

0206 花蓮地震土壤液化震害相關問題探討

黃富國¹、王淑娟²¹淡江大學水資源及環境工程學系²朝陽科技大學營建工程系

摘要

發生於民國 107 年 2 月 6 日之花蓮地震，地震規模 6.2，震源深度 6.3 公里，屬淺源地震；位於花蓮縣近海的震源，觸動了米崙斷層及嶺頂斷層錯動，在花蓮市之震度達 7 級，多處垂直最大地表加速度大於水平最大地表加速度；此次地震前震及餘震不斷，主震時雖然強震延時僅 10 秒左右，但從米崙斷層帶上之華西路至嶺頂斷層帶上之崩坎，離震央 32 公里的範圍內，多處發生了土壤液化（soil liquefaction）現象，尤其在花蓮火車站前站西起國聯五路，東至國盛七街，南起商校街，北至國盛八街的 0.2 平方公里範圍，有較明顯之地盤下陷，及建物震損的情況。液化損害之類別包括：建築結構及港灣設施地基震害、維生管線震害、土工結構及橋梁樁基震害、地盤側向擴展及流動破壞等。本文根據此次土壤液化震害之調查結果，進行初步探討，顯示前期振動對液化的影響，及「液化加震」對建築物的效應，希望成果可以提供本土化液化評估，及擬定液化防治對策的參考，以避免或降低液化震害對生命財產及工程設施可能產生之影響。

壹、前言

二年前 2 月 6 日地震規模 6.6 的美濃地震，大家記憶猶新，在台南市之震度達 5 級，除了造成台南永康區維冠大樓倒塌、人員重大傷亡外，「土壤液化」也頓時成了顯學，並被過度炒作成洪水猛獸，造成全國民眾的恐慌與不安，避之惟恐不及！也促成了政府加速公告土壤液化潛勢區，各縣市也在營建署的補助下，開始中級液化潛勢圖資的製作。而二年後很巧合的又是 2 月 6 日，在花蓮縣立霧溪近海北緯 24.1°、東經 121.73°，發生了地震規模 6.2、震源深度 6.3 公里的淺源地震(圖 1)，並觸動了米崙斷層及嶺頂斷層錯動，由北邊往南邊破裂，在花蓮市之震度達到 7 級(劇震)，花蓮氣象站之地震測站 HWA019-2 的水平最大地表加速度 PGA 達 421gal。

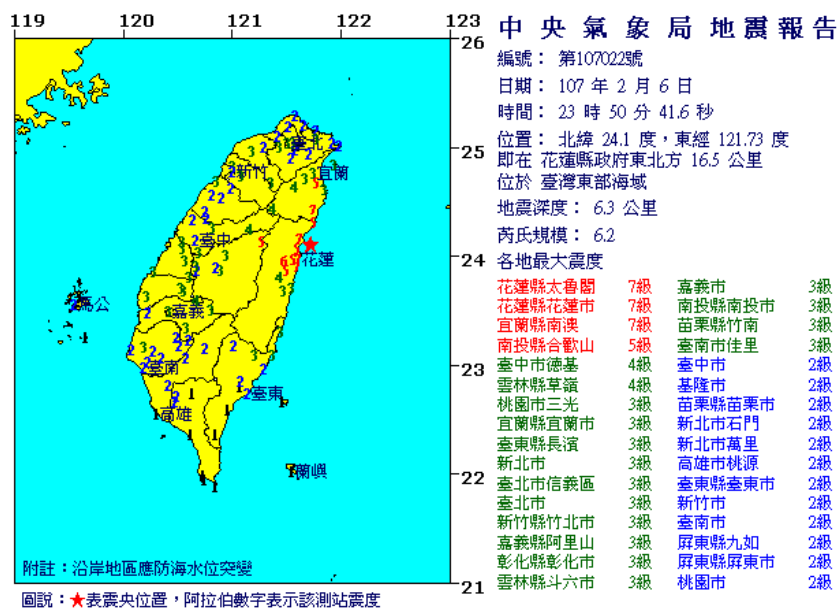


圖 1 0206 花蓮地震報告相關訊息

此次花蓮地震，除了強地動造成幾棟大樓倒塌外，事實上也發生了土壤液化震害。相較於九二一地震、0304 桃源地震、0206 美濃地震(黃富國等人，1999; 黃富國等人，2012; 黃&王，2016)，此次震度雖超過七級，但強震延時較短，約 10 秒左右，所以液化震害相對較為輕微，因此並未引起大家太多的注意;但經詳細調查，其實液化也造成了部份建物的下陷、傾斜，影響功能性及使用性，使得住戶不知所措，另也因達不到震害補助標準，而求助無門，相當無奈！另外，此次土壤液化區比較特別的是，除了建物周遭有液化噴砂外，部分屋內地坪也有斷層破裂的破裂跡;有些建物的地基雖發生了液化現象，但由於結構系統不佳(如一樓作為停車空間使用，壁量較少，形成軟弱底層)，也造成了梁柱局部受損。亦即，土壤液化並非全然是減震效應，也可能因液化較輕微，地層仍具傳遞剪力波之能力，但因地層已局部軟化，地盤振動周期延長，而使中高樓層及具軟弱底層建物，容易發生共振效應，反使震害加劇，出現「液化加震」現象。此外，這次地震，也出現了礫質土的液化現象。因此，0206 花蓮地震，又震出了土壤液化震害的一些新問題與新課題，非常值得關注!本文將先說明這次地震土壤液化之概況與破壞模式，接著，針對一些特定問題，進行較深入的探討。希望藉由這次土壤液化震害的經驗與教訓，對液化之作用與影響有更深入的認識，俾往後在工程規劃、設計及施工時，能採取更適當之對策與措施，以消弭液化震害於無形，達致防災或減災之目的。

貳、土壤液化概況與破壞模式

1. 土壤液化場址分布與液化成因

0206 花蓮地震，發生土壤液化噴砂及震陷等液化震害現象的範圍(圖 2)，從米崙斷層帶上之華西路至嶺頂斷層帶上之崩坎，距離震央最遠約 32 公里，尤其在花蓮火車站前站，西起國聯五路，東至國盛七街，南起商校街，北至國盛八街，面積約 0.2 平方公里的範圍內，有較明顯之地盤下陷，及建物震損的情況。歸納發生土壤液化現象之地點，主要為美崙溪流域及木瓜溪與花蓮溪流域等之第四紀現代沖積地盤的粉土質砂及砂礫石層...等(圖 3)。在華西路及東華大學一帶，主要為舊湖沼區之軟弱湖沼沉積土壤;在嶺頂斷層帶附近的液化，則多為斷層破裂線上之河床沖積砂質土壤。

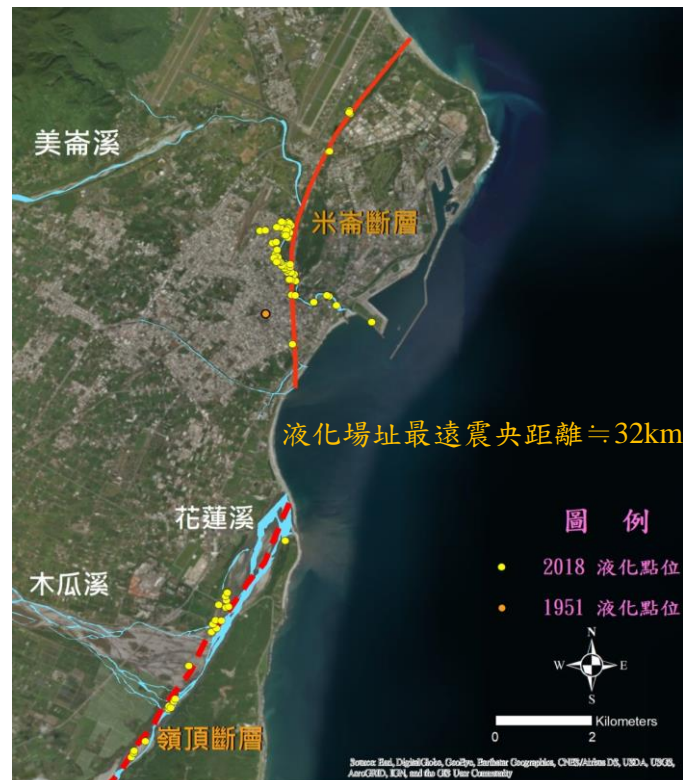


圖 2 0206 花蓮地震土壤液化場址分布圖

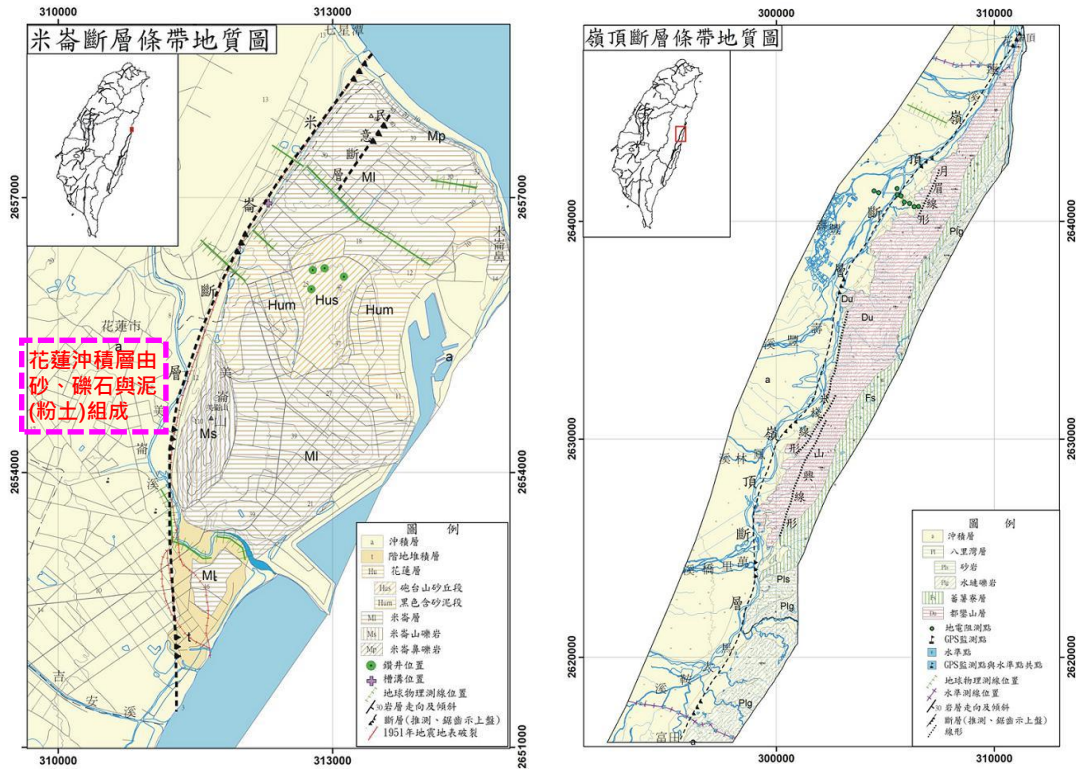


圖 3 米崙斷層及嶺頂斷層附近條帶地質圖

之前大家普遍認為花蓮之土壤液化潛勢低，應該不太會發生液化，最主要是因印象中花蓮之地質條件多為含砂礫石或卵礫石之地層，且這次地震在花蓮市之震度雖高達 7 級，但強震延時僅約 10 秒左右，超額孔隙水壓應不足以激發至發生土壤液化之條件。但事實上，震後發現，花蓮之地質條件及地震因素，均與先前之認知有很大差別！在地質條件方面，花蓮地區之沖積層由砂、礫石與泥(粉土)組成，有些區域仍含有相當厚度，易液化之砂土、粉土質砂與粉土等，且即使含礫石之礫質砂土與粉土質砂，在國內外也有相當多液化的案例，包含九二一地震時霧峰地區及南投地區；本次 0206 花蓮地震，在花蓮港就噴出最大粒徑近 10 cm 的礫石。因此，除了傳統普遍認為具液化可能性的砂質土壤外，礫質土的液化潛能，也是往後國內在液化防災方

面，須加以重視的一環！在地震因素方面，此次花蓮地震很特別的一點，就是前震及餘震很多，且有數個前震及餘震之地震規模均超過 5.0(圖 4)，對花蓮地區之沖積地層造成一定影響。在前震時，地層可能沒有達到發生土壤液化的條件，但所激發之超額孔隙水壓，會使近地表地層之飽和區域向上延伸(如同地下水位變高)，使得主震時，土壤更易液化；且由震後居民訪談知悉，有些區域是在主震完的餘震後，才看到大片的噴砂現象，如美崙溪畔兩岸大面積的噴砂，其機制相同。因此，這個很特別的地震特性，也是造成此次花蓮地區，發生土壤液化震損的重要原因之一。

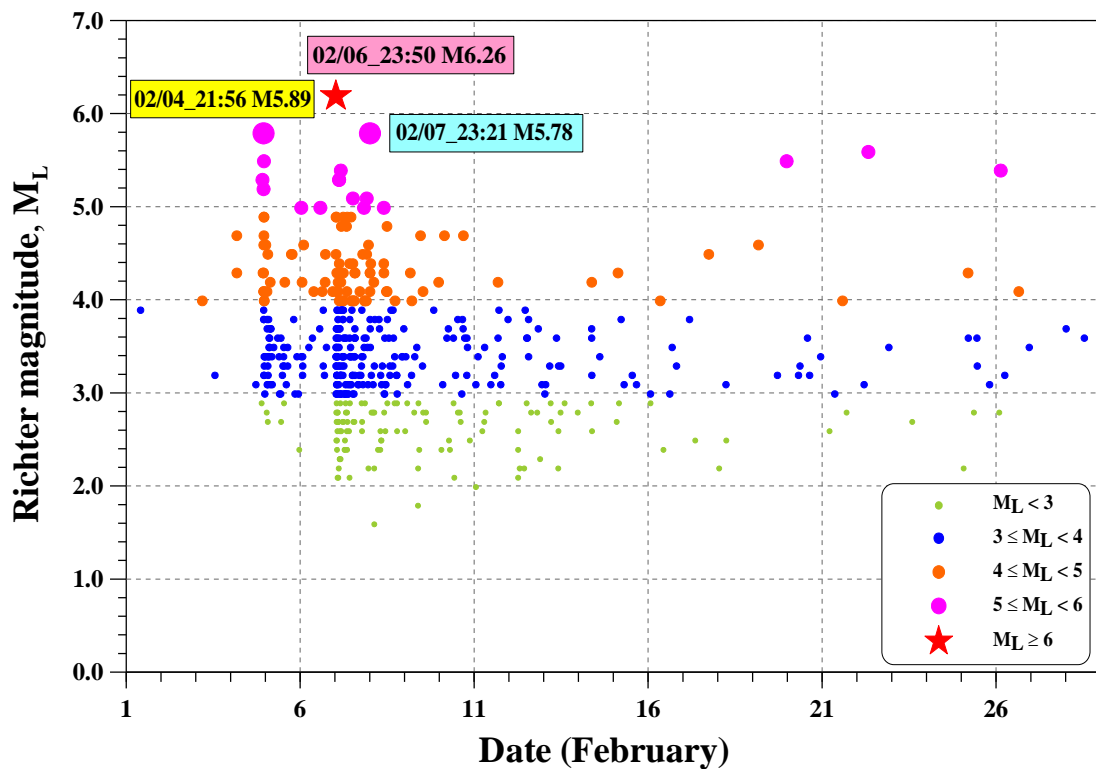


圖 4 0206 花蓮地震前後地震發生時間與規模關係序列圖

2. 土壤液化破壞模式

一般而言，若將土壤液化之破壞模式依地表結構物之有無分類，可概分為自由場 (free field) 的噴水冒砂震害及結構物 (含土工結構) 地基液化

震害。而若依地盤破壞行為及對工程設施影響分類，則可將液化破壞模式分為噴水冒砂、地基失效、側向擴展及流動破壞等四類。前二項屬於水平地盤之破壞，而後二者屬於傾斜地盤之破壞。本文以此次花蓮地震之實際液化情況，除噴水冒砂外，著眼於液化對工程設施之影響，將破壞模式另歸納成下列四類作說明。

(1) 建築結構及港灣設施地基震害

本次花蓮地震真正引起關注的，是四棟中高樓建築物的倒塌，包括雲門翠堤大樓、白金雙星大樓、吾居吾宿大樓，及統帥大飯店等，導致十多人喪生。雖然這四棟倒塌的大樓，皆鄰近錯動的米崙斷層，地震力很大，但前三棟同時也都位於花蓮車站前站附近，具宏觀液化震害現象(噴水冒砂、土體流動、建築物地基失效震陷)的區域；在這個範圍內，建物地基有噴砂、開裂、下陷 10~20cm、傾斜 1~2°、室內或室外地板上拱，形如龜殼狀者，不一而足(照片 1~6)；也有地基液化下陷，伴隨室內斷層錯動而地坪破裂情形(照片 2)。雖然建物倒塌與地震力大小、結構系統及施工品質…等因素密切相關，但土壤液化是否在其中扮演一個重要角色，實宜釐清！惜震後因搶災、復原之故，並未詳查建築物的倒塌，是否與地盤液化有關，此部分也宜再深入調查、探討。



照片 1 國盛八街住戶周遭，土壤液化噴砂及一樓階梯因斷層錯動而破裂情形



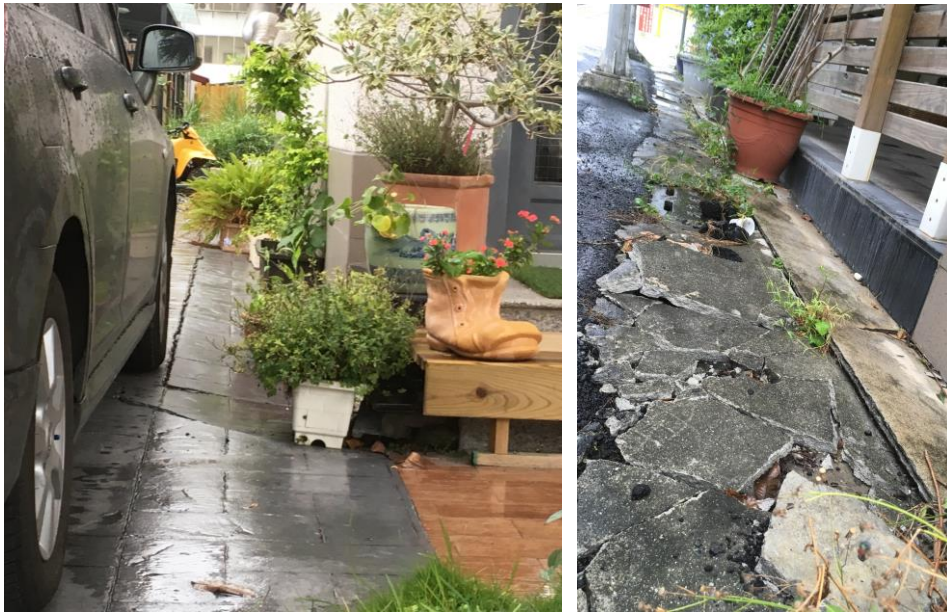
照片 2 國盛八街及五街住戶地基液化下陷，伴隨室內斷層錯動而破裂情形



照片 3 國盛五街及六街建物地基液化下陷，高額孔隙水壓引致地板拱起、開裂



照片 4 國盛二街建物地基液化下陷，導致大樓傾斜約 1~2°，被貼紅單



照片 5 國民八街民宿，因土壤液化震陷約 10~15cm、傾斜約 1~2°



照片 6 國盛五街富臨門大樓及佳美華廈，皆發生液化震陷及傾斜，但前者梁柱受剪而開裂破壞

另外，根據花蓮港務局 HWA062 地震測站紀錄顯示，花蓮港此次地震的水平最大地表加速度 PGA 達 209gal，屬 5 級強震。在#19~#25 碼頭之後線及西防波堤堤旁道路，發生較大範圍之地裂、砂礫噴出，及地表沉陷等現象，影響碼頭作業功能；照片 7 為#24 碼頭後線礫石噴出地表、#25 碼頭後線沉

陷情形，最大礫石粒徑約 10cm，最大沉陷量約 50~60cm；至於碼頭沉箱之震損則較為輕微，並無明顯之沉陷、傾斜，或結構體損壞情形。關於碼頭後線區域之回填料，係取自木瓜溪河床之砂礫石；因此，回填礫質土的液化特性及震害預防方法，如級配及夯實度要求等，也是值得關注的課題。



照片 7 花蓮港#24 碼頭後線礫石噴出地表；#25 碼頭後線沉陷情形(柯永彥攝)

(2) 維生管線震害

維生管線系統是維繫居民平常生活需求的基礎設施，包括上下水道、天然氣、電力、電信、輸油管線…等。若位於容易發生土壤液化災害之地質敏感區，一旦發生大地震，其破壞及影響不容忽視，將造成都市機能明顯下降，並可能引致火災等二次災害，嚴重影響震後救災及復建工作之進行。此次地震，除在國盛二~八街、國民八街…等大樓旁水溝及管線設施，因液化震陷而破壞之外，尚志橋下路堤上，連接砂婆礑淨水場及尚志淨水場的 600mm 鋼管，也疑似因斷層作用及路堤液化之故，導致管線接頭破壞漏水，造成三萬餘用戶停水(照片 8)。



照片 8 大樓旁水溝及管線設施因液化震陷而破壞;尚志橋下輸水鋼管疑因斷層作用及路堤液化之故，導致接頭破壞而漏水

(3) 土工結構及橋梁樁基震害

沿著美崙溪萬壽濕地二側高灘地，有很多堤防、護岸等土工結構，因土壤液化而震陷變位。照片 9 為忠烈祠附近美崙溪畔，及尚志橋下之堤防護岸，因液化震陷及地表破裂而損壞情形。二處場址皆位於米崙斷層帶上，堤防護岸伴隨破裂及湧水冒砂現象，附近居民表示，主震後，該處持續湧水二~三天。其中堤防上之長條椅下陷 20cm、往河心方向傾斜 33°。在橋梁樁基震害部分，土壤液化後地盤下陷，亦可能使橋墩產生不均勻沉陷、橋面版陷落破壞；若引致負摩擦力，則對橋墩承载力也有不利影響。照片 10 為花蓮大橋及中山橋墩柱樁基，因樁周土壤液化，地盤下陷 15~20cm，引致負摩擦力情形。而尚志橋及尚志三號橋之橋下樁基周圍，也都有噴水冒砂及地盤下陷情形。



照片 9 美崙溪畔及尚志橋下堤防護岸，因液化震陷及地表破裂而損壞



照片 10 花蓮大橋及中山橋墩柱，因樁周土壤液化下陷而引致負摩擦力

(4) 地盤側向擴展及流動破壞震害

美崙溪沿岸及花蓮溪出海口附近，接近溪岸或海岸等路基、高灘地之微傾地盤，在這次地震中，出現很多液化地層滑動，地盤側向擴展的情況，地面上常有一系列近乎平行的地面裂縫及台階式錯動。照片 11 為花蓮大橋附近高灘地，土壤液化及地盤側向擴展情況，其中，一場址張裂之地盤裂縫寬約 50cm，深度約 70cm。另一場址滑動冠部除出現平行裂縫外，崖頂附近尚有共軛弱面，可推估地震最大主應力方向；址部附近則出現數個液化噴砂口。



照片 11 花蓮大橋橋下附近地盤，土壤液化及側向擴展情形

參、土壤液化相關問題探討

1. 近斷層效應探討

在這次的地震中，土壤液化震害，如同倒塌的幾棟建築物，主要分布在米崙斷層及嶺頂斷層沿線附近，顯示土壤液化與斷層錯動引致的波傳特性有密切關係。根據震央距離 23 公里以內，鄰近花蓮市米崙斷層附近 12 個測站的地震紀錄顯示，除水平最大地表加速度 PGA 均超過 200gal 外，有一半的測站，其垂直向 PGA 超過水平向 PGA 值。因斷層破裂效應，近斷層地動常伴隨單頻率、長周期、大振幅的速度脈衝，垂直斷層或平行斷層方向，特性也有差別；由強震紀錄發現，垂直米崙斷層的東西方向，具有較大震度、較短強震延時的趨勢，其對地盤液化的影響，值得探討。

此外，過去僅考慮水平剪力波對液化的影響，但近年來有研究發現，若

垂直向強地動中富含土層壓力波(P波)基本振動頻率範圍之波動，也可能因共振作用產生明顯之軸差應力，而引致土壤液化之發生；且水平向及垂直向地震力共同作用下，會使液化在整個強震歷時中較早發生，另外，液化深度及震後地表沉陷量也都會加大。所以，近斷層效應對液化的作用及影響，是一個值得關注的議題！

2. 液化減震或加震效應探討

在過去國內外較嚴重的液化震害歷史上，土壤液化後，地層行為與液體類似，不能維持自身的形狀、有流動性，所以其上建築物常如剛體運動般，產生沉陷、傾斜…等現象，雖影響使用機能，但因承載地盤不能傳遞剪應力，上部結構不易受剪破壞，而有「液化減震」的效益。相對地，0206 花蓮地震，震度雖高，但強震延時較短，花蓮火車站前站附近，約 0.2 平方公里範圍內之建物，雖因地盤液化有較明顯之 10~20cm 地盤下陷、傾斜 1~2°，但尚屬輕微至中等損害程度，反有「液化加震」效應之疑慮。其原因係地層分布具變異性，輕微至中等損害程度之地盤，近地表地層剖面並未完全液化，尚有傳遞剪應力之能力，但超額孔隙水壓之激發，已使地盤特徵周期延長，導致中長周期結構(如中高樓層建物、具軟弱底層建物、長跨距橋梁)會有較大受震反應，易發生震損。

以照片 6 國盛五街之富臨門大樓為例，七樓高、無地下室，底層一樓作為停車使用之開放空間，牆量不足，有軟弱底層情況。0206 花蓮地震時，

大樓有土壤液化跡象，在大樓左右圍牆旁地坪分別下陷 10 cm 及 6 cm，停車場地坪有拱升抬起、滲砂情形，液化程度較輕微。雖發生了液化，但其一樓多根柱子及牆壁，卻有剪力破壞之現象，顯示「液化加震」之可能性；主震後為防餘震持續作用，馬上有慈善團體以鋼柱幫助其補強一樓，以策安全。探究其原因，富臨門大樓液化較輕微，使得地盤仍有傳遞地震應力波之能力，而因液化輕微，地盤軟化後，使地盤振動周期變長，對大樓造成了不利影響；但因場址位於米崙斷層帶上，震度高，且鄰近災損點測站之地震紀錄具近斷層長周期速度脈衝之特性，也對中高樓結構有不利影響，使得具軟弱底層情況之富臨門大樓一樓，多根柱子產生剪力破壞情形。因此，富臨門大樓的結構性損壞，可能肇因於液化加震與近斷層地震的加乘效應，惟其個別貢獻及影響程度，有待再深入探討。

經震後詳查，前站附近類似富臨門大樓具軟弱底層情況，地基出現液化徵兆，梁柱、牆壁多處產生剪力裂縫之中高樓層大樓，仍有很多棟。這個實際案例，給了我們很大的啟示，當一場址經分析，具有輕微至中度液化損害潛能時，其上建築物的耐震性能，包含結構系統，必須加以仔細評估。而以往「液化減震」的傳統觀念，也須加以調整；建築物耐震快篩、耐震評估及補強的項目及重點，也應將此特性納入考量。

3. 液化區修復補強問題探討

相較於九二一地震、0206 美濃地震，此次花蓮地震之液化震害相對較為輕微，但也造成了部份建物的下陷、傾斜，影響功能性及使用性。以訪查之其中三棟震陷建物為例，初估頂升扶正、修復補強費用，一棟超過 200 萬元、二棟超過 300 萬元，費用極高，使得住戶不知所措！但因下陷傾斜之震損情況達不到受災戶補助標準，而求助無門，相當無奈！另外，在液化震損之眾多建物中，經災害後危險建築物緊急評估，有的開紅單、有的開黃單；但有部分住戶怕開單後，使人知悉該建物曾遭致液化損壞，影響以後的買賣及租賃權益，而反對開單，導致後續無任何依據可請求震損補助，惶惶不安。

參考二年前 0206 美濃地震，土壤液化受災戶的補助標準，傾斜率超過 5/200、或沉陷量超過 60cm 以上，比照紅單；傾斜率超過 1/200、或沉陷量超過 20cm 以上，比照黃單。補助的項目包括建物之頂升扶正，及地盤補強等費用。在液化震害已漸為大家所熟知，且只要一發生強震，粉土及砂質地層在適當條件下，都可能發生液化的情況下，政府有關單位應主動根據過去幾次液化震害的經驗，針對液化震損的特性，研擬適當的法令規章，提供災後住戶必要與及時的協助及補助，以減少民怨及不必要的抗議與糾紛。

再者，為防範地震可能帶來的危害，營建署自九二一地震後，即積極推動建物之耐震初評及詳評，針對具較高危險度之危險及老舊建築物，給予重建之容積獎勵，或都市更新整建維護、結構耐震補強之補助與賦稅優惠等。

鑒於液化震害的特性，建議政府也可以將前述理念，延伸至地盤補強的補助上，尤其是位於中高液化潛勢區域的危老建築，以全面強化地震防災的能力。

肆、結語

1. 相較於九二一集集大震、桃源地震、美濃地震，0206 花蓮地震之土壤液化震害，表面上較為輕微，但卻隱含了一些重要課題，值得再深入探討與釐清。包括：(1)前震或主震(相對於餘震而言)的前期振動效應，使超額孔隙水壓在短時間內持續累積，對啟動液化的影響；(2)輕微至中度液化損害，所引起「液化加震」效應，對中長周期結構物，尤其是對具軟弱底層建築物的影響，此點有別於傳統「液化減震」的觀念，宜加以重視，並應反映於耐震設計規範之中；(3)含礫質土地層的液化特性與防災方法，也是後續應加強研究的重點。
2. 土壤液化與危老建築及具軟弱底層建築物之安全性有密切關係。此次花蓮地震倒塌之多棟建築物，位於發生明顯地盤下陷、建物傾斜之土壤液化區域，復因近斷層地動效應而震損。因此，土壤液化及近斷層地動，對建物震損之個別影響與綜合效應，應再深入研究！傳統較著重評估開發基地，是否位於嚴重土壤液化區之觀念，也須加以調整；尤其輕微至中度液化地盤受震之場址效應，不容忽視。
3. 為防範震害之發生，營建署陸續推動了建築物之耐震初評、詳評及耐震快篩等，也針對危險及老舊建築物，給予重建之容積獎勵，或都市

更新整建維護、結構耐震補強之補助與賦稅優惠等。根據此次震害經驗，建議液化潛勢區之危老建築及具軟弱底層建築物，應列為優先耐震快篩、評估及補強之對象。而以往大多著重上部結構耐震評估及補強的方式，也應延伸至場址下部之地盤改良及補強。此外，對於發生液化震損的住戶，震損程度的認定及修復補強費用的補助標準，也建議盡速研議後納入法規中，俾利遵循，以減少民怨及不必要的抗議與糾紛。

4. 目前全國多個縣市，雖已在進行中級液化潛勢圖資的製作工作，但鑽孔密度仍十分不足，地下水位高低的掌握，也須更長期的觀測紀錄。這些工作，仍須更長期的經費挹注，以使液化潛勢圖資之正確性與代表性，能持續精進，更具都市開發、規劃，或都市更新之防災參考價值！而耐震設計規範對土壤液化效應的評估，也須進行更深入及完整的考慮。此外，在液化防減災技術及工法方面，尚應研發適用於大區域、較低費用之地盤改良方式。要之，土壤液化震害待研究之課題仍多，從液化之機制、液化之評估到液化之防治等，有待持續進行本土化之研究。

參考文獻

1. 黃富國、余明山、何政弘(1999)，“九二一集集大震土壤液化震害與問題探討”，土木工程技術，第3卷，第3期，第47-79頁。
2. 黃富國、吳俊磊、王淑娟、黃騰輝(2012)，“2010年3月4日桃源地震土壤液化震害探討”，中華民國第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會，論文編號：11031。
3. 黃富國、王淑娟 (2016)，“0206美濃地震土壤液化震害探討”，技師報，第1006期，台灣省土木技師公會發行。