

# 自來水管線運用柔性接頭提升耐震性之研究

中華民國自來水協會

# 自來水管線運用柔性接頭提升耐震性之研究

研究單位：中華民國自來水協會技術研究委員會

計劃主持人：蔡錦松

研究人員：葉奕昌、張恭誠

中華民國自來水協會

中華民國九十二年三月

# 目錄

第一章 緒論 .....	1
1-1 研究背景 .....	1
1-2 研究目的 .....	2
1-3 研究內容及方法 .....	2
1-3-1 研究內容 .....	2
1-3-2 研究方法 .....	2
第二章 自來水管線柔性接頭性質 .....	4
2-1 接頭型式 .....	4
2-1-1 柔性接頭 .....	4
2-1-2 剛性接頭 .....	4
2-1-3 鎖扣型接頭 .....	5
2-2 接頭構件材料 .....	5
2-2-1 延性鑄鐵管 .....	5
2-2-2 橡膠環圈 .....	5
第三章 自來水管線接頭力學特性 .....	11
3-1 接頭勁度 .....	11
3-2 接頭力學行為 .....	12
3-2-1 軸向受力變形行為 .....	12
3-2-2 撓曲受力變形行為 .....	13
3-2-3 接頭受力變形行為歸納 .....	13
3-3 接頭破壞準則 .....	14
第四章 自來水管線接頭力學試驗 .....	21
4-1 接頭軸向拉拔試驗 .....	21
4-1-1 水壓拉拔試驗方法 .....	21
4-1-2 油壓千斤頂拉拔試驗方法 .....	22
4-1-3 拉拔試驗結果歸納 .....	22
4-2 接頭撓曲試驗 .....	22
4-2-1 撓曲強度試驗方法 .....	23
4-2-2 撓曲水壓試驗方法 .....	23
4-2-3 撓曲試驗結果歸納 .....	23
第五章 自來水管線接頭數值耐震試驗 .....	29
5-1 數值試驗分析內容與目的 .....	29
5-1-1 數值分析步驟 .....	30

5-1-2	數值分析基本參數 .....	30
5-2	接頭軸向拉拔數值試驗 .....	31
5-2-1	合理假設與簡化 .....	31
5-2-2	數值分析模擬 .....	32
5-2-3	數值試驗分析結果 .....	34
5-3	管線接頭撓曲數值試驗 .....	36
5-3-1	合理假設與簡化 .....	36
5-3-2	數值分析模擬 .....	37
5-3-3	數值試驗分析結果 .....	38
第六章	結論與建議 .....	69
	參考文獻 .....	70
附錄A	S型延性鑄鐵管 .....	72
附錄B-1	S型接合配件(1) .....	73
附錄B-2	S型接合配件(2) .....	74
	期中報告審查意見 .....	75

## 表目錄

表 2-1	延性鑄鐵管接頭形式 .....	6
表 2-2	延性鑄鐵管機械性質 .....	7
表 2-3	橡膠環圈物理性質 .....	8
表 2-3	橡膠環圈物理性質 (續) .....	9
表 2-4	橡膠SBR、CR、NBR物理性質 .....	9
表 3-1	接頭勁度參考值 .....	15
表 3-2	接頭伸縮及撓曲性能分類 .....	15
表 3-3	延性鑄鐵管接頭容許變形量 .....	16
表 4-1	S型接頭拉拔試驗結果 .....	24
表 4-2	S型接頭撓曲強度試驗結果 .....	24
表 4-3	S型接頭撓曲水壓試驗結果 .....	24
表 5-1	接頭力學試驗整理 .....	39
表 5-2	S型延性鑄鐵管尺寸 .....	39
表 5-3	S型延性鑄鐵管接合配件尺寸 .....	40
表 5-4	數值分析之材料參數 .....	40
表 5-5	S型接頭數值試驗軸向拉拔力 .....	41
表 5-6	S型接頭數值試驗軸向勁度 .....	41
表 5-7	接頭元素模型種類 .....	42
表 5-8	S型接頭數值試驗模型尺寸 .....	43
表 5-9	S型接頭數值試驗接頭彎矩 .....	43
表 5-10	S型接頭數值試驗撓曲勁度 .....	44

## 圖目錄

圖 1-1	研究計算流程圖 .....	3
圖 2-1	延性鑄鐵管接頭型式 (中國國家標準, 1998) .....	10
圖 3-1	接頭軸向勁度彈簧示意圖 .....	17
圖 3-2	接頭撓曲勁度彈簧示意圖 .....	17
圖 3-3	延性接鑄鐵管(DIP)接頭型式 (Singhal, 1984 <sup>a, b, c</sup> ) .....	18
圖 3-4	延性接鑄鐵管(DIP)接頭承插橡膠圈斷面型式 (Singhal, 1984 <sup>a, b, c</sup> ).....	18
圖 3-5	接頭軸向拉伸行為 (Singhal, 1984 <sup>a, b, c</sup> ) .....	19
圖 3-6	埋深與接頭軸向勁度關係 (Singhal, 1984 <sup>a, b, c</sup> ) .....	19
圖 3-7	接頭撓曲行為 (Singhal, 1984 <sup>a, b, c</sup> ) .....	20
圖 4-1	接頭軸向拉拔試驗方法 .....	25
圖 4-2	拉拔力與拉出量關係圖 .....	26
圖 4-3	接頭撓曲試驗方法 .....	27
圖 4-4	接頭彎矩與撓角關係圖 .....	28
圖 5-1	軸向拉拔數值試驗流程圖 .....	45
圖 5-2	撓曲數值試驗流程圖 .....	46
圖 5-3	軸對稱示意圖 .....	47
圖 5-4	軸向拉拔數值試驗示意圖 .....	47
圖 5-5	PLANE82 元素 .....	47
圖 5-6	HYPER74 元素 .....	48
圖 5-7	插口凸出部與固定圈接觸 .....	48
圖 5-8	CONTA172 元素 .....	48
圖 5-9	接合配件接觸圖 .....	49
圖 5-10	數值分析模型(1000mm) .....	49
圖 5-11	對稱邊界(UY=0)示意圖 .....	49
圖 5-12	位移控制示意圖 .....	50
圖 5-13	漏水示意圖 .....	50
圖 5-14	管徑 1000mm之率定結果 .....	50
圖 5-15	軸向拉拔數值試驗位移示意圖 .....	51
圖 5-16	插口凸出部碰觸固定圈示意圖 .....	51
圖 5-17	橡膠圈x方向應力分佈圖 (碰觸前) .....	52

圖 5-18	橡膠圈x方向應力分佈圖 (碰觸後)	52
圖 5-19	橡膠圈y方向應力分佈圖 (碰觸前)	53
圖 5-20	橡膠圈y方向應力分佈圖 (碰觸後)	53
圖 5-21	橡膠圈x方向應變分佈圖 (碰觸前)	54
圖 5-22	橡膠圈x方向應變分佈圖 (碰觸後)	54
圖 5-23	接觸元素接觸壓力分佈圖 (碰觸前)	55
圖 5-24	接觸元素接觸壓力分佈圖 (碰觸後)	55
圖 5-25	接觸元素接觸壓力分佈圖 (漏水)	56
圖 5-26	管徑 1000mm橡膠圈接觸壓力變化過程	56
圖 5-27	管徑 1000mm軸力與位移關係圖	57
圖 5-28	橡膠圈接觸壓力變化圖	58
圖 5-29	拉拔力與拔出量關係圖	59
圖 5-30	S型接頭軸向拉拔力	59
圖 5-31	撓曲試驗數值模型	60
圖 5-32	SOLID45 元素	61
圖 5-33	HYPER86 元素	61
圖 5-34	CONTA174 元素	62
圖 5-35	接頭撓曲試驗邊界條件示意圖	62
圖 5-36	撓曲試驗位移控制示意圖	62
圖 5-37	管徑 1000mm撓曲數值試驗率定結果	63
圖 5-38	X方向應力分佈圖	64
圖 5-39	Y方向應力分佈圖	65
圖 5-40	Z方向應力分佈圖	66
圖 5-41	撓曲試驗橡膠偵測點接觸壓力變化圖	67
圖 5-42	接頭彎矩與撓角關係圖	68

# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景

「水」為民眾生活之基本能源，都市化程度越高之城市，居民對其依賴性也愈高。九二一集集大地震(M=7.3)對於台灣中部自來水供水系統造成極大的重創，民眾於地震恐懼之餘，仍須面對缺水之苦。

有鑑於此，國內進一步加強自來水管線的耐震對策，包括了管體、接頭與構件的耐震性能與管線佈設規劃。中華民國自來水協會更積極於 2001 年著手檢討自來水設備的耐震基準，並於次年（2002）修編完成「自來水設施耐震設計指南及解說」。

根據「自來水設施耐震設計指南及解說」，地震發生時，管線通過高液化潛能區、邊坡滑動區或斷層處，需考慮管體可能產生局部大變形，此時耐震對策則是以管線多處接頭的變形來吸收大量地盤變形。另外，管線的接頭為管體斷面突然改變之處，往往成為地盤與管體間相對運動所衍生出之額外應力或者應變集中處，因此必須在地震時發生功能避免破壞。對於研究管線承受大量變形的能耐以及接頭破壞的模式，最直接的方法，首推實體模型試驗；惟實體模型試驗所需設備、人員以及經費都十分驚人，因此國內外學者在評估時，常採電腦數值模擬的方法。藉助電腦運算，可以同時考慮地盤、管體與接頭的相互影響與變形。但是以數值方法進行管線接頭耐震分析時，卻會遭遇到沒有適合的接頭勁度參數可用的窘境。因此，目前所急切缺乏者乃必須要有適合的接頭勁度參數。

在 9 月 11 日(2002)的都市防救災研究會中，即針對集集大地震後，自來水供水系統的災後檢討提出三大項結論，分別為：一、加強供水系統之耐震能力以減少地震破壞；二、震後緊急供水及供水系統搶救措施；三、廣設備用水源與加強水資源管理以降低缺水風險。其中，就第一大項提出的防震策略即為(1)提升管線接頭耐震等級；(2)加強管材耐震能力並規劃小區域管網系統以降低

停水風險。

以提升管線接頭耐震等級而言，需藉助試驗的方式瞭解管線接頭的伸縮、撓曲與接頭勁度特性後，才能決定管線接的耐震能力。對於規劃小區域管網系統而言，若以管網的結構性能作為考量，需將管線接頭模擬成勁度彈簧，然後藉由理論與數值分析的方式，依據液化潛能區與地震風險度進行分區。然而，國內外皆缺乏可供參考的管線接頭勁度值，在管線耐震研究上，無法作更進一步的耐震分析。因此，本研究擬將就目前國內現有管線接頭型式的變形與力學特性作一整理，並將推求接頭的勁度參數以作為接頭或管網系統耐震分析、新接頭設計的參考。

## 1-2 研究目的

國內因為進行相關接頭耐震試驗的次數較少，所以缺乏可供設計或分析的接頭勁度。本研究將針對這項需求進行探討。由於延性鑄鐵管(DIP)中的柔性接頭(K、U型)或鎖扣接頭(S、SII型)在遭遇地震時皆能提供某程度的變形，國內外在此方的研究分析資料與試驗數據較多。另外，鎖扣接頭(S、SII型)在經歷日本阪神地震(1995)後，顯示出較佳的耐震性。因此，本研究選擇延性鑄鐵管(DIP)作為研究對象。

## 1-3 研究內容及方法

### 1-3-1 研究內容

研究內容包括：

- (1)自來水地下管線，受地震力作用下破壞機制相關資料蒐集。
- (2)自來水管線接頭耐震設計方法與耐震標準蒐集。
- (3)自來水管線接頭耐震試驗規範與試驗方法蒐集。
- (4)自來水管線接頭數值試驗評估耐震參數。
- (5)結論與建議。

### 1-3-2 研究方法

研究方法是採電腦數值模擬的方法求取接頭耐震設計參數。首先，收集相關接頭型式與接頭耐震試驗資料，接著研擬適

當的數值接頭模型與數值模擬方法，然後分析數值接頭受拉、受彎折時的力與變形關係，以評估不同尺寸、型式之延性鑄鐵管 (DIP)接頭容許伸縮量、撓角及接頭勁度。研究流程如圖 1-1 所示。

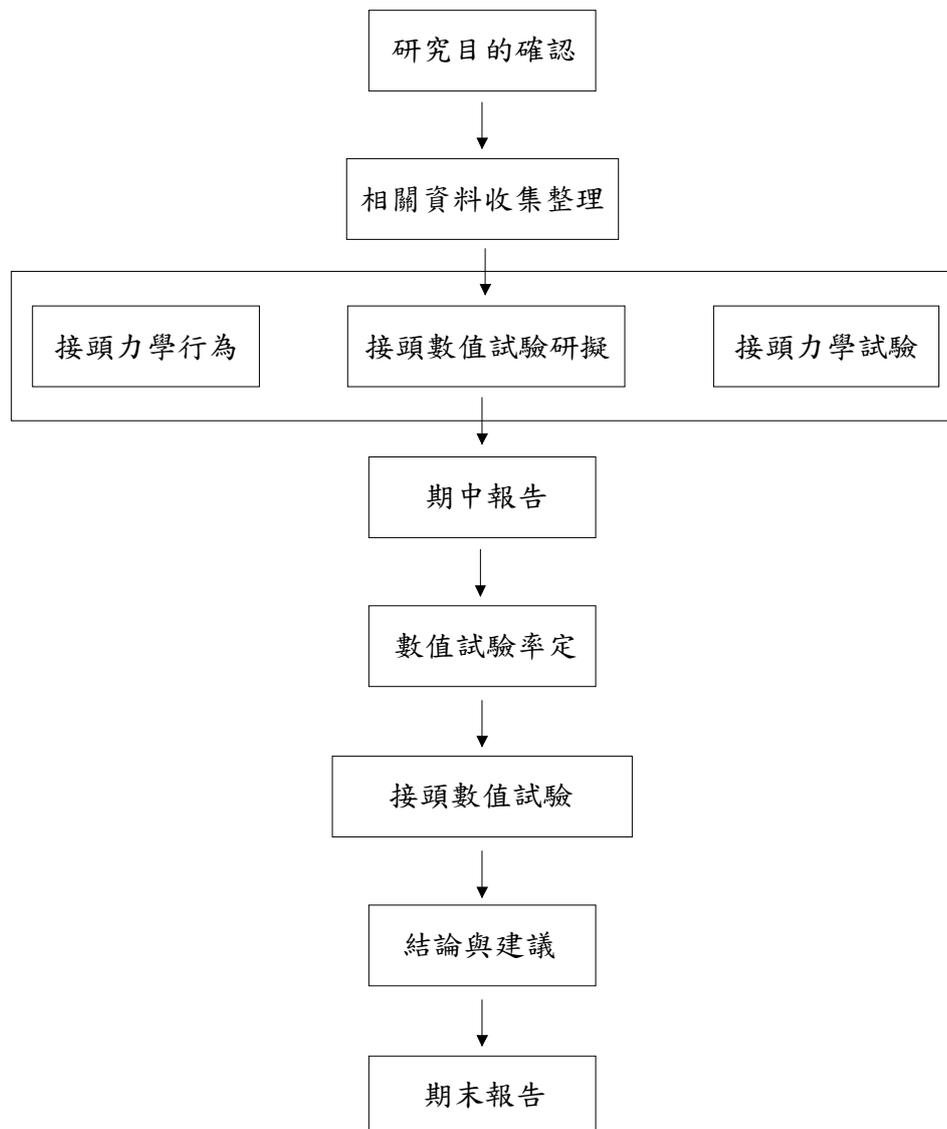


圖 1-1 研究計算流程圖

## 第二章 自來水管線柔性接頭性質

自來水管線柔性接頭泛指在外力的作用下，可提供某種程度的軸向、彎折或兩者兼備的變形能力。延性鑄鐵管(DIP)本身管體具有強度高、韌性大、耐衝擊與耐腐蝕之特性，是被採用為自來水輸配水管線之主因。由於製造、運輸與施工考量，延性鑄鐵管是以 4~6m 為一單元管長，其間以接頭相互接合，而連結成一長直管線。以下針對延性鑄鐵管(DIP)接頭作一整理，並以接頭型式與接頭構件材料兩部分介紹。

### 2-1 接頭型式

延性鑄鐵管為因應不同管路情況與施工要求，設計有多種不同接頭（表 2-1）。接頭的大致構造是於管之插口與承口間套上橡膠環圈，並以壓環迫緊，使其在承口與插口兩個面下同時產生面壓，以達到維持接頭部位水密性之目的。接頭之型式依其構造與變形特性可概分成三類：柔性接頭、剛性接頭與鎖扣型接頭。

#### 2-1-1 柔性接頭

依據目前 CNS 10808 延性鑄鐵管規定之接合型式，屬柔性接頭者，如 K 型、U 型（如圖 2-1(a), (b)），其接頭構造設計是於承口與插口間套上橡膠環圈，並以螺栓壓環迫緊，但承口與插口間仍可移動，也因為承插口之間隙與橡膠環圈之彈性材質，使此接合部位能適度彎曲。

由於管線變形能力主要會集中在接頭，故地盤變動造成管體之作用力，會為可伸縮彎曲之接頭所吸收，但若地震力造成接頭伸縮量或彎曲角大於容許值，則接頭部份易產生漏水甚至拉脫。

#### 2-1-2 剛性接頭

屬剛性接頭的則如 KF 型、UF 型接頭，其構造如圖 2-1(c), (d) 所示，於承插口上加設鎖環以及能卡住鎖環之凹槽，以螺栓將鎖環壓入凹槽中即會卡在承插口間，防止相互脫離。因此接頭部位受力難以伸縮、彎曲。一般而言，接頭若採剛性接合方式會造成

管線變形能力降低。

### 2-1-3 鎖扣型接頭

鎖扣型接頭為近年來發展之耐震型接頭，有 S 型、S II 型（如圖 2-1(e), (f)），其接頭構造原理類似柔性接頭，除可伸縮、彎曲外，由於插口端設有突出部，當接頭過度拉伸時，插口端之突出部會卡住鎖環，可防止接頭脫開。

由於鎖扣型接頭部份具有能伸縮、彎曲之柔性接頭特性，同時又有防止接頭脫落之鎖扣設計，對於大規模地盤變位，有優異之耐震性能。

## 2-2 接頭構件材料

由上述可知，管線主要是藉管體、螺栓與橡膠環圈的組合以抵抗外力與變形，本節將對其材料性質敘述：

### 2-2-1 延性鑄鐵管

延性鑄鐵管管材強度依據 CNS 10808「延性鑄鐵管」規定，拉力強度須在  $420\text{ N/mm}^2$  ( $42.8\text{ kgf/mm}^2$ ) 以上，接頭容許伸張應變應在 10% 以上，接頭形式有機械式接頭及套接式接頭，因為外力之變位可由接頭伸縮與彎曲來吸收，故管體強度問題幾乎可不考慮，延性鑄鐵管之機械性質如表 2-2 所示。

### 2-2-2 橡膠環圈

管線接頭用橡膠環圈在以壓環迫緊後，起初管面與橡膠間之空隙因橡膠變形而填滿，之後續以螺栓旋緊，接觸面上之壓力增加，達到完全密封狀態，當外力解除，橡膠環圈大致又會恢復原來形狀。因此，橡膠環圈應具有之特性包括：(1)維持高度彈性；(2)維持耐老化性能；(3)維持水質安全；(4)維持低永久變形率；(5)維持高水密性。

一般適用於延性鑄鐵管橡膠環圈的橡膠種類包括笨乙烯丁二烯膠(SBR)、氣丙烯膠(CR)與腈膠(NBR)。而延性鑄鐵管使用之橡膠環圈，依接頭型式亦有所不同。

橡膠環圈之規格依據 CNS 10774「自來水管件用橡膠製品」，其物理性質須符合表 2-3。另外，參考 JIS K 6353 亦有類似規定，見表 2-4。

表 2-1 延性鑄鐵管接頭形式  
(自來水設施耐震設計指南及解說 2002)

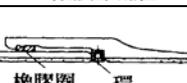
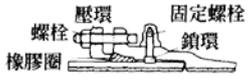
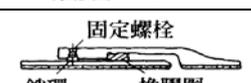
分類	名稱	構造	適用口徑 (mm)	用途	備註
柔性接頭	A 型	 螺栓 壓環 橡膠圈	$\phi 75-350$	一般管線用	
	K 型	 螺栓 壓環 橡膠圈	$\phi 75-2,600$	一般管線用	對大口徑、高壓具優良水密性
	T 型	 橡膠圈	$\phi 75-2,000$	一般管線用	對大口徑、高壓具優良水密性
	U 型	 割輪 押輪 橡膠圈 螺栓	$\phi 700-2,600$	隧道內配管、一般管線用	對大口徑、高壓具優良水密性
	PI 型	 橡膠圈 環	$\phi 300-1,350$	舊有管線配管用	
剛性接頭	KF 型	 壓環 固定螺栓 螺栓 橡膠圈 鎖環	$\phi 300-900$	彎曲處或需防止脫落處	具高抗拉拔力、彎曲剛性
	UF 型	 固定螺栓 鎖環 橡膠圈 壓環 螺栓	$\phi 700-2,600$	彎曲處或需防止脫落處	具高抗拉拔力、彎曲剛性
	凸緣	 螺栓 橡皮墊	$\phi 75-2,600$	抽水機、閥門接續處	包含 RF 型與 GF 型，但耐震最好使用 GF 型
鎖構造接頭	S 型	 螺栓 固定圈 壓環 橡膠圈 鎖環	$\phi 500-2,600$	適合耐震管線用、軟弱地盤使用	伸縮量為有效管長的 1%
	SII 型	 螺栓 鎖環 壓環 橡膠圈 固定圈	$\phi 100-450$	適合耐震管線用、軟弱地盤使用	伸縮量為有效管長的 1%
	PII 型	 固定螺栓 鎖環 橡膠圈	$\phi 300-1,350$	舊有管內配管耐震管線用	
	US 型	 橡膠圈 割輪 壓環 鎖環 螺栓	$\phi 700-2,600$	隧道內配管、耐震管線用	

表 2-2 延性鑄鐵管機械性質

性 質	單 位	數 值	備註
拉力強度	$N/mm^2$ ( $kgf/mm^2$ )	420 (42.8) 以上	1)
彎曲強度	$N/mm^2$ ( $kgf/mm^2$ )	600 (61.2) 以上	2)
耐力	$N/mm^2$ ( $kgf/mm^2$ )	270 (27.5) 以上	3)
伸縮量	%	10 以上	1)
彈性係數	$kN/mm^2$ ( $kgf/mm^2$ )	150-170 (1.6-1.7×10 <sup>4</sup> )	2)
硬度		勃氏硬度 230 以下	1)
柏松比		0.28-0.29	2)
比重		7.15	2)
線膨脹係數	1/°C	1.0×10 <sup>-5</sup>	2)

1) CNS 10808

2) JIS G 5526, 5527-1989

3) JDPA T 23 「延性管路設計與施工」

表 2-3 橡膠環圈物理性質

種類	硬度	硬度許可差	拉伸試驗			老化試驗			壓縮永久變形率% (以下)	
			拉應力 70Mpa{7 1.4kgf/cm <sup>2</sup> }時之 伸長率% (以下)	抗拉強度 Mpa {kgf/cm <sup>2</sup> } (以上)	伸長率 % (以上)	抗拉強度變化 率% (以內)	伸長率 變化率 % (以內)	硬度之 變化 H <sub>A</sub>		
		H <sub>A</sub>								
I 類	A	70	±5	200	18 <sup>(2)</sup> {184}	300	-20	+10 -20	+7 0	20
		65	±5	250	18 <sup>(2)</sup> {184}	400	-20	+10 -30	+7 0	20
		60	±5	300	18 <sup>(2)</sup> {184}	400	-20	+10 -30	+7 0	20
		55	±5	350	18 <sup>(2)</sup> {184}	400	-20	+10 -30	+7 0	20
		50	±5	400	18 <sup>(2)</sup> {184}	400	-20	+10 -30	+7 0	20
	B	65	±5	--	18 <sup>(2)</sup> {184}	450	-40 <sup>(1)</sup>	+10 <sup>(1)</sup> -40	+5 <sup>(1)</sup> 0	20
		50	±5	--	18 <sup>(2)</sup> {184}	450	-40 <sup>(1)</sup>	+10 <sup>(1)</sup> -40	+5 <sup>(1)</sup> 0	20
II 類	70	±5	200	16 <sup>(2)</sup> {163}	300	-20	+10 -30	+7 0	30	
	65	±5	250	16 <sup>(2)</sup> {163}	300	-20	+10 -30	+7 0	30	
	60	±5	300	16 <sup>(2)</sup> {163}	300	-20	+10 -30	+7 0	30	
	55	±5	350	16 <sup>(2)</sup> {163}	300	-20	+10 -30	+7 0	30	
	50	±5	400	16 <sup>(2)</sup> {163}	300	-20	+10 -30	+7 0	30	
III 類	80	±5	--	12 {122}	280	-25 <sup>(4)</sup>	+10 <sup>(4)</sup> -30	+5 <sup>(1)</sup> 0	30 <sup>(4)</sup>	
	75	±5	--	12 {122}	300	-25	+10 <sup>(4)</sup> -30	+7 <sup>(4)</sup> 0	30 <sup>(4)</sup>	
	65	±5	250	12 {122}	300	-25	+10 -30	+7 0	30	
	60	±5	300	12 {122}	300	-25	+10 <sup>(4)</sup> -30	+7 <sup>(4)</sup> 0	30 <sup>(4)</sup>	
IV 類	50	±5	--	9 {91.8}	400	-25	+10 -30	+7 0	30	

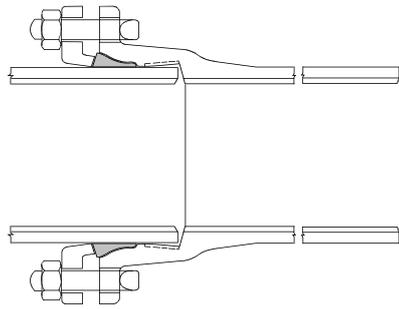
表 2-3 橡膠環圈物理性質 (續)

種類		用途 (參考)
I 類	A	管類接頭部所用之橡膠圈 (金屬管類、塑膠管類、及混凝土管類等) 及閘煩之閘座用橡膠品。
	B	鑄鐵管承插(push-on)接頭用橡膠圈之止水部。
II 類		閘式閘基底部所用之橡膠品, 及蝶閘之閘座用橡膠品。
III 類		凸緣面用之板狀橡膠品。通氣閘用圓錐狀及圓皮狀橡膠品。鑄鐵管承插接頭用橡膠圈之定位部。
IV 類		排水混凝土管用之橡膠圈。

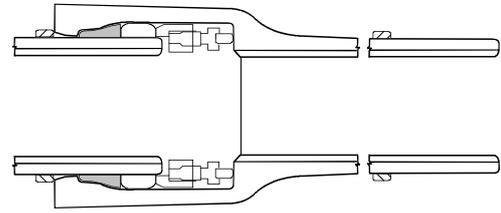
表 2-4 橡膠 SBR、CR、NBR 物理性質

接頭型式	名稱		SBR*	CR 及 NBR*
			項目	
T	標稱口徑 75-600mm	球根部	IB · 50	IB · 50, 但抗張強度在 160 $kgf/cm^2$ 以上。
		跟部	III · 80(1)	III · 80(1)
	標稱口徑 700-2000mm		IB · 65	IB · 65, 但抗張強度在 160 $kgf/cm^2$ 以上。
A	膠圈		IA · 70	IA · 70, 但抗張強度在 160 $kgf/cm^2$ 以上。
K. U. KF UF. S. SII	圓形部		IA · 55	IA · 55, 但抗張強度在 160 $kgf/cm^2$ 以上。
	角形部		IA · 70	IA · 70, 但抗張強度在 160 $kgf/cm^2$ 以上。

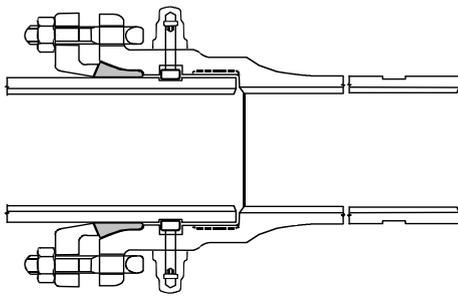
\*參考 JIS K 6353



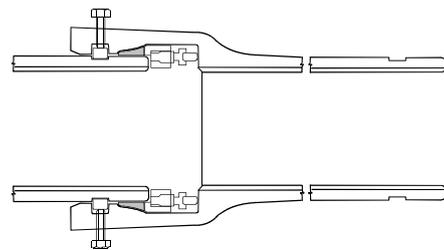
(a) K 型



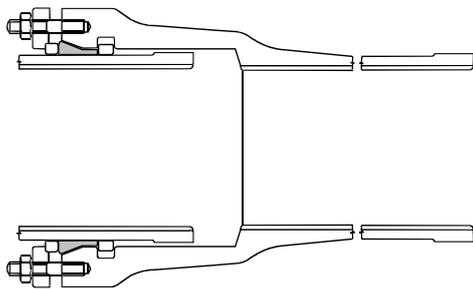
(b) U 型



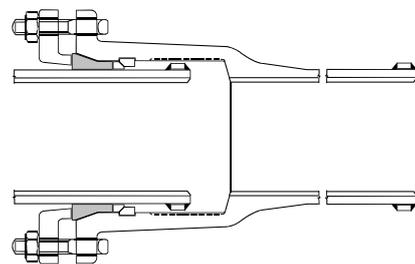
(c) KF 型



(d) UF 型



(e) S 型



(f) S II 型

圖 2-1 延性鑄鐵管接頭型式 (中國國家標準, 1998)

## 第三章 自來水管線接頭力學特性

由於自來水管線的管段長度短、管體強度高，當遭受如液化、差異沉陷、地震力、地層變形等外力作用下，管線大部分變形會集中在接頭位置。因此接頭部位的力學特性顯得相當重要，而以接頭勁度表示管線接頭部位的變形能力是其中最重要的設計參數之一。由於接頭型式多樣化，接頭勁度因此會隨不同的構造與作用力而呈現不同的勁度值。

### 3-1 接頭勁度

管線接頭結構的耐震分析，若僅針對單一接頭，則需考慮接頭處不同斷面的延性鑄鐵管、橡膠環圈、螺栓等，然而此種組合式的結構由於考慮的因素太多，例如：橡膠環圈在承口與插口之間的行為、螺栓的剪力強度、橡膠環圈受作用力後的變形特性等，若將所有影響因素都納入考慮，則將使得結構分析的過程過於複雜。

一般的作法是將管線接頭模擬成勁度彈簧以簡化其複雜的組合式結構。若是研究接頭的軸向變形行為，則將接頭模擬成軸向勁度彈簧且遵循虎克定律，見圖 3-1。

$$F = k_{\Delta} \cdot \Delta \dots\dots\dots (3-1)$$

其中，

$F$ ：軸向作用力

$k_{\Delta}$ ：軸向勁度

$\Delta$ ：軸向變位量

若是研究接頭的撓曲行為，則將接頭模擬成撓曲勁度彈簧且遵循虎克定律，見圖 3-2。

$$M = k_{\theta} \cdot \theta \dots\dots\dots (3-2)$$

其中，

$M$  : 彎矩

$k_{\theta}$  : 撓曲勁度

$\theta$  : 轉角變化量

另外，接頭的強度大小也可藉由接頭勁度來加以量化，接頭軸向勁度愈大表示接頭在抵抗拉伸或壓縮的能力較高。同理，接頭撓曲勁度愈大表示接頭在抵抗彎折時的能力較高。

### 3-2 接頭力學行為

為了要探討接頭接合管線因地層變形之反應，必須先對接頭的受力行為有所了解。但承如上述，管線接頭處斷面變化複雜，橡膠環圈又增加影響因素，對於實際行為尚未能明確了解，故多採用實尺寸結構試驗，以印證管線接頭或管體力學行為，進而探討管線破壞之機制。

在延性鑄鐵管接頭試驗方面 Singhal (1984a, b, c) 根據延性鑄鐵管柔性接頭受振行為，進行實體試驗，探討造成接頭破壞之三種力學機制，包括軸向拉伸壓縮、撓曲彎折以及扭轉等三種受力情況。

由於 Singhal 等人進行試驗研究所採用之延性鑄鐵管規尺寸以及配合之橡膠圈，並非與本地現行者相同（參考圖 3-3 與圖 3-4）。因此，雖然試驗數據對於國內應用，無實質意義，但是其試驗結果卻可作為各型接頭力學行為的參考。

#### 3-2-1 軸向受力變形行為

由 Singhal 的試驗結果可知，柔性接頭拉脫的力學行為，呈現彈性-塑性的特性（圖 3-5）且接頭拉脫強度隨管徑而增加。對於相同的外力作用下，管體埋入土壤愈深，其抵抗拉脫外力的強度將愈漸增加（圖 3-6）。比對這項結論，相當符合學理上推演的行為，因為管線設施埋入土中，管壁與土壤的摩擦力會隨著覆土壓力增加。相對的，外力作用欲拉脫接頭的困難程度，亦相對遞增。

Singhal 根據試驗的結果，推導出預測不同管徑 DIP 管接頭

在未覆土情況下最大抗拉力。其預測值和試驗值的誤差在 35% 以內。

$$P_{\max} = \frac{5}{24} \pi^2 \mu E_1 A D \frac{\left( A - \frac{e-D}{2} \right)}{(e-D)} \dots\dots\dots (3-3)$$

其中，

$P_{\max}$  : 最大拉脫抵抗力

$\pi$  : 圓周率

$E_1$  : 橡膠環圈平均彈性模數

$A$  : 橡膠環圈厚度

$D$  : 鑄鐵管外徑

$e$  : 鑄鐵管承口內徑

### 3-2-2 撓曲受力變形行為

在接頭撓曲行為方面，則呈現雙線性特性（圖 3-7），初始撓曲勁度代表接頭純轉動行為。第二階段勁度則是接頭彎折時，因橡膠環圈造成軸向滑動之效應所致。其後若接頭持續彎折，則使接頭承口與插口鑄鐵部分互相接觸，其力學特性已不受橡膠環圈所影響，不再單純。

總體而言，柔性接頭的力學性質，主要反應橡膠環圈與管身二者間發揮之摩擦特性。雖然 Singhal 研究之接頭型式與目前國內慣用者不同，但其研究成果，仍有助於了解管線接頭受力之一般行為。

### 3-2-3 接頭受力變形行為歸納

柔性接頭之構造能允許接頭滑動而拉伸，拉伸時由於橡膠環圈的摩擦阻力，接頭之受力與拉伸變形約成線性關係。當接頭接近脫開，則呈現接頭勁度值趨於下降之現象。

剛性接頭，多採法蘭（flange）與螺栓方式接合，其構造設計使接頭難以伸縮變形，而其勁度相對較大。

鎖扣型接頭則結合柔性與剛性接頭之力學特性，伸縮時由於橡膠環圈的摩擦阻力，接頭之受力與拉伸（或壓縮）變形亦約成線性關係。但當接頭持續伸縮，則會因為鎖扣之作用，使接頭後期勁度明顯上升。

對於常用各型接頭之勁度值，國內目前並無相關研究而現行規範亦無規定，相關文獻也沒有彙整性的試驗結果。因此，本文首先彙整現有文獻資料如表 3-1 列舉各種柔性接頭勁度值。

### 3-3 接頭破壞準則

判定管線接頭是否產生破壞，應依自來水管線的「功能性」來考量，對於自來水管線之功能性，並非指接頭材料承受應力大於容許應力之破壞行為，而是以接頭部位之變形已使接頭喪失「水密性」來定義破壞。因此，進行接頭伸縮或撓曲試驗時，亦必須於試體內施以水壓，以檢驗接頭之「水密性」。當試驗過程中，試驗水壓開始下降時，即接頭已達破壞，此時之接頭變形量（伸縮量或彎折角）可利用於定義接頭合理之容許伸縮量與彎折角。

針對自來水管線，為確保接頭於地震力作用下不致破壞，在進行管線接頭設計或分析時，須求得於地震力作用下自來水管線接頭之變位量及彎折角，合併因外部荷重、溫差、內壓、彎曲配管及不均勻沉陷等因素所產生之變位量及彎折角，藉以獲得接頭總軸向變位量及總撓曲角。然後以其接頭總變位及撓曲角必須小於所選用接頭之容許最大伸長量及彎折角，作為選用接頭之依據。

另外，日本國土開發技術研究中心（1977）之「地下埋設管路耐震接頭技術基準(案)」將接頭依其耐震之伸縮性能分為 S-1、S-2 及 S-3 三類，並依撓曲性能分為 M-1、M-2 及 M-3 三類，作為選用適當接頭之用，如表 3-2 所示。

中華民國自來水協會「自來水設施耐震設計指南及解說」（2002）中亦列舉了 K 型、U 型與 S、SII 型接頭之容許伸長量（表 3-3）。歸納而言，管徑愈大，接頭容許伸長量愈大。

表 3-1 接頭勁度參考值

接頭型式	管徑 (mm)	軸向勁度(kN/cm)		撓曲勁度 (kN·cm/rad)
		初始勁度	後期勁度	
S II	150	8.9	147	—
S II	400	6.5	1140	—
S	1000	52.8	5600	—
S	1500	116.5	7436	—
S	2100	168.6	13733	—
A	200	12		3123

表 3-2 接頭伸縮及撓曲性能分類

(日本國土開發技術研究中心，1977)

項目	區分	接頭之性能	
伸縮性能	S-1 類	伸縮量 (mm)	$> \pm 0.01 L (mm)$ 以上
	S-2 類		$\pm 0.005 L (mm) \sim \pm 0.01 L (mm)$
	S-3 類		$< \pm 0.005 L (mm)$
撓曲性能	M-1 類	撓曲角度 (°)	$> \pm 15^\circ$
	M-2 類		$\pm 7.5^\circ \sim \pm 15^\circ$
	M-3 類		$< \pm 7.5^\circ$
防脫性能	A 級	防脫抵抗力 $0.3D ton$ 以上	
	B 級	防脫抵抗力 $0.15D ton$ 以上 $0.3D ton$ 未滿	
	C 級	防脫抵抗力 $0.075D ton$ 以上 $0.15D ton$ 未滿	
	D 級	防脫抵抗力 $0.075D ton$ 未滿	

註：L 為管長，D 為管外徑

表 3-3 延性鑄鐵管接頭容許變形量  
(自來水設施耐震設計指南及解說 2002)

接頭 型式	K 型		U 型		S 型 (管徑 450 以下 SII 形)	
	最大 伸長量	容許 伸長量	最大 伸長量	容許 伸長量	最大 伸長量	容許 伸長量
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
75	40	31	-	-	±45.5	±42
100	"	29	-	-	"	±41
150	"	25	-	-	±60.5	±54
200	"	20	-	-	"	±52
250	"	21	-	-	"	±51
300	64	45	-	-	±75.5	±66
350	"	32	-	-	"	±65
400	"	33	-	-	"	±63
450	"	32	-	-	"	±62
500	"	33	-	-	±77	±61
600	"	"	-	-	"	"
700	"	"	64	32	"	"
800	"	"	"	"	"	"
900	"	31	"	31	"	±60
1000	72	38	67	33	±78.5	±61
1100	"	"	"	"	"	"
1200	"	39	"	34	"	±62
1350	"	"	77	40	"	±60
1500	"	40	85	41	±81	"
1600	85	41	67	33	±72.5	±50
1650	90	45	"	34	"	"
1800	95	45	"	"	±75	"
2000	105	51	72	36	±77.5	"
2100	110	53	77	39	±80	±51
2200	115	55	82	42	"	±50
2400	125	60	92	49	±82.5	"
2600	141	70	138	67	±85.5	"

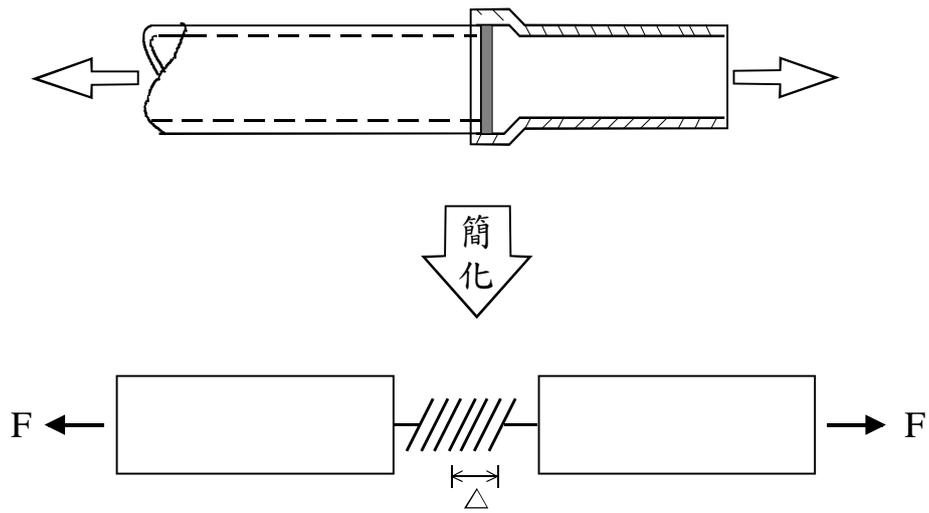


圖 3-1 接頭軸向勁度彈簧示意圖

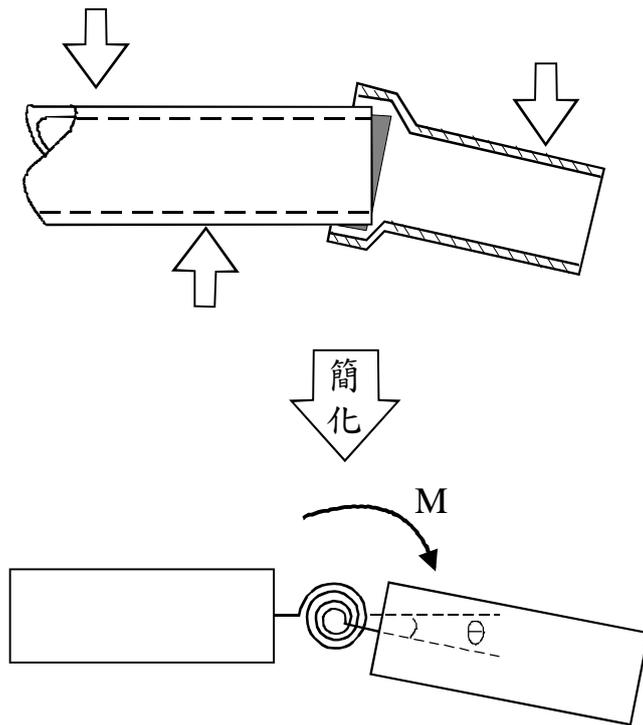


圖 3-2 接頭撓曲勁度彈簧示意圖

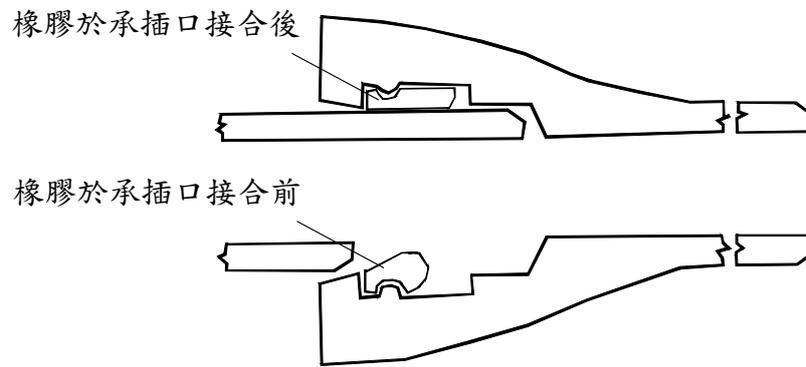


圖 3-3 延性接鑄鐵管(DIP)接頭型式 (Singhal, 1984<sup>a, b, c</sup>)

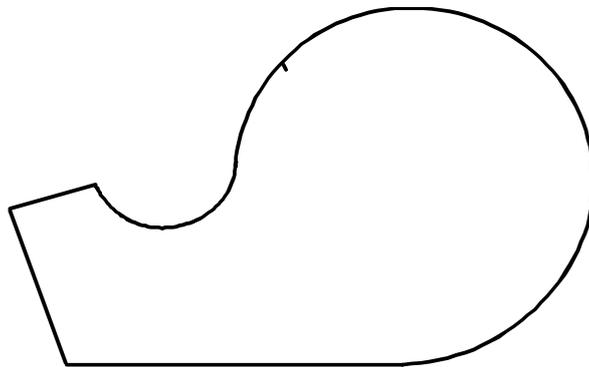


圖 3-4 延性接鑄鐵管(DIP)接頭承插橡膠圈斷面型式 (Singhal, 1984<sup>a, b, c</sup>)

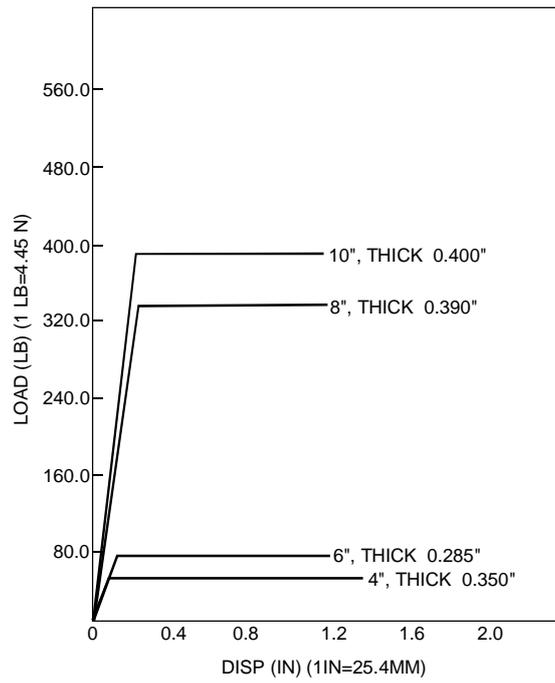


圖 3-5 接頭軸向拉伸行為 (Singhal, 1984<sup>a, b, c</sup>)

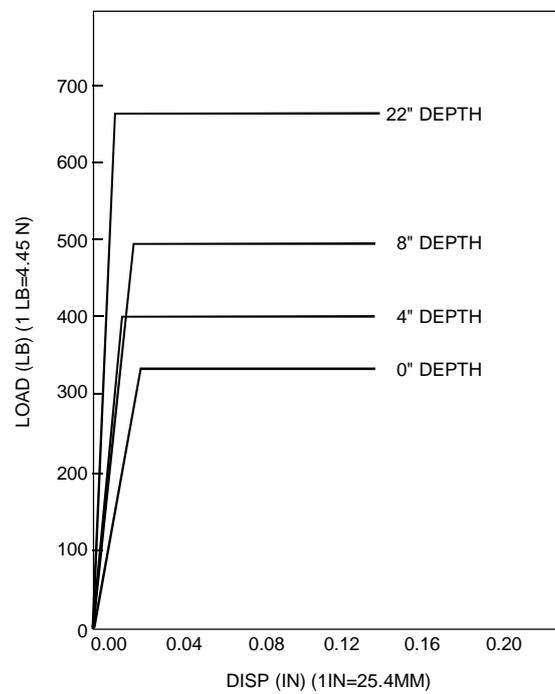


圖 3-6 埋深與接頭軸向勁度關係 (Singhal, 1984<sup>a, b, c</sup>)

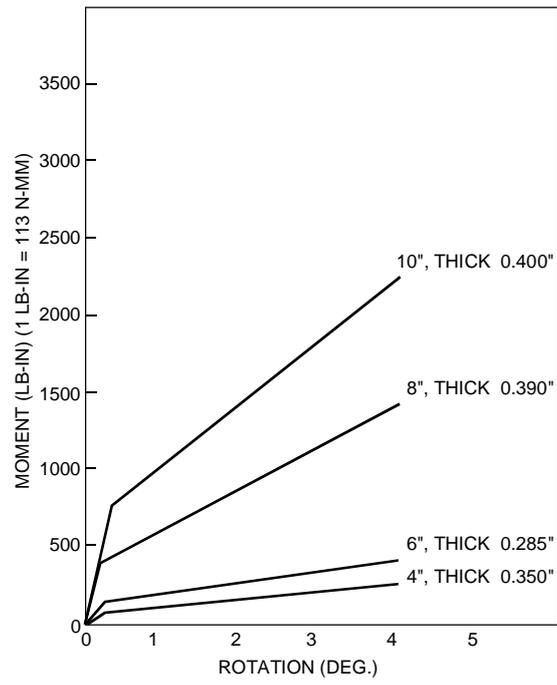


圖 3-7 接頭撓曲行為 (Singhal, 1984<sup>a, b, c</sup>)

## 第四章 自來水管線接頭力學試驗

延性鑄鐵管接頭的力學試驗可分為：軸向拔出試驗與撓曲試驗兩種，並以接頭破壞與接頭漏水作為試驗結果的依據，其重點在評估接頭的伸縮與撓曲性能，以作為接頭設計、使用的參考。前述管線接頭處由於結合了橡膠環圈之後，斷面變化複雜，無法採用理論方法進行力學分析，故多藉助實尺寸結構試驗，以求取管線接頭勁度，進而探討管線破壞之機制。

由於 S 型接頭除了有與一般柔性接頭（例如 K 型接頭）相似的伸縮特性外，其插口端增加一防止鬆脫卡榫裝置，藉由突出之卡榫部在拉拔範圍過大時卡住鎖環，防止接頭脫開。日本鑄鐵管協會(1975)曾針對此鎖扣式 S 型接頭進行接頭力學試驗，相關內容分述如下。

### 4-1 接頭軸向拉拔試驗

一般 S 型接頭的伸縮餘裕量都在管長的 $\pm 1\%$ 左右，而接頭軸向拉拔試驗有別於軸向反覆拉拔試驗，其目的是模擬當自來水管線接頭遭遇外力而產生軸向大變形時（例如：地震時發生液化、邊坡滑動或斷層位移）的接頭行為，以評估接頭軸向的力學特性，包括：接頭、材料強度、接頭水密性與接頭力學參數。接頭插口接合處主要是抵抗拉拔力，而承口底部主要抵擋地震所造成的壓縮力。接頭軸向拉拔試驗可分為(1)水壓拉拔試驗與(2)油壓千斤頂拉拔試驗方法。

#### 4-1-1 水壓拉拔試驗方法

試驗配置方式如圖 4-1(a)所示，將管段兩端以蓋子封住，而管內則充滿水，並以逐漸提高自來水管內水壓力(由 $0\sim 25\text{kgf/cm}^2$ )的方式模擬接頭受軸力拉拔的行為，且以接頭水密性(有無漏水)作為評估接頭破壞的標準。水壓拉拔試驗是以管徑 1000mm 與 1500mm 的 DIP 管進行試驗，試驗的最終結果見表 4-1，圖 4-2(a),(b)為水壓拉拔試驗的拉拔力與拉出量關係圖。

#### 4-1-2 油壓千斤頂拉拔試驗方法

試驗配置方式如圖 4-1(b)所示，接頭接合處的兩端（承口與插口）鍍上墊片，中間放置千斤頂，以加大油壓方式將管向外頂，藉此模擬接頭受軸力拉拔的行為，並以接頭管體的破壞判定破壞。油壓千斤頂拉拔試驗是以管徑 2100mm 的 DIP 管進行試驗，試驗的最終結果見表 4-1，而圖 4-2(c)為油壓千斤頂拉拔試驗的拉拔力與拉出量關係圖。

#### 4-1-3 拉拔試驗結果歸納

圖 4-2 為進行拉拔試驗時在管內上端、下端、左端、右端量測拉拔力與拉出量的關係圖。而各種管徑(1000、1500、2100mm)的設計伸縮量可參考表 2-7 約 80mm 左右。圖 4-2 顯示：

- (1) 拉拔力與拉出量的關係在初始階段呈線性關係，此時是藉由橡膠環圈與插口間的摩擦力抵抗拉拔力，這與柔性接頭 K 型力學性質或 2-3-1 節 Singhal 的接頭軸向試驗結果類似。
- (2) 當拉出量達到接頭設計伸縮量時，拉拔力與拉出量的關係因為插口端突出部與固定圈相互鎖扣住，呈現拉出量不變而拉拔力持續增加的結果，此時抵抗大部份拉拔力的是插口端突出部與固定圈本身的材料強度，而橡膠環圈提供的摩擦力僅抵抗少部份的拉拔力。
- (3) 圖 4-2 亦顯示拉拔力隨管徑增加而有增加的趨勢。
- (4) 另外，圖 4-2 中各管徑試驗的線性部份可以提供設計時所需的接頭勁度參數，各管徑的最大拉拔力可提供設計時所需的接頭破壞值。

#### 4-2 接頭撓曲試驗

接頭進行接頭撓曲試驗的目的是模擬當自來水管線接頭遭遇外力而產生撓曲大變形時（例如：地震時發生液化、邊坡滑動或斷層位移）的接頭行為，以評估接頭撓曲的力學特性，包括：接頭、材料強度、接頭水密性與接頭力學參數。由 2-3-2 節可知，接頭的撓曲行為包括純接頭轉動與接頭彎折兩部份。而接頭撓曲試驗可分為(1)撓曲強度試驗與(2)撓曲水壓試驗方法。

#### 4-2-1 撓曲強度試驗方法

試驗配置方式如圖 4-3(a)所示，將管段兩端以管台墊高，而在管中央接近接頭處加載荷重，此試驗法類似三點載重試驗法，可推求接頭處可承受的彎矩與撓曲應力大小。試驗重點在於管接頭本身的撓曲強度，所以是由接頭管體的破壞判定破壞。撓曲強度試驗是以管徑 1000mm 與 1500mm 的 DIP 管進行試驗，試驗的最終結果見表 4-2，圖 4-4(a),(b)為撓曲強度試驗（管徑 1000mm 與 1500mm）的彎矩與接頭撓角關係圖。

#### 4-2-2 撓曲水壓試驗方法

試驗配置方式如圖 4-3(b)所示，在已發生轉動的接頭部份，即承插口之間充滿  $10\text{kgf/cm}^2$  的水壓，並檢視是否有出現漏水的情況。主要目的在模擬接頭受力轉動時，接頭的水密性能力。且以接頭水密性（有無漏水）作為評估接頭破壞的標準。撓曲水壓試驗是以管徑 1000、1500、2100mm 的 DIP 管進行試驗，試驗的結果見表 4-3。

#### 4-2-3 撓曲試驗結果歸納

- (1) 由接頭撓曲強度試驗的結果可知：彎矩與接頭撓角關係，呈現類似雙線性特性（圖 4-4）。
- (2) 圖 4-3 中可提供設計分析時所需的初始（第一階段）撓曲勁度與第二階段勁度值。其中，初始撓曲勁度代表接頭純轉動行為。第二階段勁度則是接頭彎折時，因橡膠環圈造成軸向滑動之效應所致。
- (3) 若接頭持續彎折，使接頭承口與插口鑄鐵部分互相接觸，則力學特性已不受橡膠環圈所控制，力學特性不再單純。
- (4) 圖 4-4 亦顯示接頭撓角隨管徑增加而有增加的趨勢。
- (5) 進行撓曲水壓試驗，除了解接頭的水密性能力亦可提供設計分析時所需的最大接頭撓曲角度，見表 4-3。

表 4-1 S 型接頭拉拔試驗結果

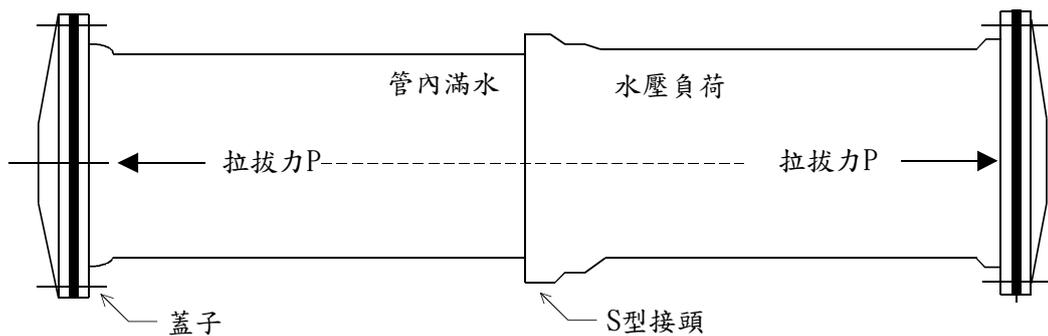
直徑 (mm)	水壓* (kgf/cm <sup>2</sup> )	拉拔力 (tf)	接頭狀態	彎曲應力** (kgf/mm <sup>2</sup> )
1,000	25	213	會發生漏水	18.5
1,500	25	474	會發生漏水	12.8
2,100	14.7	540	會發生漏水	11.0
<p>* 水壓 <math>p</math>、拉拔力 <math>P</math>、管外徑為 <math>D_2</math> 時 <math>P = \frac{\pi}{4} D_2^2 p</math>。</p> <p>**管徑 1000mm、1500 mm 的承口處、2100 mm 的插口處所產生的應力。鑄鐵彎曲強度依 JIS 5526 所規定材料強度為 60 kgf/mm<sup>2</sup> 以上。</p>				

表 4-2 S 型接頭撓曲強度試驗結果

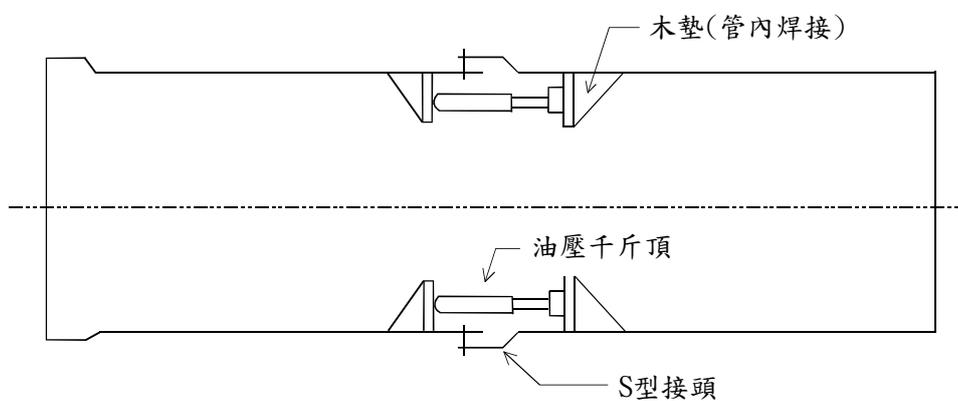
直徑 (mm)	荷重 (tf)	接頭彎矩 (tf-m)	接頭撓角	接頭狀態	起始彎曲 應力* (kgf/mm <sup>2</sup> )
1,000	24	42	4° 5'	接頭破壞	25.0
1,500	40	70	5° 5'	接頭破壞	25.7
<p>* 管徑 1000mm、1500 mm 的插口處所產生的應力。鑄鐵彎曲強度依 JIS 5526 所規定材料強度為 60 kgf/mm<sup>2</sup> 以上。</p>					

表 4-3 S 型接頭撓曲水壓試驗結果

直徑 (mm)	接頭彎曲角度	水壓 (kgf/cm <sup>2</sup> )	接頭狀態
1,000	4° 40'	10	會發生漏水
1,500	5° 30'	10	會發生漏水
2,100	1° 50'	10	會發生漏水

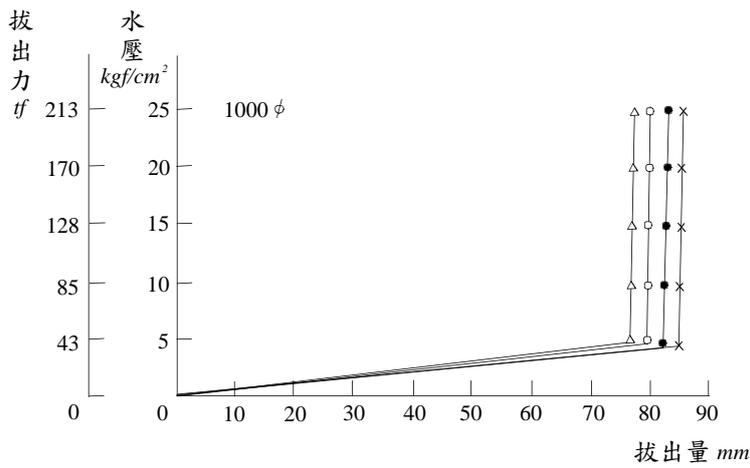


(a) 水壓拉拔試驗方法

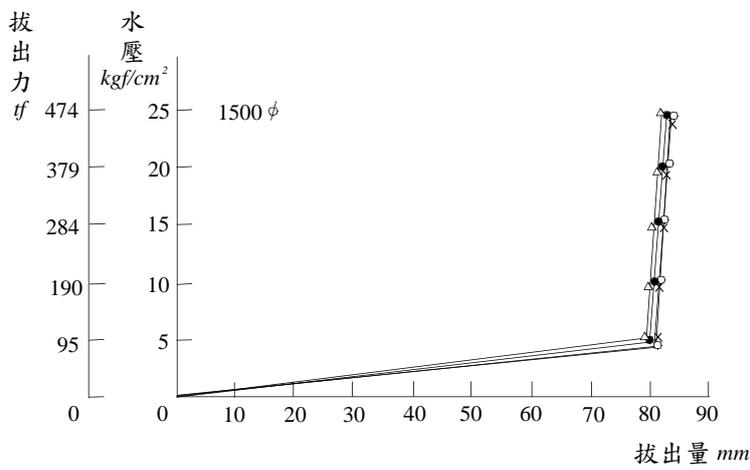


(b) 油壓千斤頂拉拔試驗方法

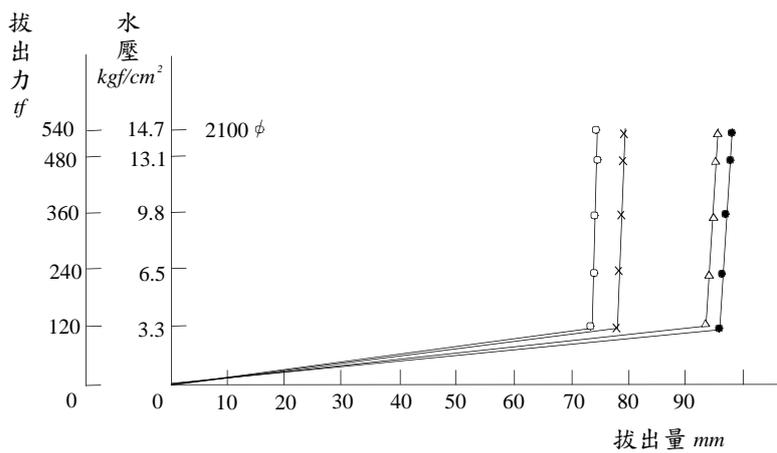
圖 4-1 接頭軸向拉拔試驗方法



(a)

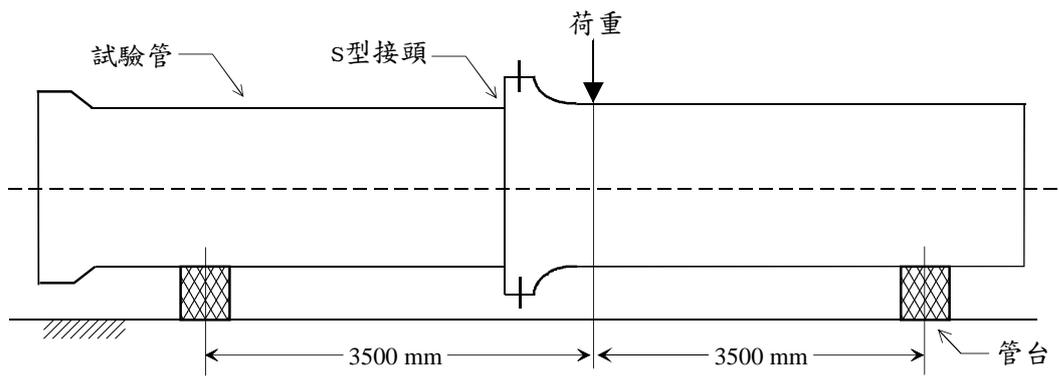


(b)

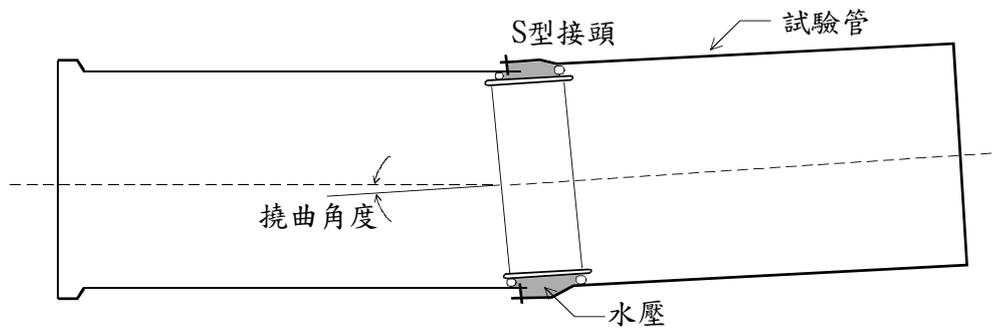


(c)

圖 4-2 拉拔力與拉出量關係圖

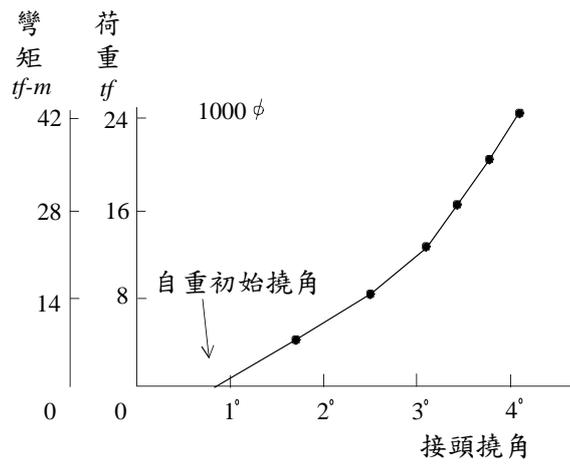


(a) 撓曲強度試驗方法

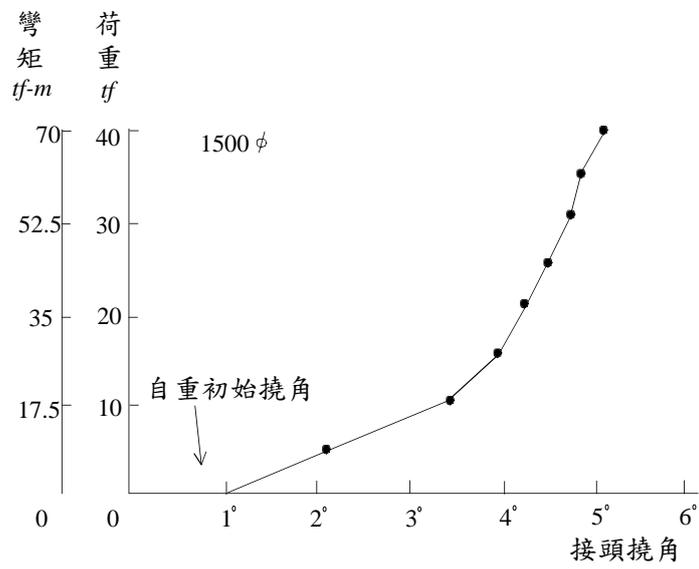


(b) 撓曲水壓試驗方法

圖 4-3 接頭撓曲試驗方法



(a)



(b)

圖 4-4 接頭彎矩與撓角關係圖

## 第五章 自來水管線接頭數值耐震試驗

集集地震(1999)過後，為了提升供水系統的耐震能力，需要先進行實尺寸的管線接頭試驗，才能了解管線接頭的力學特性、行為與破壞機制，並求得耐震設計分析所需的設計參數，包括接頭勁度與強度值，見表 5-1。

然而，進行實尺寸管線接頭試驗，雖然可以獲得最直接、最真實的試驗結果值，但仍然存在許多限制，例如：

- (1) 機具、人員之購置與聘請投資費用高。
- (2) 操作員熟習試驗操作流程訓練耗時。
- (3) 試驗用機具與器材的調整、維護與保養成本高。
- (4) 尺寸太大的管線接頭試驗會受到限制。

目前，在國外與國內，當面臨上述問題時，較務實的作法會改採用「電腦輔助設計」代替實體試驗的方法。「電腦輔助設計」，顧名思義，就是藉由電腦與軟體所提供的功能，模擬接頭試驗內容。由於試驗是在電腦內進行，則省去機具人員等配置經費，亦不需擔心管線尺寸是否太大而無法進行試驗。透過電腦，亦可了解整體管線與接頭的力學行為，並且可推求出管線接頭的勁度與強度值。因此，本研究計劃以電腦數值模擬的方法取代實尺寸的管線接頭試驗，以求得耐震設計參數，作為未來管線接頭耐震等級與管網系統耐震規劃的參考。

### 5-1 數值試驗分析內容與目的

數值試驗是採用數值模擬方法，透過數值軟體與電腦運算，進行數值試驗。以有限元素數值軟體(ANSYS)作為分析工具。數值分析內容在建構接頭數值模型，並以電腦模擬接頭在實尺寸試驗中的(1)接頭軸向拉拔與(2)接頭撓曲試驗，數值分析目的在了解管線接頭的力學特性、行為與破壞機制，並求得耐震設計分析所需的設計參數(接頭軸向勁度參數)，包括接頭勁度與強度值。

由於自來水管線的柔性接頭(K、U型)及鎖扣接頭(S、SII型)在遭遇地震時能提供某種程度的變形，國內外在這方面

的研究分析資料與試驗數據較多。另外，鎖扣接頭（S、SII 型）在經歷日本阪神地震後，顯示出較佳的耐震性，因此，本研究選擇 S 型接頭作為建構模型之對象，分析之管徑分別為 500、1000、1500 及 2000mm。

### 5-1-1 數值分析步驟

1. 釐清問題點，做出合理假設，以簡化問題。
2. 定義元素型式與尺寸，建立數值模型。
3. 給定材料參數。
4. 輸入邊界條件與負載。
5. 數值模擬分析率定
6. 進行數值模擬分析。
7. 根據 Contact 元素之接觸壓力與水壓之關係，判斷接頭是否破壞。
8. 繪製圖表與計算軸向勁度。
9. 結果比較與討論。

圖 5-1 為接頭軸向拉拔數值試驗之流程圖。

圖 5-2 為接頭撓曲數值試驗之流程圖。

### 5-1-2 數值分析基本參數

#### 1. 幾何尺寸

本研究選用管徑為 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型鎖扣接頭作分析之用，插口管與承口管之幾何形狀與尺寸大小係依據中國國家標準 CNS10808 之規範（附錄 A），接合配件（橡膠圈、背托圈、組合圈、固定圈）則依據 CNS13272 之規範（附錄 B）。詳細尺寸參見附錄並如表 5-2 及表 5-3 所示。

#### 2. 材料參數

延性鑄鐵管部分，係參考 CNS 與日本 JIS 規範，以及日本相關研究報告，其機械性質如表 2-2 所示。抗拉強度在  $420\text{ N/mm}^2$  ( $42.8\text{ kgf/mm}^2$ ) 以上，降伏強度在  $270\text{ N/mm}^2$  ( $27.5\text{ kgf/mm}^2$ ) 以上，延伸率約大於 10%；由應力與應變曲線知延性鑄鐵管為彈性材料，其平均彈性模數約介於  $150\sim 170\text{ N/mm}^2$  ( $16000\sim 17000\text{ kgf/mm}^2$ ) 間。

橡膠部分，採用 Mooney-Rivlin 材料理論，分析中必須輸入 Mooney-Rivlin 常數。Mooney-Rivlin 模式應變能通式如下所示：

$$U = \sum_{i+j=1}^N a_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j + \frac{1}{2}k(I_3-1)^2 \quad (1)$$

其中， $U$  為單位體積應變能 (Strain energy)， $a_{ij}$  為材料參數， $I_1$ 、 $I_2$  為材料應變不變量 (Invariants)。N=1 時將 (1) 式展開可得 2 個參數的 Mooney-Rivlin 式 (2)，N=2 可得 5 個參數的 Mooney-Rivlin

$$U = a_{10}(I_1-3) + a_{01}(I_2-3) + \frac{1}{2}k(I_3-1)^2 \quad (2)$$

$$U = a_{10}(I_1-3) + a_{01}(I_2-3) + a_{20}(I_1-3)^2 + a_{11}(I_1-3)(I_2-3) + a_{02}(I_2-3)^2 + \frac{1}{2}k(I_3-1)^2 \quad (3)$$

Mooney-Rivlin 常數個數共有三種選擇，依 N=1、2、3，分別有 2、5、9 個 Mooney-Rivlin 常數，選取多少個 Mooney-Rivlin 常數才適合，必須由橡膠實驗的應力應變曲線來判斷，原則是應力應變若只有 1 個轉折點，則輸入 2 個 Mooney-Rivlin 常數，2 個轉折點則輸入 5 個 Mooney-Rivlin 常數，3 個以上的轉折點則需 9 個 Mooney-Rivlin 常數。鑑於相關分析橡膠行為之文獻多採用 2 個 Mooney-Rivlin 常數，本研究選擇 ANSYS 所提供的 Mooney-Rivlin 常數作為數值試驗之用。數值分析之相關材料參數列於表 5-4，單位採用 SI 單位。

## 5-2 接頭軸向拉拔數值試驗

### 5-2-1 合理假設與簡化

由於管線接頭處斷面變化複雜，故在進行軸向拉拔試驗時須將問題簡化，並做以下之假設：

1. 考慮接頭由兩種材料構成，依中國國家標準 CNS10808 及 CNS13272 (附錄) 之規範，S 型延性鑄鐵管除插口管與承口管外，其接合配件包括組合圈、橡膠圈、背托圈、固定圈以及螺栓等。其中橡膠圈與背托圈之材料為苯乙烯丁二烯橡膠 (SBR)，其餘皆為延性鑄鐵。

2. 接頭各材料性質為均質、等向性。橡膠屬超彈性(Hyperelasticity)材料，變形時呈現出非線性、超彈性之行為。
3. 忽略管線接頭受軸向拉拔時的偏心問題，考慮接頭管在幾何與荷重上具理想軸對稱性(圖 5-3)，因此採軸對稱的方式模擬接頭軸向拉拔試驗，可簡化成 2D 數值模型進行分析。
4. 承如第三章所述，管線接頭之水密性與橡膠圈有密切關係，故分析重點集中在橡膠圈與管體互制行為，不考慮螺栓對接頭的影響。
5. 考慮水壓影響，並以水密性做為管線接頭破壞準則。
6. 數值分析中忽略管體自重，採用靜力分析。

基於上述假設，可得如圖 5-4 所示之軸向拉拔數值試驗之示意圖。

### 5-2-2 數值分析模擬

接頭數值試驗採用有限元素法，是將實體的管線接頭以節點(Node)與元素(Element)取代，透過有限元素法，可以將實體試驗系統轉化為數學模式，並藉由該數學模式進而得到該有限元素系統的解答，並透過節點、元素表現出來。

#### 1. 數值元素選取與數值模型建立

本數值試驗中，節點為點座標位置，分配在管線接頭幾何位置中。元素是節點與節點所連接而成，元素之組合由各節點相互連結，並構成結構數學模式之勁度矩陣。不同特性之工程系統可選用不同種類之元素。本數值試驗元素的選用，管體(承口與插口)以及組合圈、固定圈等接合配件以 ANSYS 提供之平面元素 PLANE82(2-D structural solid)來模擬(圖 5-5)，為一般結構分析的 8-node 元素，材質設定為延性鑄鐵。

至於橡膠圈與背托圈，則選用超彈性(Hyperelastic)元素 HYPER74(2-D 8-node hyperelastic solid)(圖 5-6)，材質設定為橡膠。由於橡膠屬超彈性材料，無法以線彈性的虎克定律描述，必須藉由能夠表現出線性應力應變特性的理論描述方合理。ANSYS 提供二種材料理論供作選擇以描述此種行為，一種為 Blatz-Ko，另一種為 Mooney-Rivlin。Blatz-Ko 適合於分析可壓縮

(Compressible)材料，如發泡橡膠；Mooney-Rivlin 適合於分析不可壓縮材料，如實心橡膠。本研究選擇 Mooney-Rivlin 理論作數值分析。

此外，在軸向拉拔試驗過程中，插口凸出部與固定圈會產生接觸(Contact)現象（圖 5-7），因此在建構模型時需增設 CONTA172(2-D surface-to-surface contact)元素（圖 5-8）來描述此一情形。除了插口凸出部與固定圈會產生接觸現象，管體與各接合配件亦會因接觸而互相影響（圖 5-9），因此亦需加設 CONTA172 元素來描述。

選定數值元素即可建構如圖 5-10 所示之數值模型。模型中將接頭複雜斷面變化予以簡化，取適當管長並以軸對稱方式建構平面模型，數值模型的尺寸見表 5-2。另外，由於 ANSYS 軸對稱之對稱軸係為 y 軸，因此模型以 x 方向為徑向，y 方向為軸力加載之方向。

## 2. 數值邊界條件與荷載方式

由於採用軸對稱之方式進行分析，故有限元素模型對稱邊界上的節點須給予一 Y 方向之束制，即接頭兩端平行於 Y 軸之線段 Y 方向自由度(Degree of freedom)給予束制（圖 5-11）。模擬過程分二步驟進行：

- (1). 輸入對稱條件後即進行分析求解。利用 Mooney-Rivlin 理論與接觸元素，使橡膠圈產生變形而擠進插口與承口之間，達成水密效果。
- (2). 負載荷重部分採位移控制(Displacement control)，給予插口管一 Y 方向之強制位移（圖 5-12），記錄每一小段位移所需之力量（位移控制法），藉此模擬管體受軸向拉拔力之行為。

## 3. 數值分析破壞判斷準則

如第四章所述，水壓拉拔試驗是將管段兩端以蓋子封住，而管內充滿水，並以逐漸增加自來水管內水壓力的方式模擬接頭受軸力拉拔行為，同時以接頭水密性（有無漏水）作為評估接頭破壞的標準。由於接頭之水密性與橡膠圈有關，因此數值分析接頭

破壞準則即以橡膠圈與延性鑄鐵管之接觸壓力作為判斷之依據。

首先利用位移控制軸向荷重的大小以推求出相對之軸向拉拔力，再利用公式(4)將軸力換算成相對之水壓，如此可得如實際試驗般的水壓變化。

$$P = \frac{\pi}{4} D_2^2 p \quad (4)$$

其中， $p$ 為水壓， $P$ 為拉拔力， $D_2$ 為管外徑。

接著觀察橡膠與鑄鐵管間接觸元素接觸壓力之變化，在插口端凸出部分尚未碰觸承口端時，接觸壓力皆大於水壓；但是當插口端凸出部分碰觸承口端後，軸拉力與水壓呈正相關迅速增加，當水壓大於橡膠與鑄鐵管間某一端接觸元素之接觸壓力時（圖 5-13），則判斷接頭發生漏水，此即為數值分析接頭破壞準則。

#### 4. 數值分析率定與數值試驗進行

數值分析率定的目的在決定一個適當且有效的數值模式（包括模型、方法、參數）以確定接下來數值分析結果的可靠性。本研究計劃以 DIP 管徑 1000mm 作為率定的比較對象，率定結果如圖 5-14 所示，僅有 A 至 B 點的力與位移過程不同。其原因為實體試驗礙於試驗機具與試驗方式的限制，而採增加水壓的方式來產生軸向拉拔力，因此，增加的水壓會持續加壓在橡膠上，使得橡膠壓在承插口上的正向力持續增加，造成靜摩擦力並非定值而呈線性變化。但在地震發生時，產生軸向拉拔力的並非水壓而是直接加載於接頭上的作用力，因此，本數值試驗的模型應較接近實際的受力情況。

#### 5-2-3 數值試驗分析結果

本研究計劃選擇管徑為 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭進行軸向拉拔試驗數值模擬。

本研究採位移控制法進行數值試驗，圖 5-15 為接頭插口部分的位移變化示意圖，當插口端突出部分碰觸至固定圈時（圖 5-16），以有無漏水決定數值試驗是否停止進行。

以管徑 1000mm 為例，分別透過應力與應變分佈等值圖來比較軸向拉拔試驗開始與結束時橡膠擠壓的情況，圖 5-17 顯示軸

向拉拔試驗進行中，x 方向應力分佈，壓力為負值且集中在橡膠前端球狀中間，球狀前端點呈現張力狀態，當插口端突出部分碰觸至固定圈時，應力分佈集中在與金屬接觸的固定圈上（圖 5-18）；圖 5-19 為軸向拉拔試驗進行中，y 方向的應力分佈，圖中顯示插口在碰觸至固定圈之前類似樑撓曲行為，碰觸至固定圈後，同圖 5-18，應力分佈集中在與金屬接觸的固定圈上（圖 5-20）；圖 5-21 與圖 5-22 顯示插口端突出部分碰觸至固定圈之前後 x 方向應變情況。

圖 5-23~5-25 為插口端突出部分碰觸至固定圈前後過程中之接觸元素壓力變化示意圖，顯示碰觸後，由於插口端突出部分與固定圈的接觸壓力增加，造成承口變形，使得橡膠與插口接觸部分的壓力降低。選取橡膠接觸壓力具代表性的幾個接觸元素，分別將其壓力值繪於圖 5-26，發現當插口端突出部分與固定圈碰觸後，接觸壓力值下降直至發生漏水。

另外，從拉拔力與位移變化之分析結果顯示，各管徑軸力與位移之關係圖皆呈現三個線性段變化。以管徑 1000mm 為例（圖 5-27），由於模擬方式採用位移控制法，在插口管移動初期( $\overline{ab}$ )，軸力隨位移增加而增加，當軸力大於橡膠提供之摩擦力後，軸力維持一定值( $\overline{bc}$ )，當插口端凸出部分碰觸承口端後，軸力隨位移增加迅速增加，直至接頭漏水破壞( $\overline{cd}$ )。此分析結果與試驗結果亦相符，在插口端突出部分尚無碰觸至固定圈時，接頭整體的力學行為由橡膠來控制，插口端突出部分碰觸至固定圈後，接頭整體的力學行為由碰觸部份控制，但接頭有無漏水仍需視橡膠接觸壓力之變化決定。

圖 5-28 分別為管徑 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭之橡膠接觸元素於發生漏水時之各元素接觸壓力與漏水時水壓力的示意圖，當接觸壓力小於水壓時判斷漏水。

圖 5-29 分別為管徑 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭拉拔力與位移變化示意圖，依據此數值試驗的結果可整理出接頭所能承受之軸向拉拔力（表 5-5），圖 5-30 定義出 S 型接頭初始滑動(Min. Axial Force)與漏水破壞時所需之軸力(Max. Axial Force)示意圖，顯示管徑與接拔力呈正相關，即管徑越大，所需接拔力越大；依數據值亦可分析計算其軸向勁度值，如表 5-6 所

示。

見圖 5-27 與表 5-6，將軸向勁度值分為三類，第一類(A)為接頭開始滑動前之軸向勁度，即 $\overline{ab}$ ；第二類(B)為將接頭滑動行為簡化為軸向勁度，即 $\overline{ac}$ ；第三類(C)為插口端突出部分碰觸固定圈後之軸向勁度，即 $\overline{cd}$ 。另外，考慮接頭開始滑動的初始軸向力值為(D)。

在進行理論、數值或設計分析時，皆是採將複雜的接頭軸向變形簡化為彈簧元素的方法。根據本研究的結果可依不同的分析目的整理適合的彈簧元素（表 5-7）。其中，若分析重視接頭軸向的滑動與變形時（柔性接頭），可採用(A)類彈簧勁度配合摩擦塊元素(D)的方式清礎模擬接頭受力與變位間的互制情況；但若若要作較保守的分析時，可將整體的滑動行為假設為線性變化，而以(B)類彈簧勁度模擬。若分析重視包括接頭軸向的滑動與插口端突出部分碰觸至固定圈後的接頭軸向力（鎖扣式接頭），則可採用(C)類彈簧勁度配合摩擦塊元素(D)的方式清礎模擬接頭受力與變位間的互制情況；另外，亦可將整體的滑動行為假設為雙線性(bilinear)變化，而將雙線性彈簧勁度分為前段的(B)類與後段的(C)類。

### 5-3 管線接頭撓曲數值試驗

#### 5-3-1 合理假設與簡化

1. 接頭由插口管、承口管、組合圈、橡膠圈、背托圈、固定圈、螺栓等接合配件構成。其中橡膠圈與背托圈之材料為苯乙烯丁二烯橡膠(SBR)，其餘皆為延性鑄鐵。
2. 接頭各材料性質為均質、等向性。橡膠屬超彈性(Hyperelasticity)材料，變形時呈現出非線性、超彈性之行為。
3. 採半對稱的方式模擬接頭軸向拉拔試驗，建構 3D 數值模型進行分析（圖 5-31）。
4. 分析重點集中在橡膠圈與管體互制行為，不考慮螺栓對接頭的影響。
5. 考慮水壓影響，並以水密性做為管線接頭破壞準則。

6. 數值分析中忽略管體自重，採用靜力分析。

### 5-3-2 數值分析模擬

#### 1. 數值元素選取與數值模型建立

管體（承口與插口）以及組合圈、固定圈等接合配件以 ANSYS 提供之三維結構分析元素 SOLID45(3-D structural solid) 來模擬（圖 5-32），材質設定為延性鑄鐵。

橡膠圈與背托圈，則選用超彈性 (Hyperelastic) 元素 HYPER86(3-D 8-node hyperelastic solid)（圖 5-33），材質設定為橡膠。並選擇 Mooney-Rivlin 理論作數值分析。

此外，在撓曲試驗過程中，配件之間會產生接觸(Contact)現象（圖 5-9），因此在建構模型時需加設 CONTA174 (3-D surface-to-surface contact)元素（圖 5-34）來描述此一情形。

接頭撓曲試驗的方式為三點載重法，試驗管徑為 500、1000、1500、2000mm，依選定之數值元素建構而成的數值模型尺寸如表 5-8 所示。

#### 2. 數值邊界條件與荷載方式

數值模擬方式為三維半對稱，因此在有限元素模型對稱面上給予 y 方向束制；另外，在試驗管兩端下方給予 x 方向束制，以模擬三點載重法中的支點（圖 5-35）。模擬過程分二步驟進行：

- (1). 輸入對稱條件後即進行分析求解。利用 Mooney-Rivlin 理論與接觸元素，使橡膠圈產生變形而擠進插口與承口之間，達成水密效果。
- (2). 負載荷重部分採位移控制(Displacement control)，在試驗管中央給予 y 方向之強制位移（圖 5-36）並記錄每一小段位移所需之力量（位移控制法），藉此推算管體所受彎矩值大小。

#### 3. 數值分析破壞判斷準則

方法同 5-2-2 節所述，但假設管內的水壓為定值，其值為  $10\text{ kg/cm}^2$ 。因此，當橡膠與插口管之接觸壓力小於  $10\text{ kg/cm}^2$  時即判定發生漏水。

#### 4. 數值分析率定與數值試驗進行

日本延性鑄鐵管協會(1976)曾針對 S 型接頭進行撓曲試驗，以接頭材料破壞為考量得到如表 4-2 的結果，若以管線施工接合時偏心為考量點可得到如表 4-3 的結果，另外亦以反覆加載（三點載重）的方式針對管徑 1000mm 進行試驗，得到在撓曲角度為  $\pm 3^\circ$  時會發生漏水。因此，在以加載與漏水為考量下，以 DIP 管徑 1000mm 作為率定的比較對象，率定結果如圖 5-37 所示。

#### 5-3-3 數值試驗分析結果

本研究計劃選擇管徑為 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭進行撓曲試驗數值模擬。

以管徑 1000mm 為例，因為接頭受到彎矩作用，於接頭處發生旋轉，以三個方向(X,Y,Z)的應力分佈等值圖(圖 5-38~圖 5-40)來呈現撓曲試驗結果，圖中以接頭上下兩側的橡膠為對象，清楚顯示當彎矩發生於接頭處，應力皆集中在插口末端下方與固定圈上方兩處。

因為作用力是由上往下的方式作用在接頭上，於接頭發生旋轉後而使插口管上側橡膠呈受壓狀態，插口管下側橡膠呈受張狀態。由分佈於橡膠上各接觸元素的壓力值結果，接頭下側橡膠承受的壓力較小，最有可能在此發生漏水狀況，因此假設漏水發生在插口管下側的橡膠與插口接觸面之間，並於橡膠上設置偵測點(圖 5-41)。圖 5-41 分別為管徑 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭之橡膠接觸元素(偵測點)於發生漏水時之各元素接觸壓力與漏水時水壓力( $10 \text{ kg/cm}^2$ )的示意圖，當接觸壓力小於水壓  $10 \text{ kg/cm}^2$  時判斷漏水。

圖 5-42 分別為管徑 500、1000、1500 及 2000mm 之 S 型接頭彎矩與撓曲角度變化示意圖並以接頭發生漏水為試驗終止之檢核點，依據此數值試驗的結果可整理出接頭所能承受之彎矩值(表 5-9)。

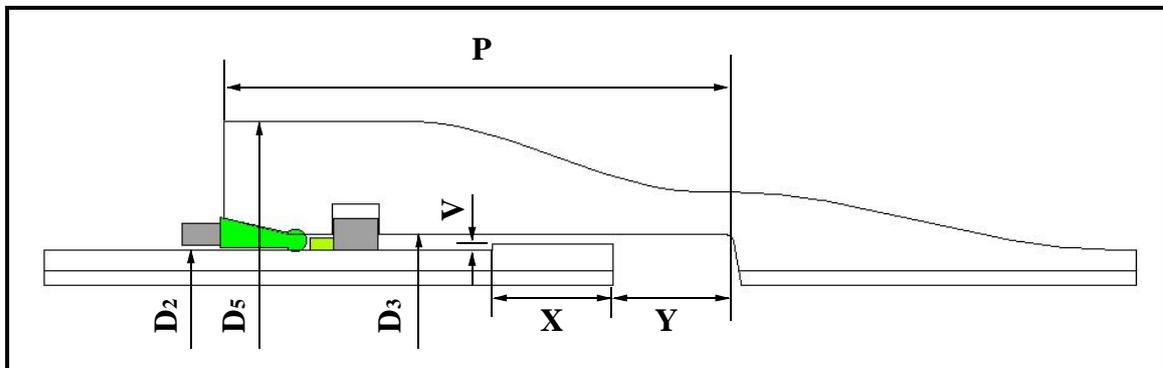
由於進行接頭撓曲理論、數值或設計分析時需要將接頭的旋轉行為簡化為撓曲彈簧元素，而以撓曲勁度代表彎矩與撓角之間的關係。因此依數值試驗的結果，並以線性內插的方式分析計算撓曲勁度值，如表 5-10 所示。

表 5-1 接頭力學試驗整理

試驗種類	試驗項目	破壞判定	試驗提供之設計參數
軸向拉拔試驗	油壓千斤頂拉拔試驗	接頭損壞	接頭軸向勁度值 接頭極限拉拔強度
	水壓拉拔試驗	有無漏水	接頭軸向勁度值 (考慮水密性) 接頭極限拉拔強度 (考慮水密性)
撓曲試驗	撓曲強度試驗	接頭損壞	接頭撓曲勁度值 接頭極限彎矩強度
	撓曲水壓試驗	有無漏水	接頭撓曲勁度值 (考慮水密性) 接頭極限彎矩強度 (考慮水密性)

表 5-2 S 型延性鑄鐵管尺寸

單位：mm



標稱管徑	管厚	內襯厚度	外徑	各部尺寸					
D	T	t	$D_2$	$D_3$	$D_5$	P	X	Y	V
500	9.5	6	528	544	652	290	60	75	3.5
1000	16.5	10	1041	1061	1215	340	80	80	4
1500	23.5	12	1554	1574	1728	360	90	80	5.5
2000	30.5	15	2061	2085	2241	375	90	80	7

表 5-3 S 型延性鑄鐵管接合配件尺寸

單位：mm

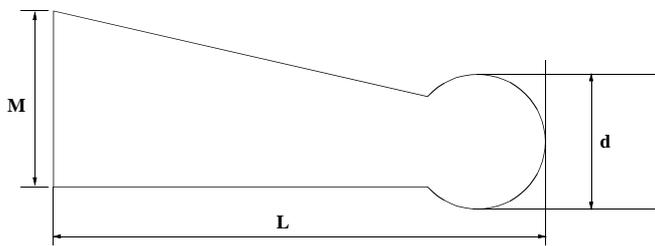
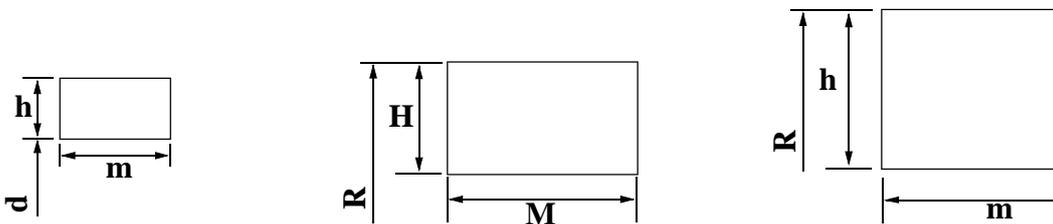
 <p style="text-align: center;">橡膠圈</p>												
 <p style="text-align: center;">背托圈                      組合圈                      固定圈</p>												
標稱管徑	橡膠圈			背托圈			組合圈			固定圈		
	各部尺寸			各部尺寸			各部尺寸			各部尺寸		
	d	L	M	d	h	m	R	H	M	R	h	m
500	14	45	17	524	6	10	279	12	25	276	15	20
1000	18	58	21	1035	8	15	539.5	16	25	538	20	30
1500	18	58	21	1554	8	15	796	16	25	796	22	35
2000	20	75	25	2051	10	15	1052.5	19	32	1052	24	40

表 5-4 數值分析之材料參數

	材料參數			
	彈性模數 ( $N/m^2$ )	柏松比 (Poisson's Ratio)	Mooney-Rivlin 常數 (MPa)	
			C1	C2
延性鑄鐵管	$1.71 \times 10^{11}$	0.28	-	-
橡膠	$2.55 \times 10^6$	0.49	0.293	0.177

表 5-5 S 型接頭數值試驗軸向拉拔力

管徑(mm)	軸向拉拔力(tf)	
	初始拉拔力	漏水時拉拔力
500	3.6	47
1000	34.5	215
1500	75.4	483
2000	81	728

表 5-6 S 型接頭數值試驗軸向勁度

管徑(mm)	軸向勁度(KN/cm)			滑動拉拔力 (tf)
	第一類(A) 初始勁度	第二類(B)	第三類(C) 後期勁度	(D)
500	29.8	4.8	4252	3.6
1000	282	50.2	6270	34.5
1500	601	95.7	8274	75.4
2000	708	110	13833	81

表 5-7 接頭元素模型種類

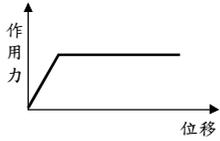
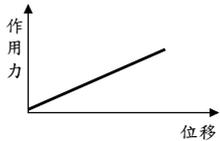
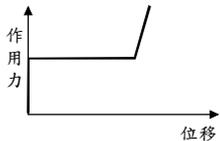
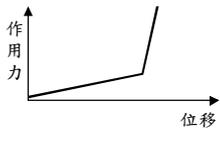
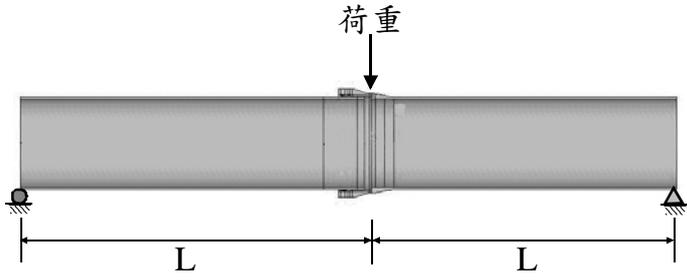
分析目的	接頭元素	接頭力學行為
1. 接頭軸向滑動與變形 2. 柔性接頭	(A) 	
1. 整體的滑動行為假設為線性變化 2. 柔性接頭	(B) 	
1. 接頭軸向滑動與插口端突出部分碰觸至固定圈後的接頭軸向力 2. 鎖扣式接頭	(C) 	
1. 整體的滑動行假設為雙線性變化 2. 鎖扣式接頭	(B) & (C) 	

表 5-8 S 型接頭數值試驗模型尺寸



管徑 (mm)	L (m)
500	1.5
1000	3.5
1500	4.5
2000	4.5

※接合部詳細尺寸參考表 5-2 及 5-3

表 5-9 S 型接頭數值試驗接頭彎矩

管徑 (mm)	荷重 (tf)	接頭彎矩 (tf-m)	接頭撓角 (°)	接頭狀態
500	3.0	2.29	2.2	發生漏水
1000	13.5	23.63	3.0	發生漏水
1500	14.3	32.24	2.3	發生漏水
2000	15.4	34.65	1.5	發生漏水

表 5-10 S 型接頭數值試驗撓曲勁度

管徑 (mm)	撓曲勁度 (KN·cm/rad)
500	$0.58 \times 10^5$
1000	$3.30 \times 10^5$
1500	$6.67 \times 10^5$
2000	$9.14 \times 10^5$

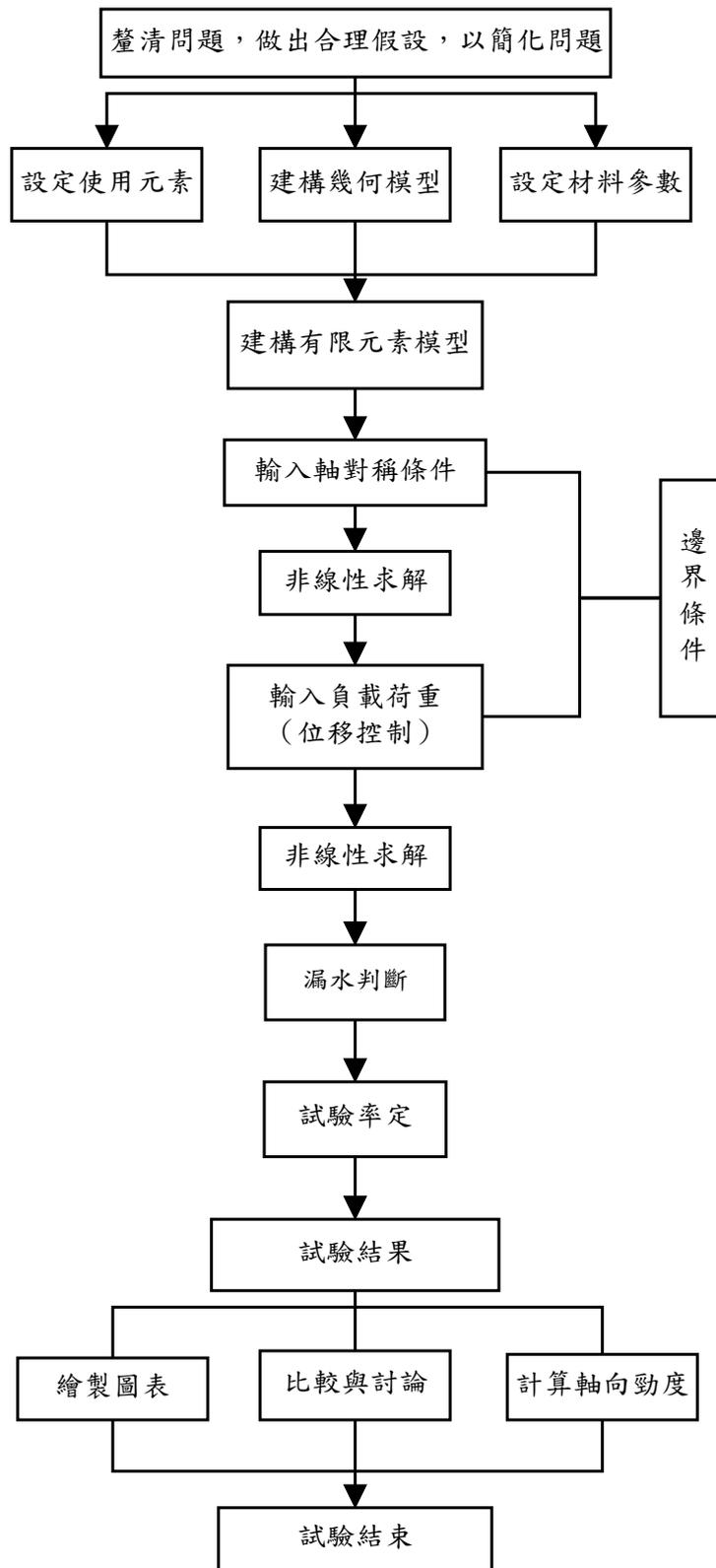


圖 5-1 軸向拉拔數值試驗流程圖

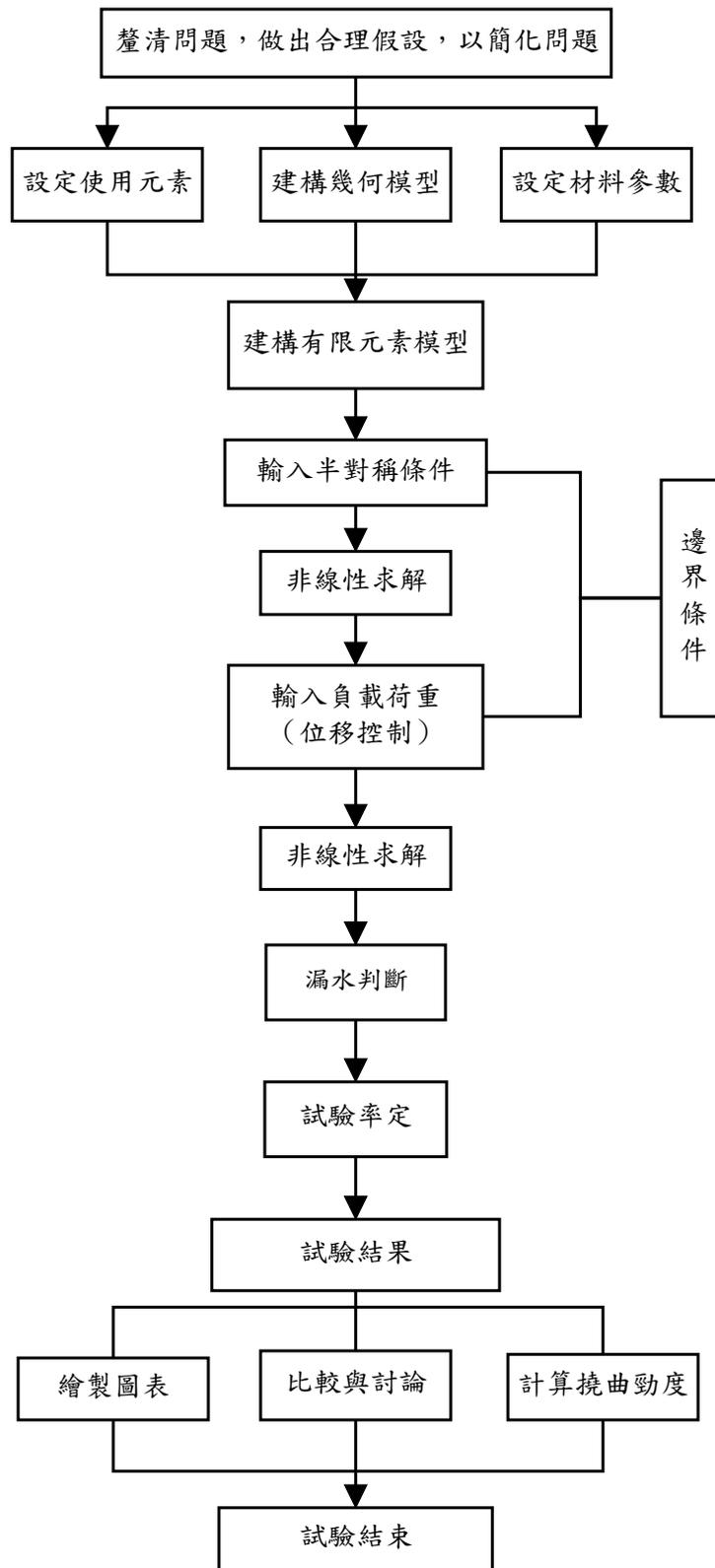


圖 5-2 撓曲數值試驗流程圖

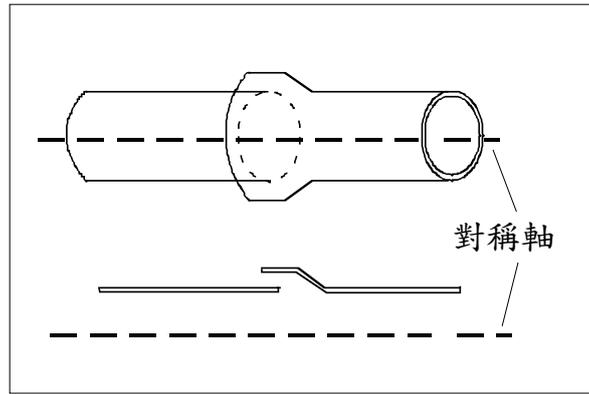


圖 5-3 軸對稱示意圖

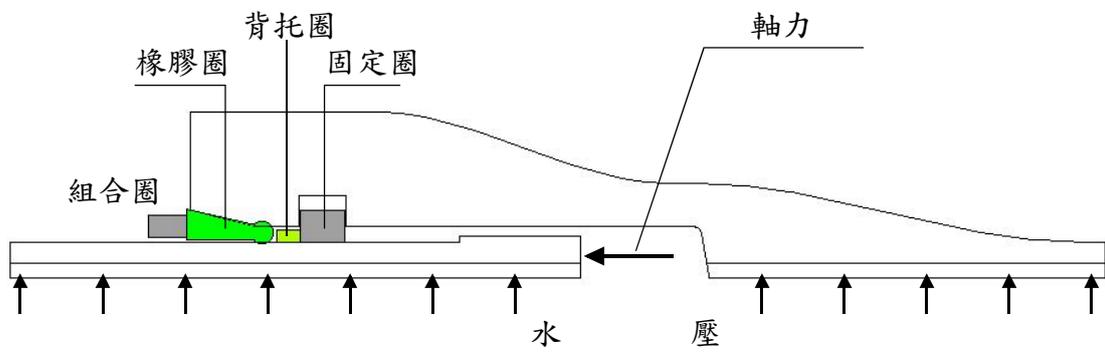


圖 5-4 軸向拉拔數值試驗示意圖

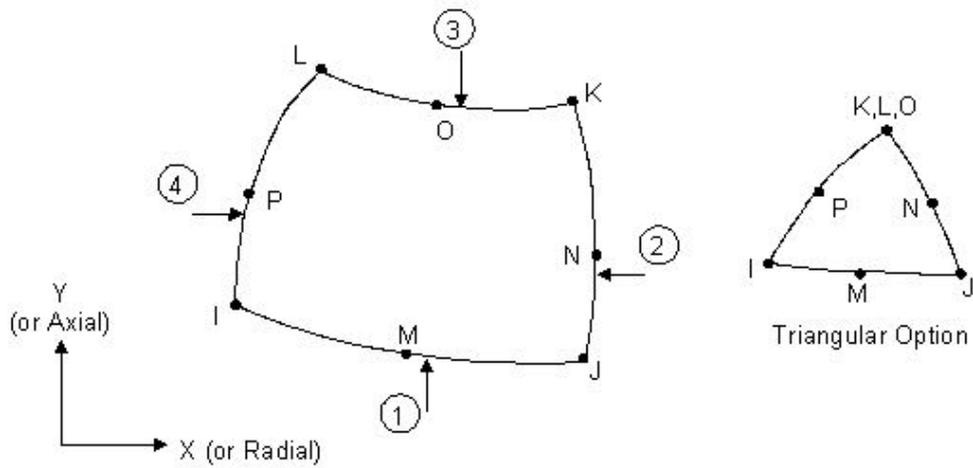


圖 5-5 PLANE82 元素

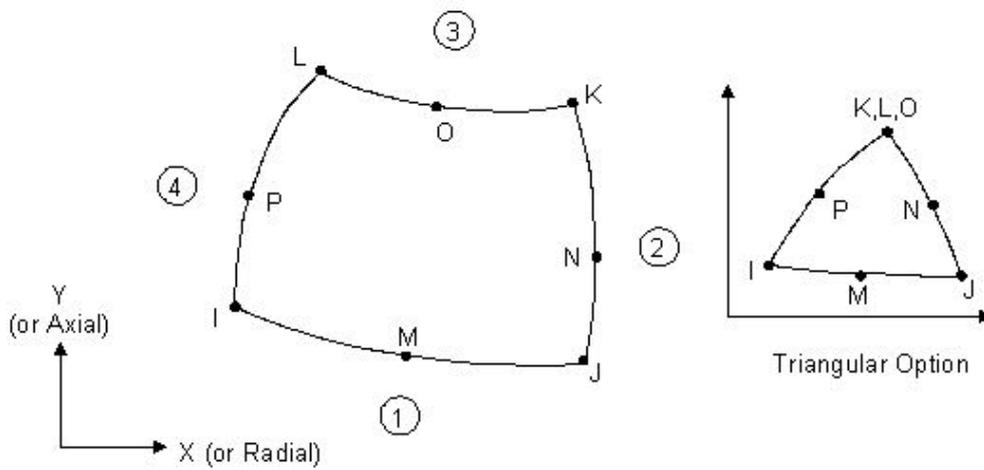


圖 5-6 HYPER74 元素

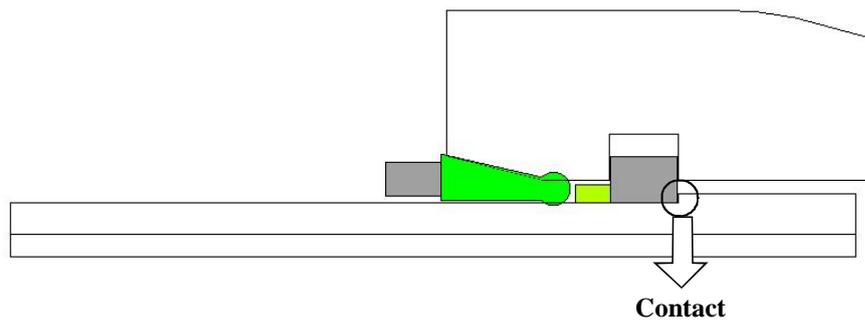


圖 5-7 插口凸出部與固定圈接觸

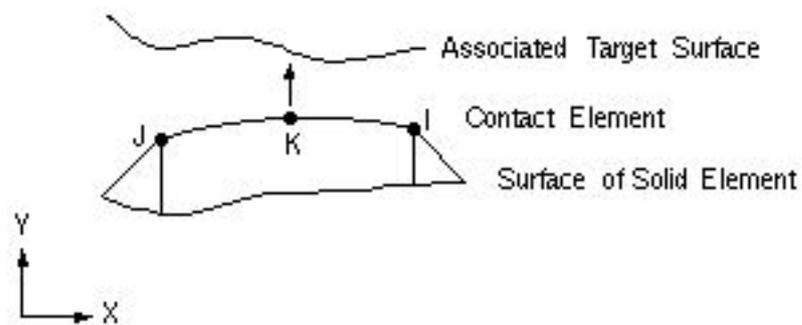


圖 5-8 CONTACT172 元素

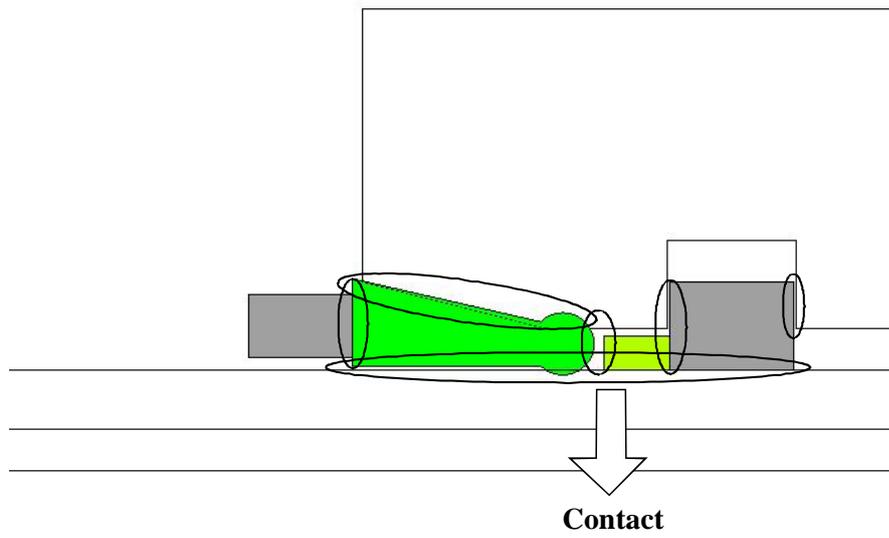


圖 5-9 接合配件接觸圖

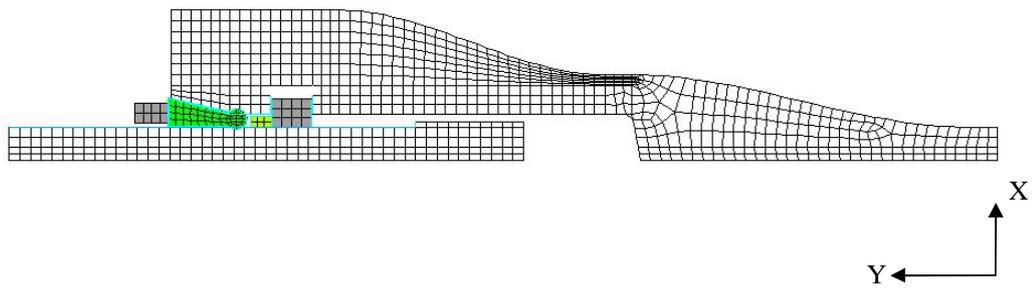


圖 5-10 數值分析模型(1000mm)

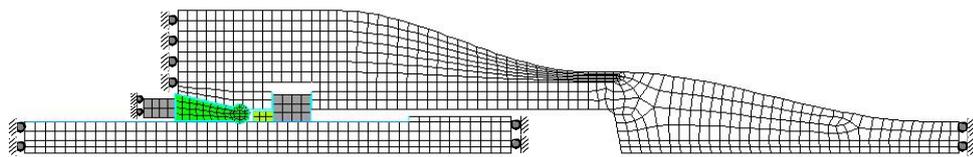


圖 5-11 對稱邊界( $UY=0$ )示意圖

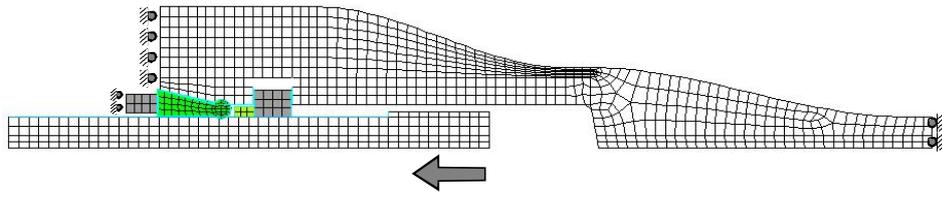


圖 5-12 位移控制示意圖

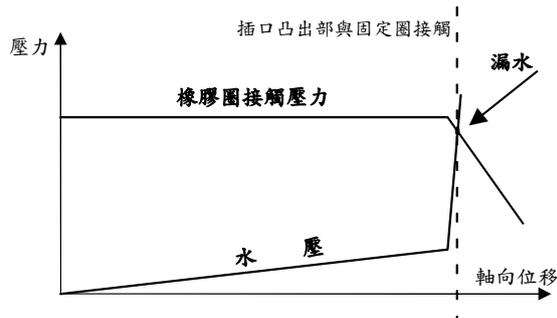
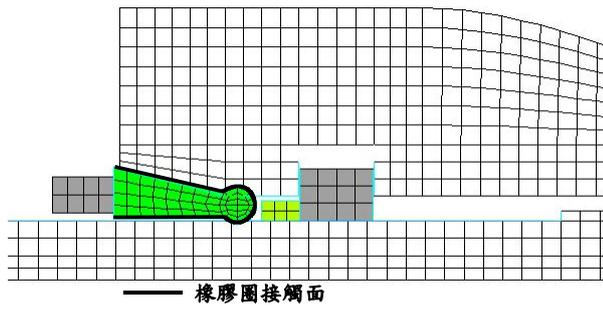


圖 5-13 漏水示意圖

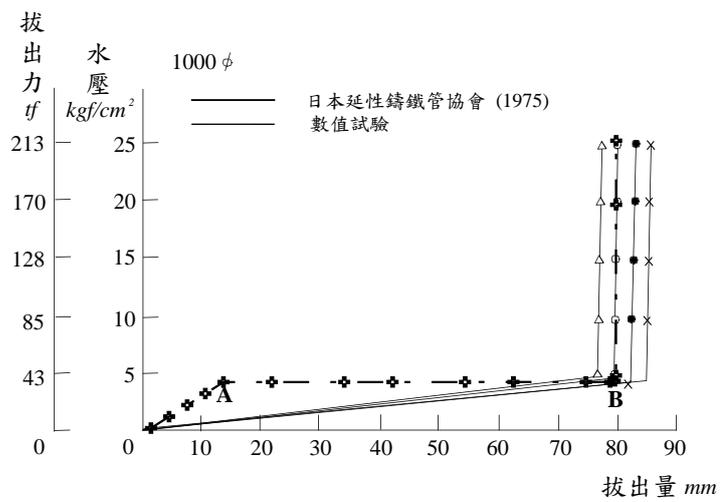


圖 5-14 管徑 1000mm 之率定結果

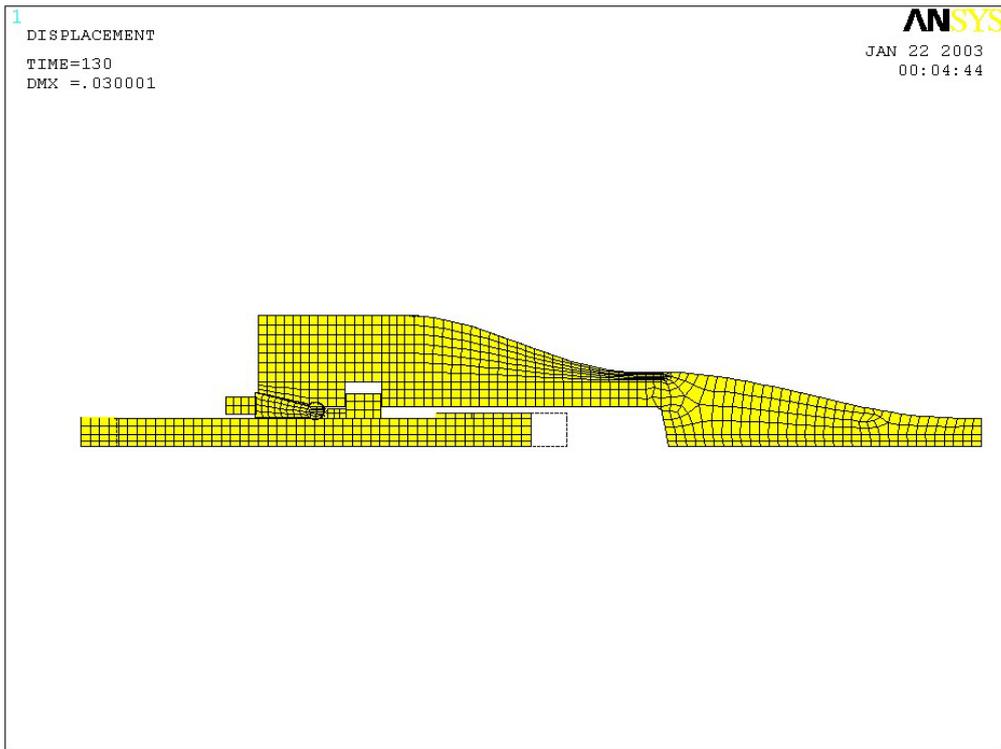


圖 5-15 軸向拉拔數值試驗位移示意圖

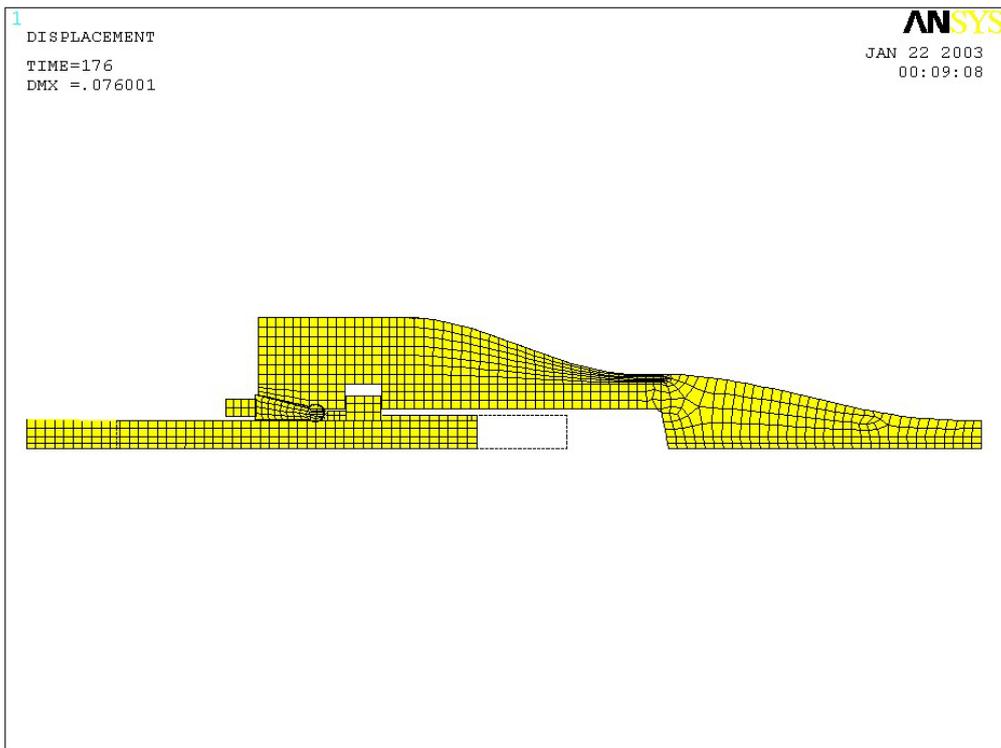


圖 5-16 插口凸出部碰觸固定圈示意圖

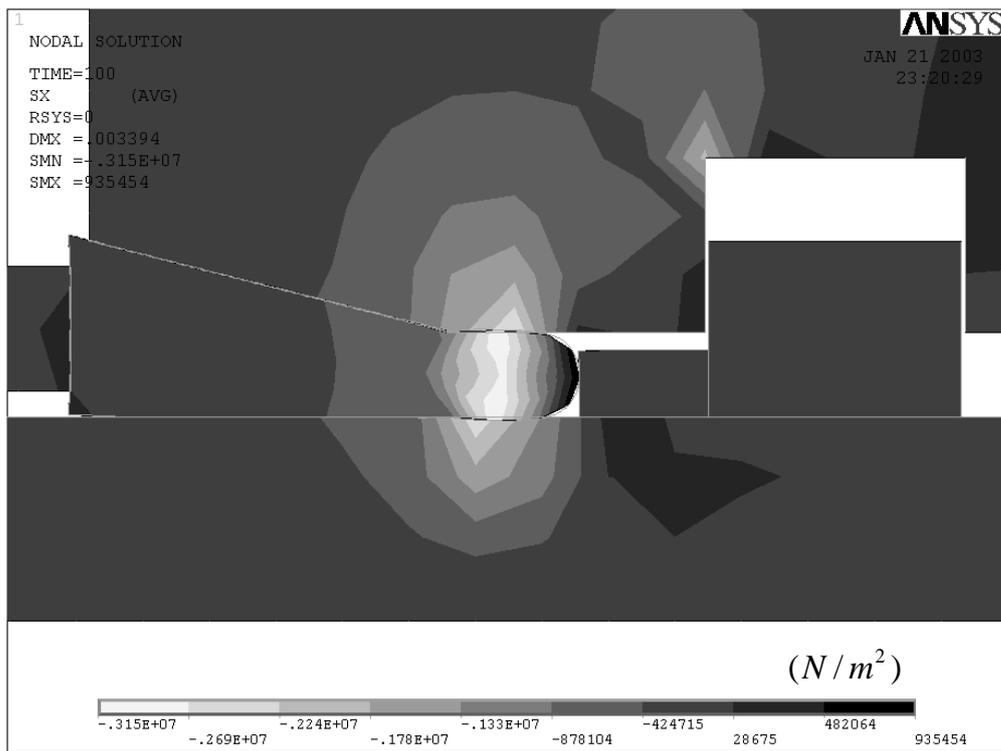


圖 5-17 橡膠圈 x 方向應力分佈圖 (碰觸前)

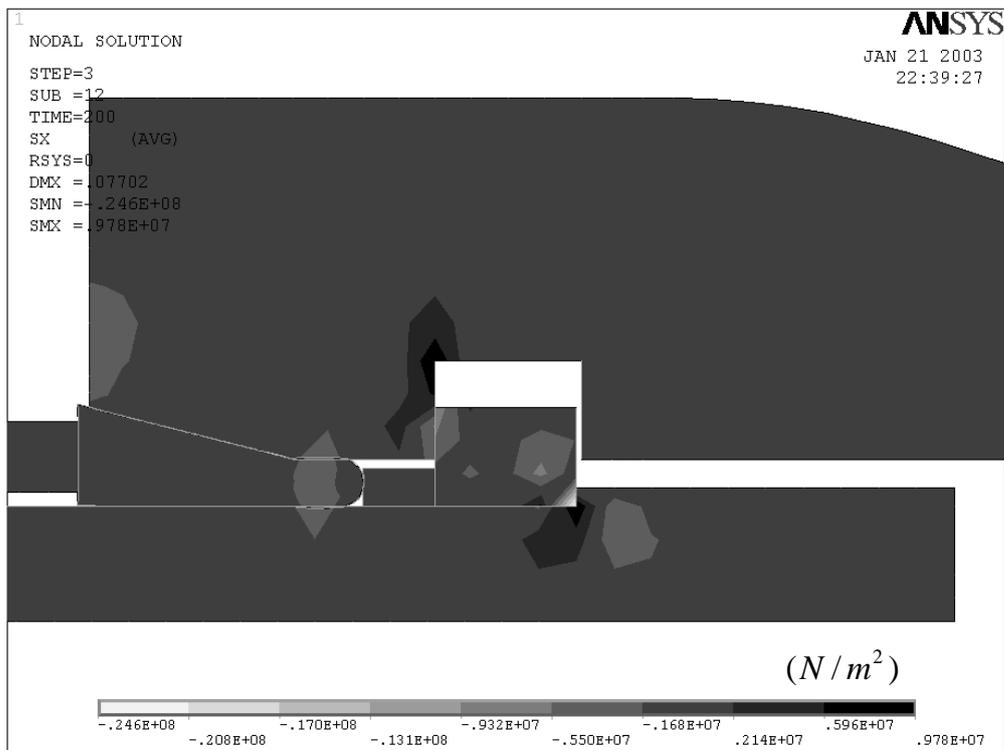


圖 5-18 橡膠圈 x 方向應力分佈圖 (碰觸後)

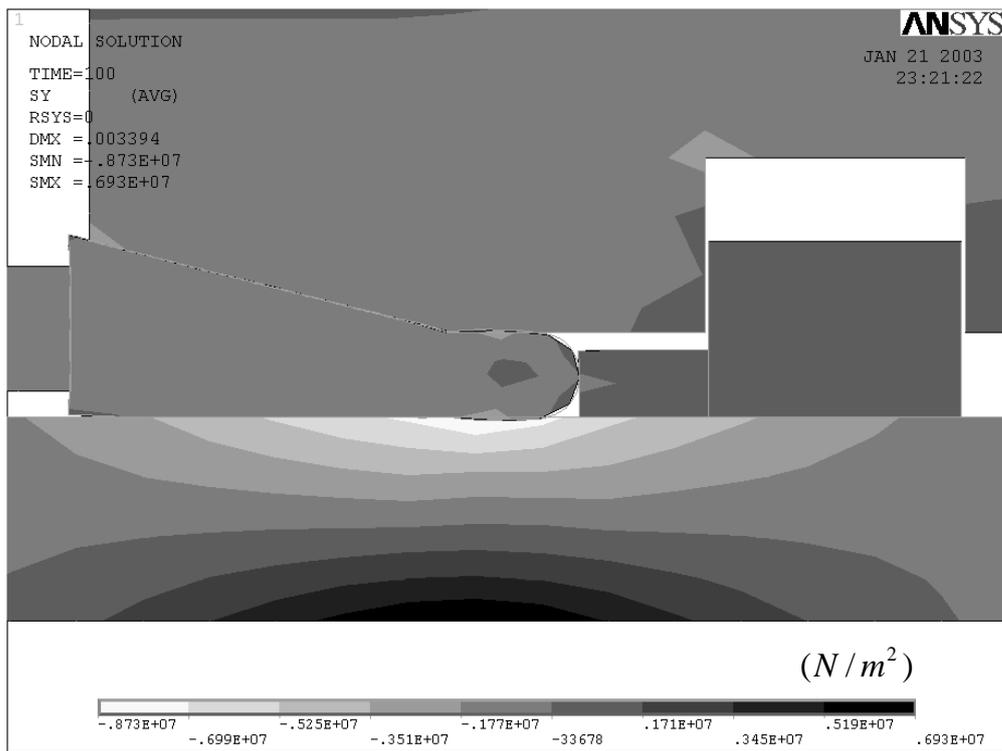


圖 5-19 橡膠圈 y 方向應力分佈圖 (碰觸前)

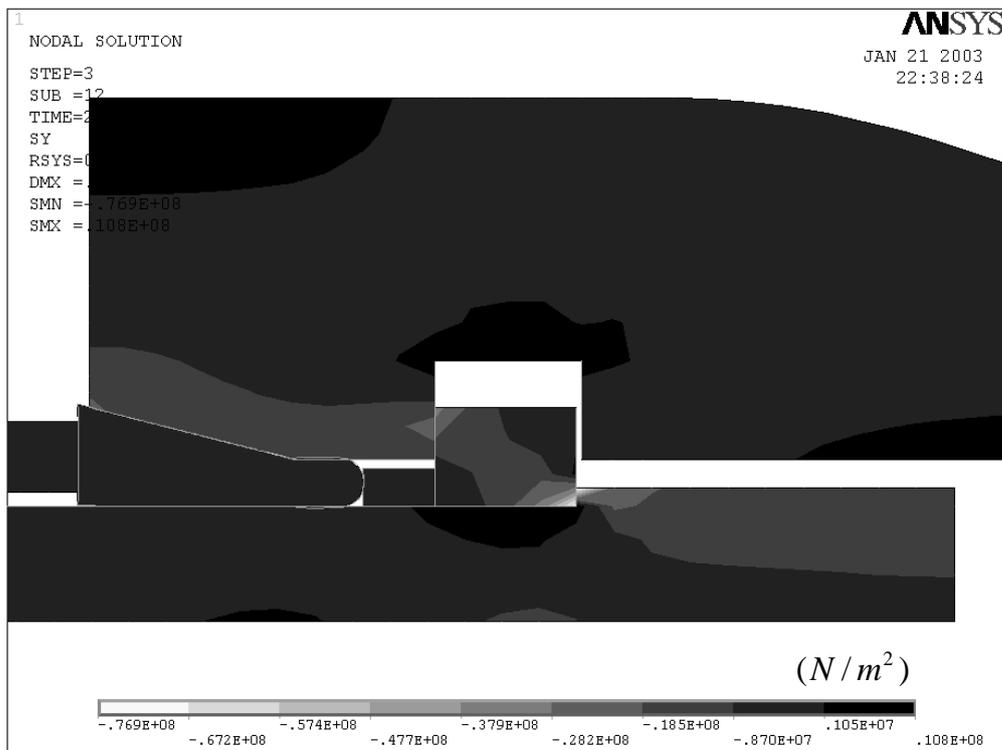


圖 5-20 橡膠圈 y 方向應力分佈圖 (碰觸後)

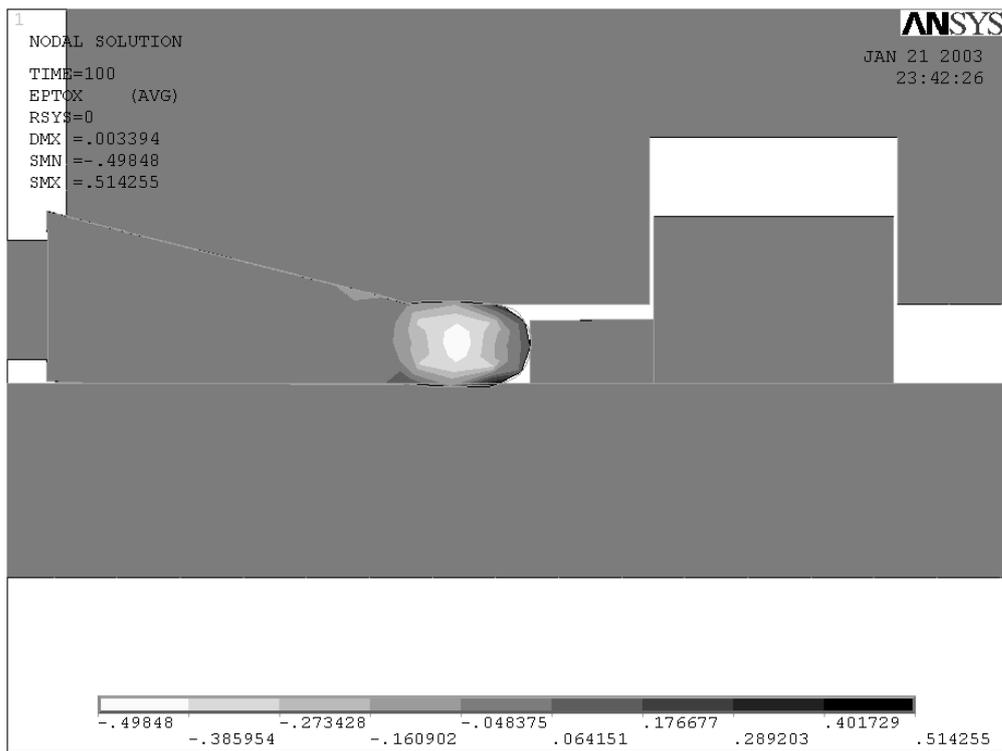


圖 5-21 橡膠圈 x 方向應變分佈圖 (碰觸前)

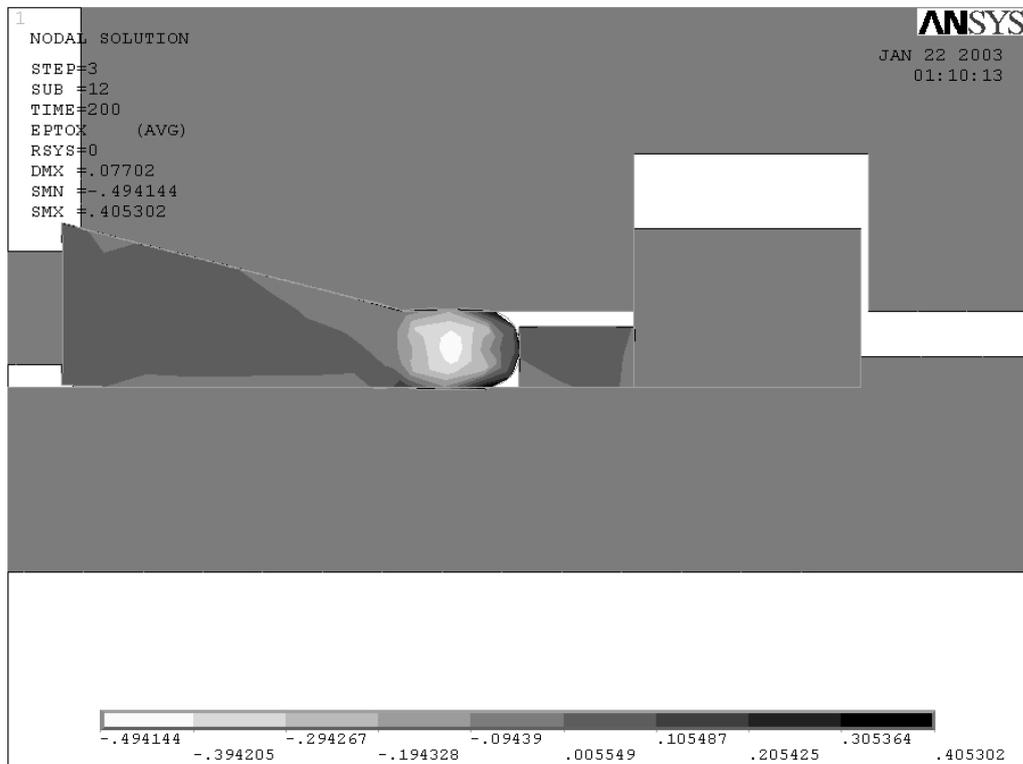


圖 5-22 橡膠圈 x 方向應變分佈圖 (碰觸後)

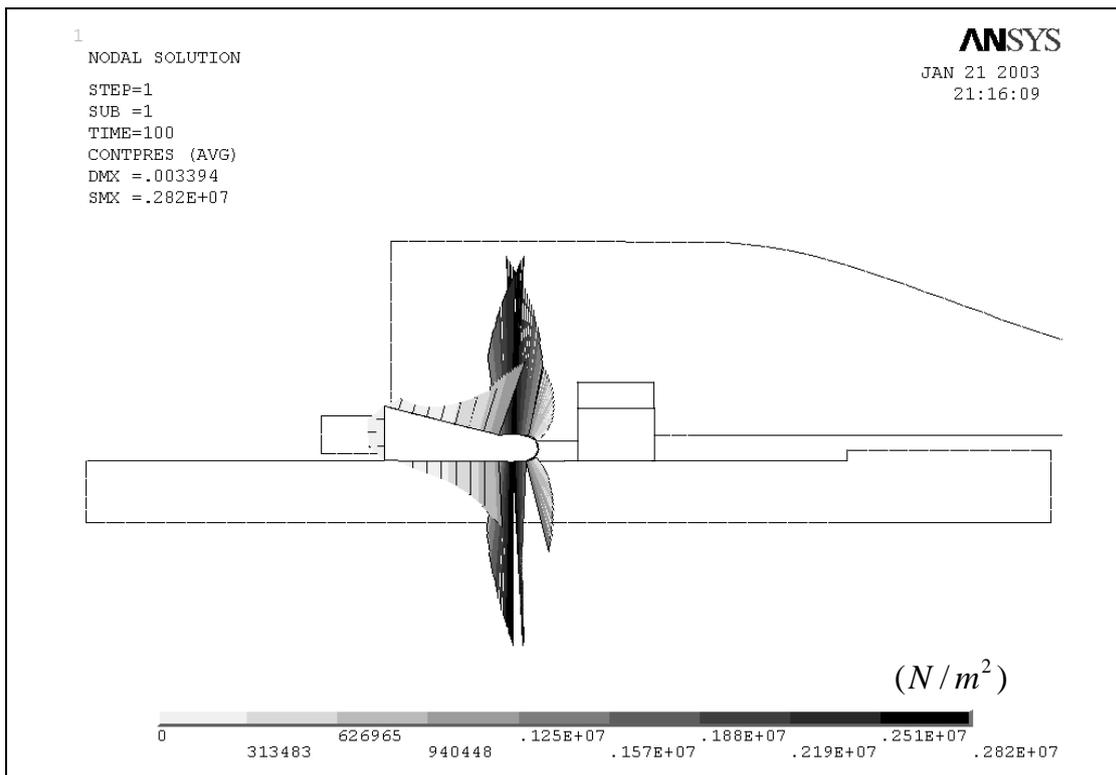


圖 5-23 接觸元素接觸壓力分佈圖（碰觸前）

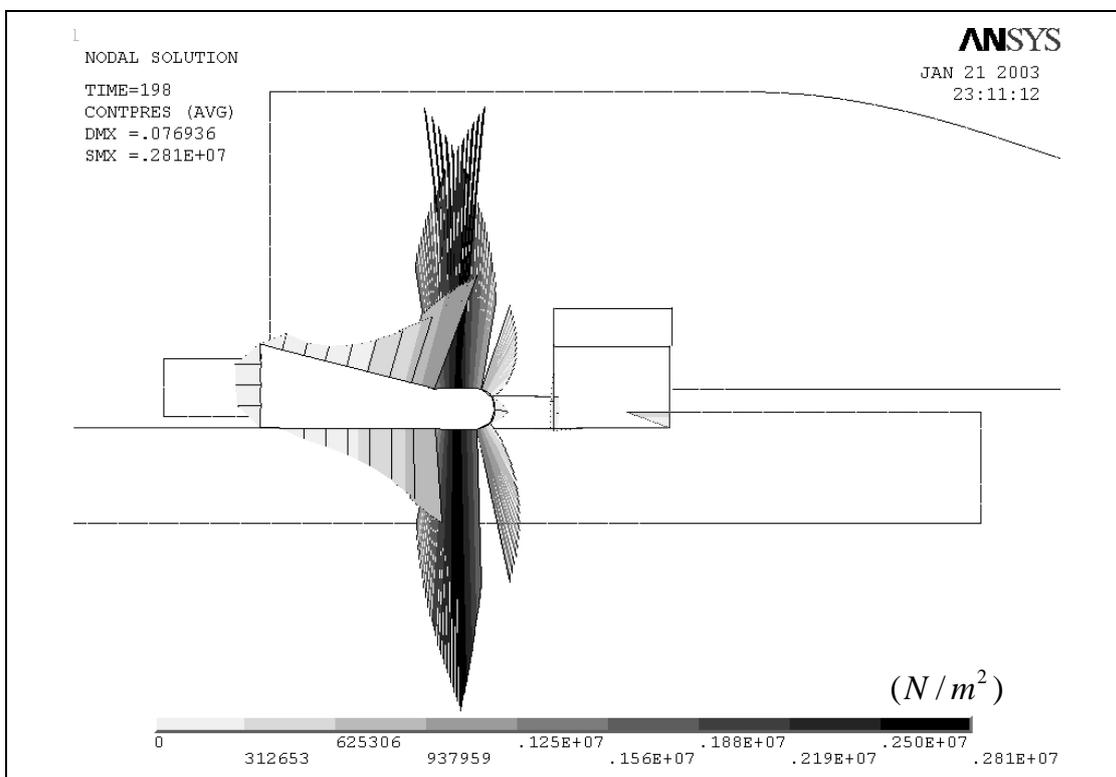


圖 5-24 接觸元素接觸壓力分佈圖（碰觸後）

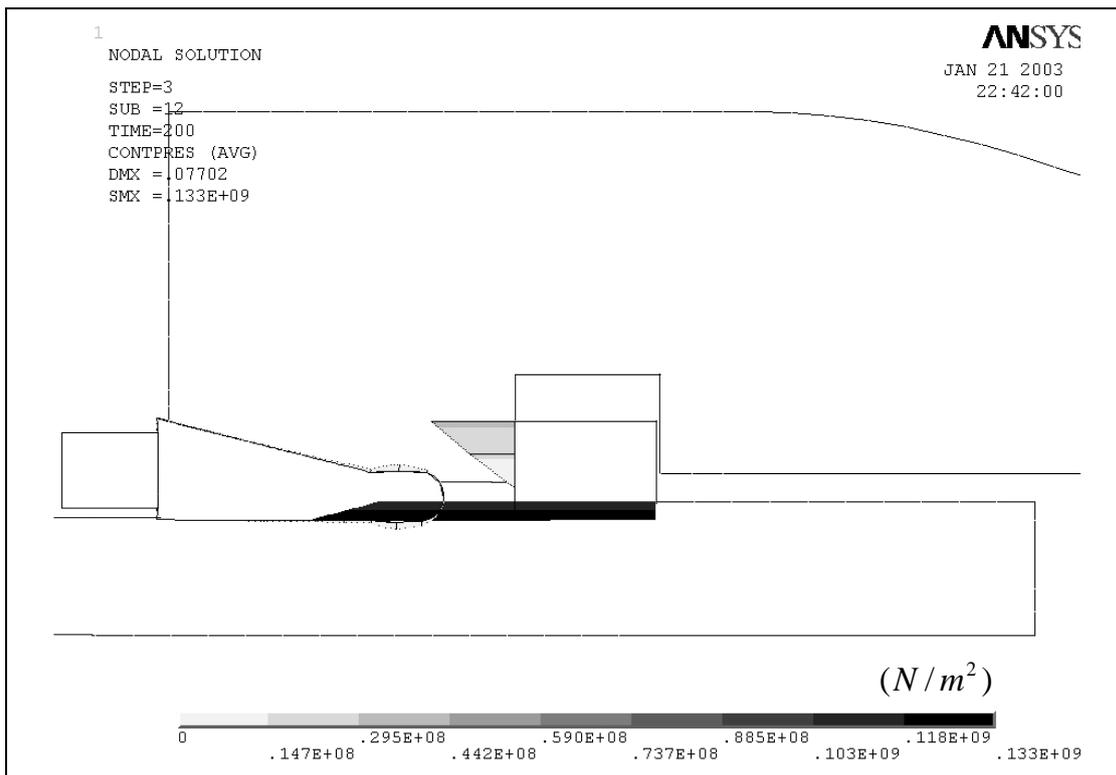


圖 5-25 接觸元素接觸壓力分佈圖 (漏水)

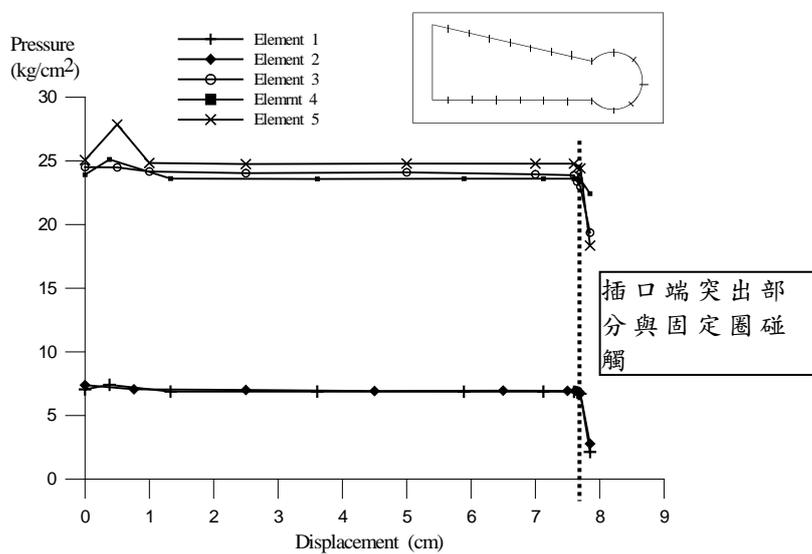


圖 5-26 管徑 1000mm 橡膠圈接觸壓力變化過程

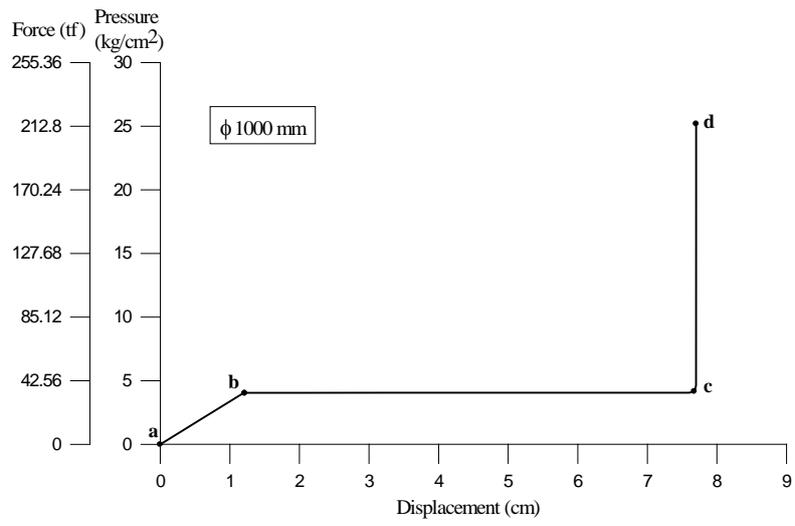
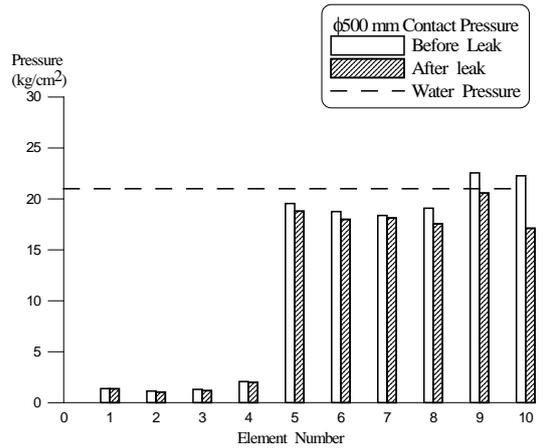
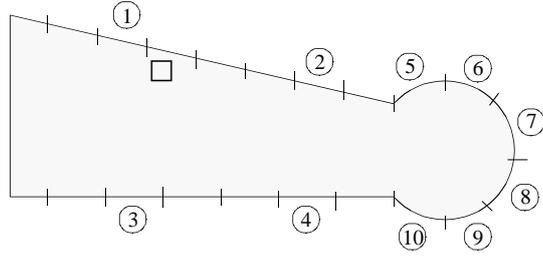
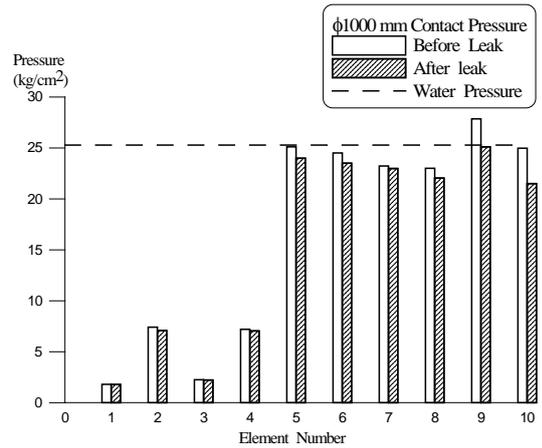


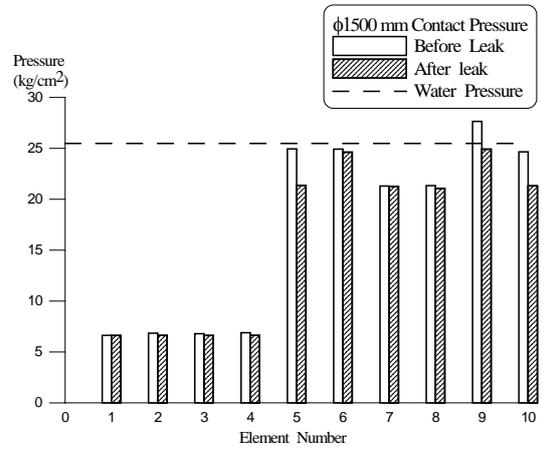
圖 5-27 管徑 1000mm 軸力與位移關係圖



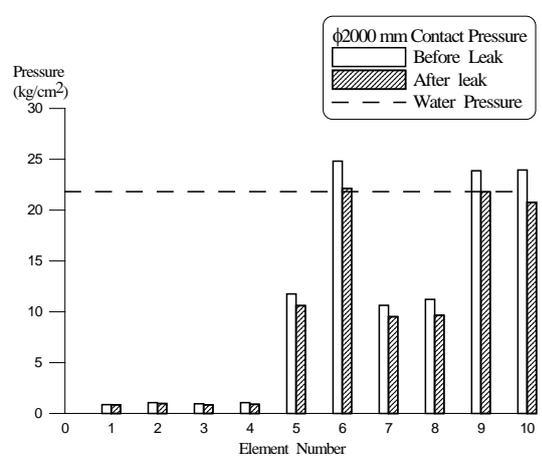
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5-28 橡膠圈接觸壓力變化圖

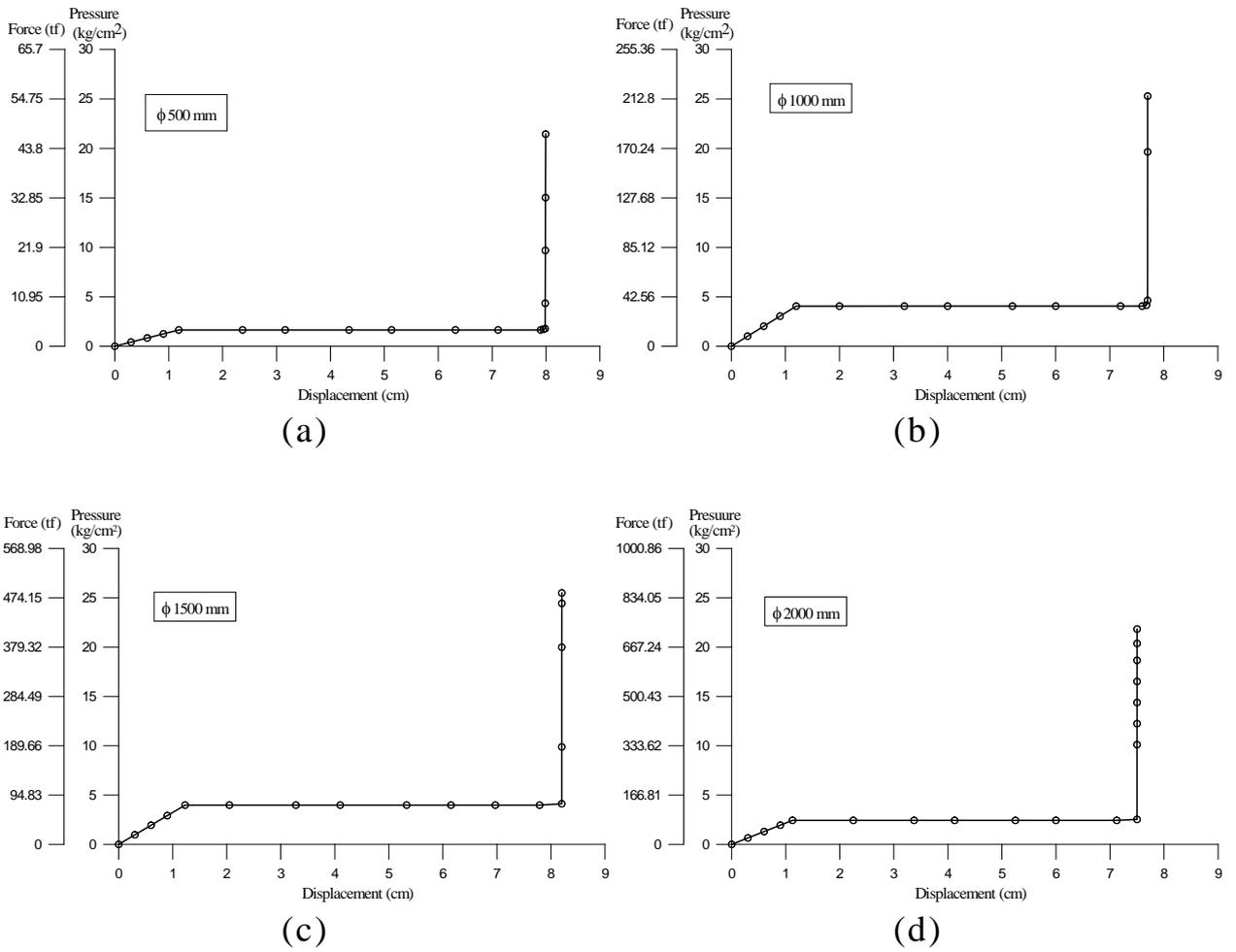


圖 5-29 拉拔力與拔出量關係圖

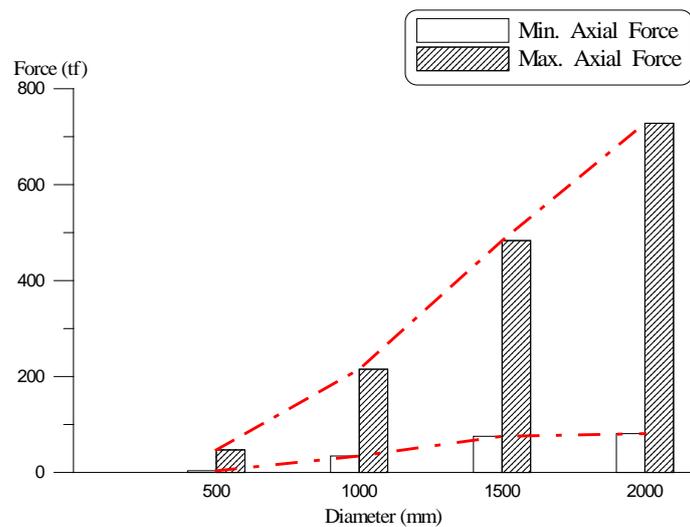
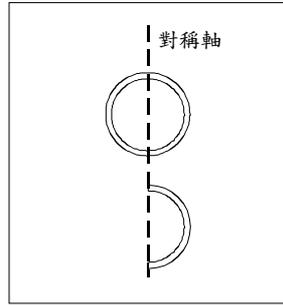
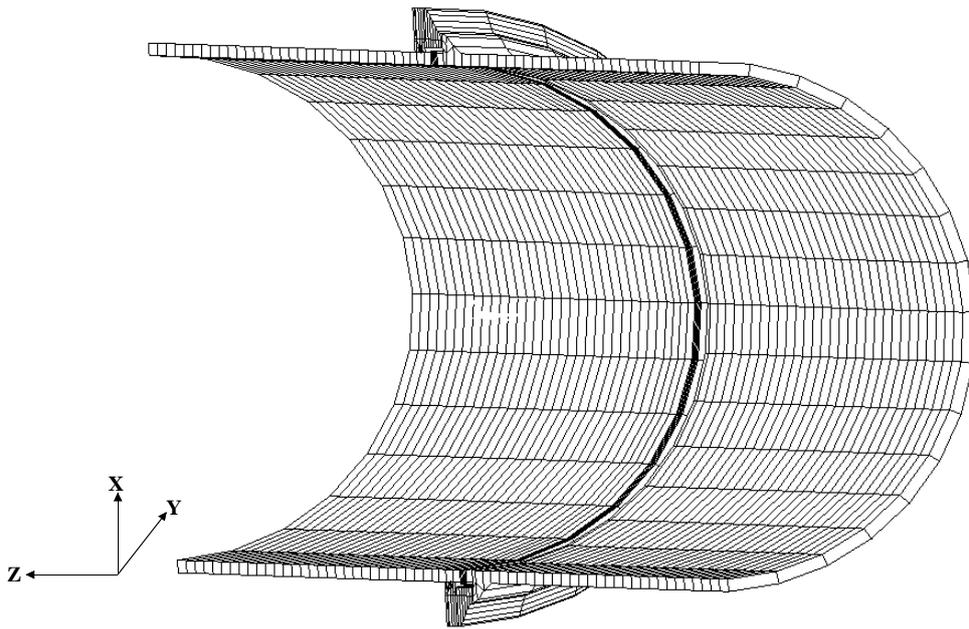


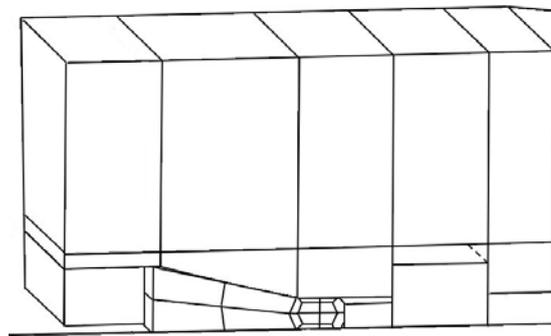
圖 5-30 S 型接頭軸向拉拔力



(a)



(b)



(c)

圖 5-31 撓曲試驗數值模型

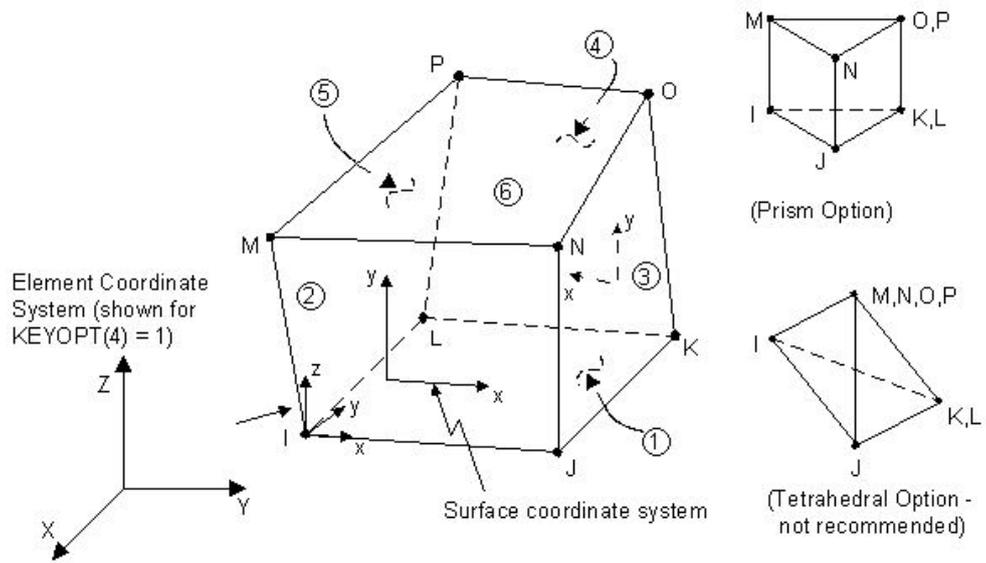


圖 5-32 SOLID45 元素

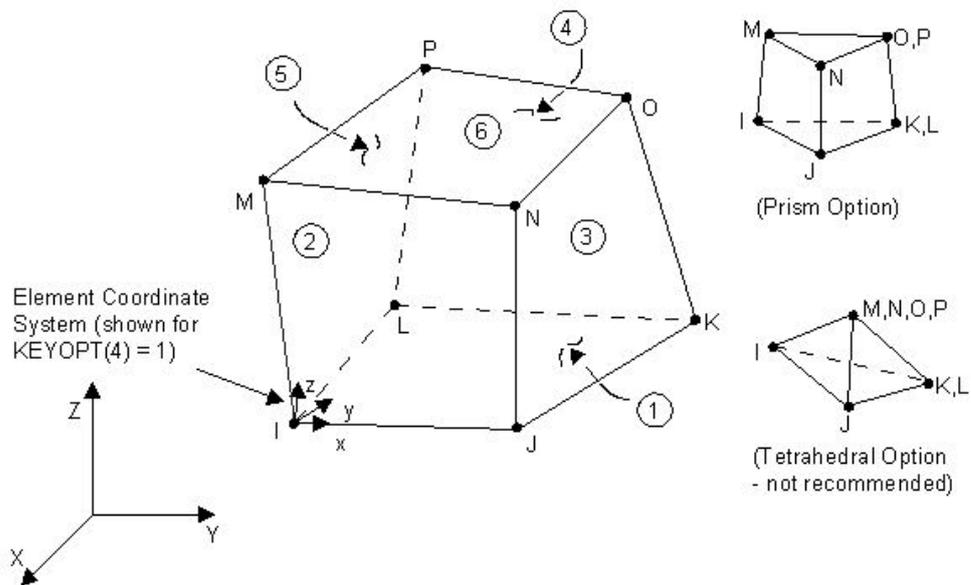


圖 5-33 HYPER86 元素

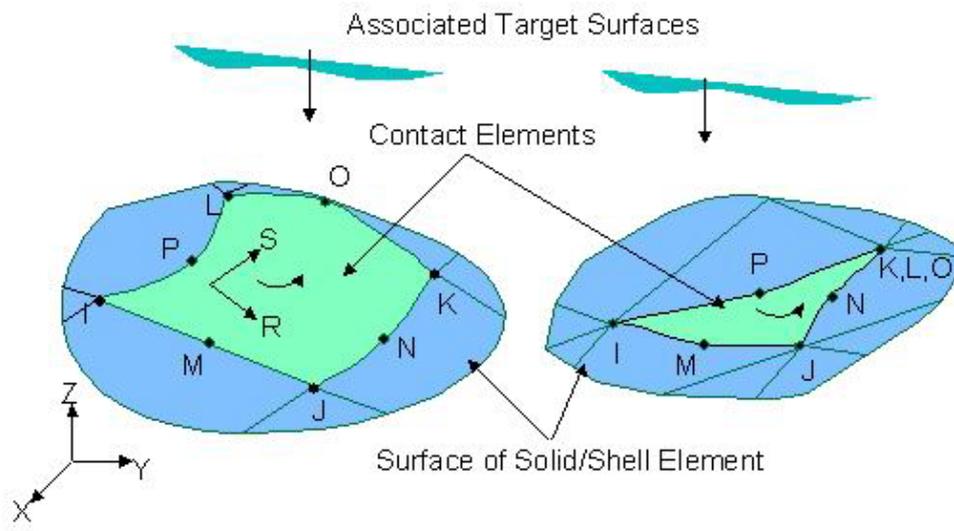


圖 5-34 CONTACT174 元素

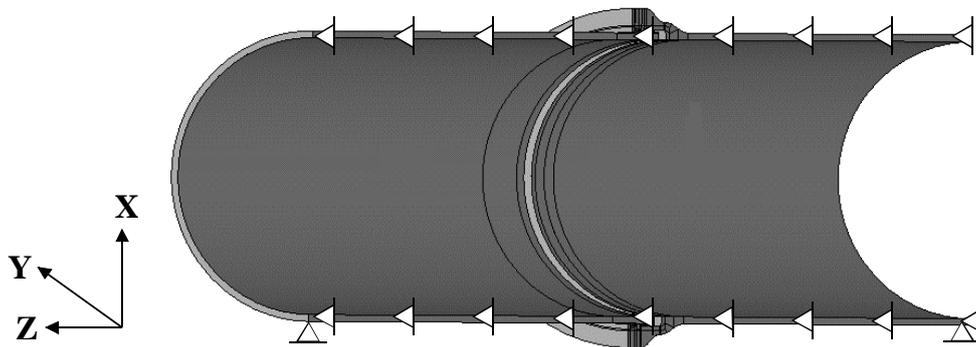


圖 5-35 接頭撓曲試驗邊界條件示意圖

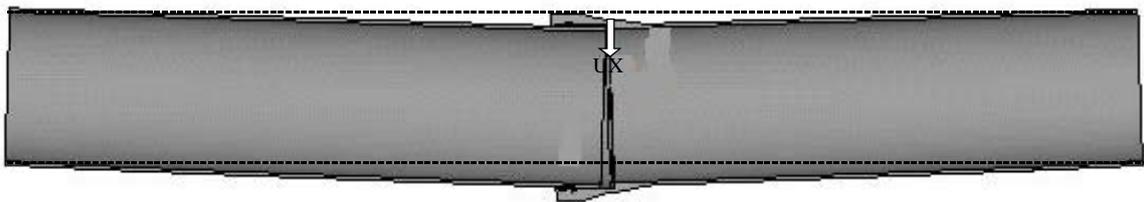


圖 5-36 撓曲試驗位移控制示意圖

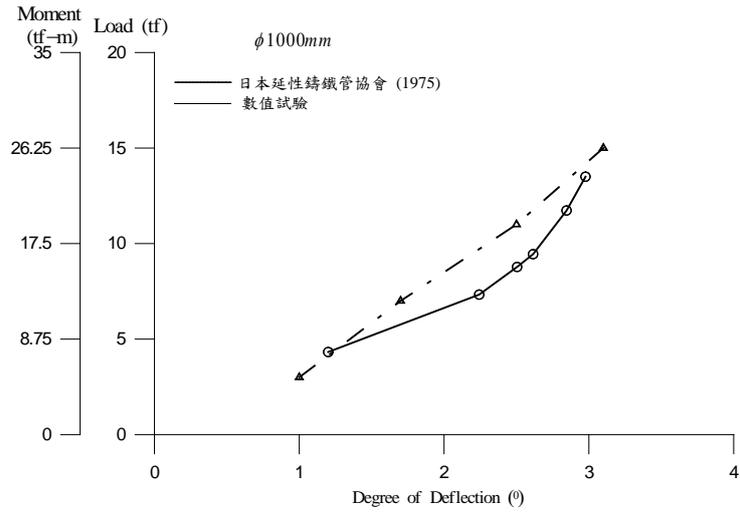


圖 5-37 管徑 1000mm 撓曲數值試驗率定結果

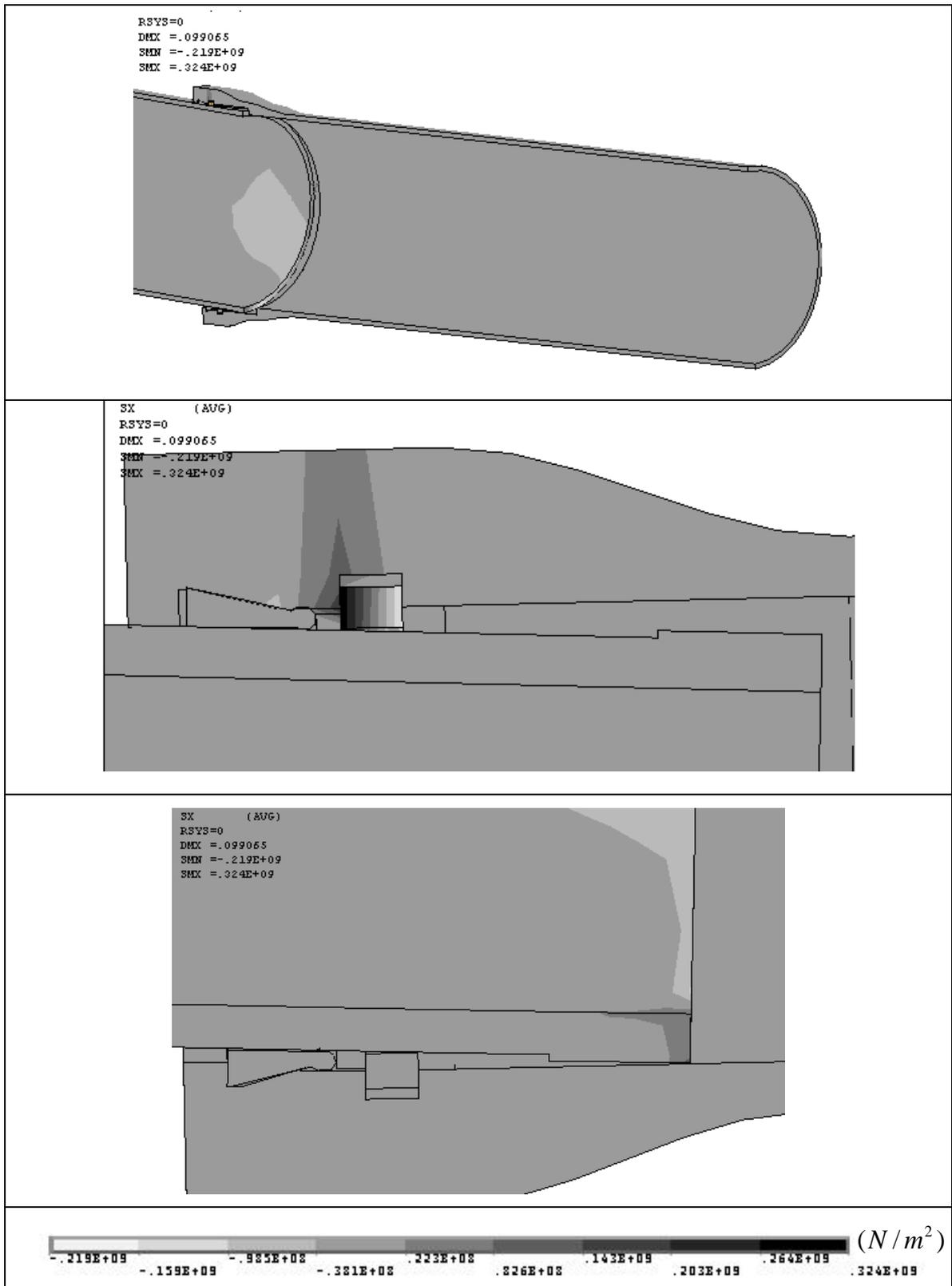


圖 5-38 X 方向應力分佈圖

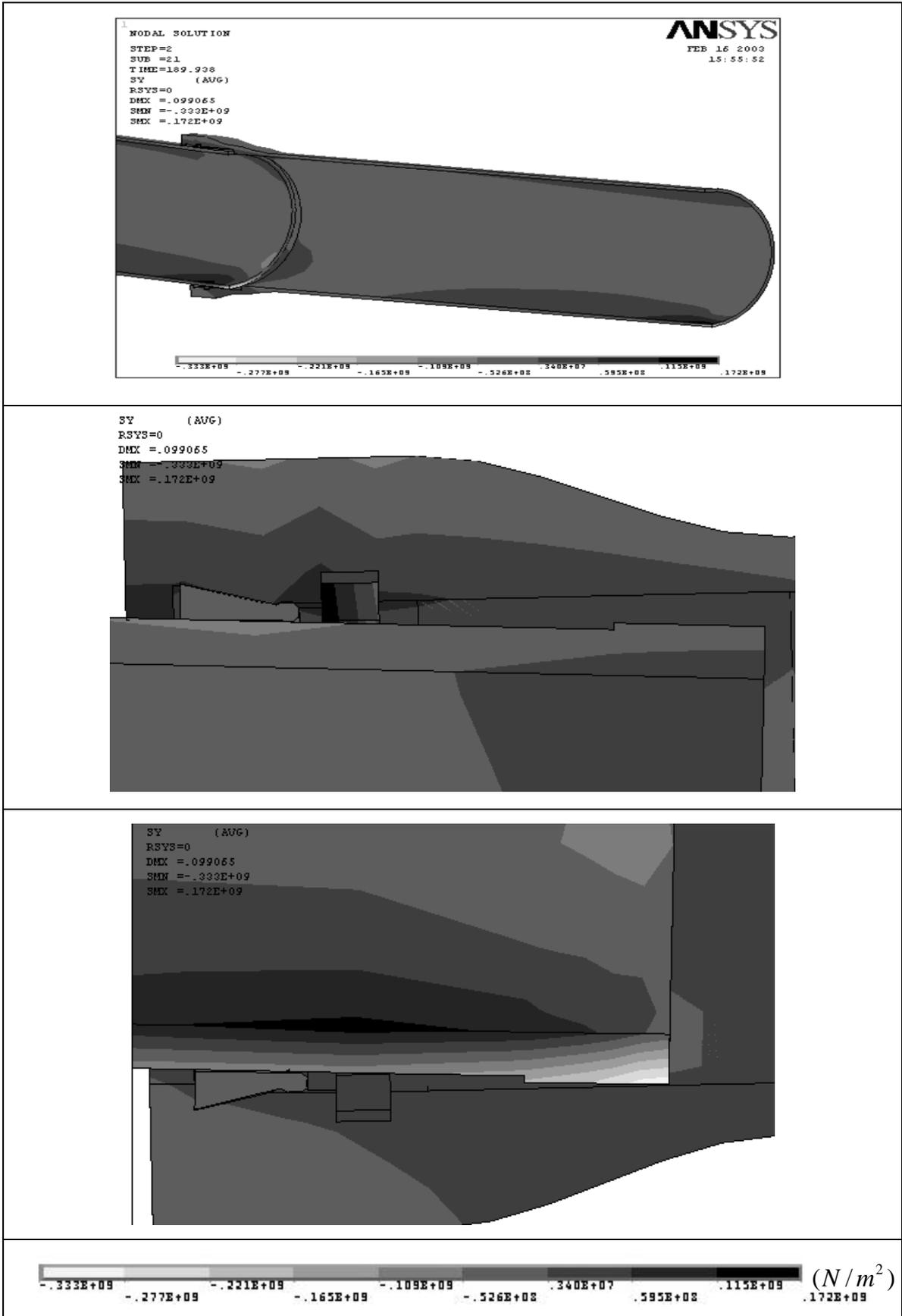


圖 5-39 Y 方向應力分佈圖

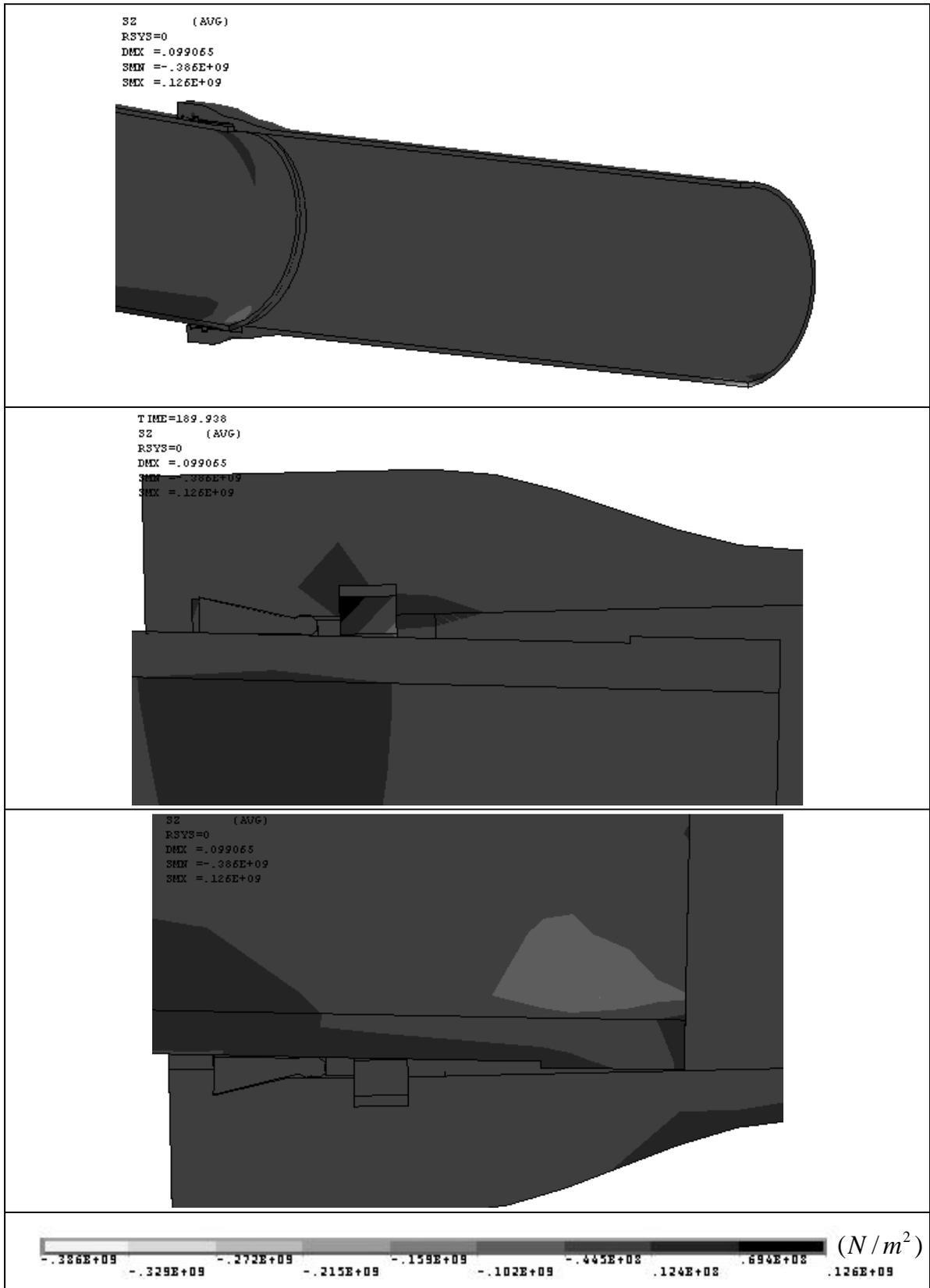


圖 5-40 Z 方向應力分佈圖

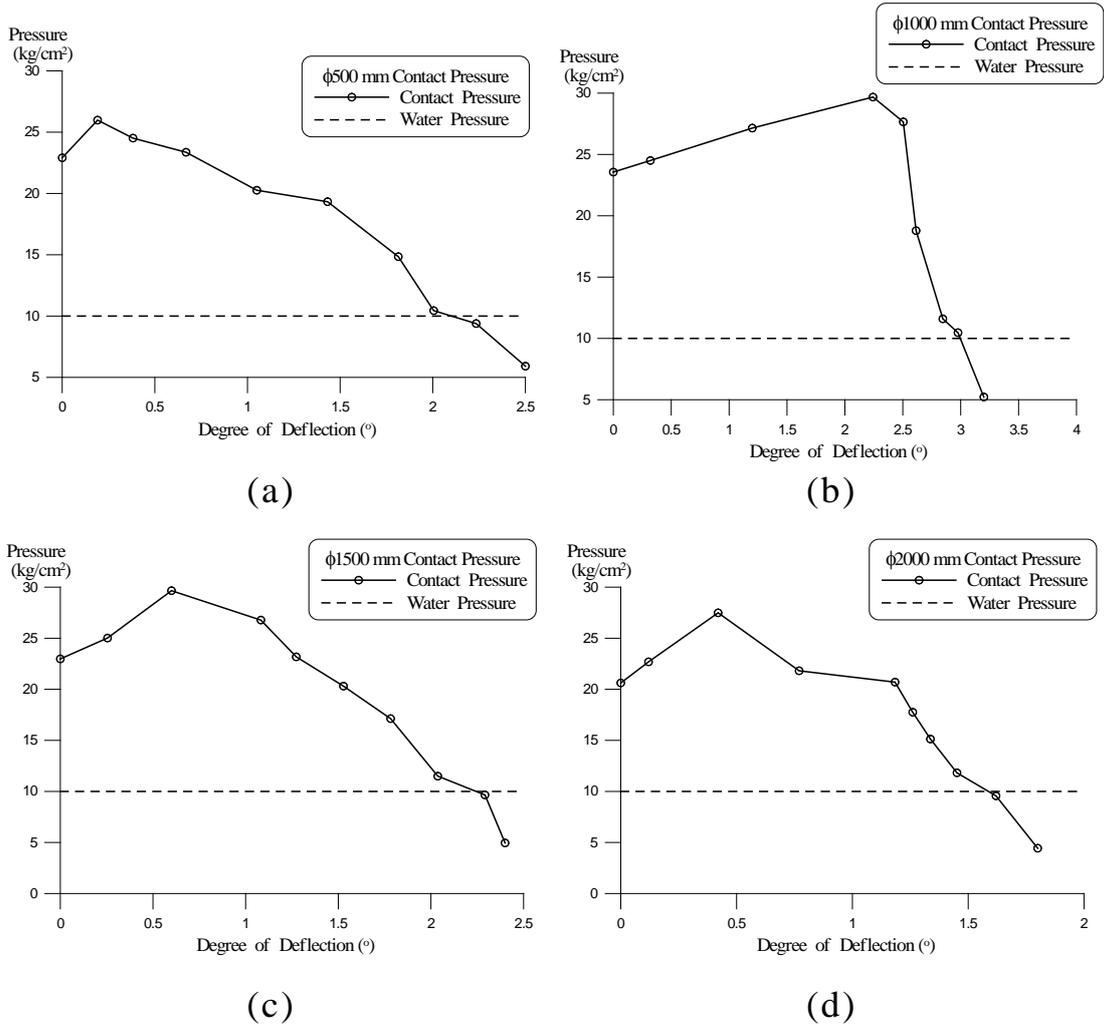
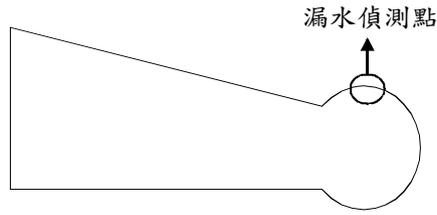
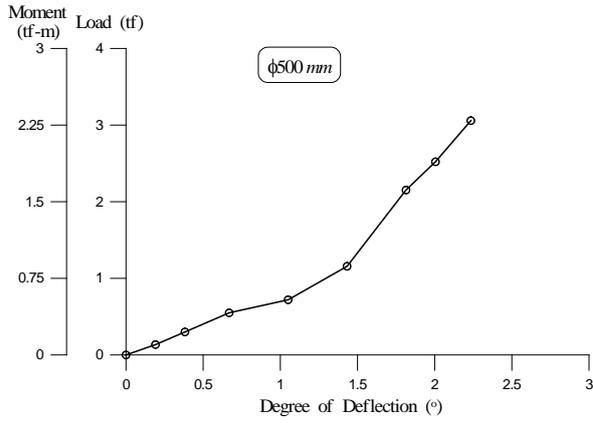
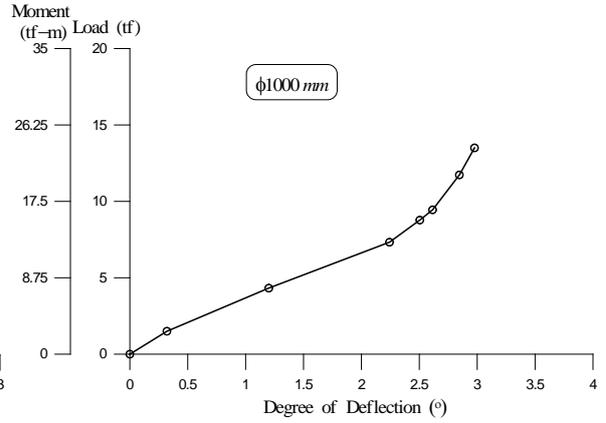


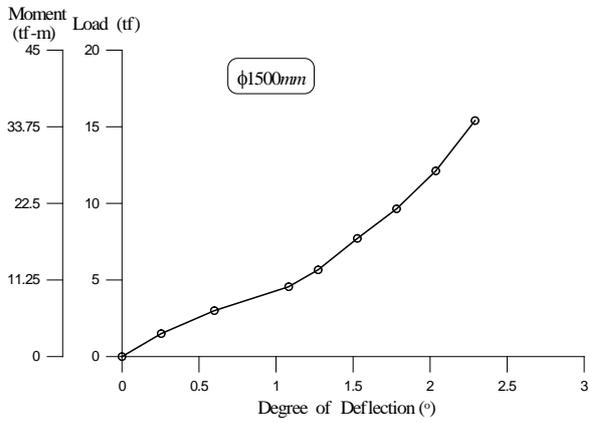
圖 5-41 撓曲試驗橡膠偵測點接觸壓力變化圖



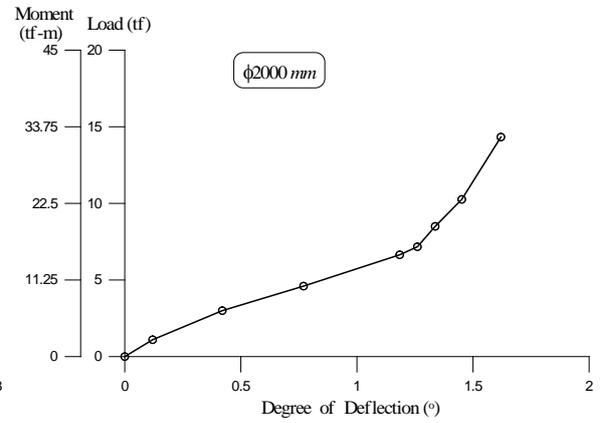
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 5-42 接頭彎矩與撓角關係圖

## 第六章 結論與建議

本研究之主要目的在以自來水接頭的數值耐震試驗取代實體尺寸試驗，並求得試驗結果。本年度研究成果重點，大致達成以下兩項目標。

### (1) 數值耐震試驗取代實體尺寸試驗

依據本研究擬定的數值試驗模型、假設條件、試驗方法與流程，可得到與實體尺寸試驗相同的結果。數值試驗雖然在初期要能熟悉電腦數值軟體，而需投入較多的心力，但數值試驗在進行時能避免許多可能發生在實尺寸試驗上的限制，在試驗內容與經費上皆比實體試驗有較大的效益。

### (2) 計算接頭勁度

國內外學者在進行管線接頭數值分析時，皆苦於無適合的接頭勁度可用，以致大多選擇連續管線進行耐震分析，在接頭的耐震分析上僅能以簡單的推導方式取代。本研究藉由數值試驗模擬接頭受拉與撓曲的行為，除了能求得管線漏水時的拉拔力與彎矩強度，並計算出接頭的軸向勁度與撓曲勁度，與適合分析的接頭模型元素。

建議後續研究，應以本階段研究初步成果作為基礎，增加研究規模；或進行管線的數值耐震分析，以將接頭耐震設計研究進一步推展至更完整的境界。

## 參考文獻

1. 中華民國自來水協會，「自來水設施耐震設計指南及解說 2002」，中華民國自來水協會，2002。
2. 中國國家標準，CNS10808 延性鑄鐵管，1998。
3. 中國國家標準，CNS13272 延性鑄鐵管件，1993。
4. 日本國土開發技術研究ソター，「地下埋設管路耐震繼手の技術基準(案)」，1977。
5. 日本延性鑄鐵管協會技術資料，地震管路について( JDPA T 05)。
6. 宮島昌克、生田目尚美、津田喜裕、北埔勝，「神戸地域における上水道管路網の地震時應答解析」，日本水道協會雜誌，第 68 卷，第 5 號，第 112~117 頁，1999。
7. 李俊傑，「氣壓輪胎之滾動摩擦行為之電腦模擬」，國立成功大學工程科學研究所，碩士論文(2000)。
8. 葉純松，「921 地震大台中地區供水危機處理」，都市防救災研討會論文集，台北，第 129-143 頁(2002)。
9. 臺灣省自來水公司，「自來水管理設工程施工說明書」，臺灣省自來水公司，1997。
10. 劉懿漢，「自行車避震氣墊之分析設計與製作」，國立成功大學工程科學研究所，碩士論文(2001)。
11. ANSYS Inc., Element Reference Version6.0, ANSYS Inc.(2002).
12. ANSYS Inc., Theory Reference Version6.0, ANSYS Inc.(2002).
13. Bartenev, G.M. and Lavrentev, V.V., Friction And Wear of Polymers, Elsevier/North-Holland Inc.(1981).
14. Ford, D.B., “Joint Design for Pipelines Subject to Large Ground Deformations”, ASME, Pressure Vessels and Piping

- Division (Publication) PVP, V77, pp. 160~165, 1983.
15. Gent, A.N., *Engineering With Rubber*, Hanser(1992).
  16. Glaeser, W.A., *Materials For Tribology*, Elsevier Science Publishers B.V.(1992).
  17. Junji Furukawa, Yukio Onouchi, Shinji Inagaki and Hiroshi Okamoto, “Rubber Elasticity at very large elongation”, *Polymer Bulletin*, V6, pp. 381~387, 1981.
  18. Masashi Miyaoka, Hiromu Miyamoto, Yakiyasu Nemoto, Sadamune Hojo and Toshi Nakajima, “About Earthquakes and Pipelines(No.3)-Anti seismic joint: S type ductile pipe”, *Ductile Iron Pipes*, Japan Ductile Iron Pipe Association, No.18, pp. 5-27, 1975.
  19. Meissner, B., Tensile stress-strain behaviour of rubberlike networks up to break. Theory and experimental comparison, *Polymer*, V41, pp. 7827~7841, 2000.
  20. Singhal, A. C., “Nonlinear Behavior of Ductile Iron Pipeline Joints”, *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, Vol. 110, No. 1, pp. 29~37, 1984.
  21. Singhal, A. C., “Axial, Bending and Torsional Behavior of Pipelines”, *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, Vol. 110, No. 1, pp. 38~47, 1984.
  22. Singhal, A. C., “Behavior of Jointed Ductile Iron Pipelines”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 110, No. 2, pp. 235~250, 1984
  23. Tsai, J. S., L. D. Jou and S. H. Lin, “Damage of Buried Water Supply Pipelines in the 1999 Taiwan Earthquake and A Preliminary Evaluation of Seismic Resistance of Pipe Joints”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 23, No.4, pp. 395-408, 2000.
  24. Tsai, C.C., Loh, C.H., and Yeh, Y.J., “Analysis of Earthquake Risk in Taiwan Based on Seisotectonic Zoning”, *Memoir of the Geological Society of China*, No. 9, pp.413-445, 1987.



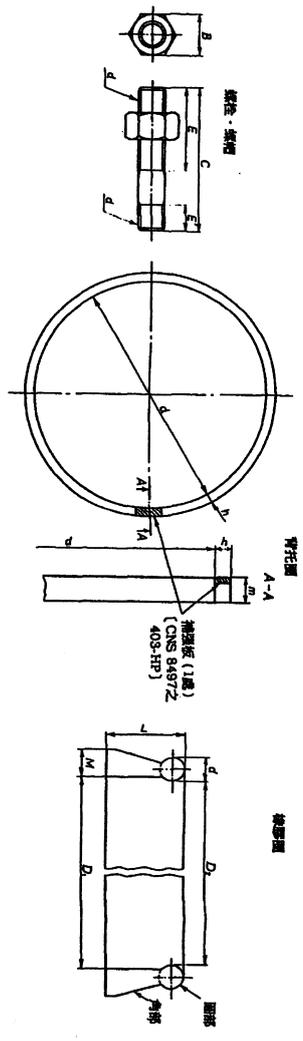


# 附錄 B-2 S 型接合配件(2)

-182-

CNS 13272, G 3253

附錄 附圖 12 S型用接合配件(2)



規格 管徑	鋼種	接合・螺帽				管牙圈				補強板				管徑	
		C	E	F	B	d	A	m	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	d	L	M		
500	M 20	101	62	20	30	14	524	6	10	518	512	14	43	17	500
600	M 20	101	62	20	30	14	627	6	10	620	614	14	43	17	600
700	M 24	125	75	24	36	16	728	8	15	718	712	17	57	21	700
800	M 24	125	75	24	36	20	831	8	15	818	812	17	57	21	800
900	M 30	140	80	30	48	20	934	8	15	918	912	17	57	21	900
1000	M 30	140	80	30	48	20	1035	8	15	1018	1012	18	59	21	1000
1100	M 30	140	80	30	48	24	1138	8	15	1119	1112	18	58	21	1100
1200	M 30	140	80	30	48	28	1240	8	15	1220	1212	18	58	21	1200
1350	M 30	140	80	30	48	28	1394	8	15	1370	1362	18	58	21	1350
1500	M 30	140	80	30	48	28	1544	8	15	1520	1512	18	58	21	1500
1650	M 30	151	90	30	48	30	1640	10	15	1620	1612	20	73	23	1650
1800	M 30	151	90	30	48	30	1841	10	15	1820	1812	20	73	23	1800
1900	M 30	151	90	30	48	34	1944	10	15	1920	1912	20	73	23	1900
2000	M 30	151	90	30	48	36	2051	10	15	2030	2012	20	73	23	2000
2100	M 30	151	90	30	48	38	2154	10	15	2130	2112	20	73	23	2100
2200	M 30	151	90	30	48	40	2248	10	15	2230	2212	20	73	23	2200
2400	M 30	151	90	30	48	44	2448	10	15	2410	2402	20	73	23	2400
2600	M 30	151	90	30	48	48	2648	12	15	2630	2622	22	80	30	2600

單位：mm

規格 管徑	接合・螺帽				管牙圈				補強板				規格 管徑
	C	E	F	B	d	A	m	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	d	L	M	
500-600				0									±0.5
700-800				-1.5									±0.5
1000-1200				+3.0									±1.0
1300-1500				-2.0									±1.0
1600-1800				-2.0									±1.0
1900-2000				-2.0									±1.0
2100-2200				-2.0									±1.0
2300-2400				-2.0									±1.0
2500-2600				-2.0									±1.0

單位：mm

AS (420X287)

## 期中報告審查意見

自來水管線運用柔性接頭提升耐震性之研究（第一年）		
項目	委員意見	意見回覆
1	DIP 防震接頭(S,SII)型價格偏高，採 K、T 型接頭較節省經費開銷，可否針對 K、T 型接頭作分析。	本案研究動機是根據國內與日本在經歷大地震後的耐震結論即鎖扣型的接頭強度較高，而進行研究，研究結果的價值在 1.提拱日後學術研究參考；2.耐震設計參考。同屬 DIP 管的 K 與 T 型柔性接頭，由於接頭型式類似 S 型，因此亦可參考本研究結果，但若要求較可靠的結論，建議納入後續研究。
2	PVCP 在 921 集集地震破壞的例子多分佈在用戶外線小口徑的接頭處，因為接頭是硬性的，之後日本的經驗是建議採柔性接頭，可否放入一併研究。	由於人力與時程的限制，本研究重點僅探討 DIP 鎖扣型接頭的力學性質，而無一併研究 PVCP 柔性接頭，關於 PVCP 柔性接頭於地震發生之耐震性能，建議納入後續研究，進行探討。
3	可否與國統、元鋼、興南等公司的管線接頭試驗結果比較、研究。	國內廠商目前尚無較大型之試驗設備，本案之研究資料主要是參考日本與美國的接頭試驗數據並與之比較。
4	HDPE（高密度聚乙烯管）的接頭是用焊的，可否改用此作研究。	日本對 HDPE 的相關研究有豐富的文獻資料可供參考，但由於本案時程上、人力分配、資料與文獻收集的限制，無法改用 HDPE 作研究，建議後續研究可採用 HDPE 接頭。

