

純混凝土牆剪力強度分析之研究

涂耀賢¹、周逢霖²、張媿婷³、林威辰³

¹：德霖技術學院營建科技系副教授

²：德霖技術學院營建科技系講師

³：德霖技術學院營建科技系四技部學生

摘要

許多年代久遠建築物之鋼筋混凝土(RC)牆或新建築物之隔間牆，因牆版配筋量少甚至於沒有鋼筋，工程師評估設計時多忽略不計。建築物之 RC 牆勁度高於其他構件，在耐震過程中 RC 牆先吸收多數之地震力，故而成為主控建築物行為之構件。研究發現即使牆版沒有鋼筋之 RC 牆與牆版配置鋼筋者擁有同等級之強度，無法忽略不計，且現行設計規範低估混凝土強度對鋼筋混凝土剪力牆剪力強度的貢獻對鋼筋混凝土剪力牆剪力強度的貢獻、對於剪力強度計算僅以水平剪力鋼筋呈現以及垂直剪力鋼筋之貢獻無法反應等問題。本文之目的著重於 RC 牆混凝土強度估算，使剪力牆強度預估更合理化。

關鍵字：RC、剪力牆、剪力強度

Study on Analysis of Shear Strength of Pure Concrete Walls

Yaw-Shen Tu¹, Feng-Lin Chou², Yu-Ting Chang³, Wei-Chen Lin³

¹ : Associate Professor, De Lin Institute of Technology.

² : Lecturer, De Lin Institute of Technology.

³ : Student, De Lin Institute of Technology.

Abstract

During the recent process of building earthquake resistance evaluation, it is often found that old buildings did not match the requirement of latest codes. Since there are few or no reinforcement in the RC walls of such buildings, for example, engineers usually ignore the reinforcement in their evaluation. Owing to the relative high stiffness, RC wall absorbs most of the earthquake forces during earthquake and therefore is considered to be the controlling element which affects the building behavior. In writer's previous research, the strength of RC wall without reinforcement cannot be neglected due to the test results which show equivalent strength level between RC wall with and without reinforcement while the building codes underestimate it. Furthermore, the codes suggest that only the contribution by horizontal reinforcement be considered in calculation of RC wall shear strength while the test results show that vertical reinforcement do have its effect on the strength. The purpose of this research is to make the estimation of RC wall shear strength more reasonable by modifying the strength estimation of RC wall concrete and incorporating the contribution of vertical reinforcement.

Keywords : Reinforced Concrete, Shear Wall, Shear Strength

壹、 研究背景與目的

台灣位處環太平洋地震帶，地震頻繁且震度大，對人民生命財產造成很大的威脅，因此，為了避免地震造成的嚴重傷害，結構物的耐震設計就相當重要。鋼筋混凝土(RC)牆因為其區分使用空間優異性、良好的抗震性、成本較低、施工程序標準化、施做容易等優點，在台灣使用頻率高。建築物中 RC 牆之勁度高於其他構件，在耐震過程中會先吸收多數之地震力，故而成爲主控建築物行爲之構件。

我國現行的耐震設計規範[1]明定結構設計時須考慮非結構牆之貢獻，其第二章規定爲「若建築物之下層與上層之結構與非結構牆之牆量比的比值低於 80%者，計算極限層剪力強度時須計及非結構牆所提供之強度，以能使確切檢核出建築物之弱層的存在。計算含非結構牆極限層剪力強度時可分別計算構架及非結構牆的強度，然後直接相加而得該層之極限層剪力強度」。近年來國內積極進行舊有建築物之耐震能力評估與補強工作，由於受評建築物建造年代久遠，構件配筋無法符合現有規範要求，例如 RC 牆版配筋量少甚至於沒有鋼筋，工程師面對此情況時多忽略不計，此種作法並不符合耐震設計規範[1]之規定。

我國工程師進行新建物之設計或既有建物之評估補強均依鋼筋混凝土設計規範之規定，但現行鋼筋混凝土設計規範[2]之強度計算公式乃基於結構物處在基本韌性需求的條件下所作之規定，可是工程師面對老舊建築物之評估補強或新建物之隔間牆模擬時，當牆的配筋條件無法滿足現行鋼筋混凝土設計規範[2]之規定時，將使工程師無所適從。

土木 401-96[2]中剪力牆之剪力強度規定之研究[3]發現三個現象，一爲即使牆版沒有配置鋼筋之 RC 牆與牆版配置鋼筋者擁有同等級之強度，無法忽略不計；另一爲現行規範低估混凝土強度對鋼筋混凝土剪力牆強度之貢獻與高估水平鋼筋對鋼筋混凝土剪力牆強度之貢獻之虞；第三爲現有規範建議 RC 牆之鋼筋對於剪力強度計算僅以水平鋼筋呈現，垂直鋼筋之貢獻無法反映，而文獻之測試結果卻顯現垂直鋼筋確實對於 RC 牆剪力強度有影響[3]。這些現象可能造成工程師誤認沒有配置鋼筋之 RC 牆強度過低可以忽略不計，但實驗顯示即使純混凝土牆亦有非常高的勁度會優先吸收大部分的力量，因此忽略牆體作法造成模擬行爲與真實行爲截然不同；或對於水平鋼筋之強度提供過分樂觀而造成不保守現象出現。

本文之目的在於針對上述土木 401-96[2]中 RC 剪力牆剪力強度公式出現的問題提出一建議模型，並針對混凝土預測強度過低現象，進行測試資料庫之分析與討論，評估方法包含土木 401-96[2]與本文建議模型中採用之文獻建議公式。以下將先說明規範對 RC 剪力牆剪力強度計算之相關規定，再以 RC 牆測試文獻中之資料分析結果說明規範對 RC 剪力牆剪力強度之規定出現的不合理現象，最後提出一可行之模型以及純混凝土剪力牆測試資料庫之分析結果，並做討論與建議。

貳、我國土木 401-96 規範對 RC 剪力牆耐震設計之規定

我國土木 401-96[2]規範之條文中有三部份規定與剪力牆剪力強度之計算有關，其一為第 4-11 節剪力與扭矩之牆的特別規定，第二為第 15.8 節耐震設計特別規定之結構牆的特別規定，第三為附錄 A 壓拉桿模型(Strut-and-Tie Models)。第 4-11 節剪力與扭矩之牆的特別規定中指出若牆之高度與寬度比值不大於 2 時，牆之水平剪力亦可依附錄 A 之壓拉桿模型計算[2]，本文將討論範圍設定於我國工程師最常用之方法與公式，因此以下將就規範[2] 第 4-11 節及第 15.8 節兩處規定說明。

二、1 規範第 4-11 節有關剪力與扭矩之牆的特別規定

土木 401-96[2]關於剪力牆之剪力強度可區分成兩部份之貢獻，一部份由混凝土所提供，其餘則由鋼筋提供，此兩部份可單獨計算。牆體之剪力強度表示式如下：

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

其中 V_n = 牆體剪力強度， V_c = 牆體混凝土提供之剪力強度， V_s = 牆體鋼筋提供之剪力強度。

$$V_c = 0.87\sqrt{f'_c}hd + \frac{N_u d}{4\ell_w} \quad (2)$$

$$V_c = \left[0.16\sqrt{f'_c} + \frac{\ell_w(0.33\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{5\ell_w h})}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{\ell_w}{2}} \right] hd \quad (3)$$

其中 f'_c = 混凝土之規定抗壓強度 (MPa)； t_w = 牆體總厚度 (mm)； d = 牆體最外受壓纖維至受拉鋼筋斷面重心之距離 (mm)，可取牆寬的 0.8 倍 ($0.8\ell_w$) [2]； ℓ_w = 牆之水平寬度 (mm)； V_u = 斷面之設計剪力 (N)； M_u = 斷面之設計彎矩 (N-mm)； N_u = 與 V_u 同時作用之設計軸力 (N)，軸壓力為正值，軸拉力為負值，並須考慮由乾縮與潛變所生之拉力的影響。

V_c 取式(2)及(3)兩者之小值，若 $(M_u/V_u - \ell_w/2) < 0$ 時，式(3)不適用，另土木 401-96[2]也以上述之 V_c 值作為估算牆體開裂時的強度。

牆體之鋼筋對剪力強度的貢獻 V_s 之規定如下：

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (4)$$

其中 s = 牆內水平剪力鋼筋之間距 (mm)； A_v = 牆中水平剪力鋼筋於 s 距離內之斷面積 (mm^2)； f_y = 水平剪力鋼筋之規定降伏強度 (MPa)。

土木 401-96[2]規定牆體需設置剪力鋼筋，鋼筋之降伏強度不得大於 412MPa，而其鋼筋量的規定如下：水平剪力鋼筋面積與混凝土垂直總斷面積之比 ρ_t 至少須為 0.0025；而垂直剪力鋼筋面積與混凝土水平總面積之比 ρ_ℓ 不得小於：

$$\rho_\ell = 0.0025 + 0.5\left(2.5 - \frac{h_w}{\ell_w}\right) (\rho_t - 0.0025) \quad (5)$$

亦不得小於 0.0025，但不需大於 ρ_t 值。式中 ℓ_w 為牆之總長度， h_w 為牆之總高度。

二、2 規範第 15-8 節有關耐震設計之特別規定

土木 401-96[2]另於第 15 章「耐震設計特別規定」中，規定對於鋼筋混凝土結構牆做為地震力抵抗系統的一部份時，單一牆體之剪力強度 V_n 可依下式計算

$$V_n = \left(\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y\right) A_{cv} \leq \frac{5}{6} \sqrt{f'_c} A_{cv} \quad (6)$$

其中： A_{cv} = 平行剪力方向之牆體面積 (= 牆體腹版厚度 t_w × 牆體水平寬度 ℓ_w) (mm^2)； α_c

= 牆體高寬比影響係數，以下式計算：

$$\text{當} \quad \begin{aligned} H/\ell_w \leq 1.5 \text{ 時, } \alpha_c &= 0.80 \\ H/\ell_w \geq 2.0 \text{ 時, } \alpha_c &= 0.53 \end{aligned} \quad (7)$$

$$1.5 \leq H/\ell_w \leq 2.0 \text{ 時, } \alpha_c = 0.53\left(3.0 - \frac{h_w}{\ell_w}\right)$$

對於牆體鋼筋用量限制的規定如下：結構牆沿縱軸與橫軸方向之鋼筋比 ρ_ℓ 、 ρ_t 均不得小於 0.0025，剪力鋼筋應於其平面上之二垂直方向均勻配置，若牆體高寬比 $H/\ell_w \leq 2.0$ 時， $\rho_\ell \geq \rho_t$ 。

參、土木 401-96[2]剪力強度公式之探討

三、1 剪力牆測試資料庫之資料說明

本文作者研究剪力牆測試強度與土木 401-96[2] 剪力強度的關係[3]，研究中使用國內外發表之鋼筋混凝土低型剪力牆測試文獻資料[4,5,6,7,8,9]，測試資料庫共包含 64 座剪力牆試體，由測試文獻之說明或破壞時主要裂縫角度顯示所有試體均為剪力破壞。若依變形型式區分為雙曲率牆及單曲率牆兩類，再依翼緣情況區分為有翼緣及無翼緣兩分類。

雙曲率牆之測試報告者為 Hidalgo 等人[4]之 26 座試體以及 Lopes[5] 之 8 座試體，本組試體共同之特色為雙曲率變形，反曲點控制於牆高一半處，且所有試體在受力方向均為矩形斷面，文獻[3]將之定義為無翼緣設置。Hidalgo 等人[4]之 26 座試體測試時不施加軸力，加載方式均為反覆載重(Cyclic loading)，牆體高寬比範圍為 0.7~2.0，水平鋼筋比由 0 ~ 0.0038，垂直鋼筋比由 0 ~ 0.0026，混凝土強度較低，且多數接近規範[2]對鋼筋混凝土之混凝土強度下限規定值 (17.3MPa)，部分試體甚至低於下限值。Lopes[5]之 8 座試體測試時施加軸力為 $0.08\ell_w t_w f'_c$ ，加載方式除試體編號 SW11 者為單向加載(Monotonic loading)外，其餘均為反覆載重，牆體高寬比均固定為 1.9，水平鋼筋比由 0.0062 ~ 0.0092，垂直鋼筋比由 0 ~ 0.0041，混凝土強度較高，達 39 ~ 48MPa。其它較詳細的資料可詳文獻[4,5]。

單曲率牆以成功大學許茂雄教授等人所作之單層 RC 剪力牆試驗數據[6,7,8,9]共 30 座試體為探討之資料庫，測試時施加水平推力於試體頂樑中心，部分試體加載方式為單向加載、部分試體則為反覆載重，混凝土強度範圍在 21 ~ 37 MPa 之間。此組試體若根據有無翼緣條件可再分成兩個分組試體，第一分組試體摘錄自文獻[6,7]，屬有翼緣之剪力牆共 14 座，翼緣尺寸為 17cm×15cm，試體之高寬比有 0.5 及 0.75 兩種、每一種高寬比試體又有不同鋼筋用量，水平鋼筋比由 0.0081 ~ 0.0145，垂直鋼筋比由 0.0085 ~ 0.0152，高寬比為 0.5 試體之翼緣放置 8-D10($f_y = 467.46MPa$)垂直鋼筋，高寬比為 0.75 試體之翼緣放置 8-D13($f_y = 452.47MPa$)垂直鋼筋。第二分組試體摘錄自文獻[8,9]，為無翼緣之剪力牆共 16 座，試體性質與第一組相似，試體之高寬比亦有 0.5 及 0.75 兩種、每一種高寬比試體也有不同之水平及垂直鋼筋用量，水平鋼筋比由 0 ~ 0.0114，垂直鋼筋比由 0.0076 ~ 0.0181，本分組試體較第一分組試體多了無水平鋼筋之狀況。其它較詳細的資料可詳文獻[6,7,8,9]。

三、2 探討比較[3]

用土木 401-96[2]強度公式評估上述 RC 剪力牆資料庫試體破壞模式，即預測強度取土木 401-96[2]之剪力預測強度與撓曲預測強度之較小值。圖 1 顯示測試強度與水平鋼筋量關係，圖中呈現出無水平剪力鋼筋配置之試體強度約與有水平剪力鋼筋配置試體之強度同等級，另外也顯示出隨水平鋼筋量增加時測試強度有隨之增加的趨勢。圖 2 顯示土木 401-96[2]預測強度與水平鋼筋量關係，圖中縱軸乃以測試強度與預測強度比值表示，由圖 2 呈現出無水平剪力鋼筋配置試體之預測強度很低，顯示土木 401-96[2]預測強度低估混凝土之強度；另有水平剪力鋼筋配置試體之預測強度隨水平鋼筋量增加時，測試強度與預測強度比值逐漸減少的趨勢，當水平剪力鋼筋愈多時甚至於出現不保守的現象。

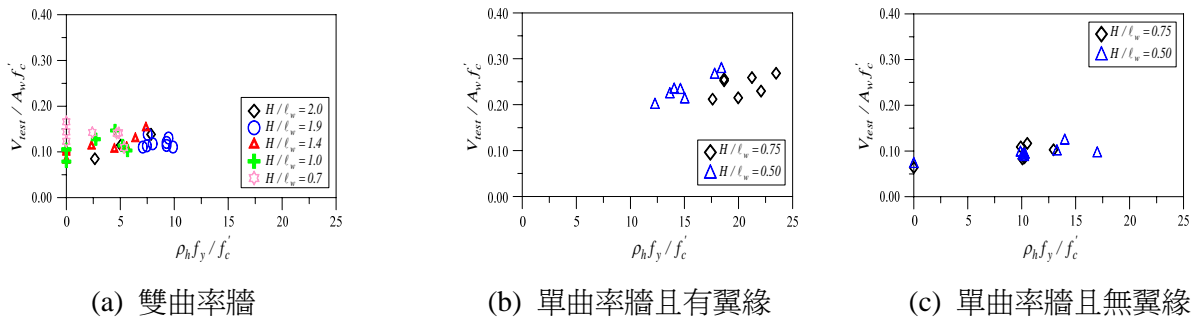


圖 1 測試強度與水平鋼筋量關係[3]

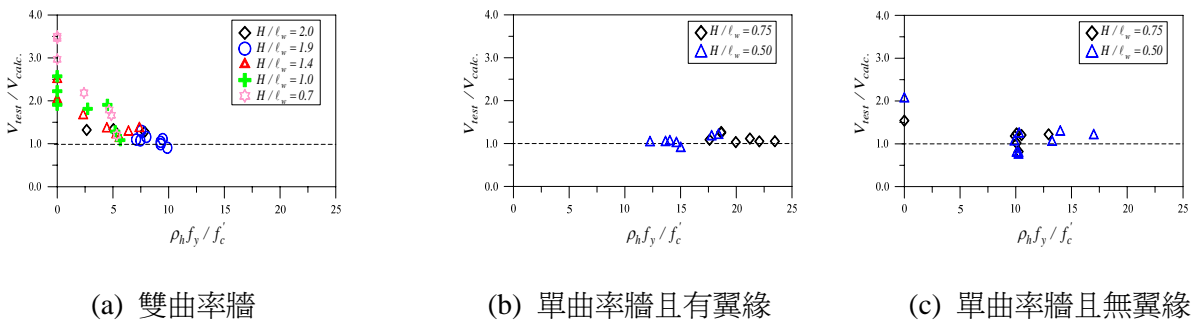


圖 2 土木 401-96[2]預測強度與水平鋼筋量關係[3]

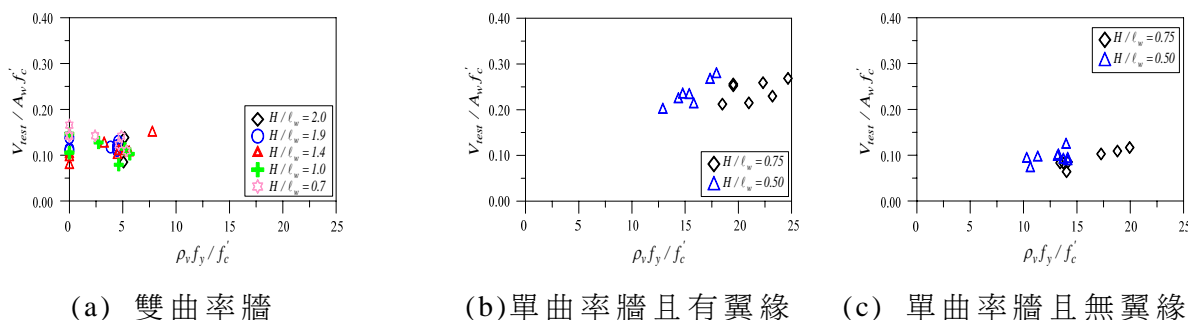


圖 3 測試強度與垂直鋼筋量關係[3]

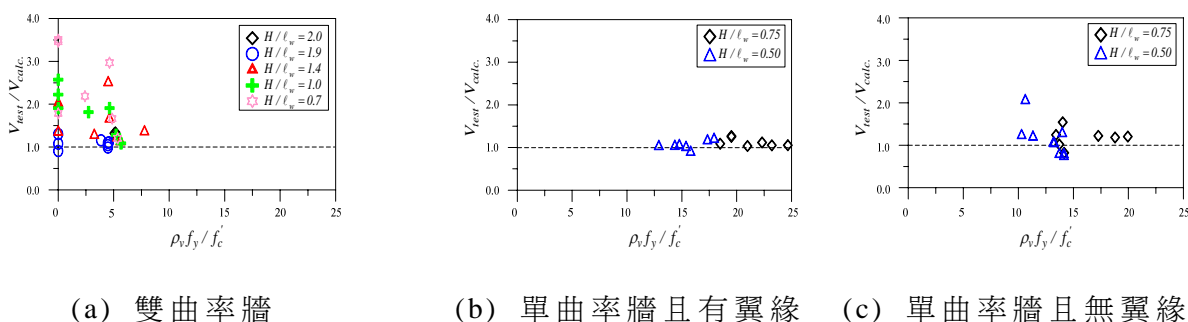


圖 4 土木 401-96[2]預測強度與垂直鋼筋量關係[3]

圖 3 顯示測試強度與垂直鋼筋量關係，圖中呈現出無垂直剪力鋼筋配置之試體強度約與有垂直剪力鋼筋配置試體之強度同等級，另外也顯示出隨垂直鋼筋量增加時測試強度有隨之增加的趨勢。圖 4 顯示土木 401-96[2]預測強度與垂直鋼筋量關係，圖中縱軸乃以測試強度與預測強度比值表示，由圖 4 呈現出無垂直剪力鋼筋配置試體之預測強度很低，亦顯示土木 401-96[2]預測強度低估混凝土之強度。

比較圖 2 與圖 4 之同一鋼筋量數據分佈情形，顯示垂直鋼筋量之測試強度對預測強度比值圖(圖 4)較水平鋼筋量(圖 2)分散，此與土木 401-96[2]之剪力強度計算僅以水平鋼筋同時涵蓋水平與垂直兩項鋼筋量對剪力抵抗之貢獻有關。分散之原因，若比較圖 2 之水平鋼筋量關係圖可知是由於無水平鋼筋之試體可能設置垂直鋼筋所致，顯示垂直鋼筋在文獻[3]探討之高寬比不大於 2 的範圍內可發揮剪力抵抗之能力，但土木 401-96[2]剪力公式中並無法反應垂直鋼筋的量化貢獻。

由上述分析討論可得到下列結論[3]：

1. 無剪力鋼筋配置之試體仍具一定之強度無法忽略不計，既有建築物評估時，使用土木 401-96[2]剪力強度公式評估無剪力鋼筋之 RC 牆強度時建議均應考慮牆體貢獻。
2. 土木 401-96[2]建議公式在混凝土強度部份明顯低估，而在水平鋼筋的強度部份則有高估之虞。
3. 垂直鋼筋量在低矮型剪力牆中可發揮對剪力強度之抵抗功用，與土木 401-96[2]之解說「低矮型牆之水平鋼筋之抗剪效率降低而垂直鋼筋之抗剪效率增加」的趨勢相符，但土木 401-96[2]剪力公式中並無法反應垂直鋼筋的量化貢獻。

肆、分析模式建議與實用探討

四、1 既有分析模式

ACI-ASCE Committee 326 [10] 報告指出 ACI 規範關於剪力強度的制定是根據梁的試驗結果而得，抗剪方式是以桁架模型模擬，剪力強度可區分成兩部份之貢獻，一部份由混凝土所提供，其他部份則由鋼筋提供，此兩部份可單獨計算。牆體之剪力強度則沿用梁之規定 [11]，如式(1)所示。牆體混凝土之剪力強度 V_c 與混凝土開裂型式有關，混凝土開裂型式由實驗觀察可歸納為兩大類：一為腹剪開裂(Web-shear)，是試體在中間腹版處主拉應力超出混凝土的抗拉強度 $1.06\sqrt{f'_c}$ 所造成的傾斜剪力裂縫對應公式如式(2)、另一為撓剪開裂(Flexure-shear)，是在距離試體底部 $l_w/2$ 高度處因撓曲拉應力超過混凝土開裂強度 $1.6\sqrt{f'_c}$ 而產生撓曲開裂，然後沿撓曲裂縫終點產生向著較大彎矩方向的斜裂縫，對應公式如式(3)。本文作者研究[3]顯示以此方法訂出之土木 401-96[2]建議公式在混凝土強度部份明顯低估、在水平鋼筋的強度部份則有高估之虞以及無法反應垂直鋼筋的量化貢獻等問題。

Sozen et al. [12]研究開裂後 RC 剪力牆受面內剪力作用之行爲時提出三彈簧模式，其中針對剪力行爲分析所用之建議公式如式(8)：

$$V_c = 1.06\sqrt{f'_c} \left(1 + \frac{f_o}{1.06\sqrt{f'_c}}\right) A_w \quad (8)$$

其中 f'_c = 混凝土之規定抗壓強度 (kgf/cm^2)； f_o = 牆體承受之平均壓應力(kgf/cm^2)； A_w = 牆體受剪力方向之面積(cm^2)

土木 401-96[2]建議公式與 Sozen et al. [12]建議公式之差異在於，土木 401-96[2]取牆板受剪後之最大剪應力處的主應力等於混凝土剪力強度，Sozen et al. [12] 建議公式則取牆板受剪後之平均剪應力產生的主應力等於混凝土剪力強度，故而 Sozen et al. [12] 建議公式計算結果會比土木 401-96[2]建議公式評估結果大。

鋼筋在剪力牆受力時扮演之角色，依土木 401-96[2]附錄 A 「壓拉桿模型」應視為拉桿，水平剪力鋼筋扮演水平拉桿，垂直剪力鋼筋扮演垂直拉桿。Schäfer [13]及 Jennewein and Schäfer [14]對於拉桿之有效性建議，拉桿傳力大小與對角壓桿之傾斜角度有關，且對角壓桿之傾斜角度應介於 $37^0 \sim 63^0$ 之間，換算成牆的高寬比約為 0.5~2 之間，即高寬比小於 0.5 時主要為垂直拉桿貢獻，高寬比大於 2 時主要為水平拉桿貢獻，高寬比介於 0.5~2 之間時由水平拉桿與垂直拉桿合併貢獻。

四、2 分析模式建議

針對上述本文作者研究之混凝土強度部份明顯低估問題[3]，建議取用 Sozen et al. [12]建議公式可增加對於混凝土強度估算值如式(10)所示。針對水平鋼筋的強度部份則有高估之虞以及無法反應垂直鋼筋的量化貢獻等問題[3]，建議取高寬比介於 0.5~2 之間時水平鋼筋與垂直鋼筋貢獻依高寬比比例分配如式(11)~ 式(13)所示，整體 RC 牆剪力牆度評估如式(9)~ 式(13)所示。

$$V_n = V_c + V_{sh} + V_{sv} \quad (9)$$

$$V_c = 1.06\sqrt{f'_c} \left(1 + \frac{f_o}{1.06\sqrt{f'_c}}\right) A_w \quad (10)$$

$$V_{sh} = m_h \frac{A_{vh} f_y d}{s_h}, \quad V_{sv} = m_v \frac{A_{vv} f_y d}{s_v} \quad (11)$$

$$m_h = 0, \quad m_v = 1 \quad ; \text{當 } H/l_w \leq 0.5 \quad (12)$$

$$m_h = \frac{2}{3} \left(2 - \frac{H}{\ell_w}\right), \quad m_v = \frac{2}{3} \left(\frac{H}{\ell_w} - \frac{1}{2}\right) \quad ; \text{當 } H/l_w \leq 0.5 \quad (12)$$

$$m_h = 1, \quad m_v = 0 \quad ; \text{當 } H/l_w \geq 2.0 \quad (13)$$

其中 m_h = 水平鋼筋對剪力強度之有效性； m_v = 垂直鋼筋對剪力強度之有效性； A_{vh} = 單一根水平剪力鋼筋斷面積 (cm^2)； A_{vv} = 單一根垂直剪力鋼筋斷面積 (cm^2)； s_h = 水平剪力鋼筋間距 (cm)； s_v = 垂直剪力鋼筋間距 (cm)； H = 牆高 (cm)； ℓ_w = 牆寬 (cm)； d = 牆體最外受壓纖維至受拉鋼筋斷面重心之距離 (mm)，可取牆寬的 0.8 倍 ($0.8 \ell_w$)，若牆高 H 小於 d 時， d 值取牆高 H 計算。

四、3 實用分析與探討

本文針對上述模式(式(9)~式(13))完成雙向均無剪力鋼筋設置之試體強度計算，試體採用日本 Hirosawa[15]於 1975 年所做之剪力牆測試報告中 Kokusho 與 Tanabe 之雙向均無剪力鋼筋設置測試試體共八座，此八座試體之測試報告均顯示為剪力破壞，試體高寬比介於 0.7~1.0，牆體厚度介於 1cm~4cm。因水平及垂直剪力鋼筋量均為 0，故僅使用建議模式之式(10)計算，其結果如表 1 所示，其中 V_{test} 為測試強度。 V_{test}/V_{calc} 乃以土木 401-96[2]公式計算，計算強度(V_{calc})取撓曲強度(V_{Mn})與剪力強度(V_{ACI})之較小值，至於剪力強度(V_{ACI})乃取土木 401-96[2] 第 4-11 節剪力與扭矩之牆的特別規定與第 15.8 節耐震設計特別規定之結構牆的特別規定之小值。

$V_{test}/V_{Proposed}$ 乃以本計劃建議模式計算之結果，計算強度($V_{Proposed}$)取撓曲強度(V_{Mn})與剪力強度(V_{Sozen})之較小值，至於剪力強度(V_{Sozen})乃取前節之式(10)計算。

表 1 雙向均無剪力鋼筋設置之 RC 剪力牆試體剪力強度計算

作者	試體編號	fc' (kgf/cm ²)	lw*H*t (cm)	邊界柱		測試強度 V _{test} (tf)	撓曲強度 V _{Mn} (tf)	剪力強度		$\frac{V_{test}}{V_{calc.}}$	$\frac{V_{test}}{V_{Proposed}}$	
				尺寸	主筋量			ACI 強度 V _{ACI} (tf)	Sozen et al. V _{Sozen} (tf)			
Kokusho	60-FW1	140	30*20*2	6*6	4-D4,2-D3	3.74	4.39	0.57	0.75	6.59	4.97	
	66-FW5	170	30*20*2	6*6	12-D4.2	3.58	9.41	0.63	0.83	5.72	4.32	
Tanabe	94-3	647	30*30*1	4*6	6-D6	1.49	7.03	0.61	0.81	2.44	1.84	
	95-2	647	30*30*2	4*6	6-D6	3.94	7.03	1.33	2.26	2.97	1.74	
	96-1	647	33.6*30*4	4*4.2	6-D6	5.14	7.02	2.73	3.62	1.88	1.42	
	97-5	327	45*45*2	6*6	6-D6	3.20	7.44	1.30	1.73	2.46	1.85	
	98-6	328	45*45*3	6*6	6-D6	4.00	7.43	1.96	2.59	2.05	1.54	
	99-7	340	45*45*4	6*6	6-D6	6.00	7.45	2.66	3.52	2.26	1.71	
試體數	8									AVG	3.29	2.42
										STD	1.81	1.39

表 1 顯示測試強度對土木 401-96[2]計算值之比值($\frac{V_{test}}{V_{calc.}}$)平均值為 3.29，標準偏差值為 1.81；至於測試強度對本計劃建議模式計算值($\frac{V_{test}}{V_{Proposed}}$)之比值平均值為 2.42，標準偏差值為 1.39。上述數據顯示本文建議模式就純混凝土牆試體之評估值較土木 401-96[1]趨近於測試值，且標準偏差值亦較小。另將表 1 之測試強度、 $\frac{V_{test}}{V_{calc.}}$ 與 $\frac{V_{test}}{V_{Proposed}}$ 分別繪圖如圖 5，其中圖 5(a)表示測試強度與高寬比關係，圖 5(b)表示 $\frac{V_{test}}{V_{calc.}}$ 與高寬比關係，圖 5(c)表示 $\frac{V_{test}}{V_{calc.}}$ 與高寬比關係。由圖 5 顯示出本計劃建議模式計算結果較趨近於測試值，且點位分布之帶寬較小，即亦顯示本文建議模式有較佳之預測結果。

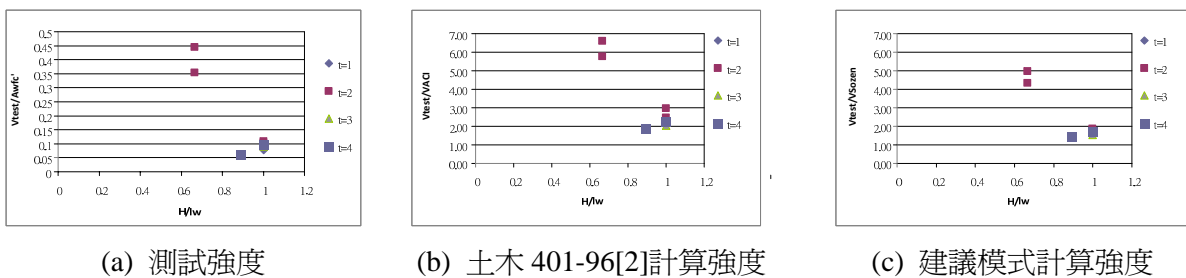


圖 5 雙向均無剪力鋼筋設置試體之強度與高寬比關係

伍、 結論與建議

RC 牆對於耐震力的抵抗很有效，RC 牆的勁度與其他構件比較相對大很多，因而成為地震時之主控構件，耐震設計規範[1]明定須與建築物其他構件一起進行結構計算，現行設計規範有低估混凝土強度、對於剪力強度計算僅以水平剪力鋼筋呈現以及垂直剪力鋼筋之貢獻無法反應等現象。本文提出一評估剪力強度之建議模式，並且以建議模式評估純混凝土剪力牆測試結果，以下說明本文所得之結論與建議。

1. 以土木 401-96[2]建議之強度公式進行純混凝土剪力牆評估，其評估結果約僅測試值之 1/3。
2. 以本文建議之模式進行純混凝土剪力牆評估，可較土木 401-96[2]提高約 30%，顯示本文之建議模式在純混凝土剪力牆剪力強度評估較土木 401-96[2]趨近於測試值。
3. 建議可對僅單向(水平或垂直)放置剪力鋼筋試體以及雙向(水平及垂直)放置剪力鋼筋試體進行計算，並深入研究。

參考文獻

1. 內政部(2006)，「建築物耐震設計規範及解說」，內政部，台北市。
2. 中國土木水利工程學會混凝土工程委員會(2007)，「混凝土工程設計規範與解說(土木 401-96)」，科技圖書公司，台北縣土城市。
3. 涂耀賢、周逢霖、江文卿(2010)，「鋼筋混凝土低型剪力牆幾何性質對剪力強度之影響」，中國土木水利工程學刊，第二十二卷，第一期，第 99-111 頁。
4. Hidalgo, P. A., Ledezma, C. A., and Jordan, R. M (2002). "Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls," *Earthquake Spectra*, 18(2), pp.287-308.
5. Lopes, M. M. P. S. (1991). "Seismic behavior of reinforced concrete walls with low shear ratio," Ph.D. Thesis, Civ. Engrg. Dept., Univ. of London.
6. 許茂雄(1988)，「低型鋼筋混凝土剪力牆承受反向重覆荷重之行爲研究(III)」，國科會防災科技研究報告，No. 77-03。
7. 許茂雄(1991)，「開口鋼筋混凝土剪力牆之耐震試驗與分析」，國科會防災科技研究報告，No. 80-04。
8. 許茂雄、廖慧明、黃錦旗、李嘉泰(1987)，「低型鋼筋混凝土剪力牆承受反重覆荷重之行爲研究(II)」，國科會防災科技研究報告，No. 76-01。
9. 許茂雄，「無邊界柱開口鋼筋混凝土剪力牆之耐震行爲」，國科會防災科技研究報告，No. 79-01 (1990)。
10. ACI-ASCE Committee 326 (1962). "Shear and Diagonal Tension," *ACI Journal, Proceedings V*. 59. No. 1, pp 1-30; No. 2, pp. 277-344; and No. 3, pp. 353-396.
11. Cardenas, A. E., Hanson, J. M., Corley, W. G., and Hognestad, E. (1973). "Design Provisions for Shear Walls," *ACI Journal, Proceedings V*. 70, No. 3, pp. 221-230.
12. Sozen, M. A., Monteiro, P., Moehle, J. P., Tang, H. T. (1992). "Effects of Cracking and Age on Stiffness Reinforced Concrete Walls Resisting In-Plane Shear," *A Proceedings of the Fourth Symposium on Nuclear Power Plant Structures, Equipment, and Piping, North Carolina State University, Raleigh, NC, December*, pp. 3.1-3.13.
13. Schäfer, K. (1996). "Strut-and-Tie Models for the Design of Structural Concrete," *Notes of Workshop, Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan*, p. 140.
14. Jennewein, M., and Schäfer, K. (1992). "Standardisierte nachweise von häufigen D-Bereichen," *DAfStb. Heft No. 430, Beuth-Verlag, Berlin*. (in German).
15. Hirosawa, M.(1975). "Past Experimental Results on Reinforced Concrete Shear Walls and Analysis on them," *Kenchiku Kenkyu Shiryo, No. 6, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo*, p. 277. (in Japanese).