

0206 花蓮地震橋梁震損調查與分析

Reconnaissance Observation and Analysis on Bridge Damage Caused by the 0206 Hualien Earthquake

洪曉慧¹ 陳俊仲² 蘇進國³ 李柏翰⁴ 江奇融⁵ 宋裕祺⁶

¹ 國家地震工程研究中心 研究員 hhung@ncree.narl.org.tw: (02-66300840)

² 國家地震工程研究中心 副研究員

³ 國家地震工程研究中心 副研究員

⁴ 國家地震工程研究中心 助理研究員

⁵ 國家地震工程研究中心 副技術師

⁶ 國立台北科技大學土木與防災研究所 教授暨國家地震工程研究中心 組長

摘要

2018 年 2 月 6 日深夜，花蓮近海發生芮氏規模 6.26 的地震，雖然本次地震規模和近幾年發生在台灣的地震相比並非很大，但由於震央接近花蓮市區，且花蓮市區內剛好有兩條活動斷層穿越，包括屬於第一類活動斷層的米崙斷層和第二類活動斷層的嶺頂斷層，所以本次地震引致之地表破裂明顯，也造成花蓮地區數座橋梁不同程度的損傷。地震過後，國家地震工程研究中心隨即組成勘災小組啟動勘災作業，其中橋梁之勘查主要以高空影像擷取系統及數位拍攝方式執行橋梁損傷之完整紀錄。花蓮地震後因震損而須緊急封閉交通之橋梁計有鄰近嶺頂斷層的花蓮大橋，以及鄰近米崙斷層的七星潭大橋、花蓮市三號橋及尚志橋等四座橋梁，本文重點為針對其中之花蓮大橋和七星潭大橋說明橋梁之災損狀況並探討其可能震損原因。本次相關調查結果，除可作為橋梁修復建議方案擬定或現地安全試驗規劃時之參考依據，更希冀對未來橋梁震害因應對策之研擬及橋梁地震防救災工作之執行有所助益。

關鍵字：花蓮地震、橋梁、活動斷層

Abstract

The reconnaissance team of bridge engineering division investigated four bridges in Hualien city immediately after the 6.26-magnitude earthquake struck just off the east coast of Taiwan on February 6, 2018. The aerial image capture device and digital photography system were employed to perform the post-earthquake survey on-site. The Hualien Bridge, located at the Provincial Highway No. 11 between the Jian and the Shoufeng Townships, was damaged due to ground movements induced by the rupture of the Lingding Fault that was believed to have run across the bridge. The other bridges, including the Qixingtang Bridge, the Hualien City NO.3 Bridge, and the Shangzhi Bridge, also suffered different levels of damage resulting from the surface rupture of Milun Fault that passed through or was closed to these bridges. The reconnaissance results and data obtained by this survey may serve as useful references for seismic evaluation and retrofit design and disaster-prevention of bridges in the future.

Keywords: 0206 Hualien Earthquake, Bridge, Active fault

一、前言

2018 年 2 月 6 日深夜，花蓮近海發生芮氏規模 6.26 的地震，雖然本次地震規模和近幾年發生在台灣的地震相比並非很大，但由於震央接近花蓮市區，且花蓮市區內剛好有兩條活動斷層穿越，包括屬於第一類活動斷層的米崙斷層和第二類活動斷層的嶺頂斷層，所以本次地震引致之地表破裂明顯，也造成花蓮地區數座橋梁不同程度的損傷。地震過後由於橋梁的震損，總計有四座橋梁須暫時封閉交通，進行緊急的檢測與維修補強，這四座橋分別為花蓮大橋、七星潭大橋、花蓮市三號橋和尚志橋，本文主要以探討花蓮大橋及七星潭大橋之震損原因為主。

二、橋梁場址附近地震特性

2.1 場址附近地震紀錄

根據中央地調所公布之斷層線位置，可套繪花蓮大橋與七星潭大橋和斷層分布關係圖如圖 1 所示。如圖所示，花蓮大橋和七星潭大橋分別跨越嶺頂斷層和米崙斷層北端，另跨越美崙溪之花蓮市三號橋與尚志橋則鄰近米崙斷層南端。氣象局在花蓮佈設許多自由場強震站，茲依據氣象局地球物理資料管理系統目前公布之測站資料，挑取其中 5 座離橋址較近之自由場測站擷取之加速度歷時資料進行分析，可得 PGA 和 PGV 值如表 1 和表 2 所示，其中各測站位置亦繪於圖 1 中。如表所示，本次地震在離七星潭大橋約 3 公里之佳里國小 HWA028 測站與離花蓮大橋約兩公里之鹽寮 HWA060 測站皆量測到大於 400gal 之最大地表加速度，震度達 7 級。依據測站所量得之加速度，透過積分可發現 HWA014 和 HWA019 測站對應之最大地表速度(PGV)皆大於 100m/s，這兩個測站則鄰近花蓮市三號橋和尚志橋，明顯的速度脈衝顯示此次地震為典型的近斷層地震。



圖 1 花蓮大橋與七星潭大橋和斷層分布關係圖

以 HWA028 測站量測到之資料為例，圖 2 為地表加速度歷時兩次積分後所得之位移歷時。如圖所示，HWA028 測站約有 5cm 之垂直向永久位移，而南北向和東西向則分別有 30cm 和 10cm 左右之永久水平位移。其他測站也可看到不同程度之永久位移。為了解本次地震和花蓮地區設計地震之差異，茲亦分別繪製 HWA060 和 HWA028 測站加速度反應譜與花蓮地區部頒公路橋梁耐震設計規範[1]所制訂之設計反應譜進行比對於圖 3 和 4 中。其中設計反應譜包括設計地震反應譜與最大考量地震反應譜，地盤種類為第一類地盤。如圖所示，HWA060 測站東西向反應譜

在週期為 0.5 秒附近高於設計反應譜，南北向反應譜在週期為 0.4 秒和 0.9 秒附近也高於設計反應譜，HWA028 測站之加速度反應譜則除了垂直向外，大致都小於設計反應譜。

表 1 花蓮地震各測站 PGA 值(單位:gal)

測站編碼	測站名稱	Z	NS	EW
HWA028	佳里國小	414.84	253.46	275.05
HWA014	信義國小	397.08	218.82	316.99
HWA012	明恥國小	338.37	280.62	279.70
HWA019	花蓮氣象站	211.01	368.55	402.99
HWA060	鹽寮	280.76	462.55	477.90

表 2 花蓮地震各測站PGV值 (單位:cm/s)

測站編碼	測站名稱	Z	NS	EW
HWA028	佳里國小	14.68	51.81	31.83
HWA014	信義國小	25.85	55.19	147.76
HWA012	明恥國小	27.01	63.88	84.85
HWA019	花蓮氣象站	26.80	95.73	138.38
HWA060	鹽寮	31.17	58.42	50.40

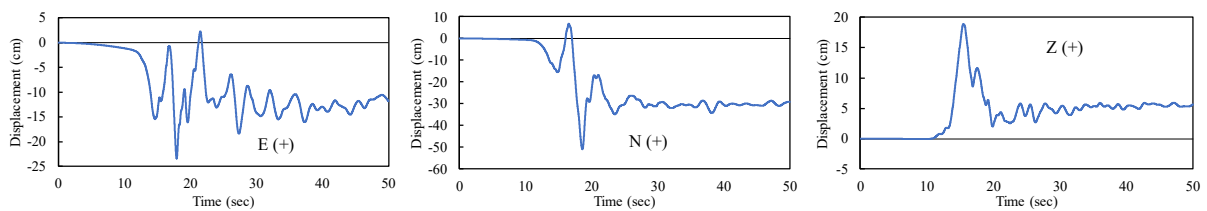


圖 2 花蓮地震 HWA028 測站地表位移歷時

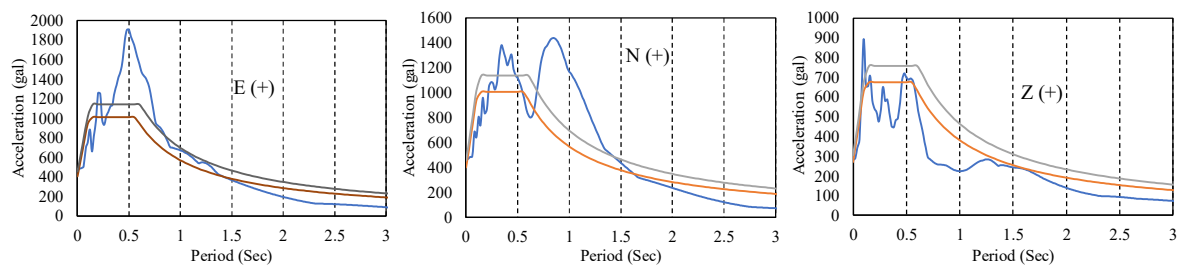


圖 3 HWA060 測站之加速度反應譜與花蓮市設計反應譜關係圖

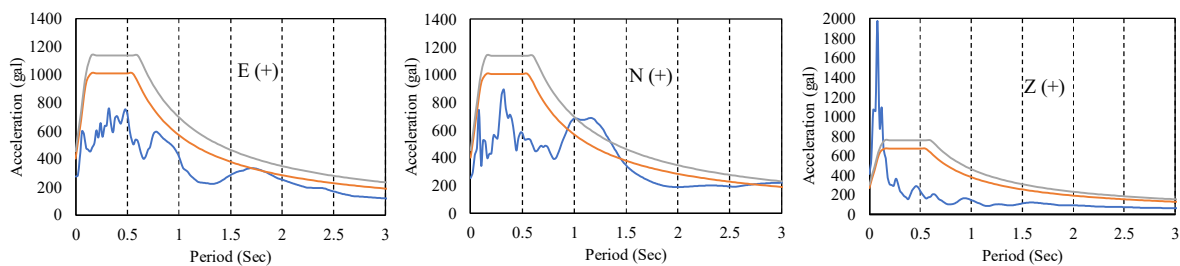
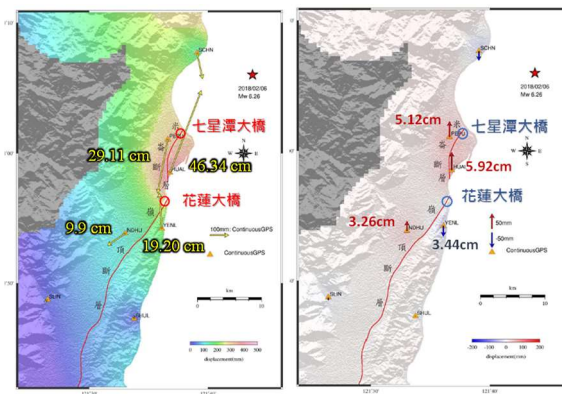


圖 4 HWA028 測站之加速度反應譜與花蓮市設計反應譜關係圖

2.2 場址附近位移

地震過後，內政部國土測繪中心與交通部中央氣象局及中央地質調查所等單位，蒐集建置於花蓮地區之衛星定位基準站震前及震後資料計算花蓮地區地震前後地表位移情形。圖 5 所示為中央地質調查所公布之花蓮地震地表位移圖[2]，箭頭方向代表移動方向，箭頭長度代表位移量值。GPS 連續追蹤站所測得最大同震位移出現於花蓮市的 HUAL 站(花蓮氣象站)，位於米崙斷層的上盤側，其同震抬升為 5.92 公分，同震水平位移為朝北偏東方向 46.34 公分，而位於此測站西北方米崙斷層下盤側的 PERU 站(北埔站)同震抬升為 5.12 公分，同震水平位移為朝南偏西方向 29.11 公分。顯示米崙斷層主要以左移形式為主，若以此兩站估算，米崙斷層兩側在沿北東方向之相對位移量 70 公分以上。此外，花蓮南側位於嶺頂斷層上盤側的 YENL 站(鹽寮東管處站)出現下陷 3.44 公分的同震變形，同震水平位移為朝北偏西方向 19.2 公分，下盤側的 NDHU 站(東華大學站)則呈現同震抬升量 3.26 公分，同震水平位移為朝西南方向 9.9 公分，故嶺頂斷層也是呈現左移運動形式。依據圖五之水平位移圖方向套繪到七星潭大橋和花蓮大橋所跨越斷層之兩側，如圖 6 所示，可知米崙斷層和嶺頂斷層大致分別垂直穿越七星潭大橋和花蓮大橋，而地表位移方向在東側為對橋梁行車向約 60 斜角往北推，西側則往相反方向南側移，另由圖五之同震位移值可發現兩個斷層上盤側(東側)位移皆較下盤側(西側)為大，所以猜測兩座橋最主要地表變形也是發生在上盤側。



水平方向

垂直方向

圖 5 花蓮地震地表同震位移圖



圖 6 七星潭大橋與花蓮大橋永久位移方向推估圖

三、花蓮大橋橋梁損傷

3.1 花蓮大橋簡介

花蓮大橋位於台 11 線海岸公路之花蓮縣吉安鄉及壽豐鄉路段，跨越花蓮溪，為前往花東濱海地區重要橋梁。橋址位於花東縱谷平原區木瓜溪出海口的沖積扇上，東側臨近海岸山脈處隨即轉換為丘陵地形，而根據中央地質調查所之臺灣活動斷層資訊網資料顯示，第二類活動斷層嶺頂斷層通過工址下方，為平移兼具逆衝斷層，斷層分布位置詳如圖 1 所示。

花蓮大橋結構體採南北兩線分離，南下線為第一代原始橋，北上線為第二代拓寬橋，兩座

橋在結構上完全分離。民國 102 年已針對下部結構進行耐震能力補強，補強工項包括基礎板擴座補強、增樁補強、橋墩的 RC 包覆補強等，也在第一代帽梁上新增橫向止震塊。現況橋梁配置如圖 7 所示，並詳列如下：

1. 第一代原始橋之橋寬約 8.1~11.45 公尺(南下線)，橋跨配置 13@40m 簡支梁，搭配齒型伸縮縫，橋長總計 520 公尺，於民國 57 年竣工完成。第一代原始橋上部結構為 3 支預力 I 型梁，支承為橡膠支承墊，下部結構為單柱圓形橋墩，而基礎為圓形沉箱基礎，但於民國 102 年在 P5~P12 沉箱側擴作基礎並增設基樁。
2. 第二代拓寬橋建於第一代原始橋之下游側(北上線)，橋寬 10.7~20.06 公尺，橋跨配置 12@40m+25m+15m 簡支梁，P3、P6、P9、P12 和 P13 上為齒型伸縮縫，其他橋墩上則以鉸接板連接橋面，橋長總計 520 公尺，於民國 91 年完成。A1~P12 上部結構為 6 支預力 I 型梁，P12~P13 上部結構為 5 支預力 I 型梁，P13~A2 上部結構為配合進出口動線，以 8 支混凝土 T 型梁設置變橋寬橋面板，支承也是橡膠支承墊，而 P1~P13 下部結構均為單柱圓形橋墩，配置基礎板及樁徑 1 公尺之基樁，樁長約 20 公尺，另於民國 102 完成橋墩 RC 包覆補強與基礎板擴座。

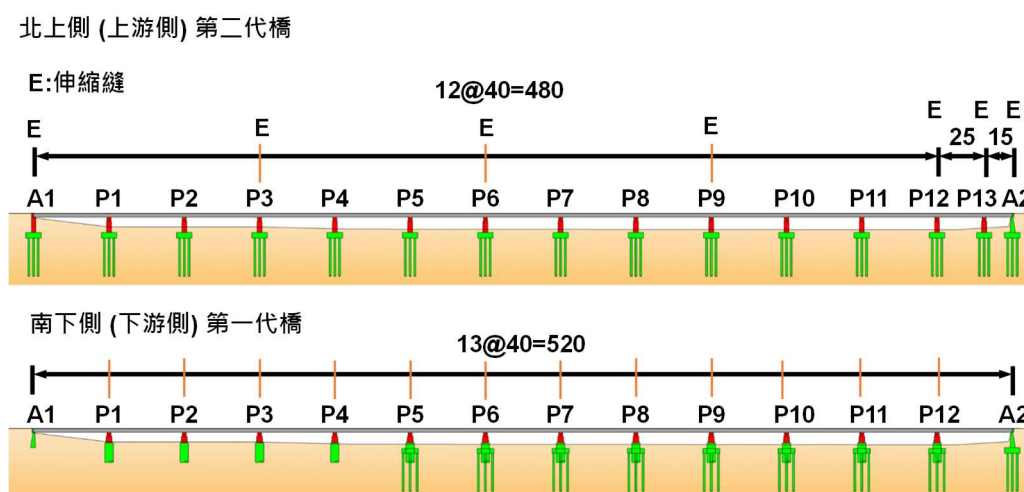


圖 7 花蓮大橋配置圖

3.2 花蓮大橋災損情況

對於花蓮大橋震害調查部分，國震中心橋梁組組員於 2 月 8 日進行現場損壞調查時，橋管單位為因應緊急搶通作業，已逐步搶修部分橋台路面隆起、伸縮縫損傷、橋護欄破裂及路燈倒塌等現狀，並以管制方式開放南下線(第一代橋)為雙向通車狀態，北上線則仍限制通行。由於南下線屬於通車狀態，所以本次調查主要以徒步北上線橋梁(第二代橋)方式進行目視檢測，根據調查結果顯示(圖 8)，花蓮大橋兩側橋台進橋板均因推擠產生路面隆起，P3、P6、P13 處伸縮縫僅有輕微損傷，P9、P12 伸縮縫則因擠壓而嚴重受損，其餘橋面鉸接版處則有不同程度之裂痕，可見相鄰跨之上部結構於地震下應有不同程度之相對位移。

花蓮大橋受損最嚴重部位為 P9 到 P12 之橋面，如圖 9 所示，北上側二代橋 P9 伸縮縫上游側拉開，下游側擠壓，南下側一代橋 P9 伸縮縫亦是在上游側拉開，下游側擠壓，而 P10 處北上

側二代橋之橋面鉸接版處遭推擠而隆起。2 月 8 日進行災損調查時 P10 處橋面已進行刨除修復，但可由圖 10 所示路面標線折點清楚看到橋面側移旋轉情形，由於此單元上部結構的位移，也使得 P9 到 P10 間北上側二代橋上游側之 PC 橋護欄全數剪壞。另由圖 11 所示之標誌線與伸縮縫偏移可發現南下側 P12 處橋面產生相對側移約 15 公分，由圖 12 所示北上側 P12 伸縮縫兩側橋護欄之偏移可發現北上側伸縮縫兩側橋面亦產生相對側移，且伸縮縫遭擠壓而突起。

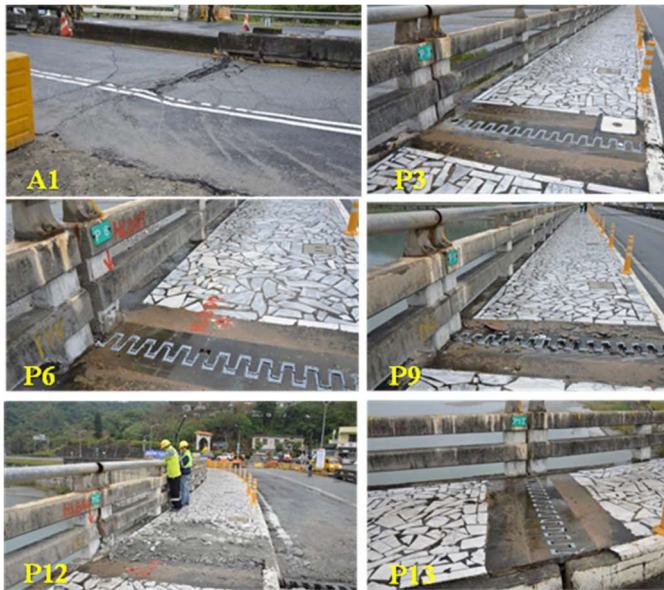


圖 8 花蓮大橋受損調查照片



圖 9 花蓮大橋P9橋面伸縮縫損傷



圖 10 花蓮大橋P9和P10處橋面側移旋轉



圖 11 花蓮大橋P12南下側橋面側移約15公分



圖 12 花蓮大橋P12北上側伸縮縫處

圖 13 所示為 P9-P12 橋面空照圖，圖面上可明顯看到 P9-P10 橋面旋轉情形，以及 P12 處鄰跨側移與擠壓情形。P12 伸縮縫處在南向線(一代橋)呈現明顯偏移現象，齒型伸縮縫平移一個齒的距離(約 15 公分)，此偏移也造成伸縮縫處橋護欄錯開而破損。北向線(二代橋)橋面同樣也有偏移現象，偏移量較小，但伴隨擠壓，所以伸縮縫完全損毀。此外，由於橋面之側移，由圖 14 可見 P12 處橫向止震塊損毀，但也由於上部結構之移動，和止震塊之協助消散能量，使得下部結構並無明顯損傷。



圖 13 花蓮大橋P9-P12橋面偏移情形



圖 14 花蓮大橋P12橫向止震塊損毀

3.3 花蓮大橋震損結果探討

配合圖 5 和圖 6 所示之斷層線位置與地震前後地表位移變化，推測此次花蓮大橋主要損傷原因為地震引發之嶺頂斷層地表破裂穿越橋梁，地表破裂使橋墩和橋台間產生差異位移，並引致上部結構之相對移動，而不同跨間橋面之相對移動進一步引致伸縮縫之破損、止震塊之損毀與護欄之損傷等。

四、七星潭大橋橋梁損傷

4.1 七星潭大橋簡介

七星潭大橋位處縣道 193 號道路上，為七星潭風景特定區段的聯外高架橋，主要聯繫舊臨潭橋段往南至四八高地間區域，主線含兩側引道路堤段，全長 710 公尺，採高架 15 公尺雙向雙車道設計，主橋上部結構為懸壁施工預力混凝土雙箱式箱型梁，下部結構為單柱式鋼筋混凝土橢圓型斷面橋墩，基礎為樁基礎。本橋於民國 100 年 7 月 22 日開工，102 年 10 月 25 日完工通車。根據中央地質調查所之臺灣活動斷層資訊網資料顯示，橋址鄰近米崙斷層(詳圖 1)。

圖 15 為七星潭大橋主橋現況相片，茲另依現場勘查結果，繪製七星潭大橋主橋配置圖於圖 16。如圖所示，七星潭大橋主橋共三跨，總長為 240 公尺，包括 2 個振動單元。橋台 A1 至 P1 橋墩為跨徑為 60m 之簡支梁橋，支承為盤式支承，A1 為縱向可移動活動支承，P1 為雙向固定之鉸接支承；P1-A2 橋台為兩跨連續剛構架曲線橋，跨徑配置為 90m+90m，P2 橋墩和上部結構為剛接，A2 橋台和橋梁車行方向斜交。依據設計圖，兩側 P1 和 A2 支承為縱向可自由移動，垂直行車向為固定，但垂直向可自動調整之盤式支承，為因應米崙斷層通過之疑慮，該支承為特殊設計具專利之支承，地震時除可縱向自由移動外，支承高度亦可在地震後進行調整。

4.2 七星潭大橋災損情況

在地震過後，由於七星潭大橋 A2 側引道路堤橋面破損嚴重，橋梁主管機關第一時間即緊急封鎖進出道路並禁止通行，故完整保留震後受損狀態。由現場勘查發現，A2 橋台順接路面部分地表破裂嚴重，左右兩側側車道路面如圖 17 所示亦具破裂情形，此地表破裂呈遭推擠而突起之

樣態。圖 18 所示為 A2 橋台側引道路堤之背填土產生坍塌與隆起交錯現象，並引致圖 19 所示之 A2 橋台下方車行箱涵破損，箱涵後方引道路堤路面沉陷，隔音牆遭推擠變形。



圖 15 七星潭大橋現況相片

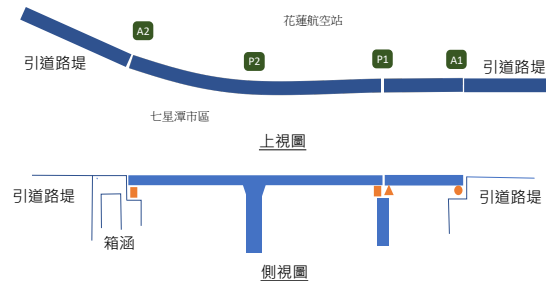


圖 16 七星潭大橋配置示意圖

圖 20 所示之現況 P2 橋墩則完全沒有損傷，主橋箱梁外觀目視上亦顯示完好，惟 A2 橋台至 P2 橋墩後方坡地有輕微滑坡現象。圖 21 所示為 P1 橋墩損傷情況，P1 橋墩因上構箱梁和橋墩側向止震塊之相互撞擊，側向止震塊產生剪力破壞，橋墩兩側保護層剝落，其中上行側(靠七星潭市區側)混凝土呈現大片剝落，鋼筋外露，所幸破壞皆在橋墩上方接近止震塊處，柱底並無任何彎矩裂縫，橋墩行車向兩側亦無剪力破壞裂縫，顯示該破壞為因止震塊遭撞擊引致之損傷，而地震引致之上構慣性力因支承之滑動而並未傳遞彎矩和過大之剪力至橋墩主體結構。圖 22 所示為 A1 至 A2 主橋橋面狀況，如圖所示，A1 橋台端與伸縮縫並無明顯結構體損傷，主橋 A1 至 A2 橋面、欄杆及護欄狀況大致良好，僅 P1 和 A2 伸縮縫處因支承滑動，兩側橋面產生相對側移而破損。



圖 17 七星潭大橋 A2 側側車道路面破裂

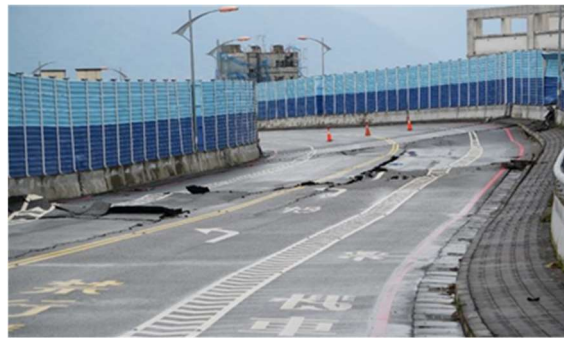


圖 18 七星潭大橋 A2 橋台後方引道路堤

4.3 七星潭大橋震損結果探討

七星潭大橋最主要的損傷為 A2 橋台後方路堤路面的破損。配合圖 6 和圖 7 所示之斷層線位置與地調所公布之地震前後地表位移變化，推測此損傷原因為米崙斷層地表破裂推力引致 A2 橋台後方引道路堤嚴重受損。依據圖 6 所示之地表位移方向，茲於圖 23 之示意圖標示對應之地表位移方向，由橋址現場顯示之引道路面破裂樣態和側車道地表裂縫可發現此破裂主要為位移推擠產生之壓擠破裂，此壓擠方向剛好對應地表位移方向。在主橋部分，地調所公告之米崙斷層線剛好通過七星潭大橋 P1-A2 間，故此兩跨連續橋梁兩側之支承被刻意設計成縱向活動垂直

向可調整之盤式支承，而地震下原本設計為固定之支承垂直向或許因為強度不足而產生明顯的移動，使得兩側 P1 和 A2 之支承呈現雙向活動狀態，也使得此單元橋梁在結構上和 A2 側橋台與 P1 橋墩完全分離，P2 橋墩成為唯一地震輸入位置，所以無論斷層通過 A2-P1 間或 P1-P2 間，此單元橋梁只會受到近斷層地震之影響，而不會受到斷層引致差異位移的影響，而依據附近 HWA028 測站資料所推得之加速度反應譜小於設計反應譜(圖 4)，所以主橋主結構之破壞輕微。另 A2 橋台和 P1 橋墩之損傷原因推測為如圖 23 所示之地表位移引致 A2 橋台往圖示箭頭方向推擠而碰撞到上部結構箱梁，故可見 A2 橋台右側止震塊遭推擠產生裂縫(圖 24a)，而 P1 側之支承明顯向市區側側移(圖 24b)應也是 A2 側和 P1 側地表位移方向相反所引致。另由圖 24(b)可發現 P1 橋墩左側之止震塊亦有破損情況，此觀察結果顯現 A2-P1 振動單元之上部結構於 P1 上方應於地震時發生明顯之左右振動，此反覆振動造成箱梁左右兩側反覆碰撞橫向止震塊，惟左側之位移反應相對較小，所以止震塊的損傷也較輕微。至於 P1-A1 之簡支單元或許因結構週期剛好與地震主頻周期偏離而振動較小，所以相對碰撞的情況則較不明顯，支承也呈現完好狀態。



圖 19 七星潭大橋 A2 側箱涵損傷，涵洞後方路堤沉陷，隔音牆遭推擠變形



圖 20 七星潭大橋 P2 橋墩現況相片



圖 21 七星潭大橋 P1 橋墩災損現況



圖 22 七星潭大橋主橋橋面損傷情形

五、結論

本次花蓮地震後之橋梁勘災作業，計有鄰近嶺頂斷層之花蓮大橋，以及鄰近米崙斷層之七星潭大橋。其中花蓮大橋為簡支橋梁型式，支承為合成橡膠支承墊，主要破壞原因為斷層錯動之差異位移，此差異位移導致支承滑動，上部結構側移、橋護欄損傷、伸縮縫損傷和橋台與止

震塊破損等，但也因上部結構之滑動而使地震力不致傳至下部結構，所以下部結構大致良好，另外也由於本次地震斷層走向約略和橋梁行車向呈垂直走向，故行車向不致因為過大位移而落橋，而垂直行車向因橫向止震塊之消能與防落功能，也使得上部結構不致產生過大側移。七星潭大橋為考慮跨斷層而特殊設計之橋梁，依據現場勘查結果，判斷在此次地震作用下，特殊設計之支承在地震下除縱向可移動外，原本設計為垂直行車固定之支承向也在橫向呈現明顯的移動，此支承雙向移動現象意外吸收了地表相對錯位引致之外力，進而降低下部結構位移量需求，避免橋墩的嚴重損傷，但由於本橋為曲線橋，A2 橋台和橋面斜交，支承設計也較為特殊，在尚未依據設計圖進行詳細分析前，難以完整解析橋梁破損原因以及橋梁於本次地震下之實際行為，本文之分析僅為依據現場所觀察到之現況配置所進行之推測。

基於本次橋梁震損調查可發現橋梁因斷層通過引致之橋梁震害有別於一般地震。一般而言，由於跨斷層橋梁需承受斷層錯動引致之差異位移的影響，所以在設計上建議橋梁之設置須避開斷層線，但有時因斷層線位置不易明確判斷，或因其他特殊因素，而無法避免在斷層線上或附近建造橋梁時，應朝向提高位移容量，以及避免落橋等目標對跨斷層橋梁進行設計或補強，可能做法包括改用彈性支承或隔震支承等以提高位移容量；主梁連續化、加強防落設施之配置、提高防落長度等以避免落橋，惟不同設計之選擇仍須仰賴個別工址更詳盡之資料分析，如鄰近斷層未來可能錯移量與錯動型態等，才能進行合理判斷與決策。

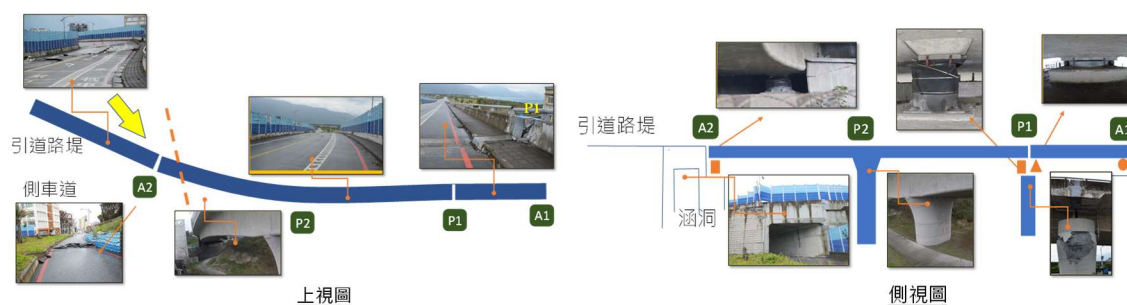


圖 23 七星潭大橋受地表位移方向示意圖



圖 24 七星潭大橋支承損傷狀況：

(a) A2 橋台側向止震塊開裂；(b) P1 橋墩支承側向位移，側向止震塊震損

參考文獻

1. 交通部 (2009)，「公路橋梁耐震設計規範」，中華民國政府出版品
2. 經濟部中央地質調查所(2018)，「20180206 花蓮地震地質調查報告」。