

國際重大震災經驗啟示及建築耐震設計規範因應 之研究

Lessons from the Great Earthquake Disasters Worldwide and the Modification Methodology for the Seismic Design Provisions of Buildings in Taiwan

主管單位：內政部建築研究所

鄭元良¹

翁元滔²

陶其駿¹

Yuan-Liang Zheng¹

Yuan-Tao Weng²

Ji-Chun Tao¹

¹ 內政部建築研究所

² 國家實驗研究院國家地震工程研究中心

摘要

本研究計畫旨在針對近年來國際上接連發生帶來重大震害的強烈地震，就其研究分析結果、勘災紀錄、研究報告與調查結果等，解析及整理這些重大震災對於地震工程與結構耐震設計的經驗內涵及重要啟示，並蒐集世界各國相關耐震設計規範的因應策略及修訂內容，以規劃研擬台灣建築物耐震設計規範的修訂方案及發展策略，其中亦針對附屬構體與非結構構材及設備、非建築結構等規範內容進行檢討及修正研擬，另外亦就現行隔減震消能元件性能測試程序的執行現況進行調查及可行性檢討。研究內容分別包含歐美、日本、紐西蘭及中國大陸等近年來國際上所發生的重大震災經驗及其對地震工程的啟示、世界各國耐震規範近來的修訂方向與內容、台灣建築物耐震設計規範的修訂策略等三大主題，據以研擬建築物耐震設計規範條文與解說修訂草案。

從近年來國際接連發生，例如：日本東北大地震及中國汶川地震等重大震害的經驗與啟示，帶動世界各國重新檢視建築物耐震設計相關規範之規定細節，並研擬相關修正方案，且鑒於近年來國內活動斷層調查結果的更新、新式結構系統的研發、設計與分析模擬技術的精進、隔減震元件的蓬勃發展，以及耐震工程品管制度的推動等，故國內建築物耐震設計相關規範，須就施行現況及國內外相關研發成果等，進行全面檢視，例如：新式結構系統韌性容量與高度限制、進行動力歷時分析時有關地震選取與強度縮放之規定、結構與土壤互制效應之考量、附屬建築物之結構部分構體與非結構構材與設備之附件係數、非建築結構的韌性容量及高度限制等相關規定，亟需儘早進行檢視、更新與修正，另外對於國內採用多年隔、減震消能元件品管驗證的相關規定，亦需就其施行應用現況與規範規定內容，進行檢討與改善策略，以確保隔、減震消能元件的設計與品管，更為合理可行與安全。

本案主要就近年來國際上重大震災的啟示與建築勘災調查結果，針對建築物耐震設計相關規範之規定內容，著手檢視並提出妥適的配套措施或及修訂方案，使其更能確保國內建築物之耐震安全，有效提昇工程設計品質。

關鍵字：耐震設計、消能元件、非結構元件、非建築結構

Abstract

Recent two decades where several earthquakes hit densely populated areas in America, Japan, China, New Zealand and Taiwan and caused heavy loss of life and wide-spread damage. Contrary to what a layman may perceive, the nature of damage observed is not a strong function of geographical location or socio-political environment of the affected areas, while the extent of damage may be. Basically, we see the same handful of issues and problems being responsible for most of the devastation, whether the earthquake occurs in Taiwan or Japan, southern California, or New Zealand. This project is to summarize the key earthquake engineering principles, learned once and forgotten or ignored many times, observance of which could result in the saving of many thousands of lives, the avoidance of untold injuries, and significant damage reduction every year.

The current Taiwan seismic design code for buildings in Taiwan was issued on December 14, 2004 and applied from July 1, 2005. Compared with the last version of seismic design code that was issued in 1997 and little modified in 1999, the differences on the requirements and formats of provision can be observed significantly. Therefore, it is necessary to indicate the items which should be taken care while designing buildings using the current seismic design provision, and to demonstrate how to apply the current seismic design code in detail by examples. In 2010, CGS bulletins the revised active fault distribution according to the new evidences of paleo-seismology investigations. It is a summary that there are total 33 active faults (Type I and II) in Taiwan. This plan also aims at developing the near-fault factors of the 9 additional Type I active faults in order to consider the near-fault effect at the seismic demands specified in the design specifications.

The objective of this project is to survey the seismic hazards and loss in recent decades for the improvement for the current seismic design of buildings in Taiwan. In order to upgrade the applicability of the current seismic design code, some revised drafts corresponding to nonstructural components, nonbuilding structures, near fault effect, and energy-dissipating device testing procedures in the current issued seismic design codes are proposed. Finally, some revised recommendations are referenced for the future modification.

Keyword: seismic design code for buildings, examples of seismic design, recommendations of modified provisions

一、前言

近十年內國際嚴重震災事件頻傳，從 2008 年中國汶川大地震、2010 年海地大地震、2011 年紐西蘭基督城地震、2011 年日本 311 東北大地震等，均造成人員生命與財產的嚴重損失，其它如墨西哥、伊朗等國，

亦有芮氏規模 6 以上的地震造成明顯災害，以三個國際重大地震為鑑：(1) 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦的喀什米爾發生規模 $M_w 7.6$ 的強烈地震，造成八萬七千餘人死亡。(2) 2008 年 5 月 12 日的中國汶川地區發生規模 $M_w 8.0$ 的強烈地震，造成六萬九千餘人死亡。(3) 2011 年 3 月 11 日，日本東北部海域發生規模 $M_w 9.0$ 地震並引發海嘯，造成一萬五千餘人死亡。這三次重大震災皆造成受災國的社會極大的衝擊，亦引起國際上對建築耐震安全的普遍注視，並重新檢討相關政策與法規，積極進行建築耐震能力與安全評估與提昇作業。台灣 1999 年發生的 921 集集地震，也造成 51,711 間房屋全倒及 53,768 間房屋半倒；若是災害性地震發生在人口密集的都會區，如台北市、高雄市，其後果必定不堪設想。台灣位於全球地震活動最為激烈頻繁的環太平洋地震帶上，為全世界主要的地震高發區之一，隨時受到地震災害的威脅。根據近百年資料統計，台灣地區約每隔十五年至二十年即會發生一次劇災型地震災害，造成極為重大的人員傷亡與經濟損失。因此，對地震災害的整備與應變是政府必須持續正視、推動的重要工作，雖自集集大地震之後，台灣的耐震設計規範便陸續開始檢討修訂，但從近年來國際上所發生強震的震害調查結果及相關分析顯示：地震的震源機制、斷層活動等特性仍不易有效掌握，故仍須鑒於以往地震災害所帶來的經驗與啟示，結合地震工程的研發成果，庚續研修結構耐震設計規範的架構與內容。

近廿年來台灣、日本、美國、加拿大、紐澳及歐洲的建築物耐震設計規範研修規劃亦有相當的進展與更新，例如設計反應譜的製作方式、新型結構系統的相關設計參數、各類結構系統或元件的性能檢核方式、動力歷時分析所用的地震歷時挑選與強度縮放方法之檢討、非結構構材及設備地震力要求、非建築結構的地震力要求及性能檢核方式、液化潛能評估方法、結構系統超強因子與位移放大係數之應用與檢討、隔減震消能元件之性能測試程序等，皆是近年來國際上各國的建築物耐震規範修訂規劃內容中常見的主題。自 1997 年後，歐美等國的耐震設計規範即有較明顯而重大的變革，其中針對耐震設計基本原則修正為：「係使建築物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。」美國 International Building Code 2000 Ed.(ICBO, 2000) 增訂最大考量地震危害等級，台灣亦開始依循此原則及地震力表達格式等大幅增修台灣建築物耐震設計規範條文與解說，國家地震工程研究中心(National Center for Research on Earthquake Engineering, 以下簡稱 NCREE)亦在 2004 年邀集國內學者專家、工程界以及相關主管機關代表所組成之耐震規範研究發展委員會定期討論研議耐震設計規範研修方案後，再送交內政部營建署審議通過，目前下列主要項目已通過經營建署審議完成：

1. 結構系統分類及容許韌性容量
2. 建築物規範之週期上限係數之調整
3. 地盤分類標準
4. 建築物之間隔規定
5. 液化潛能判定所採用之地表水平加速度
6. 臺北盆地設計地震微分區修訂
7. 隔震建築物設計

二、國內外文獻評析

在歐美地區地震工程的發展十分早，伴隨著地震學的研究，在 19 世紀末以及 20 世紀初，科學家對於地震的影響產生濃厚的興趣，在義大利、日本、美國(特別是加州地區)猶為重視，這也是因為幾次大地震的發生所導致，如日本 1855 年安政江戶地震(Edo Earthquake)、1891 年美濃尾張地震(Mino-Owar Earthquake)以及 1923 年關東大地震(Kanto Earthquake)，美國 1906 年舊金山地震(San Francisco)，義大利 1908 年梅西納地震(Messina Earthquake)等，由這些地震的震害調查經驗當中，發現到地震所產生的水平慣性力對於結構的破壞具有相當程度的影響，因此產生了在設計建築時將地震力考量進來的構想。

位於歐洲的地震工程學者最早於 19 世紀末開始建議以很小比例的自重當成水平方向的地震力來設計，這個概念後來被廣泛的應用在 20 世紀

初期的耐震設計中。

1900 年，日本學者大森房吉提出震度法的概念，將地震作用簡化成等效之靜力並取為重量的 0.1 倍作為水平地震橫力。義大利圖靈(Turin)大學應用力學教授 Panetti 則於 1924 年建議將第一層的設計水平力取為其上部重量的 1/10，而第二層與第三層的設計水平力則取為其上部重量的 1/12，這是最早將水平地震力量化的耐震設計法。1923 年日本關東大地震後，1924 年日本都市建築規範首次增設的耐震設計規定，取地震係數為 0.1。

1927 年美國國際建築事務協會(International Council of Building Officials)提出 Uniform Building Code (UBC)第一版規範，首次引進地震力設計於附錄中，地震係數取為 7.5%~10%之建築總重，此時之設計地震力建議並未具強制力，直至 1933 年長灘地震(Long Beach Earthquake)後，洛杉磯建築法(Los Angeles Building Code, LABC)參考 UBC 規定，為最早建築耐震設計的強制規定。以現在的耐震知識來看，採用地震力為自重之一定比例之靜力法並沒有考量結構的動力效應並且認為結構在地震作用之下，隨著地基作整體水平剛體移動其運動之加速度與地表加速度相同，由此所產生的水平慣性力(即建築物重量與地震係數的乘積)係沿著高度方向均勻分布。若進一步考慮到不同地區地震強度的差異性，則可在設計中按照不同震區採用不同的地表加速度。以結構動力的觀點來看，地震作用之下結構各質點的地震反應加速度事實上並不會等於地表加速度。

1937 年洛杉磯郡資助加州理工學院、史丹佛大學等單位進行建築物遭受地震破壞的廣泛研究，發現對於不同樓高的建築物，依據法規規定所設計之地震力其提供的保障並不相同，因此於 1943 年的 LABC 規範中將樓高規定納入地震考量中。

1948 年美國土木工程學會(ASCE)以及北加州結構工程同業公會(Structural Engineers Association of Northern California, SEAONC)進行「耐震設計」EQ-RD(Earthquake-Resistant Design)研究，於 1952 年將結構物的

振動週期 T 納入地震係數 C 的計算式中，此為 1932 年加州理工學院 Biot 提出反應譜概念，並於 1941 年成功的利用扭擺振動類比分析儀從一個實測地震紀錄當中製作出全世界第一個地震反應譜，得到無阻尼單自由度系統的地震最大反應加速度與基本振動週期間的關係後，首次將此概念納入地震力計算式中，為結構物耐震設計演進的一大進步。1953 年 Housner 等學者則提出有阻尼的單自由度系統的反應譜。在電腦發明之後，Clough 提出考慮高模態影響的計算方法並實際利用程式計算在高層建築中的地震反應。自此之後，反應譜理論逐漸並廣泛地被各國耐震設計規範所接受，結構耐震設計理論與方法從此之後便進入了反應譜之年代。

在進入反應譜之年代後，許多早期按照靜力係數法設計的短週期結構物，若按照彈性反應譜理論其短週期加速度反應譜值比靜力係數法的地震係數均在一倍（最大為 2.5 倍）以上，照理來說應該會因地震力不足而無法承受強烈大地震的作用。然而；在許多震害經驗當中，這些結構物卻往往能夠承受得住強烈地震的考驗，使得結構工程師無法於理論上解釋之前設計的結構物為何能夠承受如此強烈的災害地震之侵襲。

為了解決由靜力法過渡到反應譜法所衍生的適用問題，因此；以美國 UBC 規範為例，藉由使用地震力折減係數 R 的方式將反應譜法所得到的譜加速度值 S_a 折減至與靜力法水平地震力相當的設計地震譜加速度 S_{aD} ， $S_{aD}=S_aR$ ，其中地震力折減係數 R 的規定值對於韌性較差的結構取較小之值而對於韌性較佳的結構則可取較大之值。雖然當初利用地震力折減係數加譜加速反應值折減的方式是經驗性的作法，然而人們皆已經認知到應該依據結構韌性之不同來取不同的地震力折減係數，此即為考慮結構耐震能力貢獻的最早形式。然而卻經歷了一個很長的歷程才認知到結構韌性之重要性。在確定及研究地震力折減係數 R 的過程當中，Housner 和 Newmark 分別從兩個不同角度各自提出看法，Housner 認為考慮地震力折減係數 R 的因素有：每一次地震作用當中可能包括若干次大小不等的較最大反應，較小的地震反應可能出現許多次，而較大的地震反應則可能只出現一次，除此之外某些地震反應的尖峰值持續得時間可能很短，震害經驗顯示這種脈衝式的地震所帶來的震害相對較輕。

1959 年加州結構工程同業公會(Structural Engineers Association of California, SEAOC)將組構係數 K 納入地震力計算，首次導入結構非線性行為的概念，承認不同結構特性的建築其韌性以及消能能力亦有所不同，此亦為耐震設計演進的另一重大突破。

1967 年 SEAOC 提出「小震不壞、中震可修、大震不倒」概念於規範中，此準則亦被大多數學者及工程師所接受，廣泛地列於全世界耐震法規的基本精神中。1978 年 ATC 3-06 提出幾項新的概念如遠距地震對長週期結構的影響、阻尼及韌性對結構非線性行為的影響以及耐震性能要求分類等。

美國 UBC 規範基本上每 3 年改版，自 2000 年後美國建築規範由昔日的三大規範(UBC、SBC、BOCA)合併為全國通行之單一規範 International Building Code(IBC)，而首版之 2000 年版 IBC 耐震設計部份即以 1997 年版 NEHRP 規範為基礎，並融合部分 1997 年版 UBC。最新 2012 年版 IBC 則以 ASCE 7-10 為依據，而 ASCE 7-10 訂定基礎即為 NEHRP2003 (FEMA 450)。

我國耐震設計相關規定始訂於民國 63 年 2 月，條列於建築技術規則中，在此之前並無明文規定，因此當時的結構設計可能沒有考量地震力，或參考美、日等國做法假設基底剪力係數為 0.1 來設計，此 63 年版之規範開始考慮地震危害度並引入結構系統韌性與週期。民國 71 年 6 月，以美國 UBC76 規範為藍本對地震力的規定架構做了一些修訂，並提供較為完整之結構物週期計算公式。民國 78 年 5 月考量墨西哥地震引致之盆地效應影響，針對台北盆地之震力係數 C 修訂，將反應譜平台段延長至 1.65 秒，以反映地震時台北盆地特有的盆地效應。民國 86 年 5 月則將耐震設計規範於建築技術規則中獨立出來，此一版本在地震力的規定條文上採用 Newmark 的非彈性反應譜所使用的折減函數形式，使各項耐震設計參數都能盡量呈現或反映其物理意義，可說是做了重大的改變。後因發生 921 集集地震，造成中部及台北地區重大傷亡，而於 88 年 12 月緊急修訂震區劃分，為全面提高耐震設計地震力，除北、高及外島地區外，所有地區之震區係數皆以最大值 0.33 訂之，並修改台北盆地設計反應譜，提

高其平台段之放大倍率至 2.5。

921 大地震之後，內政部建築研究所協同國家地震工程研究中心、台大地震工程研究中心以及中華民國地震工程學會等相關單位，以集集大地震後的調查結論為基礎，配合中央氣象局量測之強地動觀測資料，並參考美國 IBC2000 規範以及國內外之相關研究成果，針對建築技術規則及耐震設計規範進行一系列之檢討與修訂，提出大幅改版之建築物耐震設計規範及解說，於 93 年 12 月公告，94 年 7 月 1 日施行，此版本之修訂主要有：考量不同地震水準與設計目標、以工址設計水平譜加速度係數取代震區係數 Z 以及震力係數 C 、設計地震微分區、新增近斷層因子、耐震工程品管、既有建築物之耐震能力評估與耐震補強、隔震建築、含被動消能元件系統建築等，大幅增加原有之耐震設計規範內容。

94 年版規範公告施行後，因較原 86(88)規範為複雜，且工程師在施行上也有些窒礙難行處，因此後續進行如結構系統與韌性容量、地盤分類準則、週期上限係數 C_u 值、台北盆地設計地震微分區、建築物間隔要求、隔震建築設計以及土壤液化潛能判定之地表水平加速度等內容進行修訂，經內政部營建署於 100 年 1 月公告，7 月施行，即為目前建築物耐震設計規範現行之版本。

三、研究方法

從近年來國際接連發生，例如：日本東北大地震及中國汶川地震等重大震害的經驗與啟示，帶動世界各國重新檢視建築物耐震設計相關規範之規定細節，並研擬相關修正方案，且鑒於近年來國內活動斷層調查結果的更新、新式結構系統的研發、設計與分析模擬技術的精進、隔減震元件的蓬勃發展，以及耐震工程品管制度的推動等，故國內建築物耐震設計相關規範，須就施行現況及國內外相關研發成果等，進行全面檢視，例如：新式結構系統韌性容量與高度限制、進行動力歷時分析時有關地震選取與強度縮放之規定、結構與土壤互制效應之考量、附屬建

築物之結構部分構體與非結構構材與設備之附件係數、非建築結構的韌性容量及高度限制等相關規定，亟需儘早進行檢視、更新與修正，另外對於國內採用多年隔、減震消能元件品管驗證的相關規定，亦需就其施行應用現況與規範規定內容，進行檢討與改善策略，以確保隔、減震消能元件的設計與品管，更為合理可行與安全。

本計畫主要就近年來國際上重大震災的啟示與建築勘災調查結果，針對建築物耐震設計相關規範之規定內容，著手檢視並提出妥適的配套措施或及修訂方案，使其更能確保國內建築物之耐震安全，有效提昇工程設計品質。

四、重要發現

經過對國內外有關建築物之重大震災經驗及後續因應作為進行蒐集分析，並綜整國內外震災經驗啟示、建築物耐震設計研究現況與發展方向，亦檢視國內外建築物耐震設計規範修訂沿革後，隨即針對台灣活動斷層最新調查結果，完成近斷層設計地震力要求檢討，並針對非建築結構地震力要求檢討、非結構元件及設備地震力要求與設計參數分析、消能元件性能測試程序的執行現況調查與修訂方案研擬，然後綜整本期中報告內容後以提出建築物耐震設計規範的修訂方案及發展策略。本研究對於建築物耐震設計規範修訂及因應策略主要有以下幾點重要發現：

1. 由國內外震災經驗可知，重要建築若要在地震後正常營運或是立即恢復使用，必須同時確保建築結構、機電系統、附屬於建築之重要非結構構件之耐震性能，而研擬適用之非結構耐震設計規範，為提升國內重要建築非結構耐震性能最有效的手段之一。
2. 由國內外震災經驗可知，在陸上因斷層錯動所產生的淺層地震，常易產生重大震害，故應重新檢視台灣第一類活動斷層的最新資訊，根據其震源參數調整及更新近斷層設計地震力要求。
3. 鑒於例如油槽、廠房儲存架、塔式結構等非建築結構，常見於工業設施之中，一旦產生明顯震害往往易造成重大經濟損失，且近年來

歐美各國已針對非建築結構的結構系統分類、地震引致儲存設施內液體的動態荷重及其耐震性能檢核方法及項目大幅增修非建築結構的地震力要求及相關規定；其次，鑒於非建築結構物之用途乃非供人類居住，較不易產生嚴重的人命及財產損失，故此等結構物不須考慮嚴重損壞甚至崩塌，且一般非建築結構物的韌性容量較小且其贅餘度亦小，故目前台灣耐震規範亦開始檢討是否僅須以回歸期 475 年之設計地震力進行其耐震設計與分析，而不須考慮最大考量地震等級之地震力，但必須注意的是，建築法仍認定非建築結構物乃屬建築物的一部份，故此等結構物仍須申請建照及雜項執照，故非建築結構物雖非供人類居住，但是否須檢核其最大考量地震下是否會產生崩塌或不滿足韌性要求仍須再詳加斟酌。另外，若非建築結構物之用途非同於一般建築物之使用用途時，例如排放廢水或重度污染危險性排放物之水工結構物時，應進行詳細分析檢核。

4. 近年來減震技術已廣泛應用於國內建築與橋梁新建與補強工程，內政部營建署與交通部亦於建築物與橋梁耐震設計規範中[內政部營建署 2011, 交通部 2009]新增了減震相關章節，對於消能元件之分析、設計與測試驗證要求均有規定。然而，隨著耐震技術與工法的日益精進，以及國家與人民對於建築、橋梁與公共設施之使用機能與耐震性能要求不斷提升，耐震元件的性能、製作及施工品質愈益要求，且相關規模與尺寸亦隨之增加。以近年來許多重要公共工程如橋梁應用之阻尼器為例，其設計出力、衝程與速度需求動輒分別達 200 tf、 ± 200 mm 與 400 mm/sec，國內既有實驗室之測試系統容量著實已不敷使用，往往只好至國外具大容量之實驗室進行測試，導致大幅增加營造成本與施工工期延宕，抑或遷就於國內現有測試系統之性能容量，但無法實際驗證阻尼器於設計與大地震需求下之真實力學行為，這對於未來國內耐震新技術之持續精進、提升與推動無疑是一大隱憂。