

低矮鋼筋混凝土街屋具典型開口外牆之耐震行為研究

Seismic behavior of exterior walls with typical opening of low-rise reinforced concrete street houses

主管單位：內政部建築研究所

歐昱辰¹

陳正誠¹

杜昱石¹

Yu-Chen Ou¹

Cheng-Cheng Chen¹

Yu-Shih Tu

¹國立台灣科技大學營建工程系暨研究所

摘要

低矮鋼筋混凝土連棟街屋(沿街店舖式住宅)為國內相當普遍的建築形式，此種建築沿街道方向之牆體由於通道、通風與採光之需求，常存在相當面積之開口，導致牆體與相連梁柱構架之耐震行為異於典型含牆構架。其中梯間牆構架之耐震行為已於建研所民國 99 年委託案「梯間牆對低層 RC 造沿街連棟建築物耐震性能之影響」中獲得相當程度的瞭解，惟吾人對於屋後外牆之耐震行為所知仍極為有限。對於街屋(沿街店舖式住宅)屋後外牆此議題，國內欠缺相關試驗研究，又國外相關研究因時空背景與地理條件上之不同(牆體開口特徵、配筋細節等)，是否適用於國內街屋(沿街店舖式住宅)屋後外牆亦有待試驗研究釐清，在於透過大尺寸構架之耐震試驗，瞭解含典型開口型式與配筋之屋後外牆構架之耐震行為，並研擬配套之設計規範條款以利工程界參考使用。

經過相關資料文獻蒐集及研究後發現，街屋(沿街店舖式住宅)屋後外牆具有一定之特徵，例如開口大小、開口配置、牆體厚度和材料強度、牆體配筋細節等，吾人可以依照上述之結果設計出適當之實驗試體。

本研究以有限元素軟體分析開口牆體之行為及性能，對照文獻內之式體測試數據，可有效模擬出開口牆體之式沿結果。研究並提出一套依照理論所推演出之勁度分析方法，對照 DIANA 軟體分析和既有之其他開口勁度計算方法可得到相當優異之計算結果；強度之評估方法仍待更進一步之研究。

收集所得之資料(規章條文、實際案例工程圖說)可歸納出屋後外牆典型開口型式、相關尺度、配筋細節等，可進一步據此分析、比對傳統和新式配筋之性能差異，尚待後續研究進行更進一步之探討。

實尺寸開口試體試驗方面，實驗中觀察發現牆體的破壞模式大致相同，完整牆塊如預期地提供、並且主控了側向強度的大小，正向與負向裂縫相互交錯貫穿、並切割完整牆塊，主壓桿在被正負裂縫貫穿後影響了其中各別混凝土塊的承壓能力，試驗過程中發現牆試體僅一向(不一定正向或負向)可達到模擬分析所預估的強度值，其原因為牆面其中一處發生壓碎破壞後，試體整體之力量傳遞機制就會大幅的改變，並且因牆體採用的是傳統配筋方式，僅配置溫度與乾縮控制鋼筋，混凝土所受之圍束不足，當位於主要壓桿區域中之混凝土塊被壓碎之後，因圍束不

足故破裂後之混凝土會快速的產生剝落，造成強度過早開始衰減且快速衰減。故如何加以改善其性能及防止方式等不失為未來的研究方向之一。

關鍵字：鋼筋混凝土構造、街屋(沿街店鋪式住宅)、屋後牆、開口、耐震

Abstract

The 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan caused numerous building damage and collapse. A large percentage of damaged and collapsed buildings are low-rise reinforced concrete buildings with pedestrian corridors and open fronts on the ground floors, referred to as street houses herein. This type of building (street houses) typically was damaged along the direction of the street due to the much less volume of walls along this direction than the direction perpendicular to the street. Since street houses are very common in Taiwan, there is an urgent need for seismic evaluation and retrofit of existing street houses and for improved design method for new street houses. Since structural walls possess significant seismic capacity, appropriate seismic evaluation and design of street houses requires information on the seismic behavior of walls in street houses perpendicular to the street direction. Typically, there are two types of walls along this direction. One is the wall besides the stairs and the other one is the wall in the back exterior side of the house. The seismic behavior of stairs wall has been studied previously in a 2010 ABRI research project. This research will examine the seismic behavior of the backside exterior wall.

KEYWORDS: Reinforced concrete structures, street house, backside exterior walls, opening, seismic

一、前言

豐富的地質活動及天候變化形塑了「婆娑之洋、美麗之島」的台灣。多地震及多颱風的自然環境，是生活在這片土地上的每一個人，所必須學習面對及適應的共同課題。然而對於地震這種天災，以目前的科學技術仍無法準確預測其可能發生的時間、地點與規模，對人民生命安全和財產仍為一大威脅。

論地震對台灣之影響，不得不提的是 1999 年 9 月 21 日發生的集集大地震，台灣全島均感受到嚴重搖晃，共持續 102 秒，造成 2,415 人死亡，29 人失蹤，11,305 人受傷，51,711 間房屋全倒，53,768 間房屋半倒，其中又以台灣中部受災最為嚴重，乃台灣戰後傷亡損失最慘重的天災。而倒塌的建築中有相當大比例是一層至三層樓低矮鋼筋混凝土、具騎樓且面騎樓向有開放式開口的街屋(沿街店鋪式住宅)構造，與本案研究課題息息相關。

低矮鋼筋混凝土連棟街屋(沿街店鋪式住宅)為國內相當普遍的建築形式，此種建築沿街道方向之牆體由於通道、通風與採光之需求，常存在相當面積之開口，導致牆體與相連梁柱構架之耐震行為異於典型含牆構架。其中梯間牆構架之耐震行為已於建研所民國 99 年委託案「梯間牆對低層 RC 造沿街連棟建築物耐震性能之影響」中獲得相當程度的瞭解(李宏仁等, 2010)，惟吾人對於屋後外牆之耐震行為所知仍極為有限。對於街屋(沿街店鋪式住宅)屋後外牆此議題，國內欠缺相關試驗研究，又國外相關研究因時空背景與地理條件上之不同(牆體開口特徵、配筋細節等)，是否適用於國內街屋(沿街店鋪式住宅)屋後外牆亦值得商榷。本研究之目的，在於透過大尺寸構架之耐震試驗，瞭解含典型開口型式與配筋之屋後外牆構架之耐震行為，並研究開口大小、形狀、位置等因素對牆體行為之影響，並經實驗驗證之，以研擬配套之設計規範條款以利工程界參考使用。

二、國內外文獻評析

Doi 等研究具偏心開口之多層樓 RC 構架牆體之極限剪力韌性，提出了一個交錯開口結構牆之二維模擬模型，並利用單側偏心開口牆試體之實驗數據對該模型進行校正，並用校正後之模型預測交錯開口試體之行為。隨著開口部位越接近跨度中央，結構牆之抵抗機制會因為越來越難以形成壓桿，而導致剪力容量的降低。如果是交錯排列的開口部，開口部周圍的損壞將會抑制可能的拉壓桿機制形成，導致牆體承載橫向荷重之能力退化。

Warashina 等研究具偏心開口之多層 RC 結構牆之剪力行為，對四組縮尺 40% 具有偏心開口之多層 RC 結構牆進行側向靜力加載試驗，評估結構牆之剪力傳遞機制，實驗的變量是開口部的大小及位置。實驗與分析結果比對顯示，開口結構牆之剪力強度可以無開口之剪力強度乘上一折減係數(Ono 折減係數)良好預估之。

Sakurai 等研究多開口 RC 剪力牆之抗震性能，利用多開口 RC 剪力牆之載重試驗，對不同的開口數和佈局進行探討。所有試體具有相同之等效周長比 0.4。測試結果顯示了多開口之 RC 結構剪力牆之剪力強度、破壞形式和變形，會因開口數

量和其分部形式有顯著的不同。該研究亦透過有限元素法模擬多開口剪力牆之遲滯迴圈及其破壞歷程，獲得在實驗數據與分析值之間之良好結果。

Sakurai 等研究多開口 RC 剪力牆之抗震性能，利用多開口 RC 剪力牆之載重試驗，對不同的開口數和佈局進行探討。所有試體具有相同之等效周長比 0.4。測試結果顯示了多開口之 RC 結構剪力牆之剪力強度、破壞形式和變形，會因開口數量和其分部形式有顯著的不同。該研究亦透過有限元素法模擬多開口剪力牆之遲滯迴圈及其破壞歷程，獲得在實驗數據與分析值之間之良好結果。

雲科大李宏仁教授研究梯間牆對低層 RC 造沿街連棟建築物耐震性能之影響，測試兩座填滿 1/2 (試體 B) 及 3/4 (試體 A) 跨度的構架牆體，測試結果指出模型構架內含填滿 1/2 (試體 B) 或 3/4 (試體 A) 跨度的隔間牆，對於抵抗側力強度、勁度及韌性確有明顯的差異。試體 A 強度較高但在屋頂位移 0.75% 之後強度開始衰減，屬於典型剪力主控行為，側力衰減維持至屋頂位移 1.5% 因極短梁水平牆段剪力破壞後迅速向下。試體 B 在屋頂位移 0.75% 試體降伏後仍維持側力承載能力，至屋頂位移 1.5% 時才達最大強度，屬於典型撓曲降伏主控行為。

三、研究方法

研究方法包括：(1) 文獻之收集與整理；(2) 鋼筋及混凝土基本材料實驗；(3) 開口結構牆試體之反覆載重實驗；(4) 舉辦專家座談會，邀請產、官、學各界參與討論，檢視所研擬機制的可行性及周延性；(5) 試體製作及進行反覆載重試驗；(6) 實驗數據分析與討論及實驗記錄整理。

實驗規劃以反覆載重試驗之方法進行。研究係以開口牆受地震力下之行為為主，測試大尺寸構架，包含五座典型開口牆構架試體，開口試體採用典型台灣街屋(沿街店舖式住宅)屋後牆配筋形式，牆體配置至少滿足 RC 結構規範之最少所需橫、縱向鋼筋量，並適當錨定至梁、柱及基礎內等規定，開口形式與典型台灣街屋(沿街店舖式住宅)配筋細節，由研究所蒐集到之資料分析決定，參考國內外相關文獻之後決定控制變因為「開口位置」、「開口尺寸」兩者，試驗預期之目標在於了解牆體受震之初始勁度與強度。試體加載方式採「位移控制」方式加載。

於試體頂部加載梁處，以預力螺桿對梁施加預力，並與油壓制動器(MTS-200)加載頭一起固鎖之，後利用油壓制動器施加反覆側向載重，採位移控制，預計施壓的位移比為 0.25%、0.375%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、3%、4%、5%、6%，每個位移比重複加載三次，測試觀察重點包括初始勁度、降伏位移與側力、最大載重、極限位移與側力、消能、韌性、破壞模式等。

反覆載重試驗為將試體之底端鎖固於強力地板上，將自由端利用螺桿鎖固於油壓千斤頂上，並由 200 噸之萬能試驗機(MTS)對試體之自由端施加反覆載重，試驗裝置如圖 1 所示。底端基礎以直徑 5 cm 之螺桿前後各五支(總計 10 支)將試體鎖固至強力地板上。測計包含變位量測計(LVDT)、傾斜測計(Rotation Gage)、變位測微計(Dial Gage)。安裝位置主要有四處：頂梁中央、柱塑角區、底部基礎。反

覆載重採用位移控制，施加位移比包括 0.25%、0.375%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0%、5% 以及 6%(圖 5)。每一位移比施加三次，以觀察強度與勁度衰減。

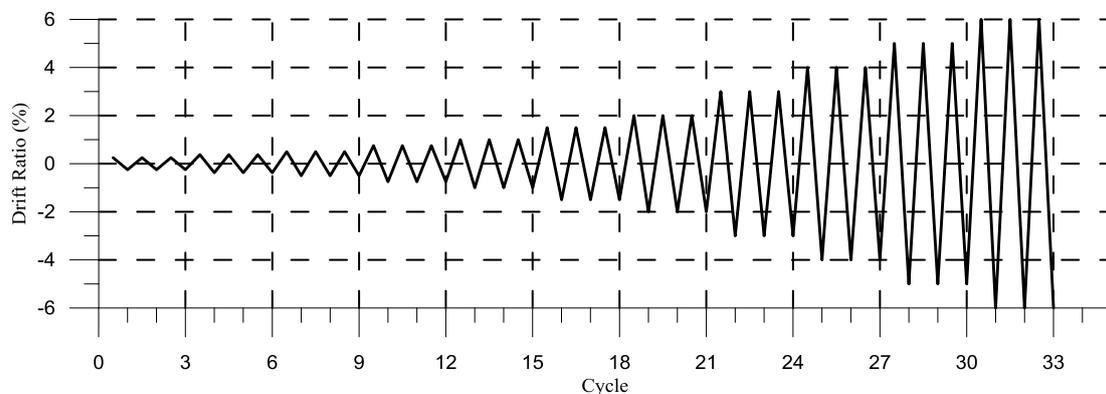


圖 1 反覆載重歷程

四、結果與討論

在開口牆體勁度評估方面，研究收集了數種實心牆體之勁度計算公式和開口牆體勁度折減係數，研究並提出了一套開口牆體之勁度計算法。基於多數開口之比較結果，可以普遍認定研究團隊所提之勁度計算法和 Bing Li 所提之簡化計算公式對以有限元素軟體分析開口牆體之勁度有較好之契合度；另若採用折減係數計算(AIJ 標準計算準則提供之勁度折減係數和 Neuenhofer 所提出之勁度折減計算法)，則常常給予開口牆體較高之勁度評估值，使用上需多加注意。

強度評估方面，實心牆體之初始側向強度採用 ACI 和 AIJ 提供之公式來做計算，以 1.ACI 實心牆體強度計算式搭配 Ono's 開口牆體強度折減係數計算開口牆體強度，2. ACI 實心牆體強度計算式搭配 AIJ 開口牆體強度折減係數計算開口牆體強度，3. AIJ 實心牆體強度計算式搭配 AIJ 開口牆體強度折減係數計算開口牆體強度，並與 DIANA 有限元素軟體分析所得之值相互比較。依各強度折減係數計算之開口牆體強度，與 DIANA 分析所得相較之下普遍過於保守，更為適當之評估計算式尚待後續研究進行之。

研究團隊發展以非線性有限元素軟體 DIANA 對 RC 開口牆體座模擬之方法，對照文獻中所研究、試驗之試體與其試驗結果，對強度及勁度的評估已有相當優良的成果，並可利用其有效分析各式開口結構牆之強勁度。以 DIANA 軟體分析開口位置影響牆體強、勁度發現：

a. 開口位於牆中心時，開口越往上移(越接近側力傳入處-樓地板)，勁度越高(側力無法有效散佈、傳遞至下部，上部剪力行為明顯)，強度亦越高。

b. 具偏心開口時，兩向(向左、向右)的勁度會以較易形成壓桿機制的一向略高一些；勁度之差異以開口越小越明顯。

c. 牆開口後將會改變原有左右兩牆段之 hw/lw 值，整體行為可由兩牆段綜合得知，會相較於未開口前更具撓曲行為。

d. 規範 AII&ACI 因開口之強度折減於開口較大時折減過多，過於保守。

e. 牆面設計時，保留較大完整牆塊(即開口相互集中或者分開)可得較高之強、勁度。

f. 偏心開口沿牆方向之正負向有不同之牆、勁度，於連棟街屋(沿街店舖式住宅)時，可透過兩兩對稱配置得較均於之性能。

g. 相同開口面積下，開高向之開口性能較優於開橫向之開口。

h. 軟體分析顯示，牆面壓桿性能之發展與傳統之等效斜撐概念不盡相同，待以實際實驗加以確認。

實尺寸典型開口牆體反覆載重試驗方面，試驗前的分析之中提到過若依照文獻與模擬分析所得之經驗來判斷，強度方面單純以水平向總開口面積最小斷面來推斷的話，試體測向強度應為 $W1 > W1C = W2 = W3 = W4 > W5$ ，以牆面總開口面積來推斷的話，試體測向強度應為 $W1 > W1C = W2 = W3 > W4 > W5$ ，若依照研究中以有限元素軟體分析所觀察到之現象「保留越大完整牆塊可使開口牆體獲得較高之強度」為判斷依據，則判斷側向強度 $W1 > WC1 = W3 = W4 > W2 > W5$ ，其中若將關鍵斷面(水平向總開口面積最小斷面)牆塊高寬比納入考量(高/寬，值越高強度越低，撓取控制)，則關係式可改寫為 $W1 > WC1 = W3 > W4 > W2 > W5$ ，勁度方面亦與強度同。

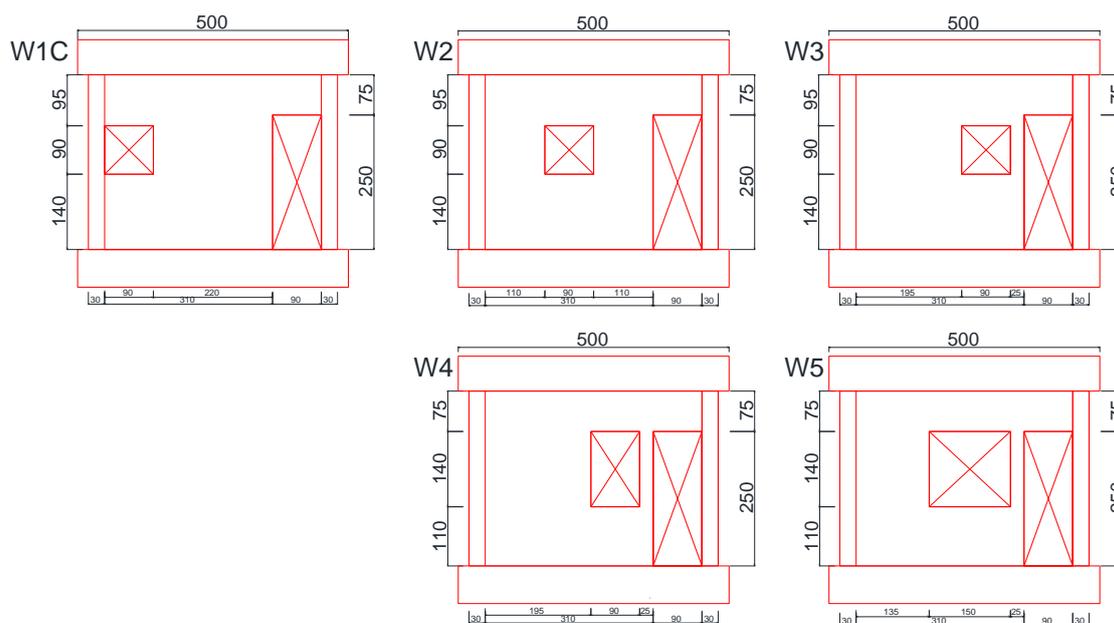


圖 2 實尺寸典型開口牆試體開口配置

由實驗觀察到牆體的破壞模式大致相同，完整牆塊如預期地提供並且主控了側向強度的大小，正向與負向裂縫相互交錯貫穿、並切割完整牆塊，主壓桿在被正負裂縫貫穿後影響了其中各別混凝土塊的承壓能力，試驗過程中發現牆試體僅一向(不一定正向或負向)可達到模擬分析所預估的強度值，其原因為牆面其中一處發生壓碎破壞後，試體整體之力量傳遞機制就會大幅的改變，並且因牆體採用的是傳統配筋方式，僅配置溫度與乾縮控制鋼筋，混凝土所受之圍束不足。當位於主要壓桿區域中之混凝土塊被壓碎之後，因圍束不足故破裂後之混凝土會快速的產生剝落，造成強度過早開始衰減且快速衰減。

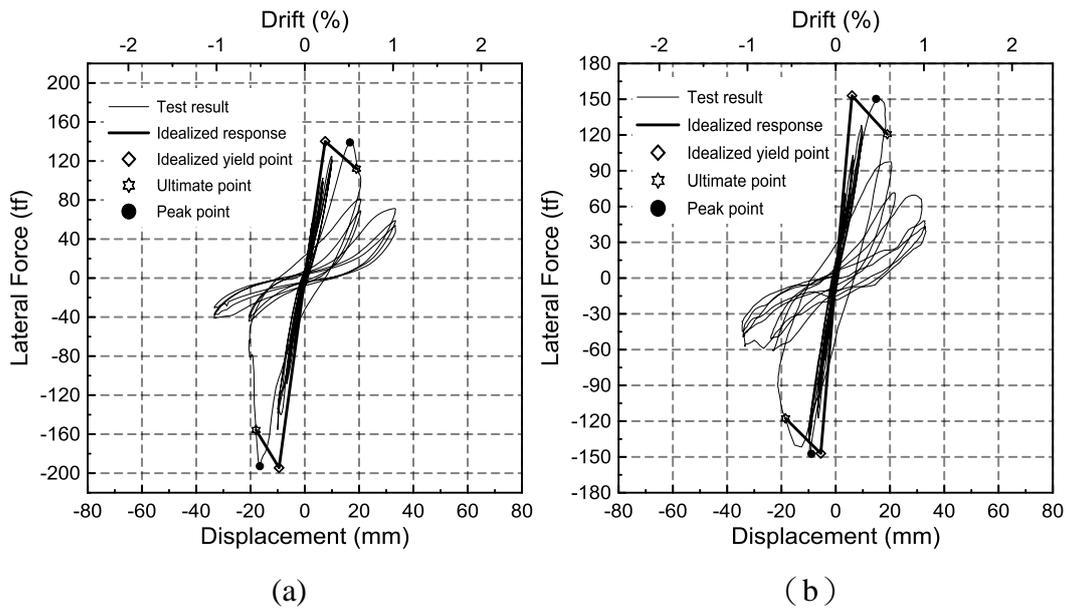


圖 3 反覆載重試驗遲滯迴圈(a)試體 W1C (b)試體 W2

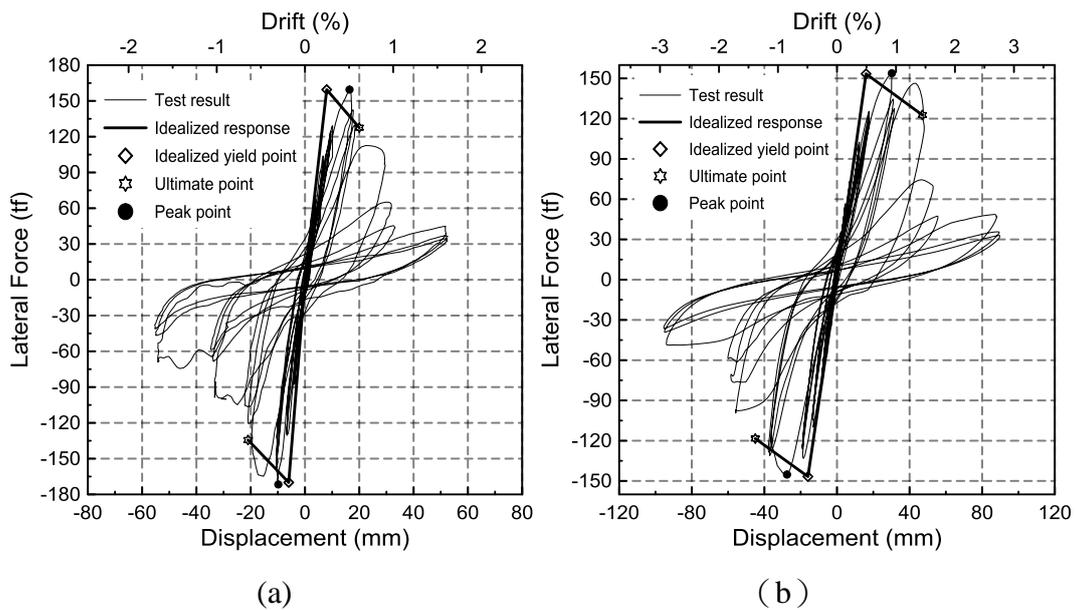


圖 4 反覆載重試驗遲滯迴圈(a)試體 W3 (b)試體 W4

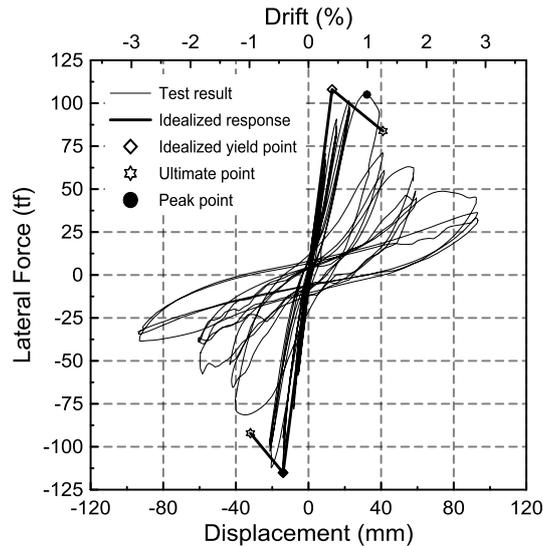


圖 5 試體 W5 反覆載重試驗遲滯迴圈

開口牆體側向強度之評估方法已有一定程度之回顧及研究，實驗證實以有限元素軟體可準確地捕捉單垮單層含開口牆構架試體之強度及勁度，強度方面較為準確之簡易計算方法尚待後續研究努力。研究調查及過去的經驗顯示，街屋(沿街店鋪式住宅)沿平行街道方向常為脆性破壞，乃強度控制，因此要解決街屋(沿街店鋪式住宅)耐震性能之問題或可從「如何讓平行街道向之構材具有足夠之強度以抵抗地震力」來著手，可考慮之方式有提高屋後牆及梯間牆之強度要求(提高鋼筋比、加厚牆尺寸、增加翼牆等)、提高柱之側向抵抗能力等。

從實驗中觀察發現，牆體的破壞模式大致相同，完整牆塊如預期地提供、並且主控了側向強度的大小，正向與負向裂縫相互交錯貫穿、並切割完整牆塊，主壓桿在被正負裂縫貫穿後影響了其中各別混凝土塊的承壓能力，試驗過程中發現牆試體僅一向(不一定正向或負向)可達到模擬分析所預估的強度值，其原因為牆面其中一處發生壓碎破壞後，試體整體之力量傳遞機制就會大幅的改變，並且因牆體採用的是傳統配筋方式，僅配置溫度與乾縮控制鋼筋，混凝土所受之圍束不足，當位於主要壓桿區域中之混凝土塊被壓碎之後，因圍束不足故破裂後之混凝土會快速的產生剝落，造成強度過早開始衰減且快速衰減。故如何加以改善其性能及防止方式等不失為未來的研究方向之一。

參考文獻

- ACI Committee 318, 2008. ACI 318-08/318R-08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute
- Paulay, T., Priestley, M.J.N., 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley and Sons, New York.
- Moehle, J.P., T. Ghodsi, J.D. Hooper, D.C. Fields, and R. Gedhada, 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, Gaithersburg, MD.

- Warashina, M., Kono, S., Sakashita, M., Tanaka, H., 2008. "Shear Behavior of Multi-story RC Structural Walls with Eccentric Openings." The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Sakurai, M., Kuramoto, H., Matsui, T., Akita, T., 2008. "Seismic Performance of RC Shear Walls with Multi Openings." The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Emin, M., and Altin, S., (2006). ACI Structural Journal, 701-709.
- Wang, J., Sakashita, M., Kono, S., Tanaka, H., Warashina, M., 2008. "A Macro Model For Reinforced Concrete Structural Walls Having Various Opening Ratios." The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Lee, J., Kim, S., and Mansour, M. (2011). "Nonlinear Analysis of Shear-Critical Reinforced Concrete Beams Using Fixed Angle Theory." J. Struct. Eng., 137(10), 1017–1029.
- Wiradinata, S., and Saatcioglu, M. (2002). "Behaviour of squat walls subjected to load reversals." Publication No. OCCERC 02-25, The Joint Centre of the Univ. of Ottawa and Carleton Univ., Ottawa.
- Doi M., Sakashita M., Kono S., Tanaka H., 2009. "Ultimate Shear Capacity of Multi-Story RC Structural Walls with Eccentric Openings." Second International Workshop on Performance, Protection and Strengthening of Structures under Extreme Loading, Aug 19-21, Hayama, Japan, Paper N105.
- Yanez, F.V., R. Park and T. Paulay. 1992. "Seismic behavior of walls with irregular openings. Earthquake Engineering." Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam.
- DIANA (2011). DIANA (FEA) User's Manual Release 9.4.4, TNO Diana BV., Netherland.
- Li, B. and Xiang, W. (2011). "Effective Stiffness of Squat Structural Walls." J. Struct. Eng., 137(12), 1470–1479.
- Li, B. and Chen, Q. (2010), "Initial stiffness of reinforced concrete structural walls with irregular openings. Earthquake Engng." Struct. Dyn., 39: 397–417.
- Neuenhofer, A (2006) "Lateral stiffness of shear walls with openings", ASCE Journal of Structural Engineers, vol.132, no. 11, pp 1846-1851.
- MacGregor, J G and Wight J K (2005) Reinforced Concrete Mechanics and Design, New Jersey, Pearson Prentice Hall.
- Park, R. and Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures, John Willey & Sons, New York, USA.
- Ono, M. and Tokuhiro, I. (1992), "A proposal of Reducing Rate for Strength due to Opening Effect of Reinforced Concrete Framed Shear Walls", Journal of Struc. Const. Engng, AIJ, No. 435, May, pp119-129.
- Jang Hoon Kim, John B. Mander. "Influence of transverse reinforcement on elastic shear stiffness of cracked concrete elements", Engineering Structures, Volume 29, Issue 8, August 2007, Pages 1798-1807
- VENTURA DIAZ Emilio Martin, FUKUYAMA Hiroshi. "Effect of the opening in the strength and stiffness of reinforced concrete structural walls", Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 2008, vol. 42, pp. 73-78
- Architectural Institute of Japan, 2004, "Guidelines for Performance Evaluation of Earthquake Resistant

Reinforced Concrete Buildings”

- Ali, M. , and Wight, J. K. (1991). “RC structural walls with staggered door openings.” J. Struct. Eng. , 117 (5) , 1514–1531.
- Vecchio, Frank J., and Collins, Michael P., “The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear.” ACI JOURNAL, Proceedings V. 83, No. 2, Mar.Apr. 1986, pp. 219-231.
- Ventura Diaz, E. M. “Effect of the Openings in the Strength and Stiffness of Reinforced Concrete Structural Walls.” Bulletin of IISEE, 42, 73-78.
- Moehle, J.P., T. Ghodsi, J.D. Hooper, D.C. Fields, and R. Gedhada , (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, Gaithersburg, MD.
- Yanez, F.V., R. Park and T. Paulay. 1992. “Seismic behavior of walls with irregular openings.”Earthquake Engineering. Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam.
- 李宏仁, 陳正誠, 朱瑞祥, 吳鎮宇, (2010). 梯間牆對低層 RC 造沿街連棟建築物耐震性能之影響, 內政建築研究所, 台北市。
- 許茂雄, 藍百圻, (2002). 既有 RC 沿街店鋪住宅滿足功能要求之耐震補強, 國立成功大學, 台南市。
- 黃世建, 陳力平, 陳俊宏, (2003). 含開口 RC 牆非韌性構架之耐震行為研究, 國家地震工程研究中心報告編號 NCREE-03-010, 台北。
- 李有豐, 黃皓君, (2003). 非韌性雙層雙跨含牆 RC 構架之擬動態試驗與結構反應之 HHT 分析, 碩士論文, 國立台北科技大學土木與防災研究所, 台北。
- 邱耀正, 謝忠龍, (2005). 大尺寸扇形配筋預鑄 RC 剪力牆實驗與分析, 國立成功大學。
- 內政部營建署, 建築技術規則(2013)
- 內政部營建署, 混凝土結構設計規範(2011)