

因應國際規範修訂與國內近斷層地震效應對於國內隔減震建築設計規範之研修考量

Recommendations for Revision of Current Taiwan Seismic Isolation and Energy Dissipation Design Codes

內政部建築研究所

汪向榮¹

黃震興¹

Wang, Shiang-Wang¹

Hwang, Jenn-Shin¹

游忠翰²

林旺春²

楊卓諺²

Yu, Chung-Han²

Lin, Wang-Chuen²

Yang, Cho-Yen²

¹ 國立臺灣科技大學

² 國家地震工程研究中心

摘要

我國於 2005 年頒布施行的建築物耐震設計規範及解說中，首次增加了「隔震建築物設計」與「含被動消能系統建築物之設計」兩章節，爾後於 2011 年頒布施行的修正版本中，僅針對「隔震建築物設計」之內容進行微幅調整。在 1999 年九二一集集大地震及國內相關規範提出後，隔減震技術已廣泛應用於國內多項重要公共工程與民生建築。目前國內隔減震建築設計規範之分析與測試規定，主要仍依循 FEMA 273 與 274 (1997 年)之報告內容。然而，於 FEMA368 與 369(2000 年)以及其後發行的相關正式報告與準則，包括 FEMA 450(2003 年)，以及 ASCE/SEI 7-05、7-10、7-16，隔減震建築之設計精神已有大幅變更，其中包括考慮性能導向與風險告知之設計地震需求、同時考慮第一與殘餘模態之等效線性靜力分析與反應譜動力分析程序、以及合理考慮變異性之邊界值分析；此外，分析時採用之地震歷時選取以及人造地震歷時製作，亦有因應近年全球記錄到的長延時與近斷層地表運動，而有所合理建議。因此，隨著全球耐震概念的演進及設計規範的脈動、因應國內工程業界於實務設計之回饋意見、以及鑒於國內近期多記錄到具有長週期高脈衝速度效應之近斷層地表運動(如 1999 年九二一集集大地震與 2018 年花蓮地震)，實迫切需要提出國內下一代隔減震建築設計規範修訂方向與草案。

本研究的主軸為因應國際規範修訂、國內近斷層地震效應，提出國內隔減震建築設計規範之修正對策，以達到與全球並駕齊驅之目標，並同時兼顧本土特性與有效解決品管不良問題，研究內容包含對於國內外重要文獻蒐集與彙整(如 ASCE/SEI 7-16)，以及目前國內針對近斷層地表運動效應對於地震工程之衝擊與因應對策。除此之外，更進一步提出目前國內隔減震建築設計規範可能且可行之研修方向，包括地震需求、分析與設計方法、試驗規定與檢核標準等。預期本計畫最終將會提出國內隔減震建築設計規範之修正草案，包含相關分析設計與測試要求，可

供國內相關工程師、產品供應商、以及公務部門使用。於此可有效且正確地推廣隔減震技術，使國內隔減震技術發展更為成熟。

關鍵詞：建築物耐震設計規範及解說、隔震建築物設計、含被動消能系統建築物之設計、耐震設計規範修訂、近斷層地震效應

Abstract

In 2005, the two new chapters, 「Seismic design requirements for seismically isolated structure」 and 「Seismic design requirements for structures with damping systems」, have been firstly approved in the previous version of Taiwan seismic design code. Afterward, merely the former chapter was slightly revised in the current code, which was approved in 2011. Following the 921 Chi-Chi Earthquake and the proposing of new codes, the technologies of seismic isolation and energy dissipation have been widely applied in many public constructions and private buildings. The current Taiwan seismic design code still follows the American FEMA 273 and FEMA 274 standards, which are approved in 1997. However, according to the FEMA 368 and FEMA 369, approved in 2000, and the afterward FEMA 450 (approved in 2003), as well as ASCE/SEI 7-05, 7-10, and 7-16, the design concepts for seismic isolation and energy dissipation have been significantly improved, such as the linear static and dynamic spectrum analysis considering first and higher structural modes, and reasonably considering the boundary problems lead from the variabilities on isolation and energy dissipation devices. Furthermore, several suggestions have been made for deciding seismic ground motions, adapted for dynamic time history analysis, owing to the study on the near-field earthquake effects and long period ground motions. Therefore, in view of the improvements of global seismic design concept and the near-field ground motions discovered recent years in Taiwan, it is necessary and imperative to propose a revision for seismic design code on seismic isolation and energy dissipation.

In this context, this study aims to propose a revision to the current Taiwan seismic design code considering the latest global seismic design codes and the near-field effects discovered in Taiwan. The objects are to keep pace with the global developments in the seismic structural design field and to solve the quality control problems for isolation and energy dissipation devices in Taiwan. To this end, this study begins with references collecting and compaction. The American ASCE/SEI 7-16 standard will be focused. On the other hand, the study on the impacts and effects caused from near-field ground motions happened in Taiwan will be conducted. Besides, the revisions to seismic design code, such as requirements of seismic ground motions, seismic design and analysis process, and testing provisions, could greatly improve the promotion of seismic isolation and energy dissipation design in Taiwan.

Keywords : Taiwan seismic design code, seismic design requirements for seismically isolated structure, seismic design requirements for structures with damping systems, revisions of design codes, near-field earthquake effect.

一、前言

在1999年九二一集集大地震及國內相關規範提出後，隔減震技術已廣泛應用於國內多項重要公共工程與民生建築，至今國內已超過200個建案採用隔震設計，近500個建案採用速度型消能元件進行減震設計。近年較著名之重要工程案例，除上述建築外，尚有佛教慈濟醫院、長庚醫院、中央與臺北市災害應變中心、內政部建築研究所、捷運站聯合開發大樓、國家實驗研究院國家動物中心、中央研究院、中華電信股份有限公司、中華郵政股份有限公司、國立臺灣、交通、臺北科技大學、臺北101國際金融大樓、臺北藝術中心、故宮博物院、台新銀行、台灣銀行、台灣積體電路製造股份有限公司、聯華電子股份有限公司、宏盛帝寶、御之苑、陶朱隱園等。此外，國內近十年內亦開始將隔減震技術應用於橋梁新建與補強工程。

我國於2005年7月1日頒布施行的建築物耐震設計規範及解說【20】中，首次增加了「隔震建築物設計」與「含被動消能系統建築物之設計」兩章節，其中分別針對隔震建築物與含被動消能系統建築物之設計概念、設計方式、靜力與動力分析方法、以及元件之試驗與檢核等，提出了明確的定義與規定。其內容之相關條文規定，乃在學研界與工程界逐年的研修與檢討下更臻完善；例如過去內政部建築研究所委託國家地震工程研究中心執行「建築物耐震設計規範隔震設計及含被動消能系統設計專章研修與示範例研擬」計畫【21】與「建築物速度型被動消能元件設計手冊之研擬」計畫【22】，其中便提供了詳細示範例說明隔震元件、速度型消能元件之基本參數、力學特性及完整設計流程。爾後於2011年頒布施行的修正版本【23】中，亦針對「隔震建築物設計」之內容進行了微幅的調整。

目前國內隔減震建築設計規範之分析與測試規定，主要仍依循FEMA 273與274(1997年)【24】之報告內容。然而，於FEMA368與369(2000年)【25】以及其後發行的相關正式報告與準則，包括FEMA 450(2003年)【26】，以及ASCE/SEI 7-05【27】、7-10【28】、7-16【29】，隔減震建築之設計精神已有大幅變更，包括考慮性能導向與風險告知之設計地震需求、同時考慮第一與殘餘模態之等效線性靜力分析與反應譜動力分析程序、以及合理考慮變異性之邊界值分析；此外，分析時採用之地震歷時選取以及人造地震歷時製作，亦有因應近年全球記錄到的長延時與近斷層地表運動，所提出之合理建議。

綜合上述，隨著全球耐震概念的演進及設計規範的脈動、因應國內工程業界於實務設計之回饋意見、以及鑒於國內近期多記錄到具有長週期高脈衝速度效應之近斷層地表運動(如1999年九二一集集大地震與2018年花蓮地震)，實迫切需要提出國內下一代隔減震建築設計規範修訂方向與草案。再者，對於隔減震元件的測試要求，包括試驗規定與檢核標準，有鑒於隔減震元件在過去數十年的多元性與不斷創新、近年國內實驗設施容量大幅提升、長延時與近斷層地表運動之合理測試程序、近期日本阻尼器之品管不週事件，實有必要進行更為嚴謹的探討，並提出更為適切且合理的之測試要求，以俾利國內隔減震建築設計規範更臻完整，並使國內隔減震技術之應用與發展更趨健全，避免此一優良耐震技術再次遭到誤用或社會大眾的誤解。

因此，本研究的主要目的為，因應國際規範修訂、國內近斷層地震效應，提出國內隔減震建築設計規範之修正對策，以達到與全球並駕齊驅之目標，並同時兼顧本土特性與有效解決品管不良問題。其中透過國內外重要文獻之蒐集與彙整，並且進一步整理國外相關規範之演進，可以了解其規範修訂之精神與概念，藉此經驗可以釐清我國規範現況之優勢與修訂之策略；再者，藉由研究我國近斷層地震之特性，以及歷年來近斷層地震對於建築所造成的影響，可以進一步完善現行規範中，對於近斷層地震應對策略所不足之處。本研究所提出之規範修正草案，包含相關分析設計與測試要求，可供國內相關工程師、產品供應商、以及公務部門使用，同時有效且正確地推廣隔減震技術，使國內隔減震技術發展更為成熟。

二、美國 ASCE/SEI 7-16 隔減震建築設計標準

ASCE (American Society of Civil Engineers) 美國土木工程師學會，成立於1852年，為美國該領域最早成立之非營利性組織，亦為全球土木技術發展之領頭羊。其專業領域會員至今已超過15萬人，遍佈全球177個國家。該學會研究範疇包含營建工程、建築、工程力學、河海工程、大地、環境、測量、以及交通工程等。隸屬ASCE、以研究結構技術與發展實務應用為宗旨的結構工程學會(SEI, Structural Engineering Institute)，於結構工程領域方面，出版了許多具有代表性的設計準則，其中ASCE7: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structure，為建築相關結構以及其附屬非結構構材，提供了最小設計載重、危害等級、以及性能目標等相關設計準則。本研究分別針對ASCE7-16中第十七章隔震結構耐震設計要求(Seismic Design Requirements for Seismically Isolated Structure)，以及第十八章結構安裝阻尼系統之耐震設計要求(Seismic Design Requirements for Structures with Damping System)，兩個章節中之條文與解說進行說明，並且補充相關概念及理論之探討。

2.1 隔震結構耐震設計要求

透過美國最新ASCE7-16準則中對於隔震建築的相關規定，可以整理出數項關於隔震設計規範的重大改革與概念，其中包括：1. 設計目標針對風險導向最大考量地震(Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake, MCER)，去除設計地震等級之需求目標；2. 採用製造商依據以進行過之實體試驗(Prototype test)結果，所提出之隔震元件標稱特性；3. 為考量隔震元件因老化效應和環境因素、試驗過程升溫、試驗加載速率與軟化效應、以及同一種型號隔震元件之製造容許誤差等，對於隔震元件力學特性所造成之不確定性，引入AASHTO (1999) λ 參數之概念進行調整，進一步計算出隔震系統設計程序中之上、下界特性，如圖1所示；4. 提出靜力分析中，地震力豎向分配之新方法；5. 簡化非線性歷程分析中，考量5%意外偏心質量之方法；6. 將隔震設計案所需的同行審查數量，由目前的三到五人，減少至最少一名。此外，同行審查無需參與實體試驗；7. 建立一套計算流程，當隔震應用案例具有相對長週期、高降伏力或摩擦力、以及低降伏位移時，預估其於不同地震程度下，隔震系統可能發生的永久殘餘變位。

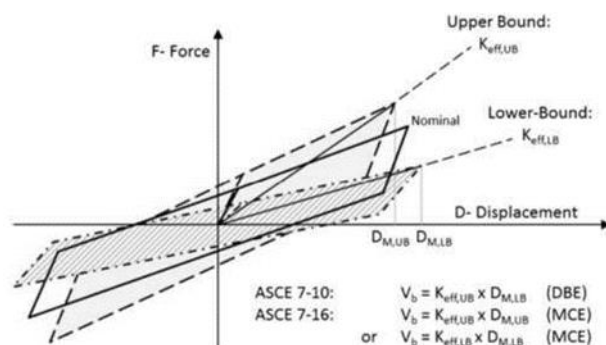


圖1、典型隔震元件之標稱、上界、下界雙線性遲滯迴圈

2.2 含被動消能系統建築物設計要求

ASCE7-16準則中對於含被動消能系統建築物設計要求之規定中，大部分皆延續ASCE7-10之相關規定，惟於以下三點之設計概念與方法上，有較重大的革新：1. 設計概念上，強調非線性歷時分析，而將傳統上的反應譜分析或是等效靜力分析，視為無法進行非線性歷時分析時的替代方案；2. 與隔震元件同步考量，環境因素、試驗影響、以及製造誤差等元件之變異性，對於整體結構設計所造成的影響；3. 於反應譜分析或是等效靜力分析中，實際考量結構物非線性以及高振泰運動所造成的影響。

三、理論研究與示範例

3.1 隔震系統之上界與下界特性

隔震元件力學特性變異性概念之採用，可以使專業設計技師於設計階段上，便先行考慮變異性對於隔震系統與整體結構上所造成之影響，以將低未來重新檢討變更設計之可能；更重要的是，變異性的概念能夠提高對於隔震結構生命週期內，其動力行為的掌握度，並且大幅提升隔震結構設計上之經濟性與保守性。反觀我國耐震設計規範中，對於隔震元件變異性之因應方式，乃是在性能試驗與實體試驗中，訂定試驗結果與標稱值間之容許誤差範圍，以及訂定試驗結果與其平均值間之變異容許範圍。然此一變異性卻未能反應於設計流程中，使隔震設計上仍存在著些許的不確定性。

有鑑於此，本研究有意將變異性之概念，自隔震元件之試驗檢核，擴展到設計階段。然我國目前對於隔震技術實務應用之經驗，以及相關試驗研究雖已趨成熟，但對於統計資料之樣本數上，仍稍嫌不足；例如各種隔震元件之老化行為、以及環境影響等等。若要將變異性之概念應用於設計階段，貿然採用ASCE7-16中對於變異性所建議之特性修正因子亦不甚合適。舉例而言，美國相關研究中所採用隔震元件之製造商，便與台灣市場上之製造商不同，因此關於製造誤差之特性修正因子理應有所不同；另一方面，美國的天然環境(如環境溫度、溫差、以及溼度等)與主要污染來源及其程度，皆與台灣大相逕庭，因此若直接採用ASCE7-16準則中所提出的環境特性修正因子，必然不合適。

承上所述，若要使我國隔震建築設計規範採用變異性之概念，除持續累積各類型隔震支承力學行為之數據外，可將我國規範中，對於隔震元件實體試驗及性能試

驗結果檢核之15%容許誤差量，訂為考量變異性之範圍。如此一來，鑒於目前規範所訂定之隔震元件試驗項目，雖然無法充分考量到環境老化和試驗條件因素之影響，但仍足以涵蓋製造誤差所產生之變異性。另外，為與試驗結果檢核目標保有一致性，以及配合既有規範中之靜力分析流程，本研究建議針對隔震元件之有效勁度(k_{eff})與等效阻尼(ξ_{eD})，等兩項力學特性參數，作為檢討變異性之依據。選取此兩項參數之作法，有別於ASCE7-16中針對特徵強度、摩擦係數、及降伏後勁度等特性參數，所進行之變異性探討。

分別以有效週期為2、3、4秒等三項、等效阻尼為10、20、30%等三項、以及降伏位移為10、20、30mm等三項之組合作為示範例，並且進一步探討結構對於元件變異性之影響趨勢。由示範例之整理結果可知，當隔震元件有效勁度等於變異性之上界值時，隔震元件會有較大的出力；反之則較小。然而當有效勁度值較低時，卻有可能因為週期延長、隔震位移增加的關係，導致元件出力值稍微上升，以至於與標稱值差異不大。另一方面，當隔震元件等效阻尼比較低時，會導致隔震位移增加，因而引至出力值之稍微上升；同時，由結果中也可以看出，阻尼比之增加對於隔震元件出力值之上升影響極小，反而會因為隔震位移之下降，降低隔震系統之出力。因此，可以歸納出若要探討隔震系統傳遞至上部結構之加速度，隔震系統之控制變異性狀況為：有效勁度為上界值，且等效阻尼比為下界值；若要探討隔震系統之最大位移，則其控制變異性狀況為：有效勁度為下界值，且等效阻尼比亦為下界值(圖2)。

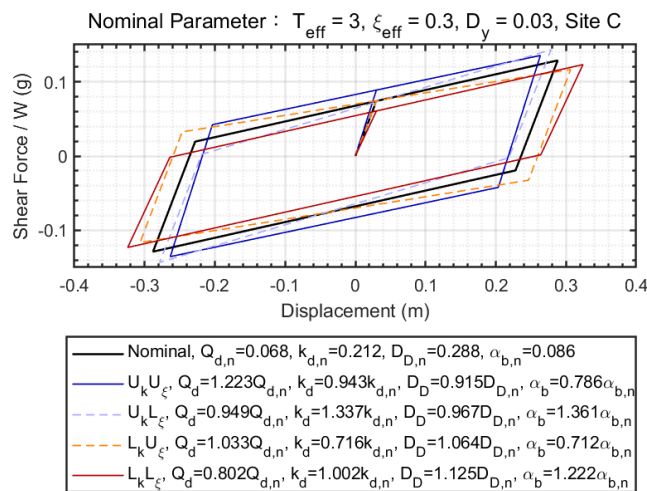


圖2、隔震系統考量標稱特性 ($T_{eff}=3\text{sec}$ 、 $\xi_{eff}=0.3$ 、 $D_y=30\text{mm}$) 上、下界變異性之遲滯迴圈與相應之參數變化

3.2 隔震系統之最大總位移

探討美國ASCE7-16準則中對於隔震系統最大總位移計算方式之修訂(美國ASCE7-16準則所規定之公式如式1與式2所示)，於不同假設結構樓高與隔震系統元件排列方式之案例計算下，發現幾乎所有的計算結果皆較我國規範計算值小，其值約略為我國規範之0.92倍至1.0倍(圖3)。由此可知，若確實的計算每個隔震元件勁度

提供位置對於值量偏心所造成的影響，其對於最大總位移之需求將較為寬鬆但更為精準。此修改算法中將以往採用整體隔震系統平面進行計算之方式，修改為直接以實際隔震元件勁度配置進行計算迴轉半徑。 P_T 之採用則提供了設計技師另一種較便捷的計算選擇，其可直接由振態分析中之平移與扭轉週期，修正簡單採用平面長寬尺寸之公式，而不需針對實際隔震元件之配置逐一進行加總計算。此一作法既簡便、精準，亦有確實理論根據，值得我國規範參考。

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (1)$$

$$P_T = \frac{1}{r_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (2)$$

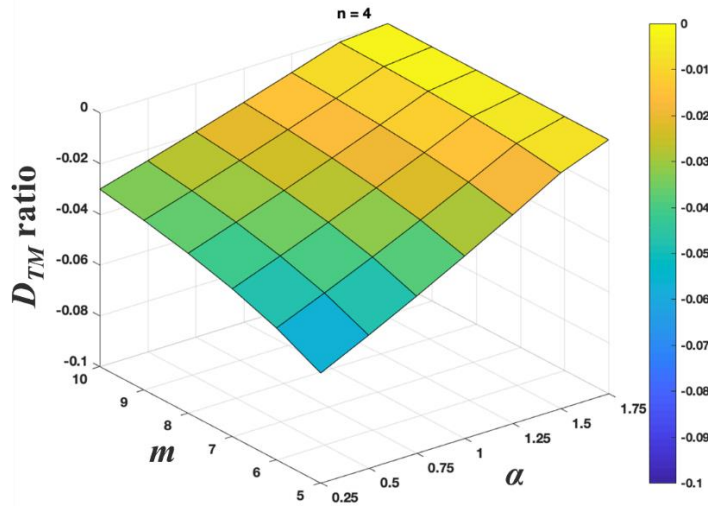


圖3、ASCE7-16定義最大總位移與我國規範之差異量圖

3.3 上部結構之地震力豎向分配方法

而美國ASCE7-16對於地震力豎向分配，提出了兩項主要修訂。第一，將隔震系統上方樓板之側力獨立於上部結構地震力之豎向分配。第二項修訂與豎向分配之比例有關。總體而言，隔震系統阻尼的增加，雖然可以減少下部結構底層或是低樓層的地震力，然卻會造成高樓層地震力的急速增加。因此，考量隔震系統變異性時，並非上界特性會造成結構地震力之增加，由本研究之結果而論，上界特性會造成上部結構高樓層的地震力增加，但卻可以降低低樓層的地震力；反之，下界特性僅能夠降低上部結構高樓層的地震力，但卻會增加上部結構低樓層的地震力。另一方面，由分析結果中也可以了解到，我國隔震設計靜力分析流程中的豎向力分配方法，只單純與樓層勁度和質量有關，此種方式有可能會對於結構低樓層之設計地震力過於保守，但卻對於高樓層設計地震力顯得較不保守(圖4)。

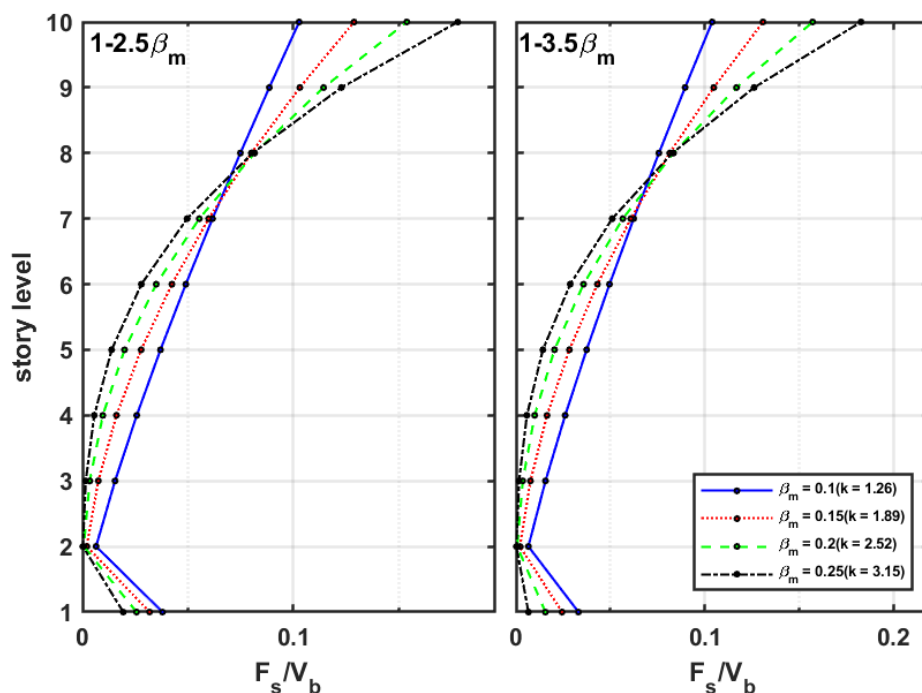


圖4、9層隔震結構於不同隔震系統型式(左：橡膠類；右：滑動類)與不同等效阻尼下，上部結構之地震力豎向分配結果

四、耐震設計規範修訂建議

提出國內隔減震建築設計規範之修正草案，包含相關分析設計與測試要求，可供國內相關工程師、產品供應商、以及公務部門使用。對於現行規範中，第九章隔震建築物設計，以及第十章含被動消能系統建築物之設計，提出了數項修訂與新增建議。新增部分包含隔震元件力學行為變異性之定義與解釋；以及於隔震元件試驗規定中，新增了出廠試驗之規定。修訂部分主要則建議將隔震元件動力歷時分析方法，包含近斷層區域之考量，合併至第三章中動力分析之相關規定；同時，因應出廠試驗之試驗項目，針對原有的性能保證試驗及實體試驗，亦於參考ASCE7-16後做了一定程度上之修訂。對於減震建築物，亦於規範建議修訂中，明確規定減震之定義，以避免業界於實務應用上，對於減震建築認知上之衝突與混淆。

五、結論與建議

本成果報告所提出目前國內隔減震建築設計規範可能且可行之研修方向，包括地震需求、分析與設計方法、試驗規定與檢核標準等。於此可有效且正確地推廣隔減震技術，使國內隔減震技術發展更為成熟。

另一方面，根據本研究成果羅列之規範第九章及第十章修訂項目，包含隔震系統設計參數之變異性、隔震元件出廠試驗等條文之新增，以及動力分析方法、減震建築之定義、與隔減震元件試驗規定等條文之修訂，皆經過數次產官學界專家之座談會進行協商，具有一定的嚴謹性、公平性、以及正確性，建議將修訂完成之第九章及第十章修正草案提送內政部營建署審查，以更新現有之「建築物耐震設計規範

與解說」，早日頒布供工程界使用。

參考文獻

1. 內政部營建署，“建築物耐震設計規範及解說”，台北，2005。
2. 內政部建築研究所，“建築物耐震設計規範隔震設計及含被動消能系統設計專章研修與示範例研擬”，台北，2006。
3. 內政部建築研究所，“建築物速度型被動消能元件設計手冊之研擬”，台北，2007。
4. 內政部營建署，“建築物耐震設計規範及解說”，台北，2011。
5. American Society of Civil Engineers (ASCE). “Minimum design loads for buildings and other structures,” ASCE/SEI 7-05, Reston, VA, 2005.
6. American Society of Civil Engineers (ASCE). “Minimum design loads for buildings and other structures,” ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, 2010.
7. American Society of Civil Engineers (ASCE). “Minimum design loads for buildings and other structures,” ASCE/SEI 7-16, Reston, VA, 2016.
8. Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency, “NEHRP Guidelines and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, 1997 Edition, Part 1: Guidelines and Part 2: Commentary,” Report Nos. FEMA 273 and 274, Washington, D.C., 1997.
9. ASCE. “Seismic rehabilitation of existing buildings.” ASCE/SEI 41- 06, ASCE, Reston, VA, 2007.
10. ASTM International. “Standard specification for plain and steellaminated elastomeric bearings for bridges.” D4014. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). “Guide specifications for seismic isolation design.” AASHTO, Washington, DC, 1990.
12. AASHTO. “Guide specifications for seismic isolation design.” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1999.
13. Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, 2000 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary,” Report Nos. FEMA 368 and 369, Washington, D.C., 2000.
14. Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, 2003 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary,” Report Nos. FEMA 450, Washington, D.C., 2003.
15. FEMA. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2009.
16. FEMA. (2012). “Seismic performance assessment of buildings.” P-58. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

17. Federal Emergency Management Agency (FEMA). "HAZUS software." Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1999.
18. National Institute of Standards and Technology (NIST). "Selecting and scaling earthquake ground motions for performing response-history analyses," GCR 11-917-15, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2011.