

國家地震工程研究中心
NATIONAL CENTER FOR RESEARCH ON
EARTHQUAKE ENGINEERING

RC 學校建築
之震害分析與快速診斷研究

劉玉文 裘維平

報告編號：NCREE-02-031

中華民國九十一年十一月

RC 學校建築
之震害分析與快速診斷研究
A Study of Earthquake-Damage Investigation
And Fast Seismic Evaluation for R.C. School Buildings

*劉玉文 **裘維平

* 私立嘉南藥理科技大學工業安全衛生系教授

** 國立成功大學建築研究所研究生

國科會計畫編號：NSC-91-2711-3-319-001-SP-10

執行期間：91 年 1 月 1 日至 91 年 12 月 31 日

計畫主持人：劉玉文

執行單位：私立嘉南藥理科技大學工業安全衛生系

中華民國九十一年十一月

November 2002

摘 要

由 921 集集大地震之震害調查顯示，學校建築受到之震害程度遠較其他類型之民間建築為大。但學校是人才培育之場所，也是緊急災難時，居民避難最主要的地方，如此違反了原來設計的目標。因此，為避免類此潛在危機在未來地震中再度造成重大傷害，本研究分別從竹山鎮、國姓鄉及埔里鎮中之中小學校舍建築，挑選了其中 9 間學校的 16 棟校舍建築物，透過震害之分析及耐震診斷，瞭解其耐震能力不佳之原因；再從中挑選出受損較嚴重之三棟校舍，進行結構補強探討，其目標不僅需達到現行耐震規範之要求，更應滿足未來功能設計標準(Performance-Based Design Code)

本研究之執行包括校舍建築現況資料收集、建築圖說整理重繪、校舍建築震害原因分析與統計、利用靜態推垮曲線法 (Static Pushover Method) 診斷各校舍建築之耐震能力及三棟校舍之結構補強探討等五大部分，研究結果獲得結論如下：

1. 柱主筋之鋼筋比對於學校建築耐震能力影響甚鉅，其值以介於 2% 2.5% 為佳。
2. 橫向箍筋間距之大小，對於耐震能力之影響頗大，尤其當間距由 15cm 降至 10cm 時，耐震能力提升程度顯著增加。因此，箍筋間距之設置以 15cm 內為佳。
3. 混凝土品質之良窳對於學校建築物之耐震能力而言，每增減 70kg/cm²，其影響程度約在 ±15% 之間。
4. 柱的強軸方向配置於平行地震力之方向，對耐震能力之提升，極為顯著。
5. 校舍建築分期、分層增建，對建築物之耐震能力極為不利，每增建一層樓，其耐震能力下降約 30%。
6. 柱斷面加大補強工法，確實可有效提升建築物之耐震性能，以北山國中北棟校舍為例，補強後之耐震能力為補強前之 1.23 倍 1.84 倍。
7. 增設 RC 牆，確實可大幅提昇建築物之耐震能力。
8. 就功能設計標準而言，三種補強工法中，以柱斷面補牆工法及增設 RC 牆補強工法為佳，切割柱與窗台之隔離縫補強工法於切割後，建築物之耐震能力雖有些為增加，但不宜單獨使用。

關鍵字：學校建築、震害分析、耐震診斷、靜態推垮曲線、功能設計、結構補強

ABSTRACT

Many school buildings were seriously damaged in the Chi-Chi earthquake that struck Taiwan in 1999. In order to avoid the damage in the following earthquakes, it is necessary to investigate the performance of school buildings under seismic action. Firstly, this research surveyed 35 school buildings in Jushan, Guoshing and Puli. Secondly, for the purpose of quantifying aseismic ability of school buildings, this research investigated some parameters about the seismic vulnerability of 16 school buildings out of 35 school buildings. Finally, we strengthen 3 school buildings that were heavily damaged of 16 school buildings to meet the performance-based design code.

This paper includes five parts as collecting data of the present status of the school buildings, sorting and redrawing the illustration of the buildings, analyzing and counting the causes of the school buildings seismic damage, evaluating the aseismic ability of every school by static push-over method and discussing the structural strengthening of three school buildings.

The main results obtained in this research show that:

1. The reinforcing steel rate of pillars has great effect on the aseismic ability of school buildings, and 2%-2.5% is better.
2. The space between the transverse stirrups has great effect on the aseismic ability. Especially when the space decreases from 15cm to 10cm, the aseismic ability is significantly increased. So, it is better that the stirrup space is within 15cm.
3. As for the effect that the concrete quality plays on the aseismic ability of school buildings, increase $70\text{kg}/\text{cm}^2$, and its effect degree is about $\pm 15\%$.
4. When the axle direction of the pillar is parallel to that of the seismic force, it can significantly increase the aseismic ability.
5. The school buildings are added by stages or stories, which is detrimental to the aseismic ability. Add one more storey, and its aseismic ability will approximately decrease by 30%.
6. Pillar section amplifying and reinforcing method can efficiently increase the aseismic ability of buildings. For example, after the northern building of Beishan junior school, its aseismic ability is increased by 1.23-1.84 times.
7. Establishing RC walls can greatly increase the aseismic ability of buildings.
8. As for the performance-based design code, among the three kinds of restrengthening methods, pillar section amplifying and reinforcing method as well as establishing RC walls is better. After the isolated slot between pillars and windows is cut with reinforcing method, although its aseismic ability of buildings is increased a little, it cannot be independently used.

Keyword : school building, damage analysis, aseismic evaluation, static pushover method, performance-based design, structural strengthening.

目 錄

表目錄	
圖目錄	
相片目錄	
附圖目錄	
符號表	

第一章 緒論

1-1 研究背景與動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 文獻回顧	2
1-3.1 震害調查方面	3
1-3.2 結構系統方面	4
1-3.3 耐震診斷方面	4
1-3.4 耐震補強方面	6
1-4 研究方法及論文架構	6
1-4.1 震害調查與分析	7
1-4.2 學校建築之耐震診斷	7
1-4.3 學校建築之補強	7
1-5 適用範圍	8

第二章 學校建築震害分析

2-1 學校建築結構系統介紹	9
2-1.1 平面配置	9
2-1.2 單元教室柱距配置	10
2-1.3 走廊配置及其結構形式	10
2-1.4 結構材料種類	12
2-1.5 屋頂形式	13
2-2 調查範圍	13
2-2.1 調查地區之選擇	13

2-2.2 調查結果	14
2-3 學校建築之震害案例分析	14
2-3.1 地質狀況說明	14
2-3.2 案例說明	16
2-3.3 損害程度比較	16
2-3.4 震害統計分析	16
2-4 本章小結	18

第三章 快速耐震診斷

3-1 基本假設	21
3-1.1 質量堆積於樓版	21
3-1.2 剪力房屋	21
3-2 靜態推垮曲線法	22
3-2.1 力的加載方式	22
3-2.2 累加各垂直構材之 Q - 曲線	22
3-2.3 剛域	23
3-3 RC 柱的側向載重與側向位移之非線性曲線	23
3-3.1 RC 柱各階段載重	24
3-3.2 RC 柱各階段之剛度與位移	26
3-4 RC 牆的側向載重與側向位移之非線性曲線	28
3-4.1 RC 牆各階段載重	28
3-4.2 RC 牆各階段之剛度與位移	30
3-5 磚牆的側向載重與側向位移之非線性曲線	31
3-5.1 磚牆的強度	32
3-5.2 磚牆的剛度與位移	34
3-6 建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r 與崩塌地表加速度 a_c	35
3-6.1 建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r	35
3-6.2 崩塌地表加速度 a_c	36
3-6.3 任意樓層崩塌之耐震診斷	40
3-7 本章小結	41

第四章 學校建築案例之耐震能力分析

4-1 實例分析之校舍介紹	43
4-2 耐震能力分析結果	44
4-3 現場損害程度比較	49
4-4 本章小結	51

第五章 提升學校建築耐震能力之探討

5-1 影響耐震能力參數之探討	53
5-1.1 混凝土強度對學校建築耐震能力之影響	53
5-1.2 柱主筋鋼筋比對學校建築耐震能力之影響	54
5-1.3 柱橫向箍筋間距對學校建築耐震能力之影響	54
5-1.4 柱配置方式對學校建築耐震能力之影響	55
5-1.5 建築物樓層數對學校建築耐震能力之影響	56
5-2 補強標準及常用工法介紹工法	56
5-2.1 補強標準介紹	57
5-2.2 耐震補強常用工法介紹	59
5-3 實際案例比較	61
5-3.1 柱與窗台間切隔離縫補強工法	61
5-3.2 加大柱斷面補強工法	62
5-3.3 增設 RC 剪力牆補強工法	63
5-4 本章小結	64

第六章 結論與建議

6-1 結論	67
6-2 建議	68

表	69
圖	85
相片	110
參考文獻	115
附圖	118

表目錄

表 2-1 不同走廊型式特徵與柱單位載重	69
表 2-2 竹山、國姓、埔里各測站位置表	70
表 2-3 竹山、國姓、埔里各測站測得之最大加速度數值	70
表 2-4 本文調查之學校損壞情況	71
表 2-5 嚴重損壞與輕微損壞校舍之比較	72
表 2-6 磚牆與 RC 牆各種圍束情況的剪應力	72
表 2-7 本文調查學校之底層壁量比與單位柱載重	73
表 4-1 本文校舍耐震診斷案例表	74
表 4-2 竹山國小西北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表	74
表 4-3 延平國小東棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類	75
表 4-4 北山國中北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表	75
表 4-5 國姓國中南棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表	76
表 4-6 育英國小北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表	76
表 4-7 愛蘭國小北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表	77
表 4-8 耐震診斷結果	77
表 4-9 耐震診斷結果與 921 地震後校舍受損狀況比較表	78
表 5-1 不同混凝土強度之耐震診斷結果	78
表 5-2 不同柱主筋之鋼筋比之耐震診斷結果	79
表 5-3 不同柱橫向箍筋間距之耐震診斷結果	79
表 5-4 柱轉置 90° 之耐震診斷結果	80
表 5-5 不同樓層數之耐震診斷結果	80
表 5-6 Vision 2000 委員會建議之建築結構最低設計要求	80
表 5-7 921 集集地震前後台灣地區主要都市設計地表加速度(PGA)修正表	81
表 5-8 強震區設計標準(以台南市為例)	81
表 5-9 切隔離縫後之耐震診斷結果	82
表 5-10 柱斷面加大之耐震診斷結果	82
表 5-11 RC 牆補強後之耐震診斷結果	83
表 5-12 補強後之耐震能力與現行法規及功能設計標準比較表	84

圖目錄

圖 1-1 研究方法流程架構圖	85
圖 2-1 不良之耐震規劃設計的平面	86
圖 2-2 良好之耐震規劃設計的平面	86
圖 2-3 單元教室長向兩跨配置型式	87
圖 2-4 單元教室長向三跨配置型式	87
圖 2-5 耐震性良好的走廊型式	88
圖 2-6 地震時走廊端部結構容易遭到破壞	88
圖 2-7 九二一地震斷層破裂帶及震央分布圖	89
圖 2-8 本文調查學校與斷層位置關係圖	90
圖 2-9 短向壁量比與單位柱載重關係圖	91
圖 2-10 長向壁量比與單位柱載重關係圖	91
圖 2-11 校舍樓層數與單位柱載重關係圖	92
圖 2-12 軸力與彎矩作用下的破壞包絡線面	92
圖 3-1 靜態推垮曲線法豎向外力加載方式	93
圖 3-2 考慮柱梁接合剛域的支柱示意圖(a)	93
圖 3-3 考慮柱梁接合剛域的支柱示意圖(b)	93
圖 3-4 磚牆劈裂路徑與有效寬度示意圖	94
圖 3-5 劉白梅修正後磚牆水平極限剪力與高寬比的關係	94
圖 3-6 我國現行建築技術規則基本假定	95
圖 3-7 利用等能量原則側向載重與側向位移非線性曲線轉換成等值二折線(最高峰值 Q 時)	96
圖 3-8 利用等能量原則將水平載重與水平位移非線性曲線轉換成等值二折線(過了 Q 之後的峰值)	96
圖 3-9 建築物一樓耐震診斷流程圖	97
圖 4-1 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖	98
圖 4-2 竹山鎮延平國小東棟校舍一樓耐震診斷圖	98
圖 4-3 國姓鄉北山國中北棟校舍一樓耐震診斷圖	99
圖 4-4 國姓鄉國姓國中南棟校舍一樓耐震診斷圖	99
圖 4-5 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖	100
圖 4-6 埔里鎮愛蘭國小北棟校舍一樓耐震診斷圖	100
圖 5-1 三棟受損較嚴重之校舍於不同混凝土強度之耐震診斷圖	101
圖 5-2 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($f_c'=130\text{kg/cm}^2$)	101
圖 5-3 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($f_c'=280\text{kg/cm}^2$)	102

圖 5-4 三棟受損較嚴重之校舍於不同鋼筋比時之耐震診斷圖	102
圖 5-5 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($r=1.32\%$)	103
圖 5-6 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($r=3.38\%$)	103
圖 5-7 三棟受損較嚴重之校舍於不同箍筋間距時之耐震診斷圖	104
圖 5-8 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($s_h=10\text{cm}$)	104
圖 5-9 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($s_h=30\text{cm}$)	105
圖 5-10 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 (柱轉置九十度後) ..	105
圖 5-11 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 (柱轉置九十度後)	106
圖 5-12 竹山鎮延平國小東棟校舍一樓耐震診斷圖 (加一層樓後)	106
圖 5-13 國姓鄉國姓國中南棟校舍一樓耐震診斷圖 (加一層樓後)	107
圖 5-14 埔里鎮愛蘭國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 (加一層樓後)	107
圖 5-15 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 (切隔離縫後)	108
圖 5-16 國姓鄉北山國中北棟校舍一樓耐震診斷圖 (加大柱斷面)	108
圖 5-17 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 (不同 RC 牆寬時)	109
圖 5-18 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖	109

相片目錄

相片 2-1	南投縣國姓鄉國姓國中 - RC 造平屋頂	110
相片 2-2	南投縣竹山鎮延和國中 - RC 造斜屋頂	110
相片 2-3	台南縣白河鎮白河國小 - 鋼浪板曲面屋頂	110
相片 2-4	南投縣國姓鄉北山國中 - RC 造斜屋頂	110
相片 2-5.1	南投縣竹山鎮竹山國小 - 正面無廊柱,柱被嚴重剪壞	110
相片 2-5.2	南投縣竹山鎮竹山國小 - 窗台柱嚴重遭到剪壞	110
相片 2-5.3	南投縣竹山鎮竹山國小 - 箍筋彎勾長度 角度不足,柱心混凝土碎裂	110
相片 2-6	南投縣竹山鎮延平國小 - 校區後方音樂教室,正面有廊柱,921 地震後現況	110
相片 2-7.1	南投縣竹山鎮延平國中 - 西棟校舍 921 地震修補後現況為正面有廊柱系統	111
相片 2-7.2	南投縣竹山鎮延平國中 - 因為有設置翼牆,故於 921 地震後損傷輕微	111
相片 2-8.1	南投縣國姓鄉國姓國中 - 南棟校舍 921 地震修補後現況,為正面有廊柱系統	111
相片 2-8.2	南投縣國姓鄉國姓國中 - 南棟校舍,921 地震修補後正立面現況	111
相片 2-9.1	南投縣國姓鄉國姓國中 - 東棟校舍,921 地震後正立面現況	111
相片 2-9.2	南投縣國姓鄉國姓國中 - 東棟校舍,因有設置翼牆,故於 921 地震後損傷輕微	111
相片 2-10.1	南投縣國姓鄉北山國中 - 東棟校舍,921 地震修補後正立面現況	112
相片 2-10.2	南投縣國姓鄉北山國中 - 東棟校舍,因為有設置翼牆,故於 921 地震後損傷輕微	112
相片 2-11	南投縣埔里鎮南光國小 - C 棟校舍 921 地震前原貌	112
相片 2-12.1	南投縣埔里鎮南光國小 - D 棟校舍 921 地震前原貌	112
相片 2-12.2	南投縣埔里鎮南光國小 - D 棟校舍於 921 地震後,受損嚴重,1F 柱被嚴重剪壞	112
相片 2-13.1	南投縣埔里鎮南光國小 - E 棟校舍 921 地震前原貌 - 正立面	112
相片 2-13.2	南投縣埔里鎮南光國小 - E 棟校舍 921 地震前原貌 - 背立面	112
相片 2-14.1	南投縣埔里鎮南光國小 - F 棟校舍 921 地震前原貌 - 未增建 3F 前之正立面	112
相片 2-14.2	南投縣埔里鎮南光國小 - F 棟校舍 921 地震前原貌 - 增建 3F 後之正立面	113
相片 2-14.3	南投縣埔里鎮南光國小 - F 棟校舍 921 地震前原貌 - 增建 3F 後之背立面	113
相片 2-15	南投縣埔里鎮南光國小 - D 棟校舍於 921 地震後,底層柱被剪斷十分嚴重	113
相片 2-16	南投縣埔里鎮南光國小 - 柱頭壓力破壞,主筋挫屈,箍筋被拉開	113
相片 2-17	南投縣埔里鎮南光國小 - F 棟校舍於 921 地震後,整棟崩塌	113
相片 2-18	南投縣埔里鎮育英國小 - 北棟校舍 921 地震前原貌 - 正立面	113
相片 2-19.1	南投縣埔里鎮愛蘭國小 - 北棟校舍地震後現況,雙邊走廊,單側有廊柱系統	113
相片 2-19.2	南投縣埔里鎮愛蘭國小 - 北棟校舍地震後現況,雙邊走廊,另一側為無廊柱系統	113
相片 2-20	南投縣埔里鎮南光國小 - 窗台柱遭受嚴重破壞情形	114
相片 2-21	南投縣埔里鎮南光國小 - 高窗短柱剪壞情形	114
相片 5-1	南投縣埔里鎮南光國小 - 柱頭發生嚴重破壞,柱頭暴開,鋼筋嚴重外露	114

附圖目錄

1-1	竹山國小西北棟校舍一樓平面圖	118
1-2	竹山國小西北棟校舍正立面圖	118
1-3	竹山國小西北棟校舍一樓結構平面圖	118
1-4	竹山國小西北棟校舍一樓柱配筋圖	119
2-1	延平國小東棟校舍一樓平面圖	119
2-2	延平國小東棟校舍正立面圖	119
2-3	延平國小東棟校舍一樓結構平面圖	120
2-4	延平國小東棟校舍一樓柱配筋圖	120
3-1	延和國中西棟校舍一樓平面圖	120
3-2	延和國中西棟校舍正立面圖	121
3-3	延和國中西棟校舍一樓結構平面圖	121
3-4	延和國中西棟校舍一樓柱配筋圖	121
4-1	國姓國中南棟校舍一樓平面圖	122
4-2	國姓國中南棟校舍正立面圖	122
4-3	國姓國中南棟校舍一樓結構平面圖	122
4-4	國姓國中南棟校舍一樓柱配筋圖	123
5-1	國姓國中東棟校舍一樓平面圖	123
5-2	國姓國中東棟校舍正立面圖	123
5-3	國姓國中東棟校舍一樓結構平面圖	124
5-4	國姓國中東棟校舍一樓柱配筋圖	124
6-1	北山國中北棟校舍一樓平面圖	124
6-2	北山國中北棟校舍正立面圖	125
6-3	北山國中北棟校舍一樓結構平面圖	125
6-4	北山國中北棟校舍一樓柱配筋圖	125
7-1	北山國中東棟校舍一樓平面圖	126
7-2	北山國中東棟校舍正立面圖	126
7-3	北山國中東棟校舍一樓結構平面圖	127
7-4	北山國中東棟校舍一樓柱配筋圖	127
8-1	南光國小 C 棟校舍一樓平面圖	128
8-2	南光國小 C 棟校舍正立面圖	128
8-3	南光國小 C 棟校舍一樓結構平面圖	129

8-4	南光國小 C 棟校舍一樓柱配筋圖	129
9-1	南光國小 D 棟校舍一樓平面圖	130
9-2	南光國小 D 棟校舍正立面圖	130
9-3	南光國小 D 棟校舍一樓結構平面圖	131
9-4	南光國小 D 棟校舍一樓柱配筋圖	131
10-1	南光國小 E 棟校舍一樓平面圖	132
10-2	南光國小 E 棟校舍正立面圖	132
10-3	南光國小 E 棟校舍一樓結構平面圖	132
10-4	南光國小 E 棟校舍一樓柱配筋圖	133
11-1	南光國小 F 棟校舍一樓平面圖	133
11-2	南光國小 F 棟校舍正立面圖	133
11-3	南光國小 F 棟校舍一樓柱配筋圖	134
11-4	南光國小 F 棟校舍一樓結構平面圖	134
12-1	育英國小北棟校舍一樓平面圖	134
12-2	育英國小北棟校舍正立面圖	134
12-3	育英國小北棟校舍一樓結構平面圖	135
12-4	育英國小北棟校舍一樓柱配筋圖	135
13-1	愛蘭國小北棟校舍一樓平面圖	135
13-2	愛蘭國小北棟校舍正立面圖	136
13-3	愛蘭國小北棟校舍一樓柱配筋圖	136
13-4	愛蘭國小北棟校舍一樓結構平面圖	136
14-1	宏仁國中校舍一樓平面圖	137
14-2	宏仁國中校舍正立面圖	137
14-3	宏仁國中校舍背立面圖	137
14-4	宏仁國中校舍側立面圖	138
14-5	宏仁國中校舍一樓結構平面圖	138
14-6	宏仁國中校舍一樓柱配筋圖	139

符號表

A	: RC 柱斷面積
A_b'	: 邊界柱突出肢的總面積 (mm^2)
A_c	: 柱斷面積
A_{ch}	: 邊界柱在 45° 破壞路徑被切過的水平箍筋剖面積 (mm^2)
A_{fi}	: 第 i 層之樓地版面積
A_g	: RC 柱或 RC 牆斷面積 (mm^2)
A_g'	: RC 牆邊界柱的全斷面積 (mm^2)
A_{gt}	: 鋼筋轉換成等值混凝土之柱全斷面積 (mm^2)
A_h	: 箍筋剖面積 (mm^2)
A_{vl}	: RC 牆與邊界柱在 45° 破壞路徑被切過的垂直筋剖面積 (mm^2)
A_{v2}	: RC 牆與邊界柱在水平破壞路徑被切過的垂直筋剖面積 (mm^2)
$A_{w,BR}$: 磚牆之斷面積
A_{wh}	: RC 牆在 45° 破壞路徑被切過的水平筋剖面積 (mm^2)
$A_{w,RC}$: RC 牆之斷面積
a_c	: 崩塌地表加速度
B	: RC 牆撓曲切線剛度的折減係數
b	: 柱寬 (mm)
C_b	: 撓曲切線剛度的折減係數
C_s	: 剪力切線剛度折減係數
c	: 極限點割線彈性模數的修正係數
d	: 有效柱深 (mm)
E	: 彈性模數
E_c	: 混凝土的彈性模數, 以 $4696\sqrt{f_c'}$ 計算 (MPa)
$(EI)_{eff}$: 有效撓曲剛度
E_u	: 極限點割線彈性模數 (MPa)
f_b'	: 紅磚的單軸抗壓強度
f_c'	: 為混凝土標稱抗壓強度 (MPa)
f_{mb}	: 紅磚與砂漿介面的抗張強度 (MPa)
f_r	: 混凝土的破裂模數
f_t	: 磚牆達極限破壞時的抗張強度 (MPa)

f_{ib}	: 紅磚的抗張強度 (MPa)
f_{tm}	: 砂漿的抗張強度 (MPa)
f_{yh}	: 箍筋的降伏強度 (MPa)
G	: 剪力模數
$(GA)_{eff}$: 有效剪力剛度
I	: 轉動慣量
I_b'	: 邊界柱突出肢對中央軸的轉動慣量 (mm^4)
I_g	: 轉動慣量, 為開裂前 RC 柱剖面忽略鋼筋的轉動慣量 (mm^4)
I_{gt}	: 鋼筋等值轉換後的轉動慣量 (mm^4)
M_{cr}	: 開裂彎矩 (N-mm)
m	: 軸力修正係數
N	: 軸壓力 (N)
S_h	: 箍筋間距 (mm)
s	: 矩形剖面形狀因子
Q	: 側向載重
Q_{cr}	: 開裂載重
Q_f	: 破壞載重
Q_{fc}	: 撓曲開裂載重
Q_{fu}	: 撓曲極限載重
Q_s	: 箍筋提供的剪力強度 (N)
Q_{sc}	: 剪力開裂載重
Q_{su}	: 剪力極限載重
Q_u	: 極限載重
Q_r	: 建築物診斷樓層之保有耐力 (N)
Q_y	: 降伏載重
t	: 磚牆厚 (mm)
t_c	: 牆邊界柱的厚度 (mm)
t_w	: RC 牆的厚度 (mm)
W_{eff}	: 磚牆有效寬度 (mm)
W_T	: RC 牆總寬度, 包含邊界柱 (mm)
W_W	: RC 牆淨寬度 (mm)
y	: RC 柱或 RC 牆斷面深 (mm)
pp	: 磚牆中點主張應力

\hat{x}	: 磚牆中央點 X 向的正向應力 (MPa)
\hat{y}	: 磚牆中央點 Y 向的正向應力 (MPa)
\hat{xy}	: 磚牆中央點所受的剪應力 (MPa)
\hat{i}	: 剪力破壞的摩擦係數
	: 波松比
\tilde{n}	: 主筋配筋比
s	: 橫向剪力筋之體積比
	: 磚牆的側向位移 (mm)
B	: 撓曲位移
B_{cr}	: 撓曲開裂位移 (mm)
B_u	: 撓曲極限位移 (mm)
S	: 剪力位移
S_{cr}	: 剪力開裂位移 (mm)
S_u	: 剪力極限位移 (mm)
T	: 總位移
T_{cr}	: 總開裂位移 (mm)
T_u	: 總極限位移 (mm)
u	: 磚牆的極限側向位移 (mm)

第一章 緒論

1-1 研究背景與動機

台灣位於環太平洋地震帶西側，歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，地震發生頻繁，建築物隨時有遭受地震襲擊之可能。1999年9月21日凌晨1點47分，南投縣發生芮氏規模達7.3的大地震，震央在北緯23.85度、東經120.78度、深度7.5公里，因位於集集鎮與中寮鄉之間的九份二山，故氣象局將之命名為集集大地震。該地震起因於車籠埔斷層錯動所引發的內陸型極淺層地震，日月潭氣象觀測站測得的最大地表加速度高達1.01g，名間國小測得的最大地表加速度也達1.00g。

此次地震造成台灣中部蒙受重大災害，根據內政部消防署統計資料共有2412人死亡、11305人受傷、房屋全倒26831棟、半倒24495棟；另由內政部建築研究所之震害調查報告【1】顯示，建築物受損達中度破壞以上（即建築物受到結構性之破壞，包含整體或部份塌陷）在南投縣有約3800棟而台中縣達2400多棟，且大部份受損嚴重之建築物均分佈在車籠埔與雙冬斷層兩側鄰近之鄉鎮地區。

在勘查各地建築物損壞災情後，發現中部災區內校舍受損最為嚴重，有近1/2的校舍倒塌或嚴重受損。學校是孕育國家幼苗之重要場所，也是緊急災難時，居民避難最主要的地方，但台灣地區每次有災害性地震發生時，學校建築的損壞總是比其他建築物來的嚴重。從早年之民國75年11月台北地震，造成景美女中、中山女中、實踐學院等校舍遭到嚴重損壞；到近期之民國87年7月17日嘉義瑞里地震，造成嘉義縣境內共有30多所中小學校建築物的嚴重損壞【2】及民國88年九二一集集地震，學校建築的損壞範圍更廣，災害程度更為嚴重，估計此次地震後學校建築之重建及修復費用接近新台幣400億元，此經費約為平常中小學十年左右之建築相關經費。所幸此次地震發生時間在凌晨一時四十七分，中小學校中沒有任何學生和教職員，否則校舍倒塌所造成之傷亡，學生緊急避難時慌亂所造成的推擠碰撞，以及玻璃、燈具墜落碎片造成之二次災害將使得整個災情不堪設想。繼集集地震後一個月，又在嘉義

發生了芮氏規模 6.2 的一二二地震，造成了民雄農工機電科第一工廠倒塌，其他校舍嚴重受損，是此次地震中受害最嚴重的學校；而嘉義市、嘉義縣多所學校也傳出災情。相對地，其他類建築則幾無嚴重災損(民雄鄉西安路有一排街屋發生傾斜)【3】。這些學校建築一再地受害顯示除了校舍興建過程施工與管理制度的缺失，其結構系統規劃上的耐震考量也不夠嚴謹。面對此一潛在性危機，若沒有良好的因應對策，則在下一次大地震來臨時，勢必又將造成另一次嚴重之損害。

1-2 研究目的

本文研究的主要目的，係藉由多方面蒐集多棟南投縣在此次 921 震害中已倒塌及未倒塌之校舍建築原始圖說，使之電腦建檔；並從常造成學校建築破壞之影響因子，如建築形式、結構系統、建築材料等方面，進行統計整理，分析探討學校建築常見的結構系統型式與其耐震上的缺點，以歸納整理出較佳之學校建築之結構系統，供日後建築師規劃設計之參考。

另有關既有學校建築，由於多數均於舊耐震規範時期所興建，其耐震性能已不符合現今之耐震需求，加上施工品質之良窳、使用者之不當使用及材料老化等因素，實際之耐震能力更是令人擔憂；本文將提出相關的補強方式及其補強所增加之耐震能力，以供日後學校建築在進行結構補強設計時之參考依據。

1-3 文獻回顧

自民國 87 年 7 月嘉義瑞里地震後，各地震相關研究單位舉辦了數次地震研討會，其探討內容多針對學校建築之耐震與補強；而於民國 88 年 9 月 21 日集集大地震後，包括相關技師公會在內之相關團體亦全面參與，辦了多次之勘查及研討會，並發表了多篇關於地震及建築物耐震方面之論文，內容包含範圍甚廣，除了學校建築外，尚包括民間建築、高層建

築、公共建築、歷史建築及道路橋樑等等；而成功大學建築系多年來投注在學校建築耐震方面的研究，更是不遺餘力，舉凡校舍耐震行為、校舍震害調查、耐震個案分析、耐震診斷等均有相當具體之成果。

1-3.1 震害調查方面

- 一、1998 年，成功大學建築系的《嘉義瑞里地震建築災害調查報告書》【4】，記錄瑞里地震的地動特徵與各種建築類型的震害現象與原因，並提出改善對策，以供法規修改及制度整合之參考，同時提供設計施工應注意事項及相關補強技術。
- 二、1999 年，國家地震工程研究中心提出《1999 年 9 月 21 日台灣中部集集地震初期勘災報告》【5】，其針對台灣中部地區地震損害情形做了全面性的調查及原因的檢討，其範圍包括地動特徵、地表變形、土壤液化、橋樑震害、台中港震害、學校建築震害、行政醫療建築震害、民間建築震害、古蹟及歷史建築震害、建築設備非結構材之震害、臨時庇護設施。
- 三、1999 年，中華民國建築師公會全國聯合會所編撰之《九二一集集大地震震災調查建築物耐震能力評估修復補強專輯》【6】，其針對 921 集集地震之調查、救援工作及建築災害作了概略的介紹，並提供鋼筋混凝土建築物之耐震能力評估方式及 RC 建築物修復補強技術的介紹。
- 四、1999 年，國科會工程科技推展中心彙編的《1999 年集集大地震災害調查研討會論文集》【7】，其內容涵蓋 921 集集大地震之地震特性、成因與斷層活動、地表變形、震害與特徵（其範圍包括建築結構、交通設施、水利設施、坡地及地盤、都市災害等）及防救災體系等。
- 五、2000 年，財團法人成大建築文教基金會發行之《九二一集集大地震建築物災害調查分析》【8】，針對九二一地震造成之建築物損害之情形及原因作了詳盡的調查及分析，其範圍包括學校建築、民間建築、公共建築、歷史建築物、功能性設施、臨時庇護設施及建築物耐震補強。

1-3.2 結構系統方面

- 一、1993 年，有鑑於嘉南地區即將面臨強震發生週期，以及學校建築之重要性，台南市政府乃委託成功大學建築研究所進行《台南市國民中小學及幼稚園學校建築結構安全評估報告》【9】。此項評估除了瞭解台南市現有校舍結構在大地震來襲時是否能確保師生之安全外，更可進一步做為各學校進行校舍維修、耐震補強、或報廢拆除之參考。
- 二、1998 年，張嘉祥教授等提出一適用於校舍規劃的耐震評估表【10】，以提供校舍規劃設計者、學校行政人員作業之參考以及促進工程專業人士與教育人員間之良好溝通。該評估方法可分為上部結構、基礎與地盤以及非結構三部份，為定性的評估方式將校舍結構分為「良好」、「普通」、「待改善」三個等級。
- 三、1999 年，內政部建築研究所委託成功大學建築研究所張嘉祥教授編撰之《學校建築防震手冊》【11】，針對學校建築從規劃設計階段、營造施工階段到使用維護階段，對附屬設施及建築物之耐震補強均提出相關防震基本概念，作為設計規劃者及學校單位管理時之準則。

1-3.3 耐震診斷方面

美國、台灣與日本有關鋼筋混凝土建築物的耐震診斷方法很多，目前國內較常見的耐震診斷方法，依其分析型態大致可區分為動態分析方法和靜態分析方法兩類，其文獻摘要如下。

一、動態分析方法：

1. 1996 年李康寧博士(Li Kang-Ning)提出之《非線性歷時分析程式》【12】，該分析方法係輸入特定之地震波，並將地震作用時間分為許多短暫時段，依序對各時段進行分析，並推算下一時段之結構反應，直至建築物破壞為止。
2. 1998 年，許茂雄教授的耐震診斷法非線性增量震譜分析【13】，其基本概念是利用某地區的工址地盤加速度反應譜，逐次施加地表加

速度之一增量，使其作用在 3D 的建築結構上，分析各結構原件內力，如此反覆運算，直至結構物因變位過大超過法規要求或結構物不穩定至崩塌止。

二、靜態分析方法：

- 1.1990 年，日本建築防災協會出版《既有鋼筋混凝土造建築物之耐震診斷基準》【14】，以結構耐震指標 I_s ，評估既有 RC 建築物的耐震性能。此診斷法係依照計算的詳細程度分為一次診斷、二次診斷與三次診斷； I_s 值愈高表示建築物的耐震性能愈佳，反之則愈差；而 I_s 則與下列因素相關：構材的極限強度、破壞形式與韌性、結構系統幾何形狀、結構體經年老化等。
- 2.1996 年，Applied Technology Council 出版《*Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*》，即 ATC-40【15】，是藉由需求曲線圖 (Demand Diagram) 與建築物容量曲線圖 (Capacity Diagram)，求得崩塌時的需求點 (Demand Point)，以判定建築物的韌性容量是否足夠。需求曲線由設計反應譜與阻尼比求得，建築物容量曲線則由非線性推垮曲線法 (Pushover Method) 求得，此兩曲線若交會，表示建築物在該加速度時不會崩塌。
- 3.1998 年，張嘉祥教授，提出單位柱載重與平行地震力方向壁量比與破壞狀況關係圖，建議嘉義地區學校建築之單位柱載重小於 14kg/cm^2 且平行地震力方向壁量比大於 0.25% 時，才能抵抗像瑞里地震那麼大的地震力【16】。
- 4.1999 年，蔡益超教授提出鋼筋混凝土建築物耐震能力評估法【17】，此方法分為初步評估與詳細評估兩種：初步評估包括耐震能力初步評估表與簡單計算耐震能力評估法，供快速篩選之用；詳細評估是根據建築物實際構材之尺寸與配筋，計算其強度與韌性，並配合建築物彈性地震分析，準確計算建築物各樓層上半層與下半層之崩塌地表加速度 A_c 。
- 5.2000 年，廖文義與柴駿甫發表之學校建築結構初步評估【18】，提出一樓層剪力簡易評估法：計算一樓的極限層剪力，求得崩塌地表加速度。其中層剪力由支柱屈服與磚牆破壞條件來提供，工址正規化

水平加速度反應譜係數 C 與結構系統地震力折減係數 F_u 之計算時須採用極限階段割線剛度對應的週期值。

6.2000 年郭心怡提出靜態推垮曲線法【19】，其基本假設為剪力房屋 (shear building) 只考慮垂直構材之耐震能力，其可細分為三種不同層次的耐震診斷法，一次診斷法為利用壁量比與柱量比組合而成的查表法；二次診斷法為將垂直構材分類，利用簡易計算公式，計算後得到較為詳細之評估方法；三次診斷法為推垮曲線法，即將水平載重依逆三角形豎向分佈，加於各個樓版上，將水平載重逐漸增加，增加至某一樓層推垮為止，而其中水平力與該樓層之水平位移，即為該建築物之推垮曲線，利用該曲線依等能量原則，計算結構系統彈性反應地震力 Q_e ，進而求得崩塌地表加速度 a_c 。

1-3.4 耐震補強方面

- 一、1996 年黃世建、蕭興臺等針對學校建築常見之結構損害現象予以歸類並提供補強計畫之建議【20】。
- 二、1997 年，許茂雄教授等提出《新建學校建築耐震規劃設計與既有學校建築耐震補強指針研擬》【21】，係針對過去學校震害記錄，提出對學校新建及既有學校建築補強具體而有效的建議。
- 三、2000 年，蔡益超教授等提出《學校建築結構耐震能力詳細評估與補強》【22】，針對各種補強工法進行分析比較，以提供未來學校建築物耐震補強工作的參考。
- 四、2000 年，張順益提出了《學校建築之強度與勁度補強研究》【23】，文中介紹了各種補強方法的適當使用時機，其所能達到的補強效果以及詳細的施工要點。

1-4 研究方法及論文架構

本研究之執行，先至南投縣埔里鎮、竹山鎮及國姓鄉調查取得學校建築之 921 地震震害資料，藉由案例分析中，歸納出震害損害之影響因素，並藉以統計其各項之相關震害數據；另外利用耐震能力評估程式，

進行學校建築於各種不同影響因子條件下之耐震診斷；再以前項分析之數據資料，以規劃學校建築之補強方案，並再進行一次耐震診斷；最後整合出學校建築結構系統與補強之相關規劃要點，研究流程架構圖如圖 1-1 所示。

1-4.1 震害調查與分析

針對南投縣埔里鎮、竹山鎮及國姓鄉等地區之學校建築，在 921 地震後，依其不同程度震害且有詳細圖說者進行調查，從所取得之震害資料 35 筆中，篩選 16 棟受損情況與建築形式較具代表性之案例作更詳細測繪、圖說蒐集與訪談；藉由調查資料之彙整與歸納，找出影響學校建築耐震能力之控制因子，並統計各因子之震害比例，從中探討各控制因子之影響程度。

1-4.2 學校建築之耐震診斷

參照各項圖說資料，規劃學校建築之理論分析模型；並藉由震害資料分析所得之影響因子規劃控制變因，如柱斷面之大小、配筋形式、箍筋間距、混凝土強度、磚牆之厚度與壁體配置位置等變因，再對四所較具代表性的校舍，利用許茂雄教授發展的「低層建築快速耐震診斷程式」【19,24】，分析該校舍建築物之崩落地表加速度，即為該棟校舍建築物之耐震能力。

1-4.3 學校建築之補強

探討各補強工法（如配置磚牆、RC 牆、加大柱斷面、劃設窗台與柱之隔離縫等）之特點及其用於學校建築之時機性，並從中挑選相關混凝土之補強工法再作進一步之耐震診斷，進而提供學校建築補強之相關規劃要點，以供日後學校建築修補之參考。

1-5 適用範圍

- 一、 本文研究結果適用範圍為五樓以下（基本振動週期 0.7 秒以下）之鋼筋混凝土造學校建築。
- 二、 有關學校建築震害案例，均取自於南投縣地區，該震區原在建築技術規則中訂為地震二區【25】，現今耐震設計規範將之劃分為甲震區，其震區水平加速度係數之值為 0.33【26】。
- 三、 建築物之樓板假設為剛性樓板，建築物視為剪力屋架(shear building)；結構物基礎假設為固定端，忽略其與土壤間之互制效應；結構系統為純柱樑結構或是含有剪力牆之構架建築物。
- 四、 震前耐震診斷所用鋼筋降服強度為 $f_y=2800\text{kg/cm}^2$ ，混凝土極限強度 $f_c' = 210\text{kg/cm}^2$ ，是以建管課建照圖上所記載為主；而震後耐震診斷所用鋼筋降服強度是 $f_y=1800\text{kg/cm}^2$ ，混凝土極限強度 $f_c' = 130\text{kg/cm}^2$ 是以南投縣教育局各中小學校舍結構補強工程報告書上所記載為主；箍筋部分均假設其圍束良好，且其箍筋降伏強度 $f_y=2800\text{kg/cm}^2$ 。

第二章 學校建築震害分析

2-1 學校建築結構系統介紹

對一棟建築物而言，事前妥善的規劃設計，往往比事後的補修來得重要。而其中的結構系統對於建築物而言，就像骨骼系統之於人體的關係，結構系統不但必須有效傳遞建築物之垂直靜載重，還必須能夠抵抗各種可能之水平外力，故吾人應於校舍規劃設計階段時，就作一詳細的檢討，尤其台灣地區位處全世界地震最頻繁之汎太平洋地震帶上，每次有強震來臨時，皆會造成人員及財物之重大損傷，若有一完善的結構系統規劃，使得構材受力情況較為均衡，則整體的耐震能力將大為提高，萬一地震強度超過設計標準時，也能避免學校建築整體崩塌之情形發生。學校建築防震安全所應考慮的項目繁多，今僅就與本文耐震診斷方法較具相關性之項目做以下之探討。

2-1.1 平面配置

台灣地區學校建築平面形狀常規劃成簡單的一字形，其主要原因乃為因應通風、採光等物理環境需求；然後再依基地地形、範圍及空間量之需要，而逐漸演變成 L 形、U 形、H 形、十字形等平面(圖 2-1 及圖 2-2)【3】。隨著平面形狀之複雜化，使建築物產生不對稱、不規則、或側翼過長等缺點，對整個學校建築結構系統在地震下之行為產生很大的影響。圖 2-1 為耐震不良之系統平面形狀，包括 L 形、U 形、H 形、T 形、Z 形、或十字形，此類型平面容易發生以下幾種破壞現象：

- 一、校舍長度過長時，除了熱脹冷縮會導致額外應力造成裂縫外，在地震時也很容易造成校舍端部的破壞。
- 二、校舍平面轉折的部份在地震時經常因為應力集中現象而導致破壞。
- 三、若剛心與質心的偏移量大，地震時容易產生偏心扭矩。

故在經歷九二一地震後，所興建之學校建築為避免上述的破壞現象，結構系統都儘量採用規則、簡單、對稱之平面形狀，如字形，矩形等原則為主。張嘉祥教授【11】曾建議矩形平面之校舍，為避免形狀過於細長，其長寬比應小於 6。若教室單元為一 10m × 10m 的矩形單元(長度 10m，寬度為教室寬 7.5m 加上走廊 2.5m 寬)，則構成矩形平面的一側翼以不超過六個教室單元為原則。

2-1.2 單元教室柱距配置

台灣地區校舍結構系統依單元教室柱配置型式可分為長向兩跨型(圖 2-3)與長向三跨型(圖 2-4)【3】，說明如下：

- 一、長向兩跨型：單位跨距多為 450cm，開窗較為自由，但柱單位載重較長向三跨型高，耐震上較為不利；
- 二、長向三跨型：單位跨距在 300—333cm 範圍內，長向柱距較小，柱單位載重較低，靜不定級數較高，在耐震上較為有利。

而在短向上，教室單位跨距多採用 750cm，有的校舍於短向牆中附加柱子，使其單位跨距減為一半，也以此增加系統短向上的靜不定度，可降低教室單元間的隔間牆體發生面外破壞的可能性。

再者，在九二一地震後發現，吾人於規劃時，常將矩形柱之強軸方向平行校舍之短向方向，且長向方向上，因為採光、通風之需要，多為無配置壁體之狀態，本文將於第五章比較此兩項對耐震能力之影響。

2-1.3 走廊配置及其結構形式

走廊為學校建築基本元素之一，其功能雖主要在連結教室或不同教學空間，但對整個結構系統之受力行為卻有相當重要之影響。校舍結構系統依走廊配置方式可分為：(1) 無廊柱式；(2) 單邊懸臂走廊式；(3) 單邊走廊有廊柱式；(4) 雙邊懸臂走廊式；(5) 雙邊走廊有廊柱式；(6) 中間走廊式(見表 2-1)。這六種系統類型中，在耐震上以雙邊走廊有廊柱式最為良好，如圖 2-5 所示，主要因為校舍橫向構架有三跨，整個系

統之靜不定級數增加，柱單位載重亦比其他類型為低。表 2.1【3】將六種走廊系統之柱單位載重作一比較，其中雙邊走廊有廊柱式只有 $4.79\text{kg}/\text{cm}^2$ ，而雙邊懸臂走廊式則高達 $9.58\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

台灣地區之懸臂走廊式校舍非常普遍，建築上之功能主要使走廊感覺較為寬敞，同時使教室與運動場（或中庭）間阻礙減少，可及性增加。但是由於走廊採懸臂式，廊柱消失，不但使得各層柱軸力增加（尤其是走廊邊之柱子），整個樓層可以有效用來抵抗水平地震力之構件也大大減少，另外，少了整排的廊柱，整個結構系統靜不定級數也大量減少，相對的建築物在地震下之危險性亦因而提高，如圖 2-6 所示。因此，校舍規劃時儘可能採取有廊柱之結構系統，以免地震時產生上下擺動，易造成樑柱節點損壞。

2-1.4 結構材料種類

目前台灣地區之學校建築以鋼筋混凝土造(RC 造)為主，加強磚造次之，木造或純磚造多已拆除翻修。九二一地震後則有許多校舍採用鋼骨造及鋼骨鋼筋混凝土造，未來這兩類之學校建築數量預計將會持續增加。由於學校建築高度一般在五層樓以下，因此只要運用適當的結構系統來配合此四種不同的材料特性，應可達到良好之耐震效果。以下就此四類建築系統加以說明。

一、 鋼筋混凝土造結構系統：又可分為以下兩類系統

1. 鋼筋混凝土柱樑抗彎構架系統：抗彎矩構架系統在分析上不考慮牆體與構架間之結構互制作用，因此牆體與構架之界面在建築構造上必須有適當的處理。
2. 鋼筋混凝土柱樑構架加剪力牆系統：構架配置剪力牆系統，在地震力作用下，剪力牆將分擔部分地震力，使得構架對地震力的負擔減少。但規劃上須注意剪力牆的均衡配置，儘量減少系統剛心與質心產生太大之位置偏差。

二、 加強磚造：為早期之施工方法，加強磚造之磚牆，係指磚牆上下均有鋼筋混凝土加強樑或基腳，左右均有鋼筋混凝土加強柱，與牆均固連成一體之牆壁。加強磚造之磚牆，其加強樑與加強柱，應在牆壁砌造完成後，再行澆置混凝土，使加強樑及柱能與磚牆連成一體【25】。一般說來，加強磚造之柱樑斷面於設計時較鋼筋混凝土框架填充磚牆為小。現所存在之加強磚造校舍，多為民國 60 年以前所建造之校舍

三、 鋼骨結構系統：由 H 型鋼組成柱樑抗彎構架，並在系統適當位置加斜撐以增加整體剛度，減少樓層水平位移。目前純鋼結構的學校建築所佔比例極少，有的校舍於原 RC 校舍頂層用鋼結構材料加建，於 RC 柱位加打化學錨栓進行植筋，再將鋼柱固定於錨栓上，屋頂版則仍以鋼浪版為主。

四、鋼骨鋼筋混凝土系統：在鋼骨柱樑週邊補以主筋及箍筋，在耐震上同時具有 RC 及鋼骨之特性。

2-1.5 屋頂形式

屋頂主要在遮陽、避雨，但 RC 建築物構架與屋頂連成一體，屋頂具有橫膈版(diaphragm)之功能，因此屋頂之形狀及剛柔度亦直接影響整個結構系統之耐震性能。台灣地區既存校舍常見屋頂形狀有平屋頂、斜屋頂、曲面屋頂、摺版屋頂等，其中又以平屋頂佔絕大多數。

- (1) 平屋頂：為絕大部分 RC 結構所採用，如相片 2-1 所示，主要由於施工較容易，工程費較低。但平屋頂常由於泄水坡度不足、排水孔阻塞，導致滲漏水、鋼筋生鏽等現象，使得建築物結構體使用年限受到影響，而鋼筋生鏽亦會使得柱樑失去其既有強度及耐震能力。另外平屋頂容易受熱，因此有些校舍會於原平屋頂上部搭建鋼架遮蓬，使得系統之載重增加。
- (2) 斜屋頂：由於施工較平屋頂困難，如相片 2-2 所示，因此一般 RC 校舍採用斜屋頂的比例不高。既存之斜屋頂校舍多為屋齡較久的校舍，其斜屋頂係由木屋架上搭蓋瓦片而成，坡度一般在 1：0.33 左右。
- (3) 曲面屋頂：多見於體育館、活動中心等大型活動空間，其屋面多採用鋼浪版，以配合大跨度並減少屋頂自重，如相片 2-3 所示。
- (4) 摺版屋頂系統：多用於國民中學校舍，摺版屋頂係 RC 澆築而成，對於隔熱具良好之效果，但多數校舍因缺乏保養維護，導致下雨時屋頂積水、漏水以及鋼筋生鏽等問題；如相片 2-4 所示。

2-2 調查範圍

2-2.1 調查地區之選擇

本次集集大地震起因於車籠埔斷層活動，於地表造成長達約 105 公

里以上之地表錯裂或錯移。此斷層南以古坑斷層（大致為古坑 - 草嶺一線）為界，約略以南 - 北走向向北延伸 83 公里，至豐原及神岡一帶斷層軌跡轉折呈東北東 - 西南西走向延伸至苗栗縣卓蘭鎮內灣村，本段長約 15.5 公里，此後以一系列約略呈西北 - 東南走向至南 - 北走向之正斷層（長約 6.5 公里）向東與雙冬 - 大茅埔斷層相接，如圖 2-7 所示【33】。由以上斷層分布可知，南投縣乃此次受地震斷層帶破裂影響最多之縣市，故本研究調查範圍以南投縣內之國民中小學校舍建築為主，又為比較地區屬性所造成之地震力影響，特選定位於車籠埔斷層帶上之竹山鎮及其下盤之國姓鄉、埔里鎮，如圖 2-8 所示。

2-2.2 調查結果

本文調查選定範圍內之國民中小學校舍建築，詳實記錄其建築形式、樓層、地震破壞情況等資料，並從調查所得之 35 筆資料中，篩選其中 9 間學校內之 16 棟校舍建築，做更詳細之訪談及蒐集其建築平面、建築高度、樑柱尺寸、牆體尺寸及其配筋等圖說資料，以作更詳細之分析。

2-3 學校建築之震害案例分析

2-3.1 地質狀況說明

九二一集集大地震受損學校遍及全台，除了校舍本身之規劃設計缺失外，主要原因也是因為地震規模過大，此次集集地震在南投縣各鄉鎮附近量到之地表加速度，大部份都在 350gal 以上，有些地方甚至高達 900gal 以上，表 2-2 及 2-3 為九二一地震發生時，在竹山、國姓、埔里等鄉鎮最近之測站位置所測得之最大地表加速度值。

以下再就各鄉鎮地質狀況加以說明：

- 一、竹山鎮：本鎮有車籠埔斷層經過，921 集集大地震發生錯動，為重創地震災區。由區域地質圖上顯示，本鎮內有另一個逆斷層通過，斷

層錯動時對於本鎮有直接影響，結構設計時應考慮耐震設計。惟為因應 921 集集地震災後重建、復建，以及新建建築物之設計需求，將台灣地區之震區簡化為地震甲區及地震乙區等兩種震區，本鎮屬於地震甲區。此區域鑽探結果顯示(BH-1):0~2.7 公尺為黃棕色壤土夾礫石，2.7~6.0 公尺為棕灰色卵礫石層，6.0 公尺以下為承載力佳的灰色砂岩盤；本鎮經鑽探後發現其地下水水位面不高，鑽探深度內並沒有地下水的存在，土層經分析後發現，當地震發生時並無產生土壤液化的可能性。

- 二、國姓鄉：本鄉西側有雙冬斷層經過且有發現露頭，此一斷層在 921 集集大地震中發生錯動。由區域地質圖上顯示，鄉內有另一逆斷層通過，此一斷層錯動時對於本鄉有直接影響。國姓鄉在 921 集集大地震時為重創地震災區，位置位於地震甲區，結構設計時應考慮耐震設計。此基地鑽探結果(BH-1):0~1.7 公尺為回填土(黃色粘壤土夾卵礫石)，1.7~7.0 公尺為承載力尚可的卵礫石夾黃色壤土，7.0~10.0 公尺為承載力佳的淺灰色砂岩層，10.0~12.8 公尺為淺灰色頁岩層，12.8 公尺以下為承載力佳的淺灰色砂岩層，所以結構體建造完成後，大部份沉陷為即時壓密沉陷量，只有少部份沉陷為長期壓密沉陷及潛變的問題。本鄉經鑽探後發現其地下水水位面不高，再經土層分析後發現，當地震發生時並無產生土壤液化的可能性。
- 三、埔里鎮：根據文獻資料研判，在埔里鎮東側約 2.5 公里有武界活動斷層分布，此一斷層錯動時對於本基地有影響，本鎮在 921 集集大地震時為重創地震災區，位置位於地震甲區，結構設計時應考慮耐震設計。本鎮鑽探結果(BH-1):0~1.0 公尺為回填土(夾有礫石)，1.0~3.05 公尺為棕黃色粘質壤土夾有礫石，3.05 公尺以下為承載力良好的黃灰色卵礫石層，所以結構體基礎應盡量置放至黃灰色卵礫石層，當基礎置放至棕黃色粘質壤土夾有礫石層時，應注意建造完成後有長期壓密沉陷的問題。本鎮經實地勘查，鎮內大部分之覆蓋面層至地面下 3.5 公尺深為黃棕色砂質壤土(含有小礫石)。再於 3.5 公尺深至 24.0 公尺深均為黃灰色卵礫石層，而此層 N 值大，基礎承載抗力強。並未發現水位面。

2-3.2 案例說明

在九二一地震中，受損的學校建築，幾乎都是鋼筋混凝土造普通教室或辦公室，損壞之一般校舍樓層數從一至三層皆有；由於學校建築機能相同，規模及結構系統類似，因此雖然災區範圍分布很廣，但各不同校舍間受損部位以及震害型態多有類似之處。表 2-4 為本文調查之學校，以及各校主要損壞情形。

2-3.3 損害程度比較

表 2-5 為就所調查之校舍，分為嚴重損壞及輕微損壞，並予以作一初步比較，表中顯示，採用單邊懸臂走廊之校舍損壞都相當嚴重，甚至底層崩塌；而反觀輕微損壞的校舍則大部分都是廊柱式之校舍建築型式。

2-3.4 震害統計分析

由本文所蒐集到的校舍圖說，檢討影響校舍建築耐震能力之幾個簡單的參數，進行整理統計分析，其中較常用來作為討論之參數，介紹如下【27】：

一、壁量比

$$\text{壁量比} = \frac{\sum_{\text{頂層}} (A_{w,BR} + A_{w,RC} \times 6)_{\text{最弱層}}}{\sum_{\text{最弱層}} A_{fi}} \quad (2.1)$$

其中 $A_{w,BR}$ 為磚牆之斷面積； $A_{w,RC}$ 為 RC 牆之斷面積； A_{fi} 為第 i 層之樓地版面積；學校建築之牆體材料主要有磚造與 RC 造兩種，RC 牆之剪力剛度較磚牆為佳，故為簡化評估之過程，需乘上係數以轉換為等值磚牆面積；牆體受柱樑圍束時，能提供較佳的抗剪能力，因此四邊圍束的牆體不作折減，三邊圍束者乘以折減係數 1/3，二邊圍束者不列入計算。

如表 2-6 亦可求得等值壁體面積的對應關係【14】。具兩側柱之 RC 牆之剪應力為具兩側柱之磚牆的 5 倍，具單側柱 RC 牆之剪應力為具單側柱之磚牆的 10 倍。考慮學校建築的牆體的各種圍束情況，本研究取 RC 牆之等值斷面積為磚牆之 6 倍，即 $\alpha = 6$ 。

評估此項時，需先找出建築物之最弱層，並針對該層之長、短軸向有效壁量計算壁量比，再取其較小值。壁量比之計算需考慮牆體材料與圍束狀況，以求得有效壁體面積。

二、單位柱載重

$$\text{單位柱載重} = \frac{\sum_{\text{最弱層}+1}^{\text{頂層}} A_{fi} \times 0.1 \text{ kg/cm}^2}{\sum (A_c)_{\text{最弱層}}} \quad (2.2)$$

其中 A_c 為柱斷面積； A_{fi} 為第 i 層之樓地板面積。

進行此項目時，需先找出建築物之最弱層，針對該層單位柱構材所承擔之建築物重量進行評估。單位柱載重之計算，一般樓層及平屋頂載重概略取 0.1 kg/cm^2

若以呂國維碩士論文中建議之校舍單位柱載重應小於 14 kg/cm^2 ，而壁量比應大於 0.25%【3】為基準，與調查結果（表 2-7）比較後發現，在各教室之間因為有為數眾多的隔間牆提供了短向上足夠的壁量，因此耐震性無虞，其短向壁量比超過 0.25% 以上者，佔調查校舍總數的 94%，如圖 2-9 所示，短向壁量比不足 0.25% 者為圖書館、辦公室等大跨度空間較易發生；反觀校舍在長方向，亦即平行走廊方向因缺乏壁量，壁量比在 0.25% 以下者有 13 棟，佔調查校舍總數之 81% 如圖 2-10 所示，形成耐震上的弱軸，顯示台灣地區校舍建築之長向壁量顯然有嚴重不足的現象。

另外在規劃較高層校舍時，設計者為了避免使用面積之減少，大多會在不增加柱斷面的前提下，提高主筋配筋量。從圖 2-11 可知單位柱載重有隨樓層數增加的趨勢，二層樓校舍單位柱載重分佈由 10 kg/cm^2 至 30 kg/cm^2 ，三層樓校舍由 15 kg/cm^2 至 50 kg/cm^2 。

2-4 本章小結

在調查了以上九所學校，十六棟校舍的個案後，將可能影響學校建築耐震能力之因素歸納為以下數點：

一、建築物之座落方位

由表 2-3 可知，九二一大地震造成之東西向加速度較南北向為大，故校舍建築物若其座落方位平行於東西向時，加上其弱軸也在此方向上，則其遭受地震力破壞之機率也大為提高。

二、平行走廊方向壁量比偏低

此次調查校舍主要以 RC 造建築物為主。有九成以上為 RC 柱樑框架填充磚牆，其餘為純 RC 造或 RC 柱樑框架加 RC 牆。這些結構可視為 RC 柱樑框架，中央填入牆體，不論是填入 RC 牆或磚牆，這些 RC 建築主要由 RC 柱樑立體構架承受垂直載重，而水平地震力則大部份由牆體抵抗，少部份才由柱樑立體構架承擔，水平地震力依據相對勁度分配。由於牆壁為良好的抗水平力構材，壁量的增加可有效降低 RC 柱樑框架分配到的水平地震力，減少柱樑框架結構受地震破壞的機率。

學校建築的平行走廊方向經常因為採光需求而大面積開窗，這也因此造成了壁量比的降低。在此次調查案例中，甚至有兩棟校舍壁量比為零。在這種壁量比低的情況下，將使得 RC 柱樑框架結構承受大部份的水平地震力，且在受地震力破壞後，由於缺乏承受垂直載重的機制之情況下，校舍將發生崩塌；相對地，學校建築的在垂直走廊方向上，教室單元間由於具有大量的隔間牆，耐震性能較佳。故在九二一地震中許多倒塌校舍實例中，校舍多沿平行走廊方向崩塌，鮮少發生垂直走廊方向之倒塌破壞形態。

三、第一層之軟層破壞

由調查情形發現校舍建築物之第一層常是整體結構系統破壞之所在，主因在於機能使用限制，因學校建築常把大跨度空間例如辦公室、圖書館、實驗室、演講室放在整棟建築物一樓，其配置原因主要是考慮使用方便性及可及性等因素，如此就會發生二樓以上教室間之隔間牆無

法連貫到一樓，使結構豎向剛度發生變化，因而造成一層樓之軟層破壞。

四、單位柱載重過高

單位柱載重在物理意義上為柱子單位面積所承擔之垂直荷重(靜載重及活載重)。由於水平地震力正比於載重大小，因此單位柱載重愈高，亦即該層垂直構材所抵抗之水平地震力愈大。同時，柱撓曲強度與軸力有關，當柱軸力超過平衡軸力後，其極限撓曲急劇降低(圖 2-12)，因此單位柱載重偏高之柱子很容易產生撓曲破壞。

可能影響校舍建築單位柱載重的因素有樓層數、柱間距及走廊型式。樓層數越多，柱間距越大再加上採用懸臂走廊，則單位柱載重越大，對校舍建築耐震能力越不利。調查中發現約有 12%的校舍建築其單位柱載重小於 14kg/cm^2 。亦即有 88%的校舍之單位柱載重超過此一標準，顯示學校建築的單位柱載重有偏高之情形。

五、窗台柱之剪壞

學校建築常以磚做為隔間牆及窗台材料。磚造窗台使柱子下半部約 $1/4 \sim 1/3$ 的長度受到束制，無法變形。在地震時，一有變形的情況發生時，受到束制的柱子的剪力將相對地提高 2.4 ~ 3.4 倍，致使柱子產生破壞，如相片 2-20 所示。高窗兩旁的柱子，束制的情形更嚴重，剪力增加的程度更高。因此這些受束制的柱子在地震中經常受到剪力破壞。如廁所短柱剪壞情形在九二一校舍建築物破壞情形中，均普遍發生在每一個學校之中，如相片 2-21 所示，此乃因在強震來襲時，大部份之水平力均由其承擔，所以柱剪力剪壞會比柱彎曲應力降服早發生；相對地，門與門間的柱子不受束制，剪壞的情形則較為少見。

六、校舍分期、分層興建

調查結果顯示校舍增建的情形十分普遍，如相片 2-14.1 ~ 2-14.3 所示，這些校舍多為民國七十五年以前政府經費有限的情形下所興建。這些分期興建的校舍，在耐震上與使用上有諸多缺點，說明如下

1. 預留鋼筋缺乏保護而銹蝕，於接續時又未事先加以清除。

- 2.預留鋼筋錨定長度不足，降低原有鋼筋與混凝土間之握裹力。
- 3.底層興建時結構設計未考慮增建上之需要，因此增建校舍之結構需另外設計。若無預留鋼筋，則在原有柱子位置植筋，再打設 RC 柱或鋼柱。調查學校中發現部份校舍增設柱子時，因放樣不精確，或施工上的誤差而有柱中心偏移的現象；有的校舍甚致上下層柱子不在同一線上，導致應力傳遞路徑的不連續，對於耐震而言極為不利。
- 4.因樓層之增加，致使垂直載重增加，增加底層柱之單位重，在抗震行為上實為不利。
- 5.校園缺乏整體性規劃，造成接續配置的校舍由於結構接續上的缺失(前述預留鋼筋銹蝕、握裹力不足等)，使接續點極易在地震時脫開來，並相互碰撞，造成碰撞層結構的嚴重損壞。當樓層高度不同，亦即建築振動週期不同時，校舍在地震作用的擺動不一致，碰撞的情形將更為嚴重。並排的校舍鄰棟間距不足時，也有相同的情形。因此應在與校舍接點處設置伸縮縫隔開，以避免地震發生時，因在不同振動週期下所發生的撕裂與碰撞破壞情形。

第三章 快速耐震診斷

對於建築物耐震能力之各種診斷方法已於本文第一章之文獻回顧敘述，不同診斷方法各有其優缺點，本文考量校舍建築之震害模式、診斷速度及實用性後，決定採用由許茂雄教授所發展出的靜態推垮曲線診斷法 (Static Pushover Method)【19, 24】。本章將先說明靜態推垮曲線法的基本假設、適用範圍、外力加載方式與累加方法，再介紹耐震診斷中，剪力房屋 (shear building) 之 RC 柱、RC 牆與磚牆等耐震元件的側向載重與側向位移之非線性曲線計算方法。最後說明建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r 與相對應的崩塌地表加速度 a_c 計算方式。

3-1 基本假設

3-1.1 質量堆積於樓板

建築物的全部質量分別集中堆積於各層樓板處，各堆積質量包括該樓板的上層下半高與下層上半高範圍內的結構與非結構構材的總質量，另加四分之一法規所規定的教室建築構造最低活載重【25】，即 $62.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ；如此，構架除樓板處以外，均視為無質量。這個假設使地震力作用在建築物時，豎向外力分配的方式得以簡化。

3-1.2 剪力房屋 (shear building)

由 921 震害後調查顯示，校舍支柱於平行走廊方向之破壞模式，和剪力房屋理想化模型的破壞模式相當接近，因此本文假設校舍支柱於平行走廊方向受震後之變形為剪力房屋變形模式，此模式乃基於下列的假設：

- 一、梁板之勁度較柱大許多，視為剛性樓板，即弱柱強梁。
- 二、支柱與牆體的側向變形為柔性，但軸向視為剛性，即不計軸向變形。
- 三、結構系統之勁度由垂直構材的側向撓曲勁度所提供，不計隔間、防火、非結構構材等所提供的勁度，亦不計軸力對勁度的影響。
- 四、結構系統支承於剛性地面上。

因此，當屋架系統作面內之橫向振動時，每一樓層將保持水平，不產生旋轉，屋架變位之形狀將為剪力變形模式，故稱之為剪力房屋。其中，RC 柱上下兩端不產生旋轉，故支柱受力變位之形狀為剪切菱形模式；牆壁因為剛度很大，欲使其上下兩端固定不動，不太可能，因此，本文假定牆頂有適當轉動，其受力變位之形狀介於剪切菱形模式與懸臂模式。

3-2 靜態推垮曲線法【19】

本節將介紹靜態推垮曲線法的外力加載方式、累加方法與剛域問題。

3-2.1 力的加載方式

靜態外力的加載如《建築物耐震設計規範及解說》【26】所述為逆三角形豎向分佈，加在各個樓板上，屋頂可能有外加橫力，如圖 3-1。各個外力從零逐漸等比例增加，增加到建築物某一樓層推垮為止。

3-2.2 累加各垂直構材之 Q - 曲線

首先訂定各單支垂直構材之側向載重 (Q) 與側向位移 () 之非線性曲線，然後以位移控制方式，累加各單支垂直構材載重之 Q - 曲線。垂直構材包括 RC 柱、RC 牆、磚牆等，其非線性 Q - 曲線詳細計算理論另行說明於 3-3 至 3-5 節中。

理論上在地震過程中，垂直構材的損壞程度有先後的差別，使得水平剛度不斷改變，剛心的位置亦隨之改變。但本文在計算偏心扭矩的影響時，鑑於學校建築之隔間牆具有很大抗扭性，故平面上的扭轉角不大，所以無論在地震過程中的任一階段，剛心仍以彈性階段的位置視之，並不隨著時間而改變。

靜態推垮曲線法假設評估的建築物為剪力房屋，即弱柱強梁，因此當大部分的垂直構材破壞時，就視該樓層崩塌。所以本文計算時就個別的垂直構材施加外力，由零逐漸等比例增大至該垂直構材破壞為止。

先畫出各單支垂直構材的非線性 Q - 曲線，再乘上此種垂直構材所擁有的桿件數，即為各垂直構材組的非線性 Q - 曲線。最後再累加各垂直構材組的非線性 Q - 曲線，即得該樓層的非線性 Q - 曲線，並由此非線性 Q - 曲線，可得該樓層最大抗剪力 Q_{uo} 。

3-2.3 剛域

不考慮柱梁接合剛域的情形時，剪力房屋 RC 柱之撓曲剛度 = $\frac{12(EI)_{eff}}{H^3}$ ， H 為 RC 柱淨高。若考慮柱梁接合剛域時，RC 柱高度為節點到節點（全高 l ），其撓曲剛度仍為 $\frac{12(EI)_{eff}}{H^3}$ 。

假設有一根 RC 柱，全長 l ，上端剛域為 a ，下端剛域為 b ，如圖 3-2 所示，剛域的 EI 為無窮大。當 A 與 B 相對位移一單位時， C 與 D 亦相對位移一單位，所以 C 與 D 相對位移一單位所需的瞬時側移彎矩（Initial Sway Moment）與側向載重，和 A' 與 B' 相對位移一單位所需者相同，如圖 3-3 所示，即 $M_{ab}' = M_{ab} - Q_b$ ， $M_{ba}' = M_{ba} - Q_a$ ， $Q = Q'$ ，撓曲剛度也就相同。因此可以很容易證明考慮柱梁接合剛域時的側向剛度，與不考慮柱梁接合剛域但高度為淨高時的側向剛度相同。

3-3 RC 柱的側向載重與側向位移之非線性曲線

本文之 RC 柱非線性 Q - 曲線計算公式及參數主要引用自郭心怡《學校建築快速耐震診斷》【19】論文之建議。但只考慮撓曲位移與剪力位移，忽略握裹滑移；依剪力房屋的假設，RC 柱的高度為 H ，今上下端視為固定端，將 RC 柱的側向總位移 T 視為撓曲位移 B 與剪力位移 S 的疊加。故由結構學可知，RC 柱上下端受側向載重 Q 時，所造成的相對位移如下所示；。

$$1. \text{ 相對撓曲位移 } B = \frac{QH^3}{12(EI)_{eff}} \quad (3-1)$$

$$2. \text{ 相對剪力位移 } S = \frac{sQH}{(GA)_{eff}} \quad (3-2)$$

其中 H 為 RC 柱的淨高，無論極短柱、窗台柱、一般柱均可適用；
 $(EI)_{eff}$ 為有效撓曲剛度；

$(GA)_{eff}$ 為有效剪力剛度；
 E 為彈性模數；
 I 為轉動慣量；
 G 為剪力模數；
 A 為 RC 柱斷面積；
 Q 為側向載重；
 矩形剖面形狀因子 s 取為 1.2。

RC 柱的側向載重與側向位移之非線性曲線，藉由開裂載重 (Q_{cr})、降伏載重 (Q_y)、極限載重 (Q_u)、破壞載重 (Q_f)，以及彈性階段、開裂階段、降伏階段、破壞階段的撓曲剛度與剪力剛度的訂定，即可計算出各階段的撓曲位移 δ_B 與剪力位移 δ_s ，疊加即得總位移 δ_T 。其各階段之外力及位移，介紹如下【28】：

3-3.1 RC 柱各階段載重

一、開裂載重 $Q_{cr} = \min(Q_{fc}, Q_{sc})$

1. 撓曲開裂載重 (Q_{fc})

$$Q_{fc} = \frac{2M_{cr}}{H} \quad (3-3)$$

$$M_{cr} = \frac{2I_g \left(f_r + N/A_g \right)}{y} \quad (3-4)$$

M_{cr} ：開裂彎矩 (N-mm)

H ：RC 柱的淨高 (mm)

N ：軸壓力 (N)

A_g ：RC 柱斷面積 (mm^2)

I_g ：轉動慣量，為開裂前 RC 柱剖面忽略鋼筋的轉動慣量 (mm^4)

y ：RC 柱斷面深 (mm)

f_r ：混凝土的破裂模數， $f_r = 0.623\sqrt{f_c'}$ ， f_c' 為混凝土標稱抗壓強度 (MPa)

2. 剪力開裂載重 (Q_{sc})

$$Q_{sc} = 0.2\sqrt{f_c'}(0.75 + 1.4d/(H/2))(1 + b_a + b_d) \cdot b \cdot d \cdot m \quad (3-5)$$

$$b_a = \sqrt{100r} - 1 \quad (3-6)$$

$$b_d = \sqrt[4]{1000/d} - 1 \quad (3-7)$$

$$m = 0.7483 \sqrt[3]{1 + \frac{N}{3.43A_g}}, m \text{ 為軸力修正係數} \quad (3-8)$$

式中 b : 柱寬 (mm)
 d : 有效柱深 (mm)
 \tilde{n} : 主筋配筋比
 N : 軸壓力 (N)

二、極限載重 $Q_u = \min(Q_{fu}, Q_{su})$

定義破壞模式：

剪力破壞： $Q_{su} - Q_{fu} < -10\text{kN}$

撓剪破壞： $-10\text{kN} < Q_{su} - Q_{fu} < 10\text{kN}$

撓曲破壞： $Q_{su} - Q_{fu} > 10\text{kN}$

1. 撓曲極限載重 (Q_{fu})

依 ACI 規範計算，假設

- (1) 應變線為一直線，即與中立軸距離成正比。
- (2) 混凝土破壞時最大應變為 0.003。
- (3) 鋼筋應力應變曲線假定為二折線，即降伏後不考慮應變硬化曲線。
- (4) 在張力邊的混凝土忽略不計。
- (5) 破壞時混凝土的應力為等值矩形分佈。

藉由力平衡求出中立軸位置，再由彎矩平衡解出極限彎矩 M_u ，最後可得：

$$Q_{fu} = \frac{2M_u}{H} \quad (3-9)$$

2. 剪力極限載重 (Q_{su})

$$Q_{su} = Q_{sc} + Q_s \quad (3-10)$$

$$Q_s = \frac{A_h \cdot f_{yh} \cdot d}{S_h} \quad (3-11)$$

其中 Q_{sc} : 剪力開裂載重 (N)，依 (3-5) 式計算

Q_s : 箍筋提供的剪力強度 (N)

- A_h : 箍筋剖面積 (mm²)
 S_h : 箍筋間距 (mm)
 f_{yh} : 箍筋的降伏強度 (MPa)
 d : 有效柱深 (mm)

三、降伏載重 (Q_y)

採極限載重 (Q_u) 的 85% 計算, 即

$$Q_y = 0.85 \min(Q_{fu}, Q_{su}) \quad (3-12)$$

四、破壞載重 (Q_f)

$$Q_f = (Q_{cr} + Q_y) / 2 \quad (3-13)$$

3-3.2 RC 柱各階段之剛度與位移

一、撓曲剛度及撓曲位移

$$B = \frac{\Delta Q \cdot H^3}{12(C_b E_c I_{gt})} \quad (3-14)$$

其中 B : Q 所造成的撓曲側向位移 (mm)

E_c : 混凝土的彈性模數為, 以 $4696\sqrt{f'_c}$ 計算 (MPa)

I_{gt} : 鋼筋等值轉換後的轉動慣量 (mm⁴)

C_b : 撓曲切線剛度的折減係數

1. 0 ~ Q_{cr} 階段

$$C_b = 0.78$$

2. Q_{cr} ~ Q_y 階段

$$C_b = 0.006806 \times f'_c \times \sqrt{1 + \frac{N}{3.43A_g}}, \quad 0.15 \leq C_b \leq 0.78 \quad (3-15)$$

3. Q_y ~ Q_u 階段

$$C_b = 0.006941 \times \frac{N}{f'_c \times r_s \times A_g}, \quad 0.03 \leq C_b \leq 0.15 \quad (3-16)$$

$$r_s = \frac{2A_h(b-2t+d-t)}{(b-2t)(d-t)S_h} \quad (3-17)$$

4. Q_u ~ Q_f 階段

$C_b = -0.0026$, 撓曲破壞

$C_b = -0.0300$, 撓剪破壞

$C_b = -0.1300$, 剪力破壞

其中 N : 軸壓力 (N)

A_g : RC 柱斷面積 (mm^2)

ν_s : 橫向剪力筋之體積比

A_h : 箍筋剖面積 (mm^2)

S_h : 箍筋間距 (mm)

b : 柱寬 (mm)

d : 有效柱深 (mm)

t : 保護層厚度 (mm) , 算至鋼筋中心

二、剪力剛度及剪力位移

$$s = \frac{1.2\Delta Q \cdot H}{C_s G A_{gt}} \quad (3-18)$$

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (3-19)$$

1. $0 \sim Q_{cr}$ 階段 ($\nu = 0.2$)

$$C_s = 0.4$$

2. $Q_{cr} \sim Q_y$ 階段 ($\nu = 0.3$)

$$C_s = 35 \frac{N \nu_s}{f_c' A_g}, \text{ 但 } C_s \leq 0.07 \quad (3-20)$$

3. $Q_y \sim Q_u$ 階段 ($\nu = 0.4$)

$$C_s = 4.5 \frac{N \nu_s}{f_c' A_g}, \text{ 但 } C_s \leq 0.01 \quad (3-21)$$

4) $Q_u \sim Q_f$ 階段 ($\nu = 0.5$)

$$C_s = -1/2500, \text{ 撓曲破壞}$$

$$C_s = -1/280, \text{ 撓剪破壞}$$

$$C_s = -1/150, \text{ 剪力破壞}$$

其中 s : Q 所造成的剪力側向位移 (mm)

ν : 波松比

C_s : 剪力切線剛度折減係數

A_{gt} : 鋼筋轉換成等值混凝土之柱全斷面積 (mm^2)

A_g : 柱斷面積 (mm^2)

3-4 RC 牆的側向載重與側向位移之非線性曲線

本文之 RC 牆非線性 Q- 曲線計算公式及參數主要引用自賴慶鴻《鋼筋混凝土剪力牆強度與剛度之試驗與分析》【29】及郭心怡《學校建築快速耐震診斷》【19】論文之建議。將 RC 牆受側向力後的側向總位移 T 視為撓曲位移 B 與剪力位移 S 的疊加。

RC 牆所受側向外力由零逐漸增加至開裂載重 (Q_{cr}) 及極限載重 (Q_u), RC 牆受力行為即由彈性階段進入開裂階段與破壞階段。若能明確訂定各階段的撓曲剛度及剪力剛度, 即可計算各階段的撓曲位移 B 與剪力位移 S , 疊加即得總位移 T 。其各階段之外力及位移, 介紹如下:

3-4.1 RC 牆各階段載重

牆體受側向力後既不是懸臂式變形也不是上下拘束不轉動式的變形, 實際變形介於兩者之間, 換言之, 牆底所受剪力 Q 與彎矩 M 之關係, 既不是懸臂式變形的 $Q = \frac{M}{H}$, 也不是上下拘束不轉動時變形的 $Q = \frac{2M}{H}$, 本文取兩者之平均, 即 $Q = \frac{1.5M}{H}$; 而變形量 B 與所受剪力 Q 之關係, 既不是懸臂式時的 $B = \frac{Q \cdot H^3}{3EI}$, 也不是上下拘束不轉動時的 $B = \frac{Q \cdot H^3}{12EI}$, 本文取兩者之平均, 即 $B = \frac{Q \cdot H^3}{7.5EI}$ 。

一、RC 牆開裂載重 $Q_{cr} = \min(Q_{fc}, Q_{sc})$

1. 撓曲開裂載重 (Q_{fc})

$$Q_{fc} = \frac{1.5M_{cr}}{H} \quad (3-22)$$

$$M_{cr} = \frac{I_g \left(f_r + N/A_g \right)}{y} \quad (3-23)$$

其中 M_{cr} : 開裂彎矩 (N-mm)

H : RC 牆淨高 (mm)

N : 軸壓力 (N)

A_g : RC 牆全斷面積 (mm^2)

y : RC 牆斷面深, $y = W_T / 2$ (mm)

f_r : 混凝土的破裂模數, $f_r = 0.623\sqrt{f_c'}$, f_c' 為
混凝土標稱抗壓強度 (MPa)

I_g : 轉動慣量, 為未開裂前 RC 牆剖面忽略鋼筋的
轉動慣量 (mm⁴)

$$I_g = \frac{1}{12}t_c W_T^3 - \frac{1}{12}(t_c - t_w)W_w^3 \quad (3-24)$$

t_c : 牆邊界柱的厚度 (mm)

t_w : RC 牆的厚度 (mm)

W_T : RC 牆總寬度, 包含邊界柱 (mm)

W_w : RC 牆淨寬度 (mm)

2. 剪力開裂載重 (Q_{sc})

$$Q_{sc} = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}A_g \left(1 + \frac{N}{14A_g} \right) \left\{ 1 - 0.1 \left[3.8 \left(\frac{H}{2W_T} \right) - 2.6 \right] \left(1 + 2 \frac{A_g'}{A_g} \right) \right\} \quad (3-25)$$

式中 A_g' : 邊界柱的全斷面積 (mm²)

f_c' 之單位為 MPa ;

軸力 N 與 Q_{sc} 之單位為牛頓 (N)

二、RC 牆極限載重 $Q_u = \min(Q_{fu}, Q_{su})$

1. 撓曲極限載重 (Q_{fu})

依 ACI 規範計算, 假設

- (1) 應變線為一直線, 即與中立軸距離成正比。
- (2) 混凝土破壞時最大應變為 0.003。
- (3) 鋼筋應力應變曲線假定為二折線。
- (4) 張力邊混凝土之張應力忽略不計。
- (5) 破壞時混凝土的應力為等值矩形分佈。

藉由力平衡求出中立軸位置, 再由彎矩平衡解出極限彎矩 M_u , 最後可得:

$$Q_{fu} = \frac{1.5M_u}{H} \quad (3-26)$$

2. 剪力極限載重 (Q_u)

假定含邊界柱 RC 牆的剪斷路徑為 45 度斜坡, 碰到底座梁時, 再沿

梁頂水平路徑剪斷之。

$$Q_u = Q_{sc} + Q_s \quad (3-27)$$

$$Q_s = \frac{m}{1+m} (A_{ch} + A_{wh} + A_{vl}) f_y + i (A_{v2} f_y + N) \quad (3-28)$$

Q_{sc} : 剪力開裂載重 (N)

Q_s : 鋼筋提供的剪力強度 (N)

i : 剪力破壞的摩擦係數, $i=0.48$

A_{ch} : 邊界柱在 45° 破壞路徑被切過的水平箍筋剖面積 (mm^2)

A_{wh} : RC 牆在 45° 破壞路徑被切過的水平筋剖面積 (mm^2)

A_{vl} : RC 牆與邊界柱在 45° 破壞路徑被切過的垂直筋剖面積 (mm^2)

A_{v2} : RC 牆與邊界柱在水平破壞路徑被切過的垂直筋剖面積 (mm^2)

N : 軸壓力 (N)

f_y : 鋼筋的降伏強度 (MPa)

3-4.2 RC 牆各階段之剛度與位移

一、 $0 \sim Q_{cr}$ 階段之位移

1. 撓曲剛度與撓曲位移

$$B = \frac{\Delta Q \cdot H^3}{7.5(BE_c I_g)} \quad (3-29)$$

B : Q 所造成的撓曲位移 (mm)

E_c : 混凝土的彈性模數, 以 $4696\sqrt{f_c'}$ 計算 (MPa)

I_g : 未發生撓曲開裂前之全剖面轉動慣量 (mm^4)

B : 撓曲切線剛度的折減係數, $B=0.3$

2. 剪力剛度與剪力位移

$$s = \frac{\Delta Q \cdot H}{(GA_g)_{eff}} \quad (3-30)$$

式中 考慮形狀因子後之等值 $(GA_g)_{eff}$ 取為 $\frac{GA_g}{3}$

s : Q 所造成的剪力位移 (mm)

G : 剪力模數, $G = \frac{E_c}{2(1+\nu)}$, $\nu=0.2$

A_g : 未發生開裂前牆體之剖面積 (mm^2)

3. 總開裂位移

故於開裂點時所造成之位移

$$T_{cr} = B_{cr} + S_{cr} \quad (3-31)$$

B_{cr} ：撓曲開裂位移 (mm)

S_{cr} ：剪力開裂位移 (mm)

T_{cr} ：總開裂位移 (mm)

二、 $Q_{cr} \sim Q_u$ 階段之位移

本文此部分採用郭心怡碩士論文【19】的計算公式，介紹如下：

$$Q = A_T (\ln \Delta_T) + B_T \quad (3-32)$$

$$A_T = \frac{Q_u - Q_{cr}}{\ln \Delta_{Tu} - \ln \Delta_{Tcr}} \quad (3-33)$$

$$B_T = \frac{Q_{cr} \ln \Delta_{Tu} - Q_u \ln \Delta_{Tcr}}{\ln \Delta_{Tu} - \ln \Delta_{Tcr}} \quad (3-34)$$

$$B_u = 0.0038 \left(8.5 \frac{H}{W_T} - 1 \right) \left(1 - 0.72 \frac{I_b'}{I_g} \right) H \quad (3-35)$$

$$S_u = 0.011 \left(1 - 0.37 \frac{H}{W_T} \right) \left(1 - 0.5 \frac{A_b'}{A_g} \right) H \quad (3-36)$$

其中 T ：總位移 (mm)

T_u ：總極限位移 (mm)， $T_u = B_u + S_u$

T_{cr} ：總開裂位移 (mm)， $T_{cr} = B_{cr} + S_{cr}$

B_u ：撓曲極限位移 (mm)

I_b' ：邊界柱突出肢對中央軸的轉動慣量 (mm⁴)

S_u ：剪力極限位移 (mm)

A_b' ：邊界柱突出肢的總面積 (mm²)

3-5 磚牆的側向載重與側向位移之非線性曲線

本文之磚牆非線性 Q- Δ 曲線計算公式及參數主要引用自黃國彰《有邊界柱梁之磚牆耐震試驗與等值牆版分析》【30】及郭心怡《學校建築快速耐震診斷》【19】論文之建議。將構架內磚牆視為二維等值牆版，即將非等向性的磚牆視為一等向性面內版，經實驗及理論方式，透過磚牆主應力與變形，以求得構架內填充磚牆的極限強度及極限點割線模數，再

進一步求得構架內磚牆的側向載重與側向位移之非線性曲線。

等值牆版的分析模式，是將構架以及構架內磚牆受側力作用的行為，視為鋼筋混凝土構架、磚牆、磚牆與構架的互制作用三項的總和。分析時將含磚牆的鋼筋混凝土構架分解成鋼筋混凝土構架及構架內受圍束磚牆兩部份，亦即將磚牆強度及磚牆與構架的互制作用歸屬於受圍束磚牆的部份。理論分析時將磚牆視為一等向性面內版，利用彈性力學理論，分析磚牆中央點主應力與變形，再由實驗求得磚牆的抗張強度。當磚牆中央點的理論主應力等於磚牆的實驗抗張強度時，磚牆就會開裂破壞。但將之與實驗比較，因磚牆係複合材料，非等向性材料，須藉由修正係數 a ，兩者才會相等。最後求得構架內磚牆的水平極限強度及極限點割線模數迴歸公式。

另外，在計算構架內磚牆極限強度的時候，由於考慮磚牆的剪力破壞路徑會傳遞至柱子，磚牆剪壞，柱子也跟著剪壞，故將邊界柱與磚牆視為一體，其變形主要由磚牆主導，惟在計算磚牆極限強度 Q_u 時，需加上柱子的剪力極限載重 Q_{su0} 。

3-5.1 磚牆的強度

一、磚牆的抗張強度

本文採用郭心怡【19】之建議紅磚的單軸抗壓強度 $f_b' = 13\text{MPa}$ ，紅磚的抗張強度 f_{tb} 約為紅磚的單軸抗壓強度 f_b' 的 22%，為 2.86 MPa；紅磚與砂漿介面的抗張強度 f_{mb} 約為 0.2MPa，砂漿的抗張強度 $f_{tm} = 2\text{MPa}$ 。

黃國彰【30】於碩士論文中提到，砂漿與紅磚所佔的比例關係，以及磚牆產生裂縫時，裂縫必須經過一層砂漿橫縫，而後再垂直撥開一條紅磚與砂漿介面，再往下切斷一層紅磚；因此若以均質等向性材料理論估算磚牆產生裂縫時，砂漿的貢獻比例以體積比例計算之為 13%，紅磚及紅磚與砂漿介面兩者平均貢獻約佔 87%。所以若將磚牆視為等向性材料，磚牆能忍受極限抗張強度假定為：

$$f_t = 0.13f_{tm} + 0.87\left(\frac{f_{tb} + f_{mb}}{2}\right) \quad (3-37)$$

f_t ：磚牆達極限破壞時的抗張強度（MPa）

f_{tm} ：砂漿的抗張強度（MPa）

f_{tb} ：紅磚的抗張強度（MPa）

f_{mb} ：紅磚與砂漿介面的抗張強度（MPa）

二、有效寬度

從黃國彰【30】的試體中，劉白梅【13】觀察到：當磚牆的高寬比小於 1 時，在形成裂縫的過程中僅在兩受壓處產生 45° 斜向裂縫，其間則由水平介面裂縫聯繫兩角隅的斜向裂縫。因水平砂漿與紅磚介面的抗張強度不高，若略去不計，則抵抗水平外力的牆體寬僅有斜向裂縫形成的區域，因此對牆寬的認定劉白梅【13】做了修正，即 $W_{eff} = \min(H, W)$ ，其中 H 為磚牆高， W 為磚牆寬。如圖 3-4 所示。

三、磚牆中央點主應力

由黃國彰碩士論文【30】推導，求得有效牆寬中心點 ($W_{eff}/2, H/2$) 的正向應力與剪應力為：

$$s_x = -\frac{5Q_u}{8Ht} \quad (3-38)$$

$$s_y = -\frac{5HQ_u}{8W_{eff}^2 t} \quad (3-39)$$

$$t_{xy} = -\frac{5Q_u}{4W_{eff} t} \quad (3-40)$$

式中 s_x ：磚牆中央點 X 向的正向應力 (MPa)
 s_y ：磚牆中央點 Y 向的正向應力 (MPa)
 t_{xy} ：磚牆中央點所受的剪應力 (MPa)
 W_{eff} ：磚牆有效寬度 (mm)，取 $\min(H, W)$
 Q_u ：磚牆水平極限強度 (N)
 H ：磚牆高 (mm)
 t ：磚牆厚 (mm)

磚牆中點主張應力為：

$$s_{pp} = \frac{s_x + s_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_x - s_y}{2}\right)^2 + t_{xy}^2} \quad (3-41)$$

四、磚牆水平極限剪力

由於磚牆極限強度 (3-37) 式，是在紅磚，砂漿等材料在理想狀況

下求得；(3-41) 式也是等向性平版理論推導出來，故須乘上一修正係數 a 才能讓這兩條公式的應力相等，即 $s_{pp} = a \cdot f_t$ ，此為 Q_u 的一元二次方程式，解 Q_u ，得

$$Q_u = \frac{4t}{15H} \left(W_{eff}^2 + H^2 + \sqrt{W_{eff}^4 + 14W_{eff}^2 H^2 + H^4} \right) \cdot a \cdot f_t \quad (3-42)$$

其中 a 值，黃國彰【30】認為與高寬比有關，經回歸析後得到

$$\text{三邊圍束：} a = 0.0884 + 0.0313 \frac{H}{W} \quad (3-43)$$

$$\text{四邊圍束：} a = 0.00251 + 0.314 \frac{H}{W} \quad (3-44)$$

郭心怡【19】利用劉白梅【13】修正後的 W_{eff} 與 a ，檢討磚牆的水平極限載重與 $\frac{H}{W}$ 的關係，發現越高瘦的磚牆，強度越高，如圖 3-5 所示，這並不合理，因此再次對有效牆寬做了回歸修正，結果為

$$\text{三邊圍束：} a = 0.1108 \frac{W_{eff}}{H} \quad (3-45)$$

$$\text{四邊圍束：} a = 0.2591 \frac{W_{eff}}{H} \quad (3-46)$$

3-5.2 磚牆的剛度與位移

1. 磚牆側向極限位移

由黃國彰碩士論文【30】推導，求得側向極限位移為：

$$\Delta_u = \frac{V_u}{E_u t} \left[\frac{H}{W_{eff}} \left(2.375 + \frac{2H^2}{W_{eff}^2} \right) + \frac{3W_{eff}}{H} \right] \quad (3-47)$$

式中 $E_u = 582c\sqrt{f_b'}$

u ：磚牆側向極限位移 (mm)，但 $\frac{\Delta_u}{H} \leq 0.01$

E_u ：極限點割線彈性模數 (MPa)

c ：極限點割線彈性模數的修正係數

f_b' ：紅磚的單軸抗壓強度 (MPa)

其中 c ，黃國彰認為與高寬比有關，由回歸得到：

$$\text{三邊圍束：} c = 0.161 \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.99} \quad (3-48)$$

$$\text{四邊圍束：} c = 0.269 \left(\frac{H}{W} \right)^{-1.82} \quad (3-49)$$

郭心怡【19】重新回歸修正，得到：

$$\text{三邊圍束： } c = 0.2528 \frac{W_{eff}}{H} \quad (3-50)$$

$$\text{四邊圍束： } c = 0.5095 \frac{W_{eff}}{H} \quad (3-51)$$

2. 磚牆的全程側向載重與側向位移關係方程式

郭心怡採用黃國彰【30】的方法，亦即仿照混凝土應力應變曲線的原則，由最高點資料，訂定全程曲線方程式。假定全程側向載重 Q 為側向位移 Δ 的三次方程式，並且通過最高 (Δ_u, Q_u) 點，即

$$Q = Q_u \left[3 \frac{\Delta}{\Delta_u} - 3 \left(\frac{\Delta}{\Delta_u} \right)^2 + \left(\frac{\Delta}{\Delta_u} \right)^3 \right] \quad (3-52)$$

式中 Q ：磚牆的側向載重 (N)

Q_u ：磚牆的側向極限載重 (N)

Δ ：磚牆的側向位移 (mm)

Δ_u ：磚牆的極限側向位移 (mm)

3-6 建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r 與崩場地表加速度 a_c

3-6.1 建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r

當水平地震力作用於建築物某樓層時，地震力會按該樓層各個垂直構材的勁度分配地震力：勁度大的構材，如鋼筋混凝土牆、短柱，分配到較大的地震力，勁度小的構材，如一般柱，則分配到較小的地震力。此時若是構材的最大剪斷力，即保有耐力小於所分配得的地震力，表示該構材無法承受如此大的水平外力，將會破壞；若是構材保有耐力大於所分配得的地震力，表示該構材能承受如此大的水平外力而不會破壞，但會依其在線性或非線性階段有不同程度的損壞。

相同地，反過來說，若能依照各個垂直構材的勁度計算出其保有耐力，再以位移控制（因為不一定所有的構材同時發揮到極限），就能疊加而得建築物該樓層保有耐力 Q_r ， Q_r 也就是建築物該樓層所能承受的最大水平外力。

本文計算建築物診斷樓層保有耐力 Q_r 的流程如下：

- 一、將診斷樓層的垂直構材分組，先依照種類分類（RC 柱、RC 牆、磚牆），再依照斷面尺寸及配筋而分，最後依照高度再細分。
- 二、計算各垂直構件組的桿件數。
- 三、畫出各單支垂直構件的非線性 $Q-\Delta$ 曲線。
- 四、將各單支垂直構件的非線性 $Q-\Delta$ 曲線，乘上各自的桿件數得到各垂直構材組的非線性 $Q-\Delta$ 曲線。
- 五、將各垂直構材組的非線性 $Q-\Delta$ 曲線疊加，即得建築物診斷樓層的層剪力與水平位移之非線性曲線。
- 六、建築物診斷樓層的層剪力與水平位移之非線性曲線的最大值，為建築物診斷樓層之保有耐力 Q_r 。

3-6.2 崩塌地表加速度 a_c

從前一小節，已經得到建築物診斷樓層的保有耐力 Q_r 。對同一棟建築物而言， Q_r 越大，耐震能力越佳， Q_r 越小，耐震能力越差。但保有耐力是一相對的指標，不同建築物的保有耐力，彼此之間無法相互比較，所以必須將保有耐力正規化，轉換成絕對的指標—崩塌地表加速度，才有指標的實質意義。

本小節先說明現行建築物耐震設計規範中設計地震力 V_d 的內涵，瞭解保有耐力 Q_r 與設計地震力 V_d 的關係。再介紹結構系統地震力折減係數 F_u 及崩塌地表加速度 a_c 的計算方式。另外，從 921 集集大地震或 1022 嘉義地震災區中發現，眾多標準國中小建築、鄉鎮公所以及沿街店鋪住宅建築多在一樓破壞，因此本節僅針對一樓崩塌時的狀況求其崩塌地表加速度。若要診斷任意樓層崩塌時的地表加速度，必須做一些修正，修正的方式將在 3-6.3 節介紹。

一、耐震設計規範中設計地震力 V_d 的意義【26】

1. 我國現行建築技術規則耐震設計的目標是要對付回歸期 475 年的震，因此震區加速度係數 Z 是代表工址回歸期 475 年的地震水平加速度與重力加速度的比例， Zg 即為回歸期 475 年的地震水平加速度如圖 3-6(a)所示。

2. 工址正規化水平加速度反應譜係數 C ，為最大地表水平加速度等於 $1.0g$ 時的結構加速度彈性反應係數，故 ZC 代表建築物在地表加速度達 475 年回歸期 Z 時，引致的絕對水平加速度。為了說明起見，若結構物可視為單自由度結構物，則如圖 3-6(a)所示，該結構物底部受到的地表加速度為 Zg 時，結構頂部將受到 ZCW 的彈性反應地震力。
3. 對於重要的建築物，規範規定用途係數 I 值採用 1.5 或 1.25，此意味著耐震設計的目標已超越對付工址回歸期 475 年之地震，甚至可能達到回歸期 1000 年以上的地震。如圖 3-6(b)所示，此時結構物頂部受到的地震力為 $V_e = ZCIW$ ，稱為彈性反應地震力；此時的地表加速度 $a_c = ZI g$ 為結構物崩塌加速度。
4. 由於建築物具有韌性，若將建築物設計成大地震時仍保持彈性，殊不經濟。大地震時容許建築物進入非彈性變形，可將彈性設計地震力予以降低，而其能降低的幅度端視其韌性好壞而定。韌性好的建築物，結構系統地震力折減係數 F_u 就可以大一些。 F_u 為 V_e/V_u 之比值。如圖 3-6(c)所示，此時已考慮結構物的韌性，其地震力 $V_u = \frac{ZCI}{F_u} W$ ，稱為彈塑性系統之極限地震力。
5. 建築物承受側力與其所產生的側位移，在外力不大時係線性，當建築物第一個構材斷面開始降伏時之作用力稱為 V_y (即降伏地震力)，其後會變為非線性，最後建築物在承受 V_u 的側力，側位移達 δ_u 時，因韌性被用盡而崩塌，此 V_u 稱為極限地震力。由於建築物靜不定度較高，在設計得頗均勻，各斷面降伏時機接近下，取保守的估計， V_u/V_y 值規範取 1.4。如圖 3-6(d)所示，若考慮此項安全因數則降伏地震力 $V_y = \frac{ZCI}{1.4F_u} W$ 。
6. 建築物的設計，不論採用工作應力法或極限設計法，在設計水平地震力 V_d 作用下，結構物尚未開始降伏。當地震力增加一個倍數 α_y ，達 V_y 後，第一個構材斷面才開始降伏，即 $\alpha_y = V_y/V_d$ 。如圖 3-6(e)所示，若考慮設計法的安全因數，則最後採用的設計地震力 $V_d = \frac{ZCI}{1.4\alpha_y F_u} W$ 。此時的地表加速度 a_d 即為設計地表加速度， $a_d = \frac{ZI}{1.4\alpha_y F_u} g$ 。

二、建築物一樓保有耐力 Q_u 與彈塑性系統基底極限地震力 V_u

建築物在剪力房屋變形下，其層剪力與側向位移之非線性曲線，是各單支垂直構材的非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的和，包含了線性與非線性的反應，已將韌性考慮在內。

建築物一樓保有耐力 Q_r 為一樓所能抵抗的最大水平外載重，當一樓所承受基底極限地震力 V_i 超過此值時，便判定整棟建築物破壞，無法繼續使用。因此一樓的非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線，為建築物一樓的彈塑性系統反應曲線，建築物一樓之保有耐力 Q_r 為建築物彈塑性系統所能忍受的基底極限地震力。

《建築物耐震設計規範及解說》【26】中的彈塑性系統基底極限地震力 V_u ，是考慮建築物韌性，將彈性反應地震力 V_e 以結構系統地震力折減係數 F_u 折減下來而得的，所以 V_u 與 Q_r 的地位相同，可以相互比較。

1. 當 $V_u > Q_r$ 時，表示該次地震所引起的彈塑性系統基底極限地震力，超過建築物一樓所能忍受的極限層剪力，故建築物判定為崩塌。
2. 當 $V_u < Q_r$ 時，表示該次地震所引起的彈塑性系統基底極限地震力，小於建築物一樓所能忍受的極限層剪力。
3. 當 V_u 落在建築物一樓非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的線性階段，則建築物一樓垂直構材完全沒有損壞。
4. 當 V_u 落在建築物一樓非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的非線性階段，則建築物一樓的韌性被消耗掉部分且有垂直構材破壞或損壞。

因此根據 V_u 所落在的位置，就可以判定各垂直構材的損壞程度。而且利用 V_u 與 Q_r 的相互關係，也可做出以下幾點判斷：

1. 對於新建的建築物，可用以設定預期的崩落地表加速度來決定建築物所需配置垂直構材的斷面積與配筋。
2. 對於已興建完成的建築物，可以計算其崩落地表加速度，檢討是否符合最新的耐震設計規範，再決定是否補強。
3. 對於受震害的建築物，可以判斷其損壞的程度，按照其所需再使用的年限及經濟效益，決定補強的程度或予以拆除。

三、結構系統地震力折減係數 F_u

由 3-6.1 節，已經得到建築物診斷樓層非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線。要利用此非線性曲線求得結構系統地震力折減係數 F_u ，必須先求得其在彈性反應時的地震力 Q_e 。但本文假設建築物為剪力房屋，梁版的剛度無窮大，使得非線性曲線彈性反應階段的剛度過大，會高估了建築物的韌性。

本文採用等能量法 (equal-energy method)【31】，求得結構系統地震力折減係數 F_u 。等能量法，是將建築物診斷樓層非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線，轉換成等值二折線，一為斜線段，另一為水平線段，水平線段的終點是診斷樓層非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的保有耐力 Q_r 與對應之位移點。二折線下所包圍的面積，與診斷樓層非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線到保有耐力與極限位移點所包圍的面積相同，如圖 3-7 所示，OABC 梯形面積等於 OB 曲線下方之面積。過了 Q_r 之後下坡段的峰值 G ，要計算結構系統地震力折減係數 F_u 時，同樣利用等能量法轉換成等值二折線，但此時水平線段對應的外力仍為 Q_r ，水平線段終點位移為峰值 G 所對應的位移，如圖 3-8 所示，OFGI 梯形面積等於 OKJ 曲線下方之面積。

等值二折線的斜線段，視為該建築物診斷樓層的彈性反應階段。本耐震診斷的適用範圍為基本振動周期 0.7 秒以下，沒有外加集中橫力的低層建築物，對這些短周期的建築物而言，彈性系統與彈塑性系統吸收的能量約略相等，因此建築物降伏後，只能再承受 $\sqrt{2R-1}$ 倍的地表加速度就會將韌性能量用盡而崩塌，其中 R 為韌性容量。因此再利用一次等能量原則，求得彈性反應時的地震力 Q_e ，亦即 OAED 三角形面積等於 OABC 梯形面積，OFKJ 三角形面積等於 OFGI 梯形面積，結構系統地震力折減係數 F_u ，即為 Q_e 與 Q_r 的比值。

四、崩場地表加速度 a_c

將《建築物耐震設計規範及解說》【26】中 ZI_g 以 a_c 表示， a_c 為建築物診斷樓層的崩場地表加速度，為求得崩場地表加速度，還需要有工址正規化水平加速度反應譜係數 C 值、結構系統地震力折減係數 F_u 與建築物的總重量 W 。工址正規化水平加速度反應譜係數 C 按照《建築物耐震設計規範及解說》【26】2.5 節計算。結構系統地震力折減係數 F_u ，如前所述方法求得，不取技術規則規定的籠統數目。若不知地盤種類則以普

通地盤視之。W 包括樓版、柱、梁與牆等靜載重以及活載重；但若屋頂為斜屋頂，則屋頂載重取正常頂樓樓版載重之三分之一計算。

經計算之後，得到建築物一樓的保有耐力 Q_r 、工址正規化水平加速度反應譜係數 C 、結構系統韌性折減係數 F_u 、樓地版總重量 W 等值，代入下式即可求得崩塌地表加速度 a_c 。

$$Q_r = \frac{a_c C W}{F_u} \quad (3-53)$$

3-6.3 任意樓層崩塌之耐震診斷

前一小節之耐震診斷方法只適用於一樓崩塌的情況，若要診斷任意樓層崩塌時的地表加速度，則需做以下修正。而整體建築物之崩塌地表加速度為比較各樓層所求得之 a_c ，再取其中最小者。

建築物保有耐力 Q_r 為診斷樓層所能抵抗的最大側向載重，當該樓層所分配到的極限地震力 V_i 超過此值時，便判定此樓層及整棟建築物破壞，無法繼續使用。因此建築物的非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線，是建築物診斷樓層的彈塑性系統反應曲線，建築物各樓層保有耐力 Q_r 為建築物彈塑性系統所能忍受的極限層剪力。

而《建築物耐震設計規範及解說》【26】中的彈塑性系統基底極限地震力 V_u ，是考慮建築物韌性，將彈性反應地震力 V_e 以結構系統地震力折減係數 F_u 折減下來而得的。將基本振動週期在 0.7 秒以下，沒有外加集中橫力的低層建築物 V_u 依照逆三角形豎向分佈後，即可計算各樓層所承受的極限層剪力 V_i ，所以 V_i 與 Q_r 的地位相同，可以相互比較。若建築物共有 n 層，診斷的樓層為第 i 層，且每一層樓的樓高，載重相同，則 $V_i = \frac{(n+i)(n-i+1)}{n(n+1)} V_u$ ，當 $i=1$ 時， $V_1=V_u$ ；當 $n=4$ 、 $i=3$ 時， $V_3=0.7V_u$ ；當 $n=4$ 、 $i=2$ 時， $V_2=0.9V_u$ 。換句話說，耐震診斷的公式修正為下式即可適用任意樓層之診斷：

$$Q_r = \frac{(n+i)(n-i+1) a_c C W}{n(n+1) F_u} \quad (3-54)$$

其中 $\frac{(n+i)(n-i+1)}{n(n+1)}$ 為修正項， n 為建築物的總樓層數， i 為診斷樓層，

一樓用 1，頂樓用 n 。 F_u 為診斷樓層的結構系統地震力折減係數，可由能量相等原則推算，不一定為規範所規定之值。

同樣地，吾人可以下列方式作為判別：

1. 當 $V_i > Q_r$ 時，表示該次地震所引起的彈塑性系統極限地震力，超過建築物診斷樓層所能忍受的極限層剪力，故建築物判定為崩塌
2. 當 $V_i < Q_r$ 時，表示該次地震所引起的彈塑性系統極限地震力，小於建築物診斷樓層所能忍受的極限層剪力。
3. 當 V_i 落在建築物非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的線性階段，則建築物垂直構材完全沒有損壞。
4. 當 V_i 落在建築物非線性 $Q-\ddot{A}$ 曲線的非線性階段，則建築物的韌性被消耗掉部分且有垂直構材破壞或損壞。

因此根據 V_i 所落在的位置，就可以判定各垂直構材的損壞程度。

3-7 本章小結

本文耐震診斷使用靜態推垮曲線法 (Static Pushover Method)，其基本假設為質量堆積在樓版處，質量包括該樓板的上層下半高與下層上半高範圍內的結構與非結構構材的總質量，另加四分之一法規所規定的教室建築構造最低活載重活載重計算；視建築物為剪力房屋 (shear building)，而且當局部破壞時不會造成整體建築物的崩塌。適用範圍為基本振動周期 0.7 秒以下低層 (low-rise) 鋼筋混凝土建築物，尤其適用於國內標準中小學建築、標準鄉鎮公所建築以及沿街店鋪住宅建築等。

靜態推垮曲線法的外加水平載重如《建築物耐震設計規範及解說》【26】為逆三角形豎向分佈，加在各個樓版上。外力從零逐漸按比例增加，增加到建築物某一樓層推垮為止。力的累加，則以位移控制，並按需要決定是否考慮偏心扭矩的影響。

建築物一樓耐震診斷的流程總結如下【24】，其流程圖如圖 3-9 所示：

1. 將一樓的垂直構材分組，先依照種類分類 (RC 柱、RC 牆、磚牆)，再依照斷面尺寸、配筋及單位柱載重而分，最後再依照高度細分。

2. 計算各垂直構件組的桿件數。
3. 建立各垂直構材之程式輸入檔。
4. 經由程式分析得到各垂直構材組的非線性 Q- Δ 曲線。
5. 將各垂直構材組的非線性 Q- Δ 曲線疊加，即得建築物一樓的基底剪力與水平位移之非線性曲線。
6. 建築物診斷一樓的基底剪力與水平位移之非線性曲線的最大值，為建築物一樓保有耐力 Q_r 。
7. 依等能量原則，計算結構系統地震力折減係數 F_u 。
8. 計算建築物的高度 h 、總樓地板面積 A_f 與建築物總重量 W 。
9. 依照《建築物耐震設計規範及解說》【26】計算工址正規化水平加速度反應譜係數 C 。
10. 計算一樓基底極限地震力 $V_u = \frac{a_c CW}{F_u}$ 。
11. 令 Q_r 與 V_u 相等，求得崩塌地表加速度 a_{co} 。

第四章 學校建築案例之耐震能力分析

4-1 實例分析之校舍介紹

本章擬自勘查區域（竹山鎮、國姓鄉及埔里鎮）內所蒐集之 16 棟校舍中，各挑選出兩棟校舍，其中一棟為小害或無害，另一棟為大害或崩塌，再進一步作程式之耐震診斷分析比較，案例介紹如下（表 4-1）：

一、竹山鎮竹山國小西北棟校舍

本棟教室興建於民國 67 年，其平面配置為四間教室連貫成之一字型，座向為座北朝南，長軸方向為東西向；單元教室柱距配置為長向三跨型即兩側各有四支窗台柱，跨距為 300cm，長向有 13 跨度，短向有 2 跨度；走廊為單邊無走廊柱式；立面系統為二層樓高且其屋頂為平屋頂形式，樓梯位於中央位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物受到嚴重損害，現已拆除重建。其平面圖，立面圖及結構平面圖，詳附圖 1-1 1-4。

二、竹山鎮延平國小東棟校舍

本棟教室興建於民國 86 年，其平面配置為二間教室連貫成之一字型，座向為座東朝西，長軸方向為南北向；單元教室柱距配置為長向三跨型即兩側各有四支窗台柱，跨距為 300cm，長向有 7 跨度，短向有 3 跨度；走廊為單邊有走廊柱式；立面系統為二層樓高且其屋頂為平屋頂形式，樓梯位於建築物之右側位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物幾乎沒有遭受損害。其平面圖，立面圖及結構平面圖，詳附圖 2-1 2-4，現況詳相片 2-6。

三、國姓鄉北山國中北棟校舍

本棟教室興建於民國 75 年，其平面配置為四間教室連貫成之一字型，座向為座北朝南，長軸方向為東西向；單元教室柱距配置為長向兩跨型即兩側各有三支窗台柱，跨距為 450cm，長向有 8 跨度，短向有 2 跨度；走廊為單邊無走廊柱式；立面系統為三層樓高且其屋頂為摺版屋頂形式，樓梯位於建築物之右側位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物受到嚴重損害，現已拆除重建。其平面圖，

立面圖及結構平面圖，詳附圖 6-1 6-4。

四、國姓鄉國姓國中南棟校舍

本棟教室興建於民國 85 年，其平面配置為三間教室連貫成之一字型，座向為座南朝北，長軸方向為東西向；單元教室柱距配置為長向三跨型即兩側各有四支窗台柱，跨距為 300cm，長向有 10 跨度，短向有 3 跨度；走廊為單邊有走廊柱式；立面系統為二層樓高且其屋頂為平屋頂形式，樓梯位於建築物之左側位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物僅遭受輕微損害。其平面圖，立面圖及結構平面圖，詳附圖 4-1 4-4，現況詳相片 2-8.1 及 2-8.2。

五、埔里鎮育英國小北棟校舍

本棟教室興建於民國 74 年，其平面配置為五間教室連貫成之一字型，座向為座北朝南，長軸方向為東西向；單元教室柱距配置為長向三跨型即兩側各有四支窗台柱，跨距為 300cm，長向有 16 跨度，短向有 2 跨度；走廊為單邊無走廊柱式；立面系統為二層樓高且其屋頂為平屋頂形式，樓梯位於中央偏左位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物受到嚴重損害，現已拆除重建。其平面圖，立面圖及結構平面圖，詳附圖 12-1 12-4。

六、埔里鎮愛蘭國小北棟校舍

本棟教室興建於民國 75 年，其平面配置為六間教室連貫成之一字型，座向為座北朝南，長軸方向為東西向；單元教室柱距配置為長向兩跨型即兩側各有三支窗台柱，跨距為 450cm，長向有 13 跨度，短向有 3 跨度；走廊為雙邊走廊，單邊有走廊柱、另一邊無走廊柱式；立面系統為二層樓高且其屋頂為平屋頂形式，樓梯位於建築物之中央外側位置。本棟教室在在 921 大地震作用下，建築物僅遭受輕微損害。其平面圖，立面圖及結構平面圖，詳附圖 13-1 13-4，現況詳相片 2-19.1 及 2-19.2。

4-2 耐震能力分析結果

一、竹山鎮竹山國小西北棟校舍

1. 校舍面積：388.80m²
2. 樓層數：地上 2 層，無地下室，屋頂為平屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.4m，建築物總高度 6.8m
4. 尺 度：X 軸 - 3.0 × 12 + 4.5 = 40.5m （13 跨）
Y 軸 - 3.6 × 2 + 2.4 = 9.6m （2 跨）
5. 方 位：X 軸（長軸方向）為東西向
6. 地盤種類：普通地盤
7. 使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f_c' = 20.58$ MPa
鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4$ MPa
砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2$ MPa
紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86$ MPa
紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2$ MPa
紅磚單軸抗壓強度 $f_b' = 13$ MPa
8. 診斷樓層：一樓
9. 診斷軸向：X 軸（長軸方向）
10. 垂直構材分類：如表 4-2 所示
11. 建築物週期： $T = 0.05h^{3/4} = 0.05 \times (6.8)^{3/4} = 0.21$ s
12. 工址正規化水平加速度反應譜係數 $C = 2.5$
13. 建築物重量 $W = 6412.14$ kN
14. 診斷結果如圖 4-1 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u = 2.57$
建築物一樓保有耐力 $Q_r = 1983.26$ kN
崩塌地表加速度 $a_c = 0.317g$

二、竹山鎮延平國小東棟校舍

1. 校舍面積：214.62m²
2. 樓層數：地上 2 層，無地下室，屋頂為平屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.6m，建築物總高度 7.4m
4. 尺 度：X 軸 - 3.0 × 6 + 3.57 = 21.57m （7 跨）
Y 軸 - 3.6 × 2 + 2.75 = 9.95m （3 跨）
5. 方 位：X 軸（長軸方向）為南北向
6. 地盤種類：普通地盤

7. 使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f_c' = 20.58 \text{ MPa}$
鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4 \text{ MPa}$
砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2 \text{ MPa}$
紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86 \text{ MPa}$
紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2 \text{ MPa}$
紅磚單軸抗壓強度 $f_b' = 13 \text{ MPa}$
8. 診斷樓層：一樓
9. 診斷軸向：X 軸（長軸方向）
10. 垂直構材分類：如表 4-3 所示
11. 建築物週期： $T = 0.05h^{3/4} = 0.05 \times (7.4)^{3/4} = 0.22 \text{ s}$
12. 工址正規化水平加速度反應譜係數 $C = 2.5$
13. 建築物重量 $W = 3708.03 \text{ kN}$
14. 診斷結果如圖 4-2 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u = 2.37$
建築物一樓保有耐力 $Q_r = 2310.47 \text{ kN}$
崩塌地表加速度 $a_c = 0.594g$

三、國姓鄉北山國中北棟校舍

1. 校舍面積： 360.00 m^2
2. 樓層數：地上 3 層，無地下室，屋頂為摺版屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.6m，建築物總高度 10.8m
4. 尺 度：X 軸 - $4.5 \times 8 = 36 \text{ m}$ （8 跨）
Y 軸 - $3.75 \times 2 + 2.5 = 10 \text{ m}$ （2 跨）
5. 方 位：X 軸（長軸方向）為東西向
6. 地盤種類：普通地盤
7. 使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f_c' = 20.58 \text{ MPa}$
鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4 \text{ MPa}$
砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2 \text{ MPa}$
紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86 \text{ MPa}$
紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2 \text{ MPa}$
紅磚單軸抗壓強度 $f_b' = 13 \text{ MPa}$
8. 診斷樓層：一樓

9. 診斷軸向：X 軸（長軸方向）
10. 垂直構材分類：如表 4-4 所示
11. 建築物週期： $T=0.05h^{3/4}=0.05 \times (10.8)^{3/4}=0.30s$
12. 工址正規化水平加速度反應譜係數 $C=2.5$
13. 建築物重量 $W=7134.02 \text{ kN}$
14. 診斷結果如圖 4-3 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u=2.88$
 建築物一樓保有耐力 $Q_r=2803.10 \text{ kN}$
 崩落地表加速度 $a_c=0.453g$

四、國姓鄉國姓國中南棟校舍

1. 校舍面積： 316.20 m^2
2. 樓層數：地上 2 層，無地下室，屋頂為平屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.6m，建築物總高度 8.2m
4. 尺 度：X 軸 - $3.0 \times 9 + 4.0 = 31.0 \text{ m}$ （10 跨）
 Y 軸 - $3.75 \times 2 + 2.7 = 10.2 \text{ m}$ （3 跨）
5. 方 位：X 軸（長軸方向）為東西向
6. 地盤種類：普通地盤
7. 使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f'_c = 20.58 \text{ MPa}$
 鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4 \text{ MPa}$
 砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2 \text{ MPa}$
 紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86 \text{ MPa}$
 紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2 \text{ MPa}$
 紅磚單軸抗壓強度 $f'_b = 13 \text{ MPa}$
8. 診斷樓層：一樓
9. 診斷軸向：X 軸（長軸方向）
10. 垂直構材分類：如表 4-5 所示
11. 建築物週期： $T=0.05h^{3/4}=0.05 \times (8.2)^{3/4}=0.24s$
12. 工址正規化水平加速度反應譜係數 $C=2.5$
13. 建築物重量 $W=6844.68 \text{ kN}$
14. 診斷結果如圖 4-4 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u=2.39$
 建築物一樓保有耐力 $Q_r=5500.44 \text{ kN}$

崩塌地表加速度 $a_c=0.769g$

五、埔里鎮育英國小北棟校舍

1. 校舍面積：535.00m²
2. 樓層數：地上 2 層，無地下室，屋頂為平屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.6m，建築物總高度 7.4m
4. 尺度：X 軸 - 3.0 × 15 + 5.0 = 50.0m（16 跨）
Y 軸 - 3.75 × 2 + 2.5 = 10.0m（2 跨）
5. 方位：X 軸（長軸方向）為東西向
6. 地盤種類：軟弱地盤
7. 使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f_c' = 20.58 \text{ MPa}$
鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4 \text{ MPa}$
砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2 \text{ MPa}$
紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86 \text{ MPa}$
紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2 \text{ MPa}$
紅磚單軸抗壓強度 $f_b' = 13 \text{ MPa}$
8. 診斷樓層：一樓
9. 診斷軸向：X 軸（長軸方向）
10. 垂直構材分類：如表 4-6 所示
11. 建築物週期： $T = 0.05h^{3/4} = 0.05 \times (7.4)^{3/4} = 0.22s$
12. 工址正規化水平加速度反應譜係數 $C = 2.5$
13. 建築物重量 $W = 6151.56 \text{ kN}$
14. 診斷結果如圖 4-5 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u = 2.30$
建築物一樓保有耐力 $Q_r = 3011.53 \text{ kN}$
崩塌地表加速度 $a_c = 0.450g$

六、埔里鎮愛蘭國小北棟校舍

1. 校舍面積：754.38m²
2. 樓層數：地上 2 層，無地下室，屋頂為平屋頂
3. 樓層高：一樓高 3.6m，建築物總高度 7.4m
4. 尺度：X 軸 - 4.5 × 12 + 6.35 = 50.0m（13 跨）

$$Y \text{ 軸} - 3.75 \times 2 + 2.5 \times 2 = 12.5\text{m} \quad (3 \text{ 跨})$$

- 5.方位：X 軸（長軸方向）為東西向
- 6.地盤種類：軟弱地盤
- 7.使用材料：假設混凝土抗壓強度 $f_c' = 20.58 \text{ MPa}$
 鋼筋降服強度為 $f_y = 274.4 \text{ MPa}$
 砂漿抗張強度 $f_{tm} = 2 \text{ MPa}$
 紅磚抗張強度 $f_{tb} = 2.86 \text{ MPa}$
 紅磚與砂漿介面的抗張強度 $f_{mb} = 0.2 \text{ MPa}$
 紅磚單軸抗壓強度 $f_b' = 13 \text{ MPa}$
- 8.診斷樓層：一樓
- 9.診斷軸向：X 軸（長軸方向）
- 10.垂直構材分類：如表 4-7 所示
- 11.建築物週期： $T = 0.05h^{3/4} = 0.05 \times (7.4)^{3/4} = 0.22\text{s}$
- 12.工址正規化水平加速度反應譜係數 $C = 2.5$
- 13.建築物重量 $W = 8647.23 \text{ kN}$
- 14.診斷結果如圖 4-6 所示：結構系統地震力折減係數 $F_u = 2.38$
 建築物一樓保有耐力 $Q_r = 5425.56 \text{ kN}$
 崩塌地表加速度 $a_c = 0.596g$

4-3 現場損害程度比較

將診斷所得資料，彙整成表 4-8，再與 921 地震後校舍受損狀況，做一比較可得表 4-9，以下就各棟之情形，分述如下：

一、竹山國小西北棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c = 317 \text{ gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r = 1983.3 \text{ kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u = 2.57$ 。而在 921 地震時其主要破壞方向為平行走廊方向，在鄰近之竹山國小測站所測得於該方向上之最大地表加速度為 518 gal ，遠高出建築物所能承受之地震力，故其於 921 地震中遭受嚴重破壞。診斷結果與現場實際狀況相符。

二、延平國小東棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c=594\text{gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r=2310.5\text{kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u=2.37$ 。而在 921 地震時，在鄰近之竹山國小測站所測得沿該棟校舍平行走廊方向上之最大地表加速度為 420gal ，在建築物所能忍受之範圍內，故於 921 地震時，主結構體幾乎沒有受到破壞。

三、北山國中北棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c=453\text{gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r=2803.1\text{kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u=2.88$ 。而在 921 地震時其主要破壞方向為平行走廊方向，在鄰近之國姓國小測站所測得於該方向上之最大地表加速度為 465gal ，高出建築物所能承受之地震力，故其於 921 地震中遭受嚴重破壞。診斷結果與現場實際狀況相符。

四、國姓國中南棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c=769\text{gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r=5500.4\text{kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u=2.39$ 。而在 921 地震時，在鄰近之國姓國小測站所測得沿該棟校舍平行走廊方向上之最大地表加速度為 465gal ，在建築物所能忍受之範圍內，故於 921 地震時，僅受輕微損害。

五、育英國小北棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c=450\text{gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r=3011.5\text{kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u=2.30$ 。而在 921 地震時其主要破壞方向為平行走廊方向，在鄰近之南光國小測站所測得於該方向上之最大地表加速度為 586gal ，遠高出建築物所能承受之地震力，故其於 921 地震中遭受嚴重破壞。診斷結果與現場實際狀況相符。

六、愛蘭國小北棟校舍：

該棟校舍經診斷後，其沿平行走廊方向所能忍受的最大崩塌地表加速度 $a_c=596\text{gal}$ ，建築物一樓之保有耐力 $Q_r=5425.6\text{kN}$ ，結構系統地震力折減係數 $F_u=2.38$ 。而在 921 地震時，在鄰近之南光國小測站所測得沿該棟校舍平行走廊方向上之最大地表加速度為 586gal ，在建築物所能忍受之範圍內，故於 921 地震時，僅受輕微損害。

4-4 本章小結

若按民國 71 年版本之建築技術規則【25】第 42 條至第 55 條之規定，將台灣地區劃分為成強震區 $Z=1.0$ ，中震區 $Z=0.8$ 及弱震區 $Z=0.6$ 三區，而南投縣當時劃分為中震區故 Z 值取 0.8；組構係數 K 值取 1.0；震力係數 C 值取 0.15；用途係數 I 值學校建築物取 1.25，故南投縣之校舍建築物於當時設計之可承受地表加速度至少應達 $0.8g \times 1.0 \times 0.15 \times 1.25=0.15g$ 。若按我國現行建築物耐震設計規範及解說【26】之規定，將台灣地區 475 年回歸期地震地表加速度分為兩區，強震區內一般建築物設計地表加速度為 $0.33g$ ，中震區為 $0.23g$ ，南投縣於 921 地震後劃分為強震區故 Z 值取 0.33。又因學校屬於供公共使用建築物，用途係數 I 取 1.25，故依據新規範設計之南投縣校舍建築物，其建築設計之可承受地表加速度至少應達 $0.33g \times 1.25=0.4125g$ ，才算合乎規範要求。

由以上之法規要求，及圖 4-1 4-6，表 4-8、4-9 之分析，吾人可作以下之探討：

一、由表 4-8 診斷結果顯示，耐震分析之六個案例其基本原有耐震能力均在 $0.31g$ 以上，其中遭受較嚴重損害之建築物為竹山國小西北棟校舍（興建於民國 67 年）、北山國中北棟校舍（興建於民國 75 年）及育英國小北棟校舍（興建於民國 74 年）雖分別僅能承受約 $0.32g$ 、 $0.45g$ 及 $0.45g$ 之地表加速度，但均高於當時法規要求的 $0.15g$ 甚多，分析其主要破壞原因，乃因其平行走廊方向所承受之地表加速度太大，分別為 $0.52g$ 、 $0.47g$ 及 $0.59g$ ，才會造成如此嚴重之損壞。

二、由分析各棟校舍之柱主筋鋼筋比 值發現，損壞較嚴重的建築物如

(1) 竹山國小西北棟校舍 值介於 1.24% (C3 柱) 1.90% (C1 柱) 之間。(2) 北山國中北棟校舍 值介於 1.07% (C4 柱) 2.65% (C6 柱) 之間。(3) 育英國小北棟校舍 值介於 1.83% (C5 柱) 3.06% (C4 柱) 之間。除了育英國小外，其餘兩棟建築物，其柱主筋鋼筋比 值有偏小之情形；而反觀損害較小之建築物如 (1) 延平國小東棟校舍 值介於 1.71% (C4 柱) 3.10% (C1 柱) 之間。(2) 國姓國中南棟校舍 值介於 1.90% (C4 柱) 3.31% (C3 柱) 之間。(3) 愛蘭國小北棟校舍 值介於 2.19% (C5 柱) 3.06% (C4 柱) 之間。其柱主筋鋼筋比 值均比損壞較嚴重的三棟建築物為大，尤以國姓國中南棟校舍的 值最大，這也是為何這些可承受較大的地表加速度之原因之一。

三、若就各校之柱箍筋間距 s_h 討論發現，損壞較嚴重的建築物如 (1) 竹山國小西北棟校舍 s_h 值固定為 20cm。(2) 北山國中北棟校舍 s_h 值固定為 25cm。(3) 育英國小北棟校舍 s_h 值介於 15 25cm 之間。除了育英國小外，其餘兩棟建築物，其柱箍筋間距 s_h 並不符合韌性設計精神；而反觀損害較小之建築物如 (1) 延平國小東棟校舍 s_h 值介於 10 20cm 之間。(2) 國姓國中南棟校舍 s_h 值介於 10 20cm 之間。(3) 愛蘭國小北棟校舍 s_h 值介於 15 25cm 之間。其柱箍筋間距 s_h 較符合韌性設計精神，即箍筋間距有圍束區及非圍束區之分。

四、若就建築物之結構系統發現，損壞較嚴重的三棟建築物，其走廊形式均為單側無走廊柱形式；相反的，另三棟損壞較輕微的建築物，其走廊形式則為單側有走廊柱形式。

第五章 提升學校建築耐震能力之探討

從第二章及第四章，吾人可知，影響學校建築耐震能力之因素眾多，本章將就幾個影響學校建築耐震能力之參數，如混凝土強度 (f_c')、柱主筋鋼筋比 (ρ)、柱橫向箍筋間距 (s_h)、柱配置方式及建築物樓層數作一探討，並對前章受損較嚴重的三棟校舍建築物作一適當的補強探討，期能對未來校舍之規劃設計，提供一可提升整體建築物耐震能力之具體建議。

5-1 影響耐震能力參數之探討

本節將以前章所分析之六棟校舍建築物，其中受損較嚴重之三棟校舍進行混凝土強度 (f_c')、柱主筋鋼筋比 (ρ)、柱橫向箍筋間距 (s_h)、柱配置方式等幾個影響學校建築耐震能力之參數探討；另三棟受損較輕微之校舍，則針對建築物之樓層數進行討論。

5-1.1 混凝土強度對學校建築耐震能力之影響

早期學校建築之興建，混凝土強度 f_c' 大多採用 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ ，較近期興建之學校建築則多採用 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ ；惟為考量混凝土老化及施工品質良窳因素，實際之混凝土強度通常較原本之設計強度為低，實際強度大多為設計強度之 70%~80%，根據南投縣教育局各中小學校舍結構補強工程報告書上所記載，震後耐震診斷所用混凝土極限強度 $f_c' = 130\text{kg}/\text{cm}^2$ ；如此一來，早期及近期興建之建築物其混凝土強度可相差將近一倍，其耐震能力勢必會造成某個程度上之折減。

今以前章診斷之三所受損較嚴重之校舍建築物（竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍），就混凝土強度 f_c' 為 $130\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $175\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $245\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $280\text{kg}/\text{cm}^2$ 等各不同情形時，探討混凝土強度 f_c' 對於學校建築耐震能力之影響（表 5-1）。

由圖 5-1 顯示，建築物之耐震能力隨著混凝土強度 f_c' 之增加而提升。以竹山國小西北棟校舍為例，當混凝土強度 f_c' 為 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 時，建築物

之耐震能力為 0.317g，隨著混凝土強度的折減，當 f_c' 降為 130kg/cm^2 時，建築物之耐震能力，略降為 0.268g（如圖 5-2 所示），降幅約為 15%；而當混凝土強度 f_c' 提升至 280kg/cm^2 時，建築物之耐震能力則略提高為 0.361g（如圖 5-3 所示），亦只增加了 13% 左右，其助益亦並不明顯。

由上述數據得知，混凝土品質之良窳對於學校建築物之耐震能力而言，每增減 70kg/cm^2 ，其影響程度約在正負 15% 之間。

5-1.2 柱主筋鋼筋比對學校建築耐震能力之影響

於 921 地震之震害調查中，許多學校建築在地震作用下，柱頂部發生嚴重的彎矩及剪力破壞，柱頭爆開，鋼筋嚴重外露，如相片 5-1 所示；由外露的鋼筋發現，大多數建築物之柱鋼筋量明顯不足。今以前章診斷之三所受損較嚴重之校舍建築物（竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍）為例，將其柱鋼筋配置視為一致，分別以 $r=1.32\%$ ，配置#5 鋼筋、 $r=1.90\%$ ，配置#6 鋼筋、 $r=2.59\%$ ，配置#7 鋼筋及 $r=3.38\%$ ，配置#8 鋼筋，以 $f_c' = 210\text{kg/cm}^2$ 之混凝土強度，探討鋼筋比 r 對學校建築耐震能力之影響（表 5-2）。

由圖 5-4 可明顯看出，建築物之耐震能力隨著鋼筋比 r 值之增加而提升。以竹山國小西北棟校舍為例，當 $r=1.32\%$ 時（如圖 5-5 所示），建築物之保有耐力 Q_r 為 1636.9kN，此時在受到 0.291g 的地表加速度時，建築物即發生崩塌，而隨著鋼筋比的增加，當 $r=3.38\%$ 時（如圖 5-6 所示），建築物之保有耐力 Q_r 為 2734.6kN，提升了 50%，而此時之耐震能力可至 0.405g，提升了 40%，由此可見，鋼筋比為建築物耐震能力之重要影響因素之一。

5-1.3 柱橫向箍筋間距對學校建築耐震能力之影響

於 921 震害調查中，許多學校建築物在地震力作用下，發生柱子頂部之彎矩及剪力破壞，於其爆開之柱頭中呈現出早期耐震規範及施工不當等所造成之缺陷，如箍筋間距過大（25 ~ 30cm）箍筋未設置耐震勾（即 135 度彎勾）等，此情況似乎成了一種常態，也因此加速了建築物的損壞。

今以前章診斷之三所受損較嚴重之校舍建築物（竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍）為例，就箍筋配置 #3@10cm、#3@15cm、#3@20cm、#3@25cm 及 #3@30cm 等各不同情形時，來探討箍筋間距對於學校建築耐震能力之影響（表 5-3）。

由圖 5-7 中顯示，箍筋間距由 10cm 加大為 30cm 時，建築物之耐震能力也隨之下滑。以育英國小北棟校舍為例，當箍筋間距為 20cm 時，建築物之耐震能力為 0.455g，保有耐力 Q_r 為 3046.9kN（如圖 4-5 所示），隨著箍筋間距縮小至 10cm 時，建築物之耐震能力提升為 0.485g，保有耐力 Q_r 提升為 3261.4kN（如圖 5-8 所示），建築物之耐震能力提升約 7%，保有耐力 Q_r 提升約 8%；而當箍筋間距加大至 30cm 時，建築物之耐震能力，則降為 0.421g，保有耐力 Q_r 降為 2851.0kN（如圖 5-9 所示），耐震能力降幅約 7%，保有耐力 Q_r 降幅約 6%。

由三棟校舍之耐震能力分析顯示，當橫向箍筋間距大於 15cm 時，其耐震能力逐漸減少，但變化緩慢，而間距由 10cm 至 15cm 時，其耐震能力則顯著降低。這也說明了，當箍筋間距符合現行耐震規範，即於梁柱接頭處之上柱底部及下柱頂部以 #3@10cm 之箍筋圍束時，建築物之耐震能力較好（實例如延平國小東棟校舍及國姓國中南棟校舍）；反之，若箍筋間距過大，則對整體建築物之耐震能力將大打折扣（實例如竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍）。因此，吾人不可忽視箍筋間距對於建築物耐震能力影響。

5-1.4 柱配置方式對學校建築耐震能力之影響

觀察早期學校建築之平面特性，其柱之配置強軸方向，多與走廊方向垂直，此配置方式較無法幫助抵抗平行走廊方向來的地震力。今以竹山國小西北棟校舍及育英國小北棟校舍為例，將其柱配置方向轉九十度，其餘因素不變，探討柱配置方式對學校建築耐震能力之影響（表 5-4）。

由表 5-4 顯示，竹山國小西北棟校舍若將其柱配置方向轉九十度，則其耐震能力將從原來的 0.317g 提升至 0.424g（圖 5-10），增加約 33%；而另一棟育英國小北棟校舍，若將其柱配置方向轉九十度，則其耐震能

力將從原來的 0.450g 提升至 0.645g (圖 5-11), 增加約 43%。

由此可知, 柱的配置方向對建築物之耐震能力, 影響極大, 故吾人於設計規劃階段時, 應儘可能的將柱的強軸方向配置平行於整棟建築物之長軸方向, 以利耐震能力之提升。

5-1.5 建築物樓層數對學校建築耐震能力之影響

由 921 震害調查結果顯示校舍增建的情形十分普遍, 如相片 2-14.1 2-14.3 所示, 這些校舍多為民國七十五年以前政府經費有限的情形下所興建。這些分期興建的校舍, 在耐震上與使用上有諸多缺點, 此部分已於第二章做過介紹, 本小節將針對前章所分析之三棟小害或無害之校舍(延平國小東棟校舍、國姓國中南棟校舍及愛蘭國小北棟校舍), 將其樓層數由二層樓加一層樓變為三層樓, 以探討建築物樓層數對學校建築耐震能力之影響(表 5-5)。

由表 5-5 顯示, 延平國小東棟校舍若將其樓層數增加一層樓, 則其耐震能力將從原來的 0.594g 下降至 0.412g(圖 5-12); 而對國姓國中南棟校舍而言, 其耐震能力將從原來的 0.769g 下降至 0.533g(圖 5-13); 對愛蘭國小北棟校舍而言, 其耐震能力將從原來的 0.596g 下降至 0.408g(圖 5-14), 三棟之耐震能力皆下降約 30%。

由此可知, 建築物樓層之增建, 對建築物之耐震能力, 影響極大, 故吾人於設計規劃階段時, 應儘量避免分層分期興建, 以免不必要之載重加載於原結構體上, 若沒辦法作整體規劃, 也應於規劃設計時, 事先將其未來可能增加之載重, 預先考慮進去, 以免地震來臨時, 造成不必要之災害。

5-2 補強標準及常用工法介紹

921 地震後, 許多建築物受到各種不同程度的損壞, 嚴重者需要拆除重建, 較輕微者則需要進行結構補強; 惟目前國內並沒有一結構補強之

完善相關設計、施工規範，故於實務界進行結構補強設計時常出現困難，其爭議性亦較大；本節將就本文所採用之補強標準及國內常用之結構補強方式作概略性之介紹。

5-2.1 補強標準介紹

本文所採用之標準為功能設計標準，以下將就此標準作一概念性介紹：

一、緣由

科技的發達在地震工程領域上，已有長足的進步，也已突破以往地震之不可確定因素，使得耐震設計從最基本的結構設計發展到以建築物之使用功能來訂定設計目標，達到保障財產價值及維持機能順暢之要求，且正逐漸受到重視。從 1994 年美國發生的北嶺大地震及 1995 年日本發生的阪神大地震到 1999 年台灣所發生的 921 大地震後顯示，依照目前規範要求所設計出的建築物雖可達到保障使用者的生命安全目標，但老舊建築物則受到損壞，該建築物建造當時之耐震設計規範尚未成熟或付諸缺如，加以年代久遠，結構體的耐震能力當然不足，要如何提昇其耐震能力，保障人員安全，則成為當今之社會責任；另外仍有一些新建的混凝土造、鋼構造、石造及木構造建築物也會受到很嚴重的損壞，其耐震能力減弱肇因於結構體缺乏保養及非結構體的損壞所致，而影響到結構體的耐震能力。

有鑑於此，自西元 1992 年起，加州工程師協會(SEAOC)組成一個特別的委員會，稱為 Vision 2000，係以多重組織共同努力，結合社會上相關團體的智慧及努力，並著眼於設計程序和最後使用目標，建立出一套設計標準，以設計程序為架構，作業流程不只注重結構設計過程，也將設計追蹤審核、施工品質保證和建物使用維修包括在內，每一步驟都需仔細確認，以期能確保建築物之耐震性能，使建築物具有可預期之使用功能，更具安全性、經濟性；期望將此設計構架發展成設計指導方針和規範條文，成為下個世紀的結構耐震規範，並預定於西元 2006 年完成整個計畫。

二、地震設計標準

因為地震的發生具有很高的隨機性，Vision 2000【33】建議之設計目標中，地震大小是以回歸週期或年超越機率來界定，小地震發生之機率高，隨著地震規模增大發生機率則降低許多；Vision 2000 建議之四種地震設計標準，其回歸期分別為 43、72、475、970 年，建築物受到該等地震作用時，其結構與非結構物使用功能在 Vision 2000 建議之設計目標中均有界定，設計時應依據預定之使用功能等級，採用適當方式來設計建物結構，使其達到預定使用功能目標之要求。Vision 2000 建議之四個設計目標所規定之地震等級分別如下所述：

1. 經常性地震(小震)：43 年回歸期即 50% 30 年超越機率。
2. 偶而性地震(中震)：72 年回歸期即 50% 50 年超越機率。
3. 稀有性地震(大震)：475 年回歸期即 10% 50 年超越機率。
4. 極稀有性地震(烈震)：970 年回歸期即 10% 100 年超越機率。

三、震後使用功能等級

為了確保震後的使用功能，建築物的結構元件、非結構元件以及各種設備必須先了解其各階段可能之受害程度及容許受害程度，才能訂出建築物結構之使用功能標準（表 5-6）。Vision 2000 建議將受害程度分成五級：

1. 無害或可完全使用(Fully Operational)：地震後，結構體及設備毫無受損，最大層間相對位移角須小於 0.2%。
2. 小害且尚可使用(Operational)：地震後輕微受損，結構體及設備經修護後可恢復運作，最大層間相對位移角須控制在 0.2%~0.5%。
3. 中害但可維護生命安全(Life Safe)：震後之結構體及設備容許中度受損，需要較長時間才能修復，結構仍然穩定，最大層間相對位移角須控制在 0.5%~1.5%為限制。
4. 大害或趨近崩塌(Near Collapes)：結構體嚴重受損，但仍然站立不倒，非結構體及設備已完全破壞。最大層間相對位移角須控制在 1.5%~2.5%。
5. 崩塌(Collapes)：結構體已崩塌。此時最大層間相對位移角大於 2.5%。

功能設計的目的，就是依照建築物之重要性分類，要求建築物受到四種不同大小地震作用時，能給予適當管制，甚至可再評估其結構體與設備之修復費用。

四、本文採用補強標準

1. 設計地表加速度

由於各國的構造及施工方法有很大的差異，因此在訂定台灣地區建築物功能設計規範時，應針對本土之營建方式來探討。同樣的，對於台灣各地區之地震危害度，在 921 地震後，也應重新修訂。本文參考成功大學土木系洪李陵教授於 921 集集地震後，根據各測站記錄，重新訂定的地震危害度曲線及地震再現期【34】，對台灣地區主要都市設計地表加速度(PGA)提出修正建議，修正前、後如表 5-7。本文因勘查學校位於強震區，故以台南市修正後設計 PGA 代表強震區之設計 PGA。

2. 建築物使用功能

本文對學校建築補強目標，不僅需達到現行建築技術規則規範要求，更應滿足未來功能設計要求。因學校建築屬於重要建築物，故其補強標準應比一般建築提昇，提昇程度不再以用途係數界定，而以建築類別界定之。例如在強震區的台南市，學校建築物受地表加速度 0.23g 地震力作用時，各樓層間變位角 $< 0.2\%$ 、地表加速度 0.41g 地震力作用時，各樓層間變位角 $< 0.5\%$ 、地表加速度 0.50g 地震力作用時，各樓層間變位角 $< 1.5\%$ 。

綜合以上兩點，可訂出南投地區之功能設計標準，如表 5-8 所示，本文將採用此標準作為案例補強之目標；也就是將前章受損較嚴重之三棟校舍，提升其崩落地表加速度至修正後的設計地表加速度，並檢核各階段地震的層間變位角，使之符合建築物使用功能標準。

5-2.2 耐震補強常用工法介紹

所謂耐震補強，即是針對耐震能力不足的結構物，做最適當的整體加勁或是桿件修補，讓結構物能符合現行最新的耐震規範。

目前既有建築物耐震補強採取的方式大致可分為以下三類：

1. 結構元件補強
2. 結構系統之調整與改善
3. 輸入地震力之減少

就結構補強原理而言，對各結構元件加以補強，一般或多或少皆可提昇總體結構之強度，但其補強成本卻極不經濟，所以在實際應用上，往往以結構系統與結構元件之補強方式配合使用，以達到最佳之補強功效與經濟性。以下就上述三種耐震補強方法作一概略性介紹【22】：

1. 建築物結構元件補強

- (1) RC 樑之補強：在既有的樑斷面上增設箍筋並增打混凝土或在樑的兩側及下緣貼鋼板，以提高樑之剪斷耐力。
- (2) RC 柱之補強：在既有的柱子上包覆鋼絲網、鋼板、複合材料、鋼板箍圍束或增設翼牆，以提高柱之剪斷耐力。
- (3) 壁體之補強：在既有牆壁位置加厚原 RC 牆，增設耐震 RC 牆或炭纖維布包覆之牆壁，以提高壁體之剪斷耐力。
- (4) 改善柱可變形長度：將連結於柱上端之垂壁與連結於柱下端之窗台拆除，或設置隔離縫使垂壁與窗台與柱子分開，以確保柱子之可變形長度。

2. 建築物結構系統改善補強

- (1) 增設耐力構架：在既存建築物外側新設扶壁或含斜撐之構架。
- (2) 增設翼牆：在既存柱之兩側加設 RC 翼牆，或將原有翼牆加寬或加厚。
- (3) 壁體之補強：在既有構架中增設耐震壁或加厚原有耐震壁，增設 RC 版或鋼板等之補強壁體，增設含鋼骨斜撐之 X 型、K 型 或 型框架。
- (4) 基礎之補強：配合其他結構系統改善補強進行基礎地盤改良、增設連續壁或群樁、基樁本身之補強。

3. 建築物輸入地震力之減少

- (1) 減輕重量：移去屋頂水塔、去除非抗震牆體、減少高層部份之規模、改用輕型構材等。
- (2) 增設制震裝置：裝設制震壁、TMD (Tuned Mass Damper) 或 AMD (Active Mass Damper) 等制震裝置，來抵減輸入之地震力或吸收地震能量。
- (3) 增設隔震裝置：在基礎裝設含鉛心多層橡膠墊 (LRB) 等隔震設施，以減少地震力傳到上部結構。

為了考慮採光與通風等學校建築之機能，台灣地區目前比較普遍的學校建築耐震補強方法有下列幾種：(1) 在柱與窗台之間切出隔離縫以減少短柱破壞之威脅(2) 增加柱或牆的剖面尺寸(3) 增設 RC 牆。下一節將就以上三種之補強方法，再作一詳細討論。

5-3 實際案例比較

本節將針對第四章所分析案例中，受損較嚴重的三棟校舍建築物(竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍)，挑選前節所介紹之耐震補強工法中常見之學校建築補強方法，加以補強，使之符合前節所述功能設計法之規定。以下將就柱與窗台間切隔離縫、加大柱斷面、增設 RC 剪力牆等補強工法，逐項探討其對學校建築耐震能力提升之影響程度。

5-3.1 柱與窗台間切隔離縫補強工法

台灣大多數的中小學校舍為了採光的考量，在平行於走廊的方向廣設玻璃窗，因此有許多磚砌之窗台緊貼柱邊。柱受到牆高度之圍束造成柱子的有效長度縮短，水平勁度大增，並產生極大的應力集中現象，而導致柱子所承受之地震力超過其抗剪強度，使得矮牆與樑底間之柱體產生斜角開裂現象。這種因為短柱效應所引起的剪力破壞是常見的地震災害，窗台與柱之間應規劃隔離縫，窗台與柱之間的隔離縫可分為完全隔離型與部分隔離型，完全隔離型之開口寬度應大於 30mm。其中，若有防水的需要時，應填充矽膠等防水彈性材料，以避免漏水。

本小節擬將竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北

棟校舍等三棟受損較嚴重之校舍的窗台柱與窗台切隔分開，討論其對耐震能力提升之效果。

由表 5-9 顯示，若不考慮功能設計標準，單就建築物之耐震能力而言，此工法確實可藉由提升建築物之整體韌性而提升其耐震能力，但其保有耐力 Q_r 卻會因而下降，此乃因為切隔離縫後，窗台柱之韌性增加，但抗剪能力卻減少的緣故；若再就功能設計標準作分析則發現，切隔離縫後，建築物之耐震能力反而下降，此乃因為雖然柱子之韌性增加，但其層間變位角需符合功能設計標準 小於 1.5% 之規定，故其整體耐震能力不升反降。

圖 5-15 為以竹山國小西北棟校舍為例所得之耐震診斷圖。由圖中可明顯看出，當不考慮功能設計標準時，建築物之耐震能力將從原來的 0.317g 提升至 0.403g，增加約 27%，而保有耐力 Q_r 從原來的 1983.3kN 下降至 1771.5kN，下降約 11%；而當考慮功能設計標準時，則其耐震能力將從原來的 0.317g 下降至 0.283g，下降約 10%，距該地區 475 年大震回歸期之設計地震力地表加速度 0.41g，尚有一段距離，故此工法對建築物耐震能力提升之效果，較不顯著。

5-3.2 加大柱斷面補強工法

此工法是於舊有柱桿件外配以鋼筋及箍筋，並澆置混凝土，以加大柱斷面面積，以增加桿件強度；此工法對於軸力、彎矩、剪力及韌性補強均有直接之成效。

本小節將竹山國小西北棟校舍及北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍等三棟受損較嚴重之校舍的柱斷面加大。竹山國小西北棟校舍及育英國小北棟校舍，其原斷面尺寸為 30cm×40cm 的柱子，將其柱斷面尺寸規劃為 35cm×45cm、40cm×50cm 及 45cm×55cm 三種，而北山國中北棟校舍則將其原斷面尺寸為 40cm×40cm 的柱子，加大規劃為 45cm×45cm、50cm×50cm 及 55cm×55cm 三種；其餘條件諸如鋼筋比、鋼筋間距、混凝土強度等均維持不變，以此討論柱斷面加大對耐震能力提升之效果。

由表 5-10 顯示，隨著柱斷面之增大，其耐震能力及保有耐力 Q_r 皆

會跟著增加，由此可知此工法確實可藉由提升柱之剛度及韌性進而提升建築物整體之耐震能力。且由表 5-12 可知，當柱斷面加大後，皆能符合現行之耐震法規規定，當加大約 50% 後，也大多能符合功能設計標準。

圖 5-16 為加大柱斷面後之北山國中北棟校舍之耐震診斷圖。由圖中可明顯看出，隨著柱斷面之增大，其耐震能力及保有耐力 Q_r 有隨著增加之趨勢。隨著柱斷面由 40cm×40cm 加大至 45cm×45cm、50cm×50cm 及 55cm×55cm 時，其耐震能力從 0.453g 分別提升至 0.559g、0.688g 及 0.833g，為補強前之 1.23 倍、1.52 倍及 1.84 倍。故此工法對建築物耐震能力之提升有顯著之效果。

5-3.3 增設 RC 剪力牆補強工法

就總體性而言，在結構補強的方式中，若能以改變結構系統的力量傳遞路徑方式來處理，應最具總體補強效益。其中，最普遍的結構系統之調整當推增設鋼筋混凝土剪力牆。增設剪力牆之功用：增設剪力牆不但可增加樓層剛度，防止變形過大，而適當的調整樓層的壁量及壁體值，更可以改善樓層剛心與質心偏心時之額外扭力之產生，而垂直剛度分布不連續之建築物，也可藉由耐震壁之調整以提高建築物之抗震能力。但是增設剪力牆可能會使建築物的使用機能受到影響，不符合原先的需求，所以在決定增設剪力牆的位置時，必須多加考慮，通常為避免造成對教室採光、通風上之不便，故可將之增設於梯間或廁所等服務空間位置上。

由第二章之震害案例得知，長向壁量比越高之建築物，其受損情形較輕微，耐震能力也越佳。本小節將針對竹山國小西北棟校舍、北山國中北棟校舍及育英國小北棟校舍等三棟受損較嚴重之校舍增設 RC 牆補強，討論其對耐震能力提升之效果。補強元素乃將 20cm 厚 RC 牆之寬度規劃為 100cm、300cm 及 450cm，分別討論其於單層雙向及雙層雙向配置 #5@20cm 鋼筋時，對學校建築耐震能力提升之影響程度：

由表 5-11 顯示，隨著 RC 牆寬度之增加，其耐震能力及保有耐力 Q_r 皆會跟著增加，而雙層雙向比單層雙向配置之耐震能力為佳。由表 5-12 可知，當建築物加入 RC 牆補強後，除竹山國小西北棟校舍補 100cm 之 RC 牆尚顯不足外，其餘皆能符合現行之耐震法規規定；但若需符合功能

設計標準，則最好可有兩片以上 RC 牆補強為佳。

圖 5-17 為以育英國小北棟校舍補強 100cm、300cm 及 450cm 之 RC 牆雙層雙向配置#5@20cm 鋼筋時之耐震診斷圖為例，當未補強前，其耐震能力為 0.450g，補強後分別提升至 0.485g、0.781g 及 1.258g，為補強前之 1.08 倍、1.74 倍及 1.80 倍。故此工法對建築物耐震能力之提升有顯著之效果；在滿足功能設計標準上，其已達烈震、中震之要求，但中震及大震之要求，尚因層間變位角較大而不能滿足功能設計標準，故圖 5-18 乃再加一片 RC 牆補強後之情形，由圖中顯示，此補強方式已可滿足功能設計標準，且其耐震能力更提升至 2.514g，較補一片 RC 牆時，又增加了一倍左右的耐震能力，故此工法對建築物耐震能力之提升有顯著之效果。

5-4 本章小結

經過耐震能力參數之探討及三種耐震補強方法評估之後，我們發現各參數對學校建築耐震能力之影響及各補強方案對於學校建築結構耐震能力的提高都有幫助，但是各種參數及補強方式所能貢獻之成效並不相同，歸納如下：

- 一、 早期及近期興建之建築物其混凝土強度可相差將近一倍，其耐震能力勢必會造成某個程度上之折減。由耐震診斷結果顯示，混凝土品質之良窳對於學校建築物之耐震能力而言，每增減 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ ，其影響程度約在正負 15% 之間。
- 二、 鋼筋比為建築物耐震能力之重要影響因素之一，以竹山國小西北棟校舍為例，當 $r=1.32\%$ 時（如圖 5-5 所示），建築物之保有耐力 Q_r 為 1636.9kN，此時在受到 0.291g 的地表加速度時，建築物即發生崩塌，而隨著鋼筋比的增加，當 $r=3.38\%$ 時（如圖 5-6 所示），建築物之保有耐力 Q_r 為 2734.6kN，提升了 50%，而此時之耐震能力可至 0.405g，提升了 40%。
- 三、 箍筋間距由 10cm 加大為 30cm 時，建築物之耐震能力也隨之下滑以育英國小北棟校舍為例，當箍筋間距為 10cm 時，建築物之耐震能力為 0.485g（如圖 5-8 所示），隨著箍筋間距加大至 30cm 時，建

築物之耐震能力降為 0.421g(如圖 5-9 所示),耐震能力降幅約 15%。

- 四、 柱的配置方向對建築物之耐震能力，影響頗大，以竹山國小西北棟校舍為例，若將其柱配置方向轉置九十度，則其耐震能力將從原來的 0.317g 提升至 0.424g (圖 5-10)，增加約 33%。
- 五、 建築物樓層之增建，對建築物之耐震能力，影響極大，由診斷結果顯示，每增建一層樓，其耐震能力下降約 30%。因此，於設計規劃階段時，應儘量避免分層分期興建，以免不必要之載重加載於原結構體上。若真的沒辦法作整體規劃，也應於規劃設計時，事先將其未來可能增加之載重，預先考慮進去，以免地震來臨時，造成不必要之災害。
- 六、 切割柱子與窗台之間的隔離縫之後，使原本與窗台相接的柱子韌性略有增加（因為柱子箍筋量不足，所以韌性很差），但是卻少了窗台磚牆所提供的強度，然而這韌性的增加並無法彌補強度的降低，反而會造成變位的增加，所以雖然其耐震能力有些為的增加，但以功能設計標準檢驗時，其層間變位角需符合功能設計標準 小於 1.5 % 之規定，故其耐震能力沒有增加反而降低了。
- 七、 柱斷面加大補強工法，確實可有效提升建築物之耐震性能；以北山國中北棟校舍為例，隨著柱斷面由 40cm×40cm 加大至 45cm×45cm、50cm×50cm 及 55cm×55cm 時，其耐震能力從 0.453g 分別提升至 0.559g、0.688g 及 0.833g，為補強前之 1.23 倍、1.52 倍及 1.84 倍，皆能符合現行之耐震法規規定，且當加大約 50% 後，也大多能符合功能設計標準。
- 八、 增設鋼筋混凝土剪力牆是最普遍的結構系統補強方式，由於剪力牆的勁度很大，要比柱子大上許多倍，因此可以承擔大部分構造物的水平力，而且剪力牆本身強度大，可以提高建築物之強度而達到耐震的效果。另外，剪力牆破壞時的韌性比比原本韌性不佳的柱子大，也可造成整體韌性容量增加，而達到規範要求的耐震能力。
- 九、 就結構補強原理而言，對各結構元件加以補強，一般或多或少皆可提昇總體結構之強度，但其補強成本卻極不經濟，所以在實際應用

上，往往以結構系統與結構元件之補強方式配合使用，例如部分住的斷面加大，加上 RC 剪力牆之增設，即可達到不錯之補強功效與經濟性。

第六章 結論與建議

6-1 結論

透過現場蒐集了三十五棟學校建築之震害資料，及對九所學校的十六棟校舍的個案詳加分析後，初步獲得影響學校建築耐震能力之因素後；再針對本文第四章所分析案例中，受損較嚴重的三棟校舍建築物，以柱與窗台間切隔離縫、加大柱斷面、增設 RC 剪力牆等補強工法，加以補強，使之符合功能設計標準。以下就所得結論，歸納如下：

1. 地震力作用方向是否平行於校舍建築之走廊方向，對其耐震能力，有極大之影響。
2. 校舍建築之耐震能力與平行走廊方向之壁量比成正相關。
3. 校舍建築之耐震能力與單位柱載重成負相關。
4. 柱主筋之鋼筋比對於學校建築耐震能力影響甚鉅，其值以介於 2% 2.5% 為佳。
5. 橫向箍筋間距之大小，對於耐震能力之影響頗大，尤其當間距由 15cm 降至 10cm 時，耐震能力提升程度顯著增加。因此，箍筋間距之設置以 15cm 內為佳。
6. 混凝土品質之良窳對於學校建築物之耐震能力而言，每增減 70kg/cm²，其影響程度約在 ±15% 之間。
7. 柱的強軸方向配置於平行地震力之方向，對耐震能力之提升，極為顯著。
8. 校舍建築分期、分層增建，對建築物之耐震能力極為不利，每增建一層樓，其耐震能力下降約 30%。
9. 切割柱與窗台之隔離縫補強工法於切割後，建築物之耐震能力雖有些為增加，但不宜單獨使用。
10. 柱斷面加大補強工法，確實可有效提升建築物之耐震性能，以北山

國中北棟校舍為例，補強後之耐震能力為補強前之 1.23 倍 1.84 倍。

11. 增設 RC 牆，確實可大幅提昇建築物之耐震能力。
12. 就功能設計標準而言，三種補強工法中，以柱斷面補牆工法及增設 RC 牆補強工法為佳。
13. 補強時，結構元件與結構系統之補強方式配合使用，例如部分柱的斷面加大，加上 RC 剪力牆之增設，即可達到不錯之補強功效與經濟性。

6-2 建議

1. 調查工作，耗時費日，資料取得不易，應將前人之經驗及蒐集成果，作一系統性之彙整，並建立資料庫，以供後人作此方面之後續研究。
2. 本文耐震診斷的垂直構材計算公式，是靜態實驗的實驗公式。但地震力為一動態載重，建議未來利用動態實驗結果，來修正本文公式。
3. 本研究之資料來源，僅為 921 地震後南投地區部分鄉鎮之學校建築震害案例，關於其他地區之學校建築部分，建議可持續研究蒐集佐證。

表 2-1 不同走廊型式特徵與柱單位載重【3】

走廊型式	一般單元平面	單位柱載重(kg/cm ²) 柱尺寸取 30cm×50cm 樓版載重取 1t/m ²	結構特徵
無廊柱		8.33	<ul style="list-style-type: none"> ●左右端通常連接樓梯 ●短向單跨 ●由於跨度較大，樑端及中點容易有斜向裂縫產生
單邊懸臂走廊		8.33	<ul style="list-style-type: none"> ●為最常見的校舍走廊型式 ●短向(垂直走廊方向)單跨，靜不定級數低 ●地震時懸臂走廊端部點容易破壞
單邊走廊有廊柱		5.55	<ul style="list-style-type: none"> ●短向為兩跨 ●靜不定級數及單位柱載重均較懸臂式為佳
雙邊懸臂走廊		9.58	<ul style="list-style-type: none"> ●柱單位載重較高 ●短向為單跨 ●地震時兩邊走廊端部容易破壞
雙邊走廊有廊柱		4.79	<ul style="list-style-type: none"> ●短向為三跨，靜不定數高 ●柱單位載重較低
中間走廊		7.29	<ul style="list-style-type: none"> ●短向為三跨，但中間走廊跨度較短，容易產生短樑現象 ●為維護教室空間的私密性，面對中間走廊常採高窗，常有短柱效應 ●中間走廊的柱子柱單位載重較旁柱高

表 2-2 竹山、國姓、埔里各測站位置表

站碼	站名	位置經緯度				高程 (M)
		緯度 (N)	緯分	經度 (E)	經分	
TCU126	竹山國小	23	45.83	120	40.71	131
TCU072	國姓國小	24	2.35	120	51.46	363
TCU074	南光國小	23	57.64	120	57.7	450

表 2-3 竹山、國姓、埔里各測站測得之最大加速度數值表

站碼	站名	PGA (gal)		
		V	NS	EW
TCU126	竹山國小	275	420	518
TCU072	國姓國小	275	371	465
TCU074	南光國小	270	368	586

表 2-4 本文調查之學校損壞情況

鄉鎮別	學校名稱	學校主要損壞情形及其現況
竹山鎮	竹山國小	<ul style="list-style-type: none"> 西北棟校舍（附圖 1-1~1-4）柱剪壞。磚牆有斜向剪力裂縫（相片 2-5.1、2-5.3）。 全校現已由慈濟認養，已接近完工階段。
	延平國小	<ul style="list-style-type: none"> 部份柱頭小害。柱兩側有砌磚牆增加柱斷面積的情形，地震造成材料交接面生成裂縫。 位於校區後方之兩層樓音樂教室（附圖 2-1~2-4），僅受輕微損害（相片 2-6）。 全校已由慈濟認養修建。
	延和國中	<ul style="list-style-type: none"> 南棟校舍做為普通教室用途的三層建築底層倒塌。 合作社拆除牆壁，造成該位置底層塌陷。 北棟校舍及西棟校舍（附圖 3-1~3-4，相片 2-7.1、2-7.2）已修復完成。
國姓鄉	國姓國中	<ul style="list-style-type: none"> 西棟校舍一樓柱嚴重毀損。 體育館小害，作為臨時辦公室及臨時教室用途。 南棟校舍（附圖 4-1~4-4，相片 2-8.1、2-8.2）及東棟校舍（附圖 5-1~5-4，相片 2-9.1、2-9.2）小害，已補強修復完成。
	北山國中	<ul style="list-style-type: none"> 北棟校舍崩塌（附圖 6-1~6-4），現已興建完成。 東棟校舍小害（附圖 7-1~7-4），已補強修復完成（相片 2-10.1、2-10.2）
埔里鎮	南光國小	<ul style="list-style-type: none"> 數棟懸臂走廊式校舍（附圖 8-1~11-4，相片 2-11、2-14.3），皆與地震方向平行，造成嚴重損害。底層柱剪壞、彎曲變形的情形嚴重（相片 2-15、2-16）。 第一棟甚至發生倒塌（相片 2-17）。 連結各棟間之走廊傾斜。
	育英國小	<ul style="list-style-type: none"> 北棟校舍（附圖 12-1~12-4）損壞嚴重（相片 2-18），一樓柱嚴重遭剪壞，屋頂有塌陷。 本校震前原有校舍 5 棟，921 震後拆除了 4 棟，除了育英館縣府即將拆除暫不予補強外，其餘已拆除完畢。
	愛蘭國小	<ul style="list-style-type: none"> 西、南、北棟教室（附圖 13-1~13-4，相片 2-19.1、2-19.2）走廊柱之柱頭、柱腳彎矩降伏，柱身剪力開裂，窗台柱彎矩應力降伏，教室隔間磚牆龜裂，樑端彎矩應力達到降伏狀態，鋁門窗擠壓變形，門窗玻璃破裂，RC 樓版完好。 所有校舍損壞並不嚴重，現均已被認養且已做好修復補強工作，現已恢復上課。
	宏仁國中	<ul style="list-style-type: none"> 所有教室（附圖 14-1~14-6）窗台柱彎壞，牆壁樓版嚴重損壞，屋頂水平位移過大，自重壓垮，混凝土嚴重剝落且鋼筋及箍筋嚴重外露變形，已拆除完畢。 本校震前原有校舍 7 棟，921 震後共拆除 4 棟，目前未拆除校舍則尚有 3 棟。除活動中心不予補強外，其餘分別為工藝教室、倉庫房等，皆已補強修復完成。

表 2-5 嚴重損壞與輕微損壞校舍之比較

	鄉鎮別	校舍名稱	長向方位	樓層數	主要損壞模式	走廊型式	長向有無牆體或翼牆
嚴重損壞校舍	竹山鎮	竹山國小西北校舍	東北—西南	2	一樓柱嚴重剪壞	懸臂	無
	國姓鄉	北山國中北棟校舍	東—西	3	一樓塌陷	懸臂	有
	埔里鎮	南光國小C棟校舍	東南—西北	2	一樓局部塌陷	懸臂	無
		南光國小D棟校舍	東南—西北	2	一樓柱嚴重剪壞	懸臂	無
		南光國小E棟校舍	東南—西北	2	一樓柱嚴重剪壞	懸臂	無
		南光國小F棟校舍	東南—西北	3	完全塌陷	懸臂	有
		育英國小北棟校舍	東—西	2	一樓柱嚴重剪壞	懸臂	無
		宏仁國中東棟校舍	南—北	3	一樓塌陷	懸臂	有
		宏仁國中南棟校舍	東—西	3	一樓塌陷	懸臂	有
宏仁國中北棟校舍	東—西	3	一樓塌陷	懸臂	有		
輕度損壞校舍	竹山鎮	延平國小東棟校舍	南—北	2	無害	單走廊有廊柱	有
		延和國中西棟校舍	南—北	3	部份磚牆開裂	單走廊有廊柱	有
	國姓鄉	北山國中東棟校舍	南—北	3	小害	懸臂	有
		國姓國中東棟校舍	東北—西南	2	小害	懸臂	有
		國姓國中南棟校舍	東南—西北	2	部份磚牆開裂	單走廊有廊柱	有
	埔里鎮	愛蘭國小北棟校舍	東—西	2	小害	雙走廊單側有廊柱	有

表 2-6 磚牆與 RC 牆各種圍束情況的剪應力

圍束情況	定義	剪應力(kg/cm ²)		比值 (RC 牆/磚牆)
		磚 牆	RC 牆	
四邊圍束	牆之四邊受上下 RC 樑及左右 RC 柱拘束，且無開口之牆。	6	30	5
三邊圍束	牆體上下兩邊及左右任一邊受 RC 樑及柱拘束之牆(有開口之牆)。	2	20	10
兩邊圍束	牆之左右皆無 RC 柱拘束之牆。	0	10	-

表 2-7 本文調查學校之底層壁量比與單位柱載重

鄉鎮別	校舍名稱	樓層數	總樓地版面積(m ²)	單位柱載重(kg/cm ²)	長向壁量比(%)	短向壁量比(%)
竹山鎮	竹山國小西北棟校舍	2	777.6	21.89	0.139	1.235
	延平國小東棟校舍	2	418.5	12.31	0.281	1.532
	延和國中西棟校舍	3	2204.8	16.74	0.157	0.730
國姓鄉	北山國中北棟校舍	3	1095	28.52	0.153	0.881
	北山國中東棟校舍	3	3240	32.66	0.094	0.511
	國姓國中東棟校舍	2	440	20.95	0.537	1.484
	國姓國中南棟校舍	2	2377	11.30	0.033	1.015
埔里鎮	南光國小C棟校舍	2	2022.3	20.13	0.081	0.954
	南光國小D棟校舍	2	1404.7	22.01	0	0.938
	南光國小E棟校舍	2	891.4	26.22	0.630	0.249
	南光國小F棟校舍	3	1549.4	23.06	0.181	1.128
	育英國小北棟校舍	2	1070	22.52	0	1.052
	宏仁國中東棟校舍	3	1232.1	48.13	0.123	0.859
	宏仁國中南棟校舍	3	2405.7	30.07	0.144	0.706
	宏仁國中北棟校舍	3	2405.7	30.69	0.098	0.694
	愛蘭國小北棟校舍	2	1508.8	25.98	0.207	0.840

表 4-1 本文校舍耐震診斷案例表

項目 校舍	座向	走廊形式	單元教室 柱距配置	興建時間	樓層數
竹山國小 西北棟校舍	座北 朝南	單邊 無走廊柱式	長向三跨	民國 67 年	兩層
延平國小 東棟校舍	座東 朝西	單邊 有走廊柱式	長向三跨	民國 86 年	兩層
北山國中 北棟校舍	座北 朝南	單邊 無走廊柱式	長向兩跨	民國 75 年	三層
國姓國中 南棟校舍	座南 朝北	單邊 有走廊柱式	長向三跨	民國 85 年	兩層
育英國小 北棟校舍	座北 朝南	單邊 無走廊柱式	長向三跨	民國 74 年	兩層
愛蘭國小 北棟校舍	座北 朝南	雙邊走廊，單邊 有走廊柱式	長向兩跨	民國 75 年	兩層

表 4-2 竹山國小西北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kN)	數量 (根,片)
RC 柱	C1	215	274.12	8
		290	274.12	2
		215	164.47	8
		290	164.47	2
	C2	290	95.94	2
		290	342.65	2
		290	52.54	2
	C3	290	82.24	2
		290	205.59	2
磚牆	420×24+2C2	215	468.3	1

表 4-3 延平國小東棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kg)	數量 (根,片)
RC 柱	C1	300	106.90	1
		300	82.28	1
		200	46.65	1
	C2	300	213.80	1
		300	149.30	1
		300	42.40	1
	C3	200	164.56	4
		300	164.56	2
		300	97.91	1
		200	93.29	4
		200	93.29	2
		300	55.51	1
	C4	345	279.88	1
		345	559.77	1
		345	390.91	1
		345	111.02	1

表 4-4 北山國中北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kN)	數量 (根,片)
RC 柱	C3	220	334.41	3
	C4	310	167.20	2
		310	334.41	4
	C5	220	195.07	2
	C6	310	390.14	4
	C7	220	557.35	3
	磚牆	BW1	220	83.60
BW2		220	167.20	1
BW3		220	167.20	2
BW4		310	250.8	1

表 4-5 國姓國中南棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kN)	數量 (根,片)
RC 柱	C1	305	58.45	1
		305	189.95	1
		305	263.01	2
		305	131.50	1
	C2	305	139.62	1
		305	244.34	1
		205	331.19	6
		305	331.19	2
		305	104.72	1
		205	81.18	1
		305	60.88	1
	C3	205	142.06	1
		205	243.53	8
	C4	310	162.35	1
		310	284.11	1
		310	121.76	1

表 4-6 育英國小北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kg)	數量 (根,片)
RC 柱	C1	315	96.91	2
		315	193.81	3
		315	263.34	2
	C2	225	230.73	10
	C3	315	50.76	2
		315	101.52	3
		315	140.28	2
	C4	225	138.44	10
	C5	315	36.92	2
		315	73.83	3
		315	87.98	2

表 4-7 愛蘭國小北棟校舍一樓 X 軸垂直構材分類表

種類	斷面 (mm)	高度 (cm)	軸向力 (kN)	數量 (根,片)
RC 柱	C1	315	32.24	2
		315	64.48	10
		315	77.73	2
	C2	210	209.55	6
	C3	315	112.84	2
		315	225.67	3
		315	272.06	2
	C4	210	274.03	5
		315	274.03	1
	C5	315	145.08	2
		315	290.15	4
315		281.55	2	
磚牆	BW1	210	80.60	1
	BW2	210	161.20	4
	BW3	315	194.33	1
	BW4	210	194.33	1
	BW5	315	80.60	1
	BW6	210	225.67	1

表 4-8 耐震診斷結果

項目	竹山鎮		國姓鄉		埔里鎮	
	竹山國 小西北 棟校舍	延平國 小東棟 校舍	北山國 中北棟 校舍	國姓國 中南棟 校舍	育英國 小北棟 校舍	愛蘭國 小北棟 校舍
建築物一樓 保有耐力 Q_r (kN)	1983.3	2310.5	2803.1	5500.4	3011.5	5425.6
結構系統地震力 折減係數 F_u	2.57	2.37	2.88	2.39	2.30	2.38
崩塌地表加速度 a_c (gal)	317	594	453	769	450	596

表 4-9 耐震診斷結果與 921 地震後校舍受損狀況比較表

項目	竹山鎮		國姓鄉		埔里鎮	
	竹山國小西北棟校舍	延平國小東棟校舍	北山國中北棟校舍	國姓國中東棟校舍	育英國小北棟校舍	愛蘭國小北棟校舍
鄰近測站測得之各校舍長向最大加速度數值 (gal)	518 (東西向)	420 (南北向)	465 (東西向)	465 (東西向)	586 (東西向)	586 (東西向)
耐震診斷所得之各校舍一樓長向崩塌地表加速度 a_c (gal)	317	594	453	769	450	596
921 地震後各校舍之損壞狀況	大害(一樓柱嚴重剪壞)	無害	大害(一樓塌陷)	小害	大害(一樓柱嚴重剪壞)	小害

表 5-1 不同混凝土強度之耐震診斷結果

混凝土強度	項目	校名 舍稱	竹山鎮	國姓鄉	埔里鎮
			竹山國小西北棟校舍	北山國中北棟校舍	育英國小北棟校舍
130 kg/cm ²	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1788.5	2535.6	2817.7
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.41	2.74	2.17
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		268	390	398
175 kg/cm ²	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1878.3	2693.4	2927.7
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.49	2.78	2.21
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		291	420	421
210 kg/cm ²	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1983.3	2803.1	3011.5
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.57	2.88	2.30
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		317	453	450
245 kg/cm ²	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2000.4	2970.5	3084.6
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.72	2.90	2.38
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		339	461	477
280 kg/cm ²	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2047.94	3032.9	3149.2
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.83	2.94	2.45
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		361	487	501

表 5-2 不同柱主筋之鋼筋比之耐震診斷結果

柱 鋼筋 比(%)	項目	校 名 舍 稱	竹山鎮	國姓鄉	埔里鎮
			竹山國小 西北棟校舍	北山國中 北棟校舍	育英國小 北棟校舍
1.32	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1636.9	2763.2	1920.8
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.85	1.85	2.49
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		291	316	312
1.90	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1980.9	2923.6	2346.6
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.61	2.33	2.45
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		322	382	374
2.59	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2324.9	3230.4	2774.0
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.45	2.61	2.43
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		355	472	437
3.38	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2734.6	3763.8	3281.7
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.37	2.46	2.36
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		405	518	504

表 5-3 不同柱橫向箍筋間距之耐震診斷結果

箍筋 間距	項目	校 名 舍 稱	竹山鎮	國姓鄉	埔里鎮
			竹山國小 西北棟校舍	北山國中 北棟校舍	育英國小 北棟校舍
10cm	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2164.6	3199.0	3261.4
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.86	2.89	2.29
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		358	519	485
15cm	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		2005.5	3033.9	3090.9
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.57	2.81	2.29
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		321	477	460
20cm	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1983.3	2907.0	3046.9
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.57	2.86	2.30
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		317	466	455
25cm	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1900.2	2803.1	2908.9
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.59	2.88	2.26
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		307	453	428
30cm	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)		1866.3	2775.4	2851.0
	結構系統地震力折減係數 F_u		2.59	2.71	2.28
	崩塌地表加速度 a_c (gal)		301	421	421

表 5-4 柱轉置 90° 之耐震診斷結果

項目	校舍名稱		育英國小北棟校舍	
	竹山國小西北棟校舍			
轉置前後	轉置前	轉置後	轉置前	轉置後
建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)	1983.3	2700.8	3011.5	4299.3
結構系統地震力折減係數 F_u	2.57	2.52	2.30	2.31
崩塌地表加速度 a_c (gal)	317	424	450	645
耐震能力增加比例 (%)	33.8		43.3	

表 5-5 不同樓層數之耐震診斷結果

樓層數	項目	校名	舍稱	竹山鎮	國姓鄉	埔里鎮
				延平國小東棟校舍	國姓國中南棟校舍	愛蘭國小北棟校舍
2F	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)			2310.5	5500.4	5425.6
	結構系統地震力折減係數 F_u			2.37	2.39	2.38
	崩塌地表加速度 a_c (gal)			594	769	596
3F	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)			2358.7	5692.9	5602.2
	結構系統地震力折減係數 F_u			2.47	2.43	2.39
	崩塌地表加速度 a_c (gal)			412	533	408
耐震能力下降比例 (%)				30.6	30.7	31.5

表 5-6 Vision 2000 委員會建議之建築結構最低設計要求

地震 回歸期	建築物 重要性	受害程度				備註
		無害 $\theta < 0.2\%$	小害 $\theta < 0.5\%$	中害 $\theta < 1.5\%$	大害 $\theta < 2.5\%$	
小震 43 年		○				θ : 為最大層間相對位移角 不得設計 重要建築 安全建築
中震 72 年		○	○			
大震 475 年		○	○	○		
烈震 970 年			○	○	○	

表 5-7 921 集集地震前後台灣地區主要都市設計地表加速度(PGA)修正表

回歸期		城市			
		台北市	台中市	台南市	花蓮市
950 年	前	0.30g	0.30g	0.38g	0.56g
	後	0.33g	0.36g	0.50g	0.83g
475 年	前	0.26g	0.26g	0.33g	0.47g
	後	0.28g	0.30g	0.41g	0.68g
72 年	前	0.17g	0.16g	0.20g	0.29g
	後	0.17g	0.18g	0.23g	0.37g
22 年	前	0.12g	0.12g	0.14g	0.21g
	後	0.12g	0.12g	0.15g	0.24g

表 5-8 強震區設計標準(以台南市為例)

地震 回歸期		受害程度			
		無害 全部機能保證	小害 無礙使用	中害 人命安全	大害 不得崩塌
建築物 重要性		< 0.2%	< 0.5%	< 1.5%	< 2.5%
小震 22 年 ($a_c=0.15g$)	●				不准設計
中震 72 年 ($a_c=0.23g$)	●		●		一般建築
大震 475 年 ($a_c=0.41g$)	●		●	●	重要建築
烈震 950 年 ($a_c=0.50g$)			●	●	安全緊要

表 5-9 切隔離縫後之耐震診斷結果

項目		校 舍		竹山鎮	國姓鄉	埔里鎮
		名 稱		竹山國小 西北棟校舍	北山國中 北棟校舍	育英國小 北棟校舍
切隔離縫前	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)			1983.3	2803.1	3011.5
	崩塌地表加速度 a_c (gal)			317	453	450
切隔離縫後	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)			1771.5	2620.5	2787.3
	崩塌地表加速度 a_c (gal)			403	533	587

表 5-10 柱斷面加大之耐震診斷結果

校舍 名稱	柱之 斷面尺寸	項目	建築物一樓保有耐力	崩塌地表加速度
			Q_r (kN)	a_c (gal)
竹山國小 西北棟校舍	30 cm × 40 cm		1983.3	317
	35 cm × 45 cm		2766.3	435
	40 cm × 50 cm		3757.5	592
	45 cm × 55 cm		4927.2	780
北山國中 北棟校舍	40 cm × 40 cm		2803.1	453
	45 cm × 45 cm		3638.2	559
	50 cm × 50 cm		4559.5	688
	55 cm × 55 cm		5498.7	833
育英國小 北棟校舍	30 cm × 40 cm		3011.5	450
	35 cm × 45 cm		4276.3	631
	40 cm × 50 cm		5799.7	866
	45 cm × 55 cm		7575.3	1146

表 5-11 RC 牆補強後之耐震診斷結果

校舍名稱	鋼筋 RC 配置方式	項 目	建築物一樓保有耐力 Q_r (kN)	崩塌地表加速度 a_c (gal)
		牆寬度		
竹山國小 西北棟校舍	單層雙向 #5@20cm	100 cm	2170.1	348
		300 cm	3781.4	548
		450 cm	8021.7	1104
	雙層雙向 #5@20cm	100 cm	2289.3	368
		300 cm	4938.9	724
		450 cm	9887.1	1309
2 片 450cm		18175.6	2373	
北山國中 北棟校舍	單層雙向 #5@20cm	100 cm	2969.7	474
		300 cm	4493.2	634
		450 cm	8191.7	1079
	雙層雙向 #5@20cm	100 cm	3064.9	485
		300 cm	5491.0	781
		450 cm	9715.3	1258
2 片 450cm		17555.9	2080	
育英國小 北棟校舍	單層雙向 #5@20cm	100 cm	3157.0	471
		300 cm	4629.9	677
		450 cm	8703.6	1262
	雙層雙向 #5@20cm	100 cm	3265.4	498
		300 cm	5877.4	866
		450 cm	10516.9	1502
2 片 450cm		18402.9	2514	

表 5-12 補強後之耐震能力與現行法規及功能設計標準比較表

項目 校舍名稱	補強方式	診斷 結果	我國現行 法規標準 0.41g < 2.5%	無害 0.23g < 0.2%	小害 0.41g < 0.5%	中害 0.50g < 1.5%	分析圖表		
竹山國小 西北棟校舍 (原耐震能力 為 0.317g)	切隔離縫	0.403g	×	×	×	×	詳圖 5-15、表 5-9		
	柱 斷 面 加 大	35cm×45cm	0.435g		×	×	×	詳表 5-10	
		40cm×50cm	0.592g		×	×		詳表 5-10	
		45cm×55cm	0.780g					詳表 5-10	
	加 剪 力 牆	單 層 雙 向	100cm	0.348g	×	×	×	詳表 5-11	
			300cm	0.548g		×	×	詳表 5-11	
			450cm	1.104g		×	×	詳表 5-11	
		雙 層 雙 向	100cm	0.368g	×	×	×	×	詳表 5-11
			300cm	0.724g		×	×		詳表 5-11
			450cm	1.309g		×	×		詳表 5-11
	2 片 450cm	2.373g					詳表 5-11		
北山國中 北棟校舍 (原耐震能力 為 0.453g)	切隔離縫	0.533g	×	×	×	×	詳表 5-9		
	柱 斷 面 加 大	45cm×45cm	0.559g		×	×		詳圖 5-16、表 5-10	
		50cm×50cm	0.688g		×	×		詳圖 5-16、表 5-10	
		55cm×55cm	0.833g					詳圖 5-16、表 5-10	
	加 剪 力 牆	單 層 雙 向	100cm	0.474g		×	×	×	詳表 5-11
			300cm	0.634g		×	×		詳表 5-11
			450cm	1.079g		×	×		詳表 5-11
		雙 層 雙 向	100cm	0.485g		×	×	×	詳表 5-11
			300cm	0.781g		×	×		詳表 5-11
			450cm	1.258g		×	×		詳表 5-11
	2 片 450cm	2.080g					詳表 5-11		
育英國小 北棟校舍 (原耐震能力 為 0.450g)	切隔離縫	0.587g	×	×	×	×	詳表 5-9		
	柱 斷 面 加 大	35cm×45cm	0.631g		×	×	×	詳表 5-10	
		40cm×50cm	0.866g		×	×		詳表 5-10	
		45cm×55cm	1.146					詳表 5-10	
	加 剪 力 牆	單 層 雙 向	100cm	0.471g		×	×	×	詳表 5-11
			300cm	0.677g		×	×		詳表 5-11
			450cm	1.262g		×	×		詳表 5-11
		雙 層 雙 向	100cm	0.498g		×	×	×	詳圖 5-17、表 5-11
			300cm	0.866g		×	×		詳圖 5-17、表 5-11
			450cm	1.502g		×	×		詳圖 5-18、表 5-11
	2 片 450cm	2.514g					詳圖 5-18、表 5-11		

原始材料強度， $f'c = 130\text{kg/cm}^2$ ， $f_y = 1800\text{kg/cm}^2$
新加入之材料強度， $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ ， $f_y = 2800\text{kg/cm}^2$
表示可符合要求，× 表示無法達到要求。

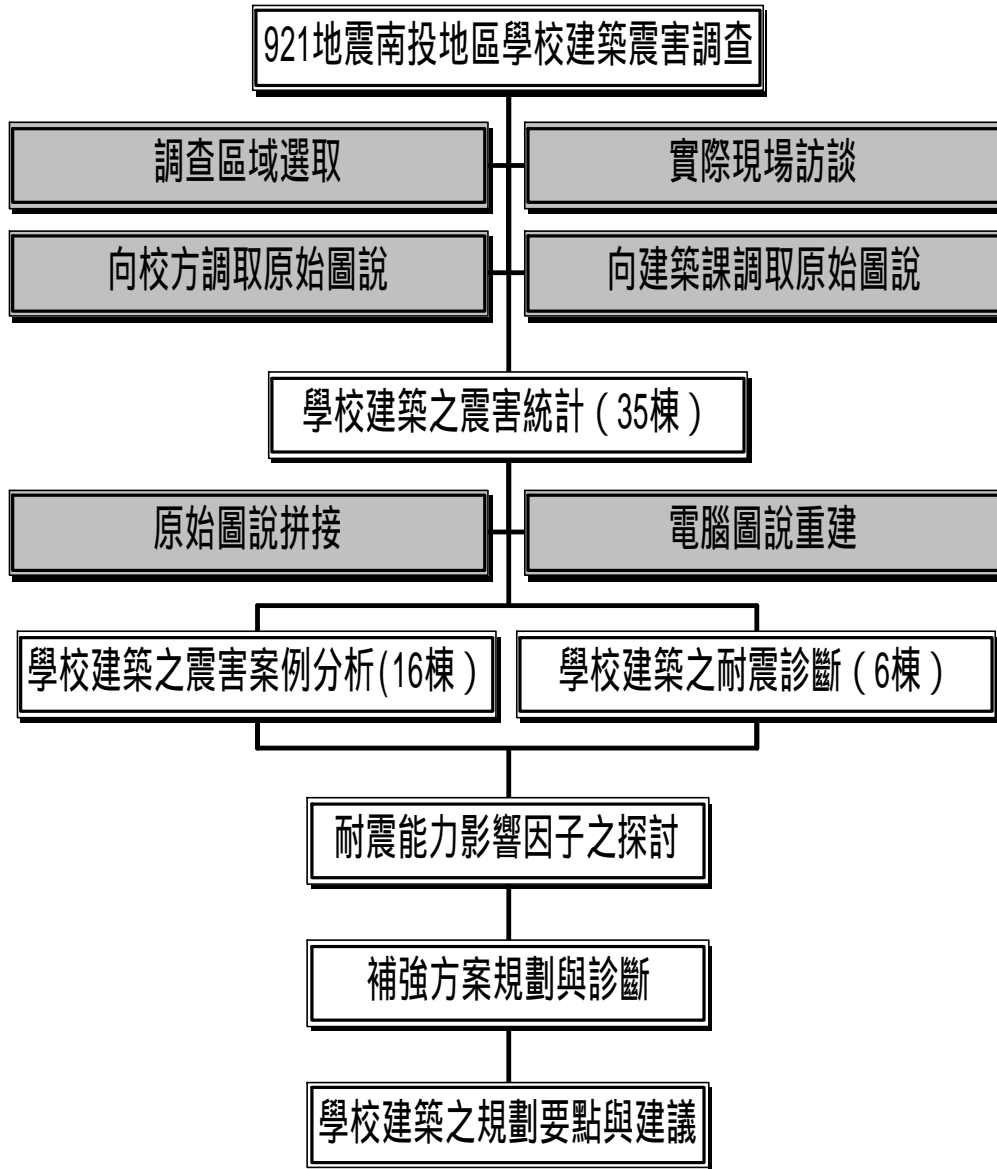


圖 1-1 研究方法流程架構圖

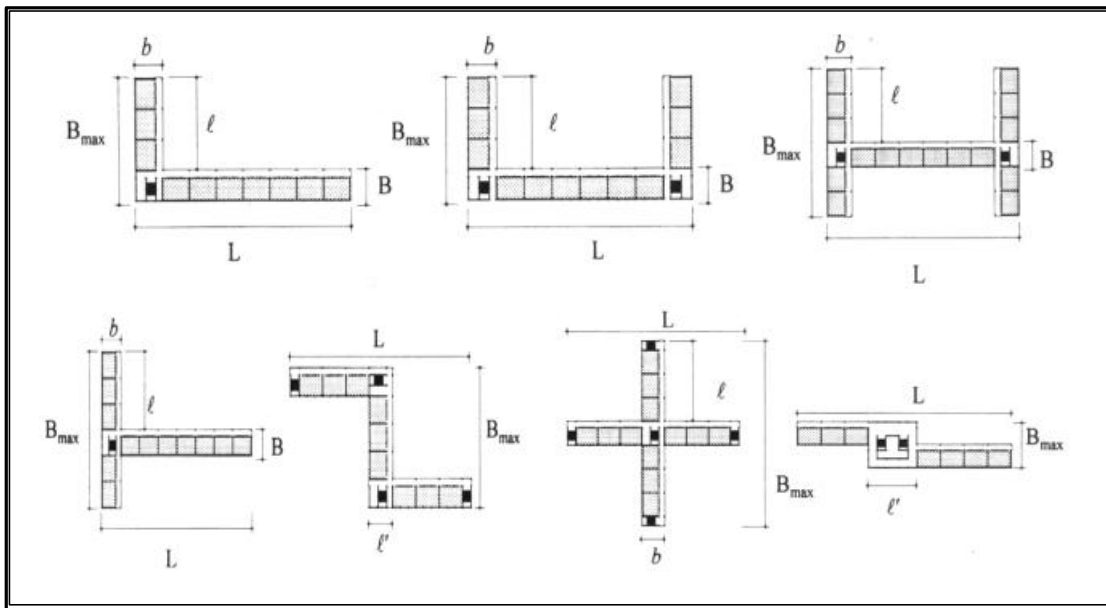


圖 2-1 不良之耐震規劃設計的平面

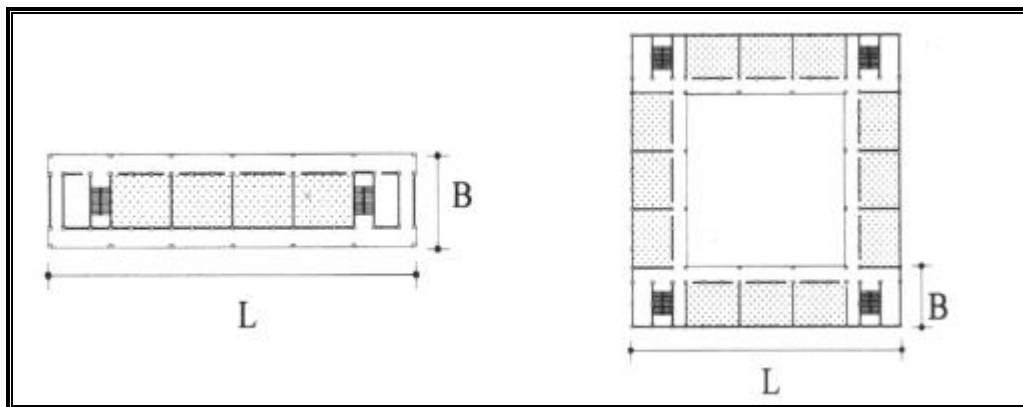


圖 2-2 良好之耐震規劃設計的平面

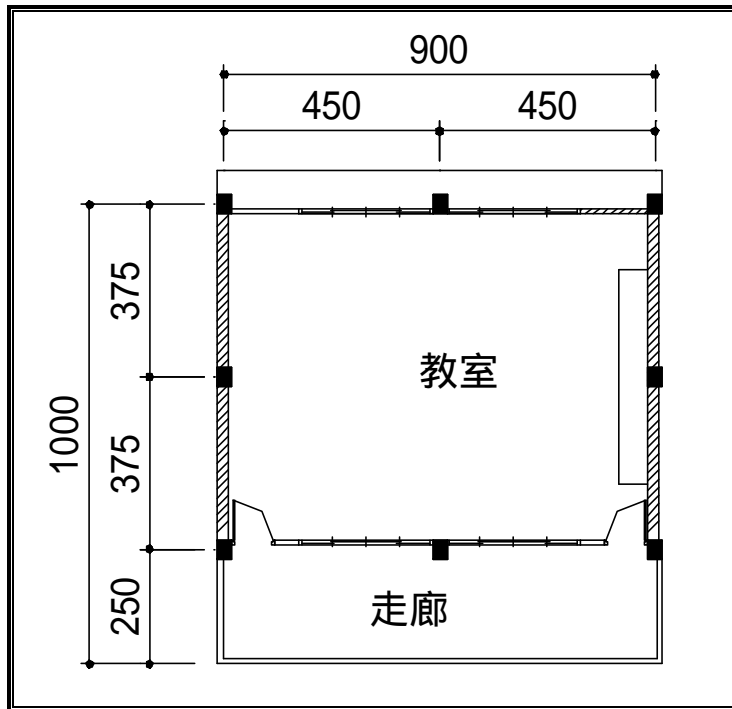


圖 2-3 單元教室長向兩跨配置型式

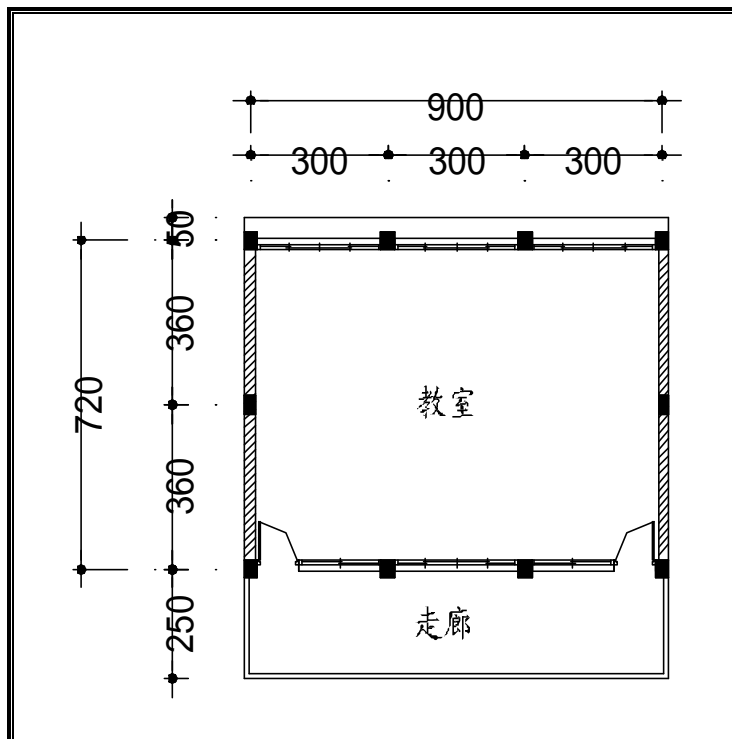


圖 2-4 單元教室長向三跨配置型式

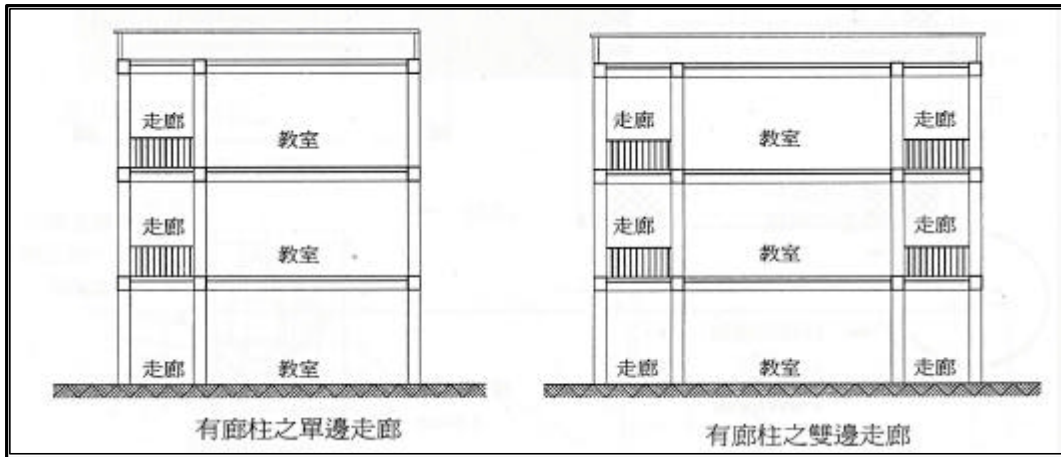


圖 2-5 耐震性良好的走廊型式

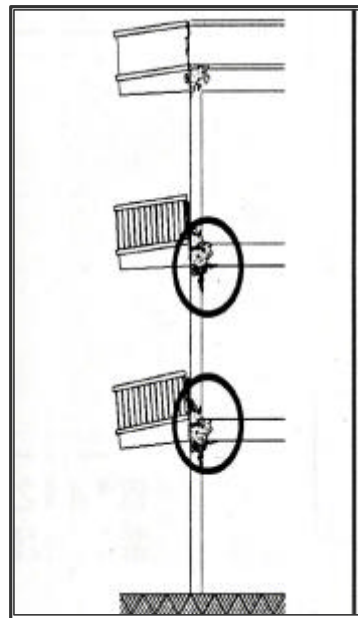


圖 2-6 地震時走廊端部結構容易遭到破壞

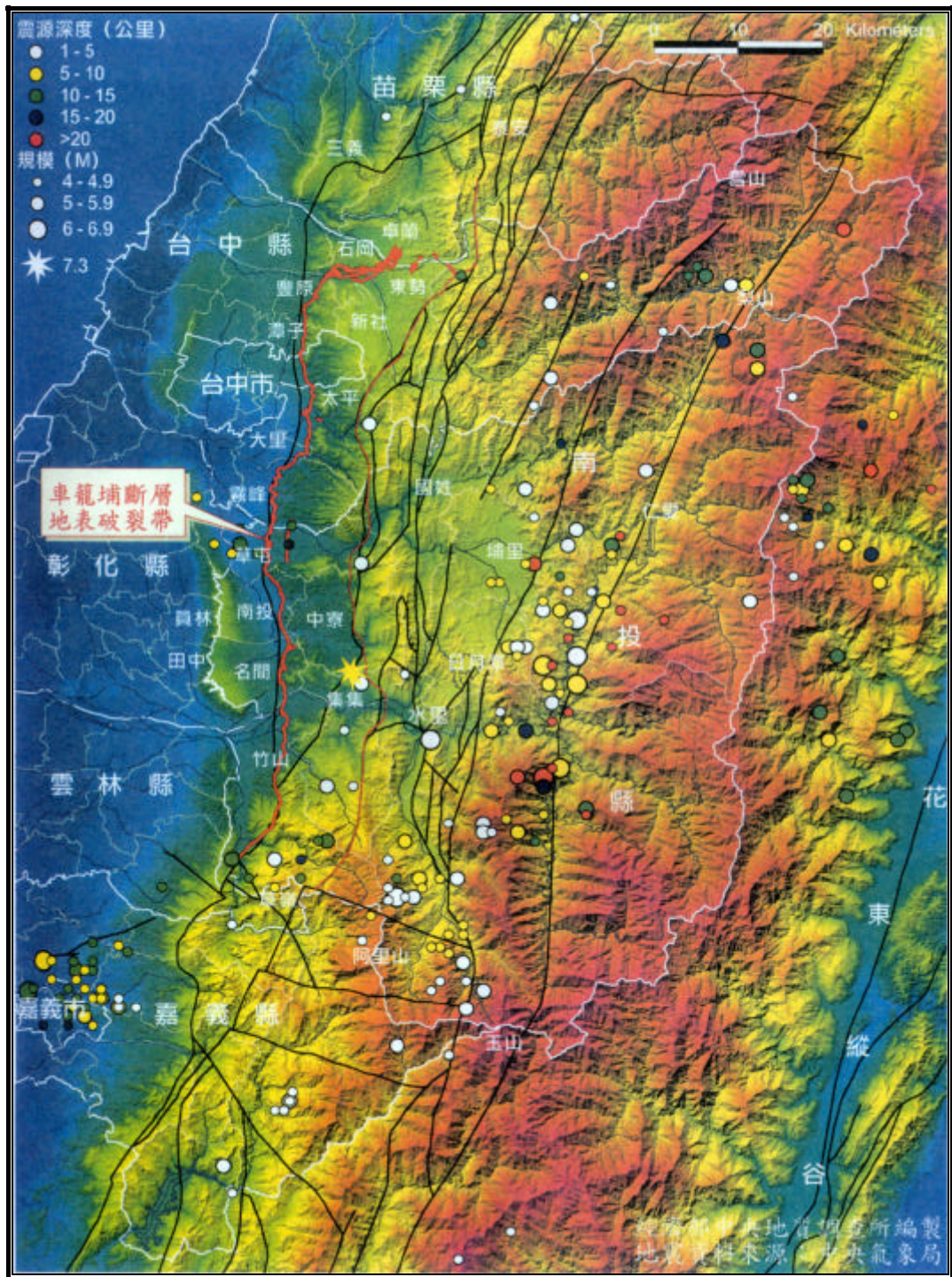


圖 2-7 九二一地震斷層破裂帶及震央分布圖【33】

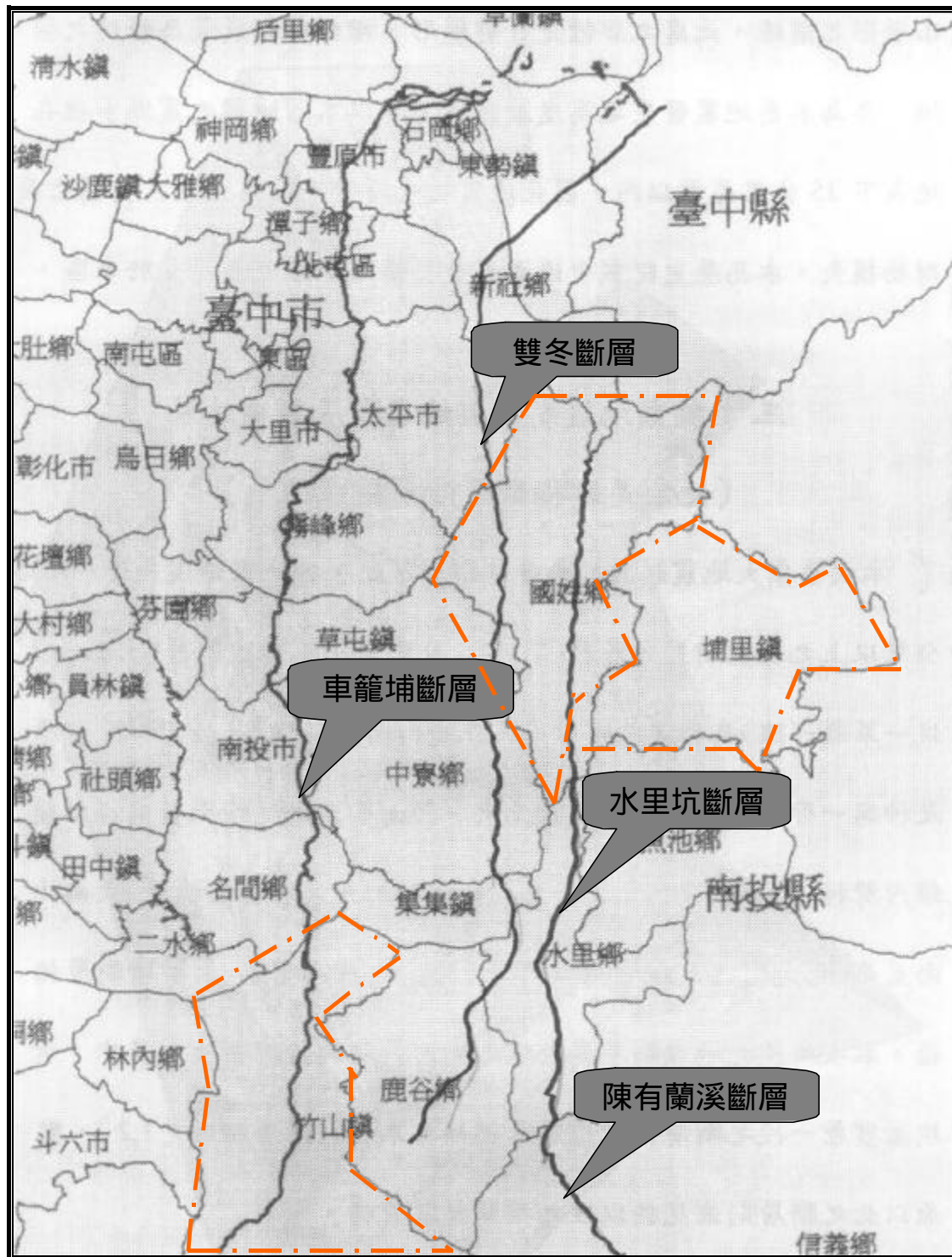


圖 2-8 本文調查學校與斷層位置關係圖

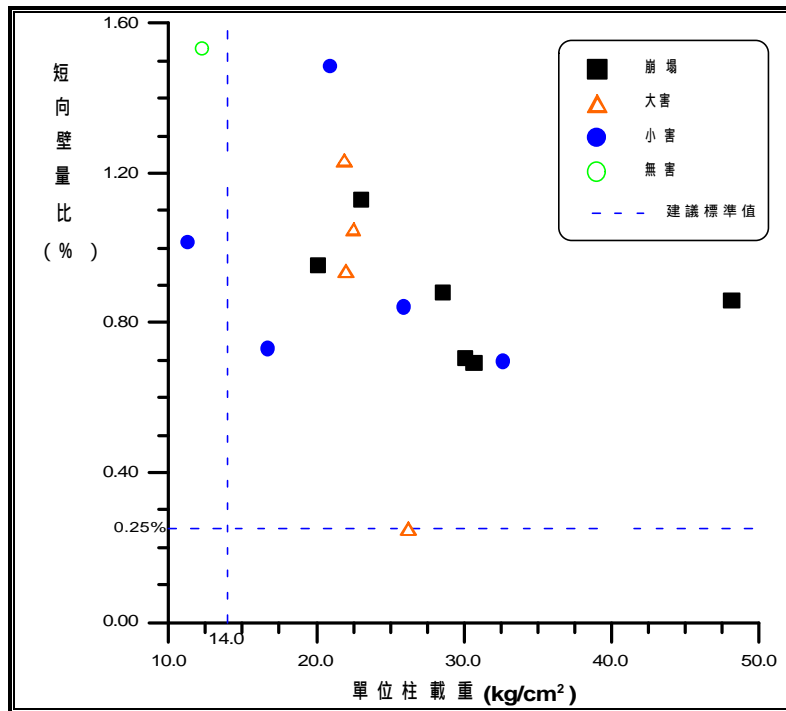


圖 2-9 短向壁量比與單位柱載重關係圖

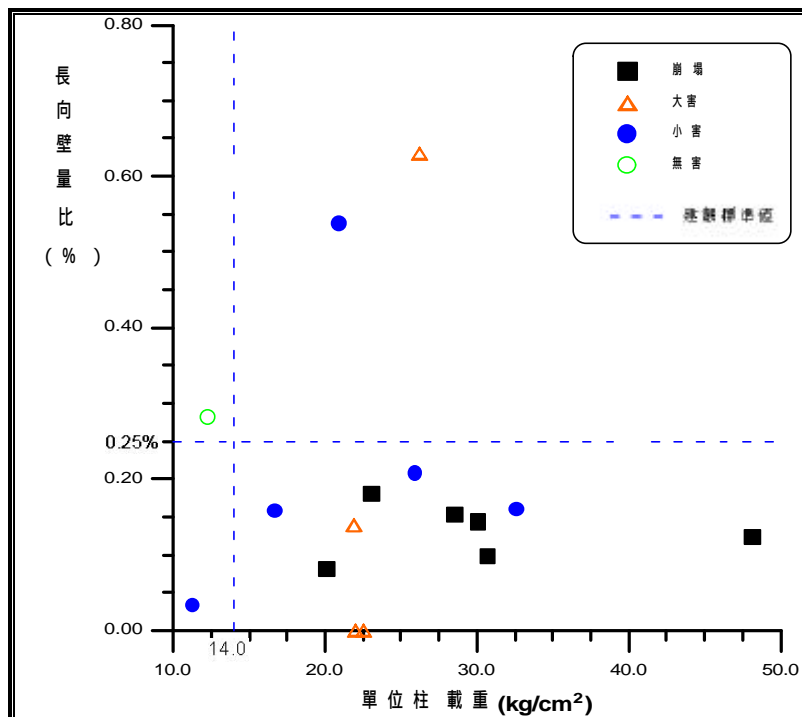


圖 2-10 長向壁量比與單位柱載重關係圖

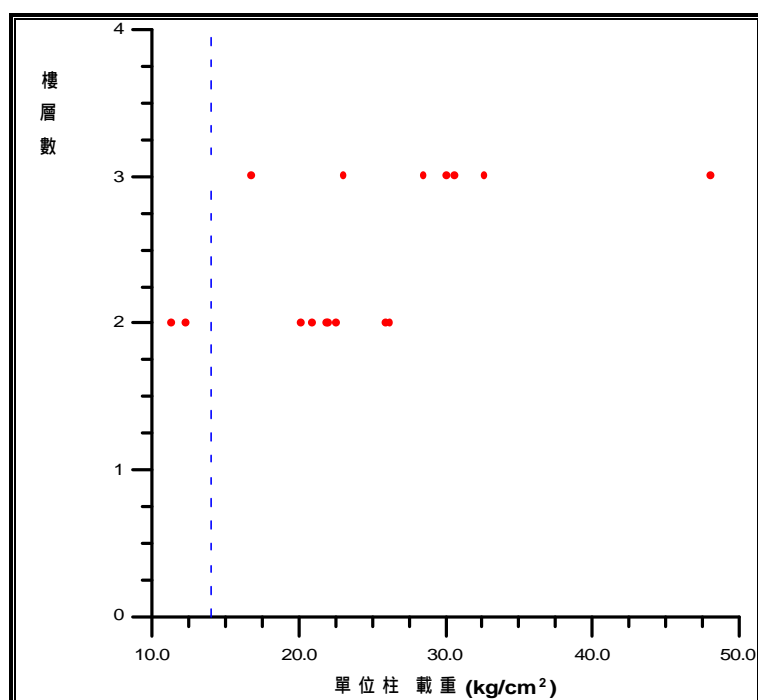


圖 2-11 校舍樓層數與單位柱載重關係圖

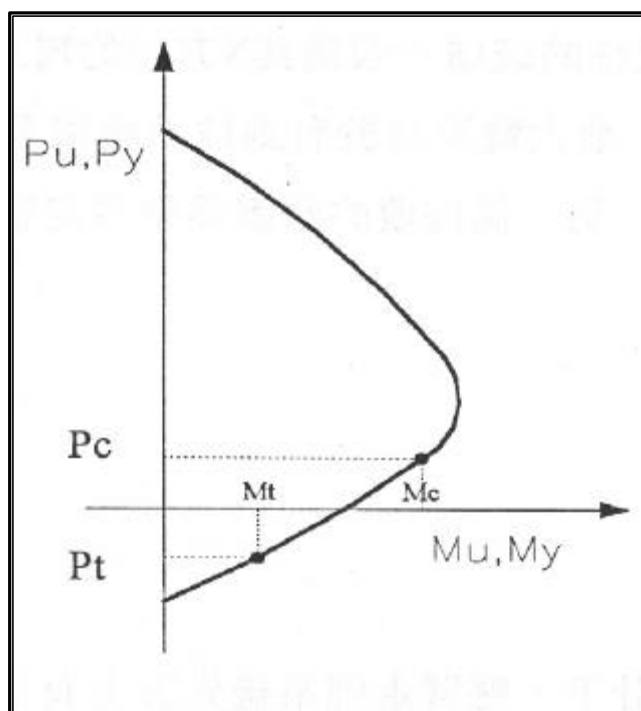


圖 2-12 軸力與彎矩作用下的破壞包絡線面

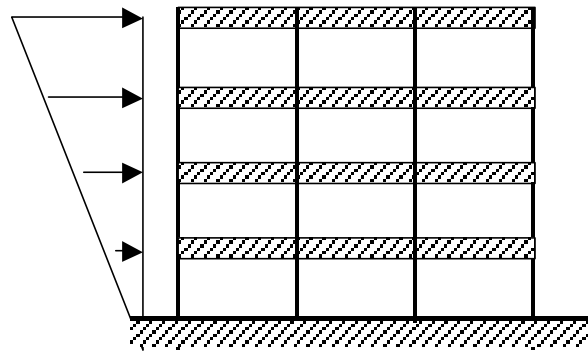


圖 3-1 靜態推垮曲線法豎向外力加載方式

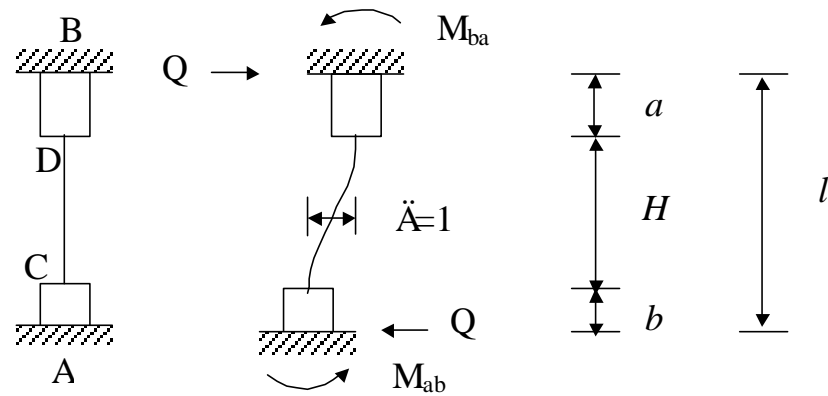


圖 3-2 考慮柱梁接合剛域的支柱示意圖(a)

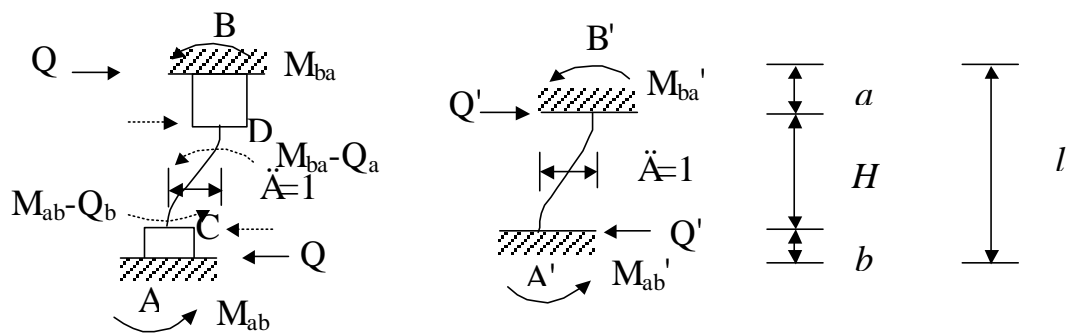


圖 3-3 考慮柱梁接合剛域的支柱示意圖(b)

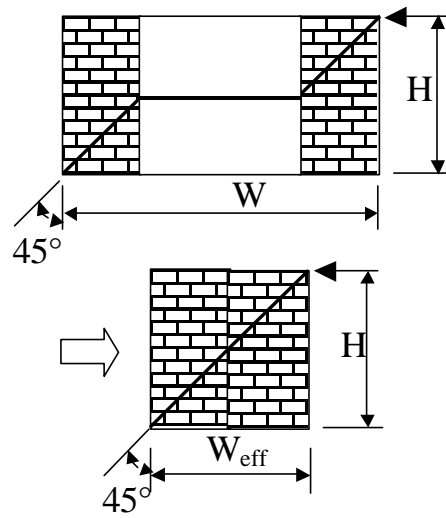


圖 3-4 磚牆劈裂路徑與有效寬度示意圖

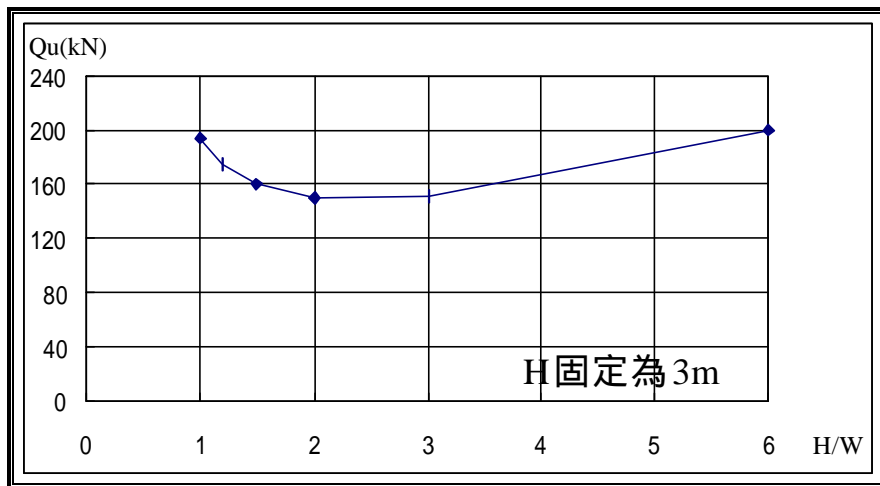


圖 3-5 劉白梅修正後磚牆水平極限剪力與高寬比的關係【19】

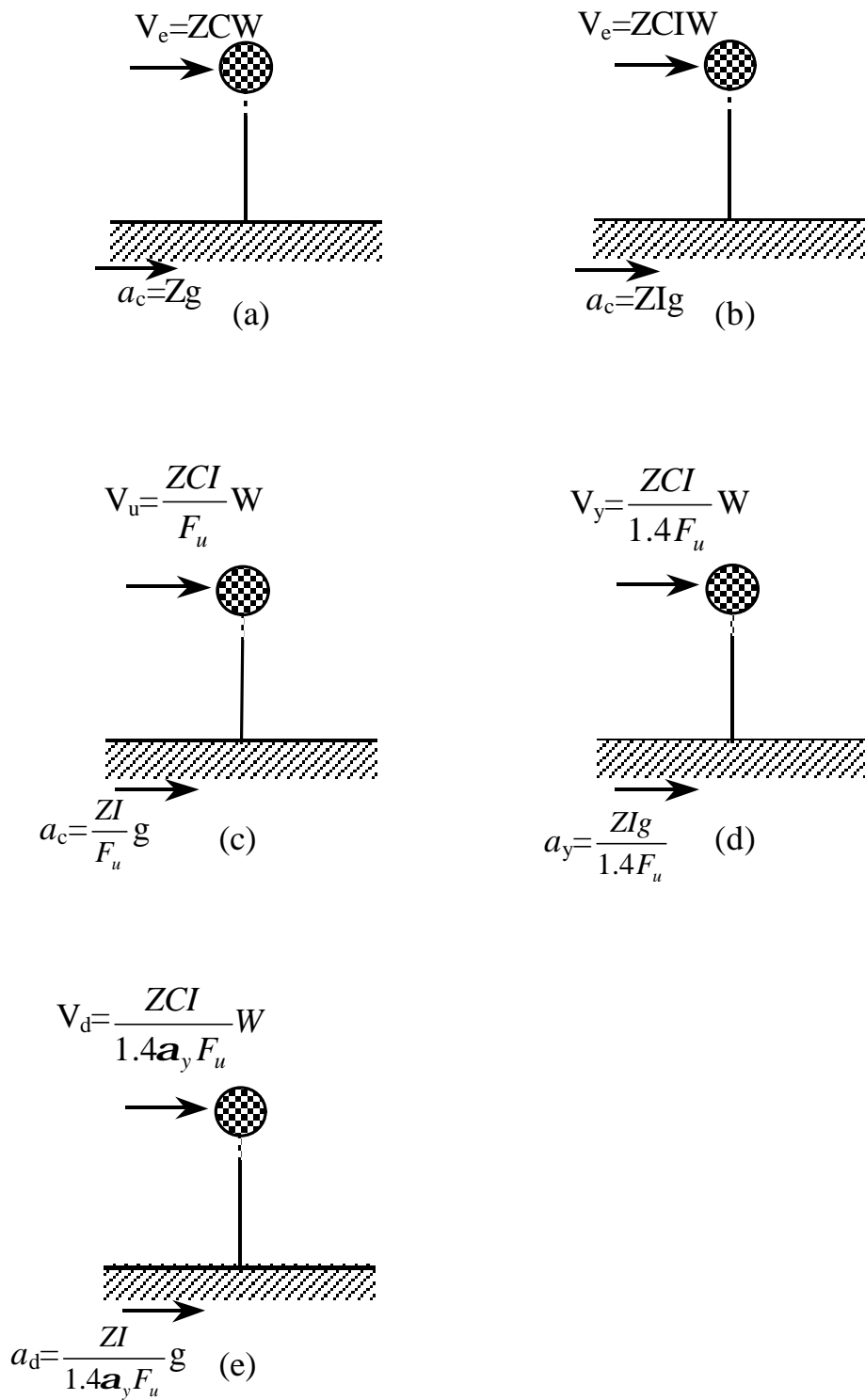


圖 3-6 我國現行建築技術規則基本假定【19】

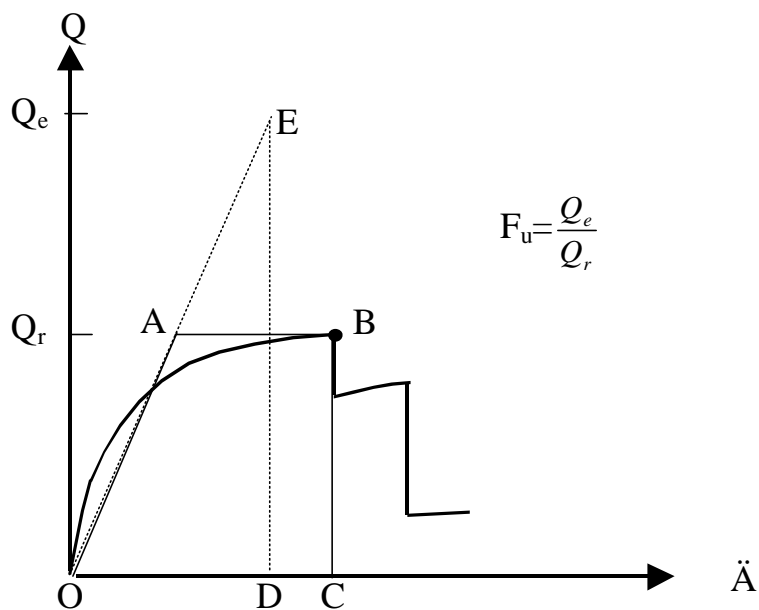


圖 3-7 利用等能量原則側向載重與側向位移非線性曲線轉換成等值二折線（最高峰值 Q_r 時）

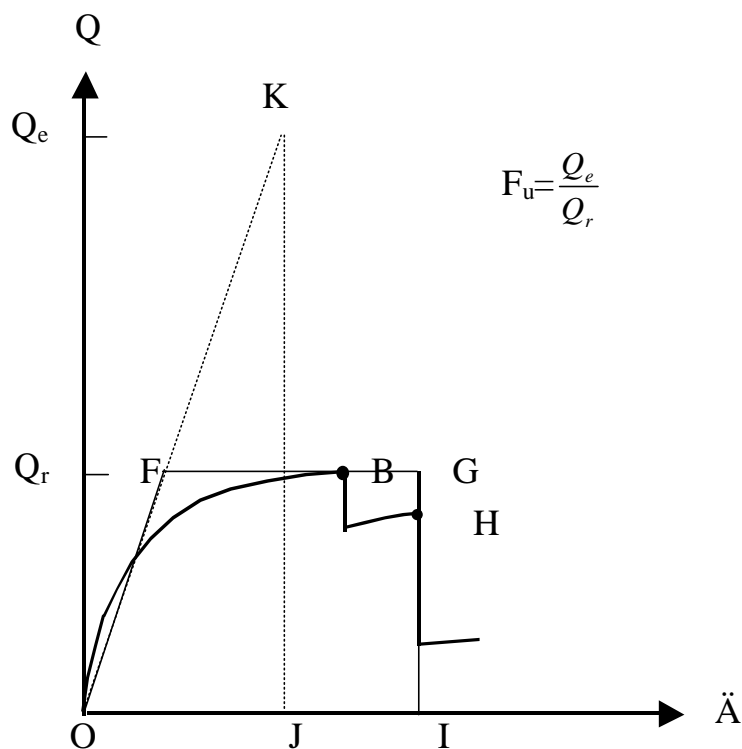


圖 3-8 利用等能量原則將水平載重與水平位移非線性曲線轉換成等值二折線（過了 Q_r 之後的峰值）

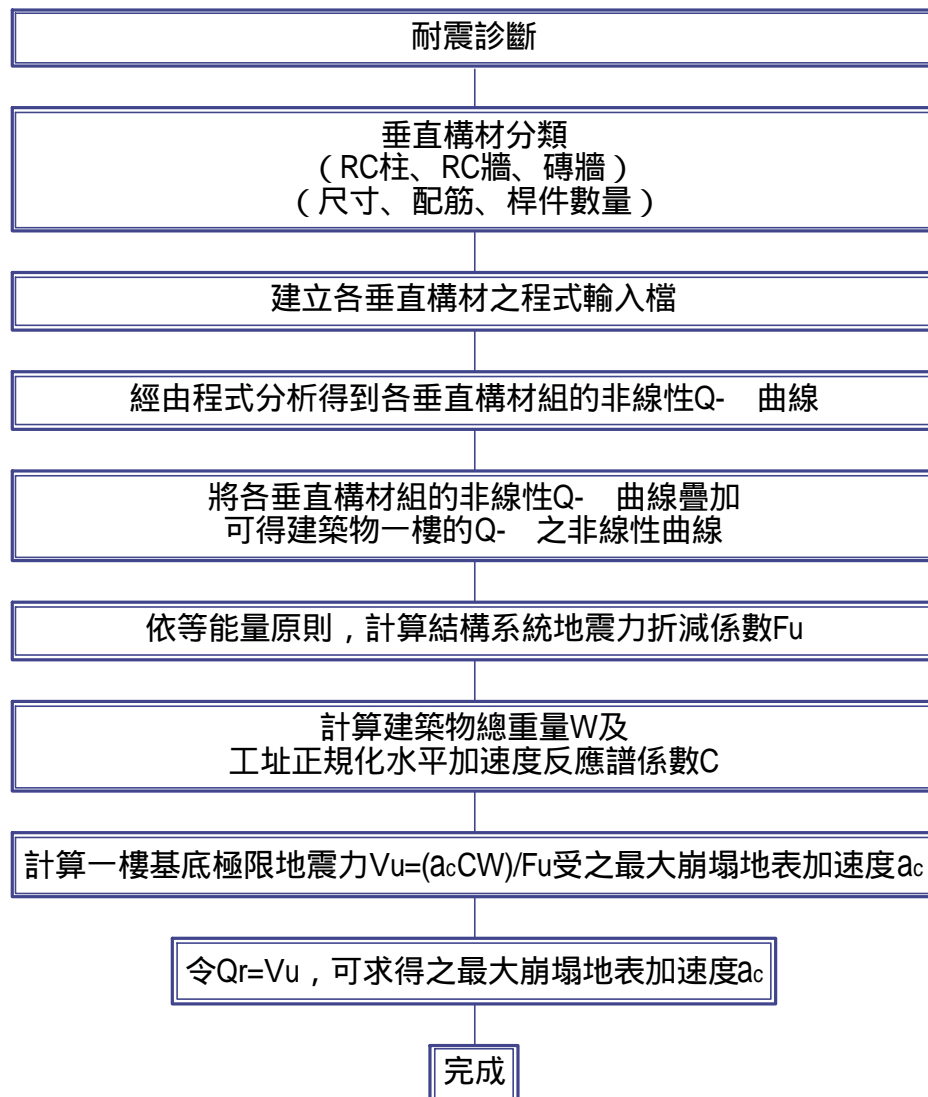


圖 3-9 建築物一樓耐震診斷流程圖

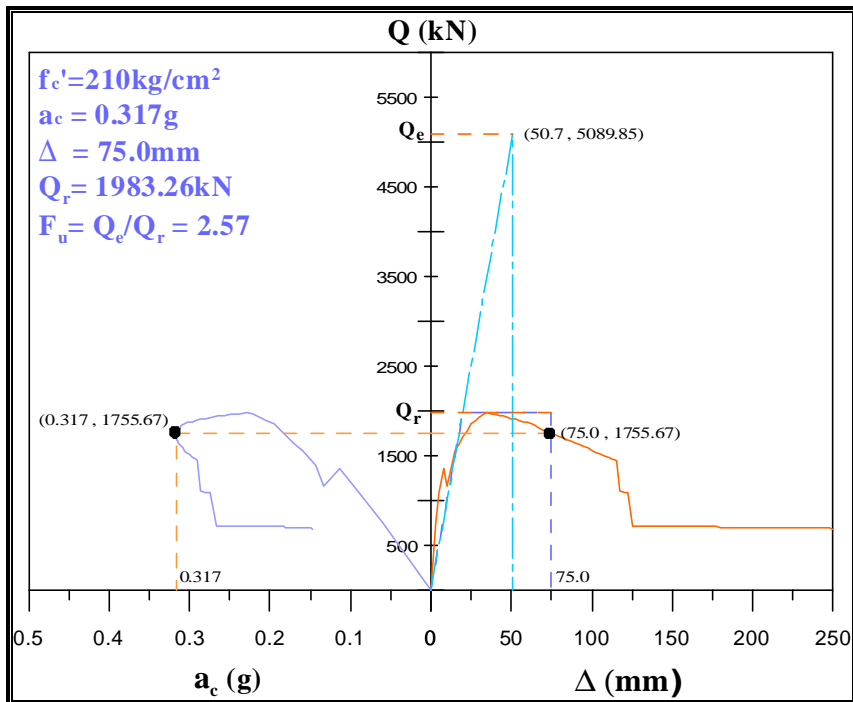


圖 4-1 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖

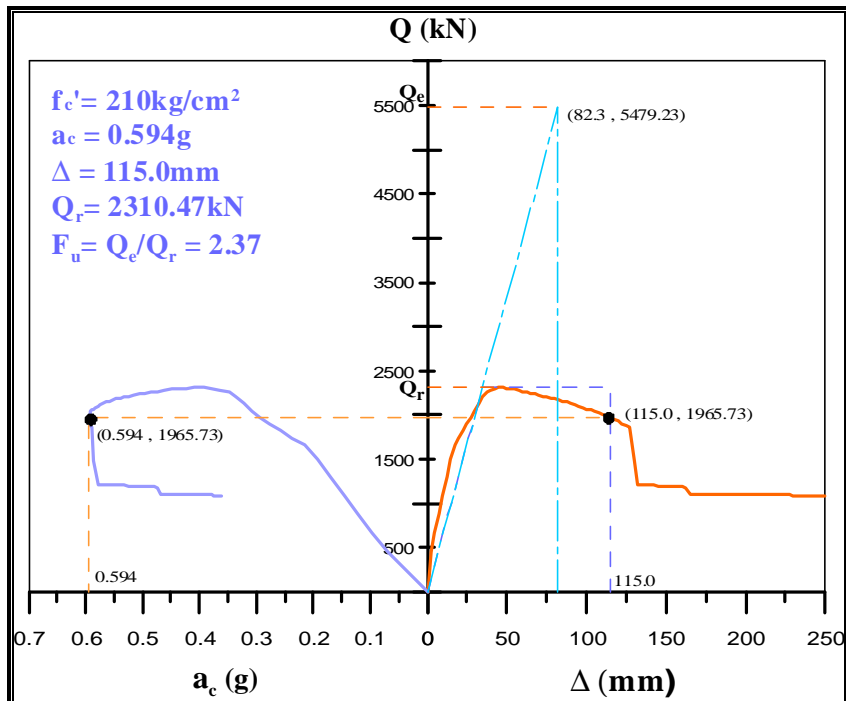


圖 4-2 竹山鎮延平國小東棟校舍一樓耐震診斷圖

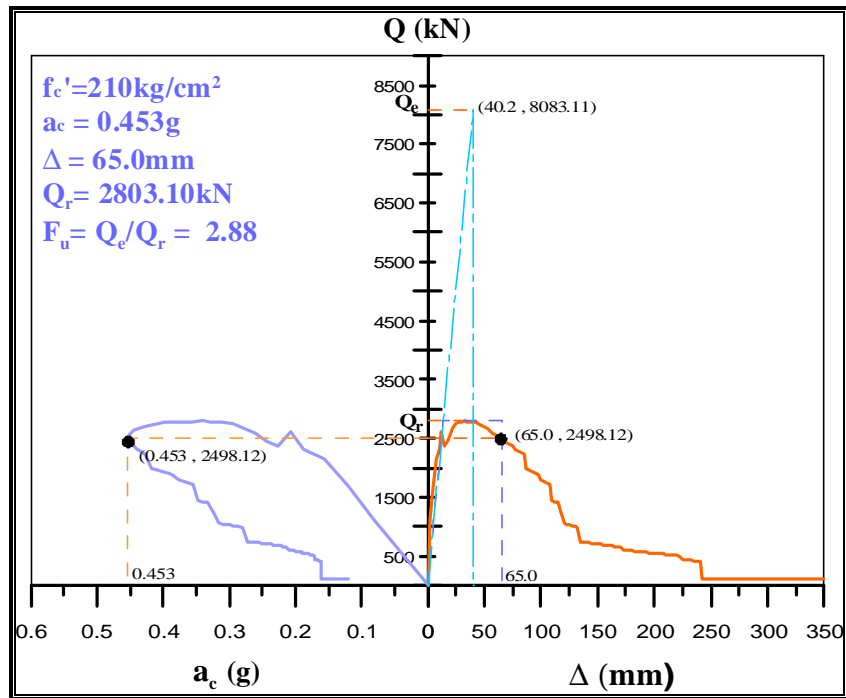


圖 4-3 國姓鄉北山國中北棟校舍一樓耐震診斷圖

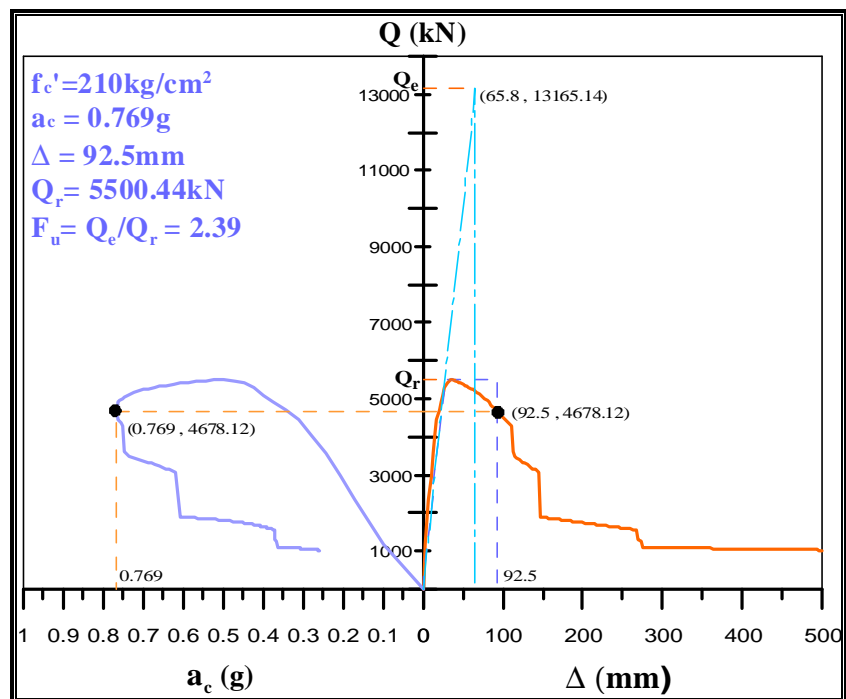


圖 4-4 國姓鄉國姓國中南棟校舍一樓耐震診斷圖

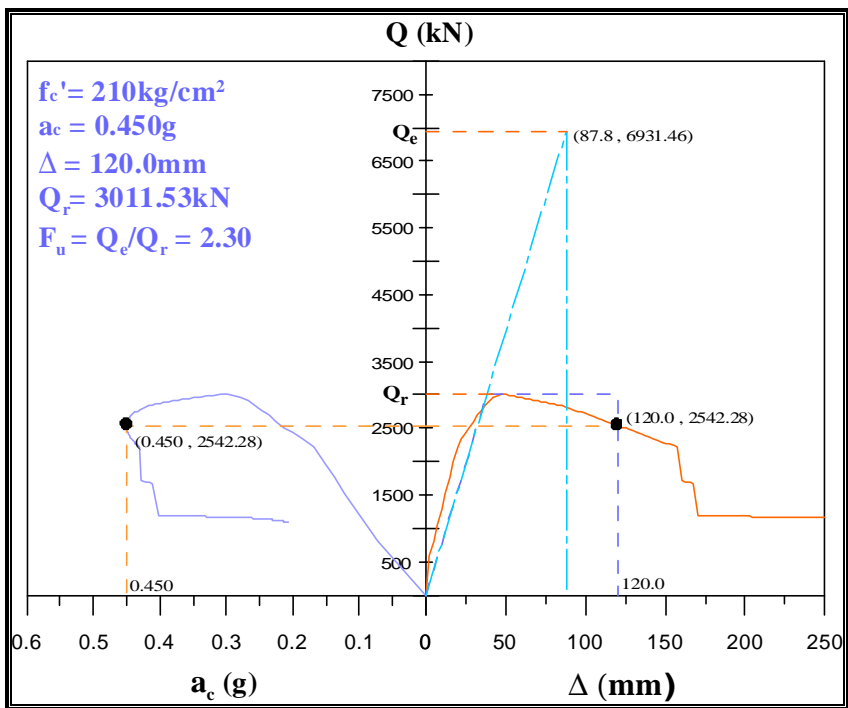


圖 4-5 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖

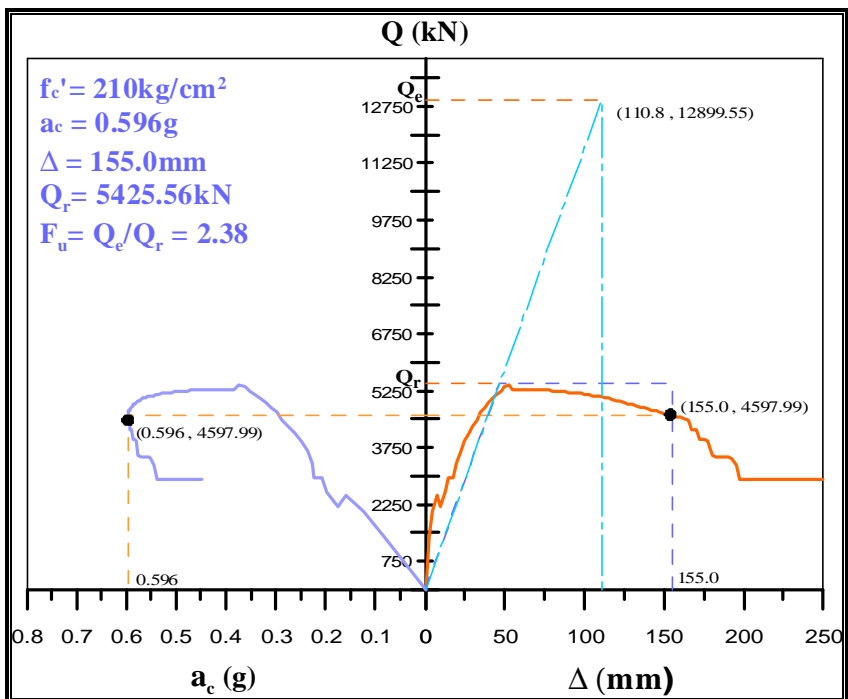


圖 4-6 埔里鎮愛蘭國小北棟校舍一樓耐震診斷圖

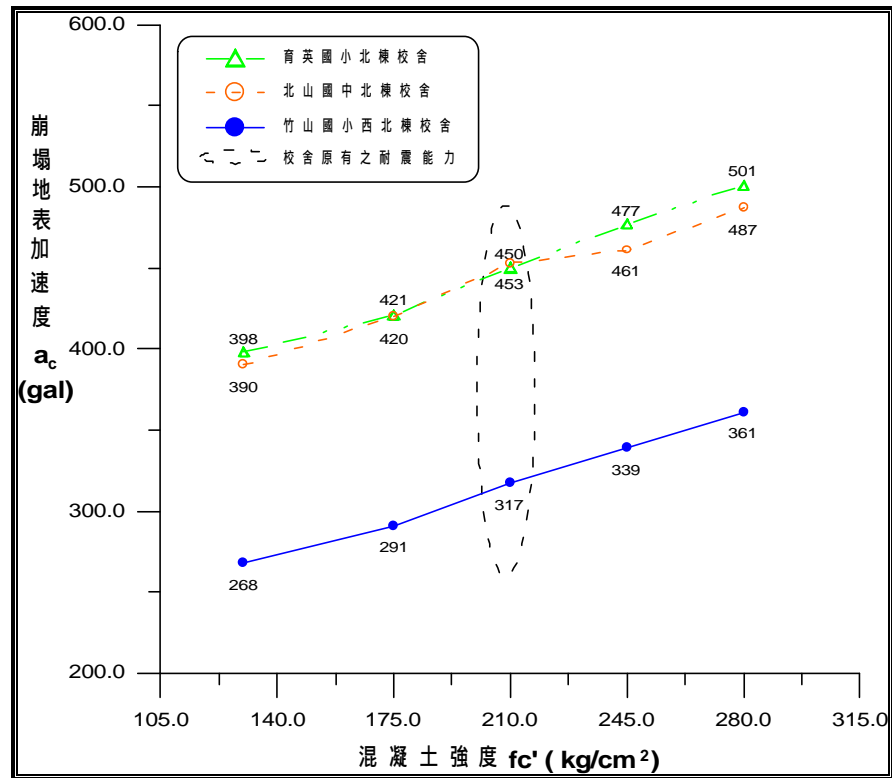


圖 5-1 三棟受損較嚴重之校舍於不同混凝土強度之耐震診斷圖

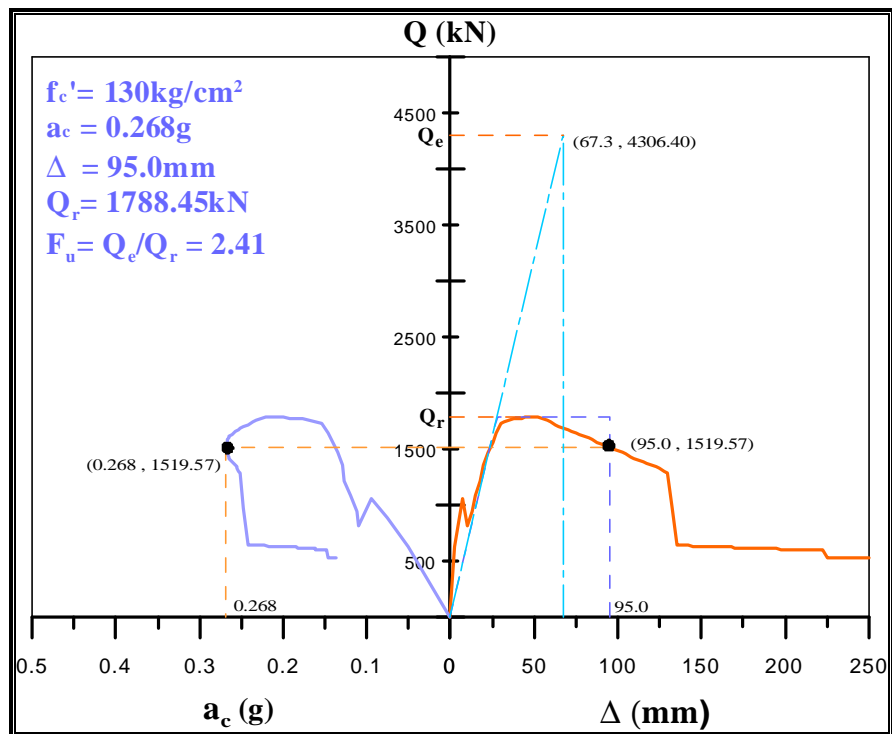


圖 5-2 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($f_c' = 130 \text{ kg/cm}^2$)

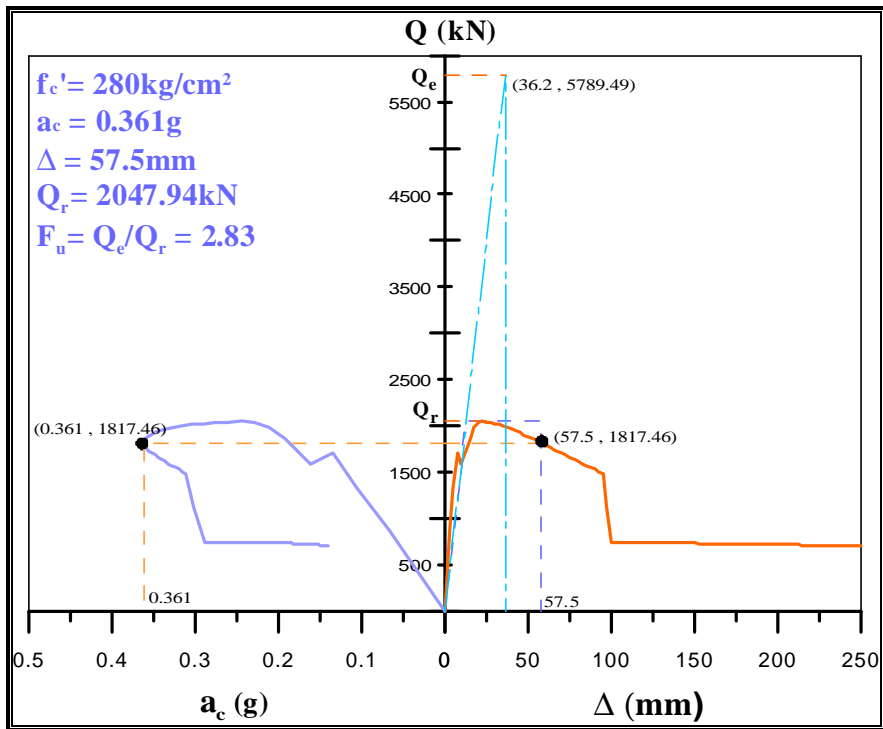


圖 5-3 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($f'_c=280\text{kg/cm}^2$)

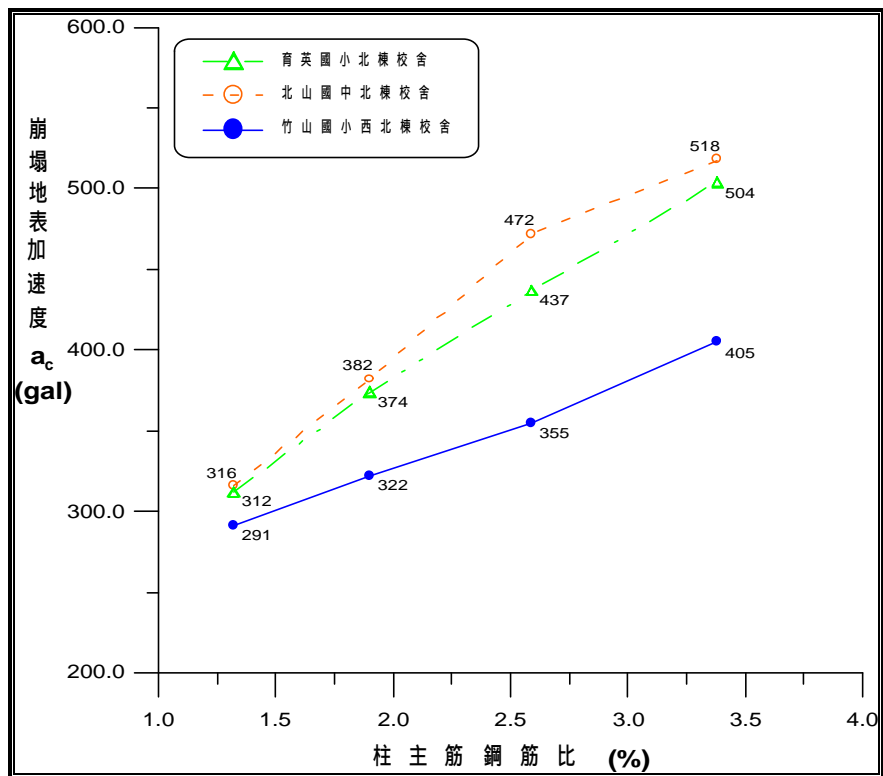


圖 5-4 三棟受損較嚴重之校舍於不同鋼筋比時之耐震診斷圖

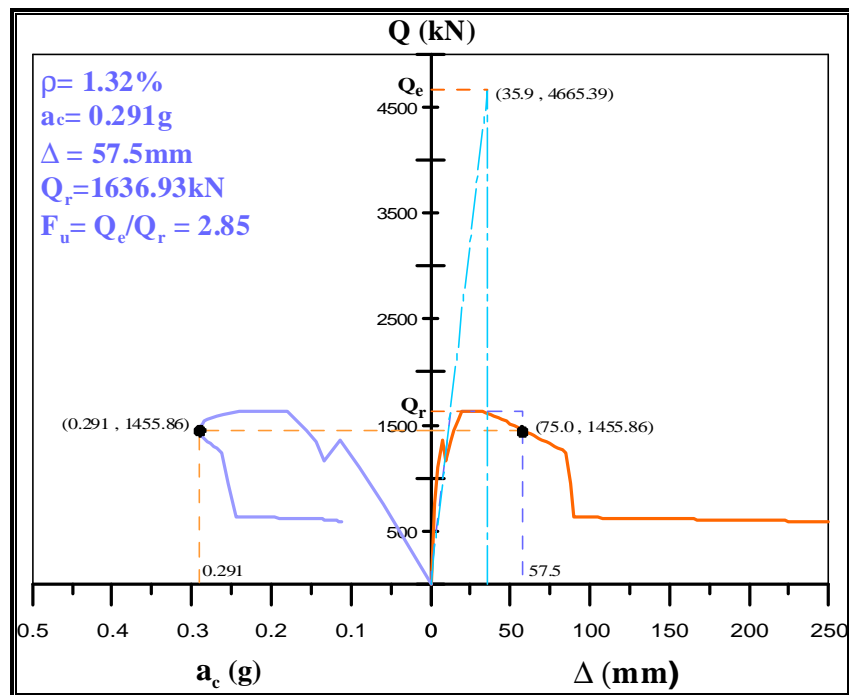


圖 5-5 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($r=1.32\%$)

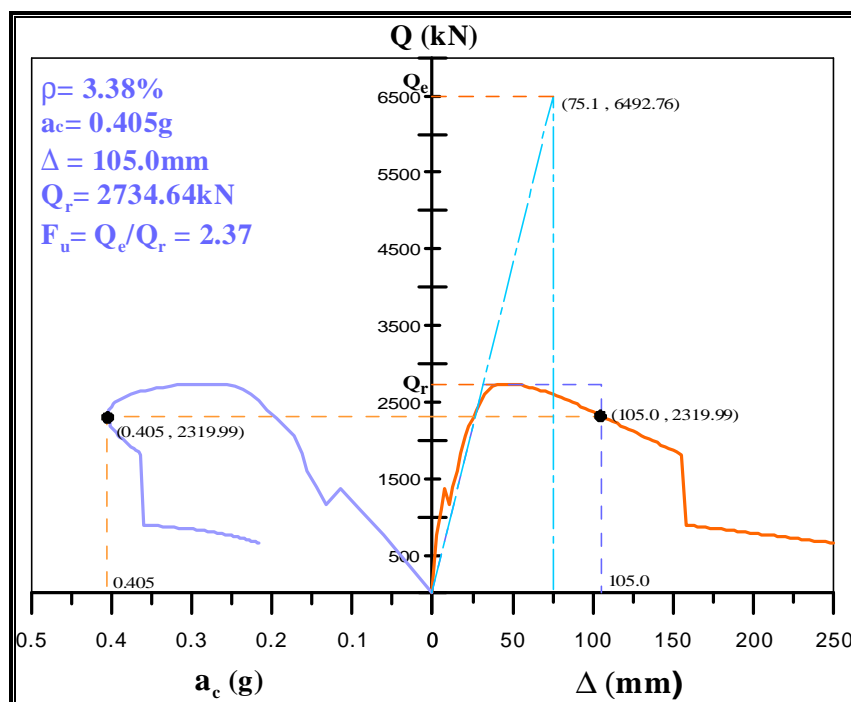


圖 5-6 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($r=3.38\%$)

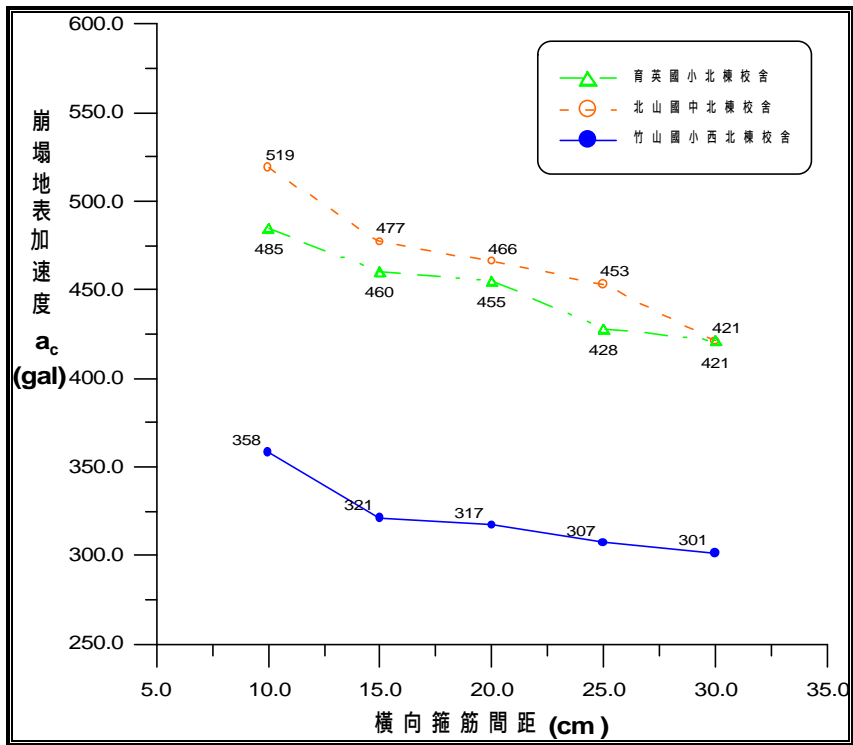


圖 5-7 三棟受損較嚴重之校舍於不同箍筋間距時之耐震診斷圖

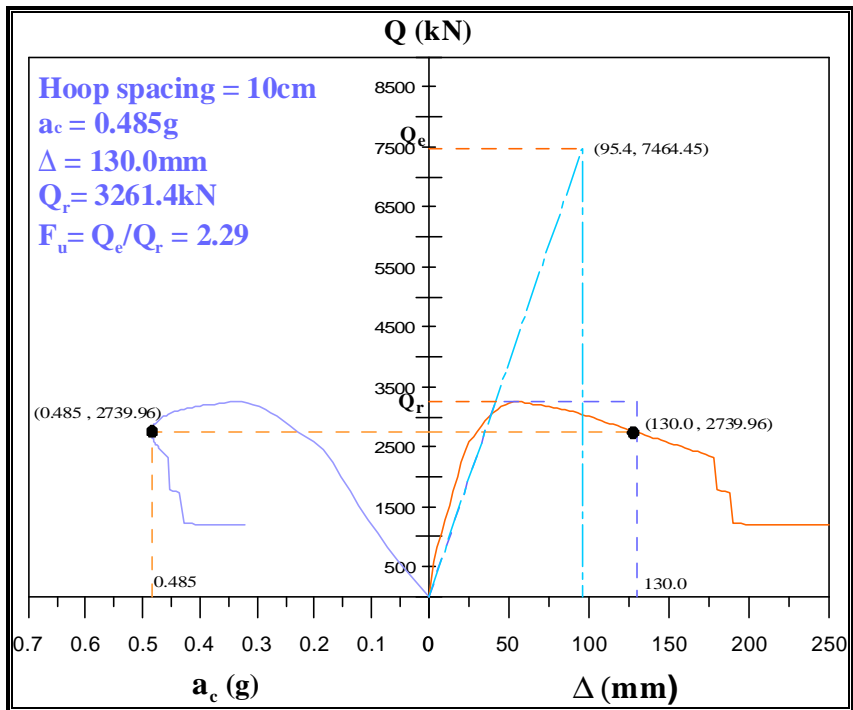


圖 5-8 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($s_h=10cm$)

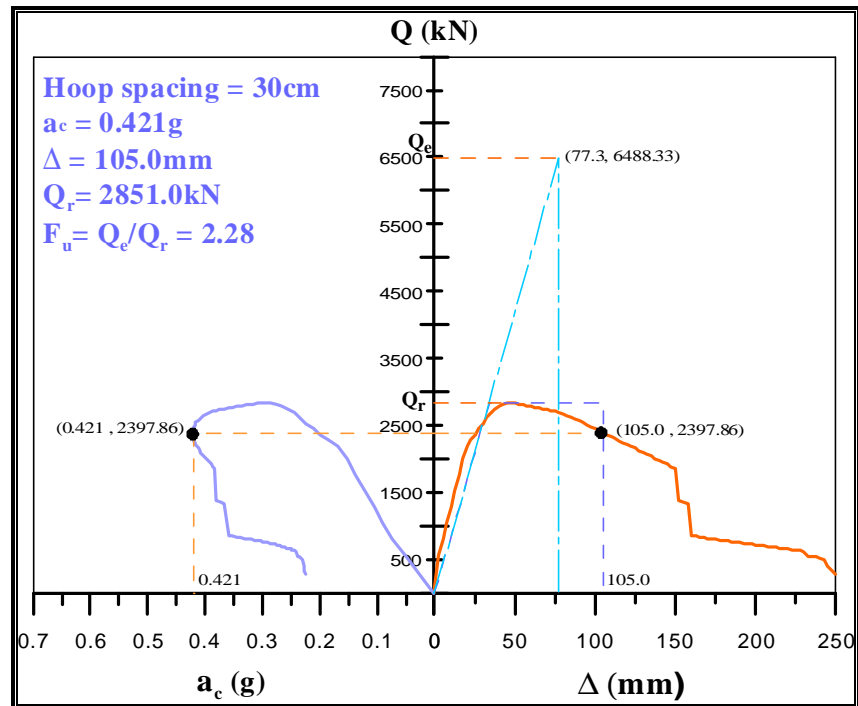


圖 5-9 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖 ($s_h=30cm$)

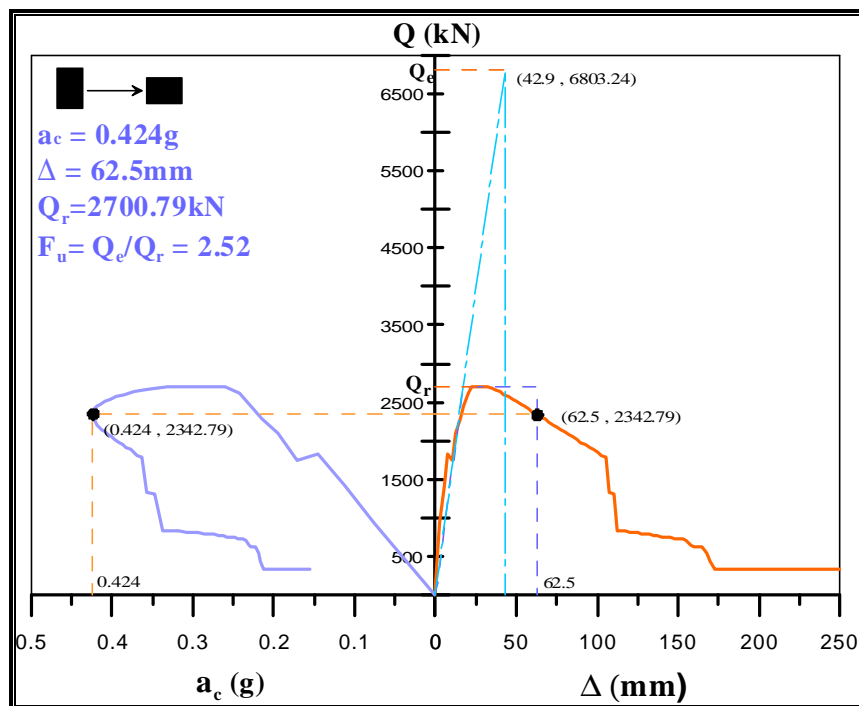


圖 5-10 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖 (柱轉置九十度後)

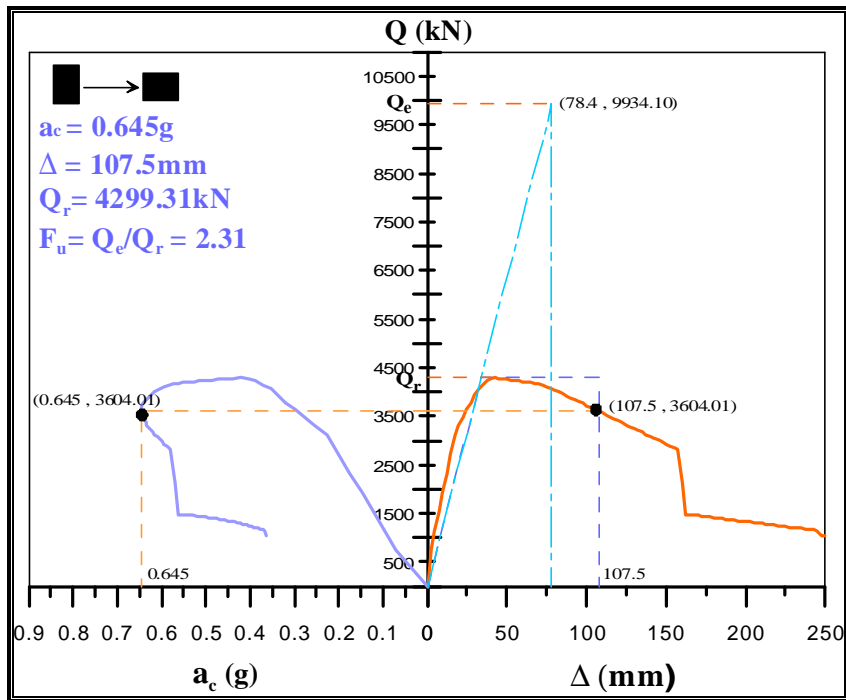


圖 5-11 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖（柱轉置九十度後）

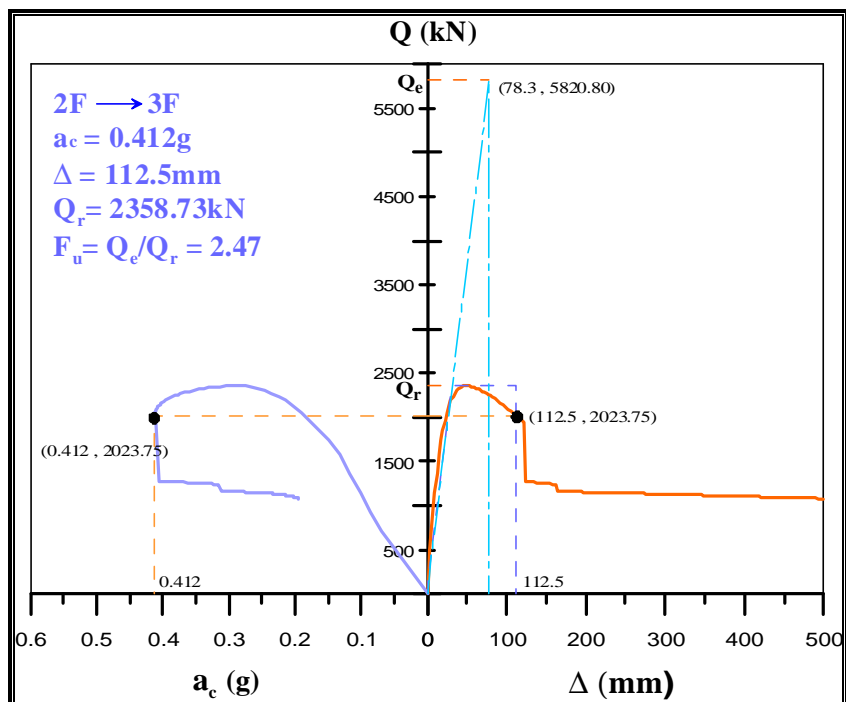


圖 5-12 竹山鎮延平國小東棟校舍一樓耐震診斷圖（加一層樓後）

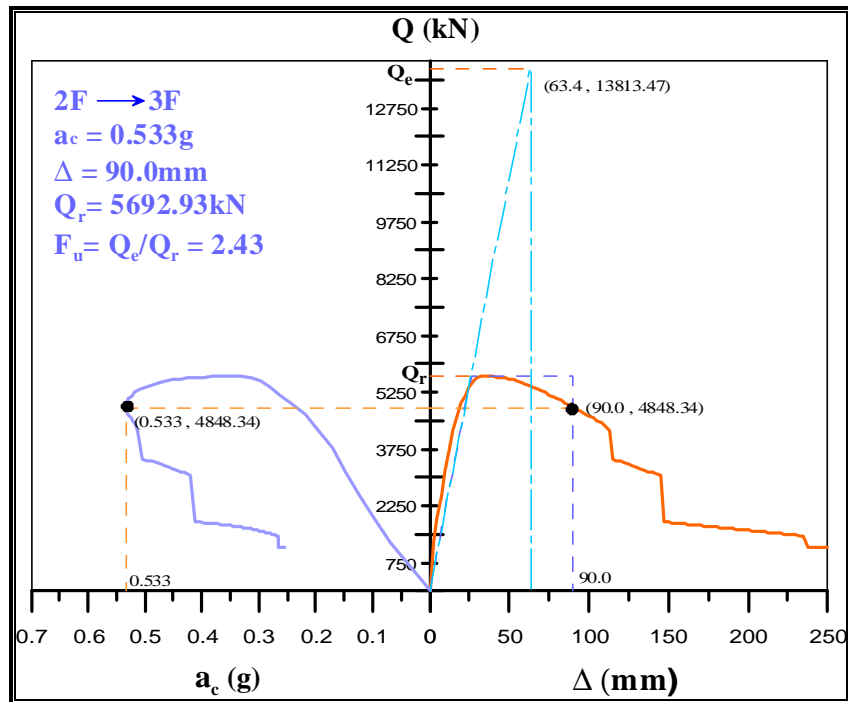


圖 5-13 國姓鄉國姓國中棟校舍一樓耐震診斷圖（加一層樓後）

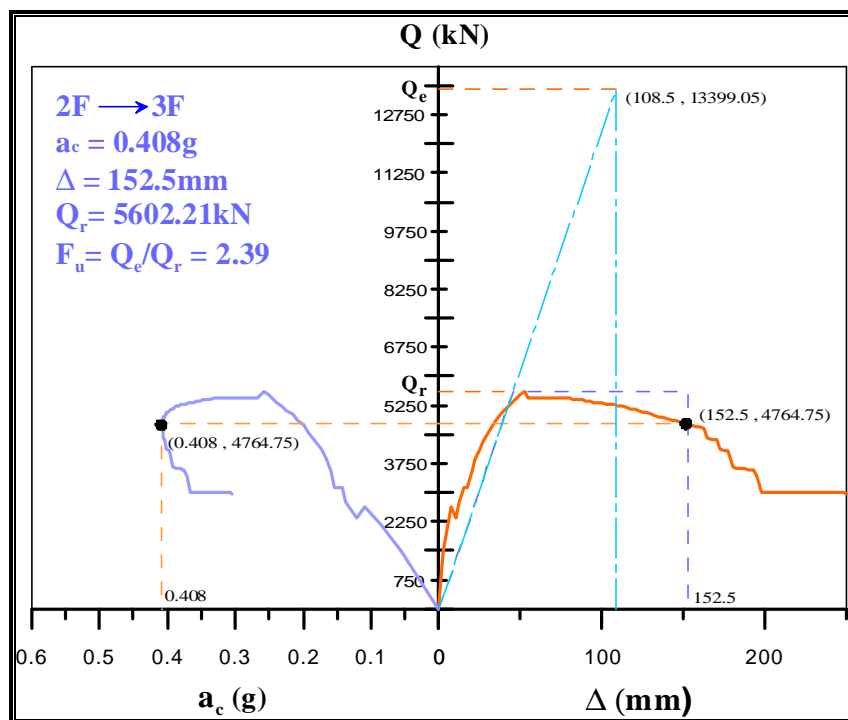


圖 5-14 埔里鎮愛蘭國小北棟校舍一樓耐震診斷圖（加一層樓後）

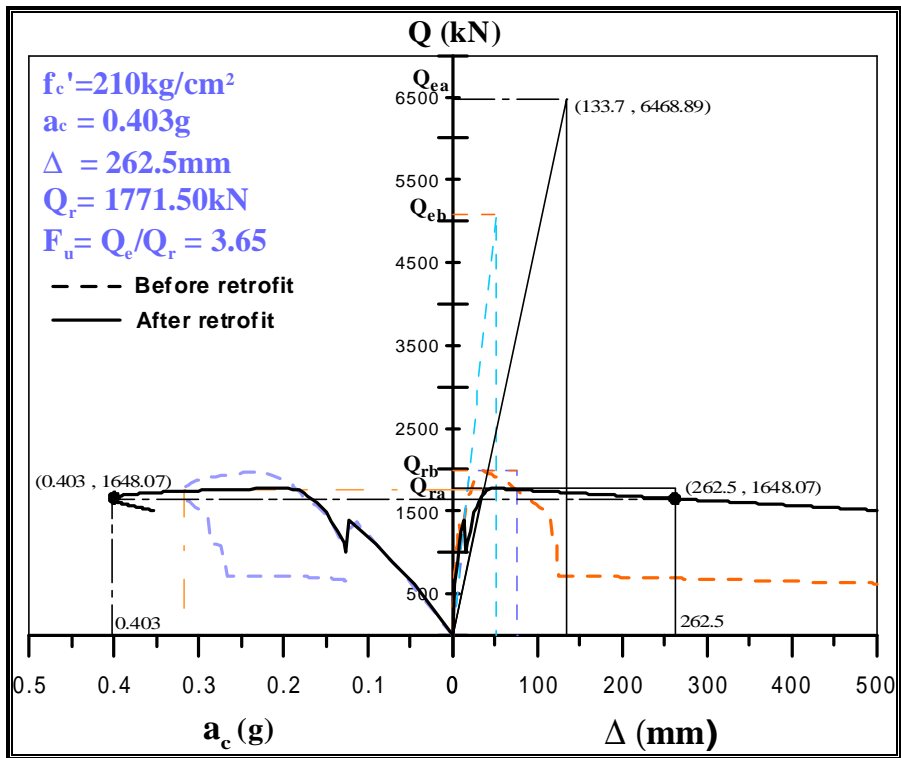


圖 5-15 竹山鎮竹山國小西北棟校舍一樓耐震診斷圖（切隔離縫後）

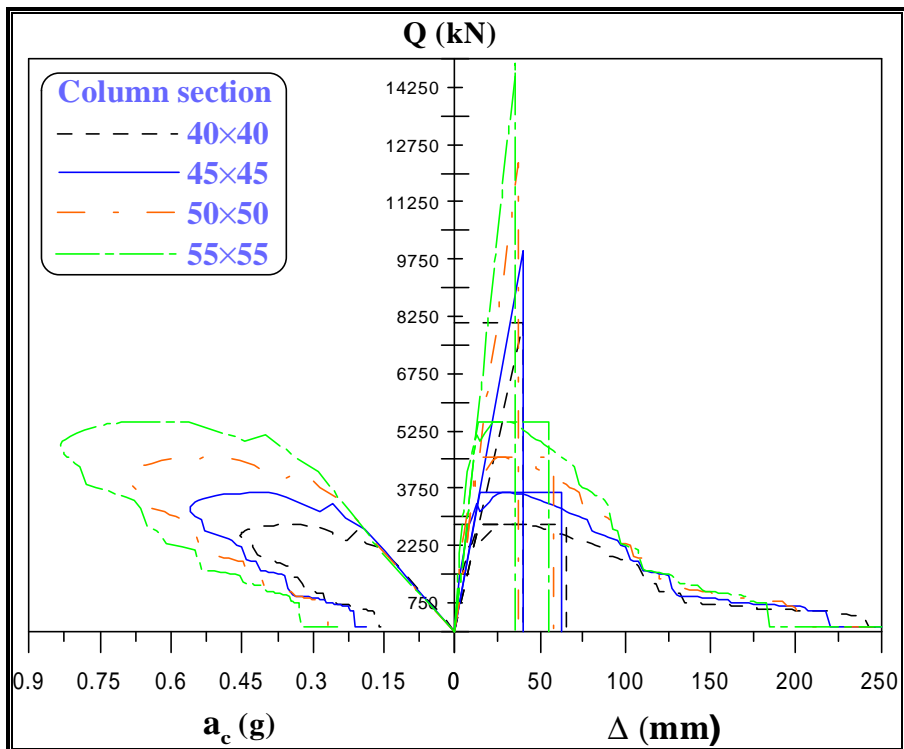


圖 5-16 國姓鄉北山國中北棟校舍一樓耐震診斷圖（加大柱斷面）

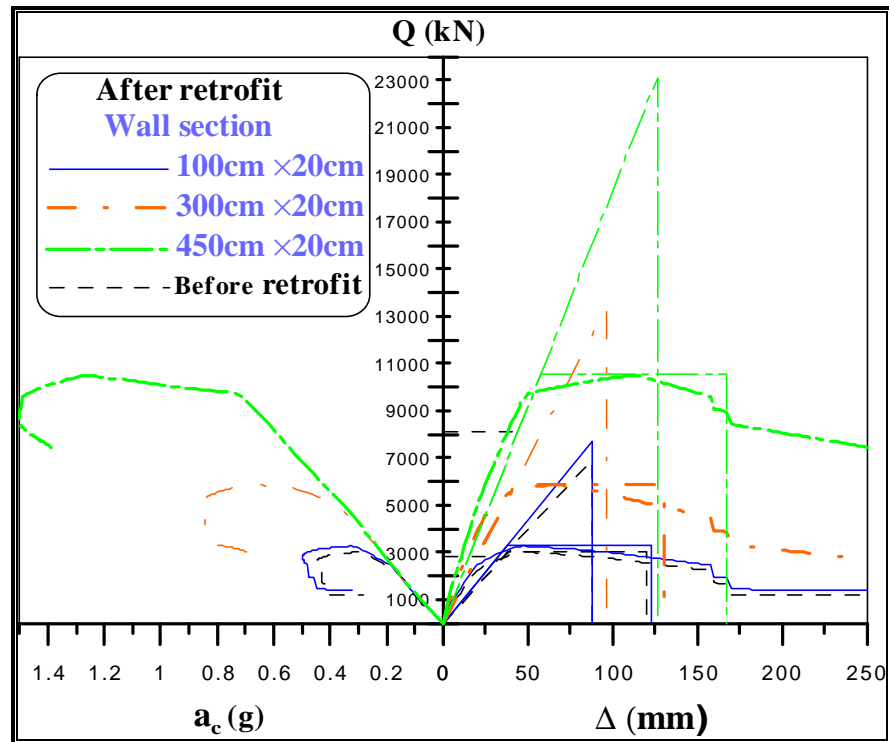


圖 5-17 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖（不同 RC 牆寬時）

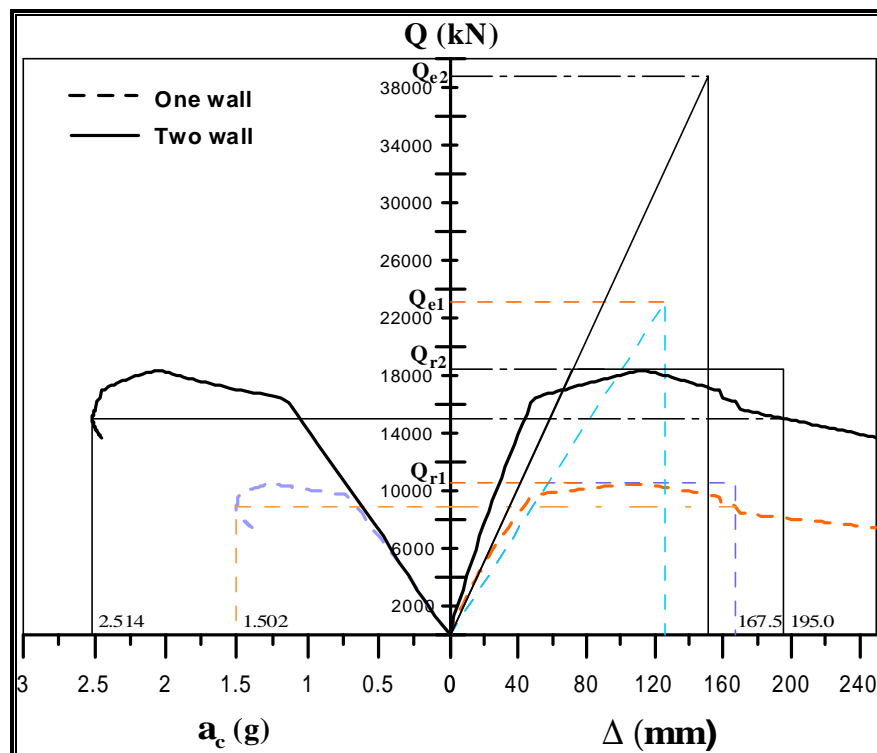


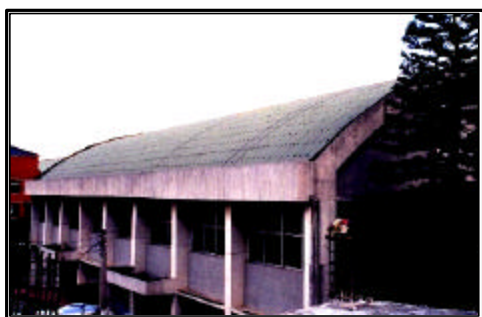
圖 5-18 埔里鎮育英國小北棟校舍一樓耐震診斷圖
（一片與兩片 450cm 之 RC 牆雙層雙向配置#5@20cm 鋼筋之比較）



相片 2-1 南投縣國姓鄉國姓國中
說明 RC 造平屋頂



相片 2-2 南投縣竹山鎮延和國中
說明 RC 造斜屋頂



相片 2-3 台南縣白河鎮白河國小【3】
說明 鋼浪板曲面屋頂



相片 2-4 南投縣國姓鄉北山國中
說明 RC 造斜屋頂



相片 2-5.1 南投縣竹山鎮竹山國小【*】
說明 正面無廊柱，柱被嚴重剪壞



相片 2-5.2 南投縣竹山鎮竹山國小【*】
說明 窗台柱嚴重遭到剪壞



相片 2-5.3 南投縣竹山鎮竹山國小【*】
說明 箍筋彎勾長度、角度不足，
柱心混凝土碎裂



相片 2-6 南投縣竹山鎮延平國小
說明 校區後方音樂教室，正面有
廊柱，921 地震後現況



相片 2-7.1 南投縣竹山鎮延和國中
說明 西棟校舍 921 地震修補後現況，為正面有廊柱系統



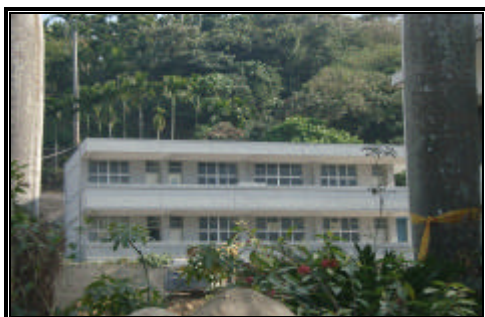
相片 2-8.1 南投縣國姓鄉國姓國中
說明 南棟校舍 921 地震修補後現況，為正面有廊柱系統



相片 2-7.2 南投縣竹山鎮延和國中
說明 因為有設置翼牆，故於 921 地震後損害輕微



相片 2-8.2 南投縣國姓鄉國姓國中
說明 南棟校舍，921 地震修補後正立面現況



相片 2-9.1 南投縣國姓鄉國姓國中
說明 東棟校舍，921 地震後正立面現況



相片 2-9.2 南投縣國姓鄉國姓國中
說明 東棟校舍，因有設置翼牆，故於 921 地震後損害輕微



相片 2-10.1 南投縣國姓鄉北山國中
說明 東棟校舍，921 地震修補後
正立面現況



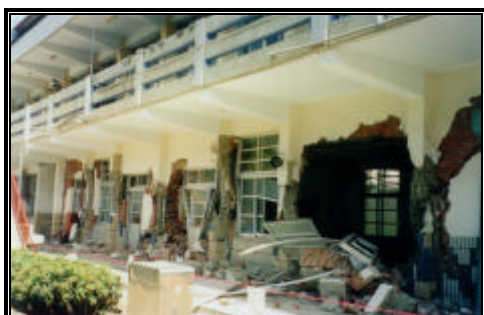
相片 2-10.2 南投縣國姓鄉北山國中
說明 東棟校舍，因為有設置翼
牆，故於地震後損害輕微



相片 2-11 南投縣埔里鎮南光國小
說明 C 棟校舍 921 地震前原貌



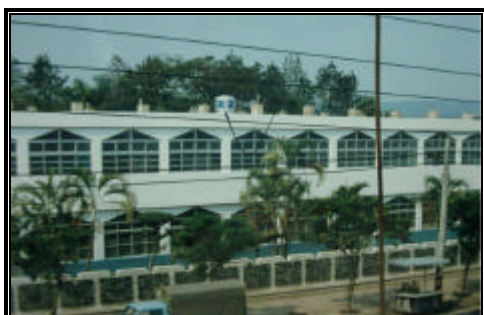
相片 2-12.1 南投縣埔里鎮南光國小
說明 D 棟校舍 921 地震前原貌



相片 2-12.2 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說明 D 棟校舍於 921 地震後，受
損嚴重，1F 柱被嚴重剪壞



相片 2-13.1 南投縣埔里鎮南光國小
說明 E 棟校舍 921 地震前原貌 -
正立面



相片 2-13.2 南投縣埔里鎮南光國小
說明 E 棟校舍 921 地震前原貌 -
背立面



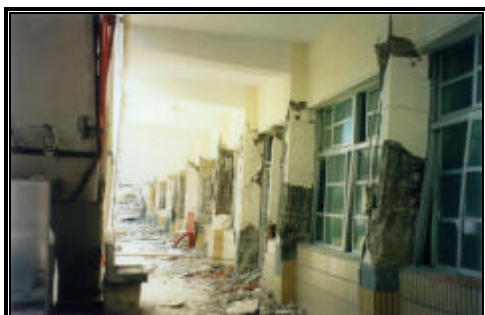
相片 2-14.1 南投縣埔里鎮南光國小
說明 F 棟校舍 921 地震前原貌 -
未增建 3F 前之正立面



相片 2-14.2 南投縣埔里鎮南光國小
說明 F 棟校舍 921 地震前原貌 -
增建 3F 後之正立面



相片 2-14.3 南投縣埔里鎮南光國小
說明 F 棟校舍 921 地震前原貌 -
增建 3F 後之背立面



相片 2-15 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說明 D 棟校舍於 921 地震後，底
層柱被剪壞情形十分嚴重



相片 2-16 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說明 柱頭壓力破壞，主筋挫屈，
箍筋被拉開



相片 2-17 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說明 F 棟校舍於 921 地震後，整
棟崩塌



相片 2-18 南投縣埔里鎮育英國小
說明 北棟校舍 921 地震前原貌
- 正立面



相片 2-19.1 南投縣埔里鎮愛蘭國小
說明 北棟校舍地震後現況，雙邊
走廊，單側有廊柱系統



相片 2-19.2 南投縣埔里鎮愛蘭國小
說明 北棟校舍地震後現況，雙邊
走廊，另一側為無廊柱系統



相片 2-20 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說 明 窗台柱遭受嚴重破壞情形



相片 2-21 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說 明 高窗短柱剪壞情形



相片 5-1 南投縣埔里鎮南光國小【*】
說 明 柱頂部發生嚴重破壞，柱頭
爆開，鋼筋嚴重外露

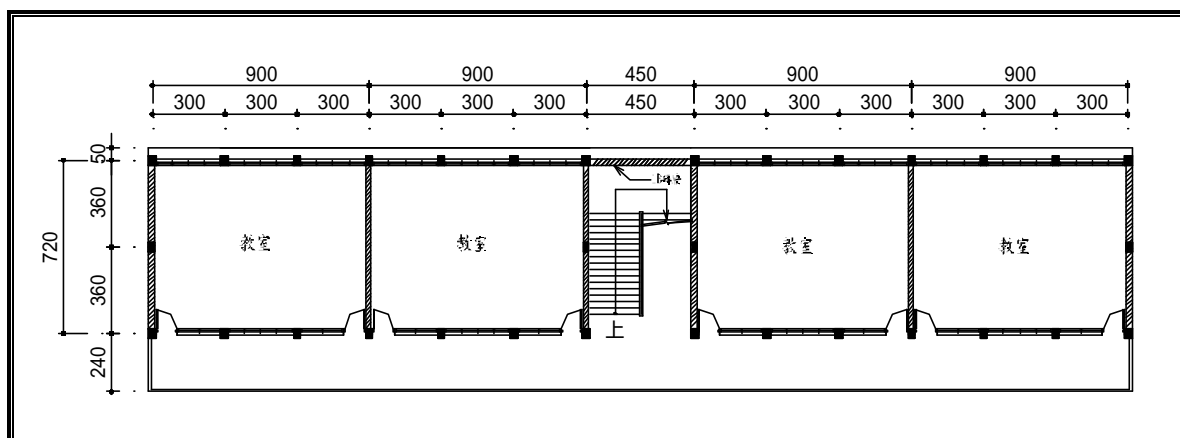
【*】感謝張嘉祥老師研究室提供

參考文獻

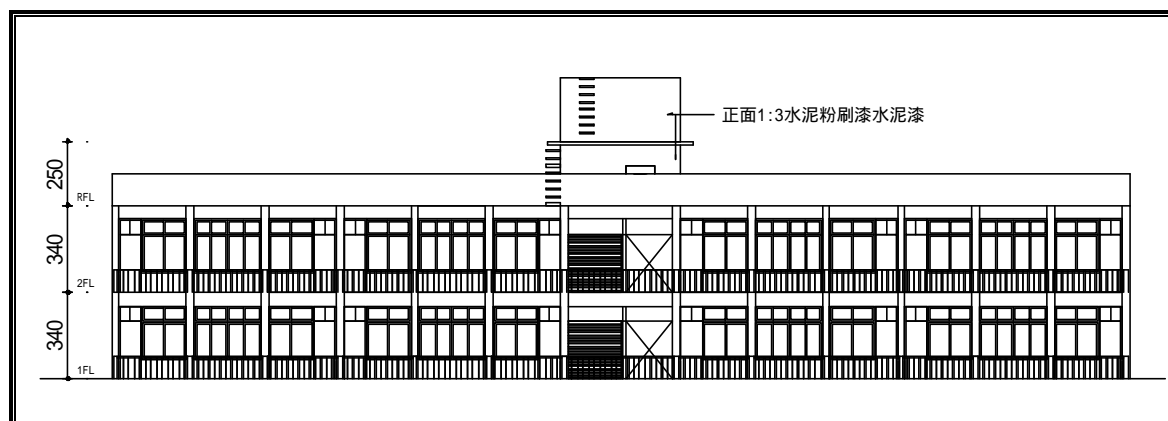
1. 內政部建築研究所， 921 集集大地震建築物震害初步調查報告 ，內政部建築研究所，1999 年 11 月。
2. 蔡義本等， 台灣省中小學校園附近動斷層普查及防震對策之研究 ，台灣省教育廳委託國立中央大學研究報告，1997 年。
3. 呂國維， 台灣地區學校建築結構系統及震害探討 ，國立成功大學建築研究所碩士論文，張嘉祥教授指導，2001 年 1 月。
4. 內政部建築研究所， 嘉義瑞里地震建築災害調查報告書 ，1998 年 8 月。
5. 國家地震工程研究中心， 1999 年 9 月 21 日台灣中部集集地震初期勘災報告 ，國家地震工程研究中心，1999 年 11 月。
6. 高志揚、林鴻志、王世昌、張中卓， 九二一集集大地震震災調查建築物耐震能力評估修復補強專輯 ，中華民國建築師公會全國聯合會，1999 年 12 月。
7. 張嘉祥、陳嘉基、呂國維、謝永宏， “九二一集集大地震學校建築震害”， 一九九九集集大地震災害調查研討會論文集 ，pp.A01~A29，國科會工程科技推廣中心，1999 年 11 月。
8. 張嘉祥等， 九二一集集大地震建築物災害調查分析 ，財團法人成大建築文教基金會， 2000 年 12 月。
9. 許茂雄、張嘉祥、姚昭智、劉玉文， 台南市國民中小學及幼稚園學校建築結構安全評估報告 ，台南市政府教育局委託國立成功大學研究報告，1993 年 9 月。
10. 張嘉祥、陳嘉基、曹文琥， 校舍耐震安全作業參考手冊 ，台南市政府，1999 年 4 月。
11. 張嘉祥， 學校建築防震手冊 ，內政部建築研究所，1999 年 4 月。
12. Li Kang-Ning， “Canny 99 Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package” Technical Manual&Users’ Manual, Civil Dept. National University of Singapore, 1996,10.
13. 劉白梅， 中高層鋼筋混凝土建築結構火害前後之地震保險費率 ，國立成功大學建築研究所博士論文，許茂雄教授指導，台南，1998 年。
14. 日本建築防災協會， 既有鋼筋混凝土造建築物之耐震診斷基準 ，

- 日本建築防災協會，東京，1990年。
15. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.,1996.
 16. 張嘉祥, "嘉義瑞里地震學校建築震害", 結構工程, 第十三卷第三期, pp.61~80, 1998年9月。
 17. 蔡益超, 鋼筋混凝土建築物耐震能力評估及推廣, 內政部建築研究所, 台北, 1999年。
 18. 廖文義、柴駿甫, "學校建築結構之初步評估", 學校建築技術研究計畫及手冊編定整合型研究計畫二期報告, 國家地震工程研究中心, 台北, 2000年。
 19. 郭心怡, 學校建築快速耐震診斷, 國立成功大學建築研究所碩士論文, 許茂雄教授指導, 台南, 2000年6月。
 20. 黃世建、陳正平、王森源、陳正誠、蕭興臺, 學校建築常見之結構損害現象歸類及補強計畫建議, 內政部建築研究所, 1996年6月。
 21. 許茂雄、張嘉祥、蔡瑞河, 新建學校建築耐震規劃設計與既有學校建築耐震補強指針研擬, 台北, 內政部建築研究所專題研究計畫期末報告(MOIS-860010), 1997年6月。
 22. 蔡益超、黃炯憲、曾一平、陳威成, 學校建築結構耐震能力詳細評估與補強, 國家地震工程研究中心, 2000年6月。
 23. 張順益, 學校建築之強度與勁度補強研究, 國家地震工程研究中心, 2000年6月。
 24. 許士昱, 耐震診斷法之改良與參數探討, 國立成功大學建築研究所碩士論文, 許茂雄教授指導, 台南, 2002年6月。
 25. 內政部營建署, 建築技術規則, 台北, 內政部營建署, 1989年5月。
 26. 內政部營建署, 建築物耐震設計規範及解說, 台北, 內政部營建署, 2001年7月。

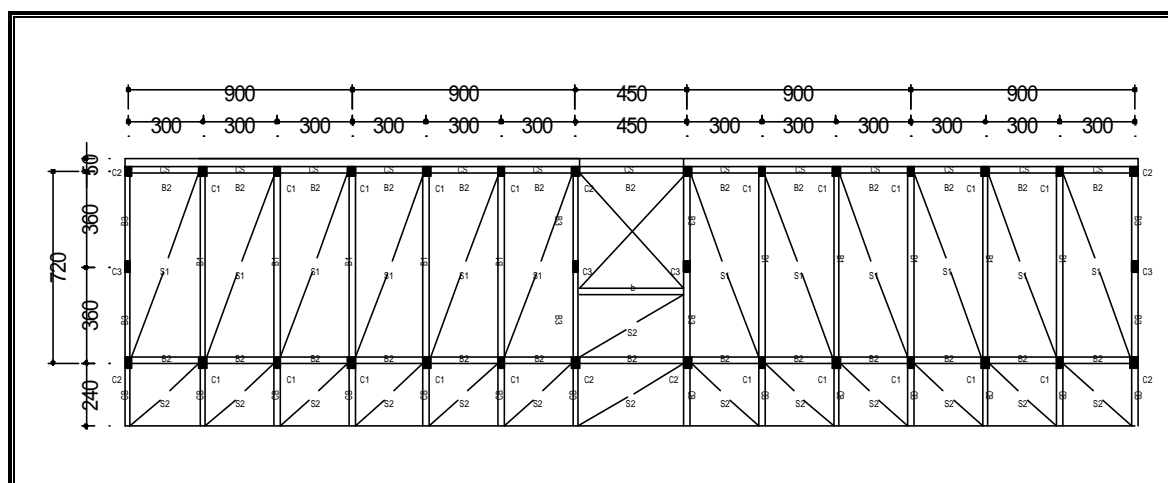
27. 張嘉祥、許茂雄、黃國彰、林國壽，「鋼筋混凝土既有校舍耐震能力與幾個影響參數關係 - 以台南地區校舍為例」，結構工程，第十卷第三期，pp23~34，1995年9月。
28. 張旭福，鋼筋混凝土短柱補強措施之定量研究，pp 31-60，國立成功大學建築研究所碩士論文，許茂雄教授指導，1993年。
29. 賴慶鴻，鋼筋混凝土剪力牆強度與剛度之試驗與分析，pp23-53，國立成功大學建築研究所碩士論文，許茂雄教授指導，1999年6月。
30. 黃國彰，有邊界柱梁之磚牆耐震試驗與等值牆版分析，pp51-70，國立成功大學建築研究所碩士論文，1995年。
31. ATC, "Structural Response Modification Factors", ATC-19 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California., pp18-19,1995.
32. 林慶偉、賴文基等，「九二一大地震成因與斷層活動機制」，一九九九集集大地震災害調查研討會論文集，pp. -1~ -16，國科會工程科技推廣中心，1999年11月。
33. Structure Engineers Association of California Vision 2000 Committee, Performance Based Seismic Engineering of Buildings, SEAOC Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.
34. 洪李凌，台灣地區設計地震力檢討，民國89年國科會防災研究成果發表會，2000年11月。



1-1 竹山國小西北棟校舍一樓平面圖



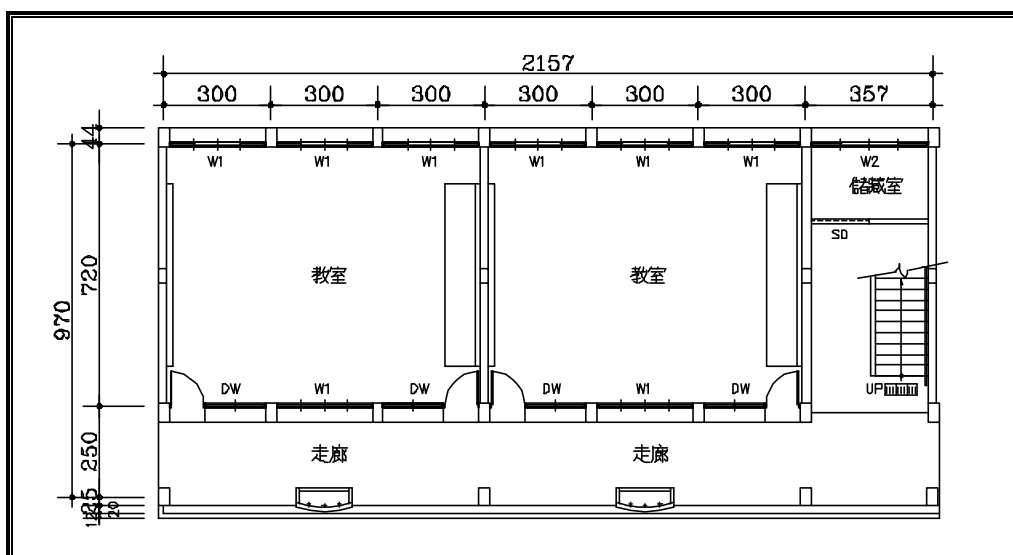
1-2 竹山國小西北棟校舍正立面圖



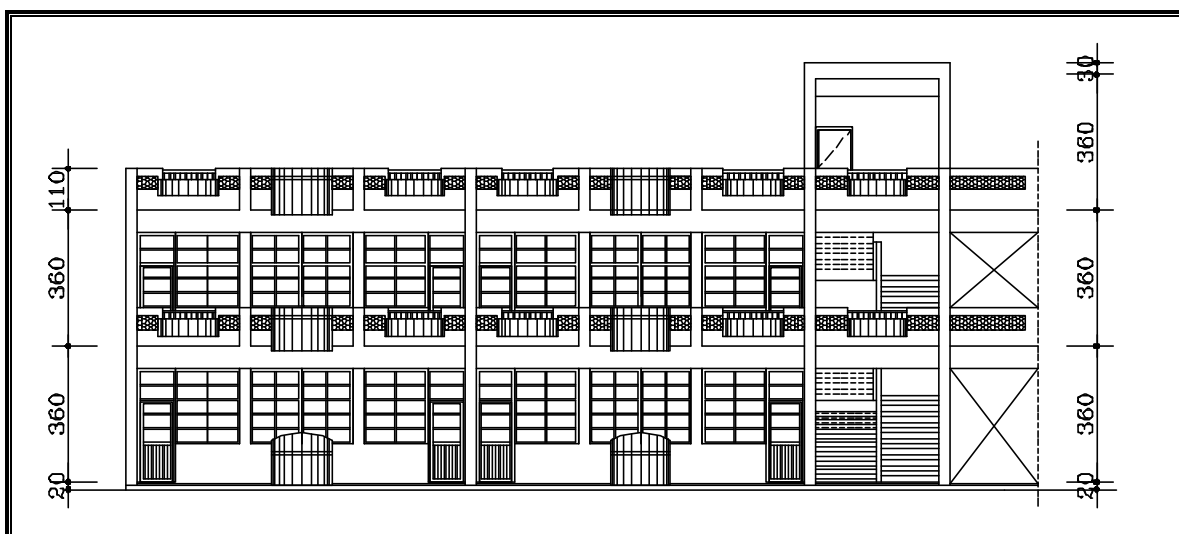
1-3 竹山國小西北棟校舍一樓結構平面圖

樓層	C1	C2	C3
1 F			
配筋	× 8-#6	× 6-#6 ○ 2-#5	○ 6-#5
箍筋	#3@20	#3@20	#3@20
尺寸	30*40	30*40	24*40

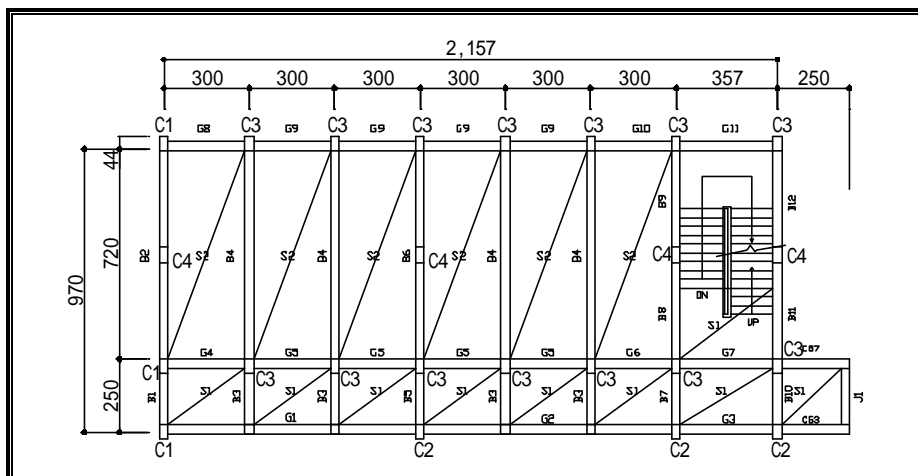
1-4 竹山國小西北棟校舍一樓柱配筋圖



2-1 延平國小東棟校舍一樓平面圖



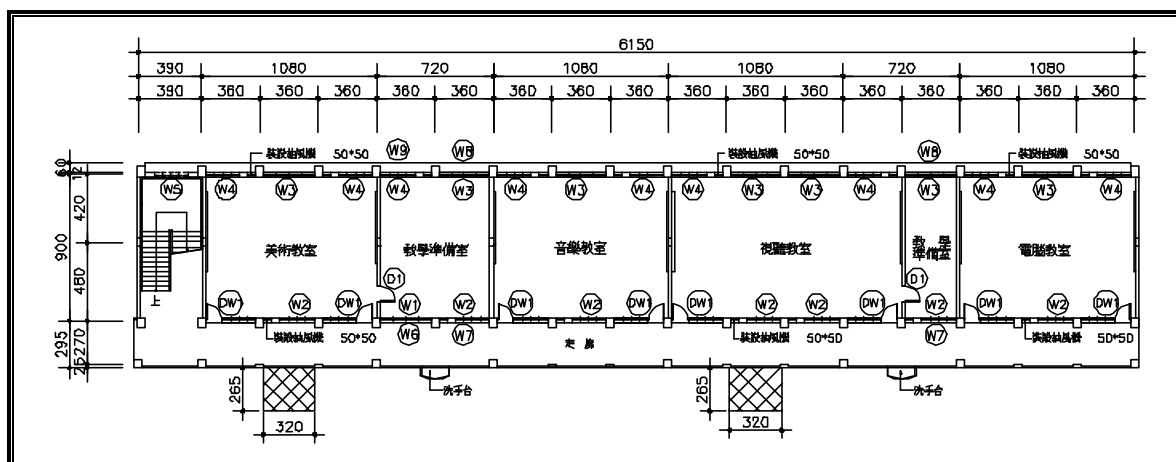
2-2 延平國小東棟校舍正立面圖



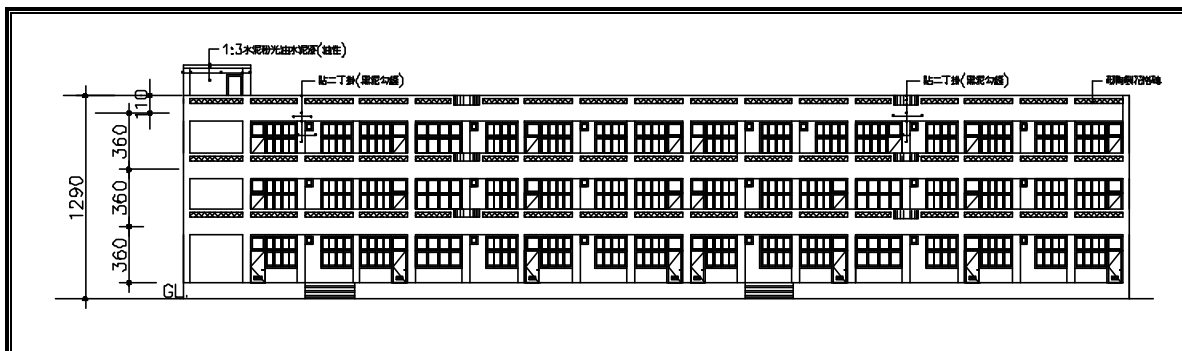
2-3 延平國小東棟校舍一樓結構平面圖

樓層 編號	C1	C2	C3	C4
1 F				
配筋	× 12-#7	× 12-#7	× 10-#7	● 6-#6
箍筋	#3@10~20	#3@10~20	#3@10~20	#3@10~20
尺寸	30*50	30*50	30*50	25*40

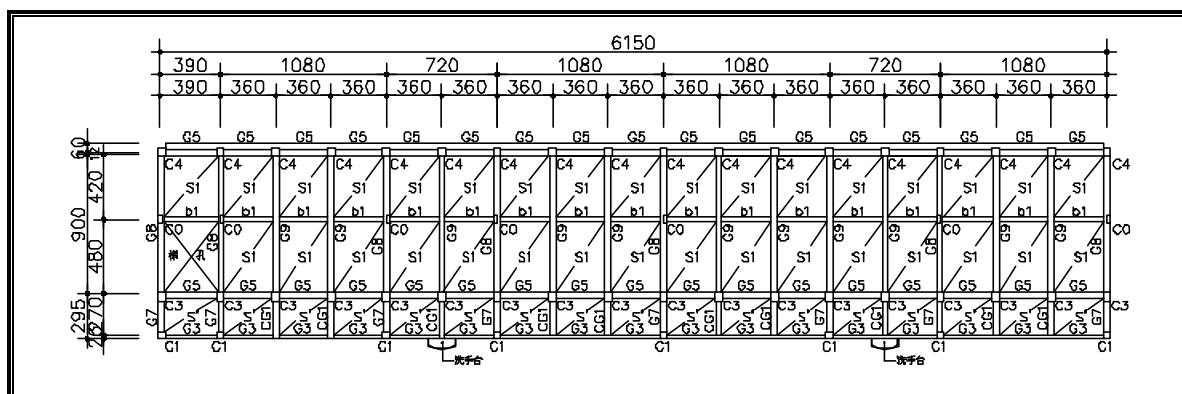
2-4 延平國小東棟校舍一樓柱配筋圖



3-1 延和國中西棟校舍一樓平面圖



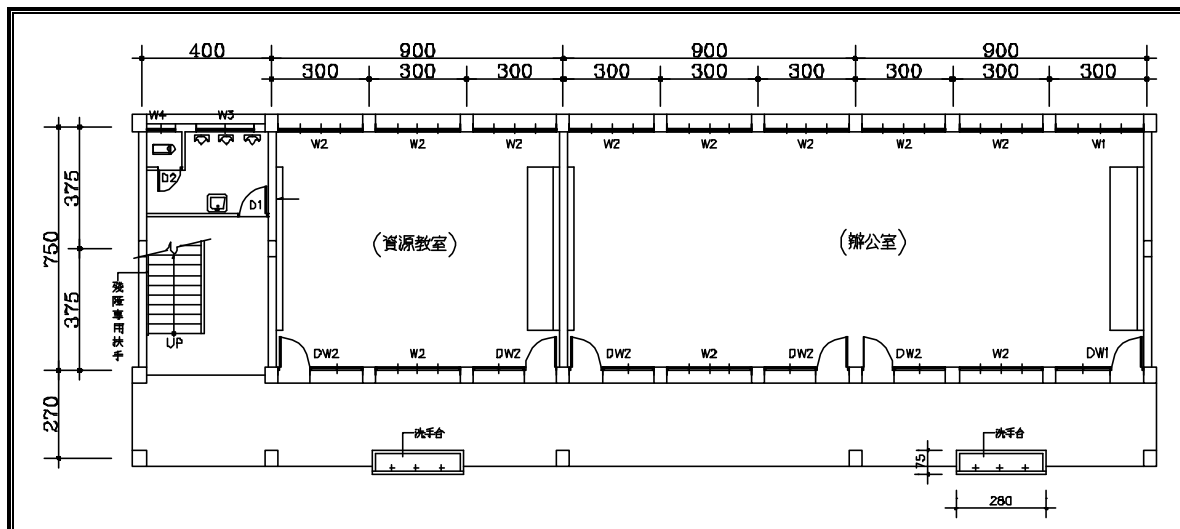
3-2 延和國中西棟校舍正立面圖



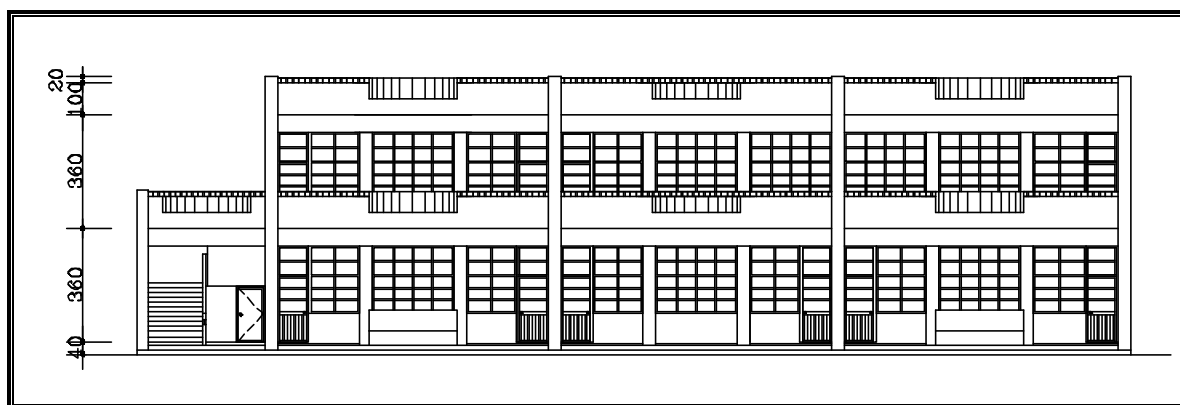
3-3 延和國中西棟校舍一樓結構平面圖

樓層	C0	C1	C2	C3	C4	C5
1 F						
配筋	○ 6-#6	○ 12-#6	○ 12-#6	△ 8-#7 ○ 4-#6	▽ 10-#8 △ 4-#6	○ 6-#6
箍筋	#3@20	#3@10~20	#3@10~20	#3@10~20	#3@10~20	#3@10~20
尺寸	25*50	50*50	50*50	50*60	50*60	25*50

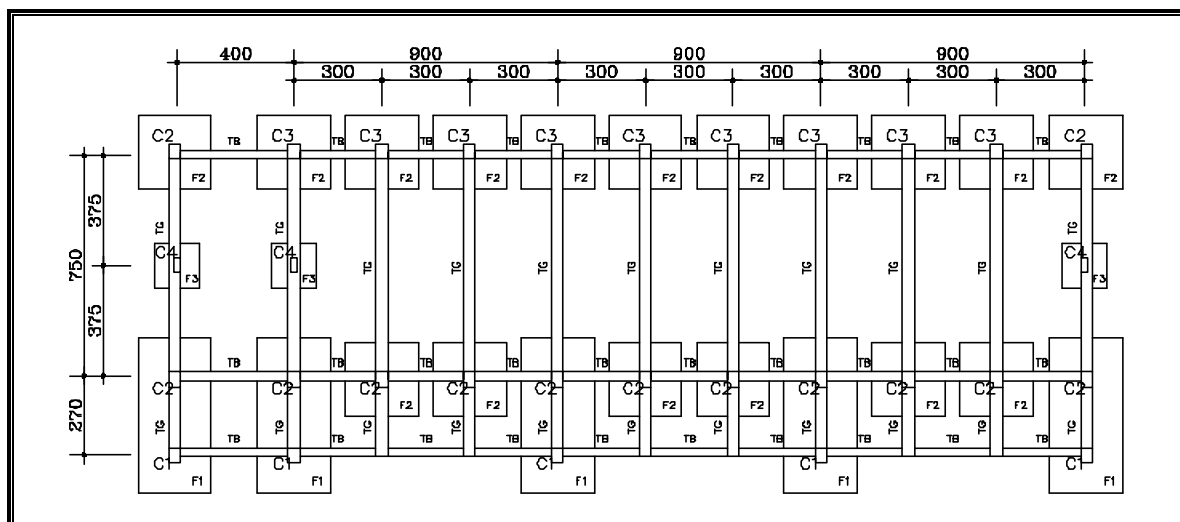
3-4 延和國中西棟校舍一樓柱配筋圖



4-1 國姓國中南棟校舍一樓平面圖



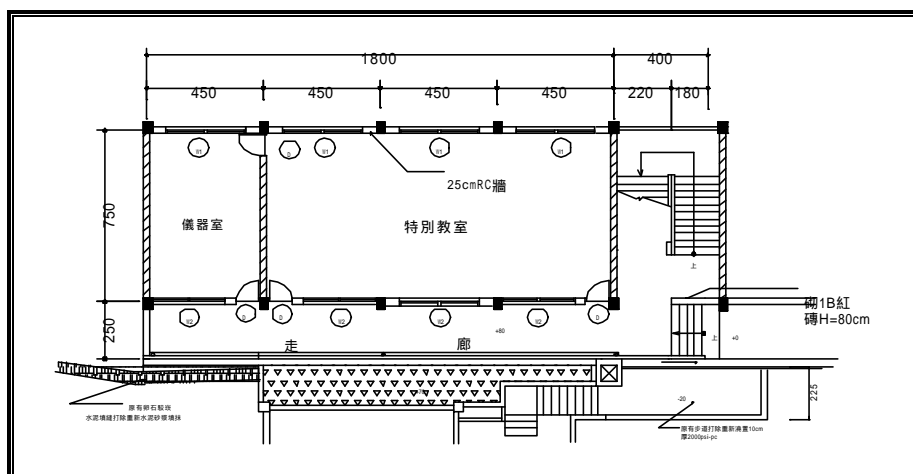
4-2 國姓國中南棟校舍正立面圖



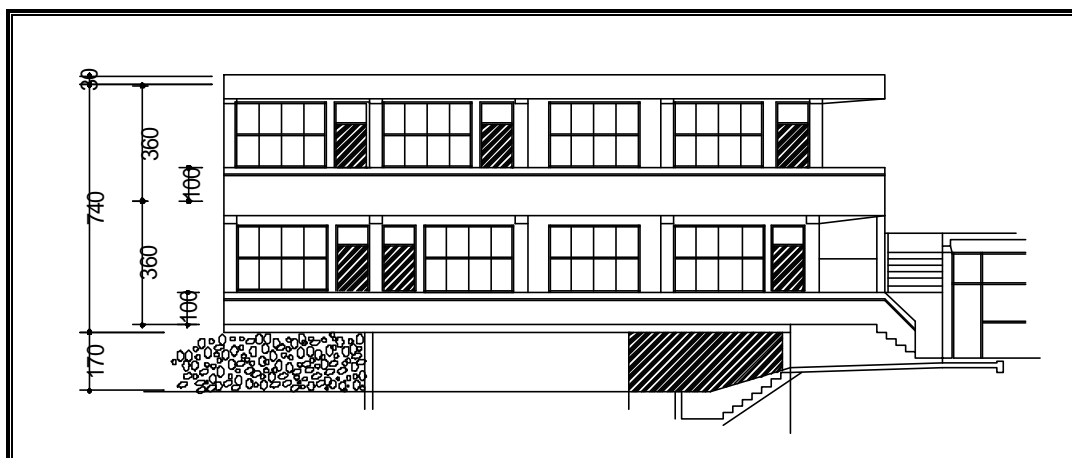
4-3 國姓國中南棟校舍一樓結構平面圖

樓層 編號	C1	C2	C3	C4
1 F				
配筋	•10-#7 *4-#6	•12-#7	○10-#8 •4-#7	*8-#6
箍筋	#3@10 20	#3@10 20	#3@10 20	#3@10 20
尺寸	40*50	40*50	40*50	24*50

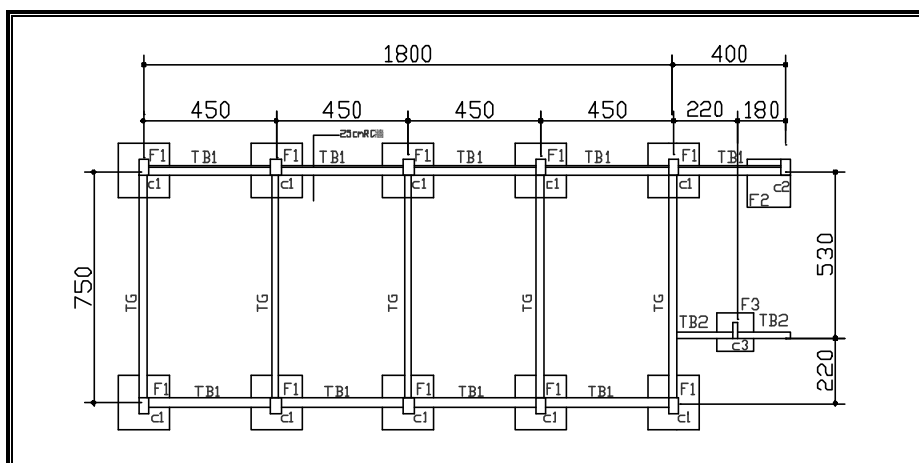
4-4 國姓國中南棟校舍一樓柱配筋圖



5-1 國姓國中東棟校舍一樓平面圖



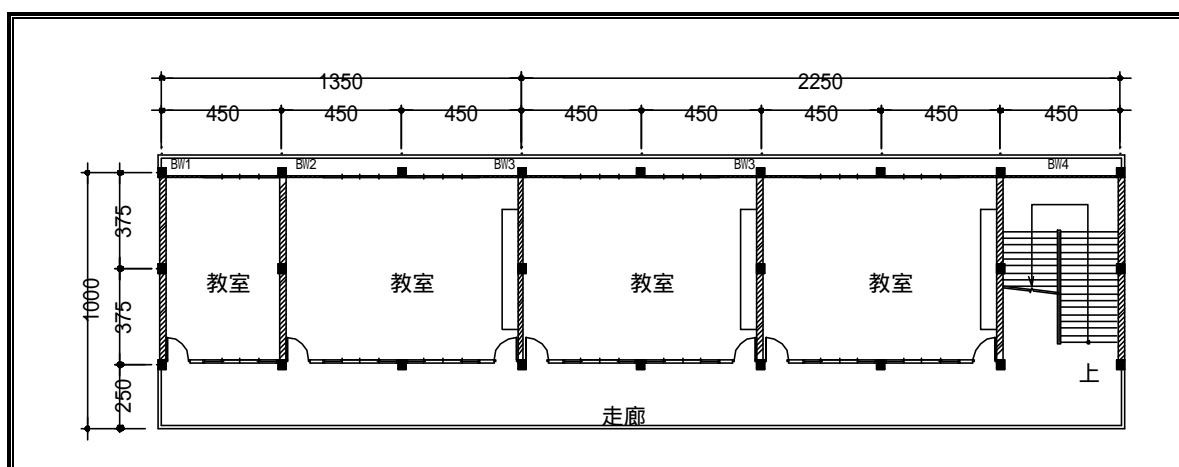
5-2 國姓國中東棟校舍正立面圖



5-3 國姓國中東棟校舍一樓結構平面圖

繪圖層號	C1	C2	C3
1 F			
配筋	× 12-#7	× 8-#7 ○ 2-#6	○ 8-#6
箍筋	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25
尺寸	35*50	35*50	20*50

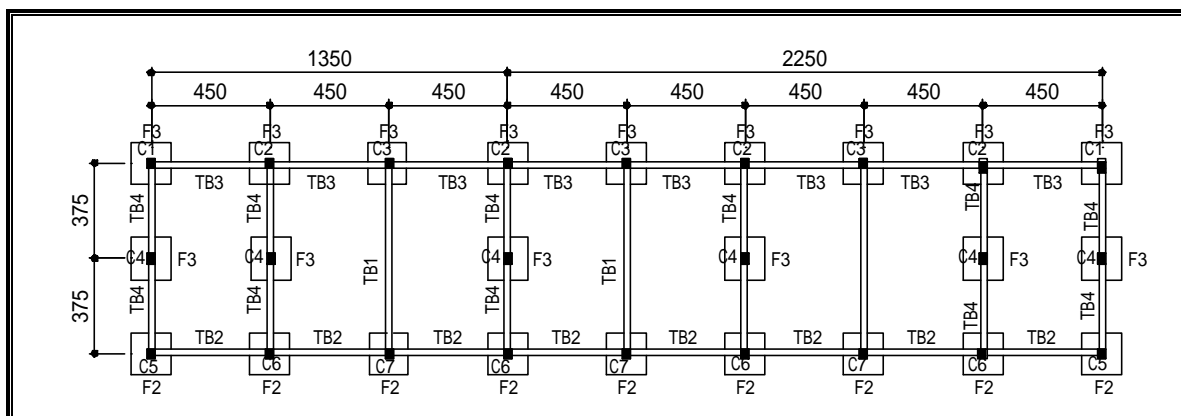
5-4 國姓國中東棟校舍一樓柱配筋圖



6-1 北山國中北棟校舍一樓平面圖



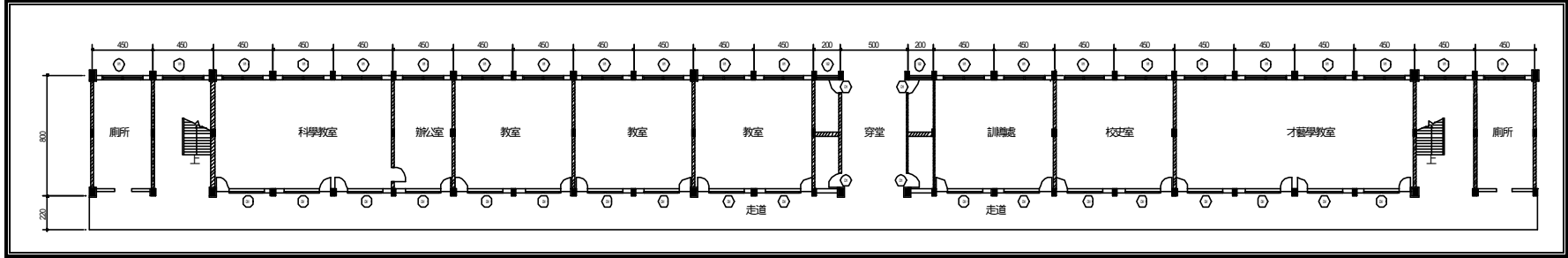
6-2 北山國中北棟校舍正立面圖



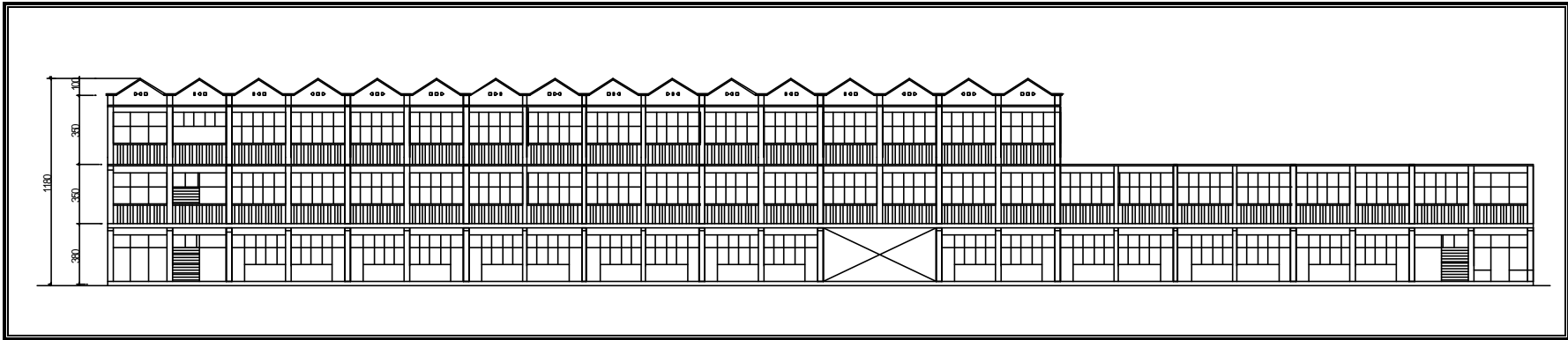
6-3 北山國中北棟校舍一樓結構平面圖

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
I							
F							
配筋	4- Φ 17 \times 6- Φ 6	4- Φ 17 \times 4- Φ 5	4- Φ 17 \times 6- Φ 6	6- Φ 6	4- Φ 17 \times 8- Φ 6	8- Φ 17 \times 9- Φ 6	4- Φ 17 \times 6- Φ 6
間距	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25
尺寸	40*40	40*40	40*40	40*40	40*40	40*40	40*40

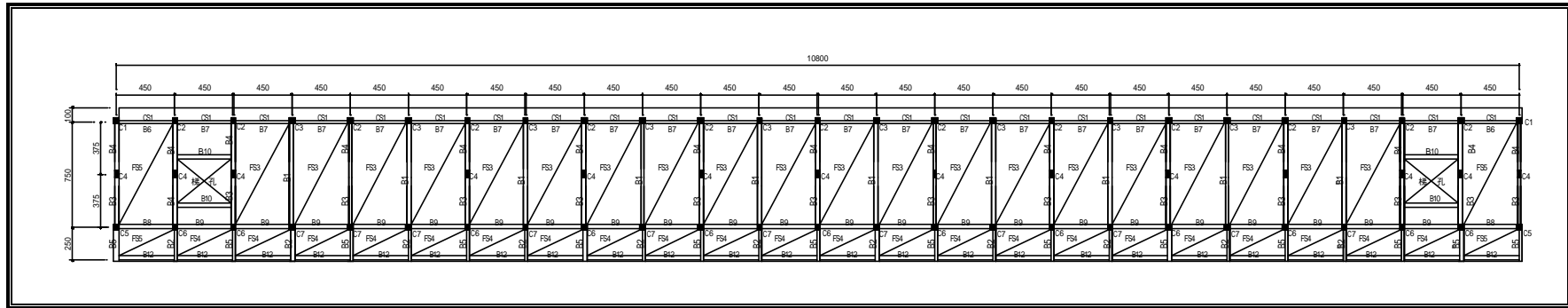
6-4 北山國中北棟校舍一樓柱配筋圖



7-1 北山國中東棟校舍一樓平面圖



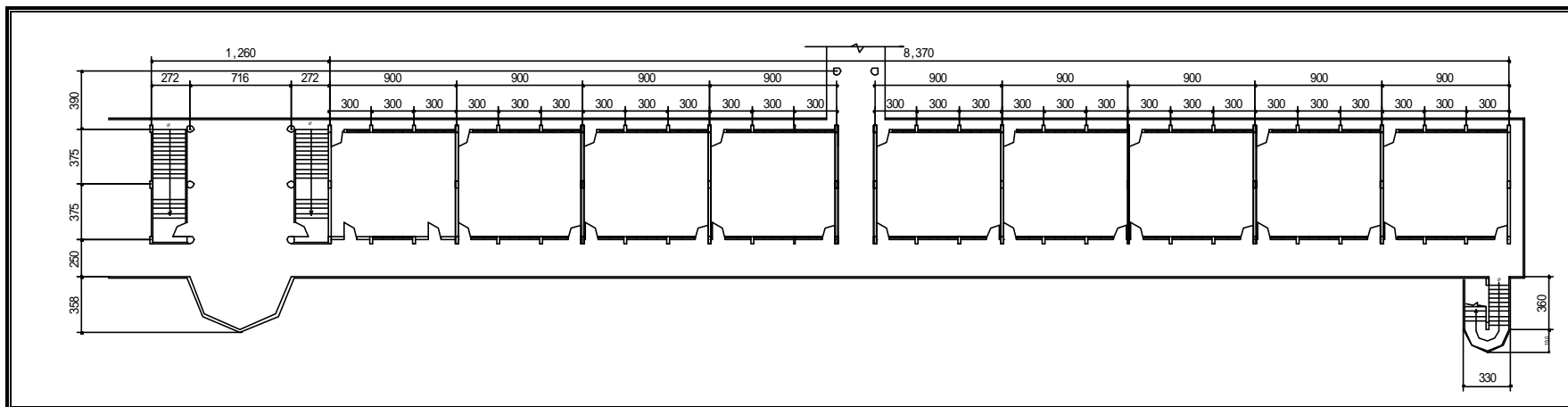
7-2 北山國中東棟校舍正立面圖



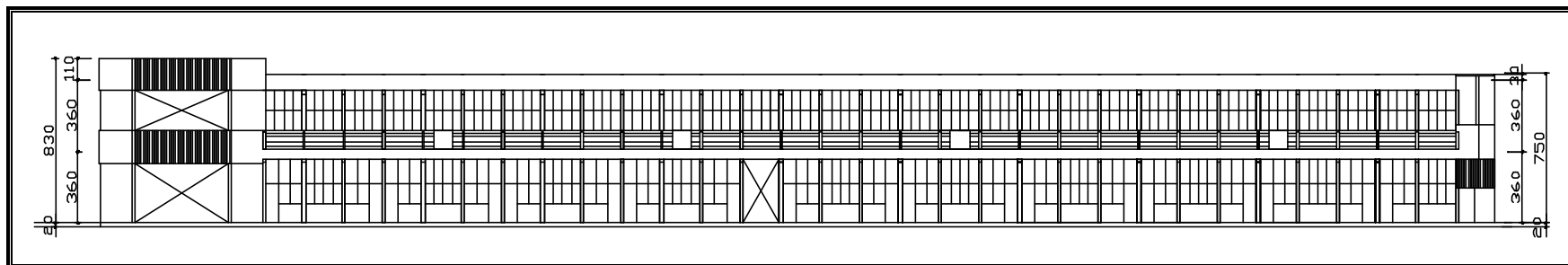
7-3 北山國中東棟校舍一樓結構平面圖

樓層	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
1 F							
配筋	◎4-#7 × 6-#6	◎4-#7 × 4-#5	◎4-#7 × 8-#6	◎6-#6	◎4-#7 × 8-#6	◎8-#7 × 4-#6	◎4-#7 × 6-#6
箍筋	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25	#3@25
尺寸	40*40	40*40	40*40	24*40	40*40	40*40	40*40

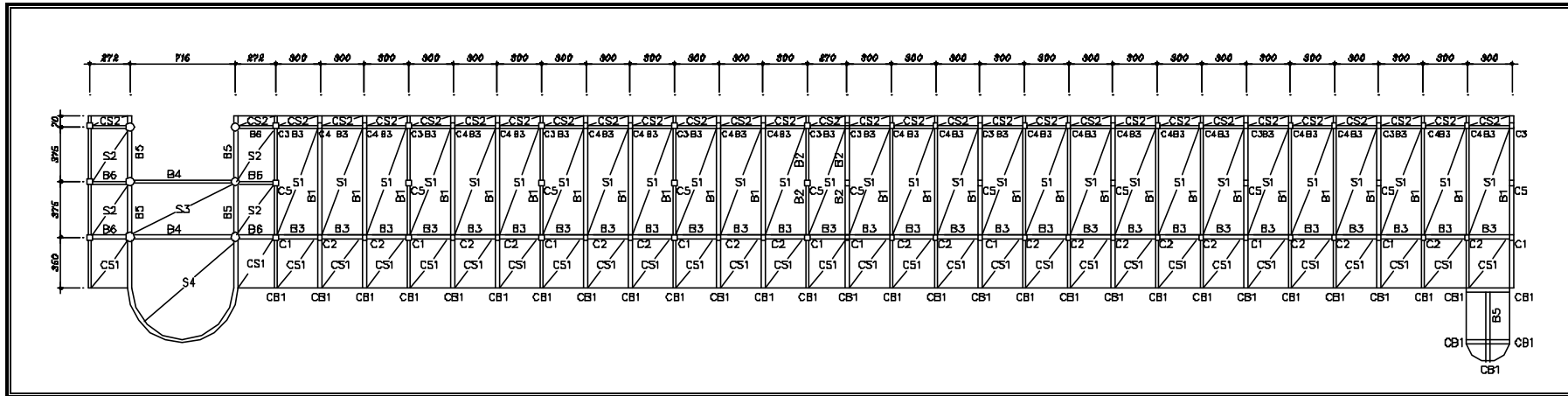
7-4 北山國中東棟校舍一樓柱配筋圖



8-1 南光國小 C 棟校舍一樓平面圖



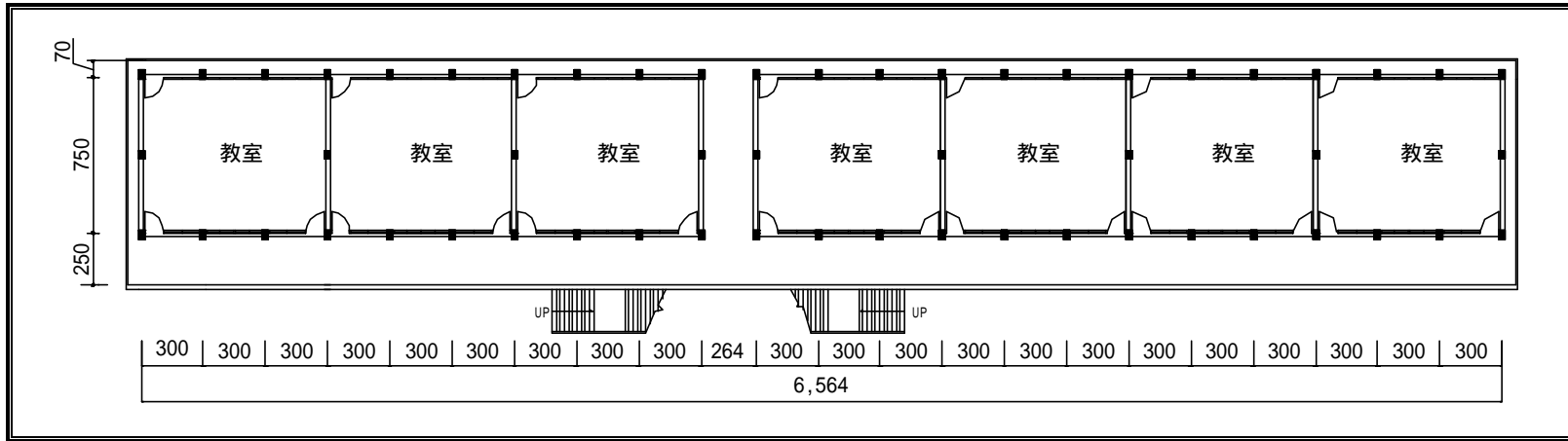
8-2 南光國小 C 棟校舍正立面圖



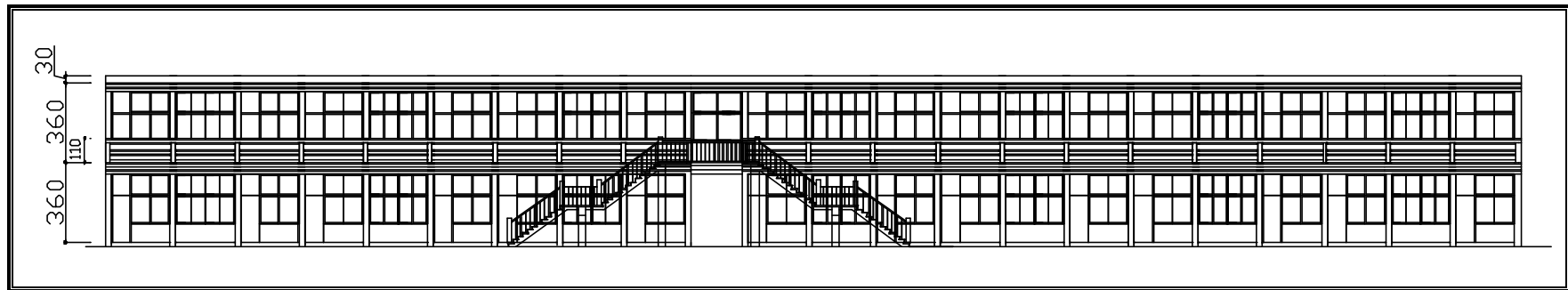
8-3 南光國小 C 棟校舍一樓結構平面圖

樓層	編號	C1	C2	C3	C4	C5
1	F					
配筋		×4-#6 ○4-#5	×6-#6 ○2-#5	×4-#6 ○4-#5	×8-#6	○8-#5
箍筋		#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25
尺寸		30*40	30*40	30*40	30*40	24*40

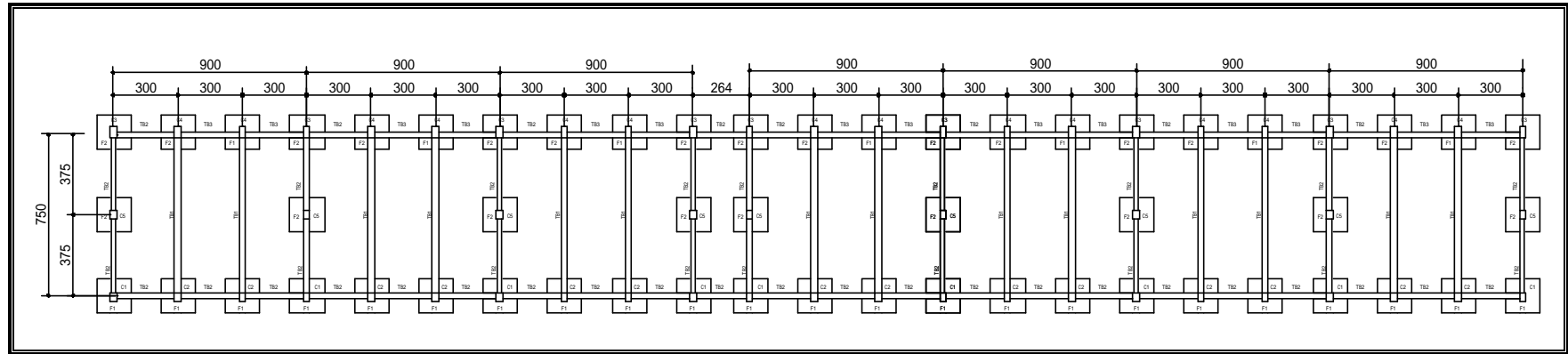
8-4 南光國小 C 棟校舍一樓柱配筋圖



9-1 南光國小 D 棟校舍一樓平面圖



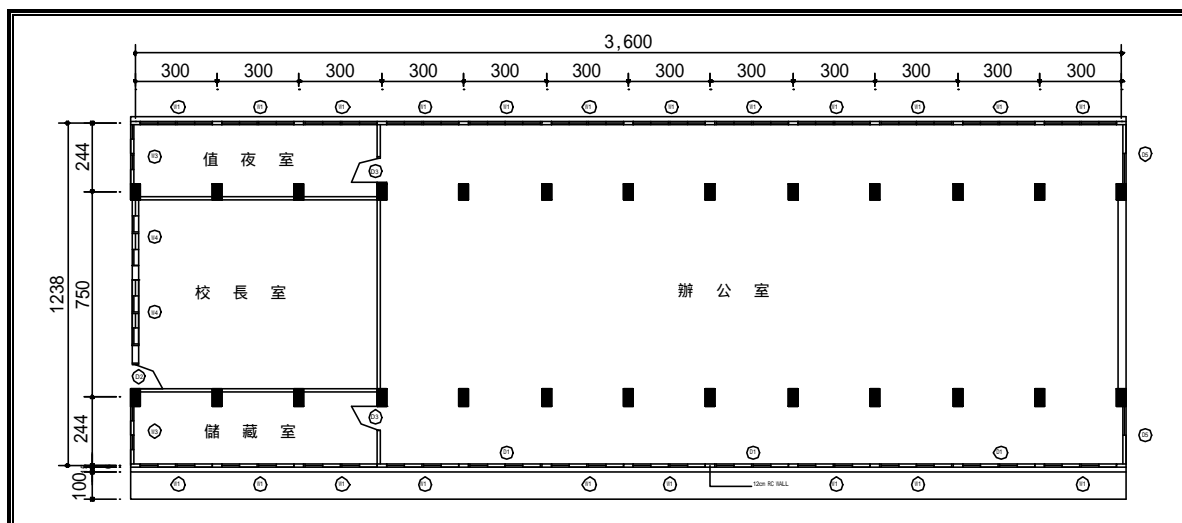
9-2 南光國小 D 棟校舍正立面圖



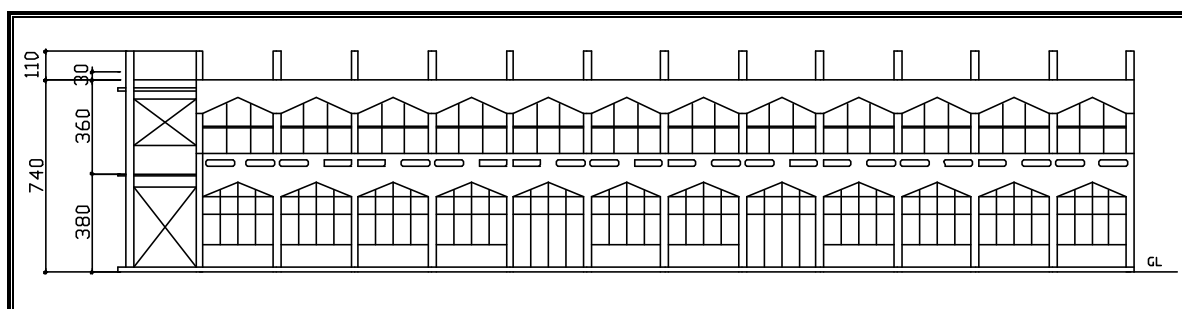
9-3 南光國小 D 棟校舍一樓結構平面圖

樓層 編號	C1	C2	C3	C4	C5
1 F					
配筋	● 4-#7 × 4-#6	● 4-#7 × 6-#6	● 8-#7	● 8-#7 × 2-#6	● 6-#6 × 2-#5
箍筋	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25
尺寸	30*40	30*40	30*40	30*40	24*40

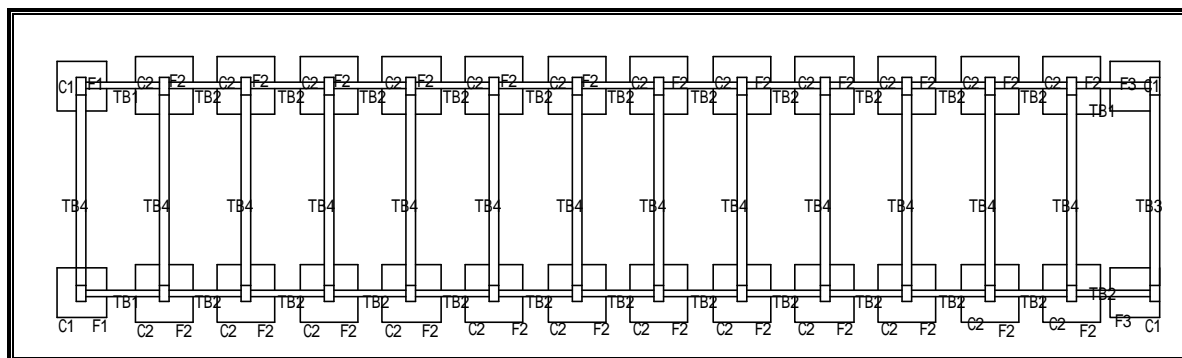
9-4 南光國小 D 棟校舍一樓柱配筋圖



10-1 南光國小 E 棟校舍一樓平面圖



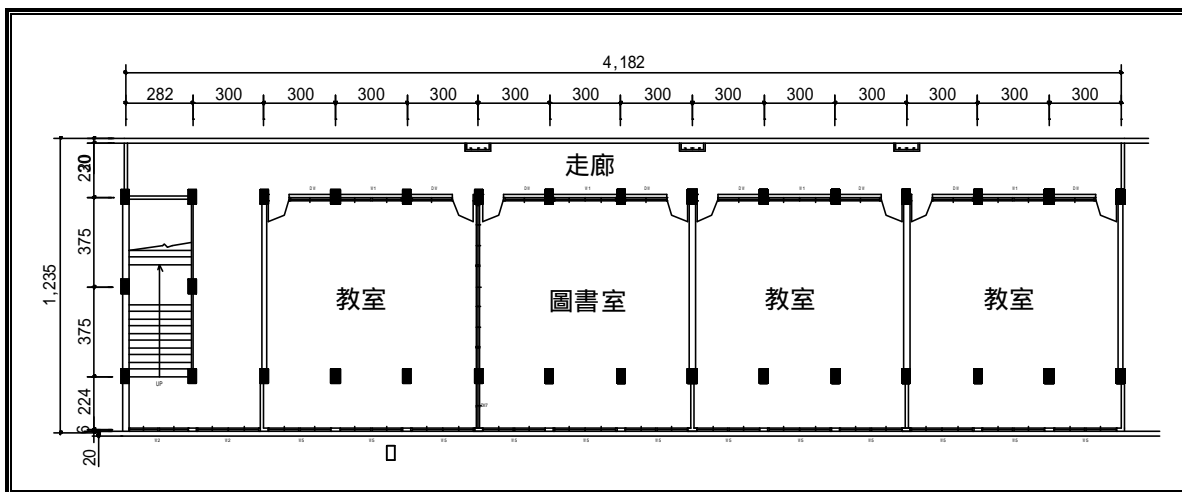
10-2 南光國小 E 棟校舍正立面圖



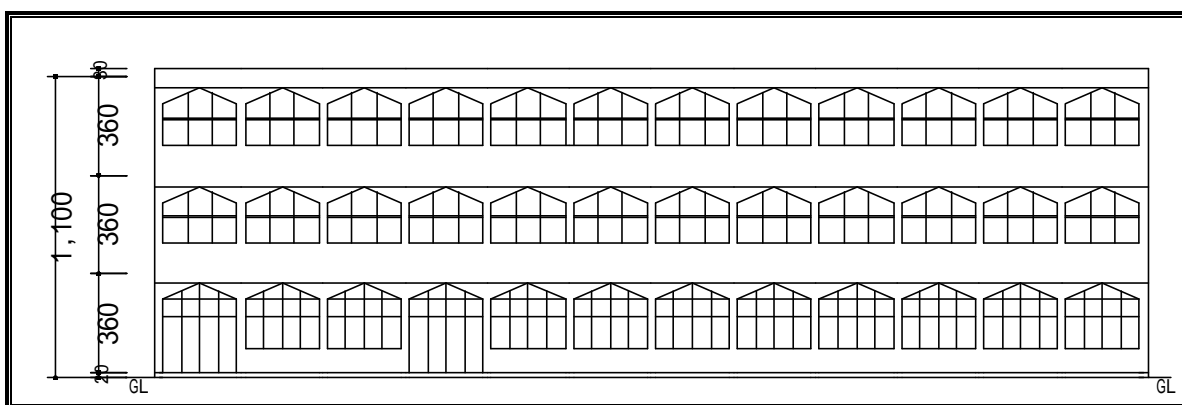
10-3 南光國小 E 棟校舍一樓結構平面圖

樓層	C1	C2
1 F		
配筋	● 10-#6	● 10-#6
箍筋	#3@15-25	#3@15-25
尺寸	35*60	35*60

10-4 南光國小 E 棟校舍一樓柱配筋圖



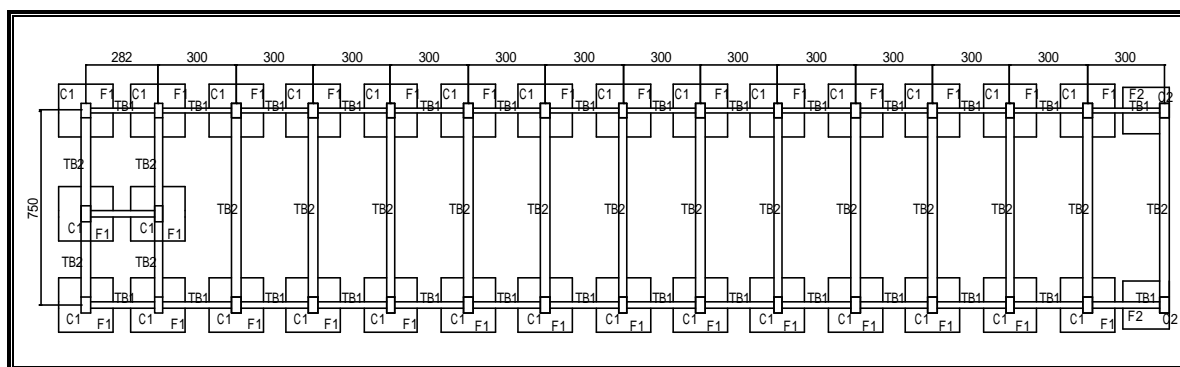
11-1 南光國小 F 棟校舍一樓平面圖



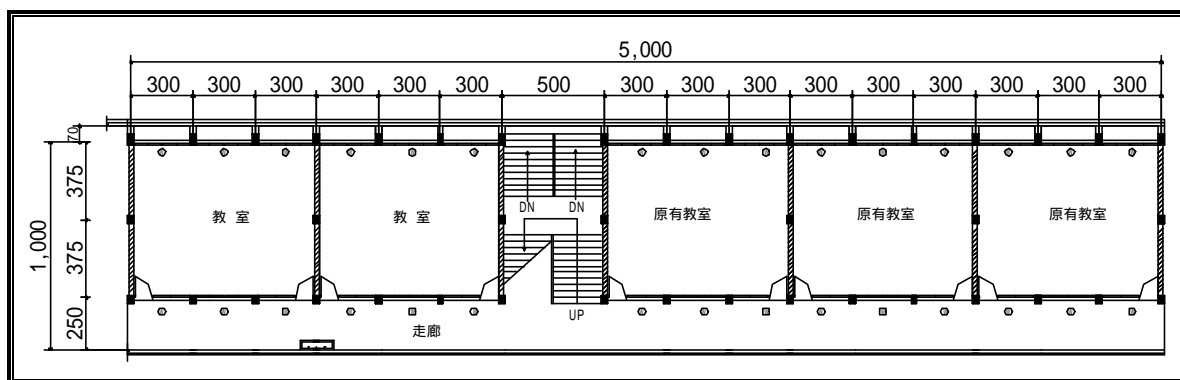
11-2 南光國小 F 棟校舍正立面圖

樓層	C1	C2
1 F		
配筋	● 12-#6	● 10-#6
箍筋	#3@15~25	#3@15~25
尺寸	35*60	35*60

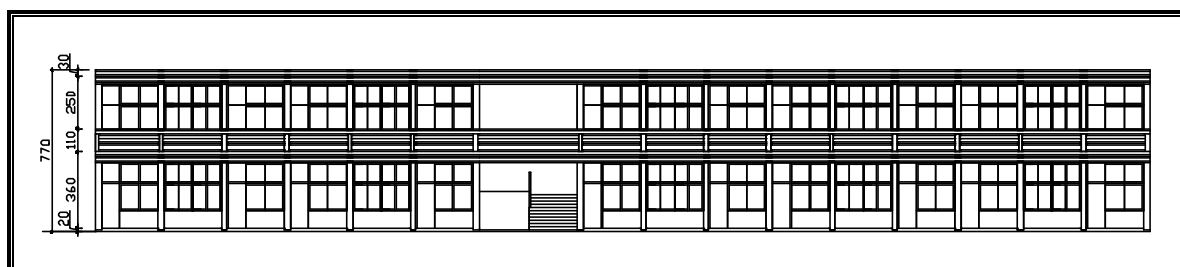
11-3 南光國小 F 棟校舍一樓柱配筋圖



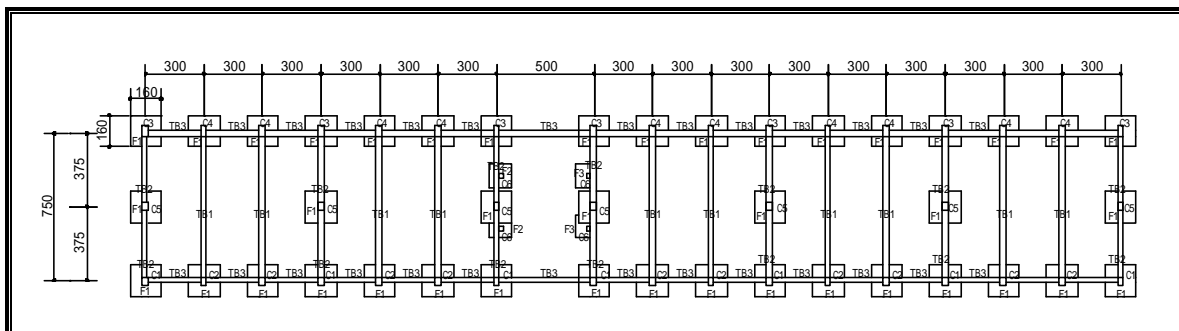
11-4 南光國小 F 棟校舍一樓結構平面圖



12-1 育英國小北棟校舍一樓平面圖



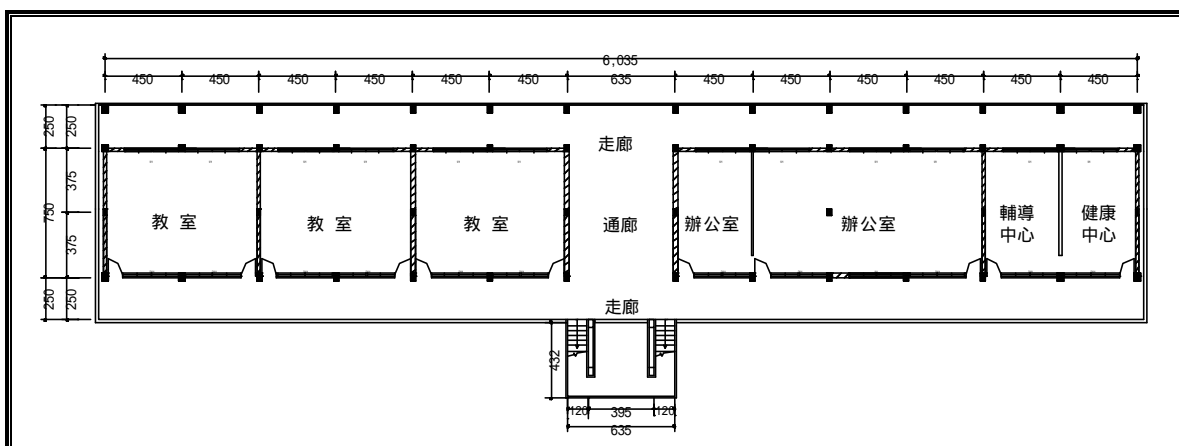
12-2 育英國小北棟校舍正立面圖



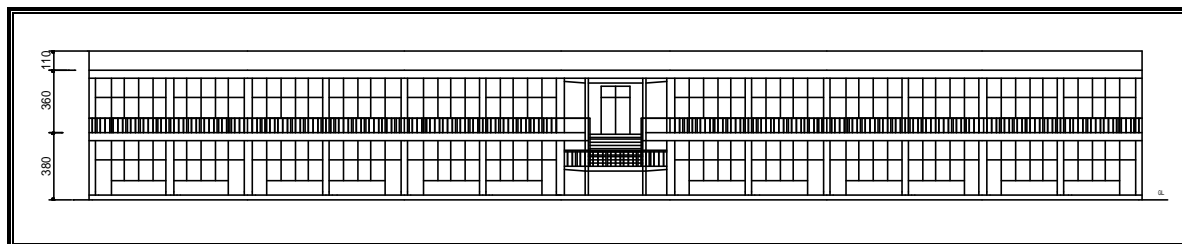
12-3 育英國小北棟校舍一樓結構平面圖

樓層編號	C1	C2	C3	C4	C5
1 F					
配筋	● 4-#7 × 4-#6	● 4-#7 × 6-#6	● 8-#7	● 8-#7 × 2-#6	● 2-#6 × 6-#5
箍筋	#3@15-25	#3@15-25	#3@15-25	#3@15-25	#3@15-25
尺寸	30*40	30*40	30*40	30*40	24*40

12-4 育英國小北棟校舍一樓柱配筋圖



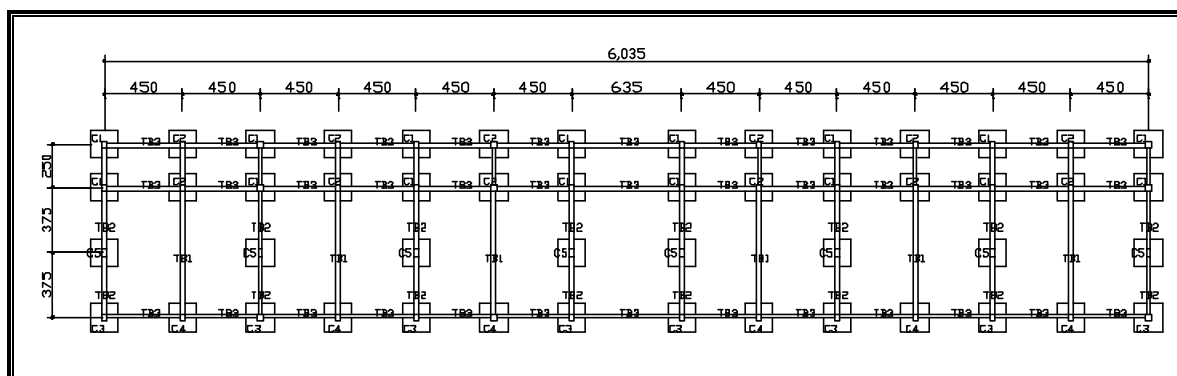
13-1 愛蘭國小北棟校舍一樓平面圖



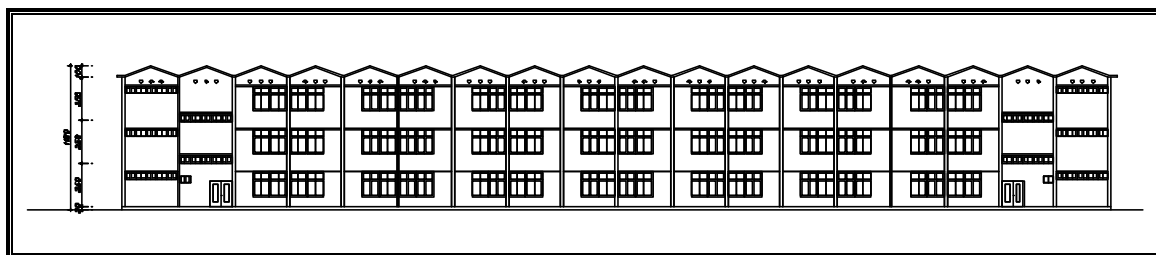
13-2 愛蘭國小北棟校舍正立面圖

樓層 編號	C1	C2	C3	C4	C5
1 F					
配筋	● 4-#7 × 4-#6	● 4-#7 × 6-#6	● 8-#7	● 8-#7 × 2-#6	● 6-#6 × 2-#5
箍筋	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25	#3@15~25
尺寸	30*40	30*40	30*40	30*40	24*40

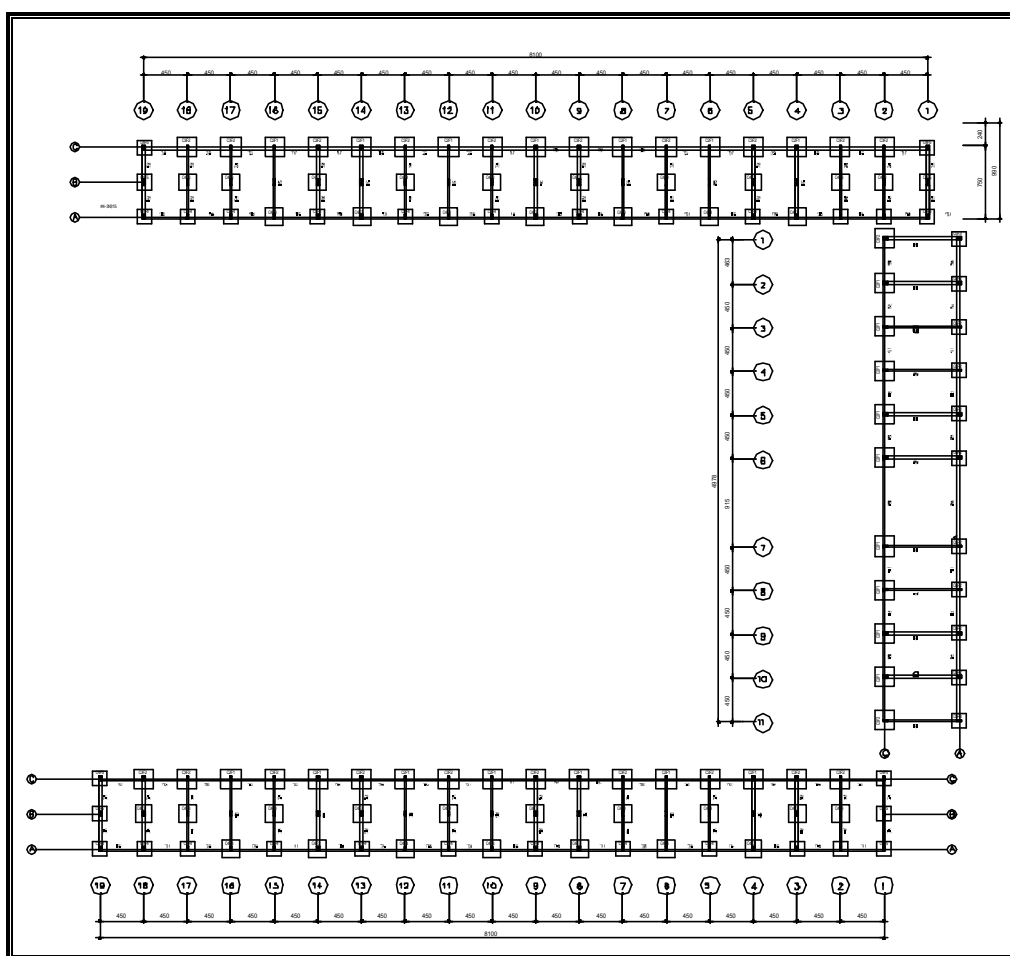
13-3 愛蘭國小北棟校舍一樓柱配筋圖










13-4 愛蘭國小北棟校舍一樓結構平面圖



14-4 宏仁國中校舍側立面圖



14-5 宏仁國中校舍一樓結構平面圖

樓層	編號	斷面尺寸及鋼筋
1 <i>F</i>	A1, A9	 <p>◎ 4-#7 × 6-#6 箍筋 #3@25 40*40</p>
	A4, A6, A8	 <p>◎ 4-#7 × 8-#6 箍筋 #3@25 雙箍 40*40</p>
	A2, A3, A5, A7	 <p>◎ 4-#7 × 4-#5 箍筋 #3@25 40*40</p>
	B1, B2, B3, B5, B7, B9	 <p>◎ 6-#6 箍筋 #3@25 40*40</p>
	C1, C9	 <p>◎ 4-#7 × 8-#6 箍筋 #3@25 40*40</p>
	C4, C6, C8	 <p>◎ 8-#7 × 4-#6 箍筋 #3@25 雙箍 40*40</p>
	C2, C3, C5, C7	 <p>◎ 4-#7 × 6-#6 箍筋 #3@25 40*40</p>

14-6 宏仁國中校舍一樓柱配筋圖