

行政院國家科學委員會

八十八年度石油暨石化產業科技學術合作研究計畫

地層變位對地下管線安全之影響

中華民國八十九年一月

地層變位對地下管線安全之影響
Effect of Ground Deformation on Safety
of Underground Pipelines

期末報告

委託單位：中國石油股份有限公司

計畫類別：石油暨石化科技

計畫編號：NSC88-CPC-E-009-011

執行期間：87年8月1日至88年12月31日

計畫主持人：陳誠直

研究助理：郭建志、吳伯家

執行單位：國立交通大學

摘要

地下管線於承受地層變位之反應已逐漸受重視，其原因在於管線破壞之影響範圍廣大，故本研究探討地下管線遭受側向地層變位時之行為，以有限元素分析程式，考慮管線外徑、回填土壤性質、與變位大小等影響參數，進行地層變位之模擬，探討管線之行為；並進行十二組實尺寸鋼管試體於承受高壓與撓曲作用時之極限撓曲強度與韌性行為，製作之試體包括鋼管對銲試體與以全圓周套管修補之鋼管試體。

數值模擬結果顯示，有限元素分析程式可適當的應用進行三維實體管線及土壤之模擬以探討管線之行為。當土層之剪動量越大，管線所受之應力會越大，且有明顯增加之趨勢。小管徑管線在土層有錯動時，其應力變化增量有隨錯動量成比例之傾向，即小管徑管線與土壤間之應力交互作用相當明顯；大管徑則沒有明顯之比例，惟其應力變化增量隨土壤勁度之增加而增大。由模擬結果亦發現小尺寸管徑於土壤相同錯動量下，管線之應力並不隨土壤勁度之變化而改變，即小管徑管線受回填土壤勁度之影響較小。

試驗結果顯示，相較於小地層變位易受損之管線接頭，鋼管對銲接合提供管線穩定之撓曲強度與優良之韌性行為。地下管線之破損洩漏，除更換及於 Gr. A 與 Gr. B 鋼管材質之以鋼板修補外，採用全圓周套管銲接修補之方式，能夠有效維持鋼管之撓曲強度與變形能力。

地下管線承受地層變位時之評估方式，可保守的假設管線完全依地層錯動而變形，以計算因變位造成的應力。因鋼管具有優良的延

展性，地下管線安全評估除考慮到強度之限界狀態，所需考慮到的另一限界狀態為其變形量或局部挫屈行為。

關鍵字：地下管線、地層變位、有限元素分析、鋼管撓曲試驗、壓力管線

Abstract

Significant damage can occur due to the ground deformation over the buried pipelines, which can be related to fault crossings, pipeline lowering, subsidence and active slope movement. This emphasizes the need for the research to study the effect of ground movement on safety of buried pipelines.

An numerical simulation was conducted to study the effect of parameters such as the diameter of pipeline, backfilled soil property, and the magnitude of the ground deformation on the pipelines. An experiment was also conducted to investigate the ultimate flexural strength and deformation capacity of the pressurized steel pipelines. Twelve full-scale specimens were fabricated and radiographic testing and included the type of butt-weld steel pipes and full encirclement welded split sleeve repaired steel pipes. Each specimen was subjected to a lateral deformation of a four-point bending test to simulate the flexural behavior of a buried pipeline.

The results of finite element analyses show that the analysis are capable of modeling the behavior of buried pipelines. The changes in stiffness of the backfilled soil can affect the behavior of the buried pipelines, especially for the larger diameter pipes; however, the stiffness of the backfilled soil has less effect on the behavior of smaller diameter pipelines. Moreover, the higher magnitude of the ground movement will result in higher stresses for the smaller diameter pipelines which are approximately proportional to the magnitude of the ground movement.

Test results show that the API 5L steel pipes with butt-weld joint have significant ultimate strength and ductility. The full encirclement

welded split sleeve provides an excellent repair procedures for steel pipelines to resist the flexural bending and lateral deformation.

Both the numerical and experimental results indicate that the evaluation of the safety of buried pipelines can be done conservatively by assuming the pipelines subjected to the same magnitude of the ground deformation. The limit states of the deformation or local buckling of the buried pipelines shall be considered in addition to the limit state of the strength.

Key words: buried pipeline, ground deformation, finite element analysis, flexural test, pressurized pipeline.

誌謝

本研究承中國石油股份有限公司提供研究經費，於研究進行期間，中國石油股份有限公司諸多同仁給予協助，更蒙探採研究所林國安所長、總公司高遠普、范垂礪總工程師、謝正行組長、台灣油礦探勘總處黃坤江隊長與新竹營業處羅國鵬工程師等熱心協助，特此致謝。此外，國家高速電腦中心及該中心李俊宏、李銘孝副研究員等亦熱心給予幫忙，在此一併致謝。

目錄

摘要	i
Abstract	iii
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	ix
圖目錄	x
照片目錄	xiv
第一章 緒論	1
1.1 簡介	1
1.2 研究背景	2
1.3 研究目的	3
1.4 研究方法	3
第二章 文獻回顧與相關規範	5
2.1 國內外文獻蒐集	5
2.2 相關規範	11
第三章 中油公司地下管線與相關施工規範	12
3.1 中油公司地下管線概述	12
3.2 中油公司地下管線施工規範	12
第四章 數值模擬	17
4.1 前言	17
4.2 有限元素分析程式 ABAQUS 簡介	17
4.3 分析模式建立	21
4.3.1 模型建立	21
4.3.2 地下管線及周圍土壤之模擬	23

4.3.3 地層變位之模擬	23
4.3.4 模型資料及歷程	24
4.4 有限元素分析結果	25
4.4.1 鋼管 von Mises 之應力	25
4.4.2 地層變位對土壤應力之影響	27
4.5 結論	28
第五章 鋼管撓曲試驗	30
5.1 概述	30
5.2 試體規劃與製作	30
5.3 材料性質試驗	33
5.4 試驗設置與步驟	33
5.4.1 試驗設置	33
5.4.2 試驗步驟	34
5.5 試驗結果	35
5.5.1 第一組試體 (八吋鋼管)	35
5.5.2 第二組試體 (十吋鋼管)	36
5.5.3 第三組試體 (十二吋鋼管)	36
5.6 結果討論	36
5.6.1 鋼管接合方式之影響	38
5.6.2 管內壓力之影響	38
5.7 結論	38
第六章 結論與建議	40
6.1 結論	40
6.2 建議	41
參考文獻	43

附表	49
附圖	54
附照片	92
附錄 放射線照相檢驗報告	97

表目錄

表 4.1 ABAQUS 之材料模式.....	49
表 4.2 土壤及鋼管材料參數.....	50
表 5.1 試體規格表	51
表 5.2 鋼管之材料強度表	52
表 5.3 各試體之彈性勁度及塑性勁度表	52
表 5.4 各試體降伏撓曲強度之試驗值與理論值之比較.....	53
表 5.5 各試體達 $3\Delta_y$ 時之撓曲強度.....	53

圖目錄

圖 3.1 鋼管周向銲道詳圖	54
圖 4.1 ABAQUS 模型建構.....	55
圖 4.2 ABAQUS 輸入流程.....	55
圖 4.3 不同型態之元素	56
圖 4.4 土壤-鋼管有限元素模型.....	56
圖 4.5 Mohr-Coulomb 破壞準則	57
圖 4.6 (a) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=10$ MPa).....	57
圖 4.6 (b) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=30$ MPa)....	58
圖 4.6 (c) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=50$ MPa)....	58
圖 4.7 (a) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=10$ MPa)...	59
圖 4.7 (b) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=30$ MPa)...	59
圖 4.7 (c) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm ($E_i=50$ MPa)...	60
圖 4.8 土層剪動 5cm 鋼管 von Mises 應力- E_i 關係圖	60
圖 4.9 (a) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=10$ MPa)..	61
圖 4.9 (b) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=30$ MPa)..	61
圖 4.9 (c) 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=50$ MPa)..	62
圖 4.10 (a) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=10$ MPa)	62
圖 4.10 (b) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=30$ MPa)	63
圖 4.10 (c) 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10 cm ($E_i=50$ MPa)	63
圖 4.11 土層剪動 10cm 鋼管 von Mises 應力- E_i 關係圖	64
圖 4.12 8"鋼管於地層不同剪動量 von Mises 應力- E_i 關係圖.....	64

圖 4.13 24"鋼管於地層不同剪動量 von Mises 應力- E_i 關係圖...	65
圖 4.14 土層剪動 5cm 鋼管正向應力- E_i 關係圖	65
圖 4.15 土層剪動 10cm 鋼管正向應力- E_i 關係圖	66
圖 4.16 8"鋼管於地層不同剪動量時正向應力- E_i 關係圖	66
圖 4.17 24"鋼管於地層不同剪動量時正向應力- E_i 關係圖	67
圖 4.18 (a) 8"鋼管土體剪動 10cm 之土體應力($E_i=10$ MPa)	67
圖 4.18 (b) 8"鋼管土體剪動 10cm 之土體應力($E_i=30$ MPa)	68
圖 4.18 (c) 8"鋼管土體剪動 10cm 之土體應力($E_i=50$ MPa)	68
圖 4.19 (a) 24"管土層剪動 10cm 之土體應力($E_i=10$ MPa)	69
圖 4.19 (b) 24"管土層剪動 10cm 之土體應力($E_i=30$ MPa)	69
圖 4.19 (c) 24"管土層剪動 10cm 之土體應力($E_i=50$ MPa)	70
圖 4.20 土體剪動 5cm 鋼管周圍土壤應力- E_i 曲線	70
圖 4.21 土體剪動 10cm 鋼管周圍土壤應力- E_i 曲線	71
圖 4.22 8"鋼管於地層於不同剪動量時土體應力- E_i 關係圖	71
圖 4.23 24"鋼管於地層不同剪動量時土體應力- E_i 關係圖	72
圖 5.1 鋼管試體詳圖	73
圖 5.2 拉力試片圖	73
圖 5.3 八吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖	74
圖 5.4 十吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖	74
圖 5.5 十二吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖	74
圖 5.6 試驗設置示意圖 (俯視圖)	75
圖 5.7 位移計位置圖	75
圖 5.8 應變計位置圖	76
圖 5.9 試體 P08 側向力-變位關係圖	77
圖 5.10 試體 P08 側向力-軸向應變關係圖	77

圖 5.11 試體 P08 側向力-環向應變關係圖	77
圖 5.12 試體 P08SP 側向力-變位關係圖	78
圖 5.13 試體 P08SP 側向力-軸向應變關係圖	78
圖 5.14 試體 P08SP 側向力-環向應變關係圖	78
圖 5.15 試體 P08SO 側向力-變位關係圖	79
圖 5.16 試體 P08SO 側向力-軸向應變關係圖	79
圖 5.17 試體 P08SO 側向力-環向應變關係圖	79
圖 5.18 試體 P08BW 側向力-變位關係圖	80
圖 5.19 試體 P08BW 側向力-軸向應變關係圖	80
圖 5.20 試體 P08BW 側向力-環向應變關係圖	80
圖 5.21 試體 P10 側向力-變位關係圖	81
圖 5.22 試體 P10 側向力-軸向應變關係圖	81
圖 5.23 試體 P10 側向力-環向應變關係圖	81
圖 5.24 試體 P10SP 側向力-變位關係圖	82
圖 5.25 試體 P10SP 側向力-軸向應變關係圖	82
圖 5.26 試體 P10SP 側向力-環向應變關係圖	82
圖 5.27 試體 P10SO 側向力-變位關係圖	83
圖 5.28 試體 P10SO 側向力-軸向應變關係圖	83
圖 5.29 試體 P10SO 側向力-環向應變關係圖	83
圖 5.30 試體 P10BW 側向力-變位關係圖	84
圖 5.31 試體 P10BW 側向力-軸向應變關係圖	84
圖 5.32 試體 P10BW 側向力-環向應變關係圖	84
圖 5.33 試體 P12 側向力-變位關係圖	85
圖 5.34 試體 P12 側向力-軸向應變關係圖	85
圖 5.35 試體 P12 側向力-環向應變關係圖	85

圖 5.36 試體 P12SP 側向力-變位關係圖	86
圖 5.37 試體 P12SP 側向力-軸向應變關係圖	86
圖 5.38 試體 P12SP 側向力-環向應變關係圖	86
圖 5.39 試體 P12SO 側向力-變位關係圖	87
圖 5.40 試體 P12SO 側向力-軸向應變關係圖	87
圖 5.41 試體 P12SO 側向力-環向應變關係圖	87
圖 5.42 試體 P12BW 側向力-變位關係圖	88
圖 5.43 試體 P12BW 側向力-軸向應變關係圖	88
圖 5.44 試體 P12BW 側向力-環向應變關係圖	88
圖 5.45 試體 P08SO 側向變位圖	89
圖 5.46 試體 P08、P08SP 及 P08BW 側向力-變位關係比較圖 .	90
圖 5.47 試體 P10、P10SP 及 P10BW 側向力-變位關係比較圖 .	90
圖 5.48 試體 P12、P12SP 及 P12BW 側向力-變位關係比較圖 .	90
圖 5.49 試體 P08SP 及 P08SO 側向力-變位關係比較圖	91
圖 5.50 試體 P10SP 及 P10SO 側向力-變位關係比較圖	91
圖 5.51 試體 P12SP 及 P12SO 側向力-變位關係比較圖	91

照片目錄

照片 3.1 二十六吋口徑天然氣管線	92
照片 3.2 鋼管定管電銲施作	92
照片 3.3 鋼管底層銲接完成	93
照片 3.4 鋼管銲道完成	93
照片 5.1 八吋鋼管試體	94
照片 5.2 試體對銲接合	94
照片 5.3 試體套管銲接修補	95
照片 5.4 試驗設置	95
照片 5.5 試體撓曲變形	96

第一章 緒論

1.1 簡介

近兩百年來，由於工業革命的影響，人類的科技也跟著日新月異，隨著文明的進步，瓦斯、石油、電信系統、自來水設備相繼被發明、利用，大大地改善了人類的生活品質。然而，諸如瓦斯、石油、自來水等，都必須經過一定程序的處理，經由管線輸送至各處，基於不浪費空間的原則，這些管線大都是採取地下埋管的形式，這種地下化的運輸系統在當今工商業社會扮演不可或缺的角色，此類地下結構物，無論是輸油管、輸氣管、自來水管，乃至電信管線，皆與我們人類的日常生活息息相關，故這些地下管線又稱「維生管線」。

維生管線既然是埋藏於地下，又是屬於長距離的地下運輸系統，難免會通過斷層地帶或不穩定地殼區，而埋藏管線周遭的土壤更有很多不同的特性，因此環境因子對地下管線的結構安全有直接的影響。

台灣地處西太平洋地震帶，因歐亞板塊與菲律賓板塊的衝擊，地殼活動從未停止過。由於地震頻繁，造成台灣地質有許多地方屬於活動斷層，此斷層在平常時候雖與一般地層無異，但若有適當誘因，如發生夠大的地震時，極可能在短時間內產生相對地層滑動。所以，一旦地震發生，除了地面上的結構物可能會遭受損壞之外，地面下的地下管線結構物也會受到影響。

1.2 研究背景

一般來說，管線破壞的原因可分成兩種，一種是人為的施工不當，以中油為例，其地下管線分為輸油管與輸氣管兩種，遍佈全省各地。但因埋設年代久遠，隨著地下管線附近的施工、抽水或交通等因素，造成偏移，或由於無法跟隨著地形、地物的改變而更正調整管線記錄資料，致使管線的位置無法確實掌握，造成其他管線單位施工時的誤挖；第二種破壞原因則是非人為因素，與管線本身的材質及埋置處之地質條件有關，其破壞原因可分為管線腐蝕、穿越斷層、土壤滑動、土壤液化、及土壤震動等。不管是哪一種原因都會引發嚴重之公安事件，使得中油與社會皆蒙受巨大之損失。

輸油、輸氣管線破壞造成之損失層面廣大，如漏油或氣爆造成之直接損失與修復之必要花費，再則為環境污染所需付之代價，如污染土壤與地下水，將直接影響公司之聲譽，間接會損耗社會成本。

由 1964 Alaska 地震、1971 San Fernando 地震、1994 年美國北嶺地震及 1995 年日本阪神大地震等顯示，地下管線一旦遭受破壞，可能會造成瓦斯外洩、石油外漏、電信受阻及自來水設備等整個維生系統的癱瘓。而由電信受阻所造成的通訊中斷，瓦斯石油管外洩所引起許多房屋的嚴重火災及對環境的污染，自來水管因斷裂缺水而無法提供救火援助，更對受災地區形成二次損害，再加上事後維生管線重建與修補的龐大社會成本，不僅對人民的生命財產產生莫大傷害，也是國家經濟發展的一大打擊，影響之劇，不可言喻。因此地層變位對地下管線的影響，實為一門重要的研究課題。

1.3 研究目的

由台灣的地質狀況與中國石油公司所擁有的地下管線系統而言，地震與地層變位所造成的影響甚為嚴重，其潛在危險性甚高，地下管線極可能因地震與地層變位所引致的變形而受損。

由以往觀察地下管線受損情況發現，造成地下管線變形以致破壞之地層變位並非不尋常，地層變位造成管線之變形可能因管線之穿越河道、不穩定邊坡或斷層而產生。

本研究之主要目的為探討地層變位對管線所造成之變形與應力分析；本計畫擬針對地層變位，以理論分析與試驗方法，探討管線於地層產生錯動時所生之應力、應變與變形，作為安全評估之依據，提供中油公司於地下管線遭受地層變位時，能加以評估其安全性之方法。最後希望達到事先預防管線破損的功能，確保維生管線系統的安全以避免產生嚴重的災害。

1.4 研究方法

由於地下維生管線的重要性，且在台灣隨時有可能遭受地震災害的雙重考慮之下，對於地下管線系統於地層變位作用下的行為及其安全性的研究，即成為刻不容緩的一件事。本計畫擬針對三軸地層變位作用下的管線系統，進行一系列的分析及試驗，並以國內現地土壤的性質，模擬現存已埋設管線於地底之實際情形，進行靜態的試驗分析，以期能建立分析、評估地下管線系統的模式。

本研究擬為三年之研究，於此第一年之研究先行探討地下管線遭受側向地層變位時之影響，而暫不考慮軸向變位。基於以往管線

動力分析之研究成果較多，故本研究之分析模擬以有限元素分析探討地層有側向變位時，考慮影響之參數，進行地下管線行為之探討。試驗方面則以鋼管進行側向撓曲試驗，探討鋼管於對接銲接與以套管銲接修補承受高壓與側向力作用時之極限強度與其變形能力。

第二章 文獻回顧與相關規範

2.1 國內外文獻蒐集

國外有關維生管線之研究甚多，舉辦之研討會為數不少，此處僅將重要相關文獻簡述如下：

Kawashima、Hasegawa 及 Nagashima (1991) 在一篇關於預埋管線耐震行為的研究中提出以量測範圍為根據，探討預埋管線耐震反應的特徵，並研究鋼製管線及塑性管線在接頭應變減少的原因，特別是在管線彎曲的部分。另外也提到當考慮耐震設計時，土壤勁度的模擬對於地震時的變位是相當重要的。

文中提出幾點結論：1. 對管線的直線部分雖然以軸向應變為主控，但在彎曲部分，撓曲應變比軸向應變更重要。2. 觀察管線軸向應變與地表加速度的關係，經由量測資料的累積，能得到一個管線應變的評估方法。3. 文中推導管線應變所用的公式 $K = C \times G_s$ ， C 取 3 太過保守， C 值應由更多的實驗數據來求得。（ K 為土壤彈性勁度， G_s 為土壤剪力模數）

Vougioukas (1991) 在一篇預埋管線的地震分析中提到，地震已被證實是地下管線損壞的主因之一，尤其是地震所引起之非動力性質的地殼變位，如土壤液化、邊坡滑動、管線彎矩破壞等。文中針對水平及垂直的變形破壞，提出一適用的分析數學式，並考慮了管線材料與土壤條件參數，其結果也適用於即時的土壤滑動。唯這些參數之決定需與其他研究作比較。

Nishio (1991) 在一篇預埋連續管線的耐震評估中指出，小管徑

管線的彎曲破壞很容易受到大地震所引起地殼變位影響。計算管線的變形能力要考慮到三個參數：管線直徑、彎管的角度及迴轉半徑，文中歸納出，若管線的直徑愈大、彎管的角度愈大或是迴轉半徑愈大，變形能力也會跟著提高。

Honegger (1992) 的研究報告中指出，一般的管線系統依其使用目的及功能，可分成兩種，其一為傳輸管線系統，另一種則為服務性管線系統。會影響到地層變位的產生，進而損壞管線系統的主要原因為斷層、邊坡下滑、土壤液化及其相關的效應，依目前的研究，仍無法證實研究成果的適用性。

Keaton (1994) 發表的報告中 (Keaton 1994) 提及影響地下維生管線損壞的因素種類，其中包括管線兩端中未支撐長度、管線破壞面夾角、土壤及管線間之摩擦性質、回填材性質、管線材質、管線表面塗漆情形等，最後加入另一個因子為美國交通部人口分類係數，此分類係數係表示於某特定範圍內，可分配到特定長度管線系統的建物數目。報告也依據此項係數，提出一個管線設計的流程圖。

Maltby 和 Calladine (1994) 提出了一篇有關地下管線之上舉挫屈的原理及試驗分析報告。在這篇報告中，一些以前發表的地下管線上舉挫屈原理均被重新整理及評論，然後，他們提出了一個簡單的公式去計算多大的軸向載重會導致局部挫屈發生；在試驗方面，隨著軸向載重不斷的增加下，管線的水平及垂直變形亦不斷變大，直至上舉挫屈的發生。試驗結果顯示，觀察到的上舉挫屈強度和理論分析所得的結果相符合。

Mavridis 與 Pitilakis (1996) 將地下管線系統遭受到軸向和橫向地層變位的行為加以分析，且進一步的加上其餘重要影響參數，如

震頻、震波速度（地表加速度、剪力波速度）等，證明土壤和管線表面之界面作用（soil-pipe interaction effect）對於臨界軸向反應有重要的影響。

Schneider（1998）發表了一篇兩個中間銲有套筒的大型管線試體之試驗的論文，文中亦包含理論分析，每個試體均承受內壓力、固定的軸向載重及側向變形去評估地下埋管的彎曲行為。唯一的試驗變數是套筒的長度，其中一個試體的套筒長度等於管線的直徑，另一個試體的套筒長度是兩倍的管線直徑。逐漸施力使試體的彎曲變形增加，直至發生清楚的破壞為止，結果顯示兩個試體的破壞均發生在套筒的周圍，且均屬於局部挫屈。文中建立了一種簡單的理論分析模式，並以此模式討論管線在同試驗載重條件下的彎曲容量。分析結果還驗證了 Tresca 降伏準則對承壓管線之非彈性彎曲強度的保守估計。這種分析方法的發展，使得我們能夠快速的計算管線非彈性彎曲強度，並且能夠快速的檢測有限元素分析結果的正確性。

國內有關管線行為之研究如下：

楊秋興（1985）對地下管線受震的動力反應進行分析，分析指出管線受震所造成的破壞主要來自結點的拉脫、壓壞或由於管線本身產生過大的的軸向變形所致；所以分析時僅考慮縱波效應，並以一簡單之數學模式來解析分段式管段的軸向應變與結點的伸長量。

研究中對連續式管線（剛性接頭）的受震分析方法則以振態疊加法：對一受軸力的長直剛性管線，以一組阻尼與彈簧來模擬結點，而對於管線所受的外力則可根據土壤的性質，利用阻尼與彈簧模擬出合理的 C 值與 K 值，經由管線的運動方程式求出各個振態的頻率，再將各個頻率所對應到的振態函數相疊加而成，此法可得相當精確

之結果。而連續式管線的軸向應變量，則是利用哈密頓原理，評估的方法是假設地震波為移動諧和波且沿著管軸方向傳播。最後提到若管線埋置於非均勻土壤，在交接面可能因土壤性質的不同而產生應力集中的效應，故建議此斷面宜採用柔性接頭或延展性較好之材料，來抵抗過大的變形。

張暉苑（1988）探討通過斷層之地下管線，在斷層產生相對滑動時的行為。研究中將管線模擬成“部分大變形無限長梁”，並分別建立彈性模式與彈塑性模式。考慮了斷層滑移距離、斷層與管線初始夾角、管線直徑、管線埋入深度、管線與土壤接觸面之摩擦角對地下管線的影響。但由實際例子來看，因為管線中的最大應力很快就超過線性極限而進入彈塑性範圍，所以彈性的適用範圍不大。

該研究更進一步將管線分為大變形與小變形兩部分來進行分析。分析結果顯示，管線應採延展性較佳、能承受較大塑性變形的材料才不易因斷層滑移而損壞；管線埋設時，為使埋設在通過斷層之管線能承受較大的斷層滑動距離，可採以下方法：1.使用較小的管徑、較淺的埋置深度。2.管線表面做光滑處理來減低與土壤間的摩擦力。3.選用與管線接觸面摩擦係數較低的土壤當回填土。4.管線與斷層的初始夾角在 90° 以內，且盡量接近 90° 。

羅俊雄（1989）對管線的地震行為、震動反應提出討論，文中著重在地表兩點之相對位移造成管線接頭鬆落之討論。假設埋置管線與覆土之間緊密結合，沒有管線滑動與土壤開裂的問題，以此評估地表土層相對位移量對管線接頭設計的影響。由於相位差及衰減因素，地震波在地表土層傳遞時引起的地表震動並不一致，此研究建立了地表相對位移反應譜的合理模式；考慮受震源機制、土層效

應、寬間關聯衰減效應的影響，瞭解低頻地震波是造成相對位移較重要的因素，震波由淺至深或由堅硬地層往軟弱地層傳遞，會引起較大的地表相對位移。

文中尚有討論管線之地震反應分析，分為管線的擬靜態解與動力分析。擬靜態解：當地震波在管線周圍的土壤地層傳遞時，管線與土壤之間相互作用的結果，將產生管線的變形，擬靜態解是將管線與土壤模擬成一作用於彈性基礎上的連續梁，分別考慮橫向剪力波與縱向的壓力波沿管線傳遞時所造成的反應；動力分析是由地下管線的模型，建立管線運動方程式，分析其自然頻率與振態，配合地表的地震模式，求得管線受地震力作用的動力反應。

葉耀輝、呂榮芳（1991）利用有限元素法來探討地下管線受力的破壞模式，文中主要是對彎管在液化區的受力行為，以三維空間來表示。分析的範圍包含了管線的幾何形狀、材料的彈性與彈塑性、埋置管線周遭土壤的基礎特性、地震波對土壤液化的影響。並使用 Wilson- θ 法及修正增量勁度法，研究地下管線的動態行為。

文中提及土壤對地下管線側向變形之束制，可用連續分佈的彈簧與阻尼來模擬，至於軸向變形方面，需考慮到土壤的特性，如土壤與管壁之間的摩擦力與土壤的黏滯力，但軸向變形較側向變形之影響微小許多，故軸向變形可以忽略，且視軸向變形與土壤變位一致。文中亦提到，管線斷面若有局部降伏則極易引起非彈性破壞其破壞值遠低於彈性的破壞值。

徐登文、邵良寅、張忠本（1991）探討管線與土壤有一相對速率變化時，管線在砂土中的上舉力情形。文中先取不同的砂質土壤做直剪試驗，取得在不同的直剪速率下，砂土密度與內摩擦角的關

係，再設計一管線尺寸，決定管線的預埋深度、管線與砂質土壤之間的相對速率，最後，將試驗結果，以雙曲線模式模擬管線受土壤上舉力所造成的應變與相對位移。

在各個埋入比下，最大上舉力與管線移動速率呈線性關係，所以將其比值定義為移動速率指數 n 。由試驗結果發現，在緊密砂中管線的移動速率指數 (n) 與埋入比 (H/D) 無關而大致呈定值狀態，最大上舉力與管線移動速率成冪次方關係，但無因次破壞位移與管線移動速率間並無顯著的冪次關係存在；相對的，在疏鬆砂中，移動速率指數與埋入比成冪次方律關係，隨著埋入比的增加， n 也跟著增加，直到埋設深度達 $H/D=8\sim 10$ 左右， n 才逐漸趨於定值，而破壞位移也在埋入比 $H/D=10$ 左右，趨近於定值，也和管線移動速率無明顯之冪次關係存在。

謝永宏 (1997) 嘗試以有起始弓度之微彎管代替傳統直管來探討、分析，分析結果顯示管線若具有起始弓度，則軸力與軸向變形、軸力與側向變形關係皆為非線性，且起始弓度與軸向變形關係亦為非線性；此外，具有起始弓度的微彎管能提升管線的柔度，弓度增加則管線的柔度也隨之增加，此可改善系統的韌性；若管線受動態軸力作用時，在一定起始弓度下軸力施加頻率與管線自振頻率的比值會影響到管線的軸向變形關係與側向變形關係，當軸力輸入頻率越大，軸向柔度的改善則不如頻率低時來的顯著。

除了理論分析外，並以試驗來印證理論分析結果；取 15 隻長度 200 cm 之鋼製管線，包括直管與起始弓度 $e=d/4$ ， $d/2$ ， $3d/4$ 及 d 的彎管來進行試驗，此外，並取兩種不同密度的土壤來進行試驗，以觀察周圍覆土的影響。由於覆土對管線有束制作用，使得管線剛度

提高，以密度較高的堅硬土壤較明顯。由於微彎有助於提高系統的韌性與柔度，故文中建議可在適當位置，如經常發生挫屈及局部脆性破壞的部位，採用微彎管，以減少管線破壞的現象。

2.2 相關規範

地下管線之設計、製作、檢驗所依循之規定一般為 ASME 與 API 之規範，中油公司管線工程施工依據下列規範為標準：

1. American Society of Mechanical Engineers 所出版的“Liquid Transportation Systems For Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia, & Alcohol,” ASME B31.4, 1992. (油管)
2. American Society of Mechanical Engineers 所出版的“Gas Transmission and Distribution Piping Systems,” ASME B31.8, 1995. (氣管)
3. American Petroleum Institute 所出版的“Welding of Pipelines and Related Facilities,” API STD 1104, 1988.
4. American Petroleum Institute 所出版的“Specifications For Line Pipe,” API SPEC. 5L.
5. 中國石油股份有限公司，長途輸油（氣）管線工程施工說明書。

第三章 中油公司地下管線與相關施工規範

3.1 中油公司地下管線概述

中油公司自日據時代以來所埋設之地下油氣管線數量甚多且分佈範圍甚廣，其總長度可能達五千三百公里，資料之建立屬極為龐大之工作，現僅就中油使用管線資料，敘述如下。

中油公司地下管線主要功能為輸油及天然氣，輸油管線所使用的規格包括口徑為四吋、八吋、十吋、十二吋、十四吋、十六吋不等，常用的為八吋、十二吋與十六吋。輸氣管線所用的規格有口徑八吋、十吋、十二吋、十六吋、二十四吋、二十六吋以及三十吋等，如照片 3.1 所示。目前中油管線所用管線規格為依據 API (American Petroleum Institute) 的規定，一般為 API 5L, Grade 一般依使用壓力而有所不同。

3.2 中油公司地下管線施工規範

中油管線工程施工說明書詳述有關施工之規定，舉凡測量、管線製作及安裝、電銲、讀管試壓、回填、防蝕等皆有規定。現將與本計畫執行有關之細節，如挖掘管溝、電銲規範、電銲檢查等，簡述如下：

挖掘管溝

管溝之寬度，無擋土措施者，以最外管壁向外 15 公分為度，有擋土措施者，至少應有 30 公分以上，在銲管處應加挖深度，及兩邊淨距不得小於 60 公分，以利現場銲接施工，管溝內當力求乾燥，以

利施工。

銲接方式

不論轉管電銲或定管電銲，管線接縫之銲接方法，以採取手工電弧銲接為限，對銲（B.W.）時銲縫間隙及斜角，參照圖 3.1 所示，並需符合本規範各項規定及 API 標準 1104 規定。

銲條規定

銲條需符合美國銲接學會規定（AWS-ASTM SPECIFICATION），電銲工作用 1/8 吋銲條 E-6010 或 E-6011 銲底層，5/32 吋銲條 E-7010 或 E-7011 銲中層，及 3/16 吋銲條 E-7010 或 E-7011 銲外層。如採 CNS 規格，必須規格相當。

轉管電銲法

管線未整條連接前，可用轉管電銲法，先分段銲接，銲接時二管位置必須整直，並用足夠之有輪氣墊，避免管線中部下垂，管線在排管以前不得銲接。所有轉管電銲每一接頭至少應銲三層，每層起銲不得在同一位置。轉管銲在銲底層時管線仍須固定並儘量避免移動。同時採用象限步驟法，交錯銲接。轉管電銲之中層及外層銲接時，應以工程品質檢驗員認可之方法，以平銲緩緩轉動鋼管維持溶化之銲鐵在銲管頂部為原則。每銲層約 1/8 吋，層數以最後一層高出管面 1/32 吋至 1/16 吋為度。其寬度約較原銲層寬 1/8 吋。惟每一接頭至少需銲三層，最後一層亦需清刷乾淨，銲縫外表必須均勻，既不許因凹陷而低於管壁，亦不許凸出高過於管壁 1/16 吋以上，突出形狀以中心最高而向兩側逐漸減少之。

定管電鐸法

定管電鐸之鋼管電鐸程序中，需先用熱板支撐，使管底與地面或其他障礙物至少有 60 公分之空間；每層鐸條均需用規定之種類與尺寸，且每層起鐸點不在同一位置。定管電鐸在鐸底層時，管線應固定不得移動，鐸接時需採用象限法步驟交錯鐸接。鐸中層及外層時，仍須採用象限法步驟程序鐸接，每鐸層約 1/8 吋，層數以最後一層高出管面 1/32 吋至 1/16 吋為度。其表面寬度約較原有鐸槽寬 1/8 吋。唯每一接頭至少需鐸三層，最後一層亦需清刷乾淨，鐸縫外表必須均勻，既不許凹陷，亦不許凸出高過於管壁 1/16 吋以上，突出形狀以中心最高而向兩側逐漸減少之。鐸完每層鐸縫後，必須立即將鐸縫上之鐸皮、鐸渣清除，如照片 3.2 所示。

電鐸檢查

包括電鐸中的檢查與放射線檢查：

電鐸中的檢查

電鐸前應檢查的項目為鐸接的方式是否正確，所使用的鐸條需經過乾燥處理，所使用的鐸條材質、工具及設備必須合於規定，電鐸工應為合格的鐸工。在點鐸時，應檢查鐸口配合是否得當，鐸口清潔工作是否徹底，點鐸是否有破裂或鐸接不夠、熔化不透的情形。鐸接中的檢查應注意各層鐸接是否確實，電弧鐸量應合於標準，鐸接不能有氣孔、氣泡、裂痕或含渣情形發生。去渣、電弧收尾及熔透的情形應符合規定。在鐸接完成後，所有鐸縫均需經過目測檢查，看看鐸縫補強高度是否恰到好處，或有無勾邊的情形，如照片 3.3、照片 3.4 所示。

放射線檢查

管線銲縫檢查以鈹 192 放射線檢查為主，而以超音波及磁粉探傷檢查為輔，放射線檢查後的底片，需審核，經判斷認為有不合於標準者，需剷除或重銲。管線於銲接完畢後，應做放射線檢查，檢查之比例：100%。如果發現有不合格之銲口時，則對每一不合格之銲口需再加抽兩個緊跟在此銲口之後的銲縫，且對同一銲工所和之銲口再做抽點檢查，若在發現有任一不合格之銲口時，應依照前法再加抽二個銲口。如此繼續追蹤檢查，直到所有檢查之銲口全部合格為止。

銲縫檢查標準（檢查 API 1104 標準）

1. 滲透不良與熔合不完全
2. 底銲道之滲透不良
3. 底面高低不平銲道之滲透不良
4. 中間凹入
5. 不完全熔合
6. 冷疊引起的不完全熔合
7. 底銲道之過份滲透使銲渣燒穿掉入管內
8. 銲料與管金屬間的夾渣問題
9. 氣孔與氣泡的檢查

回填

自管溝底至高出管頂 30 公分之管溝部分，必須全部填滿無鹽細砂，回填土絕對不可使石頭、磚塊、混凝土塊等堅硬物與鋼舌包覆層直接接觸。所有管溝回填土必須分層填土，每層以 30 公分為限，

用人工或機器確實夯實後，務使填土與附近泥土有良好之結合，過路部分夯實後之土壤密度至少需為改良式 AASHTO 95%以上。

市區道路、公路及鐵路部分依照路面下 10 公分至管頂 30 公分部分，填以碎石級配。溪產碎石級配粒料組成之重量百分率，應符合級配規定。路面下 10 公分以內，應按原路面修復。

第四章 數值模擬

4.1 前言

地層變位對地下管線之影響可由實驗室模型或全尺度試驗來觀察，然而卻有幾項問題：1. 無法製出多根完全相同的管線用於地層變位之分析；2. 實驗模型重覆性低；3. 邊界條件無法作理想的控制；4. 費時且不經濟；5. 實驗後之詮釋不易；6. 縮小模型後亦有尺度效應之影響。由於實驗室模型及現地試驗有些方面之限制，因此進行數值分析有其必要性，工程領域中使用最為廣泛者為有限元素分析法。

基於不浪費空間的原則，輸油管、輸氣管、自來水管、電信管等皆採取地下埋管之型式，由於這些管線與人們的日常生活息息相關，對於地殼活動頻繁且從未停止的台灣而言，地層活動會使地下管線有何種反應是本文研究的主旨。本文採用計算固力軟體有限元素分析程式 ABAQUS，進行地層變位對地下管線影響之數值探討，以下將對模擬結果逐一討論。

4.2 有限元素分析程式 ABAQUS 簡介

ABAQUS 程式是由美國 Hibbit, Karlsson and Sorensen 公司所發展出之有限元素分析軟體，可以用以分析多種力學問題，如受外力作用或溫度改變時其內部之應力/應變量，目前已被廣泛的應用在土木、機械工程上。國外曾將 ABAQUS 應用在維生管線上分析其局部挫屈、應變、皺褶之反應，文中將維生管線以薄殼元素 (shell element) 模擬，以預測其發生局部挫屈、皺褶的行為；國內賈儀平、

王原賢、洪榮聰 (1993) 曾使用 ABAQUS 建立一維超抽地下水引致下陷的模式，假設黏土為彈性材料，進行雲林台西地層下陷行為的預測；李德河、紀雲曜 (1997) 亦曾使用 ABAQUS 建立三維抽水引致地層下陷之有限元限模式，其中黏土材料性質為符合實際黏土之塑性行為採用程式內之 Clay plasticity 模式，砂土層假設其為一多孔質彈性體，程式模擬結果變位及應力分佈相當合理，接近實際抽水情況。

ABAQUS 有強大的模組式副程式資料庫，是以分析步驟概念組成的通用程式，編輯時依循建模型之程序可建構所需之模型。ABAQUS 模型之構成包含，元素 (Element)、材料模數 (Material Modules)、程序模數 (Procedure Modules)、載重模數 (Loading Modules)，如圖 4.1 所示。ABAQUS 之輸入檔 (Input File) 包括模型 (Model Definition) 及歷程資料 (History Definition) 兩部份，模型資料定義包含模型幾何 (Model Geometry)，其中包括節點編號、座標，元素的編號、元素格點編號，材料性質 (Property Reference)，材料性質資料 (Material Data)，與邊界條件。歷程資料定義包括歷程 (Procedure Definition)，載重 (Loads)，輸出 (Output Requests)，如圖 4.2 所示。ABAQUS 輸入檔中以“*”表示指令行的關鍵字，以“**”表示註解行。

ABAQUS 有兩種方法提供使用者建立三維模型，一種是以有限元素分析前後處理軟體 PATRAN 來繪製，它可產生 ABAQUS 所需的模型資料輸入檔 (.inp)，此種建構模型的方法相當簡便，可免去不少程式除錯的困擾，它是美國 (MSC SOFTWARE) 公司所發展，它針對各種不同的設計分析，提供一個全開放性的 CAE 環境。

MSC.PATRAN 是新一代前後處理系統之一，它結合了幾何造型整合、有限元素模型建立、以及模擬分析和結果評估能力，常被用來模擬產品的性能，並早在設計／製造實體模型測試前，即找出可能發生的問題並解決問題。它有下列幾項優點：

(1) 圖形式的使用者界面：

MSC.PATRAN 表單圖形式使用者介面和線上輔助系統是業界最先進和最容易使用的產品。

(2) 直接 CAD 幾何傳輸：

MSC.PATRAN 可從世界知名的 CAD系統傳輸幾何外型資料，如IGES、STEP/EXPRESS Neutral、ACIS、Pro/ENGINEER、CADDs、Unigraphics、CATIA、EUCLID 等。MSC.PATRAN 利用非常先進的技術來處理複雜的幾何資料傳輸問題以及現階段許多幾何資料傳輸的困難，包括拓模幾何資料上的不相容、實體模型的密合性、不同的公差系統和其它因素等等。一旦傳輸後，MSC.PATRAN 會提供大量的工具來抽取和簡化處理幾何外型，MSC.PATRAN 本身所提供的 CAD 工具可用來建立新的幾何外型。

(3) 功能強大的有限元素模型分析定義：

MSC.PATRAN 的網格劃分非常具有彈性且功能強大，它包含了從直接-自動實體網格劃分到細部的節點和元素修改的功能，負載和邊界條件可以直接加在幾何外型上或是加在分析模型上，功能強大的模型驗證技術大大縮減分析差誤的可能性並增加再次分析的效率。

(4) 交互式後處理系統：

MSC.PATRAN 功能強大的分析結果後處理顯示工具讓使用者可以準確鑒定模型的弱點／破壞的地方、包含結構的應力／應變最

小、最大區域，趨勢走向和實驗資料相關連，分析結果等值面和其它先進的圖形工具大大加快和增加結果的評估能力。這些工具可輔助工程師去解釋分析的結果資料，並對設計的模型有更深一層的認識。

(5) 可自行定義的使用者介面和分析模組：

MSC.PATRAN 也提供了可量身訂做的使用者介面，並結合現有的分析軟體合成單一使用者介面。除了整合的使用者介面之外，MSC.PATRAN 也提供了許多功能強大的分析模組，包含了結構分析、高級結構分析、熱傳分析、疲勞模擬、複合材料、結構最佳化、分析資料管理和材料選擇資料庫等。所有這些模組都整合在 MSC.PATRAN 環境下。上述的功能都可以利用 PATRAN 的指令語言依照使用者的需求修改自己的使用者介面，它提供了可程式化，具彈性的使用者介面，這也是 MSC.PATRAN 各元件的核心，使得 MSC.PATRAN 具有 MCAE 全開放性的環境。

另一種建構模型的方法是以 ABAQUS 所提供的指令來建構，以下簡介數個較常用之指令：

*NODE：Specify nodal coordinate.

*NGEN：Generate incremental nodes.

*NCOPY：Create nodes by copying.

*NFILL：Fill in nodes in a region.

*NSET：Assign nodes to a node set.

*ELCOPY：Create elements by copying from an existing element set.

*ELEMENT：Define elements by giving their nodes.

*ELGEN：Incremental element generation.

*ELSET：Assign elements to an element set.

運用上述所介紹的指令，可建構一些所需模型，但仍必需注意下列事項：

1. 格點及元素的編號順序及位置。
2. 使用 NCOPY 指令時，對於緊臨的節點會有 node 重疊的問題需特別注意。
3. 所有的 section 皆具有方向性，需注意其為順時或逆時。

惟有當指令使用正確無誤，才可顯示所建構之模型，欲觀看所建模型的錯誤訊息可看執行後產生之附檔名為 dat 的檔，其中將顯示所有的錯誤訊息。

ABAQUS 的元素資料庫 (element library) 提供數種不同的型態的元素，以方便建構所需的模型，其元素的種類包括固體元素 (solid element)、薄殼元素 (shell element)、樑元素 (beam element)、薄膜元素 (membrane element)、無限元素 (infinite element)、偶合元素 (connector element) (如彈簧)、桁架元素 (truss element) 等，如圖 4.3 所示。此外；ABAQUS 的材料性質資料庫 (material library) 有多種材料模式，包括彈性非彈性及均質非均質，ABAQUS 所提供之材料模式於本文有用到者，如表 4.1 所示。

4.3 分析模式建立

本節將以 ABAQUS 有限元素分析程式，建立一油管於土層中之三維模式，其為由管線土壤所組成之互制系統，以模擬土層變位時管線與土壤所受之應力應變與變形之行為。

4.3.1 模型建立

本分析有如下各點之假設：

1. 施加之變位僅考慮垂直於管線之水平地層錯動。
2. 地層錯動之影響範圍為無限遠。
3. 管線上考慮回填土之重力作用，而無其它載重之作用。
4. 鋼管材料參數之一的線彈性應力應變關係，乃用以探討其它參數之影響而不考慮鋼管材料之降伏應力。
5. 不考慮管線內之壓力。

圖 4.4 為所建構之有限元素模型 (管徑為8", 厚度為5.56mm) , X、Y軸 (水平方向) 為對稱軸，鋼管由二層固體元素所組成，土壤則分成九層採漸變網格 (管徑周圍密，向外漸疏) 方式形成；於考慮管徑大小及其影響範圍，並兼顧有限元素分析時之節點數量與運算時間，土體斷面取兩方向各二公尺，Z軸 (縱方向) 有二十個元素，往中央採漸變網格 (中央密，兩邊疏) 之方式，全長為六公尺，建構完成之模型共有 6900 個 element，9344 個 joint。此有限元素分析地下管線遭受地層錯動時之應力應變與變形，考慮之參數有兩種不同鋼管外徑，鋼管材料為線彈性應力應變關係，三種管線周圍土壤之彈性模數及二種不同值之地層錯動。本次模擬之歷程使用一個步驟 (step)，於單側縱向一半長度施以一變位以模擬因地層變位所導致地下管線受力之情形。

本研究中土壤及鋼管之元素採用固體元素中之 C3D8 ，其為三維八節點之立體元素，管線為鋼管材料使用線彈性應力應變關係。土壤之材料使用 Elastic 並考慮 Mohr -Coulomb 破壞準則，如圖 4.5 所示。圖 4.5 中之直線稱為破壞包絡線，當應力圓在此線以下，則土體處於穩定狀態；當應力圓與此線相切，表該土體在某一斷面

處於極限平衡狀態；當應力圓超出此線，表示該土體有許多斷面之剪應力已超過抗剪強度而破壞，但實際上這種情形是不存在的，因為土體在和破壞包絡線相切時就已破壞。當莫爾圓與破壞包絡線相切時，土體應力處於極限平衡狀態，以此作為土壤的破壞準則，稱為 Mohr-Coulomb 破壞準則。

4.3.2 地下管線及周圍土壤之模擬

為彰顯地層變位對不同管線尺寸之影響，分別採用兩種不同管徑之鋼管 (8" 及 24")，厚度為 5.56 mm，且假設其應力-應變行為為線彈性，鋼管之彈性模數為 E_s 。管線於埋設時會於其周圍先回填厚約三十公分的河砂並灑水夯實，再於其上方回填碎石級配灑水夯實，因此管線周圍土壤分別以兩種不同材料模擬，其一為管線周圍三十公分內，彈性模數為 E_i ；其二為管線周圍三十公分外，彈性模數為 E_o 。為探討夯實度對地下管線受力時的影響，管線周圍土壤彈性模數 E_i 使用三種不同值，由於粘土與礫石之彈性模數可由 3 MPa 至 70 MPa，且隨深度之不同又有變化，因此 E_i 範圍分為 10 MPa、30 MPa 及 50 MPa 三種，外層土壤之彈性模數則使用 25 MPa。土壤的波松比對於 E_i 使用 0.4， E_o 則使用 0.3，相關之土壤及鋼管材料如表 4.2 所示。

4.3.3 地層變位之模擬

地層變位的種類有正斷層 (Normal Fault)、逆斷層 (Thrust Fault)、平移斷層 (Strike-Slip Fault)、鉸移斷層 (Hinge Fault)、斜移斷層 (Oblique-Slip Fault) 等五種。本文研究之地層變位將以模擬平移斷層為主，進行數值模擬時以水平方向施一側變位剪動土體，以

模擬地層變位，地層錯動值以 5 cm 與 10 cm 位移以探討管線與土體行為。

4.3.4 模型資料及歷程

以下將簡列本模型建構所使用之指令：

```
*NODE
1,      0.,      0.3048
2,    0.0595399,  0.298929
3,    0.116613,  0.281611
4,    0.169259,  0.253486
:
*****
**ELEMENT SOIL PART **
*****
*ELEMENT, TYPE=C3D8, ELSET=SOIL11
38817, 135, 4, 5, 125, 6913, 6914, 6915, 6916
38818, 136, 135, 125, 126, 6917, 6913, 6916, 6918
:
*SOLID SECTION, ELSET=SOIL11, MATERIAL=SOIL11
1.,
:
*MATERIAL, NAME=SOIL11
*DENSITY
2000.,
*ELASTIC
1.E+7, 0.4
*MOHR COULOMB
30.,0.
*MOHR COULOMB HARDENING
500.,0.
:
*****
**ELEMENT STEEL PART **
*****
*ELEMENT, TYPE=C3D8, ELSET=STEEL
72677, 6, 7, 2, 1, 13954, 13953, 13956, 13955
72678, 7, 8, 3, 2, 13953, 13957, 13958, 13956
:
```

```

*SOLID SECTION, ELSET=STEEL, MATERIAL=STEEL
  1.,
  :
*MATERIAL, NAME=STEEL
*DENSITY
  7830.,
*ELASTIC, TYPE=ISO
  2.04E+11, 0.3
  :
*STATIC
*****
** BOUND1**
*****
*BOUNDARY, OP=NEW
  1, 3,, 0.
  2, 3,, 0.
  :
*STEP, AMPLITUDE=RAMP, PERTURBATION
  :

```

4.4 有限元素分析結果

4.4.1 鋼管 von Mises 之應力

地層變位為 5 公分時

圖 4.6a ~ 4.6c 及圖 4.7a ~ 4.7c 顯示三種不同回填土壤材料時，8" 及 24" 鋼管所受應力之情形，經分析計算所得之 $\sigma-E_i$ 關係顯示於圖 4.8。由圖 4.8 可知回填土壤勁度為 50 MPa 時，鋼管所受應力會最高，此乃由於土體夯實越緊密，鋼管受壓變形前擠壓土壤越不易而直接使鋼管受壓變形，鋼管便具有最大之位移，鋼管位移越大則所受應力越大。當回填土壤之勁度為 10 MPa 時，由於土體較鋼管軟很多，因此會使土壤先被擠壓消耗大部份應變能，軟弱之土壤會有較多之變形，鋼管則會有較小之變形，故所受之應力

會較小；此外，由於大管徑鋼管和土壤接觸面積較大，應力傳遞較均勻，故鋼管所受之應力有明顯隨土壤 E_i 增加之趨勢。

地層變位為 10 公分時

不同鋼管周圍回填土壤材料，使鋼管所受應力之情形如圖 4.9a ~ 4.9c 及 4.10a ~ 4.10c，經分析計算所得之 σ - E_i 曲線顯示於圖 4.11。由圖 4.11 可知仍以回填土壤勁度為 50MPa 時，鋼管所受應力會最高，且大管徑鋼管之應力隨土壤勁度增加之情形仍較小管徑鋼管明顯。此外；小管徑之鋼管之應力仍較大管徑鋼管高，此乃由於小管徑鋼管體積小，在地層變位時其可吸收之能量會較大管徑鋼管來得少，故會有較高之應力，因此小管徑鋼管所受之應力有明顯大於大管徑之趨勢。

8" 管與 24" 管之比較

由圖 4.12 知 8" 管於土層錯動 10cm 時，鋼管之應力較錯動 5cm 為大，約為 2 倍。由圖 4.13 知 24" 管於土層錯動 10cm 時，鋼管之應力較錯動 5cm 為大，但無顯著之倍數存在，可知小管徑鋼管其應力變化有隨土層錯動量成比例之傾向。此外；由圖 4.12 及圖 4.13 知存在一共通性，即土壤勁度越高（夯實越緊密），鋼管之應力會越大。

考慮鋼管之正向應力

圖 4.14 及圖 4.15 為 8" 及 24" 鋼管在地層變位為 5 及 10 cm 時其軸向應力，由圖知其結果亦近似於 von Mises 應力之變化，鋼管所受應力會隨土壤勁度增加而增加，且以大管徑鋼管較明顯。

圖 4.16及圖 4.17 為鋼管於不同土層剪動量時 $\sigma-E_i$ 關係，由圖可知鋼管所受應力隨土層剪動量增加而增加。

4.4.2 地層變位對土壤應力之影響

地層受到大地應力作用後會發生受壓、伸張等情形。對堅實的粘土及緊密的砂土而言，受力後易有脆性破壞發生，即有明顯的尖峰強度，隨後剪力強度隨應變增加而降低，即抗剪強度有應變軟化的現象。而軟弱的粘土及鬆砂會有塑性破壞發生，受力後無明顯的尖峰強度，強度隨應變增加而增加，抗剪強度有應變硬化的現象。

地層變位為 10 公分時

圖 4.18a~4.18c 及圖 4.19a~圖 4.19c 顯示鋼管周圍三種不同土壤回填材料時，鋼管周圍土壤所受應力之情形，為使應力分佈曲線較顯著，將應力範圍縮減至 0.4 MPa 至 -0.4 MPa 間，由圖形可見鋼管周圍之土壤將因鋼管之擠壓有較高之應力，經分析計算所得將最高值之 $\sigma-E_i$ 曲線顯示於圖 4.20 及 圖4.21。其中圖 4.20 為土層剪動 5cm 之情形。由圖 4.21 可知回填土壤勁度為 50 MPa 時，土壤所受應力會最高，此乃由於土體夯實越緊密，土粒間將越不易滑動及滾動，較緊密之土壤可提供較高之粒間摩擦力，抗剪強度會增加不易被剪動，若要剪動則所需之應力要相當大。當回填土壤之勁度為 10 MPa 時，由於較勁度為 50 MPa 的土體軟，土體的抗剪強度明顯較低，土粒滑動較易因此容易被剪動，故土壤有較小之應力。

8" 管與 24" 管之比較

由圖 4.22 知 8" 管於土層剪動 10 cm 時，土體之應力較剪動 5 cm 為大。圖 4.23 之顯示 24" 管於土層剪動 10 cm 時，土體之應力會較剪動 5 cm 為大，兩者之共通特性為，土壤之應力隨土體剪動量之增加而增加，且亦隨土壤勁度的增高（夯實越緊密）而增加。

4.5 結論

本章以 ABAQUS 有限元素分析程式進行地層變位之模擬，經模擬結果獲得以下幾點結論：

1. 以 ABAQUS 有限元素分析程式進行三維實體管線及土壤之模擬，其模型之建立與模擬程序相當簡單，其應用性相當的高。
2. 分析所得鋼管之應力乃依據鋼管線彈性材料行為之假設，以探討鋼管管徑大小、回填土壤勁度與地層錯動大小之影響，分析所得之應力值非代表管線材料之降伏或破壞與否。
3. 由模擬結果可知，當土層之剪動量越大，管線所受之應力會越大，且有明顯增加之趨勢，在不考慮管線之塑性行為且僅有側向錯動並無垂直載重下，由地層錯動量可保守判斷管線應力。
4. 小管徑管線在土層有錯動時，其應力變化增量有隨錯動量成比例之傾向，即小管徑管線與土壤間之應力交互作用相當明顯，大管徑則沒有明顯之比例，惟其應力變化增量隨土壤勁度之增加而增大。
5. 由模擬結果亦發現小尺寸管徑於土壤相同錯動量下，管線之應力並不隨土壤勁度之變化而改變，即小管徑管線受回填土壤勁度之影響較小。

6. 由分析得知，回填於管線上的砂土若回填夯實越緊密（即使土體有較高之勁度），則地層錯動時土體可提供管線之摩擦力越高，將使管線所得之應力增大。

第五章 鋼管撓曲試驗

5.1 概述

輸油氣管經常為了避免暴露於外在環境而埋於地下，但由於回填土與碎石級配粒料夯實之影響或沈陷量之不同，將造成地下管線承受撓曲，且管線之穿越河道、通過不穩定邊坡或處於斷層帶上亦將造成地下管線承受撓曲作用。本試驗之目的旨在探討對銲接合鋼管與以套管銲接修補鋼管承受高內壓與撓曲的極限強度與韌性行為。

5.2 試體規劃與製作

本試驗之試體共分三組，試體詳圖及試體規格如圖 5.1 與表 5.1 所示。第一組試體是外徑為 219 mm (8 5/8")，厚度為 8.18 mm (0.322") 的八吋鋼管，第二組試體是外徑為 273 mm (10 3/4")，厚度為 9.27 mm (0.365") 的十吋鋼管，第三組試體則是外徑為 324 mm (12 3/4")，厚度為 9.53 mm (0.375") 的十二吋鋼管，其徑厚比分別為 27、30 與 34。

三組試體的鋼管長度均在 6000 mm 左右，鋼管上標示有鋼管基本資料，如照片 5.1 所示。八吋鋼管與十吋鋼管均採用 API 5L Gr. B 之材質，十二吋鋼管採用 API 5L X52 之材質，所採用的鋼管尺寸與鋼管材質皆與中油目前所定之規格相同，Gr. B 適用於低壓管線，而 X52 則用於高壓管線。三組試體中的每一組皆包含 1 根完整、1 根對銲接合與 2 根全圓周套管銲接修補的鋼管，每組 4 根，共計 12 根鋼管。

對銲接合試體之銲接方式採用全滲透銲，如照片 5.2 所示，銲接程序完全依照中油管線工程施工說明書的規定及如第三章所述。銲接完成後，並請中國非破壞檢驗有限公司進行放射線照相檢驗，其檢驗報告置於文後之附錄。檢驗之依據規範為美國石油協會 API Standard 1104，報告中顯示試體 P08BW 的銲道有氣孔 (Porosity) 及熔渣 (Slag Inclusion) 兩項缺陷，試體 P10BW 的銲道有氣孔、根部突出 (Root Convexity) 與根部內凹 (Root Concavity) 等缺陷，試體 P12BW 的銲道則有氣孔及內部銲蝕 (Internal Undercut) 缺陷，然而這些銲道缺陷經判定後，皆屬合格，所以試體銲道已達到 API 之要求。

套管銲接修補之應用乃參照 API 規範之規定，對永久性現場地下管線有凹陷、下陷、洩漏、腐蝕、裂縫等之修補，可將受損段切除以相當之管取代或以全圓周套管以填角銲修補。且於管線之使用上若鋼管應力大於管線材質標稱強度之 40 % 以上時，修補管線洩漏禁止使用鋼板銲接方式，而須以套管方式修補。以鋼板方式修補洩漏管線僅適用於管線材質標稱降伏強度低於 276 MPa (40 ksi) (亦即僅有 GR. A 與 GR. B 能適用)，以不低於管線材質標稱降伏強度之鋼板，四角磨圓且尺寸不大於鋼管圓周之一半，以填角銲接於鋼管上。

套管銲接修補於考慮現場挖掘施工之可行性，將套管分成上下各一半圓以全圓周填角銲銲在鋼管上，側邊之上下半圓相接處採取全滲透銲方式銲接，如照片 5.3 所示，套管長度應至少 102 mm (4") 以上，其材質強度不應低於鋼管強度。所以本試驗採用之套管，其長度等於欲接合鋼管之外徑，套管厚度與鋼管厚度相當，依欲接合鋼管之管徑大小依次為 10 mm、9 mm 及 8 mm，接合八吋鋼管及十

吋鋼管之套管鋼材為 A36，接合十二吋鋼管之套管鋼材為 A572 Gr. 50。

由於地下輸油氣管需要長距離輸送，所以管線內有時充滿著高壓力，為了與實際狀況符合，故本試驗於鋼管內注水，並以手控水壓幫浦加壓。有關本試驗鋼管內之壓力，為避免試驗之危險，乃依據鋼管製造廠測試之最低水壓試驗壓力，此試驗壓力值亦標示於鋼管上，如照片 5.1 所示為八吋鋼管，管壁厚度為 0.322 英吋，其試驗壓力值為 1570 psi (10.78 MPa)，水壓試驗壓力值之決定為依據管線之設計壓力。因造成管線之最大影響因素為沿管線路徑上人類之活動，故管線之設計壓力與地區之分類有關，地區分類依人口與建築物密度區分為 1~4 級，4 級有最密集之建物。

設計壓力之公式為

$$P = \frac{2St}{D} FET$$

P ：設計壓力 (psi)， S ：鋼管標稱降伏強度 (psi)， D ：鋼管外徑 (in)， t ：管壁厚度 (in)；於考慮地區分類 2 級時，基本設計因數 $F=0.6$ ，鋼管材質為 API 5L 時，縱向接合因數 $E=1.0$ ，考慮為室溫下時，溫度降級因數 $T=1.0$ ，故

$$\frac{PD}{2t} = 0.6S$$

即管線內壓力所造成之環向應力等於 60 % 之鋼管標稱降伏強度。故八吋鋼管、十吋鋼管及十二吋鋼管所加之水壓依次為 10.78 MPa (1570 psi)、9.8 MPa (1430 psi) 及 12.64 MPa (1835 psi)。

為了施加水壓，將鋼管兩端鉚上 40 mm 厚的端板，並在鋼管上加開加壓孔、注水孔及洩水孔。

5.3 材料性質試驗

為了瞭解試體所使用的材料性質，分別製作八吋鋼管、十吋鋼管及十二吋鋼管的拉力試片，以進行鋼材之抗拉試驗，各鋼材試驗強度如表 5.2 所示。試片之尺寸、製作程序及量測標距皆依據 ASTM 所規定，詳細試片尺寸如圖 5.2 所示。並於鋼管之拉力試片黏貼應變計，以記錄鋼管材料強度的實際應力-應變曲線，其曲線如圖 5.3 ~ 圖 5.5 所示，降伏強度按照管徑大小依次為 392 MPa、405 MPa 及 420 MPa，其伸長率依次為 26 %、23 % 及 22 %。

5.4 試驗設置與步驟

5.4.1 試驗設置

本試驗於交通大學土木系結構大樓的大型結構試驗室進行，試驗機使用極限載重為 50 噸、最大拉伸行程為 ± 200 mm 之 MTS 油壓致動器，採用位移控制的方式施加側向拉力，位移速率設定在每分鐘 5 mm。

試驗設置如照片 5.4 及圖 5.6 所示。為達到鋼管在純彎下撓曲的狀況，本試驗在距鋼管兩端三分之一管長處施加等值側向拉力，使得鋼管中段受到純彎矩的作用。力量之施加為 MTS 試驗機施加側向力於一 H 型鋼梁，此鋼梁再藉由兩端之螺桿施加等值側向力於鋼管上。為了防止施力點產生鋼管局部挫屈的現象，在鋼管上包覆橡膠墊。鋼管試體置放於兩端之基座上，鋼管兩端之端板與基座接觸點

可自由滑動，以確保兩端為輓支承。

鋼管上的加壓孔連接手控水壓幫浦，水注滿鋼管後，將水壓計安裝至注水孔上，做為讀取再行加壓時管內水壓大小之用。

為進一步瞭解鋼管撓曲之行為，於距鋼管兩端三分之一管長處及靠近中點之位置架設位移計以量測鋼管撓曲之後的變形量，位移計之裝設位置見圖 5.7，並於鋼管之張力側、壓力側及頂端沿軸向黏貼應變計，分別為應變計 SGT、SGC 及 SGN，以記錄試體之軸向應變，此外，在頂端還加貼沿環向之應變計 SGH，以記錄鋼管之環向應變狀態，應變計黏貼位置如圖 5.8 所示。

5.4.2 試驗步驟

本試驗之試驗程序簡述如下：

1. 將 MTS 油壓致動器水平安裝至反力牆上。
2. 將 H 型鋼梁與油壓致動器以螺栓鎖緊固定。
3. 組裝輓支承鋼板與鋼管試體。
4. 將試體放置定位於兩基座上。
5. 安裝、架設位移量測儀器及資料擷取系統。
6. 將手控水壓幫浦接上加壓孔，開始注水於鋼管內。
7. 水滿後，安裝水壓計於注水孔上並開始加壓。
8. 水壓達到預定值後，啟動油壓制動器，對試體進行預拉試驗，以檢驗試驗裝置與量測儀器是否無誤。
9. 檢驗無誤後，以位移控制來施加側向力，並由資料擷取系統同步讀取試驗數據。
10. 觀察並記錄試驗進行時的鋼管撓曲行為。

11. 當鋼管撓曲變位接近 400 mm 時，停止試驗進行。

5.5 試驗結果

由於試驗室油壓致動器的最大拉伸行程為 ± 200 mm，因此，本試驗對鋼管所能提供在施力點的側向變位最大可達 400 mm，顧及儀器使用安全之因素，試驗於施力點變位接近 400 mm 即停止。

試驗開始後一段時間內，由監控之側向力-變位曲線得知試體處於彈性階段，當側向力再逐漸增大後側向力-變位曲線顯現出其斜率逐漸變小，判斷鋼管已有局部降伏，達降伏撓曲強度後，側向力-變位曲線呈現約略等值之上升線，直至試驗停止。

停止試驗後，觀察試體發現：在將近 400 mm 的變位下，鋼管試體因徑厚比小，皆無明顯的破壞狀況，亦無挫屈現象發生，如照片 5.5 所示。由 MTS 控制系統所顯示之載重-變位曲線得知，除試體 P12SO 外，其餘試體均無強度下降之現象，此試體強度之下降乃因螺桿施力點鋼管產生局部挫屈現象而造成。

為討論各試體之側向力-變位關係，將中間兩位移量測之鋼管側向變位取平均值，以資比較各試體之撓曲強度與行為。

5.5.1 第一組試體（八吋鋼管）

試體 P08 系列之側向力-變位關係及側向力-應變關係如圖 5.9 ~ 圖 5.20 所示，此組鋼管在試驗停止後之最大側向力在 60 kN ~ 70 kN 之間，最大張應變在 0.009 ~ 0.016 之間，顯示鋼管局部已達應變硬化階段，環向應變顯示環向應力值變化不大；試體 P08SP 因試驗儀器發生問題之緣故，僅位移至 250 mm 便停止。

5.5.2 第二組試體 (十吋鋼管)

試體 P10 系列之側向力-變位關係及側向力-應變關係如圖 5.21 ~ 圖 5.32 所示，此組試體在試驗停止後之最大側向力在 118 kN ~ 128 kN 之間，最大張應變在 0.015 ~ 0.023 之間，顯示鋼管局部已甚為降伏。

5.5.3 第三組試體 (十二吋鋼管)

試體 P12 系列之側向力-變位關係及側向力-應變關係如圖 5.33 ~ 圖 5.44 所示，此組試體在試驗停止後之最大側向力在 190 kN ~ 200 kN 之間，最大張應變在 0.021 ~ 0.025 之間。

5.6 結果討論

鋼管試體在側向力作用下，取試體 P08SO 為例，以等階段之側向力顯示其側向變位情形如圖 5.45 所示，在一開始的加載至 52.5 kN 之中，試體均呈現小幅的側向變位，但側向力在 52.5 kN ~ 70 kN 之間，側向變位大幅的增加，顯現鋼管試體已局部進入塑性行為，其勁度大幅滑落。

表 5.3 所示為各以側向力-中點變位曲線求得試體之彈性勁度與塑性勁度，各組試體之彈性勁度約略相等，八吋、十吋與十二吋鋼管各組試體彈性勁度平均值之比值為 1 : 2.39 : 3.63，其彈性勁度接近各組試體之慣性矩之比值為 1 : 2.2 : 3.85。各組試體之塑性勁度與彈性勁度之比值範圍為 3% 至 5% 間。

由於內壓力的影響，在鋼管中段的純彎矩作用區，所承受的軸向張應力與壓應力並不相等，張應力應等於彎矩的作用加上水壓的

作用，而壓應力則是彎矩的作用減去水壓的作用，如下所示：

$$\sigma_t = \frac{My}{I} + \frac{PR}{2t}$$

$$\sigma_c = \frac{My}{I} - \frac{PR}{2t}$$

R 為鋼管半徑，所以張應力會先達到降伏；而各組試體試驗結果所得到之側向力-SGT 應變曲線因無明顯的降伏點產生，故採用偏距法求 P_y ，進一步利用梁彎曲原理推求降伏撓曲強度 $M_{y,test}$ 。利用上述的軸向張應力公式求得理論降伏撓曲強度 $M_{y,theor}$ ，如下所示：

$$M_{y,theor} = \left(\sigma_y - \frac{PR}{2t}\right) \times \frac{I}{y}$$

其中之 σ_y 值以材料性質試驗所得到之各試體降伏強度代入，各試體之 $M_{y,test}$ 及 $M_{y,theor}$ 如表 5.4。由表中可知，除了試體 P08 與 P10SO 外，所有試體撓曲強度之試驗值均大於或等於理論值；在無水壓的試體 P08SO 及 P12SO 中，其撓曲強度之試驗值與理論值完全相符，而其餘含水壓試體之撓曲強度試驗值則大於理論值，試驗值與理論值比值之平均值為 1.08。

將前述利用偏距法所求得的 P_y 值套入各試體之側向力-中點變位曲線中，可得到 Δ_y ；將 Δ_y 放大成三倍求取此時的側向力，再利用梁彎曲原理求得在 $3\Delta_y$ 下的塑性撓曲強度 M_p ，各試體的 M_p 如表 5.5 所示。由表中可知，各組試體在 $3\Delta_y$ 下，除試體 P10SO 外，其餘各組試體之 SO 試體均擁有最高之彎矩容量，而 SP 試體次之，顯示無內壓力之試體有較高之極限撓曲強度。

5.6.1 鋼管接合方式之影響

考慮相同內壓力情況下，比較 P-XX、P-XX-SP 及 P-XX-BW 試體，由表 5.5 與圖 5.46 ~ 圖 5.48 可知在撓曲強度方面，八吋鋼管的強度大小是 P08SP > P08BW > P08；十吋鋼管，強度大小順序不變，但 P10BW 與 P10 之極限撓曲強度極為接近；十二吋鋼管，強度大小依序為 P12SP > P12 > P12BW，唯 P12 與 P12BW 之強度亦差異不多。上述結果顯示套管銲接修補的鋼管之撓曲強度大於完整及對銲的鋼管，可見經過套管銲接修補後，亦有助於鋼管極限撓曲強度的提升。且對銲鋼管之極限撓曲強度與直管之強度極為接近。

5.6.2 管內壓力之影響

於考慮管內壓力有無之影響，比較 SP 系列及 SO 系列之試體，由圖 5.49 ~ 圖 5.51 可知，除試體 P10SO 外，無內壓的鋼管試體其強度均大於施加內壓的鋼管試體，故內壓力會降低鋼管的極限撓曲強度。

5.7 結論

總結試驗之結果，得到以下幾點之結論：

1. 相較於小地層變位易受損之管線接頭，API 對銲接合提供管線穩定之撓曲強度與優良之韌性行為。
2. API 5L 鋼管在受到撓曲作用之後，其側向變位一開始維持彈性，隨著撓曲彎矩的增加，鋼管在進入塑性行為之後，勁度大幅滑落，側向變位急遽上升，其塑性勁度與彈性勁度之比值範圍在 3% ~ 5% 之間。
3. 地下管線由於長期埋在地底下，可能會因鏽蝕或其他外在因素而

破損洩漏，除了一般之更換修補方式外，若考慮該地下管線必須維持原有之撓曲強度甚或提高，可採用全圓周套管銲接修補之方式，此一方式能夠有效維持鋼管之撓曲強度與變形能力。

4. 管內壓力的存在，對鋼管撓曲強度將造成負面之影響，所以對於高壓地下管線應定期監控與檢測，以確保管線正常運作。
5. 因鋼管具有優良的延展性，地下管線安全評估除考慮到強度之限界狀態 (limit state)，所需考慮到的另一限界狀態為其變形量或局部挫屈行為。

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究探討地下管線遭受側向地層變位時之行為，以有限元素分析程式，考慮管線外徑、回填土壤性質、與變位大小等影響參數，進行地層變位之模擬，探討管線之行為；並進行十二組實尺寸鋼管試體於承受高壓與撓曲作用時之極限撓曲強度與韌性行為，製作之試體包括鋼管對銲試體與以全圓周套管修補之鋼管試體。

總結分析及試驗之結果，有以下幾點結論：

1. 以 ABAQUS 有限元素分析程式進行三維實體管線及土壤之模擬，其模型之建立與模擬程序相當簡單，其應用性相當的高。
2. 由模擬結果可知，當土層之剪動量越大，管線所受之應力會越大，且有明顯增加之趨勢，在不考慮管線之塑性行為且僅有側向錯動並無垂直載重下，由地層錯動量可保守判斷管線應力。
3. 地下管線應力受土壤性質影響頗大，小管徑管線在土層有錯動時，其應力變化增量有隨錯動量成比例之傾向，即小管徑管線與土壤間之應力交互作用相當明顯，大管徑則沒有明顯之比例，惟其應力變化增量隨土壤勁度之增加而增大。
4. 由模擬結果亦發現小尺寸管徑於土壤相同錯動量下，管線之應力並不隨土壤勁度之變化而改變，即小管徑管線受回填土壤勁度之影響較小。

5. 由分析得知，回填於管線上的砂土若回填夯實越緊密（即使土體有較高之勁度），則地層錯動時土體可提供管線之摩擦力越高，將使管線所之應力增大。
6. 相較於小地層變位易受損之管線接頭，API 對銲接合提供管線穩定之撓曲強度與優良之韌性行為。
7. 地下管線由於長期埋在地底下，可能會因鏽蝕或其他外在因素而破損洩漏，除了一般之更換修補方式外，若考慮該地下管線必須維持原有之撓曲強度甚或提高，可採用全圓周套管銲接修補之方式，此一方式能夠有效維持鋼管之撓曲強度與變形能力；若以鋼板方式修補洩漏管線，僅適用於 GR. A 與 GR. B 管線材質。
8. 管內壓力的存在，對鋼管撓曲強度將造成負面之影響，所以對於高壓地下管線應定期監控與檢測，以確保管線正常運作。
9. 地下管線承受地層變位時之評估方式，可保守的假設管線完全依地層錯動而變形，以計算因變位造成的應力。
10. 因鋼管具有優良的延展性，地下管線安全評估除考慮到強度之限界狀態（limit state），所需考慮到的另一限界狀態為其變形量或局部挫屈行為。

6.2 建議

對於地下管線未來之研究與發展有以下幾點建議：

1. 以有限元素程式分析地層變位對管線之影響，後續可朝考量鋼管之塑性行為方面去發展，在鋼管之韌性得以充分發揮下，探討管線於考量鋼管材料之塑性時可承受變位之行為。
2. 鋼管撓區試驗方面，後續可施加軸力於鋼管上，探討鋼管在有軸力狀態下之撓曲行為。

3. 本研究僅對垂直於管線之地層錯動探討管線行為，唯地層錯動方向與地下管線之夾角將影響地下管線之受力與行為，值得後續研究。

參考文獻

1. 楊秋興，「地下管線受震之動力反應分析」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，田堯彰教授指導，民國七十四年六月。
2. 田堯彰，「地下管線受震可用性之研讀」，國科會防災科技研究報告 74-02 號，民國七十四年八月。
3. 張暉苑，「斷層相對滑動對維生管線影響之研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，邱耀正教授指導，民國七十七年六月。
4. 羅俊雄，「維生線系統隨機地震反應之靈敏度分析」，國科會防災科技研究報告 78-36 號，民國七十八年十月。
5. 葉耀輝、呂榮芳，「有限元素法探討曲管在土壤液化區之動力行為」，國科會防災科技研究報告 79-58 號，民國八十年六月。
6. 徐登文、邵良寅、張忠本，「維生線通過不穩地質之耐震分析(二)」，國科會防災科技研究報告 79-70 號，民國八十年十一月。
7. 謝永宏，「微彎鋼製管線構材行為之研究」，國立成功大學建築研究所碩士論文，張嘉祥教授指導，民國八十六年六月。
8. 李德河，紀雲曜，「抽水引致地層下陷之三維有限元素模式之初步研究-ABAQUS 程式之應用」，第二屆水資源及水質保護研討會，台南市立成功大學，民國八十六年。
9. 中國石油股份有限公司，「長途輸油(氣)管線工程施工說明書」。
10. ASME B31.4, "Liquid Transportation Systems For Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia, & Alcohol," American Society of Mechanical Engineers, 1992.
11. ASME B31.8, "Gas Transmission and Distribution Piping Systems," American Society of Mechanical Engineers, 1995.

12. API STD 1104, "Welding of Pipelines and Related Facilities," American Petroleum Institute, 1988.
13. API SPEC. 5L., "Specifications For Line Pipe," American Petroleum Institute.
14. Ariman, T. and Lee, B. J., "Tension/Bending Behavior of Buried Pipelines under Large Ground Deformation in Active Faults," Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, pp.226-233. July, 1992.
15. Corigliano, A., Maier, G. and Mariani., S., "Analysis of Ductile Fracture in Damaged Pipelines by a Geometric Parameter Method," Engineering Structures, Vol.21, pp.924-936, 1999.
16. Eguchi, R.T., Pelmulder, S.D., Seligson, H.A. and Wiggins, J. H., "A Simplified Model for Assessing Secondary Loss Impacts Associated with Oil and Natural Gas Pipeline Failures During Earthquake," Proceeding from the Fourth Japan-U.S. Workshop on earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, 1992.
17. Ei-Sawy, K. and Moore, I. D., "Stability of Loosely Fitted Liners Used to Rehabilitate Rigid Pipes," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, pp.1350-1357, No.11, 1998.
18. Gresnigt, A. M., "Ultimate Strength and Deformation Capacity of Pipeline," Eighth International Conference on Offshore Mechanics And Arctic Engineering, pp.19-23, March, 1989.
19. Hahn, F. D. and Sritharan, S., "Lateral Response of Underground Pipelines to Earthquakes," Computers & Structures, Vol.53, No.3, pp.601-611, 1994.
20. Higuchi, M., Nakagawa, A., Sayashi, M., Yamauchi, T., Saito, M. and Sato, M., "Analytical Study on Fatigue Strength Reduction Factor of Small-Diameter Socket-Welded Pipe Joints," Journal of

Pressure Vessel Technology, ASME, Vol.120, pp.157-163, May, 1998.

21. Honegger, D.G., "Research Needs Related to Detailed Evaluation of Pipeline Response to Large Ground Deformations," Proceeding from the Fourth Japan-U.S. Workshop on earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, 1992.
22. Jones, J. W., "New Device Checks Buried Pipeline Coatings," Pipeline & Gas Journal, pp.20-21, February, 1981.
23. Katayama, I., Adachi, M. and Ozeki, K., "Simplified Dynamic Analysis Method for Buried Structures," Proceeding from the Third Japan-U.S. Workshop on earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, 1991.
24. Kawashima, K., Hasegawa, K. and Nagashima, H., "Seismic Behavior of Buried Pipelines through Field Observation," Proceedings of the 3rd US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, pp.234-243, August, 1991.
25. Keaton, J. R., "Characterizing Fault Rupture Hazards for Design of Buried Pipeline," Transportation Research Record, Vol.1411, pp.28-34.1994.
26. Koundy, V., Renevey, S., Marini, B. and Combescure, A., "Effect of Torsional Buckling in the Cleavage Failure of Low-Alloy Steel Tension Pipe Specimens," Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol.120, pp.256-261, August, 1998.
27. Maltby, T. C. and Calladine, C. R., "An Investigation into Upheaval Buckling of Buried Pipelines-I. Experimental Apparatus and Some Observations," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.37, No.9, pp.943-963, 1995.
28. Maltby, T. C. and Calladine, C. R., "An Investigation into Upheaval Buckling of Buried Pipelines-II. Theory and Analysis of

- Experimental Observations,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.37, No.9, pp.965-983, 1995.
29. Mavridis, G., and Pitilakis, K., “Transverse Seismic Analysis of Buried Pipelines,” *Proceedings of the 4th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 1995.
 30. Mavridis, G., and Pitilakis, K., “Axial and Transverse Seismic Analysis of Buried Pipelines,” *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, 1996.
 31. Miura, N. and Wilkowski, G. M., “J-R Curves from Circumferentially through-wall-cracked Pipe Tests Subjected to Combined Bending and Tension—Part I: Theory and Numerical Simulation,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME, Vol.120, pp.406-411, November, 1998.
 32. Moore, I. D., “Elastic buckling of Buried Flexible Tubes—A Review of Theory and Experiment,” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.115, No.3, pp.340-358, March, 1989.
 33. Moore, I. D., “Response of Buried Cylinders to Surface Loads,” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.7, pp.758-377, July, 1989.
 34. Moore, I. D. and Booker, J. R., “Behaviour of Buried Flexible Cylinders under the Influence of Nonuniform Hoop Compression,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol.21, No.9, pp.943-956, 1985.
 35. Nishio, N., “Evaluation of Earthquake Resistance of Buried Continuous Pipelines at Bent Parts,” *Proceedings of the 3rd US Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, pp.442-451, Aug, 1991.

36. O'Rourke, T.D., Gowdy, T.E., Stewart, H.E. and Pease, J.W., "Lifeline Performance and Ground Deformation in the Marina During 1989 Loma Prieta Earthquake," Proceeding from the Third Japan-U.S. Workshop on earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, 1991.
37. Pitilakis, K. D. and Mavridis, G. A., "Seismic Behavior & Vulnerability of Buried Pipelines," Report EPOC-CT91-0039, commission of the European Communities, D.G. XII, Part 3 "Tool for Buried Lifeline Analysis", 1993.
38. Quincy, G. L., "How to Use Null Detection in Gas Utility Systems," Pipeline and Gas Journal, pp.22-36, February, 1981.
39. Satoh, M., Suda, K., Suzuki, N. and Fusanori, M., "An Overview of Seismic Design of Buried Lifeline Structures in Japan," pp.847-874.
40. Schneider, S. P., "Flexural Capacity Of Pressurized Steel Pipe," Journal of Structural Engineering, pp.330-340, 1998.
41. Slagis, G. C., "Experimental Data on Seismic Response of Piping Components," Journal of Pressure Technology, ASME, Vol.120, pp.449-455, November, 1998.
42. Smith, E., "The Effect of Loading Mode (bending versus tension) on Crack Arrest," Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol.63, pp.75-80, 1995.
43. Troive, L., Nasstrom, M. and Jonsson, M., "Experimental and Numerical Study of Multi-Pass Welding Process of Pipe-Flange Joints," Journal of Pressure Technology, ASME, Vol.120, pp.244-251, August, 1998.
44. Yeh, Y. H. and Wang, L. R. L., "FEM Study of Ground Strains from Strong Motion Array Data for Lifeline Application," Journal of Chinese Institute of Engineers, Vol.11, No.3, pp.207-218, 1998.
45. Yong, Y., "Response of Pipeline Structure Subjected to Ground Motion Excitation," Engineering Structures, Vol.19, No.8, pp.679-

684, 1997.

46. Vougioukas, E. A., Theodossis, C. and Carydis, P. G., "Seismic Analysis of Buried Pipelines Subjected to Vertical Fault Movement," Proceedings of the 3rd US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, pp.432-441, August, 1991.
47. Zhang, X. P. and Dorn, L., "Estimation of the Local Mechanical Properties of Pipeline Steels and Welded Joints by Use of the Microshear Test Method," International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol.75, pp.37-42, 1998.

表 4.1 ABAQUS 之材料模式

General options	
Option	Requires
*DAMPING	*ELASTIC, *HYPERELASTIC, or *HYPERFORM (except when used with beam or shell general sections or superelements)
*DENSITY	
*DEPVAR	
*EXPANSION	
Elasticity options	
Option	Requires
*ELASTIC	
*HYPERELASTIC	
*HYPERFOAM	
*POROUS ELASTIC	
Rate-independent plasticity options	
Option	Requires
*CAP PLASTICITY	*CAP HARDENING, and *ELASTIC OR *POROUS ELASTIC
*CAST IRON PLASTICITY	*CAST IRON COMPRESSION HARDENING; *CAST IRON TENSION HARDENING; and *ELASTIC, TYPE=ISO
*CLAY PLASTICITY	*ELASTIC or *POROUS ELASTIC
*CONCRETE	*ELASTIC, TYPE=ISO
*DRUCKER PRAGER	*DRUCKER PRAGER HARDENING, and *ELASTIC or *POROUS ELASTIC
*FOAM	*ELASTIC or *POROUS ELASTIC
*JOINTED MATERIAL	*ELASTIC, TYPE=ISO AND *ORIENTATION
*MOHR COULOMB	*MOHR COULOMB HARDENING and *ELASTIC, TYPE=ISO
*PLASTIC	*ELASTIC
Enhancements for plasticity options	
Option	Requires
*CYCLIC HARDENING	*PLASTIC, HARDENING=COMBINED
*INELASTIC HEAT FRACTION	*PLASTIC and *SPECIFIC HEAT

表 4.1 (續)

*POROUS METAL PLASTICITY	*PLASTIC
*POTENTIAL	*PLASTIC or *CREEP
Complete mechanical definition options	
Option	Requires
*ACOUSTIC MEDIUM	*DENSITY
*DEFORMATION PLASTICITY	
*USER MATERIAL, TYPE=MECHANICAL	
Heat transfer properties	
Option	Requires
*CONDUCTIVITY	
*LATENT HEAT	*DENSITY
*SPECIFIC HEAT	*DENSITY
*HEAT GENERATION	
Electrical options	
Options	Requires
*DIELECTRIC	
*ELECTRICAL CONDUCTIVITY	
*JOULE HEAT FRACTION	
*PIEZOELECTRIC	

表 4.2 土壤及鋼管材料參數

	彈性模數 (MPa)	波松比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	摩擦角 ϕ	凝聚力 (MPa)
$E_{i(1)}$	10	0.4	2000	30	5×10^{-4}
$E_{i(2)}$	30	0.4	2000	30	5×10^{-4}
$E_{i(3)}$	50	0.4	2000	30	5×10^{-4}
E_o	25	0.3	2000	30	5×10^{-4}
$E_{S8''}$	204000	0.3	7830		
$E_{S24''}$	204000	0.3	7830		

$E_{i(1)}$: 鋼管周圍土體彈性模數為 10 MPa

$E_{i(2)}$: 鋼管周圍土體彈性模數為 30 MPa

$E_{i(3)}$: 鋼管周圍土體彈性模數為 50 MPa

E_o : 外層土體彈性模數

$E_{S8''}$: 8"鋼管彈性模數

$E_{S24''}$: 24"鋼管彈性模數

表 5.1 試體規格表

試體編號	外徑	厚度	長度	材質	標稱降伏強度
P08	219 mm (8 5/8 ")	8.18 mm (0.322 ")	6000 mm	API 5L GR.B	241 MPa (35000 psi)
P08SP			6000 mm		
P08SO			6000 mm		
P08BW			5960 mm		
P10	273 mm (10 3/4 ")	9.27 mm (0.365 ")	6020 mm	API 5L GR.B	241 MPa (35000 psi)
P10SP			6030 mm		
P10SO			6010 mm		
P10BW			5990 mm		
P12	324 mm (12 3/4 ")	9.53 mm (0.375 ")	6020 mm	API 5L X52	359 MPa (52000 psi)
P12SP			6000 mm		
P12SO			6000 mm		
P12BW			5970 mm		

註：試體編號 P - XX - YY

- “ ”：完整的鋼管
- “SP”：加內壓的套管修補鋼管
- “SO”：不加內壓的套管修補鋼管
- “BW”：對銲接合的鋼管
- “08”：八吋鋼管
- “10”：十吋鋼管
- “12”：十二吋鋼管

表 5.2 鋼管之材料強度表

試體	F_y (MPa)	F_u (Mpa)	伸長率 (%)
8吋鋼管	392	463	26
10吋鋼管	405	482	23
12吋鋼管	420	490	22

表 5.3 各試體之彈性勁度及塑性勁度表

試體	k_e (kN/mm)	k_p (kN/mm)	k_p / k_e
P08	0.73	0.036	0.049
P08SP	0.77	0.036	0.047
P08BW	0.72	0.037	0.051
P08SO	0.80	0.031	0.039
P10	1.82	0.067	0.037
P10SP	1.76	0.052	0.030
P10BW	1.82	0.069	0.038
P10SO	1.81	0.052	0.029
P12	2.72	0.090	0.033
P12SP	2.71	0.094	0.035
P12BW	2.78	0.089	0.032
P12SO	2.76	0.076	0.028

表 5.4 各試體降伏撓曲強度之試驗值與理論值之比較

試體	$M_{y,test}$ (kN-m)	$M_{y,theor}$ (kN-m)	$M_{y,test} / M_{y,theor}$
P08	96	99	0.97
P08SP	118		1.19
P08BW	105		1.06
P08SO	121	121	1.00
P10	193	181	1.07
P10SP	200		1.10
P10BW	199		1.10
P10SO	193	220	0.88
P12	296	245	1.21
P12SP	306		1.25
P12BW	281		1.15
P12SO	330	330	1.00

表 5.5 各試體達 $3\Delta_y$ 時之撓曲強度

試體	$3\Delta_y$ 之 M_p	M_p 比值 ^{*1}
P08	118	1.00
P08SP	*2	*2
P08BW	126	1.07
P08SO	135	1.14
P10	233	1.00
P10SP	247	1.06
P10BW	236	1.01
P10SO	227	0.97
P12	364	1.00
P12SP	372	1.02
P12BW	353	0.97
P12SO	393	1.08

*1: M_p 比值為各組試體 SP, BW 與 SO 試體之 M_p 與其對應 P08, P10, P12 試體之 M_p 比值。

*2: 試體 P08SP 因變位未達 $3\Delta_y$, 故在表中並未顯示其數值。

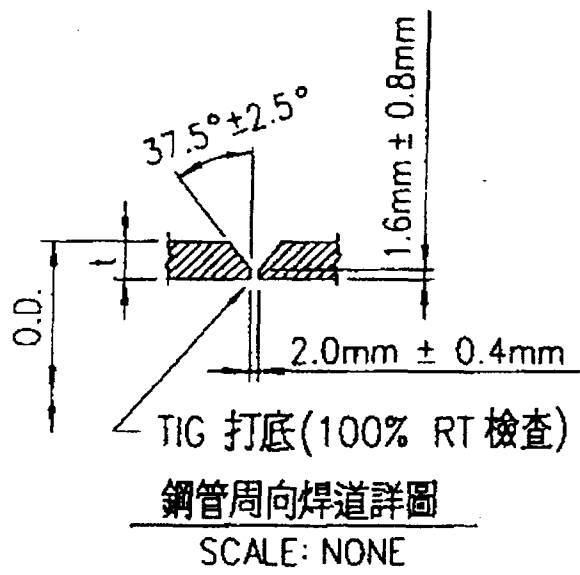


圖 3.1 鋼管周向銲道詳圖

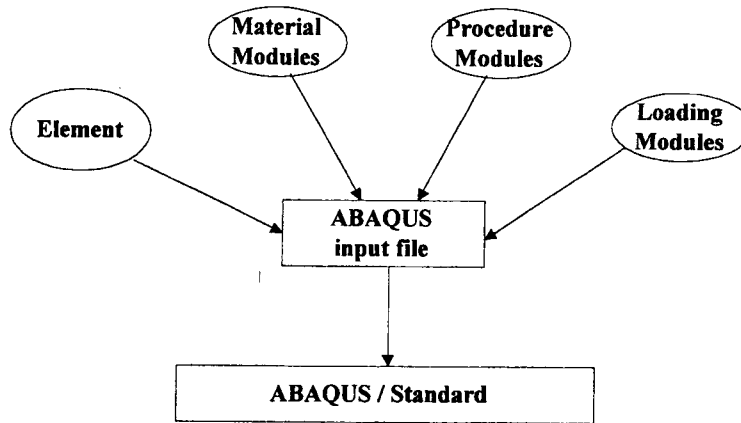


圖 4.1 ABAQUS 模型建構

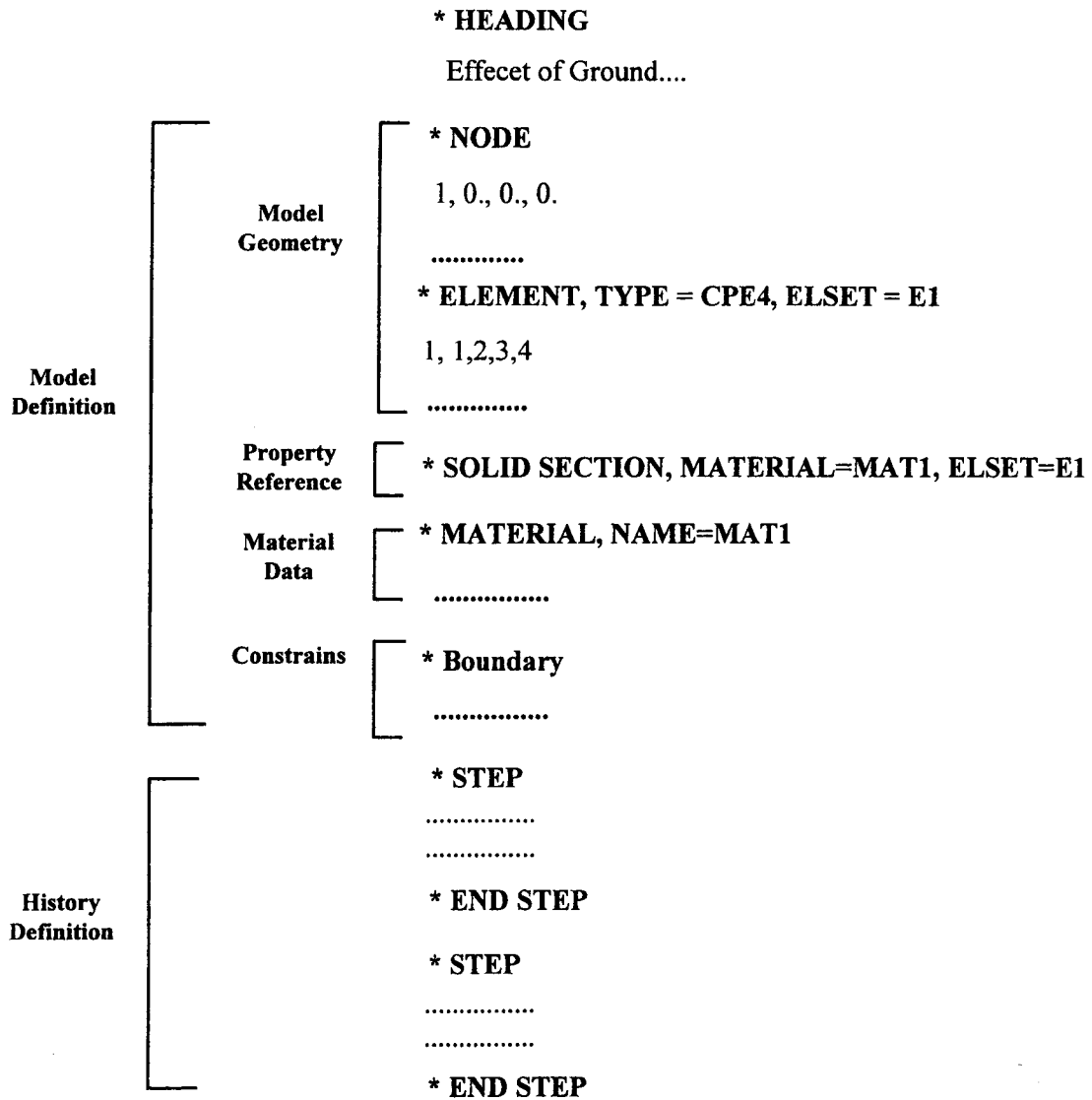


圖 4.2 ABAQUS 輸入流程

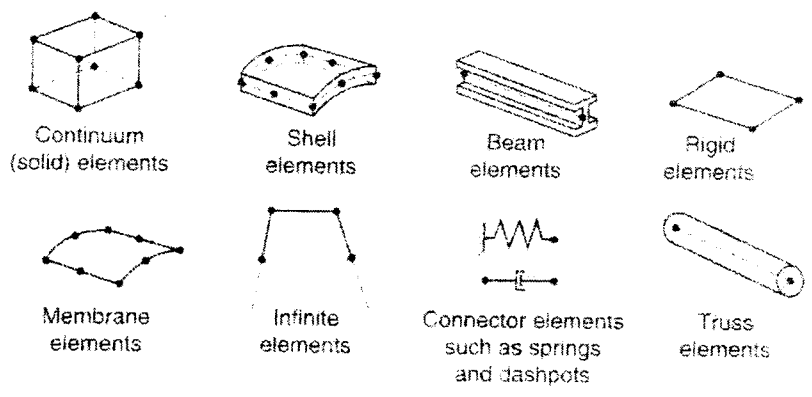


圖4.3 不同型態之元素

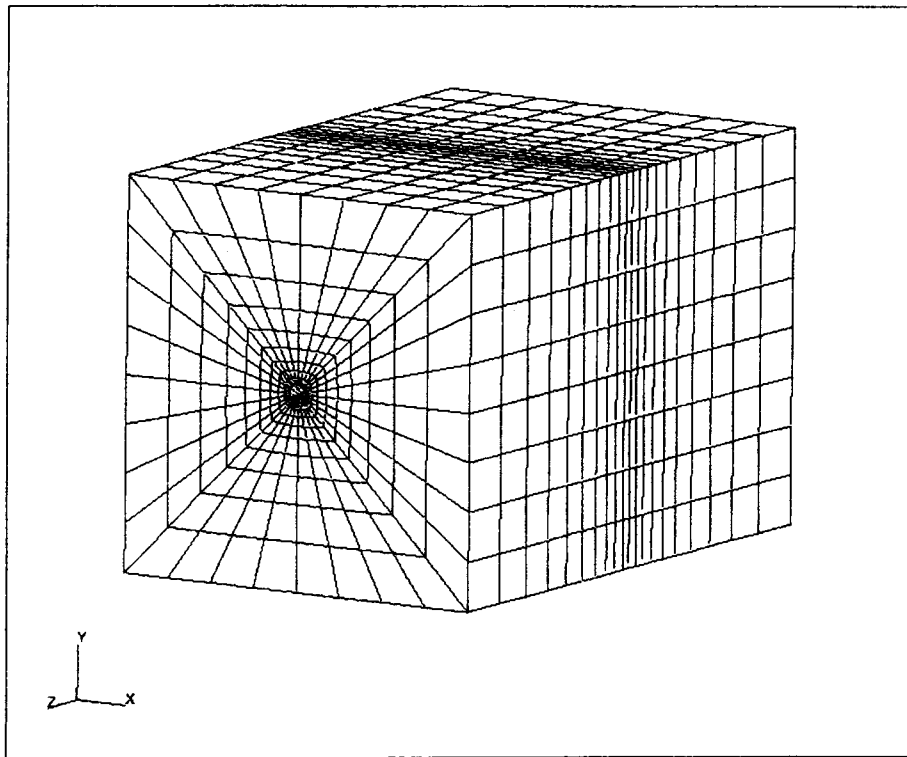


圖 4.4 土壤-鋼管有限元素模型

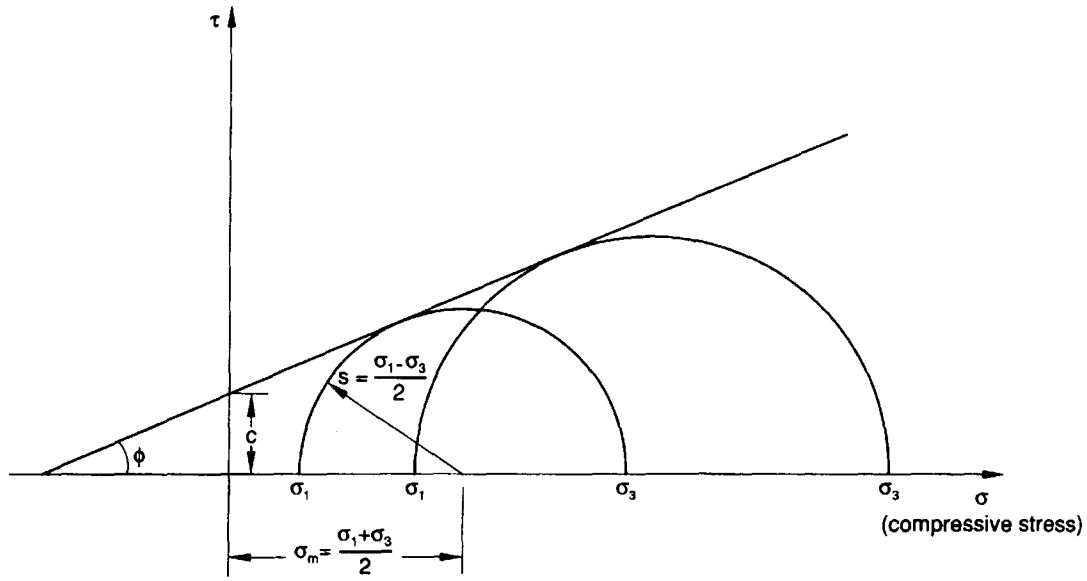


圖 4.5 Mohr-Coulomb 破壞準則

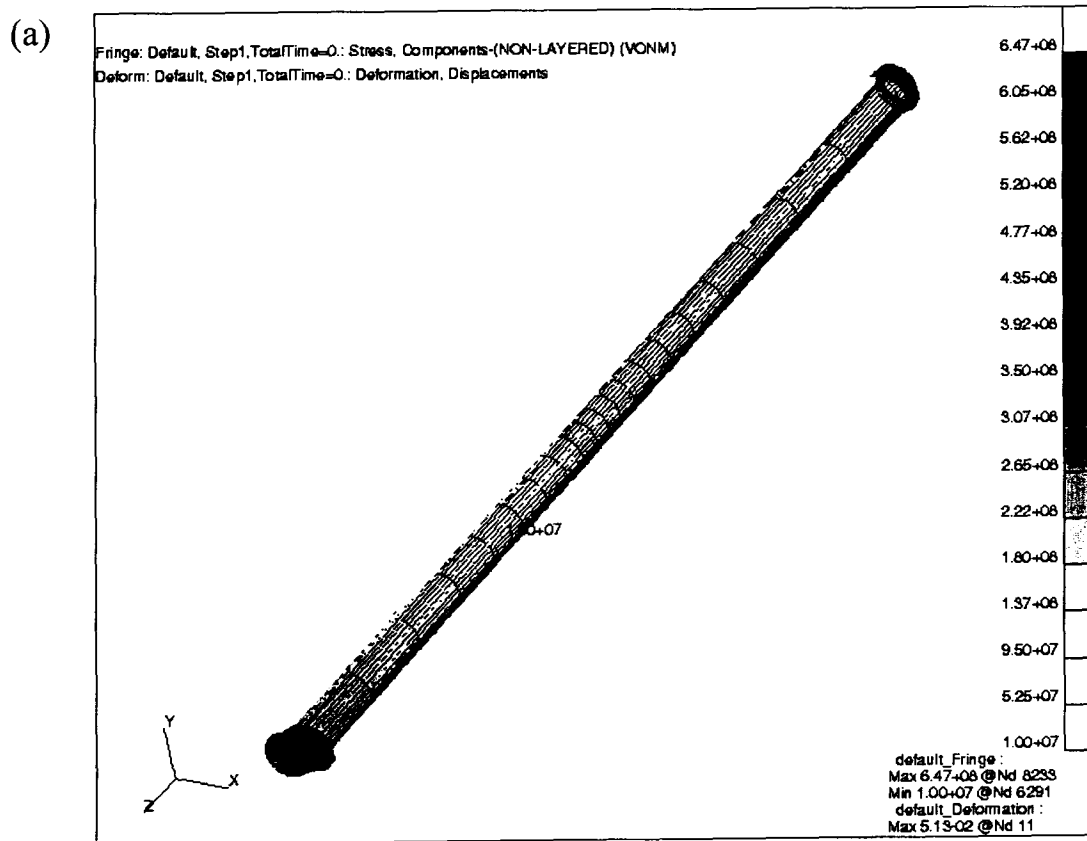


圖 4.6 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm a) $E_i=10\text{MPa}$;
 b) $E_i=30\text{MPa}$; c) $E_i=50\text{MPa}$

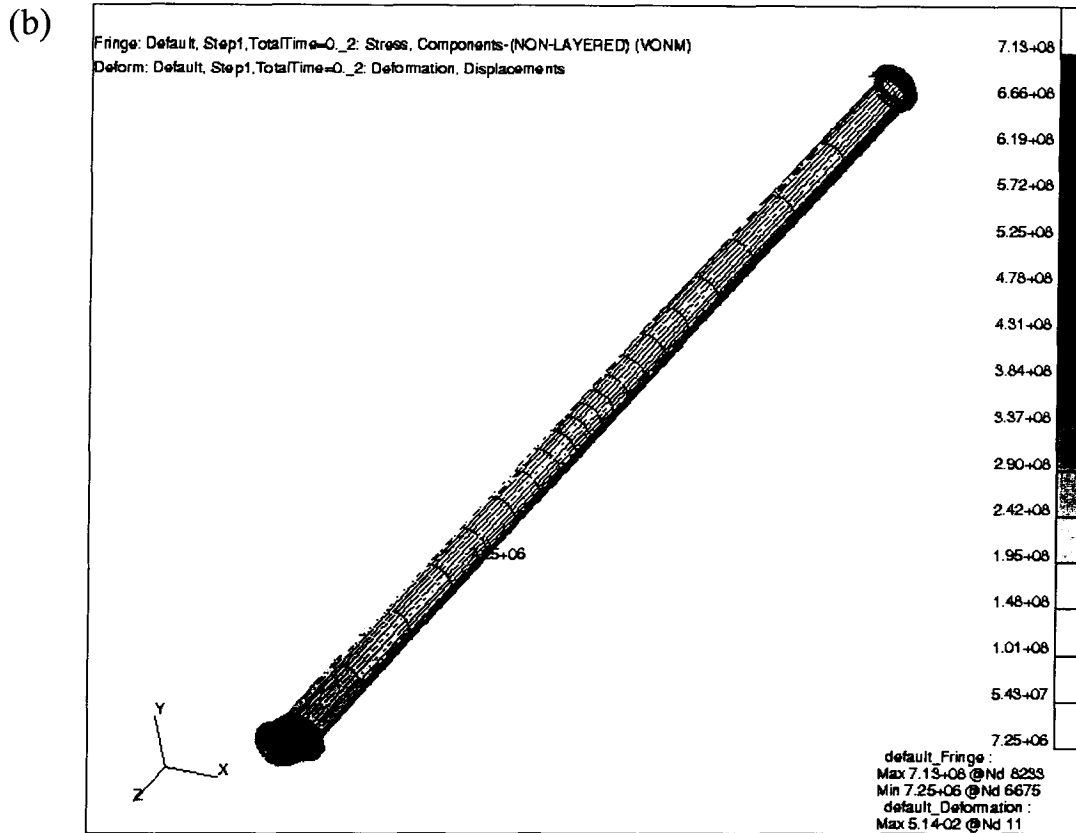


圖 4.6 (續)

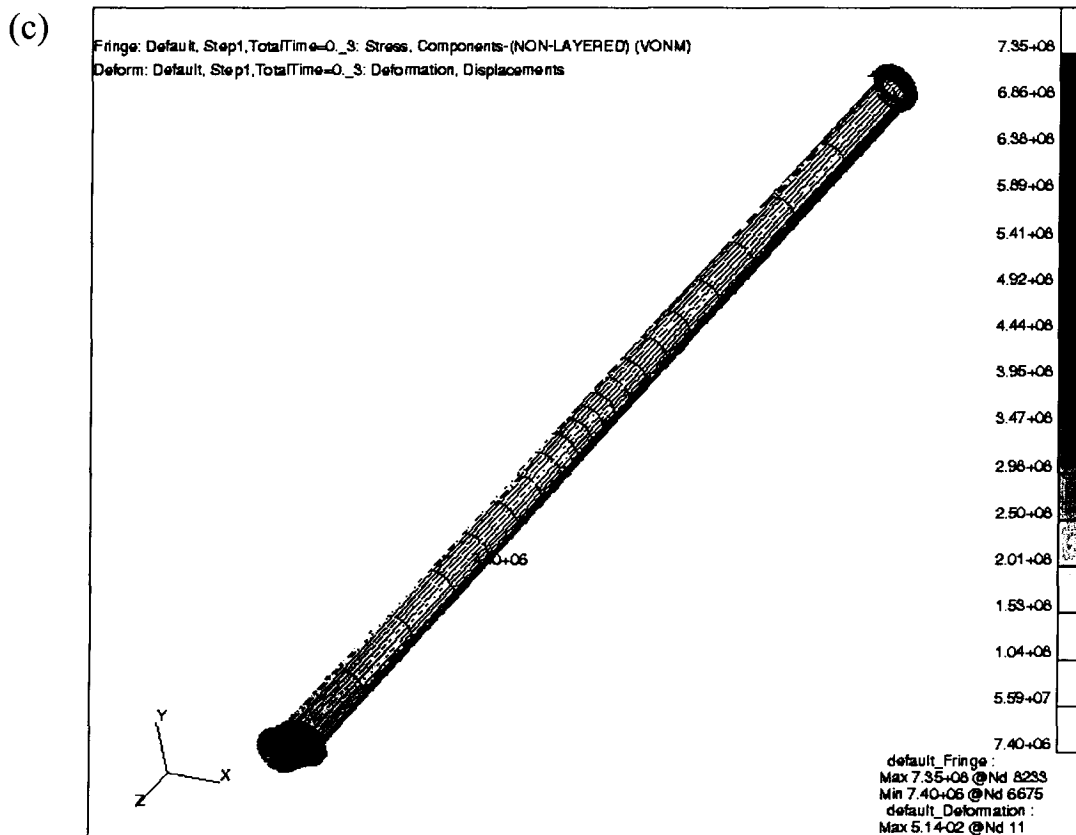


圖 4.6 (續)

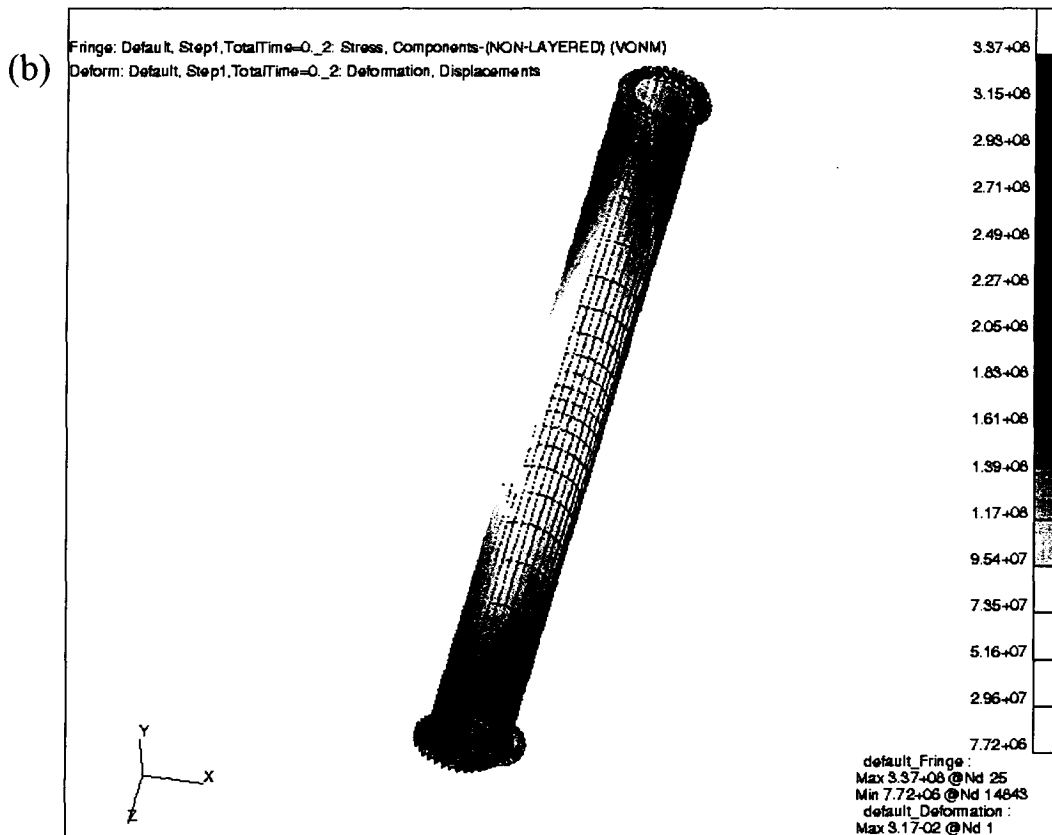
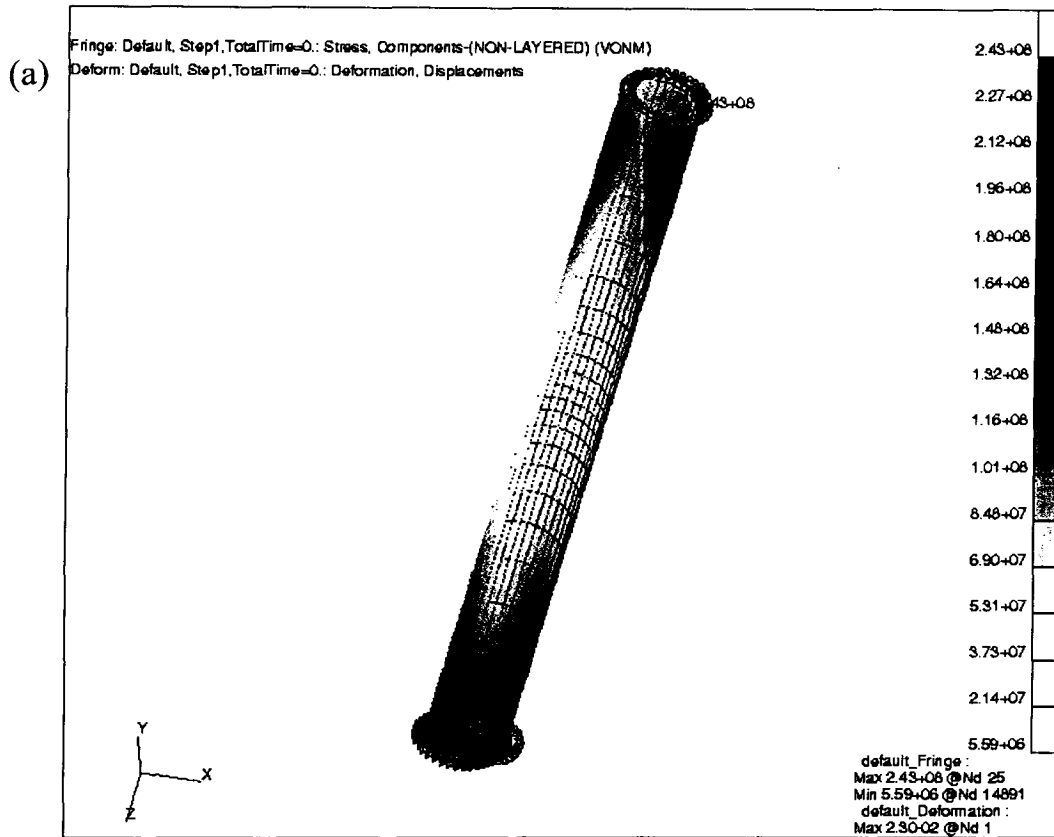


圖 4.7 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 5cm a) $E_i=10\text{MPa}$;
 b) $E_i=30\text{MPa}$; c) $E_i=50\text{MPa}$

(c)

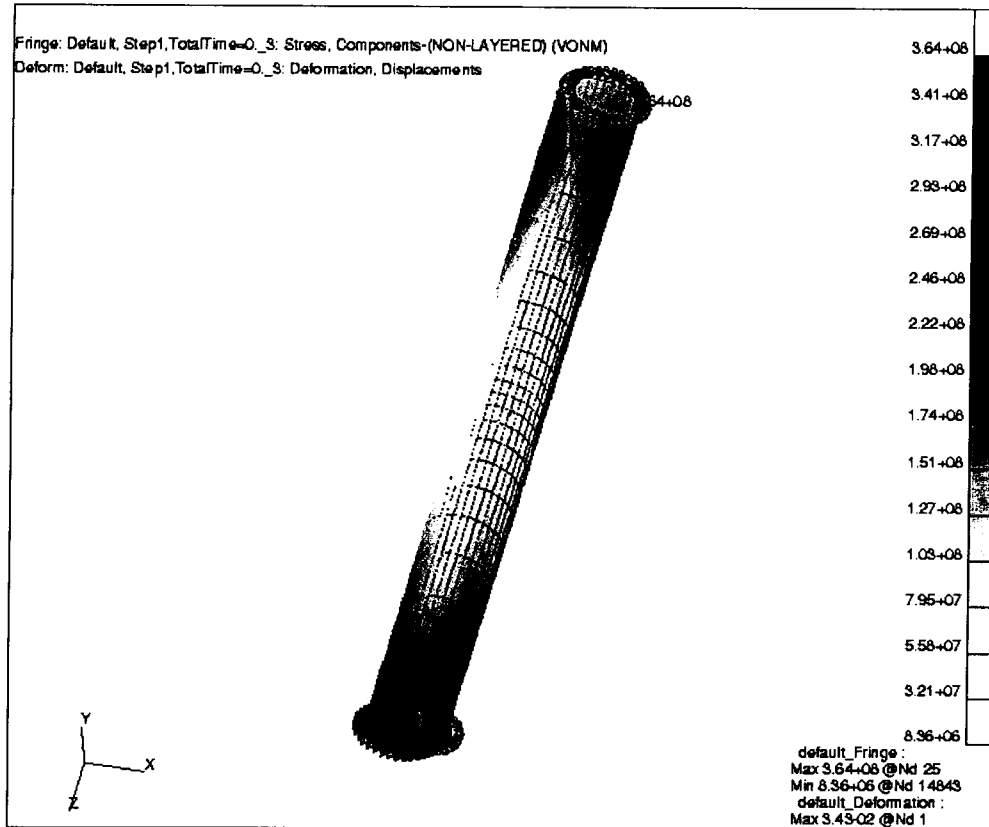


圖 4.7 (續)

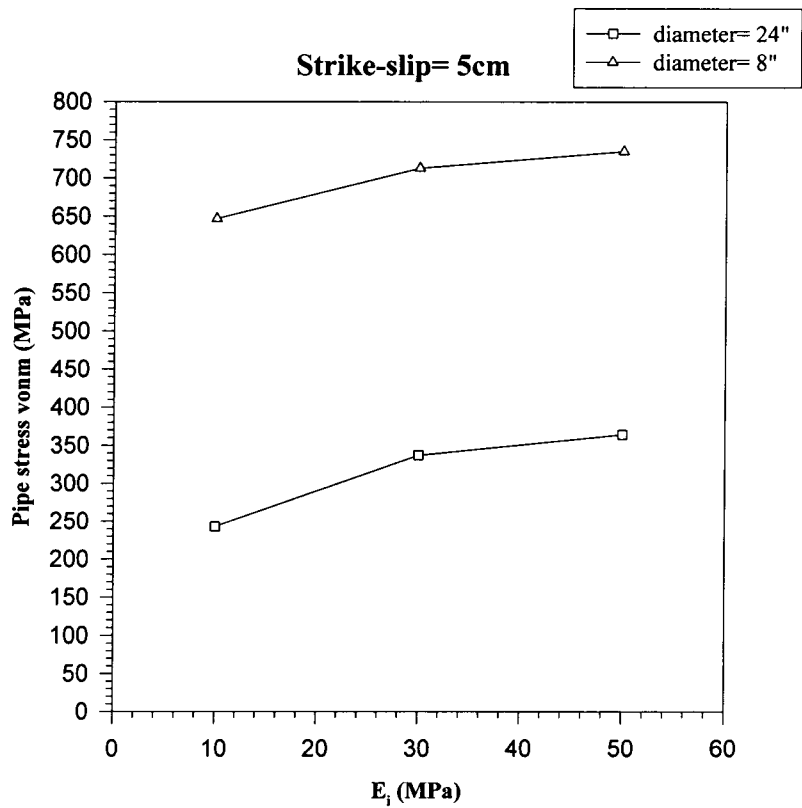
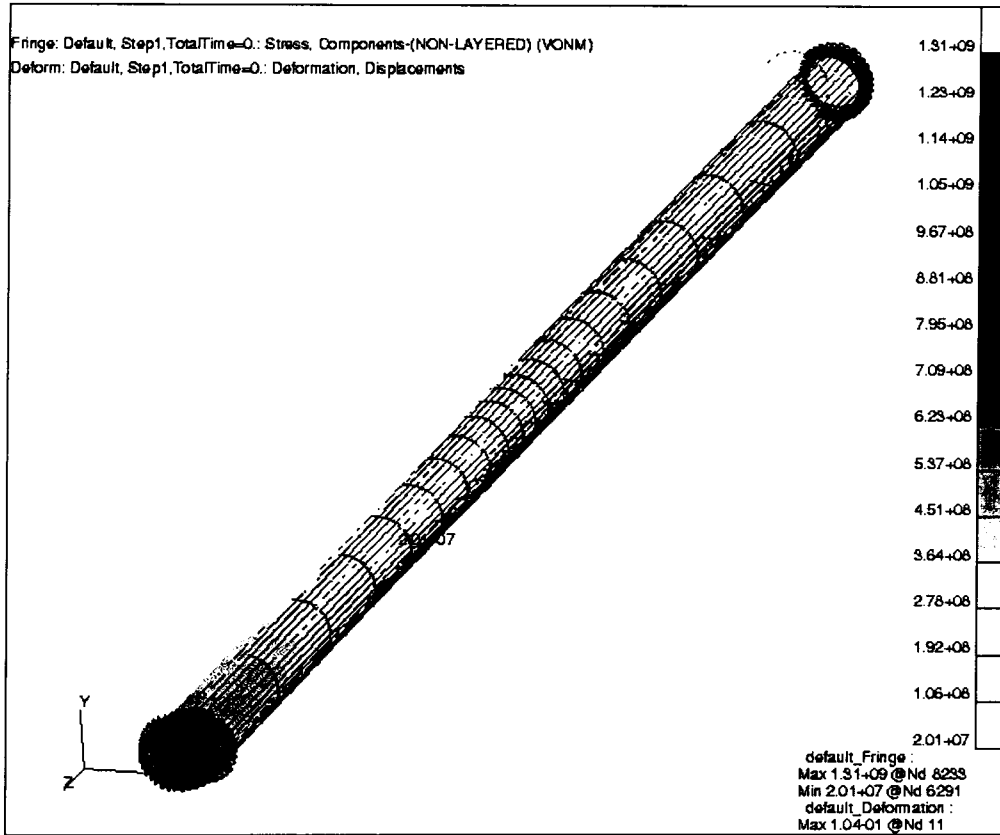


圖 4.8 土層剪動 5cm 鋼管 von Mises 應力- E_i 關係圖

(a)



(b)

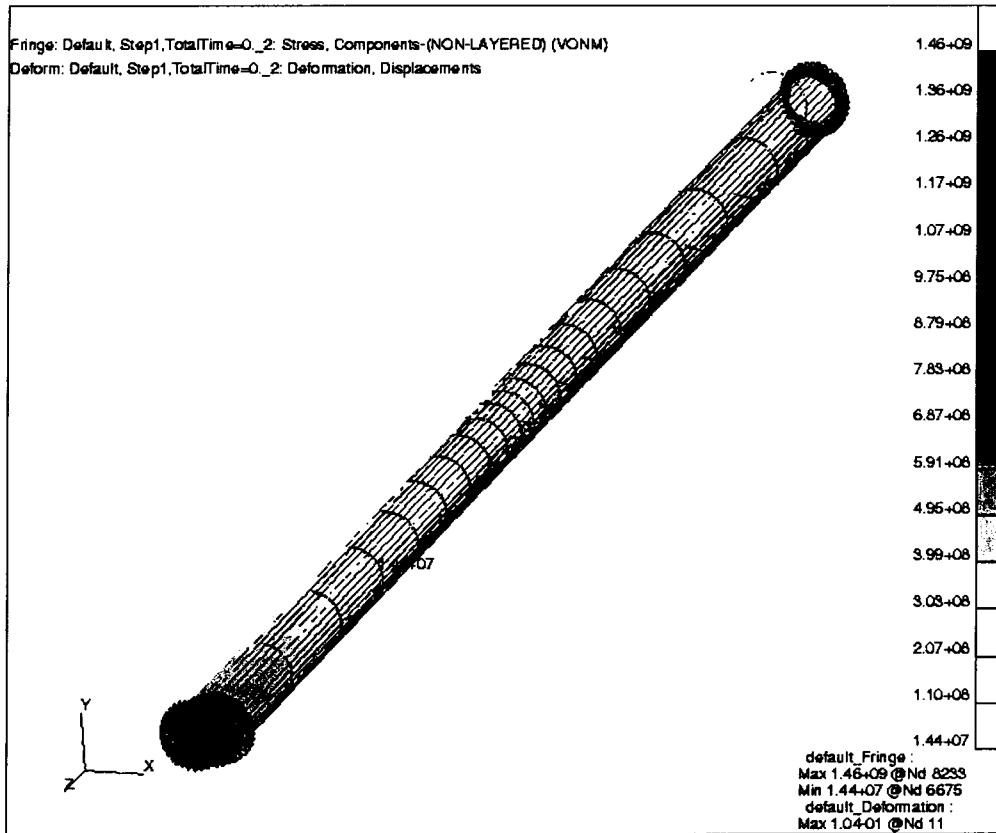


圖 4.9 8"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10cm a) $E_t=10\text{MPa}$;
b) $E_t=30\text{MPa}$; c) $E_t=50\text{MPa}$

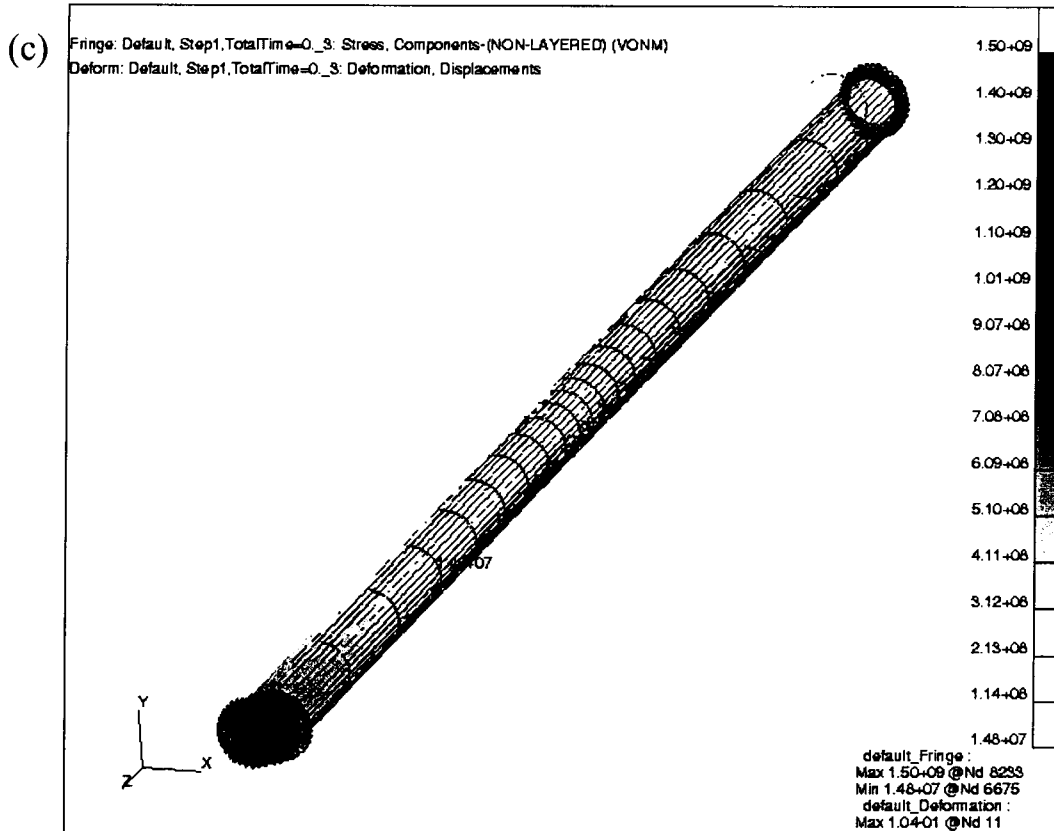


圖 4.9 (續)

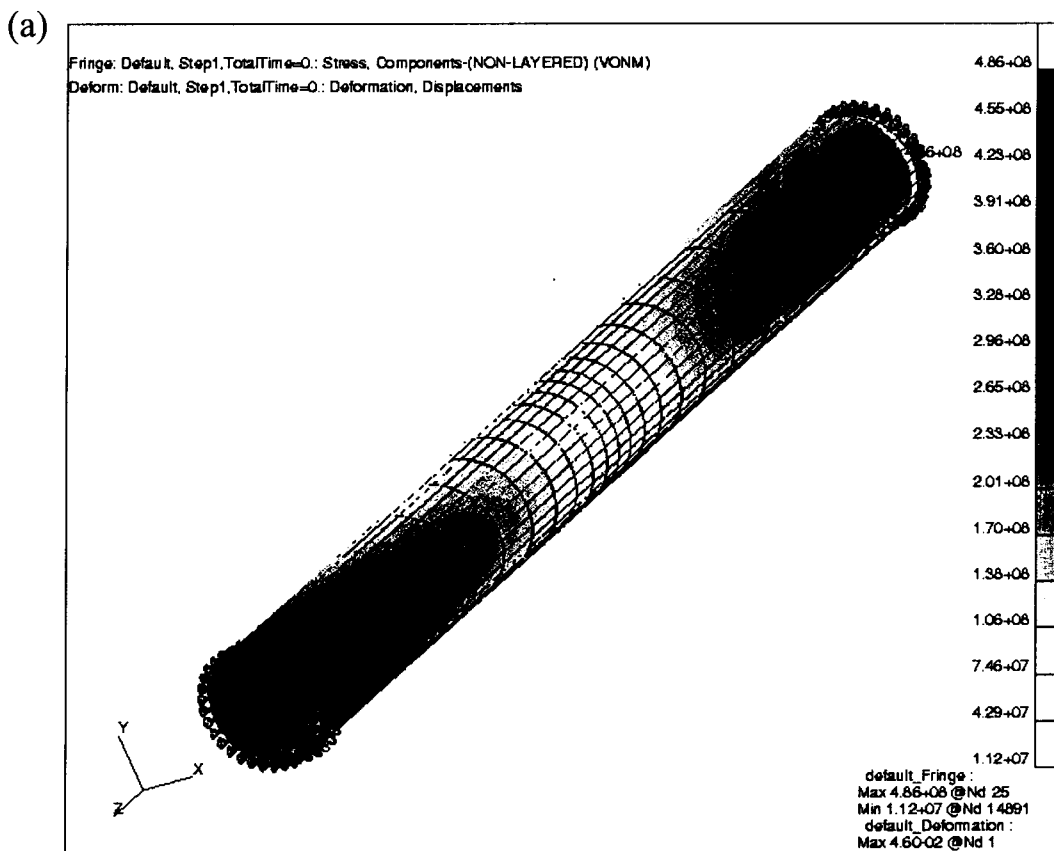


圖 4.10 24"鋼管 von Mises 應力土層剪動 10cm a) $E_t=10\text{MPa}$;
 b) $E_t=30\text{MPa}$; c) $E_t=50\text{MPa}$

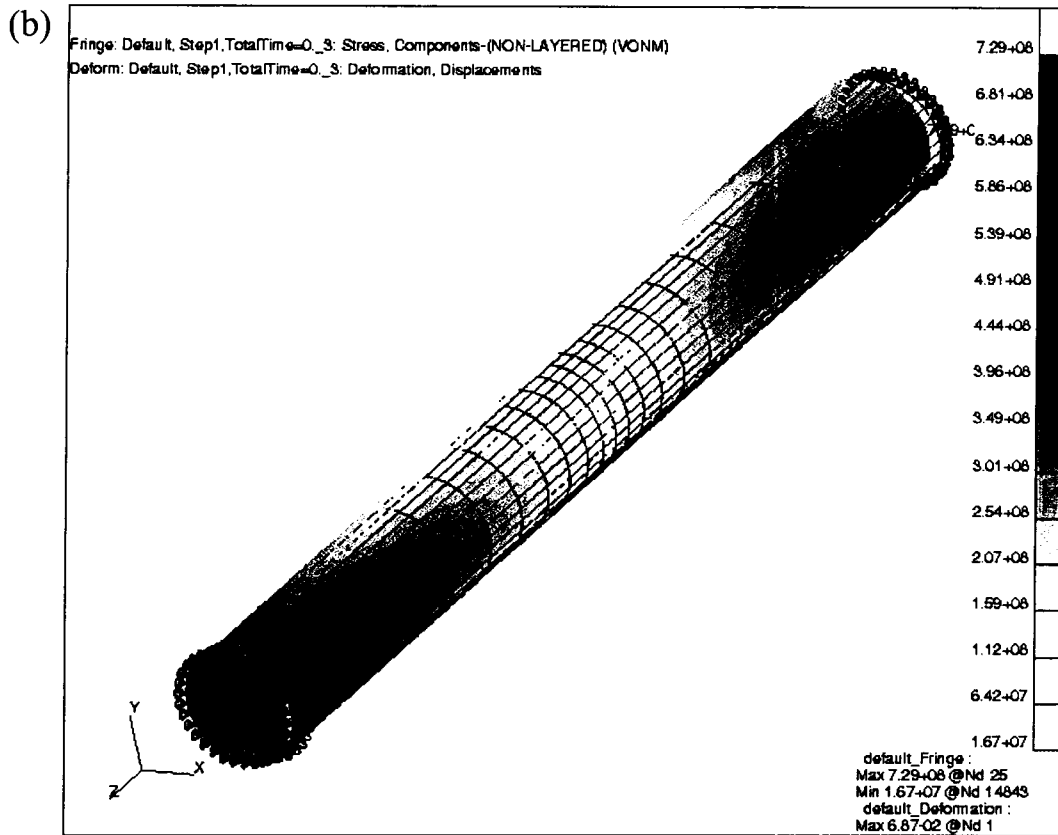


圖 4.10 (續)

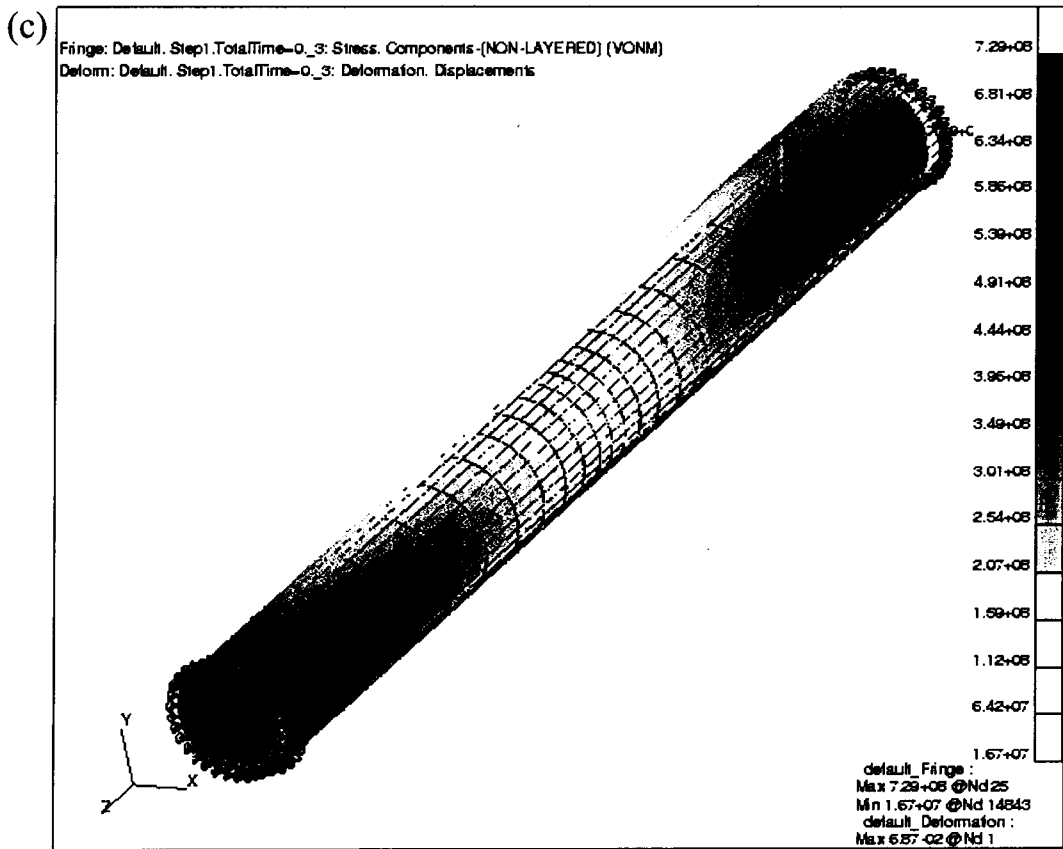


圖 4.10 (續)

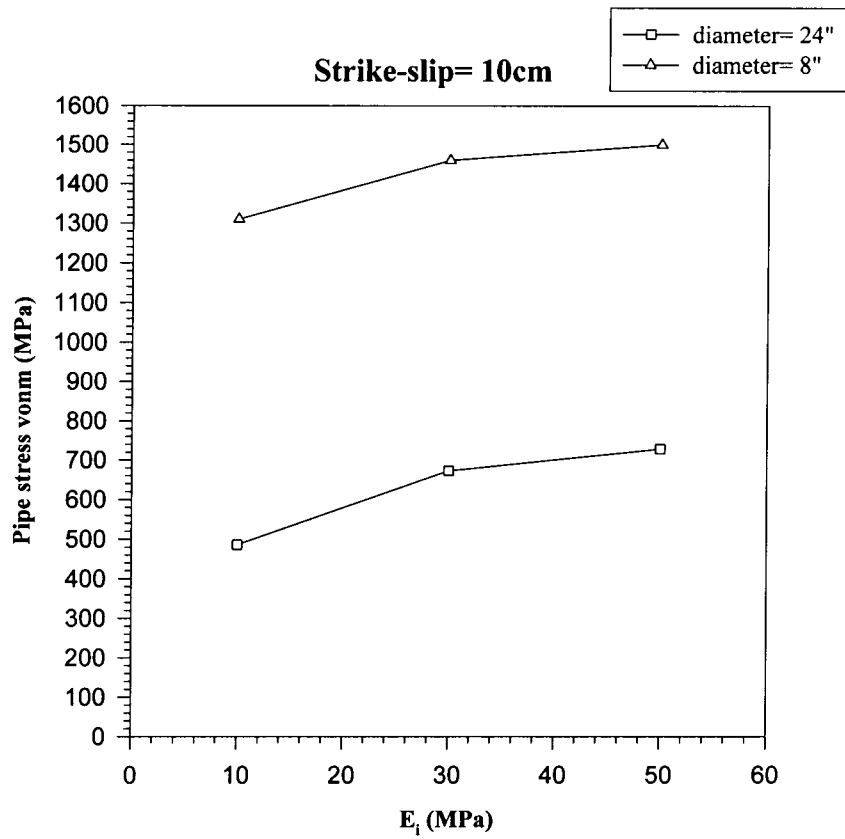


圖 4.11 土層剪動 10cm 鋼管 von Mises 應力- E_i 關係圖

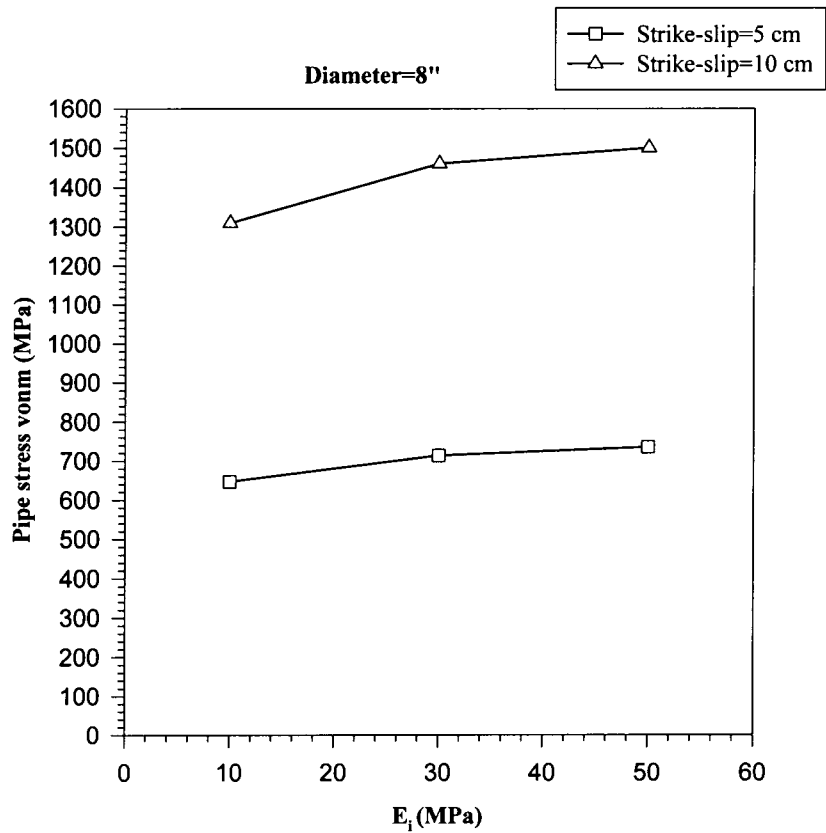


圖 4.12 8"鋼管於地層不同剪動量 von Mises 應力- E_i 關係圖

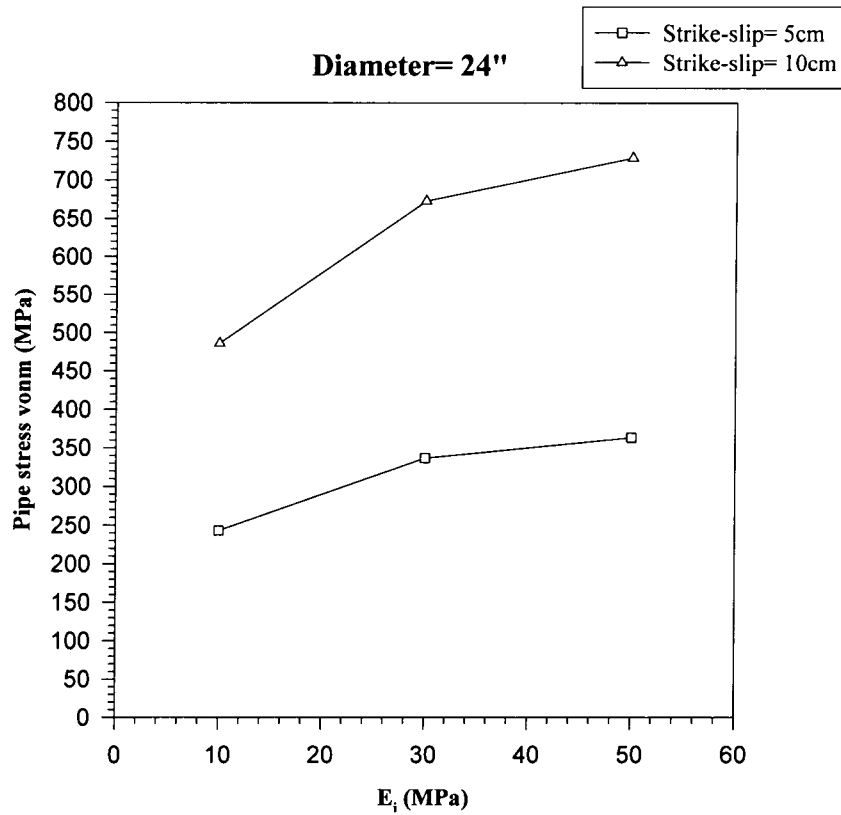


圖 4.13 24"鋼管於地層不同剪動量 von Mises 應力- E_i 關係圖

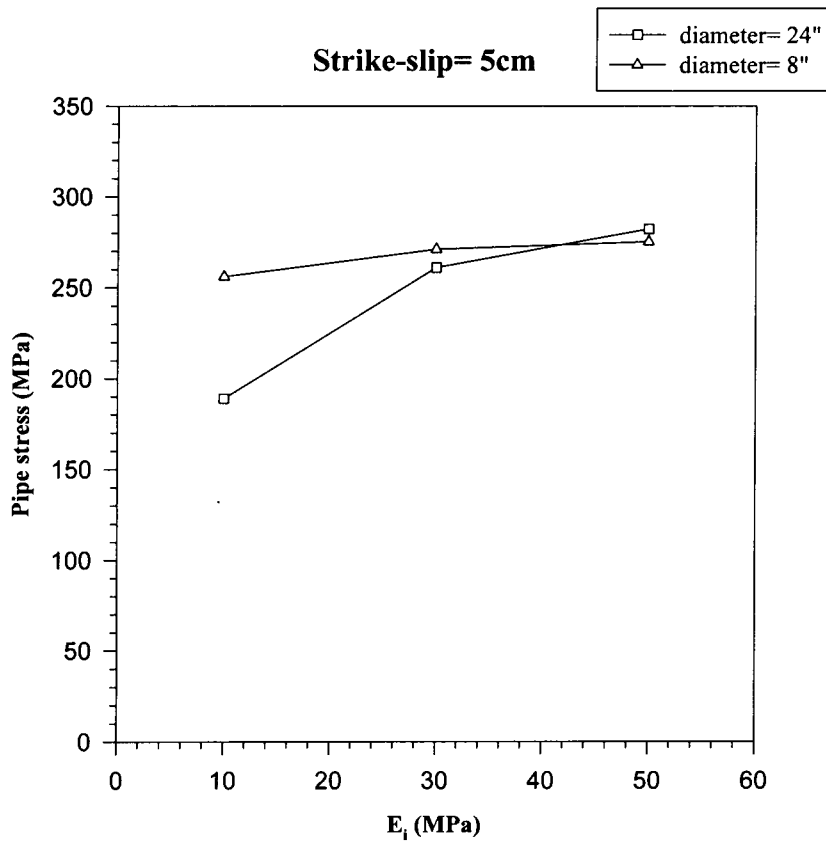


圖 4.14 土層剪動 5cm 鋼管正向應力- E_i 關係圖

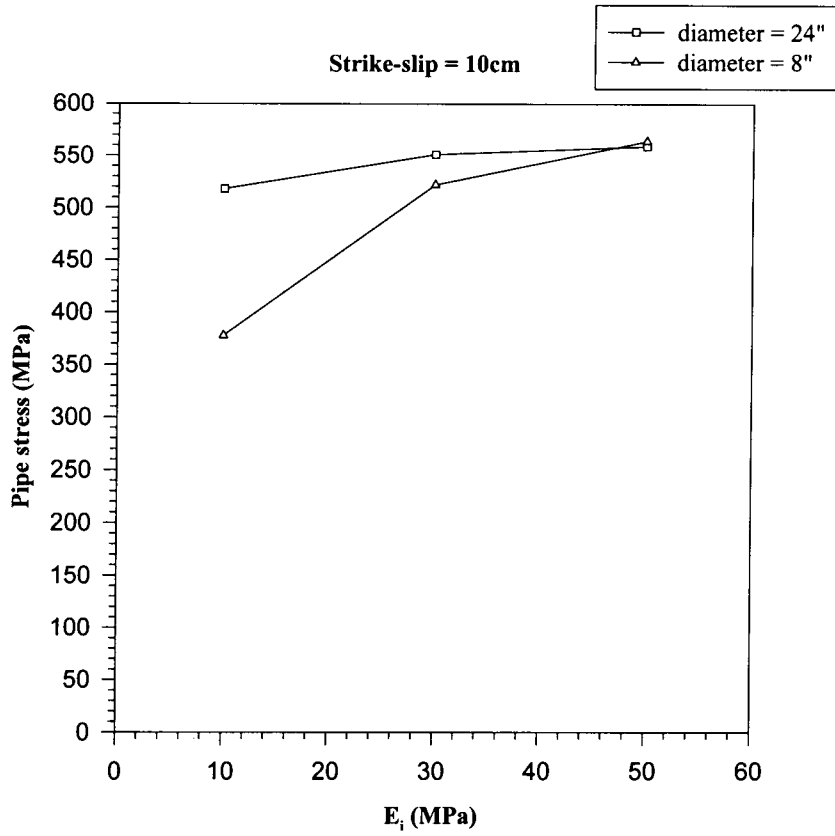


圖 4.15 土層剪動 10cm 鋼管正向應力- E_i 關係圖

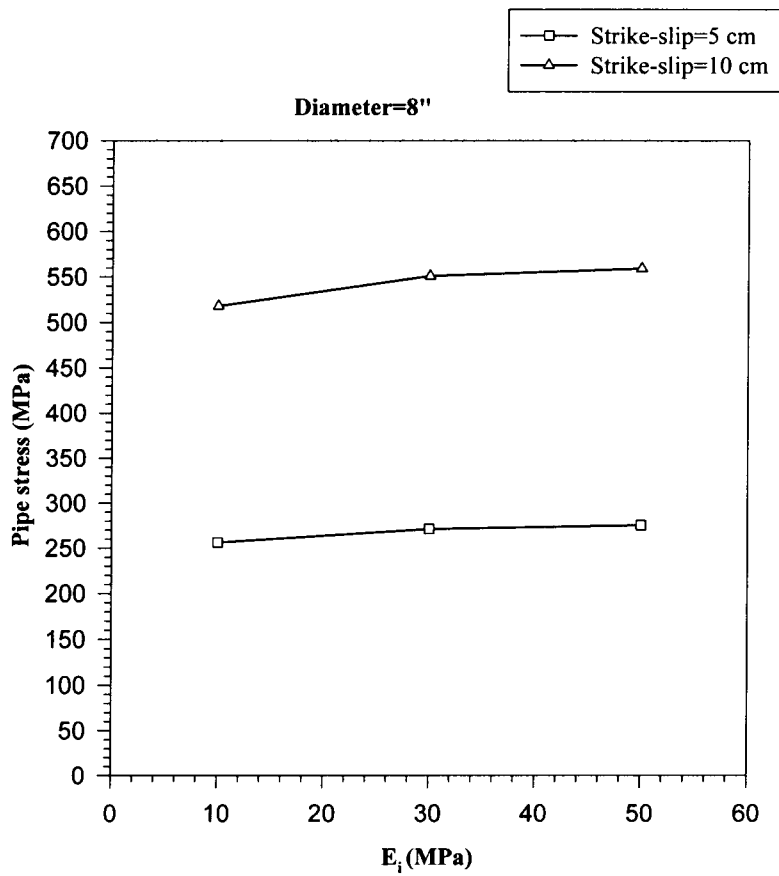


圖 4.16 8"鋼管於地層不同剪動量時正向應力- E_i 關係圖

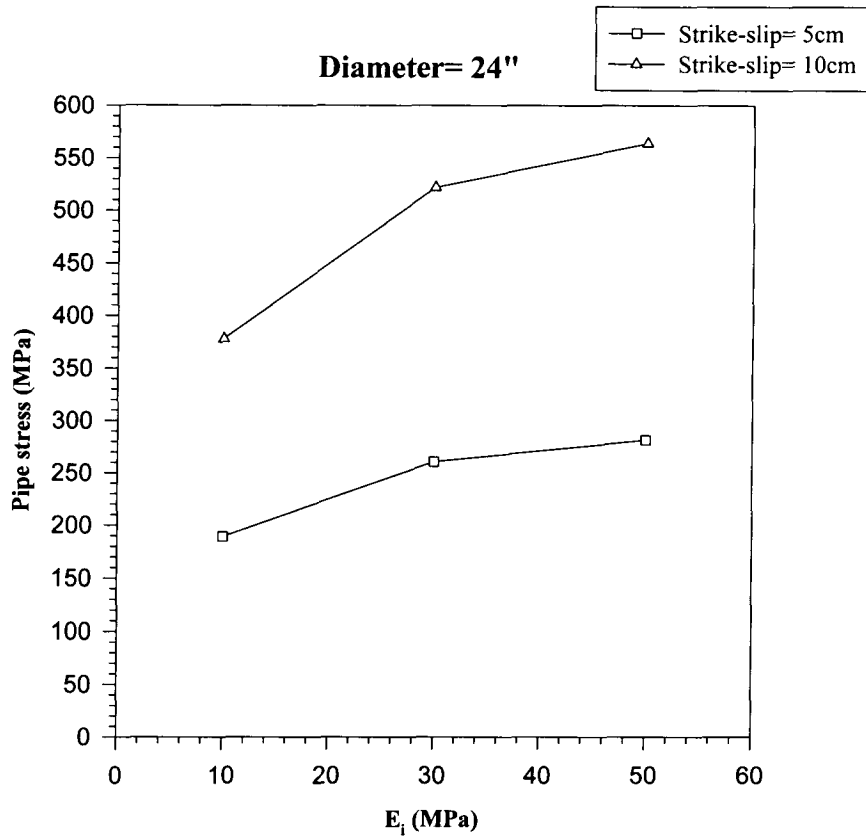


圖 4.17 24"鋼管於地層不同剪動量時正向應力- E_i 關係圖

(a)

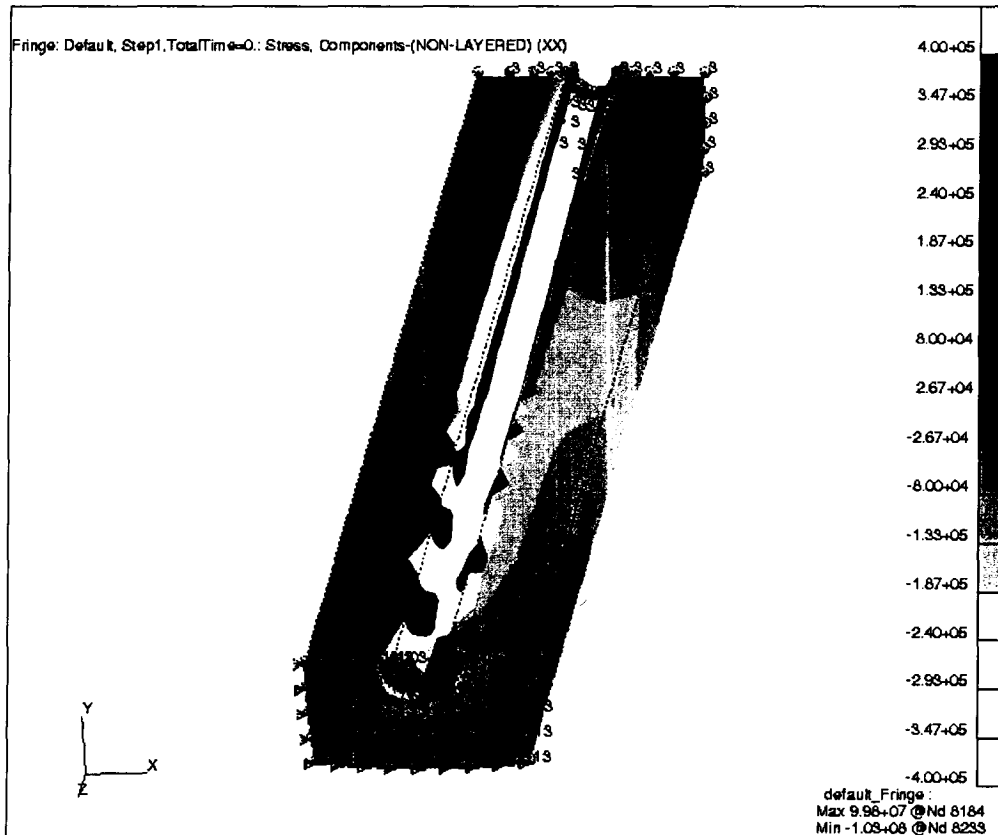


圖 4.18 8"鋼管土體剪動 10cm 之土體應力 a) $E_i=10\text{MPa}$;
b) $E_i=30\text{MPa}$; c) $E_i=50\text{MPa}$

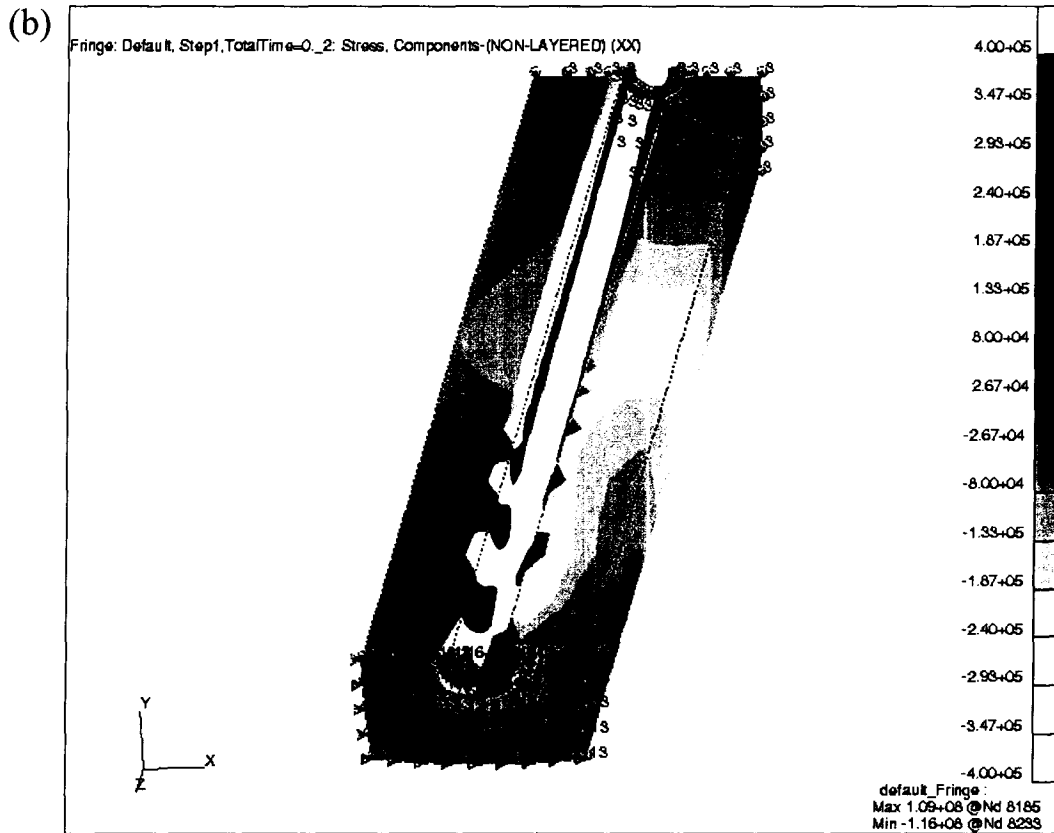


圖 4.18 (續)

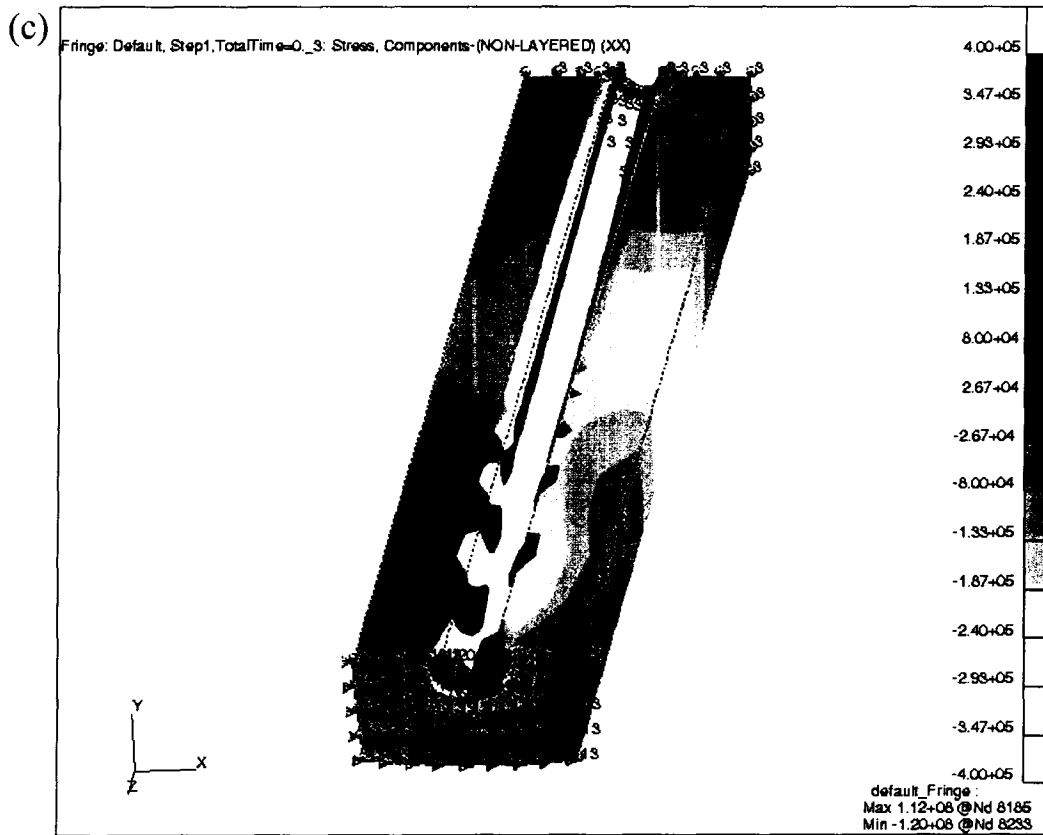


圖 4.18 (續)

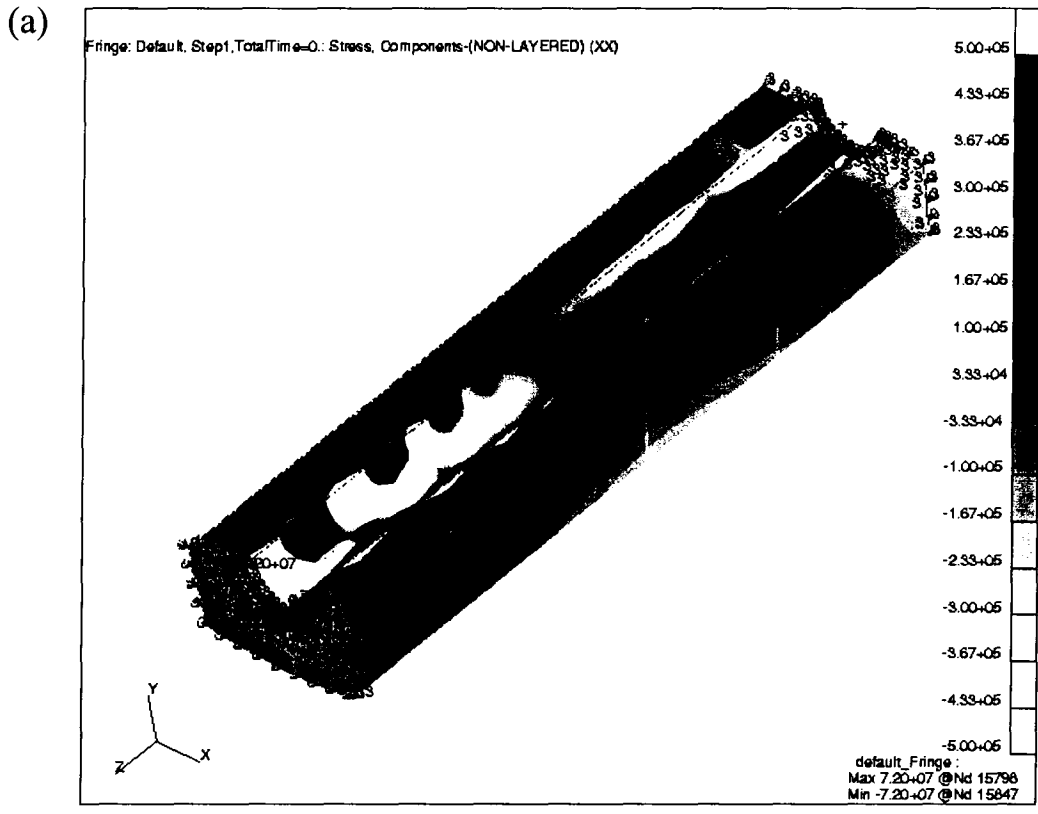


圖 4.19

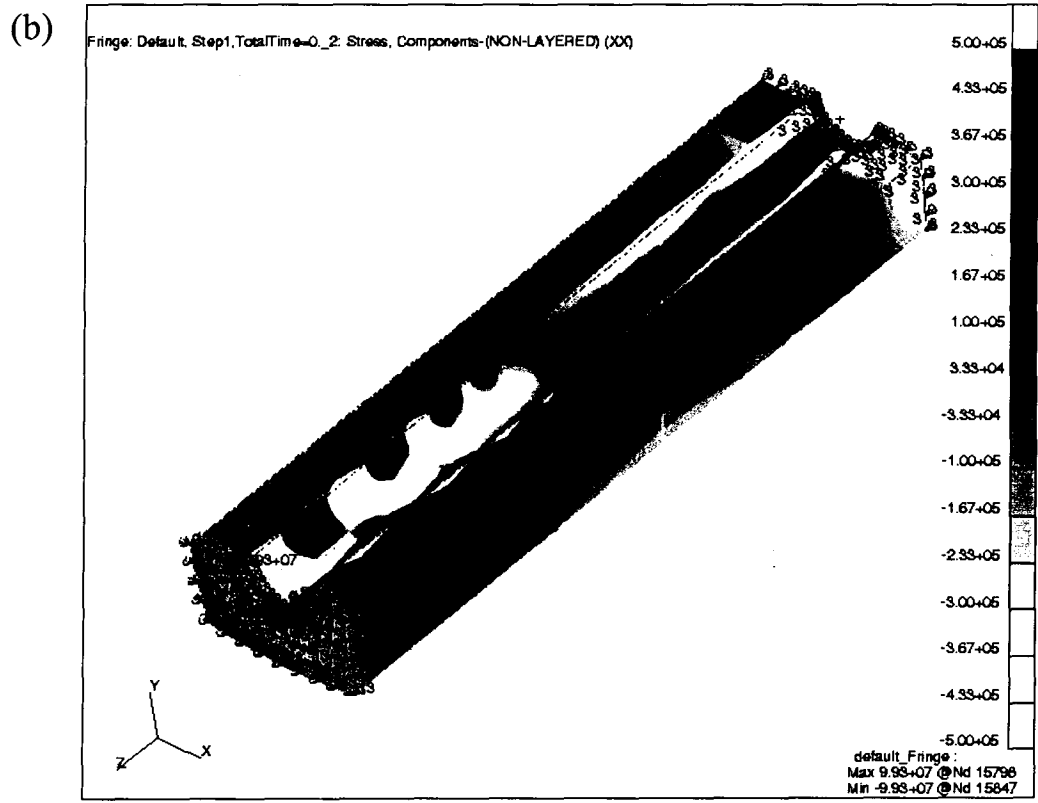


圖 4.19 24"管土層剪動 10cm 之土體應力 a) $E_t=10\text{MPa}$;
b) $E_t=30\text{MPa}$; c) $E_t=50\text{MPa}$

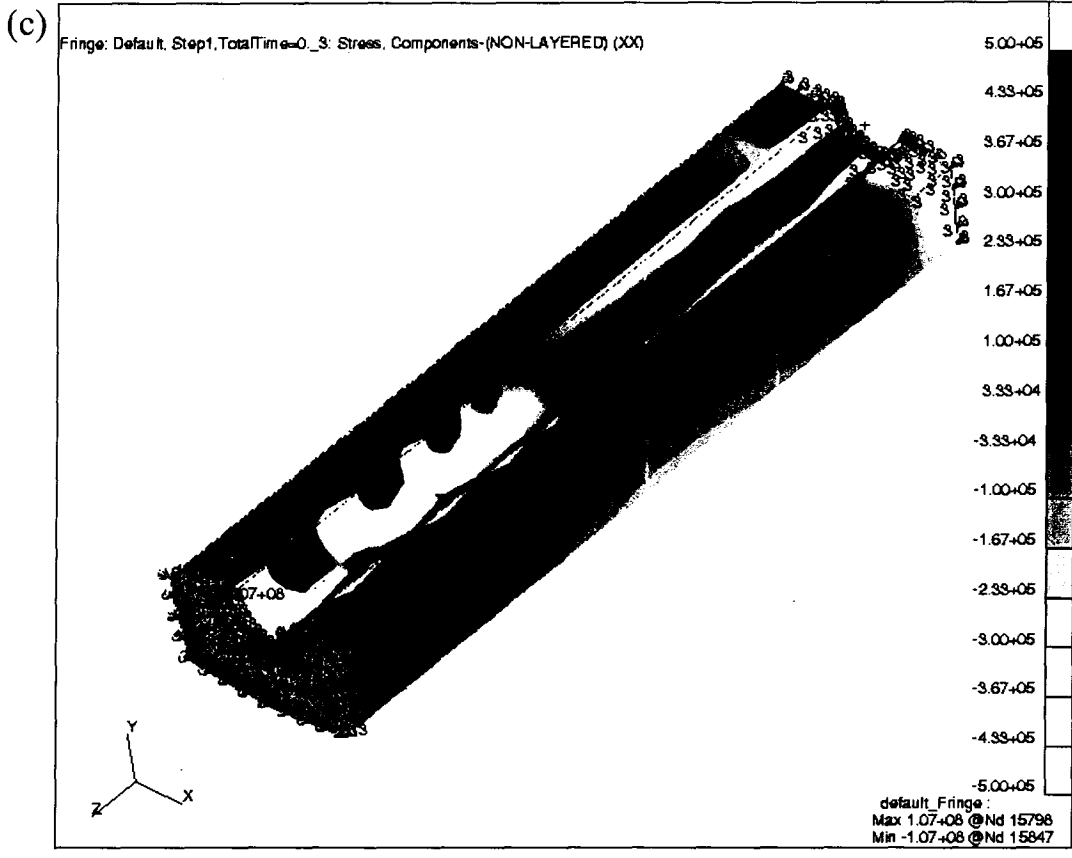


圖 4.19 (續)

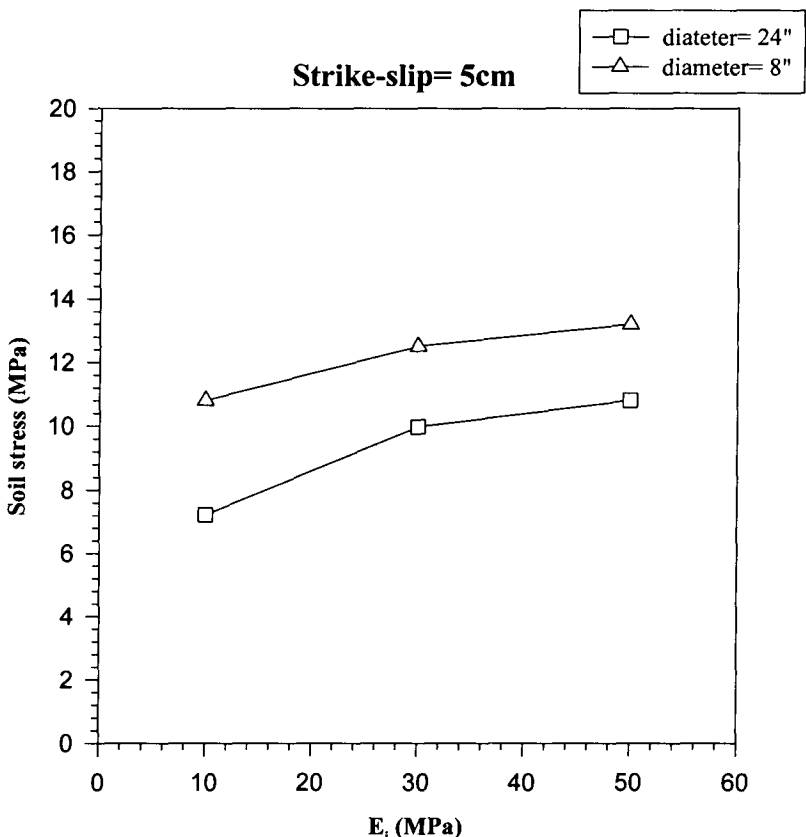


圖 4.20 土體剪動 5cm 鋼管周圍土壤應力- E_i 曲線

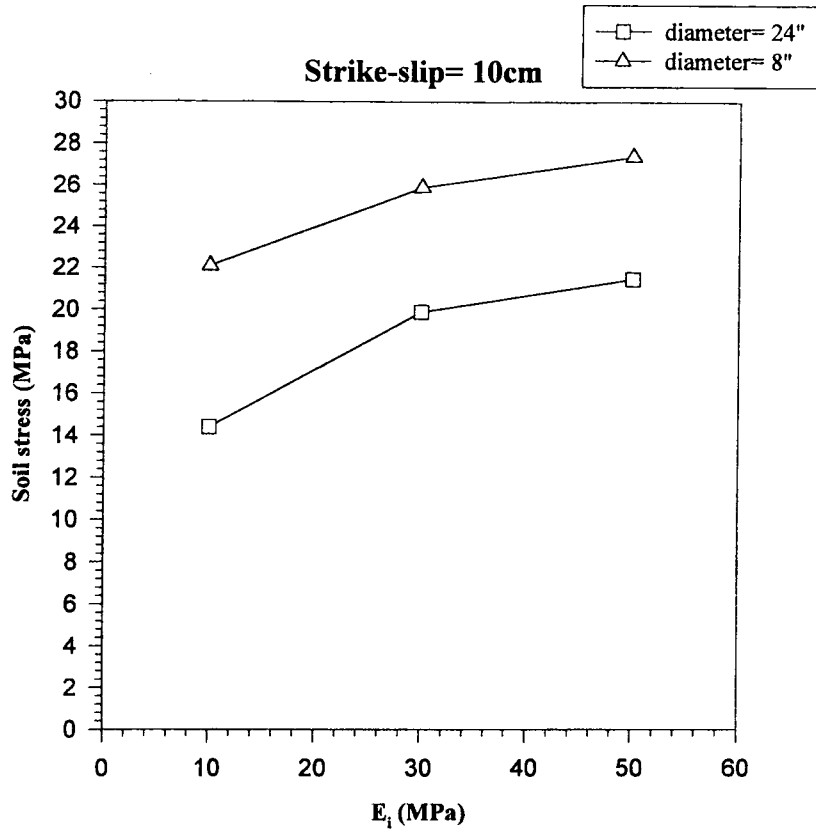


圖 4.21 土體剪動 10cm 鋼管周圍土壤應力- E_i 曲線

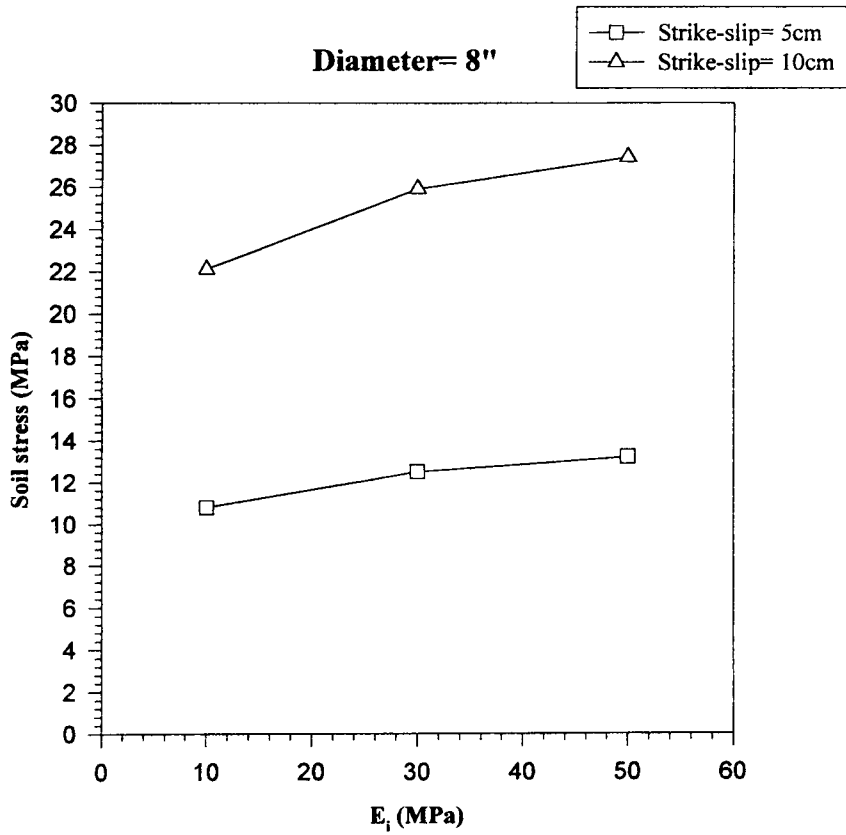


圖 4.22 8"鋼管於地層於不同剪動量時土體應力- E_i 關係圖

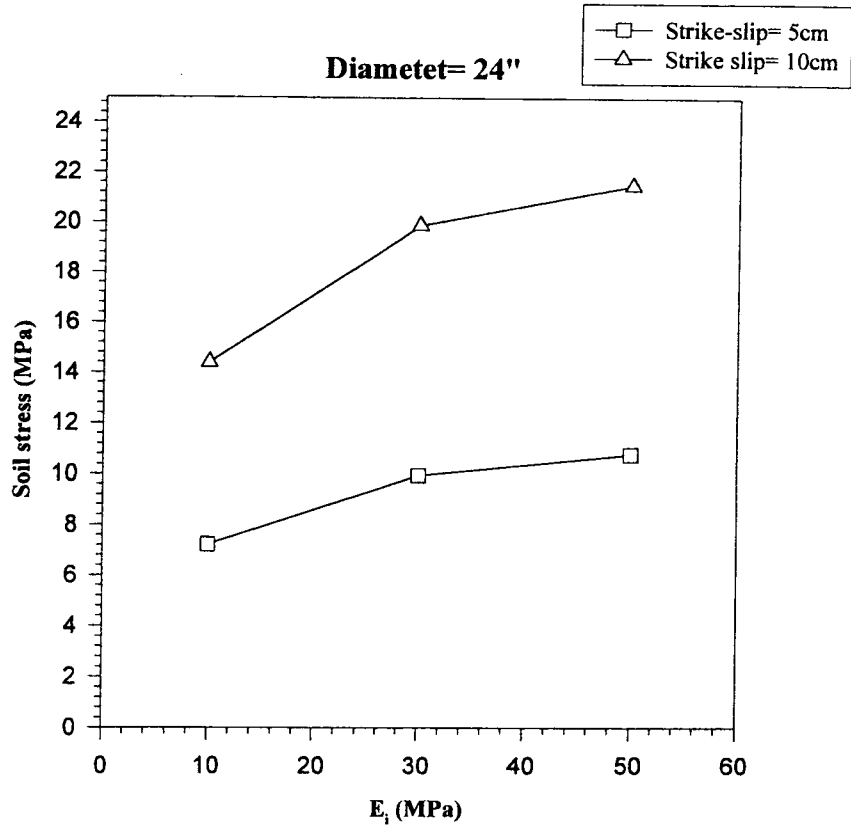


圖 4.23 24"鋼管於地層不同剪動量時土體應力- E_1 關係圖

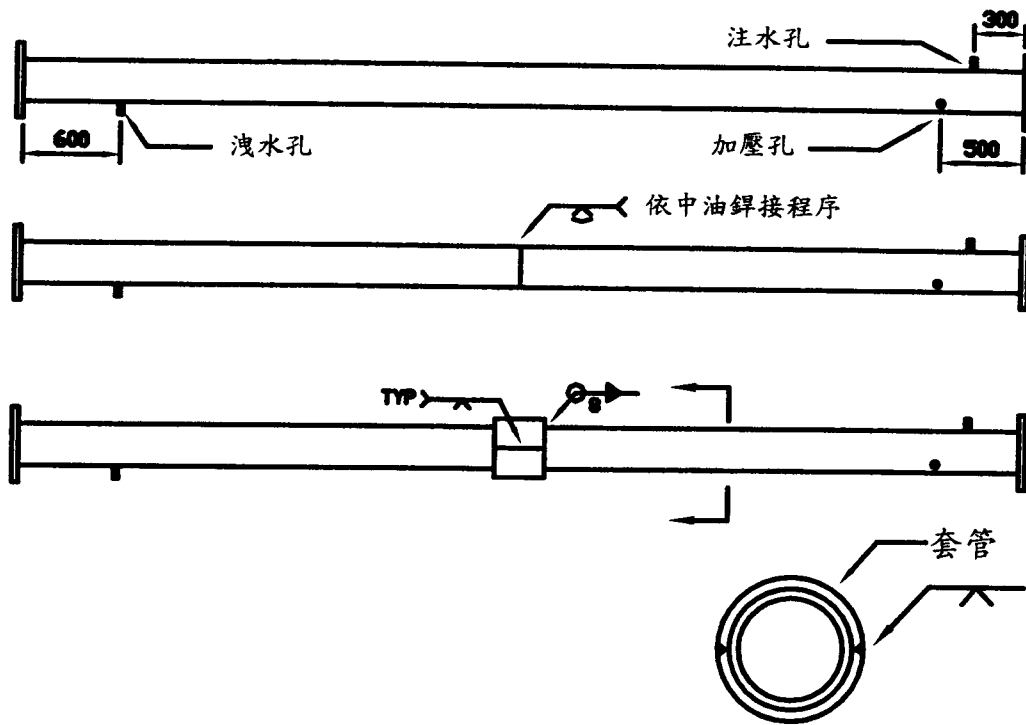


圖 5.1 鋼管試體詳圖 (單位：mm)

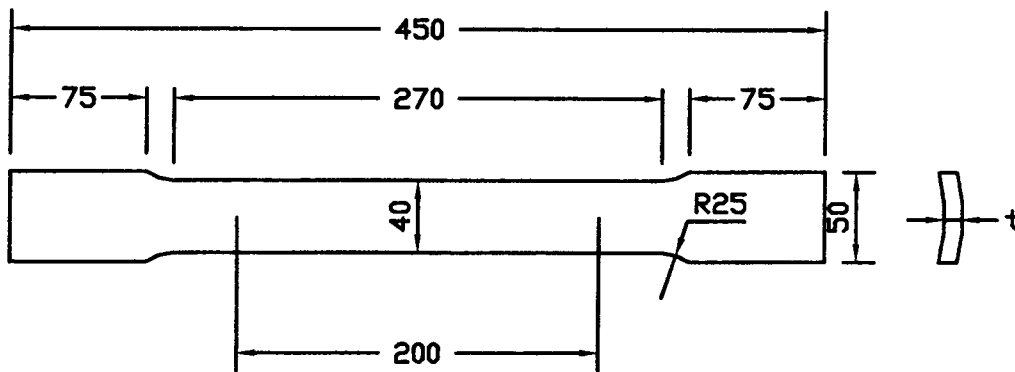


圖 5.2 拉力試片圖 (單位：mm)

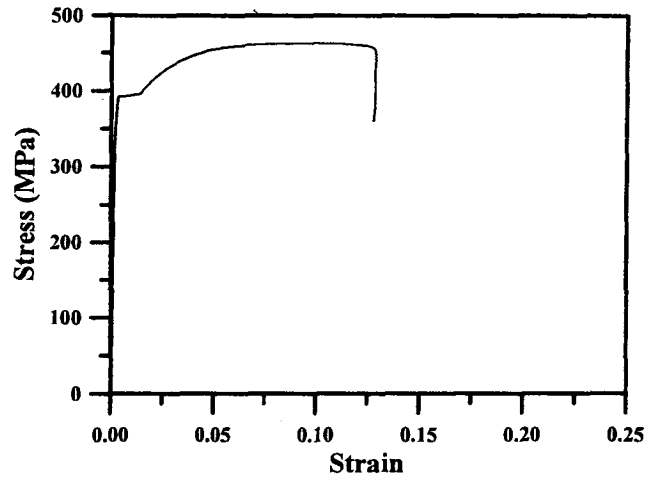


圖 5.3 八吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖

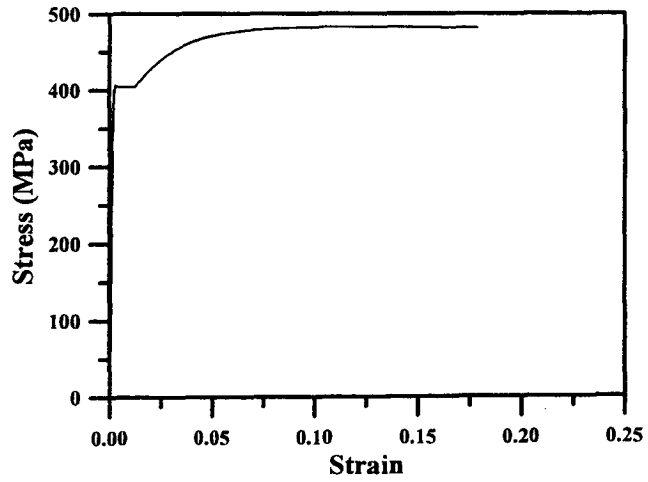


圖 5.4 十吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖

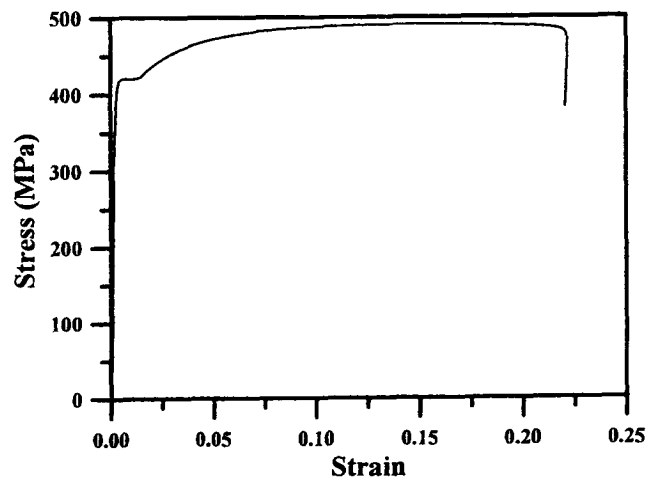


圖 5.5 十二吋鋼管拉力試片應力-應變關係圖

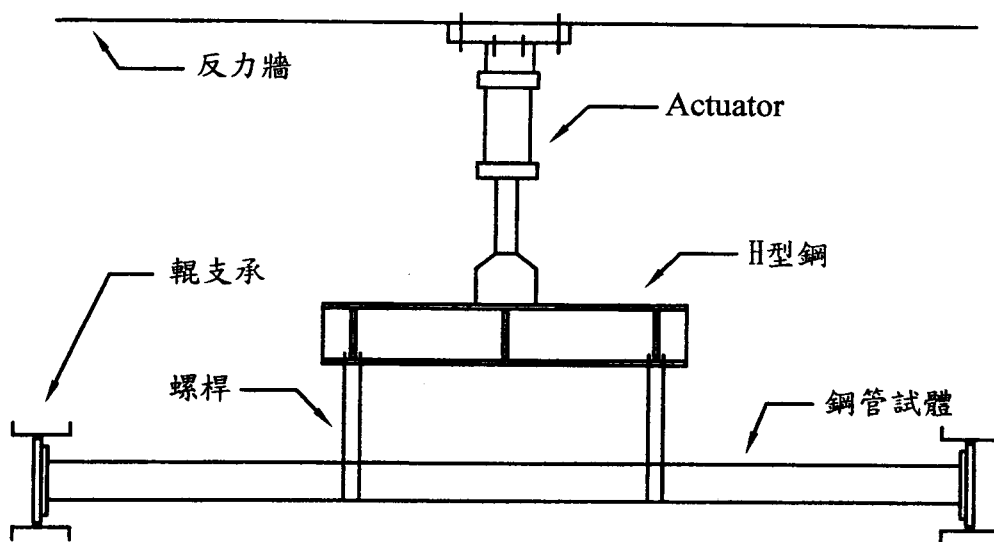


圖 5.6 試驗設置示意圖 (俯視圖)

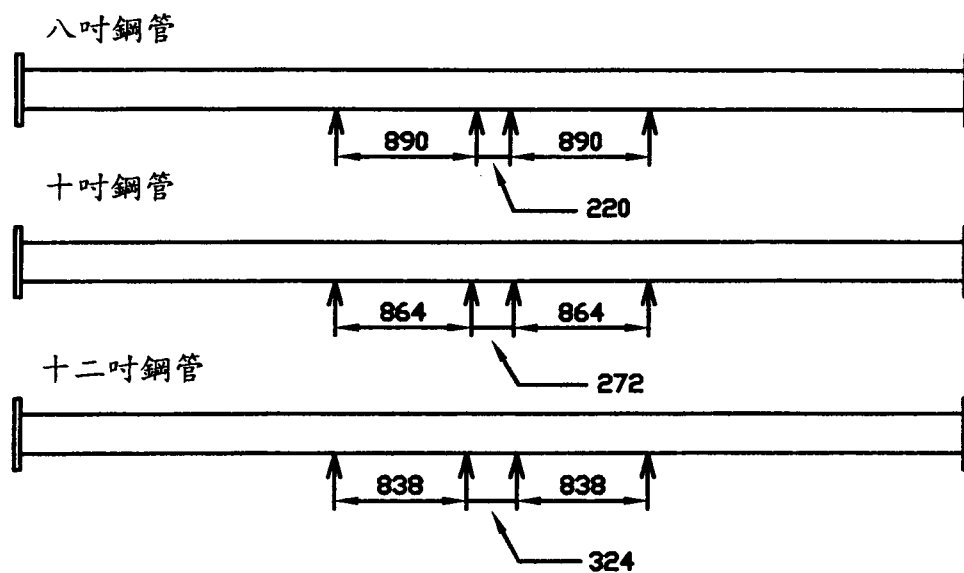


圖 5.7 位移計位置圖 (單位：mm)

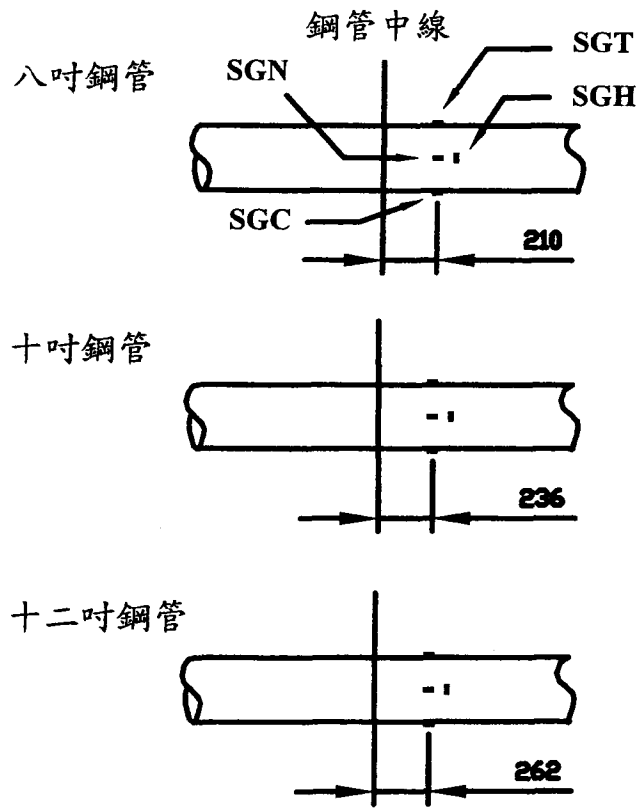


圖 5.8 應變計位置圖 (單位: mm)

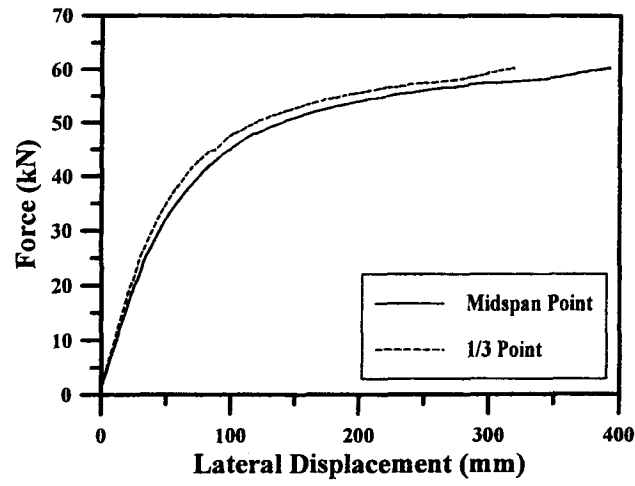


圖 5.9 試體 P08 側向力-變位關係圖

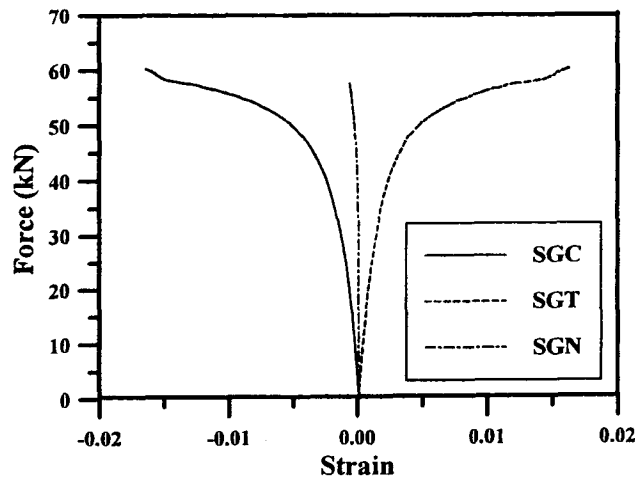


圖 5.10 試體 P08 側向力-軸向應變關係圖

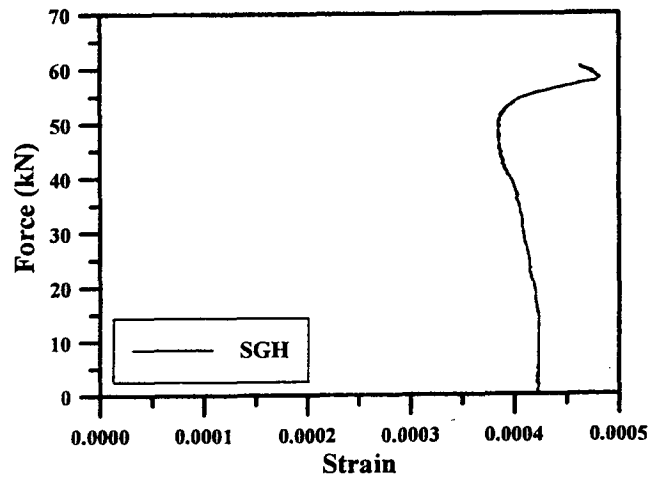


圖 5.11 試體 P08 側向力-環向應變關係圖

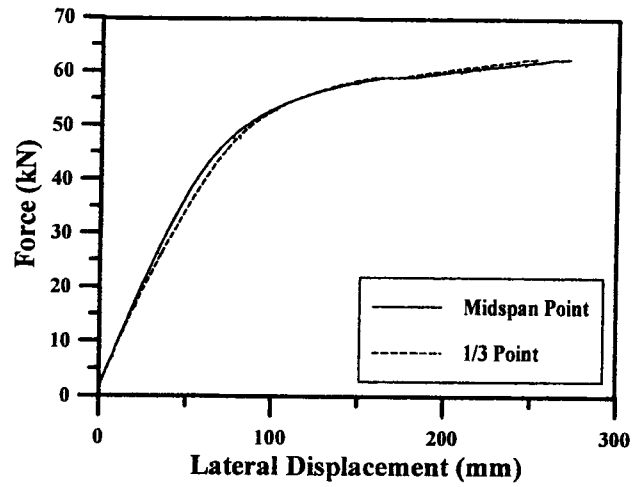


圖 5.12 試體 P08SP 側向力-變位關係圖

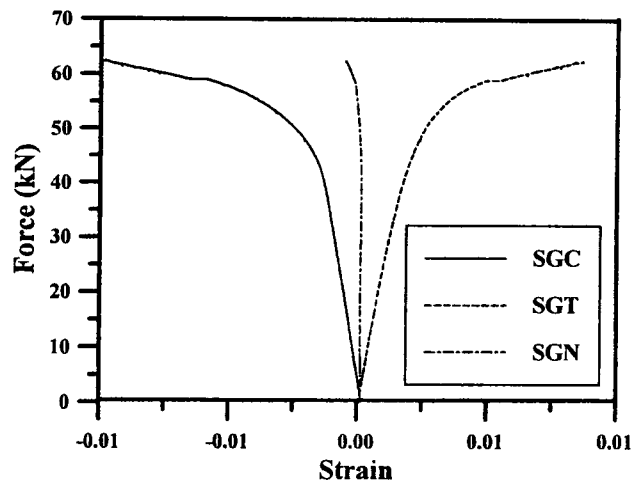


圖 5.13 試體 P08SP 側向力-軸向應變關係圖

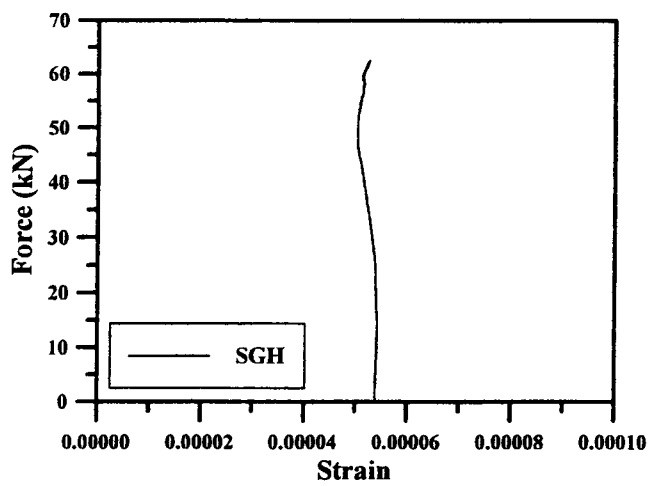


圖 5.14 試體 P08SP 側向力-環向應變關係圖

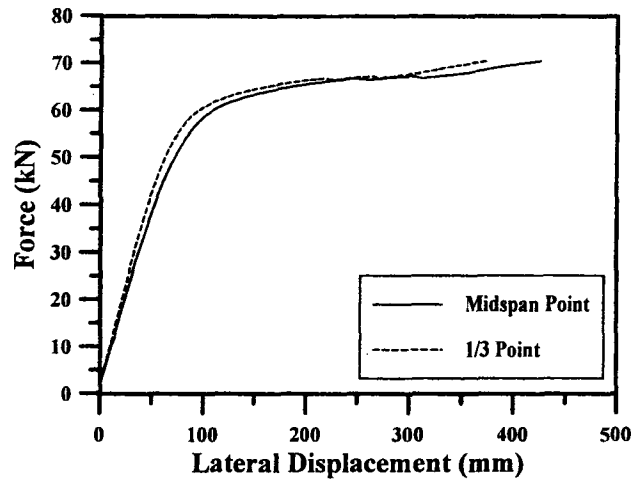


圖 5.15 試體 P08SO 側向力-變位關係圖

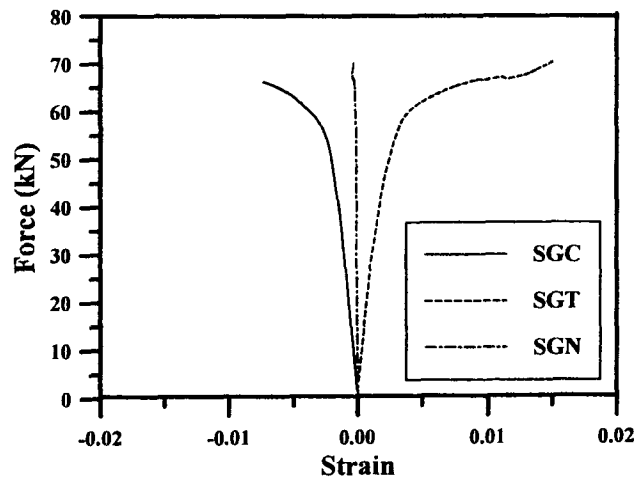


圖 5.16 試體 P08SO 側向力-軸向應變關係圖

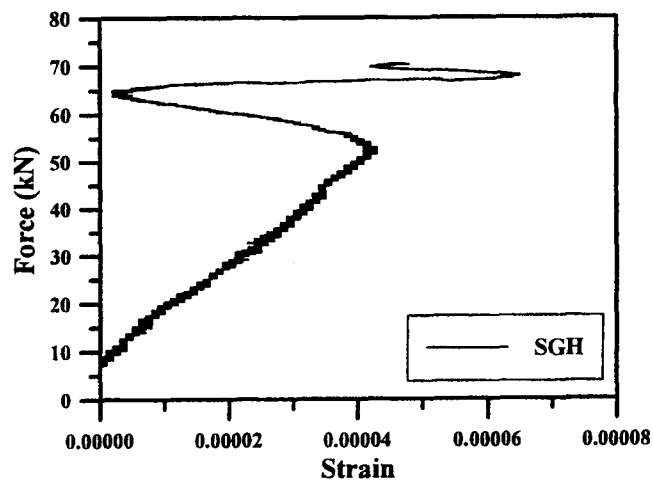


圖 5.17 試體 P08SO 側向力-環向應變關係圖

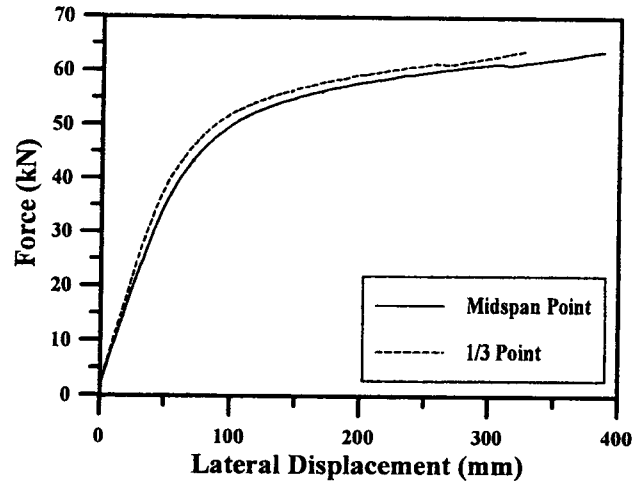


圖 5.18 試體 P08BW 側向力-變位關係圖

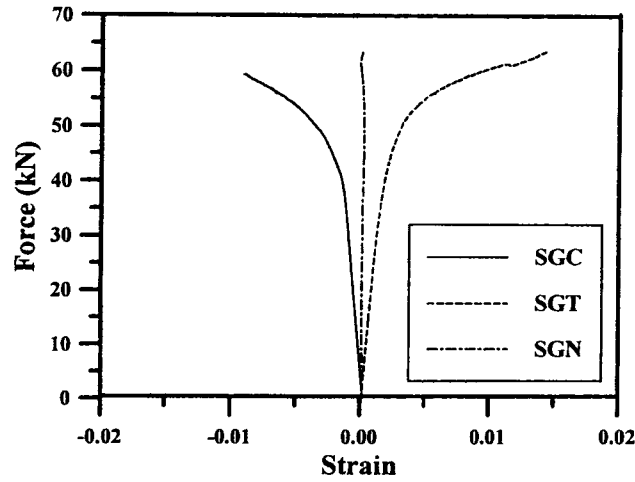


圖 5.19 試體 P08BW 側向力-軸向應變關係圖

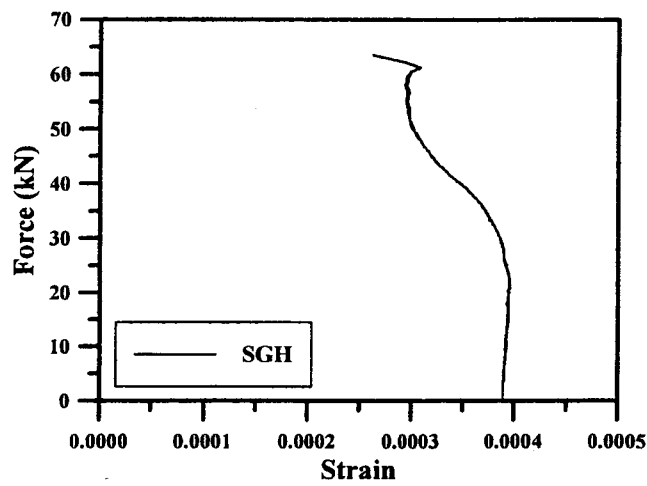


圖 5.20 試體 P08BW 側向力-環向應變關係圖

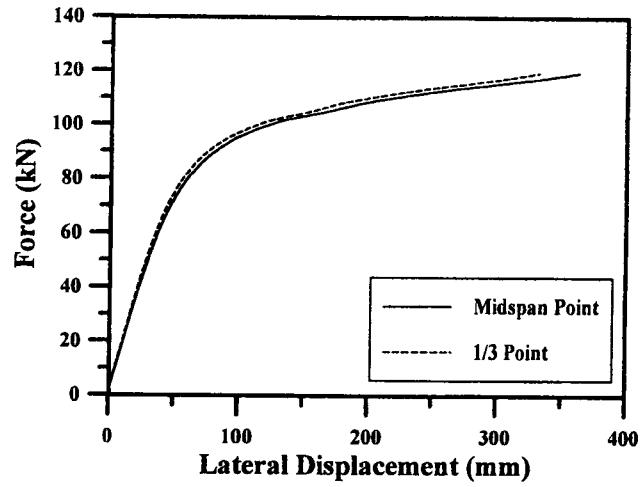


圖 5.21 試體 P10 側向力-變位關係圖

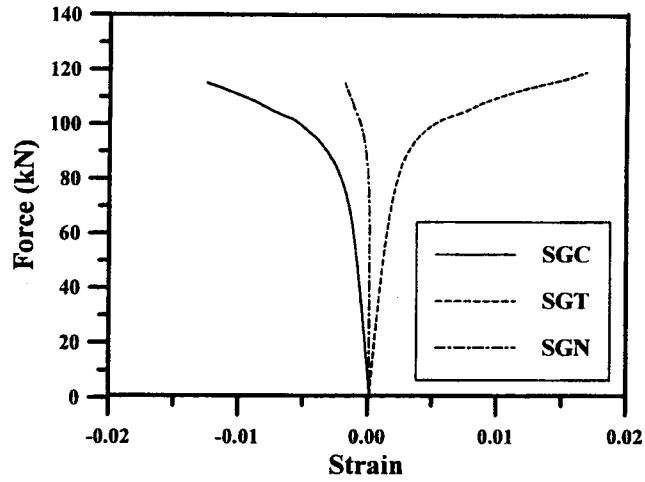


圖 5.22 試體 P10 側向力-軸向應變關係圖

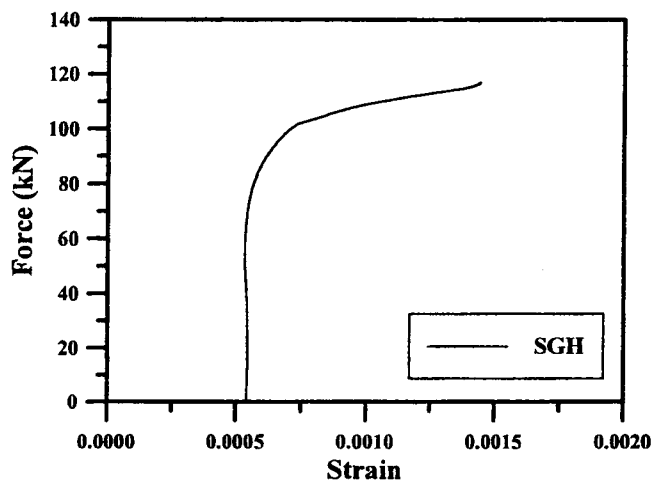


圖 5.23 試體 P10 側向力-環向應變關係圖

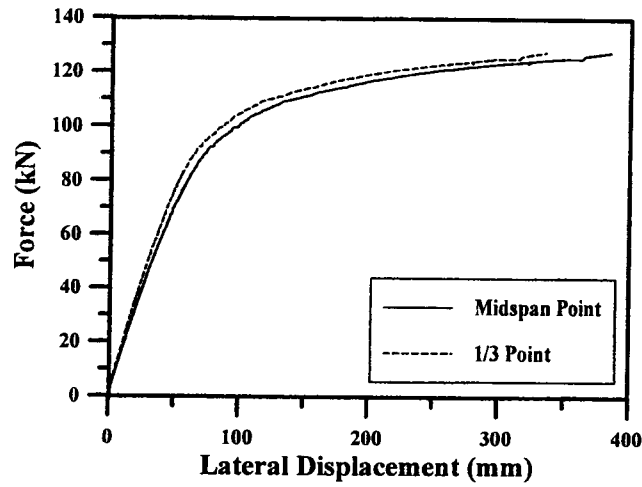


圖 5.24 試體 P10SP 側向力-變位關係圖

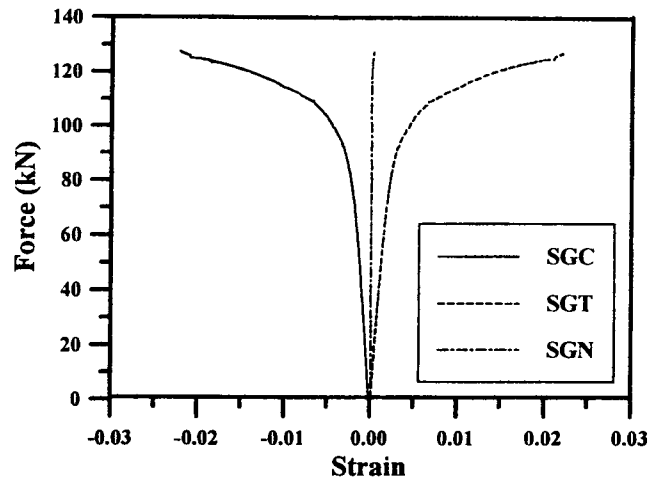


圖 5.25 試體 P10SP 側向力-軸向應變關係圖

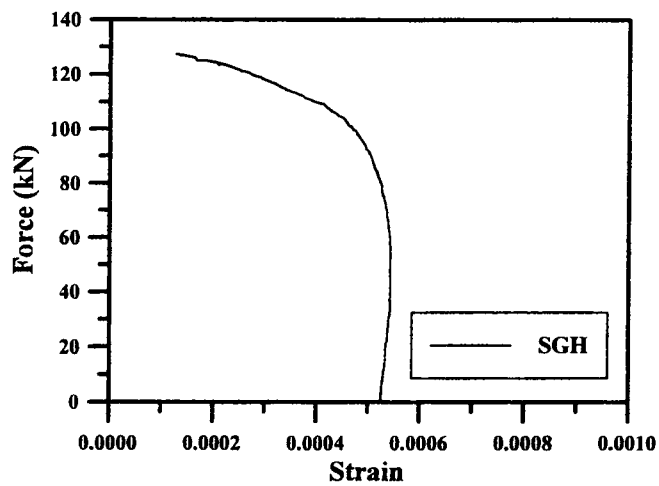


圖 5.26 試體 P10SP 側向力-環向應變關係圖

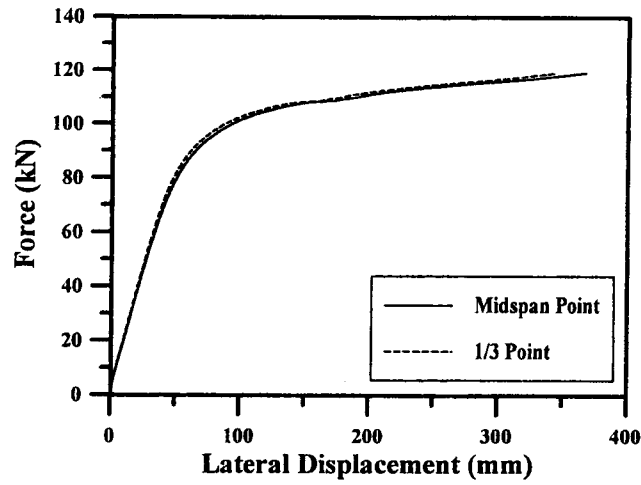


圖 5.27 試體 P10SO 側向力-變位關係圖

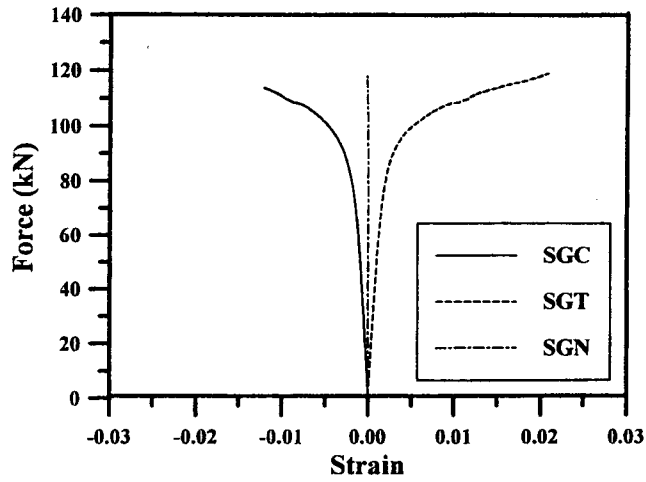


圖 5.28 試體 P10SO 側向力-軸向應變關係圖

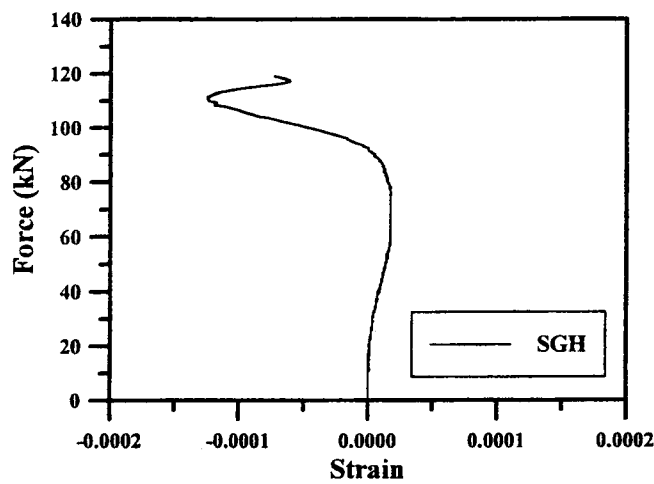


圖 5.29 試體 P10SO 側向力-環向應變關係圖

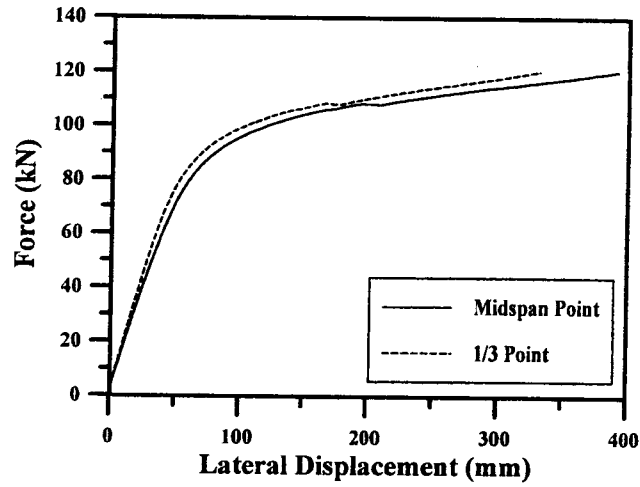


圖 5.30 試體 P10BW 側向力-變位關係圖

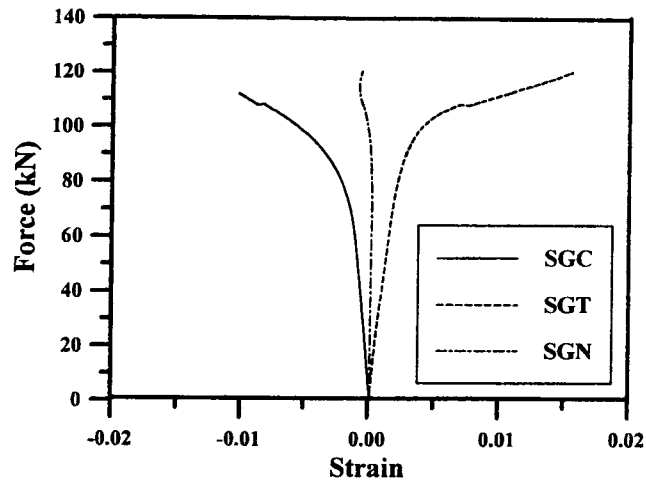


圖 5.31 試體 P10BW 側向力-軸向應變關係圖

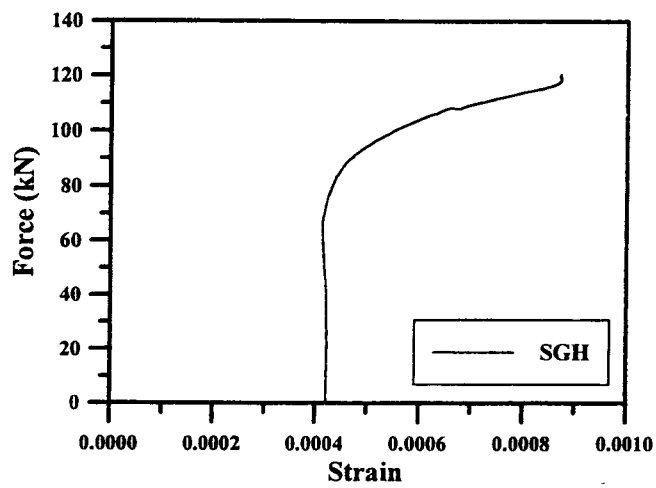


圖 5.32 試體 P10BW 側向力-環向應變關係圖

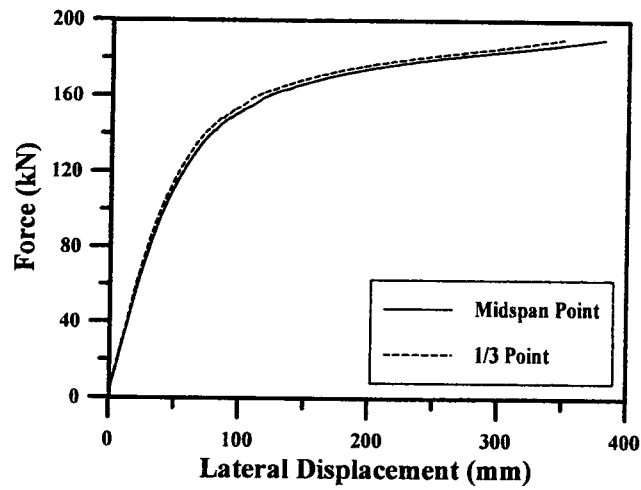


圖 5.33 試體 P12 側向力-變位關係圖

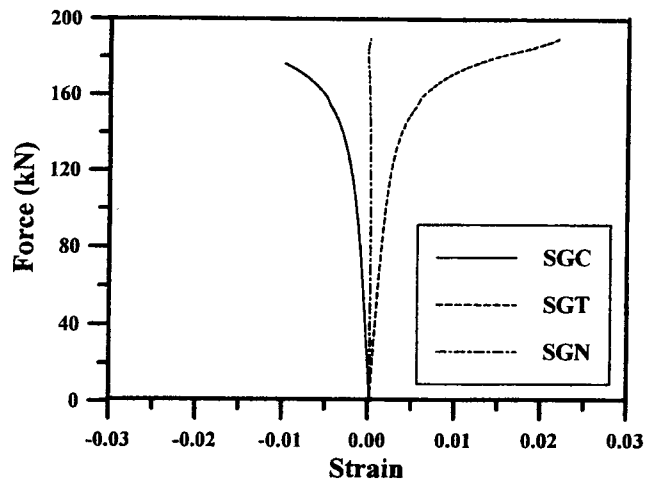


圖 5.34 試體 P12 側向力-軸向應變關係圖

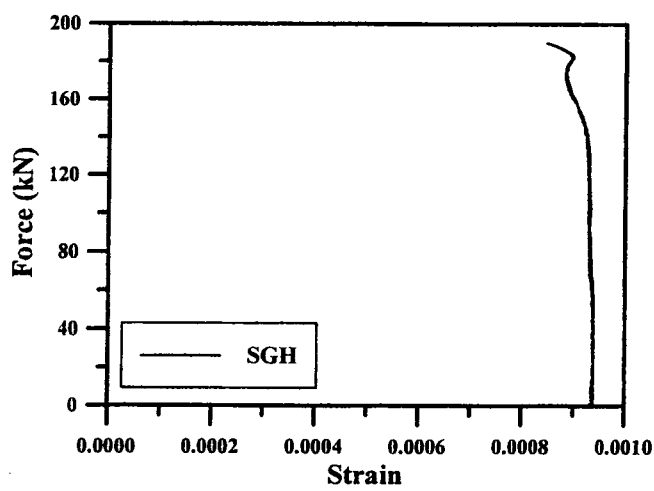


圖 5.35 試體 P12 側向力-環向應變關係圖

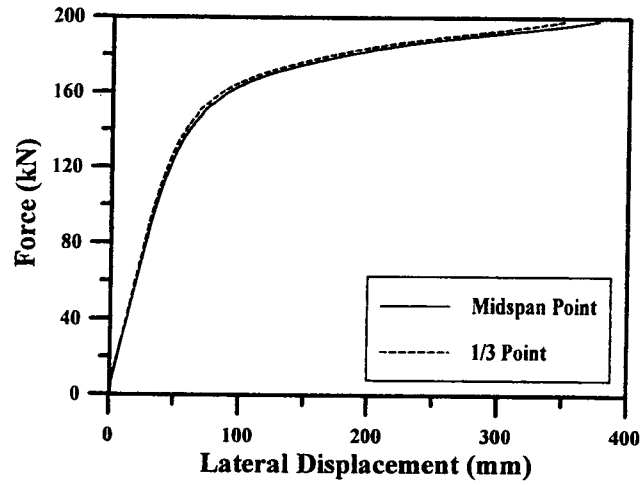


圖 5.36 試體 P12SP 側向力-變位關係圖

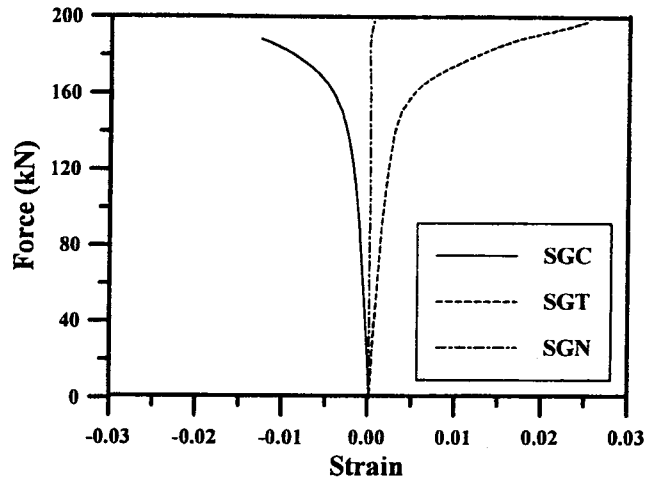


圖 5.37 試體 P12SP 側向力-軸向應變關係圖

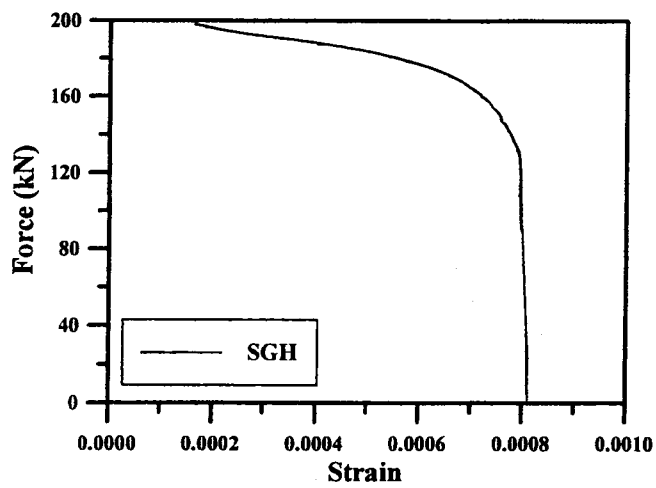


圖 5.38 試體 P12SP 側向力-環向應變關係圖

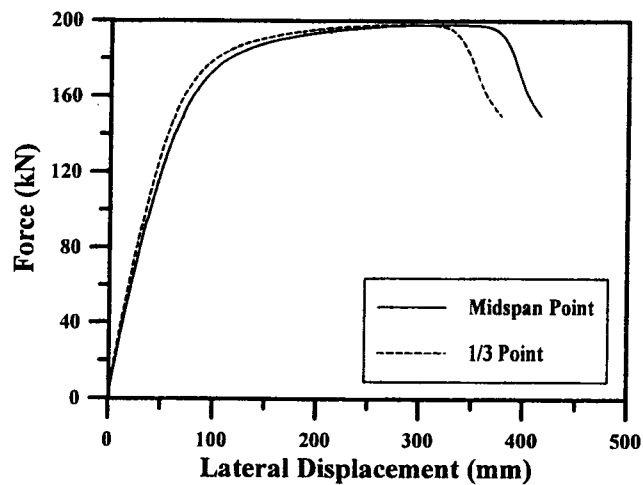


圖 5.39 試體 P12SO 側向力-變位關係圖

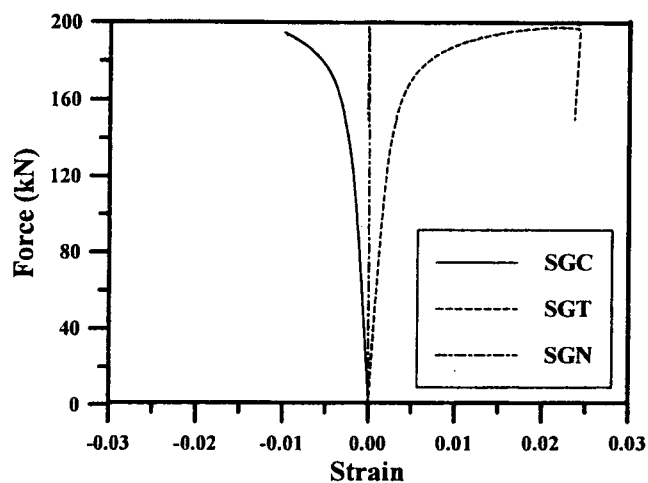


圖 5.40 試體 P12SO 側向力-軸向應變關係圖

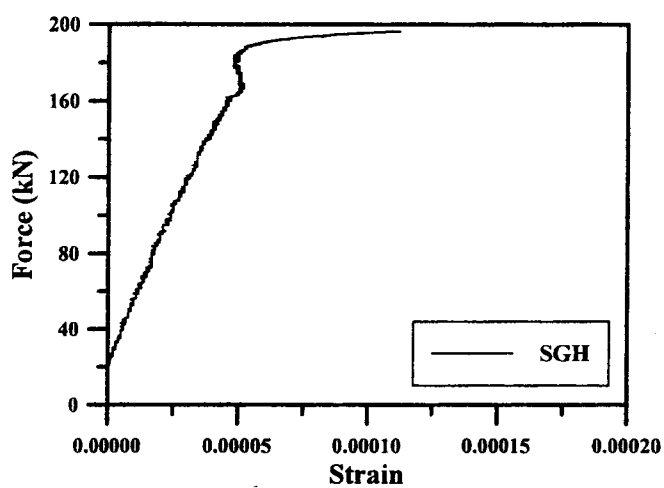


圖 5.41 試體 P12SO 側向力-環向應變關係圖

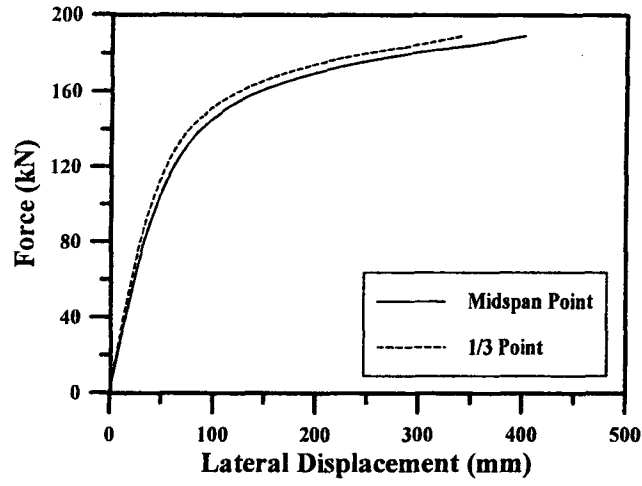


圖 5.42 試體 P12BW 側向力-變位關係圖

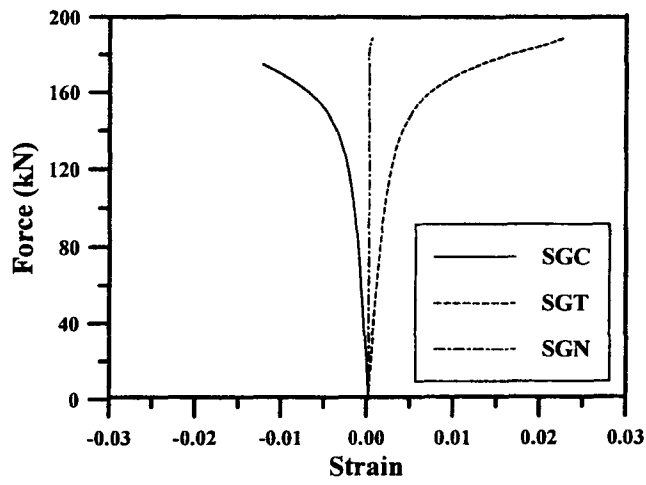


圖 5.43 試體 P12BW 側向力-軸向應變關係圖

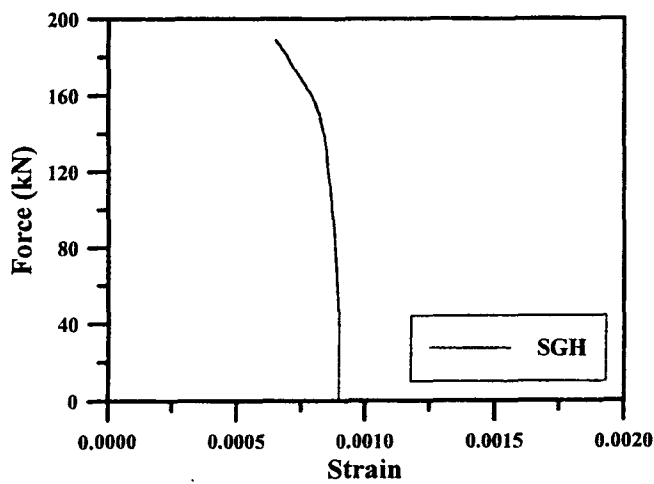


圖 5.44 試體 P12BW 側向力-環向應變關係圖

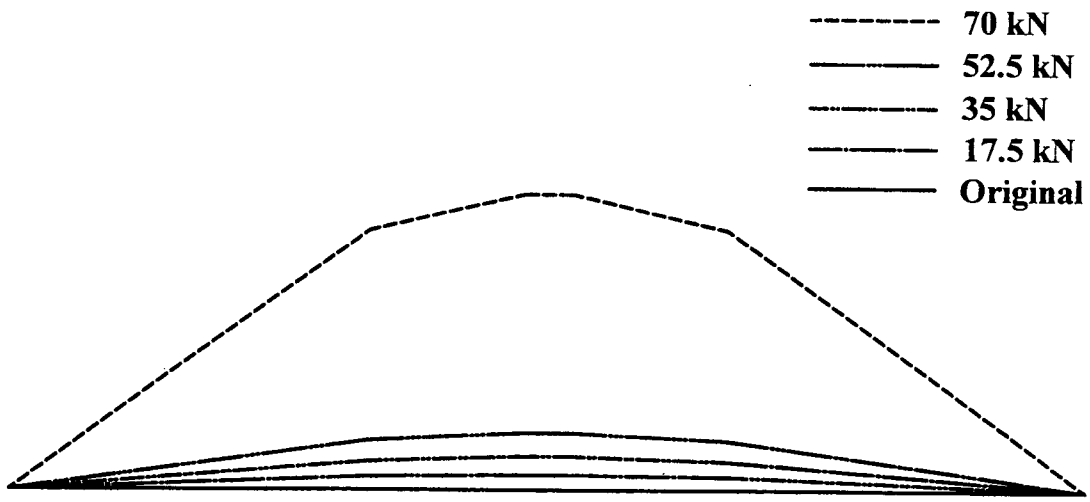


圖 5.45 試體 P08SO 側向變位圖

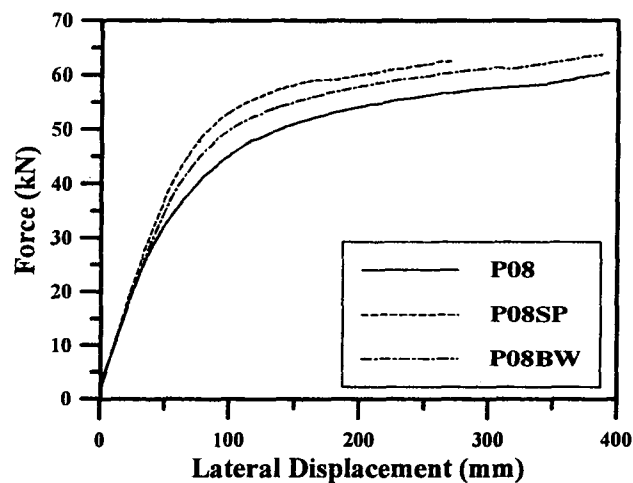


圖 5.46 試體 P08、P08SP 及 P08BW 側向力-變位關係比較圖

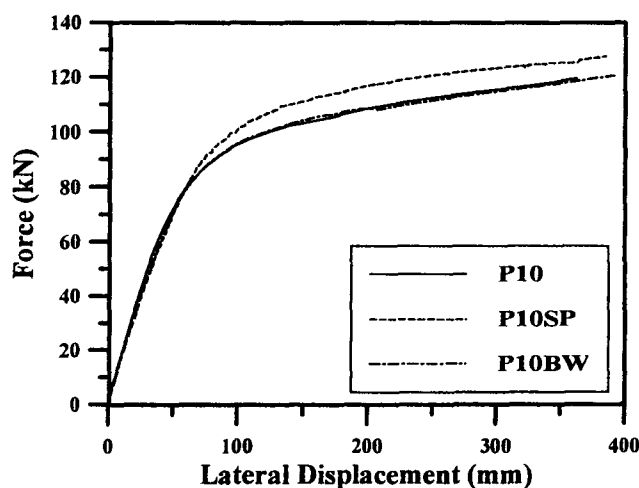


圖 5.47 試體 P10、P10SP 及 P10BW 側向力-變位關係比較圖

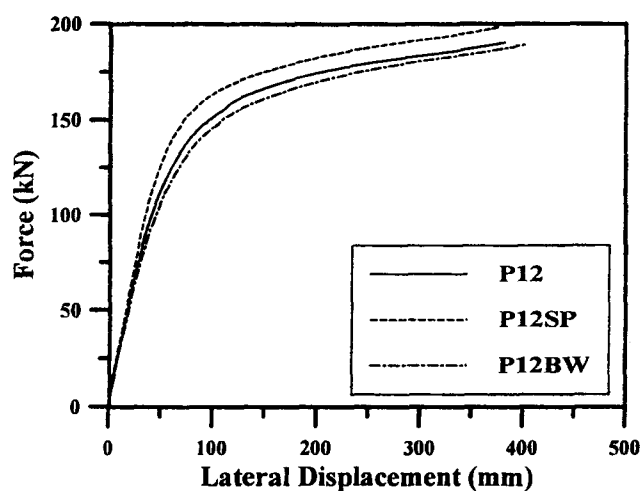


圖 5.48 試體 P12、P12SP 及 P12BW 側向力-變位關係比較圖

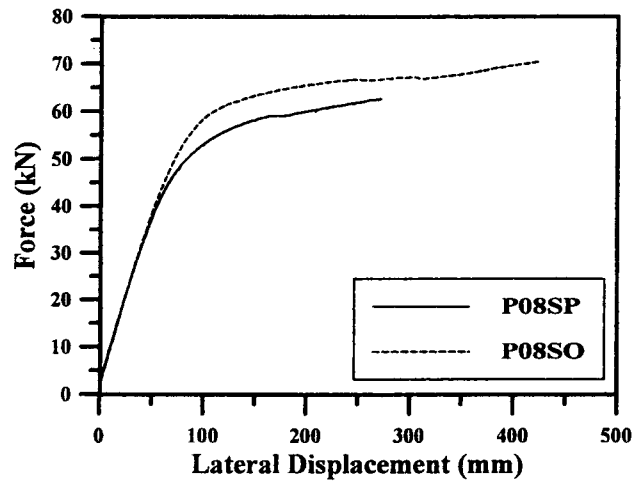


圖 5.49 試體 P08SP 及 P08SO 側向力-變位關係比較圖

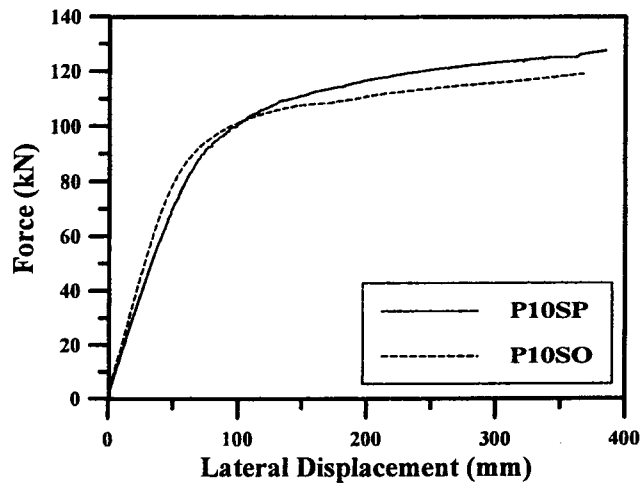


圖 5.50 試體 P10SP 及 P10SO 側向力-變位關係比較圖

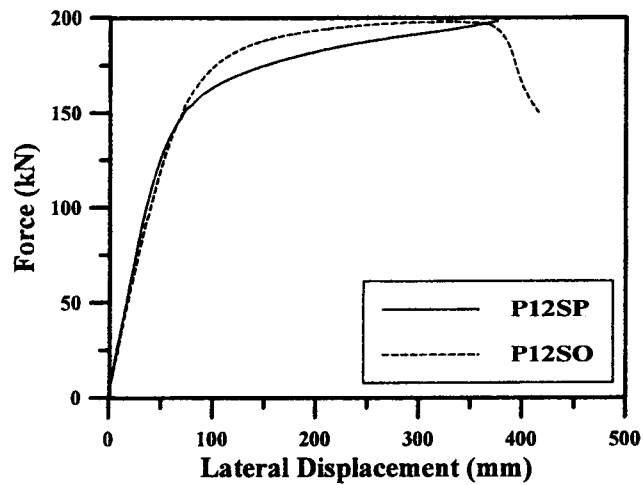
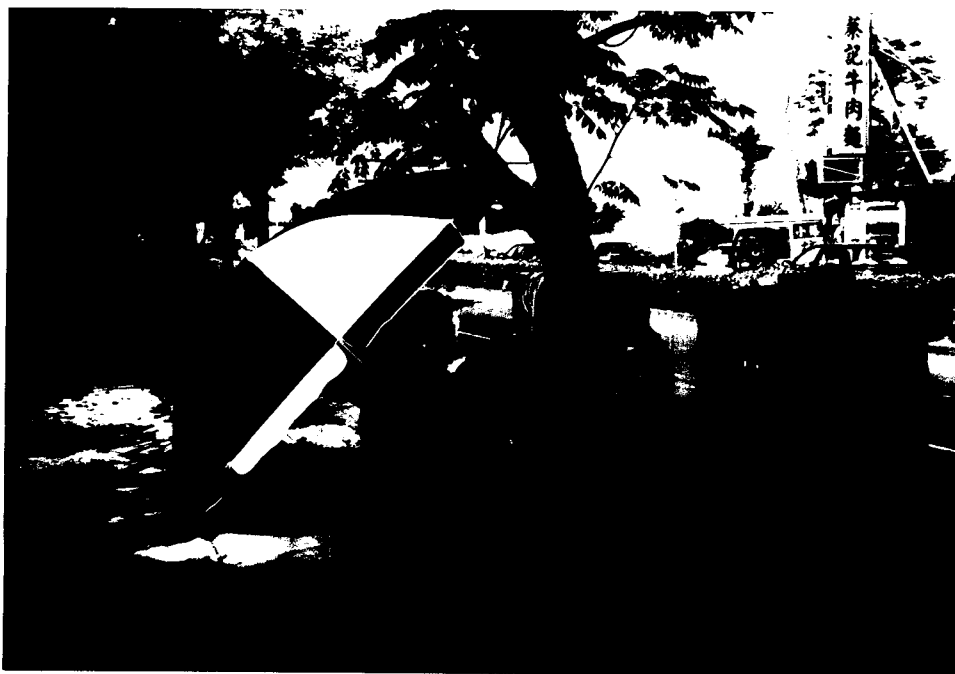


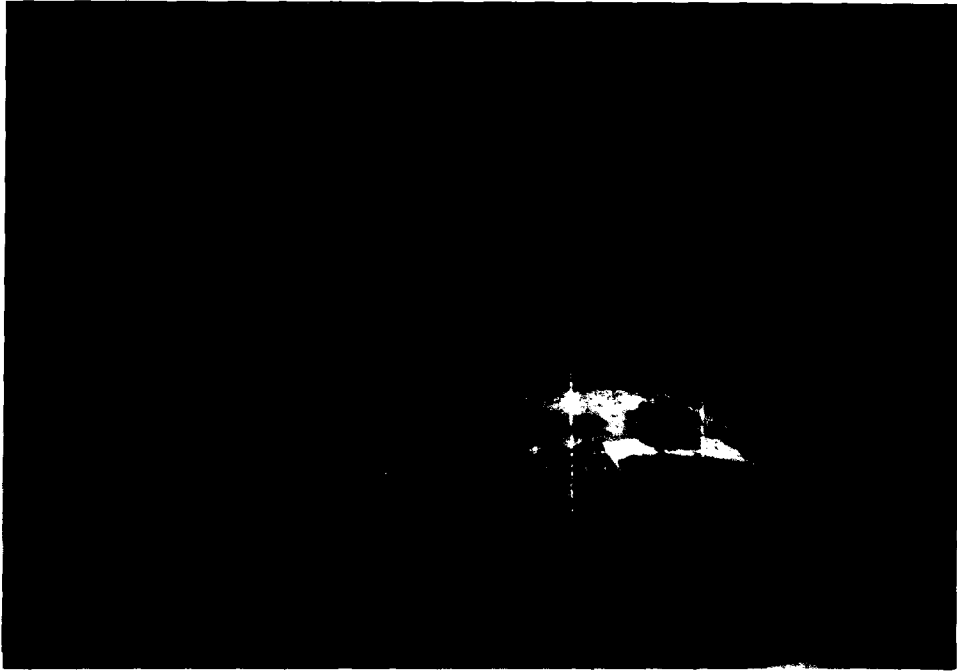
圖 5.51 試體 P12SP 及 P12SO 側向力-變位關係比較圖



照片 3.1 二十六吋口徑天然氣管線



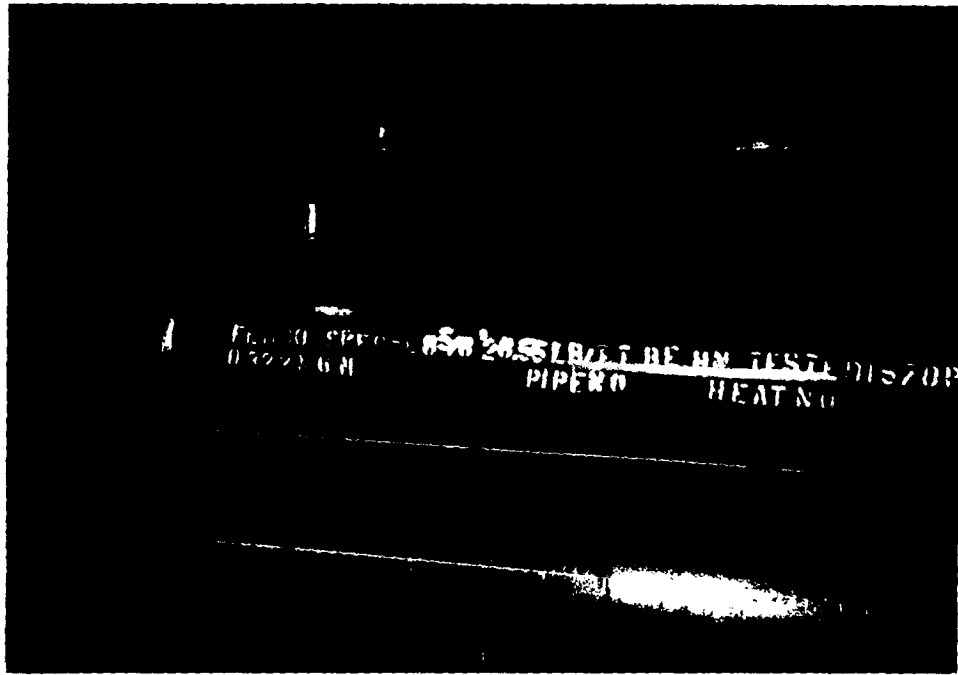
照片 3.2 鋼管定管電鐸施作



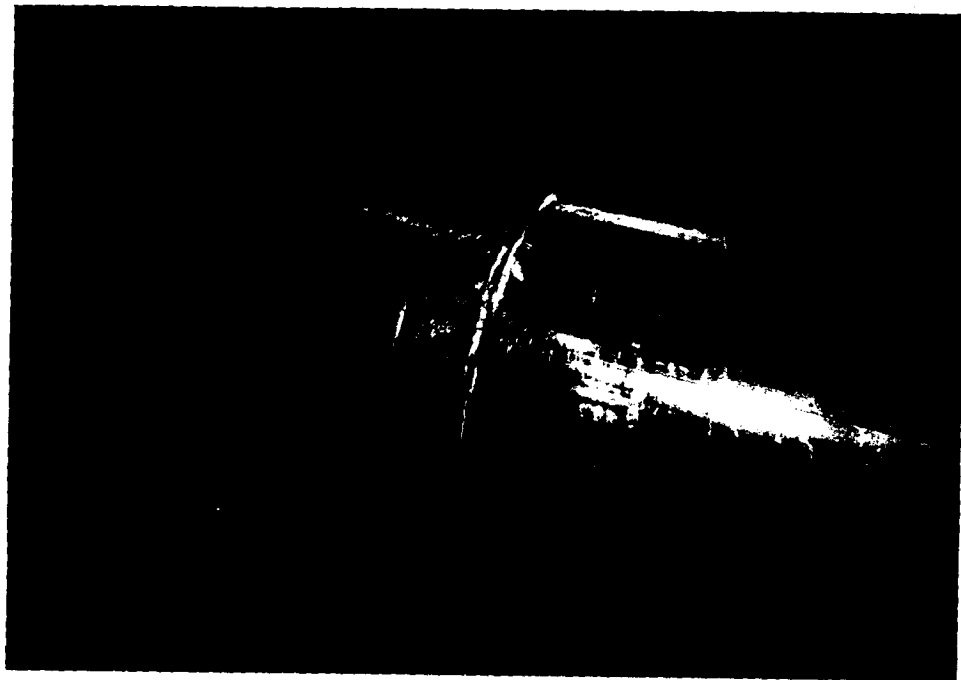
照片 3.3 鋼管底層銲接完成



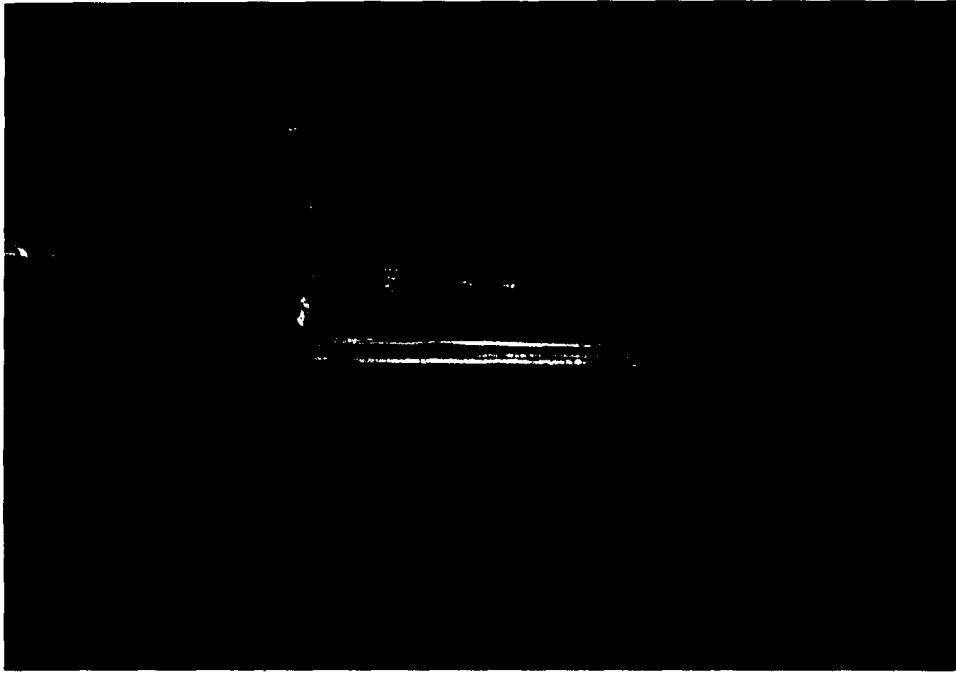
照片 3.4 鋼管銲道完成



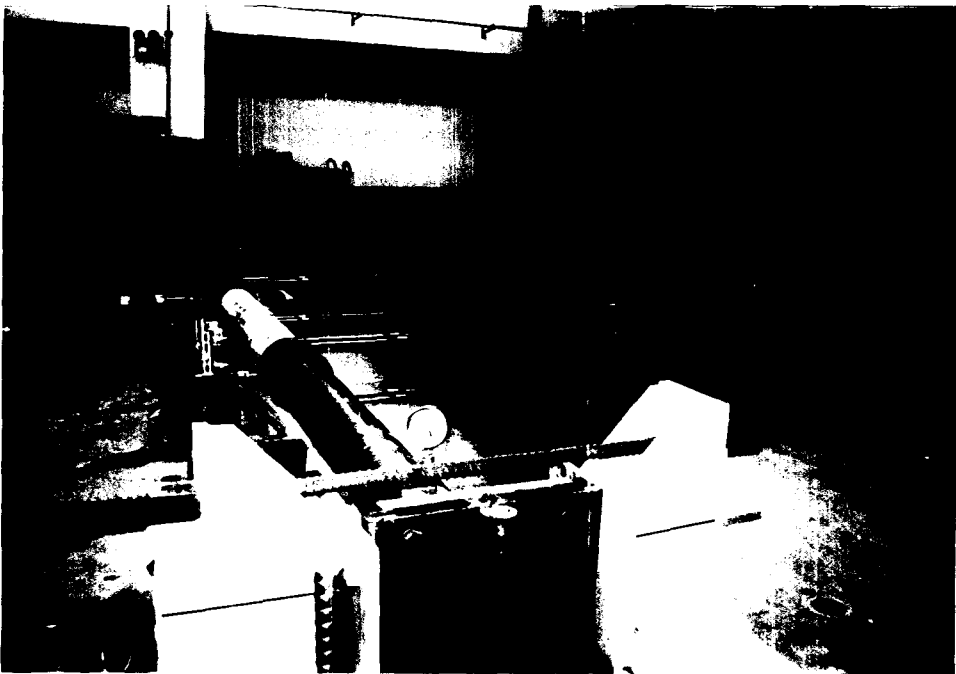
照片 5.1 八吋鋼管試體



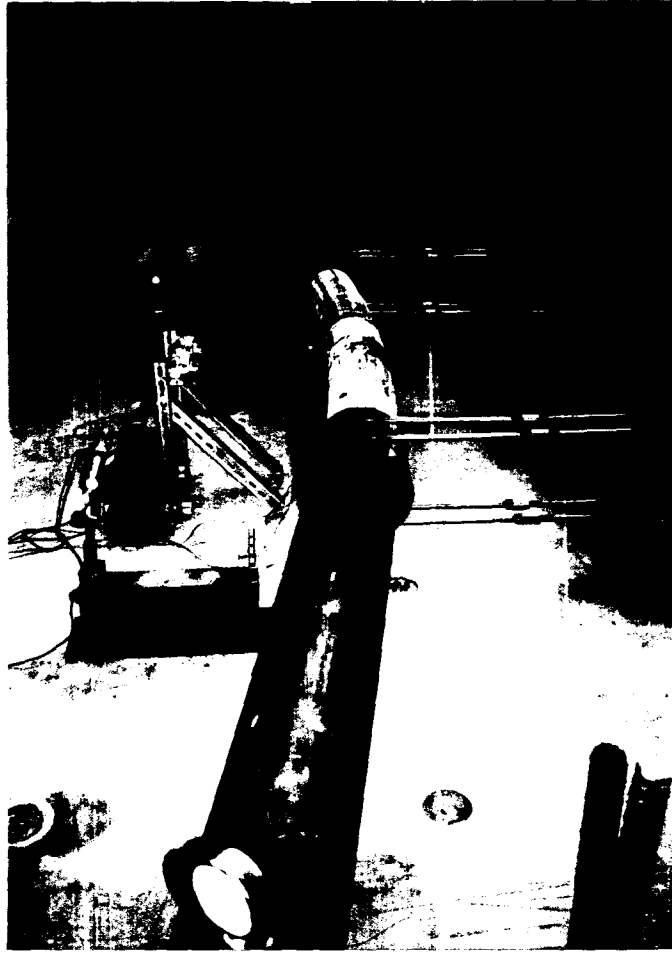
照片 5.2 試體對銲接合



照片 5.3 試體套管銲接修補




照片 5.4 試驗設置



照片 5.5 試體撓曲變形

附錄

中國非破壞檢驗有限公司 CHINA NON-DESTRUCTIVE INSPECTION 放射線照相檢驗報告 Radiographic Inspection Report		中CND檢 編號：鴻舜-8801-RT-1002 頁次：第 2 頁，共 3 頁
--	---	---

客戶：鴻舜機械有限公司 (Customer)	檢測日期：88/10/19 (Inspection Date)		
工程名稱：交通大學試驗管件對接銲道 (Job Title)	檢測地點：樹林 (Inspection Site)		
構件名稱：8",10",12" 試驗管件 (Name of Part)	檢測時機：銲接完成後 (Stage of Inspection)		
程序書編號/版次：N/A (Procedure / Ver.)	判片規範：API 1104-1983 (Inspection Code)		
檢測儀器： (Instrument)	<input checked="" type="checkbox"/> γ -Ray INC IR-100 型 45Ci Source Size 0.121" <input type="checkbox"/> X-Ray RIGAKU 250EG 型 mA Kvp		
像質計：Hole I.Q.I. #15,#17 (I. Q. I.)	增感屏：前：0.005 in 後：0.005 in (Screen) Front Back		
照射距離：8",10",12" (TFD/SFD) in	曝光時間：30 秒, 50 秒, 1 分 20 秒 (Exposure Time)		
顯像時間：5 分鐘 (Developing Time) Minute	顯像溫度：23 °C (Developing Temperature)		
底片型號：FUJI #80 (Film Type)	底片黑度：3.0 (Film Density)		
缺陷代號： (Defect Code)			
C-Crack HT-Hot Tear CV-Root Concavity IP-Incomplete Penetration I-Insertion OX-Oxidation CX-Root Convexity IUC-Internal Undercut N-Notch UC-Undercut GP-Gas Porosity MA-Misalignment P-Porosity SI-Slag Inclusion IF-Incomplete Fusion TI-Tungsten Inclusion S-Shrinkage			
檢驗位置圖：(Sketch of Inspection Location)			
			
會驗者簽名 (Witness)	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"> 余金賢 高/中級檢測師 (Level III / II Inspector) </td> <td style="width: 50%; text-align: center;"> 洪光蓮 中/初級檢測師 (Level II / I Inspector) </td> </tr> </table>	余金賢 高/中級檢測師 (Level III / II Inspector)	洪光蓮 中/初級檢測師 (Level II / I Inspector)
余金賢 高/中級檢測師 (Level III / II Inspector)	洪光蓮 中/初級檢測師 (Level II / I Inspector)		

註：(1)除非獲得本實驗室書面同意，報告不得摘錄複製。
 (2)檢測結果僅對被檢樣品有效。

中國非破壞檢驗有限公司 CHINA NON-DESTRUCTIVE INSPECTOR 放射線照相檢驗報告 Radiographic Inspection Report		中CND檢 編號：鴻舜-8801-RT-1002 頁次：第 3 頁，共 3 頁
---	---	---

底片或鐸道編號 Film or Weld No.	照相厚度 Thickness	底片尺寸 Film Size (inch)	判定 Interpretation			備註 Remark
			缺陷代號 Defect Code	結果 Result		
				合格 Acceptable	不合格 Reject	
API-5L-GR. B8-1~2	8.10mm	3 1/8"X12"	SI, P	V		
API-5L-GR. B8-2~3	8.10mm	3 1/8"X12"	P	V		
API-5L-GR. B8-3~1	8.10mm	3 1/8"X12"	NONE	V		
API-5L-GR. B10-1~2	9.27mm	3 1/8"X12"	P	V		
API-5L-GR. B10-2~3	9.27mm	3 1/8"X12"	CV	V		
API-5L-GR. B10-3~4	9.27mm	3 1/8"X12"	CX	V		
API-5L-GR. B10-4~1	9.27mm	3 1/8"X12"	P	V		
API-5L-X52-12-1~2	9.50mm	3 1/8"X12"	NONE	V		
API-5L-X52-12-2~3	9.50mm	3 1/8"X12"	NONE	V		
API-5L-X52-12-3~4	9.50mm	3 1/8"X12"	P	V		
API-5L-X52-12-4~5	9.50mm	3 1/8"X12"	NONE	V		
API-5L-X52-12-5~1	9.50mm	3 1/8"X12"	IUC	V		