

混合式耦合剪力牆耐震系統之研發

Development of a New Hybrid Coupled Shear Wall System

主管單位：內政部建築研究所、營建署

鄭敏元¹

陳正誠¹

Cheng, Min-Yuan¹

Chen, Cheng-Cheng¹

¹國立臺灣科技大學營建工程系

摘要

設計剪力牆作為建築物主要側向力支撐系統在實務上是非常普遍的作法，尤其針對中、低層建築物而言，剪力牆在施工上通常比抗彎矩構架更為經濟。因為美觀或實際需求，在剪力牆面上常常需作規則的開孔，造成原先單面剪力牆變成多面剪力牆，並以沿著樓高的梁作連接，此系統稱為並聯剪力牆系統，而連接剪力牆的梁即稱為耦合剪力梁。

耦合剪力梁必須具有適當的延展性與能量消散能力，就鋼筋混凝土耦合剪力梁而言，當梁跨距與梁深比小於二時，過去研究證實必須使用對角線鋼筋，排列對角線鋼筋在實際施工上造成極大的困難，本計畫提出使用低降伏鋼耦合剪力梁取代傳統鋼筋混凝土耦合剪力梁的構想。

實驗結果發現使用低降伏鋼耦合剪力梁試體在頂樓極層間位移達 2.00% 時因為剪力牆剪力強度不足造成破壞，其原因在於低降伏鋼的極限強度與降伏強度比很高，以低降伏鋼降伏強度作設計的耦合剪力牆系統低估了系統的極限總彎矩強度，因而造成剪力牆內的剪力需求大於設計剪力強度的破壞模式，目前規範並無針對耦合剪力牆系統內的剪力強度作明確的規範，本研究建議鋼筋混凝土並聯剪力牆的剪力強度設計應考慮材料超額強度與剪力分配係數，至少需達需求的 1.5 倍，據此設計的鋼筋混凝土並聯剪力牆系統韌性係數 (R) 建議使用 4.4。另外，使用鋼耦合剪力梁作設計時應考慮極限強度，以避免剪力牆過早破壞。

關鍵詞：耦合剪力梁、低降伏鋼、並聯剪力牆系統

Abstract

Shear wall has been used extensively as the major lateral resistant system in structural. For mid-to-low-rise buildings, shear wall system is usually more cost-effective than other lateral resistant system such as moment resisting frame. Sometimes, perforated shear wall is needed because of architectural or practical needs. A single shear wall is then divided into several individual walls connected by a series of beams along the story height. This system is referred as coupled shear wall system and beams used to connect two walls are referred as coupling beams.

To achieve the advantage of coupled wall system, coupling beams must sustain the designed shear forces and satisfactory energy dissipation abilities under large displacement reversals. For reinforced concrete coupled wall system, previous research

has found that diagonal reinforcements are necessary for coupling beams with span to depth ratio less than 2. However, the construction of this diagonal reinforcement creates considerable steel congestions. In this research, using low-yield point (LYP) steel plate as a cost-effective solution for new coupling beam design is propose

The experimental results shows that the coupled shear wall specimen with LYP steel coupling beam failed at 2.00% story drift due to excessing shear failure at bases of shear walls. LYP steel has high ultimate strength to yield strength ratio. Using specified yield strength of LYP steel in the design process significantly underestimates the shear transfer ability. That induces larger shear demand into the wall and causes premature shear failure. Based on research evidences, for reinforced concrete coupled shear wall system, this study suggests the evaluation of shear capacity of shear wall should be amplified by a factor of 1.50 which considers both overstrength factor and uneven shear distribution between tension and compression wall. With this shear amplification factor, this study suggests the ductility capacity (R) of 4.4 for the RC coupled shear wall system. When steel coupling beam is used, the shear capacity of coupling beam should be determined based on ultimate strength instead of yield strength.

Keywords : Coupling Beam, Low Yield Point Steel, Coupled Shear Wall System.

一、前言

由於剪力牆的幾何形狀提供極大的面內勁度，設計剪力牆作為建築物主要側向力支撐系統在實務上是非常普遍的作法，尤其針對中、低層建築物而言，剪力牆在施工上通常比抗彎矩構架更為經濟 (Moehle et. al., 2011)。因為美觀或實際需求，在剪力牆面上常常需作規則的開孔，造成原先單面剪力牆變成多面剪力牆，並以沿著樓高的梁作連接，此系統稱為並聯剪力牆系統，而連接剪力牆的梁即稱為耦合剪力梁。

並聯剪力牆系統理想的耐震行為與抗彎矩構架系統類似，期望塑角發生在耦合剪力梁與剪力牆底部，降低剪力牆其他區域的損害程度，以維持耐震機制。因此耦合剪力梁必須具有適當的延展性與能量消散能力，根據現行耐震設計規範 (ACI 318 Committee, 2011)，鋼筋混凝土耦合剪力梁在跨深比小於二 (即梁長/梁深小於 2)、且剪力強度大於 $1/3\sqrt{f'_c}$ (MPa) 時必須使用對角線配筋，然而 Harries 等學者 (2005) 指出對角線鋼筋與圍束箍筋的要求在實際施作上幾乎無法執行：有學者提出使用鋼梁取代鋼筋混凝土梁的做法，但是相關細部設計非常複雜且相關耐震規範也不明確。

本計畫提出新型混合式並聯剪力牆系統的構想 (Hybrid Coupled Shear Wall System)；使用低降伏鋼耦合剪力梁搭配鋼筋混凝土剪力牆，過去文獻發現剪力鋼板使用低降伏鋼材料可以得到極佳的延展性與能量消散能力 (Chen and Yen, 2000; Chen and Jhang, 2008)，由於耐震行為類似，預期低降伏鋼可以有效應用於耦合剪力梁上；針對耦合剪力梁與剪力牆的連接處，本計畫亦提出新設計方法，期望改善鋼筋混凝土剪力牆邊界區域內鋼筋過於密集的問題。

二、研究方法

本計畫主要目的在研究新式耦合剪力梁取代傳統鋼筋混凝土耦合剪力梁的可行性，以解決對角線鋼筋在施工時造成的困擾，為了達成研究目的，本計畫預計測試兩座約 1/2 縮尺並聯剪力牆系統試體，每組試體四層樓高，包含兩面鋼筋混凝土剪力牆以及連接剪力牆的四支耦合剪力梁。第一組試體，以 CW-RC 作代號；使用鋼筋混凝土耦合剪力梁，視為控制試體 (control specimen)，第二組試體，以 CW-S 作代號；使用低降伏鋼耦合剪力梁，為本計畫主要評估對象。

2.1 試體設計

有別於傳統設計方式，兩組測試試體均以”耦合效應比” 0.35 (coupling ratio) 作設計目標，當試體承受側向作用力時，耦合剪力梁內傳遞的剪力會在兩端剪力牆分別產生張力 (T) 與壓力 (C)，形成耦合效應 (coupling effect)，此效應可抵抗部分總傾覆彎矩，降低個別剪力牆設計彎矩強度，一般在評估耦合效應大小時均利用耦合效應比來定義，其數值表示耦合效應產生的彎矩強度佔總傾覆彎矩的比例。若耦合剪力梁勁度為零，沒有耦合效應 ($T=C=0$)、亦即耦合效應比為 0% 時，則剪力牆各自獨立反應；反之，若假設耦合剪力梁為一勁度無限大的剛體，耦合效應比為 100%，則並聯剪力牆系統相當於一座單面剪力牆。實際工程案例中的耦合效應比應介於上述二者之間。

在試體在耦合效應比 0.35 的前提下，利用塑性設計的概念，假設極限狀態下塑角

同時發生在所有耦合剪力梁端部與剪力牆底，其中各桿件內力均以極限強度 (ultimate capacity) 作計算。近期一篇論文指出大部分建築物的耦合效應比介於 0.20 至 0.55 之間 (Lequensne, 2011)，過低的耦合效應比不具經濟效益，過高的耦合效應比會導致剪力牆軸向壓力過大、降低剪力牆的撓曲強度與變形能力。

就低降伏鋼耦合剪力梁與鋼筋混凝土剪力牆搭接部分，考慮耦合剪力梁主要傳遞彎矩與剪力，就彎矩部分以預埋鋼筋提供耦合剪力梁翼板所需張力，而壓力則由混凝土與預埋鋼筋共同承擔，因此翼板的張力會控制預埋鋼筋的設計，對寬度 8.0 公分、厚度 1.2 公分的翼板而言，假設全部降伏的情況下可以得到最大張力為 33.21 tonf，需要使用四支五號鋼筋，為避免應力集中現象，鋼筋先焊接於一片長度 7.5 公分、寬度 4.0 公分、厚度 1.2 公分的傳接板上，然後再將傳接板焊接於 I 型鋼的翼板與腹板，位置剛好在耦合剪力梁翼板的另一側，傳接板上下各一支五號鋼筋，對稱 I 型鋼腹板兩邊各使用一片傳接板以滿足四支五號鋼筋的需求。至於剪力部分，傳接板以及 I 型鋼腹板預留孔與混凝土的承载力可提供剪力強度，其中預留孔主要目的在方便剪力牆內圍束箍筋通過，以 6.0 公分垂直間距為主，然而在耦合剪力梁間，箍筋間距改為 6.3 公分以避免連接板處上下箍筋間距過大，需要注意的是 6.3 公分箍筋間距仍然符合規範要求，最終設計完成試體如圖 1 與圖 2 所示。

2.2 實驗配置

測試試體的實驗配置可參考圖 3，試體的測試方向為南北向，每組試體測試時需要兩座 200 tonf 制動器，分別架設於試體頂樓與三樓高處，其中位於頂樓之制動器以位移控制，規劃的位移歷時如圖 4 所示，制動器速度定為 1.0 mm/s 到 2.0 mm/s 之間。

位於第三層樓高的制動器則以力量控制，力量大小設定為二分之一位於第四層樓高制動器之讀數，以模擬地震力量於低矮樓層側向力分佈情形，剪力牆的垂直載重除試體自重外，亦於每座剪力牆頂部架設四組油壓千斤頂 (hydraulic jack)，透過固定於強力樓板上的鋼纜 (直徑 15 mm)，每組千斤頂提供約 5.0 tonf 的軸向力以模擬重力垂直載重，此軸力合大小 (20 tonf) 與剪力牆自重 (約 4 tonf) 約達剪力牆軸向強度之 3.5%，位於同一牆面上的四組千斤頂由一套獨立油壓系統控制，作用力於試體側推前施加並固定油壓，在測試時並不作調整，若有需要僅於試體完成一完整週期回到零位移時才作複加壓力的動作。為防止試體於測試時產生扭轉，試體兩側分別提供適當側撐。

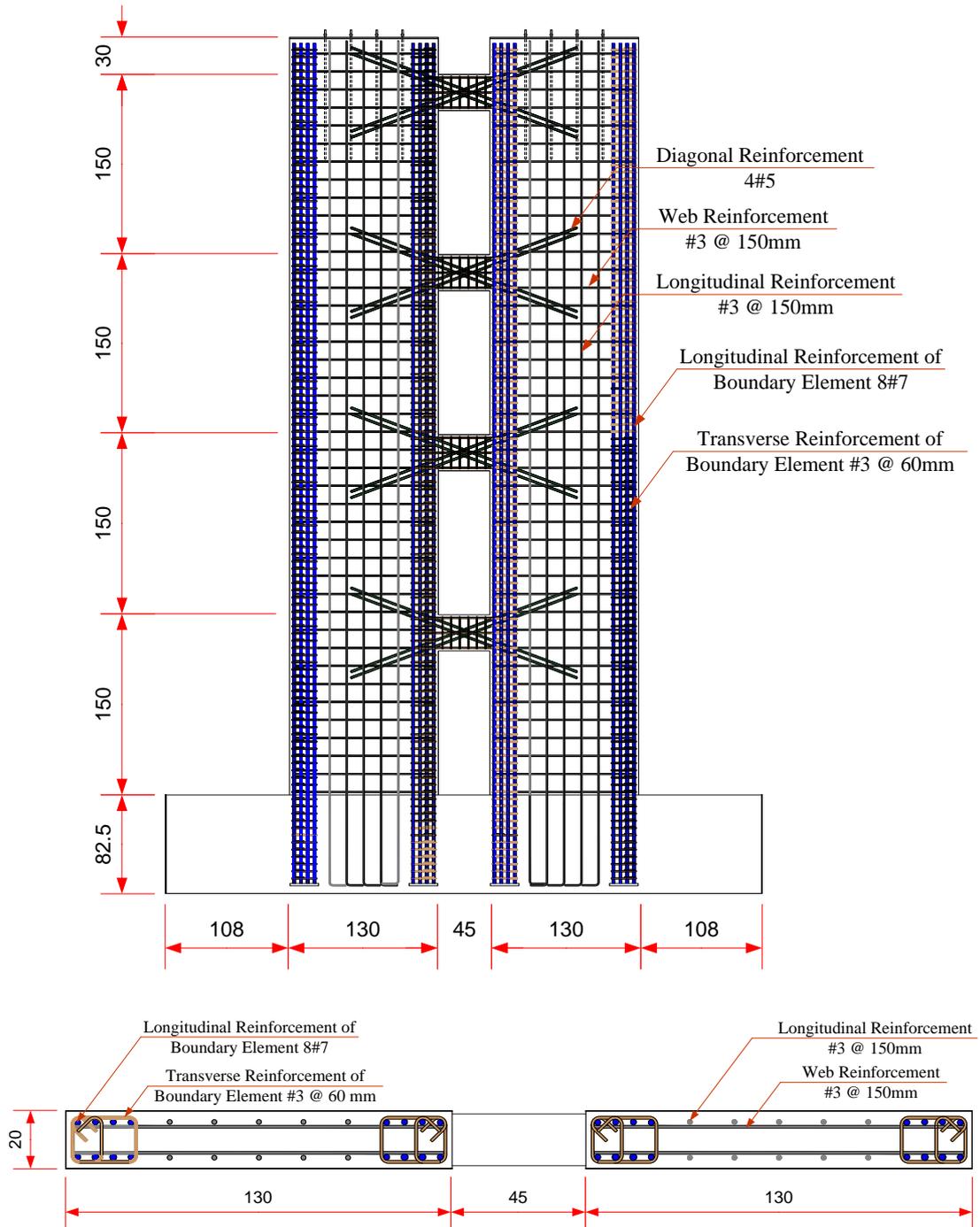


圖 1 試體 CW-RC 設計圖 (單位：cm)

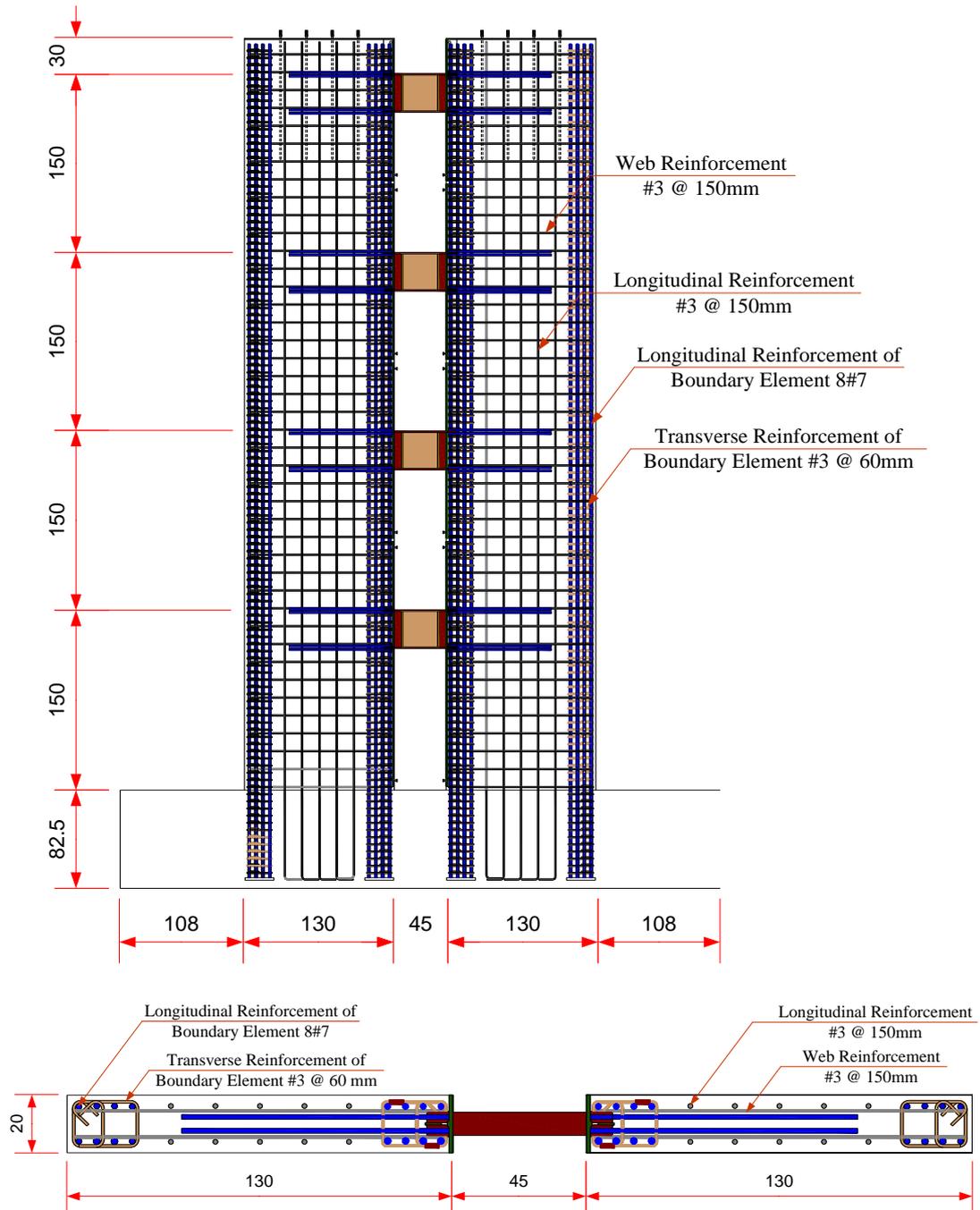


圖 2、試體 CW-S 設計圖 (單位：cm)

三、研究成果

試體 CW-RC 與 CW-S 的總彎矩強度與頂樓層間位移關係圖分別如圖 5 與圖 6 所示，其中總彎矩強度由分別二樓與四樓的制動器力量乘上個別高程所得。試體 CW-RC 在 1.25% 得到最大總彎矩強度 750 tonf-m，之後穩定維持彎矩強度直到 3.00% 的第一個週期，在從正 3.00% 到 -3.00% 的途中，南面剪力牆在一樓區域內的混凝土嚴重壓碎脫落，造成力量在該處驟減，評估應為剪力壓桿壓碎的破壞模式，實驗因此停止，事後觀察發現頂樓與第三層樓的鋼筋混凝土耦合剪力梁剪力梁有嚴重混凝土壓碎與對角線鋼筋挫屈的情形，樓版的束制條件與水平往覆載重的加載情形可能是造成此二樓層與其他樓層的耦合剪力梁破壞程度不一樣的主要原因。

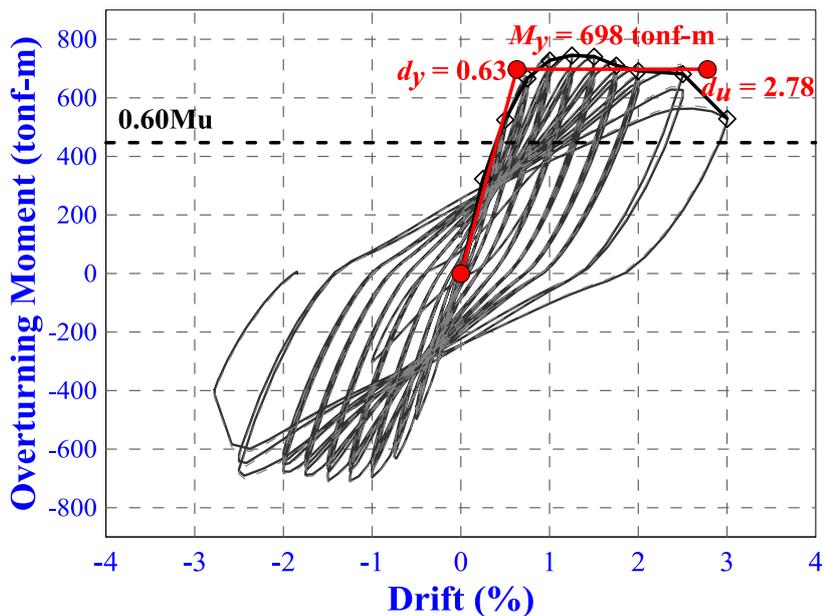


圖 5、試體 CW-RC 總彎矩與頂樓層間位移關係圖

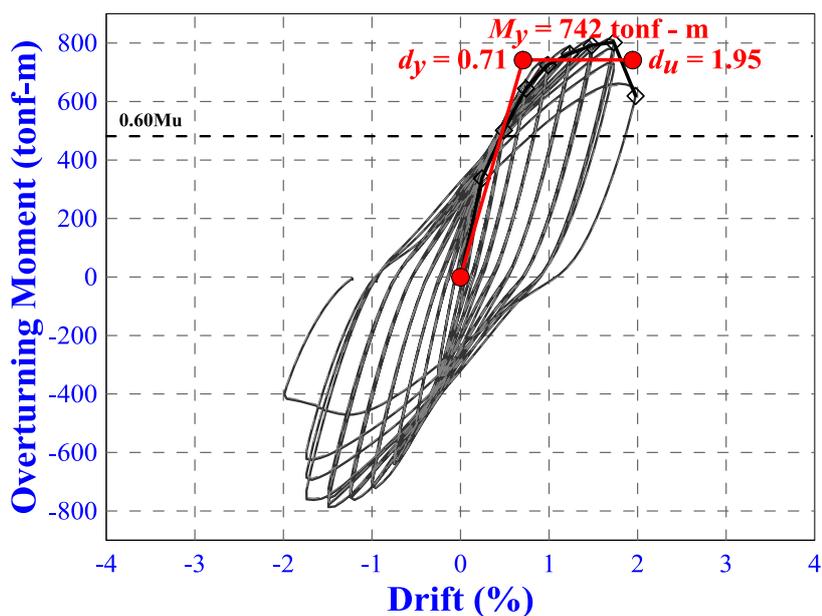


圖 6、試體 CW-S 總彎矩與頂樓層間位移關係圖

試體 CW-S 在 1.00% 得到最大彎矩強度 815 tonf-m，雖然強度比第一座試體提升 8.0% 且遲滯迴圈包覆的面積有稍微增加，但是在 1.75% 的週期內已經明顯觀察到剪力壓桿被壓碎的徵兆，在 2.00% 的第一個週期即發生嚴重剪力壓桿壓碎破壞，事後觀察除了剪力牆嚴重損毀外，低降伏鋼耦合剪力梁仍然相當完整，而鋼梁與剪力牆的連接處也沒有分開的現象，顯示在接合處的細部設計應屬可行。

兩組試體理想反應曲線如圖 5 與圖 6 所示，其中理想反應線取得方式如下：首先將遲滯迴圈內每個層間位移的第一個週期最大值標示出來，如圖 5 與 6 中菱形記號，將這些記號作連線即可得到遲滯迴圈的包絡線，然後假設彈性係數斜率與過包絡線上 0.6 倍最大彎矩強度點相同，定義極限位移位於包絡線彎矩強度衰減 20% 處，最後用面積相等的方式決定降伏彎矩，兩組試體的理想化反應線即可求得，相關數值請參考表 1，根據理想化反應線，試體 CW-RC 的位移韌性係數為 4.4；定義為極限位移除以降伏位移的比值，而試體 CW-S 的位移韌性係數則為 2.8。

表 1、理想化反應線數值

試體	降伏總彎矩強度 (tonf-m)	降伏層間位移 (%)	極限層間位移 (%)	韌性係 數
CW-RC	697.78	0.63	2.78	4.4
CW-S	742.38	0.71	1.95	2.8

需要注意的是，試體 CW-S 在低降伏鋼耦合剪力梁尚未完全發揮全部韌性時即產生剪力牆過早剪力破壞，因此本實驗無法根據有限的測試結果提供相關的耐震設計數值。考量國內目前並無對並聯剪力牆的剪力強度有做特殊規範，這次研究結果發現並聯剪力牆系統內剪力牆的剪力強度設計應考慮桿件超額強度與剪力分配情形。

實驗結果發現，以力量為基準的傳統桿件設計法在並聯剪力牆系統中可能會導致剪力牆內剪力需求過大的情形，當耦合剪力梁提供超出設計所需的剪力強度時，剪力牆內的剪力需求隨之增加，要確保剪力牆內剪力強度足夠，必須要考慮桿件的超額強度。另外，在往復載重的實驗過程中也發現，兩面剪力牆並非同時破壞，在耦合效應作用下，壓力剪力牆有先破壞的趨勢，表示剪力牆內剪力的分配並不平均。根據本次實驗的結果，試體 CW-RC 剪力牆提供的剪力強度是設計需求的 1.5 倍，此放大係數讓鋼筋混凝土並聯剪力牆系統達到 3.00% 層間位移，因此，作並聯剪力牆系統設計時，研究團隊建議 1.5 倍剪力放大係數在鋼筋混凝土剪力牆的設計中，此係數考量桿件超額強度與剪力分配情形。若使用鋼耦合剪力梁，除了 1.5 倍的剪力放大係數外，研究團隊建議鋼耦合剪力梁的剪力強度應由標稱極限應力來決定，因為鋼材有非常好的延展性，在大變形下用標稱降伏應力有低估鋼梁剪力強度的可能。

考量國內規範目前並沒有針對鋼筋混凝土並聯剪力牆系統作韌性容量 (R) 的設計建議;詳見建築物耐震設計規範及解說表 1-3 (內政部營建署,2011),根據實驗結果,在滿足以下條件下:(1) 鋼筋混凝土耦合剪力梁使用對角線鋼筋,(2)使用 1.5 倍剪力放大係數作剪力牆剪力設計,本研究建議鋼筋混凝土並聯剪力牆系統韌性容量係數 $R=4.4$ 。

四、結論與建議

本研究計畫的主要目的希望低降伏鋼耦合剪力梁可以取代傳統施工困難的鋼筋混凝土耦合剪力梁,本計畫以剪力強度作直接專換,中間過程並不複雜,有助於將研究成果普及化。

(1) 本研究主要測試兩組試體,試體 CW-RC 測試結果相當理想,最大頂樓層間位移達到 3.00%,遲滯迴圈也很理想,滿足目前大部分設計規範規定最大層間位移量的要求,針對高深比 1.5 倍的鋼筋混凝土耦合剪力梁,對角線鋼筋的排列方式可以提供穩定的耐震行為,第二座試體 CW-S 因為南側剪力牆的剪力過早破壞,頂樓最大層間位移量僅達 2.00%,初步判斷因為低降伏鋼極限強度與降伏強度比過大,造成試體在後期的耦合效應超過設計值。

(2) 本研究提出新型鋼梁與鋼筋混凝土剪力牆細部搭接法,實驗結果證實新型搭接法可以有效傳遞剪力與彎矩,比過去文獻中建議的搭接法施工方便,且施工準確性高。

(3) 作並聯剪力牆系統設計時,研究團隊建議 1.5 倍剪力放大係數在鋼筋混凝土剪力牆的設計中,此係數考量桿件超額強度與剪力分配情形。若使用鋼耦合剪力梁,除了 1.5 倍的剪力放大係數外,研究團隊建議鋼耦合剪力梁的剪力強度應由標稱極限應力來決定,因為鋼材有非常好的延展性,在大變形下用標稱降伏應力有低估鋼梁剪力強度的可能。

(4) 根據實驗結果,在滿足以下條件下:鋼筋混凝土耦合剪力梁使用對角線鋼筋以及使用 1.5 倍剪力放大係數作剪力牆剪力設計,本研究建議鋼筋混凝土並聯剪力牆系統韌性容量係數 $R=4.4$ 。

參考文獻

1. 內政部營建署,2011,“建築物耐震設計規範與解說”。
2. ACI 318 Committee, 2011, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary”, Farmington Hill, MI, U.S.
3. Chen, S.-J. and Yen, C. Z., 2008, “Application of LYP Steel Shear Damper for Seismic Resistance.”, Structural Engineering, Vol. 15, No. 1, 2000, pp. 3-21.
4. Chen, S.-J. and Jhang, C., 2008, “Seismic Behavior of Low-Yield Point Steel Plate Shear Walls.”, Structural Congress, ASCE

5. Harries, K. A.; Fortney, P. J.; Shahrooz, B. M. and Brienens, P. J., 2005, "Practical Design of Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beams-Critical Review of ACI 318 Requirements.", ACI Structural Journal, Vol. 102, No. 6, Nov.-Dec., pp. 876-882.
6. Lequensne, R. D., 2011, "Behavior and Design of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Coupling Beams and Coupled-Wall Systems.", Ph. D Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Michigan-Ann Arbor, 277 pp.
7. Moehle, J. P.; Ghodsi, T.; Hooper, J. D.; Fields, D. C. and Gedhada, R., 2011, "Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams- A Guide for Practicing Engineers." NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 6, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 37 pp.