創新橋梁監測系統建置試驗研究

張國鎮　宋裕祺　林詠彬　林呈　賴進松　李路生　陳俊仲　翁士晟

國家地震工程研究中心

摘要

對台灣橋梁而言，颱風洪水沖刷、地震等天然災害防制非常急迫與重要，因此確保橋梁於天然災害侵襲中仍能確保其功能性，減少橋梁倒塌災害發生，並儘早發出危險訊號示警，提供交通養護管理單位工程人員儘速採取適當措施應變，減低災害性事故發生，為現今橋梁監測發展的重點之一。本文以先進智慧型感測網路，包含光纖與無線感測器，整合橋梁上部與下部監測系統，研發四種沖刷監測設備-光纖沖刷監測系統、微機電壓力感測器、無線網路沖刷磚與無線網路飄浮磚，作為橋梁日常安全監控與颱洪期間河川水位與沖刷深度之即時監測，並同時於橋梁上部安裝水位計、流速計、加速度計、傾斜儀、沉陷計等感測器，相關資料將可建立橋梁長期監測資料庫，並衍生橋梁安全、沖刷評估標準作業流程與警戒值之參考。

關鍵字：沖刷監測、無線網路感測器、橋梁監測系統

一、前言

台灣位處季風氣候帶，每年五至六月間為梅雨季，七至九月間則有頻仍之颱風侵襲，此等氣候常帶來豪雨；且台灣恰於板塊交界處，平均每年約有 1000 次有感地震，往往導致公共建設的嚴重大損害，更對人民的生命財產造成威脅，尤其是近年來全球氣候異常，颱風豪雨對台灣災害之影響益形嚴重受災範圍與程度均遠較過去為烈，因此社會各界對災害的問題一向非常關心，政府與民間都致力於防救災工作，近年來人民生活水準提昇，對保護生命財產安全的要求逐漸增高。而國內大小橋梁約有兩萬座，其中由交通部高速公路局及公路總局管理的公路橋梁有一萬零五百九十座，其餘近一萬座橋梁，受限於地方政府無充足預算，相當缺乏管理、維修及相關資訊，對於民眾生命財產安全構成威脅；就橋梁設計、施工技術而言，橋梁工程技術已經漸趨成熟，設計施工對橋梁的安全程度都能有一定的標準，但是完工以後的監測與維修卻往往是左右橋梁安全的重要因素。而且隨時間的增加，工程技術再好、安全係數再高的橋梁都有老化、劣化的發生，再加上車流超載、沖刷與地震之作用，更必須加強其安全監測與維修才能保障安全。因此，為維護老舊橋梁之安全，尤其是關於老舊橋梁的使用狀況，安全評估與診斷等，迫切需要一套可靠度良好的監測預警系統，以便進行長期之監測與分析。

二、沖刷概論

欲了解橋梁於颱洪期間沖刷的行為與其安全性，勢必先行對橋墩沖刷成因進行細部的瞭解與探討。河道中設置橋墩後，周圍的水流情況會發生很大變化，由於橋墩阻水，在橋墩上游而之水位壅高，至墩前達到最高，兩側水流收縮集中，動能增加，水面逐漸下降，在墩後很大範圍內，水面較不穩定，產生墩前壅水、墩前向下射流、馬蹄型渦流、消散渦流及尾跡渦流等水理與水文機制，影響河道演變的因素極為複雜，目前計算精度不夠，橋梁設計所採用的原始斷面都是建橋前測量的中、枯水斷面。因此，橋渡設計中，一般不採用上述橋渡處實測斷面，而採用附近水深較大的斷面作為設計斷面，並以斷面最大水深或最大單寬流量作為設計依據。由於建橋窄縮水流而在橋下河床全斷面內發生的普遍沖刷，稱為一般沖刷。河流上興建橋梁後，橋下過水斷面因橋渡中的引堤、橋台和橋墩等建築物的窄縮而減小，為通過建橋前同樣大小的流量，橋下流速增大，水流挾沙能力也相應增加，這樣就要在橋下產生新的沖刷，沖刷可分為兩種情況：一種是上游來清水，此時河床必須沖深到流速小於起動流速時，沖刷才會終止，故最大沖刷深度應按床沙起動流速計算。另一種是上游來滓水，此時必須通過河床的沖深，使水流挾沙能力降低到恢復原有的輸砂平衡，沖刷才會終止，故最大沖刷深度應按水流輸砂平衡計算。隨著沖刷的發展，橋下游床加深，過水面積增大，流速逐漸下降，待達到新的輸砂平衡狀態或橋下流速降低到土的容許不沖刷流速時，沖刷停止。橋梁基礎沖刷如任其自然演變不加治導，將使淤積段河道通洪斷面不足危及河道防洪標準及影響橋梁行車安全；如為刷深型河段水流集中沖刷將造成橋梁基礎深度不足，影響橋梁結構安全。

而橋墩周圍沖刷坑的發展開始於橋墩的兩側，接著迅速地沿著圓柱型橋墩周圍向上游挺進，直到墩前交會於圓柱型橋墩前端處，最大沖刷深度發生於橋墩前緣，受擾動的河床質，則因向下射流加速馬蹄型渦流的螺旋作用，沿著橋墩流出沖刷坑至下游處(圖

1.)。沖刷坑內的水流呈現翻滾之現象，沖刷坑前半部較為陡峭，兩側之崩落則較不規則。一旦達沖刷平衡後，沖刷坑前半部近似一倒置之截頭直角圓錐體，其斜面之傾斜角則約等於泥砂在水中之安息角(repose angle)30°~34°之間；而後半部及淤積堆之型態，則受水流及河床形態影響，其型態較難掌握。整個河床沖淤變化過程中，因橋墩周圍水流狀態相當紊亂，導致砂石顆粒運移十分複雜，其泥砂顆粒運移之情況，大致可分為沖刷初期、沖刷中期、平衡沖刷三個時期，針對不同時期，對橋梁造成危害的程度皆需多加監測，並能即時反應現場狀況，對橋梁即可能發生的危險發出第一步的安全預警。

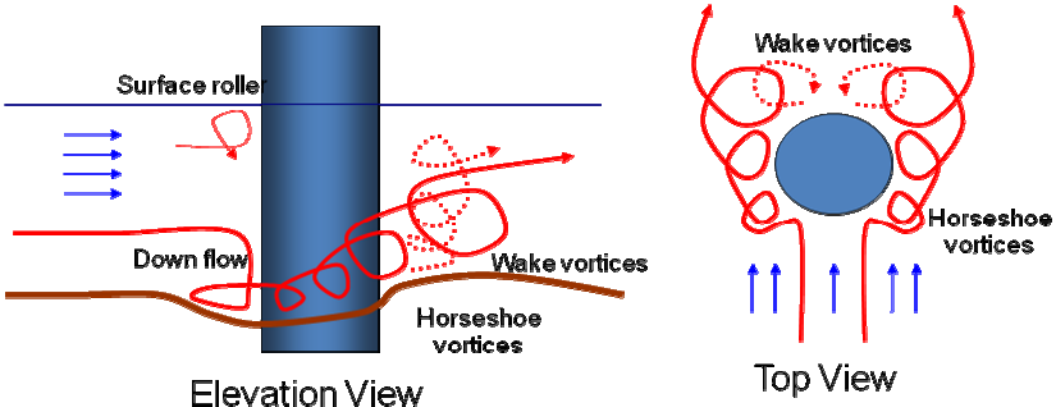

Fig. 1 橋墩基礎沖刷機制

三、沖刷監測系統

傳統的監測儀器系統，由於系統線路與不同儀器系統之整合甚為複雜，且颱風期間為因應不定時的停電問題，需備妥相當數量的備用電源，不僅佔用空間，亦造成資源損耗，感測器與機具容易損壞等問題，而且，因為該等監測儀器設備過於昂貴，往往只能單點佈設於重要地方，無法形成廣域密集面的佈設，甚至不能與其他不同種類的感測器例如雨量計、水位計、風速計、加速度計、傾斜計、壓力計…等對同一災害事件同步同時整合，進行多重災害的監測，而現今跨河橋梁多採長跨距設計，減少深槽區橋墩設立並增加通水面積，橋墩距離變長，傳統監測的訊號衰減與損失問題更加明顯，因此，亟需利用最新科技之發展，研發適用於未來的先進監測技術，為因應於不同的技術與目的。智慧型感測監測網路技術包括光纖感測器（例如光纖光柵感測器）與無線監測網路（zigbee 網路）之相關研發與應用發展，對各種天然與人為的災害之防災、減災及救災有莫大之助益。

無線網路系統之趨勢為在單一矽晶片上擁有感測、辨識、計算功能之微處理器與無線通訊，不同的感測單元可以透過不同的訊號傳輸構架如叢集方式(mesh network, cluster network)相互連結，因此，在不久的未來感測、辨識、計算能力與無線通訊網路將普遍存在各處，並深深影響人們的生活方式。此一技術適合作為颱洪期間水位即時監測網路，透過相關微機電感測器之研發設計與測試，配合無線監測網路技術之發展，可將相關災害減低到最小，並提供政府相關主管機關作為緊急應變之決策依據，該系統之運作

概念如圖 2.所示，於現地佈設星狀感測器，將訊號以無線方式傳回資料接收點後，經由網路傳回監控中心分析與評估，當監測結果橋梁有疑慮時，即時發出警訊並通知相關人員。

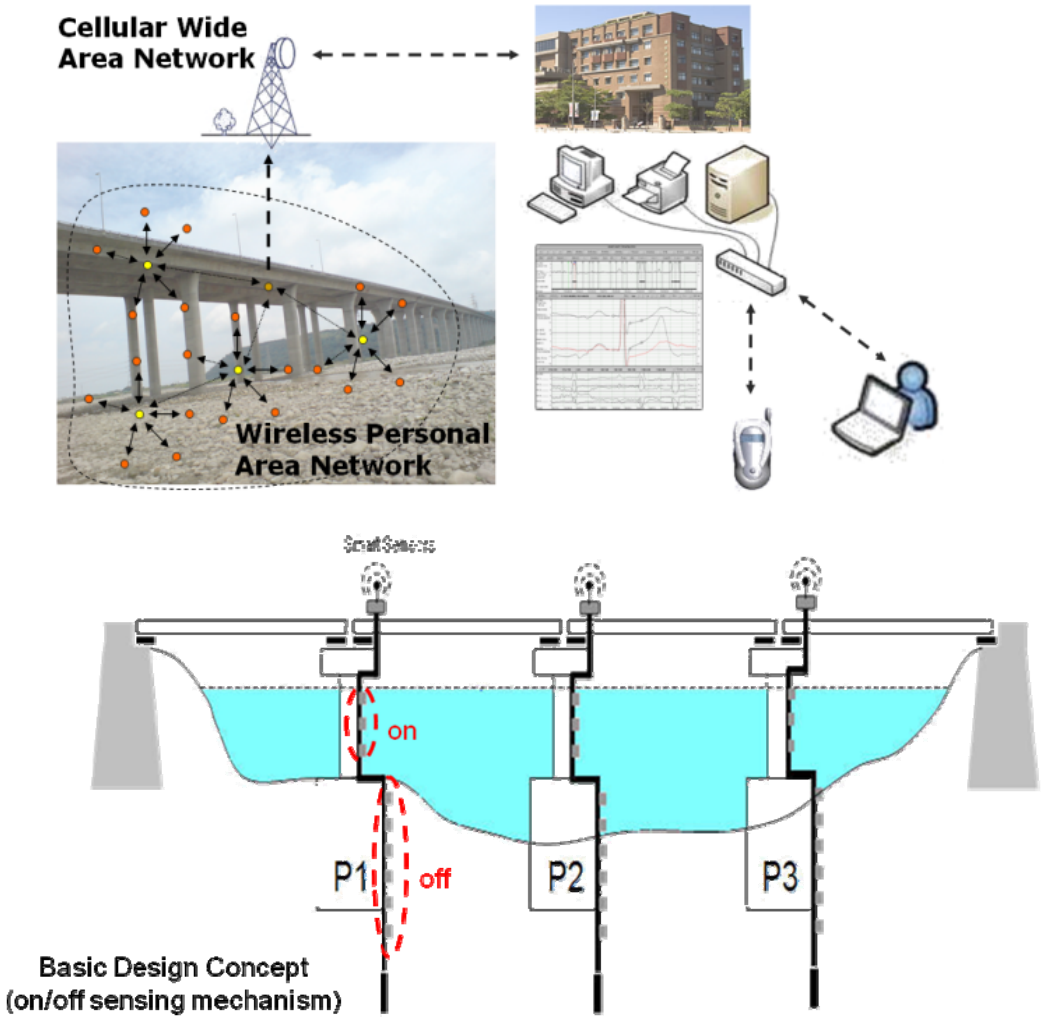

圖 2. 智慧型感測監測網路意示圖

3.1 光纖沖刷監測系統

光纖光柵感測器提供多工及直接即時量測的功能，由於光纖感測技術中的光源回饋較傳統感測系統更快速且準確，且適用於惡劣環境。基於光纖感測技術越趨成熟，光纖感測器的應用更加多樣化，基於其下列優勢：1.體積小、重量輕、柔軟性高 2.不受電磁及輻射干擾 3.低傳輸損失 4.高靈敏度 5.長期使用之準確度、穩定性與可靠度 6.抵抗惡劣環境能力佳及遠端傳輸 7.具有極大的頻寬 8.可多工(multiplexing)性質，已成功驗證藉由此光纖感測器可即時監測沖刷深度及水位面之變化，若配合適當之保護措施，可有效應用於現地試驗，進行長期監測作業。光纖光柵感測器(Fiber Bragg Grating, FBG)提供多工及直接即時量測的功能，此外，由於光纖感測器技術中的光源回饋較傳統感測系統更快速且準確，且光纖感測器適用於惡劣的環境，故光纖沖刷計可即時監測河床沖刷狀態，訊號可透過光纖網路傳回監測中心，若達沖刷預警深度值則提供預警採取適當應變措施。

3.2 無線感測網路技術

隨著科技發展,電子技術以及無線傳輸科技的普遍，傳統有線式監測系統已朝向無線、小型、整合網路及低價和省電的趨勢發展，將監測儀器與無線傳輸結合，發展出無線感測器網路(Wireless Sensor Network, WSN)，在無線感測網路的架構下，感測器節點的設計以省電、價格低廉、體積小且具有資料擷取的能力，感測器節點本身像台小型電腦，搭配備了簡單的感測、運算、無線傳輸等裝置，並將所收集的資料做基本運算處理後，透過無線傳輸裝置將資料回傳給資料收集器，最後，即可根據資料收集器所收集的資料，了解橋梁的健康狀況。

對於無線網路的架構，一般可分為物理層、資料連接層、網路層、傳輸層和應用層，最底層表愈接近硬體，最頂層為使用、操作層面，對於 ZigBee 而言，其網路與傳輸行為定義於物理層至網路層。常見的無線感測網路傳輸協定包括 802.11b/g、 IEEE802.15.4（ZigBee）、IEEE802.15.1（藍牙）或是 GPRS 等方式。選擇量測傳輸系統時必須依照頻寬、傳輸率、獲取容易、使用方便性、長期使用經濟性、技術經驗普及等因素來進行規劃與選擇，依上述特點選用 Zigbee 無線通訊技術為本研究採用之監測方法，應用 ZigBee 無線通訊技術來建構之無線監測網路系統主要可歸納具備以下特色：

(1) 現地安裝容易，可大幅提高經濟性：因為採用無線通訊技術來進行資料傳輸，可以免去傳統監測系統需配置繁雜的配線及大幅節省安裝所需的施工成本及人力，並且也因為應用微感測器，監測元件模組體積不大，可因應現地條件安裝於所需要的位置。

(2) 資料的安全性與可靠性：ZigBee 提供了資料完整性的檢查功能，並具有加密演算法，可維護資料的安全性，且因為採用了避免訊號碰撞的機制，可以防止發送或接收資料時競爭的衝突，每個發送或接收的資料封包都必須等待接收方或傳送方確認訊息，才能進行下一步的動作，確保資料的可靠性。

(3) 硬體成本低：因採用的 ZigBee 傳輸模組將隨著市場擴大及技術層面的提升，預估每個硬體成本可降至 1.5 美元到 2.5 美元之間，且系統應用之微感測器，是採用半導體製程的微機械元件晶體，大量製程製作相對使得單一感測元件的成本相當低廉，因此整套系統相較於傳統的系統於經濟上具有相當大的競爭力。

(4) 無方向性及低耗電：ZigBee 無線通訊技術係以無線電波的方式進行資料的傳輸，傳送與接收端不需要對正方向且幾乎不受中間阻擋物影響，惟電波對於鋼筋混凝土結構的穿透性需進一步討論與研究，不過於橋梁現地，大部分的感測器都配置於結構外觀，部分需內嵌的感測模組，可將感測元件與無線資料傳輸模組採用短距離的線路連接，將無線資料傳輸模組外露於結構，即可確保資料的傳輸。

(5) 網路容量大：現階段一個 ZigBee 網路最多可容納 254 個監測點，而一個區域內又可以同時存在最多 100 個 ZigBee 網路。因為對於需使用大量感測元件的土木結構，此套系統相當適合。大量的感測元件除了可以提供更完整的量測資料之外，更可以彌補部分感測元件發生故障或遭受外力破壞時，資料損失的可能。

3.3 微機電感測器

微機電系統(Micro ElectroMechanical System，MEMS)，定義為一個智慧型微小化的系統，包含感測、處理或致動的功能，包含兩個或多個電子、機械、光學、化學、生物、磁學或其他性質整合到一個單一或多晶片上。微機電系統是一種兼具電子與機械功能的微小裝置，在裝置上既擁有電子訊號的處理能力，並且有機械結構的運動能力，在製造上則藉由各種微細加工技術來達成。

MEMS 應用領域極為廣泛，包括製造業、自動化、資訊與通訊、航太工業、交通運輸、上木營建、環境保護、農林漁牧等。MEMS 根源於 1960 年代中期利用半導體製程製造機械結構於矽晶片上的概念被提出後，吸引了許多人投入該技術的研究。到了 1970 年代中期，利用該技術製造結合機械和電子元件的半導體感測器成功地被開發。基本上，MEMS 是利用半導體製程技術，整合電子及機械功能製作而成的微型裝置，主要的產品類別大致可分為加速計、陀螺儀、壓力感測器、光通訊元件、數位光源處理(DLP)、噴墨頭，以及無線網路 RF 感測元件等，目前已逐漸應用在包括汽車胎壓量測、光通訊網路、投影機、感測網路、數位麥克風、時脈振盪器，以及 括遊戲機在內的各種產品之中 。 甚至在新一代記憶體技術、生物晶片、顯示技術、新興能源等先進研究方面，也扮演了一個重要的角色。

四、即時沖刷監測系

橋墩沖刷監測之方式依所使用的感測器不同而有所差異，但最重要者必須滿足台灣河川沖刷特性要求，尤其是洪水除了泥沙泥漿外，更包括有巨大流木、流石之撞擊，即使監測感測元件晶片系統埋設於橋墩後方，不正面直接承受洪水衝擊，橋墩後方渦流亦將帶引相關流石與流木撞擊監測元件，因此監測元件之保護以及其相關設計是否可以承受橋墩後方渦流所帶引相關流石與流木撞擊乃為本計畫之是否成功之最重要條件，此外，理想的沖刷監測計應能包括水位高程變化、河床深度變化、基礎沖刷外露高度等主要監測項目。

此處使用上述之技術，研發四種即時沖刷監測系統，包括光纖沖刷感測系統、微機電沖刷壓力感測器與無線網路沖刷磚、無線網路漂浮磚等，以便互為印證即時沖刷深度量測資料，並同時比對同步整合於 zigbee 無線網路系統之水位高程、傾斜計與加速度計，利用 morlet 小波時頻訊號分析技術與 HHT 時頻訊號分析技術作為加速度計量測訊號之分析與判斷，以便作為颱洪期間河川水位與即時沖刷深度之即時監測，和橋梁基礎安全之關係的探討。

4.1 光纖沖刷感測器(圖 3a)

光纖光柵感測器提供多工及直接即時量測的功能，由於光纖感測技術中的光源回饋較傳統感測系統更快速且準確，且適用於惡劣環境，若配合適當之保護措施，可有效應用於現地試驗，進行長期監測作業。故光纖沖刷感測器可即時監測河床沖刷狀態，訊號可透過光纖網路傳回監測中心，若達沖刷預警深度值則提供預警採取適當應變措施，該系統並於 2004 年裝設於現地橋梁，經驗證可監測即時、可靠而且有效的沖刷深度資訊、河砂淤積回填及水位變化。

4.2 微機電沖刷壓力感測器(圖 3b)

利用 MEMS 置程的壓力感測器若置於水中可量測流水水位高度變化的資訊，若埋設於河川中，壓力訊號包含靜態水壓、流水動態水壓以及淤積河砂所施加的土壓力，因為感測器埋於土壤內不受動態水壓力影響，因此，經由外部附屬的即時水位高程水壓力（FL sensor），可藉由側向土壓力即時得知淤積深度。因而河砂淤積歷程以及淤積高度可由感測器所量測到的訊號反應來判讀獲得資訊。

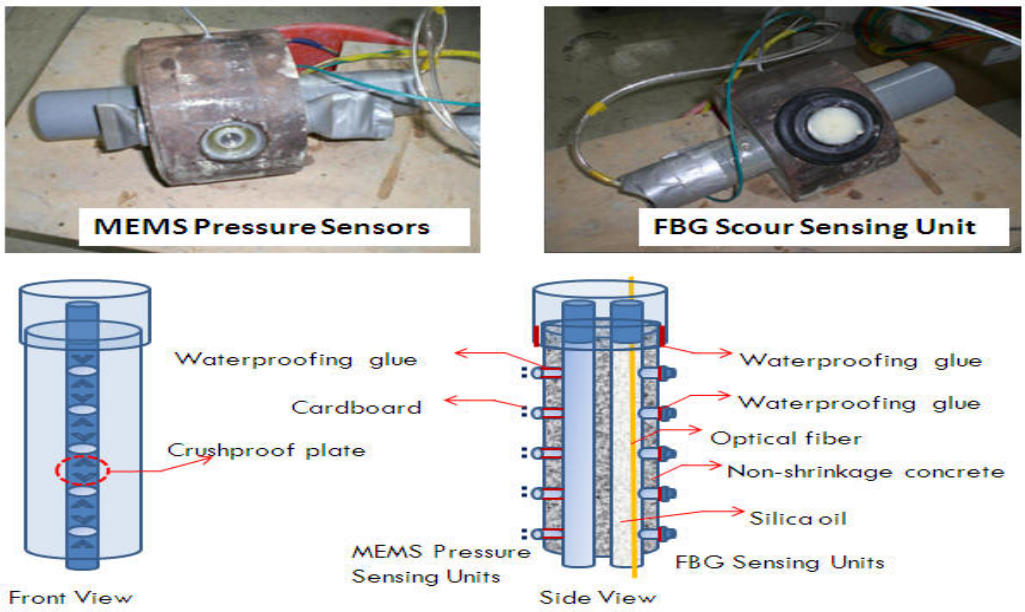

圖 3 (a)微積電沖刷感測器(b) 光纖沖刷感測器

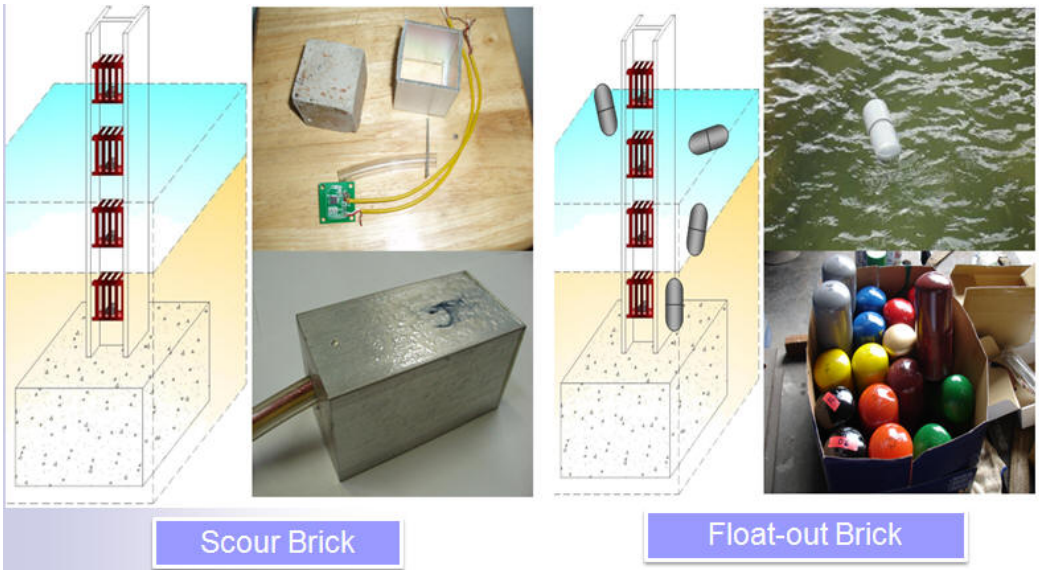

圖 4 (a) 無線網路沖刷磚 (b) 無線網路漂浮磚

4.3 無線網路沖刷磚(圖 4a)

無線網路沖刷磚使用微機電製程感測元件，其體積小且成本低，經基本加工製作成磚塊，當磚塊被沖出，微感測元件能量測到水流對此產生的振動訊號，訊號傳出後透過無線感測網路回到監控中心。

4.4 無線網路漂浮磚(圖 3b)

無線網路漂浮磚是本研究改良後之 RF 元件，具無線電發射功能之小型訊號器，將該無線網路漂浮磚事先埋於橋址處附近。在靜止狀態時不會發出信號，表示該位置尚未受洪水沖刷，但經河水沖刷浮出後，內建機械裝置將觸動體內發報系統，送出無線電封包訊號，由接受器接收後予以解碼、傳輸，進而辨識出河床之沖刷深度。其監測方法兼具成本經濟和簡便之優點，該儀器設備設置於河床時，於洪水來襲之時，能測知洪峰通過時之河床各斷面之沖刷深度，但只能使用一次，屬於拋棄型沖刷監測系統，本研究將利用 MEMS/NEMS 壓電元件技術設計此一無線網路漂浮磚，並同步設置並固定於其他三種沖刷樁附近，以便同時量測沖刷與洄淤情形。

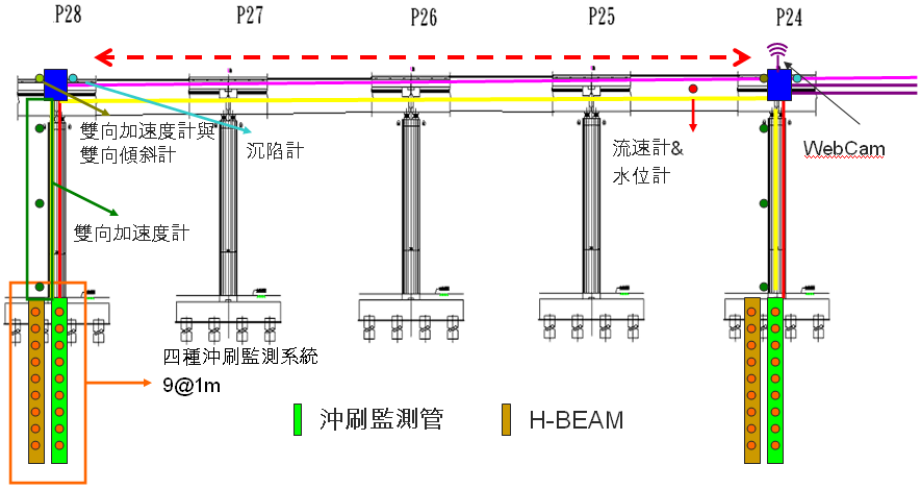

圖 5 橋梁監測系統感測器配置

圖 6 例行性現地監測系統維護

透過無線監測網路技術，可整合多種傳統橋梁監測設備於同一網路，如圖 5 所示，例行性現地監測系統維護如圖 6 所示，將前述四種沖刷感測器安裝於 H-Beam 與沖刷監測管上，每公尺裝置一組沖刷感測器，長度共 9 公尺，於橋墩上中下三處裝有雙軸加速度計，以便監測橋墩之振動情況，透過橋墩振動量測，可提供橋梁系統識別為資料庫，做為分析橋梁振動、沖刷深、水位高等不同參數之相關性研究基礎，橋面上亦有安裝雙軸加速度計，透過橋面與橋柱上加速度計也可探討橋梁上部、下部之間的關係與支承墊的特性，另裝有傾斜計與沉陷計針對橋梁安全檢測與沖刷不穩定或傾倒前的現象進行監控。除了橋梁結構部份，還設有流速計及水位計，其量測資料可回饋並驗證水理分析模型，並經由橋梁穩定性分析，以水位、流速、沖刷深度三參數，推估橋梁穩定性，作為警戒與行動值的依據。尚於橋面板加裝夜型網路設影機，可拍設河床狀況，水位變化等，鏡頭四週有紅外線燈，可於夜間拍攝。

五、結語

如何確保橋梁於颱風豪雨洪水侵襲中仍能確保其功能性，有賴於沖刷即時監測的開發研究與驗證，與其相關監測資料的判讀，分析橋梁的穩定性，評估橋梁安全。對於本文提及四種即時沖刷監測系統，包括光纖沖刷感測器、微機電沖刷壓力感測器與無線網路沖刷磚、無線網路漂浮磚等，互為印證即時沖刷深度量測資料，並比對同步整合於無線網路系統之水位計、流速計、傾斜計與加速度計，以便作為颱洪期間河川水位、流速與即時沖刷深度之即時監測，以確認相關橋梁沖刷檢、監測技術之適用性，且未來可藉由現地水文、水理資料之調查分析，配合橋梁基礎耐洪評估表格之製作與橋梁沖刷安全穩定之數值模型分析，建立橋梁安全沖刷評估模式，進而訂定橋梁沖刷安全評估標準作業流程與警戒值，相關資料將可作為颱洪侵襲期間跨河橋梁沖刷安全預警、封橋與開放之決策依據，保護橋梁與通行於橋梁上之人員和車輛，避免斷橋造成人民財產損失的悲劇再次發生。

參考文獻

1. Bruce, W. M., and Stephen, E. C., (2000), Bridge Scour, Water Resource Publications, LLC., U.S.A.
2. Chang, W. Y., Lai, J. S. and Yen, C. L., (2004), “Evolution of scour depth at circular bridge piers”, Journal of hydraulic engineering, Vol. 130, No. 9, 905-913.
3. Daugherty, R. L., Franzini, J. B. and Finnemore, E. J., (1989). Fluid mechanics with engineering application, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
4. Falco, F. D. and Mele, R., (2002), “The monitoring of bridge for scour by sonar and sedimetri”, NDT&E International, Vol. 35, 117-123.
5. Lin, Y. B., Chen, C. C., Chang, K. C., Chern, J. C. and Lai, J. S., 2005, Real-time monitoring of local scour by using fiber bragg grating sensors, Smart Materials and Structures, 14, 664-670.

6. Lin, Y.B., Lai, J. S., Chang, K. C. and Li, L.S., 2006, Flood scour monitoring system using fiber brag optical fiber sensors, Smart Material and Structures, 15, 1950-1959.
7. Mia, M. F. and Nago, H., (2003), “Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier”, Journal of hydraulic engineering, Vol. 129, No. 6, 420-426.
8. Millard, S. G.., Bungey, J. H., Thomas, C., Soutsos, M. N., Shaw, M. R. and Patterson, A., (1998), “Assessing bridge pier scour by radar”, NDT & E International, Vol. 31, No. 4, 251-258.
9. Oliveto, G. and Hanger, W. H., (2002), “Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour”, Journal of hydraulic engineering, Vol. 128, No. 9, 811-820.
10. Reddy, D. R., (2006), “Bridge scour detection”, Proceedings of National Conference on Advanced in Bridge Engineering (ABE), March 24-25.
11. W. Y. Chang, J. S. Lai and C. L. Yen, “Evolution of scour depth at circular bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, v 130, n 9 (2004) 905-913
12. Yankielun, N. E. and Zabilansky, L., (1999), “Laboratory investigation of time-domain reflectometry system for monitoring bridge scour”, Journal of hydraulic engineering, Vol. 125, No. 12, 1279-1284.