



研思如何綜整目前耐震工程技術，以落實危險、老舊建築物之加速重建或補強工作

具弱層鋼筋混凝土建築物耐震能力之初步評估與補強

蔡益超／國立台灣大學土木工程學系 名譽教授

宋裕祺／國立台北科技大學土木與防災研究所 教授、國家地震工程研究中心 組長

台灣地處太平洋地震帶上，地震發生頻仍，時有造成生命財產損失的致災性地震發生。仔細研究造成寶貴生命損失的最大原因係由建築物倒塌所引起，而建築物倒塌的模式泰多屬於一、二樓弱層破壞。譬如今年2月6日花蓮地震的統帥飯店與雲門翠堤大樓（如圖1）破壞就屬弱層破壞，其他如2016年美濃地震維冠金龍大樓倒塌，1999年921集集地震台北市東星大樓倒塌等均屬同一類型。何以會有這些弱層建築物，實乃肇因於大樓一樓（或一、二樓）常因商業活動或停車需求，須創造寬闊的使用空間，所以上樓層的一些外牆與隔戶牆沒有下到一樓。雖然此等牆體具備了相當的勁度與強度，在地震時確實會像結構牆般參與抵抗地震力的任務。上述弱層建築物一樓（或一、二樓）的極限剪力強度會遠低於其上樓層的極限剪力強度，致使一樓成為吸收地震能量的主要樓層，因而難逃首先破壞終致被壓潰的命運。

每棟建築物之耐震能力依其結構系統、結構細部與結構現況等而有所差異，如能在地震未發生前透過耐震能力評估，將耐震能力偏低的建築物篩選出來並加以補強，則大地震時原本耐震能力偏低的建築物便可因已補強而免於倒塌的命運，此乃降低地震時人命財產損失的有效工程手段。

筆者數十年來致力於耐震能力評估的研發工作，分別開發出耐震能力初步評估系統（Preliminary Seismic Evaluation System of RC Buildings, PSERCB）與耐震能力詳細評估系統（Seismic Evaluation System of RC Buildings, SERCB），並均通過內政部營建署的認證，作為建築物耐震能力評估的分析軟體。1999年



圖1 2018年2月6日花蓮地震造成雲門翠堤大樓倒塌

921 集集地震後，為能迅速篩選出耐震能力不足的建築物，所採用的初步評估是以填表方式，就影響耐震能力重要的因素採定性評估的方式逐項評分。不過此種定性評估易因評估人員主觀認定的差異，致使結果可能具備高度的不確定性。為消弭此缺點，最近幾年在內政部建築研究所的委託下，完成兼具定性與定量的建築物耐震能力初步評估系統 PSERCB，在定量評估部分，評估者只要上網輸入材料強度、構材尺寸等資料，該系統平台就會自動幫評估者計算出建築物之耐震能力並列印評估結果報表，非常方便，適合用於大量建築物的篩選工作。依照 2017 年 5 月 10 日立法院三讀通過的「都市危險及老舊建築物加速重建條例」與其後政府部門公布的諸多子辦法與行政命令，完成建築物耐震能力初步評估後，若耐震能力明顯不足者，可以逕行拆除重建；若耐震能力有疑慮者，則應再安排進行詳細評估。

PSERCB 之定量評估係將非結構牆與磚牆視為結構體，以反映建築物在地震時的結構行為與耐震能力。本系統曾廣泛舉辦說明會，一般結構技師、土木技師與建築師已深諳其操作，對於推動具弱層建築物耐震能力評估與補強工作而言，已具備充足且夠格的人力資源。

本文第二節將簡述 PSERCB 耐震能力定量評估的原理，第三節說明利用 PSERCB 進行具弱層鋼筋混凝土建築物耐震能力定量初評的方法，第四節說明大規模進行具弱層建築物耐震能力初評進行方式之建議，第五節為結論。

鋼筋混凝土建築物耐震能力定量初步評估之原理

建築物的極限剪力強度為一樓的極限剪力強度，而一樓的極限剪力強度可由一樓抵抗地震力的構材如構架的柱、RC 牆（包括剪力牆與非結構 RC 牆）及磚牆三者的貢獻來求取。以上三種構材其受力與變形的特性並不相同，譬如 RC 牆勁度最高，極限變形能力最小，而構架的柱勁度最小，但其極限變形能力最佳，磚牆則介乎其間。地震來襲時，RC 牆先抵抗大部分的地震力，當其強度與韌性完全發揮時，其他兩種構材的強度與韌性發揮的百分比為若干是相當重要的資訊。茲以一個內填充 RC 牆的構架為例說明其受力行為，當 RC 牆主導耐震行為至其韌性用完後，抗震的責

任就交給構架的柱去承擔，俟構架的柱韌性發揮完畢後，建築物最終的耐震能力就達到了。依此邏輯，建築物的耐震能力係為 RC 牆、磚牆與構架的柱等三種構材主導所得耐震能力的最大值。至於前面提到某一種構材韌性發揮完畢時，其他兩種構材強度與韌性發揮的百分比為若干，則必須進行三者的靜力非線性分析才能知曉。圖 2 所示為當 RC 牆發揮充分強度時磚牆與構架之強度發揮比；圖 3 所示為當 RC 牆發揮充分韌性時磚牆與構架之韌性發揮比。此些圖之水平坐標表示位移角，縱坐標表示正規化地震力，其值介於 0 與 1 之間。表 1 所示 18 個係數即代表某一種構材為主角時，當其韌性發揮後，自身與其餘兩種構材強度與塑性變形發展的比例。譬如 $C_{vbj} = 0.95$ ($j = 1$) 表示以 RC 牆為主體時，當其韌性完全發揮時磚牆強度發揮至 95% (圖 2)， $C_{Rbj} = 0.37$ ($j = 1$) 表示以 RC 牆為主體時，當其韌性完全發揮時磚牆塑性變形發揮至 37% (圖 3)，餘者類推。

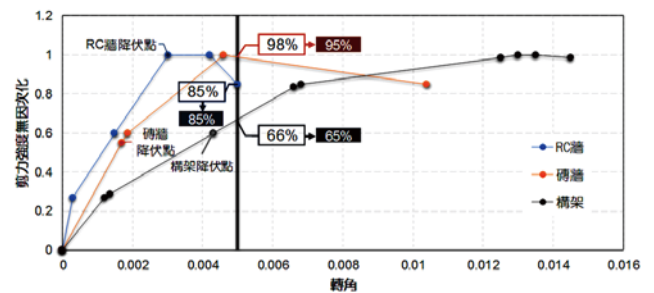


圖 2 當 RC 牆發揮充分強度與韌性時各構件強度發揮比

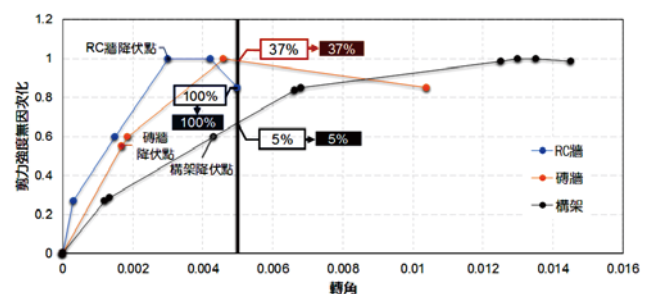


圖 3 當 RC 牆發揮充分強度與韌性時各構件強度發揮比

表 1 C_{vsj} 、 $CRsj$ 、 $Cvbj$ 、 $CRbj$ 、 $Cvcj$ 、 $CRcj$ 建議表

j	J = 1	J = 2	J = 3
C_{vsj}	0.85	0	0
$CRsj$	1.0	0	0
$Cvbj$	0.95	0.85	0
$CRbj$	0.37	1.0	0
$Cvcj$	0.65	0.95	1.0
$CRcj$	0.05	0.58	1.0

柱之極限剪力強度為柱底與柱頂塑性彎矩和除以淨高，柱承受之軸力由靜載重與二分之一活載重推求，如果知道柱尺寸與配筋，可由 RC 理論算出其塑性彎矩，進一步求出柱之極限剪力強度。本節對於理論之闡述主要在觀念的述說，將較不涉及複雜公式的推導，讀者可參閱文獻^[1]。

RC 牆之極限剪力強度 V_{swi} 為混凝土與剪力筋的貢獻之和，磚牆之極限剪力強度分四面圍束磚牆、三面圍束磚牆與無側邊圍束磚牆等三種，詳見文獻^[2,3]。

柱之破壞有可能是剪力破壞，其剪力強度以 V_{sui} 表示，因此第 i 根柱之極限剪力強度 V_{coli} 如下：

$$V_{coli} = \min (V_{m, coli}, V_{sui}) \quad (1)$$

其中 $V_{m, coli}$ 為柱發生彎矩破壞的極限剪力強度。柱如屬剪力破壞，當建築物韌性發揮後其剪力強度會折減，其修正係數 ϕ 如表 2 所示。 $\frac{V_{sui}}{V_{m, coli}} > 1.0$ 時， ϕ 值取 0.9，乃因一般強柱弱梁，柱頂彎矩一般小於塑性彎矩的緣故。

以第 j 類構材為主體，在其韌性發揮後之一樓極限剪力強度 V_{uj} 除本身之強度外，還要加上其他兩類構材極限剪力強度在當時發展的百分比如式 (2) 所示。建築物如屬平面或立面不規則性，其極限剪力強度會較小，需要乘以平面對稱性折減係數 ϕ_{pi} 與立面對稱性折減係數 ϕ_{fa} ，如表 3、4 所示。

表 2 極限剪力強度修正係數 ϕ 計算表

極限剪力強度修正係數			
	$\frac{V_{sui}}{V_{m, coli}} \leq 0.75$	$0.75 < \frac{V_{sui}}{V_{m, coli}} \leq 1.0$	$\frac{V_{sui}}{V_{m, coli}} > 1.0$
修正係數 ϕ	0.75	$0.3 + 0.6 \left(\frac{V_{sui}}{V_{m, coli}} \right)$	0.9

表 3 平面對稱性折減修正係數表

平面對稱性於定量評估基底剪力強度折減修正係數 ϕ_{pi}			
	不良	尚可	良
修正係數	0.85	0.95	1.0

表 4 立面對稱性折減修正係數表

立面對稱性於定量評估基底剪力強度折減修正係數 ϕ_{fa}			
建築物總樓層數	不良	尚可	良
七樓(含)以上	0.85	0.95	1.0
七樓至二樓(含)	0.85~1.0 內差計算	0.95~1.0 內差計算	1.0
一樓	1.0	1.0	1.0

$$V_{uj} = [C_{vcj} \sum V_{coli} \times N_{ci} + C_{vsj} (\sum V_{swi} \times N_{swi} + \sum V_{scoli} \times N_{scoli}) + C_{vbj} (\sum V_{bwai} \times N_{bwai} + \sum V_{bw3i} \times N_{bw3i} + \sum V_{bw2i} \times N_{bw2i})] \times \phi_{pi} \times \phi_{fa} \quad ; j = 1 \sim 3 \quad (2)$$

式中各變數之意義請參閱文獻^[1]。

求出建築物之極限剪力強度 V_{uj} 後，可將其除以工址的正規化加速度反應譜係數 $S_{ad} / 0.4S_{DS}$ 如此可以求得建築物之降伏地表加速度 A_{yj} ：

$$A_{yj} = \frac{V_{uj}}{S_{ad}W} = \frac{V_{uj}S_{DS}}{2.5S_{ad}W} (g); j = 1 \sim 3 \quad (3)$$

其中 S_{ad} 為設計地震水平譜加速度係數， S_{DS} 為工址短週期之設計地震水平譜加速度係數， W 為建築物之靜載重。

第 j 類構材主導時建築物之韌性容量 R_j^* 之計算請參考文獻^[1]，韌性容量 R_j^* 的求取乃將各類構材承擔之剪力視為權重計算其加權平均而得。至於各類構材之韌性容量與設計年度有關，詳見表 5。

表 5 R_{col} 、 R_{sw} 、 R_{bw} 之建議表

設計年度	R_{col}	R_{sw}	R_{bw}
63 年 2 月以前	2.4	2.0	3.0
63 年 2 月至 71 年 6 月	3.2	2.0	3.0
71 年 6 月至 86 年 5 月	4.0	2.0	3.0
86 年 5 月以後	4.8	2.0	3.0

由 R_j^* 可求得容許韌性容量 R_{aj}^* ，及結構系統地震力折減係數 F_{uaj}^* ，將降伏地表加速度與結構系統地震力折減係數相乘可得建築物達容許韌性容量時之地表加速度 A_{c1} 。此值若與耐震規範 475 年回歸期地表加速度相比較，可得權重 w 如下：

$$\begin{aligned} \text{當 } \frac{A_{c1}}{IA_{475}} \leq 0.25, w = 1.0; \\ \text{當 } 0.25 \leq \frac{A_{c1}}{IA_{475}} \leq 1.0, w = \frac{4}{3} \left(1 - \frac{A_{c1}}{IA_{475}} \right) \\ \text{當 } \frac{A_{c1}}{IA_{475}} \geq 1.0, w = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 A_{475} 為建築物耐震設計規範^[4]規定之耐震能力， I 為用途係數。此意即達到規範標準的耐震能力，權重為 0，若只達到四分之一，權重為 1.0。

此外，由 R_j^* 求結構系統地震力折減係數 F_{uj}^* ，將降伏地表加速度與結構系統地震力折減係數相乘可得建築物達韌性容量時之地表加速度 A_{c2} 。

此值若與建築物耐震設計規範 2500 年回歸期地表加速度相比較，可得權重 w 如下：

$$\begin{aligned} \text{當 } \frac{A_{c2}}{IA_{2500}} \leq 0.25, w &= 1.0; \\ \text{當 } 0.25 \leq \frac{A_{c2}}{IA_{2500}} \leq 1.0, w &= \frac{4}{3} \left(1 - \frac{A_{c2}}{IA_{2500}}\right) \\ \text{當 } \frac{A_{c2}}{IA_{2500}} \geq 1.0, w &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 A_{2500} 為建築物耐震設計規範^[4] 規定之耐震能力， I 為用途係數。此意即達到規範標準的耐震能力，權重為 0，若只達到四分之一，權重為 1.0。

具弱層鋼筋混凝土建築物耐震能力定量初評的方法

對於可能在一樓（或一、二樓）產生弱層的建築物（如圖 4），評估者可藉由建築物耐震能力初步評估系統 PSERCB 填入其上標準樓層的牆體資訊，之後 PSERCB 會自動計算所謂的樓層牆量比 γ_w ，此乃一樓（或一、二樓）的等值牆量除以標準層的等值牆量，而等值牆量是將 RC 牆的面積乘以 1.0，加上柱斷面積乘以 0.5，再加上磚牆斷面積乘以 0.25。如樓層牆量比較小，此大樓的第一層樓可能是弱層，就整棟建築物韌性發揮的觀點而言，只有一樓（或一、二樓）會進入非線性消耗地震能量，其上樓層消耗的地震能量相對較小，整體建築物的韌性容量就會變小，因此第二節談到的韌性容量 R_j^* 會變小，新的韌性容量 R_{jnew}^* 如下式計算之：

$$R_{jnew}^* = (R_j^* - 1)\gamma_w + 1 \quad (6)$$

經過此種考量弱層牆量比之計算後，計算所得的耐震能力 A_{c1} 與 A_{c2} 就會較小，弱層效應就可以被有效計及。



圖 4 弱層建築物一樓崩潰塌陷

具弱層建築物耐震能力初評與補強進行方式之建議

依照目前「都市危險及老舊建築物加速重建條例」相關細部規定，建築物耐震能力初評總分數超過 60（含）分者，就可以考量拆除重建或補強；如果初評總分數介於 30（含）至 60 分之間者，就可以考量進行後續耐震能力詳細評估；如果初評總分數低於 30 分者，表示建築物耐震能力尚稱足夠。

根據內政部不動產資訊平台資料統計，全國住宅總量 844 萬餘戶中，截至 2016 年底，屋齡 30 年以上老屋約為 384 萬戶，占了總建築物的 45%。根據以往經驗，這些老舊建築物中耐震能力不足者約占 40 ~ 50%，亦即全台灣目前約有 140 ~ 190 萬戶建築物可能會有耐震能力不足的問題，短期之內要對這些耐震能力不足的建築物全數進行耐震能力詳細評估，實屬困難。

因此當務之急應該是先針對類似維冠金龍大樓等一樓呈現開闊空間而牆量很少、具有弱層潛能的建築物如：大賣場、飯店、金融機構、市場、停車場等搜集其結構圖說（如沒有圖說者需現場量測或判斷），進行耐震能力初步評估。進行此項工作的人員須接受過 PSERCB 講習的結構技師、土木技師或建築師，彼等上網填具必要資料後，由程式自動計算耐震能力 A_{c1} 與 A_{c2} 。

弱層建築物是指一樓（或一、二樓）抵抗地震所有構材的極限剪力強度 V_{uj} 與其上樓層者差距過大，若能在弱層進行適度的階段性補強如增加適量的 RC 牆或擴柱來提升樓層牆量比 γ_w 至少達到 0.8 以上，則可有效改善弱層效應，類似維冠金龍與雲門翠堤等住商混合大樓在地震中因一樓崩潰，導致全體建築物倒塌造成的慘重人命傷亡的情況即可避免。階段性補強雖無法達到全面性補強使建築物完全符合現行耐震設計規範規定的耐震能力，但卻能防止建築物崩塌，達到保命不保產的目的，且所需的補強工程量體與工程費用相對不高，對於處理目前台灣仍有為數不少弱層建築物而言，應該是現階段最重要的工作之一。為達到快速且不失準確的目標，PSERCB 應該是很好的評估工具，有了補強構想後，再針對補強後建築物重新進行 PSERCB 的評估，即可迅速得到其補強成效。

茲建議使用 PSERCB 處理弱層建築物耐震能力初步評估與階段性補強之相關作業與標準如下：

1. 針對大賣場、飯店、金融機構、市場、停車場等具有弱層潛能的建築物族群，全面以 PSERCB 進行耐

震能力初步評估。

2. 評估者分別針對弱層與標準樓層輸入柱與牆的量體，系統可迅速計算出樓層牆量比 γ_w 。
3. 若樓層牆量比 γ_w 小於 0.8 (含) 者 (即弱層建築

物)，在短期內無法進行全面性補強或拆除重建者，應優先且儘速針對弱層建築物進行階段性補強。

4. 階段性補強之標準為補強後建築物之 PSERCB 定量指標樓層牆量比 γ_w 大於 0.8 且 $\frac{A_{c1}}{A_{475}}$ 不得低於 0.75。

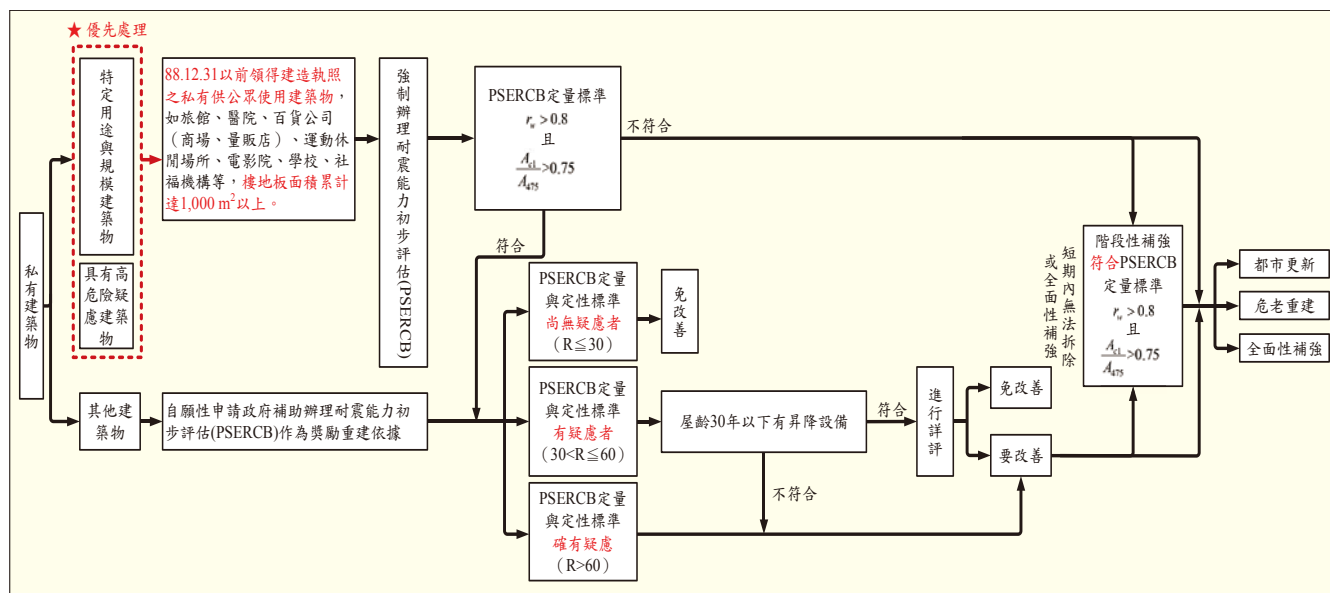


圖 5 建築物耐震能力評估與階段性補強之相關作業建議

結論

具弱層鋼筋混凝土建築物是地震時造成倒塌引致人員傷亡的主因，台灣目前此種建築物為數不少，當務之急應該是先針對類似維冠金龍大樓等一樓（或一、二樓）呈現開闊空間而牆量很少、具有弱層潛能的建築物如：大賣場、飯店、金融機構、市場、停車場等搜集其結構圖說（如沒有圖說者需現場量測或判斷），進行耐震能力初步評估，將其篩選出來進行必要的補強。相關作業程序建議如圖 5。

PSERCB 系統是一套簡便又不失準確的鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估的系統，業經舉辦多次說明會，結構技師、土木技師與建築師已熟稔其原理與操作，已廣泛建立進行耐震初評的人力資源。系統經 2016 年 9 月 19 日內政部營建署公告採用，並作為「安家固園計畫」中建築物耐震初評的認可方法。評估者只要上網填寫需求的資訊，系統會自動算出建築物的耐震能力，並輸出報告。此系統亦特別考慮弱層建築物的特性，根據樓層牆量比去折減建築物的韌性容量，得到其耐震能力。

本文建議應先針對大賣場、飯店、金融機構、市場、停車場等具有弱層潛能的建築物族群，全面以 PSERCB 進行耐震能力初步評估。評估者分別針對弱層

與標準樓層輸入柱與牆的量體，系統可迅速計算出樓層牆量比 γ_w 。對於樓層牆量比 γ_w 低於 0.8 (含) 之建築物，在短期內無法進行全面性補強或拆除重建者，應儘速針對弱層進行階段性補強，其標準為補強後建築物之定量指標樓層牆量比 γ_w 大於 0.8 且 A_{c1} / A_{475} 不得低於 0.75。此種階段性補強因只須進行弱層的補強，因此所需的工程費用與工期相當有限，短期內即可推廣執行。

弱層建築物之階段性補強工作若能儘速且確實執行，未來將可有效減免此類建築物在中大地震作用時倒塌，導致嚴重人命傷亡的遺憾事件，此乃國家社會之幸。此外也要呼籲工程界應該從震災中學習到這一課，未來設計建築物時，不要又製造出弱層建築物是幸。

參考文獻

1. 宋裕祺、蔡益超，民國 106 年 6 月，「鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估 PSERCB--- 理論背景與系統操作」，中國土木水利工程學會、中華民國結構工程學會共同出版。
2. 宋裕祺、蔡益超等，民國 98 年，「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊 --- 視窗輔助分析系統 SERCBWin2008」，台北，內政部建築研究所。
3. 宋裕祺、蔡益超，民國 106 年 12 月，「鋼筋混凝土建築物耐震能力詳細評估 SERCB--- 理論背景與系統操作」，中國土木水利工程學會、中華民國結構工程學會共同出版。
4. 內政部，民國 100 年，「建築物耐震設計規範及解說」。