

# 國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

高科技設備震害防制與無塵室樓版剛性補強研究  
A Study on Earthquake Protection of Hi-tech Facilities and  
Cleanroom Floor Rigidity Reinforcement



研究生：阮明坤

指導教授：王彥博 博士

廖偉信 博士

中華民國九十四年六月

高科技設備震害防制與無塵室樓版剛性補強研究

**A Study on Earthquake Protection of Hi-tech Facilities and  
Cleanroom Floor Rigidity Reinforcement**

研究生：阮明坤

Student : Ming-Kun Juan

指導教授：王彥博 博士

Advisor : Dr. Yen-Po Wang

廖偉信 博士

Dr. Wei-Hsin Liao

國立交通大學

土木工程學系碩士班



**A Thesis**

**Submitted to Institute of Civil Engineering  
College of Engineering**

**In Partial Fulfillment of the Requirements**

**For the Degree of**

**Master of Science**

**in**

**Civil Engineering**

**June 2005**

**Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十三年六月

# 高科技設備震害防制與無塵室樓版剛性補強研究

研究生：阮明坤

指導教授：王彥博 博士

廖偉信 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

本文主要的研究方向包含：(1)高科技設備之震害防制；(2)無塵室樓版之剛補強。高科技設備之震害防制方面：針對衝擊敏感之設備機台不適用防震加固設計之問題，考慮以設備之容許振動加速度為目標進行功能設計。摩擦單擺支承在一般環境擾動力作用下不會產生滑動，因此不影響設備生產良率，故本研究採用其進行設備隔震。文中利用改良式剪力平衡法解析隔震設備在基座傾斜下的動力行為，數值模擬結果顯示，基座傾斜的隔震設備震後的殘留位移較大。此外，本文發展出剪力平衡-速度迭代法解析隔震設備加裝非線性油壓阻尼器的動力行為，數值模擬結果顯示，隔震設備加裝非線性油壓阻尼器在地震作用下，確能有效降低隔震設備的受震反應。一系列的振動台試驗，則進一步確認隔震平台能降低設備之地震反應。無塵室樓版補強方面：由於廠房擾動源甚多，且擾動函數及位置很難清楚定義，因此無塵室樓版的微振動反應很難由數值模擬分析得到可靠的預測，故精密設備常以樓版動態反應規格作為樓版微振動的設計要求。本研究利用 SAP2000 軟體模擬樓版動態反應，結果顯示，不同邊界條件、樓版厚度及梁尺寸均會造成樓版的動態反應不同，其中以樓版厚度之影響最大。另外，針對剛性不足的樓版，採用鋁桁架補強確實可提升樓版的剛性。

關鍵字：震害防制、隔震、振動台試驗、動態剛度、樓版補強

# **A Study on Earthquake Protection of Hi-tech Facilities and Cleanroom Floor Rigidity Reinforcement**

**Student : Ming-Kun Juan**

**Advisor : Dr. Yen-Po Wang**

**Dr. Wei-Hsin Liao**

**Institute of Civil Engineering**

**College of Engineering**

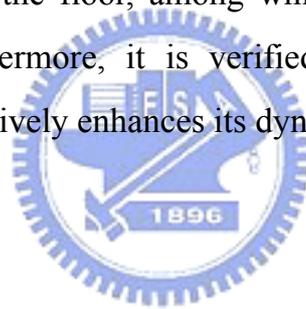
**National Chiao Tung University**

## **Abstract**

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like border. Inside the circle, there is a stylized building or structure with the letters 'ES' and 'A' on it. Below the structure, the year '1896' is inscribed. The word 'Abstract' is overlaid on the top part of the logo.

The main contents of this study include: (1) earthquake protection of hi-tech facilities; (2) cleanroom floor rigidity reinforcement. In regard to earthquake protection of hi-tech facilities, this study considers a performance-based design approach for shock-sensitive facilities, for which seismic anchorage design is not adequate, using admissible acceleration as the design criteria. The Friction Pendulum System (FPS) is adopted for seismic isolation as it won't be triggered by general environmental disturbances so that daily manufacturing process will not be affected. In this thesis, the dynamic behavior of isolated facilities on an inclined foundation is investigated. Simulation results show that residual displacement can be excessive under inclined conditions, and the test result is better predicted with modification of inclined condition in the analytical model. Moreover, a Shear Balance – Velocity Iterative Method is proposed for nonlinear dynamic analysis of

isolation platform with nonlinear viscous dampers. Simulation results indicate that additional dampers can further reduce seismic response of the isolation system. A series of shaking table tests has been conducted to confirm effectiveness of the isolation platform. While for cleanroom floor rigidity reinforcement, as the sources of disturbances is so diverse that they can not be precisely defined and located, the micro vibration responses of the floor can not be reliably predicted via numerical simulations, and therefore some experimentally obtained floor dynamic characteristics are often adopted as the design criteria for hi-tech facilities. This study extracts the dynamic characteristics of the floor based on numerical analysis by SAP2000. Results show that the boundary conditions, floor thickness and beam size affect the dynamic characteristics of the floor, among which the floor thickness is the most critical factor. Furthermore, it is verified that floor reinforced with aluminum space truss effectively enhances its dynamic stiffness.



Keywords : seismic hazard prevention, isolation, shaking table tests, dynamic stiffness, floor reinforcement

## 誌 謝

感謝吾師 王彥博教授兩年來的悉心指導，在交大進行研究的這段時間，吾師一直灌輸學生求知的熱忱及思考的邏輯，讓學生不管在學業或待人處事上都獲益匪淺。對於老師之諄諄教誨，在此致上最誠摯的謝意。

論文口試期間，承蒙國立高雄第一科技大學 盧煉元教授、國家地震中心 鍾立來教授、國立成功大學 徐德修教授、崑山科技大學 黃武龍教授撥冗指正，並提供寶貴意見，使得論文疏漏之處得以獲得改進，特別在此表示感激之意。

在交大的求學生活中，感謝 107A-5 研究室的學長廖偉信博士、李建良博士、嘉賞學長、逸軒學長、鈺文學長、銘峰學長；畢業學長啟晉、峻毅、學姊雅婷；同學連杰；學弟恩杰、科良、尚諺、學妹怡婷。在研究過程上，因你們而成長精進；在日常生活中，因你們而多采多姿。

此外，特別感謝大學好友們在求學過程中的勉勵與幫忙，護持之恩不敢稍忘。

最後，衷心感激多年來一直給予我支持的家人們，感謝你們無私的奉獻、關懷、鼓勵與包容，讓我得以無後顧之憂完成研究所的求學生涯，謝謝你們。

謹以本文獻給所有關心我的人，謝謝你們。

謹誌於交大工程二館 2005 年 6 月

# 目 錄

摘 要 .....	i
Abstract.....	ii
誌 謝 .....	iv
目 錄 .....	v
表目錄 .....	ix
圖目錄 .....	xi
第一章 前 言 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 本文內容.....	6
第二章 隔震設備之動力分析.....	8
2.1 隔震設備之動力分析模型建立.....	8
2.2 摩擦機制 .....	10
2.3 數值方法解析 .....	11
2.3.1 狀態空間法 .....	11
2.3.2 剪力平衡法 .....	14
2.4 隔震設備效益評估 .....	16
2.4.1 輸入擾動震波.....	16
2.4.2 短週期結構之隔震設備效益評估 .....	16
2.4.3 中等週期結構之隔震設備效益評估.....	18
2.5 參數研究 .....	19
2.5.1 El Centro 地震 .....	19

2.5.2	Chi-Chi 地震(TCU017).....	20
2.6	基座傾斜效應評估 .....	22
2.6.1	El Centro 地震 .....	22
2.6.2	Chi-Chi 地震(TCU017) .....	23
第三章	隔震平台加裝非線性油壓阻尼器之動力分析.....	24
3.1.	隔震平台加裝非線性油壓阻尼器之動力分析模型 .....	24
3.2	阻尼器物理特性.....	25
3.3	數值方法解析.....	26
3.3.1	狀態空間法 .....	26
3.3.2	剪力平衡-速度迭代法.....	29
3.4	系統能量計算.....	30
3.5	設備隔震加裝油壓阻尼器效益評估 .....	31
3.5.1	短週期結構之設備隔震效益評估.....	32
3.5.2	中等週期結構之設備隔震效益評估.....	33
3.6	參數研究 .....	34
3.6.1	El Centro 地震 .....	35
3.6.2	Chi-Chi 地震(TCU017) .....	36
第四章	振動台試驗.....	38
4.1	前言 .....	38
4.2	試驗規劃 .....	38
4.2.1	地震模擬振動台 .....	38
4.2.2	控制器與資料擷取系統 .....	39
4.2.3	量測儀器.....	39

4.2.4 隔震平台.....	40
4.3 隔震平台性能測試.....	40
4.3.1 測試計畫.....	40
4.3.2 振動台測試結果評估.....	41
4.3.3 試驗結果與理論模擬.....	43
4.3.4 試驗後隔震器外觀檢核.....	43
4.4 加裝油壓緩衝器隔震性能評估.....	44
4.4.1 測試計畫.....	44
4.4.2 油壓緩衝器元件測試.....	44
4.4.3 振動台測試結果評估.....	45
4.4.4 試驗後隔震器外觀檢核.....	48
第五章無塵室樓版剛性補強之研究.....	49
5.1 前言.....	49
5.2 設備動態反應目標.....	49
5.3 SAP2000 模型建立.....	51
5.4 樓版分析結果.....	51
5.5 參數分析.....	53
5.5.1 邊界條件之影響.....	53
5.5.2 樓版厚度之影響.....	54
5.5.3 梁尺寸之影響.....	55
5.6 鋁桁架補強評估.....	55
5.6.1 全面補強.....	56
5.6.2 局部補強.....	57

第六章 結論與建議.....	58
參考文獻.....	61



## 表目錄

表 1.1 一般振動之特徵與對策.....	66
表 2.1 設備加速反應度峰值比較(El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ) .....	67
表 2.2 設備位移反應峰值比較 (El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ).....	68
表 2.3 設備加速度反應峰值比較 (El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ )...	69
表 2.4 設備位移反應峰值比較 (El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ).....	70
表 2.5 設備加速度反應峰值比較 (TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ) .....	71
表 2.6 設備位移反應峰值比較 (TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ) .....	72
表 2.7 設備加速度反應峰值比較(TCU017 , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ) .....	73
表 2.8 設備位移反應峰值比較(TCU017 , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ ).....	74
表 2.9 設備加速度反應峰值比較(El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ ).....	75
表 2.10 設備加速度反應峰值比較(TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ ).....	76
表 3.1 設備加速度反應峰值比較表 (El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	77
表 3.2 設備位移反應峰值比較表 (El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	78
表 3.3 設備加速度反應峰值比較表 (El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	79
表 3.4 設備位移反應峰值比較表 (El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	80

表 3.5 設備加速度反應峰值比較表 (TCU017, $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	81
表 3.6 設備位移反應峰值比較表 (TCU017, $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	82
表 3.7 設備加速度反應峰值比較表 (TCU017, $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	83
表 3.8 設備位移反應峰值比較表 TCU017, $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ ) .....	84
表 4.1 隔震設備反應比較(El Centro) .....	85
表 4.2 隔震設備反應比較(Kobe).....	86
表 4.3 隔震設備反應比較(TCU017).....	87
表 4.4 隔震支承摩擦係數及傾斜角理論模擬 .....	87
表 4.5 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(El Centro) .....	88
表 4.6 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(Kobe) .....	89
表 4.7 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(TCU017).....	90
表 5.1 衝擊載重試驗之頻域反應函數與其反函數 .....	91
表 5.2 不同邊界條件下之參數設定 .....	91
表 5.3 不同樓版厚度下之參數設定 .....	92
表 5.4 不同梁尺寸下之參數設定 .....	92
表 5.5 結構樓版採用全面鋁桁架補強下之參數設定 .....	93
表 5.6 結構樓版採用局部鋁桁架補強下之參數設定 .....	93

## 圖目錄

圖 1.1 線切割機台移位而發生碰撞 .....	94
圖 1.2 長晶爐管傾覆破壞.....	94
圖 1.3 晶舟(bolt)與石英內管破裂.....	94
圖 1.4 機台腳柱彎曲破壞.....	95
圖 1.5 鉛心橡膠支承之剪力遲滯迴圈 .....	95
圖 1.6 摩擦單擺支承之剪力遲滯迴圈 .....	95
圖 1.7 設備基座採固定方式之振動行為與後果 .....	96
圖 1.8 設備基座採隔震方式之振動行為與效果.....	96
圖 1.9 CANON 微影設備動態剛度規格要求 .....	96
圖 2.1 摩擦支承分析模型.....	97
圖 2.2 摩擦單擺支承運動行為.....	98
圖 2.3 Mokha 模式中摩擦係數與滑動速度之關係 .....	98
圖 2.4 庫侖模式中摩擦係數與滑動速度之關係 .....	99
圖 2.5 剪力平衡法分析流程圖.....	99
圖 2.6 El Centro 震波加速度歷時(正規化至 1g).....	100
圖 2.7 TCU017 震波加速度歷時(正規化至 1g).....	100
圖 2.8 結構樓板加速度歷時反應(El Centro，正規化至 1g； $T_s = 0.3\text{sec}$ ) .....	100
圖 2.9 結構樓板加速度歷時反應(TCU017，正規化至 1g； $T_s = 0.3\text{sec}$ ) .	101
圖 2.10 結構樓板加速度歷時反應(El Centro，正規化至 1g； $T_s = 0.7\text{sec}$ )	

.....	101
圖 2.11 結構樓板加速度歷時反應(TCU017，正規化至 1g； $T_S = 0.7\text{sec}$ )	101
圖 2.12 設備加速度歷時比較(El Centro，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	102
圖 2.13 設備加速度歷時比較(El Centro，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	102
圖 2.14 隔震平台位移歷時比較(El Centro，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	103
圖 2.15 FPS 遲滯迴圈(El Centro，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	103
圖 2.16 隔震平台位移歷時比較(El Centro，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	104
圖 2.17 FPS 遲滯迴圈(El Centro，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	104
圖 2.18 設備加速度歷時比較(TCU017，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	105
圖 2.19 設備加速度歷時比較(TCU017，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	105
圖 2.20 隔震平台位移歷時比較(TCU017，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	106
圖 2.21 隔震平台位移歷時比較(TCU017，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	106
圖 2.22 FPS 遲滯迴圈(TCU017，PFA=0.5g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，W=3ton， $\mu=0.1$ )	107
圖 2.23 FPS 遲滯迴圈(TCU017，PFA=1.0g， $T_S = 0.3\text{sec}$ ， $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ，	

W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	107
圖 2.24 設備加速度歷時比較(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	108
圖 2.25 設備加速度歷時比較(El Centro , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	108
圖 2.26 隔震平台位移歷時比較(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	109
圖 2.27 FPS 遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	109
圖 2.28 隔震平台位移歷時比較(El Centro , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	110
圖 2.29 FPS 遲滯迴圈(El Centro , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	110
圖 2.30 設備加速度歷時比較(TCU017 , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	111
圖 2.31 設備加速度歷時比較(TCU017 , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	111
圖 2.32 隔震平台位移歷時比較(TCU017 , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	112
圖 2.33 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=0.5g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	112
圖 2.34 隔震平台位移歷時比較(TCU017 , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	113
圖 2.35 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=1.0g , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ ) .....	113

圖 2.36	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )	.....	114
圖 2.37	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )	.....	114
圖 2.38	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )	.....	114
圖 2.39	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )	.....	115
圖 2.40	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )	.....	115
圖 2.41	設備反應最大值比較(El Centro , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )	.....	115
圖 2.42	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )	.....	116
圖 2.43	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )	.....	116
圖 2.44	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )	.....	116
圖 2.45	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )	.....	117
圖 2.46	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )	.....	117
圖 2.47	設備反應最大值比較(TCU017 , $T_S = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )	.....	117
圖 2.48	設備加速度歷時比較(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ )	.....	118
圖 2.49	設備加速度歷時比較(El Centro , PFA=1.0g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ )	.....	118
圖 2.50	隔震平台位移歷時比較(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ )	.....	119
圖 2.51	隔震平台位移歷時比較(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ )	.....	119
圖 2.52	FPS 遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ )	.....	120
圖 2.53	FPS 遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.5g , $T_S = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ )	.....	120

圖 2.54 設備加速度歷時比較 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ ) .....	121
圖 2.55 設備加速度歷時比較 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ ) .....	121
圖 2.56 隔震平台位移歷時比較 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ ) .....	122
圖 2.57 隔震平台位移歷時比較 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ ) .....	122
圖 2.58 FPS 遲滯迴圈 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = 0.03$ ) .....	123
圖 2.59 FPS 遲滯迴圈 (TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W=3\text{ton}$ , $\mu=0.1$ , $\psi = -0.03$ ) .....	123
圖 3.1 隔震平台加裝油壓阻尼器分析模型 .....	124
圖 3.2 阻尼力與速度之關係圖 .....	124
圖 3.3 剪力平衡-速度迭代法則解析流程圖 .....	125
圖 3.4 設備加速度歷時反應比較 (El Centro , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	126
圖 3.5 隔震平台位移歷時反應 (El Centro , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	126
圖 3.6 油壓阻尼器遲滯迴圈 (El Centro , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	127
圖 3.7 FPS 遲滯迴圈 (El Centro , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	127
圖 3.8 系統能量累積 (El Centro , PFA=0.5g , $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	128

圖 3.9 設備加速度歷時反應比較(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	128
圖 3.10 隔震平台位移歷時反應(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	129
圖 3.11 油壓阻尼器遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	129
圖 3.12 FPS 遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	130
圖 3.13 系統能量累積(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.3\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	130
圖 3.14 設備加速度歷時反應比較(El Centro, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	131
圖 3.15 隔震平台位移歷時反應(El Centro, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	131
圖 3.16 油壓阻尼器遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	132
圖 3.17 FPS 遲滯迴圈 (El Centro, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	132
圖 3.18 系統能量累積(El Centro, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	133
圖 3.19 設備加速度歷時反應比較(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	133
圖 3.20 隔震平台位移歷時反應圖(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , $W = 3\text{ton}$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ).....	134
圖 3.21 油壓阻尼器遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g, $T_s = 0.7\text{sec}$ , $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,	

$W = 3ton$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf } / (m / \text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	134
圖 3.22 隔震器遲滯迴圈(TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $W = 3ton$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf } / (m / \text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	135
圖 3.23 系統能量累積(TCU017 , PFA=0.5g , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $W = 3ton$ , $\mu = 0.1$ , $c_d = 500 \text{ kgf } / (m / \text{sec})^{0.5}$ , $\alpha = 0.5$ ) .....	135
圖 3.24 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.3$ , $W = 3ton$ ) .....	136
圖 3.25 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.5$ , $W = 3ton$ ) .....	137
圖 3.26 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 1$ , $W = 3ton$ ) .....	138
圖 3.27 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.3$ , $W = 3ton$ ) .....	139
圖 3.28 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.5$ , $W = 3ton$ ) .....	140
圖 3.29 設備反應峰值比較(El Centro , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 1$ , $W = 3ton$ ) .....	141
圖 3.30 設備反應峰值比較 (TCU017 , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.3$ , $W = 3ton$ ) .....	142
圖 3.31 設備反應峰值比較(TCU017 , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.5$ , $W = 3ton$ ) .....	143
圖 3.32 設備反應峰值比較圖(TCU017 , $T_s = 0.3 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 1$ , $W = 3ton$ ) .....	144
圖 3.33 設備反應峰值比較(TCU017 , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.3$ , $W = 3ton$ ) .....	145

圖 3.34 設備反應峰值比較(TCU017 , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 0.5$ , $W = 3 \text{ ton}$ ) .....	146
圖 3.35 設備反應峰值比較(TCU017 , $T_s = 0.7 \text{ sec}$ , $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ , $\mu = 0.1$ , $\alpha = 1$ , $W = 3 \text{ ton}$ ) .....	147
圖 4.1 15 噸 MTS 動態制動器(Model 244.23s) .....	148
圖 4.2 地震模擬裝置-振動桌系統 .....	148
圖 4.3 1.5 噸油壓致動器 .....	149
圖 4.4 隔震器組裝完成圖 .....	149
圖 4.5 摩擦單擺支承凹面板 .....	149
圖 4.6 披覆鐵弗龍材料的摩擦子及基座 .....	150
圖 4.7 設備隔震測試模型 .....	150
圖 4.8 El Centro 地震歷時與頻譜反應 .....	150
圖 4.9 Kobe 地震歷時 .....	151
圖 4.10 TCU017 地震歷時 .....	151
圖 4.11 隔震平台加速度歷時(El Centro , PFA=0.59g, w=2.1ton) .....	152
圖 4.12 隔震平台位移歷時(El Centro , PFA=0.59g, w=2.1ton) .....	152
圖 4.13 隔震平台遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.59g, w=2.1ton) .....	153
圖 4.14 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(El Centro) .....	153
圖 4.15 隔震平台加速度歷時(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton) .....	154
圖 4.16 隔震平台位移歷時(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton) .....	154
圖 4.17 隔震平台遲滯迴圈(Kobe , PFA=0.59g, w=2.1ton) .....	155
圖 4.18 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(Kobe) .....	155
圖 4.19 隔震平台加速度歷時(TCU017 , PFA=0.27g, w=2.1ton) .....	156

圖 4.20 隔震平台位移歷時(Kobe , PFA=0.27g, w=2.1ton) .....	156
圖 4.21 隔震平台遲滯迴圈(Kobe , PFA=0.27g, w=2.1ton) .....	157
圖 4.22 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(TCU017) .....	157
圖 4.23 隔震平台歷時反應模擬(El Centro , PFA=0.59g, w=2.1ton) ....	158
圖 4.24 隔震平台遲滯迴圈模擬(El Centro , PFA=0.59g, w=2.1ton).....	158
圖 4.25 隔震平台歷時反應模擬(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton) .....	159
圖 4.26 隔震平台遲滯迴圈模擬(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton) .....	159
圖 4.27 隔震平台歷時反應模擬(TCU017 , PFA=0.17g, w=2.1ton) .....	160
圖 4.28 隔震平台遲滯迴圈模擬(TCU017 , PFA=0.17g, w=2.1ton) .....	160
圖 4.29 振動台試驗後隔震器外觀.....	161
圖 4.30 設備隔震加裝油壓緩衝器試驗組裝.....	161
圖 4.31 油壓緩衝器構造圖 .....	162
圖 4.32 油壓緩衝器元件測試組裝.....	162
圖 4.33 不同頻率下之簡谐波位移歷時 .....	163
圖 4.34 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較 (0.1Hz , $V_{\max} = 0.019m/sec$ ).....	164
圖 4.35 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較 (0.5Hz , $V_{\max} = 0.094m/sec$ ).....	164
圖 4.36 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較 (1Hz , $V_{\max} = 0.188m/sec$ ) .....	165
圖 4.37 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較 (1.5Hz , $V_{\max} = 0.283m/sec$ ).....	165
圖 4.38 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較 (2Hz , $V_{\max} = 0.377m/sec$ ) .....	

.....	166
圖 4.39 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(El Centro, PFA=0.54g, w=2.1ton).....	166
圖 4.40 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(El Centro, PFA=0.54g, w=2.1ton).....	167
圖 4.41 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.54g, w=2.1ton).....	167
圖 4.42 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(El Centro).....	168
圖 4.43 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(Kobe, PFA=0.64g, w=2.1ton).....	168
圖 4.44 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(Kobe, PGA=0.64g, w=2.1ton).....	169
圖 4.45 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(Kobe, PFA=0.64g, w=2.1ton).....	169
圖 4.46 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(Kobe).....	170
圖 4.47 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton).....	170
圖 4.48 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton).....	171
圖 4.49 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton).....	171
圖 4.50 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(TCU017)	172
圖 4.51 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(El Centro, w=2.1ton).....	172

圖 4.52 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(Kobe, $w=2.1\text{ton}$ ) ...	172
圖 4.53 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(TCU017, $w=2.1\text{ton}$ ) .	173
圖 4.54 振動台試驗後隔震器外觀.....	173
圖 5.1 高科技廠房樓版平面尺寸圖.....	174
圖 5.2 樓版區域畫分.....	174
圖 5.3 SAP2000 程式梁尺寸設定.....	175
圖 5.4 SAP2000 程式柱尺寸設定.....	175
圖 5.5 SAP2000 程式樓版尺寸設定.....	176
圖 5.6 SAP2000 程式模型建立.....	176
圖 5.7 模擬衝擊力.....	177
圖 5.8 Nikon 微影掃描機之 Accelerance 反應規格.....	177
圖 5.9 Nikon 微影掃描機之動態剛度規格.....	178
圖 5.10 區域 I 樓版加速度歷時圖.....	178
圖 5.11 區域 II 樓版加速度歷時圖.....	179
圖 5.12 區域 IV 樓版加速度歷時圖.....	179
圖 5.13 區域 V 樓版加速度歷時圖.....	180
圖 5.14 區域 I 樓版 Accelerance 反應.....	180
圖 5.15 區域 II 樓版 Accelerance 反應.....	181
圖 5.16 區域 IV 樓版 Accelerance 反應.....	181
圖 5.17 區域 V 版 Accelerance 反應.....	182
圖 5.18 區域 I 樓版動態反應.....	182
圖 5.19 區域 II 樓版動態反應.....	183

圖 5.20 區域 IV 樓版動態反應 .....	183
圖 5.21 區域 V 樓版動態反應 .....	184
圖 5.22 高科技廠房 6 跨模型 .....	184
圖 5.23 高科技廠房 9 跨模型 .....	185
圖 5.24 不同結構跨數下區域 I 之 Accelerance 比較 .....	185
圖 5.25 不同結構跨數下區域 II 之 Accelerance 比較 .....	186
圖 5.26 不同結構跨數下區域 IV 之 Accelerance 比較 .....	186
圖 5.27 不同結構跨數下區域 V 之 Accelerance 比較 .....	187
圖 5.28 不同結構跨數下區域 I 之動態剛度比較 .....	187
圖 5.29 不同結構跨數下區域 II 之動態剛度比較 .....	188
圖 5.30 不同結構跨數下區域 IV 之動態剛度比較 .....	188
圖 5.31 不同結構跨數下區域 V 之動態剛度比較 .....	189
圖 5.32 不同樓版厚度下區域 I 之 Accelerance 比較 .....	189
圖 5.33 不同樓版厚度下區域 II 之 Accelerance 比較 .....	190
圖 5.34 不同樓版厚度下區域 IV 之 Accelerance 比較 .....	190
圖 5.35 不同樓版厚度下區域 V 之 Accelerance 比較 .....	191
圖 5.36 不同樓版厚度下區域 I 之動態剛度比較 .....	191
圖 5.37 不同樓版厚度下區域 II 之動態剛度比較 .....	192
圖 5.38 不同樓版厚度下區域 IV 之動態剛度比較 .....	192
圖 5.39 不同樓版厚度下區域 V 之動態剛度比較 .....	193
圖 5.40 不同梁尺寸下區域 I 之 Accelerance 比較 .....	193
圖 5.41 不同梁尺寸下區域 II 之 Accelerance 比較 .....	194

圖 5.42 不同梁尺寸下區域 IV 之 Accelerance 比較 .....	194
圖 5.43 不同梁尺寸下區域 V 之 Accelerance 比較.....	195
圖 5.44 不同梁尺寸下區域 I 之動態剛度比較.....	195
圖 5.45 不同梁尺寸下區域 II 之動態剛度比較 .....	196
圖 5.46 不同梁尺寸下區域 IV 之動態剛度比較 .....	196
圖 5.47 不同梁尺寸下區域 V 之動態剛度比較.....	197
圖 5.48 樓版採用鋁桁架進行整體補強之模擬 .....	197
圖 5.49 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較 ..	198
圖 5.50 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較..	198
圖 5.51 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較 .	199
圖 5.52 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較 ..	199
圖 5.53 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較 .....	200
圖 5.54 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較.....	200
圖 5.55 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較.....	201
圖 5.56 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較 .....	201
圖 5.57 樓版採用鋁桁架進行整體補強之模型.....	202
圖 5.58 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較 .	202
圖 5.59 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較 ..	203
圖 5.60 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較	203
圖 5.61 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較	204
圖 5.62 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較 .....	204
圖 5.63 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較 .....	205

圖 5.64 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較..... 205

圖 5.65 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較..... 206



# 第一章 前言

## 1.1 研究動機與目的

台灣位於環太平洋地震帶，地處呂宋弧與琉球弧交界，由於菲律賓海板塊不斷擠壓歐亞大陸板塊因而造成台灣陸地的形成，屬於典型板塊碰撞下所產生之大陸邊緣島嶼[1]。其造陸運動截至目前為止仍持續的進行中，因此也促使台灣平均每年超過四千個大小不同的地震，其中有感地達到二百餘個。根據台灣地區斷層調查結果顯示[2]，國內北、中、南部科學園區附近或工業園區皆存在有第一類活斷層、第二類活斷層或尚無法確定之存疑性斷層，目前為止已證實新竹科學園區附近的新城斷層與南部科學園區附近的新化斷層屬於第一類活斷層，此發現對於具精密製程的高科技業者而言，其潛在的震害風險實不可輕視。

往往地震危害區域的建築設計主要鎖定在建築結構物的耐震性上，而忽略結構體內部非結構物或設備的防震考量。當地震發生時即使結構安全無慮，建築物內之非結構物或設備卻仍可能遭受嚴重損害，此一問題尤以高科技產業為甚。根據調查報告顯示[3]，儘管新竹科學園區在九二一地震(1999)及三三一地震(2002)所受到之地震強度並不大，但業者仍蒙受大量之半成品、設備及營運中斷等損失，其中又以半導體產業所遭受之損害最為嚴重。高科技業者在九二一地震中損失慘重，初估新竹科學園區損失金額即高達 110 億，而三三一地震中亦有數十億之譜[4]。過去科技業者主要仰賴保險來防範震害損失，以分散營運風險，估計超過 80% 以上的損失均可獲得保險公司理賠。惟經歷九二一震害的經驗，保險業者損失慘重，亦體認到高科技業者極度缺乏震害防治的意識，基於承保風險的考量，保險公司乃要求科技業者提升自身的防震措施，同時亦增加保費及保險自負額度，否則不予承保。面對此一轉變，高科技業者已無法再迴避做好自身的防震措施，不得不落實震害防制的工作(包括廠房結構與設備機台的防震措

施)，降低企業經營的風險，提升其競爭力[5]。

九二一地震的相關調查報告顯示，新竹科學園區所量測到之最大加速度約為 100~140gal 左右。由於震度不大，廠房結構在此一地震強度下並未傳出重大災情或損壞，但樓板加速度反應隨著樓層高度而放大的結果，導致精密製程機台普遍產生破壞。製程設備的震害模式，初步可分為設備機台之移位或碰撞、設備機台之傾覆、敏感性精密元件之破裂、設備支撐柱腳之破壞等四大類[6]，茲述如下：

一、設備機台移位或碰撞：一般而言，生產區內較低矮的設備機台在裝機時並無特別的防震加固，僅以自由站立的方式安置機台。遇強震時，設備機台往往容易產生相對的位移，而發生相互碰撞的問題，嚴重者甚至會扯斷供應物料的管線，造成有毒氣體外洩或火災等公安事故。圖 1.1 為典型的機台破壞情形[7]。

二、設備機台之傾覆：不同幾何型態的設備機台在地震下會有不同的破壞模式，對於低矮設備機台而言，較容易造成移位碰撞的震害模式；對於高寬比較大或重心較高的設備機台而言，則較容易發生晃動或傾覆等類型的震害(破壞模型如圖 1.2 所示)。

三、敏感性精密元件之破裂：對於特殊製程之機台而言，其內部可能包含脆弱且難以防護的特殊元件，地震時，機台外表無損壞之跡象，但內部精密元件卻已遭受破壞。高科技產業的離子植入機(Implanter)內作為絕緣用途的礙子(Insulator)或爐管(Furnace)中的石英晶舟(boat)，這些脆弱且易破壞的元件常是造成半導體業震害損失的主要來源。以 Furnace 機台為例，其最常見的情況為晶舟傾倒撞擊石英內管而產生破壞(如圖 1.3 所示)。

四、設備支撐柱腳之破壞：在經歷九二一大地震所造成設備機台的嚴重毀損經驗，產險公司已意識到高科技業者對設備機台在防震上的脆弱性，紛紛要求其產險客戶做好機台的防震補強工作，否則不予承保。多數廠商皆已陸續進行機台設備加固補強工程，惟已進行的設備加固

設計與高架支承補強設計，大部分的防震固定器之設計仍有瑕疵。以圖 1.4 為例，當設備機台依強度設計增設固定器時，雖然可有效抑制機台的位移，但由於固定器設計淨高過低，會造成與固定器同高處的設備柱腳極大的彎矩，機台柱腳所提供的彎矩與剪力容量不足，進而導致設備柱腳發生剪斷或撓曲破壞。

目前有關製程設備的防震加固(seismic anchorage)設計，主要是參考 UBC97 及 IBC2000 的規範決定設備所受地震力大小，再進行加固扣件的設計，亦即進行強度設計。對衝擊不敏感(shock-insensitive)之設備機台，UBS97 或 IBC2000 條文的精神或許適用，卻未必適用於對振動十分敏感的半導體或微電子製程設備。強度設計或能確保設備不產生移位或傾倒，卻無法保證設備內部構件不因振動加速度過大而發生破壞，石英爐管或離子植入機的破壞即屬於此類情況。因此，若設備內部構件之耐震力相對脆弱，不宜採用強度設計，應採用功能設計，而功能設計應以設備容許之振動加速度為設計目標[8,9]。

隔震技術[10~16]用在結構防震工業已行之有年，其目的主要為延長結構週期，以隔絕地震力的作用，有效提升結構的耐震能力，達到功能設計的目標。目前發展較成熟的隔震系統中，包括鉛心橡膠支承(LRB)、高阻尼橡膠支承與摩擦單擺支承(FPS)。儘管這些隔震系統都具備延長週期的功能，其力學特性上仍有些許差異。這些差異對於一般的建築結構或許影響不大，但對於振動敏感度極高的高科技廠房或設備影響則至為關鍵。鉛心橡膠支承之受力與變形關係可用雙線性模式描述，如圖 1.5 之遲滯迴圈所示。隔震系統在初始受力階段呈線彈性行為，直到鉛心降伏後，橡膠支承之剛度驟減才開始發揮隔震作用，並消散地震能量。儘管受力之初，鉛心橡膠支承的剛度較大，其振動、變形仍與外來擾動力之振幅成正比，因此容易受到環境微動的干擾，如果發生共振情況將更糟。摩擦單擺支承則不同，其受力與位移的關係如圖 1.6 之遲滯迴圈所示。由於摩擦力之故，結構在初始受力階段並不產生滑動，直到擾動力克服隔震系統的靜摩擦力

後，結構才開始滑動，改變週期、發揮作用。一般環境擾動力並無足夠的能量超過摩擦力，故不足以撼動設備。隔震機制只在地震發生時才被觸發，此一力學特性使其更符合精密設備的設計需求。

對於耐震力特別脆弱的製程設備，如石英爐管或離子植入機...等，亦可考慮在其基座與高架地板之間隔震，或於防振桌與樓板之間隔震。設備的振動行為與基座介面的處理方式有關：若採用固定方式(強度設計)則樓板的加速度將上傳至設備，產生劇烈振動，可能造成內部構件的鬆脫、易位，甚至傾倒、斷裂，而一旦地震超過設計值，還會造成防震扣件甚至高架地板的破壞，如圖 1.7 所示；若其基座採用隔震方式(如圖 1.8 所示)，則地震力在經過隔震介面時多已被濾掉雖然隔震層會有較大的位移，但不影響設備之定位(設備本身無相對位移)，振動加速度會大幅折減，因而能夠保護其內部構件。儘管隔震措施有其優點，在系統選擇與設計上仍須滿足下列條件[8,17]：

- 
1. 不能放大微振動量：不可因防震措施而產生微振動過大的副作用，影響日常生產良率，因此滑動支承優於橡膠支承；
  2. 須能在任意方向運動：地震來襲時之方向不定，隔震系統必須能在平面上任意方向運動；
  3. 須有自動歸位的能力：地震過後隔震系統不能有過大的殘留位移，故滑動介面應為曲面，使其具備自動歸位的機制；
  4. 須有防落安全機制：避免地震過程中隔震支承之位移過大而翻落，隔震系統須包含不妨礙隔震功能之緩衝裝置以控制位移量，作為防落裝置；
  5. 須免維護：隔震系統(含防落裝置)應避免使用機構複雜、會產生粉塵或油漬的元件，以免干擾生產作業；
  6. 須考慮管線系統的配套設計：由於設備在隔震後會有較大的位移，為避免管線因拉扯而破壞，進出隔震設備之所有管線或其接頭須能

承受預期的位移或變形量。

7. 須進行耐震性能測試(seismic performance)：隔震系統應經過嚴格的地震模擬試驗加以驗證，確認其功能後才能進行安裝。

進行廠房製程設備防震功能設計，不能不兼顧微振動控制的問題，畢竟致災性地震偶而才發生，微振動的影響卻與每日生產良率息息相關。基於經濟效益之考量，晶圓代工業者已逐漸將重心由 8 吋晶圓移往 12 吋晶圓之生產，以增加每片晶圓所能生產之晶片數量。將既有之 6 吋及 8 吋晶圓廠經過結構補強提升至 12 吋晶圓廠，乃業者節省成本、善用資源之最佳選擇。此外，由於微影(lithography)技術的提昇，促使影像技術快速發展，晶圓的製程微細化技術更是一日千里，目前更邁向奈米(nanometer,  $1nm = 10^{-9}m$ )的新紀元，90 奈米乃至於 65 奈米之製程技術亦將陸續開發出來。然而隨著元件特徵尺寸(元件最小設計尺寸)朝向細微化的發展結果，晶圓生產作業環境必然較以往更為嚴苛，特別是微振動問題[18~22]。國內目前正致力於高速鐵路之興建，其沿途所經之高科技廠房可能受到行車振動干擾而影響生產良率，因此晶圓廠房及其周邊基地之微振動量測與防制問題能否有效解決，將是國內高科技產業維繫競爭優勢的重要關鍵之一[23]。此外，廠房因火災或地震等災害造成結構體不同程度的損害，以致其強度或剛度無法達到作業環境的設計要求時，也必須進行修復補強以恢復其可用性。

振動源基本上可依擾動發生位置區分為內部振源及外部振源兩大類(詳表 1.1)[24]。在內部振動源方面，木村翔與井上勝夫等人[25~27]曾藉由實驗的方式探討樓版在人員步行衝擊力特性所產生之反應，其中對於人員步行產生之衝擊力的歷時波形有詳細的介紹，同時明確說明對於不同速度、頻率及體重對步行衝擊特性之影響。C. Q. Howard and C. H. Hansen [28]用版殼理論模擬格子梁樓版在振動作用下的反應，針對不同樓版厚度、柱勁度及柱跨度等參數作深入探討，其分析對於樓版及梁尺寸採用一等值樓版厚度替代。有關外部振源方面之研究，郭珍祥[29]曾以波動理論

分析探討外在交通所導致土壤與結構體之振動效應，並簡化 Rockwood 所提之典型電子廠房結構模型，進行建築物內部振動分析。渡邊桃子[30]以數值模擬方式，預測下層機械室之機械運轉振動傳遞到無塵室樓版之振動特性。另外，林義祥[31]以快速釋放與強迫振動實驗，求取台積電晶圓六廠之自然週期及阻尼等動力特性，並說明外部振動傳入廠房之衰減率。鍾慶樺[32]以高鐵列車行經高鐵軌道基樁所產生的振動為擾動源，運用 SAP2000 進行台積電晶圓六廠的微振動分析。蔡顯耀[24]經由有限元素軟體 ANSYS 模擬一實際建築物經人員在高架地板上步行所產生之振動量，並發現其所產振動量與鑲版厚度及材料相關性較高。

科技廠房微振動的主要是由環境擾動或機具運轉所致，這些現象隨時都在發生，其振動量比起結構之地震反應要小好幾個位階(order)，對設備或製程之影響範圍則屬寬頻(wideband)，其上限可達 80Hz 甚至更高；結構體在環境微動下的行為主要反應於結構之局部振態(local modes)，如樓版或格子梁之振態，其振動頻率較整體結構之振動頻率高，一般在 20Hz 以上。由於廠房擾動源甚多，且擾動函數及位置很難清楚定義，因此廠房樓版的微振動反應很難由數值模擬分析得到可靠的預測[19]。精密製程設備常以樓版動態剛度等定性規格目標作為對樓版微振動的要求，如 CANON 微影設備(scanner)之動態剛度規格要求(如圖 1.9 所示)。因此，高科技廠房的樓版設計定性考量及經驗的重要性要超過定量分析的結果。

## 1.2 本文內容

本文將針對設備震害防制及樓版剛性補強進行研究。第二章中將建立設備採用摩擦單擺支承隔震的運動分析模式，並透過參數研究來決定其最佳設計參數。第三章則進行摩擦單擺支承隔震加裝油壓阻尼器的動力行為分析，並藉由參數研究探討油壓阻尼器用於隔震的可行性。第四章則進行

一系列設備隔震振動台測試，透過實驗的地震震波驗證摩擦單擺支承隔震之有效性。第五章將利用 **SAP2000** 程式建立高科技廠房樓版模型，且藉由改變不同結構構件尺寸探討樓版動態剛度的趨勢，並進一步探討鋁桁架運用於樓版剛性補強的可行性。第六章為結論與建議。



## 第二章 隔震設備之動力分析

由於初步研究發現試驗量測之隔震平台位移歷時與分析結果有明顯之偏移(off-set)，判斷應為基座並非理想之水平面所致。因此本章中將考慮隔震設備在基座有傾斜狀況下之動態反應。由於滑動式隔震支承之行為具高度非線性，需利用精確之數值方法分析才能準確掌握其動力行為。Mostaghel[33]等人以不同的統御方程分別考慮基礎在滑動與靜止時的動力行為；Yang 等人則藉由指定不同勁度值之虛擬彈簧(fictitious spring)而得近似解。Wang 和 Liu[34]提出剪力平衡法(Shear Balance Method)解析高樓滑動結構的地震行為，此法大幅改善非線性動力分析之效率；葉[35]更將其擴展為雙軸剪力平衡法(Bi-axial Shear Balance Method)，以模擬滑動隔震立體構架之平面運動。摩擦單擺支承系統之分析模型及其運動行為如圖 2.1、2.2 所示。本研究將根據 Wang[33,36~41]等人所提出之改良式剪力平衡法(Improved Shear Balance Method)求解滑動隔震設備之動力反應。

### 2.1 隔震設備之動力分析模型建立

採用摩擦單擺支承進行設備隔震，其基座有傾斜角( $\psi$ )的情況(如圖 2.1(a)所示)，當受水平地震力作用下，其自由體圖如圖 2.1(b)所示。一般而言，貴重設備之質量遠小於結構質量，故兩者間動力互制效應相當小，因此分析時可單獨考慮設備之減震效益而不再考慮設備與結構之間的互制效應。吾人可透過拉格朗治方程式(Lagrange's equation) [42]建立隔震設備之運動方程式。拉格朗治方程式可表示如下：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) = Q \quad (2.1)$$

其中

$T$  為整體系統之動能;

$V$  為整體系統之位能;

$x$ ,  $\dot{x}$  分別為隔震平台的位移與速度(相對於基座);

$Q$  為系統之非保守力;

吾人首先計算整體系統之動能( $T$ )與位能( $V$ ), 可分別表示為

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x} + \dot{x}_f \cos \psi)^2 \quad (2.2)$$

$$V = mgR(1 - \cos \theta) - mgx \sin \psi \cong \frac{1}{2} \frac{mg}{R} x^2 - mgx \sin \psi \quad (2.3)$$

其中

$m$  為整體系統之總質量;

$\dot{x}_f$  為樓板運動速度;

$\psi$  為樓板傾斜角;

$R$  為 FPS 曲率半徑;

$g$  為重力加速度;

$\theta$  為隔震設備以 FPS 滑動曲面之曲率中心為軸之滑動角度。若  $\theta \leq 0.2$  時, 則  $\sin \theta \cong \theta = \frac{x}{R}$ ;

此外, 系統所產生之非保守力為隔震層界面的摩擦力( $F$ )。將式(2.2)、(2.3)及非保守力代入拉格朗治方程式, 吾人可得整體系統之運動方程式, 即

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_f(t) \cos \psi + mg \sin \psi + F(t) \quad (2.4)$$

其中

$$k = \frac{mg}{R} \text{ 為系統勁度;}$$

$F(t)$  為摩擦力，其細節於下節中說明。

## 2.2 摩擦機制

對於曲率半徑無限大之滑動式隔震系統，其所傳遞至上部設備之地震力不會超過滑動界面間的最大摩擦力，因此，隔震支承滑動界面間之摩擦力將決定隔震平台之觸發地震力。考慮設備在傾斜基座加裝隔震器時，摩擦力大小會隨隔震層處於不同狀況而有所不同，當隔震層處於滑動狀態時

$$F = \mu(mg \cos \psi - m\ddot{x}_f \sin \psi) \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (2.5)$$

其中

$\mu$  為摩擦係數；

$\operatorname{sgn}$  為方向函數；

而當隔震層處於停滯狀態時

$$|F| < \mu(mg \cos \psi - m\ddot{x}_f \sin \psi) \quad (2.6a)$$

且

$$\dot{x}(t) = 0 \quad (2.6b)$$

由式(2.5)得知，上傳至設備的地震力與摩擦係數、設備重量、樓板加速度及樓板傾斜角相關。Mokha 與 Constantinou[43]以滑動速度、滑動加速度、承壓應力、材料種類...等，作為影響摩擦力的可能因素，完成一系

列有關鐵氟龍與鋼為摩擦界面的試驗。由實驗結果得知，當滑動速度增加時，摩擦係數亦會隨之增加；而當鐵氟龍承載應力增加時，摩擦係數則隨之下降。其將所得實驗數據建立一摩擦係數之經驗公式

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min})e^{-a|\dot{x}|} \quad (2.7)$$

其中

$\mu_{\max}$  為最大動摩擦係數；

$\mu_{\min}$  為最小動摩擦係數；

$a$  為支承壓力之函數；

$\dot{x}$  為滑動界面相對運動速度。

圖 2.3 為曲率半徑無限大之滑動支承在不同支承壓力函數下摩擦係數隨滑動速度之變化率，結果顯示，當滑動速度較小時，摩擦係數變化較大，而當滑動速度愈大時，摩擦係數會趨近於最大摩擦係數( $\mu \cong \mu_{\max}$ )。而傳統的庫倫模式，則是假設摩擦係數並不會隨著速度改變而為一定值(如圖 2.4 所示)，本研究對於摩擦單擺支承之摩擦機制將考慮採用較為簡單的庫倫模式，即  $\mu = \mu_s = \mu_k$  進行分析。

## 2.3 數值方法解析

### 2.3.1 狀態空間法

採用逐步積分法可以有效地分析結構之地震行為，常見的有 Newmark 法及狀態空間法(Space State Process, SSP) [44,45]等方法。Newmark 法的基本假設為地表加速度在取樣區間為線性變化，且結構的加速度反應在積分區間亦呈現線性變化，因此所選擇之取樣週期(sampling period)不宜

太大以確保分析結果的穩定性與精確性；而狀態空間法僅假設地表加速度在取樣區間為線性變化，並不會扭曲結構系統的動力特性，故其精確度較 Newmark 法高。本研究將採用狀態空間法進行隔震設備之動力分析。首先，吾人將位形空間的運動方程式(2.4)以狀態空間表示，即

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}^* F(t) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(t) \cos \psi + \mathbf{U}^* g \sin \psi \quad (2.8)$$

其中

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之狀態向量；}$$

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 2 \text{ 之系統矩陣；}$$

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之摩擦力分配矩陣；}$$

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之地震力分配矩陣；}$$

$$\mathbf{U}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之自重作用力分配矩陣；}$$



對式(2.8)取拉普拉氏轉換(Laplace transform)可得

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{z}(t_0) + \mathbf{H}(s)\mathbf{G}(s) \quad (2.9)$$

其中

$$\mathbf{H}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \quad (2.9a)$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{B}^* F(s) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(s) \cos \psi + \mathbf{U}^* g \sin \psi \quad (2.9b)$$

$\mathbf{z}(t_0)$  表示初始條件

動力系統式(2.8)之解可由式(2.9)式取拉氏逆轉換至時域而得

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}^*(t-t_0)}\mathbf{z}(t_0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}^*(t-\tau)} \left[ \mathbf{B}^* F(\tau) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(\tau) \cos \psi + \mathbf{U}^* g \sin \psi \right] d\tau \quad (2.10)$$

式(2.10)中之積分式欲展開時， $F(\tau)$ 、 $\ddot{x}_f(\tau)$ 在取樣週期內之連續函數須為已知。由於地震記錄通常為離散型態且摩擦力呈片段線性(**piecewise linear**)，因此若假設載重函數在兩連續取樣瞬間為線性變化應屬合理。今取 $t_0 = (k-1)\Delta t$ ， $t = k\Delta t$ 及 $\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$ ， $F[k] = F(k\Delta t)$ 及 $\ddot{x}_f[k] = \ddot{x}_f(k\Delta t)$ 時，則

$$F(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} F[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} F[k\Delta t], \quad (k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t \quad (2.11a)$$

$$\ddot{x}_f(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} \ddot{x}_f[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} \ddot{x}_f[k\Delta t], \quad (k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t \quad (2.11b)$$

狀態方程式(2.9)之解析解可由式(2.10)及式(2.11)之差分方程式表示為

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{B}_0 F[k-1] + \mathbf{B}_1 F[k] + \mathbf{E}_0 \ddot{x}_f[k-1] \cos \psi + \mathbf{E}_1 \ddot{x}_f[k] \cos \psi + \mathbf{U}g \sin \psi \quad (2.12)$$

其中

$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}^* \Delta t}$  為 $2 \times 2$ 之離散時間系統矩陣；

$$\mathbf{B}_0 = \left[ (\mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right] \mathbf{B}^*$$

為 $2 \times 1$ 之前瞬時離散時間摩擦力分配矩陣；

$$\mathbf{B}_1 = \left[ -(\mathbf{A}^*)^{-1} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right] \mathbf{B}^*$$

為 $2 \times 1$ 之後瞬時離散時間摩擦力分配矩陣；

$$\mathbf{E}_0 = \left[ (\mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right] \mathbf{E}^*$$

為 $2 \times 1$ 之前瞬時離散時間地震力分配矩陣；

$$\mathbf{E}_1 = \left[ -(\mathbf{A}^*)^{-1} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right] \mathbf{E}^*$$

為 $2 \times 1$ 之後瞬時離散時間地震力分配矩陣；

$$\mathbf{U} = [(\mathbf{A}^*)^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{I})] \mathbf{U}^*$$

為 $2 \times 1$ 之瞬時離散時間自重作用力分配矩陣；

式(2.12)中之 $F[k]$ 為高度非線性之未知數，因此無法直接求解。一般而言，其求解過程僅能透過迭代方式求得其近似解。本研究將引入解析效率與精度較高之剪力平衡法來求取摩擦力，其解析法則將於下一節中介紹。

### 2.3.2 剪力平衡法

在地震力作用下，滑動隔震設備之運動行為可分為停滯(stick)與滑動(slip)兩種狀態。其整個系統之運動狀態可區分為下列四種模式，即

- (1) 停滯狀態：隔震平台上部設備如同固定於樓地板上，此時因地震所引致的支承剪力尚未達到界面間的最大摩擦力，滑動界面之相對速度為零。
- (2) 停滯到滑動：當隔震平台的支承剪力達到滑動界面之最大摩擦力時，隔震平台之滑動介面將開始產生滑動。
- (3) 滑動狀態：此階段由地震力所引致，支承剪力恆等於滑動界面的最大摩擦力，摩擦力作用方向與支承面運動方向相反。
- (4) 滑動到靜止：當支承剪力小於滑動界面之最大摩擦力時，隔震平台滑動支承將停止滑動，此時其相對滑動速度又轉變為零。

由上所敘述的滑動隔震設備之運動行為中，吾人可利用支承剪力與滑動摩擦界面之相對速度作為判定其運動狀態的指標。無論設備處於滑動或靜止狀態，其系統仍須保持力平衡之關係，此一概念即剪力平衡法之依據。當支承處於滑動狀態時，其摩擦力可由式(2.5)定義之，此狀態下之摩擦力為定值且為已知，隔震設備之地震反應可由式(2.12)之差分方程式求解；當支承處於停滯狀態時，基底剪力將小於滑動界面的最大摩擦力，如

式(2.6)所示，此時之摩擦力為一未知數，因此，將無法求解設備的受震反應。惟設備在停滯狀態下時，其基層之相對滑動速度將保持為零( $\dot{x}=0$ )，此一額外的條件式，將可作為求解未知的摩擦力，以下將詳細述說其解析法則。

吾人可在每一瞬時分析之初，假設支承處於停滯狀態，此時支承與滑動界面之相對速度為零，可將其表示為

$$\dot{x} = \mathbf{Dz}[k] = 0 \quad (2.13)$$

其中

$\mathbf{D}$  為基層之速度位置向量。

將式(2.13)代入式(2.12)可得預測之支承剪力  $\bar{F}[k]$  為

$$\begin{aligned} \bar{F}[k] = & -(\mathbf{DB}_1)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{Az}[k-1] + \mathbf{B}_0 F[k-1] + \mathbf{E}_0 \ddot{x}_f[k-1]) \cos \psi \\ & + \mathbf{E}_1 \ddot{x}_f[k] \cos \psi + \mathbf{U}g \sin \psi \end{aligned} \quad (2.14)$$

當設備處於停滯狀態時，支承剪力必小於最大摩擦力，其必須滿足式(2.6a)，即當式(2.14)所求得之支承剪力滿足該式(2.6a)時，表示隔震平台處於停滯狀態，此一結果與先前之假設相符，此時所求得之剪力即為正確解，因此令  $F[k] = \bar{F}[k]$  代回式(2.12)即可求得設備之受震反應；當支承剪力不滿足該式(2.6a)時，表示隔震平台已呈現滑動狀態，此時支承剪力應等於滑動界面最大摩擦力，即  $F[k] = \mu (mg \cos \psi - m\ddot{x}_g \sin \psi) \text{sgn}(\bar{F}[k])$ ，再將其代回式(2.12)即可求得設備之受震反應。圖 2.5 為採用剪力平衡法進行動力分析之流程圖。

## 2.4 隔震設備效益評估

### 2.4.1 輸入擾動震波

由於設備本身之剛度非常大，所以進行動力分析時假設其為剛體結構。設備擺放位置往往在結構體內而非地表上，因此在進行非線性隔震動力分析時，其輸入樓板震波之內涵將隱含著地震波以及結構特性。分析時吾人將先以振動週期分別為 0.3sec 及 0.7sec、阻尼比為 3%之單自由度未隔震結構（分別代表短週期與中等週期）模擬設備所在的結構特性，先將震波擾動輸入結構以求得其樓板加速度反應，作為隔震設備的輸入震波。而輸入之地表震波將採用堅硬地盤的 El Centro 地震與 921 集集地震（TCU017 測站）之震波記錄作為輸入擾動。堅硬地盤震波之 El Centro 地震其加速度歷時與反應譜分別如圖 2.6(a)、2.6(b)所示；集集地震 TCU017 之加速度歷時與反應譜分別如圖 2.7(a)、2.7(b)所示。

比較 El Centro 地震與 TCU017 地震之加速度反應譜可清楚發現，TCU017 震波在週期約 2 sec 處有顯著的卓越頻率。隔震設備在短週期(0.3 sec)與中等週期(0.7 sec)之結構歷時分析輸入擾動之加速度歷時及反應譜(正規化至 1g)分別如圖 2.8~2.11 所示。結果顯示，當短週期結構受到堅硬地盤地震時，其振動反應大部分反映出結構之動力特性，然而對於具長周期的地震而言，其振動反應內涵除了呈現結構之自然頻率外，震波的頻率內涵仍佔有相當大的比例。然而當結構週期較長時，結構之振動反應主要反映出結構之特性，地震之頻率內涵反而並不顯著。

### 2.4.2 短週期結構之隔震設備效益評估

設備加裝隔震平台之隔震器係考慮採用摩擦單擺支承，隔震器之曲率半徑取 1m(相對於隔震週期( $T_{FPS}$ )為 2sec)、分析時設備重量( $W$ )為 3ton 及摩擦介面之摩擦係數為 0.1，而輸入設備之樓板加速度峰值(Peak Floor

Acceleration, PFA)正規化至 0.5g 及 1.0g。

## El Centro 地震

在 El Centro 地震擾動下，不同強度之加速度反應如圖 2.12 及 2.13 所示，結果顯示裝置隔震平台之設備加速度反應有十分顯著的減震效益，且地震強度愈大時其減震效益愈明顯，分別為 72%與 79%。觀察隔震平台之滑動位移可發現，在 PFA=0.5g 時，其滑動約為 4cm 左右；當地震強度提升至 PFA=1.0g 時，最大滑動位移約 10cm 左右，仍在合理範圍內，且殘留之位移量並不明顯。隔震平台之遲滯迴圈與滑動位移歷時反應分別如圖 2.14~2.17 所示。

## Chi-Chi 地震(TCU017)



考慮以 Chi-Chi 地震(TCU017)為輸入擾動，圖 2.18 與 2.19 為比較設備隔震前後之加速度歷時反應，結果顯示在 PFA=0.5g 與 1.0g 之強度下，其加速度反應之折減分別為 47%與 21%。其結果與堅硬地盤地震作用下之減震效益有明顯的差異，蓋因 TCU017 測站之地震波在 0.5Hz 附近有一顯著的卓越頻率，與隔震平台的頻率 0.5Hz 相當接近，因而產生共振放大。圖 2.20 與 2.21 分別為 PFA=0.5g 與 PFA=1.0g 之地震強度下隔震平台之滑動位移反應。如預期的，由於共振放大效應，在 PGA=1.0g 時其最大滑動位移高達 60cm 左右。圖 2.22 與 2.23 為摩擦單擺隔震支承遲滯迴圈。

### 2.4.3 中等週期結構之隔震設備效益評估

#### El Centro 地震

考慮在 El Centro 地震作用下，設備隔震前後之加速度反應比較如圖 2.24 與圖 2.25 所示。結果顯示設備經隔震後，加速度反應大幅的折減，在 PFA=0.5g 與 PFA=1.0g 強度下，減震效益仍高達 54% 與 65%，顯示隔震平台可以有效隔絕加速度傳入設備，同時亦具備在短週期結構時的減震特性，即地震強度愈強，減震效益愈佳。圖 2.26~29 分別為隔震平台在不同地震強度下之滑動位移與遲滯迴圈。結果顯示在中等周期結構進行設備隔震時，隔震平台之滑動位移明顯的較在短週期結構時大。在 PFA=1.0g 之強度下，隔震平台最大滑動位移約為 27cm。由上述結果可知，在中等週期結構進行設備隔震時，須預留足夠的隔震縫空間來提供隔震平台受震後之滑動位移使用。



#### Chi-Chi 地震(TCU017)

考慮以 Chi-Chi 地震(TCU017)為輸入擾動，圖 2.30 與 2.31 為設備隔震前後之加速度歷時反應比較，結果顯示在 PFA=0.5g 與 1.0g 之強度下，其加速度反應折減率分別為 31% 與 20%。比較 TCU017 地震與 El Centro 地震之減震效益，可明顯看出二者的差異。蓋因 TCU017 測站之地震波之加速度卓越頻率與隔震平台的頻率接近而產生共振放大之故。圖 2.32~35 為 PFA=0.5g 與 PFA=1.0g 之地震強度下，隔震平台之滑動位移與遲滯迴圈。結果顯示在 PFA=1.0g 之強度下，隔震平台因共振效應，最大滑動位移達到 65cm。

## 2.5 參數研究

本節將針對摩擦單擺支承動力特性參數的變化對減震效益進行深入探討，藉以決定最佳之設計參數。分析時，吾人將針對在不同的地震強度下，變換隔震週期( $T_{FPS}$ )與摩擦係數( $\mu$ )進行比較。

### 2.5.1 El Centro 地震

#### 短週期結構

考慮變化摩擦係數  $\mu=0.05$ 、 $\mu=0.1$  與  $\mu=0.15$  時，觀察隔震平台在堅硬地盤地震的減震效益。圖 2.36 為在不同的輸入擾動強度下(樓板加速度峰值)，加速度反應峰值比(設備加速度/樓板加速度)與隔震平台位移反應峰值的受震反應比較。結果顯示，整體受震反應在地震下皆能有效的獲得控制，特別是在低摩擦係數 ( $\mu=0.05$ ) 的隔震表現，其減震幅度高達 79% (表 2.1)。而當摩擦係數增大時，設備加速度反應峰值亦隨之增加，此一現象為摩擦係數愈大其上傳至設備的地震力亦隨之放大之故。此外，亦可觀察到當輸入擾動愈大時其隔震效益愈加明顯。而比較摩擦單擺支承之滑動位移可知，摩擦係數越大時其滑動位移亦越小，蓋因系統消能能力愈佳之故。當隔震週期延長為 3sec 與 4sec 時，同樣的趨勢亦可由圖 2.37 與 2.38 清楚的觀察到，且當隔震週期愈長時，其隔震效益有明顯的提升。

表 2.1 為不同隔震週期與摩擦係數之條件下，設備加速度反應峰值之比較。結果顯示，當摩擦係數愈小且隔震週期越長時，其隔震效益愈佳。在最極端的例子，若採用摩擦係數為 5% 而隔震週期為 4sec 時，在  $PFA=1.0g$  時其加速度之減震效益高達 92%，而同樣條件若摩擦係數採用 15% 時其減震效益亦可達 83%。表 2.2 為摩擦單擺支承滑動位移峰值比較，結果顯示，在地震強度  $PFA=1.0g$  時，若採用隔震週期 2sec、摩擦係數為 5% 之設計條件，其最大滑動位移約為 17cm；而相同條件若隔震週期

延長為 4 秒時，其最大滑動位移可降至 14cm。若將摩擦係數提高到 15% 時，地震強度在 PFA=1.0g 以內，滑動位移皆可控制在 10cm 之內。

### 中等週期結構

圖 2.39~41 為中等週期結構 ( $T_s=0.7\text{sec}$ ) 之加速度反應峰值比與隔震平台滑動位移反應峰值比較。結果顯示，當隔震週期愈長、摩擦係數愈小時，其減震效益愈佳，此一趨勢與短週期結構的分析結果相符，而比較短週期與中等週期結構之隔震效益可發現，長週期結構之減震效益較短週期結構為差，蓋因震波經結構濾波後放大較低頻的頻率內涵所致。觀察隔震平台滑動位移峰值比較可發現，摩擦係數愈小其滑動位移愈大，當地震強度 PFA=1.0g、隔震週期 2sec 與摩擦係數為 5% 之條件時，最大滑動位移已達 32cm。

表 2.3 與 2.4 分別為不同隔震週期與摩擦係數之條件下，設備加速度反應峰值與隔震平台滑動位移反應峰值之隔震效益評估比較。結果顯示，當摩擦係數愈小且隔震週期越長時，其隔震效益愈佳，此一趨勢亦和短週期結構之反應相同。實務設計時須同時考慮加速度反應與滑動位移，檢核其是否符合設計條件。

## 2.5.2 Chi-Chi 地震(TCU017)

### 短週期結構

考慮摩擦係數  $\mu=0.05$ 、 $\mu=0.1$  與  $\mu=0.15$  時，觀察隔震平台在具長週期之近斷層地震的減震效益。圖 2.42~44 分別為隔震週期為 2sec、3sec 與 4sec 之隔震平台在不同的輸入擾動強度下(樓版加速度峰值, PFA, Peak

Floor Acceleration)，設備加速度峰值比與位移峰值的受震反應比較。結果顯示，由於所採用之近斷層地震 TCU017 在 2sec 附近具顯著週期，因此當地震強度為 PFA=1.0g 時，若隔震平台設計參數之週期採 2sec，摩擦係數為 5% 時，明顯的產生共振放大效應。分析結果如預期的，隔震效益明顯的較堅硬地盤地震為差，然而當摩擦係數與隔震週期增加時，整體受震反應在地震下皆能獲得有效的控制。當隔震週期延長到 3sec 或 4sec、摩擦係數為 10% 時，其隔震效益表現最佳，在不同地震強度下之平均減震幅度均可達 60% 左右（表 2.5）。此外，當地震強度增大時，隔震效益有明顯的提升。

表 2.5 為不同隔震週期與摩擦係數之條件下，設備加速度峰值之隔震效益評估比較。結果顯示，當隔震週期越長且摩擦係數為 10% 時，其隔震效益愈佳。此一結果明顯的不同於先前堅硬地盤地震的受震反應，主要原因為長週期震波經結構傳遞至樓板時，其低頻的振動內涵仍佔有相當的比例，與隔震設備產生共振現象，故在進行設計時需取較大之摩擦係數，以增加隔震平台的消能能力。此外，由表 2.6 摩擦單擺支承滑動位移峰值比較結果顯示，當摩擦係數提升至 15% 時，地震強度 PFA=0.5g 時，滑動位移皆可控制在 10cm 以內。而當地震強度 PFA=1.0g 時，隔震平台之滑動位移皆超過 60cm，顯然過大，需增加額外之消能機制或者其他的防落裝置以提升隔震平台的可靠度。

### 中等週期結構

圖 2.45~47 為中等週期結構 ( $T_s=0.7$  秒) 之加速度峰值比與隔震平台滑動最大位移峰值比較，結果顯示，當隔震週期為 2sec 時，隔震週期與震波週期相互接近因而產生共振放大之情形，使得經隔震後之設備幾乎無減震效益。當隔震週期延長至 3sec 或 4sec 時，其減震效益明顯的提升，且摩擦係數愈大時其減震效益愈佳。觀察隔震平台滑動位移峰值比較可發

現，摩擦係數愈大時其滑動位移愈小，當地震強度  $PFA=1.0g$ 、隔震週期 2 秒與摩擦係數為 5% 之條件時，最大滑動位移已高達 90cm；若採用摩擦係數為 15% 時，滑動位移亦達 60cm，仍明顯的過大。

表 2.7 與 2.8 分別為中等週期結構在不同隔震週期與摩擦係數之條件下，設備加速度峰值與隔震平台滑動位移之隔震效益評估比較。結果顯示，當隔震週期為 2 秒時，摩擦係數愈大其隔震效益愈佳；而當隔震週期遠離此振動週期，則摩擦係數愈小其隔震效益愈佳。比較隔震平台之滑動位移可發現，由於震波週期與隔震週期接近，滑動位移明顯有放大之趨勢，當地震強度  $PFA=0.5g$  且摩擦係數 10% 時，滑動位移約為 25cm；而地震強度  $PFA=1.0g$  在相同條件下，其滑動位移約在 60~70cm 左右，顯然是過大。因此在長週期地震進行設備隔震時，需考慮有額外之消能機制與防落裝置以提升隔震平台之穩定性。



## 2.6 基座傾斜效應評估

本節將探討因基座傾斜對隔震設備動力行為的影響。考慮在週期 0.3 秒的結構上裝置週期 2sec 的隔震器，隔震器摩擦界面的摩擦係數為 0.1，而設備為 3ton 重。輸入地震採用 El Centro 地震及 Chi-Chi 地震(TCU017)。

### 2.6.1 El Centro 地震

圖 2.48 及 2.49 分別為不同地面傾斜角下之隔震設備加速度歷時反應。由圖中可看出，基座傾斜對於加速度反應的影響並不大。表 2.9 為不同樓板加速度及不同基座傾斜角時，設備加速度反應與完全水平( $\psi=0$ )時之隔震設備加速度誤差率。由表中可看出當樓板加速度越大時，基座傾斜對隔震設備加速度的影響越小；另外在較小的地震時，基座傾斜角越大，

上傳至設備的加速度反應越大。圖 2.50 為隔震平台在傾斜角  $\psi = 0.03$  與完全水平 ( $\psi = 0$ ) 的位移歷時反應比較，結果顯示隔震平台在基座傾斜之位移明顯較在完全水平時往正位移方向偏移，且最大位移也增加了 2cm；由圖 2.51 可看出當傾斜轉為負值 ( $\psi = -0.03$ ) 時，隔震平台位移則較地面水平時往負位移方向偏移。茲由基座傾斜下之設備隔震運動方程式(2.4)可知，當地面傾斜轉角為正時設備自重作用分量 ( $mg \sin \psi$ ) 與正位移同向，故對於設備往正方向運動而言形成一推力，因此隔震器位移會較地面水平時往正位移方向偏移；而當地面傾斜轉角為負時，由設備自重作分量所造成的影響則會使隔震器往負位移方向偏移。另由圖 2.50~51 可知由於基座傾斜會使得隔震器的殘留位移變大。圖 2.52 及 2.53 則為其遲滯迴圈圖，其結果顯示隔震設備除了因基座傾斜造成隔震器偏移外，亦造成隔震平台在往復滑動之觸發地震力的不同。

### 2.6.2 Chi-Chi 地震(TCU017)

圖 2.54~55 為在不同傾斜角下，設備隔震加速度與樓板加速度歷時比較，結果顯示在傾斜地面之隔震設備與在水平地面下的加速度差不多。表 2.10 為不同樓板加速度及不同基座傾斜角時，設備加速度反應與完全水平時之隔震設備加速度誤差率。結果顯示，當  $PFA=0.25g$  且  $\psi = 0.1$  時，與完全水平時相較，隔震設備之加速度峰值相差超過 40%；而當  $PFA > 0.4g$  時，其傾斜地面與水平地面的加速度相差皆小於 2%，顯示樓板加速度越大時，傾斜地面對於隔震設備加速度影響越小。圖 2.56~59 為不同傾斜角下之隔震器的位移及遲滯迴圈，其結果清楚顯示隔震平台有偏移的現象，且殘留位移皆較完全水平時來得大。

### 第三章 隔震平台加裝非線性油壓阻尼器之動力分析

為避免隔震設備因位移過大而產生滑落，隔震平台須考慮防落機制 (fail-safe mechanism)。本章將探討隔震平台加裝非線性油壓阻尼器之耐震性能(系統之分析模型如圖 3.1 所示)。同樣利用能量法建立其運動方程式，並經由數值模擬了解隔震平台加裝非線性油壓阻尼器的減震效益。由於滑動界面摩擦力與油壓阻尼器所提供的阻尼力皆屬於高度非線性，因此本文提出剪力平衡-速度迭代法 (Shear Balance – Velocity Iterative Method) 求解此一高度非線性動力系統之行為。有關之摩擦力處理仍採用前一章所介紹之改良式剪力平衡法 (Improved Shear Balance Method)，另外針對速度型油壓阻尼器的部分則增加速度迭代流程 (Velocity Iterative Process) 進行分析。



#### 3.1. 隔震平台加裝非線性油壓阻尼器之動力分析模型

建立隔震平台加裝油壓阻尼器之系統運動方程式時將不計設備與結構之互制作用，以樓板加速度反應作為輸入震波。根據拉格朗治方程式，首先建立整體系統之動能與位能如下：

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x} + \dot{x}_f)^2 \quad (3.1)$$

$$V = mgR(1 - \cos \theta) \cong \frac{1}{2} \frac{mg}{R} x^2 \quad (3.2)$$

其中

$m$  為整體系統之總質量；

$x$ 、 $\dot{x}$  分別為隔震平台之位移與速度(相對於基座)；

$\dot{x}_f$  為樓板運動速度；

$R$  為 FPS 曲率半徑；

$g$  為重力加速度；

$\theta$  為隔震設備以 FPS 滑動曲面之曲率中心為軸之滑動角度。若  $\theta \leq 0.2$

時，則  $\sin \theta \cong \theta = \frac{x}{R}$ 。

另外，此一系統之非保守力包括隔震層界面的摩擦力( $F$ )及油壓阻尼器所產生的油壓阻尼力( $F_d$ )。將式(3.1)、(3.2)及非保守力代入拉格朗治方程式(式(2.1))，可得整體系統之運動方程式如下：

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_f(t) - F_d(t) + F(t) \quad (3.3)$$

其中

$k = \frac{mg}{R}$  為系統勁度；

$F(t)$  為摩擦力；

$F_d(t)$  為油壓阻尼力，其細節於下節中說明。



### 3.2 阻尼器物理特性

本系統採用之油壓阻尼器為速度型元件，其所提供之阻尼力與相對速度及作用方向有關，表示如下：

$$F_d(\dot{x}, t) = c_d |\dot{x}(t)|^\alpha \text{sgn}(\dot{x}(t)) \quad (3.4)$$

其中

$c_d$  為油壓阻尼器之阻尼係數；

$\alpha$  為油壓阻尼器之特性係數；

由式(3.4)可知油壓阻尼力之行為會隨著隔震平台運動狀況不同而有異，當隔震平台處於停滯狀態時，油壓阻尼力出力為零。當 $\alpha=1$ 時，油壓阻尼器之行為屬黏滯阻尼(viscous damping)，其阻尼力可簡化為

$$F_d(t) = c_d \dot{x}(t) \quad (3.5)$$

若 $\alpha \neq 1$ 時，則油壓阻尼器之行為不屬黏滯阻尼。圖 3.2 為不同特性係數下，阻尼力比( $F_d / \bar{F}_d$ ，其中 $\bar{F}_d$ 為速度在 1m/s 下之油壓阻尼力)與速度的關係，由圖中可知當速度小於 1m/s 時，特性係數 $\alpha < 1$ 的油壓阻尼器出力較大；然而當速度大於 1m/s 時，則特性係數 $\alpha > 1$ 的油壓阻尼器出力較大。

### 3.3 數值方法解析



#### 3.3.1 狀態空間法

本文已於前一章對狀態空間法作詳細的介紹，本章仍採用狀態空間法進行解析。隔震平台加裝油壓阻尼器之運動方程式(3.3)以狀態空間表示如下：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}^* F(t) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(t) + \mathbf{G}^* F_d(\dot{\mathbf{z}}, t) \quad (3.6)$$

其中

$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$  為  $2 \times 1$  之狀態向量；

$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix}$  為  $2 \times 2$  之系統矩陣；

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之摩擦力矩陣；}$$

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之地震力分配矩陣；}$$

$$\mathbf{G}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \text{ 為 } 2 \times 1 \text{ 之油壓阻尼力分配矩陣。}$$

在建立其狀態空間方程式後，對式(3.6)進行拉普拉氏轉換(Laplace transform)可得

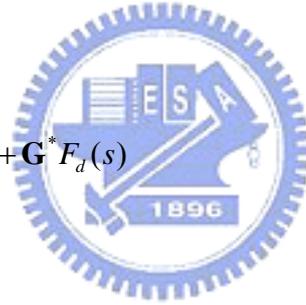
$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{z}(t_0) + \mathbf{H}(s) \left[ \mathbf{B}^* F(s) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(s) + \mathbf{G}^* F_d(s) \right] \quad (3.7)$$

其中

$$\mathbf{H}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \quad (3.7a)$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{B}^* F(s) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(s) + \mathbf{G}^* F_d(s) \quad (3.7b)$$

$\mathbf{z}(t_0)$  表示初始條件。



系統運動方程式(3.6)之解可由式(3.7)式取拉氏逆轉換至時域而得

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}^*(t-t_0)} \mathbf{z}(t_0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}^*(t-\tau)} \left[ \mathbf{B}^* F(\tau) + \mathbf{E}^* \ddot{x}_f(\tau) + \mathbf{G}^* F_d(\tau) \right] d\tau \quad (3.8)$$

式(3.8)中之積分式欲展開時， $F(\tau)$ 、 $\ddot{x}_f(\tau)$ 、 $F_d(\tau)$ 在取樣週期內之連續函數須為已知。吾人假設載重函數在連續取樣瞬間為線性變化。今取  $t_0 = (k-1)\Delta t$ 、 $t = k\Delta t$ 、 $\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$ 、 $F[k] = F(k\Delta t)$ 、 $\ddot{x}_f[k] = \ddot{x}_f(k\Delta t)$  及  $F_d[k] = F_d(k\Delta t)$  時，則

$$F(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} F[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} F[k\Delta t], \quad (k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t \quad (3.9a)$$

$$\ddot{x}_f(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} \ddot{x}_f[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} \ddot{x}_f[k\Delta t], \quad (k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t \quad (3.9b)$$

$$F_d(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} F_d[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} F_d[k\Delta t], \quad (k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t \quad (3.9c)$$

狀態方程式(3.7)之解析解可由式(3.8)及式(3.9)之差分方程式表示為

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{B}_0 F[k-1] + \mathbf{B}_1 F[k] + \mathbf{E}_0 \ddot{x}_f[k-1] + \mathbf{E}_1 \ddot{x}_f[k] + \mathbf{G}_0 F_d[k-1] + \mathbf{G}_1 F_d[k] \quad (3.10)$$

其中

$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}^* \Delta t}$  為  $2 \times 2$  之離散時間系統矩陣；

$$\mathbf{B}_0 = \left[ (\mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right] \mathbf{B}^*$$

為  $2 \times 1$  之前瞬時離散時間摩擦力分配矩陣；

$$\mathbf{B}_1 = \left[ -(\mathbf{A}^*)^{-1} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right] \mathbf{B}^*$$

為  $2 \times 1$  之後瞬時離散時間摩擦力分配矩陣。

$$\mathbf{E}_0 = \left[ (\mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right] \mathbf{E}^*$$

為  $2 \times 1$  之前瞬時離散時間地震力分配矩陣；

$$\mathbf{E}_1 = \left[ -(\mathbf{A}^*)^{-1} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right] \mathbf{E}^*$$

為  $2 \times 1$  之後瞬時離散時間地震力分配矩陣。

$$\mathbf{G}_0 = \left[ (\mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right] \mathbf{G}^*$$

為  $2 \times 1$  之前瞬時離散時間油壓阻尼力分配矩陣；

$$\mathbf{G}_1 = \left[ -(\mathbf{A}^*)^{-1} + \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{A}^*)^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right] \mathbf{G}^*$$

為  $2 \times 1$  之後瞬時離散時間油壓阻尼力分配矩陣。

式(3.10)中之 $F[k]$ 及 $F_d[k]$ 皆屬於高度非線性之未知數，因此無法直接求解。本研究將介紹一套可同時解析高度非線性的摩擦力及油壓阻尼力的方法，吾人稱之為剪力平衡-速度迭代法(Shear Balance – Velocity Iterative Method, SBVIM)，其解析法則將於下一節中介紹。

### 3.3.2 剪力平衡-速度迭代法

當隔震設備在停滯狀態下時，隔震平台基層之相對滑動速度將保持為零( $\dot{x}=0$ )，此時油壓阻尼器所提供的阻尼力為零( $F_d[k]=0$ )，吾人可藉由此額外的條件式以及上一章所提及之剪力平衡法之條件進而求解未知的摩擦力。首先，在每一瞬時分析之初假設支承處於停滯狀態，此時支承與滑動界面之相對速度為零，吾人可透過基層之速度位置向量( $\mathbf{D}$ )將基層速度設為零(如式(2.13))所示，再將式(2.13)代入式(3.10)即可得預測在基層相對滑動速度為零之時，隔震平台之支承剪力 $\bar{F}[k]$ 為

$$\bar{F}[k] = -(\mathbf{DB}_1)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{Az}[k-1] + \mathbf{B}_0 F[k-1] + \mathbf{E}_0 \ddot{x}_f[k-1] + \mathbf{E}_1 \dot{x}_f[k] + \mathbf{G}_0 F_d[k-1]) \quad (3.11)$$

換言之，吾人得到一個滿足基層不產生滑動假設的支承剪力 $\bar{F}[k]$ ，根據摩擦機制原理，當隔震平台處於停滯狀態時，其支承剪力小於最大摩擦力。若 $|\bar{F}[k]| < \mu mg$ 時，即支承剪力仍小於最大摩擦力，表示基層支承此刻處於停滯狀態，與先前的假設相符，同時表示油壓阻尼器所產生的阻尼力為零。此時再將 $F[k] = \bar{F}[k]$ 代回式(3.10)中即可求得正確之設備反應。

若 $|\bar{F}[k]| > \mu mg$ 時，即支承剪力已大於最大摩擦力，表示基層支承此刻並非處於停滯狀態而是處於滑動狀態，與先前之假設不符，由摩擦機制原理可知支承剪力應等於滑動界面之最大摩擦力，即 $F[k] = \mu mg \operatorname{sgn}(\bar{F}[k])$ 。由於基層處於滑動狀態(即有相對速度)，故此刻油壓阻尼力( $\bar{F}_d[k]$ )並不為零，為解得此刻油壓阻尼力大小，令基層此刻之假設速度與前一刻速度相等( $\dot{x}[k] = \dot{x}[k-1]$ )，並將其代回式(3.10)得基層此刻之更新速度( $\dot{x}[k]$ )，吾

人再定義一誤差函數如下

$$ER = \left| \frac{\dot{x}[k] - \dot{x}[k]}{\dot{x}[k]} \right| \quad (3.12)$$

其中

$ER$  為誤差函數；

$\dot{x}[k]$  為此刻假設速度；

$\dot{x}[k]$  為此刻更新速度；

若此誤差函數小於設定之容許誤差值( $\varepsilon$ )，則採用此刻求解速度進行求解下一刻之速度；若誤差函數大於誤差值，即令此刻假設速度與此刻更新速度相等( $\dot{x}[k] = \dot{x}[k]$ )，反覆迭代直到誤差函數小於容許誤差值，最後將其代入式(3.6)求解設備之反應。圖 3.3 為採用剪力平衡-速度迭代法的流程圖。



### 3.4 系統能量計算

為探討隔震平台系統在地震作用下的能量分佈[46]的情形，吾人首先對式(3.3)進行積分，可得

$$\int_0^x m\ddot{x}(t)dx + \int_0^x c\dot{x}(t)dx + \int_0^x kx(t)dx = \int_0^x -m\ddot{x}(t)dx - \int_0^x F_d(t)dx - \int_0^x F(t)dx \quad (3.13)$$

上式左邊第一項為慣性力所作的動能( $E_k$ )，其可表示為

$$\begin{aligned} E_k &= \int_0^x m\ddot{x}(t)dx = \int_0^t m\ddot{x}(t)\dot{x}(t)dt \\ &\cong \sum_{k=1}^n \frac{m}{4} (\dot{x}[k] + \dot{x}[k-1])(\dot{x}[k] + \dot{x}[k-1])\Delta t \end{aligned} \quad (3.14)$$

由油壓阻尼器產生的作功量則可表示為

$$\begin{aligned}
E_d &= \int_0^x F_d(t) dx = \int_0^x c_d |\dot{x}(t)|^\alpha dx = \int_0^t c_d |\dot{x}(t)|^{\alpha+1} dt \\
&\cong \sum_{k=1}^n \frac{c_d}{2} |\dot{x}^{\alpha+1}[k] + \dot{x}^{\alpha+1}[k-1]| \Delta t
\end{aligned} \tag{3.15}$$

由隔震器勁度所提供的位能( $E_s$ )可表示為

$$\begin{aligned}
E_s &= \int_0^x kx(t) dx = \int_0^t kx(t) \dot{x}(t) dt \\
&\cong \sum_{k=1}^n \frac{k}{4} (x[k] + x[k-1])(\dot{x}[k] + \dot{x}[k-1]) \Delta t
\end{aligned} \tag{3.16}$$

式(3.13)右邊第一項為地震力輸入隔震系統的總能量，其可用離散時間表示為

$$\begin{aligned}
E_I &= \int_0^x -m\ddot{x}_f(t) dx = \int_0^t -m\ddot{x}_f(t) \dot{x}(t) dt \\
&\cong \sum_{k=1}^n \frac{-m}{4} (\ddot{x}_f[k] + \ddot{x}_f[k-1])(\dot{x}[k] + \dot{x}[k-1]) \Delta t
\end{aligned} \tag{3.17}$$

隔震層摩擦界面之摩擦力所作的功，其可用離散時間表示為

$$\begin{aligned}
E_f(t) &= \int_0^x F(t) dx = \int_0^t F(t) \dot{x}(t) dt \\
&\cong \sum_{k=1}^n \frac{(F[k] + F[k-1])(\dot{x}[k] + \dot{x}[k-1])}{4} \Delta t
\end{aligned} \tag{3.18}$$

地震輸入隔震系統的能量必須與系統的動能、位能及摩擦力所作之功平衡，因此吾人可從式(3.13)~(3.18)得知

$$E_I = E_k + E_d + E_s + E_f \tag{3.19}$$

### 3.5 設備隔震加裝油壓阻尼器效益評估

本章在進行設備隔震加裝油壓阻尼器之減震效益評估時，同樣假設備本身為剛性結構。而地表震波採用代表堅硬地盤的 El Centro 地震及

921 集集地震(TCU017)，震波歷時圖與頻譜圖可參考圖 2.6 及 2.7。在輸入震波部份，吾人採用週期別為 0.3 sec 及 0.7sec、阻尼比為 3%的單自由度結構作為設備所在的結構物，其樓板加速度作為隔震設備加裝油壓阻尼器的輸入震波。二種結構物在不同地表震波作用下的樓板加速度反應如圖 2.8~2.11 所示。進行效益評估時，吾人採用隔震器的曲率半徑為 1m(即隔震週期 2 秒)且滑動界面摩擦係數( $\mu$ )為 0.1，油壓阻尼器之阻尼係數( $c_d$ )採用  $500 \text{ kgf} / (\text{m}/\text{sec})^{0.5}$  且特性係數( $\alpha$ )為 0.5，設備的重量( $W$ )則採用 3ton，輸入設備之震波加速度強度為 0.5g。

### 3.5.1 短週期結構之設備隔震效益評估

#### El Centro 地震

圖 3.4 為設備隔震前後在 PFA=0.5g 的加速度歷時反應，結果顯示隔震設備加速度反應約 190gal，減震效益可達 61%；若考慮隔震設備不加裝油壓阻尼器時，設備加速度峰值約為 140gal(參考圖 2.12)，兩者比較下可知加裝油壓阻尼器會使得設備承受的加速度略為提高。若採用單純的隔震系統(參考圖 2.14)，隔震器位移量達 4cm；而加裝油壓阻尼器後，隔震平台的最大位移量控制在 2.6cm 左右(圖 3.5)，且隔震器在地震過後的殘留位移並不大。觀察圖 3.6~3.7 之油壓阻尼器及隔震器的遲滯迴圈皆相當的飽滿。由圖 3.8 的系統能量累積可看出在地震發生時，大部份的能量都被隔震器之摩擦能及油壓阻尼器所吸收，而設備動能與位能僅承受少部份的能量。

#### Chi-Chi 地震(TCU017)

考慮 Chi-Chi 地震為輸入擾動的情況下，圖 3.9 為隔震設備加裝消能機制之加速度歷時比較，結果顯示隔震設備在樓板擾動強度 PFA=0.5g 下

的加速度減震效益仍可達 54%；若隔震設備不採用油阻尼器時，其在相同的樓板擾動強度下的減震效益約為 47%(參考圖 2.18)。由於 Chi-Chi 地震在加速度在 0.5Hz 有一卓越頻率，其效應經結構傳遞至設備並沒有完全被濾掉，而在隔震器本身設計頻率亦為 0.5Hz 的情況下，仍有共振效應的存在，此時加裝油壓阻尼器可提供隔震設備阻尼以減少因共振而造成加速度放大的效果。圖 3.10 為隔震平台加裝油壓阻尼器位移反應，結果可看出其最大位移為 6.8cm，而隔震平台未加裝油壓阻尼器的位移量達 16.5cm(參考圖 2.20)，比較二者可明顯看出在加裝油壓阻尼器之後，隔震器的位移量可減少約 60%。圖 3.11 及 3.12 分別為油壓阻尼器與隔震器的遲滯迴圈。圖 3.13 為地震作用下的能量分佈圖，由圖可看出長週期地震輸入整體系統的能量較堅硬地盤地震來得大，其多出來的能量大部份被阻尼器所吸收，由此亦可看出油壓阻尼器在長週期地震作用下的功用。



### 3.5.2 中等週期結構之設備隔震效益評估

#### El Centro 地震

考慮 El Centro 地震作用，隔震設備加裝油壓阻尼器之加速度反應如圖 3.14 所示。結果顯示在樓板強度  $PFA=0.5g$  作用下，隔震設備加速度峰值反應可折減到 47%，其減震效益雖較未加裝阻尼器隔震設備 59% 來得低，但減震效果仍非常良好。在加裝阻尼器隔震設備的位移量(圖 3.15)由採用純隔震設備的 10.5cm 降低至 7.7cm，可看出加油壓阻尼器對於隔震平台的位移量的控制具有相當優益的效果。圖 3.16 與 3.17 可看出由油壓阻尼器與隔震器的遲滯迴圈皆相當飽滿，顯示二者皆吸收相當大的能量。由圖 3.18 整體系統的能量分佈顯示堅硬地盤的地震波經由中常週期結構所傳遞至隔震設備的能量遠大於短週期結構，由油壓阻尼器及摩擦單擺支承所吸收的能量也因此提高許多，傳入至設備的動能及位能也相對的提

高，亦造成隔震設備加裝油壓阻尼器在中常週期結構的減震效應不如在短週期結構來得好。

### Chi-Chi 地震(TCU017)

考慮近斷層的 Chi-Chi 地震作用下，圖 3.19 為隔震設備加裝油壓阻尼器在中常週期結構的加速度減震效益。結果顯示隔震平台加裝油壓阻尼器在  $PFA=0.5g$  作用下，設備加速度峰值可折減 33%，此減震效果與純隔震設備減震效益 29% 相去不遠。但由圖 3.20 可看出隔震設備加裝阻尼器可將位移量從 25.4cm 降至 14.7cm，其位移折減效益高達 42%，且隔震器在地震後的殘留位移量並不明顯。圖 3.21~3.22 為油壓阻尼器與隔震器在近斷層地震作用下的遲滯迴圈圖。由圖 3.23 的系統能量分佈亦可看出長週期地震經由中常週期結構輸入至隔震系統的能量遠大於短週期結構，雖阻尼器與隔震器吸收大部份的能量但其減震效益仍不如在短週期結構來得有效；另外在中常週期結構中，長週期地震輸入至隔震系統雖不若堅硬地盤地震來得大，但設備所受的動能及位能卻比較高，使得其減震效應不如在堅硬地盤地震作用時來得有效。

### 3.6 參數研究

吾人在本節中將針對油壓阻尼器動力特性參數的變化對減震效益作一系列深入的探討，藉以決定其運用於摩擦單擺系統的最佳參數。分析時，隔震器週期採用 2sec 且滑動界面的摩擦係數假設為 0.1，滑動設備的重量設定為 3ton。分析中，吾人將針在不同地震強度下，變換油壓阻尼器阻尼係數( $c_d$ )及特性係數( $\alpha$ )進行比較。

### 3.6.1 El Centro 地震

#### 短週期結構

考慮變化不同油壓阻尼器之阻尼係數，圖 3.24 為特性係數  $\alpha = 0.3$  的油壓阻尼器在不同輸入的樓板加速度峰值(PFA, Peak Floor Acceleration)下，加速度峰值比與隔震平台位移的動力反應比較，結果顯示隔震設備在加裝油壓阻尼器後確能有效降低隔震設備的反應。由峰值加速度比可看出當阻尼係數為零時(即不加裝阻尼器之隔震系統)其效果為最佳，其在樓板加速度強度 PFA=1g 時的減震效益可達 79%(表 3.1)。此外，隔震平台在地震強度越大時減震效益越高。由隔震平台位移峰值比較可看出當阻尼係數越大時滑動位移越小，隔震平台在加裝阻尼係數  $c_d = 1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.3}$  的油壓阻尼器後可將在未加裝阻尼器之前的 11.2cm 降至 5.2cm，由此可看出油壓阻尼器對於控制隔震平台的位移量具有相當良好的效益。圖 3.25 及 3.26 為將阻尼器特性係數調整為 0.5 及 1.0，其整體減震趨勢與特性係數為 0.3 時一致。比較在不同特性係數下加速度比及隔震平台位移峰值的減震效益，結果顯示當特性係數越小時其對於降低隔震器的位移量越佳，但特性係數越大時對於設備加速度的控制卻有較佳的結果，其主要原因為特性係數越小時其在速度較小時出力較大，故能有效的降低隔震器的位移。

表 3.1 為不同阻尼係數與特性係數的條件下，設備加速度峰值之減震效益評估比較。結果顯示阻尼係數越小且特性係數越大時，隔震設備加速度折減效益越高。比較在 PFA=1g 時的 2 個極端例子，隔震設備加裝特性係數 0.3 及阻尼係數  $1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.3}$  的油壓阻尼器時之加速度減震效益為 61%，其折減效益雖不如純設備隔震的 79%，但減震效益仍非常的高。表 3.2 為隔震平台位移峰值比較，其位移折減效益為加裝油壓阻尼器與未加裝油壓阻尼器之比較。由表中可看出隔震器在加裝特性係數 0.3 及阻尼係數  $1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.3}$  的油壓阻尼器後，隔震平台在地震強度 PFA=1g 的位移量折減 54%。另外，由表中可發現當地震越大時，油壓阻尼器對於隔震平台滑動位移量的折減效果越低。

## 中等週期結構

圖 3.27~3.30 為隔震平台加裝油壓阻尼器在中等週期結構( $T_s = 0.7\text{sec}$ )時，加速度峰值比與隔震平台位移峰值比較，由圖中可看出當油壓阻尼器採用較高的特性係數及較低的阻尼係數時，對於隔震設備的加速度折減具有較佳的效果；而採用低特性係數與高阻尼係數的油壓阻尼器時，對於隔震平台的位移的控制較佳。比較隔震備台加裝油壓阻尼器分別放置於短週期與中等週期結構的減震效應可發現，地震經由中等週期結構傳遞至隔震器時引進較低頻的頻率內涵，故其加速度及位移減震效益皆比在短週期結構來得差。

表 3.3 與 3.4 分別為不同特性係數與阻尼係數下，設備加速度峰值與隔震平台滑動位移之隔震效益評估比較。結果顯示在地震強度  $\text{PFA}=1\text{g}$  時，加裝油壓阻尼器隔震設備加速度折減都可維持在 45% 以上效果，且當地震強度越大時其減震效益越佳。而阻尼係數越大時對於設備位移具有較佳的效果，此現象與在短週期結構時的反應相同。

## 3.6.2 Chi-Chi 地震(TCU017)

### 短週期結構

圖 3.30 為隔震設備採用特性係數  $\alpha = 0.3$  及不同阻尼係數在不同輸入地震強度時，加速度比與隔震平台位移峰值比較。結果顯示在小地震時，隔震器摩擦能量足以吸收由共振效應所產生的能量，所以純隔震對於設備的減震效益仍有不錯的表現；但當地震強度變大的時候，單靠摩擦的能量並不足以吸收地震所產生的能量，此時須加裝油壓阻尼器以吸收額外的能量，由加速度比較可看出當地震強度越大時，採用較高阻尼係數的阻尼器

減震效應越佳。觀察位移峰值比較圖可看出當阻尼係數越大時，隔震平台位移量越低。圖 2.31 為特性係數  $\alpha = 0.5$  下的隔震效益比較，由圖可看出其整體趨勢與特性係數  $\alpha = 0.3$  時一致。圖 2.32 為特性係數  $\alpha = 1$  時設備的隔震效益比較圖，結果顯示隔震平台採用阻尼係數  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})$ 、 $c_d = 800 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})$ 、 $c_d = 1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})$  時，對於設備的加速度折減並無太大的差異；但對於隔震設備位移控制則以  $c_d = 1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})$  最佳。

表 3.5 為不同特性係數與阻尼係數之條件下，設備加速度峰值減震效益評估比較。結果可看出若設備採用純隔震，當地震強度越強時其減震效益會越差；若隔震設備加裝阻尼係數  $c_d = 1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.3}$  及特性係數  $\alpha = 0.3$  的油壓阻尼器，則其加速度減震效益會隨著地震強度越大而要增加的趨勢，當地震強度  $\text{PFA} = 1\text{g}$  時，設備的減震效益可達 54%。表 3.6 為隔震器滑動位移峰值比較，結果顯示隔震設備加裝較大阻尼係數與較低特性係數的油壓阻尼器對於其位移折減會有較佳的結果。若取阻尼係數  $c_d = 1000 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.3}$ 、特性係數  $\alpha = 0.3$  之油壓阻尼器，當地震強度  $1\text{g}$  的情況下，可將隔震平台未加裝油壓阻尼的位移反應折減 80%。

### 中等週期結構

圖 3.33~3.35 為 Chi-Chi 地震下，隔震設備位於中等週期結構時的加速度峰值比與隔震平台位移減震效益比較圖。結果顯示隔震設備在加裝油壓阻尼器後對於加速度折減並沒有明顯的提升，若與位於短週期結構的隔震設備比較，可看出其加速度減震效益較差。觀察隔震器位可發現油壓阻尼器對於位移的控制仍有相當好的效果。表 3.7 與 3.8 分別為不同特性係數與阻尼係數之條件下，設備加速度峰值與隔震平台滑動位移之隔震效益評估比較。結果顯示在地震強度  $\text{PFA} = 1\text{g}$  時，隔震設備加裝油壓阻尼器對於加速度折減僅有 30% 左右，而其對於位移的折減效益可達 50% 以上，但滑動位移量仍有 30cm。

## 第四章 振動台試驗

### 4.1 前言

依據過去之震害經驗，當基座振動加速度超過 200gal 時，精密製程設備即可能產生晃動甚至破裂。因此，吾人須將隔震平台設計目標定為最大容許加速度 200gal。另外，考慮高科技廠房內部設備擺設密度集中，以及物料輸送管線之容許變位等現實條件，因此設定隔震平台之滑動位移不得超過 5cm 以避免設備間的碰撞或管線拉扯造成破壞。本章中，吾人將完成隔震設備及隔震設備加裝油壓緩衝器的振動台實驗，試驗震波包括 1940 年 El Centro 地震、1995 年阪神地震與 1999 年集集地震，並進一步探討其可用性。



### 4.2 試驗規劃

#### 4.2.1 地震模擬振動台

地震模擬振動台設計者為交通大學王彥博教授，其主要整合 MTS 系統的 15t 動態致動器 (Model 244.23s, 如圖 4.1)，與本地供應商所製作的不銹鋼振動桌面，為國內第一個相類似之測試設備 (圖 4.2)。根據 MTS 液壓致動器之規格，其有效運作頻率為 50Hz，因此對於桌體之基本振動頻率將設計超過 100 Hz 以確保制動器之效能。振動桌與模型結構之重量比建議為 2:1，以避免測試時模型結構和振動桌產生互制效應。振動桌為 3m×3m 的中空箱型結構，類似鋼板加勁肋的構造，當桌體重量減少至 5ton 時，桌體剛性足以抵抗彎矩和扭矩之力量。在加速度峰值為 1.0g 時，振動桌可提供之最大荷載重量為 10ton，受限於致動器容量，其最大衝程為

$\pm 12.5$  cm。在活塞面積為  $89 \text{ cm}^2$  與致動器在  $210 \text{ kg/cm}^2$  的工作壓力下，當振動桌加速度為  $1g$  且滿載時，可提供之最大控制力為  $18.7$  噸。驅動振動桌之速率為  $60 \text{ cm/sec}$  時，流率必須在  $320 \text{ lpm}$ ，其中三階 (3-stage) 伺服閥 (MTS Model 256.09) 可提供最大流量為  $90 \text{ gpm}$  ( $340 \text{ lpm}$ )。振動台系統具備  $75 \text{ gpm}$  ( $283 \text{ lpm}$ ) 的液壓泵 (MTS Model 506.62) 已足夠平均流量為  $204 \text{ lpm}$  的要求，其為尖峰流量的  $2/\pi$  倍，而需求流量與平均流量之差異可由蓄壓器 (MTS Model 111) 來進行補充或調節。

#### 4.2.2 控制器與資料擷取系統

振動台控制系統係採用 MTS 407 控制器，其不但可接受內部建立之波形，而且可由外部輸入數位訊號，例如將地震擾動轉換為類比訊號命令以伺服閥來驅動液壓制動器。振動台系統的資料擷取係採德國 IMC 公司所開發之  $\mu$ -Musycs 系統，其可同時量測  $32$  個頻道。測試資料的儲存可透過個人電腦工具與網路介面將其快速的轉換到其他的電腦進行後期處理。



#### 4.2.3 量測儀器

##### 加速度規 (Accelerometers)

加速規型號為 Crossbow (CXLO4M1)，動態量測範圍為  $\pm 4g$ ，用以量測試驗時模型結構在輸入地表擾動之方向的加速度反應，其除了設置在隔震層外也設置在設備模型頂端與振動桌面。

##### 位移計 (LVDT)

位移計為 Kyowa (DLT-300AS)，動態量測範圍為  $\pm 30 \text{ cm}$ ，測試時裝置在隔震層與基礎間，藉以量測樓層之層間變位量。

## 1.5 噸油壓致動器

1.5 噸油壓致動器(如圖 4.3 所示)裝置於反力鋼座上，並用預力鋼棒將其固定於強力地板上。該油壓致動器的出力可達 1.5ton。實驗時係採用 MTS 407 控制器控制致動器的位移反應，其衝程範圍為 $\pm 7.5\text{cm}$ 。

### 4.2.4 隔震平台

隔震平台(如圖 4.4 所示)平面設計尺寸為  $100\text{cm}\times 100\text{cm}$ ，設計高度為  $13\text{cm}$ 。隔震平台中間有一  $30\text{cm}\times 30\text{cm}$  的開孔，主要作為設備管線外接的通道。隔震平台採用的摩擦單擺支承，其凹面板(如圖 4.5 所示)之曲率半徑為  $1\text{m}$ ，相對應之隔震週期為 2 秒。摩擦介子及其基座採用鋼材且表面皆披覆鐵弗龍材料以降低摩擦係數，如圖 4.6 所示。摩擦單擺支承之凹面板係裝置於隔震平台的上層，而摩擦介子及基座則裝置於隔震平台的下層。四組隔震支承分別設置於隔震平台的四個角落。並採用每片重量  $330\text{kgf}$  的鋼板(圖 4.7)模擬設備重量，試驗時可依據所需之設備重量調整鋼板的片數。

## 4.3 隔震平台性能測試

### 4.3.1 測試計畫

本研究規劃進行了一系列的振動台試驗，以探討在真實地震作用下隔震平台應用於精密製程設備防震之可行性。El Centro 和 Kobe 地震皆為國際結構控制協會指定為地震工程研究之指標性(benchmark)地震。此外，台灣在 921 集集地震後收集到許多地震記錄，本次試驗亦以位於新竹科學園區內之測站 (TCU017) 作為振動台試驗之輸入擾動，並考慮將加速度

峰值(PFA)調整為各種不同震度等級。圖 4.8~10 分別為輸入之外力擾動的加速度歷時反應與頻譜,其依序為 El Centro 地震、Kobe 地震與 TCU017 地震。

設備模型採用 1.1ton 與 2.1ton 進行振動台試驗,將由三個基準地震連續地從一般強度的地震提升到嚴苛強度之等級。實驗過程中量測設備加速度及隔震器滑動位移以評便進行評估之隔震效益。

### 4.3.2 振動台測試結果評估

#### El Centro 地震

考慮堅硬地盤(El Centro)地震,圖 4.11 為 2.1ton 設備隔震在地震強度  $PGA=0.59g$  時,隔震前後設備加速度歷時反應,結果可清楚的觀察到其加速度明顯小於 200gal 的目標值。圖 4.12 為地震強度  $PGA=0.59g$  下,隔震平台的位移歷時反應,其最大位滑動位移達 5.1cm,已超出吾人所設定的設計目標值( $D_{max} \leq 5cm$ )。此外,地震結束後隔震平台幾無殘留位移。圖 4.13 為隔震支承之遲滯迴圈圖,結果顯示最大摩擦力約為 200kgf。表 4.1 為在不同 El Centro 地震強度作用下,設備重量 1.1ton、2.1ton 之隔震效益評估,比較不同地震強度作用下之隔震效益發現隨著地震強度增加時,設備的減震效益越佳。在七級劇震(400gal 以上)時,加速度峰值折減率皆可達 70%以上,且加速度峰值皆控制在 200gal 以內之設計目標。另外由表 4.1 中亦可知,當地震強度越大時,隔震平台的位移峰值亦越大。圖 4.14 為不同設備重量在 El Centro 地震作用時,設備加速度峰值及隔震平台位移峰值變化趨勢。結果顯示設備重量對於隔震效益並無影響,此現象可由設備隔震運動方程式(2.4)解釋,當隔震層摩擦界面的摩擦係數為一定值時,設備隔震效益並不會隨著設備的重量而改變。

## Kobe 地震

表 4.2 為在不同 Kobe 地震強度下，設備重量 1.1ton 與 2.1ton 之隔震效益。結果顯示隔震設備加速度減震效益會隨著地震強度增大而有明顯的增加。在地震強度達七級(400gal 以上)時，設備加速度折減率可達 70%以上，且加速度峰值亦小於設計目標值(200gal)。由表中亦可看出隔震平台的位移量會隨著地震強度增大而變大，但隔震平台位移峰值在七級劇震(400gal 以上)時仍可控制在 3cm 以內，滿足吾人所考慮的設計目標值。圖 4.15 為重量 2.1ton 的設備在 Kobe 地震強度 PFA=0.58g 作用下，設備在隔震前後之設備加速度歷時反應，結果可明顯看出設備加速度峰值低於 200gal 目標值。圖 4.16 為隔震平台在地震強度 PFA=0.58g 作用下的位移歷時，由圖可看出隔震平台最大滑動位移量為 2.1cm，並未超出設計目標值，且殘留位移僅約 0.7cm。圖 4.17 為隔震支承之遲滯迴圈。圖 4.18 為不同重量的設備在 Kobe 地震下，設備加速度峰值及隔震平台位移峰值隨著不同地震強度作用時的趨勢，由圖可看出隔震平台在承受不同重量時的滑動位移峰值趨勢相當接近，而設備加速度峰值在地震強度較大時會有約有 20gal 的差值，其差值可能由儀器訊號的雜訊所引起。

## TCU017 地震

考慮 Chi-Chi 地震(TCU017)作用下，圖 4.19 為 2.1ton 設備在地震強度 PFA=0.27g 時，設備在隔震前後之加速度歷時反應。由圖可看出加速度峰值為 130gal 且發生在震波的長週期脈衝處，明顯小於 200gal 的設計目標值。圖 4.20 為地震強度 PFA=0.27g 下，隔震平台的滑動位移歷時反應，結果顯示其最大滑動位移為 4.9cm 且發生在 TCU017 地震波的長週期脈衝處，但並未超出吾人設定目標值( $D_{\max} \leq 5cm$ )，地震結束後隔震平台殘留位移僅約 0.7cm。圖 4.21 為隔震支承之遲滯迴圈。表 4.3 為在不同 TCU017 地震強度作用下，隔震設備重量 1.1ton 與 2.1ton 之隔震效益評

估。結果顯示當地震強度增大時，隔震設備的加速度減震效益越佳。在六級劇震(250~400gal)時，設備加速度峰值折減率約有 55%，而加速度反應皆控制在 200gal 的設計目標值內。另由表 4.3 亦可看出當地震強度增大時，隔震平台的位移峰值亦越大。圖 4.22 為不同設備重量在 TCU017 地震作用時，設備加速度峰值及隔震平台位移峰值趨勢變化，結果顯示不同重量的設備隔震效益相當接近。

### 4.3.3 試驗結果與理論模擬

吾人在本節中將根據第二章的理論推導(設備隔震位於傾斜基座之動力解析)，進一步模擬振動台實驗的結果。表 4.4 為擬合設備隔震振動台實驗所求得的隔震支承之摩擦係數及基座傾斜角，由表中可看出隔震支承之摩擦係數約為 0.08，而基座傾斜角為 0.003。

圖 4.23 為重量 2.1ton 隔震設備在 El Centro 地震強度 PFA=0.59g 作用下，設備加速度與隔震平台位移之理論模擬與實驗結果的比較，結果顯示二者相當接近。由圖 4.24 的遲滯迴圈擬合結果顯示，本文所提出的理論確實可將設備隔震在傾斜地面所造成的基底剪力不對稱的情形完全的表現出來。圖 4.25~26 分別為重量 2.1ton 的隔震設備在 Kobe 地震強度 PFA=0.58g 作用下，設備加速度、隔震平台位移及隔震支承遲滯迴圈的擬合結果；圖 4.27~28 分別為重量 2.1ton 的隔震設備在 TCU017 地震強度 PFA=0.17g 作用下，設備加速度、隔震平台位移及隔震支承遲滯迴圈的擬合結果。由模擬的結果可看出本文所提之理論的準確性。

### 4.3.4 試驗後隔震器外觀檢核

一個可行之隔震平台，必須具備有效性與穩定性，而其中「摩擦介子」為隔震平台是否成功的關鍵之一。目前測試所採用之摩擦子為與摩擦單擺支承滑動器 (Slider) 相同的半圓球進行測試，其與摩擦子基座之披覆材料為鐵弗龍複合材料。測試後檢視鐵弗龍複合材料之表面可發現，其接觸

面上披覆之鐵弗龍並無磨耗之現象(圖 4.29(a))，且隔震器凹面版之表面亦保持相當平滑(圖 4.29(b))。

## 4.4 加裝油壓緩衝器隔震性能評估

設備隔震加裝油壓緩衝器主要的作用為：(1)防止隔震器位移過大；(2)降低在長週期震波下，因共振效應造成設備動力反應放大的現象；(3)防止設備在滑動的過程中產生傾倒的現象。防震的設計目標與上一小節一致，設備最大加速度反應須在 200gal 以內，隔震平台滑動位移亦須控制在 5cm 以內之雙重目標。

### 4.4.1 測試計畫



隔震平台加裝油壓緩衝器之振動台實驗組裝如圖 4.30 所示，本實驗採用四組油壓緩衝器，分別裝置於隔震器的兩側，一側裝置二組緩衝器(如圖 4.30(a) 所示)。油壓緩衝器與隔震器之間採用萬向接頭進行連接的動作(如圖 4.30(b)所示)，以避免緩衝器在地震的過程中受到額外的力量而造成緩衝器破壞的現象發生。隔震平台加裝油壓緩衝器之振動台試驗所採用的震波分別為 El Centro 地震、Kobe 地震、Chi-Chi 地震(TCU017)。本節中，除了探討設備隔震加裝油壓緩衝器的防震效益之外，同時比較隔震平台在加裝油壓緩衝器前後的減震效益比較。在進行振動台試驗之前，吾人亦針對油壓緩衝器進行元件測試，以了解油壓緩衝器的特性。

### 4.4.2 油壓緩衝器元件測試

本次試驗所採用的油壓緩衝器構造如圖 4.31 所示。其主要原理為當油

壓緩衝器受到外力作用時，活塞桿會往內壓函的內部移動，迫使內部液油壓通過油孔流入蓄壓器內，因而產生抵制力。油壓緩衝器元件測試是採用交通大學結構大樓實驗室的 1.5ton 油壓致動器裝置進行測試，圖 4.32 為元件測試實驗組裝實際情形。試驗時，油壓緩衝器的前後皆加裝萬向接頭後，再與 1.5ton 油壓致動器及反力座連接。進行測試時裝置荷重計以量測油壓緩衝器的出力大小，另外架設位移計量取油壓緩衝器的行程。在試驗參數方面，1.5ton 油壓致動器的位移行程設定為 3cm，採用致動器往返的頻率分別為 0.1Hz、0.5Hz、1.0Hz、1.5Hz、2.0Hz 的簡諧波以探討油壓緩衝器的力學行為，油壓致動器在不同往返頻率下的位移歷時反應如圖 4.33 所示。為確保油壓緩衝器的力學行為一致，故將隔震設備所採用的四隻油壓緩衝器皆進行元件測試。

圖 4.34~4.38 為 1.5ton 油壓致動器不同往返頻率的簡諧波作用下，四隻油壓緩衝器的遲滯迴圈比較。結果顯示油壓緩衝器在位移速度越大的時候，油壓緩衝器的出力會越大。另外，觀察油壓緩衝器在簡諧波往返頻率為 0.2Hz( $V_{\max} = 0.019m/sec$ )~2Hz( $V_{\max} = 0.377m/sec$ )的出力大小可發現，其出力相差範圍大約為 2 kgf，故緩衝器出力越大的時候，四組油壓緩衝器的出力誤差會越小。同時，由遲滯迴圈發現油壓緩衝器在受拉力與壓力時的行為並不一致，而且當速度越大時其消能面積越不飽滿，因此提供消能的機制並不如傳統油壓阻尼器來得好。

#### 4.4.3 振動台測試結果評估

##### El Centro 地震

表 4.5 為 1.1ton 與 2.1ton 的設備在不同 El Centro 地震強度作用下，隔震設備加速度及隔震平台滑動位移的峰值比較。結果顯示當地震強度越大時，隔震設備對於加速度的折減越佳，若以吾人設定的設計目標值為基準，當地震強度大於 0.54g 時設備加速度已達到設計容許目標的臨界值。圖 4.39 為 2.1 噸的隔震設備在地震強度 PFA=0.54g 作用時，設備在隔震

前後的加速度歷時反應，折減效益雖可高達 61%，但加速度峰值卻已超出 200gal，顯示其並不符合吾人之要求。由表 4.5 的隔震平台滑動位移反應峰值比較可看出隔震平台位移隨著地震強度增大而有增加的趨勢，在七級劇震(400gal 以上)作用下仍可將位移量控制於設計目標值( $D_{\max} \leq 5\text{cm}$ )內。圖 4.40 為 2.1ton 的隔震設備在地震強度 PFA=0.54g 作用下，隔震平台滑動位移歷時反應，結果顯示隔震設備加裝油壓緩衝器對於位移反應具有良好的效益，且試驗後並無明顯的殘留位移。圖 4.41 為隔震支承之遲滯迴圈，其最大出力約為 400kgf。圖 4.42 為不同設備重量(1.1ton、2.1ton)下，隔震設備加裝油壓緩衝之設備動力反應峰值比較。結果顯示在油壓緩衝器作用下，隔震設備的重量增大時，設備加速度峰值反應越小，但差異並不明顯；而隔震平台之滑動位移反應峰值亦相當接近。

## Kobe 地震

表 4.6 為 1.1ton 與 2.1ton 的隔震設備在 Kobe 地震不同強度作用下，設備加速度及隔震平台滑動位移峰值比較。結果顯示當地震強度增大時，隔震設備加速度的折減越佳。當六級烈震(250~400gal)時，設備加速度仍在 200gal 的設計目標內；而在七級劇震(400gal 以上)時，設備加速度已超過設計目標值。圖 4.43 為地震強度 PFA=0.64g 作用下，2.1ton 設備在隔震前後之加速度歷時反應比較，結果顯示加速度折減效益高達 64%，但加速度峰值卻已超過設計目標值，顯然並不符合要求。由表 4.6 可知隔震平台滑動位移會隨著地震強度增加而有變大的趨勢，但在七級劇震(400gal 以上)作用下仍可將位移量控制於 5 公分內。圖 4.44 為 2.1ton 的隔震設備在地震強度 PFA=0.64g 作用下，隔震平台滑動位移歷時反應。結果顯示隔震平台加裝油壓緩衝器對於位移反應具有良好的效益，試驗後的殘留位移約為 1.2cm。圖 4.45 為隔震支承之遲滯迴圈，其最大出力約為 400kgf。圖 4.46 為不同設備重量(1.1ton、2.1ton)的隔震設備加裝油壓緩衝後，設備在 Kobe 地震下的反應峰值趨勢。結果顯示隔震設備的重量較重時，設

備加速度峰值反應較低，但隔震平台位移量峰值較大，唯二者之差異並不大。

## TCU017 地震

表 4.7 為 1.1 噸與 2.1 噸的隔震設備在不同 TCU017 地震強度作用下，設備加速度及隔震平台滑動位移峰值比較。結果顯示當地震強度增大時，隔震設備加速度的折減效果越佳。當六級烈震(250~400gal)時，設備加速度仍可滿足 200gal 的設計標準值。圖 4.47 為 2.1ton 的隔震設備在地震強度 PFA=0.33g 作用下，隔震設備加裝油壓緩衝器前後之加速度歷時反應比較，由圖可明顯看出其減震效益。由表 4.7 亦可看出隔震平台滑動位移會隨著地震強度增加而有變大的趨勢，但滑動位移皆低於 5cm 的設計目標值。圖 4.48 為 2.1ton 的隔震設備在地震強度 PFA=0.33g 作用下，隔震平台滑動位移歷時反應，結果顯示隔震設備最大位移反應僅 1.2cm，試驗後的殘留位移並不明顯。圖 4.49 為隔震支承之遲帶迴圈圖，其最大出力約為 400kgf。圖 4.50 為不同設備重量(1.1ton、2.1ton)下，隔震設備加裝油壓緩衝器之動力反應峰值比較。結果顯示設備加速度及隔震平台滑動位移皆相當接近。

### 隔震設備加裝油壓緩衝器前後的隔震效應比較

圖 4.51~53 為三種不同的地震作用下，2.1 噸的隔震設備在加裝油壓緩衝器前後之設備加速度及隔震平台滑動位移峰值比較趨勢。結果顯示隔震設備在加裝油壓緩衝器後，設備加速度會較加裝油壓緩衝器前來得高，但卻能大幅減低隔震平台位移量。圖 4.53 為具長週期特性的 TCU017 地震，未加裝油壓緩衝器的隔震設備在地震強度 PFA=0.27g 作用下，設備加速度為 130gal，但隔震平台位移量卻達 4.6cm，明顯可看出因共振效應所產生的放大效應；加裝油壓緩衝器的隔震設備在地震強度 PFA=0.33g

作用下，設備加速度仍可控制在 200gal 以下，而隔震平台位移量僅有 1.2cm，由此可見隔震設備加裝油壓緩衝器對於長週期地震具有相當好的減震效果。

#### 4.4.4 試驗後隔震器外觀檢核

圖 4.54 為重量 2.1ton 的隔震設備加裝油壓緩衝器在進行完振動台試驗後，隔震支承的摩擦介子及凹面板的外觀。觀察摩擦介子(圖 4.54(a))並無磨耗之現象，而凹面板(圖 4.54(b))表面亦保持平滑且無任何刮痕。



## 第五章無塵室樓版剛性補強之研究

### 5.1 前言

目前高科技廠房有關生產晶圓、TFT-LCD 面板等製程設備係以樓版動態剛度(dynamic stiffness)作為檢核標準。樓版剛度與結構構件尺寸、靜態剛度(static rigidity)及邊界條件...等有關，惟目前樓版動態剛度並未從學理上作明確定義，工程實務上常以衝擊載重(impact loading)試驗求取結構特性，進而評估設備動態反應。本章將藉由 SAP2000 建立廠房結構模型，並藉由參數分析探討樓版動態反應的趨勢。另外，針對剛性不足的樓版，本研究將探討利用鋁桁架質輕、空間穿透性佳、施工快速等特性進行樓版剛度補強的可行性。



### 5.2 設備動態反應目標

設備動態反應目標常以樓版的動態剛度作為評估目標。衝擊載重試驗為結構特性之一，乃利用衝擊鎚敲擊試驗求取樓版垂直向振動反應(輸出)與衝擊力擾動反應(輸入)，以便建立輸入與輸出關係之頻域反應函數(frequency response)或其反函數(inverse function)。設備動態反應目標視其所採用振動反應物理量之不同可分為 receptance(位移/衝擊力)、mobility(速度/衝擊力)或是 accelerance(加速度/衝擊力)，分別代表一單位衝擊力作用下，該作用點所引起之樓版位移、速度及加速度頻域反應函數，各頻域反應函數與其所對應之反函數與測物理量之關係歸納於表 5.1。其中 receptance 的倒數即為動態剛度，可表示為

$$D_s(\omega) = \frac{P(\omega)}{\Delta(\omega)} \quad (5.1)$$

其中

$D_s(\omega)$  為動態剛度；

$P(\omega)$  為衝擊力頻域函數；

$\Delta(\omega)$  為敲擊點振動位移頻域函數；

若樓版的剛度不足時，機台運作將引起過大的振動反應，進而影響生產良率之穩定性。

衝擊載重試驗通常採用速度規或加速度規進行樓版垂直向振動反應之量測，因此在進行動態剛度分析時，須將其反應頻域函數轉換至位移頻域函數。在穩態(Stationary)條件下，若量測為速度反應，其位移頻域函數可表示為

$$\Delta(\omega) = \frac{\dot{\Delta}(\omega)}{\omega} \quad (5.2)$$

其中

$\dot{\Delta}(\omega)$  為敲擊點振動速度頻域函數；

若量測為加速度反應，則位移頻域函數可表示為

$$\Delta(\omega) = \frac{\ddot{\Delta}(\omega)}{\omega^2} \quad (5.3)$$

其中

$\ddot{\Delta}(\omega)$  為敲擊點振動加速度頻域函數。



### 5.3 SAP2000 模型建立

為求準確模擬無塵室樓版的振動行為，吾人採用園區內之真實廠房結構尺寸作為數值模擬分析的對象。由於高科技廠房平面長、寬尺寸動則上百米，勢必得耗費大量的時間進行電腦計算。結構體在環境微動下的樓版微振動反應主要為結構之局部振態行為，因此在研究僅選取結構局部區域進行有限元素模型分析，以便減少電腦計算時間，增加時效性。圖 5.1 為模擬結構平面尺寸圖，模擬結構為長寬各為 7.8m 且為三跨構架，其最外側四個角落為結構主柱 (1000mm×1000mm)，內部的小柱尺寸為 400mm×400mm；結構四周外圍採用的大梁尺寸為 500mm×1000mm，內部小梁尺寸則為 400mm×800mm；廠房樓層高達 4.5m，而樓層厚度為 0.2m。吾人進一步將樓版區分為九部分(區域 I~IX)，由於結構樓版平面具有對稱性，因此本文僅探討區域 I、II、IV、V 四個區域中心點的特性。

本研究採用 SAP2000 商用軟體進行廠房結構有限元素動力分析，各構件(大梁、小梁、主柱、小柱、樓版)參數設定如圖 5.3~5.5 所示，圖 5.6 為樓版 SAP2000 建立完成之模型。

分析所用的衝擊載重歷時，理想上應在為瞬間之衝擊力，以便得到一白噪音頻譜，方能均勻激發出結構所有的振動頻率，但現實情況下並無法製造出如此完美的衝擊載重，故吾人根據實際衝擊載重試驗所得之衝擊力歷時反應記錄[21]，自行製作一筆衝擊載重歷時記錄，如圖 5.7 所示，其衝擊力峰值為 40kgf 且作用時間為 0.01sec 的三角波型。結構阻尼比設定為 5%。

### 5.4 樓版分析結果

衝擊載重分析時，為求能有較佳的頻率解析度，故資料長度( $N$ )取

1000 筆(敲擊開始後)，衝擊載重歷時離散區間( $\Delta t$ )為 0.001sec，時間長度( $N\Delta t$ )為 1sec，頻率解析度( $\Delta f = 1/N\Delta t$ )為 1Hz。本研究將以 Nikon 微影掃描機動之 Accelerance 反應及動態剛度規格作為高科技廠房樓版之設計目標。圖 5.8 為掃描機之 Accelerance 反應規格要求，圖 5.9 為掃描機之動態剛度規格要求。

圖 5.10~5.13 分別為 I、II、IV、V 四個樓版區域之中心點分別在衝擊載重下的加速度歷時反應。結果顯示，樓版之加速度峰值反應低於 3gal。觀察樓版振動衰減行為可發現，其加速度反應在 0.4sec 內接近停止狀態，而區域 V 為四個樓版區域中衰減速度最慢的地方。

圖 5.14~5.17 分別為 I、II、IV、V 四個樓版區域 Accelerance 反應(加速度頻譜/衝擊力頻譜)比較。結果顯示，四個區域衝擊點之 Accelerance 反應無法達到 Nikon 微影掃描機之設計目標。在 Nikon 微影掃描機之最大容許規格方面，區域 I 僅在 30Hz 左右稍微超過規定值，其餘皆在最大容許規格值內；區域 II 則在 21Hz 左右超出最大容許規格值，其他頻率都在標準之內；區域 IV 之 Accelerance 在 17Hz 及 45Hz 左右不滿足掃描機最大容許規格值，其餘皆低於最大容許規格值；區域 V 在 30~45Hz 區間內超過規定值，其他頻率區間則符合掃描機最大容許規格值。

圖 5.18~5.21 分別為樓版區域 I、II、IV、V 之動態剛度反應，由圖可看出此四個區域的靜態剛度介於  $1.43 \times 10^8 N/m$  與  $2.44 \times 10^8 N/m$  之間，其中靜態剛度最大的是區域 I，而靜態剛度最小的是區域 V。Nikon 微影掃描機之動態剛度規格是 10Hz 至 100Hz。由區域 I 之動態剛度反應(圖 5.18)可發現其主要振動態率為 30Hz，剛度約為  $5.4 \times 10^7 N/m$ ，而樓版在頻率 35~95Hz 之間的剛度反應可符合 Nikon 微影掃描機之規格。樓版區域 II 之主要振動頻率為 21Hz(如圖 5.19 所示)，剛度約為  $4 \times 10^7 N/m$ ，其符合規格之頻段為 25~45Hz 及 55~90Hz。樓版區域 IV 主要動頻率有三個(如圖 5.20 所示)，分別為 17Hz、19Hz 及 44Hz，而頻段 22~30Hz 及 60Hz 以上可符合 Nikon 之規格。樓版區域 V 之主要振動頻率為 38Hz (如圖 5.21

所示)，其剛度約為 $2.2 \times 10^7 N/m$ ，此一區域動態剛度值在大部分頻段皆不符合 Nikon 微影掃描機之規格。

## 5.5 參數分析

本節將針對前一節所採用之廠房結構進行參數分析，分析參數包括廠房結構邊界條件、樓版厚度、小梁尺寸，仍以 Nikon 微影掃描機之 Accelerance 反應及動態剛度規格作為樓版的設計目標。

### 5.5.1 邊界條件之影響

上一節分析廠房結構乃取整體結構其中之三跨進行分析，本節有關邊界條件之影響乃以三跨構架為基本單元，將其擴大為六跨構架(如圖 5.22 所示)及九跨構架(如圖 5.23 所示)，進一步探討樓版之動態剛度在三跨(3×3bay, Boundary-A)、六跨(6×6bay, Boundary-B)及九跨(9×9bay, Boundary-C)構架時的反應。三種比較類型的構架參數設定如表 5.2 所示。

圖 5.24~5.27 分別為在不同邊界條件時，I、II、IV、V 四個樓版區域中心點受衝擊載重作用下之 Accelerance 反應比較。結果顯示樓版區域 I、II、IV 三個區域在採用結構跨數較多的情況下，樓版 Accelerance 反應雖然高於 Nikon 微影掃描機的目標規格，但皆可控制在最大容許規格值之內。樓版區域 V 增加結構跨度時，雖然可將其 Accelerance 反應峰值折減下來，但仍高於掃描機之最大容許規格值。整體而言，結構分析採用之振動單元越大時，其 Accelerance 值會越低。

圖 5.28~5.31 分別為不同邊界條件時，I、II、IV、V 四個樓版區域中心點受衝擊載重作用下之動態剛度反應比較。結果顯示，各個樓版區域在三種不同跨度的結構時，其動態剛度反應皆不能滿足 Nikon 微影掃描機之

規格，而採用多跨數的結構樓版之靜態剛度及動態剛度峰值相較於少跨度的結構樓版而言，皆有提高的趨勢。

### 5.5.2 樓版厚度之影響

本節將探討廠房結構樓版厚度對於樓版動力特性的影響。廠房原始模型之樓版厚度為 20mm，本節厚度參數設定分別為 10mm(Floor-A)、20mm(Floor-B)、30mm(Floor-C)、40mm(Floor-D)、50mm(Floor-E) 五種尺寸進行分析。其參數設定如表 5.3 所示。

圖 5.32 為區域 I 在不同樓版厚度下之 Accelerance 反應。結果顯示樓版厚度為 40mm、50mm 時，其 Accelerance 反應可滿足 Nikon 微影掃描機之標準規格；樓版厚度 30mm，可滿足掃描機之最大容許規格；而樓版厚度 10mm 及 20mm，則超出其最大容許規格。圖 5.33~5.35 為區域 II、IV、V 在不同樓版厚度下之 Accelerance 反應，由圖中可看出 Floor-C、Floor-D、Floor-E 可以滿足微影掃描機之最大容許規格值，而 Floor-A、Floor-B 則超出其最大容許規格值。整體而言，採用厚度較大的樓版可以有效降低樓版本身的 Accelerance 反應。

圖 5.36 為區域 I 在不同樓版厚度下之動態剛度反應，結果顯示厚度 40mm 及 50mm 之樓版反應可符合 Nikon 微影掃描機規格要求，但厚度 10~30mm 之樓版則不滿足規格要求。圖 5.37~5.39 分別為區域 II、IV、V 在不同樓版厚度下之動態剛度反應，由圖中可發現五種樓版厚度皆達不到掃描機之動態剛度環境要求。此外，增加樓版的厚度會提升樓版垂直向的勁度，此現象可從動態剛度反應圖看出當樓版厚度增加時，其靜態剛度值越大。舉 Floor-B 及 Floor-E 二個案例作比較，可發現其靜態剛度由  $10^8 N/m$  提升至  $10^9 N/m$ 。另外，從動態剛度反應圖中亦可看出，當樓版的厚度尺寸較大時，其動態剛度峰值亦會出現在較高頻之處。

### 5.5.3 梁尺寸之影響

本小節吾人將針對廠房結構的小梁尺寸進行參數分析，小梁之寬度及深度的尺寸分別採用 500×1000mm(Beam-A)、400×800mm(Beam-B)、300×600mm(Beam-C)、200×400mm(Beam-D)、100×200mm(Beam-E) 五種，廠房原始小梁尺寸為 400×800mm(Beam-B)，各組小梁分析參數設定如表 5.4 所示。

圖 5.40~5.44 分別為 I、II、IV、V 四個樓版區域在不同小梁尺寸下之 Accelerance 反應比較。結果顯示，除了 Beam-A 在區域 I、IV 能符合 Nikon 微影掃描機之最大容許規格值外(圖 5.40 及 5.43)，其他的小梁型式及樓版區域皆不能滿足其最大容許規格。

圖 5.45~5.48 分別為四個樓版區域在不同小梁尺寸下之動態剛度比較圖。結果顯示，廠房結構採用上述五種不同尺寸的小梁皆無法達到 Nikon 微影掃描機之動態剛度規格。當小梁尺寸越小時，樓版之動態剛度最小值亦會隨之降低。另外，觀察其動態反應圖可發現，採用不同尺寸的小梁對於其靜態剛度並無明顯的改變。

## 5.6 鋁桁架補強評估

本章所採用的廠房結構經模擬分析結果顯示其無法達到 Nikon 微影掃描機之 Accelerance 反應及動態剛度規格。本節將利用鋁桁架進行廠房結構樓版剛性的補強。質輕、空間穿透性佳等特性有助於補強工程之實際應用，補強的方式可分為全面補強及局部補強二種，其中全面補強為鋁桁架加裝在整個樓版區域範圍，而局部補強乃指針對局部須補強的區域加裝鋁桁架。無塵室內之空間皆有一定之限制，若補強桁架高度過大時可能會造成設備無法擺放的情況，故本研究考慮的補強桁架深度設定為 1m。

### 5.6.1 全面補強

廠房結構採用鋁桁架進行樓版全面補強，依桁架尺寸不同可分為四種，Truss-A 為不加桁架的原始結構，Truss-B 為加裝 216.5×8mm(直徑×管厚)之補強斜角鋁桁架，Truss-C 補強結構之鋁桁架尺寸為 318.5×9mm(直徑×管厚)，而 Truss-D 則為加裝 406.4×19mm(直徑×管厚)之鋁桁架補強結構，其模擬分析參數設定如表 5.5 所示。圖 5.48 為結構樓版全面加裝鋁桁架之 SAP2000 模擬分析結構。

圖 5.49~52 分別為結構樓版加裝不同尺寸之鋁桁架下，四個樓版區域之 Accelerance 反應比較。結果顯示，未進行鋁桁架補強之樓版(Truss-A)，其四個樓版區域之 Accelerance 反應無法達到 Nikon 微影掃描機之最大容許規格值。採用 Truss-B 及 Truss-C 方式進行剛性補強，可將樓版四個區域的 Accelerance 反應控制在最大容許規格值內。若結構樓版以 Truss-D 方式進行補強，則區域 I、II、V 之 Accelerance 反應可提升至目標規格內，而區域 IV 僅在頻率 32Hz 處稍微超出目標規格少許，其餘頻率之反應皆低於目標規格值。

圖 5.53~5.56 分別為樓版採用不同尺寸鋁桁架進行補強下，四個樓版區域之動態剛度反應比較。結果顯示，採用 Truss-A、Truss-B、Truss-C 三種鋁桁架進行補強，樓版四個區域之動態剛度無法滿足 Nikon 微影掃描機之規格。採用 Truss-D 方式進行樓版補強，可將區域 I、II、V 之動態剛度提升至掃描機之動態剛度規格之上，而區域 IV 在大部分頻段亦保持在規格以上，僅在 32Hz 時約略低於規格值。由動態剛度反應圖中亦可看出，採用尺寸較大的鋁桁架進行補強，可同時增加樓版區域的靜態剛度，且可提高其動態剛度。

## 5.6.2 局部補強

本節之局部補強乃針對較弱之樓版區域 V 採用鋁桁架進行剛度補強。考慮上節所採用之鋁桁架尺寸，樓版分析參數之設定如表 5.6 所示。圖 5.57 為結構樓版採用局部補強之 SAP2000 模擬分析結構。

圖 5.58 為區域 V 在樓版局部補強下之 Accelerance 反應比較。結果顯示，在經過鋁桁架補強之後，區域 V 之 Accelerance 反應可提升至滿足 Nikon 微影掃描機之最大容許規格值內。圖 5.59~5.62 分別為樓版局部補強下，區域 I、II、IV 之 Accelerance 反應，結果顯示，吾人針對區域 V 所進行的局部樓版補強，對於其他區域之 Accelerance 反應並無明顯的影響。

圖 5.63 為區域 V 在經過樓版局部補強下之動態剛度反應比較。結果顯示，在區域 V 採用鋁桁架進行局部樓版之剛度補強下，雖然無法滿足 Nikon 微影掃描機之規格要求，但仍可以提升該區域之靜態剛度及動態剛度峰值。圖 5.64~5.67 分別為其他區域在樓版局部補強下之動態剛度反應比較。結果顯示在局部補強後，對於其他區域之動態剛度及靜態剛度並無明顯之影響。

## 第六章 結論與建議

本研究完成之研究主題有二：(1)高科技設備之震害防制；(2)無塵室樓版之剛性補強。高科技設備震害防制方面：由於一般環境擾動力無法撼動摩擦單擺支承，故不會影響設備的生產良率，因此採用摩擦單擺支承進行設備隔震。分析時，隔震設備分別放置於短週期(0.3sec)及中常週期(0.7sec)的單自由度結構，以樓板加速度當作隔震設備的輸入地震波。本文探討隔震設備基座傾斜的動力行為，並發展出剪力平衡-速度迭代法解析隔震設備加裝非線性油壓阻尼器的動力行為。此外，本文研究完成了一系列的振動台試驗以驗證隔震平台之可行性。茲根據本文之模擬分析與振動台試驗結果歸納結論如下：

1. 隔震支承滑動介面之摩擦係數增大時，上傳至設備的加速度反應增大而隔震平台位移反應愈小；相對而言，當地震強度愈大時，隔震設備的加速度減震效益愈佳。
2. 當隔震設備基座傾斜時，對於設備之加速度反應較位於水平基座時影響不大，但隔震平台位移反應較水平基座時有明顯的偏移現象，且震後的殘留位移量也較大。
3. 隔震平台加裝油壓阻尼器進行設備防震時，同樣能降低設備的受震反應，但油壓阻尼器參數不同亦會影響減震效果。一般而言，採用特性係數( $\alpha$ )越小且阻尼係數( $c_d$ )越大時，設備加速度折減率及隔震平台位移越小；但若隔震設備週期與長週期地震卓越頻率接近時，隔震平台位移會因共振效應產生放大之現象。此時，隔震設備如能適當加裝油壓阻尼器可有效降低隔震平台位移量。
4. 由振動台實驗的結果可得知，
  - (1) 設備加裝隔震平台確實能大幅降低設備的受震反應。在隔震設計目標內，隔震平台耐震能力在 El Centro 地震及 Kobe 地震可承受七

級強度，而 TCU017 地震亦可承受六級強度。

- (2) 經振動台試驗證明，本文提出隔震平台置於傾斜基座的分析理論，確實能更精確地模擬隔震設備的受震反應。
- (3) 隔震平台加裝油壓緩衝器同樣能有效降低設備的受震反應。在隔震設計目標內，其耐震能力在 El Centro 地震可達七級強度，而 Kobe 地震及 TCU017 地震亦可達六級強度。

無塵室樓版剛性補強方面：本文採用 SAP2000 模擬廠房局部樓版，藉由改變邊界條件(跨度)、樓版厚度、梁尺寸等參數條件，探討樓版動態反應目標之趨勢。此外，針對剛性不足的樓版，本研究探討利用兼具質輕、空間穿透性佳及施工快速等特性的鋁桁架進行樓版補強的可行性。茲根據本文之模擬分析可歸納結論如下：

1. 在邊界條件的影響探討中，三種不同的模型所模擬出的樓版動態反應相近，而原始模型的動態反應較為大，採用局部樓版模擬樓版行為應屬保守面。
2. 增大樓版厚度或梁尺寸皆能提升樓版動態反應，而增大樓版厚度比增大梁尺寸更為有效。
3. 樓版全面採用鋁桁架補強下，確實能夠提升樓版整體的動態剛性；若在局部樓版進行鋁桁架補強，亦可提升該區域的動態剛性。

針對本研究仍有未盡之處，提供建議如下：

1. 經過隔震平台分析理論及振動台試驗後，證實傾斜基座確實會造成隔震平台動力反應的偏差。實際安裝隔震平台時，須設計一微調機構控制基座之水平度。
2. 進行 2.1ton 隔震設備振動台試驗中，隔震平台之鐵弗龍摩擦介子承受  $75 \text{ kgf/cm}^2$  的壓應力，並無明顯磨損的現象。若將來隔震平台運用於重量大於 2.1 噸的設備時，應針對鐵弗龍摩擦介子進行測試，找出其所能承受的最大壓應力。

3. 本文採用的油壓緩衝器與理想化油壓阻尼器特性不同，故本文所提之理論動力分析模式，尚無法進行擬合的工作。後續研究可針對油壓緩衝器元件測試結果，找出緩衝器的力學行為模式，進而解析隔震平台加裝油壓緩衝器的動力行為；或著採用理想油壓阻尼器進行隔震設備之振動台試驗，進一步驗證本文理論分析的可用性。
4. 本文針對無塵室樓版的動態反應進行一系列的模擬探討，後續研究可著眼於實際樓版動態反應與 SAP2000 模擬結果的差異性。



## 參考文獻

1. Wang, C.-Y., Chen, G.-P. and Jong, D.-T. (1994)., “The Detection of Active Faults on Taiwan Using Shallow Reflection Seismic.” TAO, 5, 177-193.
2. 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁(1998) 台灣活動斷層概論-五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書,經濟部中央地質調所特刊,第十號,全103 頁。
3. 國家地震工程研究中心, ”工業設施 921 震害報告”, 召集人: 林其璋, 中華民國八十八年十一月。
4. 陳淑惠(2002), 「經紀人漸成產險市場影響力中心-1000 大製造業投保, 五成以上靠保險軍師」, 現代保險, 第 165 期, pp.91~93.
5. 廖偉信(2004), “高科技產業設備防震加固設計”, 高科技廠房震害防治與微振量測研討會論文集, 第 41-68 頁
6. 王彥博(2004), “高科技產業之震害防制教育”, 教育部顧問室防災科技教育改進計畫
7. Disaster recovery after the Kobe Earthquake" Katsunosuke Aoyagi & Nobuo Toyoda , Future FAB Issue 2- Vol.1 p.63~p.65
8. 王彥博(2003), “我國高科技廠房之震害問題分析”, 高科技廠房震害防治研討會論文集, 第 78-107 頁
9. 王彥博(2004), “結構控制技術與系統識別研究-子計畫: 貴重醫療設備之震害防制(III)”, 中華民國國定科學委員會專題研究計畫成果報告
10. Kelly, J.M. (1986), “Aseismic Base Isolation : Review and Bibliography, “Soil Dyn. Earthquake Engrg., (5), pp.202-216.
11. 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.

12. Buckle, I.G. and Mayes, R.L.(1990), “Seismic Isolation History, Application and Performance-A World Review”, *Earthquake Spectra*, 6(2),pp.161-201.
13. Mokha, A., Constantiou, M. C., and Reinhorn, A. M., and Zayas, V. (1991), "Experimental Study of Friction Pendulum Isolation System," *J. Struct. Engrg.*, **ASCE**, 117(4), 1201-1217.
14. Martelli, A.,Parducci, A. and Forni, M.(1993), “State-of –the Art on Development and Application of Seismic Isolation and Innovative Seismic Design Techniques in Italy,”ATC-17-1 Technical Papers on Seismic Isolation, 401-402.
15. Constantinou, M. C., Tsopeles, 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.
16. 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, 2287-2290.
17. 王彥博(2004), “高科技廠房之震害分析與對策”, 高科技廠房震害防治與微振量測研討會論文集, 第 1-40 頁
18. Zant, P.V.(2000),”Microchip Fabrication-A Practical Guide to Semiconductor processing”, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Inc.
19. Keith, W.L., and Chris, A.P. (1999), “Micro-vibration criteria for 300 mm and beyond”, Semiconductor FABTECH, 10<sup>th</sup> Edition, pp. 167-170
20. 王彥博(2002), “高科技廠房之地震防災與微震控制”, 高科技廠房新工法與微振害防治研討會論文集, 1-17 頁

21. 鍾立來、王彥博、李建良(2003), “高科技廠房之微振動量測技術與理論分析”, 高科技廠房震害防治研討會論文集, 第 25-77 頁
22. 鍾立來、王彥博、李建良(2004), “高科技廠房微振量測之理論與分析”, 高科技廠房震害防治與微振量測研討會論文集, 第 69-95 頁
23. 李建良、鍾立來、王彥博(2004), “高科技廠房微振動量測之應用”, 高科技廠房震害防治與微振量測研討會論文集, 第 96-132 頁
24. 蔡顯耀(1999), “步行引致架高地板之振動之預測與評估”, 國立成功大學建築研究所碩士論文
25. 井上勝夫、木村翔等著, 1995, ”床行走時各部衝力特性”, 日本建築系計集 NO.477
26. 井上勝夫、木村翔等著, 1995, ”床特性衝源試作住宅床振動的特性”, 日本建築系計集 NO.483
27. 井上勝夫、木村翔等著, 1998, ”行感見住宅床感覺評研究”, 日本建築系計集 NO.504
28. C.Q. Howard, C.H. Hansen(2003), “Vibration analysis of waffle floors,” Computers and Structures 15-26.
29. 郭珍祥, 1996, ”機械或車輛引致結構及土壤之振動效應”, 台灣大學土木研究所碩士論文
30. 渡邊桃子、久野雅祥等著, 1997, ”微振動予測解析化範影響”, 日本建築大術演講集 40136
31. 林義祥, 1999, ”微電子廠房之動力特性與振動衰減”, 成功大學建築研究所碩士論文
32. 鍾慶樺(2001), “微電子廠之振動分析”, 國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文

33. Mostahgel, N. and Tanbakuchi, J.(1983) "Response of Sliding Structures to Earthquake Support Motion," Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol.11,pp33-56.
34. Wang, Y.P., Liu, G.J.,"Active Control of Sliding Structure under Strong Earthquake," Vol. III, 3-5 August, Los Angeles, California, U SA,pp. Fp1-23-32.
35. 葉德欽(1997), "隔震結構之耐震評估與控制," 國立交通大學土木工程研究所碩士論文.
36. 王彥博,李志成,黃清森(1994), "滑動隔震橋樑之耐震分析," 中華民國第二屆結構工程研討會,83年11月,日月潭,論文集(二),pp88-96.
37. 王彥博(1995), "橋樑隔震及消能控制研究(I): 橋樑之混合控制(I)," 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告,NSC84-2211-E-009-008.84年7月31日.
38. 王彥博(1997), "摩擦單擺隔震結構之耐震評估與控制(I)," 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告,NSC86-2621-P-009-005,86年7月31日.
39. Wang, Yen-Po, Chung, Lap-Loi and Liao, Wei-Hsin (1998), "Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1069-1093.
40. Wang, Yen-Po, and Wei-Hsin Liao (2000),"Dynamic Analysis of Sliding Structures with Unsynchronized Support Motions," Earthquake Engineering and Structural Dynamics,29,pp.297-313.
41. Wang Yen-Po, Liao, Wei-Hsin and Lee Chien-Liang (2001),"A state-space approach for dynamic analysis of sliding structures," Engineering Structures 23, pp.790-801.
42. Roy, R. and Craig, Jr., "Structural Dynamics," New York, John Wiley & Sons, 1981.

43. Mokha, A. S. Constantinou, M. C. and Reinhorn, A. M.(1990), “Teflon Bearing in Base Isolation. : Modeling,” J. Struct. Engrg., ASCE, Vol116, No.2, pp438-454.
44. Lopez-Almansa, F., Barbat, A. H., and Rodellar, J.(1988), “SSP Algorithm for Linear and Non-linear Dynamic Response Simulation,” Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, pp2687-2706.
45. 鍾立來、王彥博、楊創盛(1996), “結構動力數值分析之穩定性及精確性,” 中華民國結構工程學會, 結構工程, 第十一卷, 第四期, 第 55-66 頁.
46. 葉家君(2004), “液流阻尼器之非線性行為在結構控制上之研究,” 國立成功大學土木工程研究所碩士論文.



表 1.1 一般振動之特徵與對策

		外部振動源			內部振動源		
		交通振動	工事振動	工廠振動	建築、生產設備	步行、運動(作業)	
發生原因		*道路、軌道上分段行走、連續	*挖掘時地中障害、工事車輛行走	*工廠等衝擊力、生產機器的不平	*建築、生產設備機器及配管系加振力	*步行、運動、作業等人為衝擊力	
振動之特徵		*地盤、受振體之振動 *固體音	*衝擊振動 *短期間振動 *地盤、受振體振動	*週期的連續振動 *機器、受振體之振動	*週期的連續振動 *機器、受振體之振動 *固體音問題	*上下振動之支配 *運動、受振體之振動 *固體音問題	
防振對策留意點		*配置計畫之重視 *地盤振動對策困難	*工程、營管面調整之重視 *地盤振動對策困難	*配置計畫之重視 *地盤振動對策困難	*特殊機器設備計畫重視 *配管系考慮	*運動設施配置計畫 *與收容人員之重視	
防振對策	加振源對策	加振力之減低	*道路平坦度補正 *行走速度規則	*採用低振動工法 *重機具小型化 *挖掘速度規則	*機器變更 *平衡調整 *制振裝置設置	同左 *作業管理 *運動預定表變更 *人員規制	
		加振振動數變更	*速度規制值變更	--	*生產機器迴轉速變更	*預定表變更	
		基礎之改善	--	--	*基礎質量增加	--	
		防振支持	*軌道平板之防振	--	*機器基礎之防振材支持裝置	*浮式樓版構造	
	傳達路徑對策	配置計畫	*距離衰減考慮與建築物配置計畫	同左	交通政策對策	*距離衰減考慮與建築物配置計畫	同左
		路徑特性之變更	*採用振動遮斷壁			*間柱設置 *間隔變更	
		路徑之遮斷	*採用防振溝			*構造體分離	
	受振體對策	剛性、質量之提昇	*剛性補強 *重量構造種別採用	同左	交通政策對策	*剛性補強 *重量構造種別採用	同左
		衰減性能之提昇	*減振器之設置			*減振器之設置	
		防振裝置(免振裝置)	*免振支持裝置採用 *部分除振樓版設置			*部分除振樓版設置(浮式樓版)	

表 2.1 設備加速反應度峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

T <sub>FPS</sub> = 2 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.07	72	0.11	56	0.16	37
0.4	0.4	0.09	77	0.13	67	0.17	58
0.5	0.5	0.11	79	0.14	72	0.18	63
1	1	0.22	78	0.21	79	0.25	76
T <sub>FPS</sub> = 3 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.06	77	0.10	58	0.15	38
0.4	0.4	0.07	83	0.11	72	0.16	60
0.5	0.5	0.07	86	0.12	77	0.16	67
1	1	0.11	89	0.15	85	0.19	81
T <sub>FPS</sub> = 4 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.06	78	0.10	59	0.15	39
0.4	0.4	0.06	85	0.11	73	0.16	61
0.5	0.5	0.06	88	0.11	78	0.16	68
1	1	0.08	92	0.13	88	0.17	83

表 2.2 設備位移反應峰值比較 (El Centro ,  $T_g = 0.3\text{sec}$  ,  $W = 3\text{ton}$ )

$T_{FPS} = 2 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	2.11	0.86	0.73
0.4	4.06	3.14	2.06
0.5	5.53	4.21	3.28
1	16.8	11.05	9.59
$T_{FPS} = 3 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	1.82	0.96	0.79
0.4	3.91	2.88	1.99
0.5	5.09	3.64	3.19
1	14.2	10.18	9.31
$T_{FPS} = 4 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	1.83	0.99	0.81
0.4	3.63	2.66	2.21
0.5	4.96	3.67	3.28
1	13.55	9.93	9.33

表 2.3 設備加速度反應峰值比較 (El Centro,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

T <sub>FPS</sub> = 2 sec							
PFA (g)	Fixed	μ=0.05		μ=0.1		μ=0.15	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.10	58	0.145	42	0.17	33
0.4	0.4	0.14	64	0.18	54	0.22	45
0.5	0.5	0.18	64	0.21	58	0.24	51
1	1	0.37	63	0.36	65	0.37	63
T <sub>FPS</sub> = 3 sec							
PFA (g)	Fixed	μ=0.05		μ=0.1		μ=0.15	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.08	69	0.12	53	0.16	37
0.4	0.4	0.10	76	0.14	66	0.18	56
0.5	0.5	0.11	78	0.15	70	0.19	62
1	1	0.19	81	0.22	78	0.26	74
T <sub>FPS</sub> = 4 sec							
PFA (g)	Fixed	μ=0.05		μ=0.1		μ=0.15	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.07	73	0.11	56	0.15	38
0.4	0.4	0.08	81	0.13	69	0.17	58
0.5	0.5	0.08	84	0.13	73	0.18	65
1	1	0.10	90	0.16	84	0.22	78

表 2.4 設備位移反應峰值比較 (El Centro ,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$  ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

$T_{FPS} = 2 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	5.38	4.48	1.68
0.4	9.47	8.37	7.1
0.5	12.86	10.76	9.44
1	31.76	25.72	22.25
$T_{FPS} = 3 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	5.74	3.81	1.7
0.4	10.68	8.16	6.38
0.5	13.89	11.49	9.43
1	31.28	27.77	25.5
$T_{FPS} = 4 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	6.71	3.66	1.7
0.4	10.28	10.2	6.71
0.5	11.9	13.42	9.9
1	20.58	23.8	27.05

表 2.5 設備加速度反應峰值比較 (TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

T <sub>FPS</sub> = 2 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.13	47	0.11	54	0.16	36
0.4	0.4	0.27	32	0.20	51	0.17	57
0.5	0.5	0.39	21	0.27	47	0.23	54
1	1	1.07	-7	0.79	21	0.60	40
T <sub>FPS</sub> = 3 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.10	62	0.11	58	0.15	38
0.4	0.4	0.16	59	0.15	62	0.16	60
0.5	0.5	0.21	58	0.19	62	0.19	62
1	1	0.38	62	0.42	58	0.40	60
T <sub>FPS</sub> = 4 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.08	68	0.10	59	0.15	39
0.4	0.4	0.12	69	0.13	67	0.16	61
0.5	0.5	0.15	69	0.16	68	0.17	65
1	1	0.28	72	0.31	69	0.31	69

表 2.6 設備位移反應峰值比較 (TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

$T_{FPS} = 2\text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	8.27	1.41	0.87
0.4	22.14	9.62	2.31
0.5	34.31	16.54	7.78
1	102.11	68.62	45.13
$T_{FPS} = 3\text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	10.31	1.25	0.89
0.4	25.38	11.41	2.26
0.5	35.47	20.63	8.78
1	73.4	70.95	55.55
$T_{FPS} = 4\text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	11.55	1.18	0.89
0.4	29.52	12.39	2.32
0.5	41.75	23.1	9.2
1	92.14	83.5	63.81

表 2.7 設備加速度反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

T <sub>FPS</sub> = 2 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.18	29	0.17	33	0.18	28
0.4	0.4	0.31	23	0.27	32	0.27	33
0.5	0.5	0.40	20	0.35	29	0.34	33
1	1	0.96	4	0.80	20	0.75	26
T <sub>FPS</sub> = 3 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.11	57	0.14	46	0.17	34
0.4	0.4	0.16	61	0.18	54	0.21	48
0.5	0.5	0.19	63	0.22	57	0.24	52
1	1	0.32	68	0.37	63	0.40	60
T <sub>FPS</sub> = 4 sec							
PFA (g)	Fixed	$\mu=0.05$		$\mu=0.1$		$\mu=0.15$	
	acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
0.25	0.25	0.08	67	0.12	52	0.16	36
0.4	0.4	0.11	72	0.15	63	0.19	54
0.5	0.5	0.13	74	0.17	67	0.20	59
1	1	0.24	76	0.26	74	0.30	70

表 2.8 設備位移反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

$T_{FPS} = 2 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	12.69	6.82	3.12
0.4	25.83	17.36	11.79
0.5	35.07	25.38	18.66
1	90.61	70.14	59.51
$T_{FPS} = 3 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	12.99	7.77	3.38
0.4	23.53	18.5	13.28
0.5	30.12	25.98	20.11
1	61.31	60.25	56.56
$T_{FPS} = 4 \text{ sec}$			
PFA (g)	Displacement (cm)		
	$\mu=0.05$	$\mu=0.1$	$\mu=0.15$
0.25	13.2	8.35	3.49
0.4	24.29	19.04	14.24
0.5	31.52	26.4	21.05
1	75.15	63.03	58.52

表 2.9 設備加速度反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  
 $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

<b>PFA (g)</b>		<b>0.25</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>
$\psi = -0.1$	acc. (g)	0.145	0.159	0.169	0.222
	ER (%)	33.0	21.4	19.0	5.2
$\psi = -0.05$	acc. (g)	0.133	0.131	0.147	0.217
	ER (%)	22.0	0.0	3.5	2.8
$\psi = -0.03$	acc. (g)	0.127	0.128	0.144	0.218
	ER (%)	16.5	2.3	1.4	3.3
$\psi = 0$	acc. (g)	0.109	0.131	0.142	0.211
$\psi = 0.03$	acc. (g)	0.125	0.132	0.139	0.211
	ER (%)	14.7	0.8	2.1	0.0
$\psi = 0.05$	acc. (g)	0.148	0.150	0.152	0.207
	ER (%)	35.8	14.5	7.0	1.9
$\psi = 0.1$	acc. (g)	0.161	0.181	0.177	0.211
	ER (%)	47.7	38.2	24.6	0.0

$$* ER = \frac{|\ddot{x}(0) - \ddot{x}(\psi)|}{\ddot{x}(0)} \times 100\%$$

表 2.10 設備加速度反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  
 $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

<b>PFA (g)</b>		<b>0.25</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>
$\psi = -0.1$	acc. (g)	0.151	0.193	0.262	0.777
	ER (%)	32.5	1.5	1.1	1.1
$\psi = -0.05$	acc. (g)	0.137	0.195	0.264	0.783
	ER (%)	20.2	0.5	0.4	0.4
$\psi = -0.03$	acc. (g)	0.129	0.195	0.265	0.784
	ER (%)	13.2	0.5	0.0	0.3
$\psi = 0$	acc. (g)	0.114	0.196	0.265	0.786
$\psi = 0.03$	acc. (g)	0.125	0.197	0.266	0.787
	ER (%)	9.6	0.5	0.4	0.1
$\psi = 0.05$	acc. (g)	0.145	0.197	0.266	0.787
	ER (%)	27.2	0.5	0.4	0.1
$\psi = 0.1$	acc. (g)	0.161	0.197	0.266	0.786
	ER (%)	41.2	0.5	0.4	0.0

表 3.1 設備加速度反應峰值比較表 (El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.113	54.8	0.138	44.8	0.174	30.4	0.202	19.2	0.216	13.6
	0.4	0.4	0.131	67.25	0.152	62	0.204	49	0.252	37	0.276	31
	0.5	0.5	0.14	72	0.167	66.6	0.22	56	0.273	45.4	0.304	39.2
1	1	0.212	78.8	0.231	76.9	0.287	71.3	0.342	65.8	0.389	61.1	
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.113	54.8	0.127	49.2	0.152	39.2	0.173	30.8	0.184	26.4
	0.4	0.4	0.131	67.25	0.145	63.75	0.182	54.5	0.215	46.25	0.237	40.75
	0.5	0.5	0.14	72	0.155	69	0.193	61.4	0.238	52.4	0.26	48
1	1	0.212	78.8	0.226	77.4	0.273	72.7	0.323	67.7	0.357	64.3	
$\alpha = 1$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.113	54.8	0.114	54.4	0.122	51.2	0.131	47.6	0.138	44.8
	0.4	0.4	0.131	67.25	0.132	67	0.143	64.25	0.161	59.75	0.172	57
	0.5	0.5	0.14	72	0.14	72	0.159	68.2	0.177	64.6	0.196	60.8
1	1	0.212	78.8	0.211	78.9	0.249	75.1	0.284	71.6	0.308	69.2	

表 3.2 設備位移反應峰值比較表 (El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.32	0.84	36.4	0.5	62.1	0.29	78.0	0.2	84.8	
	0.4	3.04	2.19	28.0	1.53	49.7	1.11	63.5	0.89	70.7	
	0.5	4.02	3.33	17.2	2.54	36.8	1.78	55.7	1.45	63.9	
	1	11.18	8.95	19.9	7.08	36.7	6.25	44.1	5.19	53.6	
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.32	0.98	25.8	0.75	43.2	0.59	55.3	0.52	60.6	
	0.4	3.04	2.58	15.1	2.03	33.2	1.46	52.0	1.27	58.2	
	0.5	4.02	3.29	18.2	2.63	34.6	2.3	42.8	1.71	57.5	
	1	11.18	9.41	15.8	7.59	32.1	6.07	45.7	5.57	50.2	
$\alpha = 1$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.32	1.22	7.6	0.94	28.8	0.91	31.1	0.93	29.5	
	0.4	3.04	2.72	10.5	2.42	20.4	2.16	28.9	2.02	33.6	
	0.5	4.02	3.57	11.2	3.13	22.1	2.78	30.8	2.66	33.8	
	1	11.18	10.08	9.8	8.57	23.3	7.41	33.7	6.93	38.0	

表 3.3 設備加速度反應峰值比較表 (El Centro,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.142	43.2	0.159	36.4	0.19	24	0.217	13.2	0.229	8.4
	0.4	0.4	0.181	54.75	0.203	49.25	0.249	37.75	0.286	28.5	0.308	23
	0.5	0.5	0.205	59	0.233	53.4	0.285	43	0.329	34.2	0.356	28.8
1	1	0.364	63.6	0.366	63.4	0.412	58.8	0.483	51.7	0.532	46.8	
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.142	43.2	0.151	39.6	0.174	30.4	0.195	22	0.206	17.6
	0.4	0.4	0.181	54.75	0.195	51.25	0.234	41.5	0.27	32.5	0.288	28
	0.5	0.5	0.205	59	0.221	55.8	0.265	47	0.313	37.4	0.337	32.6
1	1	0.364	63.6	0.362	63.8	0.395	60.5	0.475	52.5	0.528	47.2	
$\alpha = 1$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.142	43.2	0.144	42.4	0.154	38.4	0.166	33.6	0.171	31.6
	0.4	0.4	0.181	54.75	0.184	54	0.206	48.5	0.232	42	0.251	37.25
	0.5	0.5	0.205	59	0.205	59	0.236	52.8	0.277	44.6	0.299	40.2
1	1	0.364	63.6	0.35	65	0.387	61.3	0.479	52.1	0.534	46.6	

表 3.4 設備位移反應峰值比較表 (El Centro,  $T_S = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$			$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	4.26	2.65	37.8	1.2	71.8	0.6	85.9	0.37	91.3		
	0.4	8.07	6.67	17.3	4.74	41.3	2.9	64.1	2.16	73.2		
	0.5	10.53	9.47	10.1	7.61	27.7	5.27	50.0	4.08	61.3		
	1	26.39	22.37	15.2	18.62	29.4	16.83	36.2	15.42	41.6		
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$			$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	4.26	3.05	28.4	1.88	55.9	1.31	69.2	1.05	75.4		
	0.4	8.07	7.04	12.8	5.44	32.6	4.25	47.3	3.52	56.4		
	0.5	10.53	9.37	11.0	7.68	27.1	6.46	38.7	5.4	48.7		
	1	26.39	22.82	13.5	18.79	28.8	16.52	37.4	15.64	40.7		
$\alpha = 1$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$			$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	4.26	3.88	8.9	3.17	25.6	2.68	37.1	2.32	45.5		
	0.4	8.07	7.5	7.1	6.35	21.3	5.56	31.1	5.25	34.9		
	0.5	10.53	9.34	11.3	8.31	21.1	7.47	29.1	6.98	33.7		
	1	26.39	23.12	12.4	19.26	27.0	17.14	35.1	15.71	40.5		

表 3.5 設備加速度反應峰值比較表 (TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.114	54.4	0.141	43.6	0.179	28.4	0.207	17.2	0.22	12
	0.4	0.4	0.196	51	0.177	55.75	0.214	46.5	0.261	34.75	0.287	28.25
	0.5	0.5	0.265	47	0.231	53.8	0.233	53.4	0.288	42.4	0.32	36
	1	1	0.786	21.4	0.58	42	0.49	51	0.462	53.8	0.462	53.8
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.114	54.4	0.131	47.6	0.158	36.8	0.179	28.4	0.19	24
	0.4	0.4	0.196	51	0.179	55.25	0.194	51.5	0.231	42.25	0.252	37
	0.5	0.5	0.265	47	0.235	53	0.229	54.2	0.262	47.6	0.288	42.4
	1	1	0.786	21.4	0.588	41.2	0.49	51	0.47	53	0.472	52.8
$\alpha = 1$	PFA (g)	Fixed	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.114	54.4	0.118	52.8	0.128	48.8	0.139	44.4	0.145	42
	0.4	0.4	0.196	51	0.184	54	0.18	55	0.188	53	0.201	49.75
	0.5	0.5	0.265	47	0.243	51.4	0.23	54	0.234	53.2	0.246	50.8
	1	1	0.786	21.4	0.595	40.5	0.496	50.4	0.478	52.2	0.484	51.6

表 3.6 設備位移反應峰值比較表 (TCU017,  $T_s = 0.3 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.41	24.1	1.07	53.2	0.66	72.3	0.39	82.3	0.25	82.3
	0.4	9.56	50.0	4.78	80.3	1.88	84.7	1.46	87.7	1.18	87.7
	0.5	16.52	39.4	10.01	74.5	4.21	86.3	2.27	88.1	1.97	88.1
	1	68.56	35.7	44.11	58.6	28.38	72.9	18.57	80.0	13.69	80.0
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.41	16.3	1.18	36.2	0.9	50.4	0.7	58.2	0.59	58.2
	0.4	9.56	35.3	6.19	65.5	3.3	80.5	1.86	83.1	1.62	83.1
	0.5	16.52	29.7	11.62	58.7	6.82	75.2	4.1	81.9	2.99	81.9
	1	68.56	33.1	45.9	55.6	30.43	67.8	22.09	74.0	17.85	74.0
$\alpha = 1$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	1.41	7.1	1.31	16.3	1.18	24.1	1.07	28.4	1.01	28.4
	0.4	9.56	15.9	8.04	33.3	6.38	45.5	5.21	51.9	4.6	51.9
	0.5	16.52	16.4	13.81	34.1	10.88	46.7	8.81	53.2	7.73	53.2
	1	68.56	29.7	48.19	50.0	34.27	60.8	26.86	65.3	23.8	65.3

表 3.7 設備加速度反應峰值比較表 (TCU017,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ ,  $\mu = 0.1$ )

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	Fix	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.168	32.8	0.176	29.6	0.202	19.2	0.223	10.8	0.232	7.2
	0.4	0.4	0.274	31.5	0.264	34	0.281	29.75	0.31	22.5	0.328	18
	0.5	0.5	0.354	29.2	0.331	33.8	0.339	32.2	0.365	27	0.385	23
	1	1	0.802	19.8	0.712	28.8	0.666	33.4	0.666	33.4	0.677	32.3
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	Fix	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.168	32.8	0.172	31.2	0.19	24	0.207	17.2	0.215	14
	0.4	0.4	0.274	31.5	0.262	34.5	0.276	31	0.298	25.5	0.312	22
	0.5	0.5	0.354	29.2	0.33	34	0.337	32.6	0.358	28.4	0.375	25
	1	1	0.802	19.8	0.702	29.8	0.658	34.2	0.667	33.3	0.684	31.6
$\alpha = 1$	PFA (g)	Fix	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		acc. (g)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)	acc. (g)	red. (%)
	0.25	0.25	0.168	32.8	0.166	33.6	0.173	30.8	0.182	27.2	0.188	24.8
	0.4	0.4	0.274	31.5	0.259	35.25	0.266	33.5	0.281	29.75	0.292	27
	0.5	0.5	0.354	29.2	0.326	34.8	0.331	33.8	0.35	30	0.363	27.4
	1	1	0.802	19.8	0.677	32.3	0.649	35.1	0.681	31.9	0.707	29.3

表 3.8 設備位移反應峰值比較表 TCU017 ,  $T_S = 0.7 \text{ sec}$  ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$  ,  $W = 3 \text{ ton}$  ,  $\mu = 0.1$

$\alpha = 0.3$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.3}$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	6.81	4.5	33.9	2.32	65.9	1.13	83.4	0.7	89.7
	0.4	17.36	12.7	26.8	8.14	53.1	5.37	69.1	4.05	76.7
	0.5	25.4	19.21	24.4	13.02	48.7	9.03	64.4	7.16	71.8
	1	70.17	56.66	19.3	43.64	37.8	34.68	50.6	29.82	57.5
$\alpha = 0.5$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^{0.5}$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	6.81	5.18	23.9	3.6	47.1	2.52	63.0	2.01	70.5
	0.4	17.36	13.59	21.7	9.71	44.1	7.19	58.6	5.99	65.5
	0.5	25.4	20.1	20.9	14.73	42.0	11.08	56.4	9.3	63.4
	1	70.17	56.38	19.7	43.4	38.2	35.06	50.0	30.74	56.2
$\alpha = 1$	PFA (g)	$c_d = 0 \text{ kgf/(m/s)}^1$	$c_d = 200 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 500 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 800 \text{ kgf/(m/s)}^1$		$c_d = 1000 \text{ kgf/(m/s)}^1$	
		disp.(cm)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)	disp.(cm)	red.(%)
	0.25	6.81	6.08	10.7	5.23	23.2	4.59	32.6	4.23	37.9
	0.4	17.36	14.9	14.2	12.22	29.6	10.29	40.7	9.27	46.6
	0.5	25.4	21.3	16.1	17.23	32.2	14.42	43.2	12.93	49.1
	1	70.17	54.8	21.9	41.77	40.5	34.06	51.5	30.34	56.8

表 4.1 隔震設備反應比較(El Centro)

<b>Input=El Centro Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.08	0.08	0	0.0
	0.19	0.10	47	0.2
	0.23	0.10	57	0.7
六級烈震 (250~400gal)	0.35	0.10	71	2.4
	0.37	0.11	70	3.0
七級劇震 (400gal 以上)	0.40	0.12	70	3.6
	0.43	0.12	72	4.4
	0.58	0.13	78	4.7
<b>Input=El Centro Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.12	0.09	25	0.1
	0.19	0.09	53	0.3
	0.23	0.09	61	0.6
六級烈震 (250~400gal)	0.33	0.10	70	1.7
七級劇震 (400gal 以上)	0.43	0.11	74	3.8
	0.52	0.13	75	4.4
	0.59	0.13	78	5.1

表 4.2 隔震設備反應比較(Kobe)

<b>Input=Kobe Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.10	0.10	0	0.0
	0.19	0.11	42	0.6
六級烈震 (250~400gal)	0.28	0.11	61	1.4
七級劇震 (400gal 以上)	0.40	0.11	73	1.5
	0.50	0.10	80	2.6
<b>Input=Kobe Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.1	0.10	0	0
	0.19	0.13	42	0.6
六級烈震 (250~400gal)	0.30	0.13	57	1.3
七級劇震 (400gal 以上)	0.45	0.13	71	1.9
	0.58	0.13	78	2.1

表 4.3 隔震設備反應比較(TCU017)

<b>Input=TCU017 Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.12	0.11	8	0.0
	0.16	0.11	31	0.6
	0.21	0.11	48	2.4
六級烈震 (250~400gal)	0.27	0.12	56	4.6
<b>Input=TCU017 Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>PFA(g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.17	0.10	41	1.3
	0.22	0.11	50	3
六級烈震 (250~400gal)	0.28	0.13	54	4.9

表 4.4 隔震支承摩擦係數及傾斜角理論模擬

<b>Earthquake wave</b>	<b>w=1.1ton</b>		<b>w=2.1ton</b>	
	$\mu$	$\psi$	$\mu$	$\psi$
<b>El Centro</b>	0.08	0.003	0.08	0.003
<b>Kobe</b>	0.08	0.003	0.08	0.003
<b>TCU017</b>	0.08	0.003	0.07	0.003

表 4.5 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(El Centro)

<b>Input=El Centro Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.14	0.10	29	0.1
	0.18	0.13	28	0.2
	0.22	0.15	32	0.2
六級烈震 (250~400gal)	0.31	0.17	45	0.3
七級劇震 (400gal 以上)	0.42	0.18	57	0.6
	0.45	0.19	58	0.7
	0.54	0.20	63	1.2
	0.57	0.21	63	1.7
	0.69	0.23	67	2.5
<b>Input=El Centro Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.10	0.10	0	0.0
	0.17	0.15	12	0.1
六級烈震 (250~400gal)	0.26	0.17	35	0.1
	0.29	0.18	38	0.2
	0.32	0.18	44	0.3
七級劇震 (400gal 以上)	0.43	0.19	56	0.5
	0.50	0.19	62	0.9
	0.54	0.21	61	1.6

表 4.6 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(Kobe)

<b>Input=Kobe Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.10	0.10	0	0.0
	0.17	0.15	12	0.1
六級烈震 (250~400gal)	0.26	0.19	27	0.5
七級劇震 (400gal 以上)	0.41	0.21	49	1.2
	0.62	0.23	63	2.2
<b>Input=Kobe Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>Intensity(g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.10	0.10	0	0.0
	0.21	0.16	24	0.2
六級烈震 (250~400gal)	0.26	0.17	35	0.6
	0.33	0.19	42	1.0
七級劇震 (400gal 以上)	0.64	0.23	64	2.6

表 4.7 隔震設備加裝油壓緩衝器反應比較(TCU017)

<b>Input=TCU017 Earthquake (w=1.1ton)</b>				
<b>PFA(g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.12	0.11	8	0.0
	0.18	0.16	11	0.1
	0.24	0.18	25	0.4
六級烈震 (250~400gal)	0.30	0.20	33	0.8
<b>Input=TCU017 Earthquake (w=2.1ton)</b>				
<b>PFA (g)</b>		<b>Peak Acceleration(g)</b>		<b>Max. Sliding Displacement (cm)</b>
		<b>Isolated</b>	<b>Reduction (%)</b>	
五級強震 (80~250gal)	0.13	0.12	8	0.0
	0.18	0.15	17	0.1
六級烈震 (250~400gal)	0.26	0.18	31	0.5
	0.33	0.19	42	1.2

表 5.1 衝擊載重試驗之頻域反應函數與其反函數

振動反應物理量	頻域反應函數	頻域反應反函數
位移	Receptance/Compliance	Dynamic Stiffness
速度	Mobility	Mechanical Impedance
加速度	Inertance/Accelerance	Apparent Mass

表 5.2 不同邊界條件下之參數設定

	<b>Boundary-A</b>	<b>Boundary-B</b>	<b>Boundary-C</b>
樓板厚度(mm)	20	20	20
樓層高(mm)	4500	4500	4500
大梁尺寸-寬*高(mm)	500*1000	500*1000	500*1000
小梁尺寸-寬*高(mm)	400*800	400*800	400*800
大柱尺寸-寬*高(mm)	1000*1000	1000*1000	1000*1000
小柱尺寸-寬*高(mm)	400*400	400*400	400*400
結構跨數	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>
模態數量	129	415	600
有效質量比(%)	100	100	75
衝擊載重(kgf)	40	40	40

表 5.3 不同樓版厚度下之參數設定

	<b>Floor-A</b>	<b>Floor-B</b>	<b>Floor-C</b>	<b>Floor-D</b>	<b>Floor-E</b>
樓板厚度(mm)	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
樓層高度(mm)	4500	4500	4500	4500	4500
大梁尺寸-寬*高 (mm)	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000
小梁尺寸-寬*高 (mm)	400*800	400*800	400*800	400*800	400*800
大柱尺寸-寬*高 (mm)	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000
小柱尺寸-寬*高 (mm)	400*400	400*400	400*400	400*400	400*400
結構跨數	3	3	3	3	3
模態數量	74	74	111	129	189
有效質量比(%)	100	100	100	100	100
衝擊載重(kgf)	40	40	40	40	40

表 5.4 不同梁尺寸下之參數設定

	<b>Beam-A</b>	<b>Beam-B</b>	<b>Beam-C</b>	<b>Beam-D</b>	<b>Beam-E</b>
樓板厚度(mm)	20	20	20	20	20
樓層高度(mm)	4500	4500	4500	4500	4500
大梁尺寸-寬*高 (mm)	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000
小梁尺寸-寬*高 (mm)	<b>500*1000</b>	<b>400*800</b>	<b>300*600</b>	<b>200*400</b>	<b>100*200</b>
大柱尺寸-寬*高 (mm)	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000
小柱尺寸-寬*高 (mm)	400*400	400*400	400*400	400*400	400*400
結構跨數	3	3	3	3	3
模態數量	140	129	115	104	79
有效質量比(%)	100	100	100	100	100
衝擊載重(kgf)	40	40	40	40	40

表 5.5 結構樓版採用全面鋁桁架補強下之參數設定

	<b>Truss-A</b>	<b>Truss-B</b>	<b>Truss-C</b>	<b>Truss-D</b>
樓板厚度(mm)	20	20	20	20
樓層高度(mm)	4500	4500	4500	4500
大梁尺寸-寬*高(mm)	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000
小梁尺寸-寬*高(mm)	400*800	400*800	400*800	400*800
大柱尺寸-寬*高(mm)	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000
小柱尺寸-寬*高(mm)	400*400	400*400	400*400	400*400
結構跨數	3	3	3	3
桁架-直徑*管厚(mm)	<b>w/o</b>	<b>216.5*8</b>	<b>318.5*9</b>	<b>406.4*19</b>
模態數量	129	135	131	135
有效質量比(%)	100	100	100	100
衝擊載重(kgf)	40	40	40	40

表 5.6 結構樓版採用局部鋁桁架補強下之參數設定

	<b>LTruss-A</b>	<b>LTruss-B</b>	<b>LTruss-C</b>	<b>LTruss-D</b>
樓板厚度(mm)	20	20	20	20
樓層高度(mm)	4500	4500	4500	4500
大梁尺寸-寬*高(mm)	500*1000	500*1000	500*1000	500*1000
小梁尺寸-寬*高(mm)	400*800	400*800	400*800	400*800
大柱尺寸-寬*高(mm)	1000*1000	1000*1000	1000*1000	1000*1000
小柱尺寸-寬*高(mm)	400*400	400*400	400*400	400*400
結構跨數	3	3	3	3
桁架-直徑*管厚(mm)	<b>w/o</b>	<b>216.5*8</b>	<b>318.5*9</b>	<b>406.4*19</b>
模態數量	129	125	126	126
有效質量比(%)	100	100	100	100
衝擊載重(kgf)	40	40	40	40

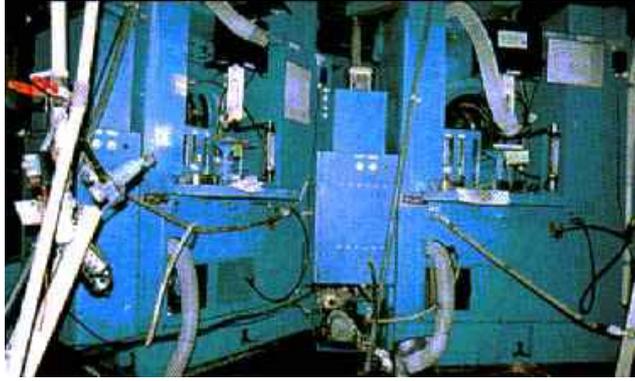


圖 1.1 線切割機台移位而發生碰撞

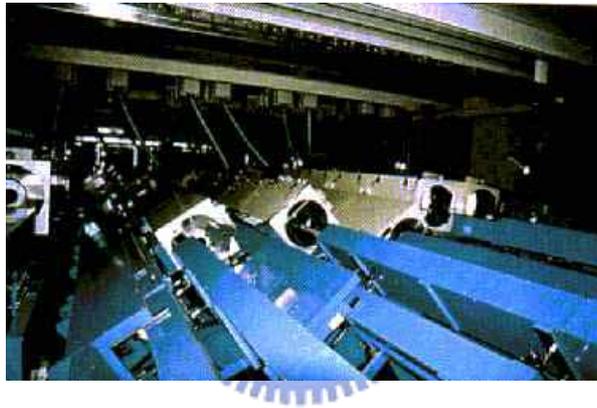


圖 1.2 長晶爐管傾覆破壞



圖 1.3 晶舟(bolt)與石英內管破裂



圖 1.4 機台腳柱彎曲破壞

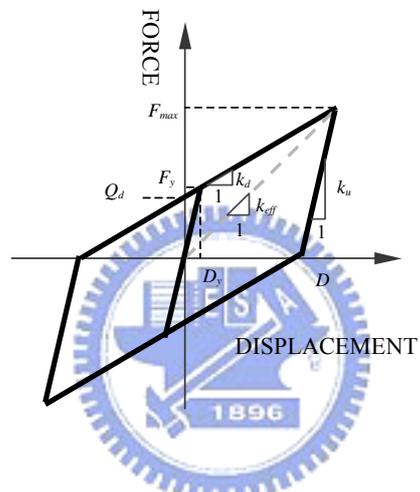


圖 1.5 鉛心橡膠支承之剪力遲滯迴圈

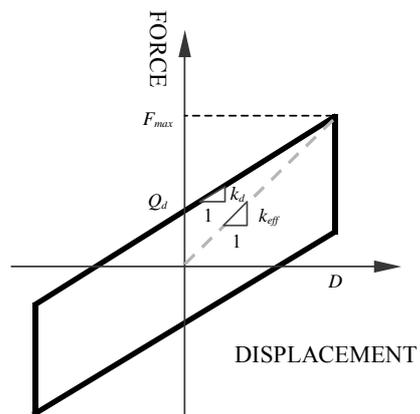


圖 1.6 摩擦單擺支承之剪力遲滯迴圈

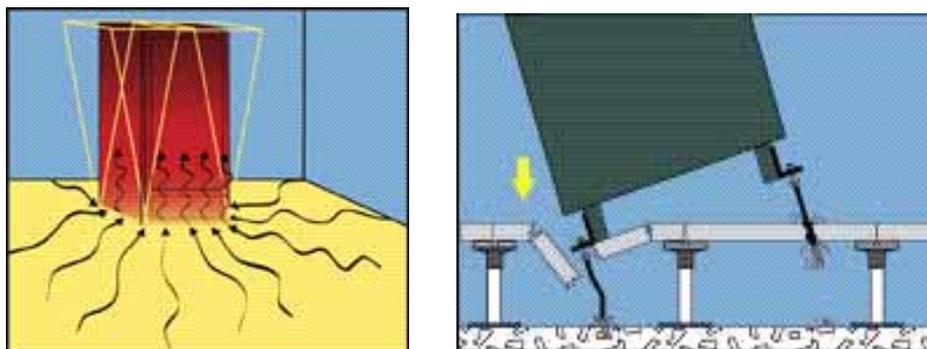


圖 1.7 設備基座採固定方式之振動行為與後果

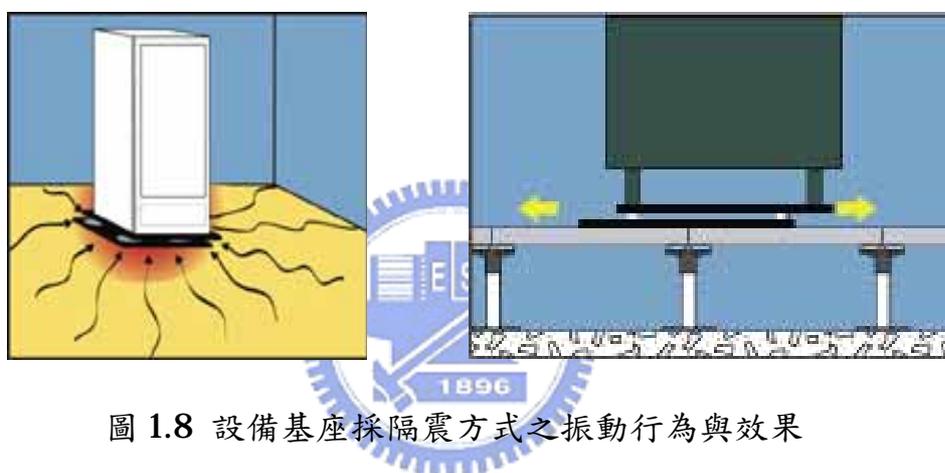


圖 1.8 設備基座採隔震方式之振動行為與效果

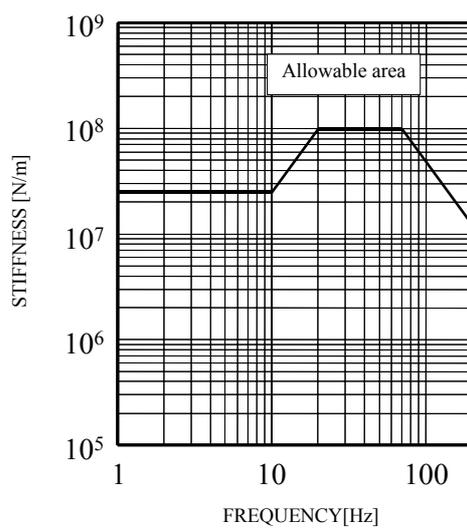


圖 1.9 CANON 微影設備動態剛度規格要求

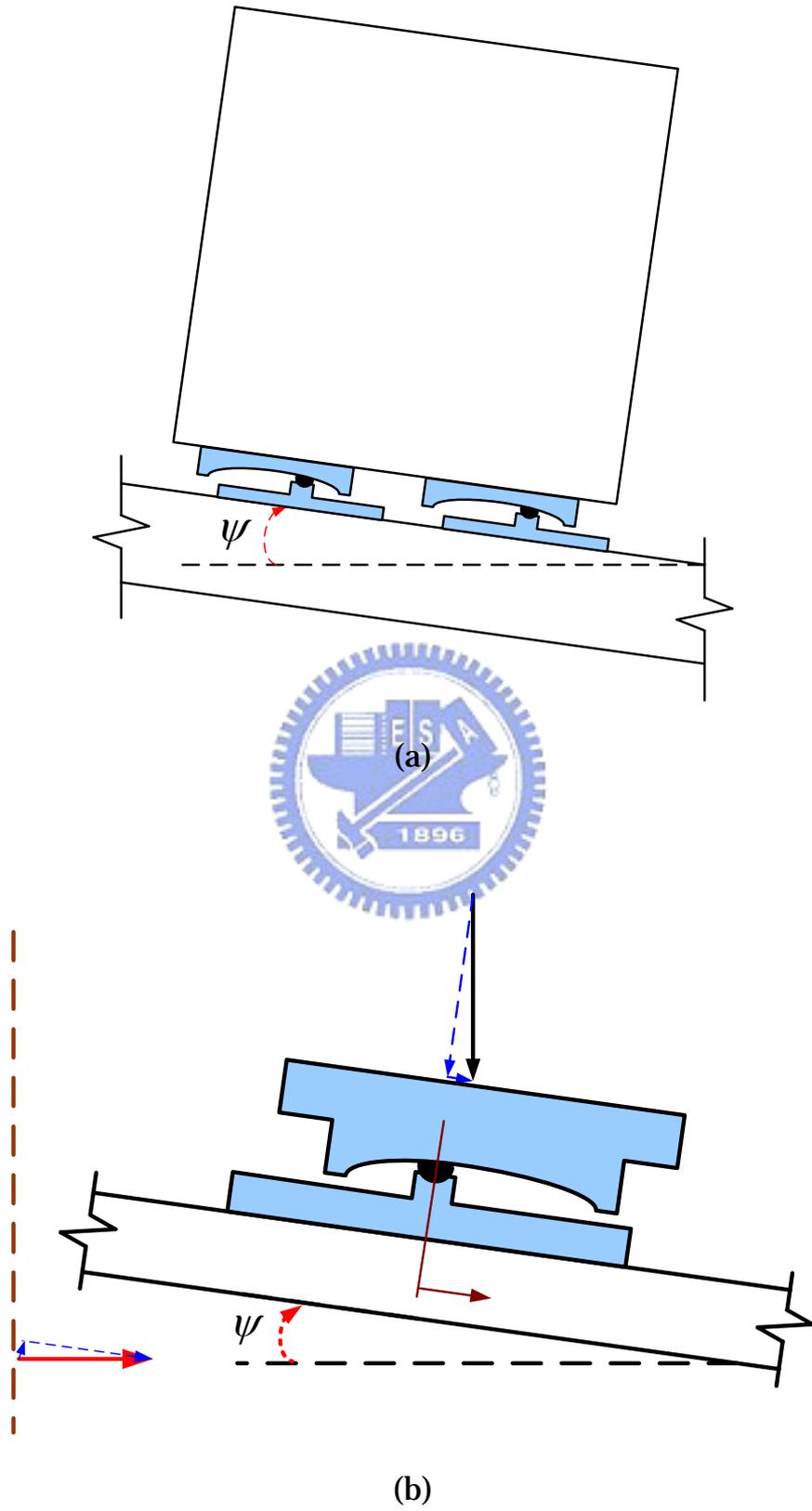


圖 2.1 摩擦支承分析模型

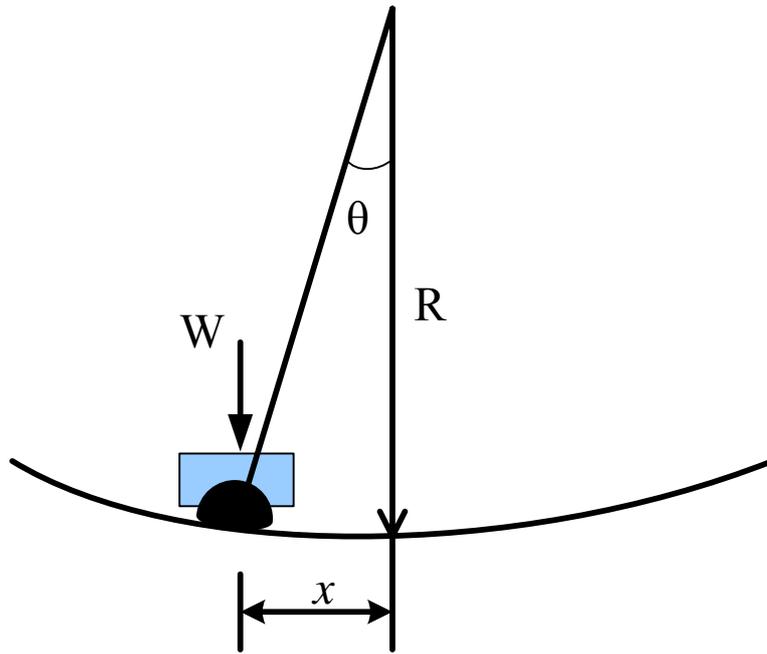


圖 2.2 摩擦單擺支承運動行為

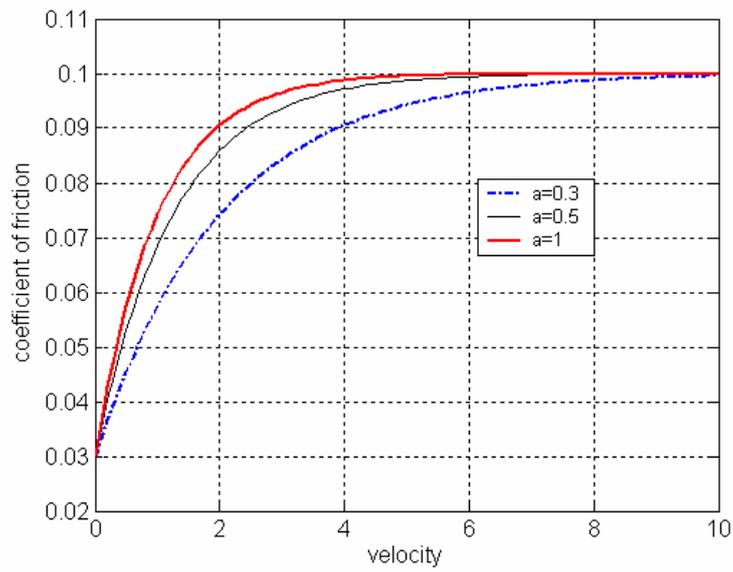


圖 2.3 Mokha 模式中摩擦係數與滑動速度之關係

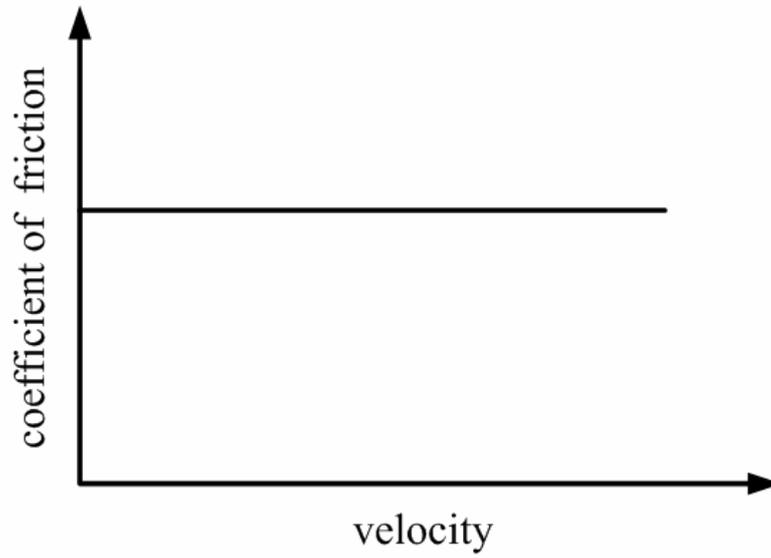


圖 2.4 庫侖模式中摩擦係數與滑動速度之關係

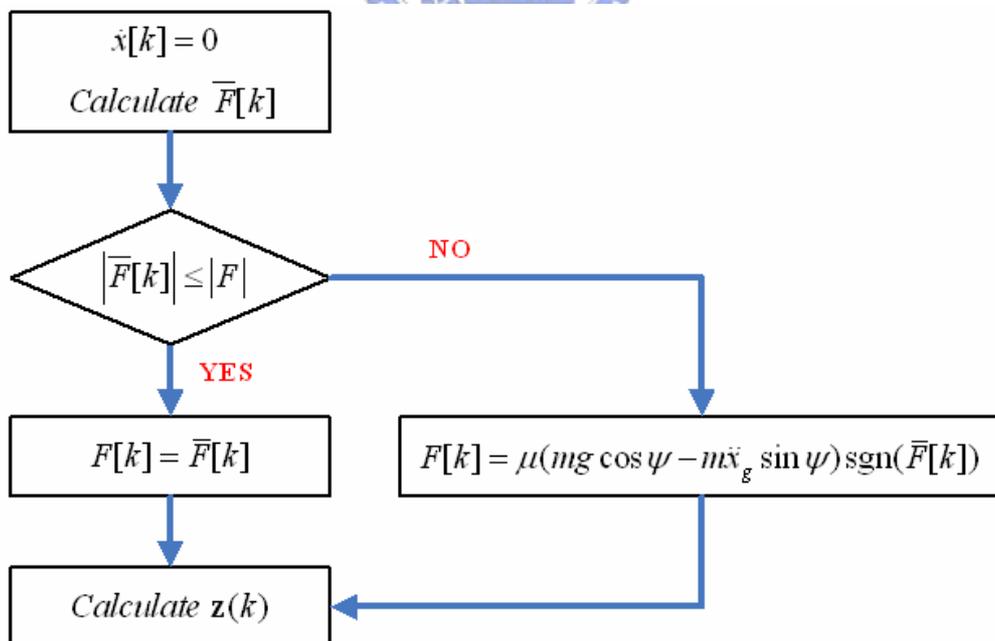
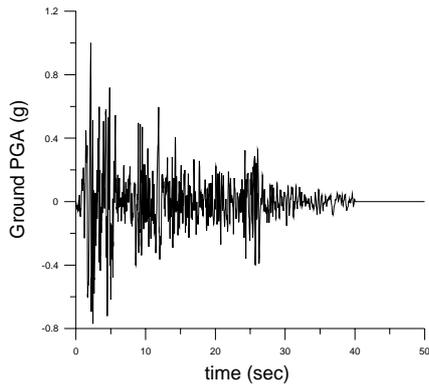
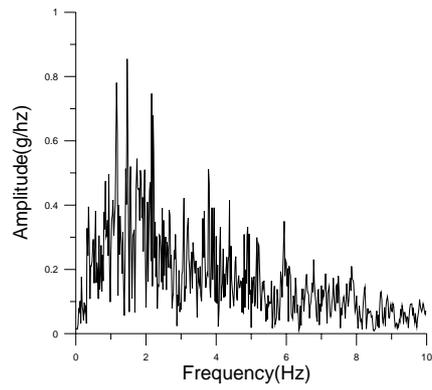


圖 2.5 剪力平衡法分析流程圖

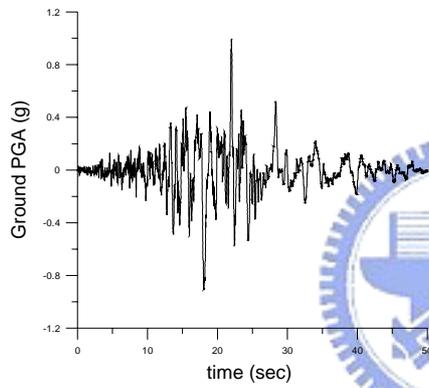


(a) 歷時圖

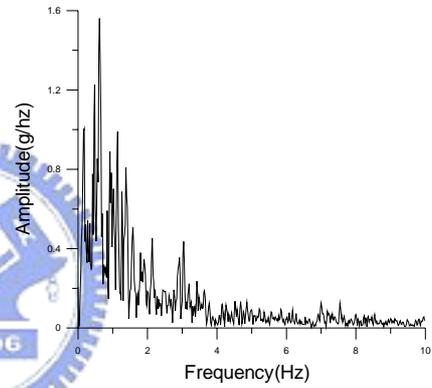


(b) 反應譜

圖 2.6 El Centro 震波加速度歷時(正規化至 1g)

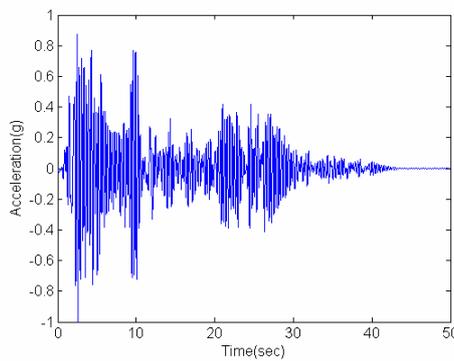


(a) 歷時圖

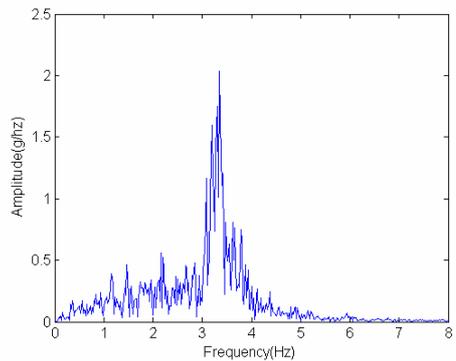


(b) 反應譜

圖 2.7 TCU017 震波加速度歷時(正規化至 1g)

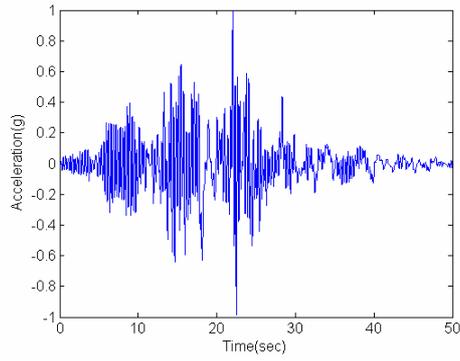


(a) 歷時圖

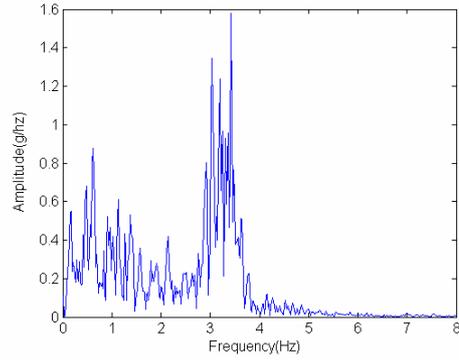


(b) 反應譜

圖 2.8 結構樓板加速度歷時反應(El Centro, 正規化至 1g;  $T_s = 0.3\text{sec}$ )

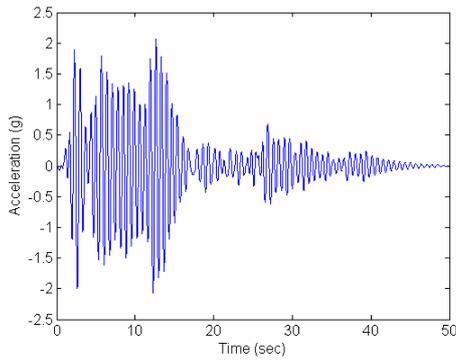


(a) 歷時圖

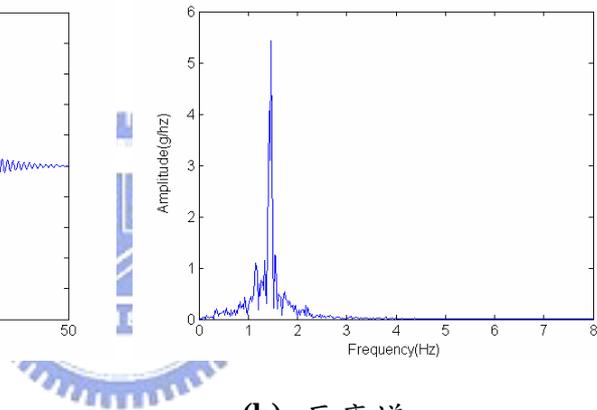


(b) 反應譜

圖 2.9 結構樓板加速度歷時反應(TCU017，正規化至 1g； $T_s = 0.3\text{sec}$ )

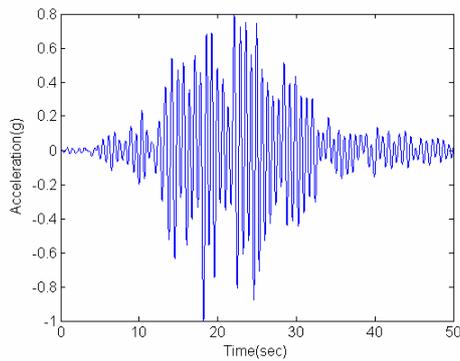


(a) 歷時圖

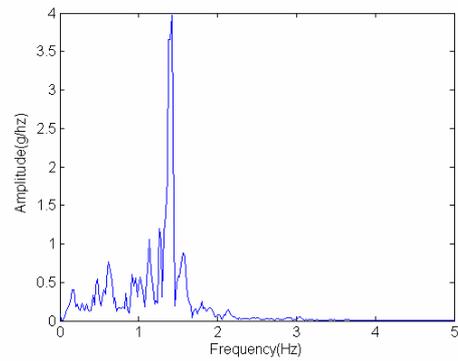


(b) 反應譜

圖 2.10 結構樓板加速度歷時反應(El Centro，正規化至 1g； $T_s = 0.7\text{sec}$ )



(a) 歷時圖



(b) 反應譜

圖 2.11 結構樓板加速度歷時反應(TCU017，正規化至 1g； $T_s = 0.7\text{sec}$ )

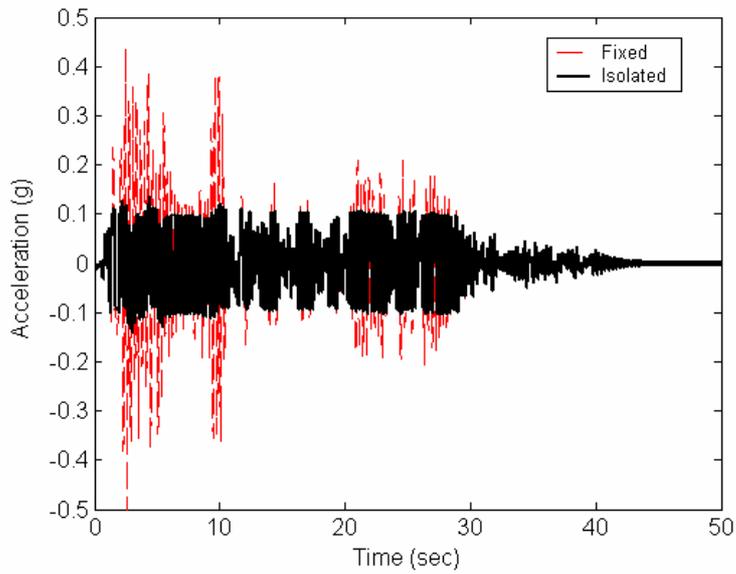


圖 2.12 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

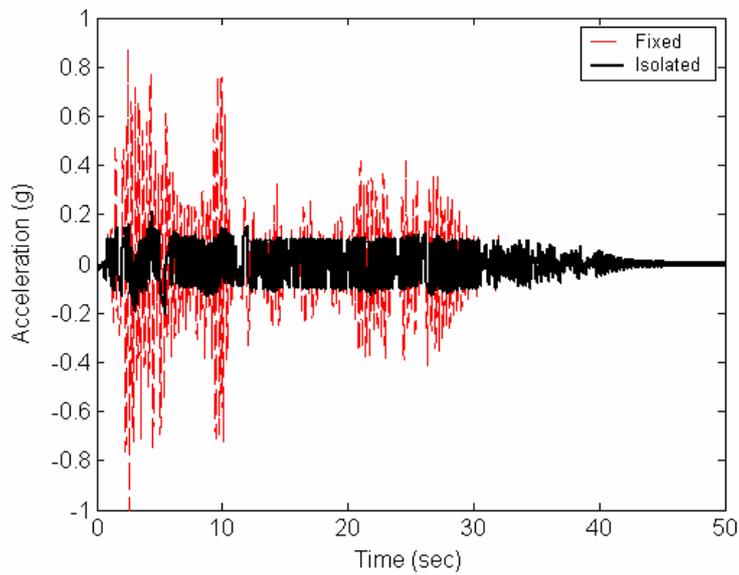


圖 2.13 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=1.0g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

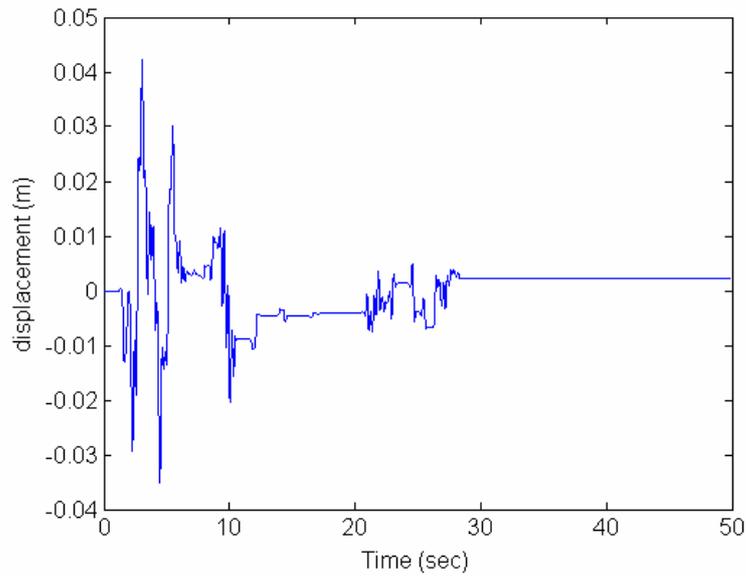


圖 2.14 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

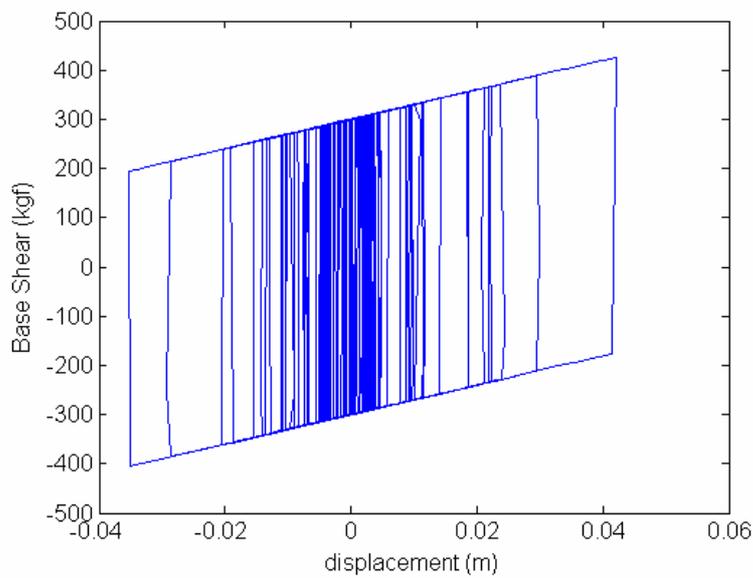


圖 2.15 FPS 遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

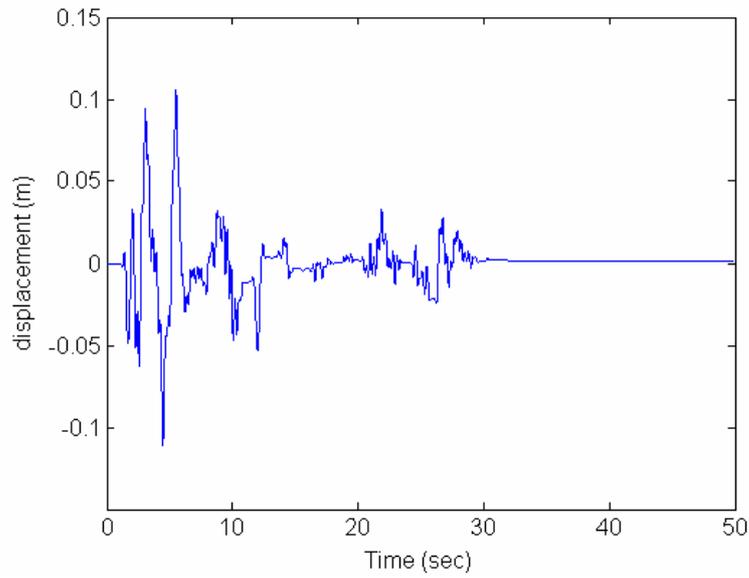


圖 2.16 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=1.0g,  $T_S = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

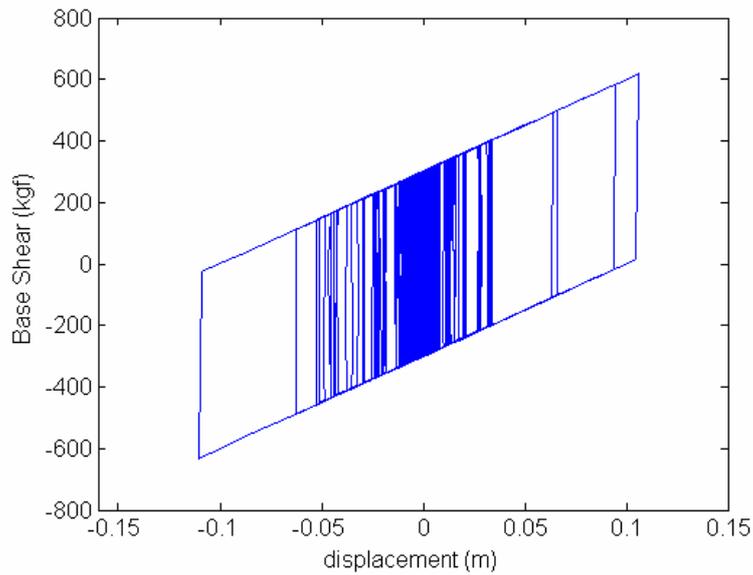


圖 2.17 FPS 遲滯迴圈(El Centro, PFA=1.0g,  $T_S = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

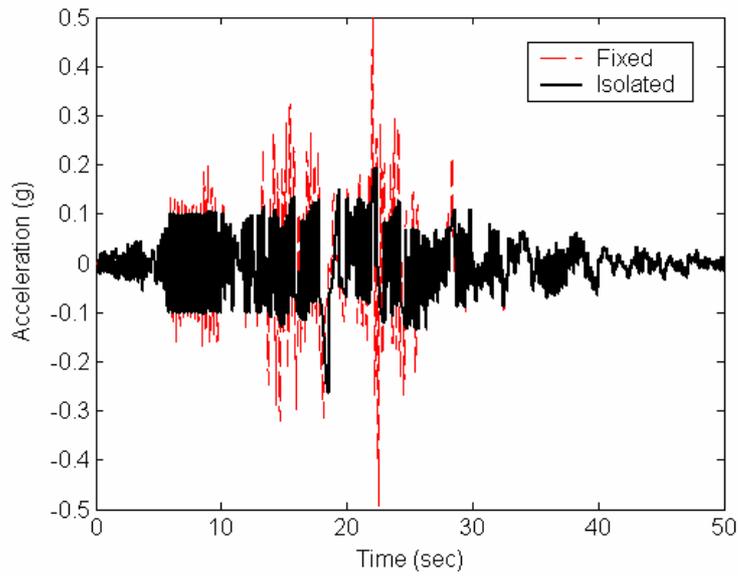


圖 2.18 設備加速度歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

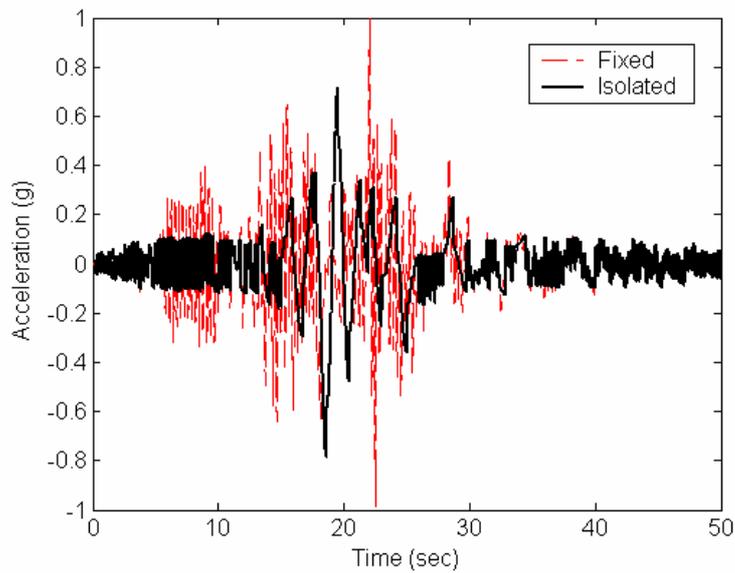


圖 2.19 設備加速度歷時比較(TCU017, PFA=1.0g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

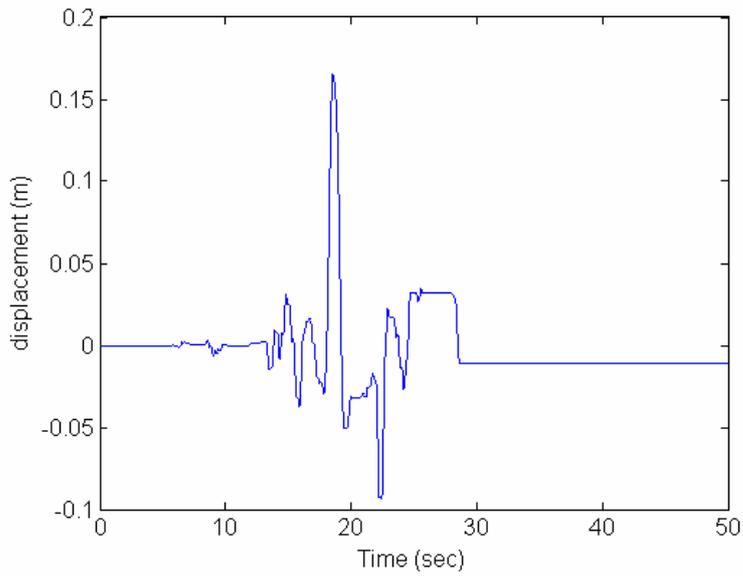


圖 2.20 隔震平台位移歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

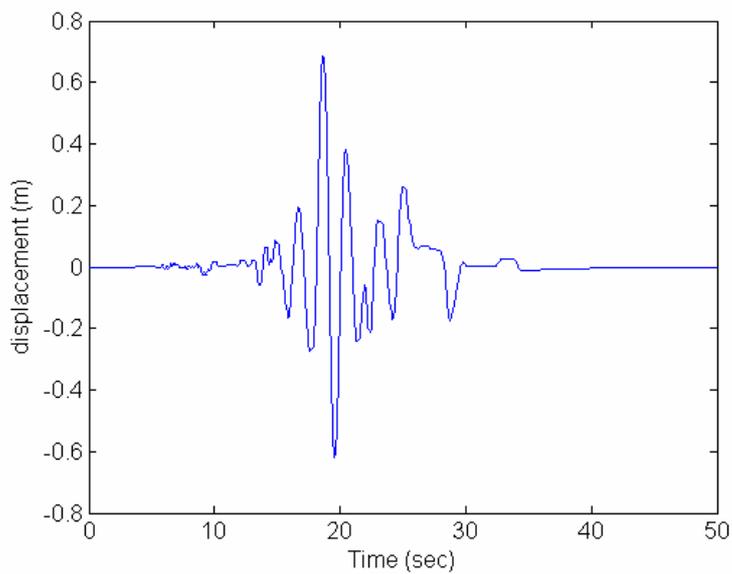


圖 2.21 隔震平台位移歷時比較(TCU017, PFA=1.0g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

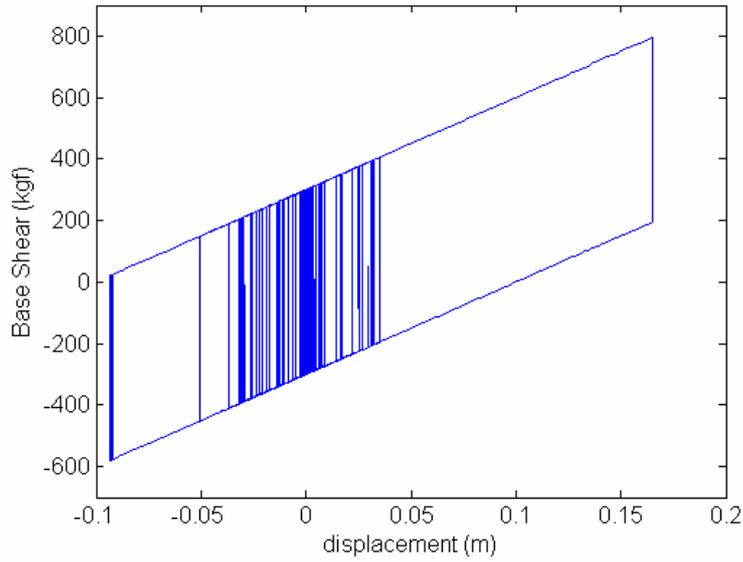


圖 2.22 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=0.5g ,  $T_S = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  
 $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$ )

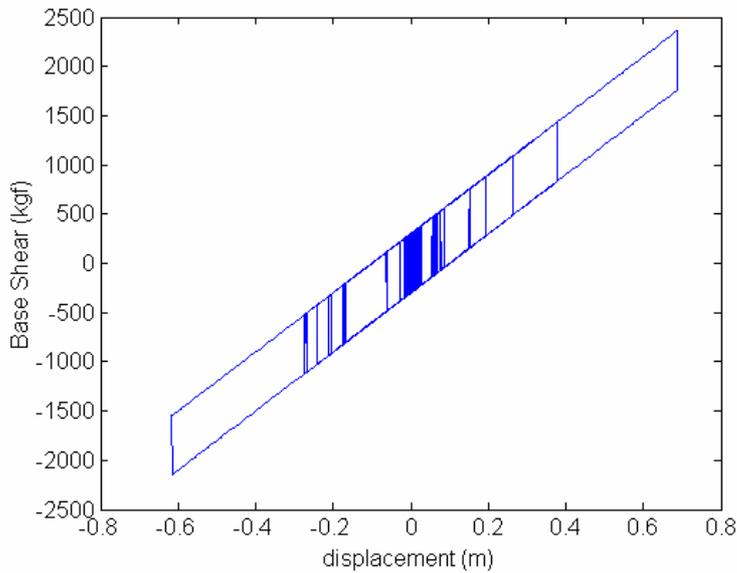


圖 2.23 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=1.0g ,  $T_S = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  
 $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$ )

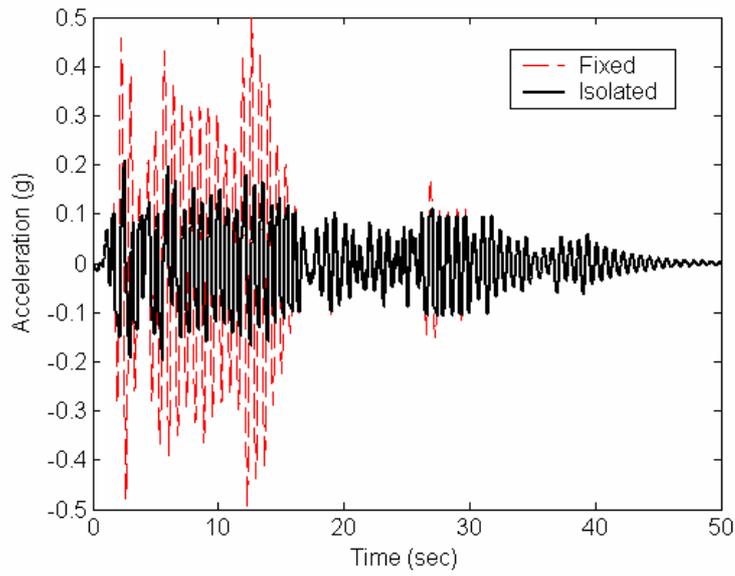


圖 2.24 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

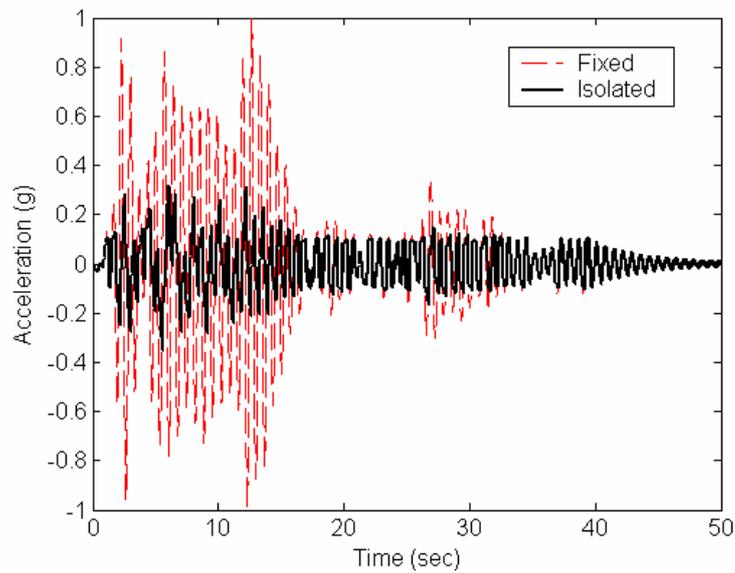


圖 2.25 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=1.0g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

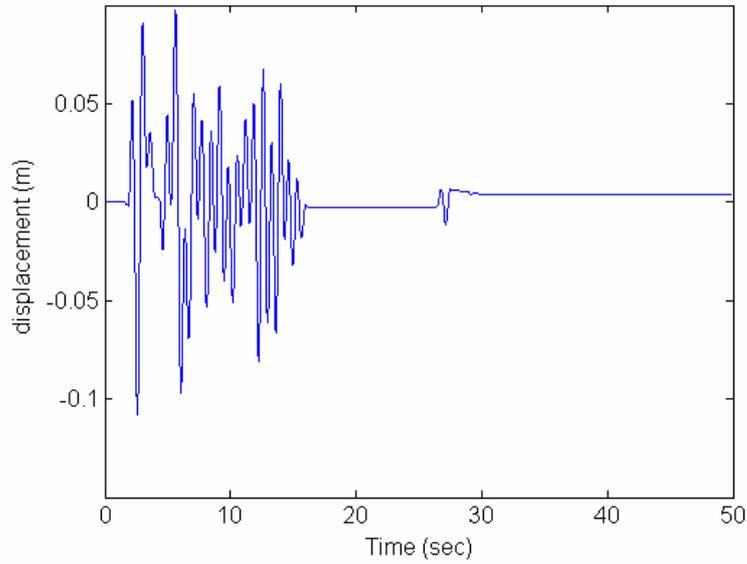


圖 2.26 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

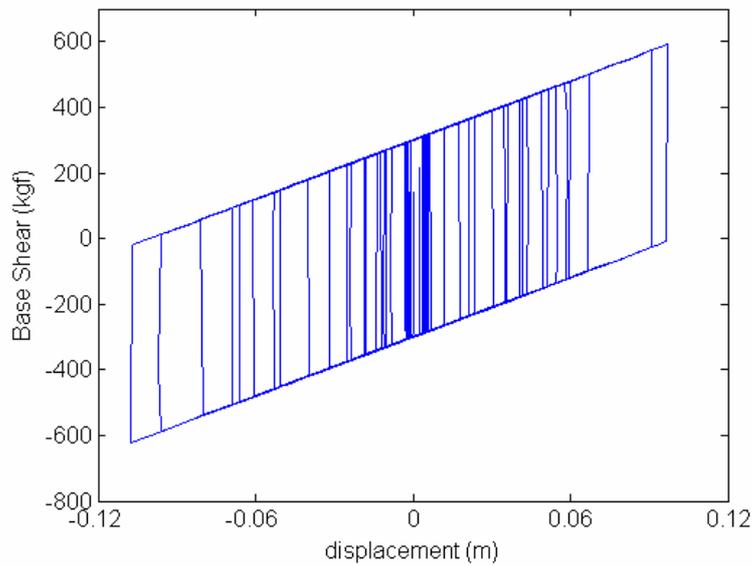


圖 2.27 FPS 遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

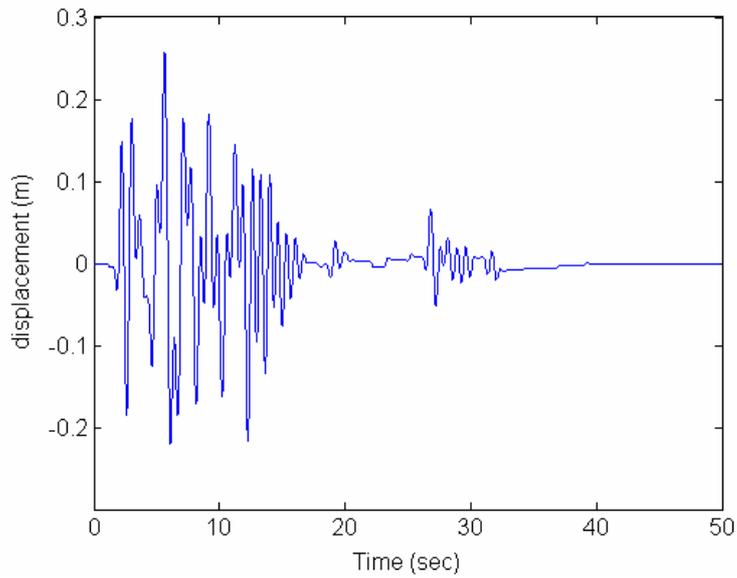


圖 2.28 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=1.0g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

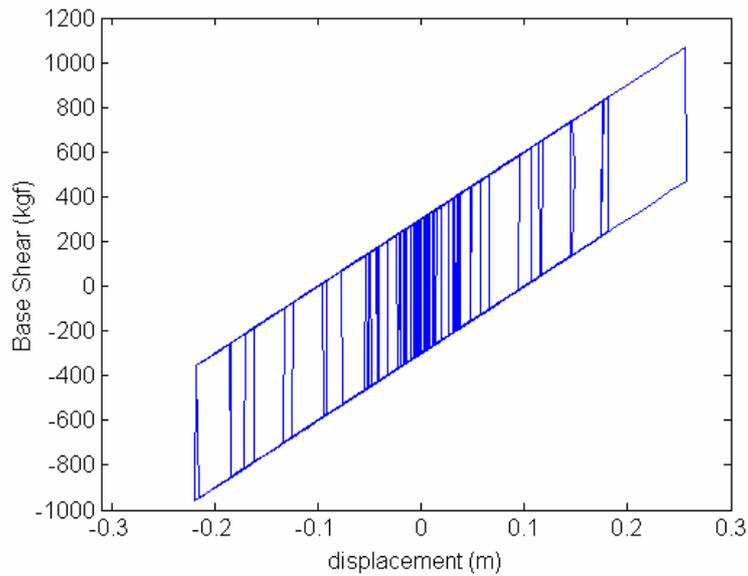


圖 2.29 FPS 遲滯迴圈(El Centro, PFA=1.0g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  
 $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

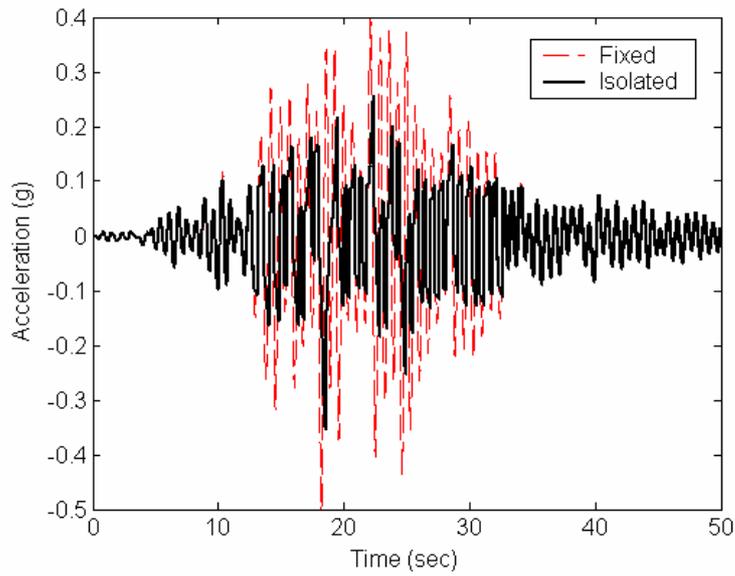


圖 2.30 設備加速度歷時比較 (TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

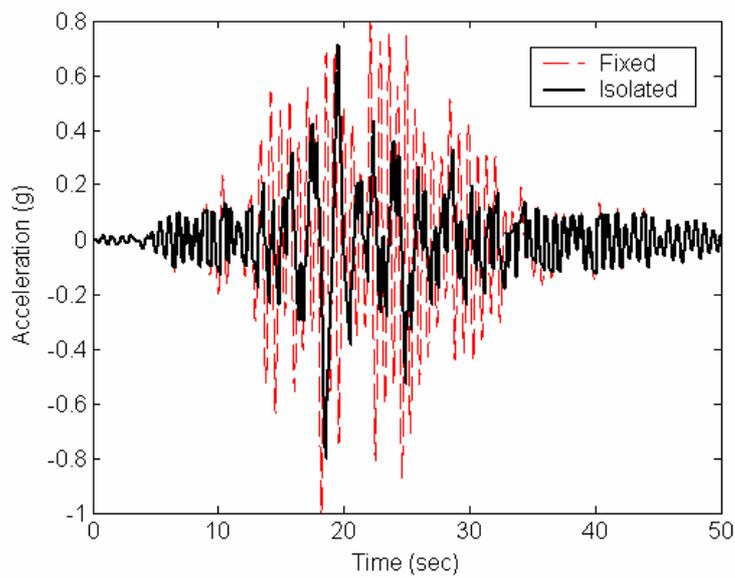


圖 2.31 設備加速度歷時比較 (TCU017, PFA=1.0g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{sec}$ , W=3ton,  $\mu=0.1$ )

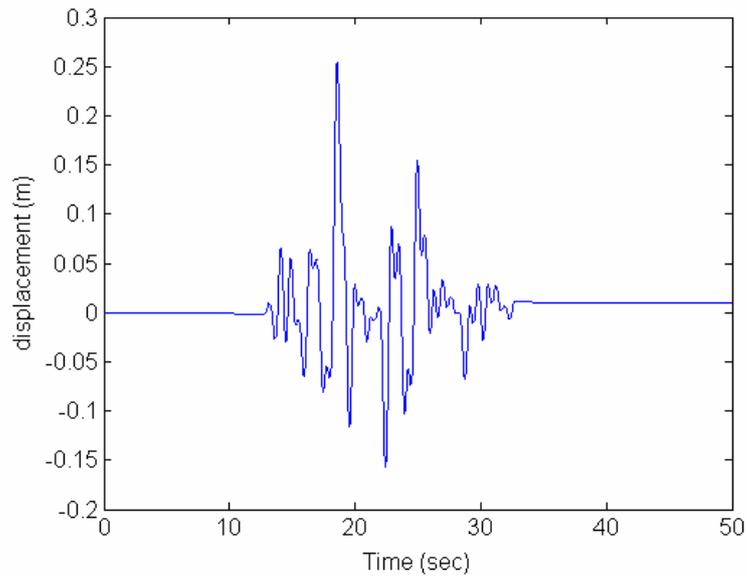


圖 2.32 隔震平台位移歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{ sec}$ ,  
 $T_{FPS} = 2\text{ sec}$ ,  $W=3\text{ ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

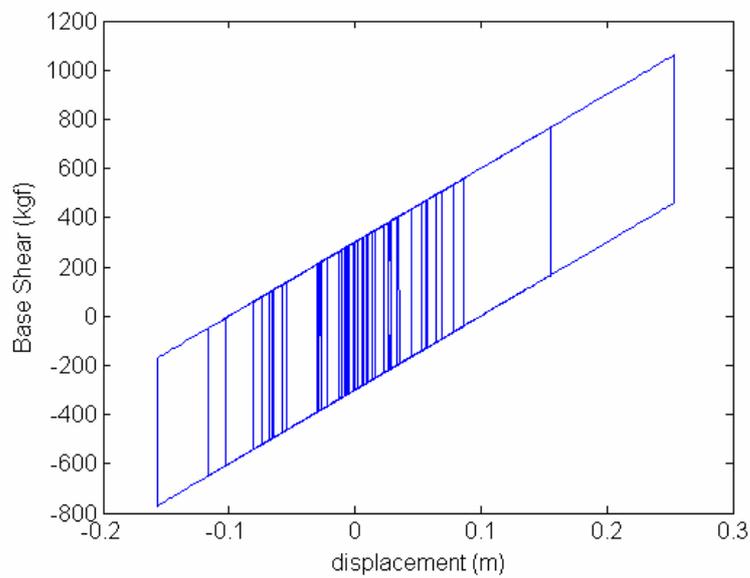


圖 2.33 FPS 遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{ sec}$ ,  
 $W=3\text{ ton}$ ,  $\mu=0.1$ )

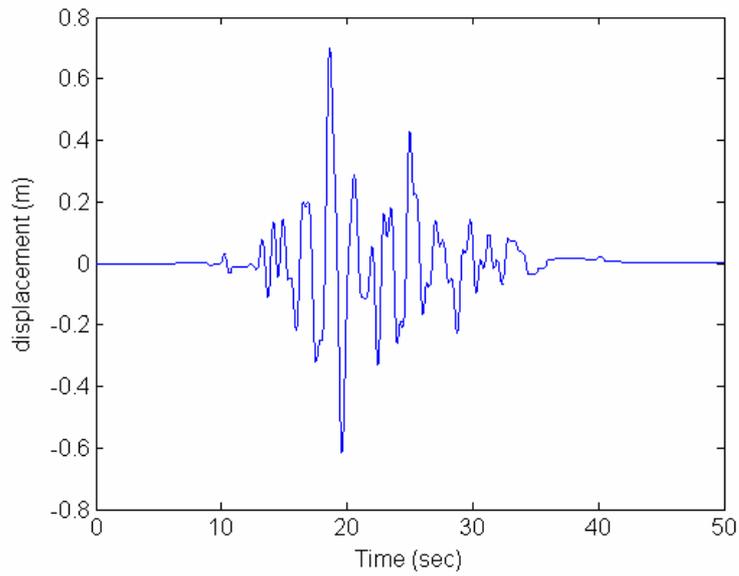


圖 2.34 隔震平台位移歷時比較(TCU017 , PFA=1.0g ,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$  ,  
 $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$  ,  $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$ )

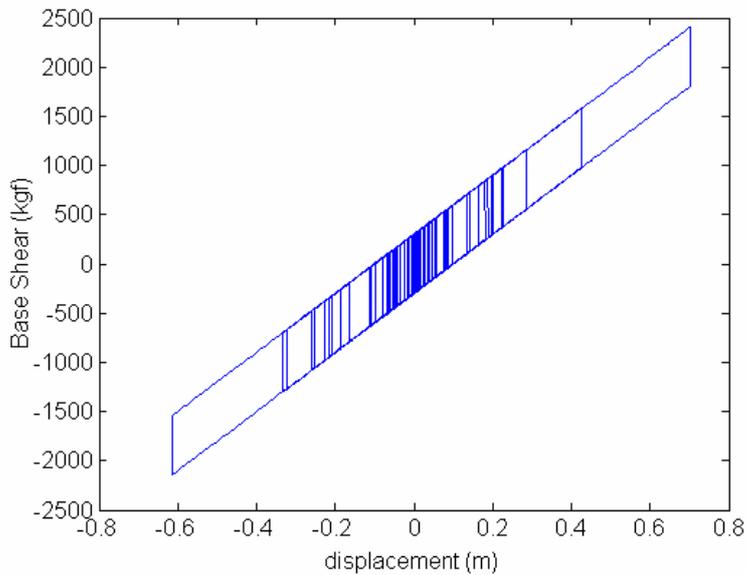
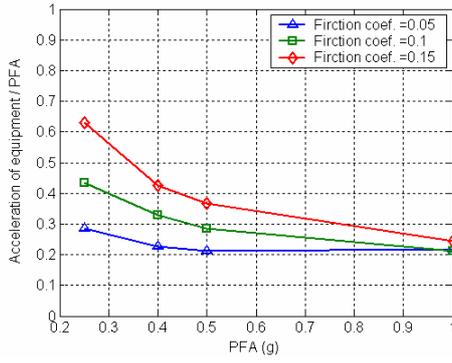
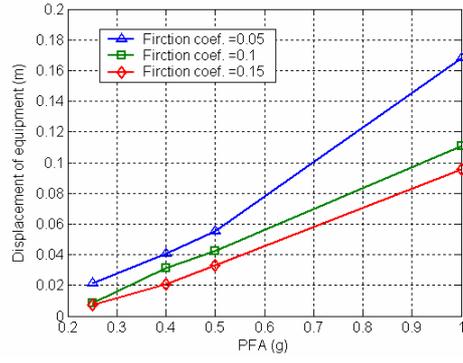


圖 2.35 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=1.0g ,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$  ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$  ,  
 $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$ )

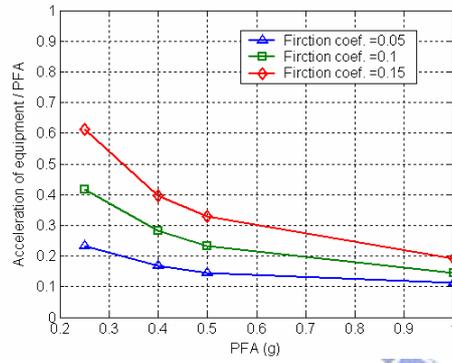


(a) 加速度比

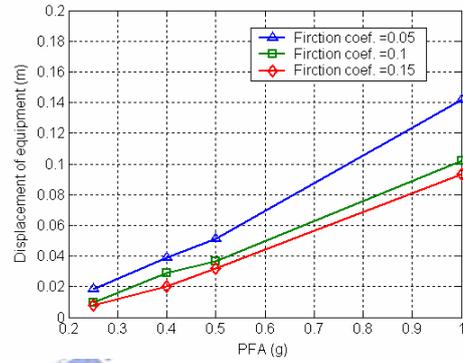


(b) 位移

圖 2.36 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )

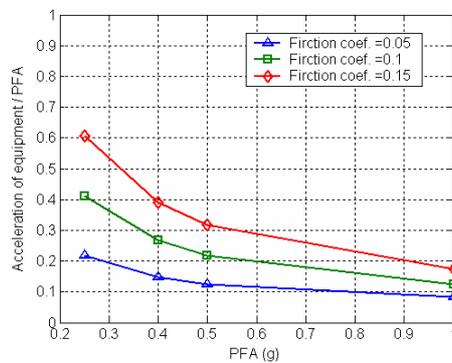


(a) 加速度比

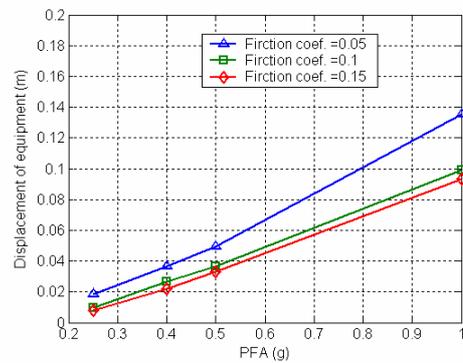


(b) 位移

圖 2.37 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )

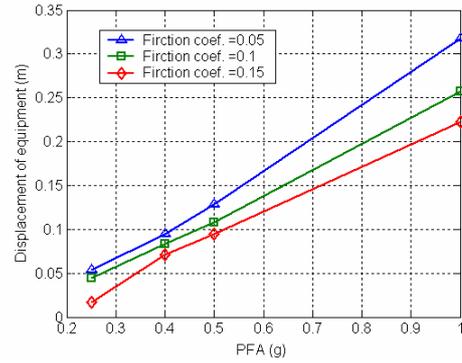
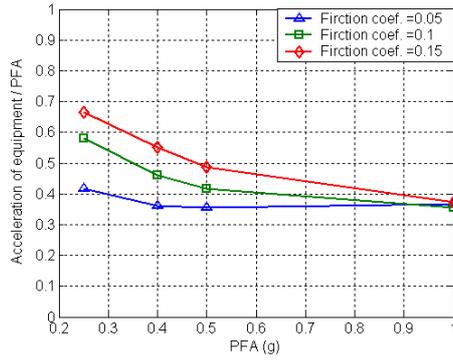


(a) 加速度比



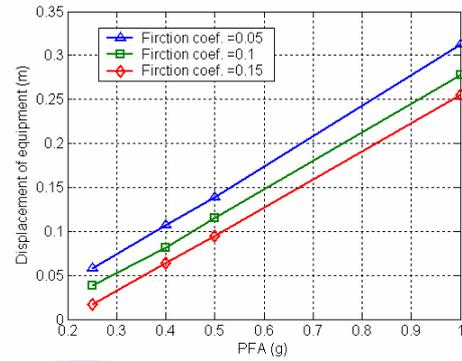
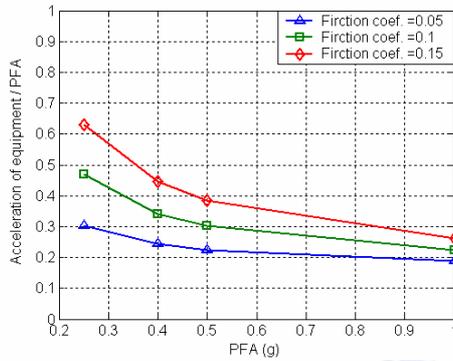
(b) 位移

圖 2.38 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )



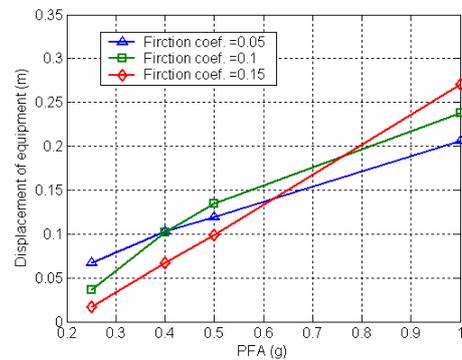
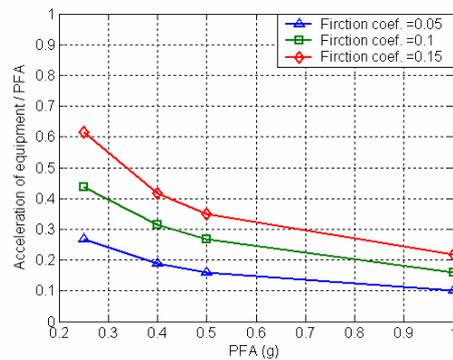
(a) 加速度比

(b) 位移

圖 2.39 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )

(a) 加速度比

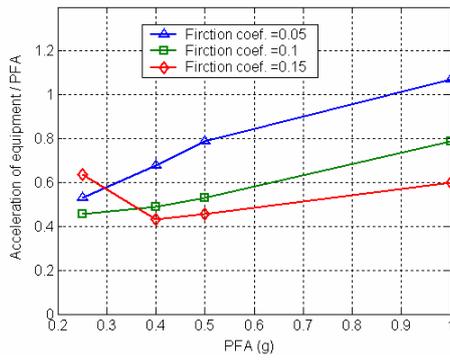
(b) 位移

圖 2.40 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )

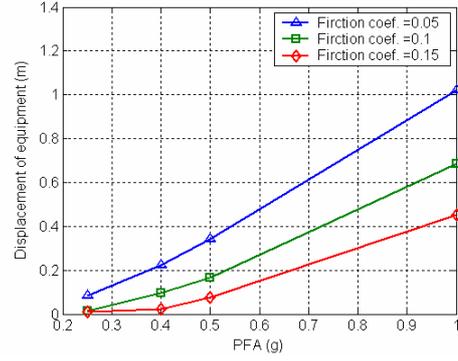
(a) 加速度比

(b) 位移

圖 2.41 設備反應最大值比較(El Centro,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )

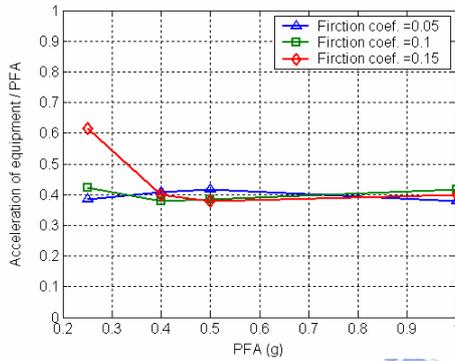


(a) 加速度比

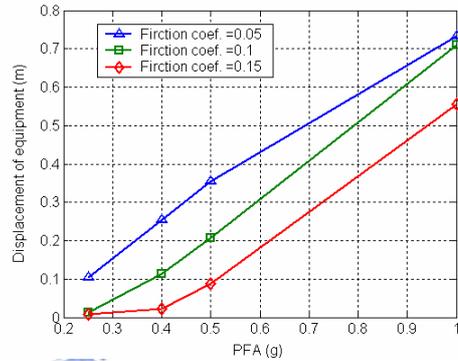


(b) 位移

圖 2.42 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )

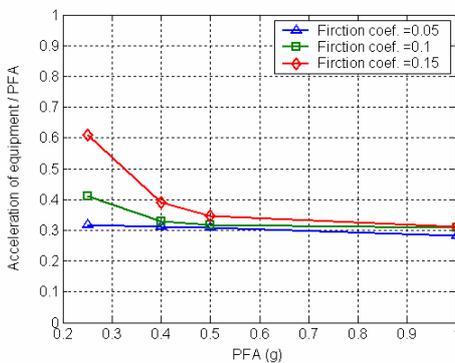


(a) 加速度比

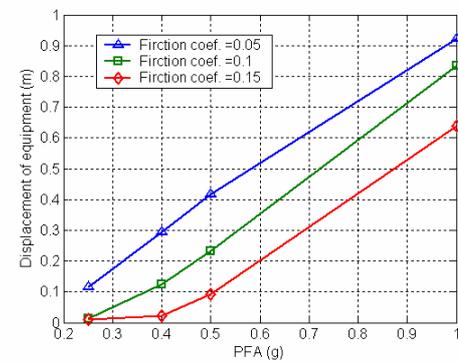


(b) 位移

圖 2.43 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )

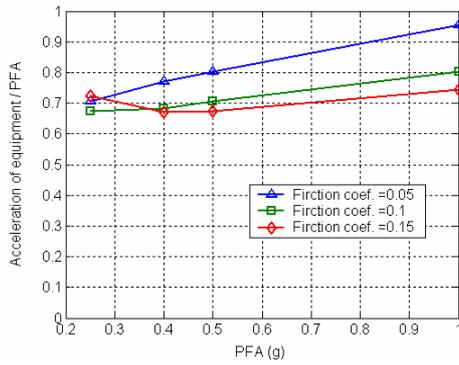


(a) 加速度比

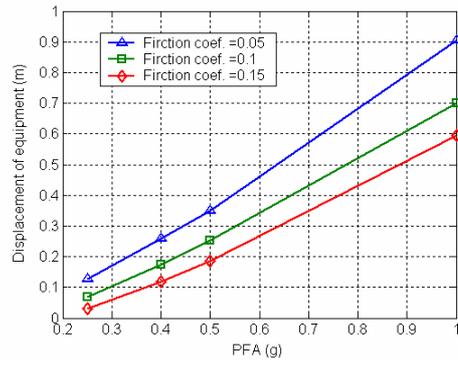


(b) 位移

圖 2.44 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )

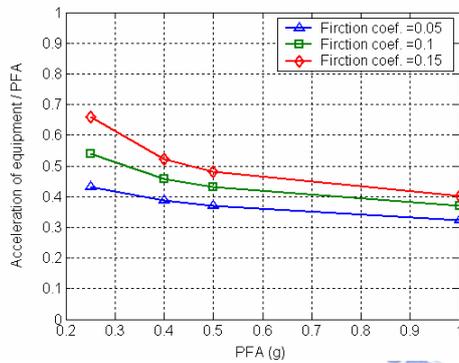


(a) 加速度比

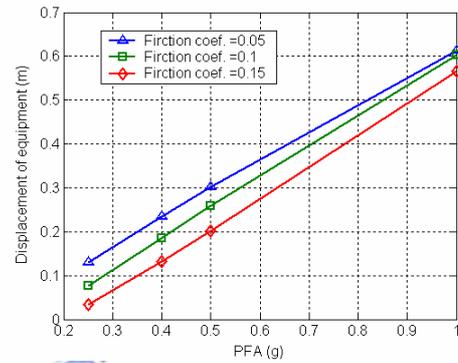


(b) 位移

圖 2.45 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ )

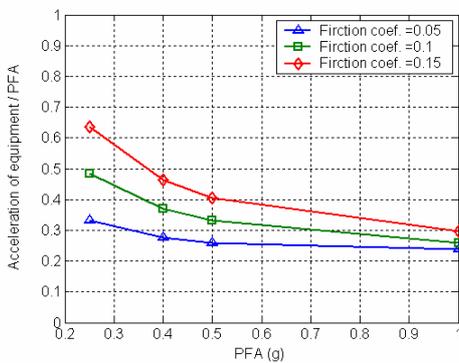


(a) 加速度比

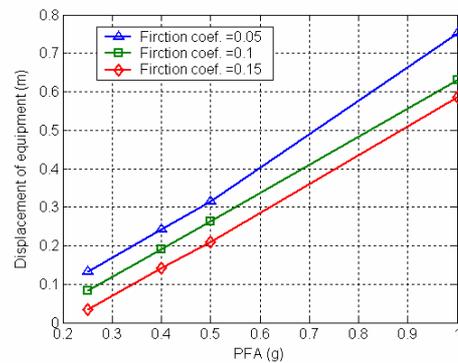


(b) 位移

圖 2.46 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 3\text{sec}$ )



(a) 加速度比



(b) 位移

圖 2.47 設備反應最大值比較(TCU017,  $T_S = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 4\text{sec}$ )

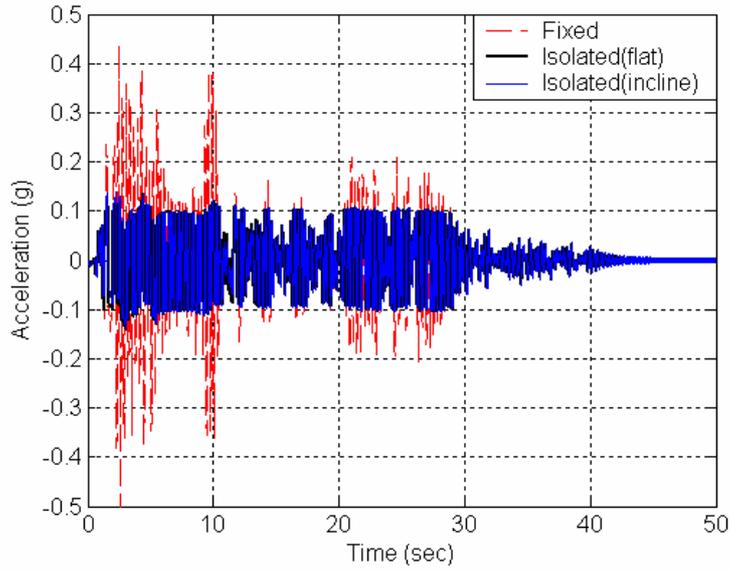


圖 2.48 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = 0.03$ )

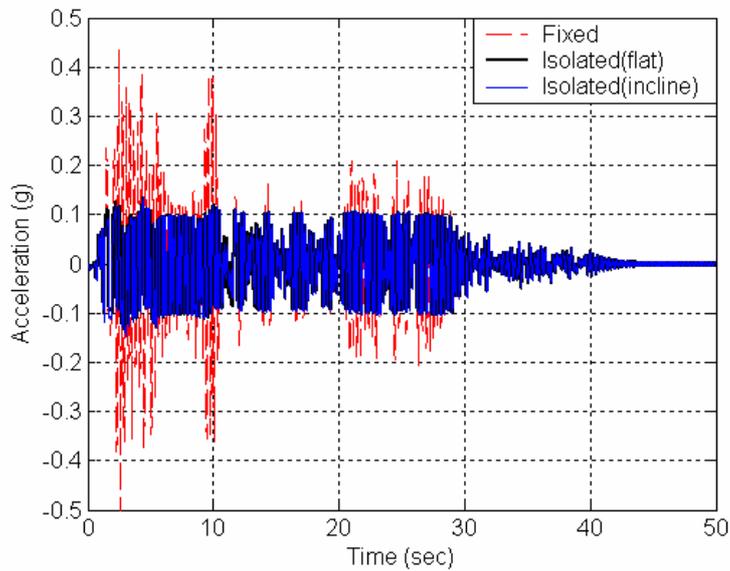


圖 2.49 設備加速度歷時比較(El Centro, PFA=1.0g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = -0.03$ )

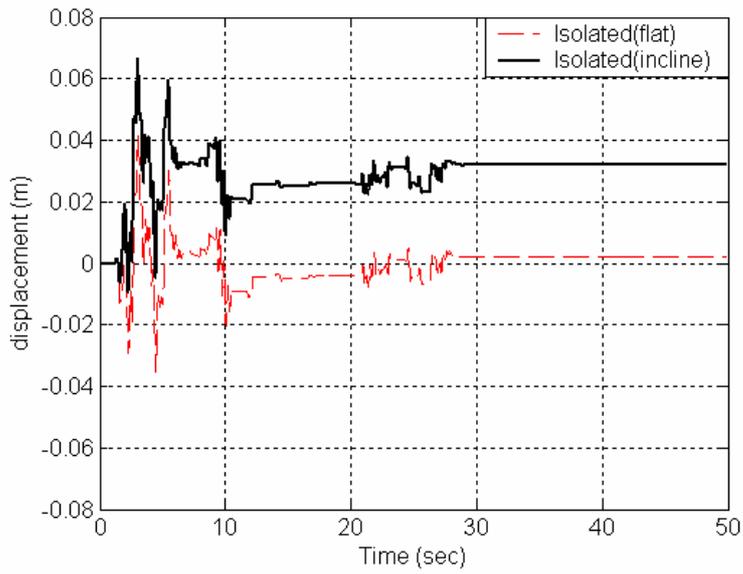


圖 2.50 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = 0.03$ )

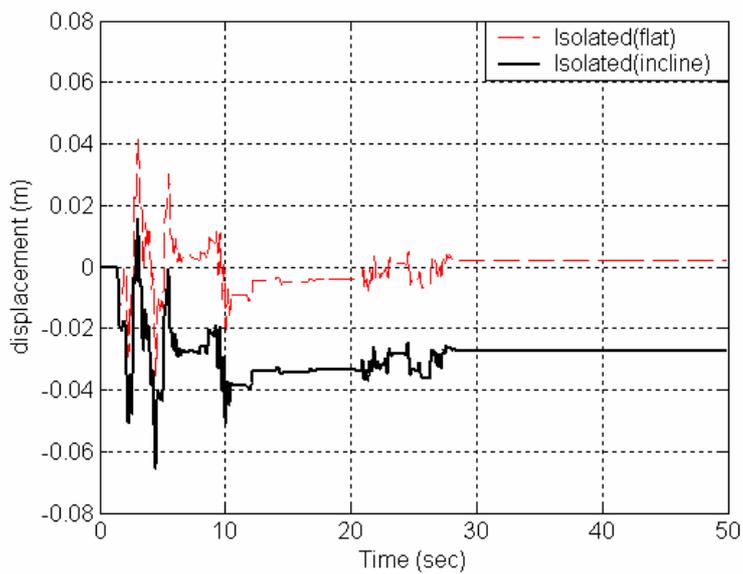


圖 2.51 隔震平台位移歷時比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = -0.03$ )

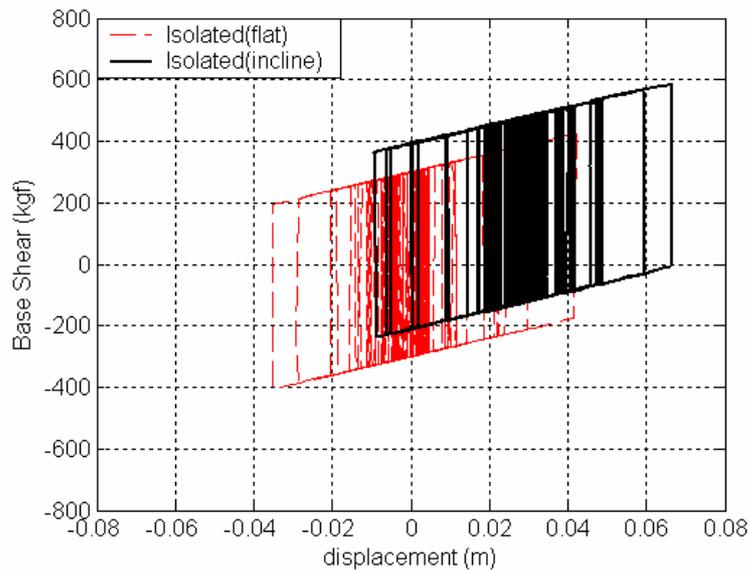


圖 2.52 FPS 遲滯迴圈 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = 0.03$ )

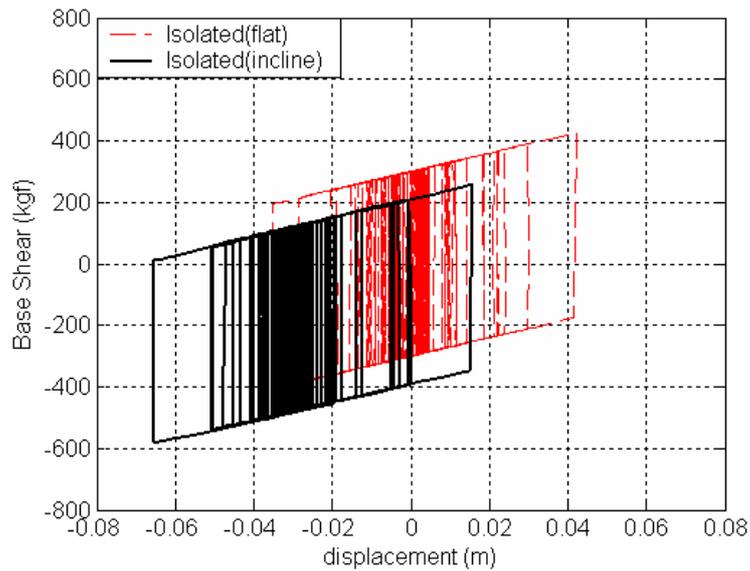


圖 2.53 FPS 遲滯迴圈 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = -0.03$ )

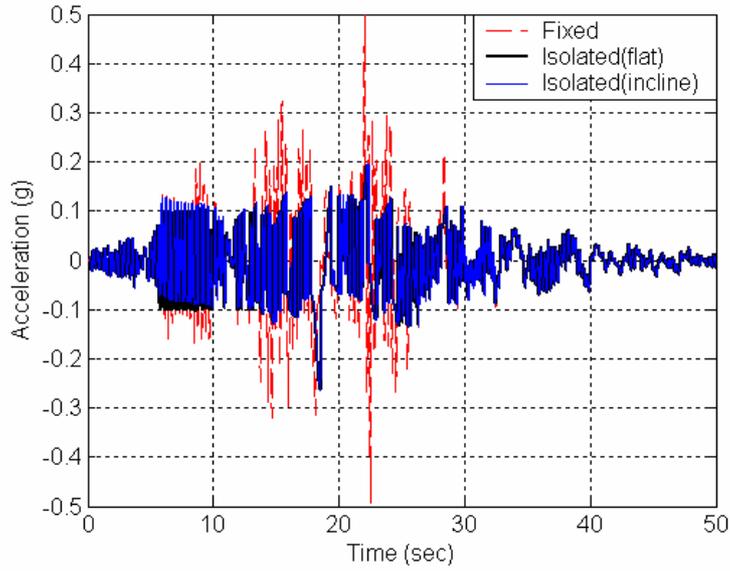


圖 2.54 設備加速度歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = 0.03$ )

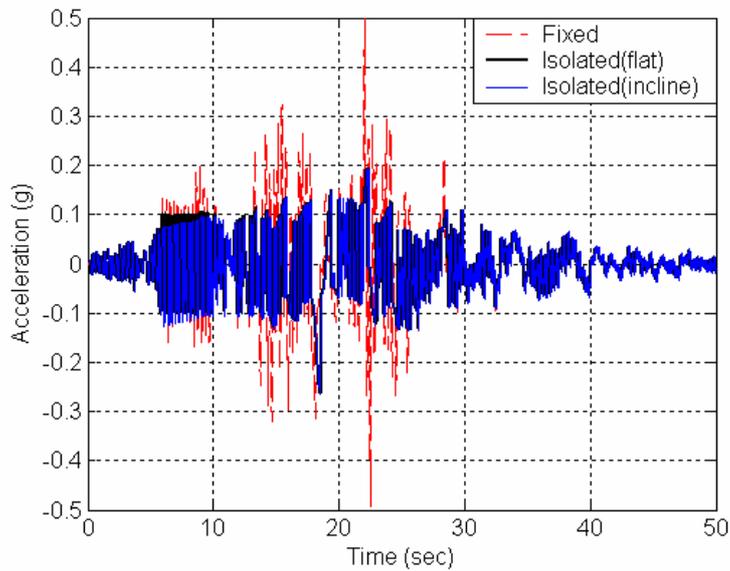


圖 2.55 設備加速度歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = -0.03$ )

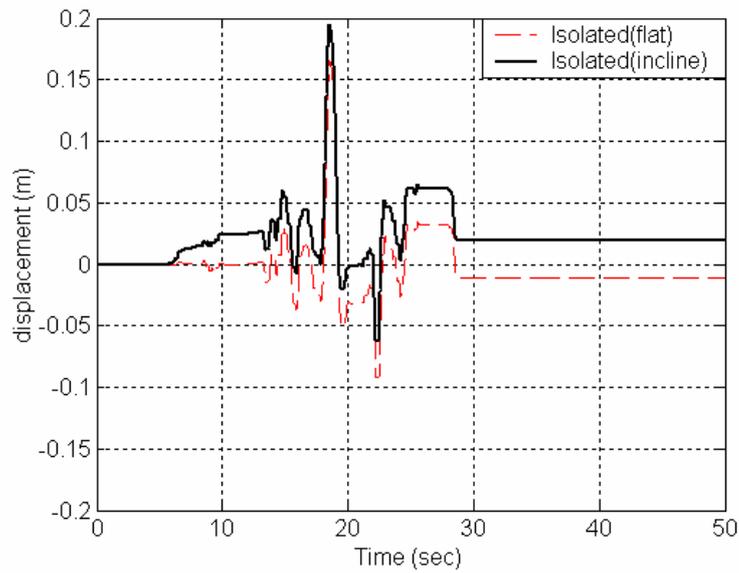


圖 2.56 隔震平台位移歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = 0.03$ )

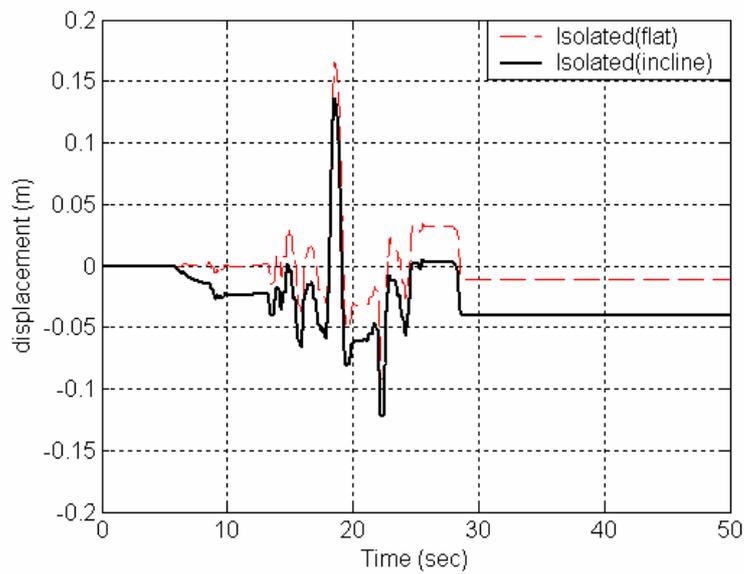


圖 2.57 隔震平台位移歷時比較(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W=3\text{ton}$ ,  $\mu=0.1$ ,  $\psi = -0.03$ )

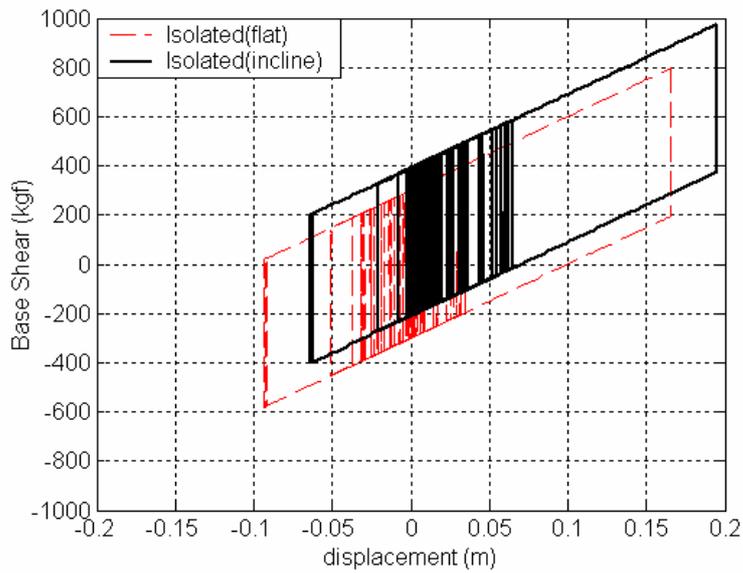


圖 2.58 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=0.5g ,  $T_s = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  
 $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$  ,  $\psi = 0.03$ )

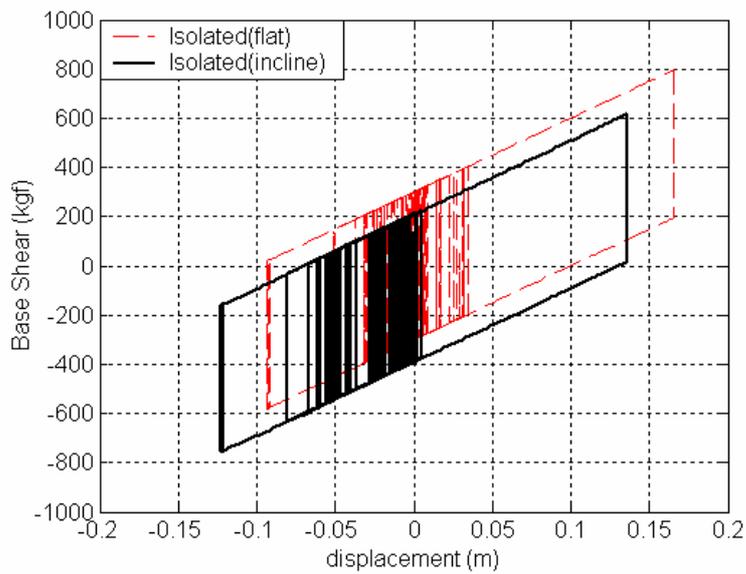


圖 2.59 FPS 遲滯迴圈(TCU017 , PFA=0.5g ,  $T_s = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  
 $W=3\text{ton}$  ,  $\mu=0.1$  ,  $\psi = -0.03$ )

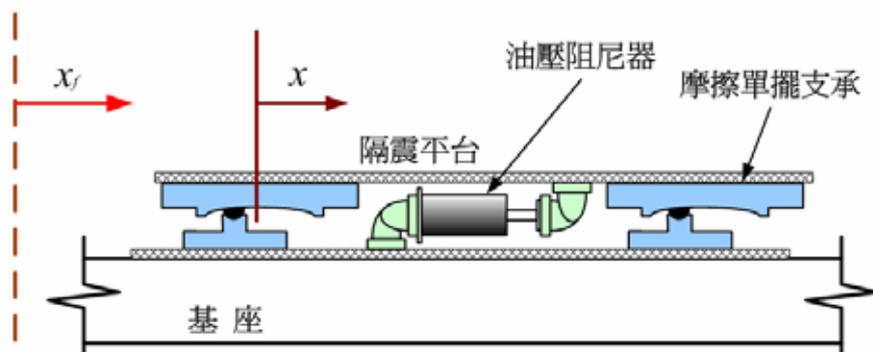


圖 3.1 隔震平台加裝油壓阻尼器分析模型

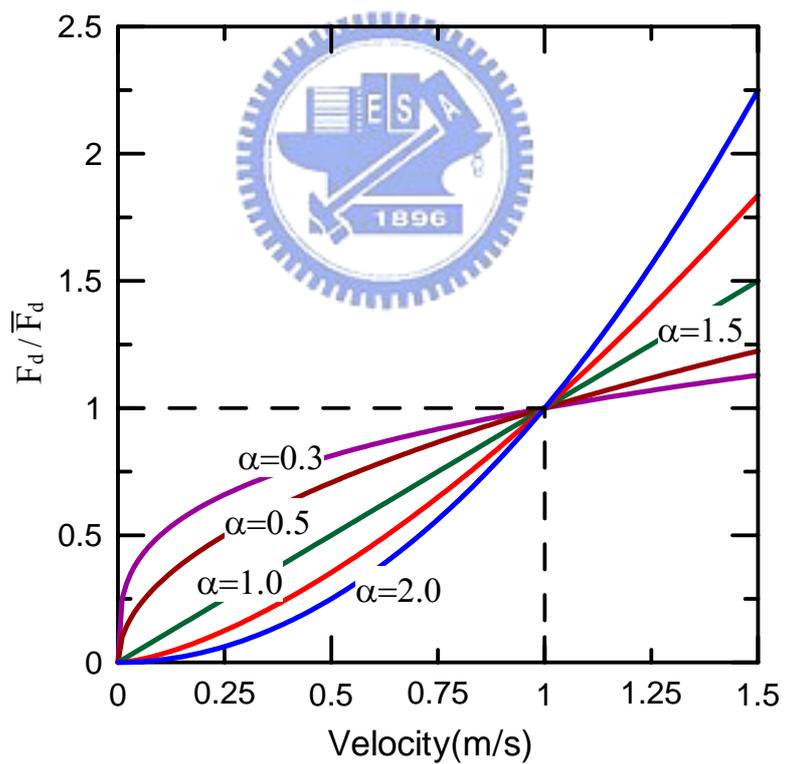


圖 3.2 阻尼力與速度之關係圖

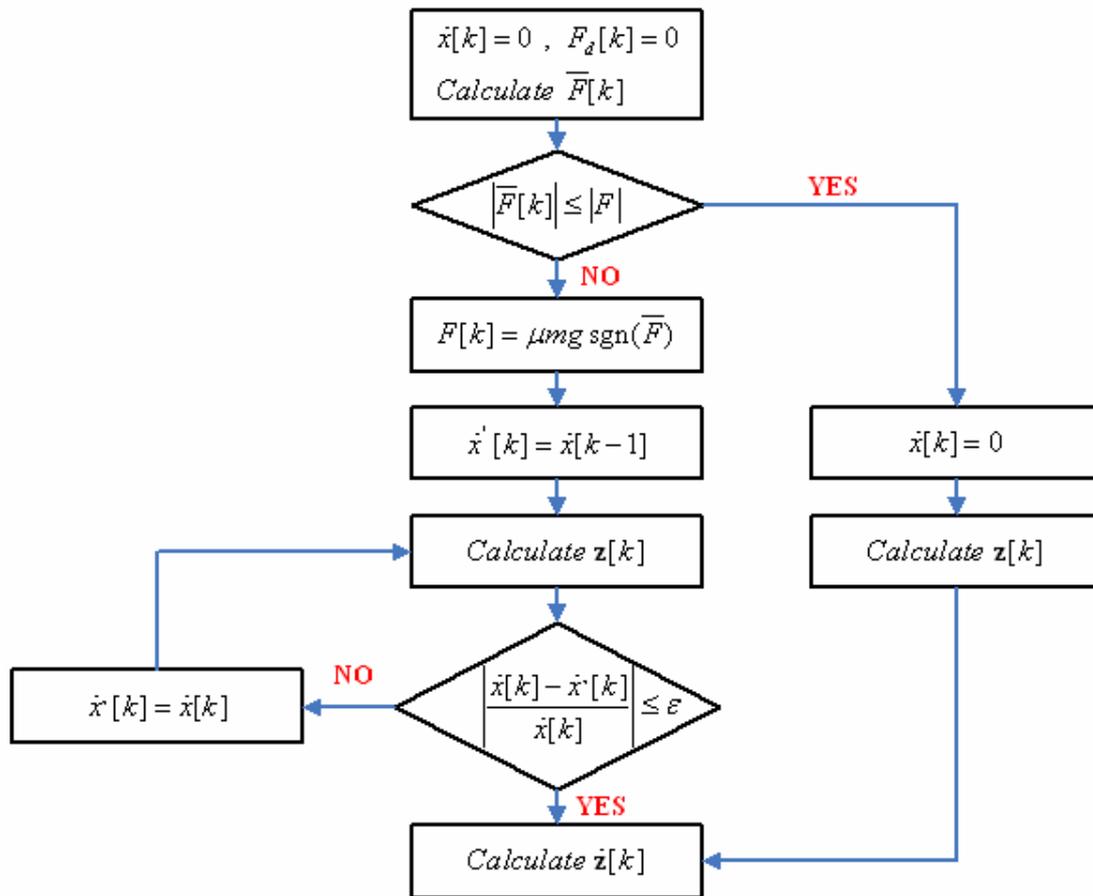


圖 3.3 剪力平衡-速度迭代法則解析流程圖

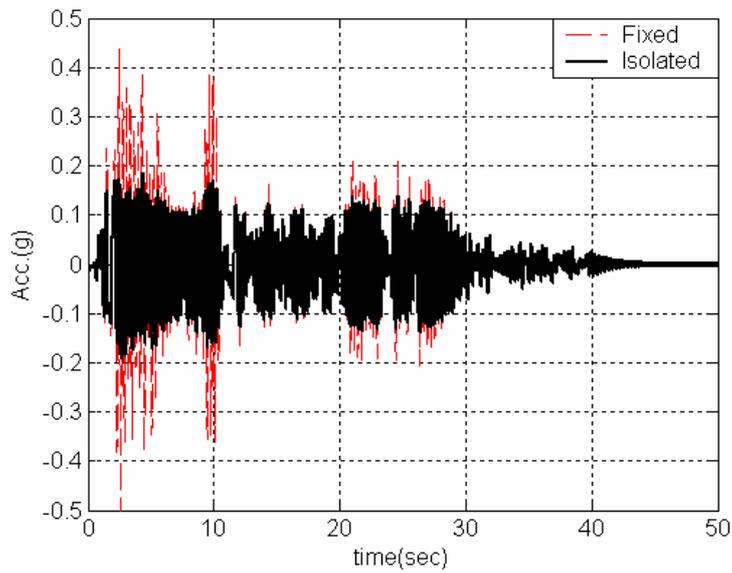


圖 3.4 設備加速度歷時反應比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

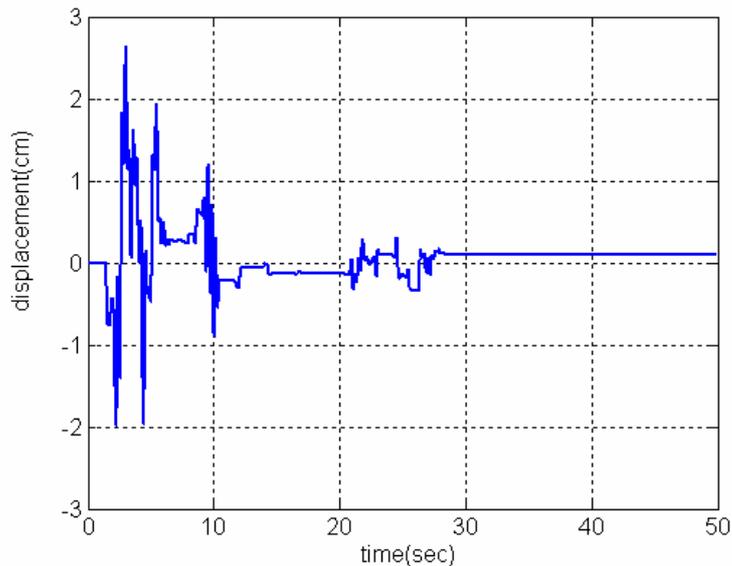
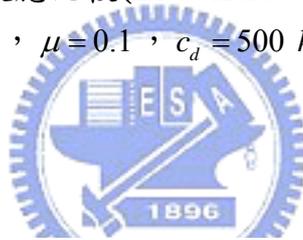


圖 3.5 隔震平台位移歷時反應(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

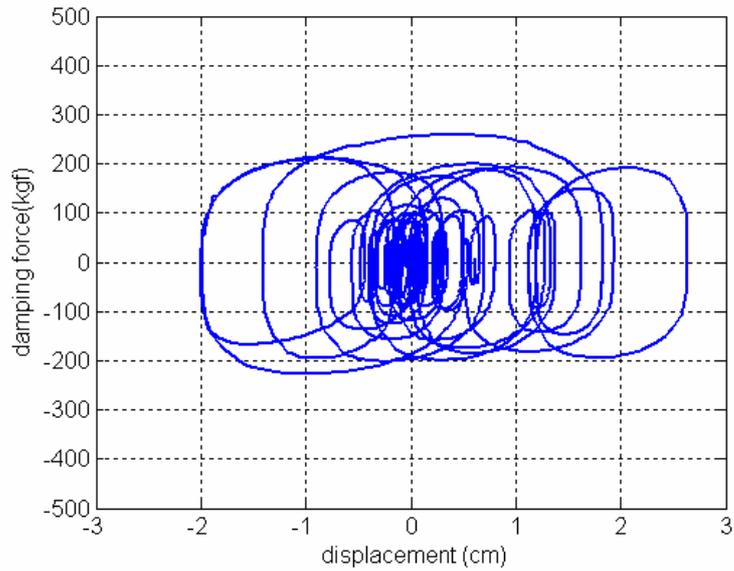


圖 3.6 油壓阻尼器遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.5g ,  $T_s = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  $W = 3\text{ton}$  ,  $\mu = 0.1$  ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$  ,  $\alpha = 0.5$ )

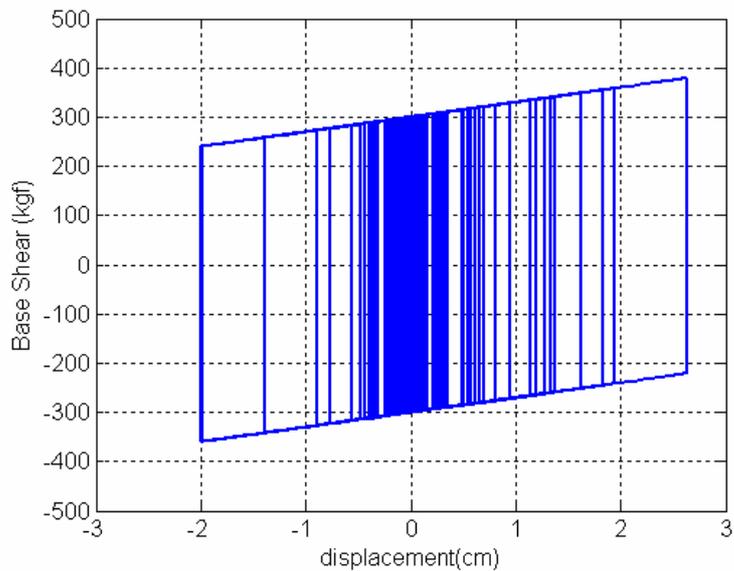
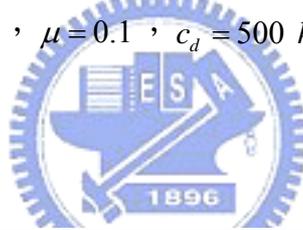


圖 3.7 FPS 遲滯迴圈(El Centro , PFA=0.5g ,  $T_s = 0.3\text{sec}$  ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$  ,  $W = 3\text{ton}$  ,  $\mu = 0.1$  ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$  ,  $\alpha = 0.5$ )

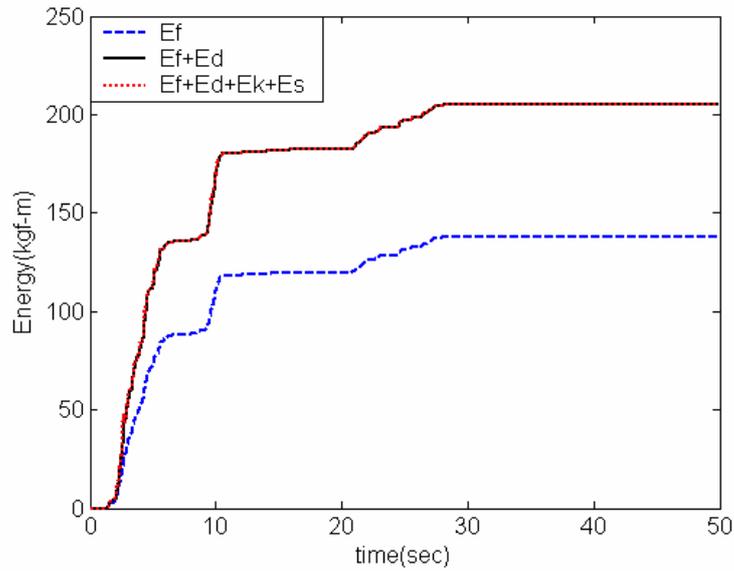


圖 3.8 系統能量累積 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

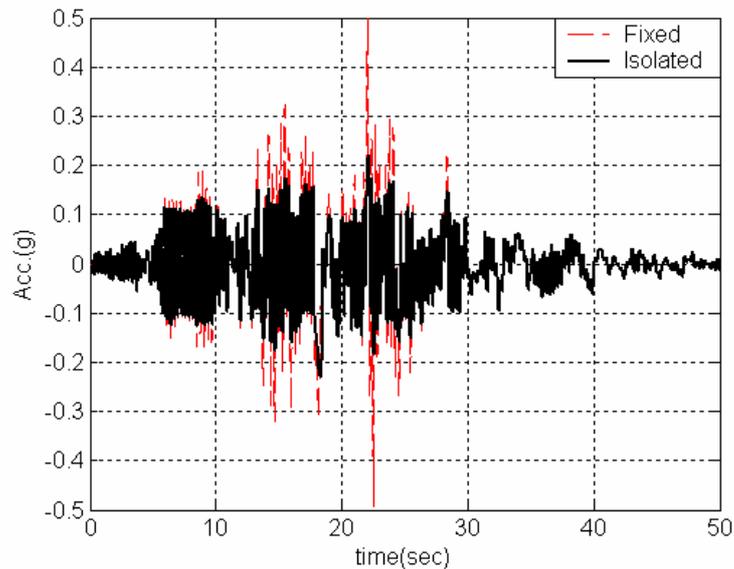


圖 3.9 設備加速度歷時反應比較 (TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

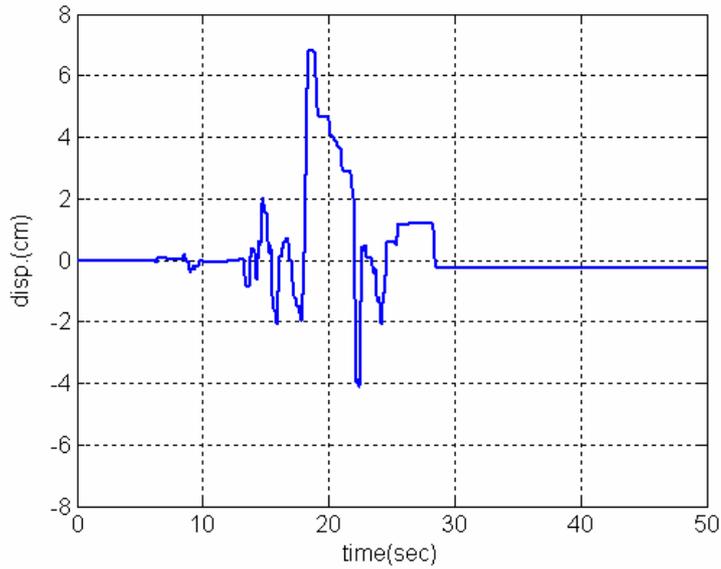


圖 3.10 隔震平台位移歷時反應(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

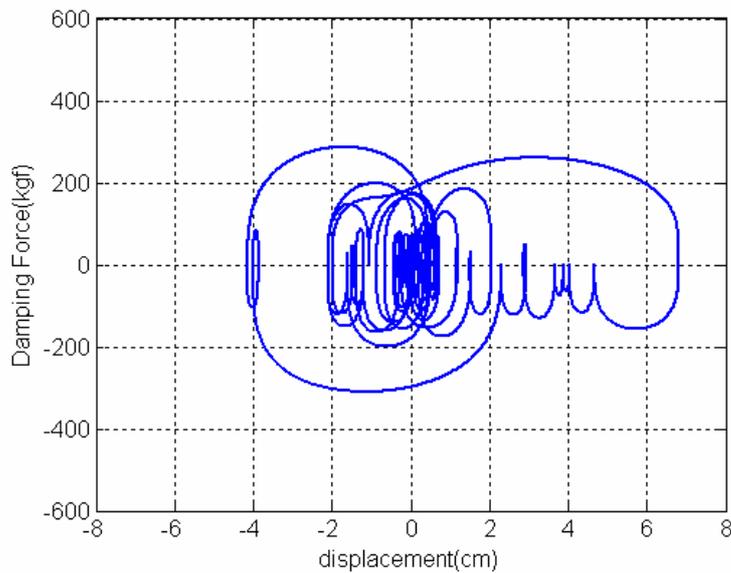
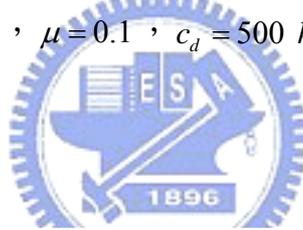


圖 3.11 油壓阻尼器遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500 \text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

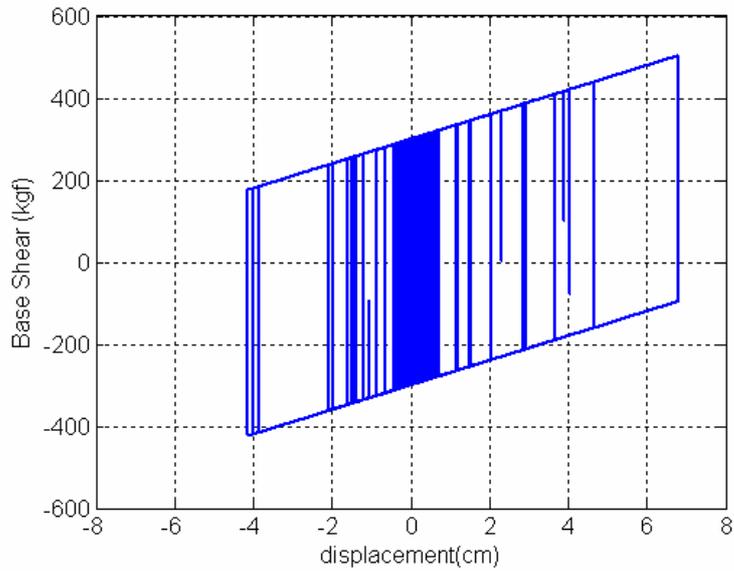


圖 3.12 FPS 遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

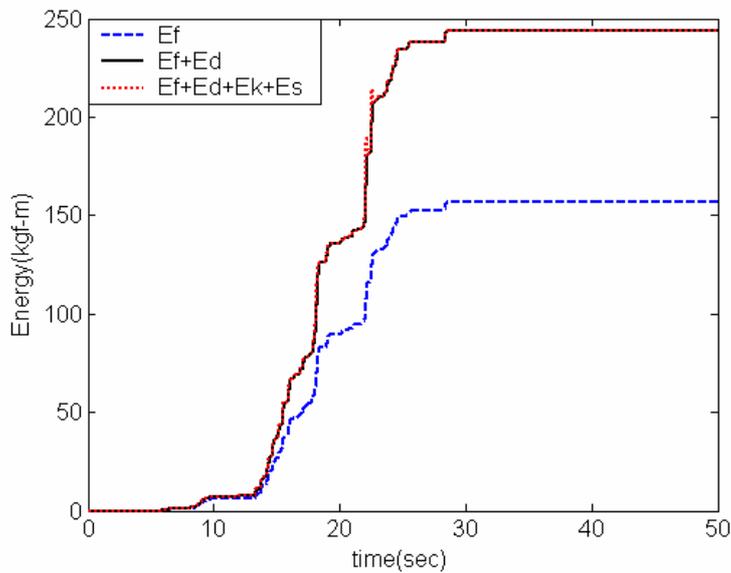
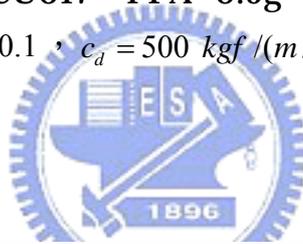


圖 3.13 系統能量累積(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

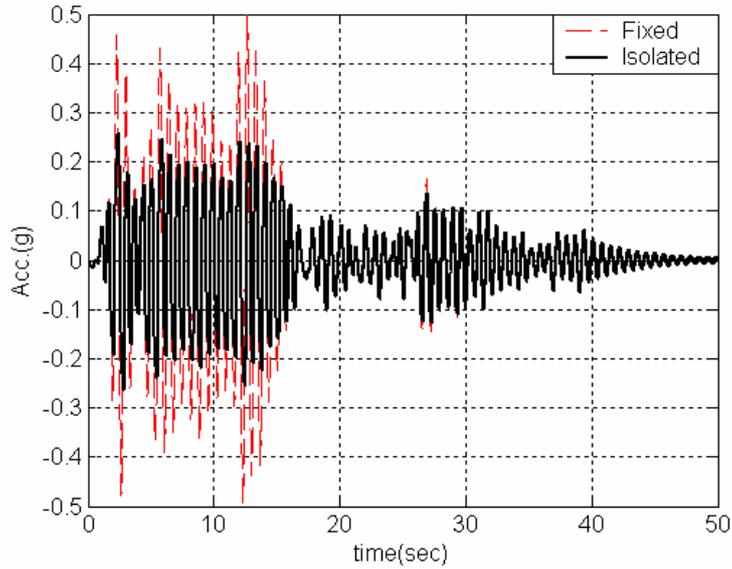


圖 3.14 設備加速度歷時反應比較(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

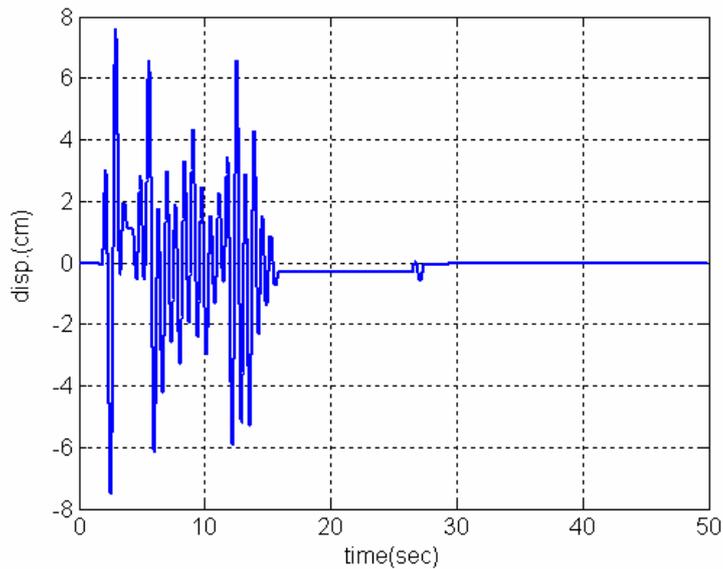
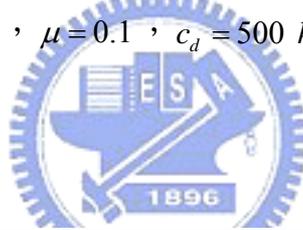


圖 3.15 隔震平台位移歷時反應(El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

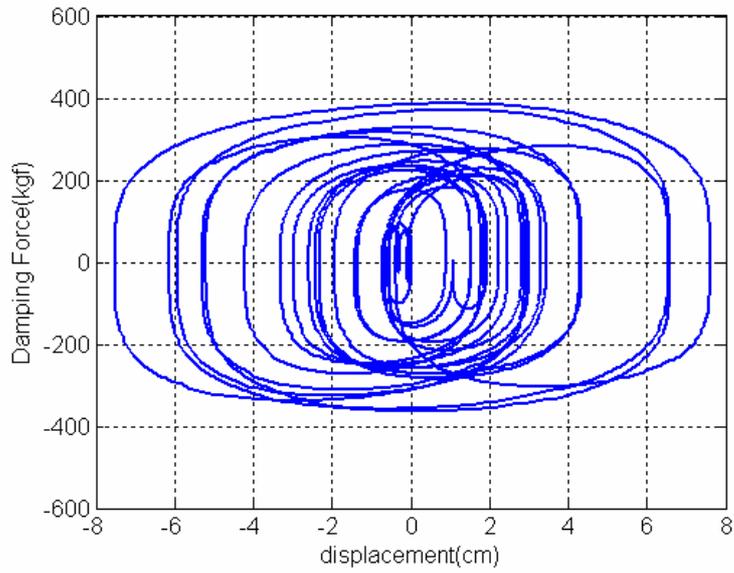


圖 3.16 油壓阻尼器遲滯迴圈 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

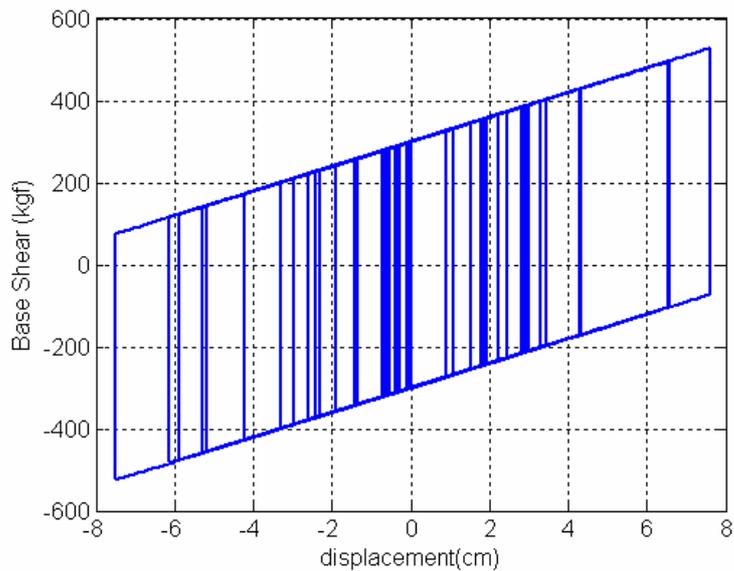
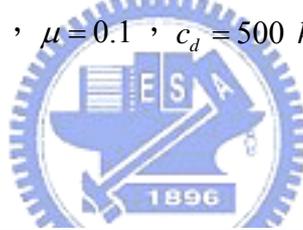


圖 3.17 FPS 遲滯迴圈 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

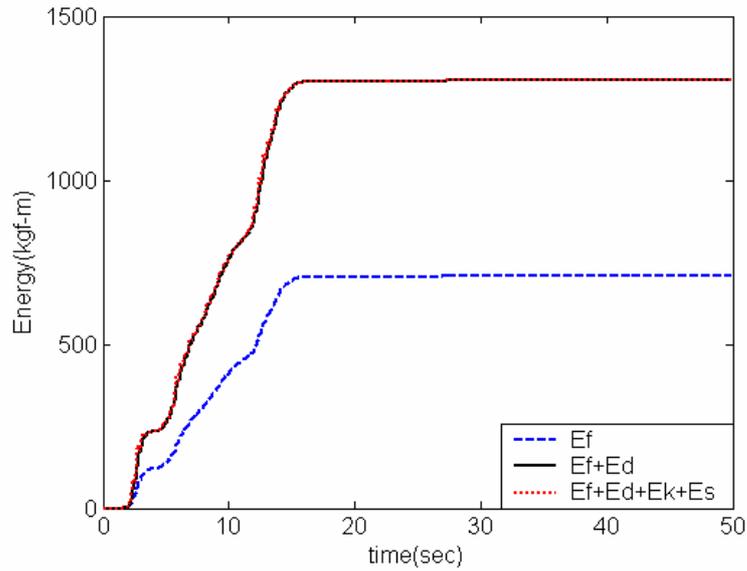


圖 3.18 系統能量累積 (El Centro, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

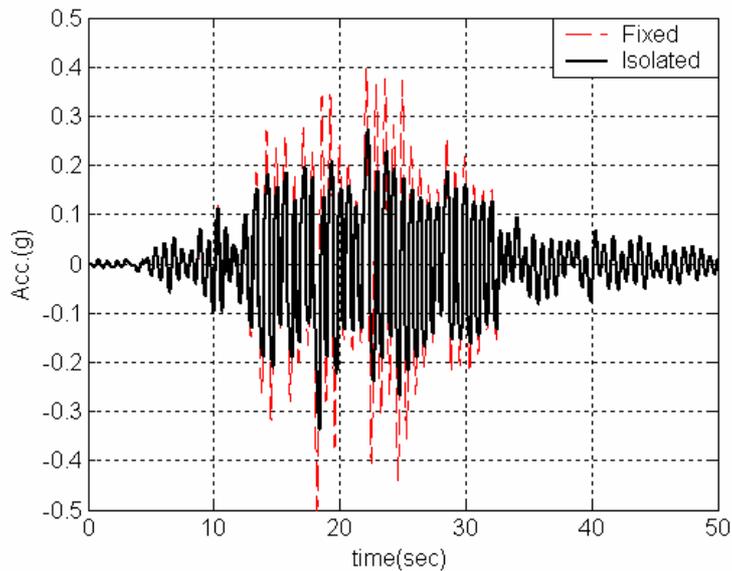


圖 3.19 設備加速度歷時反應比較 (TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

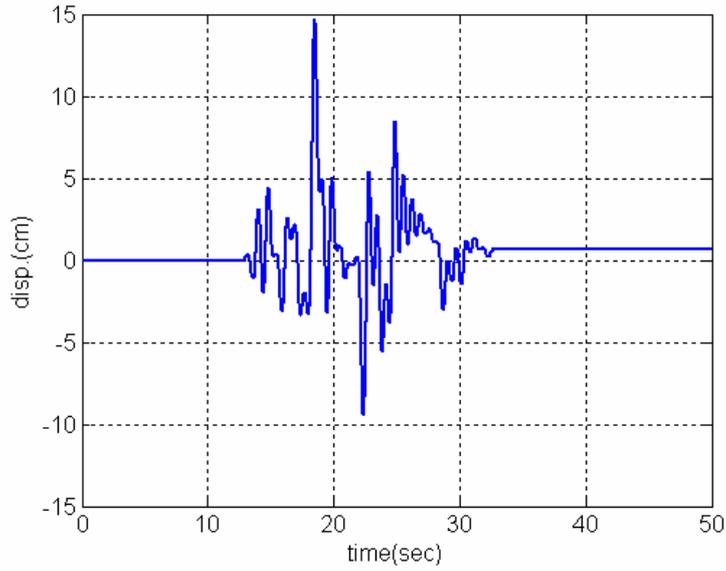


圖 3.20 隔震平台位移歷時反應圖(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

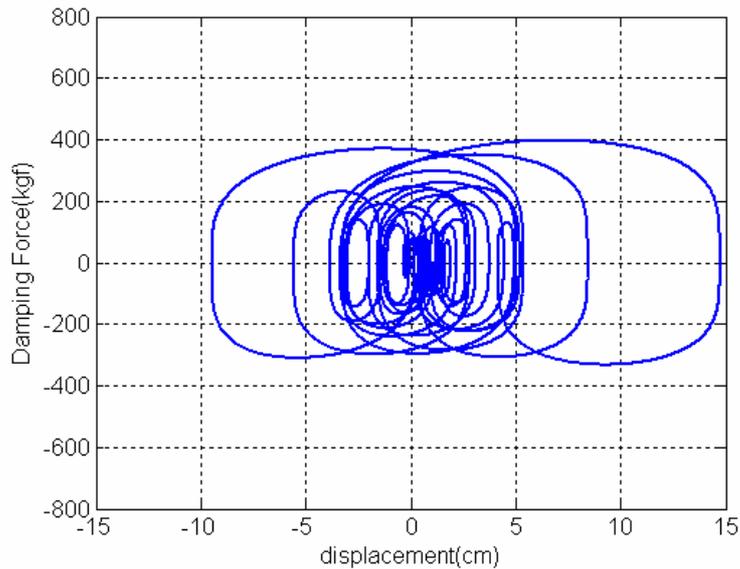
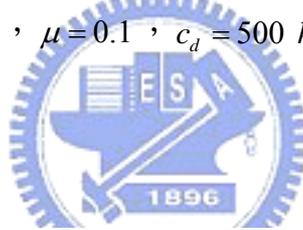


圖 3.21 油壓阻尼器遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

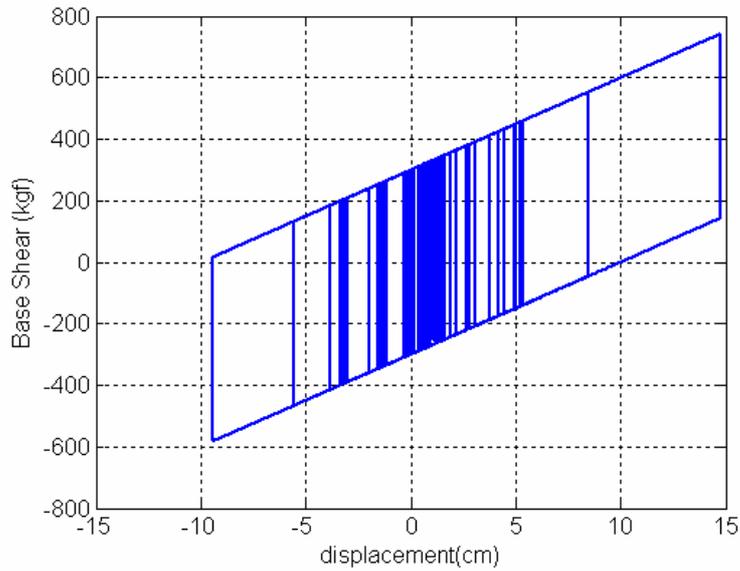


圖 3.22 隔震器遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

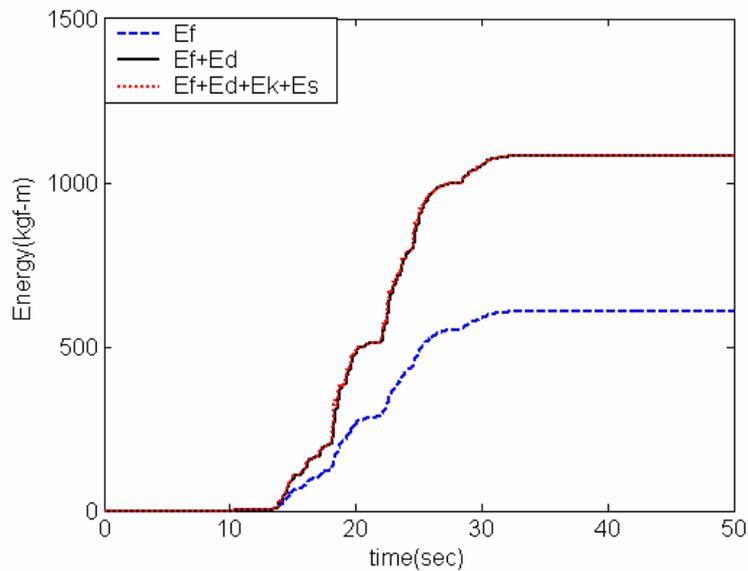
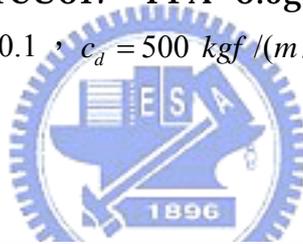
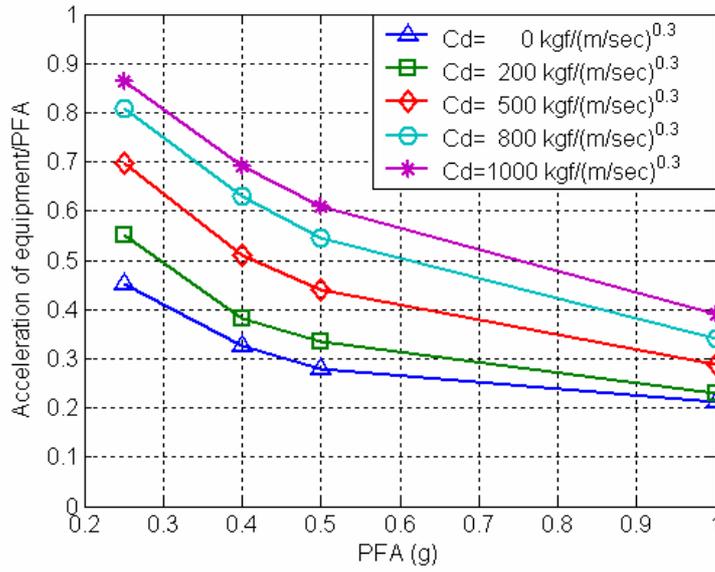
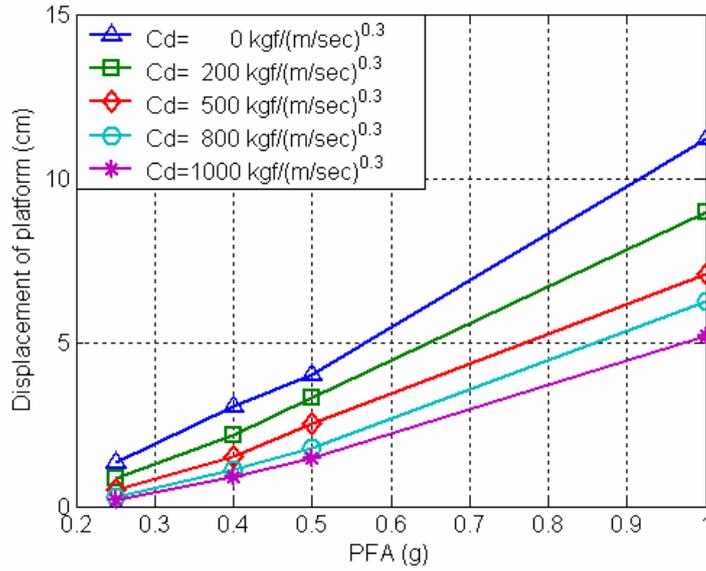


圖 3.23 系統能量累積(TCU017, PFA=0.5g,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $W = 3\text{ton}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $c_d = 500\text{ kgf}/(\text{m}/\text{sec})^{0.5}$ ,  $\alpha = 0.5$ )

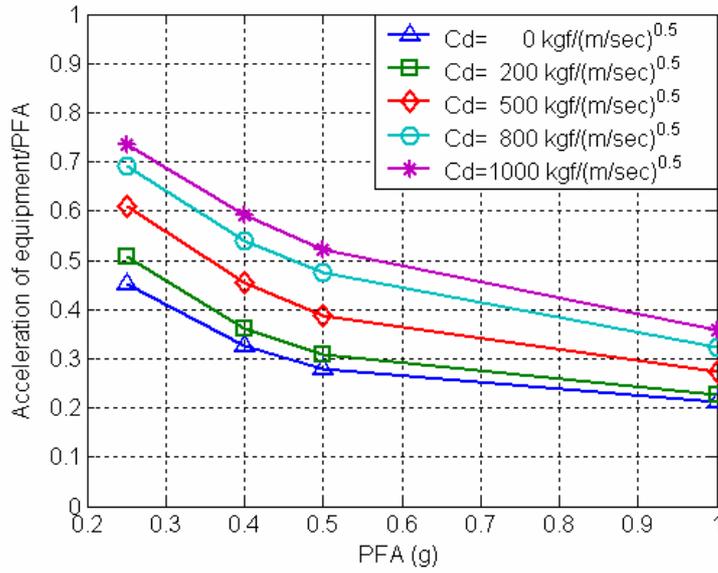


(a) 加速度比

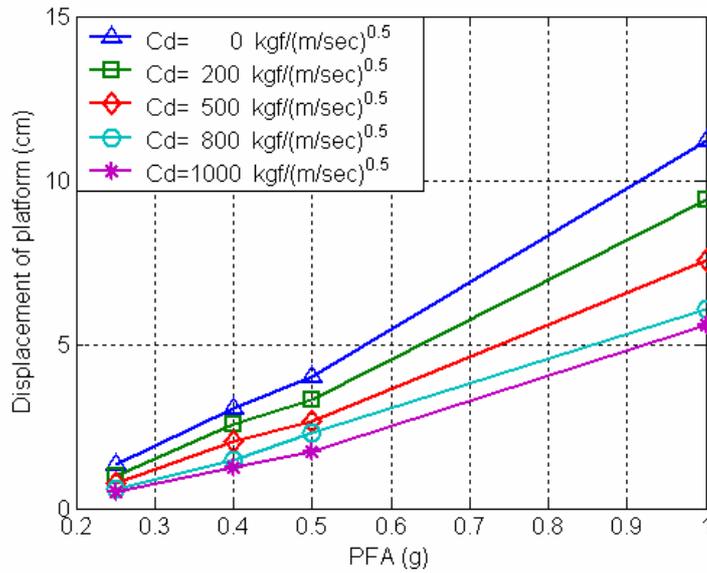


(b) 位移

圖 3.24 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

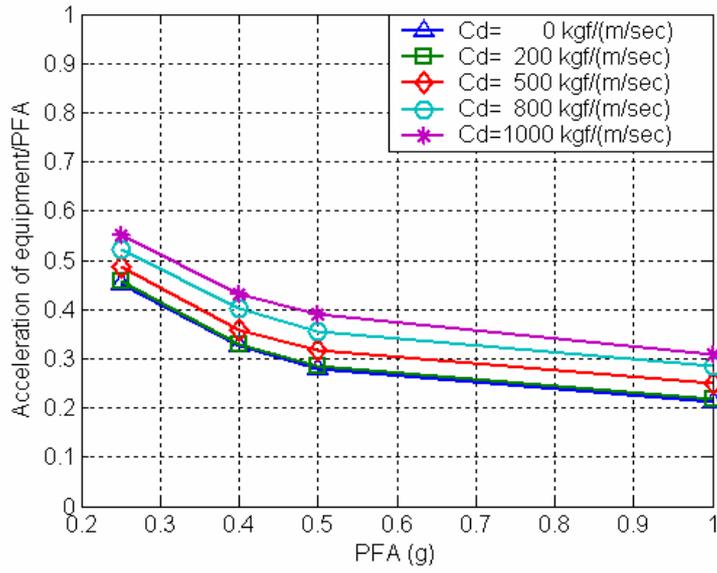


(a) 加速度比

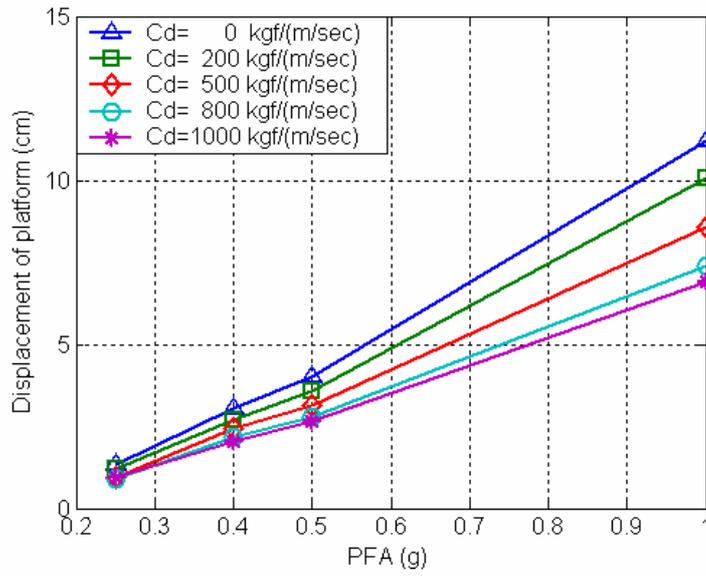


(b) 位移

圖 3.25 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

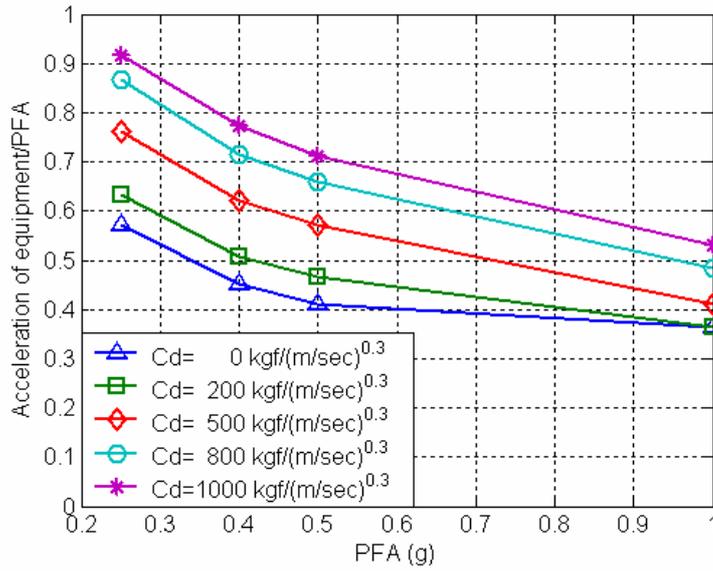


(a) 加速度比

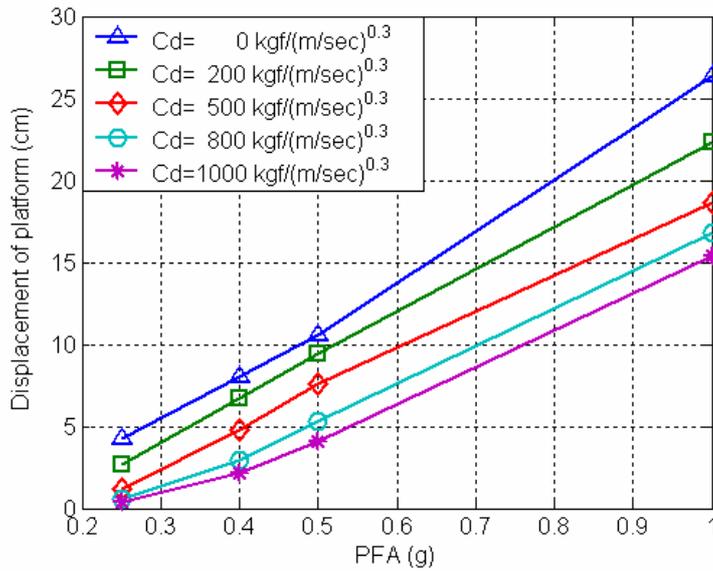


(b) 位移

圖 3.26 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 1$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

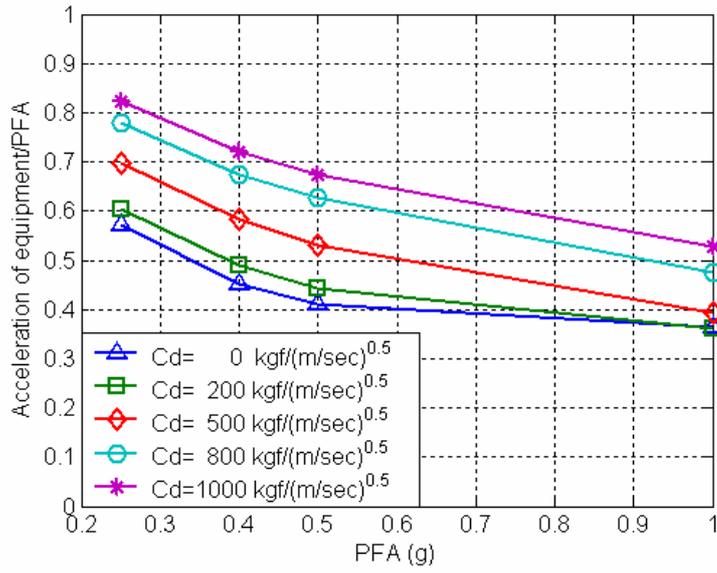


(a) 加速度比

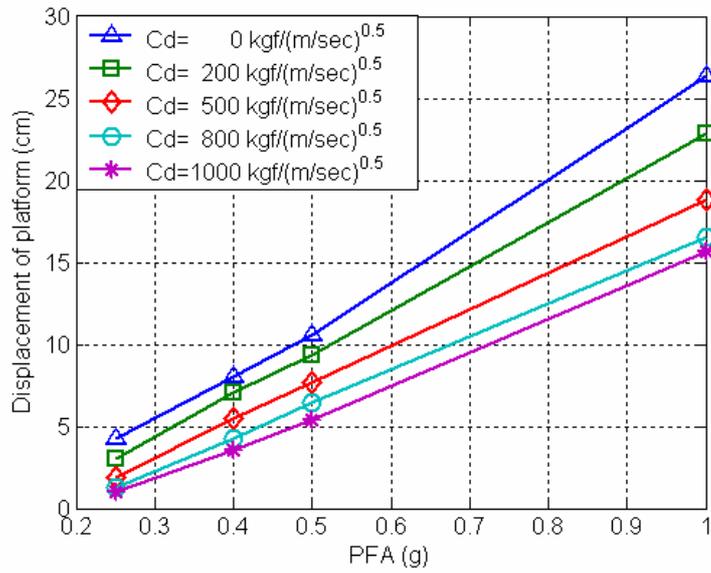


(b) 位移

圖 3.27 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

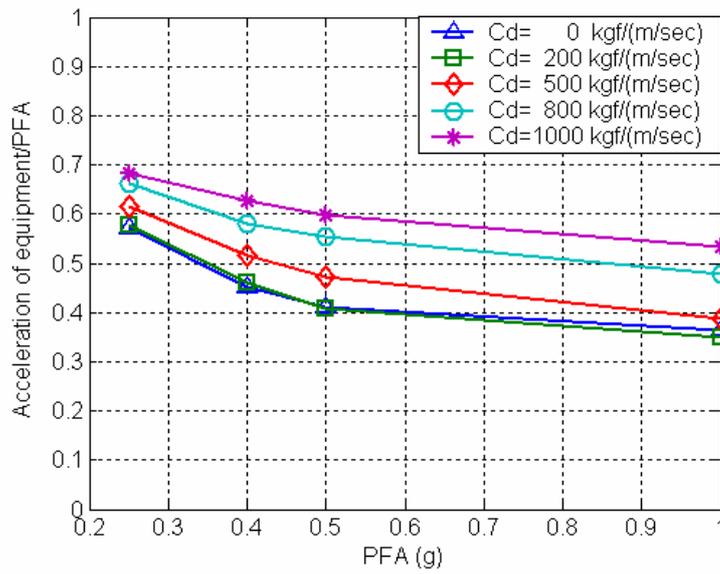


(a) 加速度比

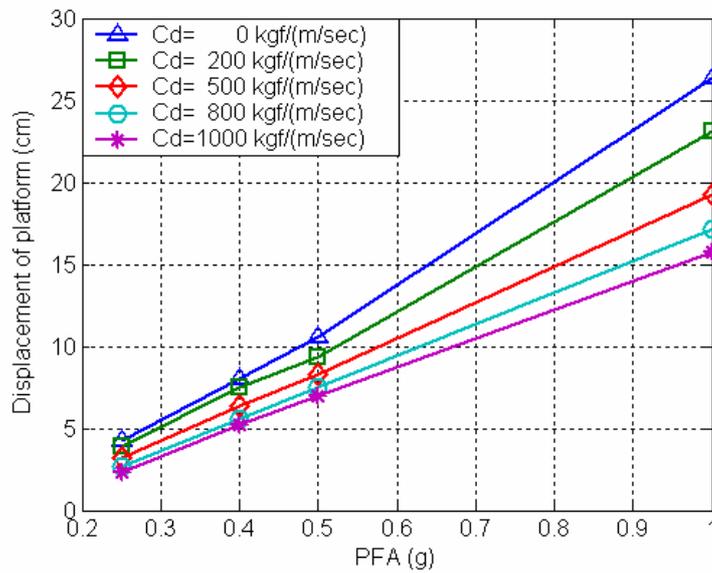


(b) 位移

圖 3.28 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

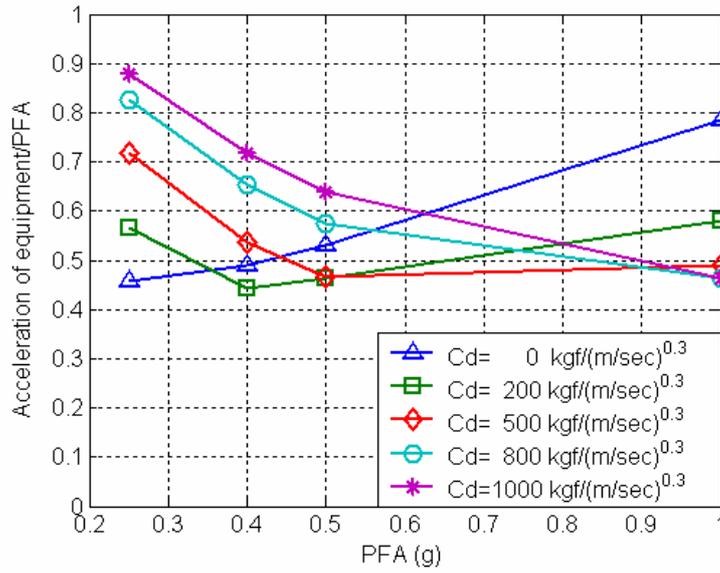


(a) 加速度比

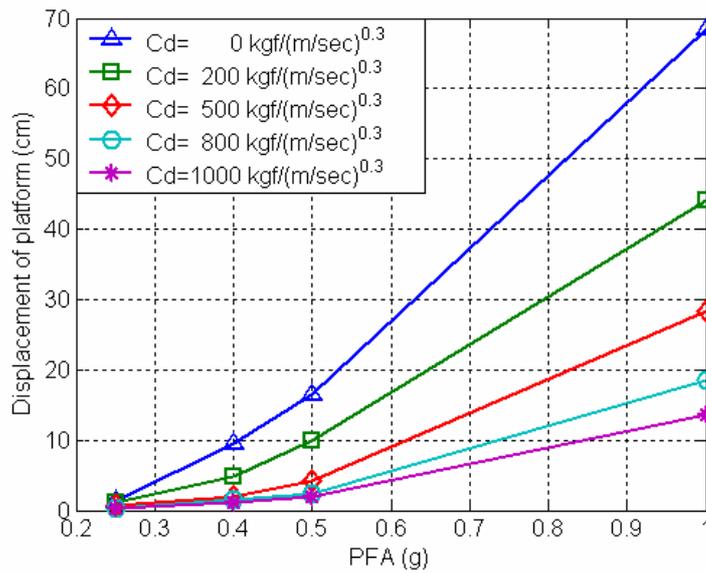


(b) 位移

圖 3.29 設備反應峰值比較(El Centro,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 1$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

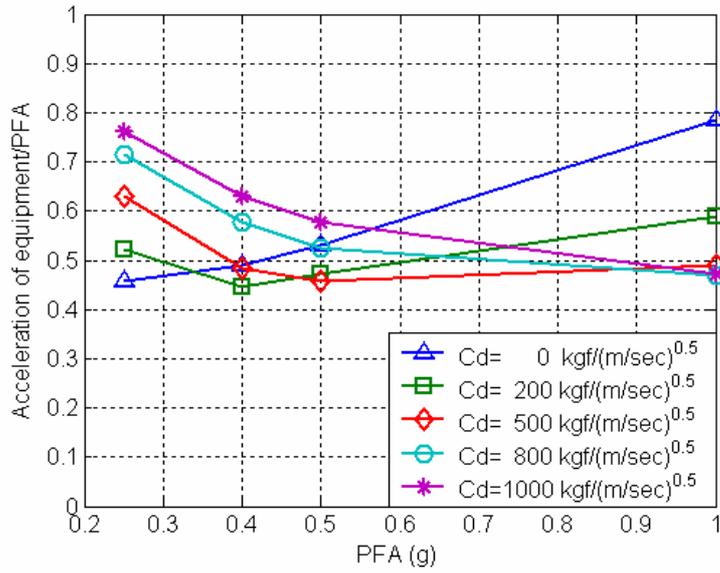


(a) 加速度比

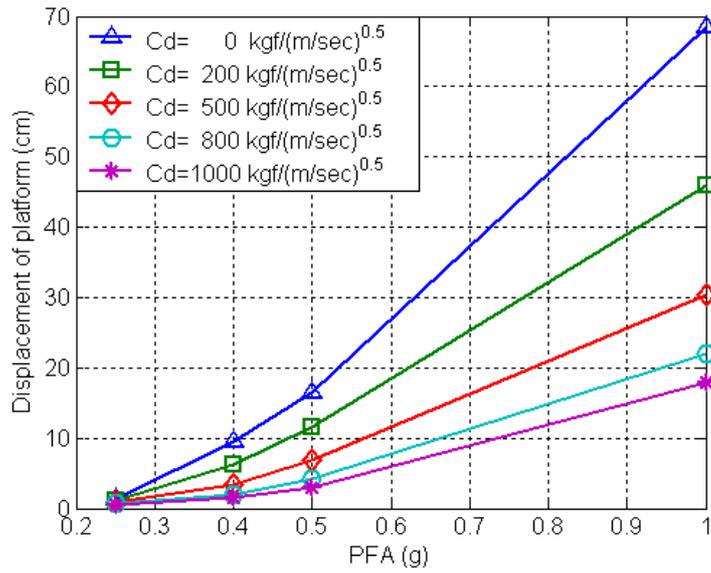


(b) 位移

圖 3.30 設備反應峰值比較 (TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

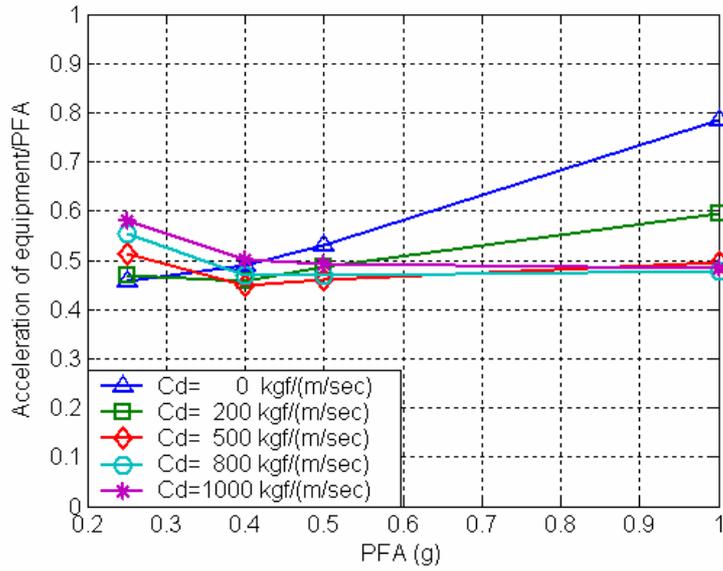


(a) 加速度比

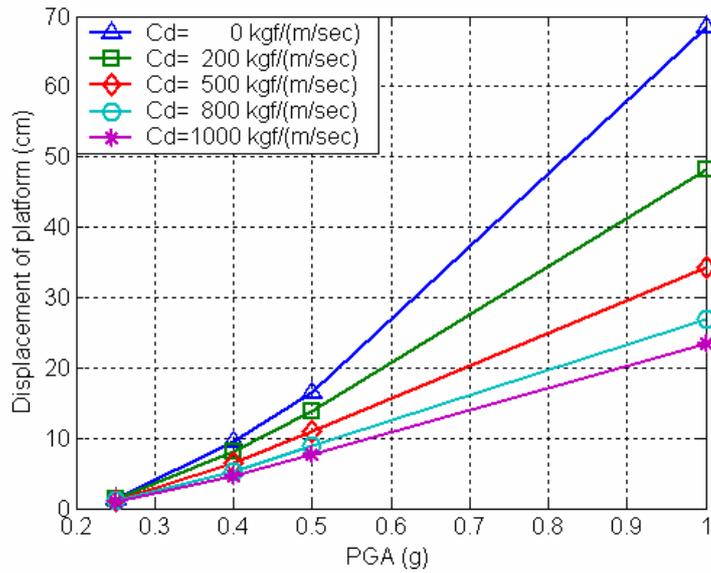


(b) 位移

圖 3.31 設備反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

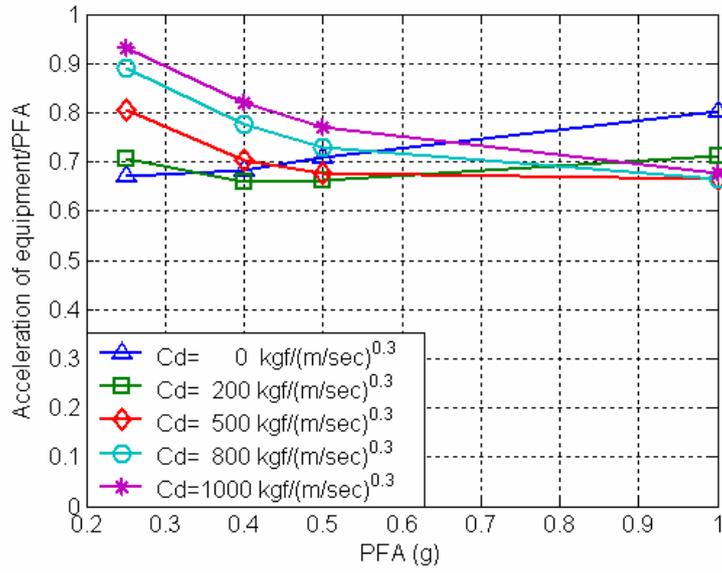


(a) 加速度比

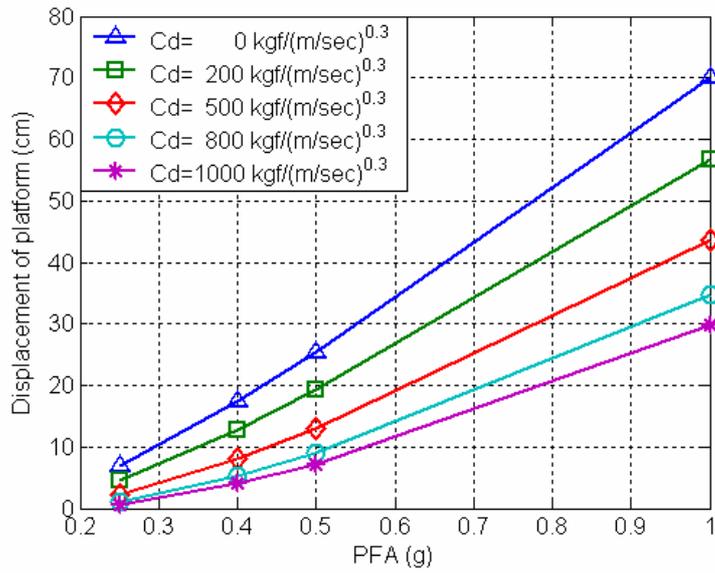


(b) 位移

圖 3.32 設備反應峰值比較圖(TCU017,  $T_s = 0.3\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 1$ ,  $W = 3\text{ton}$ )

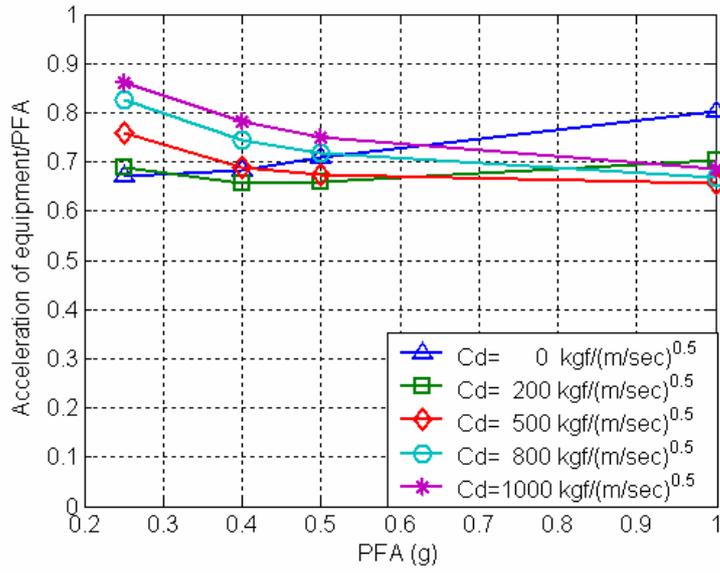


(a) 加速度比

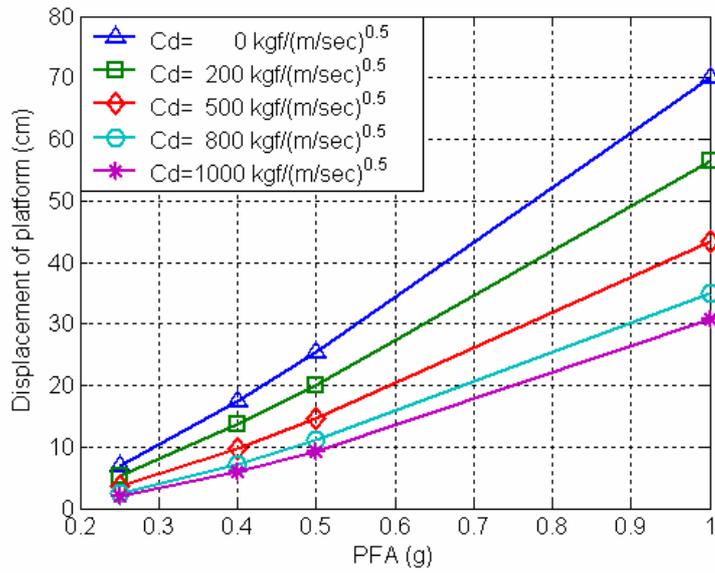


(b) 位移

圖 3.33 設備反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )

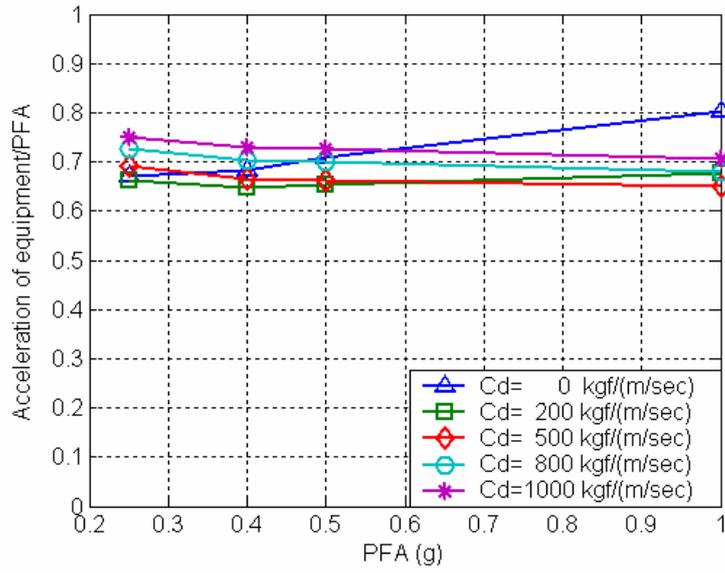


(a) 加速度比

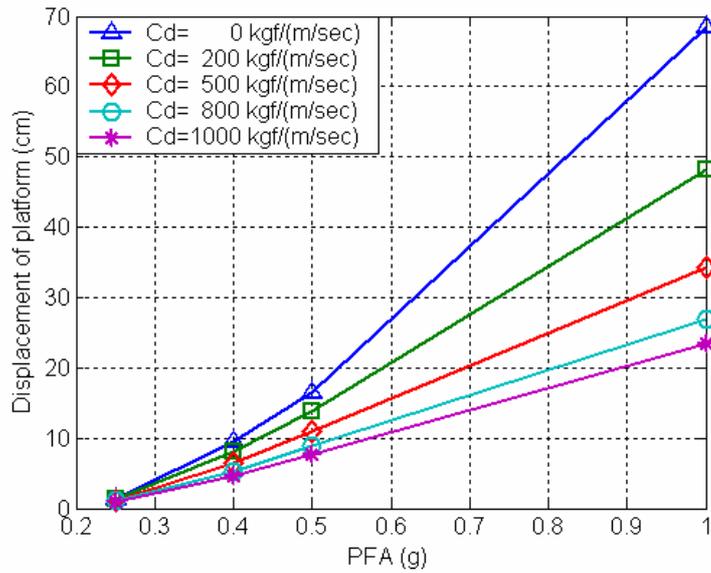


(b) 位移

圖 3.34 設備反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.7\text{sec}$ ,  $T_{FPS} = 2\text{sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $W = 3\text{ton}$ )



(a) 加速度比



(b) 位移

圖 3.35 設備反應峰值比較(TCU017,  $T_s = 0.7 \text{ sec}$ ,  $T_{FPS} = 2 \text{ sec}$ ,  $\mu = 0.1$ ,  $\alpha = 1$ ,  $W = 3 \text{ ton}$ )



圖 4.1 15 噸 MTS 動態制動器 (Model 244.23s)



圖 4.2 地震模擬裝置-振動桌系統



圖 4.3 1.5 噸油壓致動器

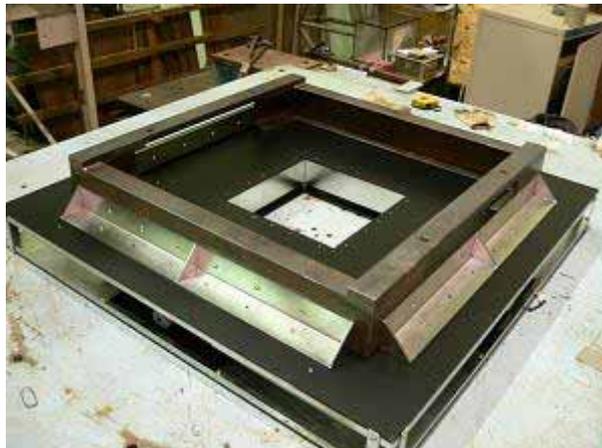


圖 4.4 隔震器組裝完成圖



圖 4.5 摩擦單擺支承凹面板



圖 4.6 披覆鐵弗龍材料的摩擦子及基座



圖 4.7 設備隔震測試模型

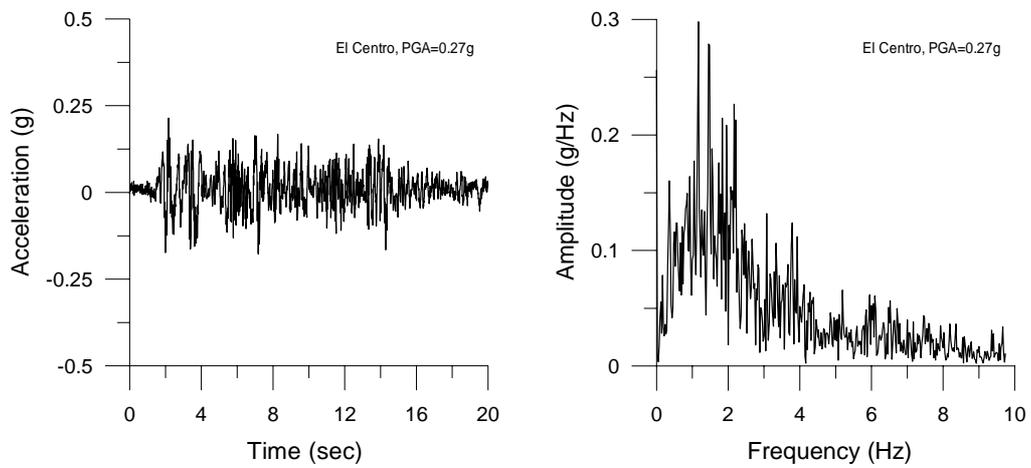


圖 4.8 El Centro 地震歷時與頻譜反應

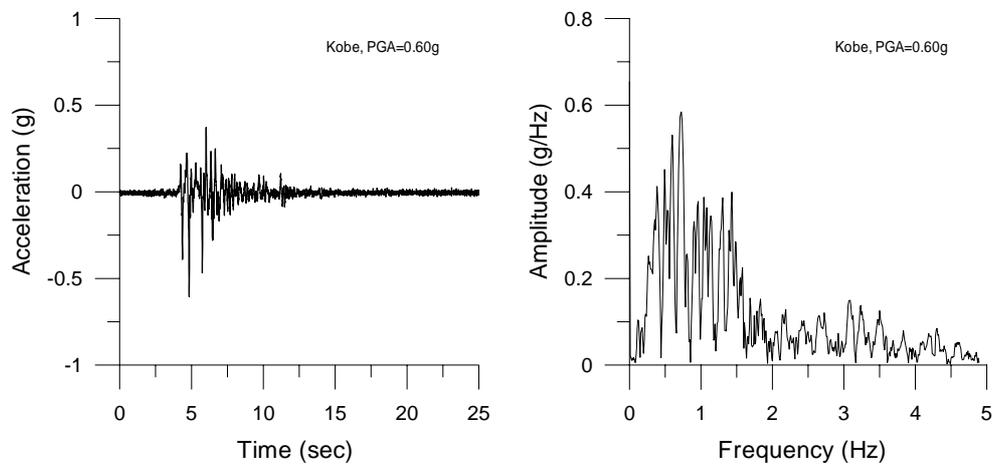


圖 4.9 Kobe 地震歷時

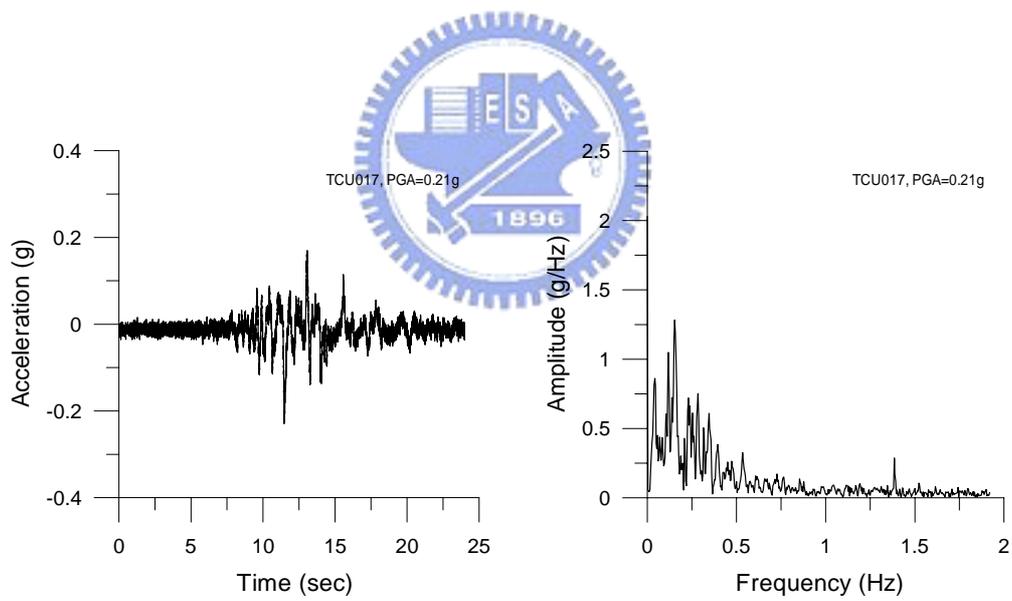


圖 4.10 TCU017 地震歷時

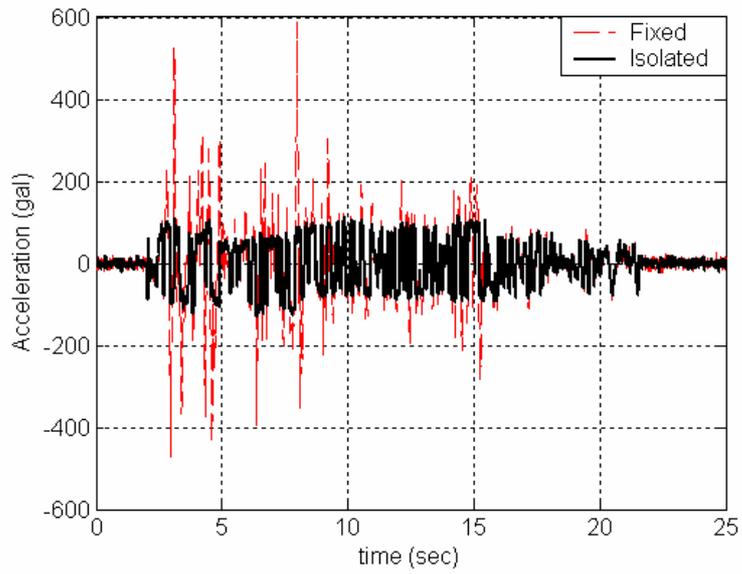


圖 4.11 隔震平台加速度歷時(El Centro, PFA=0.59g, w=2.1ton)

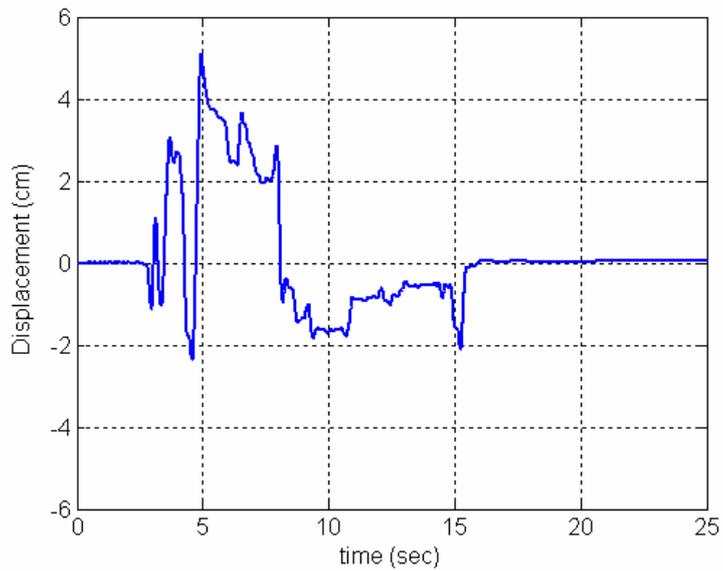


圖 4.12 隔震平台位移歷時(El Centro, PFA=0.59g, w=2.1ton)

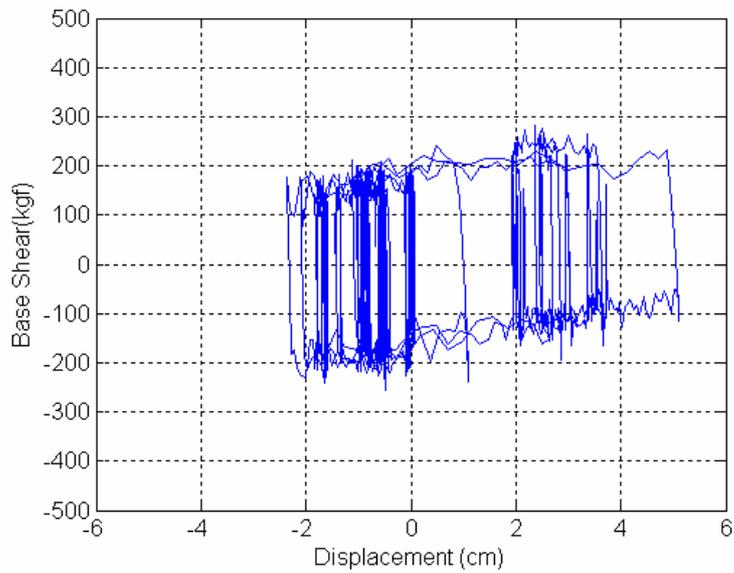


圖 4.13 隔震平台遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.59g, w=2.1ton)

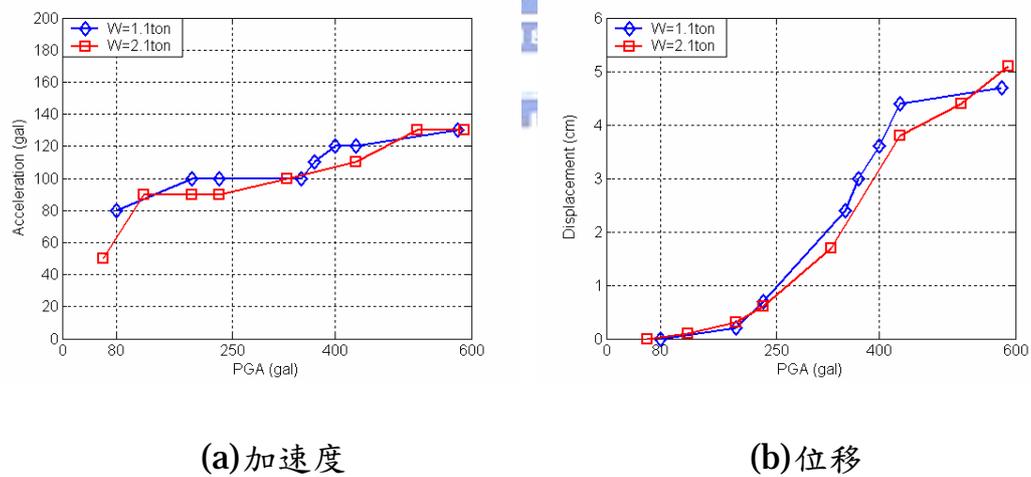


圖 4.14 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(El Centro)

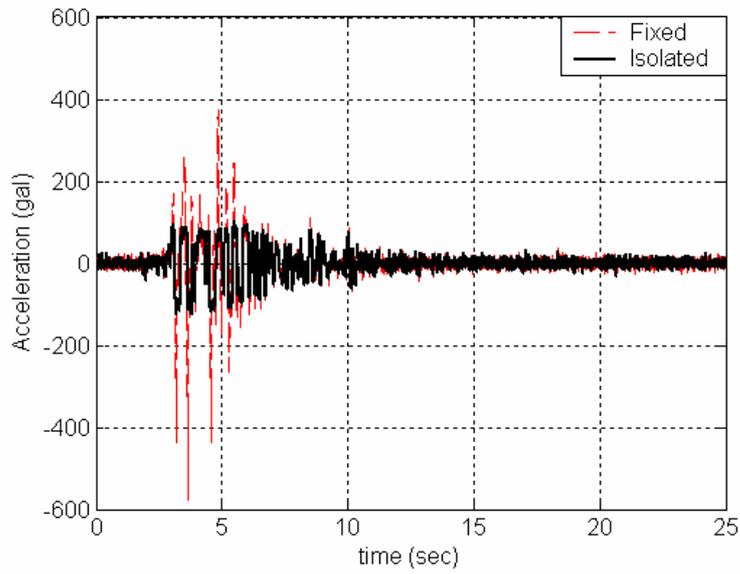


圖 4.15 隔震平台加速度歷時(Kobe, PFA=0.58g, w=2.1ton)

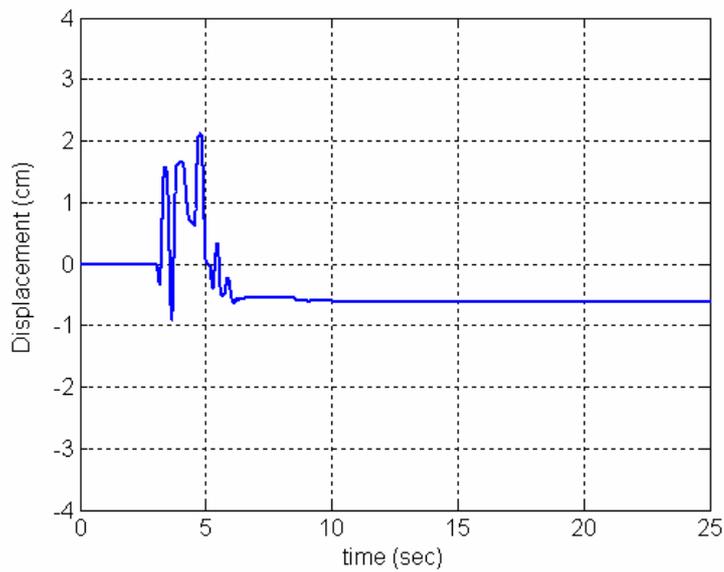


圖 4.16 隔震平台位移歷時(Kobe, PFA=0.58g, w=2.1ton)

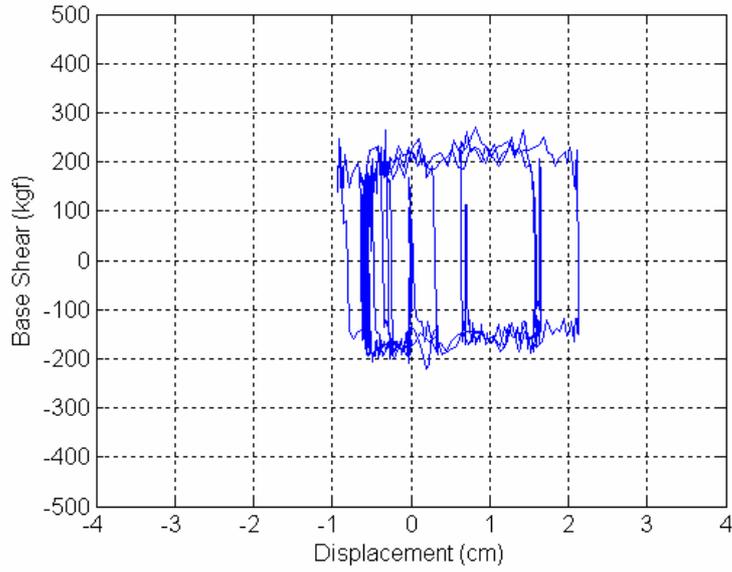
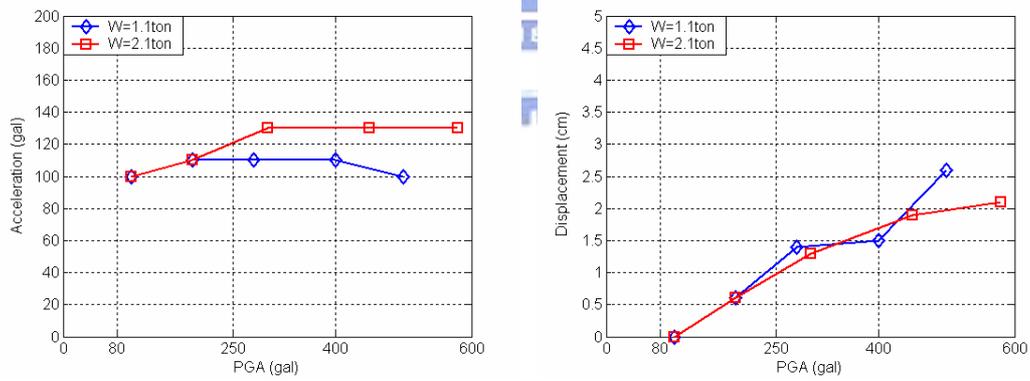


圖 4.17 隔震平台遲滯迴圈(Kobe, PFA=0.59g, w=2.1ton)



(a) 加速度

(b) 位移

圖 4.18 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(Kobe)

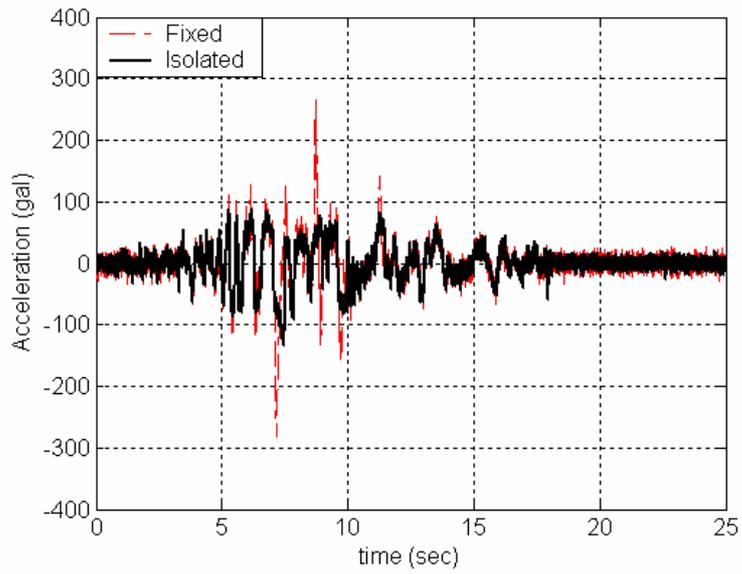


圖 4.19 隔震平台加速度歷時(TCU017, PFA=0.27g, w=2.1ton)

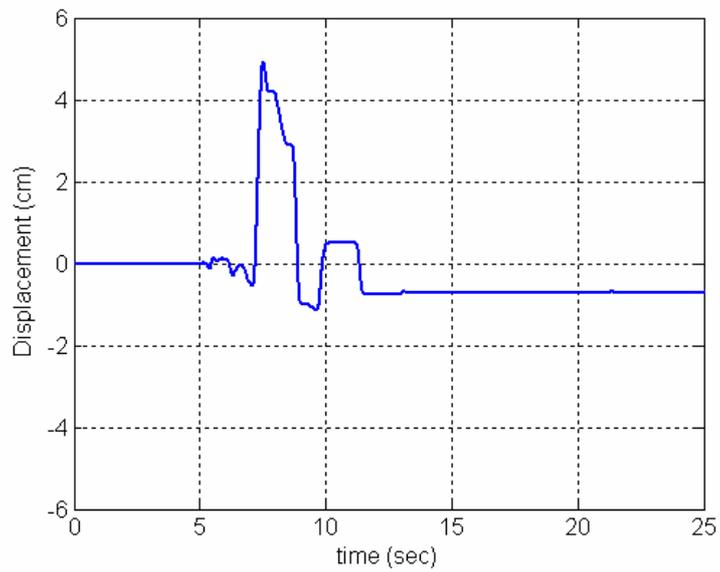


圖 4.20 隔震平台位移歷時(Kobe, PFA=0.27g, w=2.1ton)

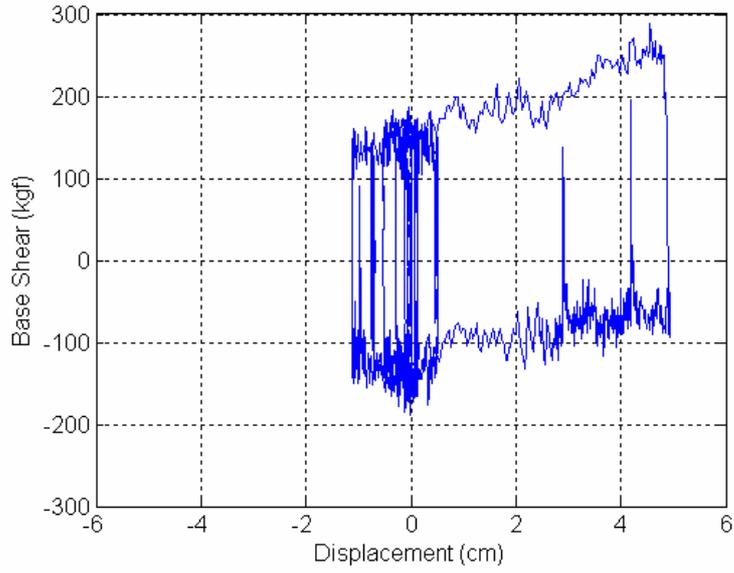
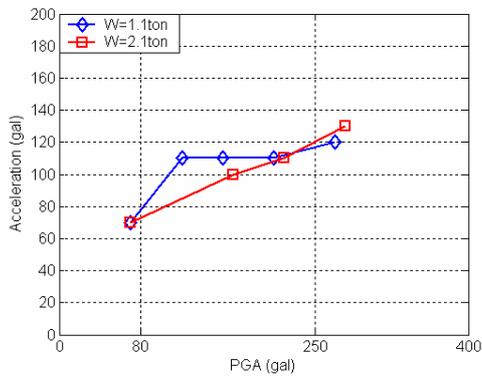
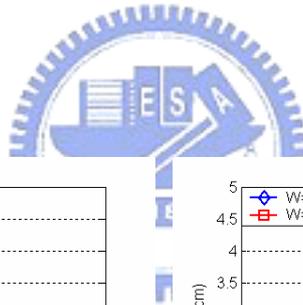
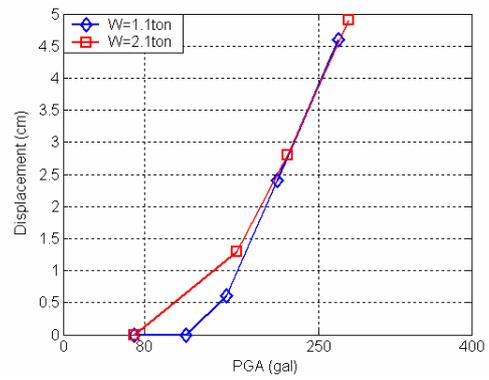


圖 4.21 隔震平台遲滯迴圈(Kobe, PFA=0.27g, w=2.1ton)



(a) 加速度



(b) 位移

圖 4.22 不同設備重量下之隔震平台反應峰值比較(TCU017)

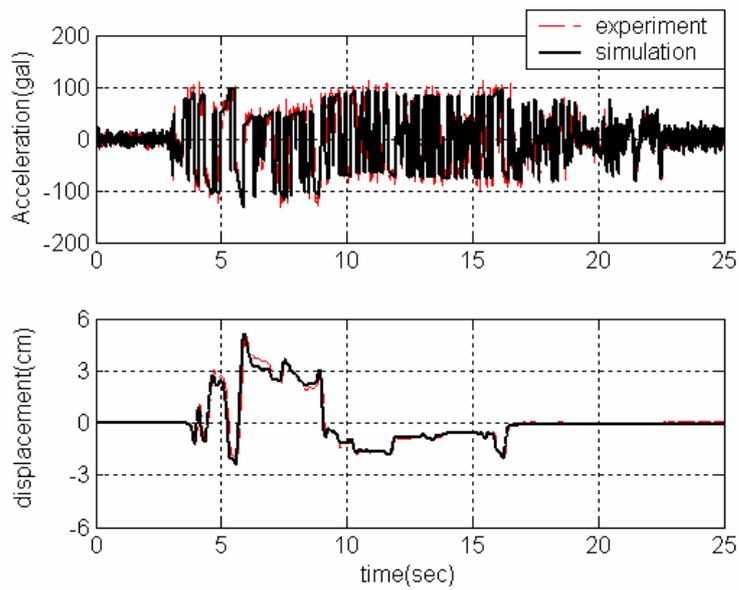


圖 4.23 隔震平台歷時反應模擬(El Centro, PFA=0.59g, w=2.1ton)

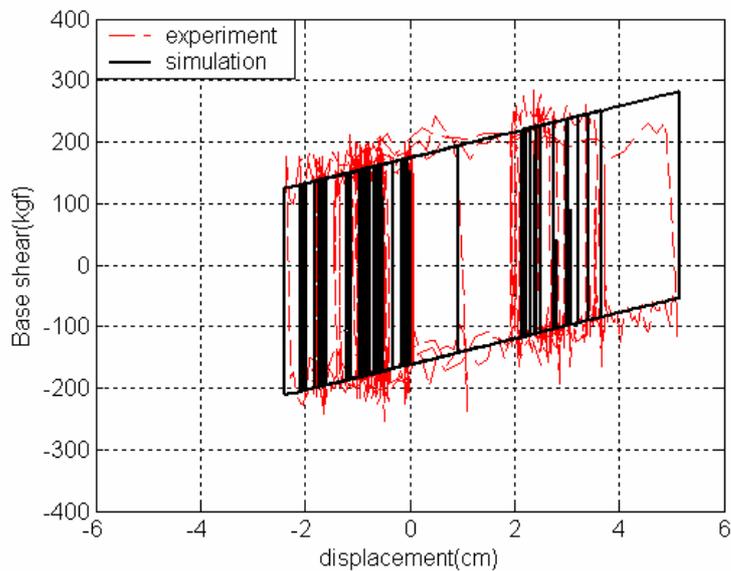


圖 4.24 隔震平台遲滯迴圈模擬(El Centro, PFA=0.59g, w=2.1ton)

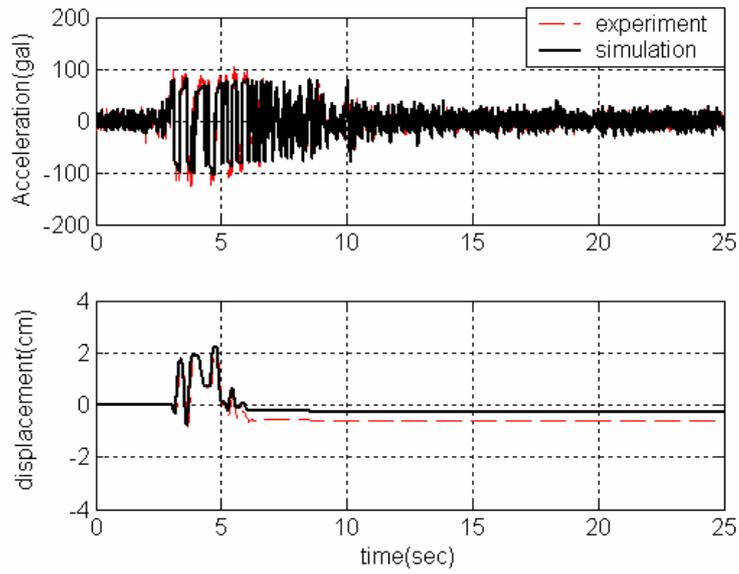


圖 4.25 隔震平台歷時反應模擬(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton)

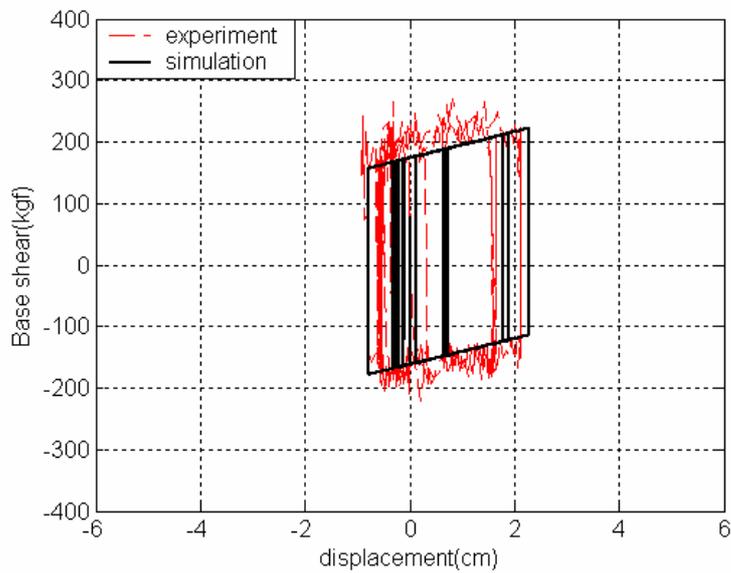


圖 4.26 隔震平台遲滯迴圈模擬(Kobe , PFA=0.58g, w=2.1ton)

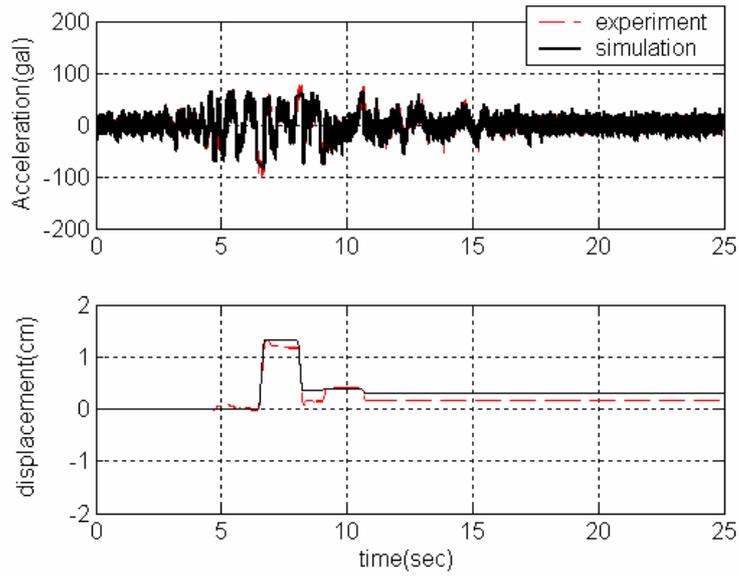


圖 4.27 隔震平台歷時反應模擬 (TCU017, PFA=0.17g, w=2.1ton)

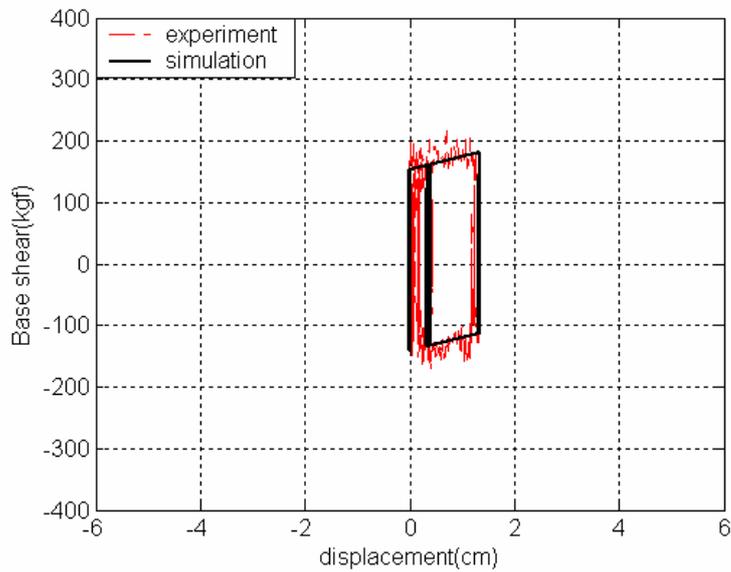
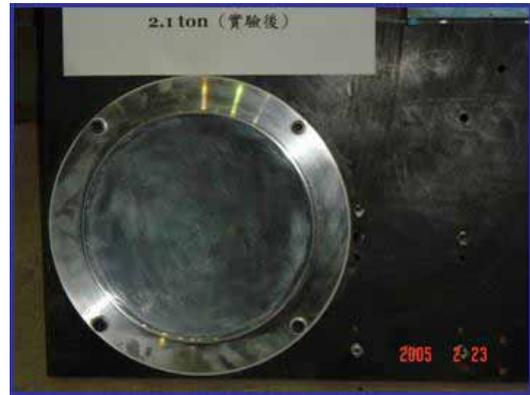


圖 4.28 隔震平台遲滯迴圈模擬 (TCU017, PFA=0.17g, w=2.1ton)



(a) 摩擦子



(b) 凹面版

圖 4.29 振動台試驗後隔震器外觀



(a) 整體組裝



(b) 局部組裝

圖 4.30 設備隔震加裝油壓緩衝器試驗組裝

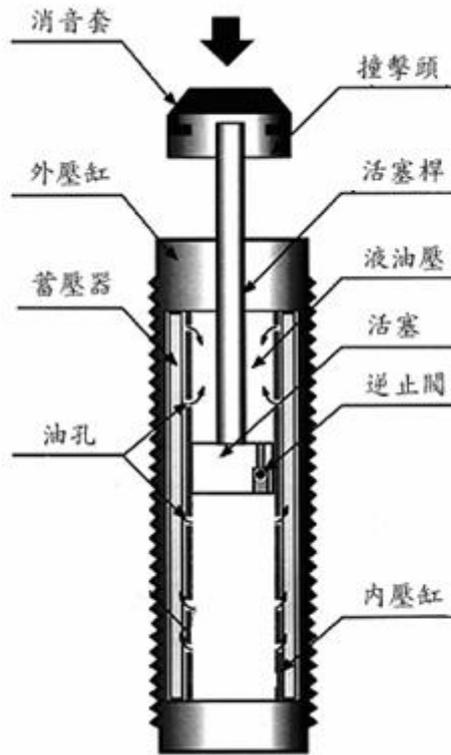


圖 4.31 油壓緩衝器構造圖

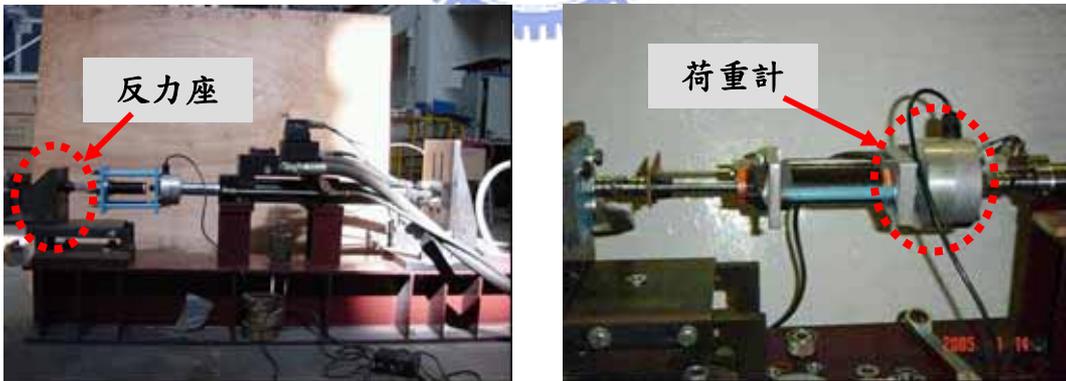


圖 4.32 油壓緩衝器元件測試組裝

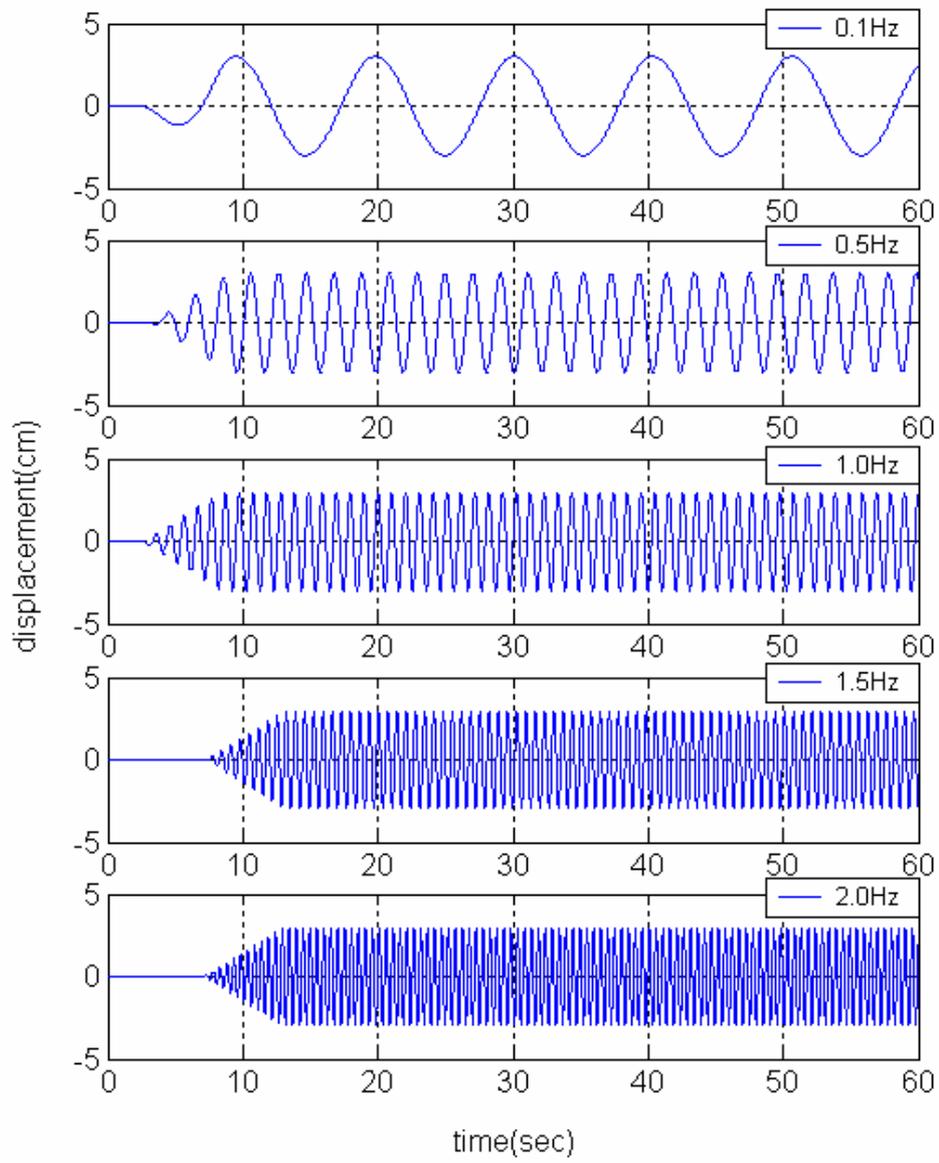


圖 4.33 不同頻率下之簡諧波位移歷時

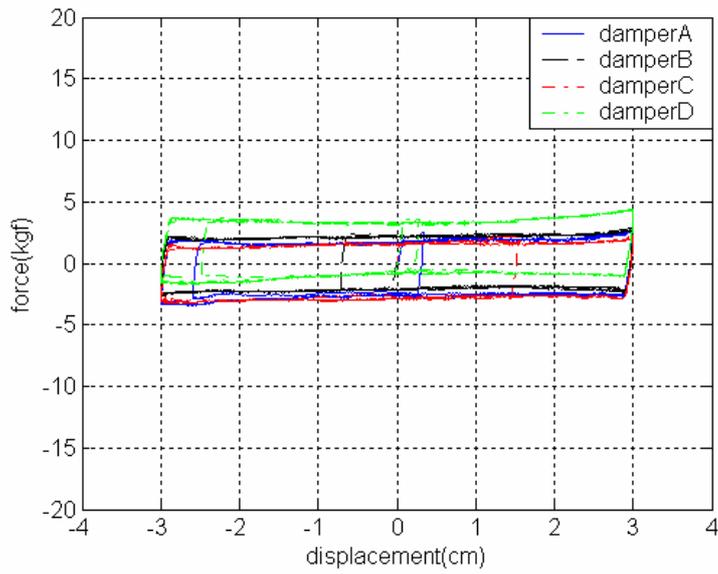


圖 4.34 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較(0.1Hz，

$$V_{\max} = 0.019m / \text{sec})$$

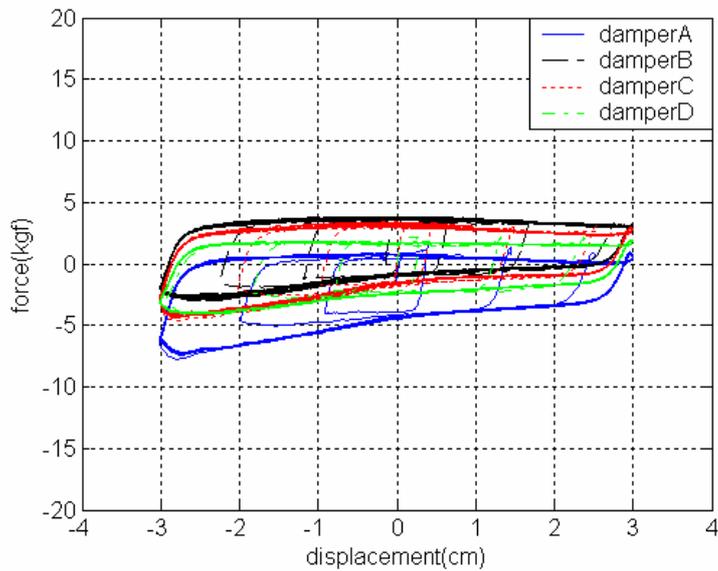


圖 4.35 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較(0.5Hz，

$$V_{\max} = 0.094m / \text{sec})$$

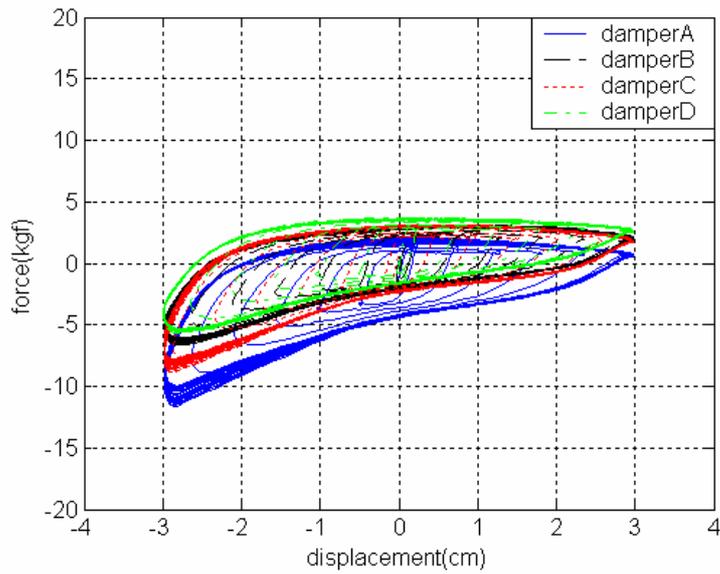


圖 4.36 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較(1Hz,  $V_{\max} = 0.188m/sec$ )

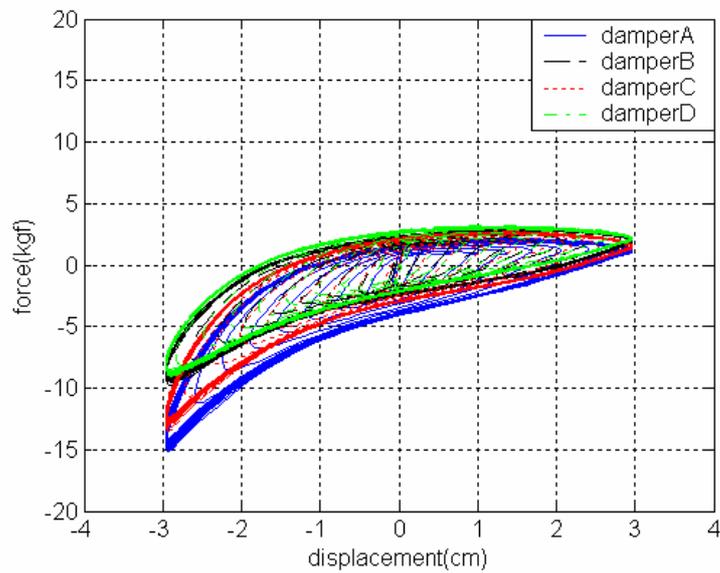


圖 4.37 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較(1.5Hz,  $V_{\max} = 0.283m/sec$ )

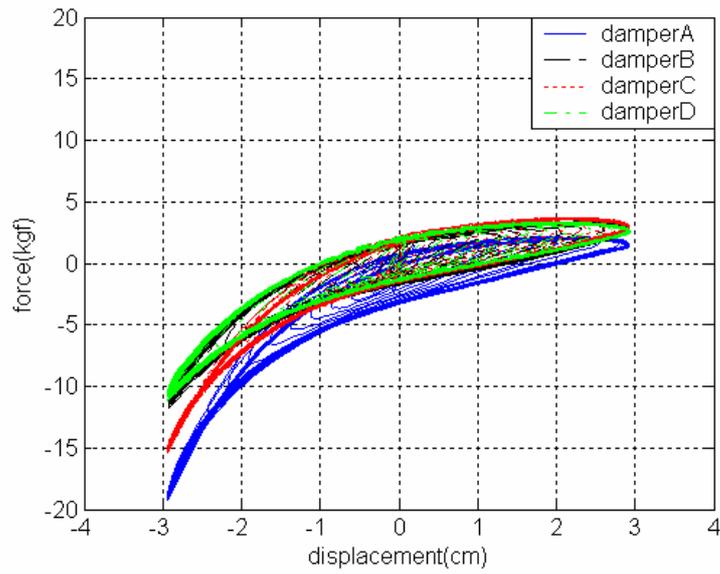


圖 4.38 不同刻度值時油壓緩衝器的遲滯迴圈比較(2Hz,  $V_{\max} = 0.377m/sec$ )

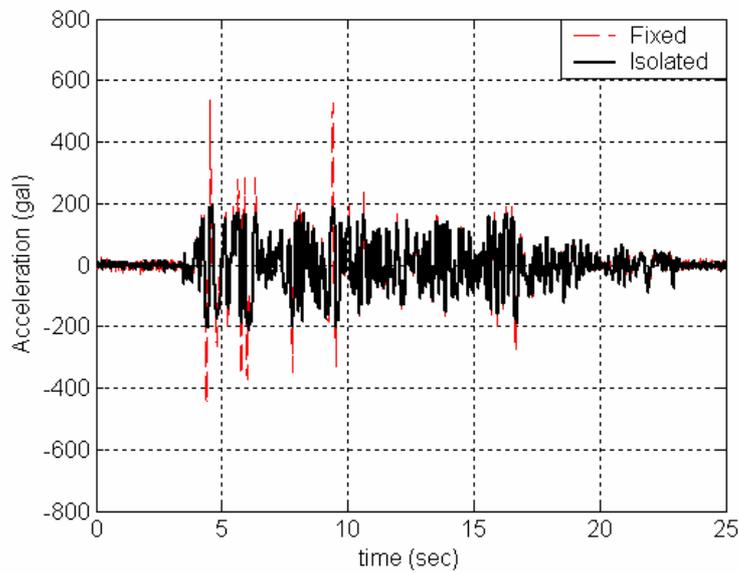


圖 4.39 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(El Centro, PFA=0.54g,  $w=2.1ton$ )

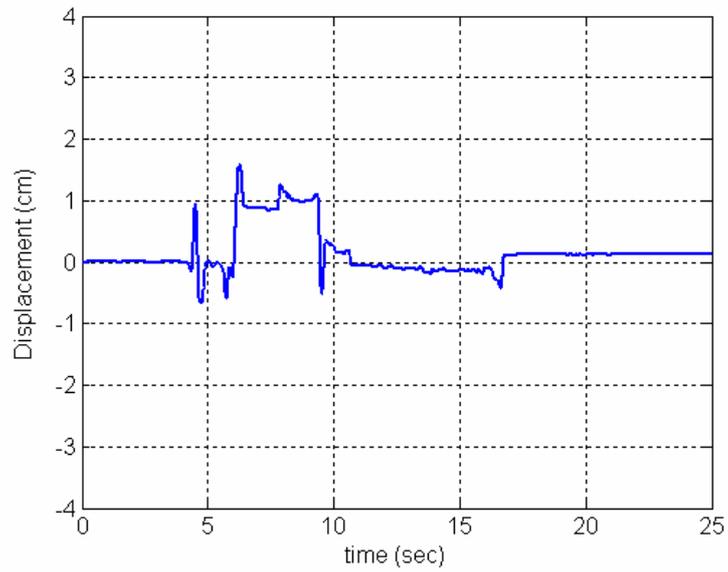


圖 4.40 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(El Centro, PFA=0.54g,

w=2.1ton)

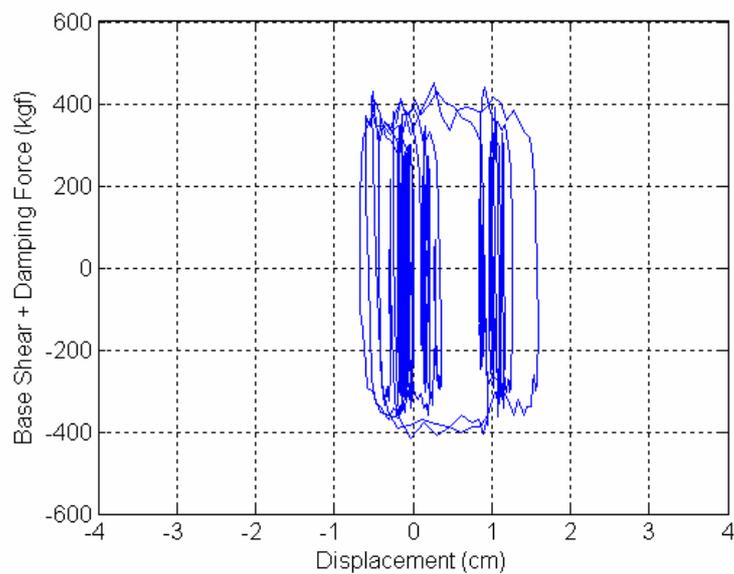
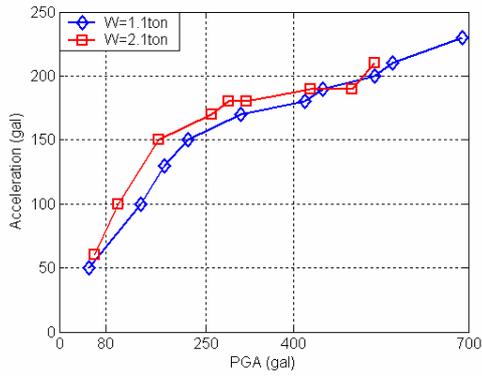
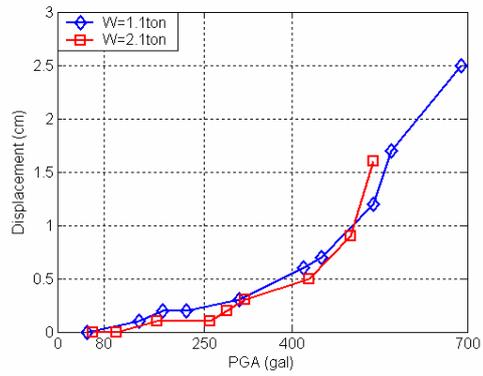


圖 4.41 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(El Centro, PFA=0.54g,

w=2.1ton)



(a) 加速度



(b) 位移

圖 4.42 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(El Centro)

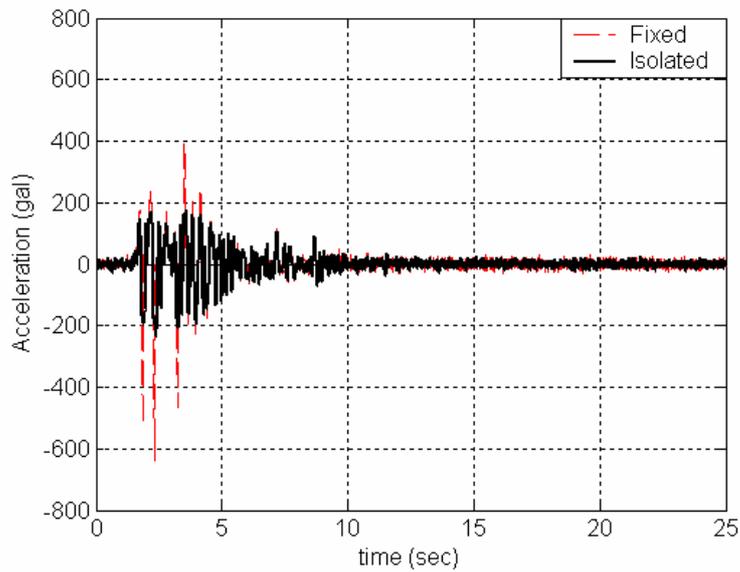


圖 4.43 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(Kobe, PFA=0.64g, w=2.1ton)

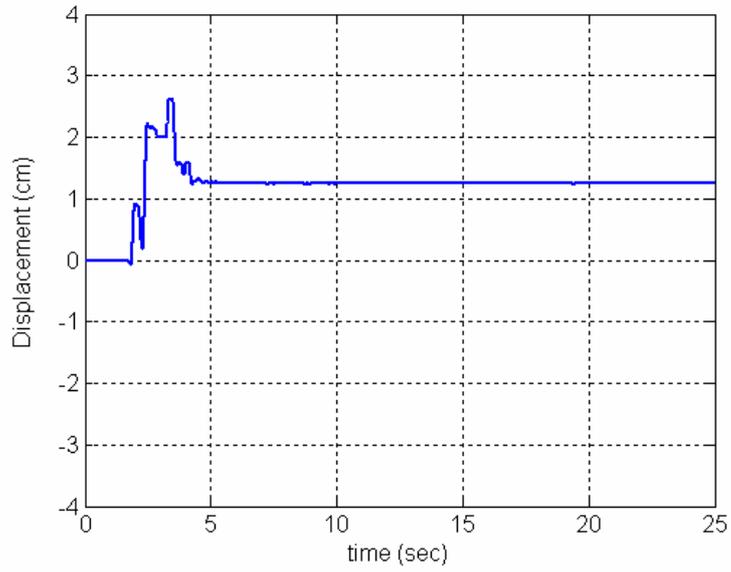


圖 4.44 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(Kobe, PGA=0.64g, w=2.1ton)

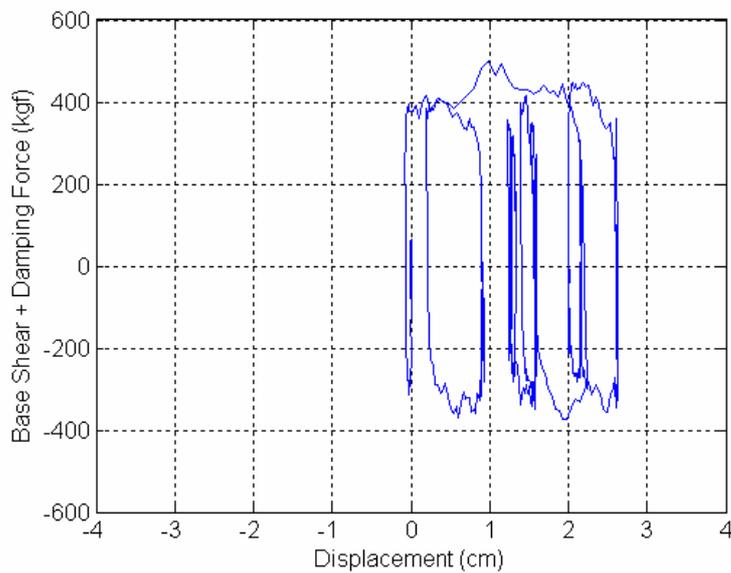
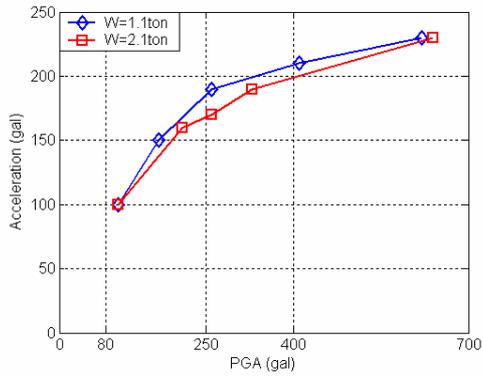
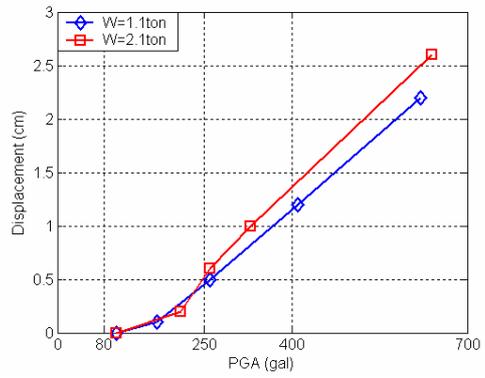


圖 4.45 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(Kobe, PFA=0.64g, w=2.1ton)



(a) 加速度



(b) 位移

圖 4.46 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(Kobe)

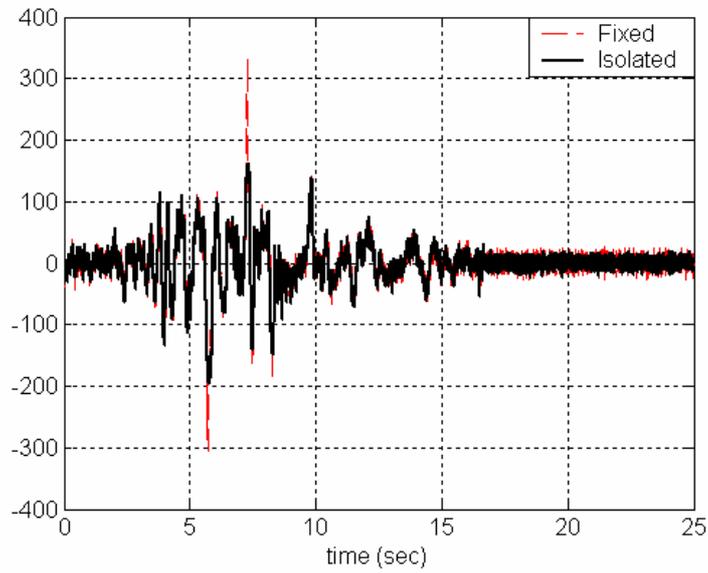


圖 4.47 隔震平台加裝緩衝器之加速度歷時(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton)

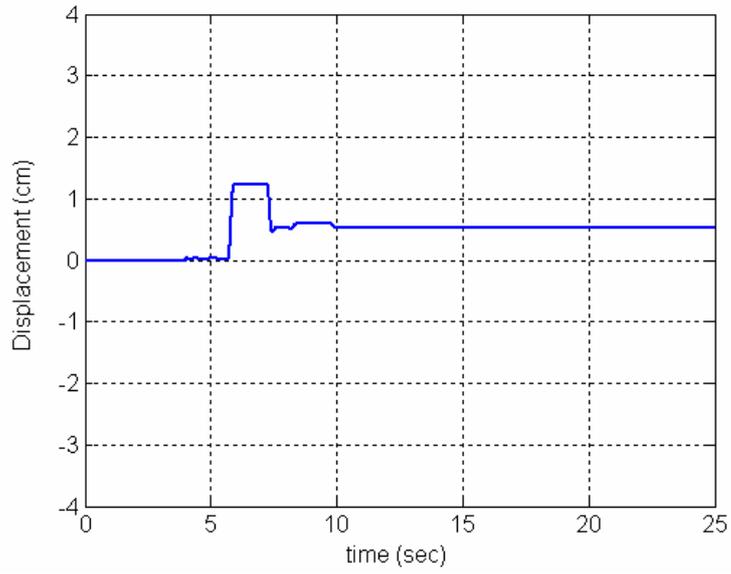


圖 4.48 隔震平台加裝緩衝器之位移歷時(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton)

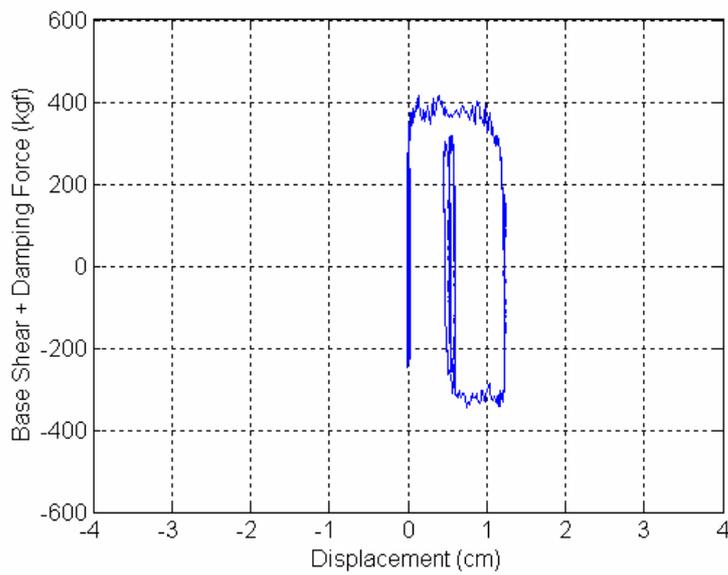
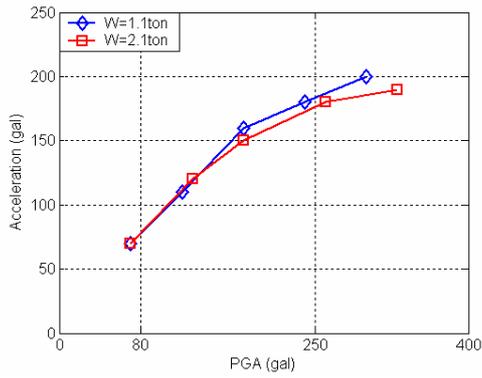
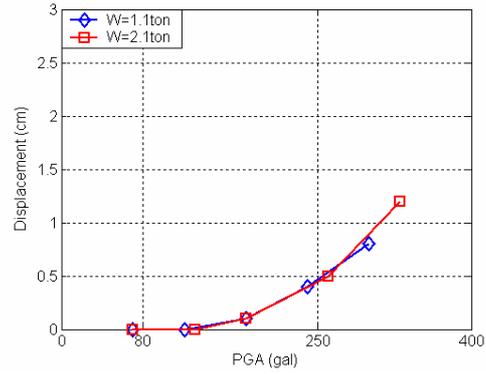


圖 4.49 隔震平台加裝緩衝器之遲滯迴圈(TCU017, PFA=0.33g, w=2.1ton)

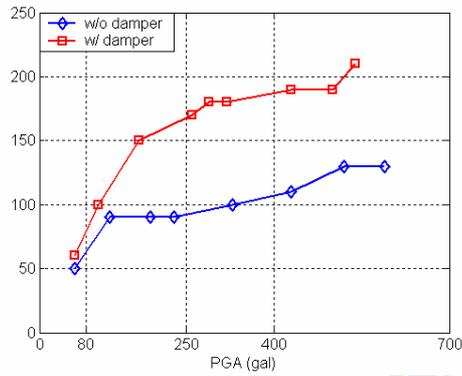


(a) 加速度

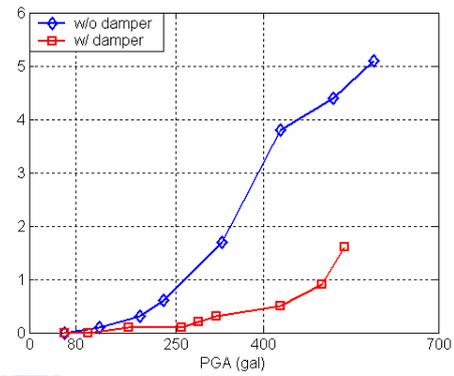


(b) 位移

圖 4.50 不同設備重量下隔震平台加裝緩衝器反應峰值比較(TCU017)

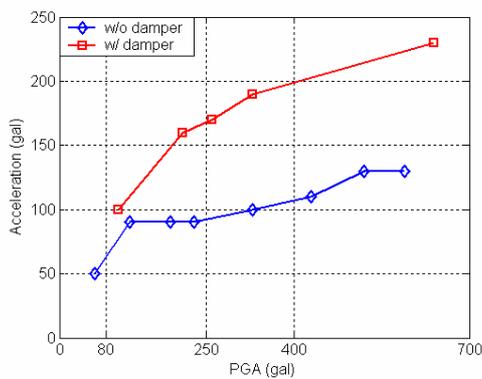


(a) 加速度

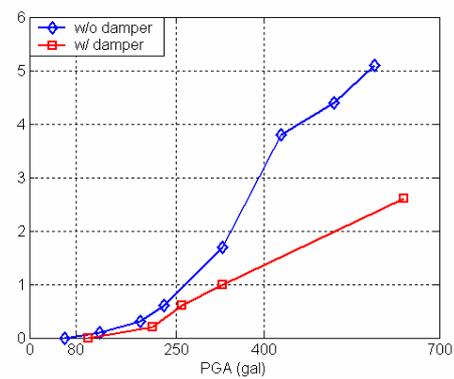


(b) 位移

圖 4.51 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(El Centro, w=2.1ton)

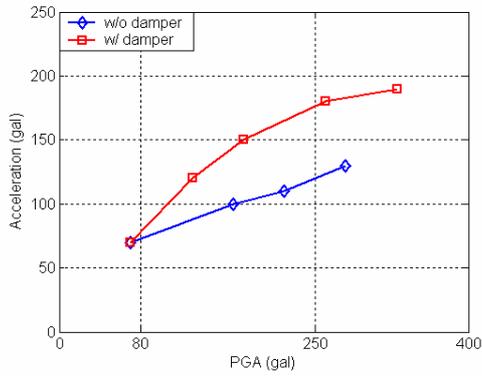


(a) 加速度

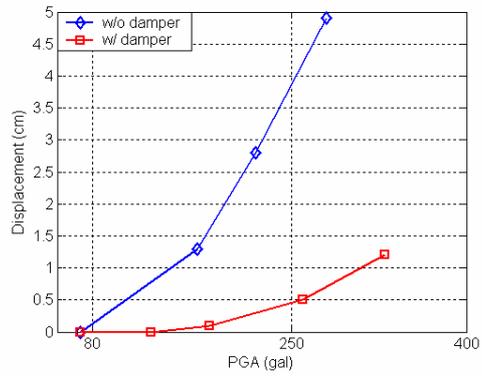


(b) 位移

圖 4.52 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(Kobe, w=2.1ton)



(a) 加速度

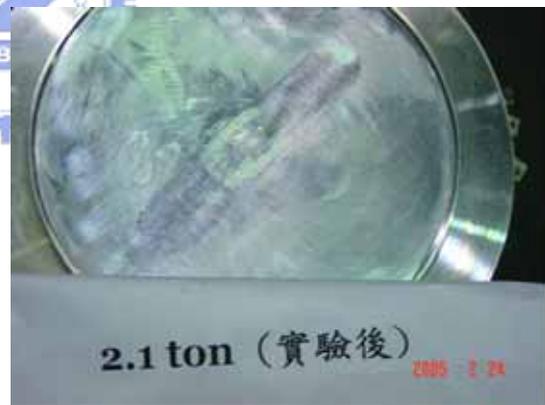


(b) 位移

圖 4.53 隔震平台加裝緩衝器前後反應峰值比較(TCU017, w=2.1ton)



(a) 摩擦子



(b) 凹面版

圖 4.54 振動台試驗後隔震器外觀

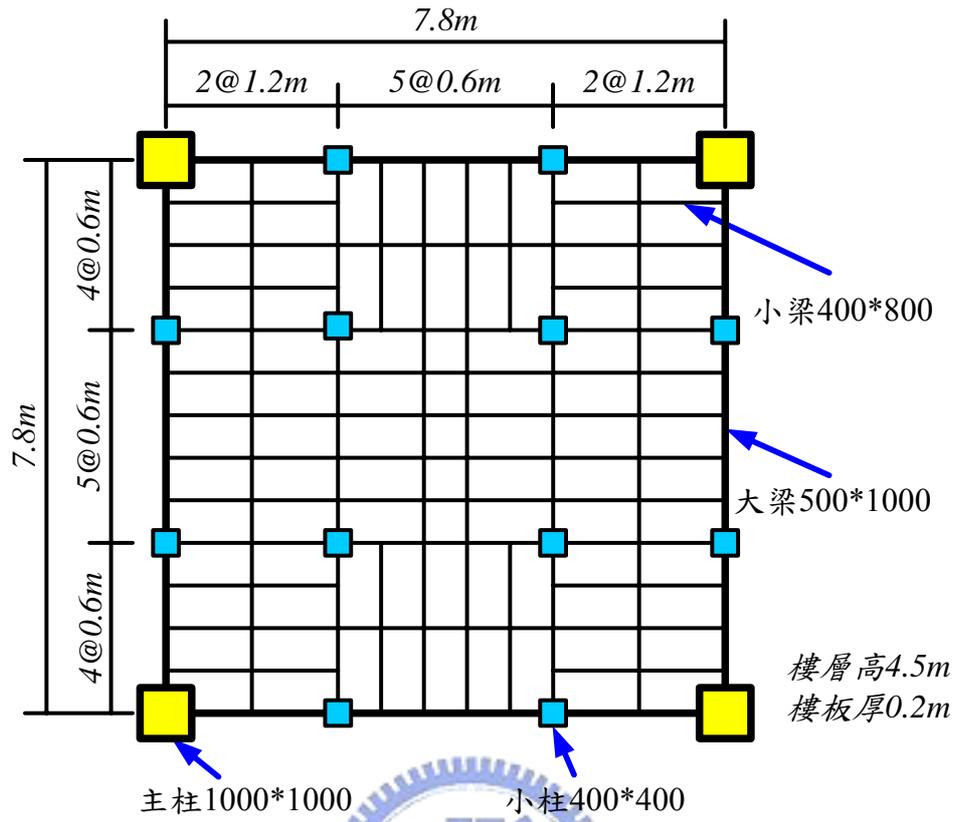


圖 5.1 高科技廠房樓版平面尺寸圖

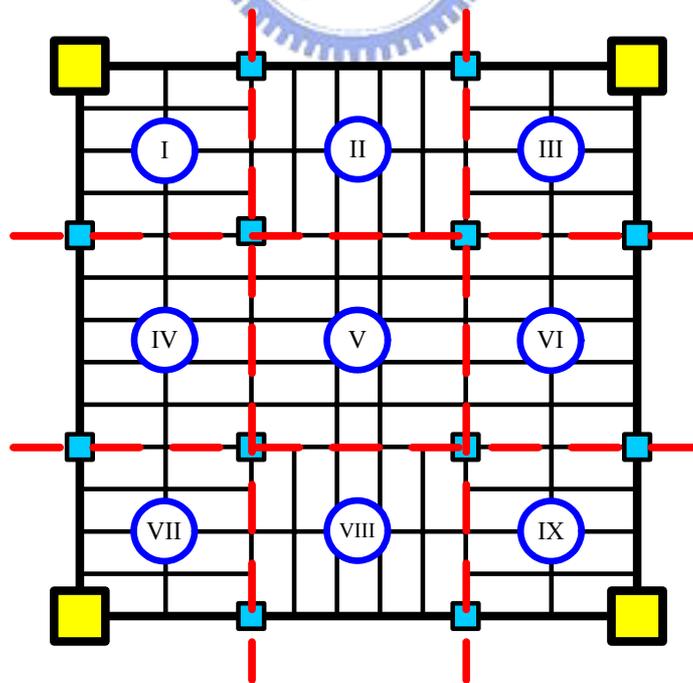


圖 5.2 樓版區域畫分

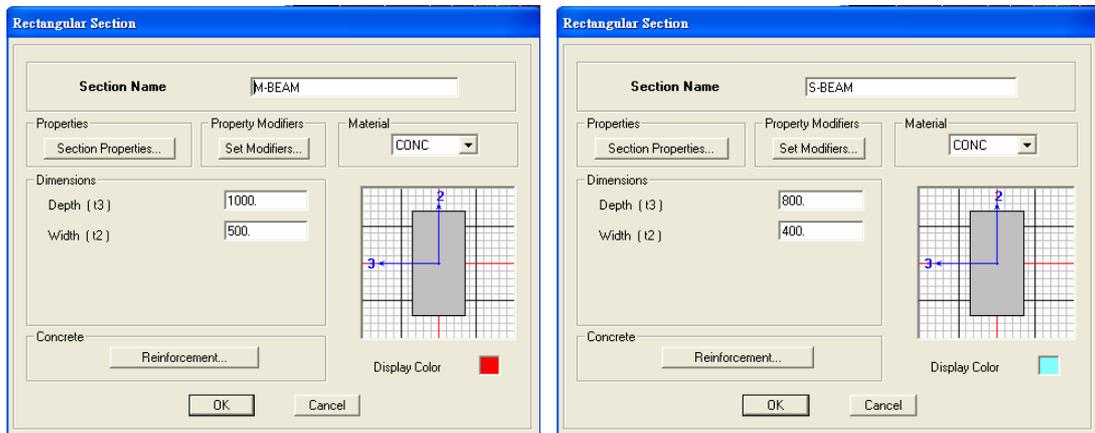


圖 5.3 SAP2000 程式梁尺寸設定

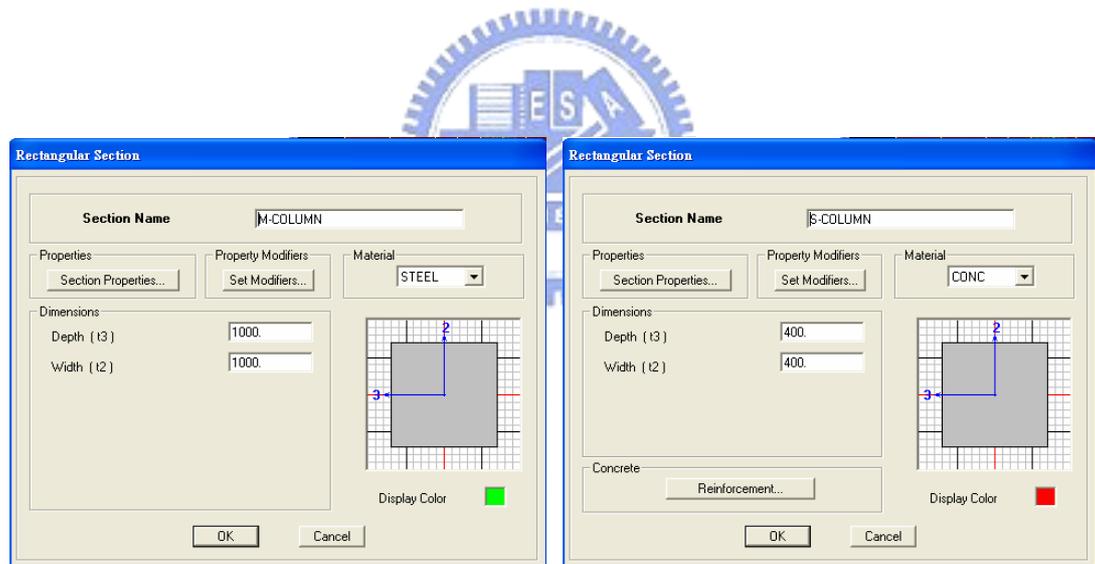


圖 5.4 SAP2000 程式柱尺寸設定

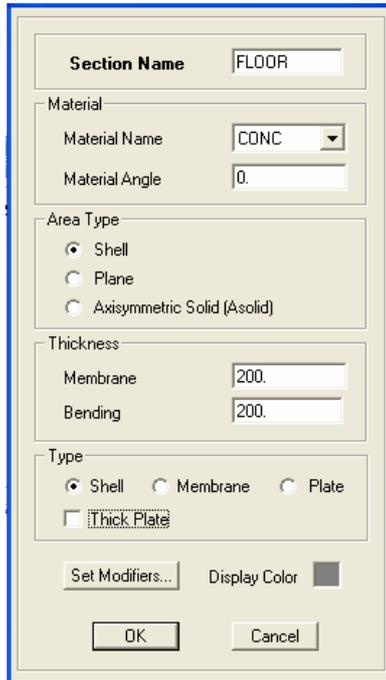


圖 5.5 SAP2000 程式樓版尺寸設定

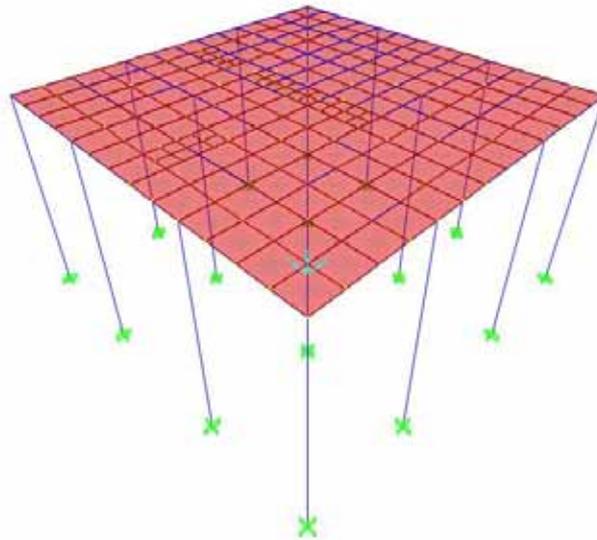


圖 5.6 SAP2000 程式模型建立

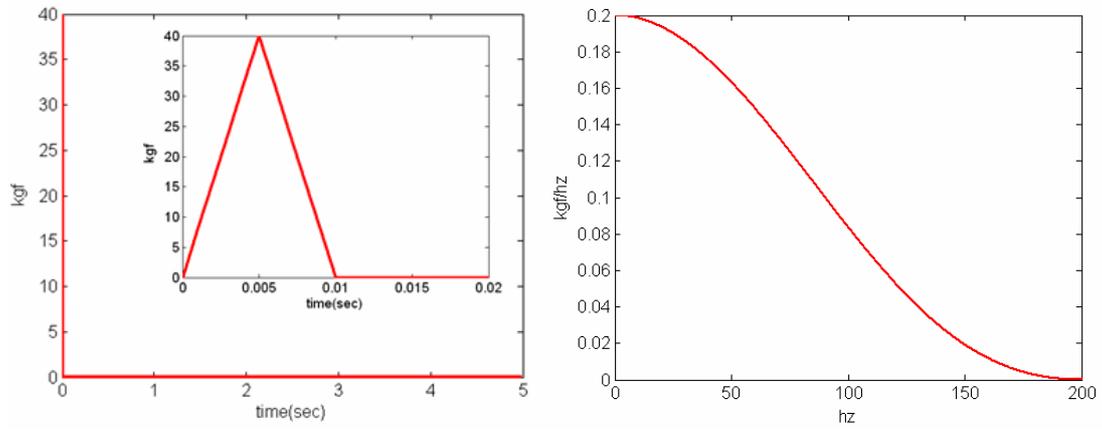


圖 5.7 模擬衝擊力

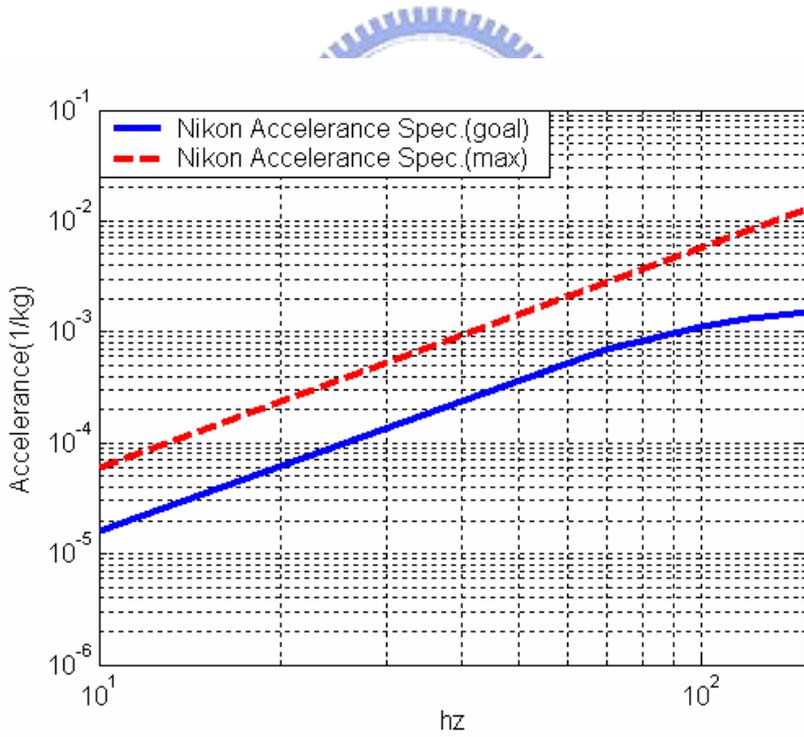


圖 5.8 Nikon 微影掃描機之 Accelerance 反應規格

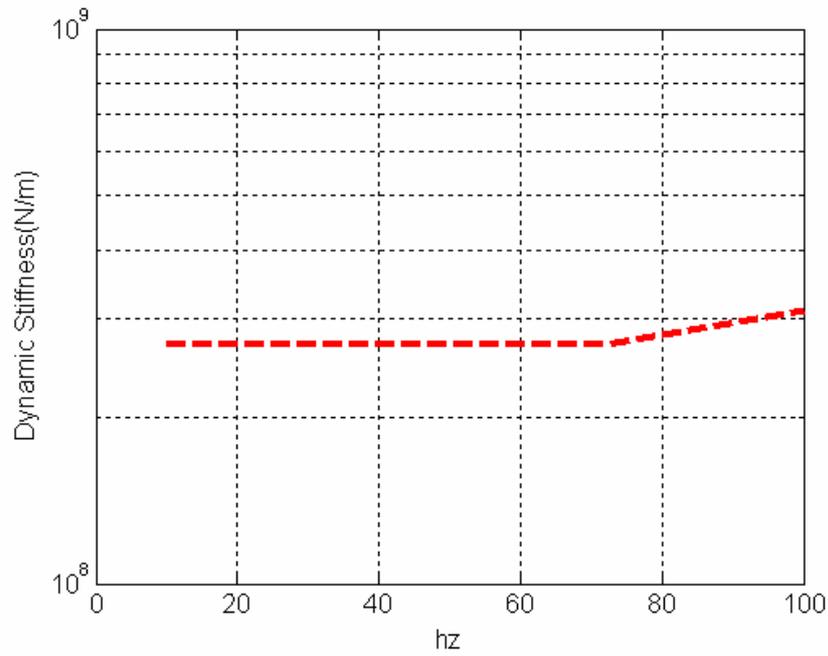


圖 5.9 Nikon 微影掃描機之動態剛度規格

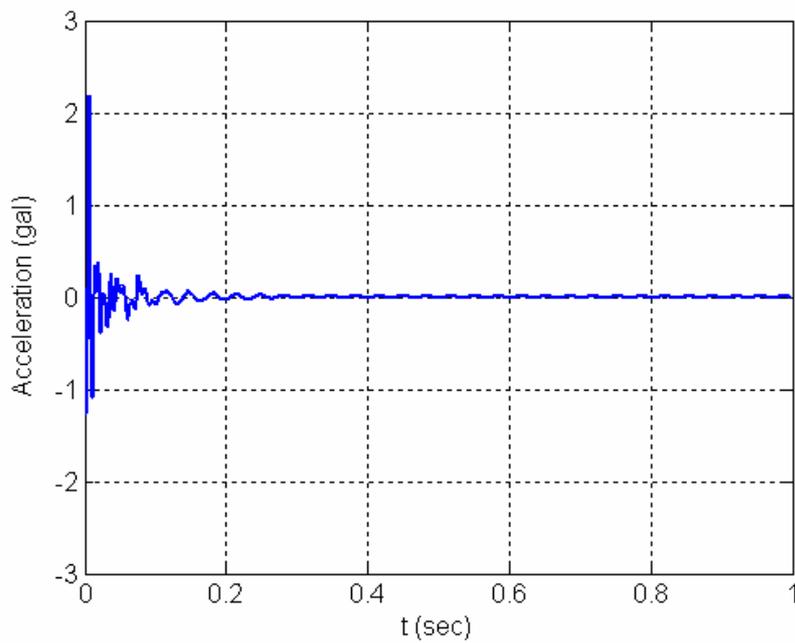


圖 5.10 區域 I 樓版加速度歷時圖

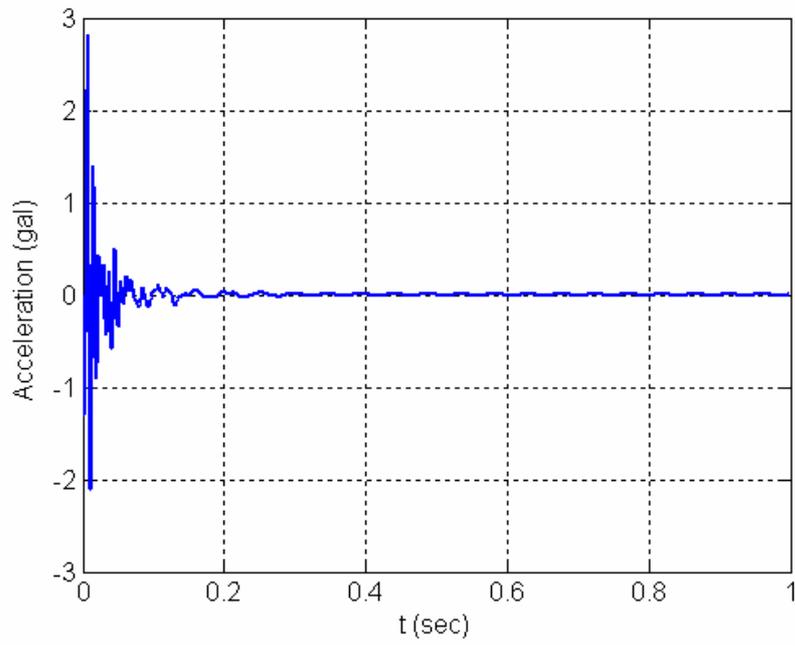


圖 5.11 區域 II 樓版加速度歷時圖

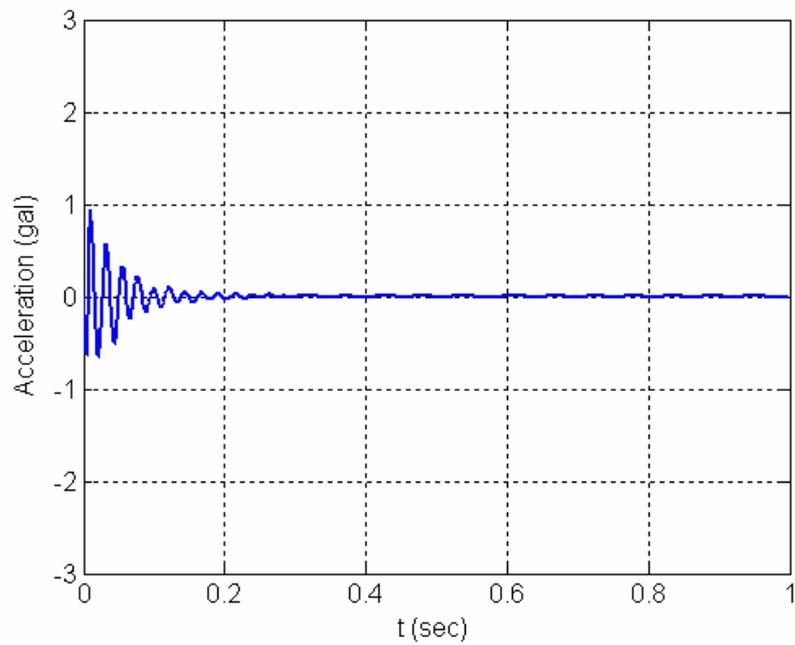


圖 5.12 區域 IV 樓版加速度歷時圖

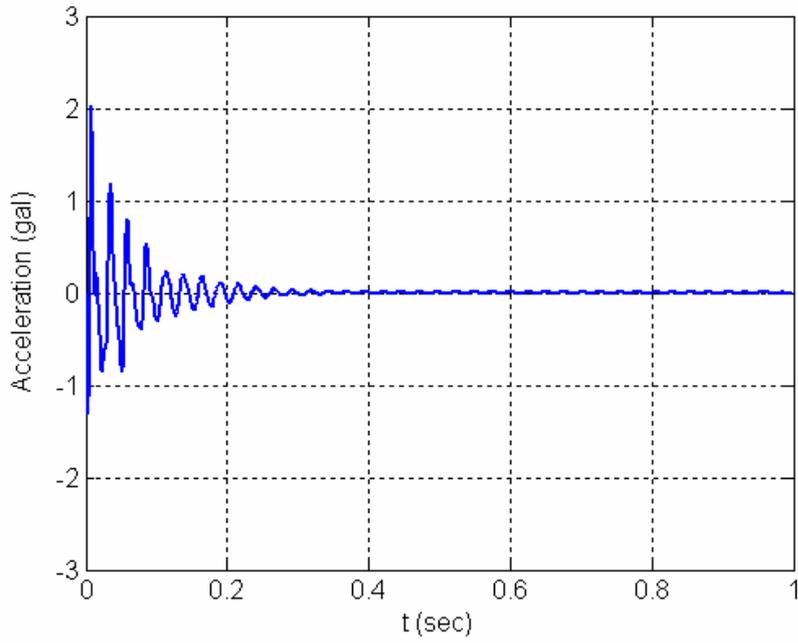


圖 5.13 區域 V 樓版加速度歷時圖

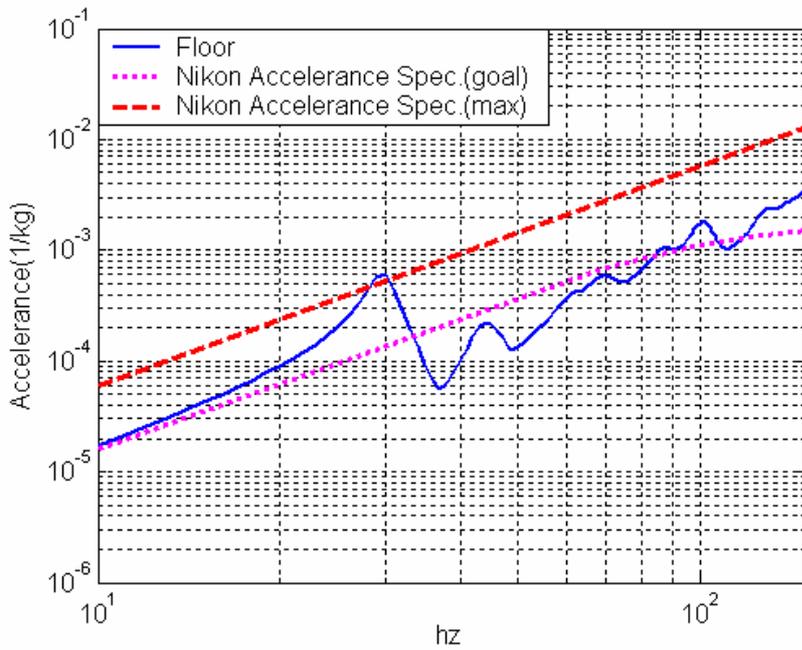


圖 5.14 區域 I 樓版 Accelerance 反應

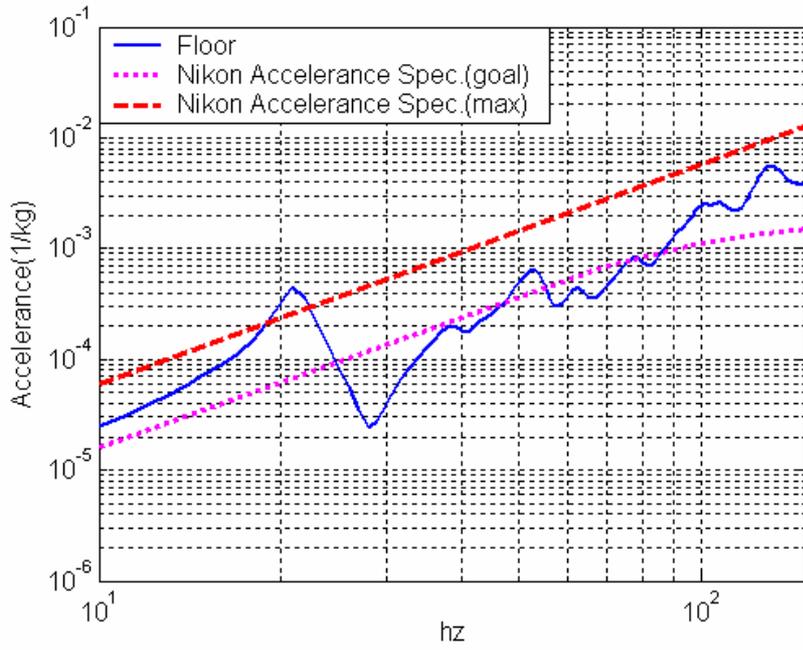


圖 5.15 區域 II 樓版 Accelerance 反應

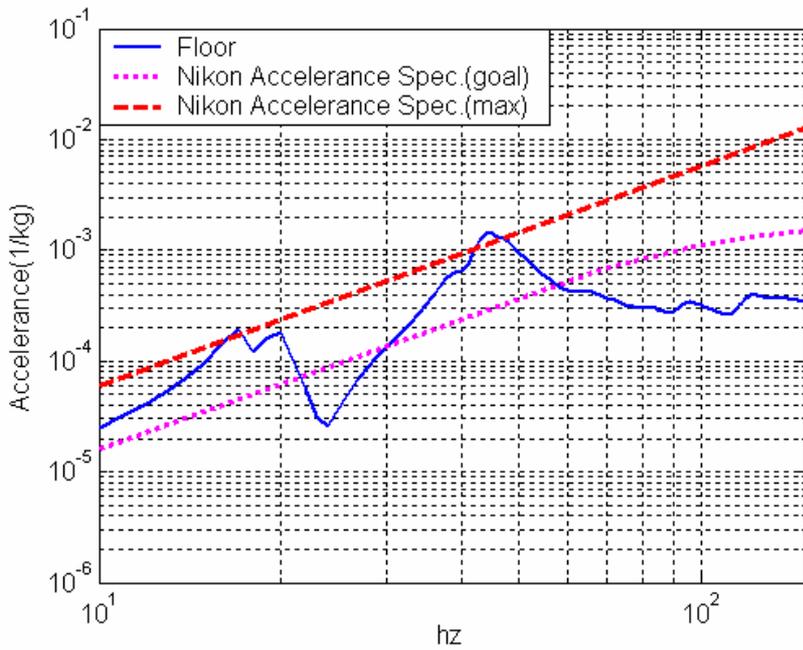


圖 5.16 區域 IV 樓版 Accelerance 反應

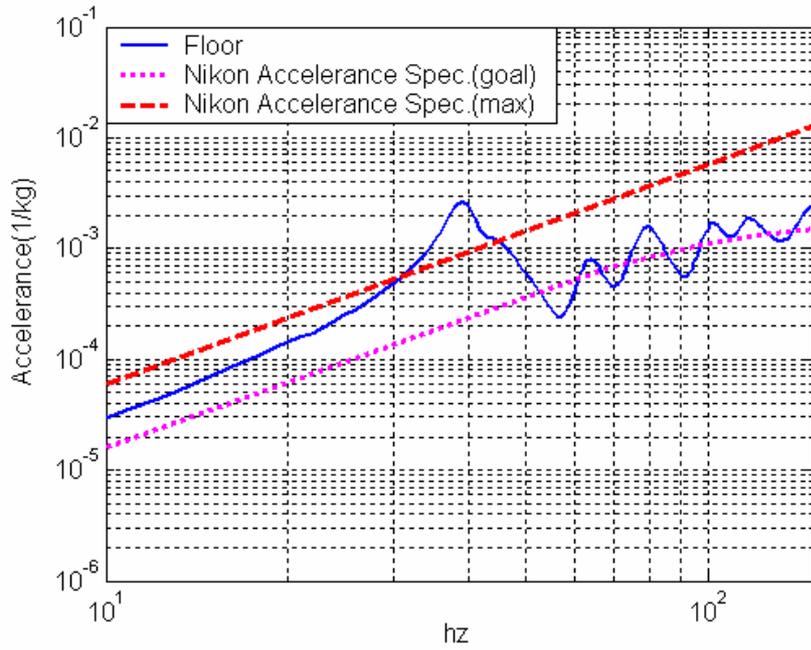


圖 5.17 區域 V 版 Accelerance 反應

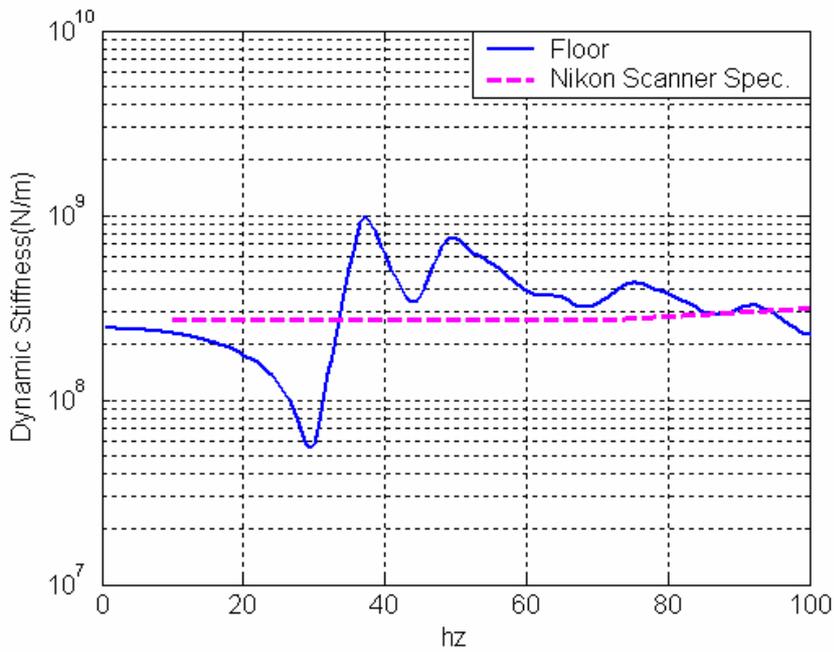


圖 5.18 區域 I 樓版動態反應

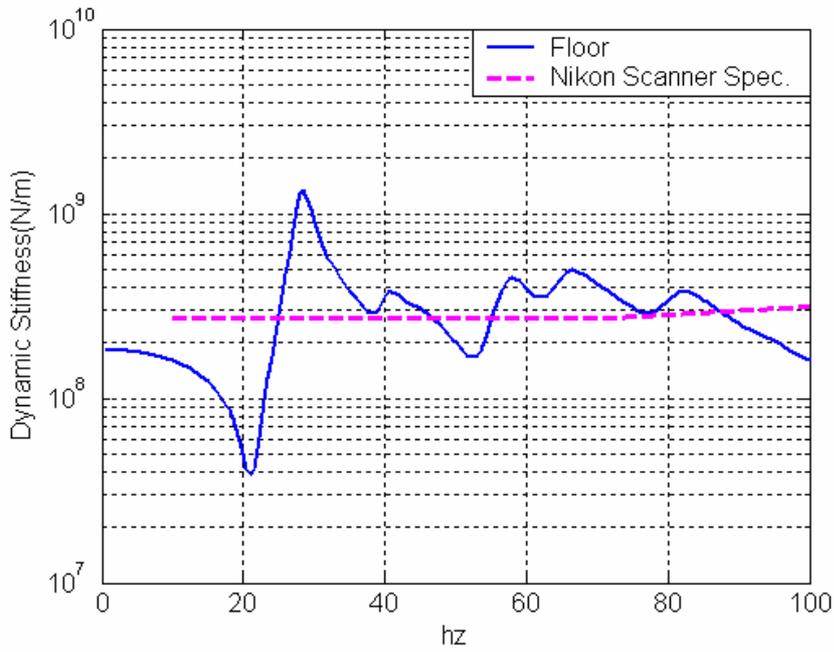


圖 5.19 區域 II 樓版動態反應

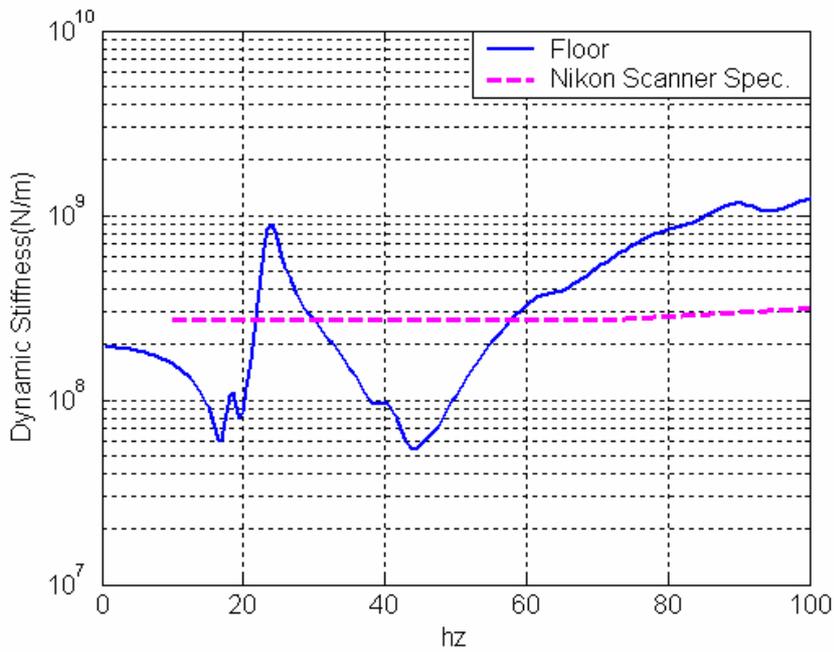


圖 5.20 區域 IV 樓版動態反應

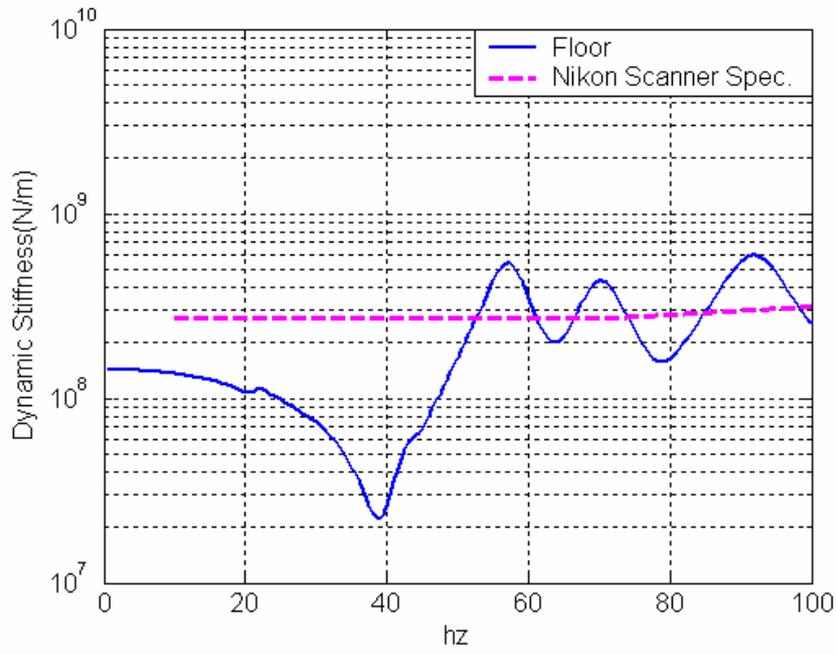


圖 5.21 區域 V 樓版動態反應

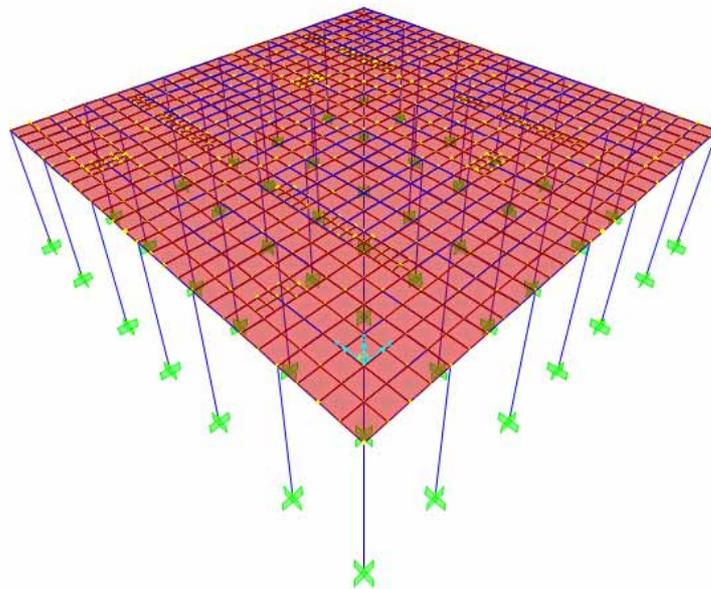


圖 5.22 高科技廠房 6 跨模型

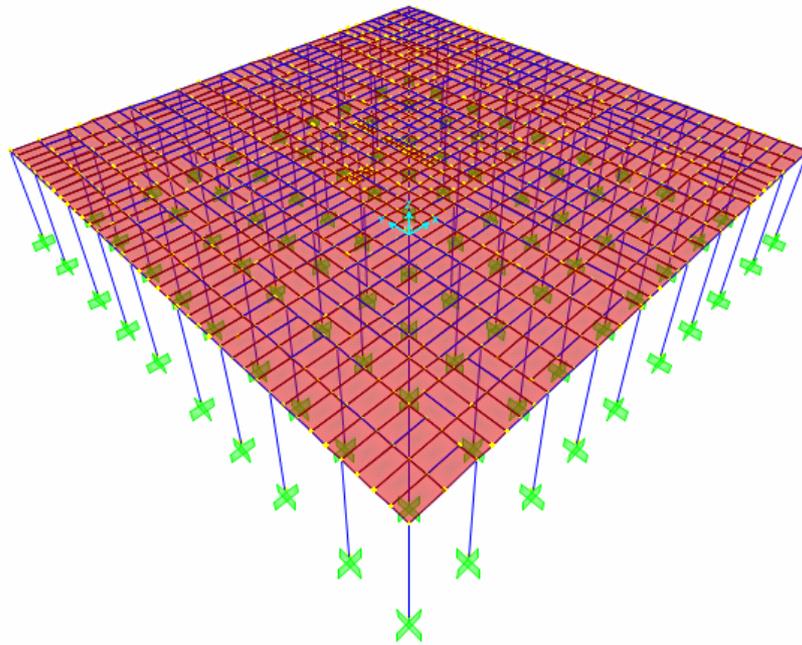


圖 5.23 高科技廠房 9 跨模型

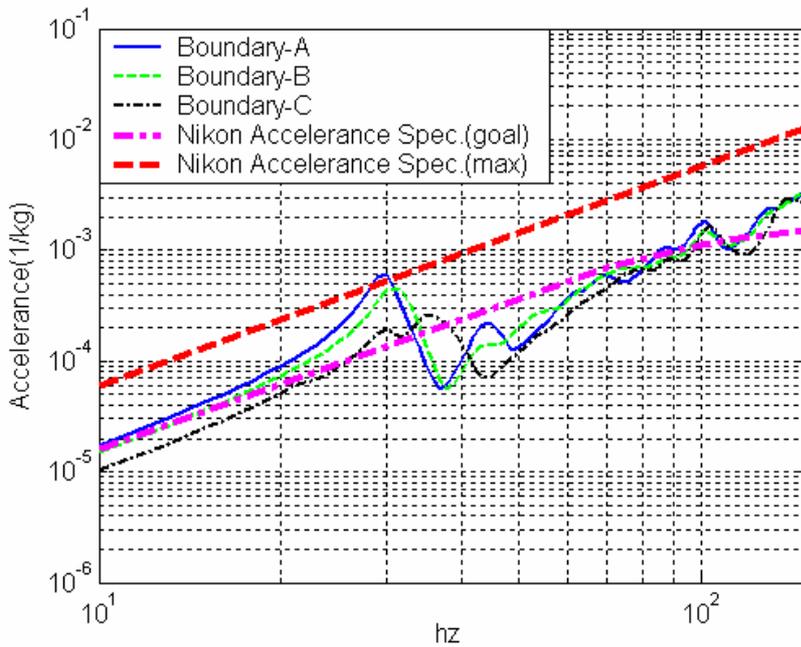


圖 5.24 不同結構跨數下區域 I 之 Accelerance 比較

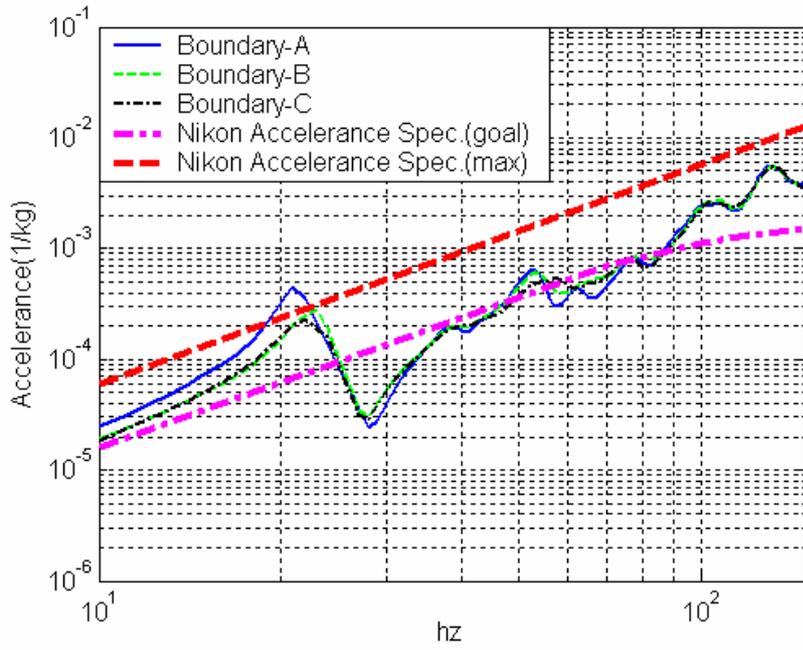


圖 5.25 不同結構跨數下區域 II 之 Accelerance 比較

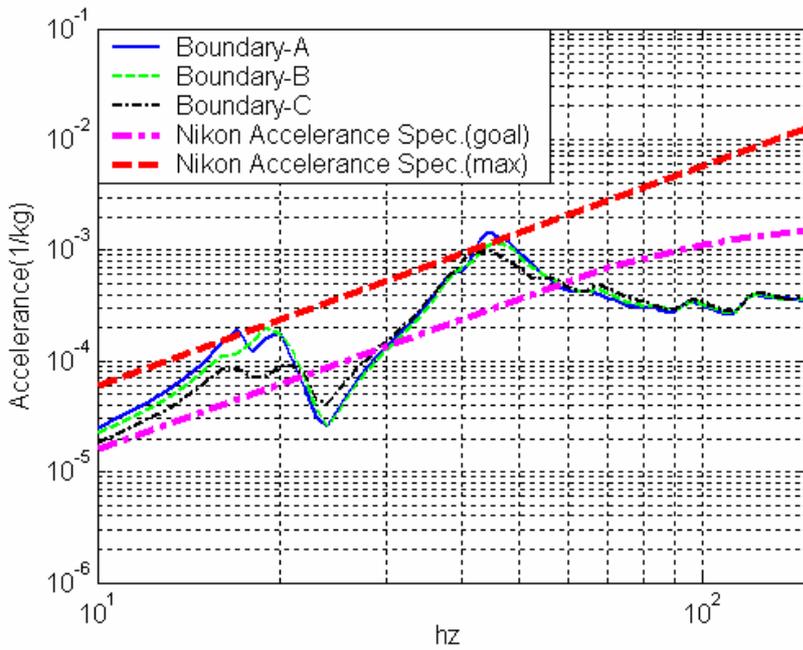


圖 5.26 不同結構跨數下區域 IV 之 Accelerance 比較

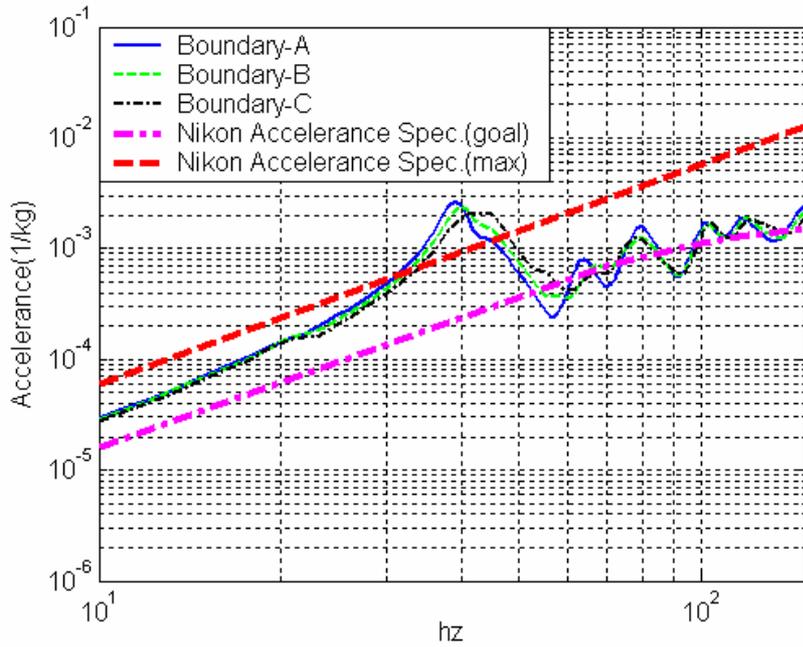


圖 5.27 不同結構跨數下區域 V 之 Accelerance 比較

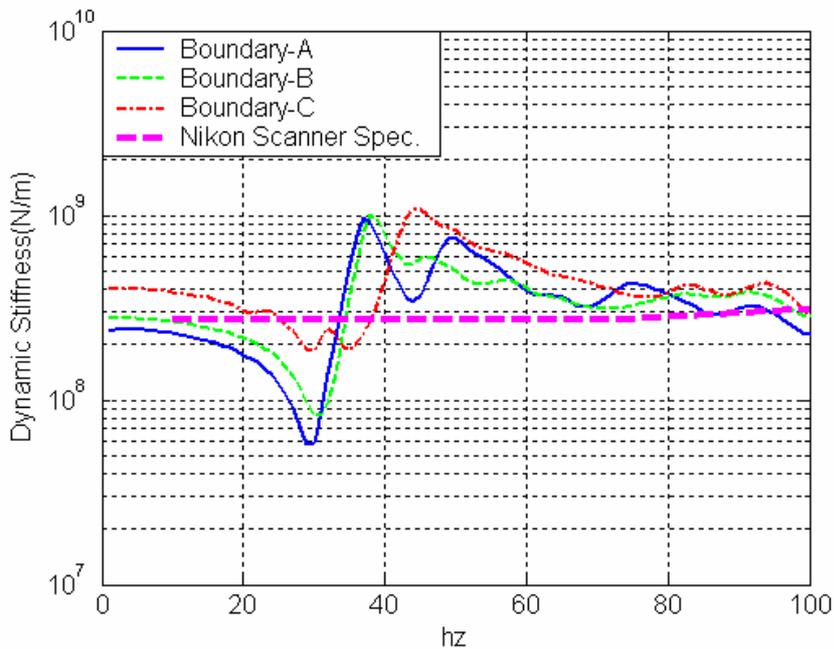


圖 5.28 不同結構跨數下區域 I 之動態剛度比較

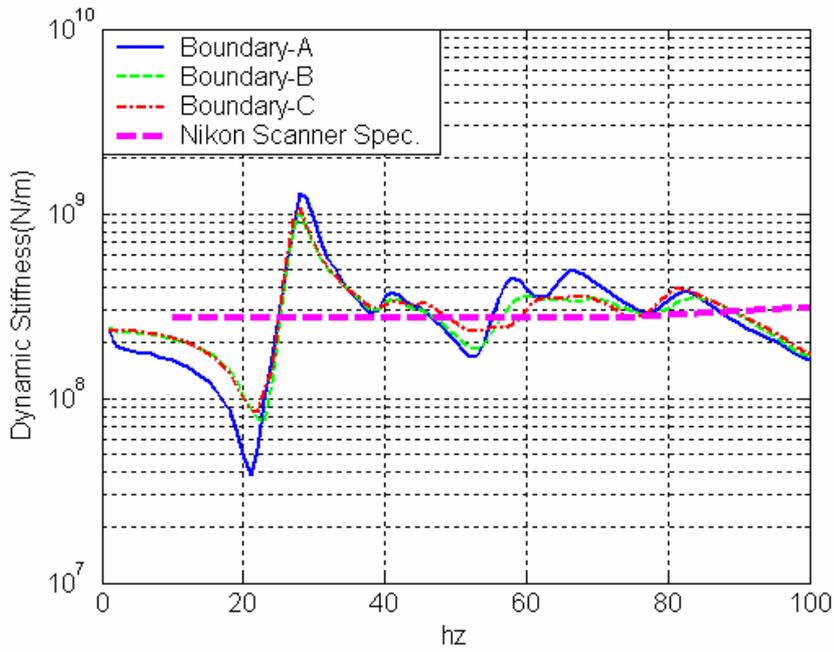


圖 5.29 不同結構跨數下區域 II 之動態剛度比較

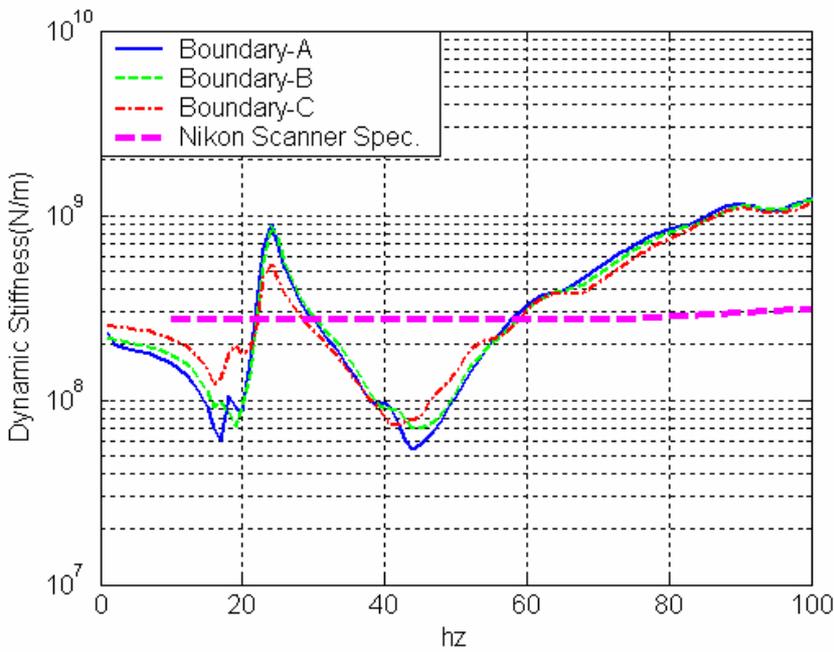


圖 5.30 不同結構跨數下區域 IV 之動態剛度比較

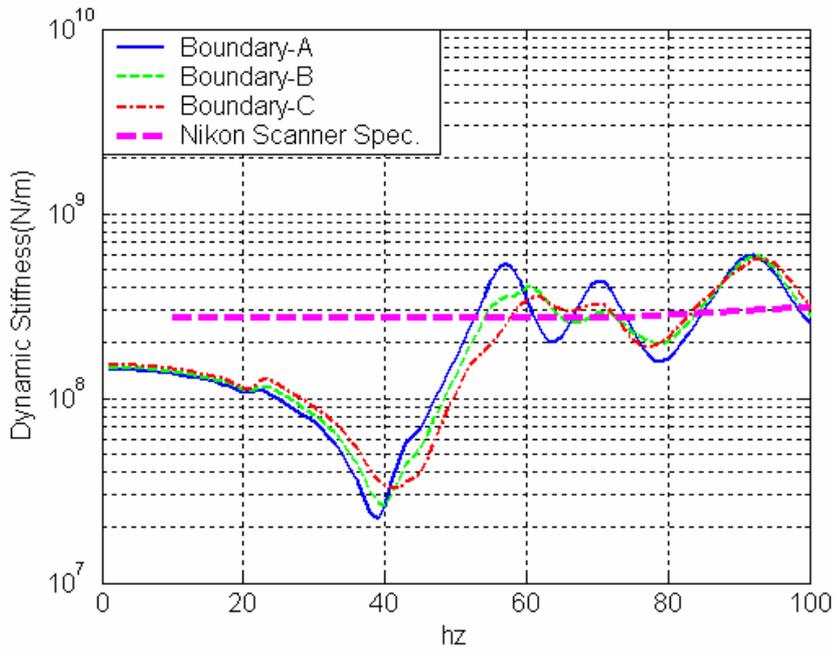


圖 5.31 不同結構跨數下區域 V 之動態剛度比較

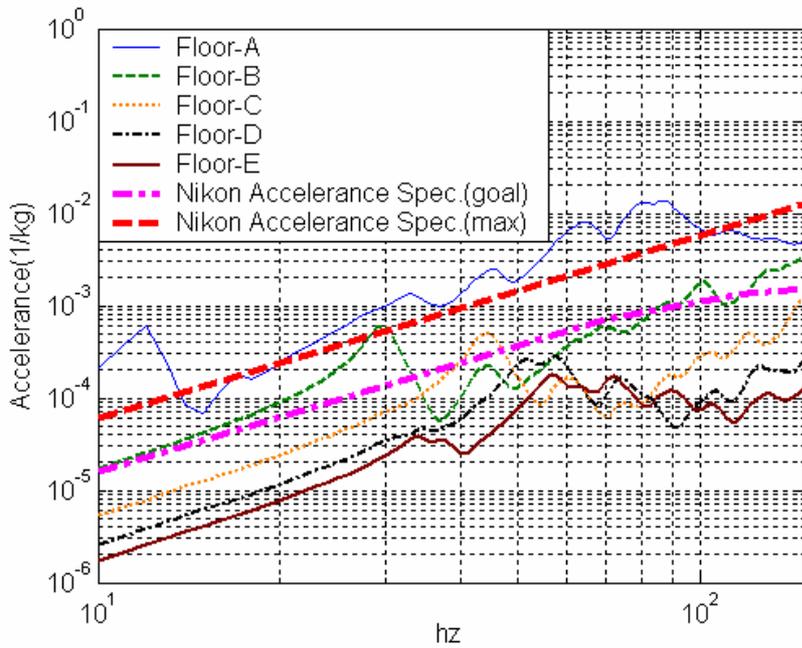


圖 5.32 不同樓版厚度下區域 I 之 Accelerance 比較

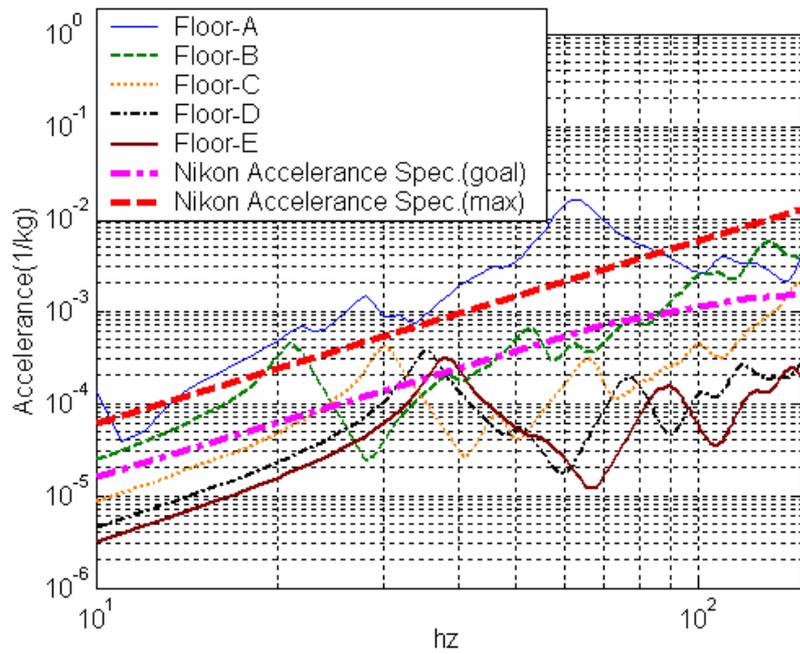


圖 5.33 不同樓版厚度下區域 II 之 Accelerance 比較

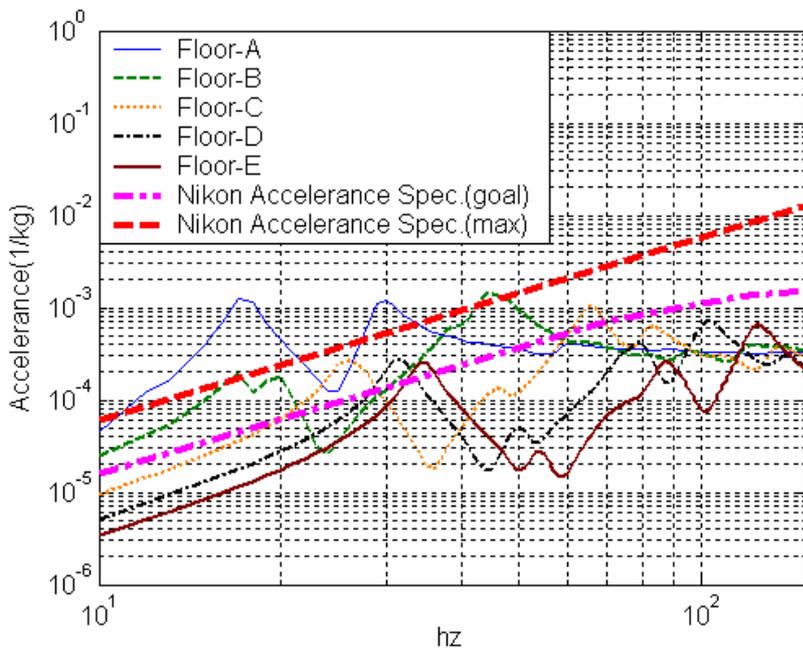


圖 5.34 不同樓版厚度下區域 IV 之 Accelerance 比較

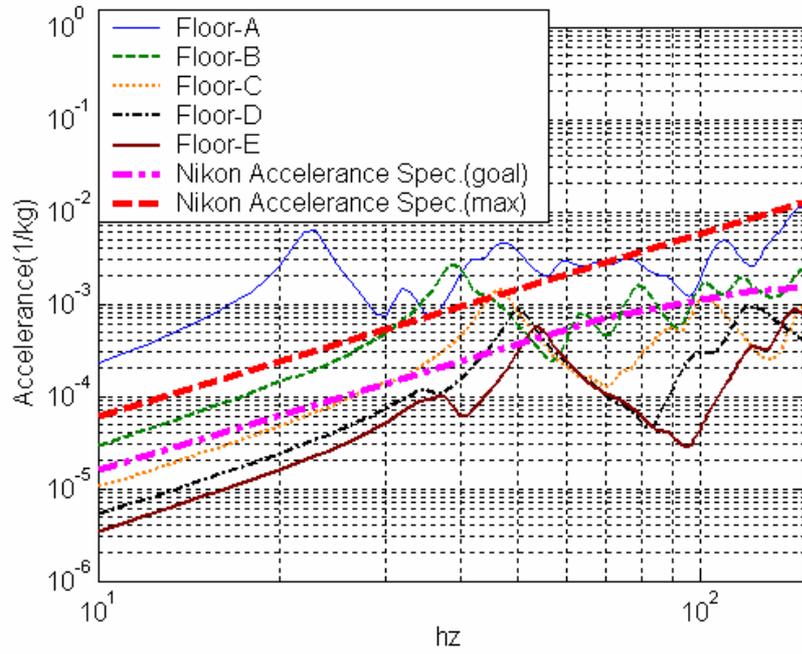


圖 5.35 不同樓版厚度下區域 V 之 Accelerance 比較

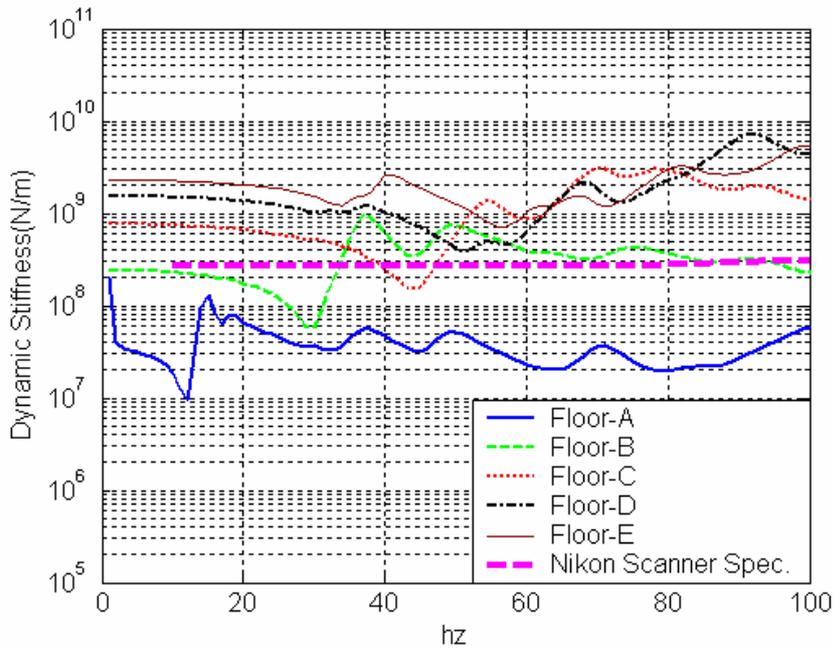


圖 5.36 不同樓版厚度下區域 I 之動態剛度比較

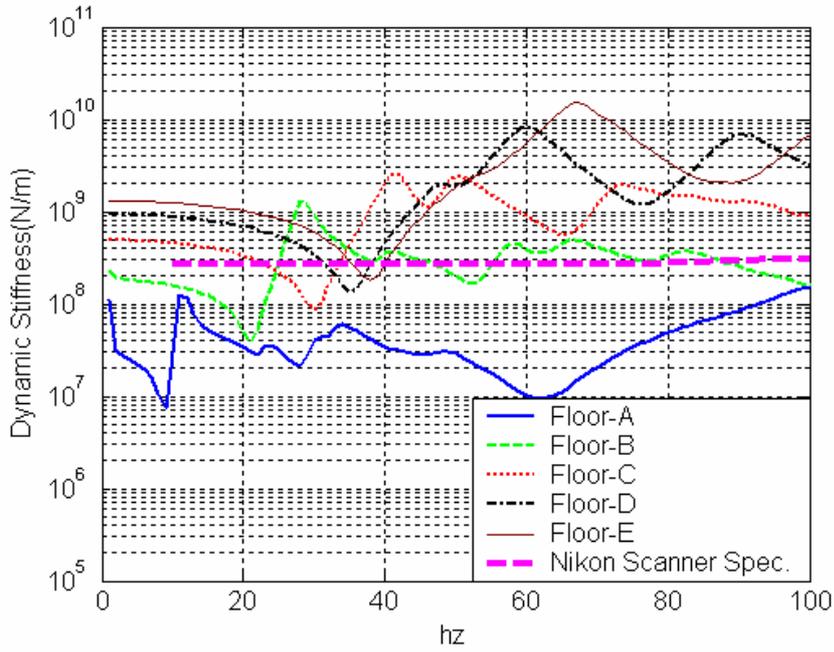


圖 5.37 不同樓版厚度下區域 II 之動態剛度比較

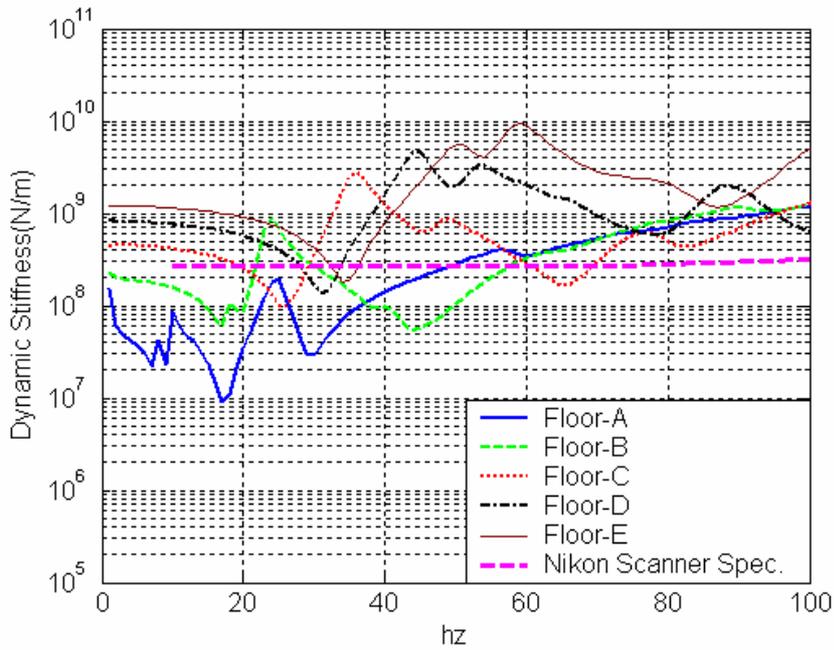


圖 5.38 不同樓版厚度下區域 IV 之動態剛度比較

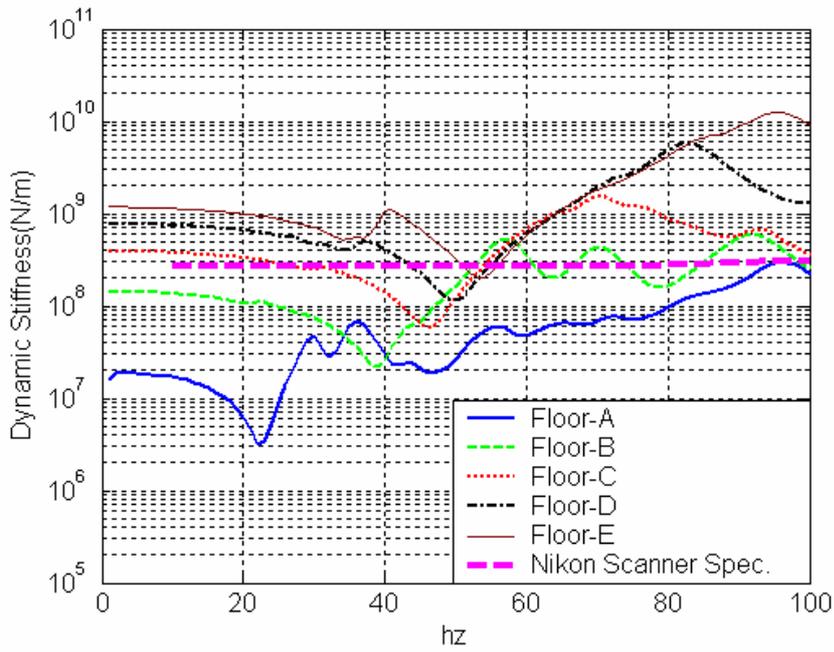


圖 5.39 不同樓版厚度下區域 V 之動態剛度比較

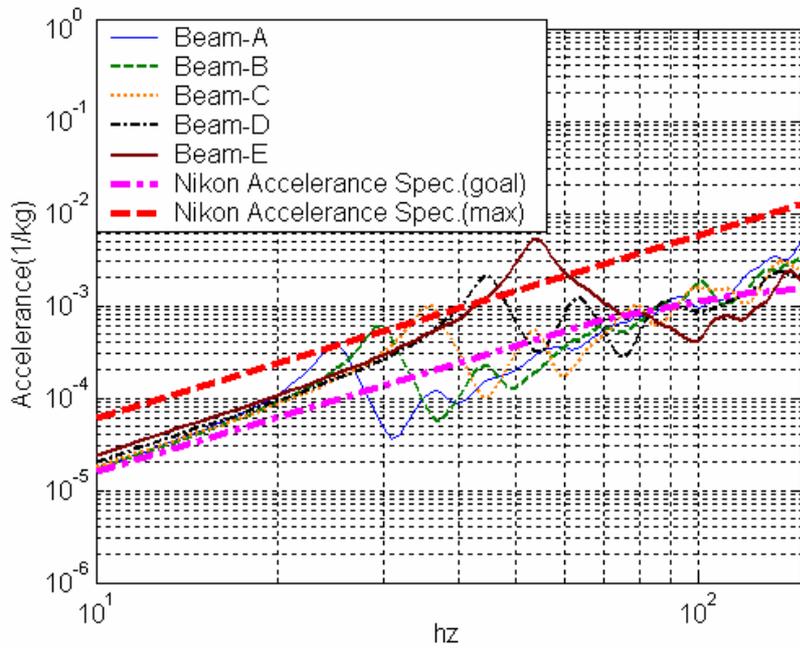


圖 5.40 不同梁尺寸下區域 I 之 Accelerance 比較

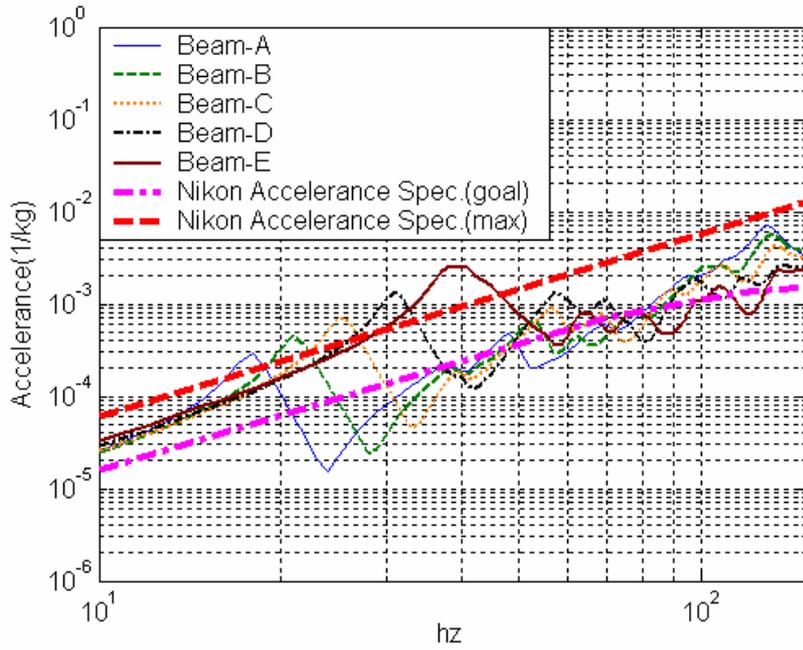


圖 5.41 不同梁尺寸下區域 II 之 Accelerance 比較

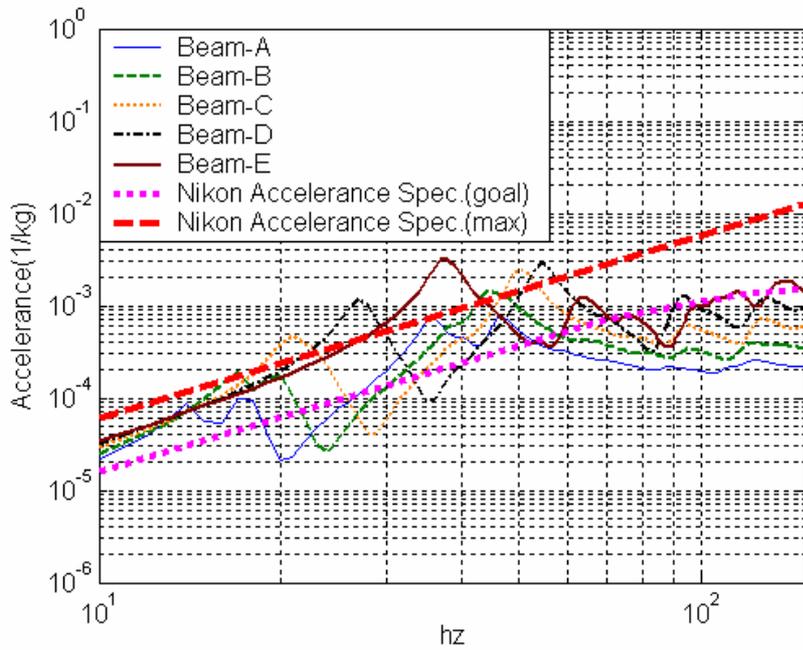


圖 5.42 不同梁尺寸下區域 IV 之 Accelerance 比較

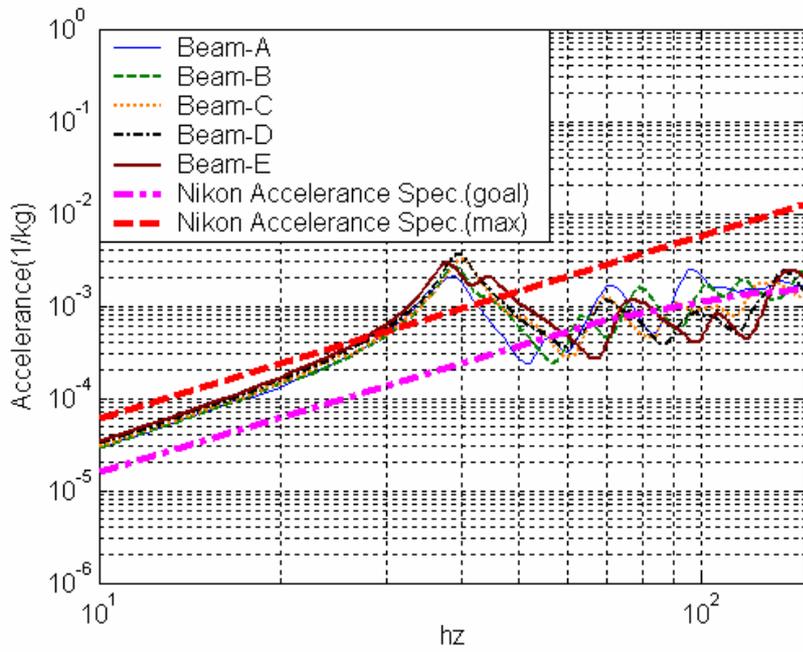


圖 5.43 不同梁尺寸下區域 V 之 Accelerance 比較

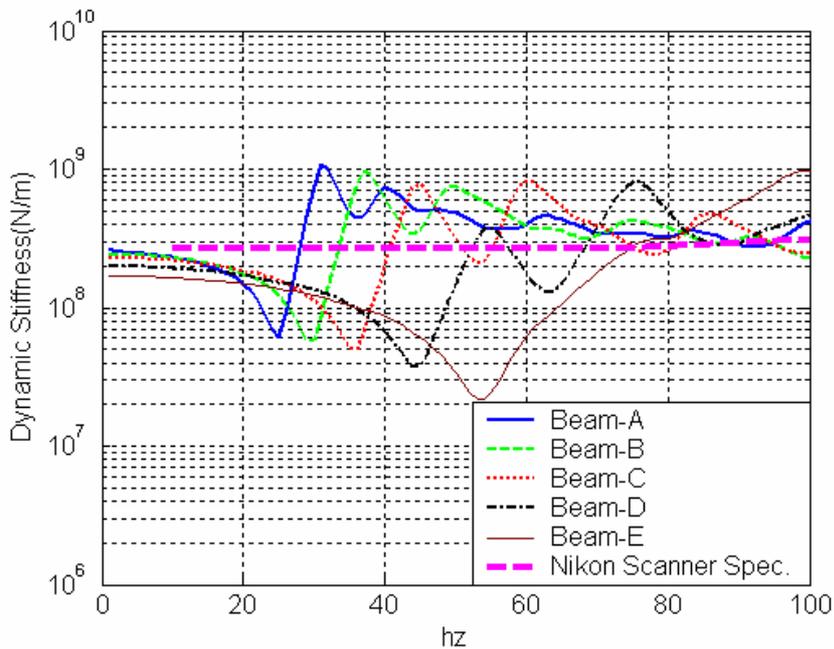


圖 5.44 不同梁尺寸下區域 I 之動態剛度比較

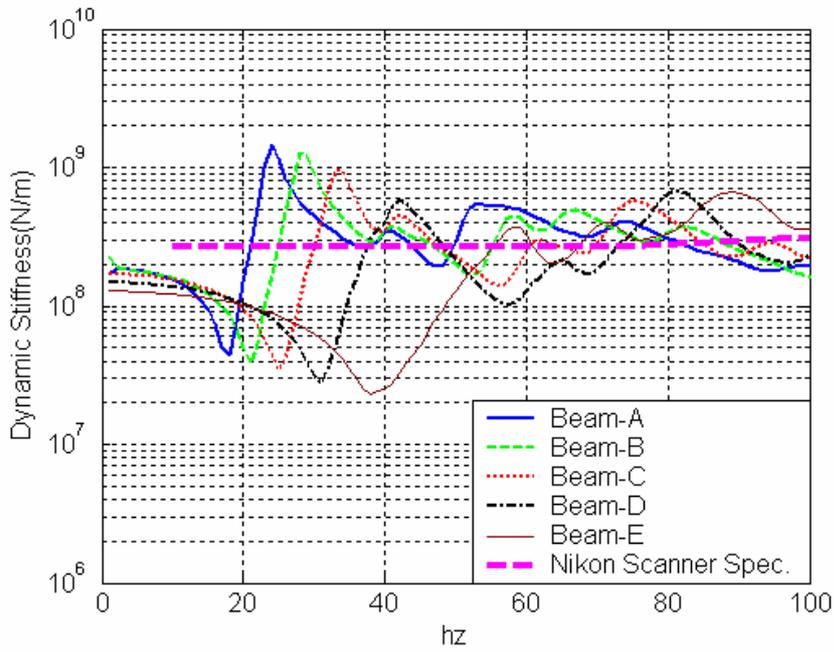


圖 5.45 不同梁尺寸下區域 II 之動態剛度比較

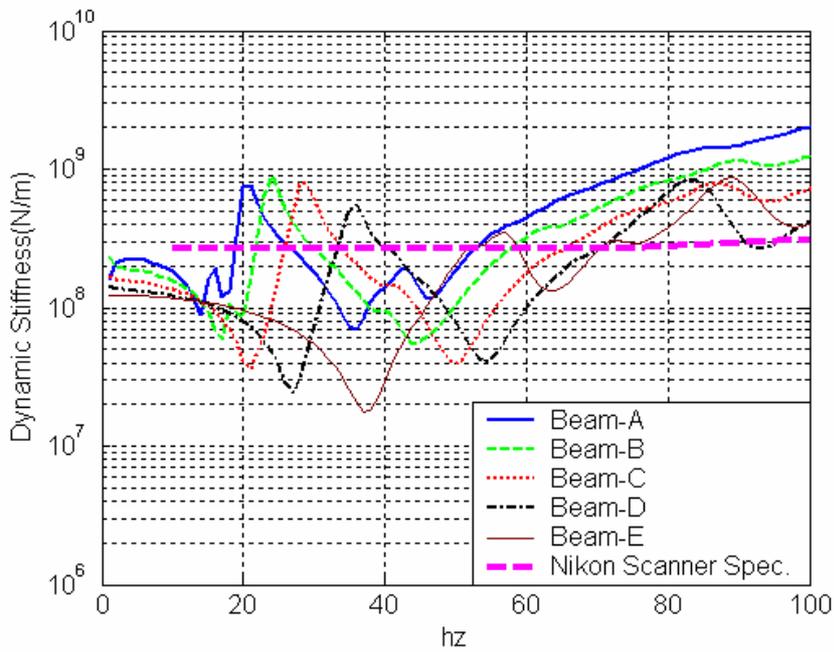


圖 5.46 不同梁尺寸下區域 IV 之動態剛度比較

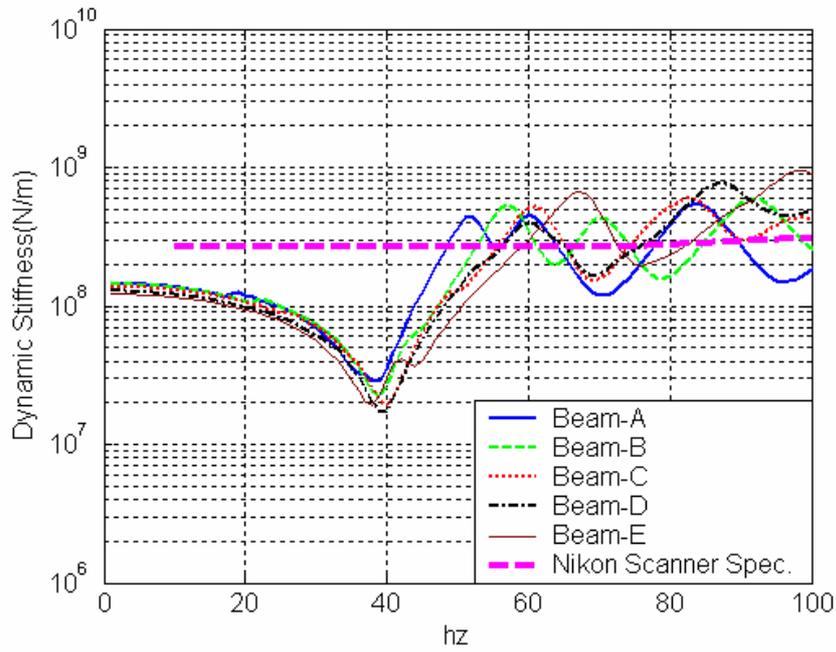


圖 5.47 不同梁尺寸下區域 V 之動態剛度比較

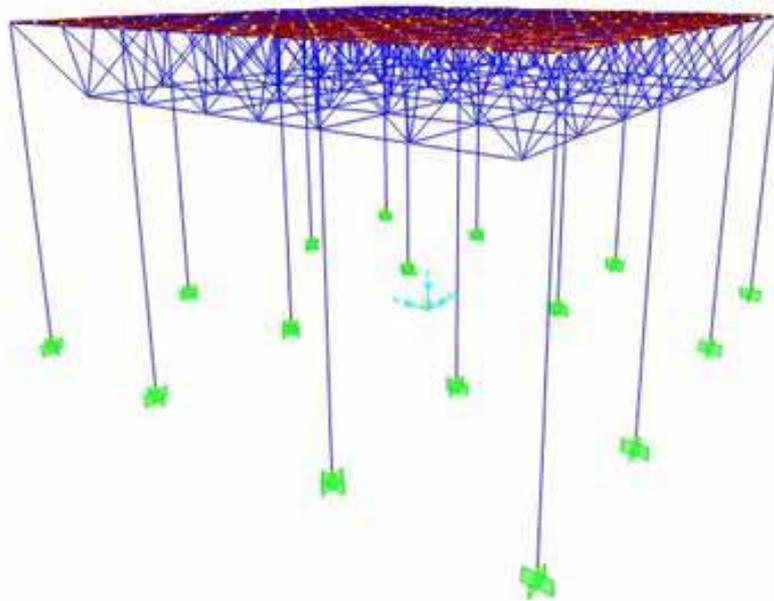


圖 5.48 樓版採用鋁桁架進行整體補強之模擬

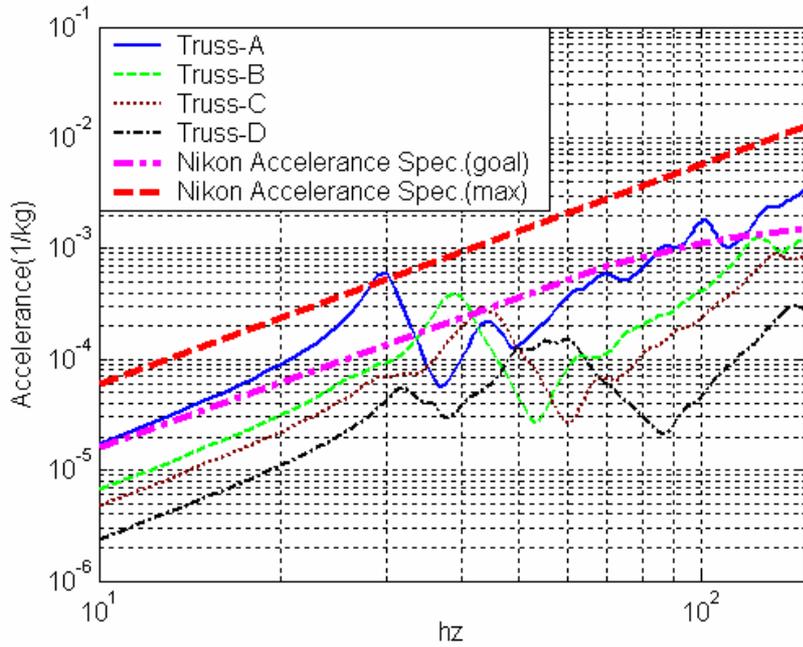


圖 5.49 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

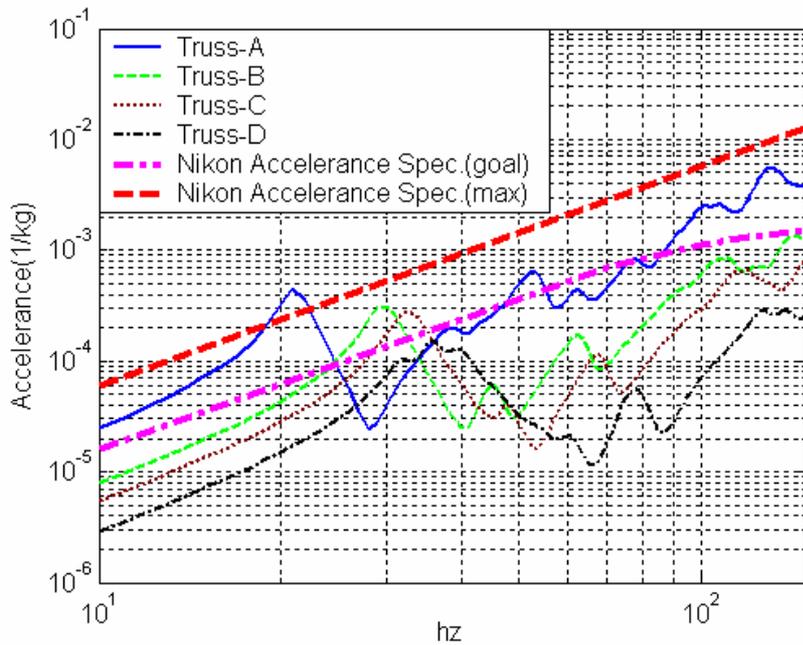


圖 5.50 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

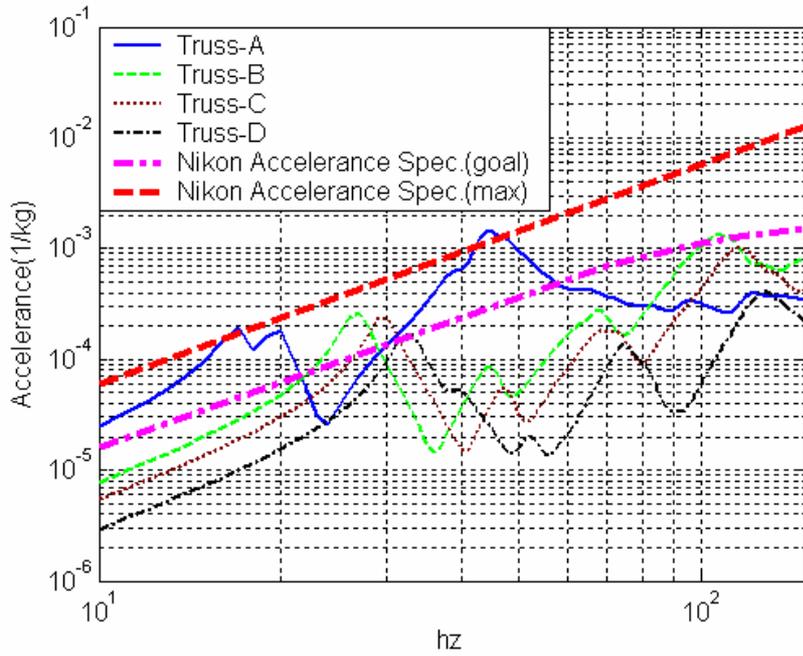


圖 5.51 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

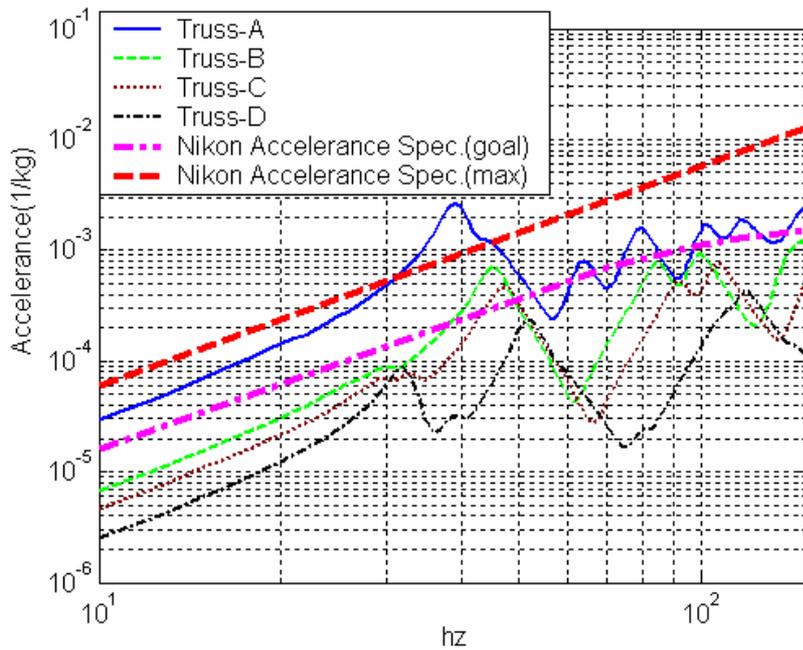


圖 5.52 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

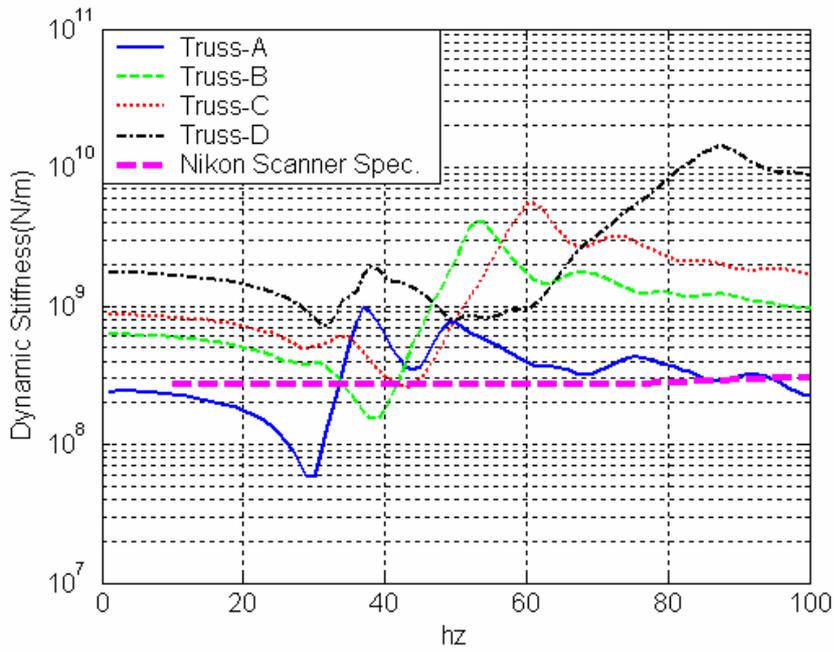


圖 5.53 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

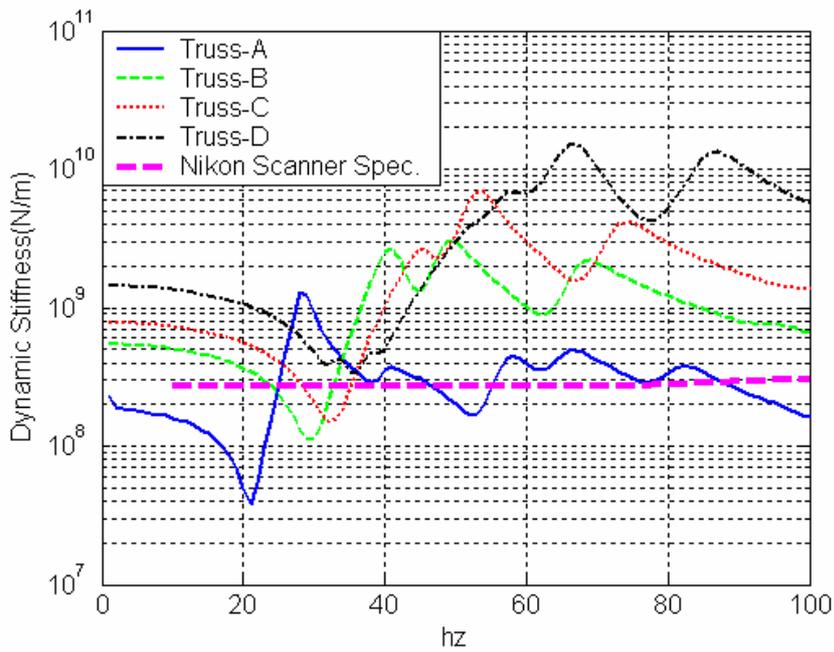


圖 5.54 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

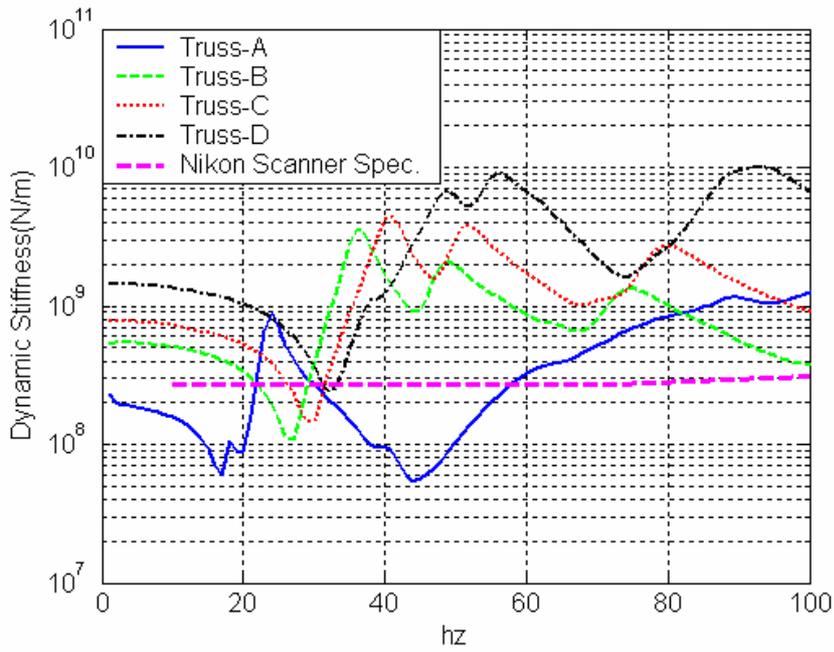


圖 5.55 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

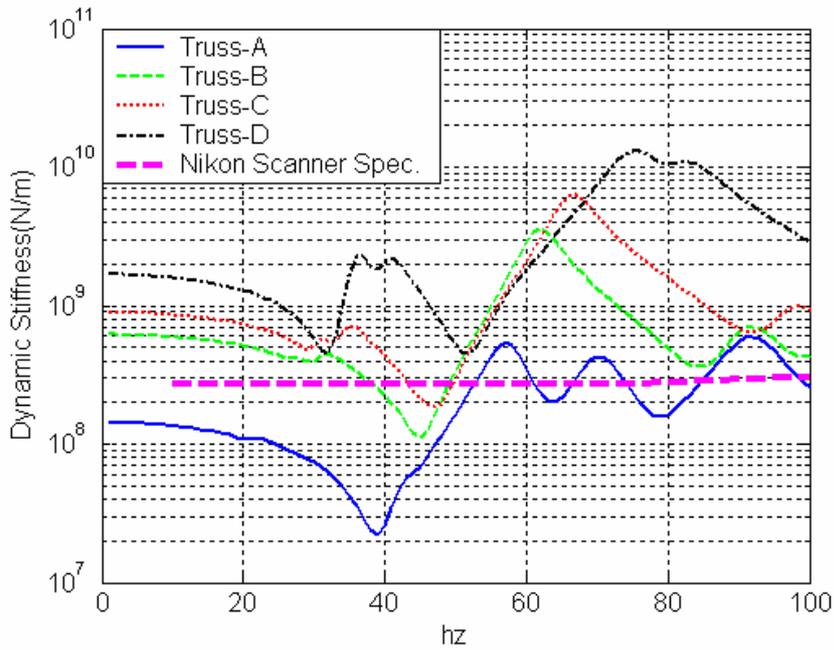


圖 5.56 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

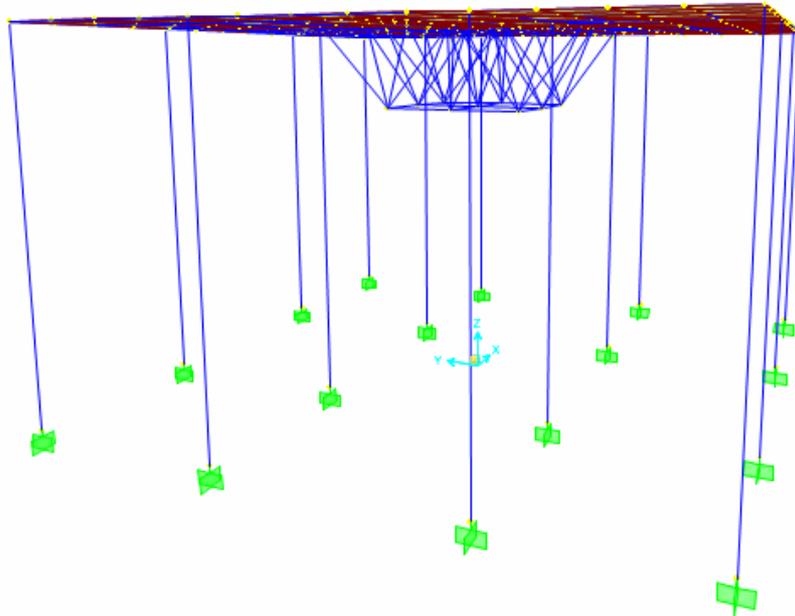


圖 5.57 樓版採用鋁桁架進行整體補強之模型

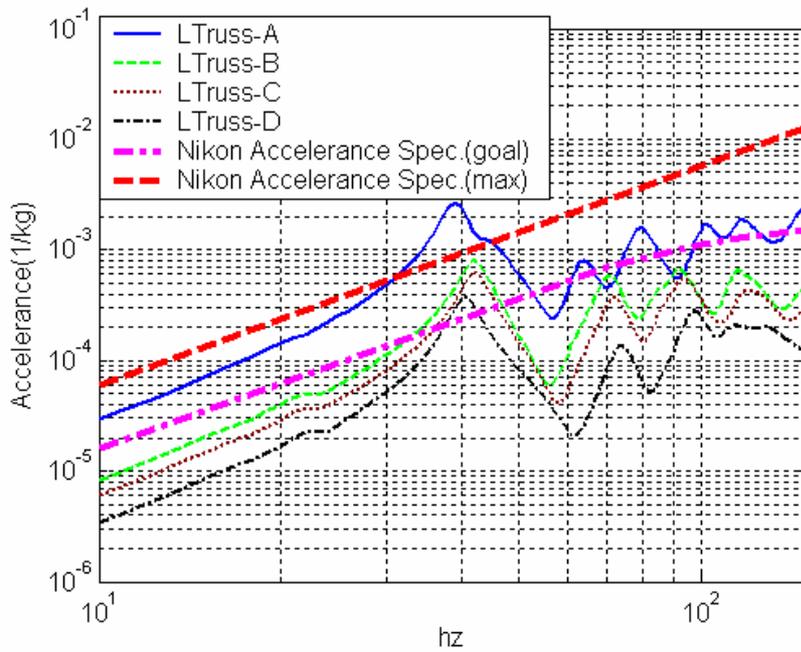


圖 5.58 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

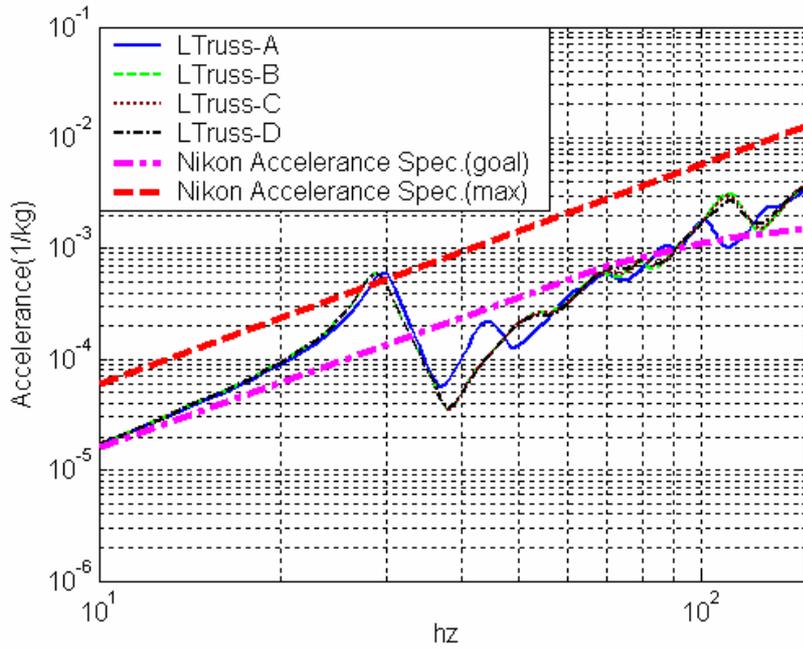


圖 5.59 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

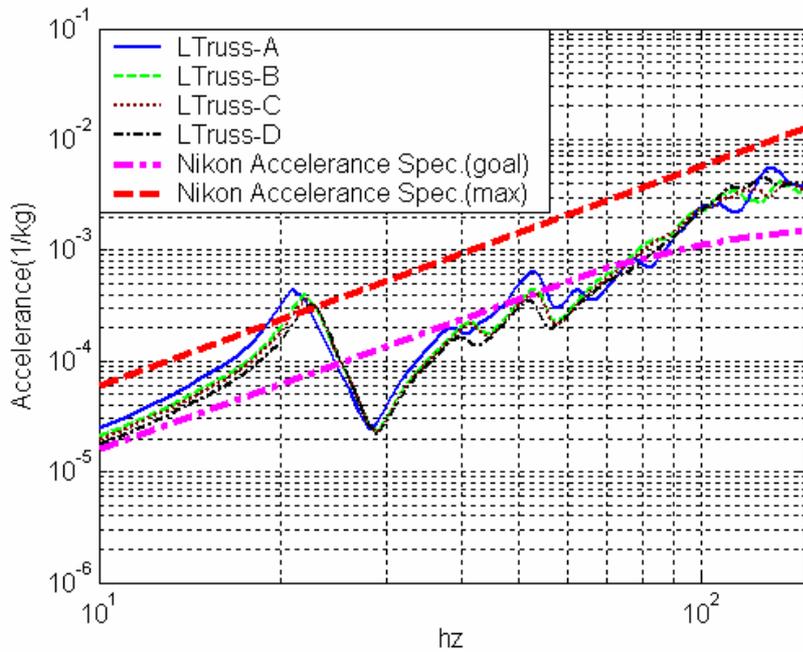


圖 5.60 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

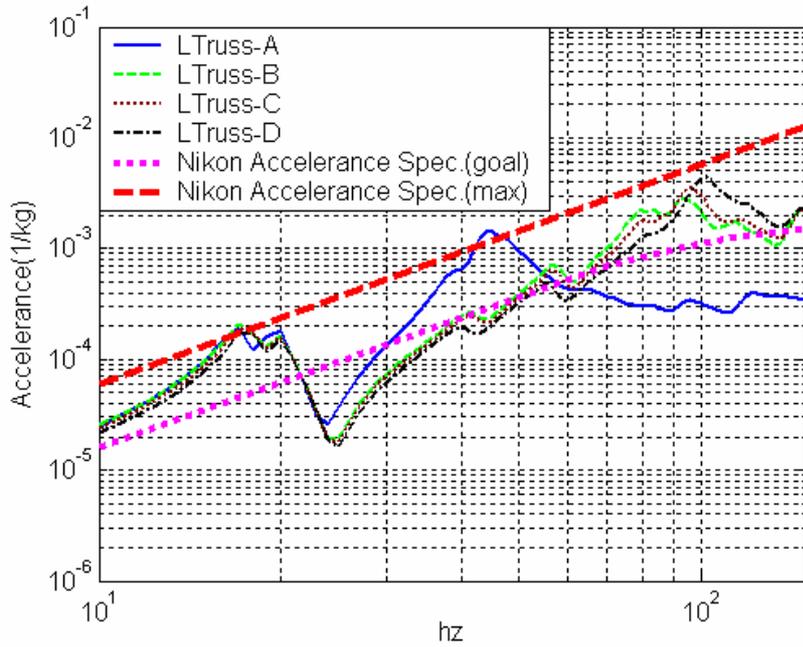


圖 5.61 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之 Accelerance 反應比較

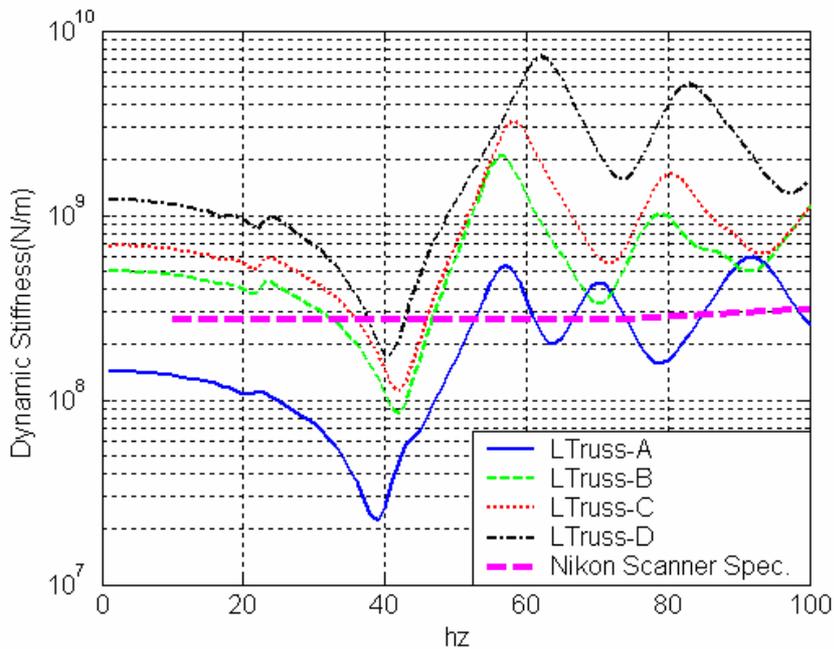


圖 5.62 區域 V 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

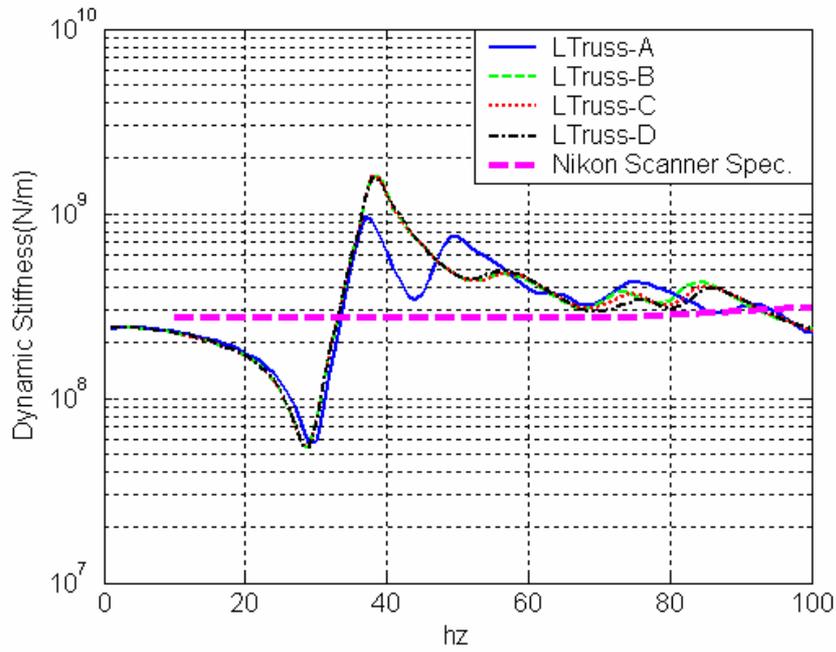


圖 5.63 區域 I 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

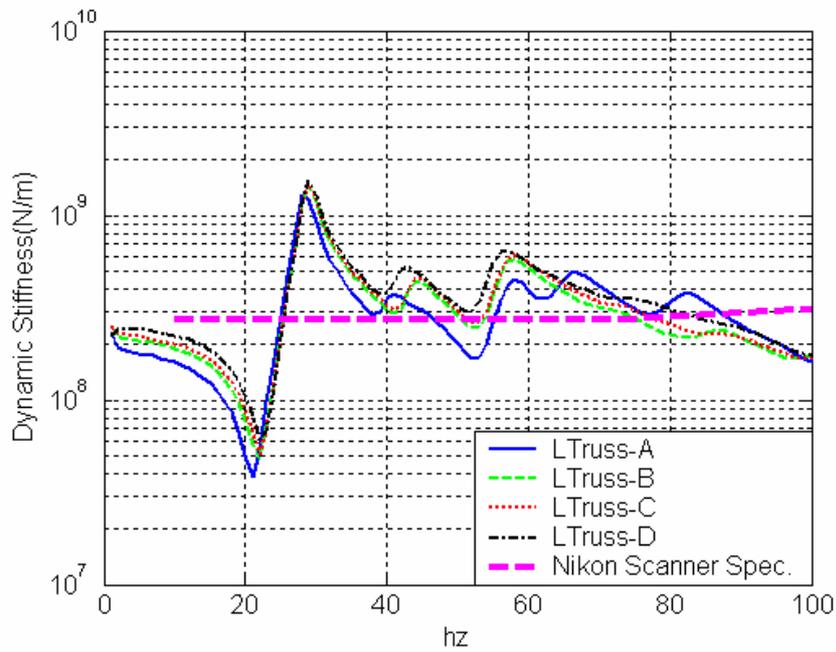


圖 5.64 區域 II 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

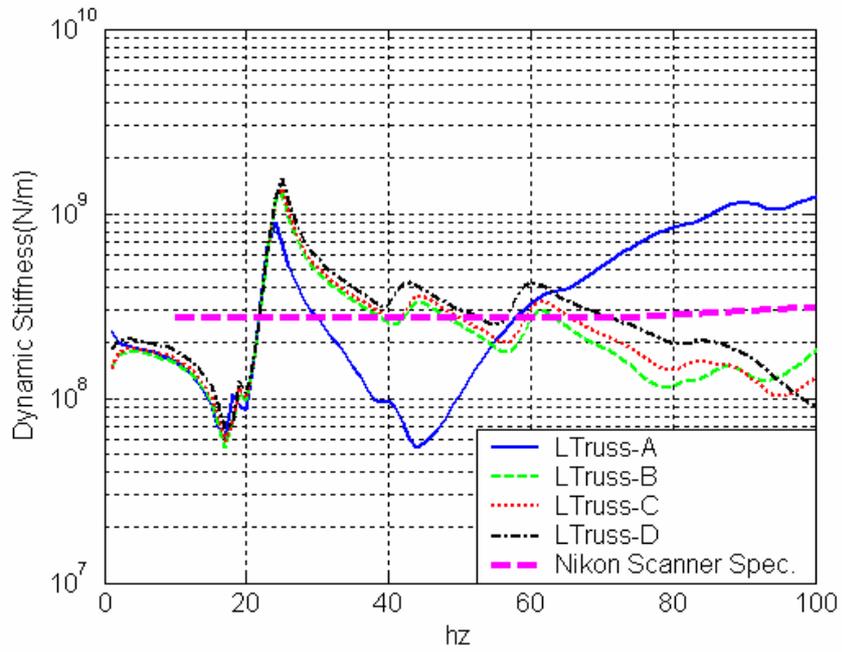


圖 5.65 區域 IV 在不同尺寸桁架全面補強下之動態剛度比較

