

Spread Foundation Retrofit Strategy of Ground settlement in Liquefied Soil 直接基礎位於液化土層震陷補強策略

蕭天任¹ 郭國振² 吳明興³ 林生發⁴ 游步上⁵

摘要

直接基礎位於液化土層除喪失部份承载力外，亦有產生液化震陷潛勢，由國內外之地震紀錄，如 921 集集大地震(1999)、智利大地震(2010)及日本 311 東北大地震(2011)，均有因液化而造地層下陷之現象，為確保橋梁安全，應將此下陷量對橋梁之安全影響納入耐震評估並研擬補強策略。本文針對基礎液化潛能指數(PL 值) >5 且震陷量大於 0.004rad(連續梁)或 0.008rad(簡支梁)之基礎研擬「地盤改良」、「地中壁圍束(無筋全套管基樁或高壓噴射樁)」或「增樁托底」等補強工法，將基礎液化震陷量降低至容許值範圍內，以確保橋梁震後安全。

關鍵詞：液化震陷、直接基礎補強、地盤改良、連續地中壁、高壓噴射樁、低壓灌漿

一、前言

「公路橋梁耐震設計規範」(107.12)解說 C8.1 節說明，土壤產生液化時將導致結構物下陷或上浮、基礎水平抵抗力降低及產生大變形等現象。C8.1.2 節說明，橋墩基礎層以下的土層若發生液化，且該基礎未作適當處理，則可能造成基礎沉陷或橋梁傾斜破壞。由國內外之地震，如 921 集集大地震(1999)、智利大地震(2010)、日本 311 東北大地震(2011)及花蓮地震(2018)，均有因液化而造地層下陷之現象。為確保橋梁安全，應將此下陷量對橋梁之安全影響納入耐震評估並研擬補強策略。

二、液化震陷評估

有關液化引致震陷之分析方法，因國內規範尚未規定，依據 Seismic Retrofitting Manual (FHWA, 2006)、Remedial measures against soil liquefaction (Japanese Geotechnical Society, 1998) 建議，液化引致震陷可採用 Tokimatsu and Seed (1987)之評估方法。本報告採用 Tokimatsu and

Seed (1987) 法，日本學者 Tokimatsu and Seed(1987)指出當地震來臨時，飽和砂土承受反覆荷重，孔隙水壓升高而使得砂土層強度降低，產生砂土層液化現象，而這些超額孔隙水壓開始經由地表排出時，砂土層伴隨產生若干的體積變化，而在地表面產生沉陷的現象。利用圖 1 中(N1)60 與 CSR(土壤反覆剪應力比)之關係，得到砂土在任何相對之(N1)60 (1kgf/cm² 下之修正 N 值)下之體積應變量 ε_v 值，進而可計算每一砂土層液化後的下陷量 s 。有關標準貫入試驗錘擊能量比，依據建築物耐震設計規範及解說草案(106.12)之 11.1.3 節之解說，「…對於沒有進行錘擊能量檢測之鑽孔，依過去經驗顯示，原則上，自由落錘可採用 70% 能量比輸入，而拉索式落錘可採用 60% 能量比輸入。」，目前國內標準貫入試驗多採用拉索式落錘，故本文建議落槌能量以 60% 分析。

Tokimatsu and Seed (1987)法之 CSR(土壤反覆剪應力比)如下式：

$$CSR = \gamma_n \frac{A_{\max} \sigma_v}{g \sigma_v'} r_d, \quad \gamma_n = M - 1$$

¹ 林同棧工程顧問股份有限公司 結構部組長 (tzhsiao@tylin.com.tw)

² 林同棧工程顧問股份有限公司 運輸土木部副理

³ 林同棧工程顧問股份有限公司 結構部經理

⁴ 交通部高速公路局 規劃組組長

⁵ 交通部高速公路局 道工科工程司

式內

- A_{max} : 本工程水平地表加速度
- σ_v : 總覆土應力
- σ'_v : 有效覆土應力
- γ_d : 應力折減係數
- g : 重力加速度

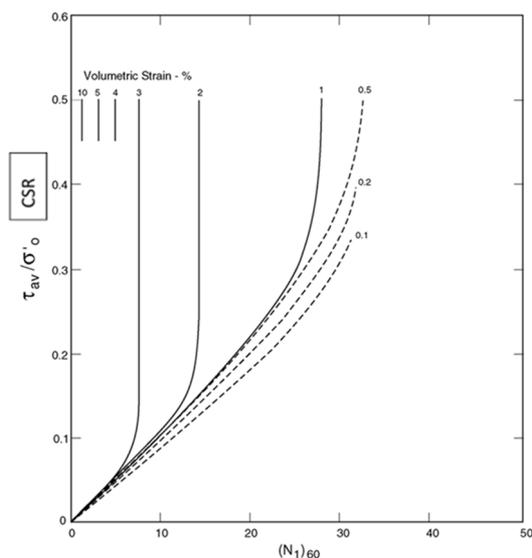


圖 1 Tokimatsu and Seed(1987)液化震陷曲線

液化潛能指數 PL 定義地盤液化之損害程度, $PL \leq 5$ 則為低度液化, Iwasaki et al.(1982)說明液化引起結構物危害程度, 液化危害性低, 一般不致引起明顯之震害, 因此本文建議若 $PL \leq 5$ 時可忽略引致之震陷問題。

另依 AASHTO LRFD 第 10.5.2.2 節之內容: 橋梁兩墩間之差異沉陷量不允許大於 0.008rad(簡支梁跨度)或 0.004rad(連續梁跨度)。故本文建議針對基礎液化潛能指數(PL 值) >5 且震陷量大於 0.004rad(連續梁)或 0.008rad(簡支梁)之基礎進行補強。

三、液化震陷補強

針對液化震陷量大之橋梁, 本文提供「增設地中壁(無筋全套管基樁或高壓噴射樁)」、「地盤改良」及「增樁托底」等 3 種補強方式供後續工程參考。

1. 增設地中壁

本工法主要係於既有基礎周圍打設具勁度之結構體, 以阻絕部分地震力, 達到降低既有基

礎下方土壤之液化震陷之功效, 其中壁可採用「無筋全套管基樁」或「高壓噴射樁」施作, 就經濟性及品質穩定而言, 優先採用「無筋全套管基樁(樁徑可採 1.0m)」為佳, 惟其施工機具所需空間較大, 橋下淨高達 8m 以上方可採用。若遇現場淨高低於 8m 者, 則可採用「高壓噴射樁(有效厚度可採 1.0m)」作為地中壁之施作工法, 兩者地中壁施作範圍建議為自直接基礎頂部起至地表下 21m, 相關示意圖如圖 2 及圖 3 所示。

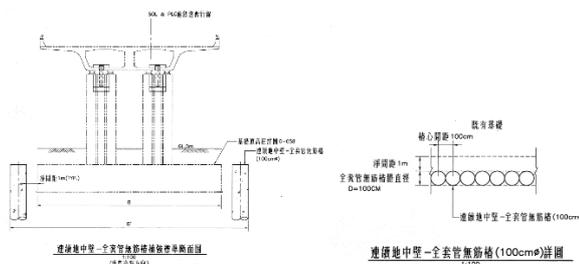


圖 2 無筋全套管基樁連續地中壁示意圖

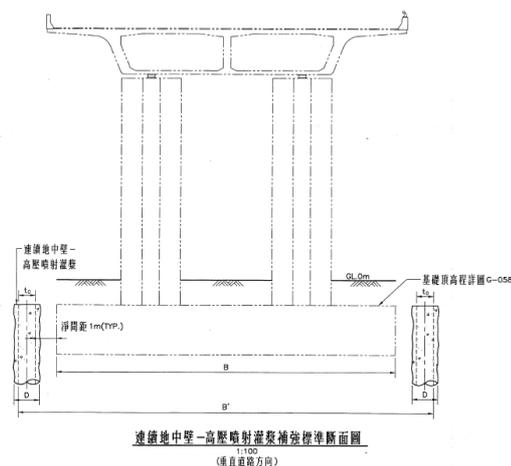


圖 3 高壓噴射樁連續地中壁示意圖

2. 地盤改良

無論是「無筋全套管基樁」或「高壓噴射樁」工法, 增設地中壁均需由上而下施作, 惟部份既有基礎位於匝道下方, 若採增設地中壁工法需進行道路封閉; 對既有交通影響甚巨。針對此一情形, 本文建議可採地盤改良方式降低基礎下方液化反應。該工法建議採國內成熟且品質控管較佳之雙環塞灌漿工法進行低壓灌漿, 改良範圍考量基礎正下方斜灌困難且恐因灌漿壓力集中引致直接基礎有頂升變位過大之虞, 故建議於地表下 9~17m 範圍進行低壓灌漿地質改良

以提高克服液化能力並將震陷量降至容許值以下，相關示意圖如圖 4 所示。

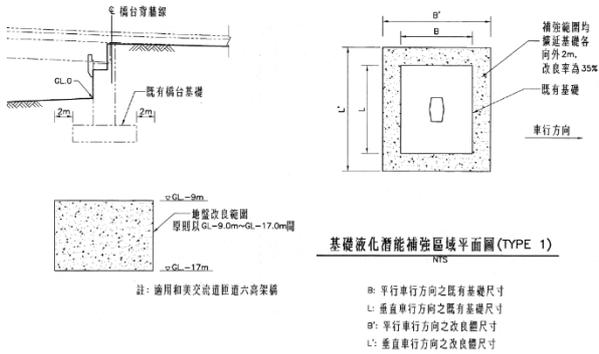


圖 4 低壓灌漿示意圖

3. 增樁托底

針對部份地質條件較差無法以大地工程手法將震陷量降低至容許值者，本文建議採增樁擴基工法，於既有基礎週邊增設全套管基樁，基樁深度貫穿液化土層，可有效避免液化震陷之影響，與一般基礎補強不同的是，若基礎下方土壤發生震陷後，基礎板下方土壤則不再提供承載力，整體基礎行為應以樁基礎形式進行設計，相關示意圖如圖 5 所示。

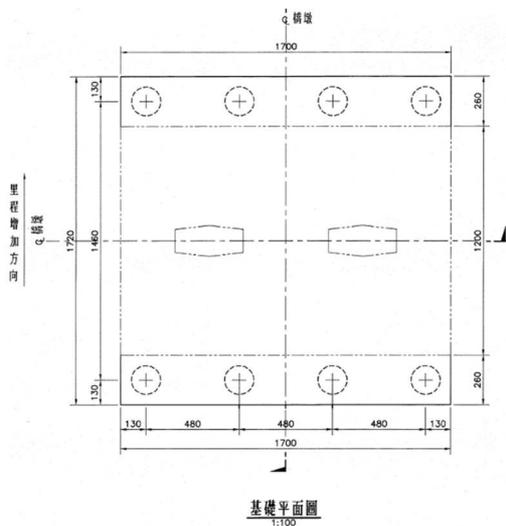


圖 5 增樁擴基示意圖

經分析與評估，上述工法之優缺點及整體施工經費整理如表 1、2 所示，增設無筋全套管基樁地中壁每墩補強之平均單價為 438 萬元，其工程經費最低、施工容易且品質較佳，建議為優先採用工法，其次為高壓噴射樁或全套管基樁托底，由於地盤改良工法工程技術及施工經費均高，若上述工法均無法施作者，最終可選用地盤改良工法。

表 1 液化震陷補強工法適用性比較表

補強工法	連續地中壁-全套管基樁	連續地中壁-高壓噴射樁	地盤改良	增樁托底
示意圖				
交維	遭遇匝道須交維	遭遇匝道須交維	配合斜灌灌漿無須交維	遭遇匝道須交維
適用性	橋下淨高 $\geq 8m$	橋下淨高 $< 8m$	基礎位於既有路堤下方	液化震陷量較大
品質管理	○	△	△	○
施工管理	○	○	△	○
說明	樁徑1m(無筋)	有效壁厚1m	既有路堤下方基礎或橋台	連續單元同時補強，以避免差異沉陷

表 2 液化震陷補強工法平均單價比較表

工法	補強墩數	補強經費	平均單價
無筋全套管基樁	53(61%)	2.32億元	438萬元/墩
高壓噴射樁	9(10%)	0.85億元	944萬元/墩
地盤改良	20(23%)	3.08億元	1,540萬元/墩
全套管基樁托底	5(6%)	0.37億元	740萬元/墩
合計	87	6.62億元	-

四、結論與建議

既有直接基礎部分座落於具液化潛勢土層，其基礎補強策略可全面採增樁方式將基礎置換為樁基礎，避免基礎沉陷，惟其工法工程經費龐大。本文建議可透過調整土壤液化基礎沉陷之耐震性能，並搭配土壤圍束及地盤改良方式將基礎沉陷量將低至容許值內，降低補強規模。

參考文獻

1. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範」，民國 98 年 6 月。
2. 交通部，「公路橋梁耐震設計規範(草案)複審成果報告書」，民國 92 年 3 月。
3. 國家地震工程研究中心，「公路橋梁耐震評估及補強準則(草案)」，民國 98 年 12 月。
4. 國家地震工程研究中心，「公路橋梁耐震性能設計規範研究(第 2 期)(上冊、下冊)」，民國 101 年 12 月。
5. 中華民國結構工程學會，「公路橋梁耐震性能設計規範草案複審成果報告書」，民國 102 年 11 月。
6. Seismic Retrofitting Manual (FHWA, 2006)
7. Remedial measures against soil liquefaction (Japanese Geotechnical Society, 1998)
8. 交通部臺灣區國道高速公路局，國道高速公路後續路段橋梁耐震補強工程(區段 2-1)「細部設計報告(第二標)」，民國 109 年 3 月。