

既設構造物之土壤液化防治對策及工法

徐明志 富國技術工程股份有限公司 / 大地技師
曾豐升 富國技術工程股份有限公司 / 大地技師

摘要

實施既設構造物之土壤液化防治措施時，受構造物內部空間、周邊設施及環境等限制，而且構造物仍須維持一定程度之使用機能，故需綜合場地特性及環境條件、施工可行性和經濟性等因素，審慎評估選擇適當且有效對策工法。在諸多條件制約下，於既設構造物現址所能施做之措施可能無法達到完全防止土壤液化之理想目標，故建議導入性能設計理念，必要時採用容許／減輕土壤液化程度之對策工法。本文除簡要說明藥液灌漿全面固結改良、格子狀改良壁及降低地下水位等三種可能適用於都會區既設構造物之對策工法外；並介紹日本國土交通省所頒布之「市街地液化對策推進指引」，考量在保留既有建築物情況下之施工效率及對策成效，採用降低地下水位及格子狀地中壁兩種方式，作為公共設施（如道路等）和住宅用地一體型液化對策之災害減輕工法，供國內相關機構政策制定及推動參考。

一、前言

一般而言，構造物之土壤液化防治對策大致可分為 (1)「抑制土壤液化發生之對策（事前對策）」，以及容許土壤液化發生之 (2)「抑制構造物損害之措施（事前對策）」和 (3)「土壤液化損害發生後採取的措施（事後對策）」等三類。此外，土壤液化造成結構物損壞後，前述第 (3) 類「事後對策」中所稱之「既設構造物液化對策」通常有兩種意義，其一是指「對因土壤液化損壞的房屋進行傾斜扶正，使其恢復到原來的狀態，不影響使用性」，以及「為防止未來地震時再次發生由土壤液化造成損害而採取之措施」，此二者經常被混淆；前者之「傾斜扶正」通常被認為是「修復措施」，並被歸類為狹義定

義的「液化對策」或「重建措施」；而後者之「再液化損害控制措施」則為預防措施或附加措施。

本文所討論之土壤液化防治對策為第 (1)、(2) 類之「事前對策」，或第 (3) 類「事後對策」中之既有構造物再液化損害控制措施；有關針對因土壤液化損壞建物所進行之頂升及扶正等措施，則不在本文討論範圍內（相關措施可參考中華民國大地工程技師公會，2006）。

內文先介紹一般新建工址常用之土壤液化對策工法之原理及分類，及既設構造物土壤液化對策工法之限制和條件，以及土壤液化對策成效目標設定考量和成效驗證建議；然後說明適用工法評估原則，並介紹日本既設構造物土

壤液化對策工法發展實施概況，但限於篇幅限制，僅選取「地盤液化對策工法」中三種較可能適用於都會區建築物之「藥液灌漿全面固結工法」、「格子狀地盤改良工法」及「降低地下水位工法」進行簡要說明；最後則以日本於 2011 年東北地方太平洋沖地震（以下稱為日本 311 地震）後，國土交通省建議採用降低地下水位工法及格子狀地中壁等兩種方式，針對獨立式住宅社區大力推動之「市街地公共設施・住宅用地一體型液化對策」，提供國內小型建物社區土壤液化對策工法選擇及政府相關單位決策制定及推動之參考。

二、既設構造物土壤液化對策工法

2.1 一般之土壤液化對策工法

談到土壤抗液化對策，通常會聯想到針對地震時之可能液化地盤，進行壓實、固結和增進排水功能等抑制土壤液化發生之事前對策。但是依策略之功能目標區分，廣義上之土壤液化對策大致可分為以下三種（見表 1）。

- (1) 抑制土壤液化之發生。
- (2) 強化結構物承載地盤之剛性，即使發生液化，亦不產生過大之地盤變形。
- (3) 加強結構物的基礎構造，即使發生液化且承載地盤產生變形，亦可使結構物維持設定之使用功能。

因此，於評估研擬土壤液化防治對策時，需考慮施作對策工法後土壤可能之液化程度及對結構物之可能影響，而且通常可由「地盤液化對策工法」或「結構基礎對策工法」兩方面進行考量選擇（見表 1）。一般常用液化對策工法之原理及工法整理如表 2：

表 1 土壤液化防治對策之目標和分類

策略目標	對策工法
(1) 抑制土壤液化之發生。	地盤液化對策工法
(2) 強化結構物承載地盤之剛性，即使發生液化，亦不產生過大之地盤變形。	
(3) 加強結構物的基礎構造，即使發生液化且承載地盤產生變形，亦可使結構物維持設定之使用功能。	結構基礎對策工法

1. 地盤液化對策工法

常用之地盤液化對策工法，包括 (a) 改良土壤性質、增加抗液化強度之方法；及 (b) 改良與應力／變形及孔隙水壓力相關之條件、使地盤較難以液化之方法。雖然 (a) 及 (b) 之原理被認為均對應於上述液化對策的「(1) 抑制土壤液化之發生」；但 (b) 中之「減少地震時的地盤剪切變形」也可被認為是「(2) 強化結構物承載地盤之剛性，即使發生液化，亦不產生過大之地盤變形」的方法之一。

2. 結構基礎對策工法

藉由加強基礎構造強度、勁度及增設輔助構造，以增加土壤液化時之基礎承載力，或減少土壤液化後之地層沉陷量及差異沉陷量對結構物之影響，為對應前述「(3) 加強結構物的基礎構造，即使發生液化且承載地盤產生變形，亦可使結構物達到設定之性能目標」。

但應注意本節內文及表 2 中所列舉之土壤液化防治對策工法，主要係基於過去在新建工程基地條件下所發展出來之工法，因此應根據場地和建築之條件審慎選擇及評估適用於既設構造物之對策工法。

2.2 既設構造物土壤液化對策工法

2.2.1 施工條件限制與成效考量

與新建構造物之場地及環境條件相比，既設構造物之抗液化工法選擇通常受到以下限制：

1. 受限於既設構造物內部可使用之空間，及構造物周邊設施及管線等，需考量對策工法之施工性。
2. 由於營運中構造物仍需維持一定程度之使用

表 2 液化對策工法之原理和分類 (整理修改自日本建築學會近畿支會, 2015; 日本土木學會, 2012; 日本建設省土木研究所, 1999)

目的	防治手段	原理	分類	主要工法
抑制液化發生(地盤液化對策工法)	改良土壤性質	增大密度 (增加有效應力)	夯實工法	表層夯實工法
				擠壓砂樁工法
				振動揚實工法
				靜力夯實工法
				動力壓密工法
		固結 (抑制剪切變形)	固化工法	淺層混合處理工法
				中層混合處理工法 (機械攪拌、高壓噴射工法等)
				深層混合處理工法 (機械攪拌、高壓噴射工法等)
				藥液灌漿工法
				生石灰樁工法
	土壤粒徑分布改良	置換工法	置換工法(開挖置換)	
			強制置換工法(壓入置換)	
			爆破置換工法	
	降低飽和度 (增加有效應力)	不飽和化工法	氣泡注入工法	
			地下水降低工法	
壓力與應力相關之條件、變形及孔隙水	改良與應力相關之條件、變形及孔隙水	增加有效應力	垂直排水工法	
		孔隙水壓之抑制、消散	水平排水工法	
			具排水功能之鋼材工法	
		遮斷周邊孔隙水壓	格子狀地盤改良工法	
		抑制剪切變形	抑制剪切變形工法	連續壁工法
				鋼板樁 機械攪拌樁/高壓噴射樁工法
		減輕液化損傷(結構基礎工法)	容許發生液化時之結構	強化基礎等
柱狀地盤改良				
減低地下構造物上浮量	抗浮樁			
	增加地下結構物重量			
管線抗變形能力	管線採可撓性接頭			
抑制液化後之變位	以地工格柵等補強直接基礎 板樁截斷工法(針對填土工程)			

機能，同時進行土壤液化對策施工時，施工機械及設備受到一定程度之限制。

3. 目標構造物附近通常有其他之房舍及構造物，需選擇不影響鄰近建築物的施工方法。

評估選擇抗液化對策工法時，通常會以對策「(1) 抑制土壤液化之發生」為改良成效目標；但基於前述各項限制，於既有構造物正下方所施做之地盤改良等對策工法，有可能無法達到完全防止土壤液化發生之目標。因此，在評估既設構造物之土壤液化對策工法時，除應根據結構

本身特性和場地之差異選擇適當的施工方法之外，而且在設計時，不宜僅是單純考慮完全抑制土壤液化發生之方法，必要時另可考量選擇容許及減輕土壤液化程度的對策，如對策「(2) 強化結構物承載地盤之剛性，即使發生液化，亦不產生過大之地盤變形」，或對策「(3) 加強結構物的基礎構造，即使發生液化且承載地盤產生變形，亦可使結構物達到設定之功能」，然後再評估選擇適當的工法。當考量採用容許/減輕土壤液化的對策施工方法時，有必要根據結構物之特性及

重要性，導入考慮結構功能的性能設計，並根據沉陷量和隆起量等指標評估對策的有效性。

採用性能設計方法時，需設定性能目標值並建立性能評估方法：於土壤液化問題中可以具體表述為 (1) 設定變形量的容許值；以及 (2) 建立評估液化地盤和結構物變形量的方法。由於目前國內之工程設計尚未採用性能設計規範，建議參考國外相關規範所訂定之容許值及構造物本身之特性，審慎訂定變形量的管理值；並藉由可靠之方法進行分析，評估施作土壤液化對策工法後之地盤和結構物變形量可小於設定之容許變形量，確保構造物在設定等級地震作用下之性能符合需求。

2.2.2 適用工法評估原則

2.1 節所列舉之一般性之土壤液化防治工法，若考量施工空間、噪音及振動等因素，並不完全適合於人口密集且建物集中之都會區。針對既設構造物之土壤液防治化對策工法選擇，應以強化結構物或對環境影響較小之工法為主要考量；而且應考慮液化土層深度範圍、建物構造或其特殊性、建物重要性、對四周環境（如噪音、振動、污染和地下水）影響、施工可行性和經濟性等因素。此外，改良工法施做過程中及完成後，均不得對既有結構物及鄰近構造物、管線等產生不良之影響；而且施工過程中可能需針對部分結構物或管線進行鑽孔、敲除、補強、暫時遷移等相關配套措施，但應能維持建物之基本營運功能。

綜合上述各項考量因素配合工程經驗及實際應用實例，於初步選擇合適之改良方案後，先行檢討施工空間及相關配套措施之可行性及適用性，必要時配合結構耐震設計需求，最後再綜合施工費用及工期等因素決定對策工法。

國內有關既設構造物土壤液化防治對策之實施例雖甚少，但日本於近三十餘年來已有相當多的施工案例報導，工程範圍涵蓋建築物、交通建設之橋梁基礎（直接/樁基礎）及路堤、海事

工程中碼頭及護岸、地中構造物（如共同管溝和地鐵）、油槽基礎、機場設施...等；對策工法則包括涵蓋「地盤液化對策工法」或「結構基礎對策工法」兩類，累積豐富之施工經驗與案例檢討建議。

本文限於篇幅，僅在第三章至第五章簡要介紹「地盤液化對策工法」中三種較可能適用於都會區建築物工法：基礎下可能液化土壤 (1) 藥液灌漿全面固結改良、(2) 格子狀改良壁及 (3) 降低地下水位等三種工法，藉由改良土壤性質、減低地盤剪切變形/遮斷壁及增加有效應力/降低土壤飽和度等方式，消除或減少基礎土壤之液化潛能，防止或減輕既有構造物之土壤液化損害。

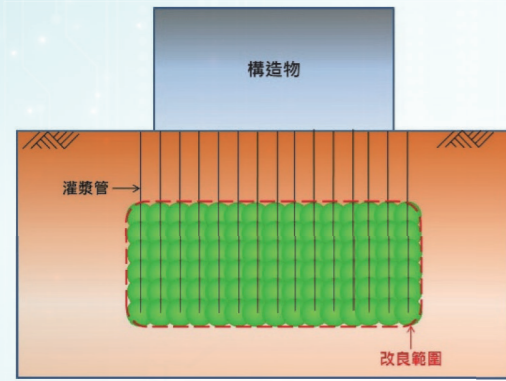
三、藥液灌漿全面固結工法

基礎土壤全面固結灌漿係採用地質改良方式，針對基礎下可能液化土壤以機械攪拌、高壓噴射或低壓灌漿方式注入水泥系或化學系材料，其目的在於改善土壤的強度、孔隙率及緊密程度；或以化學藥液增加土壤顆粒之膠結力，進而提高土壤之抗液化能力。

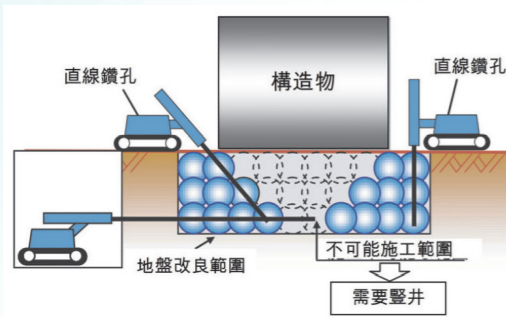
由於擬改良土體位於既設構造物之基礎下方，為避免過大灌漿壓力或排土問題造成基礎結構龜裂或隆起等負面效應，原則上宜採水泥系或化學系材料之低壓灌漿方式進行。藥液灌漿依施工方式可分成「傳統低壓灌漿工法」及「曲線鑽孔低壓灌漿工法」兩種，分別說明如下。

3.1 傳統低壓灌漿工法

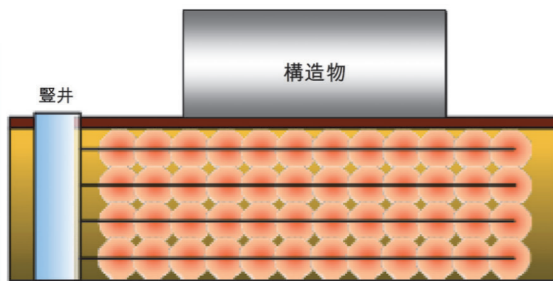
本文所稱「傳統低壓灌漿工法」係指將施工機具架設於規劃位置，依設計間距進行鑽孔及注入灌漿，設置方式大致可分為 (1) 垂直灌漿；(2) 斜向灌漿；及 (3) 水平灌漿等三種方式（見圖 1）。為防止注入灌漿液發生非預期之流失及擴散，不宜採用單重管灌漿工法；其他較有效之常用工法有「二重鑽桿複合式工法」、「單環塞工



(a) 傳統垂直灌漿施工



(b) 傳統直、斜鑽孔方式施工 (摘自河村昌洋等, 2011)



(c) 豎井構築方式施工 (摘自植田勝紀等, 2010)

圖 1 傳統低壓灌漿工法

法」及「雙環塞工法」等，但其效果及費用亦有差別，其中以雙環塞工法可獲致最佳之改良效果（但費用相對較高）。

1. 垂直灌漿

由構造物內部進行垂直鑽孔及灌漿作業，改良效果之可靠性為三種傳統方法中最佳。但因在建築物內部施工時，需在樓板或基礎板（含水箱底板）全面鑽孔，對現有建物空間使用影響最大，而且土壤改良後之復舊（包括結構物及相關設施）工作量亦最多。此外，若地下水位高於基礎板之高度，施工時需謹

慎評估相關之配套措施（如抽降淺層地下水及在基礎板設置環塞止水等），避免水、砂湧入筏基水箱或現有地下室內，造成基礎底部土壤掏空現象。

2. 斜向灌漿

由於在建物內部鑽孔進行全面低壓灌漿，將對既有構造物之營運造成較大的影響，而且後續復舊作業亦相當繁瑣，因此可考量於建物外之現有地表面向基地內斜向鑽孔、灌漿（配合部分垂直孔）。然而採用斜孔灌漿時，建物下方可能存在無法改良灌漿之區域（見圖 1(b)）；另因斜向鑽孔精度比垂直鑽孔差，因此施工時需特別的謹慎，並且選用適合的施工設備。

3. 水平灌漿

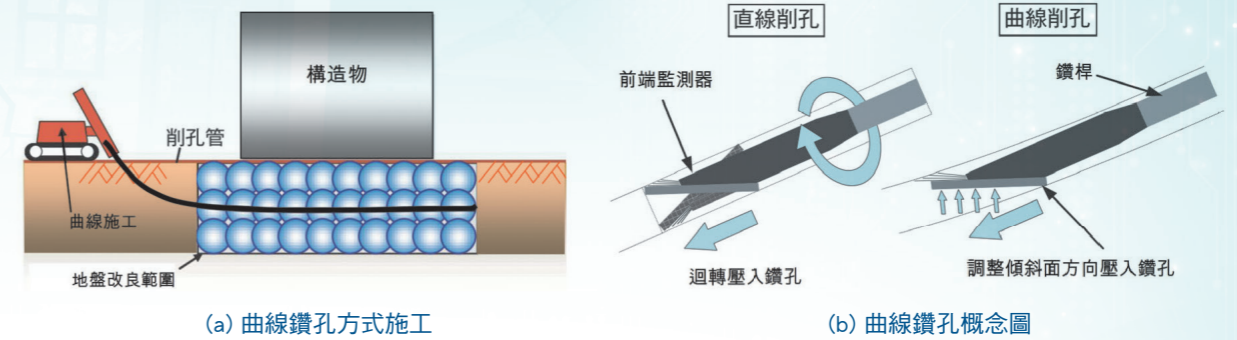
為克服上述垂直或斜孔灌漿之問題，過去亦有採用開挖垂直豎井或溝溝方式進行水平雙環塞低壓灌漿之案例，但由於既有建物周圍常緊臨現有道路、鄰房、管線，再加上若需要的改良深度較大，將面臨用地、管線、開挖支撐、搭設灌漿工作架、對周圍環境影響及事後回填復原等問題，實際施做時需克服復之困難點甚多。

3.2 曲線鑽孔低壓灌漿工法

曲線鑽孔低壓灌漿工法（施工示意圖如圖 2）是為了克服於施工障礙密集地區（諸如基樁、管線等）進行土壤液化改良所開發之工法，施工時將鑽孔機具及灌漿設備放置於建物外側空地上操控，鑽孔可在地層中進行三維變向移動，並藉由感應器避開地下障礙物（如基樁），到達預定灌漿位置後，以雙環塞方式進行灌漿。灌漿施工方式一般包括以下三種：

1. 鑽孔一體型注漿方式

於特殊之鑽孔內用鑽桿插入注漿管，拔除鑽桿時同時進行灌漿，其優點為不需額外預埋灌漿外管，對地層之干擾較小，而且可從同一地點進行多孔之鑽孔及灌漿作業，因此機具所需之施工場地相對較小；但由於灌漿完成後才能進行下



(a) 曲線鑽孔方式施工

(b) 曲線鑽孔概念圖

圖 2 曲線鑽孔低壓灌漿工法 (摘自河村昌洋等, 2011)

一孔之鑽孔，機具輪替率較低，所以施工費用比鑽孔分離型注漿方式高。

2. 鑽孔分離型注漿方式

為能提高鑽掘機具之使用效率，以節省工期及費用，亦可於鑽孔作業完成後於鑽桿內插入灌漿外管，拔除外管後以預留於地層中之灌漿管進行灌漿；但預留之灌漿管將成為地盤中之障礙物，而且因地表有預留之灌漿口，所需要之施工場地較大。

3. 可拔除鑽孔分離型鋼製注入管方式

為改善前述鑽孔分離型注漿方式預埋灌漿外管殘留於地層中之缺點，且可加長施工距離，亦有採用可拔除鑽孔分離型鋼製注入管方式進行施工之案例。

曲線鑽孔低壓灌漿工法之特點為可在建築物外側進行鑽孔及灌漿作業，不需於結構物內部作業，對既有構造物之營運影響最小，而且相關假設工程及復舊工作也最少。目前已於日本有施做實績之曲線鑽孔低壓工法至少有以下數種：

- (1) CurveX 工法 (カーベックス工法)
- (2) Ground Flex Mole Method (グランドフレックスモール工法)
- (3) MAGAR 工法 (マガール工法 / 曲がりボーリングによる薬液注入工法)
- (4) 曲がり削孔工法

上述各工法之施工理念大致相同，但其鑽頭位置偵測、傳輸及控制系統則各有特色；一般

而言，於日本之實績，鑽孔及灌漿作業長度約可達 150 ~ 200 m，鑽孔曲率半徑約可達 30 m。但因屬於特殊工法，且目前國內尚無相關之施工機具設備及實際施做經驗，需考量可能會有工法專利及施工廠商限制之情形。

設計時需根據現場條件及施工機具特性評估機具架設位置，並考慮其鑽孔路徑曲率所能涵蓋範圍。此外，為確保低壓灌漿能消除或減輕基礎土壤液化程度之有效性，施工前應對不同區域及深度之土壤性質，評估擬定適當之改良率、鑽孔及灌漿孔配置、注入率及改良土體之強度等，並應注意使用藥液之合適性及恒久性。低壓藥液灌漿之抗液化成效評估，目前仍多藉重經驗法則配合試驗室、現場試驗、數值分析等方式綜合考量。

以藥液灌漿作為土壤液化對策使地盤不發液化時之改良率原則上採用 100%，改良後之土體單壓強度通常為 50 ~ 100 kN/m² 左右；但是如果透過模型振動台試驗、離心模型實驗或動力數值分析等方式確認滿足結構所需的性能，則可適度降低改良率。

本工法於既設油槽及碼頭、護岸設施之抗液化改善措施已累積相當多之案例，參考既設油槽之實際施作案例，改良率主要介於 70% ~ 90%（亦有 100%），注入率則依各位置及深度土層之孔隙率與粒徑分布而定。此外，當基礎土壤進行改良後，其強度及勁度亦會隨之提高，對整體結構之耐震行為亦有助益；因此，在改良設計時可配合上部結構耐震性能需求一併考慮。

四、格子狀地盤改良工法

4.1 工法機制及改良壁間距

本工法以機械攪拌樁或高壓噴射樁方式施做柱狀改良體，並接續重疊組合形成連續之格子狀改良壁，將基礎下方土壤分隔成數個獨立之區間（如圖 3 案例示意）；於地震時可抑制被改良壁拘束地層之剪切變形，並可阻隔改良區內、外超額孔隙水壓之傳遞，以消除或減低土壤液化之潛勢（見圖 4）；此外，土壤發生液化時，埋置深度較淺之基礎下方土壤可能有向外側及地面噴砂之狀況，此噴砂屬物理現象，無法採用理論或經驗方式預測其量體，但透過格子狀改良壁之圍束作用可有效抑制噴砂現象。因此，即使建物周圍土壤發生液化，採用本工法應可將結構物的損害降到最低。不過，建造地中改良壁體，須注意因遮斷地下水所引致之地下水位變化，以及避免施工過程中和施工後可能損壞地下埋設物等問題。

一般而言，影響格子狀改良地盤抗液化成效之因素，包括改良壁之間距、深度、強度及剛性。於日本雖已有相當多之研究及實際案例顯示格子狀改良地盤對抗液化之有效性，亦有各方專家提出改良壁間距之決定方式，但迄今尚未有一

套完整且為眾人所遵循之設計程序。

設定改良壁間距通常分為以下有兩種方式：首先為簡易經驗法，係根據試驗和分析結果繪製改良壁間距與抗液化效果之間的關係，並據此設定格子間距；另一種方式則是採用有限元素法進行地震反應分析，依詳細之分析結果決定改良壁間距。在實際工程應用中，原則上可根據日本建築學會（2006）及日本建築中心（2018）之建議，先採用簡易經驗法進行初步估計後，再用數值分析方法進行驗證。若由於某些情況而僅依照簡易經驗法進行設定時，則改良壁間距應留有充分之餘裕（日本國土交通省，2019）。

4.2 施工方式

本工法以機械攪拌樁或高壓噴射樁方式於土層中形成柱狀改良體，並接續成一體之封閉式格子狀改良壁，施工機具特點如下：

1. 機械攪拌式地盤改良工法

確保改良體之一體性為應用格子狀地盤改良工法之重要性能要求之一。本工法最初是在使用大型機械攪拌式施工設備的前提下發展起來的，經過大量的研究和實際施工已驗證了改良體的垂直精度和接合性。

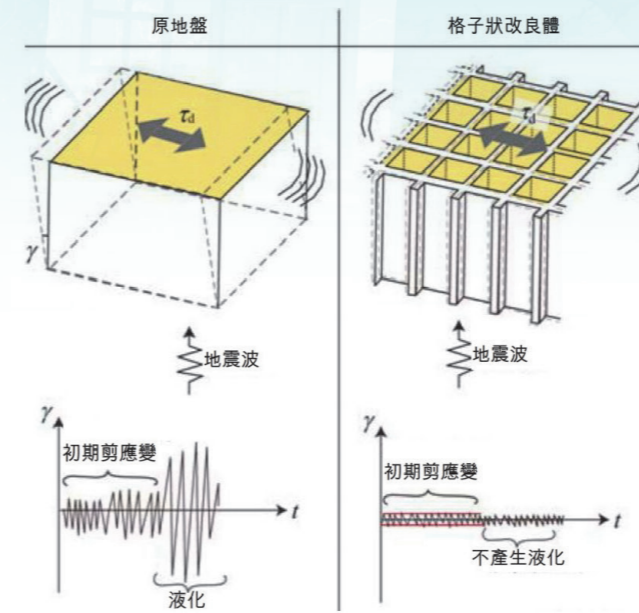


圖 4 格子狀改良地盤對土體剪應變束制及液化防制效果示意圖（摘自石川明等，2011）

目前日本使用於既有住宅用地之小型施工機械的尺寸約為寬 1.9 ~ 2.5 m、長 4.5 ~ 7 m、高 8 ~ 10 m，為自走式履帶式機械，配備單軸或多軸挖掘/攪拌桿，不僅可以在空地上使用，亦可在宅地之道路和相對較寬之相鄰建築物間（距離約 3 m）進行施工；也有在既有廠房內部空間施做之實例。此外，相對於高壓噴射式施工，機械攪拌式可提供較穩定的改良品質（改良強度、均勻性和完整性），且成本比高壓噴射式低，因此在施工條件（施工空間、埋設物等）容許下，建議儘可能採用機械攪拌方式施工（日本國土交通省，2019）。

2. 高壓噴射式地盤改良工法

為配合在狹狹及低淨高空間內進行施工，改造之超小型高壓噴射機械，例如長約 80 cm，寬 60 cm，高 170 cm，可在不需拆除牆壁、停車場、植栽或屋簷之情況，在獨棟房屋周圍構築改良體；或直接於建築物內部進行地盤改良樁之施工。為在鄰近既有構造物或建築物內部等難以提供足夠施工空間的區域，施作地盤液化對策之有利方法。

作為大型既設建築物之土壤液化對策工法，可能需配合在既設構造物內進行鑽孔及灌漿，其施工中鑽孔所需處理之問題大致與 3.1 節「傳統低壓灌漿工法」中之垂直灌漿方法相同（分區暫停部分設施使用，以及鑽孔、灌漿過程中之湧水問題），但本工法之鑽孔數量相對較少而且較集中，故影響程度相對亦較小。其中有關地下水位高於基礎板將引致鑽孔及灌漿期間之湧水問題，可依配置考慮先完成建物四周於現地表施做之改良樁，若所有改良樁均已貫穿可能液化砂土層而進入下方之黏土層，則可將地下水阻隔於基地外，配合區內局部設置抽水井即可將建物下方之地下水位降至基礎板下，解決湧水及湧砂之問題。此外，若採用高壓噴射灌漿施工時仍應注意所使用之灌漿壓力不致對地下基礎結構造成擠壓之不良影響。

4.3 工程應用實例

除由數值分析、離心機試驗等方式均已顯示本工法之有效性，於日本也已有相當多採用格子狀地盤改良方式應用於液化防治之實際案例，新建建築工程中較常被引用報導之案例，除歷經 1995 年阪神地震之神戶碼頭案例外（鈴木吉夫等，1995），並且於 2011 年 311 地震在千葉縣浦安市之建物案例中也證明其有效性（內田明彥，2016）。

近年來日本亦有多處案例使用小型施工機具於營運中既有建物內施工之案例，以 1904 年開館之重要文化財—大阪府立中之島圖書館之耐震補強及土壤液化對策工程為例（辻直樹等，2016），由於不僅施工空間狹隘且局部需要進行超低淨高（1.6 m）之施工，故使用小型施工機（長、寬、高分別為 1.5、0.9、1.2 m）及超小型施工機（長、寬、高分別為 0.5、0.55、1.2 m），施做直徑 3 m、深度達 GL-7m 及 GL-15m 之高壓噴射樁。本案例格子狀改良壁配置如圖 5 所示；圖 6 則為部分現場狹隘空間且超低淨高之施工狀況。

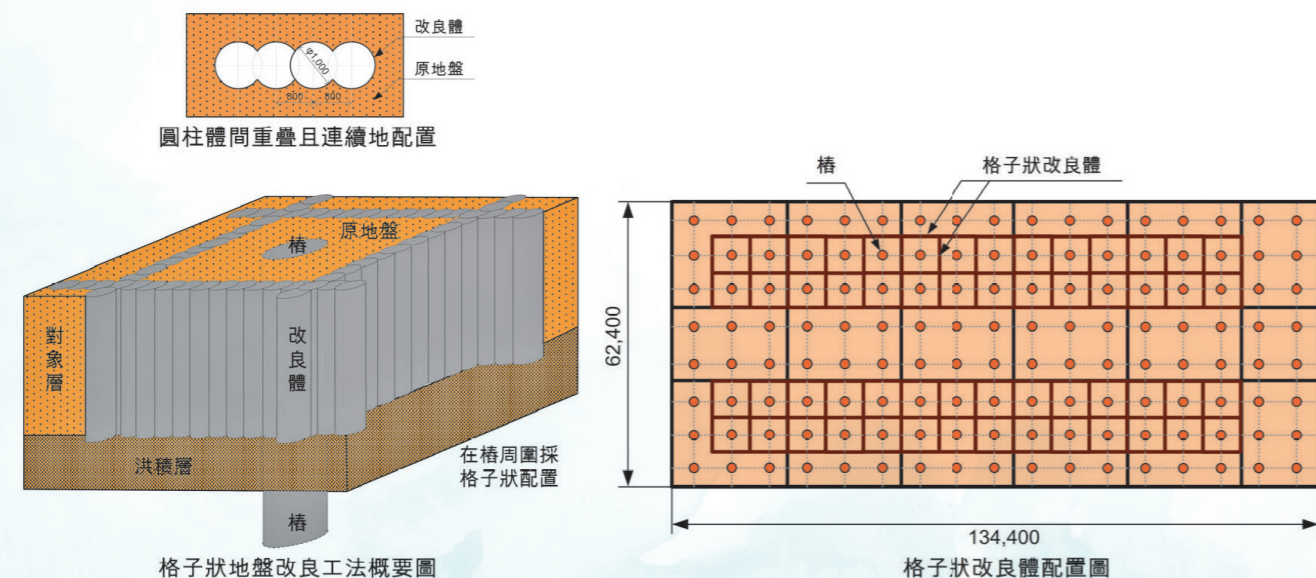


圖 3 格子狀地盤改良示意圖

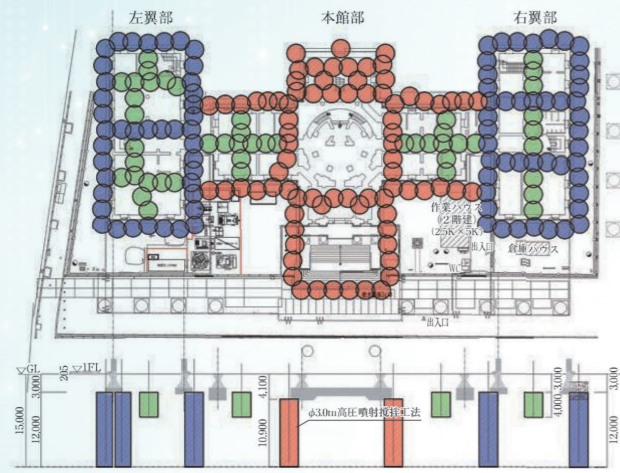


圖 5 大阪府中之島圖書館—格子狀地盤改良配置 (辻直樹等, 2016)



圖 6 大阪府中之島圖書館—狹隘空間且超低淨高之施工 (辻直樹等, 2016)

五、降低地下水水位工法

透過降低地下水水位以達到減輕土壤液化損害之效果，主要基於以下兩種機制：

1. 增加表層之非液化層厚度

地下水水位以上之表層土壤變成不飽和地層，增加地表之非液化層厚度，因此即使地下水水位下方之地層發生液化，也可減低對地表構造物之損害。

2. 增加液化目標層之有效覆土壓力

增加地下水水位下方之可能液化土層的有效覆土壓力，使地震時產生的反覆剪應力比變小，以減低液化的可能性及程度。

因此，本工法不僅有位於降低後之地下水水位上方的淺層地盤難以液化的效果，而且也可減低比地下水水位深之地盤發生液化可能性或液化程度。

然而，雖然地下水水位降低工法具有前述優點，且工程費用相對較低，但可能會因有效覆土壓力增加引致深層黏土層產生壓密沉陷，如果壓密沉陷量太大或產生不均勻沉陷，將對構造物或維生管線等公共設施造成不良影響，故於設計階段需謹慎評估考量此項因素，並在施工中及施工後進行長期之監測回饋 (水位觀測井/水壓計、沉陷觀測點及房屋傾斜計等)，必要時須調整作業計畫。

綜合前述，日本國土交通省 (2019) 建議較適合使用降低地下水水位作為土壤液化對策之地盤為：

1. 液化土層/地下水水位較淺之地盤；
2. 下層無厚層黏土堆積之地盤；
3. 液化目標層之透水係數較高之地盤。

依施工方法分類，目前已有實績之降低地下水水位代表性工法包括 (1) 排水管方式；及 (2) 抽水井方式，設計者可依地層性質、地下水水位分布及場地條件等因素評估選擇合適工法。

5.1 排水管方式

排水管方式一般是在地表淺層數公尺深度處設置排水管，用以收集管道上方透過滲透方式流入之地下水，且採用重力排水方式以減少維護和管理成本。並於管網末端亦採用較經濟之重力排水法排入河流等；若於無重力排水條件或有其他集水目的時，則需於管網末端採用強制排水方式 (幫浦抽水系統) 排至區域外，相對會有較高之維護管理成本。

排水管之埋設方法通常可分為 (1) 開挖工法及 (2) 推進工法兩種施工方式：

1. 開挖工法

開挖工法係於排水路線上設置擋土措施 (如鋼板樁等)，配合必要之水平支撐，將整段線路挖至埋設深度後設置排水管。如圖 7 之概念圖，於道路上打設鋼板樁、開挖約 1.4 m 寬/3.5 m 深之溝渠，在底部裝設直徑 200 mm 的排水管後，回填碎石至地表下約 1 m 深度，然後再以挖除之原土壤等回填

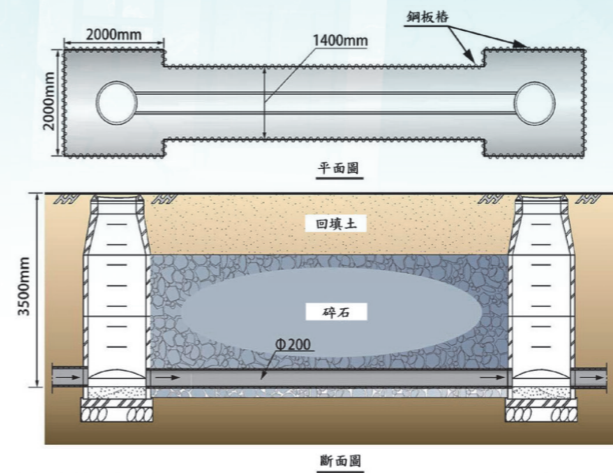


圖 7 開挖工法設置排水管概念圖 (日本國土交通省, 2019)

至地表；並依適當間距設置人孔，形成排水管網。由於開挖工法使用碎石回填排水管外側空間，故不論原地層之條件狀況，通常均可達到集水之目的。

2. 推進工法

本工法為透過挖掘工作井，並利用推進工法連接工作井及設置排水管，相較於開挖工法，可最大限度減少開挖及大幅減少施工對鄰房之影響。參考圖 8 之概念圖，利用下水道推進工法之既有機具設備進行施工，分別採用直徑 2.5 m 及 1.5 m 之鋼管工作井作為發進井及到達井使用，同時推進套管及直徑 30 cm 之排水管，到達後再拔除套管。與開挖工法不同，由於排水管係以推進方式設置，周圍並無回填透水之碎石，因此排水管須設置於均一之砂質地盤中才有集水效果；

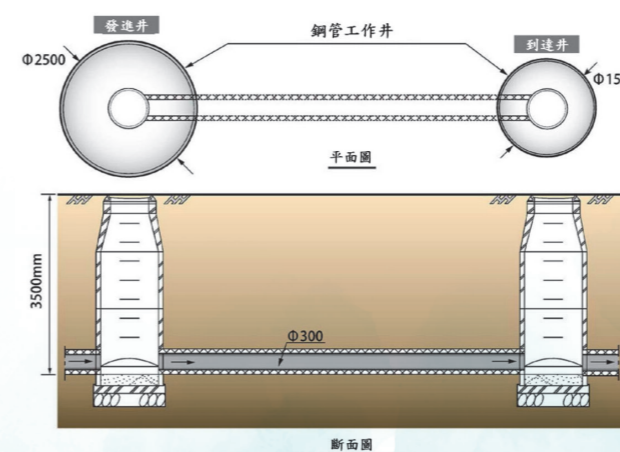


圖 8 推進工法設置排水管概念圖 (日本國土交通省, 2019)

此外，因集水斷面較小，容易產生堵塞現象，需要進行長期維護管理。

5.2 抽水井方式

採用抽水井方式，係先以鋼板樁等措施圍束計畫降低抽取地下水之區域，然後設置地下水井 (配備水泵)，再將抽降後之地下水排入既有道路側溝。與排水管方式相比，本工法之設置工程費用相對較低，但需持續幫浦運作才能維持降低後之地下水水位，故有電費、幫浦維修更換等長期運作成本。

抽降地下水水位後，在地下水水位下方所殘留之可能液化層，理論上可以考慮結合使用幫浦在短時間內降低和升高地下水水位之方式，使其呈現不飽和狀態 (混入空氣)，以增加抗液化強度的組合方法，但此類大規模不飽和工法施工之實績仍相當少。此外，如果以排水管方式 (5.1 節) 降低地下水水位之現地實際成效較差時，可以考慮採用增加抽水井方式作為附加之輔助措施。

六、公共設施·住宅用地一體型液化對策

2011 年日本 311 地震 (東日本大地震) 後，日本國土交通省基於既成市街地中整區住宅用地遭受大面積土壤液化破壞，故於 2011 年 11 月設立「市街地液化對策事業」，作為東日本大震災復興特別區域法之核心項目；並於 2014 年制定、公告與土壤液化調查方法及對策工法相關之「市街地液化對策推進指引 (市街地液化對策推進ガイドンス) (2016 及 2019 局部修訂)」，針對獨立式住宅社區推行公共設施 (如道路等) 和鄰近住宅用地一體之液化對策。

考量在保留既有建築物情況下之施工效率及對策有效性，「市街地液化對策推進指引」建議採用 (1) 降低地下水水位，及 (2) 格子狀地中壁兩種方式，作為公共設施和住宅用地一體型液化對策之抗液化工法。此外，市街地抗液化對策並非以計畫區域完全不發生土壤液化為目標，而是藉由抗液化安全係數 F_L 所計算之地表非液化層

厚度與 (1) 地表變位量；或 (2) 液化潛能指數 (P_L) 之關係，研判實施對策工法後之液化損害發生的可能性，作為液化對策工法成效評估之參考（評估細節及液化對策目標值設定基準請參考「市街地液化對策推進指引 (2019)」說明）。

6.1 降低地下水位工法

透過排水管或抽水井方式（見第五章）強制降低住宅區域及道路下之整體地下水位高度，使地盤呈現不飽和狀態，以減少發生土壤液化的可能性及土壤液化後所造成的損害（如圖 9 示意）。而且，由於基本上可以在道路等公共設施區域內進行施工，即使不在住宅區域內施工也可以實現整體計畫區域之降水目標，因此降低地下水位工法是一種很容易相容於「公共設施・宅地一體型」框架的液化對策。

於 1995 年阪神地震及 2007 年新潟縣中越沖地震後，日本即開始分別於兵庫縣尼崎市築地地區及新潟縣柏崎市山本町地採用地下水降低工法作為減輕液化災害之整體對策；另於 2011 年 311 地震後根據「市街地液化對策事業」，已分別於茨城縣潮來市、神栖市、鹿嶋市，千葉市美浜區磯辺 4 丁目，神奈川縣川崎市沿海人造地等地區實施本液化對策工法（日本國土交通省，2016；2019）。

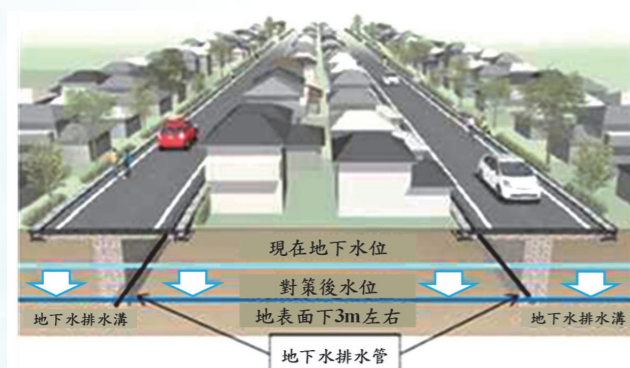


圖 9 公共設施和宅地一體型對策 - 地下水位降低工法示意圖（日本國土交通省，2019）

6.2 格子狀地中壁工法

本工法係以機械攪拌樁或高壓噴射樁方式形成格子狀改良壁，將市街地分隔成適當間距之獨立區間（如圖 10 示意），於地震作用時抑制受



圖 10 公共設施和宅地一體型對策 - 格子狀地中壁工法示意（日本國土交通省，2019）

改良壁拘束的地層之剪應變及超額孔隙水壓之傳遞，以減低土壤液化之潛勢及地震時住宅用地之沉陷量。工法之抗液化機制及設計、施工考量與特性詳第四章內容說明。

本工法之初期工程費用較高，但如果在施工過程中進行充分良好的品質控制，其長期維護和管理所需的成本則相對較小；而且相對於地下水位降低工法，對於下部黏性土層可能產生的壓密沉陷影響也較小。此外，實施市街地一體型之格子狀地中壁對策達到一定程度以上之抗液化效果後，當根據個別場地所有者的要求和可負擔費用，對每個格子狀圍束之宅地分別額外增加施做其他抗液化對策時，由於格子狀地中壁可減少其他額外工法對鄰近住宅的影響，使得進一步採取滿足居民個人需求的措施相對容易。

七、結論與建議

1. 實施既設構造物之抗液化措施時，通常受構造物內部之可使用空間、周邊設施及管線之限制，且構造物仍需維持一定程度之使用機能，再加上必需考慮減低對鄰近建物之噪音、振動及變位等影響，可使用之施工機械及設備受到相當大之限制，一般常見之土壤液化防治工法可能並不完全適用，需綜合場地特性及環境條件、施工可行性和經濟性等因素，審慎評估選擇適當且有效之對策工法。
2. 評估選擇抗液化對策工法時，通常均會以「抑制土壤液化之發生」為目標，但基於各項條件限制，於既設構造物正下方所施做之對策

工法，可能無法達到完全防止土壤液化之目標。因此，不宜僅是單純考量完全抑制液化發生之方法，必要時可根據結構物之特性及重要性，導入考慮結構物使用功能之性能設計理念，採用容許／減輕土壤液化程度之對策工法，並根據沉陷量和隆起量等指標，評估採取適當的抗液化對策及驗證其有效性。

3. 藥液灌漿全面固結工法除採用傳統之垂直灌漿、斜向灌漿及水平灌漿等方式施工外，曲線鑽孔低壓灌漿工法之鑽機及設備均設置於既有構造物外部，可克服於施工障礙密集地區（諸如基樁、管線等）之施工問題，及解決垂直和傾斜鑽孔無法涵蓋全部基礎下方地盤之情形；並可避免在構造物內部大量鑽孔及復原之困擾。
4. 於既設構造物正下方及周圍以機械攪拌或高壓噴射方式施作格子狀地盤改良工法，地震時可抑制圍束區內土壤之剪切變形，及阻斷改良區內、外超額孔隙水壓之傳遞，以減低土壤液化潛勢；亦可抑止埋置深度較淺基礎下方土壤向外側及地面噴砂之狀況。為配合解決施工空間限制，已發展出各式小型機具設備，可應用於既設構造物內部及周邊之抗液化改善施工。
5. 降低地下水位工法係藉由增加表層之非液化層厚度及液化目標層之有效覆土壓力，以達到減輕液化損害效果。依施工方法分類，目前已有實績之降低地下水位代表性工法包括埋設排水管及設置抽水井兩種方式；而埋設排水管通常可採開挖工法及推進工法兩種施工方式。
6. 日本國土交通省於 311 地震後頒布「市街地液化對策推進指引」，以獨立住宅社區為主體，考量在保留既有建築物情況下之施工效率及對策成效，建議採用 (1) 地下水位降低，及 (2) 格子狀地中壁兩種方式，作為公共設施（如道路等）和住宅用地一體型液化對策之災害減輕工法，可供國內主管機關政策制定及推動參考。

參考文獻

1. 中華民國大地工程技師公會（2006），液化區基礎修復補強工法對策說明書。
2. 日本土木學會（2012），液狀化に関する技術検討 WG「液狀化対策工法の分類と工法概要」。
3. 日本国土交通省（2016），市街地液狀化対策推進ガイドンス【資料編】。
4. 日本国土交通省（2019），市街地液狀化対策推進ガイドンス【本編】。
5. 日本建設省土木研究所（1999），液狀化対策工法設計・施工マニュアル（案），土木研究所共同研究報告書，第 186 号。
6. 日本建築センター（2018），建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針。
7. 日本建築學會（2006），建築基礎のための地盤改良設計指針案。
8. 日本建築學會近畿支會（2015），関西地方における液狀化の被害と最近の対策工法。
9. 内田明彦、田屋裕司、本多剛、津國正一、小西一生（2016），「格子状地盤改良工法における格子間隔簡易設定法の適用性」，地盤工学ジャーナル，Vol.11，No.3。
10. 石川明、社本康広、木村匠，「格子状改良体で拘束された地盤の簡易液狀化評価法」，清水建設研究報告，第 88 号。
11. 辻直樹、川副哲史（2016），「居ながら既存建物基礎の補強を可能にした高圧噴射攪拌工法」，基礎工，Vol.44，No.7。
12. 鈴木吉夫等（1995），「格子状改良による液狀化対策を施した建物基礎の調査報告」，基礎工，Vol.23，No.10。
13. 河村昌洋、三宅勇一、日口一久、磯野宗一（2011），「曲がりボーリング工法を適用した注入固化工法による供用中の旧法タンク地盤の液狀化対策の施工について」，Safety & Tomorrow，No.140。
14. 植田勝紀、青木繁、青木仁志（2010），「地中埋設物を避けて削孔する「曲がり削孔工法」- 構造物直下の液狀化対策とタイロップ埋設位置探査の施工事例」，建設の施工企画，第 722 号。