

國家地震工程研究中心
NATIONAL CENTER FOR RESEARCH ON
EARTHQUAKE ENGINEERING

自來水管線含水力學試驗與
非線性側推分析之研究

鍾立來 劉季宇 汪渤喻
郭峻瑋 邱于軒 黃炯憲

報告編號：NCREE-13-027

中華民國 102 年 8 月

自來水管線含水力學試驗與
非線性側推分析之研究

Tests with Water Pressure and Nonlinear Pushover Analysis of
Water Pipeline

*鍾立來 **劉季宇 ***汪渤喻 ****郭峻瑋 *****邱于軒 *****黃炯憲

Lap-Loi Chung, Gee-Yu Liu, Po-Yu Uang, Chun-Wei Kuo,
Yu-Hsuan Chiu and Chiung-Shiann Huang

- * 國家地震工程研究中心研究員暨國立臺灣大學土木工程學系教授
- ** 國家地震工程研究中心副研究員
- ***國立交通大學土木工程學系研究生
- ****國立臺灣大學土木工程學系研究生
- *****國立交通大學土木工程學系教授

中華民國 102 年 8 月
August 2013

摘要

本研究首先針對自來水接續管線進行試驗研究，選擇延性鑄鐵管(DIP)中，K型接頭、A型接頭管，以及延性鑄鐵平口管(多用於制水閥前後，與用戶水表接續，或者淨水廠內各單元間之接續)，進行耐震性能試驗，受測管材之標稱管徑統一取為DN400；試驗過程中以油壓致動器逐步施加位移，強制受測管材在加壓滿水的條件下，產生超出規範所容許的接頭伸縮量或彎折角，以研究其破壞機制與耐震能耐。經由管材耐震試驗，可知K型接頭之水密性良好，但不具防脫功能；A型接頭延性鑄鐵管(試體承口端為A型接頭十字管，插口端為D2K直管)水密性不良且不具防脫功能，在軸拉力或彎矩作用下，接頭十分容易鬆脫，耐震性能極差；延性鑄鐵平口管(試體由兩支單突緣短管對接)屬剛性接頭，軸拉與轉角的變形容量均極低，接頭界面之橡膠墊圈彈性不足，稍有張力或加壓後卸載即會漏水。基於以上研究成果，證實A型接頭延性鑄鐵管十分容易鬆脫，耐震性能極差，既有管線應加速汰換；平口管則變形容量極低，實不宜單獨作為輸配水管線之使用，若用於制水閥前後，或是淨水廠各單元間接續使用，則宜加強此類接頭之密合度檢查。

第二部分為進行分段管線非線性側推分析，在執行側推分析之前，必須先配置接頭的非線性塑鉸參數，前人研究中利用材料參數與實驗分析的結果建立管體的軸力、壓力、彎矩非線性塑鉸，而本研究則是利用試驗結果與非線性挫屈分析的比對結果，建立接頭的軸力、壓力、彎矩非線性塑鉸。總合上述兩部分的結果，利用案例分析探討了延性鑄鐵管DN400mm的管體受平移斷層之行為，考慮容許錯動量以及管線破壞模式，在接頭控制破壞模式下可以發現容許錯動量有減少的趨勢。

關鍵詞：地下自來水管線、管線試驗、局部挫屈、非線性鉸、地層錯動、側推分析。

ABSTRACT

This study has firstly conducted seismic testing of the DIPs. Three joint types, namely K-type-joint, A-type-joint and flange joint, were selected for the testing. Full and pressurized pipe specimens were tested under tension, compression and bending load, separately. The deformation capacity and failure mechanism of each pipe specimen were investigated experimentally.

According to the test results, K-type-joint DIPs are of high water tightness but easily disengaged under either axial tension or bending load; A-type-joint DIPs are of low water tightness and easily disengaged under either axial tension or bending load; flange-joint DIPs, as rigid joints, have very low tensile and flexural deformation capacity; leakage may occur as a result of poor elasticity of the gaskets. The following recommendations can be made according to the finding: Due to the fact of poor seismic performance, existing A-type-joint DIPs should be replaced as soon as possible; owing to the poor deformation capacity, flange-joint DIPs should not be used for water transmission and distribution; regarding the other usages, the water tightness of flange-joint DIPs should be regularly inspected.

Before carrying out nonlinear pushover analysis of pipelines, K-type-joint nonlinear plastic hinges must be set. In the early literature, material parameter and the analysis of ABAQUS are used to set the tube axial and moment plastic hinges. In this study, the K-type-joint axial and moment plastic hinges are set by combining the results of the tests and analysis. According to the results of nonlinear pushover analysis, the allowable fault displacement and failure modes of pipes under the strike-slip fault are investigated. Under the failure mode controlled by joint of the pipes, the allowable fault displacement tends to decrease when compared with the continuous pipeline without joints.

Keywords: water pipelines tests, pushover analysis, plastic hinges, DIP, K-type-joint, A-type-joint, flange-joint, local buckling

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	iii
目錄.....	v
表目錄.....	ix
圖目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機及目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 本文內容.....	5
第二章 試驗規劃介紹.....	8
2.1 延性鑄鐵管與接頭尺寸與介紹.....	8
2.1.1 K 型延性鑄鐵管.....	8
2.1.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管).....	9
2.1.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管).....	9
2.2 軸向抗拉壓試驗規劃.....	9
2.2.1 K 型延性鑄鐵管.....	10
2.2.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管).....	11
2.2.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管).....	12
2.2.4 致動、量測與資料收集系統.....	13
2.3 四點式撓曲試驗規劃.....	14
2.3.1 K 型延性鑄鐵管.....	15
2.3.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管).....	16
2.3.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管).....	17

第三章 試驗結果分析與量測觀察.....	49
3.1 變形容量.....	49
3.2 標稱管長變形容量之計算.....	49
3.2.1 軸向變形容量.....	49
3.2.2 轉角變形容量.....	50
3.2.3 耐震分級.....	50
3.3 K 型延性鑄鐵管.....	51
3.3.1. 軸拉試驗.....	51
3.3.2 軸壓試驗.....	52
3.3.3 撓曲試驗.....	53
3.3.4 試驗結果彙整與耐震分級.....	54
3.3.5 管材破壞模式與綜合性能評價.....	54
3.4 延性螺壓式三承口十字管(A 型管).....	55
3.4.1 軸拉試驗.....	55
3.4.2 軸壓試驗.....	56
3.4.3 撓曲試驗.....	57
3.4.4 試驗結果彙整與耐震分級.....	58
3.4.5 管材破壞模式與綜合性能評價.....	59
3.5 延性螺壓式單突緣短管(平口管).....	60
3.5.1 軸拉試驗.....	60
3.5.2 軸壓試驗.....	61
3.5.3 撓曲試驗.....	62
3.5.4 試驗結果彙整與耐震分級.....	62
3.5.5 管材破壞模式與性能評價.....	63

3.6	含水試驗與不含水試驗之比較.....	64
3.6.1	拉力試驗比較.....	64
3.6.2	壓力試驗比較.....	64
3.6.3	撓曲試驗比較.....	64
3.7	延性鑄鐵管 K 型接頭非線性鉸建立.....	65
3.7.1	K 型接頭之拉力非線性鉸建立.....	65
3.7.2	K 型接頭之撓曲非線性鉸建立.....	65
第四章	理論分析與非線性鉸建立.....	113
4.1	ABAQUS 非線性挫屈介紹.....	113
4.2	理論分析與試驗比較.....	114
4.3	延性鑄鐵管 K 型接頭壓力非線性鉸建立與設定.....	115
第五章	案例分析.....	125
5.1	利用 SAP2000 建立管線側推分析模型.....	125
5.2	管線受平移斷層之案例分析(拉力破壞).....	126
5.3	管線受平移斷層之案例分析(壓力與撓曲破壞).....	128
第六章	結論與建議.....	164
6.1	結論.....	164
參考文獻	168

第一章 緒論

1.1 研究動機及目的

我國位處環太平洋地震帶，平均十數年會發生一次致災性陸上強震，並因社會經濟發展的日趨成熟，而有損壞、損失升高之趨勢。地下自來水管線的耐震容量若是無法滿足耐震需求則會損壞並且漏水，自來水為維生線系統中重要的一環，因此當地下自來水管線因地震產生損壞而無法提供正常服務功能，則勢必產生民生與衛生問題，更可能因此產生二次災害如火災與瘟疫，故自來水管線因地震所引起之損壞不可不視。其震害型式主要為地表震動、變形所引致的地下管線損壞，九二一地震經驗顯示作為主要管材的延性鑄鐵管(DIP)，損壞多集中於接頭處，並且與管徑與接頭型式關係密切，當地震發生時，地下自來水管線系統可能因為地震所引致之地層錯動或土壤液化而產生損傷，因此必先瞭解水管的耐震行為才可執行設計或評估。

國內外歷次地震災害調查報告顯示，自來水管線的震害一般而言可歸納為以下三種類型：直管折損、接頭損壞、餘另件破壞。1995年日本阪神地震於神戶市所調查之 1679 公里給水管線中，接頭損壞數約佔管線總破壞數的 54.7%，值得注意者為 NS 耐震接頭在本次地震中竟然無一脫接(蔡錦松等，1999[1])。1999 年集集大地震的調查報告顯示，當時中部災區之自來水主要管種為 DIP 管(ductile iron pipe，延性鑄鐵管)與 PVCP 管(polyvinylchloride pipe，聚氯乙烯管)，其中前者又以 A 型及 K 型接頭為主；DIP 管中 450mm 以下配水管災損率為 500mm 以上輸水管災損率的 8 倍，其中接頭損壞數佔 DIP 管總破壞數的 61%，且絕大多數為接頭的脫接；PVCP 管則管材本身之耐震性即極差，因此其管線震害以直管折損佔大宗(王炳鑫，2000[2])。由上述可知：作為自來水主要管材的 DIP 管，其受震損壞多集中於接頭處，並且與管徑與接頭型式關係密切。

在土層破壞作用下，自來水接續管材隨之受力而變形，其行為端

視管線與土壤之互制關係，管線與土層破壞在不同之方位角下，受力與變形之型態亦隨之不同，或拉、或壓、或撓曲、或其組合。目前國內外 DIP 管線施工規範訂有管線接頭處的容許偏位與偏倚角，然地震以強震動的形式，對管線施加額外的位移，造成管線與接頭的隨機損壞，其所施加之軸向或側向位移量，已超出規範所容許的接頭伸長量或彎折角，而且超出的程度亦可能極可觀。綜上所述，自來水管線必須同時具備良好之強度與變形能力，故管線接頭之功效相當重要。若接頭之設計，使相接之兩管段之間，具有足夠之裕度，以柔克剛，讓管段之間自由變形，並保持功能，不致於漏水。當變形之裕度用盡時，接頭具有足夠之強度，防止管線之間鬆脫，讓力量傳至相鄰之管段，促使其他相鄰之接頭，相繼發揮變形之能力，避免管線破壞。

地下自來水管線規範，如 ISO 2531[3]、BSI EN 545-2010[4]及 JCPA T55[5]，大多著重於性能及封密性之測試。有鑑於此，本文針對臺北自來水事業處以及水利署所提供之 DIP 配水管接頭，在管內充填自來水並施予水壓，進行拉、壓及撓曲之測試。在測試之過程中，監測水壓，據以判斷管線供水能力與其受力及變形之關係，藉以訂定管線之容許強度及變形，量化其耐震之能力。

當地下自來水管線受地層錯動時，管線可能因為承受過大之彎矩或軸壓力進而產生局部挫屈(local buckling)[6]如圖 1.1，如果利用梁元素來模擬管線受地層錯動的行為時，並無法表現出管線局部挫屈破壞狀態，一般皆利用殼元素來進行模擬，但是利用殼元素對於整體的計算量以及分析是較為複雜且耗時的，在工程實務上的運用可行性是比較低的，基於上述的原因，本文也預計利用非線性側推分析，討論地下水自來管線受地層錯動的行為。

1.2 文獻回顧

相關文獻可以回溯到國外，Singhal (1984)[7]根據延性鑄鐵管柔性接頭受震行為，進行實體試驗，探討軸向拉伸壓縮、撓曲彎折以及扭轉等三種接頭受力破壞情況，Gu (2011)[8]將鑄鐵管柔性接頭置於土

壤中作管內滿水拉伸試驗，觀察管體受土壓之水密效能，國內蔡錦松(1999)[1]等人曾就自來水管線接頭進行耐震檢測試驗，選擇管徑200mm及300mm之A型柔性接頭，固定管內水壓在 10kgf/cm^2 ，分別進行接頭往復荷載及頂水伸張試驗，探討接頭伸縮變形能力，Meis et al. (2003)[9]的延性鑄鐵管試驗使用了四種不同接頭，分為無束制接頭以及束制接頭。對於接頭受震時之靜態反應，係以致動器施力，探討接頭受拉、壓以及彎矩作用下之行為反應，撓曲試驗採四點撓曲方式，距兩端1/4處施力，試體為管徑的8倍(8DN)。對於接頭受震時之動態反應，係以振動台當施力系統來探討接頭受往復載重下之行為反應。拉壓試驗結果包含了降伏強度、位移以及破壞時的強度和位移，其200mm管的試驗結果對於束制接頭和無束制接頭，皆達到降伏強度以及降伏位移後才破壞。在2011年國家地震工程研究中心報告[10]的研究係針對柔性的K型接頭，選擇100mm、200mm、400mm及600mm四種標稱管徑進行一系列管體與接頭的力學試驗，利用適當長度延性鑄鐵管對接K型柔性接頭，接頭置於中央，以油壓致動器逐步施加位移，進行軸向抗拉拔、軸向抗壓及四點式撓曲測試，進而取得管體與接頭的廣義力與廣義位移關係，以及接頭的抗拉、壓、彎曲能力，藉此作為一管線耐震評估指標。

除了自來水管線試驗外，由於側推分析本質上為非線性靜力分析，故亦有研究是利用側推分析的概念來分析地下結構物如基樁或地下管線，如邱俊翔等人[11][12]便以非線性側推分析的概念來探討基樁受側力之非線性行為，將基樁以離散的梁元素來模擬，並給予梁元素非線性之彎矩與轉角關係，土壤之效應則由離散非線性土彈簧來模擬；在地下管線之研究方面，侯信宇[13]以離散線性梁元素與離散非線性土彈簧來探討分段管受逆斷層錯動之行為，並以非線性彈簧來模擬接頭效應。近期則有Joshi等人[14]以非線性梁元素與非線性土彈簧來探討連續管受逆斷層錯動之行為。上述的研究中，基本概念均是以非線性梁元素搭配非線性土彈簧來分析地下結構物之行為，上述的概念

與側推分析是完全相同的，不同之處僅在於對地下結構之加載方式，如 Joshi 等人之模擬方式乃是給予土彈簧基底位移控制來模擬斷層效應。另一方面，在連續管受地層錯動之理論分析上，已有許多學者提出相關之理論，早期 Hall 與 Newmark[15]探討在小變形情況下，連續管因地層錯動而受拉之行為；Kennedy 等人[16][17]則延續 Hall 與 Newmark 之研究，以大變形分析之角度來探討連續管因地層錯動之受拉行為；但 Wang 與 Yeh[18]指出上述之研究並無考慮到連續管受錯動時，除了受軸力外，管線本身亦有撓曲行為，因此 Wang 與 Yeh 以彈性基礎上之 Winkler 梁原理[19]搭配大變形分析來探討連續管受地層錯動之行為，Wang 與 Yeh 推導時假設連續管受平移斷層時，變形乃是反對稱，因此可取半分析並簡化成半無限長梁來分析，其中此半無限長梁可分成兩個區域，第一個區域為管線靠近斷層處，Wang 與 Yeh 假設此區域變形為大變形且撓曲變形曲線之曲率為定值，第二個區域為管線遠離斷層處，Wang 與 Yeh 假設此區域變形為小變形，因此以 Winkler 梁來推導，Wang 與 Yeh 另指出當管線位置距離斷層夠遠時，土壤與管線間無相對位移，因此管線幾乎無變形而成一直線。

而國家地震工程研究中心報告[20]綜合上述學者的研究，利用梁元素和土壤彈簧以非線性側推分析來探討連續管受平移斷層錯動之行為，也對於平移斷層與管線之間的交互作用以及與斷層夾角關係作一完整說明，數值模型如圖 1.2，對於側推分析的模型，只考慮平移斷層的影響，故模型座標只有考慮水平面(XY 軸)，不考慮垂直面(Z 軸)，因此土壤彈簧的作用方向為水平面，不考慮垂直面，接著由 ABAQUS 分析管線之撓曲行為，並建立管體彎矩非線性鉸。同時，根據管線之材料試驗，訂定軸力非線性鉸，而土壤則以非線性彈簧模擬之，採用 SAP2000 建立管線之數值模型，並將管線及土壤之非線性參數置於模型中，繼而執行非線性側推分析。國家地震工程研究中心報告[10]藉由 ABAQUS 分析管線之壓力行為，並建立管體壓力非線性鉸，套入

SAP2000 數值模型做更進一步的非線性側推分析。

1.3 本文內容

本研究選擇接頭型式為柔性的 K 型接頭延性鑄鐵管、A 型接頭延性鑄鐵管以及剛性的平口接頭延性鑄鐵管，標稱管徑皆為 400mm，強制受測管材在加壓滿水的條件下，接頭置於中央，以油壓致動器逐步施加位移，進行軸向抗拉拔、軸向抗壓及四點式撓曲測試，產生超出規範所容許的接頭伸縮量或彎折角，以研究其破壞機制、漏水狀態與耐震容量，作為未來規劃自來水管線汰換與耐震性能提升方案之參考，並且透過試驗結果，建立接頭的拉力、撓曲非線性鉸。之後再導入商用有限元素軟體 ABAQUS 中，設置與試驗相同的水壓條件，進行軸向抗壓的數值模擬，再跟試驗所得力與位移曲線比較，比較之後對於數值模型進行合理的修正與假設，取得力與位移關係。由於無法對每種管徑一一進行實驗分析，故建立一個數值模型以分析其他管徑的力與位移曲線。最後對於國家地震中心報告[20]所建立管線受平移斷層錯動的側推分析數值模型進行每隔六公尺設置接頭的拉力、壓力、撓曲非線性鉸以模擬成分段管線，利用側推分析的結果，分析分段管線在平移斷層錯動下的容許錯動量。由上述可得本文之架構如下：

第一章 緒論

本文之研究動機與目的，說明本文之文獻回顧與架構。

第二章 試驗規劃介紹

對於三種台灣常用的接頭與延性鑄鐵管對接，在加壓滿水的條件下，進行三項管線力學測試規劃，其中包括試驗組立、試驗加載、試驗致動、量測、資料收集系統以及 sensor 配置。

第三章 試驗結果分析與量測觀察

在完成三項管體與接頭力學試驗後，所得數據進行適當處理，整理成圖表，對於管體與接頭的試驗曲線進行探討，最後與規範進行比較，建立管線耐震容量以及接頭的拉力、撓曲非線性鉸。

第四章 理論分析與非線性鉸建立

首先對於管體的材料曲線進行三線性的簡化假設，利用商用有限元素軟體 ABAQUS 導入簡化後的材料參數後，設置與試驗相同的水壓條件，模擬四種管徑管體之軸向抗壓行為，取得四種管徑力與位移關係後，再與試驗數據比對，建立接頭的壓力非線性鉸，在得到所有管徑的力與位移曲線後，利用商用有限元素軟體 SAP2000，利用其中的塑鉸設定，正規化取得所有管徑的壓力塑鉸參數。

第五章 案例分析

對於側推分析數值模型進行一簡短介紹，利用所取得接頭的拉力、壓力、撓曲非線性鉸參數，模擬成分段管線，對 DN400 管徑進行側推分析，再與之前連續管線的分析作比較與探討。

第六章 結論與建議

歸納第二章到第五章結論，並提出本研究的結論與建議。



圖 1.1 自來水管線局部挫屈[6]

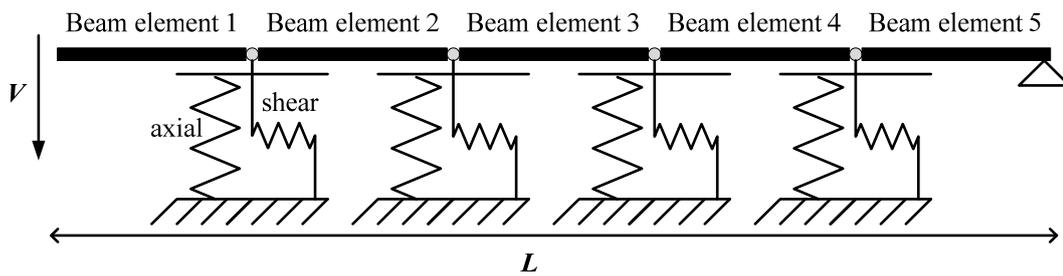


圖 1.2 非線性側推分析數值模型[20]

第二章 試驗規劃介紹

為了測試延性鑄鐵管與柔性接頭以及剛性接頭之耐震能力，受測管材之標稱管徑統一取為 DN400，配合 K 型柔性接頭、A 型柔性接頭以及平口型剛性接頭對接延性鑄鐵管，在國家地震工程研究中心進行耐震性能試驗，管材在加壓滿水的條件下，以拉、壓以及撓曲試驗研究其漏水狀態、破壞機制與耐震能耐。

2.1 延性鑄鐵管與接頭尺寸與介紹

延性鑄鐵管(DIP)具有高強度、高延展性，安全性高，以及耐衝擊、可塑性佳，容許彎曲不容易破裂，容許變形但不壓破等優點，為台灣地區自來水管線常見管材，臺北自來水事業處轄區自來水管線以延性鑄鐵管(ductile iron pipes, DIP)為最大宗，佔管線總長度的 66%，一般國內廠商產生之延性鑄鐵管，其長度為 6m，內面襯裡為普通卜特蘭水泥砂漿，內襯厚度為 6mm，外部塗裝為底鋅加柏油漆，如圖 2.1 所示，製作規範直管符合 CNS 10808 -G3219[21]、JIS G5526[22]，管件符合 CNS 13272-G3253[23]、JIS G5527[24]。

2.1.1 K 型延性鑄鐵管

標稱管徑 DN 400 之 K 型延性鑄鐵管，外徑 D 為 425.6mm，接合長度 P 為 110mm，管厚 t 為 7mm (屬 D3K 管)。K 型接頭構造，一端為承口，另一端為插口，壓圈需要的螺栓數量為 12 支，各部實體如圖 2.2 至圖 2.6 所示，管材詳細尺寸可參考表 2.1 至表 2.4 所列。K 型接頭之橡膠圈，於 CNS 13272 G3253[23]國家標準中，屬於接合配件第 III 類，材料為良質之苯乙烯丁二烯膠(SBR)、氯化丁二烯橡膠(CR)與丙烯晴丁二烯橡膠，依規定其圓部硬度須達 IA 55，角部硬度須達 IA 70，橡膠物性及製造須符合 CNS 10774 K40802[25]之第 I 類 A 種之規定，所實施之軸拉、軸壓及撓曲試驗各採取兩組試體，總共實施六次試驗。

2.1.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管)

延性螺壓式三承口十字管，以下簡稱 A 型管，管材外型呈現十字狀，長向一端為承口端，一端為接口端，總長度為 1280 mm，短向則兩端皆為承口端，總長度為 960 mm，本次試驗取標稱管徑 DN400 為試驗管體，外徑(D2)為 425.6 mm、管厚(T)為 14 mm 及接合長度(P)為 90 mm，壓圈管徑越大需要螺栓數量越多，取標稱管徑 DN400，需要 12 根鑄鐵螺栓，插口則取標稱管徑 DN400，管厚(D2)為 7.5mm 之直管進行組裝。A 型管管材詳細尺寸可參考表 2.5 至表 2.8 所列，零件實體如圖 2.7 至圖 2.12 所示。所實施之軸拉、軸壓及撓曲試驗各採取兩組試體，總共實施六次試驗。

2.1.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管)

延性螺壓式單突緣短管常稱為平口管，以下簡稱平口管；管材外型一端為突緣，一端為插口，總長度為 750mm，於管材突緣處預留孔位與對端的管件接合，試驗取標稱管徑 DN400 為試驗管體，外徑(D2)為 425.6mm，管厚(T)為 14mm，需要 12 根不鏽鋼螺栓。平口管管材詳細尺寸可參考表 2.9 至表 2.10 所列，零件實體如圖 2.13 至圖 2.15 所示。所實施之軸拉、軸壓及撓曲試驗各採取兩組試體，總共實施六次試驗。

2.2 軸向抗拉壓試驗規劃

軸拉、壓試驗裝置包含施力設備、夾具、水壓控制系統、感測計(量測接頭相對位移及試體整體變形)以及資料擷取系統。試驗時將試體垂直置於 500 噸萬能試驗機之中，如圖 2.16 所示，水壓控制系統如圖 2.17 所示，上、下兩端分別透過夾具固定，再以位移控制方式，對試體施加軸向拉力或壓力，軸拉壓實驗建置構想流程如圖 2.18 所示。

試驗過程中以 500 噸萬能試驗機內建之荷重計與位移計，分別量測軸拉、壓試驗之施力，以及試體整體變形量(軸向伸長或壓縮量)，

其 Cross Head 位移範圍 ± 75 mm，位移控制最大速率為 4.5 mm/s。另以位移計(LVDT)量測接頭之相對位移，以水壓計感測試體內的水壓變化。由於試體為有限容積之密閉容器，對試體進行加載時，即使是試體保持完好，仍可能導致其容積發生變化，進而水壓也一起隨之變化。因此，水壓控制系統必須具備自動增壓或洩壓之機制。本研究為此特別設計並訂製一專屬之水壓控制系統，可提供試驗壓力之上限值為 10 kgf/cm^2 。

以上所有量測數據均統一由資料擷取系統進行全程之資料擷錄，主要使用資料擷取系統及量測儀器說明如表 2.11 所列，K 型管拉伸及壓力試驗儀器佈置如圖 2.19，A 型管拉伸及壓力試驗儀器佈置如圖 2.20，平口管拉伸及壓力試驗儀器佈置如圖 2.21，管材裝置要則之詳細說明如以下各小節分別所述。

2.2.1 K 型延性鑄鐵管

- (a) 試體管長：所取得管材為市面上標準 6 m 長的自來水管，就其承口段由管件裁切並取兩倍標稱管徑長度，長度為 800 mm。插口段則由直管裁切兩倍的標稱管徑加上該管之接合長度 110 mm，長度為 910 mm。則總長經組立後為四倍的標稱管徑(4 DN)長度，長度為 1600 mm。
- (b) 試體端板：於試體的兩端焊接端板，端板之尺寸長及寬皆為 600 mm，厚度為 20 mm，端板中心開 PT 3/4" 管牙孔以利注出水，如圖 2.22 所示。
- (c) 端板焊接：延性鑄鐵管與端板間以焊接方式接合，因兩者材料不同，屬異料焊接，經常發生焊道混入碳元素，使得熱影響區或焊接金屬發生硬化，提高龜裂發生之風險。本研究焊接要領如下：應用兩種焊料進行焊接，以 GC-100 (SMAW) 打底，GMX309L (GMAW) 作為表面堆焊；焊接前，須將母材(鑄鐵管端部及端版)預熱至 120°C ；為防止母材因熱脹冷縮，造成材質變異或焊道斷裂，每次焊接之焊道長度以不超過 50 mm 為原則，且須以對稱交

- 錯段焊方式進行，焊接每一段後，須立即以機具連續敲擊，減輕焊接時造成的收縮應力；焊接層間溫度須控制在 250°C 以內，防止材質變異；最後以高溫泡棉包覆試件，以均溫方式進行冷卻。
- (d) 試體安裝：將壓圈與膠圈套至試體之插口，接著將試體之插口端與承口端接合，安裝過程中必須鎖緊壓圈上之螺栓使其去推擠壓圈，如此方能使 K 型接頭之接合處能達到密合，鎖緊扭力依規定為 100 N·m (臺北自來水事業處第 02505 章[26])。
 - (e) 試驗組立：首先將夾具固定於 500 噸萬能試驗機上，再將試體以螺栓鎖附的方式，固定於夾具裝置上，即完成試體於設備上的組立，詳細夾具各部尺寸，如圖 2.23。
 - (f) 感應計安裝：為觀察試驗中試體接頭的相對位移，試驗時取試體接頭之兩個相反方位，架設位移計(LVDT)各一只，量測區域之上端距離承口邊緣 165mm (1.5P)，下端距離承口端邊緣 110mm (1P)，如圖 2.24。
 - (g) 試驗條件：本軸拉、軸壓試驗定位為靜態試驗，因此油壓致動器之位移速率以慢速為原則，例如 0.15 mm/sec 左右，過程中並得於試驗觀察之時機，暫停動作。

2.2.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管)

- (a) 試體管長：承口段就所取得的管材，取長向組立直管進行試驗，但長向總長即 1280 mm，超出長度 480 mm，因此於長向插口端部設立四片加勁裝置，長度符合超出長度，使試體承口端有效長度為兩倍標稱管徑(2DN)即 800 mm，如圖 2.25 所示。插口段則由直管裁切兩倍標稱管徑(2DN)加上該管之接合長度 90 mm，長度為 890 mm，總長經組立含端板有效長度為四倍標稱管徑(8DN)長度，長度為 1600 mm，組立完成如圖 2.26 所示。
- (b) 試體組立：安裝 A 型管接頭時，乃將壓圈與橡膠圈套至直管之接口端，接著將直管之接口端與 A 型接頭之承口端使用螺栓鎖緊接合，另外短向兩承口端則以螺栓將管塞封緊，所有螺栓鎖緊之扭

矩值為 100 kgf-cm (資料來源：臺北自來水事業處)；而自來水管體內水壓穩定則以一 600 mm 正方形板件，厚度 20 mm，材質為 A36 的封板，並以焊接方法與管體接合，且在封板中間取一直徑 3/4 英吋管牙孔位用以方便安裝進出水管的位置。

- (c) 夾持裝置：由於自來水管體以及拉、壓設備皆為獨立的單元，所以必須考慮在固定管材於拉壓設備，以及自來水管內的水壓穩定；因此，在設備與管材件的固定上設計一夾具，用以方便安裝試體與進出水管。
- (d) 接頭量測區域：為觀察試驗中試體接頭的相對位移，試驗時取試體接頭之兩個相反方位，架設位移計(LVDT)各一只，量測區域之上端距離承口邊緣 135mm (1.5P)，下端距離承口端邊緣 90mm (1P)，如圖 2.27 所示。

2.2.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管)

- (a) 管體組立：平口管試體的組成，係由兩個平口管對接組成，組裝要領為橡膠墊圈放置在兩平口管中間，對準後以螺栓旋緊之，螺栓與螺帽材質為不銹鋼，而鎖緊之扭矩值為 100kgf-cm；由於平口管之管長為 750mm，所以兩平口管對接總長度為 1500mm。需特別一提，橡膠墊圈取得係以橡膠片放置於平口管接合端處，以鐵鎚敲擊平口管突緣處而得，如圖 2.28 所示。最終，平口管試體組立如圖 2.29 所示。
- (b) 試體與接頭量測區域：拉線式位移計(SP)用於量測試體之整體位移，安裝於試體兩端版之間。位移計(LVDT)用於量測接頭之相對位移，量測區域之上端距平口突緣 100 mm (DN/4)，下端相同的距平口突緣 100 mm (DN/4)。於試體之周圍，於相反兩側分別架設 LVDT 與 SP 位移計各一組，如圖 2.30 所示。
- (c) 平口管除了試體以及量測區域不同於 A 型管，其餘設置皆相同。

2.2.4 致動、量測與資料收集系統

(a) 水壓控制設備

本試驗必須藉助於水壓控制系統，以維持試體之滿水，並進行水壓控制，使之維持於固定之試驗水壓，並於試驗過程中全程記錄水壓變化情形。試驗過程中，因接頭鬆脫、損壞或管體開裂，導致試體漏水而無法維持試驗水壓時，即視為試體已喪失其功能性，試驗中止。目前國內配水管工作水壓約為 1~2 kgf/cm²，輸水幹管工作水壓約為 3 kgf/cm² 左右。依 ISO 2531 Ductile Iron Pipes, Fittings, Accessories and Their Joints for Water Applications (2009)[3]之試驗水壓規定，試驗水壓應為(1.5PN+5) kgf/cm²，PN 為工作水壓。本研究之標的管材屬配水管之管徑範圍(詳後)，因此，以(1.5×2+5) = 8 kgf/cm² 作為試驗水壓，容許變化範圍取為±0.5 kgf/cm²。試驗過程中，試體之持壓能力無法維持於此範圍時，視為失效，並以此時試體之變形能力等參數作為其耐震能力，進行耐震分級。

由於試體為有限容積之密閉容器，對試體進行加載時，即使是試體保持完好，仍可能導致其容積發生變化，進而水壓也一起變化。因此，水壓控制系統必須具備自動增壓或洩壓之機制。本研究為此特別設計並訂製一水壓控制系統，可提供試驗壓力之上限值為 10 kgf/cm²。

該系統係以壓力感測器，如圖 2.31 所示，偵測水壓值，當水壓不足時，壓力感測器便會啟動加壓馬達進行增壓，以補足水壓力至試驗壓力後，壓力感應器即停止馬達運轉；反之，當水壓過大時，壓力感測器便會啟動電磁閥，如圖 2.32 所示，進行洩壓，直至到達試驗壓力為止。由於試驗進行中，試體容積變化(水壓變化)為一連續之過程，為避免在這個過程中，發生加壓馬達(或是電磁閥)的頻繁啟動，本水壓控制系統可以設定一容許值(例如±0.5 kgf/cm²)，當水壓變動超出容許值時，加壓馬達(或是電磁閥)方纔動作。

(b) 感測計

為了解試體在軸拉、軸壓試驗過程中的受力與變形情形，須於試驗系統與試體之特定位置設置感測計，說明如下。

(1) 荷重計

本試驗以 500 噸萬能試驗機內建之荷重計，量測軸拉、軸壓試驗中對於試體的施力。又對於非防脫管材的軸拉試驗，由於預期施力可能很小，因此於試體上端夾具與萬能試驗機之間，增設一國震中心自製之荷重計，容量為 50 噸，如圖 2.33 所示，以提高量測精度。

(2) 位移計

本試驗以 500 噸萬能試驗機內建之位移計，量測軸拉、軸壓試驗中試體的整體變形量(軸向伸長或壓縮量)。另外，亦以 LVDT 位移計量測接頭之相對位移，試驗時取試體接頭之兩個相反方位，架設位移計各一只。LVDT 位移計為東京測器研究所之 SDP-200D 型 LVDT 位移轉換器，測量範圍為 ± 100 mm，如圖 2.34 所示。

(3) 水壓計

試驗進行全程須監控水壓變化情形，首先於試體之出水端設置一壓力傳感器，作為代表水壓之量測點，除將訊號送至水壓控制器以判讀是否加壓或洩壓，亦將訊號送至資料擷取系統以進行數化記錄。其次，亦於試體進、出水管線的位置設置水壓錶各一只，如圖 2.35 所示，以利現場人員即時判讀。所採 Atlantis 指針式水壓錶，量測範圍為 $0\sim 10\text{kgf/cm}^2$ ，而數位式水壓錶之量測範圍則為 $0\sim 99\text{kgf/cm}^2$ ，精度 $\pm 0.1\text{kgf/cm}^2$ 。

(c) 資料擷取系統

本試驗採東京測器研究所之 THS-1100 型資料擷取器(data logger)，如圖 2.36 所示，作為所有量測訊號之數化、記錄之用，其最快取樣頻率為 1 Hz，可滿足靜態試驗需求。

2.3 四點式撓曲試驗規劃

撓曲試驗裝置包含施力設備、夾治具、水壓控制系統、感測計(量

測接頭相對轉角、接頭下沉量、支承反力)以及資料擷取系統，如圖 2.37 所示。試驗進行方式，係將試體以水平方式，置於門型構架中間，以油壓致動器移動施力橫梁下降，透過一對 V 型夾具施力於試體，並以鉸支承作為對試體兩端點，進行四點彎矩試驗，撓曲實驗建置構想流程如圖 2.38 所示。

試驗過程中，以 100 噸油壓致動器內建之荷重計與位移計，分別量測四點彎矩試驗之總施力，以及施力橫梁下壓的位移量。另外，以角度計量測試體之轉角，以拉線式位移計監測接頭下沉量。最後，撓曲試驗構架中，鉸支承底部一律設置荷重計，以監測受力情形。以上所有量測數據均統一由資料擷取系統進行全程之資料擷錄。

2.3.1 K 型延性鑄鐵管

- (a) 試體管長：所取得管材為市面上標準 6 m 長的自來水管，就其承口段由管件裁切並取約四倍標稱管徑長度，長度為 1580 mm。插口段則由直管裁切四倍的標稱管徑加上該管之接合長度 110 mm，長度為 1690 mm。總長經組立含端板後為八倍的標稱管徑(8 DN)長度，長度為 3200 mm。
- (b) 試體端板：於試體的兩端焊接端板，其尺寸長及寬皆為 500 mm，厚度為 25 mm，端板中心開 PT 3/4 英吋管牙孔以利注出水，如圖 2.39 所示。
- (c) 端板焊接：延性鑄鐵管與端板間以焊接方式接合，因兩者材料不同，屬異料焊接，經常發生焊道混入碳元素，使得熱影響區或焊接金屬發生硬化，提高龜裂發生之風險。本研究焊接要領如下：應用兩種焊料進行焊接，以 GC-100 (SMAW) 打底，GMX309L (GMAW) 作為表面堆焊；焊接前，須將母材(鑄鐵管端部及端版)預熱至 120°C；為防止母材因熱脹冷縮，造成材質變異或焊道斷裂，每次焊接之焊道長度以不超過 50 mm 為原則，且須以對稱交錯段焊方式進行，焊接每一段後，須立即以機具連續敲擊，減輕焊接時造成的收縮應力；焊接層間溫度須控制在 250°C 以內，

防止材質變異；最後以高溫泡棉包覆試件，以均溫方式進行冷卻。

- (d) 試體安裝：先以圖 2.40 所示轉接板固鎖於試體兩側端板，再以直徑 7 cm 光滑圓棒穿過轉接板，並跨坐於圖 2.41 所示鉸支承，以兩組 L 型鋼座進行夾持，束制其上下左右移動，結果如圖 2.42 所示，L 型鋼座詳細尺寸圖如圖 2.43 所示。
- (e) 施力構架組立：利用門型構架結合油壓致動器及施力橫梁之組合，施力橫梁平行於試體上方，V 型開口治具二組固定於施力橫梁下方，作為四點彎矩試驗的施力點，最後，得到撓曲試驗之組立如圖 2.44 所示。
- (f) 感應計安裝：試驗中以角度計量測試體之轉角，其配置方式依試體南、北兩側而不同，北側於試體中心左右分別配置 4 只角度計，其位置距離承口邊緣依序為 165mm (1.5P)、400mm (1DN)、600mm (1.5DN) 及 800mm (2DN)，如圖 2.45 所示；南側則於試體中心左右分別配置 1 只角度計，其位置距離承口邊緣為 600mm (1.5DN)，如圖 2.46 所示。此外，接頭南北兩側之中心點，亦於承口邊緣處分別設置拉線式位移計之量測點各一，藉以監測接頭下沉量。

2.3.2 延性螺壓式三承口十字管(A 型管)

- (a) 試體管長：彎矩試體總長應為八倍標稱管徑(8DN)，但承口段不及四倍標稱管長(4DN)，因此，以管件試體段含端板經組裝後為四倍的標稱管徑(4DN)即 1600 mm，管件長度不足部分以鋼梁組裝，延長至 8 DN，鋼梁詳細尺寸圖如圖 2.47 所示。
- (b) 端板：試體密封端板以一 500 mm 正方形板件，厚度 20 mm，材質為 A36 的封板，以焊接方法與管體接合，端板的另一端則以螺栓與橫梁鎖緊接合用以延長。
- (c) 排氣及進出水裝置：進出水口設立於試體的正下方近端板處，尺寸為 PT3/4 英吋管牙孔；由於試驗過程試體需注滿水，隨著水緩

慢的注入試體內，應將試體中積存之空氣予以排放，以避免氣堵而難以注水，因此分別設置排氣閥於試體兩端之最高處。

- (d) 鉸支承：為得到四點彎矩之試驗條件，同時束制左、右兩端點不發生軸向移動，本研究因此設計四座鉸支承(hinge supports)。鉸支承為兩兩一對的組合，在撓曲試驗上共需兩對，試驗時置放於試體的兩端的兩側，其設計係利用 7cm 光滑圓棒穿過與試體相接的旋轉板治具，置放於工型鋼梁上，再以兩片 L 型鋼座鎖附於工型鋼梁，提供試體受彎矩變形時，得到試體可旋轉而不可上下左右移動的設計。
- (e) 夾持施力裝置：由於試體的組成為自來水管體與鋼梁藉由螺栓鎖附組合而成，為使試體受力均勻，因此設計一圓頂夾持夾具，圓頂用於當橫梁下壓彎矩力時每個角度都可以均勻受力，開口則可同時夾持管體之端板及橫梁，再次防護不鬆脫，如圖 2.48 所示。
- (f) 彎矩試驗組立：試體於鋼梁之兩端以螺栓鎖附固定於旋轉板，旋轉板再置放於鉸支承與荷重計裝置上，最後再與一片鋼板接合，施加預力固定於反力地板之孔洞上。施力加載方式則由利用門型構架與油壓致動器及橫梁組合，將橫梁平行於試體上方，夾持施力裝置固定於試體與鋼梁接合處正中央。
- (g) 量測區域：試驗中以角度計量測試體之轉角，配置方式依試體南、北兩側而不同，南側於試體中心左右分別配置 2 只角度計，其位置距離承口邊緣依序為 135 mm (1.5P)及 600mm (1.5DN)，如圖 2.49 所示；北側於試體中心左右分別配置 1 只角度計，其位置距離承口邊緣為 600mm (1.5DN)，如圖 2.50 所示。此外，接頭南北兩側之中心點，亦於承口邊緣處分別設置拉線式位移計之量測點各一，藉以監測接頭下沉量。

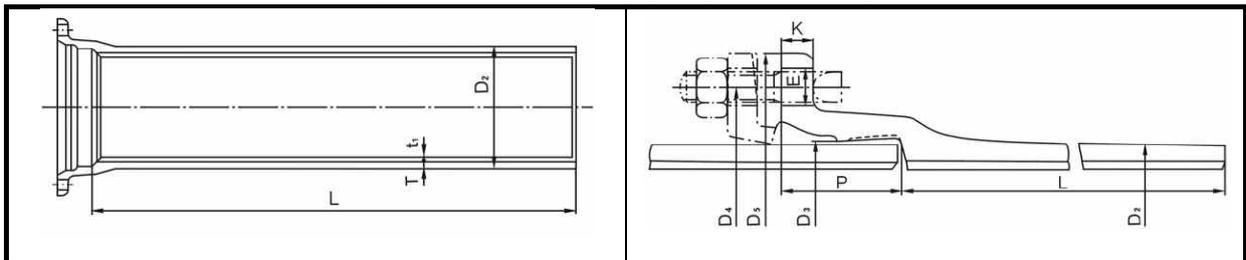
2.3.3 延性螺壓式單突緣短管(平口管)

- (a) 試體管長：彎矩試體總長應為八倍標稱管徑(8DN)，但平口管標稱長度為 750 mm 不及四倍標稱管長(4DN)，因此以管件原長對接

組裝為試體段，含端板經組裝後為近四倍的標稱管徑(4DN)即 1540 mm，管件長度不足部分以鋼梁組裝後延長至 8 DN 替代之。

- (b) 量測區域:試驗中以角度計量測試體之轉角，配置方式依試體南、北兩側而不同，南側於試體中心左右分別配置 3 只角度計，其位置距離承口邊緣依序為 100mm (DN/4)、200mm (DN/2)及 600mm (1.5DN)，如圖 2.51 所示；北側於試體中心左右分別配置 1 只角度計，其位置距離承口邊緣為 600mm (1.5DN)，如圖 2.52 所示。此外，接頭南北兩側之中心點，亦於法蘭處分別設置拉線式位移計之量測點各一，藉以監測接頭下沉量。
- (c) 平口管除了試體以及量測區域不同於 A 型管，其餘設置皆相同。

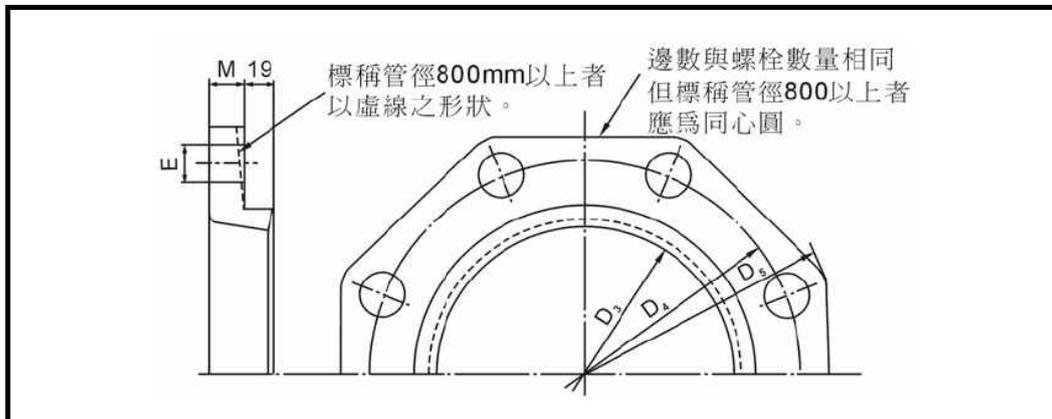
表 2.1 K 型延性鑄鐵管接頭尺寸



接合部詳細尺寸 (單位: mm)

T	t ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	E	P	K
7	6.0	425.6	429.6	512	558	23	110	25

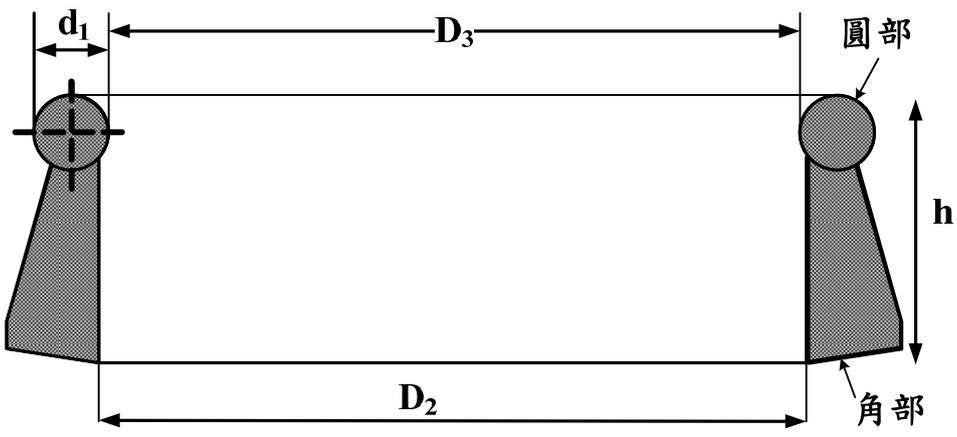
表 2.2 K 型延性鑄鐵管接合配件-壓圈尺寸



壓圈詳細尺寸 (單位: mm)

D ₃	D ₄	D ₅	E	M
429.6	512	558	23	22

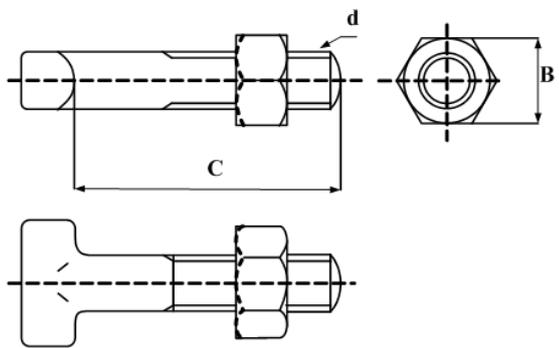
表 2.3 K 型延性鑄鐵管接合配件-橡膠圈尺寸



標稱管徑 D	橡膠圈管徑 D ₂	橡膠圈管徑 D ₃	圓部直徑 d ₁	橡膠圈長度 h
400	416	410	14	49

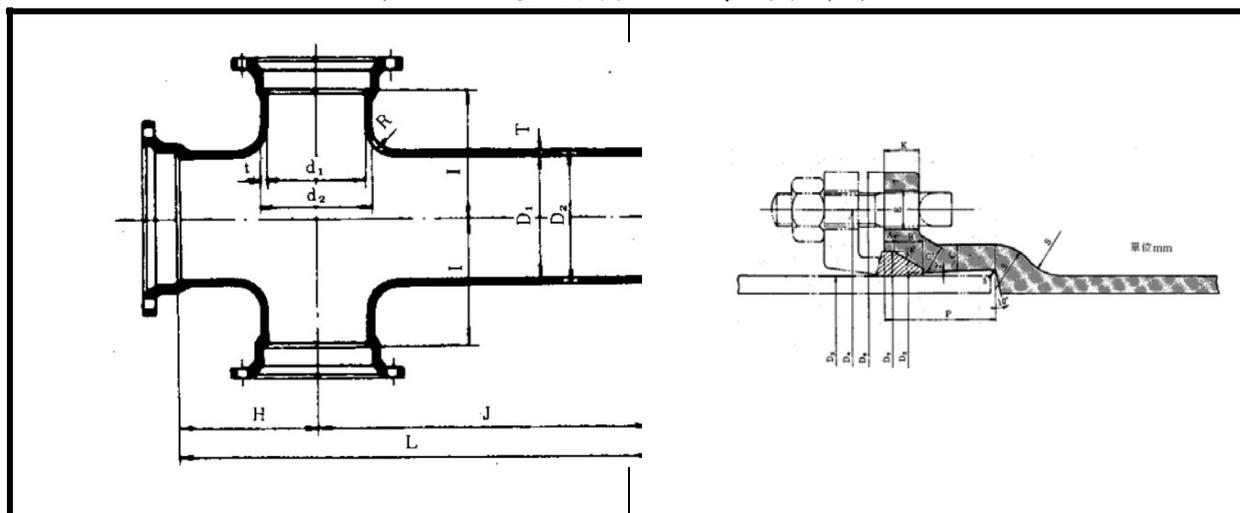
(單位：mm)

表 2.4 K 型延性鑄鐵管接合配件-T 頭螺栓、螺帽



T 頭螺栓、螺帽詳細尺寸 (單位：mm)			
d	B	C 螺栓長度	一組之數量
M20	30	110	12

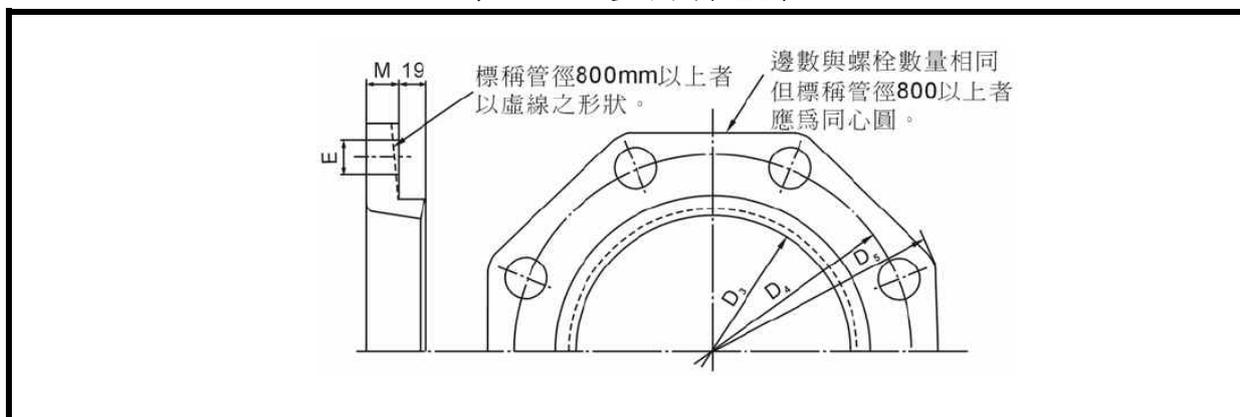
表 2.5 A 型接頭延性鑄鐵十字管



各部尺寸(mm)

T	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	E	P	K
14	397.6	425.6	429.6	512	558	23	90	25

表 2.6 A 型接頭壓圈



壓圈尺寸(mm)

D ₃	D ₄	D ₅	E	M
429.6	512	558	23	22

表 2.7 A 型接頭橡膠圈

橡膠圈尺寸(mm)						
D	M	N	I	J	K	L
416	16	6	4	10	19	33

表 2.8 A 型接頭延性鑄鐵管接合配件

T 頭螺栓、螺帽尺寸(mm)			
d	B	C	一組之數量
M20	30	110	12

表 2.9 單突緣延性鑄鐵平口管

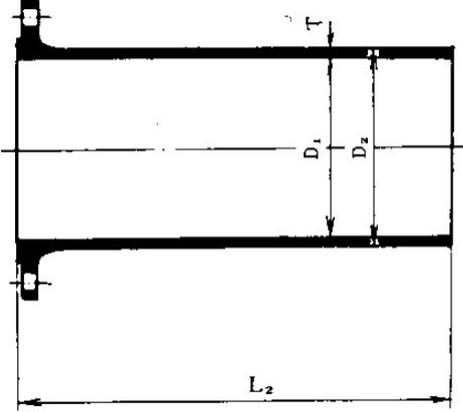
			
各部尺寸(mm)			
T	D ₁	D ₂	L ₂
14	397.6	425.6	750

表 2.10 延性鑄鐵平口管接合配件

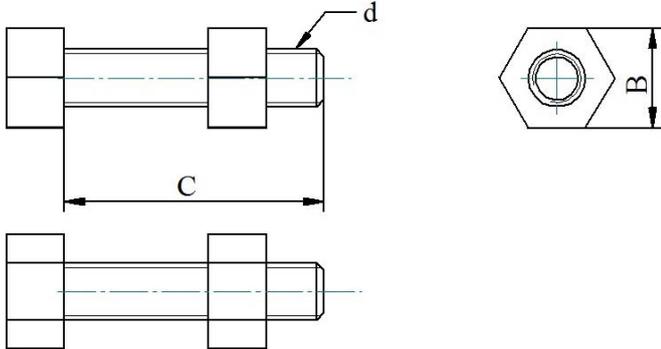
			
外六角螺栓、螺帽尺寸(mm)			
d	B	C	一組之數量
M20	30	90	12

表 2.11 軸拉壓試驗設備儀器使用一覽表

名稱	廠牌	型號
500 噸萬能試驗機	Shimadzu	EHF-UD500-70L
位移轉換器(LVDT)	東京測器研究所	SDP-200D
拉線式位移計**	Celesco	PT101-0020-111-1130
荷重計(Load Cell)*	NCREE 設計製作	
自來水管線試驗水壓控制系統	NCREE 設計製作	
資料收集系統(Data Logger)	東京測器研究所	THS-1100
<p>* 適用於 K 型接頭拉壓試驗</p> <p>** 適用於 A 型接頭拉壓試驗</p> <p>***適用於平口接頭拉壓試驗</p>		



圖 2.1 延性鑄鐵管



圖 2.2 K 型接頭承口端



圖 2.3 K 型接頭插口端



圖 2.4 K 型接頭壓圈



圖 2.5 K 型接頭橡膠圈



圖 2.6 K 型接頭壓圈之 T 型螺栓



圖 2.7 A 型接頭十字管



圖 2.8 DN400 (D2K) 直管



圖 2.9 A 型接頭壓圈



圖 2.10 A 型接頭膠圈



圖 2.11 A 型接頭 T 型螺栓



圖 2.12 A 型接頭延性螺壓式管塞



圖 2.13 單突緣平口管



圖 2.14 橡膠墊圈



圖 2.15 不鏽鋼螺栓



圖 2.16 Shimadzu 500 噸萬能試機

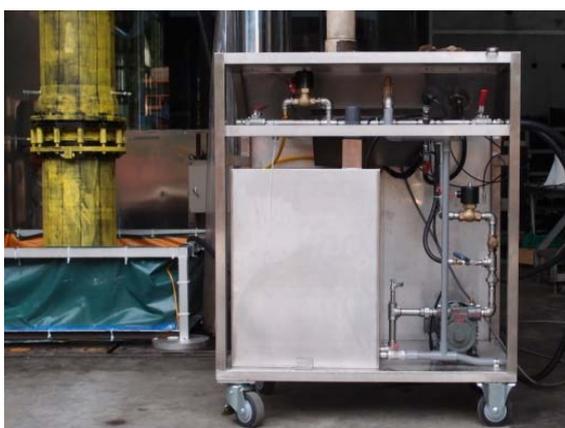


圖 2.17 水壓控制系統

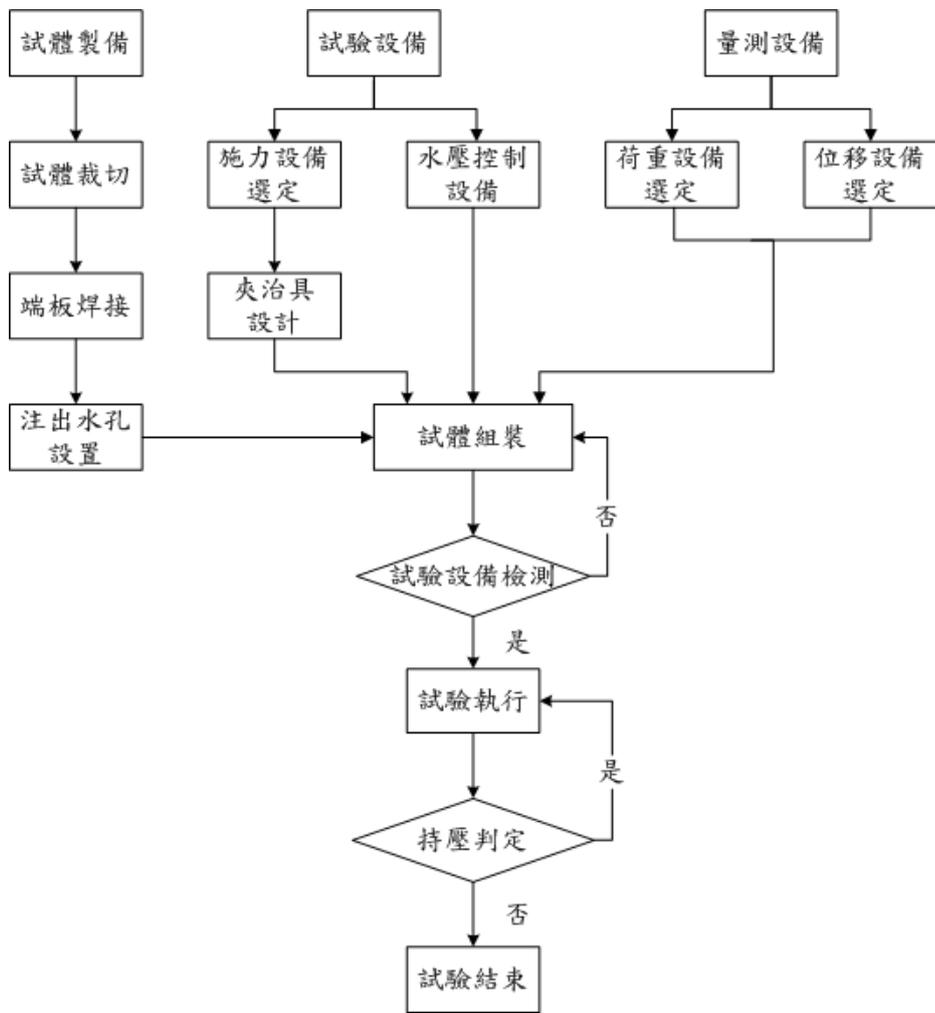


圖 2.18 軸拉壓實驗建置構想流程圖

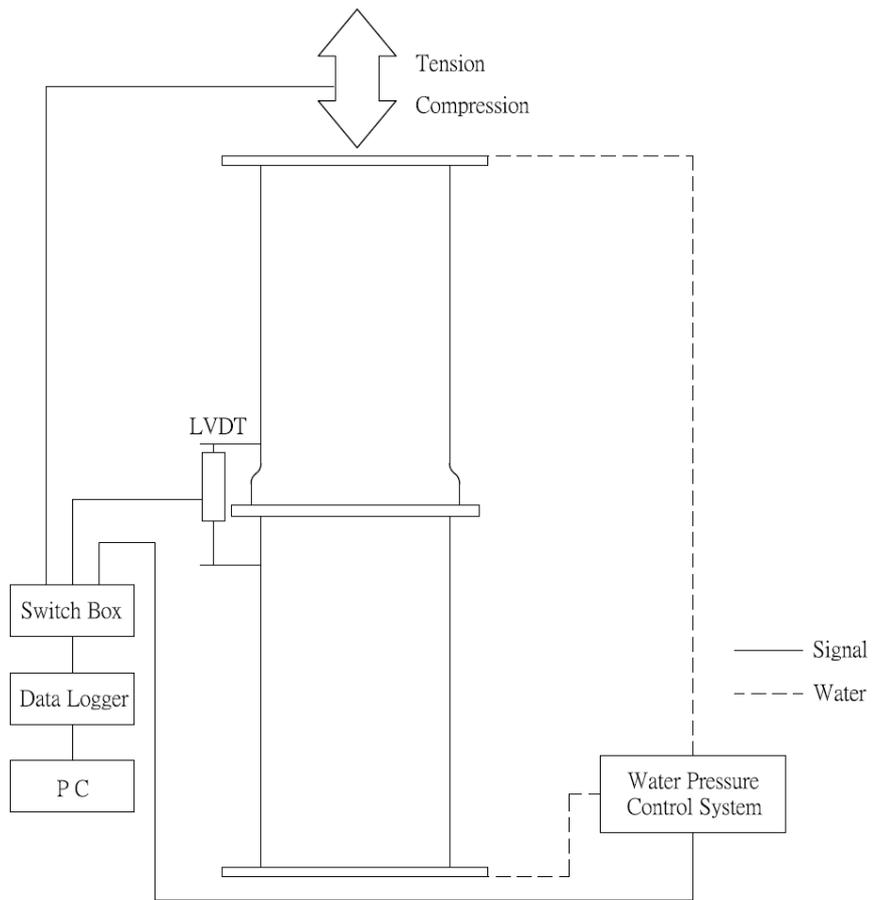


圖 2.19 K 型管軸拉壓試驗裝置示意圖

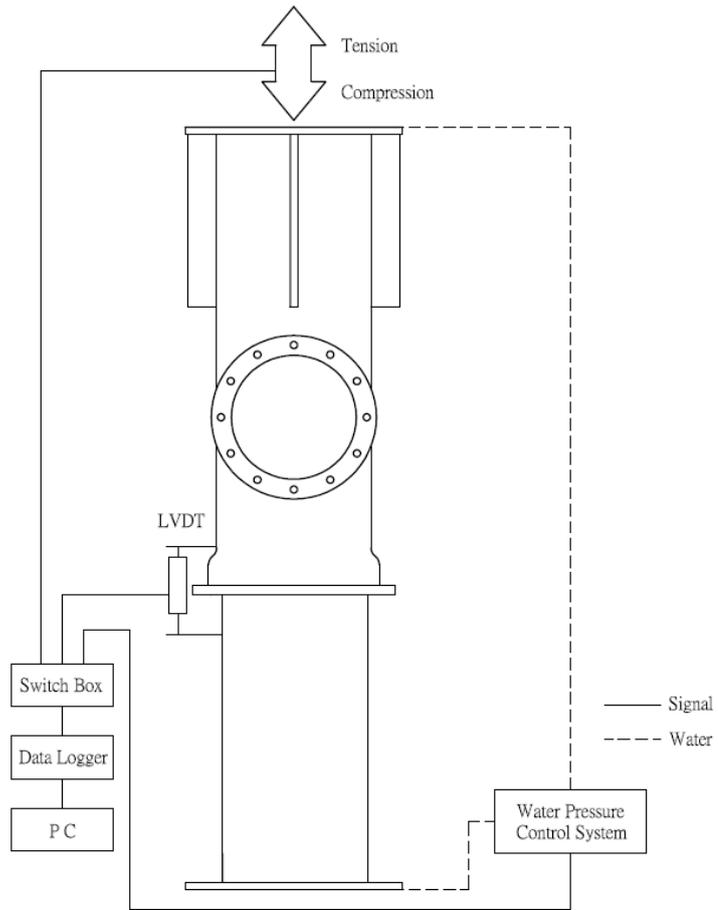


圖 2.20 A 型管接頭拉伸及壓力試驗儀器佈置

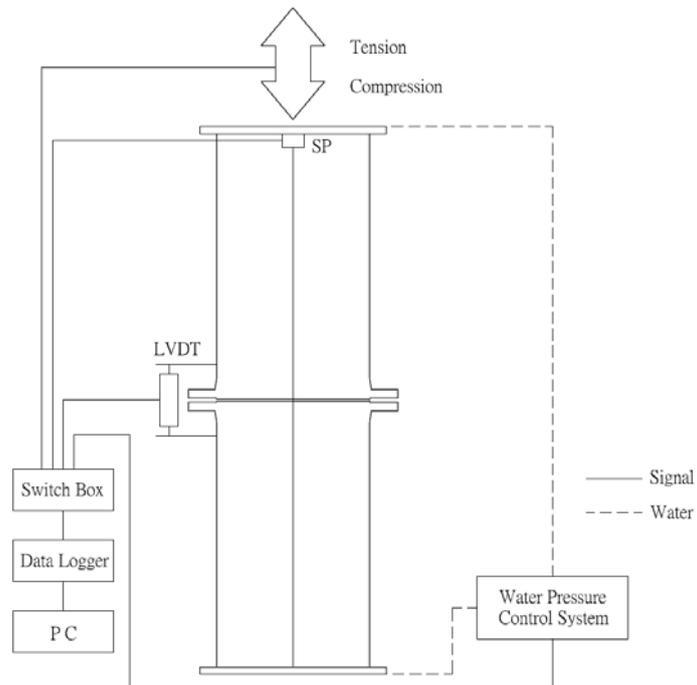


圖 2.21 平口管接頭拉伸及壓力試驗儀器佈置

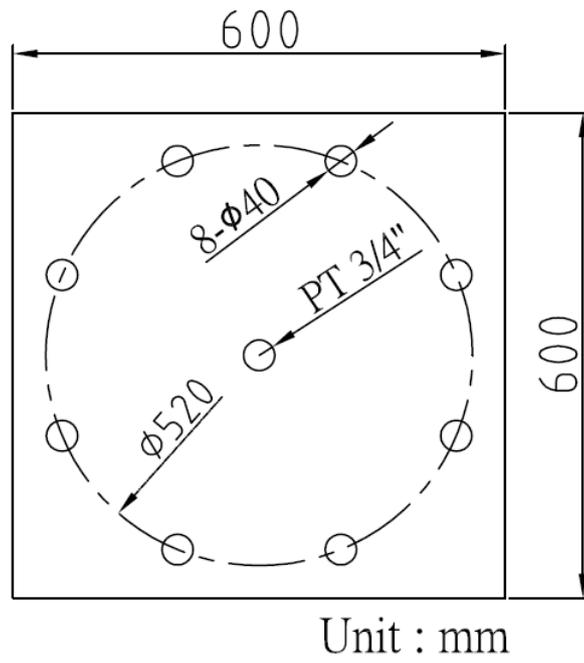


圖 2.22 軸拉壓試驗端板尺寸示意圖

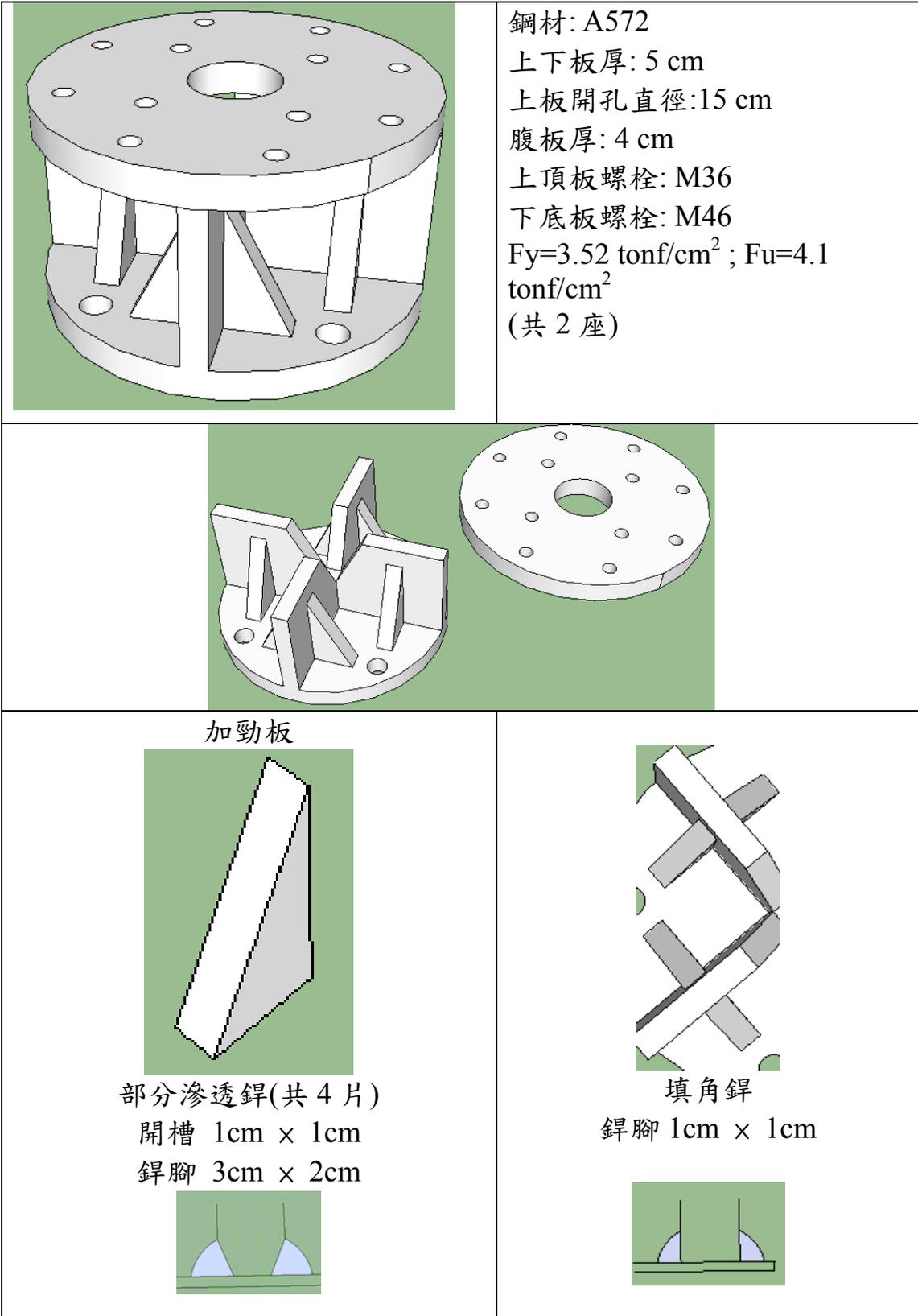


圖 2.23 詳細夾具各部尺寸(1/3)

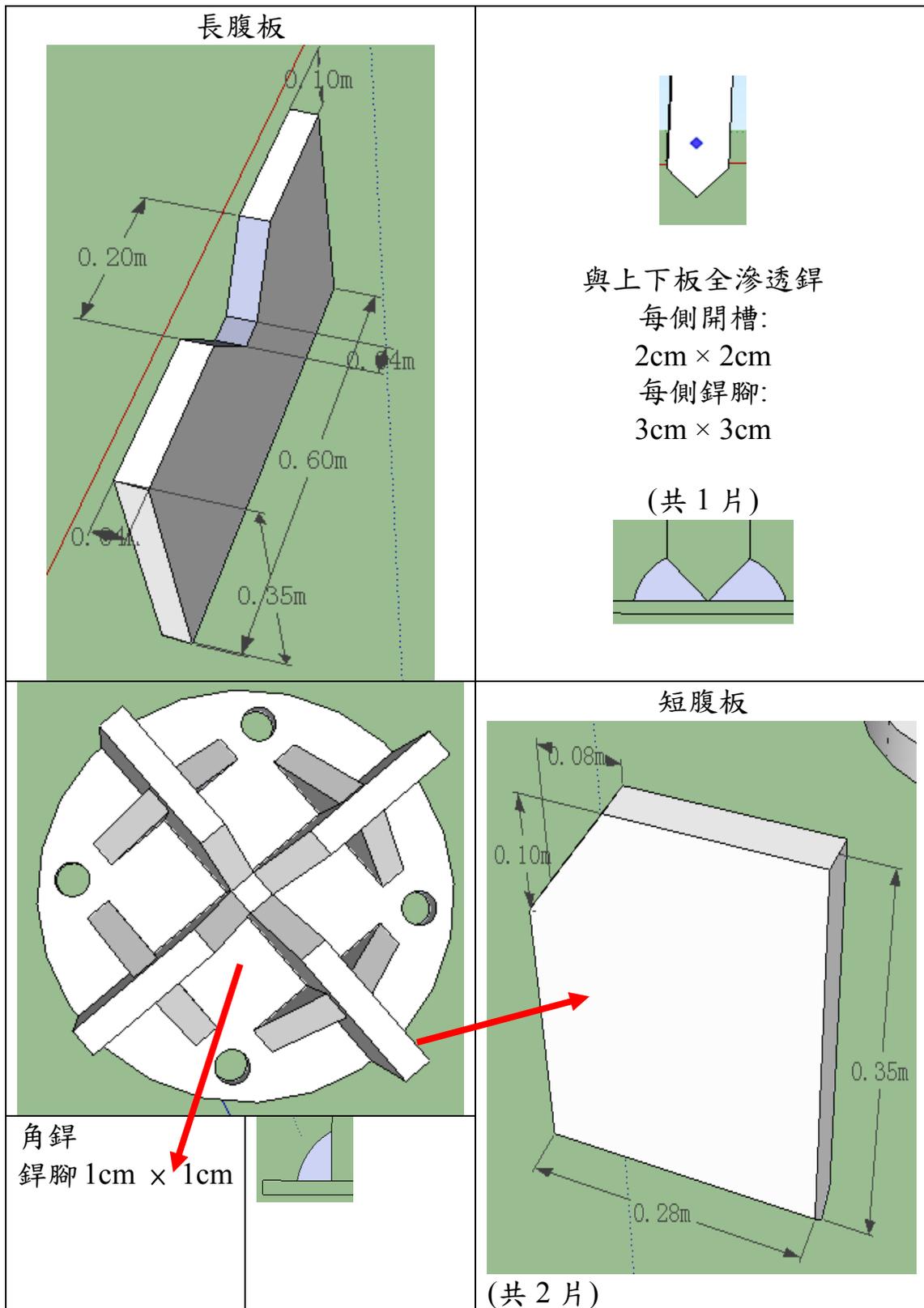
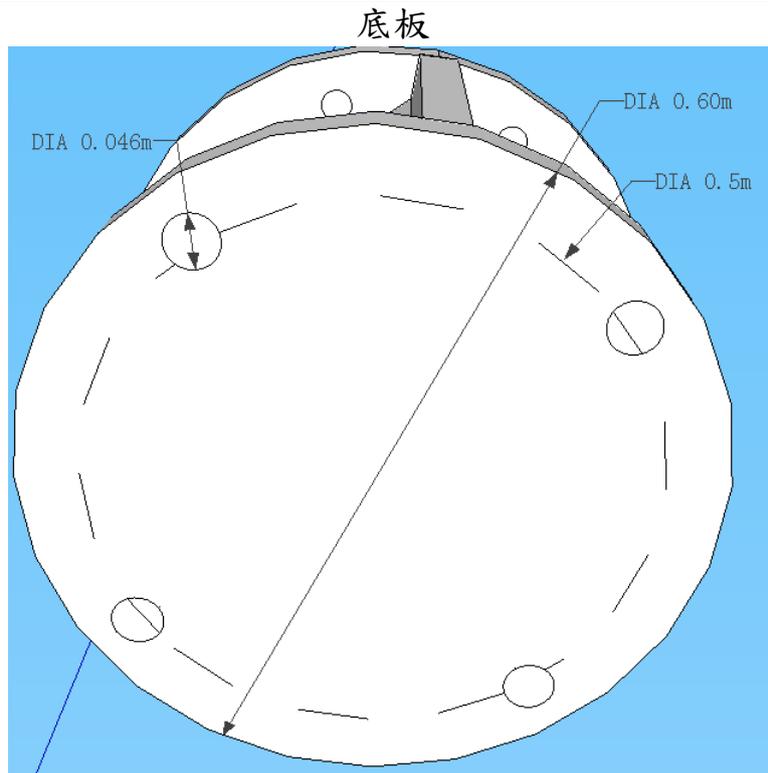
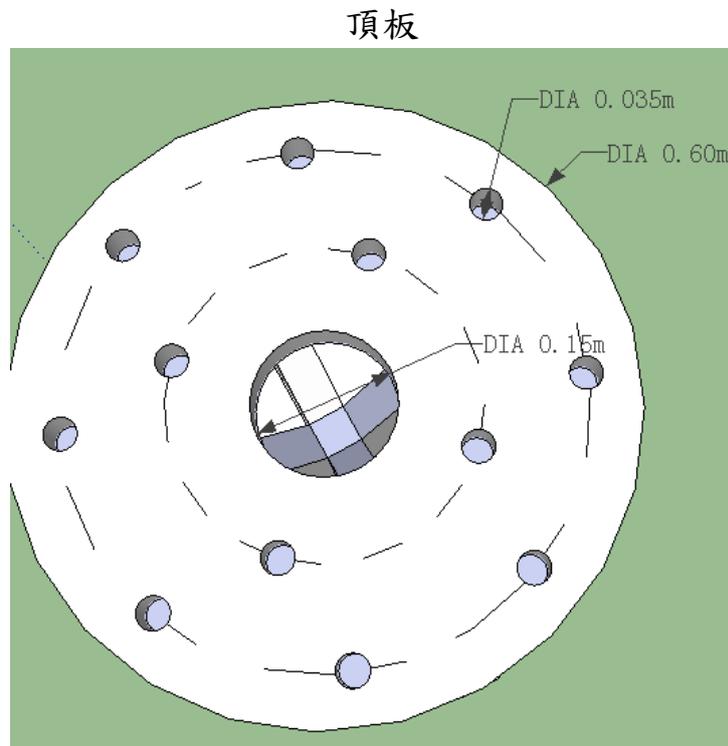


圖 2.23 詳細夾具各部尺寸(2/3)



螺栓環組直徑: 0.5m, 共 4 個孔



螺栓環組直徑(內圈): 0.3m, 共 8 個孔
螺栓環組直徑(外圈): 0.5m, 共 4 個孔

圖 2.23 詳細夾具各部尺寸(3/3)

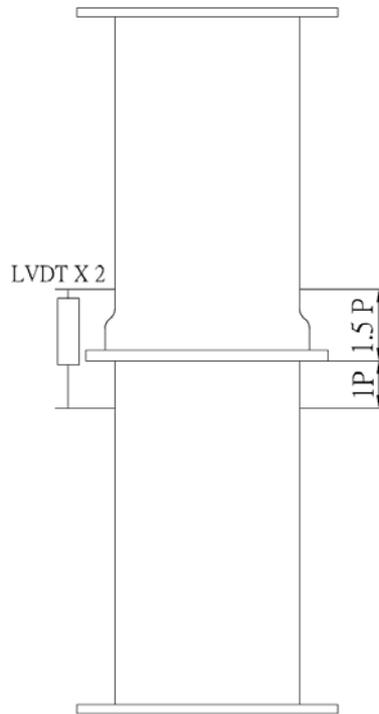


圖 2.24 軸拉壓試驗接頭量測範圍

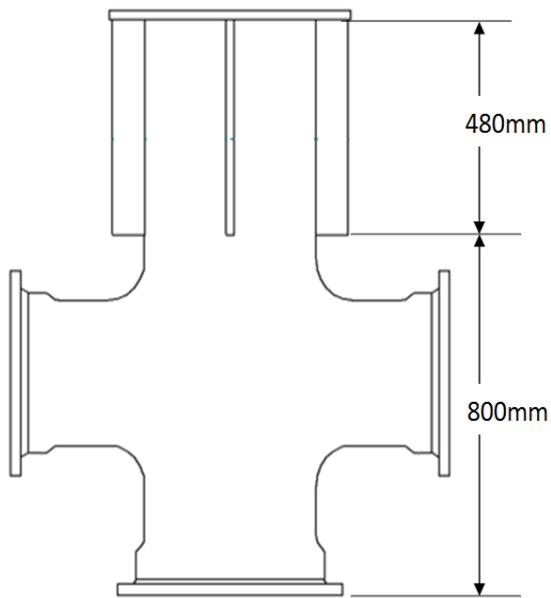


圖 2.25 A 型管加勁裝置示意圖



圖 2.26 A 型管組立圖

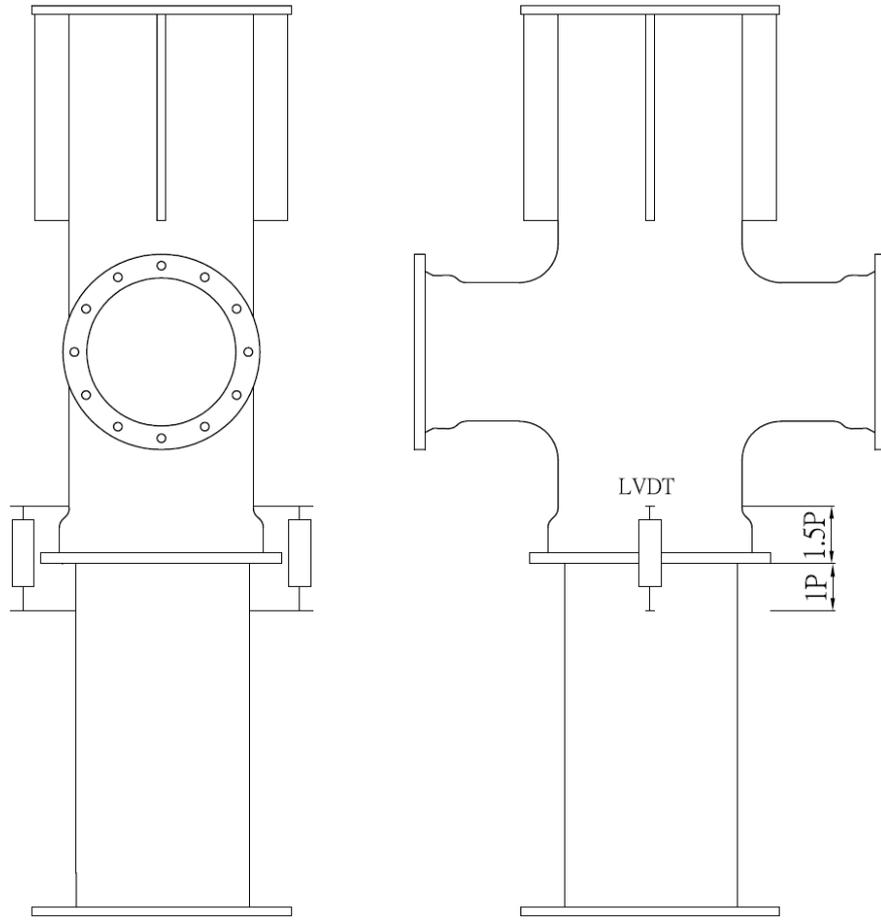


圖 2.27 A 型管軸拉壓試驗量測區域



(a) 橡膠片鋪於平口突緣處



(b) 敲擊成橡膠墊圈

圖 2.28 平口管橡膠墊圈



圖 2.29 平口管組裝完成圖

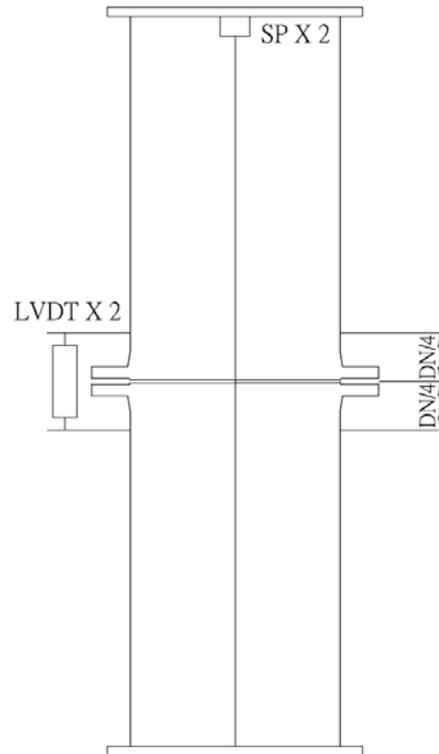


圖 2.30 平口管軸拉壓試驗量測區域



圖 2.31 壓力傳感器



圖 2.32 電磁閥



圖 2.33 50 噸荷重計



圖 2.34 LVDT 位移轉換器

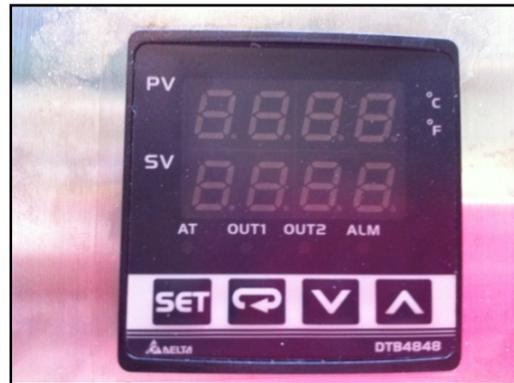


圖 2.35 水壓控制系統水壓錶(左：指針式水壓錶；右：數位式水壓錶)



圖 2.36 資料擷取系統

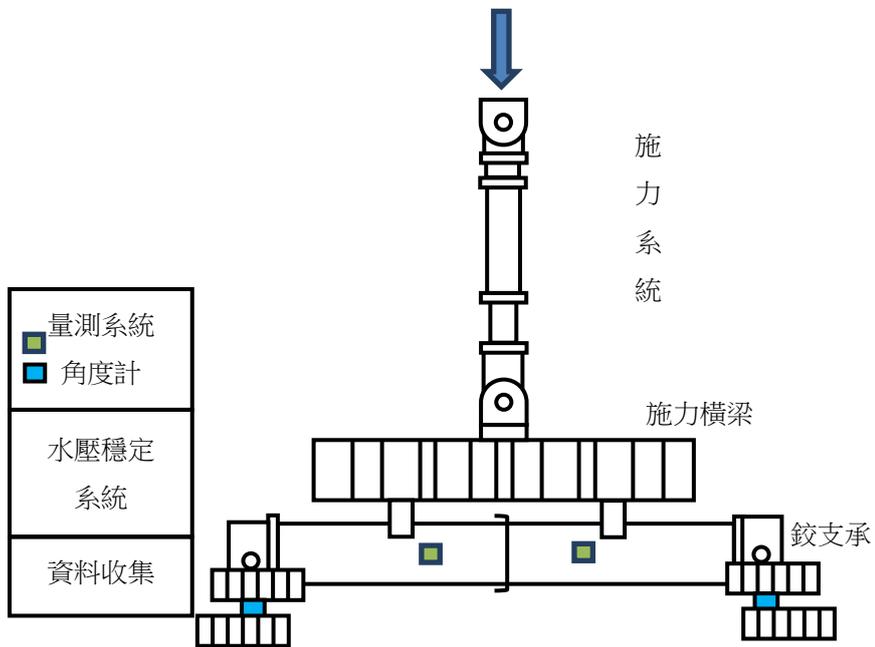


圖 2.37 撓曲試驗(四點彎矩試驗)裝置示意圖

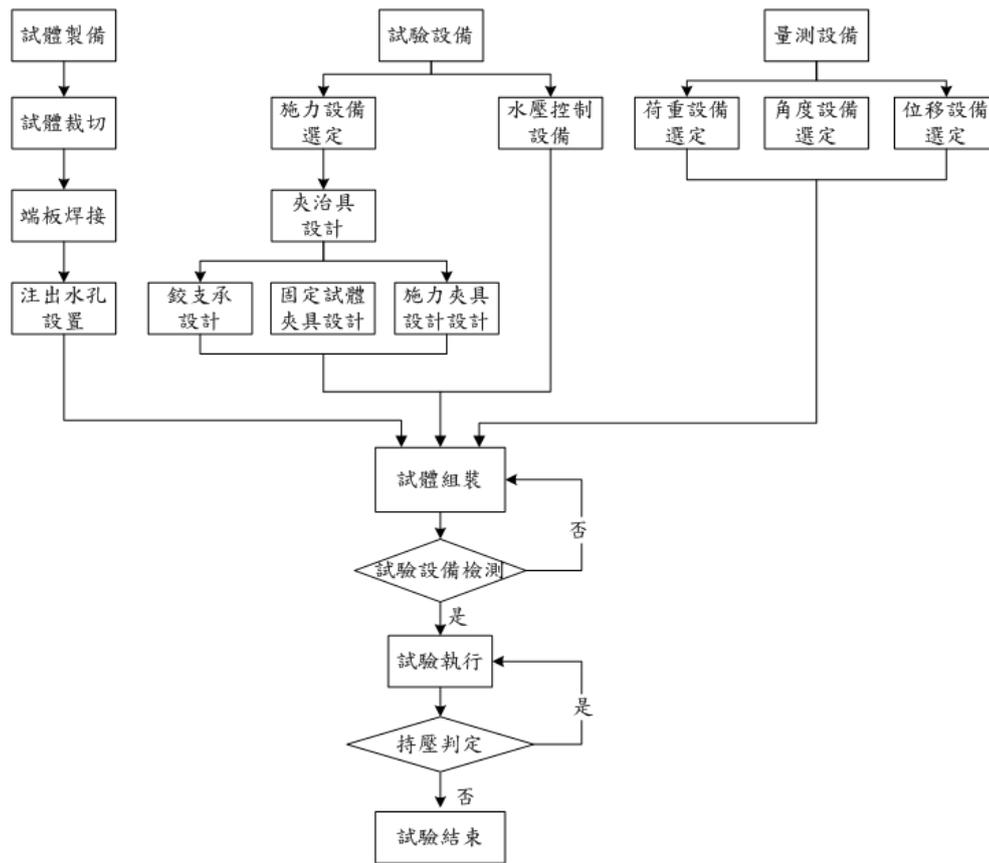


圖 2.38 撓曲實驗建置構想流程圖

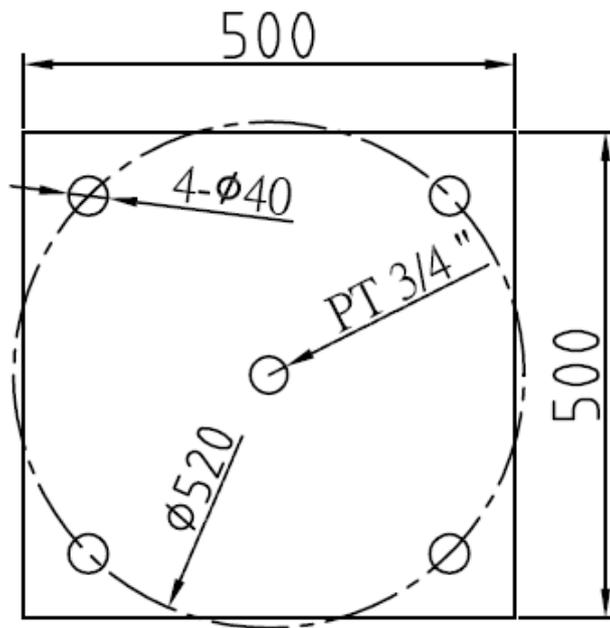


圖 2.39 彎矩端板

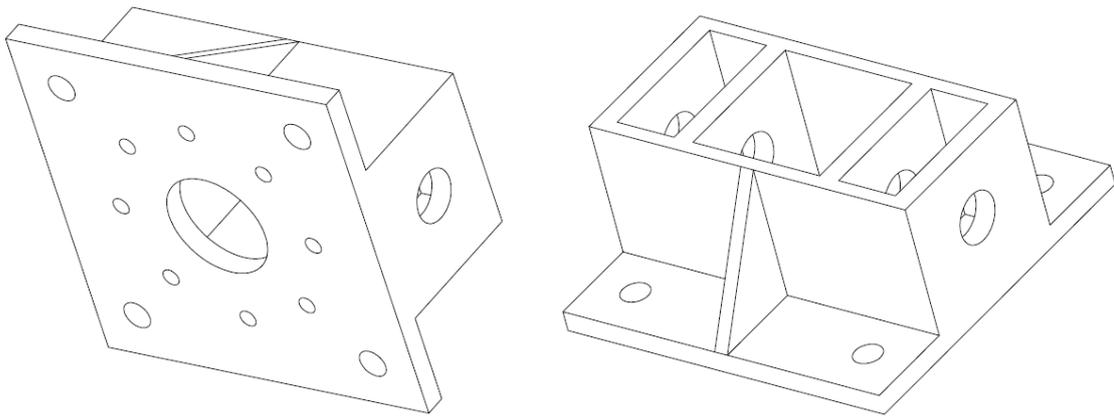


圖 2.40 鉸支承用試體轉接板

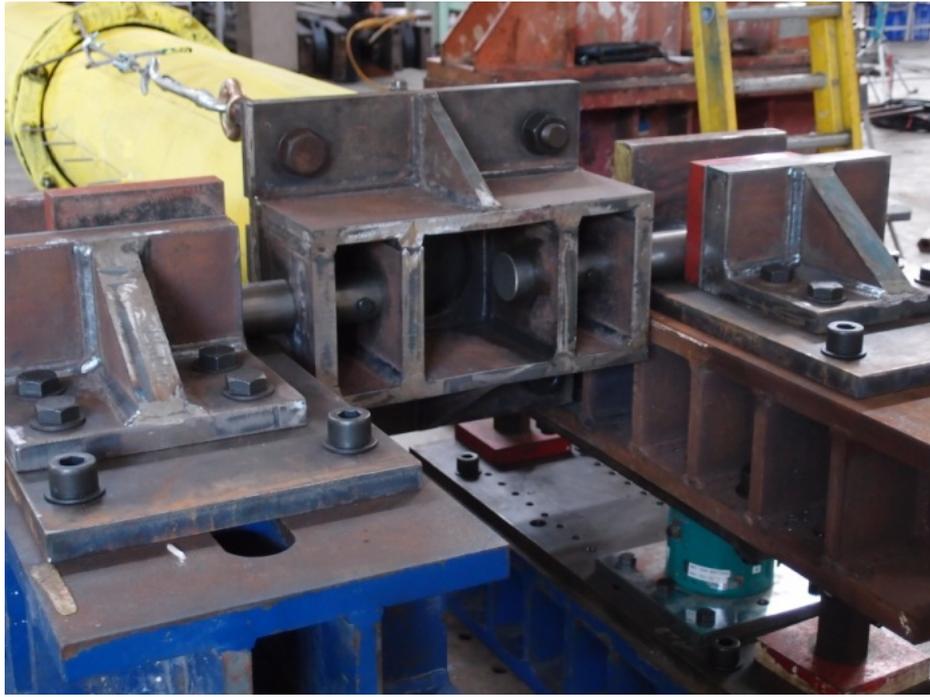


圖 2.41 試體安裝於鉸支承之情形

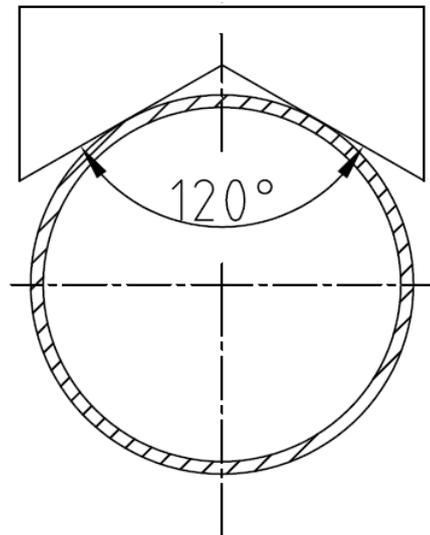


圖 2.42 四點彎矩試驗施力點之 V 型開口治具

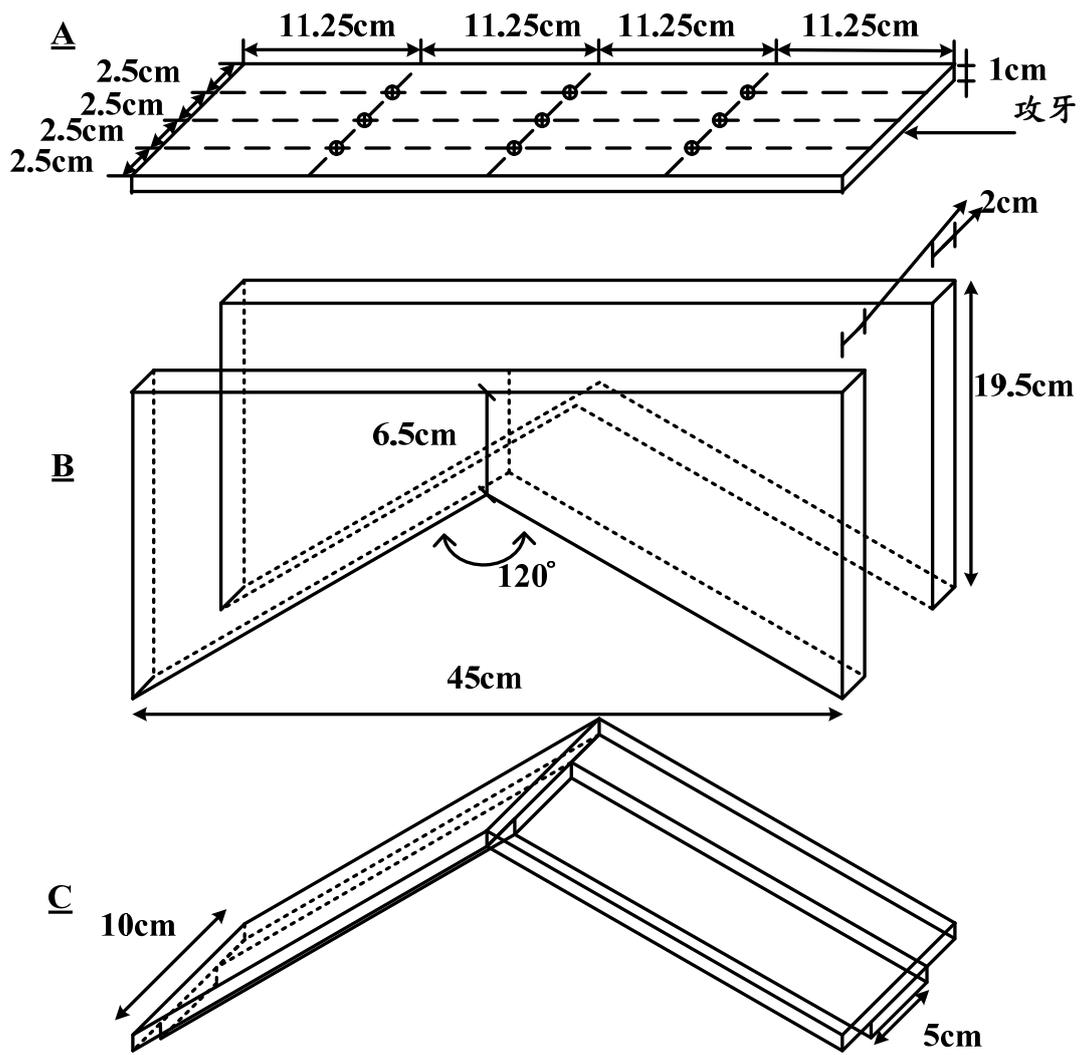


圖 2.43 L 型鋼座詳細尺寸

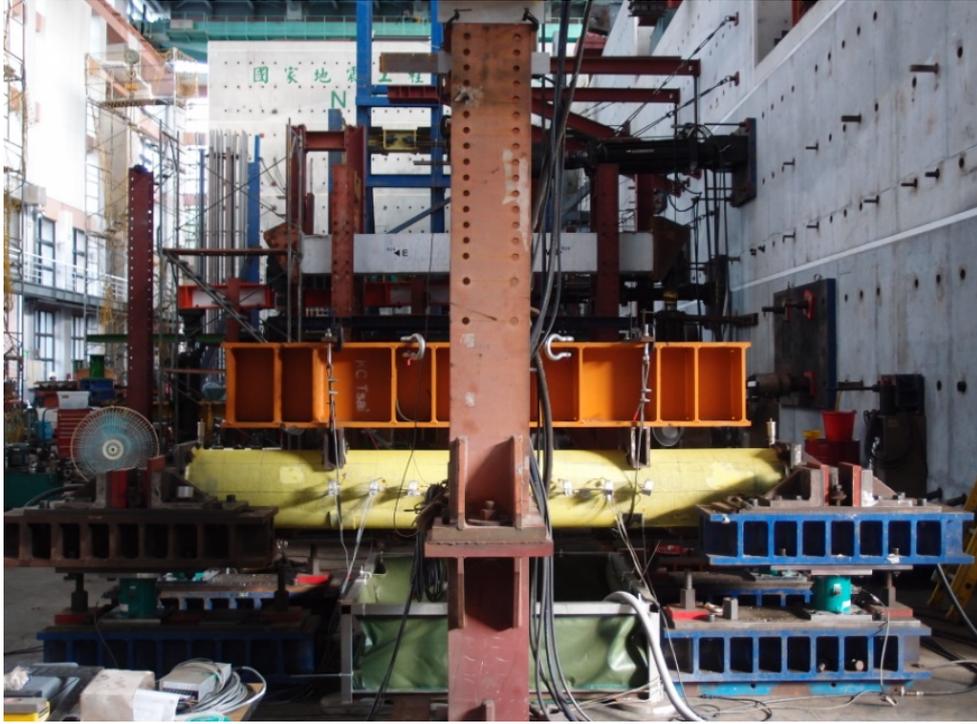


圖 2.44 K 型試體撓曲試驗組立

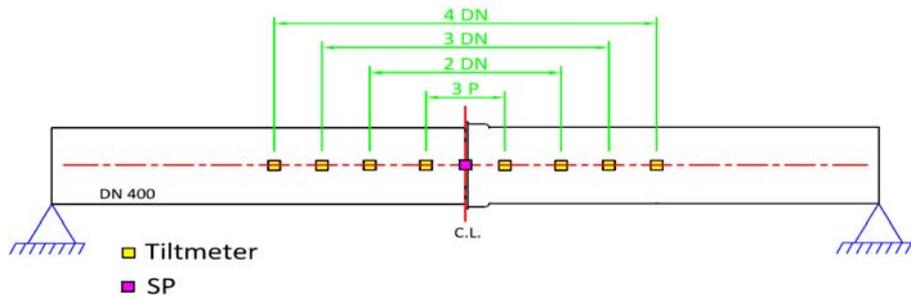


圖 2.45 撓曲試驗角度計配置示意圖(試體北側)

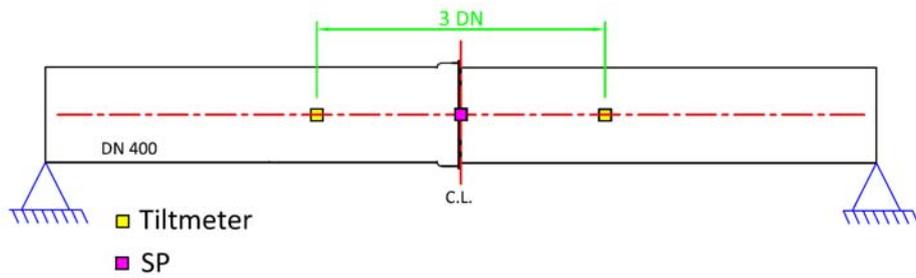


圖 2.46 撓曲試驗角度計配置示意圖(試體南側)

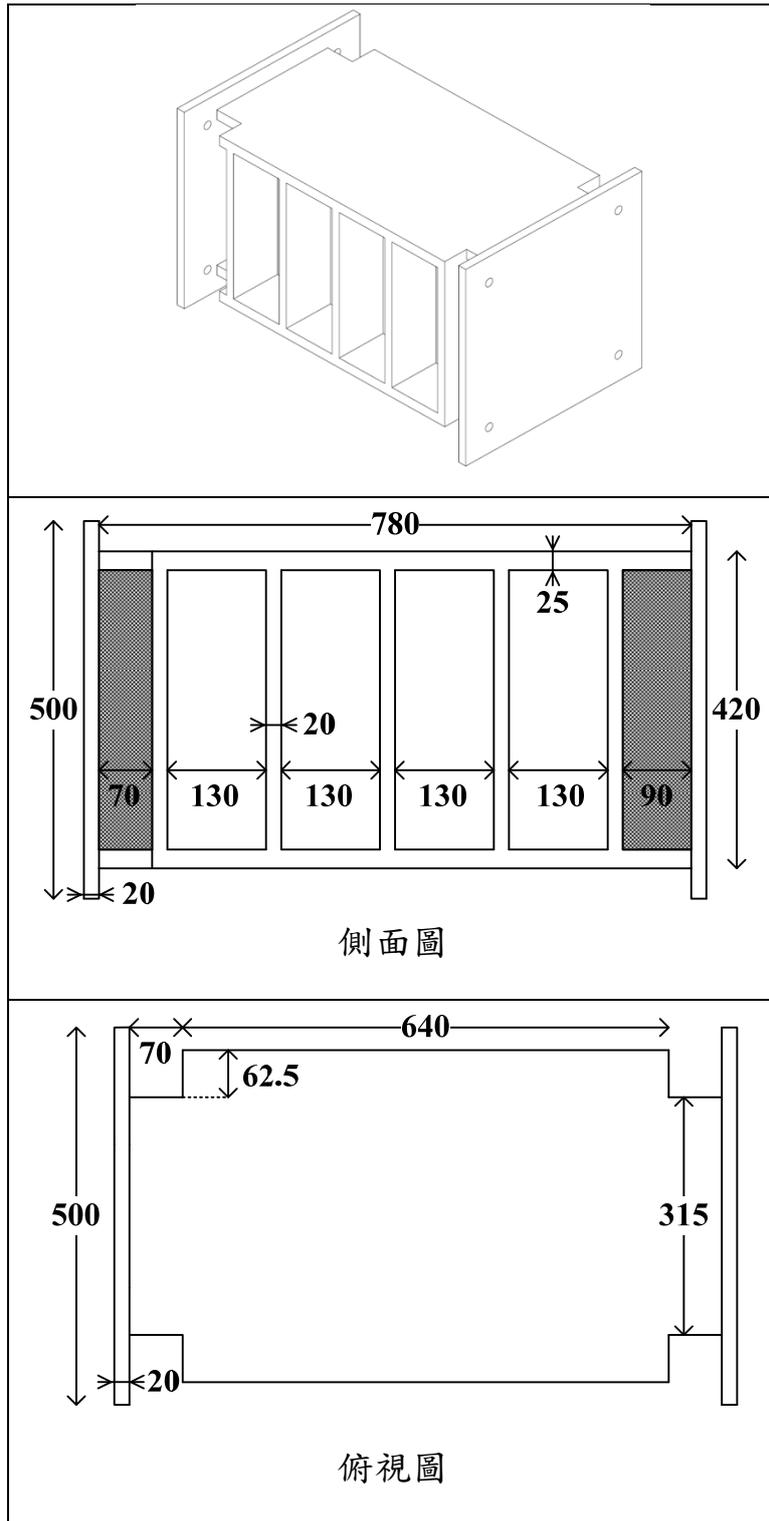


圖 2.47 撓曲試驗所用轉接鋼梁

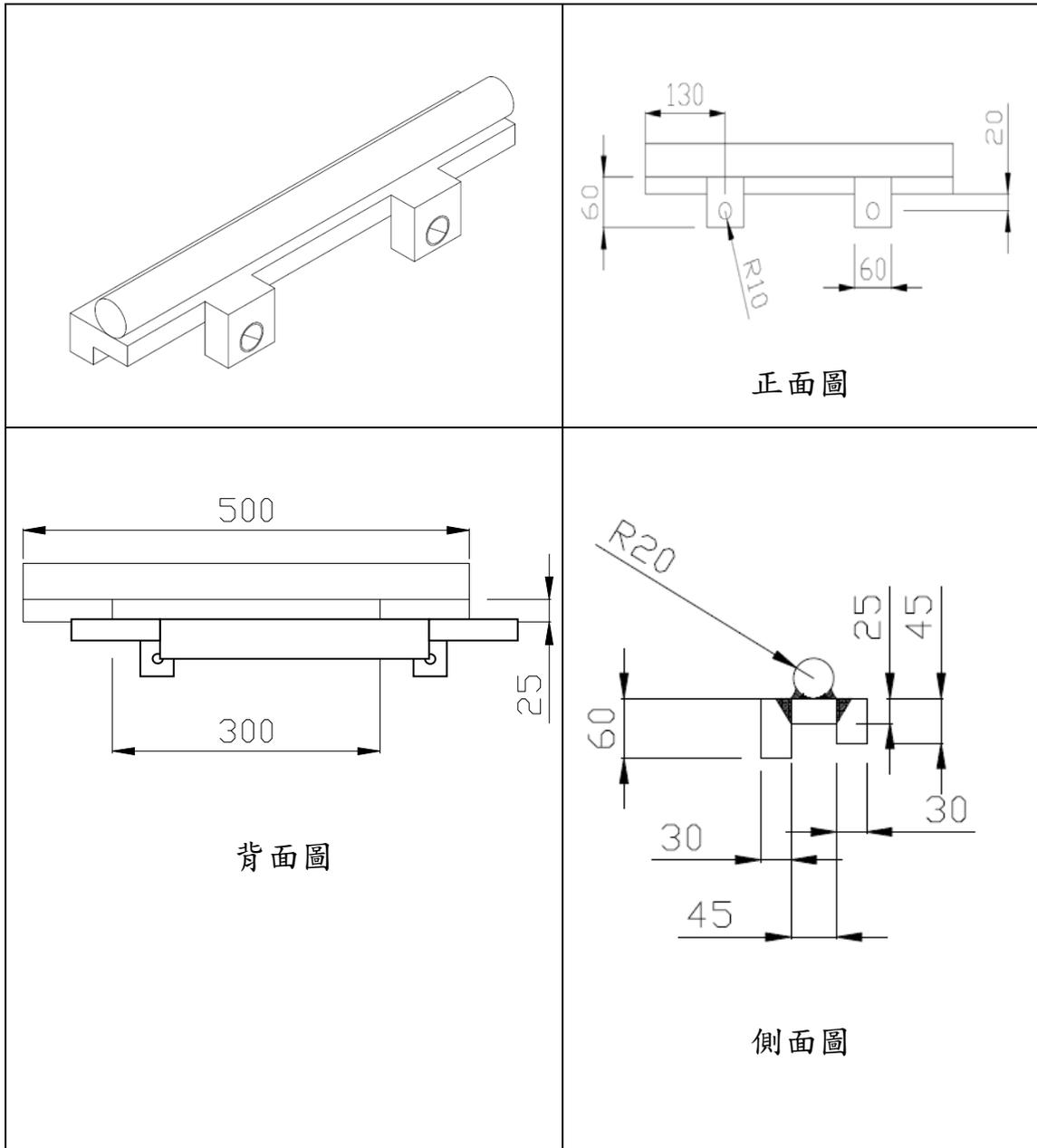


圖 2.48 撓曲試驗施力點裝置

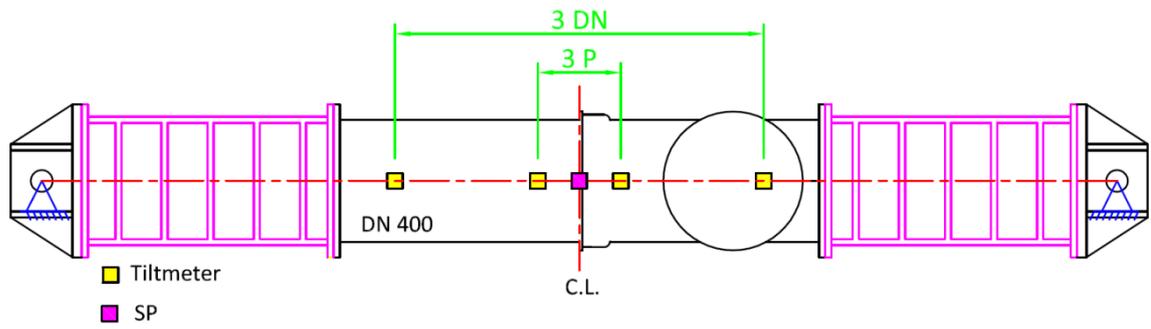


圖 2.49 A 型試體撓曲試驗角度計配置示意圖(試體南側)

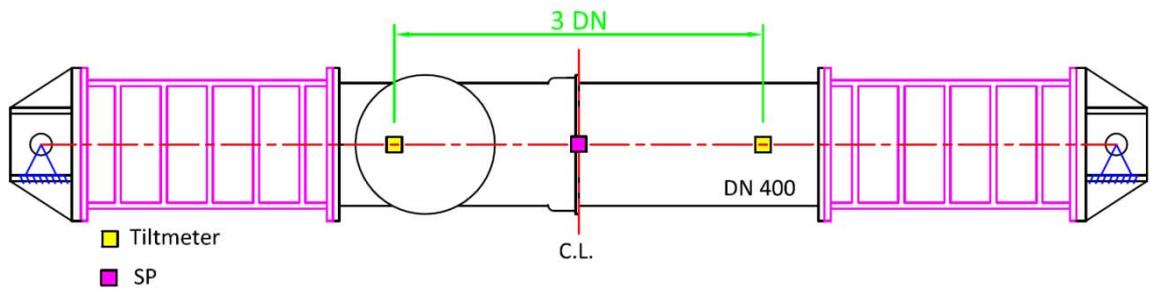


圖 2.50 A 型試體撓曲試驗角度計配置示意圖(試體北側)

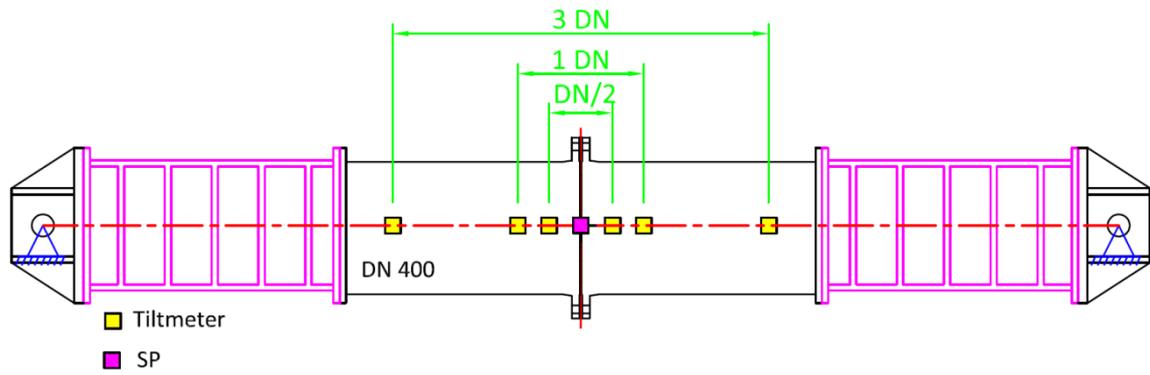


圖 2.51 平口管試體撓曲試驗角度計配置示意圖(試體南側)

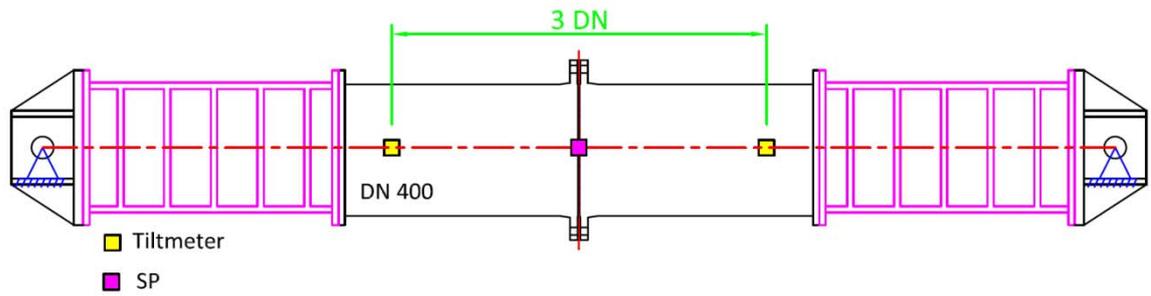


圖 2.52 平口管試體撓曲試驗角度計配置示意圖(試體北側)

第三章 試驗結果分析與量測觀察

本文主旨為對於延性鑄鐵管以台灣常用接頭對接，在管內打入水壓進行軸向抗拉、軸向抗壓以及撓曲試驗，進而取得接頭之廣義力與廣義位移之關係曲線，試驗結果皆來自水利署報告[33]和台北自來水事業處報告[34]，最後透過力與位移之曲線，建立管線數值模型之接頭非線性鉸。

3.1 變形容量

根據全程記錄所得之試體軸力-位移曲線，或是彎矩-轉角曲線，當試驗結果為強度(軸拉力、軸壓力或彎矩)可達峰值，並且下降至 0.8 倍峰值以下時，依圖 3.1 或圖 3.2 之標示，取得試體之變形容量點 (deformation capacity point)；當強度未達峰值，或是強度達峰值但未下降至其 0.8 倍，則分別依圖 3.3、圖 3.4 之標示，取得試體之變形容量點。圖中， Δ_{leak} 與 Θ_{leak} 分別為試體失效時對應之軸拉(軸壓)位移與撓曲轉角， P_{max} 與 M_{max} 分別為軸拉(軸壓)力與彎矩之峰值。定義 (δ, F) 、 (θ, M) 為變形容量點對應之試體變形容量與軸力(彎矩)值。

3.2 標稱管長變形容量之計算

ISO 16134[27]之自來水管材耐震分級，係針對標稱管長 L 之延性鑄鐵直管，依其變形容量而進行分級。因此，當試體長度不及標稱管長時，標稱管長之受測管材變形容量計算公式規定如下。

3.2.1 軸向變形容量

$$\Delta = \delta + F \cdot (L - L') / EA \quad (3.2.1)$$

其中

Δ ：標稱管長之軸向變形容量

δ ：變形容量點對應之試體整體軸向伸長(或壓縮)量

F ：變形容量點對應之軸力

L ：延性鑄鐵管之標稱管長

L' ：試體長度

E ：延性鑄鐵之楊氏模數($167 \times 10^6 \text{ kN} / \text{m}^2$)

A ：延性鑄鐵管之斷面積

3.2.2 轉角變形容量

$$\Theta(\text{rad}) = \theta + M \cdot (L - L') / EI \quad (3.2.2)$$

其中

Θ ：標稱管長之轉角容量

θ ：變形容量點對應之試體(接頭)兩側相對轉角量

M ：變形容量點對應之彎矩

L ：延性鑄鐵管之標稱管長

L' ：接頭兩側轉角量測之距離

E ：延性鑄鐵之楊氏模數($167 \times 10^6 \text{ kN} / \text{m}^2$)

I ：延性鑄鐵管斷面之面積二次矩

3.2.3 耐震分級

軸拉試驗：依 3.2.1 公式計算標稱管長軸向變形容量(伸長量)以及相應伸長率(e)；防脫力(F_{\max})訂為試驗過程所記錄之最大軸拉力。

軸壓試驗：依 3.2.1 公式計算標稱管長軸向變形容量(壓縮量)以及相應壓縮率(e)。

撓曲試驗：依 3.2.2 公式計算標稱管長之接頭轉角容量(Θ)。依 ISO 16134[27]進行受測管材之耐震分級，參考表 3.1 伸長/壓縮率、接頭轉角容量之計算公式如下：

$$e = (\Delta / L) \times 100\% \quad (3.2.3)$$

$$\Theta(\text{deg}) = \Theta(\text{rad}) \cdot 180^\circ / \pi \quad (3.2.4)$$

3.3 K 型延性鑄鐵管

3.3.1. 軸拉試驗

軸拉試驗共執行兩支試體，試體一編號為 DIP(K)400-T1，代表延性鑄鐵管(DIP)、K 型接頭、標稱管徑 400 mm、軸拉試驗(Tension Testing)之第一支試體；同理，試體二編號為 DIP(K)400-T2。延性鑄鐵管體降伏強度為 2899 kN，接合長度為 110 mm，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(K)400-T1 之軸力與位移關係，如圖 3.5 所示，接頭相對位移與試體位移相近，代表軸拉試驗的位移容量皆由接頭提供。最大軸拉力(防脫力)為 45.24 kN，為管體降伏強度之 1.56%，對應之致動器位移為 45.53 mm，為接合長度之 41.39%，如符號▲所示，拉力強度遠小於管體降伏強度。於致動器執行至接合長度 110 mm 時，並無任何水滲出，但在 111.45 mm 時(接合長度之 101.32%)，試體西北向開始產生噴漏情形，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，軸拉力為 1.64 kN(管體降伏強度之 0%)，如符號●所示，變形容量即為接合長度。試驗終止時之情形如圖 3.6 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈上有少許破壞，插口端之柏油有印壓痕跡，其餘無明顯破壞，如圖 3.7 所示。

DIP(K)400-T2 之軸力與位移關係，如圖 3.8 所示，接頭相對位移與試體位移相近，代表軸拉試驗的位移容量皆由接頭提供。最大軸拉力(防脫力)為 38.19 kN，為管體降伏強度之 1.32%，對應之致動器位移為 5.98 mm，為接合長度之 5.43%，如符號▲所示，拉力強度遠小於管體降伏強度。在致動器位移為 109.25 mm 時(接合長度之 99.32%)，試體南向開始產生噴漏情形，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，軸拉力為 0.32 kN(管體降伏強度之 0%)，如符號●所示，變形容量即為接合長度。試驗終止時之情形如圖 3.9 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈上有明顯的破壞，但試體接頭處僅有外層塗柏油處刮痕產生，試體及接頭本身無明顯破壞，如圖 3.10 所示。

3.3.2 軸壓試驗

軸壓試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(K)400-C1 以及 DIP(K)400-C2，其中 C 代表軸壓試驗(Compression Testing)。延性鑄鐵管體降伏強度為 2899 kN，管體降伏位移為 2.96 mm，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(K)400-C1 之軸力與位移關係，如圖 3.11 所示，接頭相對位移與試體位移不相近，代表軸壓試驗的位移容量大部分由管體提供。在致動器位移為 7 mm 時(管體降伏位移之 2.36 倍)，試體頂部以及底部的石膏漆開始脫落。致動器位移為 7.56 mm 時(管體降伏位移之 2.55 倍)，達到最大軸壓力為 2698 kN(管體降伏強度之 93.06%)，如符號▲所示，壓力強度小於管體降伏強度。在致動器位移為 9 mm 時(管體降伏位移之 3.04 倍)，試體底部接近端板處開始挫屈。致動器位移達 17.43 mm 時(管體降伏位移之 5.89 倍)，底部東南向挫屈處破裂漏水，導致水壓維持能力喪失，軸壓力為 1881 kN(管體降伏強度之 64.88%)，如符號●所示，變形容量大於管體降伏位移。試驗終止時之情形如圖 3.12 所示，試體在拆裝後發現挫屈的地方以及承口端多處內襯水泥掉落，K 型接頭外型無損壞，橡膠圈無明顯的破壞，如圖 3.13 所示。

DIP(K)400-C2 之軸力與位移關係，如圖 3.14 所示，接頭相對位移與試體位移不相近，代表軸壓試驗的位移容量大部分由管體提供。在致動器位移為 7 mm 時(管體降伏位移之 2.36 倍)，試體頂部以及底部的石膏漆開始脫落。致動器位移為 9.67mm 時(管體降伏位移之 3.27 倍)，達到最大軸壓力為 2594 kN(管體降伏強度之 89.48%)，如符號▲所示，壓力強度小於管體降伏強度。在致動器位移為 11 mm 時(管體降伏位移之 3.72 倍)，試體底部接近端板處開始挫屈。致動器位移達 17.07 mm 時(管體降伏位移之 5.77 倍)，底部西北向挫屈處破裂漏水，導致水壓維持能力喪失，軸壓力為 1885 kN(管體降伏強度之 65.02%)，如符號●所示，變形容量大於管體降伏位移。試驗終止時之情形如圖 3.15 所示，試體在拆裝後發現挫屈的地方以及承口端多處內襯水泥掉

落，K 型接頭外型無損壞，橡膠圈無明顯的破壞，如圖 3.16 所示。

3.3.3 撓曲試驗

撓曲試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(K)400-B1 以及 DIP(K)400-B2，其中 B 代表撓曲試驗(Bending Testing)。延性鑄鐵管體降伏彎矩為 277 kN-m，管體降伏轉角為 1 度，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。試驗後進行數據分析，主要以 1.5DN 處之角度計共 4 只，量取試體(接頭)兩側之相對轉角量，以 100 噸油壓致動器總施力，配合四點彎矩試驗之各部實際尺寸，推算試體中段之平均彎矩的大小。其餘感測計，則作為各轉角與施力量測的查核之用，屬輔助性質。

DIP(K)400-B1 之致動器力量與位移關係如圖 3.17 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.18 所示。致動器最大力量為 44.76 kN，對應之致動器位移為 84.57 mm，或者對應之相對轉角為 10.14 度(管體降伏轉角之 10.14 倍)，試體平均彎矩為 20.81 kN-m(管體降伏彎矩之 7.51%)，如符號▲所示，彎矩容量小於管體降伏彎矩。致動器位移達 120.37 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 8.31 kN，對應之相對轉角為 14.85 度(管體降伏轉角之 14.85 倍)，試體平均彎矩為 3.86 kN-m(管體降伏彎矩之 1.39%)，如符號●所示，轉角容量大於管體降伏轉角。試驗終止時之情形如圖 3.19 所示，試體在拆裝後發現橡膠圈上有明顯的破壞，插口端底部內襯水泥掉落，如圖 3.20 所示。

DIP(K)400-B2 之致動器力量與位移關係如圖 3.21 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.22 所示。致動器最大力量為 60.84 kN，對應之致動器位移為 117.37 mm，或者對應之相對轉角為 14.20 度(管體降伏轉角之 14.2 倍)，試體平均彎矩為 28.29 kN-m(管體降伏彎矩之 10.21%)，如符號▲所示，彎矩容量小於管體降伏彎矩。致動器位移達 139.23 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 14.25 kN，對應之相對轉角為 17.18 度(管體降伏轉角之 17.18 倍)，

平均彎矩為 5.90 kN-m(管體降伏彎矩之 2.13%)，如符號●所示，轉角容量大於管體降伏轉角。試驗終止時之情形如圖 3.23 所示，試體在拆裝後發現橡膠圈上有明顯的破壞，插口端底部內襯水泥掉落，如圖 3.24 所示。

3.3.4 試驗結果彙整與耐震分級

就 K 型接頭延性鑄鐵管之試驗，彙整試驗結果，並進行耐震分級。首先，根據以上試驗結果，可以得到各試體之峰值強度、失效變形、變形容量點等數據資料，如表 3.2 所列。

應用以上各試體之變形容量點，可以計算標稱管長(6m)之管材變形容量如表 3.3 所列，其中試體之斷面積為 $A = 9.20 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ，面積二次矩為 $I = 201.7 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 。

經比對各試體標稱管長變形容量與 ISO 16134 耐震分級規定，最後得到各試體的耐震分級如表 3.4 所列。由此，可推定 DN400 K 型接頭延性鑄鐵管之耐震性能：軸向拉伸變形容量為「S-1 等級」、軸向壓縮變形容量為「S-3 等級」、防脫力為「D 等級」、接頭轉角容量為「M-2 等級」。

3.3.5 管材破壞模式與綜合性能評價

K 型接頭延性鑄鐵管係由鑄鐵壓圈逼緊橡膠圈，作為承口端及插口端之界面，以達接合及止水之功效，故屬柔性接頭。接頭之拉脫力，係由預壓之橡膠圈及插口端之外殼，兩者界面之摩擦力所形成，故其強度甚低，遠低於管體之降伏強度。因此，在軸拉試驗之過程中，管體並無任何損壞。接頭之水密性良好，軸拉位移達接頭之接合長度，始漏水。試驗結束後，拆卸試體，僅發現橡膠圈有少許損壞，而插口端外殼之柏油有刮痕。

在試體之安裝時，插口端之前緣及承口端之承座，在管軸方向會有些許間隙，當軸壓位移達此間隙後，插口端之前緣與承口端之承座開始接觸，試體之軸壓力陡升，由於管體之徑厚比不小，且內部有水

壓，故隨著軸壓力之上升，管體向外挫屈越趨明顯。挫屈發展後，變形集中於局部挫屈處，軸壓強度不再上升，而下降之趨勢，隨挫屈之發展，越趨嚴重，最後於挫屈處產生縱向裂縫而漏水。試驗結束後，拆卸試體，發現於局部挫屈及承口端，多處內襯水泥掉落，而接頭及其橡膠圈皆無明顯損壞。試體之軸壓强度高，而變形容量則不大。

試體之彎矩行為，壓力側由插口端與承口端之承壓所形成，拉力側則由橡膠圈與插口端之界面摩擦力所形成。因此，試體之彎矩強度甚低，遠低於管體之降伏強度，故管體完好，無任何損壞。試體之水密性良好，直至橡膠圈與插口端之界面脫離，始漏水。於試驗結束後，拆卸試體，發現橡膠圈之拉力側(下側)沿環向斷裂，插口端拉力側之內襯水泥掉落。

K 型接頭延性鑄鐵管雖然軸拉變形容量及撓曲轉角容量表現良好，但若局部之軸拉位移或撓曲轉角的需求稍高，由於其軸拉強度及彎矩強度過低，無法有效傳遞至鄰近管段，共同承擔軸拉位移或撓曲轉角的需求，變形反而很容易集中於單一管段，導致漏水。綜言之，K 型接頭之水密性良好，但不具防脫功能，無法有效讓鄰近管段共同承擔軸拉位移及撓曲轉角之需求，不宜應用於地震活躍及地盤軟弱之地區。

3.4 延性螺壓式三承口十字管(A 型管)

3.4.1 軸拉試驗

軸拉試驗共執行二支試體，試體一編號為 DIP(A)400-T1，代表延性鑄鐵管(DIP)、A 型接頭、標稱管徑 400 mm、軸拉試驗(Tension Testing)之第一支試體，試體二編號為 DIP(A)400-T2。延性鑄鐵十字管體降伏強度為 5702kN，直管體降伏強度為 2899 kN，接合長度為 90 mm，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(A)400-T1 之軸力與位移關係，如圖 3.25 所示，接頭相對位移與試體位移相近，代表軸拉試驗的位移容量皆由接頭提供。最大軸

拉力(防脫力)為 37.1 kN，為直管體降伏強度之 1.28%，對應之致動器位移為 3.59 mm，為接合長度之 3.99%，如符號▲所示，拉力強度小於直管體降伏強度。於致動器執行至接合長度 90 mm 時，並無任何水滲出，但在 90.35 mm 時(接合長度之 100.39%)，試體北向開始產生噴漏情形，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，軸拉力為 3.15 kN(直管體降伏強度之 0%)，如符號●所示，變形容量即為接合長度。試驗終止時之情形如圖 3.26 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈嚴重破壞，插口端之柏油有印壓痕跡，其餘無明顯破壞，如圖 3.27 所示。

DIP(A)400-T2 之軸力與位移關係，如圖 3.28 所示，接頭相對位移與試體位移相近，代表軸拉試驗的位移容量皆由接頭提供。最大軸拉力(防脫力)為 41.95 kN，為直管體降伏強度之 1.44%，對應之致動器位移為 3.49 mm，為接合長度之 3.88%如符號▲所示，拉力強度小於管體降伏強度。試驗中致動器位移於 56mm 時，試體的東側開始有水流出，位移於 56 mm 至 74 mm 之間管體的北側及西側陸續的噴出水如圖 3.29 所示，76.2 mm 時已經無法維持水壓(接合長度之 84.66%)，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，軸拉力為 3.6 kN(直管體降伏強度之 0%)，如符號●所示，變形容量未達到接合長度。試驗終止時之情形如圖 3.30 所示，試體在拆裝後，橡膠圈及接頭並無明顯破壞詳見圖 3.31。

3.4.2 軸壓試驗

軸壓試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(A)400-C1 以及 DIP(A)400-C2，其中 C 代表軸壓試驗(Compression Testing)。延性鑄鐵十字管體降伏強度為 5702kN，直管體降伏強度為 2899kN，降伏位移為 2.96mm，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(A)400-C1 之軸力與位移關係，如圖 3.32 所示，接頭提供的位移大於管體提供的位移，且管體沒有挫屈。致動器位移為 12.45 mm 時(管體降伏位移之 4.21 倍)，達到最大軸壓力為 2815 kN(直管體降伏強度之 97.1%)，如符號▲所示，壓力強度小於管體降伏強度。試驗中

致動器位移於 20mm 東北側始微漏水如圖 3.33 所示，當致動器位移達 23.01 mm 時(管體降伏位移之 7.77 倍)，接頭處東北側開始噴水並無法持壓，如圖 3.34 所示，此時軸壓力為 615 kN(直管體降伏強度之 21.21%)，如符號●所示，變形容量大於管體降伏位移。試驗終止時之情形如圖 3.35 所示，試體在拆裝後發現接口端嚴重的破壞，鑄鐵管壁彎曲變形造成多處內襯水泥掉落，A 型接頭外型無損壞，但於管內北側發現有裂縫形成，橡膠圈無明顯的破壞。

DIP(A)400-C2 之試驗，於致動器位移至 2 mm 時於東南側始噴漏，3 mm 時已經無法控制水壓。如此試驗情況與 DIP(A)400-C1 大為不同，為排除因組裝不當導致試驗結果不同之可能，乃中止試驗，拆卸試體觀察，確認接頭、直管及橡膠圈均為正常情況，再將試體轉 180 度，並換上新的橡膠圈，重新組裝試體進行試驗。

因此 DIP(A)400-C2 於重新組裝後，進行了第二次的試驗，其軸力與位移關係如圖 3.36 所示。試驗進行至 1 mm 時，東側即開始滲漏，如圖 3.37 所示，2.09 mm 時開始噴水，如圖 3.38 所示，此時軸壓力為 96.15 kN，如符號●所示。本次試驗結果與第一次大致相同。由於 DIP(A)400-C1 試驗執行至 28mm，因此為觀察管接頭後續的行為是否與 DIP(A)400-C1 相同，乃繼續進行施載，並在 6mm 及以後開始每 2mm 重新注水，觀察其滲漏情況。後續的漏水情況依舊，漏水方位以接頭北側最嚴重，再漸漸往東側移動。試體在拆裝後，發現同於 DIP(A)400-C1，接口端嚴重的破壞，鑄鐵管壁彎曲變形造成多處內襯水泥掉落，A 型接頭外型無損壞，橡膠圈無明顯的破壞，試驗終止時之情形如圖 3.39 所示。

3.4.3 撓曲試驗

撓曲試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(A)400-B1 以及 DIP(A)400-B2，其中 B 代表撓曲試驗(Bending Testing)。延性鑄鐵十字管體降伏彎矩為 314kN-m，直管體降伏彎矩為 277kN-m，管體降伏轉角為 1 度，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。試驗後進

行數據分析，主要以 1.5DN 處之角度計共 4 只，量取試體(接頭)兩側之相對轉角量，以 100 噸油壓致動器總施力，配合四點彎矩試驗之各部實際尺寸，推算試體中段之平均彎矩的大小。其餘感測計，則作為各轉角與施力量測的查核之用，屬輔助性質。

DIP(A)400-B1 之致動器力量與位移關係如圖 3.40 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.41 所示。致動器最大力量為 20.26 kN，對應之致動器位移為 67.49 mm，或者對應之相對轉角為 7.85 度(管體降伏轉角的 7.85 倍)，試體平均彎矩為 9.62 kN-m(直管體降伏彎矩的 3.47%)，如符號▲所示，彎矩容量小於管體降伏彎矩。致動器位移達 79.56 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 1.65 kN，對應之相對轉角為 9.34 度(管體降伏轉角的 9.34 倍)，試體平均彎矩為 0.78 kN-m(直管體降伏彎矩的 0%)，如符號●所示，轉角容量大於管體降伏轉角。試驗終止時之情形如圖 3.42 所示，試體在拆裝後發現橡膠圈上有明顯的破壞，承口端底部內襯水泥掉落，如圖 3.43 所示。

DIP(A)400-B2 之致動器力量與位移關係如圖 3.44 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.45 所示。致動器最大力量為 9.27 kN，對應之致動器位移為 28.08 mm，或者對應之相對轉角為 3.04 度(管體降伏轉角的 3.04 倍)，試體平均彎矩為 4.40 kN-m(直管體降伏彎矩的 1.59%)，如符號▲所示，彎矩容量小於管體降伏彎矩。致動器位移達 83.93 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 3.96 kN，對應之相對轉角為 9.39 度(管體降伏轉角的 9.39 倍)，試體平均彎矩為 1.88 kN-m(直管體降伏彎矩的 0.68%)，如符號●所示，轉角容量大於管體降伏轉角。試驗終止時之情形如圖 3.46 所示，試體在拆裝後發現橡膠圈上有明顯的破壞，承口端底部內襯水泥掉落，如圖 3.47 所示。

3.4.4 試驗結果彙整與耐震分級

首先，根據以上試驗結果，可以得到各試體之峰值強度、失效變

形、變形容量點等數據資料，如表 3.5 所列。

應用以上各試體之變形容量點，可以計算標稱管長(6m)之管材變形容量如表 3.6 所列，其中試體之斷面積為 $A = 1.81 \times 10^4 \text{ mm}^2$ ，面積二次矩為 $I = 3.84 \times 10^8 \text{ mm}^4$ 。

經比對各試體標稱管長變形容量與 ISO 16134 耐震分級規定，最後得到各試體的耐震分級如表 3.7 所列。由此，可推定 DN400 A 型接頭延性鑄鐵管之耐震性能：軸向拉伸變形容量為「S-3 等級」、軸向壓縮變形容量為「S-3 等級」、防脫力為「D 等級」、接頭轉角容量為「M-3 等級」。

3.4.5 管材破壞模式與綜合性能評價

A 型接頭延性鑄鐵管試體之承口端為十字管，插口端為直管，十字管之管厚二倍於直管。A 型接頭係由鑄鐵壓圈逼緊橡膠圈，作為承口端及插口端之界面，以達接合及止水之功效，故屬柔性接頭。接頭之拉脫力，係由預壓之橡膠圈及插口端之外殼，兩者界面之摩擦力所形成，故其強度甚低，遠低於管體之降伏強度，且達最大強度後，即直線下降，管體因而並無任何損壞。接頭之水密性充分發揮，軸拉位移達接頭之接合長度，始漏水。試驗結束後，拆卸試體，直管之插口端無任何損壞，一試體之橡膠圈沿環向斷裂，另一試體之橡膠圈則無明顯損壞。

試體之軸壓能力，係由直管插口端及十字管承口端之承壓所形成。其中一支試體表現較佳，當插口端之前緣與承口端之承座開始接觸，試體之軸壓力陡升，試體之軸壓强度高，當試體之軸壓力下降至最大軸壓之 20%，始於接頭處漏水，而管體並無挫屈之現象。試驗結束後，拆卸試體，直管之插口端向軸心變形，並插入十字管之承口端，經研判後，直管較薄，軸壓強度較低，遂插入強度較高之十字管，而橡膠圈則無明顯的破壞。另一試體表現欠佳，共進行二次軸壓試驗，二次皆採全新之橡膠圈，二次試驗均發現，接頭之水密性不良，軸壓力尚未達最大強度之 5%，即漏水。

試體之彎矩能力，壓力側由插口端與承口端之承壓所形成，拉力側則由橡膠圈與插口端之界面摩擦力所形成。因此，試體之彎矩強度甚低，遠低於管體之降伏強度，且達最大值後，強度迅速下降，故管體完好，無任何損壞。試體之水密性良好，直至橡膠圈與插口端之界面脫離，始漏水。於試驗結束後，拆卸試體，發現橡膠圈之拉力側(下側)沿環向損壞，直管插口端拉力側之內襯水泥掉落。

綜言之，A 型接頭不具防脫功能，在軸拉力或彎矩作用下，接頭十分容易鬆脫，耐震性能極差。既有管線應加速汰換，不然，亦應加強(與他種直管相接時)接續橡膠圈之正確使用。

3.5 延性螺壓式單突緣短管(平口管)

3.5.1 軸拉試驗

軸拉試驗共執行兩支試體，試體一編號為 DIP(F)400-T1，代表延性鑄鐵管(DIP)、平口(F)接頭、標稱管徑 400 mm、軸拉試驗(Tension Testing)之第一支試體，試體二編號為 DIP(F)400-T2。延性鑄鐵平口管體降伏強度為 5702 kN，管體降伏位移為 2.96 mm，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(F)400-T1 之軸力與位移關係，如圖 3.48 所示。軸拉力達 243.5 kN 時，為管體降伏強度之 4.27%，對應之致動器位移為 0.81 mm，為管體降伏位移的 27.36%，如符號●所示，拉力強度小於管體降伏強度，變形容量小於管體降伏位移，試體東南向開始產生噴漏情形，接頭漏水導致水壓維持能力喪失。試驗終止時之情形如圖 3.49 所示，試體在拆裝後發現橡膠圈上有法蘭接頭印痕一圈，管材本身無明顯破壞，如圖 3.50 所示。

DIP(F)400-T2 之軸力與位移關係，如圖 3.51 所示。軸拉力達 223.4 kN 時，為管體降伏強度之 3.92%，對應之致動器位移為 0.92 mm，為管體降伏位移的 31.08%，如符號●所示，拉力強度小於管體降伏強度，變形容量小於管體降伏位移，試體東南向開始產生噴漏情形，接頭漏

水導致水壓維持能力喪失。試驗終止時之情形如圖 3.52 所示，試體在拆裝後現象與 DIP(F)400-T1 相同，橡膠圈上有法蘭接頭印痕一圈，管材本身無明顯破壞，如圖 3.53 所示。

3.5.2 軸壓試驗

軸壓試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(F)400-C1 以及 DIP(F)400-C2，其中 C 代表軸壓試驗(Compression Testing)。延性鑄鐵平口管體降伏強度為 5702 kN，管體降伏位移為 2.96 mm，下面就各試體之試驗觀察與分析進行說明。

DIP(F)400-C1 之軸力與位移關係，如圖 3.54 所示。在致動器位移為 5 mm 時(管體降伏位移的 1.69 倍)，橡膠圈突出平口管突緣。致動器位移至 17.12 mm 時(管體降伏位移的 5.78 倍)，如符號▲所示，壓力強度小於管體降伏強度，變形容量大於管體降伏位移，致動器出力 4865 kN 已達飽和，此時管體無任何滲漏或破壞情形產生。因此，擬再以反覆載重試驗求證管體的特性，由最大力逐漸下降至 0 kN，如此反覆進行。其中，第一次降至 0 kN 時，管體南側開始漏水。試驗終止時之情形如圖 3.55 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈嚴重破壞，於法蘭突出處將橡膠圈切斷，西南側螺栓處橡膠圈完全斷裂，但管材本身無明顯破壞無明顯破壞，如圖 3.56 所示。

DIP(F)400-C2 之軸力與位移關係，如圖 3.57 所示。在致動器位移為 5 mm 時(管體降伏位移的 1.69 倍)，橡膠圈亦突出平口管突緣。致動器位移至 17.33 mm 時(管體降伏位移的 5.78 倍)，如符號▲所示，壓力強度小於管體降伏強度，變形容量大於管體降伏位移，致動器出力 4770 kN 已達飽和，此時管體無任何滲漏或破壞情形產生。再降至 0 kN 時，管體南側開始漏水。試驗終止時之情形如圖 3.58 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈嚴重破壞，於法蘭突出處將橡膠圈切斷，東北側螺栓處橡膠圈完全斷裂，但管材本身無明顯破壞無明顯破壞，如圖 3.59 所示。

3.5.3 撓曲試驗

撓曲試驗亦執行兩支試體，編號為 DIP(F)400-B1 以及 DIP(F)400-B2，其中 B 代表撓曲試驗(Bending Testing)。延性鑄鐵管體降伏彎矩為 314kN-m，管體降伏轉角為 1 度，以下就各試體之試驗觀察與分析進行說明。試驗後進行數據分析，主要以 1.5DN 處之角度計共 4 只，量取試體(接頭)兩側之相對轉角量，以 100 噸油壓致動器總施力，配合四點彎矩試驗之各部實際尺寸，推算試體中段之均勻彎矩的大小。其餘感測計，則作為各轉角與施力量測的查核之用，屬輔助性質。

DIP(F)400-B1 之致動器力量與位移關係如圖 3.60 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.61 所示。致動器位移達 2.28 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 39.15 kN，如符號●所示，彎矩強度小於管體降伏彎矩，轉角容量小於管體降伏轉角，或者對應之相對轉角為 0.06 度(管體降伏轉角的 6%)，試體平均彎矩為 18.89 kN-m(管體降伏彎矩的 6.02%)。試驗終止時之情形如圖 3.62 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈上有法蘭接頭印痕一圈，管材本身無明顯破壞，如圖 3.63 所示。

DIP(F)400-B2 之致動器力量與位移關係如圖 3.64 所示，試體平均彎矩與相對平均轉角關係如圖 3.65 所示。致動器位移達 4.77 mm 時，接頭漏水導致水壓維持能力喪失，致動器力量為 97.17 kN，如符號●所示，彎矩強度小於管體降伏彎矩，轉角容量小於管體降伏轉角，或者對應之相對轉角為 0.14 度(管體降伏轉角的 14%)，平均彎矩為 44.23 kN-m(管體降伏彎矩的 14.09%)。試驗終止時之情形如圖 3.66 所示，試體在拆裝後發現於橡膠圈上有法蘭接頭印痕一圈，管材本身無明顯破壞，如圖 3.67 所示。

3.5.4 試驗結果彙整與耐震分級

首先，根據以上試驗結果，可以得到各試體之峰值強度、失效變

形、變形容量點等數據資料，如表 3.8 所列。其中，軸壓試驗已用盡 500 噸萬能試驗機之出力極限，試體仍未達漏水或破壞之狀態。

應用以上各試體之變形容量點，可以計算標稱管長(750mm)之管材變形容量如表 3.9 所列。

經比對各試體標稱管長變形容量與 ISO 16134 耐震分級規定，最後得到各試體的耐震分級如表 3.10 所列。其中，由於平口管試體均由二全等管件所組成，因此標稱管長變形容量恰為試體變形容量之半。由此，可推定 DN400 平口管之耐震性能：軸向拉伸變形容量為「S-3 等級」、防脫力為「D 等級」、接頭轉角容量為「M-3 等級」。至於軸向壓縮變形容量，則因試驗已用盡 500 噸萬能試驗機之出力極限，試體仍未達漏水或破壞之狀態，因此無法判定。

3.5.5 管材破壞模式與性能評價

延性鑄鐵平口管試體之接頭係由兩支單突緣短管對接，其界面設有橡膠墊圈，屬剛性接頭。試體之軸拉能力，係由對接之螺栓提供強度，並由橡膠墊圈提供止水之功效。試體於微小軸拉位移下，即漏水，管體、接頭及其螺栓均無任何損壞。試驗結束後，拆卸試體，橡膠墊圈有一圈壓痕，經研判後，橡膠墊圈太薄，且回彈能力差，一經拉伸，即告漏水。

試體之軸壓能力，係由二對接法蘭所形成，因為管體較厚，試體之軸壓强度高，於試驗設備達最大出力時，試體仍未損壞或漏水。但是，軸壓力全部卸載後，即漏水。試驗結束後，拆卸試體，橡膠墊圈嚴重損壞，於法蘭突出處及螺栓處，墊圈切斷，經研判後，橡膠墊圈受壓後損壞，回彈能力喪失，一經卸載，即告漏水。

試體之彎矩能力，係由接合之螺栓提供強度，而由橡膠墊圈提供止水之功效。在微小之彎矩及轉角下，接頭之拉力側（下側），即漏水，而管體、接頭及其螺栓均完好無損。試驗結束後，拆卸試體，橡膠墊圈有一圈壓痕，經研判後，橡膠墊圈太薄，且回彈能力差，一經撓曲，拉力側即告漏水。

綜言之，平口管變形容量極低，實不宜單獨作為輸配水管線之使用，若用於制水閘前後，或是淨水廠各單元間接續使用，則宜留意各場址鄰近範圍是否有重型車載問題，或是長期性地盤潛變問題，加強此類接頭之密合度檢查，適時予以調整，或更新為可撓式接管。

3.6 含水試驗與不含水試驗之比較

3.6.1 拉力試驗比較

不含水試驗與含水試驗之軸拉力與位移關係比較如圖 3.68 以及圖 3.69 所示。其不含水試驗之結果，參考國家地震工程研究中心報告[10]，軸拉試驗接頭之拉脫力，係由預壓之橡膠圈及插口端之外殼，兩者界面之摩擦力所形成，在含水試驗拉拔的過程中，管體內的水壓擠壓推動橡膠圈導致管體與膠圈之界面的摩擦力降低許多，進而影響試體強度降低，含水試驗力量峰值為不含水試驗的 0.5 倍。

3.6.2 壓力試驗比較

不含水試驗與含水試驗之軸壓力與位移關係比較如圖 3.70 以及圖 3.71 所示。含水試驗因其內部有水壓，故隨著軸壓力之上升，水壓推擠導致管體向外挫屈越趨明顯。與不含水試驗比較下，在線性階段，含水試驗的韌性較差，在非線性階段，雖然含水試驗的挫屈發展沒有提早發生，但是管體的最大強度因為水壓的推擠有明顯降低，挫屈發展後，變形集中於局部挫屈處，軸壓強度不再上升，而下降之趨勢，隨挫屈之發展，越趨嚴重，最後於挫屈處產生縱向裂縫而漏水，含水試驗力量峰值約為不含水試驗的 0.8 倍。

3.6.3 撓曲試驗比較

不含水試驗與含水試驗之彎矩與轉角關係比較如圖 3.72 以及圖 3.73 所示。試體之彎矩行為，壓力側由插口端與承口端之承壓所形成，拉力側則由橡膠圈與插口端之界面摩擦力所形成。含水試驗的拉力側由於水壓以及水重的影響，導致橡膠圈與插口端之間的摩擦力降低，

進而影響試體強度降低，並且使橡膠圈更快脫離插口端而漏水，含水試驗平均彎矩峰值遠低於不含水試驗。

3.7 延性鑄鐵管 K 型接頭非線性鉸建立

取得 K 型延性鑄鐵管構件廣義力與廣義位移關係之後，接下來建立延性鑄鐵管 K 型接頭的非線性鉸，本節將利用 K 型柔性接頭之廣義力與廣義位移之關係曲線建立接頭軸拉力非線性鉸以及接頭撓曲非線性鉸，因為抗壓試驗的破壞模式較為複雜，所以接頭壓力非線性鉸將會透過第四章的數值模擬配合本章試驗結果來建立。

3.7.1 K 型接頭之拉力非線性鉸建立

管線與斷層夾角於各種角度皆有可能因軸向變形而受拉力或壓力，因此以側推分析探討管線與斷層夾角時，有必要建立軸力非線性鉸，本小節將以實驗所得之數據建立接頭軸拉力非線性鉸。

接頭軸拉力非線性鉸如圖 3.74 所示，AB 段表示全斷面之應力未達降伏應力，因此軸拉力與位移關係為線性，BC 段表示全斷面應力已達降伏應力，故此階段之接頭軸拉力設定為管體降伏軸力 P_y 的 0.01 倍且勁度為零， P_y 為管體的降伏軸力 2270 kN，符號 P 則表示 K 型接頭試體的接合長度 0.11 公尺。由於試體位移達到接合長度即破壞並漏水，故 D 點取 0.9P 為保守估計值，軸拉力非線性鉸與軸拉試驗比較如圖 3.75 以及圖 3.76 所示。

3.7.2 K 型接頭之撓曲非線性鉸建立

接頭彎矩非線性鉸如圖 3.77 所示，建立方式參考管體彎矩非線性鉸三線段的模式，B 點降伏彎曲角度為 $0.225 \frac{P}{D}$ ，符號 P 表示 K 型接頭試體的接合長度 0.11m，符號 D 表示管徑扣除管厚的值 0.4116 m，降伏彎矩為 $0.04M_y$ ， M_y 為管體的降伏彎矩 277 kN-m，C 點臨界彎曲弧度為 $0.675 \frac{P}{D}$ ，臨界彎矩為 $0.06M_y$ ，D 點極限彎曲弧度為 $0.9 \frac{P}{D}$ ，彎

矩非線性鉸與彎矩試驗比較如圖 3.78 以及圖 3.79 所示，考量其變異性影響，所得之彎矩與角度是趨向保守的。

表 3.1 ISO 16134 管材耐震分級[27]

性能參數	等級	性能要求
伸長/壓縮率(e)	S-1	$e \geq \pm 1\%$
	S-2	$\pm 0.5\% \leq e < \pm 1\%$
	S-3	$e < \pm 0.5\%$
防脫力(F_{\max})	A	$F_{\max} \geq 3d$ kN
	B	$1.5d$ kN $\leq F_{\max} < 3d$ kN
	C	$0.75d$ kN $\leq F_{\max} < 1.5d$ kN
	D	$F_{\max} < 0.75d$ kN
接頭轉角容量(Θ)	M-1	$\Theta \geq \pm 15^\circ$
	M-2	$\pm 7.5^\circ \leq \Theta < \pm 15^\circ$
	M-3	$\Theta < \pm 7.5^\circ$
L : 標稱管長(mm) d : 標稱管徑(mm)		

表 3.2 K 型接頭延性鑄鐵管試驗數據彙整表[33]

軸拉試驗	DIP(K)400-T1	DIP(K)400-T2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	45.24	38.19
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	111.45	109.25
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	(65.42, 36.19)	(61.31, 30.55)
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	(89.16, 16.03)	(87.40, 13.11)
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	(65.42, 36.19)	(61.31, 30.55)
軸壓試驗	DIP(K)400-C1	DIP(K)400-C2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	2698	2594
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	17.43	17.07
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	(16.14, 2158)	(16.46, 2075)
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	(13.94, 2445)	(13.66, 2310)
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	(13.94, 2445)	(13.66, 2310)
撓曲試驗	DIP(K)400-B1	DIP(K)400-B2
▲ 峰值強度 M_{max} (kN-m)	20.81	28.29
● 失效變形 Θ_{leak} (deg)	14.85	17.18
Δ ($\Theta_{0.8M_{max}}$, $0.8M_{max}$) (deg, kN-m)	(11.38, 16.65)	(14.97, 22.63)
○ ($0.8\Theta_{leak}$, $M_{0.8\Theta_{leak}}$) (deg, kN-m)	(11.88, 14.99)	(13.74, 27.21)
變形容量點(θ , M) (deg, kN-m)	(11.38, 16.65)	(13.74, 27.21)

表 3.3 K 型接頭延性鑄鐵管標稱管長之管材變形容量[33]

軸拉試驗	DIP(K)400-T1	DIP(K)400-T2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	65.42	61.31
軸壓試驗	DIP(K)400-C1	DIP(K)400-C2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	20.66	19.82
撓曲試驗	DIP(K)400-B1	DIP(L)400-B2
標稱管長之相對轉角(degree)	11.38	13.74

表 3.4 K 型接頭延性鑄鐵管之 ISO 16134 耐震分級[33]

參數	ISO16134 耐震等級	參考值	軸拉試驗		軸壓試驗		撓曲試驗	
			T1	T2	C1	C2	B1	B2
軸向變形容量 (mm)	S-1	≥60	65.42	61.31				
	S-2	30~60						
	S-3	<30			20.66	19.82		
防脫力 (kN)	A	≥1200			2698*	2594*		
	B	600~1200						
	C	300~600						
	D	<350	45.24	38.19				
接頭轉角容量 (θ)	M-1	≥15°						
	M-2	7.5°~15°					11.38	13.74
	M-3	<7.5°						
*ISO 16134 未定義軸壓力之耐震分級								

表 3.5 A 型接頭延性鑄鐵管試驗數據彙整表[34]

軸拉試驗	DIP(A)400-T1	DIP(A)400-T2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	37.1	41.95
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	90.35	76.2
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	(9.28, 29.68)	(5.19, 33.56)
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	(72.28, 10.35)	(60.96, 4.45)
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	(9.28, 29.68)	(5.19, 33.56)
軸壓試驗	DIP(A)400-C1	DIP(A)400-C2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	2815	-
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	23.01	2.09
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	(16.54, 2252)	-
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	(18.41, 1398)	(1.67, 68.75)
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	(16.54, 2252)	(1.67, 68.75)
撓曲試驗	DIP(A)400-B1	DIP(A)400-B2
▲ 峰值強度 M_{max} (kN-m)	9.62	4.4
● 失效變形 Θ_{leak} (deg)	9.34	9.39
Δ ($\Theta_{0.8M_{max}}$, $0.8M_{max}$) (deg, kN-m)	(8.7, 7.69)	(4.47, 3.52)
○ ($0.8\Theta_{leak}$, $M_{0.8\Theta_{leak}}$) (deg, kN-m)	(7.47, 9.39)	(7.51, 1.38)
變形容量點(θ , M) (deg, kN-m)	(7.47, 9.39)	(4.47, 3.52)

表 3.6 A 型接頭延性鑄鐵管標稱管長之管材變形容量[34]

軸拉試驗	DIP(A400-T1	DIP(A)400-T2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	9.28	5.19
軸壓試驗	DIP(A)400-C1	DIP(A)400-C2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	22.73	1.67
撓曲試驗	DIP(A)400-B1	DIP(A)400-B2
標稱管長之相對轉角(degree)	7.47	4.47

表 3.7 A 型接頭延性鑄鐵管之 ISO 16134 耐震分級[34]

參數	ISO16134 耐震等級	參考值	軸拉試驗		軸壓試驗		撓曲試驗	
			T1	T2	C1	C2	B1	B2
軸向變形容量 (mm)	S-1	≥60						
	S-2	30~60						
	S-3	<30	9.28	5.19	22.73	1.67		
防脫力 (kN)	A	≥1200			2815*	*		
	B	600~1200						
	C	300~600						
	D	<300	37.1	41.95				
接頭轉角 容量 (θ)	M-1	≥15°						
	M-2	7.5°~15°						
	M-3	<7.5°					7.47°	4.47°
*ISO 16134 未定義軸壓力之耐震分級								

表 3.8 平口管試驗數據彙整表[34]

軸拉試驗	DIP(F)400-T1	DIP(F)400-T2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	243.5	223.4
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	0.81	0.92
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	-	-
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	(0.65, 200)	(0.72, 168)
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	(0.65, 200)	(0.72, 168)
軸壓試驗	DIP(F)400-C1	DIP(F)400-C2
▲ 峰值強度 P_{max} (kN)	†	†
● 失效變形 Δ_{leak} (mm)	†	†
Δ ($\Delta_{0.8P_{max}}$, $0.8P_{max}$) (mm, kN)	†	†
○ ($0.8\Delta_{leak}$, $P_{0.8\Delta_{leak}}$) (mm, kN)	†	†
變形容量點(δ , F) (mm, kN)	†	†
撓曲試驗	DIP(F)400-B1	DIP(F)400-B2
▲ 峰值強度 M_{max} (kN-m)	-	-
● 失效變形 Θ_{leak} (deg)	0.06	0.14
Δ ($\Theta_{0.8M_{max}}$, $0.8M_{max}$) (deg, kN-m)	-	-
○ ($0.8\Theta_{leak}$, $M_{0.8\Theta_{leak}}$) (deg, kN-m)	(0.048, 15.31)	(0.11, 35.5)
變形容量點(θ , M) (deg, kN-m)	(0.048, 15.31)	(0.11, 35.5)
†：軸壓試體抗壓強度大於 5000kN，超過試驗機的加載極限		

表 3.9 平口管標稱管長之管材變形容量[34]

軸拉試驗	DIP(F)400-T1	DIP(F)400-T2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	0.33	0.36
軸壓試驗	DIP(F)400-C1	DIP(F)400-C2
標稱管長之軸向變形容量(mm)	†	†
撓曲試驗	DIP(F)400-B1	DIP(F)400-B2
標稱管長之相對轉角(degree)	0.024	0.055
†：軸壓試體抗壓強度大於 5000kN，超過試驗機的加載極限		

表 3.10 平口管之 ISO 16134 耐震分級[34]

參數	ISO16134 耐震等級	參考值	軸拉試驗		軸壓試驗		撓曲試驗	
			T1	T2	C1	C2	B1	B2
軸向變形容量 (mm)	S-1	≥60						
	S-2	30~60			-	-		
	S-3	<30	0.33	0.36				
防脫力 (kN)	A	≥1200			†	†		
	B	600~1200						
	C	300~600						
	D	<300	243.5	223.4				
接頭轉角容量 (θ)	M-1	≥15°						
	M-2	7.5°~15°						
	M-3	<7.5°					0.024 _o	0.055 _o
*ISO 16134 未定義軸壓力之耐震分級								
†：軸壓試體抗壓強度大於 5000kN，超過試驗機的加載極限								

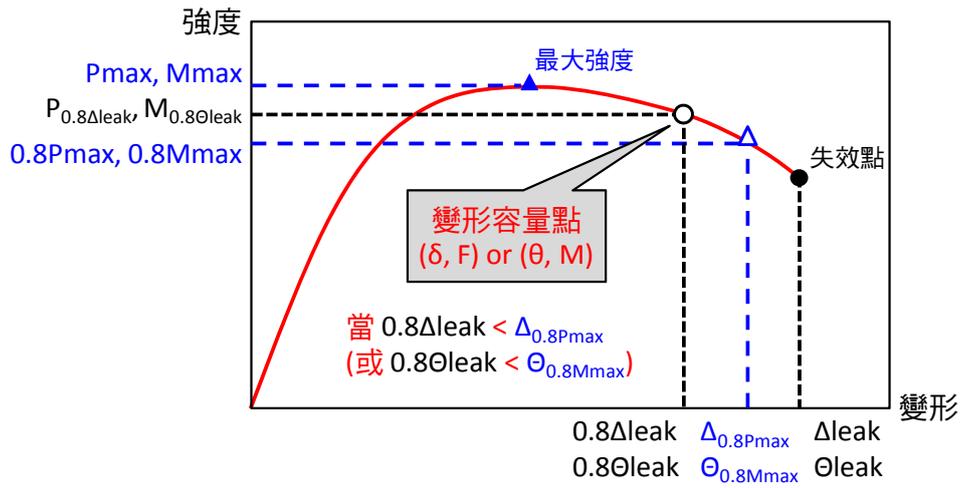


圖 3.1 容量點示意圖(試體強度達峰值且下降至其 0.8 倍以下，例一)[33]

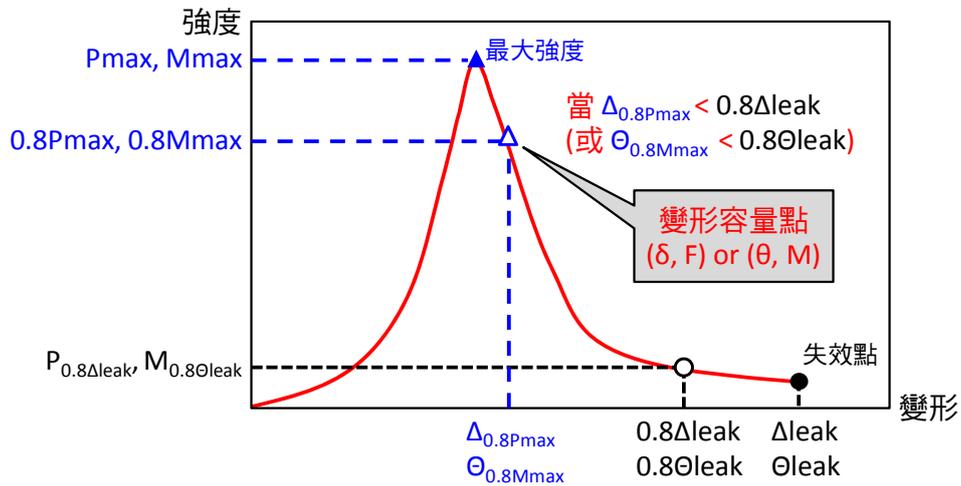


圖 3.2 容量點示意圖(試體強度達峰值且下降至其 0.8 倍以下，例二)
[33]

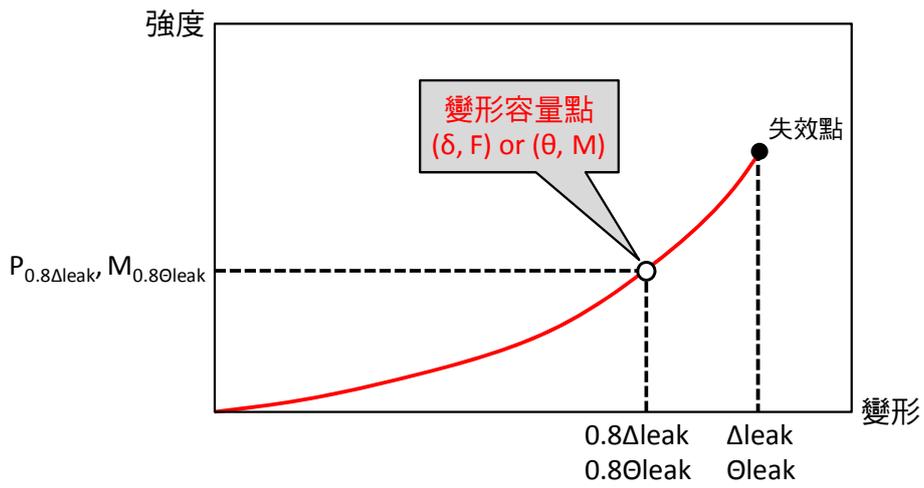


圖 3.3 容量點示意圖(試體強度未達峰值) [33]

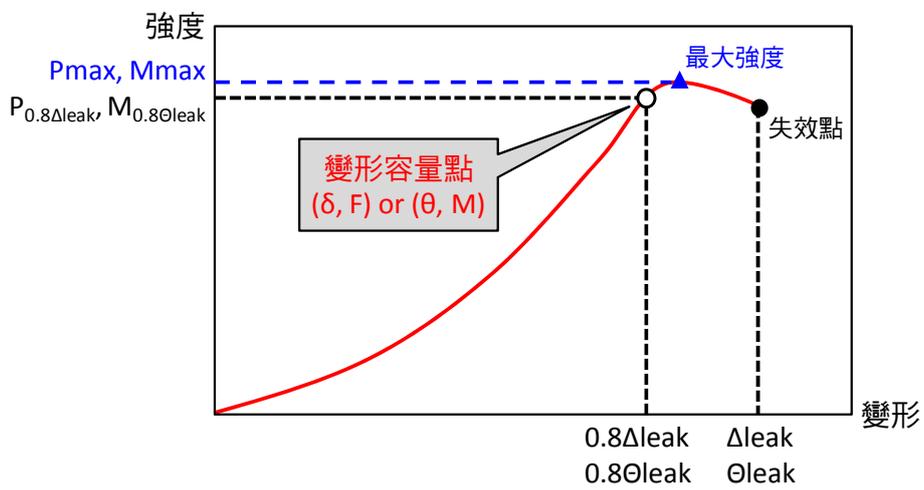
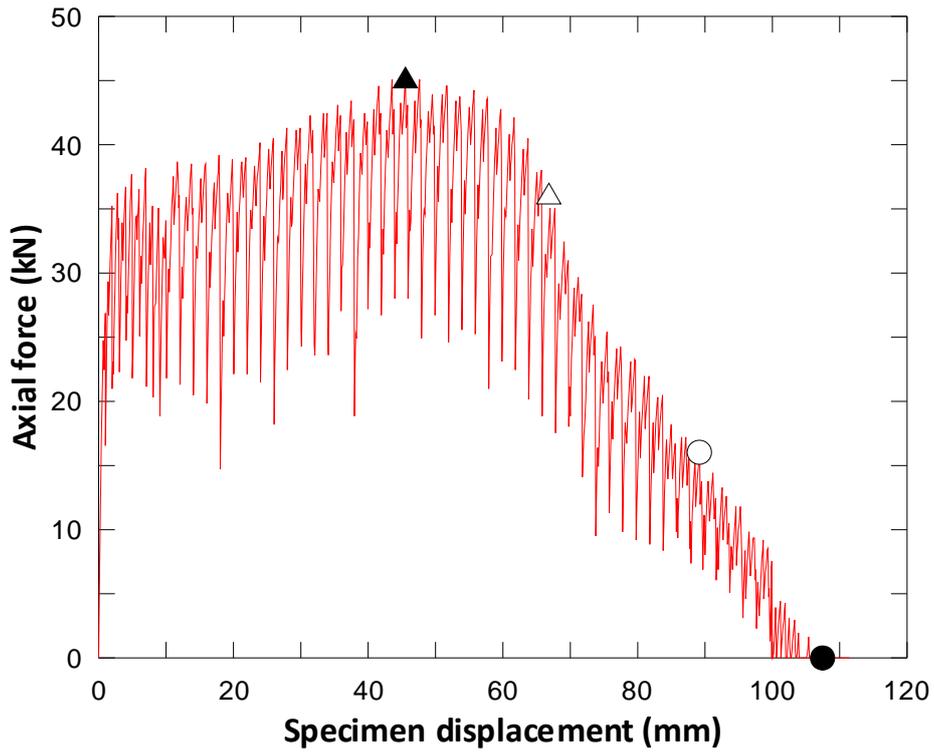
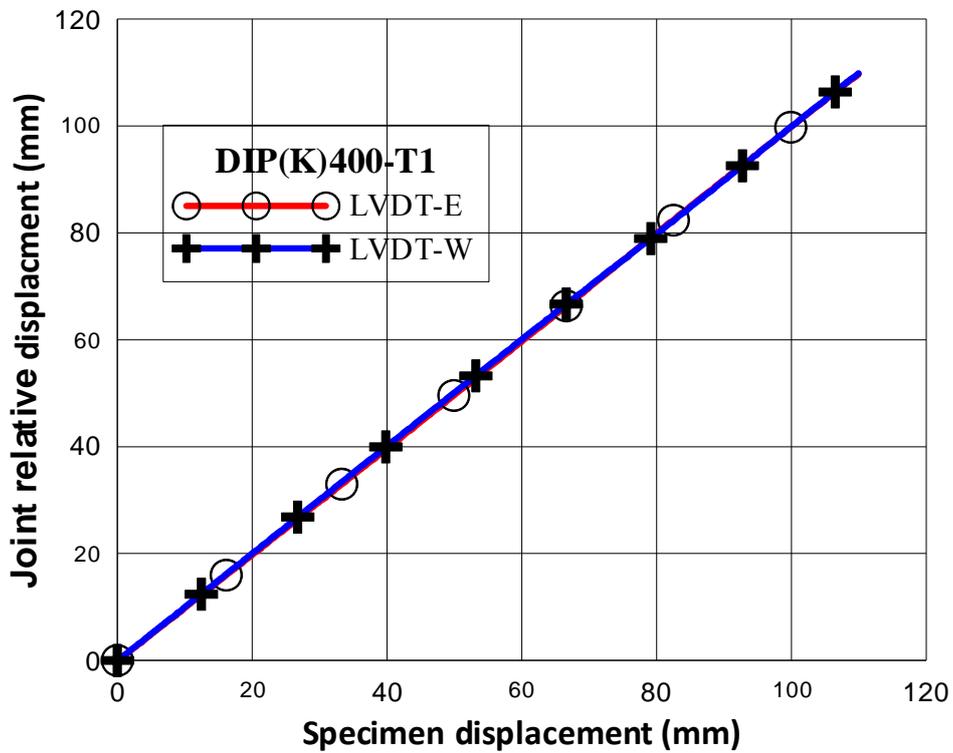


圖 3.4 容量點示意圖(試體強度達峰值但未下降至其 0.8 倍) [33]

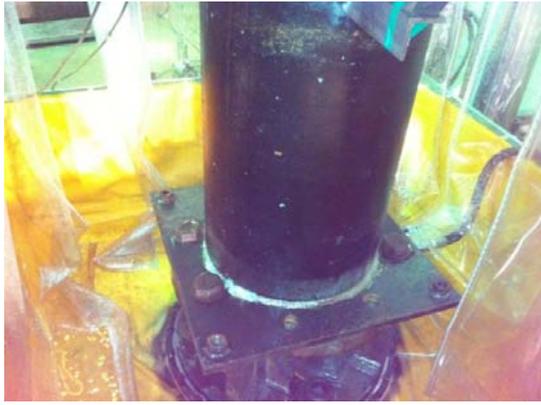


(a) DIP(K)400-T1 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(K)400-T1 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.5 DIP(K)400-T1 之軸力與位移關係圖[33]



(a) 試驗座下方積水



(b) 接頭下緣滲水情況

圖 3.6 DIP(K)400-T1 試驗終止時情形[33]

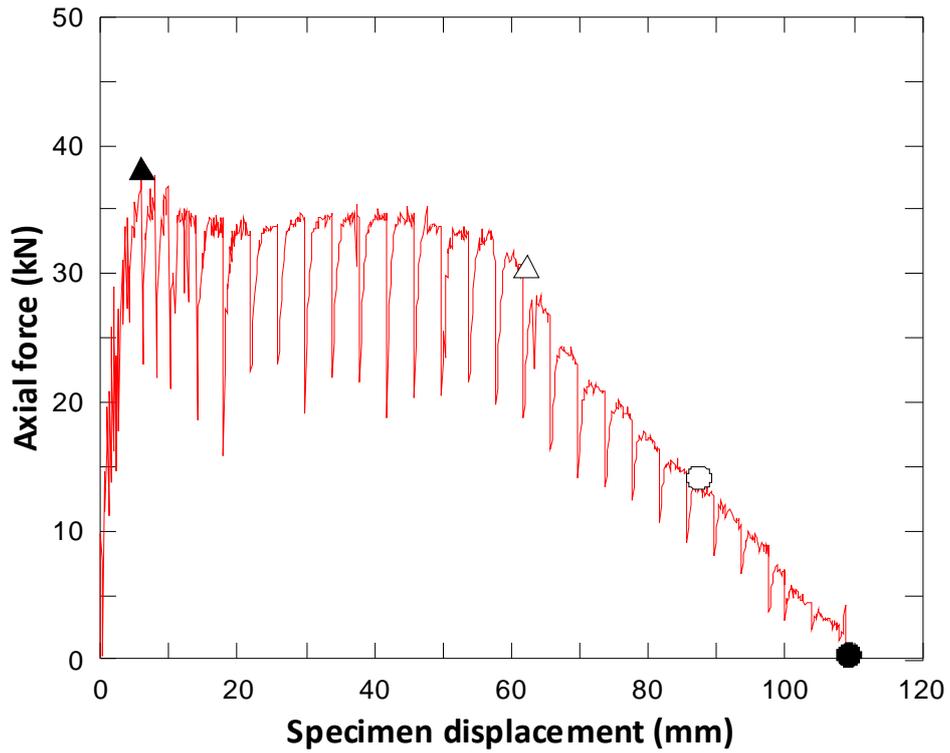


(a) 膠圈破壞情形

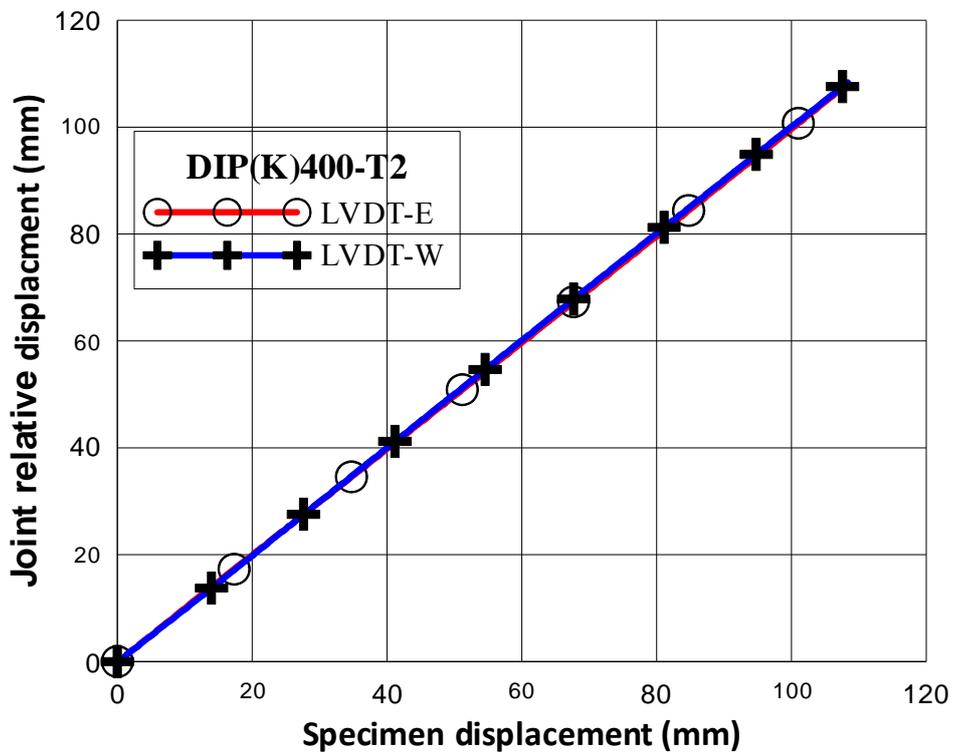


(b) 插口柏油壓痕

圖 3.7 DIP(K)400-T1 試驗結束試體檢視[33]



(a) DIP(K)400-T2 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖[33]



(b) DIP(K)400-T2 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.8 DIP(K)400-T2 之軸力與位移關係圖[33]



(a)試驗終止時承口拔離插口

(b)水壓無法控制

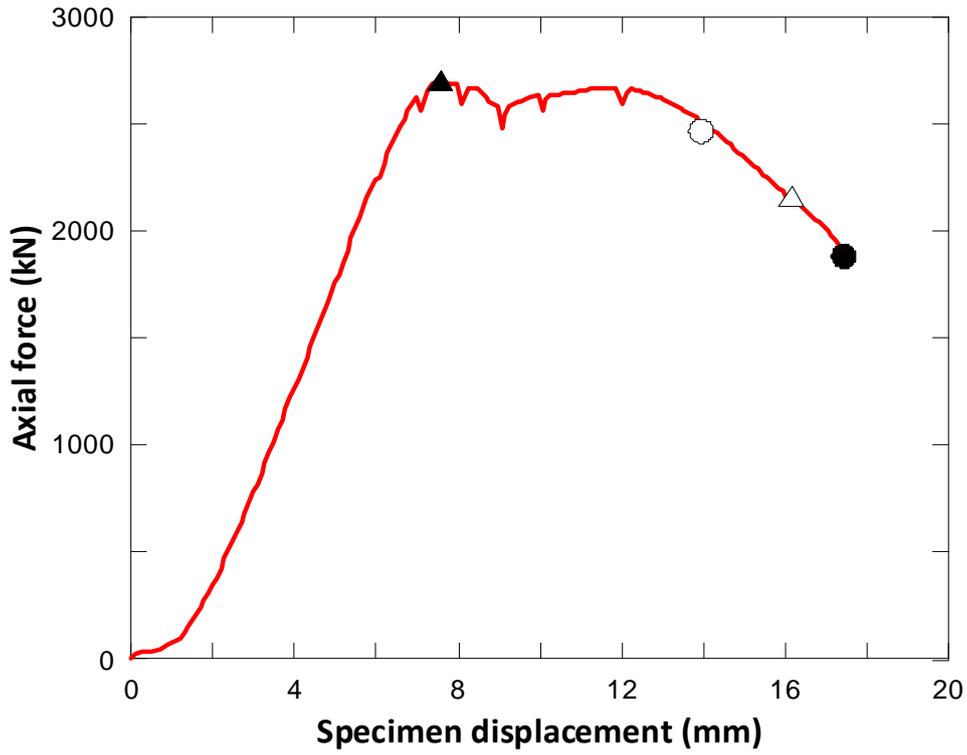
圖 3.9 DIP(K)400-T2 試驗終止時情形[33]



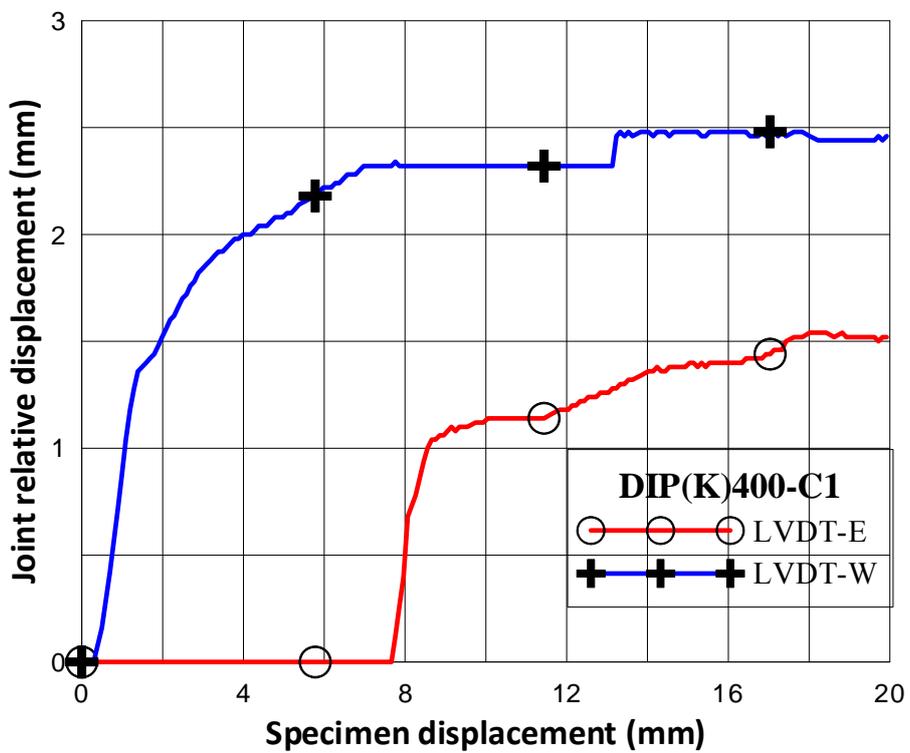
(a)膠圈破壞情形

(b) 插口端柏油壓痕

圖 3.10 DIP(K)400-T2 試驗結束試體檢視[33]



(a) DIP(K)400-C1 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(K)400-C1 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.11 DIP(K)400-C1 之軸力與位移關係圖[33]



(a) 試驗終止試體整體



(b) 插口段挫屈漏水

圖 3.12 DIP(K)400-C1 試驗終止情形[33]

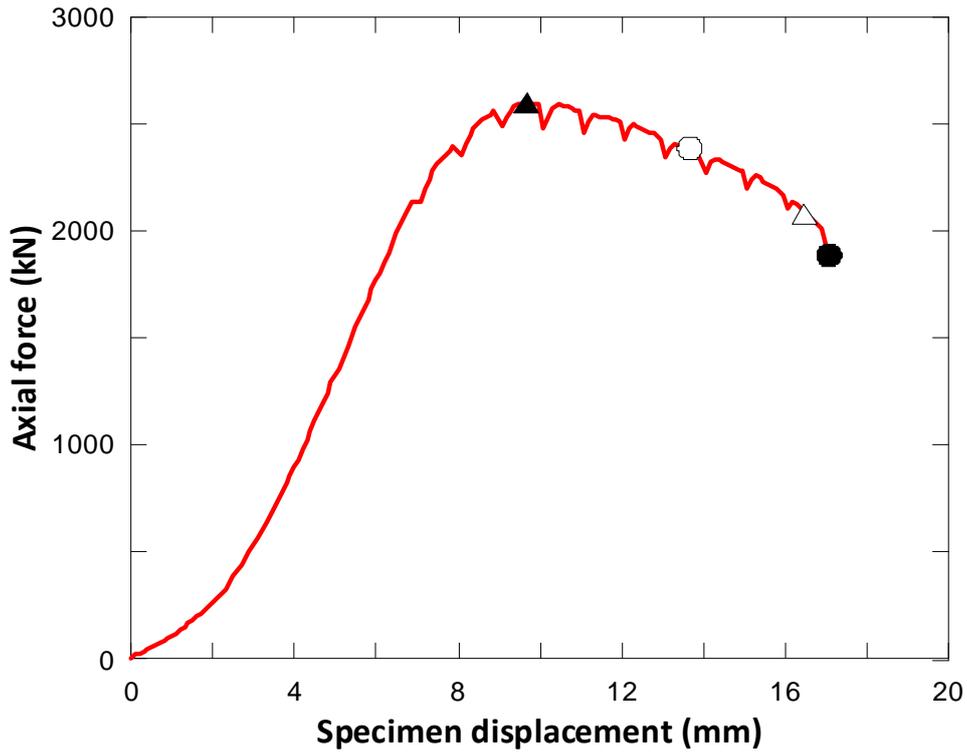


(a) 接口端挫屈嚴重

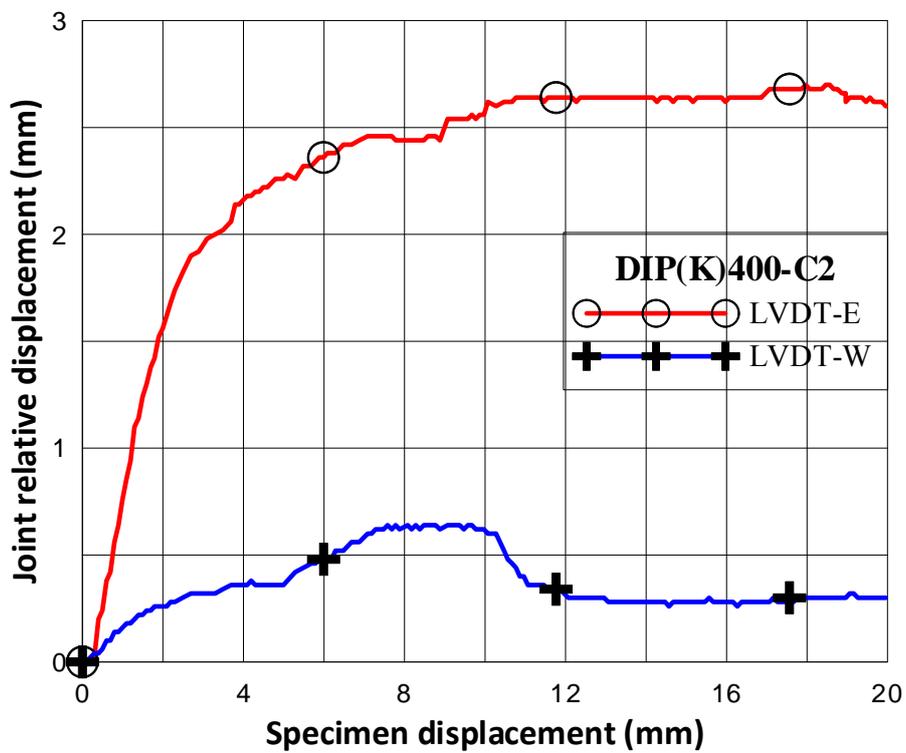


(b) 內襯水泥剝落

圖 3.13 DIP(K)400-C1 試驗結束試體檢視[33]



(a) DIP(K)400-C2 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(K)400-C2 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.14 DIP(K)400-C2 之軸力與位移關係圖[33]



(a) 試驗終止試體整體



(b) 插口段挫屈漏水

圖 3.15 DIP(K)400-C2 試驗終止情形[33]



(a) 插口末端挫屈嚴重



(b) 內襯水泥剝落

圖 3.16 DIP(K)400-C2 試驗結束試體檢視[33]

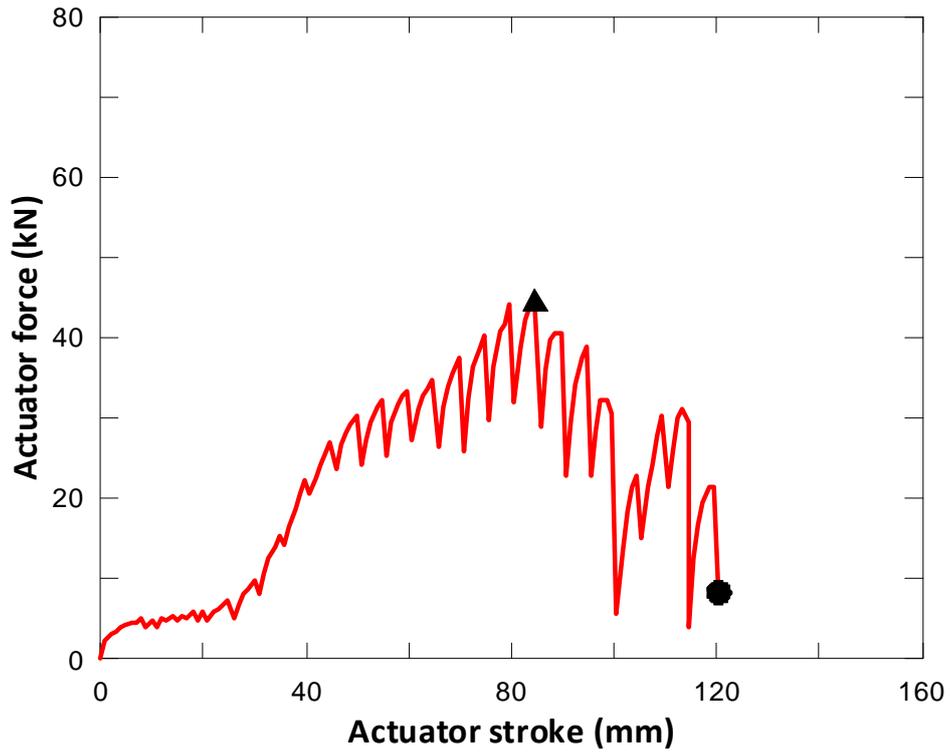


圖 3.17 DIP(K)400-B1 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[33]

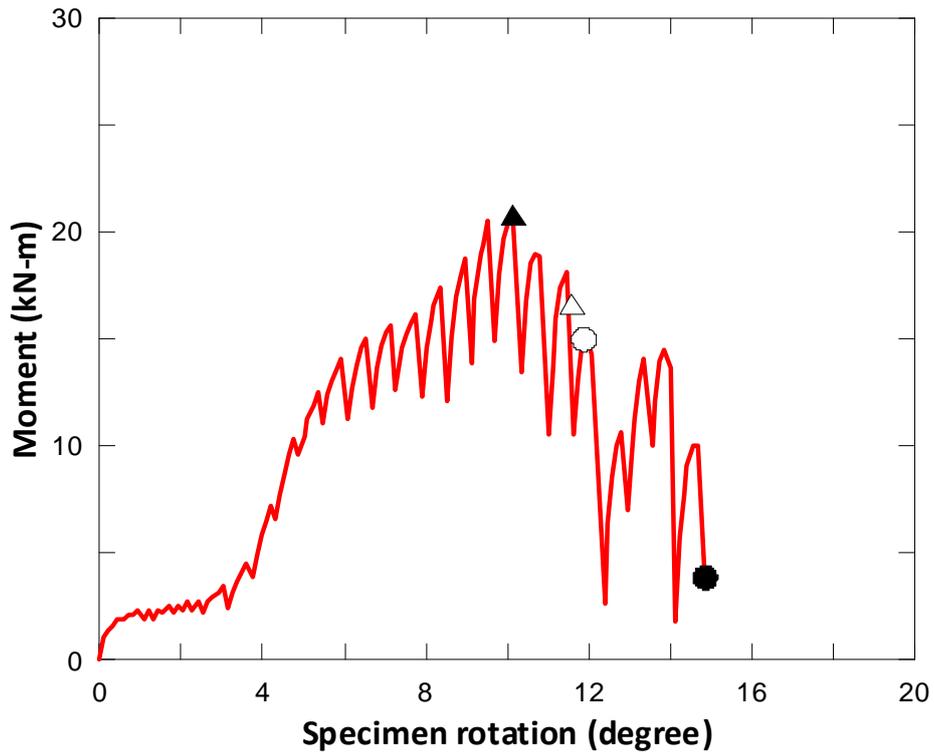


圖 3.18 DIP(K)400-B1 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[33]



(a) 試驗終止之情形



(b) 水壓無法持壓

圖 3.19 DIP(K)400-B1 試體之情形[33]



(a) 承口試驗下緣膠圈破壞情形



(b) 插口內襯水泥剝落

圖 3.20 DIP(K)400-B1 試驗結束試體檢視[33]

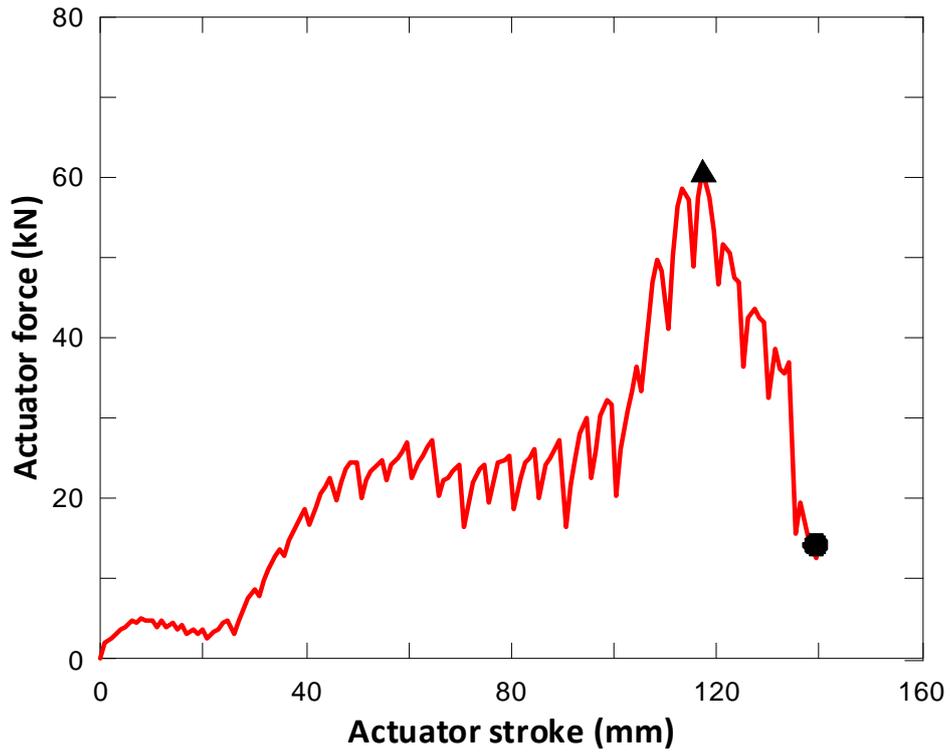


圖 3.21 DIP(K)400-B2 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[33]

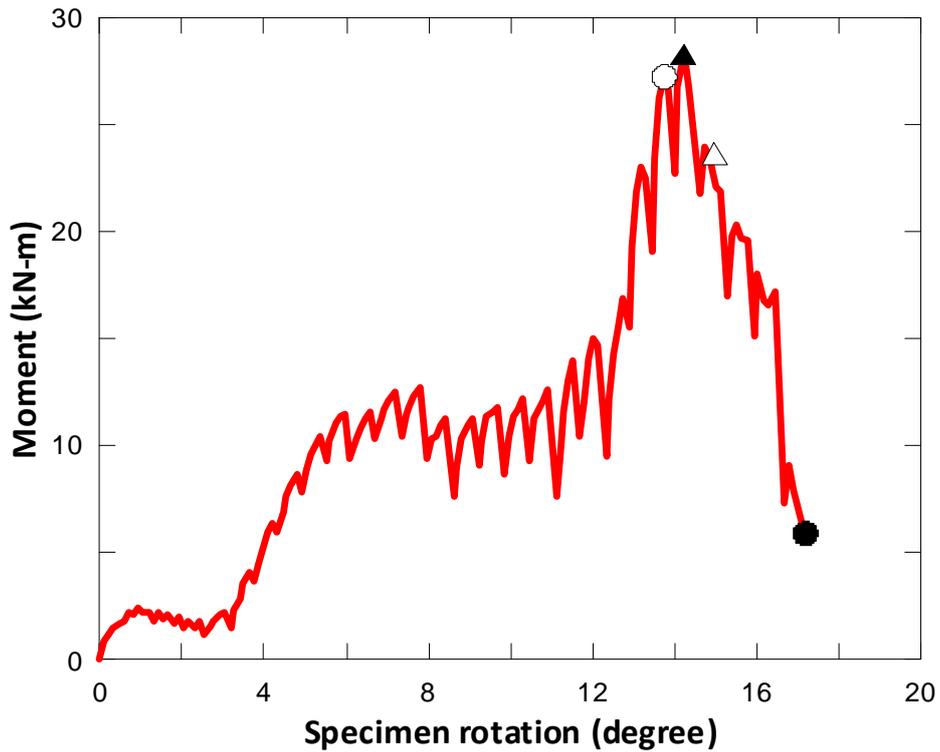
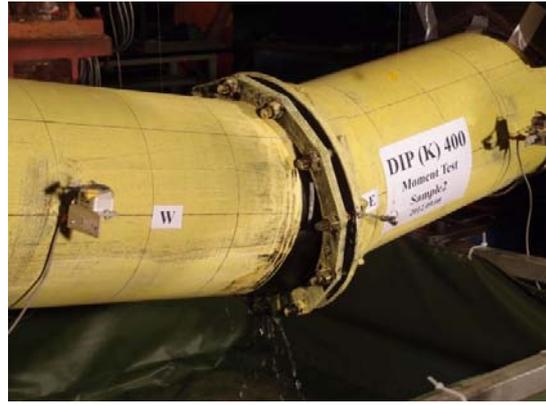


圖 3.22 DIP(K)400-B2 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[33]



(a) 試驗終止之情形



(b) 水壓無法持壓

圖 3.23 DIP(K)400-B2 試體之情形[33]

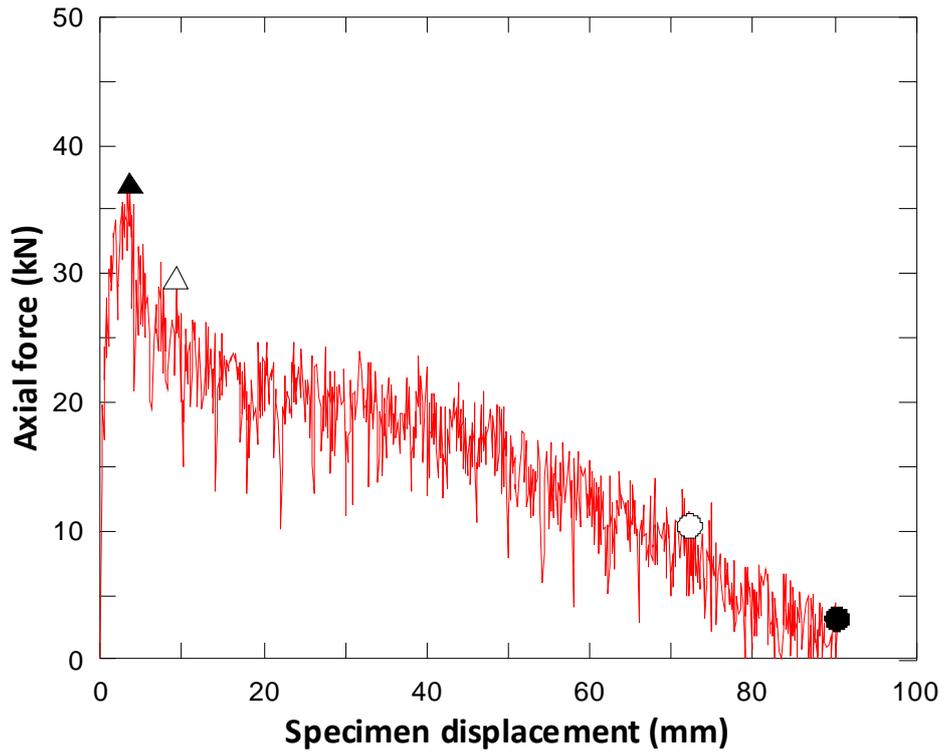


(a) 承口試驗下緣膠圈破壞情形

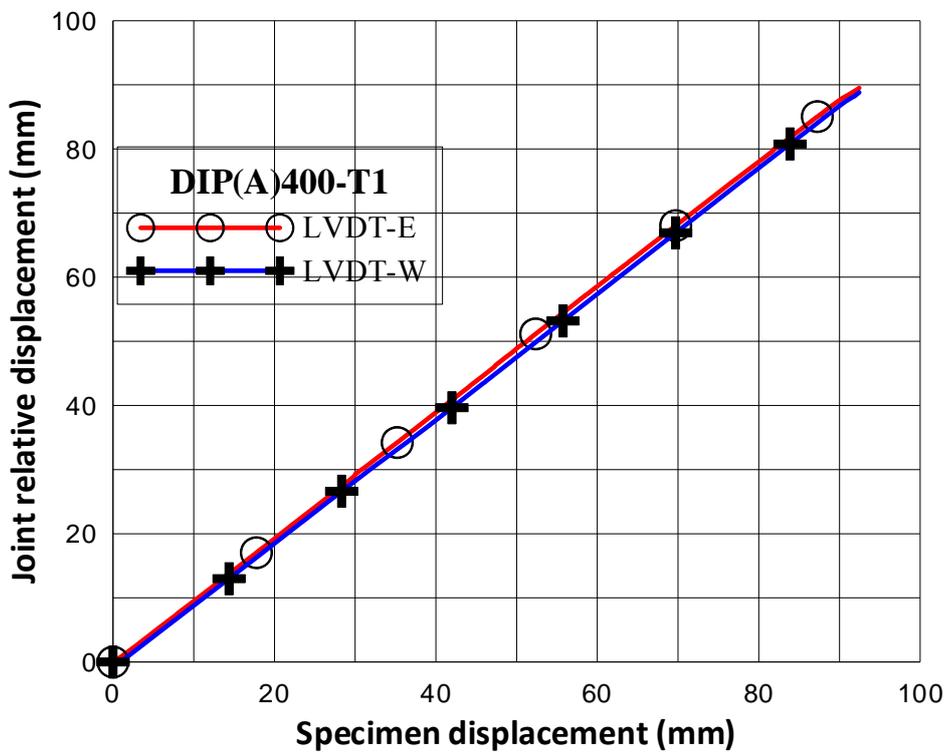


(b) 插口內襯水泥剝落

圖 3.24 DIP(K)400-B2 試驗結束試體檢視[33]

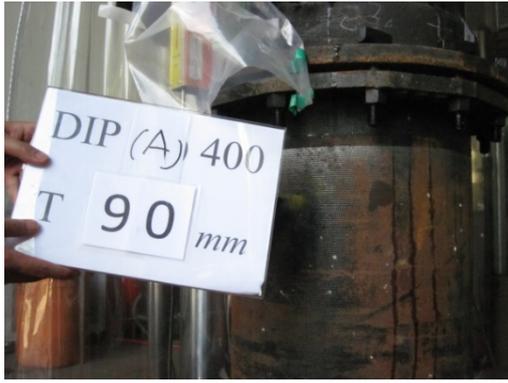


(a) DIP(A)400-T1 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(A)400-T1 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.25 DIP(A)400-T1 之軸力與位移關係圖[34]



(a) 於 90mm 時之狀態



(b) 於 90.3mm 北側水流噴出

圖 3.26 DIP(A)400-T1 試驗終止時情形[34]

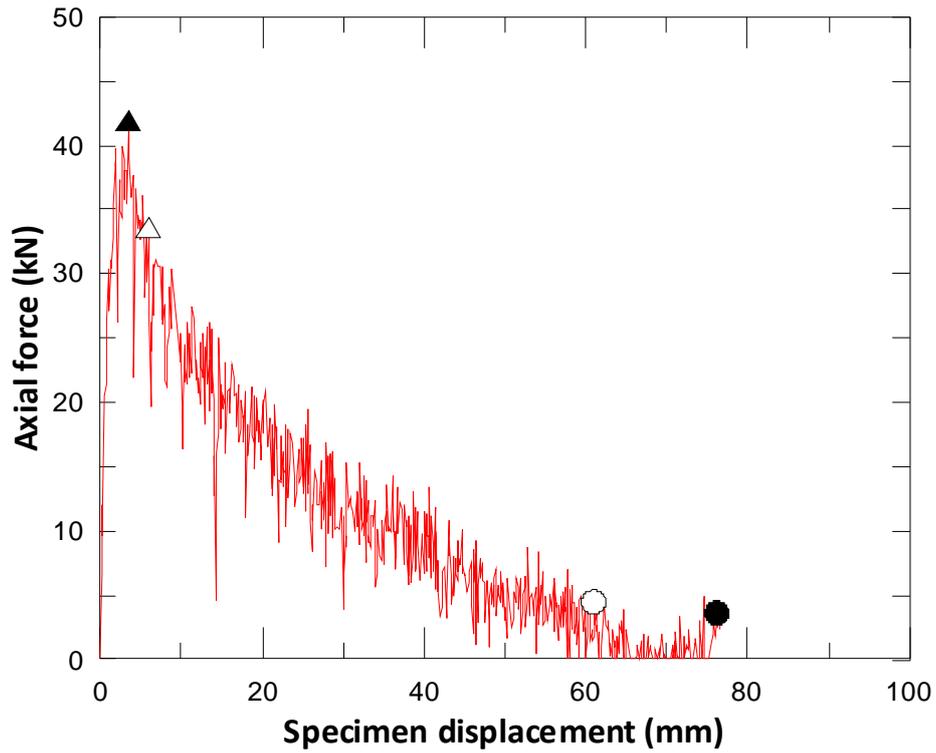


(a) 試驗結束膠圈破壞情形

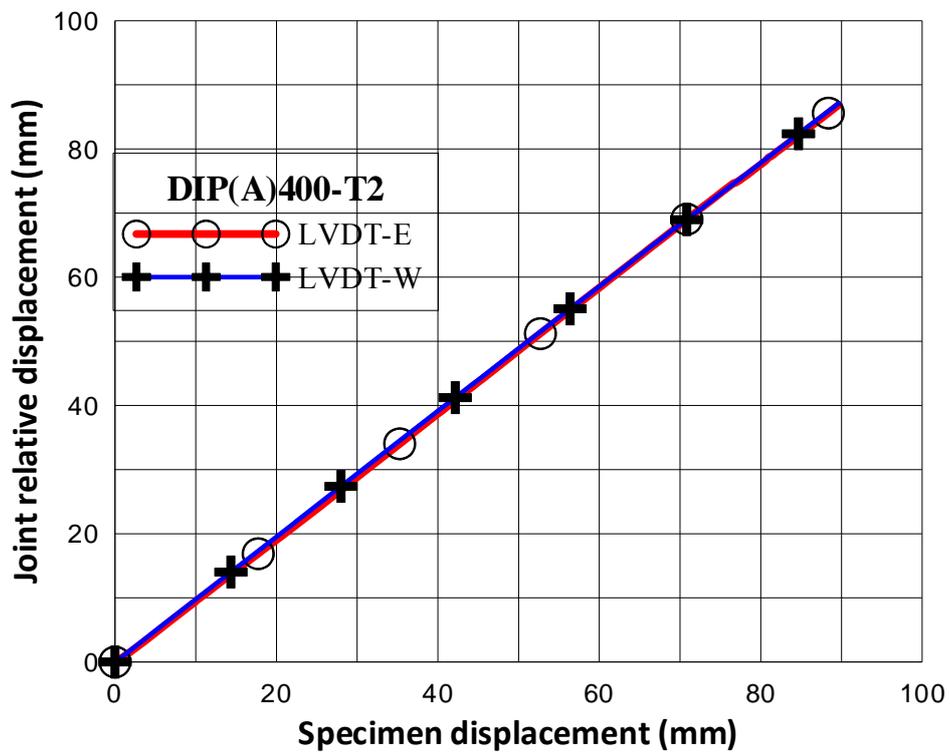


(b) 試驗結束直管接頭無損壞

圖 3.27 DIP(A)400-T1 試驗結束試體檢視[34]



(a) DIP(A)400-T2 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖[34]



(b) DIP(A)400-T2 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.28 DIP(A)400-T2 之軸力與位移關係圖[34]

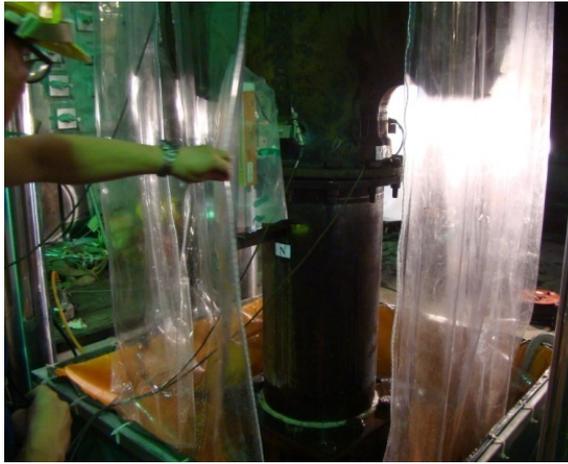


圖 3.29 DIP(A)400-T2 試驗中情形

[34]



圖 3.30 DIP(A)400-T2 試驗終止

[34]

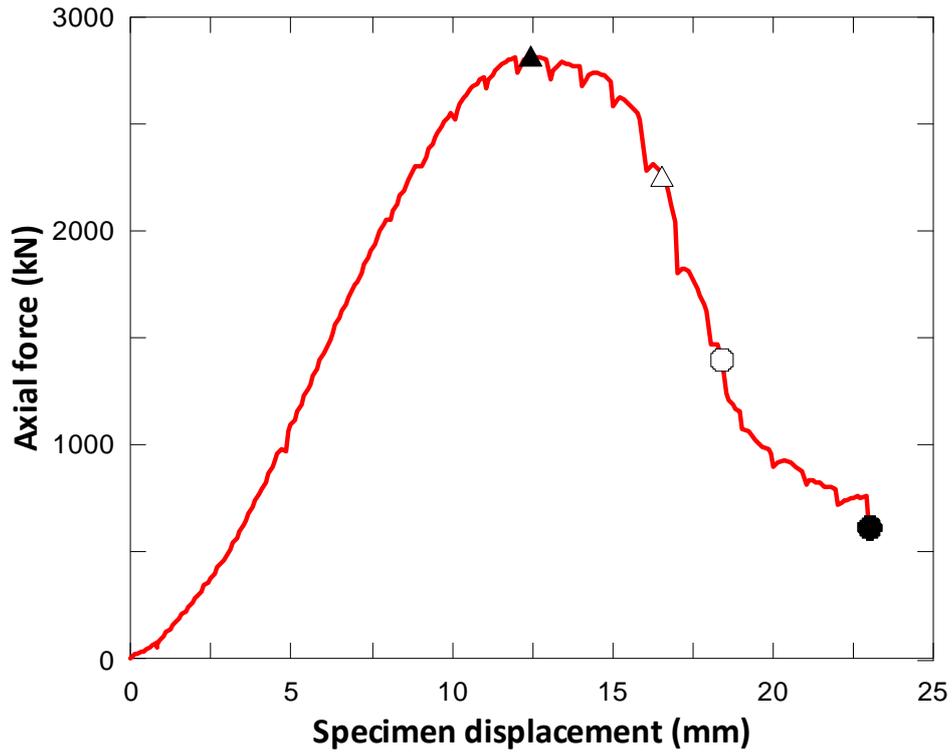


(a) 試驗結束膠圈無破壞

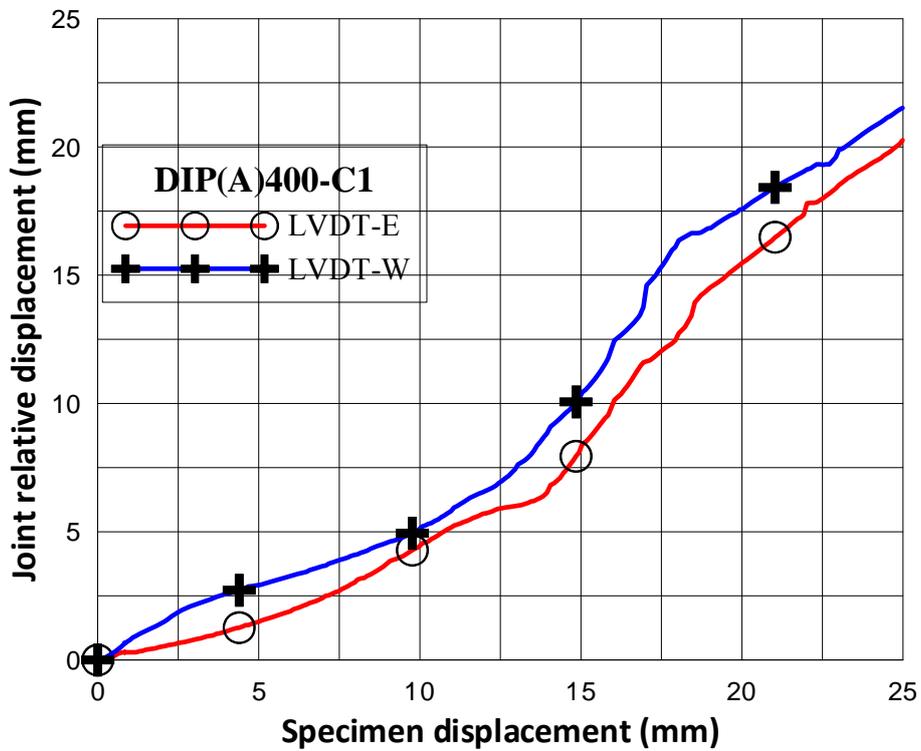


(b) 試驗結束直管接頭無損壞

圖 3.31 DIP(A)400-T2 試驗結束試體檢視[34]



(a) DIP(A)400-C1 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(A)400-C1 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.32 DIP(A)400-C1 之軸力與位移關係圖[34]

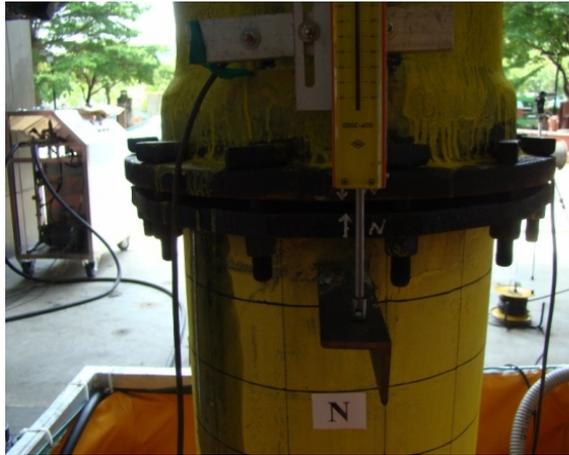


圖 3.33 DIP(A)400-C1 試驗中情形
於 20mm 東北側微漏[34]



圖 3.34 DIP(A)400-C1 試驗終止情形
於 23mm 東北側噴水水壓無法
控制[34]

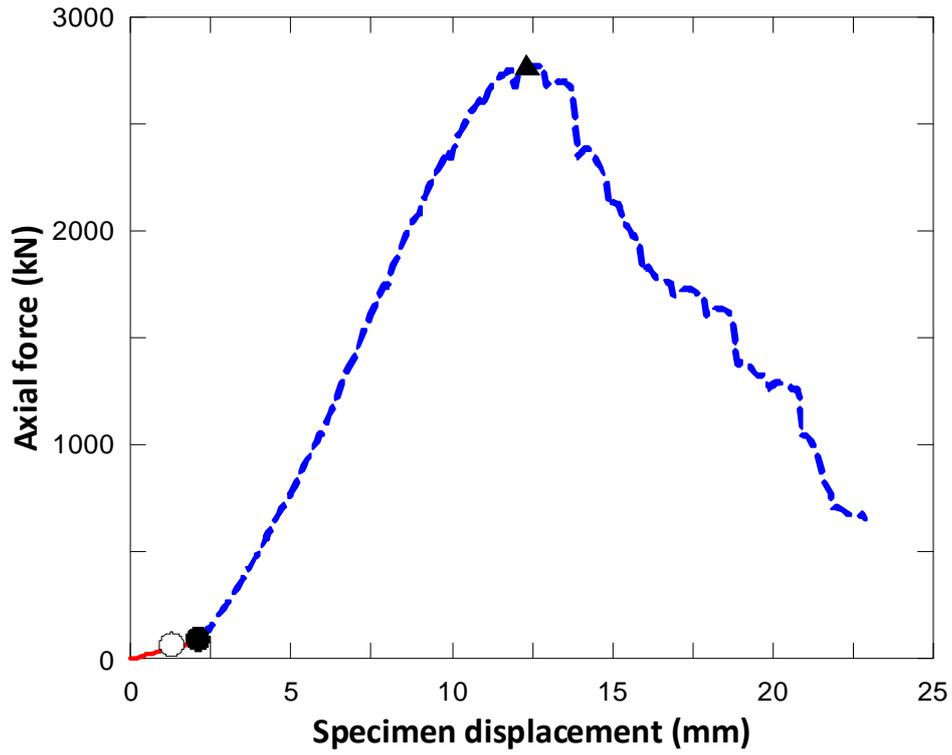


(a) 承口端鑄鐵彎曲變形內襯
脫落

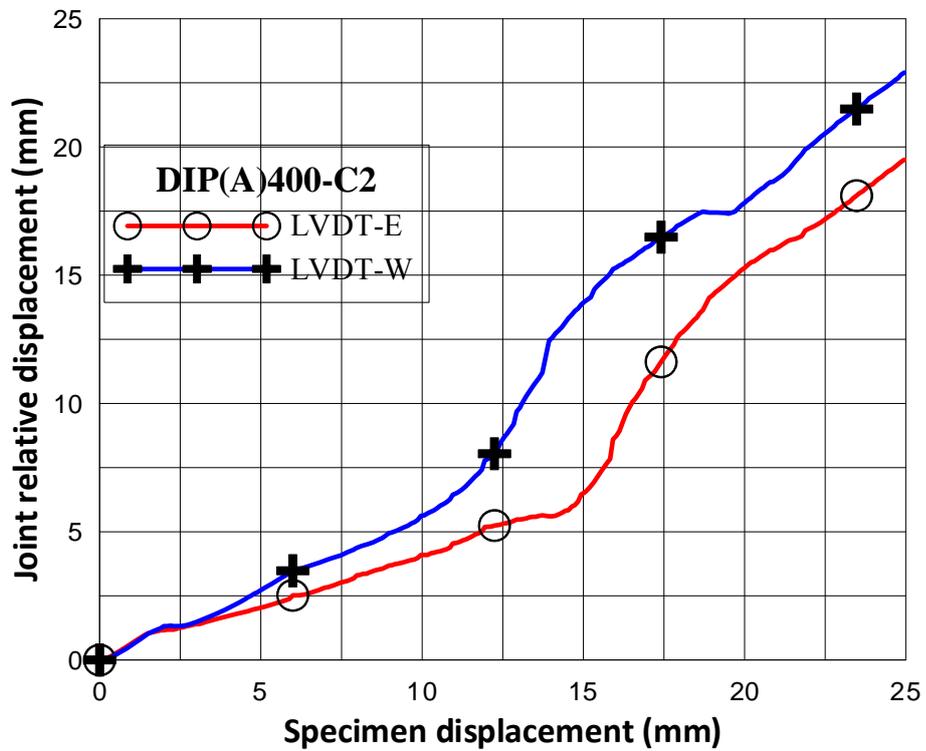


(b) A 型接頭管內裂縫形成

圖 3.35 DIP(A)400-C1 試驗結束試體檢視[34]



(a) DIP(A)400-C2 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖



(b) DIP(A)400-C2 接頭相對位移與試體軸向位移

圖 3.36 DIP(A)400-C2 之軸力與位移關係圖[34]



圖 3.37 DIP(A)400-C2 試驗中情形
於 1mm 東側水微漏[34]

圖 3.38 DIP(A)400-C2 試驗終止情形
於 2mm 東側噴水水壓無法控制
[34]



(a)承口端鑄鐵彎曲破壞

(b)內襯脫落

圖 3.39 DIP(A)400-C2 試驗結束試體檢視[34]

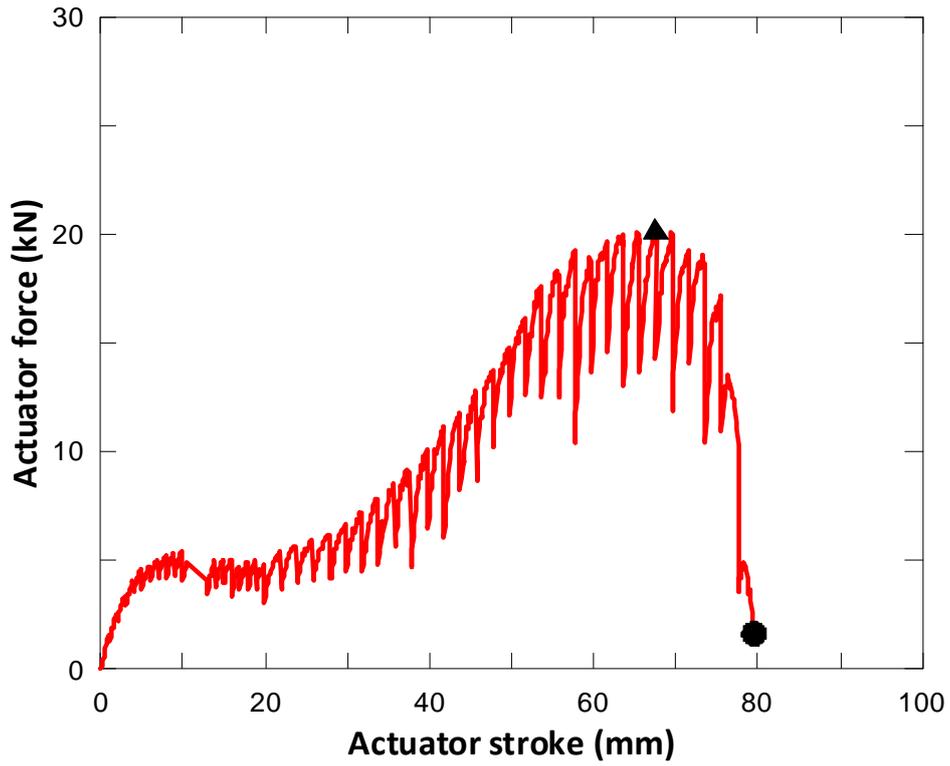


圖 3.40 DIP(A)400-B1 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[34]

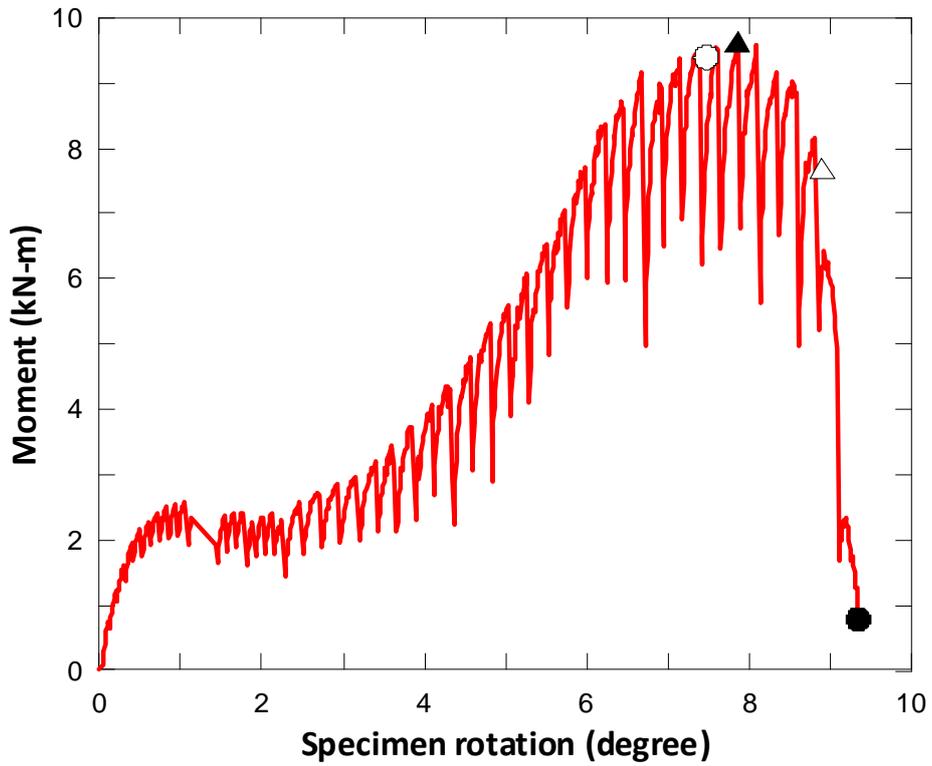


圖 3.41 DIP(A)400-B1 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[34]

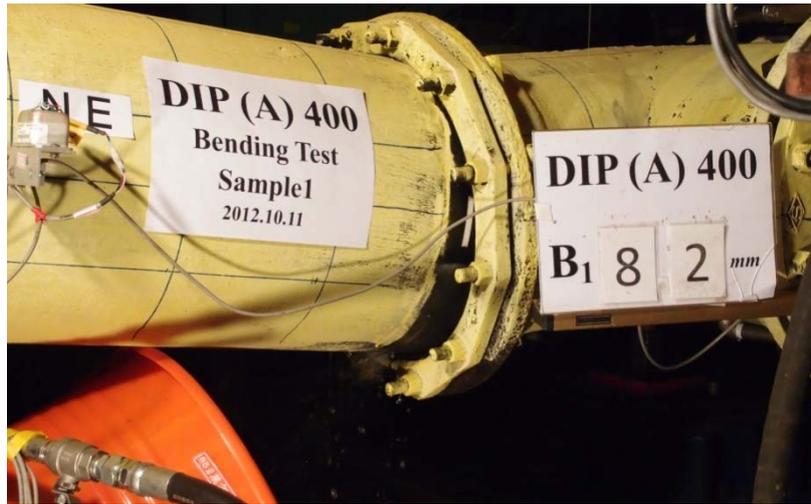


圖 3.42 DIP(A)400-B1 試驗終止情形[34]



(a) 承口試驗下緣膠圈破壞情形

(b) 插口內襯水泥剝落

圖 3.43 DIP(A)400-B1 試驗結束試體檢視[34]

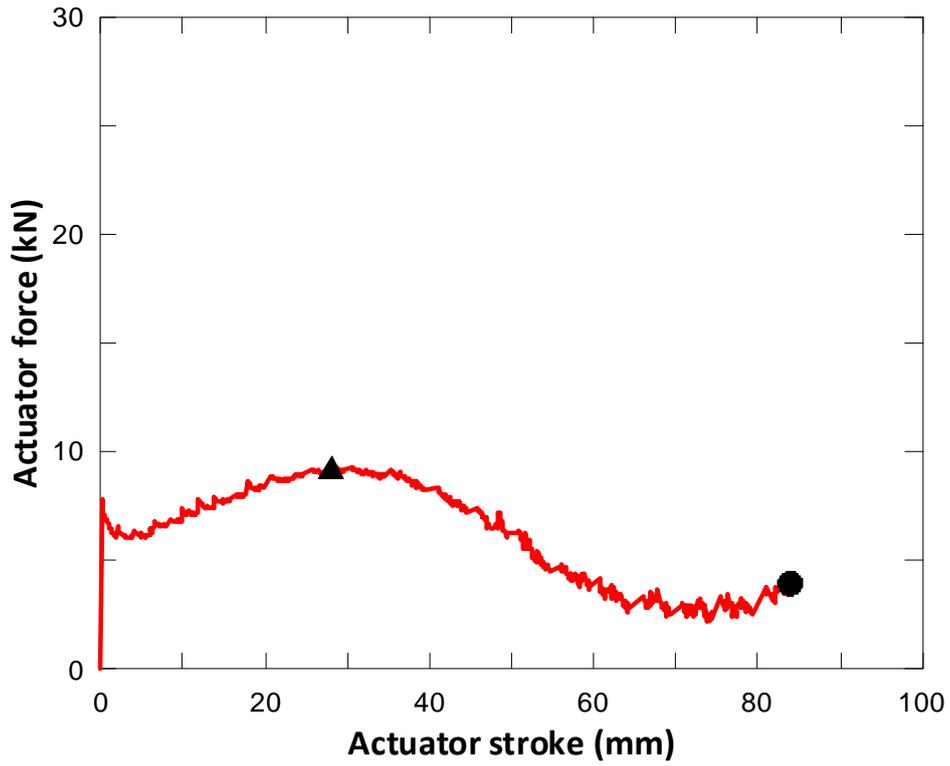


圖 3.44 DIP(A)400-B2 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[34]

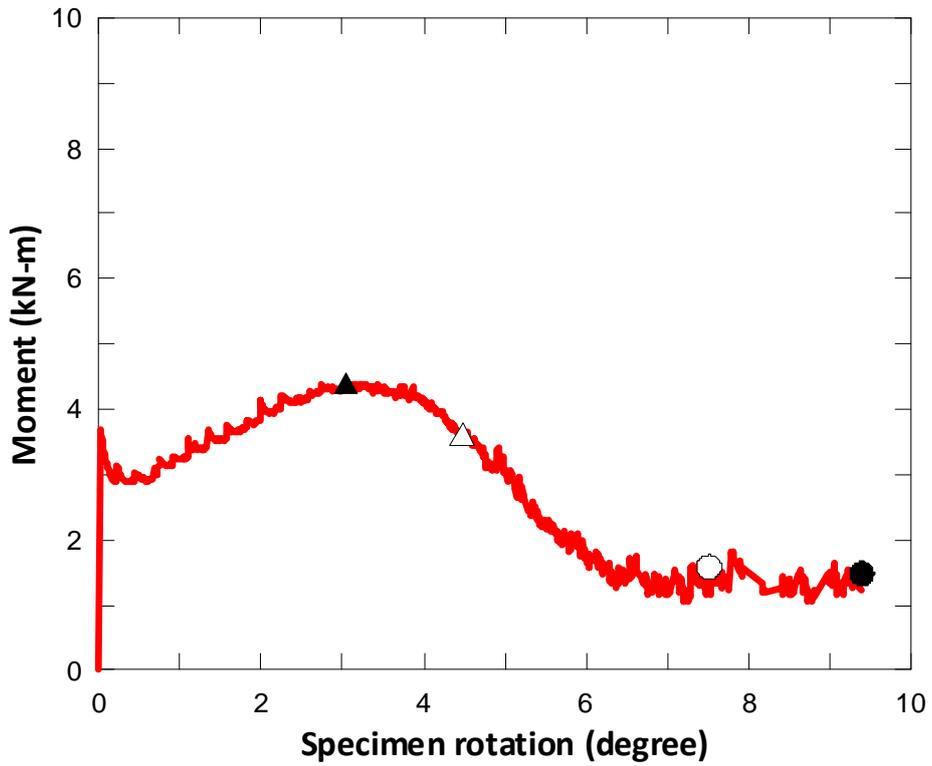


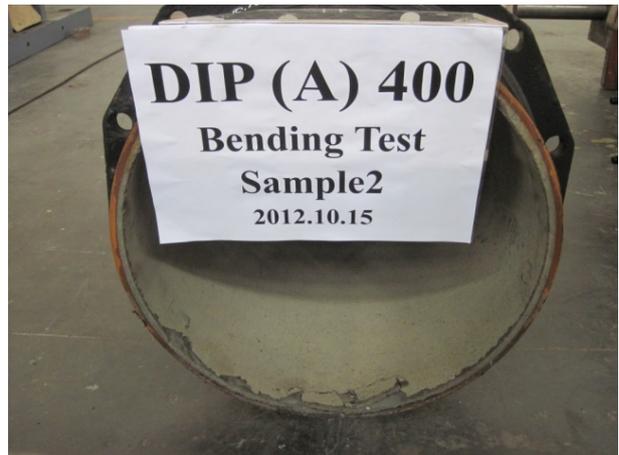
圖 3.45 DIP(A)400-B2 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[34]



圖 3.46 DIP(A)400-B2 試體之情形[34]



(a) 承口試驗下緣膠圈破壞情形



(b) 插口內襯水泥剝落

圖 3.47 DIP(A)400-B2 試驗結束試體檢視[34]

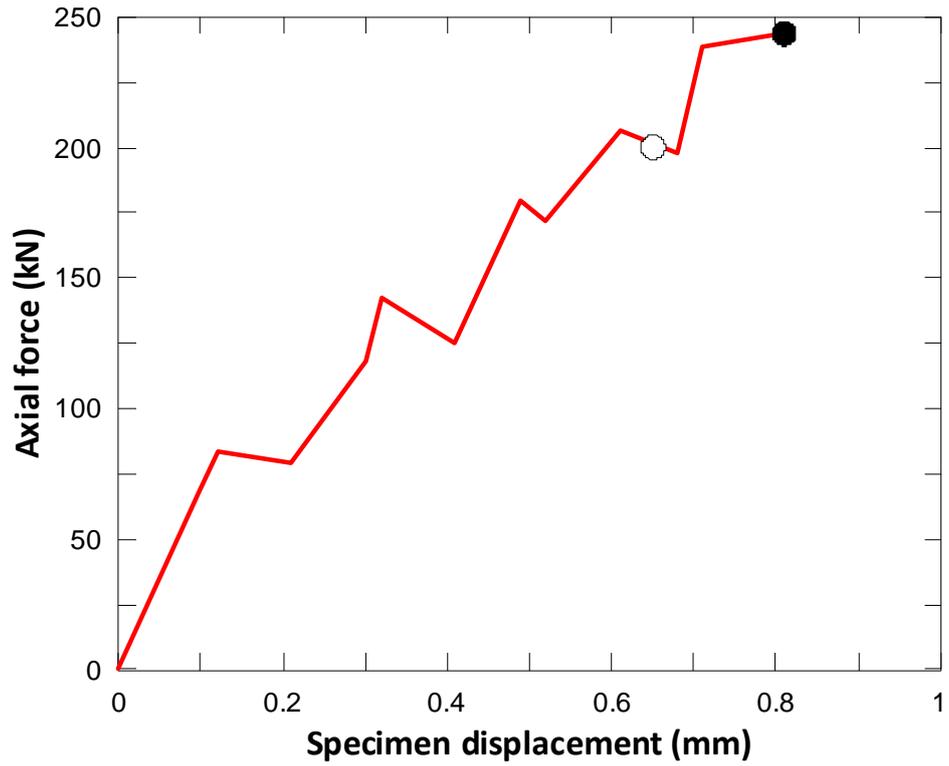


圖 3.48 DIP(F)400-T1 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖[34]

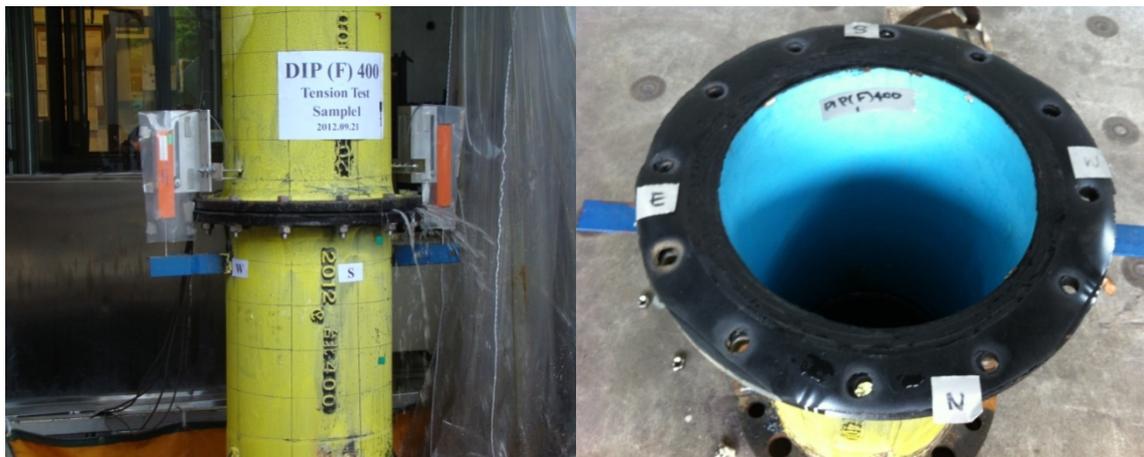


圖 3.49 DIP(F)400-T1 試驗終止情形[34]

圖 3.50 DIP(F)400-T1 試驗膠圈檢視[34]

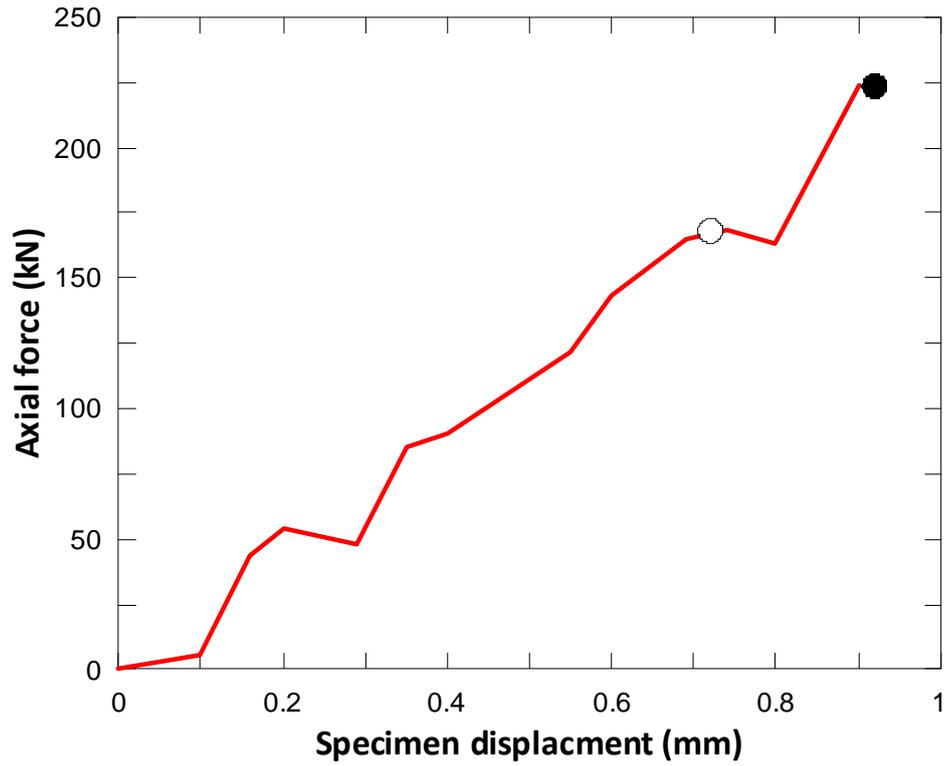


圖 3.51 DIP(F)400-T2 抗拉試驗之軸力與致動器位移關係圖[34]



圖 3.52 DIP(F)400-T2 試驗終止情形[34]

圖 3.53 DIP(F)400-T2 試驗膠圈檢視[34]

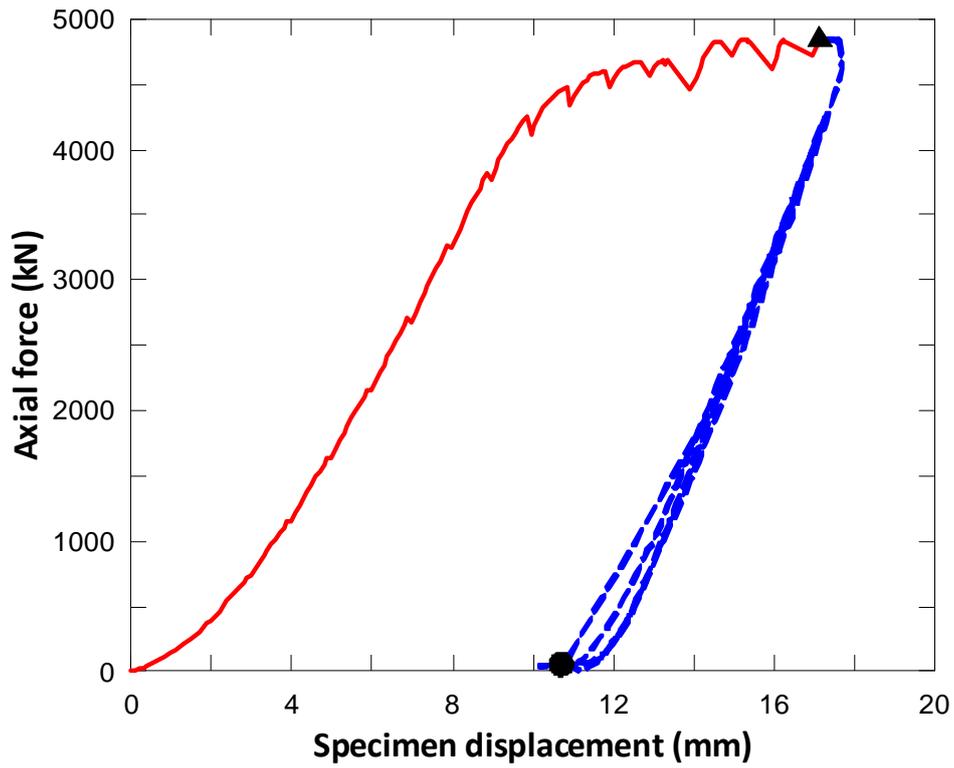


圖 3.54 DIP(F)400-C1 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖[34]



圖 3.55 DIP(F)400-C1 試驗終止情形[34]



圖 3.56 DIP(F)400-C1 試驗膠圈檢視[34]

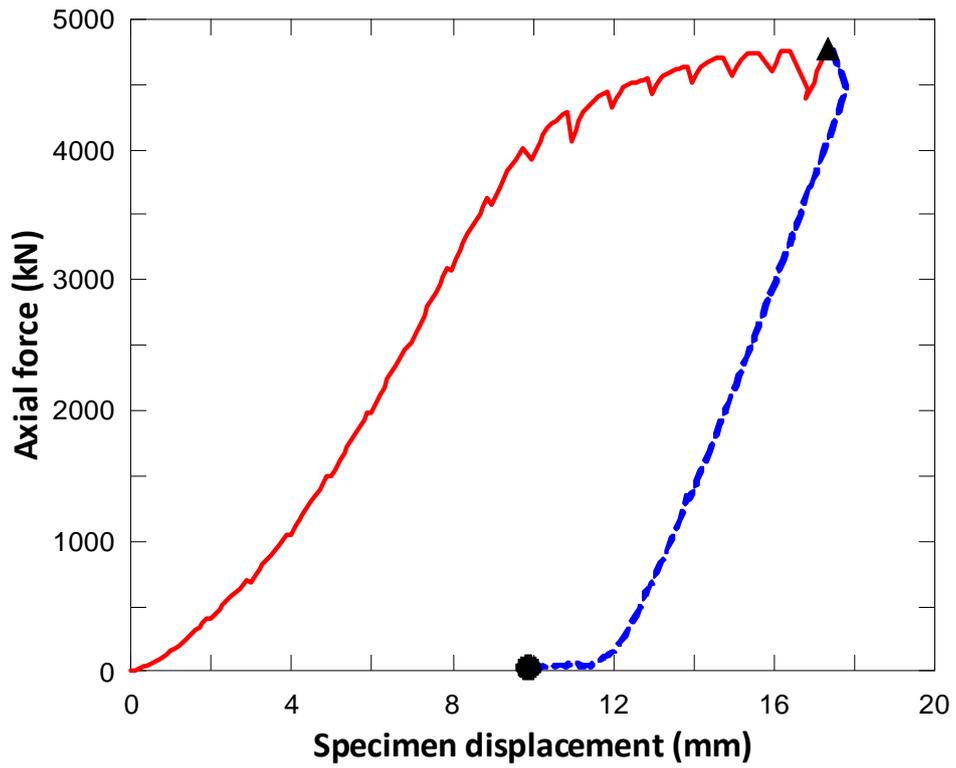


圖 3.57 DIP(F)400-C2 抗壓試驗之軸力與致動器位移關係圖[34]



圖 3.58 DIP(F)400-C2 試驗終止情形[34]

圖 3.59 DIP(F)400-C2 試驗膠圈檢視[34]

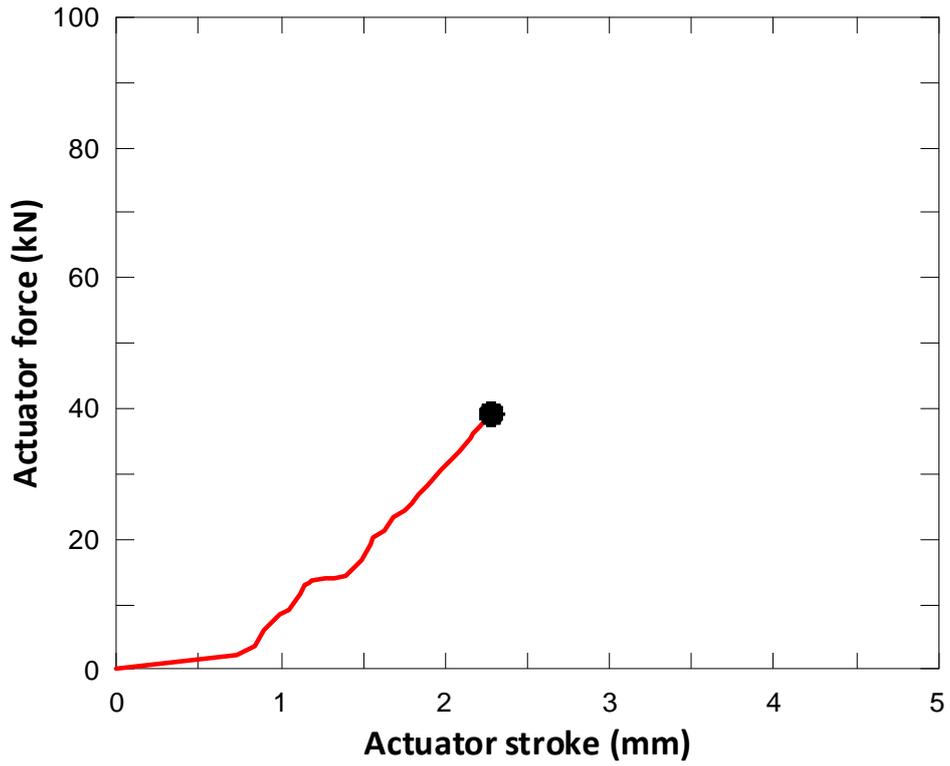


圖 3.60 DIP(F)400-B1 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[34]

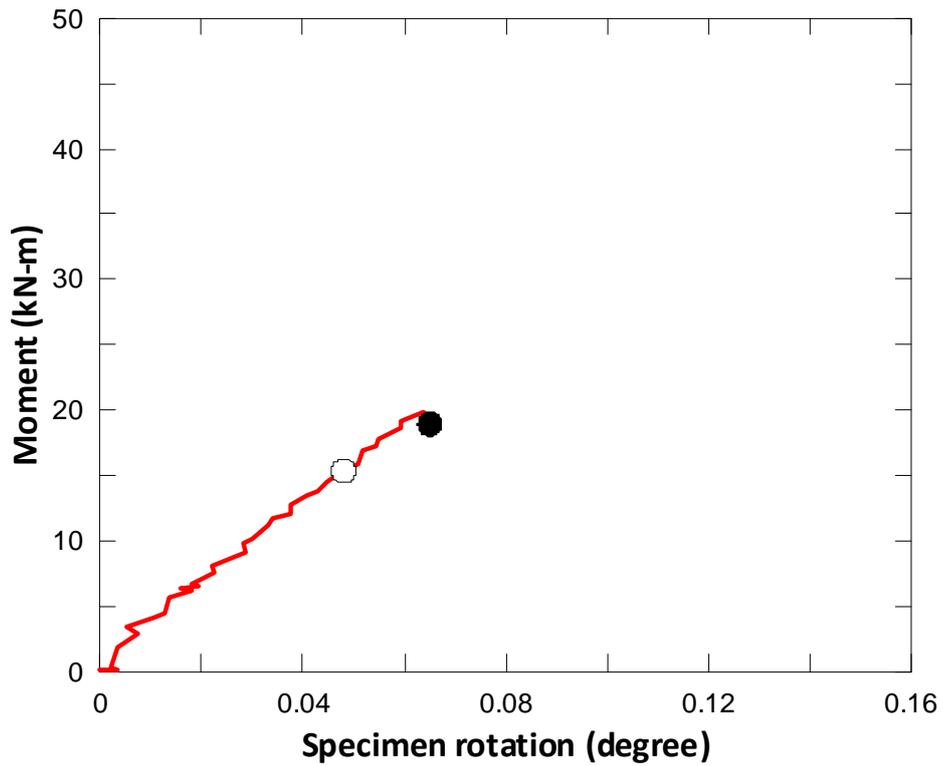


圖 3.61 DIP(F)400-B1 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[34]



圖 3.62 DIP(F)400-B1 試驗終止情形[34]



圖 3.63 DIP(F)400-B1 試驗膠圈 [34]

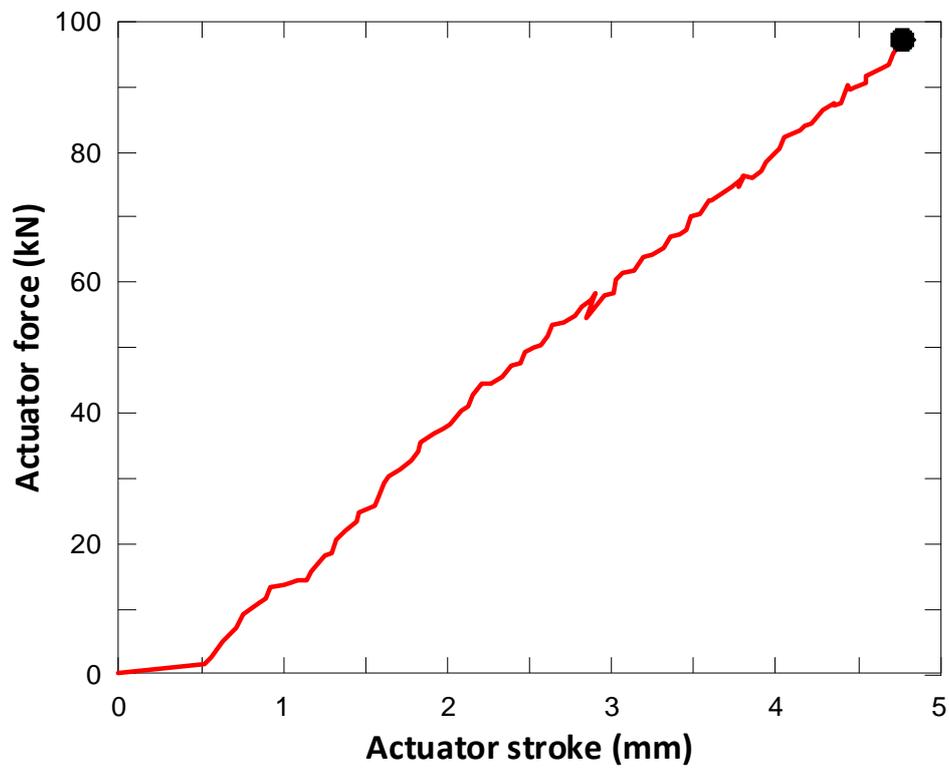


圖 3.64 DIP(F)400-B2 撓曲試驗之致動器力量與位移關係圖[34]

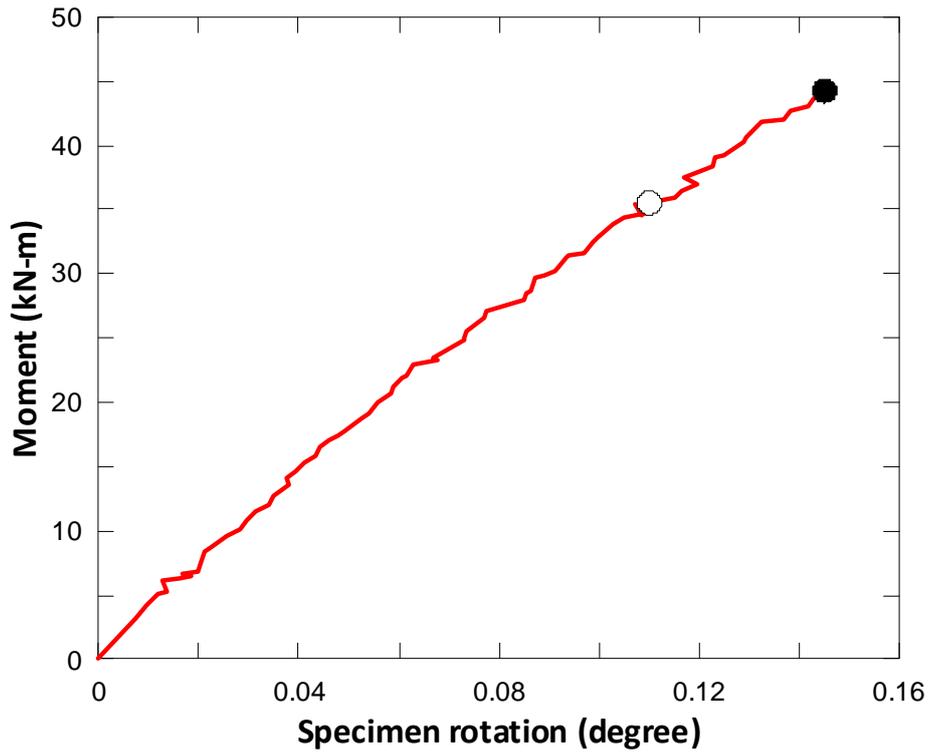


圖 3.65 DIP(F)400-B2 撓曲試驗之彎矩與相對轉角關係圖[34]



圖 3.66 DIP(F)400-B1 試驗終止情形[34]



圖 3.67 DIP(F)400-B2 試驗膠圈 [34]

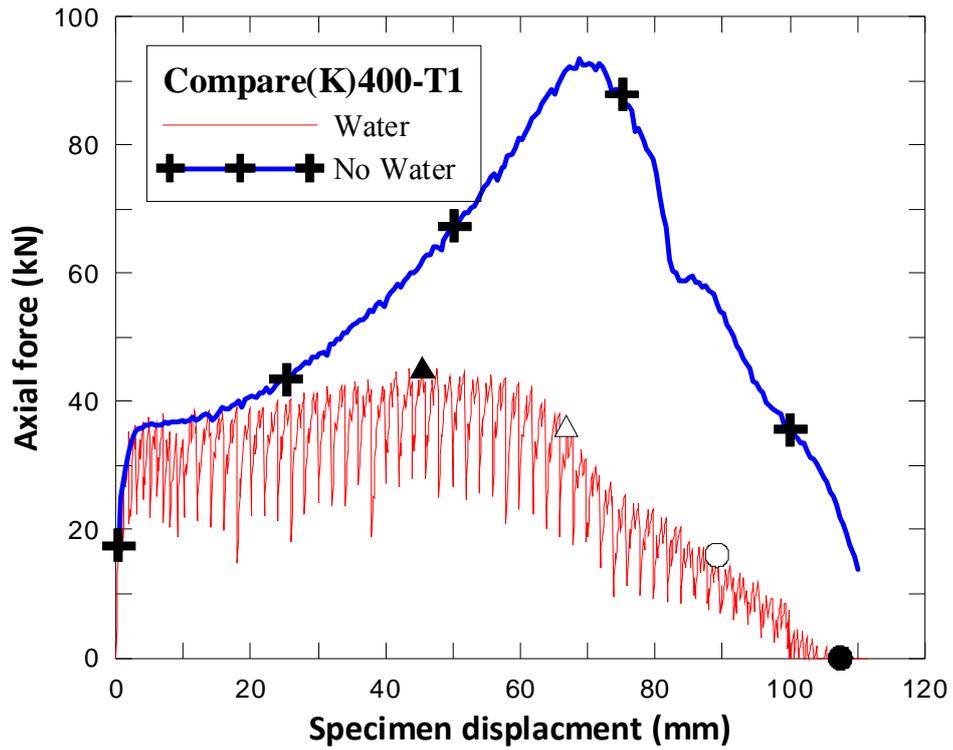


圖 3.68 DIP(K)400-T1 與無水拉力試驗比較圖[10]

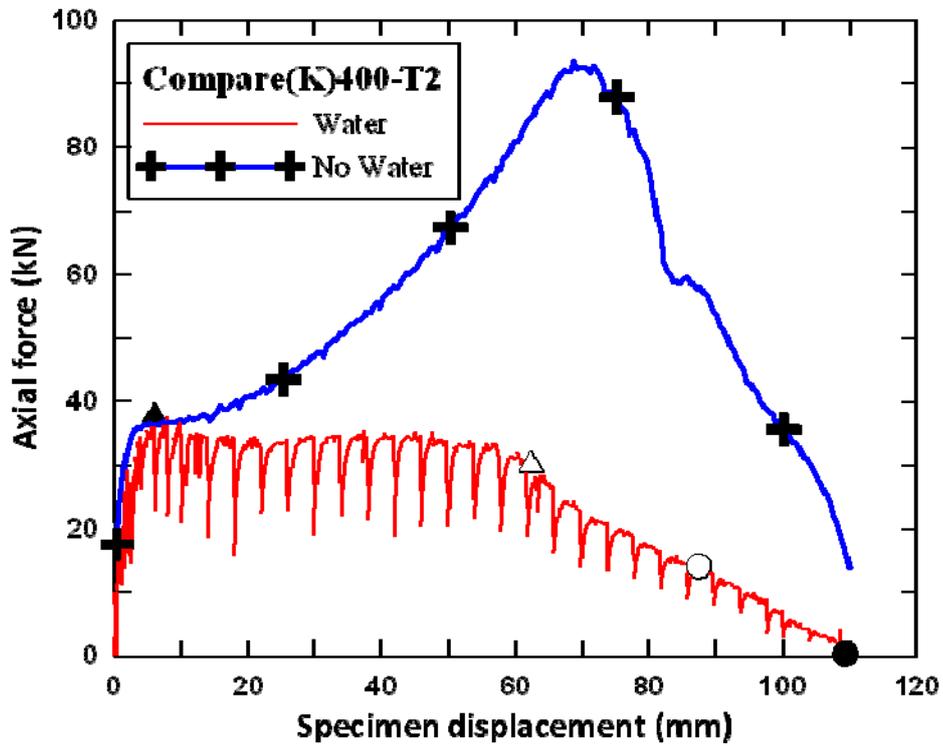


圖 3.69 DIP(K)400-T2 與無水拉力試驗比較圖[10]

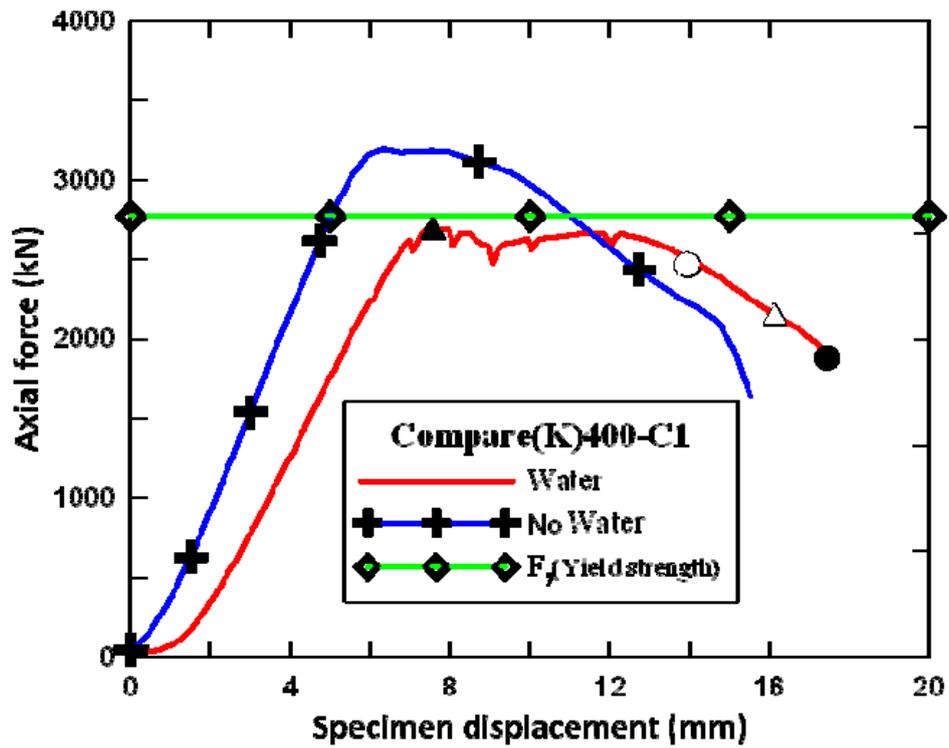


圖 3.70 DIP(K)400-C1 與無水壓力試驗比較圖[10]

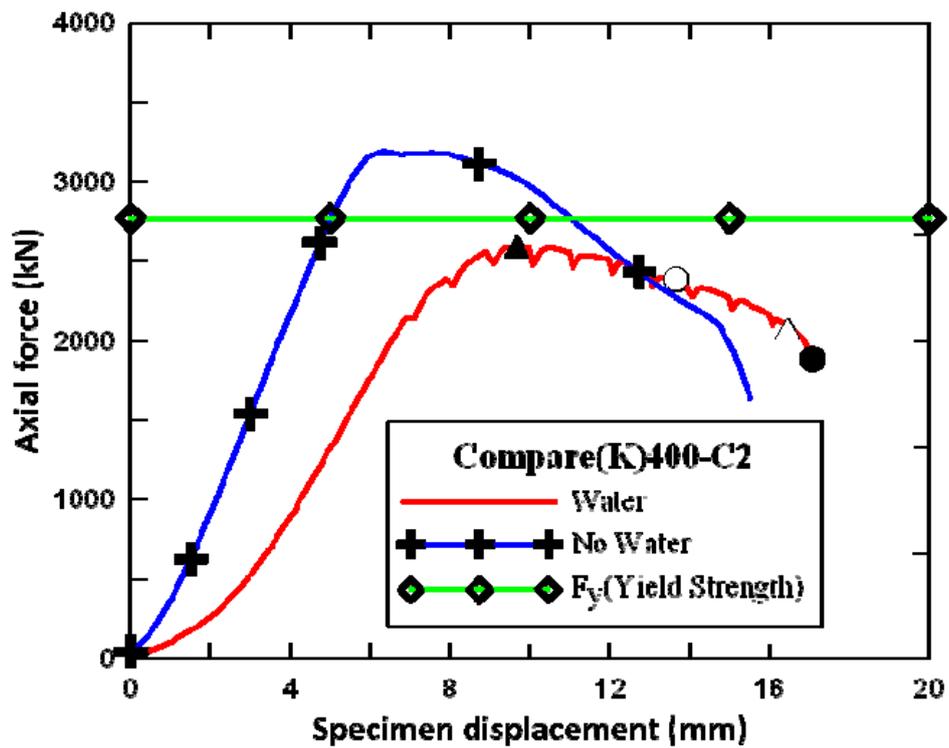


圖 3.71 DIP(K)400-C2 與無水壓力試驗比較圖[10]

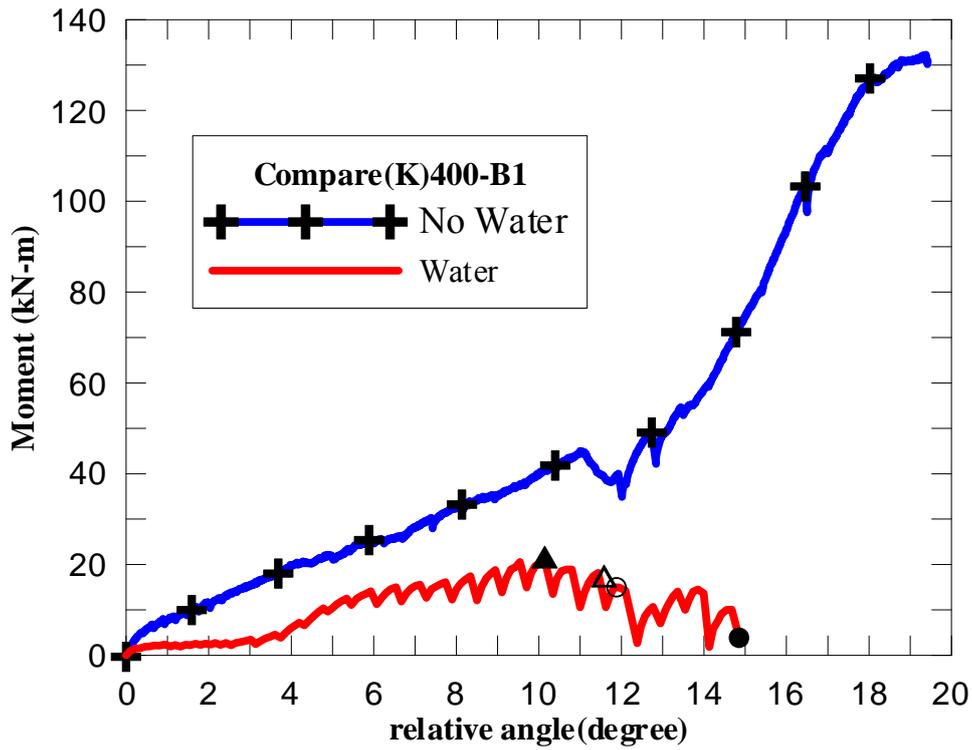


圖 3.72 DIP(K)400-B1 與無水撓曲試驗比較圖[10]

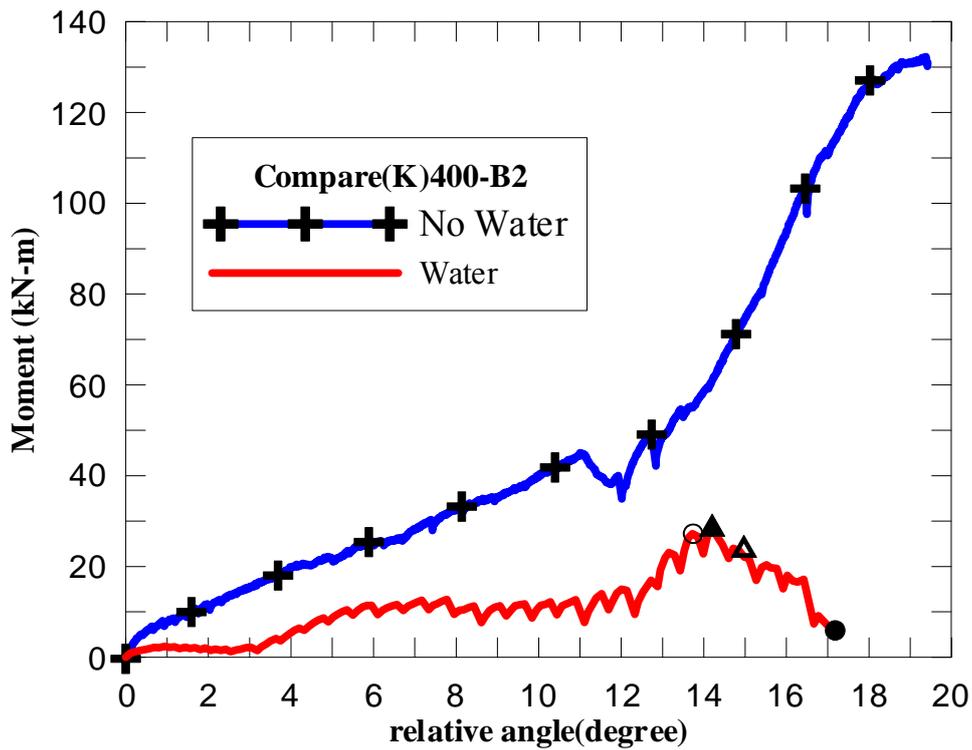


圖 3.73 DIP(K)400-B2 與無水撓曲試驗比較圖[10]

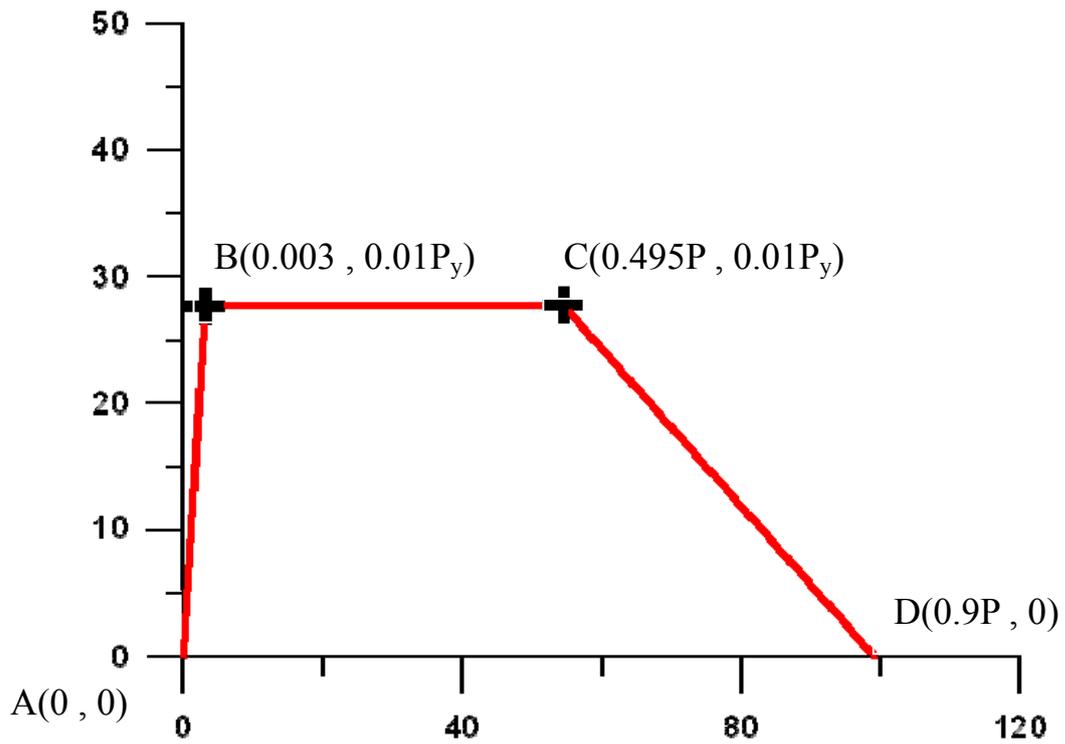


圖 3.74 K 型接頭軸拉力非線性鉸示意圖

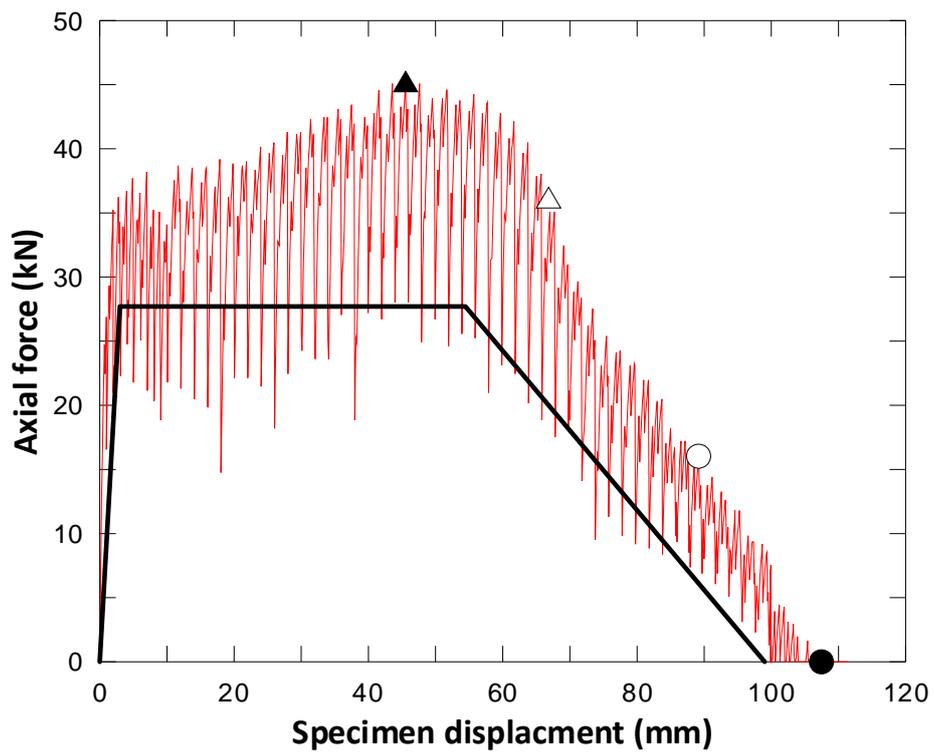


圖 3.75 DIP(K)400-T1 與接頭軸拉力非線性鉸之比較[33]

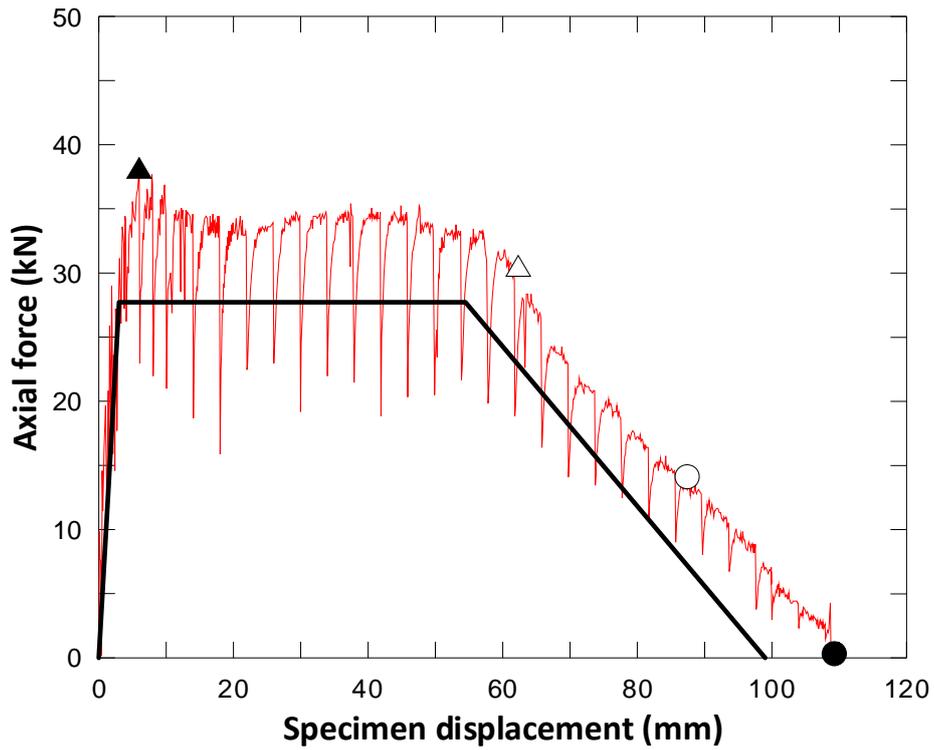


圖 3.76 DIP(K)400-T2 與接頭軸拉力非線性鉸之比較[33]

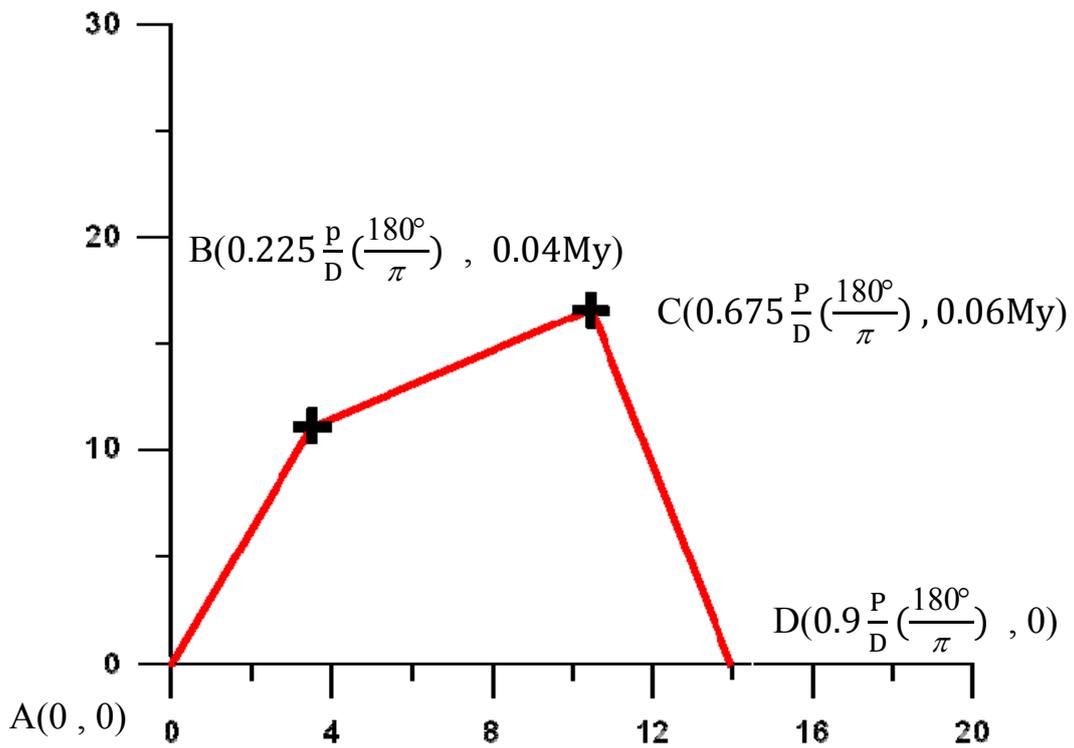


圖 3.77 K 型接頭彎矩非線性鉸示意圖

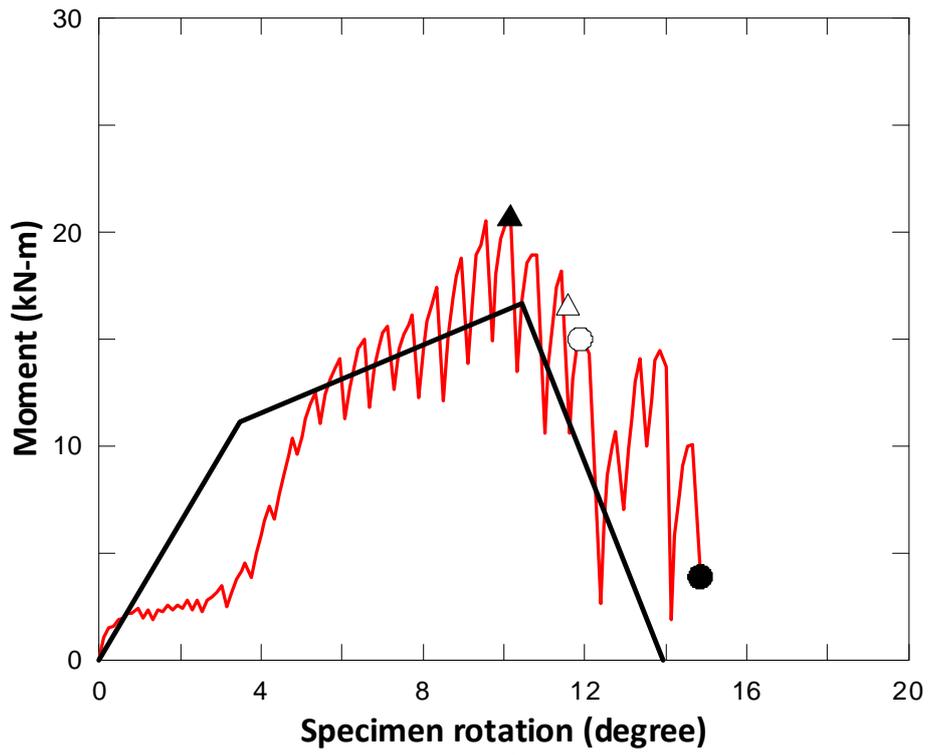


圖 3.78 DIP(K)400-B1 與接頭彎矩非線性鉸之比較[34]

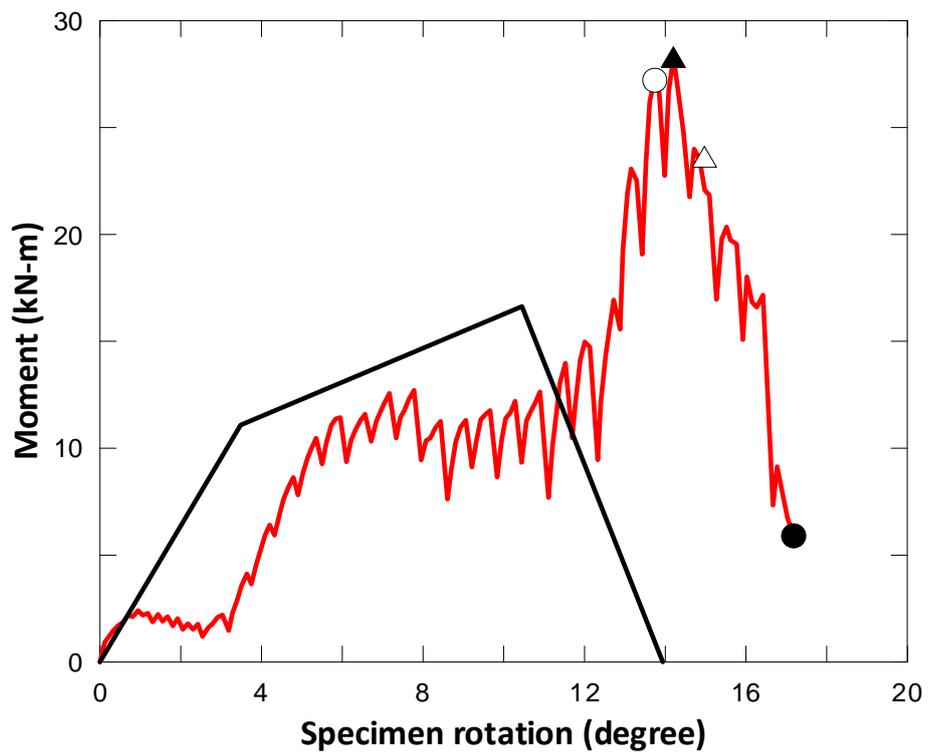


圖 3.79 DIP(K)400-B2 與接頭彎矩非線性鉸之比較[34]

第四章 理論分析與非線性鉸建立

本章節利用有限元素分析軟體 ABAQUS 建立簡化之延性鑄鐵管試驗模型，模擬管線之軸向抗壓力學行為，考慮試體在含水抗壓試驗過程中，產生局部挫屈(local buckling)，對於試體模型利用挫屈模態分析導入初始缺陷(Imperfection)，為了使分析結果更具有合理性，在模型的後挫屈行為(post buckling)使用 ABAQUS-Riks 方法分析。

取得延性鑄鐵管構件廣義力與廣義位移關係之後，接下來建立延性鑄鐵管構件的非線性鉸，本章將建立延性鑄鐵管軸壓力非線性鉸，一般而言，如欲使用商用有限元素軟體如 ETABS 或 SAP2000 進行側推分析，則必須給定模型構件非線性鉸來模擬廣義力與廣義位移關係，如彎矩非線性鉸、剪力非線性鉸、軸力非線性鉸，因此，為了簡化分析，對於非線性鉸的設立，一般使用多線性曲線來模擬構件實際非線性力與位移行為，本章節的目的將由 ABAQUS 分析輸出後的結果，利用 SAP2000 建立軸壓力非線性鉸。

4.1 ABAQUS 非線性挫屈介紹

在線性分析中，假設構件為小變形，且應力與應變曲線為一線性關係，構件的勁度(stiffness)為一常數，且載重大小與邊界條件在分析前後皆不改變，在分析過程中，構件的變形、載重施載順序以及方向等皆不影響分析結果。除此之外，構件對於不同的加載情況，可以使用常數來進行比例變換或互相疊加的方式，得到另一種全新的載重，而此種疊加方式所造成的構件應力、應變、位移等結果皆是可以累加的；在非線性分析中，構件的應力應變曲線為非線性關係，且其勁度隨著構件變形而改變，構件的載重大小與邊界條件在分析前後皆有可能改變，而構件的變形、載重施載順序及方向皆會影響分析結果，對於不同的加載情況，疊加原理已不再適用，所以不同的載重都必須獨立求解，一般而言非線性的來源有三種：材料非線性、幾何非線性、

邊界非線性。

線性特徵值分析對於預測挫屈載重為最常使用的方法之一，但是挫屈前後的穩定性問題以及在分析過程中涉及到材料非線性與幾何非線性的狀況，必須進行非線性分析，在本文此章節，即利用弧長法(Riks Method)，考慮幾何非線性靜態問題有時涉及到挫屈(buckling)或倒塌(collapse)可能，即力與位移曲線出現負的勁度(曲線下降段)，且結構必須釋放應變能來維持平衡，而 Riks 法可在不穩定的模擬過程中取得動態平衡，其相關理論內容可參閱 ABAQUS 使用手冊[28]，在此不多作著墨。

進行 ABAQUS 非線性挫屈分析有三個步驟，第一步為特徵值挫屈分析；第二步，將挫屈模態導入到完美幾何的圓管模型中作為初始缺陷，一般而言選擇挫屈第一模態，且比例因子的選擇則參考國家地震工程研究中心報告[20]取殼厚度之 2%；第三步，使用 Riks 法進行分析。

ABAQUS 中非線性挫屈分析可採用 Riks 法，考慮材料非線性、幾何非線性受到初始缺陷的影響，而初始缺陷可以透過線性挫屈模態以及一般節點位移來描述。

4.2 理論分析與試驗比較

為了驗證本節理論分析之合理性，將選擇延性鑄鐵管件標稱管徑 DN100、DN200、DN400、DN600 四種管徑之分析模型，在管內加入與試驗相同的水壓值後進行非線性挫屈分析，輸出的力與位移曲線與所進行軸向抗壓試驗四種管徑試體比較，考慮模型與實際試驗的力與位移曲線趨勢、破壞模式等，對於數值模型與實際試驗誤差作一合理的修正，以便增加模型的合理性。

如圖 4.1、圖 4.2、圖 4.3、圖 4.4 為 DN100、DN200、DN400、DN600 數值模型破壞型式，因為模型對稱關係，可以發現在管體的兩端皆發生局部挫屈，兩端皆發生大變形；最後考慮試驗時，油壓致動器衝程產生的初始誤差作進一步修正，其結果如圖 4.5、圖 4.6、圖

4.7、圖 4.8，無水試驗結果以及 ABAQUS 無水模擬結果參考國家地震工程研究中心報告[10]，作了上述修正之後，可以發現其結果皆趨於保守。

藉由所有試驗結果以及數值模擬之結果，分析其力量的峰值，整理成表格如表 4.1 所示，可以發現 DN400 以下的管徑，其模擬有水之結果的力量峰值大約是模擬無水之結果的 87%，折減了 13%，再從真實試驗去觀察，其真實有水試驗之結果的力量峰值大約是真實無水試驗之結果的 85%，折減了 15%，因此本文提出以下合理之假設：雖然沒有施作 DN100 以及 DN200 的有水試驗，但是透過數值模擬之結果以及 DN400 的試驗結果，可以推測 DN100 以及 DN200 有水試驗的力量峰值大約是無水試驗力量峰值的 85% 左右。

4.3 延性鑄鐵管 K 型接頭壓力非線性鉸建立與設定

當延性鑄鐵管構件受軸壓力時，且考慮材料非線性與幾何非線性，構件的斷面軸力與管體位移曲線關係主要可分成三個階段，第一個階段為斷面之應力皆小於材料之降伏應力，在此階段下，斷面之軸壓力與位移為線性關係，且其斜率為 EI ，第二階段斷面開始進入塑性區域，因此斷面之軸壓力與位移之關係開始為非線性，其中此階段之曲線斜率必小於第一階段之斜率 EI ，第三階段為斷面之位移到達臨界位移 Δ_{cr} ，斷面軸壓力因為發生局部挫屈而開始下降，軸力參數以及位移參數參考國家地震工程研究中心報告[10]，如表 4.2。

由上述可知，要對於本章節利用 ABAQUS 分析以及試驗結果所得之延性鑄鐵管件軸壓力與位移關係作一簡化，則使用三線性來簡化是個不錯的簡化方式，如圖 4.9，由前一小節可知有水模擬數值分析的力量峰值大約降低了 15%，因此本文將接頭壓力非線性鉸的力量峰值以及位移折減 20%，以求保守，其中 AB 段用來模擬斷面線彈性行為，BC 段用來模擬斷面到達管體降伏軸力 P_y 的 0.8 倍與降伏位移 Δ_y 的 0.8 倍後的非線性行為，CD 段則是用來模擬斷面達到管體臨界軸力 P_{cr} 的 0.8 倍與臨界位移 Δ_{cr} 後，斷面因局部挫屈而下降之行為，在 CD

段中，本文為保守分析，因此在達到極限位移 Δ_u 的 0.8 倍後，延性鑄鐵管構件便無法再承受軸力，軸壓力非線性鉸與軸壓試驗比較如圖 4.10 以及圖 4.11 所示。

表 4.1 試驗結果以及數值模擬之結果

DN	100	200	400	600
D/t	16.67	33.33	57.14	66.67
無水壓試驗力量峰值 (kN)	1125.9	1944.5	3193	5524
有水壓試驗力量峰值 (kN)	-	-	2698	-
試驗之力量折減 (%)	-	-	15	-
模擬無水壓力量峰值 (kN)	856.1	1428.3	2998.9	5611.3
模擬有水壓力量峰值 (kN)	748.7	1256.8	2657.8	4188.5
模擬之力量折減 (%)	13	12	12	25

表 4.2 延性鑄鐵管軸壓力參數整理[10]

標稱管徑 DN(mm)	t(mm)	D/t	$P_{cr}(kN)$	$\Delta_{cr}(mm)$	$\Delta_u(mm)$
100	6	16.667	855.995	8.979	25.09
150	6	25	1152.441	10.033	28.715
200	6	33.333	1428.198	9.606	28.243
250	6	41.667	1702.997	8.304	25.062
300	6.5	46.154	2162.829	8.074	24.606
350	6.5	53.846	2462.099	6.593	19.956
400	7	57.143	2998.408	6.572	19.485
450	7.5	60	3574.094	6.685	19.21
500	8	62.5	4209.31	6.934	19.154
600	9	66.667	5610.183	7.818	19.716
700	10	70	7187.173	9.162	21.116
800	11	72.727	8949.993	10.893	23.251
900	12	75	10888.51	12.949	26.011
1000	13	76.923	12987.92	15.275	29.302
1100	14	78.571	15270.93	17.827	33.041
1200	15	80	17710.03	20.571	37.161
1350	16.5	81.818	21698.73	24.982	43.935
1500	18	83.333	26064.96	29.681	51.292
1600	19	84.211	29065.6	32.947	56.466
1650	19.5	84.615	30679.1	34.612	59.12
1800	21	85.714	35649.68	39.731	67.332
2000	23.5	85.106	44663.61	42.916	73.03
2100	24.5	85.714	48705.3	46.353	78.554
2200	25.5	86.275	53220.04	49.85	84.202
2400	27.5	87.273	61448.67	56.995	95.806
2600	29.5	88.136	71540.65	64.314	107.767

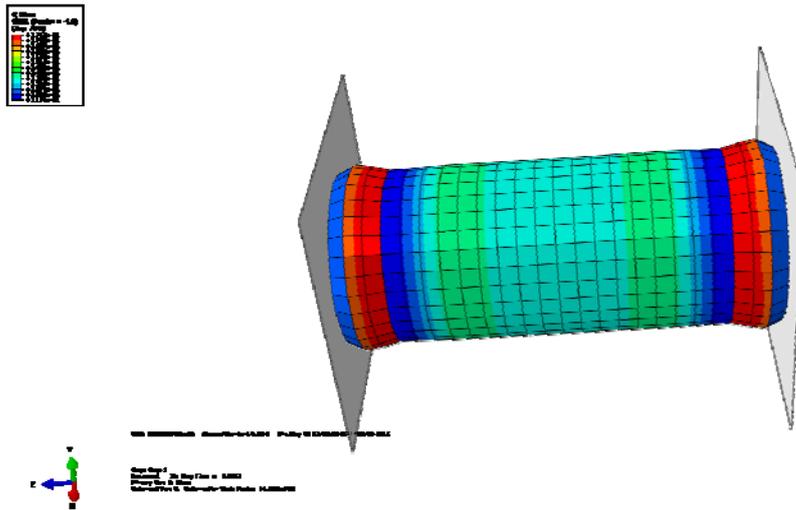


圖 4.4 DN600 數值模型破壞

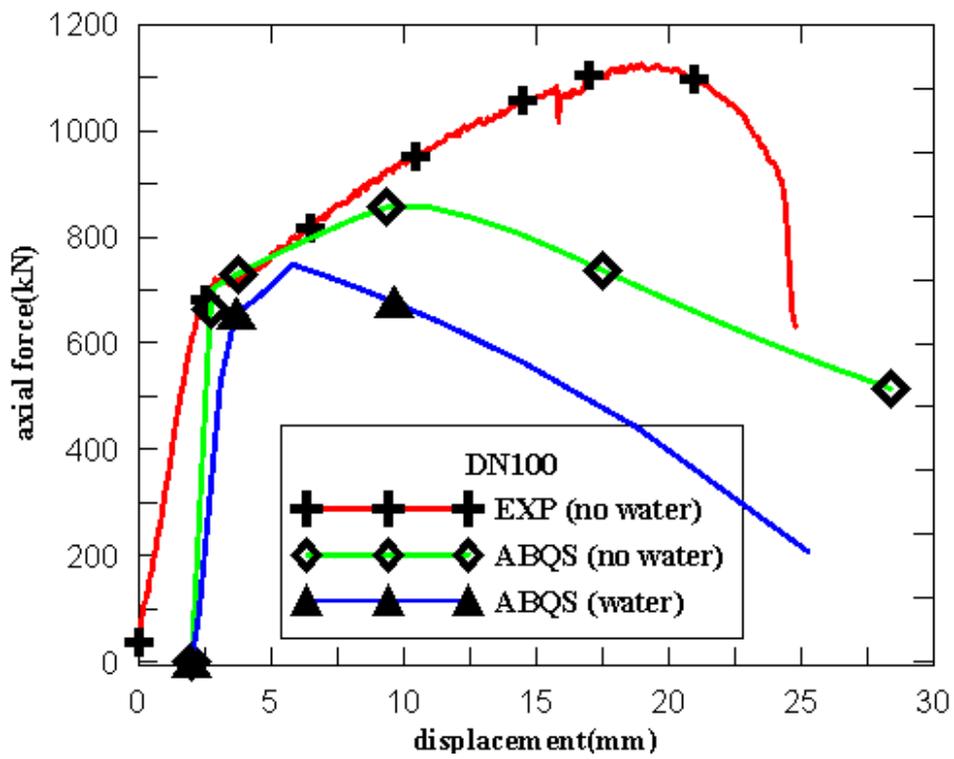


圖 4.5 DN100 數值模型與無水壓力試驗比較[10]

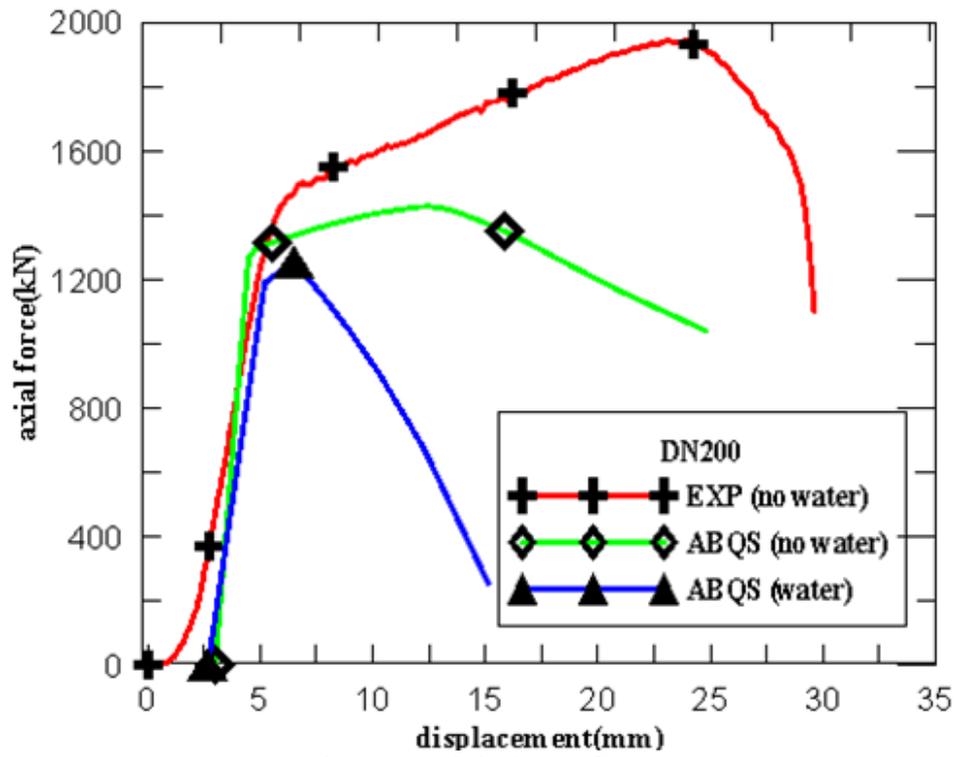


圖 4.6 DN200 數值模型與無水壓力試驗比較[10]

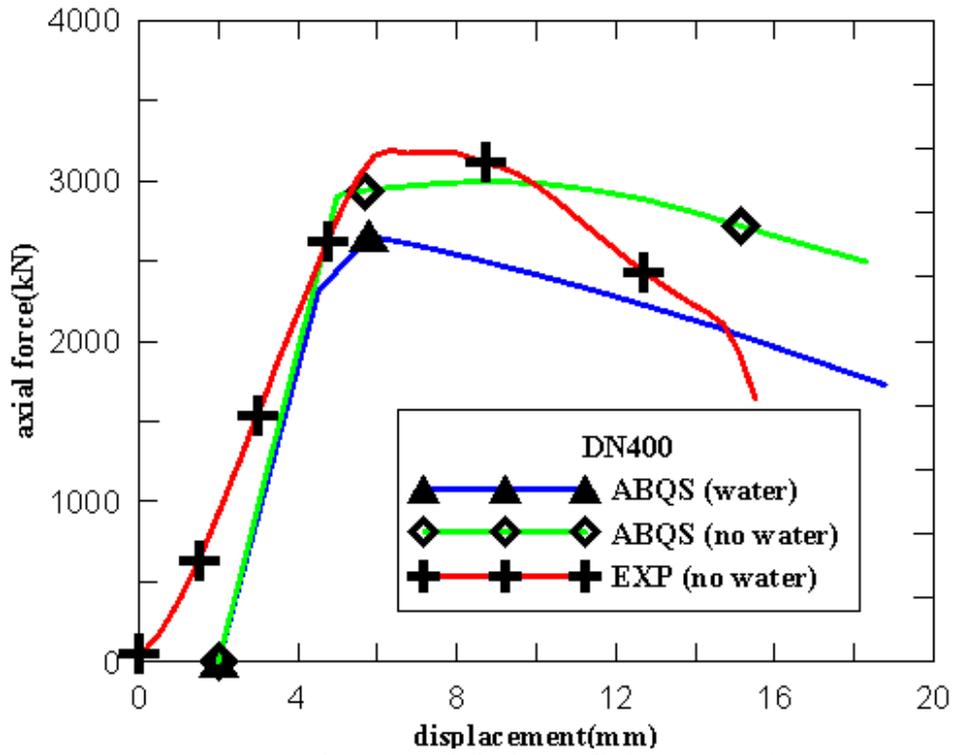


圖 4.7 DN400 數值模型與無水壓力試驗比較[10]

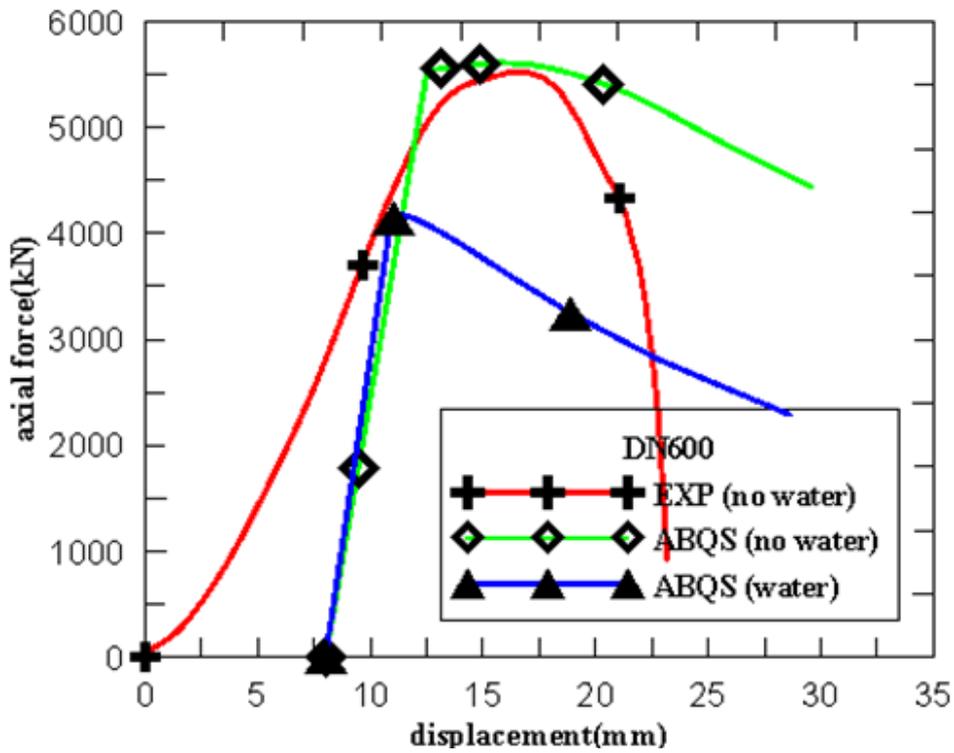


圖 4.8 DN600 數值模型與無水壓力試驗比較[10]

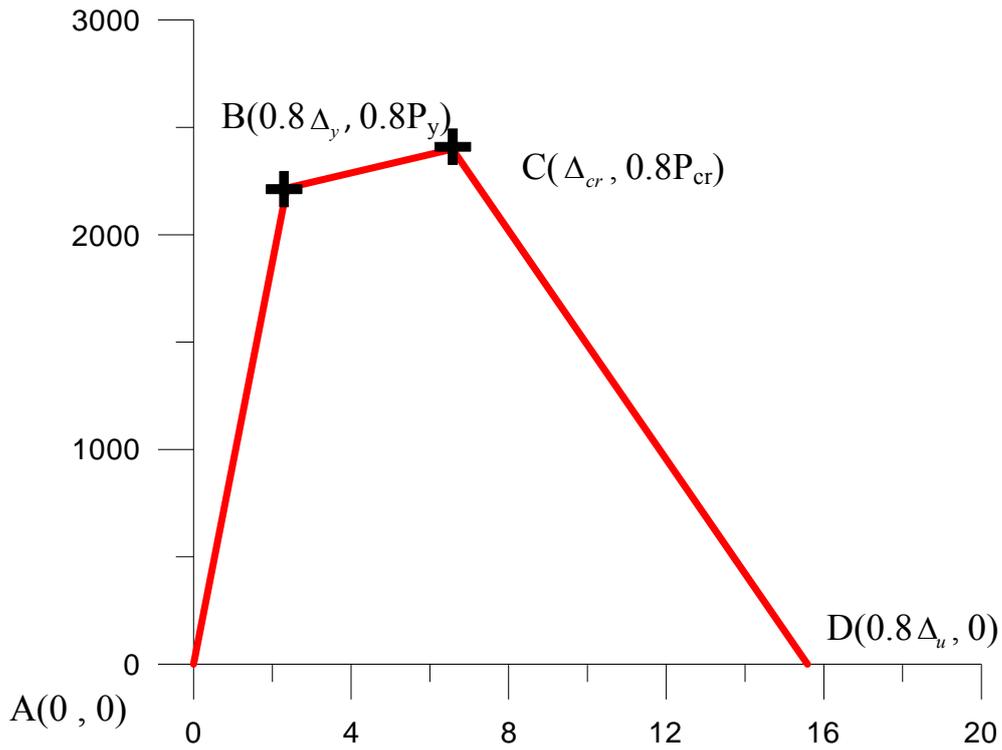


圖 4.9 K 型接頭壓力非線性鉸示意圖

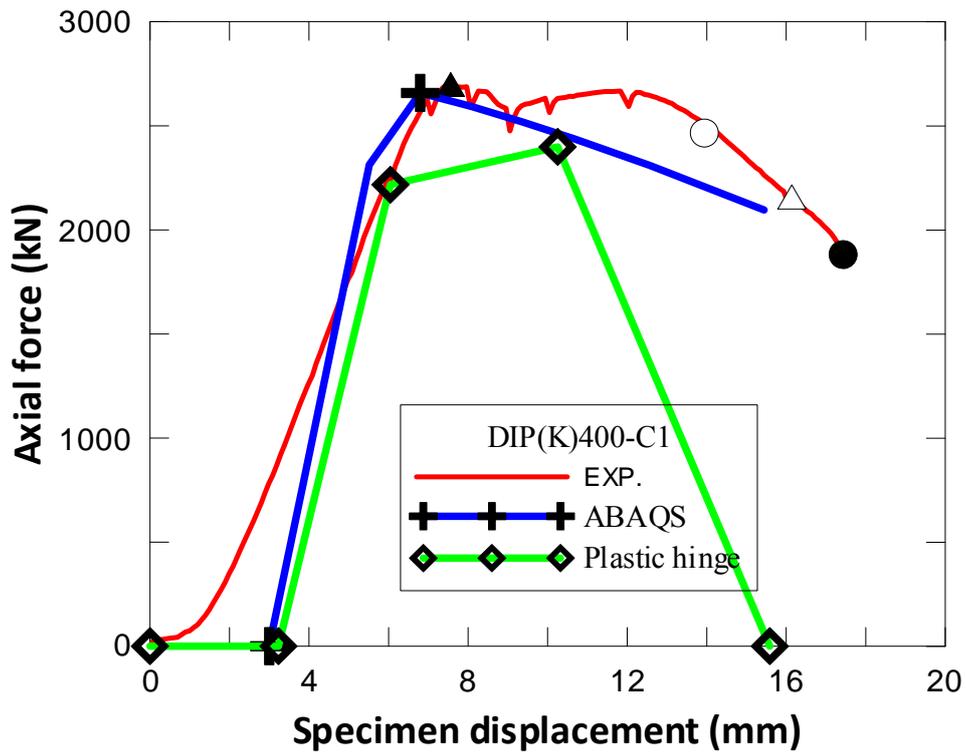


圖 4.10 DIP(K)400-C1 與接頭軸壓力非線性鉸之比較

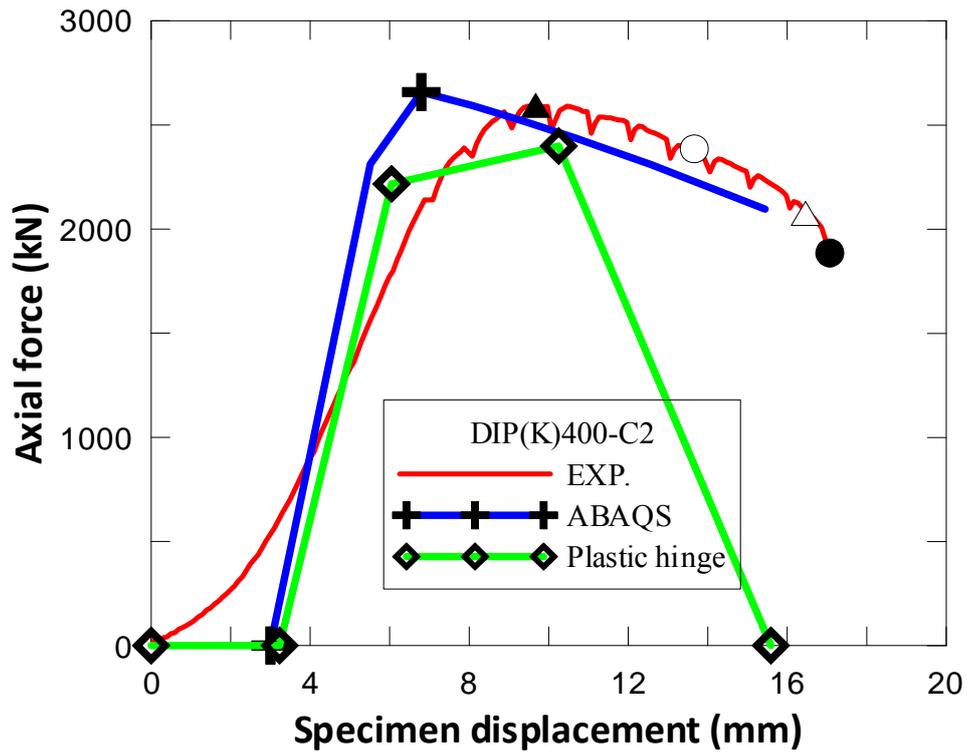


圖 4.11 DIP(K)400-C2 與接頭軸壓力非線性鉸之比較

第五章 案例分析

本章節主要目的為利用商用有限元軟體 SAP2000 以及前述章節的結論作一非線性側推分析，本章案例分析主要取 DN400 之延性鑄鐵管，當地表方向產生錯動時，稱之為平移斷層(strike-slip fault)，隨著管線與平移斷層之間的夾角不同，管線受力行為也跟著改變，本章節控制滾支承與地面的夾角，模擬分段管線受平移斷層夾角的影響，當管線與平移斷層之夾角小於 90 度如圖 5.1 (a)，管線受斷層錯動行為便是拉力與撓曲控制，當管線與平移斷層夾角大於 90 度如圖 5.1 (b)，管線受斷層錯動行為便是壓力與撓曲控制，藉由第三章的試驗結果以及第四章的模擬結果所取得接頭拉力、壓力、彎矩塑鉸參數，探討分段管線與平移斷層夾角的相互作用與斷層錯動量的關係，最後與國家地震工程研究中心報告[10]的連續管線之結果，作進一步的比較與探討。

5.1 利用 SAP2000 建立管線側推分析模型

DN400 案例分析中，主要參數條件如土壤性質、管材性質與埋深等參數可參考自來水管理設工程施工說明書[29]、侯信宇[13]、美國 ASCE(1984)規範[30]、Ha[31]等人之研究與美國康乃爾大學[32]之計畫報告，參數整理如表 5.1。

而軸向土彈簧與管體之間交互作用視為軸向土彈簧未降伏時，土壤與連續管於軸向之交互作用如同靜摩擦，當軸向土彈簧降伏，則兩者之間之行為如同動摩擦，由於本文所使用之土彈簧非線性行為是完美彈塑性，因此當土彈簧降伏後，便無法再提供更高承载力，然而隨著管線於斷層處的軸力漸增，管線為保持力平衡，因此遠離斷層處之土彈簧可能也因此開始降伏，隨著土彈簧降伏範圍越來越大，其軸力也可能開始漸增，為了確保管線長度可以展現出無限管長之非線性行為，本章節參考國家地震工程研究中心報告[20]，對於 DN400 之延性鑄鐵管取管長為 372m 來模擬無限管長的軸向行為，對於 SAP2000

而言，為了避免分析時計算量過大，因此在靠近斷層處之 30m 以長度為 0.2 倍直徑的梁元素來模擬，後面的 342m 則以長度為一倍直徑的梁元素來模擬，因此本案例計算非線性土彈簧時需要分段計算，模擬時在每個梁元素最左邊配置管體軸力非線性鉸，梁元素中點配置管體彎矩非線性鉸，圖 5.2 為非線性土彈簧性質。

由於標準生產的延性鑄鐵管長度為六公尺，每六公尺便需要安裝接頭來作續接，因此為求對稱的取半分析，本文在距斷層三公尺處的梁元素設定為第一個 K 型接頭非線性鉸，與管體非線性鉸設定方式相同，在梁元素的最左邊配置 K 型接頭軸力非線性鉸，梁元素中點配置 K 型接頭彎矩非線性鉸，之後每六公尺設定 K 型接頭非線性鉸，以模擬分段管線受側推之行為。

5.2 管線受平移斷層之案例分析(拉力破壞)

本節之案例分析針對管線受平移斷層之錯動行為作一探討，其中本節主要討論管線與平移斷層夾角小於 90 度下之情況，由於本文之模型乃是取半分析，因此如要分析分段管與平移斷層在不同夾角下之行為，則自由端的邊界條件便需修正，本章在探討管線受平移斷層錯動時，假設管線變形為反對稱，因此管線於斷層交界處的位移便沿著斷層面移動，且此一位移量為斷層總錯動量的一半，為了模擬管線於斷層處之位移是沿著斷層面移動之現象，因此本文於數值模型之自由端設置了滾支承(roller)，並改變滾支承支撐面的角度如圖 5.3，分析時便沿著滾支承支撐面方向加載，因為本文是取半分析，因此管線沿著滾支承之位移便為實際上斷層一半總錯動量 $\Delta_f/2$ ，由圖 5.3 可知 $\Delta_f \sin \theta_s/2$ 為一半斷層側向錯動量而 $\Delta_f \cos \theta_s/2$ 為另一半的斷層軸向錯動量。

本節便由上述修正過之自由端邊界條件來探討管線在不同平移斷層夾角下之行為，其中此節討論七個案例，這七個案例的管線與平移斷層之夾角分別為 90、75、60、45、30、15 與 0 度，本章節分析時有考慮了二階效應與幾何大變形效應。分析結果如圖 5.4、圖 5.7、

圖 5.12、圖 5.17、圖 5.22、圖 5.27、圖 5.32 為管線靠近斷層 20m 之破壞示意圖，可以發現變形最大的位置皆發生在第一個接頭，且塑鉸皆發生在第一個接頭上，在以上七個案例之破壞示意圖中，從非線性鉸的顏色便可知道每個梁元素之力與位移關係發展至哪個一階段，其中本文定義當有第一個非線性鉸達到 M_{cr} 或 F_{cr} 時，即塑鉸參數 C 點，則管線便達到破壞，從以上管線達破壞之示意圖可看出儘管數值模型全長為 372m，但是管線之破壞卻集中在距斷層 3 公尺處的接頭上，圖 5.8、圖 5.13、圖 5.18、圖 5.23、圖 5.28、圖 5.33 則為管線達破壞時，距離斷層 30 公尺附近之撓曲變形圖，其中當管線與平移斷層之夾角為 0 度時，管線只有軸向變形而無撓曲變形，由上述提及之撓曲變形圖可看出，對於撓曲變形而言，當管長為 30m 時，遠離斷層處幾乎已經無撓曲變形，因此本文分析之模型管長對於模擬無限長分段管之撓曲行為是足夠的，接著進一步討論管線與平移斷層在不同夾角下之破壞行為，由於接頭的拉力非線性鉸容量相當低，只有管體拉力非線性鉸的 0.01 倍，因此從 0 度到 90 度的夾角皆為接頭的拉伸破壞，但是從圖 5.27 以及圖 5.32 可以發現當管線與斷層夾角為 90 度與 75 度時，也有接頭的撓曲塑鉸產生。

分析所得之接頭處力與位移關係如圖 5.5、圖 5.9、圖 5.14、圖 5.19、圖 5.24、圖 5.29、圖 5.34 由以上七個案例之斷層處力與位移關係可看出，當管線與斷層夾角變小時，管線於接頭處之軸力亦隨之變大而剪力則是隨之變小，但從接頭處之力與位移關係可能較不便判斷管線之破壞行為，因此本文另將七個案例之管線達破壞時之軸力圖繪於圖 5.6、圖 5.10、圖 5.15、圖 5.20、圖 5.25、圖 5.30、圖 5.35，彎矩圖繪於圖 5.11、圖 5.16、圖 5.21、圖 5.26、圖 5.31、圖 5.36，觀察軸力圖以及彎矩圖可以發現，管體最大軸力或是最大彎矩都沒有到達管體降伏的數值，證明管體沒有破壞，而是接頭破壞，最後由七個案例之彎矩與軸力圖可看出，在遠離斷層 40m 後，管線幾乎已經無彎矩與軸力，由此可知本文於此案例之數值模型管長是足夠的。

5.3 管線受平移斷層之案例分析(壓力與撓曲破壞)

本節所探討之案例為管線與平移斷層夾角大於90度之情形如圖5,1(b)，本節共探討了六個案例，這六個案例之斷層角分別為105、120、135、150、165與180度，分析結果如圖5.37、圖5.42、圖5.47、圖5.52、圖5.57、圖5.62為管線靠近斷層5m之破壞示意圖，同樣地在這六個案例中，管線之破壞範圍仍舊是在距斷層3m處的接頭上，圖5.38、圖5.43、圖5.48、圖5.53與圖5.58為管線達破壞時之靠近斷層30m處之撓曲變形，同樣由於當管線與平移斷層夾角為180度時，管線行為是軸力主導因此無撓曲變形，由撓曲變形同樣可看出對於撓曲變形而言，遠離斷層30m後幾乎無撓曲變形，因此本文模型長度是足夠的，接著進一步討論管線之破壞行為，首先從圖5.37、圖5.42可看出當管線與平移斷層夾角為105、120度時，管線之破壞行為均是撓曲破壞，從圖5.47、圖5.52、圖5.57、圖5.62，則可看出當管線與平移斷層夾角為135、150、165與180度時為軸力破壞，在135度依然有接頭的撓曲塑鉸產生。

分析所得之接頭處力與位移關係如圖5.39、圖5.44、圖5.49、圖5.54、圖5.59、圖5.63由以上六個案例之斷層處力與位移關係可看出，當管線與斷層夾角變大時，管線於接頭處之軸力亦隨之變大而剪力則是隨之變小，但從接頭處之力與位移關係可能較不便判斷管線之破壞行為，因此本文另將七個案例之管線達破壞時之軸力圖繪於圖5.40、圖5.45、圖5.50、圖5.55、圖5.60、圖5.64，彎矩圖繪於圖5.41、圖5.46、圖5.51、圖5.56、圖5.61，接著比較容許斷層錯動量如表5.2、表5.3與圖5.65，由圖5.65可發現管線在不同角度下之容許錯動量並非與90度對稱，即斷層角為105度時之容許錯動量不等同於斷層角為75度時之容許錯動量，且可發現當管線行為是拉力控制時，其容許錯動量一般會比壓力與撓曲控制下的容許錯動量還小，其原因為接頭的拉力非線性鉸容量相當低，當軸力隨錯動角度變大時，接頭的拉脫破壞會比管體挫屈破壞更早發生，再與國家地震工程研究中心報告

[10]的連續管容許錯動量做一比較，0 度到 75 度可看出分段管的容許錯動量比連續管的容許錯動量低很多，主要是因為接頭拉力非線性鉸的容量只有管體拉力非線性鉸的 0.01 倍，因此容許錯動量也較低，觀察 90 度到 135 度可發現分段管的容許錯動量比連續管的容許錯動量高，主要是因為接頭可承受的撓曲變形角度較管體的角度大，因此容許錯動量較高，最後觀察 150 度到 180 度，分段管的容許錯動量比連續管的容許錯動量低一點，主要是因為接頭的壓力非線性鉸建立的位移以及力量皆為管體壓力非線性鉸的 0.8 倍，因此分段管的容許錯動量也約為連續管的 0.8 倍。

表 5.1 案例分析數值模擬之參數整理[29][30][31][32]

標稱管徑	DN400
埋設深度 H(至管中心距離)	72.875
側向土彈簧極限承载力 P_u (kN/m)	0.03625
側向土彈簧降伏位移 y_u (m)	0.03625
側向土彈簧徑度 (kN/m ²)	2010.345
軸向土彈簧極限承载力 f_u (kN/m)	8.825
軸向土彈簧降伏位移 x_u (m)	0.00254
軸向土彈簧徑度 (kN/m ²)	3474.41
管材彈性模數 $E = 167\text{GPa}$ ，土壤單位重 $\gamma_s = 20\text{kN/m}^3$ ，土壤內磨擦角 $\phi = 40^\circ$ ，管材與土壤間磨擦係數 $\mu_0 = 0.8$ 。unit：kN、m	

表 5.2 斷層容許錯動量比較(拉力控制)

管線與平移斷層夾角	本文之研究 (分段管)	國家地震工程研究中心報告[10] (連續管)
0	0.1104	0.3689
15	0.1142	0.3809
30	0.1269	0.4213
45	0.1541	0.5074
60	0.2129	0.6612
75	0.3659	0.578
90	1.0256	0.4217
Unit : m		

表 5.3 斷層容許錯動量比較(撓曲與壓力控制)

管線與平移斷層夾角	本文之研究 (分段管)	國家地震工程研究中心報告[10] (連續管)
105	0.9942	0.3411
120	0.4501	0.3532
135	0.4226	0.4053
150	0.3237	0.4150
165	0.2862	0.3676
180	0.2755	0.3535
Unit : m		

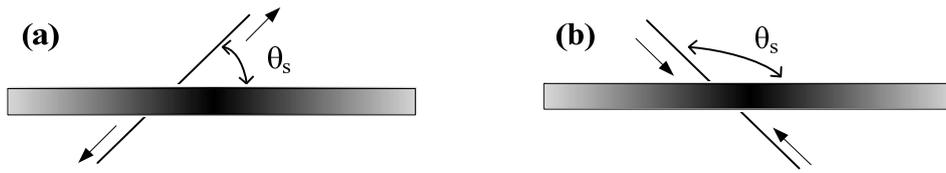


圖 5.1 管線受斷層錯動示意圖

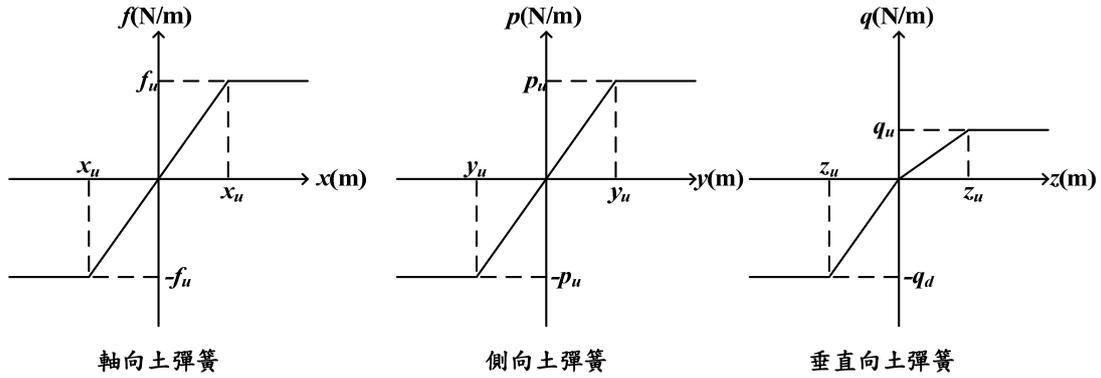


圖 5.2 ASCE(1984)所定義之非線性土彈簧示意圖[30]

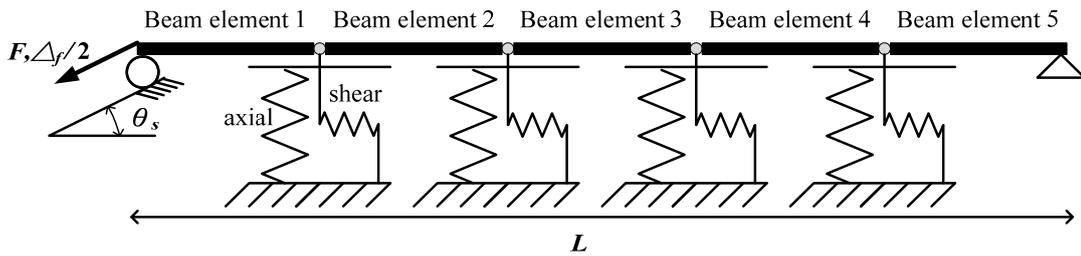


圖 5.3 自由端修正後之數值模型[10]



圖 5.4 管線與平移斷層夾角為 0 度之破壞示意圖(拉力破壞)

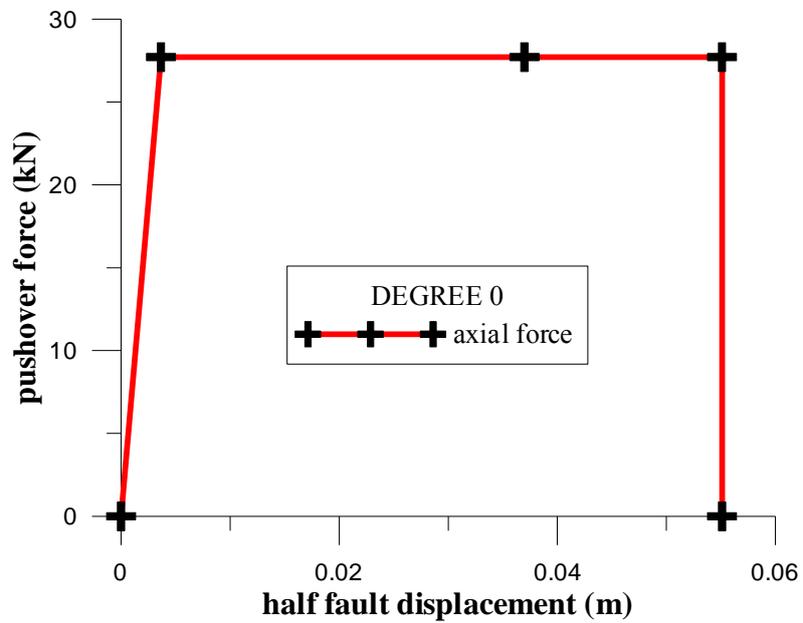


圖 5.5 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 0 度)

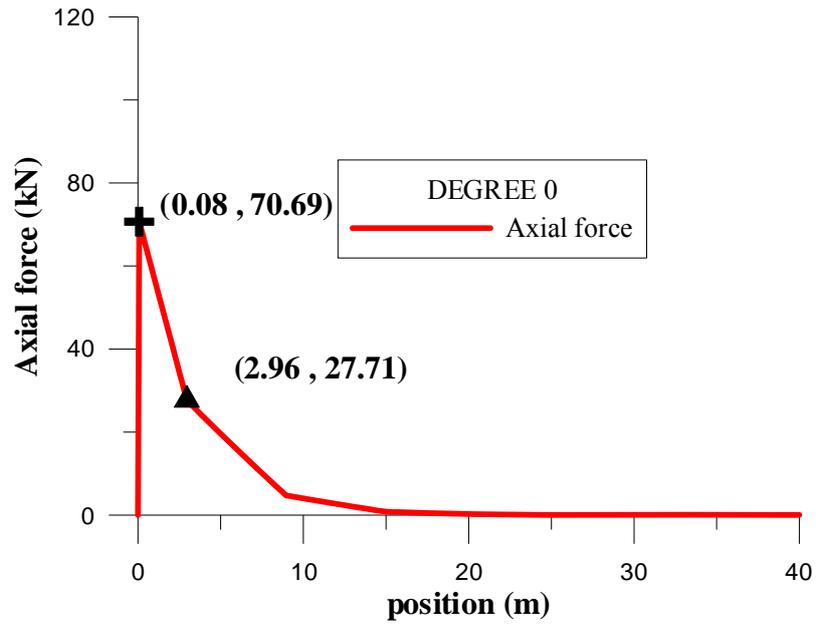


圖 5.6 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 0 度)



圖 5.7 管線與平移斷層夾角為 15 度之破壞示意圖(拉力破壞)

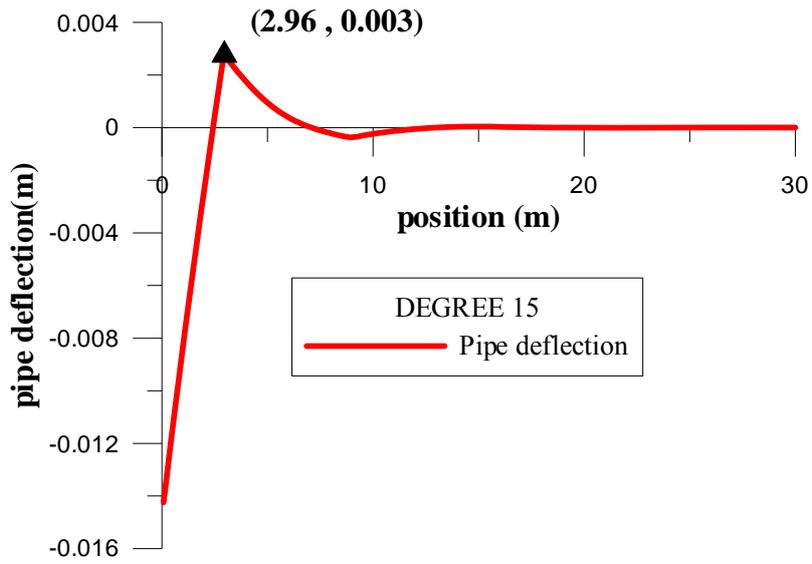


圖 5.8 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 15 度)

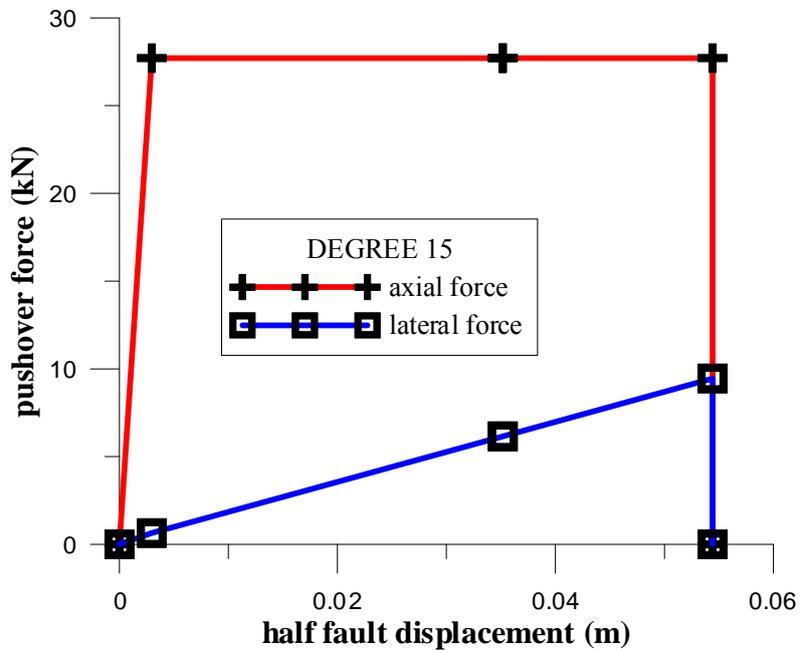


圖 5.9 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 15 度)

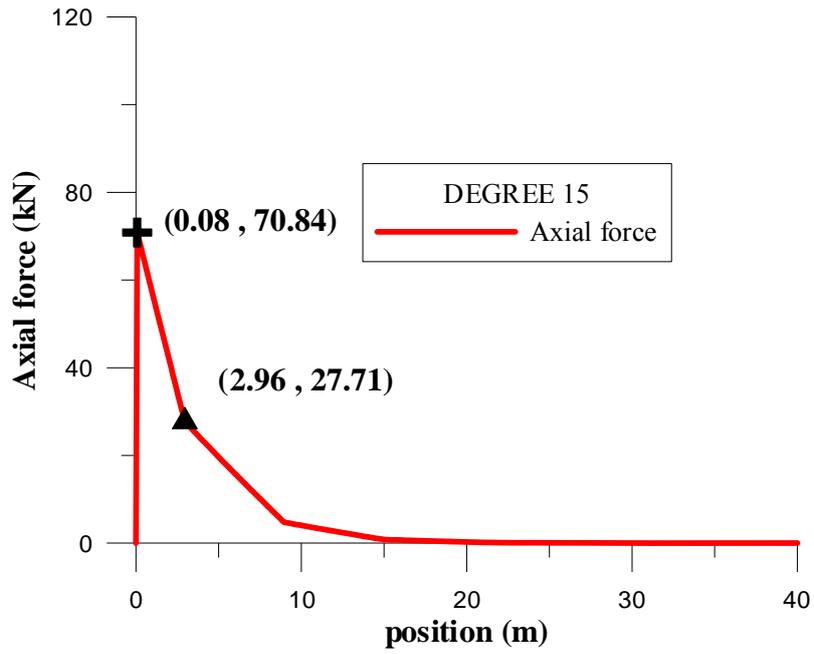


圖 5.10 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 15 度)

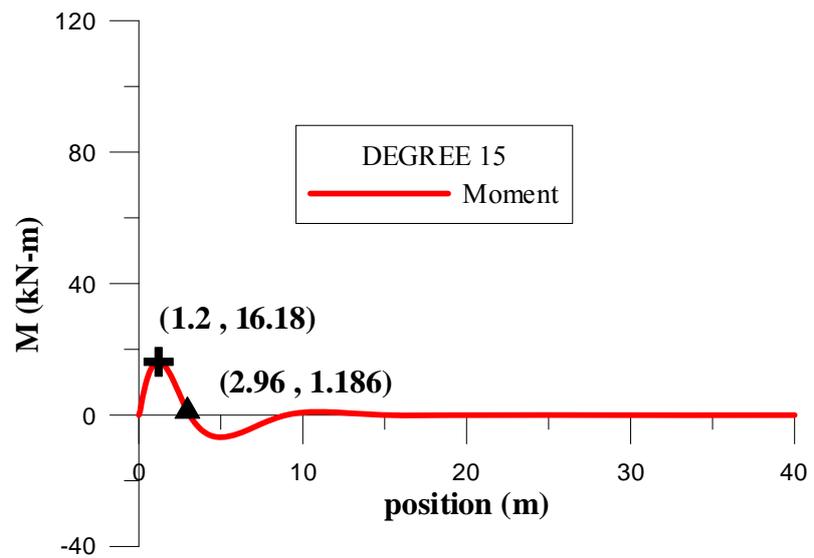


圖 5.11 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 15 度)



圖 5.12 管線與平移斷層夾角為 30 度之破壞示意圖(拉力破壞)

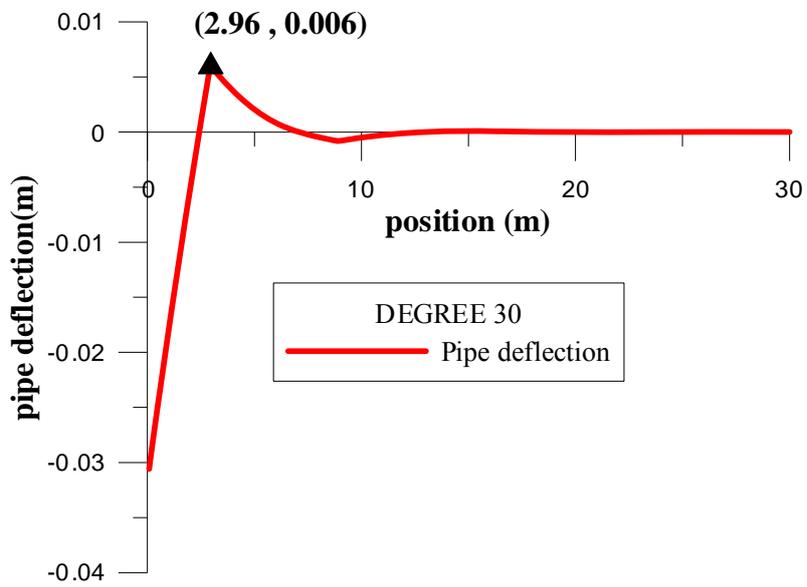


圖 5.13 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 30 度)

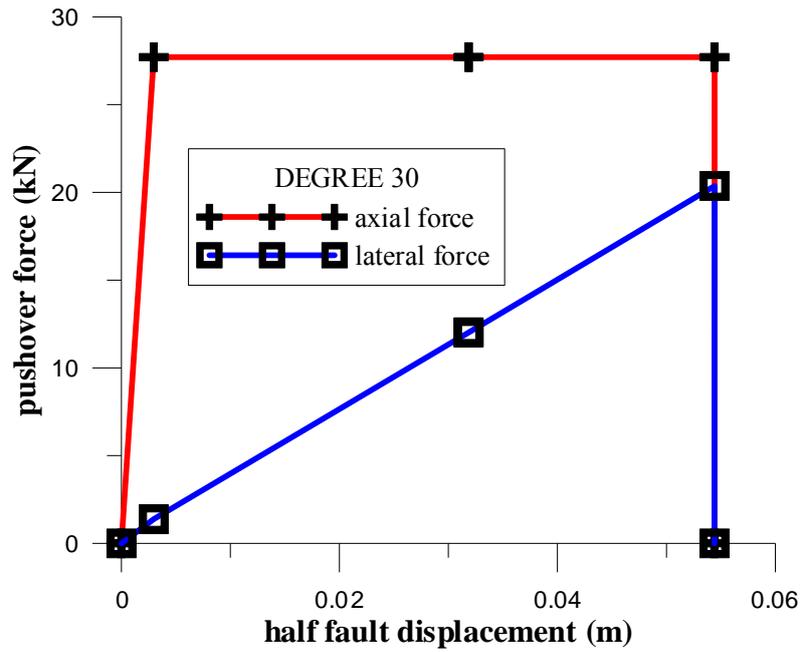


圖 5.14 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 30 度)

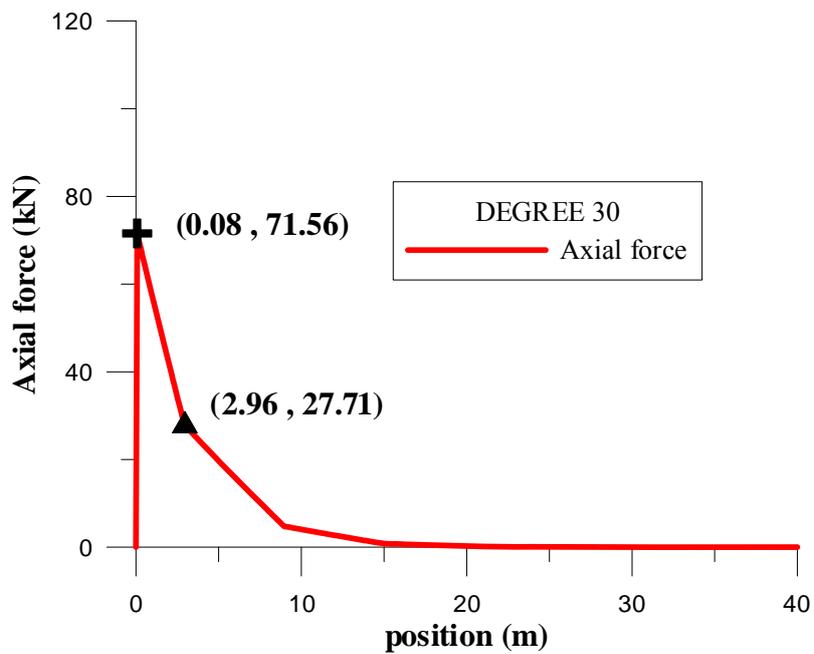


圖 5.15 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 30 度)

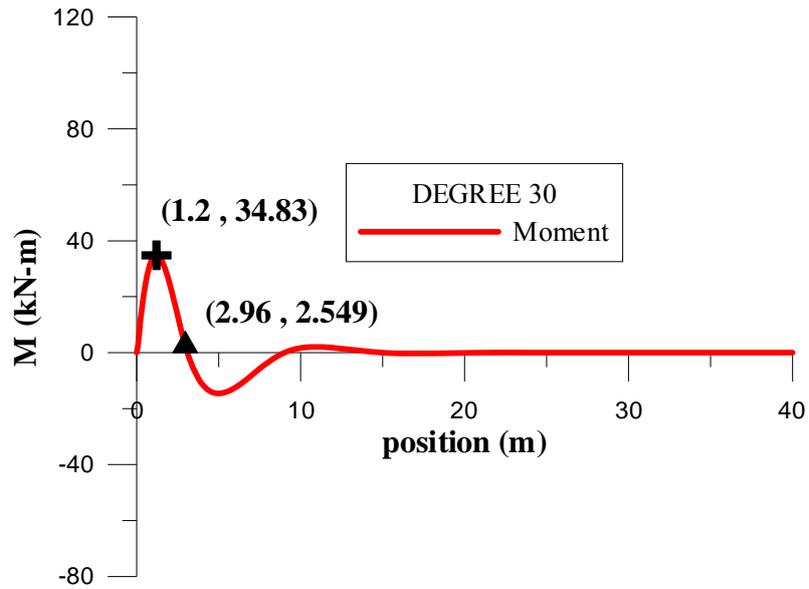


圖 5.16 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 30 度)



圖 5.17 管線與平移斷層夾角為 45 度之破壞示意圖(拉力破壞)

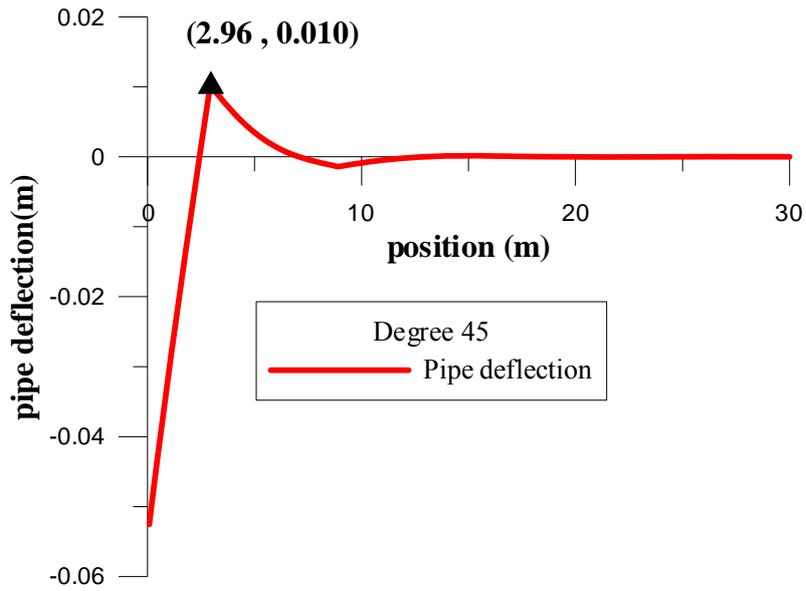


圖 5.18 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 45 度)

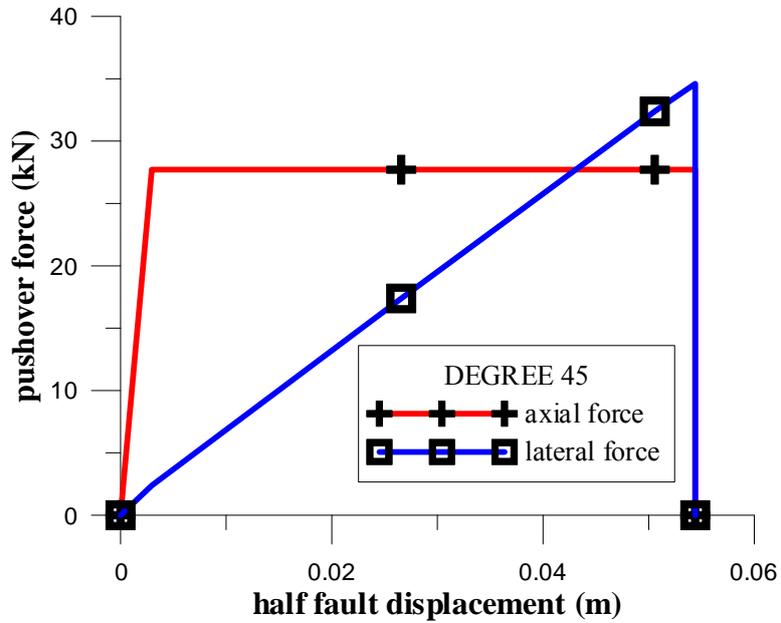


圖 5.19 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 45 度)

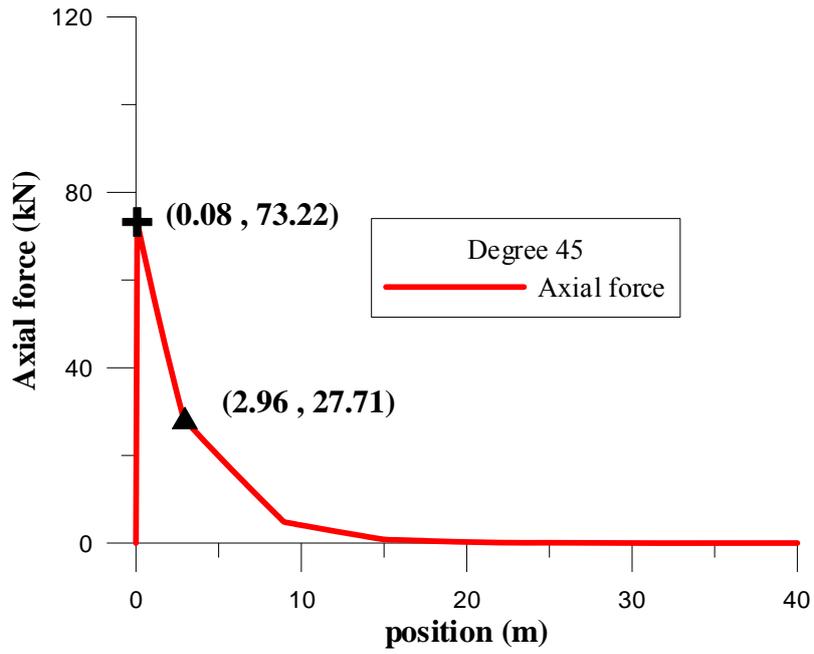


圖 5.20 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 45 度)

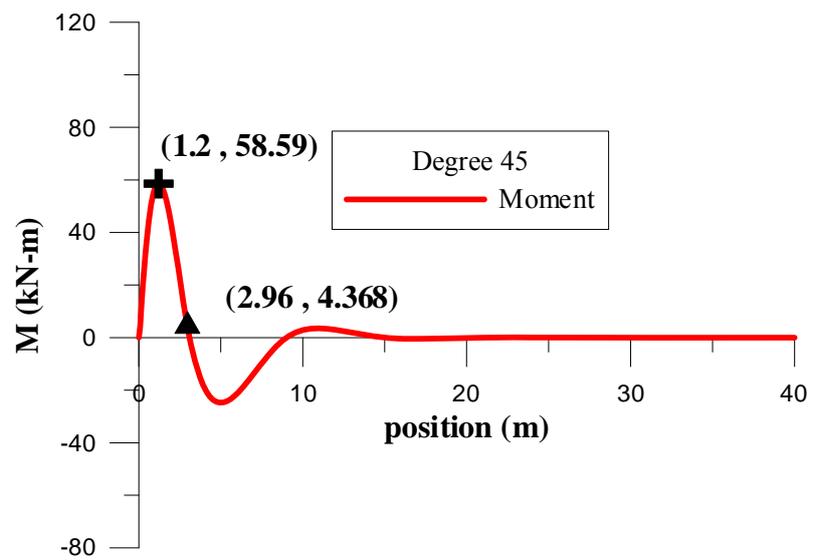


圖 5.21 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 45 度)



圖 5.22 管線與平移斷層夾角為 60 度之破壞示意圖(拉力破壞)

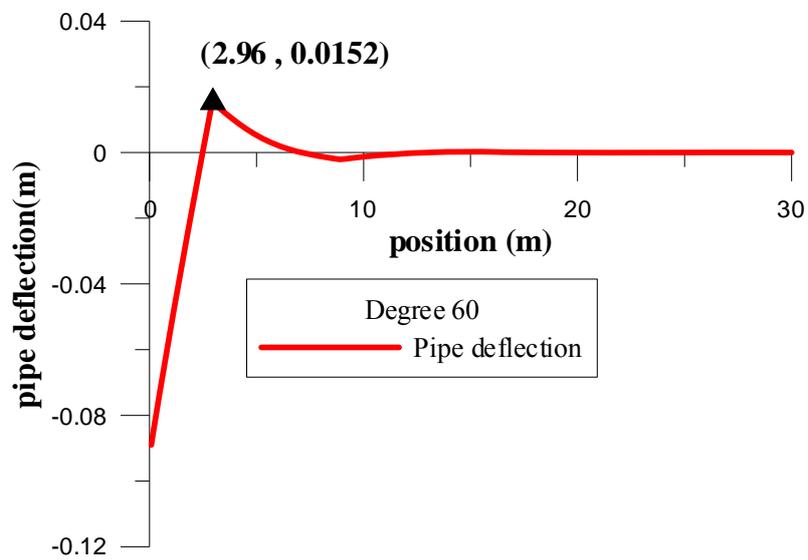


圖 5.23 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 60 度)

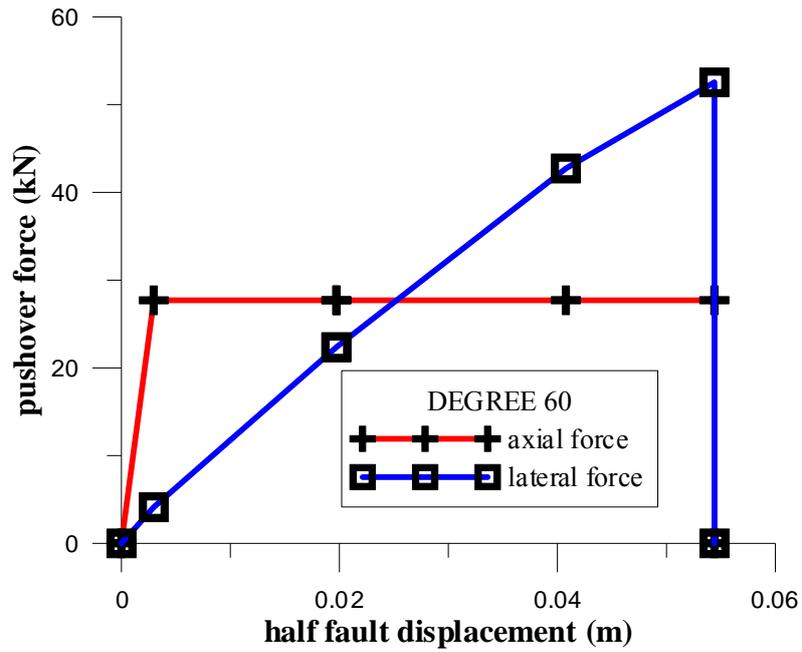


圖 5.24 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 60 度)

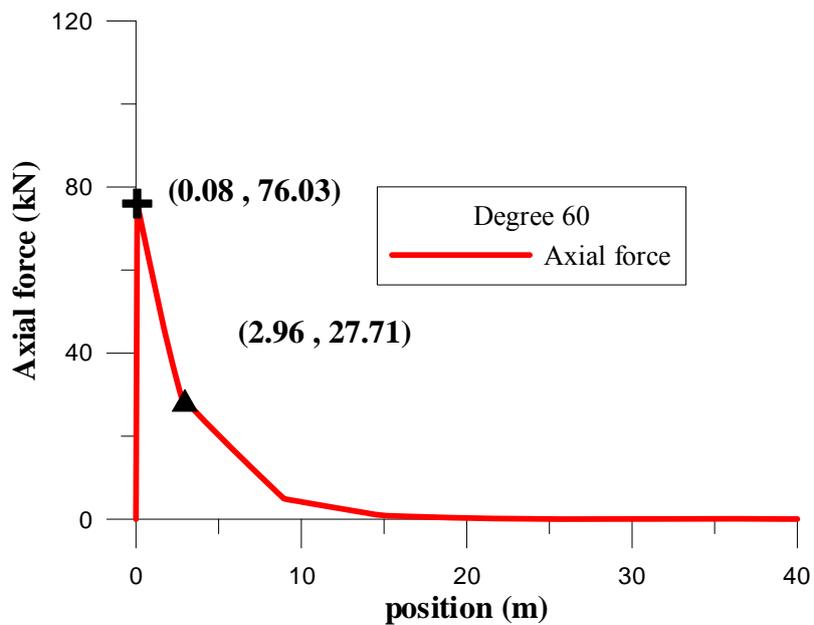


圖 5.25 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 60 度)

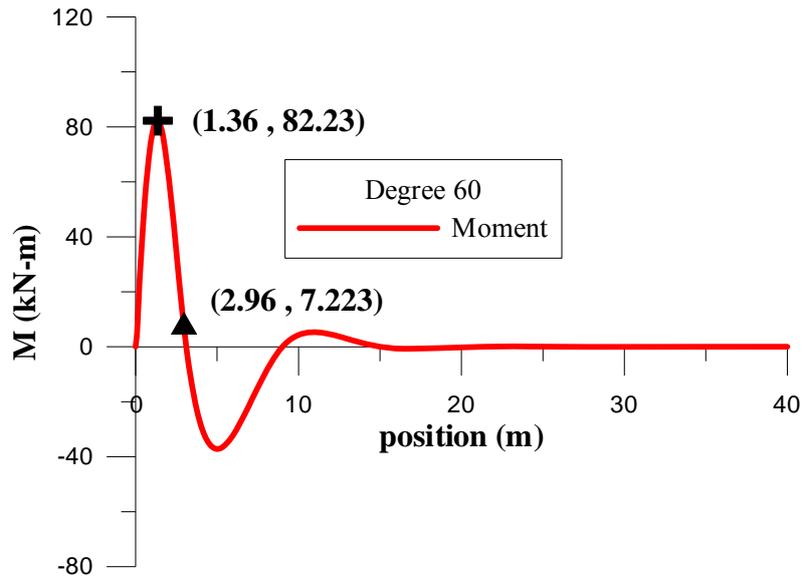


圖 5.26 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 60 度)

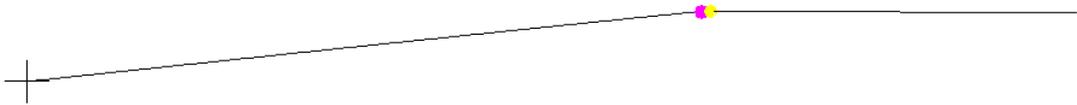


圖 5.27 管線與平移斷層夾角為 75 度之破壞示意圖(拉力破壞)

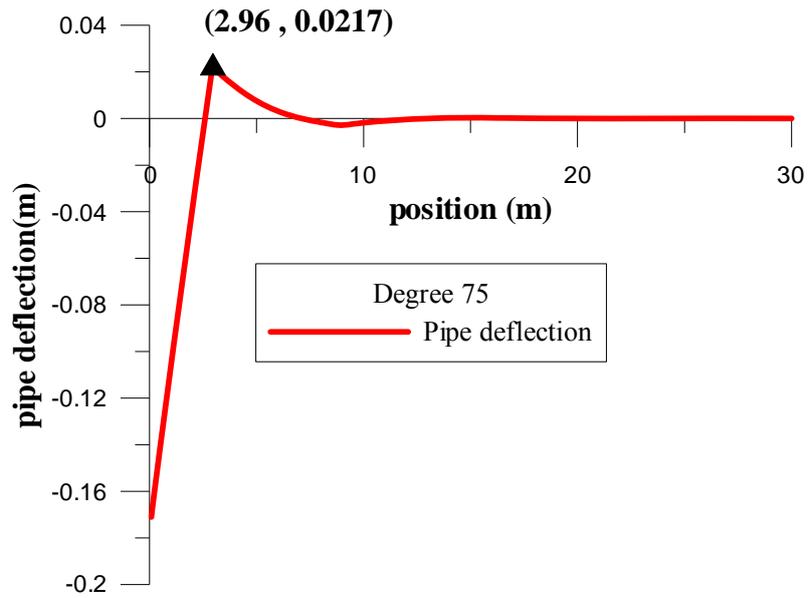


圖 5.28 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 75 度)

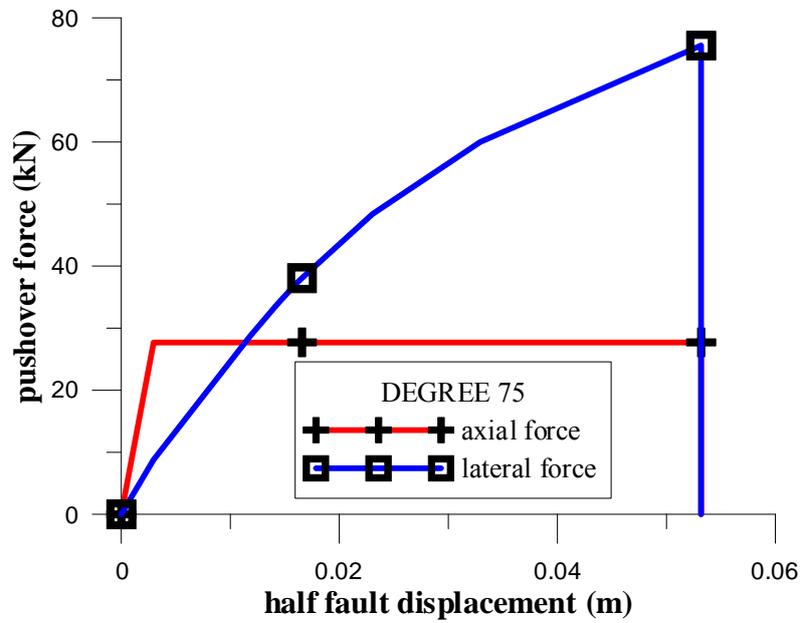


圖 5.29 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 75 度)

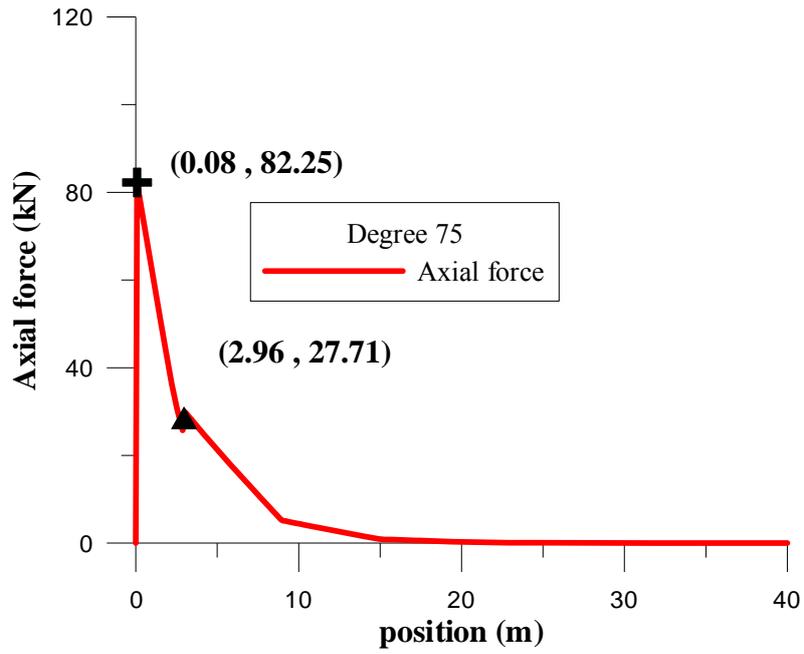


圖 5.30 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 75 度)

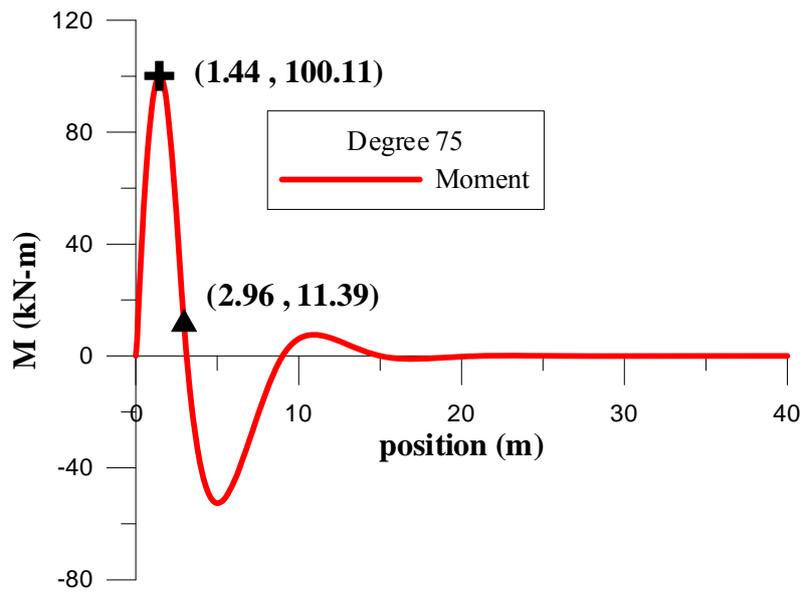


圖 5.31 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 75 度)

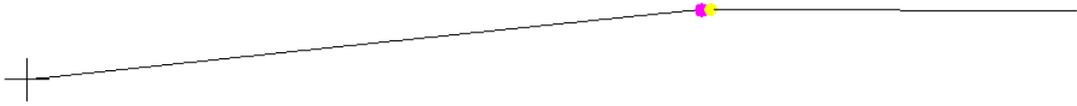


圖 5.32 管線與平移斷層夾角為 90 度之破壞示意圖(拉力破壞)

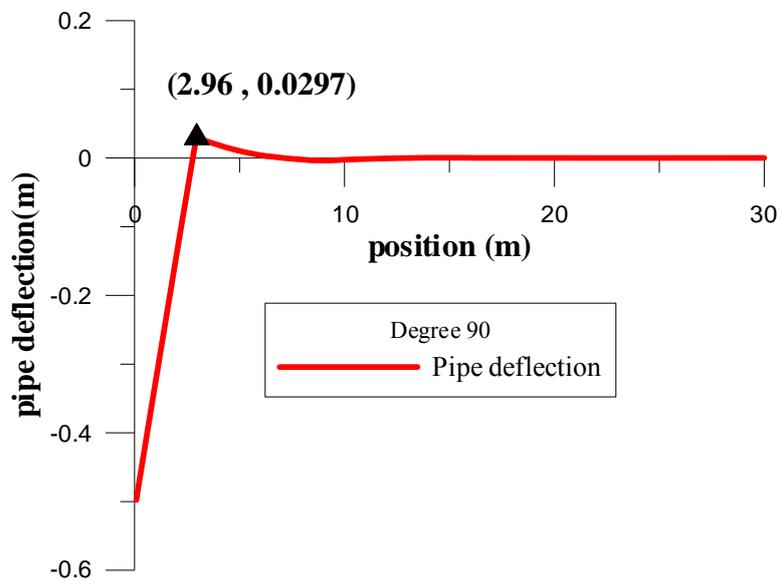


圖 5.33 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 90 度)

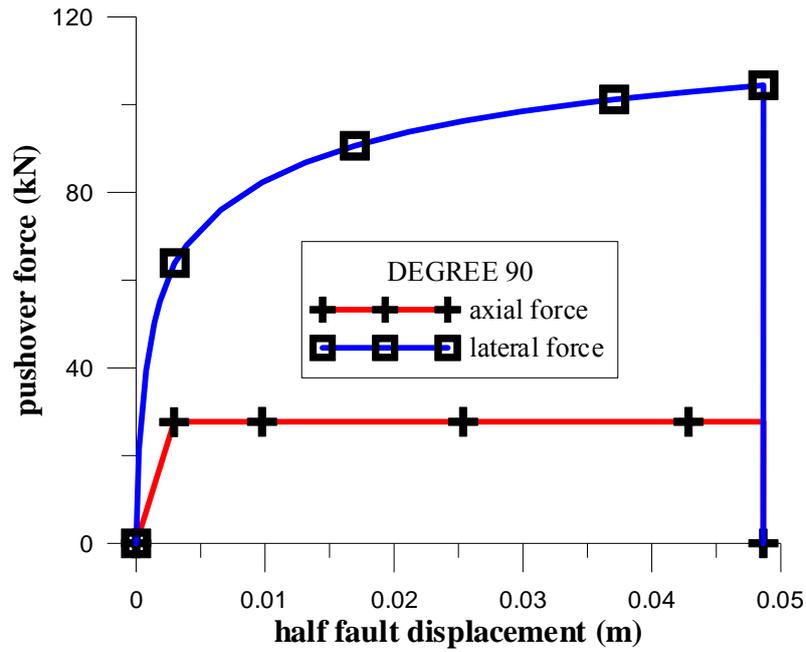


圖 5.34 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 90 度)

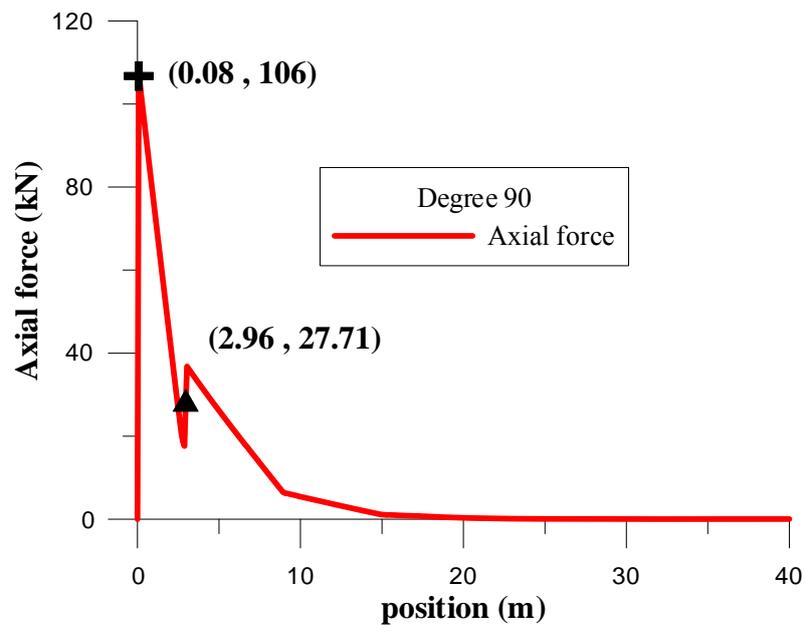


圖 5.35 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 90 度)

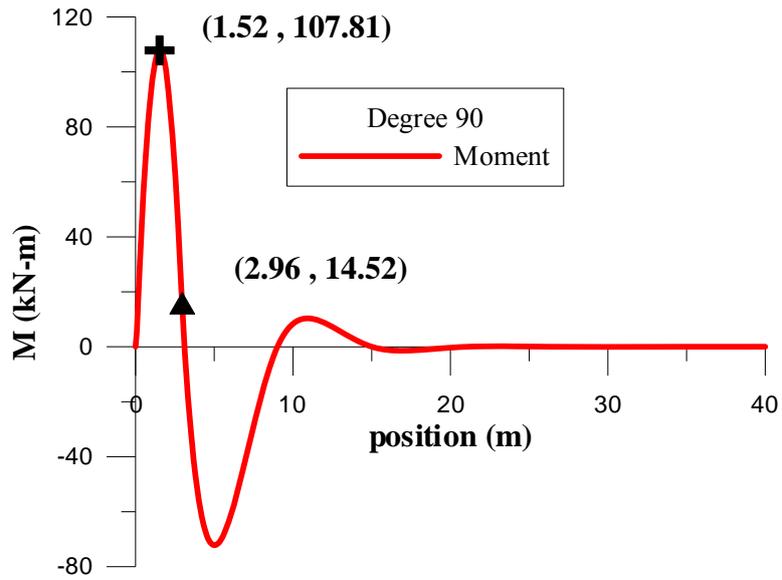


圖 5.36 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 90 度)

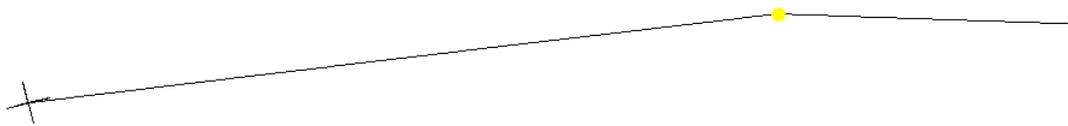


圖 5.37 管線與平移斷層夾角為 105 度之破壞示意圖(撓曲破壞)

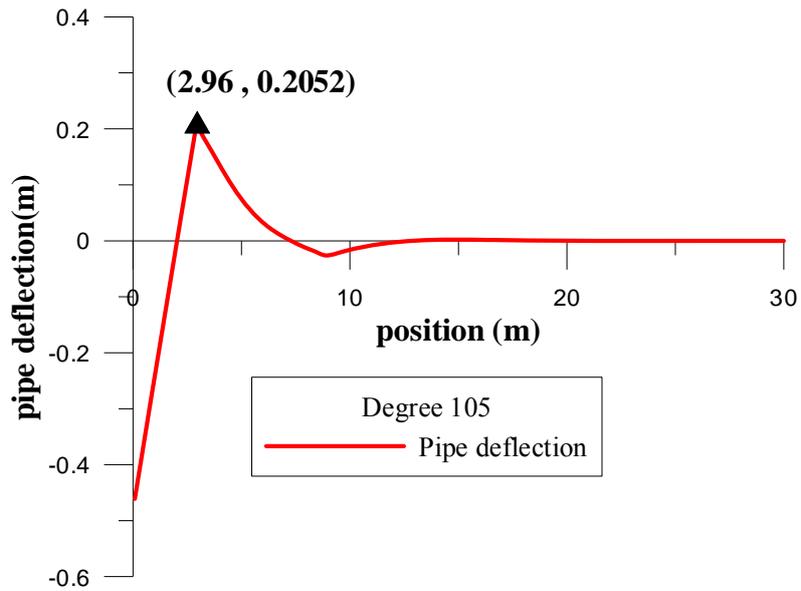


圖 5.38 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 105 度)

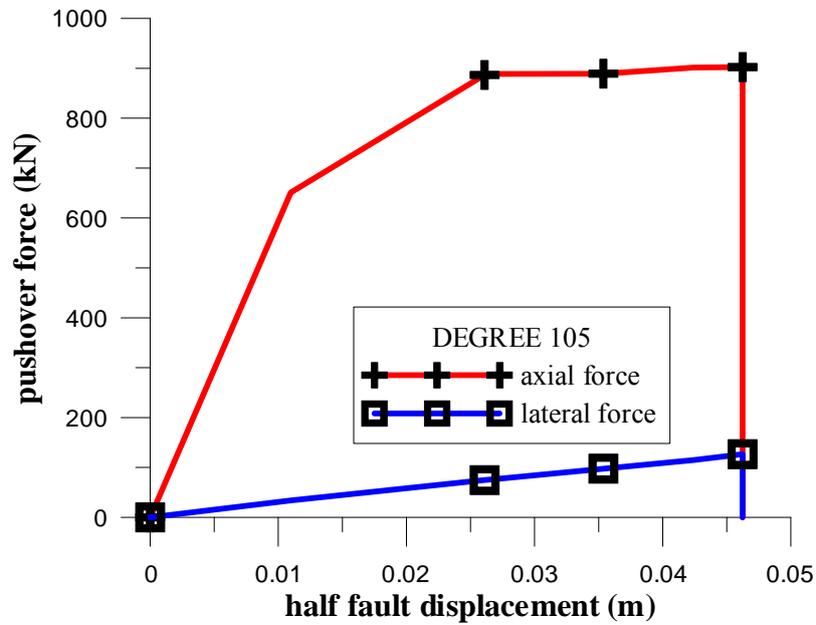


圖 5.39 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 105 度)

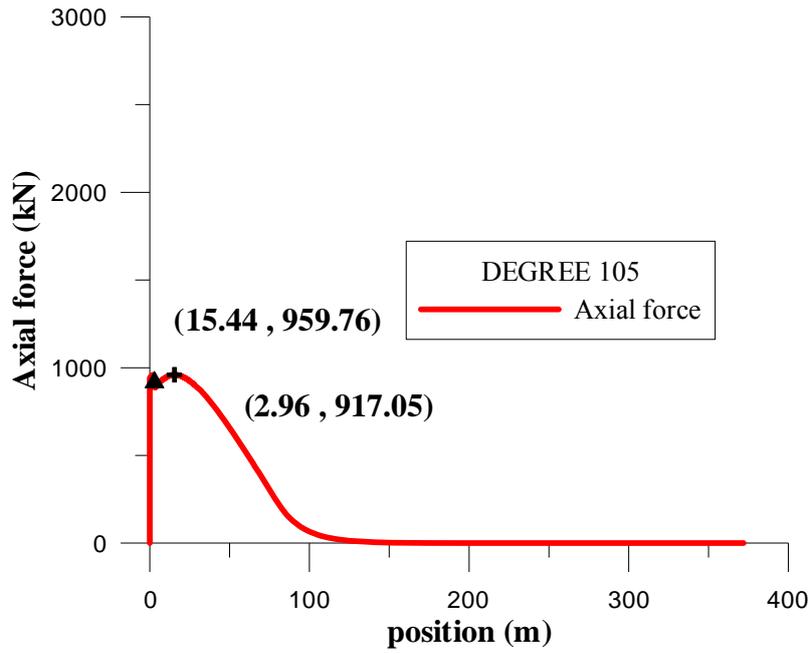


圖 5.40 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 105 度)

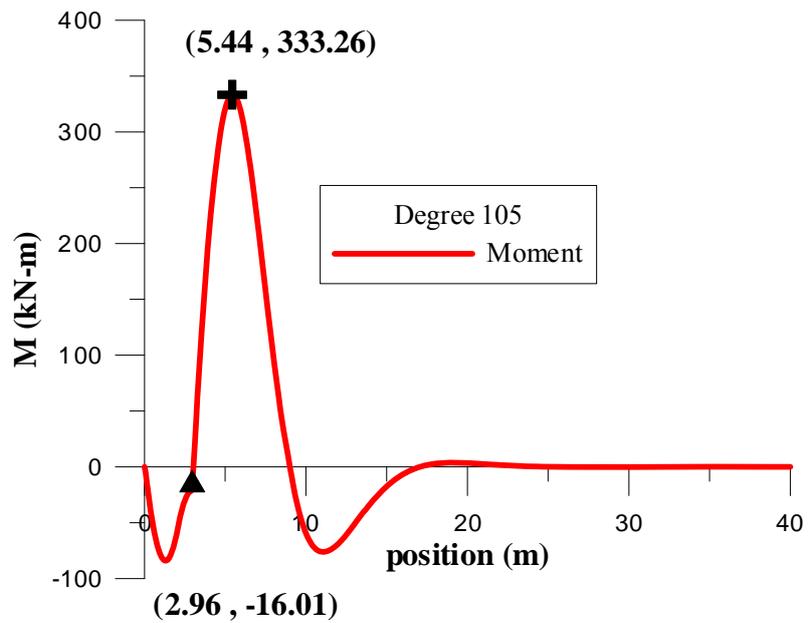


圖 5.41 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 105 度)



圖 5.42 管線與平移斷層夾角為 120 度之破壞示意圖(撓曲破壞)

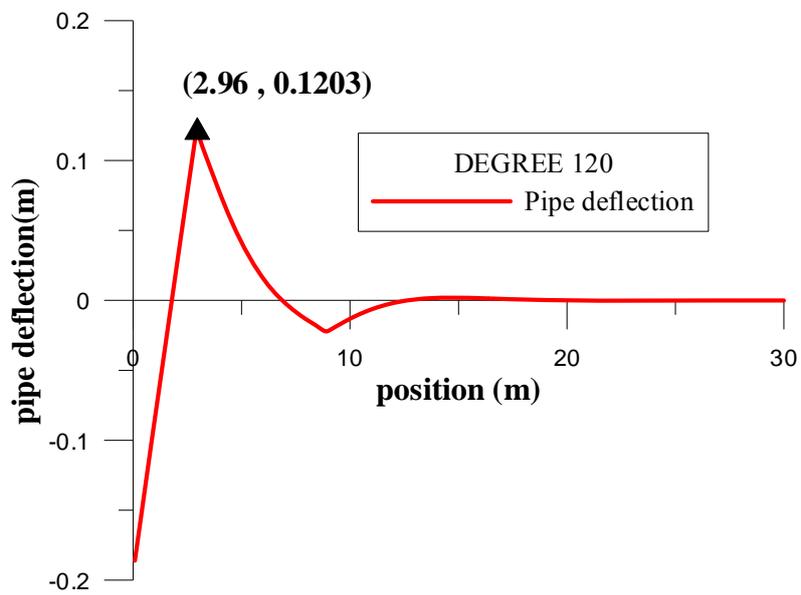


圖 5.43 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 120 度)

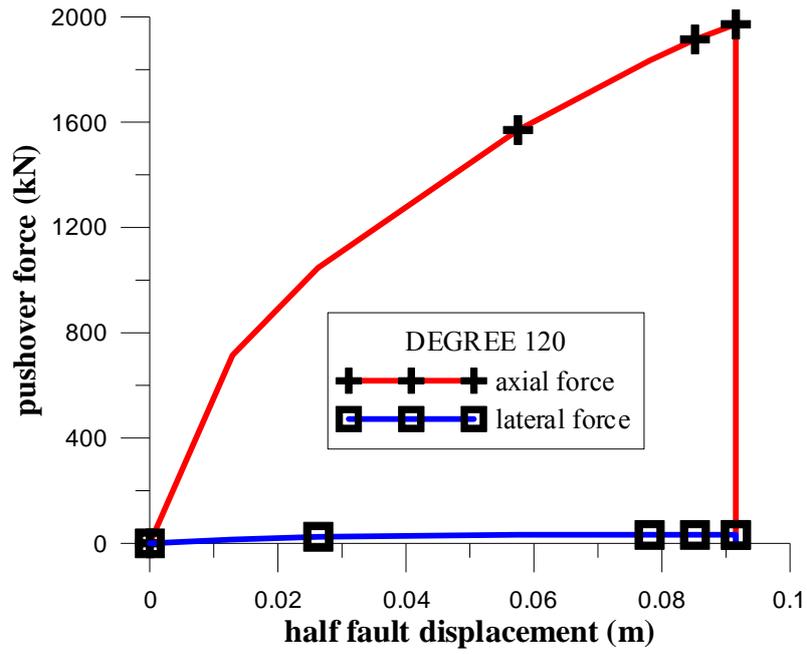


圖 5.44 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 120 度)

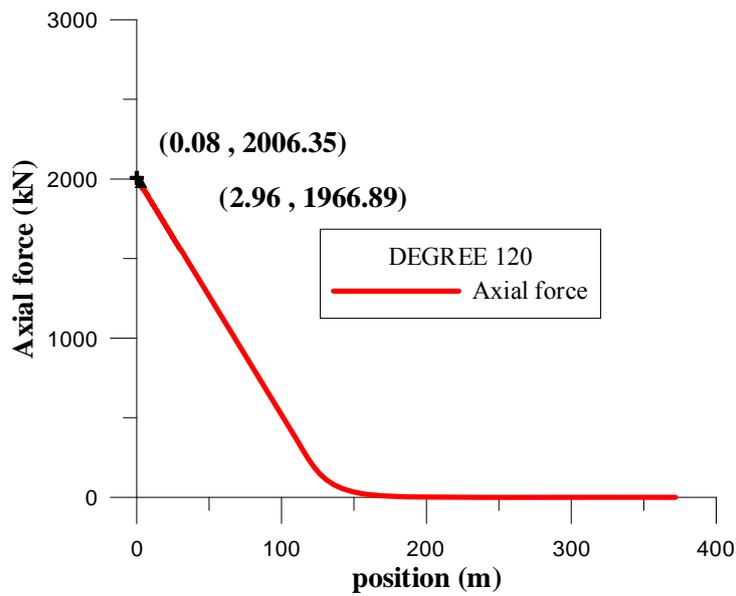


圖 5.45 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 120 度)

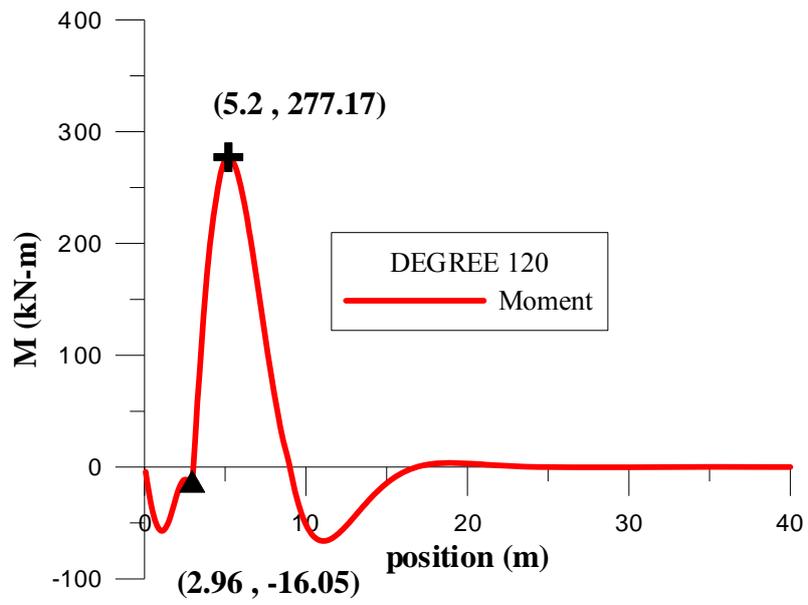


圖 5.46 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 120 度)

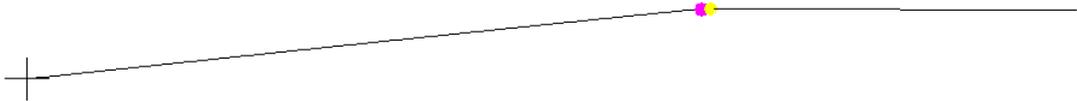


圖 5.47 管線與平移斷層夾角為 135 度之破壞示意圖(壓力破壞)

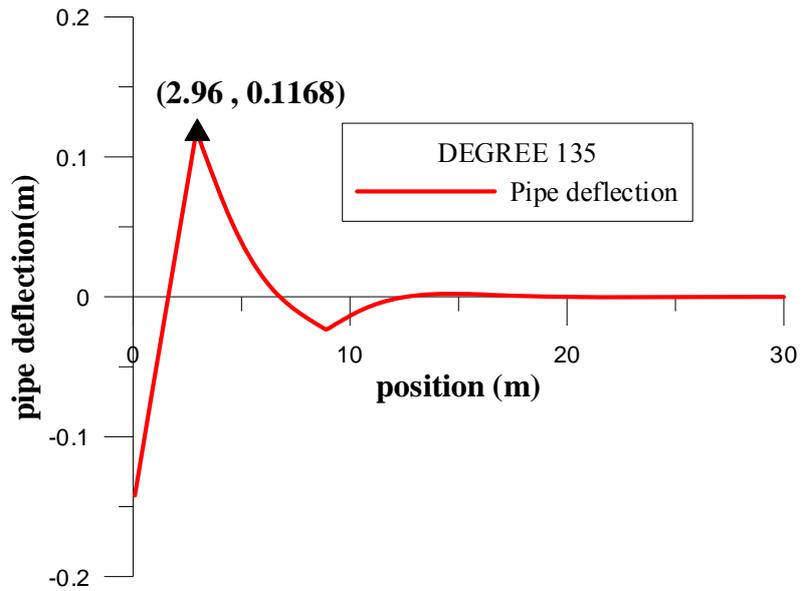


圖 5.48 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 135 度)

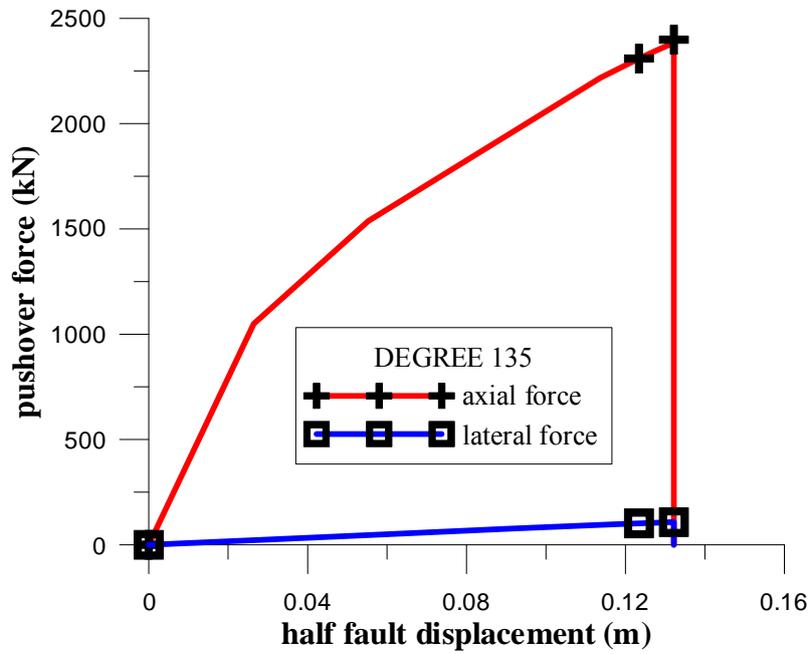


圖 5.49 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 135 度)

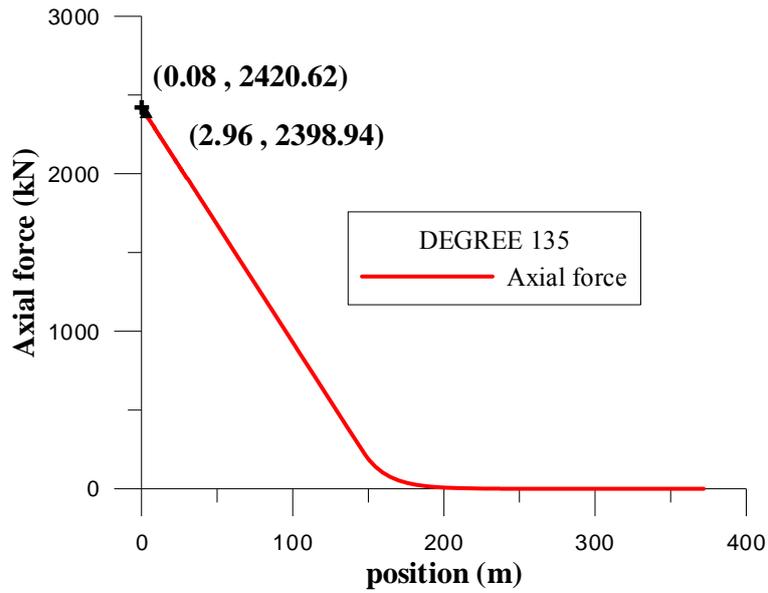


圖 5.50 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 135 度)

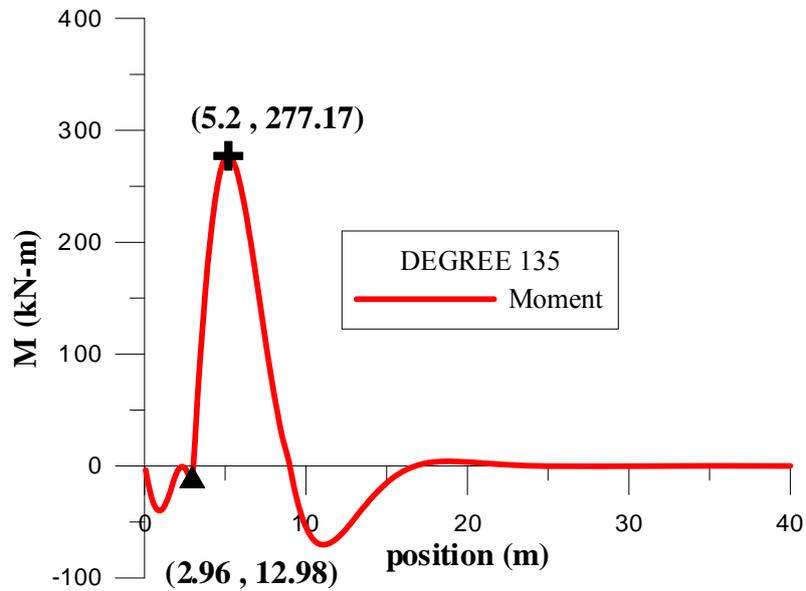


圖 5.51 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 135 度)

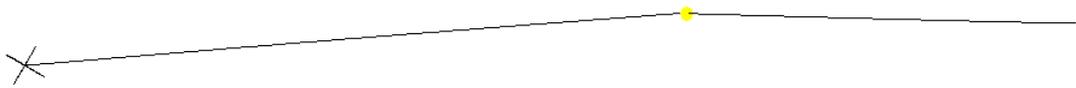


圖 5.52 管線與平移斷層夾角為 150 度之破壞示意圖(壓力破壞)

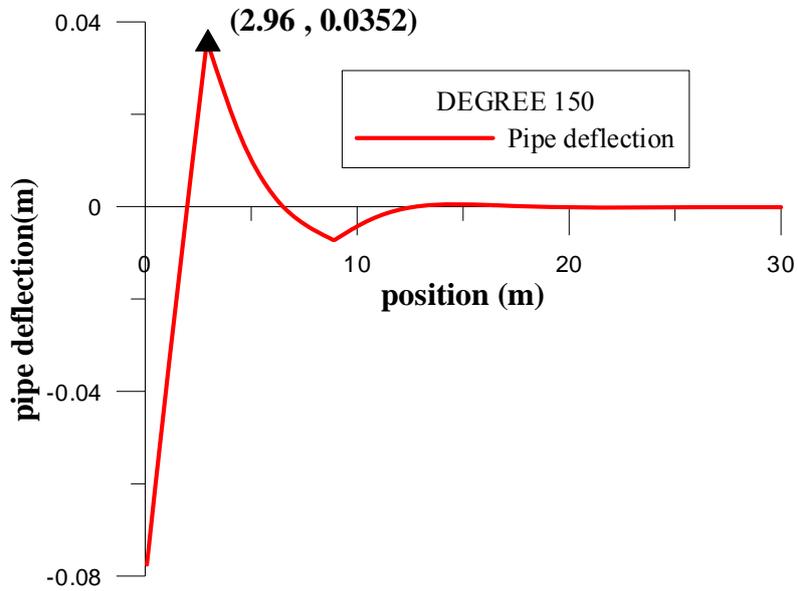


圖 5.53 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 150 度)

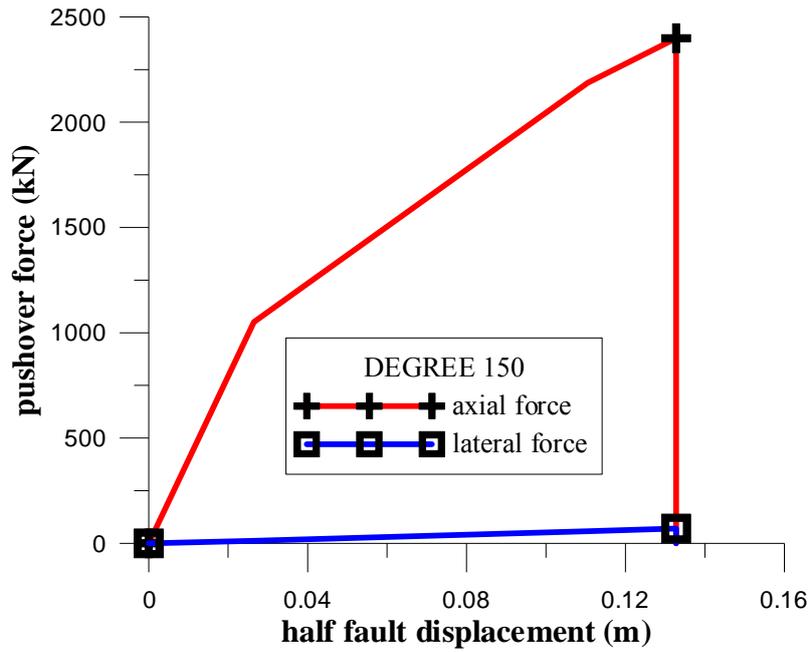


圖 5.54 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 150 度)

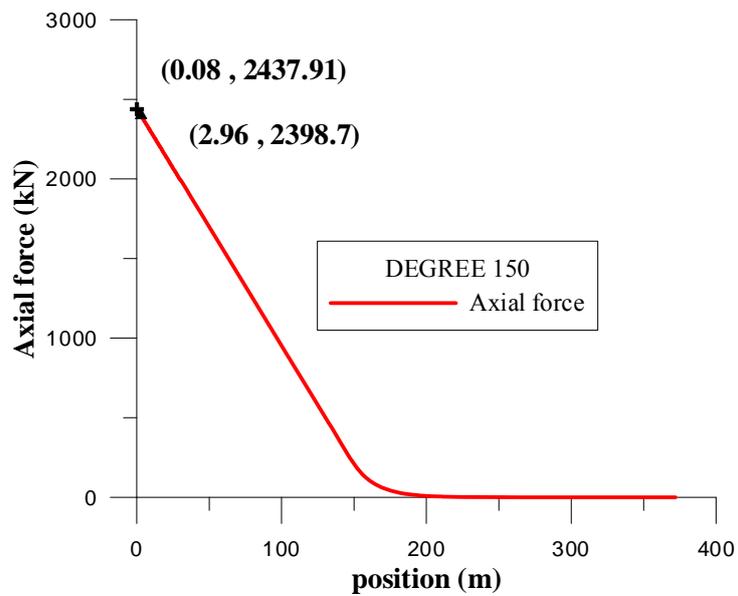


圖 5.55 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 150 度)

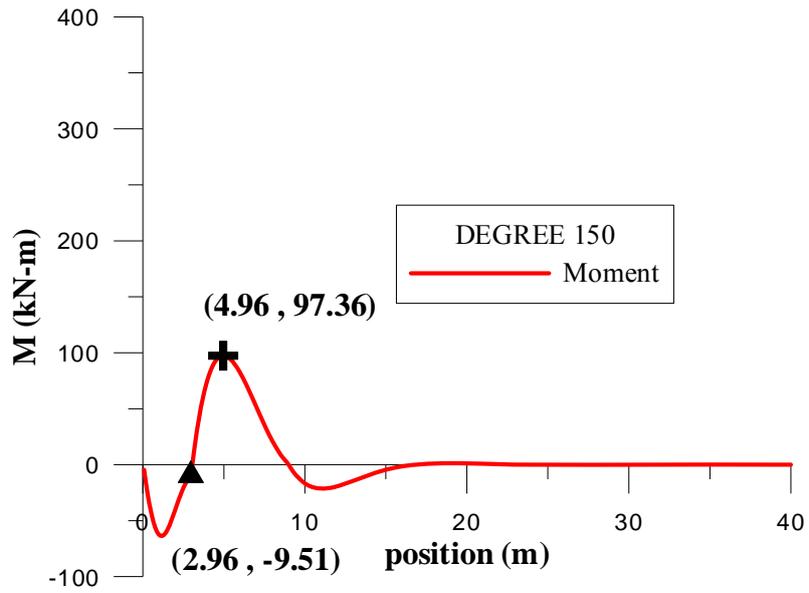


圖 5.56 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 150 度)

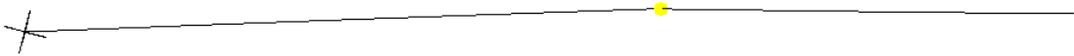


圖 5.57 管線與平移斷層夾角為 165 度之破壞示意圖(壓力破壞)

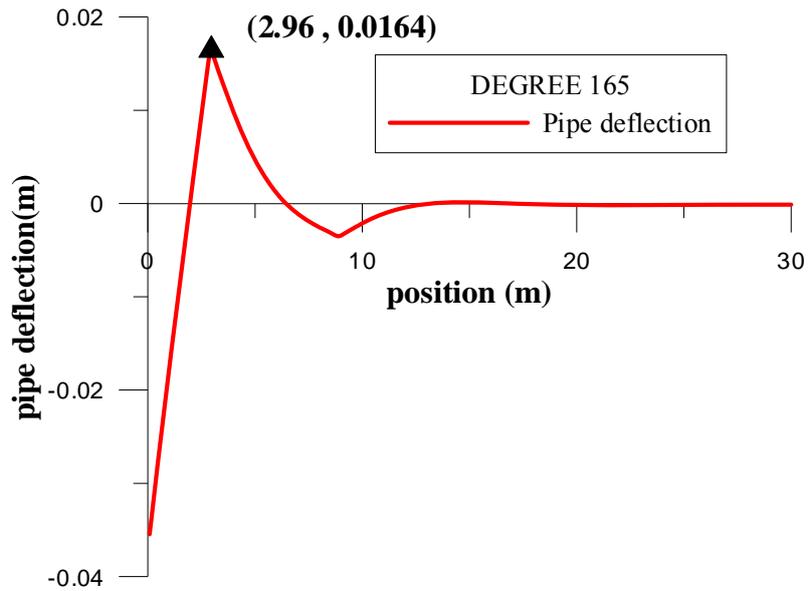


圖 5.58 管線破壞時之撓曲變形圖(管線與平移斷層夾角為 165 度)

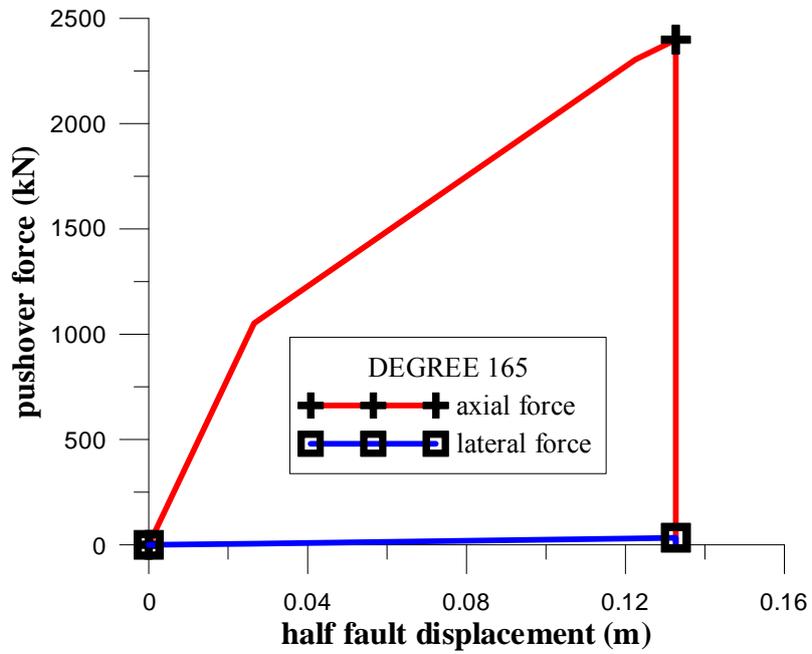


圖 5.59 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 165 度)

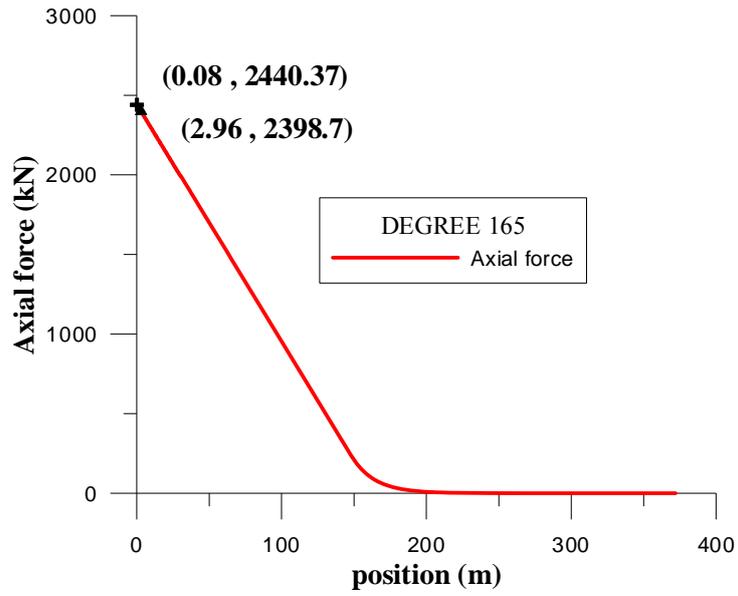


圖 5.60 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 165 度)

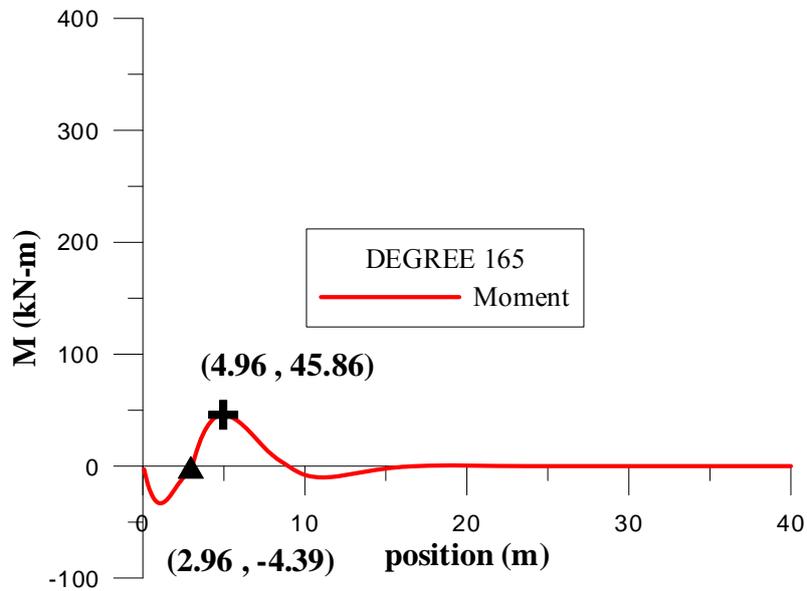


圖 5.61 管線破壞時之撓曲圖(管線與平移斷層夾角為 165 度)



圖 5.62 管線與平移斷層夾角為 180 度之破壞示意圖(壓力破壞)

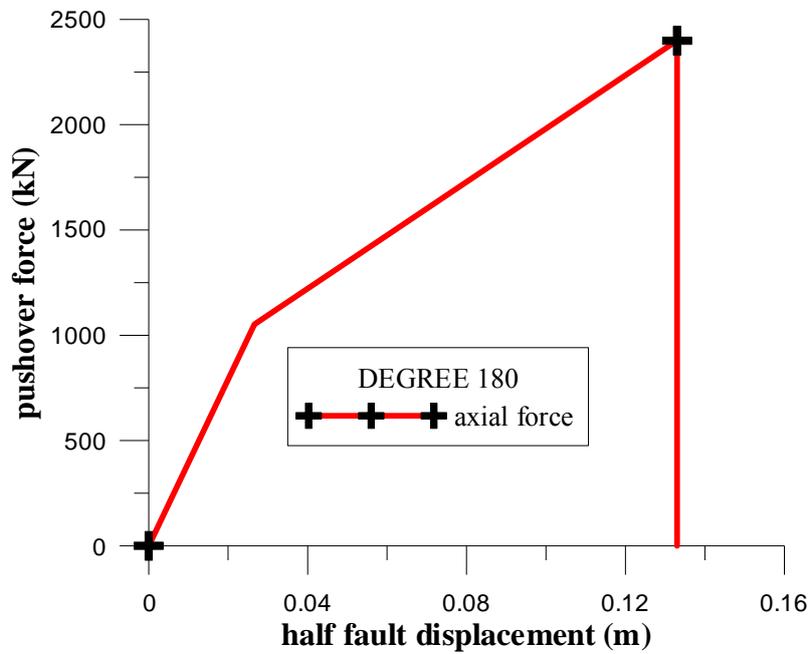


圖 5.63 管線於接頭處之力與位移關係(管線與平移斷層夾角為 180 度)

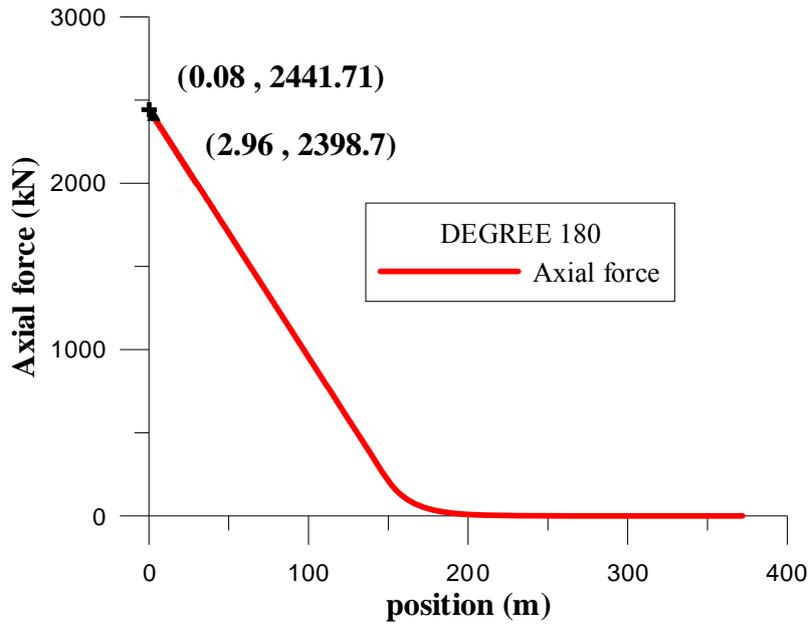


圖 5.64 管線破壞時之軸力圖(管線與平移斷層夾角為 180 度)

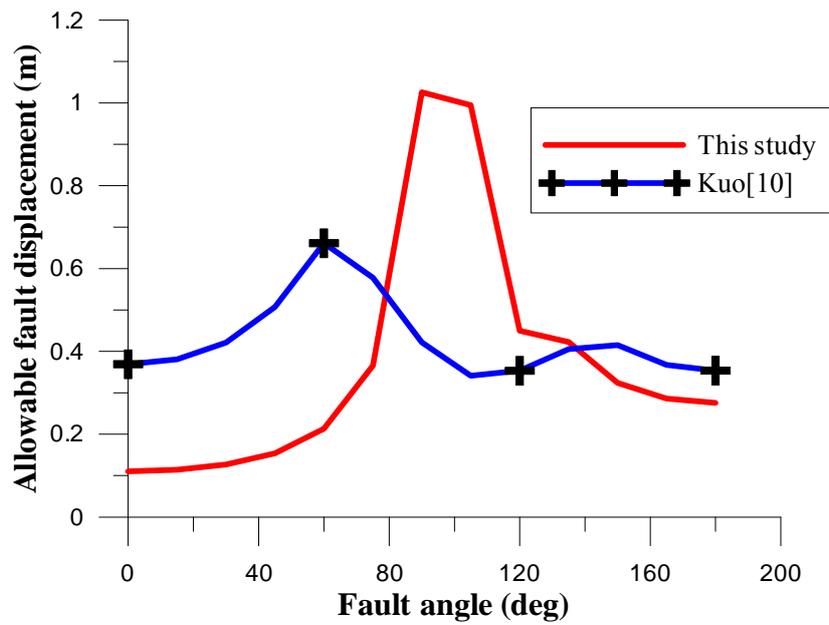


圖 5.65 斷層容許錯動量在不同斷層角下比較(0 至 180 度)[10]

第六章 結論與建議

6.1 結論

本研究利用台灣常用延性鑄鐵管配合三種類型的接頭; K 型接頭、A 型接頭、平口接頭進行一系列含水力學試驗，其中包括軸向抗拉、軸向抗壓以及四點式彎矩測試，最後透過試驗結果，建立耐震分級以及 K 型接頭的拉力、撓曲非線性鉸，其中對於試驗規劃、設計以及試驗結果在本文第二、三章有詳細的介紹。

在第四章本文利用商用軟體 ABAQUS 針對 DN100、DN200、DN400、DN600 四種標稱管徑在管內設置與試驗相同水壓後進行分析，並且對數值模型進行合理的假設以及適當的修正，接著與本文第三章試驗結果以及國家地震工程研究中心報告[10]的無水試驗結果進行比較，進而建立出 K 型接頭的壓力非線性鉸。

利用第三、四章所得之結果，建立起 K 型接頭的拉力、壓力、撓曲非線性鉸，在第五章作非線性側推分析，來探討地下自來水管線受地層錯動之行為，共 13 種管線於平移斷層夾角作詳細探討。對於管線與接頭的力學試驗之討論整理如下：

K 型接頭：K 型接頭延性鑄鐵管雖然軸拉變形容量及撓曲轉角容量表現良好，但若局部之軸拉位移或撓曲轉角的需求稍高，由於其軸拉強度及彎矩強度過低，無法有效傳遞至鄰近管段，共同承擔軸拉位移或撓曲轉角的需求，變形反而很容易集中於單一管段，導致漏水。綜言之，K 型接頭之水密性良好，但不具防脫功能，無法有效讓鄰近管段共同承擔軸拉位移及撓曲轉角之需求，不宜應用於地震活躍及地盤軟弱之地區。

1. **K 型接頭軸向抗拉試驗：**破壞模式為接頭破壞，軸向變形容量即為其接合長度 110mm，因此其他管徑雖然沒有施作試驗，也可以推測出軸向變形容量即為對應管徑的接合長度，軸向拉力容量為延性鑄鐵管體降伏強度的 2%，含水試驗力量峰值

約為不含水試驗的 0.5 倍。

2. K 型接頭軸向抗壓試驗：破壞模式為管體破壞，抗壓能力大部分由管體提供，形同連續管，軸向壓力容量為延性鑄鐵管體降伏強度 93%，軸向變形容量為延性鑄鐵管體降伏位移的 6 倍，含水試驗力量峰值約為不含水試驗的 0.8 倍。
3. K 型接頭撓曲試驗：破壞模式為接頭破壞，轉角容量約為延性鑄鐵管體降伏轉角的 17 倍，彎矩容量為延性鑄鐵管體降伏彎矩的 10%，含水試驗平均彎矩峰值遠低於不含水試驗，原因在於水壓導致管體更快破壞，螺栓尚未提供部分強度。

A 型接頭：A 型接頭不具防脫功能，在軸拉力或彎矩作用下，接頭十分容易鬆脫，耐震性能極差。既有管線應加速汰換，不然，亦應加強(與他種直管相接時)接續橡膠圈之正確使用。

1. A 型接頭軸向抗拉試驗：十字管承口端厚度為 14mm，直管插口端厚度為 7mm，接合長度為 90mm，因為接頭匹配不良的問題，膠圈承受拉力不均勻，導致膠圈嚴重破壞，影響試驗過程的水密性，因此只有一支試體達到接合長度才漏水，軸向拉力容量為延性鑄鐵直管體降伏強度的 1%。
2. A 型接頭軸向抗壓試驗：承口端較厚，插口端較薄，在軸壓過程中承口端將插口端包覆進去，抗壓能力以及軸向變形大部分由接頭提供，因此不會造成管體挫屈，插口端破壞嚴重，導致試驗過程水密性不良，變形容量為延性鑄鐵管體降伏位移的 4 倍，軸向壓力容量為延性鑄鐵直管體降伏強度的 97%。
3. A 型接頭撓曲試驗：轉角容量稍差於 K 型接頭，原因在於接合長度較 K 型接頭短，且接頭的水密性不良，轉角容量為延性鑄鐵管體降伏轉角的 9 倍，彎矩容量為延性鑄鐵管體降伏彎矩的 4%。

平口接頭：平口管變形容量極低，實不宜單獨作為輸配水管線之使用，若用於制水閥前後，或是淨水廠各單元間接續使用，則宜留

意各場址鄰近範圍是否有重型車載問題，或是長期性地盤潛變問題，加強此類接頭之密合度檢查，適時予以調整，或更新為可撓式接管。

1. 平口接頭軸向抗拉試驗：剛性接頭由螺栓提供抗拉強度，因此強度約為柔性接頭的 5 倍，因橡膠墊圈相當薄，幾乎沒有回彈能力，稍有變形即造成漏水，變形容量為延性鑄鐵管體降伏位移的 31%，拉力容量為延性鑄鐵管體降伏強度的 4%。
2. 平口接頭軸向抗壓試驗：平口管厚 14mm，軸向壓力容量超過試驗機極限荷載，接頭及管體皆無破壞，因橡膠墊圈無回彈能力，當試驗機卸載至 0 時即造成漏水。
3. 平口接頭撓曲試驗：接頭及管體皆無破壞，因為橡膠墊圈無回彈能力，接頭受拉處稍有變形即造成漏水，容許轉角為延性鑄鐵管體降伏轉角的 14%，彎矩容量為延性鑄鐵管體降伏彎矩的 14%。

對於非線性側推模型，本文利用了國家地震工程研究中心報告 [20] 研究中所建立的側推模型，對於其數值模型每隔六公尺設定接頭非線性鉸，模擬成分段管線後進行非線性側推分析，其結果與討論如下：

1. 本文第四章利用試驗與 ABAQUS 所建立的模型比較之下，建立簡化後三線性力與位移曲線，與試驗比較下皆是偏向保守合理的。
2. 本文第五章案例分析中，當管線與平移斷層夾角為 0 度到 90 度時，破壞模式皆為接頭的拉力破壞，105 度到 120 度破壞模式為接頭的撓曲破壞，135 度到 180 度破壞模式為接頭的壓力破壞，最後與國家地震工程研究中心報告 [10] 的連續管容許錯動量比較，0 度到 75 度可看出分段管的容許錯動量比連續管的容許錯動量低很多，主要是因為接頭拉力非線性鉸的容量只有管體拉力非線性鉸的 0.01 倍，因此容許錯動量也較低，觀察 90 度到 135 度可發現分段管的容許錯動量比連續管

的容許錯動量高，主要是因為接頭可承受的撓曲變形角度較管體的角度大，因此容許錯動量較高，最後觀察 150 度到 180 度，分段管的容許錯動量比連續管的容許錯動量低一點，主要是因為接頭的壓力非線性鉸建立的位移以及力量皆為管體壓力非線性鉸的 0.8 倍，因此分段管的容許錯動量也約為連續管的 0.8 倍。

3. 透過上述之分段管與連續管的容許錯動量比較，可以得知在做模擬分析的時候，不可忽略接頭的影響，也呼應本文在第一章所提到的地下管線受地震過後，接頭控制破壞的比例是比管體控制破壞來得高。

參考文獻

- [1] 蔡錦松、周立德、賴建名(1999)，「現有自來水管線(PVCP、DIP)接頭耐震檢測研究」，台灣省自來水股份有限公司八十七年度研究計畫。
- [2] 王炳鑫，2000，「台灣九二一集集地震公共給水管線設備損害報告」，中華民國自來水協會會刊，第十九卷第一期，pp.64-81。
- [3] International Standard (2009). “Ductile iron pipes, fittings, accessories and their joints for water applications”, ISO 2531 Sixth edition.
- [4] BSI Standards Publication (2010). “Ductile iron pipes, fittings, accessories and their joints for water pipelines - Requirements and test methods”, BS EN 545.
- [5] 日本延性鑄鐵管協會，2005，「呼び径 500～1000 NS 形ダクタイル鉄管」，JDPA T55。
- [6] 洪瑞鎧，2001，「921 集集大地震霧峰鄉自來水管線震害成因分析」，國立台北科技大學土木與防災研究所碩士班碩士論文。
- [7] Singhal, 1984, A. C., “Nonlinear Behavior of Ductile Iron Pipeline Joints”, Journal of Technical Topics in Civil Engineering.
- [8] Gu, F., 2011, “Pullout Test Study on Flexible Joint of Ductile Iron Buried Pipelines,” Advanced Materials Research Vols. 368-373, pp.1130-1133.
- [9] Meis, R.D. , 2003, Maragakis, E. M., Siddhartha, R., “Behavior of Underground Piping Joint Due to Static and Dynamic Loading,” Technical Report MCEER-03-0006.
- [10] 鍾立來、吳賴雲、郭峻瑋、陳振豪、劉季宇，2012，「自來水管線力學試驗與非線性側推分析之研究」，國家地震工程研究中心，研究報告 NCREE-12-010。
- [11] 邱俊翔，陳正興，楊鶴雄，2007，「樁頭受側向力作用之側推分析模式」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-07-012。
- [12] 邱俊翔，陳正興，楊鶴雄，2008，「樁基礎非線性側推分析之樁材設定方法」，國家地震工程研究中心報告，NCREE-08-012。

- [13] 侯信宇，2008，“地下延性鑄鐵管通過斷層之接頭佈設研究”，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
- [14] Joshi, S., Prashant, A., Deb, A. and Jain, S.J. , 2011, “Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion,”*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), pp.930-940.
- [15] Hall, W.J. and Newmark, N.M. ,1978,“Seismic design criteria for pipelines and facilities,” *J. tech. councils ASCE* 104, pp. 91-107.
- [16] Kennedy, R.P.,1977,Chow, A.W. and Williamson, R.A., “Fault movement effects on buried oil pipeline,” *Transport, Eng. J. ASCE* 103, pp. 617-633.
- [17] Kennedy, R.P.,1979, Darrow, A.C. and Short, S.A., “Seismic design of oil pipeline systems,” *Transport, Eng. J. ASCE* 105, pp. 119-205.
- [18] Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H. ,1985, “A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement,” *International Journal on Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13(1), pp. 75-96.
- [19] Hetenyi, M. , 1946, “*Beam on Elastic Foundation*,” University of Michigan Press.
- [20] 鍾立來、吳賴雲、陳振豪、郭峻璋、劉季宇、黃國倫，2011，“應用非線性側推分析於地下自來水管線受斷層錯動之研究”，國家地震工程研究中心報告，NCREE-11-026。
- [21] 中華民國標準 CNS 10808 (1984)，「延性鑄鐵管」，經濟部標準檢驗局。
- [22] 日本工業標準，1998，ダクタイル鑄鐵管-JIS G 5526。
- [23] 中華民國標準 CNS 13272 (1993)，「延性鑄鐵管件」，經濟部標準檢驗局。
- [24] 日本工業標準，1998，球狀石墨鑄鐵異型管-JIS G5527。
- [25] 中華民國標準 CNS 10774 (1993)，「自來水管件用橡膠製品」，經濟部標準檢驗局。

- [26] 臺北自來水事業處，2010，「自來水管理設工程施工說明書，第 02505 章」。
- [27] International Standard, 2006, Earthquake- and Subsidence-Resistant Design of Ductile Iron Pipelines, ISO 16134, First Ed.
- [28] Hibbitt, Karlsson, and Sorenson, Inc. (HKS) , 2009, “Abaqus Benchmarks Manual,”Version 6.9, Hibbitt, Karlsson, and Sorenson, Inc., Pawtucket, Rhode Island.
- [29] 台灣自來水股份有限公司，2006， “自來水管理設工程施工說明書”。
- [30] ASCE,1984,“Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems,”Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines.
- [31] Ha, D, Abdoun, T.H., O’Rourke, M.J., Symans, M.D., O’Rourke, T.D., Palmer, M.C. and Stewart, H.E.,2008, “Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene(HDPE) pipelines crossing fault zones,”Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(10).
- [32] CU, RPI and Science Discovery Center, 2007, “NEESE-SG, Annual Report,”.
- [33] 經濟部水利署，2012，「提升公共給水震損評估與管材耐震測試環境之規畫研究」。
- [34] 台北自來水事業處，2012，「自來水接續管線受震位移及滲漏之試驗研究案」。