

# 階梯基礎山坡建築結構之隔震研究(I)

A Study on the Seismic Isolation of Hillside Structures on Step Foundation(I)

計畫編號：NSC89-2625-Z009-001

執行期限：88年8月1日至89年7月1日

主持人：王彥博 國立交通大學土木系副教授

E-mail address: ypwang@cc.nctu.edu.tw

一、中文摘要(關鍵詞：坡地建築、基礎隔震、  
摩擦單擺支承)

摩擦單擺支承為鋼製滑動式隔震系統，由於其滑動界面為曲面，可使上承結構之運動如同單擺而改變結構的周期，並增進其復位之能力。摩擦機制可消散部分能量，毋須額外的耗能裝置。由於摩擦單擺支承尚具有周期不變性、抗扭性、耐久性以及對溫度不敏感等特質，近年來其在結構防震之應用備受注目。

本文藉由數值模擬分析探討摩擦單擺支承應用於階梯山坡結構隔震之可行性。針對特殊階梯結構之隔震，因其立面不對稱將導致每個隔震支承運動產生非同步之行為。有鑑於此，本文藉由「修正剪力平衡法」之概念進行非同步滑動支承隔震階梯結構之非線性動力分析。分析結果顯示在可接受之支承位移下，除了在樓層位移、加速度之外層間剪力亦有大量折減。應用摩擦單擺支承可有效地提昇階梯結構耐震性能。

英文摘要 (Keywords: hillside structures, seismic isolation, friction pendulum bearing)

The FPB made of steel is a sliding type isolation system. The sliding surface of the bearing is concave to allow for pendulum motion of the supported structure, which in turn

shifts the vibrational period of the structure, and increases its re-centering capability. The frictional mechanism helps in dissipating energy without additional energy dissipation device. Due to another characteristics of period-invariance, torsion-resistance, durability and temperature-insensitivity of the FPB's, their applications in seismic isolation have been attractive in recent years.

In this paper, the feasibility of using the Friction Pendulum Bearing (FPB) for aseismic design of hillside on step foundation is verified through numerical simulations. In view of notable exception is the application of isolation bearings to structural asymmetry in elevation unsynchronized bearing motion would occur. According, an algorithm referred to as the "modified shear balance method" is proposed for the nonlinear dynamic analysis of stepped structure isolated with unsynchronized sliding bearings. Simulation results indicate that significant reduction of the floor displacements, accelerations as well as story shear of the isolated structure can be obtained, with acceptable bearing displacements. Effectiveness of friction pendulum bearings on earthquake protection of stepped structures has been assured.

## 二、計畫緣由與目的

台灣由於都會區建地不足的情形十分嚴重，山坡地開發便成為建築用地取得之重要來源。有許多坡地建築係因應山坡地勢而為，因此往往其柱基之間會有落差，而形成階梯式基礎。此等建築結構之立面幾何並不對稱，地震時各柱受力分配不平均，極易於弱層產生破壞。然而，台灣地處歐亞板塊和菲律賓板塊之間，地震活動十分頻繁，建築物因地震所造成之傷害時有所聞(75年台北地震、79年花蓮地震、87年嘉義瑞里地震)，此外，最近發生之集集地震中亦發現陡坡處之建築物損壞特別嚴重，因此坡地建築之耐震安全性需要特別加強。

長久以來，結構耐震設計一直遵循著『小震不壞，中震可修，大震不倒』的原則而採行『韌性設計』。然而經歷了美國北嶺地震(1994)、日本阪神地震(1995)及集集地震(1999)等重創後，人們始體認到過去所遵循的耐震設計理念似已有所不足。耐震設計方法，乃至於建築法規之修訂，或應跳脫出『韌性設計』的思維，而朝更積極之『功能設計』的方向去思考。此外，為數龐大之舊有建築並未受到規範，即使在法規合理修訂後，其安全問題仍未解決。因此，對於舊有建築物的耐震補強亦為吾人應予正視之問題。基礎隔震為結構抗震的有效方式之一，它不但可應用於新建之結構，亦能應用於老舊房屋、橋樑之耐震補強。

隔震的形式可以區分為類彈簧式與滑動式兩種。類彈簧式隔震系統藉改變結構週期來避開地震的主要振頻而達到減震的目的，如鉛心橡膠支承，應用在堅硬地盤時耐震效果較佳，但在軟弱地盤有發生共振之虞。滑動式隔震系統則是藉由滑動摩擦界面隔絕地震力的作用。由於傳遞至上部結構的地震力不會超過滑動界面之最大摩擦力，因此可大幅降低結構的地震反應【1-3】。摩擦單擺支承【4-7】為滑動式隔震系統，由於其滑動界面為曲面，可使上承結構之運動如同單擺而改變結構週期，並增進其復位能力。摩擦機制可消散部分能量，毋須額外的耗能裝置。此外，摩擦單擺支承尚有有週期不變性、抗扭

性、耐久性以及對溫度不敏感等特質，因此在實際應用上將更具優勢。本計畫針對階梯型兩層樓房屋結構為對象進行研究，探討 FPB 隔震系統應用於階梯型房屋於不同特性之地震紀錄下之減震效能，將以 1940 El Centro、1995 Kobe 等強震記錄作為輸入震波進行模擬分析。

## 三、研究方法與成果

階梯式隔震房屋結構由於其座落於不平等之基礎上，結構將產生立面幾何不對稱之情形，因此，其每個隔震支承受震行為將不一致，而在分析上亦較為困難。滑動式隔震系統具高度非線性，要利用極精確的數值分析方法才能確實模擬其行為。Wang 等人【8】所提出「剪力平衡法」以進行多支承滑動隔震橋樑之動態反應分析，惟其在求取平衡剪力時仍須經由迭代方式求根。本研究將根據 Wang 等人【9,10】所提出之修正剪力平衡法，藉由簡單的邏輯判斷技巧處理各不同步隔震支承之非線性非線性動力分析模式。

### 隔震效益評估

分析模型如圖 1a、1b 所示，為避免隔震後產生軟弱底層之現象，將於底層處加上斜撐以提高其勁度，避免過大之層間位移發生。未隔震之房屋結構基本振態為 2.3Hz，選擇摩擦單擺支承之曲率半徑為 1m，因此，隔震後房屋結構週期約為 2 秒。摩擦機制將以庫侖模式簡化之，而摩擦係數取 10%，選擇 1940 El Centro、1995 Kobe 地震為輸入震波，分析結果如表一所示。

如預期的，隔震後之坡地結構其減震效益十分顯著，所有的受震反應皆有不同幅度之折減(表 1a,1b)。值得注意的是，未隔震坡地結構之二樓層間剪力遠較一樓為大，此與以往等高基礎結構之分析結果有很大之不同，蓋因較高基礎之固端支承限制了層間位移量，並吸收部分傳遞至底層剪力所致。惟如此將造成較大層間剪力發生在二樓處，實務設計上必須特別加以注意。未隔震之坡地結構因基礎不平等之特性，其底層之層間剪力與位移反應

皆較小，但以摩擦單擺支承進行隔震，其底層之層間剪力與位移減震效益雖不明顯但仍具減振效果(El Centro 地震下分別為 12% 與 38%；Kobe 地震下為 38% 與 67%)。由不同地震強度之坡地結構正規化二樓層間剪力折減比較可發現(圖 2a、2b)，樓層之層間剪力隨地震強度加大其減震效益有愈加之趨勢，當地震放大 3 倍後在二樓之層間剪力折減率更高達 91%，顯示摩擦單擺支承具備優越之減震效果與穩定性。

觀察摩擦單擺隔震支承之滑動位移歷時(圖 3)，其最大位移約 3 公分，且殘留位移量亦不明顯(僅約 0.39 公分)，顯示歸位能力相當不錯。此外，可明顯發現第三個隔震支承滑動歷時與另兩個支承不同，其在最後有較多振盪之行為發生，顯示每個支承滑動行為並非一致，而是各自獨立。比較隔震與未隔震之各樓層位移峰值(圖 4)，隔震後結構其層間位移反應相當小，整個房屋結構近似一剛體運動之情形。

#### 四、結論

1. 由於一般未隔震之坡地結構多是建構在階梯式基礎上，其各柱基並不在同一水平上，實際設計時需特別注意其內力分配，以避免柱底產生致命之剪力破壞而造成結構之坍塌。
2. 在不等高基礎的坡地結構進行隔震，可大幅提昇坡地結構之耐震反應，不僅在層間位移有效地減少，在層間剪力與傾覆彎矩亦大幅度折減，其應用當可大力推廣。
3. 應用摩擦單擺支承進行隔震，當地震強度愈大時隔震效益愈加明顯，顯示其極優越性之穩定耐震表現。

#### 五、參考文獻

(1)Constantinou, M.C., Mokha, A.S., and Reinhorn, A.M., (1991), "Study of Sliding Bearing and Helical-Steel-Spring Isolation System.", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.117, No.4, April, pp.1257-1275.

(2)Kelly, J.M., and Beucke, K.E., (1983), "A Friction Damped Base Isolation System with Fail-safe characteristics.", Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol.11, pp.33-56.

(3)Mostaghel, N., and Tanbakuchi, J., (1983), "Response of Sliding Structures to Earthquake.", Engrg. Struct. Dyn., Vol.11, pp.729-738.

(4)Mokha, A.S. and Constantinou, M.C., (1991), "Experimental Study of Friction-Pendulum Isolation System." J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 117, No. 4, April, pp.1201-1217.

(5)Zayas, V., Low, S.S. and Main, S.A., (1987), "The FPS Earthquake Resisting System , Experimental Report.", Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering, Research Center, University of California, Berkeley, Calif., June.

(6)Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kim, Y-S, and Okamoto, S., (1993), "NCEER-Taisei Corporation Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges : Experimental and Analytical Study of a Friction Pendulum System (FPS).", Technical Report NCEER-93-0020, NCEER, SUNY/Buffalo.

(7)Morikawa, Y., Fujita, S., Nagata, S. and Shimoda, I., (1992), "Development of Seismic Isolation System for Light Equipment Using Friction Pendulum Bearings.", Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, pp.2287-2290.

(8)Wang, Y. P., Chung, L. L. and Liao, W. H., (1998), "Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings," Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol.27, pp.1069-1093.

(9)Wang, Y. P., Chung, L. L., Teng, M. C., Lee, C. L. (1998), "Experimental Study of Seismic Structural Isolation Using Sliding Bearings," 2WCSC, Kyoto, Japan.

(10)王彥博, 唐治平, 鍾立來, 廖偉信(1998), 「橋樑混合控制( )」, 中華民國第四屆結構工程研討會論文集, 87 年 9 月, pp.1237-1244.

(11)Wang, Y. P., Chung, L. L., and Liao, W. H. (1998), "Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearing," Earthquake Engrg., Struct. Dyn., Vol. 27, pp.1069-1093.

表一 隔震效益評估(El Centro)

Structural Type Max. Response Quantity <sup>a</sup>	Fixed	Isolated	Reduction(%)
	Peak	Peak	Peak
$D_1/H_1$ (%)	0.08	0.05	38
$D_2/H_2$ (%)	1.56	0.40	74
$S_1/W$ (%)	15.25	13.47	12
$S_2/W$ (%)	65.32	12.96	80
$ACC_1$ (g)	0.69	0.43	38
$ACC_2$ (g)	1.27	0.34	73
$OM$ (kN-m)	4360	740	83
$DB1$ (cm)		3.13	
$DB2$ (cm)		3.14	
$DB3$ (cm)		3.26	

表二 隔震效益評估(Kobe)

Structural Type Max. Response Quantity <sup>a</sup>	Fixed	Isolated	Reduction(%)
	Peak	Peak	Peak
$D_1/H_1$ (%)	0.21	0.07	67
$D_2/H_2$ (%)	4.31	0.72	83
$S_1/W$ (%)	42.57	26.53	38
$S_2/W$ (%)	180.00	23.57	87
$ACC_1$ (g)	1.04	0.87	16
$ACC_2$ (g)	3.51	0.60	83
$OM$ (kN-m)	12031	1133	91
$DB1$ (cm)		14.03	
$DB2$ (cm)		14.06	
$DB3$ (cm)		14.31	

<sup>a</sup> $D_1/H_1$ =Story 1 Drift Ratio (normalized with respect to story height),  $D_2/H_2$ =Story 2 Drift Ratio,  $S_1/W$ =Story 1 Shear coefficient (normalized with respect to structure weight),  $S_2/W$ =Story 2 Shear coefficient,  $ACC_1$ =Acceleration of Story 1,  $ACC_2$ =Acceleration of Story 2,  $OM$ =Overtuning moment,  $DB1$ =Disp. of Bearing 1,  $DB2$ =Disp. of Bearing 2,  $DB3$ =Disp. of Bearing 3.

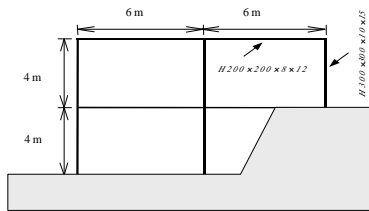


Figure 1(a) 未隔震階梯基礎二層樓結構

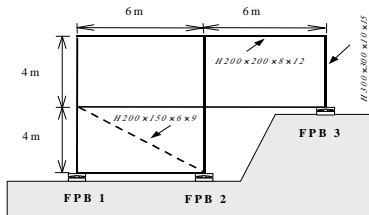


Figure 1(b) 隔震階梯基礎二層樓結構

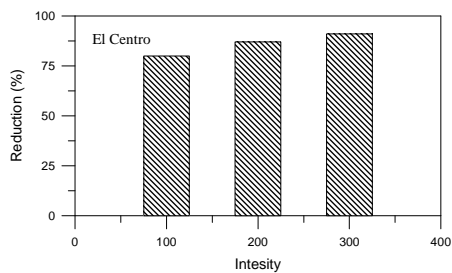


圖 3a. 不同地震強度之坡地結構二樓層間剪力折減比較

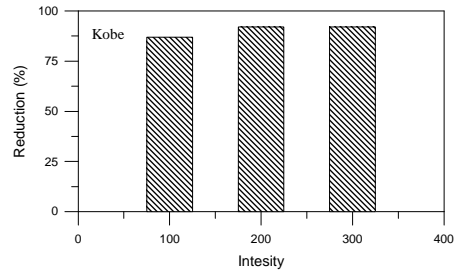


圖3b. 不同地震強度之坡地結構二樓層間剪力折減比較

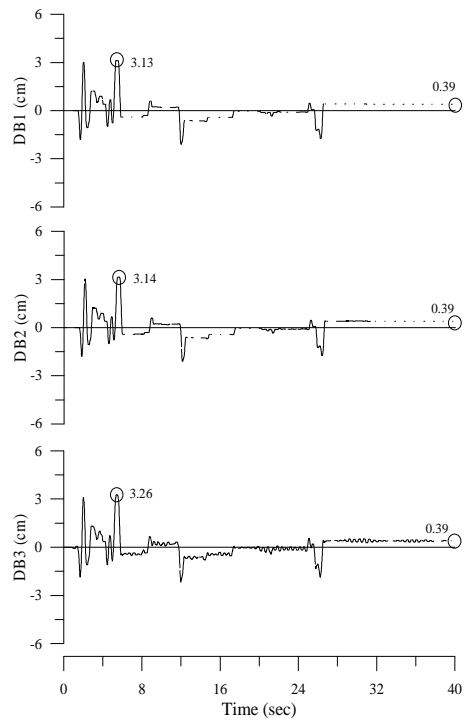


圖 3 摩擦單擺支承滑動位移 (El Centro)

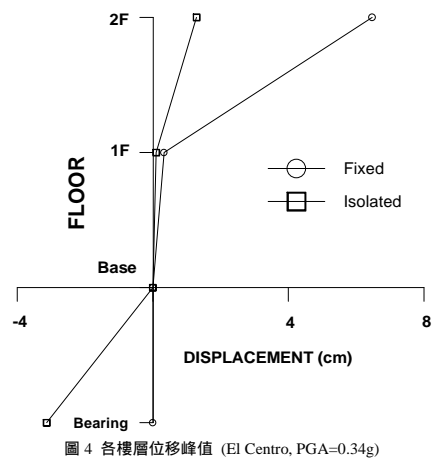


圖 4 各樓層位移峰值 (El Centro, PGA=0.34g)