



鉛心橡膠支承墊 應用於 高科技廠房及高速鐵路 減震介紹

林鴻順／國立成功大學土木工程學系 碩士生

原田成俊／國立成功大學土木工程學系 碩士生

謝雯軒／國立成功大學土木工程學系 碩士生

羅亭堯／國立成功大學土木工程學系 碩士生

朱聖浩／國立成功大學土木工程學系 教授

本文參考三篇論文，分別介紹鉛心橡膠支承墊（Lead rubber bearing, LRB）對於高科技廠房以及高速鐵路橋梁的減振效益。在高科技廠房研究中，使用三維有限元分析探討使用 LRB 產生的微振問題，及可能的解決方法。分析結果顯示，對於有 LRB 的高科技廠房，的確可以減少地震的基礎剪力，但在風力的影響下，微振反而會加大。結果就是 LRB 在高科技廠房中，雖然解決了地震的振動問題，但卻加大微振動的問題，因此選取適當的 LRB 為高科技廠房減震，實為重要的課題。在高速鐵路的研究中，同樣使用了有限元模型來做模擬。在鐵路軌道考慮了直線與曲線段，使用動輪軸、彈簧阻尼及剛性連桿模擬行進的列車。對列車行駛在有或無 LRB 的橋梁上，受到三向地震波進行模擬，結果顯示，LRB 橋梁可大量降低在直線及曲線鐵路上行駛列車的脫軌係數。

前言

鉛心橡膠支承墊（LRB）為一種由鉛、鋼板與橡膠組合而成的隔震墊。其橡膠具有高垂直高度，低水平剛度，可提供支承墊柔軟度，且具有高回收率。鉛金屬具有低屈服應力，在變形時可消散地震能量。鋼板則是提供側向變形束制，提高支承垂直勁度。結合三者特點，使 LRB 成為一種好的隔減震裝置。LRB 的優點為增加了結構物的自然週期，使其遠離地震周期範圍，可避免地震效應的放大，因此非常適合對地震有影響的高科技工廠。然而在已有的文獻中，鮮少研究高科技工廠的 LRB 問題，其主要多為建築以及橋梁研究。原因是因為生產高科技產品的設備需要嚴格的微振動標準，但在高科技工廠安裝 LRB 後，微振動是否會顯著增加尚不清楚。因此，本文介紹用有限元方

法研究了由安裝在高科技工廠的 LRB 引起的地震和環境振動，而環境振動是由風荷載引起的。

同樣的，地震期間在橋梁上行駛的高速列車的安全性也是一個重要問題，尤其是在彎曲鐵路系統的情況下。在曲線軌道上行駛的列車的振動和脫軌行為比在直線軌道上的要複雜得多。過去的研究多為直線軌道火車脫軌的情形，直到後來才有人開始研究彎曲橋梁的火車或結構行為。彎曲軌道系統的分析模型比直線軌道系統複雜許多，在本文研究了在直線及彎曲橋梁上行駛的高速列車，並在橋梁上使用 LRB 來減少地震影響，從而降低列車脫軌的可能性。本文主要參考三篇已發表的論文^[1-3]及一篇已投稿的論文，綜合其結果，說明 LRB 在科技廠房及高速鐵路上應用的問題，提供各界參考。

LRB 在高科技廠房防震會遇到的問題及解決方法

科技廠房有別於一般房屋結構，廠內具有精密儀器，對於微振動的準則也較為嚴格，其準則可參考在 1980 提出的高科技廠房的振動原則^[4]，其中主要分為五個層級，VC-A 到 VC-E。圖 1 顯是由論文^[1]所建立的廠房模型為一座三樓高科技工廠，第一層為 VC-C (RC 層)，第二層為 VC-B 鋼結構，第三層為 VC-A 鋼結構。第一層採用密集的鋼筋混凝土柱，以避免環境振動，二及三層採用大跨度桁架結構，實現更多生產空間 (如圖 1 所示)。高科技工廠通常需要厚樓板、大長桁架和密集的鋼筋混凝土柱來減少環境振動，但這種佈置往往需要增加建築質量，而加大了地震所產生的地震荷載。其次二及三層之大跨度桁架結構造成強梁弱柱結構，十分不利於抵抗地震力。

本文使用圖 1 所示的地震反應譜，然後使用 Simqke^[5] 人工地震軟體生成 X, Y 及 Z 方向地震，X 及 Y 向 PGA (peak ground acceleration) 為 0.32 g，及 Z 向為 0.1 g。再使用 SHAKE-91^[6] 程式生成每個土層的加速度場，然後將加速度場積分成位移場，施加到 p-y、t-z 和 Q-z 彈簧端，而另一端連接到基樁，進行立時動力分析。然後將分析的總基礎剪力求得，其值為所用樁頂剪力的總和，也代表高科技廠房上部結構隨時間化的總地震荷載，並使用以下式 (1)：

$$S(t) = \sqrt{S_x(t)^2 + S_y(t)^2} \quad (1)$$

其中 $S_x(t)$, $S_y(t)$ 分別為 X 與 Y 方向時變的基礎剪力，本文定義剪力比為使用 LRB 的最大總剪力與沒有使用 LRB 的最大總剪力之比值，可由剪力比來表示 LRB 在地震期間用於結構物的效率。從參考資料^[1] 分析中發現， $T_s \leq 1.0$ 的情況下使用 LRB 可以降低 50% 以上的

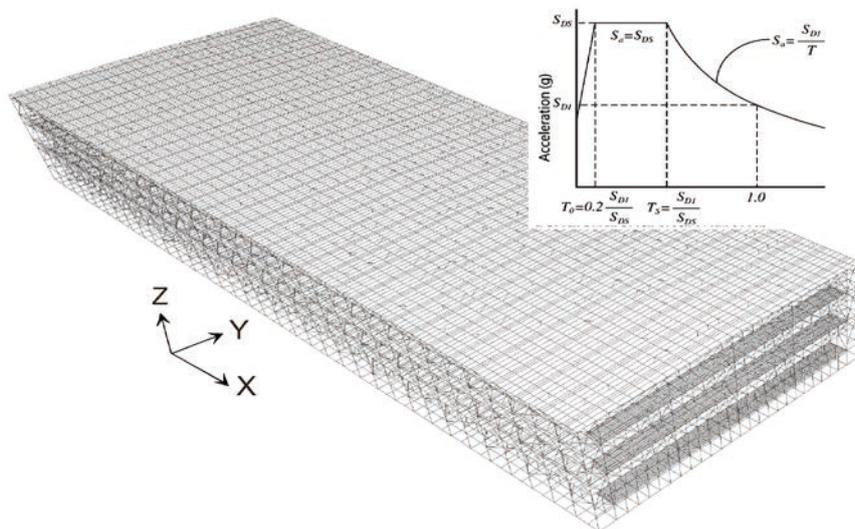
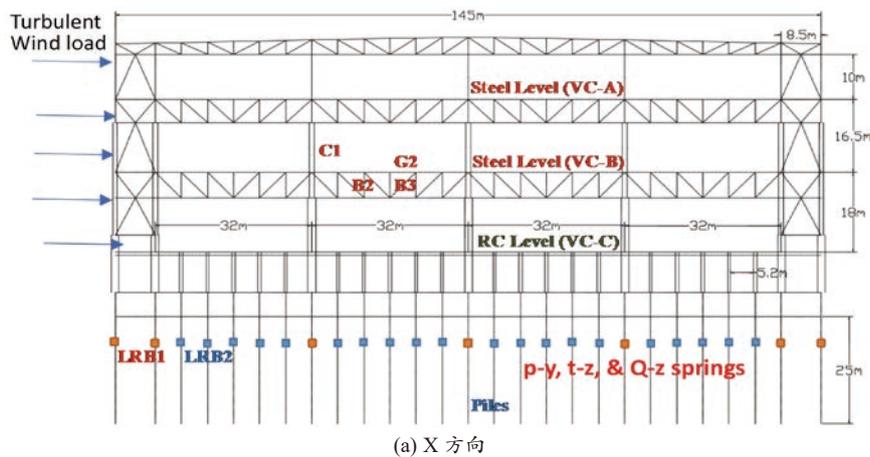


圖 1 科技廠房有限元素模型圖

地震基礎剪力(圖2),也代表高科技工廠使用LRB可以有更大的地震抵抗力。而對於周期較長的地震,如近斷層地震,會使LRB抵抗剪力的效益降低(圖2)。儘管如此,研究結果仍然表明,長週期地震的LRB效益仍在可接受範圍內。

除移動載具產生的振動外,紊流的風對高科技廠房的振動影響不可忽視。圖3顯示風載重產生的樓板振動,風載重使用10分鐘的平均風速為15 m/s的紊流風,高度位置為30 m,直接吹到結構物的長向(圖1(b))。其結果指出,高科技廠房使用LRB會大大增加風產生的振動,造成樓板微振超過規範。例如原結構一樓樓板最大微振為48 dB,合於VC-D之規範,但結構加裝LRB後,最大微振為64 dB,遠大於VC-A的規範。原因為安裝LRB會使結構物的剛度變軟,因此在風荷載的影響下,廠房的上部結構所形成的剛體運動將會無法避免。為了克服這種問題,在LRB要選擇初始剛度大的且最終剛度較小的LRB,較大的剛度可以抵抗風荷載,而較小的剛度可以減少地震荷載,細節可參考^[1]。另外風荷載對樓板微振影響極大,尤其是從14奈米到2奈米,甚至更小奈米的廠房,風荷載一定會造成問題。建議可在廠房旁加蓋其他建物,最好

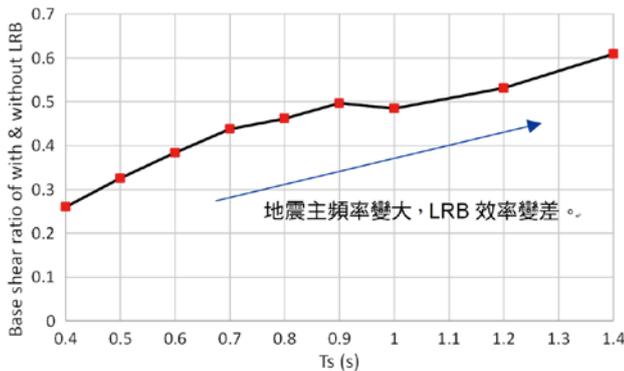


圖2 PGA為0.32 g下基礎剪力比隨 T_s (圖1(b))的變化^[1]

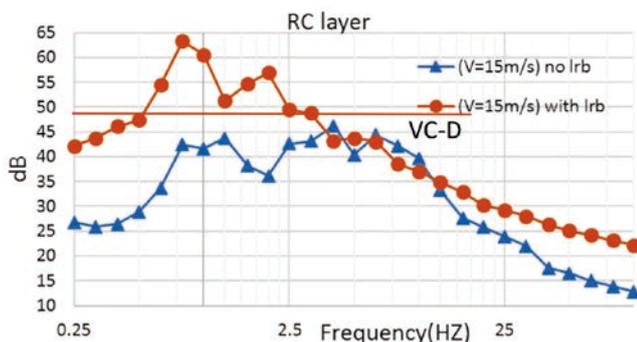


圖3 科技廠房一樓RC層dB隨頻率變化圖

高過科技廠房,阻擋風直接吹向科技廠房,而達到減小風引起的微振問題^[2]。

高鐵橋梁受地震作用下減小列車脫軌的方法

地震期間在橋梁上行駛的高速列車,其安全性是一個重要問題。雖然安全是高速列車最重要的要求,但當高速行駛的列車發生強烈地震時,仍有可能發生脫軌。尤其是對於那些在橋梁上行駛的列車,結果可能更糟,因為橋梁會顯著放大地震載荷。因此,如何防止在地震中在橋梁上行駛的列車脫軌是一個重要課題。在地震作用下,減小列車脫軌係數的方法有:

(1) 將橋墩加大

在橋梁的結構設計中,通常選擇合適的構件尺寸來抵抗地震荷載,優先考慮的是結構的安全,而不是行進中的火車的安全,由於柔性結構導致大的橋梁位移會增加地震期間火車脫軌的風險。降低列車速度雖然會降低脫軌效應,但運輸系統效率會低下。因此,參考論文^[7]研究最佳橋梁設計,以提高地震期間高速列車行駛的安全性。圖4顯示了不同的橋墩尺寸和高度($\sqrt[3]{IL}$, I =橋墩慣性矩, L =橋墩長)隨 T_s (圖1(b))及 $\sqrt[3]{IL}$ 變化下的列車脫軌係數,此圖顯示橋墩剛度越小列車脫軌係數往往越大。因此建議使用較大的橋墩剛度來提高行駛列車的安全性。

(2) 使用LRB隔震

參考資料^[3]使用帶有鉛心橡膠支承墊的直線橋梁,進行行駛列車的脫軌行為分析。分析結果顯示有LRB橋梁的地震引起之基礎剪力比沒有LRB的要小很多。與基礎剪力相似,帶有LRB橋梁的列車脫軌係

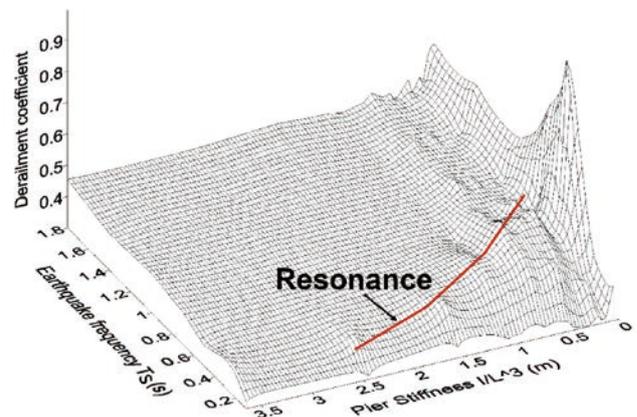


圖4 脫軌係數隨 T_s 和橋墩剛度值變化的線網圖^[7]

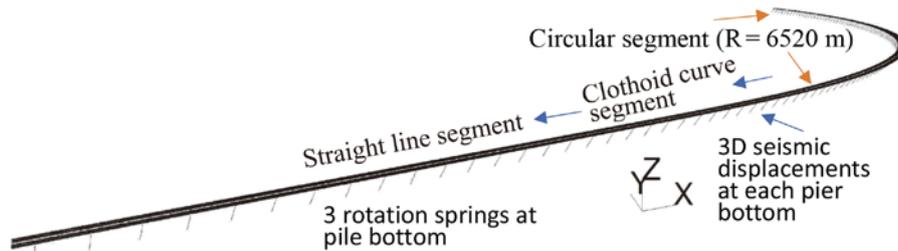


圖 5 曲線橋系統包括 500 m 的直線、400 m 的 Clothoid 曲線和 2,550 m 的圓形曲線，半徑為 6,250 m

數，較沒有 LRB 的小許多。這是因為在地震荷載下，LRB 的降伏可以減小橋梁的固有頻率，以避免此頻率接近地震的主要頻率，而產生接近共振的放大效應。然而對於主周期較長的地震，LRB 減少列車脫軌係數的現象較不明顯，因為 LRB 的降伏使橋梁週期接近地震主要週期。一般而言 $T_s < 1s$ (T_s 之定義如圖 1b 所示)，LRB 橋梁減震效果都十分明顯。本文使用一曲線橋，如圖 5 所示，列車以 300 km/h 的車速通過此橋，並發生 $T_s = 0.9 s$ 的地震，分析方法可參考 [3,4]。其地震 PGA 與脫軌係數的關係如圖 6 所示。該圖說明如下：

(1) 在不同 PGA 下，在直線橋上行駛的列車的最大脫軌係數略小於在曲線橋上行駛的列車。(2) 當分析的橋梁和列車的 PGA 大於 0.4 g 時，一些車輪與鋼軌分離過久。因此，零接觸力導致了無窮大的脫軌係數，這意味著列車脫軌了。這種情況在直線和彎曲的橋梁中都存在。(3) 對於有 LRB 的橋梁，脫軌係數隨著地震 PGA 的增加而逐漸增加。然而，對於小於 0.5 g 的 PGA，沒有發現導致無限脫軌係數所需的輪軌分離現象。此外，臨界脫軌情況下的最大脫軌係數不大於 0.8，這意味著 LRB 有效地減少了地震期間的列車脫軌，不僅適用於直線橋，也適用於曲線橋。

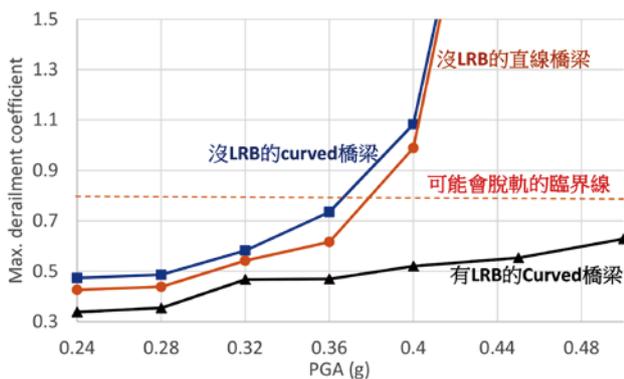


圖 6 在 $T_s = 0.9 s$ 的地震作用下列車最大脫軌係數隨 PGA 的變化圖

結論

LRB 已被證明可有效減少建築物及橋梁受地震作用下的反應，但鮮少被拿來做為科技廠房耐震及高速鐵路脫軌的防治。本文研究顯示 LRB 加裝在科技廠房及高鐵橋梁上，均有極佳的減振效果。唯一要注意的就是當地震主要周期過大時，因 LRB 的降伏會使其結構物之自然週期接近地震的主週期，使減振行為不明顯。而在微震方面，由於安裝 LRB 後會使結構物的柔度增加，導致風載重引起的微振過於顯著。因此在挑選安裝科技廠房之 LRB 時，要選擇初始剛度較大，以確保在減少地震響應時並不會增加風引起的微振動。另外本文分析結果亦顯示 LRB 能有效地減少地震期間列車的脫軌係數，不僅適用於直線橋，也適用於曲線橋。台灣高鐵在延伸至地震更頻繁的東部時，LRB 橋梁值得考慮。或甚至在比較可能橋梁與地震共振的區域，使用 LRB 替換原來的支撐墊，使行駛的列車在地震作用下更為安全。

參考文獻

- Ju, S.H., Yuantien, C.C., and Hsieh, W.K. (2020), Study of Lead Rubber Bearings for Vibration Reduction in High-Tech Factories. Applied Sciences-Basel, 10: 1502.
- Ju S.H. and Kuo H.H. (2020), Experimental and numerical study of wind-induced vibration in high-tech factories. J. Perform. Constr. Facil. 34:04020026.
- Ju, S.H. (2020), Derailment of trains moving on lead-rubber bearing bridges under seismic loads. Journal of Vibration and Control 26(1):107754632090235.
- Gordon, C.G. (1999), Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment. Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE).
- MIT. SIMQKE (1976), A Program for Artificial Motion Generation: User's Manual and Documentation. M.I.T. Department of Civil Engineering.
- Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1993), User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California at Davis, Davis, Calif.
- Ju, S.H. (2013), Improvement of bridge structures to increase the safety of moving trains during earthquakes. Engineering Structures 56: 501-508.