

國立臺灣大學工學院土木工程學系

博士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

由生命週期成本分析探討鋼筋混凝土消防廳舍

耐震設計及補強基準

Life-cycle Cost Analysis on Determining Seismic Design and
Seismic Retrofit Criteria of Reinforced Concrete
Fire Department Buildings

陳威成

Wei-Cheng Chen

指導教授：蔡益超 教授

Major Professor: I-Chau Tsai

中華民國 101 年 6 月

Jun. 2012

國立臺灣大學博士學位論文
口試委員會審定書

由生命週期成本分析探討鋼筋混凝土消防廳舍
耐震設計及補強基準

Life-cycle Cost Analysis on Determining Seismic Design and
Seismic Retrofit Criteria of Reinforced Concrete Fire
Department Buildings

本論文係陳威成君 (D95521024) 在國立臺灣大學土木工程學系
博士班完成之博士學位論文，於民國 101 年 6 月 4 日承下列考試委員
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

蔡 益 超

(指導教授)

張 國 鎮

羅 俊 雄

黃 世 建

宋 裕 祺

呂 良 正

蔡益超

張國鎮

羅俊雄

黃世建

宋裕祺

呂良正

系主任

謝 誌

光陰荏苒，轉眼六年博士班的學生生涯，隨著論文的付梓，劃下了休止符，十二年臺灣大學土木工程的求學歷程，也終告一段落。回首這些日子裡的成長歲月，總覺得得之於人者多，而出之於己者少，承蒙這許多人的提攜、幫助與關心，使得這段生活更顯得璀璨而難以忘懷。

衷心感謝指導老師 蔡益超教授這些年來悉心的教導。蔡老師鉅大的工程、學術貢獻與影響、嚴謹的治學態度、淡泊樸實的處事精神，在在都是後生晚輩無法望其項背之處，更是我們師法的典範。儘管恩師已於 2010 年榮退且近來身體微恙，依舊撥冗指導學生論文寫作，學生銘感五內，在此致上最誠摯的謝意與敬意。

論文口試期間，承蒙臺灣大學張國鎮教授、羅俊雄教授、黃世建教授及臺北科技大學宋裕祺教授的詳加指正，並提供寶貴意見，使本文疏漏之處得以更臻完備，深表感激。資料蒐集期間，感謝中央警察大學林宜君教授、鄧子正教授、林元祥教授、花蓮慈濟醫院胡勝川主任於線上給予諮詢，都帶給學生莫大的助益。研究期間，感謝學長周光武博士毫無保留的引領與協助，並逐字逐句助我審視期刊論文，常使我茅塞頓開，豁然開朗。

感謝內政部建築研究所鄭元良主任秘書同意給予在職進修之機會，也感恩內政部營建署建築管理組謝偉松組長、樂中丕科長與許許多多長官及同仁的包容與支援，使我的進修不致影響正常的業務推動。此外，也謝謝內政部建築研究所的朋友，提供寶貴的研究資料，使我的研究能更加順利進行。

博士班同窗好友俊仲、育聖、銘智、宗斌、沛清、信宏、泓斌、暉仁，有的已順利取得學位了，有的正在繼續打拼中，還有許多同門碩士班的學弟們，這六年間與你們的相互砥礪，交換經驗，是我珍貴的寶藏之一。而臺大田徑隊所有的伙伴，與你們一同練習、比賽與嬉鬧的經歷及回憶，無疑是我保持年輕衝勁與最佳狀態的泉源。謝謝大家！

最後，將本文獻給我最摯愛的父母和家人，以及所有關心、愛護我的朋友們，你們對我的照顧與支持，是我完成本文最大的動力，謝謝，並祝福你們永遠健康快樂。

威成 20 Jun. 2012

摘要

有鑑於近年來地震造成嚴重的建築物損壞與巨大的經濟衝擊，位於地震帶的國家無不擬定相關方案，投入防災的規劃與整備工作，期能防止此類廣域性災害的發生。其中，為了減低建築物於地震中所受到的損害，現行耐震設計規範已日趨嚴謹，並以提高建築物耐震能力為目標，政府部門亦逐步推動既有建築物的耐震補強工作。而耐震設計基準與耐震補強基準的選擇，將牽動著初期建造成本或補強成本與未來地震損失的消長。為了在建造成本、補強成本與地震損失之間獲得最大的效益，生命週期成本分析便是評估各種耐震設計方案或補強方案的經濟可行性最合適的工具。

本文以生命週期成本分析法，探討鋼筋混凝土消防廳舍最適宜的耐震設計基準（用途係數）與耐震補強基準。此建築物生命週期成本分析的架構，除了建築物使用年限的設定及生命週期期間各項成本支出的估算外，並結合地震危害度曲線與結構物易損性曲線的或然率模式。該生命週期成本則包括建造成本、補強成本與地震造成的各種損失，如建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡損失、建築廢棄物處理費、搬遷損失及建築物服務功能中斷引致的損失（僅保守包括額外火災損失及額外人命損失）。

研究結果發現，當建築物耐震設計基準或補強基準提升後，其地震損失與生命週期成本均可大幅降低；當新建消防廳舍採用途係數 $I = 2.1$ 設計時，建築物生命週期成本最低，為最佳的耐震設計基準，惟與 $I = 1.5$ 時之生命週期成本間的差異極低，因此，建築物耐震設計規範選用 $I = 1.5$ ，可視為恰當的耐震設計基準；對於已使用 30 年，耐震能力僅為規範規定值（已考量用途係數） $1/2$ 之消防廳舍，如預計再使用 10 年至 40 年時，其最佳補強基準約為規範規定值（已考量用途係數）的 1.1 倍至 1.5 倍，惟最佳補強基準與僅補強至規範規定值時之生命週期成本的差異亦在可容許接受之範圍內，因此在補強經費有限下，建議將補強基準訂為規範規定值（1.0 倍）即可；此外，如能注重建築物的使用維護，延長其生命週期，並適當給予補強，將可提高整體國家社會之效益。

關鍵詞：消防廳舍、生命週期成本分析、耐震設計基準、耐震補強基準、用途係數、地震損失

Abstract

Earthquakes are unpredictable, causing not only human casualties but also tremendous economic impact on the affected area. To reduce any loss by earthquakes, most countries in high-seismicity regions have proposed their disaster mitigation strategies and emergency counter-measures. In these countries, the seismic design codes were revised several times according to the state of the art in earthquake engineering, in order to prevent buildings from severe damage during earthquakes. Programs of strengthening or replacing old buildings have been created and carried out, notably for pre-earthquake code buildings.

For buildings, different seismic design criteria or seismic retrofit criteria could induce different building construction cost, retrofit cost, and earthquake loss. Life-cycle cost analysis could be employed to evaluate the trade-offs between construction cost, retrofit cost, and earthquake loss, helping engineers make an optimal decision. With the support of life-cycle cost analysis, this study determines a seismic design criterion, the importance factor I , and seismic retrofit criteria of a reinforced concrete fire department building.

The framework of such life-cycle cost analysis comprises the estimates of building service period and costs data, seismic hazard curve, and structure fragility curves. The costs are considered to be composed of the initial construction cost, retrofit cost, and the earthquake loss. The earthquake loss includes the building repair cost, contents loss, loss from fire truck damages, wage loss from casualties, debris disposal cost, relocation expenses, and loss caused by interruption of building functions.

The study shows the earthquake loss and the life-cycle cost may be reduced by

raising the seismic design or seismic retrofit criteria of buildings. For a new fire department building, the life-cycle cost reaches its minimum when the importance factor I is 2.1, which is considered an optimal criterion of seismic design. But while the difference between the life-cycle cost of $I = 1.5$ (suggested by the current seismic design code) and that of $I = 2.1$ is quite small, one may select $I = 1.5$ to design the fire department building; especially when the building construction budget is the planners' concern.

For a 30-year-old fire department building whose seismic capacity is half what the code suggests, the optimal seismic retrofit criteria are 1.1 to 1.5 times what the code suggests if the service life of the building remains 10 to 40 years. There is also quite small difference between the life-cycle cost with the optimal seismic retrofit criteria and that with the criteria the code suggests. The latter appears acceptable for the planners, especially for those who concern about the retrofit budget.

Key Words: fire department building, life-cycle cost analysis, seismic design criterion, seismic retrofit criterion, importance factor, earthquake loss

目 錄

口試委員會審定書	i
謝誌	ii
摘要	iii
Abstract	iv
目錄	vi
表目錄	x
圖目錄	xiii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 文獻回顧	4
1.3.1 建築物耐震設計基準	4
1.3.2 經濟觀點之最佳化設計	4
1.3.3 生命週期成本之意涵	5
1.3.4 生命週期成本分析之應用	5
1.4 本文內容	6
第二章 考量地震風險之生命週期成本分析架構	9
2.1 地震風險之意義	9
2.2 生命週期成本分析架構與計算	9
第三章 現行建築物耐震設計基準與補強基準	12
3.1 強度設計法之耐震設計基準	12
3.1.1 強度設計法之概念	12
3.1.2 設計基底剪力	13
3.1.3 工址設計與最大考量水平譜加速度係數	15
3.1.4 耐震設計基準	17

3.2	性能設計法之耐震設計基準	18
3.2.1	性能設計法之概念	18
3.2.2	耐震設計基準	21
3.3	耐震補強基準	22
3.3.1	既有建築物耐震補強設計原則	22
3.3.2	法規耐震補強基準	23
第四章	建築物生命週期成本分析相關資訊	25
4.1	概述	25
4.2	建築物生命週期	25
4.2.1	生命週期之意義	25
4.2.2	建築物實際生命週期統計	26
4.2.3	ISO 15686 建築物使用年限定義	27
4.3	地震危害度曲線	28
4.3.1	地震危害度曲線之意義	28
4.3.2	地震危害度分析	28
4.3.3	地震危害度分析結果應用	30
4.4	建築物易損性曲線	30
4.4.1	建築物損害程度分類	30
4.4.2	易損性曲線之定義	31
4.4.3	建築物耐震能力	32
4.4.3.1	新建建築物設計耐震能力	33
4.4.3.2	鋼筋混凝土建築物之耐震能力評估法	35
4.4.3.3	既有消防廳舍耐震能力	38
4.5	建築物建造成本	39
4.5.1	建築物建造成本估算	39
4.5.2	結構系統建造成本與耐震能力之關係	40
4.6	建築物耐震補強成本	41
4.6.1	耐震補強概述	41
4.6.2	耐震補強成本估算	42

4.7 折現率	43
4.7.1 折現率之意義	43
4.7.2 折現率選擇	44
第五章 建築物地震損失評估	45
5.1 地震損失概述	45
5.1.1 重大地震損失經驗	45
5.1.2 地震災害損失評估系統	46
5.2 建築物地震損失推估	49
5.2.1 建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失	49
5.2.2 人員傷亡損失	51
5.2.3 建築廢棄物處理費用	53
5.2.4 搬遷損失	55
5.2.5 建築物功能中斷損失	56
5.2.5.1 建築物功能中斷概述	56
5.2.5.2 消防廳舍功能中斷損失項目	57
5.2.5.3 建築物功能喪失率	58
5.2.6 額外火災損失	59
5.2.6.1 額外火災損失估計	59
5.2.6.2 地震火災預估	59
5.2.6.3 建築物火災損失影響因素	63
5.2.6.4 額外火災損失因子	64
5.2.7 額外人命損失	65
5.2.7.1 額外人命損失估計	65
5.2.7.2 緊急救護效能影響因素	66
5.2.7.3 功能復原期間減少救活之傷病患數估計	68
5.2.7.4 地震救援期間減少救活之傷病患數估計	69
第六章 建築物耐震設計基準及補強基準探討	71
6.1 案例概述	71
6.1.1 分析內容	71

6.1.2 消防廳舍基本資料與各項參數假設·····	71
6.2 消防廳舍耐震設計基準評估·····	73
6.2.1 新建消防廳舍地震損失特性·····	73
6.2.2 敏感度分析·····	74
6.2.3 最適耐震設計基準分析·····	75
6.3 消防廳舍耐震補強基準評估·····	76
6.3.1 補強前後消防廳舍地震損失與生命週期成本特性·····	77
6.3.2 最適耐震補強基準分析·····	78
第七章 結論與展望·····	80
7.1 結論·····	80
7.2 展望·····	82
參考文獻·····	83
附表·····	104
附圖·····	140
附錄 消防廳舍生命週期成本案例計算·····	170

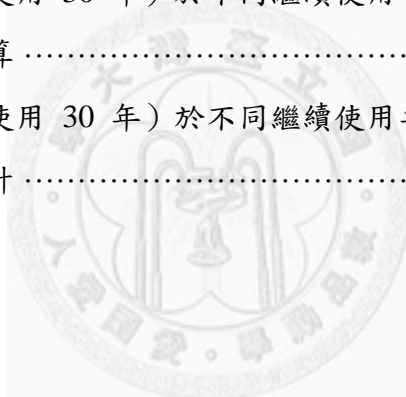


表 目 錄

表 1.1.1	前十大人命死傷之天然巨災事件 (1980-2011)	105
表 1.1.2	前十大經濟損失之天然巨災事件 (1980-2011)	105
表 1.1.3	前十大人命死傷之地震事件 (1980-2011)	106
表 1.1.4	前十大經濟損失之地震事件 (1980-2011)	106
表 3.1.1	震區短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_s^D 與 S_1^D ，與震區 短週期與一秒週期之最大考量水平譜加速度係數 S_s^M 與 S_1^M	107
表 3.1.2(a)	短週期結構之工址放大係數 F_a	108
表 3.1.2(b)	長週期結構之工址放大係數 F_v	108
表 3.1.3	近車籠埔斷層調整因子 N_A 與 N_V	108
表 3.1.4(a)	一般工址或近斷層區域之工址設計水平譜加速度係數 S_{aD}	109
表 3.1.4(b)	一般工址或近斷層區域之工址最大水平譜加速度係數 S_{aM}	109
表 3.1.5(a)	臺北盆地之工址設計水平加速度反應譜係數 S_{aD}	109
表 3.1.5(b)	臺北盆地之工址最大考量水平加速度反應譜係數 S_{aM}	109
表 3.2.1	Vision 2000 建議之建築物耐震性能等級及其損害程度描述	110
表 3.2.2	各參考文獻採用之分析方法及主要檢核內容	111
表 3.2.3	Vision 2000 建議之建築物結構性能標準	112
表 3.2.4	FEMA 273 建議之建築物結構性能標準 (混凝土韌性構架)	112
表 3.2.5(a)	FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求 -梁	113
表 3.2.5(b)	FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求 -柱	114
表 3.2.5(c)	FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求 -梁柱接頭	115
表 3.2.6	文獻[67]建議之建築物耐震性能等級及其損害程度描述	116
表 3.2.7	文獻[67]建議之不同用途群組建築物之耐震設計性能目標與標準	116
表 3.3.1(a)	文獻[67]建議之不同用途群組之既有建築物之耐震設計性能目標	

(I)	117
表 3.3.1(b) 文獻[67]建議之不同用途群組之既有建築物之耐震設計性能目標	
(II)	117
表 4.2.1 各國建築物使用年限規定	118
表 4.4.1 臺北市政府所屬消防廳舍基本資料與耐震能力.....	119
表 4.5.1 中央政府總預算編製作業手冊-共同性費用編列標準表-鋼筋混凝土 構造房屋建築費	120
表 4.5.2 公共建設工程經費估算編列手冊-建築工程-鋼筋混凝土構造.....	120
表 4.5.3 臺北市政府建築工程結構體概算編列標準-鋼筋混凝土構造(2007)...	120
表 4.5.4 臺北市都市更新事業(重建區段)建築物工程造價基準-鋼筋混凝土 構造(2010)	121
表 4.5.5 臺灣地區住宅類建築造價參考表-鋼筋混凝土構造(2008).....	121
表 4.5.6 鋼筋混凝土住宅建築各工項成本比例統計.....	122
表 4.6.1 臺北市政府所屬消防廳舍初步耐震補強設計資料.....	122
表 4.7.1 各類型公共建設建議之折現率	123
表 5.1.1 HAZUS 地震災害損失評估輸出資料.....	124
表 5.2.1 HAZUS 建議之結構系統、非結構構件、內部財產在不同損害狀態 下的損失比	125
表 5.2.2 TELES 建議之結構系統、非結構構件、內部財產在不同損害狀態下 的損失比	125
表 5.2.3 HAZUS 建議之不同損害狀態下的室內外傷亡率.....	126
表 5.2.4 TELES 建議之不同損害狀態下的室內傷亡率.....	126
表 5.2.5 TELES 建議之不同時段不同用途建築物人口密度.....	127
表 5.2.6 建築物單位面積拆除廢棄物重量	127
表 5.2.7 HAZUS 建議之結構系統及非結構構件之單位面積重量及各損害狀 態下之廢棄物產生比率	128
表 5.2.8 TELES 建議之結構系統及非結構構件之單位面積重量及各損害狀 態下之廢棄物產生比率	128
表 5.2.9 HAZUS 及 TELES 建議之不同損害狀態下的建築物修復時間	128

表 5.2.10	ATC-13 建議之消防隊震後功能恢復率與時間之關係	129
表 5.2.11	平時與地震後之消防活動環境差異	129
表 6.1.1	臺北市政府消防局消防分隊平均消防救護車輛配置數量與價值	130
表 6.1.2	臺北市大安區歷年消防勤務統計	130
表 6.2.1	TELES 建議之加速度敏感型非結構構件的易損性曲線參數	130
表 6.2.2	消防廳舍以不同用途係數設計時之地震損失計算	131
表 6.2.3	消防廳舍以不同用途係數設計時之生命週期成本計算	131
表 6.2.4	放大各參數值 10% 對消防廳舍生命週期成本之影響	132
表 6.2.5	新建消防廳舍於不同使用年限時對應之生命週期成本	133
表 6.2.6	新建消防廳舍於不同折現率時對應之生命週期成本	133
表 6.3.1	消防廳舍以不同補強基準設計時之地震損失計算	134
表 6.3.2	消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本計算	135
表 6.3.3	消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本統計	139



圖目錄

圖 1.1.1	世界天然巨災發生趨勢圖 (1950-2010)	141
圖 1.1.2	世界天然巨災損失趨勢圖 (1950-2010)	141
圖 2.2.1	建築物生命週期成本分析架構圖	142
圖 2.2.2	生命週期成本與最佳方案之關係	142
圖 3.1.1	建築物受地震側力作用下力與位移的非線性曲線及建築物耐震設計規範規定之各項地震力與韌性容量之定義	143
圖 3.2.1	FEMA 273 韌性結構之側力與變形之關係曲線及其性能等級設定 ..	143
圖 3.2.2	Vision 2000 建議之耐震性能目標	144
圖 3.2.3	FEMA 273 建議混凝土構件側力與變形之關係及其與構件性能標準之關聯	144
圖 3.2.4(a)	文獻[67]建議之耐震性能目標	145
圖 3.2.4(b)	文獻[67]建議之耐震性能目標與性能等級與建築物受力變形之關係 ..	145
圖 4.2.1	使用年限相關名詞概念示意圖	146
圖 4.3.1	地震危害度分析步驟	147
圖 4.3.2	簡化之臺北盆地地震危害度曲線	148
圖 4.4.1	建築物易損性曲線示意圖	148
圖 4.4.2	建築物容量曲線與容量譜曲線	149
圖 4.4.3	性能點之地表加速度求取示意圖	149
圖 4.4.4	典型消防廳舍結構型式	150
圖 4.4.5	臺東地震造成臺東縣消防局大樓受損情形	150
圖 4.4.6	臺北市政府所屬消防廳舍耐震能力分布圖	151
圖 4.6.1	消防廳舍耐震補強程度與補強費用迴歸分析	151
圖 5.1.1	東京都地震災害評估系統架構圖	152
圖 5.1.2	HAZUS 系統架構圖	152
圖 5.1.3	TELES 系統架構圖	153
圖 5.2.1	建築物外側地震墜落物影響範圍	153

圖 5.2.2	人員傷亡評估模式示意圖	154
圖 5.2.3	921 震災建築廢棄物再利用流程	154
圖 5.2.4	地震災害管理時序與對應行動	155
圖 5.2.5	消防隊功能恢復曲線	155
圖 5.2.6	影響火災損失之因素	156
圖 5.2.7	消防隊活動之時間序列	156
圖 5.2.8	消防隊到達時間與搶救效能之關係	157
圖 5.2.9	震後火災消防單位救災能力影響因素	157
圖 5.2.10	消防隊行進距離與火災危險度之關係	158
圖 5.2.11	到院前緊急救護活動之時間序列	158
圖 6.1.1	臺北市政府消防局消防分隊配置圖	159
圖 6.1.2	TELES 產出之震後臺北市大安區建築物室內傷亡人數之趨勢	160
圖 6.1.3	TELES 產出之臺北市大安區震後火災數之趨勢	160
圖 6.1.4	臺北市大安區震後火災可能延燒之區域	161
圖 6.2.1	消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之結構系統易損性曲線	162
圖 6.2.2	消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之非結構構件易損性曲線	162
圖 6.2.3	消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之各項地震損失	163
圖 6.2.4	新建消防廳舍於不同耐震設計基準下的生命週期成本及其組成分項	163
圖 6.2.5	不同建築物使用年限下之最佳用途係數	164
圖 6.2.6	不同折現率下之最佳用途係數	164
圖 6.3.1	消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本及其組成分項	165
圖 6.3.2	消防廳舍於不同補強基準下隨繼續使用年限增加之生命週期成本變化	168
圖 6.3.3	消防廳舍以 50 年設計使用年限補強及以各該繼續使用年限補強時之生命週期成本差異	169

第一章 緒論

1.1 研究動機

近來由於全球環境變遷引致的氣候異常與高災害潛勢地區的過度開發，導致世界各地天然巨災 (Catastrophes) 頻傳，例如 2011 年泰國超大洪災、2010 年海地地震、2008 年中國雪災及四川汶川地震、2006 年菲律賓土石流、2005 年南亞大地震及美國卡翠納颶風、2004 年南亞海嘯、伊朗地震、歐洲淹水等，對於該地區人民生命安全與身家財產造成重大的傷亡與破壞 (如圖 1.1.1 及圖 1.1.2 所示[1])，並影響國家整體經濟。在所有天然災害中，最具高度不確定性、最難預測、也最具破壞性的，非地震莫屬，所以在面對此一不可預測的災害，當其發生時，災害就已經形成。雖然平均每年因為地震造成的損失，通常不若風災、水災損失嚴重，但是一場強烈地震引致廣域性的瞬間毀滅威力，往往能將繁華的城鎮變成殘破的廢墟，對於人命有著更高的威脅性 (如表 1.1.1 至表 1.1.4 所示[1])。

而最近十年間，各地區發生傷亡慘重的劇災型地震頻率，已大幅高於以往，其災害問題恐更加複雜且困難。2011 年 3 月 11 日發生於日本東北地方的矩震級規模 9.0 大地震，震央位於宮城縣首府仙台市以東的太平洋海域，震源深度為 24.4 公里，並引發最高 40.5 公尺的海嘯，侵襲日本東北地域太平洋沿岸及北海道東部沿岸，復以其引致的火災與核子洩漏事故等複合性災害，導致大規模的地方機能癱瘓和經濟活動停止，東北地方部分城市更遭受毀滅性破壞。截至同年 10 月 24 日，地震造成至少 15,828 人死亡、3,754 人失蹤、5,942 人受傷，遭受破壞的房屋計 983,073 棟，經濟損失超過 2,100 億美元，為日本二戰後傷亡最慘重的自然災害，NHK 新聞形容此次災難是對東北三縣「毀滅性打擊」[1,2]。

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交界處，屬於環太平洋地震帶，因板塊間的擠壓和拉扯作用，活斷層分布幾乎遍及臺灣島四周，無時無刻不飽受地震威脅。根據近百年臺灣地區之災害性地震統計，平均每隔數年即有災難性地震發生。1999年9月21日發生於南投集集之芮氏規模7.3的強烈地震，是臺灣本島百年來發生之人命財產損失最慘重的一次天災，造成2,455人罹難，11,305人受傷，38,935棟建築物全倒，45,320棟建築物半倒[3]，有形的經濟損失高達140億美元[1]，相當

於當年國民生產毛額GDP之3.3%以上[117]，間接及無法量化的經濟損失恐上兆元，震災造成的傷痛，迄今仍難抹滅。

地震為地球釋放能量的自然現象，而臺灣又是地殼活動非常劇烈的區域，隨著經濟建設迅速發展，各大都會區人口密度不斷提高，高樓大廈林立，更是大幅增加地震對於人民生命財產的威脅。因此，對於災害預防與地震風險管理亟需高度重視，期盼能藉由事前的防災整備來降低未來可能發生的地震衝擊。

1.2 研究目的

為降低地震對建築物的危害，應確實掌握建築物的耐震性能，對於新建建築物，可依不斷更新的耐震設計規範從事設計施工，確保其耐震能力有一定的水準；但是既有老舊建築物，因其年代久遠，興建當時所依循的規範較不周全，施工技術較不完善，或甚至未能依照規範設計、施作，以致其耐震性能常遠低於現行耐震之安全要求，因此在大地震發生時，老舊建築物之損壞程度常遠高於近年新建之建築物[4,5]，所以對於數量極大且耐震能力不佳的老舊建築物，更迫切需要進行評估、補強或拆除重建，以提高人民生命財產的保障。然而，過去針對耐震能力不足之建築物，多以拆除重建方式為之，但在經濟考量下，資源更應有效運用，透過補強手段改善建築物耐震能力，並繼續使用之，已成為現階段處理既有建築物的主要途徑。

其中，公共建築物，如各級政府之辦公廳舍、消防及警務機關、醫院、學校、廣播電信設施、供水供電廠房等建築物，在地震災難發生時，必須持續救災機能運作、提供避難及安置災民等應變工作。基於公共建築物的重要性與功能性，位於地震帶上的許多國家，其建築物耐震設計規範均要求此類公共建築物應較一般建築物具有更高的耐震能力，並以用途係數 I 來提高設計地震力，而該用途係數通常訂為 1.25 或 1.5[6-9]。但是上開用途係數數值的選定，似乎欠缺完備的理論基礎[10]。此外，依據內政部營建署[11]在集集大地震後對於公共建築物災情的緊急初步調查發現，計有全倒 511 棟、危險 1,529 棟、需注意 2,566 棟；並擬重建 1,469 棟、修建 1,676 棟、補強 1,983 棟，其災情亦非較其他一般建築物輕微，當然也造成部分救災機能中斷，這是否意味著 1.25 或 1.5 的用途係數尚不能滿足實際需求，而應再提高呢？

另外，有鑒於老舊建築物在地震中可能遭受極大的風險，自 1960 年代起，世界許多國家即開始推動既有建築物的耐震補強計畫[12]。日本在 1995 年阪神地震後，同年 10 月即公布了「建築物耐震改修促進法」[13]，逐步針對公共建築物、供公眾使用之特定建築物及一般住宅進行耐震評估與補強，如今已有相當良好的成效[14]。臺灣亦於 1999 年集集大地震後，隔年由行政院核定「建築物實施耐震能力評估及補強方案」[15]，針對地震災害發生後，必須持續救災機能運作以救濟大眾之重要建築物，優先辦理耐震評估及補強工作。而建築物經過耐震補強後的成效，已在 2010 年 3 月 4 日高雄甲仙地震中獲得證實[16]。

截至 2007 年，建築物實施耐震能力評估及補強方案列管之 1997 年 4 月 30 日以前設計建造的公共建築物計有 17,255 件，經評估耐震能力有疑慮或需補強或拆除重建者達 5,941 件以上[17]，更遑論超過 75 萬棟屋齡 30 年以上的一般民間住宅，其耐震能力更是堪慮。上開耐震能力係指建築物能抵抗之最大地表加速度，以設計地震（回歸期 475 年）地表加速度表示時，其是否須補強或補強後之耐震能力基準，如建築物預計繼續使用年限未達 50 年者，得以繼續使用年限（不得少於 20 年）中超越機率 10%，計算工址地震地表加速度，並乘以用途係數為之[15]。該方案 2008 年修正後，規定不論建築物之繼續使用年限多寡，其耐震能力均應滿足使用年限 50 年之新建建築物標準[17]，依此基準，恐將大幅增加需補強之建築物數量與補強經費，並增加國家財政負擔。

工程設計，必須兼顧安全與經濟，或者可以說是在安全與經濟之間取得平衡。如果建築物的耐震設計（補強）基準較低，建造（補強）成本自然較小，但是未來遭受地震損害的風險與損失勢必較大；相反的，建築物以較高的耐震基準從事設計（補強），固然建造（補強）成本較高，但是卻可降低未來受地震侵襲損害的機率與損失。因此，最佳或合宜的耐震設計或補強基準的決定，便是在初期建造成本或補強成本與未來可能發生的地震損失之間取得平衡，或是在可接受的範圍內。所以，本文將以一種能同時考慮建造成本或補強成本與地震損失的分析方法，來探討最佳或合宜的建築物耐震設計基準及補強基準，以獲得國家社會最大的效益，並利政策持續推動。

1.3 文獻回顧

1.3.1 建築物耐震設計基準

我國現行建築物耐震設計規範[9]對於耐震設計的基本原則，係基於小震不壞、中震可修、大震不倒，實質上則是強調避免建築物於強震下倒塌，以保持基本生命安全。該設計理念，以力量為參數，以強度作為設計之標的，又可稱作強度設計法。計算設計地震力時，考慮抵抗地震力結構系統之類別、使用結構材料之種類及韌性設計，確認其韌性容量後，折減設計地震及最大考量地震地表加速度，以彈性靜力或動力分析進行耐震分析及設計。對於重要建築物，並以用途係數 I 來提高設計地震力或設計地震及最大考量地震之地表加速度。因此，傳統的建築物耐震設計基準，觀念上即以設計地震、最大考量地震之地表加速度、用途係數、或是某回歸期之地震地表加速度，來表達對該建築物耐震設計的可靠度要求。

然而，自 1989 年 Loma Prieta 地震後，特別是 1992 年之後，美國針對新建建築物之耐震設計及既有建築物之補強，積極發展耐震性能設計理論，其他國家如日本、加拿大、紐西蘭、澳洲、西班牙、加拿大、中國及我國，也陸續跟進，或於相關規範中引進部分耐震性能設計理念[18,19]。耐震性能設計法強調於結構受地震作用時的結構行為，與地震後的結構性能、反應或損傷必須符合預期或初始設計要求。亦即，耐震性能設計法可同時兼顧結構之損壞程度與建築物機能，除了考慮結構的強度與韌性外，著重結構之非線性變形行為，藉由增加對結構變形的限制來確保建築物之機能。因此，耐震性能設計法係採用於多等級地震危害下，符合不同用途建築物設定的耐震設計目標與標準（限制結構反應的容許值），作為建築物的耐震設計基準。

1.3.2 經濟觀點之最佳化設計

工程師從事最佳化設計、可行性分析或是方案選擇時，最普遍也最直接的方式，便是以經濟觀點作評估。例如，King 等[20]以成本效益分析法，決定醫院設施的耐震補強方案；劉玉文[21]以鋼筋混凝土校舍建築的新建費用及震後修復費用之分析，調整建築物設計標準而獲得其最佳性能；林祺偉[22]利用價值工程觀念，就鋼板包覆、碳纖維複合材料貼片、增設構材等補強方式，建立補強後增加之耐震能力與施工經費之補強效能評估模式，作為選擇補強工法的參考；王滢翠[23]針對

耐震能力不足之老舊校舍，納入剩餘使用壽命考量後，以其年平均單位面積重建經費與補強經費（含維護修繕經費），決定是否具補強效益；翁明全[24]綜合考量橋梁補強技術成本與繞道造成之社會成本，評選出震後緊急復原工法在最低總成本或最短修復期程下之最適修補替代方案。

1.3.3 生命週期成本之意涵

過去大部分政府建設計畫的決定，多以初期建造成本為唯一考慮因素[25]。但是對於一個使用年限長的結構物而言，應該以其整體生命週期作為分析最佳化設計的依據，因為如果只著重於建造成本，而忽略生命週期中所可能發生的其他各項支出，並不能獲得長期效益較佳的設計方案[26-28]。所謂生命週期成本分析（Life-cycle Cost Analysis），就是將結構物的規劃設計、營造施工、營運操作、維護管理、更新修繕與拆除廢棄等費用，視為一統合性成本，將期間所需要的經費與效益作整體規劃與考量，以期能達到生命週期成本最佳化之目的。此分析方法，係應用簡易的現金流量計算方式，提供決策者或分析者從生命週期整體成本的角度，評選出最經濟的方案。

生命週期成本，係指整個分析投資期間的時間，一般而言即為該結構物由出生到死亡的時間內，所有可能的支出費用。ASTM[29]提出建築物生命週期成本分析的標準計算模式；Rowe[30]提出結構物成本的評估分為設計建造、使用營運及維護三階段；Al-Hajj[31]提出建築物生命週期中營運與維護成本的簡單預測模式。此外，當結構物自然老化劣化致服務性降低而須維修時，該維修期間因機能中斷將引致額外的社會成本（含使用人成本及第三人成本），此一社會成本會占整體生命週期成本中，極大的比例[25,32-37]。而位於地震帶的結構物，地震造成的損失在整體生命週期成本中也極具顯著，其耐震修復與補強費用通常是併入維護成本計算。

1.3.4 生命週期成本分析之應用

近年來，已經有許多法規或文獻應用生命週期成本分析作為結構物最佳化設計或決策選定的評定工具。例如，美國國會在 1991 年通過「混合模式地面運輸最佳效益法案（Inter-modal Surface Transportation Efficiency Act, ISTEA）」，要求

橋梁、隧道、鋪面等交通設施的決策均應以生命週期成本來評估[39]；Kong 及 Frangopol[40]以生命週期成本考量橋梁因自然機能劣化時之最佳維護計畫；Ehlen[34]探討橋梁構件採用不同材料建造時，因建造成本、維護成本、拆除成本及使用人成本之不同，對於整體生命週期成本的影響，據以決定最佳的建造材料。

至於生命週期成本分析應用於地震工程方面，Liu 及 Neghabat [41]是最早將結構物生命週期中地震損失納入設計階段分析的學者之一；Chang 及 Shinozuka[39]認為橋梁設計應考慮地震風險對於其生命週期成本之影響；Wen 及 Kang[42]建立一套考慮地震損失之建築物生命週期成本估算模式，並以最小生命週期成本作為鋼結構建築物耐震設計之依據；Liu 等[43]依據生命週期成本調整抗彎矩構架系統建築物之性能水準，而獲得耐震設計最佳化；Ang 及 De Leon[44]以生命週期成本與效益探討鋼筋混凝土建築物之地震損害控制與避免倒塌之最佳可接受風險；Montes-Iturrizaga 等[45]考量地震區結構物生命週期成本，並提出最佳耐震修復補強策略；Taflanidis 及 Beck[46]與 Goda 等[47]以生命週期成本效益分析，分別提出被動消能系統與隔震建築物之最佳設計方案；Lagaros[48]探討鋼筋混凝土構架建築物填充磚牆、具軟弱層及短柱等條件下之生命週期成本；Takahashi 等[49]以不同的地震發生模式，建立建築物的生命週期成本分析架構；García-Pérez 等[10]以最小生命週期成本決定近震源地區的建築物用途係數；Padgett 等[50]考量地震風險下，比較不同橋型與修復工法在橋梁生命週期成本的差異；Kumar 等[51]分析地震損害及腐蝕等效應對於鋼筋混凝土橋梁生命週期成本之影響，並提出最佳的維護計畫；Sung 及 Su[38]針對中性化之鋼筋混凝土橋梁建立一隨時間變化的易損性曲線，並以生命週期成本評估法提出既有橋梁的最佳耐震補強策略。

1.4 本文內容

對於一個使用年限長的結構物而言，生命週期成本分析已經成為其最佳化設計或管理方案選定的決策支援工具，因此本文將以生命週期成本的觀念，來探討最佳或合宜的建築物耐震設計基準及補強基準。雖然耐震性能設計法可能成為未來結構設計的趨勢，但目前仍未發展至完備階段，其接受度亦待克服，而且事實上，我國現行的建築物耐震設計規範要求，已考慮三種等級的地震危害，並在中小度地震作用下，限制建築物之層間變位角；在 475 年回歸期設計地震作用下，

結構的韌性僅能達到極限值的 2/3 或 1/2，這已符合耐震性能設計之精神，以結構損傷控制來進行分析設計，所為的簡化程序[52]。所以，本文對於建築物最佳或合宜的耐震設計基準及補強基準的探討，仍以地震地表加速度或用途係數作為評估參數。

消防隊通常為各類災害發生後的第一線救災機關，甚至肩負災害緊急應變指揮中心或前進指揮所之責任，如果消防廳舍在地震中受到嚴重損害，勢必影響其救災功能而導致更多生命財產損失。就因為消防隊如果救災機能受損將造成極大的社會損失，而典型的消防廳舍又以鋼筋混凝土結構為主，所以本文選擇以鋼筋混凝土造消防廳舍為例，利用生命週期成本分析探討其最佳或合宜的耐震設計基準（用途係數）及補強基準，俾使其在地震發生後能有效率地展開緊急救災的任務。本文的研究成果除了可就建築物的耐震設計基準及補強基準獲得合理的理論根據外，亦可提供主管機關決策或未來修訂規範相關規定時之參考，以維護整體國家與人民的利益。至於本文考慮的生命週期成本，除建築物新建成本、補強成本，及建築物因地震損壞所造成的財產減失、人員傷亡與修復費用等直接經濟損失外，亦包括因建築物受損致其功能中斷造成的間接經濟損失（如額外火災損失及額外人命損失）。

本文的內容架構大致如下：

- 第一章 緒論。說明本文之研究動機與目的，就建築物耐震設計基準、經濟觀點之最佳化設計、生命週期成本之意涵與生命週期成本分析之應用等相關文獻作回顧，並簡要介紹本文之內容。
- 第二章 考量地震風險之生命週期成本分析架構。闡述地震風險之意義與本文採用之生命週期成本分析架構，係包括建築物使用年限設定、生命週期期間各項成本支出的估算，結合地震危害度曲線與結構物易損性曲線之應用等，並提供相關計算公式。
- 第三章 現行建築物耐震設計基準與補強基準。介紹現行建築物耐震設計之概念，包括強度設計法與性能設計法，及此二種耐震設計方法的設計基準、補強基準與相關法規規定。
- 第四章 建築物生命週期成本分析相關資訊。就第二章建築物生命週期成本分析架構所需要的基本資料，如生命週期之意義與統計、地震危害度曲線及

建築物易損性曲線之求取、建築物耐震能力之評估、建築物建造及補強成本之估算、折現率之選擇等，配合相關文獻作概述。

第五章 建築物地震損失評估。說明建築物地震損失之評估方式，除先就世界重大地震損失經驗及地震災害損失評估系統作介紹外，本文考慮之消防廳舍地震損失，則分為直接經濟損失與間接經濟損失二類。其中，直接經濟損失係指建築物因地震受損引致的建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡之工資損失、建築廢棄物處理費用及搬遷損失等；間接經濟損失則指建築物受損導致建築物服務功能中斷，所造成的損失，如額外火災損失及額外人命損失。本章就上開各地震損失項目推估提供相關參考文獻，並提出本文採用的簡易推估方式。

第六章 建築物耐震設計基準及補強基準探討。本章應用第二章、第四章及第五章之方法與程序，計算建築物的生命週期成本，以探討新建消防廳舍最佳或合宜的耐震設計基準及既有消防廳舍耐震補強基準。內容包括各項地震損失之特性討論、各參數之敏感度分析、最佳及合宜的耐震設計基準（用途係數）與耐震補強基準。

第七章 結論與展望。綜合各章之消防廳舍生命週期成本分析理論與所得到的最佳及合宜的耐震設計基準（用途係數）與耐震補強基準，作一總結，並提出未來可繼續研究的概念與建議，作為日後改進與實務應用之參考。

第二章 考量地震風險之生命週期成本分析架構

2.1 地震風險之意義

相較於其他天然災害，地震具有極大的不確定性，吾人無法預知地震的時空分布與規模大小。如果偏遠的鄉間地區雖經常發生地震，但因當地人口稀少、建設不多，因此地震造成的災害相對較小；反之，都會地區人口集中、建設稠密、工商發達，縱然僅是偶一發生的小地震，仍可能引致重大的災難，對於國家發展與民眾生活影響深遠。因此，為了降低地震造成的結構物損害、人命傷亡、經濟損失等影響，政府及民間企業均有必要進行地震風險評估，作為各項防災準備與減災策略之依據，如土地使用管制、防災據點規劃、緊急應變措施與災區復原重建計畫等。

進行風險評估時需識別災害發生的潛勢，包含發生災害的可能地點、頻率和規模等；同時須估計災害發生時，可能引起的後果，通常以損害、損失或傷亡等予以量化。以抽象的函數表示， $\text{風險} = \text{災害潛勢} \times \text{可能損失}$ 。災害潛勢或損失估計均隱含極大的不確定性，也正因為有不確定性，導致風險無法避免，甚至因不確定性加大而使風險提高。地震風險評估可針對單一工程結構物，如建築物、橋梁或其他明確標的物，也可廣泛分布於極大的研究區域內，求取該標的物或區域在模擬地震作用下的損害程度和可能的損失金額。[70,131]

2.2 生命週期成本分析架構與計算

考量地震風險的生命週期成本分析，除了結構物使用年限的設定及生命週期期間各項成本支出的估算外，亦須結合地震危害度曲線與結構物易損性曲線的或然率模式[39,46,50,71]，因此，本文的分析架構如圖 2.2.1 所示。而生命週期期間各項成本支出，理論上應包括結構物自規劃設計至拆除廢棄各階段之間的所有費

用，但在應用目不同時，考量之費用項目自然不盡相同。其中以生命週期成本分析應用於結構物耐震設計或補強方案評估時，文獻[43]建議僅須考慮初始建造成本、補強成本與未來地震可能造成的損失，其他如土地購置成本、一般維護（如材料老化、空間設備機能劣化等原因造成者）、營運及拆除等費用，則可不須考量。本文爰採用上開文獻之建議，在生命週期成本項目之估計，僅納入建造成本、補強成本與地震可能造成的損失。

生命週期成本分析，可以現值法（Net Present Value，NPV）、等值年金法（Equivalent Uniform Annual Worth，EUAW）、益本比法（Benefit-Cost Ratio，B/C Ratio）及投資報酬率法（Internal Rate of Return，IRR）等方式呈現[72]，本文係採用等值年金法，其概念及計算方式如下：

$$SRC = \mu_{C_I} + \mu_{C_R} + \mu_L \quad (2.2.1)$$

$$\mu_{C_I} = \begin{cases} \frac{r(1+r)^{t_p+t_r}}{(1+r)^{t_p+t_r} - 1} C_I & ; r \neq 0 \\ \frac{C_I}{t_p + t_r} & ; r = 0 \end{cases} \quad (2.2.2)$$

$$\mu_{C_R} = \begin{cases} \frac{r(1+r)^{t_r}}{(1+r)^{t_r} - 1} C_R & ; r \neq 0 \\ \frac{C_R}{t_r} & ; r = 0 \end{cases} \quad (2.2.3)$$

$$\mu_L = \sum_{PGA=0}^{2.0g} LOSS(\Delta PGA) \times v(\Delta PGA) \quad (2.2.4)$$

其中，

SRC : 考慮地震風險的生命週期成本。

μ_{C_I} : 建築物建造成本之年值。

μ_{C_R} : 建築物補強成本之年值。

μ_L : 建築物之年平均地震損失。

C_I : 建築物初始建造成本。

C_R : 建築物補強成本。

t_p : 建築物已過使用年限。

t_r : 建築物繼續使用年限。

r : 折現率 (係綜合考慮利率及通貨膨脹率之因子)。

$LOSS(\Delta PGA)$: 地震地表加速度在某 ΔPGA 區間中點時, 引致之建築物地震損失, 可由第五章建築物地震損失評估建議之方式來估計。

$\nu(\Delta PGA)$: 地震地表加速度在此 ΔPGA 區間之年發生率, 可由地震危害度曲線求得。

(2.2.2)式及(2.2.3)式為將建造成本或補強成本之現值 (Present Value), 經折現率轉換為年值 (Annual Value) 之換算公式[29]。(2.2.4)式為計算建築物年平均地震損失之公式, 為地震風險評估之呈現, 本文假設地表加速度自 $0g$ 以某一極小增量逐步增加至 $2.0g$ (即 $\sum_{PGA=0}^{2.0g} \nu(\Delta PGA) = 1.0$), 先計得地震地表加速度在某小區間 ΔPGA 時, 在一年中可能引致的年損失 ($LOSS(\Delta PGA) \times \nu(\Delta PGA)$), 再將所有地震地表加速度區間對應的年損失累加, 可得一年中的平均損失值, 意即年損失期望值, 亦稱為年平均損失。(2.2.4)式也是下式之簡算法:

$$\mu_L = \int_{PGA_{\min}}^{PGA_{\max}} LOSS(PGA) f(PGA) dPGA \quad (2.1.5)$$

其中, $LOSS(PGA)$ 為地震地表加速度在某 PGA 時, 引致之建築物地震損失; $f(PGA)$ 為地震地表加速度的機率密度函數 (Probability Density Function)。

當計算各種可能方案的生命週期成本後, 一般將生命週期成本最低者, 視為最佳方案 (如圖2.2.2)。但是有經驗的決策者, 會將其他不確定因素或無法量化因子等, 配合生命週期成本評估結果一併考量, 以得到最優的方案。

第三章 現行建築物耐震設計基準與補強基準

3.1 強度設計法之耐震設計基準

3.1.1 強度設計法之概念

傳統的建築物耐震設計方法，係基於基底剪力之力法或強度設計法（Force / Strength-based Seismic Design），以控制結構在設計地震下的強度為依據進行設計，我國現行建築物耐震設計規範[9]之架構尚遵循此法，並以位移相等法則或能量相等法則將設計地震力降低，而使結構在折減後地震力作用下仍保持彈性。依據規範，耐震設計的基本原則，係使建築物結構體在中小度地震時保持在彈性限度內；設計地震時容許產生塑性變形，但韌性需求不得超過容許韌性容量；最大考量地震時則使用之韌性可以達規定之韌性容量。因此，該規範考量的三種地震水準及耐震設計目標為：

1. 中小度地震（回歸期 30 年之地震，其 50 年超越機率約 80%）：此地震水準在建築物使用年限中發生的機率相當高，因此要求結構體保持在彈性限度內，不得有任何損壞。通常對於高韌性容量的建築物，此一目標常控制其耐震設計。
2. 設計地震（回歸期 475 年之地震，其 50 年超越機率約 10%）：於此地震水準下建築物不得產生嚴重損壞，以避免造成嚴重的人命及財產損失。對於重要建築物而言，其對應的回歸期應大於 475 年。於設計地震下容許建築物在一些特定位置如梁之端部產生塑鉸，藉以消耗地震能量，並降低建築物所受之地震反應。但為防止過於嚴重之不可修護的損壞，建築物產生的韌性比不得超過容許韌性容量。
3. 最大考量地震（回歸期 2500 年之地震，其 50 年超越機率約 2%）：設計目標在使建築物於此罕見之烈震下不產生崩塌，以避免造成嚴重之損失或造成二次災害。因為地震之水準已經為最大考量地震，所以允許結構物使用之韌性可以達

到其韌性容量。

3.1.2 設計基底剪力

依據 3.1.1 所述之耐震設計目標，以靜力分析時，決定建築物各主軸方向施加之設計基底剪力，為下列三式之最大值：

1. 設計地震

$$V = \frac{I}{1.4\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (3.1.1)$$

2. 避免最大考量地震崩塌

$$V_M = \frac{I}{1.4\alpha_y} \left(\frac{S_{aM}}{F_{uM}} \right)_m W \quad (3.1.2)$$

3. 避免中小度地震降伏

(1) 一般工址與近斷層區域

$$V^* = \frac{IF_u}{4.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (3.1.3a)$$

(2) 臺北盆地

$$V^* = \frac{IF_u}{3.5\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (3.1.3b)$$

其中，

S_{aD} ：工址設計水平譜加速度係數（考慮 475 年回歸期地震之彈性譜加速度需求）。

S_{aM} ：工址最大考量水平譜加速度係數（考慮 2500 年回歸期地震之彈性譜加速度需求）。

I ：用途係數。

W ：建築物全部靜載重。

α_y : 起始降伏地震力放大倍數。

F_u : 由結構系統容許韌性容量 R_a 計算之結構系統地震力折減係數。

$$(1) \text{一般工址與近斷層區域: } R_a = 1 + \frac{(R-1)}{1.5}$$

$$(2) \text{臺北盆地: } R_a = 1 + \frac{(R-1)}{2.0}$$

F_{uM} : 由結構系統韌性容量 R 計算之結構系統地震力折減係數。

上開設計基底剪力，係考慮建築物具有韌性，所以毋須將建築物設計成大地震時仍保持彈性，在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（如圖 3.1.1 所示），進行結構分析與設計，而其降低幅度，視韌性好壞而定，表現於結構系統地震力折減係數 F_u 。復由圖 3.1.1 觀之，建築物承受側力與其所產生的側位移，在外力不大時呈線性，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。此非線性的關係可以彈塑性關係來理想化，亦即彈性一直維持到 V_u ，其後變為完全塑性，韌性容量 $R = \Delta_u / \Delta_y$ 。

因為一般建築物的設計，均隱含有安全係數在內，所以在設計水平地震力 V_d 作用下，結構尚未開始降伏。當地震力增加一個倍數 α_y 達 V_y 後，第一個構件斷面才開始降伏，即 $\alpha_y = V_y / V_d$ 。由於建築物的靜不定度較高，在設計均勻、各斷面降伏時機接近下，以保守估計，外力須調升至 $1.4V_y$ 後，結構才達能承受的最大側力 V_u 。至於具韌性容量 R 的建築物，韌性對於建築物耐震能力的貢獻程度（ F_u ），與建築物的週期及所適用的反應譜有關。一般而言，週期長的建築物，由位移相等法則得 $F_u = R$ ，意即建築物降伏後可再抵抗降伏時地表加速度的 R 倍後，建築物才會因韌性用盡而崩塌；但週期短的建築物，由能量相等法則得 $F_u = \sqrt{2R-1}$ ，其韌性對耐震能力不若長週期建築物般有效。

3.1.3 工址設計與最大考量水平譜加速度係數

我國建築物耐震設計規範[9]規定之震區係以鄉、鎮、市、區等行政區為單位劃分，各微分區內之震區短週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_s^D 與 S_1^D ，分別代表工址所屬震區在堅實地盤下，設計地震作用時之短週期結構與一秒週期結構之 5% 阻尼譜加速度與重力加速度 g 之比值，並根據 50 年 10% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 475 年，其值可由表 3.1.1 獲得；震區短週期及一秒週期之最大考量水平譜加速度係數 S_s^M 與 S_1^M 分別代表工址所屬震區在堅實地盤下，最大考量地震作用時之短週期結構與一秒週期結構之 5% 阻尼譜加速度與重力加速度 g 之比值，並根據 50 年 2% 超越機率之均布危害度分析訂定，地震回歸期為 2500 年，如表 3.1.1 所示。

不同之地表搖晃程度，將改變地盤週期，進而改變短週期與長週期結構之譜加速度放大倍率，因此，必須考量土壤非線性放大效應。一般工址區域之工址短週期與一秒週期設計水平譜加速度係數 S_{DS} 與 S_{D1} ，及工址短週期與一秒週期最大考量水平譜加速度係數 S_{MS} 與 S_{M1} ，依下式計算：

$$S_{DS} = F_a S_s^D ; S_{MS} = F_a S_s^M \quad (3.1.4a)$$

$$S_{D1} = F_v S_1^D ; S_{M1} = F_v S_1^M \quad (3.1.4b)$$

其中， F_a 為反應譜等加速度段之工址放大係數，隨地盤種類與震區短週期水平譜加速度係數 S_s (S_s^D 或 S_s^M) 而改變； F_v 為反應譜等速度段之工址放大係數，隨地盤種類與震區一秒週期水平譜加速度係數 S_1 (S_1^D 或 S_1^M) 而改變。 F_a 及 F_v 可分別由表 3.1.2 求得。

近斷層區域，工址所屬震區之短週期及一秒週期水平譜加速度係數，深受該斷層之特性及工址與斷層間之水平距離影響，須藉由特徵地震之規模密度函數配合傳統均布危害度，進行考慮近斷層地震之危害度分析，來定義近斷層調整因子 N_A 與 N_v ，進而修正近斷層工址之震區水平譜加速度係數，使之合理估計近斷層區域建築物的設計地震力。近斷層區域工址短週期及一秒週期設計水平譜加速度係數

S_{DS} 與 S_{D1} ，及工址短週期及一秒週期最大考量水平譜加速度係數 S_{MS} 與 S_{M1} ，依下式計算：

$$S_{DS} = S_S^D F_a N_A ; S_{MS} = S_S^M F_a N_A ; N_A \geq 1.0 \quad (3.1.5a)$$

$$S_{D1} = S_1^D F_v N_V ; S_{M1} = S_1^M F_v N_V ; N_V \geq 1.0 \quad (3.1.5b)$$

其中， N_A 與 N_V 分別代表反應譜等加速度段與等速度段之近斷層調整因子，其值在設計地震與最大考量地震下並不相同，並隨工址與各斷層之水平距離而改變。以近車籠埔斷層調整因子為例，距離斷層 12 公里內之工址其應考量近斷層效應，其設計地震及最大考量地震之 N_A 與 N_V ，如表 3.1.3 所示。

一般而言，設計反應譜之形狀大致可區分為等加速度段（短週期）與等速度段（中、長週期）。等加速度段指的是設計反應譜之平台部分，此部分為加速度敏感區，深受近震源之影響，而等速度段之形狀，則易受遠震源之影響。一般工址或近斷層區域之工址設計水平譜加速度係數 S_{ad} ，隨建築物基本振動週期 T 與工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_{DS} 與 S_{D1} 而改變，此反應譜係數在短週期部分為常數，等於工址短週期設計水平譜加速度係數 S_{DS} ；在中週期部分，則隨 $1/T$ 的衰減趨勢遞減，但不小於 $0.4S_{DS}$ ，其中 T 為建築物的基本振動週期；在較短週期的範圍內， S_{ad} 與結構週期呈線性變化關係，如表 3.1.4(a) 所示。工址最大考量水平譜加速度係數 S_{aM} ，隨建築物基本振動週期 T 與工址短週期與一秒週期之最大考量水平譜加速度係數 S_{MS} 及 S_{M1} 而改變，此反應譜係數與結構週期之關係，亦類似工址設計水平譜加速度係數，均可由表 3.1.4(b) 所示獲得。

臺北盆地由於特殊的地形與地質條件，其地震動特性同時受到盆地扭轉效應與軟弱土層效應（沖積層厚度）之影響，其設計地震反應譜應特別考量。臺北盆地之工址短週期設計水平譜加速度係數 S_{DS} 為 0.6，工址短週期最大考量水平譜加速度係數 S_{MS} 為 0.8。其工址設計水平譜加速度係數 S_{ad} ，隨建築物基本振動週期 T 、工址短週期設計水平譜加速度係數 S_{DS} 與轉換週期 T_0^D 而改變；工址最大考量水平譜加速度係數 S_{aM} ，隨建築物基本振動週期 T 、工址短週期最大考量水平譜加速度

係數 S_{MS} 與轉換週期 T_0^M 而改變，如表 3.1.5 所示。

3.1.4 耐震設計基準

實務應用上在決定結構耐震設計基準時，通常以某回歸期設計地震來表達對該結構物耐震設計的可靠度要求，強度設計法正是如此。強度設計法之建築物耐震設計，以結構系統之強度與韌性為基礎，計算設計用之基底剪力。當建築物結構系統、材料及規模確定，並經韌性設計後，影響設計用基底剪力的因素僅為工址設計及最大考量水平譜加速度係數 (S_{aD} 及 S_{aM})，其值則是依據回歸期 475 年及 2500 年之設計地震及最大考量地震相關參數獲得。該耐震設計基準可由對應的等值地表加速度 EPA (Effective Peak Ground Acceleration) 來表示，並由工址短週期設計水平譜加速度係數及最大考量水平譜加速度係數 (S_{DS} 及 S_{MS}) 換算得之：

$$EPA_D / g = 0.4S_{DS} \quad ; \quad EPA_M / g = 0.4S_{MS} \quad (3.1.6)$$

以臺北盆地為例， $S_{DS} = 0.6$ 、 $S_{MS} = 0.8$ ，所以其耐震設計之設計地震地表加速度及最大考量地震地表加速度（或可稱為崩塌地表加速度）分別為 0.24g 及 0.32g；如將建築物之耐震能力以其能抵抗之地表加速度表示時，也可以說是以結構系統韌性容量為 R_a 時之耐震能力 0.24g、韌性容量為 R 時之耐震能力 0.32g，作為設計之依據。

對於重要性較高之建築物，因考慮其失敗的風險承受度較低而必須提高其可靠度要求，所以在強度設計法中，藉由下列方式之一達成：

1. 將設計地震力乘以一用途係數 I 來提高其設計地震力。
2. 採用較低的超越機率（較高回歸期）的設計地震。
3. 改變載重組合的地震力係數。

我國建築物耐震設計規範即藉由用途係數來調整不同重要度建築物之強度為其耐震設計基準，而提高設計地震力，亦等同於採用較高回歸期（等級）的設計地震。此法，對於不同重要度建築物的設計，是考慮在不同等級（回歸期）地震

下確保相同之容許韌性，也就是具有相同之耐震性能等級。我國建築物耐震設計規範之用途係數規定如下：

1. 第一類建築物：地震發生後必須維持機能以救濟大眾之重要建築物 $I = 1.50$
2. 第二類建築物：儲存危險物品之建築物 $I = 1.50$
3. 第三類建築物：供公眾使用之建築物 $I = 1.25$
4. 第四類建築物：一般建築物 $I = 1.00$

因此，當建築物的設計地震力須以用途係數放大時，其耐震設計基準中，設計地震地表加速度及最大考量地震地表加速度（崩塌地表加速度）（以上或可稱耐震能力）自然一併放大，意即：

$$PGA_D = 0.4S_{DS}I g \quad ; \quad PGA_M = 0.4S_{MS}I g \quad (3.1.7)$$

所以，強度設計法的建築物耐震設計基準，可以很直接地從設計地震、最大考量地震之地表加速度、用途係數來知悉。

3.2 性能設計法之耐震設計基準

3.2.1 性能設計法之概念

建築物之耐震性能設計法（Performance-based Seismic Design）是以建築物之耐震性能作為設計標的的方法，該耐震性能係指在地震力作用下，建築物所遭受的破壞及該破壞對於使用者生命安全之威脅、建築物正常功能喪失或引致工作中斷時間之長短或造成的損失、恢復正常工作或維修補強所需之時間與經費，或對社會環境之影響等。耐震性能設計法之目的在於使建築物在各規模地震力作用下，其結構行為與地震後的功能、反應或損傷必須符合預期或初始設計要求，強調以直接反應結構非線性行為之設計與分析方法作為該目標之途徑。該方法並非完全排斥以強度作為設計參數與設計目標，而是期望考量結構承受荷載各階段之受力與變形行為，選擇適宜的設計方法與分析工具，除了傳統考量的強度外，也可選擇其他表現性能的參數（如變形等）作為設計之依據，以更準確地瞭解建築

物在地震作用下的真實行為[18]。有關性能設計法之理念架構、設計方法、評估方式等研究報告，及應用其理念發展之規範、設計指針極多，惟現階段耐震性能設計法之實際應用，仍多以 Vision 2000[53]、FEMA 273/274[54,55]及 ATC-40[56]為主。

性能設計相關名詞定義如下：

1. 耐震性能 (Seismic Performance)：建築物在地震力作用下之行為與反應及其所造成的影響。
2. 地震 (危害) 等級 (Seismic Hazard Level)：設計時所考量之輸入地震之大小，通常以一定年限內發生地震之超越機率或相當之回歸期表示之。
3. 性能等級 (Performance Level)：建築物可接受之最大反應與影響程度，建築物之性能等級一般分由結構系統性能等級與非結構構件之性能等級各自表示，而結構系統性能等級包括整體結構系統及結構構件，結構構件又分主要與次要構件。由圖 3.2.1 所示之結構系統側力與變形之關係曲線，一般以強度、勁度或韌性變化較大之各點作為關鍵狀態，並以各關鍵狀態劃分為不同性能等級。
4. 性能目標 (Performance Objective)：定性表述建築物於所考量之各等級輸入地震作用下，分別被期望具有的耐震性能等級。性能目標之訂定，係綜合考量建築物的重要度、危害度、使用要求、經濟性與其他社經因素等。
5. 性能標準 (Performance Criterion)：性能目標量化之可接受標準，而量化的性能表現參數，就結構系統而言，可採用位移與變形 (層間變位角) 限制、加速度與力量限制、破壞限制、韌性限制、吸收與消散能量限制等，可經由結構試驗或震害調查分析決定。另依據文獻[57,58]之研究，可採用相關變形、韌性、能量等一個或二個參數之破壞指標 (Damage Index)，作為性能參數標準。

性能設計法的耐震設計基本原則，係使建築物在不同強度地震作用下之耐震性能等級能滿足規定的耐震性能目標與標準，以控制地震作用下結構體損傷程度，達到保障生命財產安全之目的。亦即，建築物在所考量的地震等級下，其耐

震性能表現參數（耐震反應參數）不得超過容許值或可接受之標準值，包括整體結構系統及結構構件，甚或是非結構構件、機電設備與家具用品等。

性能設計法不使用用途係數 I 來調整不同重要度建築物之耐震設計強度，而是針對不同用途之建築物，建立不同的性能目標來達成。因為耐震設計性能目標由地震等級及性能標準搭配而得，重要度越高之建築物，耐震設計性能目標越高，可經由保持相同地震等級下，要求越高的性能等級（降低結構物反應的容許值）而達成；或在考慮相同的損壞程度下，所能承受的地震危害等級越高（經由越高地震等級下維持相同之性能等級）來達成。其中前者較常被採用。

美國加州結構工程師協會（Structural Engineers Association of California，SEAOC）發表之 Vision 2000 報告，闡述了性能等級、地震等級、性能目標，以實現性能設計法理論的整個過程。Vision 2000 係採用四種建築物結構性能等級：正常使用（Fully Operational）、可使用（Operational）、生命安全（Life Safe）、接近倒塌（Near Collapse），其損害程度之描述詳如表 3.2.1 所示；四種地震等級：經常（Frequent）、偶爾（Occasional）、罕見（Rare）及極罕見（Very Rare）等級，分別代表回歸期 43 年、72 年、475 年及 970 年之地震；及三種性能目標：基本目標（Basic Objective）、重要設施目標（Essential / Hazardous Objective）、安全緊急目標（Safety Critical Objective），分別適用於一般建築物、一般基礎/危害設施建築物、極重要/高危害設施建築物。綜上，Vision 2000 的性能目標架構，如圖 3.2.2 所示。

FEMA 273 是美國聯邦緊急事件管理總署（Federal Emergency Management Agency，FEMA）對於鋼構造、混凝土構造、磚石構造與木構造建築物，以性能表現為基礎所發展之耐震評估方法，依照不同的地震等級與建築物性能等級，定出不同之復建目標，其中地震等級包括 50 年超越機率為 50%、20%、10%（BSE-1）及 2%（BSE-2）等四級之地震；建築物性能等級則分為正常使用（Operational）、立即可用（Immediate Occupancy）、生命安全（Life Safety）、避免倒塌（Collapse

Prevention) 等四種。FEMA 273 為使建築物達到小震不壞、中震可修、大震不倒之原則，訂定了基本安全目標 (Basic Safety Objective, BSO)，其規定為建築物在 BSE-1 的地震危害下，建築物的性能等級須達到生命安全等級；在 BSE-2 的地震作用下，建築物須達到建築物避免倒塌的等級。對於重要度較高之建築物，應建立比 BSO 更高之性能目標，稱之為加強目標 (Enhanced Objective, EO)；至於性能目標比 BSO 低的所謂限制目標 (Limited Objective)，則不建議作為新建建築物之設計目標。FEMA 273 的性能目標架構，相似於圖 3.2.2。至於 ATC-40，亦有類似的規定

性能設計法之初步設計，可採用強度設計法搭配位移標準進行檢核，也就是以適宜之分析方法計算結構在性能目標對應該等級地震作用下的耐震反應參數與可接受標準或容許標準值作比較，確定是否滿足耐震性能標準，但亦可採用直接位移設計法[59-61]等方式作設計，惟目前實務上仍以檢核的方式為主，各參考文獻採用之分析方法及其對應之主要檢核內容，可參閱表 3.2.2[18]。

3.2.2 耐震設計基準

耐震性能設計法係由多等級地震危害下，符合不同用途建築物設定的耐震設計目標與標準(限制結構反應的容許值)，作為建築物的耐震設計基準。其中，Vision 2000 及 FEMA 273 以結構整體的彈性及非彈性層間變位角作為性能標準的量化性能表現參數，各性能標準的容許值如表 3.2.3 及表 3.2.4 所示。此外，FEMA 273 亦訂有各性能標準下的結構構件塑性轉角檢核之量化值，如表 3.2.5 及圖 3.2.3 所示。因此，依據 3.2.1 所述之 Vision 2000 及 FEMA 273 建議之各種用途建築物的性能目標，搭配上開檢核標準，即可得到建築物的耐震設計基準。

薛強及陳國慶[67]曾研擬適用我國之建築物耐震性能設計規範草案，將建築物性能等級分為正常使用 (Operational, OP)、立即可用 (Immediate Occupancy, IO)、破壞控制 (Damage Control, DC)、生命安全 (Life Safety, LS) 及避免倒塌 (Collapse

Prevention, CP) 等五級，其定性描述如表 3.2.6 所示，而結構體之性能等級則以與強度、勁度、韌性相關的耐震性能指標量化之。其中，強度方面，結構體應提供所考量地震力作用所需的強度，且 OP 性能等級要求結構體保持彈性；勁度方面，以最大容許層間變位角加以限制；韌性方面，以容許發生之非彈性位移與極限非彈性位移容量之比例限制之。爰其對於三種不同用途群組建築物於不同等級地震下之耐震設計性能目標與標準，如表 3.2.7 及圖 3.2.4 所示。其中，第 I 類建築物必須滿足基本安全目標 (Basic Safety Objective, BSO)，第 II 類建築物必須滿足第一級加強目標 (Enhanced Objective 1, EO1)，第 III 類建築物必須滿足第二級加強目標 (Enhanced Objective 2, EO2)。以上所稱的第 I 類建築物，係指我國現行建築物耐震設計規範規定之第四類建築物 (一般建築物， $I=1.00$)，第 II 類建築物係指第三類建築物 (供公眾使用之建築物， $I=1.25$)，第 III 類建築物則指第一類及第二類建築物 (地震發生後必須維持機能以救濟大眾之重要建築物及儲存危險物品之建築物， $I=1.50$)。

3.3 耐震補強基準

3.3.1 既有建築物耐震補強設計原則

考量經濟與實務的可行性，對既有建築物的補強設計應不必要求依照新建建築物的地震設計標準與耐震設計檢核程序，可以從生命保全的觀點，來設定既有建築物補強的整體性能目標[52]。此外，文獻[67]亦建議，考慮建築物已使用年限與剩餘之年限，其耐震性能目標與標準得較新建建築物放寬，但最大考量地震對應之耐震性能目標與標準須與新建建築物一致。

性能目標放寬之方式包括：

1. 採用與新建建築物相同性能等級，但放寬地震等級，也就是將新建建築物性能目標中劃分地震等級所考慮之使用年限，以剩餘使用年限替代，但剩餘使用年限宜設下限值 (如 20 年)，年限內之超越機率不變，如表 3.3.1(a) 所示。

2. 考慮相同地震等級，但放寬性能等級，如表 3.3.1(b)所示。

3.3.2 法規耐震補強基準

依據 2000 年版建築物實施耐震能力評估及補強方案[15]，建築物之耐震能力以其能抵抗破壞之地表加速度表示，以當時建築物耐震設計規範[68]考慮回歸期 475 年之地震水準（結構韌性容量為 R_a ）的條件下，規定公共建築物不須補強或補強後之耐震能力應達下列基準（ A_{gr} ）：

1. 既有建築物預計繼續使用年限達 50 年以上者：

$$A_{gr} = A_{g,475} \times I \quad (3.3.1)$$

其中， $A_{g,475}$ 為工址回歸期 475 年之地震地表加速度， I 為用途係數。

2. 建築物預計繼續使用年限未達 50 年者，得以繼續使用年限（不得少於 20 年）中超越機率 10% 算得之地震地表加速度取代回歸期 475 年之地震地表加速度。意即，繼續使用年限 T 年內超越機率 10% 對應的回歸期

$$T_r = \frac{1}{1 - 0.9^{\frac{1}{T}}} \quad (3.3.2)$$

則回歸期 T_r 對應之地震地表加速度

$$a_{gr} = A_{g,475} \times \left(\frac{T_r}{475} \right)^k \quad (3.3.3)$$

其中， k 值介於 0.30 至 0.45 之間，為保守估計 k 可取 0.30[69]，爰

$$A_{gr} = a_{gr} \times I \quad (3.3.4)$$

上開方案 2008 年修正後[17]，規定不論公共建築物之預計繼續使用年限多寡，其耐震能力均應滿足使用年限 50 年之新建建築物標準：

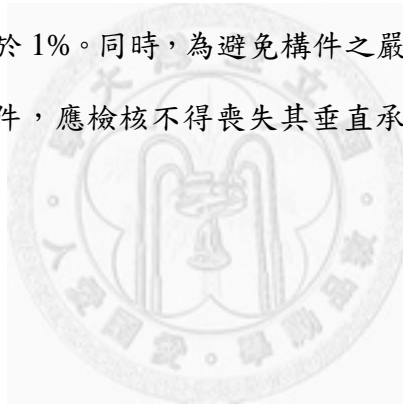
1. 建築物之耐震能力以地表加速度表示時，其耐震能力應達工址回歸期 475 年之設計地震地表加速度乘以用途係數，計算方式同(3.3.1)式，但 $A_{g,475}$ 以 $0.4S_{DS} g$ 代

之。

2. 建築物得以性能目標作為耐震能力之檢核標準，確保該建築物在工址回歸期 475 年之設計地震力下所需達到之性能標準。

配合前揭第二款規定，教育部針對國中小及高中職校舍，訂有下列耐震性能目標[52]：

1. 一般校舍 ($I=1.25$)，在其 475 年回歸期設計地震作用下之結構內力反應（基底剪力）不得超過最大強度（最大基底剪力強度），且任一樓層之最大層間變位角不得大於 2%。
2. 指定為震後避難場所之校舍 ($I=1.50$)，應具有較佳的建築物性能標準，爰規定其於設計地震作用下之結構內力反應不得超過最大強度之 80%，且任一樓層之最大層間變位角不得大於 1%。同時，為避免構件之嚴重受損，而發生局部崩塌，針對主要垂直承載之構件，應檢核不得喪失其垂直承載能力（軸向破壞）。



第四章 建築物生命週期成本分析相關資訊

4.1 概述

依 2.2 所述，考量地震風險的生命週期成本分析所需之相關資訊，包括建築物使用年限、地震危害度曲線、結構物易損性曲線、建築物建造成本、補強成本、折現率及地震損失估算等。除地震損失之估算外，其餘項目將於本章作簡要之說明並提供獲取其合理模式或數值之方法。

4.2 建築物生命週期

4.2.1 生命週期之意義

一般而言，建築物的生命週期，應自其規劃、設計、施工、使用，直到拆除廢棄之總時程，但是實務上用於估算生命週期成本時，通常以建築物的使用年限（或可包括施工期間）替代為生命週期。陳瑞鈴及林憲德[73]從四個角度來界定建築物生命週期：

1. 物理耐用年限（結構安全生命週期）：因長期使用導致建築物結構強度老化、安全堪虞，而需拆除重建的建築壽命。在經濟發展快速的國家，常因經濟活動而大量拆除重建建築物，使得許多建築物很難使用到真正結構安全的物理耐用年限。
2. 機能耐用年限（空間設備機能生命週期）：因活動空間、工作效率、舒適健康上之機能老化或不堪使用，而決定拆除的建築壽命。這種建築壽命，有時透過維護、更新、改建的手法即可延長，但有時因機能已不敷所需，即使結構安全無虞，但卻缺乏投資效益，就必須拆除重建。
3. 社會耐用年限（社會機能生命週期）：因都市計畫變更、交通變遷、居住人口變化、環境惡化、地價上漲、停車空間不足的社會因素，而需提前拆除重建

的建築壽命。社會耐用年限通常最短，卻是房地產市場上主導建築物拆除重建最具影響力的類型，也較符合建築物的實際耐用年限。

4. 稅法耐用年限（財稅法生命週期）：在財稅法上為了資產估價、銀行貸款、減稅償還等之估計，而規定的建築壽命。此類型的耐用年限，係為反應真正的物理耐用年限，因此通常比真正的社會耐用年限還長。

各國針對建築物使用年限相關規定，整理如表 4.2.1 所示。

4.2.2 建築物實際生命週期統計

事實上，建築物生命週期的統計，必須依據現有建築市場的屋齡分布、拆除建築物的屋齡分布，才能精確統計出來，但大部分國家均缺乏這類龐大的房屋資料，因此很難正確統計出建築物的生命週期。有關建築物實際壽命的調查與推估，崔竣榮等[74]估計日本 K 市公有建築物的平均壽命介於 35 至 38 年之間；野城智也等[75]統計東京都鋼筋混凝土造及鋼骨造辦公建築的平均壽命分別約為 38 年及 29 年；小松幸夫[76]推估日本鋼筋混凝土造普通住宅、集合住宅及辦公建築物的平均使用壽命分別為 40.6、38.9 及 34.8 年，鋼骨造集合住宅及辦公建築物的平均使用壽命分別為 28.9 及 29.1 年。因此日本在建築物生命週期分析中，對於非木造住宅，通常採取 40 年之評估，對於辦公建築物，則採用 35 年來評估[73]。不過 1960 年代以後，日本因為建築技術工法的革新，使得新建公有建築物的建築生命週期，已可由 30 餘年提升至 57 年左右[77]。

而臺灣建築物的使用年限，文獻[73]曾調查臺北、臺中、高雄及臺南各都會區於 1981 至 2001 年間拆除之建築物使用年限資料，得到各構造、用途建築物之整體平均拆除年限約為 23.2 年，並以日本對於建築物平均使用壽命推估常採用的殘存率預測法[76]，預測臺灣地區的建築物平均使用壽命應該介於 30 至 40 年之間。

至於歐美國家的住宅壽命，則遠較臺灣及日本的住宅壽命長，根據文獻[78]顯示，英國為 140 年，美國為 103 年（1991 年），德國約為 80 年（1987 年）。

此現象說明了人口遷徙、經濟發展與社會變動的安定度，影響住宅的重建速度甚鉅。也就是說，歐美社會並不一味追求高度經濟成長，所以其住宅需求量變動較穩定，致其平均住宅壽命較接近其物理耐用年限，是較永續的房屋政策。反之，臺灣及日本，因人口大量移動、土地使用變動大、不動產更動頻繁，造成大部分的建築物均未達物理耐用年限即被大量拆除重建，以致建築物生命週期嚴重偏低，也造成不當的地球資源浪費。再者，歐美的法律對於土地與建築物採取統一處理方式，建築物並無獨立的所有權，所謂不動產，就是土地與建築物一體的產權，因此較不會產生不動產的炒作行為；而東方人對於不動產的消費觀念，如日本與臺灣的法律，允許土地與建築物分開登記與買賣，並把建築物僅視為年限償還的資產，喜好囤積與炒作房地產，對住宅的耐久意識相差甚遠，更是助長建築物生命週期偏低的因素[73]。

4.2.3 ISO 15686 建築物使用年限定義

為了推動國際間統一的規格認證，ISO 15686[79]對於建築物及結構物的使用年限相關名詞定義如下，並已被世界各國廣泛引用，而各名詞間之差異可參考圖4.2.1：

1. 使用年限 (Service Life)：在建築物 (結構物) 安置後，結構物全部或一部到達或超過性能上必要條件的期間。
2. 參考使用年限 (Reference Service Life)：建築物 (結構物) 全部或一部，將期待或預測其具有使用情況方面的確信、參考使用年限。
3. 估計使用年限 (Estimated Service Life)：建築物 (結構物) 全部或一部，將期待其具有經由調整參考材料、設計、環境、使用性與維修等項目的一組明確使用情況，所估計的使用年限。
4. 設計使用年限 (Design Service Life)：設計者預期、要求的使用年限。
5. 預測使用年限 (Predicted Service Life)：依據紀錄性能超過時間所預知的使用年

限。

6. 預示使用年限 (Forecast Service Life) : 由預測或估計使用年限所建立的使用年限。

7. 剩餘使用年限 (Residual Service Life) : 在考慮動機的明確時間點上, 所剩餘的使用年限。

4.3 地震危害度曲線

4.3.1 地震危害度曲線之意義

地震危害度曲線 (Seismic Hazard Curve), 係表示某工址之地表振動程度與其發生機率的關係。由地震危害度曲線可以獲得某工址於某特定地震參數 (如 PGA、PGV、PGD 等) 的年發生機率, 該危害度曲線由地震危害度分析求得, 並以某地震參數與其年超越機率 (回歸期之倒數) 之關係呈現, 本文係選定最大地表加速度 (PGA) 作為地震危害度曲線的地震參數。

4.3.2 地震危害度分析

由於地震有地域性的差異, 因此每一個工址上其結構物在設計使用期限內, 地震發生或致災的機率都不相同。地震危害度分析須考慮工址周圍約 200 公里以內過去發生地震之規模、震央、震源深度以及活動斷層之地震規模潛勢, 並利用地震水平地表加速度以及結構水平譜加速度, 隨距離、地震規模變化之衰減律及其他地體構造等資料, 經複雜的或然率理論分析而得[9]。傳統上, 地震危害度分析可分為定值法地震危害度分析 (Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA) 與機率法地震危害度分析 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)。對於高風險工程的設計, 多同時進行此二種分析方法, 並就分析之結果相互驗證, 以增進結構的可靠度並確保其安全。

定值法地震危害度分析乃是依以往的地震紀錄歸納之經驗公式法則, 判斷地

震的最大規模和發生地點，進而決定工址之尖峰地表加速度，多適用於鄰近活動斷層區域，直接評定特定活動斷層對工址的影響。分析時所需要的資料包括活動斷層（或強震區）參數、工址與活動斷層（或強震區）最短距離及地表振動衰減律等，經計算各活動斷層（或強震區）可能在工址造成的地表最大加速度，再由其中選取最大的地表最大加速度定為設計加速度，其分析步驟如圖 4.3.1(a)所示。

機率法地震危害度分析則是以統計學觀點來處理特定工址、特定時期內遭受地震作用所產生之尖峰地表加速度值大於某一定值之機率或回歸期。分析時需將震源效應（發震時間、地點、規模、次數）、路徑效應（衰減律）和局部土壤效應（放大係數）等不確定性因子以合適的機率模式描述，並串聯組合，得到工址任一最大地表振動加速度值的年超越機率，即危害度曲線。詳細的機率法地震危害度分析理論，可參考文獻[80-83]，但大致的分析步驟如圖 4.3.1(b)及下列所示：

1. 識別研究區域附近可能的震源分布，包括淺層地震震源、深層地震震源與活動斷層等，通常假設各區域震源和活動斷層的地震發生序列滿足穩態 Poisson 隨機程序，其年平均發生率固定。
2. 探討各震源之地震規模與再現率的關係，對於區域震源，通常採用 Gutenberg 及 Richter 於 1954 提出的關係式，以對數的線性函數來模擬；對於活動斷層，則須推估斷層活動的幾何特性、開裂模式、平均再現率、地震規模和距離上次發生錯動的時間等。
3. 選取地表振動衰減率，探討個別地震發生時對研究區域之地震潛勢的影響，臺灣地區常用的 PGA 衰減公式，包括 Campbell、Kanai、Joyner & Boore、Japan Rock Site 等模式。
4. 以機率統計等理論綜合計算各個潛在震源對研究區域之振動危害度而獲得地震危害度曲線。

4.3.3 地震危害度分析結果應用

機率法地震危害度分析的結果除以危害度曲線表示外，亦得以不同回歸期的震度分布圖表示，是許多地震工程在實務應用時的基礎，耐震設計規範所訂定的震區劃分和震區係數，即以地震危害度分析的結果為基礎所擬訂的。有關地震回歸期與超越機率之關係，可由下式表示：

$$P_R = \frac{1}{1 - e^{(1/T)\ln(1-P_{ET})}} \quad (4.3.1)$$

其中， P_R 為回歸期， P_{ET} 為 T 年使用期限內之超越機率。因此，以臺北盆地為例，因設計地震及最大考量地震之地表加速度，係分別由 50 年 10% 及 2% 超越機率之地震求得，所以可由地震危害度曲線中，回歸期 475 年及 2500 年（或年超越機率 1/475 及 1/2500）對應的數值獲得，即 0.24g 及 0.32g。

地震危害度分析過程繁雜，且地震危害度曲線之求取並非本文之重點，因此本文運用之地震危害度曲線，則以較簡單的方式，由建築物耐震設計規範[9]之震區係數反推求得。即假設該曲線為一指數型式[69]，並由規範二組 PGA 與其對應之回歸期資料，迴歸模擬之[212]。同樣以臺北盆地為例，利用（0.24g，475 年）及（0.32g，2500 年）二點，可求得其地震危害度曲線如圖 4.3.2 所示，因此，一年內地表加速度落於某相鄰區間的發生率便可知瞭。

4.4 建築物易損性曲線

4.4.1 建築物損害程度分類

為了計算建築物於地震中可能造成的損失，必須先獲知建築物的損害程度與發生機率，通常以結構可靠度理論為基礎呈現的易損性曲線（Fragility Curve）作為評估的依據。影響建築物損害程度的變數很多，且建築物受地震作用引致的損害程度應為連續函數[84]，但實務上難以連續函數來作應用[85]。故為簡化分析，一般常將建築物的結構系統和非結構構件的損害程度，分為無損害（ ds_1 ）、輕微損

害 (ds_2)、中度損害 (ds_3)、嚴重損害 (ds_4) 與完全損害 (ds_5) 等五種離散狀態，每一損害狀態均有定性或定量的描述[86,87]，亦有文獻將損害程度分為七類者[114,122]。

其中，輕微損害係指結構系統完好，非結構構件也無嚴重損害，僅需簡單修復或粉刷，修復費用在 5% 以下。中度損害係指結構系統仍完好或僅輕微受損，無須補強；但非結構構件損害嚴重，合理修復費用約在 5% 至 20% 之間。嚴重損害係指結構系統已遭受破壞，非經適當補強否則無法提供安全使用，修復費用在 20% 至 50% 之間。完全損害者，無法補強或費用超過重置成本的 50%。又以鋼筋混凝土構架填充磚牆之建築物為例，輕微結構損害時，填充磚牆產生極細的對角裂紋及偶發的水平裂紋，磚牆與構架介面亦出現裂縫。中度結構損害時，多數填充磚牆產生較大的對角與水平裂縫，部分梁柱接頭附近的磚牆碎裂，混凝土梁柱出現斜剪裂縫。嚴重結構損害時，大多數填充磚牆出現大型裂縫，局部磚體鬆動、掉落、凸出或倒塌，部分混凝土梁柱發生剪力破壞以致倒塌，結構體可能出現永久性側向變形。完全結構損害時，因全部的填充磚牆破壞與梁柱構件的非韌性破壞，導致結構體傾倒或接近倒塌[86]。以上五種損害狀態，可藉由四條易損性曲線來區隔與呈現，如圖 4.4.1 所示。

4.4.2 易損性曲線之定義

所謂易損性曲線，係為給定地震評估參數（如 PGA、譜位移或層間變位角等）下，建築物之結構系統或非結構構件處於某種損害狀態以上程度的機率，為一對數常態分布的累積曲線[86,87]。當建築物之某地震評估參數 $X=x$ 時，建築物達到或超越損害狀態 d_s 的機率可以下式表示：

$$P[DS \geq d_s | X = x] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{d_s}} \ln \left(\frac{x}{X_{d_s}} \right) \right] \quad (4.4.1)$$

其中，

x ：建築物某地震評估參數，為隨機變數，如 PGA 等。

\bar{X}_{d_s} ：建築物損害狀態為 d_s 時之該地震評估參數的中值。

β_{d_s} ：建築物損害狀態為 d_s 時之該地震評估參數的對數標準差。

Φ ：標準常態分布的機率累積函數。

當建築物之地震評估參數 $X=x$ 時，建築物在各損害狀態 d_s 的機率可表示為：

$$P[DS = d_s | X = x] = P[DS \geq d_s | X = x] - P[DS \geq d_{s+1} | X = x] \quad (4.4.2)$$

亦即，相鄰之易損性曲線的差值，代表建築物處於某損害狀態的機率。

以 PGA 作為建築物易損性曲線的地震評估參數時，無損害狀態即代表 PGA 在建築物降伏地表加速度以下者，完全損害代表 PGA 在建築物結構系統韌性用盡時之崩塌地表加速度以上者，並在降伏地表加速度與崩塌地表加速度之間平均內差兩點，即可得輕微損害、中度損害及嚴重損害之分布區間。亦即，如果輕微損害及完全損害狀態之易損性曲線的中值分別為 A_y 及 A_c 時，對應於中度損害及嚴重損害狀態之易損性曲線的中值 A_{d_3} 及 A_{d_4} ，則分別為[87,212]：

$$A_{d_3} = A_y + \frac{1}{3}(A_c - A_y) \quad (4.4.3)$$

$$A_{d_4} = A_y + \frac{2}{3}(A_c - A_y) \quad (4.4.4)$$

其離散程度並以對數標準差表示之。因此，由圖 4.4.1 可獲得在特定 PGA 下，建築物處於各損害狀態的機率。

4.4.3 建築物耐震能力

為了建立建築物結構系統的四條易損性曲線，必須先知悉建築物的耐震能力，如降伏地表加速度與崩塌地表加速度 (A_y 及 A_c)，以獲得結構系統無損害及完全損害狀態之易損性曲線的中值。

4.4.3.1 新建建築物設計耐震能力

以強度設計法從事之耐震設計，依其耐震設計目標及設計基底剪力[9]可知，當建築物遭遇最大考量地震時，尚不至崩塌，但結構系統韌性可以達到其韌性容量 R ，接近韌性用盡。所以建築物之耐震設計恰與耐震設計規範設計規定相同時，其崩塌地表加速度可視為：

$$A_c = 0.4S_{MS}I \text{ g} \quad (4.4.5)$$

至於降伏地表加速度，則可假設為下列各式之最大值：

1. 由設計地震換算

$$A_y = \frac{0.4S_{DS}I}{F_u} \text{ g} \quad (4.4.6)$$

2. 由最大考量地震換算

$$A_y = \frac{0.4S_{MS}I}{F_{uM}} \text{ g} \quad (4.4.7)$$

3. 由避免中小度地震降伏換算

(1) 一般工址與近斷層區域

$$A_y = \frac{0.4S_{DS}I}{4.2} \text{ g} \quad (4.4.8a)$$

(2) 臺北盆地

$$A_y = \frac{0.4S_{DS}I}{3.5} \text{ g} \quad (4.4.8b)$$

其中， F_u 及 F_{uM} 為設計地震及最大考量地震時之結構系統地震力折減係數，依下式計算：

$$F_u = \begin{cases} R_a & ; T \geq T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} + (R_a - \sqrt{2R_a - 1}) \times \frac{T - 0.6T_0^D}{0.4T_0^D} & ; 0.6T_0^D \leq T \leq T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} & ; 0.2T_0^D \leq T \leq 0.6T_0^D \\ \sqrt{2R_a - 1} + (\sqrt{2R_a - 1} - 1) \times \frac{T - 0.2T_0^D}{0.2T_0^D} & ; T \leq 0.2T_0^D \end{cases} \quad (4.4.9)$$

$$F_{uM} = \begin{cases} R & ; T \geq T_0^M \\ \sqrt{2R-1} + (R - \sqrt{2R-1}) \times \frac{T - 0.6T_0^M}{0.4T_0^M} & ; 0.6T_0^M \leq T \leq T_0^M \\ \sqrt{2R-1} & ; 0.2T_0^M \leq T \leq 0.6T_0^M \\ \sqrt{2R-1} + (\sqrt{2R-1} - 1) \times \frac{T - 0.2T_0^M}{0.2T_0^M} & ; T \leq 0.2T_0^M \end{cases} \quad (4.4.10)$$

其中， T_0^D 及 T_0^M 為設計及最大考量水平譜加速度係數短週期與中週期的分界點。

然而，當建築物進行耐震能力評估時（詳 4.4.3.2），建築物承受之垂直載重通常假設為全部靜載重與 1/2 活載重[69,88]，所以分析得之耐震能力，可能會超過前述方式計算之結果，且依據李文海等[89]以標準模型建築物按規範進行耐震設計，經耐震能力評估分析後，確有此情形。爰參照建築物耐震設計規範[9]對 α_y 之求法，試著求取此可能之放大因數 q 。以鋼筋混凝土結構而言，因必須進行強柱弱梁檢核，因此塑鉸會發生在梁端，所以計算以梁為準。供公眾使用之鋼筋混凝土建築物以強度設計法設計時，梁之標稱彎矩強度 M_n 須滿足下式：

$$1.2M_D + 1.0M_L + 1.0M_E = 0.9M_n \quad (4.4.11)$$

其中， M_D 、 M_L 及 M_E 分別為靜載重、全部活載重及地震力引致之彎矩。梁端開始降伏時應滿足下式：

$$M_D + 0.5M_L + qM_E = M_n \quad (4.4.12)$$

設 $M_D = mM_E$ ， $M_L = nM_E$ ，並假設材料強度有可能偏低，即(4.4.12)式的右側亦可寫為 $0.9M_n$ ，則：

$$m + 0.5n + q = 1.2m + n + 1 \quad (4.4.13)$$

故

$$q = 1 + 0.2m + 0.5n \quad (4.4.14)$$

q 值顯然同時與 m 、 n 有關。當 $m = n = 0.25$ 時， $q = 1.175$ ；當 $m = n = 0.5$ ， $q = 1.35$ ；當 m 、 n 更大時， q 隨之增大。因此，依(4.4.5)式至(4.4.8)式求得的 A_c 及 A_y ，似可同時放大 q 倍，茲為保守計，假設 $q = 1.3$ 。

4.4.3.2 鋼筋混凝土建築物之耐震能力評估法

新建建築物可能因為超額的安全設計，使得其耐震能力通常會大於法規要求的最低標準；而既有建築物，可能因為過去建築技術或耐震設計法規的考量因素不足、結構系統配置不規則或缺陷、材料強度老化、結構構件損壞劣化、偷工減料、不當使用（增修建、加蓋、違建、夾層、提高使用載重或更改結構主構件等）等因素，而無法輕易知悉其現有耐震能力。因此，必須藉由詳細地實地調查，搭配公認的學理發展之耐震能力評估方法進行評估，才能獲知新建建築物或既有建築物實際的耐震能力。

一般建築物在大地震侵襲時會產生大於降伏變位的變形，而須進行非線性行為之分析。然而，過去國內普遍採用的鋼筋混凝土建築結構耐震能力評估方法，係為強度韌性法[69]，即以結構彈性地震分析所得之結果，依構件尺寸及配筋，推算構材之強度、破壞模式及對應的韌性容量，加總得各樓層之強度並推算對應之降伏地表加速度 $A_{y,i}$ ，再加權各構材破壞模式之韌性容量，據以計算結構系統地震力折減係數 $F_{u,i}$ ，即得該樓層的耐震能力（破壞時對應的地表加速度） $A_{c,i} = A_{y,i} \times F_{u,i}$ ，間接求取結構物非線性行為，最後以各樓層的最小值，為該建築物的耐震能力（崩塌地表加速度）。此方法雖為工程師提供一種避免非線性分析的簡化概念和方法，但其假設所有構件同時達到極限強度恐有誤判樓層強度之虞，且亦無法準確掌握結構物真正的非線性特性與各樓層間的相互影響。

而以結構性能為基準的耐震能力評估方法，則直接著重於結構物非線性行為的分析，透過結構構件塑性鉸的模擬，如 ATC-40[56]、FEMA 273/274[54,55]、SERC[90]、NCEE[88]等建議的塑性鉸特性與參數，可充分獲得結構物彈、塑性階段的結構性能，已成為目前耐震工程設計分析發展的主流，其主要包括非線性靜態側推分析法及非線性動態歷時分析法等。

非線性動態歷時分析是將地震波按時段進行數值化後，輸入結構體系的振動

微分方程，採用逐步積分法進行結構彈塑性動力反應分析，計算出結構在整個強震時域中的振動狀態全過程，給出各個時刻各層間的內力和變形，是非線性分析法中最可靠的分析方法，但具有分析過程過於繁複、程式運算耗時過久之缺點。

非線性靜態側推分析則是藉由施加垂直載重與合乎地震力分配模式的側力於結構物上，隨著力量逐步增加，記錄構件開裂、降伏、塑性變形和結構失敗等發展，依各不同受力階段之結構行為，修正構材有效勁度與不平衡力，直到塑性鉸發展至崩塌機構或達極限塑性變形為止。相較於非線性動態歷時分析，非線性靜態側推分析較能清楚提供結構物在各階段的受力與變形行為，也因此較受工程師所樂用。

至於建築物之耐震能力，則以 ATC-40[56]建議之容量震譜法（Capacity Spectrum Method）或改良法[211]求取。以改良式容量震譜法為例，可分為下列步驟：

1. 以側推分析求得建築物之容量曲線，即建築物基底剪力 V 與頂層位移 Δ_{roof} 之關係曲線。
2. 將建築物之容量曲線轉換為容量譜曲線，即譜加速度 S_a 與譜位移 S_d 之關係曲線，如圖 4.4.2 所示，可由下列公式轉換之：

$$S_a = \frac{V}{\alpha_1 W} \quad (4.4.15)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{roof}} \quad (4.4.16)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_i) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N w_i / g \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_i^2) / g \right]} \quad (4.4.17)$$

$$PF_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_i) / g \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_i^2) / g \right]} \quad (4.4.18)$$

其中， W 為建築物的總重量， α_1 為第一振態的振態質量係數， PF_1 為第一個振

態的振態參與因子， ϕ_{roof} 為第一振態在頂層之振幅， ϕ_i 為第一振態在第 i 層之振幅， w_i/g 為第 i 層的質量， N 為建築物的樓層數， g 為重力加速度。

3. 計算容量譜曲線上任一性能點 (d_{pi} , a_{pi}) 之有效週期 T_e 與等值阻尼比 β_{eff} :

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{d_{pi}}{a_{pi} \times g}} \quad (4.4.19)$$

$$\beta_{eff} = \beta_{basic} + \kappa\beta_0 = 0.05 + \kappa \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} = 0.05 + \kappa \frac{0.637(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4.4.20)$$

其中， β_{basic} 為結構物固有阻尼比， β_0 為結構降伏後遲滯行為所產生之等效黏滯阻尼比， κ 為阻尼修正因子[56]， a_y 及 d_y 分別為降伏時之譜加速度與譜位移，

$E_D = 4(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})$ 為遲滯圈一周次消散的能量， $E_{S0} = \frac{a_{pi} d_{pi}}{2}$ 為性能點對應之彈性能。

4. 計算阻尼比異於 5% 之加速度反應譜係數：等值阻尼比能擔負消散地震能量的功用，其作用有如折減彈性反應譜至非彈性反應譜，爰依據性能點之等值阻尼比，將短週期與中長週期之阻尼比 5% 之加速度反應譜係數除以阻尼修正係數 B_s 與 B_1 [9]，即 S_{DS} 與 S_{D1} 修正成 S_{DS}/B_s 與 S_{D1}/B_1 。

5. 求取性能點之地表加速度（如圖 4.4.3），並判定該性能點在此地震需求下建築物是否能達成其性能目標。而性能點對應之地表加速度依下式計算：

$$PGA_{pi} = \frac{a_{pi}}{S_{aD}^n(T_e, \beta_{eff})} \quad (4.4.21)$$

其中， $S_{aD}^n(T_e, \beta_{eff}) = \frac{S_{aD}(T_e, \beta_{eff})}{0.4S_{DS}}$ 為工址正規化設計地震加速度反應譜係數，即

(1) 一般工址與近斷層區域

$$S_{aD}^n = \begin{cases} 1 + \left(\frac{2.5}{B_s} - 1\right) \frac{T_e}{0.2T_0} & ; T_e \leq 0.2T_0 \\ \frac{2.5}{B_s} & ; 0.2T_0 < T_e \leq T_0 \\ \frac{2.5S_{D1}}{B_1 S_{DS} T_e} & ; T_0 < T_e \end{cases} \quad (4.4.22a)$$

其中， $T_0 = \frac{S_{D1} B_s}{S_{DS} B_1}$ 。

(2) 臺北盆地

$$S_{ad}^n = \begin{cases} 1 + \left(\frac{2.5}{B_s} - 1\right) \frac{T_e}{0.2T_0} & ; T_e \leq 0.2T_0 \\ \frac{2.5}{B_s} & ; 0.2T_0 < T_e \leq T_0 \\ \frac{2.5T_0^D}{B_1 T_e} & ; T_0 < T_e \end{cases} \quad (4.4.22b)$$

其中， $T_0 = \frac{T_0^D B_s}{B_1}$ 。

此外，FEMA 273 也提出四種方法評估結構物是否可達到要求的耐震功能，包括線性靜力 (LSP)、線性動力 (LDP)、非線性靜力 (NSP) 及非線性動力 (NDP)，各種方法的理論與程序，可參閱文獻[54]。

4.4.3.3 既有消防廳舍耐震能力

消防廳舍因建造年代不同，結構型態也有差異，可能有鋼筋混凝土造、鋼構造或鋼骨鋼筋混凝土造。典型消防廳舍以鋼筋混凝土結構為主，樓層數在五層樓以下，一樓為消防車庫，其他樓層則為辦公室、值班（備勤）室或宿舍等用途。依據規範規定，消防廳舍的耐震能力必須高於一般的建築物，但為爭取災害搶救之時效，發揮救災之功能，消防廳舍必須保持動線暢通無阻，其結構系統具有獨特性（如圖 4.4.4 所示），可能導致某些耐震弱點，而降低其耐震能力[91]。因此在 921 地震中，全臺消防廳舍計有全倒 6 棟，危險 13 棟，需注意 75 棟[11]，就不足為奇了。此外，2006 年 4 月 1 日的臺東地震，測得之最大地表加速度為 382gal，也造成臺東縣消防局大樓結構體嚴重受損（如圖 4.4.5 所示），而必須拆除重建[92]。

一般而言，消防廳舍的結構系統特點如下：

1. 一樓挑高（軟層）。
2. 一樓之牆量較少（弱層）。

3. 兩方向耐震強度差異（沿街方向牆量通常少於垂直街道方向，且柱斷面也多以垂直街道方向為強軸，造成建築物在沿街方向為弱軸）。

4. 懸臂結構系統。

5. 平面不對稱（一樓前面無牆，但後面有牆，易產生額外扭矩）。

依據臺北市政府委託辦理之所屬消防廳舍耐震能力評估資料，列管之 1997 年 4 月 30 日以前設計建造者計 28 件，經初步評估屬有疑慮以上者計 18 件，其中 17 件以強度韌性評估法評估其耐震能力，發現 14 件有耐震能力不足之情形[93]。本文分析該 17 件消防廳舍，得其平均之降伏地表加速度為 0.136g，崩塌地表加速度為 0.242g，約僅為規範規定值（ $A_{g,2500} \times I = 0.32g \times 1.5 = 0.48g$ ）的一半（ $A_{g,2500}$ 為工址回歸期 2500 年之地震地表加速度），降伏地表加速度及崩塌地表加速度之對數值的標準差分別為 0.650 及 0.687，結構系統韌性容量 R 約為 2.08，而平均之已過使用年限將近 30 年，如表 4.4.1 及圖 4.4.6 所示。

4.5 建築物建造成本

4.5.1 建築物建造成本估算

建築物的直接建造（工程）成本，一般包括大地工程、結構工程、裝修工程、門窗工程、設備工程（水電、消防、空調、電梯）、防水隔熱工程、景觀工程、雜項工程等費用，裝潢費、環保安衛費、品管費、營造商稅捐、利潤與管理費等[94]。各級政府為利所屬機關編列預算，分別訂有建築工程相關經費估算標準，區分不同構造、規模、用途等，就整體建築物建造成本[94-98,101]或結構體與相關設施分列之建造成本[99,100]訂定標準，保險公會亦就住宅類建築訂定造價參考表[102]，以鋼筋混凝土建築物為例，整理如表 4.5.1 至表 4.5.5 所示。應用時，應考慮不同時期之物價調整。至於各分項工程費占全體直接工程成本之比例，可參閱王儀婷[103]彙整各文獻之統計資料，如表 4.5.6 所示。Goda 等[47]亦提及，結構系統建造

成本約占全體工程成本的 20% 至 33%。

4.5.2 結構系統建造成本與耐震能力之關係

建築物結構系統的建造成本與建築方案內容、工址地質條件、地震分區、結構材料、結構系統、配置及採用的設計規範等息息相關，當然，該建造成本將隨著其設計耐震能力的提升而提高，神田順等[104]指出，當建築物的耐震能力提高至 1.25 倍時，結構系統的建造成本將提高 4% 至 10%，當耐震能力提高至 1.5 倍時，建造成本則將提高 13% 至 18%。至於二者間的數學關係，亦有許多文獻提出估算公式：

1. Ang 及 De Leon[44](墨西哥)將提升耐震能力之成本以結構可靠度的函數呈現：

$$C_u = C_i \times \left(\exp \left\{ k_1 \left[1 - \left(\frac{p_f}{p_{f_0}} \right)^{k_2} \right] \right\} - 1 \right) \quad (4.5.1)$$

其中， C_u 為提升耐震能力之成本， C_i 為原始結構系統成本， p_{f_0} 及 p_f 分別為耐震能力提升前後之結構損壞（失敗）機率（Damage/Failure Probability）， k_1 及 k_2 為常數，可由過去修復補強經驗求得。

2. García-Pérez[10,105](墨西哥)將結構系統建造成本 u 以基底剪力係數 (Base Shear Coefficient) c 的關係式呈現：

$$u = \begin{cases} C & ; c < c_0 \\ \left[1 + \alpha_2 (c - c_0)^{\alpha_3} \right] C & ; c \geq c_0 \end{cases} \quad (4.5.2)$$

其中， c_0 及 C 分別為結構無須抵抗地震力之基底剪力係數與建造成本， α_2 及 α_3 由建築物高度及地質條件決定，其值均大於 0。

3. Goda 等[47](加拿大)以結構系統建造成本 C_{ST} 與基底剪力係數 C_s 的關係式呈現：

$$C_{ST} = C_{ST0} \times \max \left[1, 1 + c_1 (C_s - c_2)^{c_3} \right] \quad (4.5.3)$$

其中， C_{ST0} 為基底剪力係數為 c_2 時之結構系統建造成本， c_1 、 c_2 、 c_3 為模型參數，

各參數可能的範圍約是 1~10、0.05~0.15、1.0~1.2。

4. 日本建設省「新建築構造體系の開發報告書」[106]提到，若基底剪力係數介於 0.1 至 0.5 之間，則建造成本 C_0 與基底剪力係數之關係略呈線性比例：

$$C_0 = \frac{C_{00}}{5} \left(\frac{R_u}{R_0} + 4 \right) \quad (4.5.4)$$

其中， C_{00} 為依現行規範最低要求設計所需要的建造成本， R_0 為現行規範規定之最低基底剪力強度， R_u 為實際設計基底剪力強度，則 $\frac{R_u}{R_0}$ 可視為用途係數。

參照我國現行建築物耐震設計規範之理念，本文選用「新建築構造體系の開發報告書」建議之(4.5.4)式作為建造成本與耐震能力的關係式。

4.6 建築物耐震補強成本

4.6.1 耐震補強概述

所謂耐震補強，即是針對耐震能力不足的建築物，做最適當的整體加勁或構件修補，以提高結構體的強度、韌性並防止過大變形，使之符合現行最新的規範。目前既有建築物耐震補強採取的方式大致可分為：(1)結構構件補強、(2)結構系統調整與改善、(3)輸入地震力減少等三大類。就結構補強原理而言，對各結構構件加以補強，多少皆可提升總體結構之強度，但其補強成本卻極不經濟，所以在實際應用上，往往為結構系統與結構構件之補強方式配合使用，以達到最佳的補強功效與經濟性。

建築物的耐震補強大致可分為下列方式[107]：

1. 建築物結構構件補強

(1) RC 梁補強：擴大既有梁斷面尺寸，或於梁兩側及下緣貼覆鋼板等。

(2) RC 柱補強：擴大既有柱斷面尺寸、既有柱包覆鋼板、鋼絲網、複合材料、鋼板箍圍束，或增設翼牆。

(3)壁體補強：既有牆加厚、增設耐震 RC 壁或包覆碳纖布。

(4)改善柱可變形長度：拆除連結於柱上端之垂壁與連結於柱下端之窗台，或設置隔離縫。

2.建築物結構系統調整與改善

(1)增設耐力構架：既存建築物外側新設扶壁或含斜撐之構架。

(2)增設翼牆：既存柱兩側加設 RC 翼牆，或將原翼牆加厚。

(3)壁體補強：既有構架中增設耐震壁或加厚原耐震壁，增設 PC 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)基礎補強：配合其他結構系統補強進行基礎地盤改良、增設連續壁或群樁、及基樁本體補強。

3.建築物輸入地震力減少

(1)減輕重量：移去屋頂水塔及非抗震壁體、減少高層部分規模、改用輕型構材。

(2)增設制震裝置。

(3)增設隔震裝置。



4.6.2 耐震補強成本估算

相較於建築物新建成本，既有建築物之耐震補強成本較難預估。FEMA 228[108]指出，耐震補強成本依建築物結構材料與結構系統型式、建築物特徵（高度、配置、基礎尺寸等）及建築物現況（原施工品質與維護情形）等之不同而異。此外，耐震補強係採結構構件補強、結構系統調整改善、被動消能及隔減震系統之應用，或不同的補強材料等，對於補強成本之估算更是大相逕庭。耐震補強工程成本，主要包括結構體補強、非結構構件補強、原有建築構件拆除與復原、既有受損構件之修復等費用。其中結構體的補強費用，視補強的強度而定；而非結構構件補強只能減低其墜落之風險，其補強費用與補強的強度較無關[42,109]。

為了獲得建築物結構體的補強費用與補強強度之關係，本文以臺北市政府委

託辦理之所屬消防廳舍耐震能力評估與初步補強設計資料[93]，如表 4.6.1 所示(補強方案多為鋼筋混凝土剪力牆或鋼框架斜撐)，進行統計分析，並考量建築物二主軸方向之補強程度與其交互影響效應，爰以建築物補強後二主軸方向之耐震能力增量比之和與結構體補強費用比作迴歸(圖 4.6.1)，獲得下列關係式：

$$\frac{\Delta C_s}{C_{s0}} = 0.1266 \times \left[\left(\frac{\Delta A_c}{A_{c0}} \right)_x + \left(\frac{\Delta A_c}{A_{c0}} \right)_y \right] \quad (4.6.1)$$

其中， C_{s0} 為既有建築物補強前之結構體建造費用， ΔC_s 為結構體補強費用， A_{c0} 為既有建築物補強前某主軸方向之耐震能力， ΔA_c 補強後建築物某主軸方向之耐震能力增量。另外，補強後的結構系統平均韌性容量 R 約提升至 2.6。

而整體建築物的補強工程成本估算，除了依(4.6.1)式得到的結構體補強費用外，亦應包括原有建築構件打除與裝修、設備等之復原費用，爰參考「高中職及國中小校舍結構耐震能力補強設計作業規範」[110]之規定，後者之費用不得超過二者合計的 30%，因此換算成整體補強工程成本，約為結構體補強費用的 1.43 倍。至於其他非結構構件之補強及既有受損構件之修復(如縫灌注環氧樹脂、敲除鬆動混凝土再灌以樹脂砂漿修復、局部構件敲除重做或陰極防蝕工法等，維持結構物之現有強度，避免繼續劣化之措施)費用，因個案考量不同，爰不予計入。

4.7 折現率

4.7.1 折現率之意義

生命週期成本分析中，各項成本之現金流量是發生在許多不同的時間點，為了避免分析偏誤，必須考量社會與經濟狀況後，決定適當的折現因子，將不同時間點之所有可貨幣化的成本與效益，轉換至相同的時間價值上再進行評估，該折現因子，稱為折現率(Discount Rate)。折現率代表投資者貨幣的時間價值，也就是透過折現率，讓投資者區分不同時間點之投資金錢支出與回收的差異，在生命週期成本計算時，可幫助投資者將不同時間點之支出與收入以相同的時間價值作為

比較的基礎[29,111]。若是運用於制定投資決策，折現率可視為投資計畫投入之資金在資本市場中對等投資機會的預期報酬率，折現率即為資金機會成本[112]。

4.7.2 折現率選擇

折現率的決定應以資金的最有效運用之利率作為基準，其隱含了機會成本及通貨膨脹率之觀念，以投資者策略及其他資金替代方案為依據。公共建設計畫之折現率的取決，影響生命週期成本與方案比較之結果甚鉅，但其選擇尚無一定準則，目前常引用政府借款利率、社會機會成本率、同類活動民營企業內部報酬率等[113]。此外，以資本結構中不同資金來源之比重予以加權所得之加權平均資金成本（Weighted Average Cost of Capital, WACC），亦可視為公共建設計畫財務評估中折現率之適切估計方法[112]。

FEMA 227[114]建議合理的折現率，政府投資之建設為 3% 至 4%，私部門投資者，則為 4% 至 6%。美國的工程建設，大多將折現率設定為 4.5% 至 10%；加拿大依照各地經濟情況與利率之不同，一般選用折現率為 2% 至 10%；歐洲各國用於公共建設投資效益及成本分析之折現率，通常為 5% 至 8%；日本預估橋梁生命週期成本之折現率採 4%，橋材選擇時採 8%[111]。而我國交通建設計畫評估之折現率統一採用 6%，部分公共建設之經濟效益分析採用的折現率，則以 10 年期公債之殖利率為標準，但臺灣 10 年期公債殖利率由 2004 年中約 2.95% 下滑至 2012 年 2 月僅約 1.29%，30 年期公債殖利率約 1.82%，相較於美國 10 年期公債殖利率約 2%（30 年期公債殖利率約 3.1%）及英國 10 年期公債殖利率 3.75%，皆明顯偏低[112,113,115,116]。此外，文獻[112]將公共建設分為社會經濟效益型、社會企業型及公益事業型，並分別建議其折現率，如表 4.7.1 所示。

第五章 建築物地震損失評估

5.1 地震損失概述

5.1.1 重大地震損失經驗

近年來世界各地地震災情不斷，強烈地震導致大規模的人員傷亡、建築物倒塌、交通設施及維生管線破壞，以及難以估計的地震延伸災害引致的損失，對於國家經濟與人民生活造成莫大的影響。雖然已知地震的可能危害並投入防災的規劃與整備工作，但是大地震來襲時，即使是科技先進國家，也是難以倖免於難。

除了第一章提及2011年日本東北地方地震及1999年臺灣921集集地震的地震災情與損失外，1989年美國Loma Prieta地震，芮氏規模6.9，造成至少68人死亡，3,757人受傷，1.2萬棟建築物毀損，2,600間企業受影響，財物損失達100億美元，成為當時美國史上經濟損失最嚴重的天災。1994年加州北嶺（Northridge）地震，芮氏規模6.8，造成超過61人死亡，8,700人受傷，房屋毀損11.4萬棟，財物損失440億美元，約占GDP之0.7%，再次刷新美國天然災害損失的紀錄。1995年日本阪神地震，芮氏規模7.2，造成6,430人死亡，4.3萬餘人受傷，災民32萬人，占其全國總人口的0.3%，房屋毀損25萬棟，道路損壞10,069處，橋梁受損320處，瓦斯、水電管線中斷，多處列車出軌，財物損失達1,000億美元，約占GDP的2%，仍是目前全球非複合性震災中，經濟損失最慘重的一場地震。此外，2008年中國汶川地震，芮氏規模8.0，造成84,000人死亡或失蹤，37萬餘人受傷，約21.6萬間房屋倒塌，直接經濟損失高達8,451億元人民幣，中國政府預計於3年內投入1萬億元人民幣進行災區重建工作[1,2,117]。這些歷史的經驗告訴我們，除了應對大自然之力量保持敬畏之心外，更應加強自身的憂患意識與風險管理觀念，期藉由平時採取的風險管理策略，將災害發生時的衝擊降至最低。

5.1.2 地震災害損失評估系統

為了有效評估地震潛在的危險程度與可能引致的災難和損失，位於高地震風險區域的國家，相繼發展地震災害損失評估系統，透過地震災害的境況模擬，大量應用於震災早期評估、耐震規範與耐震評估補強效益評估、地震保險、土地使用管制、災害防救計畫與風險管理策略上，藉以減低地震對社會與經濟的衝擊。

1. 日本地震災害損失評估系統

(1) 簡易型地震災害模擬系統

日本在阪神大地震後更積極發展地震推估系統，主要應用於短時間內之救災工作調配，許多不同推估公式及呈現方式的簡易型地震災害模擬系統被發展出來，國土廳及消防研究所開發之系統均被廣為使用。其評估流程是將震源以點、線及斷層面等模式輸入後，可計算出震度分布，並由統計資料與經驗公式獲得建築物損壞數量、傷亡人數等基本災情資料。[118]

(2) 東京都地震災害評估系統

東京都地震災害評估系統係結合災害風險潛勢分析系統與地理資訊系統（GIS）之應用，其中較著名者為Uitto[119]所發展。評估架構包括建物風險、火災風險、人命風險與避難風險之評估等四類，如圖5.1.1所示。該系統是依據都會區地震災害風險與災感度特質而設計，特別是針對東京都所特有的地震引發住宅大規模火災延燒模式、日間與夜間避難人口分布、避難與庇護風險及規劃支援系統等特質。

2. 美國地震災害損失評估系統

美國聯邦緊急事務管理總署（FEMA）於1997年利用國家地震減災計畫，委託Risk Management Solution（RMS）公司完成HAZUS-97地震災害評估決策支援系統，目前已有更新之HAZUS-99（更新公共設施地震損害風險評估模型）及HAZUS-MH（納入洪水及颶風災害）等版本。FEMA開發HAZUS之緣起，主要作為區域地震防救災之處理與相關計畫擬定之依據，並推展為全國性之地震災

害損失評估工具。

HAZUS含括地震災害損失評估與境況模擬所需的各項分析功能，如圖5.1.2所示，其系統架構分為6個主要獨立模組：自然災害潛勢、基本資料庫、直接實質損壞、間接實質損壞、直接社會經濟損失及間接社會經濟損失。由使用者選擇評估區域，定義模擬地震的規模和震源參數，即可推估地震引致的地表振動強度和土壤液化程度，進而評估工程結構物（建築物、重要設施、交通系統與維生管線）遭受不同損害程度的機率和可能的經濟損失與對社會的衝擊（人員傷亡、臨時避難所需求、建築物、重要設施、交通系統及維生管線的震後功能喪失預測及引致的直接與間接經濟損失），並估計可能引發之洪水（壩堤破壞、海嘯、湖嘯）、火災延燒（消防車及消防水源需求）、土石廢棄物與有害物質溢散等，如表5.1.1所示。[86]

3. 臺灣地震災害損失評估系統

(1) HAZ-Taiwan系統

為建立臺灣本土性地震災害決策支援系統，1998年行政院國家科學委員會和經濟部技術處合作引進美國HAZUS-97相關核心技術，委託RMS仿照HAZUS的分析架構，參酌些許本土化資料和分析模式與參數（如臺灣之地震、地質、社會經濟發展、建築與人口密度等特性），於2000年改良開發為一套適用於臺灣地區的地震災害損失評估系統，並定名為HAZ-Taiwan。[120]

(2) 簡易型地震災害模擬系統

自從引進美國HAZUS-97系統後，國內學界與政府部門即進行本土性資料調查與研究，如地盤分類、地震震源與加速度關係、日夜間人口估計、避難行為分析及震後火災等研究與調查。然此龐大資料庫不易在短期內完成，爰由內政部消防署委託國立臺北科技大學土木與防災研究所張寬勇教授，參考日本簡易型地震災害模擬系統之架構，以921地震的災損資料及國家型防災辦公室、國家地震工程研究中心的技術與成果，發展簡易型之地震災害預測系

統，對於地震後的建築物損壞、人員傷亡、火災及避難人口等，提供簡單災害預測模式，在HAZ-Taiwan尚未普及前，作為地震災害境況模擬之參考。[118]

(3)整合性多目標地震風險評估系統

國立中央大學許文科博士於2000年考量地震風險之特性及來源，整合相關地震危害度分析及保險財務分析模式，建立一整合性多目標地震風險評估系統IMOSHA (Integrated Multi-Objective Seismic Hazard Assessment)，依不同使用需求，提供地震危害度分析、建築物地震損害評估、地震損失及保險財務分析等地震風險評估模組與資訊，作為選取適當地震風險管理策略之依據[121]。該系統於2005年蛻變為商用軟體「組合地震風險評估系統RiskTracer-EQ Portfolio」，主要應用於產險業。

(4)TELES系統

雖然已建置一套本土化的地震損失評估系統HAZ-Taiwan，然而隨著使用需求和功能增加，及考量維護的便利性，國家地震工程研究中心爰著手研發新一代的震災境況模擬軟體，即「臺灣地震損失評估系統 (Taiwan Earthquake Loss Estimation System, TELES)」。除了提供更方便的使用者介面、可客製化的資料分類系統、更有效率的模擬技術外，並結合地理資訊系統 (GIS) 技術，提供震災境況模擬、震災早期評估以及震災風險評估等三大功能。

TELES 的分析流程與架構可見圖 5.1.3，除少部分更動外，大部分皆與HAZUS 相同，但其分析模式或參數值皆依臺灣地區的基本資料和集集地震的災情調查資料加以修訂或校正，經過本土化並改善 HAZ-Taiwan 的缺點，使震災境況模擬的結果能反應真實的狀況。TELES 系統大致分為地震災害潛勢分析模組、工程結構物損害評估模組、地震引致二次災害評估模組和社會經濟損失評估模組等。為提高實用性，各分析模組所用的參數值與資料庫內容，可隨使用者經費與人力多寡提供不同程度的分析精度。

由 TELES 模擬的結果，可提供各級政府研擬防震減災的對策，如規劃救災人員與機具數量、醫療設施及病床數、臨時避難所的數量與分布、民生必需品的庫存及調度機制、自來水、瓦斯和電力系統的緊急搶修策略及人力物料調度等。透過早期損失評估模組，在震後可提供即時的災損推估數據，作為緊急應變的決策參考。結合地震危害度分析理論，可推估不同地區或設施所承受的地震風險，協助擬訂合理的地震保險費率或耐震補強策略等。[87]

5.2 建築物地震損失推估

有關建築物地震損失的項目，通常考量建築物結構系統及非結構構件的修復費用、內部財產及庫存品之損失[42-45,47,48,86,87,106,123,141]、設備損失[106,141]、搬遷損失[42,43,47,86,87]、營業收入及租金損失[42-45,47,48,86,87]、建築物機能中斷損失[106,141]、間接經濟損失[86]、人員受傷及死亡損失[42-45,47,48,106,123,141]等，其中人員受傷損失，亦有考量輕傷、重傷[42,48]及精神損失[141]等情況。

本文參考上開文獻，將地震損失分為直接經濟損失與間接經濟損失二類。其中，直接經濟損失係指建築物因地震受損引致的建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡之工資損失、建築廢棄物處理費及搬遷損失等；間接經濟損失則指建築物受損導致建築物服務功能中斷，所造成的損失，就消防廳舍而言，係考慮額外火災損失及額外人命損失。

5.2.1 建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失

建築物修復費用包括結構系統如梁、柱、版、牆及斜撐等，及非結構構件如天花板、隔間、機電設備、管線、樓梯、電梯、裝潢等，因地震受損所需要的修復與置換費用。內部財產係指家具、擺飾、櫥櫃、桌椅、電腦等設備，對於消防廳舍則應含括相關救災、通訊設備及器材，在地震中可能因滑動、翻倒或受掉落

之殘骸影響而破壞。此外，消防廳舍內均停放昂貴的消防車輛，當建築物受損產生大型墜落物或倒塌時，消防車輛勢必會受損壞。

關於建築物處於某損害狀態時的修復費用，許多文獻提出估算方法：

1. Ang及De Leon[44]建議當損壞係數（損壞率）的中值在50%以下時，修復費用 c_r 約正比於建造成本 C_i 與損壞係數的中值 d （建築物未受損害時 $d=0$ ，倒塌時 $d=1$ ），但損壞係數中值超過0.5時，修復費用幾乎等於建造成本，即：

$$c_r = \begin{cases} 1.64C_i d & ;d \leq 0.5 \\ C_i & ;d > 0.5 \end{cases} \quad (5.2.1)$$

2. 日本建設省「新建築構造體系の開發報告書」[106]的建議類似Ang及De Leon的方法，但當損壞係數超過0.5時，除修復費用幾乎等於建造成本外，另須額外增加15%的費用於拆除與清運作業，即：

$$c_r = \begin{cases} 2.3C_i d & ;d \leq 0.5 \\ 1.15C_i & ;d > 0.5 \end{cases} \quad (5.2.2)$$

3. Ang及Lee[123]建議一指數型態之關係式：

$$c_r = \begin{cases} \beta_1 d^{\beta_2} & ;d \leq d_0 \\ C_i & ;d > d_0 \end{cases} \quad (5.2.3)$$

其中， β_1 、 β_2 及 d_0 需由過去震害經驗獲得。

HAZUS[86]及TELES[87]建議之建築物處於某損害狀態時的修復費用或內部財產損失，則是以損失比的方式來估計。本文採用其損失金額估算方式，分別計算特定PGA作用下的建築物結構系統修復費用、非結構構件修復費用、內部財產損失及消防車輛損失金額，如(5.2.4)式所示[86,87]：

$$L_j = \left[\sum_{d_s=2}^5 (P_{j,d_s} \times DR_{j,d_s}) \right] \times C_j \quad (5.2.4)$$

其中， L_j 為某特定項目 j 的修復或損失金額（結構系統修復費用 $j=S$ 、非結構構件修復費用 $j=NS$ 、內部財產損失 $j=CN$ 、消防車輛損失 $j=FT$ ）； P_{j,d_s} 為某特定項目 j

於此 PGA 作用下處於損害狀態 ds 時的機率， ds 由 2 至 5，代表輕微損害、中度損害、嚴重損害與完全損害； C_j 為某特定項目 j 的重建或購置成本； DR_{j,d_s} 為某特定項目 j 處於損害狀態 ds 時的損失比，該損失比係指損失（修復）金額與新建（購置）成本的比值。

通常結構系統的損失比與構造型式較為有關，非結構構件及內部財產的損失比則與建築物用途較有關[87]，HAZUS 及 TELES 建議的損失比分別如表 5.2.1 及表 5.2.2 所示，ATC-13[122]、FEMA 227[114]、Hwang[124]及日本建設省[174]等亦建議有相關損失比之值。附帶一提，即使建築物已完全損害，仍有一半的內部財產可以繼續使用或出售，因此於完全損害狀態下，其損失比為 0.5。由於 TELES 的相關分析模式及參數業依臺灣實際震災經驗予以修訂或校正而具本土化特性，因此本文之損失比依據 TELES 之規定。

因為內部財產的損害通常是伴隨著非結構構件的損害而來，所以本文於此項損失考量的易損性曲線參數，與非結構構件所用者相同。至於消防車輛損失部分，考量地震引致建築物結構系統破壞，掉落之大型廢棄物對消防車輛損害較大，爰假設消防車輛損失之易損性曲線與結構系統所用者相同，但其損失比則比照內部財產損失之規定。

5.2.2 人員傷亡損失

建築物受震損害時，會有天花板或磁磚掉落、隔間牆倒塌，甚至整體建築物傾斜或倒塌之情形，而導致人員傷亡。除了建築物內部的人員傷亡外，鄰近路過建築物的人車，亦可能因墜落物而傷亡。在小地震時，人員傷亡大多起因於非結構構件的損害，但在大地震時，結構系統的損害將引致較嚴重的傷亡，尤其是建築物發生倒塌或嚴重傾斜時[87]。人員傷亡將使其勞動能力喪失或減少而中斷未來可能的薪資收入，治療期間也需要醫療費用、看護費用或增加其他生活上必要的支出，亦可能對其本人或家人造成莫大的精神損害，導致許多社會問題。

地震引致人員傷亡的數量與傷亡程度和建築物的結構系統與非結構構件的損害程度有密切關係，也和在建構物內的人口動態分布有關。Ang 及 Lee[123]以下式估計品質良好的鋼筋混凝土構架建築物在地震時的人員傷亡率：

$$r_F = r_0(p_{fc})^\gamma \quad (5.2.5)$$

$$r_J = r_F \rho(d) \quad (5.2.6)$$

其中， r_F 及 r_J 分別為死亡率及受傷率； p_{fc} 為建築物倒塌機率； r_0 為 $p_{fc}=1$ 時的死亡率，其值為 0.075； $\gamma=1.6$ ； $\rho(d)$ 為受傷率與死亡率之比值，為與損壞係數中值 d 有關之方程式。則人員死亡及受傷對應的損失則為：

$$c_F = r_F N_o V_F \quad (5.2.7)$$

$$c_J = r_J N_o (0.9V_J + 0.1V_F) \quad (5.2.8)$$

其中， c_F 及 c_J 分別為人員死亡及受傷損失； N_o 為建築物內人口數； V_F 為人命價值； V_J 為人員受傷但不至於失能時所需之費用。(5.2.8)式係考慮傷者中有 10% 達失能程度，而失能者之損失應與人命價值相同。

雖說人命是無價的，但是為了估計人員死亡造成的損失，仍應對人命的價值予以貨幣化。人命經濟價值的估計相當複雜且困難，也有許多評估的方法，獲得的結果範圍極大，約在 3.3 萬至 800 萬美金間不等，較常採用的數值乃 174 萬美金（1987 年價值）[108,114,125]。此外，FEMA 227/228[108,114]亦建議人員輕傷及重傷之損失分別為 1,000 元及 10,000 元美金。

集集地震造成臺北市東星大樓倒塌及 73 人死亡、14 人失蹤[2]，受災戶向臺北市政府申請國家賠償（但本案不適用國家賠償法），最後臺北市政府與東星大樓住戶達成和解，該府同意支付新臺幣 1 億 5,829 萬元補償金。其中在撫慰金部分，單一請求權人者，最高為 240 萬元，最低為 160 萬元；至於一個死亡者有數請求權人者，最高可領補償金達新臺幣 504 萬元，加計已支付之社會救助 130 萬元，合計實質領取 634 萬元[213]。另外，我國「刑事補償法」第 6 條第 6 項[214]規定：「死

刑執行之補償…按受刑人執行死刑當年度國人平均餘命計算受刑人餘命，以新臺幣五千元折算一日支付撫慰金。但其總額不得低於新臺幣一千萬元。」亦可參考。

HAZUS[86]及 TELES[87]對於人員傷亡之評估，係將傷亡的程度分為四級：第一級（ S_1 ）僅需基本治療，不需住院；第二級（ S_2 ）需較多醫療手續且需住院，但無生命危險；第三級（ S_3 ）若無適當且迅速的醫療將有立即生命危險；第四級（ S_4 ）則是立即死亡。各級的傷亡人數，可由建築物內外的人口分布、建築物的損害程度及機率，與傷亡率來估計。其中，HAZUS 及 TELES 建議之傷亡率如表 5.2.3 及表 5.2.4 所示，文獻[42,114]亦建議有相關傷亡率之值；TELES 建議之各類用途建築物室內人口數如表 5.2.5 所示，亦可參閱相關研究統計[126,127]。至於建築物室外人口數，可考慮建築物外側至少一公尺之區域為地震墜落物影響範圍來估計之（圖 5.2.1[200]）。

評估人員傷亡的模式如圖 5.2.2 所示，以特定 PGA 作用下建築物室內人員死亡機率為例，可表示如下[86,87]：

$$P_{S_4}^i = P_{S,ds_2} P_{S_4|ds_2}^i + P_{S,ds_3} P_{S_4|ds_3}^i + P_{S,ds_4} P_{S_4|ds_4}^i + P_{S,ds_5} \left(P_{NC} P_{S_4|ds_5/NC}^i + P_C P_{S_4|ds_5/C}^i \right) \quad (5.2.9)$$

其中， $P_{S_4}^i$ 為建築物室內人員死亡機率； P_{S,ds_2} 、 P_{S,ds_3} 、 P_{S,ds_4} 、 P_{S,ds_5} 為結構系統於此 PGA 作用下處於各損害狀態時的機率； P_{NC} 及 P_C 為完全損害狀態時建築物未倒塌及倒塌之機率； $P_{S_4|ds_2}^i$ 、 $P_{S_4|ds_3}^i$ 、 $P_{S_4|ds_4}^i$ 為輕度損害、中度損害及嚴重損害時之死亡率； $P_{S_4|ds_5/NC}^i$ 及 $P_{S_4|ds_5/C}^i$ 為完全損害且建築物未倒塌及倒塌時之死亡率。因此建築物室內人員死亡數 NS_4^i 則為：

$$NS_4^i = P_{S_4}^i \times N_i \quad (5.2.10)$$

其中， N_i 為建築物室內人口數。

本文採用 TELES 建議之方法及室內傷亡率計算建築物室內傷亡人數，並採用 HAZUS 建議之室外傷亡率計算建築物室外傷亡人數。至於人員傷亡損失計算，則

予以簡化，僅考慮傷亡程度為 S_3 及 S_4 ，即死亡及可能造成嚴重殘疾者，其剩餘職業壽命期間可能的工資損失來估算。因此，在特定PGA作用下的人員傷亡損失金額，可依下式估算：

$$L_{CA} = (NS_3 + NS_4) \times T_{RO,FM} \times I_{FM} \quad (5.2.11)$$

其中， L_{CA} 為人員傷亡損失， NS_3 、 NS_4 分別為在此PGA作用下建築物內外傷亡程度為 S_3 或 S_4 之人數， $T_{RO,FM}$ 及 I_{FM} 分別為消防隊員之剩餘職業壽命及平均年薪。

5.2.3 建築廢棄物處理費

集集地震後造成臺灣中部地區逾十萬棟房屋倒塌，拆除後之建築廢棄物數量預估高達1,500至2,000萬公噸，多數災區廢棄物任其隨意置放，造成重建過程中嚴重的環保隱憂。為了處理此一數量龐大的建築廢棄物（或稱營建混合物），當時便以就地安定掩埋為貯置原則，但中部地區原有棄土場不足，除緊急設立臨時貯置場外，因廢棄物中，磚瓦、混凝土塊、土石及鋼筋等大部分廢料多屬可再生利用之資源，為避免環境污染並減緩天然資源的過度耗用，行政院環境保護署即推動921震災建築廢棄物再生利用計畫，進行建築廢棄物的分類、回收與再利用，如圖5.2.3所示，應用於中二高快官草屯段路堤工程及臺中港經濟部加工出口區整地填方工程。[128-130]

國內已有許多文獻針對建築廢棄物組成比率進行評估調查[128,132-136]，其中占重量比率約85%之混凝土塊及磚瓦可作為回填料、路基填料及再生骨材等，其餘廢鋼鐵、金屬、木材、玻璃、塑（橡）膠、紙類等，亦均可再生利用[137]。因此在臺灣地狹人稠、掩埋空間有限及資源不足的情況下，不論是平時的建築拆除廢棄物，或是未來大地震造成建築物毀損引致的大量廢棄物，均應以分類、回收、再利用作為處置原則，以促進廢棄物減量，減緩廢棄物任意堆置造成的環境危害，並達永續發展之目標。

震災產生的建築廢棄物總重量，可依建築物樓地板面積、單位面積重量、損害程度、機率與可產生的廢棄物比率來估計[70,86]。有關建築廢棄物單位重量的調查研究，日本鋼筋混凝土建築物之單位樓地板面積的重量約1.44公噸/平方公尺[138]；黃榮堯及莊威龍[135]提出各構造別與用途別建築物之拆除廢棄物單位面積重量，如表5.2.6所示；內政部營建署[139]（2002）的統計結果約1.22公噸/平方公尺；高雄市政府[140]以構造別分類，鋼筋混凝土造建築物以1.0公噸/平方公尺概估，鋼構造或加強磚造建築物約0.8公噸/平方公尺，公噸/平方公尺，石綿瓦造或木構造建築物約0.4公噸/平方公尺。

HAZUS[86]及TELES[70]將地震引致之建築廢棄物概分為二類：(1) RCS：需要大型機具處理、切割後方能搬移的廢棄物，如大型鋼筋混凝土塊、鋼構件等；(2) BWO：小型挖土機或搬運機具即可處理之廢棄物，如磚塊、木材和其他雜物。其假設地震引致的廢棄物分別屬結構系統或非結構構件損害造成，其中結構系統引致的廢棄數量與建築物構造類別較相關，而非結構構件引致的廢棄物數量則與特定用途分類關係較密切。此二類廢棄物的數量，可參考表5.2.7或表5.2.8推估之[70,86]。

本文以TELES建議之數據推估建築廢棄物數量，則於特定PGA作用下引致之建築廢棄物，可依下式計算[86]：

$$W_{DE} = \left[\sum_{d_s=2}^5 (P_{S,d_s} \times DF_{S1,d_s}) \right] \times W_{S,RCS} + \left[\sum_{d_s=2}^5 (P_{S,d_s} \times DF_{S2,d_s}) \right] \times W_{S,BWO} + \left[\sum_{d_s=2}^5 (P_{NS,d_s} \times DF_{NS1,d_s}) \right] \times W_{NS,RCS} + \left[\sum_{d_s=2}^5 (P_{NS,d_s} \times DF_{NS2,d_s}) \right] \times W_{NS,BWO} \quad (5.2.12)$$

其中， W_{DE} 為建築廢棄物總重量； P_{S,d_s} 、 P_{NS,d_s} 分別為結構系統與非結構構件於此PGA作用下處於損害狀態 d_s 時的機率； DF_{S1,d_s} 、 DF_{S2,d_s} 分別為結構系統處於損害狀態 d_s 時，RCS及BWO的產生比率； DF_{NS1,d_s} 、 DF_{NS2,d_s} 分別為非結構構件處於損害狀態 d_s

時，RCS及BWO的產生比率； $W_{S,RCS}$ 、 $W_{S,BWO}$ 分別為結構系統可產生之RCS及BWO總重量（單位面積重量×建築物總樓地板面積）； $W_{NS,RCS}$ 、 $W_{NS,BWO}$ 分別為非結構構件可產生之RCS及BWO總重量。

因此，在特定PGA作用下的建築廢棄物處理費，可依下式估算：

$$L_{DE} = W_{DE} \times C_{DE} \quad (5.2.13)$$

其中， L_{DE} 為建築廢棄物處理費用， W_{DE} 為在此 PGA 作用下建築廢棄物總重量， C_{DE} 為廢棄物單位重量的處理（臨時儲置、分類、回收、再利用及最終處理）費用。

5.2.4 搬遷損失

當建築物於地震中受損而無法使用時，將有一段取得資金、招標、設計、申請建築許可、清理及建造等時間（簡稱修復時間），其使用人須搬遷至其他處所居住或繼續進行該建築物原有之活動。尤其是政府機關，在地震後必須立即回復機能，以救濟大眾，所以消防廳舍在修復期間即應遷址辦公，持續從事救災救護工作，通常乃是租用臨時辦公處所，或借用其他政府機關之辦公廳舍。上開修復時間，HAZUS 及 TELES 建議如表 5.2.9 所示[86,87]。

至於搬遷所需費用，通常包括搬運費及臨時辦公廳舍的租金，但本文僅考慮租金部分，因為搬運費相較於一段長時間的租金，似可忽略的。此外，建築物如屬輕微損害時，是可以酌予調整辦公空間以從事修繕，而無須搬遷[86,87]。因此，在特定 PGA 作用下引致的搬遷損失，可依下式估算[86,87]：

$$L_{RE} = \left[\sum_{d_s=3}^5 (P_{S,d_s} \times T_{R,d_s}) \right] \times FA_{TO} \times C_{RE} \quad (5.2.14)$$

其中， L_{RE} 為搬遷損失， P_{S,d_s} 為建築物結構系統於此 PGA 作用下處於損害狀態 d_s 時的機率， T_{R,d_s} 為結構系統處於損害狀態 d_s 時的修復時間（本文採用 TELES 之建議值，但不超過 365 日）， FA_{TO} 為臨時辦公廳舍之樓地板面積， C_{RE} 為單位面積時

間之租金。

5.2.5 建築物功能中斷損失

5.2.5.1 建築物功能中斷概述

建築物損壞時，將喪失其原有的機能，簡單來說，包括基本的居住功能，亦可能使人們失去工作場所，甚至因此而失去工作與收入。對企業而言，在搬遷至其他處所繼續營業前，其經濟活動將中斷而造成收入損失；對於政府機關、醫院、學校、水電電信等機構而言，則無法提供正常的服務而使民眾權益受到損害，甚或是二次災害損失。但實際上，此一建築物功能中斷損失，或稱間接經濟損失，並非如此單純，例如，當某廠房因地震受損而無法正常出貨，是可能影響整個產業結構，造成斷鏈危機，進而影響區域經濟或國家競爭力與相關稅收，該損失之估計可說極為困難與複雜，因此通常暫不考慮[87]或酌予簡化。

Kanda 及 Shah[141]建議之建築物功能中斷損失，依建築物不同用途，以建造成本的特定比例來估計，以消防廳舍為例，當其完全損害時之功能中斷損失假設為建造成本的 10 倍；日本建設省「新建築構造體系の開發報告書」[106]以損壞係數 d 的指數關係式來估算建築物功能中斷損失 c_{lof} ，即：

$$c_{lof} = v_1 d^{v_2} \quad (5.2.15)$$

其中， v_1 及 v_2 為與建築物的用途有關之成本因子。

5.2.5.2 消防廳舍功能中斷損失項目

消防隊之工作職掌包括火災預防（消防安全管理、防災教育宣導、危險物品管理）、火災事故搶救、緊急救護及天然災害應變搶救等。如果消防廳舍在地震中受損，其救災器材裝備及消防車輛均可能損壞，消防隊員亦可能有傷亡之情形，會使得該消防隊的救災能量降低，救災時效延誤，或甚至無法出勤，將造成更多

待救援民眾的傷亡與財產損失。此外，在地震災害緊急應變期間過後，縱使該廳舍受損的消防隊已遷址持續其救災服務，但是在地震中損毀的救災器材、設備、車輛，均不可能立即更新與修復，其不足的救災資源，必須暫時由鄰近的消防隊調度支援，因而降低支援單位之救災能量，且其本身的救災能力，亦非如消防廳舍及救災器材、車輛未受損前完備，所以必須有一段時間讓受損的消防隊與支援的消防隊恢復其原有的救災能力，在此稱為功能復原期間。

因此，在計算消防廳舍功能中斷損失時，除了地震後立即的功能中斷損失外，亦應包括功能復原期間的功能中斷損失。再者，消防隊的功能包括火災搶救、人命救助與緊急救護等，所以本文在地震後立即的功能中斷損失及功能復原期間的功能中斷損失估計時，均分別考慮救災時效延誤導致的額外火災損失與額外人命損失。至於亦屬消防隊職責之火災預防及災民撤離疏散等工作，除因其難以量化外，於功能復原期間仍能由原消防隊或鄰近消防隊持續辦理，爰不納入功能中斷損失內容。再者，由額外火災損失及額外人命損失可能引發對產業結構與經濟的影響部分，因臺灣地區目前尚無相關的分析模式和參數[87]，故亦不予考量。因此，本文計得之消防廳舍功能中斷損失，為偏保守之估算。

5.2.5.3 建築物功能喪失率

為了計算消防廳舍功能中斷時的額外火災損失與額外人命損失，必須先知悉消防廳舍功能喪失的程度，該功能喪失程度應與消防廳舍損害、消防隊員傷亡、救災車輛及器材毀壞等之狀態均有關聯，惟為簡化分析，本文假設在特定 PGA 作用下的建築物功能喪失率依下式計算：

$$FFR_E = \sum_{d_s=2}^5 [P_{S,d_s} \times (1 - FUN_{d_s})] \quad (5.2.16)$$

$$FFR_R = \sum_{d_s=3}^5 \left[P_{S,d_s} \times (1 - FUN_{d_s}) \times \frac{T_{FI,d_s}}{12} \right] \quad (5.2.17)$$

其中， FFR_E 及 FFR_R 分別為地震後及功能復原期間的功能喪失率； P_{S,d_s} 為建築物結

構系統於此 PGA 作用下處於損害狀態 ds 時的機率； FUN_{d_s} 為地震緊急應變期間消防隊在建築物結構系統處於損害狀態 ds 時的平均功能維持率，上開所稱之地震緊急應變期間，由地震發生後之搶救時序（圖 5.2.4[142,143]）可知，通常為地震後 7 日內，而平均功能維持率則可由合於 ATC-13[122]統計資料的消防隊功能恢復曲線（表 5.2.10 及圖 5.2.5）獲得。此外，為了估計功能復原期間的功能喪失率，本文採用一功能中斷時間因數，即(5.2.17)式之 $\frac{T_{FI,d_s}}{12}$ ，來綜合考量受損消防隊及支援的消防隊，其救災能量恢復至 100%的時間，對於建築物結構系統處於中度損害狀態時， T_{FI,d_s} 假設為 1 個月，嚴重損害及完全損害狀態時， T_{FI,d_s} 為 2 個月；又因後續計算功能復原期間的額外火災損失及額外人命損失時，係以整年之服務需求量換算，因此此一功能中斷時間因數應先除以 12 個月。至於建築物結構系統如處於輕微損害狀態時，在震後數日內即可恢復正常運作，爰不納入功能復原期間的功能喪失率計算。

5.2.6 額外火災損失

5.2.6.1 額外火災損失估計

火災搶救的意義係指消防單位於火災發生時，為降低人命傷亡、減少財物損失、防止火勢蔓延，運用所有的器具、戰術與方法，在最短時間內迅速將火勢予以侷限並撲滅[161]。當消防廳舍功能中斷或受損時，消防隊之火災搶救效能勢必大打折扣，將會導致額外的火災損失。本文所謂的額外火災損失，為消防廳舍或消防隊救災功能受損前後的火災損失增量，可依下式計算：

$$L_{FE,FL} = FFR_E \times NEF \times PFL \times AFL_E \quad (5.2.18)$$

$$L_{FR,FL} = FFR_R \times YFL \times AFL_R \quad (5.2.19)$$

其中， $L_{FE,FL}$ 及 $L_{FR,FL}$ 分別為地震後及功能復原期間的額外火災損失； FFR_E 及 FFR_R

分別為地震後及功能復原期間的功能喪失率； NEF 為特定 PGA 作用下消防隊轄區內之震後火災數； PFL 為平均每起火災之損失； YFL 為轄區內之年度火災損失； AFL_E 及 AFL_R 分別為地震後及功能復原期間的額外火災損失因子，係指消防廳舍救災功能受損前後每起火災的損失增量，對應於消防廳舍功能未受損時的每起火災損失之倍數。

5.2.6.2 地震火災預估

依據過去的經驗，震後由於火源火器翻倒、瓦斯外洩、復電引起的電線短路等因素，加以消防水源的破壞與救災資源的缺乏等，常在震後數分鐘至數日內引發大規模的火災與損失[144,145]，為最常見的二次災害，有時候，這些損失比直接的地震災害嚴重，進而加劇震災災情。

1994年1月17日4時31分美國加州北嶺地震，至隔日八時，洛杉磯市消防局案件處理系統共接獲2,332次災害電話求助事件，其中776件屬於火災事件，1,111件為緊急救護事件，事後調查發現有151,000處瓦斯外洩。1995年1月17日5時46分日本阪神地震，地震後10日內計發生175件火災，燒損棟數7,386棟，延燒面積81萬9,108平方公尺，受災人員18,000餘人。1999年9月21日1時47分臺灣集集地震，震後7日內約發生161起火災事件[145,146]，但此次震後火災問題不如美日兩國嚴重，可能的原因包括：地震震央為人口稀疏之鄉間，且發生地震時間為凌晨時分，較之美日兩次大地震均發生在清晨開始準備早餐時段不同；復電時間較美日兩國震災區之復電情形晚；災區建築物多為鋼筋混凝土或磚造，縱有起火機會，尚不至擴大為大規模之都市火災。雖然如此，對於地震火災的發生，仍不可輕忽[147,175]。

日本於1923年關東大地震之後，即不斷開發研究震後火災的預測方法，而且隨著地震災例的發生，逐次檢討震後火災預測模式的適用性並加以修正。其震後火災起火的預測公式，包括河角法、水野法、都市防火法、神奈川縣法、東京消防廳法、愛知縣法等，以起火率、季節、時刻、木造及非木造建築物數、建築物

倒壞率、延燒等參數來預測。美國震後火災的預測式，係基於1906年至1989年間30起地震後火災的災例，以PGA或MMI震度為變數，求得一維或二維的預測式，計有保險業方法、HAZUS法（含延燒推估）等。[86,148-150]

由於美日等國的住宅型式與臺灣地區截然不同，因此無法直接引用美日研發的震後火災預測模式，惟臺灣過去對於震後火災的資料不完整，僅有集集地震較具詳細的震後紀錄，所以學者多依集集地震的火災經驗，提出相關預測公式：

1.熊光華[147,149]建議之每萬戶起火率及每百萬平方英尺樓地板面積起火數：

(1)一維起火率（每萬戶起火率）：

$$F_1 = 7.6609PGA - 1.9283 \quad (5.2.20)$$

(2)二維起火率（每萬戶起火率）：

$$F_2 = 0.7854 - 4.7137PGA + 12.0275PGA^2 \quad (5.2.21)$$

(3)每百萬平方英尺樓地板面積起火數：

$$F_3 = 0.198PGA - 0.0713 \quad (5.2.22)$$

其中， PGA 為測站觀測之地表加速度（gal）換算成MMI震度相當的PGA值。

2.李達志[151,152]建議之每百萬平方公尺樓地板面積起火率：

$$F_4 = 0.0029PGA - 0.0047 \quad (5.2.23)$$

其中， PGA 之單位為 cm/sec^2 。

3.TELES[144]考慮地表振動與永久變位程度之每百萬平方公尺樓地板面積起火率：

$$F_5 = 0.3131PGA + 0.0159PGD \quad (5.2.24)$$

其中， PGA 之單位為g， PGD 之單位為cm。

但若僅以一個災例來推估震後火災預測式，其準確性確有待商榷，且上開預測式均未考慮延燒時間和面積。因為當個別地震火災發生後，經由飛火、接焰、輻射等方式，可能導致火災擴大延燒[153]。由日本阪神地震周邊建築物火災火勢延燒狀況資料顯示，就神戶市115件火災中，大火（延燒面積3,300平方公尺以上）有27件，中火（延燒面積3,300-1,000平方公尺）有21件，小火（延燒面積1,000

平方公尺以下)有 23 件,其中有 7 件火災延燒面積超過 33,000 平方公尺,屬於都市大火(指波及廣大地域造成燒毀棟數達 50 棟以上,或燒失面積達 33,000 平方公尺以上之建築集團火災)[154]。推算火災延燒時間與面積,須依據起火率(數)、當時發現及通報火警的時間、消防車抵達時間、消防單位之搶救能力、建築物內自有之滅火設備、風速、風向、建築材料、街廓寬度等參數[86,144],然臺灣目前尚無明確之推估模式。

由於臺灣建築物多屬防火構造物,且依據集集地震建築物火勢延燒狀況,雖產生多發性的起火,然尚不至於擴大成如日本大規模之都市火災。但若是同樣強度與規模之地震,震央位於大臺北都會區,由於臺北盆地的地質屬於軟弱土層,發生液化的機率極高,並有斷層通過,對於以電氣、瓦斯為主要能源供給的臺北市而言,密佈且老舊的天然氣管線系統,所可能造成的瓦斯外洩情形極難預估,復以一般家庭並未設置瓦斯自動遮斷器,地震後起火的情形可能更加嚴重。且現今臺北市區內之建築物多有住商混合使用之行為,具有高火載量與高使用強度之特性,建築物間駐留著高密度之汽機車,在震後消防力可能折損的情況下,都可能擴大地震都市火災的規模[153]。

本文採用的震後火災數量預測式,除援引 TELES 依據集集地震資料所得之(5.2.24)式外,亦考慮了地震發生的時刻差異、復電時間與延燒的可能性,酌予修正如下:

$$NEF = NFI + NFS \quad (5.2.25)$$

$$NFI = 3 \times F_5 \times TFA = 3 \times (0.3131PGA + 0.0159PGD) \times TFA \quad (5.2.26)$$

$$NFS = NFSA \times PBH \quad (5.2.27)$$

其中, NEF 為震後火災影響之戶數, NFI 為震後起火數, F_5 為 TELES 建議之每百萬平方公尺樓地板面積起火率, TFA 為分析範圍內之建築物總樓地板面積。 NFS 為火災延燒之戶數,預定在 PGA 超過 0.3g 時才會逐步發生,其值並假設為分析範圍內由街廓延燒潛勢分析[153]所得之可能延燒區域數 $NFSA$,乘以每一延燒區域可

能燒損之戶數 PBH ；又依據 Eidinger 等[155]指出，當鄰近消防隊無法支援且消防水源缺乏時，火災延燒將影響 20 至 60 戶之間，考量臺灣建築物多屬防火構造物，因此本文假設每一可能延燒區域僅延燒 20 戶。

此外，(5.2.26)式假設震後起火數為 TELES 建議值之 3 倍，理由如下：

1. 非地震期間，一般而言，不計人為縱火（因震後火災起火原因可忽略縱火之影響 [149]），日間時段因從事炊事且電器使用較多，所以發生火災機會較凌晨時段為多，由 2005 年至 2008 年間臺北市大安區各時段消防隊出勤數（不計人為縱火）[156-159]顯示，9 時至 21 時每三小時之出勤數，約為 0 時至 3 時的 1.14 至 1.37 倍。但上開統計之倍數值恐有所低估，因為日間發生小型火災時，民眾多可初期滅火而避免火勢擴大，而夜間火災時民眾多處於睡夢中，不易察覺而予以滅火 [162]，致實際顯示之日間消防隊出動數據，卻又不會比凌晨時段多太多。
2. 依據神戶大學 Murusaki 教授調查地震時市民反應活動，地震發生時刻，因劇烈搖晃所以只有 9% 的居民實施預防火災之應變，而於 1 至 2 小時後，因其房屋毀損或避免餘震時造成危害，有 36% 的居民前往避難所，初期的避難亦讓居民無法去從事預防起火的適當措施與初期滅火工作，此時起火機率更大 [160,162]。而集集地震中，因復電引發之火災較少，肇因於復電時間較晚，前往避難之居民多已返家，並能從事火災預防工作，如果復電時間發生在居民前往避難所期間，則災情可能較嚴重。
3. 由於 TELES 之起火數預測公式係以發生於凌晨 1 時 47 分之集集地震資料分析而得，考量地震如發生在白天，炊事及電器使用可能引發之火災較多，且居民因地震驚慌避難而無暇初期救火，或居民前往避難所後暫時無人居住的房舍因復電引發之火災較晚察覺或根本不及初期應變，故本文採用之地震起火數為 TELES 建議值之 3 倍。

5.2.6.3 建築物火災損失影響因素

影響火災財務損失與人員傷亡的因素，包括住戶特性、建築物特性（含建築物火載量）、火災發生時間與空間、避難逃生狀況、消防搶救效能等（如圖 5.2.6 所示），其中，消防搶救效能包括反應與控制時間、出動之消防力等[162-164]。就消防力而言，影響火災財務損失與人員傷亡的因素包括消防力介入時間（反應時間、行進時間與距離、部署時間等，如圖 5.2.7 所示[165]）、消防出動人力、救災車輛、裝備、器材、水源、搶救戰術與人員訓練、搶救時間控制等，其中時間因素影響火災成長與發展，故為影響搶救效果最重要因子[162-164,166]。

在火災成長的過程之中，火勢迅速蔓延，擴散延燒致使空間均被大火所覆蓋的階段，稱之為閃燃。建築物起火後火勢成長至 5 分鐘將是重要時刻，因為閃燃可能即將發生而擴大火勢，使搶救行動更形困難，所以火災搶救需要在初期即以優勢之消防力加以鎮壓。有關消防隊介入時間與消防搶救效能之關係如圖 5.2.8 所示[167]。

又根據統計，臺灣 119 救災指揮中心之派遣時間平均約 30 秒，消防隊準備時間約一分鐘，部署時間約 1.33 至 1.36 分，行進時間 t_r 與距離 D 之關係如下（平均約 3.85 至 5.25 分） [162,167,168]：

$$t_r = \begin{cases} 1.655\sqrt{D} & ; \quad D \leq 0.61\text{km} \\ 0.65 + 1.056D & ; \quad D > 0.61\text{km} \end{cases} \quad (5.2.28)$$

當然，除了距離控制行進時間外，行車速度與道路交通狀況亦會影響行進時間。

影響震後火災造成損害的因素很多，包括起火源、火警通報時效與應變效率、火勢成長與延燒機制、天氣狀況、水系統的功能與消防人員滅火的能力等。此外，地震後與平時之消防活動亦有極大之差別，例如地震發生後，道路損壞、交通阻塞，致使消防車產生通行障礙，而消防栓的損壞、電話迴路故障及佔線的通信障礙，導致消防活動發生障礙，如表 5.2.11 及圖 5.2.9 所示[169,170]，這些因素均應納入震後消防搶救效能之考量。

5.2.6.4 額外火災損失因子

為計算額外火災損失因子，本文採用「火災危險度 (Fire Risk)」之概念，又稱為「火災猛烈度」，當建築物受火災侵襲後，會因不同的火災猛烈程度而有不同的危險程度，這些不同的火災危險程度，可以數學期望值表示[171]，常見的火災危險度量度可為(1)火災死亡人數、(2)火災受傷人數、(3)財物之直接金錢損失、(4)火災燒損面積、(5)火勢有無蔓延至防火區劃或起火居室外、(6)火勢有否造成建築結構完整性之破壞等，也可以是這些結果中多種結果的組合[172]。

如果消防廳舍於地震中受損將造成消防隊喪失救災功能，原本之救災工作將由鄰近轄區分隊馳援，因行進距離及時間增加，使得消防隊介入時間增加而增加火災損失，亦有支援人力、車輛、裝備較為不足之情況。由於救災時效與救災資源是決定建築物火災損失最重要的影響參數，因此額外火災損失因子便可由消防隊功能受損前後影響之救災時效與救災資源的差異求得。加拿大國家研究院 (NRC) 開發之建築物火災危險度評估軟體FiRECAMTM (Fire Risk Evaluation and Cost Assessment Model)，對於消防隊的介入有進一步的考量，本文爰參考熊光華[167]依此計算消防隊搶救效能與火災危險度之關係，估計額外火災損失因子。

依據直轄市縣市消防機關員額設置基準[173]規定，消防分隊的最大服務範圍為 5 分鐘可到達的區域，其服務面積以 9 平方公里 (服務半徑約 1.7 公里) 為原則，爰假設平均行進距離為 1.5 公里，而某一消防隊喪失救災功能，由鄰近轄區分隊支援時，假設行進距離增為 4 公里，僅考量行進距離時，火災相對危險度則增為 1.33 倍 (圖 5.2.10) [167]，本文再假設亦有救災人員、車輛、裝備較少等因素，故相對危險度酌予增為 1.5 倍，即表示因消防廳舍或消防隊喪失功能而多增加的損失為平時火災損失的 0.5 倍。

震後火災搶救在消防隊功能未受損時，仍會因交通阻塞、人員、裝備、補給不足、建物受震致自動灑水裝置失效等情形，火災相對危險度增為 3.25 倍[167]，

本文再假設亦有水源及各項後勤補給極度不足、通訊不良等因素，故相對危險度擴大為 5 倍，即震後消防隊功能未受損之搶救條件下，火災損失已為平時之 5 倍。而當消防隊喪失救災功能，由鄰近轄區分隊支援時，再考量行進距離增加、支援之救災人力物力狀況更差、鄰近分隊亦可能受損等因素，造成相對危險度亦增為 5 倍，二者加乘效應，則火災損失為平時之 25 倍，亦即表示地震後因消防隊喪失功能，相較於消防隊未受損時，將多增加平時火災損失 20 倍的損失。

綜上，地震後及功能復原期間的額外火災損失因子 AFL_E 及 AFL_R ，則分別為 20 及 0.5。至於如須考慮因消防隊功能喪失導致年度火災減少搶救之人員造成之額外人命損失，可比照 5.2.7.1 之功能復原期間額外人命損失之計算方式。

5.2.7 額外人命損失

5.2.7.1 額外人命損失估計

消防隊的職責包括將受困者儘速救離危險事故現場，並肩負著緊急傷病患到院前的緊急救護（Emergency Medical Service, EMS）工作，不僅能於事故現場穩定傷病患的生命徵象，更能於就醫途中提供有效積極的治療，亦能快速地將患者載運至合適的醫療機構，以降低患者的死亡率與失能率[176]。腦血管疾病、心臟疾病、糖尿病昏迷、緊急分娩或小產、意外事故傷害等患者，最常需要此類服務。

當消防隊功能中斷導致的反應時間延誤與救護車及相關救援、救護設備受損，將會減少能救活的傷病患，爰比照 5.2.2 之人員傷亡損失計算方式，以減少救活之傷病患其剩餘職業壽命期間可能的工資損失來估算額外人命損失如下：

$$L_{FE,LL} = FFR_E \times NDS_E \times T_{RO,EMSE} \times I_{EMSE} \quad (5.2.29)$$

$$L_{FR,LL} = FFR_R \times NDS_R \times T_{RO,EMSR} \times I_{EMSR} \quad (5.2.30)$$

其中， $L_{FE,LL}$ 及 $L_{FR,LL}$ 分別為地震後及功能復原期間的額外人命損失， FFR_E 及 FFR_R 分別為地震後及功能復原期間的功能喪失率， NDS_E 及 NDS_R 分別為地震後及功能

復原期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目， $T_{RO,EMSE}$ 及 $T_{RO,EMSR}$ 分別為地震後及功能復原期間受緊急救護服務之患者平均剩餘職業壽命， I_{EMSE} 及 I_{EMSR} 則為其平均年薪。

5.2.7.2 緊急救護效能影響因素

為達到緊急救護減少急重症病患死亡與失能之目的，能否掌握到院前第一時間進行救護，是重要關鍵。芝加哥 Cook 郡立醫院傷害中心主任 Robert Baker 指出，從緊急事件發生到病人得到最佳照護的時間，每增加 30 分鐘，死亡率增加 3 倍。如果在發病現場到送醫之間作適當的急救處置，10%-20% 因心肌梗塞猝死的病人可以獲救[177]，20%-35% 的創傷死亡病患是可以避免的[178,179]。若不注重到院前的黃金救護時間，直至到院後急診再實施高級心臟救命術，心肺停止病患救活率依然等於零[180]。

當一個人因急病或傷害造成呼吸停止後，心臟仍可利用儲存在肺臟及血液中的氧氣繼續跳動，但終將因缺氧而停止跳動。自停止呼吸心跳 4 至 6 分鐘之後，腦細胞亦將開始因缺氧而死亡，影響日後行為能力，恐造成傷患的身體殘廢或變成植物人、運動能力或智能下降，須靠他人協助才能生活[181]。根據生命之鏈 (Chain of Survival) 觀念，心肺停止病患 (Out-of-Hospital Cardiopulmonary Arrest, OHCA) 在 4 分鐘內接受 CPR，並在 8 分鐘內施行高級救護服務 (Advanced Life Support, ALS) 救治，其救活率可高達 43%；反之則可能降至 20% 以下。若不能於 8 分鐘內施行 CPR，16 分鐘內施行 ALS，則無人能存活。對於到院前心肺停止病患每延遲一分鐘開始急救，急救成功率便減少 7%-10%[182-187]。De Maio 等[188] 指出，救護車到達現場的時間每減少一分鐘，病患的存活勝算比可提升 0.77。因此，及時與適當的到院前救護可提高醫院外心肺停止病患的存活率，其他可能影響的因素包括到院前救護介入的時間、是否有目擊者執行心肺復甦術、居民人口密度、救護車運送距離、緊急救護模式等[189]。

而高血壓和冠狀動脈血管病人之存活率與急救延誤時間之關係如下[190]：

$$p_s = 0.89 \times t_d^{-0.16} \quad (5.2.31)$$

其中， p_s 為活過 90 天以上的病人比例， t_d 為延誤治療時間。

另外，創傷病患的死亡流行病學，常呈現三階段分布模式。第一類為立即死亡或數分鐘內死亡，其死亡原因多為重大器官遭受損傷所致，極少能夠經由醫療救護挽回約占 50%；第二類為早期死亡個案，多發生於創傷後一小時至一週間，死亡原因主要為大出血、多重性外傷或嚴重大腦損傷所致，需藉由即時的緊急醫療救護及迅速的手術醫療才能挽回，約占 35%；第三類為晚期死亡個案，死亡多因感染或併發症或多重器官衰竭所致，發生於一週以後，必須仰賴好的術後及加護醫療才得以挽回。在創傷照護上，有所謂黃金小時的觀念，病患如果能夠迅速現場的搶救措施，且迅速送到適當的醫院，接受最適切治療，可挽救大部分的第三類死亡病患及部分第一類病患。影響創傷病患預後的因素包括現場的處置、到院前的時間、到院前救護模式、醫院層級及創傷嚴重度等[189]。

由以上可知，儘可能縮短救護車到達現場的時間、精良的救護車設備和熟練的救（醫）護人員，是左右患者生命的關鍵角色。完善的緊急救護系統，除了減少死亡人數外，經緊急醫療而避免的痛苦、殘廢和經濟能力喪失等，更是無法估計。有關到院前緊急救護活動之時間序列如圖 5.2.11 所示[191]，而臺北市 60% 以上地區的救護車平均可於 3 至 5 分鐘到達現場，其中自派遣至現場的時間平均為 4.62-4.9 分鐘，現場救護時間為 3.8-4.34 分鐘，運送時間為 9.37-9.76 分鐘[192,193]。

5.2.7.3 功能復原期間減少救活之傷病患數估計

隨著社會生活型態、人口高齡化及災難複雜化的趨勢下，緊急救護的需求逐年成長。消防單位負責到院前緊急救護工作，其服務範圍包括初級救護服務（Basic Life Support, BLS）與高級救護服務（Advanced Life Support, ALS）。初級救護服務包括傷患評估、基礎心肺復甦、電擊去顫、給氧、止血、包紮、固定等項目，

由中級救護技術員提供服務；高級救護服務則由高級救護技術員對重症病患提供電擊去顫、體外心臟節律、氣管插管、靜脈給藥等高級救命術服務[181]。

消防單位救護隊急救送醫病患之急救原因，包括急病、毒藥物中毒、一氧化碳中毒、癲癇抽搐、路倒、精神異常、孕婦急產、溺水、一般外傷、車禍受傷、墜落傷、穿刺傷、燒燙傷、電擊傷、生物咬螫傷及心肺功能停止等，但並非所有運送病患均為危及性命之緊急傷病，亦非均需高級救護服務。其中，臺北市 ALS 案件出勤標準如下：意識不清、呼吸太快或太慢（ >30 /分或 <10 /分）、脈搏 >140 /分或 <50 /分、休克（血壓 <90 mmHg 或為血管充填時間大於 2 秒）、心因性胸痛、抽搐重積狀態（連續抽 10 分鐘以上、多次抽搐）、緊急生產、新生兒、自高處落下（ >2 公尺）、長骨骨折、一度灼傷面積 $>75\%$ ，二度灼傷面積 $>18\%$ ，三度灼傷面積 $>10\%$ 、胸或腹部穿刺傷、槍傷[181]。

國外到院前緊急救護案件，估計需要 ALS 約佔所有救護案件 30% 左右，西雅圖 1995 至 2003 之緊急救護統計資料更顯示其 ALS 佔所有救護案件 36.41%[181]。而臺北市的 ALS 需求，根據統計約佔所有救護案件的 7%-20%[181,192-196]，其中 30.9% 較屬真正急重症患者[195]。

依據現有的官方統計，並無救護車運送病患之緊急傷病嚴重程度分析，亦無送醫後的病患死亡率資料。又雖然 5.2.7.2 提及的許多研究顯示，及時的緊急救護確可提高傷患的存活率，但是 ALS 個案的預後（Prognosis）與救護隊反應時間之關係目前仍無定論[197-199]，爰尚難明確估計因消防廳舍受損致喪失救災功能，原本之緊急救護工作由鄰近轄區分隊馳援而增加反應時間造成緊急救護病患之死亡率（數）差異。惟消防隊及救護隊至少仍具將傷病患救離危險事故現場之人命救助及緊急運送功能，以維持傷病患的生命功能，避免病情惡化而死亡之機率，故本文假設功能復原期間因延誤救援致年度緊急救護減少救活之傷病患，為轄區年度緊急救護人數的 1%。

5.2.7.4 地震救援期間減少救活之傷病患數估計

由過去經驗，建築物倒塌後，90%以上的人不是自行或靠他人簡單幫忙即能逃出外，就是整個被活埋，在倒塌的瞬間就已經死亡，然而還有 5%-10% 的人是被困在一個封閉的空間，受傷情況可能不至於致命，但無法自行逃出，時間一久就會因失血、休克、脫水或缺氧而死。生還者通常是 24 小時就被救出，超過一天後，挖出生還者的機會就大減[201-204]。此「黃金 24 小時」內的人命搜救，通常可由居民自救、消防隊、警察、義警消、民間救難隊及國軍等單位支援。

因此，施邦築及葉錦勳[205]爰假設，地震後需搜救隊救出之受困人數為 TELES 產出之第二級及第三級傷亡人數之 10%；另假設受傷民眾自行就醫與救護車運送比例各占一半，故需救護車緊急運送人數為 TELES 產出之第二級及第三級傷亡人數之 50%。

惟現行 TELES 產出之傷亡人數僅包括建築物室內之傷亡情形，並不包括地震引起的心臟病患、交通事故、道路橋梁隧道損壞造成的傷亡、摔倒墜落、核子事故、震後救援意外、觸電、海嘯、地滑、液化、斷層地表開裂、壩體破壞、火災、危險物體逸散造成的傷亡，該數量應非少數，且消防隊亦應就上開傷患予以救助救護。本文考慮受困於倒塌或火災建築物內之行動不便與待救援者、因建築物損壞、通勤、交通事故等引致需要緊急運送之有生命危險之虞的傷患，爰假設因消防隊功能中斷而延誤救援致地震救援期間減少救活之傷病患人數，為以現有 TELES 僅能預估之建築物室內傷亡程度為第二級及第三級合計人數之 1/3。

第六章 建築物耐震設計基準及補強基準探討

6.1 案例概述

6.1.1 分析內容

本章將依第二章、第四章及第五章之方法與程序計得之建築物生命週期成本，作為探討新建消防廳舍最佳或合宜的耐震設計基準及既有消防廳舍耐震補強基準的評估基礎。在此所稱的耐震設計基準、補強基準或耐震能力，是以最大考量地震（回歸期 2500 年）及用途係數表示，亦即建築物結構韌性用盡時之崩塌地表加速度。

評估消防廳舍的耐震設計基準時，首先將就各項地震損失之特性作討論；再者，生命週期成本計算過程，需憑藉許多不易完全正確假設的參數值，因此將藉由敏感度分析（Sensitivity Analysis）來探討各參數對生命週期成本的影響程度，以獲知生命週期成本計算中關鍵的參數；最後，以不同的耐震設計基準，即不同的用途係數，分別計算其生命週期成本並予以分析，據以評估最適宜的耐震設計基準（用途係數）。

評估消防廳舍的耐震補強基準時，亦先就其未補強前的地震損失與生命週期成本特性進行探討；並以不同的補強基準，在不同的繼續使用年限下，分別計算其生命週期成本，據以評估各繼續補強年限下最適宜的補強基準。

6.1.2 消防廳舍基本資料與各項參數假設

本文模擬的消防廳舍，係假設座落於臺北市大安區，為一幢 5 層樓之鋼筋混凝土建築物，總樓地板面積為 2,000 平方公尺，建築物高度為 20 公尺。其生命週期成本之計算，原則以 2008 年之物價水準呈現，折現率採 2.5%。

建築物建造成本按行政院中央政府總預算編製作業手冊[95]規定，當建築物依

據建築物耐震設計規範及用途係數 $I=1.0$ 設計時，單位面積造價為 1.99 萬元/平方公尺，並假設結構系統造價占 35%。內部財產除基本的可動家具及電器設備外，亦包括相關救災、通訊設備及器材，其價值較高，爰參照 HAZUS[86]設定 GOV2（緊急應變單位）之內部財產價值，為結構系統造價的 150%，又其假設結構系統造價占總造價之 15.3%，換算則為建築物總造價之 23%，本文爰假設為 0.5 萬元/平方公尺。消防車輛成本依據臺北市政府消防局消防分隊之平均消防、救護車輛配置數量及行政院公共工程委員會共同供應契約電子採購系統[206]資料計算，如表 6.1.1 所示。

臺北市政府消防局各消防分隊隊員約在 16 至 35 人之間[207]，考量消防員勤休狀況，爰假設消防廳舍室內人數為 25 人，室外人數為 2 人。又經統計臺北市消防人員平均年齡為 34.14 歲[207]，故假設消防員之剩餘職業壽命及平均年薪分別為 20 年及 50 萬元。建築物廢棄物單位重量的處理費用可參考文獻[208]，並考慮物價指數之調整[209]，約為 0.065 萬元/公噸。消防廳舍受損後租用之臨時辦公廳舍，其樓地板面積假設為 500 平方公尺，單位時間面積之租金為 0.045 萬元/平方公尺·月。

臺北市大安區歷年的消防勤務（火災搶救及緊急救護）數量如表 6.1.2 所示 [156-159]，由於大安區共設置 3 消防分隊，其分布區位如圖 6.1.1 所示，因此假設各分隊各分擔 1/3 之勤務（勤務量以 2008 年之值計算），平均每起火災之損失為 10 萬元。TELES 產出之震後大安區建築物室內傷亡人數及火災數之趨勢如圖 6.1.2 及圖 6.1.3 所示，另外，大安區震後火災可能延燒的區域數約有 36 處（圖 6.1.4） [153]，所以每一消防分隊將負責 12 處可能延燒區域之火災搶救工作。

至於功能復原期間需要緊急救護服務之病患，考量除創傷病患外，多為年紀較長者，故其平均剩餘職業壽命假設為 10 年，平均年薪則假設為 30 萬；地震後需要緊急救護服務之病患，雖對象亦不明確，但分布於社會各階層及各年齡層之機會較大，爰假設其平均剩餘職業壽命為 20 年，平均年薪則假設為 50 萬。

6.2 消防廳舍耐震設計基準評估

本節係探討新建消防廳舍的耐震設計基準，因此假設其使用年限為 50 年，並依現行建築物耐震設計規範[9]進行設計，其結構系統韌性容量以具非結構牆之韌性抗彎矩構架 $R = 4.0$ [68]計算。建築物結構系統之易損性曲線參數中，輕微損害狀態之易損性曲線的中值（降伏地表加速度）與完全損害狀態之易損性曲線的中值（崩塌地表加速度）依 4.4.3.1 計算，對數標準差則採 4.4.3.3 統計獲得之臺北市政府所屬消防廳舍耐震能力評估資料之平均對數標準差，即 0.650 及 0.687；至於中度損害及嚴重損害狀態之易損性曲線的中值，依(4.4.3)式及(4.4.4)式計算，其對數標準差則採用輕微損害及完全損害狀態之易損性曲線的對數標準差的平均值。

另非結構構件的易損性曲線參數，則參考 TELES[87]建議之中耐震設計水準下的加速度敏感型非結構構件的頂層加速度（表 6.2.1）換算為地表加速度為之，但考量結構系統損害將影響非結構構件之損壞，爰增列非結構構件各損害狀態之易損性曲線的中值，不得大於結構系統各損害狀態之易損性曲線的中值之限制。以用途係數 $I = 1.0$ 為例，其建築物結構系統及非結構構件之易損性曲線，分別如圖 6.2.1 及圖 6.2.2 所示。

6.2.1 新建消防廳舍地震損失特性

當消防廳舍之耐震能力以用途係數 $I = 1.0$ 設計時，其各項地震損失及生命週期成本計算，如表 6.2.2 及表 6.2.3 之第一列與圖 6.2.3 所示。消防廳舍在此耐震能力下，直接經濟損失為 61.65 萬元/年，間接經濟損失為 72.67 萬元/年，整體地震損失為 134.32 萬元/年，建築物建造成本為 140.33 萬元/年，生命週期成本則為 274.65 萬元/年。其中，直接經濟損失約為建造成本的 44%，亦為建築物地震修復費用（結構系統及非結構構件之合計損失 31.57 萬元/年）的 195%，顯示在直接經濟損失的估計中，應納入建築物內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡損失、搬遷損失等項目，以符合實情；而間接經濟損失約為直接經濟損失的 118%，即代表在地震

損失的估計中，因建築物功能中斷引致的間接經濟損失，極具份量，絕不能予以忽視。另外，整體地震損失約占生命週期成本的 49%，因此位於地震帶的建築物而言，在其生命週期成本分析時，亦不容小覷地震損失的影響。

但是地震損失計算中，建築廢棄物處理費及功能復原期間的額外火災損失之值相對較小，似可忽略。然而，建築廢棄物處理之單價與運距之關係極大，如鄰近無廢棄物貯置分類場或營建混合物再利用處理機構，則應再加計運費。此外，功能復原期間的額外火災損失係由轄區內之年度火災損失換算求得，該轄區內年度火災損失之統計，係依據消防機關辦理火災後建築物及物品損失估算暫行基準[210]辦理，其計算方式與一般民眾對於火災損失的認知有所差異，且該統計結果常為消防機關施政績效之表現，因此難免有低估之疑慮。再者，臺北市之消防資源較豐富[162]，且轄內廠房及倉庫較少，所以火災損失相對於其他地區亦較低。爰此二項地震損失項目是否可忽略，仍應視各分析地區之情況調整之。

6.2.2 敏感度分析

在生命週期成本計算中，部分參數對於計算的結果貢獻度較高，爰可藉由敏感度分析，探討各參數對生命週期成本的影響程度，對於貢獻度較大的參數，其選用之值更應審慎，以免生命週期成本計算的結果失真。因此為了驗證各參數對於生命週期成本的敏感程度，在此假設各參數分別獨立，每次放大某一參數值的 10%，以獲得用途係數 $I = 1.0$ 設計之消防廳舍，其生命週期成本的變動情形，該敏感度分析的結果如表 6.2.4 所示。

正如預期，建築物初始建造成本是生命週期中成本計算中最敏感的參數，因為其值的變動將影響結構系統損失、非結構構件損失及建造成本等三項。建築物功能喪失率則是第二敏感之參數，其變動同時影響地震後及功能復原期間的額外火災損失與額外人命損失；然而，建築物功能喪失率的不確定性高，所以其值的預測遠較建築物初始建造成本的預測困難。其他諸如地震後及功能復原期間因消防

隊功能中斷而減少救活之傷病患數目及其剩餘職業壽命或平均年薪、震後火災數、平均每起火災損失、地震緊急應變期間額外火災損失因子等參數，亦具一定程度的敏感性，其值亦難以正確估計；若這些參數同時被低估或高估，則獲得之間接經濟損失的合理性就有待商榷了。另外，消防車輛的價值極高，故此一參數亦頗具敏感性。

6.2.3 最適耐震設計基準分析

本節將以不同的耐震設計基準，即逐步提高用途係數，由 $I=1.0$ 至 2.5 ，分別計算消防廳舍之生命週期成本，據以探討最適宜的耐震設計基準，計算結果如表 6.2.2 及表 6.2.3 與圖 6.2.4 所示。

由上開圖表可知，當建築物設計耐震能力提升後，其地震損失與生命週期成本均可大幅降低，例如 $I=1.2$ 時，地震損失及生命週期成本可分別減低至 91.14 萬元/年及 237.09 萬元/年，較 $I=1.0$ 時，分別減少了 32.1% 及 13.7%；當 $I=1.5$ 時，地震損失及生命週期成本則分別降低為 $I=1.0$ 時的 42.3% 及 76.9%。其中， $I=1.2$ 及 1.5 時之直接經濟損失的減低率分別為 40.0% 及 69.3%，間接經濟損失的減低率則為 25.5% 及 47.8%，顯示當建築物耐震設計基準提升時，對於直接經濟損失的減少較間接經濟損失的減少來的顯著。然而，當耐震設計基準繼續增加時，地震損失的減低效率將漸趨平緩。

再由表 6.2.3 及圖 6.2.4 可知，當 $I=2.1$ 時，建築物生命週期成本最低，為最佳的耐震設計基準（用途係數），惟該值較建築物耐震設計規範[9]規定之 1.5，差距頗大。然而，當 I 由 1.5 提高至 2.1 時，地震損失只減少了 28.16 萬元/年（ $I=1.0$ 時之地震損失的 21.0%），而當 I 由 1.0 提高至 1.5 時，地震損失則減少了 77.47 萬元/年（ $I=1.0$ 時之地震損失的 57.7%），且 $I=1.5$ 時之生命週期成本僅比 $I=2.1$ 時之生命週期成本高 11.33 萬元/年（ $I=1.0$ 時之生命週期成本的 4.1%），該差異尚屬可容許接受的範圍內，因此，選用 $I=1.5$ 而非 2.1，可視為恰當的耐震設計基準。

如果建築物使用年限非為 50 年，或採用之折現率不同時，對於最佳耐震設計基準評估結果的影響，可由表 6.2.5、表 6.2.6 與圖 6.2.5、圖 6.2.6 窺見。當建築物使用年限越短，最佳的用途係數越小，尤其是當使用年限小於 30 年時；但當使用年限超過 50 年時，最佳的用途係數值則變動不大。至於折現率提高時，最佳的用途係數值將逐漸減小。

另外，如果建築物用途非消防廳舍，而為一般住宅，則住宅的地震損失相較於消防廳舍將少了間接經濟損失及消防車輛損失，致其地震損失減少 65% 以上，因此在用途係數提高後，地震損失的減少量也較少，建造成本的增加量會較容易超過地震損失的減少量，所以一般住宅的最佳耐震設計基準會比消防廳舍的最佳耐震設計基準來得低，由圖 6.2.4 可知，一般住宅的最佳用途係數約為 1.5。

6.3 消防廳舍耐震補強基準評估

本節係探討既有消防廳舍的耐震補強基準，有關模擬之消防廳舍現況耐震能力，爰參照 4.4.3.3 統計之臺北市政府所屬消防廳舍耐震能力評估資料，其平均之降伏地表加速度為 0.136g，崩塌地表加速度為 0.242g，約僅為規範規定值 ($A_{g,2500} \times I = 0.32g \times 1.5 = 0.48g$) 的一半，降伏地表加速度及崩塌地表加速度之對數值的標準差分別為 0.650 及 0.687，結構系統韌性容量 R 約為 2.08，而平均之已過使用年限將近 30 年。因此本節以上開平均現況為例，假設未補強之既有消防廳舍耐震能力為規範規定值（已考慮用途係數）之 50%， R 為 2.08，已使用 30 年，在此條件下，以不同的補強基準，如規範規定值（已考慮用途係數）之 0.5 倍（未補強）、0.6 倍、0.7 倍…至 1.7 倍或更高的基準，在不同的繼續使用年限下，如 10 年、15 年、20 年、25 年、30 年、35 年或 40 年，分別計算其生命週期成本，據以探討各繼續補強年限下最適宜的補強基準。

其中，有關結構系統的易損性曲線模擬，同 6.2 之運算方式；至於非結構構件的易損性曲線參數，考量既有建築物整體耐震性能不佳，爰以 TELES[87]建議之低

耐震設計水準下的加速度敏感型非結構構件的頂層加速度（表 6.2.1）換算為地表加速度為之，且非結構構件各損害狀態之易損性曲線的中值，亦不得大於結構系統各損害狀態之易損性曲線的中值。對於補強後之建築物，其補強成本依(4.6.1)式估算，且因實務上及(4.6.1)式援引的補強方案多為鋼筋混凝土剪力牆，其補強效果對結構系統的強度貢獻較大，但以 4.6.2 統計得到補強後的結構系統韌性容量 R 約可略升至 2.6，因此，補強後結構系統之崩塌地表加速度依各補強基準之比例增加，但降伏地表加速度以 $R = 2.6$ 換算之，其餘各損害狀態之易損性曲線的中值及對數標準差則依 6.2 之方式運算。

6.3.1 補強前後消防廳舍地震損失與生命週期成本特性

表 6.3.1(a)為消防廳舍在不同補強基準（耐震能力）下的地震損失計算結果，當建築物未補強時（耐震能力為規範規定值的 0.5 倍），直接經濟損失為 221.39 萬元/年，間接經濟損失為 131.23 萬元/年，整體地震損失為 352.62 萬元/年，就肩負著救災功能的消防廳舍竟承受如此龐大的地震損失風險，實難被民眾所接受，尤其是建築物功能中斷導致的間接經濟損失高達每年百萬以上，在災害發生後恐難發揮其應有救濟大眾之機能。但是當建築物補強而耐震能力提升後，其地震損失則可大幅降低，例如補強至規範規定值之 0.8 倍、1.0 倍及 1.2 倍時，整體地震損失可分別減低至 139.79 萬元/年、87.26 萬元/年及 62.82 萬元/年，為建築物補強前地震損失的 39.6%、24.7% 及 17.8%，而間接經濟損失亦縮小為 67.58 萬元/年、46.63 萬元/年及 34.47 萬元/年。

圖 6.3.1 為消防廳舍在不同繼續使用年限及不同耐震補強基準時，生命週期成本及其組成分項（建造成本、補強成本及地震損失）的變動趨勢。以繼續使用年限 20 年為例（表 6.3.2(c)及圖 6.3.1(c)），在未補強時，生命週期成本為 485.93 萬元/年，其中地震損失為建造成本的 2.65 倍，且占生命週期成本的 72.6%；當建築物補強至規範規定值之 0.8 倍、1.0 倍及 1.2 倍時，生命週期成本可分別減低至 291.55

萬元/年、251.30 萬元/年及 239.17 萬元/年，地震損失則只分別占生命週期成本的 47.9%、34.7%及 26.3%，且地震損失已分別降至建造成本與補強成本總和的 0.92 倍、0.53 倍及 0.36 倍。

圖 6.3.2 為消防廳舍於不同補強基準時，隨著繼續使用年限增加之生命週期成本變化趨勢曲線。因為當建築物繼續使用年限增加，其建造成本及補強成本均可分擔至更多年，因此其生命週期成本有持續降低之趨勢，顯示建築物如能儘量延長其繼續使用年限，對於生命週期成本而言，是比較有效益的。

6.3.2 最適耐震補強基準分析

由圖 6.3.1(a)及表 6.3.3 顯示，當消防廳舍預計繼續再使用 10 年，如補強基準達到規範規定值的 1.1 倍時，可得到最低的生命週期成本，意即建築物崩塌地表加速度提升至 $1.1 \times (0.32g \times 1.5) = 0.528g$ 時，為其最佳的補強基準。同理，對於繼續再使用 15 年、20 年、25 年、30 年、35 年及 40 年的建築物，其補強基準約達規範規定值的 1.2 倍、1.3 倍、1.4 倍、1.4 倍、1.5 倍、1.5 倍時，生命週期成本才會最低，則該倍數分別為各該繼續使用年限建築物的最佳補強基準。上開最佳的補強基準隨著建築物繼續使用年限增加而提高，是因為補強成本可分擔至較多年，以致地震損失的減少量較補強成本的增加量來的顯著。

如果建築物用途非消防廳舍，而為一般住宅，則住宅的地震損失相較於消防廳舍將少了間接經濟損失及消防車輛損失，致其地震損失減少一半以上，因此在用途係數提高後，地震損失的減少量也較少，補強成本的增加量會較容易超過地震損失的減少量，所以一般住宅的最佳耐震補強基準會比消防廳舍的最佳耐震補強基準來得低。由圖 6.3.1(a)可知，當一般住宅預計繼續再使用 10 年時，最佳的補強基準為規範規定之消防廳舍耐震能力的 0.9 倍，此時建築物之崩塌地表加速度為 $0.9 \times (0.32g \times 1.5) = 0.432g$ ，即規範規定之一般住宅耐震能力的 1.35 倍；同理，其他不同繼續使用年限的住宅，其最佳的補強基準亦可求得。

雖然由以上分析得知，消防廳舍的最佳補強基準為規範規定值的 1.1 倍以上不等，但以繼續再使用 10 年者為例，最佳補強基準與僅補強至規範規定值（1.0 倍）時之生命週期成本的差異僅為 3.82 萬元/年。對於繼續再使用 15 年至 40 年者，最佳補強基準與僅補強至規範規定值時之生命週期成本的差異約在 8.95 萬元/年至 22.99 萬元/年之間，最高僅占未補強時之生命週期成本的 4.7%。因此，在補強經費不易籌措時，如能補強至規範規定值（已考量用途係數），已可大幅降低生命週期成本，應屬恰當之補強基準。

此外，有關 2000 年版及 2008 年版建築物實施耐震能力評估及補強方案規定，如建築物預計繼續使用年限未達 50 年者，是以繼續使用年限或以使用年限 50 年之新建建築物耐震設計標準為補強基準，何者生命週期成本較佳呢？在此所稱的使用年限 50 年之新建建築物耐震設計標準，係指最大考量地震（回歸期 2500 年）乘以用途係數後，所得之地表加速度；至於繼續使用年限之耐震設計標準，則是以各該少於 50 年之繼續使用年限中，超越機率 2% 計得之地震地表加速度（回歸期小於 2500 年），乘以用途係數後所得之地表加速度。表 6.3.2(h) 及圖 6.3.3 即為消防廳舍以 50 年設計年限補強及以各該繼續使用年限補強時之生命週期成本差異，明顯發現，以 50 年設計年限補強時的生命週期成本均較以各該繼續使用年限補強時之生命週期成本為低，顯示當建築物繼續再使用年限小於 50 年時，以 50 年設計年限之補強基準雖然補強成本較高，但是在整體經濟效益上，仍較具優勢。

第七章 結論與展望

7.1 結論

所謂「防災優於救災，離災又勝於防災」，然而，臺灣位處於地殼板塊活動頻繁區域，全島各個角落無時無刻不飽受地震的威脅，且又地狹人稠，都市發展密集，在避災不可能的情形下，唯有於平時做好防災工作，才能在地震發生時將災害減至最低，其中，確保建築物的耐震能力，實為地震防災業務整備重要工作之一。因此，本文運用生命週期成本效益的觀點，來探討合宜的建築物耐震設計基準及補強基準。此一生命週期成本分析方法，結合或然率模式的地震危害度曲線與結構物易損性曲線，以及建築物生命週期中各項成本支出的估計。該生命週期成本則包括建造成本、補強成本與地震造成的各種損失，如建築物修復費用、內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡損失、建築廢棄物處理費、搬遷損失及建築物服務功能中斷損失（僅保守包括額外火災損失及額外人命損失）。

本文以消防廳舍為例，以生命週期成本分析進行其耐震設計基準及耐震補強基準探討，其中，就生命週期成本分析架構部分，獲致下列結論：

- 1.對於使用時間極長的結構物，以其生命週期作為分析最佳化設計的依據，確為較具經濟效益的評估方法。生命週期成本分析則可應用簡易的現金流量計算方式，提供決策者從生命週期整體成本角度，有系統的評價各種替代方案之優劣。
- 2.生命週期期間各項成本支出，理論上應包括結構物自規劃設計至拆除廢棄各階段之間的所有費用，但是以生命週期成本分析應用於結構物耐震設計或補強方案評估時，本文僅考慮初始建造成本、補強成本與未來地震可能造成的損失。在地震損失的估計，應能包括地震造成建築物損害所引致的各種損失，但為增進運算效率，亦可僅擇重要或顯著之項目進行估算。消防廳舍於地震中造成的直接經濟損失，宜包括建築物地震修復費用、內部財產損失、消防車輛損失、人員傷亡損失、搬遷損失等項目；而因建築物功能中斷引致的間接經濟損失，如僅保守估計額外火災損失及額外人命損失時，已極具份量，因此間接經濟損失絕不宜忽視。
- 3.藉由敏感度分析可針對建築物生命週期中關鍵的成本項目進行探討，並發現建築物初始建造成本是生命週期中成本計算中最敏感的參數，建築物功能喪失率則是第

二敏感之參數，但其不確定性高，預測較困難；其他如地震後及功能復原期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目及其剩餘職業壽命或平均年薪、震後火災數、平均每起火災損失、地震緊急應變期間額外火災損失因子等參數，亦具一定程度的敏感性，其值亦難以正確估計；此外，消防車輛的價值亦頗具敏感性。

有關新建消防廳舍之耐震設計基準評估部分，獲致下列結論：

- 1.當建築物耐震設計基準提升後，其地震損失與生命週期成本均可大幅降低，且對於直接經濟損失的減少較間接經濟損失的減少來的顯著，但當耐震設計基準繼續增加時，地震損失的減低效率將漸趨平緩。
- 2.當用途係數 $I=2.1$ 時，建築物生命週期成本最低，為最佳的耐震設計基準。惟與 $I=1.5$ 時之生命週期成本間的差異極低，尚屬可容許接受的範圍內，因此，建築物耐震設計規範選用 $I=1.5$ ，可視為恰當的耐震設計基準。
- 3.當建築物使用年限越短，最佳的用途係數越小，尤其是當使用年限小於 30 年時；但當使用年限超過 50 年時，最佳的用途係數值則變動不大。當折現率提高時，最佳的用途係數值將逐漸減小。

有關既有消防廳舍（耐震能力為規範規定值的 50%，已使用 30 年）之耐震補強基準評估部分，獲致下列結論：

- 1.當建築物未補強時，在地震中可能造成的損失極大，在災害發生後恐難發揮其應有救濟大眾之機能。而耐震能力不足的建築物，任何程度的耐震補強，均能大幅降低地震損失與其生命週期成本，對於整體效益是提升的，所以應持續推動耐震補強工作。
- 2.由最小生命週期成本為評析基礎，發現繼續再使用 10 年至 40 年的消防廳舍，隨著繼續使用年限的增加，其最佳補強基準約為規範規定值（已考量用途係數）的 1.1 倍至 1.5 倍。惟最佳補強基準與僅補強至規範規定值時之生命週期成本的差異在可容許接受之範圍內，因此在補強經費有限下，建議將補強基準訂為規範規定值（1.0 倍）即可。
- 3.當建築物預計繼續使用年限未達 50 年時，以使用年限 50 年之新建建築物耐震設計標準（最大考量地震乘以用途係數）為補強基準，仍較以其繼續使用年限之耐震設計標準（以少於 50 年之繼續使用年限中，超越機率 2% 計得之地震地表加速度乘以用途係數）來補強，具經濟效益。

- 4.如建築物繼續使用年限能增加，其生命週期成本將會降低，因此應注重建築物的使用維護，不但能維持建築物機能與整體耐震能力，更能助其延長使用壽命，提高整體效益。

7.2 展望

由以上結論與研究過程之體驗，且在人力與時間的限制下，尚未能就各類型建築物的耐震設計基準與耐震補強基準作全面性的探討，而分析使用之相關參數假設，亦可能不盡周全，惟本研究結果，仍可供建築物耐震設計規範中，耐震設計及補強基準之訂定與建築物防震相關政策推動時的參考，以保障人民生命財產安全，減輕地震造成的衝擊。在此亦歸納數項建議，可作為未來研究發展、改進與實務應用之參考：

- 1.本研究係提供一種程序，可針對各結構型式、用途、現況耐震能力或使用年限建築物訂定之耐震設計基準或耐震補強基準，取得合理的理論依據，供決策或制定規範之參考。
- 2.由於建築物提高耐震能力所須增加之建造成本或補強成本，相對於地震損失的減少是較低的，因此在經費允許的條件下，建議可酌予提高設計或補強基準。
- 3.由最小生命週期成本的分析結果，建議規範可酌予提高消防廳舍的用途係數；而決策者或工程師亦可在可接受的地震損失與建造（補強）成本間，擇定合宜的設計或補強基準。
- 4.對於耐震能力不足的建築物，其最適當的補強基準，除了經濟性的考量外，亦應一併評估補強工法與位置造成建築物使用性的降低程度、建築物使用人對於補強效果心理上的疑慮、補強是否確能達到必要的耐震能力、補強或併同其他裝修設備修繕之成本占重建成本之比例等因素。
- 5.本文雖已提出一生命週期成本分析架構來探討建築物耐震設計基準與補強基準，但許多分析參數或模式尚缺本土化的研究調查或現有資料尚嫌不足，諸如建築物建造（補強）成本與耐震能力之關係、間接經濟損失估計之項目與相關參數等，建議各相關領域均能持續研究，建立本土化的數據資料，以使此生命週期成本分析更趨真實。

參考文獻

- [1] Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, Munich Re Group, 2011, NatCatSERVICE, <http://www.munichre.com>, Munich Reinsurance Company.
- [2] 維基百科, 2011, <http://zh.wikipedia.org/wiki/File>。
- [3] 李逸洋, 2006, 「921 震災住宅重建進度總結報告」, 內政部, 臺北。
- [4] 岡田恒男, 1998, 「日本における建物の地震対策の現状-阪神・淡路大震災の教訓を受けて」, 建築結構耐震診断與耐震補強研討會論文集, 臺北、高雄, 內政部建築研究所等主辦, 第 1-8 頁。
- [5] 國家地震工程研究中心、內政部建築研究所, 1999, 「921 集集大地震建築物震害調查初步報告」, 內政部建築研究所研究報告, 臺北。
- [6] International Code Council (ICC), 2006, “International Building Code,” International Conference of Building Officials, Whittier, CA, USA.
- [7] American Society of Civil Engineers (ASCE), 2005, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,” *ASCE/SEI 7-05*, Reston, VA, USA.
- [8] Building Center of Japan (財団法人日本建築センター), 2005, “The Housing Quality Assurance Act and Japan Housing Performance Indication Standards,” Tokyo, Japan.
- [9] 內政部, 2011, 「建築物耐震設計規範及解說」, 臺北。
- [10] García-Pérez, J., Castellanos, F., and Díaz, O., 2005, “Occupancy Importance Factor in Earthquake Engineering,” *Engineering Structures*, Vol. 27, No, 11, pp. 1625-1632.
- [11] 財團法人資訊工業策進會, 2000, 「九二一震災區公共建築物興建個案調查資訊處理系統」, 內政部營建署研究報告, 臺北。

- [12] Dowrick, D.J., 2009, *Earthquake Resistant Design and Risk Reduction*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, UK, pp. 6.
- [13] 日本建設省，1995，「建築物耐震改修促進法」，東京，日本。
- [14] 陳建忠、許茂雄、張嘉祥，1999，「建築物耐震評估及補強實施制度研擬」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [15] 行政院，2000，「建築物實施耐震能力評估及補強方案」，臺北。
- [16] 加速高中職及國中小老舊校舍補強專案辦公室，2010，「校舍補強計畫簡介」，校舍結構耐震能力詳細評估與補強設計作業講習會講義，加速高中職及國中小老舊校舍補強專案辦公室主辦，臺北。
- [17] 行政院，2008，「建築物實施耐震能力評估及補強方案」，臺北。
- [18] 蕭江碧、葉祥海、王亭復、薛強，2004，「建築物耐震性能設計規範架構之研究」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [19] 陳正興、黃俊鴻、鄧崇任，2009，「公共工程性能設計準則之研究」，行政院公共工程委員會研究報告，臺北。
- [20] King, S.A., Kiremidjian, A.S., Basöz, N., Law, K., Vucetic, M., Doroudian, M., Olson, R.A., Eidinger, J.M., Goettel, K.A., and Horner, G., 1997, "Methodologies for Evaluating the Socio-Economic Consequences of Large Earthquakes," *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, pp. 565-583.
- [21] 劉玉文，2000，「鋼筋混凝土校舍建築之經濟效益研究」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [22] 林祺偉，2004，「鋼筋混凝土橋樑成本評估之研究」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程研究所，基隆。
- [23] 王滢翠，2005，「既存中小學老舊校舍結構調查研究-以臺南縣為例」，碩士論文，國立成功大學建築研究所，臺南。
- [24] 翁明全，2005，「震後橋樑補強方案經濟效益評估模式之研究」，碩士論文，國

立臺灣科技大學營建工程研究所，臺北。

- [25] Arditi, D. and Messiha, H.M., 1999, "Life Cycle Cost Analysis (LCCA) in Municipal Organizations," *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-10.
- [26] Public Technology, Inc. (PTI) and US Green Building Council (USGBC), 1996, "Sustainable Building Technical Manual: Green Building Design, Construction and Operations," US Department of Energy (DOE) and US Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC, USA.
- [27] Fuller, S., 2010, "Life-cycle Cost Analysis (LCCA)," *Whole Building Design Guide*, <http://www.wbdg.org/resources/lcca.php>, National Institute of Building Sciences.
- [28] Novick, D., 1993, "Life-cycle Considerations in Infrastructure Management," *FHWA Life Cycle Cost Symposium*, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- [29] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994, "Standard Practice for Measuring Life-cycle Costs of Buildings and Building Systems," *E917-94*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [30] Rowe, D.P., 1999, "Whole Life Performance Strategy: Beyond Incremental Cost and Service Life", *Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vancouver, Canada, National Research Council of Canada, pp. 1881-1892.
- [31] Al-Hajj, A., 1999, "Modeling Running and Maintenance Costs for Life Cycle Costing Applications in Buildings," *Proceedings of the 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vancouver, Canada, National Research Council of Canada, pp. 1699-1706.

- [32] Johnston, D.W., Chen, C.J., and Abed-Al-Rahim, I., 1994, "Developing User Costs for Bridge Management Systems," Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, USA.
- [33] Vanderbilt, N., 1995, "A Socio-Economic Analysis of the Rehabilitation of the Queensboro Bridge," *Senior Thesis*, Princeton University, NJ, USA.
- [34] Ehlen, M.A., 1997, "Life-cycle Costs of New Construction Materials," *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 129-133.
- [35] Freyermuth, C.L., 2001, "Life-Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges," *Concrete International*, Vol. 23, No. 2, pp.89-95.
- [36] Ryall, M.J., 2001, "Whole-Life Costing, Maintenance Strategies and Deterioration Modeling," *Bridge Management*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, pp. 309-330.
- [37] Zhou, Y., Banerjee, S., and Shinozuka, M., 2010, "Socio-economic Effect of Seismic Retrofit of Bridges for Highway Transportation Networks: A Pilot Study," *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 6, Nos. 1-2, pp. 145-157.
- [38] Sung, Y.C. and Su, C.K., 2011, "Time-dependent Seismic Fragility Curves on Optimal Retrofitting of Neutralised Reinforced Concrete Bridges," *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 7, No. 10, pp. 797-805.
- [39] Chang, S.E. and Shinozuka, M., 1996, "Life-cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk," *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 118-126.
- [40] Kong, J.S. and Frangopol, D.M., 2003, "Life-cycle Reliability-based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 6, pp. 818-828.
- [41] Liu, S.C. and Neghabat, F., 1972, "A Cost Optimization Model for Seismic Design of Structures," *The Bell System Technical Journal*, Vol. 51, No. 10, pp. 2209-2225.

- [42] Wen, Y.K. and Kang, Y.J., 2001, "Minimum Building Life-cycle Cost Design Criteria I: Methodology, II: Applications," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 3, pp. 330-346.
- [43] Liu, M., Wen, Y.K., and Burns, S.A., 2004, "Life Cycle Cost Oriented Seismic Design Optimization of Steel Moment Frame Structures with Risk-taking Preference," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 10, pp. 1407-1421.
- [44] Ang, A.H.S. and De Leon, D., 1997, "Determination of Optimal Target Reliabilities for Design and Upgrading of Structures," *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, pp. 91-103.
- [45] Montes-Iturrizaga, R., Heredia-Zavoni. E., and Esteva, L., 2003, "Optimal Maintenance Strategies for Structures in Seismic Zones," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 2, pp. 245-264.
- [46] Taflanidis, A.A. and Beck, J.L., 2009, "Life-cycle Cost Optimal Design of Passive Dissipative Devices," *Structural Safety*, Vol. 31, No. 6, pp. 508-522.
- [47] Goda, K., Lee, C.S., and Hong, H.P., 2010, "Lifecycle Cost-benefit Analysis of Isolated Buildings," *Structural Safety*, Vol. 32, No. 1, pp. 52-63.
- [48] Lagaros, N.D., 2007, "Life-cycle Cost Analysis of Design Practices for RC Framed Structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 425-442.
- [49] Takahashi, Y., Kiureghian, A.D., and Ang, A.H.S., 2004, "Life-cycle Cost Analysis Based on a Renewal Model of Earthquake Occurrences," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, No. 7, pp. 859-880.
- [50] Padgett, J.E., Dennemann, K., and Ghosh J., 2010, "Risk-based Seismic Life-cycle Cost-benefit (LCC-B) Analysis for Bridge Retrofit Assessment," *Structural Safety*, Vol. 32, No. 3, pp. 165-173.
- [51] Kumar, R., Gardoni, P., and Sanchez-Silva, M., 2009, "Effect of Cumulative

Seismic Damage and Corrosion on the Life-cycle Cost of Reinforced Concrete Bridges,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38, No. 7, pp. 887-905.

[52] 鍾立來、葉勇凱、簡文郁、蕭輔沛、沈文成、邱聰智、周德光、趙宜峰、楊耀昇、涂耀賢、柴駿甫、黃世建、孫啟祥，2009，「校舍結構耐震評估與補強技術手冊」，第2版，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。

[53] California Office of Emergency Services (OES), 1995, “Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings”, Structural Engineers Association of California (SEAOC), Sacramento, CA, USA.

[54] Building Seismic Safety Council (BSSC) and Applied Technology Council (ATC), 1997, “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” *FEMA 273*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

[55] BSSC/ATC, 1997, “NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” *FEMA 274*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

[56] Applied Technology Council (ATC), 1996, “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings,” Vol. 1, *ATC-40*, Redwood City, CA, USA.

[57] Park, Y.J. and Ang A.H.S., 1985, “Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 111, No. 4, pp. 722-739.

[58] Park, Y.J., Ang A.H.S., and Wen, Y.K., 1987, “Damage-limiting Aseismic Design of Buildings,” *Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-26.

[59] 薛強、吳嘉偉，2004，「以結構變位、韌性與強度為設計標的之直接位移設計法」，*結構工程*，第19卷，第4期，第69-85頁。

[60] 薛強，陳國慶，2006，「耐震性能設計規範適用性及合理性之檢討」，內政部建

築研究所研究報告，臺北。

- [61] 薛強、陳國慶、陳正忠、吳嘉偉、劉明怡，2007，「建築物耐震性能設計採用直接位移設計法之效益」，*建築學報*，第 62 期增刊（技術專刊），第 67-80 頁。
- [62] Seismology Committee Structural Engineers Association of California, 1999, “Recommended Lateral Force Requirements and Commentary (SEAOC Blue Book Errata No. 1),” 7th ed., Structural Engineers Association of California (SEAOC), Sacramento, CA, USA.
- [63] International Code Council (ICC), 2000, “International Building Code,” International Conference of Building Officials, Whittier, CA, USA.
- [64] BSSC, 2001, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (2000 Edition),” *FEMA 368*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- [65] Structural Engineers Association of California, Applied Technology Council, and California Universities for Research in Earthquake Engineering (SEAOC-ATC-CUREE, SAC), 2000, “Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings,” *FEMA 350*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- [66] ASCE, 2000, “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” *FEMA 356*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- [67] 薛強、陳國慶，2005，「建築物耐震性能設計規範之研擬-子計畫一：規範與解說」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [68] 內政部，1997，「建築物耐震設計規範及解說」，臺北。
- [69] 何明錦、蔡益超、陳清泉，1999，「鋼筋混凝土建築物耐震能力評估法及推廣」，內政部建築研究所研究報告，臺北。

- [70] 葉錦勳、簡文郁，2007，「地震危害度分析與震災境況模擬技術整合研究(Ⅱ)」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [71] Cornell, C.A., 1968, "Engineering Seismic Risk Analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp.1583-1606.
- [72] Hudson, W., Hass, R., and Uddin, W., 1997, *Infrastructure Management*, McGraw-Hill, NY, USA.
- [73] 陳瑞鈴、林憲德，2001，「臺灣建築生命週期使用年限調查之研究」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [74] 崔竣榮、岡田光正、柏原士郎、吉村英佑、橫田隆司，1989，「建築の寿命とその分布の推定方法に関する研究-K市の公共建築を対象とした場合」，社団法人日本建築学会計畫系論文報告集，第402号，東京，日本。
- [75] 野城智也、加藤裕久、吉田倬郎、小松幸夫，1990，「東京都中央区における事務所建築の寿命実態」，社団法人日本建築学会計畫系論文報告集，第413号，東京，日本。
- [76] 小松幸夫，1992，「建築寿命の年齢別データによる推計に関する基礎の考察」，社団法人日本建築学会計畫系論文報告集，第439号，東京，日本。
- [77] 石塚義高，1996，「建築のライフサイクルマネジメント」，井上書院，東京，日本。
- [78] Holger Konig，2000，「健康な住まいへの道」，石川恒夫譯，株式会社建築資料研究社，東京，日本。
- [79] International Organization for Standardization (ISO), 2000, "Buildings and Constructed Assets Service Life Planning," *ISO 15686-1*, Geneva, Switzerland.
- [80] Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [81] 簡文郁，1996，「設計地震力參數與結構可靠度分析研究」，博士論文，國立臺

灣大學土木工程研究所，臺北。

- [82] 簡文郁，2001，「考慮特徵地震與場址效應的地震危害度分析」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [83] 簡文郁、張毓文，2005，「與危害度相符之境況模擬地震及其在震災評估之應用 (I)」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [84] Kircher, C.A., Nassar, A.A., Kustu, O. and Holmes, W.T., 1997, "Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation," *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, pp. 663-682.
- [85] Whitman, R.V., Anagnos, T., Kircher, C.A., Lagorio, H.J., Lawson, R.S. and Schneider, P., 1997, "Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology," *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, pp. 643-661.
- [86] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2003, "Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR3 Technical Manual," National Institute of Building Science, Washington, DC, USA.
- [87] 葉錦勳，2003，「台灣地震損失評估系統-TELES」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [88] 葉勇凱、蕭輔沛、沈文成、楊耀昇、黃世建，2009，「鋼筋混凝土建築物耐震能力詳細評估分析方法(推垮分析)」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [89] 李文海、廖文義、童士恒，2007，「台灣地震損失評估系統之強化與落實應用整合型研究-子計畫：一般建物之易損性分析 (III)」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [90] 宋裕祺、葉祥海、蔡益超、謝尚賢、盧明德、蘇進國、賴明俊，2007，「鋼筋混凝土牆、磚牆塑鉸設定與含牆建築物耐震能力評估之研究」，*建築學報*，第 62 期，第 81-98 頁。
- [91] 葉祥海、葉勇凱，2005，「消防廳舍耐震評估與補強之研究」，內政部建築研究

所研究報告，臺北。

- [92] 葉勇凱、沈文成、江文卿、王文清、鍾立來，2008，「0401 地震台東消防局震損紀錄與結構材料試驗」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [93] 內政部營建署，2011，建築物實施耐震能力評估及補強資訊管理系統，
<http://cpabm.cpami.gov.tw/k-inx/>。
- [94] 行政院公共工程委員會，2005，「公共建設工程經費估算編列手冊」，臺北。
- [95] 行政院主計處公務預算局，2007，「中華民國 97 年度中央政府總預算附屬單位預算編製作業手冊」，臺北。
- [96] 行政院主計處公務預算局，2008，「中華民國 98 年度中央政府總預算編製作業手冊」，臺北。
- [97] 行政院主計處公務預算局，2009，「中華民國 99 年度中央政府總預算編製作業手冊」，臺北。
- [98] 行政院主計處公務預算局，2010，「中華民國 100 年度中央政府總預算編製作業手冊」，臺北。
- [99] 臺北市政府教育局，2006，「臺北市政府教育局 96 年度新建工程單價編列標準」，臺北。
- [100] 臺北市政府工務局新建工程處，2006，「臺北市政府建築工程結構體概算編列計算表」，臺北。
- [101] 臺北市政府都市發展局都市更新處，2010，「臺北市都市更新事業（重建區段）建築物工程造價要項」，臺北。
- [102] 中華民國產物保險商業同業公會，2008，「臺灣地區住宅類建築造價參考表」，臺北。
- [103] 王儀婷，2006，「工料成本與房屋建築造價關係之探討」，碩士論文，國立臺灣海洋大學河海工程研究所，基隆。
- [104] 神田順、淺野美次、石井修、鈴木哲夫、橋元正美，1996，「設計用地震荷重

と建設費との相関に関する一考察」, *Structure*, 第 58 号, 第 74-80 頁, 社団法人日本建築構造技術者協会 (JSCA), 東京, 日本。

[105] García-Pérez, J., 2000, “Seismic Zoning for Initial- and Total-cost Minimization,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 847-865.

[106] 日本建設省建築研究所, 1998, 「新建築構造体系の開発報告書」, 建設省研究報告, 東京, 日本。

[107] 広沢雅也、清水泰, 1997, 「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断と補強方法について」, 建築と設備コスト情報, 1997 上期版, 第 24-35 頁, 財団法人建設物価調査会, 東京, 日本。

[108] VSP Associates, Inc., 1992, “A Benefit-cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Vol. 2: Supporting Documentation,” *FEMA 228*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

[109] Hart Consultant Group, Inc., 1994, “Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings,” *FEMA 156*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

[110] 教育部, 2009, 「高中職及國中小校舍結構耐震能力補強設計作業規範」, 臺北。

[111] 黃榮堯、許鎧麟、廖肇昌、王仲宇、陳純敬、顏上堯、張國鎮、李俊憲、謝斌麒、吳伋, 2003, 「橋梁生命週期成本評估方法與結構使用年限之建立 (1/2)」, 交通部研究報告, 臺北。

[112] 許和鈞、李宗政, 2004, 「公共建設計畫財務評估中折現率如何訂定之研究」, 行政院經濟建設委員會研究報告, 臺北。

[113] 行政院經濟建設委員會, 2008, 「公共建設計畫經濟效益評估及財務計畫作業手冊」, 第 3 版, 臺北。

[114] VSP Associates, Inc., 1992, “A Benefit-cost Model for the Seismic Rehabilitation

of Buildings, Vol. 1: User's Manual,” *FEMA 227*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

- [115] 臺灣工業銀行，2012，國內外利率動向展望，
http://www.ibt.com.tw/Research/Research_C01.aspx。
- [116] 鉅亨網金融中心，2012，<http://www.cnyes.com/index7home.htm>。
- [117] 行政院主計處，1999，「台灣 921、日本阪神與美國加州北嶺大地震比較分析」，臺北。
- [118] 張寬勇，2002，「災害損失推估系統模組之研究建置」，內政部消防署研究報告，臺北。
- [119] Uitto, J.I., 1998, “The Geography of Disaster Vulnerability in Megacities: A Theoretical Framework,” *Applied Geography*, Vol. 18, No. 1, pp. 7-16.
- [120] 羅俊雄、葉錦勳、陳亮全、洪鴻智、簡文郁、廖文義，2002，「HAZ-Taiwan 地震災害損失評估系統」，*台大工程學刊*，第 85 期，第 13-32 頁。
- [121] 許文科，2000，「整合性多目標地震風險評估系統之建立」，博士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園。
- [122] Applied Technology Council (ATC), 1985, “Earthquake Damage Evaluation Data for California,” *ATC-13*, Redwood City, CA, USA.
- [123] Ang, A.H.S and Lee, J.C., 2001, “Cost Optimal Design of R/C Buildings,” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 73, No. 3, pp.233-238.
- [124] Hwang, H.M., Xu, M., and Huo, J.R., 1994, “Estimation of Seismic Damage and Repair Cost of the University of Memphis Buildings,” Memphis, Tennessee, USA.
- [125] VSP Associates, Inc., 1994, “Seismic Rehabilitation of Federal Buildings: A Benefit/cost Model, Vol. 2: Supporting Documentation,” *FEMA 256*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

- [126] 黃台生、馮正民，2000，「國內外日間人口估算方法彙整及可行性分析」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [127] 陳建忠、林峰田，2003，「日間避難人口推估模式之建立-以台北市士林區為例」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [128] 陳振川等，2000，「九二一震災建築廢棄物再生利用推動計畫」，行政院環境保護署研究報告，臺北。
- [129] 行政院環境保護署，2005，「震災廢棄物再生利用成果」，九二一大地震救災記實，<http://www.epa.gov.tw/>。
- [130] 陳聰榮、許志雄，2006，「九二一震災建築廢棄物再生料首次運用於高速公路之執行探討」，*中華技術*，第 69 期，財團法人中華顧問工程司，臺北。
- [131] Musson, R.M.W., 2000, "Intensity-based Seismic Risk Assessment," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 20, pp. 353-360.
- [132] 陳明良，1996，「建築產業廢棄物再利用之研究-台北都會區建築廢棄物數量與種類之調查研究」，碩士論文，國立臺灣工業技術學院工程技術研究所，臺北。
- [133] 楊朝平，2000，「眉溪大湳二號堤防用地範圍內營建廢棄土性質調查正式試驗成果報告書」，經濟部水利署第三河川局研究報告，臺中。
- [134] 財團法人工業技術研究院能源與資源研究所，2000，「建築廢棄物來源、產生總量推估、分佈狀況、清理再利用體系規劃」，內政部營建署營建剩餘土石方資訊服務中心，<http://140.96.175.34/>。
- [135] 黃榮堯、莊威龍，1998，「建築拆除污染及廢棄物產生現況與調查架構研究」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [136] 黃榮堯、李崇德，2005，「建築廢棄物回收系統制度之研究」，*技術學刊*，第 20 卷，第 1 期，第 91-106 頁。
- [137] 內政部，2008，「營建事業廢棄物再利用種類及管理方式」，臺北。

- [138] 丁育群、羅時麒，1999，「台灣地區建築廢棄物查報系統及減量措施之研究」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [139] 財團法人工業技術研究院能源與資源研究所，2002，「營建剩餘土石方及建築廢棄物多元化回收再利用計畫之推動執行及其標準規範之訂定」，內政部營建署研究報告，臺北。
- [140] 高雄市政府，1994，「高雄市工務局管制建築廢棄物處理方案」，高雄市。
- [141] Kanda, J. and Shah, H., 1997, "Engineering Role in Failure Cost Evaluation for Buildings," *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, pp. 79-90.
- [142] 陳亮全、邱昌平，1988，「有關台灣都市地震災害及其成因之初步探討」，內政部建築研究所籌備小組研究報告，臺北。
- [143] 何明錦、李威儀，2000，「都市計畫防災規劃手冊彙編」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [144] 葉錦勳，2006，「地震危害度分析與震災境況模擬技術整合研究（I）」，國家地震工程研究中心研究報告，臺北。
- [145] 黃伯全，盧守謙，2001，「921 大地震起火情境之分析」，*中央警察大學災害防救學報*，第 1 期，第 185-188 頁。
- [146] 林慶元、熊光華，2000，「都市大規模地震後火災研究-子計畫：消防單位對震後火災的救災能力及主動式滅火設備效能之研究（I）」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [147] 熊光華，2001，「震後火災消防單位救災能力及主動式滅火設備效能之研究（二）：震後火災消防水源可靠性及替代性評估調查研究」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [148] 社團法人日本火災学会，1997，「火災便覽」，第 3 版，共立出版株式會社，東京，日本。
- [149] 熊光華，2001，「都會地區地震後火災防制策略規劃研究」，內政部建築研究

所研究報告，臺北。

- [150] Eidinger, J.M., 1994, "Earthquake Loss Estimation Methods Technical Manual Fire Following Earthquake," National Institute of Building Sciences, Washington, DC, USA.
- [151] 李達志，2001，「震後火災起火危險度評估之研究」，碩士論文，中央警察大學消防科學研究所，桃園。
- [152] 李達志，2002，「從美日震後火災之潛勢分析探討我國震後火災潛勢發展方向」，中央警察大學災害防救學報，第3期，第83-108頁。
- [153] 林慶元、鄭紹材，2001，「都市地震火災被動延燒終止模式之研究（二）」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [154] Akihiko Hokugo, 1996, "Progress Report on Fires Following the 1995 Great Hanshin-Awaji Earthquake," *The 13th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, NISTIR 6030*, pp. 283-287, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
- [155] Eidinger, J.M., Goettel, K.A., and Lee, D., 1995, "Fire and Economic Impacts of Earthquakes," *Proceedings of the 4th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, American Society of Civil Engineers, pp. 80-87.
- [156] 臺北市政府消防局，2006，「中華民國94年臺北市消防統計年報」，臺北。
- [157] 臺北市政府消防局，2007，「中華民國95年臺北市消防統計年報」，臺北。
- [158] 臺北市政府消防局，2008，「中華民國96年臺北市消防統計年報」，臺北。
- [159] 臺北市政府消防局，2009，「中華民國97年臺北市消防統計年報」，臺北。
- [160] 邱文豐、邱晨瑋，2005，「震災搶救消防水源整備與運用之研究案」，內政部消防署研究報告，臺北。
- [161] 鄧子正、唐雲明，1999，「火場作業影響因素之調查研究」，行政院國家科學

委員會研究報告，臺北。

- [162] 黃建華，2002，「建築物火災財務損失影響因素及解釋模式之研究」，碩士論文，中央警察大學消防科學研究所，桃園。
- [163] 林元祥，2004，「住宅建築物火災財物損失影響因素之分析與危險指標之建立」，*風險管理學報*，第6卷，第1期，第85-103頁。
- [164] 呂和樹，林元祥，2000，「建築物火災人命危險度之預測」，*中央警察大學學報*，第37期，第477-509頁。
- [165] Petersen, C.E., 1998, "1998 AMES Fire Department Response Time Study," National Fire Academy Learning Resource Center, Emmitsburg, MD, USA.
- [166] 劉采鑫，2002，「建築物火災消防搶救滅火效果之研究-以住宅用途為例」，碩士論文，中央警察大學消防科學研究所，桃園。
- [167] 熊光華，1999，「建築物火災危險及成本評估電腦模式適用性驗證研究」，內政部建築研究所研究報告，臺北。
- [168] 熊光華，1997，「台灣都會區消防力規劃及消防小隊配置之研究(II)」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [169] 日本消防庁消防研究所，1986，「地震時における消防力運用の最適化システムに関する研究開発報告書」，第9-11頁，東京，日本。
- [170] 林慶元、黃伯全，2000，「都市大規模地震後火災研究-子計畫：震後起火源之預測與防範對策之研究(I)」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [171] Hall, J.R. and Sekizawa, A., 1991, "Fire Risk Analysis: General Conceptual Framework for Describing Models," *Fire Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 33-53.
- [172] 林元祥，2000，「火災危險度評估概述」，*消防月刊*，2000年7月號，第28-39頁，內政部消防署，臺北。
- [173] 內政部，2005，「直轄市縣市消防機關員額設置基準」，臺北。
- [174] 日本建設省建築研究所、財団法人國土開發技術研究センター，1998，「新

建築構造体系の開発：目標水準分科会報告書」，建設省研究報告，東京，日本。

- [175] 林元祥、許志敏、邱益瑞，2003，「消防人員對九二一震災消防搶救時序之認知研究」，*行政暨政策學報*，第 37 期，第 1-27 頁。
- [176] 胡勝川，2002，「急診醫師與緊急醫療救護」，第 3 版，金名圖書有限公司，新北。
- [177] 黃崇墉，1988，「急救醫療系統與功能」，*公共衛生行政學*，第 1127-1141 頁，國興出版社，新竹。
- [178] 陳石池、林芳郁，2000，「創傷急診醫學」，*臺灣醫學*，第 4 卷，第 2 期，第 143-149 頁。
- [179] 馬惠明、林芳郁、涂醒哲，1999，「臺北市緊急醫療區域機動車事故死亡之可預防性研究」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [180] Jaffe, A.S., Atkins, J.M., and Eisenberg, M., 1990, "Textbook of Advanced Cardiac Life Support," American Heart Association, Dallas, Texas, USA.
- [181] 王證雄、王耀震、黃建華，2006，「高級救護隊是否持續成立」，*臺北市消防勤業務革新研究報告彙編*，第 163-181 頁，臺北市政府消防局，臺北。
- [182] Cummins, R.O., Eisenberg, M.S., Hallstrom, A.P., and Litwin, P.E., 1985, "Survival of Out-of-hospital Cardiac Arrest with Early Initiation of Cardiopulmonary Resuscitation," *American Journal of Emergency Medicine*, Vol. 3, No. 2, pp. 114-119.
- [183] Cummins, R.O., Ornato, J.P., Thies, W.H., and Pepe, P.E., 1991, "Improving Survival from Sudden Cardiac Arrest: The "Chain of Survival" Concept," *Circulation*, Vol. 83, No. 5, pp.1832-1847.
- [184] Eisenberg, M.S., Cummins, R.O., Damon, S., Larsen, M.P., and Hearne, T. R., 1990, "Survival Rates from Out-of-hospital Cardiac Arrest: Recommendations for

Uniform Definitions and Data to Report,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 19, pp. 1249-1259.

[185] Eisenberg, M.S., Bergner, L., and Hallstrom, A.P., 1978, “A Cardiac Resuscitation in the Community: Importance of Rapid Provision and Implications for Program Planning,” *Journal of the American Medical Association*, Vol. 241, No. 18, pp. 1905-1907.

[186] Larsen M.P., Eisenberg M.S., Cummins R.O., and Hallstrom, A.P., 1993, “Predicting Survival from Out-of-hospital Cardiac Arrest,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 22, No. 11, pp. 1652-1658.

[187] Stiell, I.G., Wells, G.A., Spaite, D.W., Nichol, G., Brien, B. O’, Munkley, D.P., Field, B.J., Lyver, M.B., Luinstra, L.G., Dagnone, E., Campeau, T., Ward, R., and Anderson, S., 1999, “The Ontario Prehospital Advanced Life Support (OPALS) Study Part II: Rationale and Methodology for Trauma and Respiratory Distress Patients,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 34, No. 2, pp. 256-262.

[188] De Maio, V.J., Stiell, I.G., Wells, G.A., and Spaite, D.W., 2003, “Optimal Defibrillation Response Intervals for Maximum Out-of-hospital Cardiac Arrest Survival Rates,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 42, No. 2, pp. 242-250.

[189] 蘇喜、陳恆順、林耀仁、方志鵬、石崇良、林俊佑，2006，「發展 e 化救護車標準作業模式之研究」，行政院衛生署研究報告，臺北。

[190] Siler, K.F., 1979, “Evaluation of Emergency Ambulance Characteristics under Several Criteria,” *Health Services Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 160-176.

[191] Spaite, D.W., Valenzuela, T.D., Meislin, H.W., Criss, E.A., and Hinsberg, P., 1993, “Prospective Validation of a New Model for Evaluating Emergency Medical Systems by In-field Observation of Specific Time Intervals in Prehospital Care,” *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 22, No. 4, pp. 638-645.

- [192] 胡勝川、王立敏，1993，「臺北市以 119 救護車運送求醫病人之分析」，*臺灣醫學會雜誌*，第 92 卷，附冊 1，第 S25-32 頁。
- [193] 胡勝川，1994，「實施醫佐員制度之可行性研究」，行政院衛生署研究報告，臺北。
- [194] 劉中賢、張珩，1999，「從救護出勤記錄表看臺北縣、市之到院前救護」，*中華民國急診醫學會醫誌*，第 1 卷，第 2 期，第 151-164 頁。
- [195] 陳映達，2002，「高級到院前救護制度之評估研究-救護技術員與急診醫護人員出勤模式之成效差異」，碩士論文，國立臺灣大學醫療機構管理研究所，臺北。
- [196] 馬惠明，2005，「緊急醫療救護系統醫療不良事件之研究與病患安全體系之建立」，行政院衛生署研究報告，臺北。
- [197] Stiell, I.G., Wells, G.A., Field, B., Spaite, D.W., Nesbitt, L.P., De Maio, V.J., Nichol, G., Cousineau, D., Blackburn, J., Munkley, D., Luinstra-Toohey, L., Campeau, T., Dagnone, E., and Lyver, M., 2004, "Advanced Cardiac Life Support in Out-of-hospital Cardiac Arrest," *New England Journal of Medicine*, Vol. 351, No. 7, pp. 647-656.
- [198] Rainer, T.H., Marshall, R., and Cusack, S., 1997, "Paramedics, Technicians, and Survival from Out of Hospital Cardiac Arrest," *Journal of Accident and Emergency Medicine*, Vol. 14, No. 5, pp. 278-282.
- [199] 胡勝川、高偉峰、蔡哲宏、陳啟華、顏鴻章、羅鴻彰、李建賢，1996，「鄉村到醫院前需高級救命術病例之分析」，*中華醫學雜誌*，第 58 卷，第 3 期，第 171-176 頁。
- [200] 侯鵬曦，2001，「震災時都市道路系統運輸功能評估與防災路網之研擬」，碩士論文，國立交通大學交通運輸研究所，新竹。
- [201] 神戸市消防局，1995，「阪神・淡路大震災における消防活動の記録：神戸市

域」，財團法人神戶市防災安全公社/東京法令出版株式会社，神戶/東京，日本。

- [202] 許志敏，2002，「地震時消防力運用之研究」，碩士論文，中央警察大學消防科學研究所，桃園。
- [203] 石富元，2000，「災難應變的夢幻隊伍美國都市搜索救援隊簡介」，921 院內相關期刊，<http://www.mc.ntu.edu.tw/department/cmrg/921paper/paper19.htm>，臺大醫學院社區醫學研究群。
- [204] 王炳龍、劉敏英、林四海、高森永、陳穎信、余明德，2000，「地震災難緊急醫療站開放地點及系統建置之評估-以台北及嘉義地區為例」，行政院衛生署研究報告，臺北。
- [205] 施邦築、葉錦勳，2007，「臺灣地震損失評估系統之強化與落實應用整合型研究：臺灣地震損失評估系統於地震災害初期災情即時推估及應變決策之應用(Ⅲ)」，行政院國家科學委員會研究報告，臺北。
- [206] 行政院公共工程委員會，2008，共同供應契約電子採購系統，<http://sucon.pcc.gov.tw>。
- [207] 游家祝、葉青峰、林士閔，2006，「律定分隊救災基本人力之研究」，臺北市消防勤業務革新研究報告彙編，第 43-62 頁，臺北市政府消防局，臺北。
- [208] 黃治峰，2003，「都會區營建工程剩餘土石方處理及再生利用之研究-以臺北市為例」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園。
- [209] 行政院主計總處，2012，營造工程物價指數及其年增率，<http://www.dgbas.gov.tw>。
- [210] 內政部消防署，1996，「消防機關辦理火災後建築物及物品損失估算暫行基準」，臺北。
- [211] 宋裕祺、蘇進國、吳傳威、蔡益超，2004，「以結構性能為基準之鋼筋混凝土建築物耐震能力評估」，*建築學報*，第 50 期，第 35-47 頁。

[212] 蘇建鴻，2008，「從沖刷與耐震觀點分析最低支出下橋樑設計基面之選定」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所，臺北。

[213] 臺北市政府法規委員會，2006，「東星大樓國賠案和解經過之澄清聲明（2006.1.16）」，臺北政府法規委員會新聞稿，<http://www.dba.tcg.gov.tw>。

[214] 司法院，2011，「刑事補償法」，臺北。



附表



表1.1.1 前十大人命死傷之天然巨災事件（1980-2011）[1]

Period	Event	Affected Area	Overall losses	Insured losses	Fatalities
			US\$ m, original values		
12.1.2010	Earthquake	Haiti: Port-au-Prince, Petionville, Jacmel, Carrefour, Leogane, Petit Goave, Gressier	8,000	200	222,570
26.12.2004	Earthquake, tsunamis	Sri Lanka, Indonesia, Thailand, India, Bangladesh, Myanmar, Maldives, Malaysia	10,000	1,000	220,000
2-5.5.2008	Cyclone Nargis, storm surge	Myanmar: Ayeyawaddy, Yangon, Bugalay, Rangun, Irrawaddy, Bago, Karen, Mon, Laputta, Haing Kyi	4,000		140,000
29-30.4.1991	Tropical cyclone, storm surge	Bangladesh: Gulf of Bengal, Cox's Bazar, Chittagong, Bola, Noakhali districts, esp. Kutubdia	3,000	100	139,000
8.10.2005	Earthquake	Pakistan, India, Afghanistan	5,200	5	88,000
12.5.2008	Earthquake	China: Sichuan, Mianyang, Beichuan, Wenchuan, Shifang, Chengdu, Guangyuan, Ngawa, Ya'an	85,000	300	84,000
July-Aug 2003	Heat wave, drought	France, Germany, Italy, Portugal, Romania, Spain, United Kingdom	13,800	20	70,000
July-Sept 2010	Heat wave	Russian Federation: Moscow region, Kolomna, Mokhovoye	400		56,000
20.6.1990	Earthquake	Iran: Caspian Sea, Gilan province, Manjil, Rudbar; Zanjan, Safid, Qazvin	7,100	100	40,000
8-19.12.1999	Landslides, flash floods	Venezuela: Vargas, La Guaira Punta de Mulatos, Miranda, Nueva Esparta, Yaracuy, Colombia	3,200	220	30,000



表 1.1.2 前十大經濟損失之天然巨災事件（1980-2011）[1]

Period	Event	Affected Area	Overall losses	Insured losses	Fatalities
			US\$ m, original values		
11.3.2011	Earthquake, tsunami	Japan: Honshu, Aomori, Tohoku; Miyagi, Sendai; Fukushima, Mito; Ibaraki; Tochigi, Utsunomiya	210,000	~30,000	15,500
25-30.8.2005	Hurricane Katrina, storm surge	USA: LA, New Orleans, Slidell; MS, Biloxi, Pascagoula, Waveland, Gulfport	125,000	62,200	1,322
17.1.1995	Earthquake	Japan: Hyogo, Kobe, Osaka, Kyoto	100,000	3,000	6,430
12.5.2008	Earthquake	China: Sichuan, Mianyang, Beichuan, Wenchuan, Shifang, Chengdu, Guangyuan, Ngawa, Ya'an	85,000	300	84,000
17.1.1994	Earthquake	USA: Northridge, Los Angeles, San Fernando Valley, Ventura, Orange	44,000	15,300	61
6-14.9.2008	Hurricane Ike	USA, Cuba, Haiti, Dominican Republic, Turks and Caicos Islands, Bahamas	38,300	18,500	170
May-Sept 1998	Floods	China: Jangtsekiang, Songhua Jiang	30,700	1,000	4,159
27.2.2010	Earthquake, tsunami	Chile: Bió Bió, Concepción, Talcahuano, Coronel, Dichato, Chillán; Del Maule, Talca, Curicó	30,000	8,000	520
23.10.2004	Earthquake	Japan: Honshu, Niigata, Ojiya, Tokyo, Nagaoka, Yamakoshi	28,000	760	46
23-27.8.1992	Hurricane Andrew	USA: FL, Homestead; LA; Bahamas	26,500	17,000	62

表 1.1.3 前十大人命死傷之地震事件（1980-2011）[1]

Period	Event	Affected Area	Overall losses	Insured losses	Fatalities
			US\$ m, original values		
12.1.2010	Earthquake	Haiti: Port-au-Prince, Petionville, Jacmel, Carrefour, Leogane, Petit Goave, Gressier	8,000	200	222,570
26.12.2004	Earthquake, tsunamis	Sri Lanka, Indonesia, Thailand, India, Bangladesh, Myanmar, Maldives, Malaysia	10,000	1,000	220,000
8.10.2005	Earthquake	Pakistan, India, Afghanistan	5,200	5	88,000
12.5.2008	Earthquake	China: Sichuan, Mianyang, Beichuan, Wenchuan, Shifang, Chengdu, Guangyuan, Ngawa, Ya'an	85,000	300	84,000
20.6.1990	Earthquake	Iran: Caspian Sea, Gilan province, Manjil, Rudbar; Zanjan, Safid, Qazvin	7,100	100	40,000
26.12.2003	Earthquake	Iran: Bam	500	19	26,200
7.12.1988	Earthquake	Armenia: Spitak, Kirowakan, Leninakan, Stepanavan. Turkey	14,000		25,000
17.8.1999	Earthquake	Turkey: Izmit, Istanbul, Gölcük, Kocaeli, Sakarya, Yalova	12,000	600	17,118
11.3.2011	Earthquake, tsunami	Japan: Honshu, Aomori, Tohoku; Miyagi, Sendai; Fukushima, Mito; Ibaraki; Tochigi, Utsunomiya	210,000	~30,000	15,500
26.1.2001	Earthquake	India: Gujarat, Bhuj, Ahmedabad, Surat. Pakistan, Sindh province	4,500	100	14,970



表 1.1.4 前十大經濟損失之地震事件（1980-2011）[1]

Period	Event	Affected Area	Overall losses	Insured losses	Fatalities
			US\$ m, original values		
11.3.2011	Earthquake, tsunami	Japan: Honshu, Aomori, Tohoku; Miyagi, Sendai; Fukushima, Mito; Ibaraki; Tochigi, Utsunomiya	210,000	~30,000	15,500
17.1.1995	Earthquake	Japan: Hyogo, Kobe, Osaka, Kyoto	100,000	3,000	6,430
12.5.2008	Earthquake	China: Sichuan, Mianyang, Beichuan, Wenchuan, Shifang, Chengdu, Guangyuan, Ngawa, Ya'an	85,000	300	84,000
17.1.1994	Earthquake	USA: CA, Northridge, Los Angeles, San Fernando Valley, Ventura, Orange	44,000	15,300	61
27.2.2010	Earthquake, tsunami	Chile: Bió Bió, Concepción, Talcahuano, Coronel, Dichato, Chillán; Del Maule, Talca, Curicó	30,000	8,000	520
23.10.2004	Earthquake	Japan: Honshu, Niigata, Ojiya, Tokyo, Nagaoka, Yamakoshi	28,000	760	46
21.9.1999	Earthquake	Taiwan: Nantou, Hsinchuang, Taichung, Puli, Toului, Yun-lin, Chungwa	14,000	750	2,368
7.12.1988	Earthquake	Armenia: Spitak, Kirowakan, Leninakan, Stepanavan. Turkey	14,000		25,000
16.7.2007	Earthquake	Japan: Niigata, Kashiwazaki, Nagaoka, Sanjo, Tsubame, Joetsu, Ojiya, Izumozaki, Kariwa	12,500	335	11
17.8.1999	Earthquake	Turkey: Izmit, Istanbul, Gölcük, Kocaeli, Sakarya, Yalova	12,000	600	17,118

表 3.1.1 震區短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數 S_s^D 與 S_1^D ，與震區短週期與一秒週期之最大考量水平譜加速度係數 S_s^M 與 S_1^M （摘錄）

縣市	鄉鎮市區	S_s^D	S_1^D	S_s^M	S_1^M	臨近之斷層
基隆市	中正區	0.6	0.35	0.8	0.5	
	七堵區	0.6	0.3	0.8	0.45	
	暖暖區	0.6	0.35	0.8	0.5	
	仁愛區	0.6	0.35	0.8	0.5	
	中山區	0.6	0.35	0.8	0.5	
	安樂區	0.6	0.3	0.8	0.5	
	信義區	0.6	0.35	0.8	0.5	
臺中市	豐原區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	東勢區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	大甲區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳斷層
	清水區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳斷層
	沙鹿區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳斷層
	梧棲區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳斷層
	后里區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	神岡區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	潭子區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	大雅區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	新社區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	石岡區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層
	外埔區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳、車籠埔斷層
	大安區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳、車籠埔斷層
	烏日區	0.7	0.4	0.9	0.5	車籠埔斷層
	大肚區	0.7	0.4	0.9	0.5	
	龍井區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳斷層
	霧峰區	0.8	0.45	1.0	0.55	車籠埔斷層
	太平區	0.8	0.45	1.0	0.55	車籠埔斷層
	大里區	0.8	0.45	1.0	0.55	車籠埔斷層
	和平區	0.7	0.4	0.9	0.5	車籠埔斷層
	中區	0.8	0.45	1.0	0.5	車籠埔斷層
	東區	0.8	0.45	1.0	0.55	車籠埔斷層
	南區	0.7	0.45	1.0	0.5	車籠埔斷層
	西區	0.8	0.45	1.0	0.5	車籠埔斷層
	北區	0.8	0.45	1.0	0.5	車籠埔斷層
西屯區	0.7	0.4	0.9	0.5	屯子腳、車籠埔斷層	
南屯區	0.7	0.4	0.9	0.5	車籠埔斷層	
北屯區	0.8	0.45	1.0	0.55	屯子腳、車籠埔斷層	

表 3.1.2(a) 短週期結構之工址放大係數 F_a (線性內插求值)

地盤分類	震區短週期水平譜加速度係數 S_S (S_S^D 或 S_S^M)				
	$S_S \leq 0.5$	$S_S = 0.6$	$S_S = 0.7$	$S_S = 0.8$	$S_S \geq 0.9$
第一類地盤	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
第二類地盤	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
第三類地盤	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0

表 3.1.2(b) 長週期結構之工址放大係數 F_v (線性內插求值)

地盤分類	震區一秒週期水平譜加速度係數 S_I (S_I^D 或 S_I^M)				
	$S_I \leq 0.30$	$S_I = 0.35$	$S_I = 0.40$	$S_I = 0.45$	$S_I \geq 0.50$
第一類地盤	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
第二類地盤	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
第三類地盤	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4

表 3.1.3 近車籠埔斷層調整因子 N_A 與 N_V

(a) 設計地震之調整因子

N_A	$r \leq 2$ km	$2\text{km} < r \leq 5$ km	$5\text{km} < r \leq 8$ km	$8\text{km} < r \leq 12$ km	$r > 12$ km
	1.23	1.16	1.07	1.03	1.00
N_V	$r \leq 2$ km	$2\text{km} < r \leq 5$ km	$5\text{km} < r \leq 8$ km	$8\text{km} < r \leq 12$ km	$r > 12$ km
	1.36	1.32	1.22	1.10	1.00

(b) 最大考量地震之調整因子

N_A	$r \leq 2$ km	$2\text{km} < r \leq 5$ km	$5\text{km} < r \leq 8$ km	$8\text{km} < r \leq 12$ km	$r > 12$ km
	1.25	1.20	1.10	1.03	1.00
N_V	$r \leq 2$ km	$2\text{km} < r \leq 5$ km	$5\text{km} < r \leq 8$ km	$8\text{km} < r \leq 12$ km	$r > 12$ km
	1.50	1.45	1.30	1.15	1.00

表 3.1.4(a) 一般工址或近斷層區域之工址設計水平譜加速度係數 S_{aD}

較短週期	短週期	中週期	長週期
$T \leq 0.2T_0^D$	$0.2T_0^D < T \leq T_0^D$	$T_0^D < T \leq 2.5T_0^D$	$2.5T_0^D < T$
$S_{aD} = S_{DS}(0.4 + 3T/T_0^D)$	$S_{aD} = S_{DS}$	$S_{aD} = S_{D1}/T$	$S_{aD} = 0.4S_{DS}$

註： $T_0^D = S_{D1} / S_{DS}$

表 3.1.4(b) 一般工址或近斷層區域之工址最大水平譜加速度係數 S_{aM}

較短週期	短週期	中週期	長週期
$T \leq 0.2T_0^M$	$0.2T_0^M < T \leq T_0^M$	$T_0^M < T \leq 2.5T_0^M$	$2.5T_0^M < T$
$S_{aM} = S_{MS}(0.4 + 3T/T_0^M)$	$S_{aM} = S_{MS}$	$S_{aM} = S_{M1}/T$	$S_{aM} = 0.4S_{MS}$

註： $T_0^M = S_{M1} / S_{MS}$

表 3.1.5(a) 臺北盆地之工址設計水平加速度反應譜係數 S_{aD}

較短週期	短週期	中週期	長週期
$T \leq 0.2T_0^D$	$0.2T_0^D < T \leq T_0^D$	$T_0^D < T \leq 2.5T_0^D$	$2.5T_0^D < T$
$S_{aD} = S_{DS}(0.4 + 3T/T_0^D)$	$S_{aD} = S_{DS}$	$S_{aD} = S_{DS}T_0^D/T$	$S_{aD} = 0.4S_{DS}$

註：臺北一區、二區、三區之 T_0^D 分別為 1.60 秒、1.30 秒及 1.05 秒。

表 3.1.5(b) 臺北盆地之工址最大考量水平加速度反應譜係數 S_{aM}

較短週期	短週期	中週期	長週期
$T \leq 0.2T_0^M$	$0.2T_0^M < T \leq T_0^M$	$T_0^M < T \leq 2.5T_0^M$	$2.5T_0^M < T$
$S_{aM} = S_{MS}(0.4 + 3T/T_0^M)$	$S_{aM} = S_{MS}$	$S_{aM} = S_{MS}T_0^M/T$	$S_{aM} = 0.4S_{MS}$

註：臺北一區、二區、三區之 T_0^M 分別為 1.60 秒、1.30 秒及 1.05 秒。

表 3.2.1 Vision 2000 建議之建築物耐震性能等級及其損害程度描述

性能等級	建築物損壞程度
正常使用 (Fully Operational)	建築物維持所有機能，結構系統及非結構系統幾乎無損壞。
可使用 (Operational)	建築物大部分機能可立即恢復，結構系統安全，重要設備無損，但部分非重要設備輕微受損，須修復方能恢復功能。
生命安全 (Life Safe)	中度損壞，結構體維持穩定，但僅部分設備未受損。人命安全尚可確保，但餘震期間應撤離建築物。可修復，但恐不經濟。
接近倒塌 (Near Collapse)	嚴重損壞，但結構體尚不致崩塌，非結構構件大量掉落，修復幾乎不可能。



表 3.2.2 各參考文獻採用之分析方法及主要檢核內容[18]

文獻	分析方法	檢核內容	
SEAOC 1999 藍皮書附錄 I-A[62]	線性靜力	計算之側移量 $\times 0.7 \leq$ 性能標準之側移限制	
	線性動力	計算之側移量 \leq 性能標準之側移限制	
SEAOC 1999 藍皮書附錄 I-B[62]	線性靜力	降伏機制 層間變位角限制 至少 80% 非彈性構件滿足非彈性位移百分比限制，並提供足夠韌性容量 構件單元韌性需求/容量比限制 預期不能降伏之構件應保持彈性	
	線性動力		
	非線性靜力側推		
	非線性動態歷時		
IBC 2000 [63]	線性靜力	層間變位限制	
	線性動力		
	非線性動態歷時		
FEMA 368 [64]	線性靜力	類似 IBC 2000 非線性歷時分析檢核：構件變形量不超過導致垂直承載能力喪失或導致構件強度減少至其最大之 2/3 以下之變形量之 2/3；設計層間變位不得超過層間變位限制之 125%。	
	線性動力		
	非線性靜力側推		
	非線性動態歷時		
FEMA 350 [65]	線性靜力	簡化評估法、詳細評估法、需求抵抗係數設計法 (DRFD)：以信賴參數 $\lambda = \gamma \gamma_a D / (\phi C)$ [a]，評估結構達到預期性能目標之信賴度。 檢核整體層間變位、局部接頭層間變位、柱構件軸力、柱構件續接拉力	
	線性動力		
	非線性靜力		
	非線性動力		
FEMA 356 [66] (FEMA 273 /274 更新版)	線性靜力	力量控制行為 $\kappa Q_{CL} \geq Q_{UF}$ [b]	主、次要構件，力量、變形控制行為需求 (位移係數法)
	線性動力	變形控制行為 $m \kappa Q_{CE} \geq Q_{UD}$ [c]	
	非線性靜力	力量控制行為 $Q_{CL} \geq Q_{UF}$ 變形控制行為 $d_{CE} \geq d_{UD}$ [d]、滿足性能目標對應變位限制	
	非線性動態歷時	$V_t \geq 0.8 V_y$ [e]	
ATC-40 [56]	非線性靜力 (容量震譜法)	結構整體： 豎向承載能力、側向承載能力、側向力抵抗系統韌性與變位限制	結構構件： 性能點對應構件之強度、韌性與變形滿足標準
<p>[a] D：結構反應參數需求，γ：需求變異因數，γ_a：分析不確定因數，C：結構反應參數能耐，ϕ：結構反應參數能耐折減因數。</p> <p>[b] Q_{CL}：構件最低強度，κ：考量不確定性之結構瞭解因數，Q_{UF}：構件在載重及設計地震力作用下之力量控制行為。</p> <p>[c] Q_{CE}：構件強度，m：考量變形韌性之因數，Q_{UD}：構件在載重及設計地震力作用下之變形控制行為。</p> <p>[d] d_{CE}：主要構件變形能耐，d_{UD}：目標位移對應之構件變形。</p> <p>[e] V_t：目標位移對應之基底剪力，V_y：容量曲線雙線性化後之有效強度。</p>			

表 3.2.3 Vision 2000 建議之建築物結構性能標準

性能等級	最大彈性層間變位角	最大非彈性層間變位角
正常使用	0.2%	0.0%
可使用	0.5%	0.0%
生命安全	1.5%	0.5%
接近倒塌	2.5%	2.5%

表 3.2.4 FEMA 273 建議之建築物結構性能標準 (混凝土韌性構架)

性能等級	最大彈性層間變位角	最大非彈性層間變位角
立即可用	1%	0%
生命安全	2%	1%
避免倒塌	4%	4%

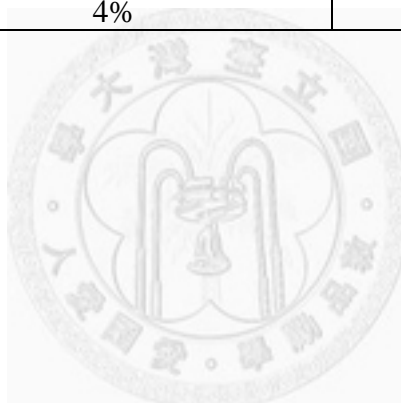


表 3.2.5(a) FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求-梁

			Modeling Parameters ³			Acceptance Criteria ³				
			Plastic Rotation Angle, radians	Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians					
Component Type										
Conditions			a	b	c	Primary		Secondary		
						Performance Level				
						IO	LS	CP	LS	CP
i. Beams controlled by flexure¹										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.005	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0	0.005	0.005	0.005	0.01
ii. Beams controlled by shear¹										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span¹										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint¹										
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

1. When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.
2. Under the heading "Transverse Reinforcement," "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming details, respectively. A component is conforming if, within the flexural plastic region, closed stirrups are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the stirrups (V') is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.
3. Linear interpolation between values listed in the table is permitted.

表 3.2.5(b) FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求-柱

Conditions	Modeling Parameters ⁴			Acceptance Criteria ⁴						
	Plastic Rotation Angle, radians	Residual Strength Ratio	c	Plastic Rotation Angle, radians						
				Component Type						
				Primary		Secondary				
				Performance Level						
a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP			
i. Columns controlled by flexure¹										
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.015	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.015	0.025	0.2	0.005	0.01	0.015	0.01	0.025
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.0	0.005	0.015	0.010	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0	0.005	0.01	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.005	0.01	0.005	0.015
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.005	–	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.005	0.005	–	0.0	0.0	0.005	0.0	0.005
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.0	0.0	–	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ii. Columns controlled by shear^{1,3}										
Hoop spacing ≤ d/2, or $\frac{P}{A_g f'_c} \leq 0.1$			0.0	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
Other cases			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
iii. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height^{1,3}										
Hoop spacing ≤ d/2			0.01	0.02	0.4	1	1	1	0.01	0.02
Hoop spacing > d/2			0.0	0.01	0.2	1	1	1	0.005	0.01
iv. Columns with axial loads exceeding 0.70P_o^{1,3}										
Conforming reinforcement over the entire length			0.015	0.025	0.02	0.0	0.005	0.001	0.01	0.02
All other cases			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<ol style="list-style-type: none"> When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table. Under the heading "Transverse Reinforcement," "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming details, respectively. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, closed hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the stirrups (V_s) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming. To qualify, hoops must not be lap spliced in the cover concrete, and hoops must have hooks embedded in the core or other details to ensure that hoops will be adequately anchored following spalling of cover concrete. Linear interpolation between values listed in the table is permitted. 										

表 3.2.5(c) FEMA 273 建議鋼筋混凝土構件之塑性鉸模擬參數與性能標準要求-梁柱接頭

Conditions	Modeling Parameters ⁴					Acceptance Criteria ⁴				
	Shear Angle, radians		Residual Strength Ratio			Plastic Rotation Angle, radians				
						Component Type				
						Primary		Secondary		
						Performance Level				
d	e	c			IO	LS	CP	LS	CP	
i. Interior joints										
$\frac{P}{A_g f'_c}$ ²	Trans. Reinf. ¹	$\frac{V}{V_n}$ ³								
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.015	0.03	0.2	0.0	0.0	0.0	0.02	0.03
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.015	0.03	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.015	0.025	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.025
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.015	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.005	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
ii. Other joints										
$\frac{P}{A_g f'_c}$ ²	Trans. Reinf. ¹	$\frac{V}{V_n}$ ³								
≤ 0.1	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02
≤ 0.1	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
≥ 0.4	C	≤ 1.2	0.01	0.02	0.2	0.0	0.0	0.0	0.015	0.02
≥ 0.4	C	≥ 1.5	0.01	0.015	0.2	0.0	0.0	0.0	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≤ 1.2	0.005	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
≤ 0.1	NC	≥ 1.5	0.005	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
≥ 0.4	NC	≤ 1.2	0.0	0.0	–	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
≥ 0.4	NC	≥ 1.5	0.0	0.0	–	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<ol style="list-style-type: none"> Under the heading "Transverse Reinforcement," "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming details, respectively. A joint is conforming if closed hoops are spaced at $\leq h/3$ within the joint. Otherwise, the component is considered nonconforming. Also, to qualify as conforming details under ii, hoops must not be lap spliced in the cover concrete, and must have hooks embedded in the core or other details to ensure that hoops will be adequately anchored following spalling of cover concrete. This is the ratio of the design axial force on the column above the joint to the product of the gross cross-sectional area of the joint and the concrete compressive strength. The design axial force is to be calculated using limit analysis procedures, as described in Chapter 3. This is the ratio of the design shear force to the shear strength for the joint. The design shear force is to be calculated according to Section 6.5.2.3. Linear interpolation between values listed in the table is permitted. 										

表 3.2.6 文獻[67]建議之建築物耐震性能等級及其損害程度描述

性能等級	建築物損壞程度
正常使用 (Operational, OP)	建築物維持所有機能，結構構件保持在彈性限度內，結構體幾乎無損壞，雖可能出現裂縫，但無須修補已可維持建築物所有機能。
輕微損傷或立即可用 (Immediate Occupancy, IO)	建築物維持大部分機能，結構體輕微損壞，但可立即使用，快速修復後能恢復全部機能。
破壞控制 (Damage Control, DC)	建築物維持必要之基本機能，結構體發生小規模損害，小規模修復後可恢復機能。
生命安全 (Life Safety, LS)	建築物維持部分機能，結構體不產生嚴重損壞，可進入建築物限定區域執行緊急救助活動，經中度規模修復後可恢復機能。
避免倒塌 (Collapse Prevention, CP)	建築物喪失大部分機能，結構體嚴重破壞，但不崩塌，不得進入建築物限定區域執行緊急救助活動，恢復建築物機能之修復不經濟或不可能。

表 3.2.7 文獻[67]建議之不同用途群組建築物之耐震設計性能目標與標準

地震等級		性能等級		
		第 I 類建築物 (BSO)	第 II 類建築物 (EO1)	第 III 類建築物 (EO2)
中小 度地 震	30 年回歸期 (80%/50 年)	OP 等級 結構構件保持彈性 $IDR_a=0.5\%$		
	50 年回歸期 (60%/50 年)		OP 等級 結構構件保持彈性 $IDR_a=0.5\%$	
	75 年回歸期 (50%/50 年)			OP 等級 結構構件保持彈性 $IDR_a=0.5\%$
設計 地震	475 年回歸期 (10%/50 年)	LS 等級 $IDR_a=2.0\%$ $IDDR_a=0.6$	DC 等級 $IDR_a=1.5\%$ $IDDR_a=0.4$	IO 等級 $IDR_a=1.0\%$ $IDDR_a=0.2$
最大 考量 地震	2500 年回歸期 (2%/50 年)	CP 等級 $IDR_a=2.5\%$ $IDDR_a=0.8$	LS 等級 $IDR_a=2.0\%$ $IDDR_a=0.6$	DC 等級 $IDR_a=1.5\%$ $IDDR_a=0.4$
<p>各性能等級均應滿足 $Q_c \geq Q_v$，其中，Q_v 及 Q_c 分別代表結構體基底剪力強度需求及容量。 IDR_a：最大容許層間變位角。 $IDDR_a$：最大容許非彈性位移百分比（非彈性位移占極限非彈性位移容量之比例）。</p>				

表 3.3.1(a) 文獻[67]建議之不同用途群組之既有建築物之耐震設計性能目標 (I)

性能等級	地震等級 (使用年限內之超越機率)		
	第 I 類建築物 (BSO)	第 II 類建築物 (EO1)	第 III 類建築物 (EO2)
OP 等級 (結構構件彈性, $IDR_a=0.5\%$)	80%/(50-n)年	60%/(50-n)年	50%/(50-n)年
IO 等級 ($IDR_a=1.0\%$, $IDDR_a=0.2$)			10%/(50-n)年
DC 等級 ($IDR_a=1.5\%$, $IDDR_a=0.4$)		10%/(50-n)年	2%/(50-n)年
LS 等級 ($IDR_a=2.0\%$, $IDDR_a=0.6$)	10%/50 年	2%/(50-n)年	2%/5 年
CP 等級 ($IDR_a=2.5\%$, $IDDR_a=0.8$)	2%/50 年		
本表假設建築物設計使用年限 50 年, 已使用 n 年, (50-n)表示剩餘使用年限, 但不得小於 20 年。			

表 3.3.2(b) 文獻[67]建議之不同用途群組之既有建築物之耐震設計性能目標 (II)

地震等級	性能等級		
	第 I 類建築物 (BSO)	第 II 類建築物 (EO1)	第 III 類建築物 (EO2)
80%/50 年 (回歸期 30 年)	OP~IO		
60%/50 年 (回歸期 50 年)		OP~IO	
50%/50 年 (回歸期 75 年)			OP~IO
10%/50 年 (回歸期 475 年)	LS~CP	DC~LS	IO~DC
2%/50 年 (回歸期 2500 年)	CP	LS	DC~LS

表4.2.1 各國建築物使用年限規定

國家 (地區)	規 定			
歐 洲	EUROCODE (1999)	臨時建築物		1-5
		可簡易替代之建築物		25
		一般建築物與公共建築物		50
		紀念性建築物		100
紐西蘭	NZS 3101 (1995)	設計使用年限為50年		
日 本	建築工事標準 仕様書・同解説 JASS 5 (1997)	等級	設計使用年限 ^[a]	極限使用年限 ^[b]
		一般	30	65
		標準	65	100
		長期	100	
	財稅法規 (RC造) [77]	辦公廳、美術館		65
		店鋪、住宅、宿舍、學校、體育館		60
		餐廳、演奏廳、電影院、舞廳 (木作裝潢30%以上/以下)		40/50
		旅館、飯店 (木作裝潢30%以上/以下)		36/47
		醫院		47
		發電所、停車場、車庫、市場		45
臺 灣	建築物耐震設計規範及解說		50	
	臺北市地價調查用建築改良物耐用年數及折舊率表 (RC造)		60	
	所得稅法固定資產耐用年 數表：房屋建築 (RC造)	辦公、商店、住宅		50
		發電所、車庫、公共浴室		35
		受腐蝕之虞者		25
		活動房屋		3
	行政院財物標準分類：房屋 建築及設備分類明細表之 最低使用年限 (RC造)	公務辦公		60
		營業、學校、醫院、宿舍		55
廠房、農舍、倉庫、車庫		45		
[a]僅需局部輕微維修但毋須大規模修補，或不產生重大劣化之使用年限。				
[b]須進行大規模補強得以繼續使用之年限。				

表 4.4.1 臺北市政府所屬消防廳舍基本資料與耐震能力

項次	建築物名稱	設計建造年代 (民國)	總樓地板面積 (m ²)	樓層數	現況建築物耐震能力 (g)							
					X 向				Y 向			
					A _{y,x}	A _{d,x}	R _x	A _{c,x}	A _{y,y}	A _{d,y}	R _y	A _{c,y}
1	光明分隊	67	1,033	3	0.078	0.115	2.174	0.143	0.087	0.129	2.199	0.160
2	臺北市政府消防局大隊部 (中崙分隊)	81-86	7,778	12	0.111	0.169	2.045	0.227	0.122	0.176	1.885	0.230
3	雙溪分隊	81-87	3,769	13	0.100	0.170	2.400	0.240	0.089	0.220	3.944	0.351
4	社子分隊	71	912	4	0.107	0.150	1.965	0.183	0.118	0.158	1.793	0.190
5	臺北市政府消防局大隊部 (大同分隊)	85	7,344	13	0.127	0.187	1.945	0.247	0.093	0.179	2.849	0.265
6	景美分隊	66-67	1,200	4	0.070	0.108	2.380	0.136	0.135	0.229	2.877	0.294
7	萬華中隊 (龍山分隊)	66	1,420	4	0.073	0.123	2.839	0.158	0.281	0.387	1.897	0.470
8	城中分隊	65	2,465	8	0.057	0.065	1.281	0.073	0.111	0.143	1.577	0.175
9	內湖分隊	67-75	1,312	4	0.048	0.069	2.066	0.085	0.051	0.076	2.221	0.095
10	松信中隊 (八德分隊)	65	1,484	4	0.045	0.069	2.351	0.087	0.046	0.071	2.382	0.089
11	東湖分隊	80	8,243	7	0.126	0.246	2.905	0.366	0.165	0.340	3.121	0.515
12	萬芳分隊	76	1,675	3	0.117	0.145	1.536	0.168	0.208	0.295	2.011	0.362
13	文山中隊	67-69	6,429	4	0.303	0.321	1.122	0.338	0.325	0.335	1.062	0.345
14	陽明山分隊	40	231	1	0.077	0.077	1.000	0.077	0.248	0.248	1.000	0.248
15	天母分隊	64	315	2	0.217	0.337	2.412	0.424	0.234	0.364	2.420	0.459
16	大安中隊 (金華分隊)	74	5,275	6	0.214	0.332	2.407	0.418	0.236	0.347	2.162	0.430
17	士林中隊 (劍潭分隊)	64	685	1	0.439	0.606	1.906	0.736	0.436	0.864	3.927	1.141
備註	A _d 為結構系統韌性容量為 R _a 時之耐震能力。											

表 4.5.1 中央政府總預算編製作業手冊-共同性費用編列標準表-鋼筋混凝土構造房屋建築費[95-98]

單價 (萬元/m ²)		樓層數 (僅設置地上層者)			
用途	預算年度	1~5	6~12	13~16	17~
辦公大樓	2008	1.990	2.330	2.770	3.160
	2009	2.400	2.810	3.340	3.810
	2010	1.990	2.330	2.770	3.160
	2011	2.034	2.381	2.831	3.230
教室	2009	2.210	2.530	3.070	
	2010	1.830	2.100	2.550	
	2011	1.870	2.146	2.606	
住宅宿舍	2009	2.210	2.610	3.000	3.130
	2010	1.830	2.170	2.490	2.600
	2011	1.870	2.218	2.545	2.657

本表所列單價不含空調、電梯設備費、景觀費。

表 4.5.2 公共建設工程經費估算編列手冊-建築工程-鋼筋混凝土構造[94]

單價 (萬元/坪)		樓層數					
用途	地區	1~5	6~9	10~15	16~17	18~21	22~25
辦公室	北區		5.7-6.3	6.5-7.8	7.8-8.3	8.4-9.1	9.3-9.9
	中區		5.6-6.2	6.3-7.6	7.6-8.2	8.3-9.0	9.2-9.8
	南區		5.5-6.1	6.2-7.5	7.4-8.1	8.2-8.8	9.0-9.7
	東區		5.5-6.1	6.1-7.4	7.3-8.0		
住宅	北區	4.2-4.5	5.5-6.1	6.3-7.5	7.5-7.9	8.0-8.8	9.0-9.7
	中區	4.1-4.4	5.4-6.0	6.1-7.4	7.4-7.8	7.9-8.6	8.8-9.6
	南區	4.0-4.2	5.3-5.9	6.0-7.3	7.3-7.7	7.8-8.5	8.8-9.5
	東區	3.9-4.0	5.3-5.7	5.9-7.2	7.2-7.6		

表 4.5.3 臺北市政府建築工程結構體概算編列標準-鋼筋混凝土構造 (2007) [100]

樓層數 (僅設置地上層者)	1~5	6~10	11~20	21~
單價 (元/m ²)	8,010	8,811	9,372	10,013

1. 本表適用於用途係數 I=1.5 之建築物。
2. 本表所列單價僅含結構體工料費用，並不包含品管費、環保安衛費、營造商保險、稅捐及利潤等費用。

表 4.5.4 臺北市都市更新事業（重建區段）建築物工程造價基準-鋼筋混凝土構造（2010）[101]

單價（萬元/m ² ）	樓層數（僅設置地上層者）				
建材設備等級	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25
第一級	1.96	2.52	2.83	3.10	3.40
第二級	2.22	2.86	3.21	3.52	3.86
第三級	2.81	3.61	4.06	4.45	4.87
本表所列單價包含所有直接工程成本、保險費及空氣污染防制費等。					

表 4.5.5 臺灣地區住宅類建築造價參考表-鋼筋混凝土構造（2008）[102]

單價（萬元/坪）	地 區				
	臺北市	新北 桃園 基隆	新竹 苗栗 雲林 彰化 南投 臺中 嘉義	宜蘭 臺南 高雄 屏東	花蓮 臺東
1	5.2	4.9	4.4	4.3	4.6
2	5.5	5.2	4.7	4.6	4.9
3	5.9	5.6	5.1	5.0	5.3
4~5	6.2	6.0	5.3	5.0	5.3
6~8	7.4	6.9	6.1	6.0	6.2
9~10	7.8	7.2	6.4	6.2	6.5
11~12	8.4	7.8	6.9	6.8	7.1
13~14	8.6	8.0	7.2	7.1	7.3
15~16	9.6	9.0	8.1	8.0	8.3
17~18	10.8	10.2	9.2	9.1	9.4
19~20	11.9	11.2	10.3	10.2	10.4
21~	13.2	11.9	11.0	10.8	11.1
本表所列單價不含裝潢費。					

表 4.5.6 鋼筋混凝土住宅建築各工項成本比例統計[103]

工程項目	比率 (%)
假設工程	1.5~3.8
結構工程 (含大地工程)	31.4~52.7
水電消防工程	14.0~23.7
裝修工程	19.9~27.9
門窗工程	2.3~9.7
防水隔熱工程	0.6~1.0
景觀工程	0.1~2.3
雜項工程	0.2~4.4
其他	2.0~7.9

表 4.6.1 臺北市政府所屬消防廳舍初步耐震補強設計資料

項次	建築物名稱	現況建築物			補強方案				
		耐震能力 (g)		預估結構 體原建造 成本 C_{SO} (萬元)	補強方式	耐震能力 (g)		整體補 強費用 C_R (萬元)	結構體 補強費 用 ΔC_S (萬元)
		X 向	Y 向			X 向	Y 向		
		$A_{c,x}$	$A_{c,y}$			$A_{c,x}$	$A_{c,y}$		
1	光明分隊	0.143	0.160	479.7	RC 剪力牆	0.373	0.430	137.4	126.5
					鋼框架斜撐	0.429	0.481	304.4	289.8
2	臺北市政府消防局大隊部	0.227	0.230	5729.4	RC 剪力牆	0.494	0.458	1878.2	1703.0
					RC 剪力牆及翼牆	0.478	0.459	2030.5	1846.8
3	雙溪分隊	0.240	0.351	3447.2	鋼斜撐及翼牆	0.541	0.647	964.1	726.8
4	臺北市政府消防局大隊部	0.247	0.265	6548.5	梁柱擴大斷面	0.470	0.463	2386.2	1582.5
5	景美分隊	0.136	0.294	581.9	鋼框架	0.433	0.376	237.1	199.4
6	萬華中隊	0.158	0.470	734.2	RC 剪力牆	0.361	0.552	270.9	190.8
					鋼框架	0.381	0.472	315.9	235.6
7	東湖分隊	0.366	0.515	6155.8	鋼斜撐	0.475	0.515	143.3	68.7
8	萬芳分隊	0.168	0.362	839.4	RC 剪力牆	0.385	0.399	216.4	173.8
9	陽明山分隊	0.077	0.248	108.1	鋼斜撐	0.411	0.391	81.6	58.3
備註	1.本表所列金額為民國 93 年 (2004) 之營建物價水準。 2.整體補強費用 C_R 不包括修復費用、設計監造費、工程管理費。								

表 4.7.1 各類型公共建設建議之折現率[112]

類 別			折現率 (%) (2004 年經濟條件)	
社會經濟效益 型公共建設	難以採行外部效 益內部化措施者	由政府自行籌資興建營 運者	中央政府長期公 債利率	
社會企業型 公共建設	可採外部效益內 部化措施，衍生內 部化財務效益，進 而具自償能力者	都市建設	住宅	6.29~7.70
			下水道	6.36~7.70
			都市開發	6.03~8.81
		交通建設	公路	7.38~7.70
			軌道	6.36~7.70
			航空	4.37~7.70
			港埠	7.42~7.70
			通信資訊	4.97~5.42
			觀光	6.39~6.91
			水利建設	水資源
		工商設施		6.91
		能源開發	油氣	3.70~6.91
			電力	3.70~6.91
環境保護	垃圾處理	4.23~6.91		
公益事業型 公共建設	非營利組織型 態，但求自給自足 之公益事業經營 模式者	教育、文化、體育（不 含職業運動）、社會福 利、衛生醫療、污染防 治、基礎農業設施建設	6.90~7.32	

表 5.1.1 HAZUS 地震災害損失評估輸出資料

<p>地震危害潛勢圖</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.評估地區之地震強度指標 2.等地震度圖 3.各評估地區之地震永久位移 4.等地震永久位移圖 5.土壤液化分布圖 6.邊坡地滑機率 	<p>洪水氾濫區</p> <p>受洪水侵害之居民數與建築物之價值</p>
<p>一般建築物之損失特性</p> <p>各結構與用途之建築物結構及非結構構件損壞率</p>	<p>危險物質之分布區位</p> <p>具有危險物質之設施分布區位</p>
<p>交通與維生管線</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.各種交通系統與維生管線之損壞機率、維修與置換之成本與修護時間 2.水管之漏水與折斷之個數與分配 3.電力與引用水系統損壞之分布圖 	<p>地震後之碎屑與瓦礫</p> <p>建築碎屑與瓦礫之重量、型態、分布與特質</p>
<p>基礎設施</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.損壞機率 2.功能維持率 3.功能中斷時間與修復時間 	<p>社會損失</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.無家可歸之戶數 2.需要臨時庇護所之人數 3.一天中不同時段的人員傷亡數
<p>高潛在損失 (HPL) 設施</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.水壩之區位 2.核電廠之區位 3.軍事設施損毀之機率與修護成本 4.其他 HPL 設施之區位 	<p>建築物損壞之直接經濟損失</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.建築物結構與非結構構件損壞成本 2.內部財產損失 3.商業成本損失 4.重置與搬遷成本 5.營業損失 6.工作薪資損失 7.租金損失
<p>地震火災延燒</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.起火點之數目 2.發生火災位置之比率 	<p>間接經濟損失</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.長期性對區域與總體經濟之影響 2.區域之長期性經濟影響

表 5.2.1 HAZUS 建議之結構系統、非結構構件、內部財產在不同損害狀態下的損失比（摘錄）

建築物用途		項目	各損害狀態之損失比 DR_d ^[a] (%)			
			輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
GOV1	一般政府機關辦公室	結構系統	0.3	1.8	9.0	17.9
		加速度敏感型非結構構件 ^[b]	1.0	4.9	14.8	49.3
		位移敏感型非結構構件 ^[c]	0.7	3.3	16.4	32.8
		內部財產	1.0	5.0	25.0	50.0
GOV2	消防、警政廳舍、緊急應變中心	結構系統	0.3	1.5	7.7	15.3
		加速度敏感型非結構構件	1.0	5.1	15.1	50.5
		位移敏感型非結構構件	0.7	3.4	17.1	34.2
		內部財產	1.0	5.0	25.0	50.0

[a]結構系統、非結構構件之損失比為各該項目之修復費用占建築物全部新建成本之比例，內部財產之損失比為損失金額占其購置成本之比例。
 [b]加速度敏感型非結構構件：天花板、機房與電力設備、管線、樓梯、電梯等。
 [c]位移敏感型非結構構件：隔間牆、外牆、裝飾品、玻璃等。

表 5.2.2 TELES 建議之結構系統、非結構構件、內部財產在不同損害狀態下的損失比（摘錄）

項目	建築物構造類別或用途	各損害狀態之損失比 DR_d ^[b] (%)			
		輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
結構系統	鋼筋混凝土構造 (低/中/高樓 ^[a]) C1L/C1M/C1H	1.0/0.8/0.5	4/3/2	32/24/16	100
加速度敏感型/位移敏感型非結構構件	政府機關 Gov1	1	10	30	100
內部財產	政府機關 Gov1	0.1	1	10	50

[a]低、中、高樓分別指 1-3 層、4-7 層、8 層以上。
 [b]損失比為各該項目之修復（損失）金額占各該項目新建（購置）成本之比例。

表 5.2.3 HAZUS 建議之不同損害狀態下的室內外傷亡率 (摘錄)

項目	結構系統 損害狀態	建築物構造 類別 ^[a]	傷亡率 (%)			
			S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
室內 傷亡 率	輕微損害	C1L/C1M/C1H	0.05	0	0	0
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	中度損害	C1L/C1M/C1H	0.25	0.030	0	0
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	嚴重損害	C1L/C1M/C1H	1	0.1	0.001	0.001
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	完全損害但 無倒塌	C1L/C1M/C1H	5	1	0.01	0.01
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
完全損害並 倒塌 ^[b]	C1L/C1M/C1H	40	20	5	10	
	C2L/C2M/C2H					
	C3L/C3M/C3H					
室外 傷亡 率	中度損害	C1L/C1M/C1H	0.05	0.005	0	0
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	嚴重損害	C1L/C1M/C1H	0.1/0.2/0.3	0.01/0.02/0.03	0.0001/0.0002 /0.0003	0.0001/0.0002 /0.0003
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	完全損害	C1L/C1M/C1H	2/2.2/2.5	0.5/0.7/1	0.1/0.2/0.3	0.1/0.2/0.3
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
[a]建築物構造類別 C1 代表純鋼筋混凝土構架，C2 代表具混凝土剪力牆之鋼筋混凝土構架，C3 代表具磚牆之鋼筋混凝土構架。						
[b]完全損害下 C1L/C1M/C1H 之倒塌率為 13%/10%/5%，C2L/C2M/C2H 之倒塌率為 13%/10%/5%，C3L/C3M/C3H 之倒塌率為 15%/13%/10%。						

表 5.2.4 TELES 建議之不同損害狀態下的室內傷亡率 (摘錄)

結構系統 損害狀態	建築物構造 類別	傷亡率 (%)			
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
輕微損害	C1L/C1M/C1H	0.02	0.001	0	0
中度損害		0.2	0.02	0.002	0
嚴重損害		1	0.5	0.1	0.01
完全損害 但無倒塌		7/4/2	5.6/3.2/1.6	4.2/2.4/1.2	3.5/2/1
完全損害 且倒塌 ^[a]		10/8/6	8/6.4/4.8	6/4.8/3.6	5/4/3
[a]完全損害下 C1L/C1M/C1H 之倒塌率為 20%/15%/10%。					

表 5.2.5 TELES 建議之不同時段不同用途建築物人口密度 (人/1,000 平方公尺)

用 途		日間	夜間	假日或通勤
Res1	住宅	8.3	22.2	16.7
Res2	國際觀光旅館、套房、旅館	5.6	16.7	11.1
Com1	百貨公司、商場、超市、市場、店鋪倉庫	40.0	10.0	40.0
Com2	電視台、廣播電台、辦公廳室	40.0	5.0	10.0
Com3	夜總會、舞廳、咖啡廳、酒家、歌廳、餐廳、影劇院、遊藝場、游泳池	20.0	10.0	40.0
Com4	診所	33.3	20.0	25.0
Com5	開放空間、停車場、防空避難室	2.5	0.2	2.5
Ind1	油槽、焚化爐、工廠	16.7	6.7	6.7
Agr1	養殖場、農舍、農業用房屋	10.0	0.2	0.2
Rel1	納骨塔、寺廟、教堂	12.5	0.2	1.0
Gov1	政府機關	33.3	1.0	5.0
Edu1	校舍	100.0	1.0	5.0
Edu2	圖書館、美術館、博物館、紀念堂、體育館、禮堂	20.0	0.2	10.0

表 5.2.6 建築物單位面積拆除廢棄物重量

構造別	用途別	廢棄物種類與單位面積重量 (kg/m ²)						
		鋼材	混凝土	磚石	非鐵金屬	玻璃	木材	總計
鋼筋混凝土	住宅	92	1322	125	1	2	17	1,558
	工廠	90	1179	99	10	2	17	1,397
	辦公	125	1399	106	1	1	17	1,649
	學校	106	1445	219	1	2	17	1,790
鋼構造	不分	165	464	99	10	2	17	756
磚造	不分	0	0	792	1	1	110	903
加強磚造	不分	21	704	660	1	1	176	1,563
木構造	不分	0	0	101	1	1	440	543

表 5.2.7 HAZUS 建議之結構系統及非結構構件之單位面積重量及各損害狀態下之廢棄物產生比率 (摘錄)

項目	建築物構造類別	RCS				BWO					
		單位重 W_{RCS} (T/1000ft ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)				單位重 W_{BWO} (T/1000ft ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)			
			輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害		輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
結構系統	C1	98	0	5	33	100	0	0	0	0	100
	C2	112	1	8	35	100	0	0	0	0	100
	C3	90	0	4	32	100	20	5	25	60	100
非結構構件	C1	4	0.1	8	28	100	5.3	1	7	35	100
	C2	4	0.1	10	30	100	5.3	1	7	35	100
	C3	4	0.1	10	30	100	5.3	1	7	35	100

表 5.2.8 TELES 建議之結構系統及非結構構件之單位面積重量及各損害狀態下之廢棄物產生比率 (摘錄)

項目	建築物構造類別或用途	RCS				BWO					
		單位重 W_{RCS} (T/m ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)				單位重 W_{BWO} (T/m ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)			
			輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害		輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
結構系統	C1L	1.13	0	5	33	100	0.09	5	15	40	100
	C1M				30					35	
	C1H				27					30	
非結構構件	加速度敏感型	0.03	0.4	4	40	100	0.12	0.8	8	40	100
	位移敏感型	0.06									

表 5.2.9 HAZUS 及 TELES 建議之不同損害狀態下的建築物修復時間 (摘錄)

	建築物用途	結構系統各損害狀態之修復時間 (日)			
		輕度損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
HAZUS	GOV1	10	90	360	480
	GOV2	10	60	270	360
TELES	Gov1	5	60	240	480

表 5.2.10 ATC-13 建議之消防隊震後功能恢復率與時間之關係

損害狀態	損失比 (%) (平均值)	達各功能恢復率所需之平均時間 (日)		
		30%	60%	100%
Slight	0-1 (0.5)	2.2	4.1	5.1
Light	1-10 (5)	5.8	9.5	18.2
Moderate	10-30 (20)	22.8	32.5	60.4
Heavy	30-60 (45)	47.1	79.4	134.9
Major	60-100 (80)	93.7	175.1	256.1
Destroyed	100 (100)	-	-	346.8

表 5.2.11 平時與地震後之消防活動環境差異

時機	災害條件	消防活動障礙
平時	<ol style="list-style-type: none"> 1.發生火災。 2.受災區域有限。 3.災害持續時間短暫。 	交通阻塞。
地震後	<ol style="list-style-type: none"> 1.同時發生多起火災。 2.受災區域廣泛。 3.火災延燒，災害時間長。 4.火災以外災害，如海嘯、山崩、建築物倒塌而受傷者多等複合性災害。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.道路損壞、倒塌建築物散亂、人員避難路徑衝突，交通失序，致使消防車通行受阻，可及性低。 2.電話迴路故障、佔線等電信障礙、停電、居民避難、恐慌，致火災情報發覺及傳達困難。 3.消防栓、蓄水池損壞，可供利用水源不足。 4.消防廳舍與設施受損、消防隊員參集狀況、疲累程度、或可能為受災戶，致部隊無法出勤、隊員承受過大心理負擔等。

表 6.1.1 臺北市政府消防局消防分隊平均消防救護車輛配置數量與價值

車 種		單價 (萬元)	數量	複價 (萬元)	備註
消防車	曲折雲梯消防車	2096.0	1	2096.0	30 公尺雲梯車
	水箱消防車	239.0	4	956.0	小型消防車
	水庫消防車	560.0	1	560.0	
救災車	救災指揮車	150.2	1	150.2	
	災情勘查車	69.0	1	69.0	
消防勤務車	消防後勤車	67.5	2	135.0	
	消防查察車				
	勤務機車	5.3	6	31.8	
救護車	一般型救護車	79.2	2	158.4	
合計			18	4156.4	

表 6.1.2 臺北市大安區歷年消防勤務統計

年度	火災搶救					緊急救護
	次數	死亡人數	受傷人數	救出人數	財物損失 (萬元)	人次
2005	68	0	0	0	204.4	7,280
2006	53	0	0	0	311.3	8,119
2007	50	2	1	0	328.4	9,460
2008	43	1	3	0	305.5	10,390

表 6.2.1 TELES 建議之加速度敏感型非結構構件的易損性曲線參數

設計水準	各損害狀態下之尖峰頂層加速度的中值 (g)			
	輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
高耐震設計	0.6	1.2	1.8	2.4
中耐震設計	0.5	1.0	1.5	2.0
低耐震設計	0.4	0.8	1.2	1.6
未耐震設計	0.4	0.8	1.2	1.6

各損害狀態之尖峰頂層加速度的對數標準差均為 0.66。

表 6.2.2 消防廳舍以不同用途係數設計時之地震損失計算（單位：萬元/年）

設計基準 (用途係數 I)	直接經濟損失								間接經濟損失(建築物功能中斷損失)					地震 損失
	結構 系統 損失	非結構 構件 損失	內部 財產 損失	消防 車輛 損失	人員 傷亡 損失	建築 廢棄物 處理費	搬遷 損失	合計	功能復原期間		震後緊急 應變期間		合計	
									額外火 災損失	額外人 命損失	額外火 災損失	額外人 命損失		
1.0	10.56	21.01	3.18	14.70	7.61	1.63	2.96	61.65	0.12	24.31	23.42	24.82	72.67	134.32
1.1	8.19	16.34	2.39	11.12	5.71	1.24	2.28	47.27	0.09	18.90	21.13	22.11	62.23	109.50
1.2	6.48	12.96	1.83	8.59	4.38	0.96	1.78	36.98	0.07	14.97	19.19	19.93	54.16	91.14
1.3	5.17	10.36	1.42	6.69	3.38	0.75	1.41	29.19	0.06	11.93	17.53	18.14	47.66	76.85
1.4	4.19	8.42	1.11	5.30	2.66	0.60	1.13	23.41	0.05	9.65	16.04	16.61	42.35	65.76
1.5	3.42	6.89	0.88	4.22	2.10	0.48	0.91	18.90	0.04	7.88	14.73	15.30	37.95	56.85
1.6	2.81	5.68	0.70	3.40	1.68	0.39	0.74	15.40	0.03	6.45	13.54	14.17	34.19	49.59
1.7	2.34	4.74	0.57	2.77	1.36	0.32	0.61	12.71	0.03	5.35	12.53	13.24	31.15	43.86
1.8	1.96	3.98	0.46	2.27	1.11	0.26	0.51	10.55	0.02	4.46	11.59	12.40	28.47	39.02
1.9	1.65	3.36	0.38	1.87	0.91	0.22	0.42	8.81	0.02	3.73	10.72	11.65	26.12	34.93
2.0	1.40	2.86	0.32	1.56	0.75	0.18	0.36	7.43	0.02	3.16	9.98	11.02	24.18	31.61
2.1	1.20	2.45	0.26	1.30	0.62	0.15	0.30	6.29	0.01	2.68	9.28	10.43	22.40	28.69
2.2	1.03	2.10	0.22	1.09	0.52	0.13	0.25	5.34	0.01	2.28	8.64	9.91	20.84	26.18
2.3	0.89	1.82	0.19	0.92	0.44	0.11	0.22	4.59	0.01	1.96	8.06	9.43	19.46	24.05
2.4	0.77	1.58	0.16	0.79	0.37	0.09	0.19	3.96	0.01	1.69	7.54	9.02	18.26	22.22
2.5	0.67	1.38	0.13	0.67	0.32	0.08	0.16	3.41	0.01	1.45	7.05	8.63	17.14	20.55

表 6.2.3 消防廳舍以不同用途係數設計時之生命週期成本計算（單位：萬元/年）

設計基準 (用途係數 I)	地震損失	建造成本	生命週期成本
1.0	134.32	140.33	274.65
1.1	109.50	143.14	252.64
1.2	91.14	145.95	237.09
1.3	76.85	148.75	225.60
1.4	65.76	151.56	217.32
1.5	56.85	154.37	211.22
1.6	49.59	157.17	206.76
1.7	43.86	159.98	203.84
1.8	39.02	162.79	201.81
1.9	34.93	165.60	200.52
2.0	31.61	168.40	200.01
2.1	28.69	171.21	199.89
2.2	26.18	174.02	200.20
2.3	24.05	176.82	200.87
2.4	22.22	179.63	201.84
2.5	20.55	182.44	202.98

表 6.2.4 放大各參數值 10% 對消防廳舍生命週期成本之影響

參 數	生命週期成本變動 (%)
建築物初始建造成本 C_I	6.26
建築物內部財產價值 C_{CN}	0.12
消防車輛價值 C_{FT}	0.54
建築物人員室內外總人數或其剩餘職業壽命 $T_{RO,FM}$ 或平均年薪 I_{FM}	0.28
建築廢棄物總重量 W_{DE} 或其單位重量處理成本 C_{DE}	0.06
臨時辦公廳舍面積 FA_{TO} 或其單位面積時間租金 C_{RE} 或建築物修復時間 T_{R,d_s}	0.11
轄區年度火災損失 YFL 或功能復原期間額外火災損失因子 AFL_R	0.00
轄區震後火災數 NEF 或平均每起火災損失 PFL 或地震緊急應變期間額外火災損失因子 AFL_E	0.85
功能復原期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目 NDS_R 或其剩餘職業壽命 $T_{RO,EMSR}$ 或平均年薪 I_{EMSR}	0.89
震後緊急應變期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目 NDS_E 或其剩餘職業壽命 $T_{RO,EMSE}$ 或平均年薪 I_{EMSE}	0.90
建築物功能喪失率 FFR	2.65

表 6.2.5 新建消防廳舍於不同使用年限時對應之生命週期成本（單位：萬元/年）

用途 係數 (I)	地震 損失	不同建築物使用年限換算之建造成本								不同建築物使用年限之生命週期成本							
		10	20	30	40	50	60	80	100	10	20	30	40	50	60	80	100
1.0	134.32	454.75	255.32	190.16	158.56	140.33	128.75	115.54	108.69	589.07	389.63	324.48	292.88	274.65	263.07	249.86	243.01
1.1	109.50	463.85	260.42	193.97	161.73	143.14	131.33	117.85	110.87	573.35	369.92	303.47	271.23	252.64	240.83	227.35	220.37
1.2	91.14	472.94	265.53	197.77	164.91	145.95	133.90	120.16	113.04	564.08	356.67	288.91	256.05	237.09	225.04	211.30	204.18
1.3	76.85	482.04	270.64	201.57	168.08	148.75	136.48	122.47	115.22	558.89	347.48	278.42	244.92	225.60	213.32	199.32	192.06
1.4	65.76	491.14	275.74	205.38	171.25	151.56	139.05	124.78	117.39	556.90	341.50	271.14	237.01	217.32	204.81	190.54	183.15
1.5	56.85	500.23	280.85	209.18	174.42	154.37	141.63	127.09	119.56	557.09	337.70	266.04	231.27	211.22	198.48	183.95	176.42
1.6	49.59	509.33	285.96	212.98	177.59	157.17	144.20	129.40	121.74	558.92	335.54	262.57	227.18	206.76	193.79	178.99	171.33
1.7	43.86	518.42	291.06	216.79	180.76	159.98	146.78	131.71	123.91	562.28	334.92	260.65	224.62	203.84	190.64	175.57	167.77
1.8	39.02	527.52	296.17	220.59	183.93	162.79	149.35	134.03	126.08	566.53	335.19	259.61	222.95	201.81	188.37	173.04	165.10
1.9	34.93	536.61	301.27	224.39	187.10	165.60	151.93	136.34	128.26	571.54	336.20	259.32	222.03	200.52	186.86	171.26	163.19
2.0	31.61	545.71	306.38	228.20	190.28	168.40	154.50	138.65	130.43	577.32	337.99	259.81	221.89	200.01	186.12	170.26	162.05
2.1	28.69	554.80	311.49	232.00	193.45	171.21	157.08	140.96	132.61	583.49	340.17	260.69	222.13	199.89	185.76	169.64	161.29
2.2	26.18	563.90	316.59	235.80	196.62	174.02	159.65	143.27	134.78	590.08	342.77	261.99	222.80	200.20	185.84	169.45	160.96
2.3	24.05	572.99	321.70	239.61	199.79	176.82	162.23	145.58	136.95	597.04	345.75	263.66	223.84	200.87	186.28	169.63	161.00
2.4	22.22	582.09	326.81	243.41	202.96	179.63	164.80	147.89	139.13	604.30	349.02	265.63	225.18	201.84	187.02	170.11	161.34
2.5	20.55	591.18	331.91	247.21	206.13	182.44	167.38	150.20	141.30	611.73	352.46	267.76	226.68	202.98	187.92	170.75	161.85

表 6.2.6 新建消防廳舍於不同折現率時對應之生命週期成本（單位：萬元/年）

用途 係數 (I)	地震 損失	不同折現率換算之建造成本				不同折現率之生命週期成本			
		2.5%	5.0%	7.5%	10.0%	2.5%	5.0%	7.5%	10.0%
1.0	134.32	140.33	218.02	306.74	401.42	274.65	352.34	441.06	535.74
1.1	109.50	143.14	222.38	312.87	409.45	252.64	331.88	422.37	518.95
1.2	91.14	145.95	226.75	319.01	417.48	237.09	317.88	410.15	508.62
1.3	76.85	148.75	231.11	325.14	425.51	225.60	307.95	401.99	502.35
1.4	65.76	151.56	235.47	331.28	433.54	217.32	301.23	397.04	499.30
1.5	56.85	154.37	239.83	337.41	441.57	211.22	296.68	394.27	498.42
1.6	49.59	157.17	244.19	343.55	449.59	206.76	293.78	393.14	499.18
1.7	43.86	159.98	248.55	349.68	457.62	203.84	292.41	393.54	501.48
1.8	39.02	162.79	252.91	355.82	465.65	201.81	291.93	394.84	504.67
1.9	34.93	165.60	257.27	361.95	473.68	200.52	292.20	396.88	508.61
2.0	31.61	168.40	261.63	368.09	481.71	200.01	293.24	399.70	513.32
2.1	28.69	171.21	265.99	374.22	489.74	199.89	294.68	402.91	518.42
2.2	26.18	174.02	270.35	380.36	497.76	200.20	296.53	406.54	523.95
2.3	24.05	176.82	274.71	386.49	505.79	200.87	298.76	410.54	529.84
2.4	22.22	179.63	279.07	392.63	513.82	201.84	301.29	414.84	536.04
2.5	20.55	182.44	283.43	398.76	521.85	202.98	303.98	419.31	542.40

表 6.3.1 消防廳舍以不同補強基準設計時之地震損失計算 (單位：萬元/年)

(a)補強基準為規範規定值之倍數

補強基準 (規範規定 值之倍數)	直接經濟損失								間接經濟損失(建築物功能中斷損失)					地震 損失
	結構系 統損失	非結構 構件 損失	內部 財產 損失	消防 車輛 損失	人員 傷亡 損失	建築 廢棄物 處理費	搬遷 損失	合計	功能復原期間		震後緊急 應變期間		合計	
									額外火 災損失	額外人 命損失	額外火 災損失	額外人 命損失		
0.5(未補強)	36.76	68.73	12.69	56.28	32.03	5.77	9.13	221.39	0.32	65.01	31.33	34.57	131.23	352.62
0.6	25.81	46.78	8.29	37.21	20.64	3.90	6.44	149.07	0.24	47.98	28.60	31.03	107.85	256.92
0.7	18.31	32.14	5.54	25.10	13.81	2.65	4.43	101.99	0.16	33.58	24.55	25.84	84.13	186.12
0.8	13.40	22.93	3.84	17.49	9.55	1.86	3.15	72.21	0.12	24.09	21.35	22.03	67.58	139.79
0.9	10.01	17.47	2.75	12.49	6.77	1.35	2.28	53.14	0.09	17.70	18.71	19.09	55.60	108.73
1.0	7.64	14.22	2.05	9.11	4.92	1.01	1.69	40.63	0.06	13.20	16.53	16.84	46.63	87.26
1.1	5.92	12.68	1.69	6.78	3.64	0.79	1.27	32.76	0.05	10.01	14.65	15.02	39.72	72.48
1.2	4.66	12.55	1.66	5.12	2.74	0.65	0.97	28.36	0.04	7.74	13.10	13.60	34.47	62.82
1.3	3.73	12.55	1.66	3.94	2.09	0.55	0.75	25.27	0.03	6.04	11.74	12.42	30.23	55.50
1.4	3.01	12.55	1.66	3.06	1.62	0.47	0.59	22.96	0.02	4.77	10.54	11.41	26.74	49.70
1.5	2.45	12.55	1.66	2.41	1.27	0.42	0.47	21.22	0.02	3.82	9.53	10.59	23.95	45.17
1.6	2.02	12.55	1.66	1.91	1.00	0.37	0.38	19.89	0.02	3.07	8.61	9.86	21.55	41.45
1.7	1.67	12.55	1.66	1.53	0.80	0.34	0.30	18.87	0.01	2.50	7.82	9.25	19.59	38.45

(b)補強基準為設計使用年限

補強基準 (設計使 用年限)	直接經濟損失								間接經濟損失(建築物功能中斷損失)					地震 損失
	結構系 統損失	非結構 構件 損失	內部 財產 損失	消防 車輛 損失	人員 傷亡 損失	建築 廢棄物 處理費	搬遷 損失	合計	功能復原期間		震後緊急 應變期間		合計	
									額外火 災損失	額外人 命損失	額外火 災損失	額外人 命損失		
50	7.64	14.22	2.05	9.11	4.92	1.01	1.69	40.63	0.06	13.20	16.53	16.84	46.63	87.26
40	9.08	16.18	2.47	11.15	6.03	1.21	2.05	48.16	0.08	15.88	17.88	18.22	52.06	100.22
35	10.06	17.53	2.77	12.55	6.82	1.35	2.29	53.37	0.09	17.71	18.76	19.15	55.71	109.07
30	11.26	19.24	3.14	14.31	7.79	1.53	2.60	59.87	0.10	20.04	19.75	20.22	60.11	119.98
25	12.90	22.03	3.67	16.75	9.13	1.79	3.02	69.29	0.11	23.14	20.99	21.61	65.85	135.14
20	15.10	26.09	4.42	20.10	11.01	2.13	3.59	82.44	0.13	27.40	22.54	23.41	73.49	155.93
15	18.44	32.42	5.59	25.31	13.92	2.67	4.48	102.84	0.17	33.91	24.68	26.00	84.75	187.59
10	24.17	43.59	7.68	34.52	19.09	3.63	6.02	138.70	0.22	45.08	27.78	29.93	103.01	241.71

表 6.3.2 消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本計算（單位：萬元/年）

(a)繼續使用年限為 10 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	150.62	0.00	503.24
0.6	256.92	150.62	10.95	418.49
0.7	186.12	150.62	21.90	358.64
0.8	139.79	150.62	32.85	323.26
0.9	108.73	150.62	43.80	303.15
1.0	87.26	150.62	54.75	292.62
1.1	72.48	150.62	65.70	288.80
1.2	62.82	150.62	76.65	290.09
1.3	55.50	150.62	87.60	293.72
1.4	49.70	150.62	98.55	298.87
1.5	45.17	150.62	109.49	305.29
1.6	41.45	150.62	120.44	312.51
1.7	38.45	150.62	131.39	320.47

(b)繼續使用年限為 15 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	140.91	0.00	493.53
0.6	256.92	140.91	7.74	405.56
0.7	186.12	140.91	15.48	342.51
0.8	139.79	140.91	23.22	303.92
0.9	108.73	140.91	30.96	280.60
1.0	87.26	140.91	38.70	266.86
1.1	72.48	140.91	46.44	259.83
1.2	62.82	140.91	54.18	257.91
1.3	55.50	140.91	61.92	258.33
1.4	49.70	140.91	69.66	260.27
1.5	45.17	140.91	77.40	263.48
1.6	41.45	140.91	85.14	267.49
1.7	38.45	140.91	92.88	272.24

表 6.3.2 消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本計算（單位：萬元/年）（續）

(c)繼續使用年限為 20 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	133.31	0.00	485.93
0.6	256.92	133.31	6.15	396.37
0.7	186.12	133.31	12.29	331.73
0.8	139.79	133.31	18.44	291.55
0.9	108.73	133.31	24.59	266.63
1.0	87.26	133.31	30.74	251.31
1.1	72.48	133.31	36.88	242.68
1.2	62.82	133.31	43.03	239.17
1.3	55.50	133.31	49.18	237.99
1.4	49.70	133.31	55.33	238.34
1.5	45.17	133.31	61.47	239.96
1.6	41.45	133.31	67.62	242.38
1.7	38.45	133.31	73.77	245.53

(d)繼續使用年限為 25 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	127.25	0.00	479.87
0.6	256.92	127.25	5.20	389.36
0.7	186.12	127.25	10.40	323.77
0.8	139.79	127.25	15.60	282.65
0.9	108.73	127.25	20.81	256.79
1.0	87.26	127.25	26.01	240.51
1.1	72.48	127.25	31.21	230.94
1.2	62.82	127.25	36.41	226.48
1.3	55.50	127.25	41.61	224.36
1.4	49.70	127.25	46.81	223.76
1.5	45.17	127.25	52.01	224.43
1.6	41.45	127.25	57.21	225.91
1.7	38.45	127.25	62.42	228.12

表 6.3.2 消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本計算（單位：萬元/年）（續）

(e)繼續使用年限為 30 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	122.33	0.00	474.95
0.6	256.92	122.33	4.58	383.82
0.7	186.12	122.33	9.16	317.61
0.8	139.79	122.33	13.74	275.86
0.9	108.73	122.33	18.31	249.38
1.0	87.26	122.33	22.89	232.48
1.1	72.48	122.33	27.47	222.28
1.2	62.82	122.33	32.05	217.20
1.3	55.50	122.33	36.63	214.46
1.4	49.70	122.33	41.21	213.24
1.5	45.17	122.33	45.79	213.29
1.6	41.45	122.33	50.36	214.14
1.7	38.45	122.33	54.94	215.72

(f)繼續使用年限為 35 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	118.29	0.00	470.91
0.6	256.92	118.29	4.14	379.34
0.7	186.12	118.29	8.28	312.69
0.8	139.79	118.29	12.42	270.50
0.9	108.73	118.29	16.56	243.58
1.0	87.26	118.29	20.70	226.24
1.1	72.48	118.29	24.84	215.61
1.2	62.82	118.29	28.98	210.09
1.3	55.50	118.29	33.12	206.91
1.4	49.70	118.29	37.26	205.25
1.5	45.17	118.29	41.40	204.87
1.6	41.45	118.29	45.54	205.28
1.7	38.45	118.29	49.69	206.43

表 6.3.2 消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本計算（單位：萬元/年）（續）

(g)繼續使用年限為 40 年

補強基準 (規範規定值之倍數)	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期成本
0.5(未補強)	352.62	114.93	0.00	467.55
0.6	256.92	114.93	3.82	375.66
0.7	186.12	114.93	7.64	308.69
0.8	139.79	114.93	11.45	266.18
0.9	108.73	114.93	15.27	238.94
1.0	87.26	114.93	19.09	221.27
1.1	72.48	114.93	22.91	210.32
1.2	62.82	114.93	26.72	204.48
1.3	55.50	114.93	30.54	200.98
1.4	49.70	114.93	34.36	198.99
1.5	45.17	114.93	38.18	198.28
1.6	41.45	114.93	41.99	198.37
1.7	38.45	114.93	45.81	199.20

(h)補強基準為設計使用年限

補強基準 (設計使用年限)	繼續使用 年限	地震損失	建造成本	補強成本	生命週期 成本
50	40	87.26	114.93	19.09	221.27
	35	87.26	118.29	20.70	226.24
	30	87.26	122.33	22.89	232.48
	25	87.26	127.25	26.01	240.51
	20	87.26	133.31	30.74	251.30
	15	87.26	140.91	38.70	266.86
	10	87.26	150.62	54.75	292.62
40	40	100.22	114.93	16.62	231.77
35	35	109.07	118.29	16.51	243.87
30	30	119.98	122.33	16.40	258.71
25	25	135.14	127.25	16.26	278.64
20	20	155.93	133.31	15.99	305.22
15	15	187.59	140.91	15.28	343.77
10	10	241.71	150.62	12.90	405.23

表 6.3.3 消防廳舍（已使用 30 年）於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本統計（單位：萬元/年）

生命週期成本		繼續使用年限						
		10	15	20	25	30	35	40
補強基準 （規範規定值之倍數）	0.5(未補強)	503.24	493.53	485.93	479.87	474.95	470.91	467.55
	0.6	418.49	405.56	396.37	389.36	383.82	379.34	375.66
	0.7	358.64	342.51	331.73	323.77	317.61	312.69	308.69
	0.8	323.26	303.92	291.55	282.65	275.86	270.50	266.18
	0.9	303.15	280.60	266.63	256.79	249.38	243.58	238.94
	1.0	292.62	266.86	251.30	240.51	232.48	226.24	221.27
	1.1	288.80	259.83	242.68	230.94	222.28	215.61	210.32
	1.2	290.09	257.91	239.17	226.48	217.20	210.09	204.48
	1.3	293.72	258.33	237.99	224.36	214.46	206.91	200.98
	1.4	298.87	260.27	238.34	223.76	213.24	205.25	198.99
	1.5	305.29	263.48	239.96	224.43	213.29	204.87	198.28
	1.6	312.51	267.49	242.38	225.91	214.14	205.28	198.37
	1.7	320.47	272.24	245.53	228.12	215.72	206.43	199.20



附圖



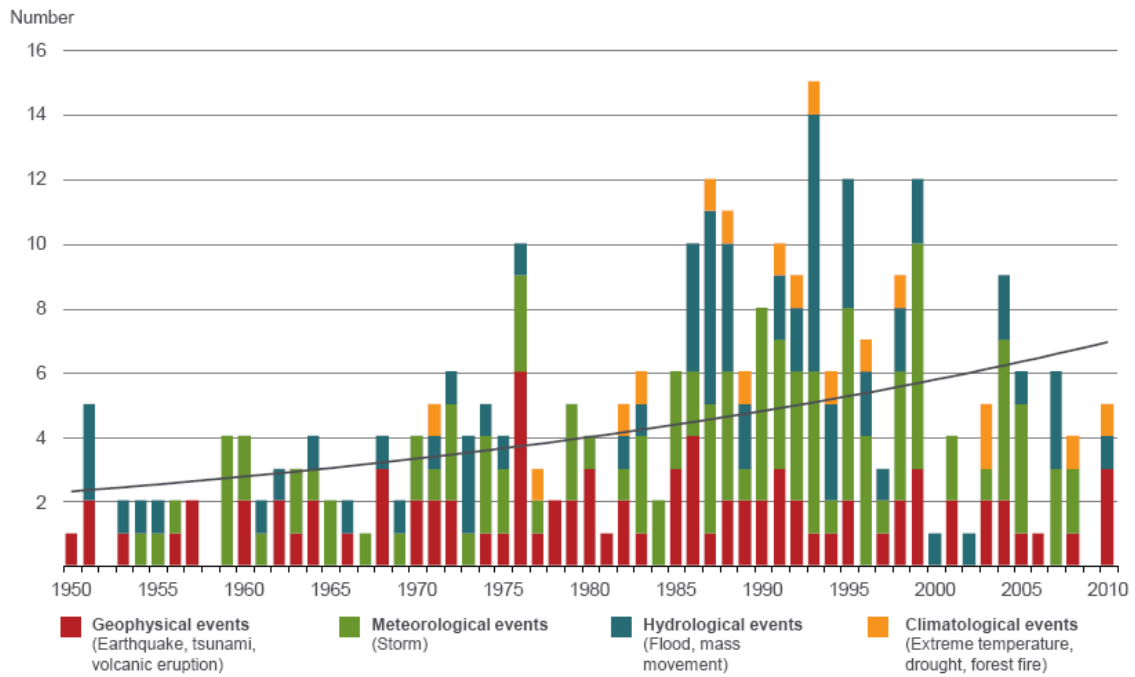


圖 1.1.1 世界天然巨災發生趨勢圖 (1950-2010) [1]

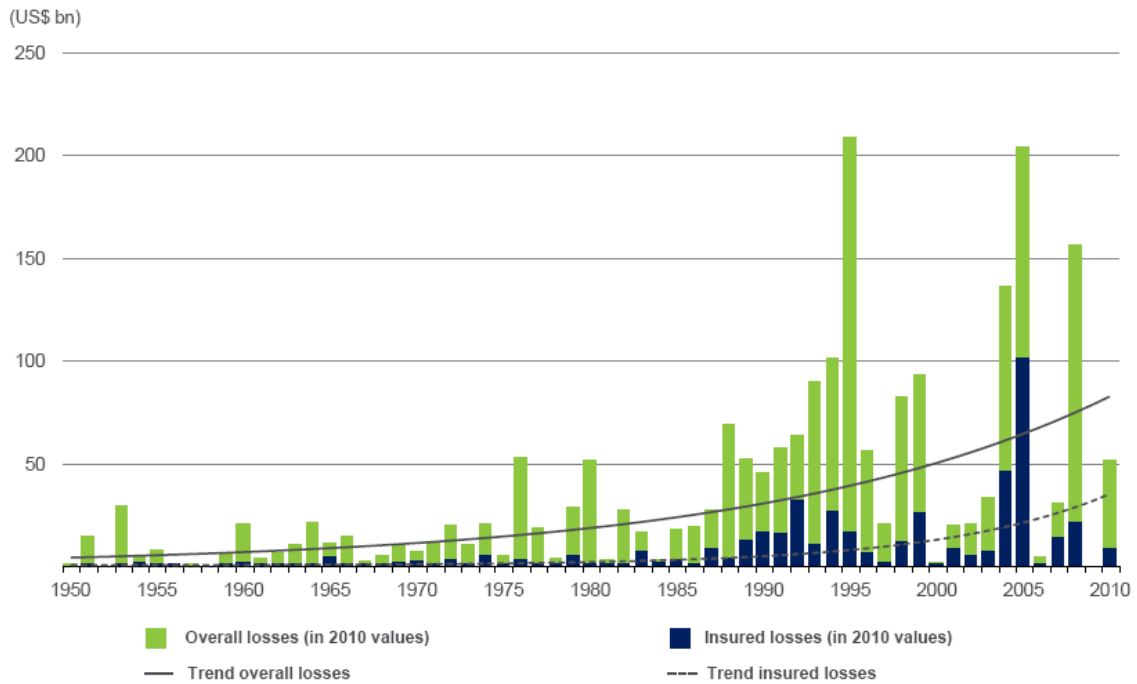


圖 1.1.2 世界天然巨災損失趨勢圖 (1950-2010) [1]

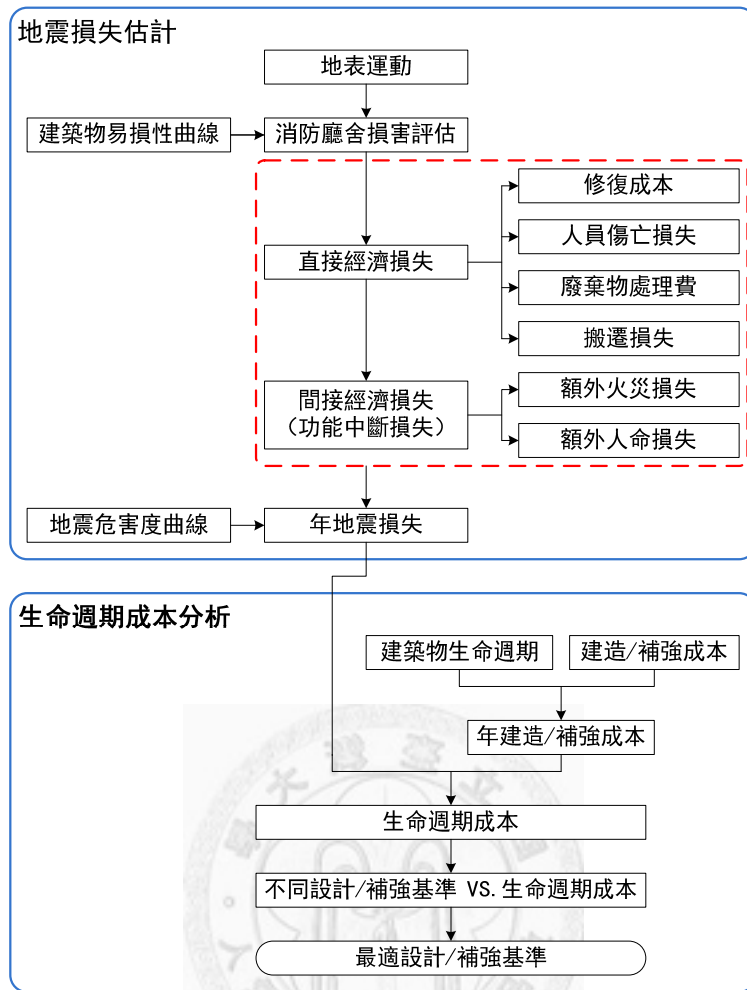


圖 2.2.1 建築物生命週期成本分析架構圖

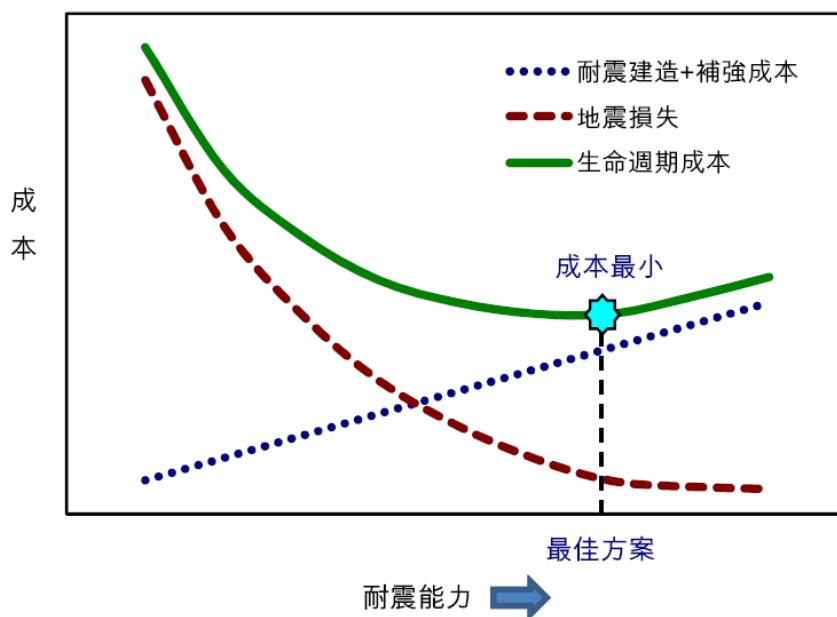


圖 2.2.2 生命週期成本與最佳方案之關係

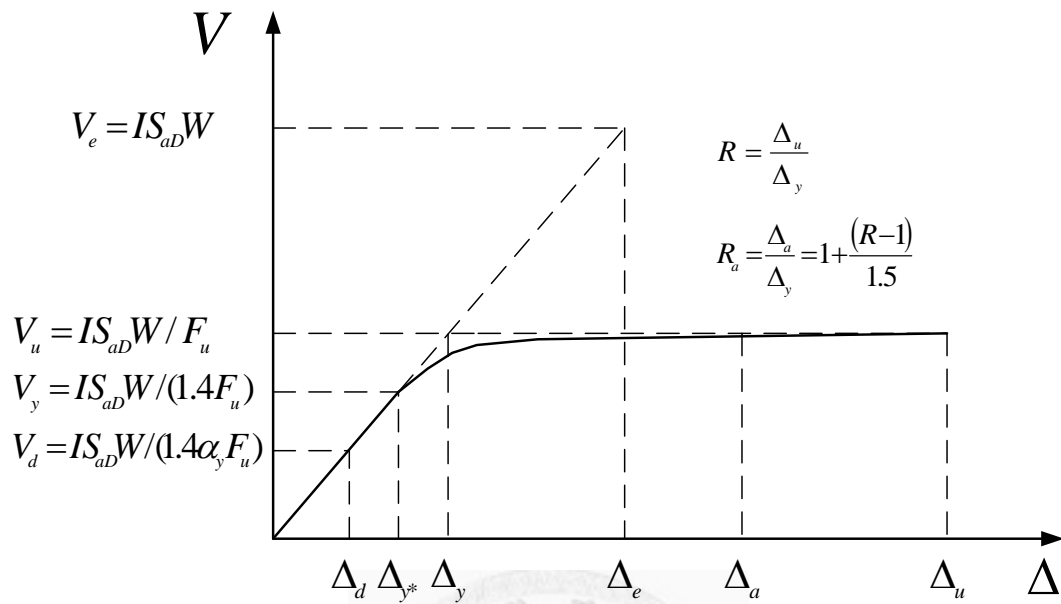


圖 3.1.1 建築物受地震側力作用下力與位移的非線性曲線及建築物耐震設計規範規定之各項地震力與韌性容量之定義

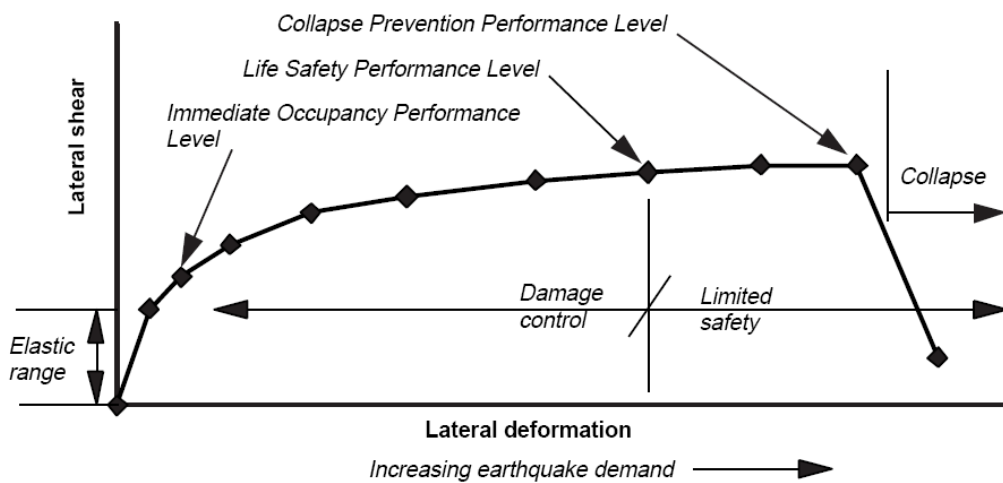


圖 3.2.1 FEMA 273 韌性結構之側力與變形之關係曲線及其性能等級設定

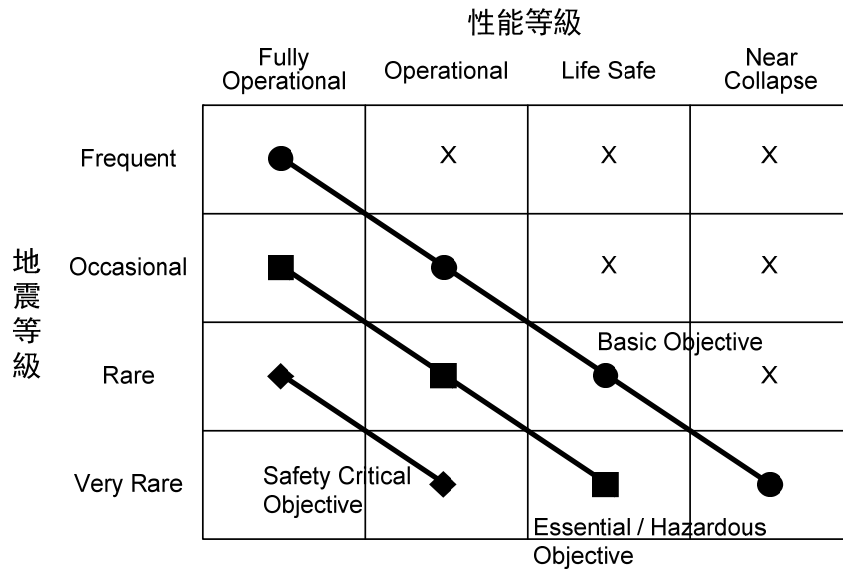


圖 3.2.2 Vision 2000 建議之耐震性能目標

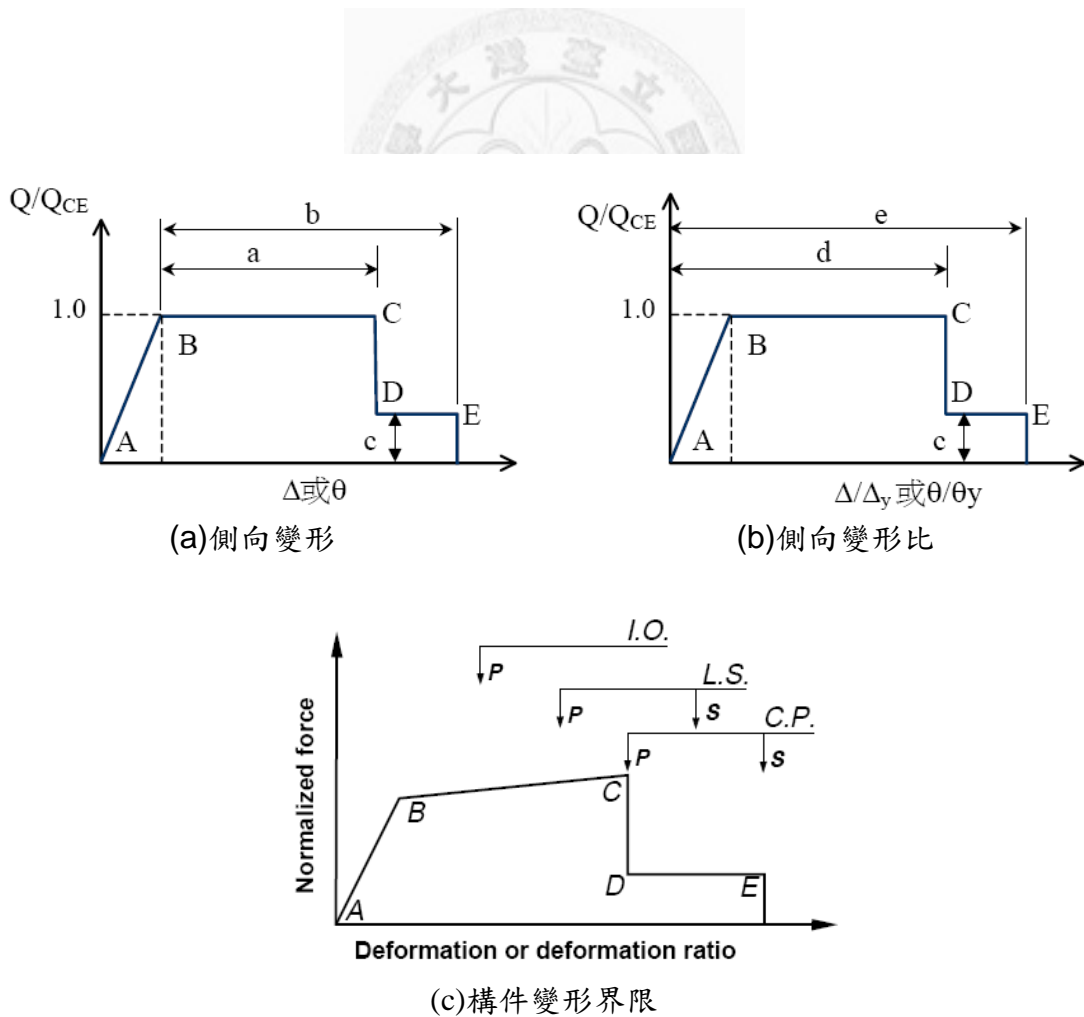


圖 3.2.3 FEMA 273 建議混凝土構件側力與變形之關係及其與構件性能標準之關聯

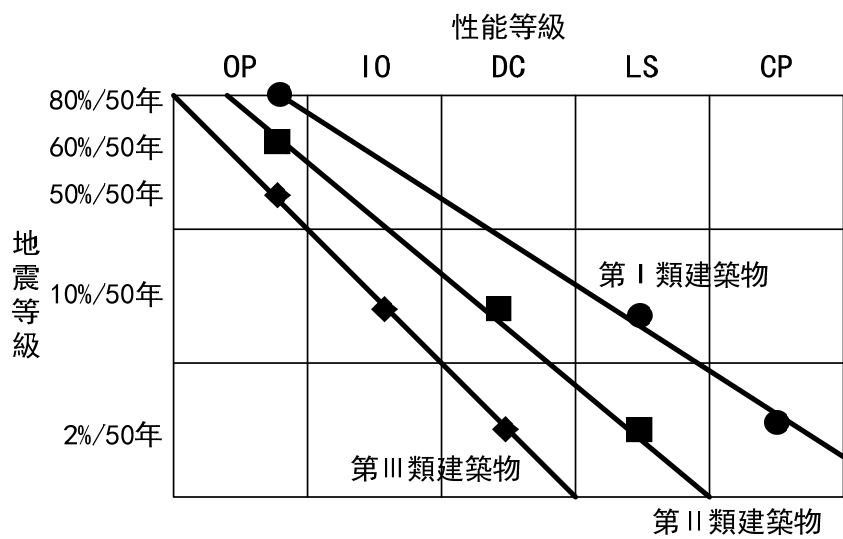


圖 3.2.4(a) 文獻[67]建議之耐震性能目標

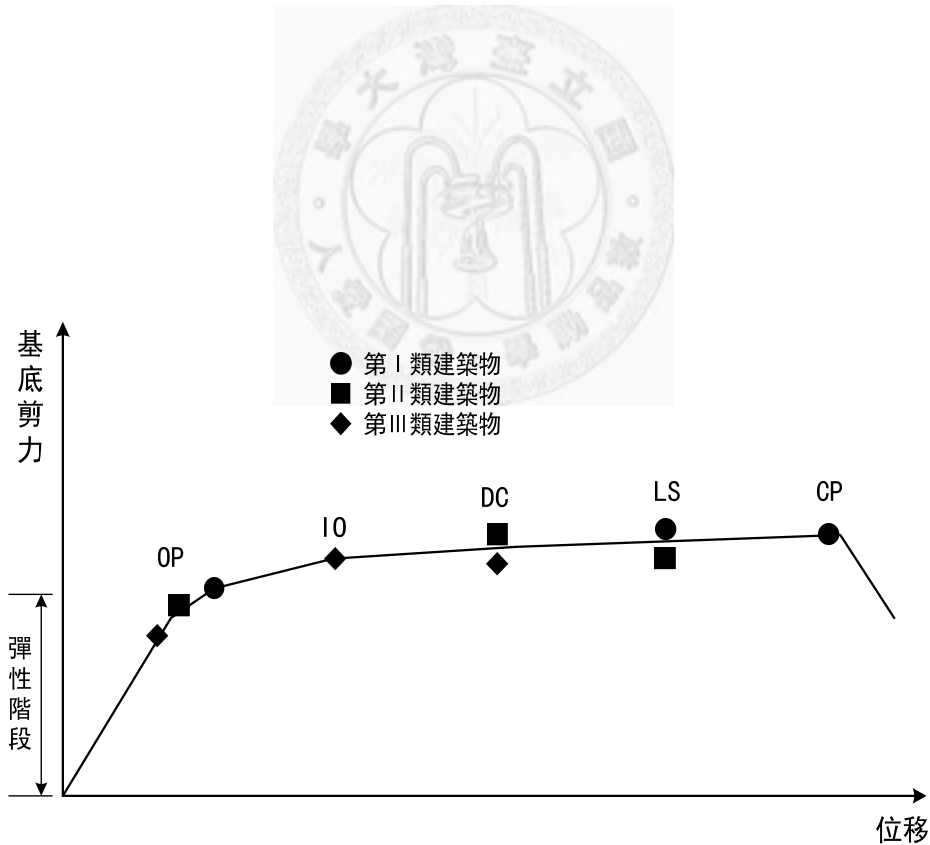


圖 3.2.4(b) 文獻[67]建議之耐震性能目標與性能等級與建築物受力變形之關係

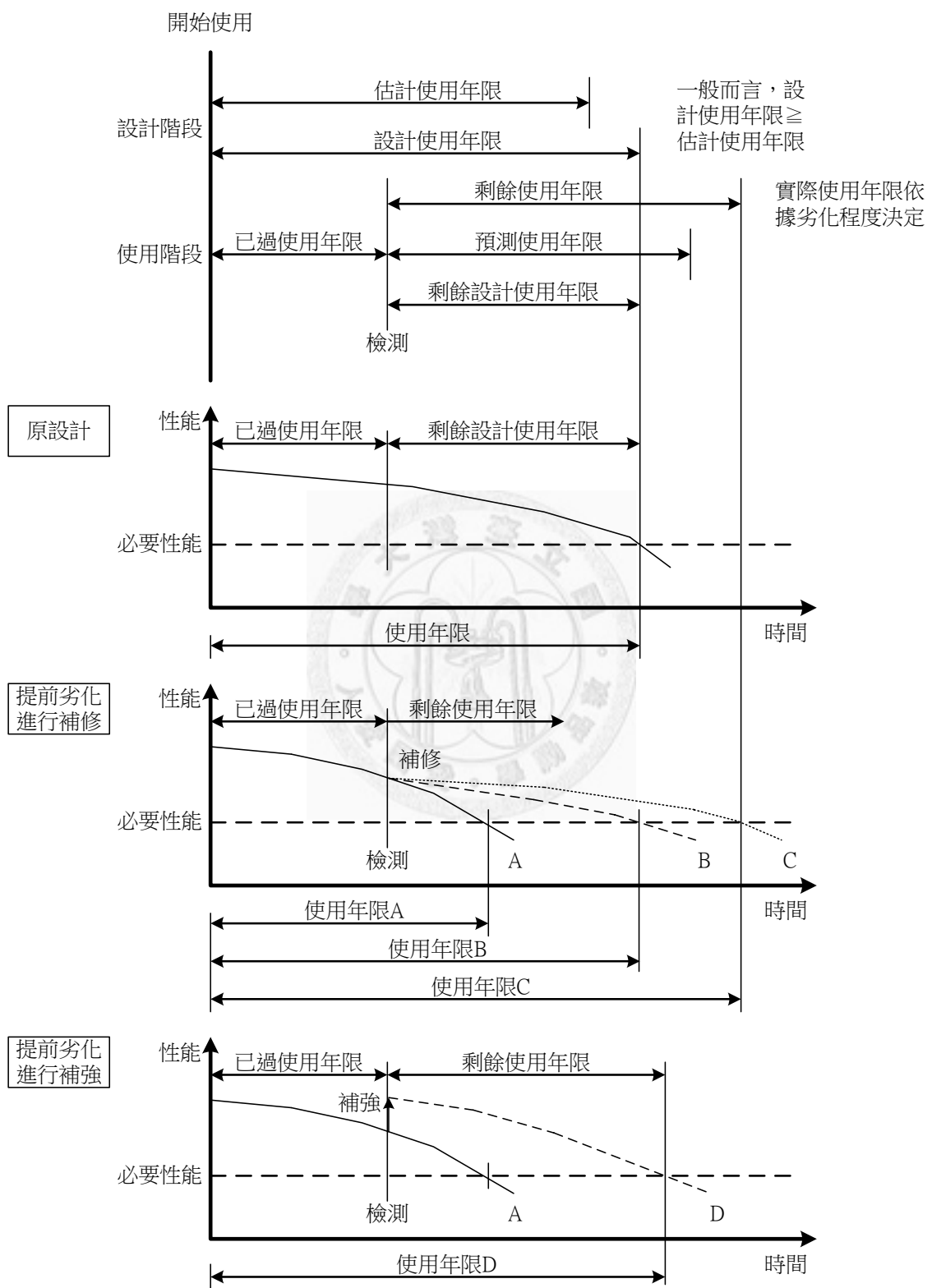
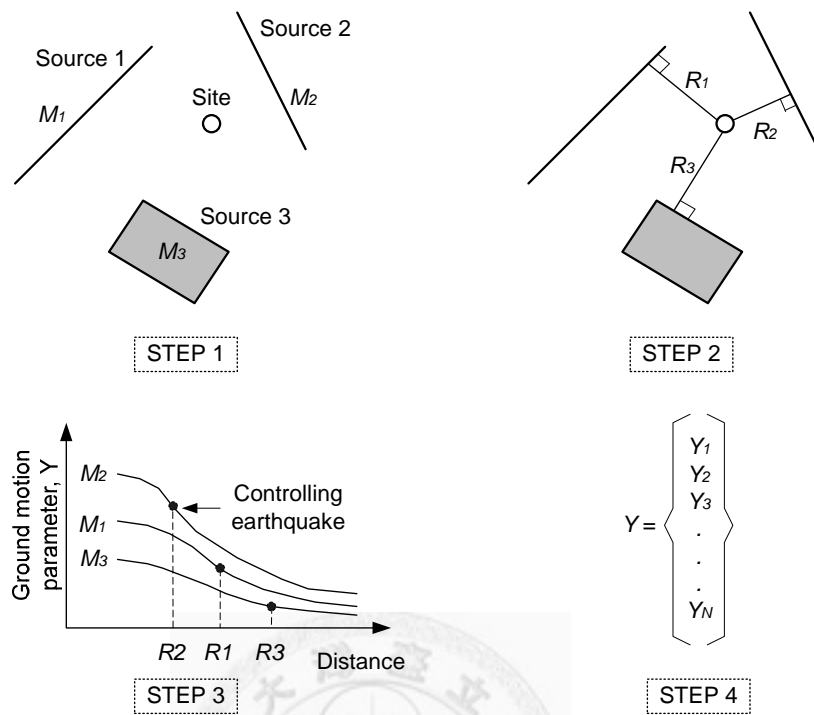
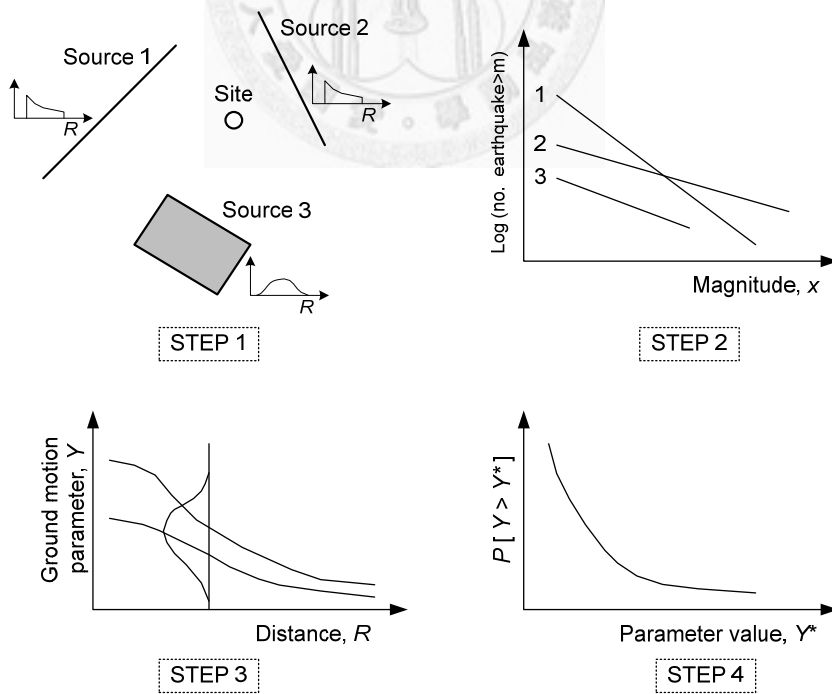


圖 4.2.1 使用年限相關名詞概念示意圖



(a) 定值法地震危害度分析



(b) 機率法地震危害度分析

圖 4.3.1 地震危害度分析步驟

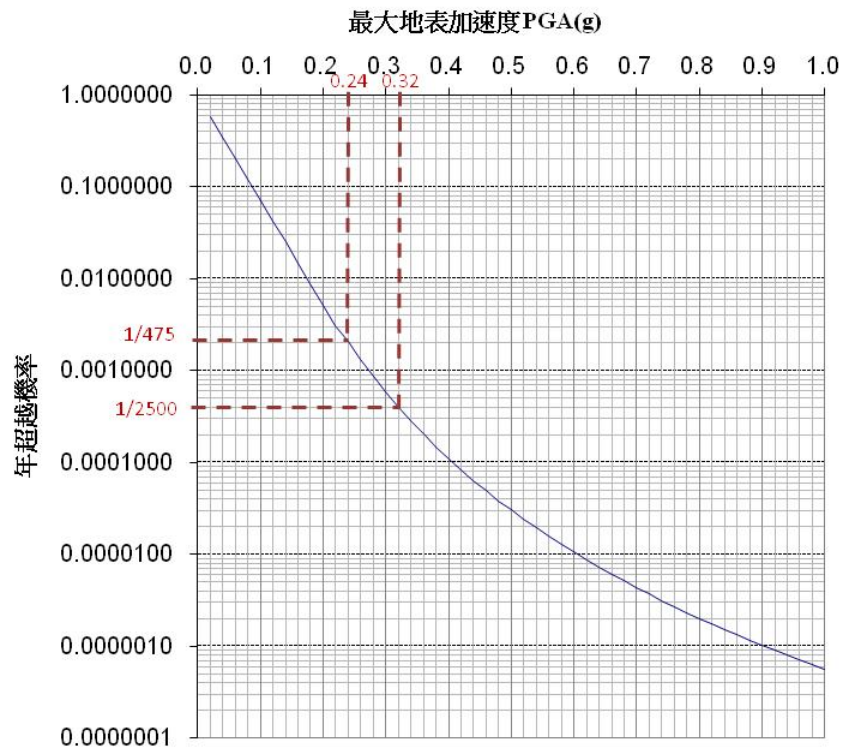


圖 4.3.2 簡化之臺北盆地地震危害度曲線

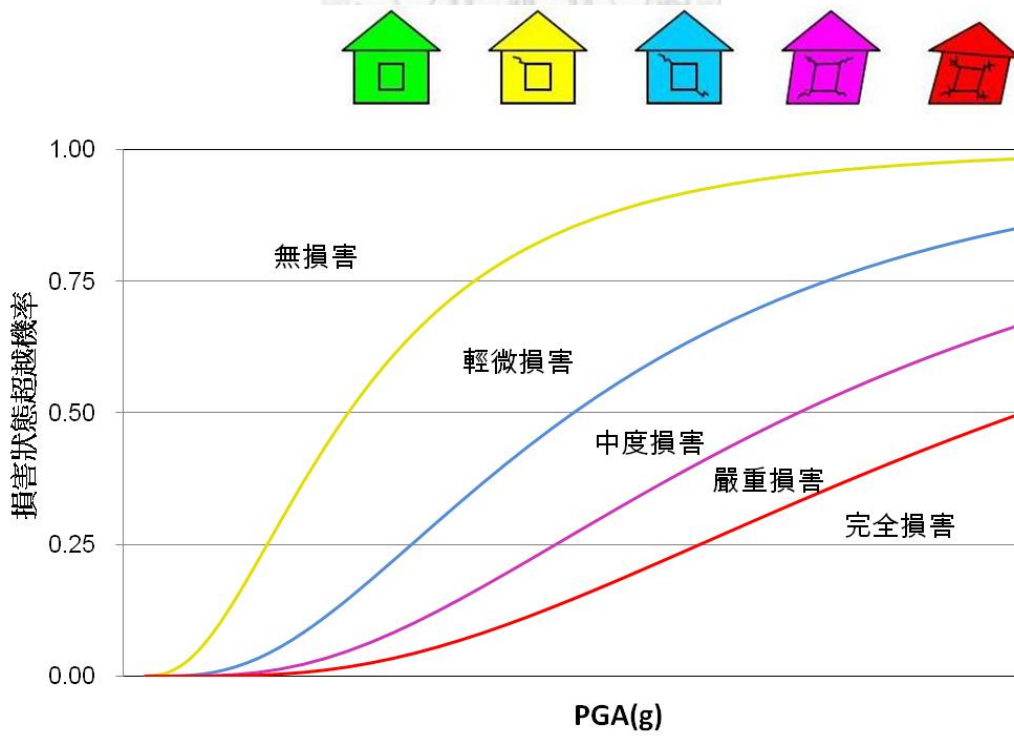


圖 4.4.1 建築物易損性曲線示意圖

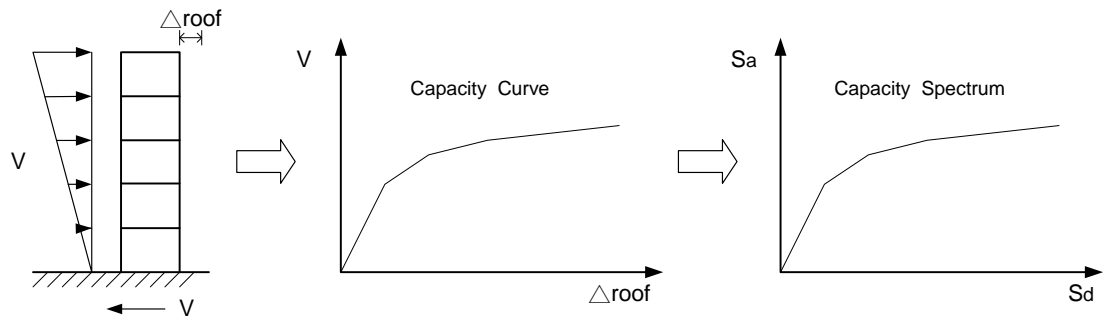


圖 4.4.2 建築物容量曲線與容量譜曲線

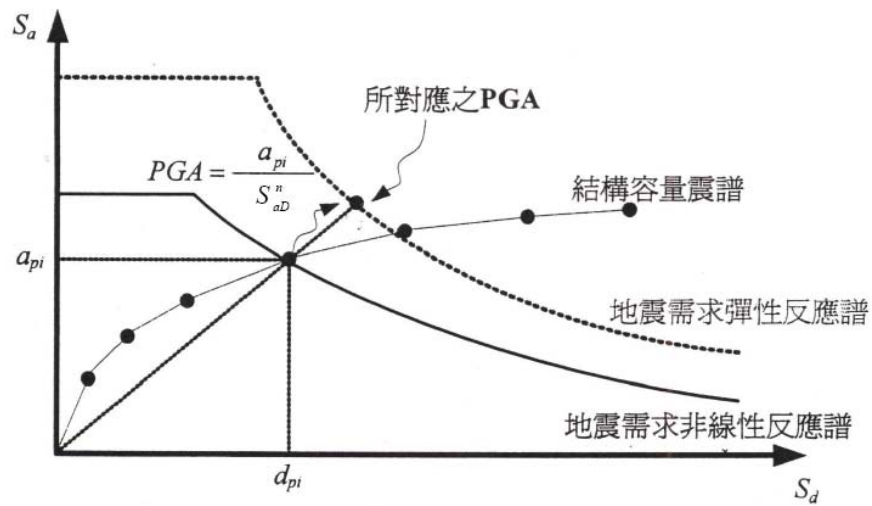


圖 4.4.3 性能點之地表加速度求取示意圖



圖 4.4.4 典型消防廳舍結構型式[91]



圖 4.4.5 臺東地震造成臺東縣消防局大樓受損情形[92]

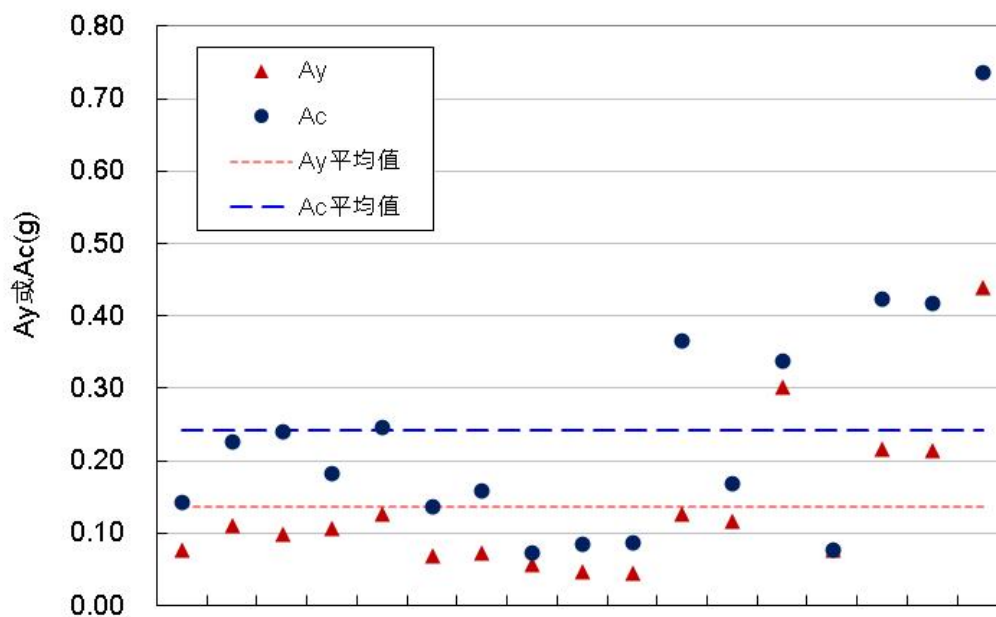


圖 4.4.6 臺北市政府所屬消防廳舍耐震能力分布圖

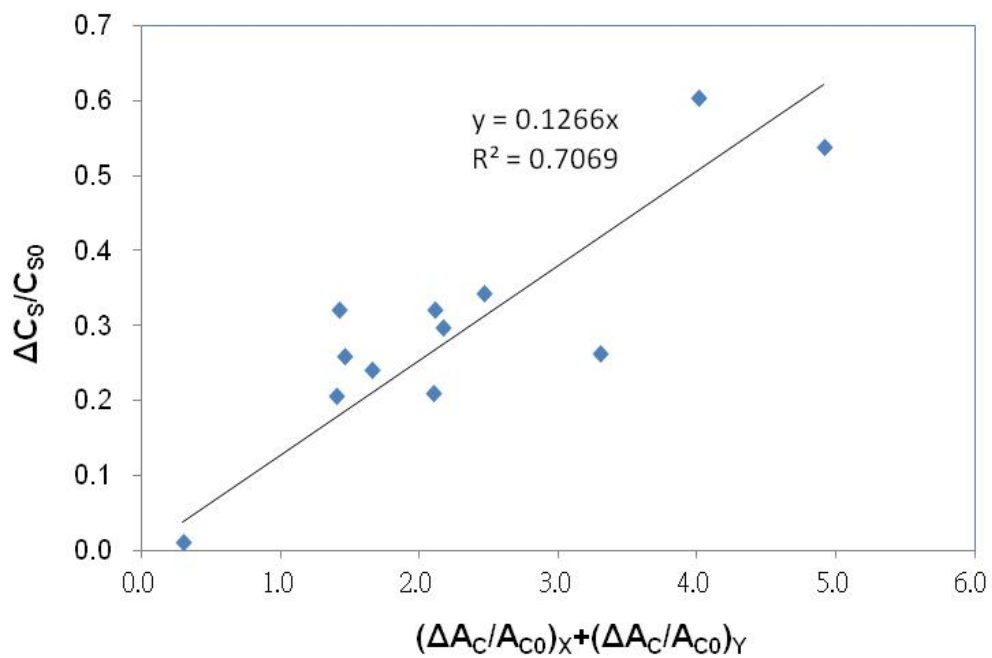


圖 4.6.1 消防廳舍耐震補強程度與補強費用迴歸分析

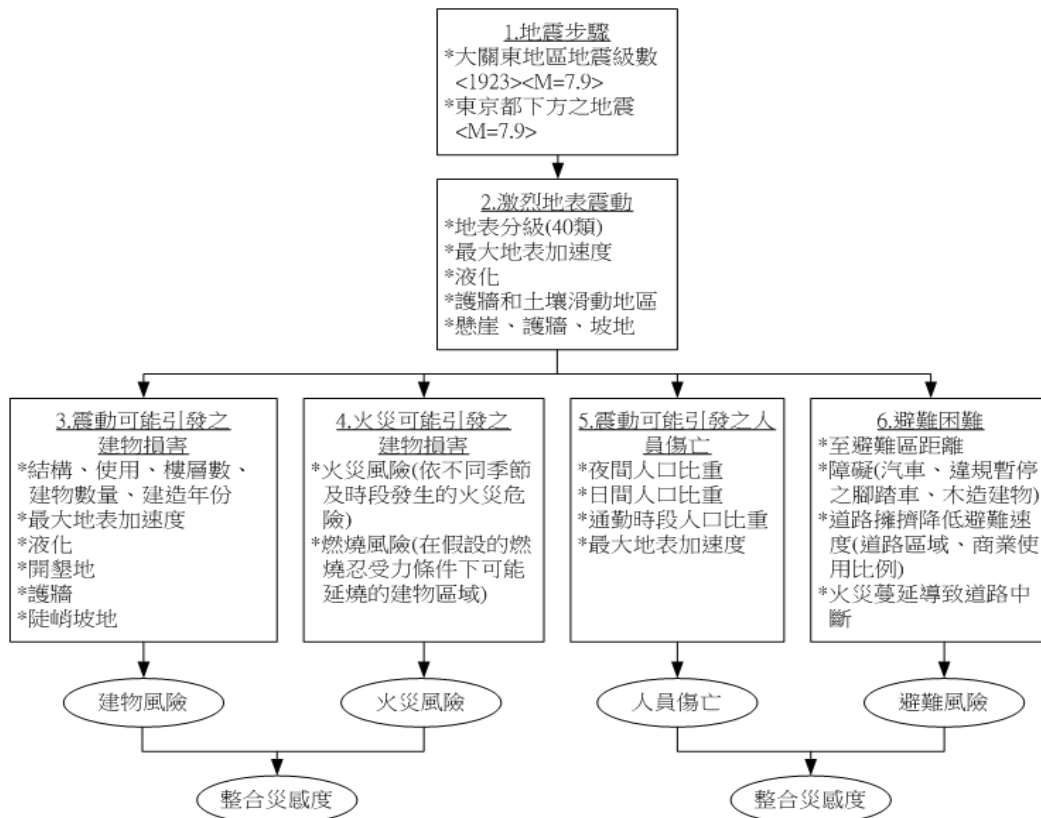


圖 5.1.1 東京都地震災害評估系統架構圖[119]

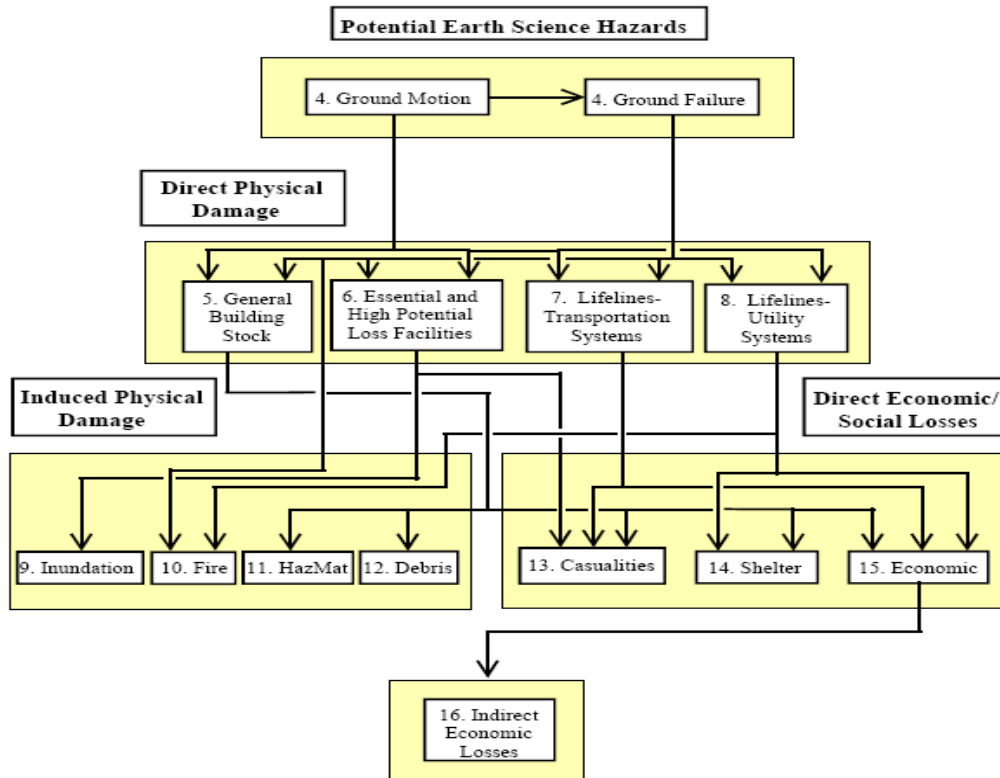


圖 5.1.2 HAZUS 系統架構圖[86]

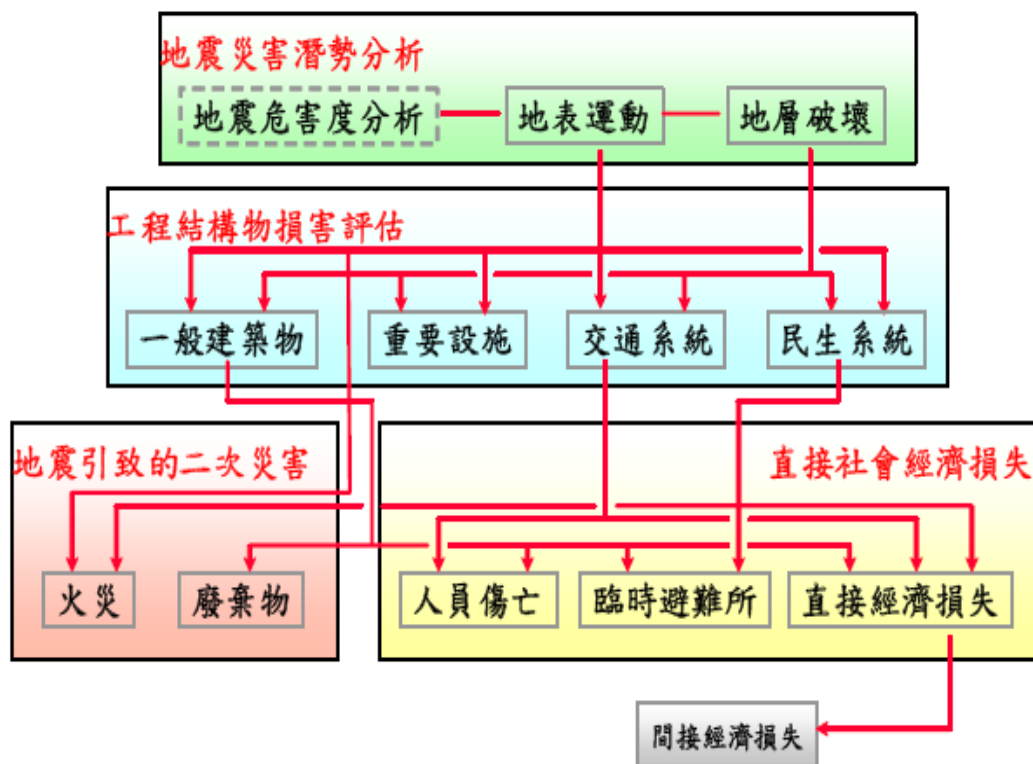


圖 5.1.3 TELES 系統架構圖[87]

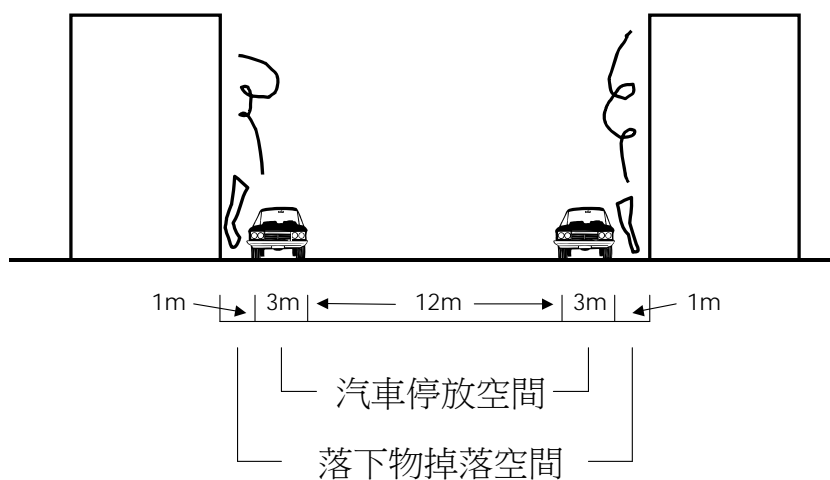


圖 5.2.1 建築物外側地震墜落物影響範圍[200]

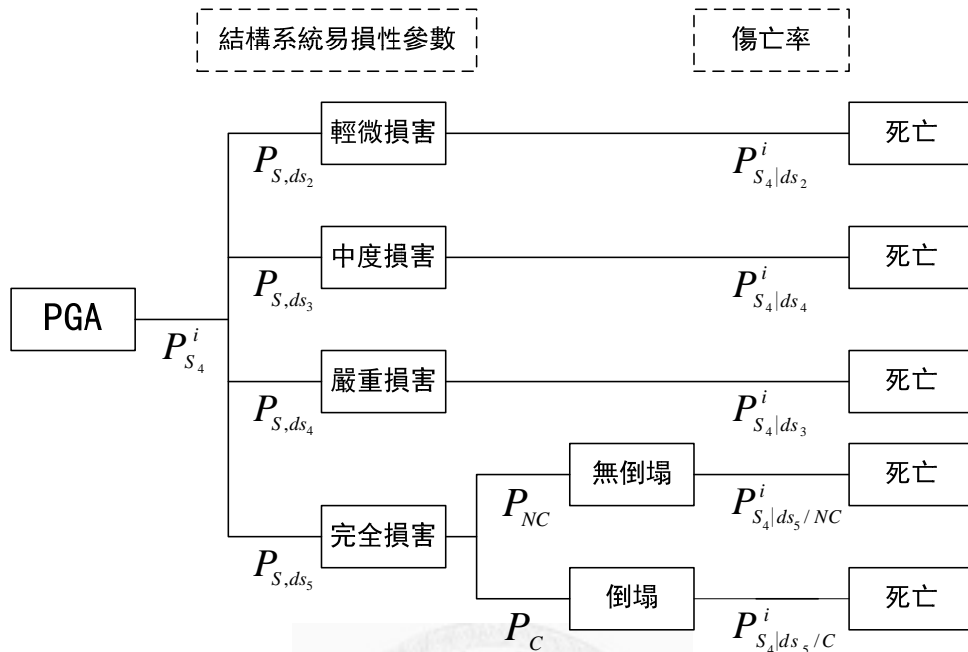


圖 5.2.2 人員傷亡評估模式示意圖

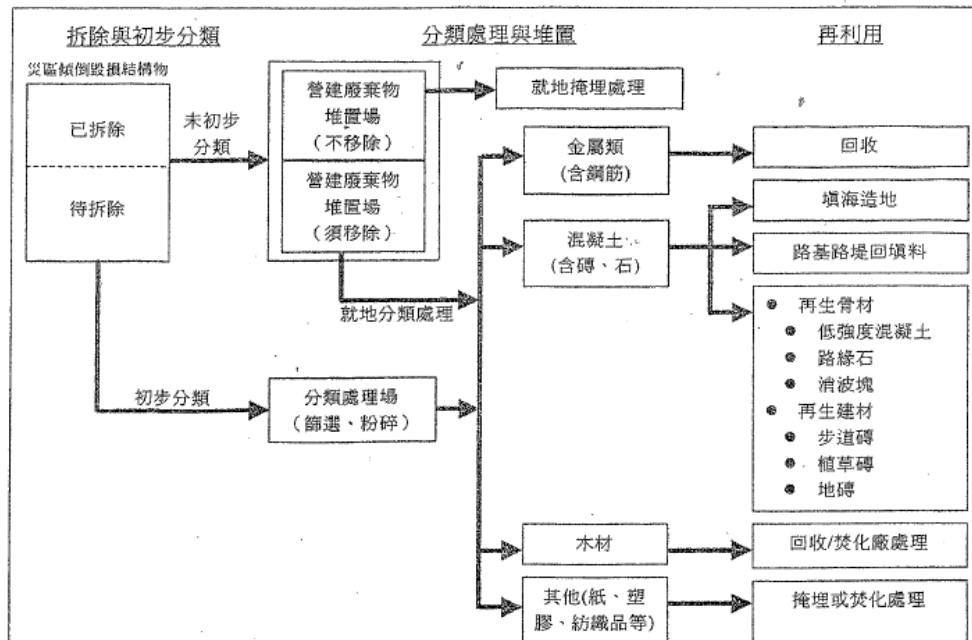


圖 5.2.3 921 震災建築廢棄物再利用流程[128]

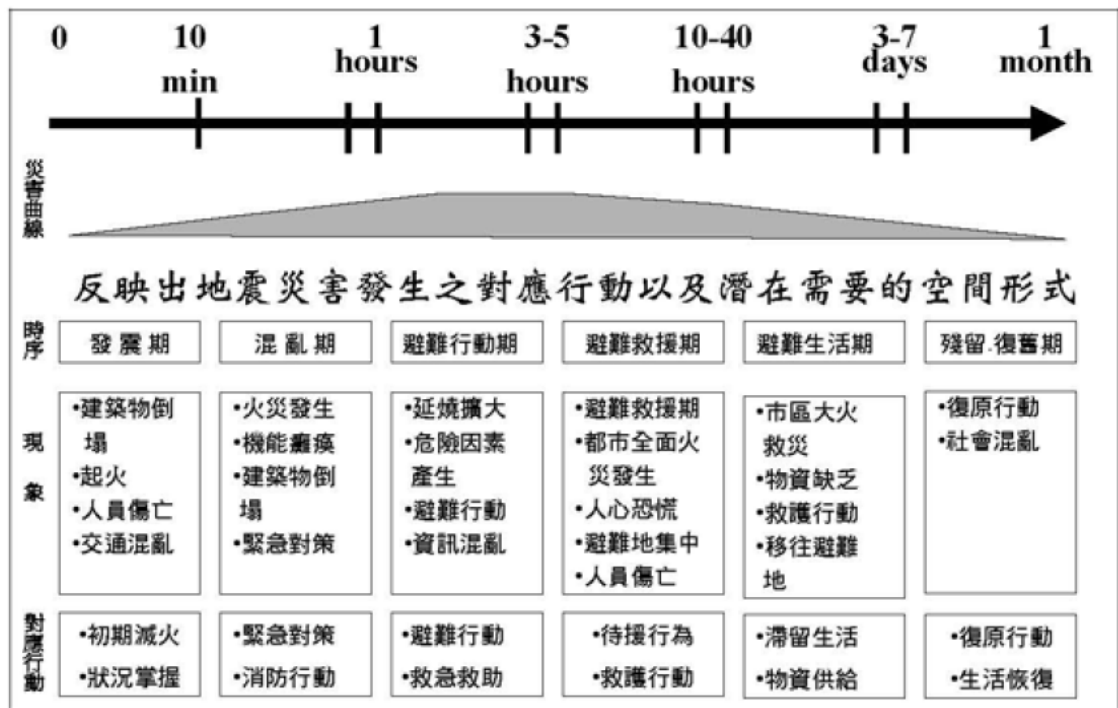


圖 5.2.4 地震災害管理時序與對應行動[142,143]

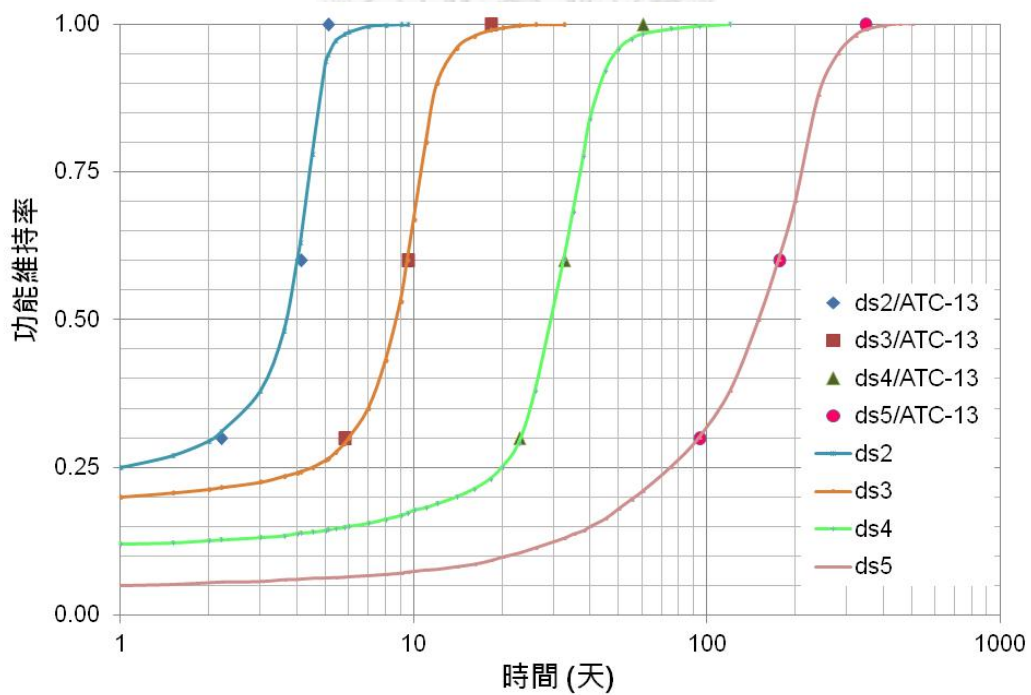


圖 5.2.5 消防隊功能恢復曲線

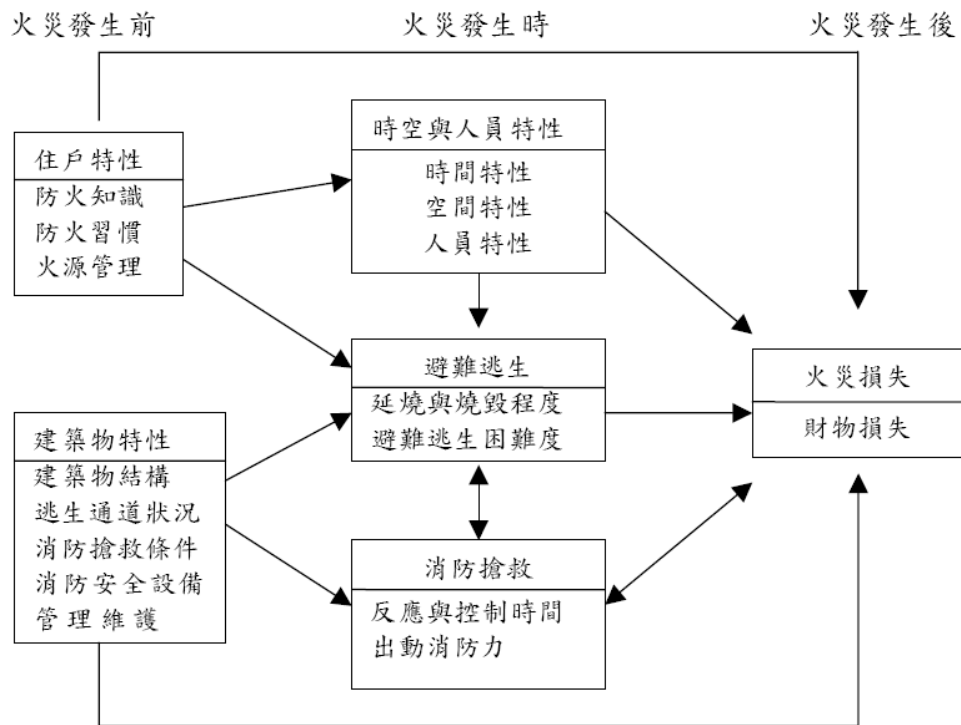


圖 5.2.6 影響火災損失之因素[163]

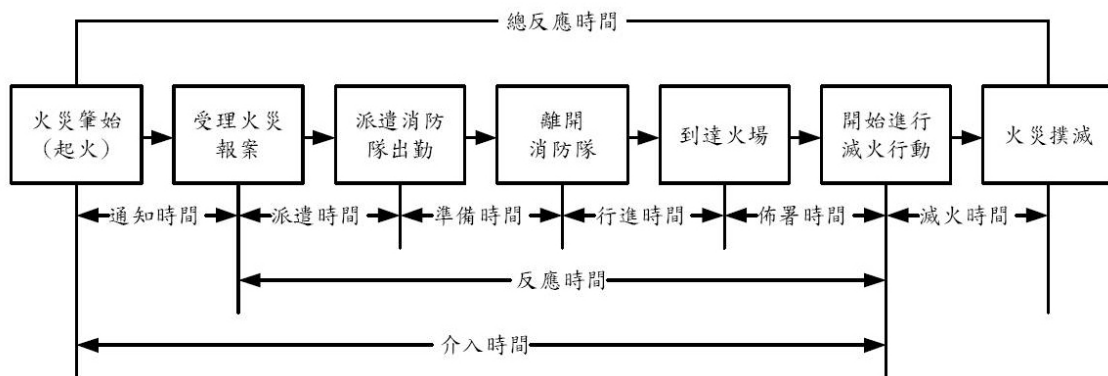
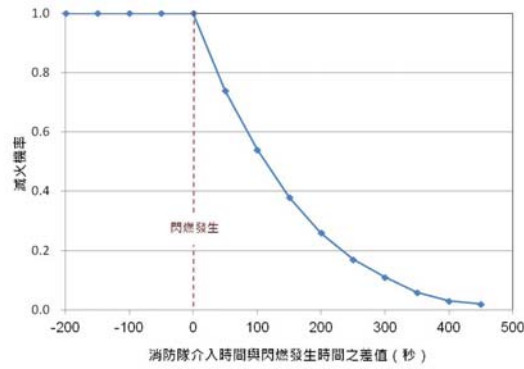
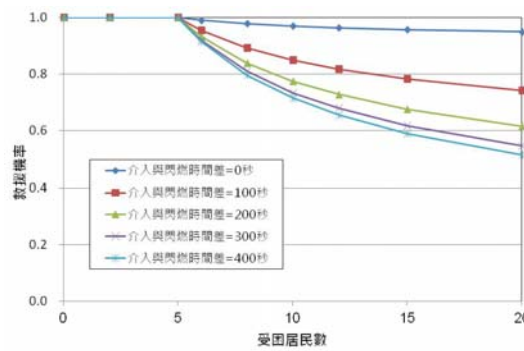


圖 5.2.7 消防隊活動之時間序列[165]



(a)滅火效能與時間之關係



(b)救援效能與時間之關係

圖 5.2.8 消防隊到達時間與搶救效能之關係[167]

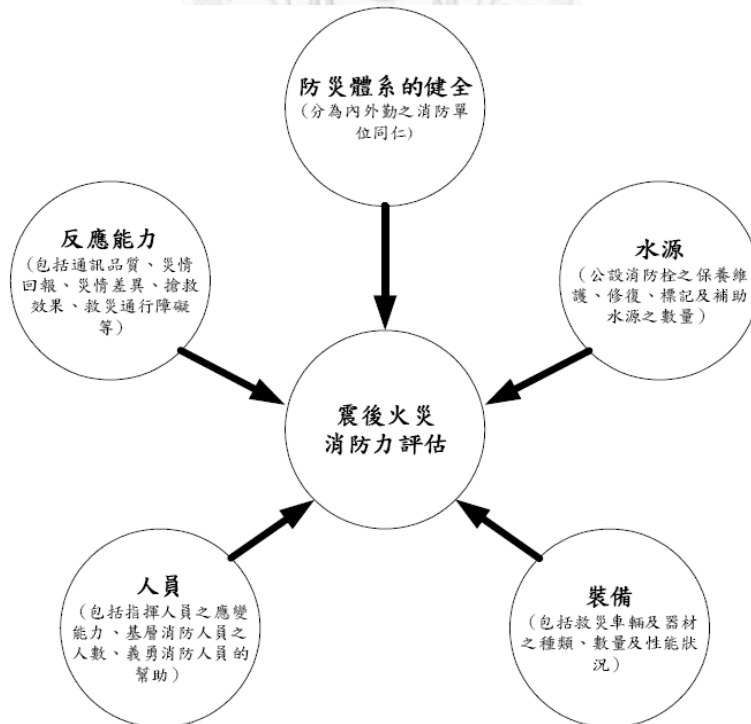


圖 5.2.9 震後火災消防單位救災能力影響因素[146]

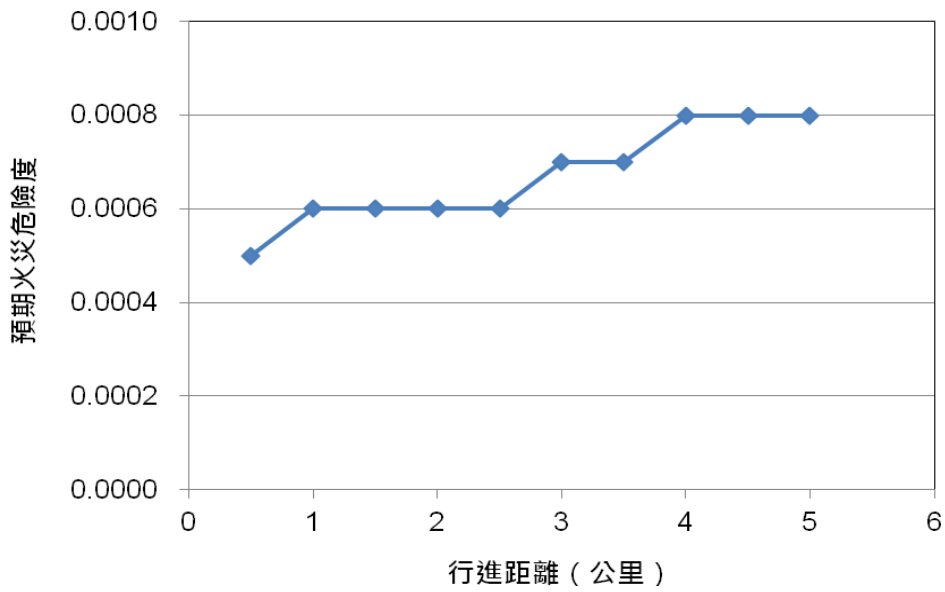
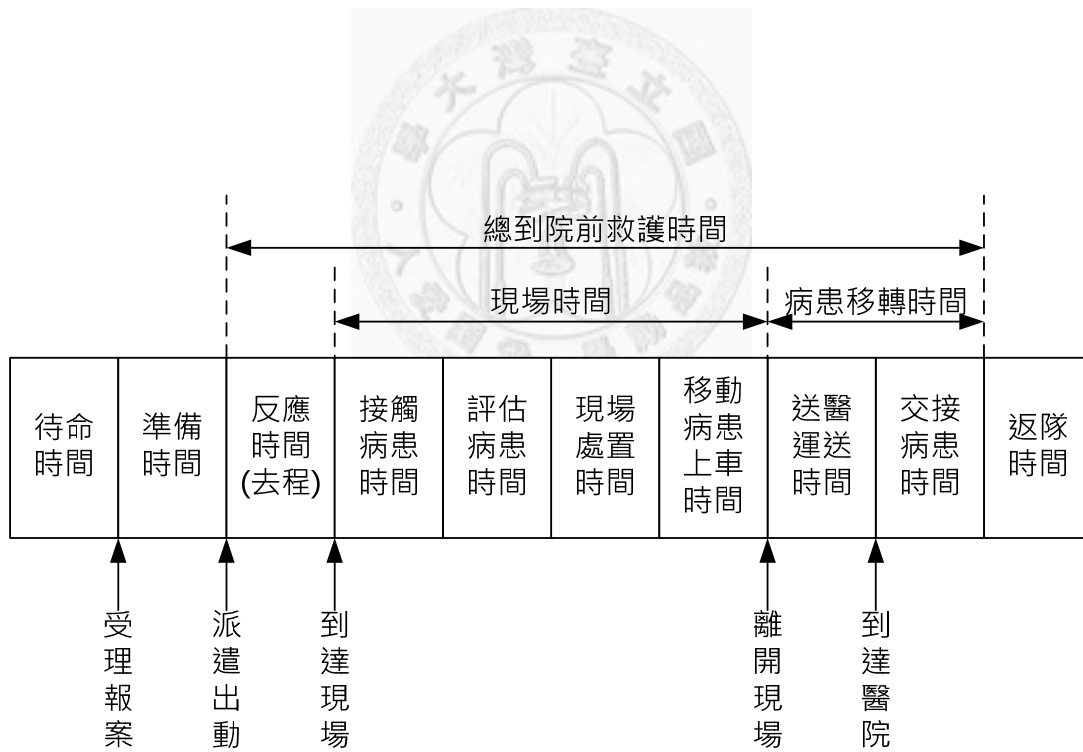


圖 5.2.10 消防隊行進距離與火災危險度之關係[167]



備註：部分學者認為反應時間應為接獲報案至到達現場之時間，準備時間亦應納入總到院前救護時間。

圖 5.2.11 到院前緊急救護活動之時間序列[191]



圖 6.1.1 臺北市政府消防局消防分隊配置圖

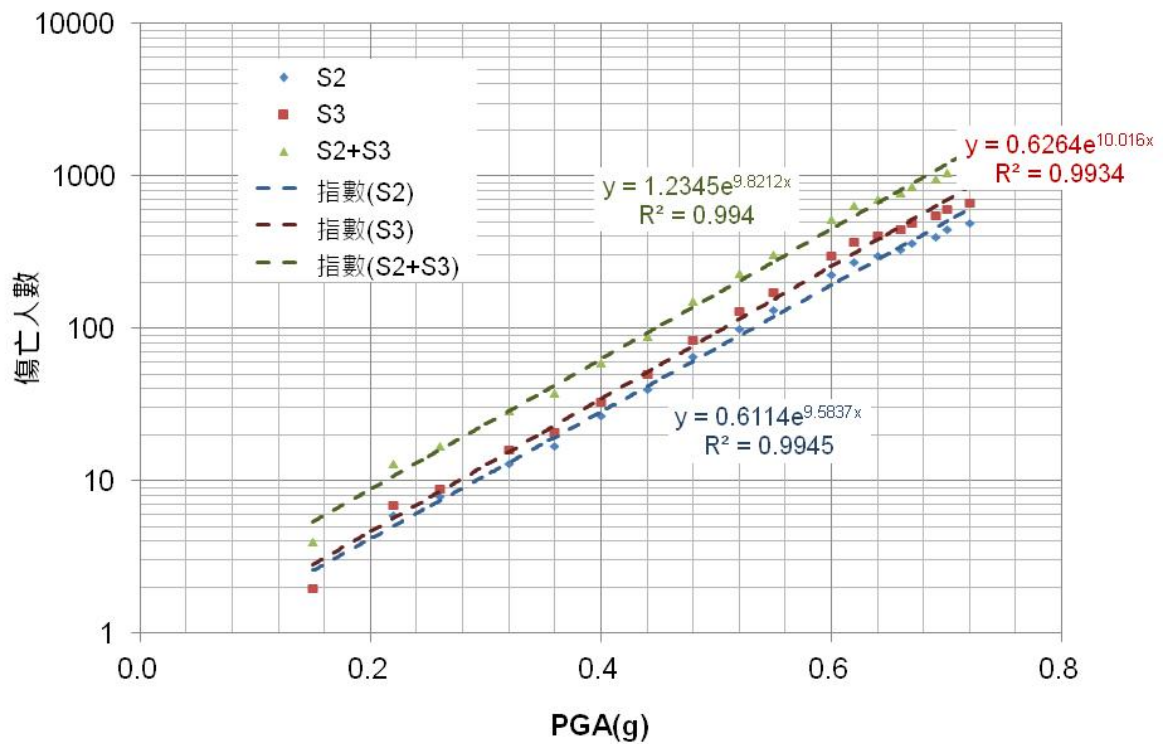


圖 6.1.2 TELES 產出之震後臺北市大安區建築物室內傷亡人數之趨勢

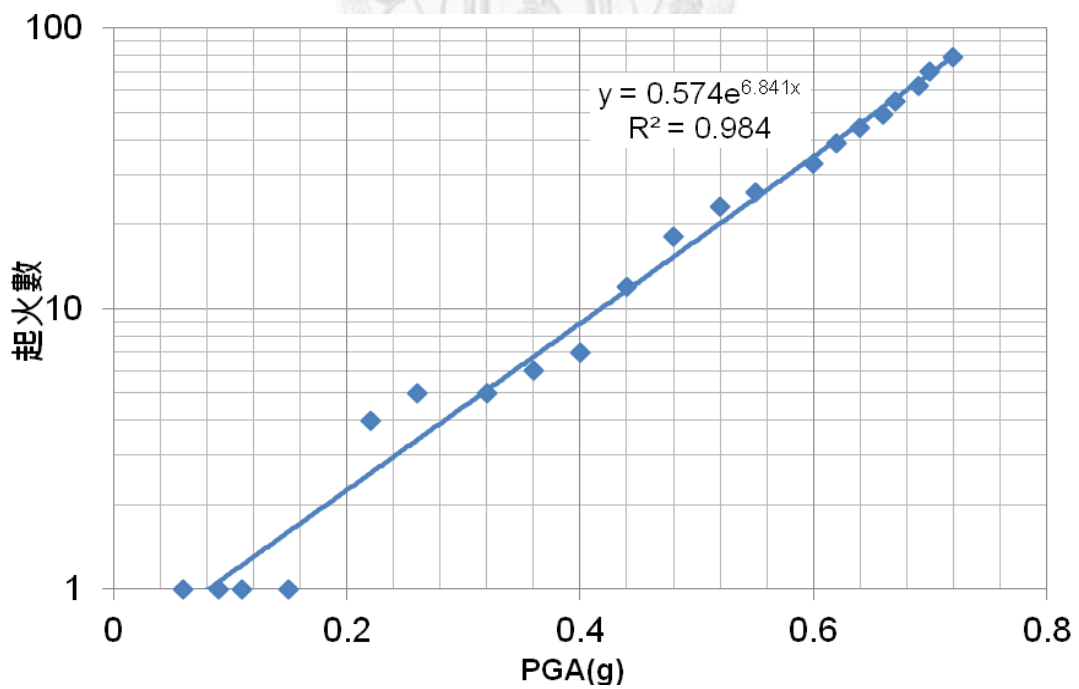


圖 6.1.3 TELES 產出之臺北市大安區震後火災數之趨勢



(a)街廓內延燒情況



(b)街廓間延燒情況

圖 6.1.4 臺北市大安區震後火災可能延燒之區域[153]

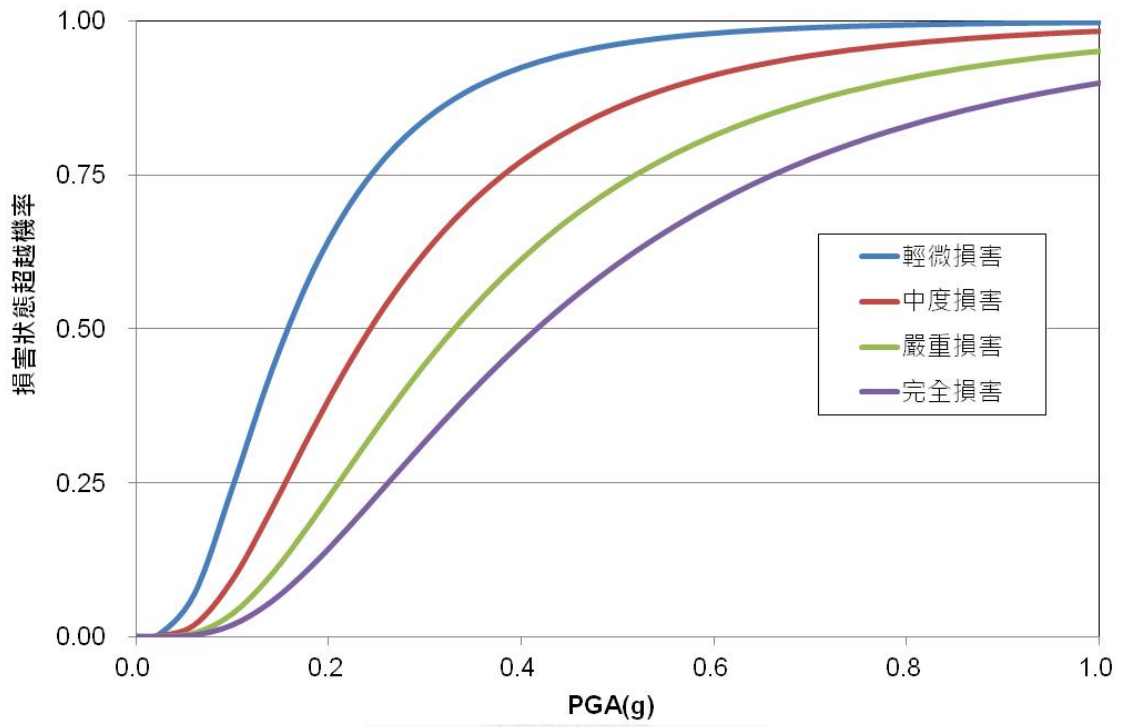


圖 6.2.1 消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之結構系統易損性曲線

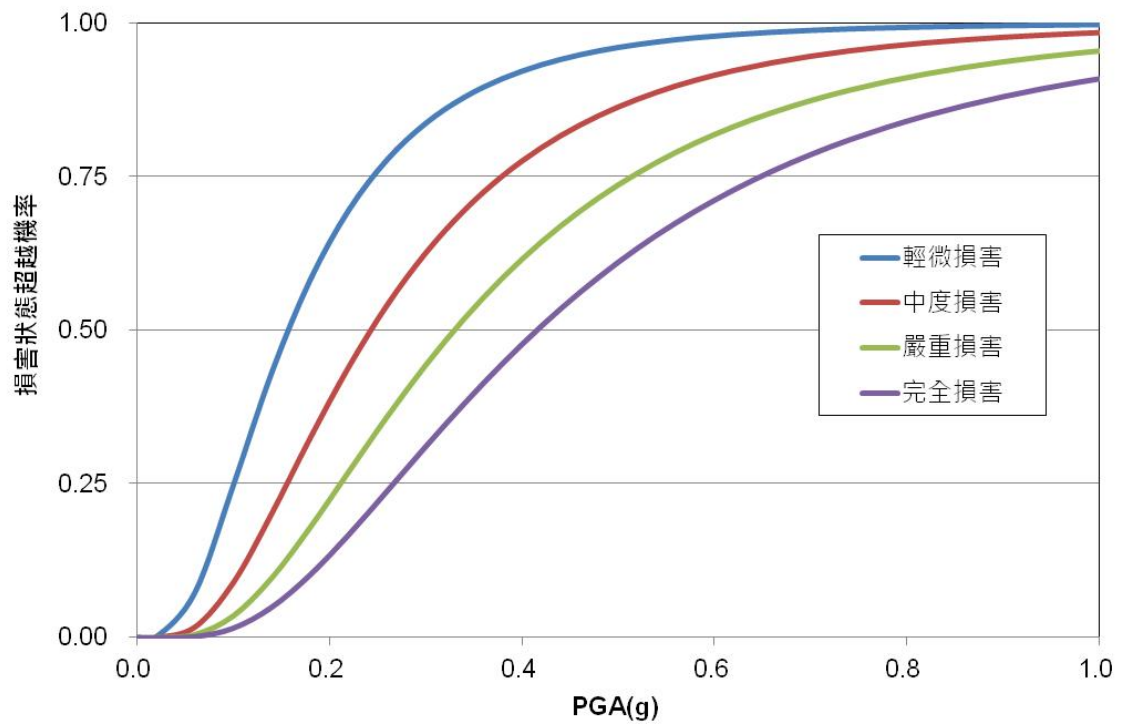


圖 6.2.2 消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之非結構構件易損性曲線

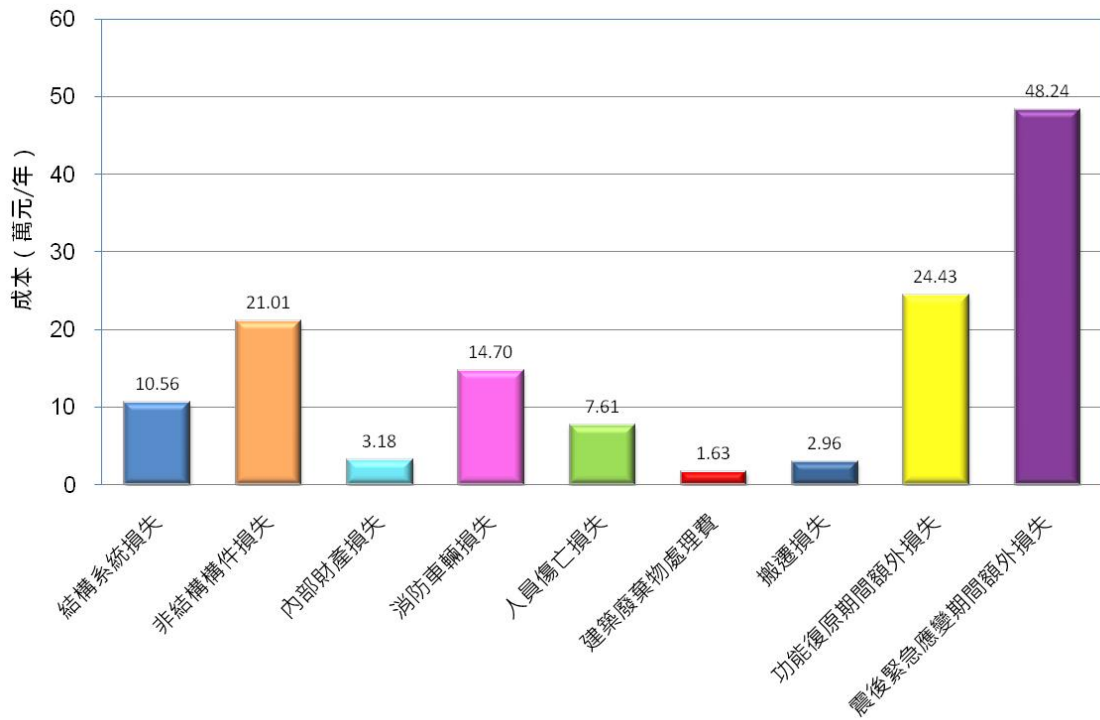


圖 6.2.3 消防廳舍以用途係數 $I=1.0$ 設計時之各項地震損失

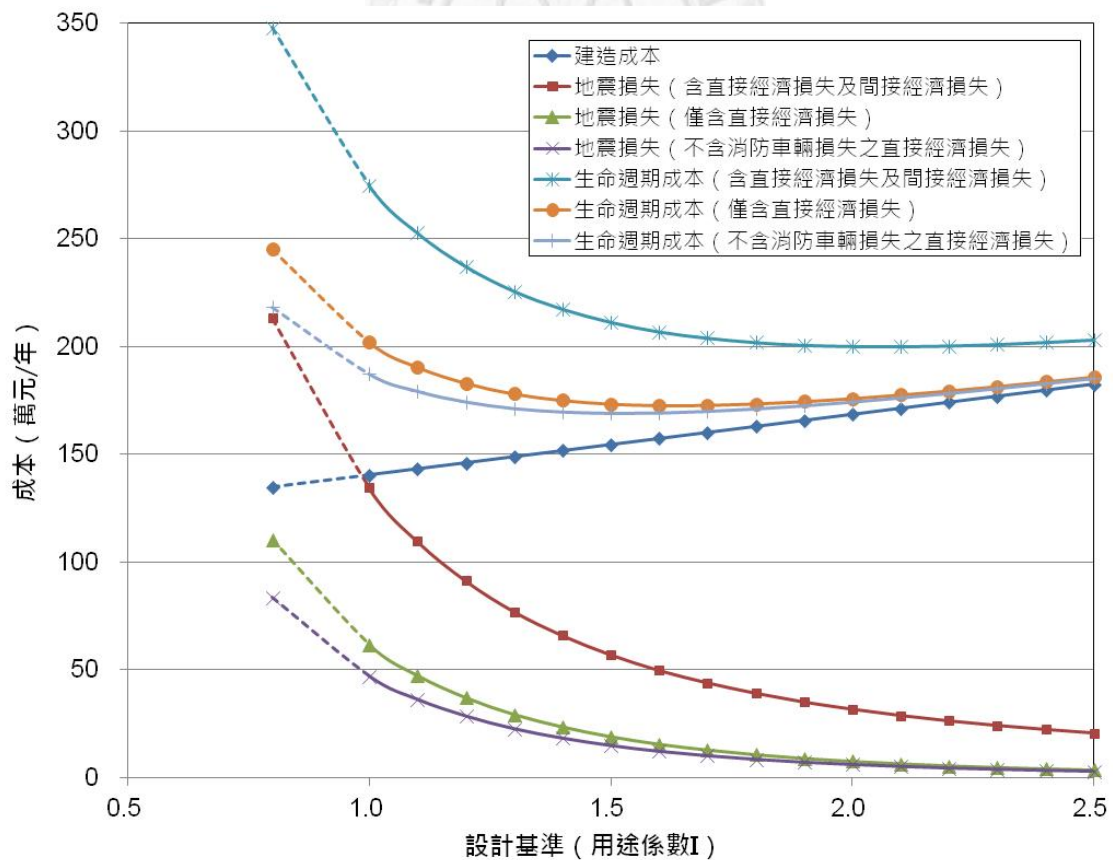


圖 6.2.4 新建消防廳舍於不同耐震設計基準下的生命週期成本及其組成分項

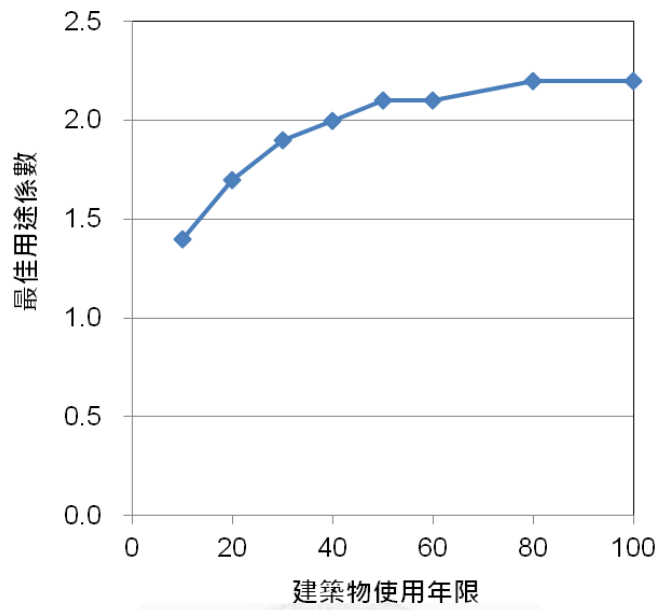


圖 6.2.5 不同建築物使用年限下之最佳用途係數

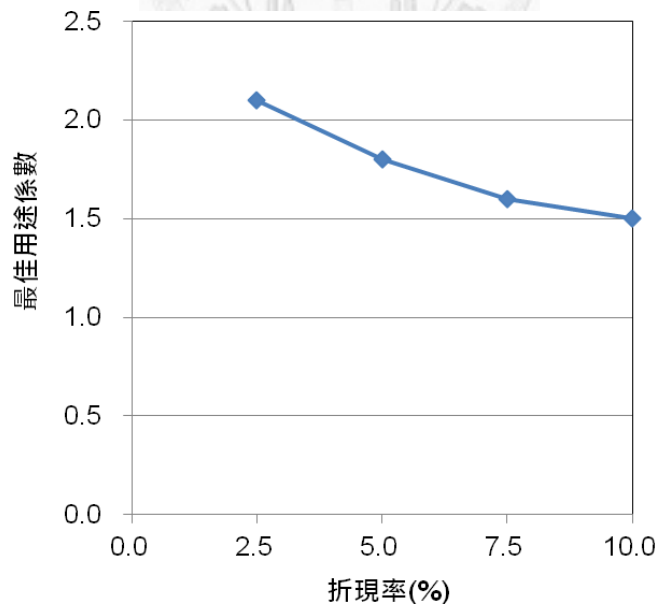
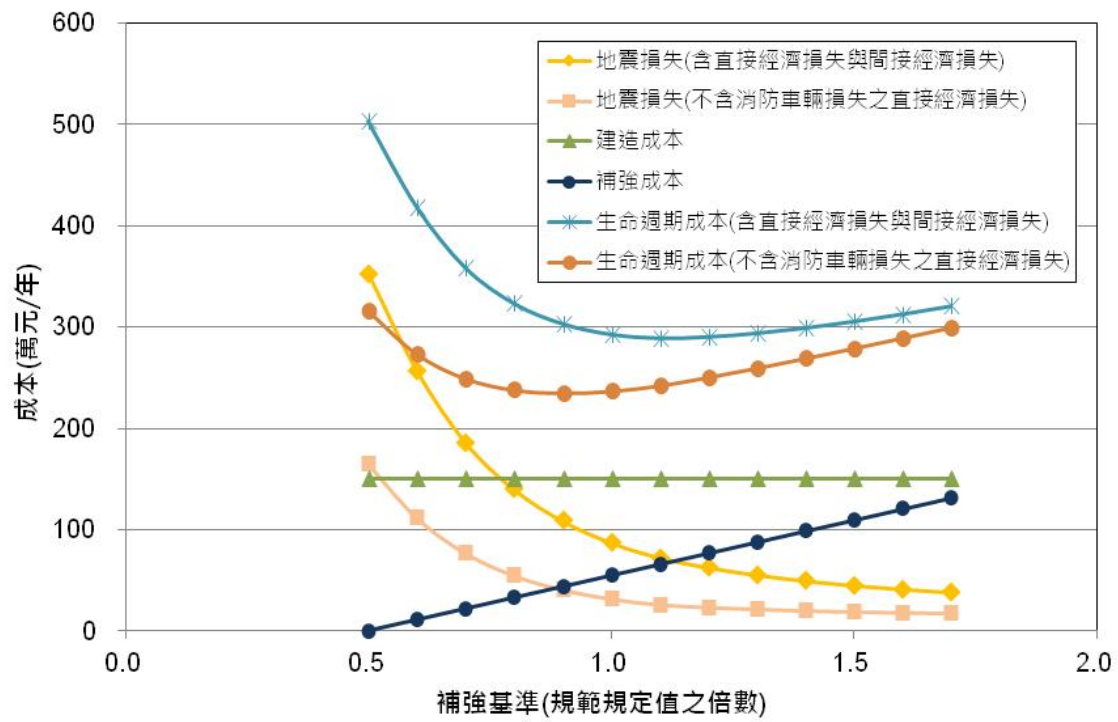
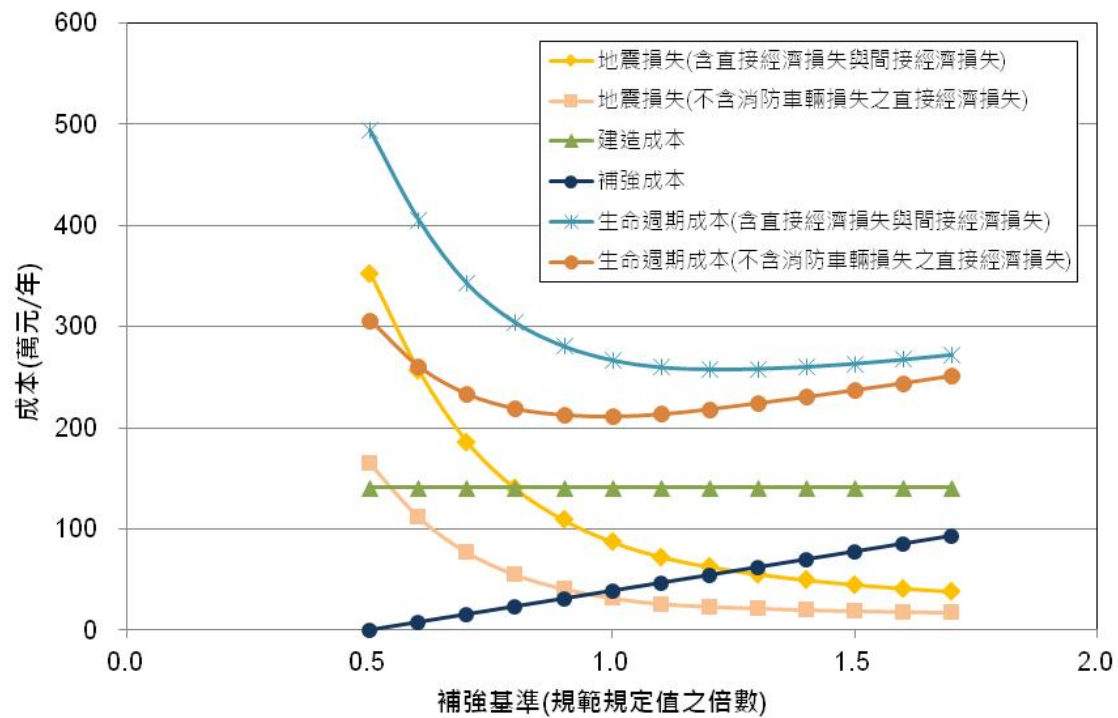


圖 6.2.6 不同折現率下之最佳用途係數

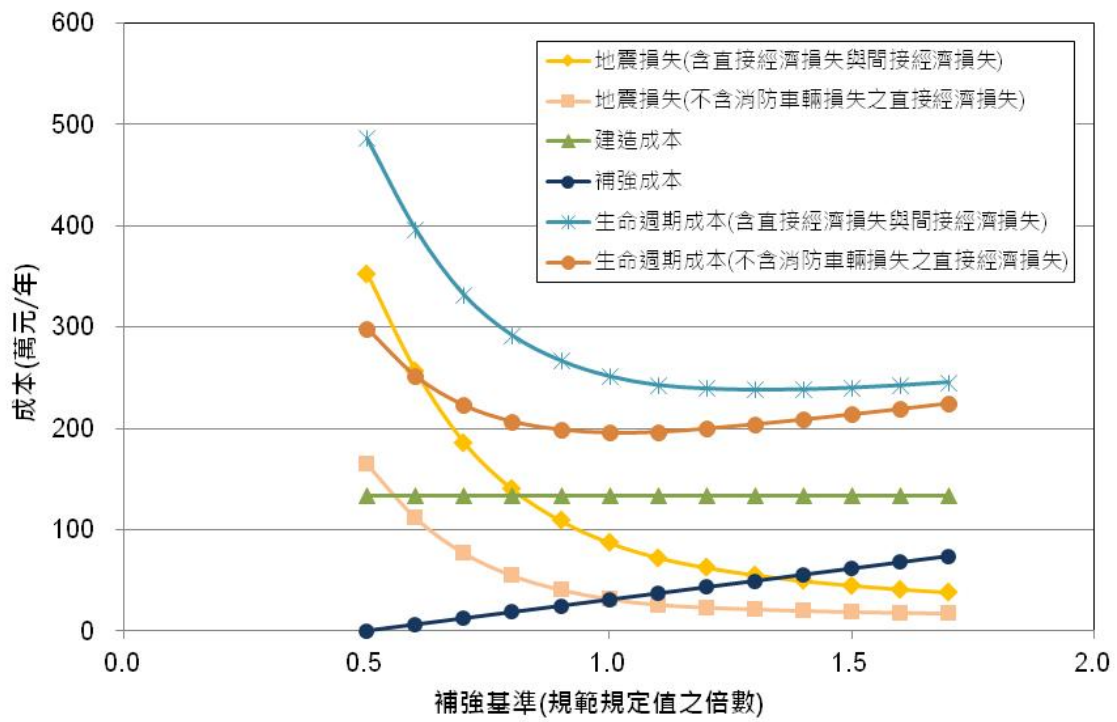


(a)繼續使用年限為 10 年

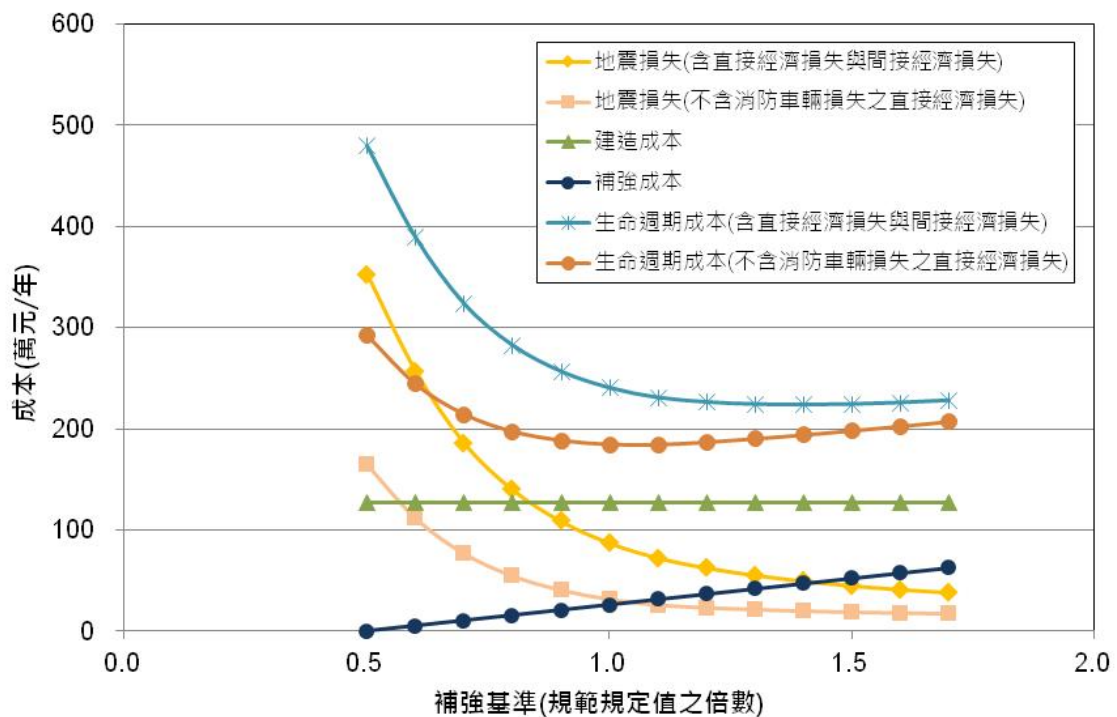


(b)繼續使用年限為 15 年

圖 6.3.1 消防廳舍(已使用 30 年)於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本及其組成分項

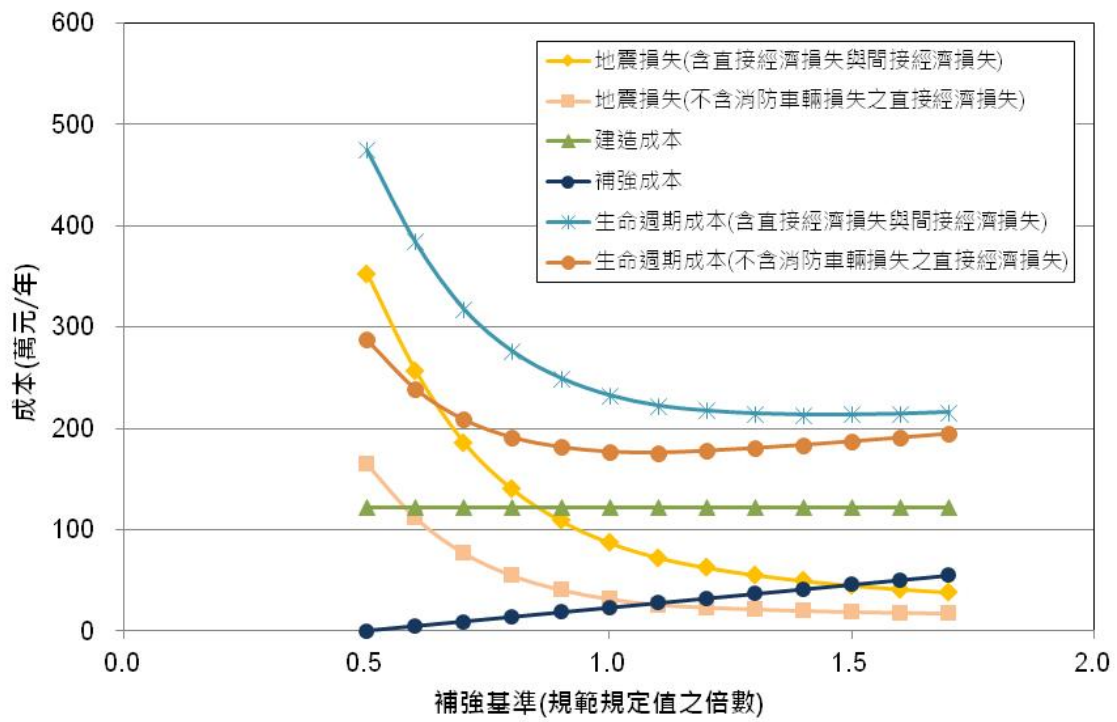


(c)繼續使用年限為 20 年

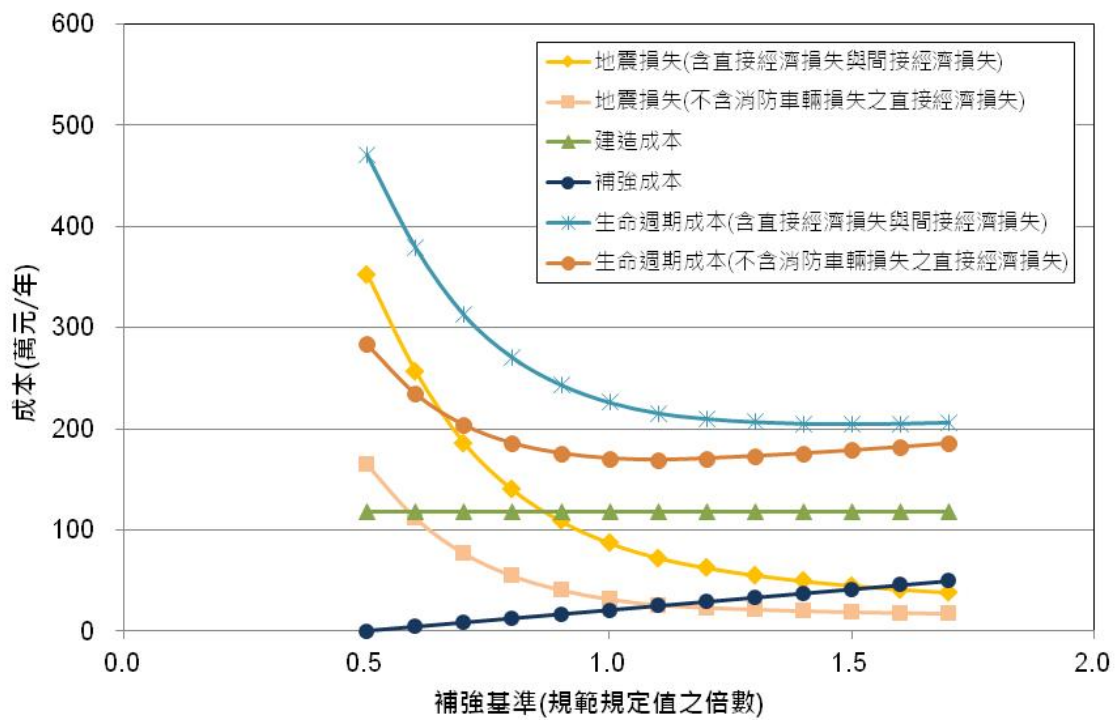


(d)繼續使用年限為 25 年

圖 6.3.1 消防廳舍(已使用 30 年)於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本及其組成分項(續)

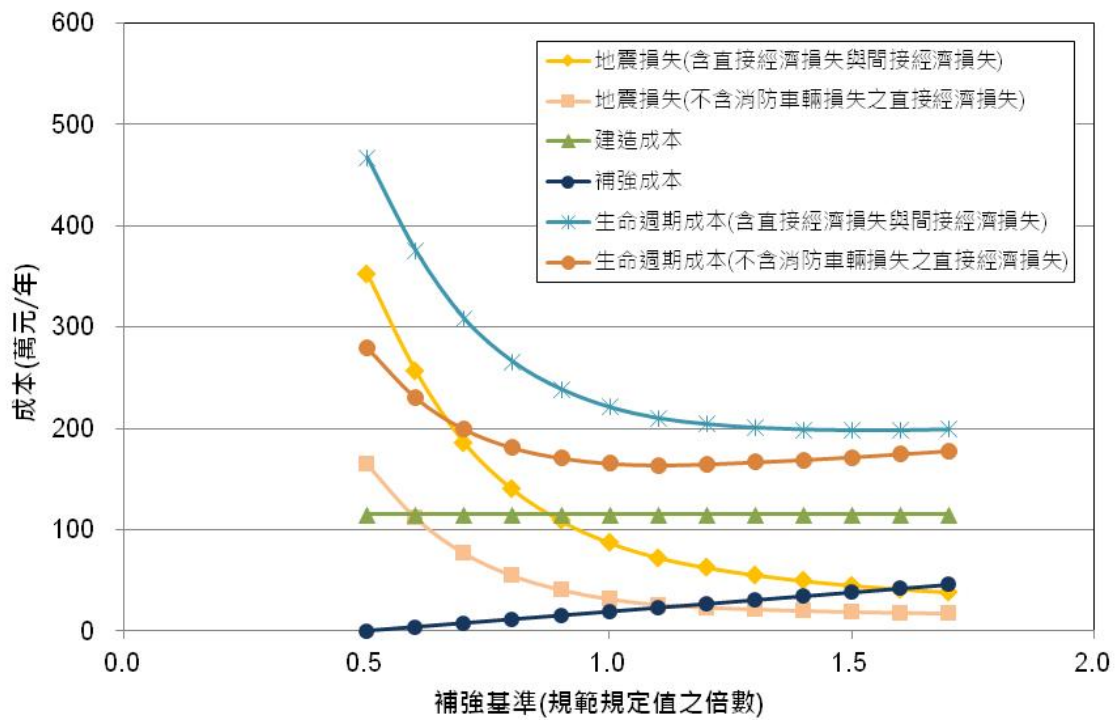


(e)繼續使用年限為 30 年



(f)繼續使用年限為 35 年

圖 6.3.1 消防廳舍(已使用 30 年)於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本及其組成分項(續)



(g)繼續使用年限為 40 年

圖 6.3.1 消防廳舍(已使用 30 年)於不同繼續使用年限及補強基準下的生命週期成本及其組成分項(續)

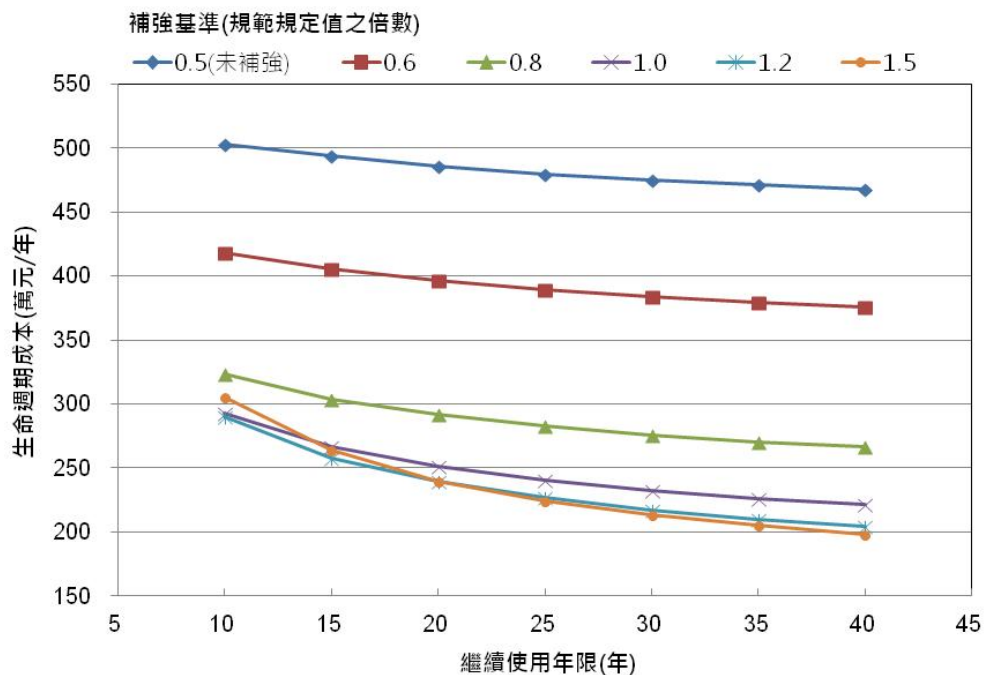


圖 6.3.2 消防廳舍於不同補強基準下隨繼續使用年限增加之生命週期成本變化

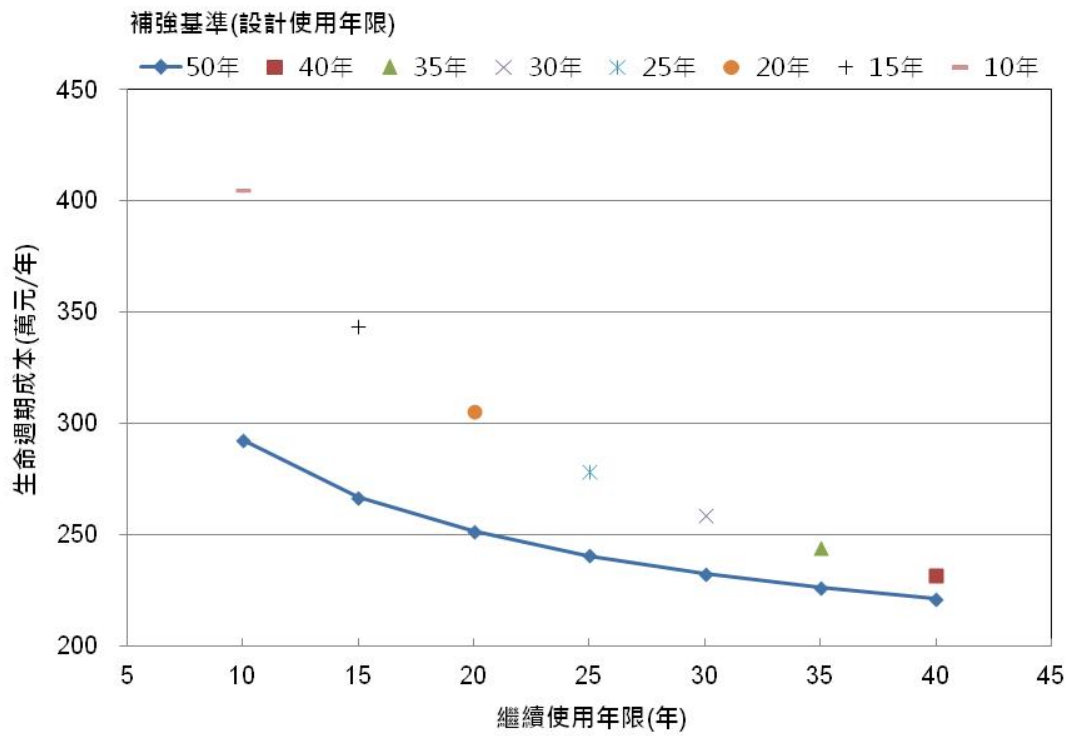


圖 6.3.3 消防廳舍以 50 年設計使用年限補強及以各該繼續使用年限補強時之生命週期成本差異



附 錄

消防廳舍生命週期成本案例計算



消防廳舍生命週期成本案例計算

一、消防廳舍基本資料及假設

- 1.座落地點：臺北市大安區（臺北二區）
- 2.構造別：鋼筋混凝土造
- 3.樓層數：5
- 4.總樓地板面積：2000m²
- 5.建築物高度： $h = 20\text{m}$
- 6.現況耐震能力：規範規定值之 50%，即 $A_{c0} = 0.5 \times (0.32 \times 1.5) = 0.24g$
- 7.建築物初始建造成本： $C_i = 3781$ 萬元

建築物建造成本按行政院中央政府總預算編製作業手冊（2008）-RC 辦公房屋：1-5 層樓為 1.99 萬元/m²，並假設該造價為臺北市用途係數為 1.0 之建築物，另建築物新建成本與耐震能力之關係採(4.5.4)式，因此，耐震能力為規範規定值之 50%之消防廳舍建造成本為：

$$C_0 = \frac{C_{00}}{5} \left(\frac{R_u}{R_0} + 4 \right) = (1.99 \times 2000 / 5) \times (0.24 / 0.32 + 4) = 3781 = C_i$$

- 8.結構系統造價比例：35%

結構系統造價 $C_{S0} = 3781 \times 0.35 = 1323.35$ 萬元

非結構構件造價 $C_{NS} = 2457.65$ 萬元

- 9.內部財產價值： $C_{CN} = 1000$ 萬元

內部財產價值假設為 0.5 萬元/m²，則 $C_{CN} = 0.5 \times 2000 = 1000$ 萬元

- 10.救災車輛價值： $C_{FT} = 4156.4$ 萬元（表 6.1.1）

二、地震損失計算（建築物耐震能力補強至規範規定值之 1.0 倍）

1. 本例 $\Delta\text{PGA}=0.04\text{g}$ ，計算 PGA 於 0.28g-0.32g 區間之地震損失，以平均 PGA=0.30g 估算

2. 建築物耐震能力由 0.24g 補強至規範規定值 $A_c = 0.48\text{g}$ ，並假上原二主軸方向耐震能力相等，由(4.6.1)式估計補強成本：

$$\frac{\Delta C_s}{C_{s0}} = 0.1266 \times \left[\left(\frac{\Delta A_c}{A_{c0}} \right)_X + \left(\frac{\Delta A_c}{A_{c0}} \right)_Y \right]$$

$$\Delta C_s = 1323.35 \times 0.1266 \times 2 \times (0.24/0.24) = 335.07 \text{ 萬元}$$

$$\text{補強後結構系統造價 } C_s = 1323.35 + 335.07 = 1658.42 \text{ 萬元}$$

整體補強成本 $C_R = 1.43 \times 335.07 = 479.15$ 萬元（約 0.24 萬元/m²；另高中職及國中小校舍結構耐震能力補強設計作業規範[110]規定結構補強費用、間接修復費、工程管理費、設計監造服務費等合計之總費用，以不高於 0.4 萬元/m² 為原則）

3. 結構系統易損性曲線參數

補強後 $R = 2.6$

建築物基本振動週期 $T = 0.07h_n^{3/4} = 0.07 \times 20^{3/4} = 0.662$ 秒

屬 $0.2T_0^M < T \leq 0.6T_0^M$ ($T_0^M = 1.3$ 秒) 區間 $F_{uM} = \sqrt{2R-1} = 2.05$

$$A_y = A_c / F_{uM} = 0.48 / 2.05 = 0.234\text{g}$$

	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_{s5}
A_g 之中值	0.234	0.316	0.398	0.480
對數標準差 β	0.650	0.669(d_{s2} 及 d_{s5} 之平均)	0.669(同左)	0.687

4. 結構系統於 PGA=0.3g 作用下處於各損害狀態之機率

	$\geq d_{s1}$	$\geq d_{s2}$	$\geq d_{s3}$	$\geq d_{s4}$	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_{s5}
機率	0.64886	0.46904	0.33632	0.24694	0.17981	0.13272	0.08937	0.24694

5.非結構構件易損性曲線參數

參考 TELES 建議之中耐震設計水準下的加速度敏感型非結構構件的頂層加速度換算為地表加速度

	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_{s5}
A_{roof} 之中值	0.4	0.8	1.2	1.6
A_g 之中值	0.133	0.267	0.400 但不可超過結構系統之 0.398	0.533 但不可超過結構系統之 0.480
對數標準差 β	0.66	0.66	0.66	0.66

6.非結構構件於 PGA=0.3g 作用下處於各損害狀態之機率

	$\geq d_{s1}$	$\geq d_{s2}$	$\geq d_{s3}$	$\geq d_{s4}$	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_{s5}
機率	0.89111	0.57007	0.33422	0.23819	0.32103	0.23585	0.09602	0.23819

7.TELES 建議之結構系統、非結構構件、內部財產在不同損害狀態下的損失比

(表 5.2.2)，結構系統選用中樓層 (C1M) 之損失比

項目	建築物構造類別或用途	各損害狀態之損失比 DR_{d_i} (%)			
		輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
結構系統	鋼筋混凝土構造 (低/中/高樓) C1L/C1M/C1H	1.0/0.8/0.5	4/3/2	32/24/16	100
加速度敏感型/位移敏感型非結構構件	政府機關 Gov1	1	10	30	100
內部財產	政府機關 Gov1	0.1	1	10	50

8.建築物修復費用依(5.2.4)式估算

$$L_j = \left[\sum_{d_i=2}^5 (P_{j,d_i} \times DR_{j,d_i}) \right] \times C_j$$

結構系統修復費用

$$\begin{aligned} L_S &= [0.17981 \times 0.008 + 0.13272 \times 0.03 + 0.08937 \times 0.24 + 0.24694 \times 1] \times 1658.42 \\ &= 454.1 \text{ 萬元(A)} \end{aligned}$$

非結構構件修復費用

$$L_{NS} = [0.32103 \times 0.01 + 0.23585 \times 0.1 + 0.09602 \times 0.3 + 0.23819 \times 1] \times 2457.65$$

$$= 722.2 \text{ 萬元(B)}$$

9. 內部財產損失、消防車輛損失依(5.2.4)式估算

$$L_{CN} = [0.32103 \times 0.001 + 0.23585 \times 0.01 + 0.09602 \times 0.1 + 0.23819 \times 0.5] \times 1000$$

$$= 131.4 \text{ 萬元(C)}$$

$$L_{FT} = [0.17981 \times 0.001 + 0.13272 \times 0.01 + 0.08937 \times 0.1 + 0.24694 \times 0.5] \times 14156.4$$

$$= 556.6 \text{ 萬元(D)}$$

10. 人員傷亡損失

採 TELES 建議之室內傷亡率 (C1M) 計算建築物室內傷亡人數 (NS_i) 及 HAZUS 建議之室外傷亡率 (C3M) 計算建築物室外傷亡人數 (NS_o) (表 5.2.3、表 5.2.4)

室內外人口分別假設為 25 人及 2 人

項目	結構系統 損害狀態	建築物構造 類別	傷亡率 (%)			
			S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
TELES 室內傷 亡率	輕微損害	C1L/C1M/C1H	0.02	0.001	0	0
	中度損害		0.2	0.02	0.002	0
	嚴重損害		1	0.5	0.1	0.01
	完全損害 但無倒塌		7/4/2	5.6/3.2/1.6	4.2/2.4/1.2	3.5/2/1
	完全損害 並倒塌 ^[a]		10/8/6	8/6.4/4.8	6/4.8/3.6	5/4/3
HAZUS 室外傷 亡率	中度損害	C1L/C1M/C1H	0.05	0.005	0	0
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	嚴重損害	C1L/C1M/C1H	0.1/0.2/0.3	0.01/0.02/0.03	0.0001/0.0002 /0.0003	0.0001/0.0002 /0.0003
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
	完全損害	C1L/C1M/C1H	2/2.2/2.5	0.5/0.7/1	0.1/0.2/0.3	0.1/0.2/0.3
		C2L/C2M/C2H				
		C3L/C3M/C3H				
[a]完全損害下 C1L/C1M/C1H 之倒塌率為 20%/15%/10%。						

$$NS_{3(i)} = [0.13272 \times 0.00002 + 0.08937 \times 0.001 + 0.24694 \times (0.85 \times 0.024 + 0.15 \times 0.048)] \times$$

$$25 = 0.1727 \text{ 人}$$

$$NS_{4(i)}=[0.08937 \times 0.0001 + 0.24694 \times (0.85 \times 0.02 + 0.15 \times 0.04)] \times 25 = 0.1422 \text{ 人}$$

$$NS_{3(o)}=[0.08937 \times 0.000004 + 0.24694 \times 0.003] \times 2 = 0.0015 \text{ 人}$$

$$NS_{4(o)}=[0.08937 \times 0.000004 + 0.24694 \times 0.004] \times 2 = 0.0020 \text{ 人}$$

$$NS_3 + NS_4 = (0.1727 + 0.0015) + (0.1422 + 0.0020) = 0.3184 \text{ 人}$$

人員傷亡損失依(5.2.11)式估算

消防隊員之剩餘職業壽命 $T_{RO,FM} = 20$ 年 平均年薪 $I_{FM} = 50$ 萬元/年

$$L_{CA} = (NS_3 + NS_4) \times T_{RO,FM} \times I_{FM} = 0.3148 \times 20 \times 50 = 318.4 \text{ 萬元(E)}$$

11. 建築廢棄物處理費用

TELES 建議之結構系統及非結構構件之單位面積重量及各損害狀態下之廢棄物產生比率 (表 5.2.8)

項目	建築物構造類別或用途	RCS				BWO					
		單位重 W_{RCS} (T/m ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)				單位重 W_{BWO} (T/m ²)	各損害狀態之廢棄物產生比率 (%)			
			輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害		輕微損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
結構系統	C1L	1.13	0	5	33	100	0.09	5	15	40	100
	C1M				30					35	
	C1H				27					30	
非結構構件	加速度敏感型	0.03	0.4	4	40	100	0.12	0.8	8	40	100
	位移敏感型	0.06									

建築廢棄物重量依(5.2.12)式計算

結構系統產生之廢棄物重量

$$W_{RCS} = [0.13272 \times 0.05 + 0.08937 \times 0.30 + 0.24694 \times 1] \times 1.13 \times 2000 = 633.7T$$

$$W_{BWO} = [0.17981 \times 0.05 + 0.13272 \times 0.15 + 0.08937 \times 0.35 + 0.24694 \times 1]$$

$$\times 0.09 \times 2000 = 55.3T$$

非結構構件產生之廢棄物重量

$$W_{RCS} = [0.32103 \times 0.004 + 0.23585 \times 0.04 + 0.09602 \times 0.4 + 0.23819 \times 1]$$

$$\times 0.09 \times 2000 = 51.7T$$

$$W_{BWO} = [0.32103 \times 0.008 + 0.23585 \times 0.08 + 0.09602 \times 0.4 + 0.23819 \times 1]$$

$$\times 0.24 \times 2000 = 143.1T$$

$$W_{DE} = 633.7 + 55.3 + 51.7 + 143.1 = 883.8T$$

建築廢棄物處理費用依(5.2.13)式估算

廢棄物單位重量的處理費用 $C_{DE} = 0.065$ 萬元/公噸

$$L_{DE} = W_{DE} \times C_{DE} = 883.8 \times 0.065 = 57.4 \text{ 萬元(F)}$$

12. 搬遷損失

TELES 建議之不同損害狀態下的建築物修復時間 (表 5.2.9)

建築物 用途	結構系統各損害狀態之修復時間 (日)			
	輕度損害	中度損害	嚴重損害	完全損害
Gov1	5	60	240	480 (以 1 年計)

臨時辦公廳舍面積 $FA_{TO} = 500m^2$

租金 $C_{RE} = 0.045$ 萬元/ $m^2 \cdot$ 月

搬遷損失依(5.2.14)式計算

$$L_{RE} = \left[\sum_{d_s=3}^5 (P_{S,d_s} \times T_{R,d_s}) \right] \times FA_{TO} \times C_{RE}$$

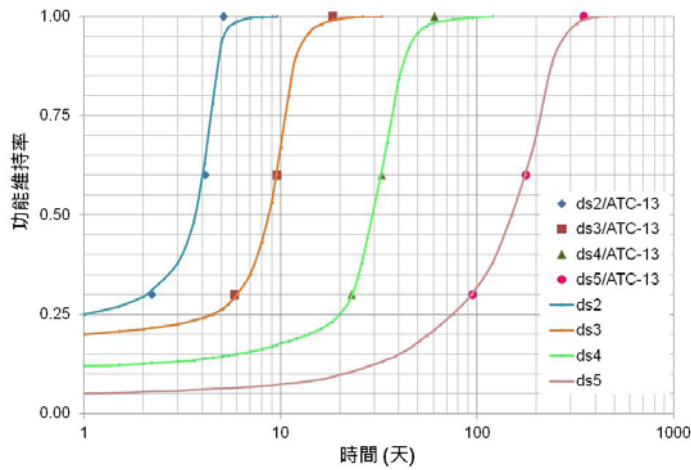
$$= [0.13272 \times 2 + 0.08937 \times 8 + 0.24694 \times 12] \times 500 \times 0.045 = 88.7 \text{ 萬元(G)}$$

13. 建築物功能中斷損失

(1) 功能喪失率依(5.2.16)式及(5.2.17)式計算

$$FFR_E = \sum_{d_s=2}^5 [P_{S,d_s} \times (1 - FUN_{d_s})]$$

$$FFR_R = \sum_{d_s=3}^5 \left[P_{S,d_s} \times (1 - FUN_{d_s}) \times \frac{T_{FI,d_s}}{12} \right]$$



FUN_{d_s} 由圖 5.2.5 獲得

	d_{s2}	d_{s3}	d_{s4}	d_{s5}
FUN_{d_s} (前 7 日平均)	0.635	0.256	0.138	0.06
$1-FUN_{d_s}$	0.365	0.744	0.862	0.94
T_{Fl,d_s} (月)	-	1	2	2

$$FFR_E = [0.17981 \times 0.365 + 0.13272 \times 0.744 + 0.08937 \times 0.862 + 0.24694 \times 0.94] = 0.474$$

$$FFR_R = [0.13272 \times 0.744 \times 1/12 + 0.08937 \times 0.862 \times 2/12 + 0.24694 \times 0.94 \times 2/12]$$

$$= 0.060$$

(2) 臺北市大安區年度火災、緊急救護統計 (3 消防分隊) (表 6.1.2)

年度	火災搶救					緊急救護
	次數	死亡人數	受傷人數	救出人數	財物損失 (萬元)	人次
2005	68	0	0	0	204.4	7,280
2006	53	0	0	0	311.3	8,119
2007	50	2	1	0	328.4	9,460
2008	43	1	3	0	305.5	10,390

(3) 額外火災損失

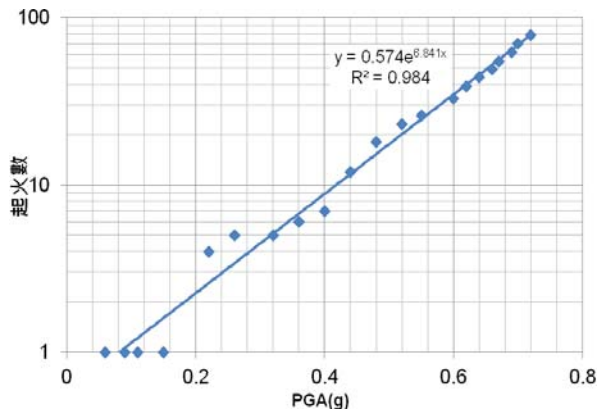
i. 震後緊急應變期間額外火災損失

震後火災影響之戶數 NEF

$$NEF = NFI + NFS$$

$$NFI = 3 \times F_5 \times TFA = 3 \times (0.3131PGA + 0.0159PGD) \times TFA$$

$$NFS = NFSA \times PBH$$



$F_5 \times TFA$ 由圖 6.1.3 之 TELES 預估之震後火災數獲得，當 $PGA=0.3g$ 時，大安區約發生 4.5 起火災/3 分隊，因此震後起火數 $NFI=3 \times (4.5/3)=4.5$ 火災延燒之戶數 NFS 預定在 PGA 超過 $0.3g$ 時才會逐步發生，因此此例 $NFS=0$ ，故 $NEF=NFI=4.5$ 。但當 PGA 超過 $0.3g$ 時，可能延燒區域數 $NFSA$ 可參考圖 5.1.4，而每一延燒區域可能燒損之戶數 $PBH=20$ 戶。

地震後額外火災損失依(5.2.18)式計算

平均每起火災之損失 $PFL=10$ 萬元

震後緊急應變期間的額外火災損失因子 $AFL_E=20$

$$L_{FE,FL} = FFR_E \times NEF \times PFL \times AFL_E = 0.474 \times 4.5 \times 10 \times 20 = 426.6 \text{ 萬元(H)}$$

ii. 功能復原期間額外火災損失

額外火災損失依(5.2.19)式計算

轄區內之年度火災損失 $YFL=305.5$ 萬元/3 分隊 (2008 年數據)

功能復原期間的額外火災損失因子 $AFL_R=0.5$

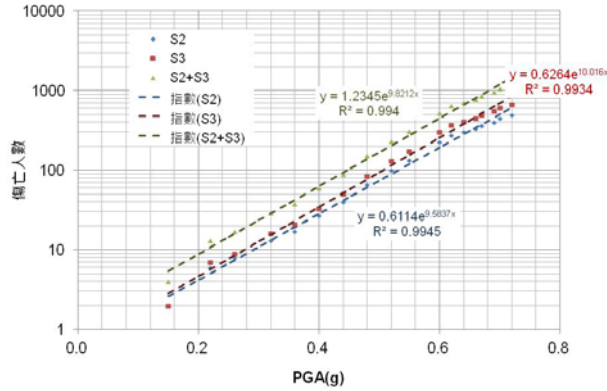
$$L_{FR,FL} = FFR_R \times YFL \times AFL_R = 0.060 \times (305.5/3) \times 0.5 = 3.1 \text{ 萬元(I)}$$

(4) 額外人命損失

依(5.2.29)式及(5.2.30)式計算

震後緊急變期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目 NDS_E 為

TELES 預估建築物室內傷亡程度為 S_2 及 S_3 合計人數之 1/3，參考圖 6.1.2 得 23.5 人/3 分隊，即 $NDS_E = 23.5/3/3 = 2.61$ 人



功能復原期間因消防隊功能中斷而減少救活之傷病患數目 NDS_R 為年度緊急救護人數 (10390 人/3 分隊, 2008 年數據) 的 1%，即 $NDS_R = (10390/3) \times 0.01 = 34.63$ 人

震後緊急變期間受緊急救護服務之患者平均剩餘職業壽命 $T_{RO,EMSE} = 20$ 年，平均年薪 $I_{EMSE} = 50$ 萬元/年

功能復原期間受緊急救護服務之患者平均剩餘職業壽命 $T_{RO,EMSR} = 10$ 年，平均年薪 $I_{EMSR} = 30$ 萬元/年

$$L_{FE,LL} = FFR_E \times NDS_E \times T_{RO,EMSE} \times I_{EMSE} = 0.474 \times 2.61 \times 20 \times 50 = 1237.1 \text{ 萬元(J)}$$

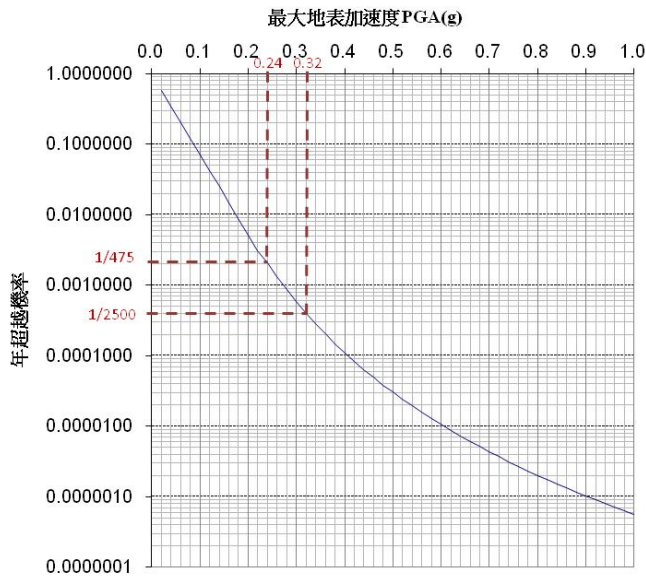
$$L_{FR,LL} = FFR_R \times NDS_R \times T_{RO,EMSR} \times I_{EMSR} = 0.060 \times 34.63 \times 10 \times 30 = 623.3 \text{ 萬元(K)}$$

14. 地震損失合計

$LOSS(0.3g) = (A)$ 至 (K) 各項損失合計 = 4618.9 萬元

直接經濟損失								間接經濟損失(建築物功能中斷損失)					地震損失
結構系統損失	非結構構件損失	內部財產損失	消防車輛損失	人員傷亡損失	建築廢棄物處理費	搬遷損失	合計	功能復原期間		震後緊急應變期間		合計	
								額外火災損失	額外人命損失	額外火災損失	額外人命損失		
454.1	722.2	131.4	556.6	318.4	57.4	88.7	2328.8	3.1	623.3	426.6	1237.1	2290.1	4618.9

由圖 4.3.2 得 PGA 於 0.28g-0.32g 區間之年發生率為 0.00046464



地震地表加速度在此區間時，一年中可能引致的年損失
 $LOSS(\Delta PGA) \times v(\Delta PGA) = 4618.9 \times 0.00046464 = 2.15$ 萬元/年

依(2.2.4)式，將所有地震地表加速度區間對應的年損失累加，可得一年中的

平均損失值（年平均損失） $\mu_L = \sum_{PGA=0}^{2.0g} LOSS(\Delta PGA) \times v(\Delta PGA) = 87.26$ 萬元/年

三、生命週期成本計算

依(2.2.1)式、(2.2.2)式、(2.2.3)式計算

$$\mu_{C_i} = \begin{cases} \frac{r(1+r)^{t_p+t_r}}{(1+r)^{t_p+t_r} - 1} C_I & ; r \neq 0 \\ \frac{C_I}{t_p + t_r} & ; r = 0 \end{cases} \quad \mu_{C_r} = \begin{cases} \frac{r(1+r)^{t_r}}{(1+r)^{t_r} - 1} C_R & ; r \neq 0 \\ \frac{C_B}{t_r} & ; r = 0 \end{cases}$$

折現率 $r = 2.5\%$

建築物已使用 $t_p = 30$ 年，預計繼續再使用 $t_r = 20$ 年

$$\mu_{C_i} = \frac{0.025(1+0.025)^{30+20}}{(1+0.025)^{30+20} - 1} \times 3781 = 133.31 \text{ 萬元/年}$$

$$\mu_{C_r} = \frac{0.025(1+0.025)^{20}}{(1+0.025)^{20} - 1} \times 479.15 = 30.74 \text{ 萬元/年}$$

$$SRC = \mu_{C_i} + \mu_{C_r} + \mu_L = 133.31 + 30.74 + 87.26 = 251.31 \text{ 萬元/年}$$