

# 土壤液化成因、災害與復建

陳銘鴻

國家地震工程研究中心

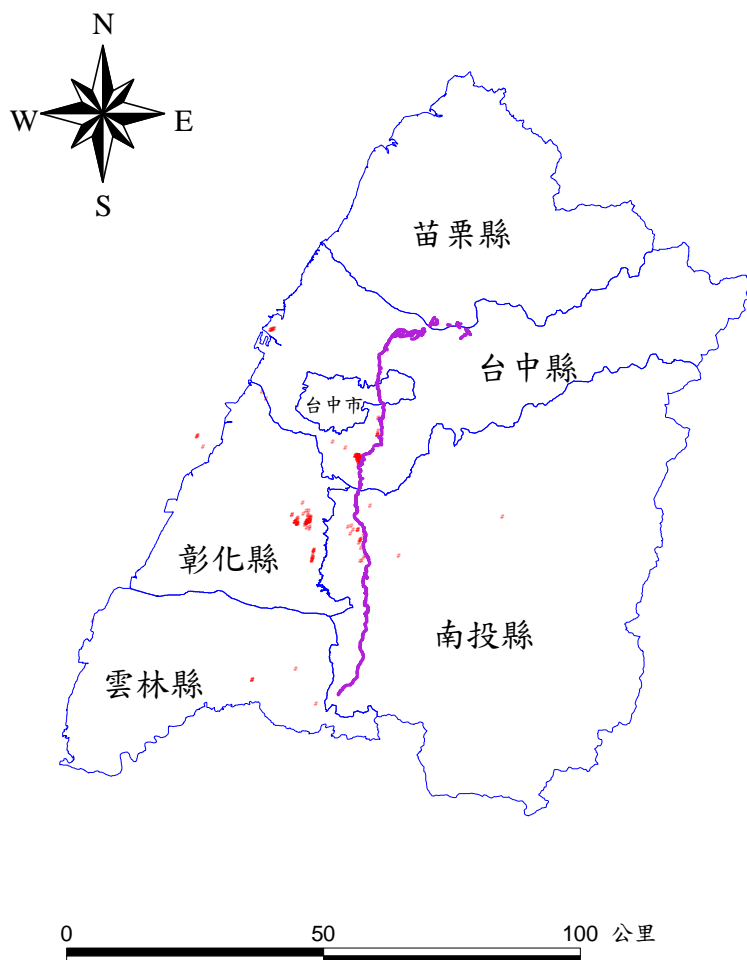
## 一、前言

土壤液化(soil liquefaction)現象是屬於地震災害之一，在歷史上之地震記錄中多有描述，近代在 1964 年日本新潟地震以及同年在美國阿拉斯加地震發生大規模土壤液化災害後，開始引起相關研究人員之重視。在台灣的地震歷史上亦有多次土壤液化現象的記載(見表一)，根據相關文獻記載，台灣上一次因地震引發液化災害是在 1964 年 1 月的嘉南地震，該次地震僅記錄到於台南白河有噴砂現象產生，故長久以來相對於地震所產生其他的災害，土壤液化引致的災害並未受到國人的重視。

1999 年發生在台灣之集集大地震，則是台灣歷史上規模最大之土壤液化事件，涵蓋範圍包括台中縣、南投縣、彰化縣以及雲林縣等地(圖一)，造成房屋傾斜、沈陷及開裂、農田為噴砂所覆蓋、渠道淤塞、橋樑陷落錯位、路基開裂側移、地下管溝破裂上浮、河道護岸設施傾毀、以及碼頭沿岸沈陷等重大影響。因此有關土壤液化防災技術的提昇與推廣，不僅是重要且迫切的課題，更對目前災區之居民有實質重要的幫助。

行政院國家科學委員會、921 重建委員會、內政部建築研究所、經濟部水利處以及國內各大學學者與大地技師公會在地震後皆先後投入土壤液化問題之調查與研究。921 地震造成土壤液化災害相當嚴重，國科會首先對此展開調查，並交由國家地震工程研究中心負責執行。所進行調查工作內容包括：液化地區災害情形的調查、現場地質鑽探、現場試驗分析、液化潛能初步分析、未來新建建物設計及施工時應注意事項及處置對策建議等。國科會所進行的鑽探工作是以大範圍的地層條件調查為主，除作為本土液化發生原因學理上的研究以外，並可以提供技師們可能發生液化的土層深度位置資料，以便在進行基礎補強時能對整體地層條件有所掌握，作為選擇補強工法的參考。同時國科會亦委託台北市大地技師工會及台灣省大地技師工會在員林鎮、南投市及霧峰鄉等三地設置技術諮詢站，對於需要服務的民眾提供專業技術的諮詢與顧問，讓民眾瞭解土壤液化的成因與減少不必要的疑慮及恐慌，更重要的是協助受損房屋基礎補強時採用正確有效的處理方法。此外，921 重建委員會在「九二一地震土壤液化區防災規劃」計劃中設置地理資訊網站(lmap.org.tw)，提供受災地區之政府與民眾所需之液化災害防救相關資訊，包括 921 地震液化區相關的數化圖形、屬性資料及相關諮詢資訊，以利災區重建時規劃、設計、施工及管理時之參考。

## 921大地震液化災害案例分佈圖



圖一 921 大地震液化災害案例分佈圖(國家地震工程研究中心)

表一 臺灣歷年（1904年～1964年）地震發生之液化震災現象統計(取自吳偉特，1979)

地震時間	地震名稱	震源位置	地震規模(M)	震災地點	震災位置與震央之距離(km)	災害現象
1904年11月	嘉義地震	北港溪下流 (120.3°E,23.6°N)	6.5	新港附近	20	噴砂
1906年3月	嘉義地震	民雄附近 (120.5°E,23.6°N)	7.1	民雄附近	10	噴砂 噴泥水
1906年4月	白河地震	店子口附近 (120.4°E,23.4°N)	5.8	白河店仔口一帶	5	噴砂
1927年8月	新營地震	新營附近 (120.3°E,23.3°N)	6.5	八掌溪、曾文溪下游	20	噴砂
1930年12月	新營地震	新營附近 (120.4°E,23.3°N)	6.5	臺南市	30	噴砂
1935年4月	苗栗、臺中地震	關刀山附近 (120.8°E,24.3°N)	7.1	峨眉溪兩岸	30	噴泥水
1935年7月	苗栗地震	後龍溪北方 (120.7°E,24.6°N)	6.2	南勢溪鐵橋 新竹	20 25	地陷 山崩砂石
1941年12月	嘉義地震	嘉義東南約 (120.5°E,23.4°N)	7.1	清水潭	23	草嶺山崩
1951年10月	花蓮地震	新化附近 (121.7°E,23.8°N)	7.3	花蓮	15	地陷
		花蓮附近 (121.8°E,24.1°N)	7.1	花蓮	30	地陷
1951年11月	臺東地震	臺東附近 (120.9°E,23.0°N)	7.3	臺東	30	路基下陷
1959年9月	恒春地震	恒春東南方 (121.2°E,22.1°N)	6.8	屏東車城鄉	67	噴泥水
1964年1月	嘉南地震	臺南東北方 (120.6°E,23.2°N)	6.5	臺南白河鎮	60	噴砂

## 二、土壤液化的成因

### 2.1 何謂土壤液化

土壤液化是指排列鬆散且孔隙中充滿水的砂質土壤受到地震激烈搖動後，土壤顆粒排列趨於緊密而擠壓孔隙水，造成孔隙水壓增高，砂粒間的結合力因而減少甚至消失。液化發生時砂與水混合成為如泥漿般的液體，以至於失去支承上部結構物的能力，則結構物便會產生下陷或傾斜等現象。若孔隙水壓力過高時，便能使得砂土由地層中裂隙往上衝出地

面，此謂噴砂。土壤液化現象一般發生在河岸、海岸及舊河道之砂質地或海埔新生地，土壤液化後的現象有包括噴砂、流砂、地層下陷等。土壤液化為地震時所產生之即時現象，地震過後由於孔隙水壓的消散，土層將回歸穩定狀態。

淺層土壤發生液化後，其內之地下水可能因過高之孔隙水壓而衝破上方覆蓋土層，夾帶大量懸浮砂土抵達地表，並在噴水孔附近形成圓錐狀堆積(如照片一)，其噴砂型式受地層條件影響，視覆蓋土層厚度及透水性而不同，有些噴砂孔甚至會形成直徑數十公分之凹陷大洞。故土壤液化不一定伴隨發生噴砂現象，但有噴砂現象則表示下方土層必曾經發生液化。



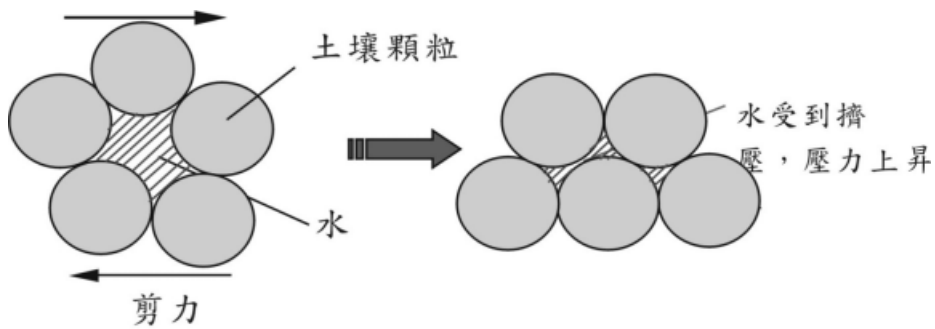
照片一 圓錐狀之噴砂孔

## 2.2 土壤液化現象之力學機制

一般飽和疏鬆砂質土壤之排列情形如圖二中左圖所示，此時土壤顆粒間排列較為鬆散，並且顆粒間的孔隙皆充滿水故稱為飽和狀態。雖然土壤顆粒在此階段處於較疏鬆的結構，但顆粒與顆粒之間仍有接觸力相互傳遞，基於摩擦理論此接觸力可提供顆粒間相互摩擦力作用，因此稱該土壤結構狀態具有一定強度(strength)。值得注意的是，存在於顆粒間孔隙的水亦會產生水壓力而推擠顆粒。為區分顆粒與顆粒間的相互作用力，以及顆粒受孔隙水之水壓力的不同，在土壤力學中稱前者為“有效應力(effective stress)”，後者稱為“孔隙水壓力(pore water pressure)”，而該二者之合者則名為“總應力(total stress)”。

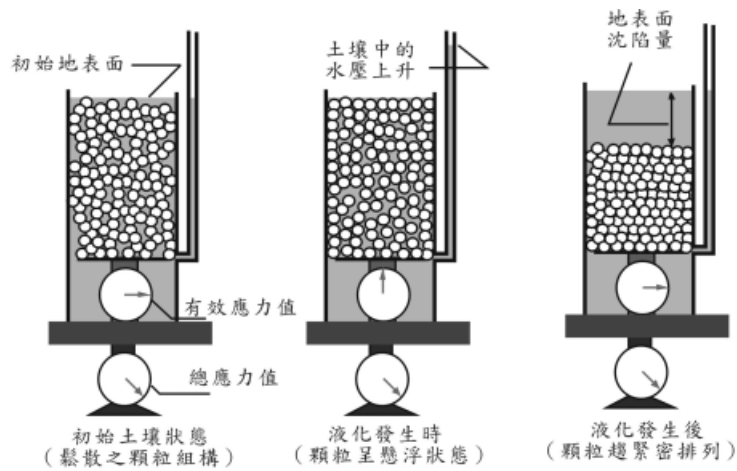
當飽和疏鬆砂質土壤受到地震力作用時，則土壤顆粒間彼此因受震動行為的影響而彼此錯動，使得其鬆散排列狀態改變，轉而成為另一排列較為緊密的結果如圖二中之右圖。在原先疏鬆結構轉變為緊密排列的變化過程中，顆粒間的孔隙空間明顯減少，而存在孔隙中的水將因此受到擠壓使得孔隙水壓上升。若土壤中無適當之排水路徑可迅速排出受壓的孔隙水時，則該孔隙水壓便持續存在土壤內部無法消散，將造成土壤顆粒亦受較大的孔隙水壓作用而迫使顆粒間相互的作用力減低，連帶導致顆粒間的摩擦力亦降低，而使土壤逐漸變為失穩的狀態。此種現象是導因於土壤內之總應力不隨地震作用而改變，亦可說土壤

內之總應力不變，當孔隙水壓上升後，有效應力便相對地減小。如果地震作用的時間夠長，孔隙水壓累積到等於總應力時，則有效應力便成為 0，表示此時土壤顆粒與顆粒之間完全沒有任何相互作用力存在，各顆粒便如同懸浮在水中一般，土壤原本具有之強度完全喪失殆盡，砂與水形成一混合體，故稱為「土壤液化」。



圖二 砂土受到剪力後孔隙水壓上昇之機制

由圖三可進一步說明土壤液化發生的過程中諸項變化情形。圖三(a)表示飽和疏鬆砂性土壤在受震前的初始組構，假設此時地下水位面與地表等高，地層中的水壓力等於靜止水壓力，砂土顆粒間雖為鬆散排列方式但顆粒間皆彼此相互接觸，所以圖中代表有效應力的磅秤顯示某一應力大小，而代表總應力的磅秤則為有效應力加上孔隙水壓力的總合。



圖三 液化發生過程變化示意圖 (Ishihara,1983)

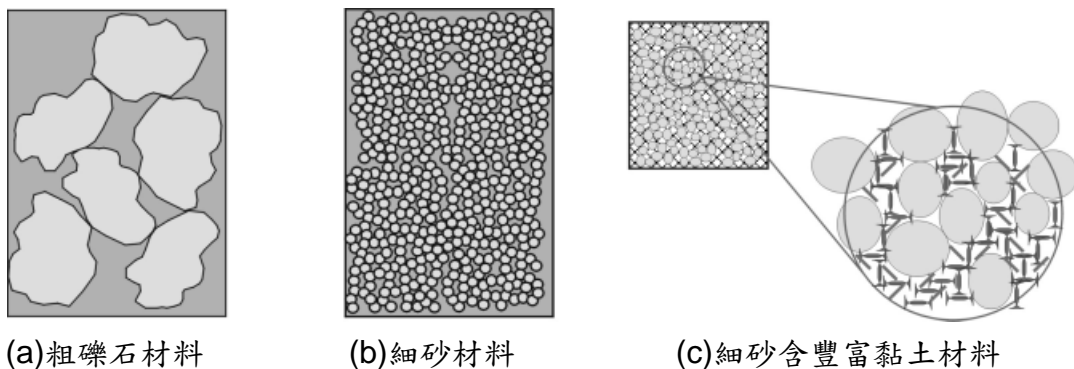
圖三(b)表示當地震力作用到孔隙水壓力等於總應力時，造成土壤顆粒間之有效應力減至為 0，因此土壤顆粒盡皆懸浮在水中而無相互接觸，同時土壤中之孔隙水壓亦明顯超出靜止水壓力甚多。當有效應力為 0 時土壤是處於無強度狀態，因此當土壤上方有結構物存在時將會因為土壤強度喪失而造成嚴重的傾斜或沈陷現象。

圖三(c)表示地震發生後受激發之孔隙水壓消散之後，土壤中之孔隙水壓又回到靜止水壓力的大小，但此時由於砂土顆粒的錯動後變得較為緊密導致地層發生下陷的情形。土壤

顆粒又再度彼此接觸而獲得有效應力，但緊密的重新排列使得整體土壤體積減少而產生相當程度的地表沈陷量。由圖三中同時可以發現，在地震作用的過程中總應力始終維持定值不變。

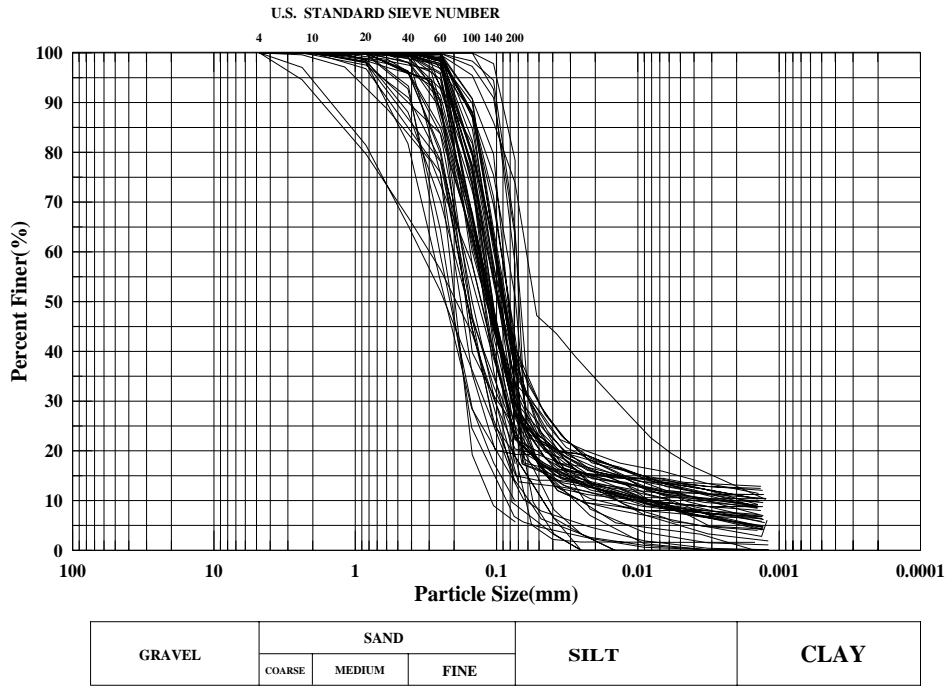
### 2.3 顆粒尺寸的影響

土壤材料需為特定尺寸才有可能發生土壤液化。土壤材料依顆粒尺寸可約略分為礫石(gravel)、砂(sand)、粉土(silt)及黏土(clay)四類。在粗顆粒的條件下，顆粒間的孔隙會較大，因此即使此類粗顆粒因地震作用而發生錯動重新排列，但受擠壓的孔隙水可由寬鬆的孔隙中從容地排出，而不致有水壓上升的情況(如圖四(a))；當顆粒尺寸由粗礫石縮小到細砂材料時，則顆粒間的孔隙因顆粒尺寸的縮小亦隨之減小，一旦土壤顆粒受震錯動時便會造成受壓孔隙水不易排出的問題，導致全面土壤液化的後果(如圖四(b))；如果土壤材料除細砂外同時包含更細小的黏土材料時，由於黏土顆粒比砂顆粒的尺寸小的多，黏土顆粒將會填充於細砂顆粒的孔隙中如圖四(c)。雖然因黏土顆粒尺寸更小會使得通水路徑更為困難，但此時因有黏土材料填充的緣故，故細砂顆粒受震後將較不會產生明顯的錯動變位，也就較不會過度壓迫孔隙水造成水壓上升。再則黏土顆粒間因有鍵結作用存在的特性而具有凝聚力(cohesion)，當孔隙水壓即使增加至相當於總應力時(有效應力為 0)，仍會因為凝聚力的作用而不致完全失去土壤的強度，而還能保有一定的承載力，也就較不會發生地表結構物沈陷的現象。由此可知，土壤液化問題僅會發生在特定的土壤材料上，此係顆粒大小使得通水路徑粗細不同，造成水壓上升情形不同。



圖四 土壤顆粒尺寸不同使得通水路徑大小有別

以 921 集集地震為例，根據在有土壤液化災害的中部四縣市出現噴砂現象的地點所採集的土樣，調查其噴出物之顆粒尺寸後整理如圖五。圖五所示為土壤粒徑曲線分佈圖，係表示各土樣中不同材料尺寸所佔的比例。由圖五顯示在 24 處不同地點所採集的噴砂土樣，其主要顆粒粒徑約在 0.1mm 左右，僅少部份比例為粉土材料，亦極少有中砂與粗砂材料被發現。此一特性可由前述之顆粒尺寸對受震後所造成孔隙水壓上升的影響加以解釋，同時亦說明土壤液化問題是需特定土壤材料組成才會發生。



圖五 921 地震液化噴砂土樣之粒徑曲線分佈圖

## 2.4 土壤液化發生條件

綜合以上之說明，可以瞭解到土壤性質是影響是否會發生土壤液化災害的首要因素，亦可稱會發生土壤液化的前提之一為該地土壤性質必須要含有疏鬆的砂質土層。其次，第二個必要條件為該地之地下水必須足夠充沛，使砂土層呈現飽和狀態。因為若非孔隙中充滿水的飽和狀態，則意含孔隙同時保有部份空氣存在(不飽和狀態)，如此在顆粒錯動變位時所造成之體積變化可由氣體所佔空間加以應付，也就不會有孔隙水受壓的情形產生。發生土壤液化的最後一必要因素為該地必須要發生足夠規模的地震力才會誘發液化產生，因為要使土壤顆粒產生足夠劇烈的變位量便需來自足夠的地震力不可。故鬆砂、飽和狀態與夠大的地震三者兼備才有引致土壤液化的條件。

## 三、土壤液化之災害

一般而言，土壤液化常見之地表表徵有噴砂孔與地盤沈陷以及地盤側移所造成的永久變位。發生土壤液化地區之上部結構由於振動直接引起的震害則很小，這是由於砂土液化後，減弱地震剪力波經過此砂土層向上的傳遞作用，限制結構基底所受之地震動的大小，進而控制由於振動所引起的震害，此種特性稱為「液化減震」。雖然土壤液化可能減低地表結構物所受的震動，但地層中液化的現象卻也造成諸多其他災害。

### 3.1 土壤液化致災之原因

土壤液化造成結構破壞的原因可約整理成以下四點：

1. 向上竄升的土水混合流使土體體積減少造成結構物沈陷。
2. 土壤中水壓過高使得土壤本身之承载力降低造成結構物沈陷。
3. 土壤中之強度減弱甚至喪失以致土體產生滑動現象，使得上部結構物發生側移、傾斜及沈陷等破壞後果。
4. 地震時土壤發生液化，過高之孔隙水壓力可能使地下結構物上浮。

土壤液化可引致房屋倒塌、傾斜、下陷、地板開裂隆起、側移等損害；橋墩傾斜、位移及橋面破壞；堤防、擋土牆及水邊結構物的崩塌與傾覆；道路與農田之開裂、塌陷及平移；埋設於地表下之管線、水箱或油槽等被抬出地面，發生破壞等。

### 3.2 建築物之沈陷傾斜

地震時，建築物常因基礎土壤液化承载力不足，同時也由於孔隙水壓消散後土壤壓密所造成之垂直變位，相對地表產生明顯的沈陷傾斜，照片二與照片三為集集地震台中縣太平市與霧峰鄉四德路建築物嚴重沈陷傾斜的情形。這些沈陷傾斜的民宅，若其結構體並無損害，則可藉千斤頂頂升扶正或淘土扶正的方式，使其恢復正常使用。

### 3.3 不同建物基礎型式之損壞型態

在台灣本島中南部地區的建物以其興建的時期與樓層數不同，而使用不同的基礎型式，也造成不同的損壞型態。以較為老舊之一樓民房而言，其基礎型式或為土角厝或磚造基礎，由於房屋荷重皆經由牆體傳遞至其下之牆基，其基礎地層產生液化時常出現牆體整體下陷，而導致房屋傾斜或與鄰近地面產生明顯高差之現象。沿房屋四周外緣則有噴砂之現象，亦有造成屋內外地坪拱起開裂與噴砂現象。由於此類建物牆體無法承受拉力，故當基地局部地層有所差異或結構物荷重分佈不均時，土壤液化將使其基礎產生差異沈陷，而使建物應力重新分佈，導致牆體開裂或房屋整體倒塌之現象。

早期興建之二、三層透天厝一般乃採獨立基腳。當基腳附之淺層地層發生液化時，由於基腳係建物荷重集中位置，其下方地層承载強度大幅降低，乃造成明顯之差異沈陷而導致房屋之破壞。較新之民宅多採用連梁(或聯合)基腳，因基礎整體穩定性較佳，液化僅造成房屋之局部傾斜。此種基礎型式之建物地坪大都受液化所產生的上昇上壓之頂升而拱起或破壞，亦伴隨大量噴砂之現象。

新式四層樓以上之公寓則多採筏式基礎或版式基礎。由於基礎之剛性較大，抵抗液化時所產生之上昇水壓或差異沈陷之能力亦較佳，故此類建物較無明顯之液化損害。但若地下室開挖擋土鋼版樁時未經夯實處理時，導致地下室與原地層並未有接續之狀況，則會沿地下室外緣出現噴砂現象。

### 3.4 側向擴展及流潰

對傾斜地層而言，地震發生時底部之液化層所能提供之抗剪力相當低，當地表面坡度



小於 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 時，於是上覆非液化層在沿液化界面因自重及水平向地震力的作用下產生滑動現象，且伴隨一系列之相互平行的地表裂縫及台階式錯動，稱為側向擴展(lateral spreading)。此種破壞型態較常見於有地形高差條件之微傾地盤，如濱河、濱海之路基或高灘地、河岸、湖岸、海岸、渠岸與窪地，如照片四所示。若滑動土體之表面坡度大於 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 時，則土體滑移位移更大，稱為流潰(flow failure)，通常發生在路堤、土壩及邊坡土體受震問題中。

當地形高差之場址發生土壤液化時，常會發生地盤流動或側移，若有地下基礎置身其中，則會遭受地盤流動之擠壓，而產生破壞。照片五則為集集地震霧峰鄉大安醫院地下室外牆遭受地盤流動壓力作用損害之情形。要避免此種地盤流動擠壓力所造成之損害，除儘量消除地形高差外，亦可在地下基礎耐震設計時，將此流動擠壓力考慮進去。

### 3.5 港灣與河堤護岸之破壞

臨水擋土構造物於地震作用時，可能由於後方背填砂土液化所產生之動態土壓與側向水壓力上升，同時又配合基礎下方砂土液化造成承载力下降等不利條件，使擋土構造物發生傾斜平移之破壞。照片六為南投縣草屯鎮隘寮溪河堤護岸設施破壞情形。

類似的災害也發生在港灣碼頭的護岸設施，照片七為集集地震台中港 1-4A 號沈箱碼頭護岸受損之情形。該案例是因為沈箱護岸於受震時，因背填水力抽砂回填土壤液化，使動態土壓變大，致使沈箱產生過量的側移傾斜，造成碼頭後線各種設施的損害與嚴重的地盤沈陷(照片八)，使碼頭喪失運輸功能。預防之道除大幅提高沈箱之設計地震力外，亦可對沈箱後之背填土進行地盤改良，使其不發生液化，以減小沈箱受震時之動態土壓力。

### 3.6 地中維生管線之破壞

液化地盤中之維生管線，易因差異沈陷或地盤流動側移而扯斷，形成水管與瓦斯管線斷裂或接頭鬆脫、電線斷路以及排水溝渠毀損等問題而產生重大的損失。照片九為建築物與週遭地盤之差異沈陷過大，使由週遭地盤進入建築物的管線剪斷或拉斷的情形。此外，地中淺埋之維生管線或其他埋於地中之輕型結構物，可能會因過大之孔隙水壓力而上浮。減輕此類損害的方法，除在維生管線的接頭採用可忍受較大差異變形之柔性接頭外，於可能上浮地段可進行地盤改良，或設計抗浮地錨或抗浮樁。

根據集集地震後土壤液化及下陷災害調查結果，將土壤液化引起各類型災害加以統計，結果如圖六所示，其所造成之災害主要仍以房屋損壞為大多數。一般而言因房屋分佈情形較其他結構物密集，因此其受液化損害所佔比例亦較高。如單就房屋損害情況分成倒塌、傾斜與下陷三種類型加以比較，由於土壤液化會造成土壤承载力降低，故對於房屋之影響主要為下陷，次為傾斜，直接造成房屋倒塌之狀況較少發生。其中倒塌部份包括調查時現場房屋已拆除者，故受震時是否完全倒塌並不可知，惟彰化縣因液化地區多為一樓平房，勘災調查時部份民眾已將房屋拆除，於損害分類時此類房屋列為倒塌，以致於該縣之

房屋倒塌統計資料偏高。

綜合集集地震事件中土壤液化之各項災害所作調查結果，可以圖七作一整理性之說明。調查發現部份地區發生水井被噴砂所填充淤塞，亦有噴砂衝破地坪而堆積在民房屋內，一般在建築物的周緣常見地表噴砂的痕跡，較高層的建築物則易產生傾斜與沈陷，有部份地下沈埋結構物受浮力作用而露出地表，部份重要設施則因採用抗液化能力較佳的基礎而未受震害。



照片二 台中縣太平市因土壤液化引致之地盤沈陷



照片三 台中縣霧峰鄉四德路建物傾斜情形



照片四 土壤液化引致之地盤側移



照片五 霧峰鄉大安醫院地下室外牆受地盤流動壓力作用之損害情形



照片六 南投縣草屯鎮隘寮溪河堤護岸設施破壞



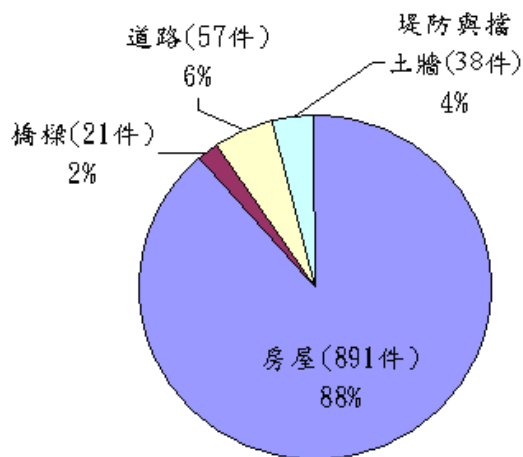
照片七 集集地震台中港1-4A沈箱碼頭護岸之受損情形



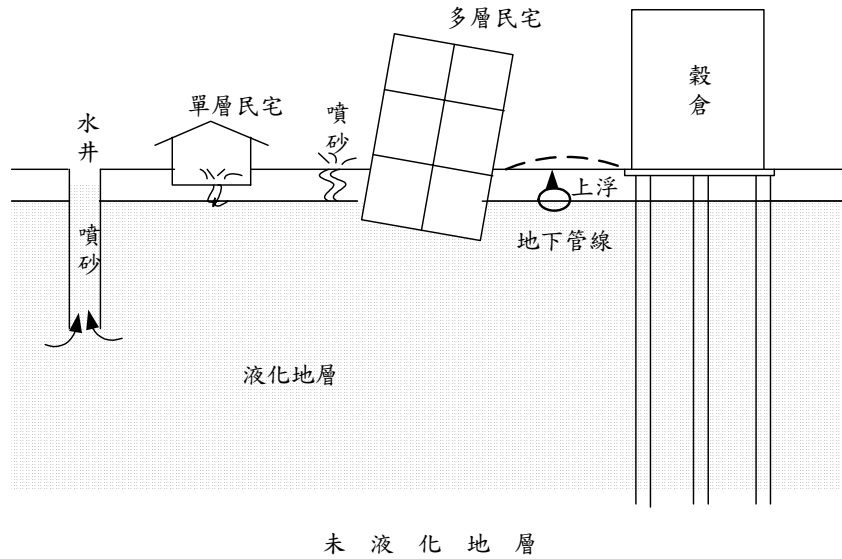
照片八 台中港碼頭護岸嚴重地盤沈陷之近照



照片九 南投市新興路因液化房屋下陷導致水管外露



圖六 液化造成各類結構物損害分佈圖



圖七 921 地震土壤液化對結構物基礎之影響

#### 四、土壤液化評估方法

對於全面性液化災害的評估必須包含三要素：(1)是否為液化敏感性土壤 (susceptibility)？(2)有無引發液化可能 (initiation)？(3)液化發生是否會釀成災害 (effect)？此三要素之第一項係與地質條件有關，可經由各種調查方式進行液化評估；第二項要素則是牽涉到地震發生分佈區域，或是其他可能引發土壤液化的震動來源，如爆破；第三項要素則是探討土壤液化發生後所可能造成的災害結果。本文中所指的土壤液化評估方法主要是就第一項進行討論，但就工程師的角色而言，重要的並非評估一地是否會發生液化，而是一旦發生液化問題後會對該地之結構及鄰近設施會造成何種程度的傷害。

##### 4.1 土壤液化評估之地質特性

對於是否屬於土壤液化敏感性土壤，可依調查尺度大小及精度之要求而分為三個等級。第一級是指由地質與地形特性加以研判，若依地質條件加以分類，可將各式地質特性概略分為液化可能性高者如今河道、古河道、低濕地、海埔新生地以及砂丘間低地，有液化可能者如扇形地、自然堤防、砂丘、洪積平原、濱海地區及其他平原區，以及液化可能性低者如台地、丘陵及山地。就此而言，台灣地區無論是中部嘉南平原、高雄平原或東部蘭陽平原等地，均為人口稠密地區，其地層皆屬沖積土層，地下水位甚高且含大量砂性土壤，因此在遭逢大地震時發生土壤液化現象之機率相當大。事實上在實際例證中顯示，發生過液化或類似地層條件者在未來地震中仍有液化可能。

第二級液化評估收錄航照圖判定地形及地質單元、現地勘查判定液化敏感性、由航照圖描繪最近經歷洪水及沈積的範圍以及訪談當地居民以瞭解過去地震時該地區之液化情形，其調查內容較第一級者深入仔細，但其調查範圍則不易如第一級廣泛，而是僅能在小

區域進行。

第三級液化災害評估需要進行特定地表下的調查以及現場與室內試驗，以推估地層土壤之液化阻抗，以及地層土壤在地震中可能導致液化之最大或等值反復剪力，再由上述兩點推估該場址之液化潛能。此一等級的調查可謂最完整亦最可靠，但其所費也極為可觀，通常在選定的工程場址才會進行現場地表下的調查甚至室內試驗，而其評估的意含則敘如 4.2。

#### 4.2 工址液化潛能之評估

利用現場地表下調查資料評估特定工址液化潛能的方法很多，較常用者包括利用工程地質鑽探時之標準貫入試驗(standard penetration test, SPT) 所得之貫入打擊數  $N$  值，或是利用電子貫入錐試驗(cone penetration test, CPT)，亦有利用量測地層中剪力波速(shear wave velocity,  $v_s$ )的方法，並且每一種調查方式又發展出各家學說不同的評估流程及考量因素，因此容易使人分不清何者最佳？

在不細分各家學說細微處的差別時，各種土壤液化評估方法基本上都具有幾項相同的概念。首先利用調查所得之地層資料(如貫入打擊數  $N$  值、電子貫入錐之阻抗、以及地層剪力波速分佈)求取該工址地層中各深度之反復抗液化強度(cyclic resistance ratio, CRR)，即代表土壤本身對抗地震作用時所能提供之抗液化能力。另外配合該工址的設計地表的最大加速度(peak ground acceleration, PGA)，可求得地震時該深度處土體所受到反復剪應力比(cyclic stress ratio, CSR)，表示在假設的地表震動強度下地中土體所將承受的作用力。將反復抗液化強度除上反復剪應力比即可得出該土體之抗液化安全係數，亦即  $FS=CRR/CSR$ 。

工程師利用安全係數(factor of safety, FS)來說明土體抗液化強度及地震時反復剪應力比的大小關係。若安全係數愈小，則表示該深度的土壤非常可能發生液化，反之安全係數愈大則便較無液化之危險。此外，愈淺處的土壤發生液化或液化砂層的厚度愈大，對地表建物的影響將愈大，造成的損失也愈大。因此工程師最後通常會綜合各項因素，而對工址給予一土壤液化危害度的描述。

### 五、土壤液化復建與對策

經土壤液化損害之結構物，若破壞情形嚴重時便需拆除重建，倘使損壞情節輕微時則可考慮予以整修。另在新建工程中面對有土壤液化之虞的場址時，則需採取有效的防治措施以避免日後地震時土壤液化問題發生，或是防範因土壤液化發生而造成重大損失。

#### 5.1 土壤液化災害之復建

地震後短期對受損建物的處置應依各建物受損狀況由專業技師負責進行修復補強工

作。一般如果結構受嚴重破壞，或是經評估修復費用過高時，則應該予以拆除重建，如果主要結構沒有損傷，可將傾斜下陷之建物以灌漿、頂升及基地土壤改良等方法加以扶正、抬高及補強。

頂升工法又稱托底工法，該工法適用於狹長型獨棟建築之扶正，在集集地震之土壤液化災區使用甚多。此工法係利用千斤頂將建築物抬起，然後填補抬起段的基礎空間，以達扶正之目的。欲將建築物抬起的關鍵在於地盤如何提供充份的反力，使千斤頂能有效的抬起上方之建築物，在若干個案現場發現許多千斤頂在施力的過程並未能抬起房子，反而因地盤不夠堅實而在施加反力時反使千斤頂往下陷。欲使千斤頂能提供有效反力可用的輔助方法甚多，例如增加千斤頂下方之受載面積或將承載地層加以改良或打設微型樁等以提供足夠支撐反力，至於採用何種方法較佳，應視該工址之地層條件及周圍施工環境而定。該工法之扶正效果大致皆可令人滿意，扶正後建築物之傾斜角大都可達小於 1/200 之標準。

灌漿工法可依採用之灌漿壓力分為低壓灌漿及高壓灌漿兩種，一般低壓灌漿採用之壓力大都小於  $20 \text{ kg/cm}^2$ ，低壓灌漿常用於止水或建築物扶正，至於高壓灌漿通常係指灌漿壓力大於  $150 \text{ kg/cm}^2$  以上，部份甚至高達  $300 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ ，其原理利用高壓切削土壤的同時將水泥漿液和土壤混合形成改良體，高壓灌漿通常用於軟弱地層之改良，以形成一具有相當強度之灌漿改良體為目標。在實際案例中曾有以灌漿工法進行建築物扶正作業，因事前調查不足，現場施工作業又缺乏監測，而發生所澆灌的漿液並非注入預期的位置，反倒自基地以外地區冒出地面，甚至造成鄰房受到毀損的工程災害。故欲使灌漿工法達到其預期的目的，絕對要有良好的事前地質調查及周詳的細部灌漿作業計畫，包括配比、灌漿壓力、施灌順序與灌漿範圍等，同時要配合良好的施工品質，並在施工中隨時監測以檢討其扶正效果，若效果與預期情況有出入時則需調整其施工方法。

整體而言，土壤液化的復建補強的旨在於提昇土壤抗液化能力、恢復基礎本身之安全穩定及構造性能、確保上部構造之安全及正常性能及維護整體構造之使用機能。但實際施作時由於基礎構造受損情形不易明確查知，及欠缺補強之管理法規及技術規範與標準等問題，使得修復工程並不容易。一般在選擇補強工法時往往會考慮先由以往工程案例經驗考慮技術可行性，同時配合現地層狀況瞭解所欲處理的範圍及深度後選用適用的工法。費用的高低與工期的長短通常也是重要的決定要素，至於補強後的長期效果，以及未來再次地震事件發生時之抗液化能力則是整體考量中不可忽略的一環。

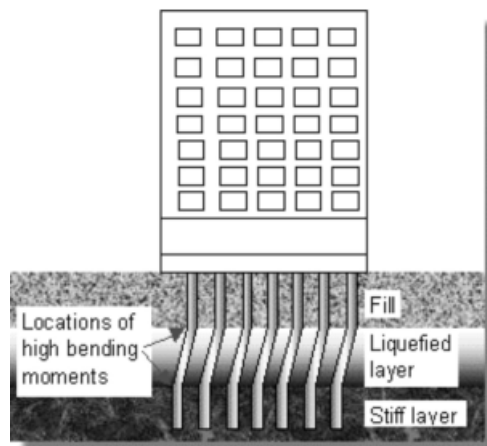
## 5.2 防治土壤液化之對策

經評估有液化可能的工址，可經由土壤改良手段來提高砂土層的抗液化能力，以改變飽和疏鬆砂質土壤的動態性質，增加地盤的支承力。針對發生土壤液化原因，只要利用工程手段，來提高土層緊密程度，就可以減少地震時孔隙水壓力的累積上升量，另外縮短孔隙水壓消散的距離，也可以減少孔隙水壓的累積量，此二種改良方法皆可有效減少有效應

力之降低，便也就降低土壤液化的可能性。

常用的土壤改良方法有土壤置換法、動態夯實法、擠壓砂樁、礫石樁，深層或淺層震動工法，爆破工法等，這些方法適合於基地範圍開闊廣大，尚未有建物的工址，並且大規模施作時成本較低。這些工法都有增加砂土密度的功效，而採用礫石樁與擠壓砂樁將可改善土體中超額孔隙水壓的消散能力。雲林麥寮六輕填海造地工區，就是利用動態夯實法及礫石樁來進行土壤改良，並且在集集地震事件中發揮成功的作用。對於近地表的軟弱砂土層，也可藉混合水泥系材料拌合現地材料回填，深層土層則可以利用粉末或漿液等改良材料與原地土壤攪拌，藉由化學固結作用來改良土壤，以提高土壤顆粒間之膠結力。

至於建築物基礎設置連續壁或其他特殊基礎型式，以限制土體變形的能力，將可抑制地震來臨時地盤引致之剪應變，從而限制液化之可能性及砂土流失之可能性。另外也可以使用特殊基礎型式來避免液化，例如使用樁基礎，但必須考慮砂土層液化時對樁基礎的影響。液化會造成樁基礎承受相大的側向荷重，當基樁貫穿液化層達到堅硬底層時，不僅只提供垂直向的承載效果以防止上部結構物發生沈陷，同時亦需考量到發生液化時可能產生之水平向變位而導致之彎矩作用(如圖八)。樁基礎在作為液化層支承考量時需要同時提供抗彎矩能力，可以較大樁徑或是埋設鋼筋加以提供，同時亦需注意樁帽接頭處允許部份柔性變形能力。



圖八 樁基礎在土壤液化時承受彎矩之示意圖

總括言之，液化防治的對策在於地盤改良與良好之基礎結構。在具液化潛能地區務必於建物設計施工前應進行地質調查，因液化潛能高低與局部區域之土層分佈變化有密切之關聯，故應針對個別工程進行鑽探調及液化潛能評估。再者，對於具有高度和中度液化潛能之土層，則應評估建物受地震作用時之可能影響程度，並且應視地層特性、建物型式和重要性、以及地層可能液化的程度，進行必要之抗液化處置措施。此外，對於地下結構較深之開挖，鼓勵採用永久性擋土結構，其擋土結構深度宜貫入非液化土層中。高度液化潛能地區採用淺基礎之建物，可優先考慮筏基，至少應採用地梁且應加大基礎面積，減少土壤液時發生不均勻沈陷和傾斜情形，以及危及結構安全之可能。較高樓層之建物，宜先進

行地盤改良，否則應加深筏基或考慮其他抗液化對策。筏式基礎若位於地下水位以下或接近地下水位，應考慮能承受地震時額外產生之水壓，避免發生破裂噴裂，進而造成建物沈陷。同時亦應考量建物之抗浮安全。

集集震災中部份擋土牆之倒塌與當時用來設計分析之地震力係數不夠有關，但有些擋土牆之傾倒破壞係因牆後土壤液化而將擋土牆推倒。未來重建時，應考量提高震災區之擋土牆的設計地震力。但在提高設計地震力後，所需配合執行之擋土牆措施加強和安全監測系統之設置等，亦是待解決的課題。

### 5.3 液化復建之經費

根據一項針對員林地區因集集地震液化災損與復建之調查研究顯示，當地主要的復舊方式可分為四種：修整地坪、灌漿扶正、頂升工法及灌漿穩固基礎。獨立基腳之基礎型式者發生沈陷時常使得一樓的地坪相對抬升造成破裂，因此其建物之修復方式多為修整地坪。調查中同時發現基礎型式為地梁基腳者，則一樓的地坪無破裂的現象，僅在騎樓或屋前庭院的地坪需要修整。灌漿扶正與頂升工法則多用在五層樓以上之建物使用筏式基礎者，此類建物が受液化災害時多發生沈陷及傾斜，同時亦需要修整騎樓下之地坪破裂問題。

該調查研究發現在修整地坪方面的費用不超過 40 萬元，但仍依材質良劣而有不同，亦有 10 萬元左右即可修復完成。頂升工法及灌漿扶正工法一般所需費用都會高於 50 萬，自數十萬元至數百萬元皆有，基本上其費用多寡與樓層數及樓地板面積有關。

## 六、結論

土壤液化一般在地震災害較少造成生命傷亡，但仍會導致相當嚴重的財物損失，更重要的是土壤液化是可以防患避免的，只要落實專業之鑽探調查及設計施工等觀念，便可有效遠離液化災害。在對可能發生液化地區之新建工程，對土壤液化及其災害之防治，在設計及施工時應有充足的考量與對策，如基地土壤之改良或使用深基礎等。將來應落實地質鑽探、調查及分析，劃定可能液化地區，並經由集集地震土壤液化案例所得經驗，訂定或修正現有土壤液化評估準則，以提供作為未來更準確評估土壤液化之可能。

## 七、參考文獻

國家地震工程研究中心，「九二一集集大地震全面勘災報告—大地工程震災調查」，民國八十八年十一月。

營建自動化策略聯盟網站資料 (<http://casa.ntust.edu.tw/>)。

九二一地震土壤液化區防災規劃網站資料(<http://lmap.org.tw/>)。



台北市大地工程技師公會、台灣省大地工程技師公會，「液化區基礎修復補強工法對策說明書」，民國八十九年九月。

國立中央大學土木系，教育部「土木工程防災教育」改進計畫，土木防災教材網站資料 (<http://www.cv.ncu.edu.tw/plan/index.html>)。

溫惠鈺，「地理資訊系統應用於員林地區液化災損及復舊調查之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，民國九十一年六月。

社団法人地盤工學會，「地震による地盤災害に関するゾーニングマニュアル」，国際地盤工學會・地震地盤工學委員会，1998。