大地工程復建與防災

關鍵詞：大地工程、極端氣候、復建、防災

台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／資深協理／李順敏 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／技術經理／吳文隆 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／副理／蕭秋安 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／大地工程部／工程師／蔡立盛 ❹

摘 要 ABSTRACT

臺灣地質構造複雜、地形陡峭，河川短促、河床坡度大且雨量集中，在極端氣候情況下，回顧近年歷史，陸續發生多起人民生命財產損失之重大災害。隨著全球變遷溫室效應、海平面上升之影響，大地工程未來將會面臨愈來愈多之重大挑戰，包括邊坡滑移、土石流及橋梁基礎沖刷等災害議題，本文整理國內大地工程於極端氣候遭遇之地工問題，並列舉工程復建案例，以及未來地工防災新思維之看法，供工程各界參考。

壹、前言

本世紀來人類活動不斷地擴張，漫無止境的能源開發與利用，雖然大幅加速了經濟文明的成長，但人們也逐漸覺醒到溫室效應造成全球暖化及海平面上升，依聯合國跨政府氣候變遷小組(IPC)2013年評估報告海平面上升速度比預估快了40%，大地環境更形脆弱。氣候變遷及北極振盪帶來全球性的天然環境失衡，極端天氣不僅影響了生活的步調，頻仍的天然災害更戕害了許多寶貴生命，造成國家經濟與財物之重大損失。

臺灣位居環太平洋地震帶，處於歐亞大陸板塊和菲律賓海洋板塊的接觸區，常常造成山崩、地滑、岩屑坍滑及土石流等多重地工災害，復因地理環境特殊，位於北迴歸線附近，為北半球太平洋颱風最頻繁的路徑上，平均每年颱風侵臺約3~4次，颱風挾帶超大豪雨，降雨強度大，累積降雨量多，超大豪雨作用不僅在山區產生山崩、土石流災害，也為平原地區引來淹水災害。此外，地質年代相對年輕，構造複雜且脆弱，地形陡峭崇山峻嶺，山地佔全臺面積四分之三以上，平原僅佔不到四分之一，可開發及居住的面積不多，加上人口往都會區集中，人口密度高居世界排名第十一。人們為滿足居住需求，漸往山坡地發展，開發山坡地或於河岸兩側居住，颱風豪雨時，居住環境更容易受到山崩災害及洪患。

回顧近年來臺灣天然災害所引發的影響，對臺灣社會產生莫大的人身傷害與經濟建設的嚴重損失，例如賀伯風災(1996)、集集大地震(1999)、桃芝風災(2001)、納莉風災(2001)、敏督利風災(2004)、辛樂克風災(2008)、莫拉克風災(2009)、梅姬風災(2010)、蘇拉風災

(2012)等。氣候極端變化也反映在侵臺颱風所帶來的降雨量，如圖1及表1所示，在1970到2000年代，每10年約僅出現一到兩個單站總雨量逾千毫米的颱風，但2000年以後到2013年為止，卻已經出現八個，意味著近年來帶來暴雨的颱風越來越多，且降雨強度越來越強，臺灣的山林能不能承受這樣每一到兩年就一次的暴雨侵襲？到底這種極端降雨還有沒有可能再創新高，或是再破紀錄？這對氣象人員而言，都是很難回答的問題，但無疑的，對全世界來說，一個颱風將近一兩千毫米的雨量，均易造成重創，而類似莫拉克颱風極端值將近3000毫米降雨量，都是很難打破的紀錄。依據世界銀行2005年出版的報告「天然災害熱區-全球風險分析」(Natural Disaster Hotspots：A Global Risk Analysis)中指出，臺灣是世界上最易受到天然災害威脅的地方，該報告指出臺灣約有73%的人口居住於有三種以上災害威脅之地區，屬災害高風險的區域，包括臺灣位於亞洲大陸東南緣，屬於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的聚合交界處，為世界上有感地震最多的地區之一；其次，臺灣也位於季風氣候帶與颱風行徑的路線上，每年夏季颱風水患等氣象災害造成的損失極為可觀；第三，其他天然災害如梅雨、寒流、乾旱等也造成臺灣經濟上不小的損失。本文整理臺灣近年來於極端氣候下常見之大地工程災害現象及復建工程案例，最後則提出未來防災的新思維，以供工程各界參考。

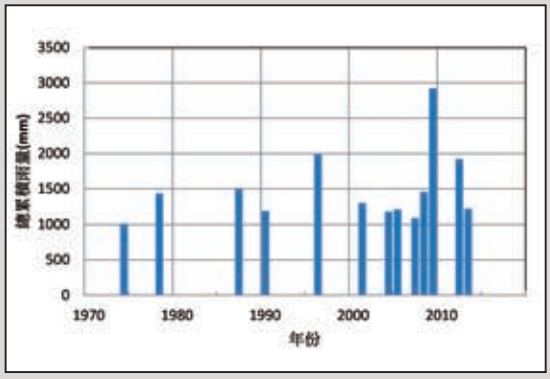

圖1 近40年總累積雨量逾千毫米之颱風累積雨量圖

貳、極端氣候下大地工程災害

極端氣候下颱風為臺灣帶來嚴重的災害，所產生之山崩、土石流及洪水，不僅沖毀許多道路、橋梁等公共設施，更引起大規模的山崩與土石流滅村的悲劇，造成人員傷亡及財產損失慘重。極端氣候下颱風引致之常見大地工程災害大致可分為山崩與邊坡滑動災害、土石流

表1 近年總累積雨量逾千毫米之颱風統計表

颱風	年份	強度	颱風總雨量(mm)	測站
蘇力	2013	強烈	1,226	松鶴
蘇拉	2012	中度	1,922	太平山
莫拉克	2009	中度	2,923	阿里山
辛樂克	2008	強烈	1,458	阿里山
柯羅莎	2007	強烈	1,093	阿里山
海棠	2005	強烈	1,216	阿里山
敏督利	2004	中度	1,182	阿里山
納莉	2001	中度	1,305	竹子湖
賀伯	1996	強烈	1,987	阿里山
楊希	1990	中度	1,194	阿里山
琳恩	1987	強烈	1,497	鞍部
婀拉	1978	中度	1,434	竹子湖
貝絲	1974	中度	1,014	竹子湖

災害及河川橋梁基礎沖刷三種類型。

一、山崩與邊坡滑動災害

極端氣候下之邊坡一旦發生災害，其破壞情形通常都相當嚴重，破壞原因最主要係連續豪雨作用，地表逕流增大，沖刷力驟增，加上河川山洪暴發，引發山崩，張荻薇等人(2009)依莫拉克風災之調查結果，將邊坡災害類型分為五大類，包括：(1)上邊坡滑動破壞、(2)下邊坡滑動破壞、(3)整體滑動破壞、(4)溪谷沖蝕、(5)河岸沖刷，各類型災害分述如下：

(一) 上邊坡滑動破壞

上邊坡地質破碎、導排水系統不良，植生不佳，坡度陡峭，在連續降雨，地表逕流沖刷與入滲下，極易造成邊坡坡體驅動力增加及抗滑能力下降，產生邊坡滑動，擋土設施破壞，崩塌土石堆積於路基或路基沖毀，典型案例如圖2所示。

莫拉克風災(2009)，台21線四德橋旁上邊坡滑動

莫拉克風災(2009)，台24線30.1k上邊坡淺層滑動土石掩蓋路面

圖2 上邊坡滑動破壞

(二) 下邊坡滑動破壞

道路下邊坡上方之路基，在擋土設施基礎缺乏穩定之承載力，或下邊坡導排水系統不佳、水流沖刷邊坡、邊坡易滑動破壞，造成路基下陷或流失，典型案例如圖3所示。

莫拉克風災(2009)，台20線 55k道路下邊坡滑動造成路基流失

莫拉克風災(2009)，高133線5.5k道路下邊坡滑動，造成擋土牆破壞及路基流失

圖3 下邊坡滑動破壞

(三) 整體邊坡滑動破壞

道路通過地質破碎區、崩積土區或地滑區，因連續豪雨，地表逕流沖刷與雨水入滲，地下水位上升，邊坡滑動剪應力增加，地層泡水軟化剪力強度降低，造成道路上下邊坡及路基滑動破壞，典型案例如圖4所示。

辛樂克風災(2008)，雲林149甲32k邊坡整體滑動，路基滑動損壞

莫拉克風災(2009)，台18線59k邊坡整體滑動，路基滑動損壞

圖4 整體邊坡滑動破壞

(四) 溪谷沖刷

道路上邊坡之山溝或野溪因豪雨降雨集中，地表逕流沖刷邊坡及溪谷，致上方之土石衝至下方堆積，造成道路路基流失或損壞，如圖5所示。

莫拉克風災(2009)，高133線3.1k溪谷土石沖刷及設施損毀

桃芝風災(2001)，溪頭地區三號坑溪谷土石沖刷

圖5 溪谷沖刷造成邊坡滑動破壞

(五) 河岸沖刷

連續豪雨溪水暴漲，河床土石淤積，河水面高於護岸頂部，以致河岸裸露部分無保護措施，水流直接淘刷邊坡或河道轉彎處之凹岸受河水淘刷，邊坡坡腳流失，失去支撐而滑動，如圖6所示。

莫拉克風災(2009)，高132線河岸沖刷造成邊坡滑動，路基流失

莫拉克風災(2009)，台21線79k壽山橋兩端路基流失及民宅地基遭洪水沖刷，建物損壞

圖6 河岸沖刷造成邊坡滑動破壞

二、土石流災害

公路依山傍水闢建，通過野溪或山溝，因上方為匯水窪地，降雨量大，溪谷土石量大及溪谷坡度陡降，產生土石流直衝而下，位於土石流堆積區之公路或村落，極易遭土石沖毀或掩埋。典型案例如2001年桃芝颱風南投地區土石流導致之災害，如圖7所示。

桃芝風災(2001)，南投地區土石流沖入民宅、道路中斷等災害

桃芝風災(2001)，溪頭地區三號坑土石流災害土石掩埋建物

圖7 土石流災害

三、河川橋梁基礎沖刷

颱風引致公路橋梁基礎破壞的主因，為基礎受洪水或土石流沖刷使基礎外露而沉陷或傾斜，導致上部結構破壞。此通常發生在河川中下游處，因為大量洪水沖刷橋梁基礎所造成。沖刷之原因有河川條件以及橋墩結構條件，河川條件包括河川坡度、寬度、河床材料及河床高度等，而橋墩結構條件則包括落墩位置、基礎型式、埋置深度、墩柱型狀及有無保護工等。一般而言，河川坡度愈陡，斷面愈狹窄之處，其水流流速愈快，沖刷能量愈大。然而在早期公路橋梁選線時，考量橋梁長度通常選擇於河寬最窄處跨越，而此處依自然條件通常沖刷能量最大，如果再加上橋梁於河川中間落墩，則更縮減河道寬度，加強沖刷能量。此外，由於臺灣營建砂石之材料絕大部分取自於河砂，因此河川中砂石歷經長期的挖掘使用，使臺灣西部主要河川之中下游河床面嚴重下降，加上近年來，河川上游多有防砂治洪等攔砂壩之興建，導致土石料源供給減少，更加重河床面下降之情況，使沖刷現象更為嚴重。沖刷破壞並不侷限於河道中的橋墩基礎，由歷次洪水災害發現，有很多橋梁工程災害係因為橋台或護岸遭受洪水侵蝕而造成破壞。典型之橋梁基礎沖刷引致之重大災害，如2008年辛樂克颱風時大甲溪流域后豐大橋，以及 2009年莫拉克颱風於高雄台3線409k新旗尾橋，皆因橋梁基礎沖刷而導致破壞，如圖8所示。

辛樂克風災(2008)，后豐大橋橋墩基礎沖刷破壞，橋面坍落

莫拉克風災(2009)，高雄新旗尾橋墩基礎沖刷破壞，橋面坍落

圖8 橋梁基礎沖刷災害

參、災害復建設計

災害復建之致災原因調查、分析及設計，可能需時良久，緩不濟急，宜視實際需求，依短期、中期及長期循序處理。短期以立即恢復交通之簡易便道或便橋，中期加固短期設施或替代方案，長期則以永久性之設計方案為宜。有關復建方案可分為隧道、路工、明隧道及橋梁等方案，各方案有其優點與限制。方案之研選，應依據現地詳細調查及致災原因分析後，因地制宜採用，以達到治本之道。

極端氣候造成之大地工程災害復建工程，須依據各案例地形、地質、水文等資料，詳細調查分析，方能提出最有效可行之對策及方案。經整理本公司近年參與之山崩、邊坡坍滑災害、土石流災害及河川橋基礎沖刷災害等之重大工程案例之復建工程設計與施工經驗，供工程各界之參考。

一、山崩復建

溪頭風景特定區二-1號道路安定彎段，是溪頭通往杉林溪之重要觀光道路，1999年集集地震造成公路長達400m大崩塌，雖曾短暫搶通，惟地震後結構鬆散之邊坡在2001年桃芝颱風豪雨襲擊下，造成更嚴重之崩塌，崩塌深度達百餘公尺，搶修工程極度困難，造成杉林溪風景區與外界隔絕。經評估「開挖邊坡闢路」、「建跨越橋」、「隧道」三個方案，本路段最後決定採用安全度較高之隧道設計(單孔二車道隧道淨寬9.0m，淨高4.6m、長度643m)，以徹底解決坍方之問題，復建前後之情形，詳圖9所示。

山崩道路復建前，山崩導致道路崩塌嚴重

山崩道路復建後，新建隧道(北洞口)

圖9 安定隧道復建前後成果圖

二、邊坡坍滑災害復建

(一) 台18線59.1k路段坍方復建

台18線為連絡阿里山及嘉義市之重要觀光道路，2009年莫拉克颱風挾帶豪雨造成阿里山公路59.1k路段附近邊坡整體性崩滑，造成龍頭明隧道下陷、側移擠壓破壞、土石崩落及道路崩塌無法通行。邊坡滑動之致災主因研判為連續豪雨、地表逕流、雨水入滲造成地下水位上升及土岩層強度泡水軟化而產生滑動。本路段復建係於道路兩側護坡整治，對坡面之排水及路面排水做適當導排，另針對部分已受側移及陷落影響之龍頭明隧道進行重建。邊坡復建工程為減低致災因子，採用之抑制工包括：修坡、坡面導排水、縱洩溝、水

59k龍頭明隧道復建前，明隧道下陷及側移擠壓破壞

59k龍頭明隧道復建後，新建明隧道並採樁基礎

圖10 台18線龍頭明隧道復建前後成果圖

59.1k道路復建前，邊坡坍滑，道路中斷

59.1k道路復建後，下邊坡採排樁及擋土牆、上邊坡採自由型框及石籠護坡

圖11 台18線59.1k復建前後成果圖

平排水管、掛網噴植護坡等；另為增加坡體強度，採用之抑止工包括：排樁配合地錨、格梁地錨護坡、自由型框配合灌漿錨筋護坡等，復建前後之情形，詳圖10、圖11所示。

(二) 台18線71k路段坍方復建

2009年莫拉克颱風挾帶豪雨造成阿里山公路71k路段附近邊坡整體性崩滑，造成道路崩塌。邊坡滑動之致災主因係暴雨造成土石大規模坍塌。由於此路段邊坡陡峭，且局部路段腹地不足，難以採用路工削坡方案，故採直接跨越，避開崩坍區，新建橋梁方式予以復建。考量本工址崩塌區之特性及地質條件，且需克服運輸與吊裝架設條件之困難。鋼構造構件輕巧，不僅可減少結構量體，並可依據運輸與施工條件需求，規劃節塊尺寸大小，除可大幅降低地震慣性力及現場易於吊裝架設外，鋼構造在工廠內製作之品質容易掌握，施工迅速。因此，本工址採半穿式鋼拱橋鋼橋(拱跨徑160m，拱高約20m，全長198m，橋面全寬10m)，復建前後之情形，詳圖12所示。

71k道路復建前，邊坡坍滑，道路中斷

71k道路復建後，新建橋梁

圖12 台18線71k復建前後成果圖

三、土石流整治復建

溪頭自然教育園區位於南投縣鹿谷鄉境內，為臺灣最著名之觀光景點之一。1999年921大地震造成溪頭地區邊坡發生多處大規模土石崩塌，成為日後引發土石流之主要材料。2001年桃芝颱風，由於上游發源區土石鬆散，經豪雨作用而產生多條土石流災害。其中三號坑下游國民旅社及鳳凰賓館、漢光樓及新大門均為重要保全對象。三號坑土石流之整治以緩坡固床，減少岸壁淘刷及降低下沖土石量配合現地景觀為設計理念，設置一系列之梳子壩、潛壩、木椿壩、竹椿壩、大型沉砂池、方籠、砌石護堤，並利用現地塊石材料裝飾相關擋土結構，以符合景觀之美化。整治設施之外亦裝設自動監測系統一套，包括雨量計與鋼索檢知器、CCD攝影機等，以利緊急應變及避難時間之爭取，復建前後之情形，詳圖13所示。

四、河川橋梁基礎復建

臺灣河川橋梁面臨之主要問題有橋梁各部結構老化、橋梁安全性不符耐震設計規範之規定，以及橋梁基礎因沖刷而裸露等問題，其中又以橋梁基礎裸露為近年最被重視之重要議題之一。工程復建若無特別考量，樁基礎為常被優先採用之基礎型式，而直接基礎較少採用。

溪頭三號坑復建前，桃芝風災造成土石流漫流

溪頭三號坑復建後，新設梳子壩

圖13 溪頭三號坑復建前後成果圖

至於沉箱基礎在某些地層條件下，其施工品質與工期較難掌握，加上沖刷問題日趨嚴重，故亦漸少採用。

(一) 烏溪橋橋基換底方式復建

烏溪橋於台3線210k+008跨越烏溪，為當地南北交通要道。本橋梁由於河床持續下降，編號P9～P13間之橋梁沉箱基礎嚴重裸露，2004年敏督利颱風、艾利颱風來襲，沖刷橋基造成部分老舊基礎嚴重裸露，其中以編號P9～P11裸露深達4.5～7.5m以上最嚴重。本橋梁基礎之復建工程係在既有橋墩基礎周圍新設基礎版及21~24m基樁後，拆除原有裸露之基礎版及基樁，並於新設基礎上改建底柱以連接原橋結構，復建前後之情形，詳圖14所示。

烏溪橋復建前，敏督利颱風橋墩嚴重裸露

烏溪橋復建後，新設樁基礎

圖14 烏溪橋復建前後成果圖

后豐大橋復建前，敏督利風災後，橋基沖刷裸露嚴重

后豐大橋復建後，新設全套管樁基礎

圖15 后豐大橋復建前後成果圖

(二) 后豐大橋卵礫石地層復建

台13線后豐大橋為跨越大甲溪之橋梁，受到砂石盜採及過度濫採影響，使得河槽區河床持續下降，尤其以2004年敏督利颱風來襲時，造成原橋直徑5m、深14m之圓形沉箱基礎嚴重裸露達8.0m以上，產生結構安全上之疑慮。本橋梁基礎之復建工程採全套管基樁，基樁直徑2.0m，考量沖刷深度，樁長採40m(含空打則約50m)。全套管鑽掘過程中，基樁施工遭遇之最大困境，為套管發生卡管、套管變形、底管磨損、機具設備故障率高等問題不斷出現，由最初約14~20天完成一支基樁，到熟練階段才得以約5天完成一支基樁，復建前後之情形，詳圖15所示。

(三) 溪洲大橋橋基換底復建

台1線溪洲大橋為跨越濁水溪之橋梁，2001年桃芝颱風來襲，夾帶豐沛雨量，濁水溪在此橋址之洪峰流量高達約29,000cms，超過二百年頻率的設計流量，沖毀橋基原有之蛇籠保護工及造成基礎部分PC樁斷裂，PC樁嚴重裸露最大達10m。本橋梁基礎復建工程係在既有橋墩基礎周圍新設基礎版及直徑1.5m、樁長50m之全套管基樁後，拆除原有裸露之基礎版及基樁，並於新設基礎上改建底柱以連接原橋橋墩結構，復建前後之情形，詳圖16所示。

溪洲橋復建前，桃芝風災後，橋墩基礎嚴重裸露

桃芝風災後，橋墩基礎嚴重裸露，換底工法新設全套管樁基礎

圖16 溪洲橋復建前後成果圖

肆、大地工程防災的新思維

在防災工作規劃上，必須先辨識災害來源，調查並瞭解災害特性，才能針對各樣災害進行防治計畫，進而預防災害或降低災害損失。綜觀各項災害，極端氣候下之山崩、土石流、洪患，均為地球運轉時之自然現象，惟人類活動區域往往與其發生衝突，因此產生之地工災害往往影響範圍大，造成生命財產之威脅。

面臨全球氣候變遷及極端氣候條件之挑戰，如何解決防災問題，必須以宏觀的新思維，尋找解決之道建構美麗家園，吾人認為以下幾點可提供作為未來努力方向之參考。

一、檢討目前設計標準與既有基礎建設安全評估

因應極端氣候所造成降雨型態改變與豪雨強度增加，目前相關的設計準則與規範實有必要配合修訂，尤其公共工程維繫大眾運輸、避難、醫療及維生等各項基本需求，在發生災害時更肩負著救災的責任與使命，具有絕對重要的需求價值，必須以更嚴謹、更高的安全標準來進行設計、施工，確保社會安全；另一方面，對於既有的橋梁基礎及結構現況，則依新的標準檢討及評估其安全性，對於不符合標準或安全性者，必要時予以維修、補強或重建，以確保工程全生命周期之安全為目標。

二、建立低碳家園讓地球資源生生不息

工程人員應深刻瞭解建立低碳生活家園的重要性，並積極落實於各類開發計畫，儘量採「低衝擊開發工法」及工程建設，不僅在建築的設計中，要巧妙融入綠建築概念，充分考量日常節能、二氧化碳減排、廢棄物減量、雨水與中水回收再利用、污水與垃圾處理、自然通風、空調熱回收等永續資源措施：在大眾運輸系統的規劃上，可有效導入供給面的「乾淨能源」與需求面的「節流」原則，訂定高價值、高效率、低排放、低耗能的「二高二低」設計策略，用具體的行動方案，響應國家永續能源及節能減碳的政策目標。

三、建立尊敬自然、重視環境的態度

許多災害的發生都是因為大自然環境因素所必然發生之情況，但是因為人類活動與這些自然現象交互作用，在無知或輕忽的情況下常受到波及，造成生命財產的損失。為了使民眾等能重視並了解那些地區可能具有災害潛勢，必須小心謹慎處理與預防，近年來政府相關單

位紛紛投入龐大的資源來進行調查地質敏感區，並將調查結果公開民眾了解，為的就是將此類敏感區域提醒開發規劃設計之重要參考，達到事先防災之目的。

四、架構防災、減災、避災、救災的風險管理

面對極端氣候之天然災害發生，人類雖無法以人為力量去改變它，但我們可以從源頭做起，訂定「國土計畫法」、「國土復育條例」…等，禁止非法濫建、濫墾、濫伐及土地超限利用，以防範天然災害擴大以達減災目的；在容易發生天然災害地點運用新的科技設置即時監測系統，隨時掌握環境或設施之變化預警資訊，以達避災的功用；平時即應加強各層級政府單位間之災害應變作業指揮、協調、通報等工作，以備不時之需，全民亦應提高風險管理觀念及整體適應能力。除了搶災救災之補救方式外，更強化主動預警疏散之應變措施，以降低災害的影響程度。

伍、結語

自然環境是人類文明最好的導師，二者如唇齒般相互依存：自然環境提供人類文明發展的基礎，形塑出不同的風土與人文；人類文明造就了瑰麗並富變化的地形地貌景觀，讓綿延不息的生命活力得到更大的揮灑空間。

地球只有一個，為確保珍貴的自然資源得以休養生息、永續發展，工程師不應迷信人定勝天，應順天而行，扛起地球公民責任，為維護一個人間淨土而努力。

參考文獻

1. 陳福勝、吳文隆、楊智堯(2006)，“土石流災害整治工程設計探討-以溪頭自然教育園區為例”，地工技術110期，p.97~p.108。
2. 中華顧問工程司(2009)，“2009莫拉克颱風八八水災橋梁勘災紀實”。
3. 張荻薇、周功台、楊智堯、王仲宇、陳銘鴻(2009)，“高屏溪流域之公路橋梁與邊坡災害”，地工技術122期，p.105~p.114。
4. 台灣世曦工程顧問股份有限公司(2009)，八八水災工程災害網站，http://www.ceci.com.tw/morakot2/。
5. 何泰源、吳文隆、蕭秋安、蔡立盛(2011)，“臺灣河川橋梁基礎問題與案例介紹”，地工技術127期，p.29~p.40。
6. 蔡宗成、吳文隆、蕭秋安、陳俊定、周坤賢(2012)，“莫拉克風災台18線59.1k路段坍方復建工程設計與施工”，中華技術93期，p.96~p.109。
7. 陳福勝、周功台、吳文隆(2008)，“大地工程之挑戰與對策”，中華技術77期 p.24~p.29。
8. 交通部台灣區國道新建工程局(2003)，“安定隧道專輯”。