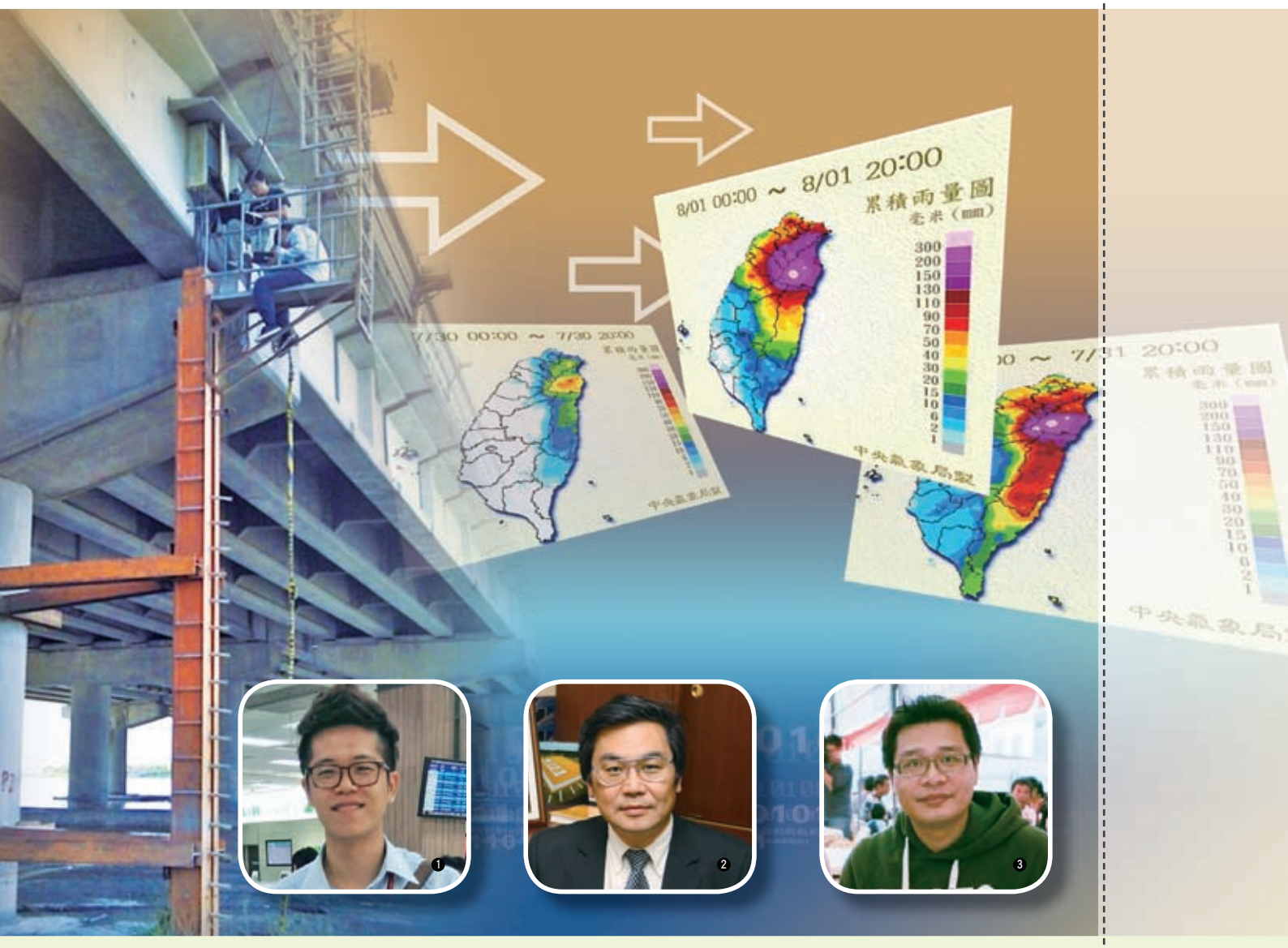
重力式壓電片沖刷監測技術

◎ 關鍵字：沖刷、局部沖刷、沖刷監測、壓電片、預警系統

財團法人中華顧問工程司／橋梁技術中心／工程師／王建翔 ❶
國立中央大學／土木工程系／教授／王仲宇 ❷
國立中央大學／工學院橋梁研究中心／博士後研究員／王顯霖 ❸

摘 要 ABSTRACT

近年來，颱風造成的暴雨、洪水強度更甚以往，斷橋事件頻傳促使橋梁維護管理單位更加重視橋梁耐洪的問題。本研究旨在開發一套具耐久、可靠且經濟的橋墩局部沖刷監測系統，為改善現有的沖刷監測計多需開挖河床、無法量測回淤變化以及造價昂貴的問題，發展出一套無需開挖河床、可量測回淤變化、造價便宜且數據處理簡單的沖刷監測計—重力式壓電片沖刷監測計。重力式壓電片沖刷監測計係利用壓電片薄膜作為主要的感測裝置，其安裝時將一重力桿上端連接一電阻尺並於桿上佈設數個壓電片薄膜製成的感測器，重力桿於安裝完成時置於固定在橋墩上的滑軌內，重力桿的底部放置於河床上。河床高程下降時重力桿會隨著下滑，並透過電阻尺計算其下滑距離；河床回淤後則藉由壓電片感測器判斷回淤高程。本沖刷監測系統所量測的數據搭配無線網路的傳輸可將資料即時傳回遠端的控制電腦，管理人員僅需經由遠端電腦便能掌握現地的狀況，並判斷該橋墩是否需進行修復甚至封鎖橋梁。



壹、前言

台灣地形狹長，山多平原少，且河川多呈東西向，而主要的鐵路及幹道皆為南北向，人們皆透過橋梁進行通勤及貨物運輸。因此，橋梁在台灣的交通運輸上扮演著極為重要的角色，也是台灣經濟發展的推手。近年來，全球的氣候變遷加劇，侵襲台灣的颱風、暴雨強度較以往更為強烈，許多重要的橋梁因為基礎嚴重裸露而承受不住洪水的衝擊應聲倒塌，也造成了人民的生命、財產等無法彌補的損失。

近年來天災頻繁，斷橋事件頻頻發生，橋墩局部沖刷監測系統日趨重要，在橋墩局部沖刷監測方面有許多團隊進行研究及現地試驗，國內的沖刷監測系統包含了光纖光柵式沖刷感測系統、微機電壓力感測系統、埋入式防水耐撞振動感應系統、重力式沖刷量測系統…等；國外則多是使用聲納、電磁式反射儀、磁性滑動套環等，本研究為改善現有沖刷監測計多需開挖河床且造價昂貴之問題，開發一造價便宜、無需開挖河床、可量測回淤變化且原理簡單之沖刷監測計—重力式壓電片沖刷監測計[19]，並於設計完成後安裝於現地橋梁進行監測。

貳、文獻回顧

國內外針對橋墩局部沖刷機制的研究已有相當多之研究成果，對於局部沖刷的機制可由許多文獻中得到詳細的介紹，國內有「本省西部重要河川橋梁橋基災害分析與橋基保護工法資料庫系統之建立」[1]與「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」[2]等，國外則有“Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures”[3]、“Bridge Scour”[4]等。

局部沖刷如圖1所示為當河道中有結構物阻擋或干擾水流流向，會造成水流受阻而沿著此結構物產生沖刷作用，進而造成結構物局部河床因沖刷而高程下降，對於橋墩基礎或橋台局部沖刷來說，則專指橋墩基礎或橋台對於水流的干擾而在周邊形成不同的渦流及射流。

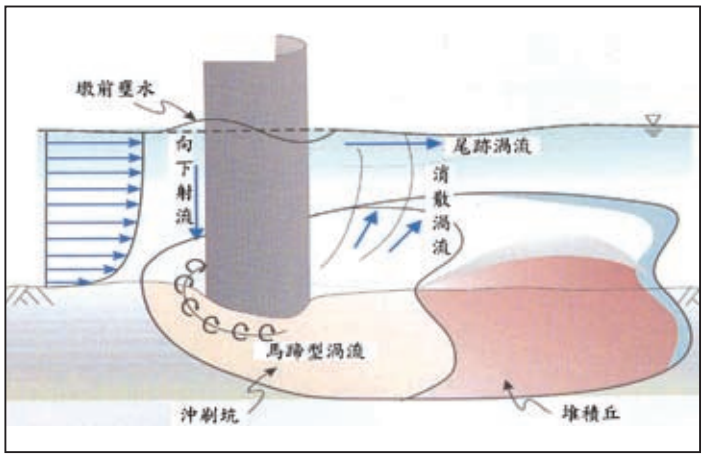


圖1 局部沖刷示意圖[11]

而國內外對於橋梁基礎局部沖刷檢、監測技術已發展多年，美國NCHRP Report396[5]、397A[6]、397B[7]、515[8]、“Bridge Scour: Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures—Review”、“Bridge Scour Monitoring Technologies: Development of Evaluation and Selection Protocols for Application on River Bridges in Minnesota”、“Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors”[9]、“Detecting Bridge Scour by Measuring the Thermal Variation Across the Stream Bed”[10]、“Real-Time Bridge Scour Monitoring: Recent Technological Development”[11]，以及國內的「光纖與光柵用於橋梁監測之研究」[12]、「橋梁監測技術手冊」[13]、「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」[14]、「橋基沖刷災害與相關之維護管理(2)－橋梁沖刷監測預警系統及其功能評析」[15]、「高科技橋梁沖刷監測系統開發與技術整合應用研究」[16]、「高科技橋梁即時監測系統建置試辦計畫-台

2 工程論著

17線西濱大橋」[17]等研究所提及之現有沖刷監測系統包括表面型、埋入式或透過非接觸式進行量測，大致簡述如下：

一、埋設橋址磚塊(圖2)

雨季來臨前將特別標註之磚塊或標的物埋設於橋址處附近之河道中，洪水過後於埋設處開挖並計算流失磚塊之數量估算洪颱期間河床遭沖刷之最大深度，屬於早期無任何適當儀器可使用之方法，此方法在雨季前預埋及雨季後的開挖工程都相當麻煩。隨著電子及通訊技術的發展，目前已有在預埋的標的物內裝設無線電發射器，當河床被沖刷至標的物預埋的地方，此標的物若產生振動則會發射一無線電密碼，由接收器解碼、傳輸則可得知是哪個標的物遭沖刷而流失。

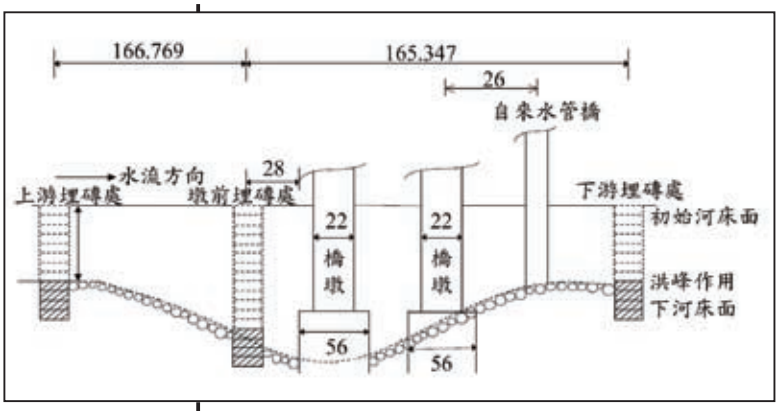


圖2 沖刷磚沖刷量測之埋設示意圖－名竹大橋[15]

二、聲納、透地雷達沖刷探測器(圖3)

聲納係藉由偵測超音波回傳的時間，因波速在不同介質中會產生折射並改變其波速，利用此一原理進而判斷河床的深度；而透地雷達的原理與聲納相似，只是發射的波有所不同，用的是電磁波。兩者皆屬於常見的檢測儀器，廣泛應用於各個領域，但其儀器成本較高，儀器操作及訊號判讀都需要專業的人員使用。

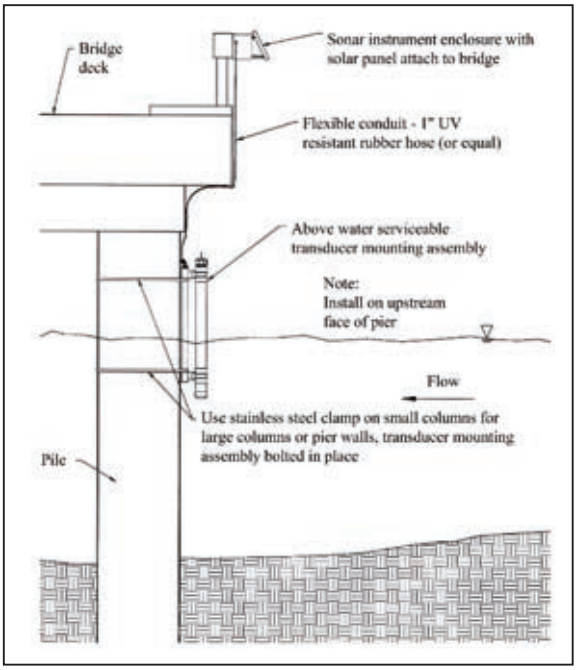


圖3 聲納式沖刷監測計[6]

三、水下攝影機

於橋墩基礎上裝設防水攝影機，並且在不同河床高程的基礎上標記不同的高程或沾標，利用攝影的方式記錄河床高程變化，但其易受浮木、流石撞擊而損壞，且在河水湍急、光源不足的情況下不易清楚的記錄真實影像。

四、重力式沖刷監測計(圖4)

重力式沖刷監測計係將一重力桿置於一固定於橋柱上的滑軌內，重力桿因自重會落於河床上，而重力桿上連結一電阻尺，當河床高程因局部沖刷而下降時，重力桿會隨河床高程下降而滑落，此時可藉由電阻尺被拉伸長度得之河床高程變化，其優點為造價便宜、耐撞且施工方便，但缺點則是河床開始回淤時，重力桿並不會隨著河床高程上升而改變位置，無法量測到回淤深度，需要定期檢查重力桿是否有被回淤，若被回淤覆蓋則需將重力桿抽出並放置於河床上。

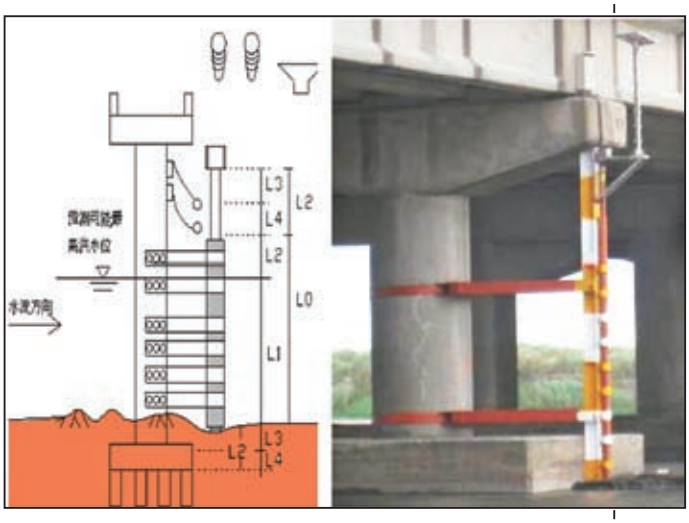


圖4 重力式沖刷監測計示意圖及完工照片[17]

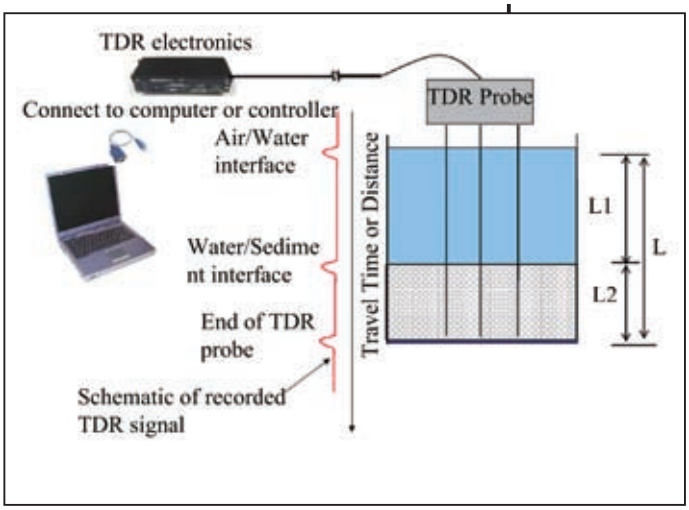


圖6 電磁式反射儀[11]

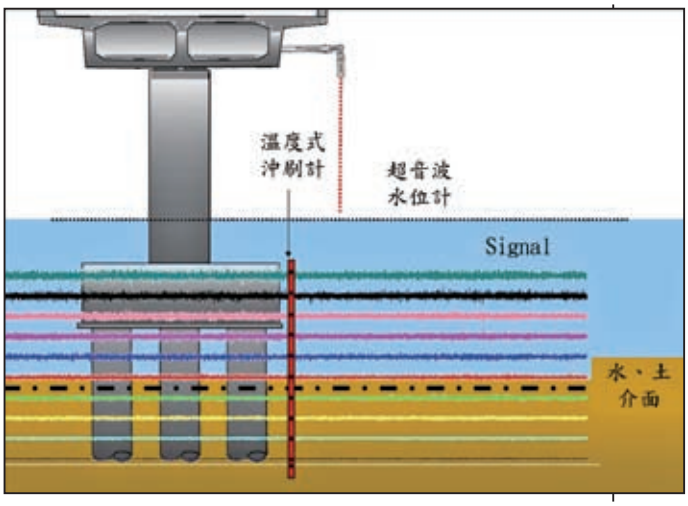


圖5 溫度式沖刷計概念圖[2]

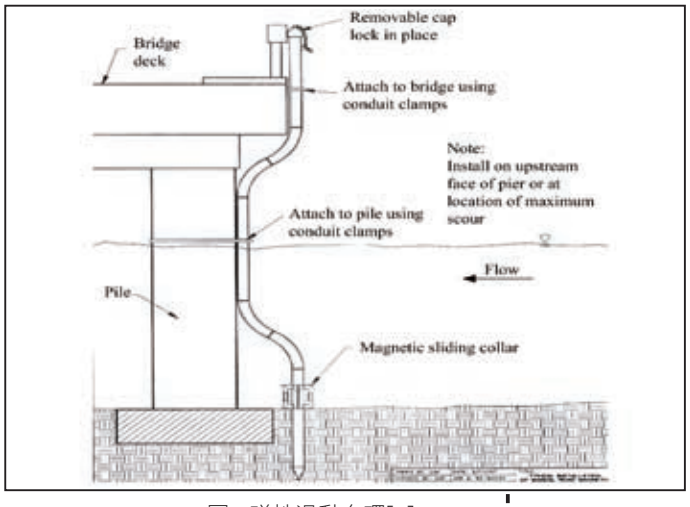


圖7 磁性滑動套環[7]

五、溫度式沖刷監測計(圖5)

溫度式沖刷監測計是利用河水與沙土層中的溫度不同判斷河水與河床的界面。

六、電磁式反射儀(圖6)

電磁式反射儀也稱做時域反射儀，此儀器是利用量測土壤的介電常數，此介電常數與土壤之含水量有關，其會在土壤與水的界面會有折射的現象產生，進而推估水與土的界面。

七、磁性滑動套環(圖7)

磁性滑動套環為國外常見的一種沖刷監測儀器，其原理為將具有磁性的套環套在一預埋於土內的圓管上，而圓管內有多個磁通開關，接近套環的磁通開關會因套環接近而有磁場反應。因此，當河床下降時其套環會隨著河床下降而滑落，藉由磁通開關的反應即可得知套環的位置，但其缺點和重力式沖刷監測計相同，無法監測回淤的變化。

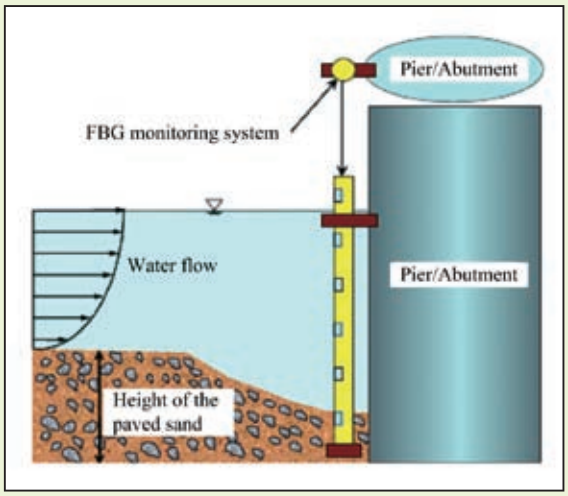


圖8 光纖光柵沖刷監測系統示意圖[9]

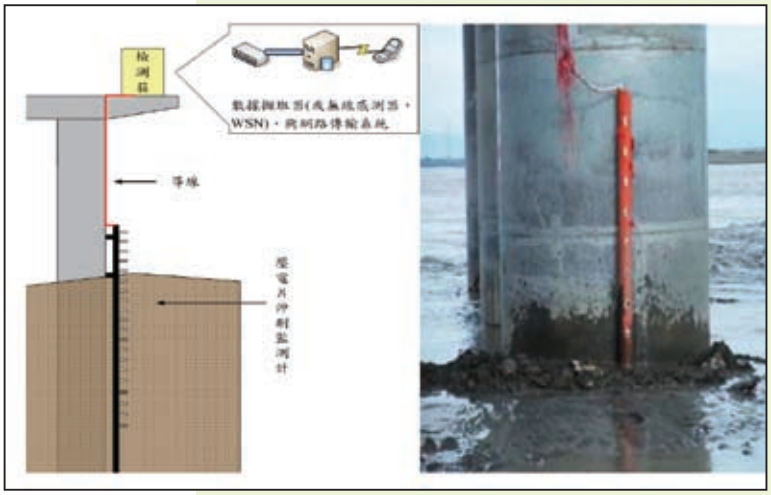


圖9 壓電片式沖刷監測計[18]

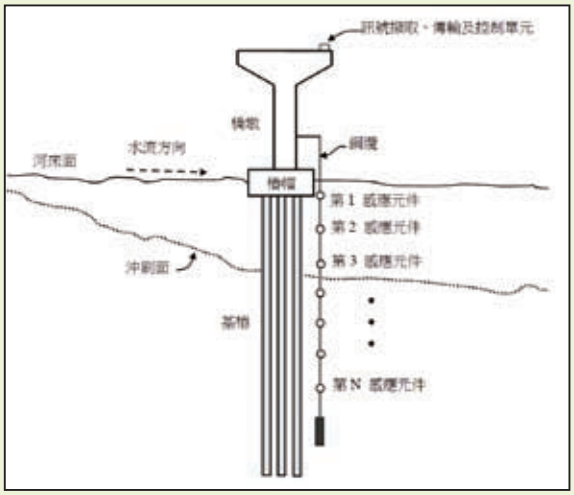


圖10 埋入式振動感應監測計系統示意圖[17]

八、光纖光柵沖刷監測系統(圖8)

光纖光柵沖刷監測系統概念係於一圓管中安裝數個不同波長之光纖光柵感測器並予以串接，並將此圓管埋入河床中，露在河床上的圓管則可視為懸臂梁，假設水流為一分佈載重作用於光纖沖刷監測系統之受力面，河床底面可視為固定支承端，則於河床上方最接近河床底面之光纖光柵所量測之應變值會較其他光纖光柵的應變值大。因此，應變量測最大值之光纖光柵位置則為河水與河床之交界面。進階的光纖光柵沖刷監測系統則是將圓管上不同高程位置開孔，並放入光纖光柵感測器，其中光纖光柵感測器製成如按鈕形狀，內有小鐵片製成懸臂梁構件，其上接有光纖光柵感應器，當水流沖擊按鈕物件時，光纖感測器會感受到懸臂梁構件受壓變形，而產生不同於未受水流沖擊之訊號。

九、壓電片式沖刷監測計(圖9)

壓電片式沖刷監測計係利用壓電薄膜作為感測器，壓電薄膜的特性為當其受到外力作用產生變形時會激發出電壓，藉由此一特性，將數個壓電片佈設於一圓管上，並將此一圓管埋入土中，當壓電片處於空氣或水的環境下，壓電片會因為風和水流沖擊擺動而產生較大電壓，而當壓電片被埋入土中時，壓電片則處於靜止狀態，電壓的反應相對於擺動時明顯的降低，進而判斷出河床的位置。

十、埋入式振動感應監測計(圖10)

埋入式振動感應監測計係將一鋼纜上每隔固定距離裝設振動感測計，在橋墩下游處鑽孔並將此鋼纜放入，而鋼纜的最底部連接一重物避免鋼纜因河水沖擊或流石、浮木撞及而遭抽出。當河床高程下降而振動感測器露出時，其

感測器會因洪水的沖擊而發出激烈的振動訊號；被埋在土中的感測器則因靜止而不會產生振動的訊號。因此可利用感測器是否有振動的反應判斷河床高程的位置。

十一、導桿式重力錘沖刷深度監測計(圖11)

導桿式重力錘沖刷深度監測計其原理和磁性滑動套環相仿，其將一圓形套環套在預埋入土中之鋼棒上，而圓形套環則連接一電阻尺，圓形套環會隨著河床高程下降而滑落，藉由電阻尺的讀數可得知河床高程下降的距離。

十二、微機電壓力感測沖刷監測計

微機電壓力感測沖刷監測計係將數個壓力感測元件佈設於一圓管上並將此圓管埋入土中，藉由量測水中及土中的壓力分布不同判斷河床與河水的界面。

十三、結構單元振動監測橋墩狀況

透過監測結構單元振動頻率及振幅變化來瞭解橋梁的狀態。藉由監測橋墩之振動與橋梁局部沖刷深度之變化做比較，若能長期進行監測，配合資料庫建立，將有助於瞭解橋梁行為，甚至可以應用於橋梁局部沖刷深度預測、構件老劣化狀況、支承狀況的瞭解並掌握其可能發生破壞的情形，達到橋梁長期結構健康診斷的目的。

參、重力式壓電片沖刷監測技術介紹

一、監測系統儀器組成

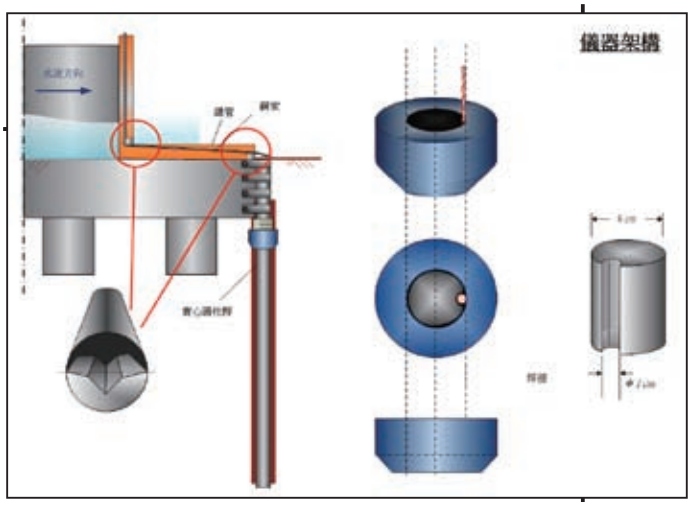


圖11 導桿式重力錘沖刷監測計[17]

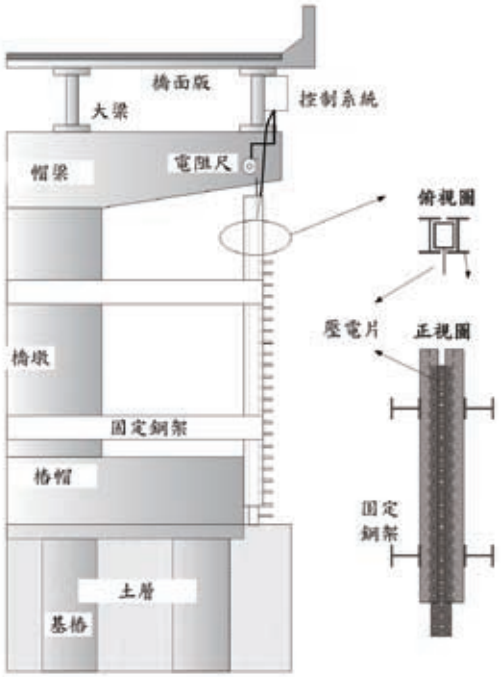


圖12 重力式壓電片沖刷監測計示意圖

重力式壓電片沖刷監測計示意圖如圖12所示，整體包含H型鋼2支、重力桿1支、電阻尺一組、數個壓電薄膜感測器和現地控制系統，以下將針對各構件的用途各別說明：

(一)H型鋼：重力式壓電片沖刷監測計係以2支H型鋼作為重力桿的保護殼以及軌道，安裝時將2支H型鋼固定於橋柱或橋墩上，再將重力桿置於此2支型鋼中，當重力桿隨著河床高程下降時，H型鋼可作為重力桿下降時的軌道，並可保護重力桿不受水面上的流

石及浮木撞擊而損壞。

(二)重力桿：重力桿為此監測計的主幹，桿上佈設數個壓電片感測器作為沖刷和回淤的判斷，並且在頂部連接電阻尺作為量測探測桿高程的變化。河床沖刷時，重力桿會隨著河床高程降低而下滑，此時利用電阻尺判斷其下滑的高程，而當河床回淤時部分重力桿會被埋在河床中，此時則利用壓電片判斷其回淤深度。

(三)電阻尺：電阻尺其原理是將線性位移變化以電阻的變化輸出，當電阻尺內部線被拉伸時，其內部會產生電阻變化造成輸出之電壓值的改變，再利用其電壓改變量換算成位移的變化。

(四)壓電薄膜感測器：基於壓電薄膜的壓電特性，薄膜在受外力產生變形時，在變形的過程中會相應產生電壓輸出，Lagasseetal.即利用此一特性，設計出應用壓電薄膜於量測沖刷與回淤過程的感測器。本研究所使用之壓電片感測器已進行過測試[2]，證明其可適用於分辨水、土界面。

(五)現地控制系統：現地控制系統作為現場資料的接收、簡單的數據處理和資料回傳，包含了數據擷取器、防雷保護器、不斷電系統、備源鉛電池和無線傳輸模組，整套系統裝置架設於防潮機箱內防止儀器受潮而故障。

二、量測原理介紹

沖刷監測計的量測運作，可由圖13進行說明，在圖13(a)中，處於沖刷前的初始狀態，此時δ0為沖刷前探測桿的初始標定位置；當沖刷發生，探測桿因河床面下降而下滑，直至沖刷達到最大沖刷深度而穩定如圖13(b)所示，此時δ1即為此次量測之最大沖刷量記錄，在沖刷開始後且尚未回淤時，探測桿處於流水深度範圍內之壓電薄膜皆處於擺動狀態；隨水流流速減緩，河床回淤現象發生後，探測桿位置仍處於最大沖刷深度發生的刷深位置，回淤之土壤則會將探測桿上的壓電薄膜覆蓋，使原本在流水中擺動的壓電薄膜轉為靜止，如圖13(c)所示之δ1區段。

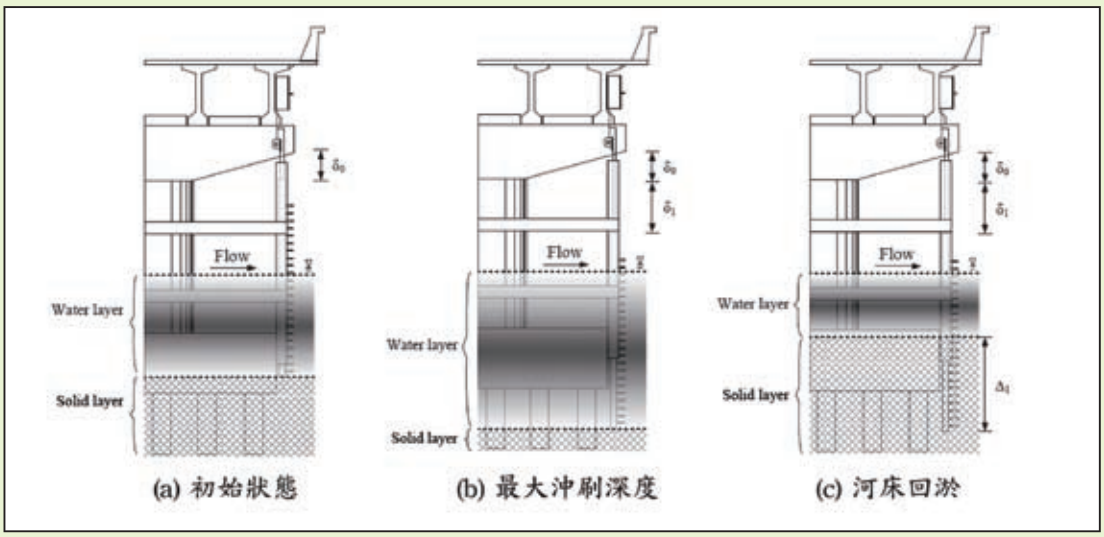


圖13 沖刷計量測機理示意圖

以上的運作流程是於系統初安裝完成且尚未發生過河床沖刷狀況之唯一初始流程，若系統已經歷過沖刷與回淤歷程後，再沖刷的運作則需分析壓電薄膜反應數據，若再沖刷深度並未達到圖13(c)中所示之δ1深度，則探測桿位置不變，電阻尺輸出訊號不變。但若再沖刷深度大於歷史最大沖刷深度，則探測桿再行下滑直至該次最大沖刷深度位置。

肆、台17線西濱大橋沖刷監測系統

一、現地監測系統建置介紹

此重力式壓電片沖刷監測技術已於民國99年10月安裝於台17線西濱大橋P21橋墩下游處，建置完成至今尚保持正常運作中，顯示其耐用性良好，以下介紹現地安裝過程。

步驟1.將固定重力桿之鋼架鎖在橋柱上如圖14所示，並將此支撐架調整鎖固。

圖14 沖刷監測系統支撐架固定

步驟2.將H型鋼及重力桿固定一併由橋面上吊掛至定點如圖15，而後將外圍兩支H型鋼固定在支撐架上，同時在河床上預挖約一米的坑洞如圖16，再將H 型鋼及重力桿連接處鬆開，讓探測桿滑入挖好的坑內，最後將土回填。

圖15 H型鋼及探測管吊掛至定點並鎖固

圖16 河床挖一公尺預埋探測桿

步驟3.安裝電阻尺及相關資料擷取設備如圖17、圖18所示，並將各感測器接線測試則完成安裝。

圖17 電阻尺安裝

圖18資料擷取設備安置

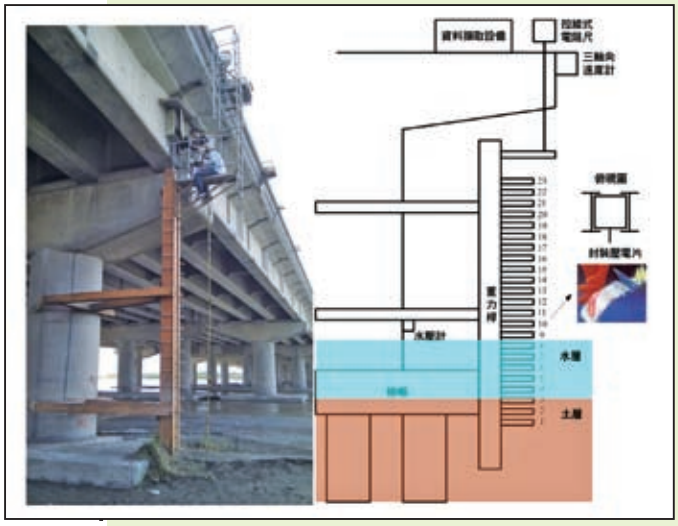


圖19 西濱大橋沖刷監測計現地安裝

二、監測成果

重力式壓電片沖刷監測計現地安裝於台17線西濱大橋P21橋墩下游處，如圖19所示，以下成果展示挑選2012年8月蘇拉颱風侵襲中台灣事件進行探討。

圖20為中央氣象局發布蘇拉颱風影響期間台灣全島累積雨量圖，從圖上顯示彰化雲林於2012/08/02當日產生瞬間暴雨，其後則雨量趨向平緩，表1為上游水庫及攔河堰進出水量之統計資料，雖降雨集中於2012/08/02，而上游水庫及攔河堰於2012/08/03尚有洩洪事件發生，從此統計資料可用以解釋沖刷監測計量測之成果。

圖21為蘇拉颱風侵襲中台灣期間量測之數據成果，圖中包含西濱大橋鄰近水位資料及本監測系統之壓電片訊號(每一條線代表一個壓電片輸出訊號)，其中沖刷深度以樁帽頂為基準，以下分別說明蘇拉颱風影響期間數據量測之成果及其對應之事因。

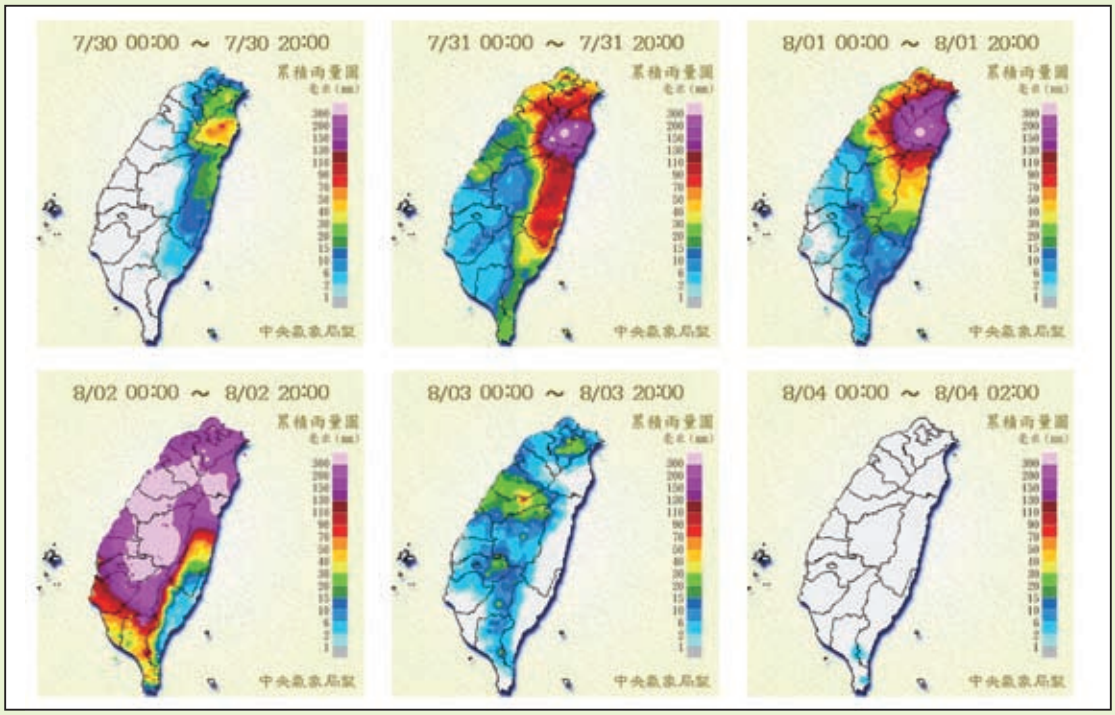


圖20 中央氣象局公布2012/07/30~2012/08/04累積雨量圖

表1 上游水庫及攔河堰進出水量統計資料

名稱	水庫基本數據 有效容量 (萬立方公尺)	每日蓄水統計 統計時間	集水區降雨量 (毫米)	進水量 (萬立方公尺)	出水量 (萬立方公尺)	即時水情資料 水情時間	水位 (公尺)	有效蓄水量 (萬立方公尺)	蓄水量 百分比(%)
霧社水庫	5379	起:2012-07-29(0時) 迄:2012-07-30(0時)	0	86.4	106.58	2012-07-29(7時)	995.74	2727.66	50.71%
		起:2012-07-30(0時) 迄:2012-07-31(0時)	9	77.21	134.73	2012-07-30(7時)	995.3	2636.58	49.02%
		起:2012-07-31(0時) 迄:2012-08-01(0時)	8.5	379.97	190.08	2012-07-31(23時)	995.23	2622.4	48.75%
		起:2012-08-01(0時) 迄:2012-08-02(0時)	102	884.72	318.55	2012-08-01(23時)	996.67	2924.25	54.36%
		起:2012-08-02(0時) 迄:2012-08-03(0時)	233	2396.55	1526.76	2012-08-02(23時)	1002.3	4225.07	78.55%
		起:2012-08-03(0時) 迄:2012-08-04(0時)	0	2104.1	1758.23	2012-08-03(19時)	1002.9	4373.74	81.31%
		起:2012-08-04(0時) 迄:2012-08-05(0時)	0	959.81	746.84	2012-08-04(7時)	1003.5	4550.78	84.60%
集集攔河堰	382.7	起:2012-07-29(0時) 迄:2012-07-30(0時)	0.2	802.68	194.54	2012-07-29(23時)	212.66	124.919	32.64%
		起:2012-07-30(0時) 迄:2012-07-31(0時)	4.3	749.04	198.82	2012-07-30(23時)	211.85	79.06	20.66%
		起:2012-07-31(0時) 迄:2012-08-01(0時)	21.7	1219.27	481.61	2012-07-31(23時)	212.95	143.7	37.55%
		起:2012-08-01(0時) 迄:2012-08-02(0時)	55.8	2101.23	1479.24	2012-08-01(23時)	210.73	48	12.54%
		起:2012-08-02(0時) 迄:2012-08-03(0時)	367.6	49450.25	49329.01	2012-08-02(23時)	209.97	34	8.88%
		起:2012-08-03(0時) 迄:2012-08-04(0時)	5.9	33076.95	33060.96	2012-08-03(23時)	207.56	13	3.40%
		起:2012-08-04(0時) 迄:2012-08-05(0時)	0	19161.36	19161.36	2012-08-04(19時)	207.22	10.56	2.76%

中央氣象局於2012/07/30發布蘇拉颱風陸上颱風警報，而從圖20顯示彰化雲林地區只有間歇性大雨，尚未降下大量豪雨，直到2012/08/02瞬間降下豪大雨，其累積雨量一天即達到300mm，此事件可對應圖21數據分析成果之事件a，其顯示a事件水位開始上升，且壓電片只有部分因為水位逐漸上升，樁帽上之壓電片開始產生擺動並產生電壓輸出。水位上升後開始慢慢發生沖刷事件，b事件至c事件為主要發生沖刷之時間，期間可發現壓電片起始擺動訊號有時間延遲現象，主要原因為各壓電片間距25cm，河床慢慢因沖刷下降導致壓電片逐漸露出並於水中擺盪，之後持續沖刷至最底之壓電片時帶動重力桿下降，下降之高度由電阻尺紀錄並將其數據納入計算，事件b為發生最大沖刷深度之時間點，其最大沖刷深度達7m。

本監測系統其優點為可量測回淤現象，事件c達最大沖深度後即開始回淤，回淤也可發現因土層慢慢回淤將壓電片埋住，其訊號停止時間也與沖刷相同有時間延遲現象，至2012/08/02傍晚發現其土層又回淤至樁帽頂附近，而事件c之後有間歇性的壓電片擺動訊號，判斷為因西濱大橋為砂質土壤，即使土層回淤但其含水豐富，導致壓電片尚可些微擺動造成仍有電壓輸出。

而後因上游攔河堰及水庫進行洩洪如表1所示，從圖21也可看出此一現象，洩洪時造成原本含水豐富的土層進行二次沖刷，其沖刷深度達3m，經過半天的時間又回淤至樁帽附近之高度。

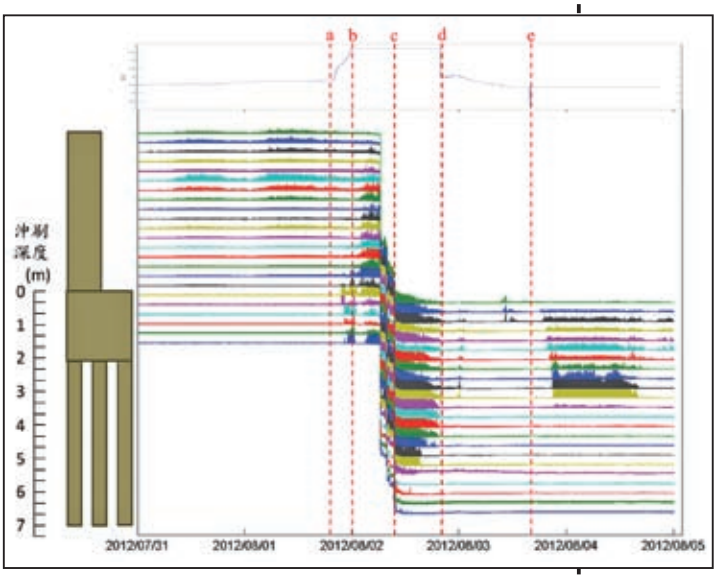


圖21 蘇拉颱風量測數據分析成果

從以上事件也可發現西濱大橋P21橋墩歷經蘇拉颱風期間產生第一次沖刷→回淤→第二次沖刷→回淤之過程，其河床高程始終保持於樁帽附近，其維持一動平衡之現象。

伍、結論

本研究旨在開發一具耐久、可靠且經濟的橋墩局部沖刷監測系統，為改善現有的沖刷監測計多需開挖河床、無法量測回淤變化以及造價昂貴的問題，發展出一套無需開挖河床、可量測回淤變化、造價便宜且原理簡單的沖刷監測計—重力式壓電片沖刷監測計，此沖刷監測計已成功於凡那比颱風期間量測到洪水沖刷的數據，也證實其可應用於現地的橋墩局部沖刷監測。

重力式壓電片沖刷監測計的量測數據處理容易，無需非常專業的技術人員判讀數據，無論是直接由電壓判斷壓電片感測器的狀態或是利用相似度比較方法判斷，皆可讓一般的管理人員操作。在洪水期間橋墩裸露的狀況也可提供管理人員作為封橋警示的參考指標之一，然而現有的封橋標準多是依據現場人員的經驗或是水位是否達到警界高度作為封橋的標準，僅利用這樣少許的資訊需要判斷橋梁結構是否安全是不夠完善的，橋梁結構的安全與否還需要考量橋墩基礎裸露的程度、洪汛期前橋梁下部結構是否受損等因素才可更進一步了解橋梁結構的健康狀況。此外，本項研究成果已進行專利申請，專利名稱：重力式壓電片沖刷監測裝置；申請號：099138004(申請中)。

參考文獻

1. 林呈等，「本省西部重要河川橋梁橋基災害分析與橋基保護工法資料庫系統之建立」，交通部運輸研究所研究報告，台北(1998)。
2. 陳振川、蔡益超、張國鎮，「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」，交通部公路總局研究報告，台北(2006)。
3. Lagasse, P.F., Zevenbergen, L.W., Schall, J.D., Clopper, P.E., “Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures”, FHWA, HEC-23, Colorado, USA (2001).
4. Melville, B. W, Coleman, S. E., Bridge Scour, The University of Auckland, Auckland, New Zealand (2000).
5. Lagasse, P.F., Richardson, E.V., Schall, J.D., Price, G.R., “Instrumentation for Measuring Scour at Bridge Piers and Abutments”, NCHRP Report 396, Washington DC, U.S.A (1997).
6. Schall, J.D., Price, G.R., Fisher, G.A., Lagasse, P.F., Richardson, E.V., “Sonar Scour Monitor - Installation, Operation, and Fabrication Manual”, NCHRP Report 397A, Washington DC, U.S.A (1997).
7. Schall, J.D., Price, G.R., Fisher, G.A., Lagasse, P.F., Richardson, E.V., “Magnetic Sliding Collar Scour Monitor - Installation, Operation, and Fabrication Manual”, NCHRP Report 397B, Washington DC, U.S.A (1997).

8. Schall, James D., Price, G.R., "Portable Scour Monitoring Equipment", NCHRP Report 515, Washington DC, U.S.A (2004).

9. Lin, Yung-Bin, Chang, Kuo-Chun, "Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors", Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing, No. 14, Washington DC, U.S.A, pp. 664-670 (2005).

10.Camp, Charles V., Pezeshk Shahram, M.ASCE, and Leatherwood, Terry D., "Detecting Bridge Scour by Measuring the Thermal Variation Across the Stream Bed", Water Resources Engineering Conference, U.S.A, pp. 246-251 (1998).

11.Yu, Bill X., Yu Xinbao, "Real-Time Bridge Scour Monitoring: Recent Technological Development", Ohio Transportation Engineering Conference, OH, U.S.A (2007).

12.張國鎮、羅俊雄，「光纖與光柵用於橋梁監測之研究」，交通部公路總局研究報告，台北，第3-20~3-32頁 (2003)。

13.張國鎮、羅俊雄、林詠彬、鍾昇財，「橋梁監測技術手冊」，交通部公路總局研究報告，台北，第5-1~5-19頁 (2003)。

14.陳振川、蔡益超、張國鎮，「橋梁監測預警系統及沖刷保護措施及補強等策略之研究」，交通部公路總局研究報告，台北，第7-3~7-5頁 (2006)。

15.林呈等，「橋基沖刷災害與相關之維護管理(2)－橋梁沖刷監測預警系統及其功能評析」，交通部公路總局研究報告，台北 (2007)。

16.陳俊仲，「高科技橋梁沖刷監測系統開發與技術整合應用研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程學系研究所，台北 (2011)。

17.李維峰等，「高科技橋梁即時監測系統建置試辦計畫-台17線西濱大橋」，交通部公路總局研究報告，台北 (2011)。

18.范文綱，「橋梁基礎局部沖刷監測與安全預警系統」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系研究所，台北 (2009)。

19.侯鈞哲，「重力式壓電片沖刷監測預警系統」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系研究所，台北 (2010)。