

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

土壤液化地基修復補強成效之評估研究

Study on the Effects of Remedy and Retrofit of Foundation of Building at Liquefied Sites

計畫編號：NSC 90-2211-E-032-024

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：黃富國 淡江大學營建系

一、中文摘要

本研究首先針對土壤液化引致之基礎破壞模式進行歸類及相應之破壞機制進行分析；接著，就土壤液化基礎之修復補強技術及補強理念進行探討；繼則以日本等國及國內九二一震後之基礎修復補強實例（國內部分以發生液化基礎震害之場址為主）進行案例探討及成效評估；最後並以液化風險分析之成果作為評量土壤液化地基修補成效之一量化工具，值得參考應用。

關鍵詞：土壤液化、基礎、修復補強

Abstract

In this research, the failure types of foundation due to soil liquefaction are classified and associated failure mechanisms are analyzed. Then, the foundation retrofit and remedial measures and concepts are studied. Following, case studies and effectiveness of aforementioned methods in Japan and Taiwan are evaluated. Finally, a quantitative index using risk analysis of liquefaction to ensure the safety of structure after retrofit and remedy of foundation is proposed.

Keywords: Soil Liquefaction, Foundation, Retrofit and Remedy

二、緣由與目的

台灣位居環太平洋地震帶上，島嶼東方及東南方即是菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交接碰撞處，地殼變動活躍，加上台

灣地質錯綜複雜，又有斷層縱橫分佈，故台灣常遭致各種地震災害。此次發生於民國88年9月21日規模M=7.3的集集內陸淺源大震，不但造成房屋嚴重受損或倒塌者近二萬幢，更造成超過2400人(含失蹤人員)往生，八仟多人受傷(國家地震中心，1999)，可謂災情慘重，足見地震之巨大破壞力量。又因此次地震係導因於原被認為發生地震機率不高之第二類活動斷層—車籠埔斷層，更顯示地震發生之不易預測及不確定性。

地震引致之災害主要可分為三大類，第一類為位於斷層帶附近直接導因於斷層錯動所產生之損害，第二類為導因於震波傳遞引致之地盤振動破壞(如土壤液化)，第三類則為地盤振動引致之上部結構振動損害。在過去之震害歷史中，很難找到像此次集集大震車籠埔斷層錯動後，直接裸露於地表長達100公里以上，地表斷層最大垂直錯動量達11公尺，最大水平錯動量達10公尺以上，因此位於斷層帶上各種土木結構設施無堅不摧，無物不毀，損失慘重，而欲避免此種震害型態，在工程設施興建之初，慎選場址是最佳之途徑。在以往之地震災害中，上部結構因耐震能力不足或施工品質不良，在強震作用下，產生震損之比例佔了大部分，下部結構因埋置土層中，在覆土之圍束下，受損比例甚少，因此，過去國內耐震設計規範及震後修復補強措施之研究大都側重於上部結構，從耐震評估到補強已有一套很完整之理論與方法，至於下部基礎結構部分則付之闕如。

由於此次九二一集集大地震特性較特殊，震源淺、規模大(M=7.3)、強震延時長達 25 秒以上，頻率內涵廣及 0.5~2Hz，因此造成了國內以往罕見之土壤液化(soil liquefaction)破壞，在很多縣市，如彰化、南投、台中、雲林等多地造成廣泛之地基震害，建築物或下陷、或傾斜、或側移，地基開裂或拱起(黃富國等，1999)，破壞模式不一而足，因此基礎震害是此次地震中值得關注的問題。

當建築物的基礎受到震損時，勢必影響到將來結構物的安全性、居住性及耐久性。如果照常使用，總有不安全之感；如果棄之不用，則甚感可惜；而將其拆除，則浪費很大。因此，除了發生極嚴重損害者外，對基礎進行修復、補強，以回復(或提升)基礎本身之安全穩定及構造性能，則是較經濟、合理的方法。惟基礎之修復、補強乃一專業技術，若發生事故後，未詳查肇因而急就章驟然從事之，不但具有風險，可能引致反效果使損害加劇而造成糾紛及爭議，更可能引起損鄰事件，不可不慎。因此，從事基礎之修復、補強時，應謹慎為之。在國外，日本自 1995 年阪神地震後，亦有很多地基基礎遭致嚴重震害，從而發展了很多實用之修復補強技術(大擇一實等，1995；田村昌仁，1995；杉村義廣，1996；間瀨哲等，1995；The Japanese Geotechnical Society,1998)，累積了許多寶貴之經驗。但是，國內以往在基礎之修復補強方面經驗較少，技術較乏，對於補強之成效更是無法有效掌握。而在此次九二一集集大地震受損災區中，當地居民復舊心切，病急亂投醫，在基礎之修復、補強過程中，很多並未對症下藥，枉費金錢，而損鄰事件及爭議也時有所聞，因此，為了減少往後在震後重建過程中可能引致之問題及困擾，並為能在災後提供一可靠有效之修復補強方法，實有必要對建築物基礎之修復補強技術及成效評估進行一深入之研究，以提升國內在基礎修復、補強方面之能力，尤其是因應土壤液化引致之基礎震害。

三、土壤液化基礎破壞模式及肇因分析

建築物地基基礎常發現之土壤液化損害型態、類別包括：建築物產生下沉、差異沉陷、傾斜；地基滑動、側移、基礎斷裂、拱起、隆升、懸空；樁頭、樁身、柱頭、基礎版等破損或龜裂等整體性或局部性損壞，破壞模式雖然很多，但主要可歸納為以下四大類(黃富國等，1999)：(1)噴水冒砂：係導因於超額孔隙水壓之持續激發，壓力達致土體所在深度之初始有效圍壓所引致，總水頭高者往總水頭低處宣洩，因此，地表處之噴水冒砂及引致之地基拱起、開裂等為土壤液化之最基本表現形式之一。(2)地基失效：土壤液化後，土層承载力喪失或降低，常導致地基產生嚴重下陷或傾斜。而上部結構受地基震害影響程度，與結構物型式有密切關係。(3)側向擴展(lateral spreading)：係指地面坡度小於 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的液化地層滑動，其成因係已液化土層的抗剪能力極低，於是上覆非液化土層在沿液化界面的自重分力和土層的水平地震力的作用下，乃產生滑動，其位移可達數米，且伴隨著一系列近乎平行的地面裂縫及台階式錯動，此類破壞型態在濱河、濱海之地基、高灘地等處常可發現。(4)流動破壞：在傾斜地表(坡度大於 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$)、堤防、碼頭或路堤下之飽和疏鬆砂土層(受剪時產生剪縮行為)，受震時，尚可能因土壤液化而在水平方向產生大滑移，導致過大(無法容許)之側向變形量，此即所謂之「流動破壞」(flow failure)。

四、土壤液化基礎修復補強技術

土壤液化後，基礎可能產生各種不同之破壞模式，影響原建築物之使用機能，而必須採取修復補強之措施，惟修復補強之工法眾多，適用性、經濟性及工期等各異，因此，必須結合考量各相關因素，方能採擇最佳方案。基礎修復、補強之技術依處理對象(地盤本身或基礎結構)之不同或原理(提高抵抗力或降低作用力)之差異，可概分為(1)地盤補強(2)基礎結構補強(3)改變結構受力機制等三大類，由於影響地基震害之因素眾多，若僅

採單一方法修補往往難以克竟其功，因此實務上常須多種工法配套同時進行，方能達成修補目標。以下簡易介紹三不同對策措施之補強理念：

1. 地盤補強（地層改良）

若基礎位於軟弱或軟硬不均之地盤上，壓縮性大，抗剪強度低，或有發生土壤液化之潛能，可透過壓密排水、夯實、化學固結及置換等方式改良土層性質，強化、固結地盤，提高地盤之承载力、降低壓縮性、增加抗震穩定性。此法一般較適用於新建結構物對場址地盤不符合力學性能之處理，對於震後受損結構物之基礎補強常是利用灌漿固結等方式搭配使用。

2. 基礎結構補強

基礎結構之修補方式和基礎損害狀況、基礎型式、建物規模及復原等級等有密切關係，方法雖然很多，但其目的皆在回復或提高修補後建物基礎之耐震能力及建物原有之使用機能。

（1）差異沉陷、傾斜扶正

扶正方式有利用千斤頂上抬之頂升工法，及以直接基礎建物為對象，逕在地基中灌入材料，藉由地基的隆升將建物抬高的灌漿工法。前者透過機械式之操作因此準確性較高，而後者雖難達到信賴性及準確性之標準，但卻能符合復舊時簡便、迅速的要求。

（2）基礎修補

包括托換原基礎或加固補強原基礎兩種。前者係對震後受損、強度不足之基礎構造，針對基礎型式、荷重分布及地盤條件等予以加寬、加深、外增托換，或使用樁基托換。而後者係將原基礎加固加厚，或用水泥漿或環氧樹脂等補強材料，注入原基礎裂縫或扶正後之空隙使其結合，以提高原基礎之抗彎、抗剪、抗滲透及沖蝕之能力，並提高其承载力。當基礎損害程度較少，建物不須抬升扶正時，亦可以僅修補基礎部分損害部位，如樁頭、基礎地梁等，以保持其功能。

（3）重建、新設基礎

若評估原基礎構造修補後仍不足以滿足功能需求，或原基礎損害嚴重，無法再使用時，則需考慮重建或新設基礎。重設之基礎可能在原基礎下，或在原基礎外再以帽梁聯結；也可能由樁基變為直接基礎，再配合地盤補強，其型式端視基礎損害情況及重設基礎之施工條件而定。

3. 改變受力機制

（1）隔震、消能

於基礎採用隔震裝置及消能器，以延長結構周期及發揮遲滯消能效果，可有效降低結構所受之地震力及各項反應，基礎受損之機率自然降低，因此，隔震消能亦為基礎修補方式之一。惟採用隔震裝置時，所有基礎必須全面施作，工程浩大，且須考量結構之高寬比，以免傾覆力矩過大，使隔震性能失效，另外，管線設施亦須配合隔震建築的最大水平位移量，採取必要的變更設計，因此，除非必要，如古蹟的保存，一般較少採用隔震、消能的方式來作基礎補強。

（2）改變荷重傳遞

改變荷重分布及傳遞機制、增設伸縮縫或加強上部結構剛度等，以改變基底應力分布狀態，使基礎受力均勻，減少結構物之差異沉陷，亦為另一種型式之基礎補強。

五、修復補強案例探討及成效評估

結構物之基礎一般可分為樁基礎及直接基礎，直接基礎又可分為筏基、條基、獨立基腳、聯合基腳及聯梁基腳等，基礎型式不同，破壞的類型及損害程度可能有很大差異，修復補強之方式自然亦隨之不同。本研究廣泛蒐集、整理了日本等國（間瀨哲等，1995）震後基礎修復、補強之案例（包括土壤液化案例），依震害地點、建物用途、建物構造、基礎型式、建築面積、地盤條件、損害概要、補強工法及工期等，分門別類予以彙整，如表一所示。在樁基礎部分，案例中包括有鋼管樁壓入至支撐層、在建築物底下增設地梁及承壓版、以深基礎樁置換補強原樁基礎之方法；也有切斷

原有樁頂部，修補後再利用的方法，以及於樁四周填入藥液或砂漿，加入各種補強體予以強化的方法。在直接基礎部分，與樁基礎相較之下，其受損程度較為輕微，大多是利用千斤頂予以撐起，或注入藥液來修復建築物的傾斜；也有因為地層承载力不足，以壓入鋼管樁、增設承壓版增加抵抗力，撐起建物以修復地基下陷的例子。

在國內案例資料方面，九二一地震之後，亞新工程顧問公司曾針對發生廣泛土壤液化震害之彰化縣員林鎮、大村鄉及社頭鄉等地進行基礎修復、補強狀況調查(亞新工程顧問公司，2000)，結果顯示現地多以灌漿、排土、托底頂升等方式進行地基之修復補強。另外，陳建忠等(2001)亦於90年5月於南投市及員林鎮有明顯液化現象之地區進行建築物液化行為調查，並據以建議新建建物基礎之抗液化對策及工法，惟並未調查液化場址之修復補強成效。此外，褚炳麟等(2002)亦針對台中縣霧峰鄉在九二一震後基礎之維修方法進行調查及探討，並歸納其採用之方法計有(a)一樓地板以RC重建；(b)土壤灌漿改良；(c)擴大基腳深度；或(d)改為筏式基礎等。而建物傾斜扶正方法則有壓力灌漿頂升及排土千斤頂頂升扶正二種工法。惟整個扶正修建過程，係採用土法煉鋼模式，一切以經驗為重，而基礎之施作則係依照一般常用規格放大其安全係數來施工。

綜合國內外基礎修復補強之案例經驗顯示，國內之修復補強業者多以經驗為施工依據，鮮少針對建物結構進行全面了解，施工中亦多乏監測儀器，修補後常僅能暫時治標，未能長久治本。在日本，雖然在整個修復工程中，仍由於定量評估的困難，而缺乏合理的施工依據，但其修復補強業者為確保施工成效，多會在適當地點裝置檢測儀器，如樁底荷重計、水平及垂直變位計、攝影機、長期變位穩定監測等。從修復補強成效觀之，各案例完工時大都達致初步成效，但因很多工程係於震後短時間內快速進行，常未詳查破壞肇因，因此修補後並未為住戶提供一個長期之安全居住環境，尤其是位於發生土壤液化區域之場址。因此，基礎破壞原因之分析是很重要的，而透過各種已完工修復工

程之效果分析，亦可提供往後類似案例修復工法採擇之參考。

在眾多修復補強工法中，地盤改良為改善土壤液化場址地層工程特性之一有效手段，若能確保改良成效，則位於其上之基礎經修復補強後，可釜底抽薪降低往後受震再度發生液化震害之機會。為此，本研究以液化風險分析之觀念(黃富國，1996)，以九二一地震前後，中部某一工業區場址地盤為例，進行地震前後場址液化風險分析結果之比較，如圖一所示，由圖中可明確量化地比較地震前後場址液化風險之差異。同理，欲進行基礎修補之場址，可先進行地盤改良後，以該風險分析之方法予以評估，再以所得之量化數據評量改良成效，若液化風險已在可接受之安全範圍內，則基礎修補之成效將可確保。因此，該風險分析方法提供了一評估土壤液化地基基礎修補成效之量化途徑，值得推廣。

六、結論

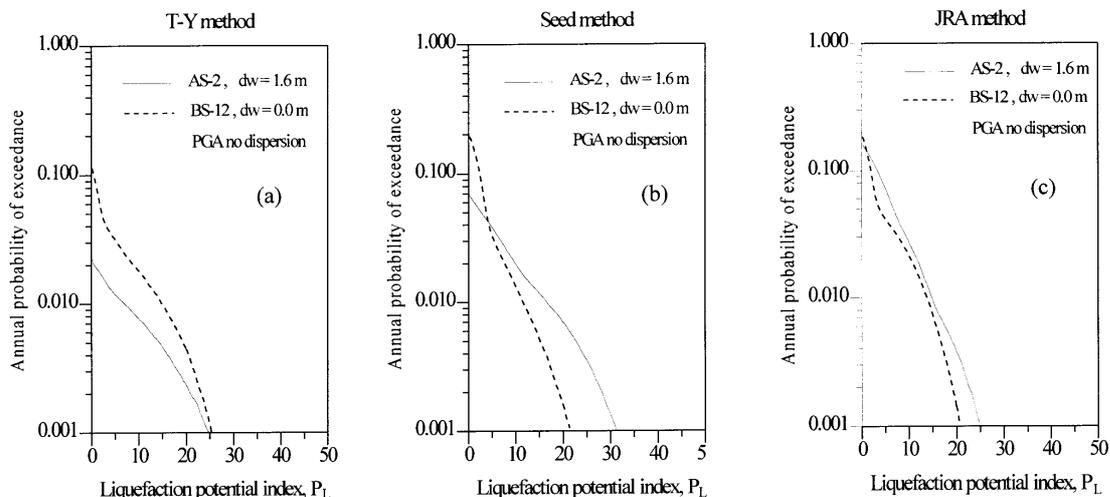
1. 基礎之修復、補強乃一專業技術，其對策措施之採擇及成效之驗證，在在須要專業評估與判斷，而非僅憑經驗作依據。在此建議政府有關單位應儘速研擬相關規範以供遵循。
2. 基礎修補工法之選擇應綜合考量結構條件、地盤條件、環境影響、工法特性、建物損害程度及復舊要求等，以確保基礎修補成效，避免將來再度遭致損害。
3. 土壤液化乃區域性地層結構問題，基礎之修補應合併考慮場址之特性，若僅修補基礎結構而忽略地盤條件，將僅治標而未治本。本研究中，提供了一以液化風險分析評估地盤改良成效之量化方法，若善加應用，對土壤液化地基修復補強成效之評估，將有極大助益。

七、計畫成果自評

本研究已初步達成研究目的，惟基礎之修復、補強技術目前仍不易有統一之標準，往後唯有繼續廣為蒐集案例，並詳細剖析、彙整各相關環節，方能為基礎之修補技術及成效確保提供一明確可循之參考基準！

八、參考文獻

1. 大擇一實、間瀨哲、田村昌仁(1995)，“基礎之破壞原因與復舊方法”，*建築技術*，*阪神地震特集 I*，第 54-62 頁，1995 年 9 月。
2. 田村昌仁(1995)，“建築基礎之復舊諸事例”，*基礎工*，第 106-109 頁，1995 年 10 月。
3. 杉村義廣(1996)，“建築構造物基礎復舊、補強今後之課題與意見”，*基礎工*，第 2-7 頁，1996 年 11 月。
4. 間瀨哲等(1995)，“復舊事例研究”，*建築技術*。
5. 亞新工程顧問公司(2000)，*土壤液化評估與處理對策研擬第一期計畫*（彰化員林鎮、大村鄉及社頭鄉）總報告。
6. 陳建忠、林宏達、廖瑞堂(2001)，*新建建築抗液化對策及工法之適用性研究*，內政部建築研究所研究計劃成果報告，MOIS902004。
7. 國家地震中心（1999），*國家地震工程研究中心簡訊*，第 32 期。
8. 黃富國(1996)，*土壤液化之危害度分析*，博士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，台北。
9. 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。
10. 褚炳麟、徐松圻、張益銘、林成川(2002)，“霧峰鄉太子城堡社區之扶正補強”，*2002 集集地震液化工程問題研討會論文集*，第 61~77 頁。
11. The Japanese Geotechnical Society(1998)，*Remedial Measures against Soil Liquefaction* , A.A. Balkema Publisher, Netherlands.



圖一 液化後 AS-2 工址及液化前鄰近工址 BS-12 之 P_L 液化風險比較

表一 日本等國之基礎復舊與補強案例

地點	用途	構造	基礎型式	建築面積	地盤條件	損害概要	補強工法	工期
神奈川縣 橫濱市	集合住宅	RC5F	擴座樁φ35cm	1F124.7m ²	黏土、砂質 粉土、粉土 質砂	下陷 50.5cm	鋼管壓入工法	4 個月
宮城縣 仙台市	集合住宅	RC4F	PC 樁φ35 cm L=10m	1F285.71m ²	—	下陷 15cm	既有樁補強 工法	3.5 個月
宮城縣 仙台市	集合住宅	PC4F	RC 樁φ30~40cm 部分直接基礎	1F332.8m ²	黏土質 回填土	下陷	深基礎樁置換 工法	6.5 個月
沖繩縣	獨立住宅	RC2F	PHC 樁φ35 cm L=16m	1F295m ² 2F146m ²	風化石灰 岩、泥岩	下陷 4.5cm 建物南側 滑動	深基礎工法	補強 5.5 個 月，增建地下 室 11 個月
兵庫縣 神戶市	倉庫	RC3F	RC 樁	8406m ²	軟弱地層	下陷 74.5cm	柱切斷與 頂升工法	2.5 個月
東京都 中央區	商店	RC2F	木樁	1F69.7m ²	黏土、砂	下陷 50cm	承壓板工法	1.5 個月
東京都 台東區	商店 暨住宅	S3F	摩擦樁	1F69.08m ²	粉土質砂、 砂質粉土	下陷 6cm	鋼管樁壓入 工法	3 個月
東京都 中央區	商店 暨住宅	S4F	摩擦樁 L=5.4m	1~4F39.72 m ² ×4， 5F6.61m ²	粉土、砂、 粉土質砂	下陷 13.4cm	承壓板工法與 鋼管樁壓入 工法	2 個月
兵庫縣 西宮市	工廠 兼事務所	S2F	PHC 樁φ50 cm L=33m、35m	1700m ²	軟弱地層 回填地	液化引起 樁周空隙	加氣砂漿填充 工法	調查及施工 7 日
大阪府 豐中市	歌劇院	RC4F B1F	PC 樁φ60~70 cm	2255m ²	粉土質細砂	裂縫漏水	無機水玻璃系 藥液灌漿	1 個月
青森縣	工廠地基	RC	樁基礎、基腳	—	砂、砂石	承载力不足	灌漿工法	—
東京都 涉谷區	獨立住宅	RC3F	筏基	1F64.08m ²	黏土、黏土 質砂、粉 土、細砂	下陷 7.5cm	鋼管樁壓入 工法	2 個月
東京都 江東區	獨立住宅	S2F	筏基	1F107m ² 2F69m ²	黏土質粉 土、粉土質 黏土	下陷 11.3cm	承壓板工法	0.5 個月
東京都	商店 暨住宅	S3F	筏基	1F48.23m ²	—	下陷 9.6cm	頂升工法	10 日
北海道	小學	RC2F	直接基礎	180m ²	—	差異沉陷 6.8cm	擠壓灌漿	1.5 個月
兵庫縣 神戶市	辦公大樓	RC6F	直接基礎	130m ²	—	差異沉陷 4.7cm	擠壓灌漿	2 周
神奈川縣 橫濱市	獨立住宅	木造 2F	連續基礎	1F35.6m ²	回填土	下陷 10.6cm	從地梁頂升 工法	5 日
歧玉縣 大宮市	獨立住宅	木造 2F	筏基	1F59.28m ²	回填土、腐 植土、粉土	下陷 14.3cm	鋼管樁壓入 工法	2.5 個月
神奈川縣 橫濱市	獨立住宅	木造 2F	連續基礎	1F181.75m ²	—	下陷 21.5cm	新設基礎	4 個月
岐阜縣	獨立住宅	木造 2F	RC 樁φ30 cm L=10m	1F153.97m ²	粉土質黏 土、細砂	下陷 30cm	建物搬移與 新設樁	約 3.5 個月
神奈川縣 橫濱市	獨立住宅	木造 2F	連續基礎，地盤 改良樁φ60 cm L=3m	124.58m ²	—	下陷 6.5cm	千斤頂下降 工法	約 1 個月
岡山市	事務所	S2F	連續基礎	156m ²	軟弱地盤	差異沉陷 4cm	灌漿工法	10 日
三重縣 鈴鹿市	工廠	—	直接基礎	—	黏土	差異沉陷	樹根樁	23 個月
菲律賓 呂宋島	辦公大樓	RC5F	連續基礎	1F 約 200m ²	—	下陷 1.5m	柱切斷與頂升 工法	約 3 個月
荷蘭 陸特丹	精油所	S3F	木樁	—	粉土質細 砂、鬆砂	下陷 5~13mm/日	灌漿工法	—