

中間樓層使用鉛心橡皮支承墊隔震建築物的隔震效應分析

Seismic Isolation Effect Analysis of the Mid-story Isolated Buildings with Lead-Rubber Bearings

葉崇偉¹ 張哲榮² 蘇芊堃³ 黃銘智^{4,*}

Chung-Wei Yeh Jer-Rong Chang Chien-Chin Su Ming-Chih Huang

¹ 空軍航空技術學院飛機工程系副教授 ² 空軍航空技術學院飛機工程系副教授

³ 空軍航空技術學院機械工程科講師 ^{4*} 空軍航空技術學院飛機工程系教授

^{1,2}Associate Professor, ^{4,*}Professor, Department of Aircraft Engineering, Air Force Institute of Technology

³Instructor, Department of Mechanical Engineering, Air Force Institute of Technology

摘要

本研究旨在探討中間樓層隔震建築物的隔震效應。隔震層上方與下方之建築物將以線性模型模擬其受震行為，而隔震層則以雙線性-遲滯模型模擬使用鉛心橡皮支承墊隔裝置之遲滯行為。數值範例結果顯示，位於隔震層下方之建築物，其加速度反應歷時並無降低，而隔震層上方各樓層之加速度反應歷時則皆有明顯降低之情形，此結果顯示隔震層之遲滯行為，的確可大量吸收傳入隔震層上方之地震能量，致使位於隔震層上方樓層之加速度反應歷時與傳統建築物比較，出現全面降低之情形。

關鍵詞：中間樓層隔震建築物、鉛心橡皮支承墊、遲滯性、雙線性-遲滯模型

ABSTRACT

This research aims to explore the seismic isolation effect of the Mid-story isolated buildings. Above and below floors of the isolated layer were simulated by a linear model, while the hysteresis behavior of the isolated layer with Lead-Rubber rubber bearings used bilinear-hysteretic model. The numerical example results show that the acceleration response of the Mid-story isolated buildings located below the isolated layer is not lower than traditional buildings, and the ones above the isolated layer are significantly reduced, which shows that the hysteresis behavior of the isolated layer can indeed absorb a large amount of seismic energy into the above floors, resulting in an overall decrease in the acceleration response of the floors above the isolated layer compared with that of traditional buildings.

Key Words: Mid-story isolated building, Lead-Rubber bearing, Hysteresis, Bilinear-hysteretic model.

一、前言

傳統的建築物一般是藉由自身的能力(Self-ability)來消散地震能量。近五十年來，如何於大型地震發生時以減輕結構物的損傷，此一課題已引起全世界許多學者與工程師們的注意。其中重要的一環為使用隔震系統(Base-isolated system)以降低建築物於受震下的損傷研究。直至今日，此項隔震技術已成功地運用於全世界各地的建築物上，而各國建築物實際使用此項技術的相關研究與探討亦相當眾多：於紐西蘭的隔震建築物有 Robinson 進行研究[1]，於日本的有 Izumi 進行探討[2]，於美國的隔震建築物則有 Naeim、Lew 和 Kelly 進行相關的研究與探討[3,4]，其他如義大利的有 Martelli 等[5]與中國的 Li 和 Hui[6]對該國的隔震建築物進行研究與探討。經過多次地震的經驗，最後亦證實了使用隔震系統的確是一種減少地震力輸入，進而降低結構物損傷的實用技術[7,8]。

有關隔震建築物的相關研究有：隔震裝置於地表振動下，其單向與雙向(模擬為正交的兩側向分量)的最大變形量或尖峰值，已可基於非線性反應歷時分析(Nonlinear response history analysis, NRHA)，再藉由簡化的過程評估而得[9]。對於地表運動的綜合效應，此簡化過程的精確度亦優於使用國際建築物規範(International Building Code, IBC)[10]所使用的等值-線性分析過程。此外，設計方程式亦已被擴展至非對稱的平面系統(Asymmetric-plan systems)，其中包含了隔震裝置外的偏心與距質量中心距離的計算[11]。由實驗觀察軸向力在時間變化上對於支承墊的影響，而開發出一種重要的模型以模擬鉛心橡皮支承墊[12]，此模型之主要研究是延伸考慮於支承內之最大軸向力發生時的搖擺效應(Effects of rocking)和翻覆力(Over

turning)，此翻覆分析迄今仍被限制於當對稱結構受單向振動之情形[13]。對於上述的搖擺現象，Ryan 等發展出考慮側向-搖擺-扭轉反應(Coupled lateral-rocking-torsion response)的連接系統，以模擬鉛心橡皮支承墊，並藉由非線性的反應歷時分析，以評估出側向變形的尖峰值和側向力的尖峰值。其結果顯示，隔震支承墊內在側向力的影響，是導致對稱性結構產生偶然扭轉力的主因。由側向力改變而造成結構體的搖擺現象，是由於支承墊個體隨時間而有勁度與強度的改變，致使引起隨時間而變的偏心性(Time-varying eccentricity)所造成[14]。基部隔震建築物若座落於都會區，近 20 幾年來發現其將會產生地界問題，致有中間樓層隔震建築物(Mid-Story Isolated Buildings)的產生，其目的是為了避免地界問題的產生，且仍能保有隔震效益所發展出有別於基部隔震建築物的隔震建築。

Loh 等[15]應用兩種識別技術，並分別利用環境振動資料與地震反應資料以識別出中間樓層隔震建物(Mid-story isolation building)的時變(Time-varying)動態特性，文中將遞迴歸隨機子空間識別法(Recursive stochastic subspace identification method)使用於環境振動資料之識別，然而對於地震反應資料則使用遞迴歸子空間識別法(Recursive subspace identification)，研究最後對樓層隔震建築物的識別動態特性進行比較，並對中間樓層隔震建築物非線性行為的影響進行詳盡之討論。Loh 等[16]提出使用輸入-輸出動力反應資料，並基於子空間識別運算(Subspace identification algorithm)法進行結構動態特性之識別，文中結合子空間識別運算與移除不直接相關模態的技術將其運用於實際系統之識別；研究使用三個結構物(一座 7 層樓鋼筋混凝土建物、一座中間樓層隔震建築物和一座隔震橋梁)運用過去 15 年中的地震資料進

行識別分析，最後藉由識別出的基本模態之頻率與阻尼比的變化情形，對上述三座建築物的服務性能進行評估與詳盡討論。

故本研究旨在探討中間樓層隔震建築物的隔震效應。隔震層上方與下方之建築物將以線性模型模擬其受震下的動力行為，而隔震層(Isolated layer)則以雙線性-遲滯模型模擬使用鉛心橡皮支承墊(Lead-Rubber Bearings)隔震層之遲滯行為。本文將運用 Masing 準則，將支承墊的遲滯迴圈轉換成背骨曲線，而此背骨曲線仍可真實地反映隔震系統的非線性遲滯性特徵。文中將進行中間樓層隔震建築物與傳統建築物於受震下的動力行為比較，以瞭解隔震層使用鉛心橡皮支承墊隔震裝置之實際隔震效應。

二、運動方程式

現考慮一理想的 N 層樓中間樓層隔震建築物，如圖 1 所示。隔震層位於第 1 樓層上方，隔震層是由數個鉛心橡皮支承墊所組成，其行為具遲滯性，而隔震層上方與下方之建物則具線性行為

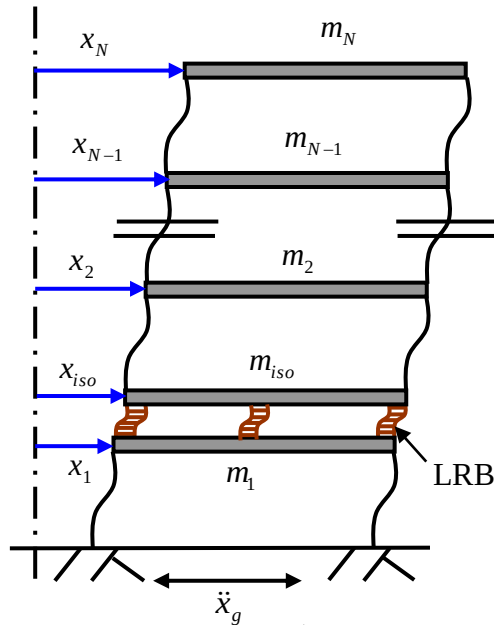


圖 1 中間樓層隔震建築物示意圖

圖 1 中，自由度 x_{iso} 為隔震層的水平向位移，自由度 $x_1 \sim x_N$ 為 1~ N 層樓板的水平向位移。據此，中間樓層隔震建築物之運動方程式可表成

$$m_N(\ddot{x}_3 + \ddot{x}_g) + C_N(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + K_N(x_3 - x_2) = 0 \quad (1)$$

$$m_j(\ddot{x}_j + \ddot{x}_g) + C_j(\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) + K_j(x_j - x_{j-1}) - C_{j+1}(\dot{x}_{j+1} - \dot{x}_j) - K_{j+1}(x_{j+1} - x_j) = 0 \quad (2)$$

$$j = 3 \sim N - 1$$

$$m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_g) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_{iso}) + K_2(x_2 - x_{iso}) - C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - K_3(x_3 - x_2) = 0 \quad (3)$$

$$m_{iso}(\ddot{x}_{iso} + \ddot{x}_g) + c_{iso}(\dot{x}_{iso} - \dot{x}_1) + h_{iso}(x_{iso} - x_1) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_{iso}) - K_2(x_2 - x_{iso}) = 0 \quad (4)$$

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + C_1(\dot{x}_1) + K_1(x_1) - c_{iso}(\dot{x}_{iso} - \dot{x}_1) - h_{iso}(x_{iso} - x_1) = 0 \quad (5)$$

此處， m_j ， C_j 和 K_j 分別表示第 j 層樓的質量，阻尼值與勁度值；而 m_{iso} ， c_{iso} 和 x_{iso} 則表示隔震層的質量，阻尼值和位移；另 h_{iso} 表隔震層的遲滯回復力， $\ddot{x}_g$ 表示地表加速度。上述之遲滯回復力 $h_{iso}(\bullet)$ ，將於下節詳述。

三、遲滯雙線性模式

第三節中的函數 $h_{iso}(x_{iso} - x_1)$ 為一個具有遲滯性的非線性函數。對於遲滯行為的描述，最常使用的便是 Masing 準則 [9,10]。它利用背骨曲線 (Backbone or skeleton Curve) 來顯示遲滯圈的特性。Masing 認為任一遲滯載重與解壓部份，在穩態的反覆載重下具有

相同形狀，且可由背骨曲線之反轉點視為原點再作尺度的兩倍調整而得。當遲滯物受到瞬時循環載重或其他的作用力時(如地震力)，則須加以修正[11]。如圖 2 所示。據此，上述之遲滯性的非線性函數 $h_{iso}(x_{iso} - x_1)$ 可表為

$$h_{iso}(x_{iso} - x_1) = g(x_{iso}^I - x_1^I) + 2f_{iso}\left(\frac{(x_{iso}^i - x_1^i) - (x_{iso}^I - x_1^I)}{2}\right) \quad (6)$$

式中，上標 I 表從開始到最近一次加載或解載所歷的時間， x_{iso}^i 表示隔震層(isolated layer)在 i 瞬間的位移， $i=I, I+1, \dots$ ，而 $f_{iso}(\bullet)$ 則表 LRB 的背骨曲線方程式。現將(6)式代入(5)式，在 i 瞬間的控制方程式可表為

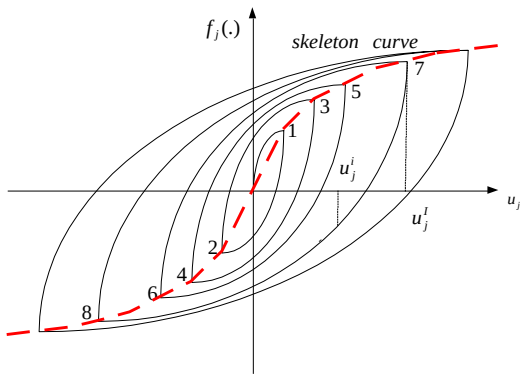


圖 2 遲滯路徑與背骨曲線示意圖

$$m_1 \ddot{x}_1^i + C_1(\dot{x}_1^i) + K_1(x_1^i) - c_{iso}(\dot{x}_{iso}^i - \dot{x}_1^i) - g(x_{iso}^I - x_1^I) - 2f_{iso}\left(\frac{(x_{iso}^i - x_1^i) - (x_{iso}^I - x_1^I)}{2}\right) = -m_1 \ddot{x}_g^i \quad (7)$$

令瞬間 $i=I$ ，則上式可改寫成：

$$g(x_{iso}^I - x_1^I) = m_1 \ddot{x}_1^I + C_1(\dot{x}_1^I) + K_1(x_1^I) - c_{iso}(\dot{x}_{iso}^I - \dot{x}_1^I) + m_1 \ddot{x}_g^I \quad (8)$$

再將 (8) 式代入 (7) 式，吾人可得：

$$\begin{aligned} & m_1(\ddot{x}_1^i - \ddot{x}_1^I) + C_1(\dot{x}_1^i - \dot{x}_1^I) + K_1(x_1^i - x_1^I) \\ & - c_{iso}((\dot{x}_{iso}^i - \dot{x}_1^i) - (\dot{x}_{iso}^I - \dot{x}_1^I)) \\ & - 2f_{iso}\left(\frac{(x_{iso}^i - x_1^i) - (x_{iso}^I - x_1^I)}{2}\right) \\ & = -m_1(\ddot{x}_g^i - \ddot{x}_g^I) \end{aligned} \quad (9)$$

然而理想化的背骨曲線，一般可用雙線性-遲滯模型取代。雙線性-遲滯模型是由兩條不同斜率的線段連接而成，如圖 3 所示。第一線段之斜率 k_{isoe} 為初始勁度，而另一線段的斜率為 k_{isoy} 則表降伏後之勁度，即

$$\begin{aligned} f_{iso}(v) &= k_{isoe}v & -D \leq v \leq D \\ &= b + k_{isoy}v & v > D \\ &= -b + k_{isoy}v & v < -D \end{aligned} \quad (10)$$

此處 D 表示降伏位移，而 b 則表固有降伏強度(Characteristic Strength)。最後現將(10)式代入(9)式，則可推得：

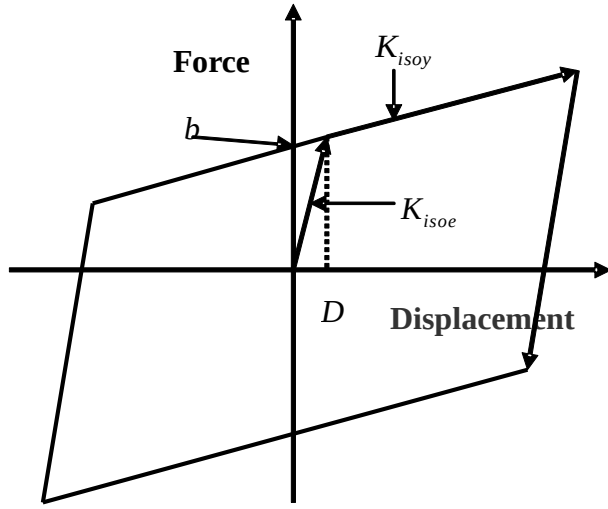


圖 3 理想化的 LRB 遲滯-雙線性模型

$$\frac{c_{iso}}{m_1} \ddot{u}_{iso}^i + \frac{k_{iseo}}{m_1} u_{iso}^i = \ddot{u}_g^i \quad -D \leq u_{iso} \leq D \quad (11)$$

$$\frac{c_{iso}}{m_1} \ddot{u}_{iso}^i + \frac{2b}{m_1} + \frac{2k_{iso}}{m_1} u_{iso}^i = \ddot{u}_g^i \quad u_{iso} > D \quad (12)$$

$$\frac{c_{iso}}{m_1} \ddot{u}_{iso}^i - \frac{2b}{m_1} + \frac{k_{iso}}{m_1} u_{iso}^i = \ddot{u}_g^i \quad u_{iso} < -D \quad (13)$$

其中

$$u_{iso}^i = ((x_{iso}^i - x_1^i) - (x_{iso}^I - x_1^I)) \quad (14)$$

$$\ddot{u}_g^i = (\ddot{x}_g^i - \ddot{x}_g^I) + \frac{C_1}{m_1} (\dot{x}_1^i - \dot{x}_1^I) + \frac{K_1}{m_1} (x_1^i - x_1^I) \quad (15)$$

(11)~(13)即為隔震層 i 瞬間之動力方程式。至於其他上部結構 i 瞬間之動力方程式，可仿上述過程而求得，故不再贅言。

四、數值範例

現考慮樓層 1 上方具隔震層之三層樓隔震建築物，其相關之數值資料如下：
 $m_{iso} = 68.04t$, $c_{iso} = 146 kN \cdot s / m$,
 $b = 245.25 kN$, $k_{iso} = 6.867 MN / m$,
 $k_{iseo} = 44.145 MN / m$; $m_1 = m_2 = m_3 = 58.32t$,
 $C_1 = C_2 = C_3 = 321 kN \cdot s / m$,
 $K_1 = K_2 = K_3 = 168.06 MN / m$ 。本文以 1940 年 N-S 向 El Centro 地震為地震力輸入資料，並利用 Newmark β 線性加速度法，求得受震下中間樓層隔震建築物的動態反應。而後將與傳統之三樓層建築物之動態行為進行比較，而傳統建築物之數值資料則與中間樓層隔震建築物各樓層之數值相同。

首先吾人將驗證模型之正確性。由圖 4 可知，隔震裝置具有雙線性-遲滯行為，與假設相符。圖 5 為樓層 1 之回復力與位移關係圖，

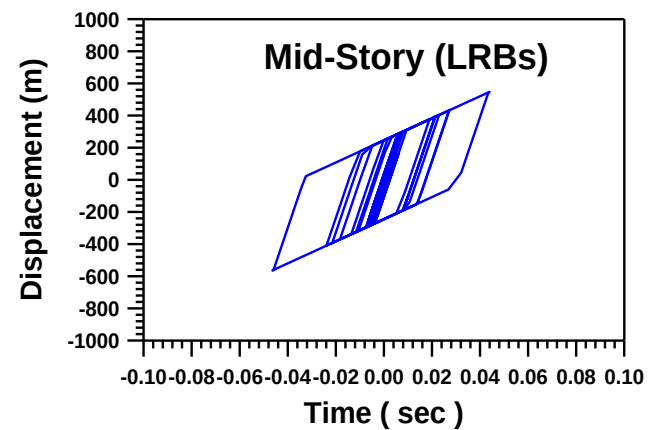


圖 4 隔震層之回復力與位移關係圖

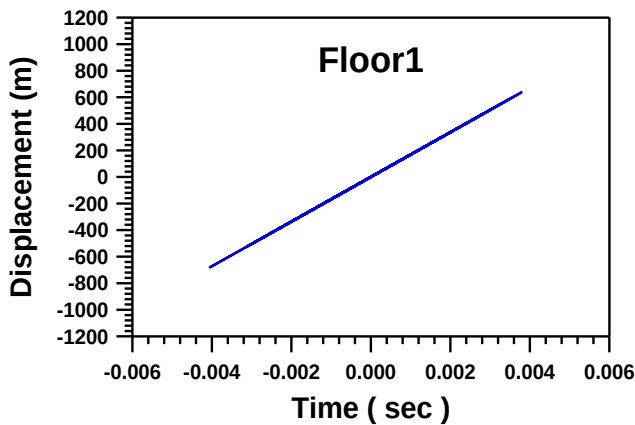


圖 5 樓層 1 之回復力與位移關係圖

由圖可知，樓層 1 之回復力具線性行為，亦與假設相符。

表 1 為中間樓層隔震建築物與傳統建築物，於受震下各樓層所受之最大加速度比較表。由表可看出樓層 1 之加速度並無降低，而位於隔震層上方各樓層所受之加速度則明顯降低許多，此結果顯示隔震裝置對受震下的建築物，的確具有阻隔地震力輸入之效果。

表 1 中間樓層隔震與傳統建築物每一樓層受最大加速度比較表

建物形式 樓層	傳統建築物 (m/sec^2)	中間樓層隔 震建築物 (m/sec^2)
樓層 1	4.220	4.723
樓層 2	8.479	5.177
樓層 3	10.783	6.051

進一步，吾人對中間樓層隔震建築物與傳統建築物各樓層在受震下的加速度反應歷時進行比較。圖 6 為樓層 1 之加速度歷時比較圖，由圖可看出樓層 1 之最大加速度並無降低；而圖 7~8 則分別表示樓層 2 與樓層 3 之加速度反應歷時，由圖 7~8 可明顯看出中間樓層隔震建築物之加速度反應歷時皆全面降低許多，亦既表示隔震層上方之樓層將因隔

震裝置的遲滯性大量吸收輸入能量，進而使得各樓層之加速度歷時全面降低。此亦再次證明隔震裝置的確對受震下的建築物，具有相當良好阻隔地震力輸入的效果。

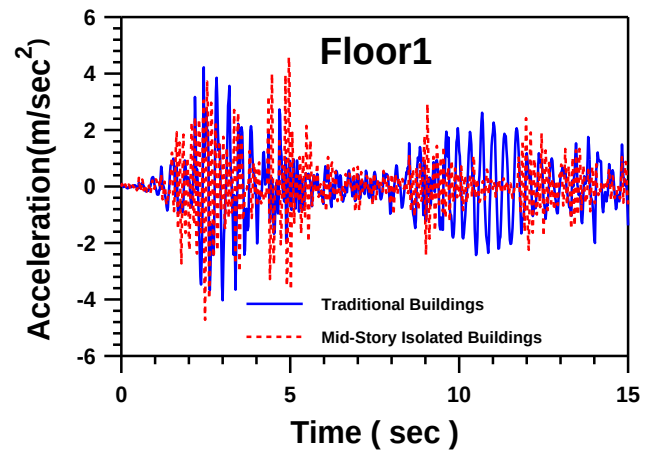


圖 6 樓層 1 之加速度反應歷時比較圖

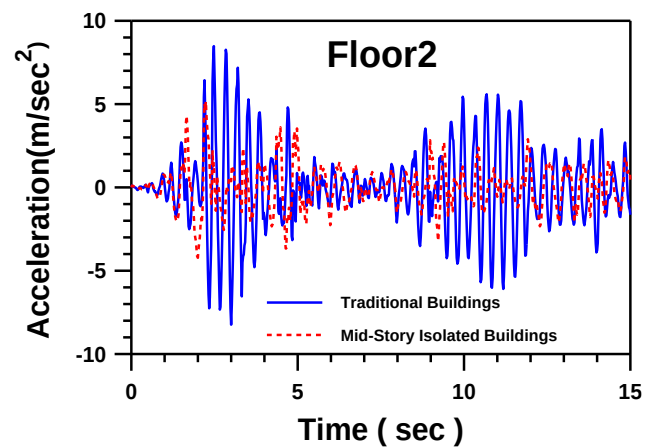


圖 7 樓層 2 之加速度反應歷時比較圖

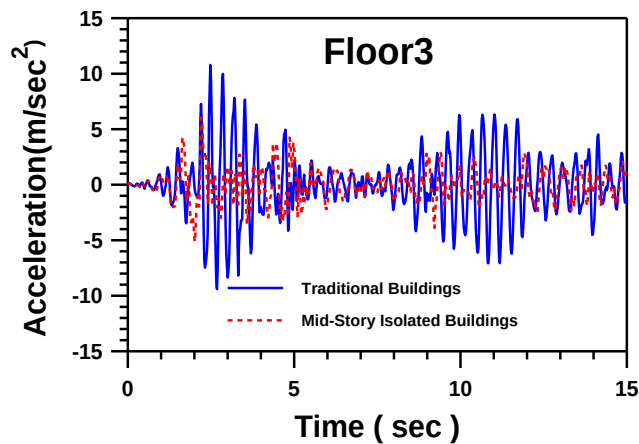


圖 8 樓層 3 之加速度反應歷時比較圖

五、結論

近 20 年來，位於人口稠密都會區的隔震建築物，為避免發生地界問題，遂有中間樓層隔震建築物之誕生，而本研究即在探討此類隔震建築物的隔震效應。隔震層上、下方之建築物將以線性模型模擬其受震下之動態行為，而隔震層則以雙線性-遲滯模型模擬其使用鉛心橡皮支承墊隔裝置之遲滯行為。結果顯示，位於隔震層下方之建築物，其最大加速度反應並無降低，而位於隔震層上方之樓層 2，其最大加速度反應則降低 39%，另第 3 樓層，其最大加速度反應更降低至 44%，此結果顯示隔震層之遲滯行為，將大量吸收傳入隔震層上方之地震能量，致使位於隔震層上方樓層之最大加速度反應歷時與傳統建築物比較，出現大幅降低之情形。

參考文獻

- 1.W. H. Robinson, "Seismic isolation, the New Zealand experience," In *Proceedings of the 1995 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 319, pp.5-19, 1995.
- 2.M. Izumi, "Recent development of passive vibration control systems in Japan," In *Proceedings of the 1997 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 357, pp.1-8, 1997.
- 3.F. Naeim, M. Lew, "Seismic base isolation in practice: the California experience," In *Proceedings of the 1995 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 319, pp.5-19, 1995.
- 4.J. M. Kelly, "Recent developments in seismic isolation technology in the United States, In *Proceedings of the 1996 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 341, pp.21-25, 1996.
- 5.A. Martelli, M. Forni, F. Bettinali, A. Marioni, G. Bonacina, "Overview on the progress of Italian activities for the application of seismic isolation," In *Proceedings of the 1996 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 341, pp.37-46, 1996.
- 6.N. H. Li, L. S. Huo, "State-of -the-art review on structural passive control," In *Liaoning Structural Engineering*, Northeast University Press, Shenyang, pp.13-18, 2000.
- 7.J. W. Asher, S. N. Hoskere, R. D. Ewing, D. R. Van Volkinburg, R. L. Mayes, M. Button, "Seismic performance of the base isolated USC university hospital in the 1994 Northridge Earthquake, In *Proceedings of the 1995 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 319, pp.147-154, 1995.
- 8.T. Ishii, T. Moteki, K. Ishida, T. Mazda,

- “Dynamic behavior of a base isolated building during earthquakes,” In *Proceedings of the 1995 ASME Pressure Vessels and Piping Conference: Seismic, Shock and Vibration Isolation*, PVP Vol. 319, pp.165-176, 1995.
- 9.R. I. Skinner, W. H. Robinson and G. H. McVerry, “Seismic isolation in New Zealand”, *Nuclear Engineering Design*, Vol. 127, pp.281-289, 1991.
10. R. I. Skinner, R.G. Tyler, A. J. Heine and W. H. Robinson, “Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes”, *Bull. New Zealand Nat. Soc. Earthquake Eng.*, Vol.13, No.1, pp.22-36, 1980.
11. W. H. Robison and W. J. Consions, “Recent development in lead damper for base isolation”, *Pacific Conf. Earthquake Eng.*, Wairakei, New Zealand (2), Aug. , pp.279-283, 1987.
12. R. J. Skinner, W. H. Robinson, G. H. McVerry, “An introduction to seismic isolation,” Wiley: New York, 1993.
13. F Naeim, J. M. Kelly, “Design of Seismic isolated structures: from theory to practice,” Willy: New York, 1999.
14. W. H. Huang *et al.*, “Characterization of seismic isolation bearings for bridges from bi-directional testing,” *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 207, New Zealand Society for Earthquake Engineering: Upper Hut, New Zealand, 2000.
15. C. H. Loh, J. H. Weng, C. H. Chen, and K. C. Lu, “System identification of mid-story isolation building using both ambient and earthquake response data,” *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 20, pp.139-155, 2013.
16. C. H. Loh, J. H. Weng, C. H. Chen, and K. C. Lu, “System identification of mid-story isolation building using both ambient and earthquake response data,” *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 20, pp.139-155, 2013.