3.08		
0.4	3.00		
0.5	2.92		
0.6	2.85		
0.7	2.78		
0.8	2.72		
0.9	2.65		
1	2.59		
1.1	2.53	2.30	4.74
1.2	2.48		
1.3	2.42		
1.4	2.37		
1.5	2.32		
1.6	2.27		
1.7	2.22		
1.8	2.18		
1.9	2.13		
2	2.09		

*註: Z 為深度、dq_z 為應力增量、Block 為鼎型塊，底床粒料原單位重為 2.44(t/m³)

(4) 有無考量土中應力增量之比較

圖 30(a)為無考量土中應力增量之模擬結果，圖 30(b)為有考量土中應力增量之模擬結果，可觀察出前者產生大範圍之沖刷坑，後者則有減緩沖刷之現象，其與鼎型塊保護工實際設置後之保護情形相同，說明本數值模型在考量土中應力增量之設定條件，可達相近之模擬結果。

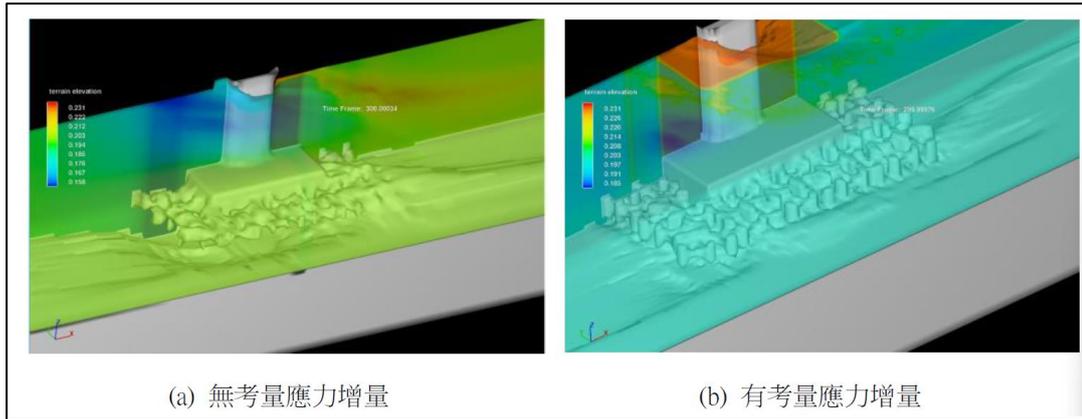


圖 30 有無考量土中應力增量後數值模擬結果之比較

(5) 數值沖刷模擬結果

依據前述測試結果之方式進行相關邊界條件、網格及參數等調整設定後，進行數值沖刷模擬，並與水槽試驗結果進行比較，確認模擬成效，圖 31 為數值模擬之結果，圖 32 為水槽試驗之結果，可觀察出除無法呈現鼎型塊因沖刷而下沉之耦合結果外，其在最大沖刷深度及周圍沖刷與淤積之情形，兩者相近，其模擬結果已有一定參考價值。

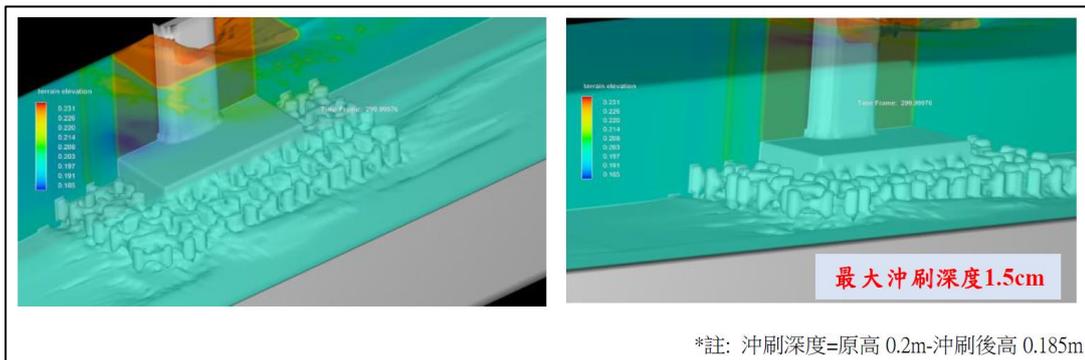


圖 31 方形基礎+鼎型塊保護工數值模擬結果(不同角度)



圖 32 方形基礎+鼎型塊保護工水槽試驗結果

2. 鼎型塊織布保護工三維數值沖刷模擬

(1) 土工織布(Geotextiles)參數設定

如前述因 FLOW3D 目前尚未發展保護工(鼎型塊、土工織布)模擬分析之模組，仍嘗試尋求以近似模擬的方式來設置，表 3 為織布之材料規格，其正向透水率為 $0.4(s^{-1})$ ，以白努利公式(Bernoulli's principle)求水頭差後，估算滲透量對於通過流量相當微小($<1\%$)，故在織布層之設置將忽略滲透行為，於鼎型塊下方設置一薄層(1mm)模型區域(圖 33)，藉以得到設置織布減緩淘刷之近似模擬效果。

表 3 土工織布材料規格表

項目	測試規範	單位	規格	
			MD	CD
抗拉強度	CNS13300	kN/m	≥ 250	≥ 250
極限延伸率	CNS13300	%	≤ 30	≤ 30
貫入強度(CBR)	ASTM D6241	N	≥ 30000	
正向透水率	CNS13298	s^{-1}	≥ 0.40	
有效開孔徑(AOS)	CNS14262	mm	≤ 0.425	

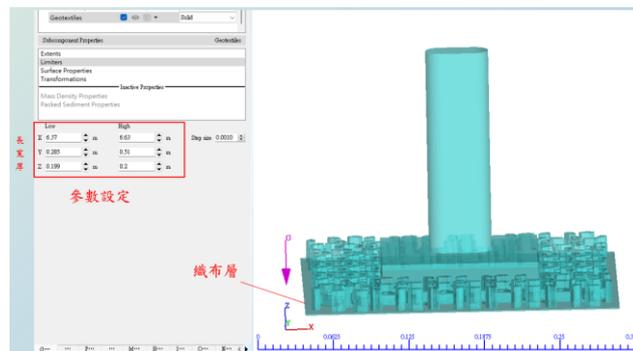


圖 33 土工織布設置情形

(2) 數值沖刷模擬結果

依據前述測試結果之方式進行相關邊界條件、網格及參數等調整設定後，進行數值沖刷模擬，並與水槽試驗結果進行比較，確認模擬成效，圖 34 為數值模擬之結果，圖 35 為水槽試驗之結果，可觀察出除無法呈現鼎型塊及土工織布因沖刷而下沉之耦合結果外，在上游側角隅皆為最大沖刷坑之位置，鼎型塊側邊皆有發展淤積之情形，因此，模擬結果在最大沖刷深度數值及周圍沖刷與淤積之情形，兩者相近，亦有不錯之模擬結果。

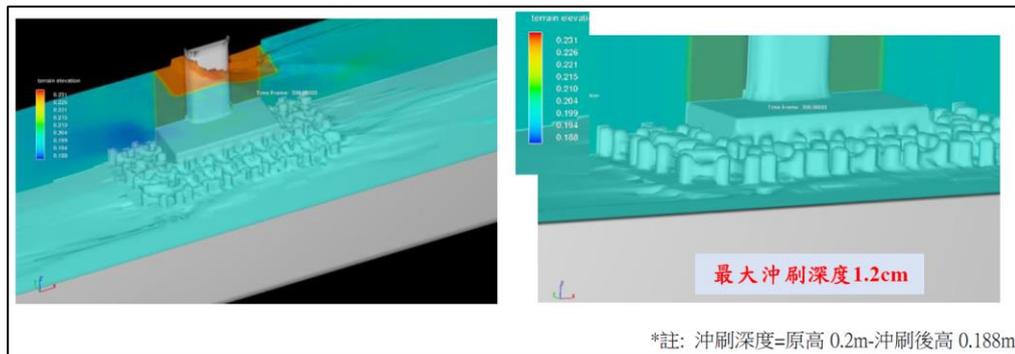


圖 34 方形基礎鼎型塊+織布保護工數值模擬結果(不同角度)

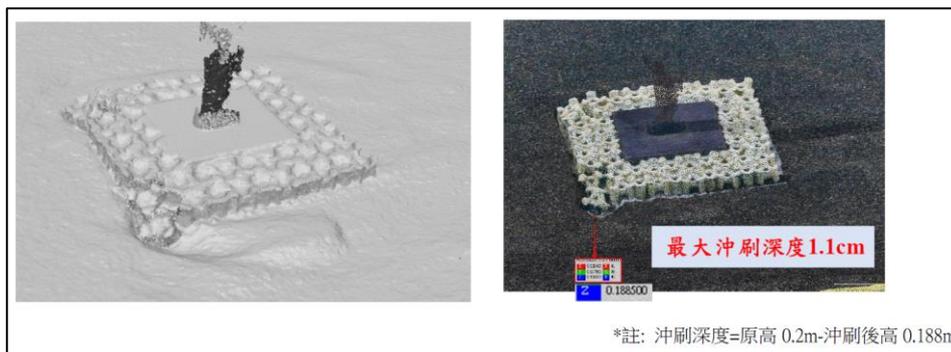


圖 35 方形基礎鼎型塊+織布保護工水槽試驗結果

五、結論與建議

1. 透過圓柱體及矩形版基礎沖刷試驗與三維數值模擬結果進行比較可知，FLOW-3D 可合理模擬沉積物移動及橋梁基礎周圍局部沖刷之深度與發展趨勢。
2. FLOW-3D 目前未發展保護工(鼎型塊、土工織布)模擬分析之模組，本研究仍嘗試以土中應力增量及設置薄層模型區來達到近似模擬的方式進行分析探討，雖未能呈現下方沉積物沖刷後上方鼎型塊及織布隨之下沉之動態耦合模擬結果，但整體仍可合理模擬沖刷深度及周圍沉積物移動，此一設置經驗、方式及模擬結果，可提供後續評估現場試驗橋址模擬鼎型塊織布工法之耐洪效能使用。
3. FLOW-3D 雖未能模擬沉積物沖刷後鼎型塊及織布隨下沉之動態耦合模擬現象，但建議可嘗試在沖刷事件後調整地形高程、鼎型塊及織布位置，並以此模型再次進行沖刷分析，以模擬保護工於多次降雨事件下之演化情形與保護效果。

六、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. Hirt, C. W. and B. D. Nichols(1981), “Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries”, J. Comput. Phys., Vol. 39, pp. 201-225
2. Khosronejad, A., S. Kang, and F. Sotiropoulos(2012), “Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers”, Advances in Water Resources, Vol.37, pp. 73-85.
3. Brian Fox, and Robert Feurich(2019), “CFD Analysis of Local Scour at Bridge Piers”, Flow Science Incorporation.
4. Flow Science(2022), “FLOW-3D Version 2022R2 User Manual”, Flow Science Incorporation.
5. 詹錢登、劉家齊 (2015), 「應用 FLOW-3D 模擬橋墩周圍流場及底床沖刷之研究」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
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. 李忠潘、吳倉慶 (2020), 「Flow-3D 應用於波場中柱體的波力研究」, 國立中山大學海洋環境及工程學系碩士論文。
9. 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。
10. 蔡立宏、賴瑞應、胡啟文、鄭登鍵、黃宇謙、莊凱迪、劉文琪 (2022), 「國道三號大甲溪橋地工織布保護工法現地沖刷試驗及驗證」, 交通部運輸研究所。
11. 蔡立宏、賴瑞應、胡啟文、鄭登鍵、黃宇謙、黃昱翔 (2023), 「鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(1/4)-數值水理分析模型建置」, 交通部運輸研究所。