

自復位隅撐鋼結構耐震行為

許協隆／國立中央大學土木工程學系教授

楊智凱／國立中央大學土木工程學系碩士

摘要

隅撐抗彎構架可有效改善抗彎構架勁度不足之問題，然因隅撐構件受軸壓力時會產生挫屈現象，造成結構強度降低，為改善此問題，本研究以具有不同摩擦消能機制之自復位梁柱接頭與自復位隅撐配置於抗彎構架，並針對其進行反覆載重試驗，界定其耐震性能。研究結果顯示，同時配置自復位梁柱接頭與自復位隅撐之構架，不僅可有效降低梁柱接頭之受力，亦可增加構架之強度及消能能力。研究結果亦證實，同時具自復位梁柱接頭與自復位隅撐之構架系統可藉良好之預力結合及有效之消能機制，達到提升結構耐震性能之目的。

Abstract

Knee braced moment resisting frame (KBRF) has been demonstrated to be effective structural form for earthquake-resistant purposes. This study focused on the performance enhancement of KBRFs by combining the self-centering knee braces and the self-centering beam-to-column connections. A series of cyclic loading tests on the self-centering KBRF structures with various magnitudes of post-tension in the brace members and beam-to-column connections were conducted. It was found from the tests that the strength and deformation capabilities of the self-centering KBRFs were effectively sustained. It is also observed from the tests that the energy dissipation of the KBRFs was significantly enhanced which justified the effectiveness of the proposed method in earthquake-resistant design.

具有自復位機制之梁柱及隅撐接合

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，地震活動頻仍，鋼結構具有良好之韌性、材料性質均勻、結

構强度高、重量較輕以及工期短等特性，因此廣泛運用於結構物耐震設計。傳統鋼建築結構係以塑性鉸的遲滯行為做為消能機制，但此種方法會使結構體產生殘餘變形，降低結構物之使用性。為改善鋼結構承載效能，本研究研擬一改善方案，以具有自復位機制之梁柱及隅撐接合形成自復位隅撐構架，使用預力鋼棒做為梁、柱及隅撐間之結合，一方面利用鋼材受拉行為較佳的優點，改善傳統隅撐因受壓而挫屈的現象；另一方面藉由預力的施加來降低結構物的殘餘變形，使建築物在地震發生後仍能回復其初始狀態，以提高結構物之使用性。

就結構承載行為而言，當其受到一側向地震力時，梁柱接頭會有較大之彎矩產生，然在隅撐抗彎構架（如圖 1 所示）中，因使用隅撐作為傳力構件，其不僅可有效降低梁柱接頭之受力，亦同時增加系統勁度，提升結構物之承載性能。Hsu 及 Jean^[1]曾針對不同角度配置之隅撐構架進行探討，其研究結果顯示，當隅撐構件於梁柱角隅處之角度配置為 45°，且隅撐和梁接合處為 1/4 有效梁長時為最佳配置，此配置之隅撐構架系統側向勁度可提高 1.3 ~ 1.8 倍。另為避免隅撐系統之破壞發生於隅撐和梁接合處，周誌桓^[2]曾以切削之鋼板做為可替換之消能裝置，將其裝設於梁構件最大彎矩處，其研究結果顯示，除可有效維持梁、柱構件之完整性，亦可提升構架勁度與強度。

由歷年之研究顯示，當隅撐構架於隅撐發生挫屈時，會有一強度遞減之現象，為了提升結構之耐震性能，本研究以已獲證實有效之摩擦及預力結合^[3-6]設計雙重自復位機制，並將之應用於隅撐抗彎構架之設計（如圖 2 所示）。此設計中包含具有不同摩擦消能機制之自復位梁柱接頭與自復位隅撐，研究中並藉由一系列構架反覆載重試驗，以界定自復位隅撐結構之耐震性能。

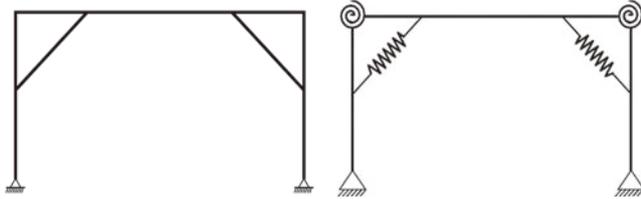


圖 1 隅撐抗彎構架

圖 2 雙重自復位隅撐構架簡化模型

結構承載行為

預力梁柱接頭接合強度

預力梁柱接合之開角行為可以雙線性模型表示之^[5]，其彎矩與轉角關係如圖 3 所示。當結構中僅含預力構件時，其結構行為如圖 3(a) 所示，圖中 A 點表示初始預力於結構所產生之接頭結合彎矩，當外力所形成之彎矩小於此結合彎矩時，梁柱接頭尚未開角 (gap opening)，當外力所形成之彎矩大於結合彎矩，此時梁柱介面開角，其勁度來自於預力構件，此形成一雙線性之特性。若結構中僅含消能系統時，其結構遲滯行為如圖 3(b) 所示，圖中 B 點表示消能元件的降伏點， K_2 及 K_3 分別為消能構件降伏前、後的勁度。若結構同時含有預力系統及消能系統時，其結構遲滯行為如圖 3(c) 所示。

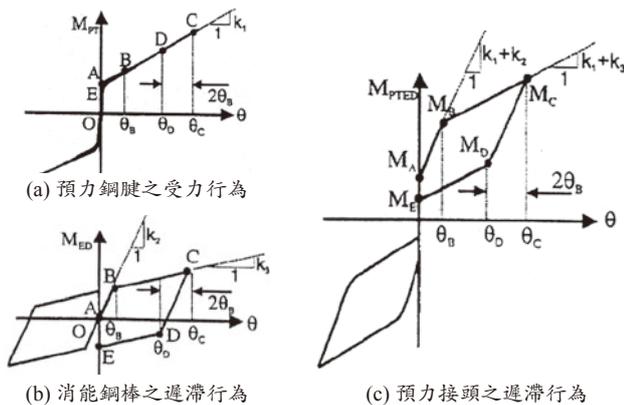


圖 3 預力梁柱接頭遲滯行為^[5]

本研究探討之自復位梁柱接頭係由預力系統及消能系統共同提供，因此其關係如下：

$$M_{PTED} = M_{PT} + M_{ED} \quad (1)$$

其中： M_{PTED} = 自復位梁柱接頭可承受之彎矩強度， M_{PT} = 預力構件所提供之彎矩強度， M_{ED} = 消能構件所提供之彎矩強度。

摩擦機制承載行為

摩擦消能機制係於接頭介面開角後，以一穩定之形式進行，如圖 4(a) 所示^[6]，設計上可於梁上下翼板設置開槽鋼板提供摩擦機制，如圖 4(b) 所示，接頭所承受之彎矩 M 為：

$$M = P \cdot d_2 + F_f \cdot d_1 \quad (2)$$

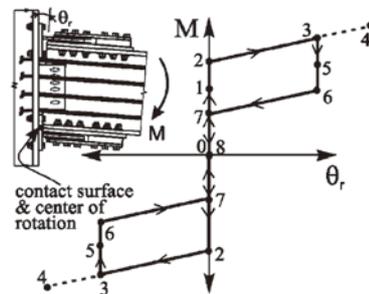
其中， P = 預力系統之合力， d_1 = 開角支點至摩擦力的距離， d_2 = 開角支點至梁之中心線的距離， F_f = 摩擦力。

$$F_f = 2 \cdot \mu \cdot N \quad (3)$$

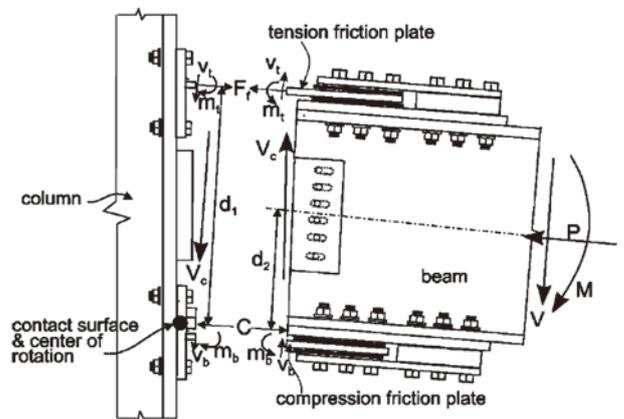
其中， μ = 摩擦係數， N = 螺栓正向力。將其整理後， P 之大小可簡化為下式：

$$P = T_0 + 2d_2 \left(\frac{k_b k_s}{k_b + k_s} \right) \cdot \theta_{d_2} \quad (4)$$

公式 (4) 中， k_b = 梁之勁度， k_s = 預力系統之勁度， T_0 = 預力系統之初始預力。由此式可知，在梁柱介面開角前，梁柱間之結合力 P 約等於 T_0 ，當梁柱介面開角後，其恢復力會因開角角度增大而增加。



(a) 梁柱介面開啟之力學行為



(b) 接頭受力之內力分佈圖

圖 4 摩擦消能接頭示意圖^[6]

具摩擦機制之自復位梁柱接頭強度

本研究研擬之自復位梁柱接頭配置如圖 5 所示，預力系統係由預力鋼棒提供，消能系統則由消能鋼棒及黃銅摩擦來提供，依配置之不同，其強度可由以下公式表示：

當梁柱接頭介面尚未開角時，系統之側向強度 P 為：

$$P = \frac{2}{L} \cdot (F_p + F_E) \cdot (d_1 + d_2) + \frac{F_f \cdot D}{L} \quad (5)$$

其中， P = 系統所受側向力， F_p = 初始預拉力， F_E = 消能鋼棒初始拉力（如初始無施加可忽略）， d_1 、 d_2 = 鋼棒至支點距離， F_f = 摩擦力（如無施加可忽略）， D = 梁有效深度， L = 側向力至接頭試驗區之距離。

當梁柱接頭開角後，可利用相似三角形（如圖 6 所示），推求鋼棒間之變形關係及鋼棒受力：

$$X_1 = \frac{d_1}{d_2} \cdot X_2 \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{d_1}{d_2} \cdot F_2 \quad (7)$$

由此可以求得介面開角後達降伏之強度 P_y 為：

$$P_y = \frac{2}{L} \cdot (F_{p_y} + F_{E_y}) \cdot \left(\frac{d_1^2 + d_2^2}{d_2} \right) + \frac{F_f \cdot D}{L} \quad (8)$$

其中， P_y = 系統降伏強度， F_{p_y} = 預力鋼棒降伏強度， F_{E_y} = 消能鋼棒降伏強度。

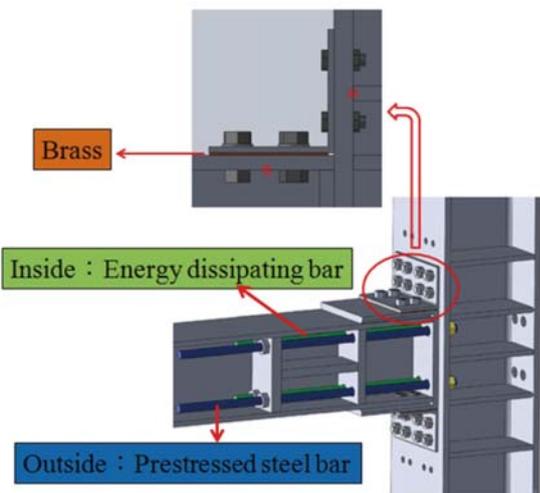


圖 5 自復位梁柱接頭

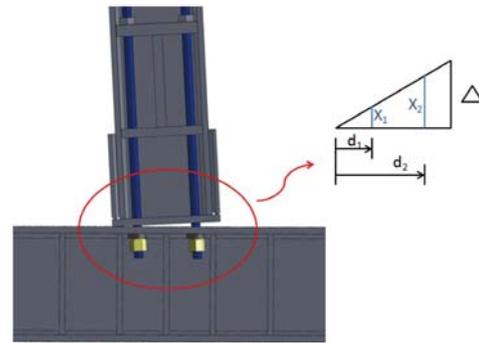


圖 6 介面開角後之相似三角形

試驗計畫

本研究共包含不同接合強度之自復位梁柱接頭構件試驗及 7 組單層單跨構架試驗，構件材質均為 A36，柱構件為 H250 × 250 × 9 × 14，梁構件為 H200 × 200 × 8 × 12，構架有效柱高為 2,520 mm，有效跨度為 4,744 mm，隅撐構件使用 H125 × 125 × 6.5 × 9 斷面製作，提供自復位機制之鋼棒為 A490 高拉力鋼棒，提供消能機制之鋼棒為 A307 鋼棒，摩擦機制使用 C2600 黃銅片進行摩擦消能。自復位梁柱接頭構件試驗之試體位移比為施力點之位移與施力點至接頭試驗區高度（2,511 mm）之比值，單層單跨構架試驗中之位移比則為施力點位移與有效柱高（2,520 mm）之比值，自復位隅撐之設計如圖 7 所示。

為瞭解不同自復位機制與消能機制之組合於地震力作用下對結構遲滯行為之影響，本研究首先針對自復位梁柱接頭進行構件試驗，包含 SS 系列、SL 系列、LL 系列及 F 系列四種，自復位梁柱接頭試驗之試體編號可參考圖 8。其後，由上述接頭構件試驗中求取適合之梁柱接頭配置於構架試驗，並與不同之消能機制組合，探討其對地震作用下結構承載行為及破壞模式之影響，構架試體配置如表 1 所示，構架試驗編號說明詳如圖 9 所示。自復位梁柱接頭與自復位構架試驗之實驗設置如圖 10 及圖 11 所示。試驗採漸增位移控制，加載歷時如圖 12 所示。

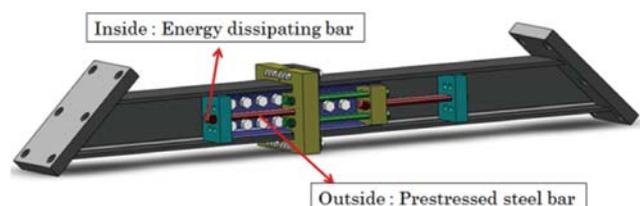


圖 7 自復位隅撐示意圖

表 1 構架試驗試體配置說明

構架編號	自復位梁柱接頭配置		自復位梁柱接頭配置	
	預力鋼棒尺寸	每一鋼棒預力大小 (tf)	預力鋼棒尺寸	每一鋼棒預力大小 (tf)
FN-NN-nn	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
FB-NN-ss	N.A.	N.A.	D10	1
FC-SS-nn	D18	6.5	N.A.	N.A.
FC-LL-nn	D20	10	N.A.	N.A.
FD-SS-ss	D18	6.5	D10	1
FD-LL-ss	D20	10	D10	1
FD-LL-ll	D20	10	D13	1.4



圖 8 自復位梁柱接頭試驗之試體編號說明

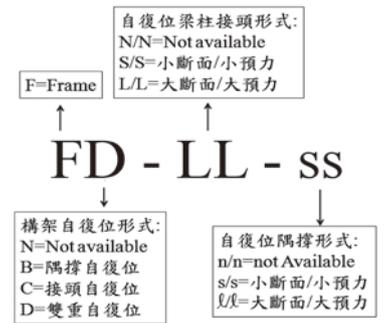


圖 9 單層單跨構架試驗之試體編號說明

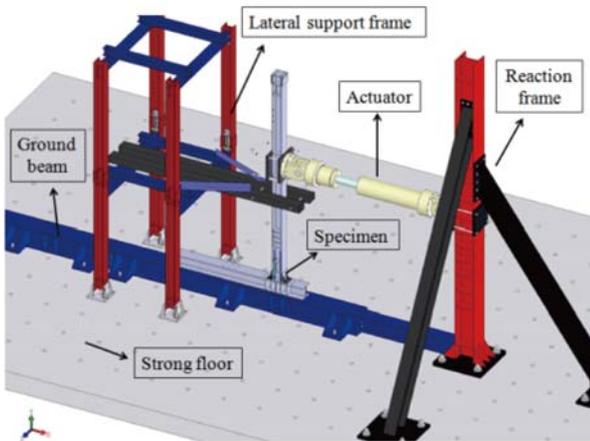


圖 10 自復位梁柱接頭試驗設置

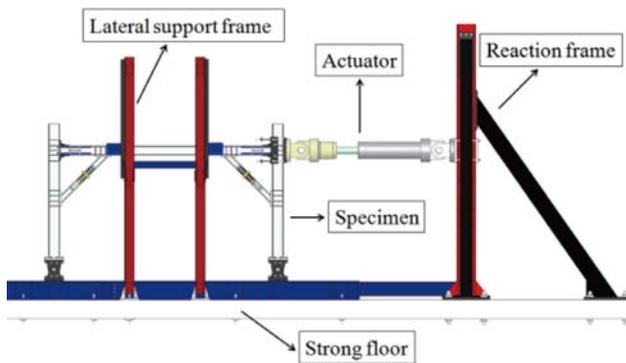
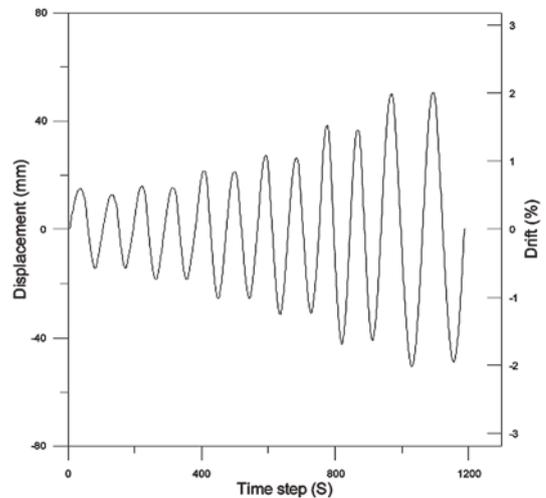
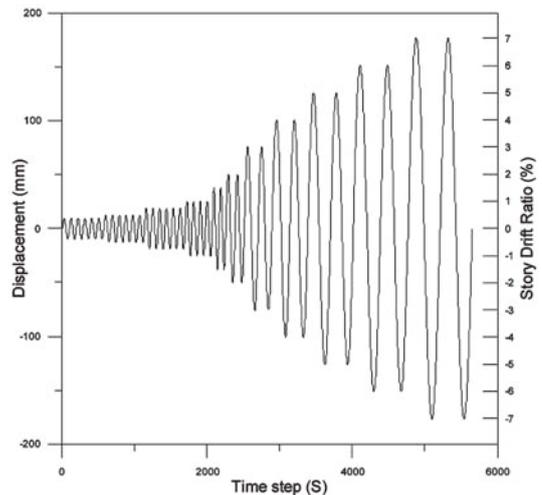


圖 11 自復位構架之試驗設置



(a) 自復位梁柱接頭



(b) 單層單跨構架

圖 12 試驗加載歷時圖

試驗結果分析與討論

自復位梁柱接頭試驗

圖 13 所示為不同結合強度下，自復位梁柱接頭之力與位移關係圖。由實驗結果得知，當接頭僅含預力系統時，結構雖有良好之自復位能力，然其無法提供有效之消能能力；若自復位梁柱接頭配置消能鋼棒作為消能機制，其消能能力僅有部分增加；然而當自

復位梁柱接頭同時配置摩擦裝置作為消能機制時，其消能能力獲有效提升，能量消散效率較使用消能鋼棒為佳。圖 14 所示為前述自復位梁柱接頭試驗之結果比較，試驗結果顯示，在相同之介面開角下，較短鋼棒

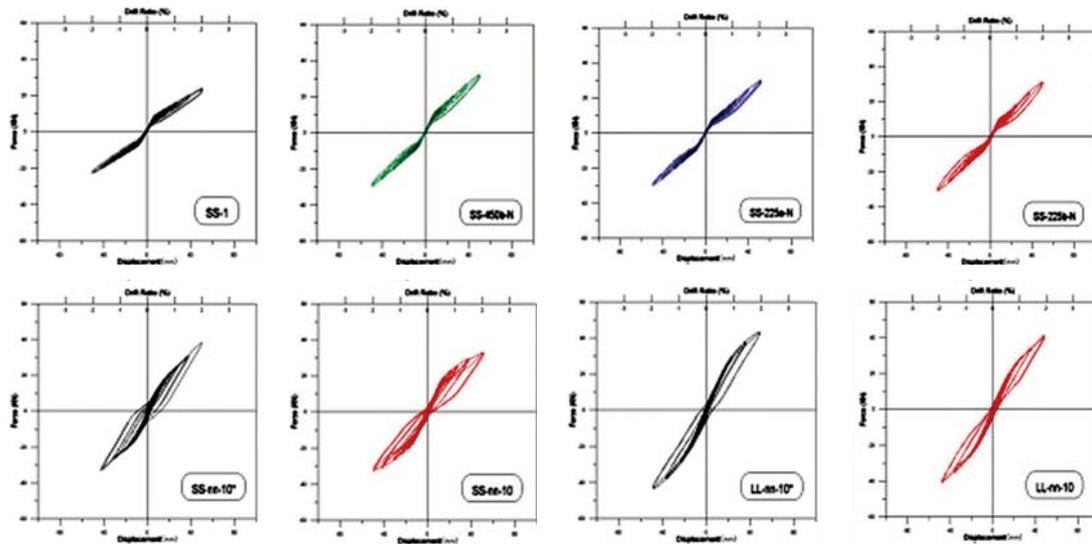


圖 13 自復位梁柱接頭載重位移關係曲線

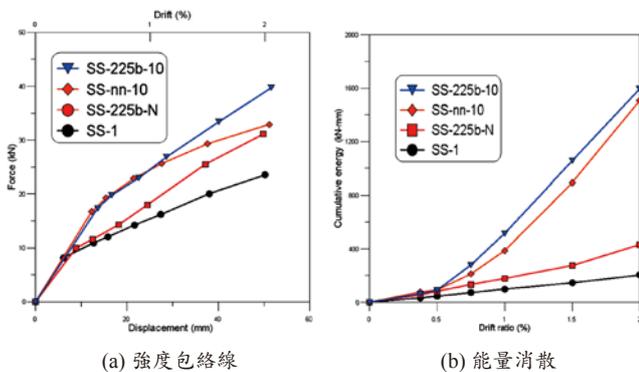


圖 14 自復位梁柱接頭試驗之結果比較

因應變較大，能量消散較大，然因其容許之伸長量較小，因此，斷裂發生時機亦較早。另就不同摩擦介面試體之試驗結果而言，由於鐵對鐵之摩擦係數較大，因此在相同預力系統下，其所提供之摩擦消能量較黃銅對鐵為高，惟其因摩擦損耗較高，遲滯穩定性反較後者為低。就有效之自復位梁柱接頭設計而言，應慎選適當之預力結合及摩擦消能機制。因此，後續之構架反覆載重試驗中，即以摩擦消能與自復位梁柱接頭及自復位隅撐共同提供結構有效之性能提升機制。

自復位構架試驗

本研究中另由自復位梁柱接頭構件試驗結果中，選取承載行為較佳之設計配置於構架試驗中，藉以評估自復位隅撐構架之耐震性能。圖 15 所示為抗彎構架及各種不同自復位梁柱接頭及隅撐配置之構架遲滯迴圈。由實驗結果可知，當構架裝置自復位隅撐後，相較於抗彎

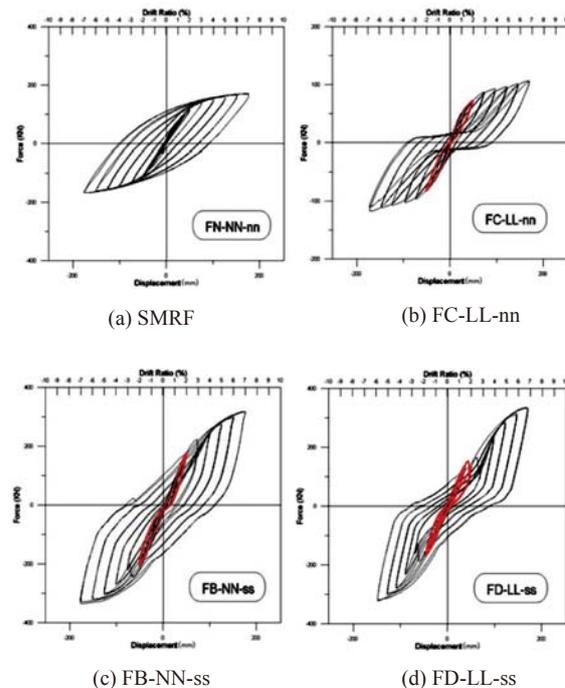


圖 15 構架試驗遲滯迴圈

構架其結構強度與勁度皆有明顯提升。圖中紅色區域表結構尚處於彈性階段，在此加載位移內，結構均不產生殘餘變形。圖 16 所示為配置不同自復位機制之構架強度及能量消散比較，由圖中可觀察到，當構架配置自復位隅撐後，其強度及能量消散均較相同構架尺度之抗彎構架提升甚多。另由試驗結果進一步比較可知，構架中配置之自復位隅撐對其承載強度提升甚多，惟若自復位隅撐強度過大，與隅撐相交處之梁斷面可能達到降伏或

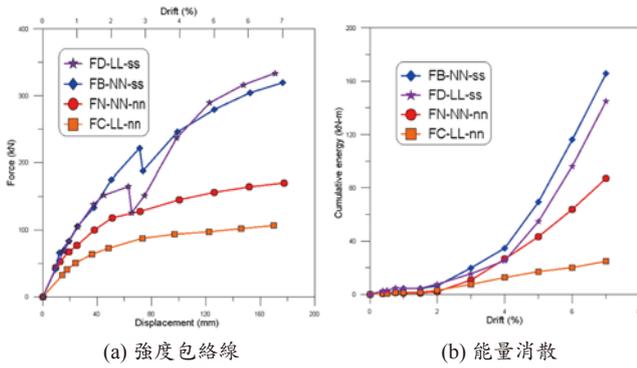


圖 16 構架試驗之結果比較

局部挫屈，造成結構自復位性能之減損，因此，在自復位隅撐結構設計中，應適度調整梁柱構件與自復位隅撐之強度比，以獲得較佳之承載效能。

結論

本研究針對自復位隅撐結構之耐震性能進行探討，由試驗結果得知，構架裝置自復位隅撐及自復位梁柱接合後，可有效降低梁柱接頭受力，延後梁端塑性鉸之形成，其結構強度與能量消散能力皆有明顯提升，因此應為適當之耐震設計方案。試驗結果亦顯示，消能機制中摩擦消能較鋼棒消能為佳，摩擦機制中，鐵對鐵之摩擦係數較大，其雖可獲得較大之消能

能量，但其摩擦損耗較快，對結構自復位性能有所影響；另黃銅對鐵摩擦之消能能量雖然略少，然其可提供穩定的自復位機制，有效降低結構之殘餘變形，應屬較佳之設計選擇。

誌謝

本研究承蒙國家地震工程研究中心提供試驗試體補助，謹此致謝。

參考文獻

1. Hsu, H.L. and Jean, S.Y., "Improving Seismic Design Efficiency of Petrochemical Facilities, Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 8, No. 2, pp. 107-117 (2003).
2. 周誌桓 (2009), 隅撐鋼結構耐震行能研究, 國立中央大學土木工程學系碩士論文, 2009。
3. Priestley, M.J.N. and Tao, J. R., "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete frames with partially Debonded Tendons", PCI Journal, Jan.-Feb., pp. 58-66 (1993).
4. Ricles, J. M., Sause, R., Peng, S. W. and Lu, L. W., "Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Posttensioned Steel Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 7, pp. 850-859 (2002).
5. Christopoulos, C., Filiatrault, A., Uang, C. M. and Folz, B., "Post-tensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 9, pp. 1111-1120 (2002).
6. Rojas, P., Ricles, J. M. and Sause, R., "Seismic Performance of Post-Tensioned Steel Moment Resisting Frames With Friction Device", Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 4, pp. 529-540 (2005).



社團法人
中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325
傳真：(02) 2396-4260
e-mail: service@ciche.org.tw

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個土木人務必加入的專業學術團體
一個國際土木組織最認同的代表團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體



歡迎加入學會

<http://www.ciche.org.tw>
請上網下載入會申請表

秘書處報告 學會將利用電子郵件信箱作為聯絡會員的管道。請各位會員記得向秘書處登記或更新您的 email 信箱。謝謝！