

以 CFRP 束制鋼梁局部挫曲行為之效能評估

易楊翰¹ 鍾育霖² 潘煌鏗³

¹高雄應用科技大學土木工程系研究生

²成功大學建築系助理教授

³高雄應用科技大學土木工程系教授

摘要

本研究針對斷面切削型柱梁接頭(RBS)的局部挫曲行為，以碳纖維貼布(CFRP)提供鋼梁腹板在面外挫曲方向的束制力，藉此維持接頭強度及韌性行為，是一種簡單的施工方式以不需現場焊接或切割方式繼續提供結構物使用功能。首先測試 CFRP 貼布力學性質，並以挫曲鋼板試驗來探討 CFRP 貼布張貼在腹板面外變形在受拉側的束制效果，結果指出使用 3 層 CFRP 貼布對整體的剛度影響雖然不大，但可以有效提升其抗壓強度約 25%，同時能夠緩和大變形時的強度衰減趨勢。另外，CFRP 貼布使用螺栓錨定增加端部束制，進而使剝離破壞有延後效果。

關鍵字：斷面切削型柱梁接頭、碳纖維貼布、塑性絞、局部挫曲

Performance Evaluation of Local Buckled Steel Beam Using CFRP as the Restraint

Youn-Ham Yi¹, Yu-Lin Chung², Huang Hsing Pan³

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Applied Sciences, Kaohsiung, Taiwan

²Assistant professor, Department of Architecture, Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

³Professor, Department of Civil Engineering, Kaohsiung University of Applied Sciences, Kaohsiung, Taiwan

ABSTRACT

A restraint method applied to the local buckled welded flange-bolted web(RBS) web plate is proposed in this study to maintain the strength of the connection that makes the damaged structure be used continuously. A physic test is conducted to evaluate the out of plane retrain performance of a buckled plate with the carbon fiber reinforced plastics (CFRP) sheets attached on the tensile side. Results indicate that the compression strength of the plate increases about 25% by the presence of the CFRP sheets, and the strength corresponding to the large deformation after the maximum strength have a less deterioration. Meanwhile, using CFRP provides the boundary anchor effect that can increase the end restraint of RBS and retards debonding between the plate and CFRP.

Keywords: Reduced-beam section connection, CFRP, Plastic hinge, Local buckling

一、前言

由 1994 年北嶺地震及 1995 年神戶地震發現，廣泛使用在鋼結構翼板銲接腹板螺栓接合形式的柱梁接頭(Welded Flange-Bolted web connection, WUF-B)，並沒有發揮預期韌性效果。而後續相關研究發展出各式韌性接合形式，其性能必須滿足梁端之塑性轉角需至少達到 3% 以上等之美國鋼結構協會(AISC)標準，其中的斷面切削型柱梁接頭(Reduced-Beam Section connection, RBS connection)，係將柱梁接合點柱面起算約 0.65 倍以上梁深的距離處，將上下翼板兩側切削形成一漸變圓弧，此處斷面抗彎強度降低後將梁端部的可能弱點會由柱梁接頭移至具穩定鋼材且無接合的梁，可保證此處形成塑性鉸，避免柱梁接頭焊接處過大局部應力或是銲接品質影響接頭強度以及韌性。針對 RBS 接頭的實驗研究(Uang *et al.*, 2000; Chi *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2002; 陳誠直, 2003)，實驗包含純鋼梁試體以及含 RC 樓板之柱梁接頭試體，接頭均能發揮所期待的強度以及韌性，而樓板可減緩切削處局部挫曲並能減少挫曲後接頭強度的衰減。由於 RBS 相對於其他在接頭處焊接額外鐵件之增強型接頭有施工方便，且材料及施工快速具有經濟性的優點外，其行為及品質也較容易掌控，成為應用最為廣泛的接合形式。

鋼結構在地震中藉由 RBS 接頭形成塑性鉸，維持了結構的穩定，但地震後出現的大量的塑性鉸，卻是結構修復上的難題，切削處會因局部挫曲在反覆變形過程中逐漸降低強度，結構整體性能亦會受到影響，若採用結構拆除方式須耗費大量金錢以及環境資源浪費，若欲修復則尚未有可靠、經濟及方便的施工方式。文獻(Li *et al.*, 2009; Deylami *et al.*, 2013)指出，事先將 RBS 切削處焊接加勁板或是在面外挫曲方向外加鋼板束制腹板可以提升接頭性能，但是對於已經形成塑性鉸的接頭，因為局部挫曲的不規則變形，以及對於挫曲後的剩餘強度的評估困難，目前則尚未有相關研究提出有效的修復方式。

塑性鉸在補強或修復後的強度不能過高，以免柱梁接頭處需負擔較高強度的彎矩導致結構弱點轉移，因此若能有效束制塑性鉸處腹板的挫曲行為，將可使此斷面恢復致接近原有強度，且不致超過原有的設計強度。本研究以挫曲鋼板試驗模擬腹板的不規則殘留變形，碳纖維貼布(CFRP)張貼於腹板挫曲的受張側，達到提供強度以及韌性束制鋼板的能力。

首先以有限元數值模型探討 RBS 接頭反覆加載下的局部挫曲行為、RBS 尺寸以及接頭強度衰減間之關係，並以挫曲鋼板試驗評估 CFRP 張貼在挫曲鋼板受張側的束制效果，探討其於實務應用的可行性。

二、切削型柱梁接頭耐震行為

2.1 切削型柱梁接頭耐震行為評估

使用有限元素分析軟體 Abaqus 評估 RH 500 x 200 x 10 x 16 與 W 36 x 150 兩個尺寸的 RBS 接頭之反覆受彎行為，兩接頭的設計尺寸如圖 1 左圖所示，兩模型分別模擬跨度為 3.7 與 7.6 米的結構，左側梁端部與柱面焊接位置為固定端，另一端為跨距中心反曲點位置，以此點為位移控制端，依照 AISC 規範計算 RBS 斷面位置與側撐位置，如圖 1 離縮減斷面二分之一梁深處有側向支撐於翼板。兩模型皆使用 A572-Gr.50 鋼材，以雙線性模擬材料行為，其 $F_y=345\text{MPa}$ 、 $E=200\text{GPa}$ 、降伏後斜率為彈性模數的 1%，並以 solid 實體模型模擬梁，反覆加載歷程則參考 AISC 規範，分別以層間變形轉角 0.0375、0.005、0.0075、0.01、0.015、0.02、0.03、0.04 rad 等振幅順序反覆加載，如圖 1 右圖所示。

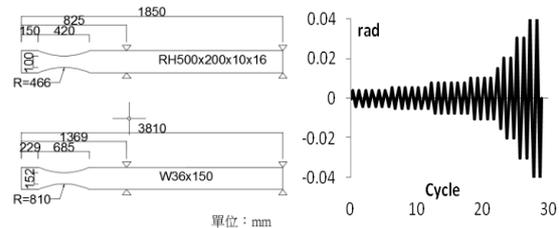


圖 1、RBS 斷面設計與側撐位置(左)、AISC 加載規範(右)

梁端部彎矩與轉角的遲滯迴圈如圖 2 所示，由兩模型接頭均滿足 AISC 對於接頭的要求性能，達 4% 轉角後其強度維持在 85% 以上，腹板開始局部挫曲後帶動翼板挫曲使力量由最高點持續下降。圖 3 為 W36 在 0.03 及 0.04rad 時各次迴圈的挫曲程度，其中 0.03_1 為發生腹板局部挫曲時的轉角，0.04_2 為 0.04rad 轉角之第二次加載時的變形情況，翼板與腹板皆有嚴重變形。圖 4 為 W36 在 3 種情況之卸載後位移控制點回到原點時的 RBS 位置殘留變形情況，加載結束後先前嚴重挫曲的腹板及翼板已大部分被拉回，但仍有殘留變形，腹板形成曲面，與未變形前相比約有 1.5 公分左右的面外變形。表 1 為彙整各變形角時所對應的抗彎強度，變形角超過 0.03rad 後，強度下降明顯且相同震幅下加載次數越多，強度衰減越大，至加載結束 RH500 以及 W36 分別剩下 6 成及 5 成左右的強度。

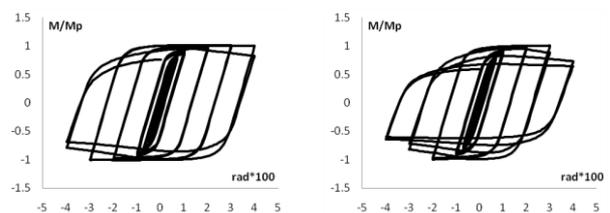


圖 2、梁模擬遲滯迴圈 RH500(左)、W36(右)

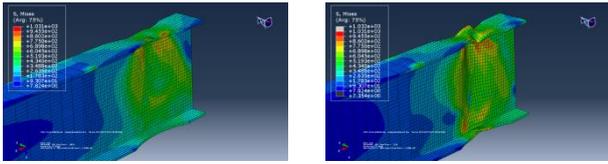


圖 3、W36 加載峰值變形-0.03_1(左)、0.04_2(右)

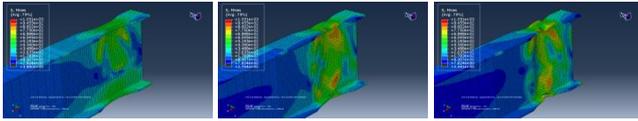


圖 4、W36 卸載後殘留變形-0.03_1 卸載(左)、0.04_1 卸載(中)、-0.04_2 卸載(右)

表 1、轉角與殘留力量(M/M_p)對照圖

轉角_迴圈數	RH500	W36
-0.03_1	-	0.78
+0.03_2	-	0.84
-0.03_2	-	0.61
+0.04_1	-	0.72
-0.04_1	0.71	0.53
+0.04_2	0.79	0.61
-0.04_2	0.61	0.53

2.2 實尺寸切削型柱梁接頭實驗結果

梁斷面尺寸、RBS 斷面削減程度以及鋼種等對於局部挫曲發生及強度衰減程度均有影響，表 2 為相關實驗研究成果，是全尺寸 RBS 柱梁接頭實驗的試體資料，包含 RBS 中心位置的斷面削減率、材種及側向支撐距離、 M_f/M_p 等，其中 M_f 為接頭設計彎矩，斷面削減率多集中在 40~50% 範圍，鋼材也多以 A572 G.50 等級鋼為主。

將表 2 各試體靜態反覆加載後所得之遲滯迴圈，取轉角 0.02-0.05rad 範圍時的抗彎強度的正規化數值(對於梁斷面全斷面塑性彎矩的比值, M/M_p)分別與試體梁深以及寬厚比的關係進行比較，如圖 5 和圖 6 所示。圖 5 的梁深越大在大變形範圍時其強度下降越明顯，最大下降至 M_p 的 40%。圖 6 寬厚比越大的試體在大變形範圍中強度下降也越明顯。由於各試體實驗過程中未發生斷裂，深度越大或是腹板寬厚比越大的梁其局部挫曲越明顯，所伴隨的強度衰減也越顯著，此現象對於結構物整體強度及地震後餘裕度也會有顯著影響。

表 2、相關實驗研究結果整理

作者	梁斷面	RBS 中心削減率(%)	F_y (MPa)	M_f / M_p	側撐距離 (mm)
Kim et al.(2005)	H-700x300 x13x24	0.50	245	0.77	-
Jones et al. (2002)	W36x150	0.50	374	0.89	2440
	W36x150	0.50	374	0.89	2440
	W36x150	0.50	374	0.89	2440
	W36x150	0.40	374	0.98	2440
	W36x150	0.50	374	0.89	2440
Uang et al. (2000)	W30x99	0.50	379	0.87	-
	W30x99	0.50	379	0.87	-
Lee & Kim (2007)	H-700x300 x13x24	0.37	304	0.94	2500
Lee et al. (2004)	H-600x200 x11x17	0.40	326	0.94	2500
	H-600x200 x11x17	0.40	326	0.92	2500
	H-600x200 x11x17	0.40	326	0.93	2500
	H-606x201 x12x20	0.40	295	0.92	2500
Deylami & Tabar (2008)	IPE450	0.47	314	0.83	2500
	IPE450	0.47	314	0.86	2500
Chi & Uang (2002)	W36x150	0.50	400	0.90	2617
	W36x150	0.50	400	0.90	2617
Chou & Uang (2002)	W24x76	0.50	345	0.84	2350
	W24x76	0.50	345	0.84	2350
	W24x76	0.50	345	0.84	2350
Deylami & Tabar (2013)	IPE450	0.47	-	0.83	2250
Li et al. (2009)	H-496x199 x9x14	0.40	278.3	0.91	-

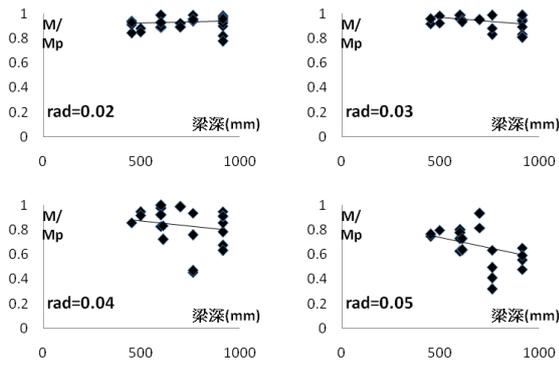


圖 5、梁深與轉角關係

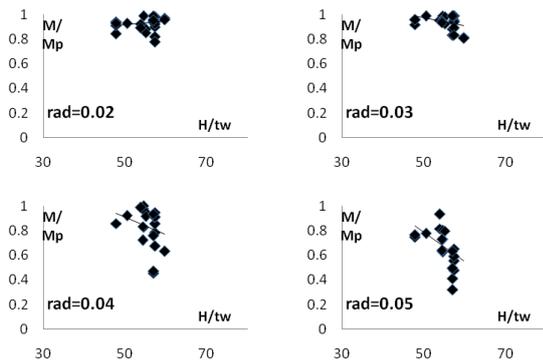


圖 6、梁之寬厚比與轉角關係

三、CFRP 於挫曲鋼板之束制效果評估

由於接頭切削斷面處抗彎強度的降低主要來自於腹板及翼板的局部挫曲行為，而地震過後結構回復至原點附近時，原來嚴重受壓挫曲的板將大部分被拉回原位，而留下部分殘餘變形，如圖 4 所示，因此若能將腹板挫曲方向束制住，降低下次地震時挫曲程度，將可減少大部分強度降低的情況。

3.1 CFRP 材料與黏結膠

3.1.1 CFRP 材料

試驗使用 CFRP 的型號是 AEC-300 碳纖維與其黏結用膠，材料試驗係依照我國規範 CNS13555 製作試片，試體共 5 組，固定以加載速率 1mm/min 進行抗拉試驗，所得到實際的抗拉強度、抗拉模數、伸長率等如表 3 所示，其張力強度約為 A572-Gr.50 鋼材張力強度的 1.5 倍，兩者的彈性模數相近。

表 3、AEC-300 碳纖維試驗結果

品名	抗張強度 kgf/cm-ply	抗張係數 kgf/mm ² -ply	設計厚度 mm/ply	伸長率 %
AEC300	715	21133	0.165	>1.7

3.1.2 黏結膠

試驗兩種不同公司所出產的黏結膠，分別為型號

AEC-300 碳纖維用膠以及 120HP 之環氧塑酯，兩者黏著性能不同，試驗參考 Yang *et al.* (2005) 對黏著劑性能的評估方法，如圖 7 所示之試體，製作各 4 組試體以比較其黏結膠性能。CFRP 搭接剪切試驗結果如圖 8 所示，AEC-300 平均剪切強度約為 11kN，120HP 為 16kN，後者強度提高近 50%。

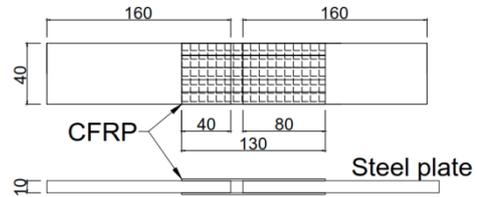


圖 7、CFRP 雙搭接剪切試驗

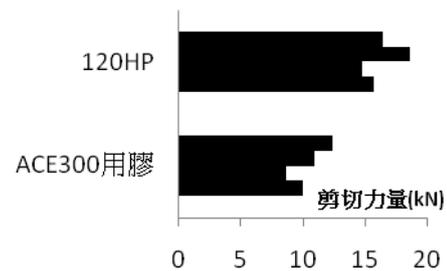


圖 8、CFRP 搭接剪切試驗結果比較

3.2 挫曲鋼板試驗試體與加載歷程設定

試驗使用模擬腹板之挫曲鋼板的長寬分別為 700x200 mm，厚度為 10mm，材質為 A572-Gr.50，且均為同一批製程之鋼材，用其模擬前章節有限元模型中 RH-500x200x10x16 梁之腹板。試體如圖 9 左圖所示，鋼板中間先壓彎至與數值模擬中腹板殘留變形相近的面外變形，上下兩端部為 MTS 夾具施力端，此處鋼板兩側焊接面外束制鋼板以避免在此處發生挫曲。圖 9 右圖為整體加載裝置，加載設備為 250kN 之 MTS，加載速率固定為 0.01 mm/s。

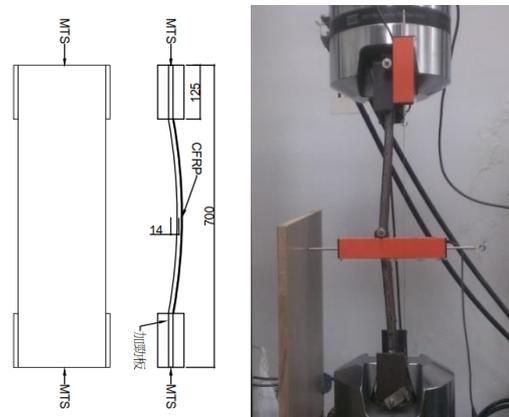


圖 9、挫曲鋼板試驗示意圖(左)試驗照片(右)

試驗共 5 組，如表 4 所示，除未貼 CFRP 的對照

組外，各試體均在鋼板受張側貼上 3 層 CFRP 貼布，除探討黏結用膠強度對挫曲束制效果外，另有兩組試體在張貼 CFRP 貼布的上下兩側以螺栓鋼板增加錨定，螺栓錨定方式、位置如圖 10 所示，挫曲鋼板碳纖維破壞主要有兩大項(1)剪切破壞(2)正向剝離破壞，此可減少正向剝離破壞的發生，最後，使用膠結強度高的黏著劑，且同時使用螺栓錨定的試體，以反覆加載方式評估其性能變化。

表 4、試體規畫

試體	黏結膠選用	螺栓錨定	加載方式
Bare	無	無	單側
AEC	AEC 黏結膠	無	單側
120HP	120HP	無	單側
120HP-A	120HP	有	單側
120HP-AR	120HP	有	*反覆

*反覆加載位移(mm)，以下加載各一迴圈：

0.75,1.5,2.25,3.0,3.75,4.5,5.25,6.0

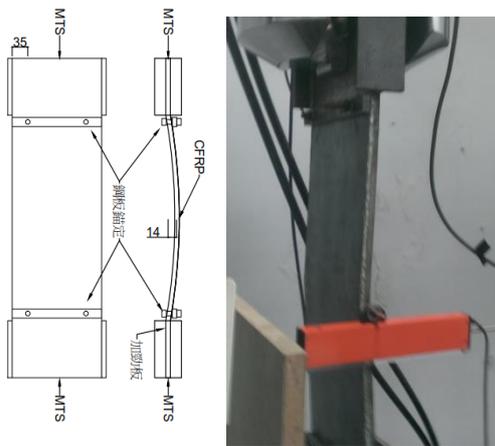


圖 10、螺栓錨定方式、位置

4.3 實驗結果

試體單側加載結果如圖 11 所示，由於貼布彈性模數與鋼材相近，且鋼板僅 10mm 厚，張力側黏貼 CFRP 對於剛度提升幾乎沒有影響，但對強度以及其後強度下降時的斜率則有顯著的提升，無黏貼的 Bare 試體最大強度約為 150kN，隨後則有明顯的強度下降。

AEC 試體在試驗過程中 CFRP 無剪力破壞亦無剝離破壞，與預期破壞行為不同，推測可能與膠厚度分布、CFRP 含浸率有關，最大強度提升並不明顯，但最大強度過後 CFRP 持續提供束制力量，使下降剛度較為平緩。

120HP 試體加載位移 3.1mm 時，CFRP 發生部分剝離而有些許強度力量下降，直至 4.39mm 時 CFRP 完全剝離破壞，最大力量提升 23.6%，強度下降斜率

則因 CFRP 已剝離，與 Bare 試體差異不大。

120HP-A 試體加載位移至 2.55mm 時有異聲發出，但無剝離或力量下降，加載位移 5mm 時出現肉眼可見剝離與剪切混合型破壞，由於端部束制使剝離破壞延後，最大力量提升 20.3%，強度下降剛度亦較無黏貼 CFRP 和緩。

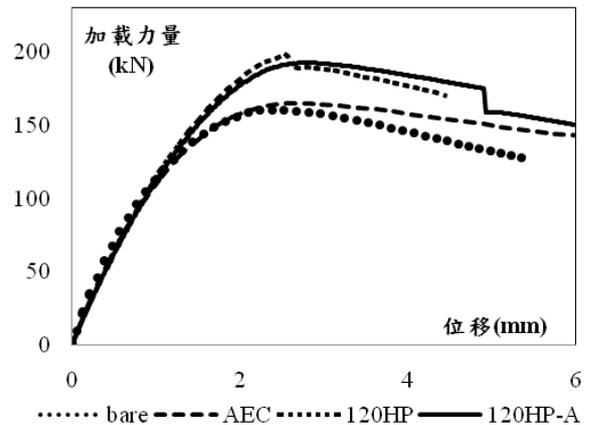


圖 11、單側加載實驗

圖 12 顯示 120HP-AR 反覆加載試驗結果，反覆加載的 120HP-AR 的最大力量包絡線與 120HP-A 相近，但 120HP-AR 在反覆加載過程之重複經歷同一變形時強度略有下降，其原因是卸載過程中鋼板與 CFRP 介面已有剪力破壞，介面剪力效果降低，但 CFRP 兩端被束制而有抗張能力，因而使強度仍然能隨變形增加而上升。

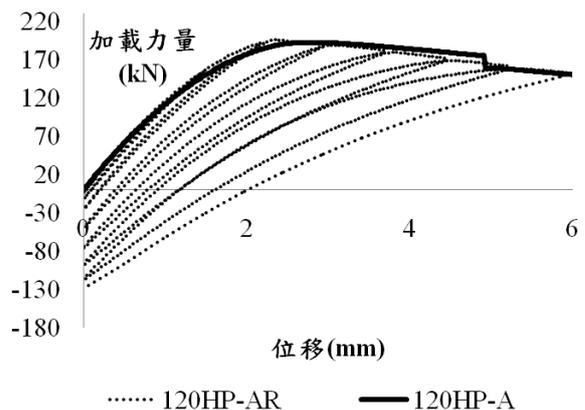


圖 12、120HP-AR 實驗結果

四、結論

RBS 接頭切削程度與梁深等影響切削區局部挫曲行為以及強度衰減的程度，為使接頭於地震後能維持原有強度以使結構能繼續使用，本研究以 CFRP 貼片束制切削區腹板的局部挫曲行為，透過挫曲鋼板實驗

結果，主要結論歸納如下：

1. 有限元模擬及過往的實驗研究結果指出在相同的切割比例下，梁深及腹板寬厚比影響局部挫曲行為，越大者其挫曲後強度衰減也越明顯，強度可下降至最大強度的 40%。
2. 以 CFRP 搭接剪切試驗指出，黏膠對於 CFRP 黏接於鋼之剪切性能對 CFRP 束制鋼板挫曲試驗結果成正比，AEC 膠對於 CFRP 束制鋼板挫曲力量則無明顯提升，120HP 較 AEC 膠剪切强度高 50%，CFRP 束制鋼板挫曲力量提升 20%。
3. 以 CFRP 束制鋼板挫曲行為對整體行為的剛度影響不大，但對於受壓強度則可提升至 24% 左右，其中又以黏結強度高的膠提升效果明顯。同時在 CFRP 未發生撕裂或剝離的情況下，即使經過最大強度後，其強度衰減程度也較未貼 CFRP 者緩和。
4. CFRP 貼布螺栓錨定可增加端部束制而使剝離破壞延後，對於強度穩定有影響。反覆加載實驗發現即使內側 CFRP 有發生局部剝離，但端部錨定仍可使 CFRP 處於受力狀態而提供挫曲束制力。

參考文獻

1. Chi, B., and C. M. Uang, "Cyclic response and design recommendations of reduced beam section moment connections with deep columns", *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol.128, pp. 464~473, 2002.
2. Chou, C. C., and C. M. Uang, "Cyclic performance of a type of steel beam to steel-encased reinforced concrete column moment connection", *J. Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 637~663, 2002.
3. Civjan, S. A., M. D. Engelhardt, and J. L. Gross, "Retrofit of pre-northridge moment-resisting connections", *J. Structural Engineering*, Vol. 126, pp. 445~452, 2000.
4. Deylami, A., and A. M. Tabar, "Experimental study on the key issues affecting cyclic behaviour of reduced beam section moment connections", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
5. Deylami, A., and A. M. Tabar, "Promotion of cyclic behavior of reduced beam section connections restraining beam web to local buckling", *Thin-Walled Structures*, Vol. 73, pp. 112~120, 2103.
6. Han, S. W., K. H. Moon, S. H. Hwang, and B. Stojadinovic, "Rotation capacities of reduced beam section with bolted web (RBS-B) connections", *J. Constructional Steel Research*, Vol. 70, pp. 256~263, 2012.
7. Jones, S. L., T.F. Gary, and M. D. Engelhardt, "Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections", *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, pp. 441~451, 2002.
8. Lee, C. H., and J. H. Kim, "Seismic design of reduced beam section steel moment connections with bolted web attachment", *J. Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 522~531, 2007.
9. Li, X., Y. Xiao, and Y. T. Wu, "Seismic behavior of exterior connections with steel beams bolted to CFT columns", *J. Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 1438~1446, 2009.
10. Uang, C. N., Q. S. Yu and C. S. Gilton, "Effects of loading history on cyclic performance of steel RBS moment connections", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1294, 2000.
11. Yang, Y. X., Q.R. Yue, and F.M. Peng, "Experimental research on bond behavior of CFRP to steel", *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, pp. 419~424, 2005.
12. Lee, C. H., S. W. Jeon, J. H. Kim, J. H. Kim, and C. M. Uang, "Seismic performance of reduced beam section steel moment connections: effects of panel zone strength and beam web connection method" 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.3449, 2004.
13. Kim, T., J. H. Park, and C. H. Lee, "Inelastic analysis of reduced beam section steel moment connections to built-up box columns", 2005.