



# 新型抗彎矩消能斜撐 耐震行為特性研究與試驗

蕭博謙 / 國立台灣科技大學營建工程系 助理教授

李承益 / 國立台灣科技大學營建工程系 研究生

特殊同心斜撐構架系統 (Special concentrically braced frame, SCBF) 因先天上具有快速提升結構勁度之特性，已被廣泛使用於強震地區之建築結構中。但傳統挫屈斜撐通常有變形容易局部集中與強度衰退快速等之脆性破壞問題，導致結構韌性容量變形能力較低之缺點。為改善傳統挫屈斜撐韌性不足與遲滯消能行為不穩定等問題，本研究過去已開發一新型抗彎矩消能斜撐 (Naturally buckling brace, 文中皆以 NBB 代稱) 之設計概念，經前期試驗驗證此 NBB 桿件不僅可大幅提升斜撐之韌性容量亦具備穩定之遲滯消能行為。

為進一步探究 NBB 之耐震行為特性，本研究規劃兩階段試驗，第一階段試驗採單軸試驗方式進行，旨在探討於反復加載作用下，不同細長比對 NBB 之遲滯性能的影響，此階段試驗亦同時探討斜撐不同斷面型式及繫接合細節對遲滯性能之影響。其結果主要顯示較低細長比之 NBB 相較於高細長比之 NBB，產生拉壓較對稱之遲滯行為，並可進一步延遲桿件局部挫屈和斷裂破壞的發生。而第二階段試驗採子構架試驗方式，旨在進一步探討成對 NBB 斜撐於構架中之遲滯性能與特性，並探討其於遠域及近斷層反復加載作用下之性能差異。試驗中設計參數包含斜撐角度、桿件整體細長比、斷面寬厚比與低降伏鋼材等。研究結果驗證成對 NBB 可在遠域和近斷層加載下，均提供對稱及穩定之強度與遲滯行為，惟細長比較大之斜撐於試驗反應中觀察到有強度衰退之現象，且此衰退現象於近斷層加載中明顯放大，而本研究依據試驗結果提出此衰退現象之估算方法。

## 簡介

同心斜撐構架 (CBF) 已被廣泛地用於鋼構造建築物的抗震結構系統中，尤其於強震地區。傳統鋼斜撐之弱點在於，斜撐會於發生桿件挫屈後隨即於斜撐中點處發展塑性鉸及局部挫屈，因而快速引致應變集中和斷裂破壞情形，這種脆性破壞模式造成傳統鋼挫屈斜撐普遍韌性不足。為改善此傳統鋼斜撐之弱點，作者過去已開發一名為「抗彎矩消能斜撐」(naturally buckling brace, 文中皆以 NBB 代稱) 之新型鋼斜撐的概念與構造設計，其主要可顯著提高斜撐遲滯行為的穩定性及桿件韌性<sup>[1]</sup>達到穩定消能之目的，提供鋼斜撐構架設計一創新替代方案。構造方面，NBB 主要為

由兩不同鋼種 (即降伏強度不同) 之槽型鋼所組成的複合桿件，且沿斜撐長度方向採用一偏心設計，如圖 1 所示。相關前期研究實驗已證實 NBB 能夠提供非常穩定之遲滯消能行為，且具備早期降伏和較大降伏後勁度之特性<sup>[1]</sup>，因此可用以提高鋼構造建築物結構於各種等級地震下的耐震性能<sup>[2]</sup>。

為提高對 NBB 耐震行為特性與性能之了解，本文進行兩階段試驗研究與分析，第一階段試驗採用單軸試驗方式測試共五組試體，各試體中由斜撐本身及雙端之接合板 (gusset plate) 接頭所組成。此階段試驗旨在探討於反復載重作用下，釐清桿件細長比對 NBB 之遲滯性能的影響，同時亦探討斜撐不同斷面型式以及

繫接接合細部對斜撐遲滯性能的影響。而本研究第二階段試驗即針對以倒 V 字型配置之成對 NBB 試體進行子構架試驗，以實際驗證成對 NBB 在構架系統中之耐震性能。並且探討成對 NBB 於遠域 (far-field) 及近斷層 (near-fault) 地震反復加載作用下之性能差異。試驗配置採倒 V 字型斜撐配置，本階段試驗共含六組試體，試驗中設計參數包含斜撐角度、桿件整體細長比、斷面寬厚比與低降伏鋼材等。

## 抗彎矩消能斜撐構造

NBB 是由兩種鋼材，包括高強度 (high strength, HS) 和低降伏 (low yield, LY) 鋼材，之槽型鋼以繫接方式組合而成之複合桿件，如圖 1 所示，且此斜撐於桿件長度方向安排一偏心 ( $e''$ ) 之設計以控制桿件於受拉與受拉下之橫向變形方向，其中 HS 部配置於離加載中心較遠處，在偏心加載作用下 HS 部相對於 LY 部具有較低的變形需求，配合其有較高的降伏強度，HS 部可主要維持彈性狀態；而相對的 LY 部具有較高的變形需求與較低的降伏強度將先達降伏後提供遲滯消能行為。此外，NBB 構造之特點在於主要維持彈性狀態的 HS 部可維持桿件於 LY 部降伏後一定程度之斷面抗彎勁度，提高桿件遲滯消能行為之穩定性，亦可延緩桿件長度方向上之變形集中、局部挫屈以及開裂破壞等的發生，增加桿件韌性。

## 試驗規畫與設計

### 第一階段單軸試驗

本階段試驗包含五組具不同細長比、斷面型式或繫接接合尺寸之試體，各試體由斜撐本身及雙端之接合板接頭所組成，所有試體具有相同之截面尺寸  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 、鋼材組合、斷面板厚與偏心大小，所有

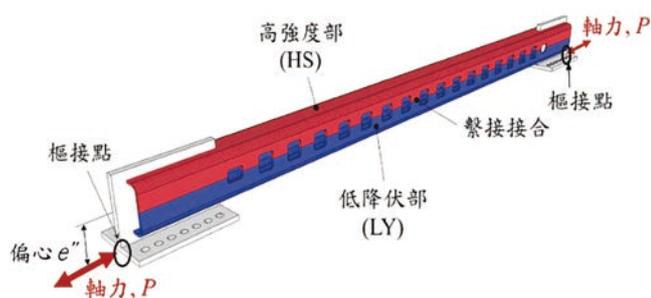


圖 1 NBB 構造示意

尺寸細節詳如表 1。其中斷面型式比較槽鋼部分採用冷彎型和焊接組合方式製成之耐震性能差異，分別以符號「C」和「B」型做為表示，詳表 1。當中 HS 與 LY 部間之繫接接合長度 (同於開孔長度) 定義為  $L_{ba}$ ，而試驗中以  $L_{ba}/L_{br}$  作為試驗變數，其中  $L_{br}$  為斜撐兩端接合板凹折處中心線間之距離，試體名稱中分別以「BT」和「BL」代表相對較長和較短的繫接尺寸。繫接接合之製成方式為將 HS 與 LY 兩槽鋼斷面先行對焊形成一方管，然後透過鑽孔和火焰切割方式於上述對焊所在面進行多個開孔，如圖 1 中所示。試體端部採用串接接合板接頭 (knife-plate connection) 之設計，各試體之接合板接頭尺寸相同，斷面為  $16\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，且於接合板上留有  $4t$  之淨空間以確保接合板於此處之面外旋轉柔度高， $t$  為接合板板厚，形成一類似樞接之接頭，如圖 2 所示。試驗中使用震幅遞增之反復加載歷時，由軸位移 0.05% 增加至 2.0%，而各震幅皆進行兩個循環，以觀察試體的遲滯性能與退情況，圖中之軸向位移角 (Axial Drift) 定義為  $\Delta_{axial}/L_{br}$ ，其中  $\Delta_{axial}$  為試體軸向變形量。若假設斜撐以  $45^\circ$  設置時為且忽略支撐長度 ( $L_{br}$ ) 與工作點長度 ( $L_{wp}$ ) 間之差異時，可將此軸向位移角乘兩倍及為對應之樓層側位移動角。試驗配置如圖 2 所示，試體下端為固接，加載施於上端。若在震幅遞增型反復加載後試體仍未斷裂破壞，則繼續進行軸向震幅 1.25% 或 1.5% 之疲勞反復加載，以獲取試體之最終疲勞壽命。

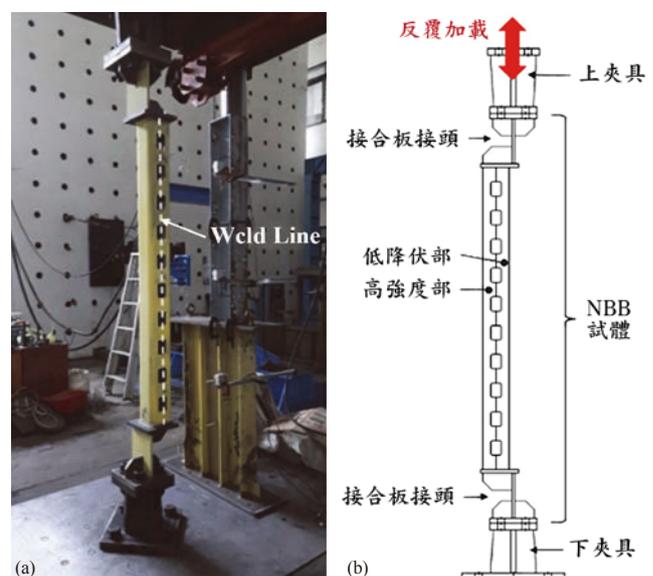


圖 2 第一階段試驗之試驗配置 (a) 照片與 (b) 構造解說

表 1 單軸試驗規劃與試體尺寸

試體名稱	$L_{br}$ [mm]	$e''$ [mm]	$t_{LY}$ [mm]	$t_{HS}$ [mm]	$KL_{br}/r$	$F_{y,LY}$ [MPa]	$F_{y,HS}$ [MPa]	斷面 型式	$L_{ba}$ [mm]	$L_{ba}/L_{br}$ [%]
C1188-BT	1188	100	8	12	19.2	127	371	C type	68	5.7
C1596-BT	1596				25.7			C type	76	4.8
B1596-BT	1596				25.3			B type	76	4.8
C2068-BT	2068				33.4			C type	84	4.1
C2068-BL	2068				33.4			C type	136	6.6

第二階段子構架試驗

第二階段試驗中主要由六組試體共十二支斜撐組成，實驗配置如圖 3(a) 所示，各試體詳細資訊詳表 2。試驗之試驗變數包括斜撐設置角、桿件細長比、斷面寬厚比、LY 鋼材種類和加載歷時類型，其中  $b = B - 2t_{LY}$ ， $r_{com}$  為斷面的迴轉半徑， $F_{y,HS}$  和  $F_{y,LY}$  分別為由拉力試驗所得之 HS 和 LY 鋼材的降伏應力。試體 A45S15 與 A30S15 之設計水平橫向強度相同（約為 900 kN），惟斜撐設置角度不同，因此兩試體斜撐具不同的細長比與寬厚比。本階段試驗採用兩種反復加載進行比較，其分別代表遠域和近斷層加載，如表 2 及圖 3(b) 與 3(c) 中所示，文中分別以「FF」與「NF」代稱。其中 FF 反復

加載採用韌性抗彎矩構架中梁柱連接試驗標準所規定之加載歷時（AISC 341-16, 2016），其層間位移角最高達 4%，並於上述加載歷時前增加四個樓層側位移角 0.125% 之彈性迴圈；而本試驗之「NF」加載歷時採用針對特殊抗彎矩構架的 SAC 近斷層加載歷時<sup>[3]</sup>，其層間位移角最高達 6%。如同前一階段試驗，於上述 NF 及 FF 反復加載後，若試體仍未發生破壞，則繼續進行 3% 樓層位移角之反復加載疲勞試驗以觀察試體之疲勞壽命。此外，試體 A45S08 與 A45S15 相比在 LY 部採較小的板厚，用以探究斷面寬厚比對成對 NBB 之耐震性能的影響。而試體 A45L08 主要用於探究低降伏鋼種（LYS100 與 SS400）對成對 NBB 耐震性能之影響。

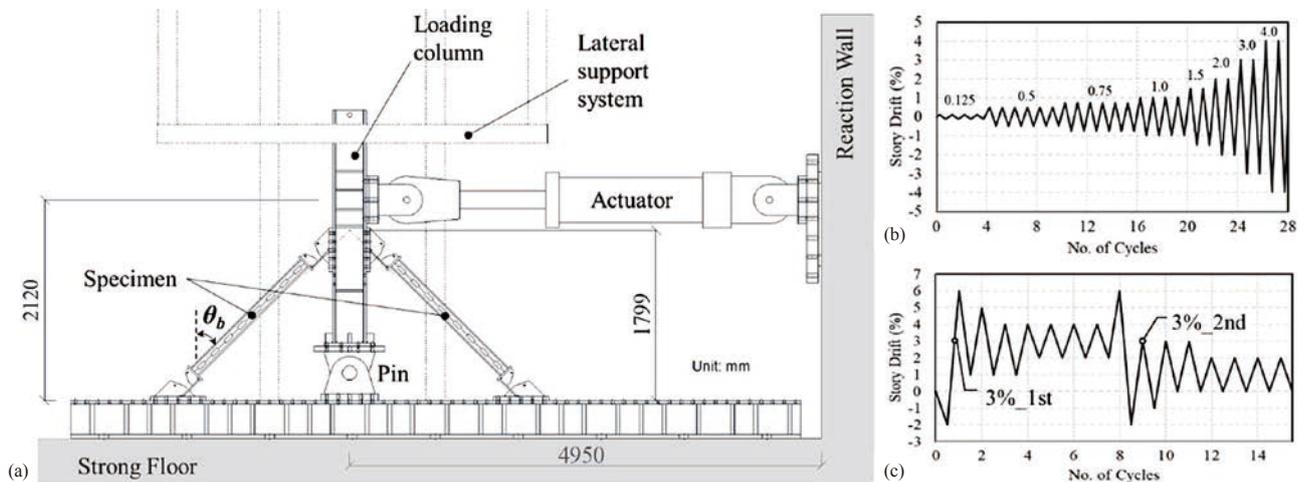


圖 3 第二階段試驗之 (a) 試驗配置，及採用之 (b) 遠域與 (c) 近斷層地震加載歷時

表 2 第二階段子構架試驗規劃與試體尺寸

試體名稱	$\theta_b$ (°)	$B \times D$ (mm)	$F_{y,LY}$ (MPa)	$F_{y,HS}$ (MPa)	$L$ (mm)	$L_{diss}$ (mm)	$t_{LY}$ (mm)	$t_{HS}$ (mm)	加載歷時 類型	$b/t_{LY}$	$KL/r_{com}$
A45S15	45	120 × 120	360	503	1924	1624	15	15	FF	6	40.3
A45S15-N									NF		
A30S15	30	150 × 150	360	503	1342	1042	15	15	FF	8	22.0
A30S15-N									NF		
A45S08	45	120 × 120	405	503	1924	1624	8	15	FF	13	40.7
A45L08			118						FF		

## 試驗結果與討論

### 第一階段單軸試驗結果

第一階段單軸試驗各試體之量測遲滯行為如圖四所示，具較小的細長比之 C1188-BT 有非常穩定的遲滯行為（圖 4(a)），且延遲局部挫屈及斷裂破壞的發生，而在疲勞試驗中亦有非常高的疲勞壽命。具中等細長比之 C1596-BT 亦提供穩定的遲滯行為，惟在 2% 軸向位移時開始出現遲滯迴圈衰退的情形（圖 4(b)），與 C1188-BT 相比其疲勞壽命也較小。採用焊接組合斷面之試體 B1596-BT 亦提供穩定的遲滯行為（圖 4(c)），惟在 2% 軸向位移時發生初始開裂情形，其整體韌性表現略小於等長之 C1596-BT，其可能造成原因包括因斷面焊接組合導致之斷面殘餘應力，及有略大之寬厚比所致。具最高細長比但不同繫接尺寸之試體 C2068-BT 和 C2068-BL 有相似且穩定的遲滯行為（圖 4(d) 與 (e)），且疲勞壽命亦非常相似，惟與其他試體相比，其受拉和受壓強度差異明顯增加，且此兩試體之疲勞壽命較 C1188-BT 為小。

由試驗觀察可發現，細長比較小之 NBB (C1188-BT) 具有相對較對稱的遲滯迴圈行為，反之細長比較大的 NBB (C2068-BT) 具有較大之拉力壓力差異。比較

各試體於拉力與壓力下之強度背脊曲線，可以看出拉伸降伏後勁度通常會大於壓縮降伏後勁度，且隨著細長比的增加，會略為增加拉伸降伏後勁度，而降低壓縮降伏後勁度，因此增加遲滯迴圈的拉壓不對稱性。試驗亦證實兩種斷面型式（即冷彎型與焊接組型式）之 NBB 皆能提供穩定且具韌性之遲滯消能行為。惟兩斷面型式導致翼板之寬厚比不同，因而影響局部挫屈之發生時機。透過計算各試體於斷面開裂前之累積塑性變形量（Cumulative plastic deformation, CPD）可量化各 NBB 試體之累積韌性與疲勞壽命。其中可明顯看出具較小細長比的 C1188-BT 具有最大的 CPD 值，而其他相對較細長的 C1596 和 C2068 系列試體之 CPD 值相似且較低，然而其 CPD 皆大於 800。

### 斜撐細長比之效應

試體 C1188-BT、C1596-BT 和 C2068-BT 三者之尺寸與材料皆相同，惟斜撐長度不同，因此可用以觀察桿件細長比對 NBB 之效應。由試驗觀察可發現，細長比較小之 NBB (C1188-BT) 具有拉壓較對稱的遲滯迴圈行為，反之細長比較大的 NBB (C2068-BT) 具有較大之拉壓強度差異。為突顯此結果，圖 5 比較此三試體於拉力與壓力下之強度背脊曲線，當中可以看出拉伸降伏後勁度通常會大於壓縮降伏後勁度，且隨著細長比的增

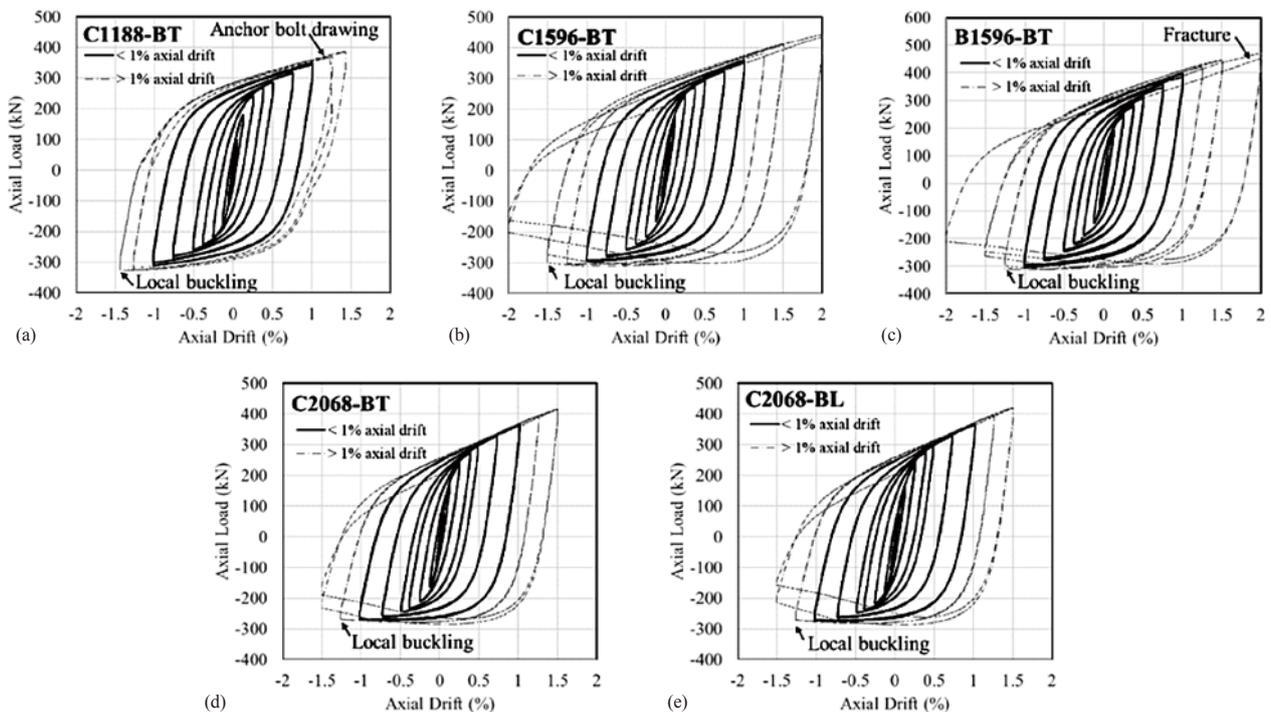


圖 4 試體 (a) C1188-BT，(b) C1596-BT，(c) B1596-BT，(d) C2068-BT，(e) C2068-BL 量測遲滯行為。

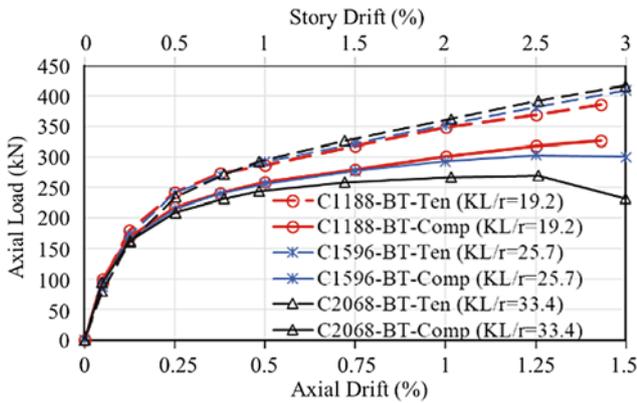


圖 5 各試體間受拉與受壓強度背脊曲線比較

加，會略為增加拉伸降伏後勁度，而降低壓縮降伏後勁度，因此增加遲滯迴圈的拉壓不對稱性。此外，試驗結果亦顯示細長比對局部挫屈發生時機之影響，細長比小的 NBB (C1188-BT) 局部挫屈發生於 1.5% 軸向位移時，而其他試體則在 1.25% 軸向位移時即發生。

第二階段子構架試驗結果

此階段試驗各試體之量測遲滯行為結果如圖六所示，試驗結果顯示此階段試驗所有試體皆具有對稱之強度與飽滿之遲滯行為，且當中具不同斜撐角度但以提供相同橫向強度設計之試體 A45S15 與 A30S15 確實產生相似之強度結果，且皆展現良好韌性表現，即在 FF 或 NF 加載歷時作用下均無斷裂情形產生，因此繼續進行

疲勞試驗直到斷裂破壞產生。本階段試驗中可發現成對 NBB 於不同情況下會有強度衰退之現象，即於第二次達該樓層側位移角時強度會比首次到達之值低，為針對此強度衰退效應進行評估與討論，需對此衰退效應先進行量化。由試驗結果可歸納出此強度衰退現象與桿件細長比以及加載歷時有關，較細長之桿件有較高之強度衰退，且此程程度於近斷層加載歷時中會被放大。此外，彙整本階段試驗各試體之 CPD 值結果，當中可發現本階段試體之 CPD 約為 200 ~ 500，普遍低於第一階段試驗之結果，其原因主要包括 (1) 本階段試體 LY 部之鋼材採用韌性較低之 SS400 鋼材，相較於前一階段採用 LYS100 鋼材明顯韌性較低，(2) 部分試體發生端板降伏與斷裂情形，並無完整發揮其原有韌性。

強度衰退效應估算

本階段試驗中可發現成對 NBB 於不同情況下會有強度衰退之現象，即於第二次達該樓層側位移角時強度會比首次達到該值時低，為針對此強度衰退效應進行評估與討論，需對此衰退效應先進行量化。由承受 FF 加載歷時之各試體中可觀察到，局部挫屈通常發生於 3% 樓層位移角之迴圈中，即為強度衰退效應開始較明顯之階段，因此本研究將 3% 樓層位移角之兩迴圈的強度進行比較作為量化此衰退效應之指標。當中定義第一次達 3% 樓層位移迴圈之最大強度為  $P_{3\%_{1st}}$ ，第二次達 3% 樓層位移迴

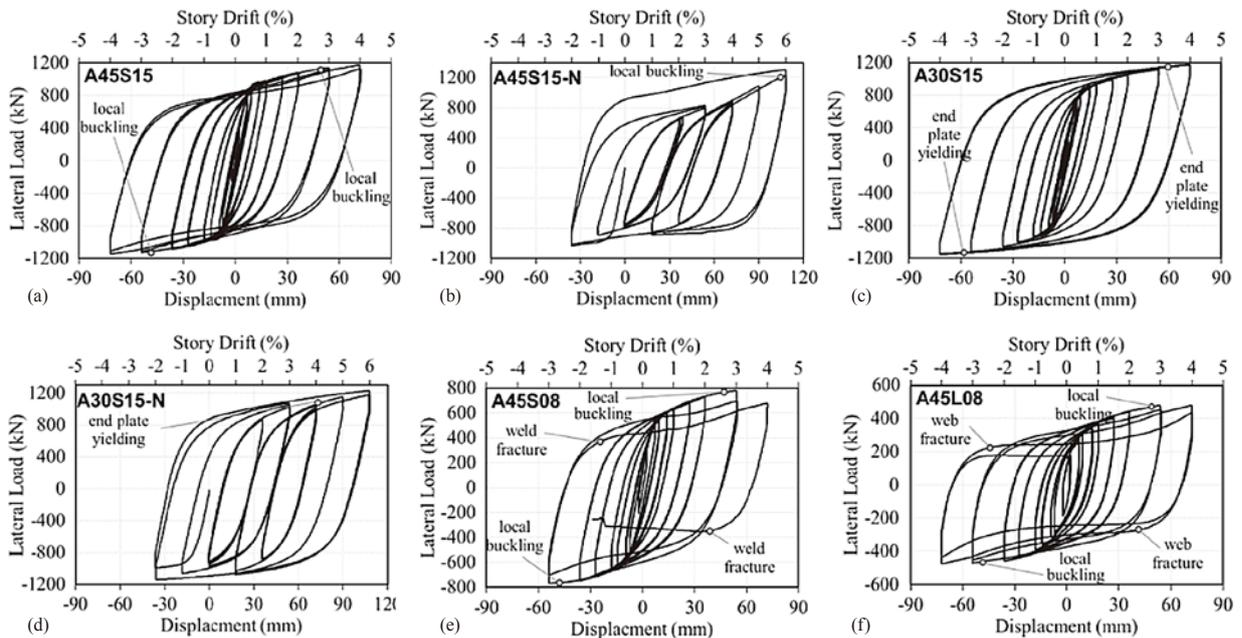


圖 6 試體 (a) A45S15，(b) A45S15-N，(c) A30S15，(d) A30S15-N，(e) A45S08，(f) A45L08 之量測遲滯行為結果。

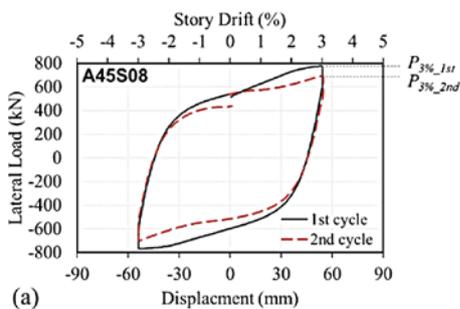
圈之最大強度為  $P_{3\%_{2nd}}$ ，如圖 7(a) 所示，而比值  $P_{3\%_{2nd}}/P_{3\%_{1st}}$  即可反應強度衰退程度之大小，由試驗結果可發現此值會隨試體之寬厚比 ( $b/t_{LY}$ ) 和細長比 ( $KL/r_{com}$ ) 增加而減少，即衰退幅度增加，如圖 7(b) 與 (c) 所示。依據本階段試驗結果可回歸出下列用於估算於 FF 反復載重下強度衰退效應 ( $P_{3\%_{2nd}}/P_{3\%_{1st}}$ ) 之方程式 (式 (1))。

$$\frac{P_{3\%_{1st}}}{P_{3\%_{2nd}}} = 151 \left( \frac{b}{t_{LY}} \right)^{-0.08} \left( \frac{KL}{r_{com}} \right)^{-0.08} \quad (\%) \quad (1)$$

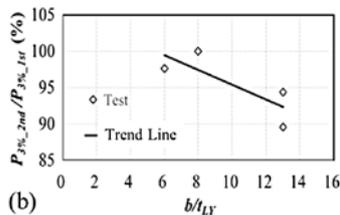
同時可利用式 (2) 定義於 FF 加載歷時下之強度衰退因子  $\eta_{FF}$ ：

$$\eta_{FF} = 1 - \frac{P_{3\%_{1st}}}{P_{3\%_{2nd}}} \quad (2)$$

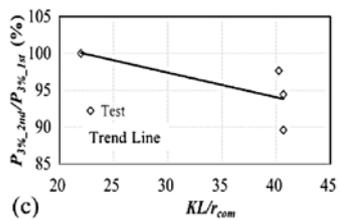
此外，試驗中可觀察到相同試體在 NF 加載歷時下之強度衰退效應相較於 FF 加載歷時下之效應更為顯著，為量化於不同加載歷時下衰退程度之差異，並建立其估算方法，本研究首先採用與前述針對 FF 加載作用下相似之定義，將 NF 加載情況下之  $P_{3\%_{2nd}}$  與  $P_{3\%_{1st}}$  分別定義為加載歷時中第一次及第二次自 0% 樓層位移增加至 3% 樓層位移角時之強度，如圖 3(c) 所示，根據



(a)



(b)



(c)

圖 7 (a) 3% 樓層位移角振幅中兩迴圈之強度 ( $P_{3\%_{2nd}}$  與  $P_{3\%_{1st}}$ ) 定義； $P_{3\%_{2nd}}/P_{3\%_{1st}}$  比值隨 (b) 寬厚比與 (c) 細長比之變化情形。

於不同加載歷時下試驗結果進行迴歸，最後可得下方式 (3) 之結果。

$$\eta_{NF} = 12\eta_{FF} + 2.1 \quad (\%) \quad (3)$$

其中  $\eta_{NF}$  為 NF 加載歷時下之強度衰退放大因子。由式 (4) 之結果可看出在 NF 加載下強度衰退效應較大，因此建議在設計中應盡量控制上述  $P_{3\%_{2nd}}/P_{3\%_{1st}}$  比值接近 1.0，即無明顯衰退，以防止在 NF 加載下出現明顯的強度衰退情形，此部分結果仍有待更多之試驗結果進行驗證。

### 結論

本研究針對新型抗彎矩消能斜撐 (NBB) 進行一系列包括單軸和子構架試驗，以強化對 NBB 遲滯行為特性與耐震性能之了解。依據試驗與分析結果，本研究可歸納出以下結論：

1. 單軸試驗結果證實 NBB 桿件能夠提供穩定且具韌性之遲滯行為，桿件細長比之效應在於影響斜撐拉伸與壓縮強度之差異，以及延緩局部挫屈和斷裂之發生時機。
2. 冷彎型和銲接組合型 NBB 具相似的遲滯性能，惟應適當檢核 LY 部之翼板寬厚比，以確保桿件韌性容量之完整發揮。
3. 細長比較小的 NBB 具有較高之 CPD 值及疲勞壽命。
4. 成對 NBB 在遠域和近斷層加載下皆可產生穩定且具韌性之遲滯行為，而不致產生破壞。
5. 成對 NBB 之強度衰退現象與 NBB 桿件之斷面寬厚比、細長比及加載歷時類別具關連性，可透過適當程序設計之。

### 參考文獻

1. Hsiao, P.C., Hayashi, K., Inamasu, H., and Luo, Y.B. (2016). "Development and Testing of Naturally Buckling Steel Braces." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 142(1).
2. Hsiao, P.C. and Liao, W.C. (2019). "Effects of Hysteretic Properties of Stud-type Dampers on Seismic Performance of Steel Moment Resisting Frame Buildings." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 145(7).
3. Krawinkler H., Gupta A., Medina R., and Luco N. "Development of Loading Histories for Testing 447 of Steel Beam-to-Column Assemblies." SAC Background Report SAC/BD-00/10, 2000.
4. Alavi A. and Krawinkler H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures." John A. Blume Earthquake Engineering Center Report No. 138, Stanford University, February 2001.