

# 建築物速度型被動消能元件設計手冊之研擬

## The study of design for velocity type dampers for buildings

主管單位：內政部建築研究所(工程組)

何明錦 張國鎮 黃震興 李台光 汪向榮 陳長佑 蔡木森 王秋文 林孟慧

財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心

### 摘要

1999 年發生 921 大地震後，國人漸漸開始重視建築物的震害防制觀念，引進大量建築隔震、消能裝置之產品與技術，工程界亦日漸重視消能裝置對於結構物的影響，根據內政部建築研究所統計，對於消能建築構造，截至民國 96 年為止，已有 81 棟之工程實績案例。然而，目前國內耐震設計規範「含被動消能系統設計」章節中，相關分析方法仍在繼續研究發展中。以美國 IBC2006 為例，規範中僅針對位移型及速度型消能元件之消能能力提供綱要性之描述，對於消能結構之設計步驟與細節並無任何詳細說明；至於日本被動消能構造設計施工論文集，亦僅針對各種消能元件之力學行為提供較詳細之描述，但對於消能結構之設計步驟及細節仍未有著墨。因此，參考美日兩國耐震設計規範之相關發展，國內耐震設計規範在含被動消能系統建築物之章節亦以綱要性條文呈現。

為便於設計及審查者使用參酌，本研究參考目前國外最新的耐震設計規範與相關設計手冊之發展，將建築物含消能元件之分析與設計原則擇要於本手冊中探討，並於本手冊中說明了性能目標、阻尼比與消能曲線等相關分析設計概念。另外，蒐集了國內外最新之速度型消能元件(包含液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器)的研究文獻與報告，並與國內專家學者及業界工程師進行意見討論及交流後，將液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器之力學性質、分析模型、應用於結構系統之分析設計、試驗驗證與相關分析軟體之應用詳盡地列於本手冊中，並以實際應用設計例之方式，完整地說明相關分析設計流程。希冀能夠藉由本研究，提供適當合理之設計經驗與參考依循，以確實達到提高結構物耐震能力之預期目標，並使工程設計單位能充分了解消能元件之應用範疇，提升國內結構工程之整體水準。

關鍵詞：速度型消能元件、分析設計、規範、設計手冊

## **Abstract**

It was not until after the 1999 Taiwan's Chi-Chi earthquake the practical applications of passive control technology in Taiwan have become extensive. Based on the outcomes of researches and developments during the past decades, the design formulas and computational tools are now available for practical engineers to design structures with passive control systems. According to the latest official statistics provided by the Architecture and Building Research Institute, Ministry of The Interior (ABRI), more than 80 buildings will be constructed or retrofitted with energy dissipation devices by the end of 2007, in which the majority is reinforced concrete residential buildings with 5 to 15 stories.

In 2005, the newly published Seismic Design Code for Buildings has been expanded from the previous version to include the structures with passive energy dissipation devices, which are mostly in accordance with FEMA 273 and FEMA 356. However, due to the fact that various types of devices can not be incorporated completely into the current seismic design, the regulations in this design code are guidelines such as IBC 2006 in U.S. and are still debated at present. For continuously updating and refining the seismic design code, the questions and problems encountered by practical engineers serve as the needs for the further modification on the current seismic design specifications for the design of energy dissipation systems. Therefore, the more detailed and rational design procedure for structures with velocity type dampers such as viscous and viscoelastic dampers is further discussed in this study in order to prevent the misusing or misunderstanding for the practical application and to enhance the domestic construction quality.

Keywords : velocity type damper 、 analysis and design, seismic design code, design procedure

## 一、前言

傳統耐震設計理念考慮結構物具有韌性，對設計地震力得以有所折減，其主要精神在於確保使用者之生命安全，以良好韌性來消散地震輸入之能量，達到小震不壞、中震可修、大震不倒之設計目標。當建物發揮愈多韌性，也意味著破壞程度愈形嚴重，雖不致倒塌，但其結構體與內部設備可能已蒙受了巨大的毀壞及使用機能的喪失，震後往往無法繼續使用或修復。故現今耐震設計之趨勢，除保障人員基本生命安全外，亦須兼顧建築物於震後之修繕、機具設備成本及營運等其他經濟層面之考量，功能設計法便是基於如此的需求下孕育而生。由於結構控制技術可有效地提高結構之耐震能力，使得結構物於承受地震侵襲時之行為及震後結構之使用機能的保有較能符合預期之設計要求，因此而被認為是滿足功能設計法的有效方法之一。

結構控制技術發展成三大領域，分別為隔震控制、被動消能系統(減震控制)與主動/半主動控制。減震系統可分為位移相依型與速度相依型兩種。位移相依型之減震裝置主要包含摩擦型阻尼器及金屬阻尼器等；而速度相依型之減震裝置主要包含黏彈性阻尼器及液態黏性阻尼器【1、2】。結構之減震設計以黏性阻尼器最為簡易，其特色為不具儲存勁度、不干擾結構物本身之週期，使設計工作簡化許多；再者黏性阻尼器理論上產生之阻尼力與速度同相，與位移呈 $90^\circ$ 相差，在結構物層間位移量為零、速度最大時出力最大，在結構物變位達極值、速度為零，亦即結構物桿件內力最大時阻尼器出力最小，此特性使黏性阻尼器在貢獻阻尼力降低結構物反應時，不會使結構物增加太多額外負擔。

1999年發生921大地震後，國人漸漸開始重視建築物的震害防制觀念，亦引進大量建築隔震、消能裝置之產品與技術。近年來，國內工程界日漸重視消能裝置對於結構物的影響，消能元件被視為加強結構物抗震能力的額外裝置，根據內政部建築研究所統計，對於消能建築構造，截至民國96年為止，已有81棟之工程實績案例。現行版「建築物耐震設計規範及解說」【3】已於前(94)年7月1日公告施行，與舊版規範比較，增加「隔震設計」與「含被動消能系統設計」之章節。然而，由於建築物隔震、消能技術引進國內之歷史尚短，而且相關規定條文應適度為因應現行技術發展而加以調整，其中目前隔震建築耐震設計規範尚稱成熟，消能元件之設計則需進一步之探討與研究。目前國內業界對於相關裝置之實際性能與設計、實務經驗，仍嫌陌生與不足，現行規範中隔震、消能裝置相關規定之章節內容雖為業界漸趨廣泛應用，但對其亦有不少之疑慮與窒礙難行之處。因此，內政部建築研究所於去(95)年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【4】，參考國內外最新之隔震、消能研發成果、設計案例、相關設計規範與手冊，並蒐集彙整相關疑義，適度檢討及調整國內現行設計規範有關隔消能建築之章節，同時研擬相關設計示範例以傳承正確之設計經驗，藉由實際應用設計例之檢討，以避免不當或錯誤之設計發生。

目前國內耐震設計規範中「含被動消能系統設計」章節之相關分析方法仍在持續研究發展中。以美國IBC2006【5】為例，規範中僅針對位移型及速度型消能元件

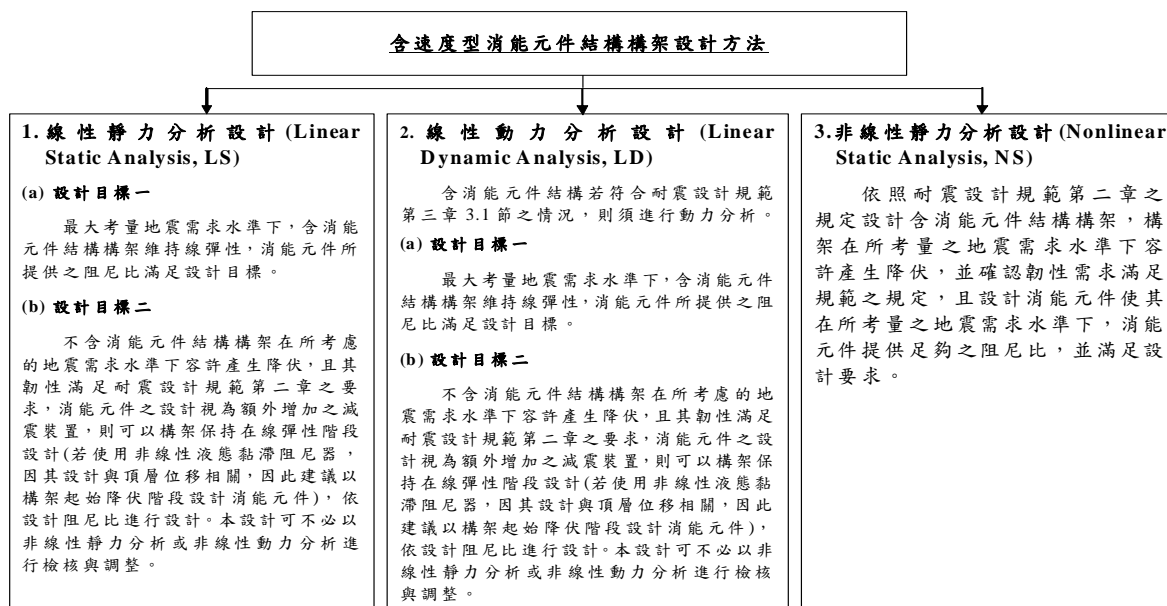
之消能能力提供綱要性之描述，對於消能結構之設計步驟與細節均無任何說明；至於日本被動消能構造設計施工論文集【6】中，亦僅針對力學行為提供較詳細之描述，但對於消能結構之設計步驟及細節仍未有著墨。參考美日兩國耐震設計規範之相關發展，國內耐震設計規範在含被動消能系統建築物之章節亦以綱要性條文呈現，為方便設計及審查者使用參酌，本研究乃蒐集國內外有關消能結構之研究報告、期刊論文、設計施工規範與手冊等參考文獻，提出符合本國國情與業界需求之消能建築物設計手冊（第一年僅以速度型消能元件為主），內容包含速度型消能元件之基本參數、力學特性及完整設計流程之設計手冊，供國內工程實務界參考。

## 二、含速度型消能元件結構構架分析設計

液態黏性阻尼器之力學行為(包含構造、作用機制、力學性質與其識別方法)、分析設計方法(包含等效阻尼比、阻尼常數設計、肘型斜撐位移放大因子、考慮撓曲轉動變形設計、不同階段之結構受力反應)、以及相關試驗驗證可參考國家地震工程研究中心相關研究報告【7~12】；黏彈性阻尼器之力學行為、數值分析模型、阻尼比計算、結構分析設計流程、以及相關試驗驗證(如圖 2)可參考國家地震工程研究中心相關研究報告【13~14】。

依據不同之設計目標，選擇線性靜力分析設計(Linear Static Analysis)、線性動力分析設計(Linear Dynamic Analysis)以及非線性靜力分析設計(Nonlinear Static Analysis)，相關設計目標之定義可參考表 1。

表 1、含速度型消能元件結構構架設計方法（資料來源：國家地震工程研究中心）



### 2.1 線性靜力分析設計(建築物耐震設計規範及解說 10.3.1 節【3】)

含液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器結構構架分析設計流程圖可分別參考圖 1 及

圖 2，分析步驟詳述請參見報告本文【15】。

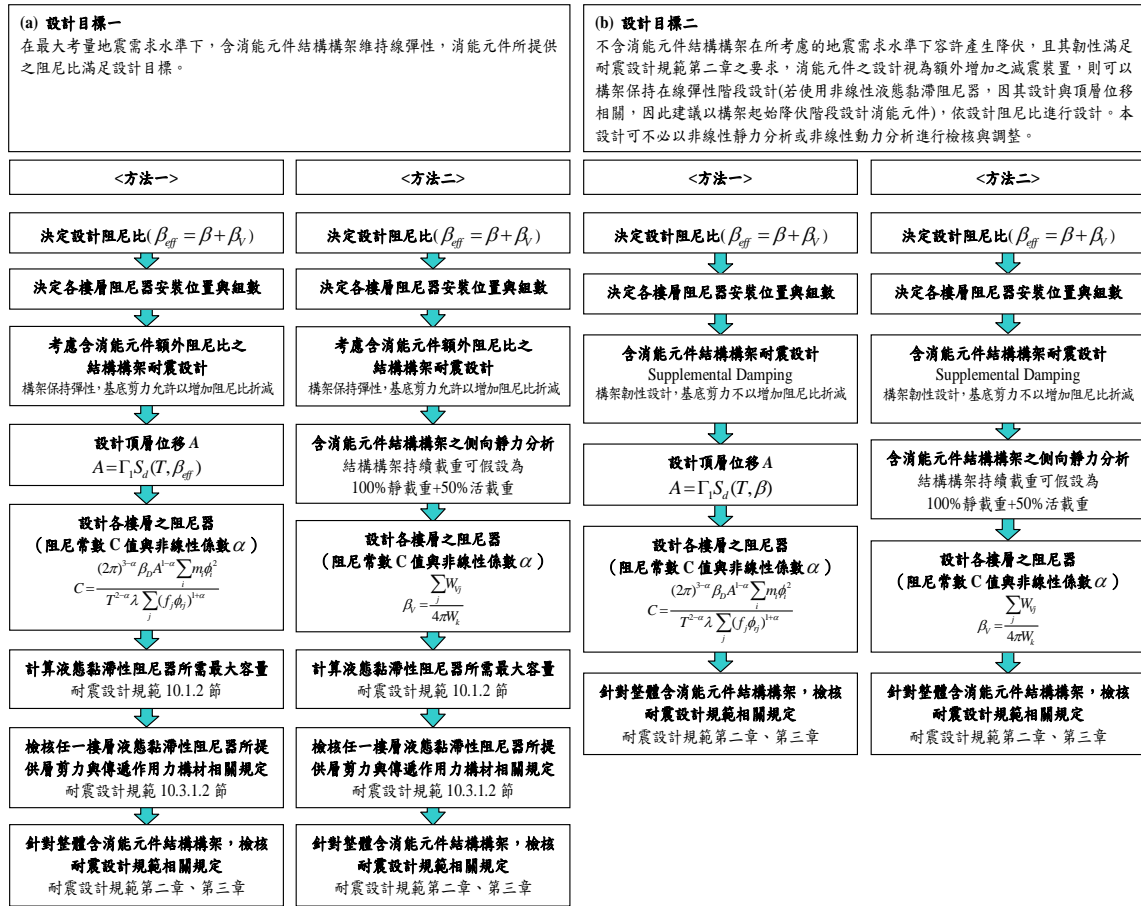


圖 1、線性靜力分析設計—液態黏滯阻尼器 (資料來源：國家地震工程研究中心)

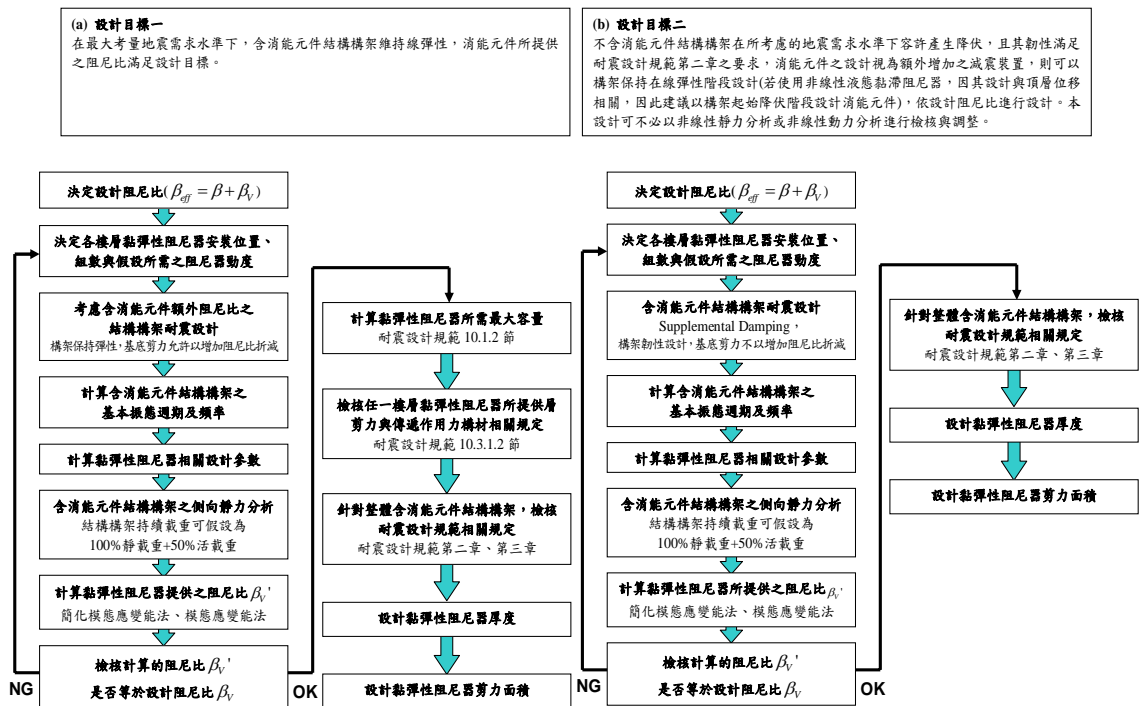


圖 2、線性靜力分析設計—黏彈性阻尼器 (資料來源：國家地震工程研究中心)

## 2.2 線性動力分析(建築物耐震設計規範及解說 10.3.2 節【3】)

建築物耐震設計規範 10.3.2 節須計算各模態之模態阻尼比，由於目前套裝軟體並不支援，本研究建議使用設計阻尼比折減設計反應譜，以進行反應譜分析，並調整所得之基底剪力不得小於 10.3.1 節修正後之等效基底剪力的 90%。

除以下說明，否則一切遵照規範第三章有關線性動力分析之規定辦理。

1. 當結構於各主軸方向之顯著振態的有效阻尼比低於 35% 時，才可採用線性動力分析的振態反應譜疊加法。
2. 為避免不當或誤用動力分析程序，若經由動力分析所得之最大基底剪力未達線性靜力分析之等效基底剪力的 90%，則所有子結構與桿件的作用力與變形量必須等比例放大，以達修正後等效基底剪力的 90%。(規範建議修訂：動力分析所得之最大基底剪力不得小於 10.3.1 節修正後之等效基底剪力的 90%)
3. 三個可能導致最大構材內力的位移情況分別為：(1)最大變位情況，此時黏滯力為零；(2)最大速度情況，此時變位量為零；以及(3)最大加速度情況。直接應用反應譜疊加法可求得在最大變位情況的桿件作用力。另外，各顯著振態在最大速度與最大加速度情況的桿件作用力亦須計算比較。

含液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器結構構架分析設計流程圖可分別參考圖 3 及圖 4，分析步驟詳述請參見報告本文【15】。

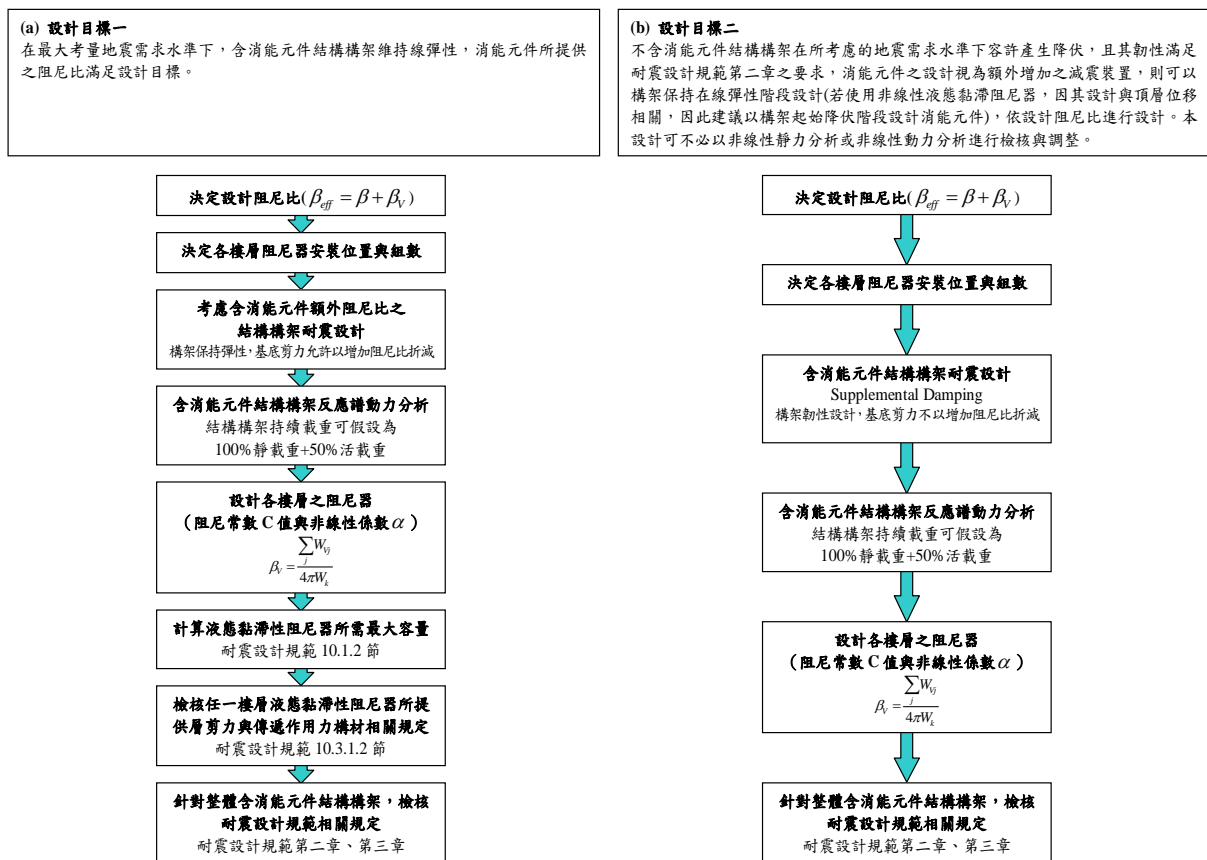


圖 3、線性動力分析設計—液態黏滯阻尼器 (資料來源：國家地震工程研究中心)

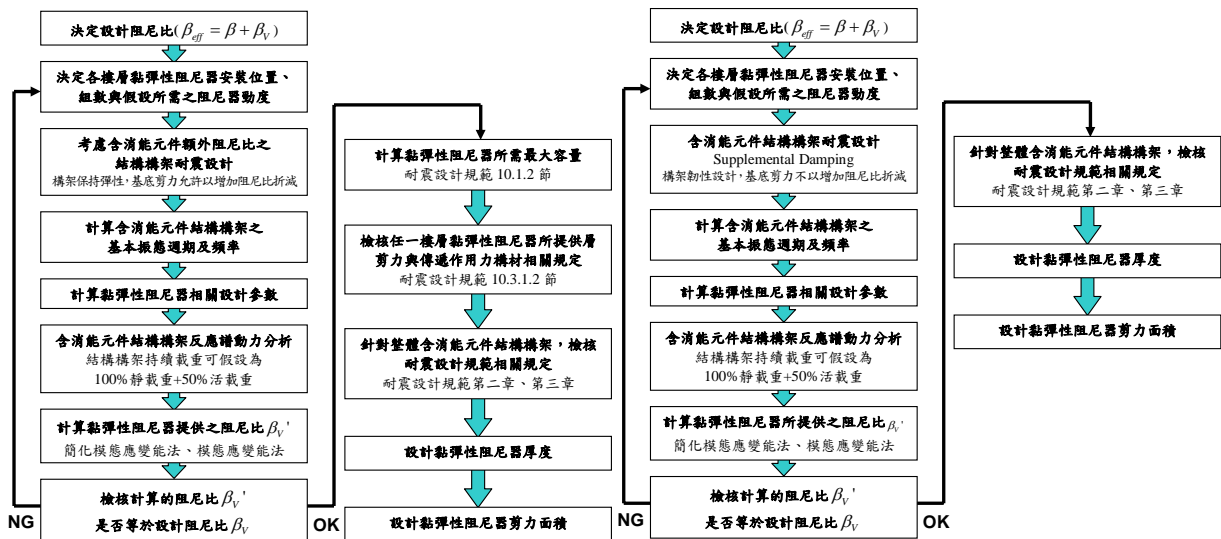
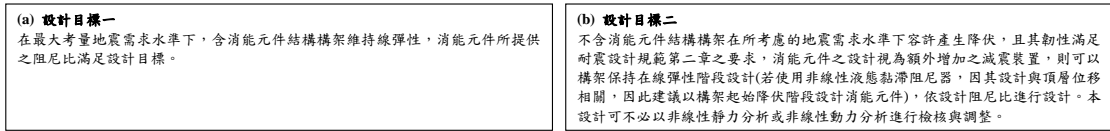


圖 4、線性動力分析設計一黏彈性阻尼器（資料來源：國家地震工程研究中心）

### 2.3 非線性靜力分析(建築物耐震設計規範及解說 10.4.1 節【3】)

在設計地震下，消能系統能正常發揮功能，原結構體容許產生降伏，但使用之韌性不得高於規定之容許韌性容量  $R_a$ ；在最大考量地震下，消能系統仍能正常發揮功能，原結構體容許產生降伏。利用容量震譜法(Capacity Spectrum Method)進行非線性靜力分析。容量震譜法為非線性靜力分析的一種方法，利用側推分析(Pushover Analysis)直到建築物達到破壞機制為止，並將分析結果繪於 ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra)之格式。其中，容量譜(Capacity Spectrum)為建築物本身的抗震能力；需求譜(Demand Spectrum)則為建築物於地表運動期間的需求，利用工址地層資料、土壤特性及震區等因素，並考量結構進入非線性後非彈性變形產生之能量消散折減而得之反應譜。當結構物進入非線性範圍時，結構物因構件降伏導致強度及勁度衰減，而使得整體結構物的週期拉長，非彈性變形形成之等效阻尼消散部分地震能量，進而折減需求譜。最後，非彈性需求譜及容量譜所產生之交點稱為功能績效點(Performance Point)，即代表該建築物所能承受的最大位移及地震強度。

本方法為依照耐震設計規範第二章之規定設計含消能元件結構構架，構架在所考量之地震需求水準下容許產生降伏，並確認韌性需求滿足規範之規定，且設計消能元件使其在所考量之地震需求水準下，消能元件提供足夠之阻尼比，並滿足設計要求。含液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器結構構架分析設計流程圖可分別參考圖 5 及圖 6，分析步驟詳述請參見報告本文【15】。



### 設計目標

本方法為依照耐震設計規範第二章之規定設計含消能元件結構構架，構架在所考量之地震需求水準下容許產生降伏，並確認韌性需求滿足規範之規定，且設計消能元件使其在所考量之地震需求水準下，消能元件提供足夠之阻尼比，並滿足設計要求。



圖 5、非線性靜力分析設計—液態黏滯阻尼器 (資料來源：國家地震工程研究中心)



### 設計目標

本方法為依照耐震設計規範第二章之規定設計含消能元件結構構架，構架在所考量之地震需求水準下容許產生降伏，並確認韌性需求滿足規範之規定，且設計消能元件使其在所考量之地震需求水準下，消能元件提供足夠之阻尼比，並滿足設計要求。

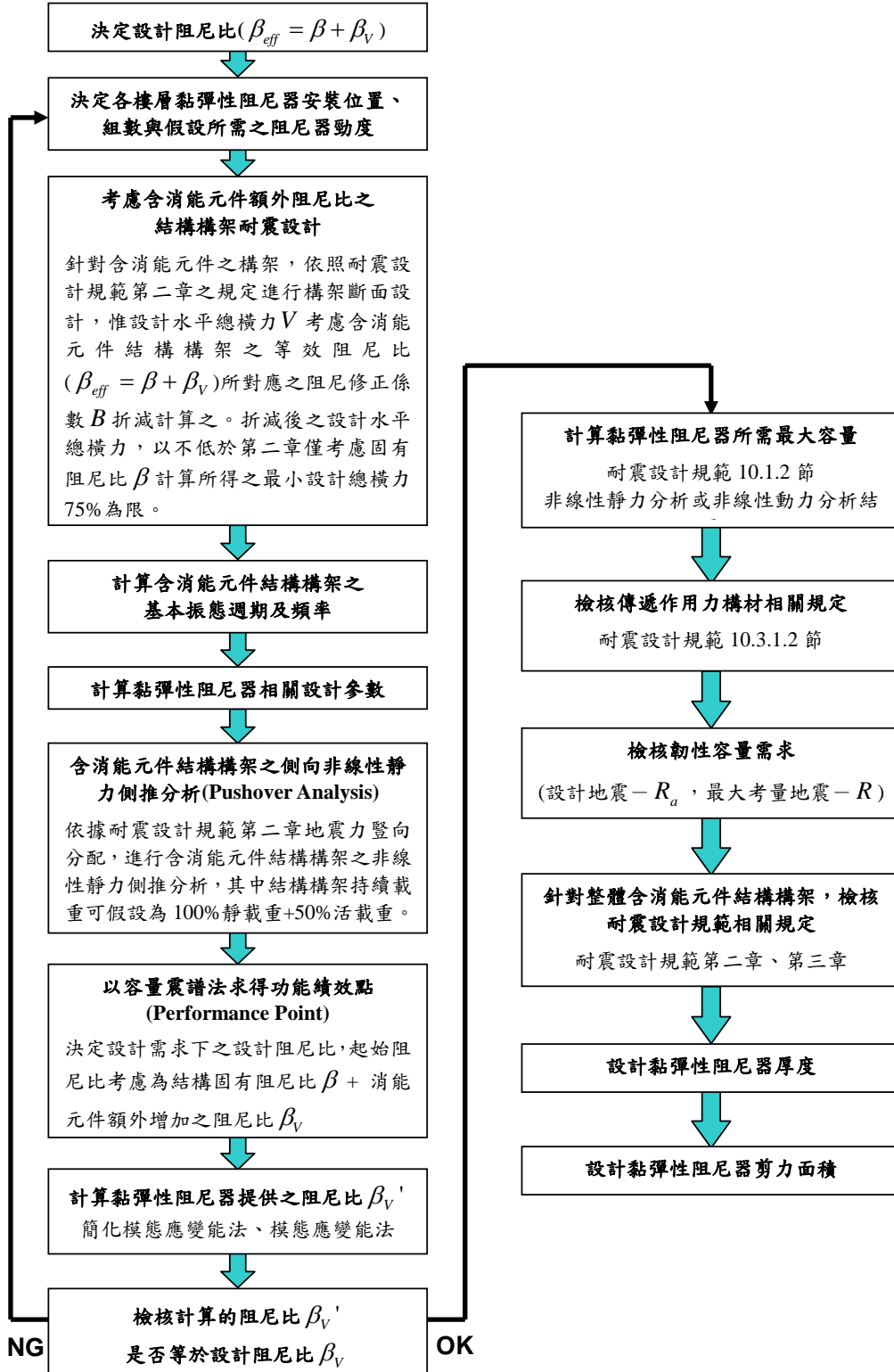


圖 6、非線性靜力分析設計—黏彈性阻尼器 (資料來源：國家地震工程研究中心)

## 2.4 非線性動力分析(建築物耐震設計規範及解說 10.4.2 節【1】)

在依照耐震設計規範第十章線性靜力、線性動力與非線性靜力分析之規定設計含消能元件結構構架後，可選擇以非線性動力分析進行檢核。

1. 消能建築物之動力分析若以非線性歷時分析法進行時，非線性歷時分析時須以消能元件之遲滯模式為之。所輸入之地震記錄，至少取三個與設計反應譜相符之水平地震記錄，其應能確切反映工址設計地震(或最大考量地震)之地震規模、斷層距離與震源效應。針對任一個水平地震紀錄，其 5% 阻尼反應譜於  $0.2T_{eD}(T_{eM})$  至  $1.5T_{eD}(T_{eM})$  週期範圍內任一點之譜加速度值不得低於設計(最大考量)譜加速度值之 90% 及於此週期範圍內之平均值不得低於設計(最大考量)譜加速度值之平均值，其中  $T_{eD}(T_{eM})$  為消能建物於設計地震(最大考量地震)下之有效振動週期。
2. 若使用七組、或更多組的地震加速度歷時，所得反應的平均值可作為設計之用。
3. 若消能元件之性質相依於運作頻率、操作溫度(含因運作所造成之溫度上升)、變形(或應變)、速度、支承载重及雙向載重等因素，則於非線性動力歷時分析時須計及此些因素之影響。由於影響因素眾多，所以須進行多次不同之分析以確定消能元件之可能反應值，建築物及消能元件須以多次不同分析之最大反應來加以設計。
4. 構架本身若有產生阻尼力，分析及設計構架時須包含此一阻尼力；桿件之作用力歷時須以桿端位移及速度來推估。
5. 含消能元件之建築物之許可反應，消能元件之穩定反應具有關鍵性，因此，消能元件用於設計地震及最大考量地震分析時，其力及位移性質須經由實體試驗(規範 10.7 節)資料來決定。
6. 輸入之地震紀錄，以工址附近之紀錄為佳。地震紀錄在長周期 ( $T_{eD}$ ) 範圍之反應譜，應考量土壤之長周期反應特性(規範 3.7 節)。

## 三、結論與建議

### 3.1 結論

參考目前國外最新的耐震設計規範與相關設計手冊，如美國 IBC2006 與日本被動消能構造設計施工論文集，將其建築物含消能元件之分析與設計原則，擇要於本研究中探討，並於本研究中說明其性能目標、阻尼比與消能曲線等相關分析設計概念。另外，在蒐集了國內外最新之速度型消能元件（包含液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器）的研究文獻與報告，以及與國內專家學者與相關業界人士進行意見交流後，將液態黏性阻尼器與黏彈性阻尼器之力學性質、分析模型、應用於結構系統之分析設計、試驗驗證與相關分析軟體之應用詳盡地列於本研究中，並以實際應用設計例之方式，完整地說明相關分析設計流程。藉由本研究，提供適當合理之設計經驗與參考依循，以確實達到提高結構物耐震能力之預期目標，並使工程設計單位能充分瞭解消能元件之應用範疇，提升國內結構工程之整體水準。

## 3.2 建議

以下建議可行之即期辦理及可中、長期辦理之研究計畫供參酌。為求隔震、消能技術能完整且落實於國內之工程建設上，因此進一步蒐集國內外研究文獻，並配合國內業界之應用心得及需求實有再繼續研究之必要，以期能提供更多種且完整之消能元件設計法，供國內工程界實務參考。

### 3.2.1 即期辦理計畫

1.建議繼續蒐集參考國內外相關研究發展，並配合工程應用心得，研擬訂定符合工程界需求之消能規範

目前國內含消能元件結構之設計規範仍為初步發展，因此建議仍以綱要性之規定為原則，未來須繼續參考更多的研究文獻，並同時與國內消能系統之新發展齊頭並進。

2.定期舉辦專家學者座談會以蒐集相關研究成果、業界問題與需求

舉辦專家座談會議，敦聘國內專家學者講習，並邀請相關業界人士與會，針對目前規範第十章含被動消能系統建築物之設計進行討論，以彙整目前業界之問題與建議，如此將研究成果發揮於工程實務應用上，以有效地解決工程界所面臨之問題。

### 3.2.2 中、長期辦理計畫

1.建議納入常見消能裝置之標準施工規範與精度分級

規範中可考慮研擬較常被採用之消能裝置之標準施工規範與精度分級，並納入施工規定標準與說明或於條文或解說中明示。另外提供各種元件設計與施作之手冊，以使能夠正確導入結構系統，提升國內對於消能建築構造之規劃、設計技術。並推廣消能建築，使國內業界更瞭解消能裝置之特性與相關規劃、設計、檢核、試驗及施工注意事項，並減少接踵而至之缺失。

2.建議建立合理與完善之品質管理與特殊審查機制

建立消能元件合理與完善之品質管理機制，如此可提昇相關工程施工效率，以避免不必要之人力物力耗費，當國內有相關元件測試能力時，建議須於國內認可之試驗機構進行測試，並建立國內消能建築之特殊審查機制，以確保消能結構設計之品質與正確性。

3.建議進行應用消能建築物與消能元件供應廠商資料庫研究

建議可建立目前國內應用消能系統建築物與相關供應廠商之資料庫，除可全面性瞭解國內目前應用之情形，探討其是否真正符合消能設計之精神，以正確釐清與落實防震之觀念。供應廠商資料庫亦可提供工程師消能元件選擇之參考依據。

## 參考文獻

1. Whittaker, Andrew and Constantinou, M.C., (2000), "Fluid Viscous Dampers for Building Construction," First International Symposium on Passive Control, pp 133-142, Tokyo Institute of Technology, Tokyo.
2. Fu, Yaomin and Kasai, Kazuhiko (1998), "Comparative Study of Frames Using Viscoelastic and Viscous Dampers," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, No. 5, pp513-522.
3. 「建築物耐震設計規範及解說」，內政部營建署，民國 94 年 7 月。
4. 「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」，內政部建築研究所，民國 95 年 12 月。
5. International Building Code, International Conference of Building Officials, Whilter, California, 2006.
6. 「被動消能構造設計施工論文集」，東京工業大學。
7. 黃震興、黃尹男，「使用線性黏性阻尼器建築結構之耐震試驗與分析」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-01-022，2001。
8. 黃震興、黃尹男、洪雅惠，「含非線性黏性阻尼器結構之減震試驗與分析」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-02-020，2002。
9. 黃震興、李昭逸，「含黏性阻尼器減震結構之非彈性地震反應試驗與分析」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-03-011，2003。
10. 黃震興、易序良，「含黏性阻尼器減震結構設計公式修正」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-03-012，2003。
11. 黃震興、何松宴，「使用黏性阻尼器減震結構設計公式修正 II」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-04-009，2003。
12. 黃震興、黃尹男、蔡俊祥，「使用黏性阻尼器於鋼筋混凝土結構之試驗研究」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-04-010，2004。
13. 張國鎮、朱毅倫、林裕淵、蔡孟豪，「加黏彈性阻尼器實尺寸鋼結構振動台試驗與分析」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-99-029，1999。
14. 張國鎮、李森楠，「壁式黏彈性阻尼器於建築結構之應用」，國家地震工程研究中心報告 NCREE-01-026，2001。
15. 「建築物速度型被動消能元件設計手冊之研擬」，內政部建築研究所，民國 96 年 12 月。