

# 集集地震土壤液化總評估研究

黃安斌 / 交通大學土木工程系

## 一、前言

台灣中西部地區部分砂土在集集地震期間有明顯液化跡象，並導致臨近結構物的破壞。發生液化的土壤包括台灣中西部常見之粉土細砂與夾有砂土之礫石。本研究計畫於民國八十九年八月開始，整合國內七所大學相關系所之學者，分成十數個子題，對台灣地區顆粒性土壤液化行為與發生液化之可能性（潛能）進行綜合評估的研究，並對現有分析方法提出必要改進建議。為建立長期觀察與研究所需之資料庫，本計畫也選定數處試驗站進行一系列現地試驗、取樣及室內試驗，透過這些試驗來確立試驗站址之大地工程性質。在試驗站也將安裝強震儀及孔隙水壓監測系統，以便未來進行土壤液化行為之觀察。

## 二、土壤液化的評估

土壤液化是飽和的（浸泡在水裡，例如在地下水



圖一 彰化伸港鄉高灘地噴砂孔（黃俊鴻攝，摘自九二一集集大地震大地工程震災調查報告）。

位以下，土壤顆粒間之孔隙為水所填滿）顆粒性土壤例如砂土、粉土甚至於礫石受剪應力影響而使土壤內之水壓增加，當此水壓大到足以抵銷土壤顆粒間之接觸力時，會發生有如土壤顆粒漂浮於水中而流動的現象，此一現象我們稱之為液化。在手掌上放一些泡水的砂土，往復搖動手掌數秒鐘後，手中的砂土就會因液化而流動。地震時整個地殼劇烈的往復搖動，這就可能會造成大面積砂土層的液化。砂土液化時會失去其部分或全部之強度，隨著強度降低會發生砂土與水湧出地面之砂湧（圖一）、地面破裂（圖二），乃至於砂



圖二 中二高名間收費站路堤開裂噴砂（王明輝攝，摘自九二一集集大地震大地工程震災調查報告）。



圖三 台中港三號碼頭後線回填區嚴重下陷 (簡連貴攝, 摘自九二一集集大地震大地工程震災調查報告)。

土本身或建築於其上結構物之沈陷或傾斜 (圖三、四)。但是並不是只有像地震一樣往復搖動的力量才能使土壤液化, 而土壤液化後也不一定會向水一樣完全失去強度。這些細節問題已超出本文範圍, 因而在此不予討論。

國際學術界對於土壤液化之研究主要來自美國與日本。一九六〇年代中期至一九七〇年初, 美國西部與日本都曾發生嚴重之地震與土壤液化, 更促成了這兩個國家正視土壤液化問題, 並投入大量的資源從事相關研究。目前在評估土壤受動力載重行為及預估砂土液化潛能常用之方法與理論, 大部分都是根據這些年代的研究基礎。這些方法大致將液化潛能的問題分成需求與供給兩方面來看, 所謂的需求面是當地震發生時, 地層內可能引發之剪應力大小及往復震動次數, 兩者均會隨地震之強度而增加。供給面是指地層



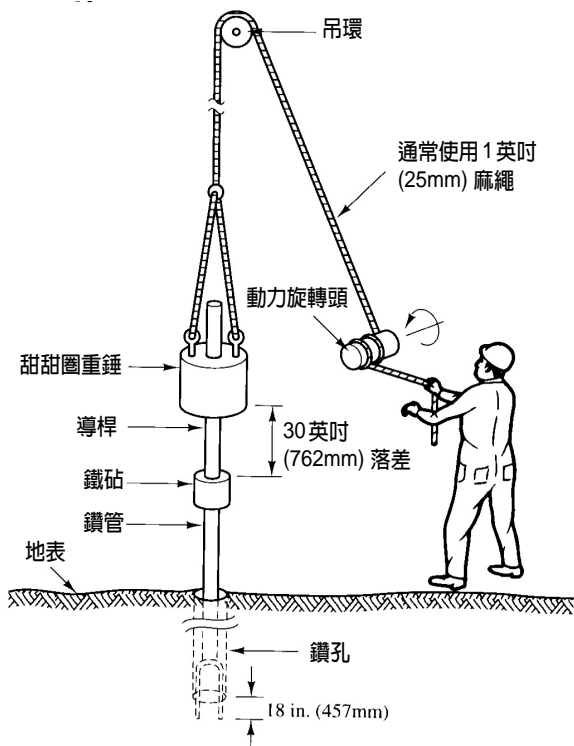
圖四 台中霧峰鄉太子城堡因土壤液化而導致房屋傾斜(褚炳麟攝, 摘自九二一集集大地震大地工程震災調查報告)。

內土壤在既有之密度與圍壓情況下, 所能承受之剪應力及往復震動的次數, 密度越高則承受剪應力大小與往復震動次數之能力越強。需求面的分析應考慮附近斷層之特性、位置以及地層之力學性質。供給面的分析可以從地層內取得砂土試樣後, 在試驗室進行往復受載之剪力試驗, 來決定其抗液化能力, 或者在現地進行試驗, 以間接或經驗的方法來推估地層內砂土抗液化能力。

### 三、方法

本整合型計畫的重心主要在供給面, 也就是針對台灣中西部常見之粉土細砂與礫石進行與評估其抗液化能力之研究。根據文獻可知砂土之動態行為受砂土顆粒結構、粒徑分布、礦物含量與年歲等因素之影響非常明顯 (Ishihara, 1993)。因為砂土礦物的含量與沉積環境均有差異, 所以國外提出之試驗數據對國內砂土之適用性必須進一步評估確認。若要以室內試驗的方法來評估現地砂土液化行為, 則必須採用非擾動性之試體才有意義。常用之冰凍取樣方法, 是將低溫之鹽水或液態氣體經由金屬管線在地下水水位下取樣區域內循環, 將砂土冰凍, 然後以薄鋼管做成之薄管取樣器, 將約 70mm 直徑、1m 長之冰凍砂土試體取出, 所得試體一直保存於薄鋼管內, 並保持冰凍直到試體安裝於試驗室內之儀器後才可解凍。冰凍取樣法非常昂貴, 所以至今以非擾動砂土試樣之試驗數據很有限。

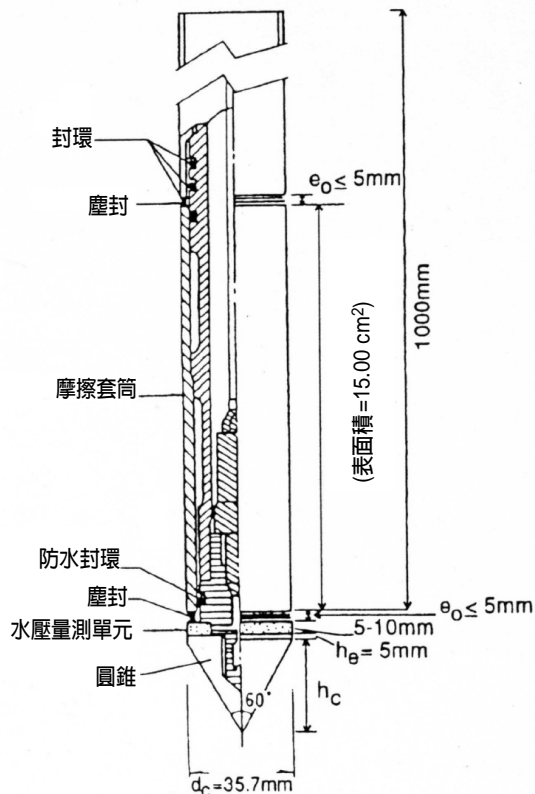
現地試驗可以避免使用昂貴之冰凍取樣。最常用的現地試驗方法包括標準貫入試驗 (standard penetration test, SPT)、圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT)、與剪力波速試驗。標準貫入試驗是使用 63.5kg 重錘以 760mm 落差之能量來重複打擊鑽桿頂端, 此打擊能量經由鑽桿傳遞至位於鑽孔底部與鑽桿連結之 51mm 外徑土壤取樣器, 直到此取樣器貫入砂土 450mm, 每 150mm 紀錄一次打擊數, 最後 300mm 打擊數之總和稱為 N 值 (圖五)。圓錐貫入試驗是將一直徑 35.6mm 錐尖夾角 60°, 內部安裝有壓力感測器之圓錐貫入儀以每秒 20mm 之速度貫入砂土, 此時錐尖



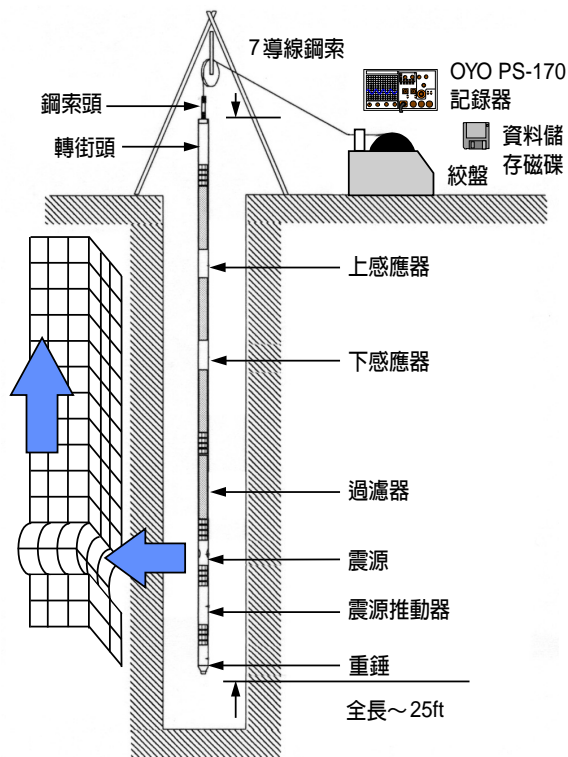
圖五 標準貫入試驗示意圖

內感測器所量得之土壤阻抗壓力稱為貫入阻抗， $q_c$ 。圖六顯示標準圓錐貫入儀之剖面圖。剪力波速之量測可以在鑽孔內或地表產生剪力波震源，然後於地層內以加速度儀在與震源不同距離的位置，感應震動波之到達，利用加速度儀之間距與震動波到達時間差來反算土層內之剪力波速， $V_s$ 。圖七是以懸吊於鑽孔內之震源與加速度儀來量測波速裝置之示意圖。此裝置同時可以量測壓力波 (P波) 與剪力波 (S波) 因此稱為懸吊式 P-S 量測儀。但土壤內於地下水位以下所量得之壓力波只反應水之特性，無助於分析砂土抗液化能力。

文獻中已有許多經驗的法則根據標準貫入試驗之 N 值、圓錐貫入試驗之  $q_c$ 、或  $V_s$  來決定砂土抗液化強度 (Youd and Idriss, 2001)。這些經驗法則之建立大多是根據現有試驗結果與液化行為資料庫進行標定與歸納後所提出，因此其適用性常受限於試驗設備、程序與土壤行為之區域性。現有國外所提出之試驗數據大部分是在低細料含量或乾淨石英砂內所得之結果。本研究針對台灣西海岸非常具有代表性之雲林麥寮粉土細砂所進行一系列之試驗，指出麥寮細砂含有雲母與



圖六 標準圓錐貫入儀示意圖 (ASTM D5778)



圖七 日本 OYO 公司之懸吊式 P-S 波量測系統

黏土性礦物，其壓縮性遠高於乾淨之石英砂，因此在砂土行為與現地試驗結果分析上，必須考慮這些差異性之存在，才能得到適當結果 (Huang *et al.*, 1999)。標準貫入試驗可能是國際間最常用之現地試驗方法，但是國內標準貫入試驗所使用之夯錘屬於甜甜圈式，效率低且不穩定，因此在歐美與日本已不再使用。國內機具試驗所得標準貫入試驗之  $N$  值，能否直接適用於國際文獻中所提之經驗法則也需要進一步評估。

關於礫石性砂土之動態行為，在國際學術界報導較少。礫石性砂土之液化行為也大多採用室內動態剪力試驗以及現地大型之貝克貫入試驗 (Becker Penetration Test, BPT) (Harder and Seed, 1986) 來評估。貝克貫入試驗是美國加州大學 Seed 教授為礫石現地探勘而研發。使用打擊能量為 11.0 kJ 之柴油打樁錘，來打擊 140mm 到 230mm 外徑之厚鋼管以貫入礫石土壤。貫入時鋼管之底部可以開口，配合高壓空氣將鋼管內之碎屑沖至地表做為取樣。或者以閉口之方式將鋼管貫入，同時紀錄每貫入 300mm 所需之打擊數  $N_b$ 。受到顆粒尺寸的影響，進行礫石性砂土的室內試驗必須使用大型試體。同時因為礫石顆粒間孔隙很大，試驗時包在試體外之橡皮膜容易鉗入孔隙內而影響試驗結果。台灣中部常見之礫石比較接近卵石，其粒徑比前述所報導之礫石為大。國內關於礫石性砂土之動態剪力試驗數據非常有限，尤其是使用非擾動性試體所做之試驗。貝克貫入試驗則尚未有在國內使用之經驗。本研究對於礫石液化之研究僅限於貝克貫入試驗之使用。

## 四、目的

本研究之目的包括：(1)集集地震大地工程探勘資料彙整與分析。(2)建立適用於台灣西部砂土，使用標準貫入試驗、圓錐貫入試驗與剪力波速評估其液化潛能之方法。(3)嘗試使用不同方法於地下水位以下取得非擾動性之砂土試體。(4)對非擾動性試體進行一系列室內試驗以決定其動態參數。(5)經由比較室內試驗與現地試驗結果，建立台灣西部砂土動態參數與現地試驗間之經驗關係。(6)在礫石層內進行一系列貝克貫入

試驗，建立使用貝克貫入試驗評估其液化潛能之方法。

## 五、內容

本計畫之工作內容共分成：集集地震大地工程探勘資料彙整與分析、試驗站現地試驗、試驗站取樣及室內試驗、試驗站監測系統之安裝與地質背景調查、液化潛能分析方法之改進等五大項。

### (一)集集地震大地工程探勘資料彙整與分析

集集地震後，國家地震研究中心及其他研究單位曾對台灣中西部地區土壤液化之現象進行探勘。因為時間緊迫，這些探勘目的比較偏重全面性土壤液化現象之觀察與紀錄。本研究將以這些探勘資料為基礎來確認試驗站位置，以及各試驗站將進行試驗、分析及監測之內容。試驗站規劃有四處，其選擇是以土壤行為具有代表性，同時可以長期進行監測、現地試驗與取樣為主要之考量。試驗站一至三位於中部地區。試驗站一以調查礫石性砂土之液化為主。試驗站二以粉土細砂液化行為之探勘為主。試驗站三以未液化行為之粉土細砂探勘為主。試驗站四位於嘉南地區，八掌溪河口地帶常發生液化之區域，其主要功能是安裝監測儀器以便於長期監測。

### (二)試驗站現地試驗

本研究將在試驗站二、三、四進行標準貫入試驗、圓錐貫入試驗與剪力波速量測，並與土壤液化之紀錄交叉分析，對現有使用標準貫入試驗、圓錐貫入試驗與剪力波速評估台灣地區砂土液化潛能方法提出修正。試驗站一將進行貝克貫入試驗，因為貝克貫入試驗之套管遠比標準貫入試驗裂殼取樣器之直徑為大，所得結果比較不受礫石顆粒尺寸之影響。因此使用貝克貫入試驗之  $N_b$  值，結合砂土標準貫入試驗使用  $N$  所累積的經驗，來估算礫石液化潛能應該有相當高之可行性。

### (三)試驗站取樣及室內試驗

嘗試使用拉福爾取樣器 (Laval Sampler)、沙冰取樣器 (Slush Sampler)、及冰凍法，在地下水位以下鑽



圖八 往復式三軸試驗儀

取非擾動試體。Laval Sampler 原本是加拿大 Laval 大學為靈敏性黏土取樣（試樣直徑 20 cm）而研發，但是為地下水位以下具有相當程度凝聚力粉土細砂之取樣也有成功的經驗。Slush Sampler 俗稱「Frostie」，在薄殼取樣器開口處後方安裝液態二氧化碳管路，適用於地下水位以下乾淨無凝聚力砂土之取樣。Slush Sampler 在常溫下貫入砂土內，然後透過一循環管線，將液態二氧化碳從地表導入取樣器開口處後方之管路，使試體底部冰凍，而將其餘之砂土試樣箝制於取樣器內，然後提升至地表。

所得砂土試體將進行室內應力及應變控制之往復式三軸試驗（圖八），以及大變形之三軸單向壓縮試驗。這些試驗之目的在確定天然砂土勁度（剪力模數）及阻尼係數與應變之關係、飽和情況下往復受力抗液化之強度、穩定狀態曲線，以及其殘餘強度之特性。結果之分析將注重粉土含量、試體擾動、顆粒結構、

粉/黏土與細砂微小互層對粉土細砂行為之影響。

#### （四）試驗站監測系統之安裝與地質背景調查

試驗站將安裝強震儀及孔隙水壓監測系統，以便未來地震發生時觀察土壤之液化。各試驗站之地質背景、附近之活動斷層及導致試驗站區域產生地層活動之震源或控制斷層，將進行詳細調查。各試驗站土壤之成因、礦物含量等地球物理與地球化學性質也將進行必要之試驗來分析確認。

#### （五）液化潛能分析方法之改進

使用確定式及機率式之方法，配合觀察地震後現地液化行為及前述之試驗結果，進行交互分析並比較現有液化潛能的分析方法，將現有方法改進或創新，以適用於台灣地區砂土液化潛能分析之程序與方法。

#### 參考文獻

- 國家地震工程研究中心 (2000年2月) 九二一集集大地震大地工程震災調查報告，總召集人林美聆，頁111。
- Harder, L. F., Jr., and H. B. Seed (1986) *Determination of Penetration Resistance for Coarse-Grained Soils Using the Becker Hammer Drill*. Earthquake Research Center, University of California, Berkeley, Report UCB/EERC-86/06.
- Huang, A. B., H. H. Hsu, J. W. Chang (1999) The behavior of a compressible silty fine sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **36**(1), 88-101.
- Ishihara, K. (1993) Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes. *Geotechnique*, **43**(3), 351-415.
- Kovacs, W. D., L. A. Salomone and F. Y. Yokel (1982) Energy Measurement in The Standard Penetration Test. *NBS Building Science Series*, **135**, National Bureau of Standard, Washington, D. C.
- Youd, T. L., I. M. Idriss (2001) Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(4), 297-313.

(收稿日期：90年6月4日；接受刊登：90年8月10日)