

學校建築初步評估法

本研究所發展之耐震能力初步評估法，係以日本建築防災協會所制定的耐震診斷基準為基礎，配合國內實際學校建築情況與相關試驗結果，並以方便初步勘查使用為原則，發展出一學校建築初步耐震評估法，並將其表格化，可針對為數眾多之校舍建築進行耐震能力評估之初步篩選。

本法主要為計算結構底層各別抗橫力構材之強度，分為 RC 柱、磚牆及 RC 牆三種，將勘查所得之構材截面積，乘以其單位面積極限剪力強度，計算得各別構材之強度後，將其加總則可得樓層之強度，再配合韌性容量之假設及根據現行規範之地震力計算方式，可以推得整體校舍底層之耐震能力並給予基本之評分，即為其「基本耐震性能」之評分。得知整體校舍之基本耐震評分後，再根據校舍之平立面規則與否、窗台及氣窗造成之短柱效應等因素給予適當之修正因子調整，各個調整因子之影響總和即為「整體調整因子」，將「基本耐震性能」與「整體調整因子」相乘，則可得校舍之「耐震指標」分數，據以判斷其是否有耐震能力上之疑慮。

耐震能力指標分數低於 80 分者，表示其耐震能力頗為不足，確有耐震疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，將可能有嚴重損壞或倒塌之疑慮，應最優先進行耐震能力之補強設計與施工，以避免地震發生時造成嚴重傷亡；耐震能力指標分數介於 80 分及 100 分者，表示其耐震能力可能不足，有耐震上的疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，將有可能發生嚴重結構上之破壞，其耐震能力之提升(補強工程)列為次優先對象；耐震能力指標分數高於 100 分者，表示其尚無耐震疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，應不至於發生嚴重結構上之破壞，於地震發生後僅需進行簡單之修復即可繼續使用。

3.1 基本假設

茲將本耐震能力初步評估法之部分基本假設條列分述如下：

1、破壞模式：

假設校舍建築之破壞在底層，且校舍建築垂直走廊方向因有多面隔間牆，致使垂直走廊方向之抗震能力增加，故其破壞方向皆為沿走廊方向。校舍建築沿走廊方向之構架多有窗台，考慮窗台及樓板造成梁構材之實際強度及勁度較原設計時增大許多，故假設破壞構材均為柱構材，而梁構材不破壞。

2、單位面積載重：

黃世建針對台南地區 30 棟校舍之教室單元所計算之平均單位面積載重為 913kg/m^2 ，變異程度為 102kg/m^2 。考慮屋頂之載重較一般樓層為低，為簡化起見，本研究假設二樓以上至屋頂層之單位面積載重皆為 900kg/m^2 。

3、鋼筋及混凝土之材料性質：

針對老舊之校舍建築，假設其混凝土抗壓強度 f'_c 為 160kg/cm^2 ，鋼筋之抗拉降服強度 f_y 為 2800kg/cm^2 。

3.2 構材之極限剪力強度

磚牆

根據蔡益超教授引用許茂雄教授所作之一系列磚牆之研究結果，四面圍束及三面圍束磚牆之極限剪力強度 V_{u4} 及 V_{u3} ，皆可利用下式計算得：

$$V_u = \frac{t}{150H} (40W_{eff}^2 + 40H^2 + 40\sqrt{W_{eff}^4 + 14H^2W_{eff}^2 + H^4}) F_t \alpha_u \dots\dots\dots(1)$$

其中

- t : 磚牆厚度，單位為 cm^2
- H : 磚牆高度，單位為 cm
- W_{eff} : 磚牆有效寬度，單位為 cm
- F_t : 磚牆之劈裂強度，單位為 kg/cm^2
- α_u : 極限強度修正係數

則四面圍束之校舍隔間磚牆之單位面積極限剪力強度 τ_{BW4} 以及三面圍束之校舍磚造翼牆之單位面積極限剪力強度 τ_{BW3} ，皆可根據下式計算得：

$$\tau_{BW} = \frac{V_u}{W \times t} \dots\dots\dots(2)$$

其中

W ：磚牆寬度，單位為 cm

本研究假設各種不同之典型四面圍束之校舍隔間磚牆型式，其寬度為 500cm 至 700cm 之間，高度為 260cm 至 280cm 之間，磚牆劈裂強度假設為 $18.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，計算得之四面圍束之校舍隔間磚牆之單位面積極限剪力強度約為 $3.3\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右。

三面圍束之校舍磚造翼牆則假設其寬度為 20cm 至 180cm 之間，高度為 260cm 至 280cm 之間，磚牆劈裂強度假設為 $18.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，計算得之三面圍束之校舍隔間磚牆之單位面積極限剪力強度約為 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右。

本研究較保守的將四面圍束磚牆之單位面積極限剪力強度 τ_{BW4} 取為 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ ，其權數定為 1.0；三面圍束情形下 τ_{BW3} 取為 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，其權數定為 0.5；若兩面圍束，則不考慮其極限剪力強度。相關推估之數據請見表 3-2 及表 3-3。

RC 柱

對於 RC 柱之剪力強度，本研究以台灣一般老舊校舍之圍束箍筋的情況來估算其剪力強度，柱之剪力強度的計算方式為：

$$\tau_c = V / bd \dots\dots\dots(3)$$

$$V = V_c + V_s \dots\dots\dots(4)$$

其中 V_c 為混凝土所提供之強度，而 V_s 則為鋼筋所提供之強度，其計算方式分別為

$$V_c = 0.93\sqrt{f'_c}bd \dots\dots\dots(5)$$

$$V_s = A_s f_y d / s \dots\dots\dots(6)$$

其中 s 為圍束箍筋之間距， b 及 d 為柱之寬度與深度， f_y 及為 f'_c 鋼筋與混凝土之標稱強度。

若以台灣一般老舊校舍之柱尺寸與圍束箍筋的情況來看，其柱沿走廊方向深度約在 25~35cm 之間，而圍束箍筋一般為採用 3 號鋼筋且間距在 20~30cm 之間。假設柱深度及寬度分別為 30cm 及 40cm，且箍筋間距為 25cm，並假設混凝土強度為 160 kg/cm²，如此則可得

$$V_c / bd = 11.76 \quad \text{kg/cm}^2$$

$V_s / bd = (A_s f_y d / s) / bd = (2 \times 0.71 \times 2800 \times 30 / 25) / (30 \times 40) = 3.98 \text{ kg/cm}^2$ ，所以柱之極限剪力強度 τ_c 約為 15 kg/cm²，其值剛好為磚牆極限剪力強度 $\tau_{BW4} = 3 \text{ kg/cm}^2$ 之五倍。若以磚牆極限剪力強度為基準，則在相同斷面積下，柱之強度為磚牆之 5 倍，故將柱構材之權數訂為 5.0。

RC 牆

對於非剪力牆之鋼筋混凝土牆之強度，本研究收集了葉永信、廖文義、邱聰智等人之含鋼筋混凝土牆構架試驗結果，經統計迴歸分析後得知，鋼筋混凝土牆之極限剪力強度 τ_{RCW} 約為 29.3kg/cm²，為保守起見，將其權數取為 8.0，即假設其極限剪力強度 $\tau_{RCW} = 24 \text{ kg/cm}^2$ ；各試驗結果整理後之表格如表 3-4 所示，統計分析圖形則繪於圖 3-1 中。

3.3 基本耐震性能計算

得知所有構材的強度後，將其加總可得到底層之剪力強度，根據耐震設計規範之地震力計算公式：

$$V = \frac{ZIC}{1.4\alpha_y F_u} W \dots\dots\dots(7)$$

其中

V : 地震最小設計水平總橫力

Z : 震區水平加速度係數

I : 用途係數

C : 工址正規化水平加速度反應譜係數

W : 校舍之總重，依前面所述， $W = 900 \sum A_f$ ，其中 A_f 為二樓以上樓地板總面積，單位為 m²

α_y : 起始降服地震力放大倍數

F_u : 結構系統地震力折減係數

此公式中之 $1.4\alpha_y V$ 根據前面所述之單位面積剪力強度計算得，亦即以下列公式來表示：

$$1.4\alpha_y V \cong \tau_{BW4} \sum A_{BW4} + \tau_{BW3} \sum A_{BW3} + \tau_C \sum A_C + \tau_{RCW} \sum A_{RCW} \dots\dots\dots(8)$$

其中

$\sum A_{BW4}$: 一樓磚牆總斷面積(四面圍束)，單位為 cm^2

$\sum A_{BW3}$: 一樓磚牆總斷面積(三面圍束)，單位為 cm^2

$\sum A_C$: 一樓 RC 柱總斷面積，單位為 cm^2

$\sum A_{RCW}$: 一樓 RC 牆總斷面積，單位為 cm^2

將式 3.7 整理可得，校舍若具有足夠之耐震能力需要滿足：

$$\frac{(1.4\alpha_y V)F_u}{ZICW} \geq 1.0 \dots\dots\dots(9)$$

一般情況下，牆具有較大之剛性，且其破壞時所對應之位移較柱構材來得小，所以柱與牆之極限強度不會同時達到，且同一校舍中，所有構材也不會同時達到其極限強度，所以對於式(8)計算所得之底層剪力強度必須適度加以修正，於此參考日本耐震診斷基準法之規定將其強度，乘以一折減係數 β ， β 取為 0.8，則可將式(8)改寫為：

$$\frac{\beta(1.4\alpha_y V)F_u}{ZICW} \geq 1.0 \dots\dots\dots(10)$$

假設結構之韌性容量為 $R_a=1.2$ ，且假設校舍建築皆為短週期之建築物，則依耐震設計規範中之等能量之觀念，結構系統地震力折減係數 $F_u = \sqrt{2R_a - 1} \approx 1.183$ ；若考慮校舍是否於設計地震力下倒塌，用途係數 I 應取 1.0，但若考慮校舍作為緊急避難場所，用途係數 I 可取 1.25，以反映其因重要性所需之安全係數；因為評估對象為低矮校舍，所以將其 C 值直接取為 2.5。

將式(8)及上述參數值代入式(10)，則可依用途係數 I 值取 1.0 或 1.25 而得式(11)及式(12)，分別代表不同之耐震需求之所需之標準值，80 分代表校舍於設計地震力下不致倒塌之標準值，100 分則代表

校舍耐震性之安全係數符合耐震設計規範對於此等重要性建築物之耐震需求：

$$\frac{(\sum A_{BW4} + 0.5 \sum A_{BW3} + 5 \sum A_C + 8 \sum A_{RCW})}{10 \times \sum A_f \times Z} \geq 80 \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{(\sum A_{BW4} + 0.5 \sum A_{BW3} + 5 \sum A_C + 8 \sum A_{RCW})}{10 \times \sum A_f \times Z} \geq 100 \dots\dots\dots(12)$$

定義一參數 E 代表校舍基本耐震性能：

$$E = \frac{(\sum A_{BW4} + 0.5 \sum A_{BW3} + 5 \sum A_C + 8 \sum A_{RCW})}{10 \times \sum A_f \times Z_{code}} \dots\dots\dots(13)$$

則校舍基本耐震性能 E 可根據調查所得之底層各構材之截面積、二樓以上樓地板總面積 A_f 及現行耐震規範之震區係數 Z_{code} ，代入式(13)得知。

調整因子調查項目與耐震指標

調整因子調查項目

依據前述得知校舍基本耐震性能 E 後，尚需根據結構物之現況、結構系統是否優良等因素，修正其耐震性能。本評估表參考蔡益超所發展之鋼筋混凝土建築物耐震能力初步評估法中之部分項目，並加入國內校舍典型之平面耐震性等調整因子，考慮各影響因子是否影響校舍於地震下有倒塌疑慮為主，綜合而成本評估表之六項調整因子調查項目，茲將其條列介紹如下：

1、平面及立面對稱性：

本評估表參考建築耐震設計規範之規定，若結構及其側向力抵抗系統的平面幾何形狀具有凹角，超過凹角部分於兩水平方向之結構尺寸同時大於沿該方向結構總長之 15% 以上者，表示該結構具有凹角性，則耐震能力折減為 0.95 倍；若該結構具有凹角，但超過凹角部分於任一方向之結構尺寸不足沿該方向結構總長之 15%，且無其他平面及立面不規則之情況，則耐震能力不予折減；若該結構不具任何凹角，且無其他平面及立面不規則之情況，則耐震能力增加為 1.05 倍。

2、軟弱層顯著性：

若結構物之一樓因為使用性等考量，而使得二樓以上 RC 牆或磚牆於一樓中斷，致使一樓之極限層剪力強度與勁度降低，將造成地震力作用時變形集中，以致於韌性用盡，建築物就發生軟弱層破壞。故本表格依據牆體中斷的程度折減其對應之耐震能力，若 2/3 以上牆體中斷，則耐震能力折減為 0.8 倍；若 1/3 至 2/3 之牆體中斷，則耐震能力折減為 0.9 倍；若 1/3 以下之牆體中斷，則不折減其耐震能力。值得注意的是，軟弱層顯著性具有方向性，故評估時只需考慮評估方向之牆量變化導致軟弱層之顯著性即可。(計算範例請見 4.6.1 台南縣崑山國小之評估)

3、裂縫銹蝕滲水等程度：

鋼筋混凝土構材若具有裂縫，代表混凝土品質不良或強度不足；保護層不足等因素使得鋼筋銹蝕膨脹，鋼筋銹蝕將會降低構材之強度，鋼筋銹蝕膨脹亦會導致混凝土剝落，並加速鋼筋鏽蝕的程度，這些因素都會影響結構物的耐震安全，故以結構物整體之裂縫銹蝕滲水等程度作為調整項目。若稍有裂縫銹蝕滲水等情形，則耐震能力折減為 0.95；若裂縫銹蝕滲水等情形較為嚴重，則耐震能力折減為 0.9；若無，則不折減其耐震能力。

4、變形程度：

結構體基礎若有明顯的差異沉陷，將會造成部分構材承受額外的載重，甚至造成嚴重變形，使其耐震能力降低。故若結構體有明顯的變形程度，則耐震能力折減為 0.9 倍；若無，則不折減其耐震能力。

5、平面耐震性：

典型的校舍建築多為數間並排相連，而呈現一字形的平面配置，其走廊形式為了滿足學生活動空間之要求，多將廊柱省略而成為懸臂走廊，故這類校舍結構系統之贅餘度較少。校舍之結構系統贅餘度越多，則於地震時越能發揮韌性與力量重分配的能力，將有助於減少地震時倒塌之可能性，故本研究將典型的校舍建築簡單分為三大類，一為廊外無柱或其他，其耐震能力不予調整；一為單走廊且廊外有柱或中間走廊，其結構系統無懸臂走廊之形式且贅餘度較多，故其耐震能力增加為 1.1 倍；最後一種為雙走廊且廊外有柱，其結構系統贅餘度最多，故其耐震能力增加為 1.2 倍。

6、短柱嚴重性：

一般老舊校舍之柱箍筋間距多為 20cm 至 30cm 左右，其剪力強度不高，且老舊校舍於設計時假設為純梁柱系統，並沒有考慮教室窗台及樓梯廁所等牆壁開氣窗所造成之短柱效應，然而這種短柱效應將會使得剪力容量不足之柱於地震時發生非預期之剪力破壞，導致結構韌性不足，若該校舍有過多之柱受到短柱效應之影響，將易造成校舍瞬間倒塌。故若校舍因窗台或氣窗造成

短柱現象之柱根數達到全部柱根數之 50% 以上，則耐震能力折減為 0.9 倍，若不足 50% 則不予折減其耐震能力。值得注意的是，短柱嚴重性具有方向性，故評估時只需考慮評估方向之短柱比率是否超過一半即可，另一方向開窗等因素造成之短柱效應不需考慮。

定義 q_1 至 q_6 分別代表上述六項調整因子，並定義一整體調整因子 Q 為上述六項調整因子之乘積，代表調整因子對於耐震能力的折減或增加：

$$Q = q_1 \times q_2 \times q_3 \times q_4 \times q_5 \times q_6 \dots\dots\dots(14)$$

耐震指標

定義一耐震指標 I_s 為基本耐震性能與調整因子之乘積，代表調整後之耐震性能：

$$I_s = E \times Q \dots\dots\dots(15)$$

本評估表之目的為找出於設計地震力下可能倒塌之校舍建築，故應忽略用途係數 I 所造成之效應，故以 80 分作為耐震能力堪慮之標準，若校舍調查所得之耐震指標 I_s 值低於 80 分者，表示其耐震能力頗為不足，確有耐震疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，將有嚴重損壞或倒塌之疑慮，應最優先進行耐震能力之補強設計與施工，以避免地震發生時造成嚴重傷亡；耐震指標 I_s 值介於 80 分及 100 分者，表示校舍耐震性之安全係數尚不符合耐震設計規範對於此等重要性建築物之耐震需求，仍有耐震性能不足的疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，將有可能發生嚴重結構上之破壞，其耐震能力之提升(補強工程)列為次優先對象；耐震指標 I_s 值高於 100 分者，表示其尚無耐震疑慮，若有相當於 475 年回歸週期之地震發生時，應不至於發生嚴重結構上之破壞，於地震發生後僅需進行簡單之修復即可繼續使用。