



低降伏鋼板與混凝土複合剪力牆 耐震性能研究

鄭錦銅／高雄科技大學營建工程學系 教授

張詠欽、黃昇賢／高雄大學土木與環境建工程學系 研究生

張惠雲／高雄大學土木與環境建工程學系 教授

本文研究的鋼板與混凝土複合剪力牆是以兩片鋼面板內填充混凝土材料以及剪力連接器（剪力釘）組合而成的牆體，其特色為具有高勁度與強度。因其施工快速與高強度的特性，最早被應用於核電廠內圍阻體、抗冰離岸構造與大型船體，近年來則多應用於超高樓層結構中。因本研究複合剪力牆主要應用於高樓建築核心筒，需釐清高軸力對於承重牆體之鋼板挫屈行為影響。因此，本研究主要研究參數為牆體厚度（鋼材比）、剪力釘間距（細長比）、與軸力比等。試驗牆體鋼面板主要以低降伏鋼製作，可有效增加鋼面板韌性能力以及增大剪力釘間距。為同時向試體施加軸力與橫向剪力作用，本研究實驗皆在國家地震研究中心南部實驗室 BATS (Bi-Axial Dynamic Testing System) 機台進行。共製作八座尺寸 1,200 × 1,200 mm，高寬比為 1.0 的複合鋼板剪力牆，進行靜態反覆側推試驗。試驗結果發現，牆體厚度與承受軸力的高低對試體極限強度的影響不大，但軸力卻會影響試體對於橫向變形的消能能力。而剪力釘間距在錨定效果上有明顯差異，採保守公式計算剪力釘間距試體在韌性消能能力上能有效提升。

前言

國內外相關研究已經證實鋼板與混凝土複合剪力牆系統具備優異的韌性變形能力，可提供高樓建築結構所需側向勁度與強度。當鋼板剪力牆承受地震力時，鋼面板側向變形除了發展的拉力場外，垂直於拉力場方向也同時發展出壓應力，迫使鋼板挫屈，內充填混凝土可以有效延緩鋼板挫屈。鋼面板可以充當模板，整塊組裝完成模組節塊可在工廠預鑄，再吊裝工地現場組裝，加快建造速度節省工時。混凝土與鋼板複合剪力牆有許多不同的種類，在本篇論文中主要研究的複合剪力牆系統之剪力牆體係為兩片鋼板夾混凝土層之三明治牆體，如圖 1 所示。為避免鋼板與混凝土受挫屈力時分離，鋼板面內層需焊接一定距離之剪力釘，並錨錠於混凝土內。國外已有將此系統應用於鑽油平台^[1]，船殼^[2]，核能電廠^[3-5]，與剪力牆構造^[6-10]

其優異之載重性能。近幾年，韓國^[6]大陸^[7,8]美國學者^[5,9,10]開始積極研究鋼板與混凝土複合剪力牆之受剪行為，包含強度、勁度或是韌性變形能力。韓國與大陸文獻研究牆體皆應用於高樓結構且皆專注於牆體本身之受剪行為，其試體之邊界柱大都與牆體同寬。因橫向力皆施加於牆體上緣，牆體受力後呈現單曲變形，牆體下緣彎矩較大，故牆底鋼面板容易發生挫屈。有些美國文獻^[9]牆體之邊界柱較寬，可以改善牆體下緣鋼板容易發生挫屈現象。這些文獻除了說明試體試驗結果外，也都提出理論以預測牆體之初始勁度，極限剪力強度，強度變形包絡線與遲滯變形曲線等。另外，高強度混凝土也被應用於建造複合剪力牆試驗試體^[8,10]2017年，美國學者^[10]也開始著手研究複合剪力牆體應用於高樓建築，探討高軸力對牆體耐震行為影響。國內研究始於台大土木系黃尹男教授於2014年開始進行

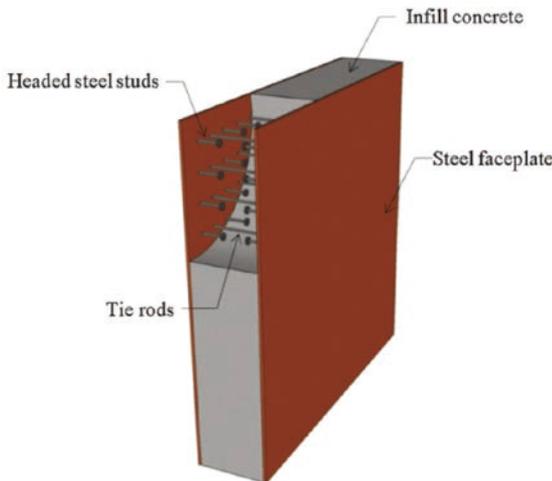
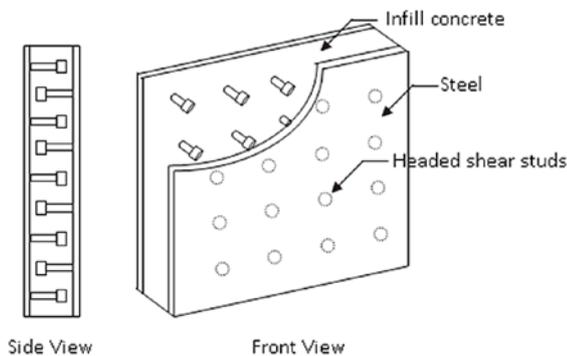
圖 1(a) 典型鋼板混凝土複合剪力牆構造示意圖^[5]

圖 1(b) 鋼板混凝土複合剪力牆斷面示意圖

剪力牆體反覆載重試驗 (in-plane cyclic shear test)^[11]，主要應用於核能電廠圍阻體。本研究 2017 年開始進行系列鋼板與混凝土複合剪力牆耐震性能研究^[12]，應用於建築構造。

實驗設計與程序

複合剪力牆主要應用於高樓建築核心筒，需釐清高軸力對於承重牆體之鋼板挫屈行為影響。本研究主要研究參數為牆體厚度（鋼材比）、剪力釘間距（細長比）、及軸力比等。試驗牆體鋼面板主要以低降伏鋼製作，可有效增加鋼面板韌性能力以及增大剪力釘間距。本文共製作八個剪力牆體進行反覆側推試驗研究。試體設計參數如表 1 所示，總厚度 T 為表中兩面鋼板厚度 t_p 加上充填混凝土厚度，鋼材比為 $2t_p/T$ ，剪力釘間距 s ，配置細長比 s/t_p 。試體為縮尺模型，參考一般 RC 結構建築物樓高 3 m，以等比例縮小 2.5 倍，

牆長寬皆為 1.2 m。表中顯示試體編號第 1 字母 L 代表使用低降鋼材為鋼面板。第 2 字母 B 代表牆體混凝土厚度 15 cm，N 代表厚度 10 cm。第 3 字母代表試體承受設計軸力比之高低，Z 代表試體未承受軸力，L 代表試體承受 10% 極限軸力，A 代表試體承受 30% 極限軸力，H 代表試體承受 50% 極限軸力，其計算方式如公式 (1) 所示。上述設計軸力比的定義為，試體承受的實際承受軸力與極限軸力 P_u 兩數值之比值

$$\text{軸力比} = \frac{P}{P_u} = \frac{P}{0.85f'_c A_c + F_y A_s} \quad (1)$$

其中 f'_c 為設計混凝土強度， A_g 為混凝土斷面積， A_s 為鋼面板與邊界版斷面積和， F_y 為鋼材降伏強度。最後一組數字代表剪力釘間距（靜態加載）。此外，在試體設計中，需求細長比計算剪力釘間距，直接影響鋼面板挫屈行為。參考文獻^[13]需求細長比可由下式求得：

$$\frac{s}{t_p} \times \sqrt{\frac{F_y}{E}} \leq 1.0 \quad (2)$$

其中 S 為剪力釘間距， t_p 為鋼面板厚度， E 為鋼面板彈性模數與 F_y 為鋼面板降伏強度（100 MPa）。考量鋼面板應變硬化影響，公式 (2) 中 F_y 改用目標位移時鋼面板抗拉強度 200 MPa 計算，需求細長比為 31.6（前 4 組試體依此設計）。再考量試體承受高軸力以保守計算，此需求細長比再乘以 0.8 縮小為 25.3（後 4 組試體依此設計）。詳細試體設計圖如圖 2 所示。本文剪力釘布置並非如圖 1a 頭對頭並列，而是梅花排列如圖 1b 所示。剪力牆混凝土厚度 100 mm 剪力釘直徑 13 mm，混凝土厚度 150 mm 剪力釘直徑 16 mm。混凝土設計強度 $f'_c = 280 \text{ kgf/cm}^2$ 。

表 1 試體設計尺寸與研究參數

試體編號	軸力比 P/P_u	混凝土厚度 (cm)	鋼板厚 t_p (cm)	鋼材比 $2t_p/T$ (%)	剪力釘間距 s (cm)	配置細長比 s/t_p	需求細長比
LNZ-24	0	10	0.8	13.8	24	30	31.6
LBZ-24	0	15	0.8	9.6	24	30	31.6
LNA-24	0.3	10	0.8	13.8	24	30	31.6
LBA-24	0.3	15	0.8	9.6	24	30	31.6
LBL-20	0.1	15	0.8	9.6	20	25	25.3
LNA-20	0.3	10	0.8	13.8	20	25	25.3
LBA-20	0.3	15	0.8	9.6	20	25	25.3
LBH-20	0.5	15	0.8	9.6	20	25	25.3

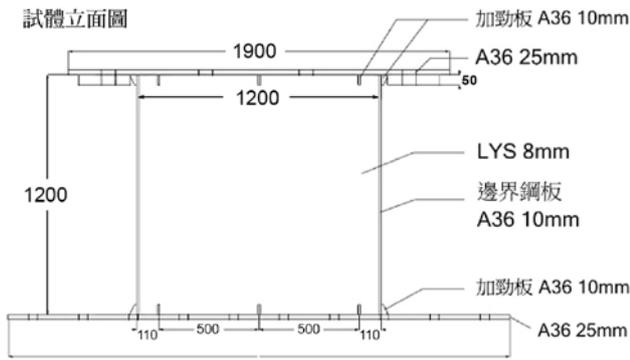


圖 2(a) 試體外觀與尺寸

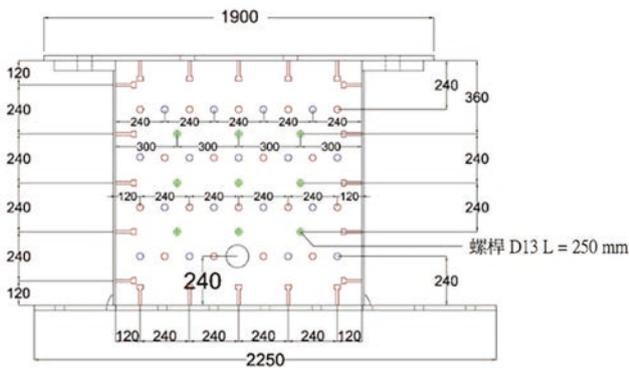


圖 2(b) 剪力釘間距為 24 cm 之試體設計圖

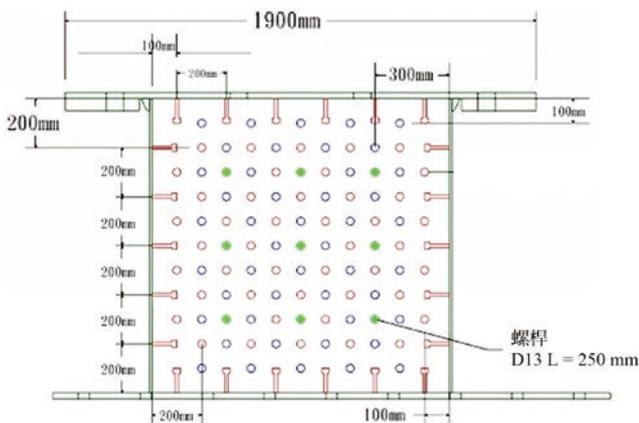


圖 2(c) 剪力釘間距為 20 cm 之試體設計圖

實驗結果

圖 3 與圖 4 顯示各試體最終破壞情況與橫向載重—位移遲滯迴圈圖。因為邊界鋼板之圍束，再加上剪力牆試體為雙曲變形，試體破壞模式從文獻之角落混凝土壓碎致鋼面板挫屈（撓曲破壞）轉化成鋼面板先降伏後挫屈之剪力破壞。本研究證實良好設計之剪力牆試體皆可展現高強度，高勁度與高韌性變形能力。

試體破壞模式可分為三類，對剪力釘間距為 24 公分試體而言，試驗顯示承受高軸力（軸力比 0.3）將大

幅降低剪力牆試體之變形能力，但是對試體橫向極限強度影響不大。試體破壞模式為剪力釘錨定不足致鋼面板大面積 45° 對角斜向挫屈（剪力破壞傾向），如圖 3(a)（如試體 LNA24，LBH20，LBA24 及 LNZ24），其中 LNZ24 試體雖承受低軸力但厚度 10 公分推測剪力釘錨定不足。第二類破壞模式為靠近加勁板之上下邊界鋼板銲道熱影響區挫屈開裂，延伸入鋼面板與上下基板介面，試體左右角落鋼面板靠近上下基板附近嚴重挫屈，試體中央鋼面板降伏未有局部挫屈現象（撓曲破壞傾向），如圖 3(b) 所示（如試體 LBZ24 與 LBL20）。對剪力釘間距 20 公分試體而言，承受高軸力只輕微降低剪力牆試體變形能力，而且對試體橫向強度影響不大。第三類試體破壞模式為除了靠近加勁板之上下邊界鋼板銲道熱影響區挫屈開裂，延伸入鋼面板與上下基板介面，試體鋼面板靠近上下基板三排剪力釘距離內發生局部挫屈（軸力彎矩破壞傾向），如圖 3(c)（如試體 LBA20，及 LNA20）。由此可見，剪力釘間距（鋼面板細長比）較小試體在強度與變形上皆有較好耐震表現。對於承受

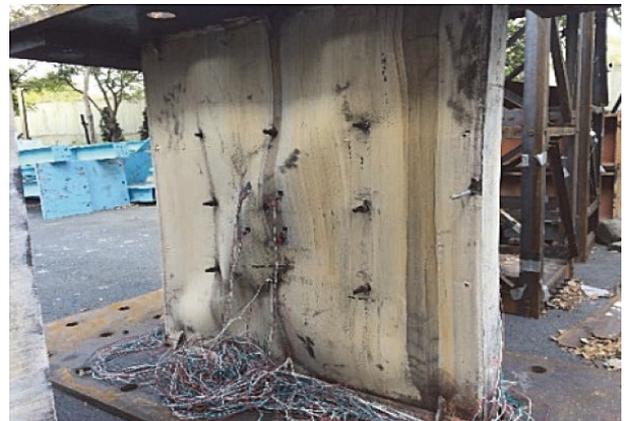


圖 3(a) LNZ-24 破壞模式



圖 3(b) LBL20 破壞模式

高軸力試體，文獻建議以鋼面板降伏強度計算剪力釘間距之鋼面板細長比公式，試驗顯示並不保守，本文建議應採用剪力牆目標位移時之拉力強度計算再乘以 0.8 較為保守。由遲滯迴圈圖可發現只要剪力釘間距滿足保守公式，軸力愈高消能面積愈飽滿。



圖 3(c) LBA-20 破壞模式

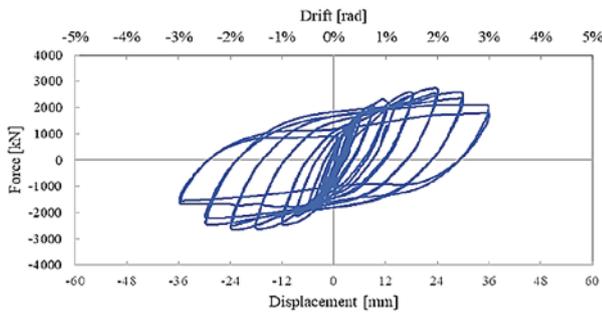


圖 4(a) 試體 LNZ-24 遲滯迴圈

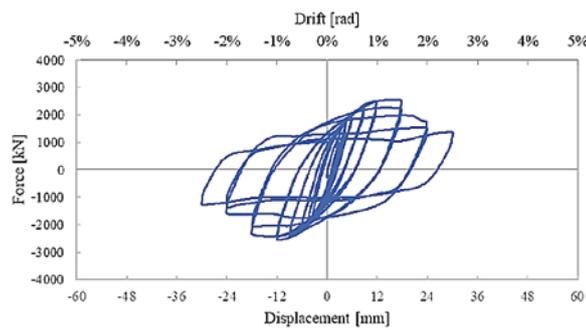


圖 4(b) 試體 LNA-24 遲滯迴圈

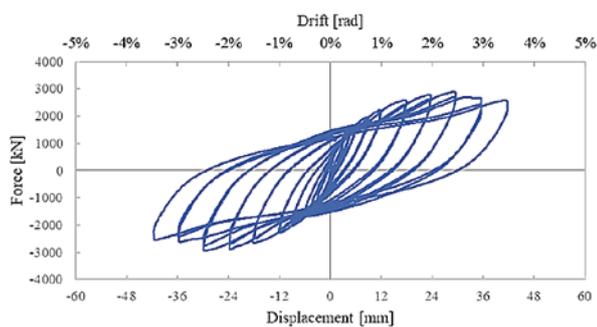


圖 4(c) 試體 LBZ-24 遲滯迴圈

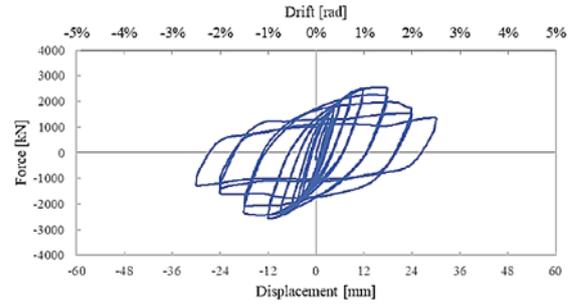


圖 4(d) 試體 LBA-24 遲滯迴圈

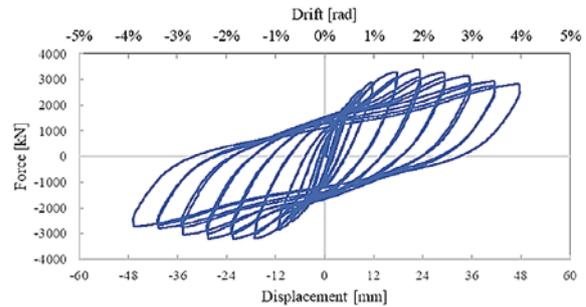


圖 4(e) 試體 LBL-20 遲滯迴圈

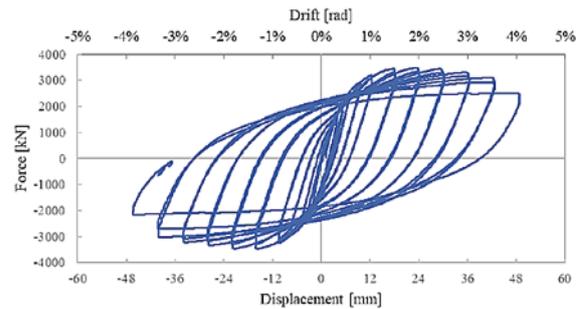


圖 4(f) 試體 LBA-20 遲滯迴圈 (單位：g)

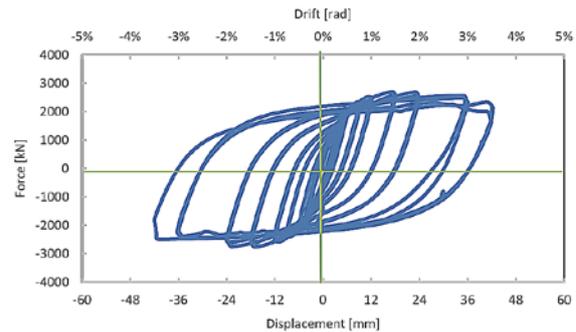


圖 4(g) 試體 LNA-20 遲滯迴圈

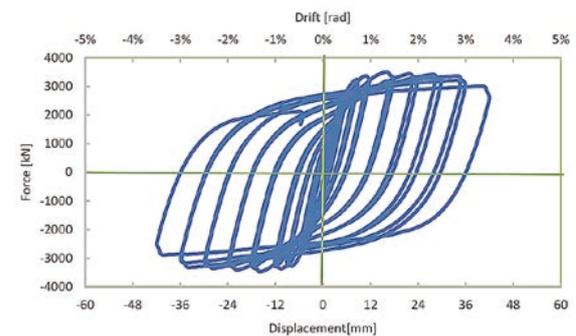


圖 4(h) 試體 LBH-20 遲滯迴圈

結論與建議

本研究共製作八座鋼板與混凝土複合剪力牆試體進行反覆側推試驗，實驗變因包含牆體混凝土厚度、軸力大小以及剪力釘間距。綜整其試驗結果獲得下列結論：

1. 本研究證實經良好設計之剪力牆試體皆可展現高強度，高勁度與高韌性變形能力。
2. 試驗顯示牆體鋼面板採用低降伏鋼製作，可有效增加鋼面板韌性能力以及增大剪力釘間距節省建造成本。
3. 試驗結果發現，牆體承受軸力的高低對試體橫向強度的影響不大，但卻會影響試體對於橫向變形的消能能力。
4. 比較各試體破壞模式，所有試體牆體鋼面板皆先降伏後挫屈。當剪力釘間距較大，其破壞模式相近皆為角落加勁板附近出現撓曲裂縫後，承受較高軸力試體鋼面板會發生大面積對角斜向挫屈。當剪力釘間距設計較保守時，承受小軸力試體局部挫屈現象較多集中在四個角落，先在邊界板之加勁版銲道熱影響區出現明顯裂痕，再延伸至角落鋼面板。當試體承受高軸力時，上下鋼面板發生局部挫屈或中央鋼面板發生對角斜向挫屈摺痕。
5. 文獻建議以鋼面板降伏強度計算剪力釘間距之鋼面板細長比公式，試驗顯示並不保守，如採用剪力牆目標位移時之拉力強度計算再乘以 0.8 設計剪力釘間距，試驗顯示效果良好，即使試體承受高軸力，試體在強度以及韌性消能能力上皆能有效提升。
6. 比較試體牆體混凝土厚度影響，試驗顯示未承受軸力牆體混凝土厚度 15 cm 試體之剪力釘錨定效果比厚度 10 cm 試體較佳。

誌謝

本研究承蒙中國鋼鐵股份有限公司無償提供低降伏鋼板及科技部計畫補助，在此申致謝忱。

參考文獻

1. Ohno, F., T. Shioya, Y. Nagasawa, G. Matsumoto, T. Okada, and T. Ota (1987), "Experimental Studies on Composite Members for

- Arctic Offshore Structures Steel/Concrete Composite Structural Systems," C-FER Publication No. 1, Proceedings of a special symposium held in conjunction with POAC 1987, Fairbanks, Alaska, 9th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions.
2. Huang, Z., J.Y. Liew, Y.J. Richard, and J. Wang (2014), "Static behavior of curved lightweight steel-concrete -steel sandwich beams subjected to lateral loads." EUROSTEEL 2014, September 10-12, 2014, Naples, Italy.
3. Fukumoto, T., B. Kato and K. Sato (1987), "Concrete filled steel bearing wall," IABSE Symposium, Paris-Versailles, 1987.
4. Ozaki, M., S. Akita, H. Osuga, T. Nakayama, and N. Adachi (2004), "Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear," Nuclear Engineering and Design, 228, pp. 225-244.
5. Epackachi, S., A.S. Whittaker, and Y-N. Huang (2015), "Analytical modeling of rectangular SC wall panels," Journal of Constructional Steel Research, 105, pp. 49-59.
6. Eom, T-S., H-G. Park, C-H. Lee, J-H. Kim, and I-H. Chang (2009), "Behavior of double skin composite wall subjected to in-plane cyclic loading," Journal of Structural Engineering (ASCE), 135(10), pp.1239-1249.
7. Hu, H-S., J-G. Nie, and M.R. Eatherton (2014), "Deformation capacity of concrete-filled steel plate composite shear walls," Journal of Constructional Steel Research, 103, pp.148-158.
8. Nie, J-G., H-S. Hu, J-S. Fan, M-X. Tao, S-Y. Li and F-J. Liu (2013), "Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete filled double-steel-plate composite walls," Journal of Constructional Steel Research, 88, pp.206-219.
9. Chen, L., Mahmoud, H., Tong, S-M., and Y. Zhou (2015), "Seismic behavior of double steel plate-HSC composite walls," Engineering Structures, 102, pp.1-12.
10. Ji, X., Cheng, X., Jia, X. and A.H. Varma (2017), "Cyclic In-Plane Behavior of Double-Skin Composite Walls in High-Rise Buildings," Journal of Structural Engineering (ASCE), 143(6), 04017025.
11. 陳柏安 (2015), 「低矮型鋼板混凝土複合牆之耐震性能試驗與分析」, 台灣大學土木系碩士論文, 黃尹男教授指導, 民國一百零四年八月。
12. 曾皓鼎 (2014), 「鋼板混凝土複合剪力牆之耐震性能研究」, 國立交通大學土木工程學系, 碩士學位論文, 劉俊秀、鄭錦銅教授指導, 民國一百零五年十二月。
13. Zhang, K., Varma, A.H., Malushte, S.R., and S. Gallocher (2014), "Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls," Nuclear Engineering and Design, 269, pp. 231-239. 