

FLAC^{3D} 於沉埋隧道動態分析之應用

冀樹勇^{*}，林金成^{**}，陳錦清^{***}

摘要

本文主要以穿越高雄港區之沉埋隧道案例，探討 FLAC^{3D} 於三維沉埋隧道動態分析之適用性及隧道在地震作用下之行爲反應，其中包括隧道變形、沉埋管段接頭變位與沉埋管段結構應力等。數值模擬分析中，土壤地層材料應力應變行爲皆以彈塑性模式模擬，沉埋隧道結構則以彈性殼元素模擬，另沉埋隧道管段接頭則以介面元素模擬，以反映相鄰管段之差異變位。分析結果顯示，沉埋管段接頭之軸向伸縮爲隧道安全之主要考量機制，在既有資料推估之分析參數下，分析結果大致已可掌握隧道在設計地震下之行爲反應。

一、前言

高雄港過港隧道自民國 73 年完工通車後，經 20 年的營運結果，並未發生結構體不穩定、應力過高或過度沉陷變形的不正常現象，此顯示過港隧道未受強震侵襲之狀況下，其結構安全性良好。惟根據近年地震研究或建築技術規則之修訂，該區域設計地震 PGA 值至少應由原設計之 0.15g 提高至 0.23g 以上，故結構物之受震安全性應根據最新地震評估結果，進行全面性之檢核，以瞭解其隧道結構之受震安全性。因爲沉埋隧道之受震行爲係三維度之結構土壤互制問題，因此本文嘗試以三維有限差分數值分析程式 FLAC^{3D}，進行分析評估，以探討分析模式之適用性，期能較完整掌握過港隧道於設計地震下之行爲反應，進而評估目前結構設施之耐震能力，提供後續類似工程問題分析之參考。

二、工程概述

高雄港過港隧道以高雄市新生路爲起點，經前鎮漁港與第三貨櫃中心間之漁港南三路，穿過水深 14 公尺，寬 440 公尺之高雄港主航道，至對岸旗津中興商港區，爲四車線隧道，往返各兩車線，分左右兩孔並列，每兩車線淨寬 7 公尺，最小淨高 4.60 公尺，最大縱坡度 4.5%。除兩端聯絡道路外，隧道全長 1,550 公尺，包括穿過主航道沉埋管式隧道段，計埋設沉埋管 6 節，每節長 120 公尺，共長 720 公尺；兩端斜坡引道自深度約 EL.-15 公尺，順 4.5% 坡度達陸上 EL+4.70 公尺，全長 830 公尺（包含前鎮端開口引道 259.25 公尺，箱涵引道 155.75 公尺；中興端開口引道 249.25 公尺，箱涵引道 165.75 公尺）。沉埋管 6 節計有 7 處接頭，其中柔性接頭 6 處，剛性接頭 1 處，如圖 1 所示。柔性接

* 中興工程顧問社大地工程研究中心經理

** 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

*** 中興工程顧問社副執行長

頭(如圖 2 所示)端面裝設 Gina 止水橡膠墊圈，於沉埋管沉放時緊密接合，達成止水作用；內層再裝設第二道 Ω 型橡膠止水環，並考慮接頭抵抗地震及基礎不均勻沉陷之安全性，另裝設水平與垂直剪力樺及拉緊裝置。為方便沉埋管之沉放，第五處接頭 J5 設計為剛性接頭。

沉埋管之基礎採連續支承方式，於沉埋管底與基槽底間先鋪設碎石，再由預埋之灌砂管自外部灌砂及水泥熟料至管底，厚度約 1 公尺，最後再以水泥皂土砂漿填充其餘孔隙。根據相關地質及鑽孔資料研判，隧道路線所經之地層均為未膠結之現代沖積層(如圖 3 所示)，主要組成爲砂、粉土及黏土，地層多分類爲粉土質砂層或粉土質黏土層。既有地質資料並未顯示有任何地質構造經過計畫區。

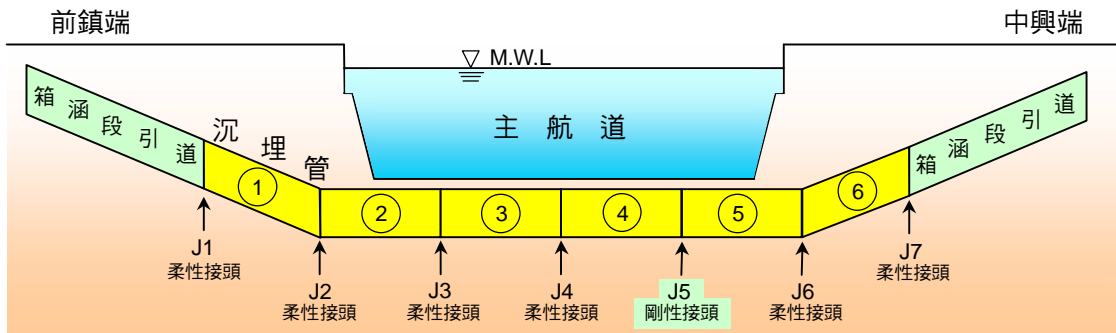


圖 1 過港隧道沉埋管分段與接頭分布示意圖

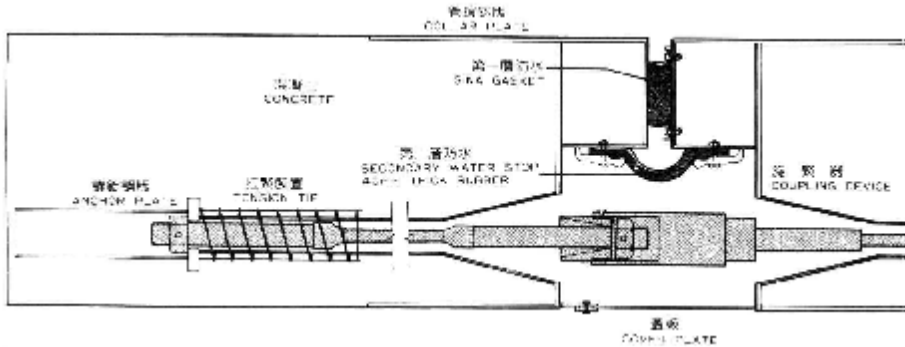


圖 2 沉埋管柔性接頭

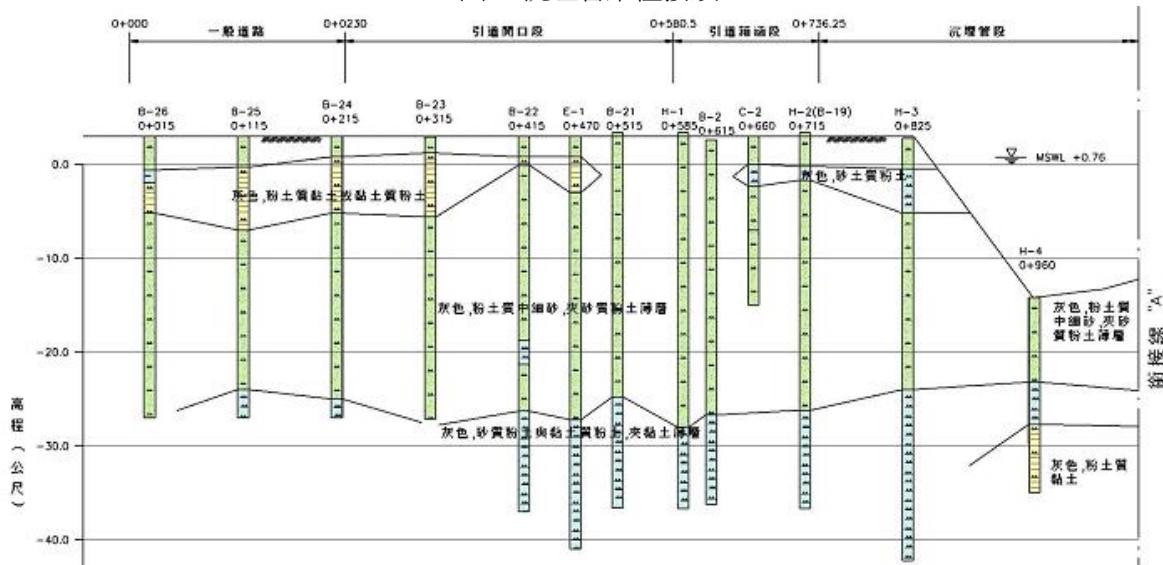


圖 3 隧道地質剖面圖

三、分析模式

一般地下結構物之耐震分析方法可分為地震係數法、強制變位法及動態反應分析法等。其中前兩種分析方法因簡化分析模式，僅能獲得局部結構物之仿靜態反應，對於地震過程中隧道之動態行為，則無法藉由該兩方法進行評估。動態反應分析，目前工程實務上所使用之分析程式除一般泛用型程式外，針對大地工程問題所發展之軟體如表 1(Kramer and Paulsen, 2004)所示，其中等值線性模式之程式屬早期發展且應用最為廣泛之分析程式，但因其僅在頻率域內求解動力方程式，故無法求得土壤之塑性永久變形，因此在評估地盤之變位時，往往需輔以相關材料試驗結果與其它方法。非線性模式分析法係在時間域內直接求解地盤反應，包括加速度、應變與變位歷時等，故其應用已日益普遍，且因土壤材料模式之改進，該分析模式已逐步取代等值線性分析模式，而成為大地工程動態分析之主流。

表 1 應用於工程實務之大地工程動態分析程式(摘自 Kramer and Paulsen, 2004)

維度	作業系統	材料組構模式	
		等值線性	非線性
1-D	DOS	Dyneq, Shake91	AMPLE, DESRA, DMOD, FLIP, SUMDES, TESS
	Windows	ShakeEdit, ProShake, Shake2000, EERA	CyberQuake, DeepSoil, NERA, FLAC, ShearBeam
2-D	DOS	FLUSH, QUAD4/QUAD4M	TARA-3, FLIP, DYSAC2, LIQCA
	Windows	QUAKE/W	PLAXIS, FLAC
3-D	DOS	TLUSH	DYNAFLOW, VERSAT
	Windows	SASSI2000	FLAC ^{3D}

(一) 設計階段耐震分析

高雄過港隧道原設計階段之耐震分析，分別採用近似靜態解與質點模式(模式 Okamoto-Tamura)之動態反應分析兩種方法，進行隧道結構與管段接頭之耐震評估(康乃恭，1987)。前者將隧道模擬為承受波傳遞之連續體，求其近似靜態解；後者則將隧道模擬為以等值彈簧系統支承之集中質點系統，承受地盤振動，進行動態分析求得動力解。為保守起見，其結果取兩者較大者作為設計值。在隧道本體之耐震設計 PGA 0.15g，與接頭設計 PGA 0.23g 之設計條件下，其分析結果顯示：隧道縱向最大彎矩為 28,500 t-m、最大剪力 844 t、最大軸向力 3,900 t、最大接頭轉角為 3.39×10^{-4} 弧度及最大接頭縱向分離 29.2 mm。以上之分析結果，係假設整體隧道為一維之連續梁或沿隧道軸向分布之集中質點模式，故其地震反應僅沿隧道之軸向變化。

(二) FLAC^{3D} 分析模式

本文採用美國 Itasca 公司發展之三維地工分析電腦程式 FLAC^{3D} 進行數值模擬分析，FLAC^{3D} 係以有限差分方法配合內建可選擇之土壤分析模式進行時間域之動態分析，分析時之邊界條件採用自由場邊界(Free Field Boundary)消除分析時分析域內材料與邊界波傳能量反射之影響，分析時並可依

需求記錄地盤運動過程中土層各點之加速度、動態應力及位移歷時。本文由基地地質資料建立分析區域與分析網格，其整體隧道及地層之三維分析之示意網格如圖 4 與圖 5 所示。網格區域範圍以涵蓋隧道全長之區域為主，包括沉埋段及箱涵段引道範圍，其平面尺度為 1800 m × 90 m，垂直深度範圍取至地表下 60 m。雙孔隧道結構以殼元素模擬，其沉埋段之接頭部分網格如圖 6 所示。

在材料模式部分，因為既有鑽探資料與試驗資料缺乏之情況下，無法以精確之材料模式模擬，故就一般工程實務分析上，採用簡化之材料模式進行分析。土壤地層以遵循 Mohr-Coulomb 降伏準則之彈塑性材料模擬，結構殼元素採線彈性材料模擬。

(三) 設計地震及材料參數

本文之設計地震評估並未依據最新地震資料進行地震危害度分析，因此採用既有之區域地震反應譜產生人工合成設計地震。圖 7 為高雄前鎮旗津第三類建物耐震規範反應譜，若取再現週期 475 年，再利用 SIMQUAKE 程式產生人工合成設計地震加速度歷時如圖 8 所示，其 PGA 為 0.23g，圖中僅取歷時 20 秒並以該地震歷時作為動態分析之縱向及水平橫向輸入地震。沉埋隧道以上之海水係以固體元素模擬，其體積模數 K 取 2×10^7 kPa、剪力模數 G 取 1.2×10^2 kPa，模式中以極小之剪力模數模擬海水之無剪力強度行為；另沉埋管段接頭部分，採介面(Interface)元素模擬，其正向勁度 K_n ，依據 Gina 止水橡膠墊圈之變形—壓縮曲線，並考慮其受地震作用下之平均壓縮量，取 5×10^6 kPa；剪切勁度 K_s 則取 5×10^6 kPa。

高雄過港隧道原規劃設計階段已進行地質調查，其地層分層依據以往鑽探結果概分，而其材料強度則依據各分層土壤性質與參考類似地層之材料特性推估，表 2 為分析模式所採用之地層材料參數。

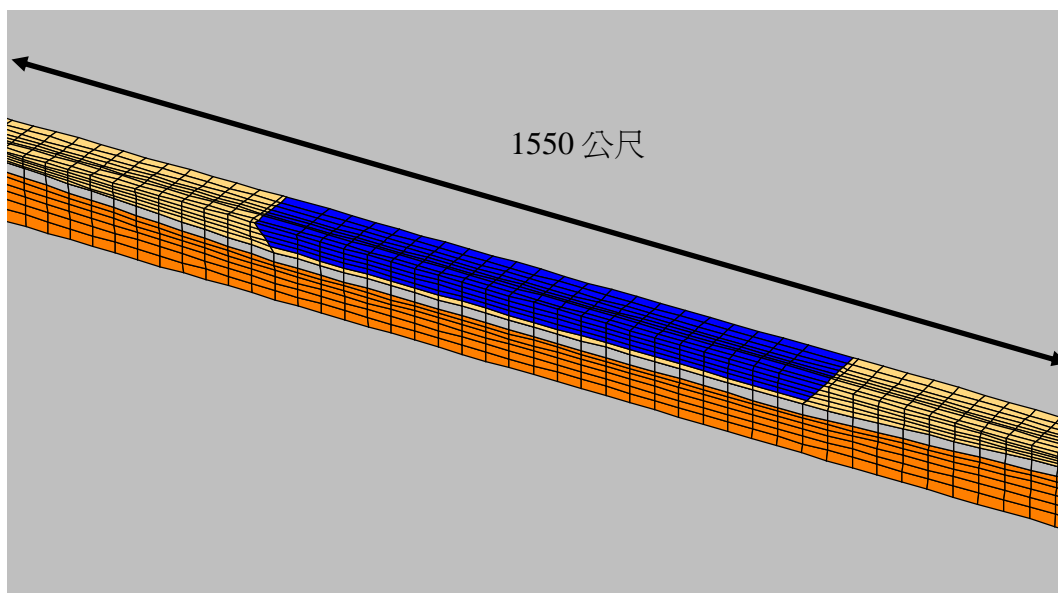


圖 4 過港隧道三維分析網格(全區域)

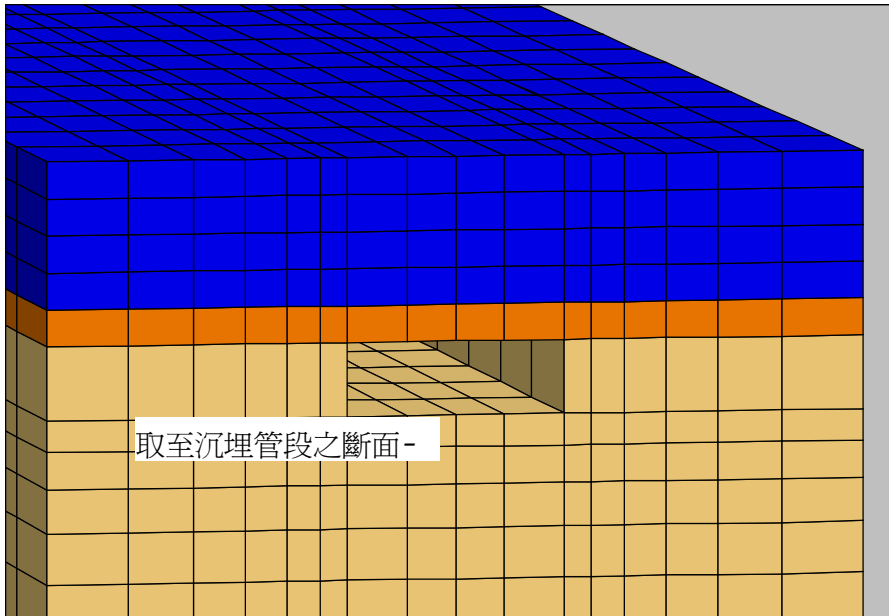


圖 5 過港隧道三維分析網格(橫斷面)

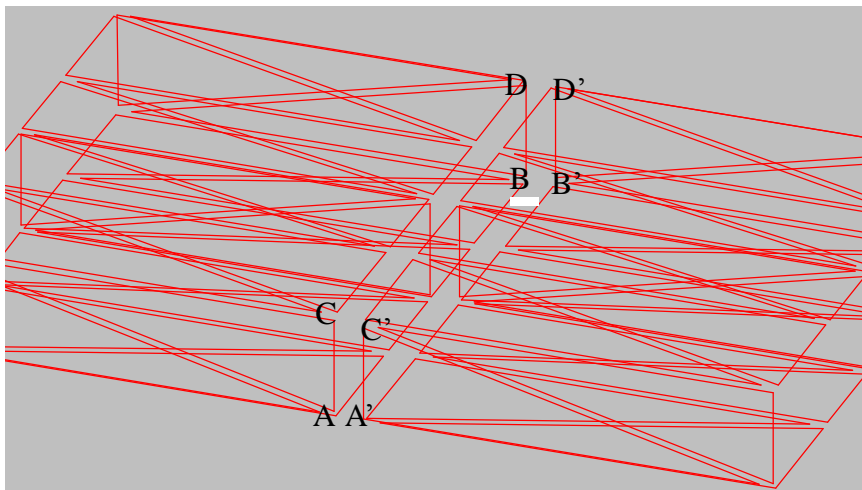


圖 6 動態分析之雙孔隧道結構網格示意圖

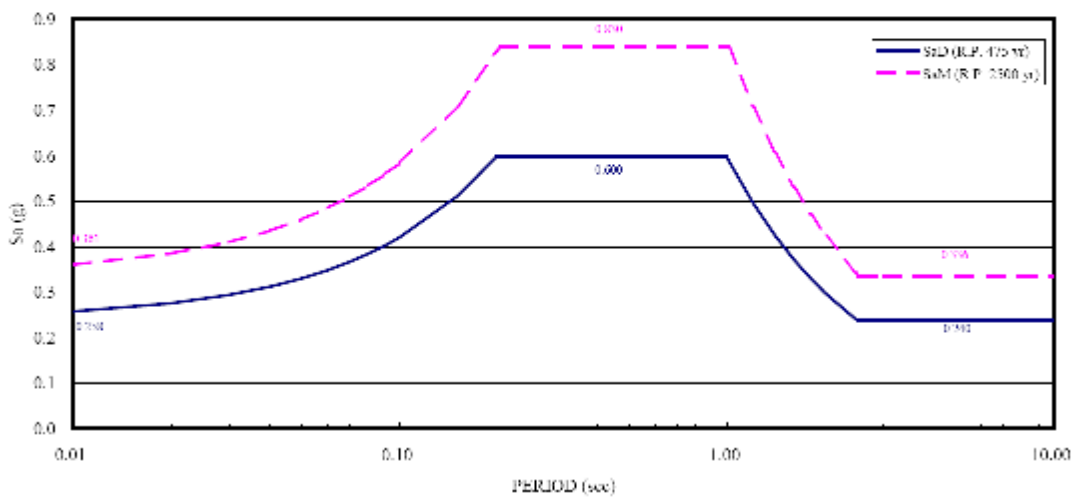


圖 7 前鎮旗津第三類建物耐震規範反應譜(2002)

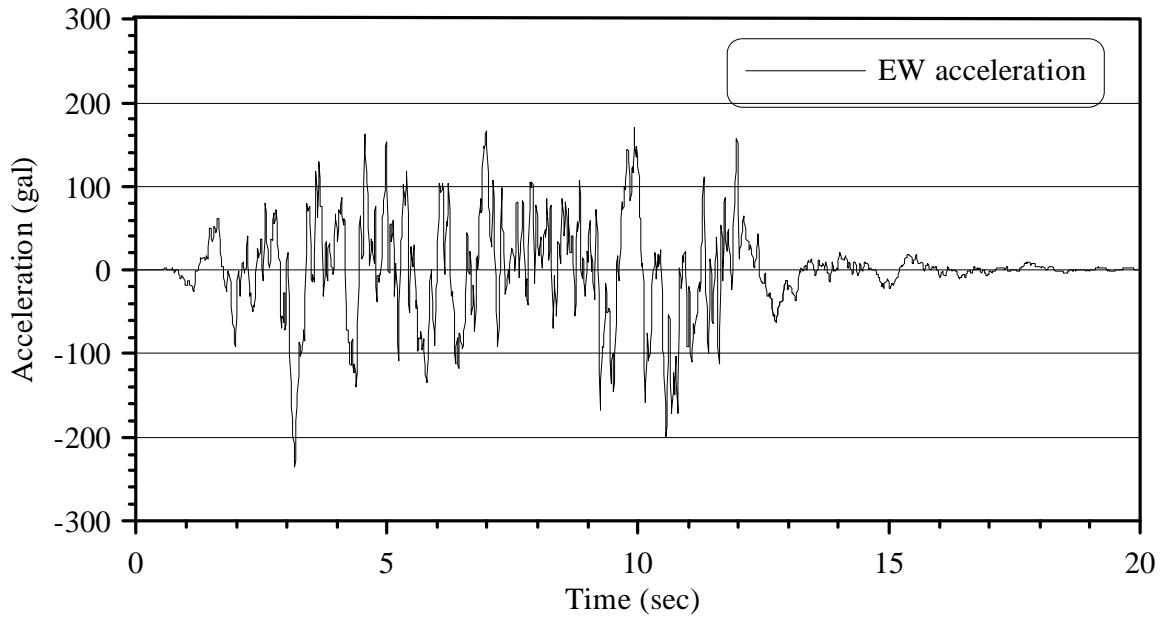


圖 8 分析所用設計地震歷時

表 2 分析所採用之簡化地層參數表

土層分層	深度 (m)	單位重 (T/m ³)	摩擦角 ϕ (deg.)	凝聚力C (kPa)	彈性模數 (kPa)	包松比
Layer 1	0~10	2.0	30	0	132480	0.38
Layer 2	10~20	2.0	32	0	281520	0.38
Layer 3	20~30	2.0	32	0	331200	0.38
Layer 4	30~40	2.0	32	0	317400	0.38
Layer 5	40~60	2.0	34	0	414000	0.38

四、分析結果

本文之三維動態分析採用 $FLAC^{3D}$ 程式進行，其中土壤以固體元素模擬、隧道以結構殼元素模擬、各沉埋管段之柔性接頭則以界面元素模擬，並考慮第 4 與第 5 節沉埋管段間為剛性接頭。分析模型並採用自由域邊界，以消除地震波遇分析邊界之能量反射。

分析結果顯示，沉埋管第二節最大縱向軸力為 3,730T，與原設計最大縱向軸力 3,900T 相當。接頭相對變位分析結果如圖 9(a)及圖 9(b)所示，其中接頭縱向相對變位較側向相對變位明顯，顯示沉埋隧道在設計地震作用下之管段接頭以縱向相對變位為主。表 3 為各接頭不同節點處在地震後之永久軸向伸縮量，其中接頭 J2(沉埋管第 1 與第 2 管段接頭)處產生之壓縮量為最大，顯示斜坡段沉埋管有向下滑動造成 J2 接頭壓縮之現象。對於 Gina 止水橡膠墊圈將產生影響，其壓縮量由原始靜水壓力作用下之 123mm 與地震作用下增加之 14mm(接頭 J2 節點 D)，總變形量達 147mm，對照 Gina

止水橡膠墊圈之變形－壓縮曲線，其承受之壓力是否超過非經常性之最大壓力 6,000kN/m，有待進一步蒐集相關資料進行評估。表 4 為利用接頭斷面節點變位量所計算之接頭角變量，各接頭之角變量普遍大於因靜載重作用下不均勻沉陷所造成之角變量達 10 倍以上。

將接頭斷面各節點之相對變位量平均，並與原設計之接頭伸縮量比較，如表 5 所示。整體而言，各接頭之平均伸縮量皆仍在設計範圍內，顯示設計具有相當程度之保守性，其中接頭 J2 之平均壓縮量較大，應為接頭檢查評估之關鍵位置。若將地震歷時過程中，接頭之相對變位歷時之最大值摘出，如表 6 所示，各接頭相對變位歷時之最大值普遍高出震後永久相對變位達 10% ~ 40% 以上。

耐震分析結果顯示，各隧道管段本身結構在地震歷時中之應力大致皆在設計強度範圍內，且各柔性接頭相對變形量亦在設計範圍，惟分析結果係在部份假設條件下獲得，假設條件包括以往之設計地震、推估之地層材料參數與所採用之分析材料模式。

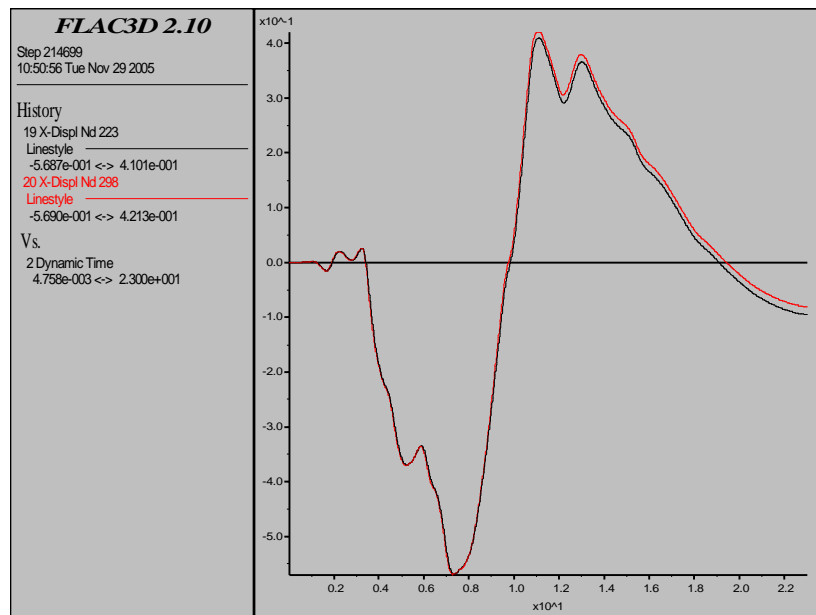


圖 9(a) 柔性接頭 J2 兩側縱向變位歷時

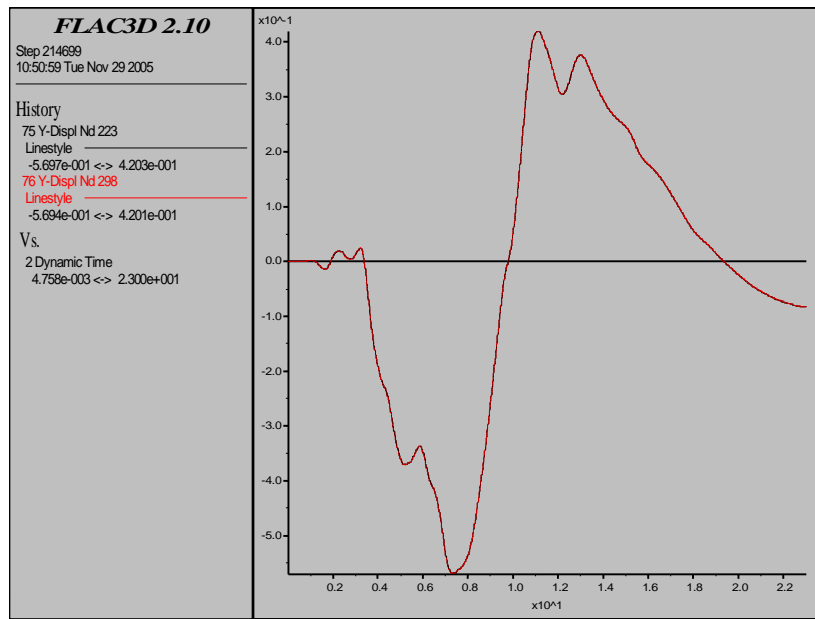


圖 9(b) 柔性接頭 J2 兩側水平向變位歷時

表 3 地震後接頭不同位置之縱向變位量

接頭編號	設計採用值(縱向)		分析之接頭縱向相對變位* (震後, cm)			
	伸張 cm	壓縮 cm	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'
1	2.8	2.5	-1.2	-0.6	-0.9	-0.7
2	2.8	2.5	-1.3	-1.5	-1.3	-1.4
3	2.7	2.4	-0.3	-0.5	-0.3	-0.5
4	2.5	2.3	0.1	0.0	0.1	0.0
5	-	-	-	-	-	-
6	2.9	2.7	0.9	0.9	0.9	1.0
7	2.7	2.4	0.9	0.9	0.9	0.9

*正號代表伸張；負號代表壓縮。分析節點如圖 1 所示。

表 4 地震後之接頭角變量

接頭編號	分析之角變量 (震後)	
	垂直向	水平向
1	6.00E-05	6.67E-06
2	-1.93E-04	8.71E-05
3	2.87E-05	2.70E-05
4	1.12E-05	2.87E-05
5	-	-
6	-8.88E-05	-4.21E-05
7	-3.76E-04	2.27E-04

註：垂直向：頂版與底板之平均相對變位/頂版與底板間之高度
 水平向：兩側牆之平均相對變位/兩側牆間之寬度

表 5 地震後接頭平均變位量

接頭編號	設計採用值(縱向)		分析之相對變位 (震後)	
	伸張 cm	壓縮 cm	縱向 cm *	水平 cm
1	2.8	2.5	-0.84	0.02
2	2.8	2.5	-1.37	-0.10
3	2.7	2.4	-0.41	0.04
4	2.5	2.3	0.08	0.03
5	-	-	-	-
6	2.9	2.7	0.94	0.13
7	2.7	2.4	0.91	0.12

*正號代表伸張，負號代表壓縮

表 6 地震歷時中引起之平均接頭最大變位量

接頭編號	設計採用值(縱向)		分析之相對變位		
	伸張 cm	壓縮 cm	縱向		水平 cm
			伸張 cm	壓縮 cm	
1	2.8	2.5	1.2	0.7	0.1
2	2.8	2.5	2.5	1.3	0.2
3	2.7	2.4	0.1	0.1	0.1
4	2.5	2.3	0.4	0.9	0.1
5	-	-	-	-	-
6	2.9	2.7	1.4	2.0	0.6
7	2.7	2.4	0.6	1.4	0.1

五、結論

綜合本文之耐震初步分析結果，所採用之三維動態歷時分析模式，可掌握以往設計階段因電腦科技與數值分析技術之限制而無法評估土壤與結構受力變形之行爲，並針對過度簡化模式所造成結構局部破壞行爲進行評估，以爲後續改善補強設計之參考。分析結果可歸納結論如下：

1. 時間域動態分析已爲地震模擬之發展趨勢，不僅因爲可求得地盤震後變形，更可藉由適當之材料模式，掌握地盤材料於地震過程中複雜的力學行爲反應。
2. 沉埋隧道之耐震分析屬三維度之物理問題，其關鍵在於沉埋段之接頭耐震能力上，屬局部之行爲反應。依據本文初步分析結果，隧道接頭之軸向伸縮變形爲主要控制之破壞機制，其接頭之材料強度與受震下之行爲反應，應爲後續營運維護之重點關切項目之一。
3. 土壤結構互制分析在時間域之歷時分析模式下，其行爲反應受地震加速度歷時與材料彈塑性模式影響至鉅，故詳細之地震危害度分析與材料地質調查及試驗，可使分析結果更爲精確，且更具營運維護之參考價值。

六、誌謝

感謝中興工程顧問公司大地工程部提供本文所需之相關資料，使本文得以順利完成。

參考文獻

1. Kramer, S. L. and Paulsen, S. B., "Practical Use of Geotechnical Site Response Models", Pacific Earthquake Engineering Research Lifeline Program Report, (2004).
2. Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I.M. and Makdisi, F., "Analysis of the Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971", *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 73-2*, University of California, Berkeley, June. (1973)
3. *Manual of FLAC3D, Version 2.1*, Itasca Consulting Group, Inc. Vol. 1-5, Minneapolis, Minnesota, U. S. A. (1986).
4. 康乃恭，「高雄港過港海底隧道工程設計及施工」，土木水利，第十三卷，第四期，pp. 61-91 (1987)