

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

可更換核心板之挫屈束制消能支撐耐震實驗

與有限元素分析

Seismic Tests and Finite Element Analyses of Buckling Restrained

Braces with a Replaceable Core Plate



研究生：陳昇陽

指導教授：周中哲 博士

中華民國 九十七 年 十 月

可更換核心板之挫屈束制消能支撐耐震實驗
與有限元素分析

Seismic Tests and Finite Element Analyses of Buckling Restrained
Braces with a Replaceable Core Plate

研究生：陳昇陽

Student : Sheng-Yang Chen

指導教授：周中哲 博士

Advisor : Chung-Che Chou



Submitted to Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Civil Engineering

October 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年十月

可更換核心板之挫屈束制消能支撐耐震實驗與有限元素分析

研究生：陳昇陽

指導教授：周中哲 博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

本研究主要探討可更換核心之挫屈束制消能支撐耐震行為與有限元素分析，其中共進行四組實尺寸之挫屈束制消能支撐試驗，而試體均由一組核心單元與兩組圍束單元利用螺栓栓接組合而成，因此試體組裝及拆解過程簡易。四組試體中，其中一組為了求取挫屈束制消能支撐整體實驗挫屈強度，因此韌性容量未能滿足 AISC(2005)耐震規範規定，而另外三組設計得宜之試體於試驗後其行為良好，且韌性容量均滿足 AISC(2005)耐震規範規定。本研究並利用非線性有線元素分析程式 ABAQUS(2003)，可預測試體之極限壓力強度及挫屈行為，並建立 18 組變化各項參數之模型以探討其可能破壞模式，而經由實驗與有限元素分析之結果，提出可更換核心板之挫屈束制消能支撐之設計方法。

Seismic Tests and Finite Element Analyses of Buckling Restrained Braces with a Replaceable Core Plate

Student: Sheng-Yang Chen

Advisor: Dr. Chung-Che Chou

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This research presents the results from component tests and finite element analyses on a proposed type of a steel buckling-restrained brace (BRB) with a replaceable core plate. The proposed BRB is composed of two components: (1) a steel core element that carries the entire axial forces during both tension and compression and (2) two restraining elements that are bolted to prevent the core from buckling in compression. Since the two restraining elements are easily assembled and separated, the steel core can be replaced if it is damaged after cyclic loads. Four full-scale BRB subassemblages were tested based on AISC (2005) seismic provisions to investigate inelastic cyclic deformation capabilities and verify theoretical predictions on the structural stability of the braces. Test results indicated that three proposed BRBs with sufficient out-of-plane restraining stably sustain severe inelastic axial strain reversals up to 2.1%, and develop a cumulative plastic ductility capacity much higher than that specified by AISC (2005). However, one BRB, designed with inadequate out-of-plane restraining, experienced global flexural buckling after a large number of inelastic reversals. Non-linear finite element analysis conducted for each BRB showed that the ultimate compressive strength and post-buckling behavior could be predicted if the initial geometric imperfections were considered in the model. A parametric study was also conducted for 18 BRBs using the non-linear finite element computer program ABAQUS to further verify the effectiveness of the restraining element and number of bolts to prevent the core from global and local buckling. A design procedure for the proposed BRB was provided based on the test and analytical results.

誌謝

本論文得以完成，由衷感謝恩師 周中哲博士悉心的指導與教誨，使我學習到研究的精神與嚴謹的態度，並匡正我許多缺點使愚生能更加的進步，在此獻上最誠摯的感謝。

同時在論文口試期間，承蒙李耀中博士、國立交通大學 劉俊秀 教授、陳誠直 教授及鄭復平 副教授的蒞臨指導，對本論文提供許多寶貴的意見，使得本論文更加完備，在此致上最由衷的謝意。

在兩年的研究所求學期間，特別感謝 俊翰學長及智凱學長，對於實驗及分析提供許多寶貴的經驗與幫助，且總是不厭其煩的教導，使我能更順利的完成本論文；而同學浩然、學弟鈞棋、盛威及家福，於每次實驗時鼎力相助，真的非常感謝你們，都是因為有你們的幫助，本論文才得以順利完成。在此感謝在實驗過程中能誌鋼構廠、鴻舜鋼構廠及國家地震工程研究中心(NCREE)的幫助，使實驗能順利完成。感謝在交大兩年求學期間，給我鼓勵及關心的好朋友們，因為有了你們使我的研究生涯能順利完成。

最後謹將本論文獻給我最重要的家人，感謝父親 陳瑞榮先生、母親 吳初月女士及弟弟 昇寬，謝謝你們讓我能心無旁騖的致力於課業與研究，且陪我度過這每個開心與難過的時刻，願與你們分享這份榮耀與喜悅。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	X
照片目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.3 研究動機.....	4
1.4 研究目的.....	4
1.5 研究內容.....	5
第二章 可更換核心板之挫屈束制消能支撐力學行為與試體設計.....	6
2.1 前言.....	6
2.2 可更換核心板之挫屈束制消能支撐簡介及原理.....	6
2.3 可更換核心板之挫屈束制消能支撐力學行為.....	7
2.3.1 核心單元降伏強度及極限強度.....	7
2.3.2 等效彈性勁度.....	8
2.3.3 圍束單元斷面慣性矩需求.....	9
2.3.4 螺栓強度與圍束單元之面板厚度.....	10
2.3.5 整體挫屈強度.....	11
2.3.6 局部挫屈強度.....	13

2.3.7 螺栓強度(Inoue).....	15
2.4 材料性質	16
2.5 組合式挫屈束制消能支撐試體設計	16
2.5.1 試體 1.....	17
2.5.2 試體 2.....	18
2.5.3 試體 3.....	19
2.5.4 試體 4.....	20
2.6 試體試驗構架裝置及載重歷時	20
2.6.1 油壓制動器.....	21
2.6.2 資料擷取系統.....	21
2.6.3 層間側位移角與核心應變的關係.....	21
2.6.4 試驗載重歷時.....	22
2.6.5 試體韌性容量(CPD).....	23
2.7 試驗量測規劃	23
第三章 試體試驗與結果分析	25
3.1 前言	25
3.2 試體製作與組裝	25
3.3 試體 1 試驗現象與結果分析	26
3.3.1 試驗現象.....	26
3.3.2 試驗結果分析.....	27
3.4 試體 2 試驗現象與結果分析	28
3.4.1 試驗現象.....	28
3.4.2 試驗結果分析.....	29
3.5 試體 3 試驗現象與結果分析	31
3.5.1 試驗現象.....	31

3.5.2 試驗結果分析.....	32
3.6 試體 4 試驗現象與結果分析.....	33
3.6.1 試驗現象.....	33
3.6.2 試驗結果分析.....	34
3.7 試驗結果比較.....	35
3.8 可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計流程.....	37
第四章 有限元素分析.....	39
4.1 前言.....	39
4.2 試體有限元素模型建立.....	39
4.2.1 結構模型.....	39
4.2.2 材料性質.....	40
4.2.3 接觸性質.....	41
4.3 有限元素分析結果.....	42
4.3.1 試體 1 分析結果.....	43
4.3.2 試體 2 分析結果.....	44
4.3.3 試體 3 分析結果.....	44
4.3.4 試體 4 分析結果.....	45
4.4 參數研究.....	46
4.4.1 模型 5、6、7、14、15、16.....	47
4.4.2 模型 3、4、8、9、17、18、19.....	48
4.4.3 模型 10、11、12、13、20、21、22.....	48
4.4.4 參數研究分析結果.....	49
第五章 結論.....	53
5.1 結論.....	53
參考文獻.....	55

附錄 可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計例.....147



表目錄

表 2.1 鋼材材料性質.....	57
表 2.2 混凝土抗壓強度.....	57
表 2.3 無收縮水泥砂漿抗壓強度(試體 4).....	57
表 2.4 各試體彈性勁度.....	58
表 2.5 各試體細節.....	58
表 2.6 各試體設計值.....	59
表 2.7 每階段加載歷時所對應核心應變、韌性容量與最大韌性之關係....	59
表 2.8 各組試體重量.....	59
表 3.1 試體圍束構件中點與端部相對位置.....	60
表 3.2 試體兩端殘餘變形量.....	60
表 3.3 核心單元與面板間淨距.....	61
表 3.4 試體理論值與試驗值之彈性勁度.....	61
表 3.5 試體非彈性勁度與彈性勁度比較.....	62
表 3.6 挫屈長度範圍內量測之變形量百分比.....	62
表 3.7 試體最大韌性與韌性容量.....	63
表 3.8 試體差異與試驗結果比較.....	64
表 4.1 A572 Gr.50 鋼材之ABAQUS硬化參數輸入指令(試體 4).....	65
表 4.2 ABAQUS 與Test之試體軸向力比較表.....	65
表 4.3 各組試體挫屈模態數.....	66
表 4.4 試體試驗值與分析值之彈性勁度.....	66
表 4.5 各模型細節.....	67
表 4.6 各模型設計值.....	68
表 4.7 各組模型挫屈模態數.....	69
表 4.8 模型局部挫屈行為.....	70

表 4.9 模型整體挫屈行為.....71



圖目錄

圖 1.1 國內外學者試體剖面示意圖	72
圖 2.1 BRBF	73
圖 2.2 試體示意圖	73
圖 2.3 組合式挫屈束制消能支撐核心單元示意圖	74
圖 2.4 斷面漸變段示意圖	74
圖 2.5 核心單元各段定義	74
圖 2.6 核心單元高模態挫屈之力學行為	75
圖 2.7 整體挫屈力學行為	76
圖 2.8 消能支撐受壓之力學行為	76
圖 2.9 圍束單元提供側向勁度示意圖	76
圖 2.10 局部挫屈力學行為	77
圖 2.11 局部挫屈力學行為	77
圖 2.12 整體挫屈力學行為	77
圖 2.13 試體 1	78
圖 2.14 試體 2	80
圖 2.15 試體 3	82
圖 2.16 試體 4	84
圖 2.17 試體試驗構架圖	86
圖 2.18 層間側位移角與核心應變示意圖	86
圖 2.19 試體試驗標準加載歷時與疲勞歷時	87
圖 2.20 核心與圍束單元應變計量測位置	87
圖 2.21 位移計量測位置	88
圖 3.1 面板預彎示意圖	88
圖 3.2 標準加載歷時下油壓制動器力量位移關係	89

圖 3.3 疲勞加載歷時下油壓制動器力量與位移關係	89
圖 3.4 試體 1 標準加載歷時下軸向力量與位移關係	90
圖 3.5 試體 1 彈性勁度.....	91
圖 3.6 試體 1 非彈性勁度.....	91
圖 3.7 試體 1 疲勞加載歷時下軸向力量與位移關係	92
圖 3.8 試體 2 第一次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	93
圖 3.9 試體 2 第二次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	94
圖 3.10 試體 2 第三次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	95
圖 3.11 試體 2 彈性勁度.....	96
圖 3.12 試體 2 非彈性勁度.....	96
圖 3.13 試體 2 疲勞加載歷時下軸向力量與位移關係	97
圖 3.14 試體 3 第一次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	98
圖 3.15 試體 3 第二次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	99
圖 3.16 試體 3 第三次標準加載歷時下軸向力量與位移關係	100
圖 3.17 試體 3 彈性勁度.....	101
圖 3.18 試體 3 非彈性勁度.....	101
圖 3.19 試體 4 標準加載歷時下軸向力量與位移關係	102
圖 3.20 試體 4 彈性勁度.....	103
圖 3.21 試體 4 非彈性勁度.....	103
圖 3.22 軸向力與核心應變關係.....	104
圖 3.23 平面內中點垂直變位與核心應變關係	104
圖 3.24 BRB 受軸壓下面外變形沿試體軸向分佈關係	105
圖 3.25 BRB 受軸拉下面外變形沿試體軸向分佈關係	105
圖 3.26 BRB 軸壓下圍束單元應變沿試體軸向分布關係	106
圖 3.27 BRB 受軸拉下圍束單元應變沿試體軸向分布關係	106

圖 3.28 各試體剖面圖.....	107
圖 4.1 核心單元模型.....	108
圖 4.2 圍束單元模型.....	108
圖 4.3 螺栓模擬情形.....	109
圖 4.4 墊板模型.....	109
圖 4.5 試體模型整體圖.....	110
圖 4.6 試體模型分解圖.....	110
圖 4.7 試體整體剖面圖.....	111
圖 4.8 試體第一挫屈模態.....	111
圖 4.9 摩擦係數對整體挫屈力之影響(試體 4).....	111
圖 4.10 試體 1 核心單元在每階段加載歷時下之挫屈模態數(Scale=10)..	112
圖 4.11 試體 4 核心單元在每階段加載歷時下之挫屈模態數(Scale=10)..	112
圖 4.12 試體 1 實驗與分析結果比較.....	113
圖 4.13 試體 2 實驗與分析結果比較.....	114
圖 4.14 試體 3 實驗與分析結果比較.....	115
圖 4.15 試體 4 實驗與分析結果比較.....	116
圖 4.16 分析模型產生整體挫屈現象(試體 4, Scale=10).....	117
圖 4.17 試體 3、試體 4 及 18 組模型之軸向力量與軸向應變關係圖	117
圖 4.18 四組模型受軸壓下面外變形沿試體軸向分布關係	118
圖 4.19 分析結果比較圖.....	118

照片目錄

照片 3.1 核心單元.....	119
照片 3.2 圍束構件.....	119
照片 3.3 置入整平機整平.....	120
照片 3.4 圍束構件假組裝.....	120
照片 3.5 核心單元應變計.....	121
照片 3.6 1 mm薄板.....	121
照片 3.7 圍束構件置入核心單元、墊板與 2-3 mm墊片.....	122
照片 3.8 放上另一組圍束構件.....	122
照片 3.9 扭力扳手將螺栓鎖至預緊軸力.....	123
照片 3.10 試體組裝完成.....	123
照片 3.11 圍束構件中點與端部相對位置量測方式.....	124
照片 3.12 長槽形鋼構件點焊於面板.....	124
照片 3.13 2-3 mm之長形薄板.....	125
照片 3.14 墊板.....	125
照片 3.15 圍束構件內部澆置無收縮水泥砂漿.....	126
照片 3.16 試體 1 試驗前全景(正視).....	126
照片 3.17 試體 1 試驗前全景(側視).....	127
照片 3.18 接合段與接合板採用螺栓接合.....	127
照片 3.19 焊道補強情形.....	128
照片 3.20 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad).....	128
照片 3.21 量測試體兩端殘餘變形量示意圖.....	129
照片 3.22 量測核心單元與面板間之淨距示意圖.....	129
照片 3.23 試體 1 下端殘餘變形($\alpha=0.024$ rad).....	130
照片 3.24 試體 1 核心單元斷裂.....	130

照片 3.25 試體 2 試驗前全景(正視).....	131
照片 3.26 試體 2 試驗前全景(側視).....	131
照片 3.27 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad).....	132
照片 3.28 試體 2 下端殘餘變形($\alpha=0.024$ rad).....	132
照片 3.29 試體 2 核心單元斷裂.....	133
照片 3.30 試體 3 試驗前全景(正視).....	133
照片 3.31 試體 3 試驗前全景(側視).....	134
照片 3.32 試體 3 螺栓 80 顆(第一次試驗).....	134
照片 3.33 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad).....	135
照片 3.34 試體 3 螺栓 28 顆(第二次試驗).....	135
照片 3.35 試體 3 螺栓 16 顆(第三次試驗).....	136
照片 3.36 試體 3 發生整體挫屈現象(正視, 第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)...	136
照片 3.37 試體 3 發生整體挫屈現象(側視, 第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)...	137
照片 3.38 試體 3 發生整體挫屈現象(上視, 第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)...	137
照片 3.39 試體 3 圍束單元出現降伏現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	138
照片 3.40 試體 3 圍束單元產生面外變形(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	138
照片 3.41 試體 3 螺栓與螺栓周圍之面板出現降伏現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	139
照片 3.42 試體 3 核心單元與面板間之淨距並產生相對移動(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	139
照片 3.43 試體 3 轉換段與接合板焊道補強處產生裂縫(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	140
照片 3.44 試體 3 轉換段與接合板焊道補強處周圍出現降伏現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad).....	140
照片 3.45 試體 3 雙接合板並未產生挫屈現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)	141

照片 3.46 試體 3 核心單元產生第一挫屈模態	141
照片 3.47 試體 4 試驗前全景(正視).....	142
照片 3.48 試體 4 試驗前全景(側視).....	142
照片 3.49 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad).....	143
照片 3.50 試體 4 發生整體挫屈現象(正視, $\alpha=0.018$ rad).....	143
照片 3.51 試體 4 發生整體挫屈現象(側視, $\alpha=0.018$ rad).....	144
照片 3.52 試體 4 發生整體挫屈現象(上視, $\alpha=0.018$ rad).....	144
照片 3.53 試體 4 核心單元與面板間並未產生相對滑動($\alpha=0.018$ rad).....	145
照片 3.54 試體 4 轉換段與接合板焊道補強處周圍出現降伏現($\alpha=0.018$ rad)	145
照片 3.55 試體 4 雙接合板並未產生挫屈現象($\alpha=0.018$ rad).....	146
照片 3.56 試體 4 核心單元產生第一挫屈模態	146



第一章 緒論

1.1 前言

台灣位於環太平洋地震帶上，由於歐亞板塊與菲律賓板塊的相對運動，導致地震發生的十分頻繁，尤其在 921 大地震發生過後，近幾年來建築結構對於耐震的能力越來越受重視，因此如何利用最經濟且有效的方式，使新建與既有結構物之耐震能力足夠，並有效降低結構物在地震力作用下的反應，保護結構體的安全，是當前國內外工程研究的重要課題，因此所謂的結構隔震、減震等結構控制技術逐漸受到重視。其結構系統大多分為抗彎構架系統、斜撐構架系統或二元結構系統，耐震能力雖有一定的可靠性，但其結構消能機構於大地震時所產生之非線性變形，往往造成結構物震後接合損傷或再使用機能喪失。在上述情況下，挫屈束制消能支撐構架系統因具有較多項優點，因此近幾年來逐漸受到重視，並被廣泛應用於耐震結構實例中。

同於一般同心斜撐構架系統，挫屈束制消能支撐構架系統亦能提供有效側向勁度，使結構物受地震時的樓層側位移角得以受到控制，而不同於一般同心斜撐構架系統在大地震下若過度受壓，斜撐容易發生挫屈情形導致喪失抗震之功用，但挫屈束制消能支撐於受壓時並不會產生挫屈情形，因此可以產生十分飽滿的遲滯行為消散大部分的地震輸入能量，並減少其他梁柱構件的非線性變形需求，使結構物在地震下之整體行為趨於穩定。設計適當的挫屈束制消能支撐構架系統，除了具有高強度、高勁度與高韌性等優點外，亦可減小梁柱斷面尺寸，提升整體結構物之競爭力。

1.2 文獻回顧

為了瞭解挫屈束制消能支撐構件之力學行為、側撐圍束構件的材料與整

體構件的幾何形狀等，過去有相當多學者提出相關的研究，因此，以下將針對數篇挫屈束制消能支撐相關之研究作一介紹：

1. Zheng-Cheng Chen (2000)

Chen (2000)提出一系列韌性斜撐，如圖 1.1(a)所示，其中主受力元件斷面為平板或十字形斷面，側撐元件可採用鋼筋混凝土版、方形鋼筋混凝土斷面、鋼管混凝土斷面或純鋼構斷面，並比較四種側撐元件之優劣性。試驗結果顯示韌性斜撐皆有良好之遲滯行為與高韌性之特性，其中以純鋼構側撐元件不論施工性、品質控制性及構材行為皆屬最佳，鋼管混凝土側撐元件則次之。

2. Cameron Black、Nicos Makris 和 Ian Aiken (2004)

Black、Makris和Aiken (2004)提出一系列共 5 組之挫屈束制消能支撐，如圖 1.1(b)所示，其中核心單元斷面為平板或十字形斷面，圍束單元為鋼套管內部填充圍束構材(Mortar)，試體滑動單元採用脫層材料為滑動機制，並提出確保其遲滯行為穩定之設計公式，包含整體挫屈、局部挫屈及核心轉換段塑性扭轉破壞。試驗結果顯示 5 組試體在不同的加載歷時下均有良好之遲滯消能行為，其中有 2 組於疲勞加載時發生核心斷裂展現良好之韌性容量，並由其他 3 組試驗結果提出若核心單元為平板時，核心轉換段加勁板之寬厚比(b/t)需小於 5，以確保核心轉換段不會產生破壞。

3. Mamoru Iwata 和 Masatoshi Murai (2006)

Iwata和Murai (2006)提出一系列共 13 組之挫屈束制消能支撐，如圖 1.1(c)所示其中核心單元斷面為平板，圍束單元為兩獨立之圍束構件焊接組合而成，任一組圍束構件為 L 形鋼構件內填充圍束構材(Mortar)所組成，試體滑動單元採用脫層材料為滑動機制，並探討圍束單元彈性挫屈力與核心

單元降伏力之關係及核心單元寬厚比(b/t)對消能行為之影響。試驗結果顯示顯示 13 組試體在標準加載歷時下均有良好之遲滯消能行為，其中有 1 組於疲勞加載時發生核心斷裂展現良好之韌性容量，3 組於標準加載時產生弱軸整體挫屈現象，8 組於標準加載時產生弱軸局部挫屈現象，1 組於標準加載時產生強軸整體挫屈現象，而發生強軸整體挫屈現象為試體設計不當所致，從試驗結果顯示試體之圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值大於 1.0 即可產生良好之遲滯消能行為，且在不同的核心寬厚比下消能行為未有顯著差異，並依據試驗結果提出挫屈束制消能支撐之設計步驟。

4. Yuji Koetaka、Yasuki Byakuno 和 Kazuo Inoue (2006)

Koetaka、Byakuno和Inoue (2006)提出一系列共 5 組之挫屈束制支撐，如圖 1.1(d)所示，其中核心單元為平板，圍束單元為兩獨立之平板利用螺栓栓接而成，試體滑動單元採用預留壓縮空間為滑動機制，並提出確保其遲滯消能行為穩定之設計公式，包含整體挫屈、局部挫屈及螺栓強度設計。試驗結果顯示 5 組中，有 4 組設計最大軸向壓力大於核心單元降伏力即產生良好之消能行為，而另 1 組則因設計最大軸向壓力小於核心單元降伏力，因此試體未產生消能行為，並利用試驗結果顯示之破壞模式來驗證設計公式之可靠性。

5. Keh-Chyuan Tsai 和 Chih-Yu Wei (2006)

Tsai和Wei (2006)提出一系列共 3 組之可拆型預鑄式挫屈束制消能支撐，如圖 1.1(e)所示，其中核心單元斷面為平板，圍束單元為兩獨立之圍束構件利用螺栓栓接而成，任一組圍束構件為開槽側撐元件(例如 C 形、V 形、弧形或 U 形)內填充混凝土所組成，試體滑動單元採用預留壓縮空間為滑動機制，並提出圍束構材混凝土強度需求設計公式。試驗結果顯示 3 組

試體在標準加載歷時下均有良好之遲滯消能行為，而 3 組於標準加載時均產生局部挫屈現象，並利用試驗現象驗證設計公式之可靠性。

1.3 研究動機

近年來許多研究報告已驗證挫屈束制消能支撐擁有優良之遲滯消能行為，也被廣泛應用於實際結構物的耐震設計上，而應用技術亦屬於成熟階段，但習見之挫屈束制消能支撐仍有改善的空間：(1)在製造方式上，軸力構件插通於圍束元件不易施作，且軸力構件定位不易，並在軸力構件上又需貼附一層脫層材料導致施工變異性較大，而容易造成品質控制不當，(2)就地震力後檢測機制而言，皆不易於震後即時獲得有關消能支撐是否繼續使用之訊息，而挫屈束制消能支撐構架可設計讓消能支撐來承受大部分之地震剪力與能量，一旦支撐損壞導致失去耐震性能後果將不堪設想。因此本研究將側撐元件分為兩獨立之圍束構件，再將核心單元與兩獨立之圍束構件利用螺栓栓接組合而成，由於螺栓拆卸容易，因此地震後易於檢測消能支撐破壞情形，同時因採用預留壓縮空間來取代脫層材料作為試體之脫層單元，減少施工變異性進而維持施作品質。

1.4 研究目的

本研究重點著重於此種可更換核心板之挫屈束制消能支撐之設計方法、力學行為及遲滯消能能力，並藉由變化圍束單元強度與螺栓數目，來探討各式體之差異性，研究目的如下所述：

1. 依據 AISC(2005)的挫屈束制消能支撐測試方式進行，比較各組試體在不同圍束單元強度與螺栓數目下，強度與消能行為的差異，檢驗消能支撐之抗震性能與耐久性。
2. 依據試驗結果，於非線性有限元素軟體 ABAQUS(2003)中，建立本研究

之挫屈束制消能支撐的分析模型，並與試驗結果比較來驗證分析模型的可靠性。

3. 針對本研究之挫屈束制消能支撐進行有限元素之參數研究，藉由改變圍束單元強度與螺栓間距，來探討其對於挫屈束制消能支撐強度及消能行為之影響。

1.5 研究內容

本研究內容共分為五個章節，除本章外，第二章為介紹組合式挫屈束制消能支撐力學行為與試體設計，並規劃及安排各組試體。第三章為試體試驗與結果分析，介紹試體製作、組裝過程及試驗現象觀察。第四章為有限元素分析，敘述分析模型的建立並將分析結果與試驗結果做比較。第五章為結論。



第二章 可更換核心板之挫屈束制消能支撐力學行為 與試體設計

2.1 前言

本章探討挫屈束制消能支撐構架中(圖 2.1)新研發可更換核心板之挫屈束制消能支撐之力學行為與試體設計，每組試體皆採用螺栓栓接將核心單元與兩組圍束單元組成一體，如圖 2.2(a)所示，圖 2.2(b)為圖 2.2(a)之立體分解圖，並變化圍束單元之斷面與螺栓數目，以研究在不同配置下可更換核心板之挫屈束制消能支撐的消能行為與可能發生的破壞模式。2.2 節為可更換核心板之挫屈束制消能支撐簡介及原理，2.3 節為可更換核心板之挫屈束制消能支撐力學行為，2.4 節敘述各試體之材料性質及強度，2.5 節為可更換核心板之挫屈束制消能支撐試體設計，2.6 節介紹試體試驗構架裝置及載重歷時，2.7 節介紹試驗量測規劃。

2.2 可更換核心板之挫屈束制消能支撐簡介及原理

傳統斜撐在受壓時會產生挫屈現象導致消能行為不佳，而製作適當的挫屈束制消能支撐在受拉與受壓時，均能達到降伏且受壓時不會發生挫屈現象，是一種具有穩定的力學行為與優良的抗疲勞性質之軸力構件，能解決傳統斜撐在受壓時易發生挫屈的問題，而本研究可更換核心板之挫屈束制消能支撐亦有此特性。目前挫屈束制消能支撐在型式上或製作方式上有許多種，但不管外形上之差異，各種形式的挫屈束制消能支撐之基本原理是相似的，其概括可由下列三個部份所組成，如圖 2.3 (a)所示，圖 2.3(b)為圖 2.3 (a)之橫剖面圖：

1. 核心單元：又稱為主受力單元，是此構件中主要的受力元件，可分為消能段、接合段及轉換段。消能段為核心單元斷面積最小的部分，主要功

能是承受軸向拉力與壓力使構件產生非線性變形而消能，強度與消能表現皆由此段控制。接合段為核心單元之兩端，主要功能是連接消能支撐與接合板，在消能支撐發生最大軸力下接合段始終保持在彈性變形範圍內避免接合段的破壞。轉換段為防止消能段與接合段斷面變化過大而產生應力集中現象，一般設計上保持在彈性變形範圍作為要求，但斷面漸變段斜率不能超過 2.5(Uang et al. 2004)如圖 2.4 所示，並在消能段與轉換段斷面皆為雙對稱斷面(例如十形或I形等)時，檢核是否會發生扭轉挫屈破壞(Makris et al. 2003)。

2. 圍束單元：又稱側撐單元，主要功能是提供側向強度與勁度，為了避免核心單元受軸壓力時產生整體挫屈與局部挫屈的行為，一般常見圍束單元是由鋼管內部填充無收縮水泥砂漿或自充填混凝土等圍束構材組合而成(Watanaba et al. 1988, 蔡克銓等人 2001)。本研究圍束單元是由兩組獨立的圍束構件利用墊板及螺栓栓接組合而成，而任一組圍束構件是由鋼板與長槽形鋼構件焊接後，將內部澆置混凝土或無收縮水泥砂漿組合而成。
3. 滑動單元：又稱脫層單元，主要功能是防止核心單元受壓產生側向膨脹與圍束單元產生過大摩擦力使軸壓力增加，造成軸壓力與軸拉力強度上的差異，因此一般常見為在核心單元與圍束單元間被覆一層脫層材料或預留間隙(Inoue et al.2006)，根據 AISC 2005 接受的挫屈束制消能支撐於受軸壓與軸拉反應強度差距不可超過 30%。本研究的挫屈束制消能支撐並無使用脫層材料，而採用預留間隙。

2.3 可更換核心板之挫屈束制消能支撐力學行為

2.3.1 核心單元降伏強度及極限強度

可更換核心板之挫屈束制消能支撐核心單元之標稱降伏強度 P_{my} 為：

$$P_{ny} = A_y F_{ny} \quad (2-1)$$

其中 F_{ny} 為核心單元之標稱降伏應力， A_y 為核心單元消能段斷面積。挫屈束制消能支撐核心單元之設計極限壓力強度 $P_{max,d}$ 為：

$$P_{max,d} = \beta \Omega \Omega_h P_{ny} \quad (2-2)$$

其中 Ω 為材料超強因子，核心單元材質為 A36 鋼材建議取 $\Omega = 1.5$ ，核心單元材質為 A572 Gr.50 鋼材建議取 $\Omega = 1.1$ 。 Ω_h 為材料應變硬化因子，核心單元材質為 A36 鋼材建議取 $\Omega_h = 1.5$ ，核心單元材質為 A572 Gr.50 鋼材建議取 $\Omega_h = 1.25$ (蔡克銓等人 2006)。 β 為消能支撐壓力強度調整因子，一般而言挫屈束制消能支撐受壓強度往往大於受拉強度，但兩者差距不可以超過 30% (AISC 2005)，故取 $\beta = 1.3$ 。

2.3.2 等效彈性勁度

可更換核心板之挫屈束制消能支撐勁度是核心單元由消能段、轉換段與接合段三段共同串聯後加成，如圖 2.5 所示，故整體勁度 K_{total}^c 為：

$$K_{total}^c = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_y} + 2\frac{1}{K_t} + 2\frac{1}{K_c}\right)} \quad (2-3)$$

而有效挫屈長度之勁度 K_{yt}^c 為：

$$K_{yt}^c = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_y} + 2\frac{1}{K_t}\right)} \quad (2-4)$$

(2-3)式及 (2-4)式中

$$K_y = \frac{EA_y}{L_y} \quad (2-5)$$

$$K_t = \frac{EA_t}{L_t} \quad (2-6)$$

$$K_c = \frac{EA_c}{L_c} \quad (2-7)$$

其中 A_y 為消能段斷面積， L_y 為消能段長度， A_t 為轉換段中點斷面積， L_t 為轉換段長度， A_c 為接合段全斷面積， L_c 為接合段長度，而設計核心單元時，在設計極限壓力強度 $P_{\max,d}$ 作用下消能段之斷面須降伏而產生消能行為，轉換段與接合段之斷面則須保持在彈性變形範圍內，以確保可更換核心板之挫屈束制消能支撐能發揮良好的遲滯消能行為。

2.3.3 圍束單元斷面慣性矩需求

為了防止挫屈束制消能支撐發生整體挫屈，一般採用 Watanabe 等人 (Watanabe et al. 1988) 的研究建議，兩組圍束單元之整體斷面慣性矩 $I_{r,g}$ 選擇如下所示：

$$\frac{P_e}{P_y} \geq FS \quad (2-8)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 E_r I_{r,g}}{L^2} \quad (2-9)$$

$$I_{r,g} = \frac{P_e L^2}{\pi^2 E_r} \quad (2-10)$$

其中 P_e 為圍束單元之彈性挫屈強度， P_y 為核心單元實際降伏強度， E_r 為圍束單元之材料彈性模數， L 為消能支撐的有效挫屈長度， FS 為一安全係數，而 Watanabe 建議一般應用時安全係數 FS 可取 1.5。而本研究 $I_{r,g}$ 組成如下所示：

$$I_{r,g} = I_f + I_c + I_{con} \quad (2-11)$$

其中 I_f 為面板對核心單元中心之斷面慣性矩， I_c 為長槽形鋼構件對核心單元中心之斷面慣性矩， I_{con} 為填充材對核心單元中心之斷面慣性矩。

2.3.4 螺栓強度與圍束單元之面板厚度

當核心單元受高軸向壓應變時，消能段會產生高模態挫屈，且高模態挫屈之形式在核心單元達降伏或極限載重下一致，如圖 2.6 (a)所示，並假設核心單元與面板接觸位置為固定端，利用彈性挫屈尤拉公式求出高模態挫屈波長 L_w (Inoue et al. 2006)：

$$P_y = \frac{\pi^2 E_t I_c}{(0.5L_w)^2} \quad (2-12)$$

$$L_w = \sqrt{\frac{4\pi^2 E_t I_c}{P_y}} \quad (2-13)$$

其中 I_c 為核心單元消能段之弱軸慣性矩， E_t 為核心單元降伏後的楊氏模數 [$E_t = 0.05 E_s$ (Shimokawa et al. 1998)]， E_s 為核心單元鋼材彈性模數。如圖 2.6 (b)所示，此時核心單元產生高模態挫屈時側頂圍束單元之作用力 f 為：

$$f = \frac{4P_{\max,d} g}{L_w} \quad (2-14)$$

其中 g 為核心單元與面板間淨距， $P_{\max,d}$ 為 (2-2) 式， L_w 為 (2-13) 式。而本研究挫屈束制消能支撐採螺栓栓接組合而成，而螺栓強度亦直接影響消能支撐的強度，因此須提供足夠的螺栓強度使消能支撐發揮良好的遲滯消能行為。當核心單元產生高模態挫屈時，螺栓需提供足夠強度防止核心單元將兩組獨立的圍束單元分離，核心單元側頂圍束單元之總側向力 F_1 為：

$$F_1 = fn_1 = f \frac{L_y}{L_w} \quad (2-15)$$

其中 f 為 (2-14) 式， L_y 為核心消能段長度。因此可求得螺栓顆數 N_b 為：

$$N_b \geq \frac{FSF_1}{T_b} \quad (2-16)$$

其中 FS 為安全係數， T_b 為螺栓抗拉強度。螺栓間距 L_b 為：

$$L_b \leq \frac{L_y}{N_b/2-1} \quad (2-17)$$

如圖 2.6(c)所示，在挫屈束制消能支撐橫剖面下之受力形式，作用力 F_2 為：

$$F_2 = f \frac{L_b}{L_w} \quad (2-18)$$

在 F_2 作用下將弱面(A 點)所求得彎矩 M 與剪力 V ，利用 Von Mises 降伏準則即可求得面板厚度 t ：

$$\sigma_x = \frac{My_1}{I_b} = \frac{6M}{L_b t^2} \quad (2-19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{V}{L_b t} \quad (2-20)$$

$$\phi \sigma_{ny1}^2 = \sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 \quad (2-21)$$

其中 σ_x 為弱面之撓曲應力， τ_{xy} 為弱面之剪應力， ϕ 為折減係數取 0.9， σ_{ny1} 為面板之標稱降伏應力， y_1 為面板中心至外緣距離[見圖 2.3 (b)]， I_b 為螺栓間距範圍內面板之斷面慣性矩。依據螺栓規格決定面板寬度 b_f 為：

$$b_f = b_c + 6d_b \quad (2-22)$$

其中 b_c 為核心消能段寬度， d_b 為螺栓直徑。

2.3.5 整體挫屈強度

由 (2-10)式求得圍束單元之整體斷面慣性矩 $I_{r,g}$ 配合面板選取與核心單元消能段寬度相同的長槽形鋼構件後，忽略槽形鋼構件內填充材(混凝土)強度，求出兩組圍束單元之整體斷面塑性彎矩強度 M_p^g 為：

$$M_p^g = Z_{gf} F_{nyf} + Z_{gc} F_{nyc} \quad (2-23)$$

其中 Z_{gf} 為兩組圍束單元之面板之塑性斷面模數， F_{nyf} 為面板之標稱降伏應力， Z_{gc} 為兩組長槽形鋼構件之塑性斷面模數， F_{nyc} 為長槽形鋼構件之標稱降伏應力。為了使組合式挫屈束制消能支撐能有優良的遲滯消能行為，應避免圍束單元產生整體挫屈，而整體力學行為如圖 2.7 所示，利用 $P-\delta$ 二階效應推導其力平衡方程式為：

$$E_r I_{r,g} \frac{d^2(y-y_0)}{dx^2} + P_{\max,g}(y+G+e) = 0 \quad (2-24)$$

其中 E_r 為圍束單元之材料彈性模數， e 為消能支撐兩端接合段與接合板組裝時產生之相對誤差(1 mm)，並在 (2-24) 式中假設

$$y_0 = i \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2-25)$$

$$G = g \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2-26)$$

其中 i 為消能支撐之初始變形(= $L_{yt}/1000$ ， L_{yt} 為核心單元消能段及轉換段總長度)， g 為核心單元與面板間淨距(3 mm)，將 (2-25) 式及 (2-26) 式代入 (2-24) 中即可求得中點變形 δ 為：

$$\delta = \frac{i+g+e}{\left(1 - \frac{P_{\max,g}}{P_e}\right)} \quad (2-27)$$

故組合式挫屈束制消能支撐中點之彎矩 M_{mid} 為：

$$M_{mid} = \frac{i+g+e}{1 - \frac{P_{\max,g}}{P_e}} P_{\max,g} \quad (2-28)$$

將 (2-23) 式等於 (2-28) 式即可求得在此圍束強度下核心單元能承受之最大軸向力 $P_{\max,g}$ 為：

$$P_{\max,g} = \frac{M_p^g}{i + g + e + \frac{M_p^g}{P_e}} \quad (2-29)$$

若 (2-29) 式大於 (2-2) 式則符合設計，若不符合則重新挑選圍束單元斷面。

2.3.6 局部挫屈強度

當核心單元受高軸向壓應變時，消能段會產生如波浪般的高模態挫屈，此時圍束構材須提供足夠勁度來防止核心單元產生局部挫屈行為。Wada 等人 (Wada et al. 1994) 假設外鋼管勁度無限大，因此圍束構材須提供足夠的側向勁度，如圖 2.8 所示，其力平衡方程式為：

$$E_t I_c \frac{d^4 y(x)}{dx^4} + P_{\max,l}^w \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = -q(x) \quad (2-30)$$

$$q(x) = ky(x) \quad (2-31)$$

其中 E_t 為核心單元降伏後的楊氏模數， I_c 為核心單元消能段之弱軸慣性矩， k 為圍束單元每單位長度所提供的有效側向彈性勁度，並將 (2-30) 式簡化為：

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} + 2\gamma^2 \frac{d^2 y(x)}{dx^2} + \zeta^4 y(x) = 0 \quad (2-32)$$

在 (2-32) 式中

$$\gamma^2 = \frac{P_{\max,l}^w}{2E_t I_c} \quad (2-33)$$

$$\zeta^4 = \frac{k}{E_t I_c} \quad (2-34)$$

而此特徵方程式之判別式為：

$$\Delta = 2\sqrt{\gamma^4 - \zeta^4} \quad (2-35)$$

並利用邊界條件即可求出發生局部挫屈破壞力 $P_{\max,l}^w$ 為：

$$P_{\max,l}^w = 2\sqrt{kE_r I_c} \quad (2-36)$$

如圖 2.9 所示，蔡克銓等人(蔡克銓等人 2006)提出圍束單元每單位長度所提供的有效側向彈性勁度 k 為：

$$k = \frac{\omega L_w}{\frac{5\omega L_w^4}{384E_r I_{r,l}} L_w} \quad (2-37)$$

其中 E_r 為圍束單元之材料彈性模數， $I_{r,l}$ 為單一圍束單元對本身形心取局部斷面慣性矩， L_w 為 (2-13) 式， ω 為圍束單元所受之均佈載重。Inoue 等人(Inoue et al. 2006)假設核心單元發生高模態挫屈時，相鄰兩螺栓間僅一側頂圍束單元之作用力作用於相鄰兩螺栓間距之中點，如圖 2.10 所示，將圍束單元之螺栓束制點當成鉸支承，即可求得圍束單元產生局部最大彎矩 M_{\max} 為：

$$M_{\max} = \frac{fL_b}{4} \quad (2-38)$$

將 (2-14) 式代入 (2-38) 式可得：

$$M_{\max} = \frac{P_{\max,l}^i g L_b}{L_w} \quad (2-39)$$

令圍束單元之局部降伏彎矩 M_y^l 等於 M_{\max} 即可求得局部挫屈破壞力 $P_{\max,l}^i$ 為：

$$P_{\max,l}^i = \frac{M_y^l L_w}{g L_b} \quad (2-40)$$

本研究採用 Inoue 等人(Inoue et al. 2006)之部分假設，當核心單元產生高模態挫屈時，相鄰兩螺栓間僅一側頂圍束單元之作用力作用於相鄰兩螺栓間距之中點，將圍束單元之螺栓束制點當成鉸支承，即可求得圍束單元產生局部最大彎矩 M_{\max} 為：

$$M_{\max} = \frac{fL_b}{4} \quad (2-41)$$

將 (2-14) 式代入 (2-41) 式可得：

$$M_{\max} = \frac{P_{\max,l} g L_b}{L_w} \quad (2-42)$$

並求得一組圍束單元(一片面板加一槽鋼)之局部塑性彎矩 M_p^l 為：

$$M_p^l = Z_{lf} F_{nyf} + Z_{lc} F_{nyc} \quad (2-43)$$

其中 Z_{lf} 為一組圍束單元之面板之塑性斷面模數， F_{nyf} 為面板之標稱降伏應力， Z_{lc} 為一組圍束單元之長槽形鋼構件塑性斷面模數， F_{nyc} 為長槽形鋼構件之標稱降伏應力。令圍束單元之局部塑性彎矩 M_p^l 等於 M_{\max} 即可求得局部挫屈強度 $P_{\max,l}$ 為：

$$P_{\max,l} = \frac{M_p^l L_w}{g L_b} \quad (2-44)$$

如圖 2.11 所示，若相鄰兩螺栓間有數個側頂圍束單元之作用力時，則須依不同個數作用力的情況下所求得之圍束單元局部最大彎矩 M_{\max} ，並令圍束單元之局部塑性彎矩 M_p^l 等於 M_{\max} 即可求得局部挫屈破壞力 $P_{\max,l}$ 。若 (2-44) 式大於 (2-2) 式則符合設計，若不符合則重新挑選圍束單元斷面。

2.3.7 螺栓強度(Inoue)

如圖 2.12 所示，Inoue 等人(Inoue et al. 2006)提出斜撐產生整體挫屈時，求出斜撐中點彎矩 M_{mid} 為：

$$M_{mid} = \frac{i + g + e}{1 - \frac{P_{\max,d}}{P_e}} P_{\max,d} \quad (2-45)$$

利用斜撐中點與端部之彎矩差，即可求得作用於圍束單元上的剪力 Q_s 為：

$$Q_s = \frac{M_{mid} - M_0}{d} \quad (2-46)$$

其中 M_0 為斜撐端部彎矩， d 為兩獨立圍束單元之形心距離。螺栓顆數 N_b^i 為：

$$N_b^i = \frac{2Q_s}{\mu_f N_0} \quad (2-47)$$

其中 Q_s 為 (2-46) 式， μ_f 為摩擦係數， N_0 為螺栓之預拉力。

2.4 材料性質

本實驗總共分為四組試體，主要之材料分為鋼柱、核心單元、圍束單元之面板及長槽形鋼構件，其中鋼柱、核心單元及圍束單元之面板均採用 A572 Gr.50 之材料性質，而圍束單元之長槽形鋼構件採用 A36 之材料性質，為了了解各材料性質之強度，以及提高未來各項分析研究及有限元素程式之準確性，本研究將各試體材料之拉力試驗結果列於表 2.1 而混凝土及無收縮水泥砂漿強度分別列於表 2.2 及表 2.3。

2.5 可更換核心板之挫屈束制消能支撐試體設計

本研究試體共四組，柱子採用箱形柱 $\square 550 \times 550 \times 35 \times 35$ mm，核心單元長度為 4180 mm，其中消能段、轉換段與接合段長度分別為 2800 mm、290 mm 與 400 mm，而此三段斷面積分別為 3300 mm^2 、 7480 mm^2 與 20460 mm^2 ，根據 (2-3) 式至 (2-7) 式可分別求得整體彈性勁度及各段之彈性勁度並分別列於表 2.4。試體設計降伏強度 P_{yn} 的取法是假設真實結構物受側力作用之下如圖 2.1(b) 所示，取第二層的消能支撐構件強度約為 1250 kN，因此核心單元消能段寬度及厚度分別為 150 mm 及 22 mm，寬厚比(=b/t)為 6.8，符合 Iwata (Iwata et al. 2006) 所提出試體之圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值(P_e/P_y)介於 2 至 3 時，寬厚比(=b/t)需介於 4 至 9 之間，可確保試體之韌性容量即達 AISC(2005) 建議之 200 以上。轉換段斷面積因各試體強度

需求差異而有所不同，接合部分將接合段插入兩片接合板之間，利用足夠強度的螺栓及焊道連接消能支撐與接合板。圍束單元是將面板與長槽形鋼構件焊接後，內部填充混凝土或無收縮水泥砂漿組合而成，其長度為 2940 mm。每組試體核心單元消能段面積不變，因此設計極限強度 $P_{\max,d}$ [(2-2)式] 均相同，並變化圍束單元尺寸及螺栓數目，研究在不同圍束單元強度與勁度作用下，消能支撐反覆載重行為的差異。每組試體細節如圖 2.13 至圖 2.16 所示，而各組試體差異列於表 2.5 並於下節詳述。

2.5.1 試體 1

本試體為了研究可更換核心板之挫屈束制消能支撐韌性容量，因此希望在 AISC 2005 標準載重歷時作用下，消能支撐未發生整體挫屈或局部挫屈行為。試體尺寸如圖 2.13 所示，依據 (2-1) 及 (2-2) 式可求得降伏強度及設計極限壓力強度分別為 $P_y=1211$ kN 及 $P_{\max,d}=2252$ kN，令圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值 (P_e/P_y) 為 6.4，利用 (2-10) 式可求得整體斷面慣性矩 44432996 mm⁴ (表 2.5)，再利用 (2-13) 及 (2-14) 式可得核心單元高模態挫屈之波長 L_w 為 210 mm 及側頂圍束單元作用力 f 為 129 kN，挑選 A490 規格直徑為 19 mm 的高拉力螺栓，而此規格螺栓之抗拉強度為 166 kN，並取安全係數為 3.0，依據 (2-16) 式及 (2-17) 式可求得螺栓顆數及間距分別為 32 顆及 186 mm，而為了探討面板厚度之力學行為，將螺栓間距設計為 186 mm ($<L_w=210$ mm)。利用 (2-21) 式可得 Gr. 50 面板厚度為 10.8 mm，本試體採用 12 mm 且面板寬為 270 mm。本試體預留間隙 g 為 3 mm，其核心單元與兩獨立圍束單元之面板間淨距各為 1.5 mm。挑選 A36 長形鋼構件為 $150 \times 75 \times 6.5 \times 10$ mm，而試體測試時混凝土強度為 57.1 MPa (見表 2.2)。求出槽鋼、面板及混凝土所組成的圍束單元之整體及局部斷面塑性彎矩強度 M_p^g ，再根據 (2-29) 及 (2-44) 式可得整體挫屈強度及局部挫屈強度分別為 P_y

之 4.7 倍及 12.7 倍，均大於設計極限強度 2252 kN(=1.9 P_y)，因此可確保本試體在 AISC(2005)標準載重歷時下不會產生挫屈行為。依據 2.3 節可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計步驟，所求得各項數值詳列於表 2.6。

2.5.2 試體 2

本試體為了研究可更換核心板之挫屈束制消能支撐韌性容量，因此希望在 AISC 2005 標準載重歷時作用下，消能支撐未發生整體挫屈或局部挫屈行為。試體尺寸如圖 2.14 所示，依據 (2-1)及 (2-2)式可求得降伏強度及設計極限壓力強度分別為 $P_y=1228$ kN 及 $P_{max,d}=2265$ kN，令圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值(P_e/P_y)為 3.2，利用 (2-10)式可求得整體斷面慣性矩 22582066 mm⁴(表 2.5)，再利用 (2-13)及 (2-14)式可得核心單元高模態挫屈之波長 L_w 為 208 mm 及側頂圍束單元作用力 f 為 131 kN，挑選 A490 規格直徑為 19 mm 的高拉力螺栓，而此規格螺栓之抗拉強度為 166 kN，並取安全係數為 3.0，依據 (2-16)式及 (2-17)式可求得螺栓顆數及間距分別為 32 顆及 186mm，而為了探討面板厚度之力學行為，將螺栓間距設計為 186 mm ($<L_w=208$ mm)。利用 (2-21)式可得 Gr. 50 面板厚度為 10.9 mm，本試體採用 12 mm 且面板寬為 270 mm。本試體預留間隙 g 為 3 mm，其核心單元與兩獨立圍束單元之面板間淨距各為 1.5 mm。挑選 A36 長形鋼構件為 150×60×4.5×4.5 mm，而試體測試時混凝土強度為 57 MPa (見表 2.2)。求出槽鋼、面板及混凝土所組成的圍束單元之整體及局部斷面塑性彎矩強度 M_p^s ，再根據 (2-29)及 (2-44)式可得整體挫屈強度及局部挫屈強度分別為 P_y 之 2.5 倍及 6.3 倍，均大於設計極限強度 2265 kN(=1.8 P_y)，因此可確保本試體在 AISC(2005)標準載重歷時下不會產生挫屈行為。依據 2.3 節可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計步驟，所求得各項數值詳列於表 2.6。

2.5.3 試體 3

本試體為了研究不同螺栓強度對可更換核心板之挫屈束制消能支撐的影響，因此將改變螺栓顆數並觀察消能支撐強度是否產生變化。試體尺寸如圖 2.15 所示，依據 (2-1)及 (2-2)式可求得降伏強度及設計極限壓力強度分別為 $P_y=1201$ kN及 $P_{max,d}=2274$ kN，令圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值(P_e/P_y)為 2.5，利用 (2-10)式可求得整體斷面慣性矩 16738929 mm⁴(表 2.5)，再利用 (2-13)及 (2-14)式可得核心單元高模態挫屈之波長 L_w 為 211 mm及側頂圍束單元作用力 f 為 129 kN，挑選 A490 規格直徑為 19 mm 的高拉力螺栓，而此規格螺栓之抗拉強度為 166 kN，並取安全係數分別為 7.4、2.6 及 1.5，依據 (2-16)式可求得螺栓顆數分別為 80、28 及 16 顆，(2-17)式可求得螺栓間距分別為 72、216 及 432mm，而為了探討面板厚度之力學行為，將螺栓最大間距設計為 432 mm ($>L_w=211$ mm)。利用 (2-21)式可得 Gr. 50 面板厚度分別為 17.1 mm、10.0 mm 及 12.2 mm，本試體採用 12 mm 且面板寬為 270 mm。本試體預留間隙 g 為 3 mm，其核心單元與兩獨立圍束單元之面板間淨距各為 1.5 mm，並挑選 A36 長形鋼構件為 $150 \times 50 \times 4.5 \times 4.5$ mm，而試體測試時混凝土強度為 58.2 MPa (見表 2.2)。求出槽鋼、面板及混凝土所組成的圍束單元之整體及局部斷面塑性彎矩強度 M_p^s ，再根據 (2-29)式可得整體挫屈強度為 P_y 之 2.0 倍，而局部挫屈破壞力因螺栓間距不同而產生差異，利用 (2-44)式分別求得在上述三種不同螺栓間距下產生局部挫屈強度分別為 P_y 之 14、4.8 及 2.3 倍，均大於設計極限強度 2274 kN($=1.9 P_y$)，因此可確保本試體在 AISC(2005)標準載重歷時下，不會因螺栓束制強度不同而產生局部挫屈行為。依據 2.3 節可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計步驟，所求得各項數值詳列於表 2.6。

2.5.4 試體 4

本試體為了求取可更換核心板之挫屈束制消能支撐整體實驗挫屈強度，因此希望在AISC 2005 標準載重歷時中，使消能支撐發生整體挫屈行為。試體尺寸如圖 2.16 所示，依據 (2-1)及 (2-2)式可求得降伏強度及設計極限壓力強度分別為 $P_y=1238$ kN及 $P_{max,d}=2171$ kN，令圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值(P_e/P_y)為 1.4，利用 (2-10)式可求得整體斷面慣性矩 10078747 mm⁴(表 2.5)，再利用 (2-13)及 (2-14)式可得核心單元高模態挫屈之波長 L_w 為 208 mm及側頂圍束單元作用力 f 為 125 kN，挑選A490 規格直徑為 19 mm的高拉力螺栓，而此規格螺栓之抗拉強度為 166 kN，並取安全係數為 1.5，依據 (2-16)式及 (2-17)式可求得螺栓顆數及最大間距分別為 16 顆及 465mm，因試體核心單元消能段中心處斷面積較大，導致圍束單元中心處不能放置螺栓，因此螺栓間距不一致，而為了探討面板厚度之力學行為，將螺栓間距設計為 465 mm ($> L_w=208$ mm)。利用 (2-21)式可得Gr. 50 面板厚度為 11.9 mm，本試體採用 12 mm且面板寬為 270 mm。本試體預留間隙 g 為 3 mm，其核心單元與兩獨立圍束單元之面板間淨距各為 1.5 mm，並挑選A36 長形鋼構件為 $150 \times 35 \times 4.5 \times 4.5$ mm，而試體測試時無收縮水泥砂漿強度為 48.3 MPa(見表 2.3)。求出槽鋼、面板及混凝土所組成的圍束單元之整體及局部斷面塑性彎矩強度 M_p^g ，再根據 (2-29)及 (2-44)式可得整體挫屈破壞力及局部挫屈破壞力分別為 P_y 之 1.2 及 1.3 倍，均小於設計極限強度 2171 kN($=1.8 P_y$)，因此可檢驗本試體在AISC(2005)標準載重歷時中，是否會如設計值產生整體挫屈。依據 2.3 節可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計步驟，所求得各項數值詳列於表 2.6。

2.6 試體試驗構架裝置及載重歷時

本實驗於國立交通大學土木系結構實驗室進行，試驗構架圖 2.17 所

示，試驗所採用之施力設備與資料擷取系統敘述如下。

2.6.1 油壓制動器

本研究在進行新型挫屈束制消能支撐實驗時，所提供之水平側向力是由一支 MTS 油壓制動器提供，其最大輸出力量為 2000 kN，衝程限制為 ±600 mm，在試驗中所採用之加載速率為 0.5 mm/sec，同時將油壓制動器的資料輸出連接至資料擷取系統，由擷取系統接收油壓制動器上輸出之力量及位移。

2.6.2 資料擷取系統

本研究所有試驗量測數據均藉由資料擷取系統收集，本試驗所採取之資料擷取系統為 InstruNet 100 資料擷取盒，系統共有 64 個頻道可供資料收集，同時配合 InstruNet World 軟體操作，可適用於多種不同形式之量測儀器，而有關於量測儀器上之設定方式，皆依據 InstruNet World 軟體操作手冊。

2.6.3 層間側位移角與核心應變的關係

實驗構架中的層間側位移角為 α ，而新型挫屈束之消能支撐與構架間之角度為 θ ，如圖 2.18 所示，可找出樓層高 h ($=3850$ mm) 與跨距 l ($=3180$ mm) 相對於軸向長度 l_b ($=4992$ mm) 之關係為：

$$l_b^2 = h^2 + l^2 \quad (2-48)$$

$$(l_b + \delta)^2 = h^2 + (l + d)^2 \quad (2-49)$$

其中 δ 為軸向變形量， d 為層間側位移量，將 (2-49) 式展開，忽略 δ^2 及 d^2 可得軸向變形量 δ 為：

$$\delta = \frac{ld}{l_b} = d \cos \theta = \alpha h \cos \theta \quad (2-50)$$

故軸向應變 ε 為：

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_b} = \frac{\alpha h \cos \theta}{\frac{h}{\sin \theta}} = \frac{\alpha}{2} \sin 2\theta \quad (2-51)$$

當消能支撐進入降伏消能階段時，大量的塑性變形會集中在核心單元消能段，故其應變 ε_c 為：

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon}{\gamma} \quad (2-52)$$

其中 γ 為集中消能因子(Nakamura et al. 2000)，如下所示：

$$\gamma = \frac{L_y}{L_{wp}} \quad (2-53)$$

其中 L_y 為核心單元消能段長度(=2800 mm)， L_{wp} 為消能支撐兩端工作點間之距離(= l_b)。

2.6.4 試驗載重歷時

各試體加載歷時是參考美國AISC所建議之加載歷時(AISC 2005)來對試體進行加載，載重加載歷時如圖 2.19 所示，分為標準加載歷時與疲勞加載歷時，而標準加載歷時中 Δ_{by} 為消能支撐構件發生初始降伏所對應之層間側位移角， Δ_{bm} 為消能支撐構件軸向變形所對應之設計層間位移角， Δ_{bm} 至少要大於 0.01 弧度(AISC 2005)，本試驗 Δ_{bm} 設定為 0.012 弧度(核心應變為 1.06%)：

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{2} \sin 2\theta = \frac{0.012}{2} \sin 100 = 0.00591$$

$$\gamma = \frac{2800}{4992} = 0.56$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon}{\gamma} = \frac{0.00591}{0.56} = 0.0106 = 1.06\%$$

而每階段加載歷時所對應核心應變列於表 2.7。試驗過程中油壓制動器造成消能支撐受壓時定義為負方向，將油壓制動器之水平側位移除以樓層高度($h=3850$ mm)定義為負層間側位移角，反之油壓制動器造成消能支撐受拉時定義為正方向，對應正層間側位移角，而本研究進行載重加載試驗時，油壓制動器設定為先往負層間側位移角移動。

2.6.5 試體韌性容量(CPD)

目前挫屈束制消能支撐在型式上或製作方式上有許多種，而各種挫屈束制消能支撐也各有其優勢性，因此挫屈束制消能支撐的優劣取決於消能行為的表現，而根據美國 AISC 2005 所建議挫屈束制消能支撐之韌性容量 (Cumulative Plastic Ductility, CPD) 至少要大於 200，而韌性容量 μ_c 為：

$$\mu_c = \frac{\sum \Delta_{plastic}}{\Delta_y} \quad (2-54)$$

其中 $\Delta_{plastic}$ 為消能支撐之塑性變形量， Δ_y 為消能支撐之降伏變形量。消能支撐發揮之最大韌性 μ_{max} 為：

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (2-55)$$

其中 Δ_{max} 為消能支撐之最大變形量。而每階段加載歷時所對應消能支撐韌性容量與最大韌性列於表 2.7。

2.7 試驗量測規劃

本試驗所使用之量測儀器分為：(1)單向應變計(以S為標示)，主要用來

量測核心單元消能段及圍束單元之應變。(2)位移計(以L為標示)，主要用來量測組合式挫屈束制消能支撐之軸向變形量。(3)拉線式位移計(以L為標示)，主要用來量測組合式挫屈束制消能支撐之面外變形量及中點的垂直變位，而各試體之量測儀器架設位置皆相同如圖 2.20 及圖 2.21 所示。



第三章 試體試驗與結果分析

3.1 前言

本研究共製作四組新研發挫屈束制消能支撐，目的在探討本研究提出可更換核心板之挫屈束制消能支撐遲滯行為與圍束單元勁度及螺栓數目關係，並藉由試驗驗證設計是否恰當，包含試體實際施作的難易程度與可行性。3.2 節介紹試體製作與組裝程序，3.3 節至 3.6 節為各組試體試驗現象描述與結果分析，3.7 節為試驗結果比較。

3.2 試體製作與組裝

本研究試體製作分為兩階段，第一階段由能誌鋼構廠製作試體 1、試體 2 及試體 3，第二階段由鴻舜鋼鐵廠製作試體 4。試體部份分為核心單元與圍束單元，其中核心單元為一裁切之鋼板(照片 3.1)，而圍束單元為兩組獨立的圍束構件利用墊板及螺栓栓接組合而成。兩階段試體製作流程差異如下所述，能誌鋼構製作過程中圍束單元之任一組圍束構件是由面板與長槽形鋼構件焊接(照片 3.2)後，將圍束構件置入整平機整平(照片 3.3)，並利用螺栓將兩組圍束構件進行假組裝(照片 3.4)後，內部澆置混凝土組成。待圍束構件完成與核心單元黏貼應變計後(照片 3.5)，於核心單元中心與消能段兩端點貼上 1 mm 薄板(照片 3.6)，將一組圍束構件放平置入核心單元、墊板與 2-3 mm 之墊片(照片 3.7)，再放上另一組圍束構件(照片 3.8)利用扭力扳手將螺栓鎖至預緊軸力(照片 3.9)，試體即組裝完成(照片 3.10)。能誌鋼構製作過程中面板與長槽形鋼構件焊接前，先將面板預彎使兩端端部與中點相對位置相差 16 mm 如圖 3.1 所示，焊接過程中圍束構件會產生些微變形量，最終圍束構件中點與端部相對位置差值可由量測得知(照片 3.11)，而各試體圍束構件中點與端部之相對位置差如表 3.1 所示。鴻舜鋼鐵

製造過程中先將長槽形鋼構件點焊於面板上(照片 3.12)，再將核心單元與兩組圍束構件利用 2-3 mm 之長形薄板(照片 3.13)、墊板(照片 3.14)及螺栓接而成，再將長槽形鋼構件焊接固定於面板上，最後於圍束構件內部澆置無收縮水泥砂漿(照片 3.15)試體即組裝完成，而所有試體均於鋼構廠組裝完成後送至交通大學結構實驗室中進行試驗。

3.3 試體 1 試驗現象與結果分析

3.3.1 試驗現象

照片 3.16 及照片 3.17 為試體 1 實驗前之全景，本試體為第一支測試的試體，核心單元接合段與接合板採用 8 顆 A490 規格直徑為 32 mm 之高張力螺栓連接(照片 3.18)，本試體共有 32 顆螺栓，螺栓間距為 186 mm，圍束單元所提供之 P_e/P_y 為 6.4。在所有試驗裝置準備就緒後，先施以彈性測試已確定各裝置之功能正常運作，但在進行彈性測試時接合螺栓即產生滑動現象，因此試驗終止並進行焊道補強(照片 3.19)。在補強之後試驗重新開始進行，圖 3.2(a)為施以標準歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，而試驗過程中於側位移角 $\alpha=0.0038$ 弧度(相當於 Δ_{by} ，核心應變為 0.19%)結束時，試體轉換段端部出現些微降伏(照片 3.20)，但試體外觀無明顯變化，並持續進行試驗，而在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量(照片 3.21)及核心單元與面板間淨距(照片 3.22)並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha=0.024$ 弧度(相當於 $2.0\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%)二圈試驗後，亦指標準歷時加載試驗結束，此時試體下端之殘餘變形如照片 3.23 所示，但試體未發生挫屈現象而核心單元與面板間淨距也維持不變。因此施以側位移角 $\alpha=0.018$ 弧度(相當於 $1.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 1.58%)之疲勞歷時加載試驗，圖 3.3(a)為疲勞歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，直到疲勞歷時加載至第 21 圈側位移角 $\alpha=-0.018$ 弧度

往 $\alpha = +0.018$ 弧度走時發生巨響，強度快速下降，為核心單元斷裂，此時停止油壓制動器的控制結束試驗，並於試驗後將圍束單元與核心單元之螺栓鬆開分離，檢視核心斷裂情形(照片 3.24)，發現核心單元斷裂於中點斷面積變化處。

3.3.2 試驗結果分析

圖 3.4(a)為BRB軸向位移標準加載歷時，圖 3.4(b)為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖 3.4(c)為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3.4(d)為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3.4(e)為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3.4(f)為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖，其中圖 3.4(b)至圖 3.4(d)可利用線性迴歸得到試體整體勁度 K_{total}^m [圖 3.5(a)]、有效挫屈長度之勁度 $K_{yt,1}^m$ [圖 3.5(b)]及核心消能段與轉換段串聯之勁度 $K_{yt,2}^m$ [圖 3.5(c)]，而 K_{total}^m 、 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 分別為：

$$K_{total}^m = \frac{F}{L_1} \quad (3-1)$$

$$K_{yt,1}^m = \frac{2F}{L_2 + L_3} \quad (3-2)$$

$$K_{yt,2}^m = \frac{2F}{L_4 + L_5 + L_6 + L_7} \quad (3-3)$$

其中 F 為試體軸向力， L_1 至 L_7 分別為各位移計量測到之軸向變形量。根據 2.3.2 節 (2-3)式及 (2-4)式可求得試體整體勁度 K_{total}^c 及有效挫屈長度之勁度 K_{yt}^c ，將試驗值與理論值所求得試體之彈性勁度差異列於表 3.4，由表中可看出 K_{total}^c 與 K_{total}^m 誤差為 1.0%，但由圖 3.5(a)可看出線性迴歸根實驗值差異很大較不可靠，可能為量測位移計本身問題，而 K_{yt}^c 與 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 誤差分別

為 2.9% 及 4.9%，顯示試驗值與理論值接近。試體之非彈性勁度亦可取圖 3.4(c) 及圖 3.4(d) 每階段加載歷時下之極值利用線性迴歸得到 $K_{p,1}^m$ [圖 3.6(a)] 及 $K_{p,2}^m$ [圖 3.6(b)] 與試體之彈性勁度 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 比較列於表 3.5。並在每階段加載歷時下將挫屈長度範圍內量測之軸向變形量差異列於表 3.6，由表中可看出 (L2+L3) 及 (L4+L5+L6+L7) 所量測之軸向變形量差異均小於 10%，可說明挫屈長度範圍內之變形量集中於核心單元消能段。圖 3.4 中核心應變 ε_c 為：

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{L_y} \quad (3-4)$$

其中 δ 為各位移計量測到之軸向變形量， L_y 為消能段長度。試體在標準載重歷時過程中產生最大軸壓及軸拉力分別為 1724 kN 及 1566 kN，兩者強度相差約 10% 是在可接受的範圍內 (AISC 2005)，而標準歷時加載試驗結束試體未發生整體挫屈與局部挫屈現象，且面板與接合螺栓均未出現破壞情形，因此驗證了公式 (2-16)、(2-21)、(2-29) 及 (2-44) 的可靠性。

圖 3.7(a) 為疲勞加載歷時，共計經歷 21 個迴圈，圖 3.7(b) 為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖 3.7(c) 為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3.7(d) 為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3.7(e) 為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3.7(f) 為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖。根據 2.6.5 節公式 (2-54) 及 (2-55) 可分別求得本試體之最大韌性 μ_{\max} 及韌性容量 μ_c 列於表 3.7。

3.4 試體 2 試驗現象與結果分析

3.4.1 試驗現象

照片 3.25 及照片 3.26 為試體 2 試驗前之全景，本試體共有 32 顆螺栓，螺栓間距為 186 mm，圍束單元所提供之 P_e/P_y 為 3.2，圖 3.2(b) 為施以

標準歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，而試驗過程中於側位移角 $\alpha=0.0038$ 弧度(相當於 Δ_{by} ，核心應變為 0.19%)結束時，試體轉換段端部出現些微降伏(照片 3.27)，但試體外觀無明顯變化，並持續進行試驗，到了側位移角 $\alpha=-0.018$ 弧度(相當於 $1.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 1.58%)第一圈要往 $\alpha=+0.018$ 弧度走時，油壓制動器發生問題，於是試驗中止將油壓制動器控制到原始位置，並重新開始進行標準歷時加載試驗，而情況與第一次試驗相同到了側位移角 $\alpha=-0.018$ 弧度(相當於 $1.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 1.58%)第一圈要往 $\alpha=+0.018$ 弧度走時，油壓制動器發生問題，於是試驗中止並將油壓制動器送廠維修。在油壓制動器修復後試驗重新開始進行，而試驗過程中在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量及核心單元與面板間淨距並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha=0.024$ 弧度(相當於 $2.0\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%)二圈試驗後，亦指標準歷時加載試驗結束，此時試體下端之殘餘變形如照片 3.28 所示，但試體未發生挫屈現象而核心單元與面板間淨距也維持不變，因此施以側位移角 $\alpha=0.018$ 弧度(相當於 $1.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 1.58%)之疲勞歷時加載試驗，圖 3.3(b)為疲勞歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，直到疲勞歷時加載至第 9 圈側位移角 $\alpha=-0.018$ 弧度往 $\alpha=+0.018$ 弧度走時發生巨響，強度快速下降，為核心單元斷裂，此時停止油壓制動器的控制結束試驗，並於試驗後將圍束單元與核心單元之螺栓鬆開分離，檢視核心斷裂情形(照片 3.29)，發現核心單元斷裂於中點斷面積變化處。

3.4.2 試驗結果分析

圖 3.8 至圖 3.10 為本試體第一次至第三次標準歷時加載試驗之試驗結果，因此取圖 3.8 作說明。圖 3.8(a)為標準加載歷時，圖 3.8(b)為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖中軸向變形突然驟減此為量測位移計

本身問題，圖 3. 8(c)為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3. 8(d)為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3. 8(e)為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3. 8(f)為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖，其中圖 3. 8(b)至圖 3. 8(d)可利用線性迴歸得到試體整體勁度 K_{total}^m [圖 3. 11(a)]、有效挫屈長度之勁度 $K_{yt,1}^m$ [圖 3. 11(b)]及核心消能段與轉換段串聯之勁度 $K_{yt,2}^m$ [圖 3. 11(c)]，並根據 2.3.2 節 (2-3)式及 (2-4)式可求得試體整體勁度 K_{total}^c 及有效挫屈長度之勁度 K_{yt}^c ，將試驗值與理論值所求得試體之彈性勁度差異列於表 3. 4，由表中可看出 K_{total}^c 與 K_{total}^m 誤差為 53%差異較大，可能為量測位移計本身問題，而 K_{yt}^c 與 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 誤差分別為 9.1%及 5.4%，顯示試驗值與理論值接近。試體之非彈性勁度亦可取圖 3. 8(c)及圖 3. 8(d) 每階段加載歷時下之極值利用線性迴歸得到 $K_{p,1}^m$ [圖 3. 12(a)]及 $K_{p,2}^m$ [圖 3. 12 (b)]與試體之彈性勁度 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 比較列於表 3. 5，並在每階段加載歷時下將挫屈長度範圍內量測之變形量列於表 3. 6，由表中可看出(L2+L3)及(L4+ L5+L6+L7)所量測之軸向變形量差異均小於 10%，可說明挫屈長度範圍內之變形量集中於核心單元消能段。試體在標準載重歷時過程中產生最大軸壓及軸拉力分別為 1756 kN及 1567 kN，兩者強度相差約 12%是在可接受的範圍內(AISC 2005)，而標準歷時加載試驗結束試體未發生整體挫屈與局部挫屈現象，且面板與接合螺栓均未出現破壞情形，因此驗證了公式 (2-16)、(2-21)、(2-29)及 (2-44)的可靠性。

圖 3. 13(a)為疲勞加載歷時，共計經歷 9 個迴圈，圖 3. 13(b)為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖 3. 13(c)為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3. 13(d)為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3. 13(e)為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3. 13(f)為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖。根據 2.6.5 節公式 (2-54)及 (2-55)

可分別求得本試體之最大韌性 μ_{max} 及韌性容量 μ_c 列於表 3.7。

3.5 試體 3 試驗現象與結果分析

3.5.1 試驗現象

照片 3.30 及照片 3.31 為試體 3 試驗前之全景，本試體圍束單元所提供之 P_e/P_y 為 2.5，圖 3.2(c)為施以標準歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，而第一次試驗試體螺栓顆數為 80 顆，此時螺栓間距為 72 mm (照片 3.32)，試驗過程中於側位移角 $\alpha=0.0038$ 弧度(相當於 Δ_{by} ，核心應變為 0.19%)結束時，試體轉換段端部出現些微降伏(照片 3.33)，但試體外觀無明顯變化，並持續進行試驗，而在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量及核心單元與面板間淨距並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha=0.024$ 弧度(相當於 $2.0\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%)二圈試驗後，亦指標準歷時加載試驗結束，試體未發生挫屈現象而核心單元與面板間淨距也維持不變，並施以側位移角 $\alpha=0.018$ 弧度(相當於 $1.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 1.58%)之疲勞歷時加載試驗，圖 3.3(c)為疲勞歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，而於疲勞歷時加載 2 圈後實驗中止，此時之韌性容量為 256，將油壓制動器控制到原始位置，並將試體部分螺栓拆掉剩下 28 顆，此時螺栓間距為 216 mm (照片 3.34)，試驗重新開始進行，而試驗過程中在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量及核心單元與面板間淨距並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha=0.024$ 弧度(相當於 $2.0\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%)二圈試驗後，亦指標準歷時加載試驗結束，此時之韌性容量為 452，試體未發生挫屈現象而核心單元與面板間淨距也維持不變，因此實驗中止將油壓制動器控制到原始位置。並將試體部分螺栓拆掉剩下 16 顆，此時螺栓間距為 432 mm (照片 3.35)，試驗重新開始進行，而試驗過程中在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量及核心單

元與面板間淨距並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha=0.024$ 弧度(相當於 $2.0\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%)二圈試驗後，亦指標準歷時加載試驗結束，試體未發生挫屈現象而核心單元與面板間淨距也維持不變，因此繼續往側位移角 $\alpha=0.03$ 弧度(相當於 $2.5\Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.64%)進行二圈試驗後，於第三圈原始位置往 $\alpha=-0.03$ 弧度走時試體發生整體挫屈(照片 3.36 至照片 3.38)，強度快速下降，此時將油壓制動器控制於破壞時的位置，並觀察紀錄試體破壞情況，其中試體中點產生之面外變形為 117 mm，於試體中點最大變形處圍束單元之長槽形鋼構件出現降伏現象(照片 3.39)及產生面外變形(照片 3.40)，而接合螺栓與螺栓周圍之面板皆出現降伏現象(照片 3.41)，此外核心單元與面板間之淨距為 4 mm 且兩者因變形過大產生約 1 mm 相對移動(照片 3.42)，並在轉換段與接合板焊道補強處焊道產生裂縫(照片 3.43)且焊道周圍出現降伏現象(照片 3.44)，且雙接合板並未隨著試體發生整體挫屈而產生挫屈現象(照片 3.45)，待實驗現象觀察結束後，停止油壓制動器的控制結束試驗，並於試驗後將圍束單元與核心單元之螺栓鬆開分離，檢視核心破壞情形(照片 3.46)，發現核心單元產生第一模態模態挫屈。

3.5.2 試驗結果分析

圖 3.14 至圖 3.16 為本試體第一次至第三次標準歷時加載試驗之試驗結果，因此取圖 3.14 作說明。圖 3.14(a)為標準加載歷時，圖 3.14(b)為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖 3.14(c)為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3.14(d)為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3.14(e)為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3.14(f)為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖，其中圖 3.14(b)至圖 3.14(d)可利用線性迴歸得到試體整體勁度 K_{total}^m [圖 3.17(a)]、有效挫屈長度之勁度

$K_{yt,1}^m$ [圖 3. 17(b)]及核心消能段與轉換段串聯之勁度 $K_{yt,2}^m$ [圖 3. 17(c)]，並根據 2.3.2 節 (2-3)式及 (2-4)式可求得試體整體勁度 K_{total}^c 及有效挫屈長度之勁度 K_{yt}^c ，將試驗值與理論值所求得試體之彈性勁度差異列於表 3. 4，由表中可看出 K_{total}^c 與 K_{total}^m 誤差為 29% 差異較大，可能為量測位移計本身問題，而 K_{yt}^c 與 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 誤差分別為 4.9% 及 5.4%，顯示試驗值與理論值接近。試體之非彈性勁度亦可取圖 3. 14(c)及圖 3. 14(d)每階段加載歷時下之極值利用線性迴歸得到 $K_{p,1}^m$ [圖 3. 18(a)]及 $K_{p,2}^m$ [圖 3. 18(b)]，並與試體之彈性勁度 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 比較列於表 3. 5，並在每階段加載歷時下將挫屈長度範圍內量測之變形量列於表 3. 6，由表中可看出(L2+L3)及(L4+L5+L6+L7)所量測之軸向變形量差異均小於 10%，可說明挫屈長度範圍內之變形量集中於核心單元消能段。試體在標準載重歷時過程中產生最大軸壓及軸拉力分別為 1951 kN 及 1692 kN，兩者強度相差 15% 是在可接受的範圍內(AISC 2005)。本試體發生整體挫屈時之軸向壓力為 1951 kN，而根據 2.3.4 節公式 (2-29) 可求出本試體發生整體挫屈之軸向力為 2137 kN，兩者強度相差約 10%，而試體發生整體挫屈前，並未發生局部挫屈且面板與接合螺栓均未出現破壞情形，因此驗證了公式 (2-16)、(2-21)、(2-29)及 (2-44)的可靠性。根據 2.6.5 節公式 (2-54)及 (2-55)可分別求得本試體之最大韌性 μ_{max} 及韌性容量 μ_c 列於表 3. 7。

3.6 試體 4 試驗現象與結果分析

3.6.1 試驗現象

照片 3. 47 及照片 3. 48 為試體 4 實驗前之全景，本試體圍束單元所提供之 P_e/P_y 為 1.4，圖 3. 2(d)為施以標準歷時加載試驗下油壓制動器力量與位移關係圖，而試驗過程中於側位移角 $\alpha = 0.0038$ 弧度(相當於 Δ_{by} ，核心應

變為 0.19%) 結束時，試體轉換段端部出現些微降伏(照片 3.49)，但試體外觀無明顯變化，並持續進行試驗，而在每階段加載歷時結束後量測試體兩端之殘餘變形量及核心單元與面板間淨距並分別列於表 3.2 及表 3.3，直到側位移角 $\alpha = 0.024$ 弧度(相當於 $2.0 \Delta_{bm}$ ，核心應變為 2.11%) 第一圈時，從原始位置往 $\alpha = -0.024$ 弧度走時試體發生整體挫屈(照片 3.50 至照片 3.52)，強度快速下降，此時將油壓制動器控制於破壞時的位置，並觀察紀錄試體破壞情況，其中試體中點產生之面外變形為 67 mm，於試體中點最大變形處核心單元與面板間之淨距為 4 mm 但兩者未產生相對滑動(照片 3.53)，而圍束單元與接合螺栓均未出現降伏現象，並在轉換段與接合板焊道補強處周圍出現降伏現象(照片 3.54)，且雙接合板並未隨著試體發生整體挫屈而產生挫屈現象(照片 3.55)，待實驗現象觀察結束後，停止油壓制動器的控制並結束試驗，並於試驗後將圍束單元與核心單元之螺栓鬆開分離，檢視核心破壞情形(照片 3.56)，發現核心單元產生第一模態模態挫屈。

3.6.2 試驗結果分析

圖 3.19(a) 為標準加載歷時，圖 3.19(b) 為軸向力量與消能支撐整體位移關係圖，圖 3.19(c) 為軸向力量與有效挫屈長度之位移關係圖，圖 3.19(d) 為軸向力量與核心消能段位移關係圖，圖 3.19(e) 為軸向力量與核心相對於上方圍束端部之位移關係圖，圖 3.19(f) 為軸向力量與核心相對於下方圍束端部之位移關係圖，其中圖 3.19(b) 至圖 3.19(d) 可利用線性迴歸得到試體整體勁度 K_{total}^m [圖 3.20(a)]、有效挫屈長度之勁度 $K_{yt,1}^m$ [圖 3.20(b)] 及核心消能段與轉換段串聯之勁度 $K_{yt,2}^m$ [圖 3.20(c)]，並根據 2.3.2 節 (2-3) 式及 (2-4) 式可求得試體整體勁度 K_{total}^c 及有效挫屈長度之勁度 K_{yt}^c ，將試驗值與理論值所求得試體之彈性勁度差異列於表 3.4，由表中可看出 K_{total}^c 與 K_{total}^m 誤差為 12% 差異較大，可能為量測位移計本身問題， K_{yt}^c 與 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 誤差分別為

9.0%及 0.1%，顯示試驗值與理論值接近。試體之非彈性勁度亦可取圖 3.19(c)及圖 3.19(d)每階段加載歷時下之極值利用線性迴歸得到 $K_{p,1}^m$ [圖 3.21(a)]及 $K_{p,2}^m$ [圖 3.21(b)]，並與試體之彈性勁度 $K_{yt,1}^m$ 及 $K_{yt,2}^m$ 比較列於表 3.5，並在每階段加載歷時下將挫屈長度範圍內量測之變形量列於表 3.6，由表中可看出(L2+L3)及(L4+L5+L6+L7)所量測之軸向變形量差異均小於 10%，可說明挫屈長度範圍內之變形量集中於核心單元消能段。試體在標準載重歷時過程中產生最大軸壓及軸拉力分別為 1660 kN 及 1494 kN，兩者強度相差約 11%是在可接受的範圍內(AISC 2005)。本試體發生整體挫屈時之軸向壓力為 1660 kN，而根據 2.3.4 節公式 (2-29)可求出本試體發生整體挫屈之軸向力為 1456 kN，兩者強度相差約 14%，而試體發生整體挫屈前，並未發生局部挫屈且面板與接合螺栓均未出現破壞情形，因此驗證了公式 (2-16)、(2-21)、(2-29)及 (2-44)的可靠性。根據 2.6.5 節公式 (2-54)及 (2-55)可分別求得本試體之最大韌性 μ_{max} 及韌性容量 μ_c 列於表 3.7。

3.7 試驗結果比較

圖 3.22 為 4 組試體軸向力與核心應變關係，圖中顯示各組核心應變均超過降伏應變，但因應變計黏貼於試體內部，試驗過程中易產生破壞，導致各組試體量測到之核心應變有差異。

圖 3.23 為 4 組試體中點垂直變位(L12 量測值)與核心應變(S1 量測值)關係，圖中顯示各組試體中點垂直變位均會隨著核心應變加大而增加，但各組試體均未發生強軸挫屈現象。

圖 3.24 為 4 組試體每階段加載歷時於BRB受軸壓下之面外變形沿試體軸向的分佈，試體 1 與試體 2 發生核心斷裂，因此圖 3.24(a)及圖 3.24(b)並未發現試體有明顯的面外變形，而試體 3 與試體 4 則發生整體挫屈現象，因此可從圖 3.24(c)及圖 3.24(d)明顯發現試體中點之面外變形分別為 117

mm及 67 mm，並可看出兩組試體挫屈方向相反。

圖 3. 25 為 4 組試體每階段加載歷時於BRB受軸拉下之面外變形沿試體軸向的分佈，圖中顯示各組試體於受拉時，均未發現試體有明顯的面外變形。

圖 3. 26 為 4 組試體每階段加載歷時於BRB受軸壓下之圍束單元應變沿試體軸向的分佈，試體 1 與試體 2 發生核心斷裂，因此圖 3. 26(a)及圖 3. 26(b)可說明圍束單元應變均未達降伏應變，而試體 3 與試體 4 則發生整體挫屈現象，因此可從圖 3. 26(c)及圖 3. 26(d)明顯發現試體中點之圍束單元應變均已達降伏應變，並顯示兩組試體挫屈方向相反。

圖 3. 27 為 4 組試體每階段加載歷時於BRB受軸拉下之圍束單元應變沿試體軸向的分佈，圖中顯示各組試體於受拉時，圍束單元應變並未產生明顯變化。

由上述四組試驗可得知各試體軸向拉壓強度差異及韌性容量(μ_c)，為了解本研究提出之組合式挫屈束制消能支撐滑動單元採用預留壓縮空間是否恰當，因此參考國內外學者提出之挫屈束制消能支撐試驗細節，並將試體差異及試驗結果列於表 3. 8，而國內外學者提出之挫屈束制消能支撐試驗如下所簡述，Black等人(Black et al. 2004)提出五組挫屈束制消能支撐試體如圖 3. 28(a)所示，其中核心單元斷面為平板或十字形斷面，圍束單元為鋼套管內部填充圍束構材(Mortar)，試體滑動單元採用脫層材料為滑動機制，而各組試體軸向拉壓強度差異及韌性容量(μ_c)均滿足AISC 2005 規範之要求。Iwata等人(Iwata et al. 2004)提出十三組挫屈束制消能支撐試體，本研究參考其中四組試驗結果如圖 3. 28(b)所示，而核心單元斷面均為平板，圍束單元為兩獨立之圍束構件焊接組合而成，任一組圍束構件為L形鋼構件內填充圍束構材(Mortar)所組成，試體滑動單元採用脫層材料為滑動機制，而各組試體軸向拉壓強度差異及韌性容量(μ_c)均滿足AISC 2005 規範之要

求。蔡克銓等人(蔡克銓等人 2006)提出三組組合型預鑄式挫屈束制消能支撐如圖 3.28(c)所示，其中雙核心單元斷面為平板，圍束單元為兩獨立之圍束構件利用螺栓栓接組合而成，試體滑動單元採用預留壓縮空間為滑動機制，而此次實驗目的為了研究局部挫屈與圍束構材強度之關係，因此有兩組試體韌性容量(μ_c)未滿足 AISC 2005 規範之要求，但各組試體軸向拉壓強度均滿足 AISC 2005 規範之要求。由上述比較可說明消能支撐滑動單元採用脫層材料或預留壓縮空間均能使消能支撐產生良好的消能遲滯行為，因此可採用預留壓縮空間作為滑動單元以改善脫層材料施工變異性較大之缺點。

3.8 可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計流程

Step 1. 利用結構物受側力作用之下，求得消能支撐構件設計強度 (2-2) 式，並決定核心單元消能段面積 A_y 。

Step 2. 令 $P_e / P_y = 2.5$ ，利用彈性尤拉挫屈公式 (2-9) 式，可求得圍束單元整體斷面慣性矩 $I_{r,g}$ (2-10) 式。

Step 3. 如圖 2.6(a)所示，利用核心單元消能段弱面慣性矩求得核心單元高模態波長 L_w (2-13) 式，如圖 2.6(b)所示，當核心單元產生高模態挫屈時，求出側頂圍束單元之側向力 f (2-14) 式，並求出在核心單元消能段範圍內側頂圍束單元之總側向力 F_1 (2-15) 式，並將取安全係數 $FS = 1.5$ 求得螺栓顆數 N_b (2-16) 及螺栓間距 L_b (2-17)，並檢核 $L_b \leq 1.5L_w$ 。

Step 4. 在螺栓間距範圍內求出側頂總力為 F_2 (2-18) 式，如圖 2.6(c)，依據 F_2 求出弱面彎矩 M 與剪力 V ，並利用 Von Mises 降伏應力準則求出面板厚度 t (2-21) 式，並依螺栓規格決定面板寬度 b_f (2-22) 式。

Step 5. 利用 $I_{r,g}$ 挑選與核心單元消能段同寬之槽鋼後，求出由槽鋼、面板及

混凝土所組成的圍束單元之整體斷面塑性彎矩強度 M_p^g (2-23) 式，其中忽略混凝土強度，利用 M_p^g 求出整體挫屈強度 $P_{\max,g}$ (2-29) 式，並檢核 $P_{\max,g} \geq P_{\max,d}$ ，若不滿足則重新挑選槽鋼斷面。

Step 6. 求出單一圍束單元本身之塑性彎矩強度 M_p^l (2-43) 式，其中忽略混凝土強度，利用 M_p^l 求出局部挫屈強度 $P_{\max,l}$ (2-44) 式，並檢核 $P_{\max,l} \geq P_{\max,d}$ ，若不滿足則重新挑選槽鋼斷面。



第四章 有限元素分析

4.1 前言

本章使用美國 Hibbit, Karlsson and Sorensen 公司所研發的 ABAQUS 有限元素分析程式(2003)進行結構試體非線性有限元素分析，評估有限元素分析的可靠性，並進一步探討可更換核心板之挫屈束制消能支撐局部挫屈力學行為。4.2 節為試體有限元素模型建立，4.3 節為有限元素分析結果，4.3 節為參數研究。

4.2 試體有限元素模型建立

為了與試驗結果比較，分析模型採用與試驗試體相同之核心單元及圍束單元尺寸(圖 2.13 至 圖 2.16)來進行有限元素之模擬，而有關分析模型之建立、材料性質與接觸性質的細節及特性，分述如下。

4.2.1 結構模型

模型採用三維結構元素進行模擬，其中核心單元及圍束單元皆採用 8 個節點的磚元素(C3D8R)，而每個節點有 3 個位移自由度。圖 4.1 為核心單元模型網格採用 $38 \times 38 \times 38 \text{ mm}$ 之立方體，由於試驗結果未發生強軸挫屈現象，因此將消能段軸向中心線束制 1 個位移自由度[2 方向(垂直軸向方向)]，並將一端接合段束制 3 個位移自由度，另一端接合段則束制 2 個位移自由度且施以一軸向載重位移[1 方向(軸向方向)]，以求得試體力量 - 位移曲線。圖 4.2 為圍束單元模型網格採用 $60 \times 60 \times 60 \text{ mm}$ 之立方體，是由兩組獨立圍束構件利用螺栓栓接所組成，而模型中螺栓模擬是由一組獨立圍束構件之面板上選取與螺栓面積相同之矩形面積(289 mm^2)實體延伸至另一組獨立

圍束構件之面板，實體延伸之厚度為 25 mm(核心單元厚度 22 mm加上核心單元與面板間之淨距 3 mm)，如圖 4.3 所示。圖 4.4 為墊板模型網格採用 $70 \times 70 \times 70$ mm之立方體，而墊板厚度為 25 mm並在螺栓處空出較大面積 (361 mm^2)挖空，再將圍束單元及墊板兩端部束制 1 個位移自由度[2 方向(垂直軸向方向)]。圖 4.5 及圖 4.6 分別為核心單元、圍束單元與墊板模型所組成之試體模型整體及分解圖，圖 4.7 為試體整體剖面圖。如圖 4.8 所示，在模型分析前導入試體第一挫屈模態之初始面外變形為挫屈長度的 1/3000 (Initial Imperfection)為 1mm，而本研究有限元素分析模擬試體於單一載重下之力學行為。

4.2.2 材料性質

輸入模型之材料性質乃根據材料之強度試驗結果，分析模型之構材主要分為鋼、螺栓、混凝土及無收縮水泥砂漿，材料性質分述如下：

1. 鋼材材料性質：

鋼材之降伏強度採用鋼材拉力試驗之值，如表 2.1 所示，鋼材之彈性模數 E_s 採用 203,000 MPa，波松比為 0.3，並使用周中哲與吳家慶(2004)由 A572 Gr.50 鋼材反覆載重試驗所得之應變硬化參數，其中包含等向硬化參數(Isotropic Hardening)及走動硬化參數(Kinematic Hardening)，表 4.1 為核心單元 A572 Gr.50 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令，而其餘 A572 Gr.50 鋼材及 A36 鋼材材料性質採雙線性行為模擬。

2. 螺栓材料性質：

試驗過程中螺栓均未產生相對移動或滑動現象，因此於分析模型中將螺栓之彈性模數採用 $2030,000 \text{ MPa}(=10 E_s)$ ，波松比為 0.3，以減少螺栓兩端之相對位移量的產生，且分析模型中並未考慮非彈性變形。

3. 混凝土材料性質：

混凝土彈性模數 E_c 為 37,135 MPa($=5000\sqrt{f'_c}$)， f'_c 為各試體測試時混凝土強度(表 2.2)，波松比為 0.2，且分析模型中不考慮非彈性變形及混凝土開裂效應。

4. 無收縮水泥砂漿材料性質：

無收縮水泥砂漿彈性模數 E_c 為 34,737 MPa($=5000\sqrt{f'_c}$)， f'_c 為 48.3MPa (表 2.3)，波松比為 0.2，且分析模型中不考慮非彈性變形及無收縮水泥砂漿開裂效應。

4.2.3 接觸性質

由於核心單元受高軸向壓應變時，會產生高模態挫屈行為而與面板接觸，因此需使用接觸面(Contact)來定義兩者間的關係，並採用介面元素之硬性接觸(Hard Contact)來模擬接觸面之法向行為(與面板垂直方向)，所謂的硬性接觸為當兩個表面之間間隙歸零時，在分析中即加入接觸限制，但對接觸面之間能夠傳遞的接觸壓力大小並未做任何限制；當接觸面之間的接觸壓力變為零或負值時，兩個接觸面會分離並且解除限制。而 ABAQUS 對接觸面的定義分為兩種，一為主控表面(Master Surface)，另一為從屬表面(Slave Surface)，其中主控表面為較平滑之表面，而主控表面法向須一致且指向從屬表面；從屬表面為變形較大之表面，且網格劃分須比主控表面更精細。ABAQUS 使用主-從接觸演算法規律為主控表面的節點可以穿透到從屬表面，而從屬表面的節點不能穿透到主控表面，且主控表面與從屬表面網格密度相近似時，從屬表面應由更為柔軟的材料組成。根據上述 ABAQUS 對接觸面的定義，本研究將核心單元定義為從屬表面，面板定義為主控表面來模擬兩接觸面之接觸行為。

在分析模型中面板與墊板間雖未有間隙，但不能將圍束單元與面板視為一連續體，因此亦採用介面元素之硬性接觸(Hard Contact)來模擬接觸面

之法向行為，並根據上述 ABAQUS 對接觸面的定義，本研究將面板定義為從屬表面，墊板定義為主控表面來模擬兩接觸面之接觸行為。

通常當表面發生接觸時，在接觸面之間會傳遞切向力(與面板平行方向)，所以在分析中就要考慮阻止表面之間相對滑動的摩擦力。庫倫摩擦(Coulomb Friction)是經常用來描述接觸面之間的交互作用，其摩擦力 τ 定義為：

$$\tau = \mu p \quad (4-1)$$

其中 μ 為摩擦係數， p 為兩接觸面之間的接觸壓力，本研究將摩擦介面設定為允許彈性滑動的懲罰剛度模擬(Penalty)，所謂彈性滑動的懲罰剛度模擬為在黏結的接觸面之間發生少量的相對運動之摩擦行為。在模擬摩擦行為時容易造成求解方程組中增加了非對稱項，因此建議摩擦係數 μ 小於 0.2，可使非對稱項的大小和影響都非常小，且油滑鋼板間之摩擦係數介於 0.05 至 0.11 之間(Tribology Index)，而本研究 4 組試體均於核心單元與面板表面塗上一層牛油，因此摩擦係數 μ 取 0.1。圖 4.9 為試體 4 在不同摩擦係數下對試體整體挫屈力之影響，由圖中可看出摩擦係數愈大試體發生整體挫屈力亦愈大，並取整體挫屈時軸向變形與實驗值接近之摩擦係數為 0.1 來作為各組試體模擬時之摩擦係數。

4.3 有限元素分析結果

本研究有限元素分析主要模擬 4 組已進行反覆載重試驗之試體，將此 4 組試體由有限元素分析於單一載重下所得之分析結果與實驗結果進行比較，並由各試體之軸向力量與位移關係圖中可整理出實驗與分析在每階段層間側位移角下之各試體軸向力差值比例，如表 4.2 所示，由表中可進一步看出各試體軸向壓力之實驗值與分析值誤差範圍均在 10%之內，而軸向拉力之實驗值與分析值誤差在 17%之內。圖 4.10 及圖 4.11 分別為試體 1

及試體 4 之核心單元在每階段加載歷時下之挫屈模態數，將各組試體挫屈模態數列於表 4.3 並與理論值比較，而理論值之挫屈模態數 n 為：

$$n = \frac{L_y}{L_w} \quad (4-2)$$

其中 L_y 為消能段長度(=2800 mm)， L_w 為 (2-13) 式。各組試體其分析結果細節詳述如下。

4.3.1 試體 1 分析結果

圖 4.12(a) 為試體 1 之軸向力量與位移關係圖，圖中拉壓打折點皆為核心單元產生全斷面降伏，而在彈性分析過程中軸向變形逐漸增大，因此在 $\delta = 1.8 \text{ mm}$ ($0.33\Delta_{by}$) 時，核心單元由初始變形($n=1$)變成如波浪般之變形($n=6$)，且波峰數會逐漸增加至核心單元達到全斷面降伏而產生高模態挫屈($n=12$)，而圖中於 $\delta = 59.1 \text{ mm}$ ($2.0\Delta_{bm}$) 時，軸壓力與拉力分別為 1759 kN 及 1672 kN 兩者相差 5%，試驗值為 10%，並利用線性迴歸可求得試體之彈性勁度，將試驗值與分析值所得之彈性勁度差異列於表 4.4，由表中可看出誤差小於 2%，顯示試驗值與分析值接近。圖 4.12(b) 為每階段加載歷時之核心應變沿軸向的分佈，本組試體分析在達到與標準加載歷時試驗結束後之相同軸向位移下($\delta = 59.1 \text{ mm}$) 未產生整體挫屈現象，因此從圖中可看出核心應變於軸向拉壓時均約為 2.1%，並於受拉時觀察出核心應變沿軸向均勻分佈，但受壓時因產生高模態挫屈導致核心應變分佈較不均勻。圖 4.12(c) 為試體面外變形沿軸向的分布，本組試體未產生挫屈現象，因此圖中顯示試驗及分析皆未產生明顯的面外變形。圖 4.12(d) 為每階段加載歷時之圍束單元應變值沿軸向分佈，本組試體未發生挫屈現象，因此僅於試驗時在圍束單元中點量測到微小應變值，而於分析中圍束單元應變值皆趨近於零。

4.3.2 試體 2 分析結果

圖 4.13(a)為試體 2 之軸向力量與位移關係圖，圖中拉壓打折點皆為核心單元產生全斷面降伏，而在彈性分析過程中軸向變形逐漸增大，因此在 $\delta = 1.8 \text{ mm}$ ($0.33\Delta_{by}$)時，核心單元由初始變形($n=1$)變成如波浪般之變形($n=7$)，且波峰數會逐漸增加至核心單元達到全斷面降伏而產生高模態挫屈($n=12$)，而圖中於 $\delta = 59.1 \text{ mm}$ ($2.0\Delta_{bm}$)時，軸壓力與拉力分別為 1803 kN 及 1712 kN 兩者相差 5%，試驗值為 12%，並利用線性迴歸可求得試體之彈性勁度，將試驗值與分析值所得之彈性勁度差異列於表 4.4，由表中可看出誤差小於 6%，顯示試驗值與分析值接近。圖 4.13(b)為每階段加載歷時之核心應變沿軸向的分佈，本組試體分析在達到與標準加載歷時試驗結束後之相同軸向位移下($\delta = 59.1 \text{ mm}$)未產生整體挫屈現象，因此從圖中可看出核心應變於軸向拉壓時均約為 2.1%，並於受拉時觀察出核心應變沿軸向均勻分佈，但受壓時因產生高模態挫屈導致核心應變分佈較不均勻。圖 4.13(c)為試體面外變形沿軸向的分佈，本組試體未產生挫屈現象，因此圖中顯示試驗及分析皆未產生明顯的面外變形。圖 4.13(d)為每階段加載歷時之圍束單元應變值沿軸向分佈，本組試體未發生挫屈現象，因此僅於試驗時在圍束單元中點及端點量測到微小應變值，而於分析中圍束單元應變值皆趨近於零。

4.3.3 試體 3 分析結果

圖 4.14(a)為試體 3 之軸向力量與位移關係圖，圖中拉壓打折點皆為核心單元產生全斷面降伏，而在彈性分析過程中軸向變形逐漸增大，因此在 $\delta = 1.8 \text{ mm}$ ($0.33\Delta_{by}$)時，核心單元由初始變形($n=1$)變成如波浪般之變形($n=7$)，且波峰數會逐漸增加至核心單元達到全斷面降伏而產生高模態挫屈($n=12$)，本組試體是將第 3 次試驗之力量與位移關係圖與分析作比較，因此

實驗值與分析值在每階段加載歷時下之軸壓力與軸拉力差異較大，而試驗中於 $\delta = 73.9 \text{ mm}$ ($2.5\Delta_{bm}$)第3圈時，試體發生整體挫屈，但為維持各組試體之應變硬化及走動硬化參數相同，因此分析本試體於 $\delta = 73.9 \text{ mm}$ ($2.5\Delta_{bm}$)時，軸壓力為1830 kN未達到試驗時整體挫屈力1951 kN，因此分析時未發生整體挫屈現象，而此時之軸壓力與拉力分別為1830 kN及1693 kN兩者相差8%，試驗值為15%，並利用線性迴歸可求得試體之彈性勁度，將試驗值與分析值所得之彈性勁度差異列於表4.4，由表中可看出誤差小於2%，顯示試驗值與分析值接近。圖4.14(b)為每階段加載歷時之核心應變沿軸向的分佈，本組試體分析在達到與標準加載歷時試驗結束後之相同軸向位移下($\delta = 73.9 \text{ mm}$)未產生整體挫屈現象，從圖中可看出核心應變於軸拉時約為2.6%並沿軸向均勻分佈，而於軸壓時因產生高模態挫屈導致核心應變分佈較不均勻，且本組試體軸向變形較大此現象更為明顯，圖中可觀察出核心消能段中點及端部應變分別約為2.2%及3.1%。圖4.14(c)為試體面外變形沿軸向的分佈，本組試體分析時未產生挫屈現象，因此圖中未產生明顯的面外變形，而試驗時產生整體挫屈現象並從圖中可明顯看出面外變形量為16 mm，此變形量為試驗力量下降時之變形量並非最大變形量。圖4.14(d)為每階段加載歷時之圍束單元應變值沿軸向分佈，本組試體實驗時產生整體挫屈現象，因此在圖中可觀察到圍束單元上產生較明顯之應變值，其中中點應變值已達降伏應變，而分析時雖未發生整體挫屈現象，但因軸向變形量較大因此從圖中可看出在圍束單元上亦產生些微應變值但均小於0.2%。

4.3.4 試體4分析結果

圖4.15(a)為試體4之軸向力量與位移關係圖，圖中拉壓打折點皆為核心單元產生全斷面降伏，而在彈性分析過程中軸向變形逐漸增大，因此在

$\delta = 1.8 \text{ mm}$ ($0.33 \Delta_{by}$)時，核心單元由初始變形($n=1$)變成如波浪般之變形($n=6$)，且波峰數會逐漸增加至核心單元達到全斷面降伏而產生高模態挫屈($n=12$)，並由圖中可看出試體於軸向壓力達 1740 kN後力量明顯下降，圖 4. 16 為分析模型中發生整體挫屈現象，而此時之軸拉力為 1673 kN兩者相差 4 %，試驗值為 11%，並利用線性迴歸可求得試體之彈性勁度，將試驗值與分析值所得之彈性勁度差異列於表 4. 4，由表中可看出誤差小於 6%，顯示試驗值與分析值接近。圖 4. 15(b)為每階段加載歷時之核心應變沿軸向的分佈，本組試體試驗於軸向位移為($\delta = 39.4 \text{ mm}$)時產生整體挫屈現象，而分析在達到軸向位移為($\delta = 36.2 \text{ mm}$)即產生整體挫屈現象，因此從圖中可看出核心應變於軸向拉壓時均小於 2%，並於受拉時觀察出核心應變沿軸向均勻分佈，但受壓時因產生高模態挫屈導致核心應變分佈較不均勻。圖 4. 15(c)為試體面外變形沿軸向的分佈，圖中顯示試驗及分析時試體中點均於發生整體挫屈時產生明顯的面外變形分別為 11.3 mm及 11.5 mm，而試驗變形量為試驗力量下降時之變形量並非最大變形量。圖 4. 15(d)為每階段加載歷時之圍束單元應變值沿軸向分佈，本組試體產生整體挫屈現象，因此在圖中可觀察到實驗及分析時圍束單元上產生較明顯之應變值，其中中點應變值均已達降伏應變，而在分析時靠近圍束單元端部之應變值亦已達降伏，顯示局部慣性矩較小可能導致局部挫屈發生。

4.4 參數研究

為了了解挫屈束制消能支撐之核心單元長度 L_c 、厚度 t_c 、螺栓間距 L_b 及圍束單元強度對於挫屈束制消能支撐強度之影響，因此本研究針對此四項參數進行挫屈束制消能支撐之參數研究，藉由改變此四項參數來進一步討論各參數對於挫屈束制消能支撐強度之影響。

根據 2.3 節的設計方法將本研究所要進行的 18 組挫屈束制消能支撐各

模型細節及設計值分別列於表 4.5 及表 4.6 並於下節詳述，而 18 組模型分別為不同核心長度(2800 mm, 4800 mm, 9600 mm)、厚度(14 mm, 22 mm, 32 mm)及圍束單元尺寸之挫屈束制消能支撐模型，模擬挫屈束制支撐於單一載重下之力學行為。模型 5(A15L28P24S)至模型 13(A64L96P25)為 3 種不同長度及厚度之挫屈束制消能支撐，並且根據前述的設計方法設計出成功之模型，其 P_e/P_y 均接近 2.5(表 4.6)。而模型 14(A15L28P24LB)至模型 22(A64L96P14GB)則將前九組模型的圍束單元勁度降低或螺栓間距加大，使挫屈束制支撐整體或局部強度不足導致模型發生整體或局部挫屈行為，檢核分析結果是否與理論值相近，並將試體 3 及試體 4 之分析結果與 18 組參數研究模型共同做比較。模型命名方式以模型 5(A15L28P24S)為例，其中 A15 為核心單元面積 $A_c(=1500 \text{ mm}^2)$ 除以 100，L28 為核心長度 $L_y(=2800 \text{ mm})$ 除以 100，P24 為圍束單元彈性挫屈力 P_e 與核心單元降伏力 P_y 比值 $P_e/P_y(=2.4)$ 乘 10 倍，S 表示成功試體，此外 GB 為整體挫屈試體，LB 為局部挫屈試體。參數研究模型之材料性質及應變硬化參數則統一使用與真實試體 4 相同之材料性質(表 2.1 及表 2.3)與應變硬化參數(表 4.1)。

4.4.1 模型 5、6、7、14、15、16

本系列核心單元面積均為 1500 mm^2 ，核單元降伏強度為 563 kN，其中三組模型 5、6 及 7 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值均取接近於 2.5，螺栓間距分別為核心單元高模態挫屈波長之 2、2 及 1.9 倍，螺栓強度安全係數為 1.5，此三組為了探討核心長度對於挫屈消能支撐強度之影響，因此核心長度分別為 2800 mm、4800 mm 及 9600 mm。模型 14 及 15 是分別將模型 5 及 6 之螺栓間距由原本為核心單元高模態波長之 2 倍分別提升至 3.3 及 4.8 倍，而螺栓強度安全係數由原本 1.5 分別降低至 1.0 及 0.7，使局部強度不足導致發生局部挫屈行為，並將挫屈時之局部挫屈強

度與理論值做比較。模型 16 是將模型 7 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值由 2.5 降至 1.3 使整體強度不足導致發生整體挫屈行為，並將挫屈時之整體挫屈強度與理論值做比較。

4.4.2 模型 3、4、8、9、17、18、19

本系列核心單元面積均為 3300 mm^2 ，其中模型 3、模型 4 為實驗試體 3 及試體 4，因此核單元降伏強度除了模型 3 為 1201 kN 其餘模型均為 1238 kN，而前三組模型 3、8 及 9 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值均取接近於 2.5，螺栓間距分別為核心單元高模態挫屈波長之 2.1、1.4 及 1.3 倍，螺栓強度安全係數為 1.5，三組為了探討核心長度對於挫屈消能支撐強度之影響，因此核心長度分別為 2800 mm、4800 mm 及 9600 mm。模型 17 及模型 18 是分別將模型 3 及模型 4 之螺栓間距由原本為核心單元高模態波長之 2.1 及 2.2 倍提升至 2.7 及 3.4 倍，而螺栓強度安全係數由原本 1.5 分別降低至 1.2 及 1.0，使局部強度不足導致發生局部挫屈行為，並將挫屈時之局部挫屈強度與理論值做比較。模型 19 是將模型 8 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值由 2.4 降至 1.2 使整體強度不足導致發生整體挫屈行為，並將挫屈時之整體挫屈強度與理論值做比較。

4.4.3 模型 10、11、12、13、20、21、22

本系列核心單元面積均為 6400 mm^2 ，核單元降伏強度為 2400 kN，其中三組模型 10、模型 11 及模型 12 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值分別為 2.4、2.3 及 2.5，螺栓間距分別為核心單元高模態挫屈波長之 1.5、1.5 及 1.4 倍，螺栓強度安全係數為 1.5。此三組為了探討核心長度對於挫屈消能支撐強度之影響，因此核心長度分別為 2800 mm、4800 mm 及 9600 mm。九組成功模型中均將圍束單元彈性挫屈強度與核心

單元降伏強度(P_e/P_y)比值設計趨近於 2.5，因此本系列中將模型 13 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值定為 2.0，螺栓間距為核心單元高模態挫屈波長之 1.5 倍，螺栓強度安全係數為 1.5，觀察是否會產生挫屈行為。模型 20 是將模型 10 之螺栓間距由原本為核心單元高模態波長之 1.5 倍提升至 2.3 倍，而螺栓強度安全係數由原本 1.5 降低至 1.1，使局部強度不足導致發生局部挫屈行為，並將挫屈時之局部挫屈強度與理論值做比較。模型 21 及模型 22 是分別將模型 11 及模型 12 之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值由 2.3 及 2.5 分別降至 1.3 及 1.4 使整體強度不足導致發生整體挫屈行為，並將挫屈時之整體挫屈強度與理論值做比較。

4.4.4 參數研究分析結果

將參數研究九組成功模型在核心單元達到降伏應變時之挫屈模態數列於表 4.7 並與理論值比較。

圖 4.17(a)為核心面積 $1500 \text{ mm}^2(100 \times 15)$ 之軸向力量與軸向應變關係圖，圖中看出三組設計得當之模型 5、6 及 7 在軸向應變達到 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，模型 14 及 15 因螺栓間距過大分別於軸向應變為 2.9%及 1.4%時發生局部挫屈行為(見表 4.8)，導致核心單元強度衰減，而局部挫屈均發生在端部兩螺栓間，在此範圍內之高模態數目分別為 3 個及 4 個，此時圍束單元的最大側向變形為 17 及 14 mm。模型 16 將圍束強度降低於軸向應變為 1.2%時發生整體挫屈行為(見表 4.9)，導致核心單元強度衰減，此時圍束單元的最大側向變形為 13 mm。

圖 4.17(b)為核心面積 $3300 \text{ mm}^2(150 \times 22)$ 之軸向力量與軸向應變關係圖，圖中看出三組設計得當之模型 3、8 及 9 在軸向應變達到 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，但模型 4 因圍束強度不足於軸向應變為

1.4%時發生整體挫屈行為(見表 4.9)，導致核心單元強度衰減，此時圍束單元的最大側向變形為 12 mm。模型 17 螺栓間距過大於軸向應變為 1.8%時發生局部挫屈行為(見表 4.8)，導致核心單元強度衰減，而局部挫屈均發生在端部兩螺栓間，在此範圍內之高模態數目分別為 3 個，此時圍束單元的最大側向變形為 13 mm。模型 18 圍束強度雖不足，但因螺栓間距為模型 4 之 1.5 倍導致在發生整體挫屈行為前於軸向應變為 0.18%時產生局部挫屈行為(見表 4.8)，導致核心單元強度衰減，而局部挫屈發生在端部兩螺栓間，在此範圍內之高模態數目分別為 3 個，此時圍束單元的最大側向變形為 4 mm。模型 19 因圍束強度不足於軸向應變為 1.0%時發生整體挫屈行為(見表 4.9)，導致核心單元強度衰減，此時圍束單元的最大側向變形為 14 mm。

圖 4.17(c)為核心面積 $6400 \text{ mm}^2(200 \times 32)$ 之軸向力量與軸向應變關係圖，圖中看出三組設計得當之模型 10、11 及 12 在軸向應變達到 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，模型 13 雖圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值定為 2.0，亦達到軸向應變 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，模型 20 螺栓間距過大於軸向應變為 0.26%時發生局部挫屈行為(見表 4.8)，導致核心單元體強度衰減，而局部挫屈均發生在端部兩螺栓間，在此範圍內之高模態數目分別為 2 個，此時圍束單元的最大側向變形為 6 mm。模型 21 及模型 22 因圍束強度不足分別於軸向應變為 1.0%及%時發生整體挫屈行為(見表 4.9)，導致核心單元強度衰減，此時圍束單元的最大側向變形分別為 13 mm及 12 mm。

圖 4.18(a)為模型 15 面外變形沿軸向分佈，圖中顯示模型端部於發生局部挫屈時產生明顯的面外變形為 13mm，而其它處均未產生明顯之面外變形。圖 4.18(b)為模型 20 面外變形沿軸向分佈，圖中顯示模型端部於發生局部挫屈時產生明顯的面外變形為 6mm，而另外一邊端部亦產生明顯的

面外變形為 3mm。圖 4. 18(c)為模型 21 面外變形沿軸向分佈，圖中顯示模型中點於發生整體挫屈時產生明顯的面外變形 13 mm。圖 4. 18(d)為模型 22 面外變形沿軸向分佈，圖中顯示模型中點於發生整體挫屈時產生面外變形為 12 mm。

圖 4. 19(a)為模型軸向強度及螺栓間距與核心單元高模態波長之比值關係圖，圖中顯示圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值大於 2.0，螺栓間距小於核心單元高模態挫屈波長之 2 倍，則模型在軸向應變達到 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，且最大軸向壓力與核心降伏力比值均趨近於 1.4，若圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度 (P_e/P_y)比值大於 2.0，但螺栓間距大於核心單元高模態挫屈波長之 2 倍，則模型在軸向應變未達到 3.2%時核心單元強度均衰減，且最大軸向壓力與核心降伏力比值均小於 1.4(模型 14、15、17 及 20)，而其中模型 18 因圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值小於 2.0，且螺栓間距(=700 mm)大於核心單元高模態挫屈波長之 2 倍(=516 mm)，因此核心單元強度衰減最為明顯。

圖 4. 19(b)為軸向強度及圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度 (P_e/P_y)之比值關係圖，而模型之螺栓間距與核心單元高模態波長之比值均小於 2，圖中顯示圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值大於 2.0，則模型在軸向應變達到 3.2%(相當於 $3.0 \Delta_{bm}$)時核心單元強度均未衰減，且最大軸向壓力與核心降伏力比值均趨近於 1.4，但圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值小於 1.5，則模型在軸向應變未達到 3.2%時核心單元強度均衰減，且最大軸向壓力與核心降伏力比值均小於 1.4(模型 4、16、19、21 及 22)。

圖 4. 19(c)為核心長度、厚度及整體斷面慣性矩($I_{r,g}$)對於核心強度的影響，橫座標為各模型之整體斷面慣性矩除以相同核心長度下之最小斷面慣

性矩，而模型之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值均趨近於 2.5，圖中顯示設計得當之挫屈束制消能支撐在相同核心厚度下，核心長度越短，核心抗壓強度越高；在相同核心長度下，核心厚度越厚，核心抗壓強度越高，同時在相同核心長度下，整體斷面慣性矩越大亦可得核心強度亦高。

圖 4. 19(d)為分析模型之整體或局部挫屈強度與理論預測整體或局部挫屈強度之關係圖，圖中顯示在不同核心長度、厚度及整體斷面慣性矩下分析模型與理論預測之整體或局部挫屈強度差異大約為 20%。

由上述分析結果可得模型之圍束單元彈性挫屈強度與核心單元降伏強度(P_e/P_y)比值大於 2.0，螺栓間距小於核心單元高模態挫屈波長之 1.5 倍，螺栓強度安全係數為 1.5，即可避免整體及局部挫屈行為發生，且核心強度亦不會衰減，而在不同核心長度、厚度及整體斷面慣性矩下，核心強度差異均小於 10%，因此 2.3 節的設計方法適用於不同長度及厚度之可更換核心板之挫屈束制消能支撐設計。

第五章 結論

5.1 結論

本研究共試驗 4 組新型挫屈束制消能支撐試體，其中試體 1 及試體 2 為研究挫屈束制消能支撐韌性容量，試體 3 為研究不同螺栓強度對挫屈束制消能支撐的影響，試體 4 為研究挫屈束制消能支撐整體挫屈行為，而各試體差異列於表 2.5。其中試體 1 及試體 2 在標準加載歷時下均未產生挫屈現象，並展現良好的遲滯消能行為及韌性容量，而試體 1 及試體 2 之韌性容量分別為 804 及 650 均超越 AISC(2005)耐震規範規定，其試體最大核心應變為 2.1%，試體 3 在標準加載歷時下變換不同螺栓強度亦未產生挫屈現象，而消能支撐整體強度維持不變，並展現良好的遲滯消能行為及韌性容量，其韌性容量為 767 亦超越 AISC(2005)耐震規範規定，試體最大核心應變為 2.6%，試體 4 為了研究整體挫屈強度，因此其設計並不滿足本研究之設計步驟，在標準加載歷時下如預期地發生整體挫屈，但挫屈前依然展現良好的遲滯消能行為。此外，本研究針對各試體之試驗結果，以探討及分析其力學行為及破壞模式，並配合有限元素軟體 ABAQUS 進行分析及參數研究，來修正組合式挫屈束制消能支撐之設計步驟。

根據本研究之試驗結果與有限元素分析，可歸納出以下幾點結論：

1. 由 4 組試驗結果顯示以預留壓縮空間取代脫層材料作為脫層單元，並不會影響消能支撐之遲滯消能行為，而 4 組消能支撐軸向拉壓強度差異介於 10 至 15% 之間均小於 (AISC 2005) 建議之 30% 內，最大軸向應變為 2.64%，且累積韌性容量分別為 804、650、767 及 120，除了試體 4 之外，其它 3 組試體亦超越 AISC(2005) 建議之 200。
2. 由試體 3 之試驗結果顯示試體採用足夠的螺栓強度(螺栓總拉力強度與側頂力量比值高於 1.5 倍)及適當的螺栓間距(低於核心單元高模態挫屈

波長之 2.1 倍)即可發揮穩定的遲滯消能行為，而採用較保守之螺栓強度(螺栓總拉力強度與側頂力量比值為 7.4 倍及 2.6 倍)及較窄的螺栓間距(核心單元高模態挫屈波長之 0.3 倍及 1.0 倍)，並不會提升消能支撐強度，亦不影響遲滯消能行為。

3. 本研究可更換核心板之挫屈束制消能支撐於測試後將圍束構件拆除檢驗發現試體 1 及試體 2 均斷裂於中央處，而產生整體挫屈試體的核心板與圍束單元面外變形一致，因此本研究之挫屈束制消能支撐可於地震後將圍束桿件分離檢驗核心板是否需更換。
4. 利用有限元素程式 ABAQUS 模擬 4 組試體之整體行為，模擬結果之最大軸向壓力與拉力強度與試驗差異分別小於 10%及 20%，其中試體 4 發生整體挫屈時軸向強度為 1697 kN 與實驗挫屈強度 1660 kN 誤差為 2%，由上述可知 4 組試體試驗與分析結果均相近，證明可利用非線性有限元素程式進行消能支撐之參數研究。
5. 由 4 組試驗結果與參數分析研究結果顯示挫屈束制消能支撐之圍束單元彈性挫屈力與核心單元降伏力比值(P_e/P_y)取 2.5，螺栓間距為核心單元高模態挫屈波長之 1.5 倍，而螺栓強度安全係數為 1.5 時，即可展現良好的遲滯消能行為及韌性容量，其韌性容量亦滿足 AISC(2005)耐震規範規定。
6. 由參數分析研究結果顯示，設計得當之挫屈束制消能支撐，在相同核心厚度下，核心長度越短，核心抗壓強度越高；在相同核心長度下，核心厚度越厚，核心抗壓強度越高，同時在相同核心長度下，整體斷面慣性矩越大亦可得核心強度亦越高。

参考文献

1. AISC. (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. AISC , Chicago.
2. Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., and Fujimoto, M., “Properties of Brace Encased in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube.” *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, August 2-9, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan.(Vol. IV-719~724)
3. Wada, A., Sacki, E., Takeuchi, T. and Watanabe, A., “Development of Unbonded Brace.”, Nippon Steel Corporation, Tokyo, JAPAN.
4. Wada, A., Sacki, E., Takeuchi, T. and Watanabe, A. (1994). “Development of unbonded brace.” Nippon Steel Corporation, Tokyo, Japan.
5. Shimokawa, H., Morino, S., Kamiya, M., Ito, S., Kawaguchi, I., Kamura, H., and Hirota, M. (1998). “Elasto-plastic behavior of flat-bar brace stiffened by square steel tube (Part 7).” *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, Structures III, pp.843-844.
6. Nakamura, H., Maeda, Y., Sasaki, T., Wada, A., Takeuchi, T., Nakata, Y., and Iwata, M. (2000), “Fatigue Properties of Practical-Scale Unbonded Braces” , Nippon Steel Technical Report, No. 82, July, pp.51~57.
7. Black, C. J., Makris, N., and Aiken, I. D. (2002) . “Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained unbonded braces.” *Technical Rep. No. PEER 2002/08*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, Calif.
8. Iwata, M., Murai, M., Kobayashi, F., and Noda, T. (2003). “Experimental study on buckling-restrained braces using steel mortar planks.” *J. Struct. Constr. Eng., AIJ*, No. 569, 105-110.
9. Sabelli, R., Mahin, S., and Chang, C. (2003) “Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces.” *Engineering Structures, Volume 25, Issue 5, April 2003*, pp. 655-666.
10. Makris, N. (2003). “Plastic torsional buckling of cruciform compression members.” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 6, pp.689-696.
11. Uang, C. M., and Nakashima M. “Steel buckling-restrained braced frames.” In *Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering* (Chapter 16). Bozorgnia Y, Bertero VV (eds). CRC Press LLC: Boca Raton, FL,2004; 16-1-16-37.
12. Usami, T., Lu, Z., and Ge, H. (2005). “A seismic upgrading method for steel arch bridges using buckling-restrained braces.” *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 34:471-496.

13. Iwata, M., and Murai, M. (2006). "Buckling-restrained braced using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper." *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 35 : 1807-1826.
14. Inoue, K., Koetaka, Y., and Byakuno, Y. (2006). "Experimental verification of design criteria of knee brace damper." *8th Taiwan-Korea-Japan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Nagoya, Japan.*
15. Fahnstock, L. A., Sause, R. and Ricles, J. M. (2007). "Seismic Response and Performance of Buckling-Restrained Braced Frames." *J. Struct. Eng., ASCE*, 133(9), 1195-1204.
16. Fahnstock, L. A., Sause, R. and Ricles, J. M. (2007). "Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame." *J. Struct. Eng., ASCE*, 133(9), 1205-1214.
17. 陳正誠,「韌性同心斜撐構架與韌性斜撐構材之耐震行為與設計」, 結構工程, 第十五卷 第一期, 民國八十九年三月, 第 53~78 頁。
18. 賴俊維,「鋼骨消能支撐構架之耐震行為研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 蔡克銓教授指導, 民國九十年六月。
19. 蔡克銓、賴俊維,「鋼骨消能支撐構架之耐震研究」, 結構工程, 第十七卷 第二期, 民國九十一年六月, 第 3~32 頁。
20. 蕭博謙,「實尺寸三層樓挫屈束制支撐 CFT 柱構架擬動態試驗行為與分析」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 蔡克銓教授指導, 民國九十三年六月。
21. 魏志毓,「挫屈束制支撐局部挫屈與構架耐震效益分析研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 蔡克銓教授指導, 民國九十五年六月。
22. 蔡崇興、陳文信、梁義德、陳貴麒,「強化式挫屈束制斜撐之元件測試及有限元素分析」, 第八屆結構工程研討會, 日月潭, 民國九十五年九月。
23. 蔡崇興、陳文信、劉育誠、陳貴麒,「簡易強化式挫屈束制斜撐之元件測試及模擬」, 第八屆結構工程研討會, 日月潭, 民國九十五年九月。
24. 周中哲(2005),「拆解式夾型鋼骨挫屈束制消能支撐裝置」, 中華民國專利, 新型第 M275237 號。
25. 周中哲, 陳昇陽(2008),「組合式鋼骨挫屈束制消能支撐裝置」, 中華民國專利, 新型第 M324687 號。

表 2.1 鋼材材料性質

Specimen No.	Member	Location	F_y	F_u	A572 Gr50	A36
			(MPa)	(MPa)	$R_y = \frac{F_y}{F_{my}}$	$R_y = \frac{F_y}{F_{my}}$
1	Core	Plate	367	525	1.06	-
	Restrained Member	Channel	274	425	-	1.10
		Face Plate	441	558	1.28	-
2	Core	Plate	372	528	1.08	-
	Restrained Member	Channel	285	434	-	1.15
		Face Plate	411	558	1.28	-
3	Core	Plate	364	530	1.06	-
	Restrained Member	Channel	285	434	-	1.15
		Face Plate	411	558	1.28	-
4	Core	Plate	375	506	1.09	-
	Restrained Member	Channel	279	438	-	1.13
		Face Plate	389	515	1.13	-

表 2.2 混凝土抗壓強度

Specimen No.	Cylinder No.		Average (MPa)
	1 (MPa)	2 (MPa)	
1	57.6	56.6	57.1
2	58.9	55.0	57.0
3	60.6	55.8	58.2

表 2.3 無收縮水泥砂漿抗壓強度(試體 4)

Cube No.(5 cm×5 cm×5 cm)	1	2	3	Average
7 Day (MPa)	39	40	44	41.0
21 Day (MPa)	41	44	48	44.3
28 Day (MPa)	46	49	50	48.3

表 2.4 各試體彈性勁度

Specimen No.	Computed Elastic Stiffness (kN/mm)				
	K_y	K_t	K_c	K_{yt}^c	K_{total}^c
1	236	5159	10230	216	207
2	236	5159	10230	216	207
3	236	4946	10230	215	207
4	236	5255	10230	216	208

表 2.5 各試體細節

Specimen No.	Core Plate			Restrained Member					Bolt (A490 3/4in)	
	b_c (mm)	t_c (mm)	Yield Length (mm)	Channel and Face Plate (mm)	$\frac{I_f}{I_{r,g}}$ (%)	$\frac{I_c}{I_{r,g}}$ (%)	$\frac{I_{con}}{I_{r,g}}$ (%)	$I_{r,g}$ (mm ⁴)	No.	Spacing (mm) L_b
1	150	22	2800	150x75x6.5x10 270x12	3	68	29	44432996	32	186
2	150	22	2800	150x60x4.5x4.5 270x12	5	54	41	22582066	32	186
3	150	22	2800	150x50x4.5x4.5 270x12	7	54	39	16738929	80	72
									28	216
									16	432
4	150	22	2800	150x35x4.5x4.5 270x12	11	53	36	10078747	16	465

Note : $I_{r,g}$ 為實際試體圍束單元所提供之整體斷面慣性矩

表 2.6 各試體設計值

Specimen No.	Core Plate			Restrained Member						Bolt Number		
	P_y (kN)	$P_{max,d}$ (kN)	L_w (mm)	P_e (kN)	$\frac{P_e}{P_y}$	$\frac{P_{max,g}}{P_y}$	$\frac{P_{max,l}^w}{P_y}$	$\frac{P_{max,l}^i}{P_y}$	$\frac{P_{max,l}}{P_y}$	N_b^i	N_b	Safety Factor
1	1211	2252	210	7792	6.4	4.7	14.5	10.9	12.7	10	32	3.0
2	1228	2265	208	3949	3.2	2.5	10.2	6.1	6.3	20	32	3.0
3	1201	2274	211	2943	2.5	2.0	8.6	13.1	14.0	44	80	7.4
							8.6	4.4	4.8	44	28	2.6
							8.6	2.1	2.3	44	16	1.5
4	1238	2171	208	1758	1.4	1.2	5.8	1.3	1.3	40	16	1.5

表 2.7 每階段加載歷時所對應核心應變、韌性容量與最大韌性之關係

Test Phase	No. of Cycles	Story Drift (%)	Brace Axial Deformation (mm)	Brace Axial Strain (%)	Maximum Ductility μ_{max}	Plastic Ductility	Cumulative Plastic Ductility μ_c
Δ_{by}	2	0.38	5.3	0.19	1.0	0.0	0.0
$0.5 \Delta_{bm}$	2	0.6	14.8	0.53	2.9	15.2	15.2
$1.0 \Delta_{bm}$	2	1.2	29.6	1.06	5.7	37.6	52.8
$1.5 \Delta_{bm}$	2	1.8	44.2	1.58	8.5	60.0	112.8
$2.0 \Delta_{bm}$	2	2.4	59.1	2.11	11.4	83.2	196.0
$2.5 \Delta_{bm}$	2	3.0	73.9	2.64	14.2	105.6	301.6

表 2.8 各組試體重量

Specimen No.	Steel Weight (kg)	Concrete Volumn (m ³)	Concrete Weight (kg)	Total Weight (kg)	Price (NT Dollars)
1	470	0.06	144	614	39583
2	453	0.05	120	573	39583
3	439	0.04	96	532	41455
4	420	0.03	72	492	49624

表 3.1 試體圍束構件中點與端部相對位置

Specimen No.	Restrained Member	Relative Deformation between Center and End Location (mm)
1	1	1
	2	1
2	1	2
	2	2
3	1	3
	2	2

表 3.2 試體兩端殘餘變形量

Specimen No.	Test Phase	Location	Δ_{by}	$0.5 \Delta_{bm}$	$1.0 \Delta_{bm}$	$1.5 \Delta_{bm}$	$2.0 \Delta_{bm}$	$2.5 \Delta_{bm}$
			$\delta=5.2\text{mm}$ (mm)	$\delta=14.8\text{mm}$ (mm)	$\delta=29.6\text{mm}$ (mm)	$\delta=44.2\text{mm}$ (mm)	$\delta=59.1\text{mm}$ (mm)	$\delta=59.1\text{mm}$ (mm)
1	First	Top	0	3	8	13	19	-
		Bottom	1	3	11	18	28	-
2	First	Top	0	4	8	-	-	-
		Bottom	1	3	9	-	-	-
	Second	Top	0	5	10	-	-	-
		Bottom	1	4	9	-	-	-
	Third	Top	0	4	10	16	19	-
		Bottom	1	5	11	15	21	-
3	First	Top	0	4	11	18	23	-
		Bottom	2	10	12	17	27	-
	Second	Top	0	3	10	17	22	-
		Bottom	2	5	11	18	25	-
	Third	Top	1	2	9	16	20	26
		Bottom	2	4	9	18	27	35
4	First	Top	0	3	8	16	-	-
		Bottom	2	2	11	17	-	-

表 3.3 核心單元與面板間淨距

Specimen No.	Test Phase	Δ_{by} $\delta=5.2\text{mm}$ (mm)	$0.5 \Delta_{bm}$ $\delta=14.8\text{mm}$ (mm)	$1.0 \Delta_{bm}$ $\delta=29.6\text{mm}$ (mm)	$1.5 \Delta_{bm}$ $\delta=44.2\text{mm}$ (mm)	$2.0 \Delta_{bm}$ $\delta=59.1\text{mm}$ (mm)	$2.5 \Delta_{bm}$ $\delta=59.1\text{mm}$ (mm)
1	First	3	3	3	3	3	-
2	First	3	3	3	3	3	-
	Second	3	3	3	3	3	-
	Third	3	3	3	3	3	-
3	First	3	3	3	3	3	-
	Second	3	3	3	3	3	-
	Third	3	3	3	3	3	4
4	First	3	3	3	3	4	-

表 3.4 試體理論值與試驗值之彈性勁度

Specimen no.	Computed Elastic Stiffness (kN/mm)					Measured Elastic Stiffness (kN/mm)			Difference		
	K_y	K_t	K_c	K_{yt}^c	K_{total}^c	$K_{yt,1}^m$	$K_{yt,2}^m$	K_{total}^m	$\frac{K_{yt}^c}{K_{yt,1}^m}$	$\frac{K_{yt}^c}{K_{yt,2}^m}$	$\frac{K_{total}^c}{K_{total}^m}$
1	236	3945	10230	216	207	210	206	211	+2.9%	+4.9%	-1.9%
2	236	3945	10230	216	207	198	205	135	+9.1%	+5.4%	+53%
3	236	3732	10230	215	207	205	204	160	+4.9%	+5.4%	+29%
4	236	4041	10230	217	208	199	219	185	+9.0%	-0.1%	+12%

表 3.5 試體非彈性勁度與彈性勁度比較

Specimen no.	Measured Plastic Stiffness (kN/mm)				Measured Elastic Stiffness (kN/mm)		$\frac{K_p^m}{K_{yt}^m}$			
	$K_{p,1}^m$		$K_{p,2}^m$		$K_{yt,1}^m$	$K_{yt,2}^m$	$\frac{K_{p,1}^m}{K_{yt,1}^m}$		$\frac{K_{p,2}^m}{K_{yt,2}^m}$	
	Com- pression	Tension	Com- pression	Tension			Com- pression	Tension	Com- pression	Tension
1	10.8	8.3	10.7	8.4	210	206	0.051	0.040	0.052	0.041
2	10.3	8.9	10.1	8.6	198	205	0.052	0.045	0.049	0.042
3	11.7	8.6	11.7	8.5	205	204	0.057	0.042	0.057	0.042
4	11.6	7.4	11.2	7.8	199	219	0.058	0.037	0.056	0.036

表 3.6 挫屈長度範圍內量測之變形量百分比

Specimen No.	Loading	Transducer Location	Δ_{by}	$0.5 \Delta_{bm}$	$1.0 \Delta_{bm}$	$1.5 \Delta_{bm}$	$2.0 \Delta_{bm}$	$2.5 \Delta_{bm}$
			$\delta=5.2\text{mm}$ (%)	$\delta=14.8\text{mm}$ (%)	$\delta=29.6\text{mm}$ (%)	$\delta=44.2\text{mm}$ (%)	$\delta=59.1\text{mm}$ (%)	$\delta=59.1\text{mm}$ (%)
1	Compression	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	94	97	97	98	98	-
	Tension	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	97	96	98	99	99	-
2	Compression	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	91	93	96	97	96	-
	Tension	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	96	98	101	99	99	-
3	Compression	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	106	100	99	100	100	94
	Tension	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	91	93	96	97	98	99
4	Compression	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	95	96	97	97	-	-
	Tension	(L2+L3)/(L4+L5+L6+L7)	92	91	94	97	-	-

表 3.7 試體最大韌性與韌性容量

Specimen No.	Test Phase	Test Description	Maximum Ductility μ_{max}	Cumulative Plastic Ductility μ_c	Total C.P.D
1	First	Standard	11.4	196.0	803.5
		Fatigue	8.5	607.5	
2	First	Standard	8.5	106.3	650.2
	Second	Standard	8.5	106.3	
		Fatigue	8.5	241.6	
	Third	Standard	11.4	196.0	
Fatigue		8.5	241.6		
3	First	Standard	11.4	196.0	766.8
		Fatigue	8.5	60.0	
	Second	Standard	11.4	196.0	
	Third	Standard	14.2	314.8	
4	First	Standard	8.5	120.3	120.3

表 3.8 試體差異與試驗結果比較

Reference	Specimen	Yield Length (mm)	Core Material	P_y (kN)	P_e (kN)	$\frac{P_e}{P_y}$	$P_{T,max}$ (kN)	$P_{C,max}$ (kN)	$\frac{P_{C,max}}{P_{T,max}}$	ϵ_{max} (%)	Story Drift (%)	μ_{max}	μ_c	Test Result
Black et al. (2002)	99-1	3090	JIS SM490A	1217	5666	4.66	1400	1519	1.09	2.07	3.0	10	324	-
	99-2	2990	JIS SM490A	1622	5666	3.49	1853	1988	1.07	2.07	3.0	10	879	Tensile Fracture
	99-3	3450	JIS SM490A	2155	9910	4.66	2551	2784	1.09	2.07	3.0	10	279	-
	00-11	3410	JIS SM490B	2033	9910	4.87	3006	3401	1.13	2.07	2.25	15	1045	Without Failure
	00-12	3410	JIS SM490B	2033	9910	4.87	3004	3338	1.11	2.07	2.25	15	537.7	-
Iwata et al. (2006)	P16M11	1251	SN400B	740	1164	1.6	1036	1110	1.07	2.5	2.5	15	420	Local Buckling
	P24L4	1251	SN400B	539	1303	2.4	835	862	1.03	3.0	3.0	18	556	Global Buckling
	P32M11	1251	SN400B	740	2450	3.2	1073	1147	1.07	3.0	3.0	18	488	Local Buckling
	P46M7	1251	SN400B	481	2207	4.6	722	818	1.13	3.0	3.0	18	1236	Tensile Fracture
Tasi et al. (2006)	W90H60	1700	A572 Gr.50	1326	>1989	>1.5	1654	2038	1.23	1.84	2.25	9.2	123	Local Buckling
	W100H70	1700	A572 Gr.50	1473	>2210	>1.5	1860	2490	1.33	2.45	3.0	12.3	213	Local Buckling
	W100H60	1700	A572 Gr.50	1473	>2210	>1.5	1840	2269	1.23	1.84	2.25	9.2	123	Local Buckling
Chou and Chen (2008)	Specimen 1	2800	A572 Gr.50	1211	7792	6.43	1566	1724	1.10	2.11	2.4	11.4	804	Tensile Fracture
	Specimen 2	2800	A572 Gr.50	1228	3949	3.22	1567	1756	1.12	2.11	2.4	11.4	650	Tensile Fracture
	Specimen 3	2800	A572 Gr.50	1201	2943	2.45	1692	1951	1.15	2.64	3.0	14.2	767	Global Buckling
	Specimen 4	2800	A572 Gr.50	1238	1758	1.42	1494	1660	1.14	1.58	1.8	8.5	120	Global Buckling

表 4.1 A572 Gr.50 鋼材之 ABAQUS 硬化參數輸入指令(試體 4)

Material (Grade)	A572 Gr.50
Input Statement	*Material, Name = Gr.50 *Elastic 203000, 0.3 *Plastic, Hardening = Combined, Data Type = Parameters 375, 28000, 266 *Cyclic Hardening, Parameters 375, 150, 12
Isotropic Hardening Parameters	Q = 150 b = 12
Kinematic Hardening Parameters	C=28000 γ=266

表 4.2 ABAQUS 與 Test 之試體軸向力比較表

Aixal Force (kN)		Axial Displacement							
		$-\Delta_{by}$ $\delta=-5.2\text{mm}$	Δ_{by} $\delta=5.2\text{mm}$	$-1.0\Delta_{bm}$ $\delta=-29.6\text{mm}$	$1.0\Delta_{bm}$ $\delta=29.6\text{mm}$	$-1.5\Delta_{bm}$ $\delta=-44.2\text{mm}$	$1.5\Delta_{bm}$ $\delta=44.2\text{mm}$	$-2.0\Delta_{bm}$ $\delta=-59.1\text{mm}$	$2.0\Delta_{bm}$ $\delta=59.1\text{mm}$
No.1	ABAQUS	-1122	1144	-1628	1567	-1704	1643	-1759	1672
	Test	-1153	1111	-1490	1342	-1579	1468	-1724	1566
	Ratio (%)	97	103	109	117	108	112	102	107
No.2	ABAQUS	-1144	1205	-1666	1602	-1750	1676	-1803	1712
	Test	-1180	1143	-1509	1410	-1612	1486	-1756	1567
	Ratio (%)	97	105	110	114	109	113	103	109
No.3	ABAQUS	-1156	1120	-1626	1570	-1717	1640	-1797	1672
	Test	-1323	930	-1593	1311	-1654	1531	-1806	1607
	Ratio (%)	87	120	102	119	104	107	100	104
No.4	ABAQUS	-1203	1239	-1558	1534	-1697	1673	-	-
	Test	-1212	1255	-1416	1374	-1660	1494	-	-
	Ratio (%)	99	99	110	112	102	112	-	-

表 4.3 各組試體挫屈模態數

Specimen No.	Buckling Mode (n)							
	Analysis							Theory Δ_{by} $\delta=5.2\text{mm}$
	Initial	$0.33 \Delta_{by}$ $\delta=1.8\text{mm}$	Δ_{by} $\delta=5.2\text{mm}$	$1.0 \Delta_{bm}$ $\delta=29.6 \text{ mm}$	$1.5 \Delta_{bm}$ $\delta=44.2 \text{ mm}$	$2.0 \Delta_{bm}$ $\delta=59.1 \text{ mm}$	$2.5 \Delta_{bm}$ $\delta=73.9 \text{ mm}$	
1	1	6	12	12	12	12	-	14
2	1	7	12	12	13	13	-	14
3	1	7	11	12	13	15	16	14
4	1	6	12	13	13	-	-	14

表 4.4 試體試驗值與分析值之彈性勁度

Specimen No.	Measured Elastic Stiffness (kN/mm)		Analysis Elastic Stiffness (kN/mm)	Difference	
	$K_{yt,1}^m$	$K_{yt,2}^m$	K_{yt}^a	$\frac{K_{yt,1}^m}{K_{yt}^a}$	$\frac{K_{yt,2}^m}{K_{yt}^a}$
1	210	206	209	+0.5%	-1.4%
2	198	205	209	-5.3%	-1.9%
3	205	204	208	-1.4%	-1.9%
4	199	219	207	-3.9%	+5.8%

表 4.5 各模型細節

Model		Core Plate				Restrained Member				Bolt			
		b_c (mm)	t_c (mm)	Yield Stress (MPa)	Yield Length (mm)	Channel (mm)	Face Plate (mm)	Length (mm)	$I_{r,g}$ (mm ⁴)	Bolt Size (mm)	N_b	L_b (mm)	F.S
No.	Name												
5	A15L28P24S	100	15	375	2800	100x46x4.5x4.5	200x10	2940	7767168	16	22	280	1.5
6	A15L48P25S	100	15	375	4800	100x76x4.5x4.5	200x10	4940	20138857	16	36	282	1.5
7	A15L96P25S	100	15	375	9600	100x134x4.5x4.5	200x10	9740	72688354	16	74	267	1.5
3	A33L28P24S	150	22	364	2800	150x50x4.5x4.5	270x12	2940	16758522	19	16	432	1.5
8	A33L48P24S	150	22	375	4800	C 150x75x6.5x10	270x12	4940	43695988	16	36	284	1.5
9	A33L96P25S	150	22	375	9600	150x156x4.5x4.5	270x12	9740	159846725	16	72	274	1.5
10	A64L28P24S	200	32	375	2800	200x56x4.5x4.5	320x14	2940	33266295	19	14	455	1.5
11	A64L48P23S	200	32	375	4800	C 200x80x7.5x11	320x14	4940	80615534	19	24	438	1.5
12	A64L96P25S	200	32	375	9600	200x178x4.5x4.5	320x14	9740	309930822	19	48	418	1.5
13	A64L48P20S	200	32	375	4800	200x88x4.5x4.5	320x14	4940	69940478	19	24	438	1.5
14	A15L28P24LB	100	15	375	2800	100x46x4.5x4.5	200x10	2940	7767168	16	14	467	1.0
15	A15L48P25GB	100	15	375	4800	100x76x4.5x4.5	200x10	4940	20138857	16	16	686	0.7
16	A15L96P13GB	100	15	375	9600	100x100x4.5x4.5	200x10	9740	36613236	16	74	267	1.5
17	A33L28P24LB	150	22	375	2800	150x50x4.5x4.5	270x12	2940	16369975	19	12	560	1.2
4	A33L28P14GB	150	22	375	2800	150x35x4.5x4.5	270x12	2940	10078747	19	16	465	1.5
18	A33L28P14LB	150	22	375	2800	150x35x4.5x4.5	270x12	2940	10078747	19	10	700	1.0
19	A33L48P12GB	150	22	375	4800	150x60x4.5x4.5	270x12	4940	22016167	16	36	284	1.5
20	A64L28P24LB	200	32	375	2800	200x56x4.5x4.5	320x14	2940	33266295	19	10	700	1.1
21	A64L48P13GB	200	32	375	4800	200x68x4.5x4.5	320x14	4940	44694868	19	24	438	1.5
22	A64L96P14GB	200	32	375	9600	200x140x4.5x4.5	320x14	9740	179652939	19	48	418	1.5

表 4.6 各模型設計值

Model		Computed Parameters									ABAQUS		
		P_y (kN)	$P_{max,d}$ (kN)	L_w (mm)	$\frac{L_b}{L_w}$	P_e (kN)	$\frac{P_e}{P_y}$	$\frac{P_{max,g}}{P_y}$	$\frac{P_{max,l}}{P_y}$	Elastic Stiffness K_{yt}^c (kN/mm)	Result	$\frac{P_{max}}{P_y}$	Elastic Stiffness (kN/mm)
No.	Name												
5	A15L28P24S	563	987	142	1.97	1362	2.42	2.0	3.2	100	S	1.42	89
6	A15L48P25S	563	987	142	1.99	1394	2.48	2.1	5.7	60	S	1.39	50
7	A15L96P25S	563	987	142	1.85	1405	2.50	2.1	13.8	31	S	1.38	24
3	A33L28P24S	1201	2274	211	2.05	2943	2.45	2.0	2.3	215	S	1.48	208
8	A33L48P24S	1238	2171	208	1.37	3025	2.44	2.1	8.1	131	S	1.47	124
9	A33L96P25S	1238	2171	208	1.32	3090	2.50	2.0	11.5	67	S	1.45	64
10	A64L28P24S	2400	4210	302	1.51	5834	2.43	1.9	2.3	415	S	1.50	401
11	A64L48P23S	2400	4210	302	1.45	5580	2.33	1.9	5.9	252	S	1.48	247
12	A64L96P25S	2400	4210	302	1.38	5999	2.50	1.9	9.2	130	S	1.47	127
13	A64L48P20S	2400	4210	302	1.45	4841	2.01	1.6	3.8	252	S	1.47	243
14	A15L28P24LB	563	987	142	3.3	1362	2.42	2.0	1.2	100	LB	1.32	84
15	A15L48P25LB	563	987	142	4.83	1394	2.48	2.1	1.0	60	LB	1.19	48
16	A15L96P13GB	563	987	142	1.85	708	1.25	1.1	7.55	31	GB	1.20	25
17	A33L28P24LB	1201	2274	211	2.65	2943	2.45	2.0	1.2	215	LB	1.13	200
4	A33L28P14GB	1238	2171	208	2.24	1758	1.42	1.2	1.3	217	GB	1.36	207
18	A33L28P14LB	1238	2171	208	3.37	1758	1.42	1.2	0.6	217	LB	0.58	206
19	A33L48P12GB	1238	2171	208	1.37	1357	1.23	1.1	3.7	131	GB	1.32	125
20	A64L28P24LB	2400	4210	302	2.3	5834	2.43	1.9	1.2	415	LB	0.97	390
21	A64L48P13GB	2400	4210	302	1.45	3244	1.29	1.1	3.0	252	GB	1.31	247
22	A64L96P14GB	2400	4210	302	1.38	3473	1.44	1.2	6.7	130	GB	1.31	128

表 4.7 各組模型挫屈模態數

Model		Buckle Mode (n)	
No.	Name	ABAQUS ($\varepsilon=0.19\%$)	Theory ($\varepsilon=0.19\%$)
5	A15L28P24S	15	20
6	A15L48P25S	28	34
7	A15L96P25S	60	68
8	A33L48P24S	22	23
9	A33L96P25S	43	46
10	A64L28P24S	8	9
11	A64L48P23S	15	16
12	A64L96P25S	31	32
13	A64L48P20S	17	16



表 4.8 模型局部挫屈行為

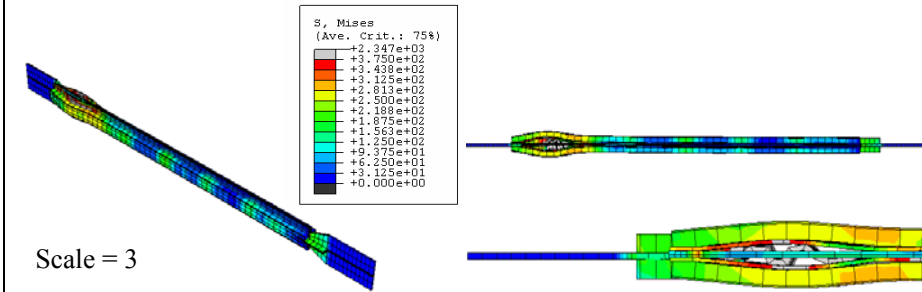
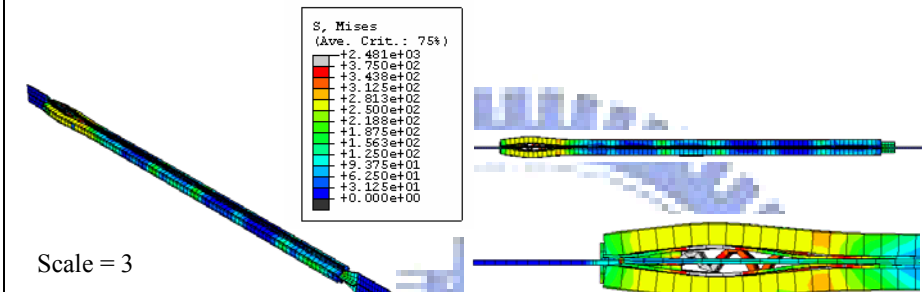
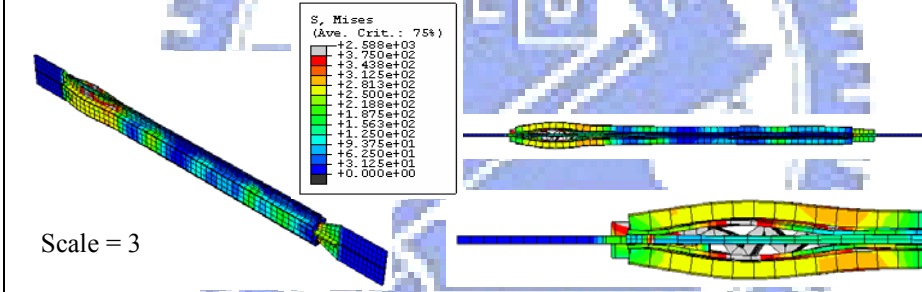
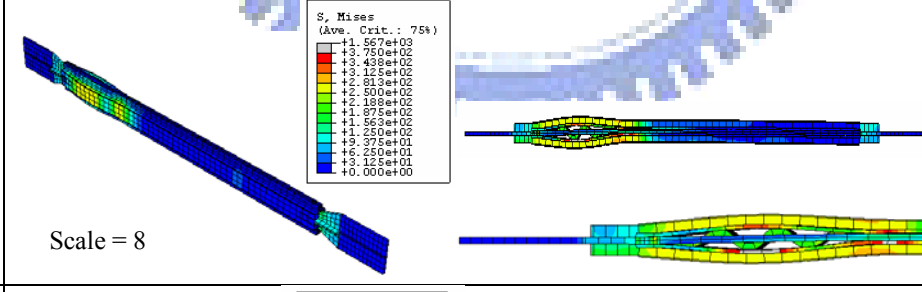
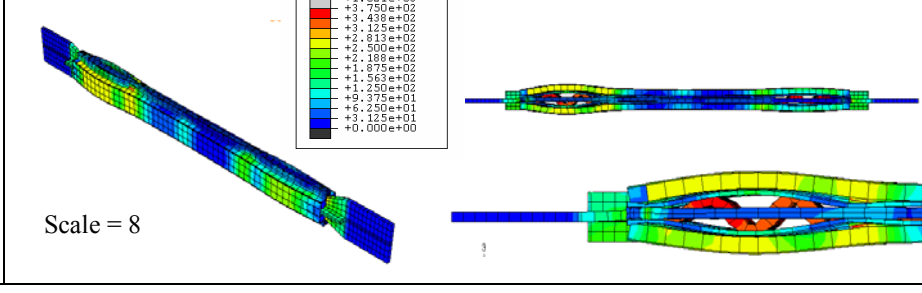
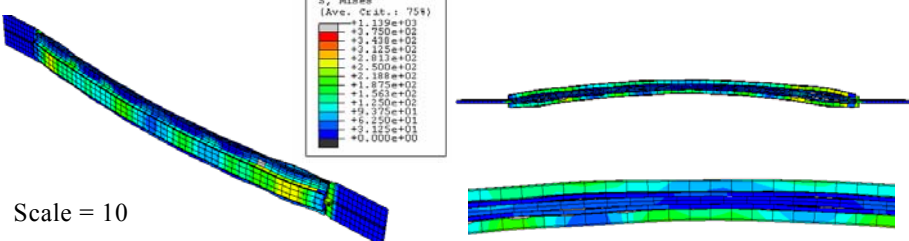
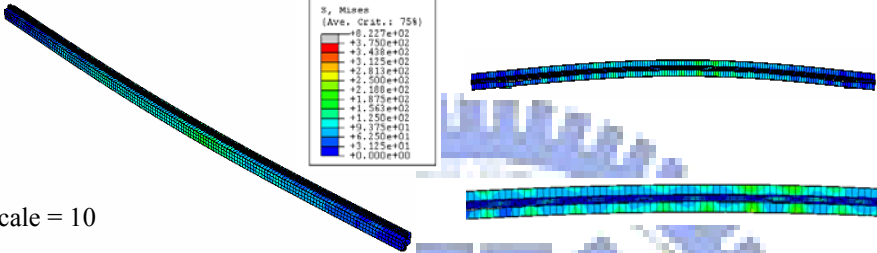
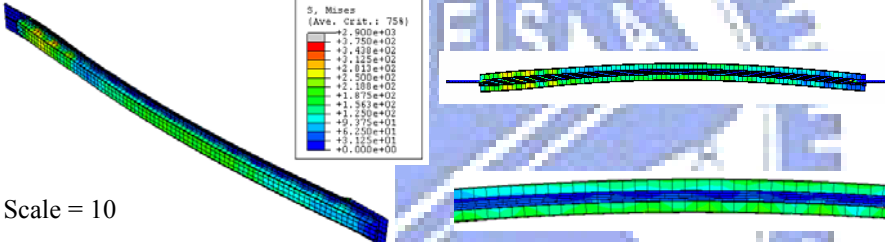
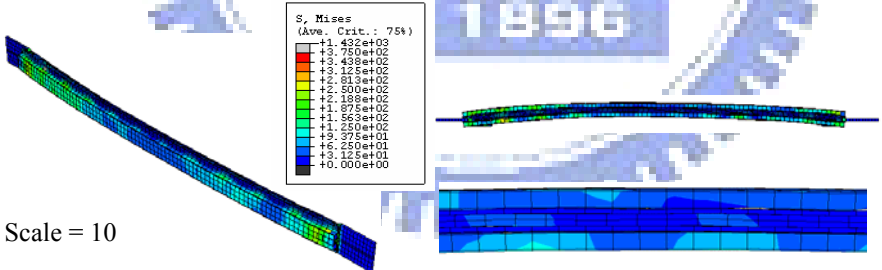
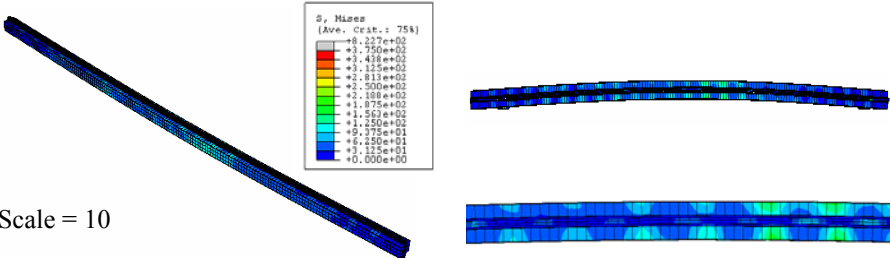
Model No.	Local Buckling Pattern	When the ultimate load decreases
14		$\epsilon_c = 2.9\%$
		$\delta_{out} = 17 \text{ mm}$ (467 mm)
		$\epsilon_r = 2.1\%$
		n=3
15		$\epsilon_c = 1.4\%$
		$\delta_{out} = 14 \text{ mm}$ (686 mm)
		$\epsilon_r = 1.6\%$
		n=4
17		$\epsilon_c = 1.8\%$
		$\delta_{out} = 13 \text{ mm}$ (560 mm)
		$\epsilon_r = 1.5\%$
		n=3
18		$\epsilon_c = 0.18\%$
		$\delta_{out} = 4 \text{ mm}$ (700 mm)
		$\epsilon_r = 0.3\%$
		n=3
20		$\epsilon_c = 0.26\%$
		$\delta_{out} = 6 \text{ mm}$ (700 mm)
		$\epsilon_r = 0.4\%$
		n=2

表 4.9 模型整體挫屈行為

Model No.	Global Buckling Pattern	When the ultimate load decreases
4	 <p>Scale = 10</p>	$\epsilon_c = 1.4\%$
		$\delta_{out} = 12 \text{ mm}$ (2800 mm)
		$\epsilon_r = 0.1\%$
16	 <p>Scale = 10</p>	$\epsilon_c = 1.2\%$
		$\delta_{out} = 13 \text{ mm}$ (9600 mm)
		$\epsilon_r = 0.12\%$
19	 <p>Scale = 10</p>	$\epsilon_c = 1.0\%$
		$\delta_{out} = 14 \text{ mm}$ (4800 mm)
		$\epsilon_r = 0.16\%$
21	 <p>Scale = 10</p>	$\epsilon_c = 1.0\%$
		$\delta_{out} = 13 \text{ mm}$ (4800 mm)
		$\epsilon_r = 0.1\%$
22	 <p>Scale = 10</p>	$\epsilon_c = 1.1\%$
		$\delta_{out} = 12 \text{ mm}$ (9600 mm)
		$\epsilon_r = 0.13\%$

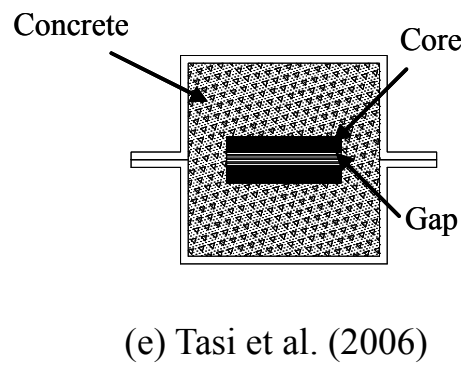
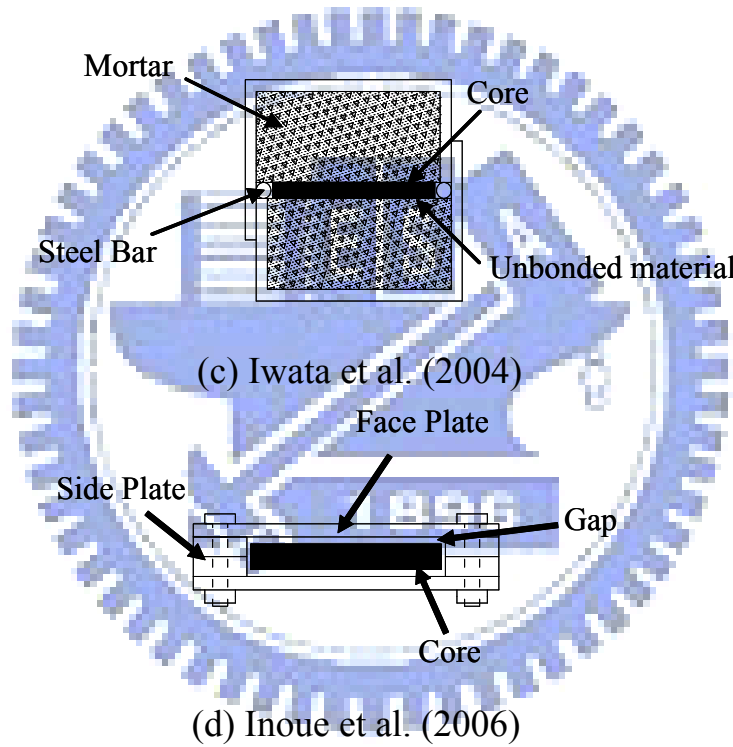
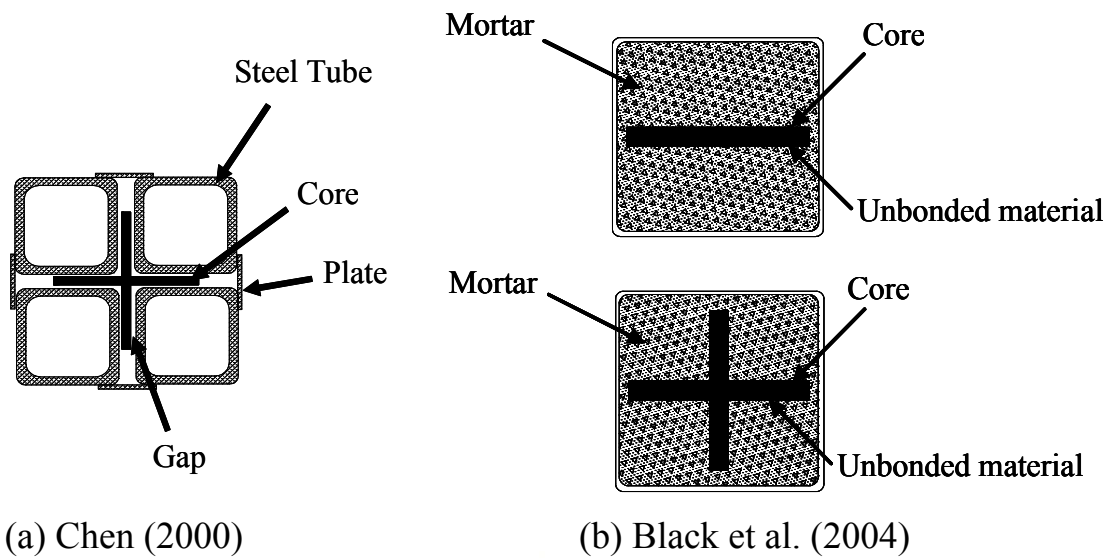
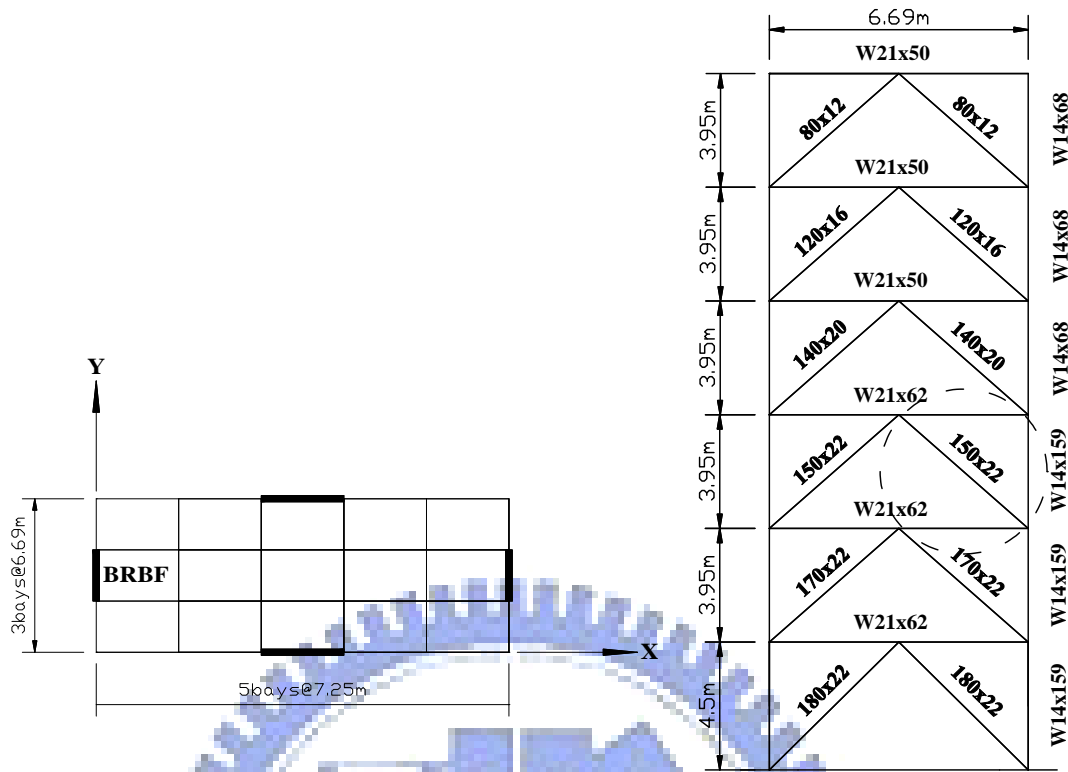
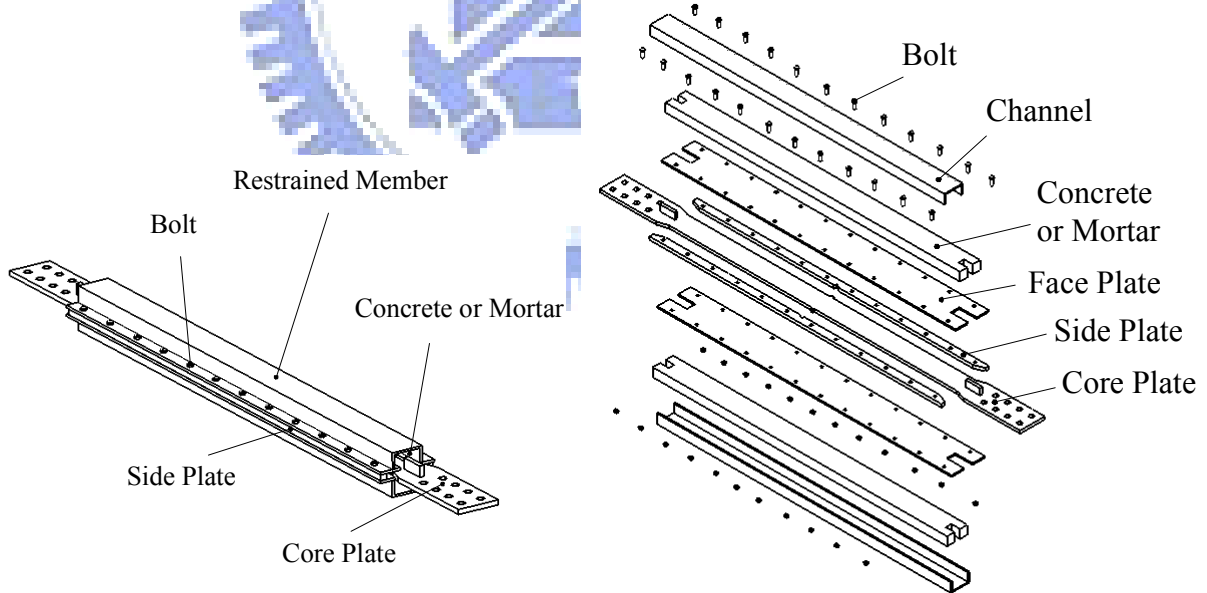


圖 1.1 國內外學者試體剖面示意圖



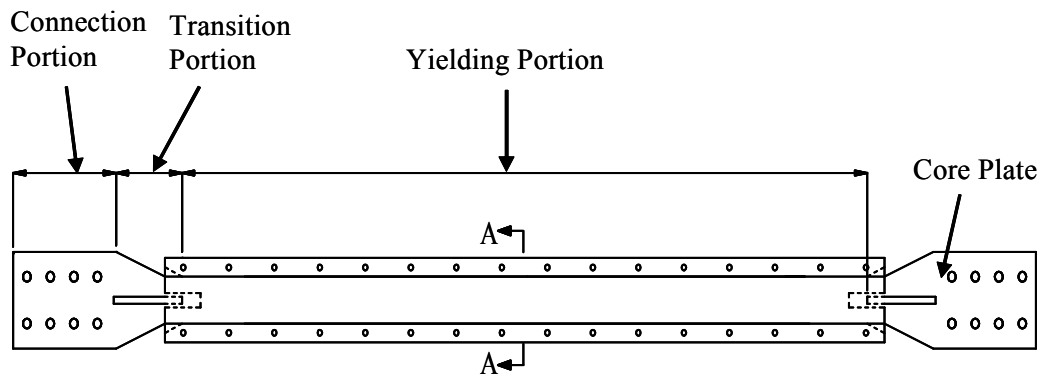
(a) Plan View (b) Elevation View

圖 2.1 BRBF

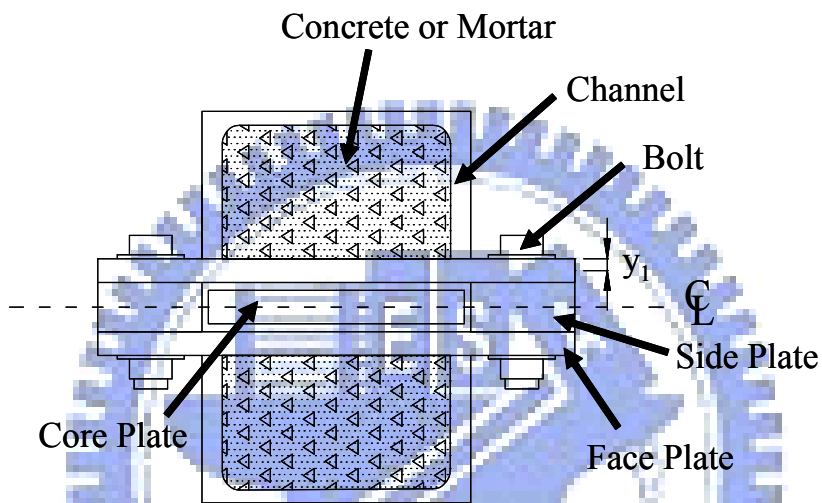


(a) 3D View (b) Detail

圖 2.2 試體示意圖



(a) Elevation



(b) Section A-A

圖 2.3 組合式挫屈束制消能支撐核心單元示意圖

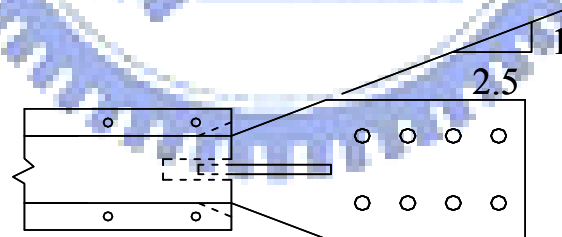


圖 2.4 斷面漸變段示意圖

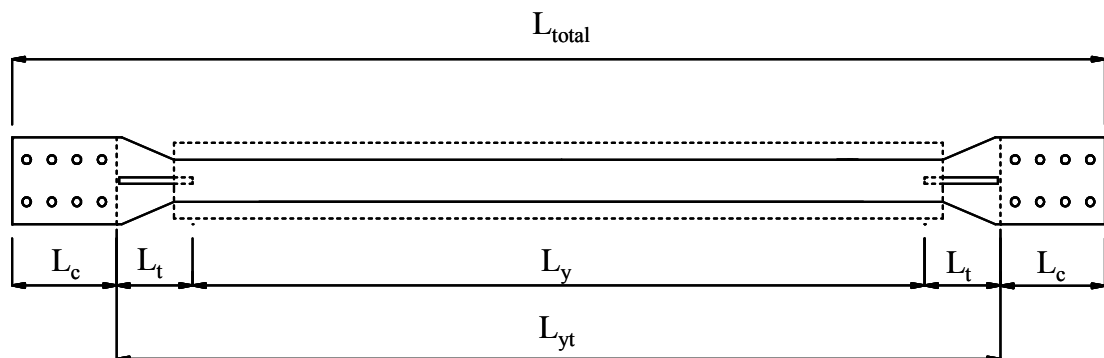
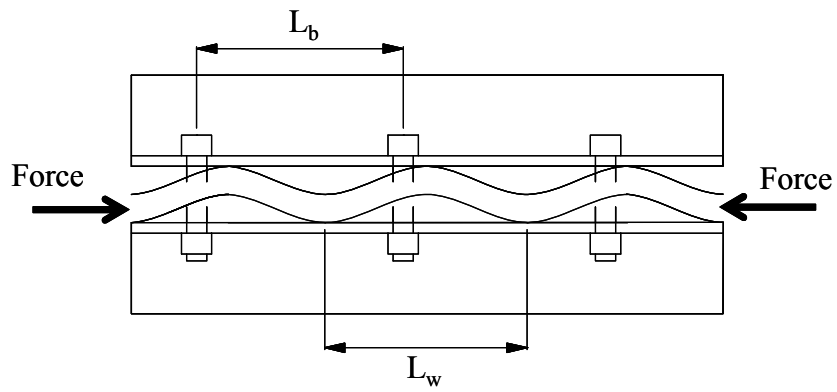
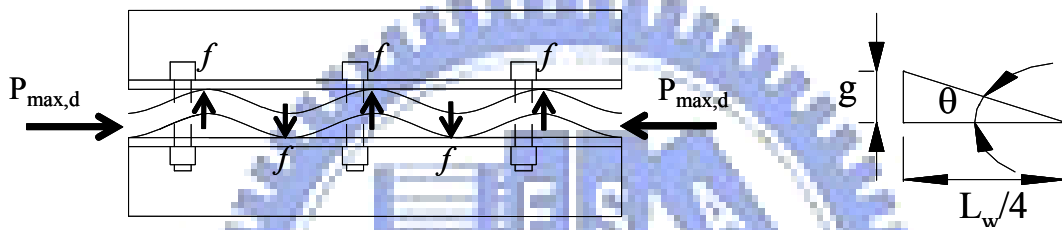


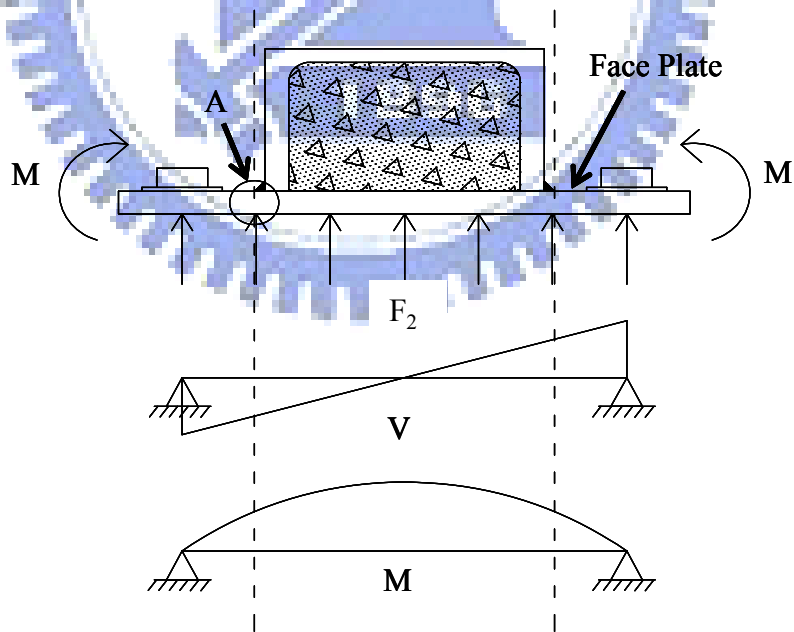
圖 2.5 核心單元各段定義



(a) High Order Buckling



(b) Axial Force Transform Lateral Force



(c) Transverse Force Action

圖 2.6 核心單元高模態挫屈之力學行為

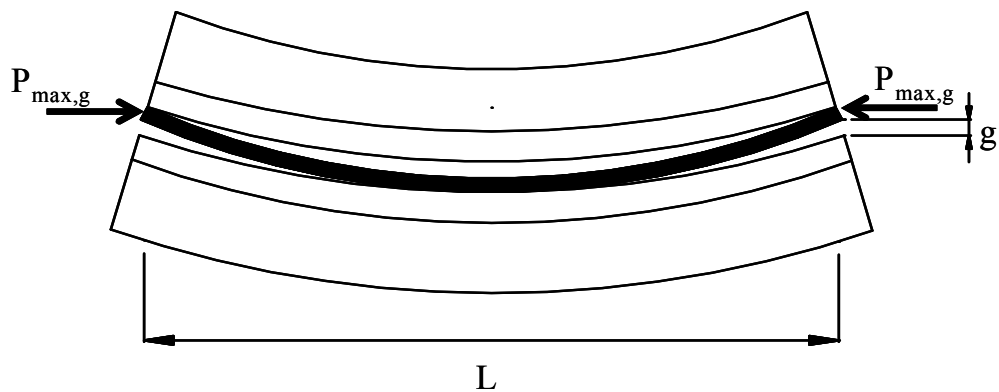


圖 2.7 整體挫屈力學行為

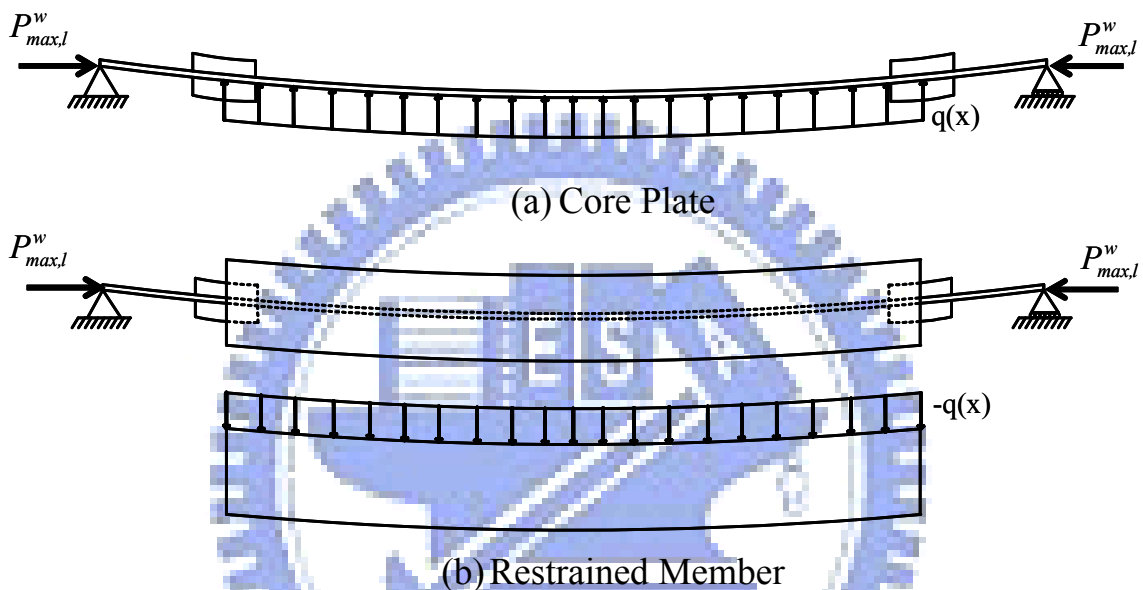


圖 2.8 消能支撐受壓之力學行為

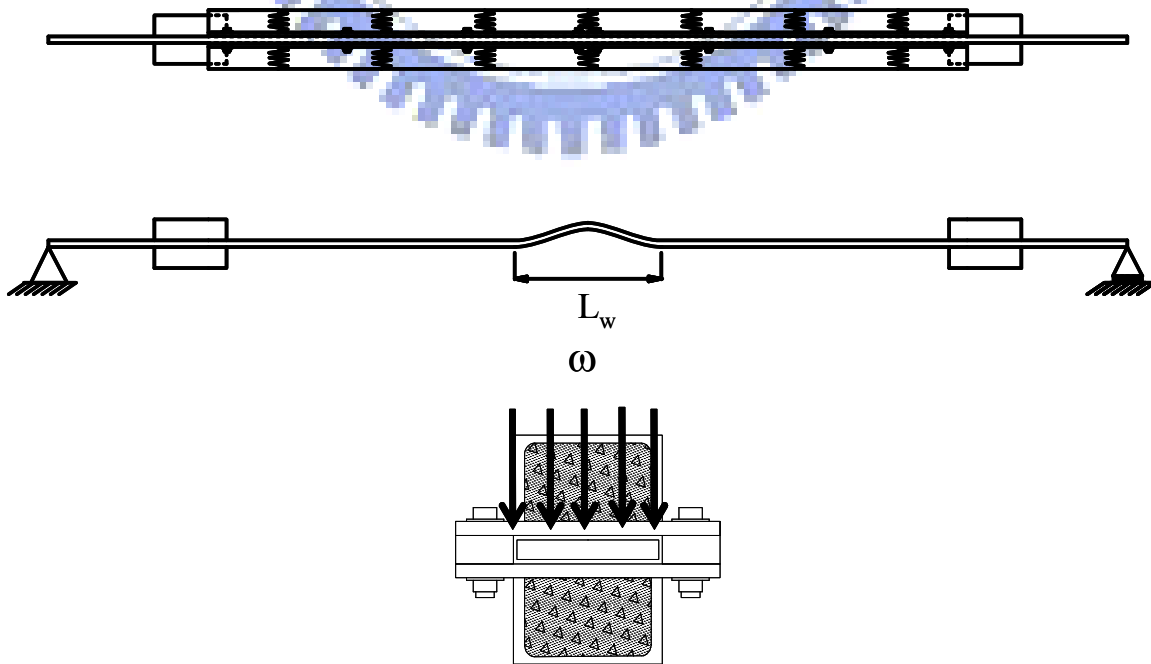


圖 2.9 圍束單元提供側向勁度示意圖

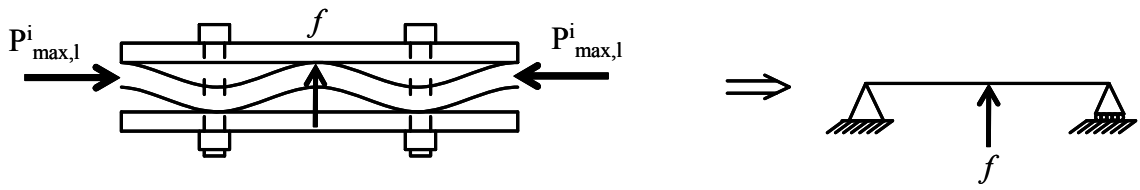


圖 2.10 局部挫屈力學行為

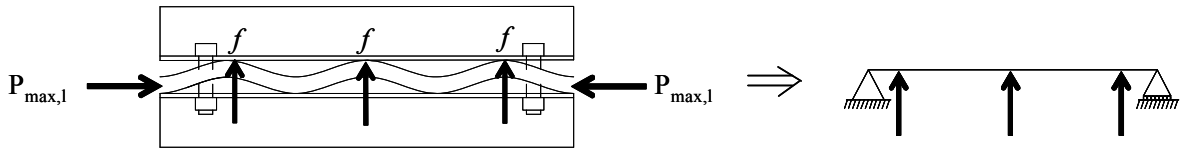


圖 2.11 局部挫屈力學行為

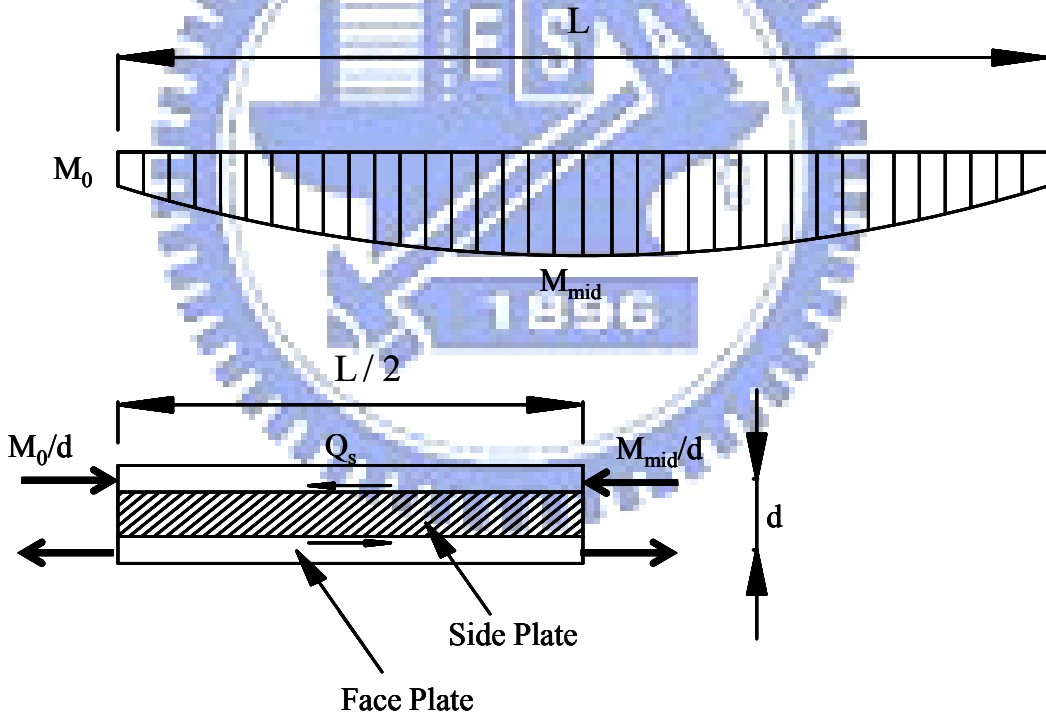
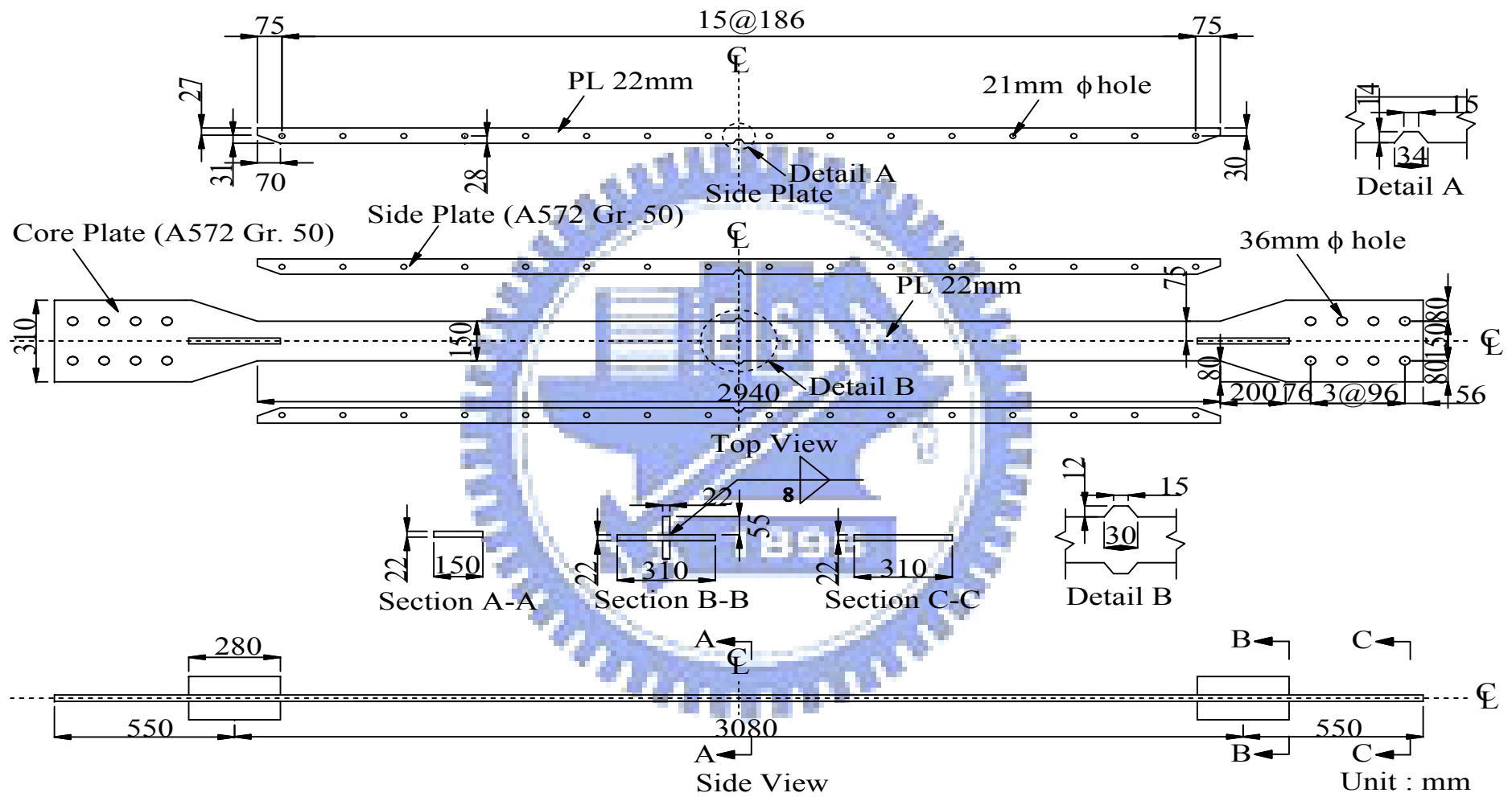
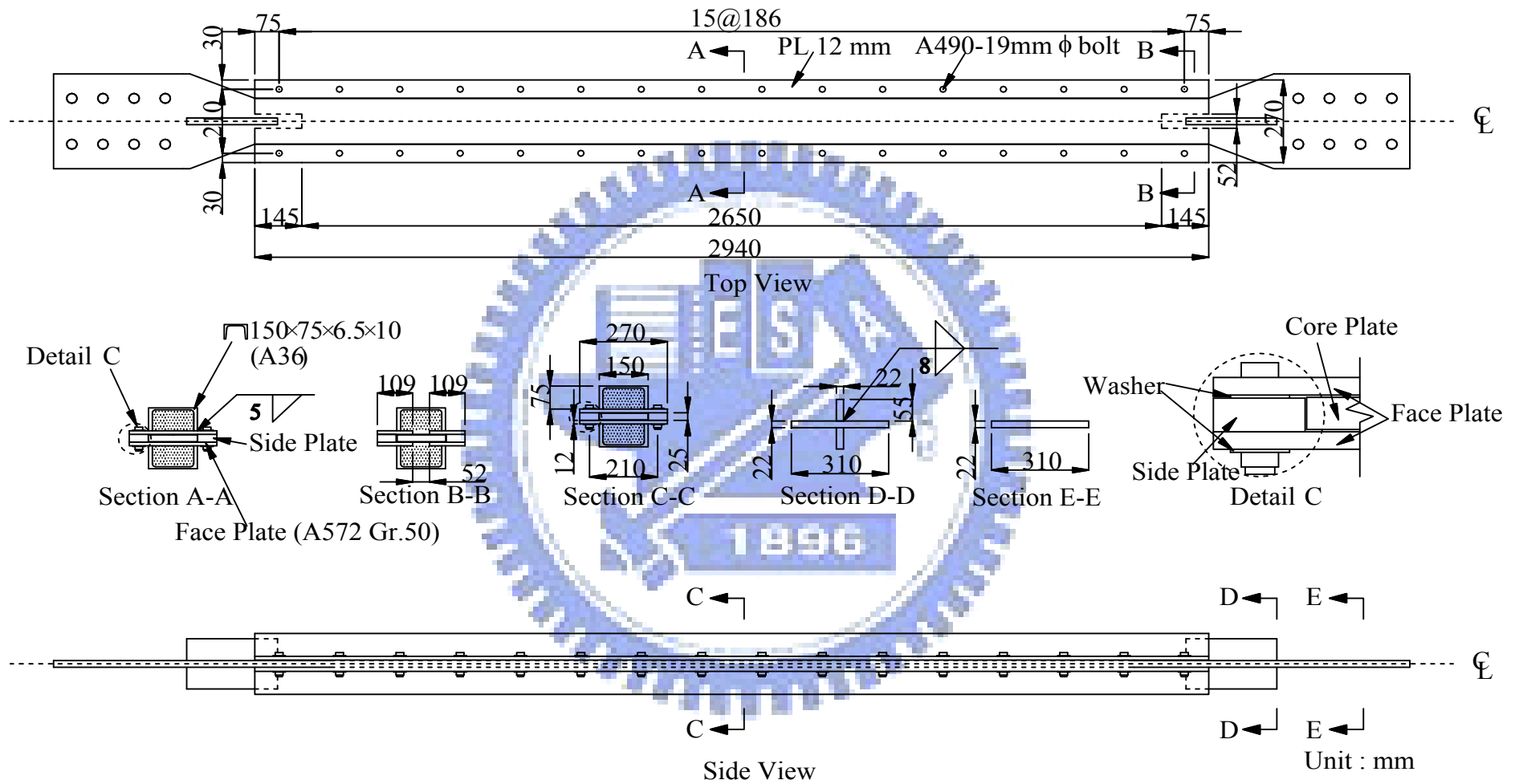


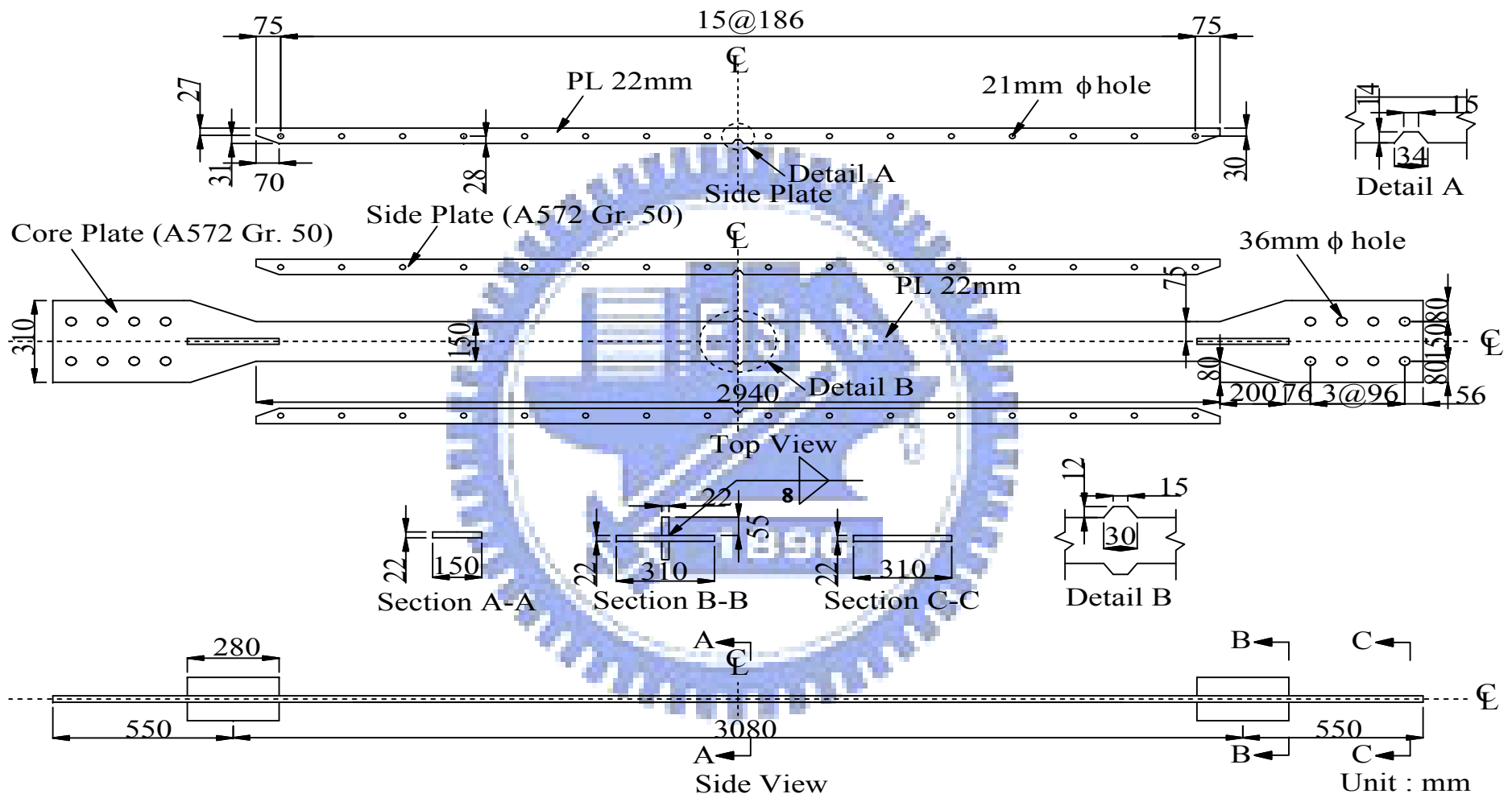
圖 2.12 整體挫屈力學行為



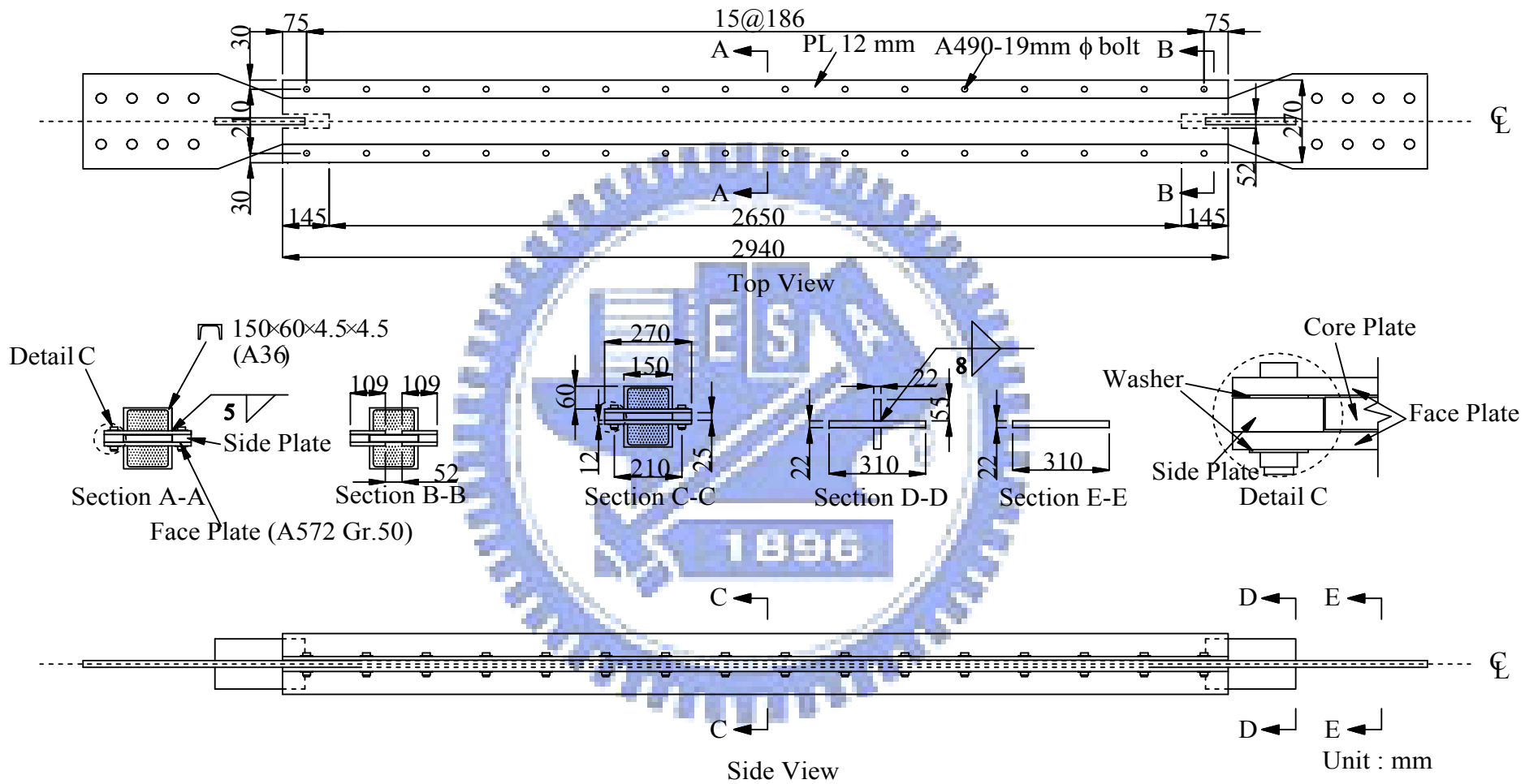
(a) Core Plate
圖 2.13 試體 1



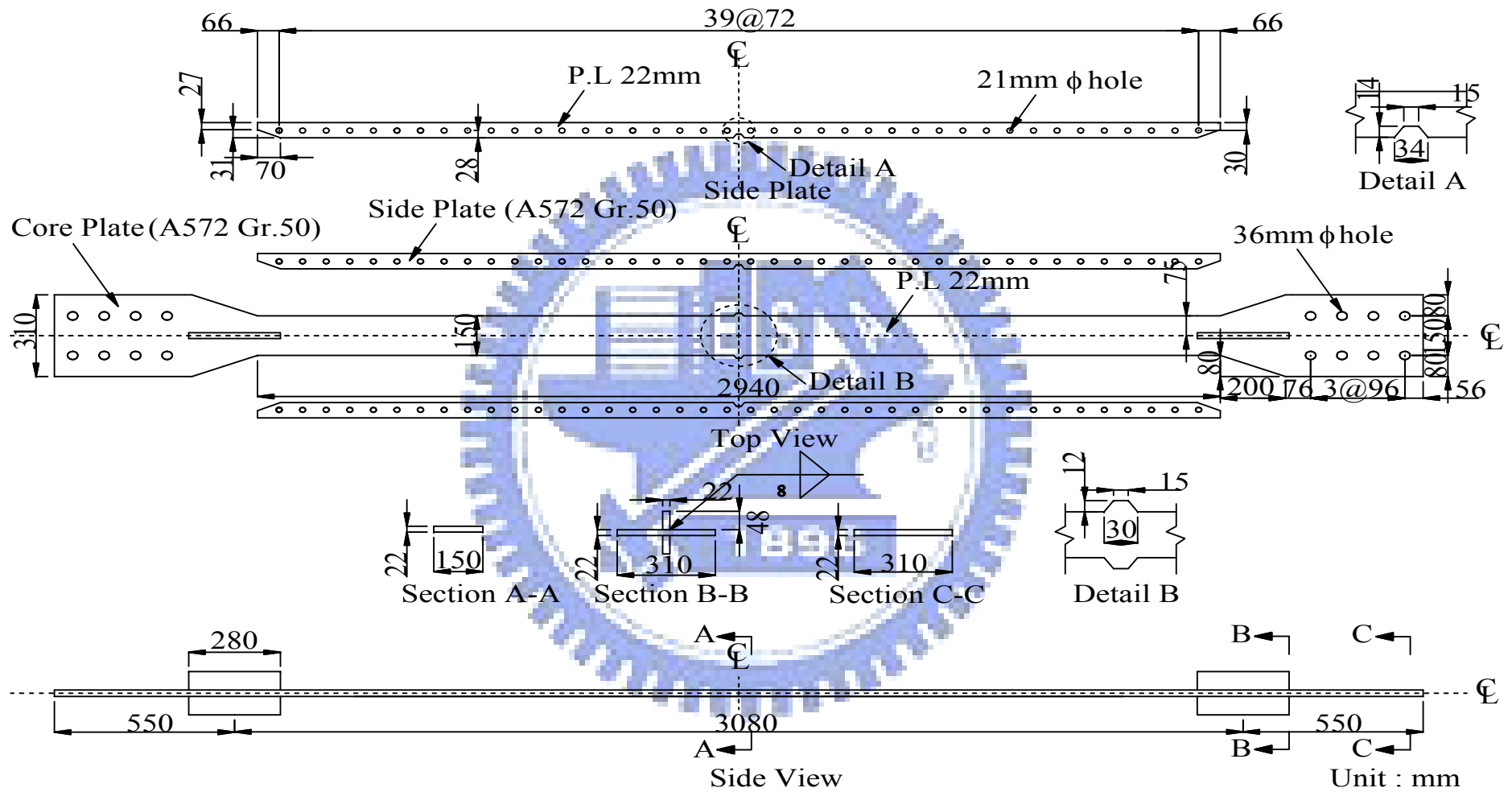
(b) Restrained Member
圖 2.13 試體 1(續)



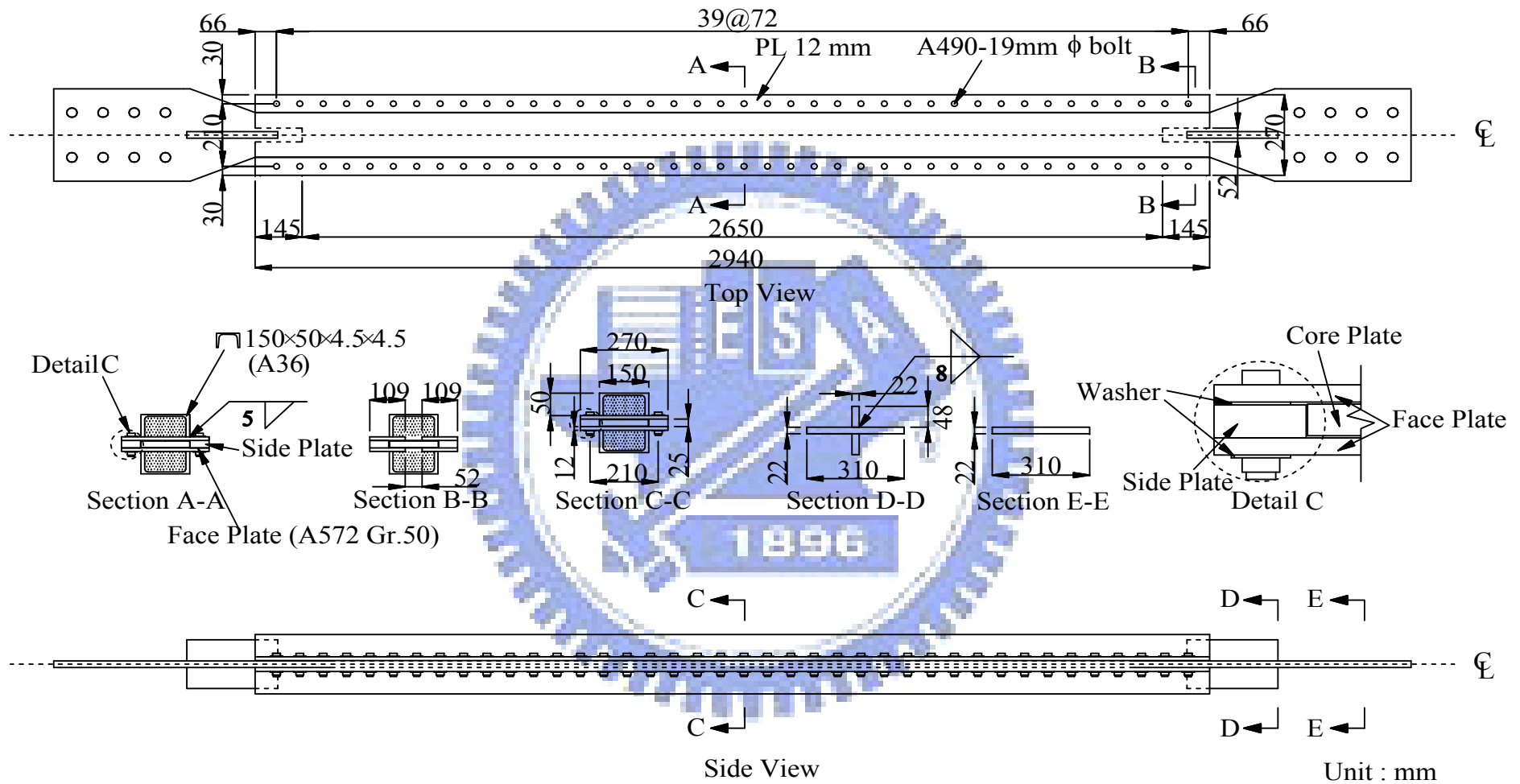
(a) Core Member
圖 2.14 試體 2



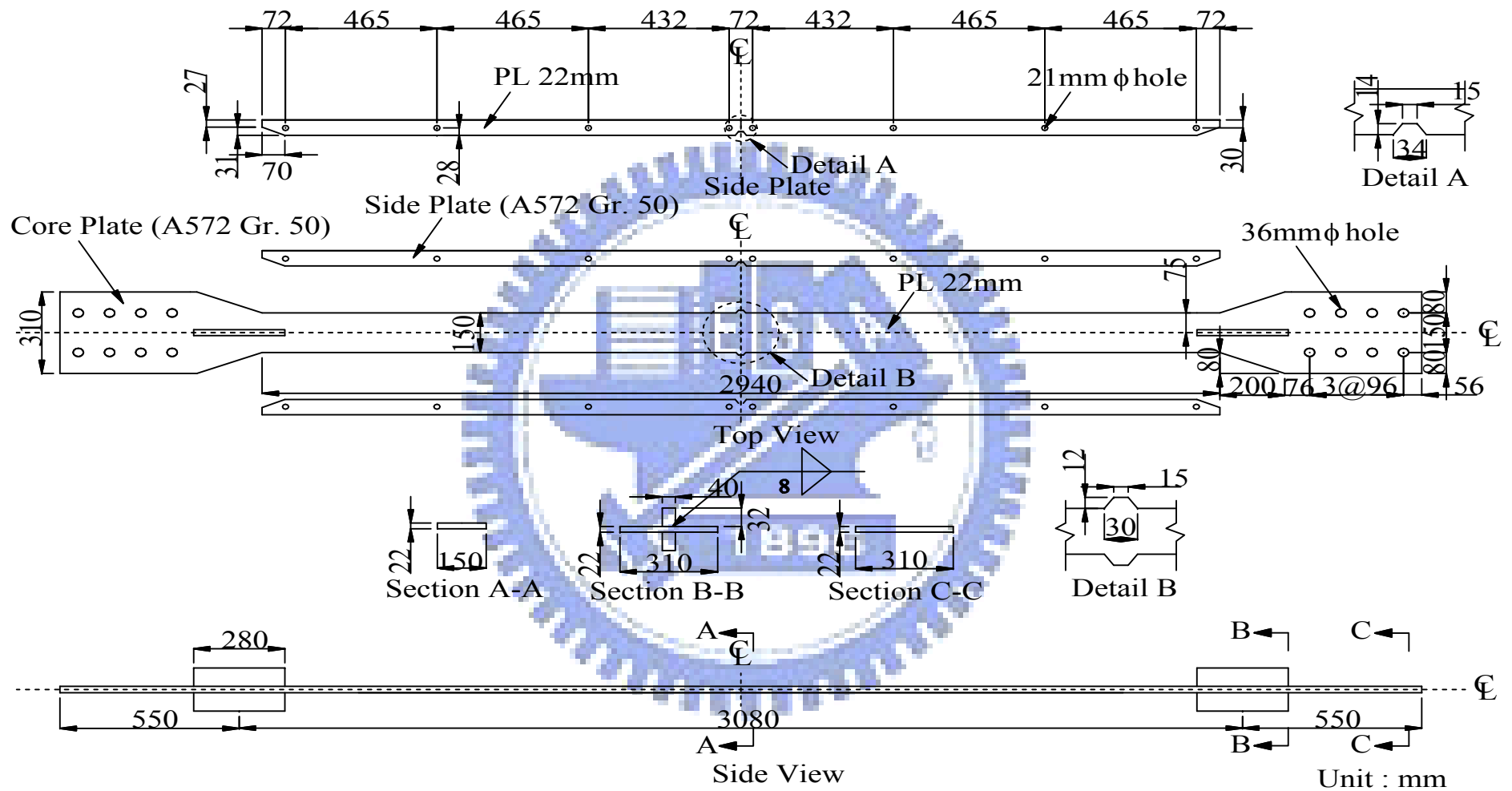
(b) Restrained Member
 圖 2.14 試體 2(續)



(a) Core Plate
圖 2.15 試體 3



(b) Restrained Member
圖 2.15 試體 3(續)



(a) Core Plate
圖 2.16 試體 4

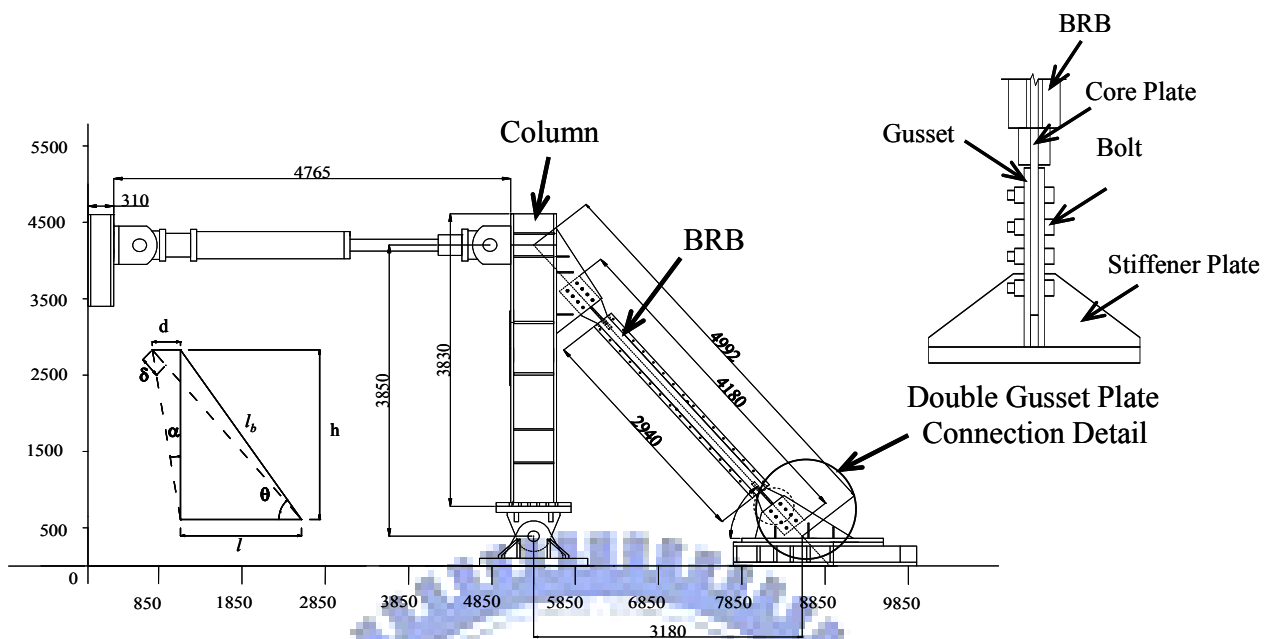


圖 2.17 試體試驗構架圖

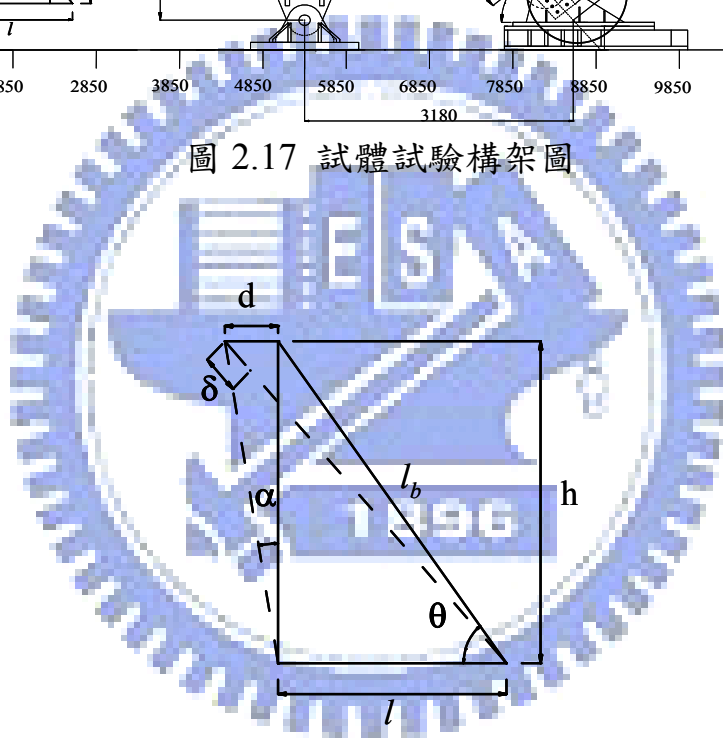


圖 2.18 層間側位移角與核心應變示意圖

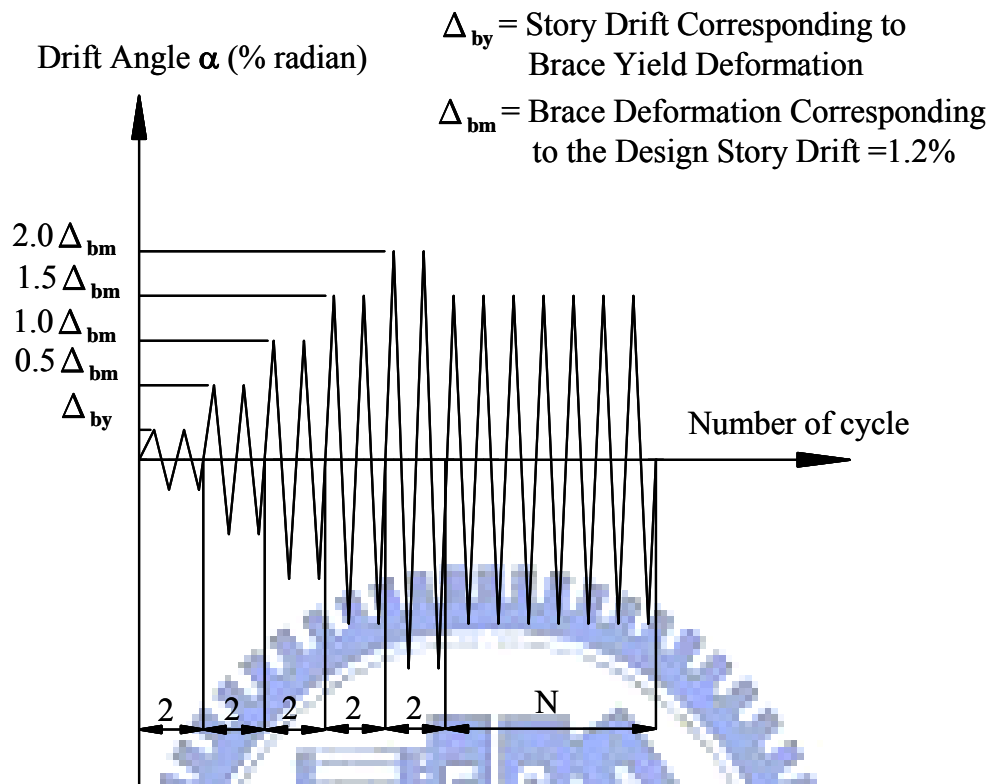


圖 2.19 試體試驗標準加載歷時與疲勞歷時

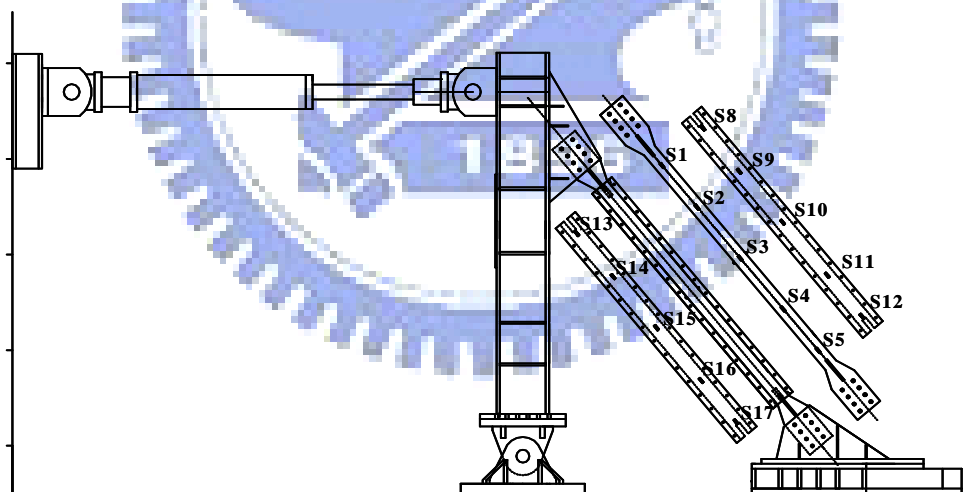


圖 2.20 核心與圍束單元應變計量測位置

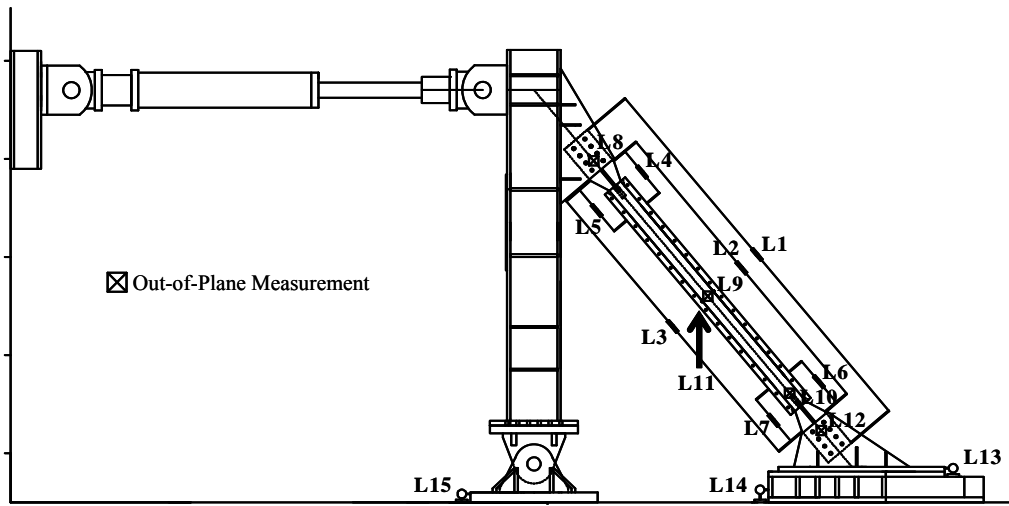


圖 2.21 位移計量測位置

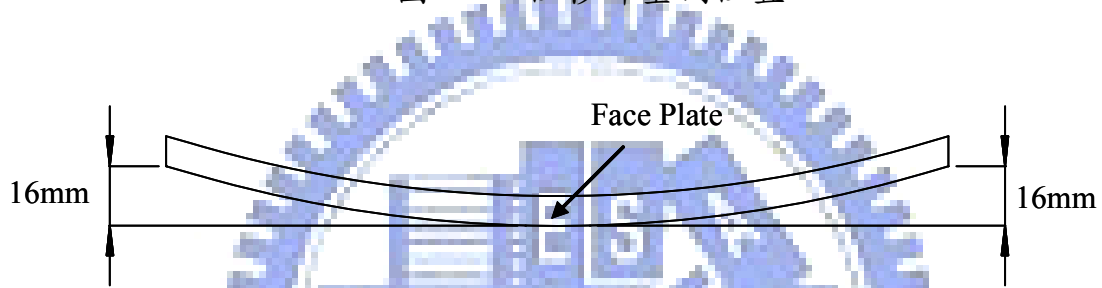


圖 3.1 面板預彎示意圖

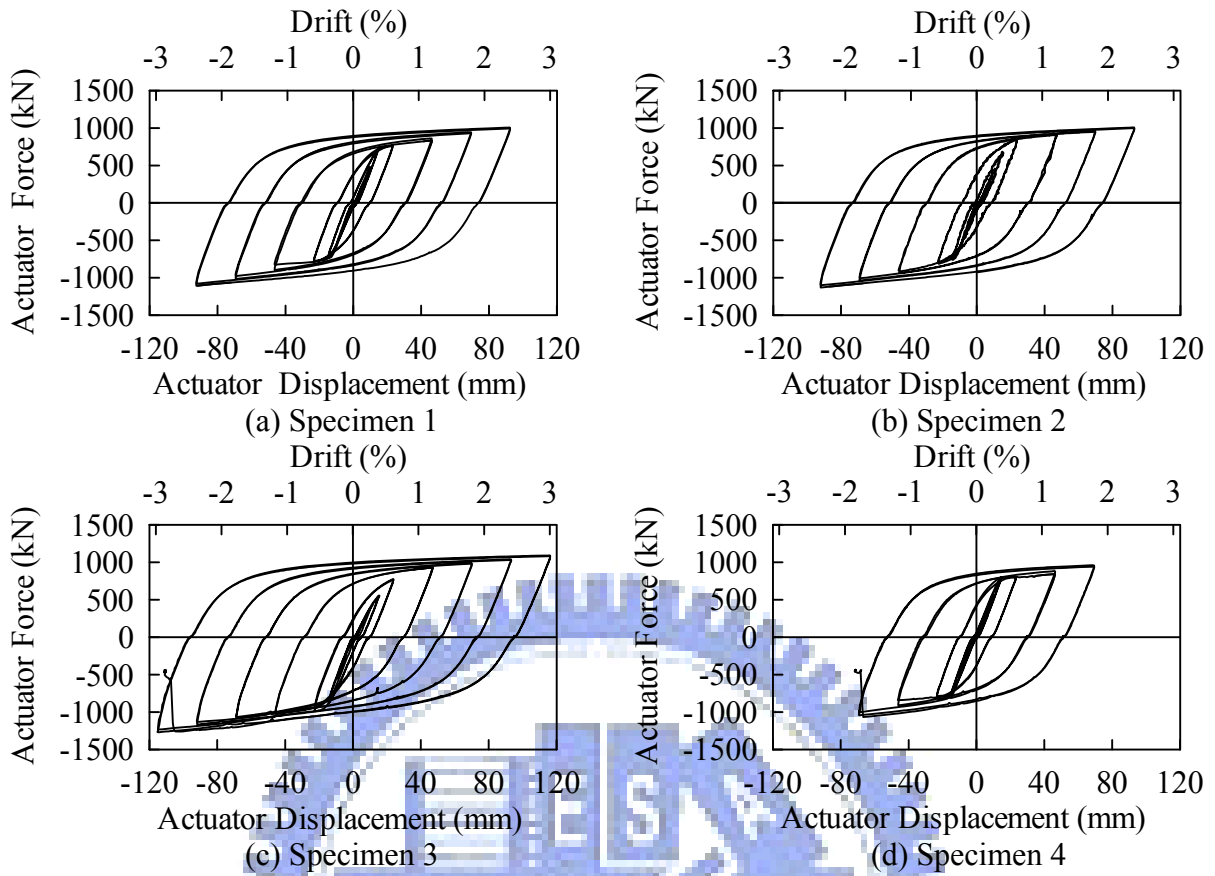


圖 3.2 標準加載歷時下油壓制動器力量位移關係

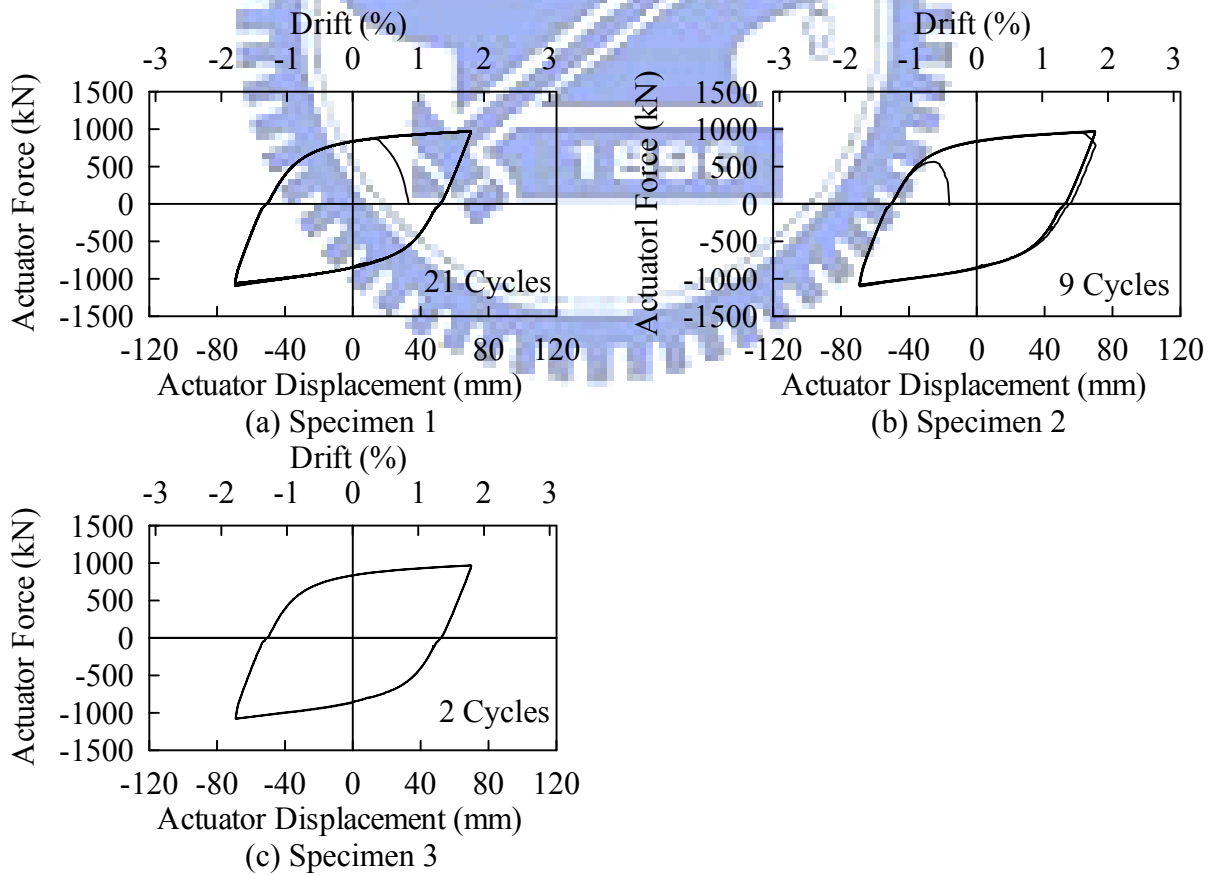


圖 3.3 疲勞加載歷時下油壓制動器力量與位移關係

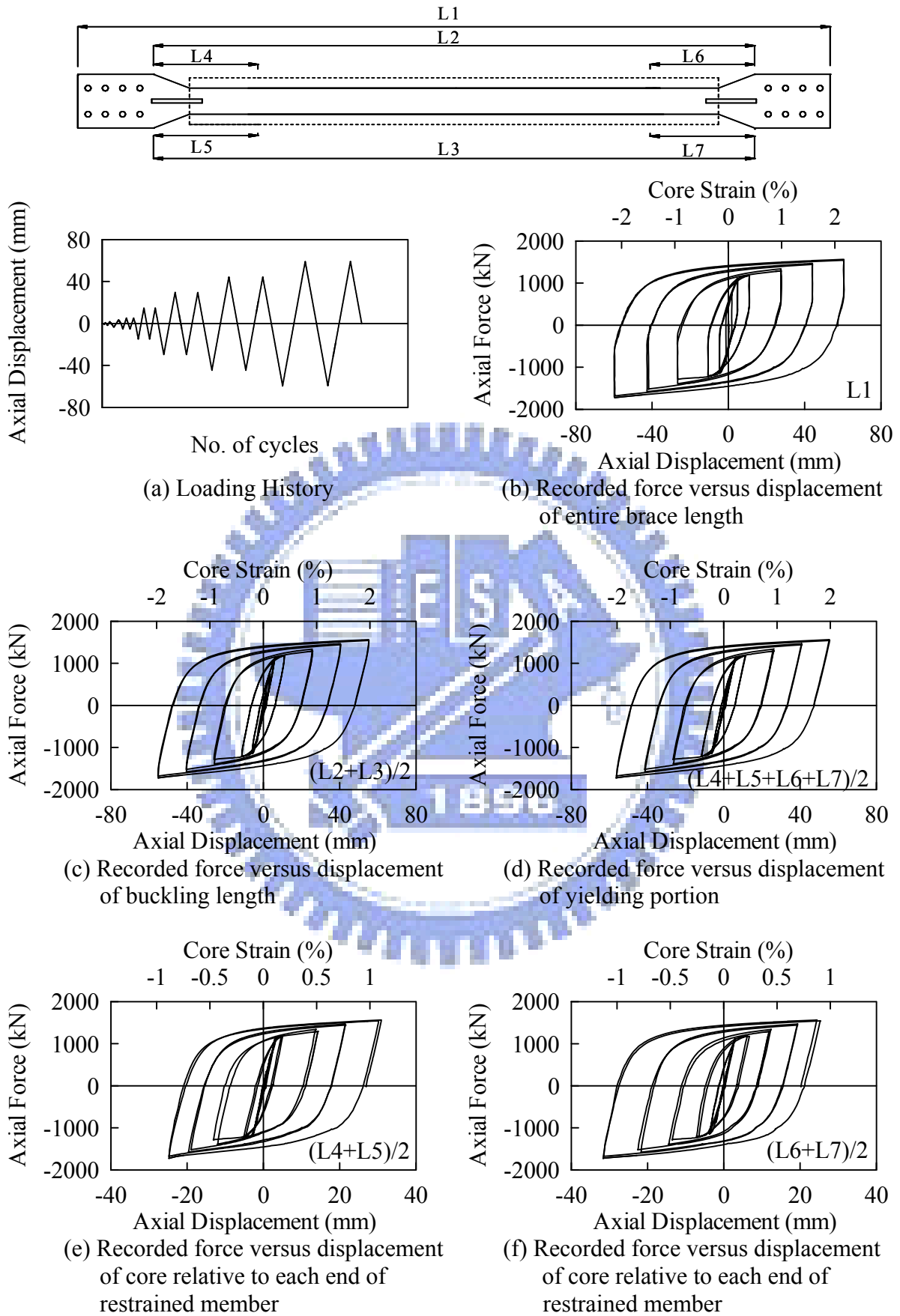
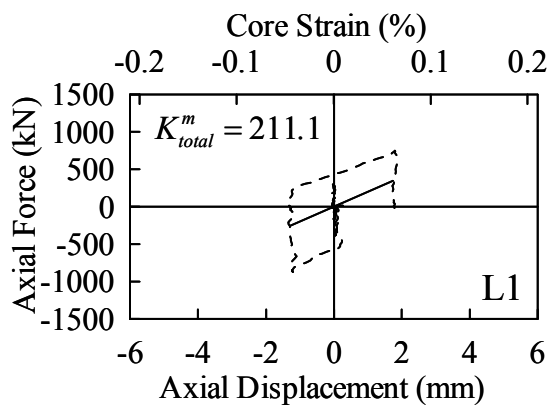
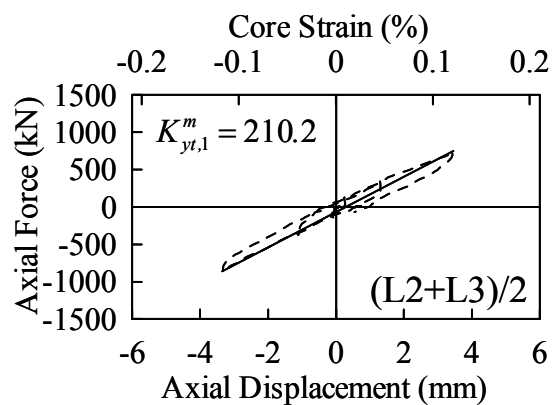


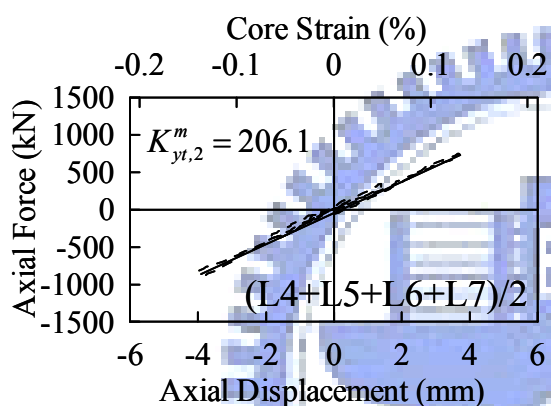
圖 3.4 試體 1 標準加載歷時下軸向力量與位移關係



(a) Elastic stiffness of entire brace length

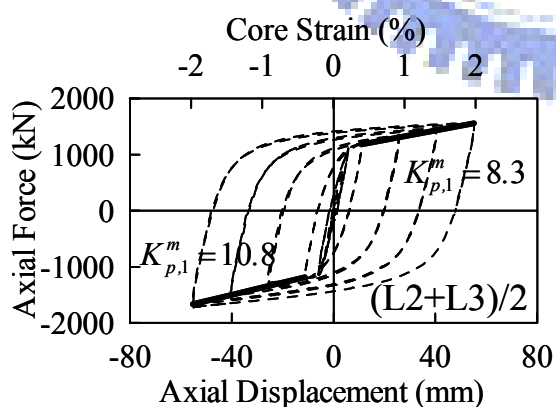


(b) Elastic stiffness of buckling length

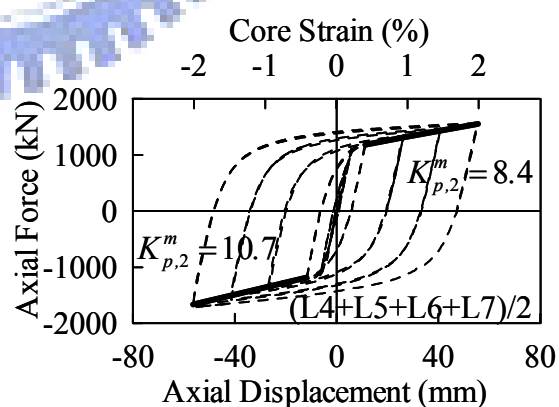


(c) Elastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.5 試體 1 彈性勁度



(a) Inelastic stiffness of buckling length



(b) Inelastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.6 試體 1 非彈性勁度

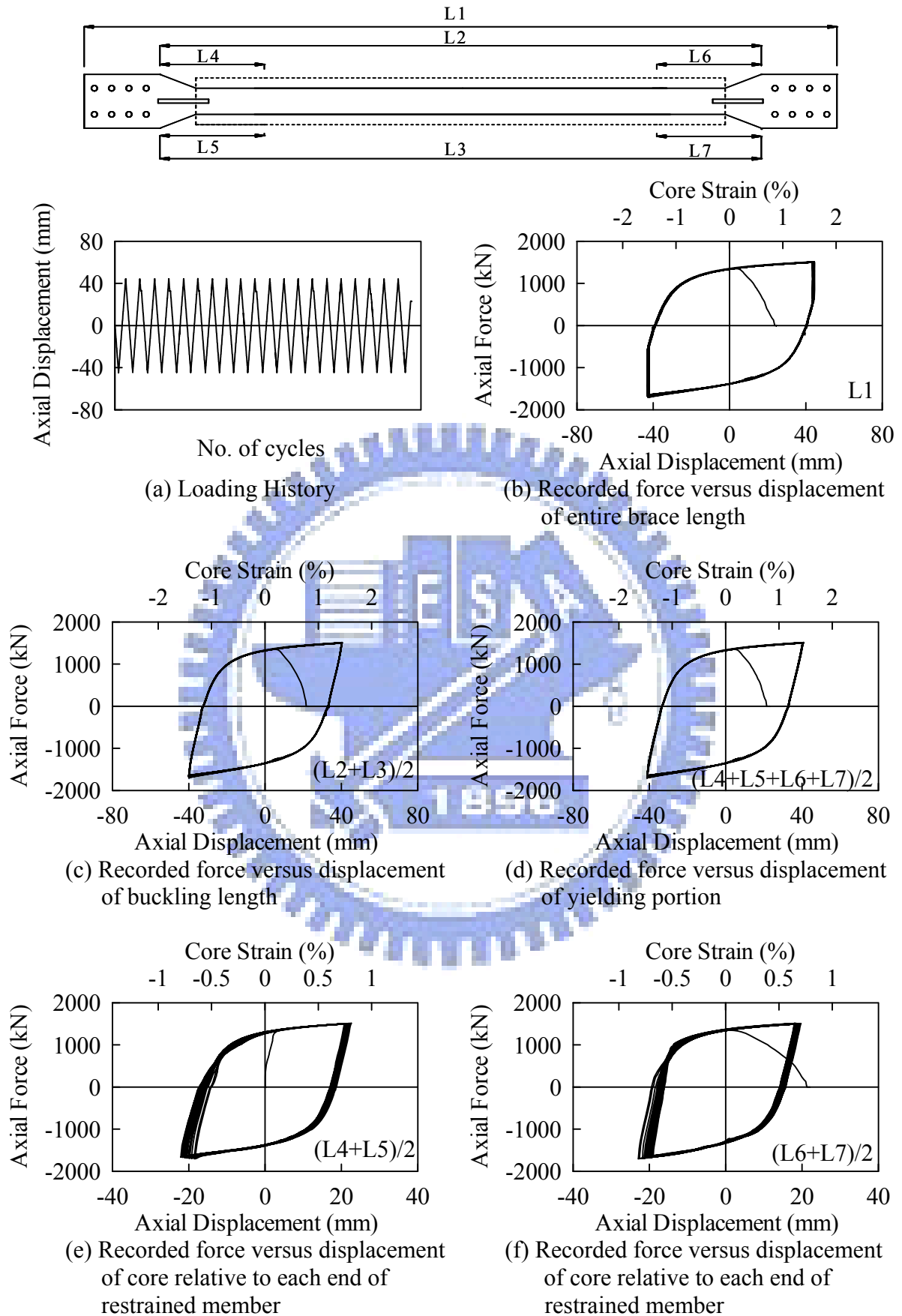


圖 3.7 試體 1 疲勞加載歷時下軸向力量與位移關係

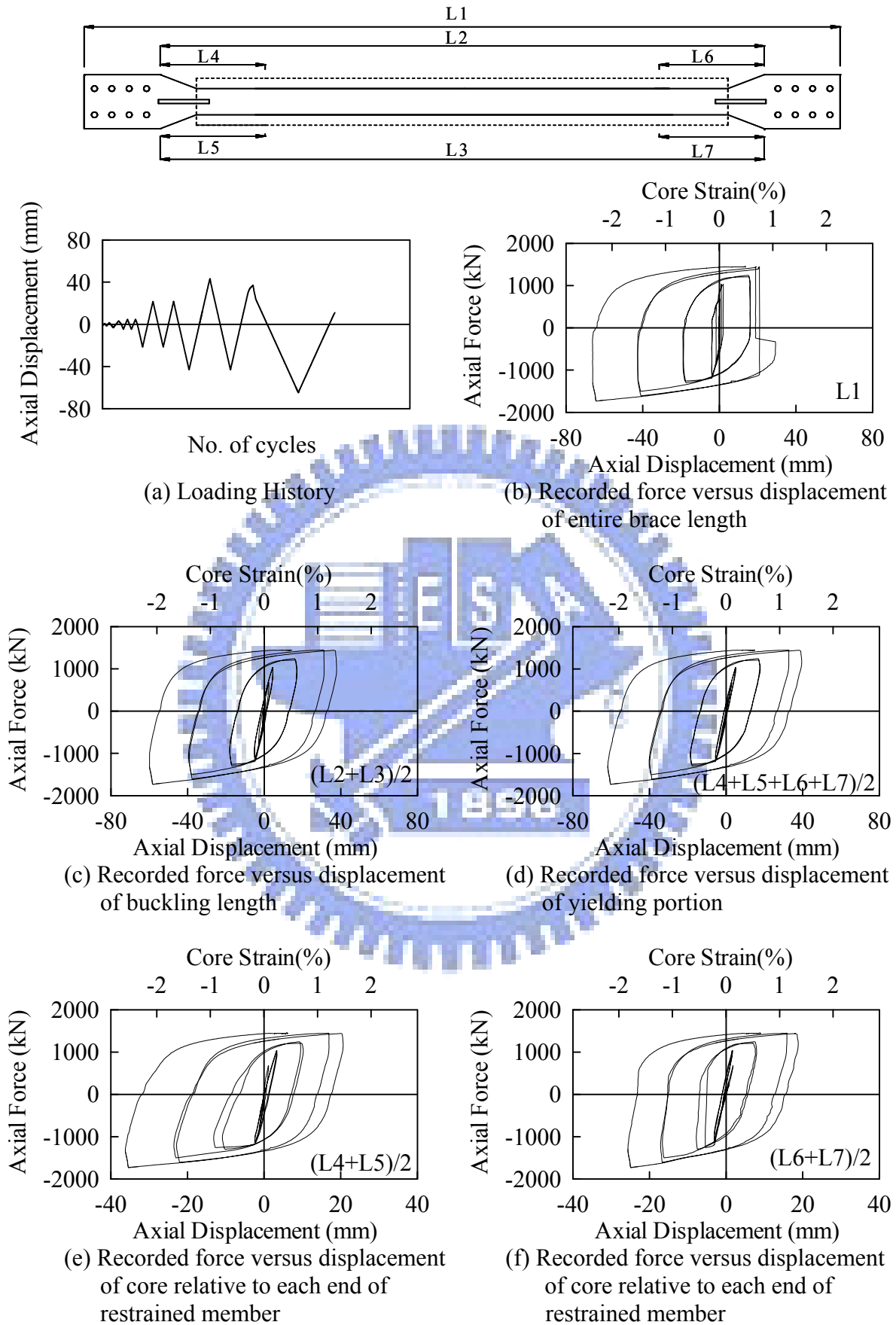


圖 3.8 試體 2 第一次標準加載歷時下軸向力量與位移關係

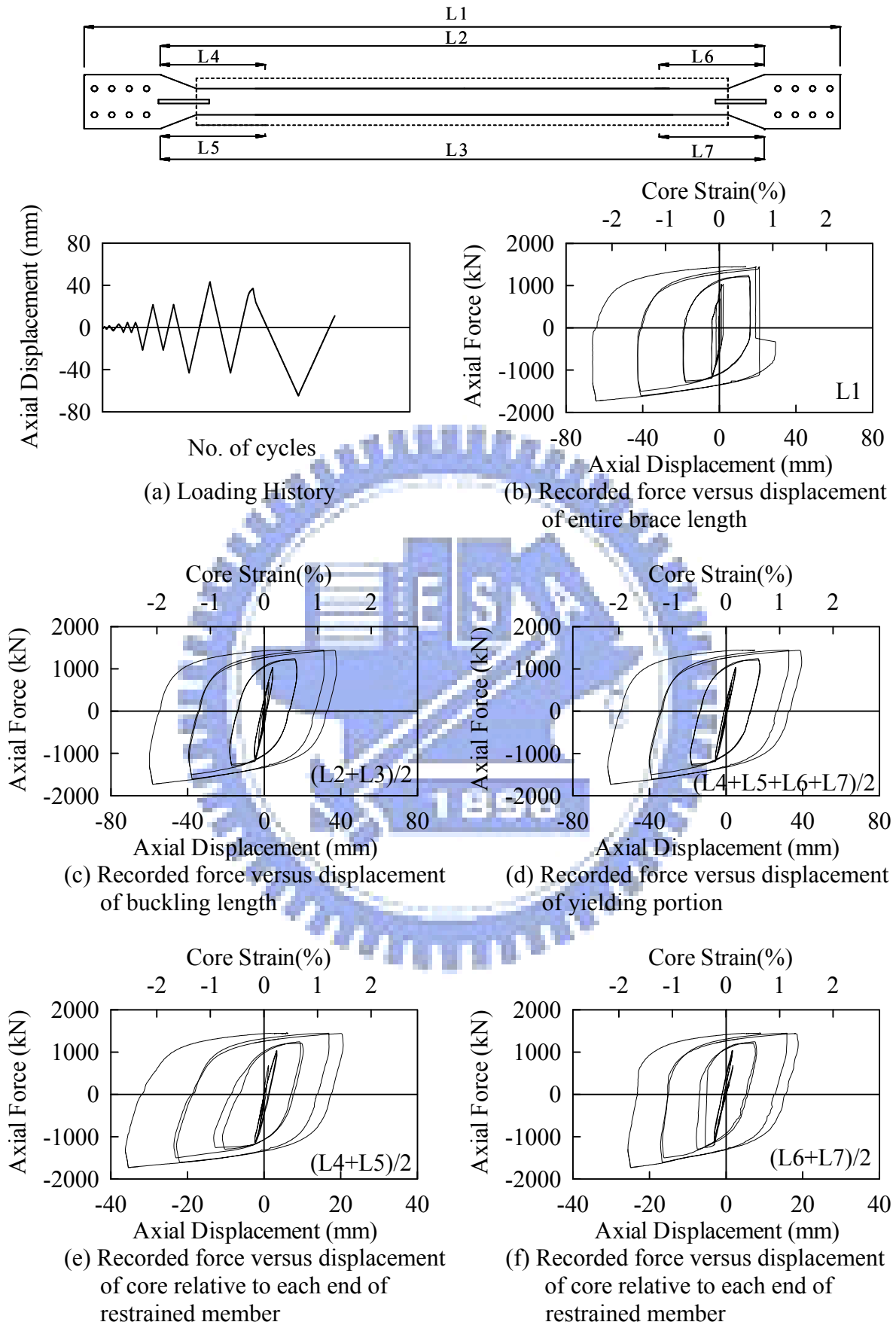


圖 3.9 試體 2 第二次標準加載歷時下軸向力量與位移關係

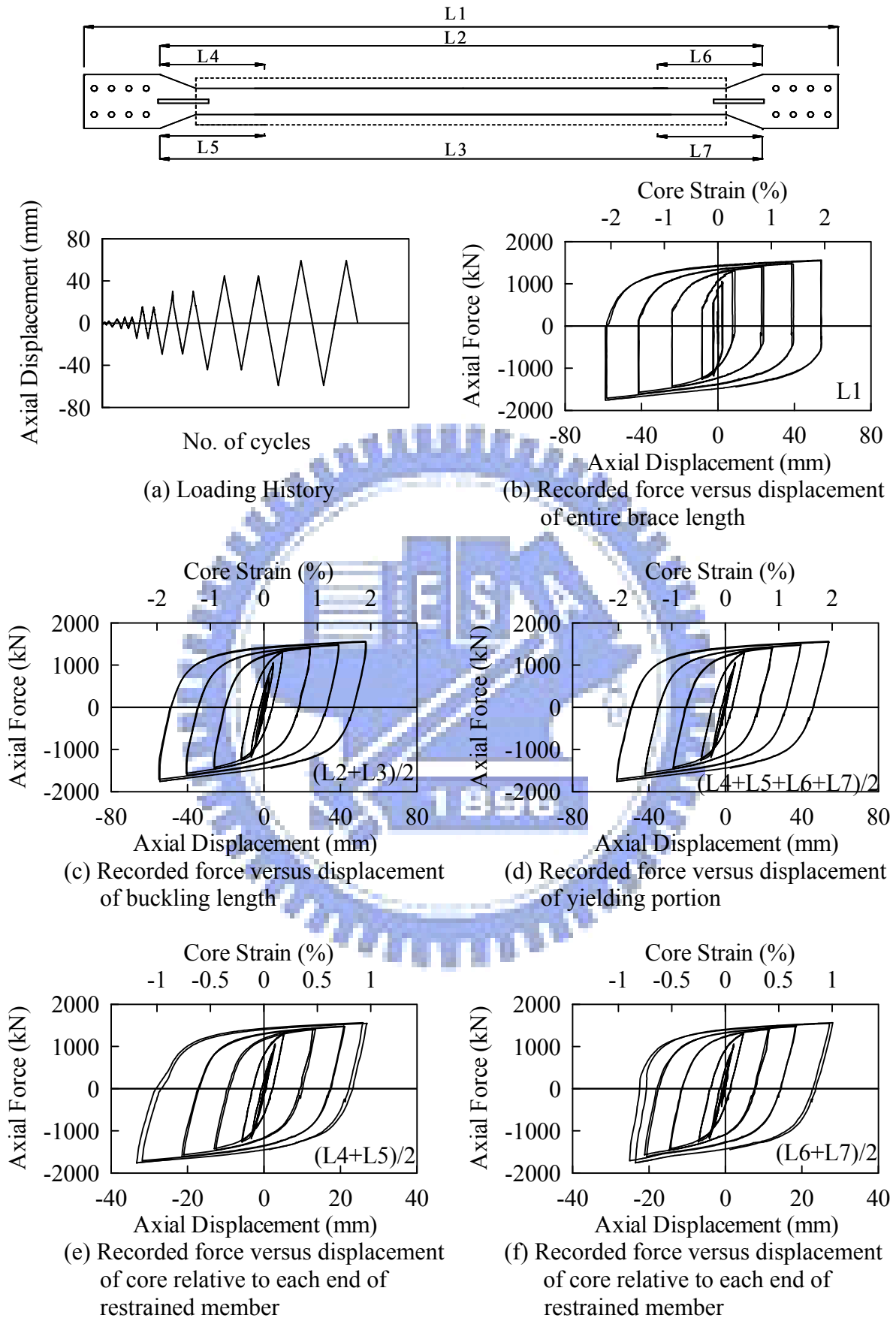
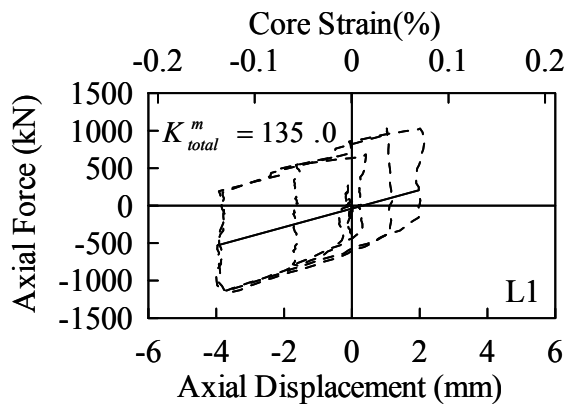
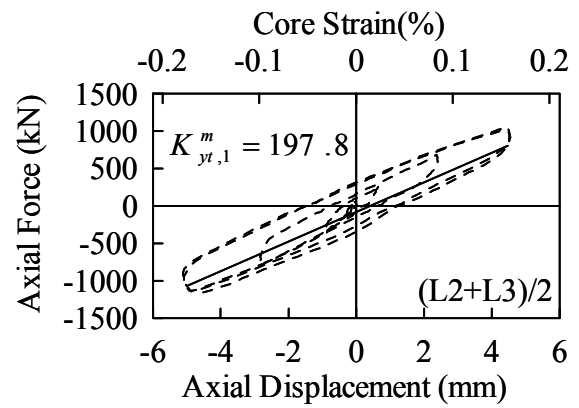


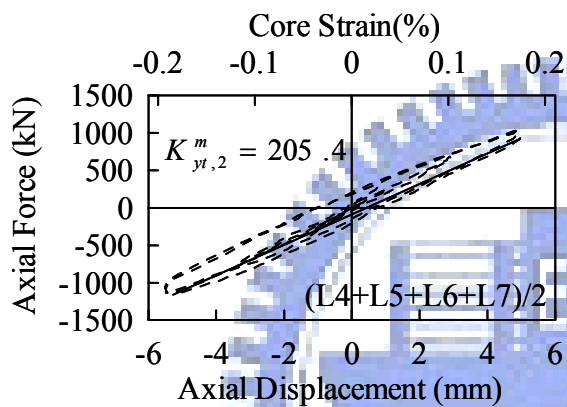
圖 3.10 試體 2 第三次標準加載歷時下軸向力量與位移關係



(a) Elastic stiffness of entire brace length

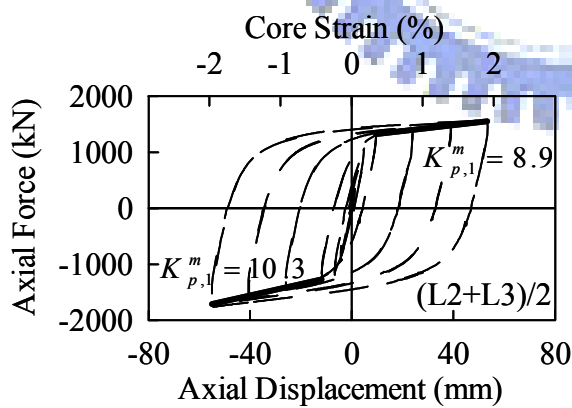


(b) Elastic stiffness of buckling length

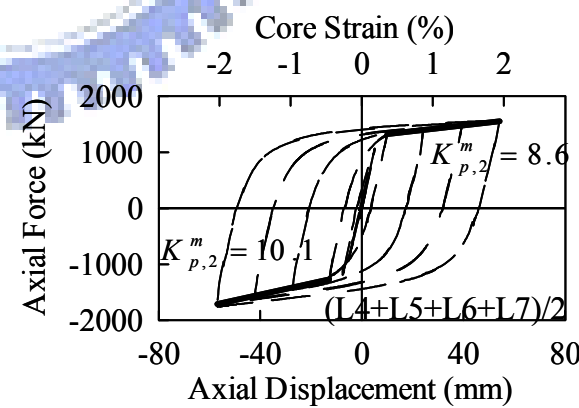


(c) Elastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.11 試體 2 彈性勁度



(a) Inelastic stiffness of buckling length



(b) Inelastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.12 試體 2 非彈性勁度

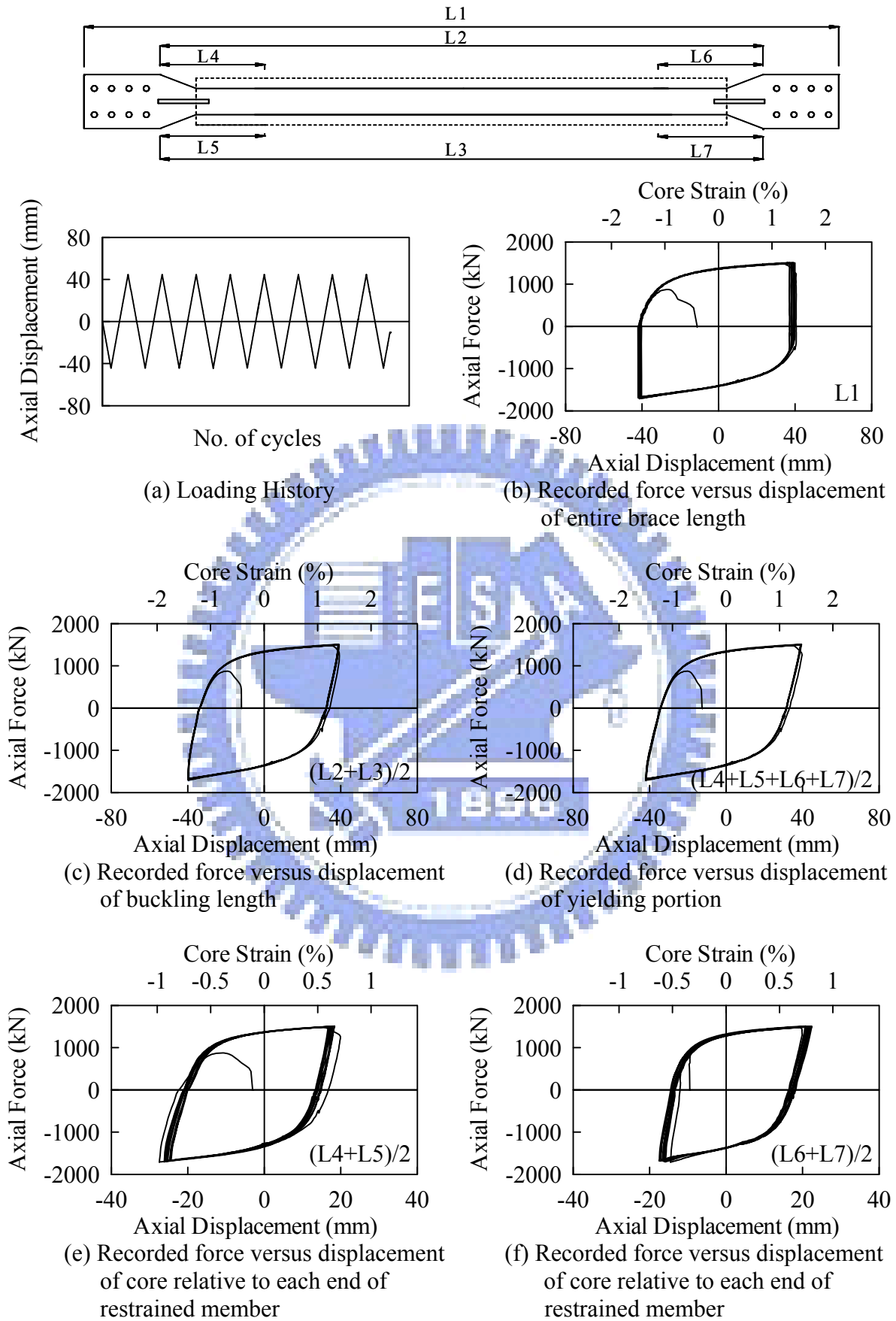


圖 3.13 試體 2 疲勞加載歷時下軸向力量與位移關係

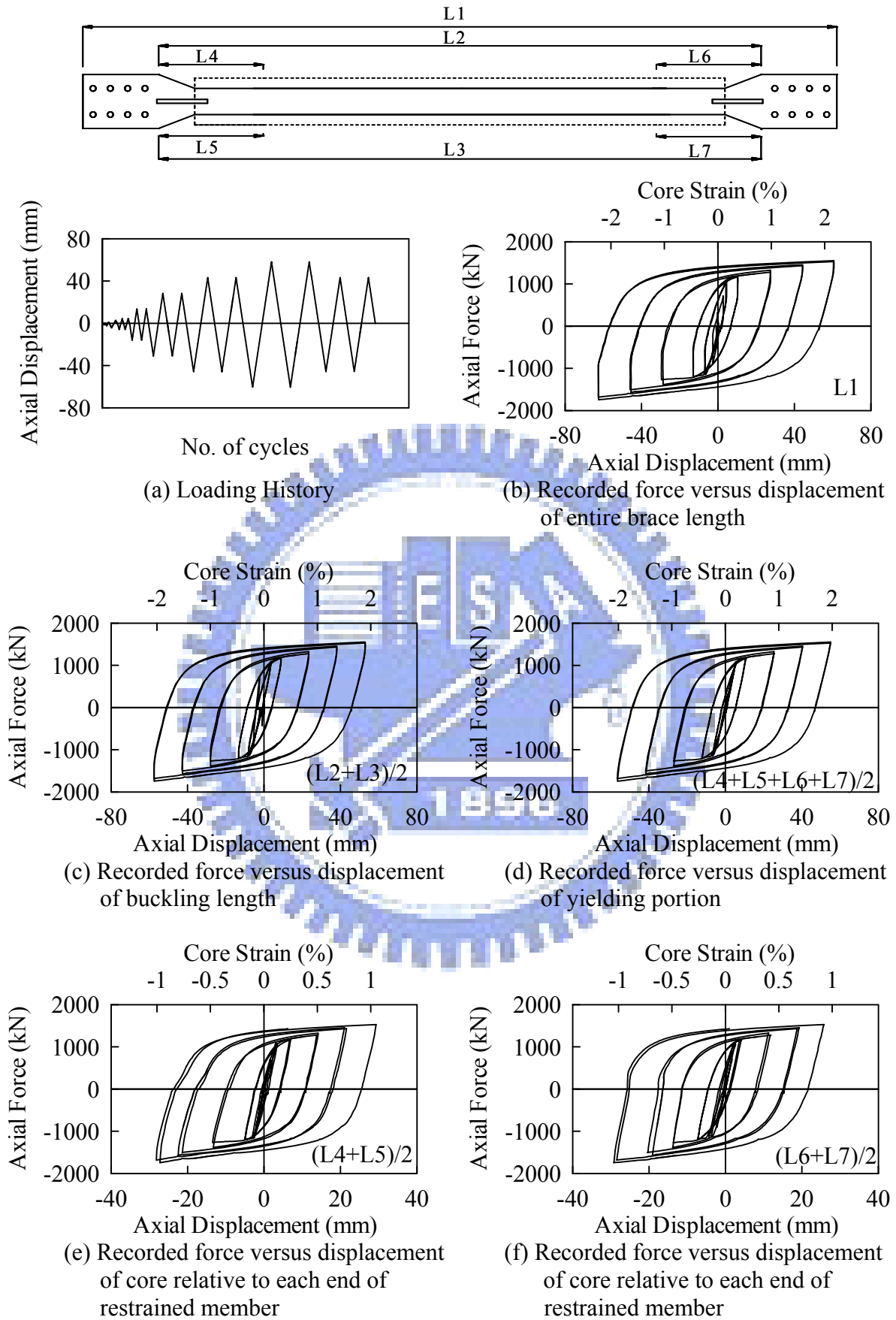


圖 3.14 試體 3 第一次標準加載歷時下軸向力量與位移關係

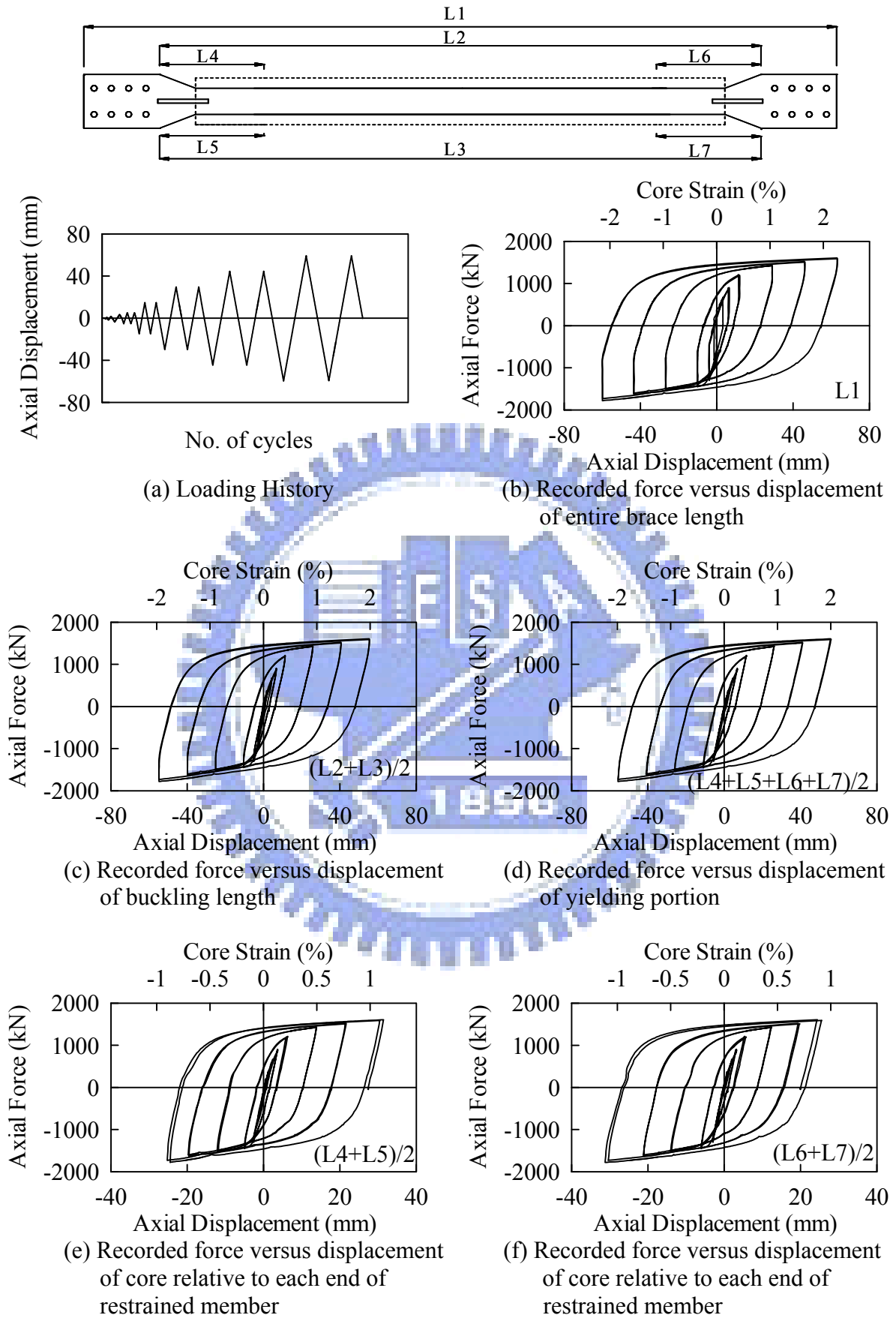


圖 3.15 試體 3 第二次標準加載歷時下軸向力量與位移關係

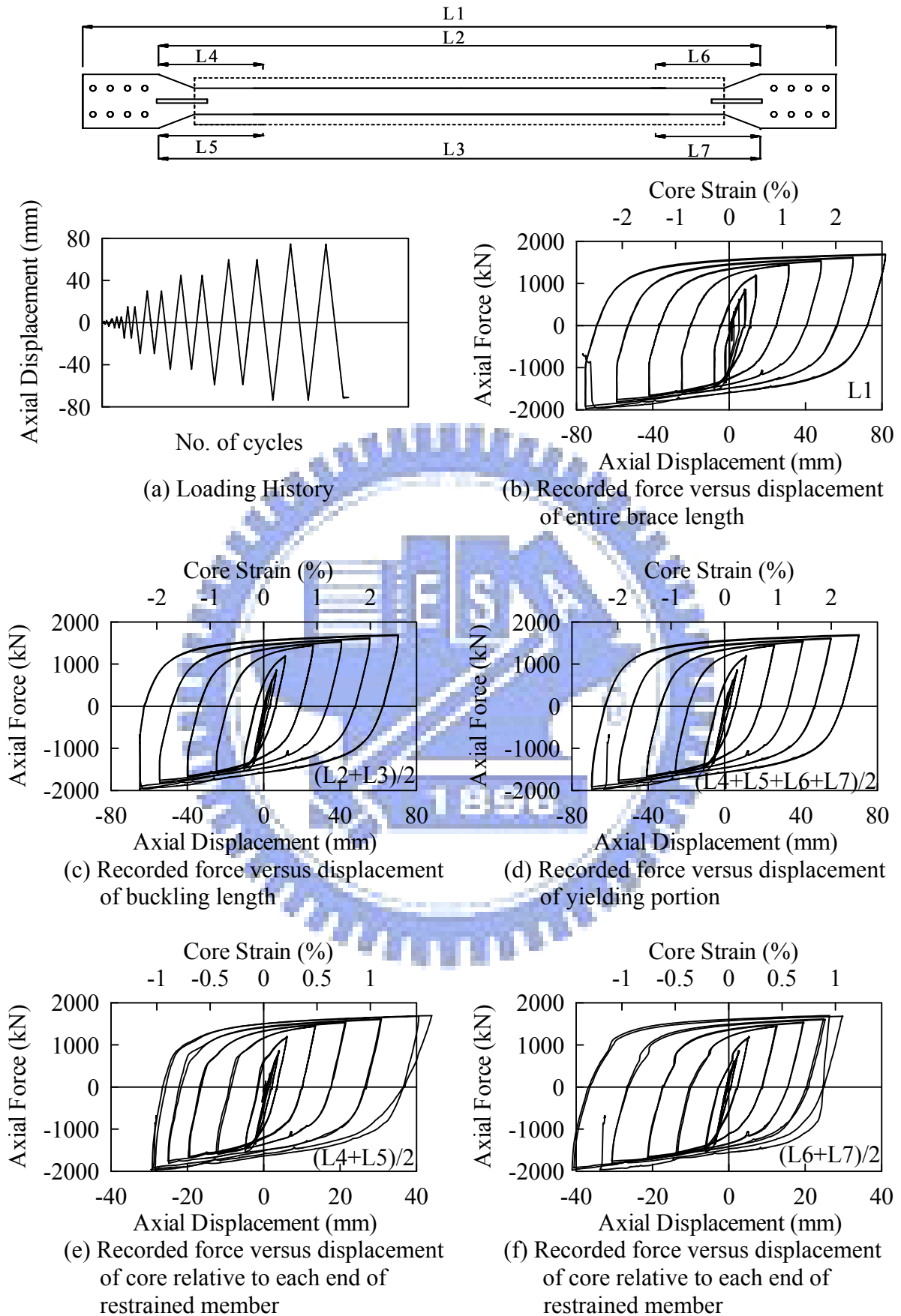
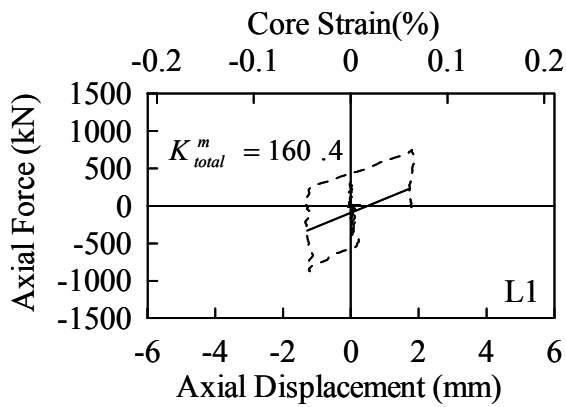
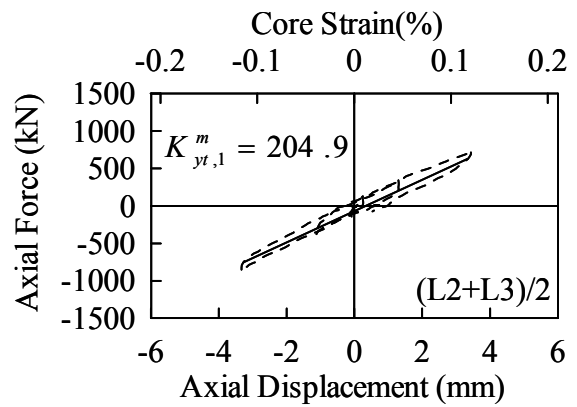


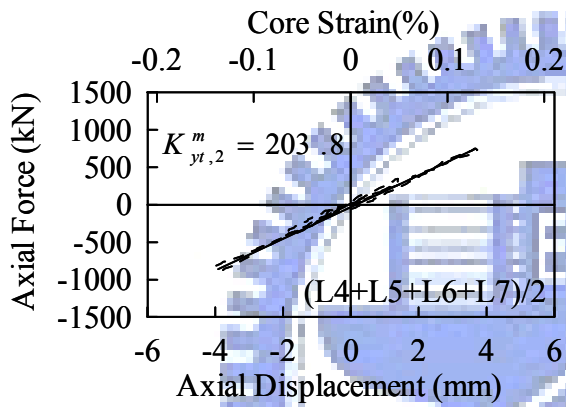
圖 3.16 試體 3 第三次標準加載歷時下軸向力量與位移關係



(a) Elastic stiffness of entire brace length

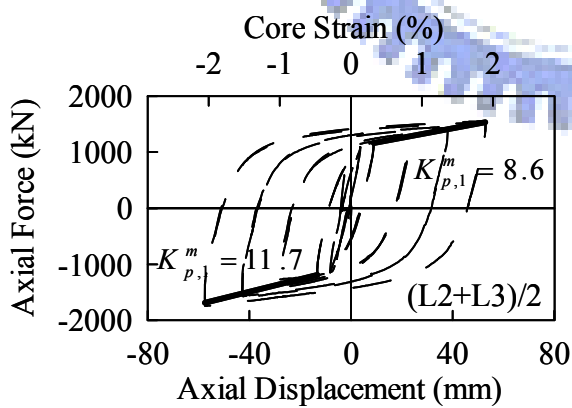


(b) Elastic stiffness of buckling length

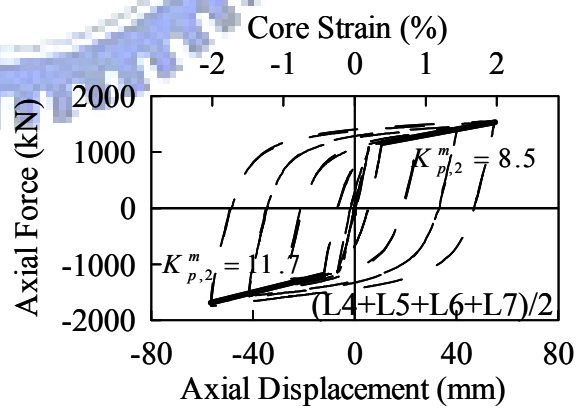


(c) Elastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.17 試體 3 彈性勁度



(a) Inelastic stiffness of buckling length



(b) Inelastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.18 試體 3 非彈性勁度

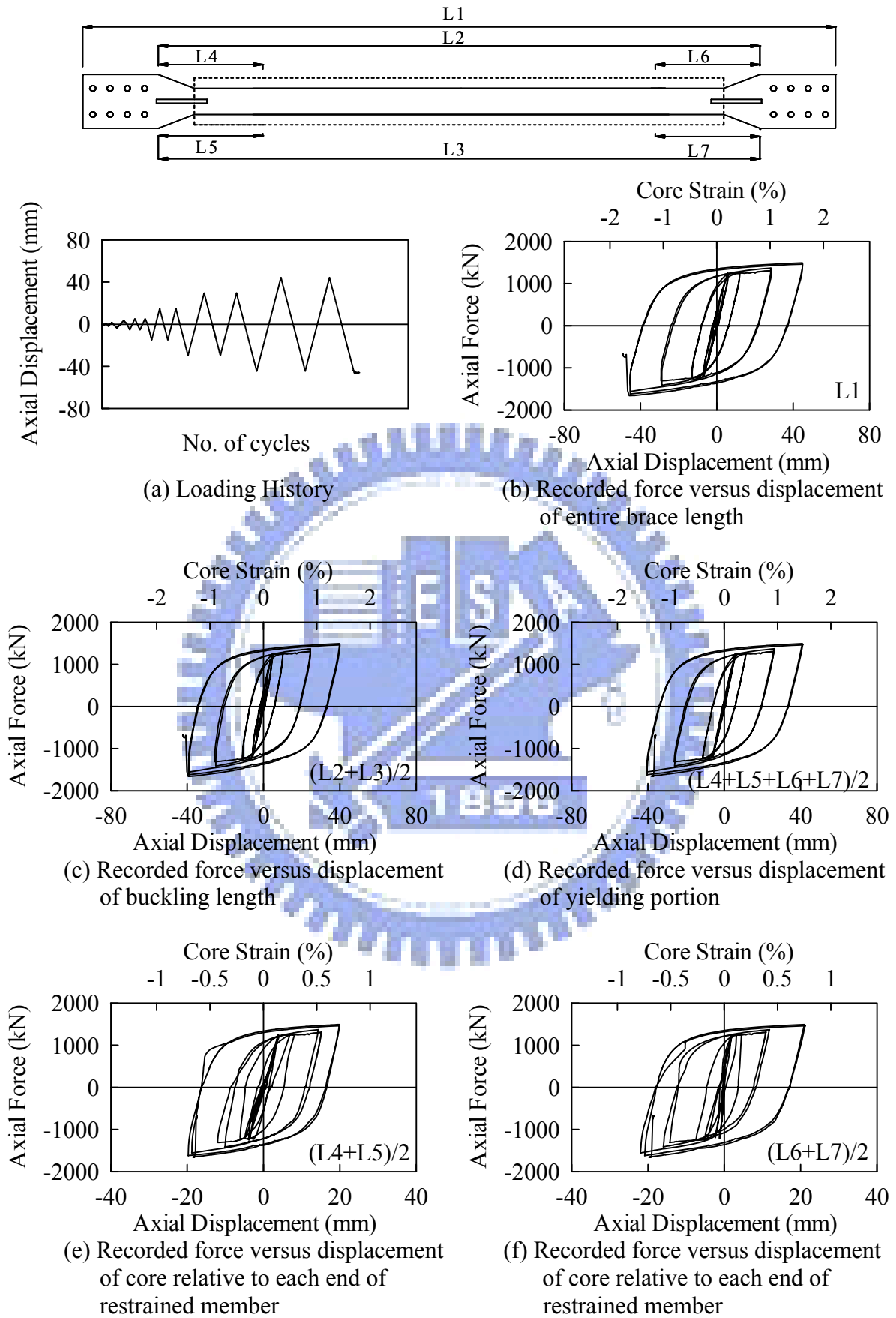
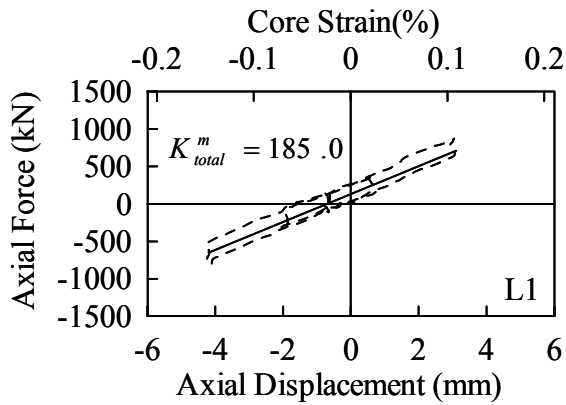
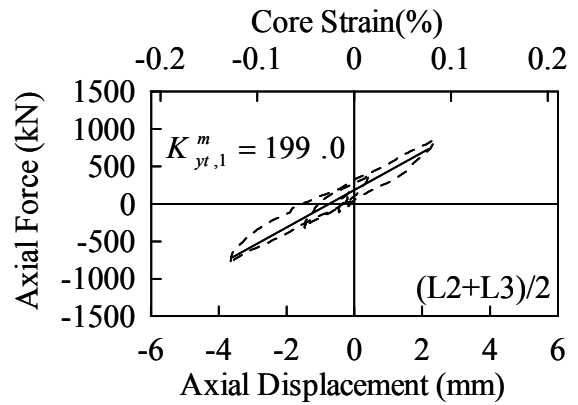


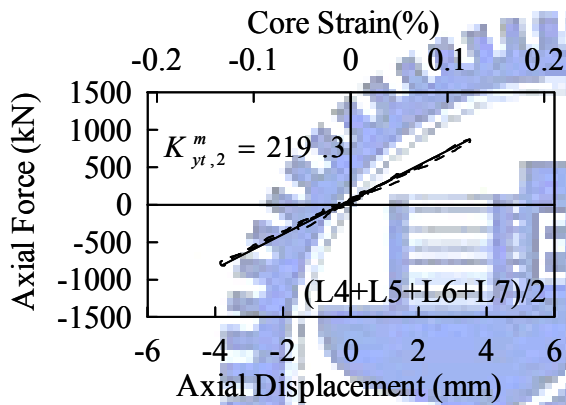
圖 3.19 試體 4 標準加載歷時下軸向力量與位移關係



(a) Elastic stiffness of entire brace length

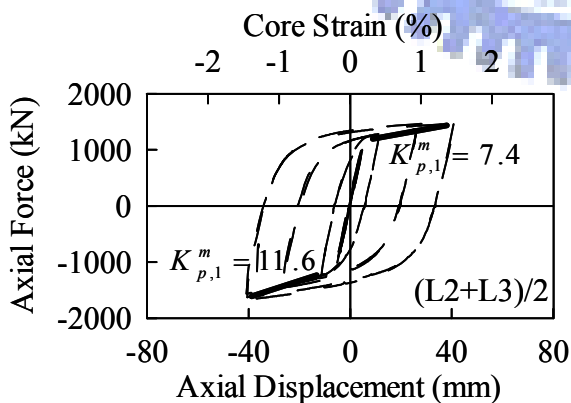


(b) Elastic stiffness of buckling length

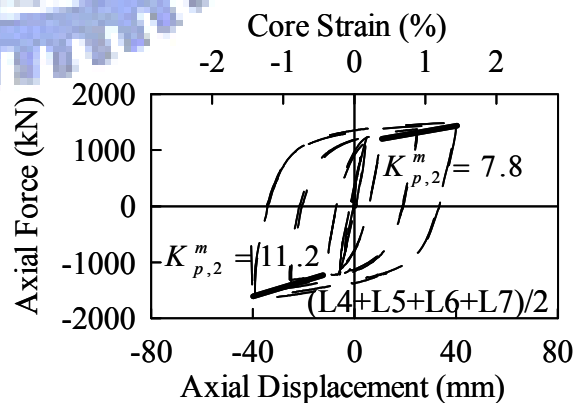


(c) Elastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.20 試體 4 彈性勁度



(a) Inelastic stiffness of buckling length



(b) Inelastic stiffness of yielding and transition portion

圖 3.21 試體 4 非彈性勁度

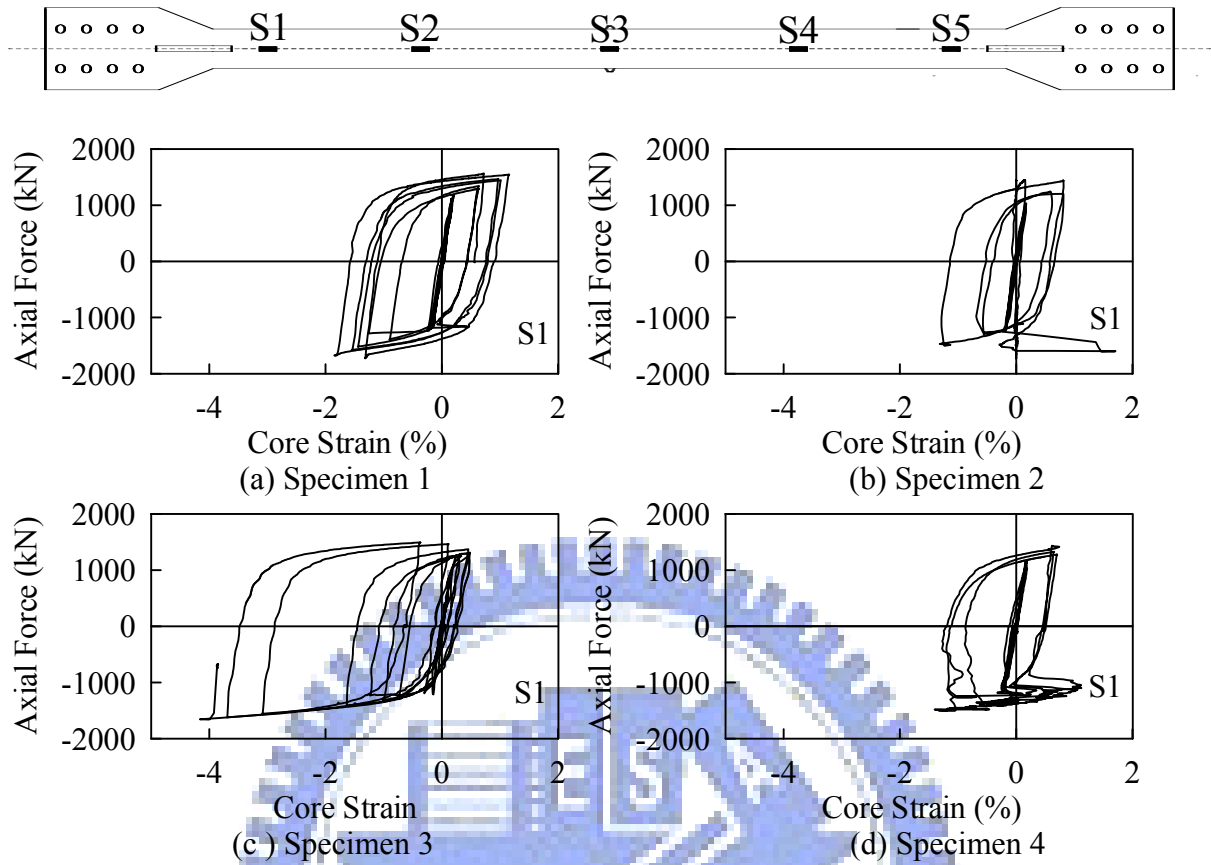


圖 3.22 軸向力與核心應變關係

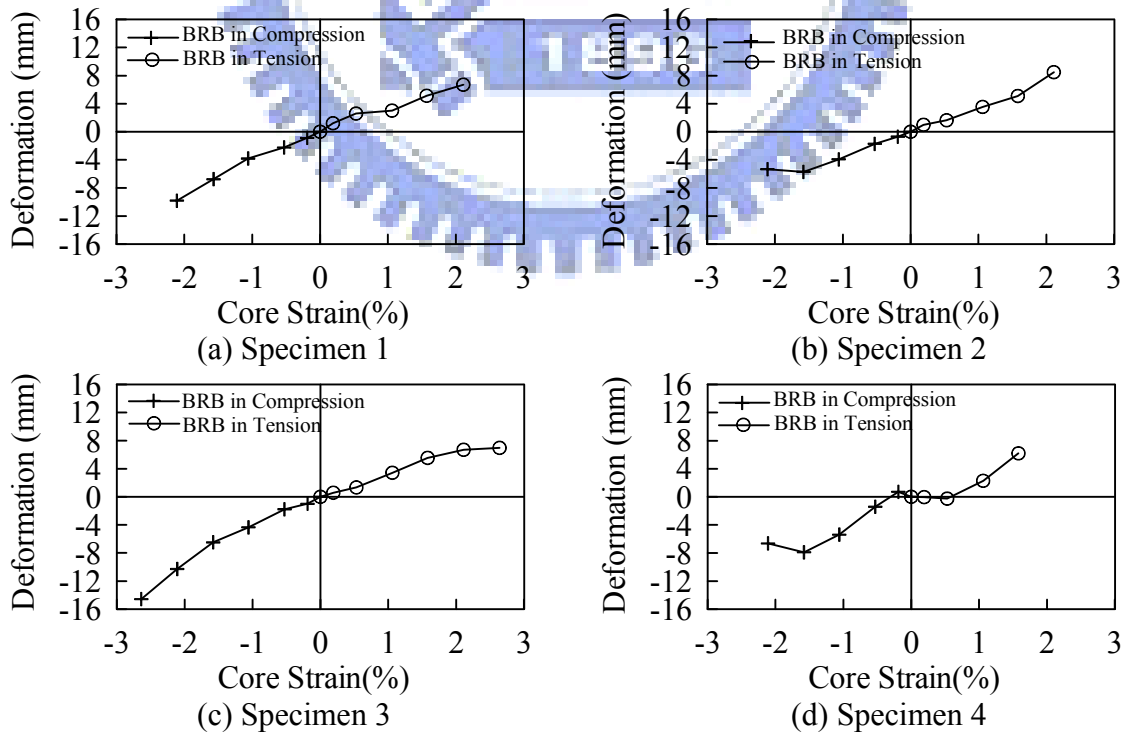
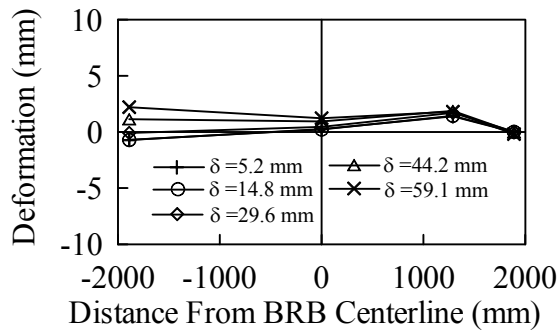
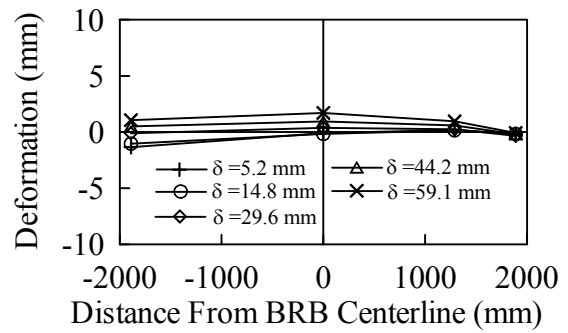


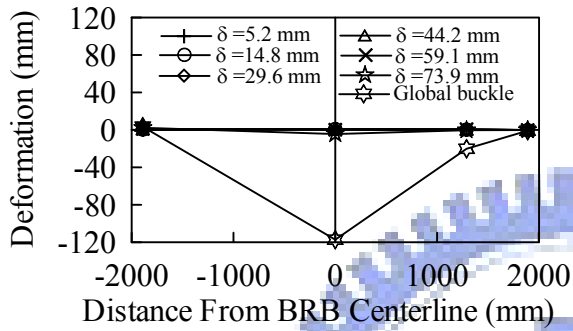
圖 3.23 平面內中點垂直變位與核心應變關係



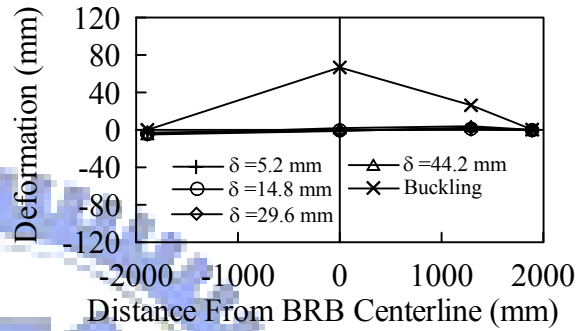
(a) Specimen 1



(b) Specimen 2

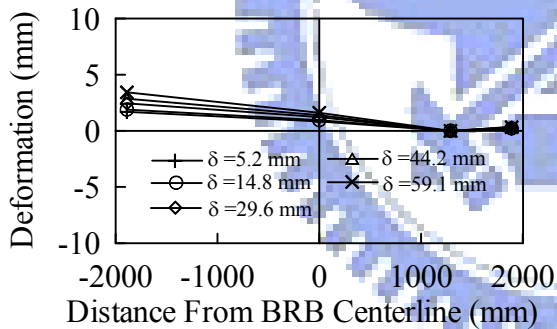


(c) Specimen 3

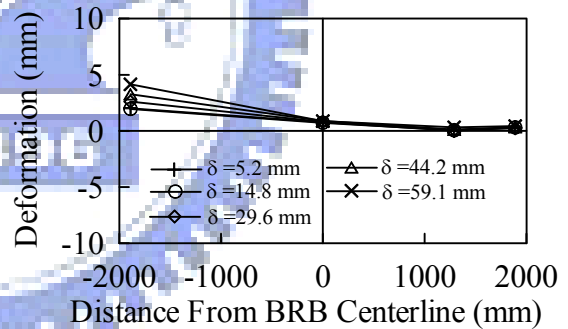


(d) Specimen 4

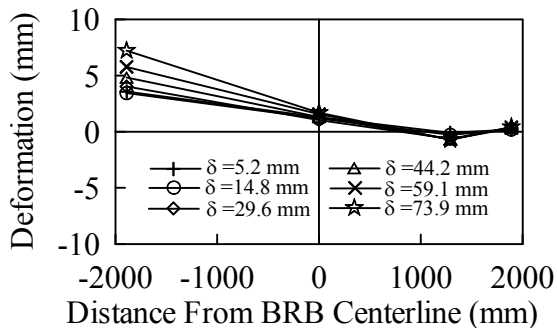
圖 3. 24 BRB 受軸壓下面外變形沿試體軸向分佈關係



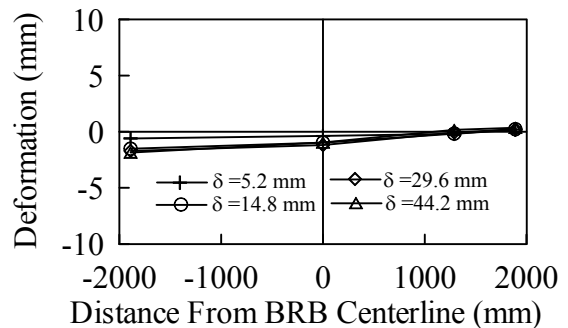
(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



(c) Specimen 3



(d) Specimen 4

圖 3. 25 BRB 受軸拉下面外變形沿試體軸向分佈關係

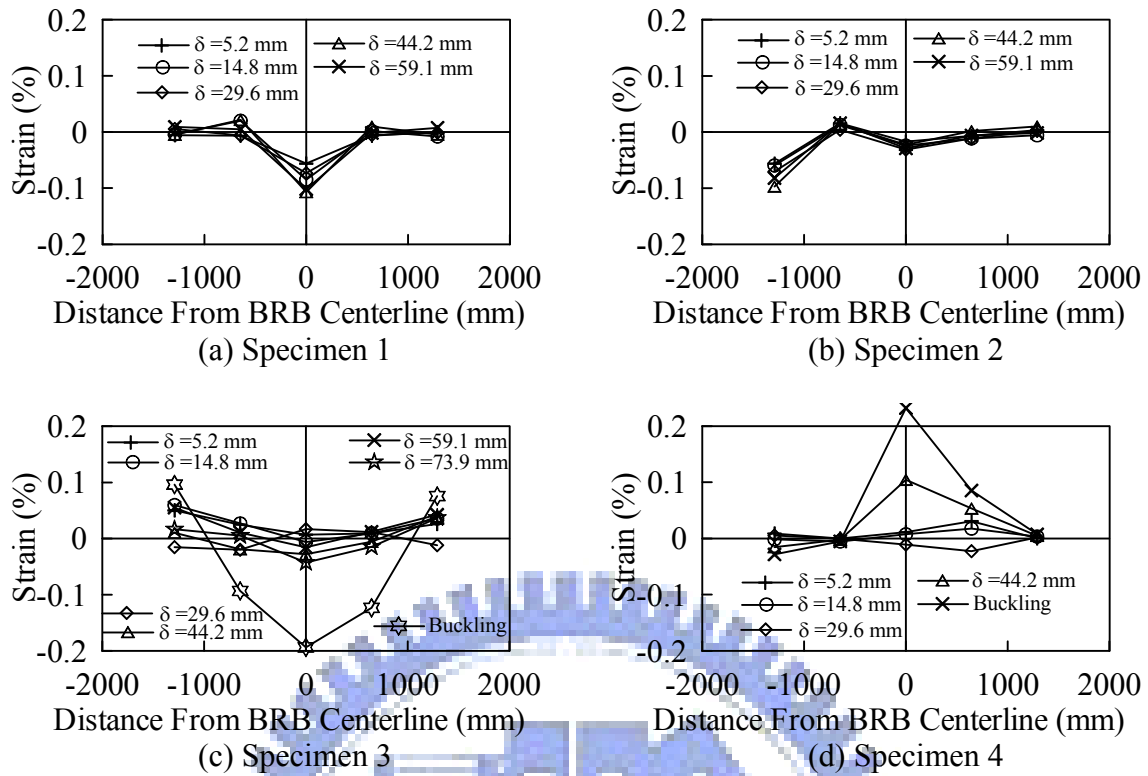


圖 3.26 BRB 軸壓下圍束單元應變沿試體軸向分布關係

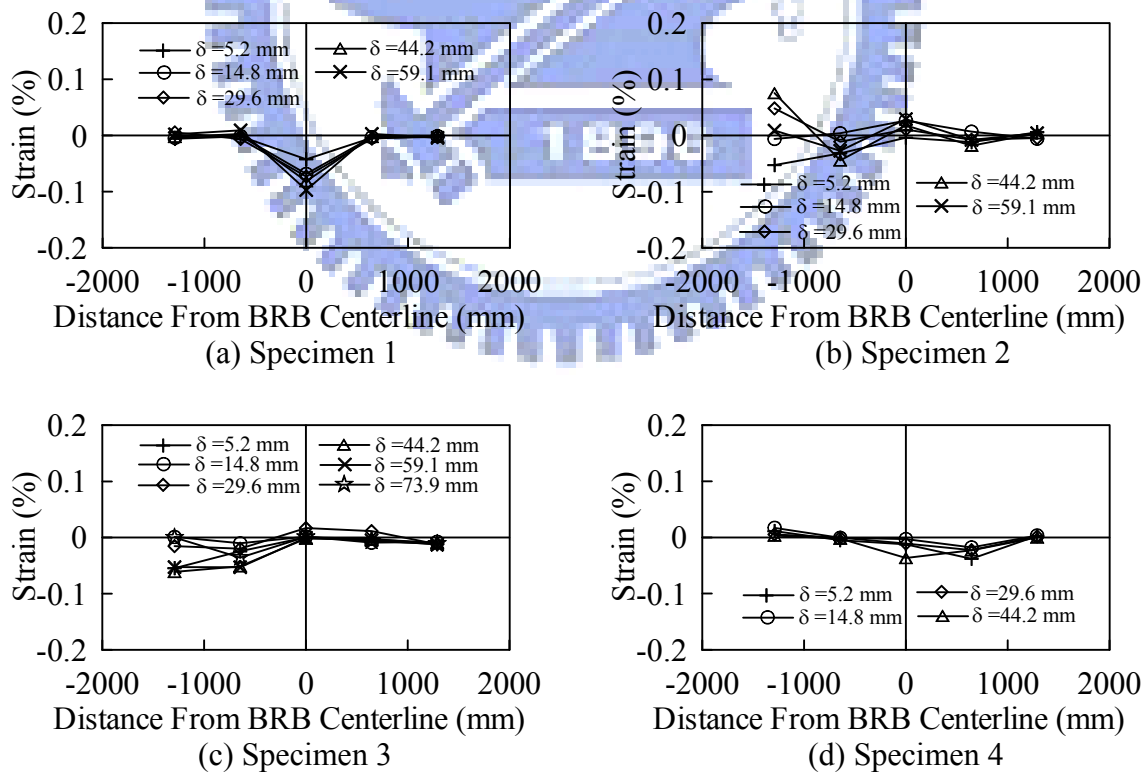
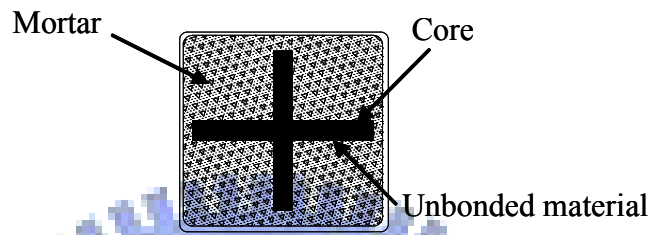
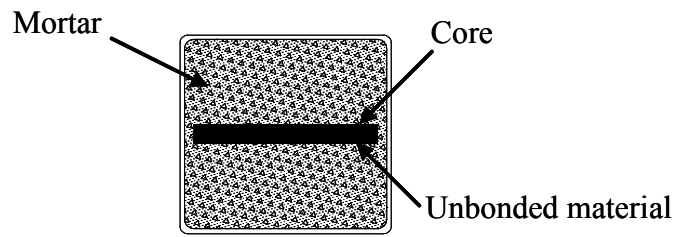
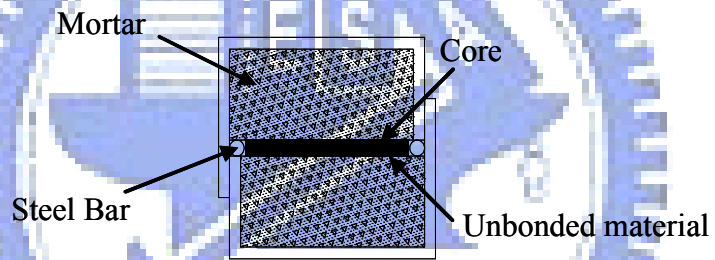


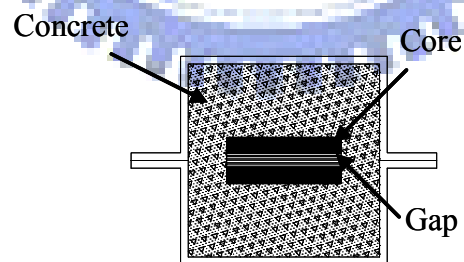
圖 3.27 BRB 受軸拉下圍束單元應變沿試體軸向分布關係



(a) Black et al. (2004)

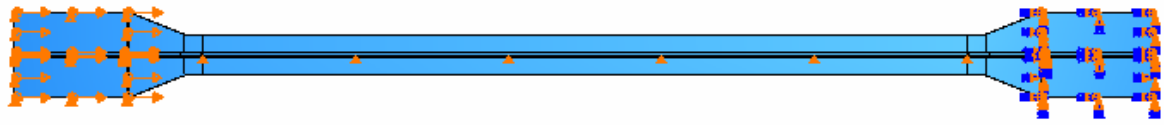


(b) Iwata et al. (2004)

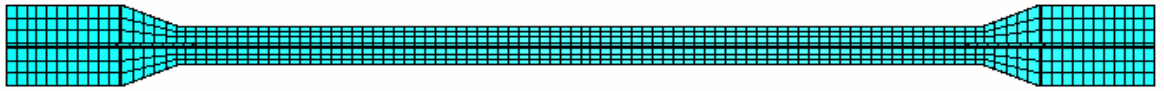


(c) Tasi et al. (2006)

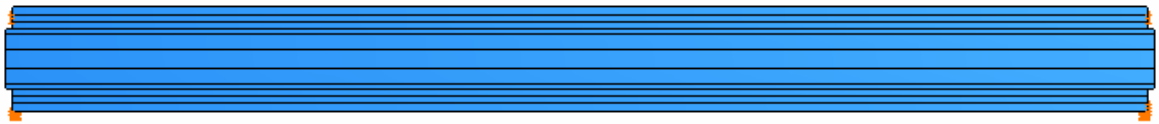
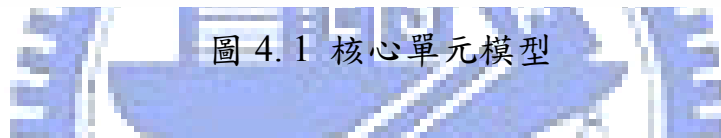
圖 3.28 各試體剖面圖



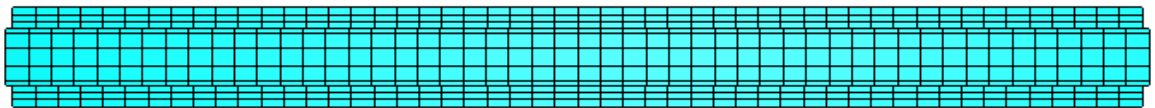
(a) Part



(b) Mesh



(a) Part



(b) Mesh



圖 4.2 圍束單元模型

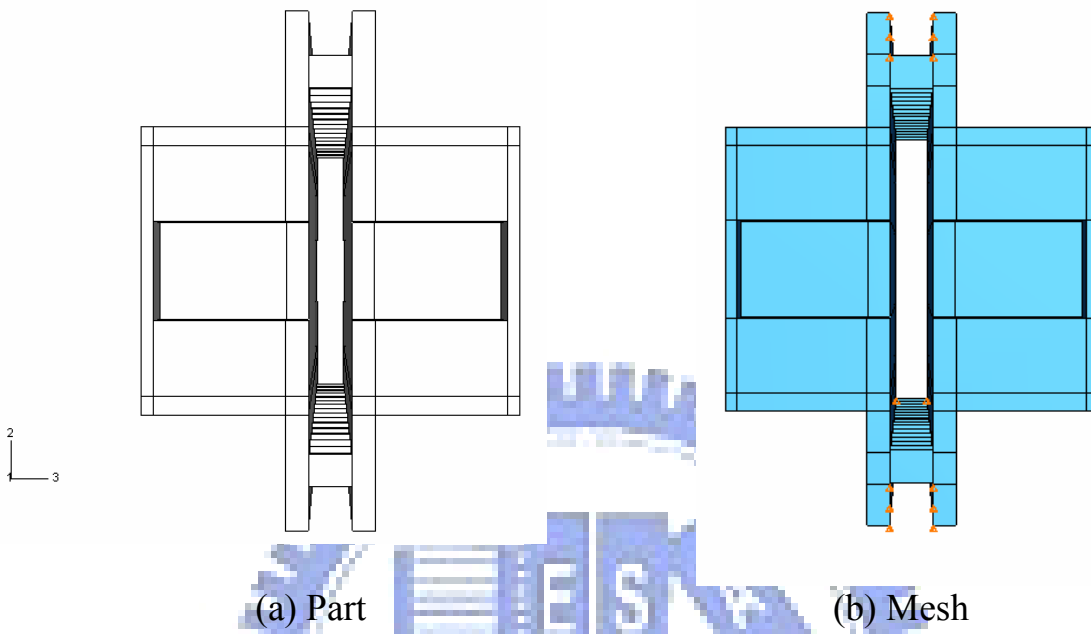


圖 4.3 螺栓模擬情形



圖 4.4 墊板模型

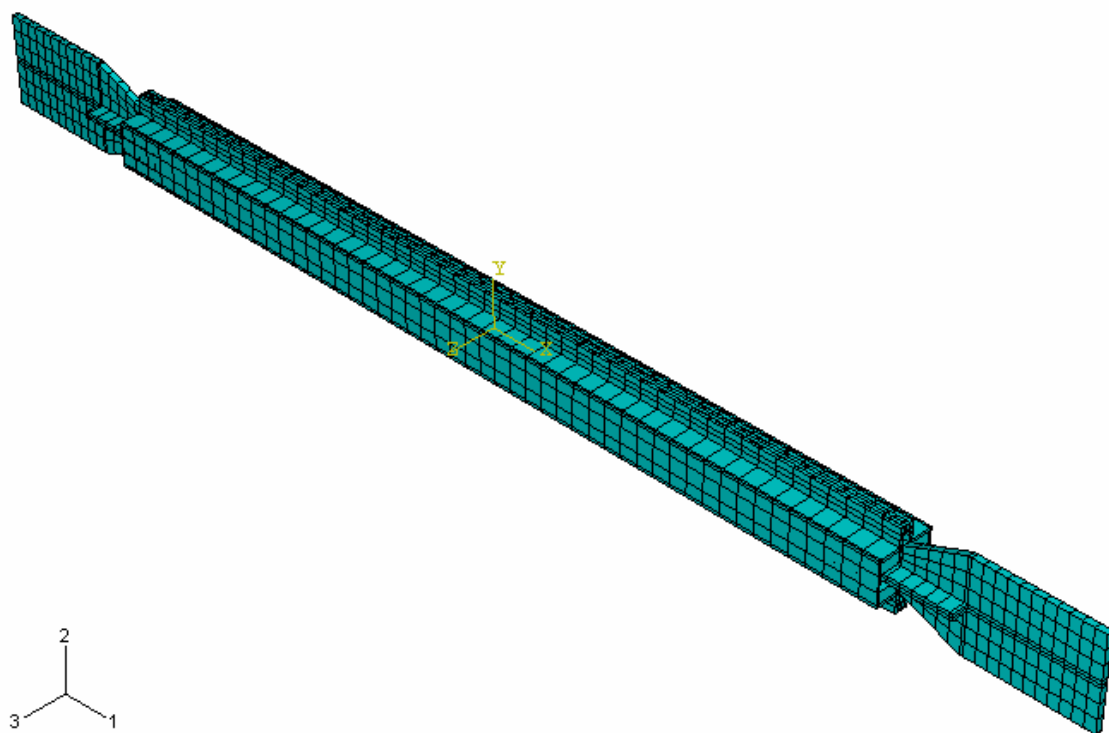


圖 4.5 試體模型整體圖

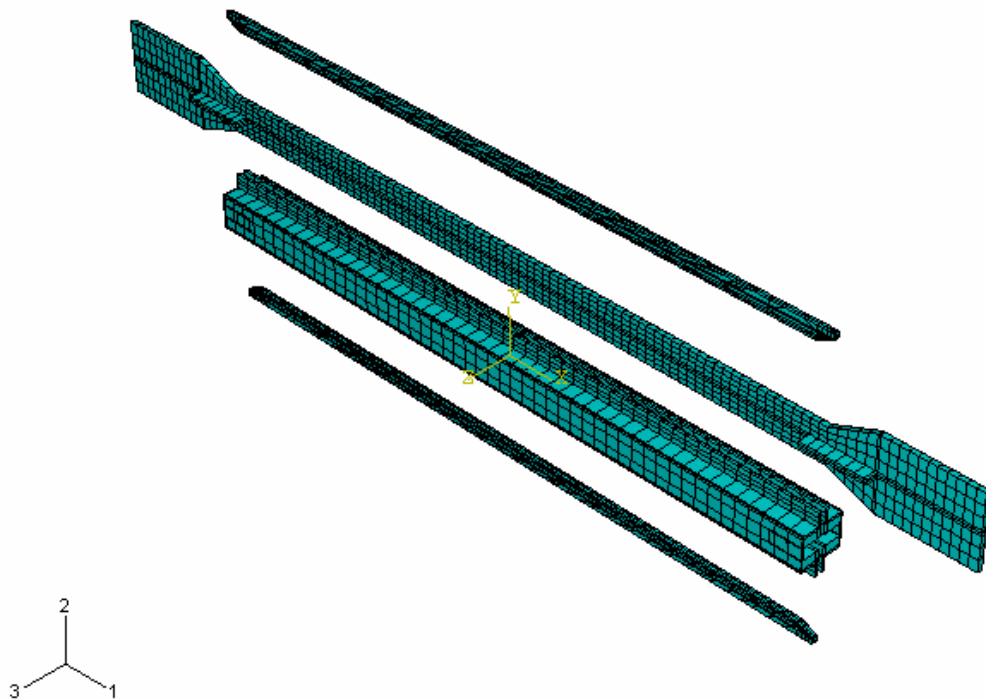


圖 4.6 試體模型分解圖

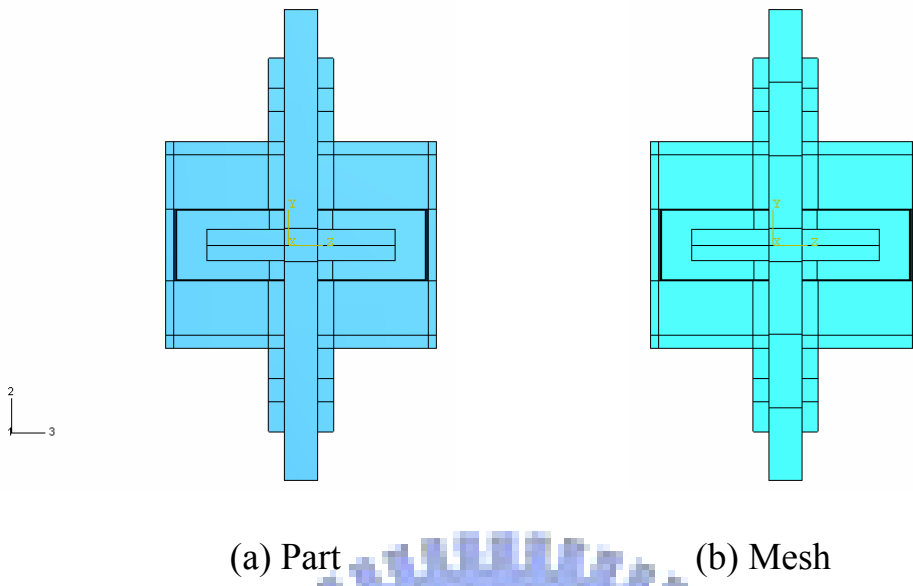


圖 4.7 試體整體剖面圖

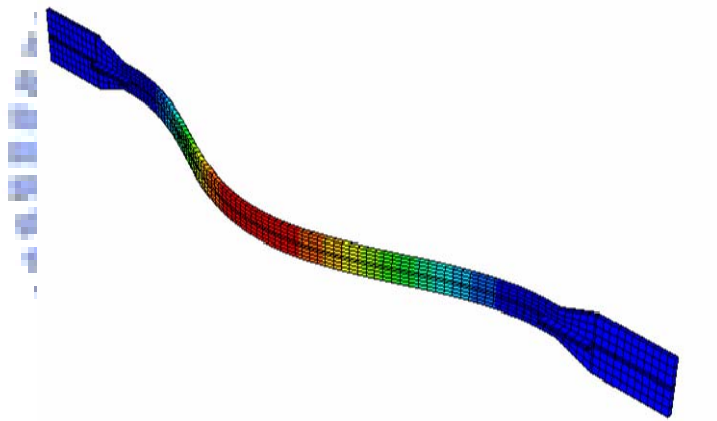


圖 4.8 試體第一挫屈模態

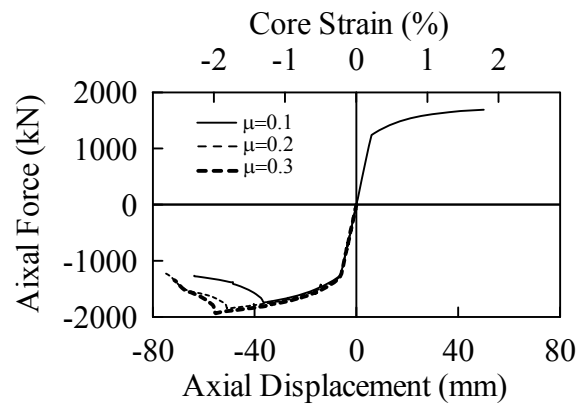


圖 4.9 摩擦係數對整體挫屈力之影響(試體 4)

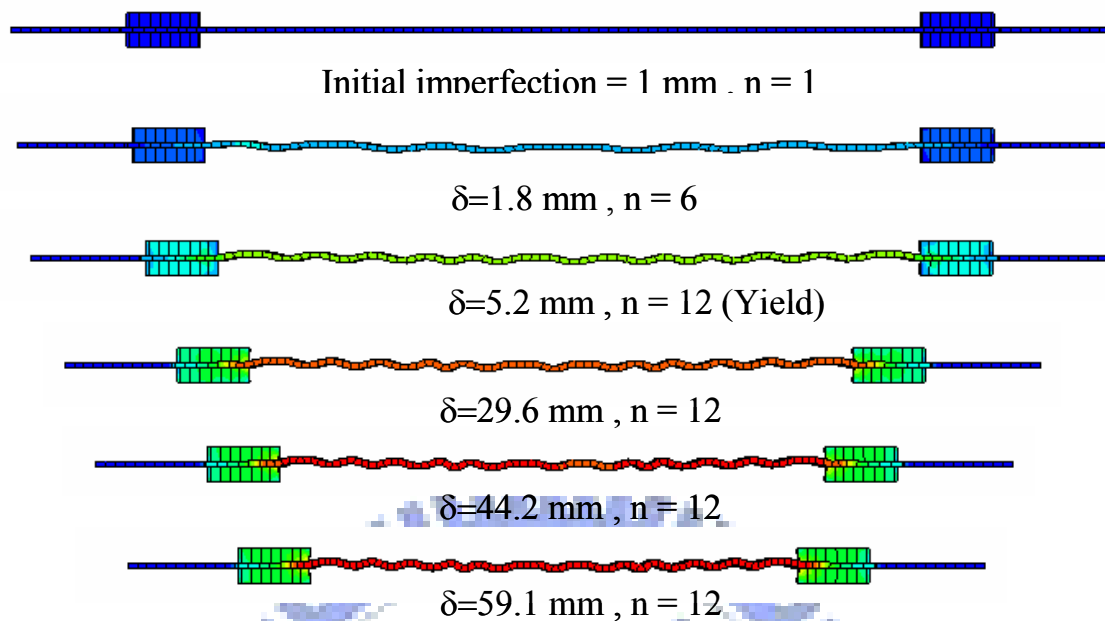


圖 4.10 試體 1 核心單元在每階段加載歷時下之挫屈模態數(Scale=10)

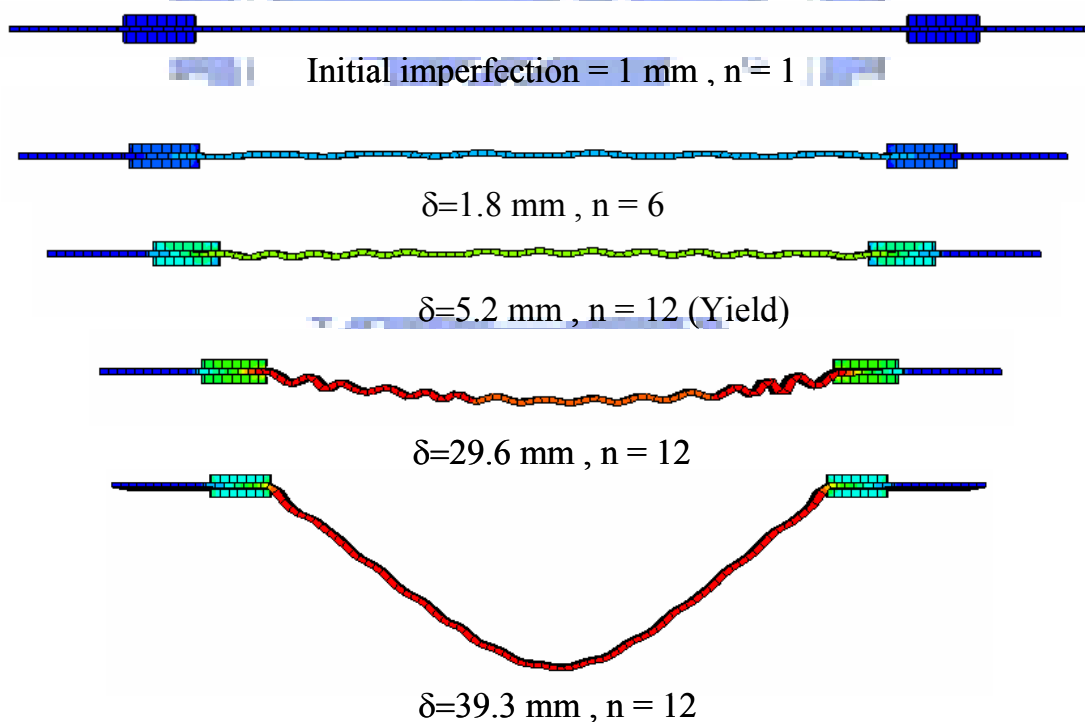
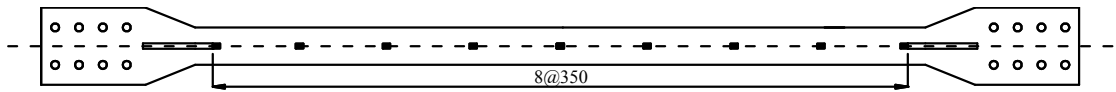
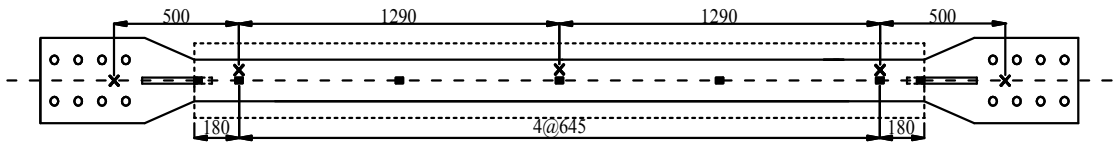


圖 4.11 試體 4 核心單元在每階段加載歷時下之挫屈模態數(Scale=10)



Core Member



■ Strain gauge location
 × Displacement transducer location

Restrained Member

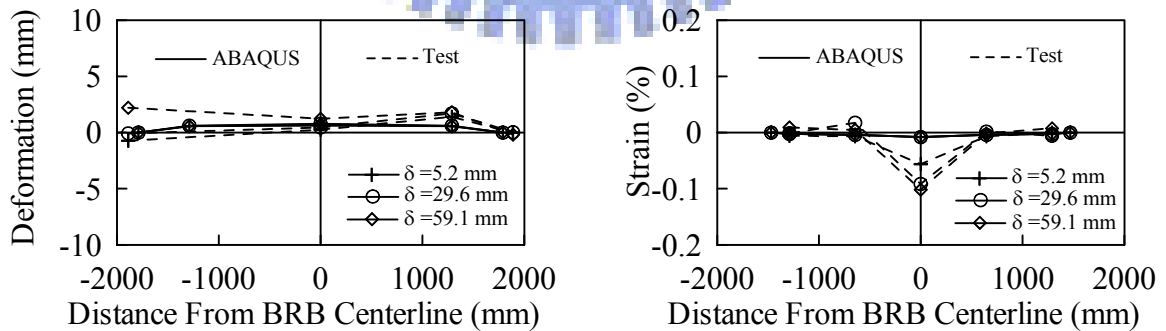
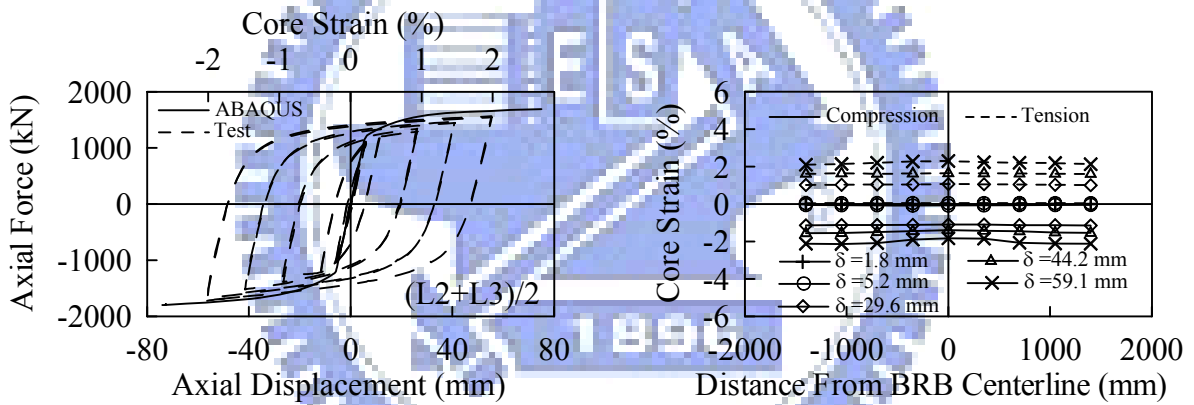
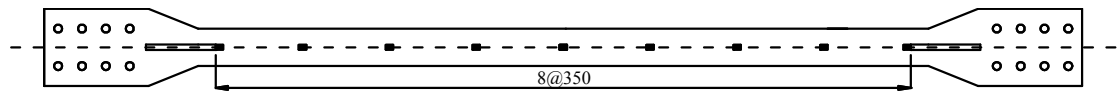
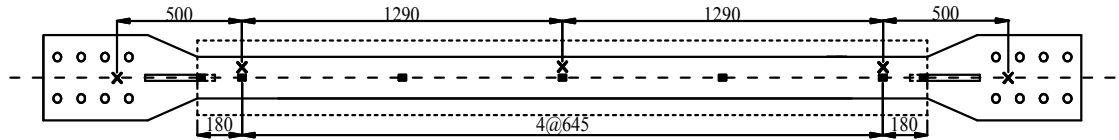


圖 4.12 試體 1 實驗與分析結果比較



Core Member



- Strain gauge location
- ✕ Displacement transducer location

Restrained Member

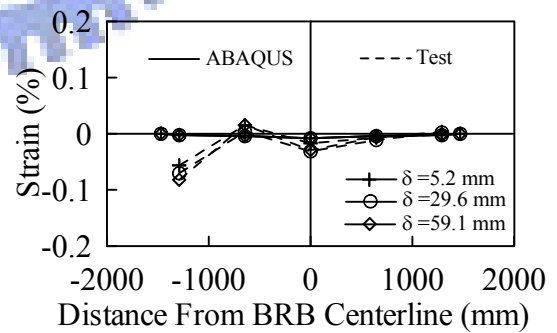
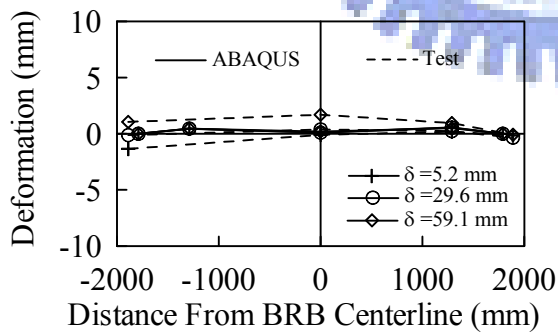
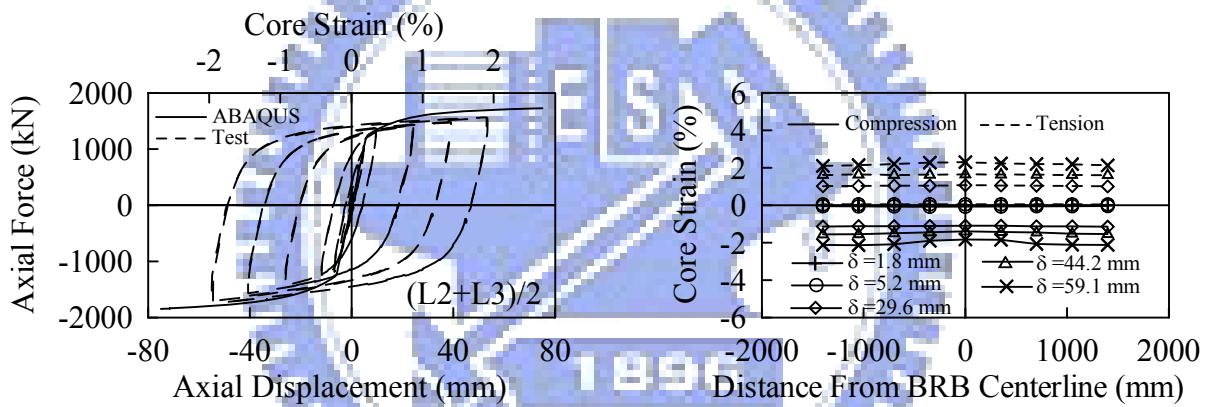
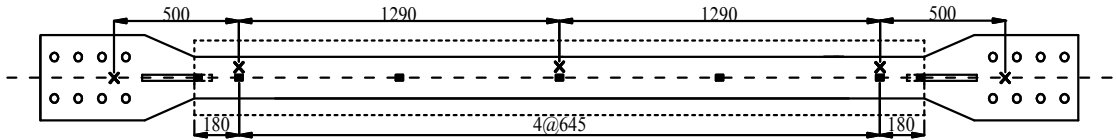


圖 4.13 試體 2 實驗與分析結果比較



Core Member



- Strain gauge location
- ✕ Displacement transducer location

Restrained Member

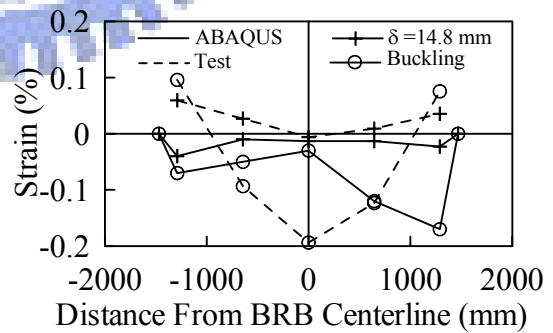
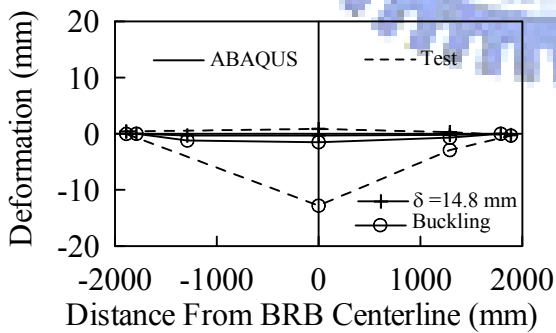
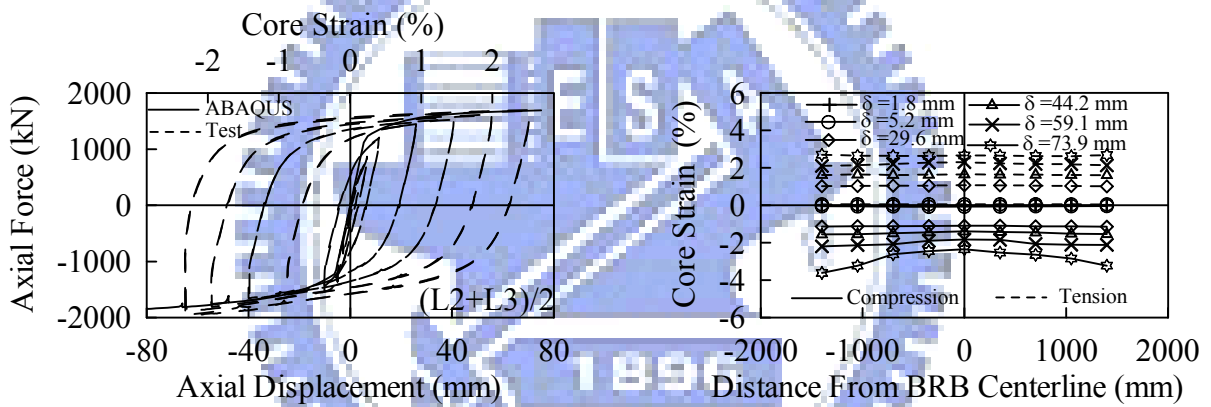
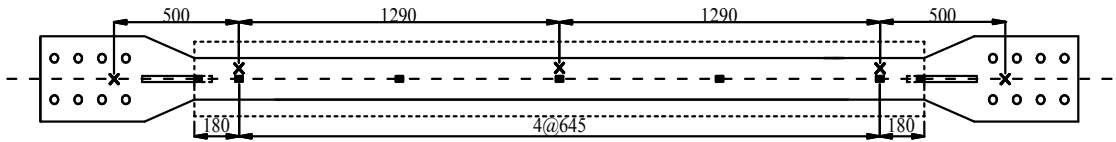


圖 4.14 試體 3 實驗與分析結果比較



Core Member



■ Strain gauge location
 ✕ Displacement transducer location

Restrained Member

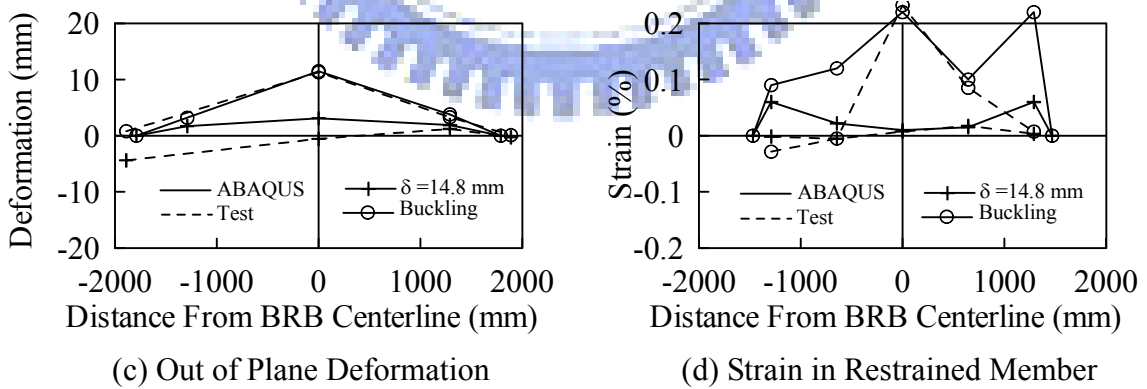
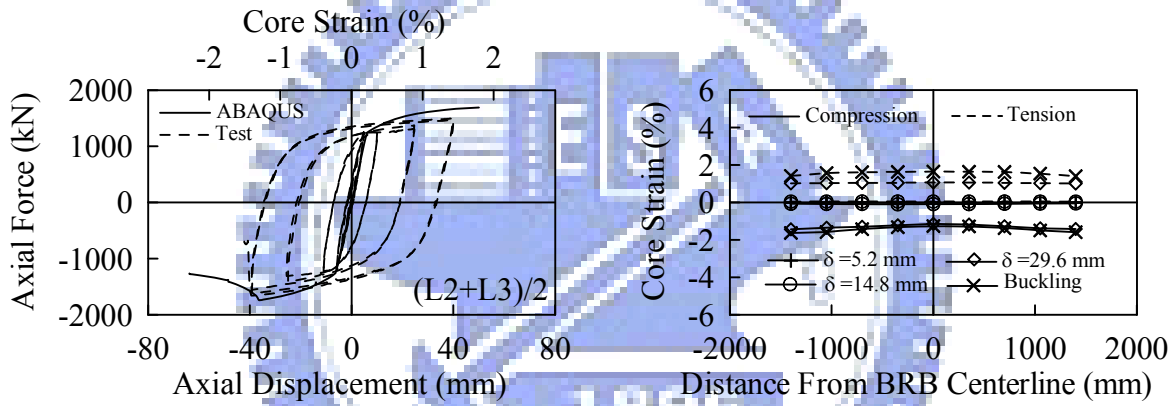


圖 4.15 試體 4 實驗與分析結果比較

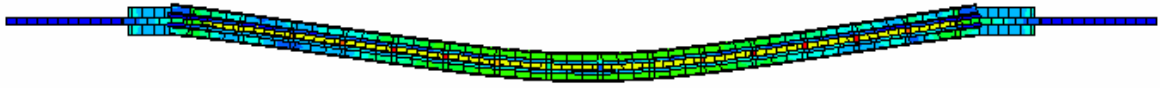


圖 4.16 分析模型產生整體挫屈現象(試體 4, Scale=10)

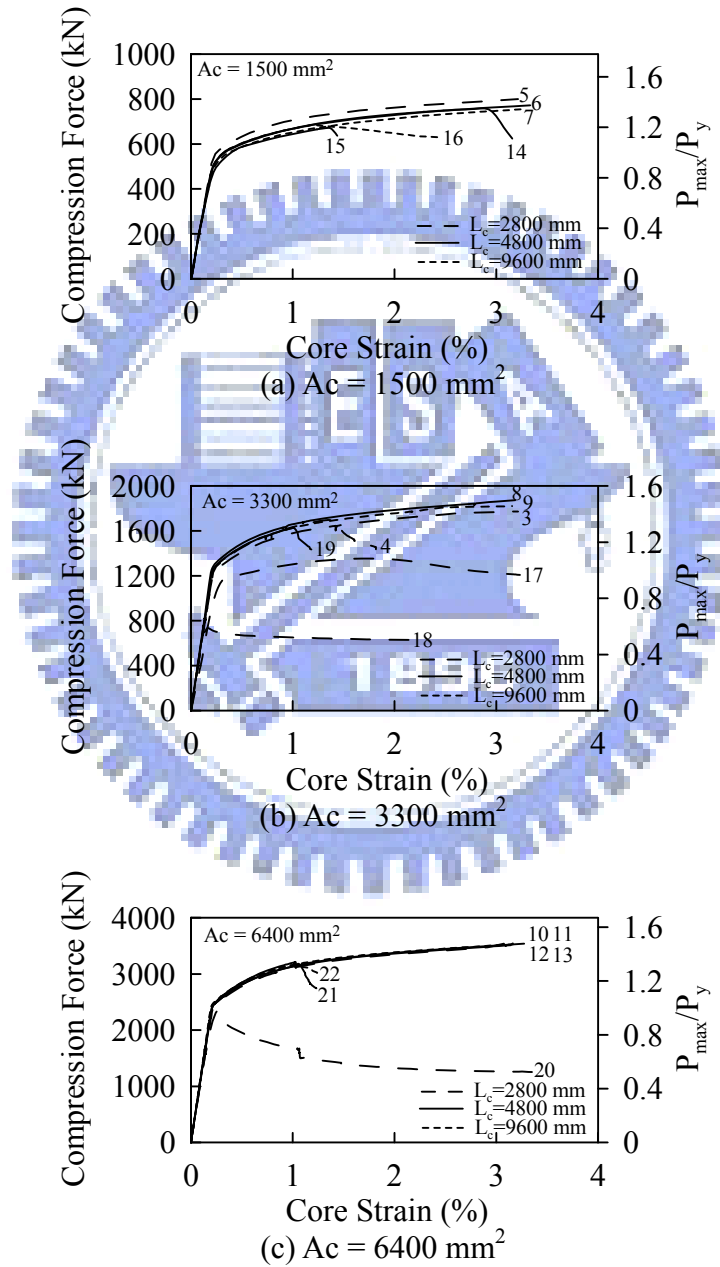


圖 4.17 試體 3、試體 4 及 18 組模型之軸向力量與軸向應變關係圖

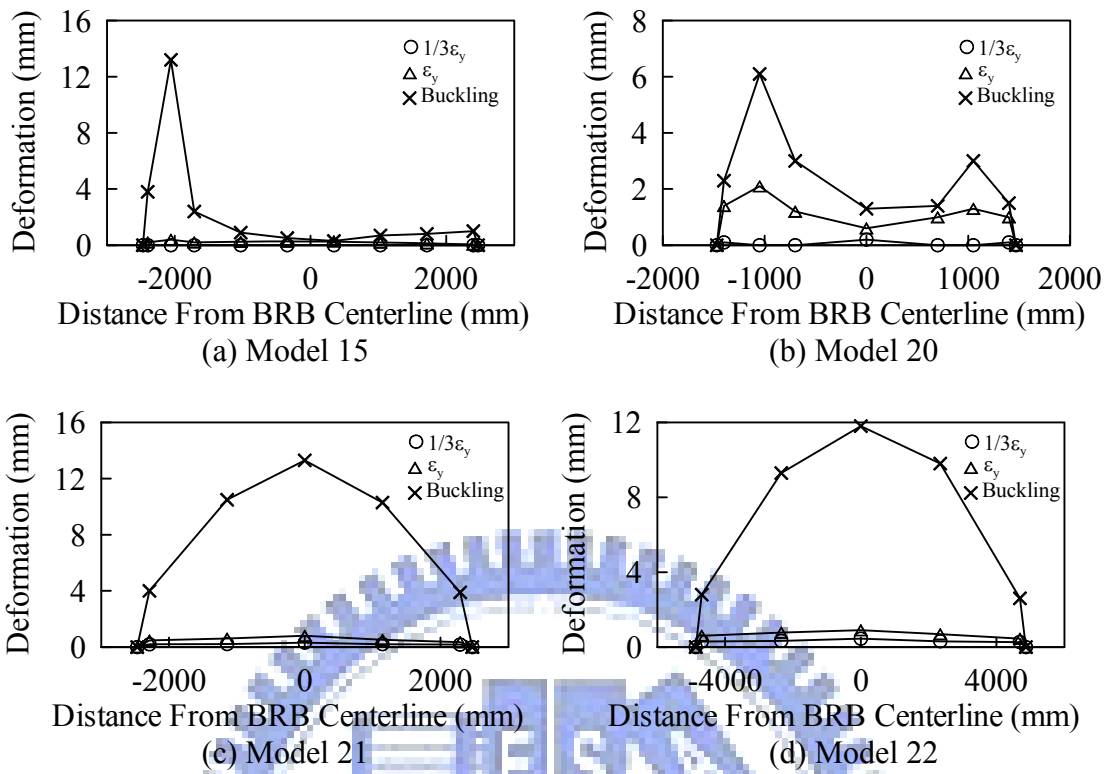


圖 4.18 四組模型受軸壓下面外變形沿試體軸向分布關係

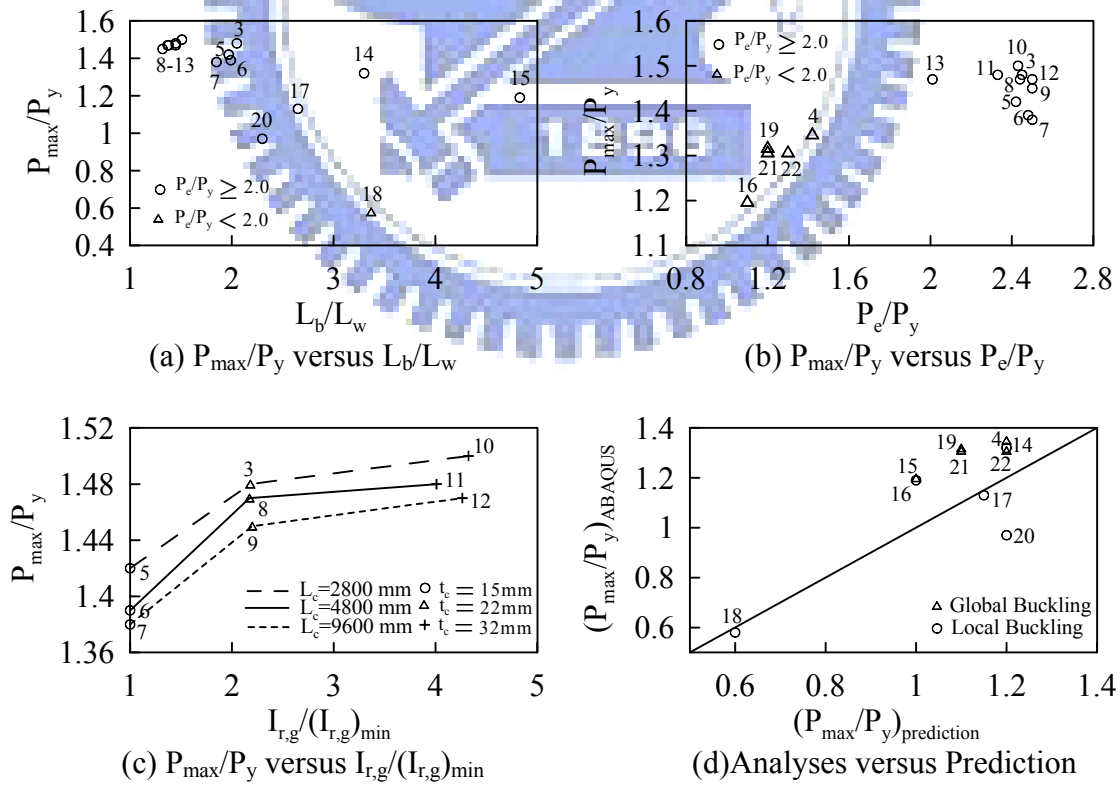


圖 4.19 分析結果比較圖



照片 3.1 核心單元



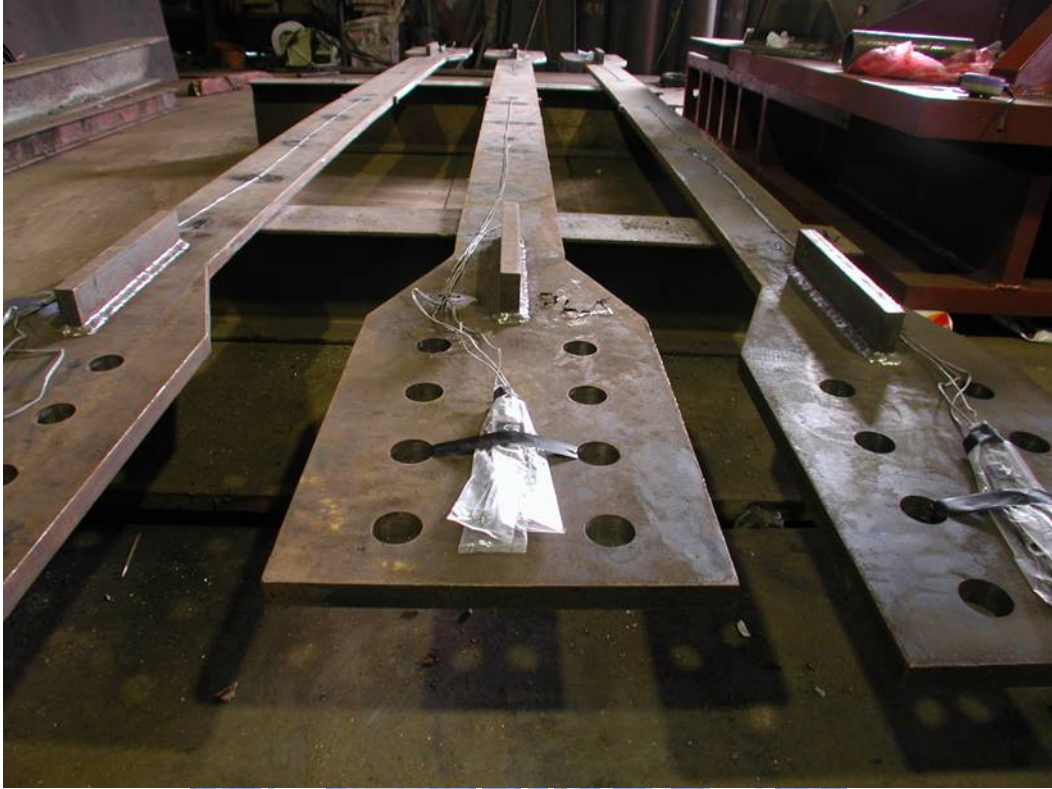
照片 3.2 圍束構件



照片 3.3 置入整平機整平



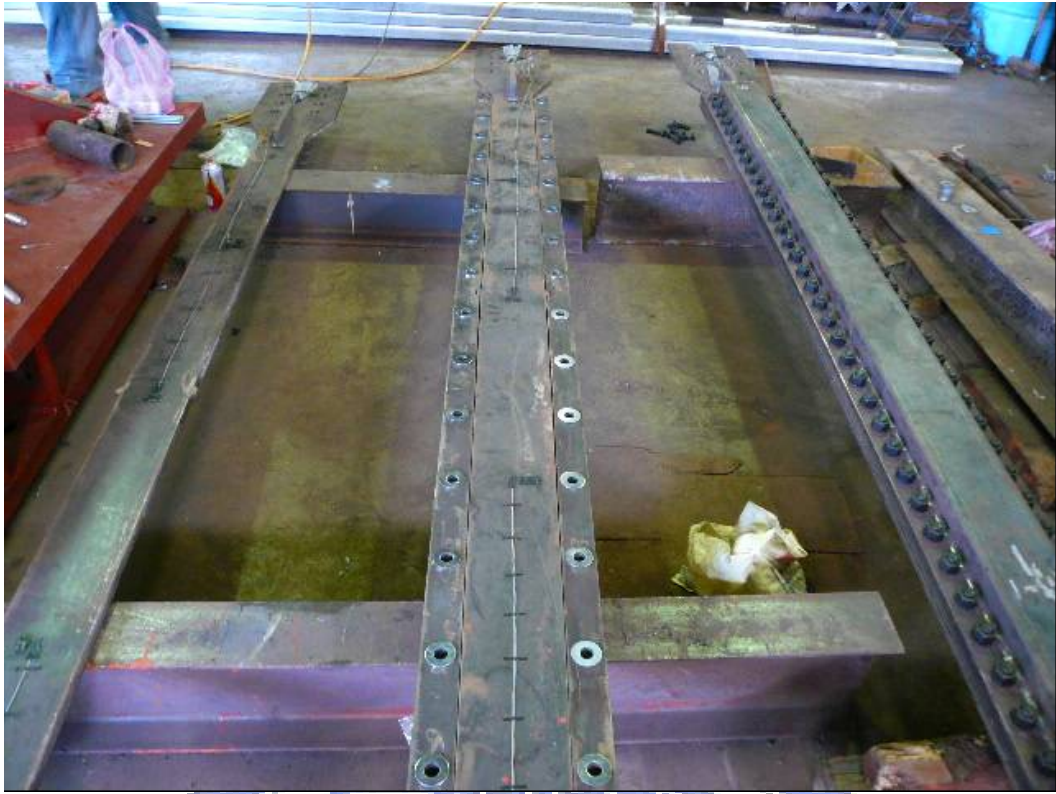
照片 3.4 圍束構件假組裝



照片 3.5 核心單元應變計



照片 3.6 1 mm 薄板



照片 3.7 圍束構件置入核心單元、墊板與 2-3 mm 墊片



照片 3.8 放上另一組圍束構件



照片 3.9 扭力扳手將螺栓鎖至預緊軸力



照片 3.10 試體組裝完成



照片 3.11 圍束構件中點與端部相對位置量測方式



照片 3.12 長槽形鋼構件點焊於面板



照片 3.13 2-3 mm 之長形薄板



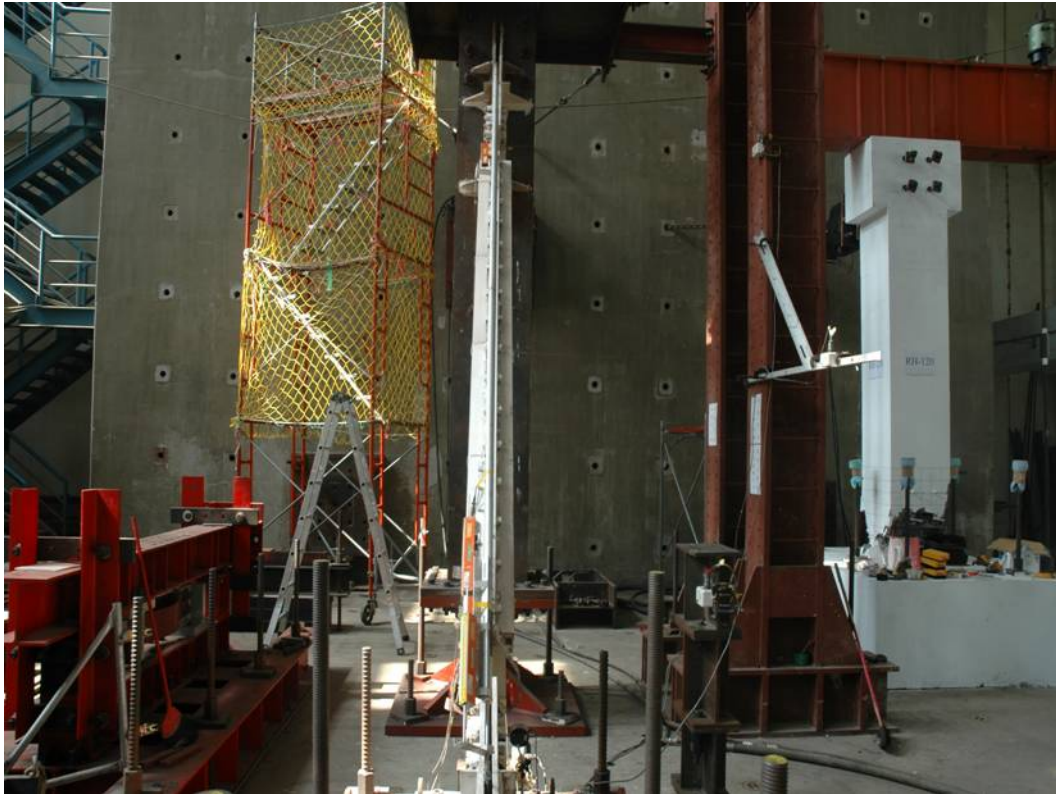
照片 3.14 墊板



照片 3.15 圍束構件內部澆置無收縮水泥砂漿



照片 3.16 試體 1 試驗前全景(正視)



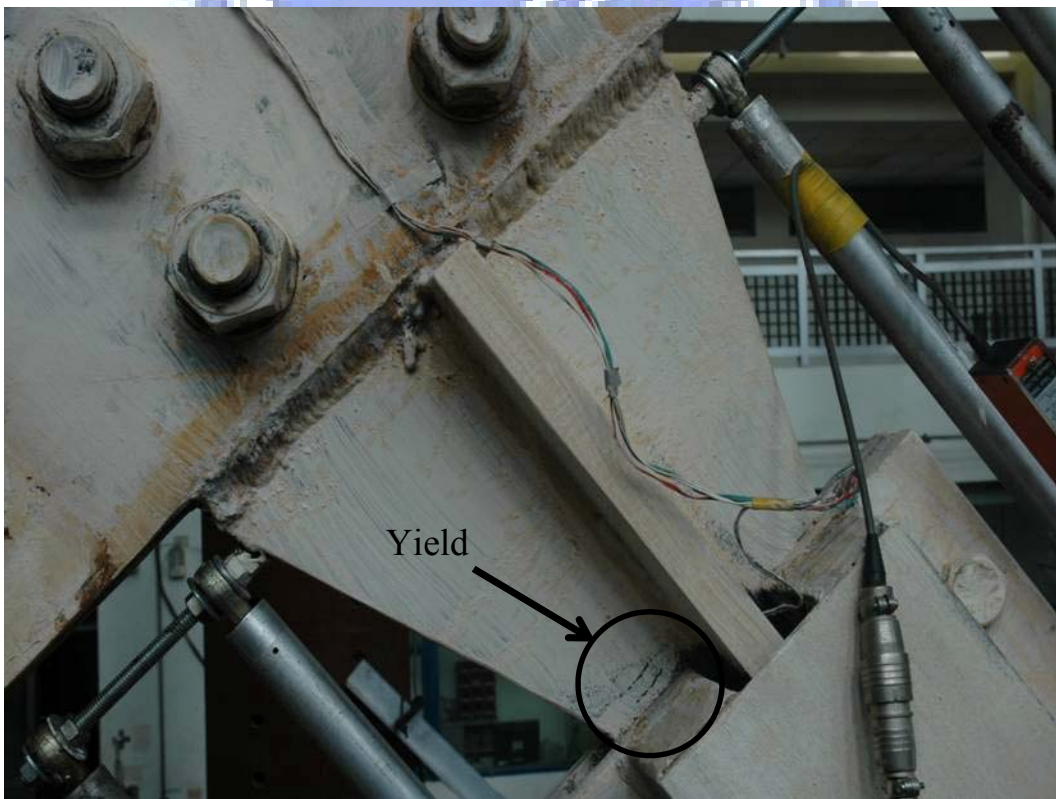
照片 3.17 試體 1 試驗前全景(側視)



照片 3.18 接合段與接合板採用螺栓接合



照片 3.19 焊道補強情形



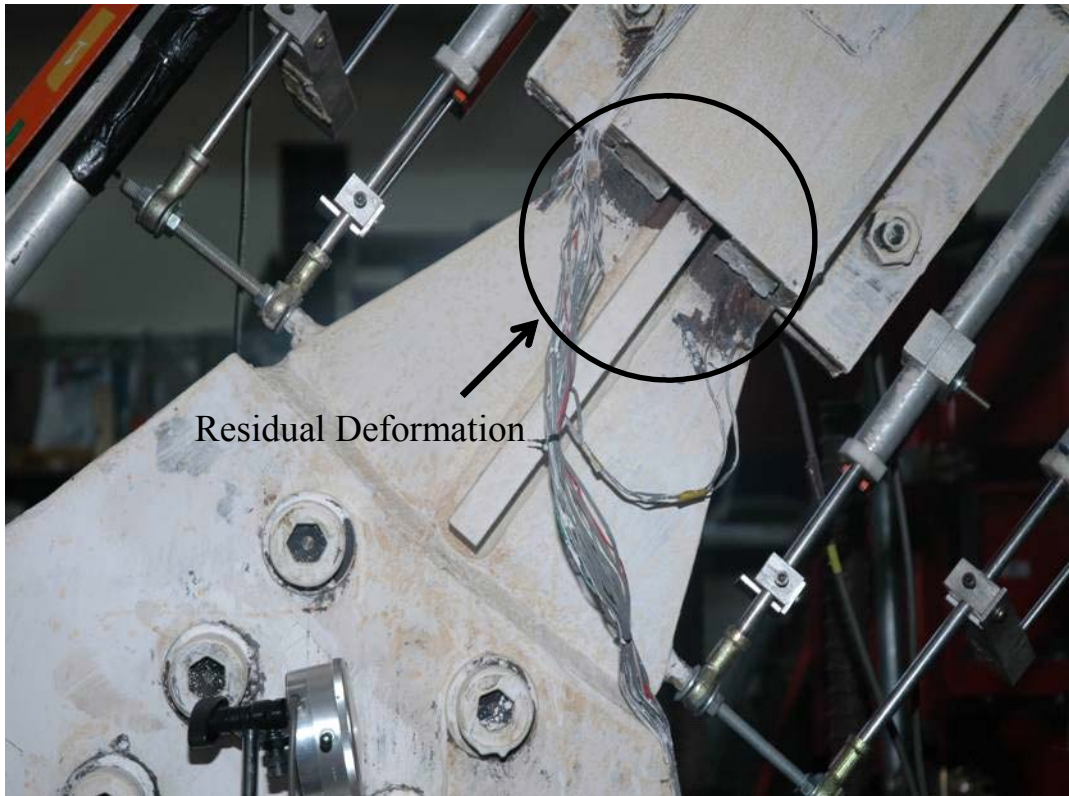
照片 3.20 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad)



照片 3.21 量測試體兩端殘餘變形量示意圖



照片 3.22 量測核心單元與面板間之淨距示意圖



照片 3.23 試體 1 下端殘餘變形($\alpha=0.024$ rad)



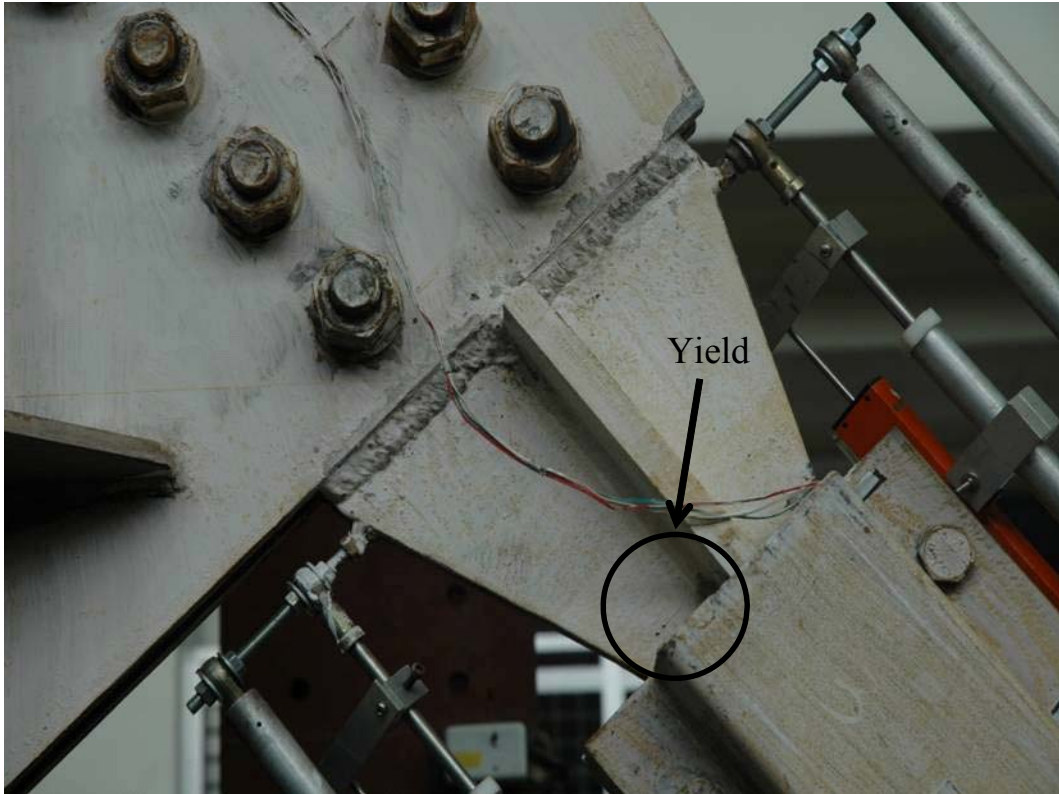
照片 3.24 試體 1 核心單元斷裂



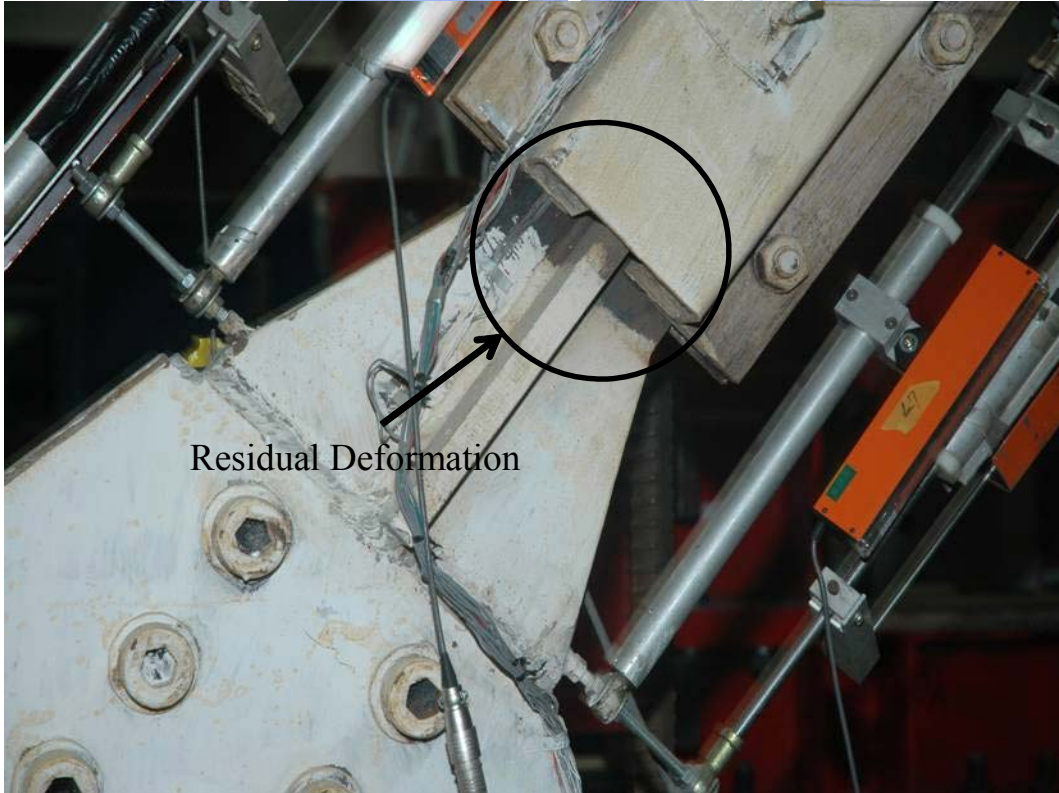
照片 3.25 試體 2 試驗前全景(正視)



照片 3.26 試體 2 試驗前全景(側視)



照片 3.27 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad)



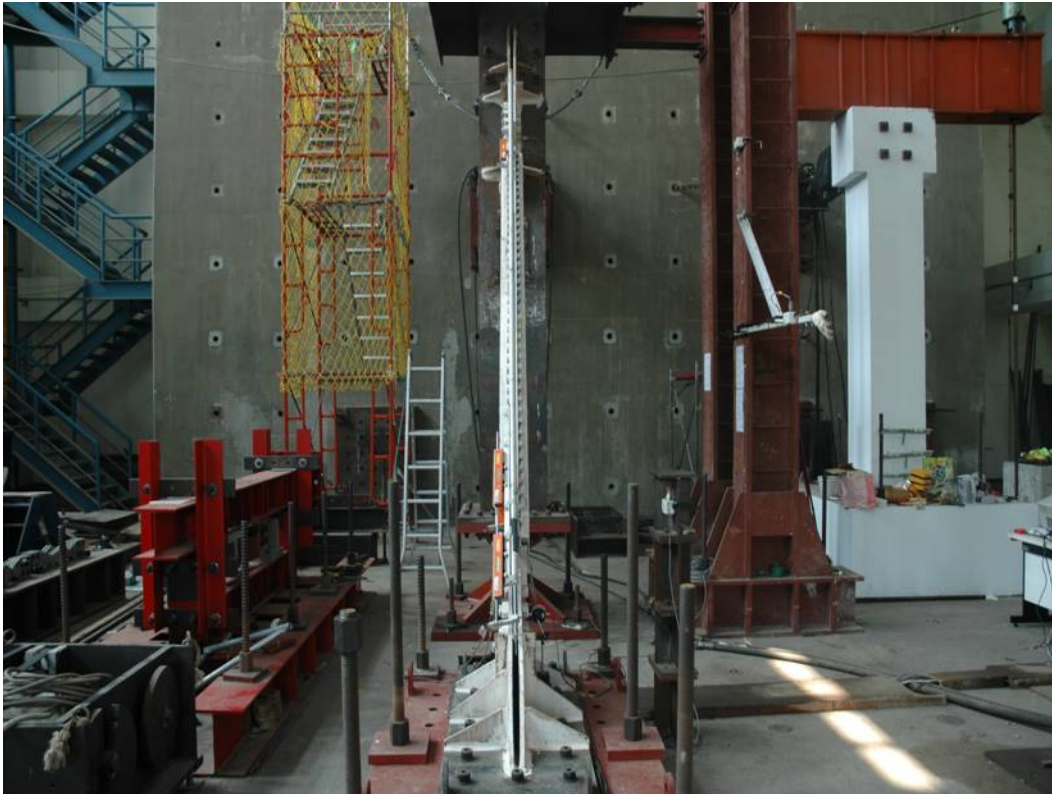
照片 3.28 試體 2 下端殘餘變形($\alpha=0.024$ rad)



照片 3.29 試體 2 核心單元斷裂



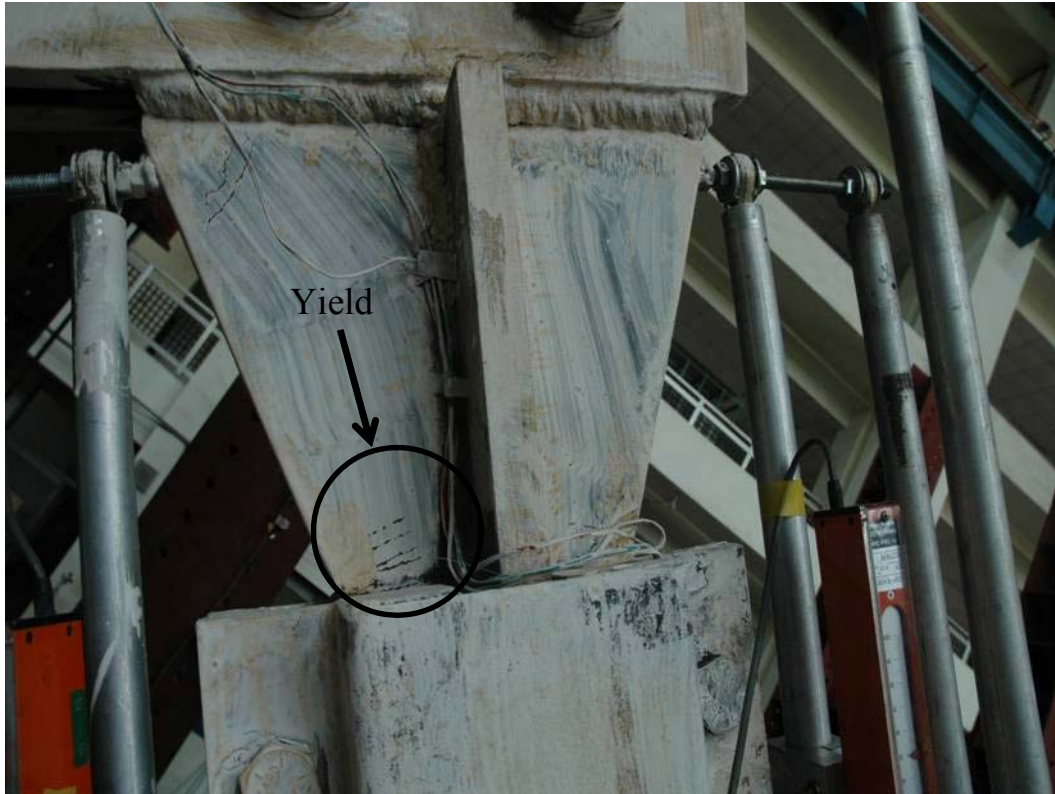
照片 3.30 試體 3 試驗前全景(正視)



照片 3.31 試體 3 試驗前全景(側視)



照片 3.32 試體 3 螺栓 80 顆(第一次試驗)



照片 3.33 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad)



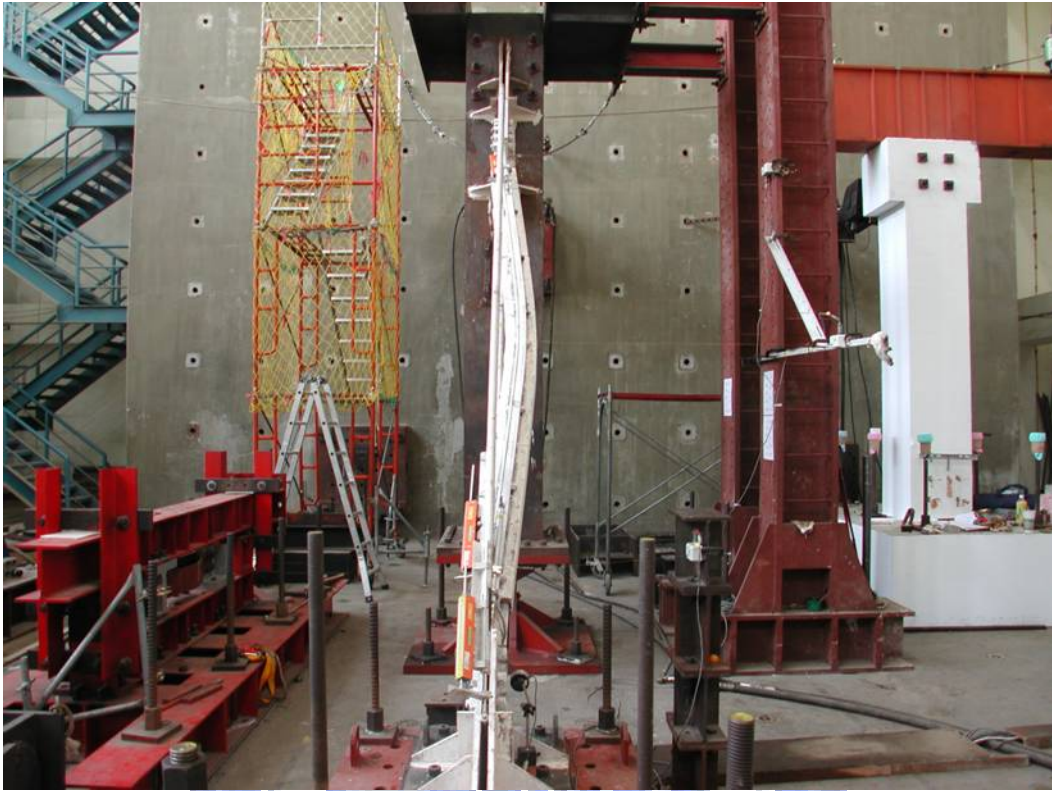
照片 3.34 試體 3 螺栓 28 顆(第二次試驗)



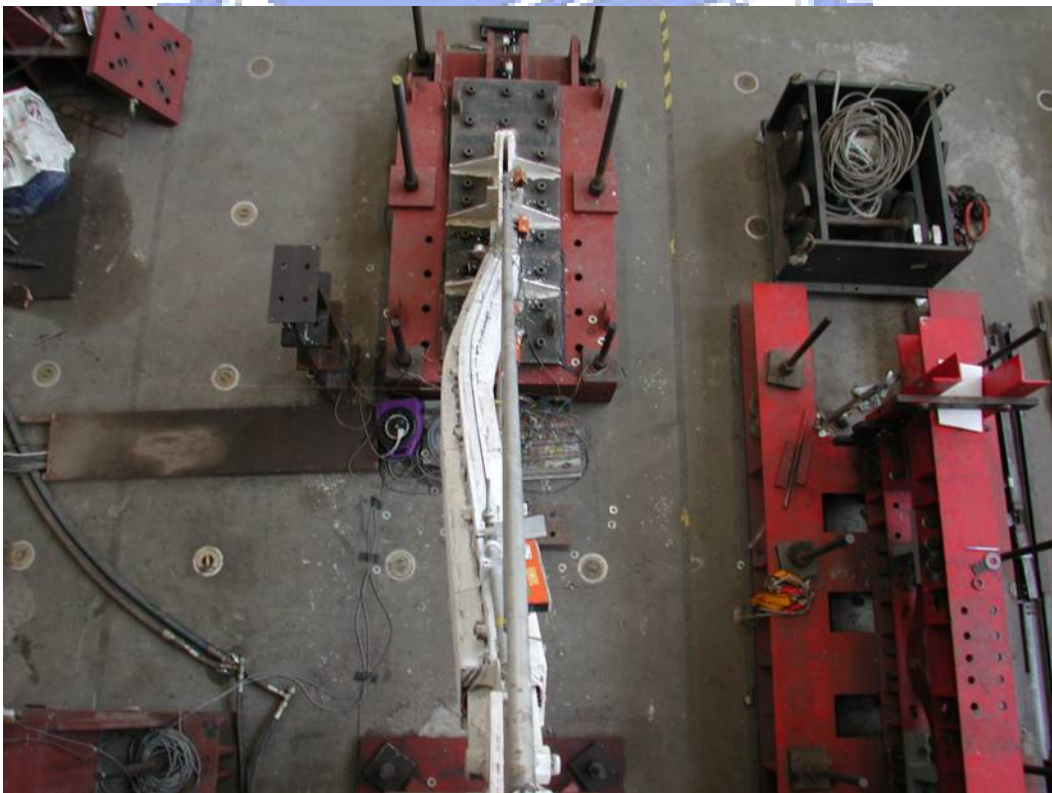
照片 3.35 試體 3 螺栓 16 顆(第三次試驗)



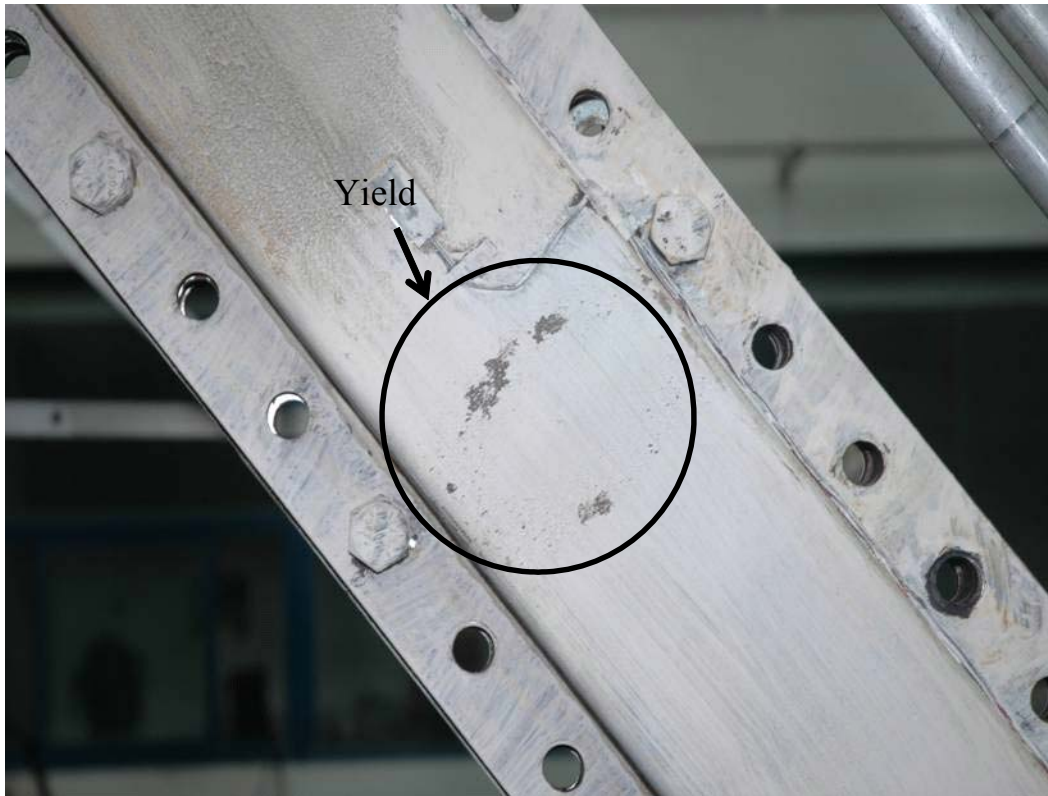
照片 3.36 試體 3 發生整體挫屈現象(正視，第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.37 試體 3 發生整體挫屈現象(側視，第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.38 試體 3 發生整體挫屈現象(上視，第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.39 試體 3 圍束單元出現降伏現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.40 試體 3 圍束單元產生面外變形(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.41 試體 3 螺栓與螺栓周圍之面板出現降伏現象(第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



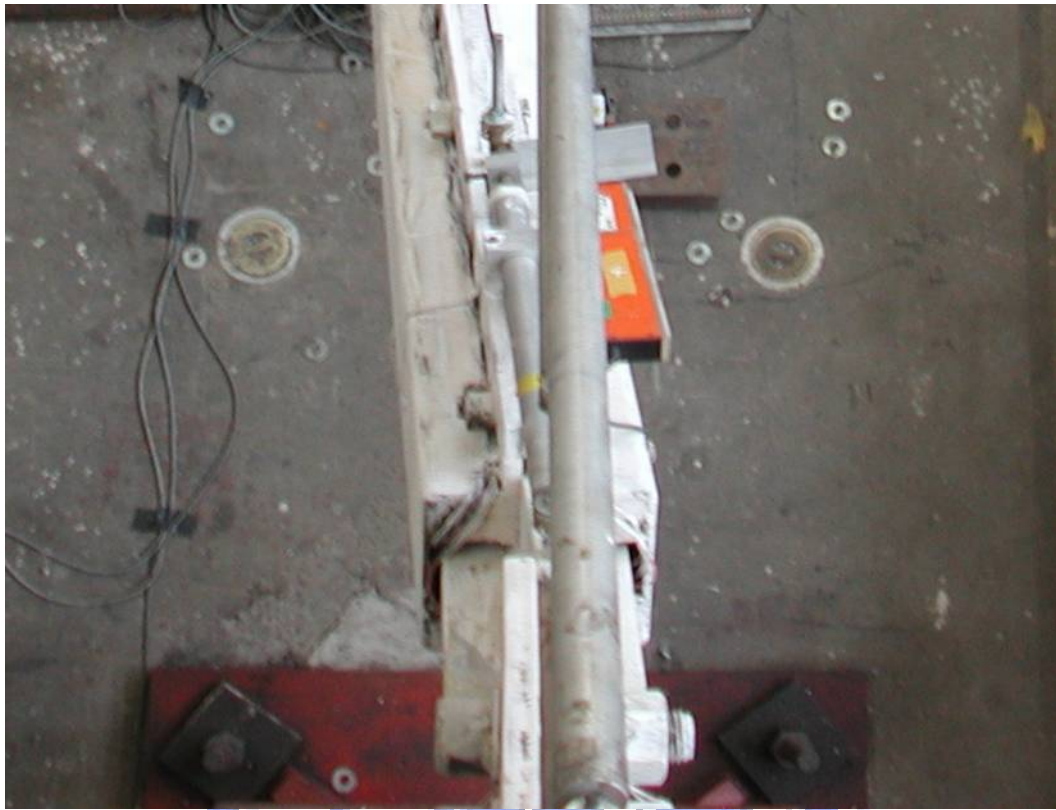
照片 3.42 試體 3 核心單元與面板間之淨距並產生相對移動(第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.43 試體 3 轉換段與接合板焊道補強處產生裂縫(第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



照片 3.44 試體 3 轉換段與接合板焊道補強處周圍出現降伏現象(第三次試驗， $\alpha=0.03$ rad)



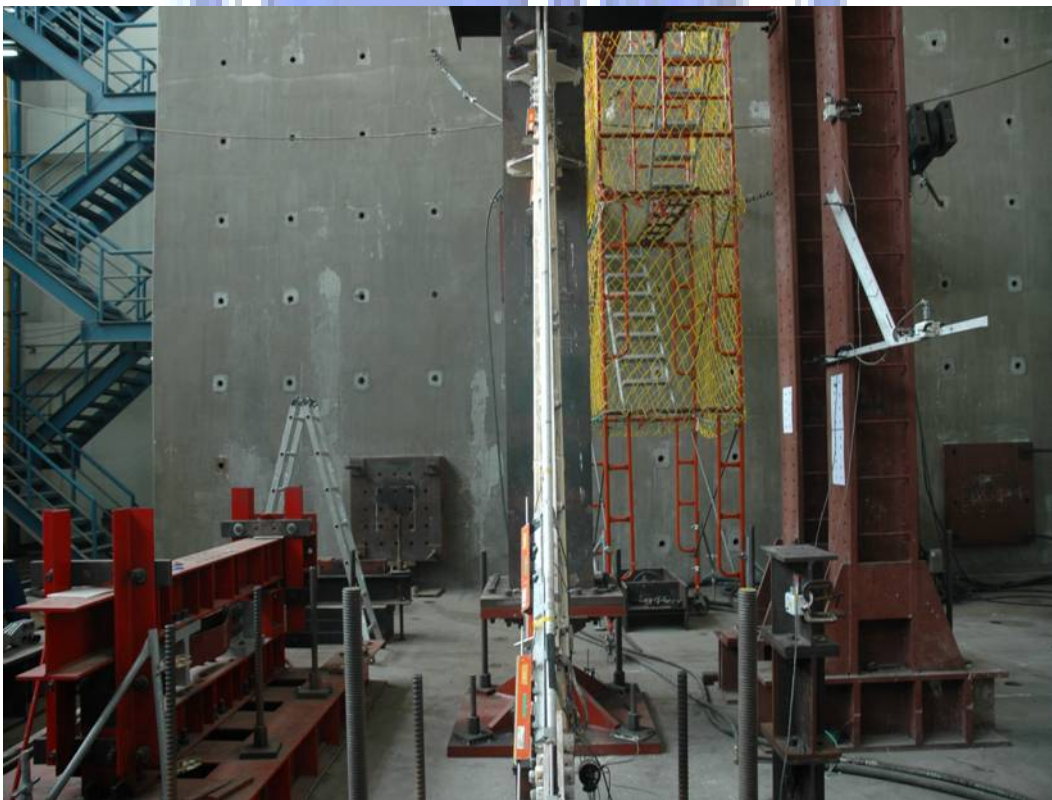
照片 3.45 試體 3 雙接合板並未產生挫屈現象(第三次試驗, $\alpha=0.03$ rad)



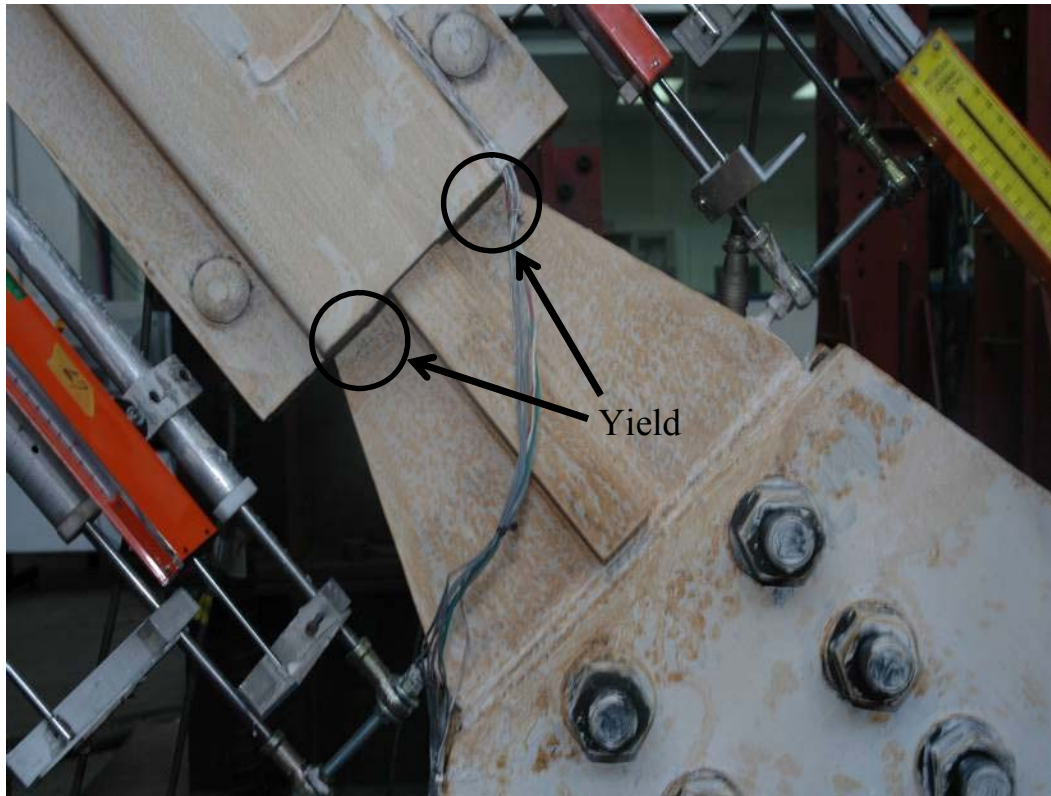
照片 3.46 試體 3 核心單元產生第一挫屈模態



照片 3.47 試體 4 試驗前全景(正視)



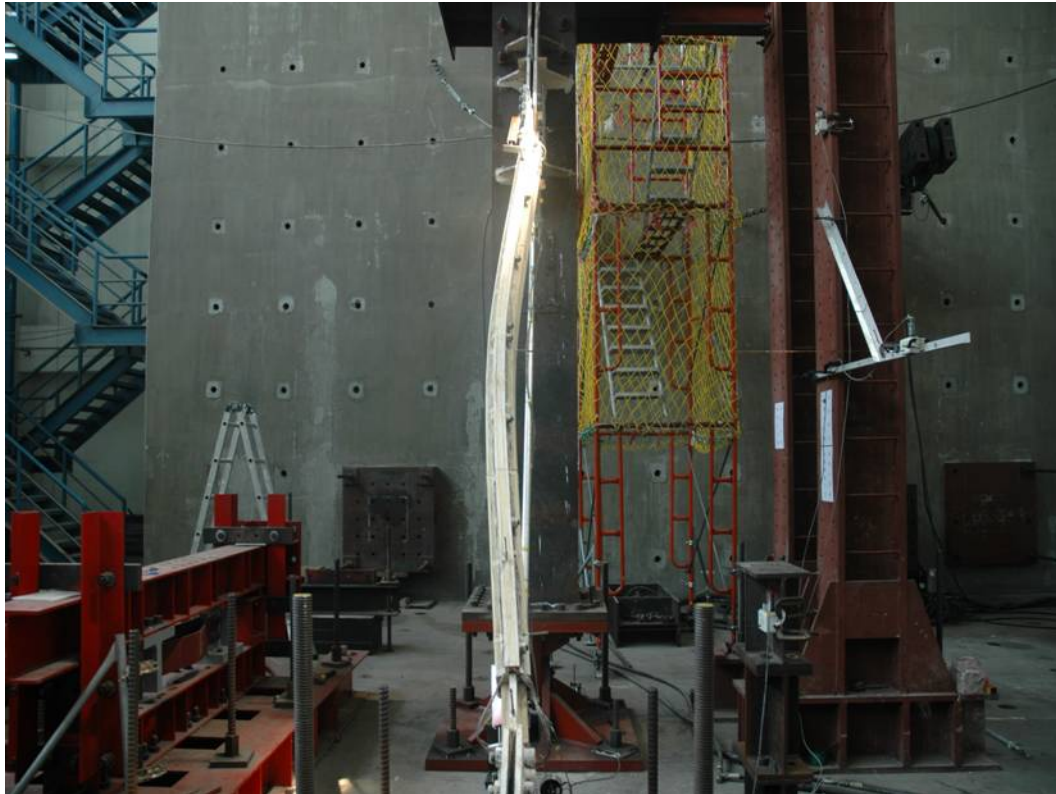
照片 3.48 試體 4 試驗前全景(側視)



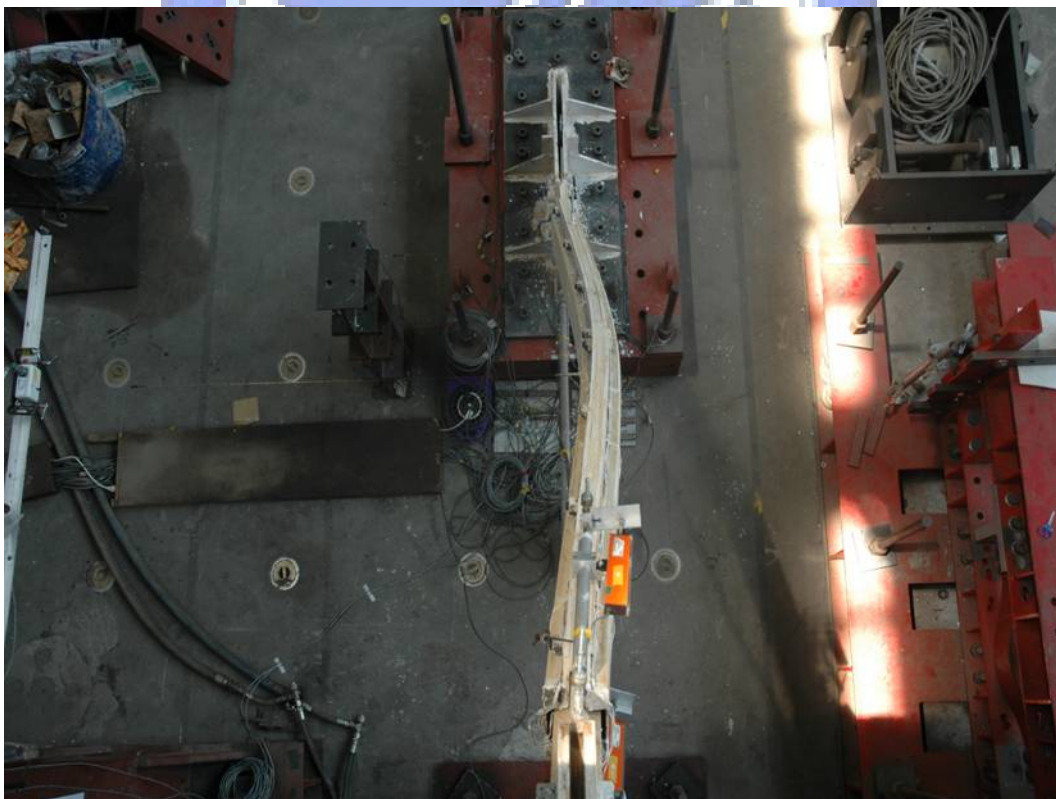
照片 3.49 轉換段端部出現降伏($\alpha=0.0038$ rad)



照片 3.50 試體 4 發生整體挫屈現象(正視, $\alpha=0.018$ rad)



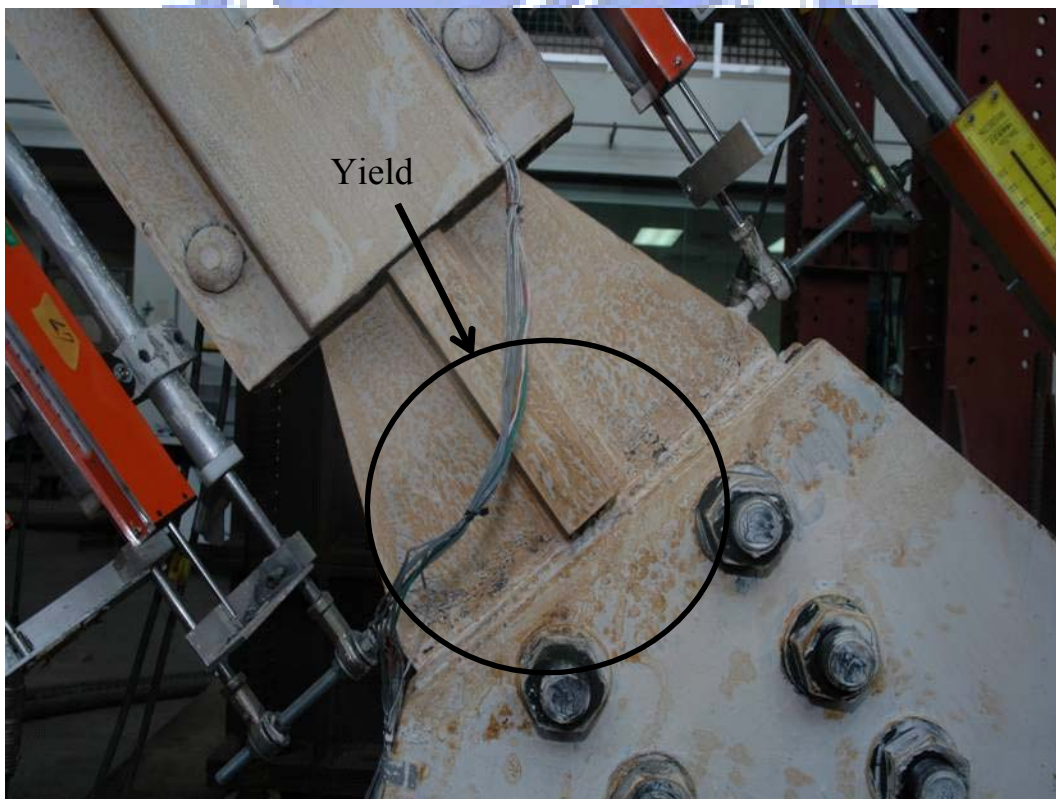
照片 3.51 試體 4 發生整體挫屈現象(側視, $\alpha=0.018$ rad)



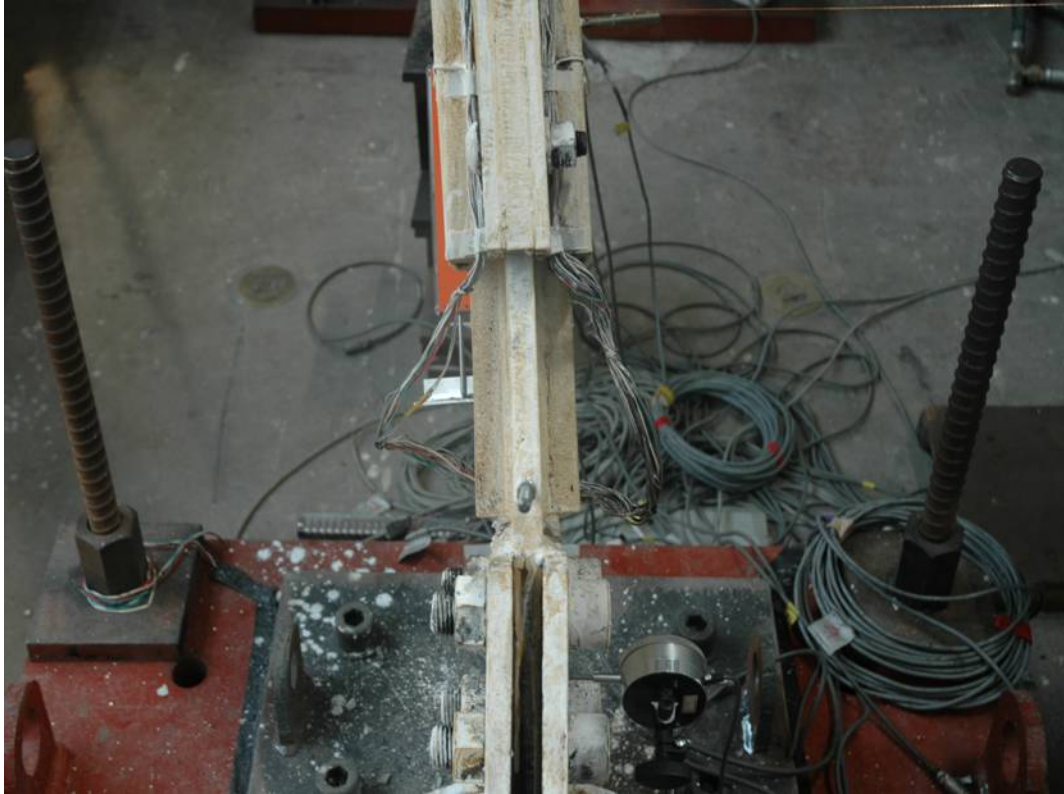
照片 3.52 試體 4 發生整體挫屈現象(上視, $\alpha=0.018$ rad)



照片 3.53 試體 4 核心單元與面板間並未產生相對滑動($\alpha=0.018$ rad)



照片 3.54 試體 4 轉換段與接合板焊道補強處周圍出現降伏現($\alpha=0.018$ rad)



照片 3.55 試體 4 雙接合板並未產生挫屈現象($\alpha=0.018$ rad)



照片 3.56 試體 4 核心單元產生第一挫屈模態

附 錄

設 計 例

$$\text{核心面積 } A_c = 150 \times 22 = 3300 \text{ mm}^2 \quad L_y = 4800 \text{ mm}$$

$$\text{核心降伏應力 } F_y = 375 \text{ MPa} \Rightarrow P_y = 3300 \times 375 = 1237500 \text{ N}$$

$$\text{核心極限應力 } F_u = 506 \text{ MPa} \Rightarrow P_u = 3300 \times 506 = 1669800 \text{ N}$$

$$P_{\max,d} = 1.3P_u = 1.3 \times 1669800 = 2170740 \text{ N}$$

決定整體斷面慣性矩

$$\text{令 } \frac{P_e}{P_y} = 2.5 \rightarrow P_e = 2.5P_y = 3093750 \text{ N}$$

$$I_{r,g} = \frac{P_e L^2}{\pi^2 E_r} = \frac{3093750 \times 5380^2}{\pi^2 \times 203000} = 44694480 \text{ mm}^2$$

決定圍束板厚、螺栓強度

$$I_{core} = \frac{b_c t_c^3}{12} = \frac{150 \times 22^3}{12} = 133100 \text{ mm}^4$$

$$L_w = \frac{4\pi^2 E_r I_{core}}{P_y} = \frac{4 \times \pi^2 \times 0.05 \times 203000 \times 133100}{1237500} = 43098 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow L_w = 208 \text{ mm}$$

$$f = \frac{4P_{\max,d} g}{L_w} = \frac{4 \times 2170740 \times 3}{208} = 125235 \text{ N}$$

$$n_1 = \frac{L_y}{L_w} = \frac{4800}{208} = 23.1 \approx 23$$

$$F_1 = n_1 f = 23 \times 125235 = 2880405 \text{ N}$$

取安全係數 1.45 趨近於 1.5

$$N_b = \frac{FS \cdot F_1}{N} = \frac{1.45 \times 2880405}{115700} = 36.0$$

$$L_b = \frac{L_y}{N_b / 2 - 1} = \frac{4800}{36 / 2 - 1} = 282 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow L_b = 282 \text{ mm} \leq L_w = 1.5 \times 208 = 312 \text{ mm}$$

$$n_2 = \frac{L_b}{L_w} = \frac{282}{208} = 1.36$$

$$F_2 = n_2 f = 1.5 \times 125235 = 187853 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M = \frac{(93927 + 71563) \times 25}{2} = 2068625 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$V = 71563 \text{ N}$$

令面板厚度 t

$$\sigma_x = \frac{My_1}{I_b} = \frac{2068625 \times \frac{t}{2}}{\frac{1}{12} \times 282 \times t^3} = \frac{44013}{t^2}$$

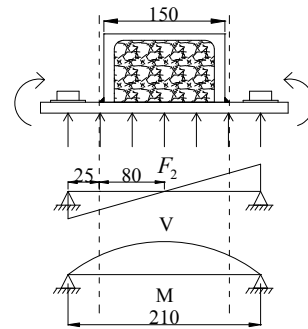
$$\tau_{xy} = \frac{V}{A} = \frac{71563}{282 \times t} = \frac{254}{t}$$

$$\phi \sigma_{\text{myl}}^2 \geq \sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 \quad (\phi = 0.9)$$

$$\Rightarrow 0.9 \times 345^2 \geq \left(\frac{44013}{t^2}\right)^2 + 3\left(\frac{254}{t}\right)^2$$

$$\Rightarrow 107122.5t^4 - 193548t^2 - 1937144169 \geq 0$$

$$\Rightarrow t \geq 11.6 \text{ mm}$$



挑選槽剛 $150 \times 75 \times 6.5 \times 10$

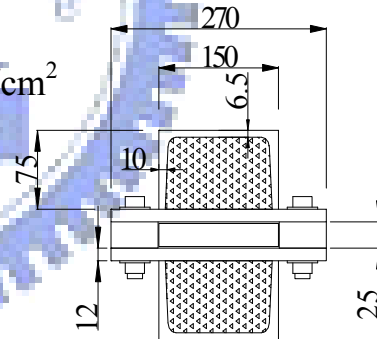
$$f'_c = 490 \text{ kg/cm}^2 = 7000 \text{ psi}$$

$$E_c = 15000 \sqrt{f'_c} = 15000 \sqrt{490} = 332039 \text{ kg/cm}^2$$

$$= 32540 \text{ N/mm}^2$$

$$E_s = 203000 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{203000}{32540} = 6.2$$



檢核整體斷面慣性矩

$$I_{r,g} = I_f + I_c + I_{con}$$

$$= 2(1170000 + 2371 \times 76.7^2 + \frac{21 \times 68.5^3}{12} + 21 \times 68.5 \times 58.75^2$$

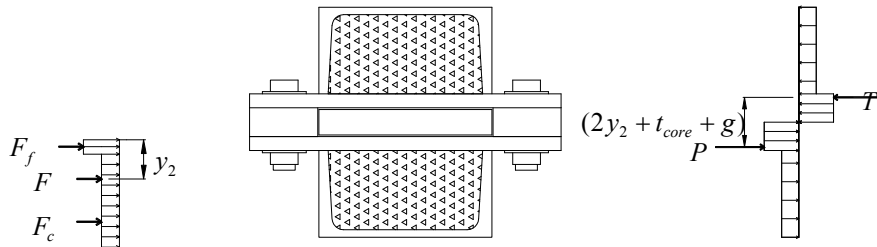
$$+ \frac{270 \times 12^3}{12} + 270 \times 12 \times 18.5^2)$$

$$= 43587317 \text{ mm}^4$$

$$P_e = \frac{\pi^2 E_s I_{r,g}}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 203000 \times 43587317}{5380^2} = 3017112 \text{ N}$$

$$\frac{P_e}{P_y} = \frac{3017112}{1237500} = 2.44$$

整體斷面塑性彎矩強度



$$y_2 = \frac{270 \times 12 \times 389 \times 6 + 2371 \times 279 \times 64.2}{270 \times 12 \times 389 + 2371 \times 279} = 26.0 \text{ mm}$$

$$P = 2371 \times 279 + 270 \times 12 \times 389 = 1921869 \text{ N}$$

$$M_p^g = P \times (2 \times 26.0 + 22 + 3) = 1921869 \times 77.0 = 147983913 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

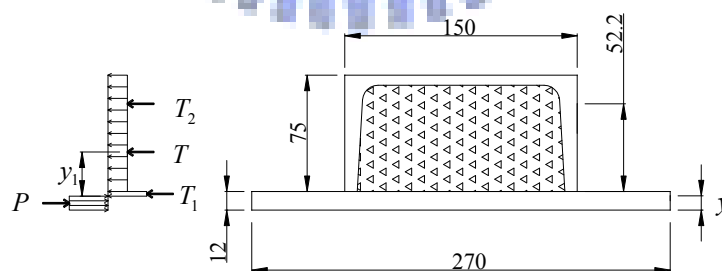
整體挫屈強度

$$P_{\max, g} = \frac{M_p^g}{i + g + e + M_p^g / P_e} = \frac{147983913}{5.38 + 3 + 1 + 147983913 / 3017112}$$

$$= 2532748 \text{ N}$$

$$\frac{P_{\max, g}}{P_y} = \frac{2532748}{1237500} = 2.05$$

局部斷面塑性彎矩強度



$$T = 2371 \times 279 + 270 \times (12 - y) \times 389 = 661509 + 1260360 - 105030y$$

$$= 1921869 - 105030y$$

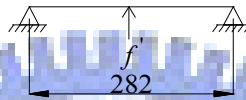
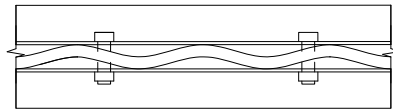
$$P = 270 \times y \times 389 = 105030y$$

$$P = T \Rightarrow 105030y = 1921869 - 105030y \Rightarrow y = 9.1 \text{ mm}$$

$$y_1 = \frac{661509 \times (52.2 + 2.9) + 304587 \times 1.45}{661509 + 304587} = 38.2$$

$$M_p^l = P(38.2 + 4.55) = 955773(42.75) = 40859296 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

局部挫屈強度



$$M_{\max} = f' a = 70.5 f'$$

$$M_{\max} = M_p^l \Rightarrow 70.5 f' = 40859296 \Rightarrow f' = 579564 \text{ N}$$

$$f' = \frac{4P_{\max,l}g}{L_w} \Rightarrow P_{\max,l} = \frac{f' L_w}{4g} = \frac{579564 \times 208}{4 \times 3} = 10045776 \text{ N}$$

$$\frac{P_{\max,l}}{P_y} = \frac{10045776}{1237500} = 8.1$$