

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

圓棒型加勁消能器力學行為之有限元素分析研究

Mechanical Behavior Analysis Of
Circular Added Damping And Stiffness Device
by using FEM



鄭孟杰

Meng-Chieh Cheng

指導教授：吳賴雲 教授

Advisor: Professor Lai-Yun Wu

中華民國九十七年六月

June, 2008

誌 謝

研究所期間，感謝指導教授 吳賴雲教授的啟蒙與悉心指導。學習過程中，鼓勵我參與各種研討會，使我受益匪淺。感謝 鍾立來教授給予研究方向的建議與指導，老師在研究上嚴謹的態度更是我輩學習的典範。

在論文撰寫過程中，學長國倫、旭輝給予指導，與我討論問題所在，也協助我解決問題，學長不厭其煩的態度令我敬佩且由衷的感謝。

感謝口試委員 陳永祥 李正寬 王仁佐委員審閱全文，並且不吝惠賜寶貴意見，使得本文能夠更完整而嚴謹。另外特別再次感謝 王仁佐博士在口試完後，幫助我修改文章且給予研究上的協助，使得本文得以順利完成。

兩年裡的日子裡，同儕俊偉、俊昌、宣宏、玉邦、文驤、宴維，一起上課的生活點滴，學術上的討論、課餘時間的閒聊、趕作業的革命情感，你們的陪伴讓兩年的研究生生活變得絢麗多彩。學長蕙燈、耀昇、漢平，不只是在課業上的指導，並且在未來人生規劃上給予方向及建議，讓我能提早為將來做好準備。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親 鄭焯勳 游秀葉及最親愛的弟妹妹。感謝我的家人在生活上的支持和女朋友郁茜在背後精神上的鼓勵，郁茜的體諒、包容，使我有動力並且專心一致的完成本文。

摘要

圓棒形加勁消能器是由數根圓形鋼棒所組成，採用斜撐系統接於梁柱構架中，因鋼棒之高度遠大於其直徑，層間剪力驅使圓形鋼棒彎曲變形，主要位移為彎矩所產生的位移量，再者，由於每個斷面高程之應力值控制成定值，所以每高程之斷面會一起達到降伏，即會同時由彈性進入塑性階段，每個高程皆可以產生極大的應變，因此具有極佳的變形與消能能力。

研究計畫採用商用有限元素軟體 ABAQUS 來當作數值分析程式，ABAQUS 是一套先進通用有限元素程式系統，發展軟體的目的是對固體和結構的力學問題進行數值計算分析。此軟體被廣泛地認為是功能最強的有限元素軟體，可以分析複雜的固體和結構力學系統。

本研究在針對圓棒形加勁消能器進行理論分析、數值模擬及試驗驗證。針對圓形鋼棒，進行材料試驗，分別為拉伸試驗及拉壓試驗，由拉伸試驗可得到應力及應變曲線，而由拉壓試驗則可知道是否有走動硬化。並利用不同徑高比之圓棒形加勁消能器進行元件測試，針對圓棒形加勁消能器進行元件測試試驗，以 Abaqus 程式模擬 D20H80、D20H100 試體之圓棒形加勁消能器，將其分析結果與測得之實驗數據比較。另外模擬 D50H175、D50H200、D50H250、D50H175 四組試體，觀察其消能效果，作為日後實驗或者是實務上的參考。

目錄

第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧與研究動機	2
1.3 研究動機和方法	4
第二章 圓棒形加勁消能器之力學性質	7
2.1 以懸臂梁方式解析單邊圓形鋼棒力學性質	7
2.2.1 線彈性階段	9
2.2.2 塑性階段	10
2.3 圓棒形加勁消能器往覆載重之力與位移關係	13
2.4 等效彈塑性	16
第三章 試體規畫設計	23
3.1 實驗試體規畫	23
3.2 實驗試體設計	23
3.3 元件測試構架	26
3.3.1 施力系統佈置	26
3.3.2 試驗程序	27
3.3.3 量測系統	27
3.4 數值分析試體規畫	28

第四章 ABAQUS 應用及分析	58
4.1 ABAQUS 簡介	58
4.2 ABAQUS 分析模型的組成	59
4.2.1 前處理(Preprocessing)	61
4.2.2 模擬計算(Simulation)	63
4.2.3 後處理(Post processing)	63
4.4 元素的積分	64
4.5 建構結構物之基本有限元素種類	65
4.6 元件測試數值驗證	68
4.7 問題討論	79
第五章 結論與展望	83
6.1 結論	83
5.2 展望	84
參考文獻	85
附錄一	89
附錄二	90
附錄三	91



圖目錄

圖 1.1	加裝圓棒形加勁消能器之結構.....	6
圖 2.1	圓棒形加勁消能器之彎矩及應力分佈圖.....	18
圖 2.2	圓棒形加勁消能器受力示意圖.....	18
圖 2.4	圓棒形加勁消能器之理論 $\frac{V}{V_y}$ 與 $\frac{\Delta}{\Delta_y}$ 曲線圖.....	19
圖 2.5	圓棒形加勁消能器力學性質單一循環行走路徑.....	20
圖 2.6	圓棒形加勁消能器應力分佈圖.....	21
圖 2.7	材料試驗示意圖.....	22
圖 2.8	理論示意圖.....	22
圖 3.1	材料試驗設計圖(unit : mm).....	48
圖 3.2	拉力試驗結果.....	49
圖 3.3	第一支拉壓試驗結果.....	49
圖 3.4	第二支拉壓試驗結果.....	50
圖 3.5	D20H100 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	51
圖 3.6	元件測試試體設計圖(unit : mm).....	51
圖 3.7	D20H80 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	52
圖 3.8	D20H80 之元件測試試體設計圖(unit : mm).....	52
圖 3.9	D50H175 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	53
圖 3.10	D50H200 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	53

圖 3.11	D50H250 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	54
圖 3.12	D50H300 消能鋼棒之曲線(unit : mm).....	54
圖 3.13	元件測試構架架設配置.....	55
圖 3.14	位移反覆載重歷時圖.....	56
圖 3.15	元件測試構架照片.....	57
圖 4.1	Abaqus 產品.....	59
圖 4.2	Abaqus 分析流程圖.....	60
圖 4.3	Abaqus 中平移與旋轉自由度標示示意圖.....	61
圖 4.4 (a)	B31 元素.....	67
圖 4.4 (b)	Solid 元素.....	67
圖 4.5	材料參數.....	68
圖 4.6	位移控制歷時.....	68
圖 4.7	Beam 試體模型.....	69
圖 4.9	Solid 試體模型.....	70
圖 4.11	D20H80 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖.....	71
圖 4.12	D20H100 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖.....	72
圖 4.13	D50H175 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖.....	73
圖 4.14	D50H200 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖.....	74
圖 4.15	D50H250 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖.....	75

圖 4.16	D50H300 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖	76
圖 4.17	D20H100(Solid)圓棒形加勁消能器遲滯迴圈	77
圖 4.18	Solid 和 Beam 元素遲滯迴圈比較圖	78
圖 4.19	硬化使用 isotropic 和實驗遲滯迴圈比較圖	80
圖 4.20 (a)	各種尺寸圓棒形加勁消能器遲滯迴圈比較圖	80
圖 4.20 (b)	各種尺寸圓棒形加勁消能器遲滯迴圈比較圖	81
圖 4.21	各種尺寸圓棒形加勁消能器消散能量比較圖	81
圖 4.22	圓棒形加勁消能器軸向力遲滯迴圈	82



表目錄

表 3.1	圓棒形加勁消能器設計資料.....	29
表 3.2a	等效降伏應力 σ_y	30
表 3.2b	等效降伏應力 σ_y	31
表 3.2c	等效降伏應力 σ_y	32
表 3.2d	等效降伏應力 σ_y	33
表 3.2e	等效降伏應力 σ_y	34
表 3.2f	等效降伏應力 σ_y	35
表 3.3	D20H80 消能鋼棒之曲線表.....	36
表 3.4	D20H100 消能鋼棒之曲線表.....	37
表 3.5	D50H175 消能鋼棒之曲線表.....	38
表 3.6	D50H200 消能鋼棒之曲線表.....	39
表 3.7	D50H250 消能鋼棒之曲線表.....	40
表 3.8	D50H300 消能鋼棒之曲線表.....	41
表 3.9	D20H80 消能鋼棒之曲線表.....	42
表 3.10	D20H100 消能鋼棒之曲線表.....	43
表 3.11	D50H175 消能鋼棒之曲線表.....	44
表 3.12	D50H200 消能鋼棒之曲線表.....	45
表 3.13	D50H250 消能鋼棒之曲線表.....	46

表 3.14 D50H300 消能鋼棒之曲線表.....47



第一章 緒論

1.1 前言

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之交接處，在環太平洋地震帶上，為西太平洋地震頻繁的地區之一。在考量到建築物的安全性、使用性與舒適性，我們必須將建築物的耐震能力納入設計考量。近年來，建商也常以隔、制震技術為建築銷售案之賣點，因此如何去制震、減震變成首要課題。

對於結構新建、補強及修復之耐震設計，結構控制是有效之因應辦法。此技術利用外加之控制元件或控制系統以改變結構之動力特性，達到提升結構安全性、舒適性或功能性為目的。

在諸多的結構控制技術與元件中，加勁阻尼裝置（Added Damping and Stiffness, ADAS）因擁有穩定的消能行為、製作成本低廉及安裝簡易等優點，實際應用於工程上的可行性相對提高。本文主要著重於圓棒形加勁消能器之研究與發展，進行理論分析、數值模擬及試驗驗證，來探討圓棒形加勁消能器用於結構控制，作為新建、補強及修復結構之消能元件，在耐震上的效果。

圓棒形加勁消能器是由數根圓形鋼棒所組成，圓形的設計使消能器無強弱軸之分，進一步達到全方位的消能機制。其設計理念是當消能器產生上下兩端產生水平錯動變位時，圓形鋼棒每高程之斷面會一

起達到降伏，如圖 2.3，消能器將透過鋼材的降伏後的加卸載來進行能量的消散。消能器採用斜撐系統接於梁柱構架中，如圖 1.1，因鋼棒之高度遠大於其直徑，層間剪力驅使圓形鋼棒彎曲變形，主要位移為彎矩所產生的位移量，由於每個斷面高程之應力值控制成定值，如圖 2.1，所以每高程之斷面會一起達到降伏，即會同時由彈性進入塑性階段，每個高程皆可以產生極大的應變，因此具有極佳的變形與消能能力。再者，因為全斷面都同時降伏的設計也可以避免兩端集中過大的應力應變。本文將以圓棒型加勁阻尼器為研究對象並針對其力學行為進行討論。

1.2 文獻回顧與研究動機

近年來國內有關既有及新建結構耐震能力之提升研究眾多，而結構控制乃耐震能力提升方法之一。結構控制之設計揚棄傳統耐震設計之概念，傳統耐震設計主要利用梁柱去消散能量，而未考慮隔間牆與樓板對於梁柱之影響，而結構控制之設計則在傳統結構系統外，裝設控制元件，由於控制元件對於能量傳導路徑非常明確，經由適當之配置方式，巧妙地消散或隔絕地震輸入結構之能量。結構控制之方法可分為主動控制與被動控制，其主動控制方法則是對結構系統而言，環境載重與控制力均為外力，可是環境載重發生之時機、方向與大小並非人們所能預期的，但控制力施加之時機、方向與大小卻在人們掌握

之中。因此控制力之作用必須有所依據，使控制力在適當之時機，以適當之方向及大小施加在結構上，如此控制力才能發揮其功用，來抑制結構物因環境載重而引起之動力反應。其中東帝士 85 國際廣場 [1][2][3] 乃是全國第一座採用主動控制作為減振元件之土木結構。大樓採用主動調諧質塊阻尼器作為控制元件，兩組懸吊鐘擺式質塊阻尼器分別裝設於第 78 層樓板之兩個對角角落，以抑制該大樓兩個水平方向及扭轉方向之結構動力反應，其目的在於減緩風力所造成之振動，來提昇大樓之舒適度。而對於被動控制方法則分別為隔震器 [4][5][6] 與消能器，其中消能器方面又分成速度型消能器 [7] 至 [14] 與位移型消能器 [15] 至 [22]。速度型消能器有二種，(1) 黏彈性阻尼器 (Viscoelastic Damper)：當結構物受到振動時，阻尼器會藉由黏彈性材料產生剪力變形來吸收及消耗震動能量，以減少結構物的側移量，且可使各樓層的側位移變得較均勻。(2) 液態阻尼器：為利用提高結構之阻尼比，以降低在地震力作用下結構之振動反應。位移型消能器也有二種，(1) 摩擦型阻尼器 (Friction Damper)：當結構物受到振動時，利用滑動摩擦力所消散之能量來減小地震力，一般以銅片或煞車墊為摩擦襯墊，可有效的降低結構之受震反應。(2) 金屬消能系統：應用特殊遲滯元件以穩定地提供結構遲滯消能能力，和有效地提升系統的強度與韌性容量，以確保結構系統在強烈地震作用下能適時發揮設計的耐震效果，

消散地震輸入的能量，避免結構物脆性破壞的發生。常見的金屬消能元件有下列幾種，(1) ADAS：鋼板消能器 (Plate Added Damping and Stiffness Device，簡稱 ADAS)在與斜撐構材合併使用時，除有效提升結構之彈性勁度外，亦能在消能器降伏後增加構架之遲滯阻尼，而有效降低結構之受震反應；(2) SLEA：剪力連桿消能器 (Shear Link Energy Absorber，簡稱 SLEA)為一融合 ADAS 觀念及偏心斜撐構架系統之連桿梁觀念的裝置，除了易於施工外，已經試驗證實具有高勁度及穩定消能特性；(3) BRB：挫屈束制消能支撐，用於取代傳統斜撐，具有高勁度及穩定消能特性，不會有挫屈以造成強度及勁度下降之行為發生。

圓棒形加勁消能器屬於結構被動控制之金屬消能元件，為利用其每高程之斷面同時降伏來消散地震能量，本研究旨在針對結構加裝圓棒形加勁消能器之研究與發展。

1.3 研究動機和方法

本文主要著重於圓棒形加勁消能器之研究與發展，進行理論分析、數值模擬及試驗驗證，來探討圓棒形加勁消能器用於結構控制，作為新建、補強及修復結構之消能元件，在耐震上的效果。

針對圓棒形加勁消能器，進行理論推導，可得到圓棒形加勁消能器之直徑與高程關係、圓棒形加勁消能器之勁度、降伏強度、極限強

度、力-位移及遲滯迴圈關係。先進行材料試驗，分別包含拉伸試驗及拉壓試驗，以了解圓棒之應力應變曲線及走動硬化之情形，再將試驗規劃成元件測試，針對不同徑高比之試體進行往覆載重之元件測試，比較試體在消能上的效果。

為了將圓棒形加勁消能器之力學性質推導之理論分析作為工程設計上之依據，因此採用商用有限元素軟體 ABAQUS 來當作數值分析程式，進行驗證比對，比較數值分析結果與實驗分析結果。透過 ABAQUS/CAE 建構模形，然後對產生的幾何體賦予物理和材料特性、負載和邊界條件，進行模擬。

透過 ABAQUS 進行模擬可了解整體結構內部應力分佈情形，進而了解未來結構發生變形時內部最先達到破壞之部位，由此事先可先做補強及修正來防範。再者，透過 ABAQUS 也可以發現實驗過程中忽略的部分，如：消能器上下兩端位移錯動過程中軸向拉力的產生、邊界條件的影響等。經由此研究，期能有利於未來圓棒形加勁消能器之實用化，以提升新建、補強及修復結構之耐震能力，將建築結構在地震力作用下之振動量大幅降至可以容忍之範圍內，以確保人員與結構之安全，進而減緩地震之災害。

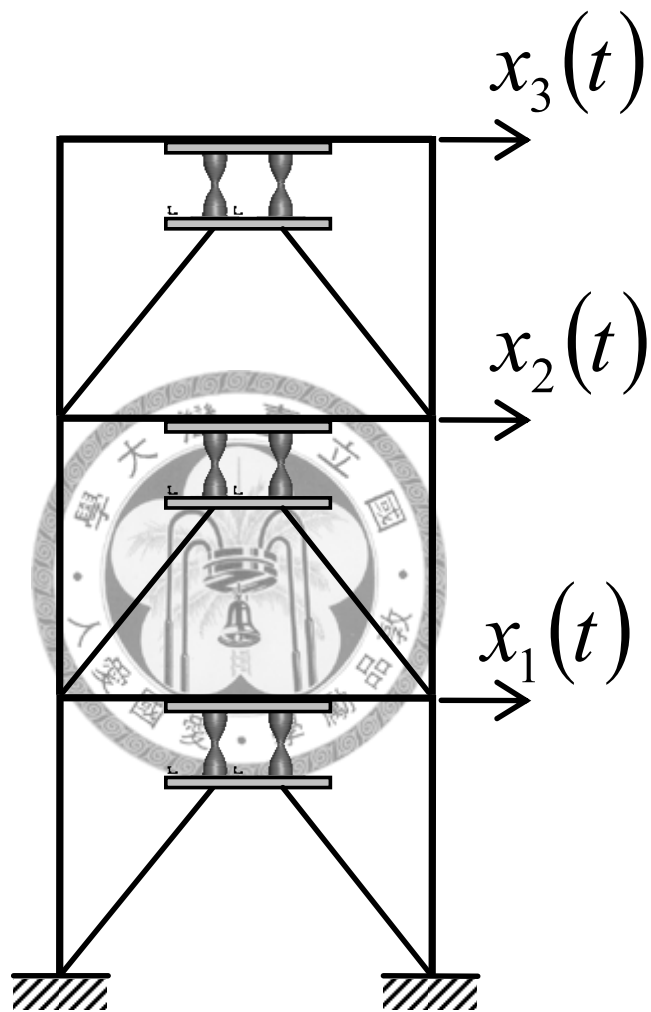


圖 1.1 加裝圓棒形加勁消能器之結構

第二章 圓棒形加勁消能器之力學性質

2.1 以懸臂梁方式解析單邊圓形鋼棒力學性質

圓棒形加勁消能器是由數根圓形鋼棒所組成，採用斜撐系統接於梁柱構架中，因鋼棒之高度遠大於其直徑，層間剪力驅使圓形鋼棒彎曲變形，主要位移為彎矩所產生的位移量，再者，由於每個斷面高程之應力值控制成定值，如圖 2.1，所以每高程之斷面會一起達到降伏，即會同時由彈性進入塑性階段，每個高程皆可以產生極大的應變，因此具有極佳的變形與消能能力。

圓棒形加勁消能器在承受側力時，經由力量的傳遞，在鋼棒半高處產生反曲點，可視為鉸接，如圖 2.2。因為圓棒形加勁消能器為反對稱結構，我們將其轉換為分析單邊圓形鋼棒以懸臂梁解析求 $u-\Delta$ 圖，其中圓形鋼棒下端視為固定端，反曲點視為自由端。

圓棒形加勁消能器公式推導即以上所述之力學原理為前提，將鋼棒材質假設成完全彈塑性材料，並在變形後平面保持平面之假設，分別推導材料在線彈性階段(降伏前)與進入塑性階段(降伏後)時之相關公式。

由圖 2.2 可知圓形鋼棒在高程 x 之外緣應力 σ 為：

$$\sigma(x,y) = \frac{M(x)}{S(d)}, \quad \frac{-H}{2} \leq x \leq \frac{H}{2} \quad (2.1)$$

其中 d 為圓形鋼棒之直徑， H 為圓形鋼棒之高度， y 為圓形鋼棒高程 x

所對應之半徑座標， $M(x)$ 為圓形鋼棒受側向力 V 乘以高程 x ，而 $S(d)$ 為圓形鋼棒上下兩端之斷面模數(section modulus)等於 $\frac{\pi}{32}d^3$ 。

為了讓圓形鋼棒每高程之斷面會一起達到降伏，因此每高程之外緣應力($y = \frac{d}{2}$)皆一致：

$$\sigma_{\max}(x) = \text{const.} = \frac{Vx}{\frac{\pi}{32}d^3} = \frac{32Vx}{\pi d^3} \quad (2.2)$$

並令高程為 $x = \frac{H}{2}$ 時，其直徑 d 為：

$$d = D \quad (2.3)$$

其中 D 為圓形鋼棒上下兩端之直徑，此處可得最大應力為：

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{S} = \frac{V \frac{H}{2}}{\frac{\pi}{64} D^4} = \frac{16VH}{\pi D^3} \quad (2.4)$$

而在高程為 $\frac{H}{2}$ 時之最大應力與任何高程之最大應力相等，即

(2.2)與(2.4)相等，可得

$$\frac{16VH}{\pi D^3} = \frac{32Vx}{\pi d^3} \quad (2.5)$$

則可求得直徑與高程之關係為：

$$d = D \sqrt[3]{\frac{2x}{H}} \quad (2.6)$$

如圖 2.2 所示，所有的單邊圓形鋼棒受到的位移同為 $\Delta/2$ ，其中 Δ 為圓棒形加勁消能器之位移，故每片受側向力 V 為圓棒形加勁消能器受側向力 u 之 $1/N$ 倍，其中 N 為圓形鋼棒數，令鋼棒之彈性模數 E 為常

數，則可利用懸臂梁方法解析每一根單邊圓形鋼棒。

2.2.1 線彈性階段

在線彈性階段，可利用單位虛載重法，推導側力 V 與側位移 Δ 的關係（可參考附錄一）：

$$\frac{\Delta}{2} = \int_0^{\frac{H}{2}} \frac{Mm}{EI} dx = \frac{24VH^3}{5\pi ED^4} \quad (2.7)$$

則

$$V = \frac{5\pi ED^4}{24H^3} \cdot \frac{\Delta}{2} = \frac{5\pi ED^4}{48H^3} \Delta = k_d \Delta \quad (2.8)$$

其中圓形鋼棒之彈性勁度 k_d 為：

$$k_d = \frac{5\pi ED^4}{48H^3} \quad (2.9)$$

當圓形鋼棒外緣(離中性軸最遠處)同時降伏時，其應力為：

$$\sigma_y = \frac{M_y}{S} = \frac{V_y \frac{H}{2}}{\frac{\pi}{32} D^3} = \frac{16 H}{\pi D^3} V_y \quad (2.10)$$

所以，由式(2.10)可得圓形鋼棒之單一鋼棒降伏側力 V_y 為：

$$V_y = \frac{\pi D^3}{16 H} \sigma_y \quad (2.11)$$

整理式(2.8)與式(2.11)，可得圓形鋼棒之降伏側位移 Δ_y 為：

$$\Delta_y = \frac{V_y}{k_d} = \frac{3H^2}{5ED} \sigma_y = \frac{3H^2}{5D} \varepsilon_y \quad (2.12a)$$

$$\Delta = \frac{3H^2}{5D} \varepsilon \quad (2.12b)$$

2.2.2 塑性階段

若圓形鋼棒材料假設為完全彈塑性，當鋼棒進入塑性時，經由斷面塑性分析，可找到側力與位移關係，其公式推導如下所示。

參考圖 2.3 所示，可知斷面彎矩 M ：

$$M = m_{ce} + m_{cp} + m_{te} + m_{tp} \quad (2.13)$$

因為 m_{ce} 等於 m_{te} 且 m_{cp} 等於 m_{tp} ，所以

$$M = 2m_{ce} + 2m_{cp} = 2(m_{ce} + m_{cp}) \quad (2.14)$$

其中 m_{ce} 為斷面受壓且未達降伏區域所造成之彎矩， m_{cp} 為斷面受壓且已達降伏區域所造成之彎矩， m_{te} 為斷面受拉且未達降伏區域所造成之彎矩， m_{tp} 為斷面受拉且已達降伏區域所造成之彎矩；則可求得斷面受壓且已達降伏區域所造成之彎矩 m_{cp} ，及斷面受壓且未達降伏區域所造成之彎矩 m_{ce} ：

$$m_{cp} = \int_{y_e}^D \sigma_y y \sqrt{D^2 - 4y^2} dy = \frac{\sigma_y}{12} (D^2 - 4y_e^2)^{\frac{3}{2}} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} m_{ce} &= \int_0^{y_e} \sigma_y \frac{y^2}{y_e} \sqrt{D^2 - 4y^2} dy \\ &= \frac{\sigma_y}{64y_e} \left[-2D^2 y_e \sqrt{D^2 - 4y_e^2} + 16y_e^3 \sqrt{D^2 - 4y_e^2} \right. \\ &\quad \left. - D^4 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{D^2 - 4y_e^2}}{2y_e} \right) + \frac{\pi D^4}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

其中 y_e 為中性軸到已降伏區域之最短距離，故可求得斷面彎矩 M ：

$$M = \frac{\sigma_y}{32y_e} \left[-2D^2 y_e \sqrt{D^2 - 4y_e^2} + 16y_e^3 \sqrt{D^2 - 4y_e^2} - D^4 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{D^2 - 4y_e^2}}{2y_e} \right) + D^4 \frac{\pi}{2} \right] + \frac{\sigma_y}{6} (D^2 - 4y_e^2)^{\frac{3}{2}} \quad (2.17)$$

由圖 2.2 也可求得固定端彎矩 M ：

$$M = \frac{VH}{2} \quad (2.18)$$

再由圖 2.3 可知 y_e 處之應變 ε ：

$$\varepsilon = \frac{D/2}{y_e} \varepsilon_y \quad (2.19)$$

則可求得 y_e ：

$$y_e = \frac{D\varepsilon_y}{2\varepsilon} \quad (2.20)$$

並求得整支圓形鋼棒之位移(可參考附錄二)：

$$\Delta = \frac{3H^2}{10y_e} \varepsilon_y \quad (2.21)$$

當 $y_e = \frac{D}{2}$ 時，則可求得整支圓形鋼棒之降伏位移 (可參考附錄二)：

$$\Delta_y = \frac{3H^2}{5D} \varepsilon_y \quad (2.22)$$

由式(2.21)及式(2.22)可得整支圓形鋼棒之位移與降伏位移的比值

(簡稱位移比)：

$$\frac{\Delta}{\Delta_y} = \frac{D}{2y_e} \quad (2.23)$$

則可得到中性軸至已降伏區域之最短距離 y_e 與位移比之關係：

$$y_e = \frac{D\Delta_y}{2\Delta} \quad (2.24)$$

並令

$$x = \frac{\Delta}{\Delta_y} \quad (2.25)$$

分別將式(2.10)、(2.18)、(2.24)、(2.25)代入式(2.17)，可得整支圓形鋼棒之側力 V 與降伏側力 V_y 的比值(簡稱側力比)與位移比之關係(可參考附錄三)：

$$\frac{V}{V_y} = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2} \left[5 - 2\left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2 \right] - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta}{\Delta_y}\right) \tan^{-1} \left[\frac{-1}{\left(\frac{\Delta}{\Delta_y}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2}} \right] \quad (2.26)$$

綜合以上所述，即可得到側力與位移的關係為：

$$\frac{V}{V_y} = \frac{\Delta}{\Delta_y} \quad |\Delta| \leq \Delta_y \quad (2.27)$$

$$\frac{V}{V_y} = \left\{ \frac{2}{3\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2} \left[5 - 2\left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2 \right] - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta}{\Delta_y}\right) \tan^{-1} \left[\frac{-1}{\left(\frac{\Delta}{\Delta_y}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta}\right)^2}} \right] \right\} \text{sgn}(d\Delta)$$

$$|\Delta| > \Delta_y \quad (2.28)$$

其中 $\text{sgn}(\bullet) = \frac{\bullet}{|\bullet|}$ 為 (\bullet) 之正負符號。

由以上關係可知，當 $\frac{\Delta}{\Delta_y} = 1$ ，即位移剛達降伏位移 Δ_y ，則

$\frac{V}{V_y} = 1$ ，此時對應的側力為 V_y ；當 $\frac{\Delta}{\Delta_y} \cong \infty$ 時，表示位移趨近於無窮

大，則 $\frac{V_p}{V_y} = \frac{16}{3\pi} \cong 1.698$ ，定義此時極限位移所對應之側力為 V_p ：

$$V_p = \frac{16}{3\pi} V_y \quad (2.29)$$

整理 $\frac{V}{V_y}$ 與 $\frac{\Delta}{\Delta_y}$ 之關係，可得圓棒形加勁消能器之理論 $\frac{V}{V_y}$ 與 $\frac{\Delta}{\Delta_y}$ 關係曲線圖，如圖 2.4 所示。

2.3 圓棒形加勁消能器往覆載重之力與位移關係

若以位移控制方式對圓棒形加勁消能器進行往覆載重試驗，且側位移幅度 $\Delta = d'_3 \Delta_y$ ， $d'_3 > 1$ ，其中 x'_3 為韌性比。在每一回合的往覆位移控制下，圓棒形加勁消能器側力與側位移之正規化關係形成一遲滯迴圈[23][24][25]，如圖 2.5 所示。

為方便計算，以下令 $d = \frac{\Delta}{\Delta_y}$ ， $f = \frac{V}{V_y}$

1. 線彈性段(圖 2.6(1))：

$$0 < d_1 \leq 1, f_1 = d_1$$

2. 塑性段(圖 2.6(3))：

$$d_2 > 1, f_2 = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1-d_2^{-2}} [5-2d_2^{-2}] - \frac{2d_2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{d_2 \sqrt{1-d_2^{-2}}} \right)$$

3. 塑性段極限(圖 2.6(4))：

$$d_3 \gg 1, f_3 \cong 1.698 \text{ (即 } V_p \approx 1.698V_y \text{)}$$

4. 卸載彈性段(圖 2.6(5))：

$$d'_3 - 2 \leq d_4 < d'_3, \text{ 令 } d_4 = d'_3 - 2\lambda, \text{ 其中 } \lambda \text{ 為線彈性回復因子}$$

$$(0 < \lambda \leq 1),$$

$$f_4 = f'_3 - 2f_\lambda$$

$$\text{其中 } f'_3 = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1-d_3'^{-2}} [5 - 2d_3'^{-2}] - \frac{2d_3'}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{d_3' \sqrt{1-d_3'^{-2}}} \right), \quad f_\lambda = \lambda$$

5. 卸載塑性段(圖 2.6 (7)) :

$$-d_3' < d_5 < d_3' - 2, \quad \text{令 } d_5 = d_3' - 2n, \quad \text{其中 } n \text{ 為塑性回復因子}$$

$$(1 < n < d_3')$$

$$f_5 = f'_3 - 2f_n$$

$$\text{其中 } f_n = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1-n^{-2}} [5 - 2n^{-2}] - \frac{2n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{n \sqrt{1-n^{-2}}} \right)$$

6. 反塑性段起點(圖 2.6 (8)) :

$$d_6 = -d_3', \quad f_6 = -f'_3 = \frac{-2}{3\pi} \sqrt{1-d_6'^{-2}} [5 - 2d_6'^{-2}] + \frac{2d_6}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{d_6 \sqrt{1-d_6'^{-2}}} \right)$$

7. 反塑性段 :

$$d_7 < -d_3', \quad f_7 = -f_2 = \frac{-2}{3\pi} \sqrt{1-d_7'^{-2}} [5 - 2d_7'^{-2}] + \frac{2d_7}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{d_7 \sqrt{1-d_7'^{-2}}} \right)$$

8. 反塑性段極限 :

$$d_8 \ll -1, \quad f_8 = -1.698$$

9. 反卸載彈性段 :

$$d_6 < d_9 \leq d_6 + 2, \quad \text{令 } d_9 = d_6 + 2\lambda, \quad \text{其中 } \lambda \text{ 為線彈性回復因子}$$

$$(0 < \lambda \leq 1)$$

$$f_9 = f_6 + 2f_\lambda$$

$$\text{其中 } f_\lambda = \lambda$$

10. 反卸載塑性段 :

$d_6 + 2 < d_{10} \leq d'_3$ ，令 $d_{10} = d_6 + 2n$ ，其中 n 為塑性回復因子

$$(1 < n \leq d'_3)$$

$$f_{10} = f_6 + 2f_n$$

$$\text{其中 } f_n = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1-n^{-2}} [5 - 2n^{-2}] - \frac{2n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{n\sqrt{1-n^{-2}}} \right)$$

11. 單一遲滯迴圈結束。

若於卸載線彈性段過程中突然加載，則會沿原路線返回，再沿塑性段往塑性段極限走。但若於卸載塑性段過程中突然加載，則假設此點為 (d_{5a}, f_{5a}) ，必須記錄卸載塑性段之 n 值為 n_a ，

12. 卸載再加載彈性段（圖 2.6 (15)）：

$d_{5a} < d_{11} \leq d_{5a} + 2$ ，令 $d_{11} = d_{5a} + 2\lambda$ ，其中 λ 為線彈性回復因子

$$(0 < \lambda \leq 1)$$

$$f_{11} = f_{5a} + 2f_\lambda$$

$$\text{其中 } f_\lambda = \lambda$$

13. 卸載再加載塑性段（圖 2.6 (16)）：

$d_{5a} + 2 < d_{12} \leq d'_3$ ，令 $d_{12} = d_{5a} + 2n$ ，其中 n 為塑性回復因子

$$(1 < n \leq n_a)$$

$$f_{12} = f_{5a} + 2f_n$$

$$\text{其中 } f_n = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1-n^{-2}} [5 - 2n^{-2}] - \frac{2n}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{n\sqrt{1-n^{-2}}} \right)$$

14. 卸載再加載遲滯迴圈結束，再沿塑性段往塑性段極限走。

2.4 等效彈塑性

由於材料試驗之曲線並非完全彈塑性，因此採用等能量之觀念，來推導出等效彈塑性理論之降伏應力 σ_y ，簡稱等效降伏應力。由式(2.11)圓棒形加勁消能器之單一鋼棒降伏側力 V_y 及式(2.12)圓棒形加勁消能器之降伏側位移 Δ_y 可得：

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_y} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (2.30)$$

其中降伏應變為：

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.31)$$

則最大應變為：

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_y \Delta_{\max}}{\Delta_y} = \frac{\sigma_y \Delta_{\max}}{E \frac{3H^2}{5ED} \sigma_y} = \frac{\Delta_{\max}}{E \frac{3H^2}{5ED}} = \frac{5D}{3H^2} \Delta_{\max} \quad (2.32)$$

並根據圖 2.7 之實驗示意圖計算出能量面積為：

$$E_{total} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i) \quad (2.33)$$

再由如圖 2.8 之理論曲線，假設理論之能量面積與材料試驗之能量面積相同：

$$\begin{aligned} E_{total} &= \frac{\sigma_y}{2} [(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_y) + \varepsilon_{\max}] \\ &= \frac{\sigma_y}{2} \left[\frac{10D}{3H^2} \Delta_{\max} - \frac{\sigma_y}{E} \right] \\ &= \frac{5\Delta_{\max}}{3H^2} \sigma_y - \frac{\sigma_y^2}{2E} \end{aligned} \quad (2.34)$$

即可求得等效降伏應力 σ_y 之二次方程式：

$$\sigma_y^2 - \frac{10ED}{3H^2} \Delta_{\max} \sigma_y + 2EE_{total} = 0 \quad (2.35)$$

進而求得等效降伏應力 σ_y 為：

$$\sigma_y = \frac{5ED}{3H^2} \Delta_{\max} - \sqrt{\left(\frac{5ED}{3H^2} \Delta_{\max}\right)^2 - 2EE_{total}} \quad (2.36)$$

若不考慮鋼棒尺寸，則可利用最大應變與等效能量面積，經由理論彈

性模數求得等效降伏應力 σ_y 為：

$$\sigma_y = E\varepsilon_{\max} - E\sqrt{\varepsilon_{\max}^2 - 2\frac{E_{total}}{E}} = E\left(\varepsilon_{\max} - \sqrt{\varepsilon_{\max}^2 - 2\frac{E_{total}}{E}}\right) \quad (2.37)$$



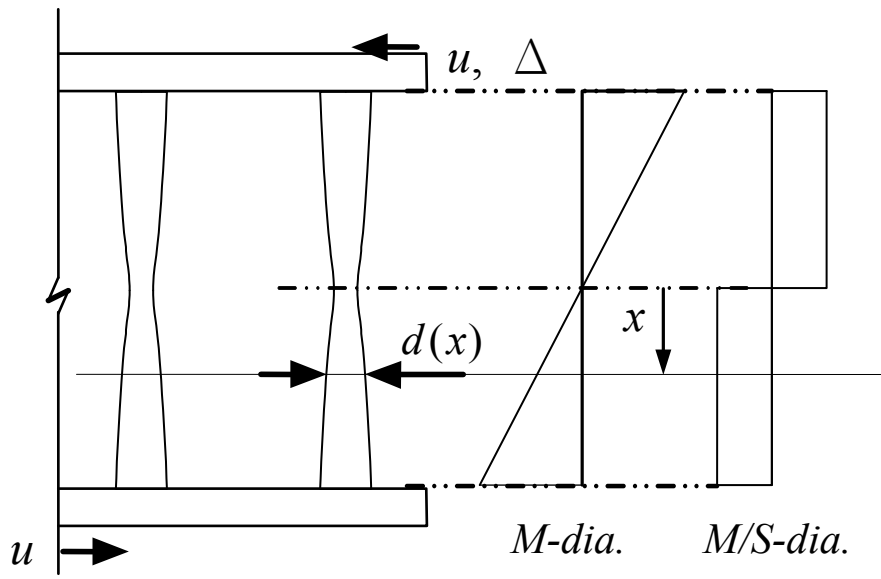


圖 2.1 圓棒形加勁消能器之彎矩及應力分佈圖

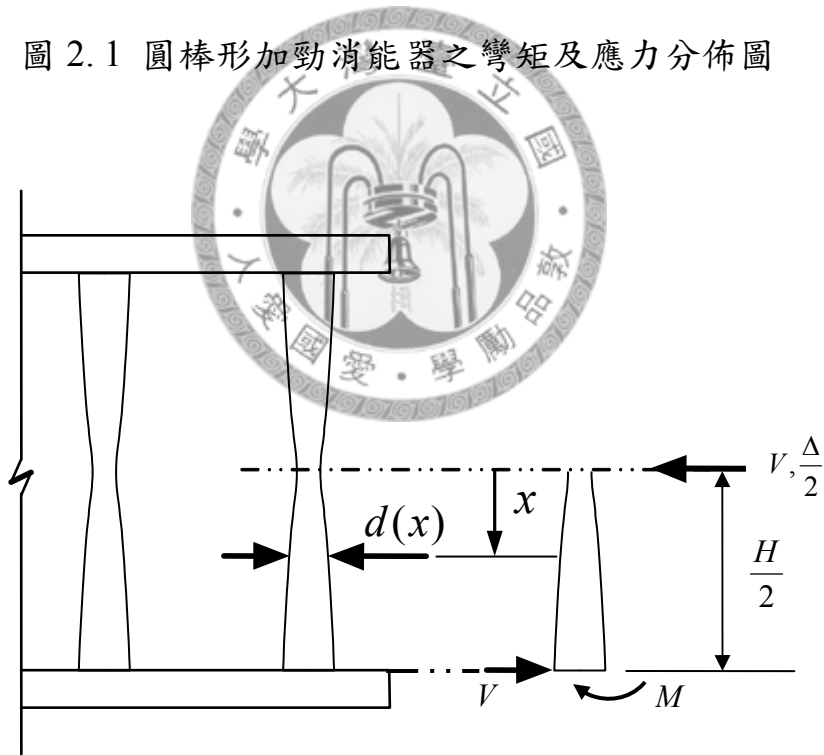


圖 2.2 圓棒形加勁消能器受力示意圖

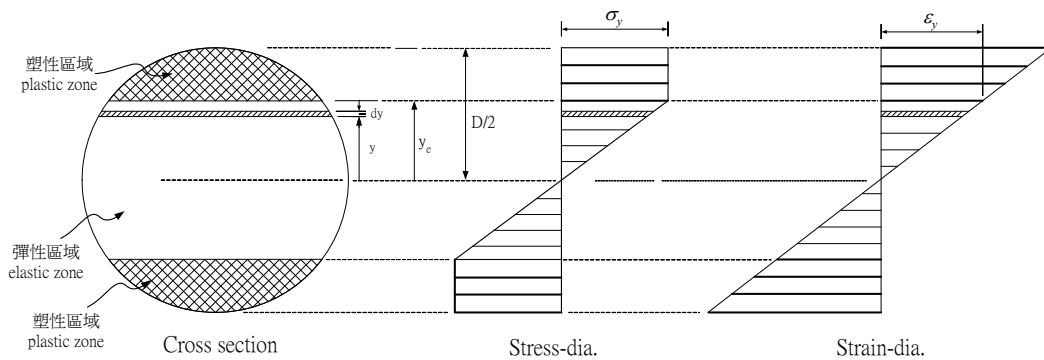


圖 2.3 圓形鋼棒斷面應力及應變示意圖

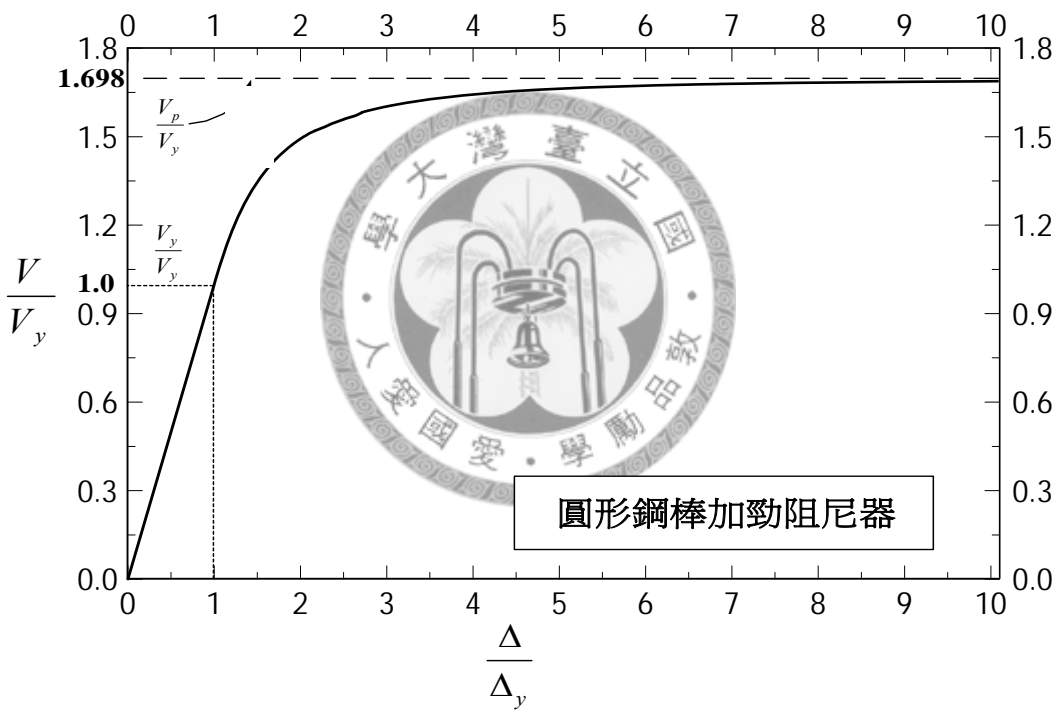


圖 2.4 圓棒形加勁消能器之理論 $\frac{V}{V_y}$ 與 $\frac{\Delta}{\Delta_y}$ 曲線圖

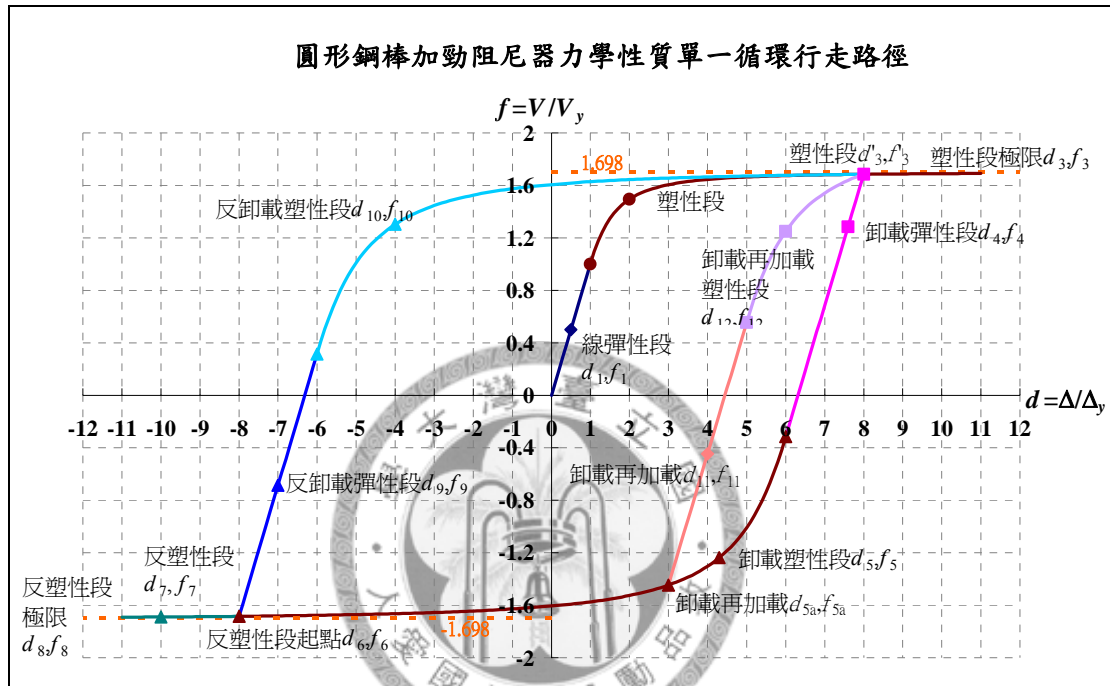


圖 2.5 圓棒形加勁消能器力學性質單一循環行走路徑

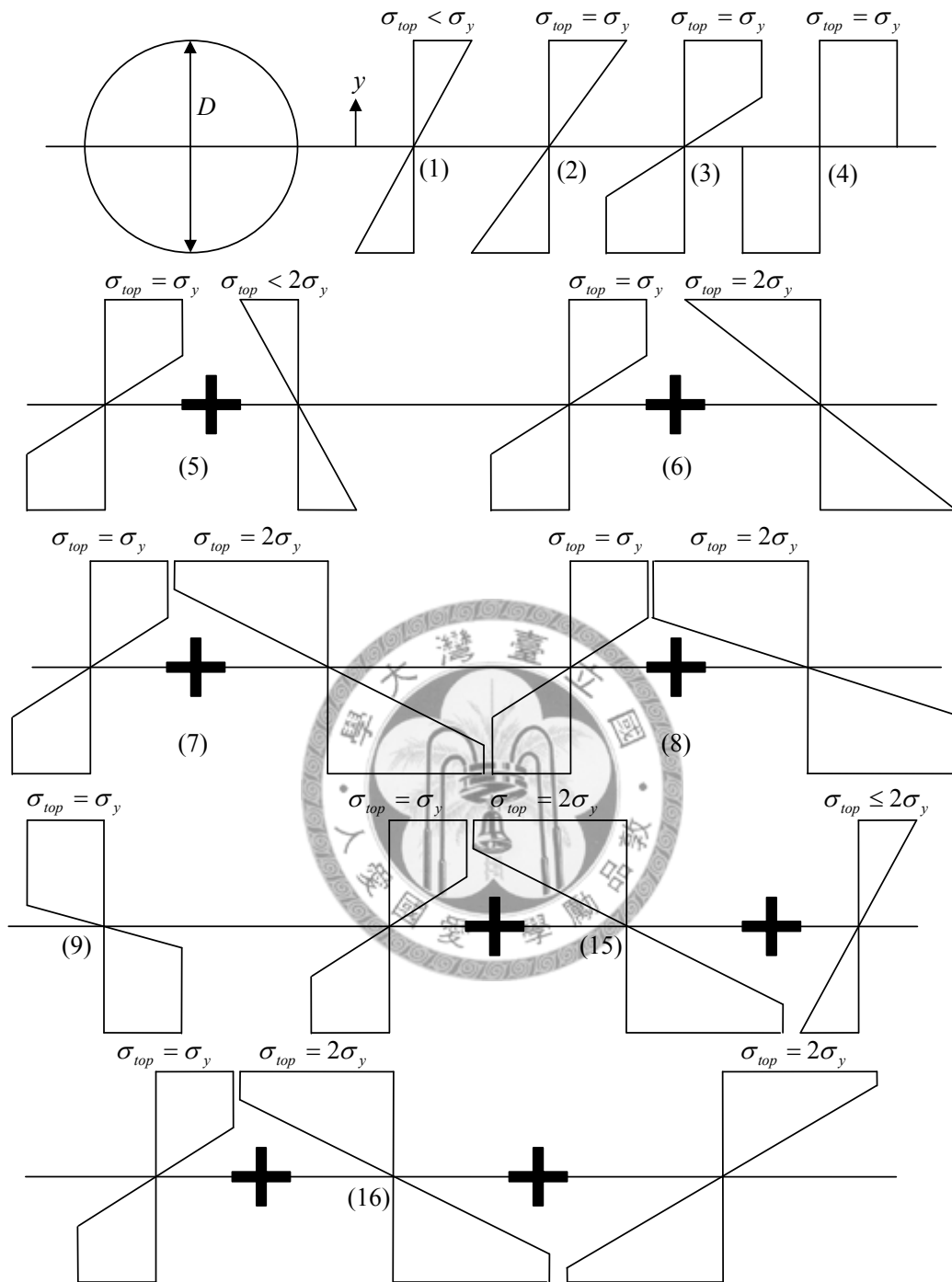


圖 2.6 圓棒形加勁消能器應力分佈圖

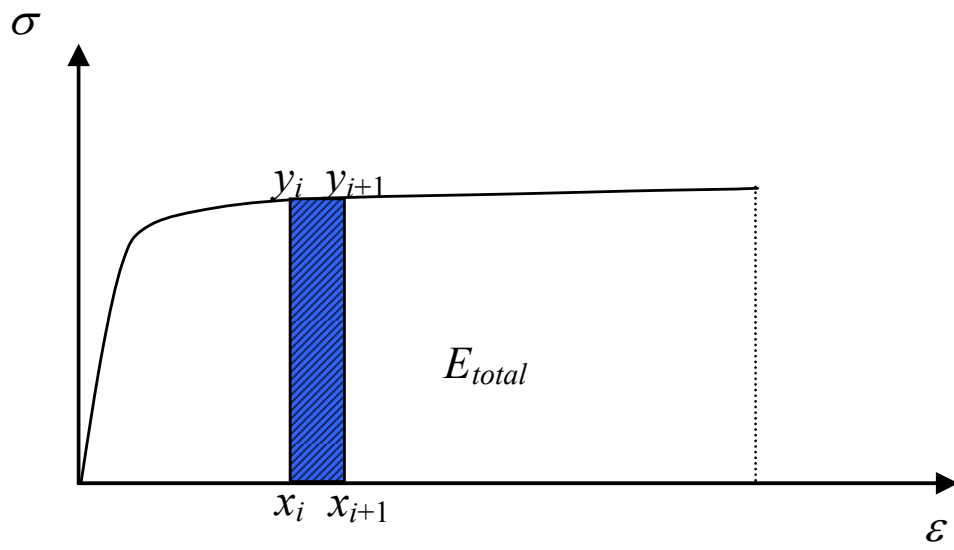


圖 2.7 材料試驗示意圖

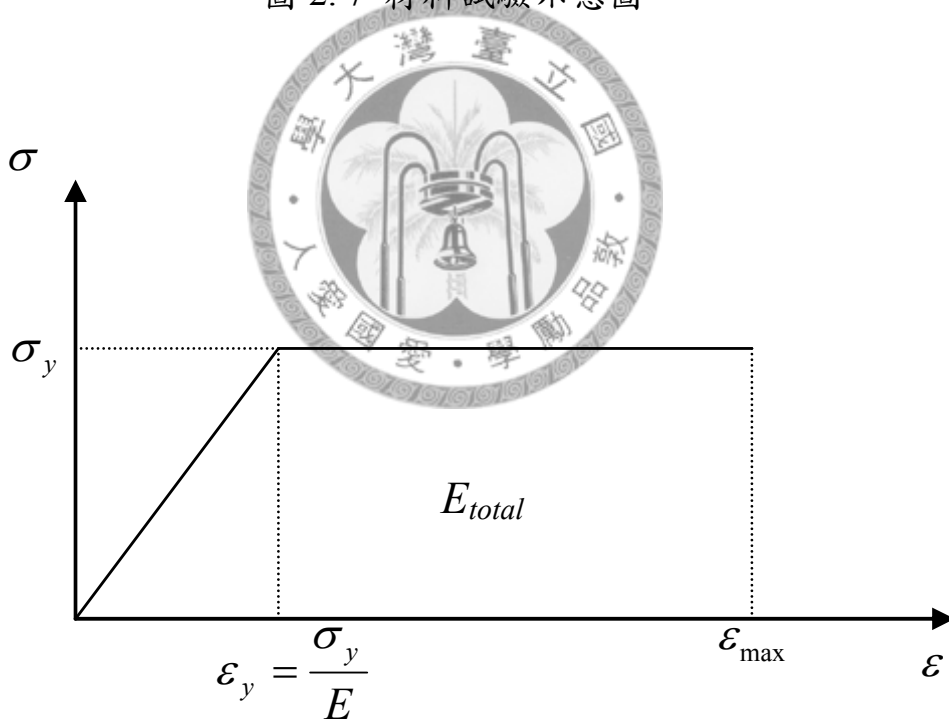


圖 2.8 理論示意圖

第三章 試體規畫設計

3.1 實驗試體規畫

本試驗的加勁消能器是以圓棒形加勁阻尼器為主。採用 S304 之鋼材、直徑為 22mm 之鋼棒，進行 CNC 加工，並以全滲透鐸方式與端板相連接。由前人研究報告[26]可知試驗後破壞的情況往往是在鐸接處附近，鐸接的地方為幾何斷面改變處，容易產生應力集中，本試驗採用全滲透鐸的接合設計概念，可避免於鐸接處之細縫開裂。

最後，圓棒形加勁消能器共規劃兩組。分別為直徑 20mm 高度 100mm 圓棒形加勁消能器(D20H100)試體；直徑 20mm 高度 80mm 圓棒形加勁消能器(D20H80)試體。

3.2 實驗試體設計

本試驗在國家地震工程研究中心進行，為考量研究經費，而採用中心現成的元件測試構架進行試驗。

達到較好的消能效果，直徑與高度比例必須超過 1:5，為了比較消能效果，設計消能元件的尺寸，直徑與高度比例分別為 1:4 及 1:5，且應用在工程實尺寸設計可行性，避免消能元件佔據結構物過大空間，消能元件的高度不能超過樓層高度的十五分之一，如樓層高度為 3m 則不能超過 20cm，並為了配合中心現成的振動台構架可以安裝試驗試體，消能元件又可參與消能，消能元件的降伏強度不能太高。最

後決定，圓棒形加勁消能器之圓棒其直徑為 20mm、高度為 100mm，並依此命名為 D20H100，另外一組圓棒形加勁消能器之圓棒其直徑為 20mm、高度為 80mm，並依此命名為 D20H80，以進行單獨試驗。為了了解不鏽鋼棒之材料性質，因此另外設計一組圓棒拉力試驗及二組圓棒拉壓試驗，皆採用直徑 22mm 之 S304 不鏽鋼棒，並採用 CNS 金屬材料拉伸試驗試片規範，由 2 號試片可知對於對邊距離 25mm 以下之棒狀材料，不需做任何加工，設計圖如圖 3.1，拉力試驗結果如圖 3.2，由於應力-應變關係圖上並無明顯的降伏點，對於此類鋼材，降伏應力的取得通常在 0.2% 應變值處作一與彈性應力應變圖平行之直線段，此直線段與應力應變圖相交處即定義為此鋼材之降伏應力，此為橫距法[27]，由材料試驗可以此方法求得降伏應力為 557.7MPa，並可設計出圓棒形加勁消能器設計資料如表 3.1；而對於拉壓試驗，第一支拉壓試驗結果如圖 3.3，第二支拉壓試驗結果如圖 3.4。並利用 2.4 節之等效彈塑性及拉力試驗結果，可求得最大應變 ε_{\max} 所對應之等效降伏應力 σ_y ，如表 4.3a 至表 4.3f。

(1) D20H100 消能元件

D20H100 消能元件，即所謂的圓棒形加勁消能器，其鋼棒材料採用 S304 之不鏽鋼。消能鋼棒曲線則由(2.6)式已知長度 $H=100\text{mm}$ ，直徑 $D=20\text{mm}$ ，給予高程 x 可求出任一高程所對應之直徑 d ，即可設計出

此消能鋼棒之曲線；而在消能鋼棒中間段頸縮處為了避免應力集中及不被剪斷，則以兩倍安全因子的降伏剪力設計：

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{V_y F_s 4\sqrt{3}}{\sigma_y \pi}} \quad (3.1)$$

其中 F_s 為安全因子，設計頸縮處最小直徑為 8.32mm，並將原曲線之曲率大於千分之五的中間段修正，使用曲率小於千分之五的曲線及頸縮處最小直徑迴歸出新的曲線公式，如圖 3.5 及表 3.4。消能鋼棒上下端板厚度則以兩倍安全因子的極限彎矩，設計厚度為 15mm，上下端板尺寸為 PL 250×200×15 mm，共需二片，上下背墊板尺寸為 PL 40×40×5 mm，共需二片，採用 M20 的 A325 高拉力螺栓來固定端板，共需一組，端板、消能鋼棒及背墊板之間則以全滲透鐸相接。而對於元件測試之試體，消能鋼棒上下端板尺寸為 PL 250×250×15 mm，共需二片，端板、消能鋼棒及背墊板之間則也以全滲透鐸相接。D20H100 之元件測試試體設計圖如圖 3.6 所示。

(2) D20H80 消能元件

D20H80 消能元件，除了在消能鋼棒中間段頸縮處為了避免應力集中，設計頸縮處最小直徑為 9.31mm，並將原曲線之曲率大於千分之五的中間段修正，使用曲率小於千分之五的曲線及頸縮處最小直徑迴歸出新的曲線公式，如圖 3.7 及表 3.3。而對於元件測試之試體，D20H80 端板、背墊版及螺栓之尺寸規格或材料性質皆與 D20H100 之元件測試

試體相同，因此 D20H80 之元件測試試體設計圖如圖 3.8 所示。

3.3 元件測試構架

為試驗經費之考量，試驗鋼架不另製作，直接採用國家地震工程研究中心已有的試驗設備，其架設配置圖如圖 3.13 所示，元件測試構架可參考圖 3.15，主要佈置有施力系統佈置及量測系統佈置，分別詳細說明如下。

3.3.1 施力系統佈置

此試驗之施力系統包括：元件測試構架一組、油壓致動器三具、油壓泵三具，其說明如下：

(1) 元件測試構架：單獨測試加勁消能器之性能，此試驗採位移控制反覆載重，係控制水平向的反覆位移量，最後可得水平位移與側力的關係曲線。元件測試構架有搭配一具水平向油壓致動器及兩具垂直向油壓致動器，除了可提供水平方向位移控制反覆載重之外，還可由垂直向的兩具油壓致動器，以位移控制，來控制消能元件垂直向的位移或軸力，其配置圖可參考圖 3.13。

(2) 油壓致動器：為驅動元件測試構架之控制外力。共使用一具水平向油壓致動器及兩具垂直向油壓致動器，水平向油壓致動器作為側力加載之用；垂直向油壓致動器可控制垂直向的位移或軸力，以達到

實驗要求。目前配置的三具油壓致動器皆為高性能動態油壓致動器，亦可施作似靜態之位移控制反覆載重試驗，其反應頻率為 1024Hz，最大出力為±50 ton，最大衝程為±500 mm，製造商為 MTS。

(3) 油壓泵：為提供油壓致動器之動力，每具油壓致動器必須配置一具油壓泵，其液壓油之工作壓力為 20.6 MPa (3000 psi)。

3.3.2 試驗程序

本試驗反覆載重試驗，其位移反覆載重歷時如圖 3.14。所示。定義 Drift Ratio 為 $\frac{\Delta}{H}$ ，其中 Δ 為試體水平位移量(mm)；H 為受力高程 1.6(m)。藉由中間一具油壓致動器之位移量(mm)以及三具油壓致動器之載重總合(kN)，可得到試體之位移-側力曲線圖，以進一步了解構架在受到模擬地震力之下，結構行為與破壞模式。

3.3.3 量測系統

元件測試量測系統包括位移計二支；量測儀器之說明如下：位移計：為了能實際量測到元件測試試驗中加勁消能器上、下方之相對位移，因此也於元件測試試體上、下方各裝一支位移計，此位移計最大量測範圍為±100 mm

3.4 數值分析試體規劃

因為實驗必須配合振動台構架高度因此設計 D20H100 及 D20H80，但是在實用上必須要配合樓房高度，因此我們以消能元件的高度不能超過樓層高度的十五分之一的原則另外去設計四組試體以期將來可供實務上參考。分別以樓層高度 2.6m、3m、3.8m、4.5m 做設計，分別為 D50H175(直徑為 50mm、高度為 175mm)、D50H200(直徑為 50mm、高度為 200mm)、D50H250(直徑為 50mm、高度為 250mm)、D50H300(直徑為 50mm、高度為 300mm)。

四組試體由消能鋼棒曲線則由 (2.6)式設計，消能鋼棒中間段頸縮處為了避免應力集中及不被剪斷，則以兩倍安全因子的降伏剪力設計 (3.1)式，並將原曲線之曲率大於千分之五的中間段修正，使用曲率小於千分之五的曲線及頸縮處最小直徑迴歸出新的曲線公式，如圖 3.5~12 及表 3.3~表 3.8，另提供其它相關消能器設計值參考數據，如表 3.9~14，以期將來工程上設計參考使用。

表 3.1 圓棒形加勁消能器設計資料

採用材料： 不銹鋼 S304			
鋼棒直徑 D	(mm)	20	20
鋼棒高度 H	(mm)	80	100
降伏應力 σ_y	(MPa)	557.7	557.7
彈性模數 E	(GPa)	200	200
降伏剪力 V_y	(kN)	10.95	8.76
極限剪力 V_p	(kN)	18.59	14.87
降伏位移 Δ_y	(mm)	0.535	0.836
勁度 K_d	(kN/mm)	20.47	10.48

表 3.2a 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
1.06E-05	32	0.002708	38.698	0.0060072	52.412	0.0095387	57.847
7.92E-05	32	0.0027133	38.735	0.0061022	52.629	0.0095545	57.864
8.45E-05	32	0.0027819	39.215	0.0061128	52.652	0.0096179	57.928
0.00015308	32	0.00284	39.613	0.0062078	52.863	0.0096443	57.954
0.00023227	32	0.0028452	39.648	0.0063134	53.09	0.0097498	58.059
0.00031145	32	0.0029033	40.037	0.0063978	53.267	0.0098449	58.152
0.00035895	32	0.0029086	40.072	0.0064823	53.44	0.0098607	58.167
0.00036423	32	0.0029772	40.52	0.0064876	53.45	0.0098765	58.182
0.00043813	32	0.0029825	40.554	0.0064981	53.471	0.009961	58.262
0.0004962	32	0.0030617	41.056	0.0065773	53.629	0.0099663	58.267
0.00056483	32	0.0031197	41.415	0.0066776	53.824	0.010061	58.356
0.0005701	32	0.0032042	41.925	0.0067779	54.013	0.010177	58.463
0.00062289	32	0.0032781	42.36	0.0068624	54.169	0.010183	58.468
0.00063345	32	0.003352	42.785	0.0068782	54.198	0.010304	58.578
0.00070207	32	0.0034365	43.258	0.0068835	54.208	0.010404	58.667
0.00076014	32	0.0034998	43.602	0.0069732	54.369	0.01051	58.759
0.0007707	32	0.0035895	44.074	0.007063	54.528	0.010515	58.763
0.00083404	32	0.0036687	44.473	0.0070841	54.564	0.010521	58.768
0.00089739	32	0.0037479	44.858	0.0071738	54.719	0.010631	58.862
0.00090266	32	0.003806	45.135	0.0072688	54.879	0.010637	58.867
0.00096073	32	0.0038852	45.502	0.0073691	55.045	0.010732	58.946
0.0010241	32	0.003901	45.574	0.0073797	55.062	0.010832	59.029
0.0010874	32	0.0039749	45.906	0.0074694	55.207	0.010948	59.122
0.0011508	32	0.0040488	46.229	0.0074905	55.24	0.011059	59.21
0.0012088	32	0.0041438	46.63	0.0075855	55.389	0.011165	59.292
0.0012775	32	0.0041491	46.651	0.0076647	55.511	0.011275	59.376
0.0013355	32	0.0041649	46.717	0.00767	55.519	0.011376	59.451
0.0013936	32	0.0042283	46.976	0.0076806	55.535	0.011471	59.521
0.0013989	32	0.0042336	46.997	0.0076858	55.543	0.011571	59.593
0.0014622	32	0.0043075	47.293	0.0076964	55.559	0.011582	59.601
0.0015361	32	0.0043866	47.601	0.0077122	55.582	0.011703	59.687
0.0015942	32	0.0044764	47.94	0.0077809	55.684	0.011814	59.765
0.001647	32	0.0044869	47.979	0.0078917	55.846	0.011914	59.834
0.0016575	32	0.0045608	48.249	0.0079815	55.974	0.012036	59.917
0.0017156	32	0.0046506	48.568	0.0079867	55.981	0.012146	59.992
0.0017209	32	0.0047456	48.895	0.007992	55.988	0.012252	60.061
0.0017842	32	0.0048406	49.212	0.0080923	56.128	0.012342	60.12
0.0018317	32	0.0049145	49.453	0.0080976	56.136	0.012347	60.123
0.001837	32	0.0049251	49.487	0.0081873	56.258	0.012363	60.134
0.0018423	32	0.0049356	49.52	0.0082876	56.392	0.012468	60.201
0.0019056	32.477	0.004999	49.719	0.0083087	56.42	0.012479	60.208
0.0019742	33.018	0.0050095	49.752	0.0083985	56.536	0.01259	60.277
0.0020323	33.485	0.0050887	49.995	0.0085041	56.671	0.012706	60.349
0.0020376	33.527	0.0050993	50.026	0.0086043	56.796	0.012812	60.413
0.0020429	33.569	0.005189	50.292	0.0087152	56.931	0.012933	60.485
0.0021115	34.12	0.005284	50.565	0.0088155	57.05	0.013033	60.543
0.0021748	34.629	0.0053632	50.786	0.0089263	57.18	0.013054	60.556
0.0022329	35.098	0.0053685	50.8	0.0090055	57.271	0.013165	60.619
0.0022435	35.183	0.005379	50.829	0.0090266	57.295	0.01317	60.622
0.0023121	35.726	0.0054529	51.03	0.0091322	57.413	0.013287	60.688
0.0023807	36.264	0.005548	51.283	0.0091428	57.425	0.013292	60.691
0.0023913	36.346	0.0056535	51.556	0.0092272	57.518	0.013403	60.753
0.0024599	36.866	0.0057538	51.807	0.0092378	57.53	0.013514	60.814
0.002518	37.304	0.005833	52.001	0.0092431	57.536	0.013614	60.868
0.002576	37.739	0.0058383	52.014	0.0093381	57.638	0.01363	60.877
0.0026446	38.244	0.0059227	52.215	0.0094331	57.738	0.013741	60.937

表 3.2b 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
0.013841	60.99	0.017673	62.611	0.022049	63.855	0.026135	64.706
0.013857	60.998	0.017679	62.613	0.022155	63.88	0.026241	64.725
0.013957	61.051	0.017795	62.652	0.022271	63.907	0.02633	64.741
0.014068	61.108	0.0179	62.688	0.022366	63.929	0.026341	64.742
0.014184	61.167	0.018016	62.727	0.022371	63.931	0.026346	64.743
0.014189	61.169	0.018127	62.763	0.022387	63.934	0.026436	64.759
0.014195	61.172	0.018233	62.798	0.022392	63.936	0.026446	64.761
0.014305	61.227	0.018354	62.837	0.022403	63.938	0.026547	64.779
0.014422	61.284	0.018449	62.867	0.022414	63.94	0.026652	64.798
0.014527	61.336	0.018544	62.897	0.022503	63.961	0.026753	64.815
0.014633	61.386	0.01856	62.902	0.022604	63.984	0.026879	64.838
0.014638	61.389	0.018666	62.935	0.022614	63.987	0.02698	64.855
0.014754	61.443	0.018782	62.971	0.02272	64.011	0.02708	64.873
0.014854	61.49	0.018877	63	0.022831	64.036	0.027085	64.874
0.014881	61.502	0.019019	63.043	0.022836	64.037	0.027175	64.889
0.014976	61.546	0.019114	63.071	0.022941	64.061	0.02718	64.89
0.015066	61.586	0.019209	63.1	0.023036	64.082	0.027265	64.905
0.015071	61.589	0.019325	63.134	0.023047	64.084	0.027381	64.925
0.015097	61.601	0.019431	63.166	0.023131	64.103	0.027481	64.942
0.015213	61.653	0.019558	63.203	0.023147	64.106	0.02756	64.955
0.015303	61.692	0.019658	63.232	0.023237	64.126	0.027581	64.959
0.015319	61.699	0.019764	63.262	0.023358	64.153	0.027661	64.972
0.015324	61.701	0.019785	63.268	0.023475	64.178	0.027682	64.975
0.015424	61.745	0.01988	63.296	0.023585	64.202	0.027761	64.989
0.015435	61.75	0.019996	63.328	0.023591	64.203	0.027766	64.989
0.015451	61.756	0.020086	63.353	0.023596	64.204	0.027782	64.992
0.015535	61.793	0.020196	63.384	0.023686	64.223	0.027866	65.006
0.015651	61.842	0.020202	63.385	0.023775	64.242	0.027888	65.009
0.015762	61.888	0.020207	63.387	0.023791	64.245	0.027977	65.024
0.015868	61.932	0.020218	63.39	0.023913	64.271	0.028078	65.04
0.015873	61.934	0.020291	63.41	0.024008	64.291	0.028083	65.041
0.015989	61.982	0.020302	63.413	0.024124	64.315	0.028194	65.059
0.01609	62.022	0.020408	63.441	0.024219	64.335	0.028283	65.073
0.016105	62.029	0.020418	63.444	0.024335	64.358	0.028384	65.089
0.0162	62.066	0.020534	63.474	0.024435	64.379	0.028479	65.104
0.016338	62.12	0.020635	63.501	0.024541	64.4	0.028579	65.12
0.016427	62.155	0.02064	63.502	0.024662	64.425	0.028584	65.121
0.016433	62.157	0.020735	63.527	0.024757	64.443	0.028669	65.134
0.016449	62.164	0.020846	63.556	0.024868	64.465	0.028785	65.153
0.016554	62.204	0.020862	63.56	0.024879	64.467	0.028875	65.167
0.016665	62.247	0.020957	63.584	0.024984	64.488	0.02897	65.181
0.016676	62.251	0.021057	63.61	0.02499	64.489	0.029065	65.196
0.016797	62.296	0.021062	63.612	0.025079	64.507	0.02916	65.211
0.016897	62.334	0.021078	63.616	0.025201	64.53	0.02926	65.226
0.016992	62.369	0.021178	63.641	0.025317	64.553	0.029265	65.227
0.016998	62.371	0.021279	63.666	0.025412	64.571	0.029355	65.24
0.017008	62.375	0.021379	63.692	0.025523	64.592	0.029461	65.256
0.017124	62.417	0.021395	63.696	0.025618	64.61	0.029561	65.271
0.017235	62.457	0.021506	63.723	0.025723	64.63	0.029661	65.286
0.01724	62.459	0.021595	63.745	0.025818	64.648	0.029751	65.299
0.01733	62.491	0.021616	63.75	0.025824	64.649	0.029851	65.314
0.017351	62.499	0.021717	63.775	0.025834	64.65	0.02993	65.326
0.017452	62.534	0.021833	63.803	0.025929	64.668	0.029941	65.328
0.017547	62.567	0.021843	63.806	0.026014	64.683	0.03002	65.339
0.017552	62.569	0.021854	63.808	0.026019	64.684	0.030041	65.342
0.017668	62.609	0.021949	63.831	0.026035	64.687	0.030126	65.355

表 3.2c 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
0.030226	65.369	0.033156	65.762	0.036682	66.175	0.039659	66.482
0.030321	65.383	0.033251	65.774	0.036687	66.175	0.039675	66.483
0.030411	65.396	0.03333	65.784	0.036772	66.184	0.039749	66.49
0.030421	65.397	0.03342	65.795	0.036851	66.193	0.039759	66.491
0.030427	65.398	0.033499	65.805	0.036935	66.202	0.039828	66.498
0.030495	65.408	0.033589	65.816	0.03703	66.212	0.039902	66.505
0.030501	65.409	0.033599	65.818	0.037094	66.219	0.039981	66.513
0.030511	65.41	0.033678	65.827	0.037178	66.228	0.039992	66.514
0.030596	65.422	0.033689	65.829	0.037247	66.235	0.039997	66.514
0.030691	65.436	0.033773	65.839	0.037326	66.244	0.040071	66.521
0.030775	65.448	0.033868	65.851	0.037347	66.246	0.040081	66.522
0.03078	65.448	0.033884	65.853	0.037363	66.248	0.04015	66.529
0.030796	65.451	0.033948	65.86	0.037368	66.248	0.040224	66.536
0.030875	65.462	0.034037	65.871	0.037421	66.254	0.04024	66.537
0.030949	65.472	0.034127	65.882	0.037426	66.254	0.040293	66.543
0.030955	65.473	0.034212	65.892	0.037505	66.263	0.040308	66.544
0.03096	65.473	0.034296	65.902	0.037511	66.263	0.040398	66.553
0.03105	65.486	0.034402	65.915	0.03759	66.271	0.040409	66.554
0.03106	65.487	0.03447	65.923	0.037674	66.28	0.040483	66.561
0.031123	65.496	0.034486	65.925	0.037685	66.281	0.040562	66.568
0.031134	65.497	0.034576	65.936	0.03769	66.282	0.040646	66.576
0.031224	65.509	0.034655	65.945	0.037748	66.288	0.040725	66.584
0.031313	65.522	0.034739	65.955	0.037764	66.29	0.040805	66.592
0.031403	65.534	0.03475	65.956	0.037843	66.298	0.040894	66.6
0.031488	65.545	0.034829	65.966	0.037928	66.307	0.0409	66.601
0.031493	65.546	0.034834	65.966	0.038007	66.315	0.040963	66.606
0.031567	65.556	0.03484	65.967	0.038091	66.324	0.040968	66.607
0.031572	65.557	0.034914	65.976	0.038097	66.324	0.041053	66.615
0.031577	65.557	0.034924	65.977	0.038176	66.332	0.041137	66.623
0.031651	65.567	0.035009	65.987	0.038255	66.34	0.041222	66.631
0.031741	65.579	0.035093	65.997	0.03826	66.341	0.041301	66.638
0.031746	65.58	0.035098	65.997	0.038339	66.349	0.04138	66.645
0.031757	65.582	0.035183	66.007	0.03835	66.35	0.041385	66.646
0.031841	65.593	0.035273	66.017	0.038424	66.358	0.041465	66.653
0.031847	65.594	0.035278	66.018	0.038508	66.366	0.041538	66.66
0.03191	65.602	0.035352	66.026	0.038588	66.375	0.041618	66.667
0.031921	65.603	0.035441	66.037	0.038598	66.376	0.041697	66.674
0.032016	65.616	0.035521	66.046	0.038683	66.384	0.041771	66.681
0.032026	65.617	0.035595	66.054	0.038757	66.392	0.041781	66.682
0.032037	65.619	0.035605	66.055	0.038762	66.392	0.041839	66.687
0.032042	65.619	0.035679	66.064	0.038841	66.4	0.041845	66.688
0.032137	65.632	0.035684	66.064	0.038941	66.41	0.04185	66.688
0.032206	65.641	0.035763	66.073	0.03901	66.417	0.04186	66.689
0.032274	65.65	0.035848	66.083	0.03902	66.418	0.041924	66.695
0.032364	65.662	0.035922	66.091	0.039094	66.426	0.04194	66.696
0.032369	65.662	0.035927	66.091	0.039174	66.434	0.042003	66.702
0.032448	65.672	0.035932	66.092	0.039184	66.435	0.042019	66.703
0.032512	65.681	0.036012	66.101	0.039269	66.443	0.042077	66.709
0.032533	65.683	0.036101	66.111	0.039342	66.451	0.042082	66.709
0.032623	65.695	0.036191	66.12	0.039348	66.451	0.042087	66.709
0.032633	65.696	0.03626	66.128	0.039416	66.458	0.042151	66.715
0.032723	65.707	0.036265	66.129	0.039427	66.459	0.042161	66.716
0.032802	65.717	0.036355	66.139	0.039432	66.459	0.04223	66.722
0.032897	65.73	0.036429	66.147	0.039506	66.467	0.042309	66.729
0.032976	65.74	0.036513	66.156	0.039511	66.467	0.04232	66.73
0.033066	65.751	0.036592	66.165	0.03958	66.474	0.042399	66.737

表 3.2d 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
0.042404	66.738	0.045186	66.976	0.048216	67.217	0.051325	67.447
0.042467	66.743	0.04526	66.982	0.048295	67.223	0.051394	67.451
0.042557	66.751	0.045265	66.983	0.04838	67.23	0.051399	67.452
0.042562	66.752	0.045339	66.989	0.048385	67.23	0.051484	67.458
0.042631	66.758	0.045344	66.989	0.048459	67.236	0.051489	67.458
0.042705	66.764	0.045424	66.996	0.048538	67.242	0.051552	67.463
0.042716	66.765	0.045503	67.003	0.048628	67.248	0.051568	67.464
0.042784	66.771	0.045577	67.009	0.048702	67.254	0.051658	67.47
0.042795	66.772	0.045656	67.015	0.048797	67.261	0.051663	67.471
0.042869	66.779	0.045661	67.016	0.048876	67.267	0.051737	67.476
0.042943	66.785	0.045666	67.016	0.048939	67.272	0.051742	67.476
0.043022	66.792	0.04573	67.021	0.048955	67.273	0.051816	67.481
0.043027	66.792	0.045814	67.028	0.049034	67.279	0.05189	67.487
0.043032	66.793	0.045878	67.033	0.049113	67.285	0.051901	67.487
0.043106	66.799	0.045888	67.034	0.049124	67.286	0.051959	67.491
0.043117	66.8	0.045893	67.034	0.049203	67.292	0.051969	67.492
0.043191	66.807	0.045967	67.04	0.049288	67.298	0.05198	67.493
0.043265	66.813	0.046041	67.046	0.049362	67.304	0.052048	67.498
0.043349	66.821	0.046046	67.046	0.049372	67.304	0.052128	67.503
0.043354	66.821	0.046052	67.047	0.049446	67.31	0.052143	67.504
0.04336	66.822	0.046136	67.054	0.04953	67.316	0.052228	67.51
0.043365	66.822	0.046152	67.055	0.049615	67.322	0.052312	67.516
0.043439	66.828	0.046163	67.056	0.049689	67.328	0.052376	67.52
0.043513	66.835	0.046215	67.06	0.049705	67.329	0.052392	67.521
0.043518	66.835	0.046295	67.066	0.049779	67.335	0.052476	67.527
0.043592	66.842	0.046379	67.073	0.049784	67.335	0.052481	67.528
0.043687	66.85	0.046448	67.079	0.049858	67.34	0.05256	67.533
0.043761	66.857	0.046537	67.086	0.049868	67.341	0.052566	67.533
0.043777	66.858	0.046543	67.086	0.049942	67.347	0.052634	67.538
0.043845	66.864	0.046548	67.087	0.050011	67.352	0.05265	67.539
0.043851	66.864	0.046601	67.091	0.050095	67.358	0.052708	67.543
0.043856	66.865	0.046611	67.092	0.050111	67.359	0.052782	67.548
0.043924	66.871	0.046622	67.093	0.050174	67.364	0.052798	67.55
0.044004	66.878	0.046696	67.099	0.050185	67.365	0.052867	67.554
0.044009	66.878	0.04677	67.105	0.05019	67.365	0.052872	67.555
0.044067	66.883	0.046849	67.111	0.050254	67.37	0.052882	67.555
0.044077	66.884	0.046859	67.112	0.050275	67.371	0.052962	67.561
0.044136	66.889	0.046933	67.117	0.050343	67.376	0.053046	67.567
0.044151	66.89	0.047007	67.123	0.050428	67.382	0.053057	67.567
0.04422	66.896	0.047086	67.129	0.050496	67.387	0.053062	67.568
0.044225	66.896	0.047166	67.136	0.050565	67.392	0.053131	67.572
0.044236	66.897	0.047255	67.143	0.05057	67.393	0.053226	67.579
0.044299	66.903	0.047329	67.148	0.050576	67.393	0.053294	67.583
0.044373	66.909	0.047408	67.154	0.050581	67.393	0.053299	67.584
0.044384	66.91	0.047498	67.161	0.050586	67.394	0.053373	67.589
0.044389	66.91	0.047572	67.167	0.050639	67.397	0.053384	67.589
0.044463	66.916	0.047651	67.173	0.050671	67.4	0.053474	67.595
0.044542	66.923	0.047736	67.18	0.050734	67.404	0.053542	67.6
0.044626	66.93	0.047741	67.18	0.05075	67.405	0.053548	67.6
0.044695	66.936	0.047815	67.186	0.050829	67.411	0.053616	67.605
0.0447	66.936	0.047894	67.192	0.050908	67.417	0.053621	67.605
0.044785	66.943	0.047968	67.198	0.050987	67.422	0.053632	67.606
0.044859	66.949	0.047978	67.199	0.051082	67.429	0.053706	67.611
0.044948	66.957	0.048063	67.205	0.051172	67.436	0.053769	67.615
0.045022	66.963	0.048142	67.211	0.051177	67.436	0.053775	67.616
0.045102	66.969	0.048211	67.217	0.051246	67.441	0.053875	67.622

表 3.2e 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
0.053954	67.627	0.057042	67.825	0.059866	67.995	0.063303	68.19
0.054017	67.632	0.057047	67.825	0.059877	67.996	0.063382	68.194
0.054107	67.638	0.057053	67.826	0.059887	67.996	0.063445	68.198
0.05417	67.642	0.057121	67.83	0.059956	68	0.06345	68.198
0.054255	67.647	0.0572	67.835	0.060025	68.004	0.063466	68.199
0.054334	67.653	0.057269	67.839	0.060098	68.009	0.06354	68.203
0.054339	67.653	0.057354	67.845	0.060172	68.013	0.063619	68.207
0.054434	67.659	0.057364	67.845	0.060241	68.017	0.063625	68.208
0.054498	67.663	0.057438	67.85	0.060325	68.022	0.063704	68.212
0.054508	67.664	0.057507	67.854	0.060399	68.026	0.063778	68.216
0.054587	67.669	0.057575	67.858	0.060479	68.031	0.063846	68.22
0.05464	67.673	0.057581	67.858	0.060563	68.035	0.06392	68.224
0.054725	67.678	0.057649	67.863	0.060621	68.039	0.063926	68.224
0.054809	67.684	0.057739	67.868	0.060626	68.039	0.063931	68.225
0.054878	67.688	0.057818	67.873	0.060711	68.044	0.063936	68.225
0.054894	67.689	0.057892	67.877	0.060779	68.048	0.06401	68.229
0.054968	67.694	0.057903	67.878	0.06079	68.048	0.064079	68.233
0.055036	67.698	0.057971	67.882	0.060859	68.052	0.064153	68.237
0.055047	67.699	0.058056	67.887	0.060933	68.057	0.064226	68.241
0.05511	67.703	0.058114	67.891	0.060943	68.057	0.064242	68.242
0.055121	67.704	0.058119	67.891	0.061012	68.061	0.064258	68.242
0.0552	67.709	0.058124	67.891	0.061086	68.065	0.064316	68.246
0.055279	67.714	0.058135	67.892	0.061165	68.07	0.064385	68.249
0.055358	67.719	0.058188	67.895	0.06117	68.07	0.064459	68.253
0.055432	67.724	0.058267	67.9	0.061233	68.074	0.064548	68.258
0.055506	67.729	0.058272	67.9	0.061313	68.079	0.064607	68.261
0.055601	67.735	0.058335	67.904	0.061397	68.083	0.064696	68.266
0.05567	67.739	0.058341	67.904	0.061466	68.087	0.064775	68.27
0.055733	67.743	0.058415	67.909	0.061545	68.092	0.064844	68.274
0.055823	67.749	0.05842	67.909	0.061635	68.097	0.064855	68.274
0.055891	67.753	0.058478	67.913	0.061698	68.1	0.064918	68.278
0.05597	67.758	0.058568	67.918	0.061708	68.101	0.064934	68.279
0.055981	67.759	0.058636	67.922	0.061782	68.105	0.065002	68.282
0.05605	67.763	0.05871	67.926	0.061867	68.11	0.065082	68.287
0.056118	67.768	0.058721	67.927	0.06193	68.114	0.065166	68.291
0.056124	67.768	0.058779	67.931	0.06202	68.119	0.065256	68.296
0.056129	67.768	0.058863	67.936	0.062083	68.122	0.065324	68.3
0.056197	67.772	0.058869	67.936	0.062089	68.123	0.065335	68.3
0.056203	67.773	0.058884	67.937	0.062152	68.126	0.065404	68.304
0.056266	67.777	0.058948	67.941	0.062157	68.126	0.06543	68.305
0.056277	67.777	0.058953	67.941	0.062226	68.13	0.065483	68.308
0.056351	67.782	0.058964	67.941	0.062231	68.13	0.065573	68.313
0.056424	67.787	0.059037	67.946	0.062316	68.135	0.065583	68.314
0.056435	67.787	0.059043	67.946	0.062395	68.14	0.065646	68.317
0.056488	67.791	0.059106	67.95	0.062458	68.143	0.065726	68.321
0.056498	67.791	0.05918	67.954	0.062537	68.147	0.065794	68.325
0.056567	67.795	0.059264	67.959	0.062611	68.152	0.0658	68.325
0.056651	67.801	0.059338	67.964	0.062616	68.152	0.065868	68.329
0.056731	67.806	0.059349	67.964	0.062696	68.156	0.065958	68.333
0.056736	67.806	0.059423	67.969	0.06277	68.16	0.066032	68.337
0.056805	67.81	0.059491	67.973	0.062849	68.165	0.066037	68.337
0.05682	67.811	0.059576	67.978	0.062928	68.169	0.066095	68.34
0.056826	67.811	0.059655	67.983	0.062996	68.173	0.066185	68.345
0.056889	67.815	0.059708	67.986	0.063076	68.177	0.066253	68.349
0.056963	67.82	0.059724	67.987	0.063144	68.181	0.066333	68.353
0.057026	67.824	0.059798	67.991	0.063229	68.186	0.066401	68.356

表 3.2f 等效降伏應力 σ_y

ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y	ϵ_{max}	σ_y
0.066496	68.361	0.069627	68.521	0.073253	68.696	0.076373	68.84
0.06657	68.365	0.0697	68.525	0.073258	68.697	0.076441	68.843
0.066644	68.369	0.069796	68.529	0.073327	68.7	0.076447	68.844
0.066729	68.373	0.069864	68.533	0.073343	68.701	0.076515	68.847
0.066802	68.377	0.069869	68.533	0.073422	68.704	0.076526	68.847
0.066882	68.382	0.069938	68.537	0.073491	68.708	0.076595	68.85
0.066961	68.386	0.070023	68.541	0.073565	68.711	0.076679	68.854
0.066966	68.386	0.070102	68.545	0.073649	68.715	0.076748	68.857
0.067029	68.389	0.070186	68.549	0.073728	68.719	0.076758	68.857
0.06704	68.39	0.07026	68.553	0.073807	68.722	0.076843	68.861
0.067109	68.393	0.070265	68.553	0.073892	68.726	0.076917	68.864
0.067119	68.394	0.07035	68.557	0.073966	68.73	0.076922	68.865
0.067183	68.397	0.070429	68.561	0.07404	68.733	0.07699	68.868
0.067193	68.398	0.070519	68.565	0.074114	68.737	0.077001	68.868
0.067262	68.401	0.070593	68.569	0.074198	68.741	0.077012	68.869
0.067336	68.405	0.070682	68.574	0.074277	68.744	0.077075	68.872
0.06742	68.41	0.070767	68.578	0.074362	68.748	0.07708	68.872
0.067499	68.414	0.07083	68.581	0.074436	68.752	0.077165	68.876
0.067568	68.417	0.070899	68.584	0.074509	68.755	0.077244	68.879
0.067573	68.417	0.070983	68.588	0.074515	68.755	0.077312	68.882
0.067663	68.422	0.071047	68.591	0.074525	68.756	0.077402	68.886
0.067737	68.426	0.071131	68.595	0.074589	68.759	0.077471	68.889
0.067747	68.426	0.07121	68.599	0.074673	68.763	0.077487	68.89
0.067821	68.43	0.071284	68.603	0.074747	68.766	0.077545	68.893
0.067895	68.434	0.071363	68.606	0.074752	68.766	0.077571	68.894
0.067969	68.438	0.071442	68.61	0.074831	68.77	0.07764	68.897
0.068038	68.441	0.071527	68.614	0.074905	68.773	0.077724	68.901
0.068043	68.441	0.071601	68.618	0.074985	68.777	0.077788	68.903
0.068048	68.442	0.071675	68.621	0.07508	68.781	0.077793	68.904
0.068138	68.446	0.071749	68.625	0.075169	68.785	0.077872	68.907
0.068207	68.45	0.071838	68.629	0.075227	68.788	0.077956	68.911
0.068281	68.454	0.071907	68.633	0.075233	68.788	0.078041	68.914
0.068286	68.454	0.071986	68.636	0.075238	68.789	0.078104	68.917
0.068291	68.454	0.071991	68.637	0.075317	68.792	0.078194	68.921
0.06837	68.458	0.071997	68.637	0.075391	68.796	0.078252	68.924
0.068381	68.459	0.072065	68.64	0.075465	68.799	0.078257	68.924
0.06846	68.463	0.072076	68.641	0.07547	68.799	0.078273	68.925
0.068534	68.466	0.07215	68.644	0.075549	68.803	0.078347	68.928
0.068544	68.467	0.072229	68.648	0.075565	68.804	0.078426	68.931
0.068613	68.47	0.072298	68.651	0.075576	68.804	0.078432	68.932
0.068687	68.474	0.072377	68.655	0.075644	68.807	0.078437	68.932
0.068698	68.475	0.072472	68.66	0.07565	68.808	0.078505	68.935
0.068771	68.478	0.07254	68.663	0.075739	68.812	0.078516	68.935
0.068856	68.483	0.072609	68.666	0.075808	68.815	0.078595	68.939
0.068925	68.486	0.072625	68.667	0.075824	68.815	0.078653	68.941
0.06893	68.486	0.072694	68.67	0.075892	68.819	0.078659	68.941
0.069009	68.49	0.072778	68.674	0.075898	68.819	0.078743	68.945
0.069014	68.491	0.072862	68.678	0.075961	68.822	0.078817	68.948
0.069083	68.494	0.072931	68.681	0.075972	68.822	0.078891	68.952
0.069157	68.498	0.072936	68.682	0.076035	68.825	0.078907	68.952
0.069236	68.502	0.072947	68.682	0.076051	68.826	0.078996	68.956
0.06932	68.506	0.073016	68.685	0.076056	68.826	0.079065	68.959
0.069394	68.51	0.073021	68.686	0.07613	68.829	0.07907	68.959
0.069458	68.513	0.073095	68.689	0.076199	68.832	0.079144	68.962
0.069537	68.517	0.073163	68.692	0.076278	68.836	0.079223	68.966
0.069542	68.517	0.073179	68.693	0.076283	68.836	0.079313	68.97

表 3.3 D20H80 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0.0	9.31	15.5	14.58	31.0	18.37
0.5	9.32	16.0	14.74	31.5	18.47
1.0	9.36	16.5	14.89	32.0	18.57
1.5	9.41	17.0	15.04	32.5	18.66
2.0	9.48	17.5	15.18	33.0	18.76
2.5	9.58	18.0	15.33	33.5	18.85
3.0	9.69	18.5	15.47	34.0	18.95
3.5	9.83	19.0	15.60	34.5	19.04
4.0	9.98	19.5	15.74	35.0	19.13
4.5	10.15	20.0	15.87	35.5	19.22
5.0	10.33	20.5	16.01	36.0	19.31
5.5	10.53	21.0	16.13	36.5	19.40
6.0	10.75	21.5	16.26	37.0	19.49
6.5	10.97	22.0	16.39	37.5	19.57
7.0	11.21	22.5	16.51	38.0	19.66
7.5	11.46	23.0	16.63	38.5	19.75
8.0	11.72	23.5	16.75	39.0	19.83
8.5	11.99	24.0	16.87	39.5	19.92
9.0	12.16	24.5	16.98	40.0	20.00
9.5	12.39	25.0	17.10		
10.0	12.60	25.5	17.21		
10.5	12.81	26.0	17.32		
11.0	13.01	26.5	17.44		
11.5	13.20	27.0	17.54		
12.0	13.39	27.5	17.65		
12.5	13.57	28.0	17.76		
13.0	13.75	28.5	17.86		
13.5	13.92	29.0	17.97		
14.0	14.09	29.5	18.07		
14.5	14.26	30.0	18.17		
15.0	14.42	30.5	18.27		

表 3.4 D20H100 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0.0	8.32	17.0	13.96	34.0	17.59
0.5	8.38	17.5	14.09	34.5	17.67
1.0	8.42	18.0	14.23	35.0	17.76
1.5	8.48	18.5	14.36	35.5	17.84
2.0	8.56	19.0	14.49	36.0	17.93
2.5	8.66	19.5	14.61	36.5	18.01
3.0	8.79	20.0	14.74	37.0	18.09
3.5	8.93	20.5	14.86	37.5	18.17
4.0	9.09	21.0	14.98	38.0	18.25
4.5	9.26	21.5	15.10	38.5	18.33
5.0	9.45	22.0	15.21	39.0	18.41
5.5	9.58	22.5	15.33	39.5	18.49
6.0	9.86	23.0	15.44	40.0	18.57
6.5	10.13	23.5	15.55	40.5	18.64
7.0	10.38	24.0	15.66	41.0	18.72
7.5	10.63	24.5	15.77	41.5	18.80
8.0	10.86	25.0	15.87	42.0	18.87
8.5	11.08	25.5	15.98	42.5	18.95
9.0	11.29	26.0	16.08	43.0	19.02
9.5	11.50	26.5	16.19	43.5	19.09
10.0	11.70	27.0	16.29	44.0	19.17
10.5	11.89	27.5	16.39	44.5	19.24
11.0	12.07	28.0	16.49	45.0	19.31
11.5	12.25	28.5	16.58	45.5	19.38
12.0	12.43	29.0	16.68	46.0	19.45
12.5	12.60	29.5	16.77	46.5	19.52
13.0	12.77	30.0	16.87	47.0	19.59
13.5	12.93	30.5	16.96	47.5	19.66
14.0	13.08	31.0	17.05	48.0	19.73
14.5	13.24	31.5	17.15	48.5	19.80
15.0	13.39	32.0	17.24	49.0	19.87
15.5	13.54	32.5	17.32	49.5	19.93
16.0	13.68	33.0	17.41	50.0	20.00
16.5	13.82	33.5	17.50		

表 3.5 D50H175 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0	24.87	30	35.00	60	44.09
1	24.87	31	35.38	61	44.33
2	24.92	32	35.76	62	44.58
3	24.99	33	36.12	63	44.81
4	25.10	34	36.49	64	45.05
5	25.24	35	36.84	65	45.28
6	25.41	36	37.19	66	45.51
7	25.60	37	37.53	67	45.74
8	25.83	38	37.86	68	45.97
9	26.09	39	38.19	69	46.19
10	26.37	40	38.52	70	46.42
11	26.69	41	38.84	71	46.64
12	27.03	42	39.15	72	46.85
13	27.39	43	39.46	73	47.07
14	27.79	44	39.76	74	47.28
15	28.20	45	40.06	75	47.50
16	28.64	46	40.35	76	47.71
17	29.10	47	40.64	77	47.91
18	29.52	48	40.93	78	48.12
19	30.05	49	41.21	79	48.33
20	30.57	50	41.49	80	48.53
21	31.07	51	41.77	81	48.73
22	31.56	52	42.04	82	48.93
23	32.03	53	42.31	83	49.13
24	32.49	54	42.57	84	49.32
25	32.93	55	42.83	85	49.52
26	33.37	56	43.09	86	49.71
27	33.79	57	43.34	87	49.90
28	34.20	58	43.60	87.5	50.00
29	34.60	59	43.84		

表 3.6 D50H200 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0	23.27	34	34.90	68	43.97
1	23.26	35	35.24	69	44.18
2	23.31	36	35.57	70	44.40
3	23.39	37	35.90	71	44.61
4	23.50	38	36.22	72	44.81
5	23.65	39	36.53	73	45.02
6	23.83	40	36.84	74	45.23
7	24.05	41	37.14	75	45.43
8	24.29	42	37.44	76	45.63
9	24.57	43	37.74	77	45.83
10	24.87	44	38.03	78	46.03
11	25.21	45	38.32	79	46.22
12	25.57	46	38.60	80	46.42
13	25.96	47	38.87	81	46.61
14	26.38	48	39.15	82	46.80
15	26.82	49	39.42	83	46.99
16	27.14	50	39.69	84	47.18
17	27.70	51	39.95	85	47.36
18	28.23	52	40.21	86	47.55
19	28.74	53	40.46	87	47.73
20	29.24	54	40.72	88	47.91
21	29.72	55	40.97	89	48.10
22	30.18	56	41.21	90	48.27
23	30.63	57	41.46	91	48.45
24	31.07	58	41.70	92	48.63
25	31.50	59	41.94	93	48.81
26	31.91	60	42.17	94	48.98
27	32.32	61	42.40	95	49.15
28	32.71	62	42.64	96	49.32
29	33.10	63	42.86	97	49.49
30	33.47	64	43.09	98	49.66
31	33.84	65	43.31	99	49.83
32	34.20	66	43.53	100	50.00
33	34.55	67	43.75		

表 3.7 D50H250 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0	20.81	42	34.76	84	43.80
1	20.82	43	35.03	85	43.97
2	20.88	44	35.30	86	44.14
3	20.98	45	35.57	87	44.31
4	21.12	46	35.83	88	44.48
5	21.30	47	36.09	89	44.65
6	21.52	48	28.84	90	44.81
7	21.77	49	29.24	91	44.98
8	22.06	50	29.62	92	45.14
9	22.38	51	30.00	93	45.31
10	22.73	52	30.37	94	45.47
11	23.11	53	30.72	95	45.63
12	23.52	54	31.07	96	45.79
13	23.95	55	31.41	97	45.95
14	24.41	56	31.75	98	46.10
15	24.88	57	32.08	99	46.26
16	25.20	58	32.40	100	46.42
17	25.71	59	32.71	101	46.57
18	26.21	60	33.02	102	46.72
19	26.68	61	33.32	103	46.88
20	27.14	62	33.62	104	47.03
21	27.59	63	33.91	105	47.18
22	28.02	64	34.20	106	47.33
23	28.44	65	34.48	107	47.47
24	28.84	66	34.76	108	47.62
25	29.24	67	35.03	109	47.77
26	29.62	68	35.30	110	47.91
27	30.00	69	35.57	111	48.06
28	30.37	70	35.83	112	48.20
29	30.72	71	36.09	113	48.35
30	31.07	72	41.60	114	48.49
31	31.41	73	41.79	115	48.63
32	31.75	74	41.98	116	48.77
33	32.08	75	42.17	117	48.91
34	32.40	76	42.36	118	49.05
35	32.71	77	42.54	119	49.19
36	33.02	78	42.73	120	49.32
37	33.32	79	42.91	121	49.46
38	33.62	80	43.09	122	49.60
39	33.91	81	43.27	123	49.73
40	34.20	82	43.44	124	49.87
41	34.48	83	43.62	125	50.00

表 3.8 D50H300 消能鋼棒之曲線表

H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)	H(mm)	d(mm)
0	19.00	41	32.45	82	40.88	123	46.80
1	19.01	42	32.71	83	41.05	124	46.93
2	19.08	43	32.97	84	41.21	125	47.05
3	19.19	44	33.22	85	41.38	126	47.18
4	19.35	45	33.47	86	41.54	127	47.30
5	19.54	46	33.72	87	41.70	128	47.43
6	19.78	47	33.96	88	41.86	129	47.55
7	20.06	48	34.20	89	42.01	130	47.67
8	20.37	49	34.44	90	42.17	131	47.79
9	20.71	50	34.67	91	42.33	132	47.91
10	21.07	51	34.90	92	42.48	133	48.03
11	21.46	52	35.12	93	42.64	134	48.15
12	21.87	53	35.35	94	42.79	135	48.27
13	22.30	54	35.57	95	42.94	136	48.39
14	22.73	55	35.79	96	43.09	137	48.51
15	23.21	56	36.00	97	43.24	138	48.63
16	23.71	57	36.22	98	43.39	139	48.75
17	24.20	58	36.43	99	43.53	140	48.86
18	24.66	59	36.63	100	43.68	141	48.98
19	25.11	60	36.84	101	43.82	142	49.09
20	25.54	61	37.04	102	43.97	143	49.21
21	25.96	62	37.25	103	44.11	144	49.32
22	26.37	63	37.44	104	44.25	145	49.44
23	26.76	64	37.64	105	44.40	146	49.55
24	27.14	65	37.84	106	44.54	147	49.66
25	27.52	66	38.03	107	44.68	148	49.78
26	27.88	67	38.22	108	44.81	149	49.89
27	28.23	68	38.41	109	44.95	150	50.00
28	28.58	69	38.60	110	45.09		
29	28.91	70	38.78	111	45.23		
30	29.24	71	38.97	112	45.36		
31	29.56	72	39.15	113	45.50		
32	29.88	73	39.33	114	45.63		
33	30.18	74	39.51	115	45.76		
34	30.49	75	39.69	116	45.89		
35	30.78	76	39.86	117	46.03		
36	31.07	77	40.03	118	46.16		
37	31.36	78	40.21	119	46.29		
38	31.64	79	40.38	120	46.42		
39	31.91	80	40.55	121	46.54		
40	32.18	81	40.72	122	46.67		

表 3.9 D20H80 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	2.8 ton		
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	20	mm
鋼棒高度 =	H =	80	mm
σ_y =		21	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	7853.98	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	785.40	mm ³
M _y =	$\sigma_y * S =$	16493.36	kg-mm
V _y =	$2 * M_y / H =$	412.33	kg
Z =	$(D^3)/6 =$	1333.33	mm ³
M _u =	$\sigma_y * Z =$	28000	kg-mm
V _u =	$2 * M_u / H =$	700.00	kg/根
Δy =	$(48 * V_y * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	0.1976	mm
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	0.1976	mm
K _d =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	2086.21	kg/mm
根數 =		4	根
設計側力 =		2.80	ton
材料質量 =		2.30	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
V _y *S =		824.67	kg
最小直徑D _{min}	$((V_y * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
=		9.31	mm
最小半徑R _{min} =		4.65	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
M _u *S =		56000	kg-mm
容許剪應力F _v =	0.3F _u =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度t _{EPmin}			
= 3*M _u *S/(8*F _v *r ₂) =		14.2857143	mm
	採用	15.00	mm

表 3.10 D20H100 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	2.24 ton		
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	20	mm
鋼棒高度 =	H =	100	mm
$\sigma_y =$		56.85499	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	7853.98	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	785.40	mm ³
My =	$\sigma_y * S =$	44653.80	kg-mm
Vy =	$2 * My / H =$	893.08	kg
Z =	$(D^3)/6 =$	1333.33	mm ³
Mu =	$\sigma_y * Z =$	75806.65333	kg-mm
Vu =	$2 * Mu / H =$	1516.13	kg/根
$\Delta y =$	$(48 * Vy * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	0.8361	mm
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	0.8361	mm
Kd =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	1068.14	kg/mm
根數 =		4	根
設計側力 =		6.06	ton
材料質量 =		2.30	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
Vy * S =		1786.15	kg
最小直徑 D _{min}	$((Vy * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
=		8.32	mm
最小半徑 R _{min} =		4.16	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
Mu * S =		151613.3067	kg-mm
容許剪應力 Fv =	0.3Fu =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度 t _{EPmin}			
=	$3 * Mu * S / (8 * Fv * r^2) =$	38.67686395	mm
	採用	15.00	mm

表 3.11 D50H175 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	10.00	ton	
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	50	mm
鋼棒高度 =	H =	175	mm
$\sigma_y =$		21	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	306796.16	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	12271.85	mm ³
My =	$\sigma_y * S =$	257708.77	kg-mm
Vy =	$2 * My / H =$	2945.24	kg
Z =	$(D^3)/6 =$	20833.33	mm ³
Mu =	$\sigma_y * Z =$	437500	kg-mm
Vu =	$2 * Mu / H =$	5000.00	kg/根
$\Delta y =$	$(48 * Vy * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	0.3783	mm
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	0.3783	mm
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D)$		
Kd =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	7785.29	kg/mm
	$= (5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3)$		
根數 =		2	根
設計側力 =		10.00	ton
材料質量 =		7.20	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
Vy * S =		5890.49	kg
最小直徑D _{min}	$((Vy * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
=		24.87	mm
最小半徑R _{min}	=	12.44	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
Mu * S =		875000	kg-mm
容許剪應力Fv =	0.3Fu =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度t _{EPmin}			
=	$3 * Mu * S / (8 * Fv * r2) =$	35.71428571	mm
	採用	35.00	mm

表 3.12 D50H200 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	8.75	ton	
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	50	mm
鋼棒高度 =	H =	200	mm
$\sigma_y =$		21	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	306796.16	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	12271.85	mm ³
My =	$\sigma_y * S =$	257708.77	kg-mm
Vy =	$2 * My / H =$	2577.09	kg = $\sigma_y * (\pi * D^3) / (16 * H)$
Z =	$(D^3)/6 =$	20833.33	mm ³
Mu =	$\sigma_y * Z =$	437500	kg-mm
Vu =	$2 * Mu / H =$	4375.00	kg/根
$\Delta y =$	$(48 * Vy * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	0.4941	mm = 0.0001544
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	0.4941	mm = $(3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D)$
Kd =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	5215.53	kg/mm = $(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3)$
根數 =		2	根
設計側力 =		8.75	ton
材料質量 =		7.20	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
Vy * S =		5154.18	kg
最小直徑D _{min}	$((Vy * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
=		23.27	mm
最小半徑R _{min} =		11.63	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
Mu * S =		875000	kg-mm
容許剪應力Fv =	0.3Fu =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度t _{EPmin}			
=	$3 * Mu * S / (8 * Fv * r2) =$	35.71428571	mm
	採用	35.00	mm

表 3.13 D50H250 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	7.00	ton	
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	50	mm
鋼棒高度 =	H =	250	mm
$\sigma_y =$		21	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	306796.16	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	12271.85	mm ³
My =	$\sigma_y * S =$	257708.77	kg-mm
Vy =	$2 * My / H =$	2061.67	kg
			= $\sigma_y * (\pi * D^3) / (16 * H)$
Z =	$(D^3)/6 =$	20833.33	mm ³
Mu =	$\sigma_y * Z =$	437500	kg-mm
Vu =	$2 * Mu / H =$	3500.00	kg/根
$\Delta y =$	$(48 * Vy * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	0.7721	mm
			= 0.0002413
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	0.7721	mm
			= $(3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D)$
Kd =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	2670.35	kg/mm
			= $(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3)$
根數 =		2	根
設計側力 =		7.00	ton
材料質量 =		7.20	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
Vy * S =		4123.34	kg
最小直徑 D _{min}	$((Vy * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
		20.81	mm
最小半徑 R _{min} =		10.40	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
Mu * S =		875000	kg-mm
容許剪應力 Fv =	0.3Fu =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度 t _{EPmin}			
	$= 3 * Mu * S / (8 * Fv * r2) =$	35.71428571	mm
	採用	35.00	mm

表 3.14 D50H300 消能鋼棒之曲線表

圓形鋼棒加勁阻尼器設計			
設計側力：	5.83	ton	
採用材料：	不銹鋼S304		
標稱降伏強度：	21 kg/mm ²		
鋼棒直徑 =	D =	50	mm
鋼棒高度 =	H =	300	mm
$\sigma_y =$		21	kg/mm ²
E =		20400	kg/mm ²
I =	$(\pi * D^4)/64 =$	306796.16	mm ⁴
S =	$(\pi * D^3)/32 =$	12271.85	mm ³
My =	$\sigma_y * S =$	257708.77	kg-mm
Vy =	$2 * My / H =$	1718.06	kg = $\sigma_y * (\pi * D^3) / (16 * H)$
Z =	$(D^3)/6 =$	20833.33	mm ³
Mu =	$\sigma_y * Z =$	437500	kg-mm
Vu =	$2 * Mu / H =$	2916.67	kg/根
$\Delta y =$	$(48 * Vy * H^3) / (5 * E * \pi * D^4) =$	1.1118	mm = 0.0003474
	$= (3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D) =$	1.1118	mm = $(3 * H^2 * \sigma_y) / (5 * E * D)$
Kd =	$(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3) =$	1545.34	kg/mm = $(5 * \pi * E * D^4) / (48 * H^3)$
根數 =		2	根
設計側力 =		5.83	ton
材料質量 =		7.20	kg
設計頸縮處最小直徑			
安全因子 S =		2	
Vy * S =		3436.12	kg
最小直徑 D _{min}	$((Vy * S * 4 * 3^{1/2}) / (\sigma_y * \pi))^{1/2}$		
=		19.00	mm
最小半徑 R _{min} =		9.50	mm
設計端板最小厚度			
安全因子 S =		2	
Mu * S =		875000	kg-mm
容許剪應力 Fv =	0.3Fu =	14.7	kg/mm ²
端板最小厚度 t _{EPmin}			
=	$3 * Mu * S / (8 * Fv * r2) =$	35.71428571	mm
	採用	35.00	mm

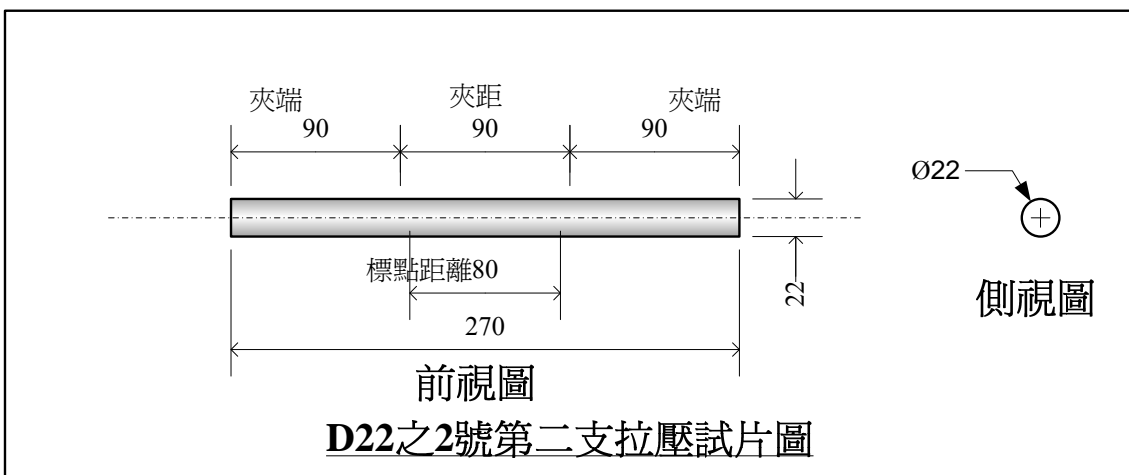
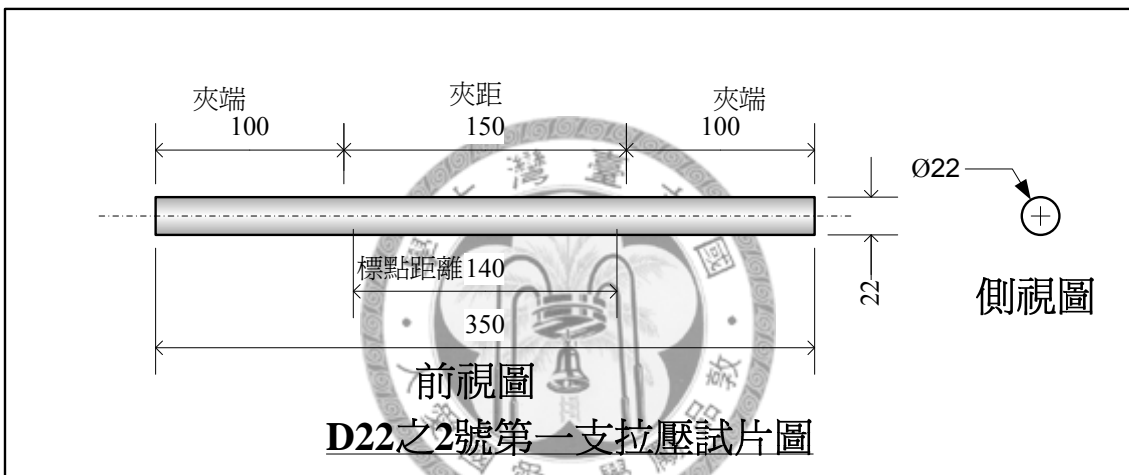
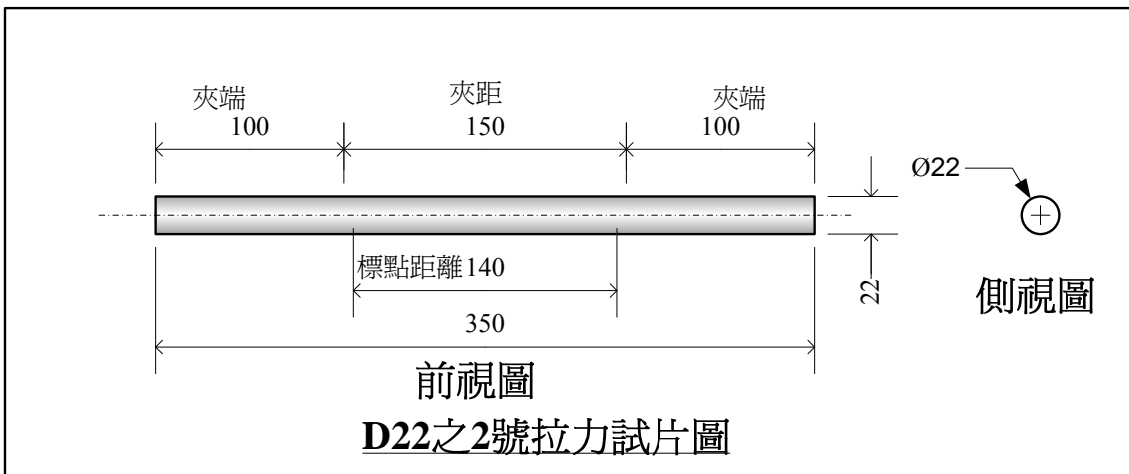


圖 3.1 材料試驗設計圖(unit : mm)

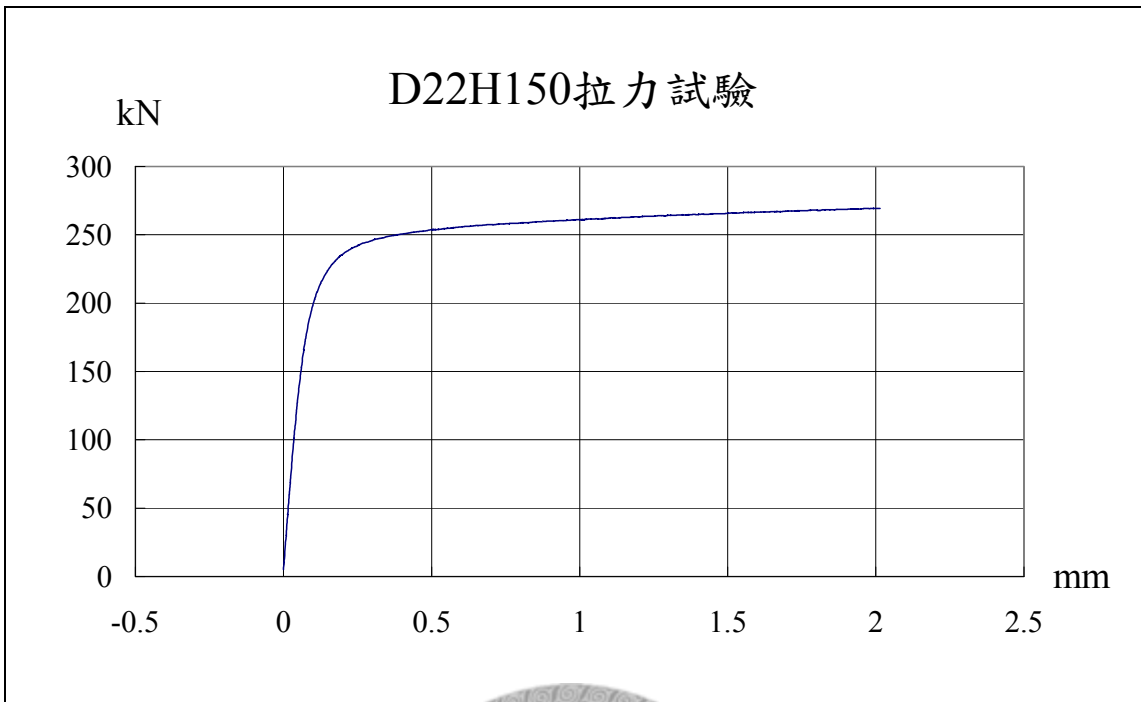


圖 3.2 拉力試驗結果

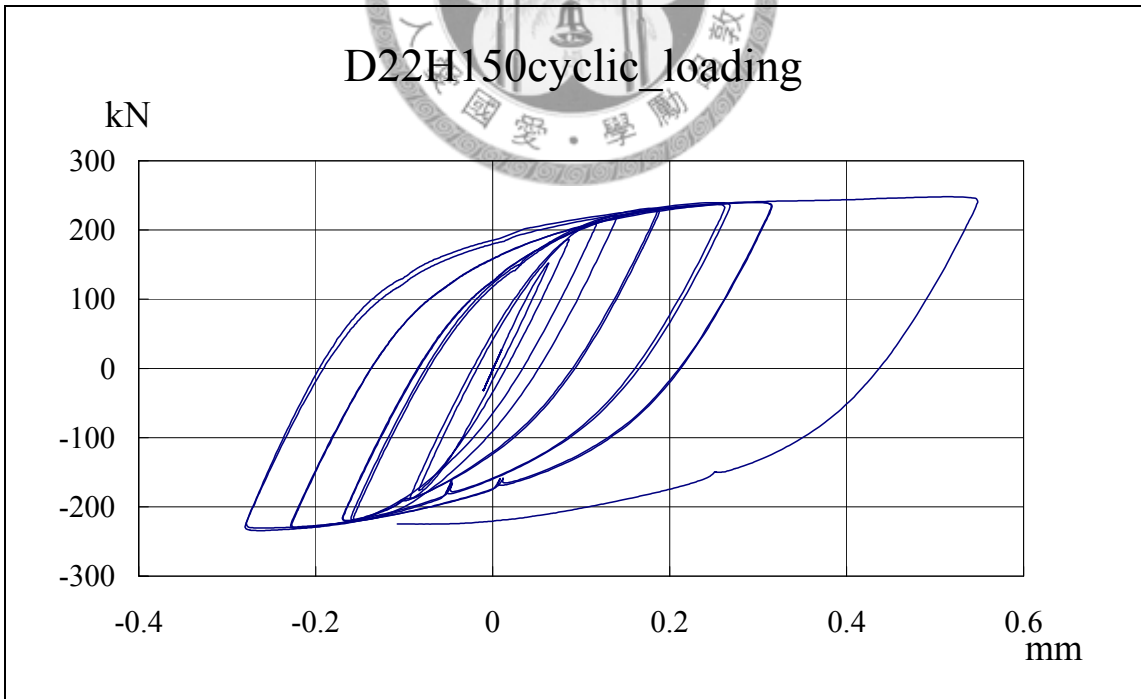


圖 3.3 第一支拉壓試驗結果

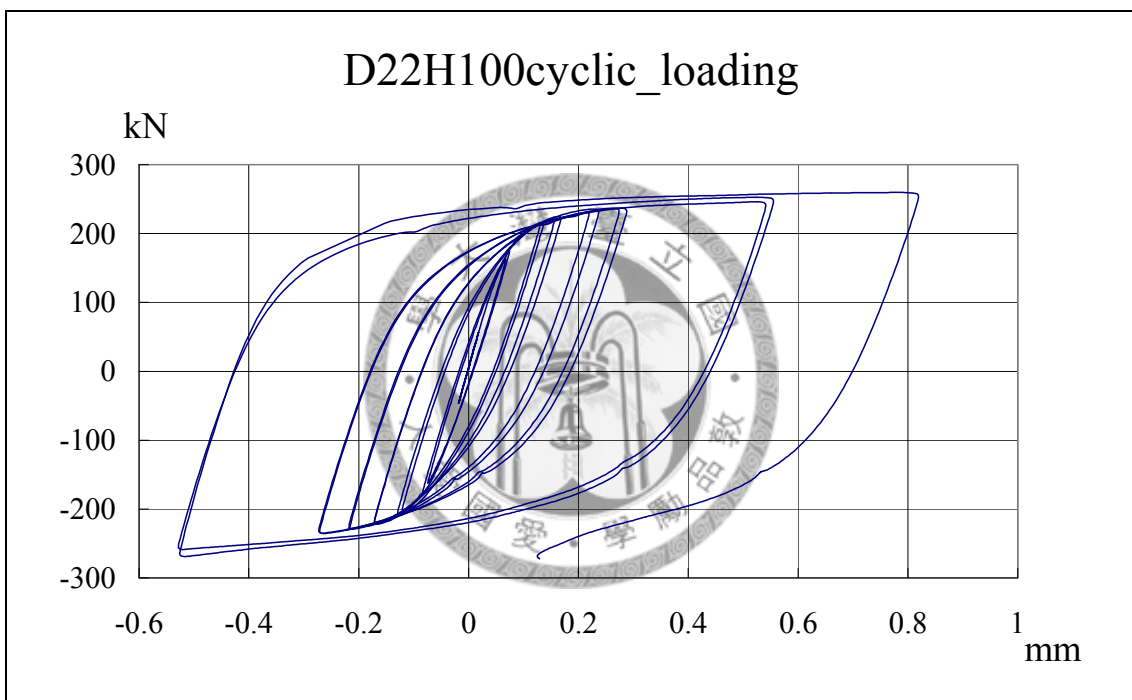


圖 3.4 第二支拉壓試驗結果

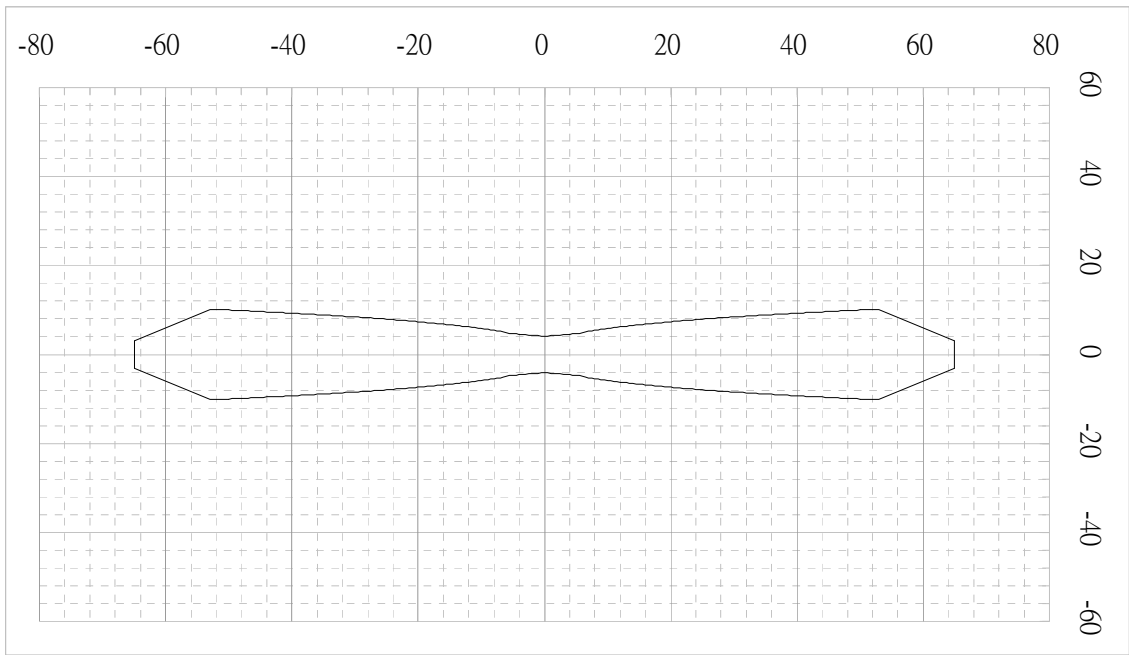


圖 3.5 D20H100 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

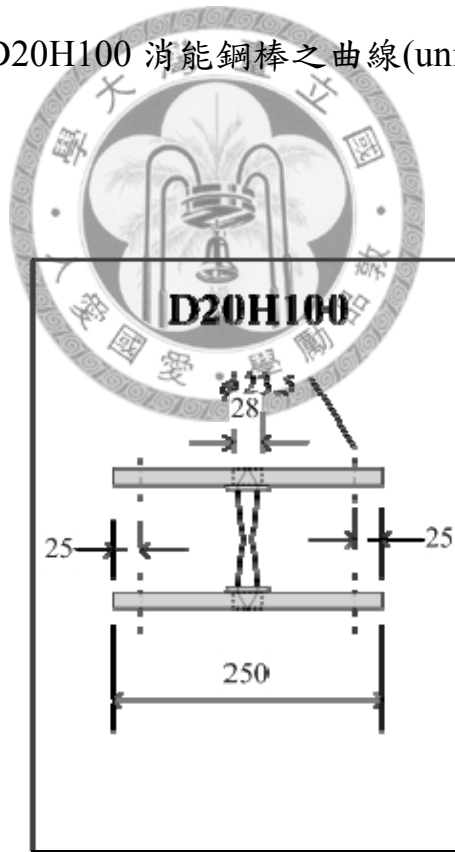


圖 3.6 元件測試試體設計圖(unit : mm)

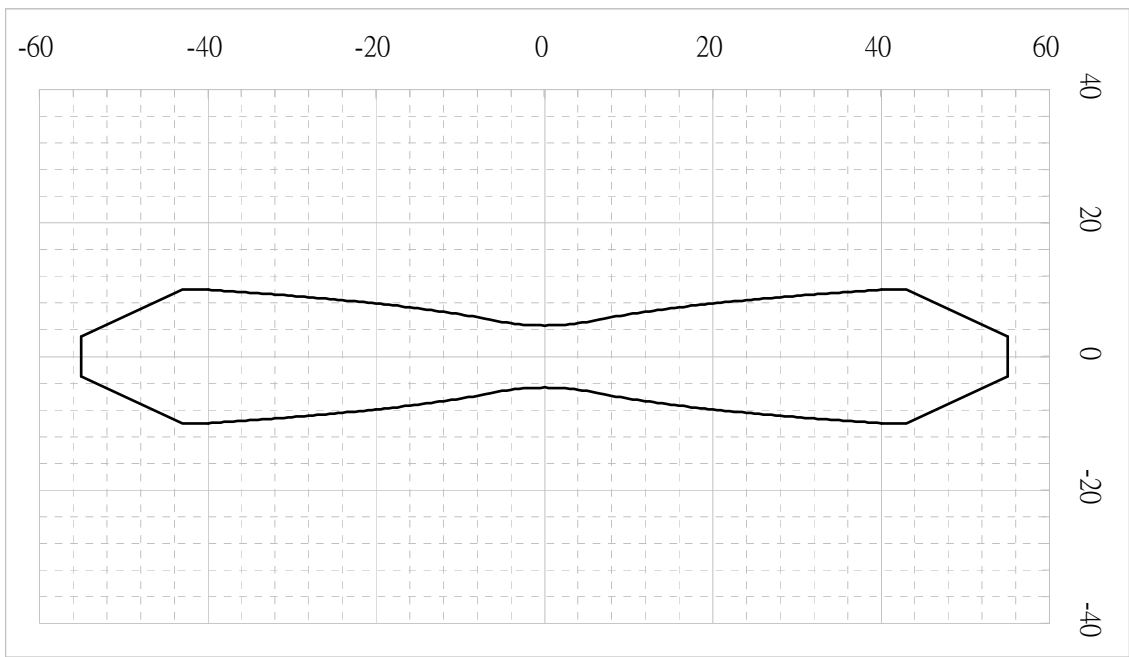


圖 3.7 D20H80 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

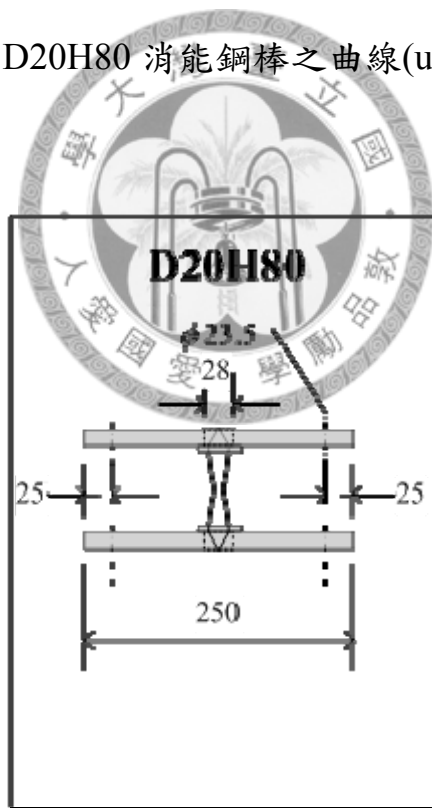


圖 3.8 D20H80 之元件測試試體設計圖(unit : mm)

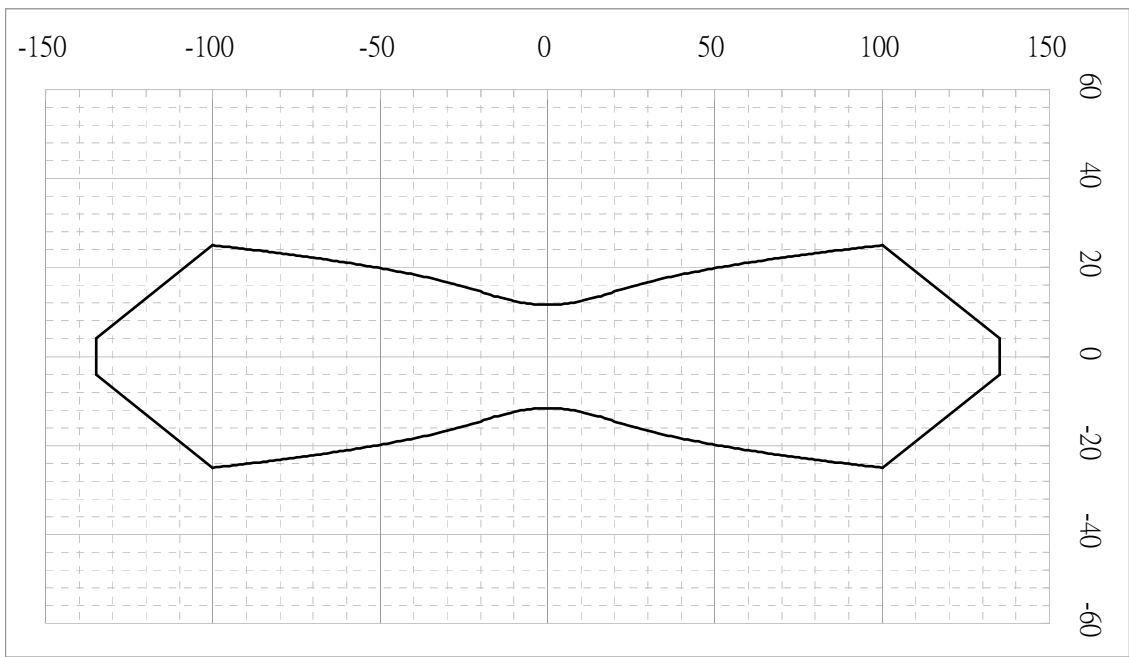


圖 3.9 D50H175 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

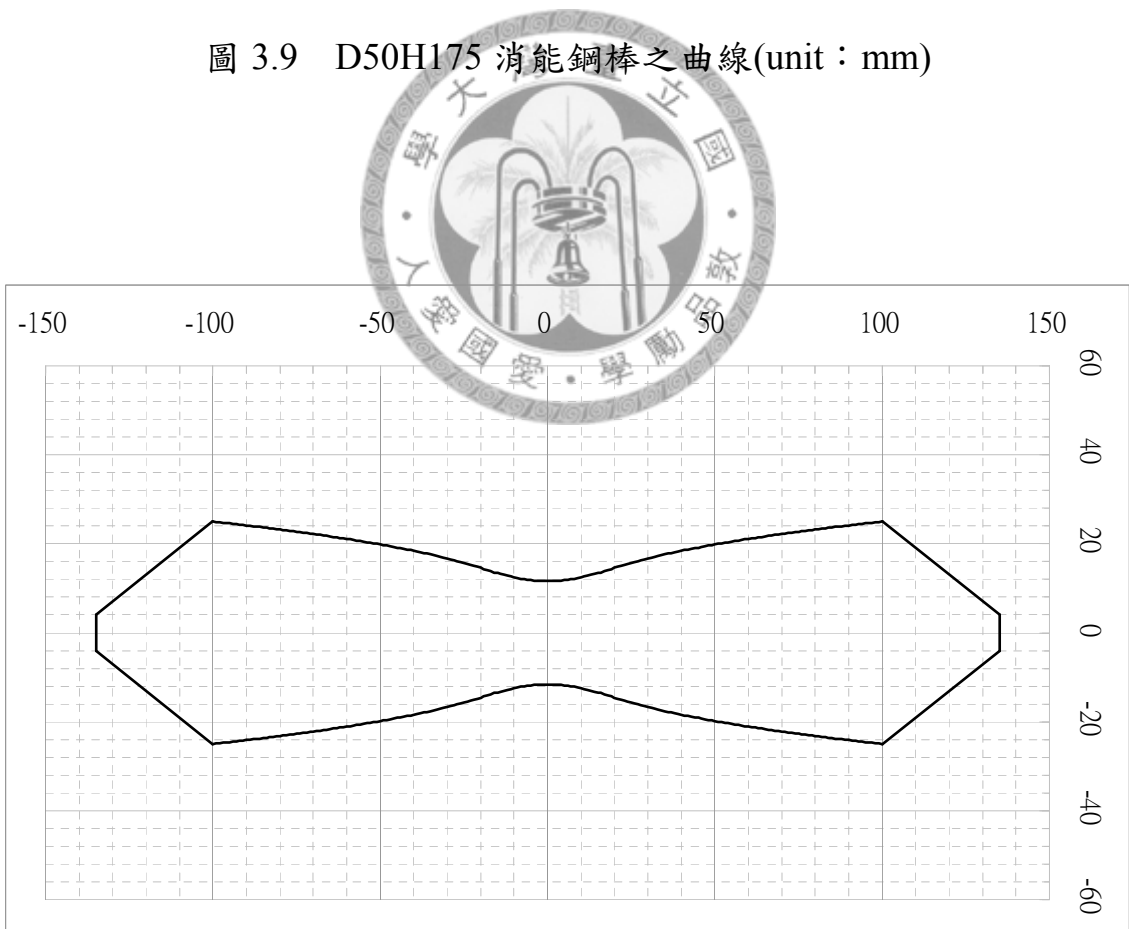


圖 3.10 D50H200 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

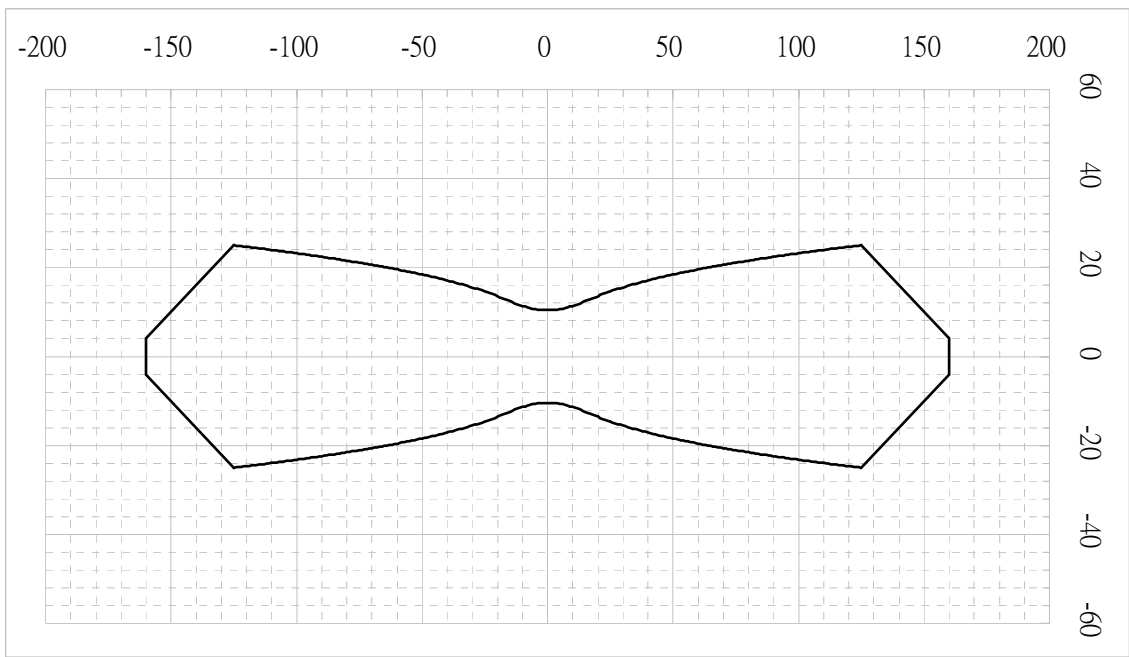


圖 3.11 D50H250 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

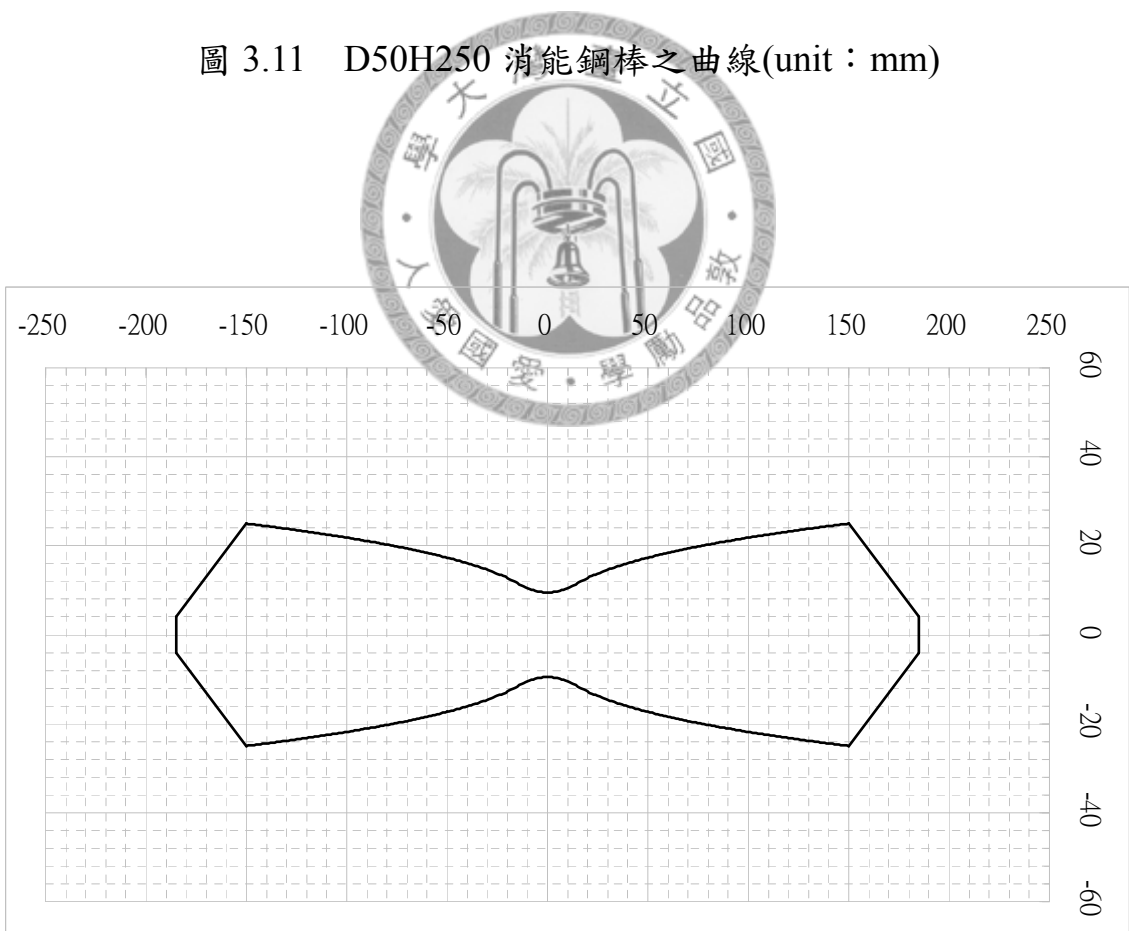


圖 3.12 D50H300 消能鋼棒之曲線(unit : mm)

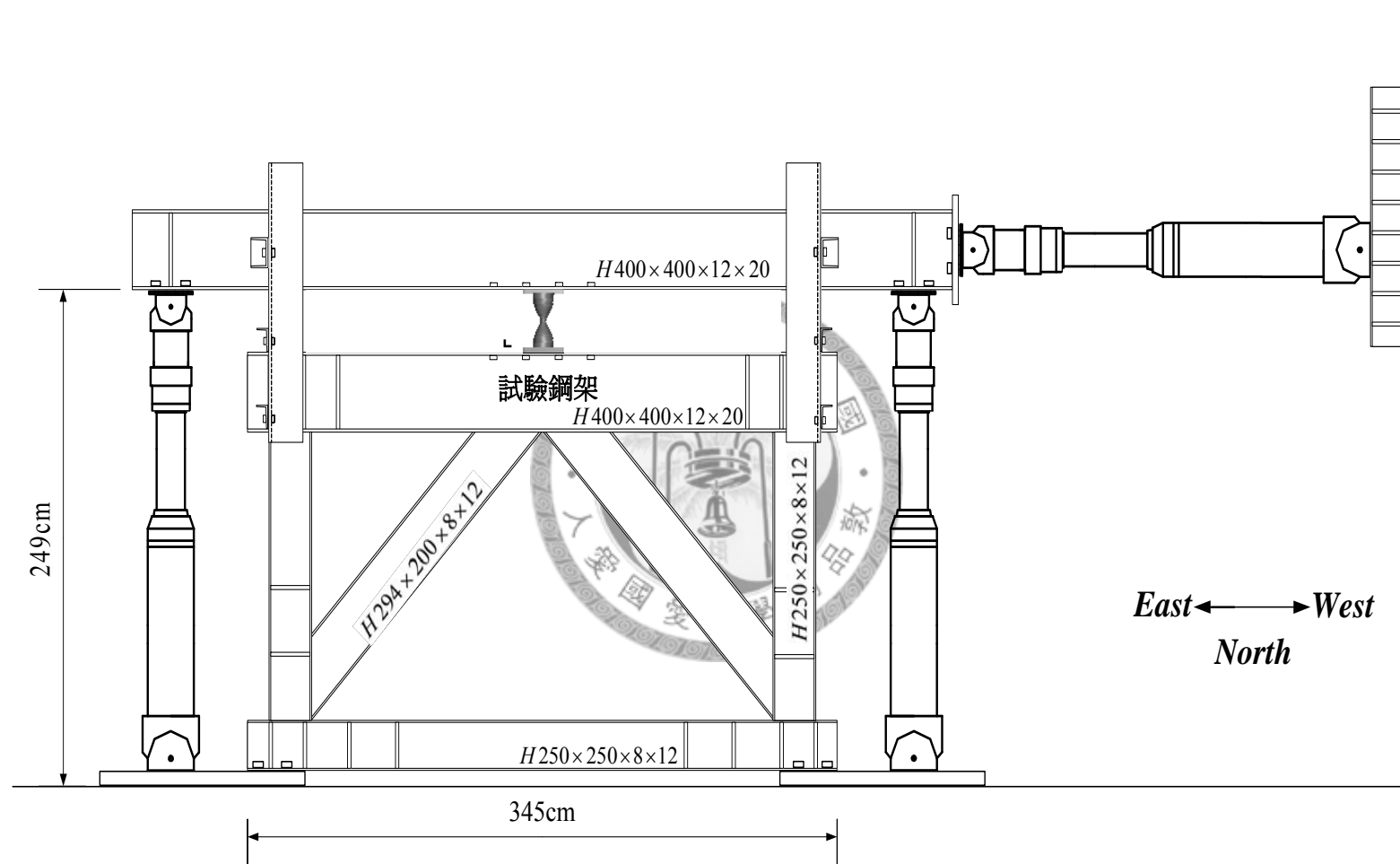


圖 3.13 元件測試構架架設配置

Drift Ratio [%]	0.00313	0.00625	0.0125	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.25	0.375	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2	3
Displacement [mm]	0.050	0.100	0.20	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00	4.00	6.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00	32.00	48.00
Actuator Load Rate (mm/sec)	0.02	0.02	0.04	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.20	0.30	0.32	0.32	0.32	0.40	0.40	0.64	0.64
Period [sec/cycle]	10	20	20	40	40	40	40	40	80	80	100	150	200	200	240	200	300
Number of Cycle	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Time [sec]	20.0	40.0	40.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	160.0	160.0	200.0	300.0	400.0	400.0	480.0	400.0	600.0
Accumulated time [sec]	20.0	60.0	100.0	180.0	260.0	340.0	420.0	500.0	660.0	820.0	1020.0	1320.0	1720.0	2120.0	2600.0	3000.0	3600.0
取樣頻率 [1/sec]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
取樣數目	40	80	80	160	160	160	160	160	320	320	400	600	800	800	960	800	1200
累積取樣數目	40	120	200	360	520	680	840	1000	1320	1640	2040	2640	3440	4240	5200	6000	7200

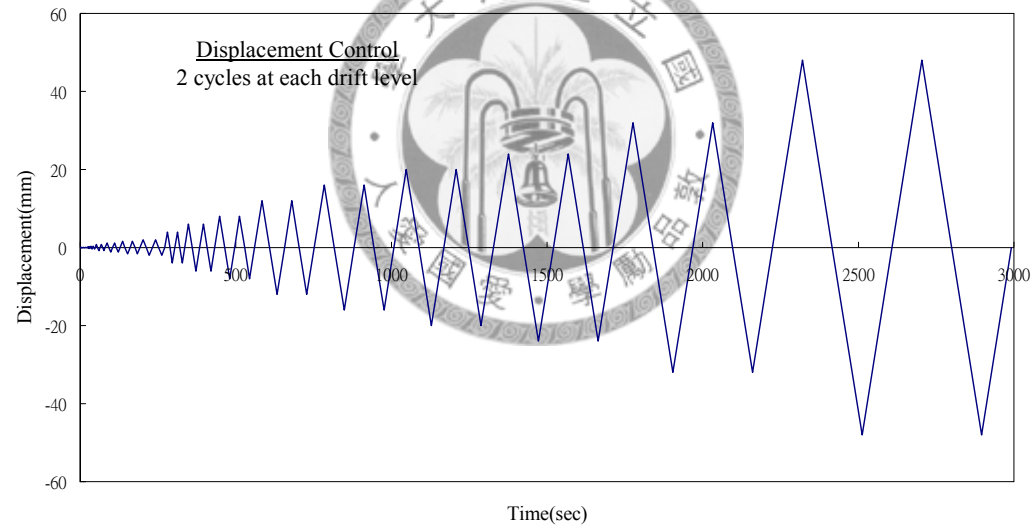


圖 3.14 位移反覆載重歷時圖



圖 3.15 元件測試構架照片

第四章 ABAQUS 應用及分析

4.1 ABAQUS 簡介

Abaqus 是國際上先進的大型通用有限元計算分析軟體之一，是美國 HKS 公司(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.)的產品，主要模組包括 Abaqus/Standard 及 Abaqus/Explicit。

其中在 Abaqus/Standard 還附加了三個特殊用途的分析模組：Abaqus/Aqua、Abaqus/Design 和 Abaqus/Foundation。

Abaqus/CAE 是集成的 Abaqus 工作環境，它包括了 Abaqus 模型的建模、互動式提交作業和監控運算過程、以及結果評估(及後處理)等功能。Abaqus/Viewer 是 Abaqus/CAE 的子模組，它只包括其中的後處理功能。另外，Abaqus 還分別為 MOLDFLOW 界面和 ADAMS/Flex 界面。Abaqus 也提供轉換器，可將第三方 CAD 系統的幾何模型轉換成 Abaqus/CAE 相容的模型，可將第三方前處理軟體的輸入檔轉成 Abaqus 的輸入檔，也可將 Abaqus 的結果檔轉成第三方後處理軟體可讀的結果檔。這些模組之前的關係見圖 4.1。

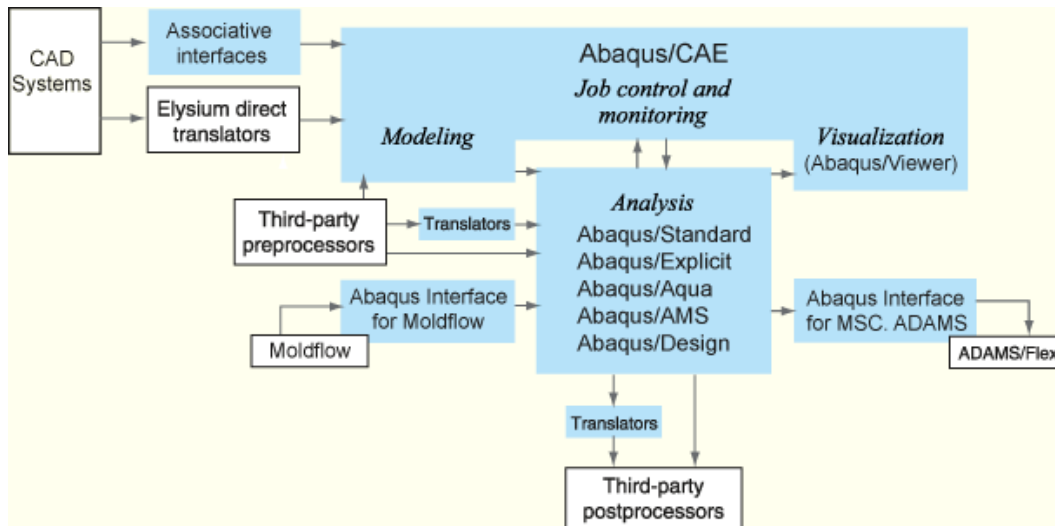


圖 4.1 Abaqus 產品[35]

Abaqus/Standard 適用於求解廣泛的線性和非線性問題，包括結構的靜態、動態、熱和電反應等，Abaqus/Explicit 適用於分析像衝擊和爆炸這樣短暫、瞬時的動態事件，對高度非線性問題也非常有效。Abaqus 提供十分豐富可模擬任意實際形狀的單元庫；配合其提供的材料模型庫或自定材料行為，可模擬大多數典型工程材料性質，能解決結構之應力及位移的許多問題。本文採用 Abaqus/CAE 建造模型並使用 Abaqus/Standard 做為後處理分析工具。

4.2 ABAQUS 分析模型的組成

一個完整的 Abaqus/Standard 或 Abaqus/Explicit 分析過程，通常由三個明確的步驟組成：前處理、模擬計算和後處理。這三個步驟通過檔案之間建立的聯繫如下：

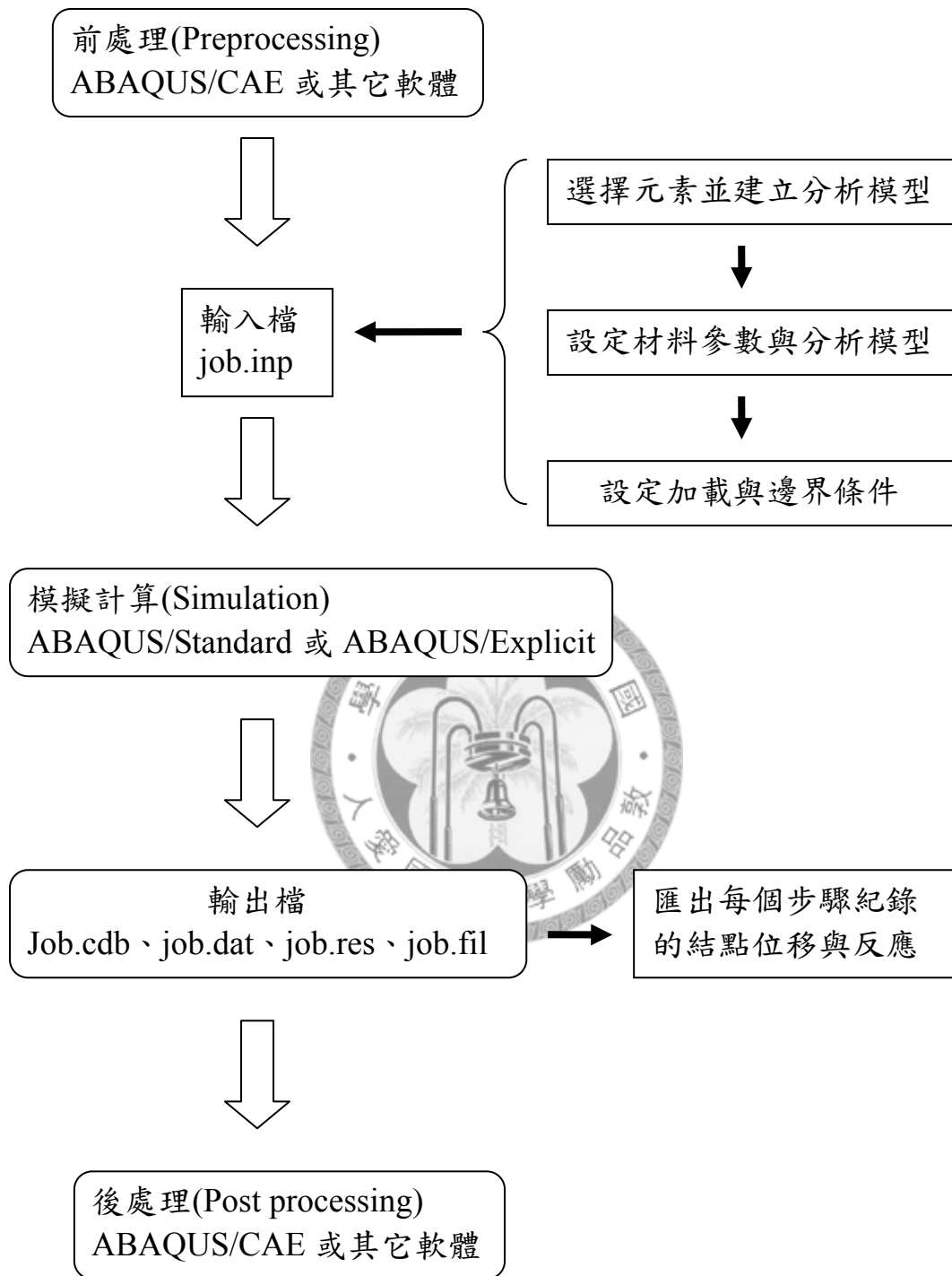


圖 4.2 Abaqus 分析流程圖

4.2.1 前處理(Preprocessing)

Abaqus/CAE 是完整的 Abaqus 運算環境 (Complete Abaqus Environment)，分為若干個模組，每個模組定義了模擬過程的一個邏輯面，如定義幾何形狀、材料性質、元素截面性質和產生網格等，每個功能模組接續進行。Abaqus 的前處理主要在定義物理問題的模型，包含離散化的幾何形體、元素斷面屬性、材料性質、負載和邊界條件。以下(1)、(2)、(3)皆可透過 Abaqus/CAE 前處理完成。

(1) 建立實體模型

使用 Abaqus/CAE 或其他前處理程式，以圖形方式建立各個單獨的部件(Part)，根據材料定義及截面幾何形狀，定義部件的材料與截面性質。部件建立後，各部件單獨存在於本身的座標系統中，依據需求可將各個部件裝配(Assembly)於總體座標系統中。Abaqus 中的自由度(1、2、3、4、5、6)對應到的座標系統為(x、y、z、 ϕ_x 、 ϕ_y 、 ϕ_z)。

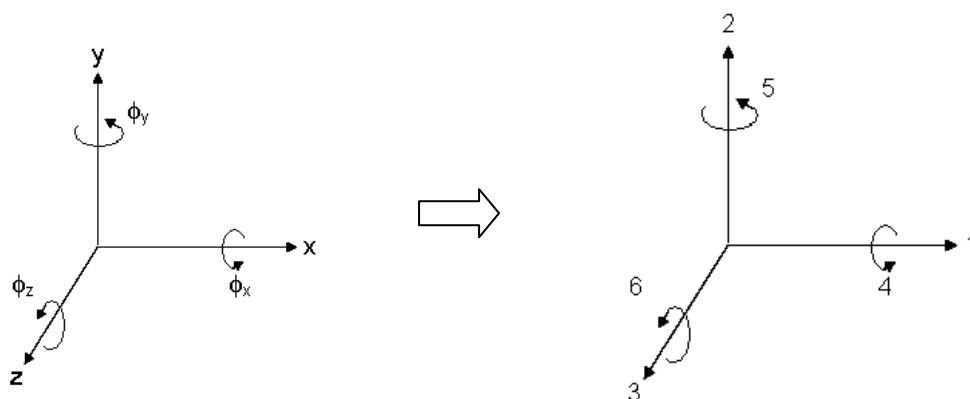


圖 4.3 Abaqus 中平移與旋轉自由度標示示意圖

在 Abaqus 中使用的關於自由度的順序約定如下：

自由度 1: 1 方向的位移 (X 方向的位移)

自由度 2: 2 方向的位移 (Y 方向的位移)


自由度 3: 3 方向的位移 (Z 方向的位移)

自由度 4: 繞 1 軸的轉動 (繞 X 軸的轉動)

自由度 5: 繞 2 軸的轉動 (繞 Y 軸的轉動)

自由度 6: 繞 3 軸的轉動 (繞 Z 軸的轉動)

(2) 建立分析步驟與邊界負載



使用分析(Step)模組設置分析的步驟，此程序為實現模擬過程的變化，如負載與邊界的改變，而Abaqus/CAE會自動產生初始步驟，其餘的步驟則自己建立，在分析過程中可依需求，在任何步驟要求輸出資料。另外在負載(Load)模組裡指定負載、邊界及場變數，依據先前設定的分析步驟，可要求這些負載與邊界條件在哪些分析步中起作用。至於先前提到裝配後的模型，彼此是獨立的，若當中間有交互用產生，如各個區域的拘束、接觸等，必須在交互作用(Interaction)模組裡指定，同樣的也可根據分析步來規定在哪些步驟起作用。

(3) 劃分網格

利用網格(Mesh)模組產生有限元素網格，主要的網格分割分為兩個步驟操作，首先在實體模型邊界上灑上種子(Seeds)，然後對實體模型進行網格分割，得到的元素數目、尺寸，乃依據所選擇的種子數目決定，而 ABAQUS/CAE 會盡可能地在各個種子處佈置網格的節點。至於元素類型的設置，可在網格分割前或產生之後建立進行。

4.2.2 模擬計算(Simulation)

Abaqus/Standard 或 Abaqus/Explicit 藉由讀入 Abaqus/CAE 產生的輸入檔，求解出輸入檔中定義的數值模型。Abaqus/Standard (顯式) 與 Abaqus/Explicit (隱式) 皆可解決廣泛的問題，但針對問題的特點來選用顯式或隱式的方式處理，可以節省計算時間亦不影響結果。對於非線性的問題，Abaqus/Standard 會自動調整增量步的大小，能便捷且有效的解決非線性問題；有些問題若使用 Abaqus/Standard 求解，因為材料的複雜或是接觸問題，可能難以收斂而導致大量的疊代，因為每次的疊代都需要求解由大量線性方程組成的方程組，故選擇隱式分析可以節省硬碟空間和記憶體，大量減少時間成本。

4.2.3 後處理(Post processing)

Abaqus/Standard 或 Abaqus/Explicit 分析計算後的結果，如應力、位移或其他基本變數後，將資訊發送給 Abaqus/CAE，對作業的進程進行

監控，並產生輸出資料庫。透過Abaqus/CAE 的視覺化(Visualization) 模組或其他後處理軟體，可以讀入輸出資料，對結果做評估。視覺化 模組可將讀入的二進位輸出資料庫中的檔案以多樣式顯示結果，如彩 色等值線、變形圖、動畫和X-Y曲線圖等，對於分析結果以圖形方式輸 出，可讓設計者得到更直覺的感受。

4.4 元素的積分

在ABAQUS中所有的元素都使用數值積分，對於材料行為的描述 提供了完整的一致性。由能量法得知，應力作用在試件上將會產生變 形，由此應力對應的應變可求出對材料做功為

$$\delta W = \int_V \tilde{\sigma} : \delta \tilde{\epsilon} dV \quad (3.1)$$

其中 V 代表體積。因此由數值積分做功的積分式可由元素中積分點 的做功總和表示

$$\int_V \tilde{\sigma} : \delta \tilde{\epsilon} dV \rightarrow \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_i : \delta \tilde{\epsilon}_i V_i \quad (3.2)$$

其中 n 為元素中積分點的數目， V_i 為積分點所對應的體積。

4.5 建構結構物之基本有限元素種類

Abaqus 提供十分豐富可模擬任意實際形狀的單元庫；配合其提供的材料模型庫或自定材料行為，可模擬大多數典型工程材料性質，能解決結構之應力及位移的許多問題。以下僅介紹應用於本研究內容方面建構模型時所使用到的梁元素和實體元素相關內容設定。

梁元素(Beam Element)

在Abaqus中的所有梁元素都是梁柱類元素，這表示它們可以產生軸向、彎曲和扭轉變形。梁元素用來模擬一維尺寸遠大於另外二維尺寸的構件，且只有長度向的應力比較顯著。在Abaqus 中梁元素的名字以字母” B” 開頭，下一個字符表示元素的維數：” 2” 指的是二維梁元素、” 3” 指的是三維梁元素。第三個字符表示插值的階數：” 1” 代表線性插值(Timoshenko beam)、” 2” 代表二次插值(Timoshenko beam)、” 3” 代表三次插值(Euler-Bernoulli beam)。自由度方面，二維梁元素有3 個自由度(x, y, ϕ_z)，三維梁元素有6 個自由度($x, y, z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$)。

Abaqus 提供了二種選項塊來定義梁橫截面的幾何形狀，包括：
*BEAM SECTION 及 *BEAM GENERAL SECTION。在 *BEAM SECTION 中提供了一些常用斷面如：ARBITRARY(開斷面或封閉斷面的薄壁)、BOX(矩形中空斷面)、CIRC(圓形斷面)、HEXAGONAL(六

邊形中空斷面)、I(I 形斷面)、L(L 形斷面)、PIPE(圓形中空斷面)、RECTANGULAR(矩形斷面)、TRAPEZOID(梯形斷面)，需配合 *MATERIAL 選項塊來定義材料性質。而 *BEAM GENERAL SECTION 中除了上述的斷面外，另提供兩種自定類型：GENERAL、NONLINEAR GENERAL 允許你用多種一般的方法來定義橫截面行為來模擬線性或非線性行為，由於這個選項是直接透過截面的工程量(面積、慣性矩等)來模擬梁橫截面的行為。二者最大的差異在於前者需在橫截面上積分點積分任何量，後者不需要，只有在對應力和應變有輸出要求時，才透過合力和合力矩來計算，所以 *BEAM GENERAL SECTION 選項的計算花費比 *BEAM SECTION 選項小。

本文消能器模型採用 B31 梁元素(三維梁元素，線性插值 Timoshenko beam)，梁橫截面的幾何形狀採用 BEAM SECTION 中的 CIRC(圓形斷面)去建構模型。

實體元素(Continuum elements)

在不同的元素族中，連續體(Continuum elements)或者實體元素(Solid)能夠用來分析最廣泛的構件。顧名思義，實體元素簡單地簡單模擬部件中的一小塊材料。由於它們可以通過其任何一個表面與其它元素相連，實體元素就像建築物中的磚或馬賽克的瓷磚一樣，因此能夠用來構建具有幾乎任何形狀、承受幾乎任意負載的模型。

在 Abaqus 中，應力/位移實體元素的名字以字母“C”開頭。隨後的兩個字母表示維數，並且表示了元素的有效自由度。字母“3D”表示三維元素；“AX”表示軸對稱元素；“PE”表示平面應變元素；而“PS”表示平面應力元素。

本文消能器模型除了採用 B31 梁元素去和實驗值比對另外也同時用 Solid 元素去進行驗證，Solid 部份本文採用 C3D20R 元素，C3D20R 乃是一種具有 20 個節點的 3D Solid Element，此種元素 是二階元素，由於他能夠有效模擬試體外觀、因此比一階元素更能提供較高的精確性，同時，二階元素對於彎矩的模擬也具有較高的效率。至於元素編號的 R，則是代表降階積分(Reduce Integration)。

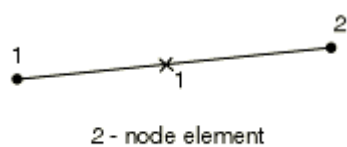


圖 4.4(a) B31 元素

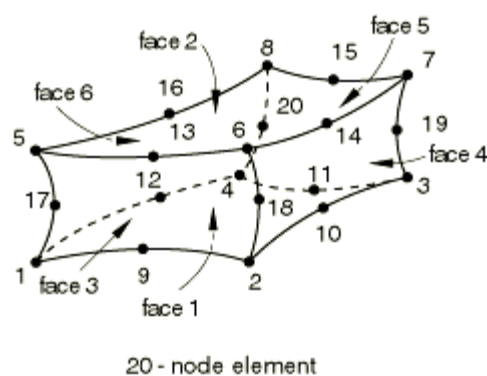


圖 4.4(b) C3D20R 元素

4.6 元件測試數值驗證

針對消能器進行元件測試試驗，此章節將以 Abaqus 程式模擬 D20H80、D20H100 試體之圓棒形加勁消能器，將其分析結果與測得之實驗數據比較。另外模擬 D50H175、D50H200、D50H250、D50H175 四組試體，觀察其消能效果，作為日後實驗或者是實務上的參考。以下簡介相關分析設定及相關分析成果。

材料參數

採雙線性，如圖 4.5， $E=169\text{GPa}$ 、 $E_p=1.96\text{GPa}$ ；此根據單拉實驗(圖 3.2)

分兩段線性回歸得；

Yield Stress=644MPa; Hardening: Kinematic。

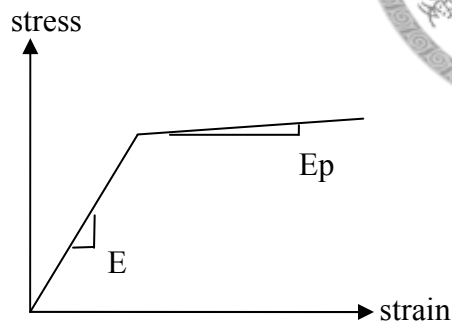


圖 4.5 材料參數

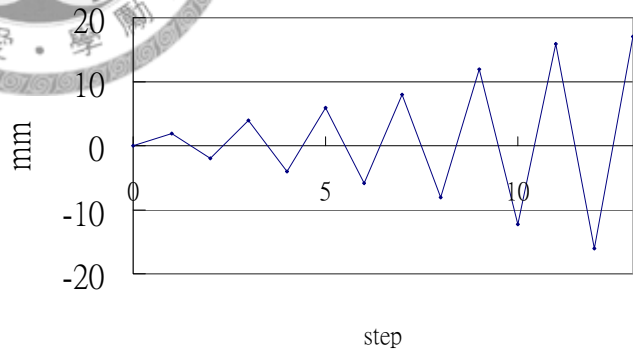


圖 4.6 位移控制歷時

邊界條件

模擬同實驗採位移控制，震幅如圖 4.6 所示，邊界設定部份採下端固定(六個空間自由度皆鎖住，上端僅允許 x 方向移動(僅放開 1 方向, x 方向自由度))

Beam Element 建構模型與網格劃分

part 沿軸向共切 20 等分，消能器模型將由 20 塊結塊組程，其半徑決定原則為取斷面平均值當做平均半徑，如高 50mm 時半徑 10mm，高 45mm 時半徑 9.66mm 則取平均 9.83mm 做為高 50mm 到高 45mm 的結塊平均半徑，如下圖 4.7 所示，其餘結塊作法雷同。mesh 部份採沿軸向平均 80 等份，採用 B31 梁元素，如圖 4.8。

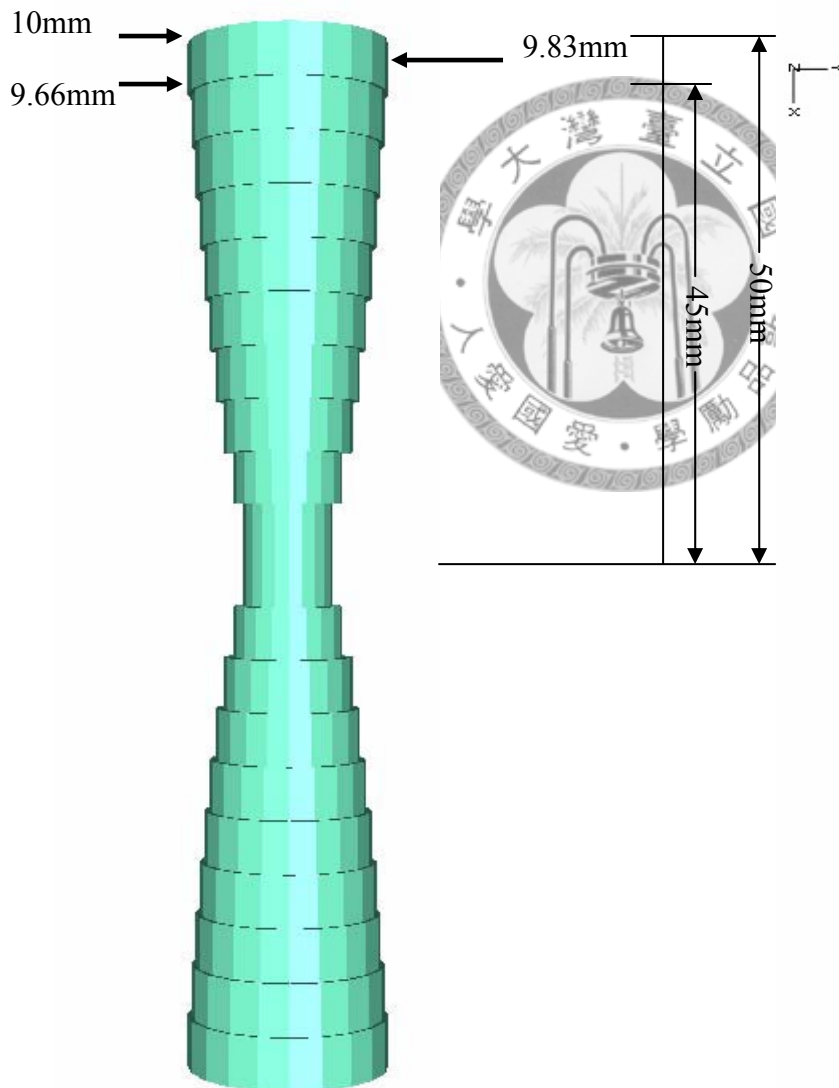


圖 4.7 Beam 試體模型

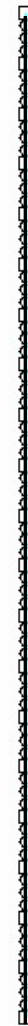


圖 4.8 Beam 試體網格劃分

Solid Element 建構模型與網格劃分

Part 部份可由 Abaqus/CAE 的 Section Sketch 直接以繪圖方式製成，如圖 4.9。mesh 部份在實體部件上的邊界上撒上種子(Seeds)，然後對部件實體分割網格，元素尺寸取 Approximate global size: 0.004，得 1444 塊 element，如圖 4.10。

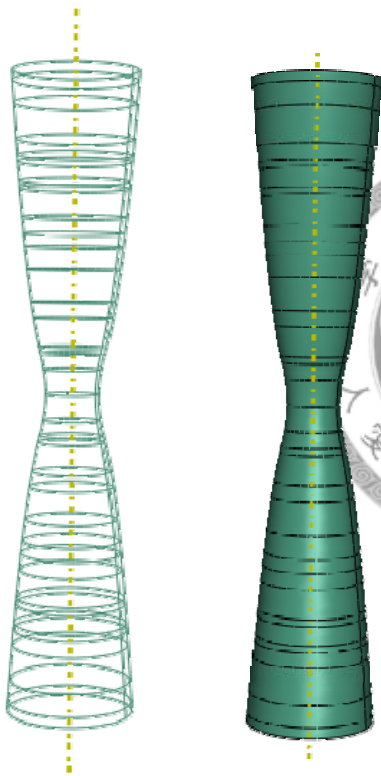


圖 4.9 Solid 試體模型

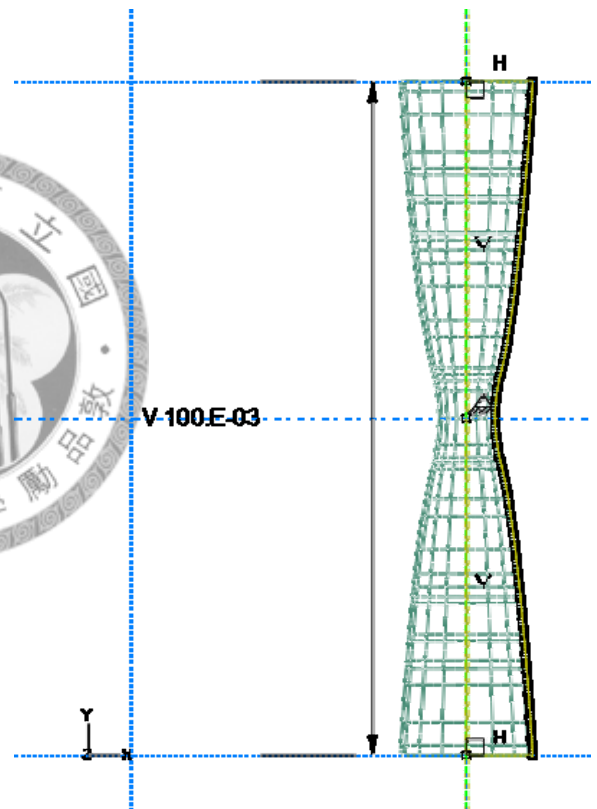


圖 4.10 Solid 試體網格劃

下列 case 分別以分別以 Beam Element、Solid Element 去建構模型，來觀察其消能效果。

CASE 1

D20H80(直徑 20mm 高度 80mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

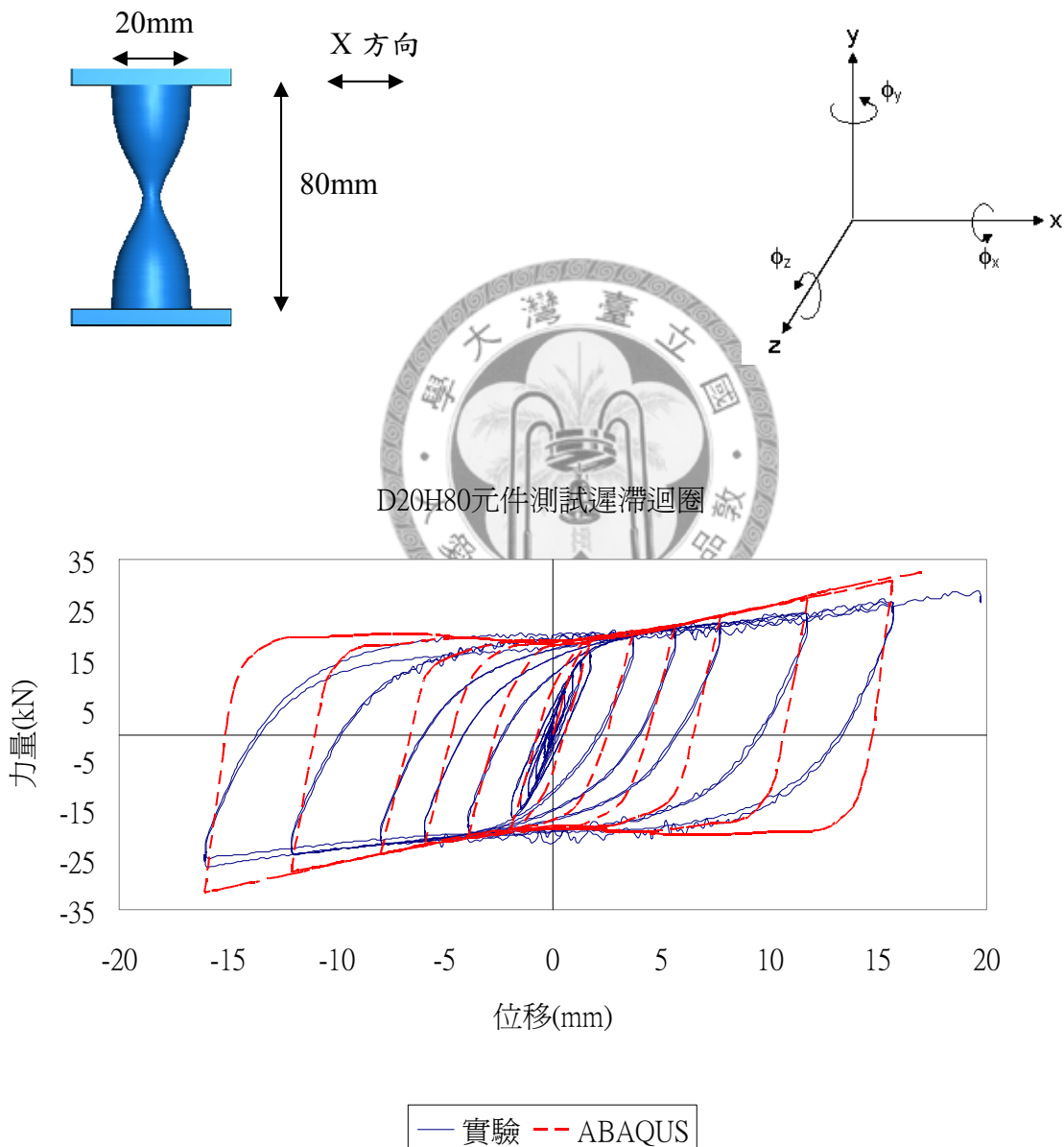


圖 4.11 D20H80 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 2

D20H100 (直徑 20mm 高度 100mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

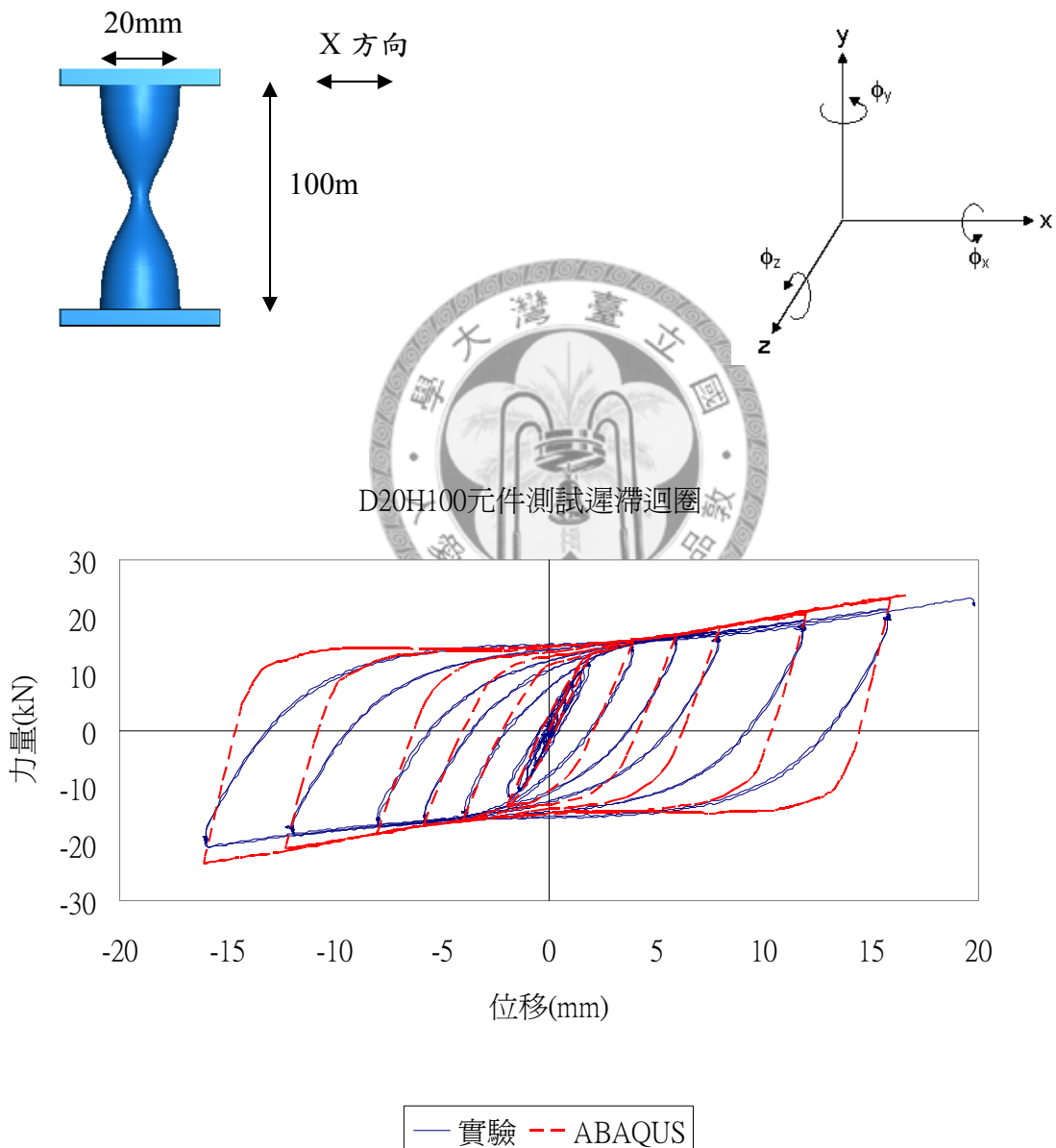


圖 4.12 D20H100 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 3

D50H175 (直徑 50mm 高度 175mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

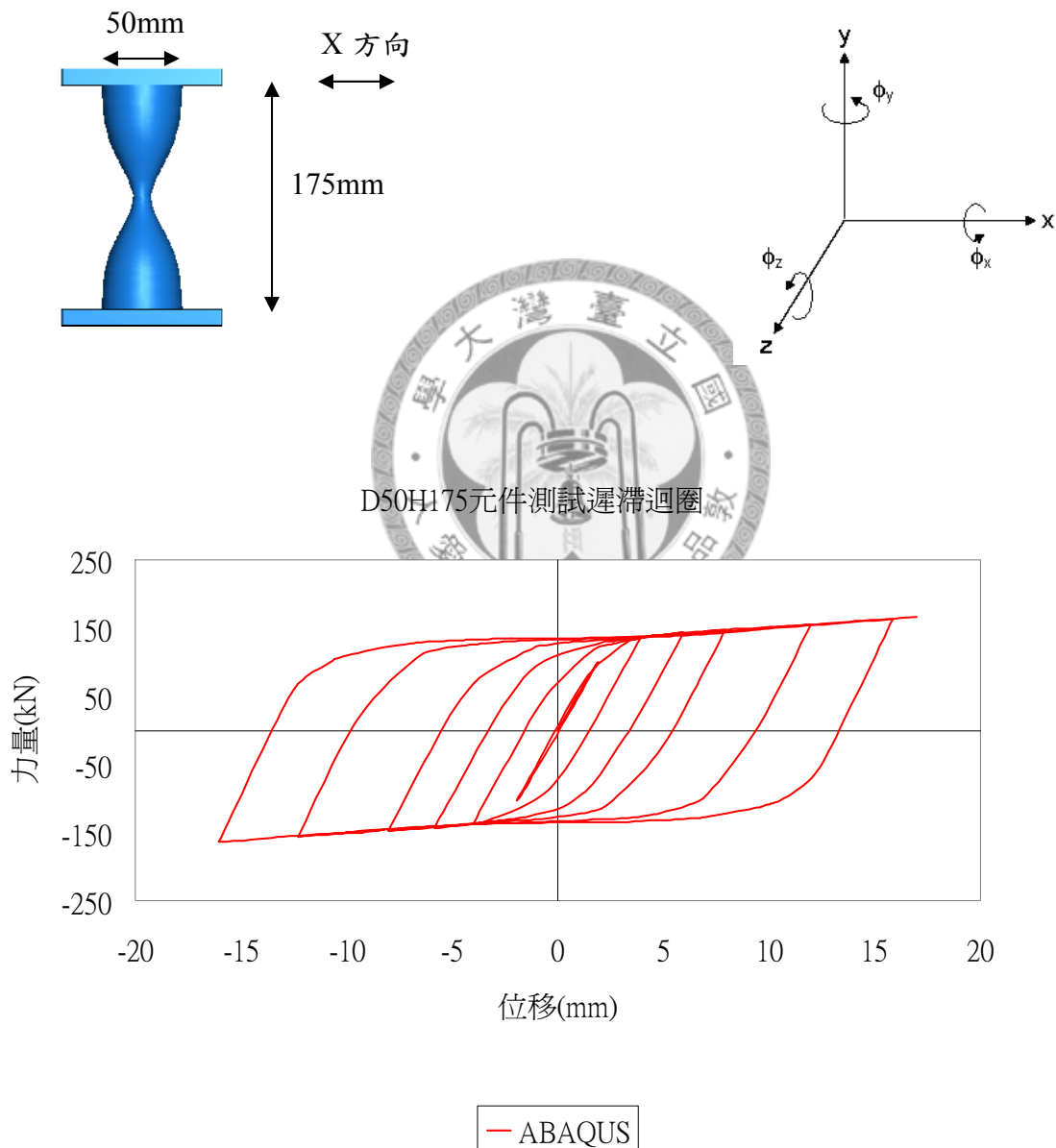


圖 4.13 D50H175 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 4

D50H200 (直徑 50mm 高度 200mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

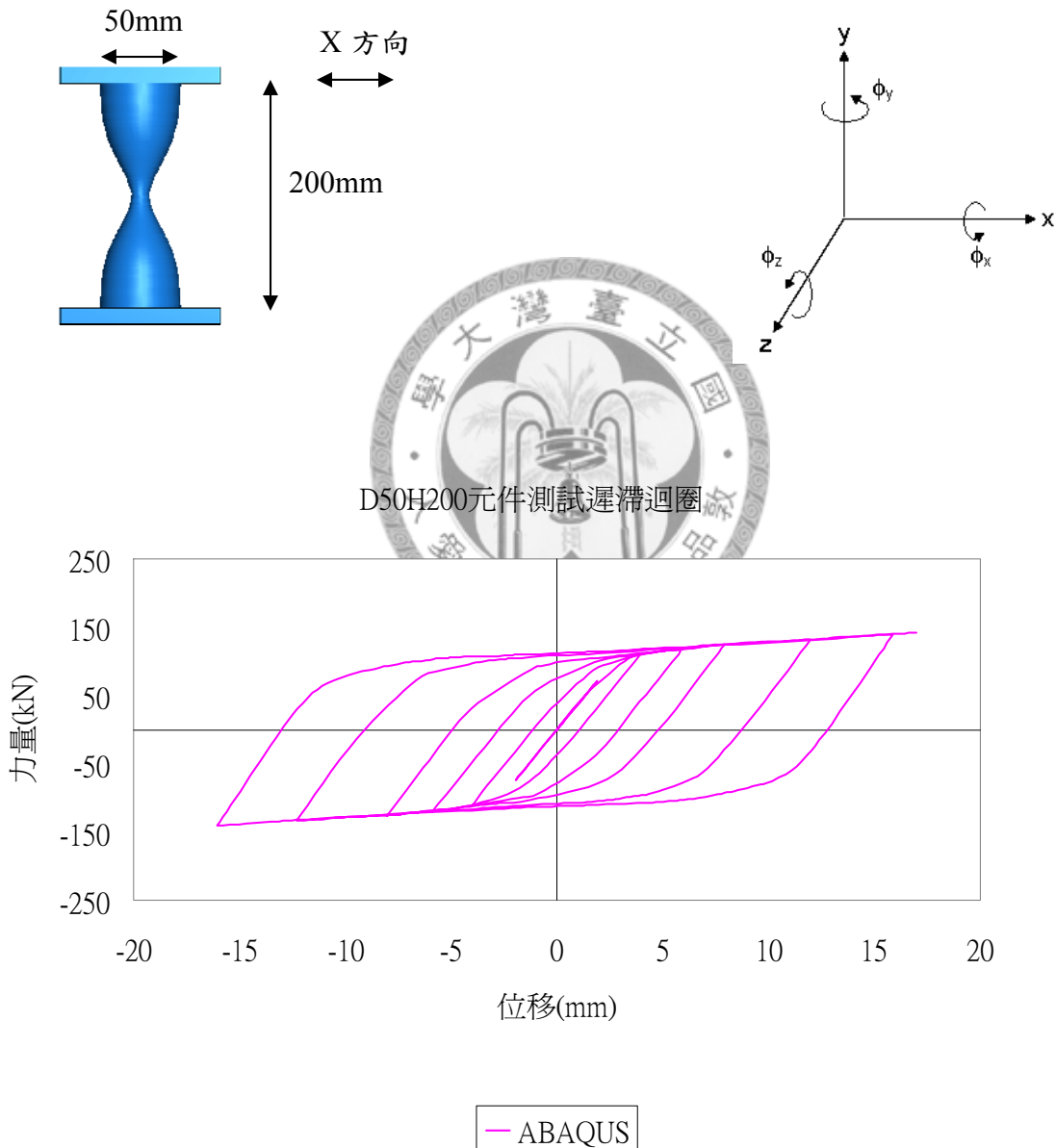


圖 4.14 D50H200 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 5

D50H250 (直徑 50mm 高度 250mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

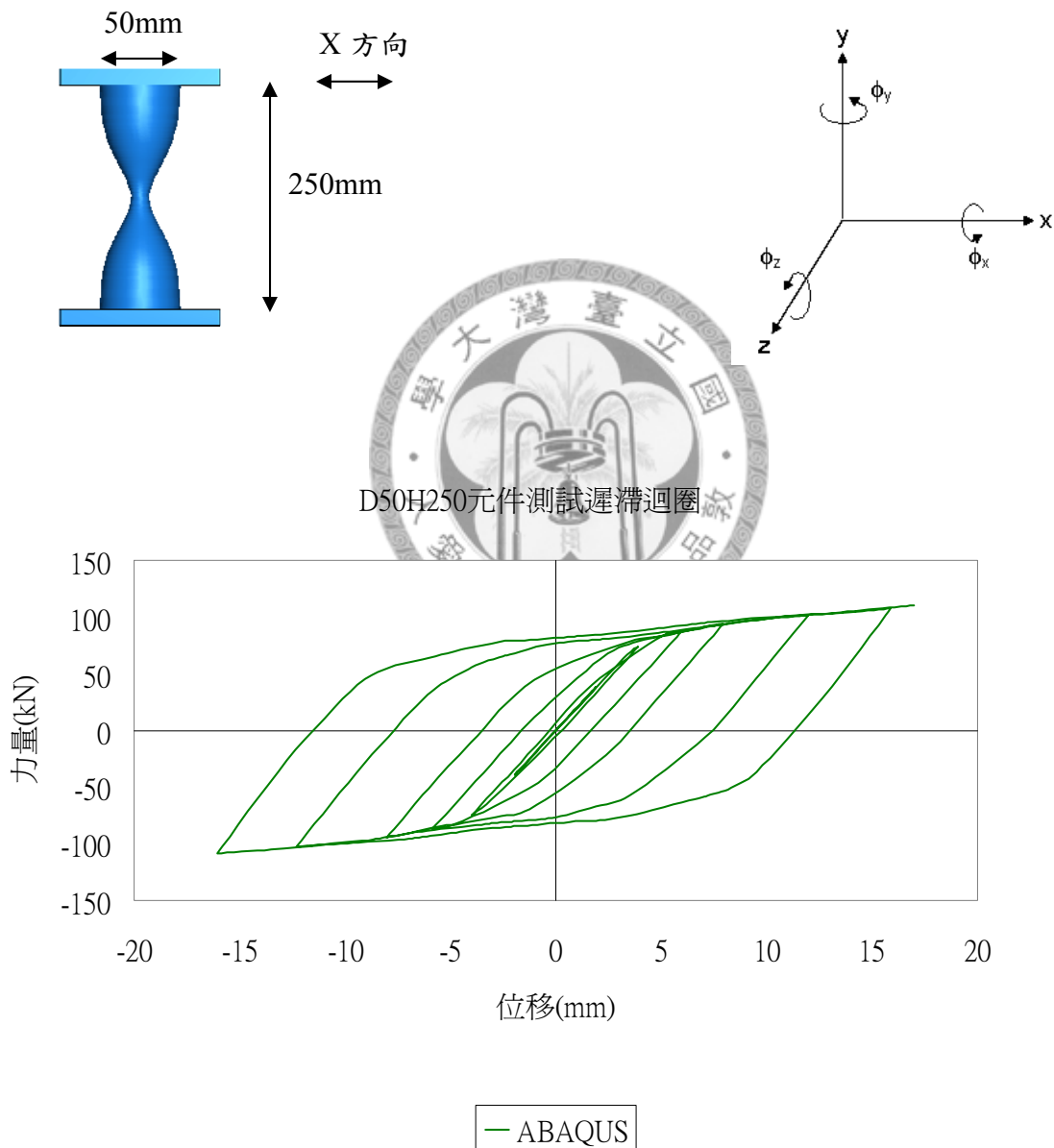


圖 4.15 D50H250 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 6

D50H300 (直徑 50mm 高度 300mm)，以 Beam Element 模擬，由梁元素 B31 組成，切 80 結塊，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

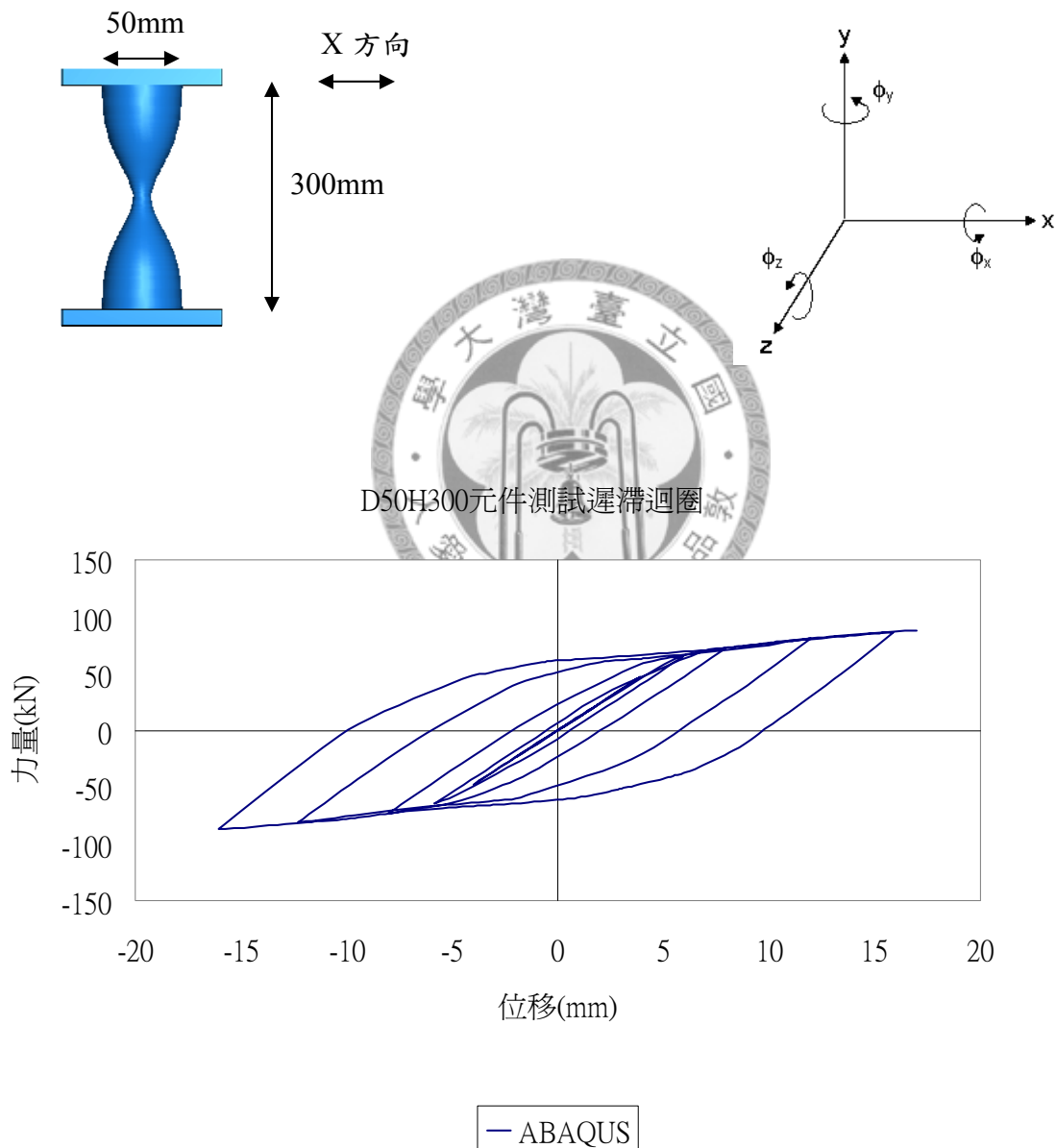


圖 4.16 D50H300 圓棒形加勁消能器遲滯迴圈圖

CASE 7

D20H100 (直徑 20mm 高度 100mm)，以 Solid Element 模擬，由元素 C3D20R 組成，邊界設定部份採下端固定，上端僅允許 x 方向自由度移動，其震幅如圖 4.6 所示。

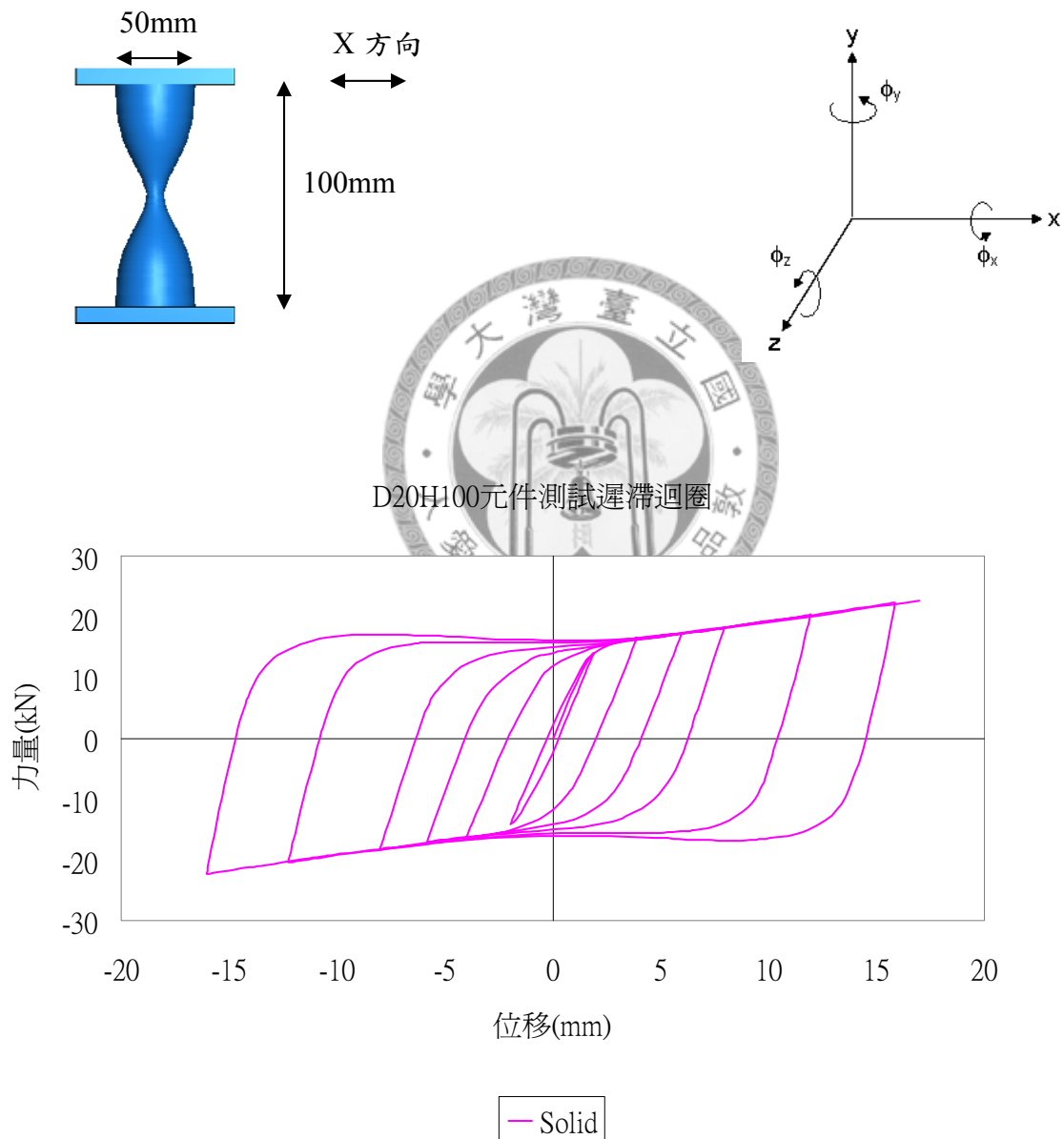
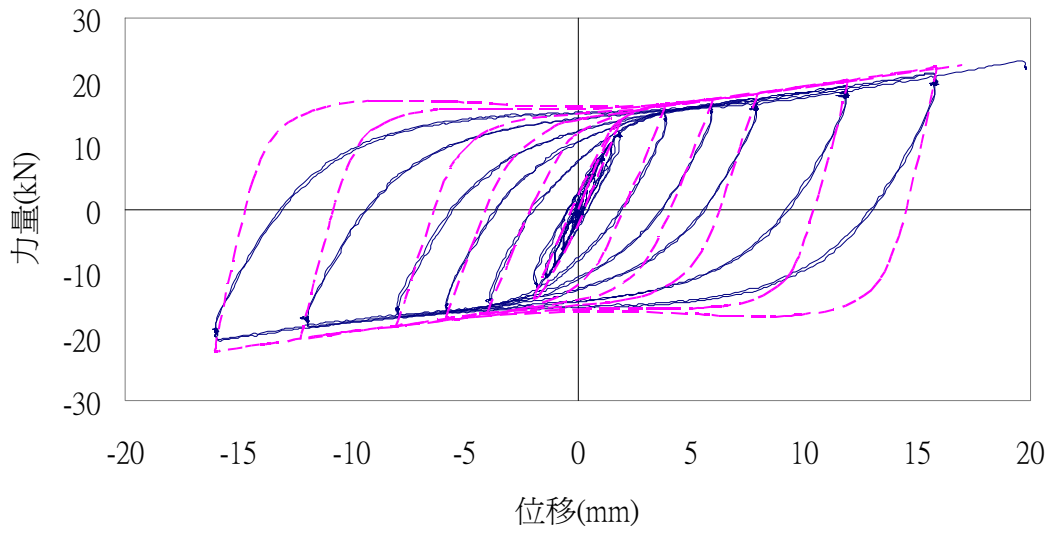


圖 4.17 D20H100(Solid)圓棒形加勁消能器遲滯迴圈

D20H100元件測試遲滯迴圈



D20H100元件測試遲滯迴圈

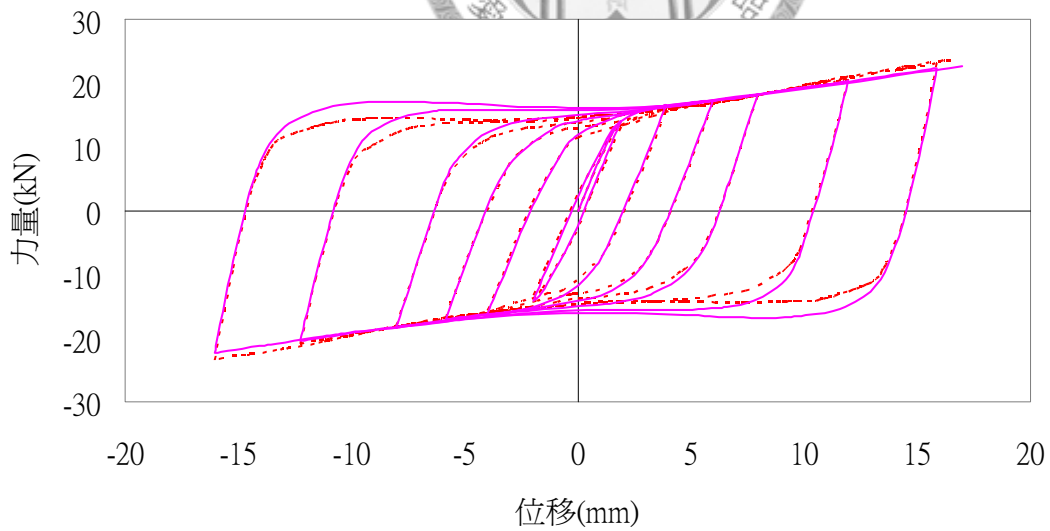


圖 4.18 Solid 和 Beam 元素遲滯迴圈比較圖

4.7 問題討論

針對消能器 Abaqus 模擬部分以下將數值分析及成果重點整理如下：

1. 由圖 4.18 可以看出以 Beam 和 Solid 元素去分析圓棒型加勁消能器其成果和趨勢大致相同，但是以 Beam 元素來處理問題可以大大節省分析時間也可以有效的觀察分析成果，建議以 Beam 元素先對試體研究分析，如想進一步進行內視觀察再考慮以 Solid 元素進行分析。
2. 消能效果隨徑高比而遞減，如圖 4.20，徑高比(H/D)越大，則消散能量越小，參考圖 4.21 將其線性回歸可得 $Y = -6 \cdot 10^6 X + 4 \cdot 10^7$ ，Y 表 km-mm 消散能量，X 表 H/D，其趨勢可供參考。
3. 一般而言我們會認為硬化部分必須以 isotropic 來作為設定，但是使用 isotropic 會有在加卸載過程中會有殘留產生，影響其降伏強度，使每圈加卸載的降伏點不斷變大，會與實驗成果有所出入，如圖 4.18 建議使用 Kinematic 作為硬化部分的設定，則不考慮殘留應力，會使數值分析成果和實驗較為相近。
4. 隨消能器上下端錯動位移產生，軸向力隨之產生，隨著位移增大，軸向力同步增大，如圖 4.22。
5. 觀察單拉實驗和理論分析應化部分應為水平線，但是消能器實驗和數值分析的硬化部分為緩慢上升，推估為軸向力造成 P- Δ 效應，使硬化爬升。

D20H100元件測試遲滯迴圈

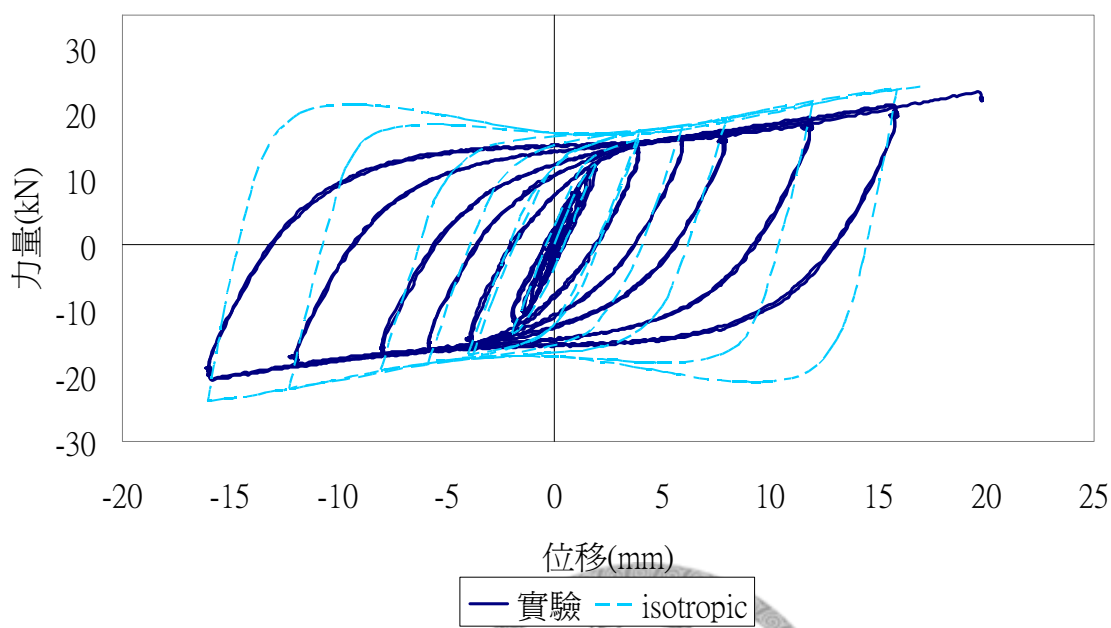


圖 4.19 硬化使用 isotropic 和實驗遲滯迴圈比較圖



元件測試遲滯迴圈

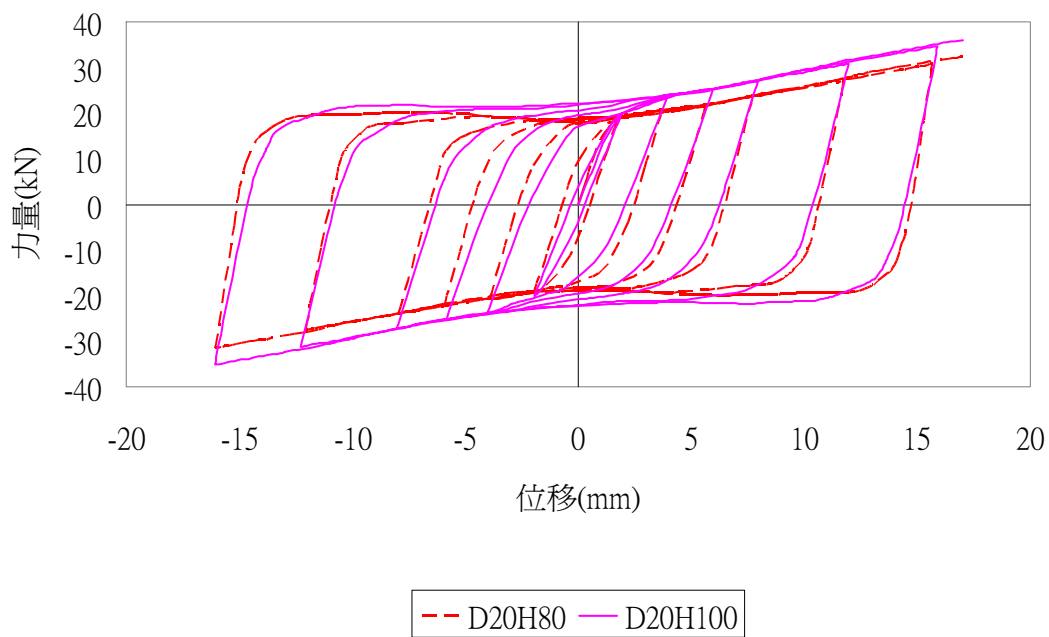


圖 4.20 (a) 各種尺寸圓棒形加勁消能器遲滯迴圈比較圖

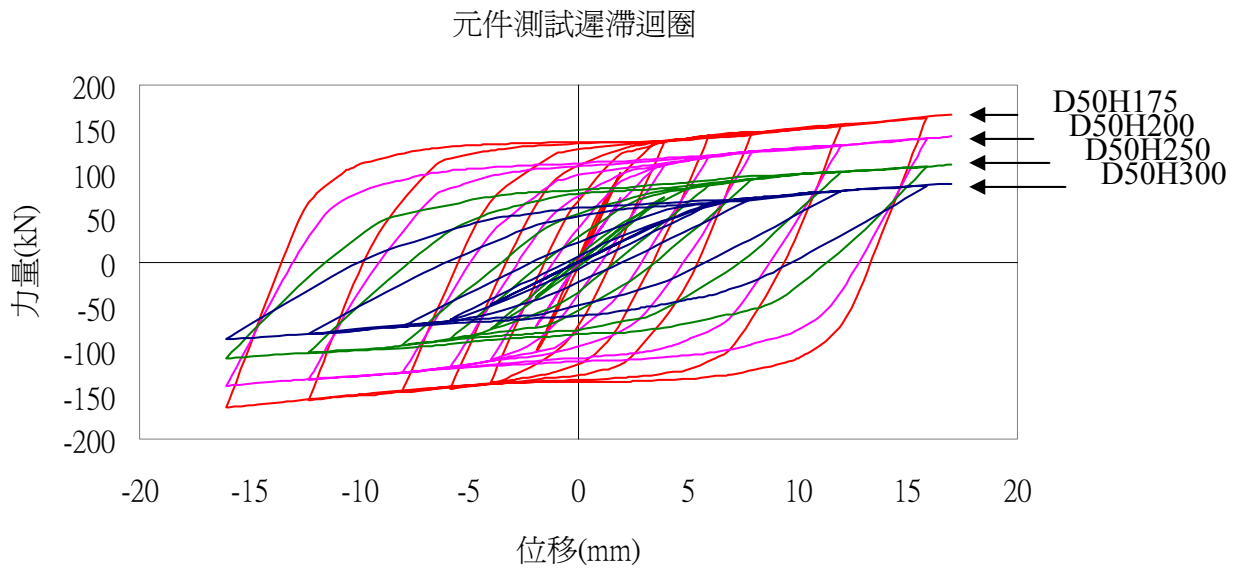


圖 4.20 (b) 各種尺寸圓棒形加勁消能器遲滯迴圈比較圖

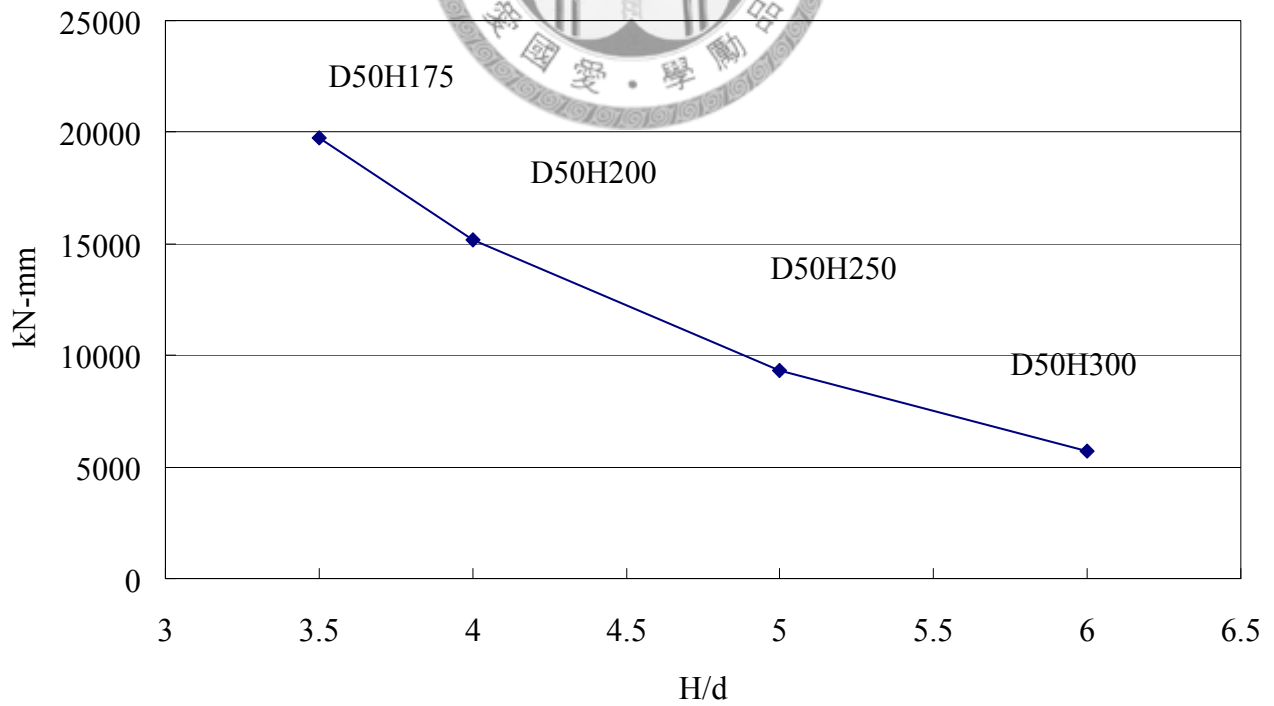


圖 4.21 各種尺寸圓棒形加勁消能器消散能量比較圖

D20H100元件測試軸力遲滯迴圈

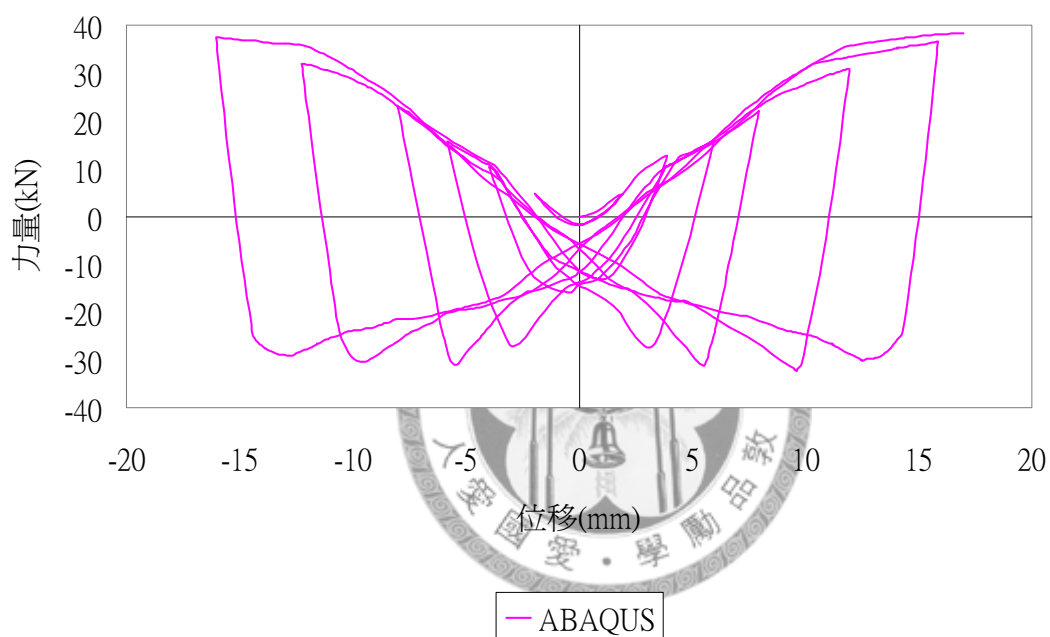


圖 4.22 圓棒形加勁消能器軸向力遲滯迴圈

第五章 結論與展望

6.1 結論

本研究主要以有限元素分析軟體 ABAQUS 針對圓棒形加勁消能器作力學分析研究，配合圓棒形加勁消能器之理論分析，發展出可適用於圓棒形加勁消能器之理論模擬，並將實際實驗結果分析，作為與理論模擬比對之依據。整個過程包含有圓棒形加勁消能器之力學性質、圓棒形加勁消能器之試體規劃與設計、圓棒形加勁消能器之實驗結果、有限元素軟體分析等等。綜合本文之研究結果可歸納得以下結論。針對消能器 ABAQUS 模擬部分以下將數值分析及成果重點整理如下：

1. 以 Beam 元素去分析圓棒型加勁消能器比以 Solid 元素去進行分析時省時，兩者分析成果相似，但是計算時間相差甚遠。
2. 消能效果隨徑高比而遞減，徑高比(H/D)越大，則消散能量越小。
3. 硬化必須以 Kinematic 進行設定，isotropic 會造成遲滯迴圈發散。
4. 隨消能器上下端錯動位移產生，軸向力隨之產生，隨著位移增大，軸向力同步增大。
5. 軸向力造成 P- Δ 效應，使原本應為水平線之硬化曲線緩慢爬升。

5.2 展望

考量到未來在實務上的發展，須進一步探討消能器效果和力學性質，未來可進行研究如下列所示，以期彌補現行研究之不足。

1. 考慮拉壓行為對消能器造成之影響。
2. 考慮剪力效應對消能器造成之影響。
3. 將消能器並排並進行模擬觀察其成果。
4. 將並排後之消能器放上結構物模擬觀察其成果。
5. 提供更完整、簡單的方法去進行試體模擬。



參考文獻

- [1] 鍾立來、吳賴雲、李明璦、楊培堅，2004，“東帝士 85 國際廣場之結構主動控制”，結構工程，第十四卷，第二期，第 45～65 頁。
- [2] 蔡益超、李慶豐，1988，“東帝士高雄超高大樓地震設計反應譜之研擬”，國立臺灣大學，工學院，地震工程研究中心研究報告第 CEER77-09 號。
- [3] 蔡東和，1994，“東帝士-建台 85 層大樓運用高性能混凝土之結構設計構想”，中華民國結構工程學會，結構工程，第九卷，第一期，第 39～42 頁。
- [4] 陳柏任、蔡崇興、鍾立來、江子政，2004，“多跨結構物加裝組合式橡膠支承墊之三軸向振動台實驗”，結構工程期刊，第 323～324 頁。
- [5] 蔡崇興、江子政、陳柏任，2004，“足尺度鋼構架加裝複擺隔震器之地震模擬振動台試驗”，第七屆結構工程研討會論文集，第 331～332 頁。
- [6] 黃銘智、陳振華、陳唐徵，2004，“用樁基礎隔震橋梁的動態模型-考慮基礎搖擺效應”，第七屆結構工程研討會論文集，第 368～369 頁。
- [7] 徐德修、李永峰，1988，“結構液流阻尼器之設計及應用”，結構工程，第十三卷，第二期，第 31～31 頁。
- [8] 洪雅惠、蔡俊祥、黃震興，2004，“加裝非線性黏性阻尼器之減震結構設計”，第七屆結構工程研討會論文集，第 361～362 頁。
- [9] 柯鎮洋、謝百鍾，1987，“淺談免震、防振及制振構造工法”，結構工程，第二卷，第四期，第 33～40 頁。

- [10] 張荻薇，1988，“認識隔(減)震制振結構”，結構工程，第三卷，第一期，第 67~80 頁。
- [11] 夏太偉，1996，“單自由度結構體減振之最佳化設計”，結構工程，第十一卷，第二期，第 23~35 頁。
- [12] 宋文沛、施明祥、陳亮宏、郭其珍，2004，“蓄壓式半主動油壓阻尼器消能行為之數值模擬模式”，第七屆結構工程研討會論文集，第 305~306 頁。
- [13] Hou, C. Y., Hsu, D. S., Lee, Y. F., and Chen, H. Y., 2004, “Mechanisms to cause the nonlinear behavior of fluid dampers for seismic energy dissipation”, 第七屆結構工程研討會論文集，第 307~308 頁。
- [14] 施明祥、宋文沛，2004，“蓄壓式半主動油壓阻尼器之行為研究”，第七屆結構工程研討會論文集，第 313~312 頁。
- [15] 施明祥、宋文沛、隋忠寰，2004，“位移相依半主動油壓阻尼器之消能行為研究”，第七屆結構工程研討會論文集，第 311~312 頁。
- [16] 施明祥、宋文沛，2004，“低降伏加勁阻尼裝置之研發”，第七屆結構工程研討會論文集，第 315~316 頁。
- [17] 陳坤盛、施明祥、宋文沛，2004，“降伏加勁阻尼裝置理論分析之統計驗證研究”，第七屆結構工程研討會論文集，第 317~318 頁。
- [18] 陳柏任、魏宗德、楊培堅、蔡崇興、鍾立來、江子政，2004，“強化式加勁阻尼器於建築物防震之應用實例”，第七屆結構工程研討會論文集，第 327~328 頁。
- [19] 蔡崇興、江子政、陳貴麒、陳柏任、游士賢、吳健民，2004，“新

型挫屈束制斜撐之元件測試以及數值模擬研究”，第七屆結構工程研討會論文集，第 333~334 頁。

[20] 盧煉元、劉彥緯、林錦隆，2004，“應用楔形原理之摩擦阻尼器研發”，第七屆結構工程研討會論文集，第 343~344 頁。

[21] 蔡崇興、李冠興、陳文信、陳貴麒，2004，“軸向加勁阻尼器之研發與測試”，第七屆結構工程研討會論文集，第 345~346 頁。

[22] 林其璋、蘇宇宏、王哲夫，2004，“多元調諧質量阻尼器之樓板振動控制”，第七屆結構工程研討會論文集，第 359~360 頁。

[23] T.T. Soong, and G. F. Dragash, 1990, Passive Dissipation Systems in Structure Engineering, John Wiley & Sons.

[24] Meirovitch, L., 1990, Dynamics and Control of Structures, John Wiley & Sons.

[25] Chen, W.F., Han D. J., 1988, Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlay.

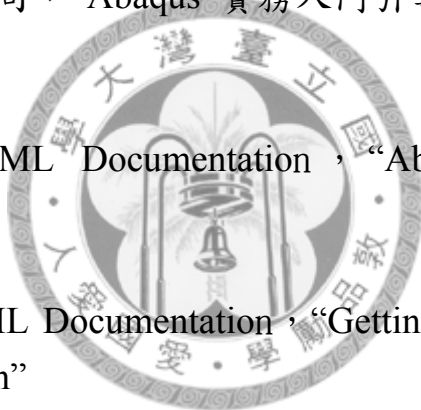
[26] 曾建創，2003，“鋼筋混凝土結構之鋼框架消能補強及修復試驗研究”，指導教授：鍾立來教授、吳賴雲教授，國立台灣大學碩士論文。

[27] 陳生金，2001，“鋼結構設計—極限設計法與容許應力設計法”，科技圖書，台北。

[28] http://www.ncree.gov.tw/03_Exp/Frame3.htm，國家地震工程研究中心網頁。

[29] 林沛暘，2000，“系統識別與結構控制在結構物減震之應用研究”，指導教授：羅俊雄教授，國立台灣大學博士論文。

- [30] 施閔元，2003，“鋼筋混凝土結構加勁消能補強之耐震能力評估”，指導教授：鍾立來教授、吳賴雲教授，國立台灣大學碩士論文。
- [31] Inaudi, J. A., and De la Llera, J. C., 1992, Dynamic Analysis of Nonlinear Structures using State-Space Formulation and Partitioned Integration Schemes, UCB/EERC-92/18.
- [32] 林昭葳，2005，“結構加裝圓棒形加勁消能器之動力分析及試驗驗證”，指導教授：鍾立來教授、吳賴雲，國立台灣大學碩士論文。
- [33] 愛發股份有限公司，“Abaqus 實務入門引導”，全華圖書股份有限公司。
- [34] Abaqus 6.7 HTML Documentation，“Abaqus Analysis User's Manual”
- [35] Abaqus 6.7 HTML Documentation，“Getting Started with Abaqus: Interactive Edition”
- [36] Abaqus 6.7 HTML Documentation，“Abaqus/CAE User's Manual”



附錄一

圓棒形加勁消能器材料於線彈性階段側力 V 與側位移 Δ 的關係：

$$\begin{aligned}\frac{\Delta}{2} &= \int_0^{\frac{H}{2}} \frac{Mm}{EI} dx \\ &= \int_0^{\frac{H}{2}} \frac{(Vx)x}{E \left[\frac{\pi}{64} \left(\frac{2x}{H} \right)^3 D^4 \right]} dx \\ &= \frac{64VH^{\frac{4}{3}} 2^{\frac{-4}{3}}}{\pi ED^4} \int_0^{\frac{H}{2}} x^{\frac{2}{3}} dx \\ &= \frac{64VH^{\frac{4}{3}} 2^{\frac{-4}{3}}}{\pi ED^4} \frac{3}{5} x^{\frac{5}{3}} \Big|_0^{\frac{H}{2}} \\ &= \frac{64 \times 2^{\left(\frac{-4}{3}-\frac{5}{3}\right)} \times \frac{3}{5} VH^{\left(\frac{4}{3}+\frac{5}{3}\right)}}{\pi ED^4} \\ &= \frac{24VH^3}{5\pi ED^4}\end{aligned}$$



其中 I 為圓形鋼棒於高程 x 時之慣性力矩(moment of inertia)：

$$I = I(d) = \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\pi}{64} D^4 \left(\frac{2x}{H} \right)^3$$

附錄二

由 B 斷面直徑與 A 斷面直徑之關係及斷面曲率，可推得單側鋼棒側位移 Δ' ，進而推得整支鋼棒之側位移 Δ ，過程如下：

$$d = D^3 \sqrt{\frac{2x}{H}}$$

$$\frac{y_e}{D} = \frac{y'_e}{d} = \frac{y'_e}{D^3 \sqrt{\frac{2x}{H}}} = \frac{y'_e}{D^3 \sqrt{\frac{x}{L}}}$$

$$\therefore y'_e = y_e \sqrt[3]{\frac{x}{L}} = y_e \left(\frac{L-x'}{L} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\Delta' = \int d\Delta' = \int (L-x') d\theta$$

$$= \int (L-x') \frac{d\theta}{dx'} dx'$$

$$= \int_0^L (L-x') \frac{\varepsilon_y}{y_e \left(\sqrt[3]{\frac{L-x'}{L}} \right)} dx'$$

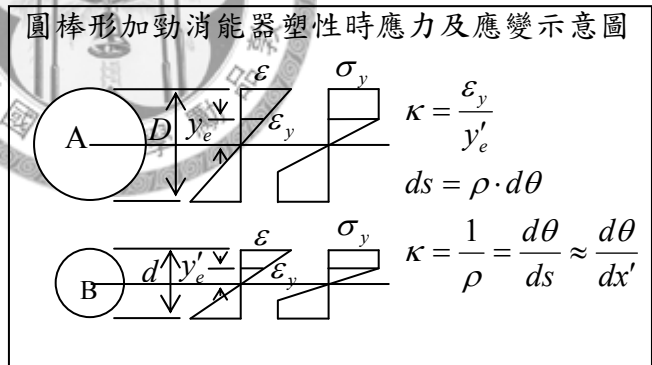
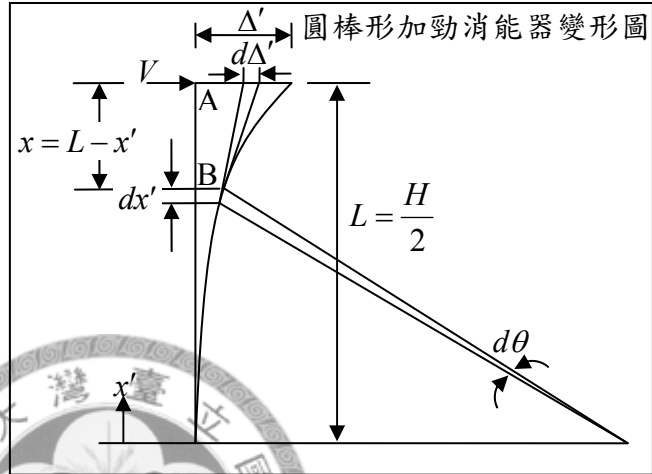
$$= \frac{\sqrt[3]{L} \varepsilon_y}{y_e} \int_0^L \sqrt[3]{(L-x')^2} dx'$$

$$= \frac{3\varepsilon_y H^2}{20y_e}$$

$$\Delta = 2\Delta' = \frac{3\varepsilon_y H^2}{10y_e}$$

當 $y_e = \frac{D}{2}$ 時，此時位移為降伏位移：

$$\Delta_y = \Delta \Big|_{y_e = \frac{D}{2}} = \frac{3\varepsilon_y H^2}{10 \left(\frac{D}{2} \right)} = \frac{3\varepsilon_y H^2}{5D}$$



附錄三

圓形鋼棒材料進入塑性時側力與位移關係：

$$V \frac{H}{2} = V_y \frac{16H}{\pi D^3} \frac{x}{16D} \left[-\frac{D^3}{x} \sqrt{D^2 - \frac{D^2}{x^2}} + \frac{2D^3}{x^3} \sqrt{D^2 - \frac{D^2}{x^2}} \right. \\ \left. - D^4 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{D^2 - \frac{D^2}{x^2}}}{\frac{D}{x}} + D^4 \frac{\pi}{2} \right) + \frac{16H}{\pi D^3} V_y \left(D^2 - \frac{D^2}{x^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

則

$$\frac{V}{V_y} = \frac{2}{H} \left\{ \frac{Hx}{\pi D^4} \left[\frac{2D^4}{x^3} \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} - \frac{D^4}{x} \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} - D^4 \tan^{-1} \left(x \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} \right) + D^4 \frac{\pi}{2} \right] \right. \\ \left. + \frac{8H}{3\pi} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}$$

$$= \frac{4}{\pi x^2} \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} - \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} - \frac{2x}{\pi} \tan^{-1} \left(x \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} \right) + x + \frac{16}{3\pi} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= \frac{2}{3\pi} \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}} \left[5 - \frac{2}{x^2} \right] - \frac{2x}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{-1}{x \sqrt{1 - \frac{1}{x^2}}} \right)$$

並代入 $x = \frac{\Delta}{\Delta_y}$ ，則

$$\frac{V}{V_y} = \frac{2}{3\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta} \right)^2} \left[5 - 2 \left(\frac{\Delta_y}{\Delta} \right)^2 \right] - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta}{\Delta_y} \right) \tan^{-1} \left[\frac{-1}{\left(\frac{\Delta}{\Delta_y} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta_y}{\Delta} \right)^2}} \right]$$