

墩前淤積對橋墩穩定性影響之試驗與模擬

黃仲偉¹, 王威翔², 洪曉慧³, 陳筱安³, 李昊翰¹

¹中原大學土木工程學系; ²士盟科技; ³國家地震工程研究中心

摘要

近年來因氣候變遷所造成的極端降雨常造成橋樑的破壞，而其破壞模式常導因於橋墩附近淤積之漂流物使橋體所受之水流作用力產生加乘效果，進而影響橋墩或上部結構之穩定性。實務上工程師缺乏可靠的分析模式來估計此等作用力，故無法合理地評估橋梁於極端降雨作用下之安全性。有鑑於此，本研究以沉箱基礎橋墩之單墩作為探討對象進行洪水下穩定試驗，藉由試驗與模擬探討橋墩結構在不同水流速度、基礎裸露深度與不同程度的漂流物淤積狀態下之穩定性。實驗中漂流物淤積於墩前之情況係以不同尺寸之木板模擬，同時於木板後安裝荷重計以量測水流力透過木板對墩前造成之壓力；另於橋墩墩頂安裝速度計，量測橋墩墩頂於水流作用下之反應，透過希爾伯特—黃轉換來判斷橋墩的穩定性。數值模擬部分則採用尤拉分析來模擬水槽實驗中的各種現象。本研究可獲得不同程度漂流物淤積狀態下，不同流速水流力對橋墩所作用之壓力以及引致之沖刷深度。

關鍵字：墩前淤積、橋墩、希爾伯特—黃轉換、尤拉分析

ABSTRACT

According to past reconnaissance reports on typhoons or floods, the failure modes of collapse bridges can be contributed to debris accumulation. The debris not only increases the effective area of substructure components, but also reduces the flow area and cause backwater upstream. To gain better understanding of bridge behavior in an extreme flood event, the hydraulic loads has to be calculated precisely, especially the hydraulic loads under the condition of debris accumulation. In order to examine the bridge structure behavior in different flood velocities, levels of foundation exposure, and debris accumulation extent, a series of small scale hydraulic model tests of cross-river piers under flood water and debris loads were conducted. In this experiment, planks of different sizes were used to simulate the debris accumulation of different levels. A load cell is installed after the plank to measure the hydraulic load while velocimeters are installed on the top of piers to measure the corresponding responses. Hilbert-Huang Transform was carried out to analyze these velocity time histories to judge whether the pier is stable. Numerical simulation adopted Eulerian analysis to simulate the fluid-structure coupled system.

Keywords: debris accumulation, bridge pier, Hilbert-Huang Transform, Eulerian analysis

一、緒論

台灣是狹長型島嶼，但山脈的面積卻佔本島總面積之百分之七十五，多呈南北走向。河流則主要呈東西流向穿越山川，具短而急之特性。無論是南北往來之鐵公路系統、山區交通與東西向聯絡道路都需仰賴山區橋梁連接，故台灣由南到北有眾多跨越坡陡流急河川之跨河橋梁。跨河橋梁之安全性評估除與本身之結構設計細節有關之外，也

須將其環境特性納入考量。近年來因全球暖化現象的氣候變遷，河川豐枯流量懸殊使得河道輸砂量產生極大變化，河道產生強烈沖淤變化，河床沖蝕極為嚴重。一旦豪雨來臨，河道流量相較平常更大且急，加上山區常因地震或人為開發等因素，造成土質鬆軟，每遇豪雨土石隨同雨量傾洩而下，對於跨河橋梁安全，造成相當衝擊。

以八八水災為例，豪大雨帶來的重大

災情震驚全國，初步勘災報告[1]顯示：上游橋梁毀損原因主要是受到土石流危害，通水斷面遭流木阻塞導致水道淤積，致使水流力道過大推倒橋墩，或橋墩遭土石流木撞擊而損壞傾倒。勘災中亦發現很多受損橋梁附近都有漂流物淤積（見圖 1），漂流物於橋墩或上部結構之淤積可能為橋梁崩塌的主因之一。尤其是跨距短之橋梁，當橋梁所在處之河道遭大量漂流物土石堆積所阻擋時，河道的束縮會引致沖刷，並加速河床之侵蝕、沖刷深度會加深。且主河道水流之阻礙也將引起橋梁上游壅水效應，提高水位高程與流速，並對鄰近橋墩產生斜向水流力；再加上橋梁受力面積會增加，以及高速水流帶來之流木衝擊效應，橋梁結構所受之總作用力將比無漂流物掛淤或土石堆積之情況增高數倍之多。



圖 1 水災後橋下漂流物、土石淤積情形

由上可知：若橋梁當初在設計時或安全評估時未將墩前淤積的狀況納入考量，則橋梁於極限洪水之天然災害下，整體之安全與穩定性將難以確保。為瞭解跨河橋墩結構在不同水流速度、基礎裸露深度與不同程度的漂流物淤積狀態下之耐洪能力，本研究參考澳洲昆士蘭大學洪水實驗室[2]與美國路易斯維爾大學水工實驗室所進行之小尺寸模型試驗，以及美國陸軍工程兵團水文工程中心所進行之中尺寸模型試驗[3]，假台大水工試驗所水槽進行一系列之單墩水工模型試驗，檢討沉箱基礎橋墩在不同程度漂流木淤積狀態下之受洪水破壞機制，期望研究成果將來可提供工程界進行相關耐洪評估之參考，也可作為改進現行規範之依據。

二、試驗建置

本研究透過縮尺之沉箱基礎單墩模型，在實驗水槽模擬沉箱基礎橋墩在河道中的行為，並配合不同的試驗條件，進行多次沉箱基礎單墩在不同漂流物淤積狀態下之耐洪能力試驗，觀察結構整體行為。

2.1 試驗環境

本研究於台大水工試驗所之大型多功能水槽進行試驗，水槽試驗配置示意圖如圖 2 所示，試驗水槽長 37 公尺，寬 1 公尺，單墩模型之縮尺比例為 1:36，模型總高 70 cm，含柱高 22 cm，沉箱高度 48 cm，試驗以 30×10cm、40×10cm 以及 50×10cm 三種不同尺寸之矩形木板固定於沉箱基礎前方，模擬不同程度之漂流物淤積。本試驗忽略河道具有坡度、河寬、河向等不同之水利變化條件，目的為以較單純之實驗條件，減少控制變因，觀察漂流物淤積對沖刷深度之影響，以及橋墩在漂流物淤積狀態下之受力行為。

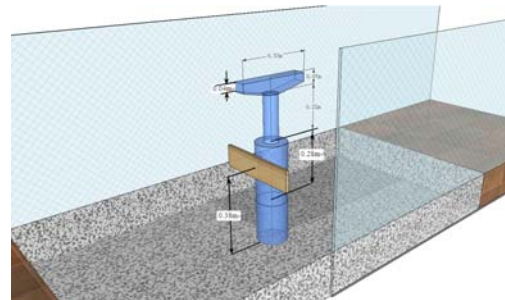


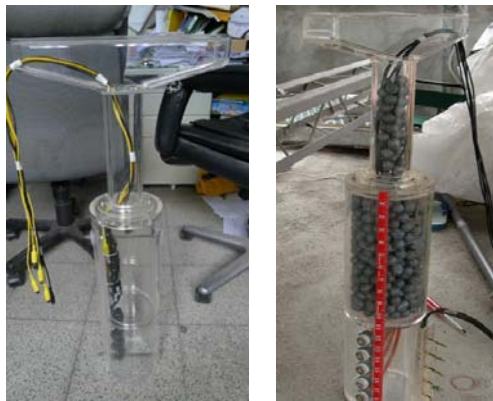
圖 2 試驗水槽與縮尺橋墩示意圖

2.2 內視攝影機之設計

由於實驗過程中需即時量測沖刷深度，因此本研究規劃一透明壓克力沉箱基礎橋柱，其形狀仿照一般混凝土橋墩設計，並在內部安裝四具攝影機以即時監看沖刷情況。可安裝內視攝影機之壓克力沉箱基礎橋墩縮尺模型實體如圖 3 所示，模型帽梁部分為由兩片梯形，加上彎折後之曲面組合而成，上構橋面系統之重量主要由兩片梯形所承受，再經由承壓於模型之圓筒橋柱部份向下傳遞。由於試體內部將放置內視攝影機，又必須同時填入符合混凝土縮尺模型試體自重之鉛球，為了避免鉛球之遮蔽影響攝影機拍攝範圍，鉛球填放位置需位於沉箱上半部與橋墩位置，以空出沉箱內底部空間。壓克力沉箱基礎橋墩縮尺模型之實體照片如

圖 3(a)所示，圖 3(b)則為模型在鉛球堆疊完成後之相片。

實驗所需之內視攝影機安裝於壓克力試體內底部。由於單一攝影機視角範圍有限，必須要佈置足夠多之攝影機才能做到沖刷深度之量測，本實驗總共安裝 4 個攝影機。實驗前透過貼於縮尺沉箱模型外之標尺適當調整攝影機擺設之位置，沖刷歷程中可直接由攝影機影像畫面配合所拍攝之標尺得知即時沖刷深度。攝影機位於試體內底部，因埋置於土中之攝影機所在空間並無光線進入，且即使沖刷達到攝影機所在深度，穿過水體傳至試體內部之光線亦不足以提供足夠之照度供攝影機拍攝清晰之影像，因此本研究亦在針孔式攝影機鏡頭之四周安裝發光二極體 (Light Emitting Diode, LED)，以提供水中拍攝河床狀況及沖刷變化之光源。

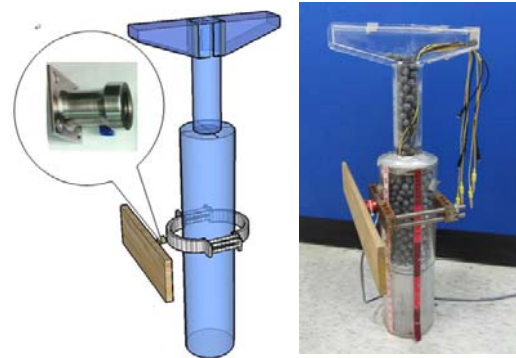


(a) 縮尺模型實體 (b) 鉛球堆疊位置
圖 3 壓克力沉箱基礎橋墩縮尺模型實體

2.3 量測儀器配置

由於橋墩或上部結構附近淤積之漂流物會使橋體所受之作用力產生加乘效果，為能有效了解此一加乘力量，本研究特別設計水下荷重計及其夾具，此設計可將荷重計安裝於木板與橋墩試體中間，以此了解當此橋墩受水流力之衝擊時，水流力透過木板對橋墩造成之壓力。荷重計安裝位置如圖 4(a)所示，其設計為在其環狀處平均黏貼四片應變計(strain gauge)，將其接收訊號數據平均後即可得水流力透過木板對橋墩所施加之外力。荷重計安裝方式為將其鎖於客製化夾具以固定於橋墩沉箱基礎前方，並將本試驗

所規畫之不同尺寸的木板鎖於荷重計上，即完成橋墩試體整體之配置。圖 4(b)為木板與荷重計安裝至橋墩基礎上之整體圖，本研究木板安裝位置為基礎底上方 38 cm 處。



(a) 荷重計安裝位置 (b) 橋墩與荷重計
圖 4 橋墩與壓力計結合後之整體模型

將此客製化荷重計與木板安裝在壓克力橋墩上後，即可於大型水槽進行漂流物淤積對橋墩影響之沖刷試驗。因試驗水槽在放水過程中需等待水位上升至水深不再變化，此時所測得之流速才是穩定流速，而本研究亦探討流速對橋墩沖刷的影響，為使每一次實驗進行時所接收到之數據為穩定流速下的結果，所以本研究於每次試驗前置作業時，先以兩片黏貼質量塊的壓克力板將底層鋪沙蓋住，目的為盡量降低水位尚未穩定前沖刷深度的改變。待水槽水位即流量穩定後，即可輕輕的將壓克力板由水槽中取出，之後則可開始擷取實驗所需之資料以利後續進行實驗結果之探討。

圖 5 為實驗整體佈設情形，本研究亦安裝之測儀器除前之水中攝影機以及客製化荷重計外，亦於帽梁頂安裝速度計，並使用微震儀進行資料接收，以了解橋墩在不同情況下之頻率變化。此外，本研究亦所規畫之試驗除改變木板尺寸外，亦改變三種不同流速，探討在不同漂流物淤積程度，與不同速度水流力作用下，水流力透過淤積之漂流物對橋墩引致受力之差異性，以及漂流物淤積之存在對橋梁沖刷程度之影響。針對沖刷深度，最後並將有漂流物淤積與無漂流物淤積情形下橋墩沖刷深度之變化趨勢進行比較。試驗採用之木板尺寸計有 10×30cm、10×40cm 和 10×50cm 共三種，並搭配

39.81cm/s、49.22cm/s 以及 56.56cm/s 三種不同的水流速度，再加上無安裝木板搭配三種流速之情況，共計 12 組試驗。12 組試驗之初始埋砂深度均為 20 cm，即初始狀態基礎裸露為 28 cm，模擬漂流物的板材中心點安裝於距基礎底部高約 38 公分處，穩定狀態之水深為 24 cm，即穩定水面位於基礎面下 4 cm 處。

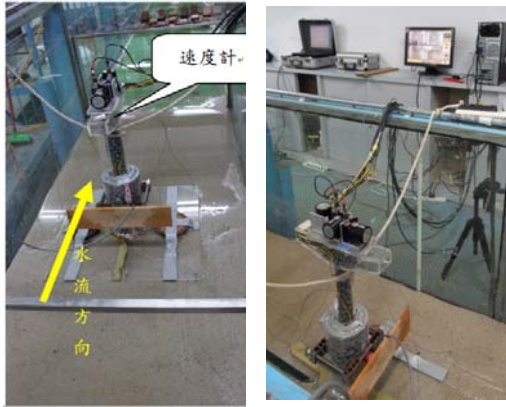


圖 5 實驗整體配置圖

三、數值模擬

由於水槽實驗中不易量測到流場因墩前淤積物（也就是木板）存在與否的改變，為進一步探討木板大小以及出駛入流流速改變下對流場以及橋墩沖刷的影響，本研究利用有限元素商業軟體 ABAQUS 進行相關的模擬，俾利釐清各種物理現象與進行後續的定量分析。底下就求解的控制方程式、求解方式與邊界條件分述如後。

3.1 控制方程式

描述剛體和可變形體運動的基本方程式包括：質量守恆（又稱為連續方程式）、運動方程式和能量方程式[4]。其中質量守恆可寫為：

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

上式中 D 代表全微分， ρ 與 \mathbf{v} 分別代表密度與速度向量， ∇ 與 \cdot 分別代表梯度與內積的運算子。而運動方程式可寫為：

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot (\nabla \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} \quad (2)$$

上式中 $\boldsymbol{\sigma}$ 與 \mathbf{b} 分別代表物體之應力張量與微體力向量。最後，能量方程式可寫為：

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \rho \dot{Q} \quad (3a)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3b)$$

上式中 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 為應變率張量（strain rate tensor）， E 與 Q 分別代表能量與輸入的熱。

若流體為不可壓縮流（incompressible fluid），則流體密度可視為常數，其全為分為零，而質量方程式可改為：

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

若為牛頓流體（Newtonian fluid），其剪應力正比於應變率，則對應之應力與應變關係可寫為：

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + 2\mu\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (5)$$

上式中 p 為壓力， λ 與 μ 分別整體與剪力模數（bulk and shear modulus of viscosity）， \mathbf{I} 為單位矩陣。一般為了求解方便會假設狀態函數來描述壓力、密度與溫度之間的關係如下：

$$f(p, \rho, T) = 0 \quad (6)$$

將方程式（5）代入方程式（2）之中，且假設流體為無整體黏滯性（bulk viscosity）之不可壓縮流，則可得到 Navier-Stokes 方程式如下：

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{b} \quad (7)$$

上述方程式即為本文在流體方面的控制方程式。而固體與流體的差異主要在應力與應變之關係，本研究在固體方面只考慮等向線彈性材料，其對應的材料組成律可寫成：

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} \quad (8)$$

其中 \mathbf{u} 為位移向量。

3.2 流固耦合分析

對於包含流體以及存在於流體之中可變形固體的系統而言，模擬的方式必須考慮到流體與固體之間的耦合。近幾年來由於電腦效能的提升，流固耦合（fluid/structure interaction，簡稱為 FSI）的模擬也有相當的進步。ABAQUS/Explicit 在耦合尤拉與拉格蘭治（coupled Eulerian-Lagrangian，簡稱為 CEL）分析的方式提供足夠的功能來模擬流體與固體之間的交互作用。

在流體分析的部份，自由液面大晃動引起的強非線性往往給問題的求解造成很大困難，對大晃動問題進行數值模擬，要先

選擇適當的描述方法。過去通常採用尤拉法 [5-7] 和拉格蘭治 [8-9] 來描述非定常自由面流體流動，它們有著各自的優勢和局限性。

在拉格蘭治描述中，網格結點與流體質點在整個運動過程中始終保持重合，流體質點與網格結點之間不存在相對運動，因此很容易追蹤自由液面，適用於線性小晃動問題。不僅可簡化控制方程式的求解，且能有效地追蹤流體質點的運動軌跡，準確地描述波動的自由液面。但是在涉及求解帶自由面流體大幅運動時，此時的晃動已經具有很強的非線性特徵，如果還採用拉格蘭治描述，由於流體質點運動的急劇變化，將導致計算網格的扭曲，會面臨網格奇異問題，從而使計算無法繼續進行。

若採用固定網格的尤拉描述，整個計算過程中計算網格始終保持初始狀態，從而可以描述流體質點運動的急劇變化，如碎波等現象。尤拉描述雖然可以有效地分析整個流場內部的運動，但很難精確跟蹤流體的自由液面，即很難給出準確的自由面形狀和位置。由於本研究主要在探討墩前淤積對流場所造成的改變以及對橋墩受力的影響，對於自由液面的準確度並非要求重點，故採用尤拉描述來進行流體分析。

另一方面，固體橋墩部分的狀態方程式仍然在常規的拉格蘭治坐標系統下建立，由於橋墩結構工作時不允許破壞與傾倒，因此本文分析中不考慮結構的材料非線性，只考慮結構的幾何非線性，分析中考慮所有的外力作用，包括外部施加的作用力、慣性力、阻尼力等。採用有限元素方法建立的在拉格蘭治坐標系統下的橋墩結構的運動方程可以表示為

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}_s(t) \quad (9)$$

上式中 $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 和 \mathbf{u} 分別代表橋墩的加速度、速度與位移向量， \mathbf{F}_s 代表橋墩承受的載重向量，包括流體作用在橋墩上之水壓力， \mathbf{M} 為橋墩結構之質量矩陣， \mathbf{C} 為橋墩結構之阻尼質量矩陣（本文採用雷利阻尼）， \mathbf{K} 為橋墩結構之勁度矩陣。

水槽內的流體和橋墩通過相互作用面進行耦合，即耦合面上流體以應力的形式作用在橋墩的表面，造成橋墩的變形和應力分布；同樣地，橋墩表面的運動則會影響流體運動。因此，耦合邊界面上速度和相互作用是連續的，滿足以下連續條件

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{u}_s \quad (10a)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_f \cdot \mathbf{n}_f = \boldsymbol{\sigma}_s \cdot \mathbf{n}_s \quad (10a)$$

上式中下標 f 與 s 分別代表流體與固體結構，而 $\boldsymbol{\sigma}_f$ 與 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 分別為耦合面上流體和橋墩結構表面的應力； \mathbf{n}_f 與 \mathbf{n}_s 分別為流體和橋墩結構耦合面的法向量，方向均是向外。

假設耦合體系的求解向量是 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_f, \mathbf{X}_s)$ ，其中 \mathbf{X}_f 和 \mathbf{X}_s 分別為定義在水體和橋墩表面的流體和固體的求解向量。將流體方程和橋墩結構方程統一到一個體系中，該流固耦合體系的方程式可以寫為：

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_f \\ B_s \end{Bmatrix} \quad (11)$$

採用增量牛頓-拉普森方法求解固流耦合方程，對節點位移 \mathbf{u}_0 對應的殘值進行泰勒展開，並假設計算的殘值等於零可得：

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}) = \mathbf{R}(\mathbf{u}_0) + \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_0)}{\partial \mathbf{u}} \Delta\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (12)$$

方程式第 $n+1$ 時間步中的第 $k+1$ 迭代運算步的求解公式可以表達如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}^k)}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}_{n+1}^k &= \mathbf{J}_{n+1}^k \Delta \mathbf{u}_{n+1}^k \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{ff}^k & \mathbf{0} & \mathbf{J}_{if}^k \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_{ss}^k & \mathbf{J}_{is}^k \\ \mathbf{J}_{if}^k & \mathbf{J}_{is}^k & \mathbf{J}_{ii}^k \end{bmatrix}_{n+1} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{u}_f^k \\ \Delta \mathbf{u}_s^k \\ \Delta \mathbf{u}_i^k \end{Bmatrix}_{n+1} = - \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_f^k \\ \mathbf{R}_s^k \\ \mathbf{R}_i^k \end{Bmatrix}_{n+1} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k + \lambda \Delta \mathbf{u}^k \quad (14)$$

上式中位移向量 \mathbf{u} 分為 \mathbf{u}_f （包括所有流體變數，即所有流體節點的速度和壓力）、 \mathbf{u}_s （包括所有結構體變數即除耦合面外所有節點的位移）、 \mathbf{u}_i （包括耦合面上的變數）等三部分，其中下標 f 、 s 、 i 分別代表流體、橋墩結構與耦合接觸面；矩陣 \mathbf{J} 反應流體域隨時間的變化和耦合接觸面節點運動引起的坐標系統移動速度改變，即接觸面上的一個節點的運動可以改變整個流體域產生運動，並且改變每個節點處的坐標系統的移動。

將方程式(13)解耦為線性化的流體求解問題和流體荷載作用下的結構體求解問題：

$$\mathbf{J}_{ff}^k \Delta \mathbf{u}_f^k = -\mathbf{R}_f^k \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{ss}^k & \mathbf{J}_{is}^k \\ \mathbf{J}_{is}^k & \mathbf{J}_{ii}^k \end{bmatrix}_{n+1} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{u}_s^k \\ \Delta \mathbf{u}_i^k \end{Bmatrix}_{n+1} = - \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_s^k \\ \mathbf{R}_i^k + \mathbf{J}_{if}^k \Delta \mathbf{u}_f^k \end{Bmatrix}_{n+1} \quad (16)$$

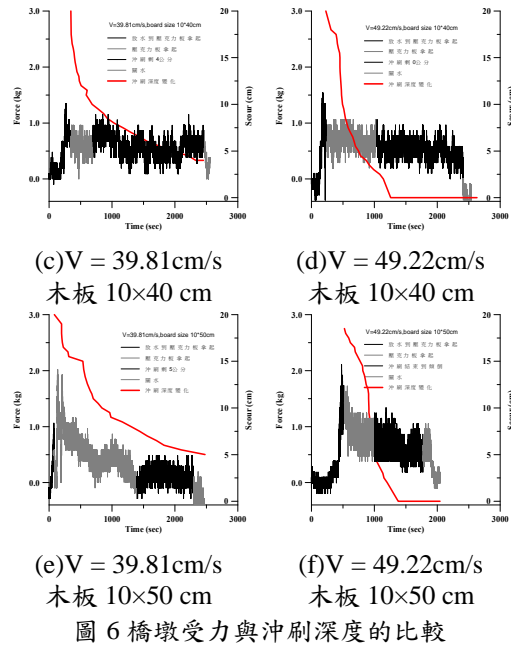
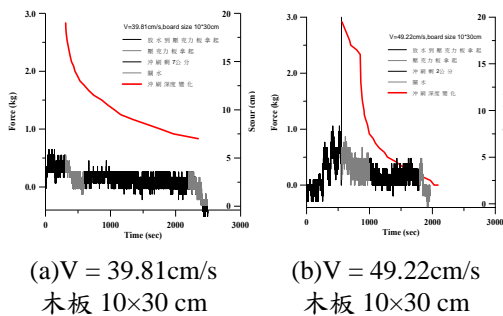
分別求解橋墩結構方程式和流體方程式，得到橋墩和流體邊界面上的水壓力分佈和自由液面的晃動幅值隨時間的變化曲線，即可以確定橋墩結構所承受的動水荷載。

四、實驗與模擬結果

實驗流程為先將試體佈設於水槽中，使其埋沙深度為 20 cm，並將壓克力板壓在沙面上以降低沖刷之可能。當實驗佈置完成後即開始放水，且當水槽水深高度持續維持在 24 cm 的狀態下，再將壓克力板拿起。任一次試驗之試驗時間為放水後 40 分鐘，但若試驗過程中橋墩傾倒，則提前結束當次試驗。每一次試驗結果可獲得三種數據曲線，其一為安裝於橋墩上方速度計之速度反應，其二為水流力透過木板對橋墩所造成之荷重計的變化，其三則是沖刷深度隨時間之變化。以下將分別針對此量測結果進行分析與比較。

4.1 橋墩受力與沖刷深度變化

本節將荷重計所量測到之數據進行整理，並將數據分為四階段繪製載重變化曲線，即(1)放水至水槽水位穩定後將壓克力板拿起；(2)壓克力板拿起後至沖刷深度不再變化；(3)沖刷深度不再變化後至實驗結束；(4)開始卸水。依此整理方式可得圖 6 之載重變化曲線，其中圖(a)-(f)分別代表木板尺寸為 10×30 cm、10×40 cm 和 10×50 cm 於不同水流速度下之結果。圖 7 所示除涵蓋橋墩受力隨時間之變化曲線外，亦顯示在壓克力板拿起後，沖刷深度隨時間之變化曲線，此沖刷深度為從水中攝影機拍攝結果所擷取之記錄。



由圖 6 所示之曲線中可發現當水位到達穩定後將壓克力板拿起瞬間，橋墩受力會有一突跳值，此突跳值研判為人為導致之結果，因壓克力擋板面積較大，拿起時可能會輕微撞擊到橋墩而影響荷重計量測數值。壓力變化曲線之第二段代表阻擋沙面沖刷之壓克力擋板被拿起後，橋墩開始沖刷時木板對橋墩的施力變化。該段施壓荷重曲線顯示隨著時間增加，橋墩受力會降低。

此外，由水中攝影機監測系統所得對應之沖刷深度曲線可發現，當壓克力擋板被拿起後，橋墩前埋沙即開始被沖刷，沙面越來越低，對應之沖刷深度越來越大。將壓力變化曲線與沖刷深度變化曲線對應比較可發現墩前木板引致之橋墩受力會隨沖刷深度越深而越來越小，且此一現象也會隨著木板尺寸之增大而越為顯著。此現象推斷是因為隨沖刷深度越來越深，沿水深之通水面積變大，故局部流速會較尚未沖刷前之流速小，進而導致水流力透過相同尺寸木板引致之橋墩受力相對減少，但在此需注意的是荷重計所量測之橋墩受力為水流力透過墩前木板所引致之橋墩受力，此受力值並不涵蓋水流直接衝擊橋墩之外力，若將直接衝擊橋墩之水流外力與透過木板傳遞之外力相加，沖刷較深之橋墩極可能比沖刷較輕微橋墩承受較多外力。

對第三階段曲線而言，將此段的壓力變化曲線與依據水中攝影機監測結果所繪製沖刷深度變化曲線進行比較可發現，當沖刷深度不再明顯變化時，壓力計讀數也漸趨穩定而達一約略定值狀態，此係由於通水面積不再改變，流速較為穩定，故此時量測到之壓力計數值可較為穩定。本研究並將此段流量穩定後之橋墩受力以及最終沖刷深度記錄於表 1 與表 2 之中。由表 1 與表 2 中可發現當木板尺寸越大，其壓力計量測之力量有越大之趨勢，由此可證明漂流物淤積之程度對橋墩所受水流力具有極大的影響力，且漂流物淤積面積越大沖刷越快，也更容易導致橋墩傾倒，影響橋墩整體的安全性。另外圖 6、表 1 與表 2 亦顯示水流流速為影響橋墩整體穩定性之因素之一，隨著流速增大，沖刷越為快速，橋墩穩定性也快速降低。

表 1 不同試驗下荷重計平均值之比較(kg)

木板 流速	無木板	10×30 cm	10×40 cm	10×50 cm
39.81 cm/s	—	0.10	0.50	0.62
49.22 cm/s	—	0.12	0.50	0.70
56.56 cm/s	—	0.80	1.20	1.00

表 2 不同試驗下沖刷深平均值之比較(cm)

木板 流速	無木板	10×30 cm	10×40 cm	10×50 cm
39.81 cm/s	11	13	16	15
49.22 cm/s	16	18	20	傾倒
56.56 cm/s	16	傾倒	傾倒	傾倒

上述實驗結果顯示：墩前漂流物之淤積不僅影響橋墩受力，亦影響沖刷深度，進而影響水流速度，亦即漂流物淤積程度與沖刷深度、水流速度間會交互影響。為單純顯示漂流物淤積程度對橋墩受力之影響，茲亦由圖 6 中擷取出試驗在流量穩定，且沙面尚未沖刷前，所量測到之木板傳遞水流壓力，並將其結果整理於表 3。觀察表 3 可明顯看出在同一條件的木板尺寸下，木板所傳遞之水流力會隨著水流速度之增大而提高。另外隨著木板尺寸增加，量測到之壓力也有隨之增

大之趨勢。

表 3 未沖刷前荷重計之平均值(kg)

木板 流速	10×30 cm	10×40 cm	10×50 cm
39.81 cm/s	0.288	0.576	0.484
49.22 cm/s	0.480	0.868	1.436
56.56 cm/s	1.056	1.874	1.632

4.2 數值模擬之流場變化

前述已介紹流固耦合的相關理論與求解方式，而實際建立對應的有限元素模型時，考慮整個水槽系統為左右對稱，為節省計算量，故本文只建立左半部的系統，其對應的模型如圖 7 所示。模型的節點數約 85000，其中橋墩的部份採用 1190 個固體元素 (C3D8R)；流體的部份採用 76608 個尤拉元素 (EC3D8R)。系統的初始條件為水槽入口流體的初始速度，水槽四周的邊界條件則為不可穿越 (no flux)。流體設定為尤拉物質 (Eulerian material)，橋墩的彈性係數採用壓克力材質，但密度則考慮鉛球的重量。

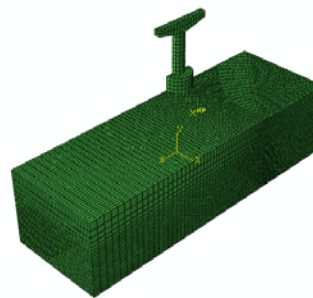
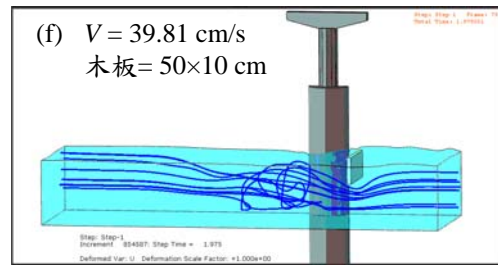
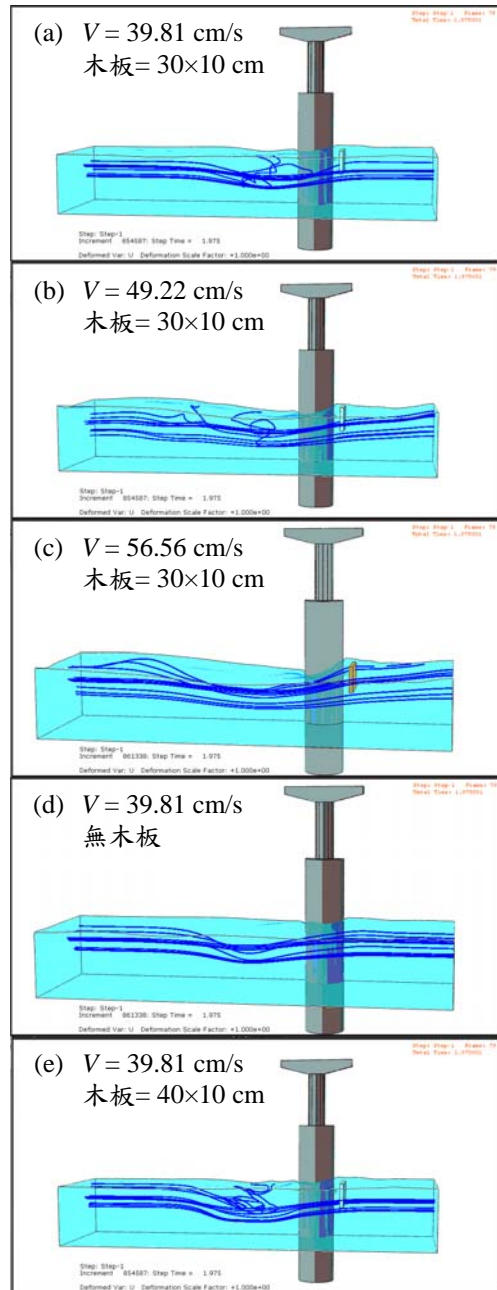


圖 7 水槽的有限元素模型

為簡化分析，在此暫不考慮沖刷後水槽河床變化造成流場改變的效應，僅先探討不同流速與不同墩前堆積物大小對流場的影響為何。在此要強調的是：利用 ABAQUS/Explicit 求解得到是流固耦合的瞬態解，隨著時間演進，整個流場的流線分佈皆有所不同。但為方便比較，在此僅列出時間 $t = 2$ 秒時的水槽流線分佈。圖 8(a)-(c) 為針對同一墩前淤積物 (木板大小為 30×10 cm)，不同入流流速下所產生的流線分佈圖。從圖中可

看出隨著流速增加，流線分佈顯得越混亂，且自由液面的變化越大。圖 8(d)-(f)為針對同一水槽入流流速下，不同墩前淤積物的流場流線分佈圖。(木板大小為 30×10 cm)，比較圖 8(a)與 8(d)-(f)可看出：當墩前淤積物(木板)越大時，流體越過木板所造成的渦流效應越大，這可用於解釋水槽實驗中所觀察到的現象：墩前淤積物越大時，橋墩底部的沖刷會越嚴重。



五、結論

本研究針對橋梁因漂流物淤積引致之安全問題進行探討，水槽實驗與模擬的結果均顯示：墩上設置有木板之橋墩沖刷深度與沖刷速度皆比對應之無木板橋墩為大，且沖刷深度與沖刷速度也有隨著木板尺寸增大而有提高之趨勢。此外，墩前木板之存在亦會提高橋墩之受力，漂流物淤積造成之橋墩受力提高結合基礎沖刷之加速，將嚴重影響橋梁基礎之穩定性與安全性。依據實驗與模擬之結果，漂流物淤積對橋梁安全性之不良影響已獲得證實，因此建議未來新建橋梁之設計與既有橋梁之安全評估均須將漂流物淤積之潛在可能性與其影響納入考量。

六、參考文獻

- [1] 財團法人中華顧問工程司，2009 莫拉克颱風八八水災橋梁勘災紀實，2009
- [2] M. Jempson, Flood and debris loads on bridges PhD Thesis, School of Engineering, The University of Queensland, 2000.
- [3] A. C. Parola, "Debris forces on highway bridges", NCHRP 445, National Cooperative Highway Research Program, 2000.
- [4] Y. C. Fung, A first course in continuum mechanics, 3rd edit., Prentice Hall, 1994.
- [5] A. Kovacs, M. Kawahara, "A finite element scheme based on the velocity correction method for the solution of the time-dependent incompressible Navier-Stokes equations," Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 13, pp. 403–423, 1991.
- [6] G. Ren, T. Utnes, "A finite element solution of the time-dependent incompressible Navier-Stokes equations using a modified velocity correction method," Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 17, pp. 349–364, 1993.
- [7] Y. T. Nakayama, M. Mori, "An Eulerian

- finite element method for time-dependent free surface problems in hydrodynamics,” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 22, pp. 175–194, 1996.
- [8] T. Okamoto, M. Kawahara, “Two-dimensional sloshing analysis by Lagrangian finite element method,” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 11, pp. 453–477, 1990.
- [9] M. Hayashi, K. Hatanaka, M. Kawahara, “Lagrangian finite element method for free surface Navier-Stokes flow using fractional step methods,” *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 13, pp. 805–840, 1991.