

3D有限元素法應用在橋梁基樁位移事故後 地質改良效益之探討

李景亮

中國科技大學專任講師

摘要

在橋樑基樁設計實務上，採用一維或二維程式分析工程問題，已累積相當多的經驗，而在利用一維及二維程式分析結果的應用考量上，國內外的相關研究成果也有相當好的結論。本研究案例為預力箱型梁橋樑在施拉預力時發生箱型預力梁局部挫屈行為導致橋面下陷、支撐失敗事故及具有樁基礎之基礎板位移約6cm。本研究以Plaxis 3D程式模擬研究案例之基樁在原設計、事故時及事故後地質改良等三種條件下，基樁承受最大水平力及彎矩作用時其樁頂位移量及彎矩值之大小，藉以評估本研究案例地質改良之效益。

關鍵詞：基樁、數值分析、PLAXIS 3D。

Using The 3D Finite Element Method to Explore On Geological Improvement Effectiveness after The Bridge Foundation Pile Displacement Accident

Abstract

In the bridge foundation pile design practice, the uses of one dimensional or the two-dimensional formula to analyze and design we have accumulated quite many experiences and applications both in the domestic and foreign related researches. This case research discovers the displacement on top of the pile、the collapse of the bridge resulting from construction of prestressed- bridge. Using the plaxis 3D program to simulate and analyze the values of displacement and moment of pile under the condition of original pile design, time when the accident happening, and after geological improvement and estimate the effectiveness on geological improvement of pile

Keywords：Pile, Finite element analysis, PLAXIS 3D

3D有限元素法應用在橋梁基樁位移事故後 地質改良效益之探討

李景亮

中國科技大學專任講師

一、前言

在橋樑基樁設計實務上，採用一維或二維程式分析工程問題，已累積相當多的經驗，而在利用一維及二維程式分析結果的應用考量上，國內外的相關研究成果也有相當一致的結論。本研究案例為預力箱型梁橋樑於九十七年十一月十三日發生箱型預力梁局部挫屈行為致橋面下陷、支撐失敗事故及具有樁基礎之基礎板位移，為探討經位移之樁基礎是否適合以地質改良之方式繼續使用。因此本文利用Plaxis 3D 有限元素程式，以三維程式之分析結果，深入探討其地質改良之效益。



圖一 箱型預力梁局部挫屈 4K+086 事故處



圖二 箱型預力梁局部挫屈情形

二、研究案例

本研究案例橋梁為非制式箱型梁預力工法橋梁，橋寬 11m，跨徑配置 59.38+90+59.37m。於九十七年十一月十三日施加預力時，於橋樑左右箱型梁發生挫屈造成橋面下陷，橋墩之損壞情形有垂直之微細裂縫，開挖受損之橋墩兩側土壤至基礎版並未發現明顯裂縫或破壞情形，橋墩於箱型梁未敲除前與土壤間有 6cm 間隙，箱型梁敲除後傾斜測量其變形量為 0.6 公分。研究案例於上部構造事故後拆除完成進行基礎下基樁低壓地盤改良填充孔隙並增加摩擦力方式進行修復補強作業。



圖 三 橋墩與地表裂縫



圖 四 橋墩基礎完成灌漿作業

三、數值分析模型建立

本研究採用數值分析軟體為Plaxis 3D 程式，該程式被廣泛運用在處理大部分大地工程領域問題，Plaxis 3D FOUNDATION主要發展來分析基礎結構物（含樁基、筏基）及臨海結構物，並可建立大範圍的三維有限元素網格。該套裝程式可提供靜力彈塑性變形、進階土壤模式、穩定性分析、壓密分析及安全性分析等。

3.1 Plaxis 運算模式

Plaxis程式運算模式為以疊代法進行彈塑性有限元素運算，元素類別包括：4 次方15 節點楔形元素、模擬土壤結構間互制行為之介面元素、樑元素、版元素、牆元素、樁、埋入式樁、地錨及支撐等。內含多種土壤應力-應變組合律模式，包括Mohr-Coulomb組合律。

3.2 Plaxis 基本操作及指令說明

Plaxis的基本主程式包含前處理用之輸入程式（Input）、計算程式（Calculation）、後處理用之輸出程式（Output）及曲線程式（Curve），用以追蹤某一幾何點之某一物理量的歷程變化。其中最關鍵者為前處理之輸入程式，所有求解問題之基本資料皆於本程式中建立，輸入程式之指令可概略分為幾何次指令群、荷重次指令群、材料次指令群、及網格次指令群：

1. 幾何次指令群：以交談式類似CAD 介面建立問題三維模型，含有地層剖面資料、樑、版、牆、樁、地錨、支撐及邊界條件等。

2. 荷重次指令群：包含加載點荷重、線荷重及面荷重等。
3. 材料次指令群：用以啟動資料庫，以產生及修改材料力學參數，包含 土壤、樑、版、牆、樁、地錨及支撐等。
4. 網格次指令群：為設定網格比例、粗細來自動產生3D有限元素網格，並可局部加密。

數值分析軟體為Plaxis 3D程式(Brinkgreve, 2004)，該程式被廣泛運用在處理大部分大地工程領域問題，Plaxis 3D FOUNDATION主要發展來分析基礎結構物（含樁基、筏基）及臨海結構物，並可建立大範圍的三維有限元素網格，及基樁受力行為。該套裝程式可提供靜力彈塑性變形、進階土壤模式、穩定性分析、壓密分析及安全性分析等。

Plaxis程式運算模式以疊代法進行彈塑性有限元素運算，元素類別包括：4次方15節點楔形元素、模擬土壤結構間互制行為之介面元素、樑元素、版元素、牆元素、樁、埋入式樁、地錨及支撐等。內含多種土壤應力-應變組合律模式，包括Mohr-Coulomb組合律。運算時可選用階段施工（Staged construction）來分階段模擬循序施工步驟。

3-3 地質概述：

本研究案例工址位置之地質鑽探成果報告書內鑽探報告孔位為 DB-03-14、DB-04-01、DB-04-02、DB-04-03 為主，其地層狀況簡化表如下表：

表一 設計用土層簡化剖面及建議參數(DB-04)

層次	土壤分類	深度(m)	N	r_t (t/m ²)	S_u (t/m ²)	C_c	C/C'	ϕ / ϕ'
1	C1 夾 ML 及 SM	4.50	2-12 (7)	1.98	4.40	-	-/0.0*	-/27.0*
2	SM 夾 CL 及 ML	17.00	3-34 (14)	1.95	-	-	-/0.0*	-/31.0*
3	CL、ML 偶 夾 SM	24.00	4-16 (9)	1.94	5.60	0.225	-/0.0*	-/30.0*
4	泥岩	28.00	67->10 0	2.27	-	8.9	-/5.0*	-/25.0*

本研究案例採用之地質、地質改良及基樁模擬參數如下

表二、Plaxis 3D 輸入之地層及地質改良參數

Name	1-CL 回填土	2-SM	3-CL	4-Mud	Pier	1-CL 改良	2-SM 改良	3-CL 改良
	CL 夾 ML 及 SM	SM 夾 CL 及 ML	CL、ML 偶夾 SM	泥岩	墩柱	CL 夾 ML 及 SM	SM 夾 CL 及 ML	CL、ML 偶夾 SM

範圍	m	0~4.5	4.5~17.0	17.0~24.0	24.0~40.0				
Model		Mohr-Coulomb				線彈性	Mohr-Coulomb		
Type		不排水	排水	不排水	不排水	Non-porous	不排水	不排水	不排水
γ_{unsat}	[kN/m ³]	18.8	18.5	18.4	21.7	24	18.8	18.5	18.4
γ_{sat}	[kN/m ³]	19.8	19.5	19.4	22.7	-	19.8	19.5	19.4
k _x	[m/day]	1.0e-7	1.0e-4	1.0e-7	1.0e-7	-	0	0	0
k _y	[m/day]	1.0e-7	1.0e-4	1.0e-7	1.0e-7	-	0	0	0
k _z	[m/day]	1.0e-7	1.0e-4	1.0e-7	1.0e-7	-	0	0	0
ν	[-]	0.45	0.40	0.40	0.20	0.15	0.35	0.35	0.35
E _{ref}	[kN/m ²]	5000*4.4= 2.2e4	500(14+15)= 1.45e4	5000*5.6= 2.8e4	50*750= 3.75e4	2.5e7	8.5e4	8.5e4	8.5e4
c _{ref}	[kN/m ²]	44	0.1 ^{*1}	56	50	-	100	56.6	100
φ	[°]	0	31	0	25	-	0	31	0
ϕ	[°]	-	-	-	-	-	-	-	-
R _{inter}	[-]	0.5	0.66	0.5	0.5	Rigid	0.5	0.5	0.5

地下水位面： -3.5m， *1：程式建議用小值取代零，來改進計算效率

表三 Plaxis 3D 輸入之樁參數

Name		PILE
E	[kN/m ²]	2.5e7
γ	[kN/m ³]	24
Type		Massive Circular Pile
Diameter	m	1.5
Base Resistance F _{max}	kN	29440

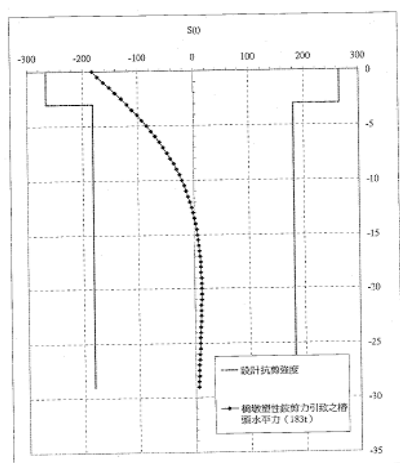
表四 Plaxis 3D 輸入之樁表皮摩擦力（原始） PILE

地層	深度 [m]	L [m]	T [kN/m]
		扣除樁至地表深度 4.4m	
1-CL	0.0~ 4.5	0.0~ 0.1	62.2
2-SM	4.5~17.0	0.1~12.6	46.6
3-CL	17.0~24.0	12.6~19.6	79.1
4-Mud（算至樁底）	24.0~-33.4	19.6~29.0	141.5

四、數值分析模擬結果與分析

本研究案設計採『橋墩弱、基礎強』之設計方式，當強大外力發生時，塑性鉸將發生於橋墩底部與樁帽銜接處，基礎結構系統則不致破壞。經檢視現場(如下圖五)無塑性鉸之破壞現象，橋墩之垂直傾斜率 1/783 及 1/313。

本研究案例之橋墩原設計之塑性鉸剪力 $V_p=3663\text{ t}$ ，單樁承受之最大水平力 $P_H=183\text{ t}$ 。於此載重下原設計之樁身剪應力分佈情形如圖五。

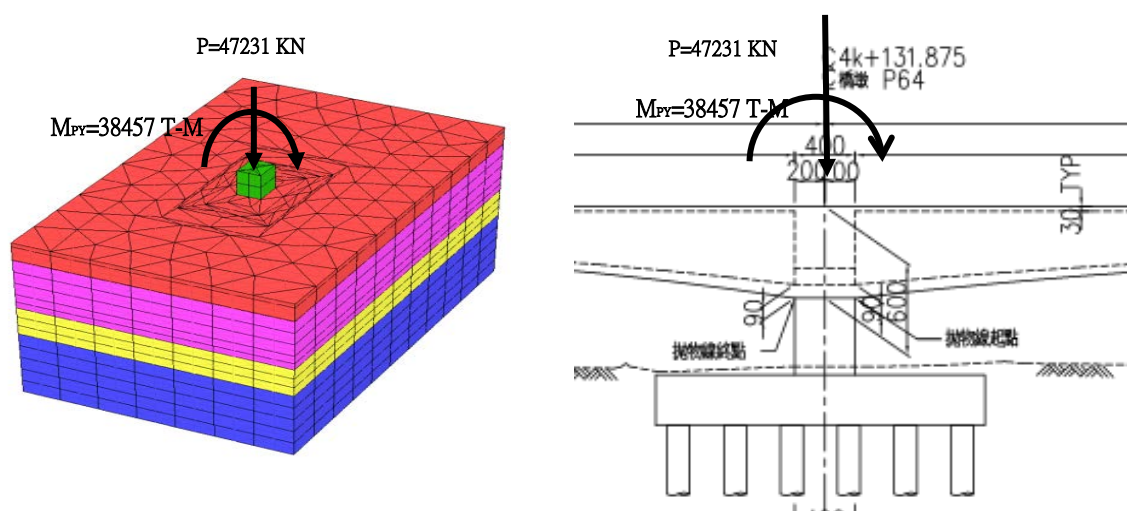


圖五 基樁受水平力 $P_H=183\text{ t}$ ，樁身剪應力圖及橋墩照片

綜上推論事故發生時橋墩所受外力尚低於塑性鉸剪力，亦即橋墩下之基樁所受水平力 P_H 小於 183 t ，因此本案事故引致之樁身剪應力低於設計強度，故以數值分析軟體 Plaxis 3D 程式模擬單樁所受水平力最大 $P_H=183\text{ t}$ 等三種案例，以提供橋墩基礎地質改良合理性評估依據，分析模式及結果如下述：

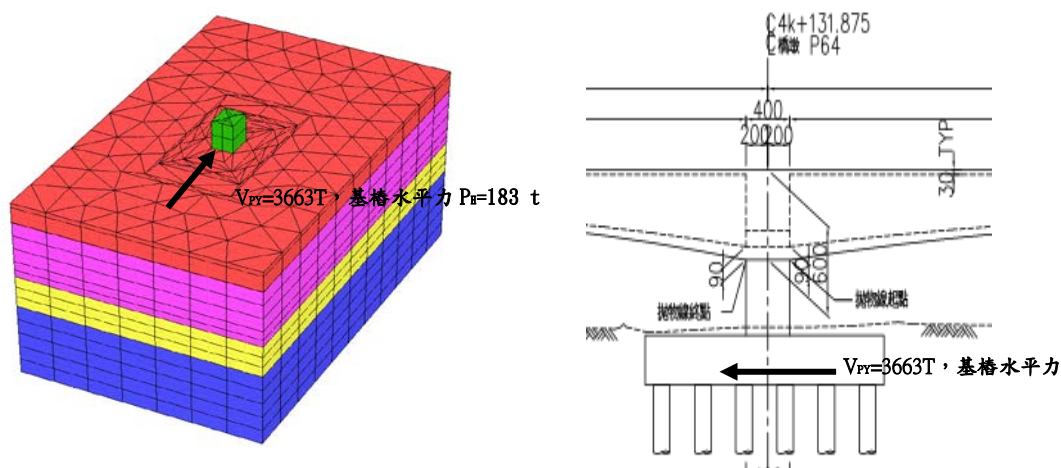
4-1 橋墩基樁地質改良範圍情境模擬分析

- (1) Case1：原設計 $P=47231\text{ KN}$ ， $M_{PY}=38457\text{ T-M}$ 時，以 Plaxis 3D 分析橋墩基樁受力後地表側向變形最大 $U_z=42.84\text{ mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-20.3\text{ mm}$ 。



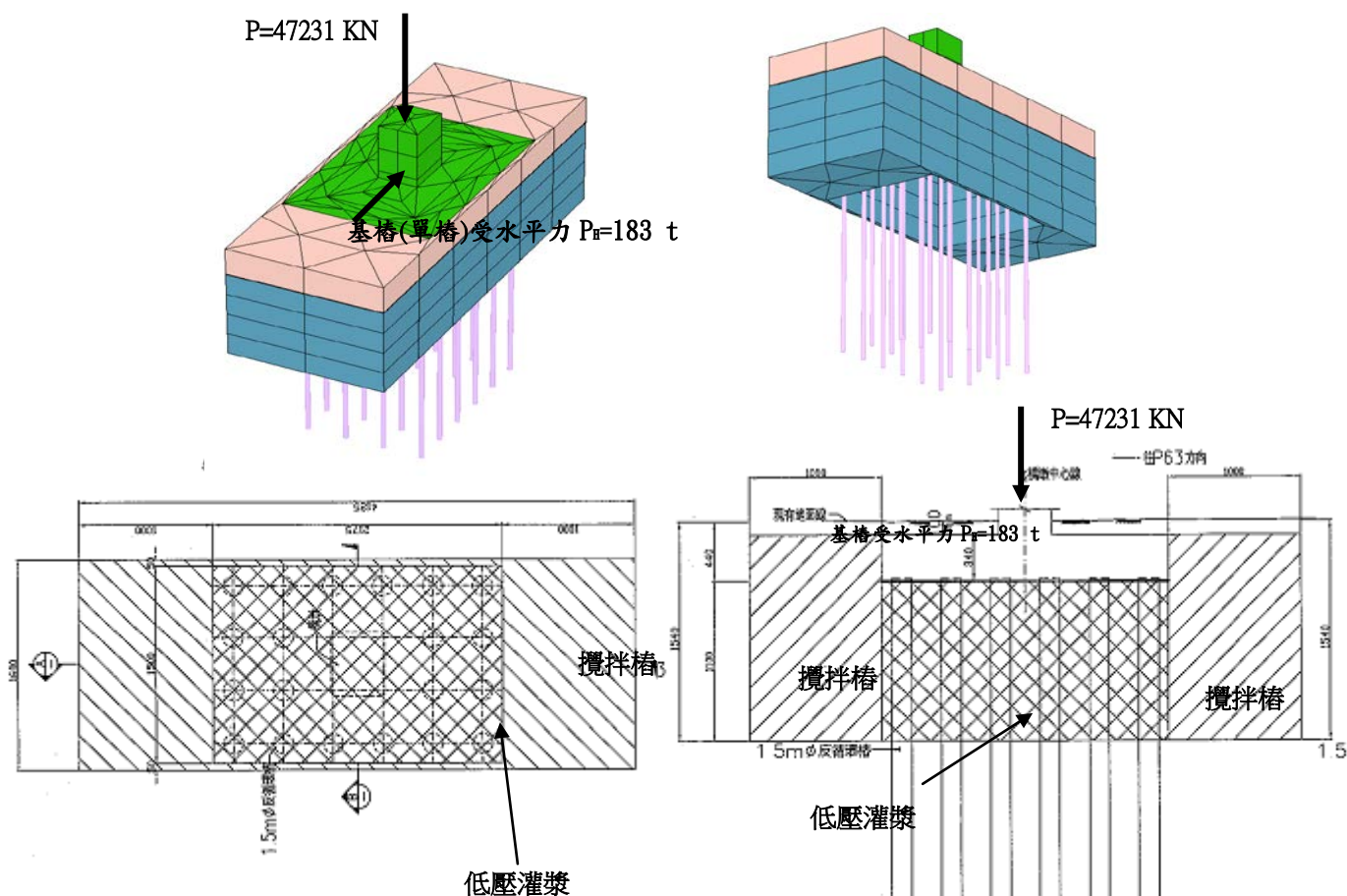
圖六 Case1 原設計 $P=47231\text{ KN}$ ， $M_{PY}=38457\text{ T-M}$ ，PLAXIS 3D 分析模式

(2)Case2：當事故發生時，支撐承受垂直荷重，橋墩受最大水平力 $V_{PY}=3663T$ ，亦即基樁(單樁)受水平力 $P_H=183\text{ t}$ ，以 Plaxis 3D 分析橋墩基樁受力後，地表側向變形最大 $U_z=42.58\text{mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-2.53\text{mm}$ 。



圖七 Case2 當橋墩受 $V_{PY}=3663T$ 時，PLAXIS 3D 分析模式

(3)Case3：灌漿範圍 (16mX41.25mX15.4m)時，橋墩受壓力 $P=47231\text{ KN}$ ，基樁(單樁)受水平力 $P_H=183\text{ t}$ ，以 Plaxis 3D 分析橋墩基樁受力後地表側向變形最大 $U_z=32.33\text{mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-16.6\text{mm}$ 。



圖八 Case 3 範圍灌漿(16mX41.25mX15.4m)，PLAXIS 3D 分析模式

4-2 研究案例分析結果

上述三種分析案例與橋墩基樁受力後地表側向變形最大 U_z 及地表垂直變形(沉陷)最大 U_y 之應變圖整理如下：

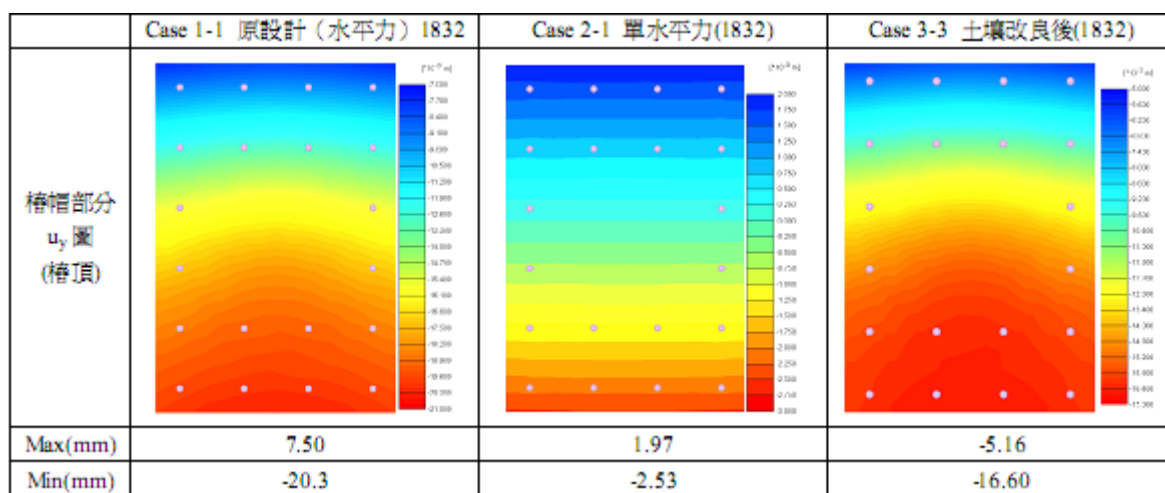
	Case 1-1 原設計(水平力) 1832	Case 2-1 單水平力(1832)	Case 3-3 土壤改良後(1832)
樁帽部分 u_z 圖 (地表)			
Max(mm)	-35.67	-36.98	-27.67
Min(mm)	-42.84	-42.58	-32.33

圖九 三種分析案例與橋墩基樁受力後地表側向變形最大 U_z (mm)

	Case 1-1 原設計(水平力) 1832	Case 2-1 單水平力(1832)	Case 3-3 土壤改良後(1832)
樁帽部分 u_z 圖 (樁頂)			
Max(mm)	-43.74	-43.30	-31.45
Min(mm)	-45.30	-43.56	-34.09

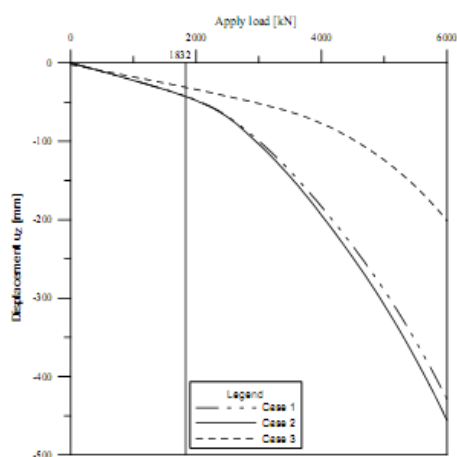
圖十 三種分析案例與橋墩基樁受力後樁頂側向變形最大 U_z (mm)

	Case 1-1 原設計(水平力) 1832	Case 2-1 單水平力(1832)	Case 3-3 土壤改良後(1832)
樁帽部分 u_y 圖 (地表)			
Max(mm)	-5.90	3.35	-4.68
Min(mm)	-21.12	-4.09	-16.89

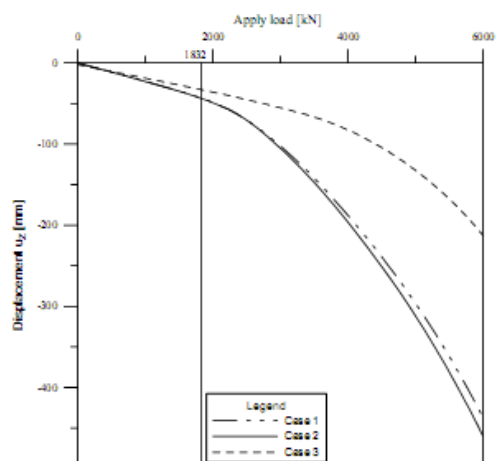


圖十二 三種分析案例與橋墩基樁受力後樁頂垂直變形(沉陷)最大 U_y (mm)

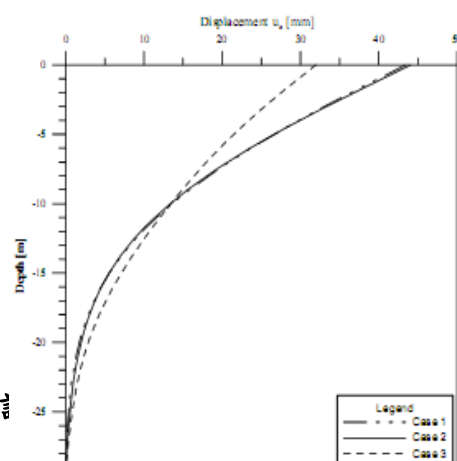
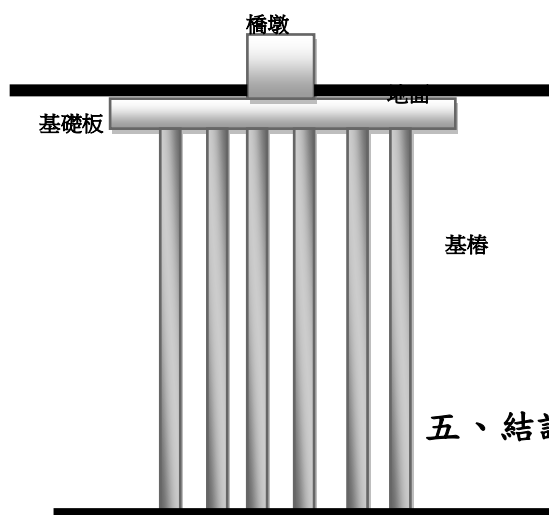
依據基樁對地表側向位移抵抗能力及基樁對地表垂直向位移，評估 Case3 灌漿後確能提高基樁之側向抵抗能力，側向荷重與地表側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖及側向荷重與樁頂側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖如下，灌漿後側向位移抵抗能力提高 25%。



圖十三 側向荷重與地表側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖



圖十四側向荷重與樁頂側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖



五、結論與建議

圖十五 樁身與側向變位 U_z 之關係/case1/case2/case3

本研究案例採『橋墩弱、基礎強』之設計方式，當強大外力發生時，塑性鉸將發生於橋墩底部與樁帽銜接處，基礎結構系統則不致破壞。經檢視現場無塑性鉸之破壞現象，本研究以Plaxis 3D 有限元素分析橋墩基樁探討地質改良方式修復補強之效益，研究結果發現如下：

- (1) 原設計 $P=47231 \text{ KN}$ ， $M_{PY}=38457 \text{ T-M}$ 時，以 PLAXIS 3D 分析橋墩基樁受力後地表側向變形最大 $U_z=42.84\text{mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-20.3\text{mm}$ 。
- (2) 當事故發生時，支撐承受垂直荷重，橋墩受最大水平力 $V_{PY}=3663\text{T}$ ，亦即基樁(單樁)受水平力 $P_H=183 \text{ t}$ ，以 Plaxis 3D 分析橋墩基樁受力後，地表側向變形最大 $U_z=42.58\text{mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-2.53\text{mm}$ 。上述分析結果與事故現場檢測結果相符
- (3) 灌漿範圍 (16mX41.25mX15.4m)時，橋墩受壓力 $P=47231 \text{ KN}$ ，基樁(單樁)受水平力 $P_H=183 \text{ t}$ ，以 Plaxis 3D 分析橋墩基樁受力後地表側向變形最大 $U_z=32.33\text{mm}$ ，地表垂直變形(沉陷)最大 $U_y=-16.6\text{mm}$ 。依據基樁對地表側向位移抵抗能力及基樁對地表垂直向位移，評估 Case3 灌漿後確能提高基樁之側向抵抗能力，側向荷重與地表側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖及側向荷重與樁頂側向位移 U_z 之 $p-\Delta$ 圖，灌漿後側向位移抵抗能力提高 25%。
- (4)以 3D 有限元素模擬基樁在事故後可能之行為，並模擬地質改良對其修復補強之效益、其分析輸入之參數複雜度以及相關構件之模擬與程式之侷限性，總體分析結果雖與實際施工事故後之結果相近，可以提供施工單位修復補強之信心。

六、參考文獻

1. ACI-209
2. AASHTO 9.15-1996
3. 交通部頒『鐵路橋梁設計規範』
4. 『台鐵台南沙崙支線計畫工程第二標(設計施工統包)2K+000~6K+523』混凝土澆置計畫書 97 年 10 月
5. 『台鐵台南沙崙支線計畫工程(3k+982.5~4k+191.248)預力箱型梁坍塌事故原因鑑定報告書』台灣省土木技師公會 98 年 1 月 6 日 98 省土技字第 0039 號
6. 高市土技字第 09800195 號『台鐵台南沙崙支線計畫工程第二標墩柱 P62-P65 跨南 160 道路三跨連續預力箱型梁破壞原因鑑定報告書』
7. JTomlinson, M.J., Pile Design and Construction Practice, Rainbow-Bridge Book Co., Ltd (1977).
8. Rojas, E., Valle, C., and Romo, M. P., §Soil-Pile Interface Model for Axial

Loaded Single Piles," Soils and Foundations, Vol.39, No.4, Aug., pp.35 -45 (1999).