屈東制総務

周中哲/國立臺灣大學土木工程學系教授、國立臺灣大學地震工程研究中心主任、 國家地震工程研究中心兼任研究員

鍾秉庭/國立臺灣大學地震工程研究中心助理

吴宗翰、陳澤邦、蕭佳宏/國立臺灣大學土木工程學系研究生

Dinh-Hai Pham、Alexis Rafael Ovalle Beato/國立臺灣大學土木工程學系研究生

摘要

本研究設計及試驗一種可提升結構物抗震能力 的鋼造夾型挫屈束制斜撐構架及雙核心自復位斜撐構 架,挫屈束制斜撐(BRB)提供飽滿的能量消散但 會產生大的殘餘變形,雙核心自復位斜撐在反覆載重 下具有旗幟型自復位的消能行為,可有效減少殘餘變 形。本文首先介紹此兩種斜撐的力學行為,並以動力 分析模擬三層樓構架在20組地震下之平均最大變形與 殘餘變形,並首次進行鋼造夾型挫屈束制斜撐及雙核 心自復位斜撐之構架設計和實驗,結果顯示此兩種斜 撐構架在試驗過程均保持良好的耐震能力。

Abstract

Traditional seismic resisting systems in a large earthquake can experience significant damage and residual drifts due to energy dissipation of some structural members, which leads to difficult or expensive to repair after earthquakes. A steel dual-core selfcentering brace (DC-SCB), which utilizes three steel bracing members, two friction devices, and two sets of tensioning elements that are in a parallel arrangement for doubling its axial deformation, has been proposed and validated to provide both the energy dissipation and self-centering properties to seismic resisting systems. A prototype three-story steel dual-core selfcentering braced frame (DC-SCBF) was designed, and its full-scale one-bay DC-SCBF was tested to validate the system response. The DC-SCB was then replaced by the sandwiched buckling-restrained brace (SBRB) in a full-scale two-story frame, so the seismic performance of the DC-SCBF and the special mixed braced frame (SMBF) that has both the DC-SCB and SBRB in a frame could be evaluated. The full-scale two-story DC-SCBF, SMBF and BRBF subassembly specimen performed well up to an interstory drift of 2% after multiple tests. Nonlinear time history analyses were also performed on the prototype braced frames to obtain seismic demands.

鋼造結構物受震後的兩大課題

鋼造建築物中常見的制震系統以抗彎構架及斜撐 構架為主,均利用結構構件非線性韌性行為降低結構 物承受之地震力,但反覆的非線性行為易產生結構破 壞與殘餘變形,使結構物修復的困難度大幅增加,因 此(1)如何提升結構物在地震下的自復位能力以降低結 構物受震後的修復費用,及(2)提升結構物在大地震後 的抗震能力以承受接下來之地震是一項重要課題。同 心鋼斜撐構架藉由斜撐提供高勁度與消能行為,但由 於斜撐挫屈會導致結構破壞集中於特定樓層。作者等 人^[1-3]曾發展夾型挫屈束制斜撐(SBRB),此種新式挫 屈束制斜撐將核心構件與兩組獨立分離之圍束構件利 用螺栓栓接組合而成,斜撐耐震行為遠高於AISC^[4]要 求,地震過後亦可將圍束構件與核心構件相接之螺栓 直接鬆開分離,檢查斜撐之核心構件是否發生破壞, 加速震後檢測及更換機制,達到節省成本及永續環保 目的。雖然挫屈束制斜撐之良好遲滯行為能加強斜撐 構架之耐震性能^[5-10],但結構物在地震作用下會因斜撐 消釋能量而造成結構物產生殘餘變形^[11-17]。

為減少結構物因地震災害造成之殘餘變形,亦有 使用記憶合金製成之自復位斜撐被提出[18,19],但記憶 合金斜撐過於昂貴且難以根據結構物受大地震力作設 計。因此學者 Christopoulos 等人^[13] 提出單核心自復位 斜撐 (SCED), 由兩組鋼受壓構件、一組消能構件及 施加於斜撐構件預力之拉力構件所組成,此自復位斜 撐可承受軸向變形,並提供一穩定之能量消散與自復 位之能力,但由於該自復位斜撐之變形量受制於所使 用之拉力構件應變能力,因此對拉力構件線彈性應變 需求極高,也無法使用於大變形需求下之斜撐構件。 學者周中哲與陳映全^[20-22]發展雙核心自復位斜撐(DC-SCB),利用增加一組鋼受壓構件與一組拉力構件改變斜 撐中的傳力機制,在相同拉力構件應變下,使雙核心 自復位斜撐變形量可達單核心自復位斜撐變形量的兩 倍,或是在相同斜撐變形量下大幅降低對拉力構件彈 性應變需求[3,15-17,20-27]。學者周中哲與鍾秉庭[10] 進一步 發展交錨型雙核心自復位斜撐,改變前一代雙核心自 復位斜撐之兩組拉力構件與三組鋼受壓構件的配置, 减少外圍斷面尺寸,目拉力構件所需施拉預力的數量 僅為前一代雙核心自復位斜撐之拉力構件所需施拉預 力數量的一半[27]。

本文首先介紹鋼造夾型挫屈束制斜撐(SBRB) 及雙核心自復位斜撐(DC-SCB)之力學行為和工程應 用實例,接著設計三層樓單跨雙核心自復位斜撐構架 (DC-SCBF)與特殊抗彎構架(SMRF),利用 20 組 地震歷時在設計地震層級地震力(DBE)與最大地震 層級地震力(MCE)下對構架進行非線性動力歷時分 析,探討構架之平均最大變形與殘餘變形的差異,並 首次將預力自復位鋼造斜撐及夾型挫屈束制斜撐一起 搭配應用於構架系統中,進行一層樓單跨 DC-SCBF 和 二層樓單跨 DC-SCBF、二層樓單跨特殊混合斜撐構架 (SMBF)及二層樓單跨 BRBF之實尺寸構架耐震試 驗,其中 SMBF 構架為 DC-SCB 及 SBRB 共同使用於 單一斜撐構架中,實驗目的在於驗證不同斜撐構架之 變形能力、消能能力、殘餘變形與耐用性能。

夾型挫屈束制斜撐及雙核心自復位 斜撐之力學行為及試驗

夾型挫屈束制斜撐 (SBRB)

挫屈束制斜撐是一種韌性消能斜撐,作者等人研發的夾型挫屈束制斜撐(圖1(a)),主要由一組核心構件及兩組相同的圍束構件以螺栓夾合的方式組成^[1],此種 SBRB 的兩組圍束構件是由槽鋼銲接於鋼板組成,內部可填或不填充水泥砂漿或混凝土,易於工廠內組裝,也易於現地拆解,提供建築物震後檢查核心構件的機會,也提供震後可更換損壞的核心構件機制,由於圍束構件可重複使用,因此具環保及永續使用功能,此種 SBRB 可以單或雙接合板與構架相接,雙接合板面外穩定度較單接合板高^[2,3,15-17]。

作者等人於過去的研究中共計測試 15 種不同尺 寸的夾型挫屈束制消能斜撐(SBRB),在臺灣已實驗 過的 SBRB 最大長度為 8,660 mm,最大降伏力 5,200 kN,最大軸壓力 6,800 kN^[8,9],研究顯示此種 SBRB 的 耐震性能(圖 1(b)與 1(c))遠優於美國 AISC^[4]耐震規 範的各項要求,且最大軸力拉壓差比可小於 5%;11 m 長的夾型挫屈束制斜撐也曾於中國同濟大學大型實驗 室進行反覆載重測試,斜撐反應非常良好,也遠優於 中國耐震規範對挫屈束制斜撐的嚴格要求,試體測試 結束經檢視也未發生破壞。

此種夾型挫屈束制斜撐分別於 2014 年使用於臺灣 高雄市立圖書總館新建工程及中國甘肅省科技館新建



工程的主要抗震消能機制(圖2),其中約6m長且構件最大外斷面尺寸362mm×342mm的夾型挫屈束制斜撐使用於高雄市立圖書總館,並於2013年在內政部營建署建築研究所進行實尺寸測試,測試之最大軸拉力及軸壓力分別約為6,550kN及6,800kN(最大拉壓力差約4%),穩定的消能行為遠優於美國AISC^[4]及臺灣耐震規範對 BRB的要求^{[28]。}

雙核心自復位斜撐(DC-SCB)

雙核心自復位斜撐(Dual-Core Self-Centering Brace, DC-SCB)不但能減低建築物在地震下的最大側向變 形,並同時具自復位的能力以降低斜撐及建築物於地震 後的側向殘餘變形(Residual Deformation)。周中哲與鍾 秉庭於 2014 年發展交錨型雙核心自復位斜撐,其組成 包含三組鋼受壓構件、兩組拉力構件、兩組消能構件及 四片端板,其中第一核心構件、第二核心構件及外層構 件均為一方形鋼管,外層構件將第一核心構件、第二核 心構件及兩組拉力構件包覆其中,內端板固定於第二核 心構件兩側,外端板放置於第一核心構件與外層構件之 兩側。在斜撐端部由第一核心構件伸出之鋼板與外層構 件之角鋼間利用螺栓固定,藉由界面之相對位移產生摩 擦消能。

DC-SCB 之力學行為如圖 3 所示,當軸拉力未超過 消能構件與預力所提供之力量時,斜撐不會有明顯的 變形量,當軸拉力超過消能構件與預力所提供之力量 Fdt 時,斜撐發揮消能效果:





(b)甘肅科技館圖 2 夾型挫屈束制斜撐(SBRB)在臺灣及中國大陸之工程 應用案例

$$F_{dt} = P_{dt} + P_f = \frac{n}{2}T_{in} + P_f$$
(1)

其中 n/2 為一組拉力構件之數量(內外層拉力構件數量 皆為 n/2), T_{in} 為單支拉力構件之初始預力, P_f 為摩擦 力。斜撐受軸拉時的開啟力 F_d 對應到開啟位移 Δ_d:

$$\Delta_{dt} = \frac{P_{ob,in} + P_f}{K_{ob}} \tag{2}$$

其中 $P_{ob,in}$ 為外層構件在初始預力時所分配到的力量, K_{ob} 為外層構件之軸向勁度。斜撐受軸拉時,斜撐之初 始彈性勁度為 $K_{m,ii}(=F_{di}/\Delta_{di})$,而後彈性勁度 $K_{m,pi}$ 由軸 向力量所經過的兩組拉力構件與第二核心構件之軸向 勁度串聯而得:

$$K_{m,pt} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{n}{2}K_{ten}} + \frac{1}{K_{2c}} + \frac{1}{\frac{n}{2}K_{ten}}}$$
(3)

其中 K_{ten} 與 K_{2c} 分別為單支拉力構件與第二核心構件之 軸向勁度。當斜撐受軸拉時,外層構件會頂著右側外端 板向右方移動(圖 3b),藉由外層拉力構件將力量從右 側外端板傳至左側內端板,並由第二核心構件將力量傳 至右側內端板,再由內層拉力構件將力量傳至左側外端 板,此時斜撐之伸長量 28 為內層與外層拉力構件之伸長 量(δ)之合,顯示拉力構件有 δ 的伸長量,整體斜撐會 有 28 變形量。拉力構件之伸長量造成的額外拉力便可在 斜撐卸載時將兩受壓構件拉回至初始位置,擁有自復位 能力(圖 3(c))。當斜撐受軸壓時,會有類似力學行為。

圖4為7.95-m長DC-SCB於國家地震工程研究中 心進行六階段試驗,使用兩支油壓千斤頂施力於連接柱 與斜撐的傳力梁上(圖4(a)),斜撐角度為26°,並利用 雙接合板將梁柱與斜撐連結,此雙接合板因配置在斜撐 端部兩側,距斜撐中心軸遠,造成雙接合板斷面慣性矩 較傳統單接合板大,所以不易挫屈^{[3,15-17]。}斜撐之鋼材使 用ASTM A572 Gr. 50、兩組拉力構件使用12支ASTM A416 Gr. 270高強度鋼絞線及使用4顆M20F10螺栓施 加力量於C2680黃銅作為斜撐摩擦消能,DC-SCB的第 一核心構件斷面尺寸為T250×280×8mm之方型鋼 管,外層構件斷面尺寸為T210×240×10mm之方型鋼 管,外層構件斷面尺寸為T340×340×8mm之方型鋼 管(圖4(b))。本斜撐共進行六階段試驗,Phase1為標 準載重試驗,是為由小至大的層間側位移角(0.09%、



(c)力量與位移關係圖

圖 3 交錨型雙核心自復位斜撐 (DC-SCB) 之力學行為及遲 滯反應



0.18%、0.36%、0.5%、1%、1.5%及2%)各反覆加載 兩圈所組成;Phase 2為疲勞載重試驗,在層間側位移 角1.5% 重複加載15圈。圖4(c)為DC-SCB在第1及第 2階段試驗的軸力與軸位移關係圖,最大軸力可達1700 kN,殘餘變形相較BRB小很多(圖1(b)),且斜撐之 軸拉力與軸壓力的反應相當對稱,在層間側位移角2% 時,拉力構件應變0.66%小於鋼鉸線降伏應變0.7%,因 此拉力構件沒有降伏。第3及第4階段試驗重複第1階 段試驗之加載歷時並增加層間側位移角2.5%反覆加載兩 圈,第5及第6階段試驗分別為層間側位移角1.5%重複 加載30圈及2.5%重複加載15圈,DC-SCB進行六階段 試驗後,斜撐鋼構件及拉力構件沒有發現損壞,且試驗 過程保持良好的旗幟型自復位消能行為^[10]。

三層樓單跨雙核心自復位斜撐構架 (DC-SCBF) 與特殊抗彎構架 (SMRF) 之耐震分析

三層樓單跨 DC-SCBF 與 SMRF 構架之 參數設計及側推分析

本研究之三層樓單跨雙核心自復位斜撐構架(DC-SCBF)及特殊抗彎構架(SMRF)假設座落於美國洛杉磯堅硬土壤(Firm Soil)上,結構物為三層樓3×3跨,X向為三跨,跨距均為9m,Y向為三跨,其跨距分別為6m、9m及6m,X向有兩個單跨的DC-SCBF或SMRF,圖5a與5b分別為三層樓單跨DC-SCBF與SMRF的立面圖,一、二及三樓之樓高分別為3.96m、3.58m及3.56m,總高度為11.1m。三層樓3×3跨結構物之一樓及二樓的設計靜載重為110psf(5.28kN/m²),三樓的設計靜載重則為90psf(4.32kN/m²),總載重W為8,443kN。

本研究之結構物為辦公大樓,屬於第 I 類地震需 求,其重要係數 I 為 1.0,工址等級為 C,位於堅硬的土 壤區,根據以上的設計需求,可知該區域地震反應譜之 短週期 0.2 秒加速度 (S_s) 為 1.5 g,且週期為 1 秒時之 加速度 S_I 為 0.6 g。由美國耐震規範 ASCE^[29]的公式可 得設計反應譜短週期 (S_{DS}) 及 1 秒週期 (S_{D1}) 之加速度 分別為 1.0 g 及 0.6 g,並根據 ASCE^[29] 針對挫屈束制斜 撐構架的強度折減係數 *R* 定為 8 (DC-SCBF 和 SMRF), 超強因子 Ω_0 為 2.5 (DC-SCBF) 和 3 (SMRF),位移放



圖 5 三層樓單跨 DC-SCBF 及 SMRF 之構架尺寸和側推分析

大係數 C_d 為 5 (DC-SCBF)和 5.5 (SMRF),系統贅餘 力的可靠係數 ρ 為 1.5 (DC-SCBF和 SMRF),結構物週 期公式採用 ASCE ^[29] 耐震設計準則:

 $T_a = C_t h^x \tag{4}$

其中 C_{t} 為 0.0731 (DC-SCBF) 和 0.0724 (SMRF), x 為 0.75 (DC-SCBF) 和 0.8 (SMRF), h 為結構物高 度。因此三層樓單跨 DC-SCBF 和 SMRF 之設計參數如 表 1 所示,三層樓單跨 DC-SCBF 及 SMRF 之電腦分析 模型第一模態週期 T_{1} 分別為 0.47 秒及 1.02 秒。 三層樓單跨 DC-SCB 及 SMRF 和一層樓單跨 DC-SCBF 利用電腦模擬分析軟體 PISA^[30]進行側推分析 (圖 5c),圖中顯示 DC-SCBF 及 SMRF 在各頂層側位 移角下之梁、柱及斜撐等各構件的降伏位置,可知三 層樓單跨 DC-SCBF 及一層樓單跨 DC-SCBF 之構架初 始勁度幾乎相同,且構架初始降伏力均大於設計基底 剪力 792 kN (DC-SCBF)及 592 kN (SMRF)。

表1 三層樓單跨 DC-SCBF 及 SMRF 設計參數

構架類型	Cs	重量 (kN)	設計基底剪力 (kN)	第一模態週期, T1(sec)	規範週期, 1.4Ta (sec)
DC-SCBF	0.125	4222	792	0.47	0.62
SMRF	0.093	4222	592	1.02	0.69

三層樓單跨 DC-SCBF 與 SMRF 構架於 地震下的反應

本研究挑選 20 個美國加州或臺灣的強地動地震 紀錄進行動力歷時分析,地震紀錄規模從 6.7 至 7.3 不 等,土壤類型為 C 或 D,挑選的紀錄不受近斷層效應 影響,並以設計地震層級 (DBE)下地震歷時放大 1.5 倍以探討構架在最大地震層級 (MCE)下之耐震需 求。由圖 6 可知,三層樓單跨 DC-SCBF 及 SMRF 之 兩組構架系統在 20 組地震歷時下的設計地震反應譜及 反應平均值, DC-SCBF 的層間側位移角反應明顯小於 SMRF 反應,且 DC-SCBF 在 MCE 地震層級下沒有如 SMRF 有明顯的殘餘變形產生。

鋼造夾型挫屈束制斜撐及雙核心 自復位斜撐之構架試驗

本研究在 2014 年 3 月使用前述三層樓 DC-SCBF 中的一樓進行一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 構架試驗, 並在 2014 年 12 月進行二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 構 架試驗,接著將二樓之 DC-SCB 換成 SBRB 進行二層



樓單跨實尺寸 SMBF 構架試驗,試驗完成後則將一樓 之 DC-SCB 換成 SBRB,進行二層樓單跨實尺寸 BRBF 構架試驗,構架試驗均在國家地震工程研究中心實驗室 進行測試,目的在瞭解自復位斜撐構架與挫屈束制斜 撐構架的耐震性能、側向勁度、消能能力與側向變形 等行為。構架組成為 ASTM A572 Gr. 50 鋼材之一樓梁 (H500×200×10×16 mm)、二樓梁(H500×200×9× 14 mm)、柱(H414×405×18×28 mm)及接合板,一 層樓及二層樓單跨實尺寸構架試驗均使用四支油壓千斤 頂施力於連接構架試驗的傳力梁上,並利用雙接合板將 梁柱與斜撐連結,此雙接合板因配置在斜撐端部兩側, 距斜撐中心軸遠,造成雙接合板斷面慣性矩較傳統單接 合板大,所以不易挫屈^[3,15-17]。

本研究之四組構架試驗分別使用兩組夾型挫屈 束制斜撐(SBRB)及兩組雙核心自復位斜撐(DC-SCB),兩組 SBRB 之核心構件消能段斷面積均為 55 mm×18 mm,核心構件鋼材材質均為 SN490B,設計 降伏力為 386 kN,並根據周中哲與陳昇陽^[1]所提出的 建議作設計準則;兩組 DC-SCB 之三組鋼受壓構件均 使用 ASTM A572 Gr. 50 鋼材,拉力構件均使用 12 支 ASTM A416 Gr. 270 高強度鋼鉸線及使用 4 顆 M20 F10 螺栓施加力量於 C2680 黃銅作為斜撐摩擦消能,並根 據以往的研究結果^[10,21,22] 作為斜撐的設計準則,因此 DC-SCB 之初始預力及摩擦力的設計參數如表 2 所示。

表 2 三層樓單跨 DC-SCBF 之斜撐在各樓層的設計參數

		雙核心自	2% 層間側位移角				
樓層	需求力量	設計軸力	鉸線預力	摩擦力	鉸線	最大軸力	鉸線最大應變
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	數量	(kN)	(%)
3	349	400	277	123	8	941	0.75
2	630	700	416	284	12	1492	0.75
1	729	800	416	384	12	1597	0.76

一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 構架試驗

● 一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 試驗規劃

本研究^[7-10]進行一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 構架 試驗的標準反覆加載歷時是參考美國耐震規範 AISC^[4] 針對挫屈束制斜撐構架所建議之加載歷時,層間側位 移角由小至大分別為 0.09%、0.18%、0.36%、0.5%、 1%、1.5% 及 2%,除此之外,本研究也利用 20 組地 震歷時針對所設計的三層樓單跨雙核心自復位斜撐構 架進行非線性動力歷時分析,並依據設計地震反應譜 的相似度,挑選 IND090 與 TCU039 兩組地震分別在 DBE 層級與 MCE 層級下的一層樓位移反應歷時進行構 架試驗的位移歷時控制。

為了檢驗一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 之變形能 力、消能能力、殘餘變形及耐用性能,本研究共進行 八階段試驗的反覆載重,各階段試驗分述如下。

- 第1階段試驗(無摩擦消能階段試驗):由小至大的 反覆加載2圈位移歷時至層間側位移角0.5%,以檢 驗初始預力。
- 2.第2階段試驗(無摩擦消能階段試驗):由小至大的 反覆加載2圈位移歷時至層間側位移角2%,以檢驗 DC-SCBF在斜撐無摩擦消能下的行為。
- 3.第3階段試驗(標準試驗):由小至大的反覆加載2
 圈位移歷時至層間側位移角2%,以檢驗DC-SCB在 斜撐含有摩擦消能下的行為。
- 4.第4階段試驗(地震歷時試驗):使用 IND090 DBE 層級之三層樓構架的一樓位移歷時作為 DC-SCBF 實 驗的位移控制歷時。
- 5.第5階段試驗(地震歷時試驗):使用 IND090 MCE 層級之三層樓構架的一樓位移歷時作為 DC-SCBF 實 驗的位移控制歷時。
- 6.第6階段試驗(地震歷時試驗):使用 TCU039 DBE 層級之三層樓構架的一樓位移歷時作為 DC-SCBF 實 驗的位移控制歷時。
- 7.第7階段試驗(地震歷時試驗):使用 TCU039 MCE 層級之三層樓構架的一樓位移歷時作為 DC-SCBF 實 驗的位移控制歷時。
- 8.第8階段試驗(疲勞試驗):固定層間側位移角1.5%下,重複加載10圈的位移歷時。

● 一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 試驗結果

不含摩擦消能裝置之雙核心自復位斜撐為一雙線性彈性行為,使得構架 DC-SCBF 在層間側位移角 0.5% 之前保持雙線性彈性行為,DC-SCBF 在第1與第 2階段試驗可求得斜撐之初始預力為440 kN,層間側 位移角1%時梁近柱端降伏。在第2階段試驗之層間側 位移角1.5%時,靠近千斤頂側之梁端翼板發生局部挫 屈,此現象並無在梁柱與斜撐接合處發生,在第2階 段試驗結束後,將梁端進行梁翼內側加勁板補強,使 用4片12 mm厚的ASTM A572 Gr. 50 鋼材銲接在易發 生梁局部挫屈處的梁翼內部,加強千斤頂側之梁端抵 抗局部挫屈的能力,此種梁翼內側加勁技術在過去也 進行過多組梁柱接頭實驗,證明此梁柱抗彎接頭具有 在多次大變形實驗下仍能滿足美國及臺灣最新耐震規 範的要求^[31-33]。

第3階段試驗之加載歷時和第2階段試驗相同, 但此階段斜撐使用 M20 F10 螺栓施力於 C2680 黃銅上 而使斜撐提供摩擦消能。圖7為一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 在第3、第7及第8階段試驗之千斤頂側力與 側位移關係圖,在第3階段試驗之層間側位移角1.3% 時,靠近千斤頂側的梁端發生降伏,在層間側位移角 2%時,靠近千斤頂側之梁端局部挫屈因梁翼內側加勁 板而成功遠離柱面,且梁挫屈變形量小於第2階段試 驗時之情形(圖8)。

圖 9(a) 為雙核心自復位斜撐(DC-SCB) 和梁柱構架(MRF) 之側力比, 柱剪力由黏貼於柱腹板之三軸應變計轉換而得, 斜撐軸力可由千斤頂側力減去柱剪 力再和斜撐與水平夾角關係轉換而得, 斜撐軸向變形 由架設於斜撐端部之位移計而得。由圖可知在第3階 段試驗時,斜撐裝上消能裝置,使得斜撐所佔的側力 比明顯高於梁柱構架的側力比。圖9(b)為DC-SCB和 MRF之能量消散,顯示DC-SCB在第8階段試驗的 消散能量和第3階段試驗的消散能量相似,且遠超過 MRF的能量消散。圖9(c)為DC-SCBF在各階段試驗 之斜撐的預力與摩擦力變化,圖中顯示斜撐預力在第 二階段試驗時略為損失,之後均不再變化,多次試驗 後則導致黃銅表面耗損而使得摩擦力逐漸減少,即斜 撐提供的消散能量也會些許下降。

二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 三組構架試驗

● 二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 三組 構架試驗規劃

本研究進行二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 三組構架試驗的標準反覆加載歷時也是參考





圖 8 一層樓 DC-SCBF 在層間側位移角 2% 之實驗情形 (第 3 階段試驗)



美國耐震規範 AISC^[4] 針對挫屈束制斜撐構架所建議之 加載歷時,二樓頂層側位移角分別為 0.05%、0.1%、 0.2%、0.4%、0.8%、1.2% 及 1.6%,在二樓頂層側位移 角達 1.6%時,二樓的樓層層間位移角可達 2%,一樓 的層間位移角可達 1.2%。本研究也利用 20 組地震歷時 針對所設計的三層樓雙核心自復位斜撐構架在 IND090 與 CNP196 兩組地震下(MCE 層級)之二樓頂層位移 反應歷時進行構架位移控制試驗。

為了檢驗二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 之變形能力、消能能力、殘餘變形及耐用性能, 本研究共進行六階段試驗的反覆載重,各階段試驗分 述如下:

- 第1階段試驗(無摩擦消能階段試驗):由小至大的 反覆加載2圈位移歷時至二樓頂層側位移角0.4%, 以檢驗初始預力。
- 2.第2階段試驗(無摩擦消能階段試驗):由小至大的 反覆加載2圈位移歷時至二樓頂層側位移角1.6%, 以檢驗 DC-SCBF 構架在斜撐無摩擦消能時的反應。
- 3.第3階段試驗(標準試驗):由小至大的反覆加載2 圈位移歷時至二樓頂層側位移角1.6%,以檢驗DC-SCBF構架在斜撐具摩擦消能時的反應。
- 4.第4階段試驗(地震歷時試驗):使用 IND090 MCE 層級之三層樓構架的二樓位移歷時作為二層樓構架 的位移控制歷時實驗。

- 5.第5階段試驗(地震歷時試驗):使用 CNP196 MCE 層級之三層樓構架的二樓位移歷時作為二層樓構架 的位移控制歷時實驗。
- 6.第6階段試驗(疲勞試驗):固定二樓頂層側位移角1.2%下,重複加載10圈的位移歷時實驗。
- 二層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 三組 構架試驗結果

DC-SCBF 在第1階段試驗時,二樓層間側位移角 達 0.14%時二樓之 DC-SCB 達開啟力。DC-SCBF 在第 2階段試驗時,二樓頂層側位移角 1.2%之千斤頂側的 柱底翼板降伏,二樓頂層側位移角 1.6%(二樓層間側位 移角 2%時)之一樓及二樓梁端均產生些微降伏。DC-SCBF 在六階段試驗結束後,僅發現柱底、一樓和二樓 梁端及接合板些許降伏,沒有發生挫屈或破壞現象。

DC-SCBF在第3階段試驗之加載歷時和第2階 段試驗相同,但此階段斜撐使用M20F10螺栓施力 於C2680黃銅上而使得DC-SCB斜撐提供摩擦消能能 力。圖10為二層樓單跨實尺寸DC-SCBF在第3及第 6階段試驗之千斤頂側力與側位移關係圖,整體構架反 應穩定且力量對稱,並有良好的自復位消能行為。在 第3階段試驗時,構架最大側力2,074 kN,對應一樓 及二樓斜撐最大軸力分別為1,467 kN與1,633 kN(圖 11),此圖也顯示二樓斜撐軸向變形大於一樓斜撐軸向 變形,符合分析預期。



DC-SCBF 構架試驗結束後,將二樓 DC-SCB 換成 SBRB,接著進行和 DC-SCBF 相同的六階段 SMBF 構架 試驗(圖 12(a)), SMBF 在前4 階段試驗下的耐震行為均 很好,在第5階段試驗結束後,發現靠近千斤頂側之二樓 梁端下翼板與接合板焊接處發生些微裂縫,修補開裂處後 進行第6階段試驗,SMBF在第6階段試驗結束後,各構 件沒有發現任何破壞及挫屈。SMBF 構架試驗結束後,將 一樓 DC-SCB 也換成 SBRB,接著進行和 DC-SCBF 相同 六階段的 BRBF 構架試驗 (圖 12(b)), BRBF 在第3 階段 試驗之二樓頂層側位移角 1.6% 時(二樓層間側位移角 2% 時),靠近千斤頂側之二樓梁端發生輕微局部挫屈,第3 階段試驗結束後,一樓上側接合板、二樓下側接合板與一 樓梁端接合處銲道發生輕微裂縫,經過修補後則進行後面 三階段試驗。這些銲道接合的裂縫皆起因於二層樓斜撐構 架經歷過多次大變形的反覆載重測試造成銲材及構件間的 疲勞破壞,並不影響其耐震性能評估。

圖 13 為二層 樓 單 跨 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 在第 3 階段試驗之千斤頂側力與側位移比較圖,在 第 3 階段試驗之二樓頂層側位移角 1.6%(二樓層間 側 位移角 2%)時,DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 之構 架最大側力分別為 2274 kN、1764 kN 及 1507 kN,顯 示 DC-SCBF 擁有較大的最大側力與較小的殘餘變形, 而 BRBF 則有較小的最大側力與較大的殘餘變形。圖 14(a) 為三組二層樓單跨構架之能量消散比較,圖中顯 示在第 3 階段試驗時,DC-SCBF 所消散的能量為 168 kN-m,SMBF 與 BRBF 之消散能量分別為 DC-SCBF 的 1.3 倍與 1.2 倍,DC-SCBF 在六階段試驗後所消散的全 部能量為 806 kN-m,SMBF 及 BRBF 之全部消散能量 分別為 DC-SCBF 的 1.1 倍與 0.9 倍,雖然 DC-SCBF 擁 有較大的最大側力,但第 3 階段試驗及全部能量消散 反而是 SMBF 較多,而非 BRBF 較多。

圖 14(b) 為三組二層樓單跨構架之側向勁度比較, DC-SCBF 之側向初始彈性勁度為 43 kN/mm, SMBF 與 BRBF 之側向初始彈性勁度分別為 DC-SCBF 的 0.8 倍 與 0.6 倍, DC-SCBF 之側向非彈性勁度為 21 kN/mm, SMBF 與 BRBF 之側向非彈性勁度分別為 DC-SCBF 的 0.8 倍與 0.7 倍,顯示雙核心自復位斜撐提供構架有較 大的側向勁度。圖 14(c) 為三組二層樓單跨構架之側 向殘餘變形比較,實驗也驗證雙核心自復位斜撐(DC-SCB)提供構架最佳的自復位能力。





(b) BRBF







結論

本篇文章首先介紹過去發展的夾型挫屈束制斜撐 (SBRB)耐震性能與應用,此種 SBRB 將核心構件與 兩組獨立分離之圍束構件利用螺栓栓接組合而成,易 於工廠內銲接及組裝,也易於現地拆解,提供結構物 震後檢查 BRB 核心構件的機會,地震過後亦可將圍束 構件與核心構件相接之螺栓直接鬆開分離,並提供震 後可只需更換損壞的核心構件機制^[1,34,35],目前此種實 驗過的夾型挫屈束制斜撐最大長度11 m,最大降伏力 5,200 kN,最大軸壓力 6,800 kN,最大拉壓力差可控制 在 4%,試驗數據顯示此種 BRB 的耐震性能遠優於美 國 AISC^[4]、中國及臺灣耐震規範的各項要求,並實際 應用於中國及臺灣的建築物中。

近年來為了要更進一步地發展兼具消散地震能量 及自復位能力的抗震消能斜撐,本文介紹新發展的雙 核心自復位斜撐(DC-SCB),斜撐試驗結果顯示在反 覆載重下有良好的旗幟型自復位遲滯迴圈之力學消能 行為,在層間側位移角2.5%時,此種斜撐之最大軸力 可達6,500 kN^[25-27],驗證雙核心自復位斜撐之整體變形 能力可藉由兩組拉力構件串聯排列,達拉力構件伸長 量之兩倍,並有優異的耐震性能,且拉力構件可採用 傳統的高強度鋼絞線或高分子複合材料纖維棒製成。

本研究也設計三層樓單跨雙核心自復位斜撐構架 (DC-SCBF)與特殊抗彎構架(SMRF),利用 20 組地 震歷時在設計地震層級地震力(DBE)與最大地震層級 地震力(MCE)下對構架進行非線性動力歷時分析, 發現 DC-SCBF之自復位及消能能力可達到較 SMRF小 的最大層間側位移角及殘餘變形,過去研究也証實其 最大層間位移角及殘餘變形也較 BRBF小^[14,25-27]。

本研究亦進行一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 和二 層樓單跨實尺寸 DC-SCBF、SMBF 及 BRBF 之耐震試 驗,試驗結果顯示一層樓單跨實尺寸 DC-SCBF 在八階 段試驗下所消散的總能量為 AISC^[4] 標準反覆載重試驗 (第3階段試驗)的3.5倍。二層樓單跨DC-SCBF、 SMBF 及 BRBF 在第3 階段試驗之二樓層間側位移角 2% 時,顯示 DC-SCBF 擁有較大的最大側力與較小的 殘餘變形。在第3階段試驗時,DC-SCBF所消散的 能量為168 kN-m, SMBF與BRBF之消散能量分別為 DC-SCBF 的 1.3 倍與 1.2 倍, DC-SCBF 在共六階段試 驗後所消散的全部能量為 806 kN-m, SMBF 及 BRBF 之全部消散能量分別為 DC-SCBF 的 1.1 倍與 0.9 倍, 累積能量顯示不同斜撐構架間之差距不大。同時,DC-SCBF之側向初始彈性勁度為43 kN/mm, SMBF與 BRBF 之側向初始彈性勁度分別為 DC-SCBF 的 0.8 倍 與 0.6 倍, DC-SCBF 之側向非彈性勁度為 21 kN/mm, SMBF與 BRBF 之側向非彈性勁度分別為 DC-SCBF 的 0.8 倍與 0.7 倍, 顯示雙核心自復位斜撐提供構架有較 佳的彈性及非彈性側向勁度,使用1支DC-SCB取代1 支 BRB 可使 2 層樓 BRBF 構架實驗時的側向勁度提高 約20%,本研究也證實雙核心自復位斜撐構架有足夠的 能量消散能力及降低構架受地震後殘餘變形之能力。

誌謝

本研究承蒙科技部補助三年期(2013~2016)的 優秀年輕學者研究計畫及國立臺灣大學三年期(2013~ 2016)的桂冠型研究計畫,使得鋼造夾型挫屈束制斜 撐及雙核心自復位斜撐構架設計及3組實尺寸斜撐構 架耐震實驗工作順利進行,並感謝國家地震工程研究 中心提供實驗方面的協助,本研究科技部計畫編號: NSC-102-2221-E-002-101-MY3,臺灣大學桂冠型研究 計畫編號:102R7771、103R7771、104R7771。

參考文獻

- 周中哲、陳昇陽(2010)「可更換核心板之挫屈束制消能支撐耐 震試驗及有限元素分析」,結構工程,第二十五卷,第一期,第 43-70頁。
- 周中哲、劉佳豪(2011)「挫屈束制消能斜撐構架接合板耐震設計 及試驗分析」,結構工程,第二十六卷,第四期,第91-100頁。
- 3. 周中哲、劉佳豪(2012)「可更換核心板之挫屈束制消能斜撐實尺 寸構架耐震試驗:單與雙接合板設計及驗證」,結構工程,第二十 七卷,第二期,第95-114頁。
- 4. AISC. 2010. Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- 5. 陳正誠(2000)「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,第53-78頁。
- 6. 蔡克銓、賴俊維(2002)「鋼骨消能支撐構架之耐震研究」,結構 工程,第十七卷,第二期,第3-32頁。
- 7. 周中哲、吳宗翰, Alexis Rafael Ovalle Beato, 鍾秉庭,陳映全, 周志雄(2014)「新型鋼造雙核心自復位斜撐構架設計與耐震試驗 行為」,研究報告編號:NCREE No. 14-029,國家實驗研究院國家 地震工程研究中心。
- 周中哲,、鍾秉庭、范廷海、鄭宇岑、陳映全(2014)「夾型挫屈 束制斜撐及雙核心自復位斜撐減震技術發展與應用」,減震技術通 訊,第一期,第15-20頁,中國。
- 9. 周中哲、陳映全、范廷海、鍾秉庭、張武明(2014)「鋼造雙核心 自復位斜撐實驗分析與韌性斜撐構架之動力歷時行為」,結構工 程,第二十九卷,第三期,第81-104頁。
- 周中哲、鍾秉庭(2014)「交錨型雙核心自復位斜撐發展驗證: 耐震試驗及有限元素分析」,結構工程,第二十九卷,第二期, 第 82-103頁。
- Fahnestock, L.A., Sause, R., and Ricles, J., 2003. Analytical and experimental studies on buckling restraint braced composite frames, Proc. Int. Workshop on Steel and Concrete Composite Construction, Rep. No: NCREE-03-026, National Taiwan University, Taiwan.
- Uang, C.M. and Kiggins, S., 2003. Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames, Int. Workshop on Steel and Concrete Composite Construction, Report No. NCREE-03-026, National Taiwan University, Taiwan.
- Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H.J., and Lacerte, M., 2008. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation, J. Structural Engineering, ASCE, 134(1), pp. 96-107.
- Tremblay, R., Lacerte, M., and Christopoulos, C., 2008. Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces, J. Structural Engineering, ASCE, 134, pp. 108-120.
- 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), pp. 1137-1156.
- 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), pp. 531-551.
- Chou, C.C., Liu, G.S., and Yu, J.C., 2012. Compressive behavior of dual-gusset-plate connections for buckling-restrained braced frames, J. Constructional Steel Research, 76, pp. 54-67.

- Filiatrault, A., Tremblay, R., and Kar, R., 2000. Seismic evaluation of friction spring seismic damper, J. Structural Engineering, ASCE, 126, pp. 491-499.
- Sheliang, W., Xindong, Z., Wang, S., and Junqiang, Z., 2004. The seismic response analysis of isolation structure with shape memory alloy re-centering dampers, in Proc. 10th JSSI Symp. On Performance of Response Controlled Buildings, Yokohama, Japan.
- 20. 周中哲、陳映全、鍾秉庭(2012)「雙核心預力拉伸自復位消能 支撐裝置」,中國、美國、日本及臺灣發明專利。
- 21. 周中哲、陳映全(2012)「鋼造雙核心自復位斜撐發展與耐震實驗:應用複合纖維材料棒為預力構件」,土木工程學報,第四十五卷,第二期,第202-206頁,中國。
- 22. 周中哲、陳映全(2012)「預力雙核心自復位斜撐發展與耐震實驗」,結構工程,第二十七卷,第三期,第108-126。
- 23. 周中哲、羅盛威、劉俊秀(2012)「翼型鋼柱與鋼梁內加勁接 頭耐震設計與試驗分析」結構工程,第二十七卷,第四期,第 51-69頁。
- Chou, C.C. and Chen, Y.C., 2013. Development of steel dual-core selfcentering braces: quasi-static cyclic tests and finite element analyses, Earthquake Spectra. (available online, September 2013).
- 25. Chou, C.C., Chen, Y.C., Pham, D.H., and Truong, V.M., 2014. Steel braced frames with dual-core SCBs and sandwiched BRBs: mechanics, modeling and seismic demands, Engineering Structures, 72, pp. 26-40.
- 26. Chou, C.C., Chung, P.T., and Cheng, Y.T., 2014. Seismic tests of large-scale energy dissipating braces: dual-core self-centering brace and sandwiched buckling-restrained brace, 5th Asia Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.
- Chou, C.C. and Chung, P.T., 2014. Development of cross-anchored dual-core self-centering braces for seismic resistance, J. Constructional Steel Research, 101, pp. 19-32.
- 28. 張盈智、周辰穎、劉佳豪(2014)「高雄市立圖書館總館全懸吊 結構之設計」,第三屆海峽兩岸建築減震技術交流會議,5月15 日,臺北市,臺灣。
- 29. ASCE Standard, Minimum Design Loads for Building and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2010.
- 30. Tsai, K.C. and Lin, B.Z., 2003. Development of an object-oriented nonlinear static and dynamic 3D structural analysis program, Center for Earthquake Engineering Research, National Taiwan University, Taiwan.
- 周中哲、饒智凱(2008)「鋼骨梁柱梁翼內側加勁板補強接頭耐 震行為」,結構工程,第二十三卷,第四期,第101-123頁。
- Chou, C.C. and Jao, C.K., 2010. Seismic rehabilitation of welded steel beam-to-box column connections utilizing internal flange stiffeners. Earthquake Spectra, 26(4), pp. 927-950.
- 33. Chou, C.C., Lo, S.W., and Liou, G.S., 2013. Internal flange stiffened moment connections with low-damage capability under seismic loading, J. Constructional Steel Research, 87, pp. 38-47.
- Chou, C.C. and Chen, S.Y., 2010. Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces, Engineering Structures, 32, pp. 2108-2121.
- 35. Chou, C.C. and Chen, P.J., 2009. Compressive behavior of central gusset plate connections for a buckling-restrained braced frame, J. Constructional Steel Research, 65(5), pp. 1138-1148.