



具自復位特性之鋼結構柱腳 耐震性能研究

鍾育霖／國立成功大學建築學系 副教授

結構接點具有自復位特性可以減少結構震後的殘留變形以及構件的損傷，進而減少震損修復費用以及縮短復原時間，近年許多研究提出不同類型的自復位接點，而根據研究結構物中使用自復位柱腳對於減輕結構的殘留變形的影響最顯著，同時柱子因為需要負擔垂直載重且受損後不易修復，因此在柱腳使用具自復位特性的接頭對降低震後修復工作有明顯效果。由於自復位柱腳具有柱軸向方向的預力構件，設計上需考量此額外軸向載重造成之影響，此外，國內目前使用箱型柱居多，封閉柱斷面不若H型鋼易於在其外側安裝阻尼等消耗能量裝制，與其相關的研究也較少。本研究提出了適用於H型鋼柱以及箱型柱之自復位接合形式，其預力將不會增加柱軸向負擔，並且研發非對稱摩擦阻尼以及阻尼鋼棒作為柱腳的耗能機制，再以實尺寸反覆加載試驗評估其耐震性能。實驗顯示非對稱摩擦阻尼兩方向的強度可形成非對稱的形式，兩階段強度大小可藉由螺栓張力強度控制，而強度上升時的滑動距離可由螺栓孔徑控制，兩種自復位柱腳之變形可達4%的層間變形，同時具有穩定以及顯著的自復位行為，強度衰減輕微且柱仍維持彈性。

研究背景與目的

抗彎矩構架是鋼結構常見的結構系統型式，主要依賴結構接點的塑性行為消耗地震能量，對於接點的韌性要求甚高，1994年美國北嶺地震中發生許多梁柱接頭因韌性不足而發生脆性斷裂^[1]，進而造成許多結構震損，結構接合部位所需花費佔鋼結構建造成本之比例不低，而震損修復補強費用更可達初始製作成本的數倍^[2]。此地震後各國陸續發展各式高性能接頭，現今的鋼構建築已普遍使用經過預先實驗驗證性能之韌性梁柱接頭，例如切削式梁柱接頭等，大型地震中接頭附近的梁斷面形成塑性鉸而能穩定消耗能量並具有高度塑性變形能力，使建築物能夠發揮預期的耐震性能。由於塑性鉸區域常伴隨局部挫曲的發生或甚至結構整體的變形過大產生殘留變形等，使得建築在地震過後仍需花費可觀的費用與時間修復，近年有許多接頭方面研究致力提升結構堅韌性(resilient)，使其能夠

在大地震後迅速回復到日常運轉的狀態，包含自復位(self-centering)接合以及可修復式接合等。

自復位的接合方式係結合軸向預力構件如預力鋼棒等與阻尼裝置(圖1)，預力構件之軸向拉力提供接點回復原位的回復彎矩(圖1(a))，接合界面在受彎矩時的張合使阻尼變形降伏而消耗地震能量(圖1(b))，兩者結合可降低結構殘留變形以及消耗地震能量甚至構件可維持彈性等優點(圖1(c))^[3]，大幅降低震後所需的修復能量及時間，然而由於其耗能能力較同斷面的一般韌性接頭低，使用自復位接合的結構在地震時的變形比使用傳統韌性接頭的結構更大，反而可能對非結構物或建築物的機能造成影響，池永等人^[4]的結構動態分析結果指出，當僅有結構柱腳接合具有自復位特性時可有效降低整體結構的殘留變形，其值為使用固定柱腳接合結構的20%以下，有鑑於柱腳的震損修復困難，因此發展自復位柱腳有其效益，由於自復位接合機制中需要

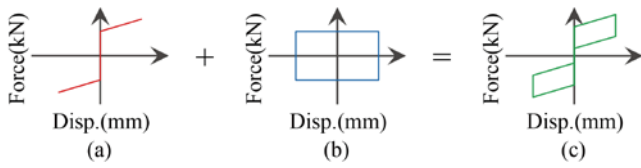


圖 1 自復位接合機制

在結構構件軸向加入預力構件，此預力對於梁的影響不大，但是對於結構柱的影響則不能忽視，考量柱需要承擔長期軸力以及短期載重下的變動軸力，針對此預力需要額外的補強設計以局部增強柱的強度，目前國內外的研究較多著重於 H 型鋼柱等開放斷面，國內常用的箱型柱則甚少有相關研究 [5]。

本文將介紹筆者過去數年時間發展自復位柱腳接合形式，分別應用於 H 型鋼柱以及國內常用的箱型斷面柱，文中將介紹使用於接頭的非對稱摩擦阻尼系統、接頭的力學原理以及性能試驗結果。

H 型斷面鋼柱腳

此設計主要針對低層建築，柱子底部未與柱底板焊接，僅放置其上透過兩側的摩擦阻尼與基礎板連結，如圖 2 所示，接點的彎矩強度來自於：(1) 當彎矩發生使得柱與柱底板間張合發生時，啟動摩擦阻尼將會開始滑動進而提供接點抵抗的彎矩的強度；(2) 由於柱承擔垂直載重，當柱底部受到彎矩以單側為支點而張開時將會產生抵抗彎矩，此彎矩在某程度變形以下會形成柱腳的復位彎矩。兩者並聯後將如同圖 1 之行為，具有自復位特性但不使用預力構件，然而由於前述之復位彎矩的強度有限，而摩擦阻尼具有正反向強度對稱的特性，當摩擦阻尼強度超過柱底界面張開時的解壓彎矩強度時（圖 1(a) 中的折線位置強度），自復位的性能會受到影響，在上述考量下兩者結合之強度將無法發揮柱斷面的強度，因

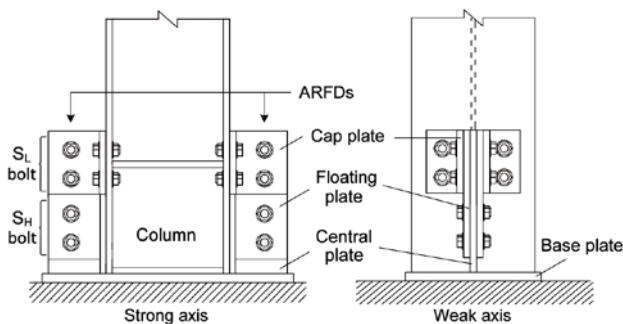
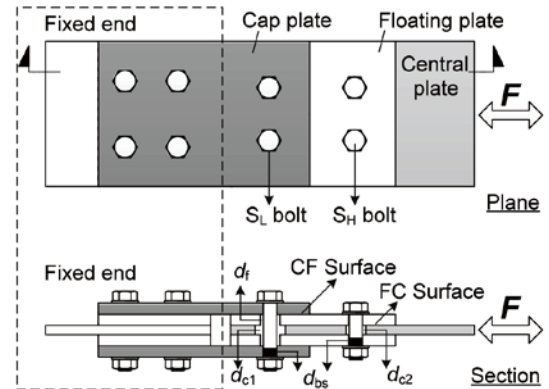


圖 2 自復位柱腳接合概念圖

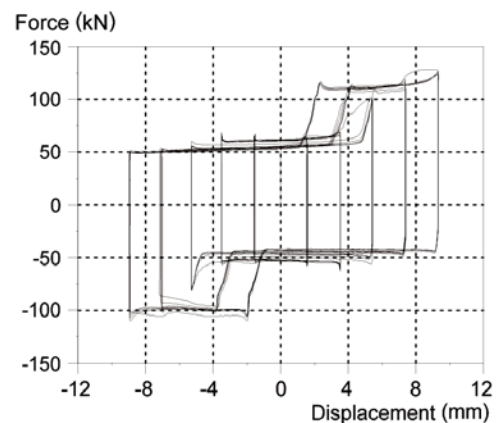
此本研究發展了正向的強度高於卸載時在為位移原點時強度的非對稱摩擦阻尼（Asymmetrical resistance friction damper, ARFD），與復位彎矩結合可提升接頭強度同時維持自復位的特性。

非對稱阻尼

非對稱摩擦阻尼如圖 3(a) 所示，係以中心板（Central plate）、內板（Floating plate）以及外板（Cap plate）組成，並以高張力螺栓鎖固，外板孔徑以及內版的外側未被外板覆蓋之螺栓孔徑都為對應使用螺栓之標準孔徑，內板內側孔徑以及中心螺栓孔之孔徑則大小由有所不同，透過各板之孔徑大小差異，中心板受拉滑動時，中心板與內板會在不同滑動距離與螺栓接觸，使得抵抗強度上升，當足以克服另一個滑動面啟動所需的強度時，滑動在不同滑動面發生，力量方向相反時亦同，圖 3(b) 為實驗結果，而各階段的強度可透過不同位置螺栓導入的預張力決定，強度上升時的滑動距離則由螺栓孔徑決定。



(a) 摩擦阻尼示意圖



(b) 實驗結果

圖 3 非對稱摩擦阻尼

性能試驗與結果

實驗試體及加載系統如圖 4 所示，一實尺寸 H 型鋼柱以前述接合方式與基礎鋼梁接合，柱頂部上方與水平向千斤頂相接，千斤頂前端為一個鉸接座，透過千斤頂水平向反覆加載模擬地震下柱腳接點的受力情況，柱軸向安裝預力鋼棒以模擬柱之長期軸向載重，柱斷面為 H300 × 300 × 10 × 15、長 1.7 公尺、SS400 鋼材，加載歷程係依照 AISC 鋼結構接點標準加載歷程，以位移控制方式逐步增加，實驗標準試體 (SPC) 為軸力比為 0.2，摩擦阻尼螺栓之張力強度均為 60 kN，而 SPCB 試體則將螺栓張力提升至 120 kN。

實驗所得到之試體柱底部的彎矩與層間變形角關係如圖 5 所示，兩組試體遲滯迴圈呈現穩定自復位的特性，約在 1% 層間變形角時有明顯強度提升，此為非對稱摩擦阻尼之到達第二階段的強度所造成，實驗最終可達 4% 層間變形角，兩圈後且無強度降低，外力卸載後也幾乎沒有殘留變形，試體最大強度為 275 kN-m，為柱全斷面塑性彎矩強度之 75%。

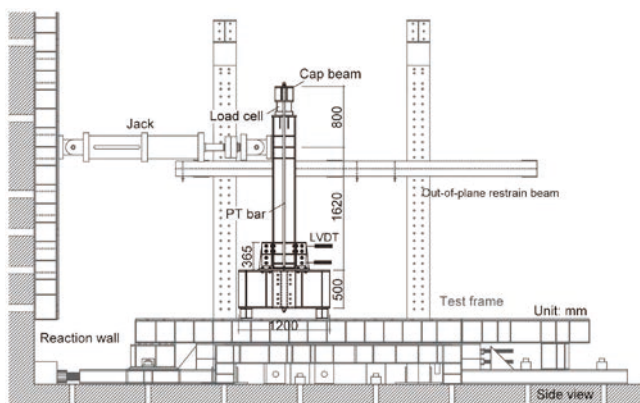


圖 4 試體與加載系統

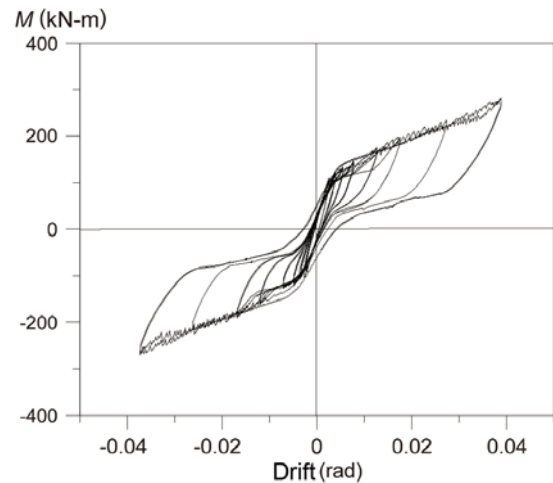


圖 5 實驗結果

箱型鋼柱腳

本研究提出之自復位箱型柱柱腳如圖 6 所示，包含內柱與箱型柱 (外柱)，透過預力鋼棒固定內柱與基礎梁 (圖 6(a))，內柱底部與基礎梁上端為柱腳受彎矩時開合界面，而預力可提供接頭回復彎矩，而後箱型柱 (外柱) 由上方套入透過底部板與內柱底板間以螺栓接合 (圖 6(b)、6(c))，透過此位置的接合傳遞內外柱間的彎矩 (圖 6(d))，如此箱型柱 (外柱) 不需額外承擔預力鋼棒的軸向載重，同時鋼柱無多餘鐵件在其表面影響外觀，與一般傳統型柱腳接合相近，對於室內使用機能以及裝潢影響程度低。

在底板與基礎梁間安裝阻尼鋼棒，兩端分別以透過螺牙螺帽與底板與基礎梁固定，透過底板界面張開時阻尼鋼棒受拉降伏提供耗能以及接頭強度，另外鋼棒外側安裝鋼套管以抑制鋼棒挫曲。

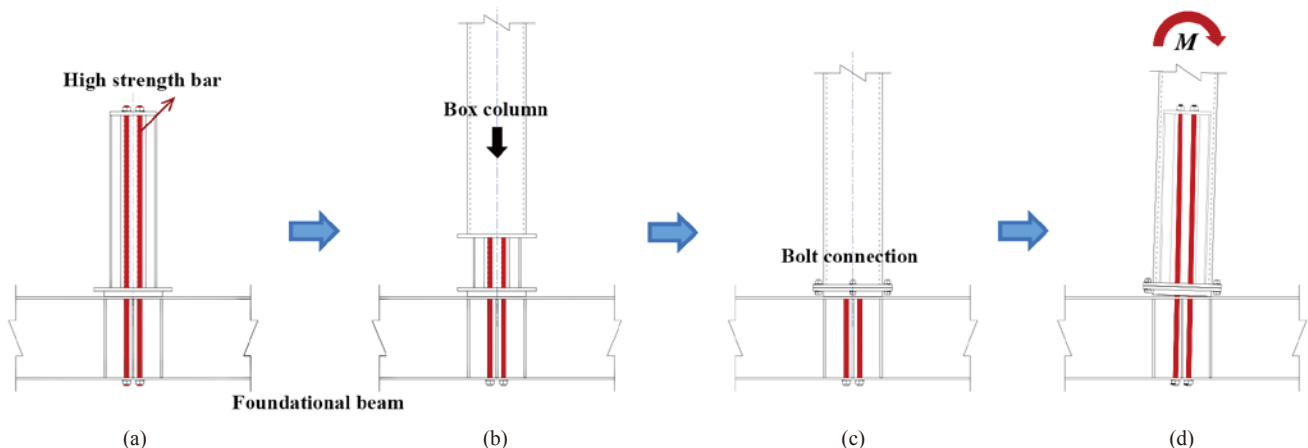


圖 6 自復位箱型柱腳示意圖



(a) 試體與加載裝置

(b) 實驗結果

圖 7 自復位箱型柱

性能試驗與結果

性能試驗係利用國家地震研究中心南部實驗室之雙軸向加載系統 (BATS)，以反覆加載方式測試一實尺寸鋼柱腳受彎矩性能。柱腳設計如圖 7(a) 所示，內柱為 H250 × 250 × 9 × 14 型鋼，底部焊接 510 × 510 mm 平面尺寸的鋼底板，透過直徑 32 mm 的兩支預力鋼棒與深度 380 mm 的基礎鋼梁結合並拉緊預力。其後套上 Bo × 300 × 300 × 22 箱型柱，柱底板透過螺絲與內柱底板接合，同時，安裝阻尼鋼棒。箱型鋼柱試體使用 SN400 製作，外柱上端安裝鉸接座，其上方頂板 BATS 上方的頂版以預力鋼棒固定，BATS 下方支承板以垂直頂升方式施加柱垂直載重，同時水平方向致動器以位移控制方式反覆加載。

試體柱腳彎矩與柱底旋轉角關係如圖 7(b) 所示，柱底旋轉角為透過位移計量測柱底板翹起角度，試體呈現出顯著的自復位特性，且柱底最大轉角超過 3%。試體之解壓彎矩以及最大彎矩在正負向分別約為柱斷面全塑性彎矩之 57% 以及 71%。遲滯迴圈中的耗能面積來自於消能鋼棒的軸向的塑性行為，由於有局部的挫曲產生，接頭在後半段的加載、卸載方向的剛度以及強度有所變化。根據柱底板、柱底部等處安裝的應變計讀數，柱試體在實驗過後仍維持彈性狀態。由於消能鋼棒拆裝容易，地震過後僅需要更換消能鋼棒即可。

結語

1. 非對稱摩擦阻尼透過實驗證明，可形成穩定且兩方向的強度不對稱的遲滯行為，兩階段強度大小可藉由螺絲張力強度控制，而強度上升時的滑動距離可由螺絲孔徑控制。

2. 本研究提出兩種軸向預力不直接加諸在柱子的自復位接頭，在應用非對稱摩擦阻尼的 H 型鋼柱腳方面，實尺寸性能試驗顯示在 4% 的層間變形下仍有穩定以及顯著的自復位行為，強度未有衰減且最終柱子仍維持彈性，接頭的強度可透過摩擦阻尼的螺絲張力調整，本實驗中試體測試所得最大強度達柱斷面強度之 89%。
3. 本研究提出之具自復位之箱型柱柱腳具有阻尼鋼棒可消耗地震能量，震後更換容易。實尺寸實驗證實其具有明顯且穩定的自復位特性，當變形達到底部轉腳超過 3% 時，接頭未發生強度降低現象，試驗所得之最大強度達到柱斷面強度之 71%，且柱子仍維持彈性。

參考文獻

1. SAC Joint Venture: State of Art Report on Past Performance of Steel Moment-Frame Buildings in Earthquakes, Report FEMA 355E, September 2000, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
2. Li Quanwang and Ellingwood Bruce R., Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock-aftershock earthquake sequences, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007; 36, pp. 405-427
3. Tsai I Keh-Chyuan, Chou Chung-Che, Lin Chi-Lon, Chen Pei-Ching, and Jhang Sheng-Jih, Seismic self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2008; 37:627-645.
4. 池永昌容, 中島正愛, セルフセンタリング柱脚を用いた鉄骨骨組の残留変形低減効果, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 54B, 2008 年 3 月
5. Chou Chung-Che, Wang Yu-Chi, Chen Jun-Hen, Seismic design and behavior of post-tensioned steel connections including effects of a composite slab, Engineering Structures, 30(2008), pp. 3014-3203.