



鋼造夾型挫屈束制斜撐於高層建物設計實驗及應用

劉佳豪／築遠工程顧問有限公司 專案副理、國立臺灣大學土木工程學系 碩士

張盈智／築遠工程顧問有限公司 總經理、國立臺灣大學土木工程學系兼任 副教授

周中哲／國立臺灣大學土木工程學系 教授、國立臺灣大學工學院 副院長

鍾秉庭／國立臺灣大學土木工程學系 碩士及研究助理

陳俊翰／築遠工程顧問有限公司 專案經理、國立交通大學土木工程學系 博士

近年來，挫屈束制斜撐（BRB）已在建築物中被廣泛使用，主要因為優異的抵抗地震及能量消散能力，本文介紹一種無填充混凝土的鋼造夾型挫屈束制斜撐（Sandwiched Buckling Restrained Brace，簡稱 SBRB）在臺灣鋼結構高樓的發展應用。本文會先介紹數個高樓設計案例以及相對應各案例的實尺寸 SBRB 試驗成果，亦會探討 SBRB 在對不同建築空間需求條件下的調整與設計，包括斜撐斷面的尺寸以及斜撐擺放角度（同心或偏心）。最後，透過非線性靜力側推分析來比較各 BRB 建築構架的整體耐震行為。

前言

由於鋼造夾型挫屈束制斜撐（SBRB）無需內灌混凝土，設計及工廠製造簡單，具備良好的韌性行為，逐漸在鋼構耐震建築成為好的抗震斜撐元件，本文介紹 SBRB 性能及五種不同建築規模的實際設計及施工案例（圖 1），說明此二元系統（鋼構抗彎構架 + BRB 斜撐構架）在臺灣應用情形。案例 A 為八層樓高的高雄市立圖書總館，建築物由角落的四個組合型巨型鋼柱、屋頂桁架、高強度鋼棒吊起每層樓版組成，將 SBRB 配置於兩個角落之巨型柱內作為主要耐震構架，此建築物歷經 2016 年高雄美濃地震（芮氏規模 6.6）襲擊下安全無虞。案例 B 及 C 為兩棟位於新北市及新竹市的鋼構辦公大樓設計案例，樓高分別為 20 樓及 19 樓，案例 D 則為一棟 20 樓高之台北市信義區廣慈公共住宅案例，其主結構為鋼骨混凝土造（SC），案例 E 為坐落於新北市板橋之 46 樓高層旅館及住宅設計案例，

目前正由東鋼構施工中。BRB 構架通常配置在服務核（樓、電梯）所在處，而工程師們時常需要更改 BRB 的設計斷面使得斜撐可維持在建築裝修層內；或者更改 BRB 的角度使其可以避開走廊、門口及窗戶等衍生出不同的斜撐接合細節，本文將透過有限元素分析模擬其不同接合所造成之傳力行為，並以非線性靜力側推分析比較案例 A、C、D、E 建築物整體耐震行為。

鋼造夾型挫屈束制斜撐（SBRB）

學者周中哲等人^[1-3]發展的夾型挫屈束制斜撐（SBRB），是由一組核心構件（Core Plate）及兩組獨立分離的圍束構件（槽鋼及面板）所組成（圖 2(a)），其中斜撐之圍束構件利用螺栓將核心構件束制其中。相較於傳統 BRB 之設計，SBRB 可於現地拆卸圍束構件提供檢查核心構件於地震後是否斷裂的機制，同時圍束構件內可按力量需求及設計條件決定是否使用混

| Case | T_x (sec) | T_y (sec) | C_s | W (tf) |
|------|-------------|-------------|-------|--------|
| A | 0.957 | 1.052 | 0.183 | 18674 |
| B | 2.656 | 3.100 | 0.092 | 19889 |
| C | 3.689 | 3.209 | 0.080 | 23876 |
| D | 3.035 | 3.259 | 0.086 | 42506 |
| E | 3.619 | 4.489 | 0.079 | 53316 |

(tf = 9.8 kN)

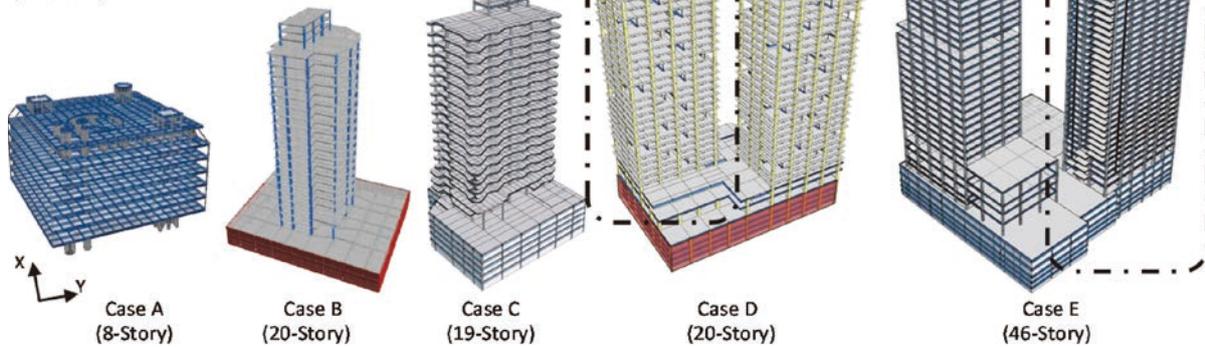


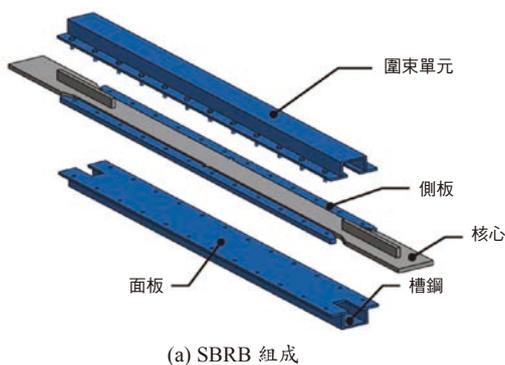
圖 1 BRB 構架設計案例

凝土，國內使用內灌混凝土的 SBRB 有高雄市立圖書館（圖 2(b)）及台北市中山北路 SRC 住宅大樓；但因內灌混凝土及鋼製斜撐對鋼構廠是不同的施作工項會增加作業成本及時間，若無使用混凝土則可減短約 50% 製造工期。近年來無內灌混凝土的 SBRB 及構架試驗研究^[2-6]均驗證其耐震性能符合美國 AISC 341^[7]的要求，已分別使用在甘肅蘭州科技博物館、新竹華邦電子辦公大樓、台北廣慈博愛公宅、台北私立延平高級中學體育館及興建中的新北市 46 樓高層旅館及住宅等^[4-6]。

圖 3 及圖 4 介紹兩種建築設計案例中 SBRB 之試驗行為，斜撐編號 SBRB1、SBRB2 分別代表新竹華邦電子辦公大樓及台北廣慈博愛公宅之試驗斜撐（對應圖 1 之案例 C、D），兩組 SBRB 試體皆無內灌混凝土，核心板斷面尺寸分別為 50×200 mm 及 48×292 mm，材質為 SN490B 及 SM570 MB。兩組 SBRB 之試驗皆採用 2016 年 AISC 341 耐震設計規範（T6 章節）

建議之載重規定進行^[7]。其中 SBRB1 採用五階段之載重測試：在第一、三、四載重階段中，採用標準加載歷時（最大側位移角達 2.53%）；而在第二、五載重階段，試驗斜撐以承受對應 1.9% 位移角之側向位移分別進行三個及十個週次的疲勞性試驗。SBRB2 則分為兩個階段之試驗：其中在第一階段試驗中，SBRB 採用標準加載歷時（最大軸向位移為 83 mm）；並於第二階段試驗中，施加了五個週次之 63 mm 軸向位移疲勞測試。圖 3(b) 所示為 6.9 m 長之實尺寸 SBRB1 試體，其斜撐角度約為 48 度；圖 4(b) 則為 5.5 m 長之實尺寸 SBRB2 試體，實驗配置採直立式（純軸向）試驗。

由圖 3(c)、3(d)、4(d) 及 4(e) 可觀察出，SBRB1 及 SBRB2 試體可在斜撐軸向應變分別達 1.6% 及 2% 下保持良好且飽滿之遲滯消能行為（降伏軸力分別為 3795 及 4,836 kN、最大軸力分別為 5,127 及 8,028 kN）。試驗結果顯示 SBRB 最大軸壓及軸拉力比值不超過 7%，此值遠比 AISC 341^[7]耐震規範所規定的 30% 來得小；



(a) SBRB 組成



(b) SBRB 應用於高雄市立圖書館

圖 2 夾形挫屈束制斜撐 (SBRB) 之組成及應用 (案例 A)



(a) SBRB 現場與實驗室試體配置 (b) 試體照片 (單位:mm)

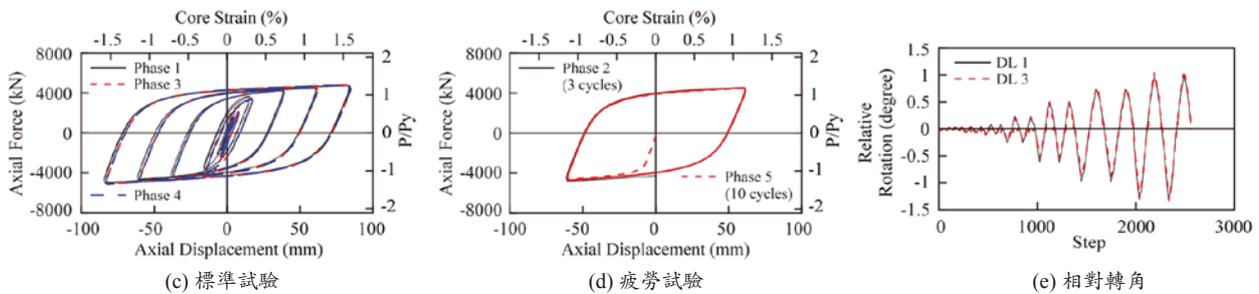


圖 3 實尺寸 6.9 m 長之 SBRB 1 試驗 (案例 C: 新竹華邦電子辦公大樓 [6])

且累積非線性變形量 (CPD) 分別為 632 及 241，滿足 AISC 341 耐震規範所規定之要求 (CPD ≥ 200)。

圖 5 為於國震中心實驗室利用 5 支 100 噸油壓千斤頂連接塔柱進行一組 3.865 m 長的實尺寸 SBRB 試驗，SBRB 核心構件斷面為 70 × 230 mm，外圍尺寸為 270 × 350 mm，除了槽鋼為 ASTM A36 和核心構件為 SN490B 材質外，其餘材質均為 ASTM A572 Gr. 50，圍束構件內無填充混凝土。在規定的二次實驗過程中，SBRB 最大軸拉力與軸壓力分別為 7,901 kN 與 8,064 kN，最大核心應變 2.4%，最大壓拉軸力比為 1.02 (= 8064 / 7901)，顯示斜撐遲滯行為相當對稱，滿足 AISC 341 [7] 小於 1.3 倍及 CPD = 200 的要求，試驗結束後沒有任何破壞發生。

斜撐接合型式

在臺灣建築設計案例中，常見的 BRB 構架配置於樓、電梯間，且常用隔間牆包覆，所以工程師們需在受限的斜撐斷面尺寸 (斜撐斷面高度及寬度) 中作設計。有時候，為了避開建築空間舉凡走廊、門口、窗戶等，也會使用偏心之 BRB 構架作為斜撐構架的設計。

斜撐斷面配置及角度

BRB 的斷面寬度或高度常受到隔間牆內空間的限制 (通常為 300 ~ 600 mm 之容許配置空間)，使用者可考慮轉置斜撐斷面的寬度及高度，使其符合建築空間需求。圖 6 顯示在建築空間限制中兩種不同的斜撐斷面配置選擇，其中 Type A 代表 SBRB 斷面高度 H 是平行於隔間牆的面外軸向，亦即斷面高度 H 會受到隔間牆內淨空間的限制；而 Type B 為 Type A 的轉置，其代表 SBRB 斷面寬度 B 會受到牆內淨空間的限制。在 Type A 中，因其圍束高度受到限制，設計者可透過將斜撐圍束寬度 B 增加或是增加其圍束各單元鋼板厚度，以維持整體斜撐之抗挫屈束制強度，然而，上述作法可能會導致較不經濟的斷面。而對於 Type B 斷面配置，由於圍束高度 H 並沒有受到隔牆淨空間的限制，因此可以用相對較薄的鋼板厚度設計出需求的圍束尺寸，進而得到較經濟的圍束單元設計，SBRB 視設計及建築需求可分別搭配單或雙接合板與構架相接合 [8,9]。圖 7 顯示為新北市一棟 46 層高住宅之標準層平面

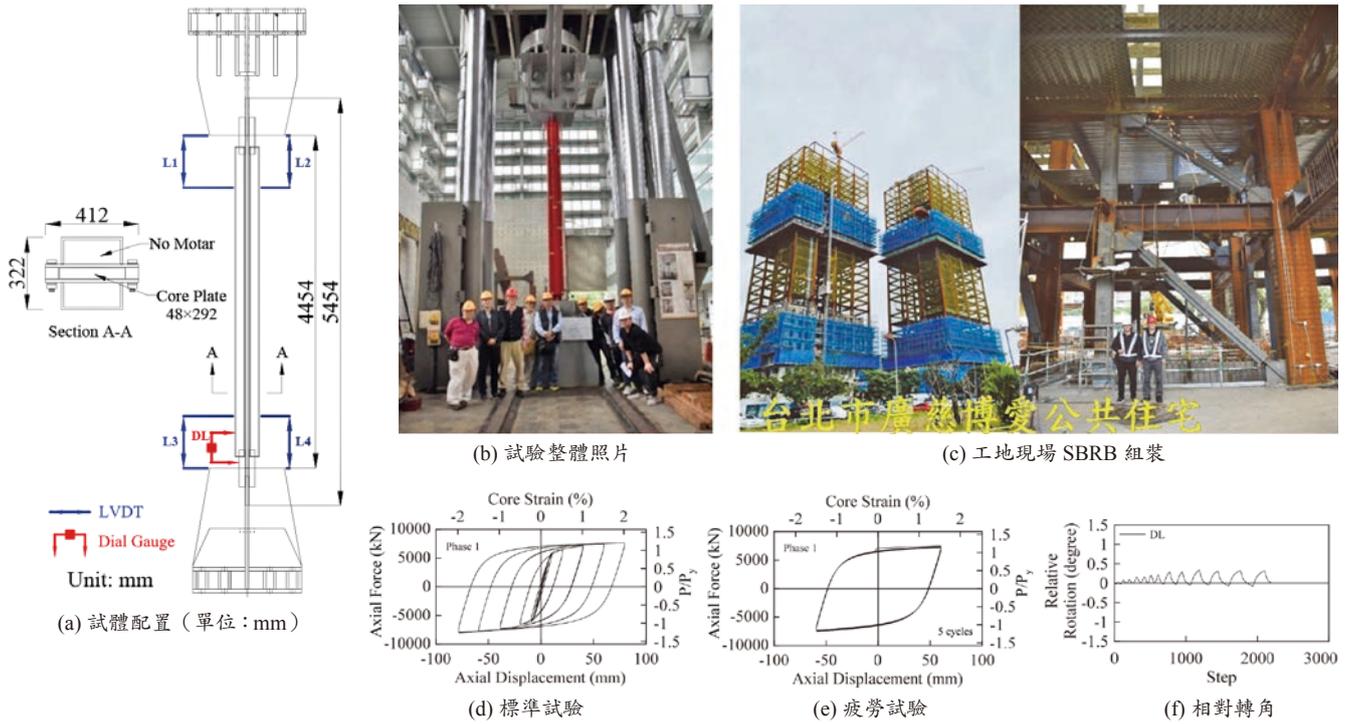


圖 4 實尺寸 5.5 m 長之 SBRB 2 試驗 (案例 D: 台北市廣慈博愛公共住宅^[4])

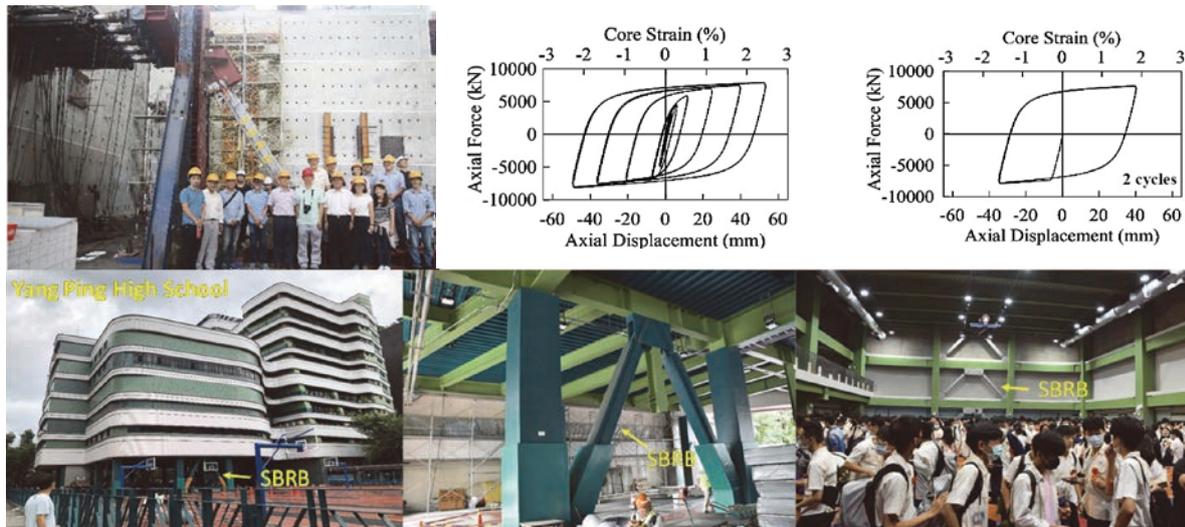


圖 5 實尺寸 3.865 m 長之 SBRB 試驗 (案例: 台北市私立延平高級中學體育館^[5])

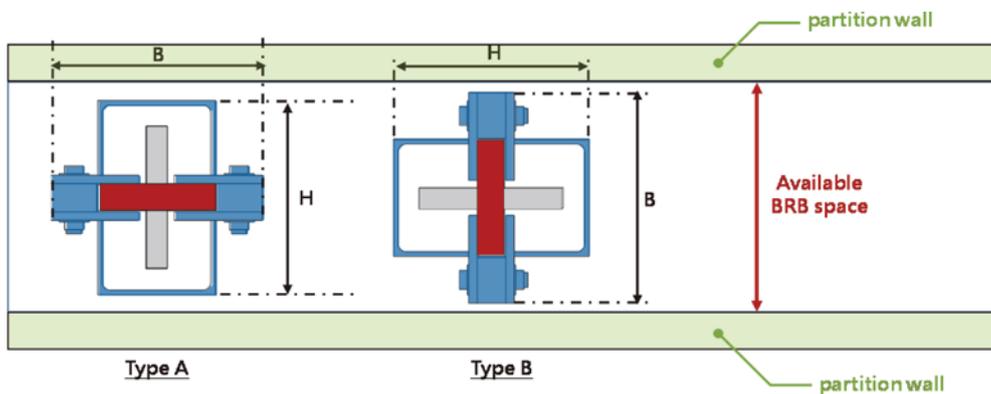


圖 6 建築空間中不同 SBRB 斷面配置選擇

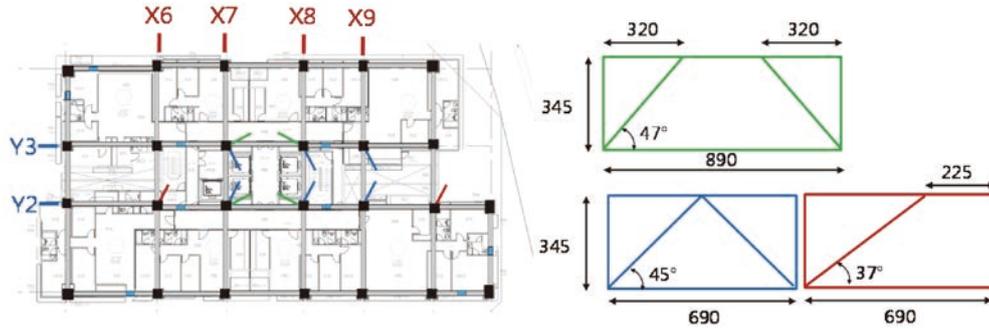


圖 7 新北市 46 層大樓之 SBRB 構架立面配置 (案例 E, 單位: cm)

(案例 E), 其 X 向及 Y 向分別配置了多組偏心 SBRB 構架, 目前正興建中, 預計 2022 年底完工, 將成為新北市最高的旅館及住宅大樓。

有限元素分析

本節將以案例 B 及案例 E 分別對於 Type A 及 Type B 接合型式作深入的有限元素分析探討, 兩組分析模型中之 SBRB 降伏軸力皆為 500 tonf, 及最大斜撐軸力 787 tonf。在案例 B 的有限元素分析模型中 (圖 8), 首先建置單一對角 SBRB 構架之有限元素模型, 並考量在最大考量地震下, 對有限元素模型施加斜撐最大軸力及梁柱內力; 案例 E 以偏心之倒 V 型斜撐配置作為 BRB 構架 Type B 接合型式之有限元素模型 (圖 9)。案例 B、E 皆可滿足在發展斜撐最大軸力下, 接合部位保持彈性, 但由於偏心斜撐之配置使得連桿梁處受到極

大的剪力, 因此在案例 E 中鋼梁兩側新增 12 mm 封板使其斷面強度符合斜撐最大軸力需求。

SBRB 構架整體行為

在工程設計過程中為瞭解結構物在地震下的行為, 初步可用非線性靜力側推結構物檢核構件的非線性時機及塑鉸分佈, 非線性的地震歷時分析由於時間耗費較大目前設計單位只針對重要結構物來進行, 本文針對圖 1 中案例 A、C、D、E 四種不同鋼構 SBRB 構架建築利用 ETABS 程式進行非線性靜力側推分析各建築物的降伏機制及各建築物之韌性容量。

構架非線性靜力側推分析

圖 10 為案例 A、C、D 及 E 之非線性靜力側推分析結果, 圖中共 4 個點為: 1 號點代表初始降伏點、

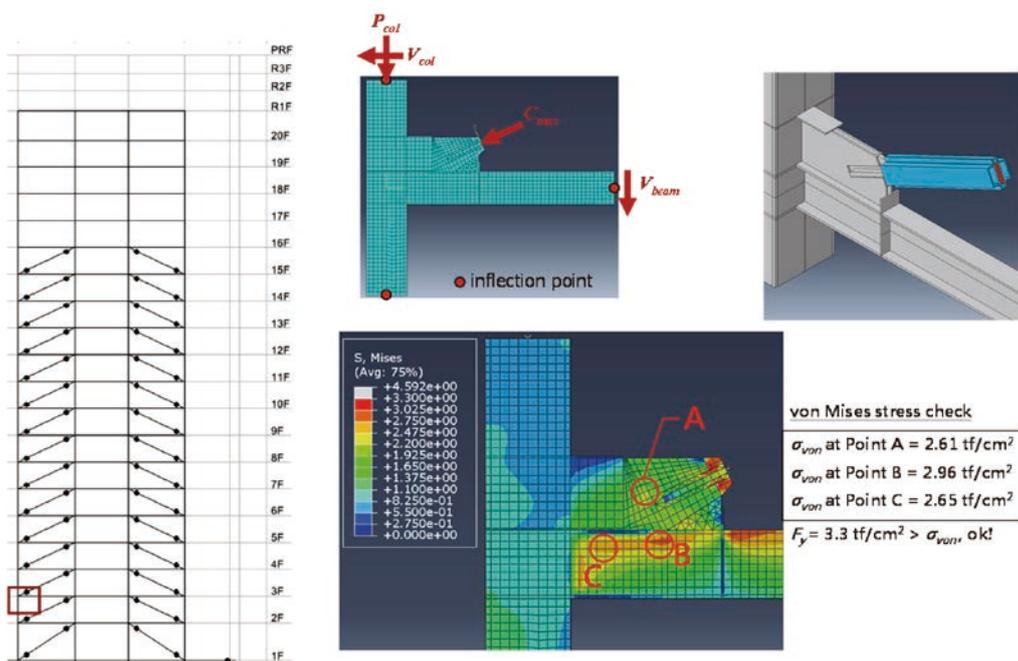


圖 8 Type A 接合型式之有限元素分析 (方案 B-20 樓辦公大樓)

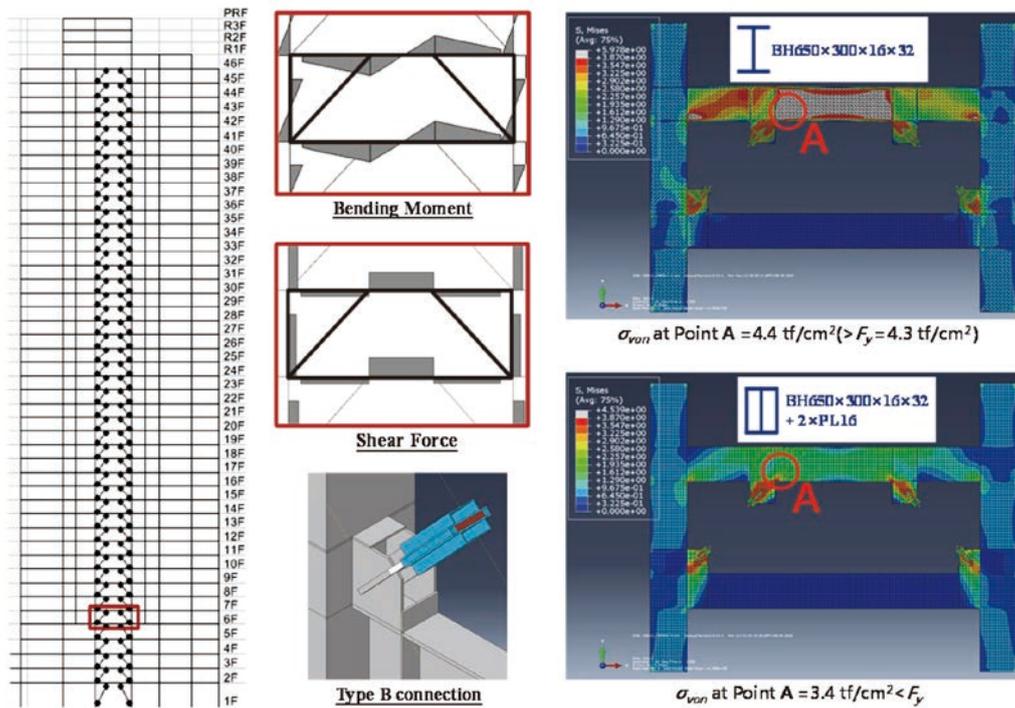


圖 9 Type B 接合型式之有限元素分析 (方案 E - 新北市 46 樓住宅)

2 號點為系統降伏點、3 號點及 4 號點為對應 475 及 2500 年地震迴歸期之性能點。首先觀察各側推分析中塑鉸的分佈，SBRB 於各分析結果中確實能在整體構架系統中先降伏消能，另外，就韌性容量的角度來看，臺灣建築耐震設計規範^[11] 假設在對應最大考量地震下之容許韌性容量 $R = 4$ ；然而，由圖 10 中各分析結果，在計算 2500 年地震迴歸期與系統降伏點之位移比值可

得到使用之韌性容量 R^* ，其值約介於 $0.88 \sim 1.25$ ，遠小於臺灣耐震設計規範韌性 $R = 4$ 之設計規定^[11]。此乃因為設計中考量折減係數、結構物複雜度且高贅餘度、風力載重控制或其他因素下，臺灣建築設計案例之使用韌性容量遠較耐震規範設計參數低，亦代表依規範設計可得較為保守的結果。

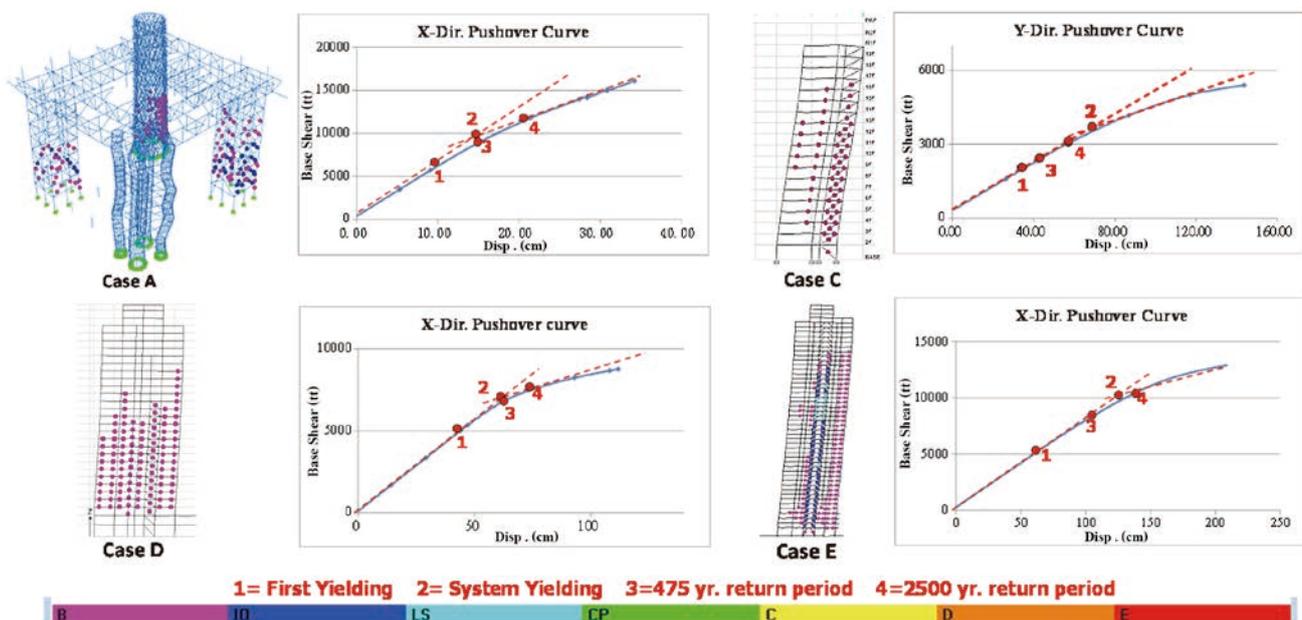


圖 10 四棟 SBRB 構架例之 ETABS 非線性側推分析

結論

本文提供純鋼夾型挫屈束制斜撐 (SBRB) 應用於不同建築實例分享，由於此種 SBRB 無需內灌混凝土，設計及工廠製程簡單，約可省下 50% 製造時間；同時，使用螺栓將核心構件與其他鋼構件接合，相較於傳統埋入於混凝土中之 BRB，SBRB 更可於現地拆卸圍束構件檢查核心構件於大地震後是否破壞的機制。此純鋼型 SBRB 已分別使用在甘肅蘭州科技博物館、新竹華邦電子辦公大樓、台北市廣慈博愛公宅、台北市私立延平高級中學體育館及興建中的新北市 46 樓高層旅館及住宅等。根據實尺寸 SBRB 分別於國家地震工程研究中心及內政部建築研究所的試驗 (圖 3 至圖 5)，驗證純鋼型 SBRB 性能滿足 AISC 341 (2016) 穩定且飽滿之遲滯行為要求 [7]。另外以有限元素分析不同接合型式或偏心 SBRB 之接合配置，顯示在適當地設計下接合處可滿足斜撐發展最大軸力下保持彈性的要求。最後藉由四個 SBRB 構架案例之非

線性側推分析，顯示此四棟以 SBRB 為建築物耐震消能之主要元件，依 2500 年地震迴歸期回推使用韌性容量 R^* 值皆小於 1.5，均滿足臺灣耐震韌性容量 $R = 4$ 的設計要求 [11]。

誌謝

本研究承蒙科技部 (計畫編號：98-2625-M-002-017、100-2625M-002-012 及 102-2221-E-002-101-MY3) 補助，使得 SBRB 的研究工作能順利執行，感謝東鋼結構及長榮鋼鐵股份有限公司製造實尺寸試體，並感謝國家地震工程研究中心及內政部建築研究所實驗室人員協助實驗進行。

參考文獻

1. Chou, C.C. and Chen, S.Y. (2010). "Subassembly Tests and Finite Element Analyses of Sandwiched Buckling-restrained Braces." *Engineering Structures*, 32, 2108-2121.
2. Chou, C.C., Hsiao, C.H., Chen, Z.B., Chung, P.T., and Pham, D.H. (2019). "Seismic Loading Tests of Full-Scale Two-Story Steel Building Frames with Self-Centering Braces and Buckling-Restrained Braces." *Thin-Walled Structures*, 140, 168-181.
3. 周中哲、蕭佳宏、陳澤邦、鍾秉庭、范廷海 (2017)，「全尺寸二層樓雙核心自復位斜撐構架與夾型挫屈束制斜撐構架之耐震試驗與非線性動力歷時分析」，*結構工程*，第三十二卷，第二期，第 35-64 頁
4. 周中哲、鍾秉庭 (2019)，「廣慈博愛園區 D 標大樓夾型鋼骨挫屈束制消能支撐試驗」，成果報告，長榮鋼鐵股份有限公司，國立臺灣大學地震工程研究中心。
5. 周中哲、鍾秉庭 (2018)，「台北市私立延平高級中學夾型鋼骨挫屈束制消能支撐試驗」，成果報告，東鋼結構股份有限公司，國立臺灣大學地震工程研究中心。
6. 周中哲、鍾秉庭 (2017)，「華邦電子竹北大樓夾型鋼骨挫屈束制消能支撐試驗」，成果報告，東鋼結構股份有限公司，國立臺灣大學地震工程研究中心。
7. AISC 341-16. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.
8. Chou, C.C., Chung, P.T., and Cheng, Y.T. (2016). "Experimental Evaluation of Large-Scale Dual-Core Self-Centering Braces and Sandwiched Buckling-Restrained Braces." *Engineering Structures*, 116, 12-25.
9. Chou, C.C. and Liu, J.H. (2012). "Frame and Brace Action Forces on Steel Corner Gusset Plate Connections in Buckling-Restrained Braced Frames." *Earthquake Spectra*, 28(2), 531-551.
10. Chou, C.C., Liu, J.H., and Pham D.H. (2012). "Steel Buckling-Restrained Braced Frames with Single and Dual Corner Gusset Connections: Seismic Tests and Analyses." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 7(41), 1137-1156.
11. 臺灣建築耐震設計規範 (2011)，內政部建築研究所。

UG 聯合大地工程顧問股份有限公司
UNITED GEOTECH, INC.

台北市內湖區瑞光路583巷21號5樓
TEL : +886-2-27985198 · FAX : +886-2-26580958
E-Mail : services@mail.ugi.com.tw

• 大地工程之調查規劃設計與監造
Geotechnical Engineering

• 隧道設計、監造與檢測補強
Design、Construction Supervision &
Rehabilitation of Tunnels

• 工程地質與工址調查、地球物理探測
Engineering Geology、Site Investigation &
Geophysical Prospecting

• 水利水保工程之規劃設計與監造
Hydraulic Engineering、Soil & Water Conservation

• 土木運輸工程之規劃設計與監造
Transportation Engineering

• 專案管理
Project Management

