



淺談近年 台灣土壤液化 及案例

倪勝火／國立成功大學土木工程學系 教授

近二十餘年來因地震引發之土壤液化屢見不鮮，土壤一旦液化，土壤有效應力下降為零時，土壤失去抗剪能力，導致土壤承载力降低或喪失而引致各種災害，如建築物傾斜或下陷、土壤側潰、土壤噴砂水、地面下陷、地下建築物隆起或上浮、公道路路面龜裂、地下管線損壞或其他（如港灣或堤岸掏空損壞等）。所謂知己知彼百戰百勝，知災則可探討防災、減災措施與對策，以建制土壤液化之防治，亦有利於土壤液化機制基本學理研究，以建制土壤液化評估方法。本文簡介土壤液化及影響土壤液化之因素，及其可能引起各種災害與地表特徵，並以案例照片說明，期能達到知災之目的。

前言

因地震引發之土壤液化是指在地震之外力反覆震盪下，鬆散之無凝聚性土壤如砂、礫石、粉土等之土壤顆粒因受到壓縮，內部空隙減小，由於空隙水無法立即排出而造成孔隙水壓力迅速上升，導致土壤空隙內超額孔隙水壓力升高，當總水壓升高至與其總應力相等時，土壤有效應力下降為零時，土壤失去抗剪能力，而使土壤呈現液態化的現象。

台灣由地震引發土壤液化（soil liquefaction）問題，有文獻之最早紀錄^[1]為明朝永曆 15 年（1666 年）12 月發生於嘉義附近之嘉義地震所引發之地裂、噴砂，而清康熙 59 年（1722）10 月 1 日在臺南、嘉義、高雄亦因地震而造成地裂、噴砂現象；自 1901 ~ 2022 年台灣地區造成土壤液化災害之地震經統計約有 19 個地震（如表 1 所示）。台灣因地震引發土壤液化問題之受到重視與研究投入，應是始自 1999 年 921 地震，過去雖有少數地震引致土壤液化，但因造成之震損問題不嚴重，以及對造成土壤液化之機制尚不清楚，因此對土壤液化問題並未重視及深究。近 20 年來台灣地震引致之土壤液化造成震損較嚴重的地震約有四次，分別為（1999）集集大地震、（1999）嘉義地震、（2010）甲仙地震及（2016）美濃地震。本文將針對此四個地震引致土壤液化所造成之災害作一簡單的敘述，另本文所有照片均為作者拍攝。

土壤液化及其影響因素

土壤液化及其物理機制

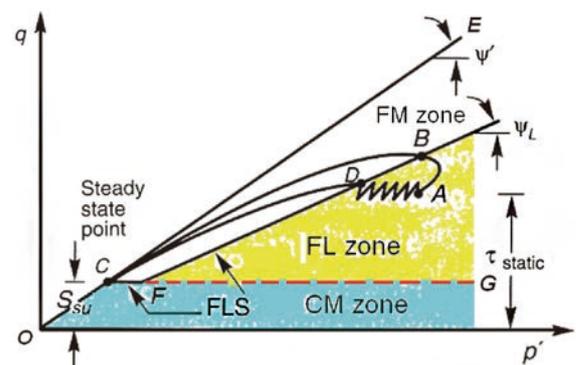
液化（liquefaction）這個名詞，最早是由 Mogami 與 Kubo^[2]於 1953 年所提出的，發生於土壤時，一直到目前都是用以描述在不排水情況下，飽和疏鬆之非凝聚性土壤受到單一持續加載的或短暫的或反覆振動的擾動時所產生的土壤變形現象。而地震引發之土壤液化是大地地震工程的一個專用術語，指在外來地震力的作用下，原本是固態的土壤變成液態，或變成粘稠的流體。飽和疏鬆砂質土壤如細砂、粉土質砂、砂質或粉質粘土等，通常在地震之外力反覆震盪下，鬆散的土壤顆粒因受到壓縮，內部空隙減小，由於空隙水無法立即排出而造成內部超額孔隙水壓力（excess pore water pressure）迅速上升，當水壓升高至與其有效覆土應力相等時，土壤失去支承力，致使土壤呈現液態化的現象，稱為土壤液化。

那土層通常在甚麼深度會發生土壤液化呢？一般規範認為在 20 m 以內，但美國華盛頓州交通部大地工程設計手冊^[3]考慮液化的最大深度限制為 80 英尺（近 27 m），因此，如果規範標準與可液化土壤相匹配時，即使深度大於 20 至 30 m，也有可能發生液化。其實，可能發生液化的最大深度可能與砂土和粉質砂土是否仍可保持鬆散並保持足夠的孔隙比和水力傳導係數的最大深度有關，但與地震發生之規模或震度亦相關。

表 1 1901-2022 年台灣地區土壤液化災害性地震^[4]

#	年/月/日	時/分	緯/經度	地點	震深源度 km	規模	死亡	房屋全毀	備註
1	1904/11/06	4/25	23.6/120.3	嘉義附近	7	6.1	145	661	斗六地震。新港附近發生地裂及噴砂。
2	1906/04/14	3/18	23.4/120.4	鹽水港	20	6.6	15	1794	7時52分再震，地裂噴砂，崖崩甚多。
3	1927/08/25	2/09	23.3/120.3	臺南新營附近	20	6.5	11	214	
4	1930/12/08	16/01	23.3/120.4	臺南新營附近	20	6.1	4	49	曾文區多地裂及噴砂。
5	1930/12/22	8/08	23.3/120.4	臺南新營附近	10	6.5	-	121	台南市道路龜裂，噴砂。
6	1935/04/21	6/02	24.4/120.8	竹縣關刀山附近	5	7.1	3276	17907	新竹—臺中烈震。獅潭、屯子腳斷層。有地裂噴砂。
7	1935/07/17	10/51	24.6/120.7	後龍溪河口	30	6.2	44	1734	新竹—臺中烈震餘震。
8	1941/12/17	3/19	23.4/10.5	嘉義市東南 10 公里中埔附近	12	7.1	358	4520	嘉義地方（中埔）烈震。草嶺山崩。
9	1946/12/05	6/47	23.1/120.3	臺南新化附近	5	6.1	74	1954	新化地震。有地裂噴砂，電桿鐵路歪斜。
10	1951/10/22	11/29	24.1/121.7	花蓮東北東 30 公里	18	7.1	-	-	花東縱谷地震系列
11	1959/09/25	10/37	22.1/121.2	恆春東 50 公里	10	6.5	-	3	恆春地震
12	1964/01/18	20/04	23.2/120.6	臺南東北東 43 公里	18	6.3	106	10924	嘉南烈震（白河地震）。有地裂，噴砂。
13	1986/11/15	5/20	24.0/121.8	花蓮東偏南 10 公里	15	6.8	13	37	花蓮地震。蘇花及橫貫公路全線中斷，北迴鐵路鐵軌扭曲。中和華陽市場 2/3 房屋倒塌。
14	1991/03/12	14/04	23.2/120.1	臺南佳里附近	12.3	5.9	-	-	將軍鄉噴砂。
15	1999/09/21	1/47	23.9/120.8	日月潭西方 9 公里	8	7.3	2415	51711	集集大地震。二十世紀台灣島內規模最大地震，車籠埔斷層活動，錯動長達 80 公里。南投、台中縣災情慘重。
16	1999/10/22	10/19	23.5/120.4	嘉義市西偏北 2.5 公里	12.1	6.4	-	7	嘉義地震。嘉義噴砂。
17	2010/03/04	8/18	23.0/120.7	高雄甲仙地震站東南方 17.1 公里	22.6	6.4	-	-	甲仙地震。噴砂。
18	2016/02/06	3/57	22.5/120.9	屏東縣政府北偏東方 27.1 公里（位於高雄市美濃區）	14.6	6.6	117	466	美濃地震。噴砂。
19	2018/02/06	23/50	24.1	花蓮縣政府東北方 16.5 公里（位於臺灣東部海域）	6.3	6.2	17	195	0206 花蓮地震。噴砂。

土壤液化會造成土壤的強度大幅下降或完全失去，且引起因土壤需釋放超額孔隙水壓之在地面噴出泥水現象，由於基礎土壤流失，可能因而引發土壤上部建物包括沉陷或傾斜等損壞災害。液化造成的災害與地表特徵主要有土壤側潰、流動液化（或稱為流潰）、地面土壤噴砂水及下陷、地下建築物隆起或上浮、公路或堤頂路面龜裂或下陷、地下管線損壞、水利設施及港灣等堤岸掏空損壞等。地震引起土壤液化產生之土層破壞型式，因地表之坡度不同所呈現之破壞型態而不同，其主要有三種，在水平地表為噴泥（砂）水（sand boil），在平緩之坡面呈現側潰（lateral spread），而在陡坡面則產生流動液化（flow liquefaction），流動液化類似由雨水造成之土石流，不過由地震引起土壤液化產生之土石流之水是因地震激發之超額孔隙水壓力，促使水由地下往上流所造成。引發流動液化之機制可由應力路徑如圖 1 說明，圖中由破壞包絡線 OE、流動液化線（FLS）及通過穩定狀態 C 點之水平線分割 CFG 成三個區域分別為流動液化區（FL zone）、反覆變形區（CM zone）及快速流動變形區

圖 1 引起流動液化之機制^[5]

（FM zone）（即 ECFDB 包圍區）。地震時會產生何種液化端視土壤之初始靜態剪應力（ t_{static} ）處在何種應力狀態，若如圖位於 A 點（即在流動液化區），即初始靜態剪應力大於土壤之殘餘強度 S_{su} ，即在土層受振動產生超額孔隙水壓力，應力狀態逐漸由 A 點向左移至 D 點，當到達 D 點（即流動液化線）時，土壤將快速變形移至 C 點破壞，此即土壤產生流動液化破壞。反之，若初始靜態剪應力位於反覆變形區，則只會發生土壤側潰。

早期 Seed [6] 提出土壤初始液化 (initial liquefaction) 與反覆流動性 (cyclic mobility) 的定義，前者之情境發生在飽和疏鬆砂土層。當土壤受到一反覆應力作用時，土壤之孔隙水壓來不及排出，而導致超額孔隙水壓產生，當超額孔隙水壓等於土壤的有效圍壓時之狀態，即稱之為初始液化或百分之百孔隙水壓比 (peak cyclic pore pressure ratio of 100%)，此時土壤瞬間喪失其全部的強度，而產生連續性的大量變形。後者之情境發生於飽和中等緊密至緊密砂土。當反覆應力作用，而使土壤產生初始液化現象，此時土壤只喪失部份強度，因此只產生少量變形。而隨後繼續作用之反覆應力使土體的變形持續緩慢的增加，稱之為有限度應變 (limited strain)。有限度應變可能係由於緊砂受後續的反覆應力僅使土體產生有限度的變形並使土體發生膨脹，激發負的超額孔隙水壓，致使超額孔隙水壓下降，土體在此一反覆荷重下重新達到穩定。

土壤液化過程之物理機制可如圖 2 [7,8] 說明，假設飽和疏鬆無凝聚性土壤原來之結構如圖 2a 所示。總應力等於有效應力加上孔隙水壓，當土壤受反覆剪力作用時，由於作用時間短暫，使得土壤內被激發之超額孔隙水壓無法消散，因而降低了有效應力，直到有效應力降到零。此時土粒頓失有效圍壓的圍束，各顆粒間毫無作用力存在，有如懸浮於水中，呈現液化現象，如圖 2b。液化過後，被激發超額孔隙應力得以消散，排出水份，各土壤顆粒即沈澱、堆積、重組排列，使得土壤趨於更緊密，如圖 2c。

影響土壤液化潛能的因素

影響土壤液化潛能的因素包括內在因素及外在因素，內在因素包含土壤相對密度 (或孔隙比)、有效圍壓 (深度)、土壤顆粒特性 (包括：顆粒大小、級配、顆粒形狀及礦物組成等)、前期應力及應變歷史、過壓密比 (OCR)、側向土壓力係數 (K_0)、飽和度、孔隙介質 (淡水或鹹水等)、土層沉積過程、細料含量與塑性等，外在因素包含地震震度或規模、地表加速度、振動大小、振動頻率、振動波形等。這些影響土壤液化潛能的因素之重要性如表 2 所示。

土壤液化災害型態

土壤液化引致災害有土壤承载力降低或喪失，如建築物傾斜或下陷、土壤側移及流潰、土壤噴砂水及

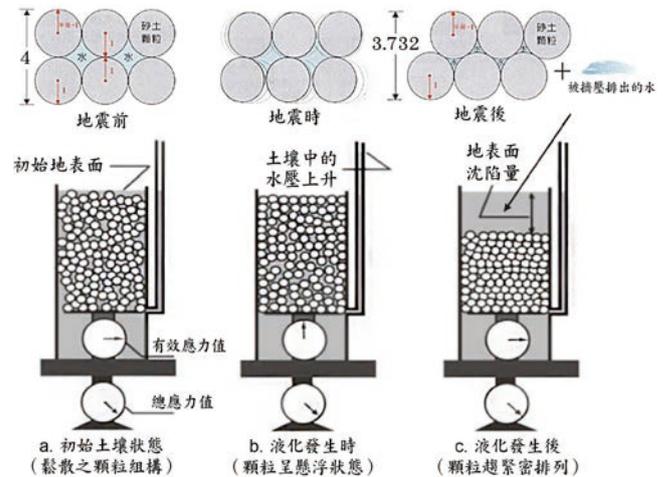


圖 2 土壤液化過程之物理機制 [7,8]

表 2 影響土壤液化潛能因素之重要性 [9]

影響因素	影響程度	
	純淨砂土	含細料砂土
平均有效圍壓, σ'_v	R	R
相對密度 / 孔隙比	V	V
飽和度, S	V	V
過壓密比, OCR	L	V
前期應力應變歷史	V	V
土層沉積過程	V	V
顆粒大小、形狀、級配、礦物組成	V	V
反覆荷重頻率	R	L
時間效應	R	R
剪應變下之體積變化	U	U

表中：V- 主要影響因素，L- 次要影響因素，
R- 輕微影響因素，U- 重要性未清楚

地面下陷、地下建築物隆起或上浮、道路路面龜裂、地下 / 面管線損壞或其他 (如港灣或堤岸掏空損壞等)。

噴砂

在地震發生時或地震發生之後，超額孔隙水壓的消散大部分往上方排除，所以對於上方的土壤產生一作用力，此一力量會使土壤變疏鬆。當向上排除的超額孔隙水達到臨界水力坡降時，上方土壤的有效應力便會減至零，產生流砂現象 (quick condition)。此時水流的速度足夠將土壤顆粒帶至地表。在現地，土層往往是不均勻的，所以向上排出的孔隙水會沿著土層裂縫或較脆弱的地方，以相當高的流速噴出地表面，造成噴砂現象 (sand boil)。

噴砂的形成是一種複雜且有點隨機的過程，其影響的因素有超額孔隙水壓的大小；超額孔隙水壓區域的厚度、密度、深度；於超額孔隙水壓區域上方土層的厚度、滲透性、完整性等。噴砂在工程上而言並不

是很重要，卻是地震來時土層產生高額孔隙水壓的一個指標。但是伴隨噴砂所產生的地表沈陷對於結構物所造成之影響須加以重視。

地表沉陷

飽和砂土受地震作用而發生液化現象，其所產生的超額孔隙水壓在逐漸消散的同時，常會伴隨著地表沉陷，液化及其伴隨的地表沈陷大致可以分為三個階段：(1) 土壤受地震震動形成不排水狀態，產生超額孔隙水壓，有效應力因而降低，土壤顆粒漸呈現懸浮狀；(2) 超額孔隙水壓所形成的水力坡降趨使孔隙水向孔隙外流動；(3) 孔隙水向孔隙外流動，因而降低了水力坡降，直到超額孔隙水壓完全的消散，而孔隙水的流出也造成了土體元素體積的減少。超額孔隙水壓愈大，土體元素的體積變化也愈大。隨著超額孔隙水壓的消散，地表沉陷。液化造成地表沉陷所需的時間與土壤的壓縮性、滲透性，以及排水路徑長度有關，其範圍可自數分鐘至一天的時間。

側向擴張或側潰 (lateral spreading)

由於地震作用造成表層土壤分裂成塊狀，並且向下坡方向或自由面（如河道）移動。地表面在側向擴張開端處會形成裂隙和碎塊，在側邊的邊界會形成剪力區，而在尾端會造成土壤的擠壓和彎曲。所以在側向擴張區域的結構物容易因此產生破壞。

邊坡滑動或流潰

地震來臨時造成邊坡滑動的原因有二：一為地震所產生的反覆慣性力，垂直方向的慣性力減少了土壤的正向力，水平方向的慣性力則增加了邊坡下滑的力量。另一為土壤液化造成剪力強度的降低，坡壞原有的平衡，於是導致邊坡下滑。

基礎的破壞

以樁基礎為例，發生液化的土層會產生變形，可能使樁身承受額外的剪力及彎矩，造成破壞。

建築物的傾 / 斜倒

由於建築物下方的土壤液化，失去原有的承載力，建築物因而傾倒。

維生管線破壞

通常由於建築物下方的土壤液化產生陷錯位而拉斷或擠壓破壞。

地下構造物隆 / 浮起

通常由於土壤液化時伴隨之高超額孔隙水壓產生之上浮力造成地下密閉結構物之隆 / 浮起。

土壤液化災害案例

近 20 年來台灣地震引致之土壤液化造成震損較嚴重的地震約有四次，分別為（1999）集集大地震、（1999）嘉義地震、（2010）甲仙地震及（2016）美濃地震。針對此四個地震及其引致土壤液化所造成之災害及照片如下回顧。

集集大地震

大地震發生於 1999 年 9 月 21 日凌晨 1 時 47 分 12 秒之南投集集，地震規模為 7.3，總共持續大約 102 秒，期間台灣全島都感受到明顯搖晃。這場地震造成 2,417 人罹難，29 人失蹤，11,305 人受傷，另有 51,711 棟房屋全倒，53,768 棟房屋半倒，為台灣百年以來規模最大、傷亡損失最嚴重的自然災害。許多道路與橋樑等交通設施、堰壩以及堤防等水利設施，以及電力設備、維生管線、工業設施、醫院、學校、政府機關等公共設施遭到震毀，更引發大規模的山崩與土壤液化災害，其中又以台灣中部的災情最為嚴重。由於在台灣西部平原地區，多為細砂、沈泥質細砂、細砂質沈泥偶夾黏土層所形成的沖積層。其地層特性屬軟弱、高壓縮性、低強度及高飽和度等，在遭遇地震作用時，易引起土壤液化的問題，而伴隨土壤液化所產生的地表沈陷與變形，對於房屋結構、公路橋樑、擋土設施、地下管線、港灣設施、濱海結構等，都可能造成重大的損害。在此次的 921 集集大地震，土壤液化的現象普遍在台灣西部地區發現^[10]，並造成了規模不一的損害，所以土壤液化在 921 地震發生之後，便受到了各方的重視。

嘉義地震

1999 年嘉義地震，又稱 1022 嘉義地震，地震發生於 1999 年 10 月 22 日上午 10 時 19 分，地震規模為 6.4，震央位於嘉義市西偏北 2.5 公里處，本次地震災區的範圍不大，共計有 230 人受傷，房屋全倒 7 棟，半倒 30 棟。仁義潭水庫和蘭潭水庫的大壩於地震後產生裂縫，大壩附近的溢洪道旁道路亦產生裂痕；民雄農工實習工廠倒塌；嘉義縣和嘉義市共有百多所學校

的校舍受損；近八萬戶用戶停電；雲林地區也有約一萬戶用戶停電；梅山通往太平的嘉 162 甲線公路 4.6 公里處發生路基嚴重龜裂下陷、8.7 公里處因坍方落石而阻斷交通；嘉義市區沿八掌溪部分土壤液化，台南青寮近八掌溪農地噴砂。

甲仙地震

甲仙地震或高雄地震，發生於當地時間 2010 年 3 月 4 日 8 時 18 分，地震為芮氏規模 6.4，發生地點在高雄縣桃源鄉和茂林鄉的交界處，即震央位於高雄甲仙地震測站東偏南方 17.1 公里處（並不在甲仙鄉內）。此地震中，造成玉井國中校舍嚴重損壞，虎頭埤壩體開裂，台南縣鹽水大埤及新化鎮北勢里等地區出現土壤液化之大面積噴砂現象，高速鐵路鄰近新化鎮北勢里處高鐵列車在緊急煞車過程中引發軌道扣件脫落及軌道板破損，列車出軌等意外事件，所幸並未造成人員傷亡。

美濃地震

發生於 2016 年 2 月 6 日凌晨 3 時 57 分 27 秒之高雄美濃地震，地震規模為 6.5 地震，台南震度 5 級。此次地震雖稱為高雄美濃地震或稱 0206 地震，但此地震造成台南市之震災最為嚴重，此地震在台南造成 116 人死亡，多棟大樓及房屋傾斜倒塌或毀損，另造成台南市數萬戶在地震後停電及停水。而本次地震更造成台南市區多處都會地區之嚴重土壤液化，對於市區多數房屋造成下陷及傾斜，而大內曾文溪河溪護岸之土壤液化也造成日新護岸及尖山堤防之多處產生流動液化破壞及堤防受損。

地震引致土壤液化造成的災害與地表特徵如上節所述，此四次地震大致均有呈現，只是範圍大小略有差異，現主要以高雄美濃地震造成台南市土壤液化之災害與地表特徵說明。美濃地震土壤液化災損在住宅區主要發生於安南區溪頂里（惠安街）、中西區文和街及新市區三民街 50 巷，在自由場主要發生於新化區北勢里、永康大灣東路 150 號及歸仁大廟村保吉路，在水利設施方面主要發生於大內區日新護岸及尖山堤防，現就各種災害與地表特徵典型案例以照片說明如下：

1. 地表（不）均勻沈陷（傾斜 / 覆）：發生於安南區德安街口、中西區文和街、新市區三民街之地表不均勻沈陷如圖 3 所示。



圖 3 發生於安南區德安街口（左上）、中西區文和街（左下）、新市區三民街（右）之地表不均勻沈陷

2. 噴砂（通常發生在水平地表）：發生於新化區北勢里之噴砂如圖 4 所示。



圖 4 發生於新化區北勢里之噴砂

3. 側潰（通常發生在緩坡）：發生於發生於大內曾文溪之側潰如圖 5 所示。



圖 5 發生於發生於大內曾文溪側潰

4. 流動液化 (通常發生在陡坡)：發生於發生於大內曾文溪日新護岸 A、B 兩處之流動液化如圖 6 所示。

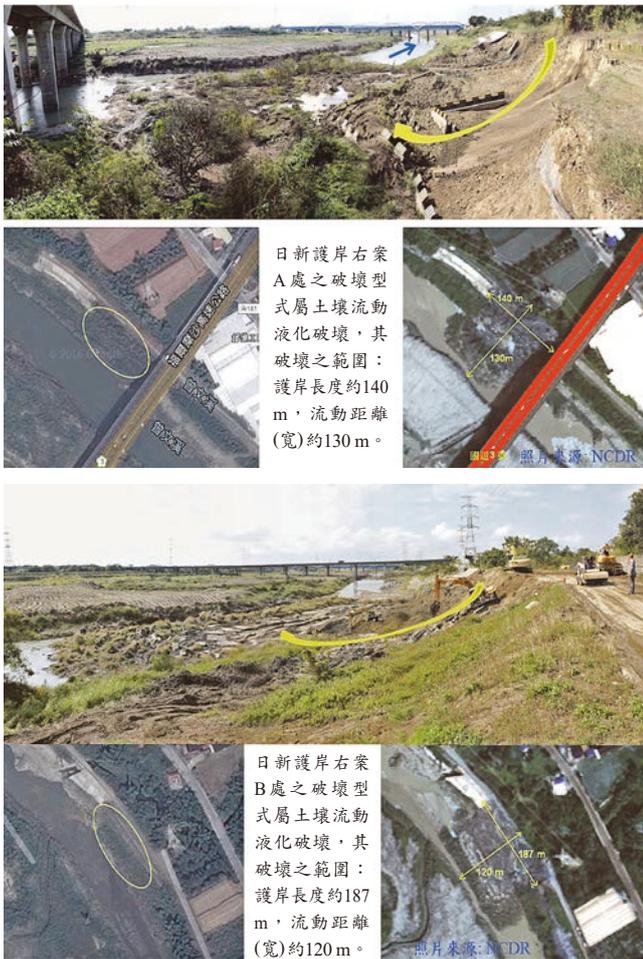


圖 6 發生於大內曾文溪日新護岸 A、B 兩處之流動液化

5. 建築物的傾斜 (不均勻沉陷)：發生於安南區惠安街及中西區文和街 (右) 之建築物的傾斜 (不均勻沉陷) 如圖 7 所示。



圖 7 發生於安南區惠安街及中西區文和街 (右) 之建築物的傾斜 (不均勻沉陷)

6. 建築物的沉陷 (均勻沉陷)：發生於新市區三民街之建築物的均勻沉陷如圖 8 所示。



圖 8 發生於新市區三民街之建築物的均勻沉陷

7. 地下建物浮起：發生於新市區三民街地表及安南區府安路之地下人孔的隆起如圖 9 所示。



圖 9 發生於新市區三民街地表及安南區府安路之地下人孔的隆起

8. 自來水管線斷裂：發生於新市區三民街之自來水管線斷裂如圖 10 所示。



圖 10 發生於新市區三民街之自來水管線斷裂

9. 港灣或堤岸 / 堤防掏空：發生於大內區尖山堤防因堤防內部土壤液化造成地表下陷及掏空如圖 11 所示。圖 12 說明可能致損之液化區域。

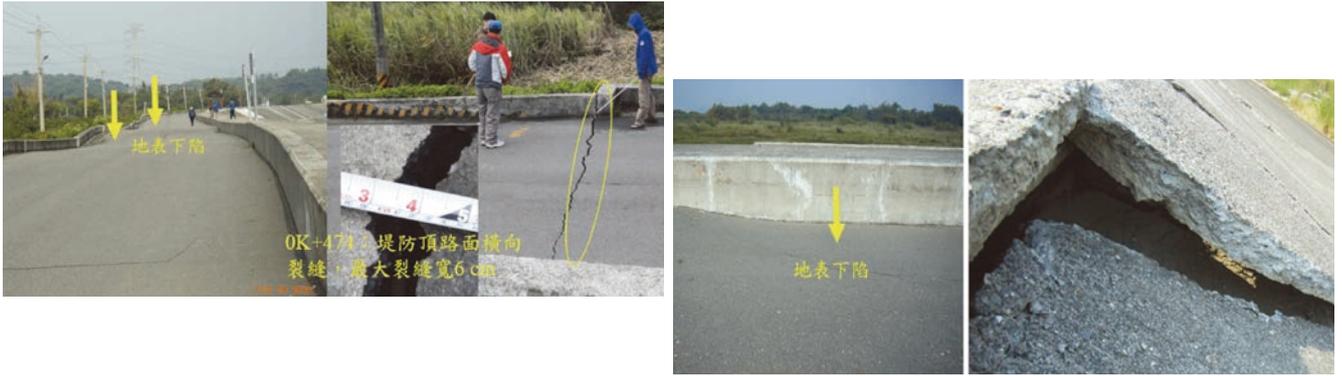


圖 11 發生於大內區尖山堤防因堤防內部土壤液化造成地表下陷及掏空

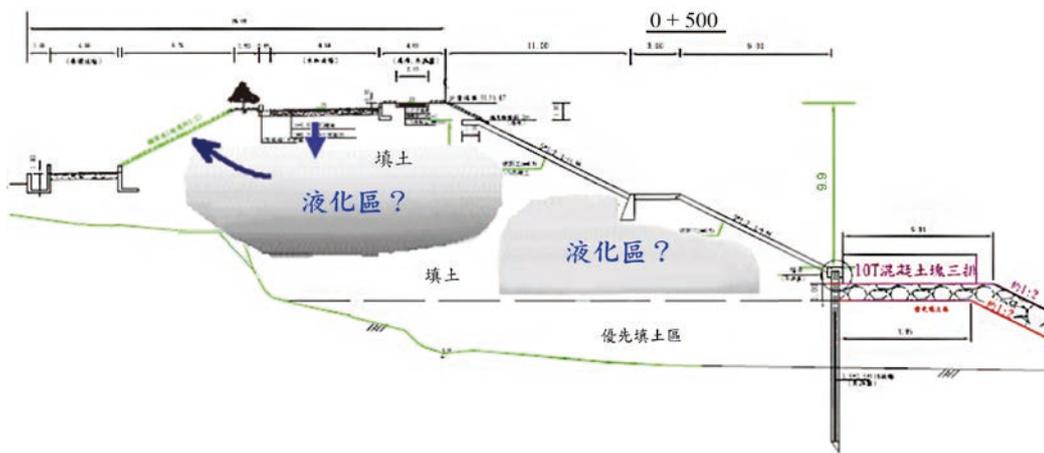


圖 12 大內區尖山堤防因堤防內部土壤液化示意圖

結語

因地震引發之土壤液化所引致之災損屢見不鮮，如建築物傾斜或下陷、土壤側移及流潰、土壤噴砂水及地面下陷、地下建築物隆起或上浮、公路路面龜裂、地下/面管線損壞或其他（如港灣或堤岸掏空損壞等）。本文引用美濃地震因土壤液化而發生之各種災害與地表特徵案例以照片說明其致災型態。知災則可探討防災、減災措施與對策，建制土壤液化之防治，以降低對產業之衝擊、降低液化引致之各種災害、保障生命及財產之安全、降低對交通營運及維生管線之衝擊。而土壤液化防災、減災措施亦有利於土壤液化機制基本學理研究、建立適用之較標準適用之評估法、以建制土壤液化微分/敏感區、研究經濟有效之地盤改良工法，如土壤緊密化、排水降壓、增加土壤勁度、限制土壤液化範圍（圍封法：連續壁、攪拌樁等），以降低土壤液化發生潛能。

參考文獻

1. 鄭世楠，葉永田（1989），西元 1604 年至 1988 年臺灣地區地震目錄，中央研究院地球科學研究所研究計畫 IES-R-661，第 8-10 頁。
2. Mogami, T. and Kubo, K. (1953), "The Behavior of Soil during Vibration." Proceedings, 3rd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Vol. 1, pp. 152-155.
3. WSDOT (2022), Geotechnical Design Manual, Pub. No. M46-03, Washington State Department of Transportation.
4. 中央氣象局網頁，1901~2022 年台灣地區土壤液化災害性地震。
5. Kramer, S.L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 348-422.
6. Seed, H.B. (1979), "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes." Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 201-255.
7. 國家地震工程研究中心（2010），「安全耐震的家：認識地震工程」，國家地震工程研究中心，臺北。
8. Ishihara, K. (1993), "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards." The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo.
9. 陳名利（1990），「以剪力模數評估砂土液化潛能之研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院工程技術研究所營建工程組，台北。
10. 賴宏源（2000），「九二一集集地震中部地區土壤液化案例之析」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，臺南。