

應用形狀記憶合金之自復位鋼構梁柱接頭開發

Development of a Self-Centering Steel Beam-to-Column Connection Using Shape Memory Alloys

鍾育霖¹ 杜立均² 劉釋亞³ 潘煌鏗⁴

¹ 成功大學建築學系助理教授, E-mail: ylchung@mail.ncku.edu.tw

² 高雄應用科技大學土木系碩士生

³ 成功大學建築學系碩士生

⁴ 高雄應用科技大學土木系教授

科技部計畫編號: MOST 104-2625-M-006-004

摘要

抗彎矩構架系統主要依賴接頭的彈塑性行為以維持結構韌性行為，具有自復位特性的柱梁接頭中由附加的阻尼系統消耗地震能量，主要結構構件如柱梁等可維持彈性，同時地震後可回復到原點，減少結構損傷以及殘留變形。形狀記憶合金具有彈性應變超過 6% 的超彈性特性，反覆受力過程中具有阻尼效應可消耗部分能量，本研究將其與碟型彈簧串聯組成形狀記憶螺栓，以較短的記憶合金即可達到接頭塑性變形要求的伸長量，新研發之非對稱摩擦阻尼在加載時比卸載時有更高的摩擦力，使用在接頭中可增加接頭強度以及耗能。實驗結果顯示非對稱摩擦阻尼可透過螺栓的軸力調整初始、上升段以及卸載時之摩擦力，而與形狀記憶螺栓組合之柱梁接頭，在實尺寸接頭反覆加載實驗中顯示明顯之自復位行為且具有穩定耗能特性。

關鍵字: 形狀記憶合金、非對稱摩擦系統、碟型彈簧、自復位

Abstract

After the 1994 Northridge earthquake, new ductile beam-to-column connections have been used in many buildings. The connections have been proofed to develop plastic hinges to under the cyclic loading of many physical tests. Although the development of plastic hinges could dissipate more energy from earthquake and lead to a ductile behavior of the building, the repair or deconstruction of the damaged building will become an issue after the earthquake. According to this, self-centering connections are developed recently.

In this study, a new self-centering connection has been proposed using the shape memory alloy (SMA). The disc springs are connected with the SMA rod to develop a SMA bolt. The elastic elongation of the bolt will be enlarged and to be able to be applied in real scale structure. A unsymmetrical friction damper is proposed and its performance has been confirmed by tests. By deciding pretension of the high tension bolts in the damper, the friction force under the loading and unloading directions can be decided. The combination of the SMA bolts and the unsymmetrical damper in the beam-to-column connection has been proved to be able to perform stable self-centering behavior.

Keywords: shape memory alloy、unsymmetrical friction system、disc spring、self-centering

一、前言

抗彎矩構架系統為鋼結構中常採用之結構系統，其耐震行為仰賴接合處的強度以及韌性性能，柱梁接頭、柱腳等接合處的破壞將會影響結構強度以及穩定性。94 年的美國北嶺地震中發現，許多鋼結構柱梁接頭在未有明顯之塑性變形下發生斷裂，顯示了當時鋼結構接頭韌性不足的問題，其後各界陸續發展許多韌性接頭[1]，如斷面切削式柱梁接頭(Reduce Section Beam, RBS)等。地震中接頭將可發揮塑性變形能力以及耗能使結構物達到目標性能，但地震過後大量受損的接頭將面臨修復高昂的代價。有鑒於此近年發展了出了具自復位特性的結構系統或是接合方法，使結構物不僅滿足耐震要求同時在地震過後回到原點，不產生殘留變形，有些系統甚至可透過更換阻尼的方式使結構構件維持彈性，免除了後續的維修工作。Christopoulos[2], Ricles[3], Tsai[4]等人均利用預力鋼鍵沿著梁的軸向串連數跨的柱梁接合，並以施加預力的方式提供接合處的回覆力，接合處另使用摩擦或是其他消能機制消耗能量以獲得兼具耗能的自復位接合系統，由於梁需要承受額外的軸向壓力，以及可能的預力損失，部分研究則使用高彈性變形的特殊金屬替代預力鋼鍵。

形狀記憶合金(Shape Memory Alloy, SMA)為高性能的金屬材料，於近十年漸為工程界所應用，其特性之一乃能夠藉由溫度的上升使金屬晶相產生相變化，恢復其降伏變形前之形狀，此稱為其記憶效應；另一特性為合金在高於相變化溫度下施加應力使其受到塑性變形後，可藉由釋放應力的方式使其恢復變形前之形狀，稱為超彈性效應，彈性應變可達 6% 以上由於價格高昂，目前的研究多利用其可耗能以及自復位效果，將其應用於附加於結構之阻尼器，或安裝於結構構件中的重點位置藉以提升其性能[5]，Ocel 等人[6]將形狀記憶合金應用於梁柱接頭，於試驗後加熱形狀記憶合金，運用其形狀記憶效應使已發生殘餘應變之梁柱接頭回復至原本形狀。Seicher[7]，利用長度 400mm 形狀記憶合金棒的超彈性效應使接頭具有自復位及耗能效果。Fang 等人將形狀記憶螺栓應用於端板式(end-plate)柱梁接頭。由於接頭須滿足塑性變形的要求，特別在大尺寸的接合中欲保持自復位效果則需使用相當長的記憶合金棒，上述研究所使用的梁深都僅為 200~300mm，此外為滿足接合強度要求須大量使用大斷面記憶合金鋼棒，上述兩篇研究中接頭強度僅為梁全斷面塑性彎矩(M_p)的 6 成左右，在設計上並不經濟，其研究綜合以上，於結構接合處有效率的使用形狀記憶合金將是在實務上能否應用的關鍵。

本研究提出一新式梁柱接頭，目標將其應用於中低樓層的建物的重點樓層中，利用形狀記憶合金之超彈性效應以及耗能系統，達到能夠滿足韌性要求以及高強度的自復位接頭，使結構物於地震力作用下，除了能進入塑性階段，發揮消能的貢獻，於地震力結束後也不會留下殘餘變位。首先材料試驗評估形狀記憶合金的靜態及動態材料特性，以及以單元試驗評估所提出的非對稱摩擦阻尼系統的性能以及各項參數影響，最後以實尺寸柱梁接合抗彎試驗評估接頭的性能。

二、應用形狀記憶合金之柱梁接頭

2.1 柱梁接頭力學模型

為有效率利用形狀記憶合金於中低樓層的結構接合中，將形狀記憶合金棒與高彈性材料串聯組成記憶合金螺栓，使兩者變形的總和能夠達到接頭的塑性變形要求，如此可使用較短的記憶合金棒材，接頭中加入摩擦耗能系統，其力學行為將與形狀記憶合金螺栓所形成的遲滯行為並聯，使接頭強度得以提高，可減少形狀記憶合金棒材的直徑需求，如此將可減低接頭造價並可應用於實尺寸的結構接點。

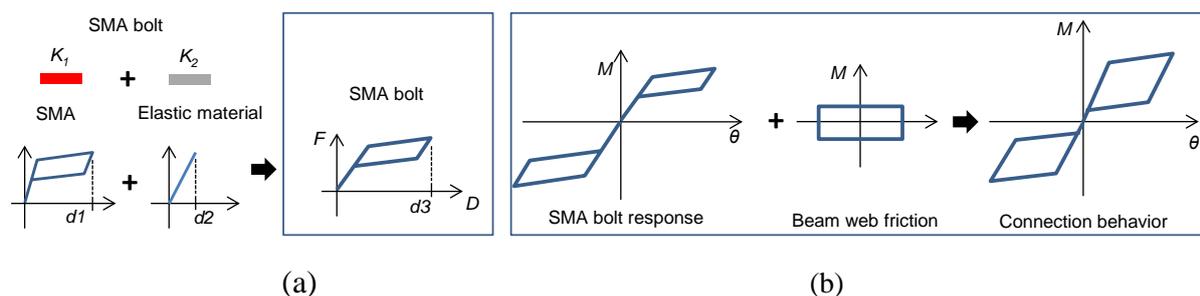


圖1 應用形狀記憶合金螺栓之接頭力學模型:(a) 記憶合金螺栓行為;(b) 接頭之遲滯迴圈

2.2 形狀記憶合金材料特性

形狀記憶合金的超彈性行為，會隨著材料組成比例、相變化溫度、加載時溫度、加載速度以及加載方向等而改變[8]，因此對記憶合金材料特性進行不同震幅的動靜態反覆加載試驗以了解其力學特性。

2.2.1 材料試驗規劃與加載方式

實驗使用鎳鈦合金形狀記憶金屬，其中鎳成分比例約為 55.8%，棒材直徑為 30mm，長度為 200mm，兩端車牙長度為 30mm，中央削減為直徑 20mm 斷面，長度為 120mm 並以漸變段與兩側車牙端接續。加載試驗之頻率分為靜態加載及動態加載。靜態加載試驗以每秒 $1.3E-4\%$ 之速度進行反覆拉伸試驗，而動態加載試驗則分為 0.25Hz、0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz 四種不同頻率進行加載。加載時逐次增加 1% 之應變，每次 2 個迴圈，應變達 6% 即停止試驗。由於 MTS 試驗機之性能限制，於高頻率工作時，僅能提供小變形量的加載，故本實驗設計加載頻率逐次提增時，依次調降各次加載之目標應變。

2.2.2 材料實驗結果

靜態反覆加載之應力應變迴圈結果如圖 2 所示，超彈性特性明顯，但隨著應變振幅增加，其遲滯迴圈面積提增，同時殘餘應變也愈大，加載結束後的殘餘應變與初始狀態相比約為但其應變均小於 1%。圖 3 為 0.25Hz 頻率動態加載之應力應變迴圈，可見於較高頻率加載下，其遲滯迴圈的包絡面積有些微減小，產生的殘餘應變亦較小。圖 4 為靜態

至頻率 1.5Hz 加載下取各迴圈實驗加載至 3% 的應變的迴圈的疊合，在各頻率加載下，降伏強度、彈性模數以及之形狀及線下包絡面積均有些許差異，但整體差異並不十分明顯，因此本研究以靜態加載來模擬形狀記憶合金的動態加載行為。

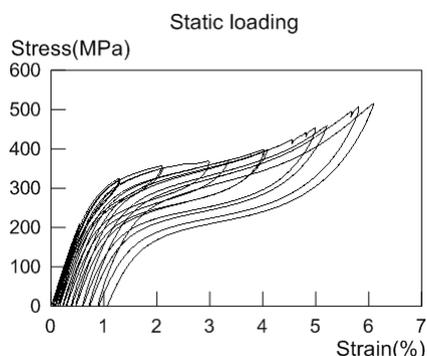


圖2 靜態加載應力-應變遲滯迴圈

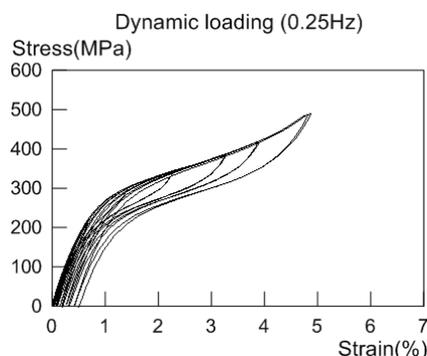


圖3 0.25Hz加載應力-應變遲滯迴圈

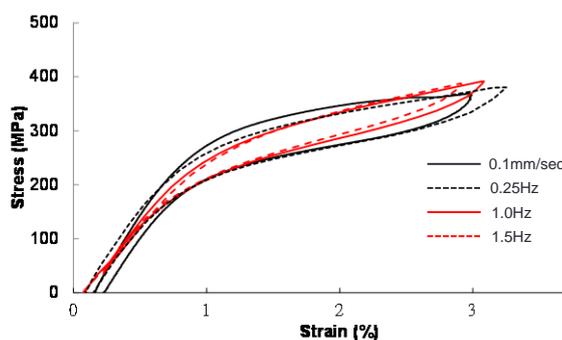


圖4 靜動態加載至3%應變迴圈

2.3 非對稱摩擦系統

摩擦阻尼具有高剛度以及穩定耗能特性，在柱梁接頭中加入摩擦接合可以提高接合強度、剛度以及阻尼的效果，接頭處的摩擦阻尼可利用梁腹板透過高張力螺栓與柱接合的方式，以螺栓滑動造成的摩擦力耗能，由於摩擦力為正負方向大小對稱，摩擦力越大雖可提供較高的接頭強度以及耗能，但負方向摩擦力將會削減記憶合金所提供的自復位效果，本研究所提出之非對稱式摩擦接合，其遲滯行為如圖 5(a)所示，正摩擦方向強度會隨變形而階梯上升，卸載時摩擦力則回復為初始較低的摩擦力，如此摩擦力在正向可以增加接頭強度，同時在卸載時又不降低自復位的效果。如圖 5(b)的摩擦阻尼單元所示，由中心板及兩側對稱的內板以及外板組成，再以螺栓鎖固，外板孔徑最小，內板左右孔之孔徑分別比外板孔大以及與外板孔相同，中心板左右孔之孔徑則再比內板的左右孔再分別放大，如此左右側螺栓以預張力鎖緊後，當阻尼受向外拉力時，由於內外板間僅受單一顆螺栓造成之摩擦力，而內板與中心板間受兩顆螺栓造成的摩擦力，受力時外內板間將先滑動，當左側螺栓與內板之螺栓孔壁接觸時，承壓力提高導致內板與中心板間開

始滑動，當卸載時，隨著負方向力量增加內外板間先到達靜摩擦力而後開始滑動，如此形成不對稱之遲滯行為。

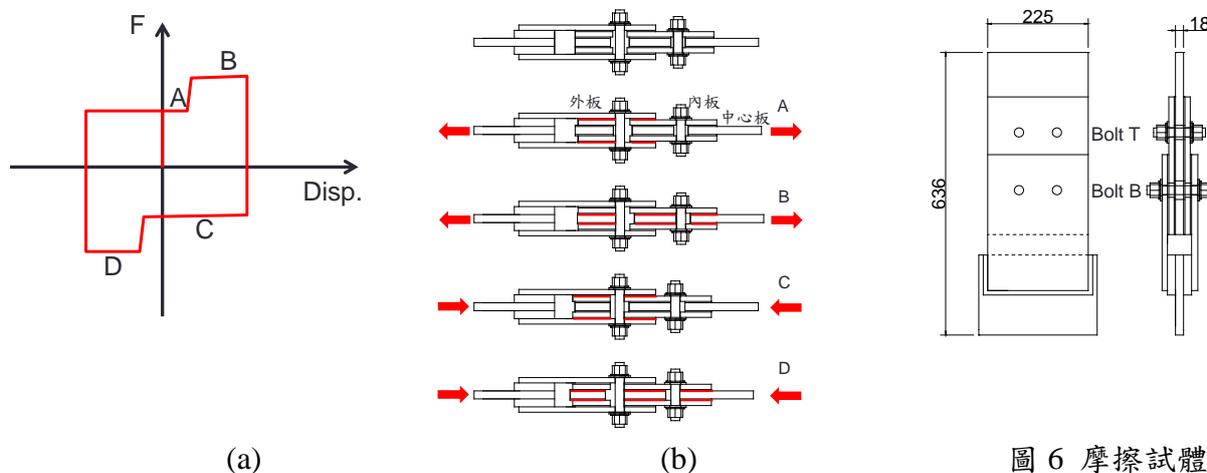


圖 5 摩擦阻尼示意圖: (a)非對稱遲滯迴圈; (b)摩擦單元;

2.3.1 單元試體設計

單元摩擦試體如圖 6 所示，各板間內夾 3mm 厚之鋁板以增加摩擦係數，經測試其摩擦係數達到 0.5，外板孔徑為 21mm，內板上下孔之孔徑為 21 及 30mm，中心板上下孔之孔徑為 30 及 42mm。實驗以螺栓預張力為參數，第一組試體(F1-1)上下螺栓預張力均為 30kN，第二組試體(F1-2)上方螺栓(Bolt T)預張力為 50kN，下方螺栓(Bolt B)預張力為 30kN。

2.3.2 實驗結果

反覆加載的實驗結果如圖 7 所示，F1-1 試體及 F1-2 試體因為下方螺栓預拉力相同，因此的初始摩擦力相同，均為 125kN，但上升段摩擦力因上方螺栓軸力不同而有改變，兩試體摩擦力分別 125 及 160kN，F1-2 試體的上升段摩擦力大於 F1-1 試體，與以摩擦係數 0.5 計算得上升段摩擦力相符，此摩擦板機構可藉由改變螺栓軸力控制正負方向摩擦力大小，造成非對稱之摩擦遲滯迴圈。

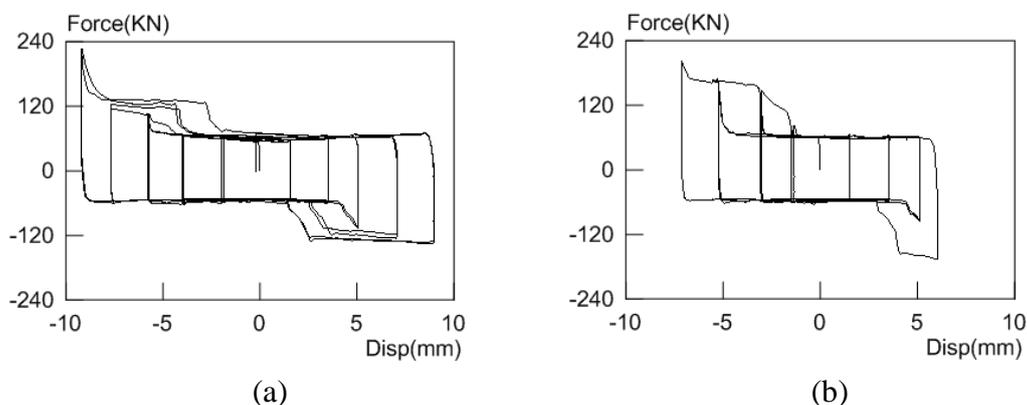


圖 7 摩擦單元試驗遲滯迴圈: (a)F1-1; (b) F1-2

三、實尺寸自復位柱梁接頭抗彎試驗

3.1 試體設計與加載系統

梁柱試體接合為 T 字形，長度分別為 2860 及 3300mm，柱兩端為樞接，梁端部與千斤頂接合施加水平方向載重，如圖 8(a)所示，梁、柱端部模擬為結構反曲點，為一高度 3.3 米跨距約 5.6 米之結構框架。梁、柱斷面分別為 H500×200×10×16 及 H350×350×12×19，均為 A490-Gr.50 材質。接頭細部如圖 8(b)所示，由八組形狀記憶合金螺栓總成將梁柱接合並於腹板位置設置非對稱摩擦阻尼。

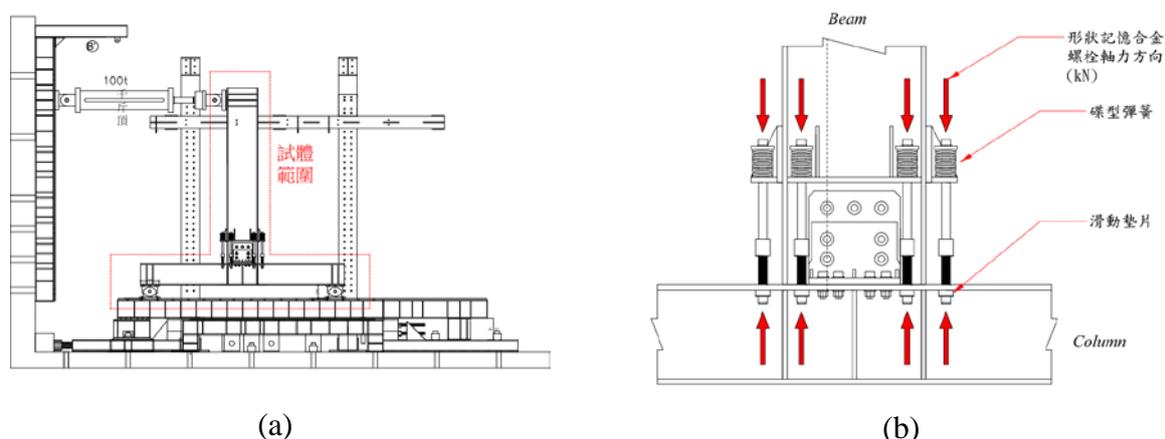


圖8 實尺寸梁柱接頭試驗細部圖說 a、正面示意圖 b、剖面示意圖

形狀記憶合金棒透過高拉力鋼棒與碟型彈簧(Disc spring)串聯並施加預張力，梁翼板外側形狀記憶合金螺栓因接頭受彎時拉伸長度較大，以 10 組碟型彈簧正反向串聯疊加，梁翼板內側螺栓則為 8 組彈簧串聯，實驗變數為腹板處高張力螺栓預力變化、彈簧數量以及記憶合金螺栓軸力，如表 1 所示，藉此觀察對於遲滯迴圈中強度以及耗能之影響。加載歷程為 0.375%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、3%、4% 層間變形角，其中 0.375%~0.75% 振幅循環加載 6 次、1% 振幅加載 4 次、1.5%~4% 振幅加載 2 次。

表 1 梁柱接頭試驗參數

組別	彈簧數量		螺栓軸力(kN)		SMA 軸力(kN)
	梁外側	梁內側	外鋼板	內鋼板	
10.8S-M24-1	10	8	100	100	80
10.8S-M24-2	10	8	100	100	50
8S-M24	8	8	60	100	50

3.2 實驗結果

各試體之梁端彎矩以及層間變形角關係如圖 9 所示，彎矩為千斤頂出力乘以千斤頂位置至柱面距離，三組試體均呈現明顯之自復位行為，遲滯迴圈中強度與剛度十分接近，10.8S-M24-1 試體(圖 9(a))因記憶合金螺栓軸力以及摩擦力較大，其最大強度較高，

達到 480kN-m，且其耗能面積亦較大，而僅改變外側彈簧數量在整體接頭剛度影響並不明顯，此外摩擦阻尼之上升段並未出現，使得最大強度(480kN-m)約僅為梁斷面全塑性彎矩之 65%，由實驗中觀察得知接點旋轉開合時，內鋼板先與一根位於外剛板的下側螺絲接觸承壓，然後內鋼板以此位置為支點旋轉，可能因為此旋轉使得內鋼板與梁腹板間摩擦力降低，其行為尚須要進一步考察，實驗至大變形階段時，於 3%層間變形角時梁外側之記憶合金棒之軸向應變達到 5.5%而停止加載。

10.8S-M24-1 試體於 3% 變形角時，外側形狀記憶合金螺絲被拉長 11mm，扣除形狀記憶合金之伸長量(軸向應變為 5.5%)，彈簧在加載過程中所提供之額外壓縮變形為 5mm，透過與彈簧串聯可有效增加形狀記憶合金螺絲軸向彈性變形，由於形狀記憶合金之軸向剛度有初始、降伏後以及再硬化三階段不同變化，因此彈簧數量以及剛度之設計尚須進一步評估。

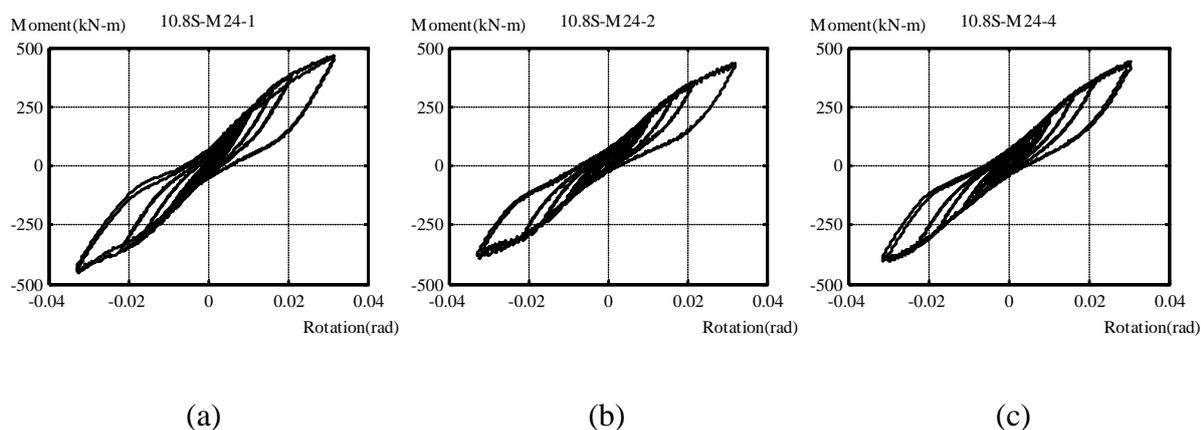


圖 9 遲滯迴圈: (a) 10.8S-M24-1; (b) 10.8S-M24-2; (c) 8S-M24

四、結論

本研究利用形狀記憶合金超彈性特性，透過將其與彈簧串聯做為軸向彈性變形之螺絲組件，並發展非對稱摩擦阻尼，將此二構件應用於固定柱梁接頭，發展強度及塑性變形能力可滿足耐震需求之自復位接頭，本文透過單元試驗以及實尺寸柱梁接頭反覆加載實驗驗證其性能，所得之主要結論歸納如下。

1. 透過複數鋼板以及鋼板滑動後螺絲承壓行為，使摩擦阻尼在滑動過程發展複數個摩擦面，各摩擦面提供之摩擦力大小不同而表現出非對稱由遲滯迴圈，即加載時摩擦力大於卸載時摩擦力，同時透過各部位螺絲軸力的差異可調整迴圈中各階段摩擦力大小。
2. 實尺寸柱梁接頭試驗中，3%層間變形時形狀記憶合金螺絲被拉長 11mm，扣除形狀記憶合金之伸長量(軸向應變為 5.5%)，彈簧在加載過程中所提供之額外壓縮變形為 5mm，與記憶合金提供之彈性變形相近，因此透過與彈簧串聯可有效增加形狀記憶合金螺絲軸向彈性變形，可有效減短記憶合金棒之需求長度並將其應用於較大尺寸的柱

梁接點。

3. 柱梁接頭的遲滯迴圈顯示明顯的自復位特性，由於梁腹板位置的摩擦阻尼的中間板在梁受彎過程發生轉動使摩擦的上升段未出現，使接頭在 3% 層間變形時的抗彎強度僅為 480kN-m，約為梁全塑性彎矩 65%。在變形方面，柱梁接頭再層間變形 3% 時仍保有明顯的自復位性能。

參考文獻

1. Federal Emergency Management Agency: FEMA350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame buildings, July 2000.
2. Christopoulos C., Filiatrault A., Uang C.M., Folz B., Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames, *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128: 1111-1120
3. Ricles J.M., Sause R., Peng S.W., Lu L.W., Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Posttensioned Steel Connections, *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128: 850-859
4. Tsai K.C., Chou C.C., Lin C.L., Chen P.C., Jhang S.J., Seismic self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, **37**: 627-645
5. Han Y.L., Li Q. S., Li A. Q., Leung A. Y. T., Lin P. H., Structural Vibration Control by Shape Memory Alloy Damper, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32: 483-494
6. Ocel J., DesRoches R., Leon T. R., Hess G. W., Krumme R., Hays R. J., Sweeney S., Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys, *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130: 732-740
7. Speicher M., DesRoches R., Leon T. R., Experimental Results of A NiTi Shape Memory Alloy(SMA)-Based Recentering Beam-Column Connection, *Engineering Structures*, 33(2011): 2448-2457
8. DesRoches R., McCormick J., Delemont M., Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars, *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130: 38-46