

第十章 含被動消能系統建築物之設計

10.1.1 通則

本章以下各節提供安裝消能元件之設計指南。其中包括分析程序與元件試驗標準，除本章之規定外，所有含消能系統之建築物須符合本規範其它章節之相關規定，除非各小節另有修正。

消能元件之設計應考慮其環境因素，包括風力、老化、潛變、疲勞、環境溫度、運轉溫度以及曝露於濕氣或有害物質中。

加裝消能元件之建築物，其樓高不得超過本身結構系統之限制高度。

一棟含消能元件之消能建築物的數學模型應包括消能元件之平面與豎向配置，且其數學模型之分析應考慮激振頻率、環境與運轉溫度、承載及雙向載重等因素對元件之影響。此外，為了獲取消能元件因力學特性改變對分析結果之影響，必要時須進行多重分析。

10.1.2 被動消能設計基本原則

本章所訂消能建築之設計基本原則為：對所有消能建築，要求在中小度地震下須完全保持彈性，且非結構元件無明顯損壞；在設計地震下，消能系統能正常發揮功能，而原結構體可容許產生降伏，但使用之韌性不得超過其容許韌性容量 R_a 。在最大考量地震下，消能系統仍能正常發揮功能，而原結構體容許產生降伏，但使用之韌性不得高於規定之韌性容量 R 。若未能符合10.3節有關可進行線性分析規定之消能建築物，則須依照10.4節之規定進行非線性動力分析。

相較於由最大考量地震計算所得之最大值，消能元件應能承受更大之位移（及速度，對速度型元件而言），位移（及速度）容量之增加與消能系統所提供的贅餘程度有關。

1. 建築物之某一樓層於其主軸方向若提供4組以上之消能元件，且在樓層剛心之兩側配置2組以上時，則所有消能元件須能承受經由最大考量地震計算出之最大總位移的1.3倍。惟速度型元件至少另須能承受經由最大考量地震計算出最大總速度的1.3倍所對應之力。
2. 建築物之某一樓層於其主軸方向若提供少於4組之消能元件，或在樓層剛心之兩側配置少於2組時，則所有消能元件須能承受經由最大考量地震計算出之最大總位移之2.0倍。惟速度型元件至少另須能承受經由最大考量地震計算出之最大總速度的2.0倍所對應之力。

在前述第一項或第二項所述之規定下，位於消能元件間傳遞作用力之構材與接頭須適當設計使其在線彈性範圍之內。

解說：

本規範提供在耐震設計中有關消能元件配置之系統化程序。雖然這些程序是初步發展且易變的，但仍然是目前為止有關這種程序的文獻中包含最廣泛的。當有更多的資料時這些程序將有可能變更，因此目前的情況可以說規範與消能系統的新發展齊頭並進。

規範提供在建築構架中使用消能元件之桿件力與變形計算之程序及消能元件試驗之要求。有關受力與變形之桿件校核計算須遵守第三章之程序及材料之強度與變形限制。

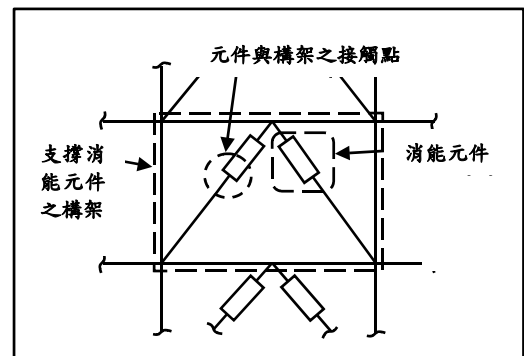


圖 C10-1 消能元件之示意圖

在本規範中關於消能元件有一些新的定義，即支撐消能元件之構架及接觸點，這些單元如圖 C10-1 所示。

在一建築構架中引入消能元件之主要目的為減少在構架之位移與損壞。位移的減少是由增加建築構架之勁度或能量耗散（一般稱為阻尼）來達成。金屬降伏、摩擦及黏彈消能元件一般會使建物中勁度與阻尼之增加；而黏滯元件一般只增

加阻尼而已。圖 C10-2 簡單地顯示不同形式之消能元件對一建築之受力與位移反應所帶來之影響。增加黏滯阻尼並不改變受力與位移關係，意即「具黏滯 EDS」之受力與位移曲線基本上是與「無 EDS」之曲線相同。

某些型式之消能元件之受力與位移關係可能與環境情況(例如：風、老化、及運轉溫度)、激振頻率、承受之變形及雙向變形有關。這種相關性應在數學模型分析中藉由限制模擬消能元件性質之數值後加以分析。

規範所提之分析程序只是近似而已。用線性與非線性程序所計算之屋頂位移可能比相鄰樓層間之層間變位與相對速度之估計要來的正確。規範要求消能元件能夠承受比最大考量地震分析所計算之最大值還要大的位移(及速度，對速度相關元件而言)。

必須承認在一建築構架中之每一樓層，每一主方向均安置 4 個以上之元件將比一在每一主方向上安置較少元件之構架更為可靠。在位移(及速度)容量上之增加量與支撐消能系統之贅餘程度有關。所增加的力將用於設計支撐消能元件之構架，此反映在最大考量地震中支承元件之構架保持彈性之目的。目前規範中，有關力與位移容量之增加(=130%，對 4 個以上之元件及 200%，對少於 4 個以上之元件)只是一種工程規範要求。消能元件與支撐構架之勁度特性均應包含在建築物之數學模型中。若忽略支撐構架之勁度則整個建築物的側向勁度將會被嚴重低估(亦即目標位移被顯著高估)。

相反地，若柔性支撐構架假設為剛性，則消能元件之有效性可能被高估而導致不保守之結果。有關此方面之資料可參考Constantinou等人(1996)之論述。

有關遲滯(位移相關)元件及黏滯與黏彈(速度相關)元件之分析程序於 10.3 節中說明。金屬降伏元件類似偏心斜撐鋼構架中之剪力連桿，因此在構架系統中安置金屬降伏元件相關線性程序之發展的考量允許承受非彈性反應，然而目前還無法發展一規則以將消能元件之最小降伏強度關聯至一既有構架之降伏強度上，這是一個在既有構架中限制非彈性作用程度之一關鍵步驟，故目前尚無此類線性程序。

對於能符合 10.3 節規定之消能建築物，因其幾何形狀及動力行為較為單純，可僅進行等值線性靜力分析；對未能符合 10.3 節規定之消能建築物，因其幾何形狀或動力行為較為複雜，故另行要求此類消能建築物要進行非線性動力分析。

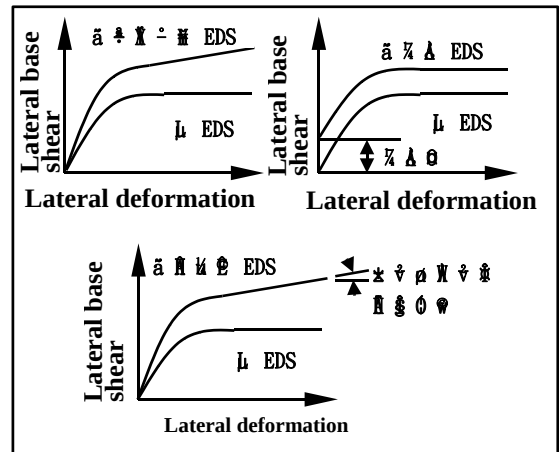


圖 C10-2 不同消能元件對建築之受力與變形反應之影響

10.2 消能元件之模擬

本節將消能元件概分為位移型、速度型與其它型式。位移型消能元件顯現剛塑性(摩擦元件)、雙線性(金屬降伏元件)或三線性遲滯行為，且其反應需與速度及激振頻率無關。速度型消能元件包含固態與液態之黏彈性元件及液態黏滯性元件。第三類(其它)則含括所有不屬於位移型與速度型的消能元件，其典型範例包括形狀記憶合金(超彈性效應)、摩擦—彈簧組件，以及兼具回復力與阻尼的液態消能元件。

模擬消能系統時，若介於消能元件與結構間傳遞作用力之子結構的撓度足以影響消能系統之行為，則必須同時考慮該子結構的勁度。撓度足以影響消能系統行為的子結構包括基礎、與消能元件串接的斜撐及其接頭。

除非使用經證實更精準的方法或行為模型，消能元件必須依據以下各子節之描述加以模擬。

解說：

規範確認位移型、速度型與其它等三種型式的消能元件。金屬降伏與摩擦消能元件屬於位移型消能元件，其受力與位移關係範例如圖C10-3所示。形狀記憶合金消能元件也展現與圖C10-3相似的遲滯反應。

速度型消能元件則包含黏彈性固態消能元件、藉由黏彈性液體變形而運作之消能元件(例如：黏滯剪力牆)，以及迫使液體穿越小孔而運作之消能元件(例如：液態黏滯消能元件)。圖 C10-4 說明這類元件典型的遲滯行為。

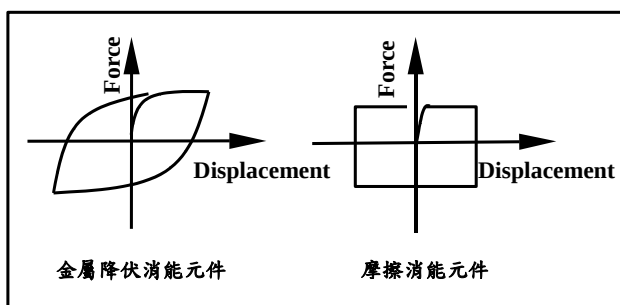


圖 C10-3 位移型消能元件之理想化受力與變形關係圖

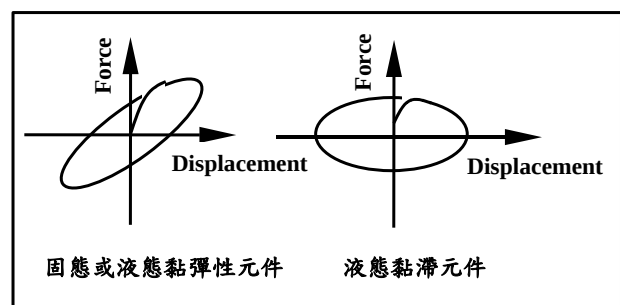


圖 C10-4 速度型消能元件之理想化受力與變形關係圖

消能元件之遲滯行為無法以圖C10-3或圖C10-4等基本型式加以描繪者，則歸屬於其它類別。例如形狀記憶合金元件、具位移重新置中歸零能力的摩擦彈簧組件。圖C10-5顯示這些元件的受力與位移關係，可發現這些元件均藉由位移重新置中的功能消散能量，並以幾乎為常數的作用力抵抗運動。形狀記憶合金元件可適當設計以顯現圖C10-5所表示的遲滯行為。可參考ATC(1993)、EERI(1993)以及Soong與Constantinou (1994)等文獻獲致更多的相關資訊。

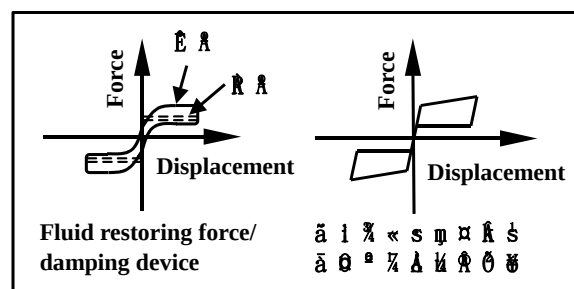


圖 C10-5 具回復能力之消能元件之理想化受力與變形關係圖

10.2.1 位移型元件

位移型元件的受力與位移反應關係主要是該元件兩端點相對位移的函數，而與兩端點間的相對速度及激振頻率並無實質關係。

位移型元件應進行細部模擬以便充分掌握其受力與位移反應關係，以及其與軸向、剪切及撓曲之互制或雙側向變形反應的關聯。

為能藉由實驗數據評估位移型元件的反應，可將其受力表示為：

$$F = k_{eff} D \quad (10-1)$$

其中，位移型元件的有效勁度 k_{eff} 由下式計算：

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (10-2)$$

F^+ 與 F^- 則分別為該元件端點相對位移為 D^+ 與 D^- 時之受力。

解說：

位移型消能元件呈現雙線性或三線性遲滯行為，彈塑性或剛塑性(摩擦)行為。有關此類元件之行為與模擬細節可參考 Whittaker 等(1989)、Aiken 與 Kelly(1990)、ATC(1993)、Soong 與 Constantinou (1994)、Grigorian 與 Popov(1994)、Yang 與 Popov(1995)以及 Li 與 Reinhorn(1995)等文獻。

10.2.2 速度型元件

速度型元件的受力與位移反應關係主要是該元件兩端點相對速度的函數。

A. 固態黏彈性元件

黏彈性元件的週期反應通常與運動的頻率、振幅以及運轉溫度(包括受激引致之溫度上升)有關。

固態黏彈性元件可利用並聯之彈簧與阻尼(Kelvin 模型)加以模擬。彈簧常數與阻尼係數之選取則應充分掌握該元件與頻率和溫度之相依性，使其與消能建築之基頻(f_1)與運轉溫度範圍一致。若固態黏彈性元件之週期反應無法藉由單一彈簧常數與阻尼係數之估算充分掌握時，消能建築的反應則必須考慮多組可能的彈簧常數與阻尼係數的極限值，並藉由建築構架的多重分析予以估算。

黏彈性元件的受力可表示為：

$$F = k_{eff} D + C \dot{D} \quad (10-3)$$

其中， C 為黏彈性元件的阻尼係數， D 為該元件兩端點的相對位移， $\dot{D}$ 為兩端點的相對速度，而 k_{eff} 為該元件之有效勁度，可由下式計算：

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} = K' \quad (10-4)$$

K' 則是所謂的儲藏勁度。

該元件的阻尼係數則須以下式計算：

$$C = \frac{W_D}{\pi \omega_1 D_{ave}^2} = \frac{K''}{\omega_1} \quad (10-5)$$

其中， K'' 為耗散勁度，角頻率 ω_1 等於 $2\pi f_1$ ， D_{ave} 為位移 D^+ 與 D^- 之絕對值的平均，而 W_D 為該元件一圈完整之力-位移遲滯曲線所包圍的面積。

解說：

固態黏彈性消能元件一般而言含有黏彈性聚合物所組成的束縛層。此類元件呈現黏彈性固體之行為，其力學特性與頻率、溫度與運動振幅有關。圖C10-6為固態黏彈性元件在角頻率為 ω 之正弦運動下之受力與位移反應關係示意圖，其作用力可表示成：

$$F = k_{eff} D + C \dot{D} \quad (C10-1)$$

各項如條文中所定義。能量消散元件之有效勁度以下式計算：

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|D^+| + |D^-|} \quad (C10-2)$$

而該元件之阻尼係數則須以下式計算：

$$C = \frac{W_D}{\pi \omega D_{ave}^2} \quad (C10-3)$$

其中， D_{ave} 為位移 D^+ 與 D^- 之絕對值的平均；而 W_D 為該元件一圈完整之力與位移遲滯曲線所包圍的面積。

有效勁度也常在文獻中以術語儲藏剪力勁度表示為 K' ；而阻尼係數則以耗散勁度 K'' 來表示：

$$C = \frac{K''}{\omega} \quad (C10-4)$$

一般而言，有效勁度與阻尼係數與頻率、溫度與運動振幅有關。圖C10-7顯示這些參數的正規值，該值為Chang等人(1991)藉由一個黏彈性聚合物在固定剪切應變 γ 之狀況下測試而得。值得一提的是，黏彈性聚合物之參數與頻率及溫度的相依性易受組合成份之影響而變化，Bergman與Hanson(1993)指出此相依特性應為聚合物組成份的函數。因此，並非所有的黏彈性固體均呈現如圖C10-7所示的相依關係。圖中所示之正規化參數為儲藏剪力模數(K')與耗散剪力模數(K'')。

可利用先進的黏彈性模型(Kasai 等，1993)，模擬遍佈於寬廣頻率範圍內的黏彈性固體行為。較為簡單的模型雖僅能獲得限定頻寬範圍內的行為，但已足夠滿足大部分的修護計畫案。舉例而言，圖 C10-7

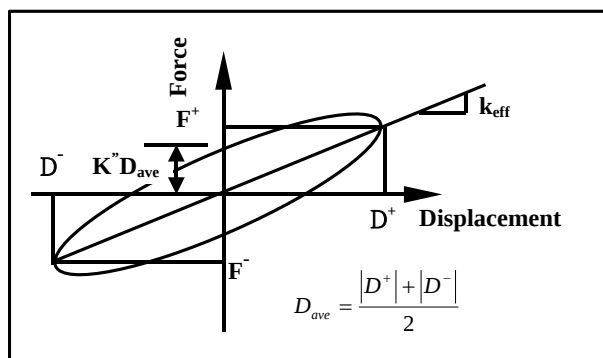


圖 C10-6 固態黏彈性元件之理想化受力變形關係

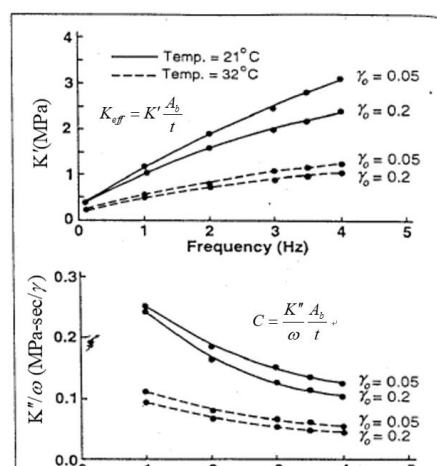


圖 C10-7 固態黏彈性元件之有效勁度(K')與阻尼係數(K''/ω)

中該元件在 21°C 的行為，即可由圖 C10-8 所示的標準線性固體模型加以模擬，模擬結果則如圖 C10-9 所示。

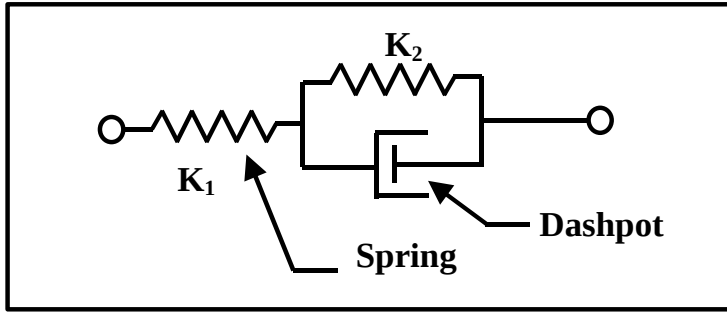


圖 C10-8 黏彈性元件之力學模型

模型中使用之參數值為 $G_1=5.18$ MPa、 $G_2=0.48$ MPa，而 $\eta_2=0.31$ MPa-sec/rad，其中 G_1 、 G_2 與 η_2 定義為：

$$G_1 = \frac{K_1 t}{A_b} ; \quad G_2 = \frac{K_2 t}{A_b} ; \quad \eta_2 = \frac{C_2 t}{A_b} \quad (C10-5)$$

上式中， K_1 、 K_2 與 C_2 為該標準線性固體模型之彈簧常數與阻尼係數， A_b 為該元件的束縛面積，而 t 為該元件內黏彈性材料的厚度。

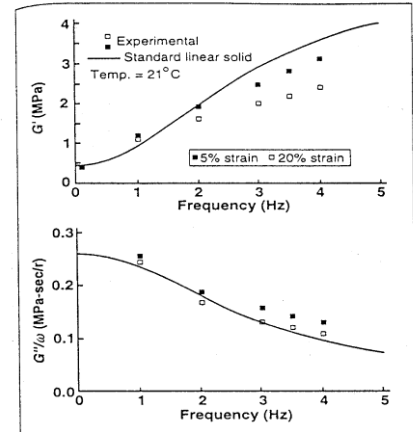


圖 C10-9 利用標準固態黏彈性模型預則固態黏彈性元件之力學性質

B. 液態黏彈性元件

液態黏彈性元件的週期反應通常與運動的頻率、振幅，以及運轉溫度(包括受激引致之溫度上升)有關。

液態黏彈性元件可利用串聯之彈簧與阻尼(Maxwell 模型)加以模擬。彈簧常數與阻尼係數之選取則應充分掌握該元件與頻率和溫度之相依性，使其與消能建築之基頻(f_1)與運轉溫度範圍一致。液態黏彈性元件的受力可表示為：

$$\begin{cases} F = k_{\text{eff}} D_k = C \dot{D}_c^{\text{cexp}} \\ D = D_k + D_c \end{cases} \quad (10-6)$$

其中， k_{eff} 為該元件的有效勁度， C 為液態黏彈性元件的阻尼係數， D_k 為彈簧的相對位移， D_c 為阻尼的相對位移， $\dot{D}_c$ 為阻尼所承受的相對速度， cexp 為阻尼指數項，一般 cexp 在 0.2 到 2.0 之間， D 為該元件兩端點的相對位移。

若液態黏彈性元件之週期反應無法藉由單一彈簧常數與阻尼係數之估算充分掌握時，消能建築的反應則必須考慮多組可能的彈簧常數與阻尼係數並藉由建築構架的多重分析予以估算。

解說：

藉由剪切黏彈液體(ATC, 1993)發揮功效之液態黏彈性消能元件，除了在靜力作用時之有效勁度為零外，其行為與圖C10-6所示之固態黏彈性元件行為極為相似。固態與液態黏彈性元件可利用負載頻率趨近於零時之耗散勁度與有效勁度的比值加以分辨，比值逼近無限大者為液態黏彈性元件，而比值為零者則為固態黏彈性元件。

黏彈性液體之行為可藉由精準的黏彈性模型模擬(Makris 等, 1993)，但在大部分的例

子中可藉由如圖 C10-10 所示之 Maxwell 模型有效模擬液態黏彈性元件的行為。

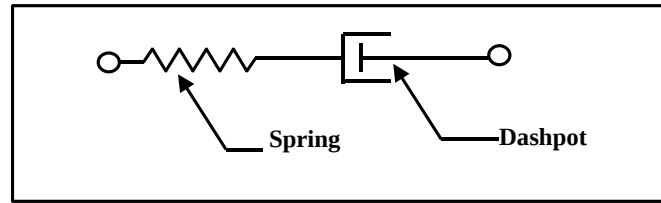


圖 C10-10 模擬液態黏彈性元件之 Maxwell 模型

C. 液態黏滯元件

液態黏滯元件的週期反應與運動速度相關；也可能與運動的頻率與振幅相關；通常與運轉溫度(包括受激引致之溫度上升)有關。液態黏滯元件可能在高頻反覆載重時呈現些許勁度。當線性液態黏滯元件在 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 的頻率範圍內呈現勁度時，則必須模擬為液態黏彈性元件。

當液態黏滯元件在 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 的頻率範圍內呈現無勁度時，其受力可表示為：

$$F = C_0 |\dot{D}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{D}) \quad (10-7)$$

其中， C_0 為該元件之阻尼係數， α 為該元件的速度指數， $\dot{D}$ 為該元件兩端點的相對速度，而 sgn 為符號函數，在此用以定義相對速度的正負號。

解說：

迫使液體穿越小孔可引致純黏滯行為 (Constantinou 與 Symans, 1993; Soong 與 Constantinou, 1994)。液態黏滯性元件在高頻反覆荷載時呈現些許勁度。當線性液態黏滯元件在 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 的頻率範圍內呈現勁度時，則必須模擬為液態黏彈性元件，其中， f_1 為消能建築物的基頻。

本節所述的頻率範圍均介於 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 之間。頻寬下限 $0.5f_1$ 與側向勁度折減為四分之一時之基頻一致；此折減就像是為現存結構之極限變形能力提供一上限值。頻寬上限 $2.0f_1$ 則是認為未包括在此數學模型的建築構材與單元可能提供相當的勁度而導致大於 f_1 的基頻。

當液態黏滯元件在 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 的頻率範圍內無勁度呈現時，其受力可表示為：

$$F = C_0 |\dot{D}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{D}) \quad (C10-6)$$

其中，各參數如條文中所定義。最簡單的液態黏滯消能元件為線性液態消能元件，其指數 $\alpha=1$ 。典型的指數值則介於 0.5 至 2.0 之間 ($0.5 \leq \alpha \leq 2.0$)。

10.2.3 其它型式之元件

無法歸類於位移型或速度型的消能元件，應當利用公認的力學原理或直觀現象模型加以模擬。此模型必須能夠充分地描述該元件在所有的作用源(如重力、地震力、熱源等)作用下的受力、速度及位移反應。

解說：

其它具有如圖 C10-5 所示之遲滯型態的消能元件，則須用與上述位移型或速度型消能元件不同的模擬技術。此類分析模擬可參見 Tsopelas 與 Constantinou (1994)、Nims 等 (1993)、以及 Pekcan 等 (1995) 之相關文獻。

10.3 線性分析

須證實在所考慮的地震需求水準下，當考量消能元件增加之阻尼效應後，由消能元件提供的有效阻尼不得超過基本模態臨界阻尼的 30%，才能使用線性分析，使用線性分析程序的其它限制則分述於後面各子節。

解說：

除了刻意將消能構架系統設計成在設計地震下仍維持線彈性外，概括所有消能消能建築的線性分析程序尚未發展至規範應具備的水準。

為能適當獲得消能建築的動力特性，消能元件與支撐構架的勁度應同時含括於數學模式之中。若忽略消能組件之添增勁度對消能建築的影響，將低估譜作用力需求以及高估譜位移需求，同時將計算出錯誤的振態阻尼係數。必須利用割線勁度將消能元件線性化，如此將高估位移量且低估消能元件添增阻尼的效益，而為一保守的假設。消能建築的數學模型必須同時考慮消能元件在水平面與垂直向的空間分布狀況，使能明顯地評估力傳遞路徑以及消能組件週遭構材的設計作用力。

速度型消能元件可能與負載頻率、溫度、變形量(應變)、速度、支撐力與雙側向力有關。因此，必須在分析階段考慮此相依性，亦即使用這些相依特性的邊限值進行消能建築之多重分析。

10.3.1 等值線性靜力分析

A. 位移型元件

若滿足下列要求，則可利用線性靜力分析方法來分析位移型消能元件之效應：

1. 每一樓層在考慮方向上提供之最大層剪力與藉由地震力豎向分配公式(2.11 節)計算之樓層需求剪力的比值，必須介於所有樓層比值平均值的 80% 至 120% 之間。樓層最大層剪力之計算應包含所有結構體、非結構體及消能元件的貢獻。
2. 每一樓層在考慮方向上由所有消能元件所提供之最大層剪力不得超過構架本身的 50%，此所謂層剪力乃基於設計地震下計算而得。計算消能元件的最大層剪力時，必須考慮其老化與環境效應。

為考量消能元件提供的能量消散阻尼，由第二章計算所得之擬靜力應藉由表 3-1 定義的阻尼修正因子予以折減。有效阻尼比依下式計算：

$$\beta_{\text{eff}} = \beta + \frac{\sum_j W_{Dj} + \sum_i W_{Fi}}{4\pi W_k} \quad (10-8)$$

其中， β 為構架系統之固有阻尼比，除非依 3.2 節之規定修正外，其值設定為 0.05。 W_{Dj} 為第 j 個位移型消能元件以樓板位移為基準完成一個完整循環所做的功， W_{Fi} 該樓層主構架所消能之非線性遲滯能， W_k 則為構架之最大應變能，可由(10-9)式計算：

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i u_i \quad (10-9)$$

其中， F_i 與 u_i 分別為第 i 層的慣性力與位移。

解說：

本節首先規定使用線性靜力程序分析位移型消能元件的兩個額外限制。第一個限制條件旨在確保建築構架中各樓層的降伏趨於一致，以避免破壞集中於任一樓層。建築構架(含消能元件)之逐層塑性分析，為計算各樓層最大抗力時之優先選用法則。

第二個限制條件旨在限制消能元件對消能建築反應的影響。簡言之，此限制限定消能元件在任一樓層的抗力不得大於該樓層建築構架(含消能元件貢獻)總抗力的三分之一。

在消能建築中總等效黏滯阻尼30%的限制下，由位移型消能元件的添增阻尼可藉由表 3-1 定義的阻尼修正因子來折減側向作用力。有效阻尼則應藉由下述步驟估算：

1. 假設一個消能建築之有效阻尼比，藉由表 3-1 定義相對應的阻尼修正因子，並計算側向作用力。
2. 利用此一修正後之側向作用力，代入地震力豎向分配公式(2.11 節)計算該消能建築第 i 樓層的水平作用力 F_i 。
3. 利用線性分析模型計算第 i 樓層相對於水平作用力 F_i 的水平位移 u_i 。
4. 利用計算所得之水平作用力 F_i 與位移 u_i ，依規範條文之(10-8)與(10-9)式估算有效阻尼比 β_{eff} 。
5. 將步驟 4 計算所得之有效阻尼代入步驟 1，作為初始假設值，並重複步驟 1 至 4。反覆迭代，直至步驟 1 使用的初始假設值與步驟 4 計算所得的有效阻尼比相等為止。

B. 速度型元件

若能滿足下列要求，則可利用線性靜力分析方法來分析速度型消能元件之效應：

每一樓層在考慮方向上由所有消能元件提供之最大層剪力不得超過構架提供層剪力的 50%，此所謂層剪力乃基於設計地震下計算而得。計算消能元件的最大層剪力時，必須考慮其老化與環境效應。

為考量消能元件提供的額外阻尼效應，由第二章計算所得之擬靜力應藉由表 3-1 定義的阻尼修正因子予以折減。有效阻尼比依下式計算：

$$\beta_{\text{eff}} = \beta + \frac{\sum_j W_{Vj} + \sum_i W_{Fi}}{4\pi W_k} \quad (10-10)$$

其中， β 為構架系統之固有阻尼比，除非依 3.2 節之規定修正外，其值設定為 0.05。 W_{Vj} 為第 j 個速度型消能元件以依樓板位移為基準，完成一個完整循環所做的功， W_{Fi} 為該樓層主構架所消能之非線性遲滯能， W_k 則為構架之最大應變能，依(10-9)式計算。

第 j 個線性黏滯元件完成一個完整循環所做的功可由下式計算：

$$W_{Vj} = \frac{2\pi^2}{T} C_j \delta_{vj}^2 \quad (10-11)$$

其中， T 為包含速度型元件所提供勁度之結構基本週期， C_j 為第 j 個元件的阻尼係數，而 δ_{vj} 為第 j 個元件沿軸向兩端點間的相對位移。計算有效阻尼比之式(10-10)可以下式(10-12)式

替換（僅適用於線性黏滯元件）：

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\pi \sum_j C_j u_{rj}^2 \cos^2 \theta_j + T/2\pi \sum_i W_{Fi}}{T \sum_i F_i u_i} \quad (10-12)$$

其中， θ_j 為第 j 個元件的水平傾角，而 u_{rj} 為第 j 個元件沿著水平方向兩端點之相對位移，而 u_i 為第 i 層相對於基面之位移，其它項之定義如前述。

C. 位移型與速度型消能元件混合使用

考慮高樓建築時其中低樓層使用位移型元件較合適，而速度型元件配置在較高樓層較為恰當，故混合使用位移型或速度型消能元件時，除須遵守 10.3.1A 節或 10.3.1B 節有關可進行等值靜力分析之規定外，其有效阻尼比依下式計算：

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_{Dj} + \sum_j W_{Vj} + \sum_i W_{Fi}}{4\pi W_k} \quad (10-13)$$

其中，(10-13)式中各項之定義如前述。

建築物內構材的設計力需考量下述三個不同變位情況來計算，並採用最大值進行設計。

1. 最大變位情況

建築物各樓層的側向力需由地震力豎向分配公式(2.11 節)計算，其中， V 為修正後之等效基底剪力。

2. 最大速度與零變位情況

任一消能元件之黏滯力分量必須由(10-3)、(10-6)或(10-7)式計算，其中相對速度 $\dot{D}$ 之值為 $2\pi f_1 D$ ，而 D 為該元件在最大變位情況下之端點相對變位。在數學模型中，必須於該元件之銜接點考慮此黏滯力，且其作用方向與結構在最大變位情況的變形形狀一致。

3. 最大加速度情況

將最大變位情況時之作用力乘上參數 CF_1 ，以及最大速度情況時之作用力乘上參數 CF_2 ，兩者之總和定義為建築結構在最大加速度情況的設計作用力。其中，

$$CF_1 = \cos[\tan^{-1}(2\beta_{eff})] \quad (10-14)$$

$$CF_2 = \sin[\tan^{-1}(2\beta_{eff})] \quad (10-15)$$

而 β_{eff} 則由(10-10)、(10-12)或(10-13)式計算。

解說：

本節首先規定使用線性靜力程序分析消能元件的一個額外限制，該限制旨在限制消能元件對消能建築反應的影響。簡言之，此限制限定消能元件在任一樓層的抗力不得大於該樓層建築構架(含消能元件貢獻)總抗力的三分之一。

在消能建築中30% 總等效黏滯阻尼的限制下，由速度型消能元件的添增阻尼可由表3-1定義的阻尼修正因子來折減側向作用力。有效阻尼則應藉由下述步驟估算：

1. 假設一個消能建築之有效阻尼比，藉由表 3-1 定義相對應的阻尼修正因子，並以之計算側

向作用力。

- 2.利用此一修正後之側向作用力，代入地震力豎向分配公式(2.11 節)計算該消能建築第 i 樓層的水平作用力 F_i 。
- 3.利用線性分析模型計算第 i 樓層相對於水平作用力 F_i 的水平位移 u_i 。
- 4.利用計算所得之水平作用力 F_i 與位移 δ_i ，依規範條文之(10-10)、(10-12)或(10-13)式估算有效阻尼比 β_{eff} 。
- 5.將步驟 4 計算所得之有效阻尼代入步驟 1，作為初始假設值，並重複步驟 1 至 4。反覆疊代，直至步驟 1 使用的初始假設值與步驟 4 計算所得的有效阻尼比相等為止。

針對以速度型消能元件進行消能之建築，因為作用力中的黏滯力分量無法直接計算，使得構材內力的計算變得非常複雜。條文中描述了三個可能導致最大構材內力的位移情況：(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。

在速度達最大值的瞬間黏滯力最大，其水平分量將與此瞬間的慣性力平衡而使得位移量為零。黏滯力將於支承黏滯消能元件之支撐上引致軸力，此軸力的大小則與(a)該黏滯元件衍生之阻尼量，以及(b)達到總阻尼需求的消能元件個數有關。

假設建物呈現頻率為 f_1 而振幅與最大變位量一致之簡諧運動，則可計算得達到最大加速度的時間；在此條件下，最大加速度等於最大變位時的加速度與 $(CF_1 + 2\beta_{\text{eff}} CF_2)$ 的乘積。Constantinou 等人(1996)證明此假設產生具有可接受之準確性的結果。值得一提的是，當 $CF_1 = CF_2 = 1$ 時，將導致保守的構材內力估計值。

10.3.2 線性動力分析

除非本節另有規定外，否則遵照第三章有關線性動力分析之規定辦理。當結構主振態於各主軸方向之有效阻尼低於臨界阻尼之 30% 時，可採用線性動力分析的振態反應譜疊加法。

解說：

消能元件之添增阻尼與勁度可導致(1)較低的顯著週期與(2)較小的譜需求，因此，消能元件之主要功效在於降低位移。

以線性靜力分析結果的 90% 作為線性反應譜疊加法計算之作用力與位移的下限，其目的在於防範不當或誤用動力分析程序。

A. 位移型元件

擬以線性動力分析方法進行結合位移型消能元件之結構分析時，應符合先前 10.3.1A 節的條件限制。

為能利用振態反應譜疊加法進行分析，基於 5%結構阻尼的反應譜必須修正以考慮由位移型消能元件提供的阻尼。5%阻尼的加速度反應譜必須藉由振態相依之阻尼修正因子(B_s 或 B_1)，針對該振態週期附近之結構週期範圍予以折減。值得注意的是，各振態的阻尼修正因子均不相同。各振態的阻尼修正因子必須藉由該振態之有效阻尼由表 3-1 查知，而各振態之有效阻尼比則可利用與 10.3.1A 節中類似的方法計算而得。

若是經由動力分析所得之最大基底剪力未達 10.3.1 節修正後之等效基底剪力的 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 90%修正後等效基底剪力的水準。

解說：

使用消能元件所做之功的模態估算值與模態應變能之估算結果，可稍加修正(10-8)式計算得模態阻尼比。因消能建築的位移由基本振動模態支配，因此適宜的考量策略為修正基本模態的阻尼比以反映消能元件的消能能力，並忽略能量消散對高模態反應的阻降效益。

B. 速度型元件

擬以線性動力分析方法進行結合速度型消能元件之結構分析時，應符合先前 10.3.1B 節的條件限制。

為能利用振態反應譜疊加法進行分析，基於 5%結構阻尼的反應譜必須修正以同時考慮由速度型消能元件提供的阻尼。5%阻尼的加速度反應譜必須藉由振態週期相依之阻尼修正因子(B_s 或 B_1)，針對該振態週期附近之結構週期範圍予以折減。值得注意的是，各振態的阻尼修正因子均不相同。各振態的阻尼修正因子必須藉由該振態之有效阻尼比由表 3-1 查得。第 m 個振態的有效阻尼($\beta_{\text{eff}-m}$)可依下式計算：

$$\beta_{\text{eff}-m} = \beta_m + \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_{mk}} \quad (10-16)$$

其中， β_m 為構架系統第 m 個振態之有效阻尼比， W_{mj} 為第 j 個元件以該振態之樓層位移為基準完成一個完整循環所做的功，而 W_{mk} 則為構架在第 m 個振態之最大應變能，可由(10-16)式計算：

$$W_{mk} = \frac{1}{2} \sum_i F_{mi} u_{mi} \quad (10-17)$$

其中， F_{mi} 與 u_{mi} 分別為第 m 個振態下第 i 層樓板的水平慣性力與水平位移。第 j 個線性黏滯元件於第 m 個振態下完成一個完整循環所做的功可由下式計算：

$$W_{mj} = \frac{2\pi^2}{T_m} C_j \delta_{mj}^2 \quad (10-18)$$

其中， T_m 為包含速度型元件所提供勁度之結構在第 m 個振態下之週期， C_j 為第 j 個元件的阻尼係數，而 δ_{mj} 為第 j 個元件在第 m 個振態下沿著軸向兩端點間的相對位移。

直接應用反應譜疊加法則可求得在最大變位情況的桿件作用力，而各顯著振態最大速度與最大加速度情況的桿件作用力則可藉由 10.3.1B 節的描述計算。而組合參數 CF_1 與 CF_2 則藉由第 m 個振態之有效阻尼 $\beta_{\text{eff}-m}$ 代入(10-14)與(10-15)兩式求得。

若是經由動力分析所得之最大基底剪力未達 10.3.1 節修正後之等效基底剪力的 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 90%修正後等效基底剪力的水準。

解說：

考慮消能元件提供的阻尼比，可利用(10-16)式至(10-18)式計算模態阻尼比，並利用此修正之阻尼比估算譜需求。因消能建築的位移由基本振動模態支配，因此適宜的考量策略為修正基本模態的阻尼比以反映消能元件的消能能力，並忽略能量消散對高模態反應的阻降效益。

10.4 非線性分析方法

10.4.1 非線性動力分析方法

消能建築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。

解說：

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、支承載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，建築物及消能元件設計時須以多次不同分析下之最大反應來加以設計。

構架本身若有產生阻尼力則須於分析及設計構架時包含此一阻尼力，桿件之作用力歷時須以桿端位移及速度來推估。

含消能元件之建物其許可反應關鍵於消能元件之穩定反應，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資料來決定(10.7節)。

10.4.2 中小度地震消能建築設計考慮

若消能建築採用位移型消能元件，須在第 2.10 節所規定之中小度地震作用下，主結構體及消能元件皆不得產生降伏。

解說：

由於位移型消能元件須確保不會過早發生降伏而提前產生遲滯消能，且須避免經常更換其相關組件，而速度型消能元件在中小度地震作用下並無此顧慮。

10.4.3 容許層間相對側向位移角

消能建築須按其消能元件之有效阻尼比，計算出中小度地震之設計地震力，並檢核其在中小度地震作用下，各樓層層間相對側向位移角不得超過 0.005，計算位移時應計及平移與扭轉位移。

解說：

消能建築可按 10.3.1 節所述方式計算有效阻尼比，並依其有效阻尼比適度折減其設計

地震力，但仍須遵守第二章有關中小度地震作用下建物層間相對側向位移角之限制。

10.5 消能系統細部要求

10.5.1 通則

所有消能系統建築物之消能元件及其它結構系統須遵照本節所有要求事項。

10.5.2 消能元件之設計考慮因素

消能元件之設計、建造及配置須依據最大考量地震反應及下列載重狀況來決定：

- 1.地震力造成之低循環數、大變形能力衰減。
- 2.風力、溫度效應及其它反覆載重所造成之高循環數、變形能力衰減。
- 3.重力造成之力及位移。
- 4.侵蝕或因為濕氣或化學暴露造成消能元件部分的黏著。
- 5.暴露於環境因素包括溫度、人為、濕氣、輻射、反應、侵蝕等。

因低循環數疲勞而破壞的消能元件必須抵抗風力而不滑動、移動或是非彈性循環。

消能元件的設計須考慮溫度條件、消能元件外殼、製造誤差及其它造成消能元件在使用期限內改變的因素。

10.5.3 消能元件之接合或束制

消能元件之端部必須考慮多軸變形之效應，須能協調或束制軸向、側向以及垂直向消能系統之位移以滿足分析時之假設。

10.5.4 風力疲勞損壞控制

消能元件及其附件須經可信之研究並證實於使用年限內不得有疲勞損壞，元件若會因低週數疲勞而產生破壞，則其於設計風力下元件必須保持在彈性範圍之內。

解說：

消能建築若會發生低週數疲勞而破壞，則在彈性範圍內應足夠抵抗設計風力以避免過早的非預期破壞。

其它含密封流體元件應在密封有可能不確實及流體漏出之情況下進行分析，因其有可能導致元件之消耗能量之能力顯著的降低。在速度型元件中因風力所引致之位移，可能造成在元件中之溫度增加，其影響可能很大，因此在設計這些元件時須特別的考量。

10.5.5 防火

消能系統須具有適當之防火保護，使其防火時效與建築物之柱、梁、牆、樓版或其它構材之防火時效一致。

10.5.6 檢測及維護

建築設計時須考慮消能元件可進行定期檢查及必要之置換等維護工作：

- (1)消能建築需有能滿足設計需求之檢測及維護計畫。
- (2)消能建築需留設供檢查及更換所有消能構材及元件之通道與空間。
- (3)監造者及結構設計者需於消能建築核發使用執照前，完成消能系統及界面區域所有構件之最終檢查。
- (4)消能系統構件之修復及更換需在有消能建築設計或施工經驗之建築師或專業技師監督下進行。

解說：

某些消能硬體之形式須定期檢查，此與傳統之營建材料不常或甚至不曾檢查過之情況有所不同。甚至對某些硬體形式之安裝後試驗而言，若只提供少數用於消能元件中之新材料或流體之老化特性資料時更需要審慎。因此，消能元件簡易的定期檢查與試驗及定期置換是必要的。

10.5.7 品質管制計畫

結構設計者應依第 10.7 節之規定提供消能元件之品質管制計畫，製造消能元件之品質計畫需由合法之專業技師進行，品質計畫需包含製造流程之描述、檢驗步驟、檢驗方法及測試以確保品質。

解說：

消能建築之所以視為可接受的關鍵在於消能元件的可靠反應。消能元件之可靠性是基於嚴格的生產品質控制計畫。

10.5.8 維護計畫

專業技師須建立維護及測試之時程表以便進行維護之工作，藉以確保消能元件於使用年限內能正常運作，此外維護與測試之等級亦須反映出消能元件的運作狀態歷程，以制定維護計畫。

解說：

若像摩擦消能元件、流體黏滯性消能元件、黏彈消能元件、及其它之機械式消能元件之類的消能元件需要定期的維護與測試。若像金屬降伏及鉛之塑性流之元件可能不需維護。

對於消能元件之定期維護與測試需要建立維護紀錄以保證阻尼硬體在設計生命期中有可靠之反應。維護與測試之程度應反映元件之使用狀態過程，施工時即須開始檢測維護，例如裝設時精度之要求、材料規格是否符合設計要求等；完工後亦須訂定其定期檢查及不定期抽查維護等計畫，檢查維護時可用外觀目視及簡易測試等方法加以檢視，且須依消能元件特性檢討其材料或零件是否須補充、修復或更換，尤其在地震或風災、火災等災害發生後須馬上進行檢修維護。

10.6 設計審查

10.6.1 通則

所有設置有消能元件之建築物之設計審查除須符合一般規定之外，尚須與本節之特別規定符合。消能系統之設計審查及具相關之試驗計畫應由另一獨立之工程審查小組進行，

小組之成員包括適當訓練之專業人員及在地震分析上，此包括消能方法之理論與應用上有經驗之人士所組成。

設計審查至少包括下列各項：

1. 地表運動審查。
2. 包括消能元件測試要求、消能元件製作品質與保證及計畫性維護和監測之要求等消能元件設計參數。
3. 包括線性或非線性分析之審查。
4. 地震力抵抗系統及消能系統之初步設計審查。
5. 地震力抵抗系統、消能系統及其它分析之定案設計審查。

解說：

許多專業設計師均非完全了解有關使用消能元件之分析與設計。因此，消能建築之分析與設計細節應由一獨立之審查小組進行審查。此小組應包括在地震分析上及消能元件理論與應用上有經驗之人士所組成。

10.7 消能元件所需之試驗

10.7.1 通則

在被动消能系統之設計中所假設之受力與變形關係與阻尼值均應在生產前經過實體試驗及性能保證測試證實。或者這些試驗在設計階段前已施作，則這些測試結果可用於設計。

在本節中所謂之試驗，其目的為：(1)證實於設計中所假設被動消能元件之力與位移性質；(2)展示在最大考量地震作用下各別元件之精確特性。但這些測試不應視作滿足 10.5.7 節中所規定之品質管制計畫。

專業技師應對由 10.7.2 節規定之實體試驗中所得之有效勁度與阻尼值提出明確之合格標準，這些標準應能反映在設計中之假設值並考慮材料性質之變異性及提供不合格之上下限反應值。

專業技師應對 10.7.5 節規定之性能保證測試中所得之有效勁度與阻尼值提出明確之合格標準。性能保證測試之結果可作為產品合格標準之基礎，除非工程合約另有規定。此標準須能識別出承載歷時對各消能元件反應之影響。

不論是實體試驗或性能保證測試時，專業技師均應考慮 10.1.2 節中有關最大考量地震作用下，依消能系統之組數，訂定消能元件所須提供容量等相關細節。

對於所有實體與實際產品所採之製程與品管措施均應相同，在生產製造前所有細節均應經由實體試驗及性能保證測試，並由專業技師審查通過。

10.7.2 實體試驗

A. 通則

下列實體試驗須分別施作於設計中各類型及各尺寸之消能元件各兩個全尺寸試體。若經審查通過，消能元件之每一類型之代表性尺寸試體可選用作性能保證測試。非經專業技師同意，否則測試試體不可用於建築構體上。

B. 資料擷取

每一試驗中之每一循環之力與變位關係均須應用數位化方式記錄。

C.測試之順序與循環週數

消能元件不應構成承重系統之一部分，但應能承受一些重力，對於下列最基本之試驗順序，每一消能元件試體均應加載以模擬其在建築上之重力及其環境溫度的劇變。

1. 每一元件均應循環加載至在設計風暴所預期之次數，但不得少於 2000 次完全反覆之載重（位移相關及黏彈元件）或位移（黏滯元件）循環週數，其振幅如設計風暴所預期，且頻率等於建築物基本週期之倒數（ $f_1=1/T_1$ ）。

例外：若消能元件不承受風力引致之受力或位移，或設計風力小於阻尼器降伏力或滑動力，則以上試驗可免除。

2. 每一元件均應加載 5 次完全反覆循環，其位移須相當於最大考量地震作用下之反應，且測試頻率為 f_1 ，若消能元件的特性會因當時溫度的不同而有差異，則須在至少三種操作溫度（最小、週遭、最大）下進行試驗。

例外：只要下列條件滿足，消能元件可由上述方法以外之其它方法進行測試：

(1)所提試驗方法須與此節的反覆循環試驗要求相似。

(2)所提試驗方法須能反映消能元件在不同溫度、不同載重頻率下及試驗時溫度升高之效應。

(3)所提試驗方法須經由專業技師審查通過。

D.速度相關或激振頻率相關之元件

若消能元件之受力與變形性質在變化測試頻率從 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 之條件下，在小於或等於最大總位移內任何時候該性質之變動量超過設計值之 15%時，則前述之測試應在 $0.5 f_1$ 、 $1.0f_1$ 及 $2.0 f_1$ 之頻率下再測試。

例外：若使用縮尺實體試體以量化消能元件之速率相關性質，則縮尺實體試體應與足尺實體有相同之型式、材料、相同之製造過程與品質管制，同時應在與代表足尺載重速率相似之頻率下進行測試。其中須以縮尺實體與足尺實體進行衝擊試驗來證明縮尺實體試體之縮尺比例具備足尺實體之代表性，然後再進行縮尺實體試體之實體測試。

E.雙向位移相關之元件

若消能元件是用來承受雙側向變形，則前述之測試應在最大考量地震之雙向零側向位移以及雙向尖峰側向位移之下進行。

例外：若使用縮尺實體試體以量化消能元件之雙側向位移之性質，則縮尺實體試體應與足尺實體有相同之型式、材料、相同之製造過程與品質管制，同時應在與代表足尺位移相似之位移下進行之測試，同時應在與代表足尺載重速率相似之頻率下進行測試。其中須以縮尺實體與足尺實體進行衝擊試驗來證明縮尺實體試體之縮尺比例具備足尺實體之代表性，然後再進行縮尺實體試體之實體測試。

F.測試類似之元件

若消能元件為(1)相似之尺寸及同樣之材料、內部構件以及靜動態內壓，(2)同樣之內部組裝過程及製造品質控制程序，且已為實驗室測試通過者，只要提供下列資料則可不需經過實體試驗：

1. 檢附所有相關測試數據及合格證明。
2. 製造者能向專業技師證實已測試元件之相似性。
3. 規範已認可之測試數據。

解說：

在 10.7 節中對於某些試驗雖可用縮尺之實體，但視需要時仍應進行足尺試驗。元件之破壞特性不得由縮尺試驗來決定。

每次試驗循環中至少必須有 100 個數據點以足夠反映消能元件之受力與變形反應。

必須進行消能元件之實體試驗以驗證在消能建築之分析與設計中所作之假設，並展示其消能硬體能承受設計風暴與最大考量地震所引致之多次變形循環。

在消能建築中所使用之每一主要形式與尺寸之消能元件應測試至少二個足尺實體。這些實體元件應使用與生產用之元件相同的材料所組裝而成。

每一實體消能元件應承受至少 2000 次位移循環其振幅等於在設計風暴下所預期者，此試驗之目的有二個：(1)展示在設計風暴中元件之疲勞壽命不會耗盡，以及(2)提供元件在設計風暴中具有與設計性能相同之工程紀錄。對於短週建築物，在設計風暴中可能遭遇超過 2000 個顯著位移循環，此時應增加其位移循環之次數。

消能元件應儘量測試以確定其扮演的關鍵角色，每一實體元件試體均應承受 20 個相當於最大考量地震之位移循環，其試驗頻率應取代表最大考量地震下建築物之頻率特徵。

規範中有關頻率相依性之評估本質上是與消能元件中所發展之試驗是類似的。 $0.5f_1$ 至 $2.0f_1$ 之頻率範圍應可涵蓋一建物之頻率反應。 $2.0f_1$ 之頻率相當於一比設計中所假設之剛度更大之建築物頻率，而 $0.5f_1$ 之頻率相當於一因地震搖動效應而勁度減少至原有的 $1/4$ 時之建築物頻率(可能是消能建築之上限值)，這些試驗之數據均應落於在建物設計中所假設之限定值範圍內，若未符合要求則應更嚴密地在 $0.5f_1$ 、 $1.0f_1$ 及 $2.0f_1$ 之頻率下再進行測試，以檢核消能元件性能，若再未符合要求，則不予接受。

若一消能元件之受力與位移性質受垂直於消能元件長向之方向上的建物位移影響，則這種影響性應由試驗來分析。

實體元件之反應須考慮以下兩種最大考量地震的狀態下進行試驗：

- (1) 該消能元件所屬樓層雙向產生最大速度反應時（發生零側向位移時）
- (2) 該消能元件所屬樓層雙向產生最大位移反應時

以上述任一狀態下該消能元件在每一側向之尖峰變位（正向及負向）反應作為 10.7.2C 第 2 項之反覆循環測試所使用的最大位移，每一側向皆須分別以其正、負向尖峰變位反應加以測試，而此種雙向效應影響須透過此試驗項目來反映，並以 10.7.4 節等相關規定檢核該消能元件性能是否符合設計要求，這些試驗數據應落在建物設計中所假設之限定值範圍內。

10.7.3 受力與位移特性之決定

任何消能元件之受力與位移特性均須基於 10.7.2 節所提實體元件之循環載重與位移試驗。

一個消能元件之有效勁度(k_{eff})應在每一變形循環中依下式計算：

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (10-19)$$

其中，力 F^+ 及 F^- 分別為在位移 Δ^+ 及 Δ^- 時之力，消能元件之有效勁度應建立在 10.7.2C 節所述之測試位移基礎之上。

一個含有勁度消能元件之有效阻尼比應在每一變形循環中依下列公式計算：

A.位移型元件：

$$\beta'_D = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{k_{eff} \Delta_{ave}^2} \quad (10-20)$$

其中， k_{eff} 為(10-19)式所示之有效勁度，且 W_D 為一位移型消能元件在一實體試驗中位移 (Δ_{ave}) 等於位移絕對值 Δ^+ 及 Δ^- 的平均下之一個完整力與位移反應循環所包圍之面積。

B.速度型元件：

$$\beta'_V = \frac{\pi C f'}{k_{eff}} \quad (10-21)$$

其中， k_{eff} 為(10-19)式所示之有效勁度， C 為速度型消能元件之阻尼係數， f' 為測試頻率。

解說：

每一消能元件之力與變形特性應利用 10.7.2 節所述之循環試驗結果決定。本節之有效勁度(k_{eff})及有效阻尼比的表示式只限於含勁度消能元件才適用，液態黏滯元件則不須依從本節規定。

10.7.4 試驗結果檢核

若下列所有之情況皆符合，則該實體元件之行為表現可視為達到要求：

1. 在 10.7.2C 節之試驗之下其受力與位移曲線有非負值之增額承載容量。

例外：若消能元件為具速度相關之行為則不須依從此規定。

2. 在 10.7.2C 節之試驗中，一實體消能元件在任一循環中之有效勁度(k_{eff})其差異不超過平均有效勁度之 $\pm 15\%$ 內。

例外：(1)若分析顯示更大差異值對消能建築反應並無有害的影響，則 15%之限制可以提高。

(2)流體黏滯消能元件及其它不具有有效勁度之元件則不需依從本規定。

3. 在 10.7.2C 節之每一試驗中，一實體消能元件試體在任一循環中於零位移所對應之最大、最小力與所有循環之最大、最小力平均值之差異皆不超過 15%內。

例外：若分析顯示更大的差異值對消能建築反應並無有害的影響，則 15%之限制可以提高。

4. 在 10.7.2C 節之每一試驗中，一實體消能元件試體在任一循環中之遲滯圈面積(W_D)不超過平均遲滯曲線面積之 $\pm 15\%$ 內。

例外：若分析顯示更大的差異值對消能建築反應並無有害的影響，則 15%之限制可以提高。

5. 對於位移相關型元件在 10.7.2C 節之每一試驗所得之平均有效勁度，在零位移之平均最大、最小力及遲滯迴圈之平均面積(W_D)均應落在設計值之內，其差異不超過 5 個循環面積之 $\pm 15\%$ 內。

6. 對於速度相關型元件在 10.7.2C 節所述步驟下之每一試驗計算所得之在零位移之平均最大、最小力，有效勁度（只對黏彈性元件）及遲滯迴圈之平均面積(W_D)均應落在設計值之內。

7. 液態黏滯元件之力與速度性質的變化量不應超過其設計理論值之 $\pm 15\%$ 。

解說：

若有使用到多重之功能性水準則應擴大實體試驗之規範要求至與原來所述不同之位移水準下進行測試。這些額外之測試應能驗證在考慮建物反應不同之水準下分析消能元件反應中所作之假設。

10.7.5 性能保證測試

在裝設消能元件於建築物之前，專業技師須按該消能元件特性，訂定抽樣比例及測試內容。抽樣時即按專業技師所訂之抽樣比例與測試內容，挑選出每一類型且其尺寸具代表性的消能元件進行測試，以確保他們的力-速度-位移之特性在專業技師所設定的限制以內。

解說：

在此將實體試驗與性能保證測試加以區隔，實體試驗內容主要針對消能元件完成設計未量產前，先製作試體以針對風力、地震力等不同外力型式或如溫度等環境之變異性加以測試，其中亦考慮建物本身基本特性如基本振頻等變異性；而性能保證測試是消能元件生產安裝前根據專業技師設計時所訂的消能元件性能加以抽樣測試，以確保他們的力-速度-位移等特性是否符合要求，並確保品質穩定，乃著重於品管檢核，故兩者所採用的試體若非經該專業技師審查核可，不可重覆使用。

10.8 定義

設計位移：一消能系統或元件之設計地震位移但不含真實及意外扭矩所引致之額外位移。

設計地震：一使用者所指定之地震用於設計消能建築，其地表振動標準如第二章所述。

消能系統：所有包含個別消能元件，消能系統間的力傳遞構件以及與其它結構系統接合之元件所組成之集合體。當風力束制系統被使用以符合規範之規定時，此一消能系統亦包含風力束制系統。

消能元件：系統中允許大量由地震引致的側向變形的一種側向柔軟且垂直向剛硬的結構元件。此類元件可能被視為部分承擔或額外的承重系統。

有效阻尼：一建築或元件在一反應循環中所消耗能量所對應之等值黏滯阻尼值。

有效勁度：一建築或元件之側力除以相應之側位移所得之值。

消能元件(EDD)：指一非支承靜載重之元件其設計係用來在地震反覆循環當中以某一特定方式消耗能量。

消能系統(EDS)：所有消能元件，支撐構架與連接器之完整集合體。

最大考量位移：一消能系統或元件之最大地震位移，但不包括因真實或意外扭矩所引致之額外位移。

設計總位移：指一消能系統或元件之設計地震位移，包括因真實或意外扭矩所引致之額外位移。

最大總位移：指一消能系統或元件之最大考量地震位移，包括因真實或意外扭矩所引致之額外位移。

速度型消能元件：元件中之受力與相對速度相關之消能元件。

位移型消能元件：元件中之受力與相對位移相關之消能元件。

10.9 符號說明

C 或 C_j : 阻尼係數。

CF_i : 使用於速度相關之消能元件之狀態組合係數。

D : 目標譜位移，或一消能單元之位移。

D_{ave} : 一消能單元之平均位移，等於 $(|D^+| + |D^-|) / 2$ 。

D_c : 液態黏彈性元件中由阻尼所承受的相對位移。

D_k : 液態黏彈性元件中由阻尼所承受的相對位移。

D^- : 一消能單元之最大負位移。

D^+ : 一消能單元之最大正位移。

$\dot{D}$ 或 $\dot{D}_c$: 一消能單元之相對速度。

F : 在一消能單元中之力。

F^- : 一消能系統單元在實體試驗之一個單一循環中於一位移振幅為 Δ^- 時所對應之負值力。

F^+ : 一消能系統單元在實體試驗之一個單一循環中於一位移振幅為 Δ^+ 時所對應之正值力。

K' : 儲存勁度。

K'' : 損失勁度。

T_{eD} : 消能建築在設計地震作用下之有效振動週期。

T_{eM} : 消能建築在最大考量地震作用下之有效振動週期。

T_m : 含速度型消能元件所提供勁度之結構在第 m 個振態下之週期。

T_s : 消能建築於標的位移之割線基本週期。

W_D : 在一消能建築或元件中於一完全位移循環中所耗散之能量。

W_{Dj} : 一位移型消能元件以樓板位移為基準，完成一個完整循環所做的功。

W_{Fi} : 消能建築第 i 樓層所消釋之非線性遲滯能。

W_{mj} : 一速度型消能元件於第 m 個振態下完成一個完整循環所做的功。

W_{mk} : 消能建築構架於第 m 個振態之最大應變能。

W_k : 消能建築構架之最大應變能。

W_{Vj} : 一速度型消能元件以樓板位移為基準，完成一個完整循環所做的功。

c_{exp} : 指液態黏彈性元件之阻尼指數項。

f_1 : 建築物之基本頻率。

k_{eff} : 一消能元件之有效勁度。

u_i : 設計側向力作用下第 i 樓層之水平位移。

u_{mi} : 第 m 個振態下第 i 樓層之水平位移。

Δ_{ave} : 一消能單元實體試驗之一循環中之平均位移，等於 $(|\Delta^+| + |\Delta^-|)/2$ 。

Δ^+ : 一消能單元在實體試驗之一循環中之正位移振幅。

Δ^- : 一消能單元在實體試驗之一循環中之負位移振幅。

α : 液態黏滯元件之速度指數。

β : 在建築構架中之固有阻尼比（一般等於 0.05）。

β_{eff} : 如（10-10），（10-12）及（10-13）等式所示之建築物有效阻尼比。

β'_D : 一位移型消能元件本身之有效阻尼比。

β'_V : 一速度型消能元件本身之有效阻尼比。

δ_{mj} : 一速度型消能元件在第 m 個振態下沿軸向兩端點間之相對位移。

δ_{ij} : 一速度型消能元件沿軸向兩端點間之相對位移。

θ_j : 消能元件之傾斜角。

ω_1 : $2\pi f_1$ 。

參考文獻

BSSC, 1995, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, 1994 Edition Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report Nos. FEMA 222A and 223A), Washington, D.C.

BSSC, 1997, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, 1997 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, prepared by the Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency (Report Nos. FEMA 302 and 303). Washington, D.C.

BSSC, 2000, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, 2000 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, prepared by the Building Seismic Safe Council for the Federal Emergency Management Agency (Report Nos. FEMA 368 and 369). Washington, D.C.

Secretary of the Interior, 1993, Standards and Guidelines for Archaeology and Historic Preservation Published in the Federal Register, Vol.48, No. 190, pp. 44716-44742.

解說參考文獻：

Aiken, I. D., and Kelly, J. M., 1990, Earthquake Simulator Testing and analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems for Multistory Structures, Report No. EERC-90/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., and Kelly, J. M., 1993, "Testing of Passive Energy Dissipation Systems," Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol. 9, No. 3, pp. 335-370.

ATC, 1993, Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and "Active Control, Report No. ATC-17-1, Applied Technology Council, Redwood City, California.

Bergman, D. M., and Hanson, R. D., 1993, "Viscoelastic Mechanical Damping Devices at Real Earthquake Displacements," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol.9, No. 3, pp. 389-412.

BSSC, 1995, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, 1994 Edition, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report Nos. FEMA 222A and 223A) , Washington, D.C.

Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S.-T., and Lai, M. L., 1991, Seismic Response of a 2/5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers, Report No. NCEER-91-012, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.

Chopra, A. K., 1995, *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Constantinou, M. C., Soong, T. T., and Dargush, G. F., 1996, *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.

Constantinou, M. C., and Symans, M. D., 1993, "Experimental Study of Seismic Response of Buildings with Supplemental Fluid Dampers," *The Structural Design of Tall Buildings*, John Wiley & Sons, New York, New York, Vol. 2, pp. 93-132.

Den Hartog, J. P., 1956, *Mechanical Vibrations*, Dover Publications, New York, New York.

EERI, 1993, "Theme Issue: Passive Energy Dissipation," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol. 9, No. 3.

Grigorian, C. E., and Popov, E. P., 1994, *Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections*, Report No. UCB/EERC-94/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Kareem, A., 1994, "The Next Generation of Tuned Liquid Dampers," *Proceedings of First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, pp. FP 5-19 to PP 5-28.

Kasai, K., Munshi, J. A., Lai, M. L., and Maison, B. F., 1993, "Viscoelastic Damper Hysteretic Model: Theory, Experiment, and Application," *Proceedings: Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, Applied Technology Council Report No. ATC-17-1, Redwood City, California.

Kaynia, a. M., Veneziano, D., and Biggs, J. M., 1981, "Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers." *Journal of the Structural Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 107, pp. 1465-1484.

Li, C., and Reinhorn, A. M., 1995, *Experimental Study and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II-Friction Devices*, Report No. NCEER-95-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.

Liang, Z., Tong, M., and Lee, G. G., 1995, *Real Time Structural Parameter Modification (RSPM)*:

Development of Innervated Structures, Report No. NCEER-95-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.

Makris, N., Constantinou, M. C., and Dargush, G. F., 1993, "Analytical Model of Viscoelastic Fluid Dampers," *Journal of the Structural Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, New York, New York, Vol. 119, No. 11, pp. 3310-3325.

Mayes, R. M., 1988, "Analysis, Design and Testing of the Isolation System for the Salt Lake City & County Building," *International Seismic Isolation/Historic Preservation Symposium*, Salt Lake City, Salt Lake City Corporation, Salt Lake City, Utah.

Naaseh, Simin, 1995, "Seismic Retrofit of San Francisco City Hall - The Role of Masonry and Concrete," *Proceedings of the Third National Concrete and Masonry Engineering Conference*, San Francisco, California.

Newmark, N. M. and Hall, W. J., 1982, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

Nims, D. F., Richter, P. J. and Bachman, R. E., 1993, "The Use of the Energy Dissipation Restraint for Seismic Hazard Mitigation," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol. 9, No. 3, pp. 467-498.

Pekcan, G., Mander, J., and Chen, S., 1995, "The Seismic Response of a 1:3 Scale Model RC Structure with Elastomeric Spring Dampers," *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol. 11, No. 2, pp. 249-267.

Pyle, S. L., Janseen, A. G., Holmes, W. T., and Kircher, C.A., 1993, "Life-Cycle Cost Study for the State of California Justice Building," *Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, Applied Technology Council Report No. ATC-17-1, Redwood City, California.

Reinhorn, a. M., Li, C., and Constantinou, M. C., 1995, *Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping Part 1: Fluid Viscous Damping Devices*, Report No. NCEER-95-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.

Sakai, F., 1989, "Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations," *Proceedings, International Conference on High Rise Buildings*, Nanjing, China.

SEAOC 1986, *Tentative Seismic Isolation Design Requirements*, Structural Engineers Association of California, San Francisco, California.

SEAOC, 1996, *Recommended Lateral Force requirements and Commentary*, Sixth Edition, Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.

Sladek, J. R., and Klingner, R. E., 1983, "Effect of Tuned-Mass Dampers on Seismic Response," *Journal of the Structural Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, New York, No. 109, pp. 2004-2009.

Soong, T. T., and Constantinou, M. C., 1994, *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag, Wien-New York.

Symans, M. D., Constantinou, M. C., Taylor, D. P., and Garnjost, K. D., 1994, "Semi-Active

Yang, T.-S., and Popov, E. P., 1995, Experimental and analytical Studies of Steel Connections and Energy Dissipators, Report No. UCB/EERC-95/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

