校舍結構材料強度選用對耐震能力評估之影響

邱智佑	莊慶福	林大森	李增欽*
國立聯合大學土木與防災工程學系	國立聯合大學土木與防災工程學系	國立聯合大學土木與防災工程學系	國立聯合大學土木與防災工程學系
研究生	助理教授	兼任助理教授	教授

摘要

近年來國家地震工程研究中心，為致力於提升老舊校舍的耐震能力，以防止校舍建築未來於大地震侵襲時，不致發生無預警之倒塌而造成學生傷亡，因而發展結構物側推分析方法用以進行耐震評估，此法已引起國內學界甚多之論著，並以多面向探討老舊校舍之耐震能力。惟對材料之取樣試驗進而選用其強度，該選用強度之精確度對耐震能力評估之影響如何?又，該材料強度變化與結構型式變化對耐震能力評估之關聯性如何?甚值探討。本文研究係以多變量統計分析理論及側推分析理論進行探討數種常見校舍型式之耐震能力，亦即以各種不同高寬比、長寬比之校舍，於混凝土及鋼筋材料強度變化下分析探討其耐震能力之關聯性。分析結果顯示: 耐震性能與材料強度及結構特性之間呈現高度相關性，應可藉由該關係曲線推估老舊校舍耐震性能隨材料強度增減之變化，俾迅速了解並提供實務評估與判斷之參考。

關鍵字：側推分析；耐震性能；迴歸分析; 材料強度

Influence of seismic capacity evaluation for school building with structure materials strength variation

Abstract

In recent years, the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) is to endeavor the seismic capacity enhancement for old school buildings, which will prevent the earthquake struck without warning and cause the building collapse and casualties. Meanwhile spur considerable articles to explore the old school buildings for seismic capacity. However, when we use the compression strength from testing samples, how it would affect the accuracy of seismic capacity from different selections? Further, what are the relationships between the variance strength of material and structure types to affect the evaluation of seismic capacity? It is worthy of study and exploration. This study intends to use multivariate statistical analysis and by the NCREE pushover analysis theory to explore several common types of structure, in order to obtain the relationships of variety different aspect of height-width ratio, length-width ratio, strength of concrete and reinforcement.

The results showed high correlation that seismic capacity between material properties and characteristics of structural. Seismic capacity can be estimated by the curve to quickly understand and provide practical reference for decision-making.

Keywords: pushover analysis; seismic capacity; regression analysis

一、前言

建築物耐震能力評估之發展迄今在國內已將近23年，其發展始自民國80年1月內政部建築研究所籌備處出版「現有鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊」[1]；於民國85年4月內政部建築研究所再出版「既有鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊」[2]，並將耐震評估分為三種，即「初步評估法」、「詳細評估法」與「詳細分析評估法」，而其中詳細分析評估法係以崩塌地表加速度Ac來代表建物之耐震能力；至民國88年12月，內政部建築研究所出版「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估法及推廣」專題研究計畫成果報告[3]，而將鋼筋混凝土建築物耐震能力評估方法分成「初步評估」與「詳細評估」兩種；於民國92年2月台灣省結構工程技師公會編著出版「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊」[4]及評估應用程式TSRC1，並大量運用於國內公有建築物之耐震評估，國家地震工程研究中心則於民國97年9月出版「校舍結構耐震評估與補強技術手冊（第一版）」[5]，運用於中小學，據以評估及補強以達耐震能力之求；民國98年11月出版「校舍結構耐震評估與補強技術手冊（第二版）」[6]以改善並修正分析參數以貼近校舍行為。

台灣自民國五十七學年度起，實施九年國民義務教育，但當年的經濟、財政、師資及既有的中學校舍數量嚴重不足。因此，省教育廳交付「省立成功大學建築工程系」進行國民中學教室標準圖設計，並推廣至全省。而該批教室始用迄今已約有45年左右。

鑑於民國88年921大地震震災之影響，近年來政府積極推動校舍耐震能力評估暨補強設計工程不遺餘力，因此依據該標準圖興建之校舍，迄今原已屆滿使用期限而應拆除之校舍，將得以補強方式繼續使用。而這類型的標準教室數量相當多，然而進行這些校舍耐震能力之評估者，未必能深切瞭解該校舍之原始設計圖說，並確切掌握設計參數，致使評估結果容或有失精確。近年來國家地震工程研究中心，為致力於提升老舊校舍的耐震能力，以防止未來校舍建築於大地震侵襲時，不致發生無預警之倒塌而造成學生傷亡，因而發展結構物側推分析方法用以進行耐震評估，此法已引起國內學界甚多之論著，並以多面向探討老舊校舍之耐震能力。王學誠[7]曾選用三棟校舍以TSRC程式分析其耐震能力，探討在不同之材料參數下之耐震能力與耐震初步評估結果進行探討。在我國921地震後，李佳勤[8]以台南市及南投縣之百間校舍耐震評估結果與921崩塌地表加速度地震資料庫相比對，顯示無適當耐震設計之校舍之破壞行為與921地震記錄之破壞情況相符，曾至堅[9]提出合理之塑鉸設定方法進行側推分析，以模擬貼近校舍之真實耐震能力。劉政宏[10]以強度韌性法及國家地震工程研究中心之輔助程式等方法，對收集到之十棟典型校舍進行分析並比對其差異性。賴永錚[11]提出側推位移參考點應以結構物之形心為主，以避免高估耐震能力。任世華[12]提出增建部分與原結構間容易發生錯動，經側推分析，補強前校舍塑鉸發展圖顯示多處已達有效開裂點。徐思穎[13]提出建築物於施工階段常有混凝土強度不同之情形，部分亦有增建之情形，因此，評估建築物因具不同之混凝土強度或有增建情形之耐震能力已廣受重視。張祐禎[14]以側推分析方法針對典型校舍進行參

數探討及分析，並提出若依既有建築物興建年期對鋼筋降伏強度與混凝土抗壓強度予以折減，則其分析之容量曲線為保守，但仍需審慎採用底層混凝土強度以免誤判破壞模式。

對材料之取樣試驗進而選用其強度，該選用強度之精確度對耐震能力評估之影響如何?又，該材料強度變化與結構型式變化對耐震能力評估之關聯性如何?甚值探討。本文研究係依側推分析理論進行探討不同高寬比之標準圖校舍，於混凝土及鋼筋材料強度變化下之耐震能力關聯性。

二、分析方法

2.1 典型國民中學教室標準校舍說明

民國57年，教育廳交付「省立成功大學建築工程系」進行國民中學教室標準圖設計，並推廣至全省。而該標準圖之設計要求有下列數項：

(1) 短向廊外無柱為單跨懸臂式走廊型式。
(2) 長向每一教室單元僅具單柱支撐。
(3) 屋頂板為山形褶板，版厚 9cm，其餘樓層樓板厚為 13cm。
(4) 每三間教室搭配樓梯及廁所為一標準單元，校方可依需求排列組合。
(5) 混凝土設計強度為 fc’=175 kgf/cm^2。
(6) 二樓以上柱箍筋採用 Φ= 6mm 圓鐵鋼筋。
(7) 固定隔間磚牆施工時，均需先砌完磚牆後始得灌梁、柱混凝土。

圖 1(a) 標準國中校舍背立面圖

圖 1(b) 標準國中校舍正立面圖

圖 1　標準國中校舍立面圖

2.2 分析程式及分析方法

本耐震評估工作係依據國家地震工程研究中心研發之「校舍結構耐震評估與補強技術手冊(NCREE-09-023)」及相關修訂文件所發展之非線性塑鉸定義計算梁、柱、RC牆及磚牆之構件非線性塑鉸，以ETABS 8版以上之版本進行整體結構耐震之側推分析，求得建築物基底剪力與屋頂側向位移之關係曲線，進而推估出建築物之性能目標地表加速度Ap值。其中NCREE 程式建議之彎矩塑鉸其位置設定於構材兩端，以曲線線型呈現撓剪破壞型式；剪力塑鉸假設位於構材中央，曲線線型呈現剪力破壞型式。而針對性能點之選取需滿足無發生豎向構材破壞情形、屋頂最大位移點不

超過2 %，以質心位移對應之最大基底剪力計算性能點。

本文以三間教室搭配一樓梯間及廁所之標準國中校舍為一基準，分析之校舍ETABS結構模型如圖2所示，其ETABS結構塑性鉸設定則如圖3所示。當分析在該型式之校舍為一層樓校舍時如圖2(a)、圖3(a)、二層樓校舍如圖2(b)、圖3(b)及三層樓校舍如圖2(c)、圖3(c)下，各樓層分析均以對應之不同混凝土強度與不同鋼筋強度下分析該校舍之長向耐震能力。分析之混凝土強度採計 70 kgf/cm^2、105 kgf/cm^2、140 kgf/cm^2、175 kgf/cm^2、210 kgf/cm^2、245 kgf/cm^2、280 kgf/cm^{2}等七種，鋼筋強度採用1400 kgf/cm^2、2100 kgf/cm^2、2400 kgf/cm^2、2800 kgf/cm^2、3500 kgf/cm^2、4200 kgf/cm^{2}等六種。

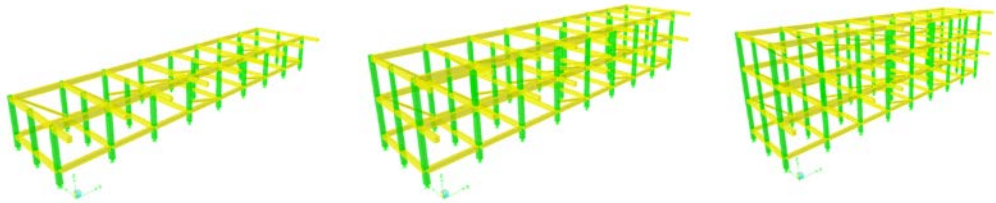

圖 2(a) 一層樓校舍模型　　圖 2(b) 二層樓校舍模型　　圖 2(c)三層樓校舍模型

圖 2　分析之校舍 ETABS 模型

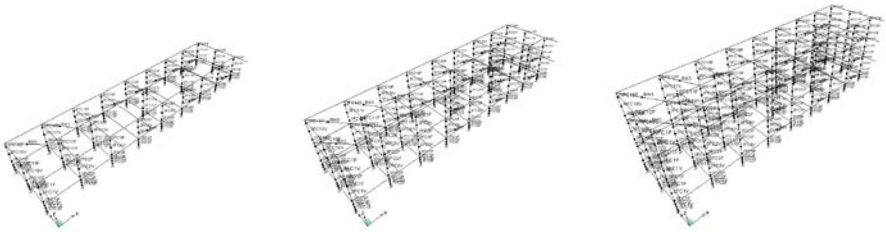

圖 3(a) 一層樓校舍模型　　圖 3(b) 二層樓校舍模型　　圖 3(c)三層樓校舍模型

圖 3　分析之校舍 ETABS 塑鉸設定圖

三、分析結果與討論

3.1　一層樓校舍分析結果

依據上述所建立之一層樓校舍結構模型，先固定鋼筋之降伏強度f_y=1400 kgf/cm^2，然後依序變化混凝土強度fc' (kgf/cm^2)，分別為70 kgf/cm^2、105 kgf/cm^2、140 kgf/cm^2、175 kgf/cm^2、210 kgf/cm^2、245 kgf/cm^2、至280 kgf/cm^2，而得各混凝土強度下之校舍崩塌地表加速度Ap值，將各Ap值經迴歸分析後，可得一層樓校舍在f_y=1400 kgf/cm^2 下之崩塌地表加速度迴歸分析圖。依此方式，其後再依序變化，鋼筋降伏強度f_y=2100 kgf/cm^2、2400 kgf/cm^2、2800 kgf/cm^2、3500 kgf/cm^2、與4200

kgf/cm^2，可分別得其他五條校舍崩塌地表加速度Ap之迴歸分析曲線，各種鋼筋強度之迴歸趨勢線如圖4所示。不同鋼筋強度之崩塌地表加速度Ap值，與混凝土強度fc’之迴歸趨勢線呈現為一對數型式，其相關係數R^2 值介於0.991-0.999之間，其符合度佳。

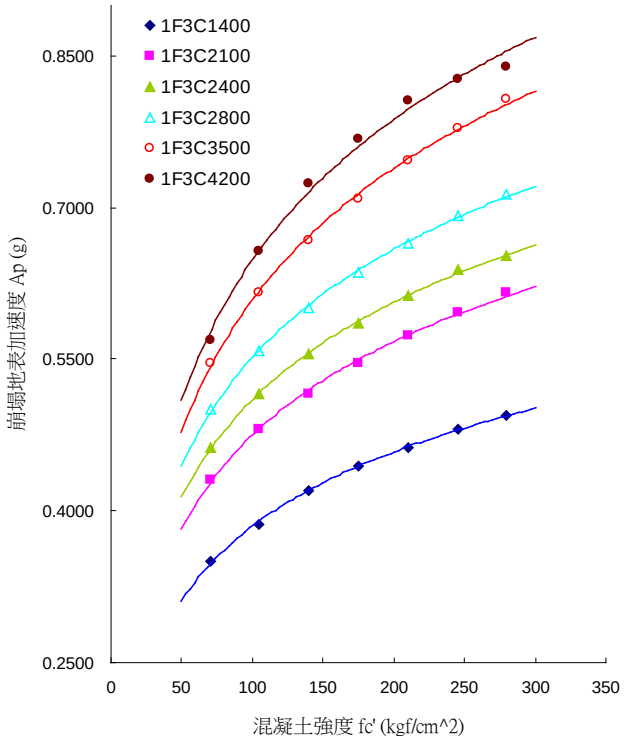

圖4 一層樓校舍崩塌地表加速度Ap與混凝土強度fc’關係圖

如圖4所示，一層樓校舍之崩塌地表加速度Ap值，隨混凝土抗壓強度之增加而提升；以f_y=2800 kgf/cm^{2}為例，混凝土強度由70 kgf/cm^{2}增加至280 kgf/cm^{2}時，其Ap值由0.5002 g 提升至0.7133 g，約提升43%。因此，如表1所示，若以混凝土強度210 kgf/cm^{2}及對應之崩塌地表加速度Ap值作為正規化之基準時，可知當混凝土強度降低67%時，亦即混凝土強度210 kgf/cm^{2}降低至140kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將降低為90%。如表2，若再考量鋼筋強度由2800 kgf/cm^{2}降至2400 kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將再降低為84%。

表1 一層樓校舍崩塌地表加速度Ap與混凝土強度fc’正規化彙整

混凝土強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
70	0.33	0.5002	0.75	-25%
105	0.50	0.5581	0.84	-16%
140	0.67	0.6011	0.90	-10%
175	0.83	0.6354	0.96	-4%
210	1.00	0.6652	1.00	0
245	1.17	0.6925	1.04	+4%
280	1.33	0.7133	1.07	+7%

表2 一層樓校舍崩塌地表加速度Ap值與鋼筋強度fy正規化彙整

鋼筋強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
1400	0.50	0.4195	0.70	-30%
2100	0.75	0.5164	0.86	-14%
2400	0.86	0.5547	0.92	-8%
2800	1.00	0.6011	1.00	0
3500	1.25	0.6682	1.11	+11%
4200	1.50	0.7242	1.20	+20%

3.2 二層樓校舍分析結果

同理，依據建立之二層樓校舍結構模型，先固定鋼筋之降伏強度f_y=1400 kgf/cm^2，然後依序變化混凝土強度fc' (kgf/cm^2)，分別為70 kgf/cm^2、105 kgf/cm^2、140 kgf/cm^2、175 kgf/cm^2、210 kgf/cm^2、245 kgf/cm^2、至280 kgf/cm^2，而得各混凝土強度下之校舍崩塌地表加速度Ap值，將各Ap值經迴歸分析後，可得二層樓校舍在f_y=1400 kgf/cm^2 下之崩塌地表加速度迴歸分析圖。依此方式，其後再依序變化，鋼筋降伏強度f_y=2100 kgf/cm^2、2400 kgf/cm^2、2800 kgf/cm^2、3500 kgf/cm^2、與4200 kgf/cm^2，可分別得其他五條校舍崩塌地表加速度Ap值之迴歸分析圖。經迴歸分析後，二層校舍在不同鋼筋強度下之崩塌地表加速度Ap值與混凝土強度fc' (kgf/cm^2)關係圖如圖5。不同鋼筋強度之崩塌地表加速度Ap值，與混凝土強度fc'之迴歸趨勢線呈現為一對數型式，其相關係數R^2 值介於0.974-0.997之間，其符合度佳。

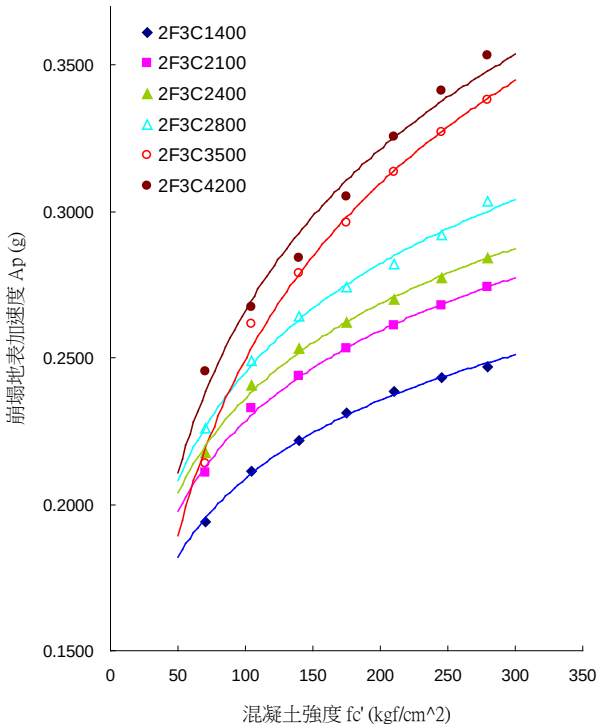

圖5 二層樓校舍崩塌地表加速度Ap與混凝土強度fc'關係圖

如圖5所示，二層樓校舍之崩塌地表加速度Ap值，隨混凝土抗壓強度之增加而提升；以f_y=2800 kgf/cm^{2}為例，混凝土強度由70 kgf/cm^{2}增加至280 kgf/cm^{2}時，其Ap值由0.2258 g 提升至0.3034 g，約提升34%。因此，如表3所示，若以混凝土強度210 kgf/cm^{2}及對應之崩塌地表加速度Ap值作為正規化之基準時，可知當混凝土降低67%時，亦即混凝土強度210 kgf/cm^{2}降低至140 kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將降低為94%。如表4，若再考量鋼筋強度由2800 kgf/cm^{2}降至2400 kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將再降低為90%。

表3 二層樓校舍崩塌地表加速度Ap與混凝土強度fc'正規化彙整

混凝土強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
70	0.33	0.2258	0.80	-20%
105	0.50	0.2489	0.88	-12%
140	0.67	0.2641	0.94	-6%
175	0.83	0.2740	0.97	-3%
210	1.00	0.2818	1.00	0
245	1.17	0.2919	1.04	+4%
280	1.33	0.3034	1.08	+8%

表4 二層樓校舍崩塌地表加速度Ap值與鋼筋強度fy正規化彙整

鋼筋強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
1400	0.50	0.2220	0.84	-16%
2100	0.75	0.2440	0.92	-8%
2400	0.86	0.2534	0.96	-4%
2800	1.00	0.2641	1.00	0
3500	1.25	0.2787	1.06	+6%
4200	1.50	0.2842	1.08	+8%

3.3 三層樓校舍分析結果

依據建立之三層樓校舍結構模型，先固定鋼筋之降伏強度f_y=1400 kgf/cm^2，然後依序變化混凝土強度fc' (kgf/cm^2)，分別為70 kgf/cm^2、105 kgf/cm^2、140 kgf/cm^2、175 kgf/cm^2、210 kgf/cm^2、245 kgf/cm^2、至280 kgf/cm^2，而得各混凝土強度下之校舍崩塌地表加速度Ap值，將各Ap值經迴歸分析後，可得三層樓校舍在f_y=1400 kgf/cm^2 下之崩塌地表加速度迴歸分析圖。依此方式，其後再依序變化，鋼筋降伏強度f_y=2100 kgf/cm^2、2400 kgf/cm^2、2800 kgf/cm^2、3500 kgf/cm^2、與4200 kgf/cm^2，可分別得其他五條校舍崩塌地表加速度Ap值之迴歸分析圖。經迴歸分析後，三層校舍在不同鋼筋強度下之崩塌地表加速度Ap值與混凝土強度fc' (kgf/cm^2)關係圖如圖6。不同鋼筋強度之崩塌地表加速度Ap值，與混凝土強度fc'之迴歸趨勢線呈現為一對數型式，其相關係數R^2 值介於0.986-0.990之間，其符合度佳。

如圖6所示，三層樓校舍之崩塌地表加速度Ap值，隨混凝土抗壓強度之增加而提

升；以f_y=2800 kgf/cm^{2}為例，混凝土強度由70 kgf/cm^{2}增加至280 kgf/cm^{2}時，其Ap值由0.1503 g 提升0.2225 g，約提升48%。

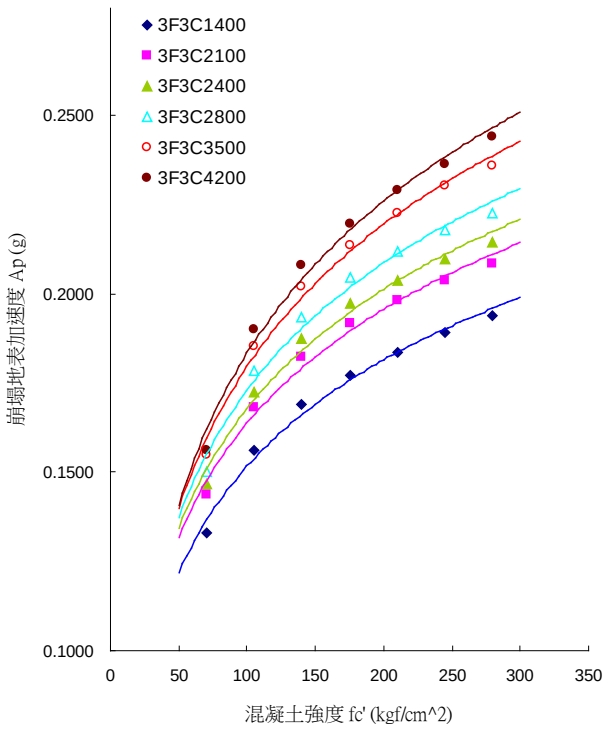

圖6 三層樓校舍崩塌地表加速度Ap與混凝土強度fc'關係圖

表5 三層樓校舍崩塌地表加速度Ap值與混凝土強度fc'正規化彙整

混凝土強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
70	0.33	0.1503	0.71	-29%
105	0.50	0.1783	0.84	-16%
140	0.67	0.1933	0.91	-9%
175	0.83	0.2044	0.96	-4%
210	1.00	0.2120	1.00	0
245	1.17	0.2177	1.03	+3%
280	1.33	0.2225	1.05	+5%

表6 三層樓校舍崩塌地表加速度Ap值與鋼筋強度fy正規化彙整

鋼筋強度		崩塌地表加速度		
(kgf/cm^2)	正規化	(g)	正規化	百分比
1400	0.50	0.1688	0.87	-13%
2100	0.75	0.1823	0.94	-6%
2400	0.86	0.1875	0.97	-3%
2800	1.00	0.1933	1.00	0
3500	1.25	0.2019	1.04	+4%
4200	1.50	0.2082	1.08	+8%

因此，如表5所示若以混凝土強度210 kgf/cm^{2}及對應之崩塌地表加速度Ap值作為正規化之基準時，可知當混凝土降低67%時，亦即混凝土強度210 kgf/cm^{2}降低至140 kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將降低為91%。如表6，若再考量鋼筋強度由2800 kgf/cm^{2}降至2400 kgf/cm^{2}時，其崩塌地表加速度Ap值將再降為88%。

經上述案例分析，國民中學之標準三間教室校舍，其長向耐震能力Ag與混凝土強度fc'及鋼筋強度fy互為顯著因子：

(1) 以鋼筋強度 fy=2800 kgf/cm^2、二層校舍為例，當混凝土強度由 210 kgf/cm^2 減弱 50%至 105 kgf/cm^2 時，可估計出其對應之耐震能力將衰減約 11%為原來耐震能力之 89%。而據此結果可以給予分析者在耐震能力分析初期，即可預測採用分析之混凝土強度將影響評估耐震能力之大小。

(2) 現況老舊國中校舍多數係依國民中學教室標準圖施工，圖說為三層樓設計。初期依圖說僅施做一層樓校舍，因此，本文分析時之一層樓配筋量係採標準圖說之一樓配筋量進行分析，故其分析所得之崩塌地表加速度 Ap 值偏高。依續分析增建為二層樓校舍及再增建為三層樓校舍之崩塌地表加速度 Ap 值，由圖 4 至圖 6 即可以了解其崩塌地表加速度 Ap 值逐漸降低。

四、結論

本文依ETABS房屋結構分析軟體建立結構模型，再以國家地震中心所提供之NCREE側推輔助程式，進行國民中學三間標準教室大小校舍之耐震能力地表崩塌加速度Ap值之評估，獲致以下結論：

(1) 國民中小學校舍耐震能力評估之地表崩塌加速度 Ap 值隨混凝土強度 fc'之增強而增加，其迴歸分析之關係曲線呈一自然對數線型。該曲線復隨鋼筋降伏強度之增強其 Ap 值則約略平行上升，惟線型則更呈陡峭。

(2) 依本文分析，當校舍混凝土強度 fc'由 210 kgf/cm^2 下降至 140 kgf/cm^2 時，其一層樓校舍、二層樓校舍與三層樓校舍之崩塌地表加速度將減弱為原有之 90%、94%與 91%，顯現混凝土強度減小對耐震能力之影響。

(3) 依本文分析，當校舍混凝土強度 fc'由 210 kgf/cm^2 下降至 140 kgf/cm^2 時，若鋼筋強度亦由 2800 kgf/cm^2 降至 2400 kgf/cm^2 時，其一層樓校舍、二層樓校舍與三層樓校舍之崩塌地表加速度將減弱為原有之 84%、90%與 88%，顯現鋼筋強度減少對耐震能力之影響。

上述分析結果顯示: 耐震性能與材料強度及結構特性之間呈現高度相關性，依本文研究結果，可藉由該關係曲線推估老舊校舍耐震性能隨材料強度增減之變化，而可提供校舍建築耐震能力實務評估與判斷之參考。

參考文獻

1. 內政部建築研究所籌備處,「現有鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊」,營建雜誌社，1991。
2. 內政部建築研究所，「既有鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊」，1996。
3. 內政部建築研究所，「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估法及推廣」，1999。
4. 台灣省結構工程技師公會，「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估手冊(附磁片)」，科技圖書，2003。
5. 鍾立來、葉勇凱、簡文郁、柴駿甫、蕭輔沛、沈文成、邱聰智、周德光、趙宜峰、楊耀昇、黃世建，「校舍結構耐震評估與補強技術手冊」，國家地震工程研究中心研究報告，編號 NCREE-08-023，2008。
6. 鍾立來、葉勇凱、簡文郁、蕭輔沛、沈文成、邱聰智、周德光、趙宜峰、楊耀昇、涂耀賢、柴駿甫、黃世建、孫啟祥，「校舍結構耐震評估與補強技術手冊第二版」，國家地震工程研究中心研究報告，編號 NCREE-09-023，2009。
7. 王學誠，「應用案例式推理於典型中小學教室 建築耐震能力初步評估系統之研究 」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，2003。
8. 李佳勤，「台灣中小學校舍結構耐震能力評估之研究」，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程研究所，2006。
9. 曾至堅，「低矮型校舍耐震能力詳細評估方法之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程學研究所，2007。
10. 劉政宏，「典型 RC 校舍結構耐震能力評估方法之比較」，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程研究所，2008。
11. 賴永錚，「校舍分析模式對耐震能力評估值的影響」，碩士論文，國立中興大學土木工程學研究所，2010。
12. 任世華，「校舍結構耐震性能評估—美濃案例校舍之研究」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，2010。
13. 徐思穎，「建築物混凝土強度對側推分析結果之影響」，碩士論文，中國科技大學土木與防災設計研究所，2011。
14. 張祐禎，「耐震評估參數之研究-以典型鋼筋混凝土校舍為例」，碩士論文，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所，2011。