

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

低容量液流阻尼器之性能測試與應用

**Performance Tests and Applications of
Low-capacity Fluid Dampers**

研究生：趙勵元

指導教授：王彥博 教授

中華民國九十八年十月

低容量液流阻尼器之性能測試與應用

Performance Tests and Applications of
Low-capacity Fluid Dampers

研究生：趙勵元

Student : Li-Yuan Chao

指導教授：王彥博 博士

Advisor : Dr. Yen-Po Wang

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文



**Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of
Master of Science
In
Civil Engineering
October 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十八年十月

低容量液流阻尼器之性能測試與應用

研究生：趙勵元

指導教授：王彥博 博士

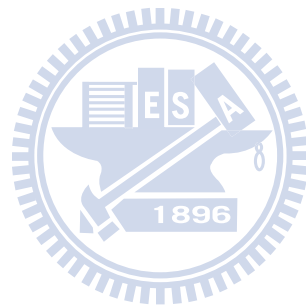
國立交通大學土木工程研究所

摘要

本研究旨在探討低容量液流阻尼器的力學特性與工程應用—包括設備基座之減振，以及房屋結構（含木造與鋼結構）之防震應用。為了解液流阻尼器之力學行為，本文根據流體動力學理論，考慮非牛頓流體，建立了液流阻尼器之流體動力分析模式。經由參數分析，探討活塞面積、活塞厚度及孔隙大小對於液流阻尼器力學行為之影響，並發現阻尼係數與勁度之頻率相依特性，此乃習用之 Kelvin model 所無法模擬者。元件測試結果顯示，合作廠商研製之液流阻尼器有飽滿而穩定之遲滯消能特性，其性能較日本原廠提供之阻尼器更為優異。設備基座減振測試結果顯示，低容量液流阻尼器展現極佳之減振效果，三分之一倍頻分析證明其有效之控制範圍極廣，整體而言以 30~100Hz 的頻寬內減振效果最為顯著。以振動台完成之一系列結構

耐震性能測試結果，顯示低容量液流阻尼器無論應用於木造結構或鋼結構上，均能發揮減振效果，具有成為結構抗震阻尼器之應用潛力。

關鍵詞：液流阻尼器、流體動力學、牛頓流體、非牛頓流體、減振、耐震性能測試



Performance Tests and Applications of Low-capacity Fluid Dampers

Student : Li-Yuan Chao

Advisor : Dr . Yen-Po Wang

Institute of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University



Abstract

The objective of this study is to explore the mechanical characteristics of a low-capacity fluid dampers through our cooperation with company discovering possible industrial applications in control of machine-induced vibration, and earthquake resistance of building structures (on both wood and steel model structures) . To get more insight of the mechanics of viscous fluid dampers, a fluid dynamic model has been developed based on theories in fluid dynamics with consideration of non-Newtonian fluid. The effects of piston area, piston thickness and gap of the annular orifice on the mechanical behavior of the fluid dampers are assessed via the parametric study. Both the damping coefficient and stiffness of the fluid damper are found to be frequency- dependent, which could not be reflected by using the Kelvin's model. Results of the

component tests indicate that the fluid dampers developed by cooperation with company exhibit rich and stable energy-dissipative characteristics superior to those of the prototype by the Japan manufacturer. Effectiveness of the low-capacity fluid dampers in machine-induced vibration control have been observed via the simulation tests. The dampers are proved to be effective in a wide range of spectrum as revealed from the one-third octave spectrum analysis, and generally speaking, the control effect is most prominent within the bandwidth of 30~100 Hz. A series of seismic performance tests of the fluid dampers for structural response control by the shaking table has been conducted. Experimental results for both the wood and steel model structures show that the fluid dampers are effective in seismic vibration control. The potential of using fluid dampers for earthquake protection of building structures has been confirmed.

Key words : fluid damper, fluid dynamics, Newtonian fluid, non-Newtonian fluid, vibration control, seismic performance test

誌 謝

感謝吾師 王彥博教授與李建良博士兩年來的悉心指導，在交大研究期間，讓學生體會到學術研究之真理所在且對研究鍥而不捨的精神以及求知的熱忱，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，承蒙淡江大學 吳重成教授、國立交通大學 翁正強教授、國立交通大學 郭心怡教授撥冗指正，並提供寶貴意見，使得論文疏漏之處以獲改進得，特別在此表示感激之意。

在交大求學的生活中，感謝研究室的學長李建良博士、學長張簡嘉賞博士、逸軒學長，在此特別感謝建良學長實驗上的協助與學業上提供的寶貴意見讓我可以順利完成論文；畢業學長家杰、建華、哲維、羅開；同學顥勳、羿廷、力邨、家福；學弟志儒、厚餘。大家為了實驗而一起做到天亮的日子、大家一起烤肉與打球的日子、在學業上互相切磋的日子、還有一起出去玩的日子，對我而言我會珍惜與你們享處的時光。

最後，衷心感謝我的家人，給我的鼓勵、關懷、溫馨、奉獻與支持，讓我可以順利完成論文。

謹以本文獻給所有關心我的人，謝謝你（妳）們。

謹誌於交大工程二館 2009 年 10 月

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	iii
目錄.....	vi
表目錄.....	ix
圖目錄.....	xii
第一章 緒論.....	1
第二章 液流阻尼器之流體力學理論.....	8
2.1 基本構造及原理.....	8
2.2 黏滯阻尼器之流體力學理論.....	10
2.2.1 牛頓流體(Newtonian Fluid).....	11
2.2.2 非牛頓流體(Non-Newtonian Fluid).....	15
2.3 參數分析.....	21
2.3.1 參數設定.....	21
2.3.2 擬合結果.....	23
2.3.3 小結.....	24
第三章 含液流阻尼器結構之動力分析.....	35
3.1 前言.....	35
3.2 運動方程式.....	35
3.3 數值解析方法—狀態空間法.....	38
3.4 MATLAB 數值模擬分析.....	42
3.4.1 模型建立與模擬規畫.....	42
3.4.2 模擬結果.....	44
3.5 ETABS 數值模擬分析.....	45
3.5.1 ETABS 簡介.....	45

3.5.2	定義木材性質與構件斷面	45
3.5.3	阻尼器模型參數設定	47
3.5.4	模型建立	48
3.5.5	阻尼器參數擬合	49
3.5.6	擬合結果	49
3.6	小結	50
第四章	液流阻尼器之元件測試	79
4.1	前言	79
4.2	低容量液流阻尼器之元件測試	79
4.2.1	元件測試構架	80
4.2.2	試驗規劃與量測系統	81
4.2.3	試驗結果與分析	82
4.3	參數擬合	83
4.3.1	參數設定	83
4.3.2	擬合結果	84
4.4	小結	84
第五章	液流阻尼器之防振(震)性能試驗	114
5.1	前言	114
5.2	低容量液流阻尼器在設備基座之減振性能測試	114
5.2.1	試驗規劃(Experimental Setup)	115
5.2.2	資料擷取與訊號處理分析	116
5.2.3	測試結果評估	117
5.2.4	小結	118
5.3	鋼結構加裝液流阻尼器之耐震性能測試	119
5.3.1	試驗規劃	119
5.3.2	試驗計劃	122

5.3.3 耐震性能試驗與評估	123
5.3.3.1 Hachinohe Earthquake	123
5.3.3.2 El Centro Earthquake	125
5.3.3.3 Kobe Earthquake	128
5.3.4 小結	131
5.4 木造結構加裝低容量液流阻尼器之耐震性能測試	132
5.4.1 測試機構與量測系統	132
5.4.2 試驗配置與規劃	134
5.4.3 耐震性能試驗與評估	135
5.4.3.1 Kobe Earthquake	135
5.4.3.2 Hachinohe Earthquake	137
5.4.3.3 El Centro Earthquake	138
5.4.4 小結	140
第六章 結論與建議	221
參考文獻	224
附錄 A. ARX 系統識別理論	227

表目錄

表 2.1 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果	26
表 2.2 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果	26
表 2.3 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果	27
表 2.4 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果	27
表 3.1 木造空構架結構模型尺寸	51
表 3.2 模擬分析所考慮之液流阻尼器活塞半徑	51
表 3.3 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Kobe Earthquake, PGA=1g)....	52
表 3.4 各樓層加速度均方根值比較(Input=Kobe Earthquake, PGA=1g).....	53
表 3.5 常用樹種分類【23】	54
表 3.6 普通結構木材纖維方向之容許應力 (單位： kgf/cm^2)【23】	55
表 3.7 木材纖維方向之彈性模數 (單位： $10^3 kgf/cm^2$)【23】	56
表 3.8 模擬之活塞半徑與所對應之阻尼係數及速度指數	57
表 4.1 阻尼器元件測試項目	87
表 4.2 1.5tf 油壓致動器規格	87
表 4.3 訊號擷取系統 (datalogger) 規格	87
表 4.4 荷重元 (Load Cell) 規格	88
表 4.5 筆記型電腦規格	88
表 4.6 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=0.5 Hz)	88
表 4.7 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=1 Hz)	89
表 4.8 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=2 Hz)	89
表 4.9 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=3 Hz)	90
表 4.10 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=5 Hz)	90
表 5.1 加速度規/速度規之規格	141

表 5.2 訊號擷取系統規格.....	142
表 5.3 筆記型電腦規格.....	142
表 5.4 激振器(Shacker)開啟之加速度振動反應 RMS 值	142
表 5.5 五層樓鋼結構模型細部尺寸.....	143
表 5.6 五層樓鋼結構模型之動力特性.....	143
表 5.7 各樓層加速度峰值反應比較(Input=Hachinohe).....	144
表 5.8 各樓層加速度均方根值比較(Input=Hachinohe).....	145
表 5.9 結構之等效頻率與阻尼比(Input=Hachinohe).....	146
表 5.10 液流阻尼器最大出力(Input=Hachinohe).....	146
表 5.11 各樓層加速度峰值反應比較(Input= El Centro).....	147
表 5.12 各樓層加速度均方根值比較(Input= El Centro).....	148
表 5.13 裝設阻尼器模型結構之等效頻率與阻尼比(Input=El Centro).....	149
表 5.14 液流阻尼器最大出力(Input= El Centro).....	149
表 5.15 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Kobe)	150
表 5.16 各樓層加速度均方根值比較(Input=Kobe)	151
表 5.17 裝設阻尼器模型結構之等效頻率與阻尼比(Input=Kobe)	152
表 5.18 液流阻尼器最大出力(Input= Kobe)	152
表 5.19 二層樓木造模型結構之細部尺寸	153
表 5.20 二層樓木造模型結構之動力特性	153
表 5.21 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Kobe)	154
表 5.22 各樓層加速度均方根值比較(Input=Kobe)	154
表 5.23 木造結構之等效頻率與阻尼比(Input=Kobe)	155
表 5.24 液流阻尼器最大出力(Input= Kobe)	155
表 5.25 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Hachinohe).....	156
表 5.26 各樓層加速度均方根值比較(Input=Hachinohe).....	156
表 5.27 裝設阻尼器木造結構之等效頻率與阻尼比(Input=Hachinohe).....	157

表 5.28 液流阻尼器最大出力(Input= Hachinohe).....	157
表 5.29 各樓層加速度峰值反應比較(Input= El Centro).....	158
表 5.30 各樓層加速度均方根值比較(Input= El Centro).....	158
表 5.31 裝設阻尼器木造結構之等效頻率與阻尼比(Input= El Centro).....	159
表 5.32 液流阻尼器最大出力(Input= El Centro).....	159



圖目錄

圖 1.1 液流阻尼器【4】	7
圖 1.2 西雅圖水手隊主場 Safeco Field 活動式屋頂之減震系統【4】	7
圖 2.1 液流阻尼器構造示意圖.....	28
圖 2.2 液體元素在環狀孔隙中之自由體圖	28
圖 2.3 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)	29
圖 2.4 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=55\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)	30
圖 2.5 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=20\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)	31
圖 2.6 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.3\text{mm}$)	32
圖 2.7 Modified Kelvin's model 之參數對應圖($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)	33
圖 2.8 Modified Kelvin's model 之參數對應圖($R=55\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)	33
圖 2.10 Modified Kelvin's model 之參數對應圖 ($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.3\text{mm}$)	34
圖 3.1 二層樓結構加裝液流阻尼器之示意圖	57
圖 3.2 非線性液流阻尼器出力迭代分析流程圖	58
圖 3.3 二層樓木造結構之振態.....	59
圖 3.4 輸入震波歷時(Kobe Earthquake).....	60
圖 3.5 各樓層之加速度反應歷時比較 ($R=25\text{mm}, \text{Input}=\text{Kobe earthquake}$).....	60
圖 3.6 各樓層之加速度反應歷時比較 ($R=22.5\text{mm}, \text{Input}=\text{Kobe earthquake}$).....	61
圖 3.7 各樓層之加速度反應歷時比較 ($R=20\text{mm}, \text{Input}=\text{Kobe earthquake}$).....	61

圖 3.8 各樓層之加速度反應歷時比較 (R=17.5mm,Input=Kobe earthquake).....	62
圖 3.9 各樓層之加速度反應歷時比較 (R=15mm,Input=Kobe earthquake).....	62
圖 3.10 各樓層之加速度反應歷時比較 (R=12.5mm,Input=Kobe earthquake).....	63
圖 3.11 各樓層之加速度反應歷時比較 (R=10mm,Input=Kobe earthquake).....	63
圖 3.12 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=25mm).....	64
圖 3.13 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=22.5mm).....	64
圖 3.14 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=20mm).....	65
圖 3.15 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=17.5mm).....	65
圖 3.16 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=15mm).....	66
圖 3.17 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=12.5mm).....	66
圖 3.18 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=10mm).....	67
圖 3.19 ETABS 材料性質定義設定	67
圖 3.20 定義桿件斷面.....	68
圖 3.21 ETABS 柱、梁尺寸設定範例	68
圖 3.22 ETABS 中 Damper 設定參數介面.....	69
圖 3.23 阻尼器之 Maxwell 串聯模式與 Kelvin 並聯模式	69
圖 3.24 阻尼器以對角斜撐型式配置.....	70
圖 3.25 木造空構架之 ETABS 模型	70
圖 3.26 各樓層加速度值比較 (R=25mm,C=26, α =1.1, Input=Kobe earthquake).....	71
圖 3.27 各樓層加速度值比較 (R=22.5mm,C=21, α =1.1, Input=Kobe earthquake).....	71

圖 3.28 各樓層加速度值比較 (R=20mm,C=16, $\alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake).....	72
圖 3.29 各樓層加速度值比較 (R=17.5mm,C=11, $\alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake).....	72
圖 3.30 各樓層加速度值比較 (R=15mm,C=7, $\alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake).....	73
圖 3.31 各樓層加速度值比較 (R=12.5mm,C=3.5, $\alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake).....	73
圖 3.32 各樓層加速度值比較 (R=10mm,C=1, $\alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake).....	74
圖 3.33 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=25mm、C=26、 $\alpha=1.1$)	74
圖 3.34 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=22.5mm、C=21、 $\alpha=1.1$)	75
圖 3.35 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=20mm、C=16、 $\alpha=1.1$)	75
圖 3.36 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=17.5mm、C=11、 $\alpha=1.1$).....	76
圖 3.37 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=15mm、C=7、 $\alpha=1.1$)	76
圖 3.38 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=12.5mm、C=3.5、 $\alpha=1.1$)	77
圖 3.39 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較(R=10mm、C=1、 $\alpha=1.1$)	77
圖 3.40 活塞頭半徑 R 與阻尼係數 C 之關係	78
圖 4.1 低容量液流阻尼器元件外觀尺寸 (單位: mm)	91
圖 4.2 元件測試構架設計圖.....	92
圖 4.3 液流阻尼器擾動示意圖.....	93
圖 4.4 元件測試構架組裝完成照片.....	93
圖 4.5 元件測試照片.....	94
圖 4.6 MTS1.5tf 動態油壓致動器.....	94
圖 4.7 荷重元 (Load Cell)	95
圖 4.8 訊號擷取系統.....	95

圖 4.9 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/480$ rad).....	96
圖 4.10 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/240$ rad).....	96
圖 4.11 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/120$ rad).....	97
圖 4.12 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/60$ rad).....	97
圖 4.13 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/30$ rad).....	98
圖 4.14 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1Hz$, $\theta = 1/480$ rad).....	98
圖 4.15 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1Hz$, $\theta = 1/240$ rad).....	99
圖 4.16 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1Hz$, $\theta = 1/120$ rad).....	99
圖 4.17 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1Hz$, $\theta = 1/60$ rad).....	100
圖 4.18 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1Hz$, $\theta = 1/30$ rad).....	100
圖 4.19 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/480$ rad).....	101
圖 4.20 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/240$ rad).....	101
圖 4.21 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/120$ rad).....	102
圖 4.22 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/60$ rad).....	102
圖 4.23 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/30$ rad).....	103
圖 4.24 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/480$ rad).....	103
圖 4.25 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/240$ rad).....	104
圖 4.26 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/120$ rad).....	104
圖 4.27 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/60$ rad).....	105

圖 4.28 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/30$ rad)	105
圖 4.29 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5Hz$, $\theta = 1/480$ rad)	106
圖 4.30 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5Hz$, $\theta = 1/240$ rad)	106
圖 4.31 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5Hz$, $\theta = 1/120$ rad)	107
圖 4.32 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5Hz$, $\theta = 1/60$ rad)	107
圖 4.33 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5Hz$, $\theta = 1/30$ rad)	108
圖 4.34 各式阻尼器最大出力 vs.位移變化曲線圖	109
圖 4.35 各式阻尼器最大出力 vs.速度變化曲線圖	110
圖 4.36 液流阻尼器之遲滯迴圈比較 ($\theta = 1/480$ rad , $R=8mm$ 、 $L=11mm$ 、 $h=0.72mm$).....	111
圖 4.37 液流阻尼器之遲滯迴圈比較 ($\theta = 1/240$ rad , $R=8mm$ 、 $L=11mm$ 、 $h=0.72mm$).....	111
圖 4.38 液流阻尼器之遲滯迴圈比較 ($\theta = 1/120$ rad , $R=8mm$ 、 $L=11mm$ 、 $h=0.72mm$).....	112
圖 4.39 液流阻尼器之遲滯迴圈比較 ($\theta = 1/60$ rad , $R=8mm$ 、 $L=11mm$ 、 $h=0.72mm$).....	112
圖 4.40 液流阻尼器之遲滯迴圈比較 ($\theta = 1/30$ rad , $R=8mm$ 、 $L=11mm$ 、 $h=0.72mm$).....	113
圖 5.1 基座減振測試構架設計圖	160
圖 5.2 支撐架	161
圖 5.3 加速規/速度規	161
圖 5.4 資料擷取系統	162

圖 5.5 激振器(Shaker).....	162
圖 5.6 基座安裝完成照片.....	163
圖 5.7 激振器安裝完成.....	163
圖 5.8 加速規安裝完成.....	164
圖 5.9 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test1).....	164
圖 5.10 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test2).....	165
圖 5.11 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test3).....	165
圖 5.12 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test1).....	166
圖 5.13 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test2).....	167
圖 5.14 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test3).....	168
圖 5.15 振動台油壓致動器.....	169
圖 5.16 地震模擬振動台.....	169
圖 5.17 五層樓鋼結構模型.....	170
圖 5.18 407 控制器.....	171
圖 5.19 IMC 資料擷取系統.....	171
圖 5.20 耐震性能測試所使用之感測計.....	172
圖 5.21 輸入震波歷時.....	173
圖 5.22 液流阻尼器之安裝.....	174
圖 5.23 五層樓鋼構耐震性能測試構架組裝完成照片.....	175
圖 5.24 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.09g).....	176
圖 5.25 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.14g).....	177
圖 5.26 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.19g).....	178
圖 5.27 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.24g).....	179
圖 5.28 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.30g).....	180
圖 5.29 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.09g)....	181
圖 5.30 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.14g)....	181

圖 5.31	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.19g)	181
圖 5.32	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.24g)	182
圖 5.33	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.30g)	182
圖 5.34	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.05g)	183
圖 5.35	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.14g)	184
圖 5.36	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.18g)	185
圖 5.37	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.25g)	186
圖 5.38	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.30g)	187
圖 5.39	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.05g)	188
圖 5.40	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.14g)	188
圖 5.41	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.18g)	188
圖 5.42	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.25g)	189
圖 5.43	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.30g)	189
圖 5.44	各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.08g)	190
圖 5.45	各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.14g)	191
圖 5.46	各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.22g)	192
圖 5.47	各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.34g)	193
圖 5.48	各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.37g)	194
圖 5.49	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.08g)	195
圖 5.50	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.14g)	195
圖 5.51	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.22g)	195
圖 5.52	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.34g)	196
圖 5.53	一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.37g)	196
圖 5.54	結構之振態分析(Hachinohe,PGA=0.14g)	197
圖 5.55	結構之振態分析(El Centro,PGA=0.14g)	198
圖 5.56	結構之振態分析(Kobe,PGA=0.14g)	199

圖 5.57 El Centro 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g).....	200
圖 5.58 Kobe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g).....	200
圖 5.59 Hachinohe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g).....	201
圖 5.60 Kobe 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g).....	201
圖 5.61 Hachinohe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g).....	202
圖 5.62 El Centro 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g).....	202
圖 5.63 二層樓木造模型結構之立面圖.....	203
圖 5.64 一樓液流阻尼器之安裝圖.....	204
圖 5.65 一樓液流阻尼器之安裝位置圖.....	204
圖 5.66 裝設液流阻尼器之二層樓模型結構.....	205
圖 5.67 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.08g).....	206
圖 5.68 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.12g).....	206
圖 5.69 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.19g).....	207
圖 5.70 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.25g).....	207
圖 5.71 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.28g).....	208
圖 5.72 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.08g).....	208
圖 5.73 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.12g).....	209
圖 5.74 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.19g).....	209
圖 5.75 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.25g).....	210
圖 5.76 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.28g).....	210
圖 5.77 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.08g).....	211
圖 5.78 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.15g).....	211
圖 5.79 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.19g).....	212
圖 5.80 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.22g).....	212
圖 5.81 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.26g).....	213
圖 5.82 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.08g)..	213

圖 5.83	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.15g)..	214
圖 5.84	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.19g)..	214
圖 5.85	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.22g)..	215
圖 5.86	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.26g)..	215
圖 5.87	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.10g).....	216
圖 5.88	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.16g).....	216
圖 5.89	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.20g).....	217
圖 5.90	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.23g).....	217
圖 5.91	各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.29g).....	218
圖 5.92	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.10g)..	218
圖 5.93	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.16g)..	219
圖 5.94	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.20g)..	219
圖 5.95	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.23g)..	220
圖 5.96	一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.29g)..	220

第一章 緒論

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，屬環太平洋地震帶的一部份，地震活動非常頻繁。然而，地震是自然界最不可預測的災害，發生時往往造成生命財產重大的損失，有關結構防震之課題相當重要。

結構耐震設計，長久以來的觀念是利用材料的強度以及結構構件之韌性來抵抗地震力以及消散伴隨而來的能量，達成小震不壞、中震可修、大震不倒的目標。然而，結構往往因為梁柱接頭設計不當或施工不良造成塑性角提早破壞，使得韌性未能充分發揮。為了補足傳統耐震設計之缺點，近年來結構控制的觀念在土木工程領域已被廣泛應用【1】。結構控制技術為結構工程領域中的減震方法之一，可應用於新建結構之抗震，亦可用於老舊建物之耐震補強。

結構控制的技術一般而言可分為三種，包括主動控制、半主動控制和被動控制【2】，其中被動控制是目前運用較為廣泛的結構控制方法。結構被動控制又可概分為基礎隔震【3】及消能減震兩種方法。基礎隔震藉由支承延長結構基本週期，避開地震的主要振頻以隔絕地震力的傳輸路徑，降低結構所須承受之地震力；結構消能是將地震時造成結構層間位移與相對速度作為消能元件之驅動方式，將釋放的能

量藉由消能元件之塑性變形或流阻性吸收，使結構物在強震來襲時不至產生嚴重損害。被動控制技術因毋須額外的動力供給、設計簡單、機構行為容易掌握，較具發展潛力。消能減震裝置可分為速度相依型與位移相依型兩種。凡元件之消能行為與構件之位移變形有關者，稱之為位移相依型消能器，其消能原理係利用金屬材料之大幅變形使其承受之應力超過該材料降伏強度，而由彈性行為進入塑性變形，繼而在往復運動中產生吸能之作用；元件之消能行為與流體之流動速度有關者稱之為速度相依型消能器，其消能原理係利用阻尼裝置組成構件間之相對運動，間接驅動其內含流質或半固態材料之流動而產生阻力，或因材料本身之黏滯性而產生對於振動之抵抗力。位移相依型減震裝置種類繁多，包括加勁阻尼鋼板(ADAS)、預彎拱鈹【4、5】及摩擦阻尼器【6】等；速度相依型之減震裝置主要包含黏彈阻尼器與黏滯阻尼器【7、8】，本論文擬研究之低容量液流阻尼器即為黏滯阻尼器(Viscous -Damper)。

液流阻尼器在結構防震上之應用屬於被動控制領域，它主要是藉由圓管內活塞運動與液體的黏滯性所產生的阻力來消能，在工程實務上已有相當多的應用，包括建築結構或橋樑之減震，例如 1995 年美國 Taylor Devices, Inc. 【11】(圖 1.1)之液流阻尼器被應用於西雅圖水手隊主場 Safeco Field 活動式屋頂之減震，如圖 1.2 所示。一般用於

結構與橋樑減震之液流阻尼器，屬於體積、出力較大之高容量液流阻尼器，阻尼器之出力可達數十噸甚至百噸以上。本論文將針對體積及出力較小之低容量液流阻尼器進行研究，其出力約在 500~800 公斤，可應用於質量較小之建築結構(如木造房屋)或振動設備之減振。

液流阻尼器最早源自於軍事用途【9、10】，應用於飛彈發射座上，藉以吸收砲火發射瞬間之後座衝擊能量。隨著美蘇冷戰結束，液流阻尼器乃陸續用於土木工程等民生工業用途上，成為建築結構吸收地震能量、消散衝擊力的輔助元件。液流阻尼器應用在結構防震上已行之有年，地震時利用阻尼器之遲滯消能行為消散地震能量，可有效提升結構的耐震能力，達到功能設計的目標。國內有關液流阻尼器之研究以徐德修等人較具代表性，徐德修及李永峰【12】指出，影響液流阻尼器之阻尼特性的主要因素為阻尼器的管徑及活塞與套筒間之孔隙面積；黃賜琳【13】利用流體力學理論推導阻尼器之數學模式，取得阻尼係數之理論公式；李永峰【14】探討液流阻尼器之研發設計、製造及測試，依照規範評估被動消能器之試驗項目及步驟，測試本土研製液流阻尼器性能的穩定性及耐久性，並與國外已在工程實務應用之產品相比較。以上液流阻尼器之相關文獻提供許多珍貴資訊，有助於吾人對其流體動力行為之理解，對液流阻尼器之研發、設計均有很大的參考價值。

木造與磚造房屋，因材料特性的限制，無法容許結構產生較大的位移與變形，所以往往在地震發生時倒塌或受損的情況最嚴重。日式木造建築是以梁與柱為主體骨架，所承受的各種外力主要也是透過梁柱之間來傳遞，因此梁柱接頭之強度相當重要，構件間之接合方式與穩定性乃影響建築物結構安全的關鍵因素。1995年日本阪神地震中，許多傳統木造結構嚴重受損，主要是因木造建築之水平抵抗力較弱，結構變形量過大而造成梁柱接頭破壞，加上屋瓦質量集中於結構頂部，因此在地震作用下極易受損，甚至倒塌。此乃木造建築之梁柱接頭以榫接的方式接合為主，在往覆載重下其穩定性較差；在水平載重作用下，整體木造構架可能呈現平行四邊形的不穩定結構，若無適當加勁，梁柱接頭可能因變形過大而破壞，使得構架大幅變形，甚至傾倒。在木造建築安裝斜撐雖能防止構架變形，但也增加整體結構之勁度而改變週期，可能導致加速度反應之放大；此外，安裝斜撐將會干擾木造建築之使用，難以被大眾接受。為了防止梁柱接頭的破壞，近年來日本建商開始考慮於木造建築的梁柱接頭附近安裝低容量之液流阻尼器，不僅能束制水平的變形量，保護梁柱接頭，還能吸收地震能量，達到消能減震的目的；相較於安裝斜撐所佔用的空間，低流量液流阻尼器只佔用梁柱接頭附近之角隅，在應用上較具可行性。

另一方面，低容量液流阻尼器亦可應用於科技廠房之設備減振

上。台灣的電子、光電等高科技產業蓬勃發展，近年來已成為世界知名高科技產品代工重鎮，為能提高生產良率，許多精密產品之生產組裝製程均在無塵室中進行。無塵室除了潔淨度要求極高之外，對微振動之要求亦甚為嚴苛。由於製程中設備之運轉會產生振動，使許多精密儀器在製造過程中因振動而產生誤差，影響產品良率。為能有效降低設備運轉產生之振動，可於設備基座與樓板之間加裝液流阻尼器來吸收振動能量。由於基座與樓板間的高度限制，施做補強的空間有限，所以選擇消能減振裝置時以隔振支承或是小型之阻尼器為主。低容量液流阻尼器因為體積小，用於高科技廠房之設備基座減振相當合適，它能有效吸收機台設備運轉之振動，減少產品瑕疵，提高良率。綜以所述，開發低容量液流阻尼器，無論是對於木造結構之耐震補強，或是廠房設備基座減振之應用，均有很大的發展潛力。

本文共分六章，第一章為緒論，介紹研究動機與目的及文獻回顧。第二章將介紹液流阻尼器之理論推導，利用流體動力學與填充液黏度變化之特性，找出阻尼器於之非線性出力行為與頻率相依特性 (frequency-dependent characteristics)。第三章介紹木造構架加裝液流阻尼器之動力分析，以狀態空間法求解其運動方程式，並利用商用軟體 ETABS 針對阻尼元件參數進行擬合，以建立其分析結果之關聯性。第四章為液流阻尼器之元件測試，針對合作廠商清瑞機械有限公司所

提供之液流阻尼器進行性能測試，找出液流阻尼器出力極限與消能特性。第五章為液流阻尼器之防振(震)性能試驗，探討液流阻尼器應用於高科技廠房設備基座減振，以及木造結構與五層樓鋼結構防震之可行性，作為未來實際應用之參考。第六章為結論與建議。



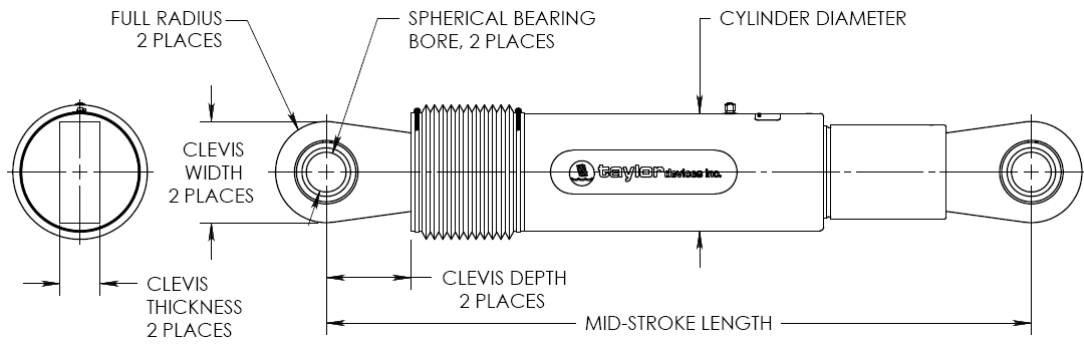


圖 1.1 液流阻尼器【4】



圖 1.2 西雅圖水手隊主場 Safeco Field 活動式屋頂之減震系統【4】

第二章 液流阻尼器之流體力學理論

2.1 基本構造及原理

液流阻尼器之構造係由鋼製套管、活塞桿及略小於套管內徑的活塞頭所構成，如圖 2.1 所示；阻尼器內填充具有黏滯性的液體(如矽油)，運動過程中阻尼器藉由活塞兩側液體產生的壓力差產生阻抗，環狀孔隙旨在控制活塞頭於黏滯性液體中移動時所產生的阻尼特性。

根據美國 FEMA 273 (FEMA 1997) 【15】 規範，線性液流阻尼器之出力可表示如下：

$$F_T = C\dot{x} + Kx = F_D + F_E \quad (2.1)$$

其中

F_T ：阻尼器提供的總出力；

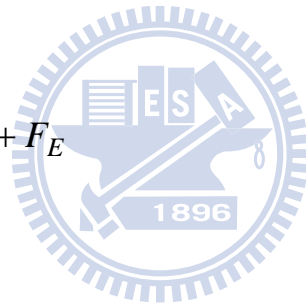
C ：阻尼係數；

K ：阻尼器之勁度；

x ：活塞桿之位移；

\dot{x} ：活塞桿之運動速度；

F_D ：阻尼力；



F_E ：恢復力。

式 (2.1) 中所示之阻尼力 F_D 與阻尼器之速度 \dot{x} 成正比，故稱為線性液流阻尼器。若為非線性液流阻尼器，則其出力大小與速度的冪次方成正比，其力學關係可表示如下：

$$F_D = C|\dot{x}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (2.2)$$

其中

α ：速度指數；

sgn ：方向函數。

式 (2.1) 中之恢復力 F_E 主要是因為活塞於套管運動時擠壓黏滯性液體產生壓縮所致。Verma【16】曾針對此現象提出物理模型來描述阻尼器的勁度，假設管內液壓是因為阻尼器套管中活塞桿單面推擠黏滯性液體所造成；為了減少勁度之效應，Verma 提出將套管內活塞桿改為雙邊對稱型式，並於套管內設計蓄壓室來減壓以降低勁度。然而相關之研究結果顯示，無論將阻尼器中之活塞桿改為雙邊對稱，或於套管內設計蓄壓室，阻尼器在高頻運動時仍會出現勁度。

Constantinou 和 Symans (1992)【17】及後續 Seleemah 和 Constantinou (1997)【18】等人採用馬克斯威爾模型(Maxwell Model)

來模擬出線性阻尼器的行為如下：

$$F_T + \phi \frac{dF_T}{dt} = C_0 \dot{x} \quad (2.3)$$

其中

ϕ ：鬆弛時間；

C_0 ：頻率幾近於零時所對應之阻尼係數。

在 Maxwell model 中， F_T 仍為阻尼力與恢復力兩項之疊加。惟此一模型仍無法用來描述非線性液流阻尼器之力學行為。

液流阻尼器之另一支研究主流是以流體力學原理為基礎，聚焦於阻尼器中之流體動力行為。Symans and Constantinou (1997) 根據流量守衡原理建立阻尼器之流體動力學理論；Makris (1996) 【19】以 Navier–Stokes 方程式描述電流變液 (electrorheological fluid) 之流變 (rheological) 行為進行電流變液阻尼器之力學分析；Chien-Yuan Hou 【20】提出以 Navier–Stokes 方程式分析液流阻尼器環狀孔隙中之流體動力學，並考慮剪切效應與黏彈性行為對液流阻尼器之影響，以分析液流阻尼器內流體之動力行為。

2.2 黏滯阻尼器之流體力學理論

本文有關黏滯阻尼器之流體力學理論主要是參考 Chien-Yuan

Hou【20】之研究，應用流體動力學與黏度變化之關係，考慮阻尼器填充液為牛頓流體或非牛頓流體之條件建立液流阻尼器之流體動力模式。牛頓流體(Newtonian Fluid)為流變行為符合牛頓黏度定律之流體，其剪應力(τ)與剪切速率($\dot{\gamma}$)呈正比關係，即 $\tau = \eta\dot{\gamma}$ ；其中 η 即為黏度，在一定溫定壓下 η 為常數，與時間及剪切速率($\dot{\gamma}$)均無關。而非牛頓流體(non-Newtonian Fluid)之流體行為不符合上述牛頓黏度定律，其黏度(η)會隨著剪切速率($\dot{\gamma}$)而改變。吾人可根據矽油之特性參數，透過非牛頓流體之性質得到液流阻尼器的頻率相依特徵。惟Chien-Yuan Hou【20】只探討阻尼器在穩態簡諧波條件下之動力行為，為能建立含油壓阻尼系統之整體結構動力方程式，本研究將利用上述流體力學理論，結合結構動力分析，探討其在地震擾動下之動態行為。

2.2.1 牛頓流體(Newtonian Fluid)

當液流阻尼器內部為環狀孔隙時，其液體流動行為可以一維空間座標來描述。圖 2.2 所示為液體元素在孔隙中之自由體圖，由於流體在環狀孔隙中流動，所以適合以極座標(polar coordinate)來表示；當活塞頭的周長與阻尼器套管內徑之周長相同時，流體可視為在兩個平行金屬板間流動，可採笛卡兒座標來表示；一般來說，阻尼器之套管

內徑與活塞頭周長必定不相等，不過當孔隙寬度很微小時，套管內徑與活塞頭之周長可視同相等，當其周長差在 2% 以內時，液體元素在孔隙中之自由體圖使用笛卡兒座標表示應為合理的作法。假設液體為不可壓縮，利用力平衡之條件，吾人可得到以下之偏微分方程式：

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (2.4)$$

其中

u ：流體元素之流速；

$\rho \frac{\partial u}{\partial t}$ ：單位流體體積之慣性力；

$\frac{\partial p}{\partial x}$ ：沿著活塞頭厚度方向之液壓梯度；

$\frac{\partial \tau}{\partial y}$ ：作用在元素表面之剪應力。

$$\text{式(2.4)中之} \frac{\partial p}{\partial x} \cong \Delta p / L \quad (2.5)$$

其中

Δp ：活塞頭前後之壓力差；

L ：活塞頭厚度。

活塞頭與套管內壁固定不動的條件下，當液體壓力加於阻尼器之

套管室內時，在孔隙中所產生之速度變量曲線為拋物線，且以 $y = h/2$ 處為對稱軸(h 為孔隙之寬度)，如圖 2.2 所示。換句話說，在 $y = h/2$ 時， $\tau = 0$ ，這是因為對稱所致。所以流體在 $y = h/2$ 時剪力為零；不過 Chien-Yuan Hou【20】所進行的阻尼器測試結果顯示，這並不是事實。圖 2.2 可以看出實際速度之變量曲線，因為沒有滑動，所以管壁之流體速度必須要與管壁運動狀態相同。由於活塞頭與套管有不同之運動情形，所以實際速度之變量曲線並以 $y = h/2$ 處為對稱軸。但是當孔隙寬度比活塞頭之半徑小時，孔隙中最大流速會比套管運動速度大很多，因此套管之運動對速度變量曲線不會有很大的影響，而且所產生之速度變量曲線將會接近於對稱。假設孔隙中流體速度變量曲線在 $y = h/2$ 處為對稱，並利用 $\tau(h/2) = 0$ 為邊界條件對 (2.4) 式進行積分；假設流體之慣性力很小，可以忽略，所以式 (2.4) 可簡化為：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (2.4a)$$

式 (2.4a) 對 y 積分後可得：

$$\tau(y) = \frac{\Delta p}{L} \left(\frac{h}{2} - y \right) \quad (2.6)$$

流體動力分析中，黏滯性流體之剪應力與剪切速率之關係如下：

$$\tau(y) = \eta \dot{\gamma}(y) = \eta \frac{\partial u(y)}{\partial y} \quad (2.7)$$

其中

η ：流體之黏度；

$\dot{\gamma}$ ：流體元素之剪切速率。

將式(2.7)代入式(2.6)後可以得到環狀孔隙阻尼器之 Navier–Stokes 方程式：

$$\eta \frac{\partial u(y)}{\partial y} = \frac{\Delta p}{L} \left(\frac{h}{2} - y \right) \quad (2.8)$$

如果流體黏度為常數($\eta = \eta_0$)且為牛頓流體，將(2.8)式對 y 積分並代入邊界條件 $u(h) = 0$ ，可得到沿 y 方向之速度分佈：

$$u(y) = \frac{\Delta p}{2\eta_0 L} (hy - y^2) \quad (2.9)$$

速度分佈求得之後，即可以計算出孔隙中之流速，該流速必須與阻尼器套管內不可壓縮液體之流速相等。假設 $h \ll R$ ，即可以估計出 Δp ：

$$\begin{aligned} AV &= \int_0^h 2\pi(R+y)u(y,t) dy \\ \Rightarrow \pi(R+h)^2 V &= \int_0^h 2\pi(R+y) \frac{\Delta p}{2\eta_0 L} (hy - y^2) dy \\ \Rightarrow (R+h)^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \int_0^h (R+y)(hy - y^2) dy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (R+h)^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \int_0^h [R(hy - y^2) + y(hy - y^2)] dy \\ \Rightarrow (R+h)^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \left[R \left(\frac{hy^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right) + \left(\frac{hy^3}{3} - \frac{y^4}{4} \right) \right]_0^h \\ \Rightarrow (R+h)^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \left[R \left(\frac{h^3}{6} + \frac{h^4}{12} \right) \right] \\ \Rightarrow (R+h)^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \frac{h^3}{6} (R+h) \end{aligned}$$

$$\because h \ll R, \quad \therefore (R+h) \approx R$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R^2 V &= \frac{\Delta p}{\eta_0 L} \frac{h^3}{6} R \\ \Rightarrow \Delta p &= \frac{6\eta_0 L V R}{h^3} \end{aligned} \quad (2.10)$$

其中

R ：活塞頭之半徑；

V ：活塞桿之運動速度。

將 Δp 與活塞頭斷面積(忽略活塞桿)相乘，即可以計算出填充牛頓流體

之阻尼器出力(沒有勁度之影響)：

$$F_T = F_D = 6\pi\eta_0 L (R/h)^3 V \quad (2.11)$$

2.2.2 非牛頓流體(Non-Newtonian Fluid)

在低剪切速率 ($\dot{\gamma} \approx 0$) 的條件下，液體黏度被視為常數 (η_0)，

該流體為即視牛頓流體。隨著剪切速率遞增，黏度開始變化的區域為轉換域(transition region)，矽油的黏度會隨著剪切速率之增加而降低，呈現出非牛頓流體之行為；黏度與剪切速率關係曲線之斜率最後將收斂至一常數。

阻尼器環狀孔隙中之矽油在極大之剪切速率下會變稀薄(即黏度降低)，阻尼器將進入非線性行為。雖然矽油在高速壓力變化時已變為非牛頓液體，但吾人仍可先求出環狀孔隙內之剪切速率。考慮流體為穩態流(steady flow)，則可求出在環狀孔隙中流體之平均流動速度：

$$AV = A_2V_{ave} \quad (2.12)$$

其中

A ：套筒內之斷面積，

A_2 ：為孔隙之斷面積，

V ：阻尼器之速度，

V_{ave} ：孔隙內之平均流動速度。

Yasuda(1979)【21】-Carreau(1972)【22】提出之聚合物液體黏度與剪切速率的關係如下：

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 + (\kappa \dot{\gamma})^b\right)^{(a-1)/b} \quad (2.13)$$

其中

κ ：時間之常數；

a 、 b ：流體之流變學 (rheological) 常數。

將式 (2.7) 及 (2.13) 帶入式 (2.6) 中求解，可得到以 Δp 表示之流體速度 $u(y)$ 。由於 Δp 項亦為未知數，故需藉由額外之方程式求解 Δp 。首先假設阻尼器受到外在擾動之速度為 $V(t)$ ，由於套管內之流量與孔隙內之流量相同，則依連續條件必須滿足：

$$AV(t) = \int_0^h 2\pi(R+y)u(y,t)dy \quad (2.14)$$

其中

$V(t)$ ：阻尼器之運動速度。

上式中因流速隨著時間而改變，故孔隙流速亦為時間之函數，因此 $u(y)$ 改為 $u(y,t)$ 。

上述理論係將矽油視為純黏性液體。然而矽油不僅具黏性，亦會表現出彈性行為而使阻尼器產生勁度；黏彈性材料在剪切應變產生變化時，其剪應力會隨著時間而遞減，這種應力鬆弛現象可以由

Maxwell 模型來描述如下：

$$\tau + \lambda_1 \frac{\partial \tau}{\partial t} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

其中 λ_1 為材料之鬆弛時間。

式 (2.15) 與式 (2.7) 的差異在鬆弛這一項，將式 (2.6) 代入式 (2.15)

可以得到

$$\frac{1}{L} \left(\frac{h}{2} - y \right) (\Delta p(t) + \lambda_1 \Delta \dot{p}(t)) = \eta \frac{\partial u(y,t)}{\partial y} \quad (2.16)$$

其中

$\Delta \dot{p}(t)$ 為 $\Delta p(t)$ 對時間之導數。

將式 (2.16) 與式 (2.14) 結合，可以求出考慮黏彈性矽油之流體動力行為。

為了求解流體之速度分佈，首先運用有限差分法(Finite Difference)求解非線性方程式 (2.16)：

$$\frac{\partial u(y,t)}{\partial y} = \frac{u_{y+\Delta y}^t(y,t) - u_y^t(y,t)}{\Delta y} \quad (2.17)$$

將式 (2.17) 代入式 (2.16) 中，可得到流體速度分佈函數：

$$u_{y+\Delta y}^t(y,t) = \left\{ \left[\frac{1}{L} \left(\frac{h}{2} - y \right) (\Delta p(t) + \lambda_1 \Delta \dot{p}(t)) \right] \frac{\Delta y}{\eta} \right\} + u_y^t(y,t) \quad (2.18)$$

其中 Δy 是由孔隙寬度方向分割 n 個等間距格點之間格。若孔隙之寬度為 1mm 時， $\Delta y = 1/n \text{ mm}$ 。由式 (2.18) 可以得到 y 方向之速度分佈。但因式中 $\Delta p(t)$ 為未知數，所以再將式 (2.18) 帶入式 (2.14) 中求出 $\Delta p(t)$ 之關係式：

$$AV(t) = \int_0^h 2\pi(R+y) \left\{ \left[\frac{1}{L} \left(\frac{h}{2} - y \right) (\Delta p(t) + \lambda_1 \Delta \dot{p}(t)) \right] \frac{\Delta y}{\eta} + u_y^t(y,t) \right\} dy$$

由於 $u_y^t(y,t)$ 為初始值，即前一步幅之已知值。上式整理之後得到：

$$\Delta p(t) + \lambda_1 \Delta \dot{p}(t) = -\frac{6L}{\Delta y h^3} \eta(t) \left[(R+h)^2 V(t) - 2u_\eta^t(y,t)Rh - u_y^t(y,t)h^2 \right]$$

由 Chien-Yuan Hou 【20】之實驗數據得知，矽油材料之鬆弛時間 $\lambda_1 = 0.0015 \text{ s}$ ，將此值代入上式，並利用(Heaviside)逆運算即可求出 $\Delta p(t)$ 之解如下：

$$\begin{aligned} \Delta p(t) = & e^{-666.67t} + \frac{6L}{\Delta y h} \left[-\frac{(R+h)^2}{h^2} \eta(t)V(t) + \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_y^t(y,t)\eta(t) \right] \\ & + \frac{9 \times 10^{-3} L}{\Delta y h} \left[\frac{(R+h)^2}{h^2} \dot{\eta}(t)V(t) + \frac{(R+h)^2}{h^2} \eta(t)\dot{V}(t) - \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_y^t(y,t)\dot{\eta}(t) \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

在式 (2.19) 中，黏度項 $\eta(t)$ 為時間之函數，藉由式 (2.13) 聚合物

液體黏度與剪切速率之關係，求出剪切速率後即可以得知。活塞頭側壁面因須滿足不滑動條件，所以速度為零，此外，活塞頭壁面至孔隙中央位置之流速呈線性變化，因此吾人可求出孔隙內之平均剪切速率：

$$\dot{\gamma} = \frac{V_{ave} - 0}{h/2} = \frac{2V_{ave}}{h} \quad (2.20)$$

再由流體連續條件，可求出在環狀孔隙中的平均流動速度：

$$V_{ave} = \frac{AV(t)}{A_2} = \frac{(R+h)^2}{(R+h)^2 - R^2} V(t) \quad (2.21)$$

因此可得到剪切速率之時間函數：

$$\dot{\gamma} = \frac{2(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} V(t) \quad (2.22)$$

將式 (2.22) 代入式 (2.13) 即可以得到黏度 $\eta(t)$ 如下：

$$\eta(t) = \eta_0 \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} V(t) \right\}^b \right\}^{(a-1)/b} \quad (2.23)$$

將 $\eta(t)$ 對時間微分可得到 $\dot{\eta}(t)$ 如下：

$$\dot{\eta}(t) = \left\{ \eta_0 \left(\frac{a-1}{b} \right) \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{V}(t) \right\}^b \right\}^{[(a-1)/b]-1} \right\} \times \left\{ b \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{V}(t) \right]^{b-1} \right\} \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \ddot{V}(t) \right] \quad (2.24)$$

將活塞頭前後之壓力差與活塞頭斷面積相乘，即可得到阻尼力如下：

$$F_d(t) = \Delta p(t)A \quad (2.25)$$

2.3 參數分析

為瞭解本節由流體動力學所推導出之液流阻尼器力學行為，本研究將推導之公式與液流阻尼器之非線性公式作擬合，藉此找出所對應之阻尼係數及勁度。從非牛頓流體之推導過程中可得知當矽油受到高剪切速率時，黏度會降低且顯示出非線性力學行為，因此本節將探討液流阻尼器在不同頻率下，受簡諧波擾動之力學行為。

2.3.1 參數設定

■ 流體動力學推導出之液流阻尼器公式

流體動力學推導之液流阻尼器公式中已知定值：

(1) 矽油之材料之鬆弛時間 $\lambda_1 = 0.0015s$ ；

(2) 初始黏度 $\eta_0 = 1.002 \text{ Pa s}$;

(3) 時間之常數 $\kappa = 7.2 \times 10^{-6}$;

(4) 流體之流變學 (rheological) 常數 $a = 0.43$ 、 $b = 0.6$;

液流阻尼器尺寸設定值：

(1) 阻尼器活塞頭半徑 $\begin{cases} R = 27.5 \text{ mm} \\ R = 55 \text{ mm} \end{cases}$;

(2) 活塞頭厚度 $\begin{cases} L = 10 \text{ mm} \\ L = 20 \text{ mm} \end{cases}$;

(3) 孔隙寬度 $\begin{cases} h = 0.2 \text{ mm} \\ h = 0.3 \text{ mm} \end{cases}$;



■ 液流阻尼器之非線性公式

非線性液流阻尼器之行為可表示如下：

$$F = C(\Omega)\dot{x}^\alpha + K(\Omega)x$$

本節將以 Modified Kelvin's model 之阻尼係數 $C(\Omega)$ 、勁度 $K(\Omega)$ 及 α 與非牛頓流體理論所得之遲滯迴圈結果作擬合分析，求出最佳之參數，俾便未來加以應用。

■ 本系列模擬分析共探討四組不同液流阻尼器尺寸：

(1) $R = 27.5 \text{ mm}$ ， $L = 10 \text{ mm}$ ， $h = 0.2 \text{ mm}$ ；

(2) $R=55\text{mm}$, $L=10\text{mm}$, $h=0.2\text{mm}$;

(3) $R=27.5\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $h=0.2\text{mm}$;

(4) $R=27.5\text{mm}$, $L=10\text{mm}$, $h=0.3\text{mm}$ 。

2.3.2 擬合結果

以簡諧波為輸入擾動時，液流阻尼器非線性公式(Modified Kelvin's model)的遲滯迴圈能完全與流體動力學之液流阻尼器公式的遲滯迴圈重合，且擬合結果得到之速度指數 α 均為 1，Modified Kelvin's model 擬合之四組結果歸納於表 2.1~2.4，Modified Kelvin's model 之四組參數對應如圖 2.7~2.10 所示。

第(1)組尺寸擬合結果，當頻率為 1Hz 時的擬合結果，Kelvin's model 擬合出之阻尼係數 C 值為 $3 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ ，因為分析出之遲滯迴圈沒有斜率所以其勁度值 K 為 0。頻率為 5Hz 時的擬合結果，Kelvin's model 擬合出之阻尼係數 C 值為 $2.9 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ 、勁度 K 值為 $5 \text{ kgf} / \text{mm}$ 。頻率提升時 Kelvin's model 都能夠擬合出所對應之阻尼係數 C 值及勁度 K 值，各頻率下遲滯迴圈擬合如圖 2.3 所示。

第(2)組尺寸擬合結果，以第(1)組模擬尺寸為對照組，當頻率為 1Hz，活塞半徑增大為 $R=55\text{mm}$ 時，阻尼係數 C 值由 $3 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ 提升至 $45 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{mm}$ 。隨著頻率升高至 25Hz，其勁度由 $100 \text{ kgf} / \text{mm}$

增加為 1450 kgf/mm ，遲滯迴圈擬合如圖 2.4 所示。

第(3)組尺寸擬合結果，第(1)組模擬尺寸為對照組，當頻率為 1Hz ，活塞頭厚度改變為 $L=20\text{mm}$ 時，阻尼係數 C 值由 $3 \text{ kgf}\cdot\text{sec/mm}$ 提升至 $6 \text{ kgf}\cdot\text{sec/mm}$ 。隨著頻率升高至 25Hz ，其勁度由 100 kgf/mm 增加為 200 kgf/mm ，遲滯迴圈擬合如圖 2.5 所示。

第(4)組尺寸擬合結果，第(1)組模擬尺寸為對照組，當頻率為 1Hz ，孔隙寬度改變為 $h=0.3\text{mm}$ 時，阻尼係數 C 值由 $3 \text{ kgf}\cdot\text{sec/mm}$ 降為 $0.65 \text{ kgf}\cdot\text{sec/mm}$ 。隨著頻率升高至 25Hz ，其勁度由 100 kgf/mm 下降為 21 kgf/mm ，遲滯迴圈擬合如圖 2.6 所示。

2.3.3 小結

由參數分析的結果可以發現，由流體動力學推導之公式之遲滯迴圈會隨著頻率提升而偏斜產生勁度，這驗證了矽油之彈性行為可能使阻尼器發生勁度之效應。分析結果顯示頻率越高時，液流阻尼器之勁度效應越明顯。以第(1)組模擬尺寸為對照組，改變液流阻尼器設定值比較之後可發現，當活塞半徑 R 放大兩倍時，擬合之阻尼係數 C 值將大幅提升，勁度 K 值則會隨著頻率升高變大。當活塞頭厚度 L 放大兩倍時，其阻尼係數 C 值及勁度 K 值均有提升且約為兩倍。當孔隙寬度 h 放大兩倍時，其阻尼係數 C 值及勁度 K 值均下降。由一系列擬

合結果得知增加活塞半徑時，阻尼係數會大幅提升，但勁度值也將隨著頻率升高而大幅增加。而孔隙寬度增加時，阻尼係數將會下降，勁度隨著頻率提升之幅度也降低。



表 2.1 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果

(R=27.5mm,L=10mm,h=0.2mm)

Frequency(Hz)						
	1	5	10	15	20	25
Coefficients						
Modified Kelvin's model						
$C(\Omega)$ (kgf · sec /mm)	3	2.9	2.8	2.65	2.65	2.6
$K(\Omega)$ (kgf /mm)	0	5	20	35	70	100

表 2.2 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果

(R=55mm,L=10mm,h=0.2mm)

Frequency(Hz)						
	1	5	10	15	20	25
Coefficients						
Modified Kelvin's model						
$C(\Omega)$ (kgf · sec /mm)	45	41	39	39	37	36
$K(\Omega)$ (kgf /mm)	0	60	250	600	900	1450

表 2.3 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果

(R=27.5mm,L=20mm,h=0.3mm)

Frequency(Hz) Coefficients Modified Kelvin's model	1	5	10	15	20	25
$C(\Omega)$ (kgf · sec /mm)	6	5.8	5.6	5.5	5.2	5.2
$K(\Omega)$ (kgf /mm)	0	60	250	600	900	1450

表 2.4 Modified Kelvin's model 之參數擬合結果

(R=27.5mm,L=10mm,h=0.3mm)

Frequency(Hz) Coefficients Modified Kelvin's model	1	5	10	15	20	25
$C(\Omega)$ (kgf · sec /mm)	0.65	0.63	0.61	0.6	0.59	0.59
$K(\Omega)$ (kgf /mm)	0	1	3.5	8	15	21

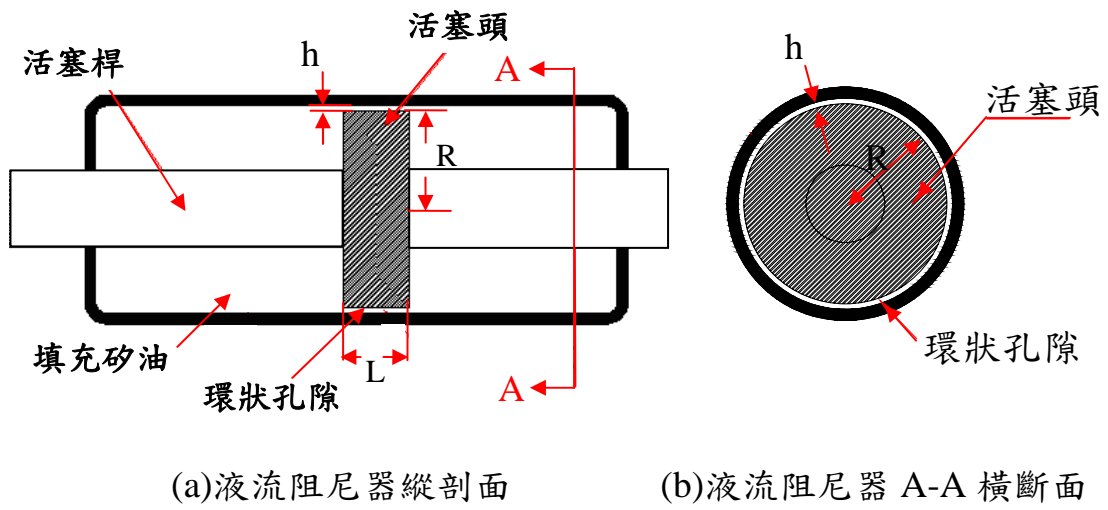


圖 2.1 液流阻尼器構造示意圖

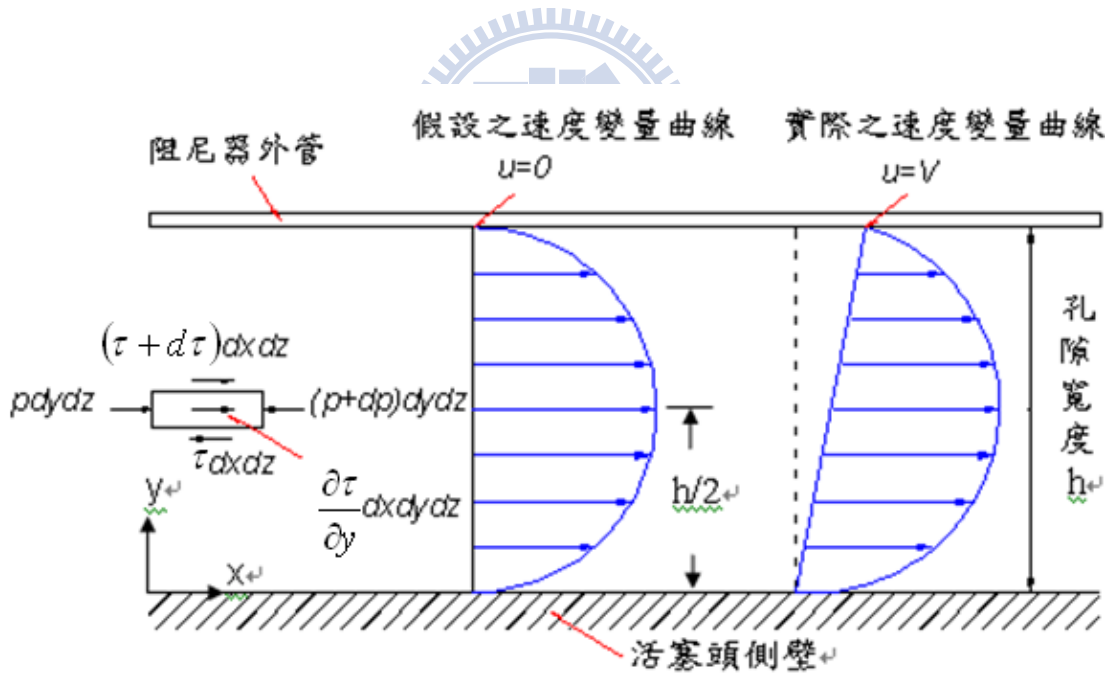


圖 2.2 液體元素在環狀孔隙中之自由體圖

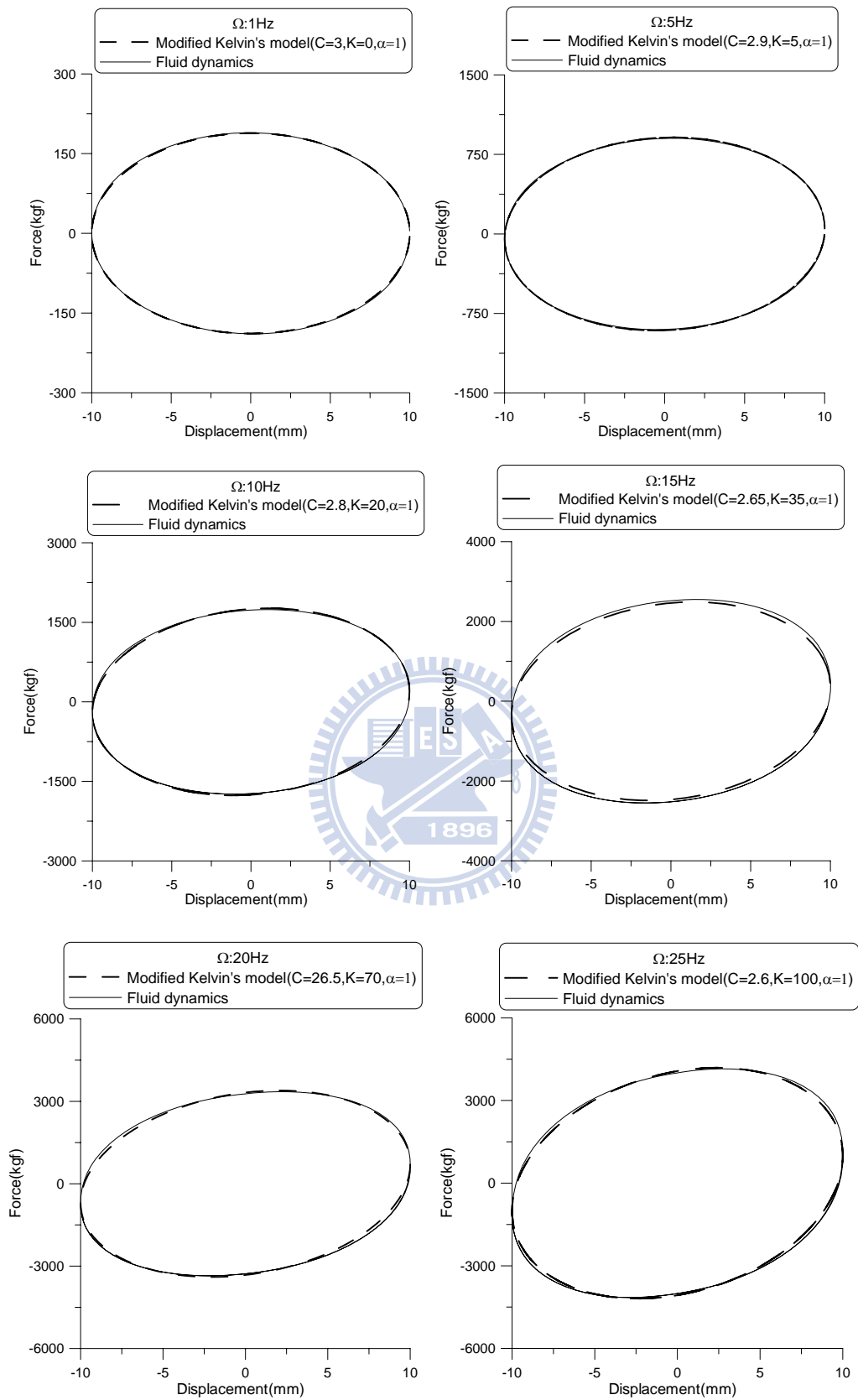


圖 2.3 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)

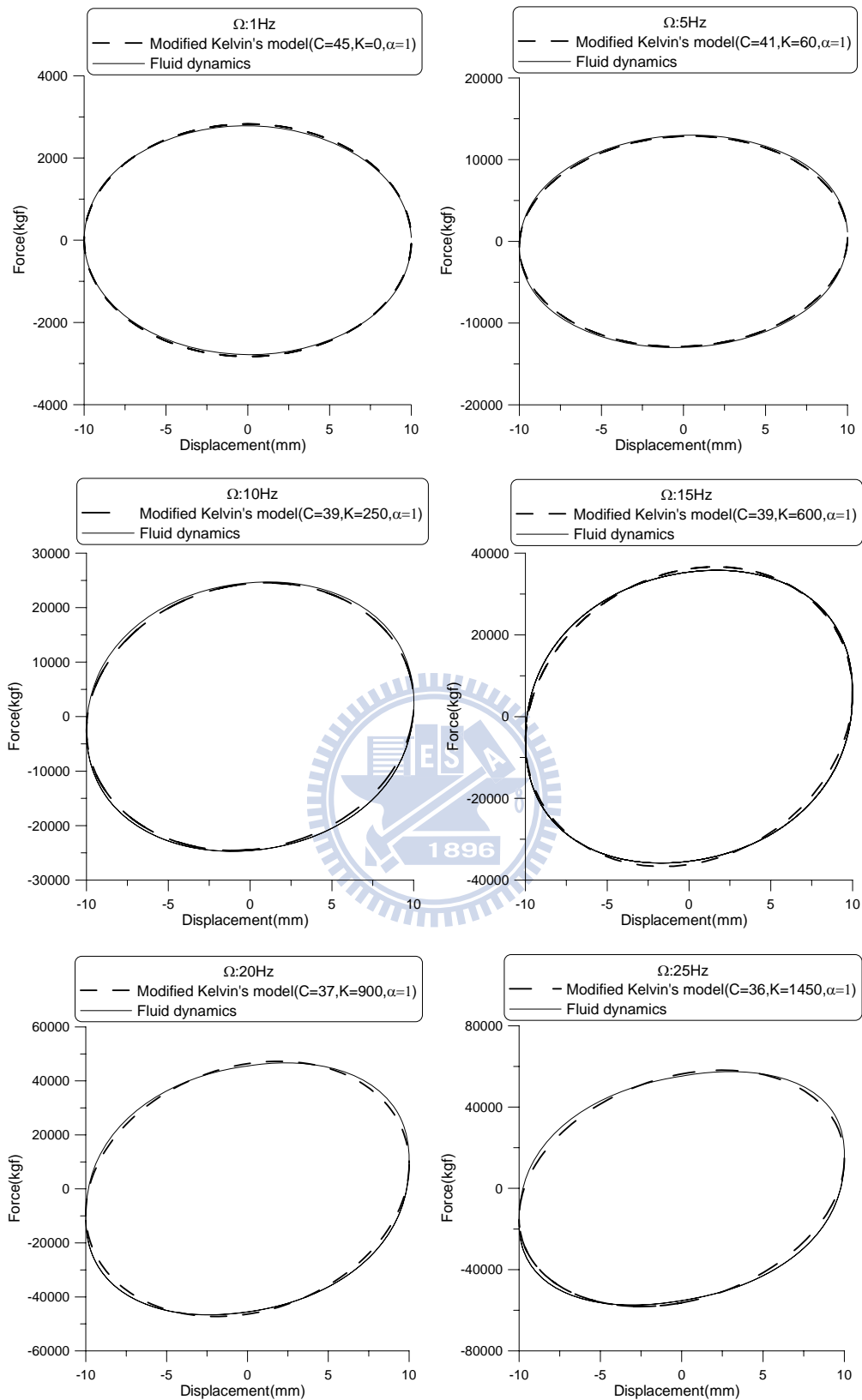


圖 2.4 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=55\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)

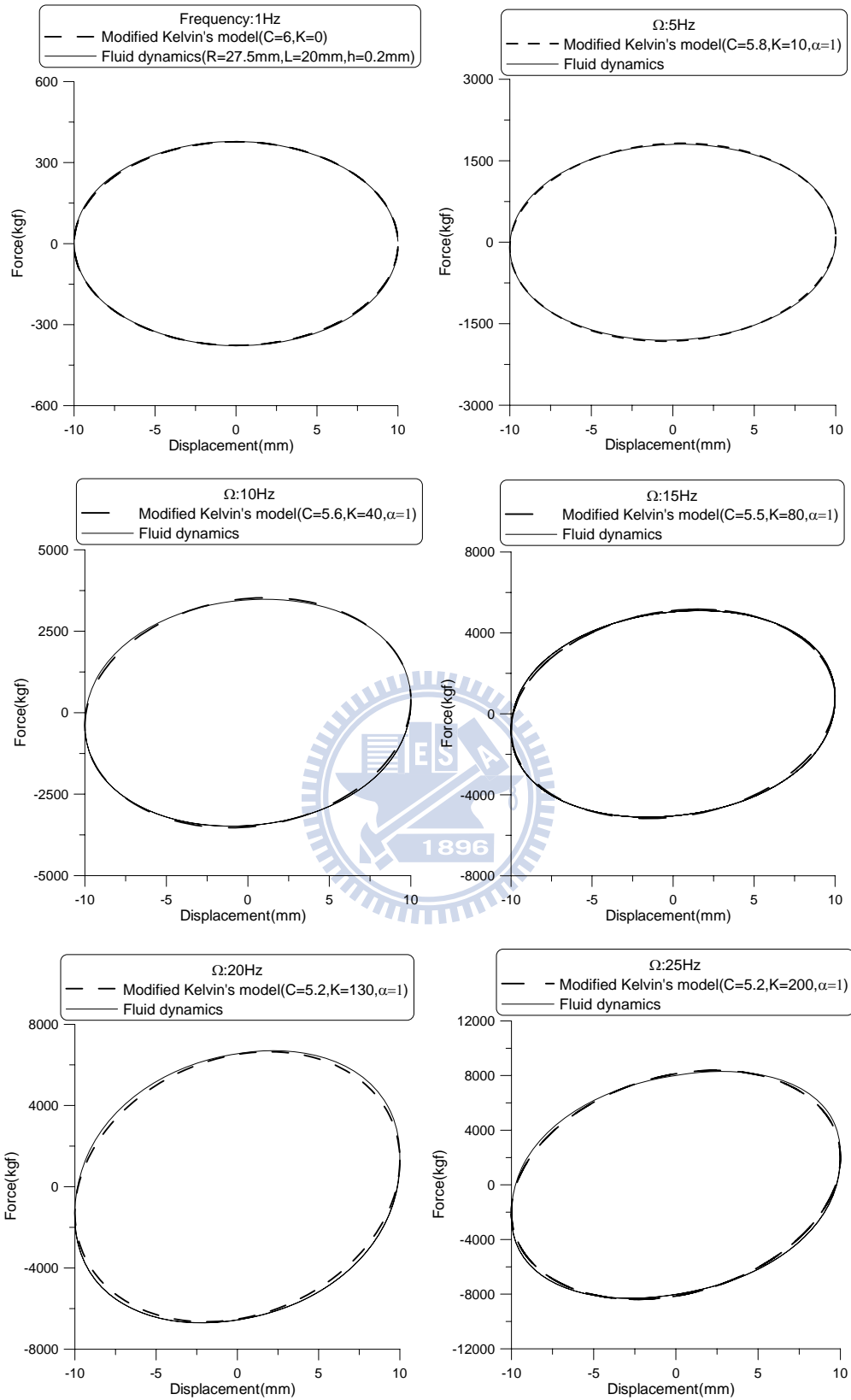


圖 2.5 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=20\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)

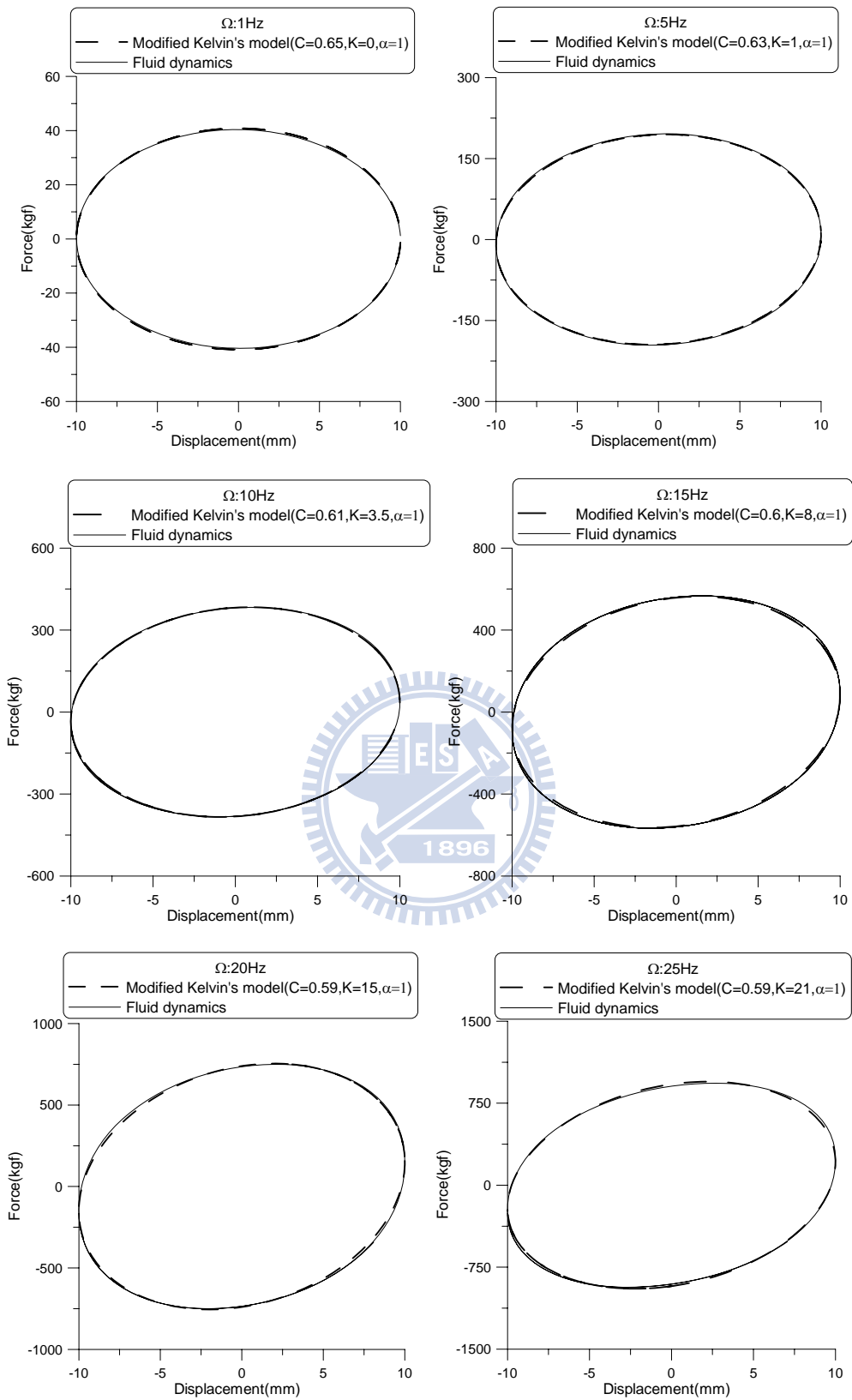


圖 2.6 液流阻尼器之遲滯迴圈擬合($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.3\text{mm}$)

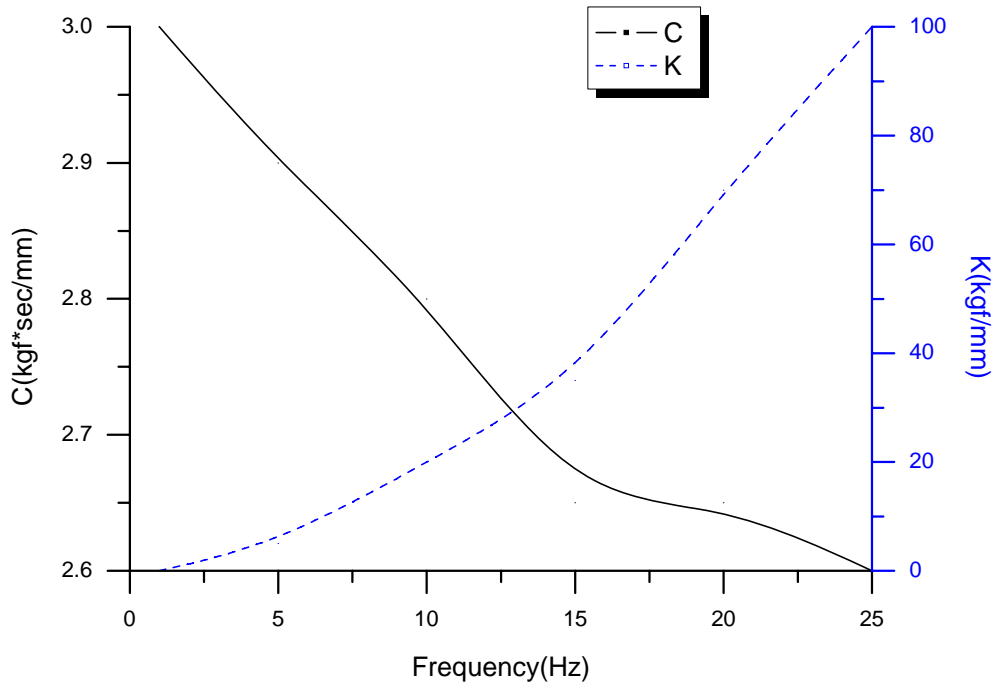


圖 2.7 Modified Kelvin's model 之參數對應圖

($R=27.5\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)

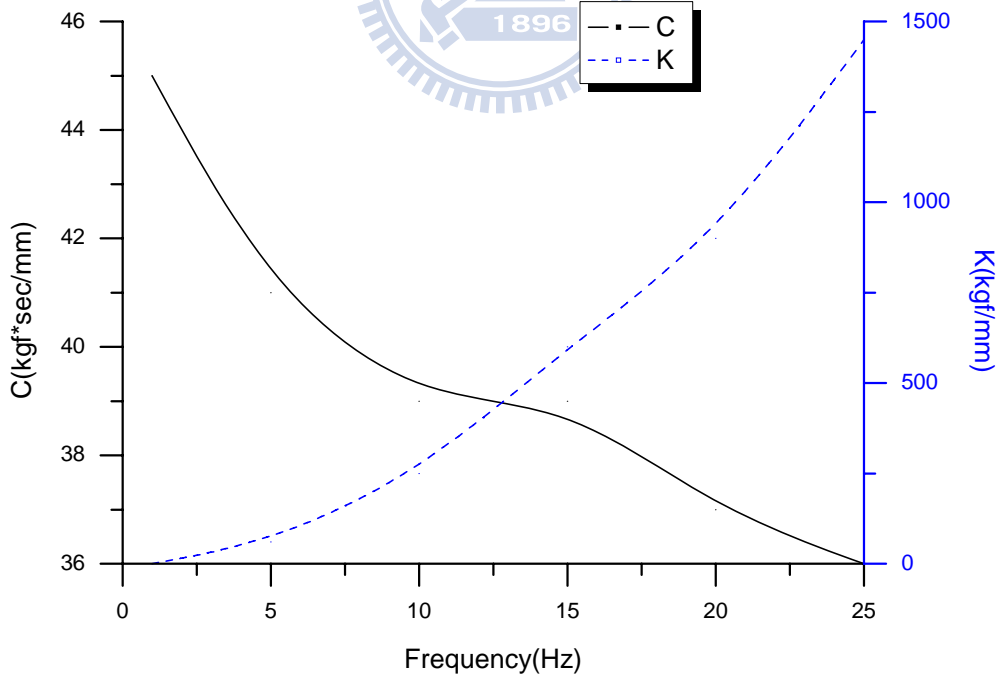


圖 2.8 Modified Kelvin's model 之參數對應圖

($R=55\text{mm}, L=10\text{mm}, h=0.2\text{mm}$)

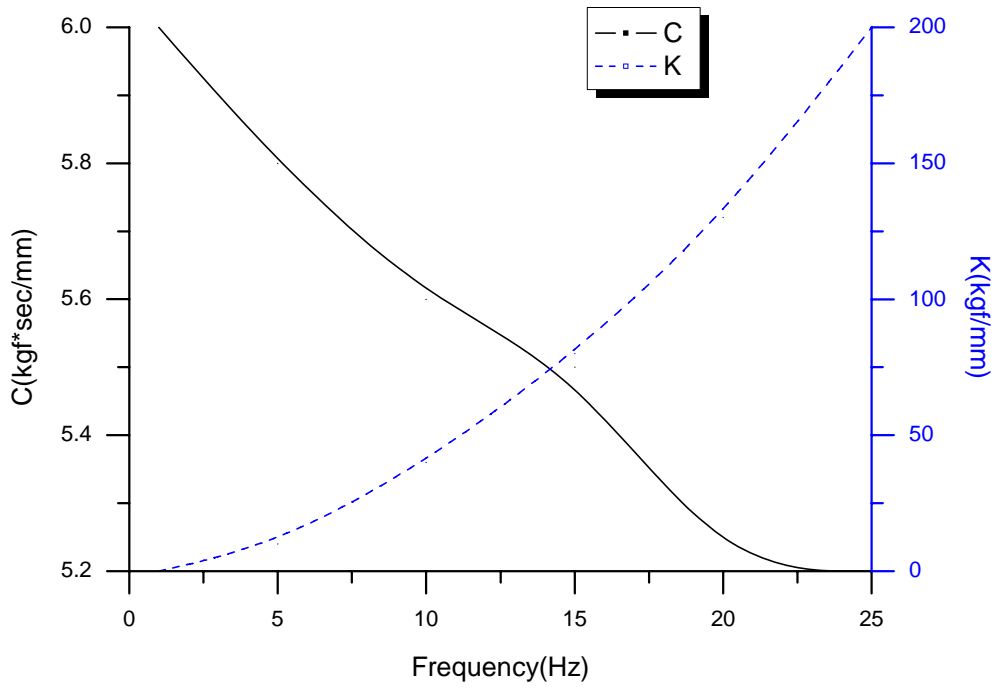


圖 2.9 Modified Kelvin's model 之參數對應圖

($R=27.5\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $h=0.2\text{mm}$)

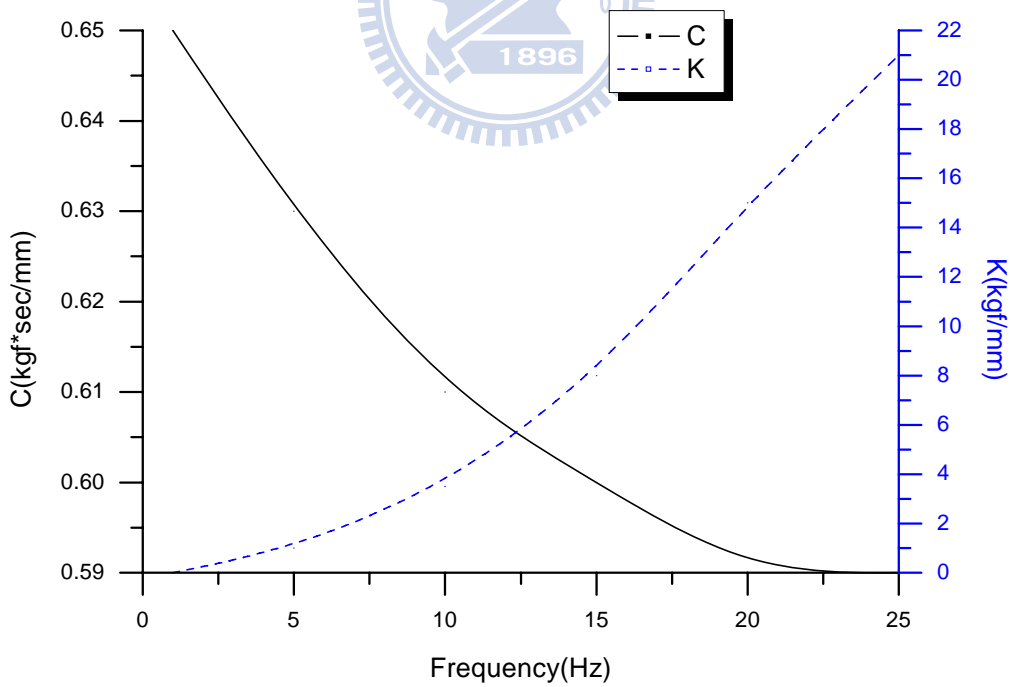


圖 2.10 Modified Kelvin's model 之參數對應圖

($R=27.5\text{mm}$, $L=10\text{mm}$, $h=0.3\text{mm}$)

第三章 含液流阻尼器結構之動力分析

3.1 前言

前章已針對液流阻尼器之流體力學理論作介紹，本章將進行結構加裝液流阻尼器之耐震性能評估。運動方程式將併入阻尼器之流體動力系統，其數值求解將採用狀態空間法。本節數值範例將以一座二層樓木構架為對象，探討其加裝液流阻尼器之減震效益，並與 ETABS 之分析結果進行擬合與比較。

3.2 運動方程式

圖 3.1 為液流阻尼器安裝於二層樓構架之示意圖，此結構有 2 個自由度，由力平衡關係可得到平衡方程式如下：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{u}_g - \begin{bmatrix} f_{d1} & 0 \\ 0 & f_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{u}_1) \\ \text{sgn}(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.1)$$

其中

m_1 、 m_2 為結構各樓層之質量；

c_1 、 c_2 為結構各樓層之阻尼係數；

k_1 、 k_2 為結構各樓層之勁度；

u_1 、 u_2 為結構各樓層之位移；

\dot{u}_1 、 \dot{u}_2 為結構各樓層之速度；

\ddot{u}_1 、 \ddot{u}_2 為結構各樓層之加速度；

\ddot{u}_g 為地表加速度；

sgn 為方向函數；

f_{d1} 、 f_{d2} 為液流阻尼器之阻尼力， $f_{di} = \Delta p_i \times A_{di}$ ($i=1,2$)；

A_{di} 為第 i 支液流阻尼器活塞頭之斷面積；

Δp_1 、 Δp_2 為活塞頭前後之壓力差，可分別表示如下：

$$\begin{aligned} \Delta p_1(t) = & e^{-666.67t} + \frac{6L}{\Delta y h} \left[-\frac{(R+h)^2}{h^2} \eta_1(t) \dot{u}_1(t) + \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_{y1}^t(y,t) \eta_1(t) \right] \\ & + \frac{9 \times 10^{-3} L}{\Delta y h} \left[\frac{(R+h)^2}{h^2} \dot{\eta}_1(t) \dot{u}_1(t) + \frac{(R+h)^2}{h^2} \eta_1(t) \ddot{u}_1(t) - \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_{y1}^t(y,t) \dot{\eta}_1(t) \right] \end{aligned} \quad (3.2a)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_2(t) = & e^{-666.67t} + \frac{6L}{\Delta y h} \left[-\frac{(R+h)^2}{h^2} \eta_2(t) \dot{u}_2(t) + \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_{y2}^t(y,t) \eta_2(t) \right] \\ & + \frac{9 \times 10^{-3} L}{\Delta y h} \left[\frac{(R+h)^2}{h^2} \dot{\eta}_2(t) \dot{u}_2(t) + \frac{(R+h)^2}{h^2} \eta_2(t) \ddot{u}_2(t) - \left(\frac{2R}{h} + 1 \right) u_{y2}^t(y,t) \dot{\eta}_2(t) \right] \end{aligned} \quad (3.2b)$$

其中

L ：活塞頭厚度；

R ：活塞頭之半徑；

h ：孔隙間距；

$\eta_1(t)$ 、 $\eta_2(t)$ ：各樓層液流阻尼器之油品黏度；

$u_{y1}^t(y,t)$ 、 $u_{y2}^t(y,t)$ ：各液流阻尼器前一刻流速之已知值。

Δp_1 中之黏度 η_1 、 $\dot{\eta}_1$ 表示如下：

$$\eta_1(t) = \eta_0 \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{u}_1(t) \right\}^b \right\}^{(a-1)/b} \quad (3.3a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1(t) = & \left\{ \eta_0 \left(\frac{a-1}{b} \right) \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{u}_1(t) \right\}^b \right\}^{[(a-1)/b]-1} \right\} \\ & \times \left\{ b \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{u}_1(t) \right]^{b-1} \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \ddot{u}_1(t) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.3b)$$

Δp_2 中之黏度 η_2 、 $\dot{\eta}_2$ 表示如下：

$$\eta_2(t) = \eta_0 \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} \dot{u}_2(t) \right\}^b \right\}^{(a-1)/b} \quad (3.4a)$$

$$\dot{\eta}_2(t) = \left\{ \eta_0 \left(\frac{a-1}{b} \right) \left\{ 1 + \left\{ \frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} [\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)] \right\}^b \right\}^{[(a-1)/b]-1} \right\} \\ \times \left\{ b \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} [\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)] \right]^{b-1} \right\} \left[\frac{2\kappa(R+h)^2}{h[(R+h)^2 - R^2]} [\ddot{u}_2(t) - \ddot{u}_1(t)] \right] \quad (3.4b)$$

其中

κ ：時間常數；

a 、 b ：油品之流變學（rheological）常數。

3.3 數值解析方法—狀態空間法

式 (3.1) 之運動方程式可簡化為：

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u}(t) = -M\ddot{\mathbf{u}}_g(t) - \mathbf{F}_d(t) \quad (3.5)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}。$$

\mathbf{F}_d ：液流阻尼器所提供之阻尼力。

$$\mathbf{F}_d = \begin{bmatrix} f_{d1} & 0 \\ 0 & f_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{u}_1) \\ \text{sgn}(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} ; \quad \dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

上式可以狀態空間表示如下：

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g(t) + \begin{bmatrix} -M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{F}_d(t) \quad (3.6a)$$

或

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{E}\ddot{u}_g(t) + \mathbf{G}\mathbf{F}_d(t) \quad (3.6b)$$

其中

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix} \text{ 為 } 4 \times 1 \text{ 之狀態向量；}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix} \text{ 為 } 4 \times 4 \text{ 之系統矩陣；}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} -I \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 為 } 4 \times 1 \text{ 之地震力分配矩陣；}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 為 } 4 \times 2 \text{ 之阻尼力分配矩陣。}$$

將 (3.6) 式做 Laplace transform 可以得到：

$$z(s) = H(s)z(t_0) + H(s)[E\ddot{u}_g(s) + GF_d(s)] \quad (3.7)$$

其中

$$H(s) = (sI - A)^{-1} ;$$

$z(t_0)$ 為初始條件。

對 (3.7) 式取 Laplace 逆轉換至時域，可得到結構運動方程式之時域

解如下：

$$z(t) = e^{A(t-t_0)}z(t_0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}[E\ddot{u}_g(\tau) + GF_d(\tau)]d\tau \quad (3.8)$$

欲展開式 (3.8) 中之積分式時， $\ddot{u}_g(\tau)$ 、 $F_d(\tau)$ 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，取

$t = k\Delta t$ 、 $t_0 = (k-1)\Delta t$ 、 $\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$ 、 $\ddot{u}_g[k] = \ddot{u}_g(k\Delta t)$ 及 $\mathbf{F}_d[k] = \mathbf{F}_d(k\Delta t)$

時，則

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

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

狀態方程式 (3.6b) 之離散時間解可以由式 (3.8) 積分得到如下：

$$\mathbf{z}[k] = A_D \mathbf{z}[k-1] + E_0 \ddot{u}_g[k-1] + E_1 \ddot{u}_g[k] + G_0 \mathbf{F}_d[k-1] + G_1 \mathbf{F}_d[k] \quad (3.10)$$

其中

$A_D = e^{A\Delta t}$ 為 4×4 之離散時間系統矩陣；

$$E_0 = \left[(A)^{-1} A_D + \frac{1}{\Delta t} (A)^{-2} (I - A_D) \right] E$$

為 4×1 之前瞬時離散時間地震力分配矩陣；

$$E_1 = \left[-(A)^{-1} A_D + \frac{1}{\Delta t} (A)^{-2} (A_D - I) \right] E$$

為 4×1 之後瞬時離散時間地震力分配矩陣；

$$G_0 = \left[(A)^{-1} A_D + \frac{1}{\Delta t} (A)^{-2} (I - A_D) \right] G$$

為 4×2 之前瞬時離散時間油壓阻尼力分配矩陣；

$$G_1 = \left[-(A)^{-1} A_D + \frac{1}{\Delta t} (A)^{-2} (A_D - I) \right] G$$

為 4×2 之後瞬時離散時間油壓阻尼力分配矩陣。

式 (3.10) 中之 F_d 為非線性之未知函數，其求解過程須透過迭代方式求得。式 (3.5) 中 u 、 \dot{u} 為未知，而阻尼力 F_d 又為 \dot{u} 、 \ddot{u} 之函數，因此其解必須透過迭代過程修正阻尼力直至收斂為止。迭代步驟如下：
令此刻之假設阻尼力與前一刻阻尼力相等，並將其代回式 (3.10) 得

到更新之速度 ($\dot{u}[k]$)，由式 (3.6) 得到更新之加速度 $\ddot{u}[k]$ ，將上一步驟求出之 $\dot{u}[k]$ 、 $\ddot{u}[k]$ 代回式 (3.2) 計算阻尼力 F_d' 。在此定義一誤差函數 (ER)、 f_{di} 為此刻阻尼力及 f_{di}' 為更新阻尼力：

$$ER = \left| \frac{f_{di}' - f_{di}}{f_{di}'} \right| \quad i = 1, 2 \quad (3.12)$$

若誤差函數之絕對值大於容許誤差值 (ε)，則更新阻尼力 ($f_{di} = f_{di}'$)，重覆前述步驟反覆迭代，直到誤差函數小於容許誤差值為止。圖 3.2 為液流阻尼器求解阻尼力之迭代流程。

3.4 MATLAB 數值模擬分析

建立含液流阻尼器結構之運動方程式後，本研究乃以 MATLAB 程式進行數值模擬分析，探討其加裝液流阻尼器之減震效益。數值模擬範例將以一座二層樓木構架為對象。

3.4.1 模型建立與模擬規畫

(1) 建立木構架

本次模擬之結構係根據交通大學結構實驗室之木造二層樓結構模型做為對象，詳細之構件尺寸資料參照表 3.1。經由木造空構架之振動台試驗，以其各樓層之加速度反應歷時進行 ARX model 系統識

別，可得整體結構之第一模態之頻率及阻尼比分別為 2.45Hz 及 3.64%，第二模態之週期以及阻尼比分別為 11.52Hz 及 2.26%。識別所得之各樓層模態如圖 3.3 所示。ARX 系統識別分析之相關理論詳附錄 A。

模擬分析時，結構之質量、阻尼係數及勁度均採用木構架模型之實際參數，其勁度係由柱尺寸計算而得知，阻尼係數則由系統識別結果(阻尼比、振頻及振態)推算出來。

(2) 液流阻尼器設定值

根據 Chien-Yuan Hou【20】，矽油之相關材料參數如下：鬆弛時間 $\lambda_1=0.0015\text{s}$ 、初始黏度 $\eta_0=1.002\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、時間常數 $\kappa=7.2\times 10^{-6}$ 、流體之流變學常數 $a=0.43$ 及 $b=0.6$ ；可變之設定值有阻尼器活塞頭半徑 (R)、活塞頭厚度(L)及孔隙寬度(h)等。本次模擬將活塞頭厚度與孔隙寬度固定為 5mm 及 0.55mm，分別以不同阻尼器之活塞頭半徑來代表不同容量(capacity)之阻尼器，探討木構架加裝液流阻尼器之減震效益。本例考慮之活塞頭半徑尺寸如表 3.2 所示。

(3) 模擬規劃

本模擬分析範例將考慮於二層樓木結構模型之各樓層安裝液流阻尼器進行分析。輸入震波係以國際結構控制協會 (International

Structural Control Society) 所建議之 Kobe Earthquake 作為輸入地表擾動，震波強度為 $PGA=1g$ ，震波之歷時如圖 3.3 所示。

3.4.2 模擬結果

在 Kobe 地震($PGA=1g$)擾動下，不同活塞頭半徑之各樓層加速度反應峰值歸納於表 3.3。結果顯示，在不同活塞頭半徑下，結構一、二樓層裝設液流阻尼器後之加速度反應皆有折減效益，各樓層之加速度反應歷時比較如圖 3.4~3.10。當液流阻尼器之活塞頭半徑($R=25mm$)時，RF 之加速度峰值折減效益為 55.1%、2F 為 23.6%。隨著活塞頭半徑變小，液流阻尼器之遲滯迴圈消能面積減少，因此各樓層之加速度峰值折減率亦略減。當活塞頭半徑($R=10mm$)時，RF 之加速度峰值折減效益降為 37.9%、2F 之折減效益為 14.0%。各樓層阻尼器遲滯迴圈如圖 3.11~3.17。

各樓層加速度反應之均方根值 (root-mean-squares, RMS) 的比較歸納於表 3.4。當液流阻尼器之活塞頭半徑($R=25mm$)時，RF 之加速度 RMS 值折減效益為 53.3%、2F 之折減效益為 29.4%。隨著活塞頭半徑變小，各樓層之加速度均方根值折減率亦略減。當活塞頭半徑($R=10mm$)時，RF 之折減效益降為 30.1%，2F 降為 8.5%。

3.5 ETABS 數值模擬分析

3.5.1 ETABS 簡介

ETABS 歷經多次的修改與改版後，成為功能強大之全視窗介面結構分析軟體。使用者可在三維空間中建立幾何形狀的基本分析模型，桿件元素的斷面幾何性質，鋼筋混凝土材料、鋼構材、非線性元素力學性質、或是新定義材料之材料特性，以至於靜力分析、模態分析、反應譜分析、歷時分析、推進分析及結構分析等，皆可輕易地於 ETABS 視窗介面中快速、準確的完成。

ETABS 之分析結果可完全以圖形介面顯示，如靜力載重變形、動力振形、軸力、剪力、彎矩圖、應力分佈圖、遲滯迴圈圖及歷時結果分析等。視窗圖形化的呈現，可讓使用者能夠清楚地了解結構模型的力學行為。此外，標準化之文字格式輸出結果，可供使用者從事後處理工作。

3.5.2 定義木材性質與構件斷面

使用 ETABS 程式模擬木造材質之特性時，必須先瞭解所使用的結構用木材(包含製材、集成材、結構板材、結構用組合材等)之材種為哪一種樹木品種，再依照樹種的分類來查詢其木造材質之彈性模數、容許應力值以及剪力模數等數值。而查詢的標準以“木構造建築

物設計及施工技術規範”【23】中所提供之表格與數值為主要依據。目前木造結構建築係以“木構造建築物設計及施工技術規範”作為檢核標準，檢核內容包含結構之分析、材料容許應力及構材設計等。表 3.5 為常用樹種分類，以針葉與闊葉樹種的不同分門別類，再由等級 I、II、III…之順序來區分硬度之大小。表 3.6 為普通結構材纖維方向之容許應力，可以利用表 3.5 之分類來找出所使用結構木材之容許拉應力、容許壓應力及容許剪應力，在木構架結構斷面設計上均參考此表格做為檢核之標準。表 3.7 為木材纖維方向之彈性模數，使用 ETABS 軟體進行模擬時，因為內建之材質沒有木造材料，所以需要輸入材料之彈性模數值及密度模擬出木造材料之性質。而結構用木材之密度可由文獻【24】所提供之全台灣樹木品種密度查詢得知，依照不同樹齡、年輪大小區分，其密度亦有所不同。

參考上述之表格所提供之結構用木材數值，即可以在 ETABS 軟體中適當地模擬出木造結構之模型參數，配合實驗室中之木造結構實際尺寸進行地震反應的分析。首先需定義材料性質，其設定版面如圖 3.18 所示：

其中，

Mass per unit Volume：單位體積之質量；

Weight per unit Volume：單位體積之重量；

Modulus of Elasticity：彈性模數；

Poisson's ratio：波松比；

Coeff of Thermal Expansion：熱膨脹係數。

因為木材性質是由使用者定義，所以在材料性質中之 Type of Design 設定為「None」。已知實際木造結構的柱及梁等尺寸可於 Frame Section 自行定義桿件斷面，如圖 3.19 所示：

其中

Import：匯入斷面定義檔

Add：加入一斷面



選擇 Add/Rectangular，依照實際尺寸進行設定。如圖 3.20 所示，斷面對話方塊隨斷面幾何形狀之不同而有所不同。圖中左側視窗各項參數鍵入完畢後，右側視窗會顯示該斷面之幾何形狀。

3.5.3 阻尼器模型參數設定

ETABS 程式內建有 Damper 元素，可直接用於液流阻尼器之模擬。Damper 設定值的部份分為線性(Linear Properties)與非線性(Nonlinear Properties)兩種設定值，如圖 3.21 所示。Damper 之模型

採串聯形式 Maxwell 模式，如圖 3.22(a)所示。其力與位移的關係可由下式表示：

$$F = ky = C\dot{x}^\alpha$$

其中， F ：阻尼力；

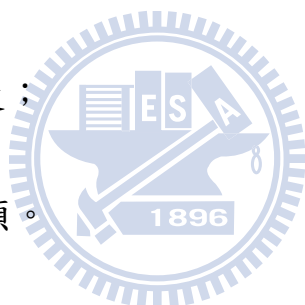
k ：彈簧常數；

C ：阻尼係數；

y ：彈簧之位移；

\dot{x} ：阻尼器之速度；

α ：速度之指數項。



為了使 Damper 忽略彈簧所產生的彈力，所以在分析時 k 值係給一個很大的數值，使 Damper 之行為接近純阻尼的情形。

3.5.4 模型建立

模擬分析原本即須作某種程度之理想假設，為使分析結果儘可能接近實際狀況，本例仍將以交通大學結構實驗室之二層樓木造構架模型為對象進行分析，並與 MATLAB 之結果進行比較。阻尼器係以對角斜撐型式配置，如圖 3.23 所示，圖 3.24 為木造空構架之 ETABS 模型。

ETABS 程式模擬之木製空構架是否能準確模擬出結構特性與使用之木材材料參數有關，木材之材料特性(彈性模數、密度等...)可能會因為含水率不同及裁切時之損傷而與規範(表 3.5~3.7)提供之數值有差異。本研究分析時乃經由調整材料參數之設定值，使模擬結構之週期與木造構架之系統識別結果相符。經由計算調整後所得之木材彈性模數為 $70 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ，密度為 $5.3 \times 10^{-4} \text{ kgf/cm}^3$ 。

3.5.5 阻尼器參數擬合

為建立流體動力學所呈現之液流阻尼器特性參數與 ETABS 分析之關聯性，本節將根據前節 MATLAB 程式之分析結果來擬合 ETABS 程式中之內建阻尼器模型參數，即找出液流阻尼器之阻尼係數 C 與速度指數 α 等特性常數，作為未來實際應用時之參考。

3.5.6 擬合結果

以 Kobe 地震($\text{PGA}=1\text{g}$) 作為輸入地表擾動，比較 MATLAB 與 ETABS 分析之各層樓絕對加速度值、遲滯迴圈是否相同。當液流阻尼器活塞半徑 $R=25\text{mm}$ ，ETABS 擬合結合所對應之阻尼器 C 值為 26、 α 值為 1.1，則二者所分析之各層樓絕對加速度值幾乎重合，如圖 3.25 所示；阻尼器之遲滯迴圈趨勢也相當接近，如圖 3.32 所示。當活塞半徑 R 值為 22.5mm 時，ETABS 擬合結果所對應之阻尼器之 C

值為 21、 α 值為 1.1，各層樓絕對加速度值與阻尼器遲滯迴圈分別如圖 3.26 及 3.33 所示。R 值依序遞減 2.5mm 至 R=10mm 之各例，其擬合結果亦相當吻合。不同活塞半徑 R 值所對應之阻尼器特性常數 C 值及 α 值歸納於表 3.8。各層樓絕對加速度值比較如圖 3.27~3.31，各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較如圖 3.34~3.38。

3.6 小結

為了有效的運用流體動力學理論推導之液流阻尼器公式，使用活塞半徑之變數來改變阻尼器出力特性，所以本章利用 ETABS 程式來擬合，找出流體動力學理論推導之液流阻尼器公式與 ETABS 之關聯性。將擬合之七組活塞頭半徑 R 值與對應之阻尼係數 C 值構成圖表，可以看出當活塞頭半徑 R 值增加時阻尼係數 C 值也跟著增加，且將每個點連接後發現活塞半徑 R 值與阻尼係數 C 值頗接近線性的關係，由多項式擬合可得 $y = 0.0419x^2 + 0.2333x - 5.75$ ，如圖 3.39 所示，由此可得知當活塞頭半徑等比例增大時，其阻尼係數也會增加，且兩者對應關係可藉由多項式算出。

表 3.1 木造空構架結構模型尺寸

總高度	500 cm
樓層高度	250 cm
樓層寬度	200 cm
柱斷面	14 × 9 cm
樓板厚	3 cm

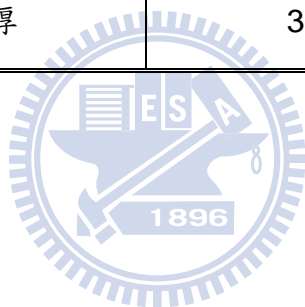


表 3.2 模擬分析所考慮之液流阻尼器活塞半徑

活塞頭半徑 R (mm)						
25	22.5	20	17.5	15	12.5	10

表 3.3 各樓層加速度峰值反應比較

(Input= Kobe Earthquake, PGA=1g)

<i>R=25 mm</i>			<i>R=22.5 mm</i>			
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	2.418	1.085	55.1	2.418	1.098	54.6
2F	1.384	1.056	23.6	1.384	1.062	23.3
<i>R=20 mm</i>			<i>R=17.5 mm</i>			
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	2.418	1.082	55.3	2.418	1.097	54.6
2F	1.384	1.055	23.8	1.384	1.062	23.3
<i>R=15 mm</i>			<i>R=12.5 mm</i>			
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	2.418	1.100	54.5	2.418	1.212	49.9
2F	1.384	1.056	23.7	1.384	1.007	27.3
<i>R=10 mm</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	2.418	1.503	37.9			
2F	1.384	1.191	14.0			

表 3.4 各樓層加速度均方根值比較

(Input=Kobe Earthquake, PGA=1g)

<i>R=25 mm</i>				<i>R=22.5 mm</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.302	0.141	53.3	0.303	0.149	50.9
2F	0.192	0.136	29.4	0.193	0.141	27.0
<i>R=20 mm</i>				<i>R=17.5 mm</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.303	0.140	53.9	0.303	0.148	51.0
2F	0.193	0.135	30.0	0.193	0.141	27.1
<i>R=15 mm</i>				<i>R=12.5 mm</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.303	0.162	46.4	0.303	0.182	39.8
2F	0.193	0.149	22.8	0.193	0.161	16.8
<i>R=10 mm</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.303	0.212	30.1			
2F	0.193	0.177	8.5			

表 3.5 常用樹種分類【23】

針闊葉樹別	類別	樹種
針葉樹	I 類	花旗松、俄國落葉松
	II 類	羅漢柏、扁柏、羅森檜、南方松(1)
	III 類	赤松、黑松、落葉松、鐵杉、北美鐵杉、南方松(1)、 世界爺
	IV 類	冷杉、蝦夷松、檜松、朝鮮松、柳杉、西部側柏、雲 杉、杉木、台灣杉、放射松
闊葉樹	I 類	木堅木
	II 類	栗木、櫟木(2)、山毛櫟(2)、檫木、油脂木、冰片樹、 硬槭木
	III 類	柳桉

表 3.6 普通結構木材纖維方向之容許應力 (單位: kgf/cm^2) 【23】

樹種		長期容許應力				短期容許應力 S^f
		L^f_c	L^f_t	L^f_b	L^f_s	
針 葉 樹	I 類	75	55	95	8	長期容許應力 之 2 倍
	II 類	70	55	90	7	
	III 類	65	50	85	7	
	IV 類	60	45	75	6	
闊 葉 樹	I 類	90	80	130	14	
	II 類	70	60	100	10	
	III 類	70	50	90	6	

表 3.7 木材纖維方向之彈性模數 (單位： 10^3 kgf/cm^2) 【23】

樹種		E	
		普通結構材	上等結構材
針 葉 樹	I 類	100	110
	II 類	90	100
	III 類	80	90
	IV 類	70	80
闊 葉 樹	I 類	100	110
	II 類	80	90
	III 類	70	80

表 3.8 模擬之活塞半徑與所對應之阻尼係數及速度指數

活塞頭半徑 R (mm)	25	22.5	20	17.5	15	12.5	10
阻尼係數 C	26	21	16	11	7	3.5	1
速度指數 α	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

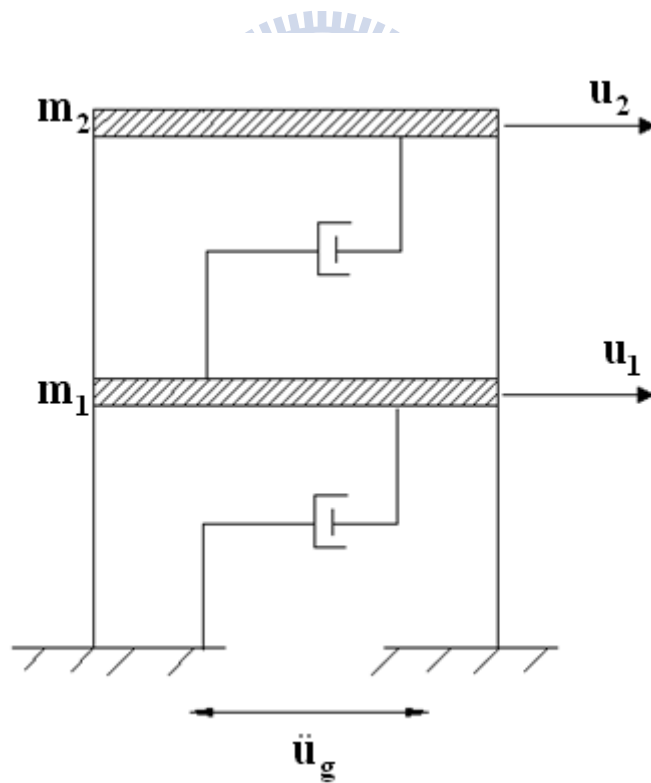


圖 3.1 二層樓結構加裝液流阻尼器之示意圖

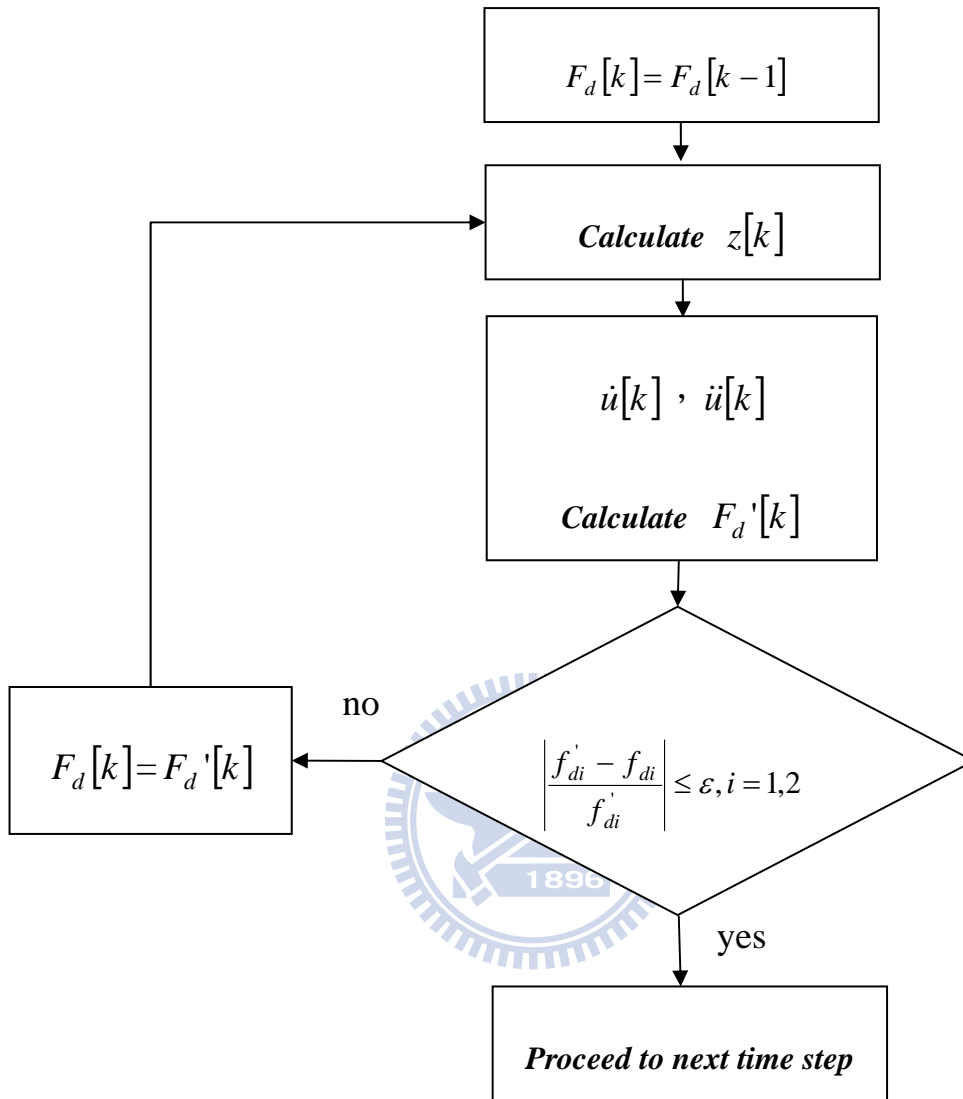
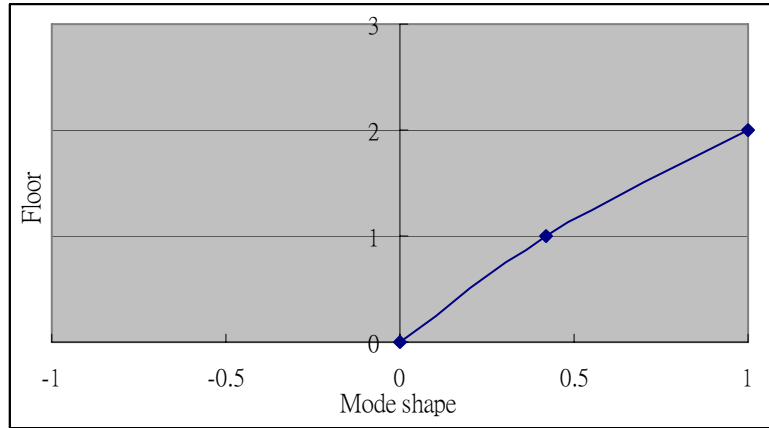
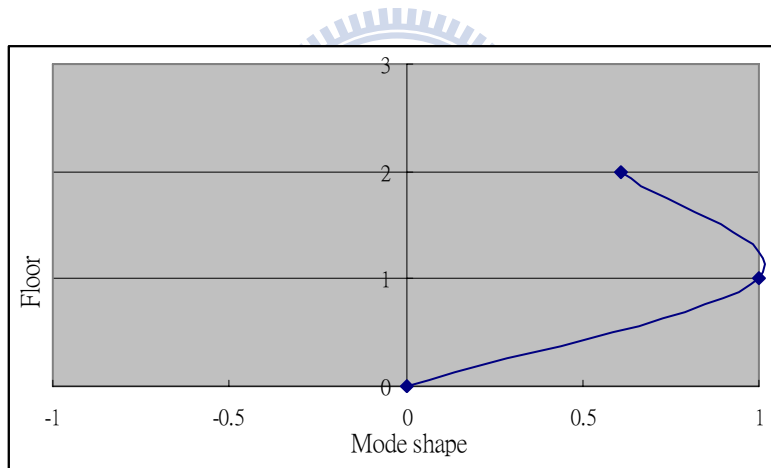


圖 3.2 非線性液流阻尼器出力迭代分析流程圖



(a) First Mode



(b) Second Mode

圖 3.3 二層樓木造結構之振態

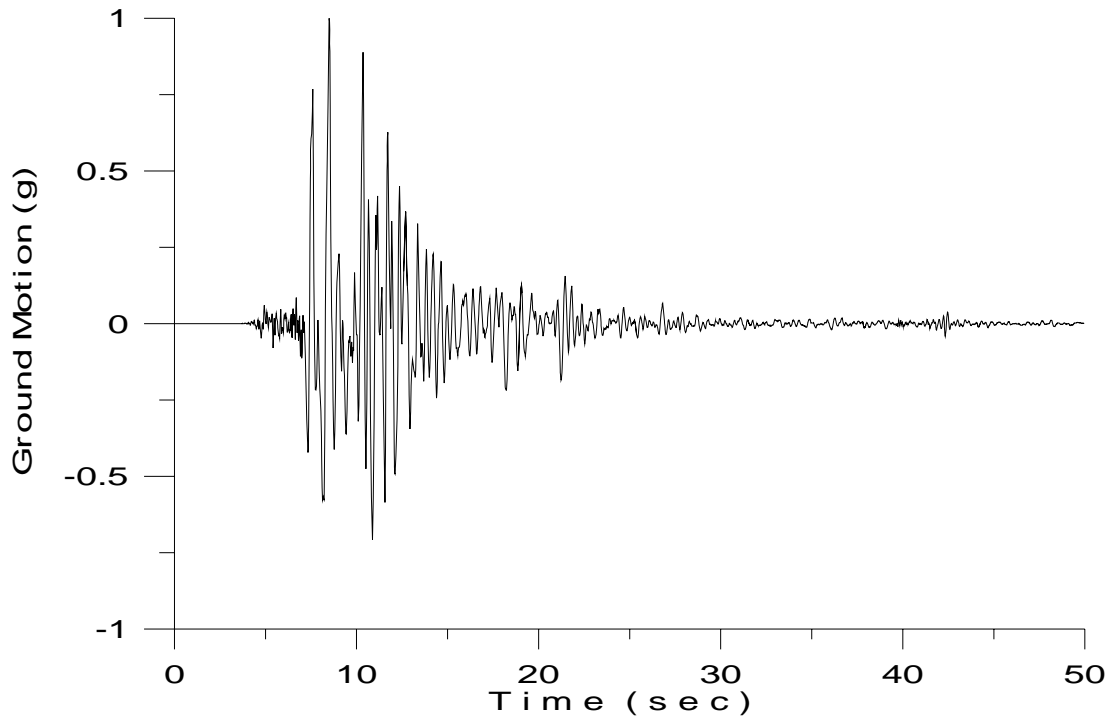


圖 3.4 輸入震波歷時(Kobe Earthquake)

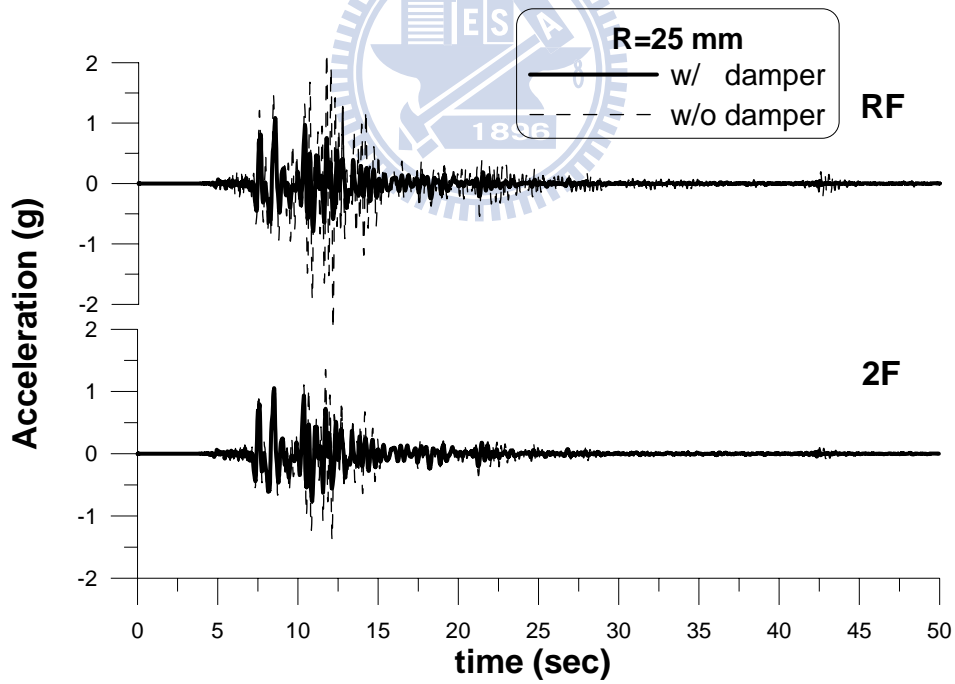


圖 3.5 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=25mm, Input=Kobe earthquake)

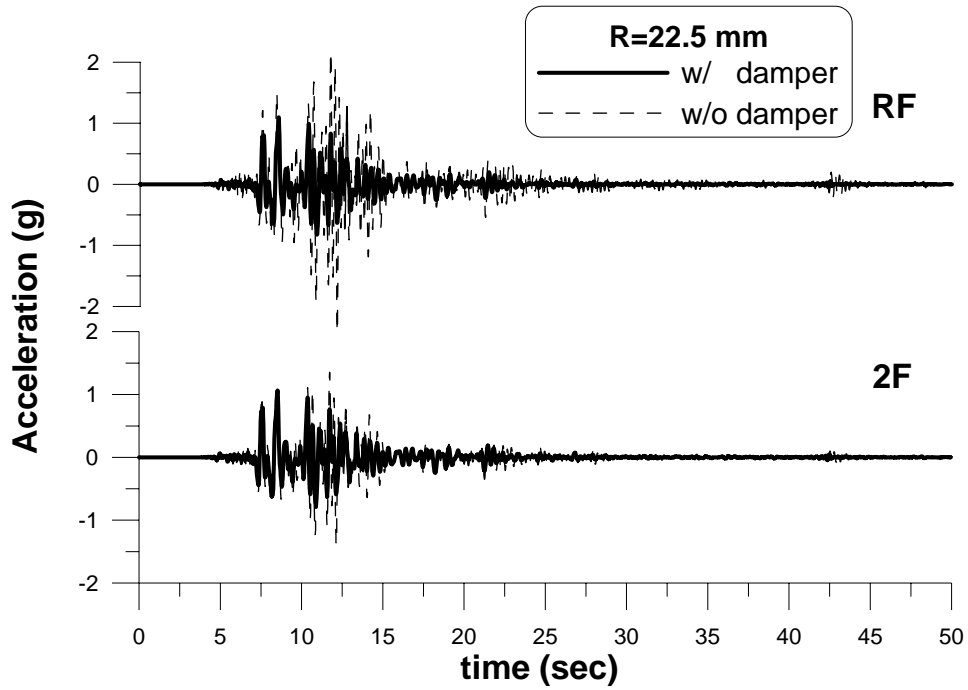


圖 3.6 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=22.5mm, Input=Kobe earthquake)

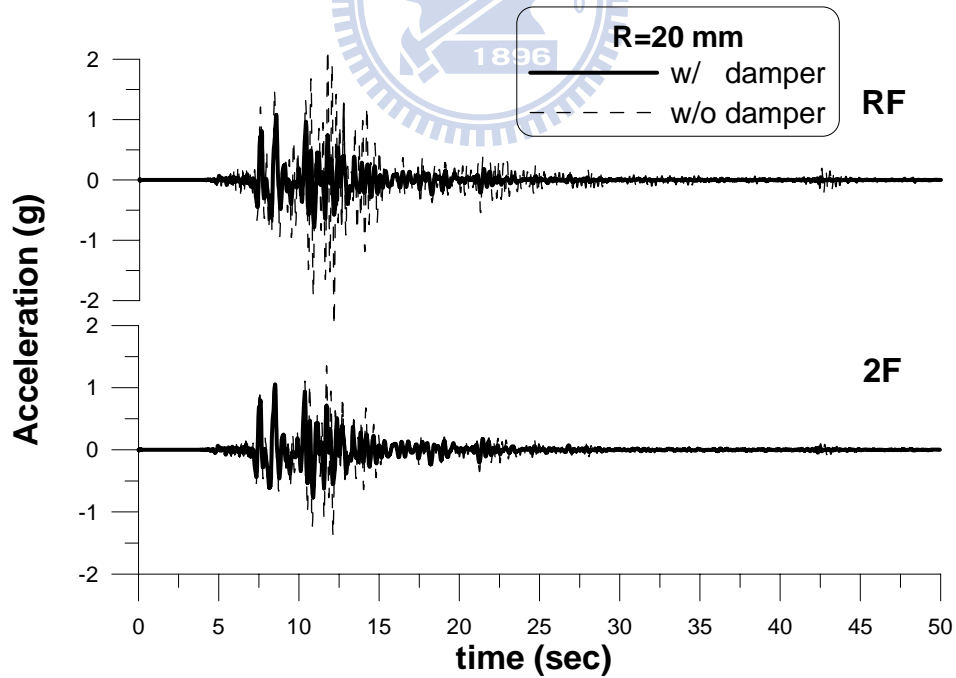


圖 3.7 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=20mm, Input=Kobe earthquake)

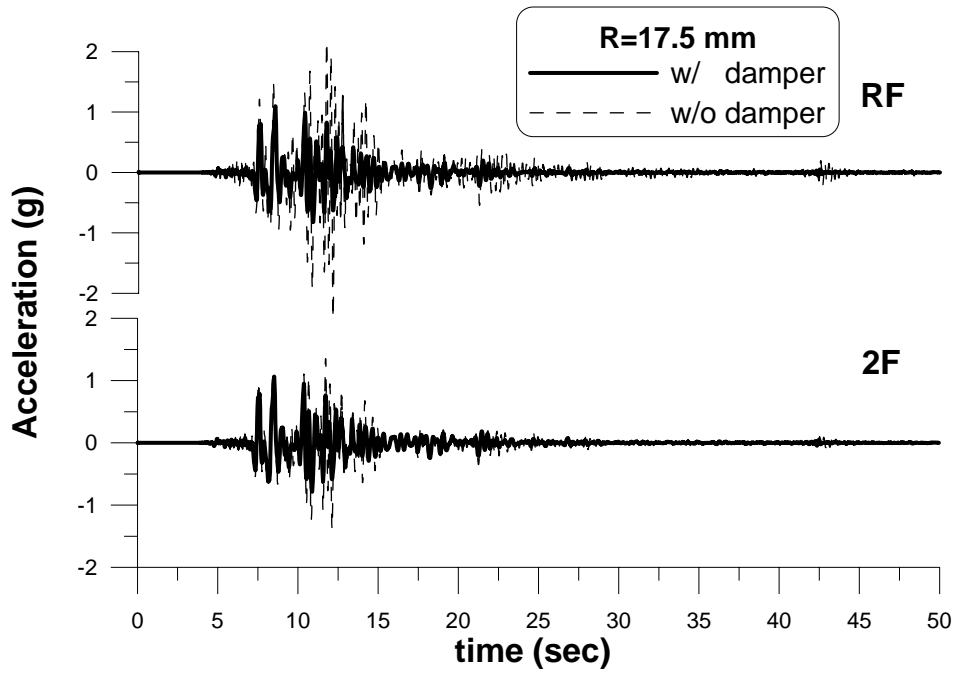


圖 3.8 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=17.5mm, Input=Kobe earthquake)

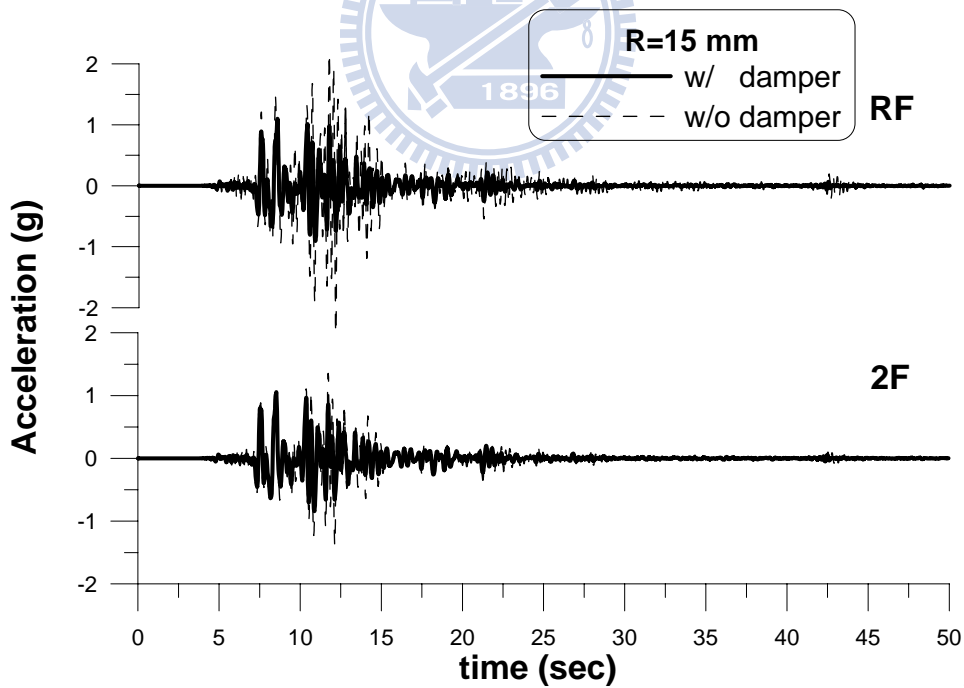


圖 3.9 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=15mm, Input=Kobe earthquake)

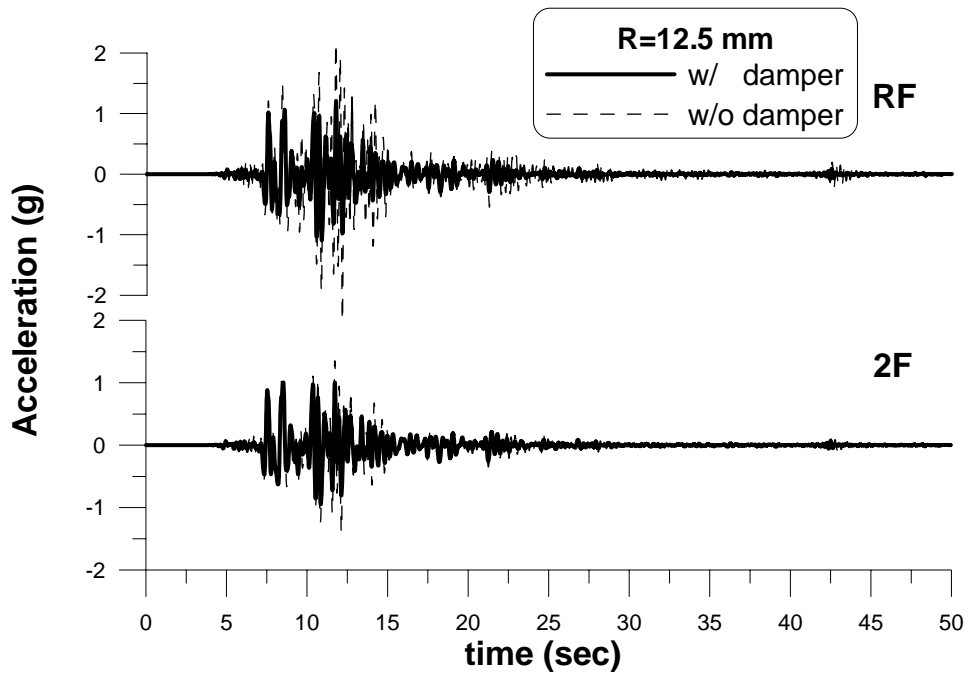


圖 3.10 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=12.5mm, Input=Kobe earthquake)

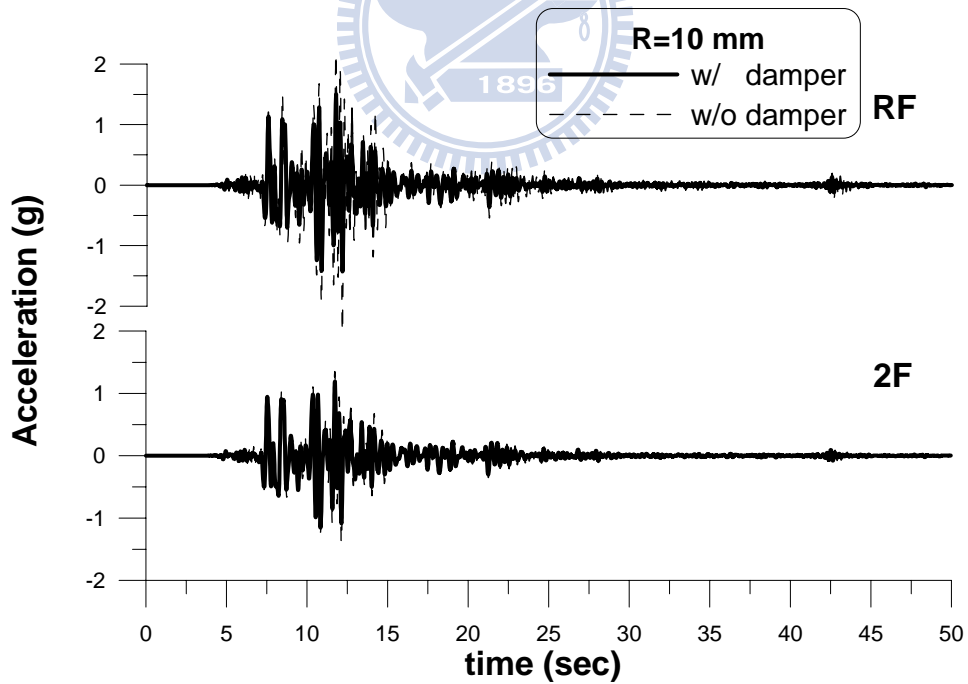


圖 3.11 各樓層之加速度反應歷時比較

(R=10mm, Input=Kobe earthquake)

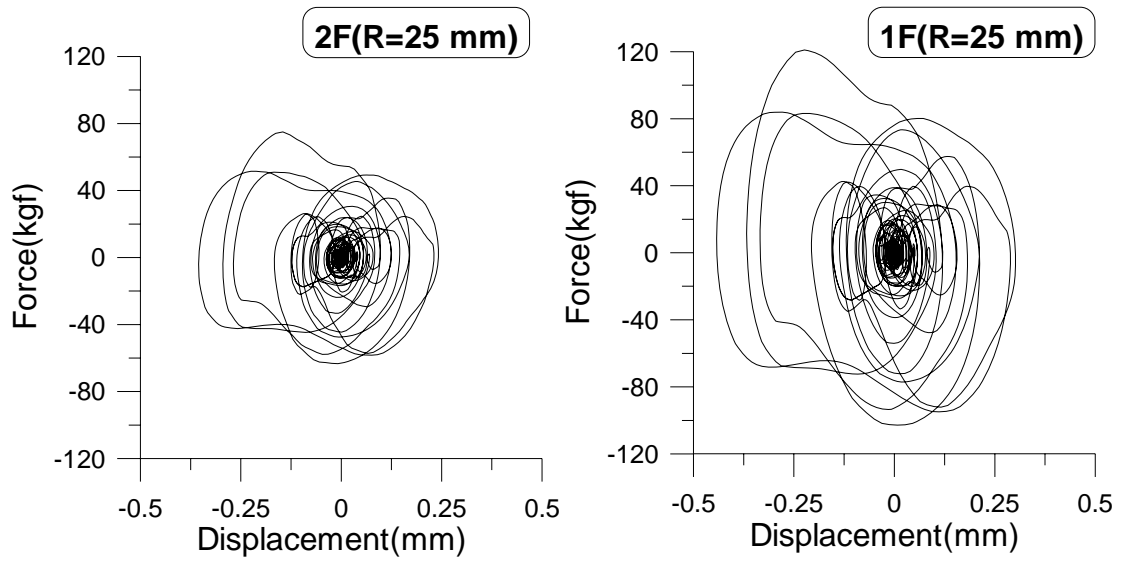


圖 3.12 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=25mm)

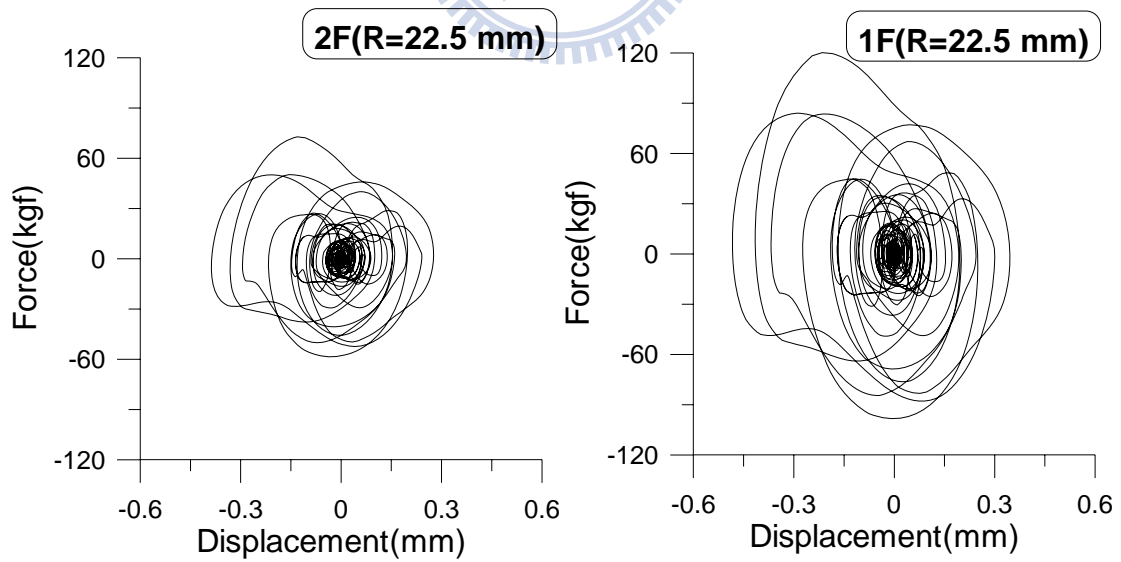


圖 3.13 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=22.5mm)

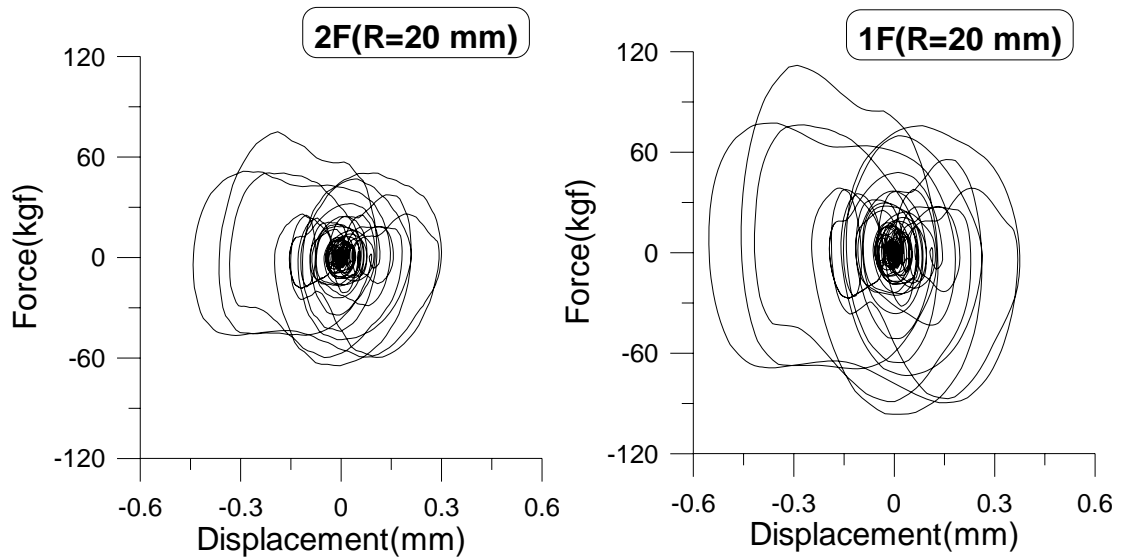


圖 3.14 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=20mm)

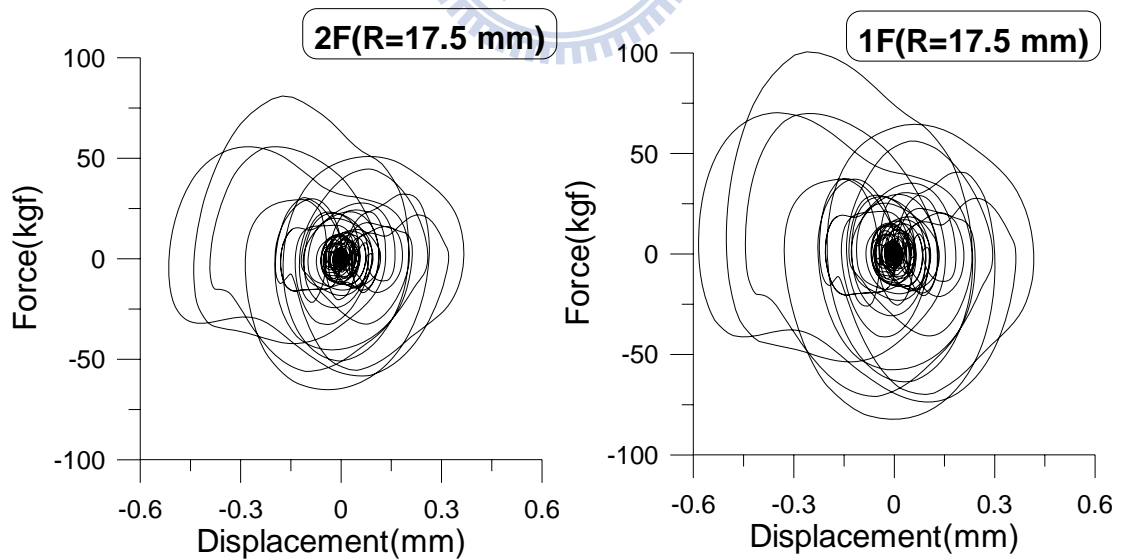


圖 3.15 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=17.5mm)

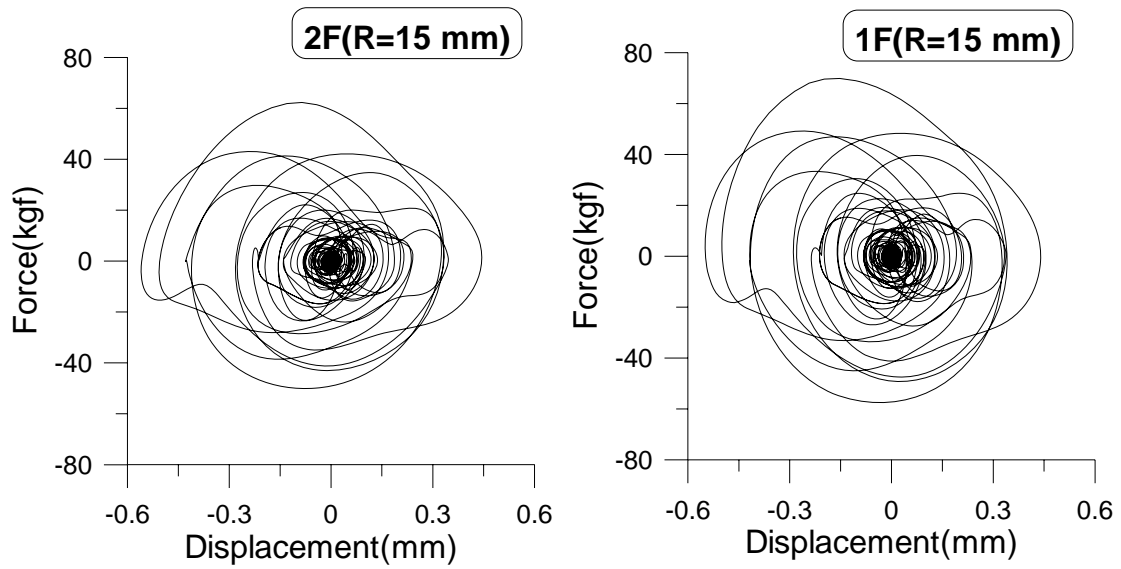


圖 3.16 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=15mm)

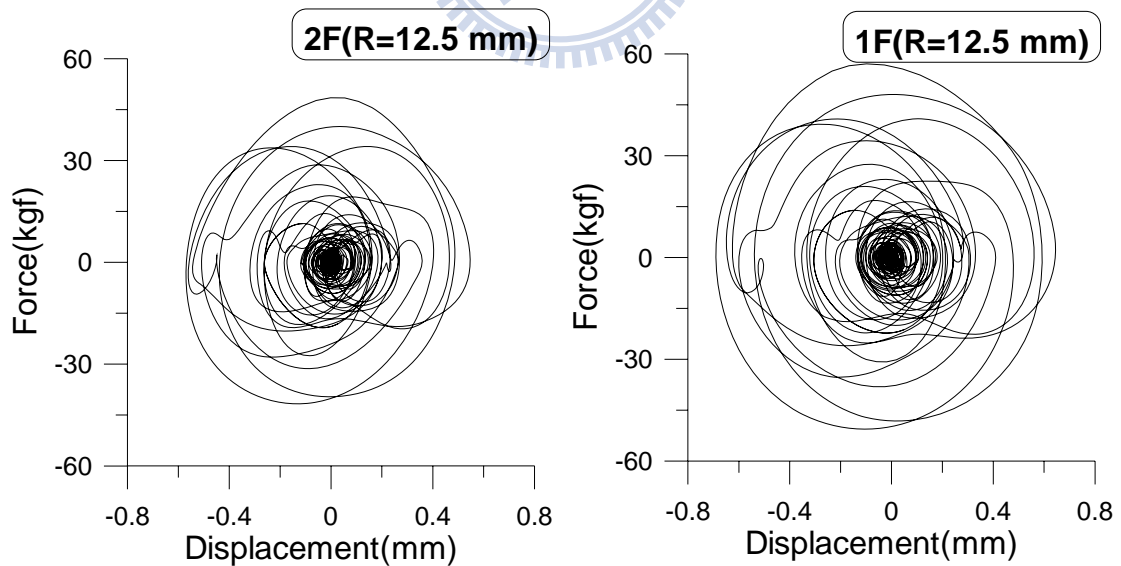


圖 3.17 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=12.5mm)

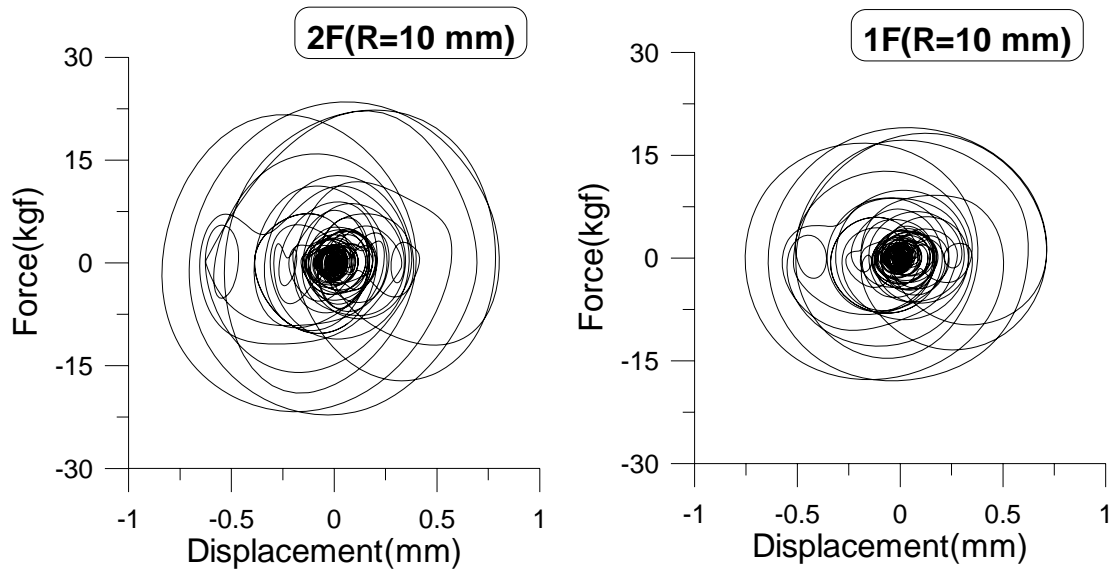


圖 3.18 各樓層阻尼器遲滯迴圈(R=10mm)

Material Property Data

Material Name [WOOD]

Display Color
Color [Red]

Type of Material
 Isotropic Orthotropic

Type of Design
Design [None]

Analysis Property Data

Mass per unit Volume	5.400E-07
Weight per unit Volume	5.297E-04
Modulus of Elasticity	70000.
Poisson's Ratio	0.1
Coeff of Thermal Expansion	5.500E-06
Shear Modulus	31818.182

Design Property Data

OK Cancel

圖 3.19 ETABS 材料性質定義設定

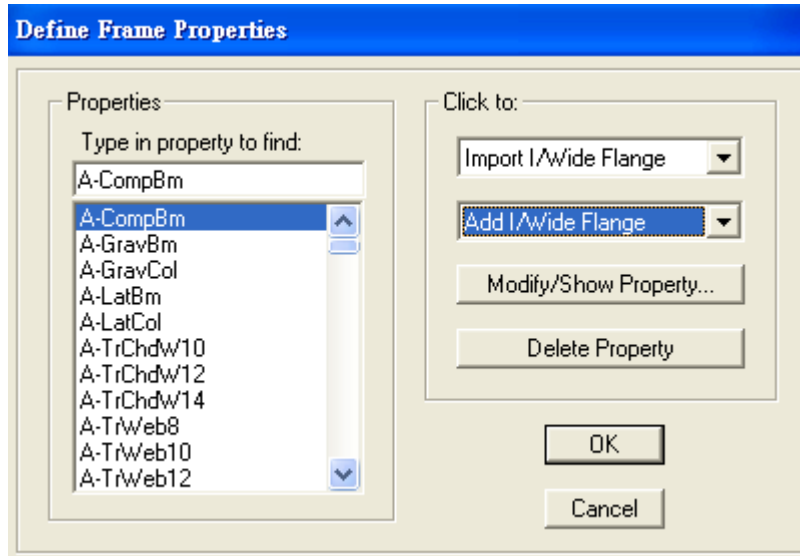


圖 3.20 定義桿件斷面

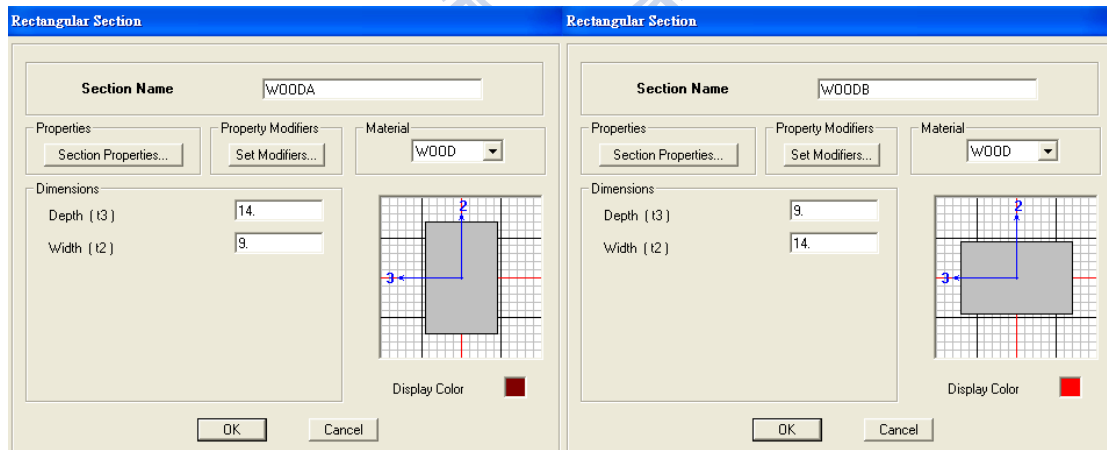


圖 3.21 ETABS 柱、梁尺寸設定範例

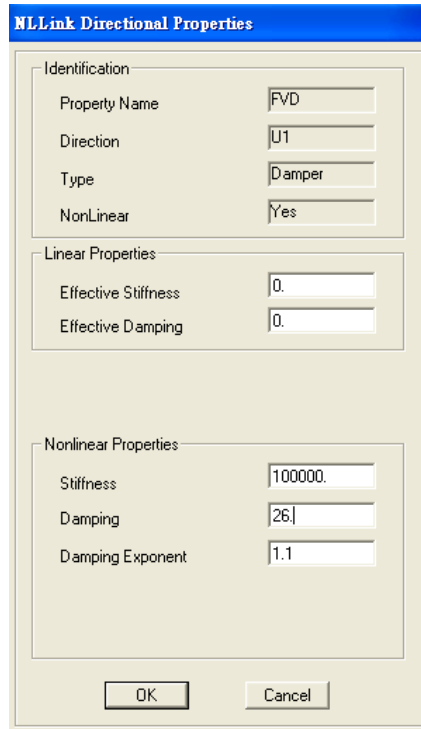


圖 3.22 ETABS 中 Damper 設定參數介面

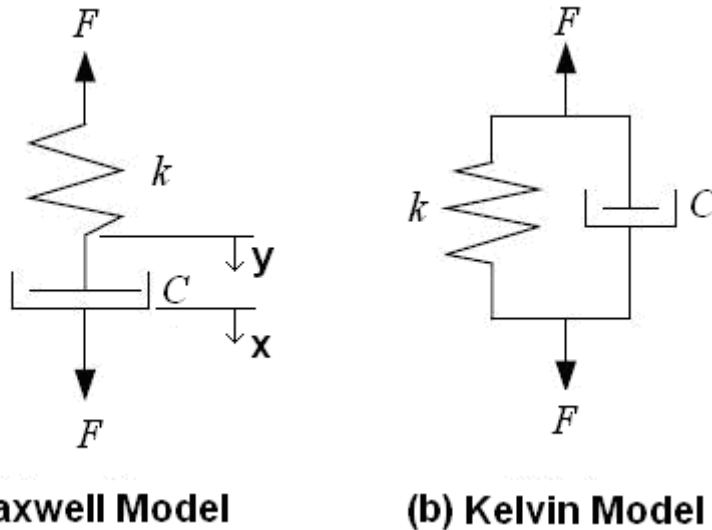


圖 3.23 阻尼器之 Maxwell 串聯模式與 Kelvin 並聯模式

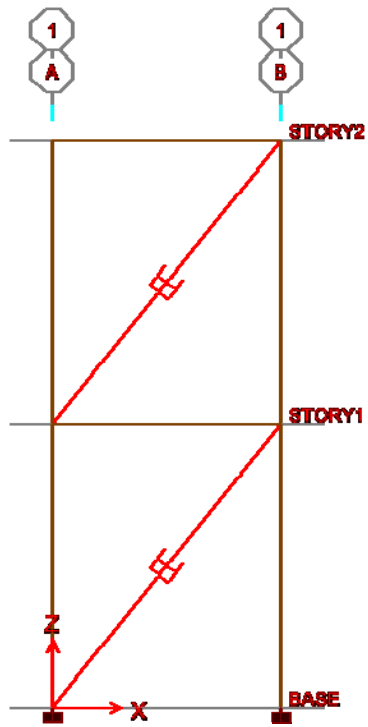


圖 3.24 阻尼器以對角斜撐型式配置

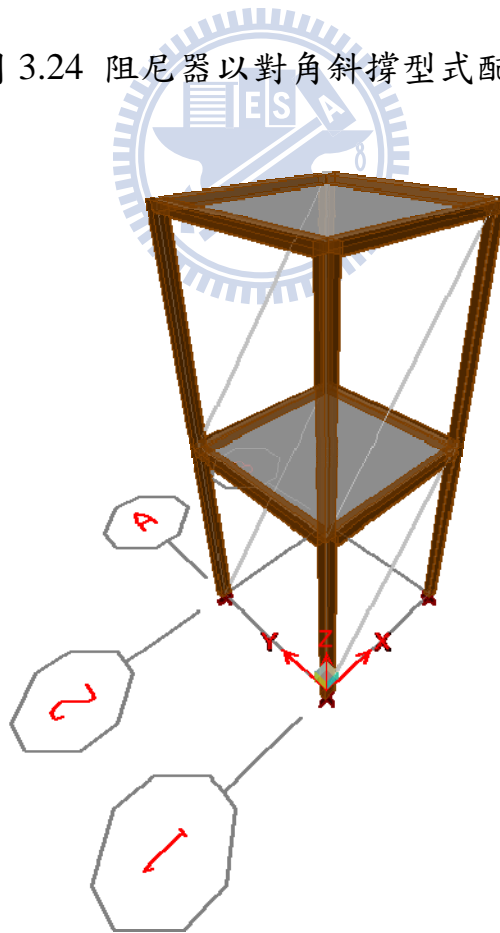


圖 3.25 木造空構架之 ETABS 模型

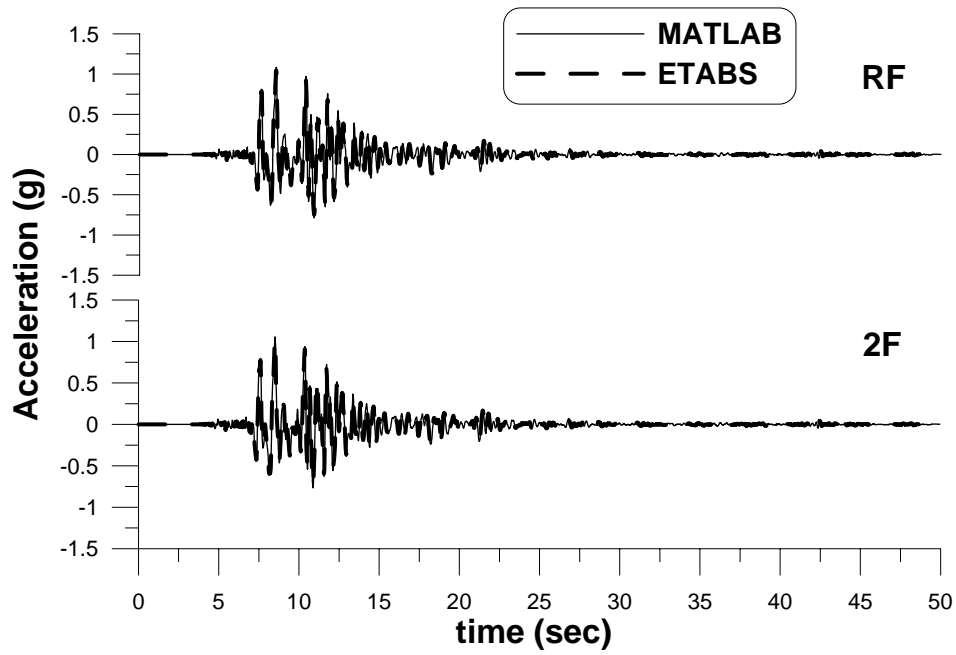


圖 3.26 各樓層加速度值比較

($R=25\text{mm}, C=26, \alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake)

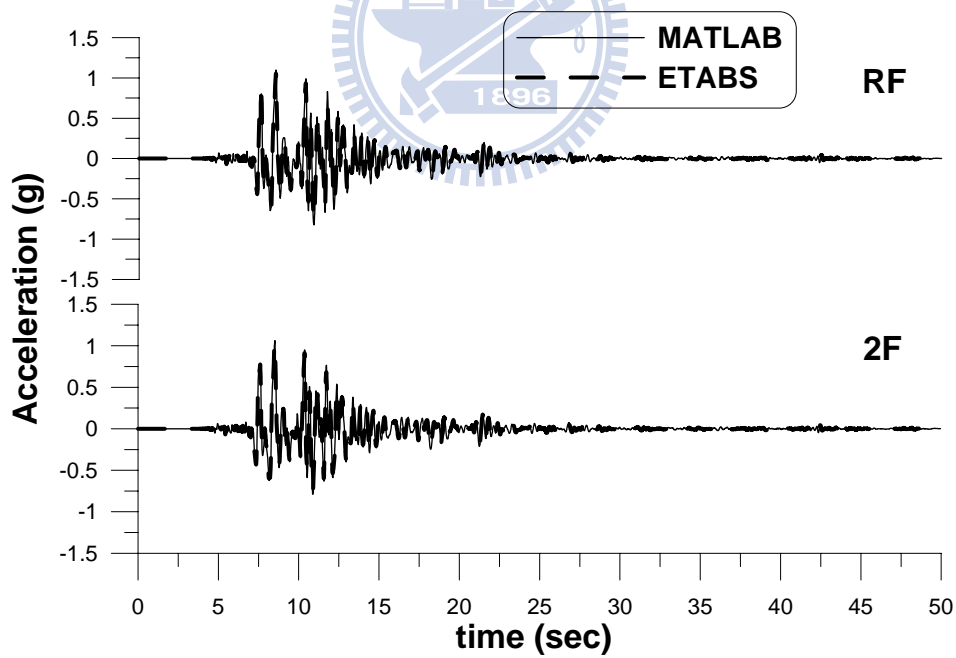


圖 3.27 各樓層加速度值比較

($R=22.5\text{mm}, C=21, \alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake)

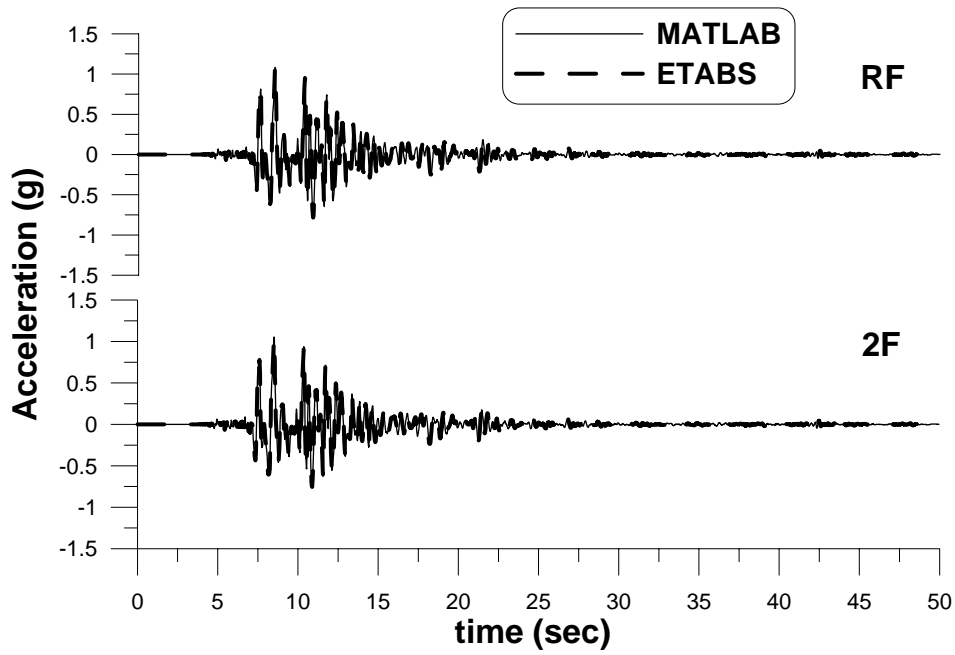


圖 3.28 各樓層加速度值比較

($R=20\text{mm}, C=16, \alpha=1.1, \text{Input}=\text{Kobe earthquake}$)

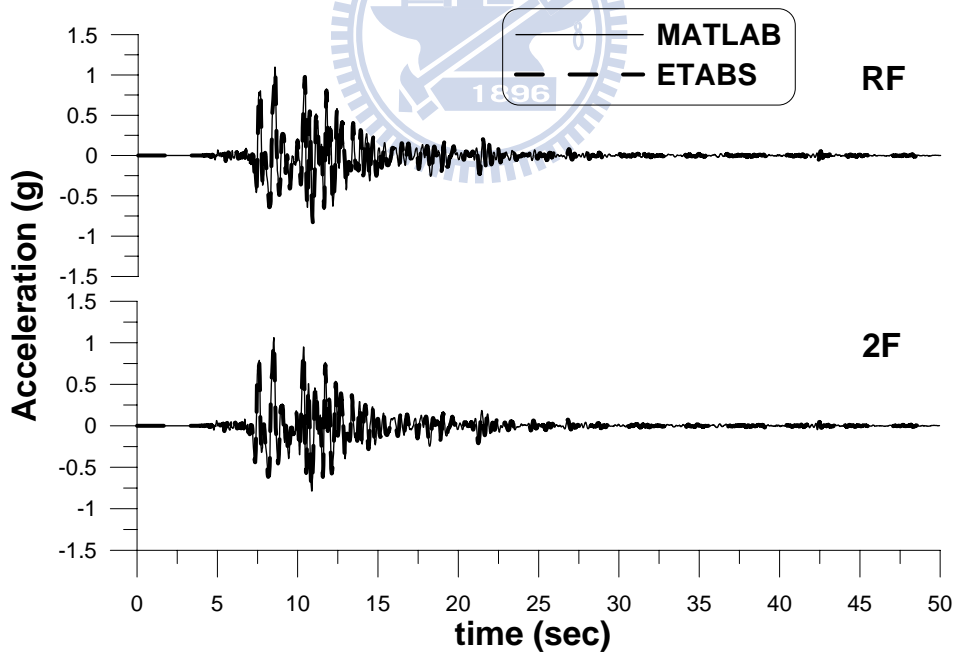


圖 3.29 各樓層加速度值比較

($R=17.5\text{mm}, C=11, \alpha=1.1, \text{Input}=\text{Kobe earthquake}$)

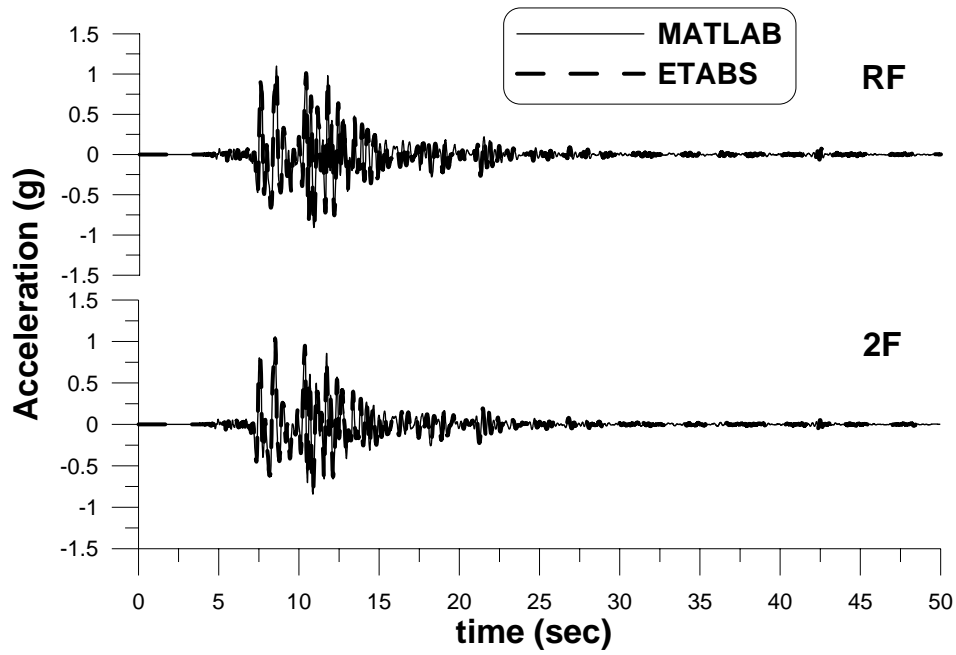


圖 3.30 各樓層加速度值比較

($R=15\text{mm}, C=7, \alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake)

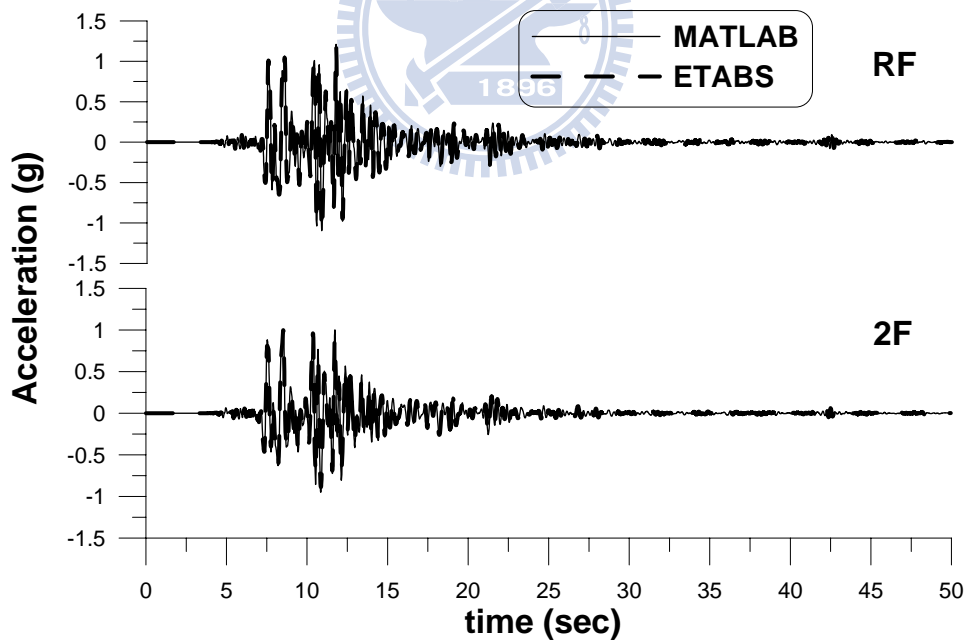


圖 3.31 各樓層加速度值比較

($R=12.5\text{mm}, C=3.5, \alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake)

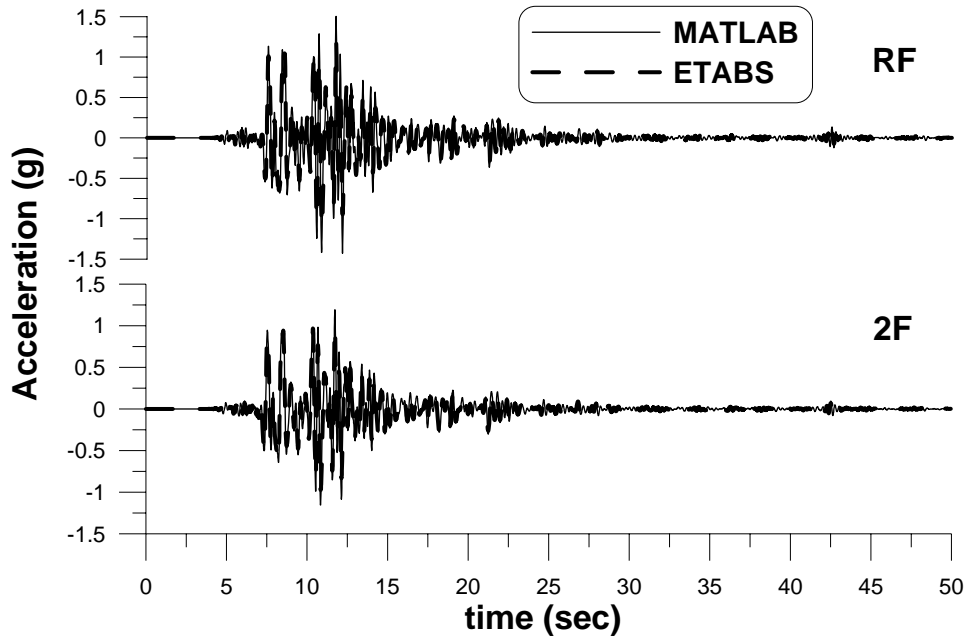


圖 3.32 各樓層加速度值比較

($R=10\text{mm}, C=1, \alpha=1.1$, Input=Kobe earthquake)

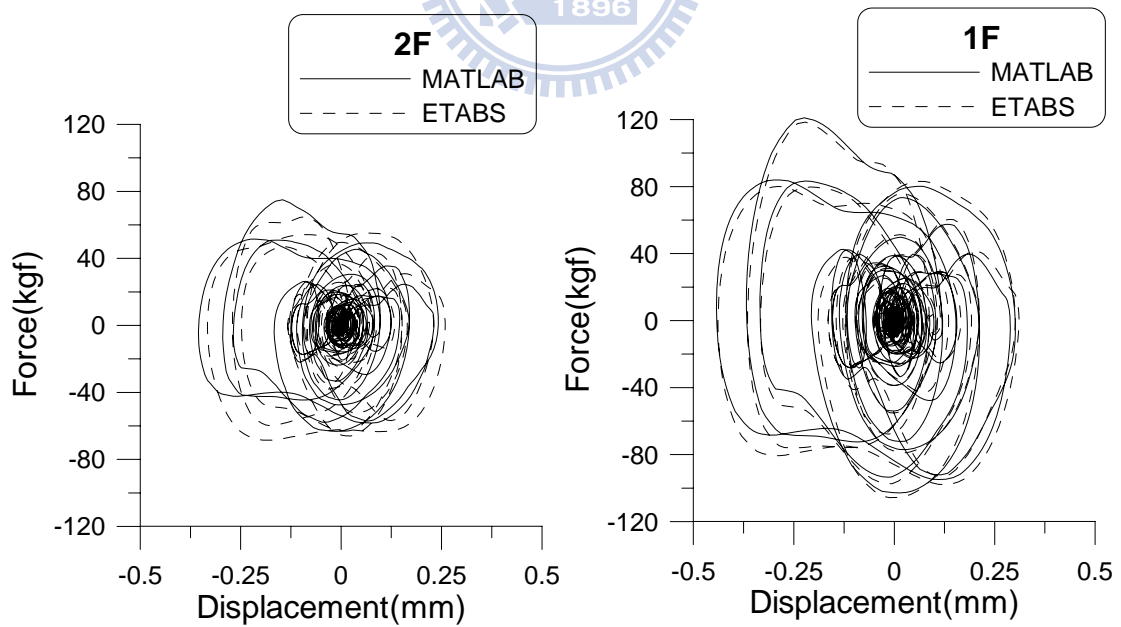


圖 3.33 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=25\text{mm}$ 、 $C=26$ 、 $\alpha=1.1$)

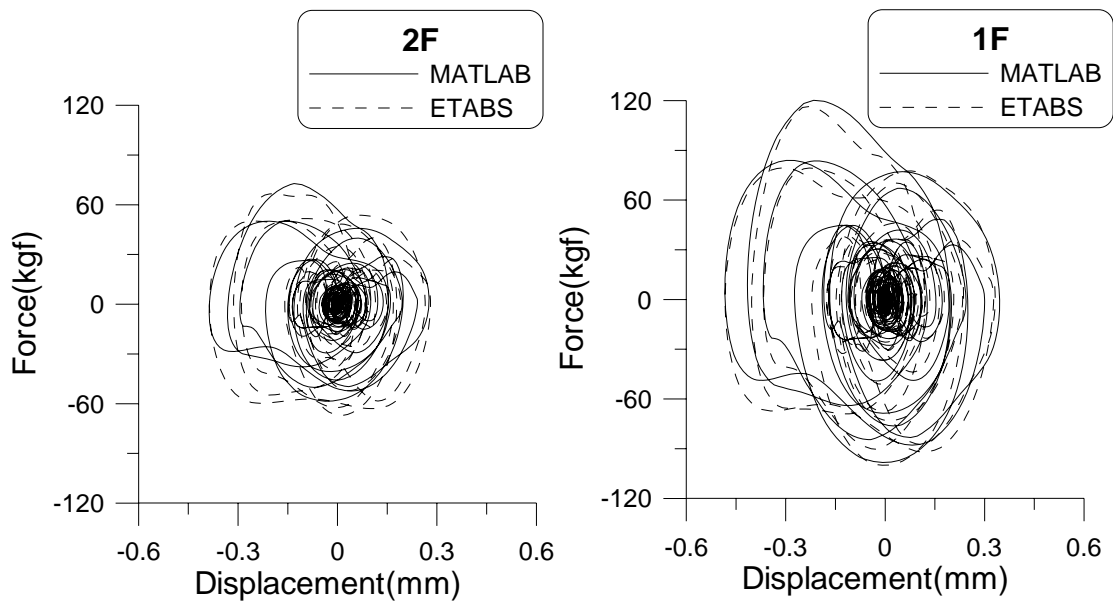


圖 3.34 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=22.5\text{mm}$ 、 $C=21$ 、 $\alpha=1.1$)

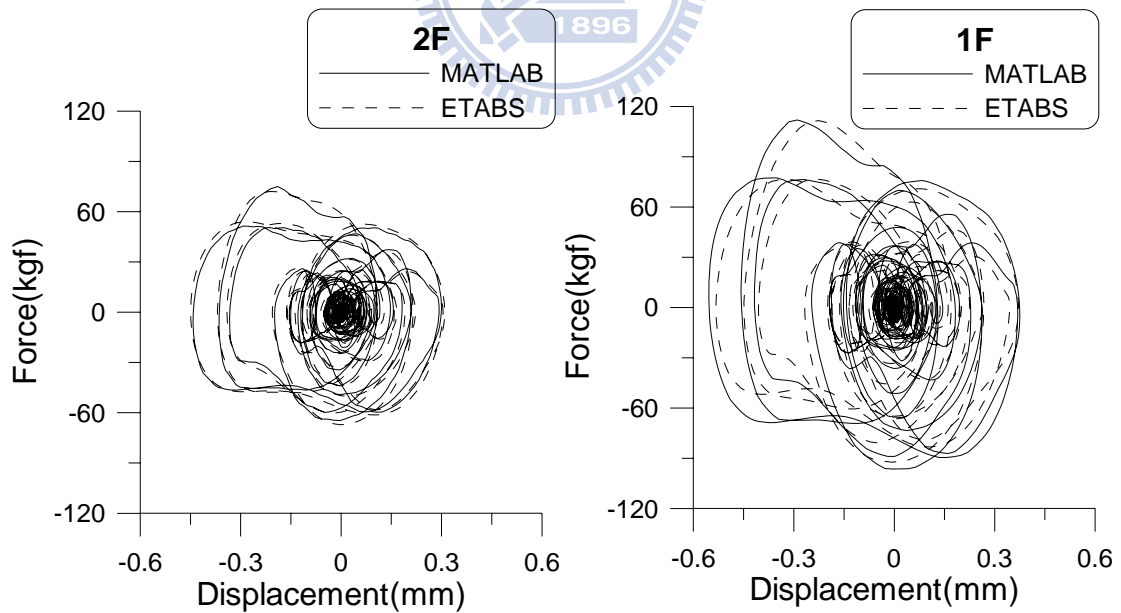


圖 3.35 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=20\text{mm}$ 、 $C=16$ 、 $\alpha=1.1$)

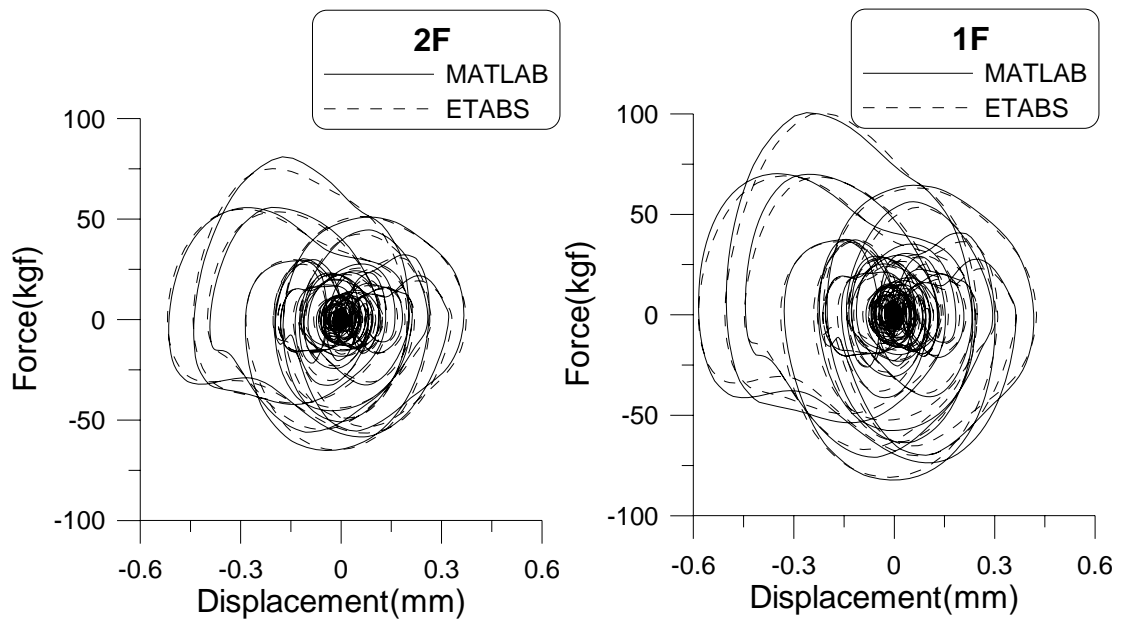


圖 3.36 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=17.5\text{mm}$ 、 $C=11$ 、 $\alpha=1.1$)

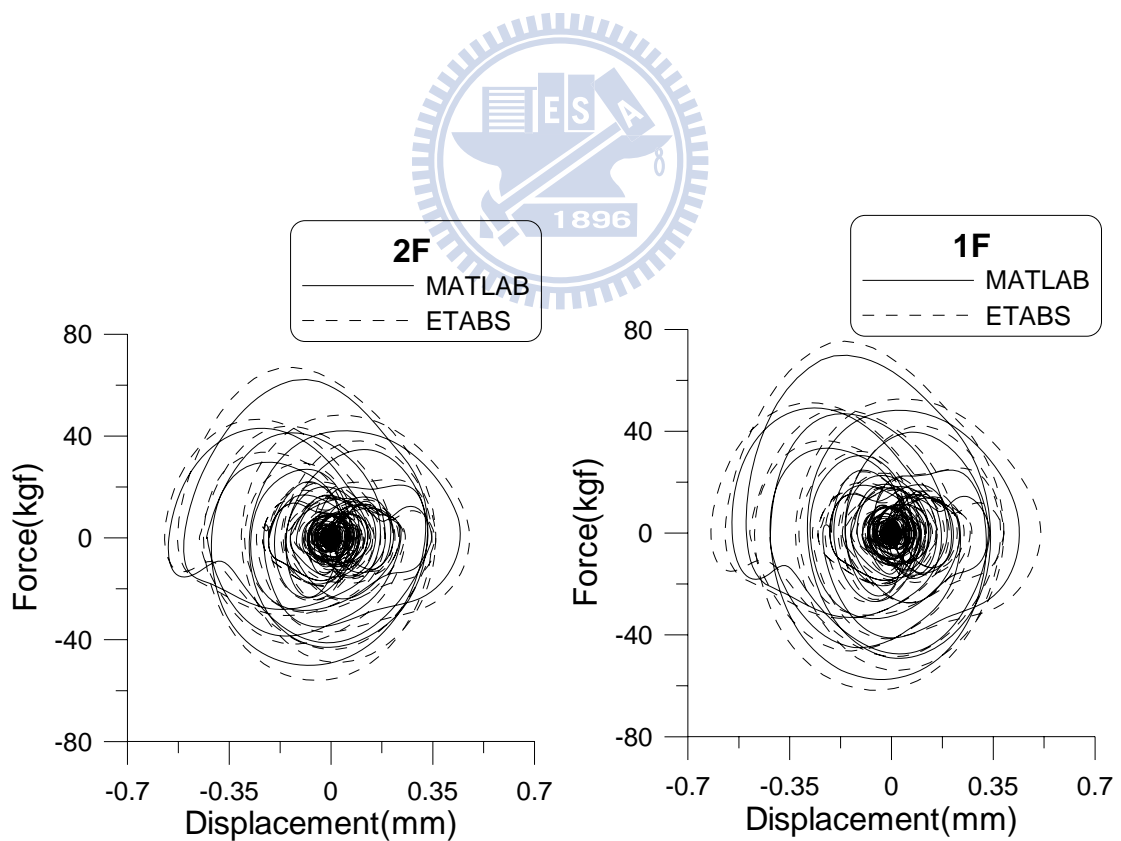


圖 3.37 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=15\text{mm}$ 、 $C=7$ 、 $\alpha=1.1$)

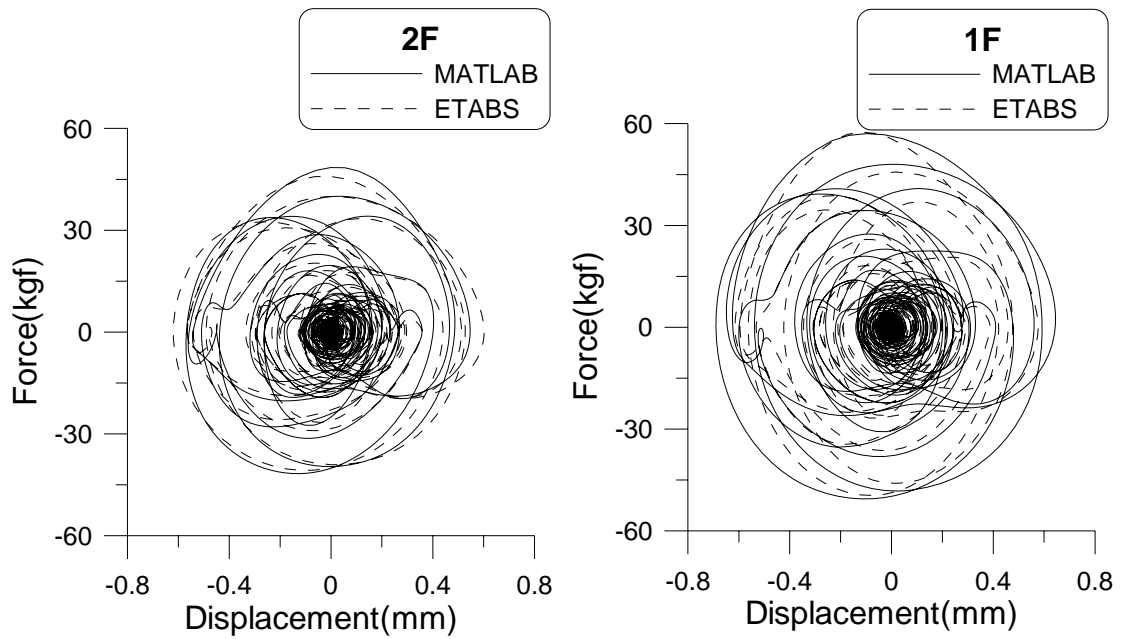


圖 3.38 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=12.5\text{mm}$ 、 $C=3.5$ 、 $\alpha=1.1$)

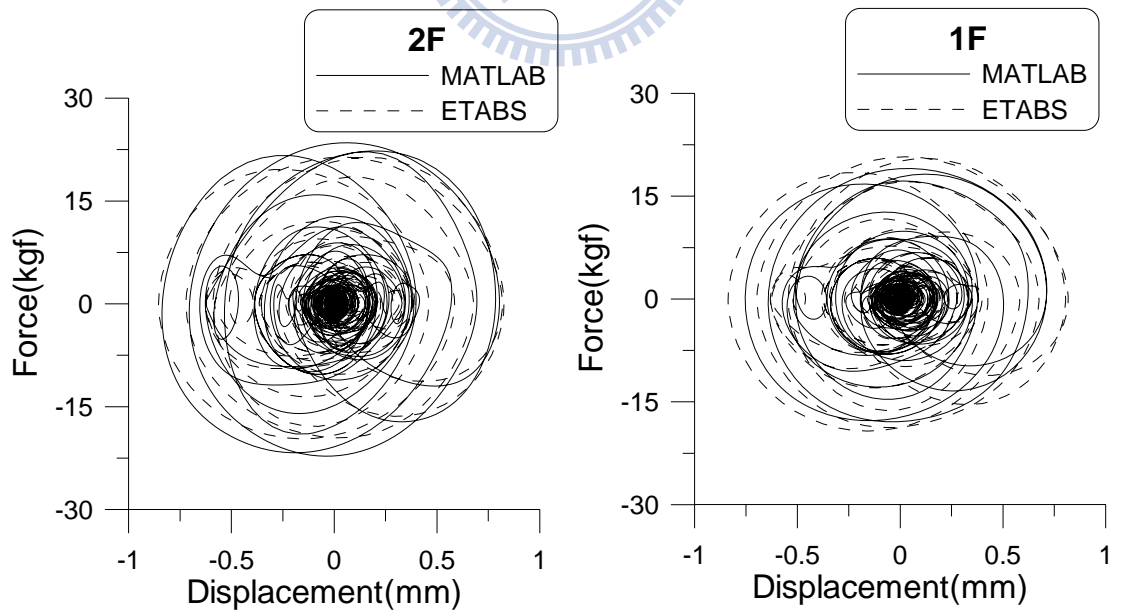


圖 3.39 各樓層阻尼器之遲滯迴圈比較($R=10\text{mm}$ 、 $C=1$ 、 $\alpha=1.1$)

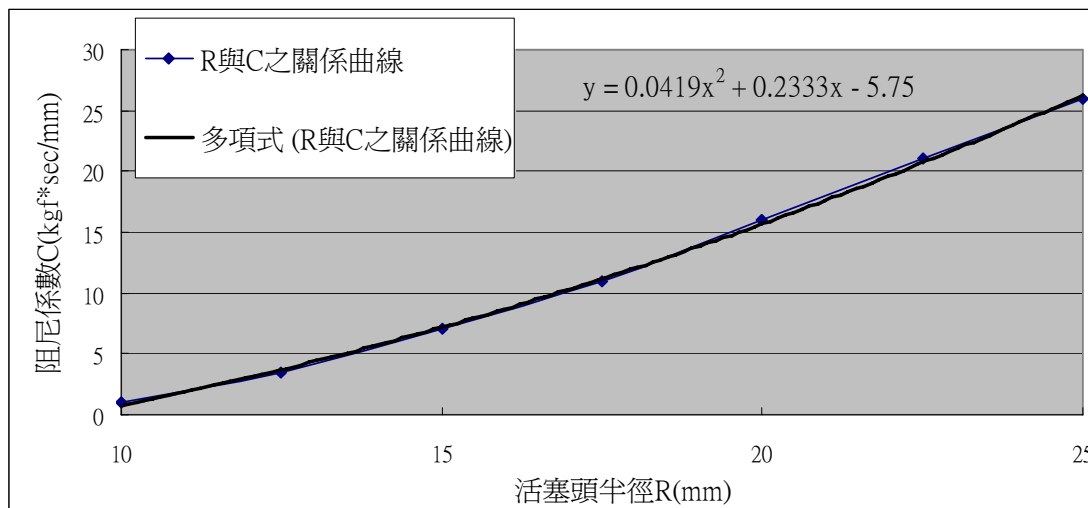


圖 3.40 活塞頭半徑 R 與阻尼係數 C 之關係

第四章 液流阻尼器之元件測試

4.1 前言

本研究將針對國內廠商清瑞機械有限公司自行研發之低容量液流阻尼器進行性能測試，協助其進行低容量液流阻尼器之性能驗證工作。清瑞機械所研發之低容量液流阻尼器主要是外銷至日本，作為木造房屋抗震之用。日本木造建築的比例極高(住宅使用木構造高於 80%)，由於位於環太平洋地震帶上，菲律賓海板塊、歐亞大陸板塊以及美洲板塊之間，因此日本的地震比台灣更為頻繁。基於木造住宅過去之震害經驗，日本建商與居民極為重視木造建築物之防震技術發展，以小型阻尼器作為木造房屋減震裝置的想法與市場遂應運而生。

本系列元件測試之目的，在比較不同組裝構造、油品黏稠度、活塞頭半徑與活塞開孔方式之阻尼器，其遲滯消能行為與出力大小；測試裝置乃依照日本業主之要求製作，務使測試條件更符合真實狀況，俾有助於未來實際應用時之參考；經由性能測試，可瞭解液流阻尼器之穩定性與力學特性，並找出阻尼器之可能設計缺失並予修正，俾得到最佳之設計模式。

4.2 低容量液流阻尼器之元件測試

本研究有關液流阻尼器元件測試，係針對日本所提供之液流阻尼

器 1 支（記為 TOKIWA）及清瑞機械自行生產組裝的阻尼器 2 支（記為 CRM_1 及 CRM_2 各 1 支）所進行。低容量液流阻尼器元件外觀尺寸如圖 4.1 所示。

4.2.1 元件測試構架

元件測試構架之設計如圖 4.2 所示，係利用一 H 型鋼（基礎底座）與反力座將 1.5 噸油壓致動器安裝於 H 型鋼上之適當位置。此設計是參考日本豐田工業高等專門學校在測試低容量液流阻尼器元件時之構架，該構架設計的目的在模擬液流阻尼器應用於木造結構梁柱接頭間之安裝模式。為能量測阻尼器之出力，乃於致動器與阻尼器固定端間安裝一荷重元（Load Cell）直接進行量測。圖 4.4~4.5 為元件測試構架設計圖及組裝完成照片。由試體夾具的迴轉中心至致動器連接位置距離為 300 mm，阻尼器裝設角度約為 45 度，測試阻尼器均以 $\Phi=5\text{mm}$ 之螺絲鎖固。

為得到液流阻尼器之遲滯迴圈，必須將荷重元量測之力量與致動器量測之位移，透過幾何換算為阻尼器之軸力及軸向位移。如圖 4.3 所示，為瞭解致動器輸出位移 u 與擾動轉角 θ 及阻尼器水平夾角 φ 之關係，當致動器水平位移 u 時，與擾動轉角之關係為 $u = L \sin \theta$ ，而此刻之液流阻尼器長度為 T' ，則與水平夾角之關係為

$u = W - (T' \cdot \cos \varphi)$ 。當擾動角度為 θ ，由 $(L' \cos \theta) - a'$ 得到阻尼器之垂直向長度，接著由 $W - (L' \sin \theta)$ 得到阻尼器之水平向長度，將水平向長度與垂直向長度平方和開根號可求出擾動 θ 角度時液流阻尼器之長度 T' ，阻尼器之軸向位移即為 $T - T'$ 。液流阻尼器之軸力可由荷重元量測之力量乘上 $\cos \varphi$ 即可計算出。

4.2.2 試驗規劃與量測系統

本研究規劃以簡諧波進行一系列之元件測試，測試項目包含測試頻率 (Ω) 及轉角 (θ) 兩項參數，而轉角 (θ) 為致動器輸出位移除上致動器連接點至迴轉中心之距離 L ，如圖 4.2。試驗共考慮五種不同頻率 (0.5Hz、1.0Hz、2.0Hz、3.0Hz、及 5.0Hz)，以驗證液流阻尼器在各種不同擾動頻率下之特性；每一測試頻率之下，均考慮五種不同轉角 ($1/480$ 、 $1/240$ 、 $1/120$ 、 $1/60$ 及 $1/30$ rad)。為了測試液流阻尼器之穩定性，每一種測試組合均進行 10 個循環。相關測試條件及組合歸納於表 4.1。

元件測試所使用之儀器設備列舉如下：

- (A) MTS 1.5tf 油壓致動器 (圖 4.6)：用以提供測試機構之軸向往復加載，其規格參閱表 4.2。
- (B) 訊號擷取系統 (圖 4.8)：將荷重元及致動器量測到之反力與位移

訊號擷取整理置電腦中，再由電腦進行資料的存取，其規格參閱表 4.3。

(C) 2.0tf 荷重元 (圖4.7)：用以量測致動器反力，並換算出液流阻尼器之軸向出力，其規格參閱表4.4。

(D) 筆記型電腦：供資料儲存與分析之用，其規格參閱表 4.5。

4.2.3 試驗結果與分析

比較三支阻尼器之遲滯行為，在每個頻率之擾動轉角為 $1/480\text{rad}$ 時，TOKIWA 阻尼器之出力與遲滯迴圈飽滿度均優於 CRM_1 及 CRM_2 阻尼器，如圖 4.9、4.14、4.19、4.24 及 4.29；隨著擾動轉角增大 ($1/240\text{rad}$ 、 $1/120\text{rad}$ 、 $1/60\text{rad}$ 及 $1/30\text{rad}$)，CRM_1 及 CRM_2 阻尼器之遲滯迴圈面積逐漸大於 TOKIWA 阻尼器，證明清瑞機械自行生產之液流阻尼器在變位相對較大時其性能優於日本液流阻尼器。

比較 CRM_1 及 CRM_2 兩支液流阻尼器於各個測試條件之性能，CRM_2 無論是出力及遲滯迴圈飽滿度都比 CRM_1 優異。只有當頻率 3Hz，擾動轉角為 $1/30\text{rad}$ 時，CRM_1 遲滯迴圈面積大於 CRM_2，如圖 4.28。各式阻尼器於不同擾動頻率及轉角所得之遲滯迴圈如圖 4.9~圖 4.33 所示。

圖 4.34 為各式阻尼器於不同擾動頻率及振幅的最大出力變化曲

線圖。圖 4.35 為各式阻尼器於不同擾動頻率及速度的最大出力變化曲線圖。結果顯示，CRM_2 阻尼器於不同擾動轉角下均有較大的出力，且隨著擾動頻率的增大，其差異更趨明顯。整體而言，清瑞機械所提供之 CRM_1 與 CRM_2 兩支阻尼器有較佳的表現，且由曲線圖可以看出在高頻 (2Hz、3Hz、5Hz) 時 CRM_2 阻尼器之出力曲線較平滑穩定，相關數值整理於表 4.6~表 4.10，其中 MAX 值為最大拉力，min 值為最大壓力，均值為 $\frac{1}{2}(MAX + |\min|)$ 。

4.3 參數擬合

以流體動力學推導之液流阻尼器公式，擬合元件測試 CRM_1 液流阻尼器之遲滯迴圈，藉由程式擬合結果探討流體動力學理論公式之精確性及合理性。本次擬合之測試項目為頻率 5Hz、擾動轉角 (1/480、1/240、1/120、1/60 及 1/30rad)。

4.3.1 參數設定

■ 流體動力學推導之液流阻尼器公式中已知定值：

(1) 矽油之材料之鬆弛時間 $\lambda_1 = 0.0015\text{s}$ ；

(2) 初始黏度 $\eta_0 = 1.002\text{ Pa s}$ ；

(3) 時間之常數 $\kappa = 7.2 \times 10^{-6}$ ；

(4)流體之流變學 (rheological) 常數 $a=0.43$ 、 $b=0.6$ ；

- 液流阻尼器尺寸設定值：以元件測試 CRM_1 之阻尼器尺寸為輸入值，液流阻尼器活塞頭半徑 $R=8\text{mm}$ 、活塞頭厚度 $L=11\text{mm}$ 。

4.3.2 擬合結果

由於 CRM_1 阻尼器實際孔隙寬度 h 無法得知，因此以擬合頻率 5Hz、擾動轉角為 $1/480$ rad 之遲滯迴圈作為孔隙寬度設定值，擬合結果得到之孔隙寬度 $h=0.72\text{mm}$ 。

擬合結果顯示，在擾動轉角 $1/120$ 、 $1/480$ rad 及 $1/240$ rad 時，流體動力學推導之液流阻尼器遲滯迴圈與元件測試之遲滯迴圈圖形相當近似，如圖 4.36~4.38 所示。隨著擾動轉角增大($1/60$ 及 $1/30\text{rad}$)，理論推導公式之遲滯迴圈圖形與實際元件測試圖形將產生差異，CRM_1 出力比理論值大，且隨著擾動增加而差異越大。如圖 4.39~4.40 所示。

4.4 小結

本系列元件測試結果顯示，清瑞機械所製造之液流阻尼器呈現穩定的消能特性，且隨擾動之頻率與振幅增大時，液流阻尼器之遲滯迴圈更趨飽滿且出力也會隨之增加。整體而言，日本所提供之阻尼器 (TOKIWA) 之出力及遲滯迴圈飽滿度均不及清瑞機械研製之阻尼

器，只有在較小之振幅擾動（ $1/480$ rad）時消能效果較佳，顯示其阻尼器之敏感度較高。

清瑞機械所研發之阻尼器，經過不斷測試及改良，務求其出力更大且消能面積更加飽滿。它是根據日本所提供之阻尼器（TOKIWA）設計改善阻尼器管內部液體之流動性，以及換裝較黏稠之油品，發展為 CRM_1 阻尼器。CRM_1 雖然成功提升阻尼器之出力，但因使用油品黏稠度較高之故，使得阻尼器內部活塞片在測試過程中經常變形損壞，其穩定性及耐久性較差。

為了提昇液流阻尼器之耐久性，清瑞機械將阻尼器內部活塞片更換為硬度較高之材質，並改變阻尼器孔隙分布及大小增加液體的流動性，提高其穩定性。經過一系列測試後，成功改良出之 CRM_2 阻尼器，其出力及遲滯迴圈飽滿度均優於 CRM_1，且經過反覆迴圈測試後，證明其穩定性及耐久性均有所提升。

經由一系列液流阻尼器之研發測試結果，顯示油品之黏稠度會影響阻尼器出力大小；黏稠度高，活塞移動之阻力就增大，阻尼器出力也隨之提升，但一味地提高阻尼力而忽略了阻尼器零件(活塞片、油封、套管等)強度時，可能導致耐久性降低。為提升阻尼器之穩定性，管內之液體流動性是關鍵因素，適度決定孔隙之形狀與分佈，可將活

塞頭之壓力分散，避免活塞變形。

擬合元件測試之遲滯迴圈結果發現，當擾動轉角增大時(1/60、1/30 rad)擬合圖形將產生差異，如圖 4.39~4.40 所示。由於 CRM_1 阻尼器管內填裝的油品種類與理論之矽油不同，當活塞運度速度增加，阻尼器套管內液體黏度變化也不同，因此有出力大小的差別。

此外，元件測試時，因油壓致動器本身亦具有阻尼特性，在高速狀態下致動器的阻尼效應增加，這也有可能是造成較大衝程之測試結果與流體動力學之預估結果產生落差的原因，此部份的問題仍待進一步釐清。



表 4.1 阻尼器元件測試項目

Driving Frequency(Hz)	0.5	1	2	3	5
Actuator stroke(mm)	0.625	1.25	2.5	5	10
θ (rad)	1/480	1/240	1/120	1/60	1/30

表 4.2 1.5tf 油壓致動器規格

<i>Model Number</i>	MTS 244.11
<i>Maximum Force</i>	3.3 kips (150 kN)
<i>Static Stroke</i>	7.2 in (182.88 mm)
<i>Dynamic Stroke</i>	6.0 in (152.4 mm)

表 4.3 訊號擷取系統 (datalogger) 規格

<i>Model</i>	IMC S
<i>Analog Input</i>	16 differential channels
<i>Sum Sampling Rate</i>	20 kHz
<i>Maximum Sampling Rate</i>	10 kHz
<i>Noise(input Shorted)</i>	9 μ Vrms
<i>A/D converter resolution</i>	16 bits

表 4.4 荷重元 (Load Cell) 規格

<i>Model</i>	JHSENSE
<i>Type</i>	LM-2T
<i>Capacity</i>	2000 kg
<i>S.N.</i>	40901

表 4.5 筆記型電腦規格

COMPAQ (Mobile Intel(R) Pentium(R))
4-M CPU 1.80GHz
265MB RAM

表 4.6 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=0.5 Hz)

<i>Frequency : 0.5 Hz 單位(kgf)</i>									
	CRM_1			CRM_2			TOKIWA		
	MAX	min	均值	MAX	min	均值	MAX	min	均值
1/480 rad	18.4	-20.6	19.5	26.3	-25.2	25.8	26.8	-26.9	26.9
1/240 rad	33.4	-35.5	34.4	48.1	-50.8	49.5	33.1	-32.5	32.8
1/120 rad	66.6	-69.7	68.1	88.8	-85.9	87.3	46.8	-47.2	47.0
1/60 rad	103.8	-106.8	105.3	149.5	-150.1	149.8	70.2	-75.1	72.7
1/30 rad	140.0	-144.5	142.2	187.8	-191.3	189.6	98.2	-97.8	98.0

表 4.7 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=1 Hz)

<i>Frequency : 1 Hz 單位(kgf)</i>									
	CRM_1			CRM_2			TOKIWA		
	MAX	min	均值	MAX	min	均值	MAX	min	均值
1/480 rad	19.4	-21.4	20.4	33.1	-35	34.1	33.1	-35.7	34.4
1/240 rad	40.1	-42.0	41.1	67.1	-73	70.1	44.0	-43.8	43.9
1/120 rad	86.8	-88.1	87.5	125.7	-130.1	127.9	65.3	-64.4	64.9
1/60 rad	134.6	-131.1	132.9	177.5	-181	179.2	95.1	-94.5	94.8
1/30 rad	199.9	-214.6	207.3	272.3	-280.2	276.2	118.3	-123.0	120.6

表 4.8 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=2 Hz)

<i>Frequency : 2 Hz 單位(kgf)</i>									
	CRM_1			CRM_2			TOKIWA		
	MAX	min	均值	MAX	min	均值	MAX	min	均值
1/480 rad	18.9	-19.2	19.0	34.9	-36.2	35.5	43.4	-45.0	44.2
1/240 rad	41.3	-40.7	41.0	73.3	-76.5	74.9	55.0	-55.6	55.3
1/120 rad	89.8	-87.3	88.5	143.1	-143.6	143.4	76.3	-76.4	76.3
1/60 rad	192.8	-187.6	190.2	234.8	-240.7	237.8	87.8	-91.6	89.7
1/30 rad	385.7	-404.3	395.0	375.4	-377.8	376.6	108.1	-109.1	108.6

表 4.9 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=3 Hz)

<i>Frequency : 3 Hz 單位(kgf)</i>									
	CRM_1			CRM_2			TOKIWA		
	MAX	min	均值	MAX	min	均值	MAX	min	均值
1/480 rad	13.9	-14.7	14.3	23.5	-25.4	24.4	32.4	-34.1	33.2
1/240 rad	33.3	-32.7	33.0	56	-58	57	49.3	-50.3	49.8
1/120 rad	76.7	-73.6	75.1	117.3	-119.6	118.4	72.5	-72.3	72.4
1/60 rad	177.8	-177.5	177.7	222.9	-228.9	225.9	89.7	-93.4	91.6
1/30 rad	414.9	-405.4	410.2	374.7	-378.1	376.4	121.1	-131.9	126.5

表 4.10 各個阻尼器之出力極值 (測試頻率=5 Hz)

<i>Frequency : 5 Hz 單位(kgf)</i>									
	CRM_1			CRM_2			TOKIWA		
	MAX	min	均值	MAX	min	均值	MAX	min	均值
1/480 rad	8.2	-8.2	8.2	8.1	-8.3	8.2	18.9	-19.0	18.9
1/240 rad	18.8	-19.5	19.1	25.1	-26.2	25.7	32.5	-33.6	33.1
1/120 rad	44.7	-42.8	43.7	55.6	-57	56.3	52.1	-52.8	52.5
1/60 rad	110.3	-114.7	112.5	129.6	-136	132.8			
1/30 rad	287.3	-278.7	283.0	329.5	-316.5	323			

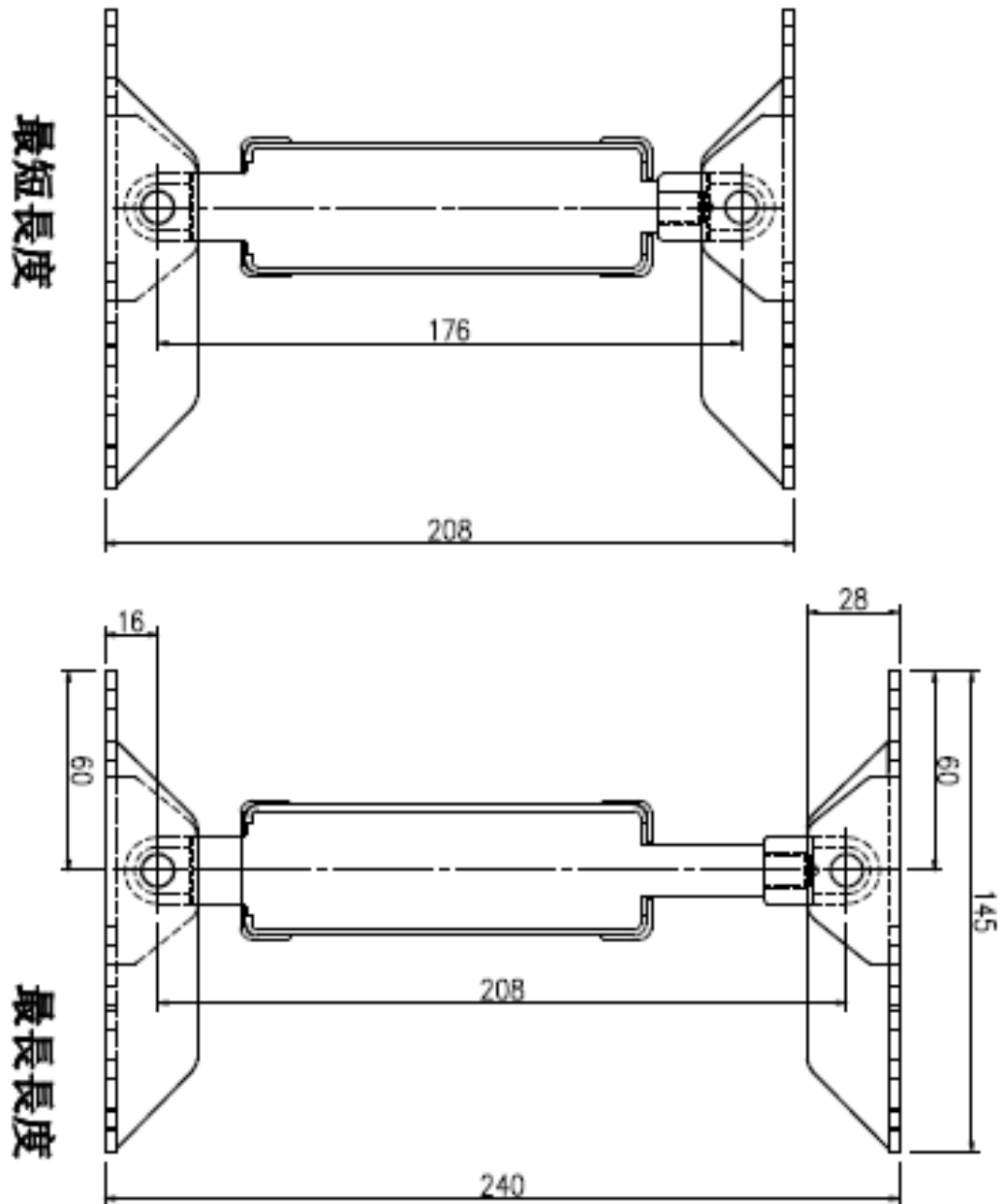


圖 4.1 低容量液流阻尼器元件外觀尺寸（單位：mm）

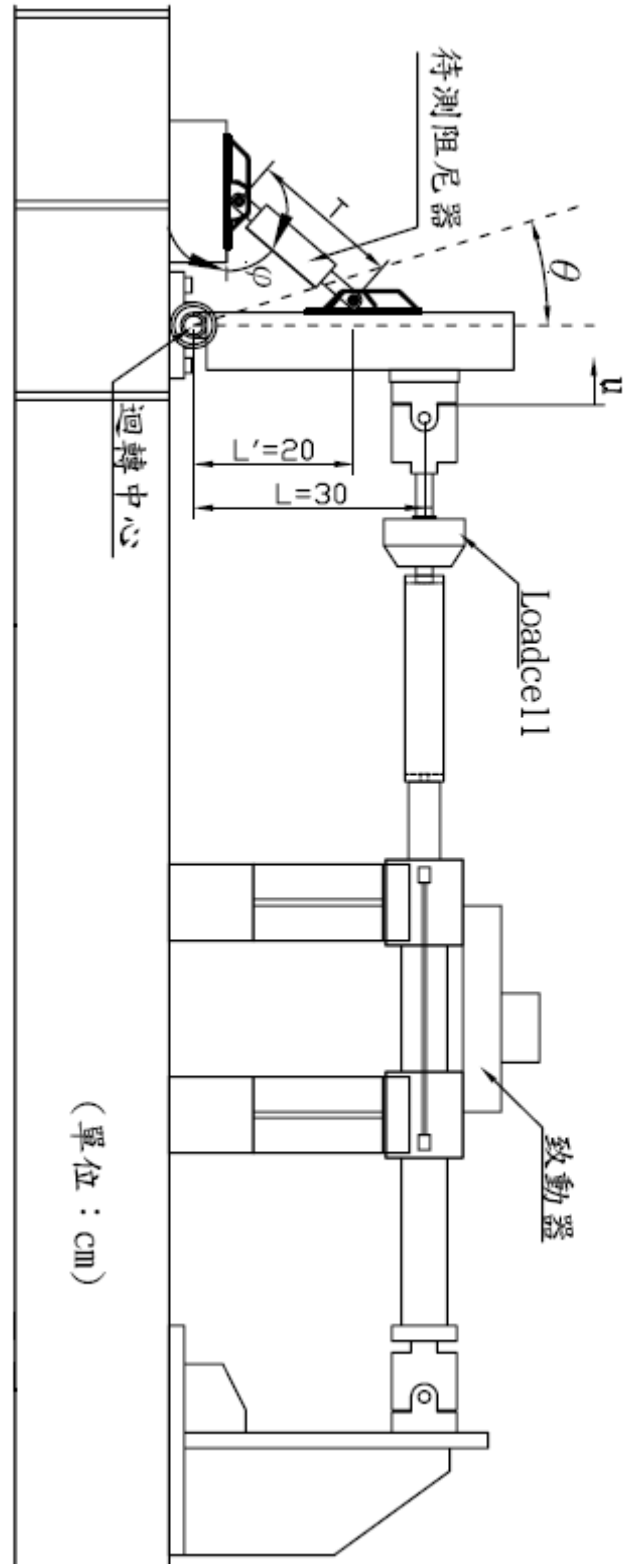


圖 4.2 元件測試構架設計圖

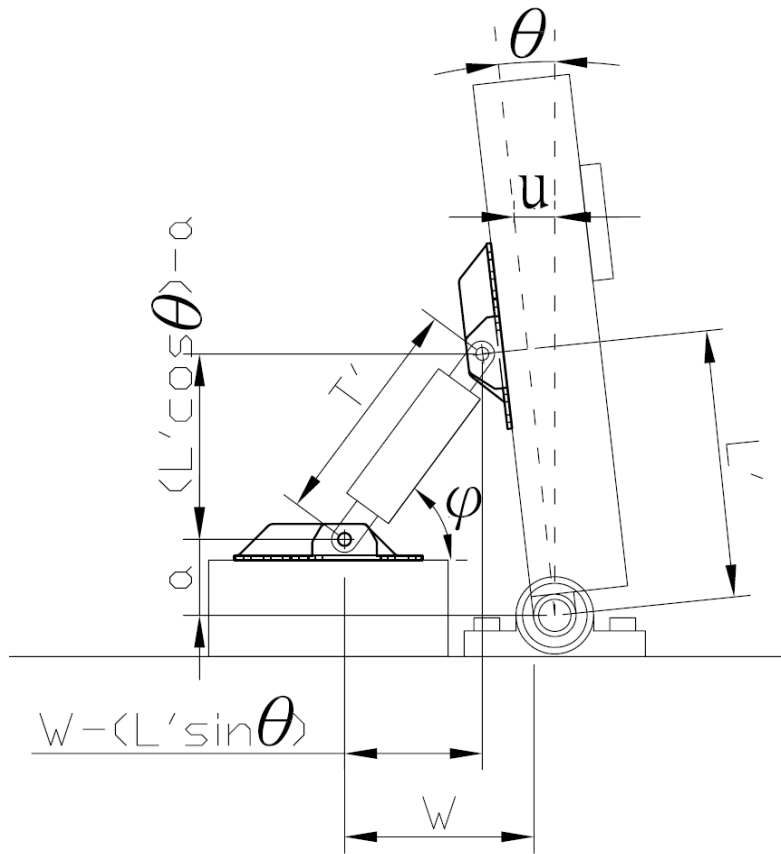


圖 4.3 液流阻尼器擾動示意圖

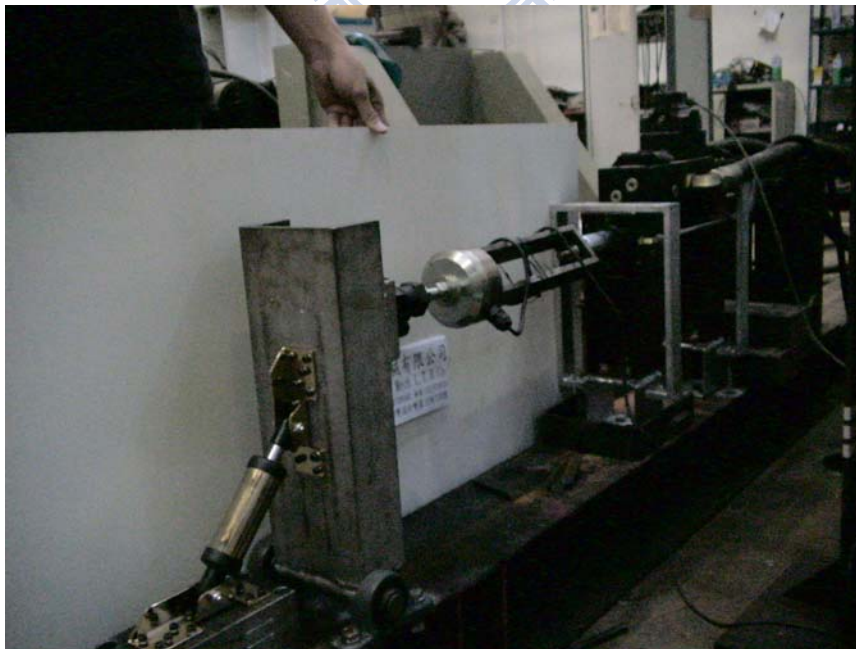


圖 4.4 元件測試構架組裝完成照片

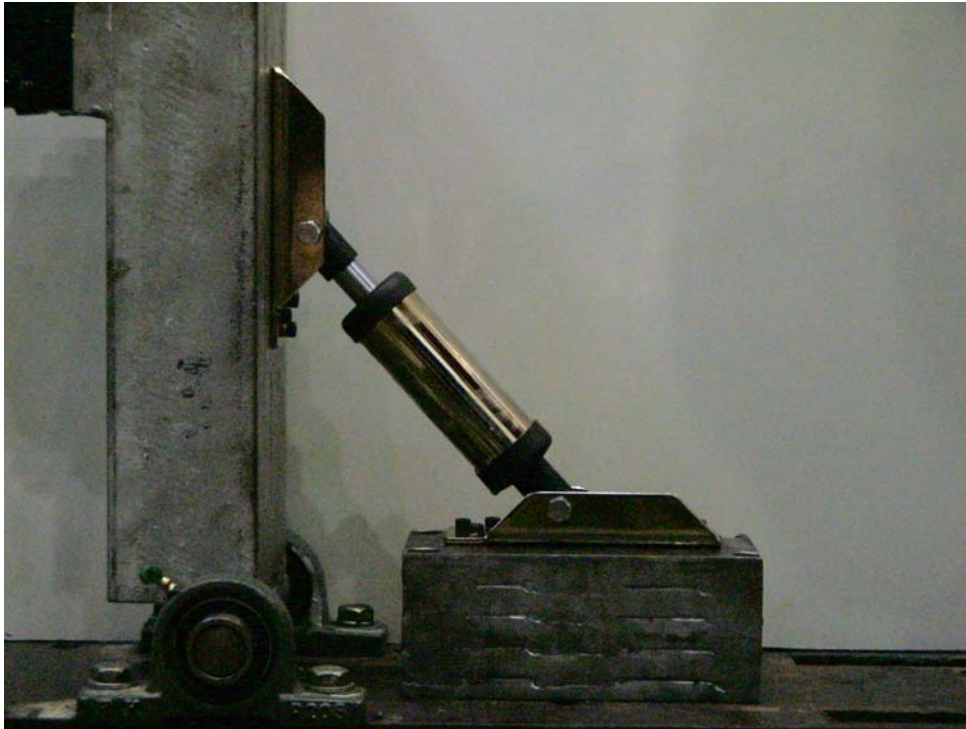


圖 4.5 元件測試照片

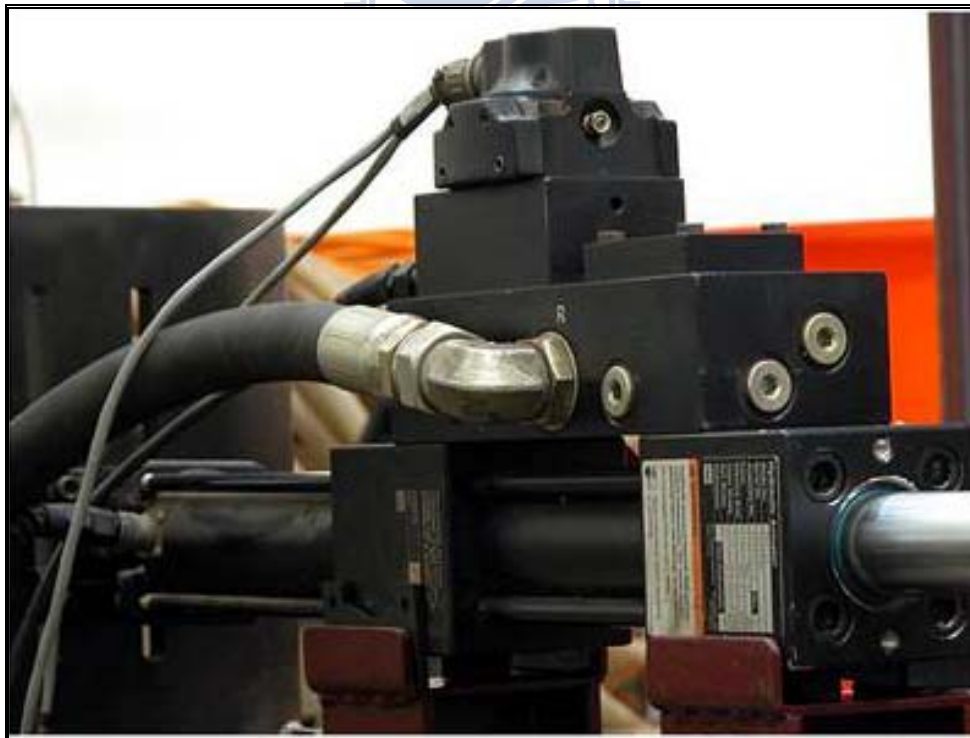


圖 4.6 MTS1.5tf 動態油壓致動器



圖 4.7 荷重元 (Load Cell)



圖 4.8 訊號擷取系統

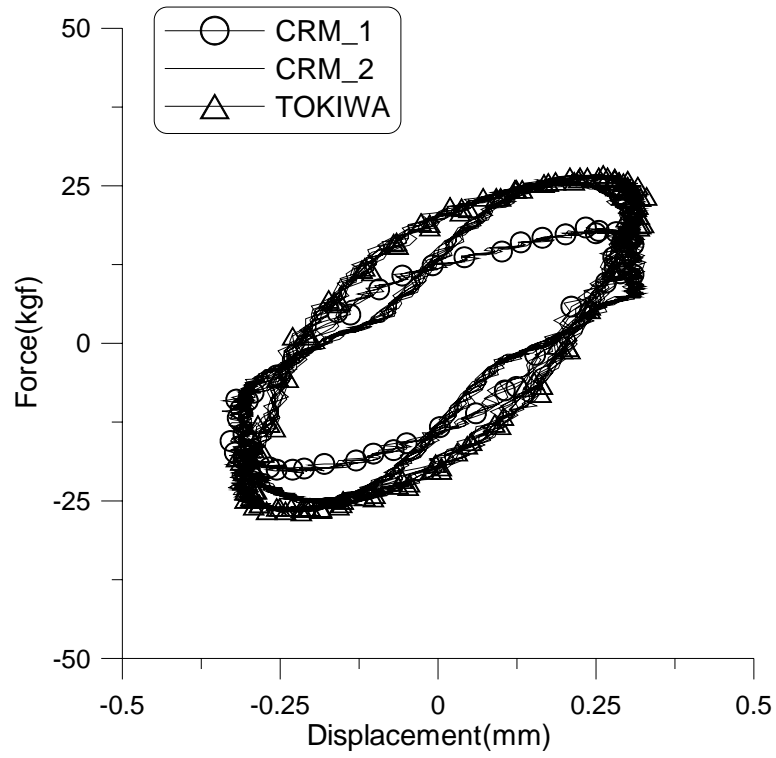


圖 4.9 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/480$ rad)

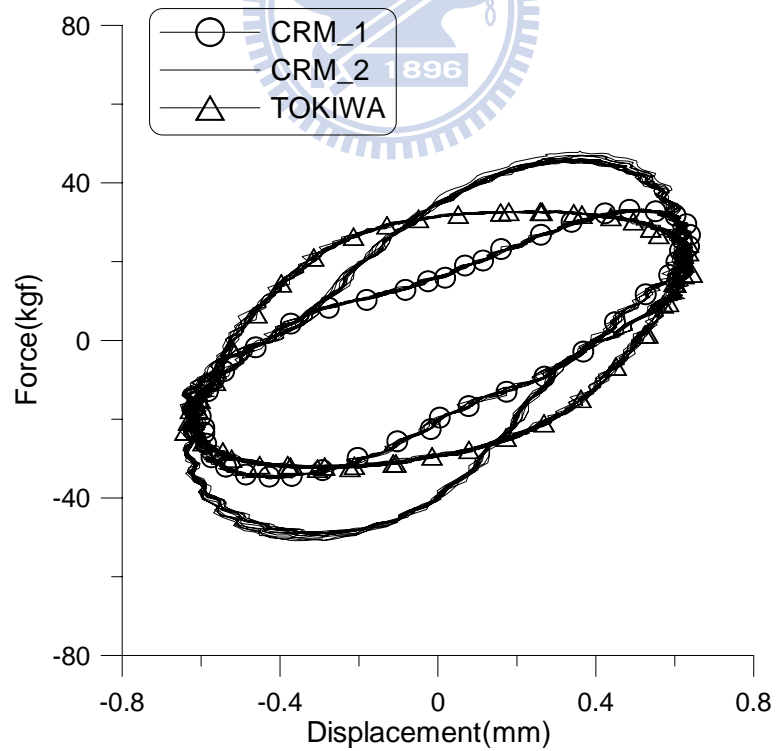


圖 4.10 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5Hz$, $\theta = 1/240$ rad)

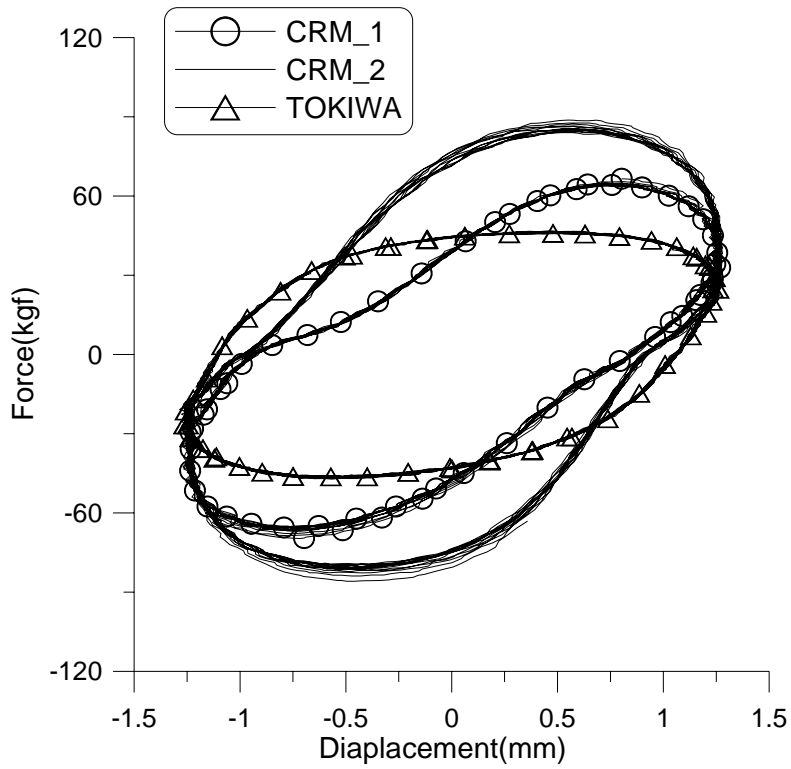


圖 4.11 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5\text{Hz}$, $\theta = 1/120\text{ rad}$)

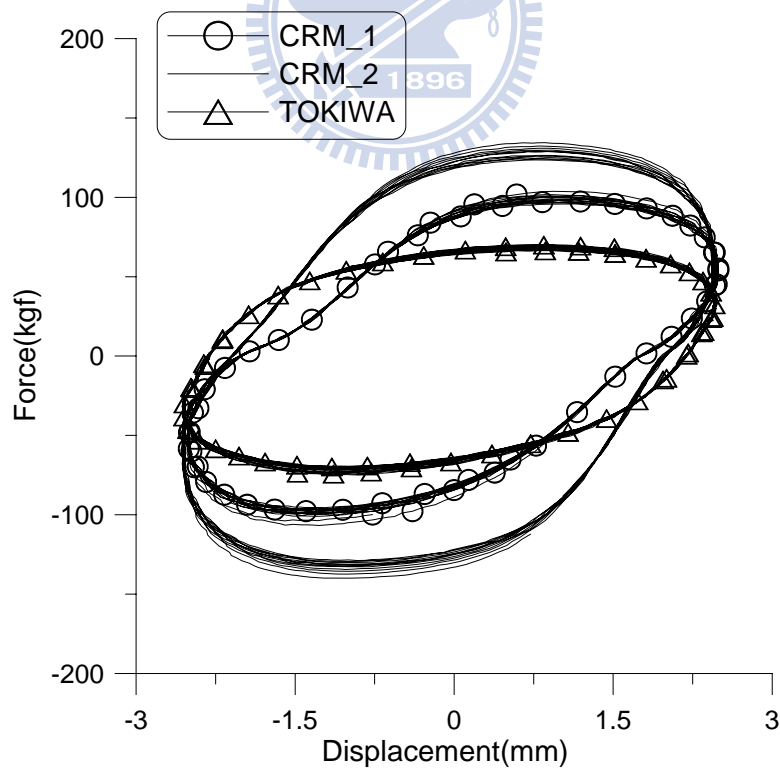


圖 4.12 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5\text{Hz}$, $\theta = 1/60\text{ rad}$)

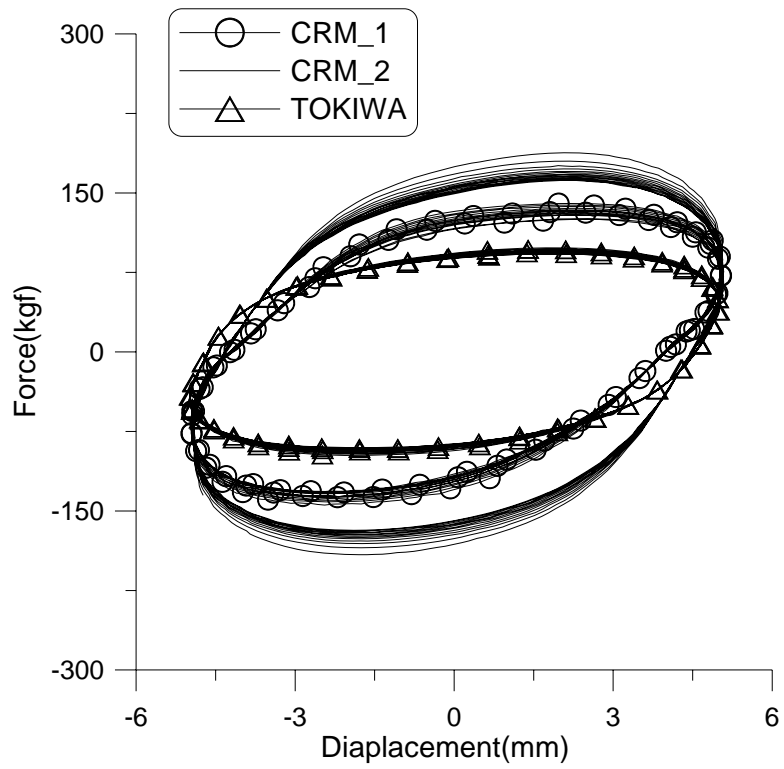


圖 4.13 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 0.5\text{Hz}$, $\theta = 1/30 \text{ rad}$)

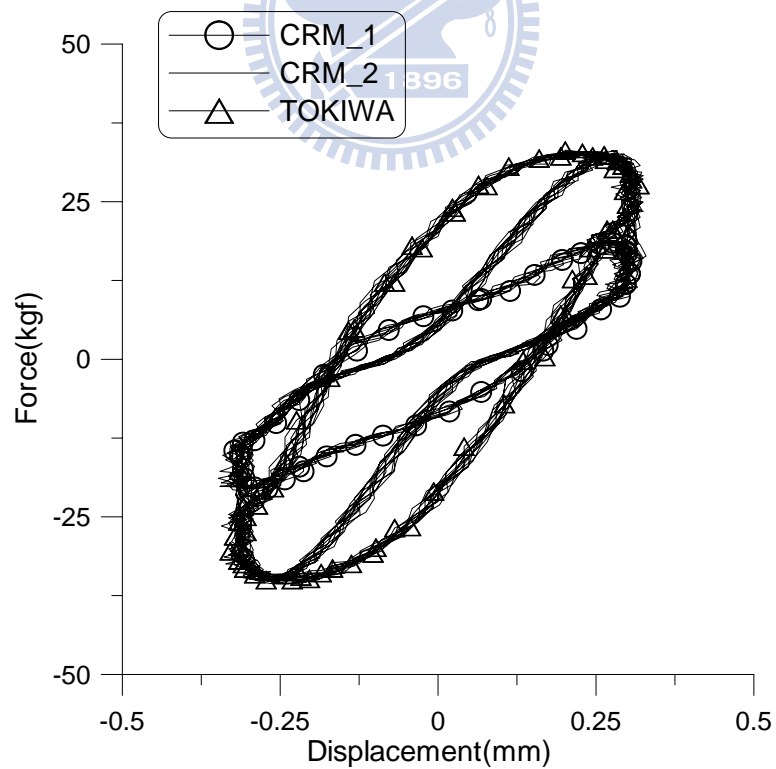


圖 4.14 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1\text{Hz}$, $\theta = 1/480 \text{ rad}$)

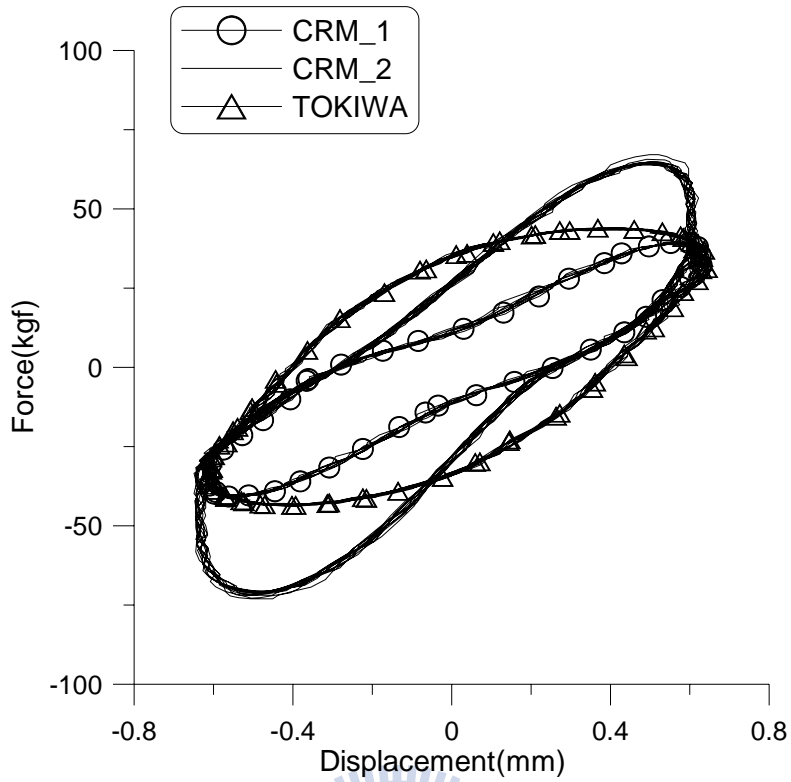


圖 4.15 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1\text{Hz}$, $\theta = 1/240 \text{ rad}$)

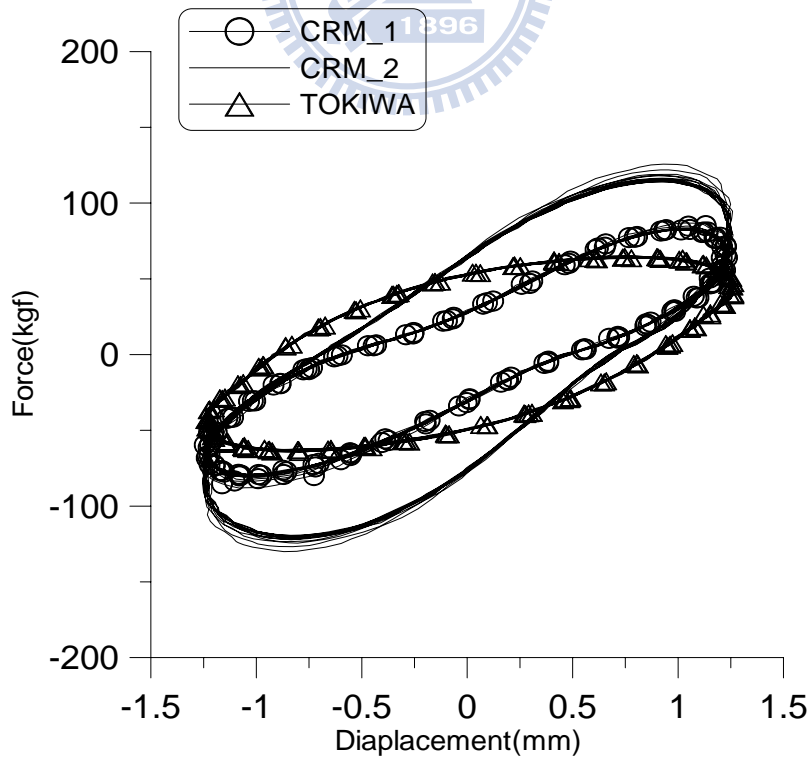


圖 4.16 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1\text{Hz}$, $\theta = 1/120 \text{ rad}$)

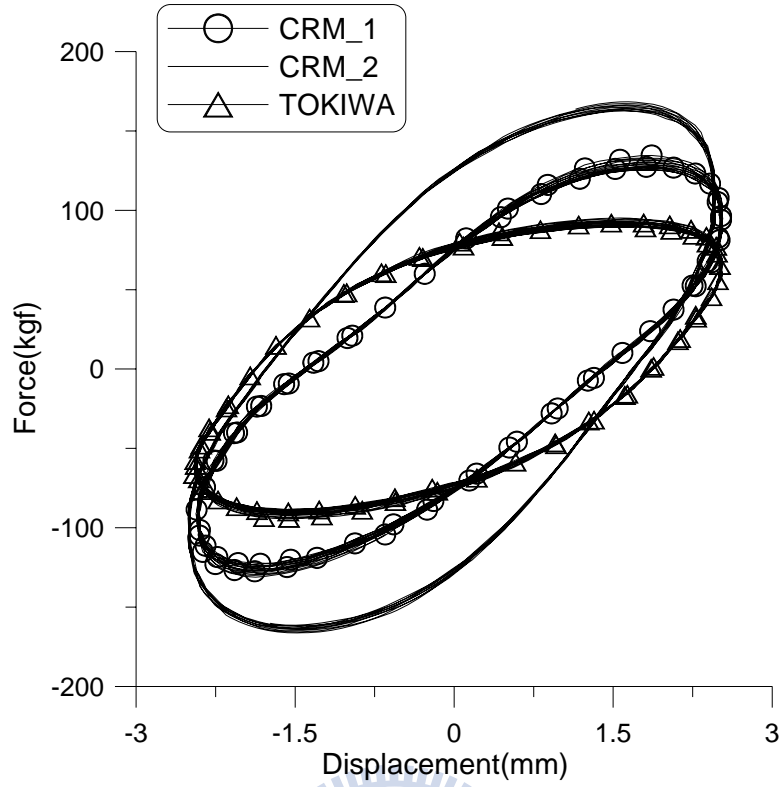


圖 4.17 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1\text{Hz}$, $\theta = 1/60 \text{ rad}$)

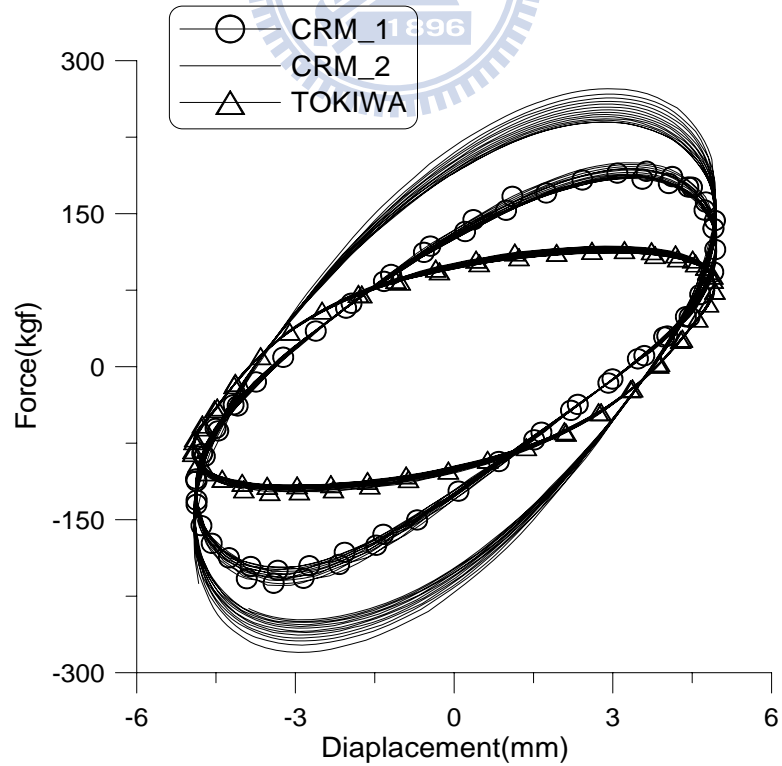


圖 4.18 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 1\text{Hz}$, $\theta = 1/30 \text{ rad}$)

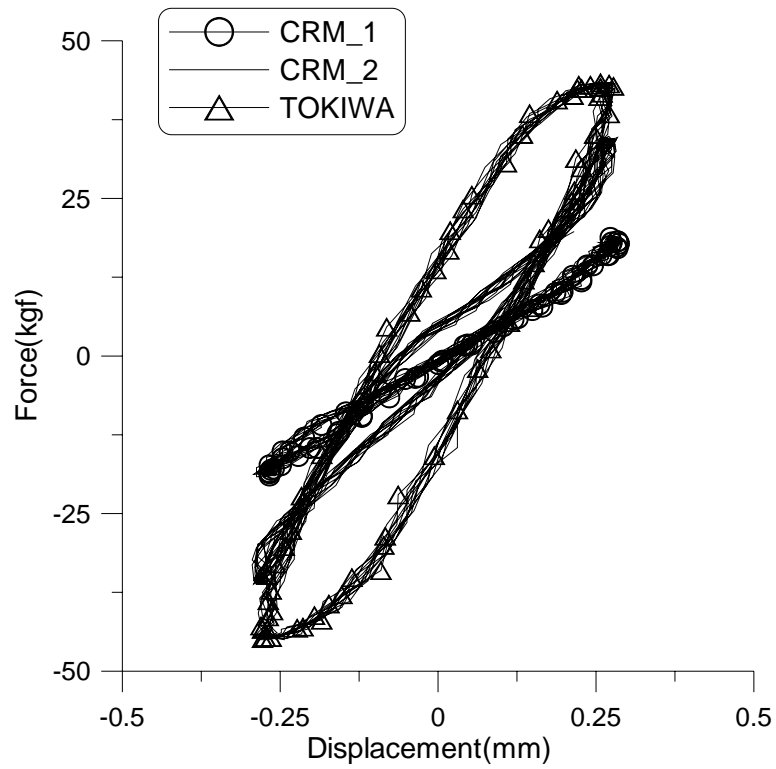


圖 4.19 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/480$ rad)

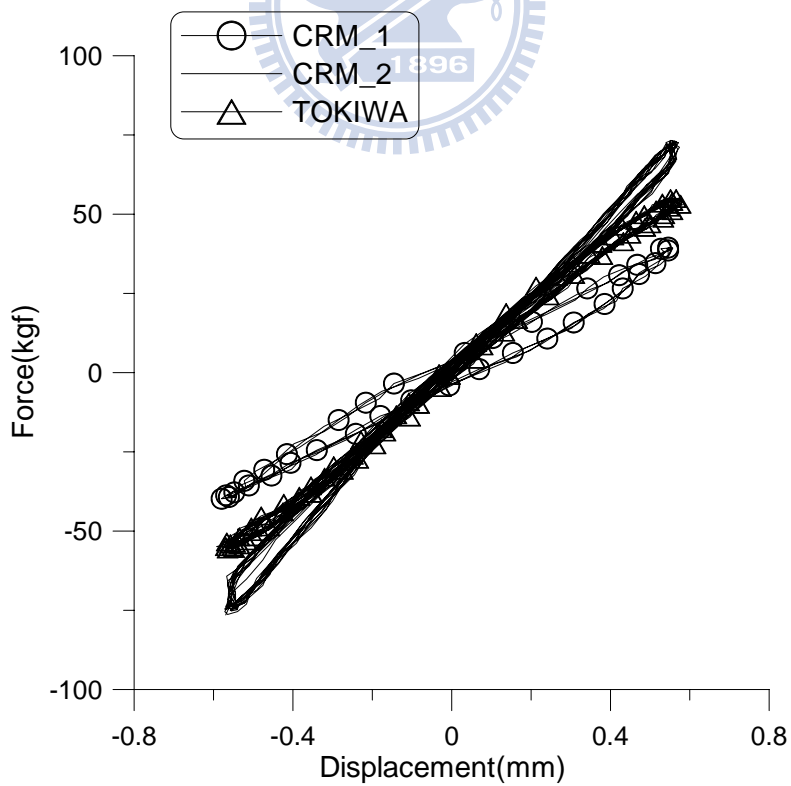


圖 4.20 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/240$ rad)

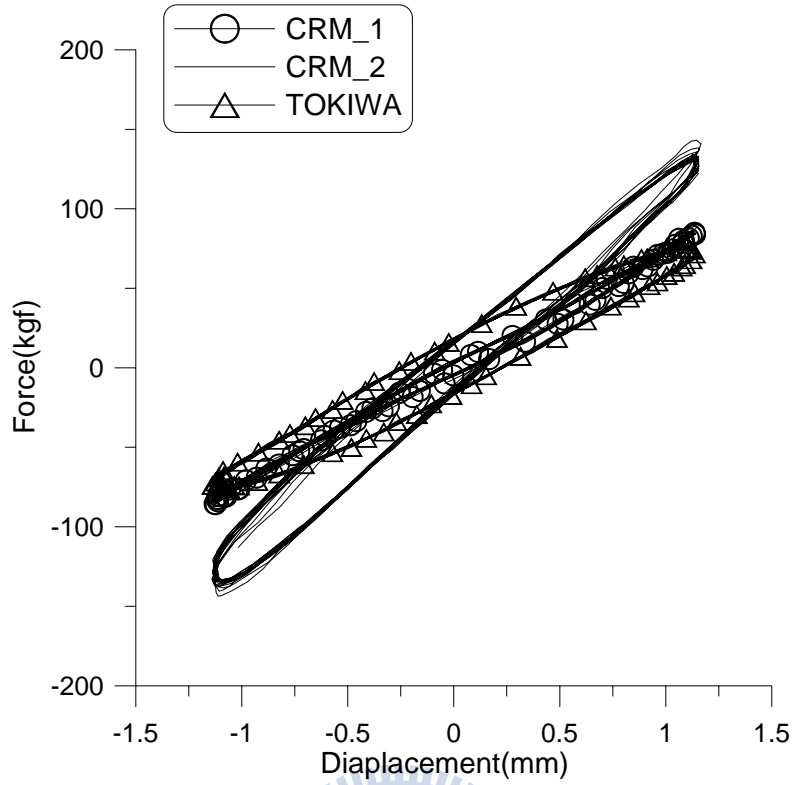


圖 4.21 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/120$ rad)

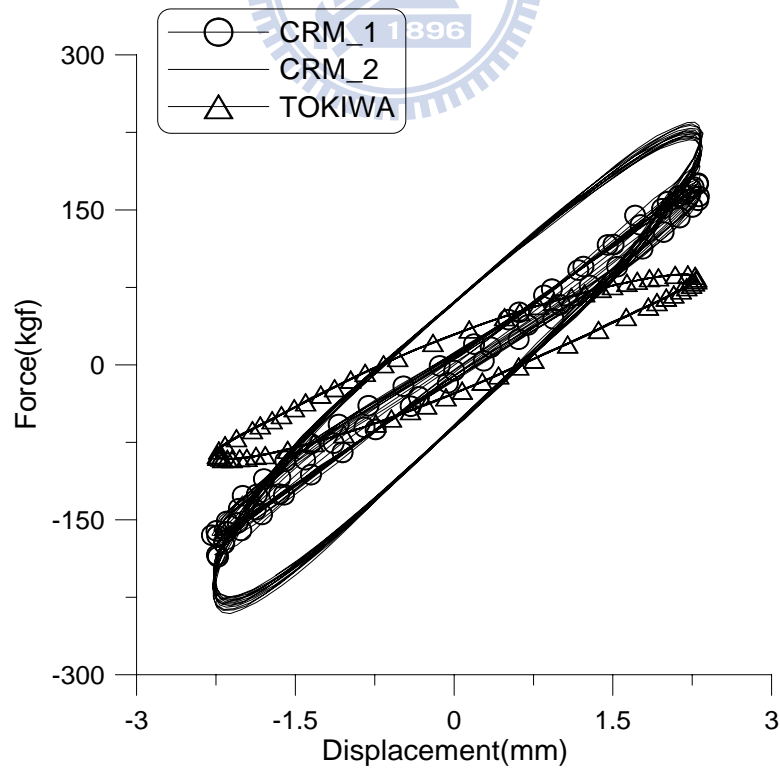


圖 4.22 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2Hz$, $\theta = 1/60$ rad)

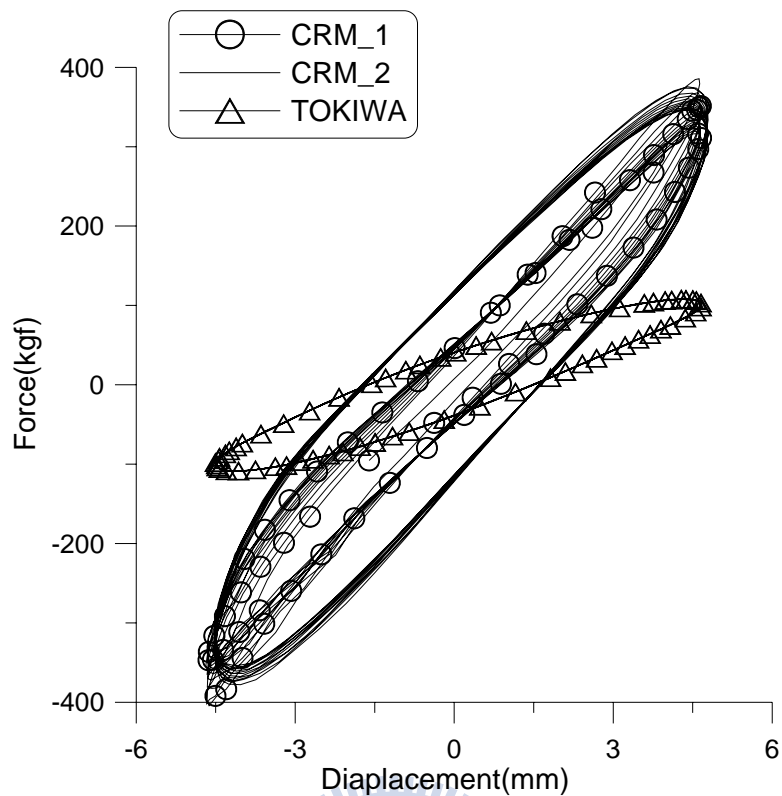


圖 4.23 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 2\text{Hz}$, $\theta = 1/30 \text{ rad}$)

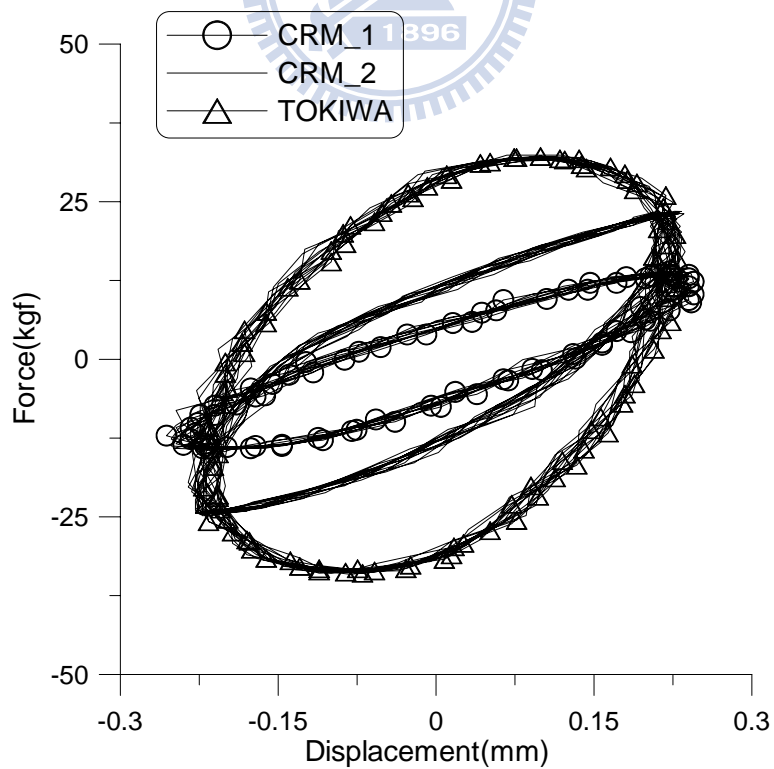


圖 4.24 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3\text{Hz}$, $\theta = 1/480 \text{ rad}$)

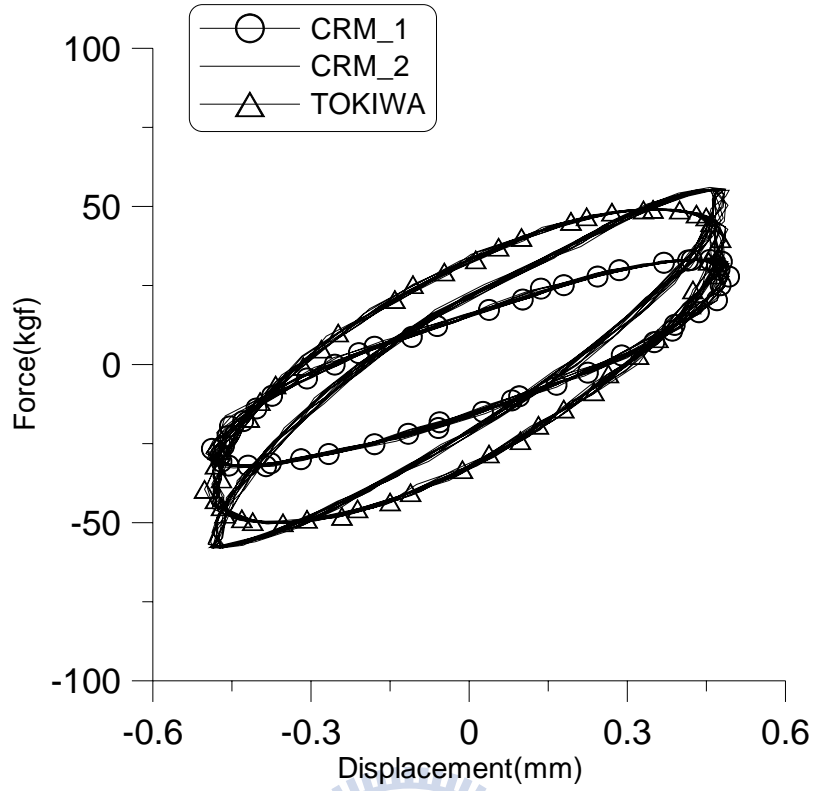


圖 4.25 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3\text{Hz}$, $\theta = 1/240 \text{ rad}$)

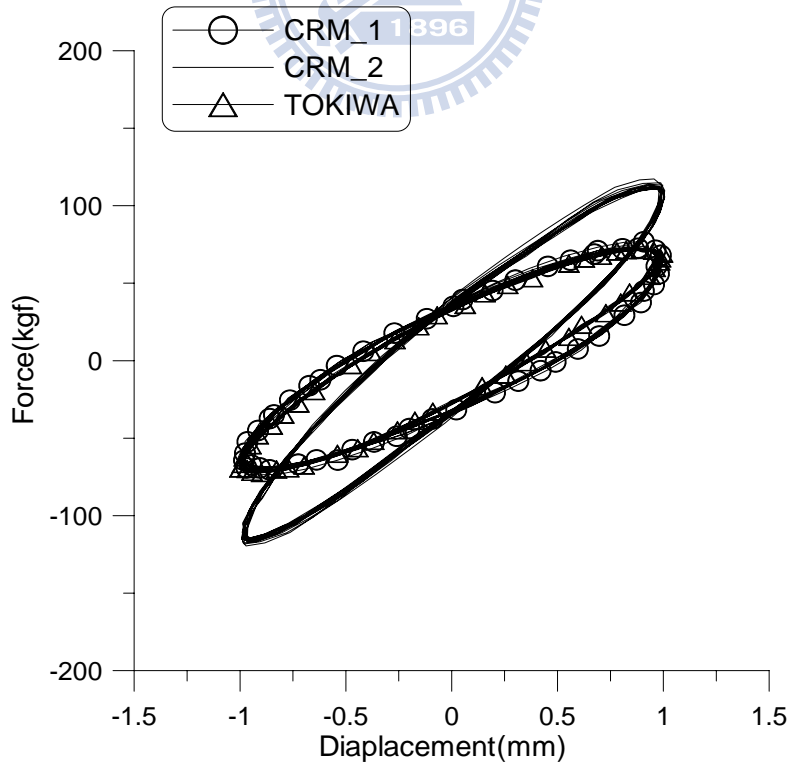


圖 4.26 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3\text{Hz}$, $\theta = 1/120 \text{ rad}$)

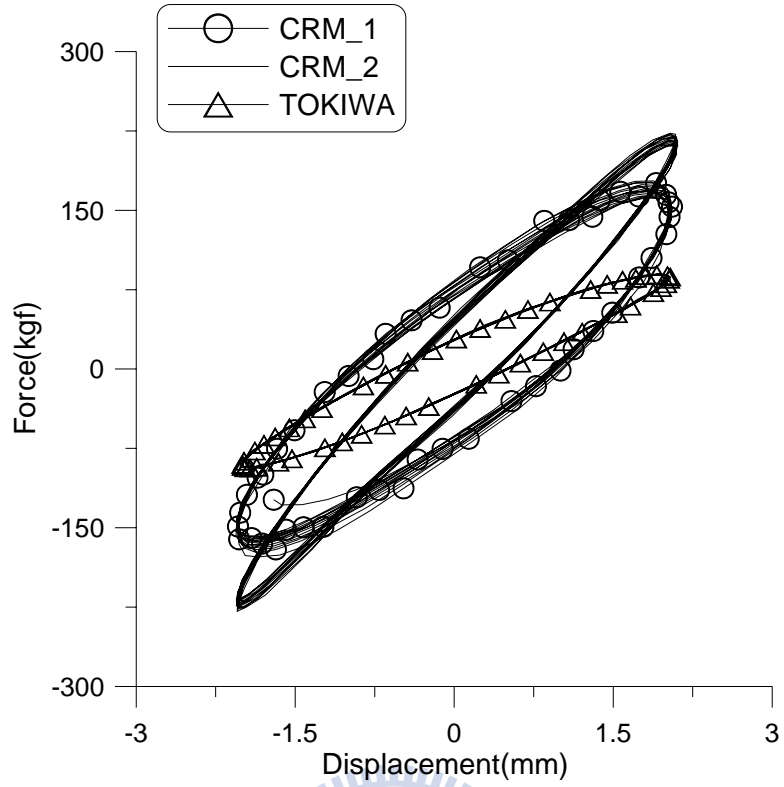


圖 4.27 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/60$ rad)

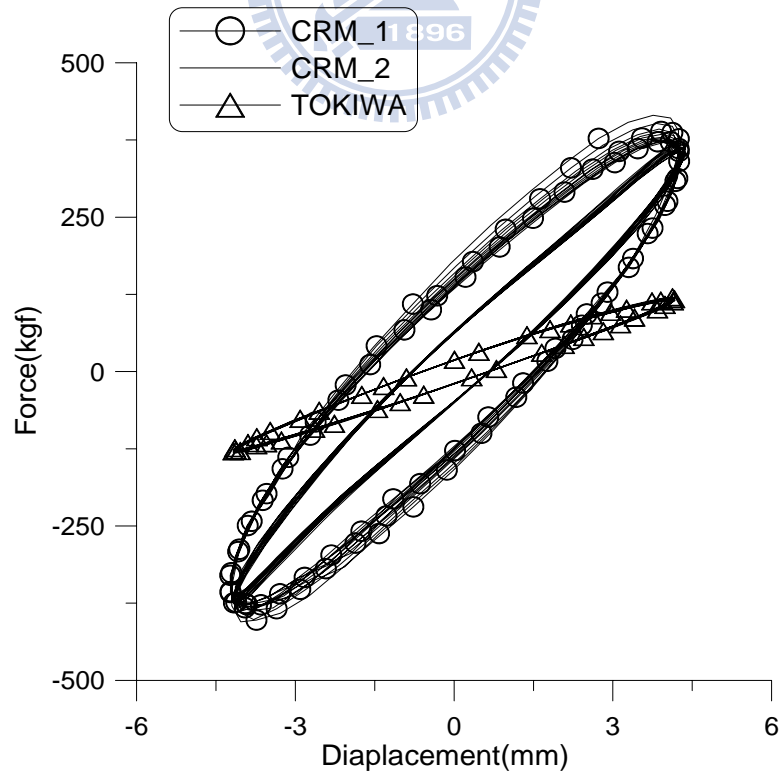


圖 4.28 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 3Hz$, $\theta = 1/30$ rad)

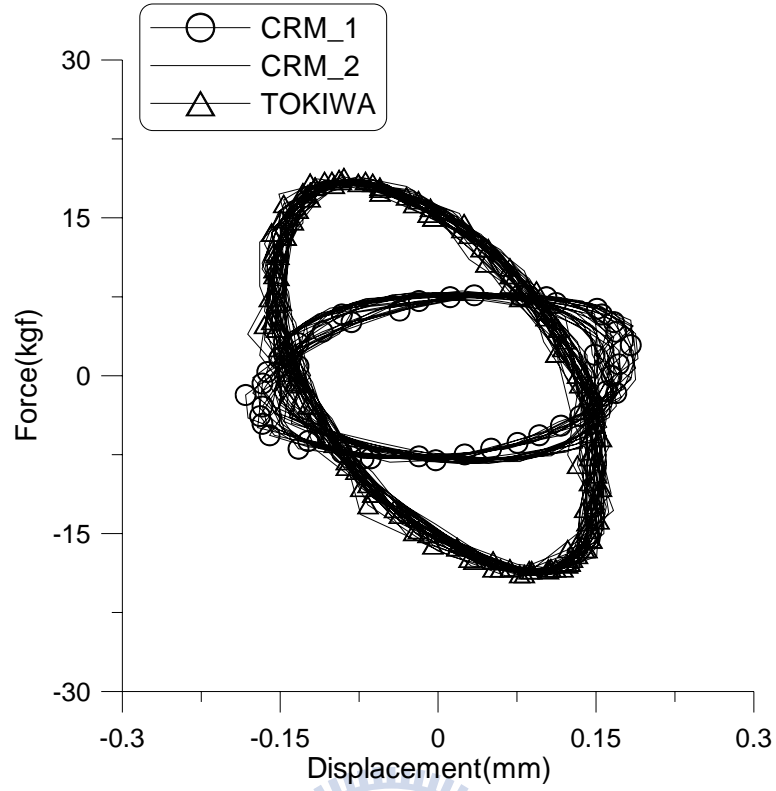


圖 4.29 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5\text{Hz}$, $\theta = 1/480\text{ rad}$)

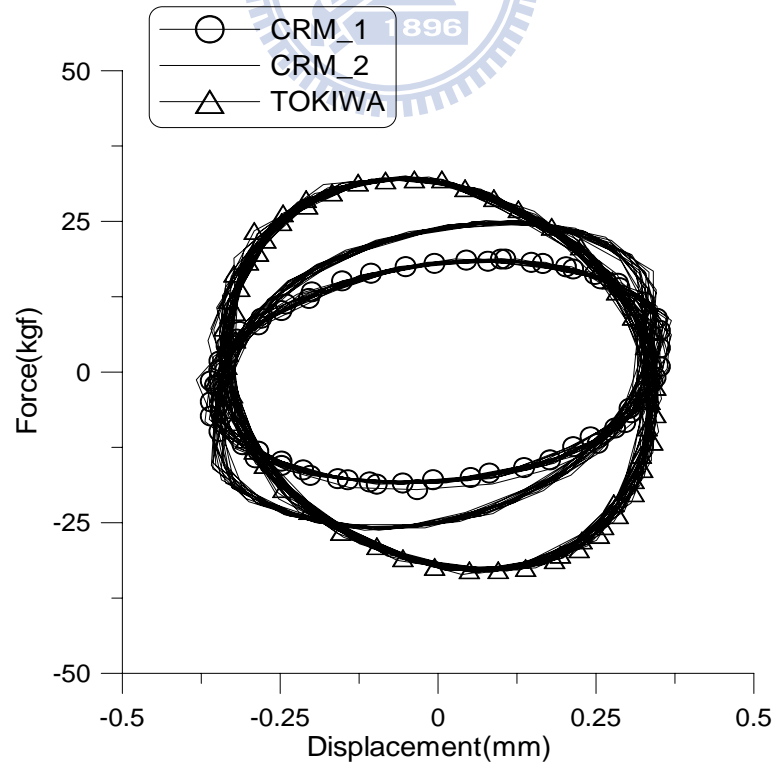


圖 4.30 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5\text{Hz}$, $\theta = 1/240\text{ rad}$)

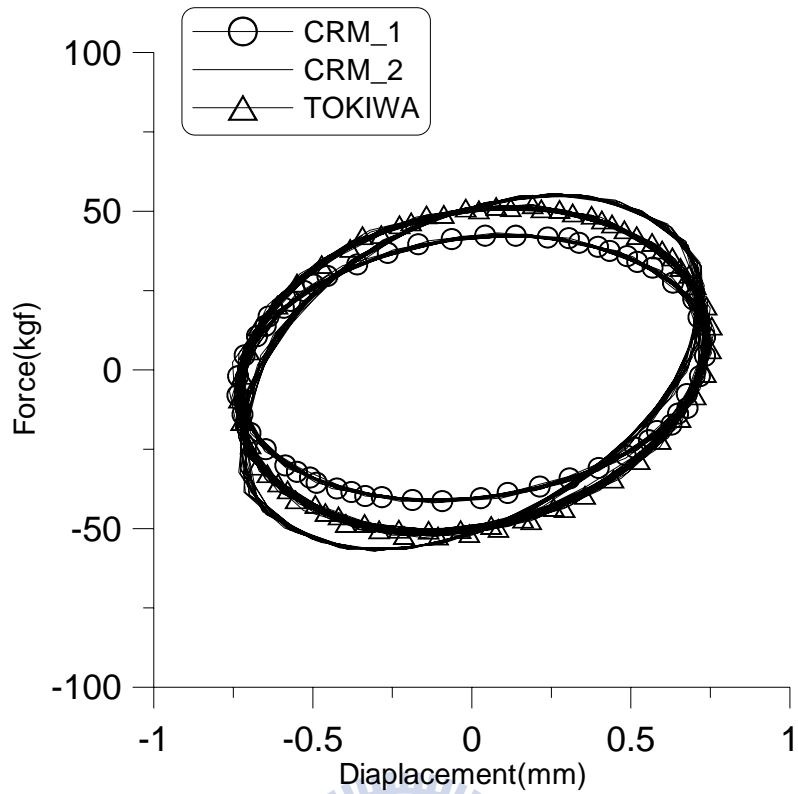


圖 4.31 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5\text{Hz}$, $\theta = 1/120 \text{ rad}$)

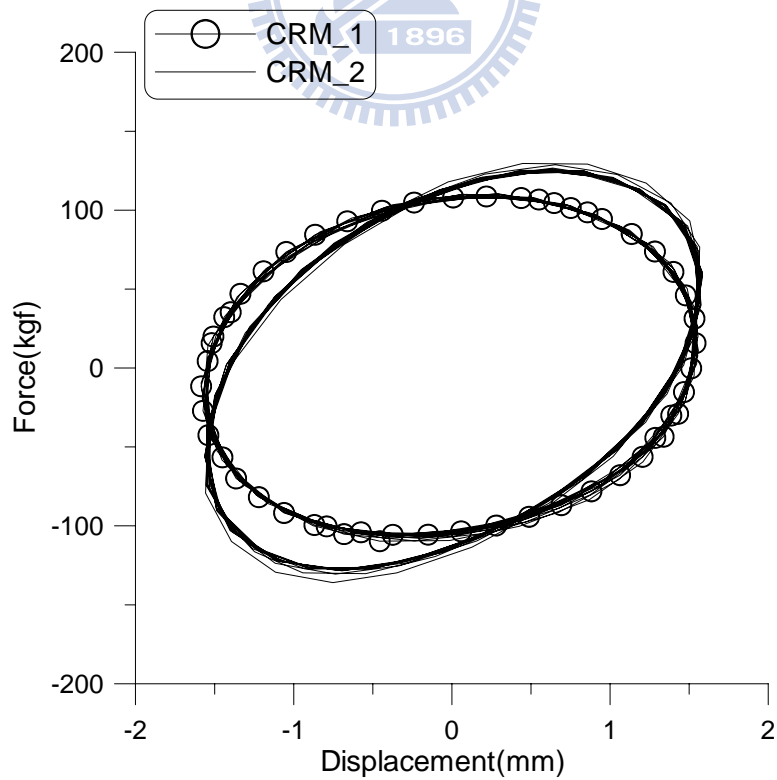


圖 4.32 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5\text{Hz}$, $\theta = 1/60 \text{ rad}$)

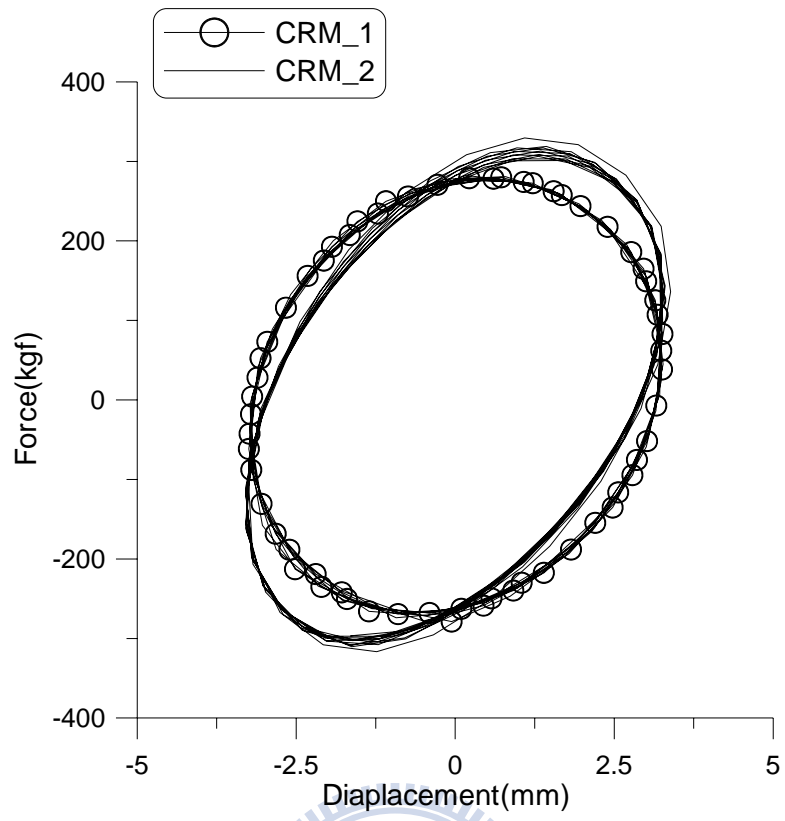


圖 4.33 各式阻尼器之遲滯迴圈($\Omega = 5\text{Hz}$, $\theta = 1/30 \text{ rad}$)

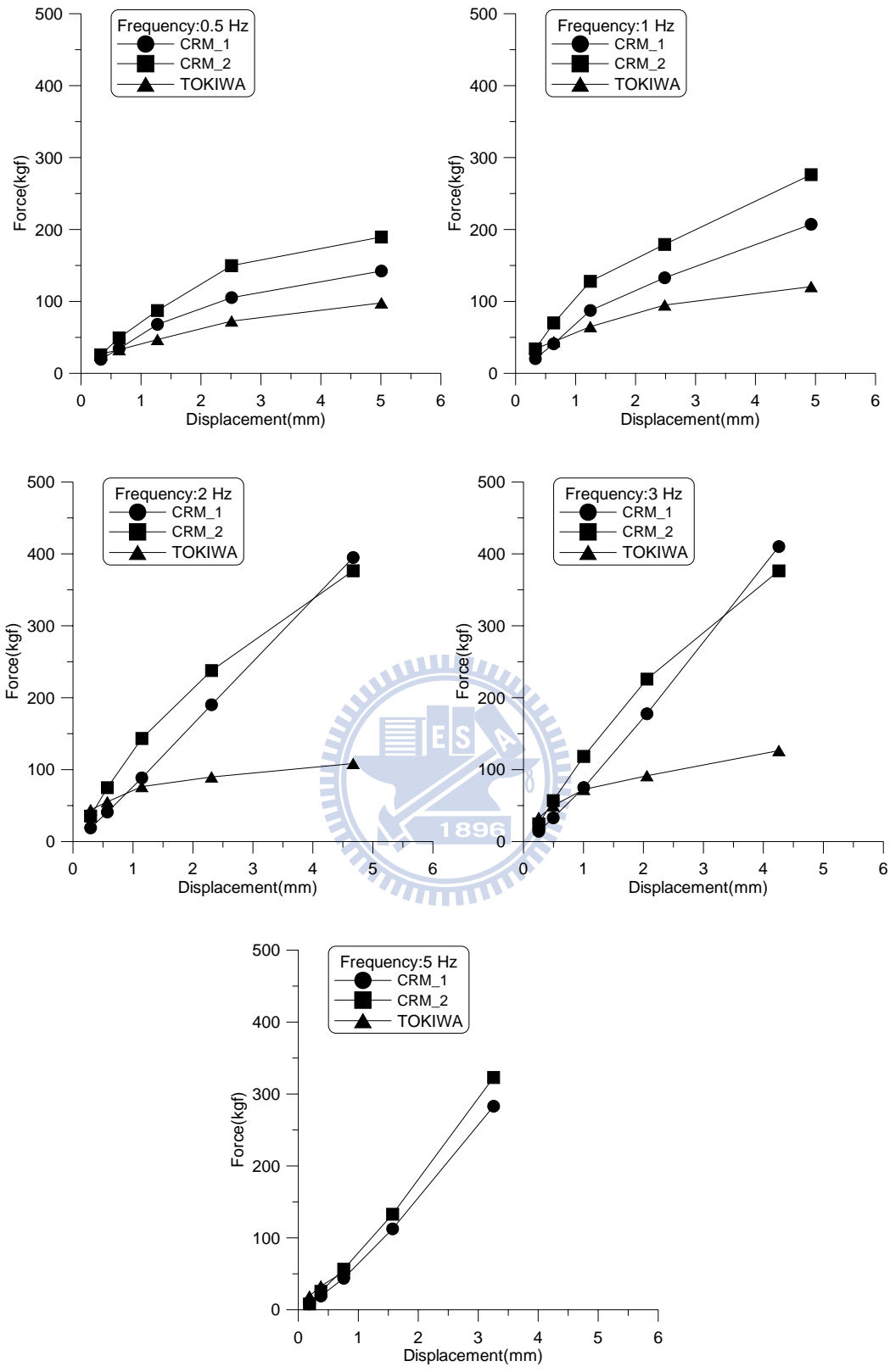


圖 4.34 各式阻尼器最大出力 vs.位移變化曲線圖

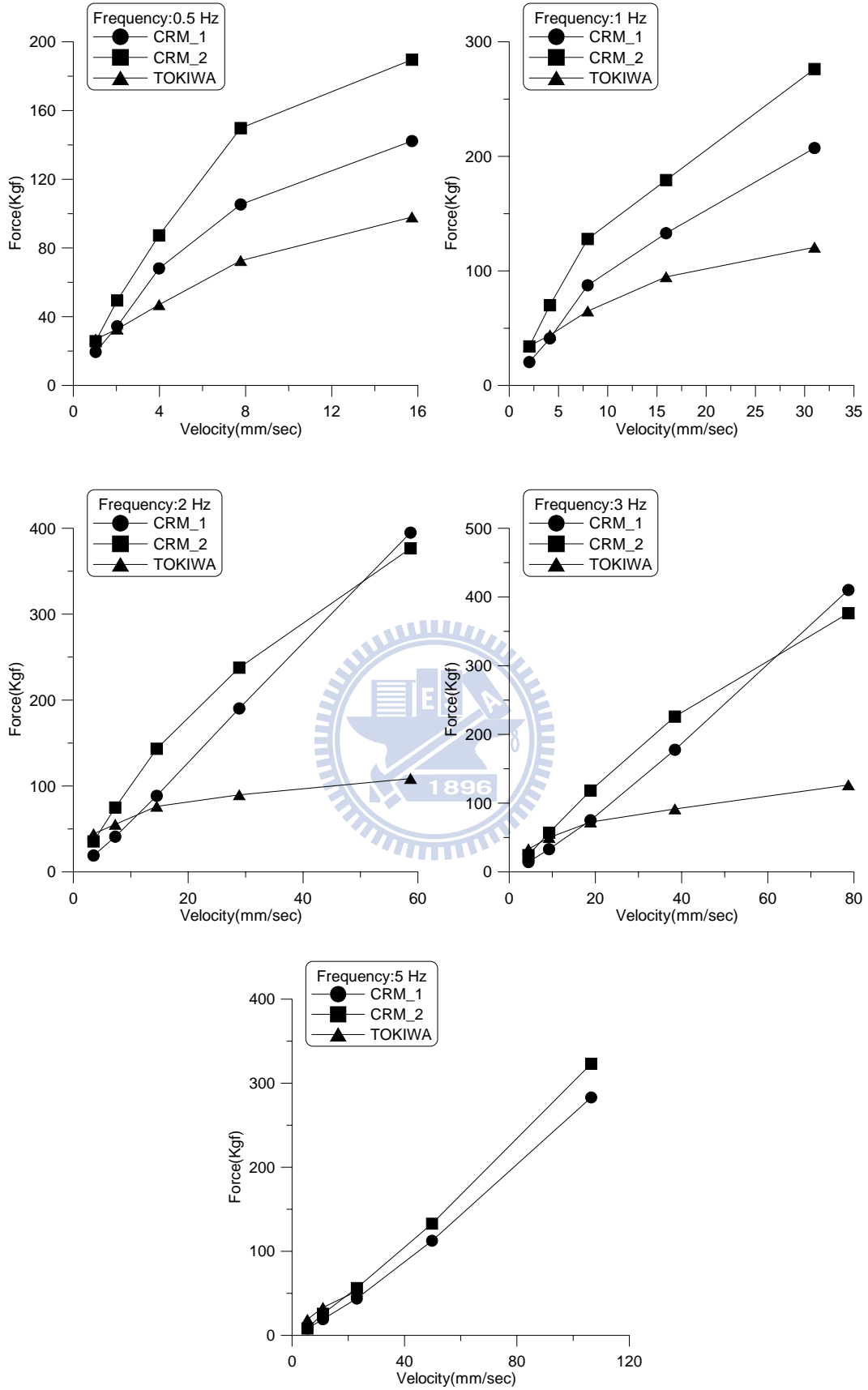


圖 4.35 各式阻尼器最大出力 vs.速度變化曲線圖

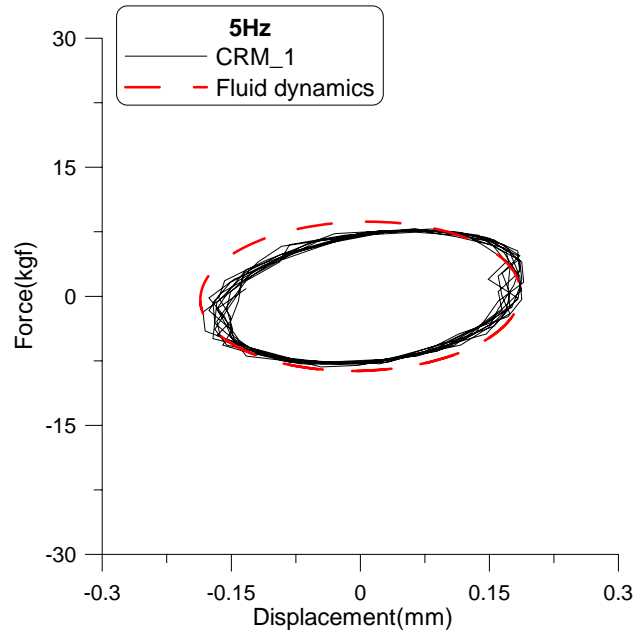


圖 4.36 液流阻尼器之遲滯迴圈比較

($\theta = 1/480$ rad , $R=8$ mm 、 $L=11$ mm 、 $h=0.72$ mm)

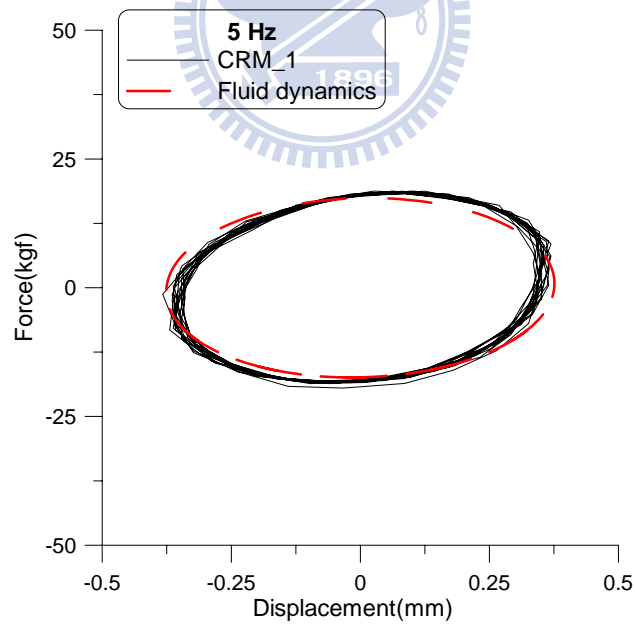


圖 4.37 液流阻尼器之遲滯迴圈比較

($\theta = 1/240$ rad , $R=8$ mm 、 $L=11$ mm 、 $h=0.72$ mm)

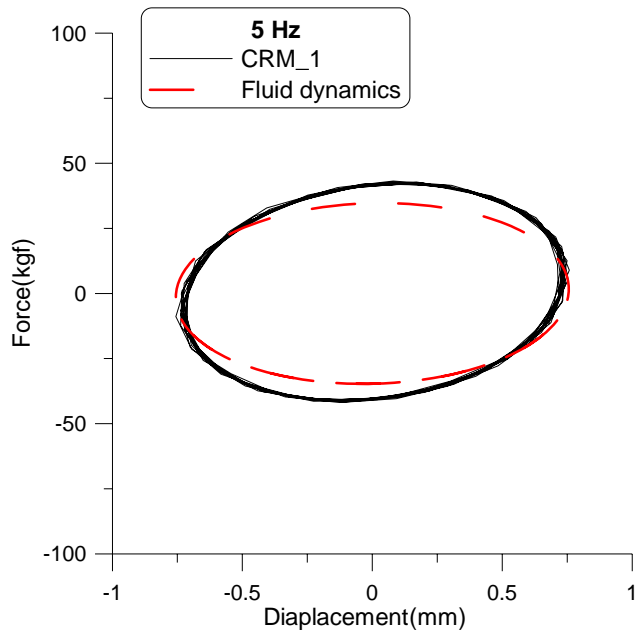


圖 4.38 液流阻尼器之遲滯迴圈比較

($\theta = 1/120 \text{ rad}$, $R=8\text{mm}$ 、 $L=11\text{mm}$ 、 $h=0.72\text{mm}$)

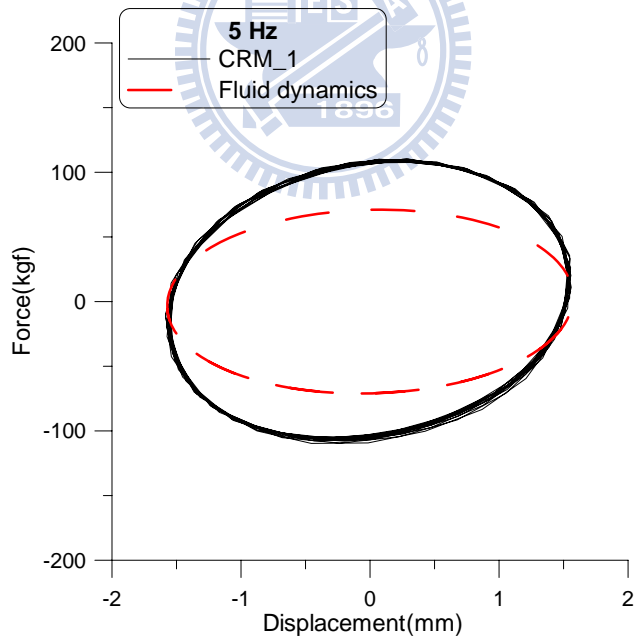


圖 4.39 液流阻尼器之遲滯迴圈比較

($\theta = 1/60 \text{ rad}$, $R=8\text{mm}$ 、 $L=11\text{mm}$ 、 $h=0.72\text{mm}$)

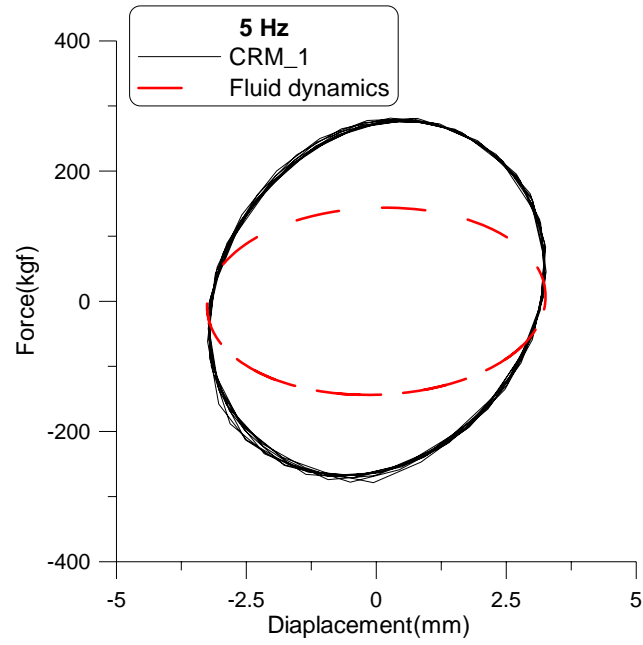
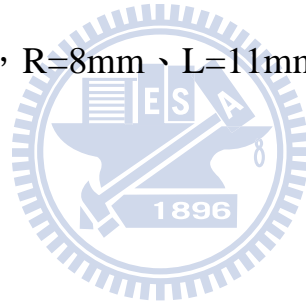


圖 4.40 液流阻尼器之遲滯迴圈比較

($\theta = 1/30 \text{ rad}$, $R=8\text{mm}$ 、 $L=11\text{mm}$ 、 $h=0.72\text{mm}$)



第五章 液流阻尼器之防振(震)性能試驗

5.1 前言

前章有關低容量液流阻尼器之元件測試與分析，確認其於往復運動過程中之遲滯消能行為，具有成為結構抗震阻尼器之應用潛力。本章乃以清瑞機械研製之低容量液流阻尼器進行一系列之防振(震)應用，包括：

1. 設備基座之減振；
2. 鋼結構之耐震性能測試；及
3. 木造結構之耐震性能測試。



5.2 低容量液流阻尼器在設備基座之減振性能測試

高科技廠房對結構微振動量要求特別嚴格，因為廠房內高精密度之設備、儀器所生產製造之產品均以微米甚至奈米為單位。廠房環境若振動過大（例如機台運轉時所產生的微振動）將影響製程設備的運作，降低產品的良率，造成損失甚至失去競爭力。為了避免微振動問題對製程與產品造成不良影響，本研究將考慮以低容量液流阻尼器應用於設備基座之減振，將阻尼器安裝至基座下方以吸收機台之振動。

5.2.1 試驗規劃(Experimental Setup)

本系列測試係於交通大學土木工程系之大型結構實驗室進行，測試構架之設計如圖 5.1 所示。試驗時首先將鋼板固定於四組支撐架上，支撐架如圖 5.2 所示，低容量阻尼器則安裝於支撐架間之中點位置。鋼板及基座上分別裝設一組加速規(垂直向)，如圖 5.8 所示，並利用激振器(Shaker)產生垂直向振動作為輸入擾動，每次試驗均擷取激振器運轉達穩態後之訊號進行分析，比較加裝阻尼器與未裝阻尼器之測試結果。圖 5.6 為安裝完成低容量液流阻尼器之鋼板基座，圖 5.7 為激振器安裝於鋼板上之照片，用以模擬廠房機台之擾動。試驗時量取鋼板上之加速度振動反應作為減振效果評估之依據。

本系列試驗所使用之設備列舉如下：

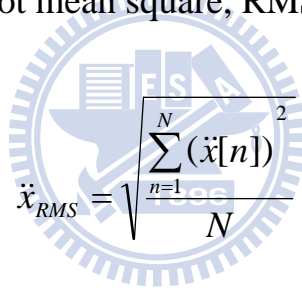
- (A) 加速度規/速度規 (圖 5.3)：用以量測鋼板以及基座之加速度或速度(可選擇)，其規格參閱表 5.1。
- (B) 訊號擷取系統 (圖 5.4)：將荷重元及致動器量測到之反力與位移訊號擷取整理置電腦中，再由電腦進行資料的存取，其規格參閱表 5.2。
- (C) 激振器(Shaker) (圖 5.5)：製造簡諧波(Sinusoid)擾動，識別結構之振動特性(頻率)。

(D)筆記型電腦：供資料儲存與頻譜分析之用，其規格參閱表 5.3。

5.2.2 資料擷取與訊號處理分析

本系列試驗資料擷取系統設定之取樣頻率(sampling rate)為 1000Hz，總取樣時間為 180 sec，即每一測點共有 180,000 筆資料可供資料處理與分析之用。本試驗將以加速度均方根值作為評估樓板振動之物理量，並由三分之一倍頻分析瞭解減振情況在頻域之分佈，其計算方式簡要說明如下：

■ 加速度均方根值 (root mean square, RMS)：


$$\ddot{x}_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\ddot{x}[n])^2}{N}}$$

其中， \ddot{x}_{RMS} 為加速度均方根； $\ddot{x}[n]$ 為每一瞬時之加速度反應； $N = 180000$ 為量測之資料總數。

減振液流阻尼器安裝前、後之加速度 RMS 振動量折減率可根據下式計算：

$$\text{折減率} = \frac{(\ddot{x}_{RMS} \text{減振前} - \ddot{x}_{RMS} \text{減振後})}{\ddot{x}_{RMS} \text{減振前}} \times 100\%$$

■ 三分之一倍頻分析：

1/3 倍頻速度均方根振動量 $\sigma_{\dot{x}}(f_{ic})$ 之分貝值 $\sigma_{\dot{x},dB}(f_{ic})$ 可根據下式換算：

$$\sigma_{\dot{x},dB}(f_{ic}) = 20 \log_{10} \frac{\sigma_{\dot{x}}(f_{ic})}{\sigma_{\dot{x},ref}}$$

其中 $\sigma_{\dot{x},ref} = 1 \mu \text{ in/sec} = 1 \times 10^{-6} \text{ in/sec} = 2.54 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ ，為速度均方根之參考值。

5.2.3 測試結果評估

圖 5.9 至圖 5.11 為同一測點進行三次測試，由三次的測試結果比較低容量液流阻尼器安裝前、後之鋼板與基座垂直向加速度反應歷時。其結果顯示，於鋼板上之加速度歷時反應均有明顯的折減效果，說明低容量液流阻尼器可以有效吸收激振器運轉時所產生之振動，降低鋼板之加速度反應。

表 5.4 為激振器運轉至 1200 rpm(擾動頻率 20Hz)條件下之鋼板加速度均方根值與振動折減率統計表。結果顯示，於激振器運轉相同情況下之三次測試，測點之振動反應折減率分別為 28.4%、31.9% 及 31.4%，鋼板上之振動均有良好的折減效果，三次測試之折減率都有約 30% 之折減率。

圖 5.12~圖 5.14 為基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較。其結果顯示，加裝低容量液流阻尼器後三次測試均能降低 10Hz 以上之振動能量，尤以 30Hz~100Hz 間之減振效果最顯著，說明低容量液流阻尼器有應用於設備減振之潛力。

5.2.4 小結

本試驗主要針對設備基座安裝低容量液流阻尼器前、後進行鋼板振動量測，以激振器模擬廠房內之機器運作時之擾動，將低容量液流阻尼器安裝至基台下方俾便瞭解安裝低容量液流阻尼器之控制效益。振動量測分析結果顯示，於鋼板下方安裝低容量液流阻尼器的確能發揮減振作用，加速度均方根值折減率平均可達 30.6%，且由 1/3 倍頻圖可知低容量液流阻尼器主要在降低 10Hz 以上之高頻反應，而以 30~100Hz 頻寬範圍之減振效果最為顯著。由這些試驗結果顯示，低容量液流阻尼器應用於高科技廠房基台減振應為可行，惟基座下方仍須有足夠空間安裝阻尼器，且擾動源本身之擾動能量不宜過大，否則減振後樓板振動量未必符合設計要求。

5.3 鋼結構加裝液流阻尼器之耐震性能測試

根據本文第三章針對二層樓木造構架加裝液流阻尼器之動力分析，其結果顯示液流阻尼器能有效控制結構之加速度反應，提高樓房結構之耐震能力；本節將進一步以振動台試驗，驗證清瑞機械研製之低容量液流阻尼器應用於五層樓鋼結構模型之耐震表現。液流阻尼器乃藉由斜撐與結構結合，安裝於一、二樓，共使用 4 支阻尼器。

5.3.1 試驗規劃

(1) 地震模擬振動台

結構動力試驗方法中，以振動台最能模擬真實之地動環境。在振動台試驗中，結構之動力特性可表露無遺，因此也最適合於教學及研究成果之示範與檢驗。交通大學地震模擬振動台主要整合 MTS 動態油壓致動器(Model 244.23s, 如圖 5.15)及 $3^m \times 3^m$ 的不銹鋼桌台 (圖 5.16)。致動器活塞面積為 89 cm^2 ，在 210 kg/cm^2 的工作壓力下，出力可達 15tf。根據 MTS 油壓致動器之規格，要求其有效運作頻率為 50Hz，因此桌體之基本振動頻率設計值大於 100 Hz 以確保油壓致動器之效能。振動台為中空箱型結構，並以鋼板為肋骨加勁而成之構造。振動桌與模型結構之重量比為 1:2，以避免測試時模型結構和振動桌產生互制效應。當加速度峰值為 1.0g 時，振動桌可提供之最大

荷載重量 (payload) 為 10ton。受限於致動器容量，其最大衝程為±12.5 cm。

(2) 五層樓鋼結構模型

本次耐震性能試驗係將液流阻尼器安裝於一座五層樓鋼結構模型之一、二樓上進行測試，該鋼結構模型之平面為 $2^m \times 2^m$ ，樓高 6.7m，總重量約 4.1tf (圖 5.17)，相關之結構參數如表 5.5 所示。

本研究利用地震模擬振動台以 El Centro 地震波 (PGA=0.1g) 作為輸入擾動，取基座所量測到之加速度訊號作為輸入資料，並以各樓層所量測到的訊號作為輸出資料，選擇單一輸入-多重輸出 (SIMO) 之 ARX 模型進行模型結構之系統識別。ARX 系統識別分析之相關理論詳附錄 A。

根據 ARX 系統識別結果，空構架 (未裝阻尼器) 結構之基本振頻為 1.45 Hz，第一模態之等效阻尼比為 0.29%。第二模態之頻率及等效阻尼比為 4.53 Hz 及 0.33%，第三模態之頻率及等效阻尼比為 7.59 Hz 及 0.25%，識別所得之各樓層模態如圖 5.55 所示。識別出各振態之頻率及阻尼比歸納於表 5.6。

(3) 控制系統與資料擷取系統

(a) 控制系統

控制系統為振動台之中樞所在，吾人使用 MTS 407 控制器之位移控制模式操控振動台，因此，輸入之訊號為地表加速度歷時經基線修正積分所得之位移歷時記錄。407 控制器內部波形產生器可提供矩形波、三角形波及正弦波等類比訊號輸出，配合數位訊號輸入模組振動台，可模擬隨機訊號及任意形式之地表擾動，如圖 5.18 所示。

(b)資料擷取系統

資料擷取系統採用為 IMC 公司之產品，如圖 5.19 所示，其主要功能為輸出地震命令訊號至 407 控制器以驅動振動台，同時紀錄各感應計之振動訊號。資料擷取系統包含類比/數位(A/D)、數位/類比(D/A)及數位輸入/輸出(Digital I/O)等功能，並提供 32 組單端式(Single-ended)接線法類比輸入，8 組單端式(Single-ended)接線類比輸出、32 組單端式(Single-ended)接線數位類比輸入/輸出，最大總取樣頻率為 80kHz。

(4)感測計配置

(a)加速規(Accelerometers)

本試驗使用之振動感應計之安排以加速規為主，共安裝 7 個加速規(CROSSBOW \pm 4g)，如圖 5.20(a)所示，其裝設位置包括振動台面上、基座以及各樓板中央，用以量測模型結構各樓層之加速度反應。

(b)雷射位移計

本試驗於一樓液流阻尼器內側各安裝一組雷射位移計 (Wenglor, ± 15 cm) 用以量測液流阻尼器之軸向位移，其動態量測範圍為 30cm，如圖 5.20(b)所示。

(c) 荷重元 (Load cell)

為掌握液流阻尼器於結構受震過程中的遲滯消能行為，規劃於一樓兩側之液流阻尼器中安裝兩組動態荷重元 (Jih-Sense, LM-2T)，如圖 5.20(c)所示，每組荷重元之荷載上限為 2tf。

5.3.2 試驗計劃

本系列試驗規劃於五層樓鋼結構模型一、二樓層兩側計安裝四組液流阻尼器進行耐震性能測試。試驗所用之輸入震波係以國際結構控制協會 (International Structural Control Society) 所建議之 Kobe Earthquake、Hachinohe Earthquake 及 El Centro Earthquake 等地震作為輸入地表擾動，並調整其最大地表加速度進行一系列之耐震試驗。三組輸入震波之歷時如圖 5.21 所示。為了避免未以液流阻尼器保護之空構架結構於試驗中受損，有關空構架之試驗僅採用 $PGA=0.1g$ 的地震強度進行測試，其餘更大地震強度之空構架試驗結果係依照地震強度作線性比例放大，加裝液流阻尼器之試驗結果則為直接量測值。

本系列試驗中，液流阻尼器係與 H 型鋼斜撐串連後安裝於模型

結構框架之對角，阻尼器乃固定於 H 型鋼翼板上做為連結，其接頭之細部設計如圖 5.22(a)所示；圖 5.22(b)為液流阻尼器實際安裝於鋼結構樓層之間。圖 5.23 為液流阻尼器安裝於五層樓鋼結構模型之成品。

5.3.3 耐震性能試驗與評估

本系列液流阻尼器之耐震性能測試係以 Hachinohe Earthquake、El Centro Earthquake 及 Kobe Earthquake 三組震波作為地表擾動，並調整其最大地表加速度進行一系列之耐震試驗。五層樓鋼構模型於不同擾動震波作用之試驗結果分述如下：

5.3.3.1 Hachinohe Earthquake 896

在 Hachinohe 地震，不同震度擾動下，各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.7。結果顯示，在不同地震強度下，於結構一、二樓層裝設液流阻尼器後，所有樓層之加速度反應皆有明顯折減，毫無例外。2F 及 3F 之加速度峰值在 $PGA=0.09g$ 時都約有 33% 以上之折減效益；當地震強度增加為 $PGA=0.3g$ 時，2F 之折減效益還能維持在 30%，3F 之折減效益則維持在 20%。未裝設液流阻尼器之樓層(4F、5F 及 Roof)加速度峰值在 $PGA=0.09g$ 時其折減效益都約在 39%~46%，隨著地震強度的提升 4F 加速度峰值折減率雖略有減少，但仍都維持在

約 20% 上下，而 5F 及 RF 加速度峰值折減效益為 30%~40%。各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.24~5.28 所示。

各樓層加速度反應之均方根值 (root-mean-squares, RMS) 的比較歸納於表 5.8。RMS 之結果反映出更為顯著之折減效益，主要是能量衰減累積之故。當 $PGA=0.09g$ 時，安裝液流阻尼器之樓層加速度之均方根值折減高達 70%，而未安裝之樓層(4F、5F 及 RF)也約有 70% 之折減效益；當地震強度提升時，各樓層仍維持一定的折減率，當 $PGA=0.3g$ 時，2F 及 3F 折減率為 68% 及 72%。其他各樓層加速度均方根值之折減效益均達到 70% 以上。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝液流阻尼器之結構於不同震度之 Hachinohe 震波作用下，均可清楚識別出模型結構之前三個模態，識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.9。其結果顯示，加裝液流阻尼器後，結構系統之各振態阻尼比均有顯著提升，顯示液流阻尼器對於結構產生具體之消能作用。以 $PGA=0.09g$ 之識別結果為例，加裝液流阻尼器之結構，其第一振態頻率由原先空構架之 1.45Hz(表 5.6)增為 2.07Hz，阻尼比則由 0.29% 上升至 10.9%；第二振態結構頻率由 4.53Hz 提升至 6.34Hz，阻尼比由 0.33% 上升至 11%；第三振態結構頻率由 7.59Hz 提升至 8.96Hz，阻尼比由 0.25% 上升至 4.3%。

於不同地震強度下，由一樓之兩組荷重元及位移計所測得阻尼器出力及衝程所繪之遲滯消能迴圈如圖 5.29~5.33 所示，不同地震強度下所對應之液流阻尼器最大出力歸納於表 5.10。其結果顯示，鋼結構東西兩側配置液流阻尼器之出力有隨地震強度增加而上升的趨勢：以西側液流阻尼器而言，當 $PGA=0.09g$ 時，最大出力達 208kgf；當地震強度提升至 $PGA=0.30g$ 時，最大出力可達 590kgf。比較結構兩側之液流阻尼器出力，當 $PGA=0.09g$ 時可發現其兩側阻尼器出力有差別，東側最大出力為 86kgf 而西側最大出力 208；隨地震強度增加，東西兩側出力之差距逐漸縮小，當 $PGA=0.30g$ 時，東側出力為 514kgf 與西側出力 590kgf。發生液流阻尼器出力不同的原因，可能與本次清瑞機械提供液流阻尼器(CRM_2 型號)製造過程均以人工打造組裝，其產品精度未臻完善有關。此外，安裝定位的精準度也會影響到阻尼器的性能表現，惟其誤差並未影響到結構之整體抗震表現。

5.3.3.2 El Centro Earthquake

在 El Centro 地震，不同震度之擾動下，各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.11。結果顯示，在 $PGA \leq 0.14 g$ 的兩組試驗結果顯示，裝設液流阻尼器之結構二樓加速度反應峰值之折減效果並不理想，二樓甚至有放大的現象。主要是地震強度較小，結構反應不大，一些突波雜訊即造成峰值突出之故，RMS 之結果則無此現象。隨著地震強度

增加 ($PGA \geq 0.18g$)，裝設液流阻尼器之樓層其加速度峰值皆有折減，且隨著地震強度的提升，其效益越趨顯著。各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.34~5.38 所示。

各樓層之加速度反應均方根值 (RMS) 比較歸納於表 5.12。RMS 結果反映出更為顯著之折減效益，此歸因於能量衰減累積之故。當 $PGA=0.05g$ 時，2F 及 3F 之加速度均方根值折減率分別為 26% 及 67%；當地震強度提升時，2F 折減效益有提升至 55% 而 3F 則維持在 65% 的折減率；當 $PGA=0.3g$ 時，其折減效益提升至 66% 及 71%。未裝設液流阻尼器之其他樓層其折減效益也相當顯著，當 $PGA=0.05g$ 時，4F、5F 及 RF 之加速度均方根值折減率都達 60% 以上；當地震強度提升時，4F、5F 及 RF 之折減效益有提升的趨勢，當 $PGA=0.30g$ 時皆達到 70% 左右之折減率。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝液流阻尼器之結構於不同震度之 El Centro 震波作用下，可清楚識別出模型結構之前三個模態。識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.13。其結果顯示，加裝液流阻尼器後，結構系統之自然頻率及阻尼比均有提升，顯示液流阻尼器對於結構有些微加勁及消能的作用。以 $PGA=0.05g$ 之識別結果為例，加裝液流阻尼器之結構，其第一振態頻率由原先空構架之 1.45Hz 增為 1.92Hz，阻尼比則由 0.29% 上升至

9.8%；第二振態結構頻率由 4.53Hz 提升至 5.84Hz，阻尼比由 0.33% 上升至 6.5%。；第三振態結構頻率由 7.59Hz 提升至 8.48Hz，阻尼比由 0.25% 上升至 3%。

為進一步探討結構配置液流阻尼器於 El Centro 地震擾動下($PGA \leq 0.14g$)，結構加速度峰值反應於 3F 呈現峰值反應放大之問題，本研究乃針對結構配置液流阻尼器於 El Centro($PGA=0.14g$)、Kobe ($PGA=0.14g$) 及 Hachinohe ($PGA=0.14g$) 等地震擾動下之結構振動反應進行系統識別。識別所得之各樓層模態如圖 5.54~5.56 所示。其結果顯示，配置液流阻尼器之結構振態變化趨勢與未安裝時相當，顯示液流阻尼器並未造成結構振態於高樓層處有特別凸出或放大的現象。圖 5.57 為 El Centro 震波(振動台桌面實際量測之加速度反應)之傅氏頻譜，其結果顯示，El Centro 震波於 2.93Hz 及 8.78Hz 有顯著的峰值(以 8.78Hz 頻譜峰值最大)，此兩個擾動頻率與結構加裝液流阻尼器後之第三振態頻率(8.77Hz)幾乎相同，顯示地表擾動頻率內涵與結構部分振動頻率有共振的現象，此為造成結構 3F 加速度峰值放大的原因。結構在 Kobe 及 Hachinohe 地震擾動下，經系統識別所得之結構頻率與震波傅氏頻譜比較如圖 5.58~5.59 所示。其結果顯示，Hachinohe 地震除第一模態與震波主要頻率內涵較為接近外，並未如 El Centro 地震中，發生結構前兩個自然振動頻率均與震波主要

頻率內涵共振的現象，所以在 Hachinohe 地震擾動下，液流阻尼器有較佳的減震效益；Kobe 震波之主要頻率內涵與結構之第一振態及第二振態較為接近，故在 Kobe 地震擾動下之減震效益亦不如 Hachinohe 一例理想。

於不同地震強度下，由一樓之兩組荷重元及位移計所測得阻尼器出力及衝程所繪之遲滯消能迴圈如圖 5.39~5.43 所示，不同地震強度下所對應之液流阻尼器最大出力歸納於表 5.14。其結果顯示，鋼結構東西兩側液流阻尼器出力有隨地震強度增加而上升的趨勢：以西側液流阻尼器而言，當 $PGA=0.05g$ 時，最大出力達 137kgf；當地震強度提升至 $PGA=0.30g$ 時，最大出力可達 589kgf。比較結構兩側之液流阻尼器出力發現其出力略有差異，亦為西側阻尼器出力大於東側；隨著地震強度增加，東西兩側阻尼器之出力差距則逐漸縮小。

5.3.3.3 Kobe Earthquake

在 Kobe 地震，不同震度之擾動下，各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.15。結果顯示，在 $PGA \leq 0.22 g$ 的三組試驗結果顯示，裝設液流阻尼器之結構一、二樓加速度反應峰值之折減效果並不理想，一樓有放大的現象。主要是地震強度較小，結構反應不大，一些突波雜訊即造成峰值突出之故，RMS 之結果即無此問題。隨著地震強度增加

($PGA \geq 0.34g$)，裝設液流阻尼器之結構各樓層加速度峰值皆有折減，且隨著地震強度的提升，其效益越趨顯著。各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.44~5.48 所示。

各樓層之加速度反應均方根值 (RMS) 比較歸納於表 5.16。RMS 結果反映出更為顯著之折減效益，此歸因於能量衰減累積之故。當 $PGA=0.08g$ 時，2F 及 3F 之加速度均方根值折減率分別為 61% 及 66%；當地震強度提升時，折減效益有提升，當 $PGA \geq 0.34g$ 時，其折減效益提升至 70% 以上。未裝設液流阻尼器之其他樓層折減效益也相當顯著，當 $PGA=0.08g$ 時，4F、5F 及 RF 之加速度均方根值折減率都達 60% 以上；當地震強度提升時，每層樓之反應折減效益有提升的趨勢，當 $PGA=0.37g$ 時，2F~RF 之折減效益皆達到 70% 以上。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝液流阻尼器之結構於不同震度之 Kobe 震波作用下，可清楚識別出模型結構之前三個模態。識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.17。其結果顯示，加裝液流阻尼器後，結構系統之自然頻率及阻尼比均有提升，顯示液流阻尼器對於結構有些微加勁及消能的作用。以 $PGA=0.08g$ 之識別結果為例，加裝液流阻尼器之結構，其第一振態頻率由原先空構架之 1.45Hz 增為 2.04Hz，阻尼比則由 0.29% 上升至 11.3%；第二振態結構頻率由 4.53Hz 提升至 6.15Hz，阻尼比由 0.33% 上升至

5.5%。；第三振態結構頻率由 7.59Hz 大幅提升至 9.62Hz，阻尼比由 0.25% 上升至 4.4%。

接著探討結構配置液流阻尼器於 Kobe 地震擾動下 ($PGA \leq 0.22g$)，結構加速度峰值反應於 2F 呈現峰值反應放大之問題，同樣的針對結構於 El Centro($PGA=0.14g$)、Kobe($PGA=0.14g$)及 Hachinohe ($PGA=0.14g$) 等地震擾動下之結構振動反應進行系統識別。識別所得之各樓層模態如圖 5.54~5.56 所示。其結果顯示，配置液流阻尼器之結構振態變化趨勢與未安裝時相當，顯示液流阻尼器並未造成結構振態於高樓層處有特別凸出或放大的現象。圖 5.60 為 Kobe 震波（振動台桌面實際量測之加速度反應）之傅氏頻譜，其結果顯示，Kobe 震波於 2.9Hz、5.75Hz 及 9.75Hz 有顯著的峰值，此三個擾動頻率與結構加裝液流阻尼器後之前三個振態相當接近（2.09Hz、6.21Hz 及 9.72Hz），顯示地表擾動頻率內涵與結構部分振動頻率有共振的現象，此為造成結構樓層加速度峰值放大的原因。結構受 Hachinohe 及 El Centro 地震擾動，經系統識別所得之結構頻率與震波傅氏頻譜比較如圖 5.61~5.62 所示。其結果顯示，Hachinohe 地震除第一模態與震波主要頻率內涵較為接近外，並未如 Kobe 地震中，發生結構前三個自然振動頻率均與震波主要頻率內涵共振的現象；El Centro 地震之主要頻率內涵與結構之第一振態及第三振態較為接近，故在 El Centro 地

震擾動下之減震效益亦不如 Hachinohe 一例理想。

於不同地震強度下，由一樓之兩組荷重元及位移計所測得阻尼器出力及衝程所繪之遲滯消能迴圈如圖 5.49~5.53 所示，不同地震強度下所對應之液流阻尼器最大出力歸納於表 5.18。其結果顯示，鋼結構東西兩側液流阻尼器出力有隨地震強度增加而上升的趨勢：以西側液流阻尼器而言，當 $PGA=0.08g$ 時，最大出力達 238kgf；當地震強度提升至 $PGA=0.37g$ 時，最大出力可達 802kgf。比較結構兩側之液流阻尼器出力發現亦有差別，同樣是西側阻尼器出力大於東側，但隨著地震強度增加，東西兩側阻尼器之出力差距則逐漸縮小。

5.3.4 小結

本研究利用低容量液流阻尼器結合型鋼組成液流阻尼器，並安裝至結構模型以振動台進行耐震性能測試。由試驗結果顯示，結構加裝液流阻尼器後大幅提升結構之阻尼比，顯示液流阻尼器對於結構具有消能的作用。安裝液流阻尼器結構於 Hachinohe 地震作用下，結構各樓層加速度峰值與均方根值，均呈現相當優異的折減效益。於 El Centro 及 Kobe 地震作用下，因發生部份結構自然頻率與震波之主要頻率共振，致使整體之減震效益不彰。惟液流阻尼器屬於速度型阻尼器，隨地震強度增加，液流阻尼器於強震下因相對速度增高而吸收更

多能量，使其減震效益亦呈現提升的現象。此外，第四章元件測試顯示，清瑞機械研製之液流阻尼器(CRM_2)在衝程較小時其遲滯迴圈圖較不飽滿，顯示其性能在阻尼器衝程較小時尚難發揮；惟當衝程在1.27mm 以上時，其遲滯消能特性即可有效發揮，此由輸入地震強度較大時，加速度峰值亦能反映出減震效果可以得到印証。

另由試驗結果發現，東西兩側之液流阻尼器遲滯消能迴圈形狀與出力性質不同，此可能與本次清瑞機械提供液流阻尼器(CRM_2 型號)製造過程均以人工打造組裝，其產品精度未臻完善有關。俟未來機械化量產後，應較能確保每支液流阻尼器性能一致，在這個條件下結構之減震效果應會更為顯著。

5.4 木造結構加裝低容量液流阻尼器之耐震性能測試

本系列試驗係針對二層樓木造構架加裝低容量液流阻尼器之耐震性能進行驗證。液流阻尼器之安裝係根據日本方面之應用方式，將其安裝於梁、柱接頭附近的角隅上，目的在提升木造結構梁、柱接頭的強度及穩定性，避免梁、柱接頭變形過大造成破壞。

5.4.1 測試機構與量測系統

1.地震模擬振動台

規格同 5.3 節所述。

2.木造結構模型

本系列耐震性能試驗係將低容量液流阻尼器元件安裝於一座實尺寸之二層樓單跨木結構模型上進行測試。該木結構模型之平面 $2\times 2\text{m}^2$ ，樓高 5m，重約 324kgf (圖 5.63)。相關之結構參數如表 5.19 所示。

本研究利用地震模擬振動台以 Kobe 地震波(PGA=0.1g)作為輸入擾動，取基座所量測到之加速度訊號作為輸入資料，並以各樓層所量測到的訊號作為輸出資料，選擇單一輸入-多重輸出(SIMO)之 ARX 模型進行模型結構之系統識別。

根據系統識別結果，空構架（未裝阻尼器）結構之第一模態之頻率及阻尼比分別為 2.45Hz 及 3.64%，第二模態之週期以及阻尼比分別為 11.52Hz 及 2.26%。識別所得之各樓層模態如圖 3.3 所示。各振態之頻率及阻尼比歸納於表 5.6。

3.控制系統與資料擷取系統

規格同 5.3 節所述。

4.感測計配置

(a)加速規(Accelerometers)

本試驗使用之振動感應計之安排以加速規為主，共安裝 3 個加速規(CROSSBOW $\pm 4g$)，如圖 5.20(a)所示，其裝設位置包括振動台面上及各樓板中央，用以量測模型結構各樓層之加速度反應。

(b) 荷重元(Load cell)

為掌握低容量液流阻尼器於結構受震過程中的出力行為，規劃於一樓梁柱間之低容量液流阻尼器中安裝四組動態荷重元 (Jih-Sense, LM-2T)，如圖 5.20(c)所示，每組荷重元之荷載上限為 2tf。

5.4.2 試驗配置與規劃

本試驗於二層樓木造結構模型一、二樓層梁柱接頭附近的角隅間安裝八組低容量液流阻尼器進行耐震性能測試，圖 5.64 為一樓液流阻尼器與荷重元連接之安裝完成圖，圖 5.65 為四組荷重元裝設位置，圖 5.66 為液流阻尼器於二層樓木造結構之組裝完成照片。

試驗所用之輸入震波係以國際結構控制協會 (International Structural Control Society) 所建議之 Kobe Earthquake、Hachinohe Earthquake 及 El Centro Earthquake 等地震作為輸入地表擾動，並調整其最大地表加速度進行一系列之耐震試驗。三組輸入震波之歷時如圖 5.21 所示。為了避免空構架結構於試驗中受損，有關空構架之試驗僅採用 PGA=0.1g 的地震強度進行測試，其餘更大地震強度之空構架試

驗結果係依照地震強度作線性比例放大，加裝低容量液流阻尼器之試驗結果則為直接量測值。

5.4.3 耐震性能試驗與評估

木造結構加裝低容量液流阻尼器在 Kobe Earthquake、El Centro Earthquake 及 Hachinohe Earthquake 等三組震波不同強度下之試驗結果分別討論如下：

5.4.3.1 Kobe Earthquake

在 Kobe Earthquake 下之測試結果中，各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.21。五組試驗中各樓層之加速度峰值都有折減效果，其中當 $PGA=0.25g$ 時折減效益較為平均，2F 之折減率為 17%，RF 之折減率為 16%，各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.67~5.71 所示。各樓層加速度反應之均方根值 (root-mean-squares, RMS) 的比較歸納於表 5.22，五組測試中 RMS 結果均有折減效益，當 $PGA=0.08g$ 時，RF 之加速度均方根值折減率為 18%；當地震強度提升時，其折減效益有提升的趨勢，當 $PGA=0.28g$ 時，其折減效益提升至 33%。2F 之折減效益亦有類似趨勢。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝液流阻尼器之木造結構於不同震度之 Kobe 震波作用下，均可清楚識別出模型結構之二

個模態。識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.23。其結果顯示，加裝低容量液流阻尼器後，結構系統之等效阻尼比有提升，顯示低容量液流阻尼器對於結構具有消能的作用。以 $PGA=0.08g$ 之識別結果為例，加裝低容量液流阻尼器之結構，阻尼比則由 3.6% 上升至 7.8%；第二振態結構阻尼比由 2.2% 上升至 3.7%。

於不同地震強度下，安裝於一樓液流阻尼器的四組荷重元所測得之軸向拉、壓力歷時如圖 5.72~5.76 所示。不同地震強度所對應之低容量液流阻尼器最大出力歸納於表 5.24。其結果顯示，木造結構梁柱兩側之出力有隨地震強度增加而上升的趨勢，且於 $PGA=0.28g$ 達最大值。以 S-W 液流阻尼器為例，當 $PGA=0.08g$ 時，最大出力達 35kgf，當地震強度提升至 $PGA=0.28g$ 時，最大出力可達 199kgf。

比較液流阻尼器軸向拉、壓力歷時圖， $PGA=0.08g$ 時之結果顯示北側液流阻尼器(N-W 及 N-E)出力有差別，N-W 及 N-E 之最大出力分別為 27kgf 及 14kgf；隨地震強度增加，N-W 阻尼器之最大出力逐漸提升，但是 N-E 阻尼器之出力並沒有隨地震強度增加而變大。當 $PGA \geq 0.19g$ 時，N-E 阻尼器之最大出力均維持在 30kgf 左右沒有提升。在比較北側液流阻尼器(S-W 及 S-E)之最大出力值，其值雖然不同但差距不大，且均隨地震強度增加而逐漸提升。發生 N-E 液流阻尼器出力不同的原因，可能與本次清瑞機械提供液流阻尼器製造過程

均以人工打造組裝，其產品精度未臻完善有關。

5.4.3.2 Hachinohe Earthquake

Hachinohe Earthquake 中各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.25。在 $PGA \geq 0.22g$ 的二組測試中 2F 及 RF 之加速度峰值都有折減效果，其中當 $PGA = 0.26g$ 時折減效益最好，2F 之折減率為 25%，3F 之折減率為 11%。 $PGA \leq 0.19g$ 之三組測試顯示，裝設液流阻尼器之 2F 加速度反應峰值均有 12% 之折減率，不過 RF 加速度反應峰值有些微放大的現象，各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.77~5.81 所示。各樓層之加速度反應均方根值的比較歸納於表 5.26。五組測試結果加速度 RMS 值均有折減效益，當 $PGA = 0.08g$ 時，2F 之加速度均方根值折減率為 23%；當地震強度提升時，其折減效益有提升的趨勢，當 $PGA = 0.26g$ 時，其折減效益提升至 36%。RF 之折減效益亦有類似之趨勢。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝低容量液流阻尼器之木造結構於不同震度之 Hachinohe 震波作用下，亦能清楚識別出模型結構之二個模態。識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.27。其結果顯示，加裝低容量液流阻尼器後，結構系統之阻尼比有提升，顯示液流阻尼器對於結構有消能的作用。以 $PGA = 0.08g$ 之

識別結果為例，加裝液流阻尼器之結構，阻尼比由 3.6% 上升至 7.1%；第二振態結構阻尼比則由 2.2% 上升至 3.4%。

於不同地震強度下，安裝於一樓液流阻尼器的四組荷重元所測得之軸向拉、壓力歷時如圖 5.82~5.86 所示。不同地震強度所對應之低容量液流阻尼器最大出力歸納於表 5.28。其結果顯示，木造結構兩側之出力有隨地震強度增加而上升的趨勢，且於 $PGA=0.26g$ 達最大值。以 S-W 液流阻尼器為例，當 $PGA=0.08g$ 時，最大出力達 23kgf，當地震強度提升至 $PGA=0.26g$ 時，最大出力可達 73kgf。比較液流阻尼器軸向拉、壓力歷時圖，N-E 阻尼器出力仍未隨地震強度增加而變大。當 $PGA \geq 0.19g$ 時，N-E 阻尼器之最大出力均維持在 20kgf 左右沒有提升。

5.4.3.3 El Centro Earthquake

El Centro Earthquake 中各樓層加速度反應峰值歸納於表 5.29。在 $PGA \geq 0.23g$ 的二組測試中 2F 及 RF 之加速度峰值都有折減效果，但是折減率沒有前兩個震波優異。 $PGA \leq 0.20g$ 之三組測試顯示，裝設液流阻尼器之 2F 及 RF 加速度反應峰值均有放大的現象，各樓層之加速度反應歷時比較如圖 5.87~5.91 所示。各樓層加速度反應之均方根值的比較歸納於表 5.30。五組測試結果之加速度 RMS 值均有折減

效益，當 $PGA=0.10g$ 時，RF 之加速度均方根值之折減率為 7.9%；當地震強度提升時，其折減效益有提升的趨勢，當 $PGA=0.29g$ 時，其折減效益提升至 13.9%。RF 之折減效益亦有類似趨勢。

接著利用 ARX 模型進行系統識別分析。加裝低容量液流阻尼器之木造結構於不同震度之 El Centro 震波作用下，均可清楚識別出模型結構之二個模態。識別所得之自然頻率與阻尼比等動力特性歸納於表 5.31。其結果顯示，加裝液流阻尼器後，結構系統之阻尼比有提升，顯示液流阻尼器對於結構有消能的作用。以 $PGA=0.10g$ 之識別結果為例，加裝液流阻尼器之結構，阻尼比則由 3.6% 上升至 8.7%；第二振態結構阻尼比由 2.2% 上升至 3.2%。

於不同地震強度下，安裝於一樓液流阻尼器的四組荷重元所測得之軸向拉、壓力歷時如圖 5.92~5.96 所示。不同地震強度所對應之低容量液流阻尼器最大出力歸納於表 5.32。其結果顯示，木造結構梁柱兩側之出力有隨地震強度增加而上升的趨勢，且於 $PGA=0.29g$ 達最大值。以 S-W 液流阻尼器為例，當 $PGA=0.10g$ 時，最大出力達 45kgf，當地震強度提升至 $PGA=0.29g$ 時，最大出力可達 186kgf。比較液流阻尼器軸向拉、壓力歷時圖，N-E 阻尼器出力仍沒有隨地震強度增加而變大。當 $PGA \geq 0.20g$ 時，N-E 阻尼器之最大出力均維持在 40~50kgf 沒有顯著提升。

5.4.4 小結

本節完成應用低容量液流阻尼器於木造結構之耐震性能測試，藉由振動台試驗驗證低容量阻尼器配置於梁柱接頭角隅上的方式對木構造之減震效果。試驗結果顯示，木造結構加裝低容量液流阻尼器後，對於結構之自然頻率並無影響，而結構之等效阻尼比則有顯著增加，顯示低容量液流阻尼器產生具體之消能作用。此外，加裝低容量液流阻尼器之木造結構於 Kobe 地震作用下，結構各樓層加速度峰值與均方根值，均呈現折減效益。於 Hachinohe 地震及 El Centro 地震作用下，當 $PGA < 0.2g$ 時其加速度峰值反應之折減效益不彰，惟由 RMS 反應指標則反映出減震效果。主要原因是利用消能器增加結構阻尼效應，其能量吸收會隨著時間而逐漸累積，因此能反映在 RMS 之結果及等效阻尼比上。結構加速度反應峰值若出現在地震初期，因振動衰減效益尚未發揮，加上震波較小時，偶發之突波雜訊都可能使加速度峰值上升，因此整體減震效果就不是太顯著。此外，由第四章之元件測試結果亦知，清瑞機械研製之液流阻尼器在衝程較小時其遲滯迴圈圖較不飽滿，顯示其性能在阻尼器衝程較小時尚難發揮；為當衝程在 1.27mm 以上時，其遲滯消能特性即可有效發揮，此由輸入地震強度較大時，加速度峰值亦能反映出減震效果可以得到印証。

表 5.1 加速度規/速度規之規格

<i>Model</i>		WR731
		Power unit/Amplifier
<i>Frequency Range</i>	<i>Acceleration</i>	0.1~450Hz(3dB deviation)
	<i>Velocity</i>	1.5~150Hz(3dB deviation)
<i>Dynamic Range</i>	<i>Acceleration</i>	± 0.5g
	<i>Velocity</i>	± 50in/sec
<i>Sensitivity</i>	<i>Acceleration</i>	10 , 100 , 1000V/g
	<i>Velocity</i>	0.1 , 1 , 10V/(in/sec)
<i>Noise</i>	<i>0.1~10Hz</i>	1.0 μ g(Peak to Peak)
	<i>10~450Hz</i>	0.2 μ g rms

表 5.2 訊號擷取系統規格

<i>Model</i>	IMC S
<i>Analog Input</i>	16 differential channels
<i>Sum Sampling Rate</i>	20 kHz
<i>Maximum Sampling Rate</i>	10 kHz
<i>Noise(input Shorted)</i>	9 μ Vrms
<i>A/D converter resolution</i>	16 bits

表 5.3 筆記型電腦規格

ASUS F3S Series
Duo T7100 CPU
1024MB Memory

表 5.4 激振器(Shacker)開啟之加速度振動反應 RMS 值

Test	RMS (gal)		Reduction (%)
	w/o Damper	w/ Damper	
1	74	53	28.4
2	72	49	31.9
3	70	48	31.4

表 5.5 五層樓鋼結構模型細部尺寸

Length (m)	2
Width (m)	2
Height of 2~5 floors (m)	1.3
Height of 1 st floors (m)	1.5
m_5 (kg-sec ² /m)	82.28
m_4 (kg-sec ² /m)	84.75
m_3 (kg-sec ² /m)	84.75
m_2 (kg-sec ² /m)	84.75
m_1 (kg-sec ² /m)	85.13

表 5.6 五層樓鋼結構模型之動力特性

Mode	1	2	3	4
Frequency (Hz)	1.45	4.53	7.59	10.12
Damping Ratio (%)	0.29	0.33	0.25	0.32

表 5.7 各樓層加速度峰值反應比較(Input=Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.09g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.380	0.202	46.9	0.581	0.267	54.0
5F	0.325	0.197	39.5	0.496	0.257	48.2
4F	0.282	0.167	40.6	0.431	0.278	35.5
3F	0.283	0.188	33.6	0.432	0.277	35.9
2F	0.243	0.151	37.9	0.371	0.213	42.7
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.24g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.762	0.447	41.3	0.948	0.612	35.5
5F	0.650	0.426	34.5	0.809	0.516	36.2
4F	0.564	0.461	18.3	0.702	0.563	19.8
3F	0.566	0.484	14.4	0.704	0.565	19.7
2F	0.486	0.356	26.8	0.605	0.409	32.4
<i>PGA=0.30g</i>						
	w/o damper (g)	w/ damper (g)	Reduction (%)			
RF	1.198	0.719	40.0			
5F	1.023	0.703	31.3			
4F	0.888	0.722	18.7			
3F	0.890	0.717	19.5			
2F	0.765	0.547	28.5			

表 5.8 各樓層加速度均方根值比較(Input=Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.09g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.1592	0.0373	76.6	0.2433	0.0542	77.7
5F	0.1514	0.0383	74.7	0.2313	0.0520	77.5
4F	0.1103	0.0300	72.8	0.1685	0.0427	74.6
3F	0.1100	0.0264	76.0	0.1680	0.0395	76.5
2F	0.0874	0.0234	73.2	0.1335	0.0350	73.8
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.24g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.3188	0.0931	70.8	0.3968	0.1101	72.3
5F	0.3031	0.0879	71.0	0.3773	0.1054	72.1
4F	0.2207	0.0721	67.3	0.2748	0.0856	68.8
3F	0.2201	0.0673	69.4	0.2740	0.0796	70.9
2F	0.1749	0.0612	65.0	0.2178	0.0733	66.4
<i>PGA=0.30g</i>						
	w/o damper (g)	w/ damper (g)	Reduction (%)			
RF	0.5016	0.1318	73.7			
5F	0.4769	0.1268	73.4			
4F	0.3473	0.1022	70.6			
3F	0.3464	0.0946	72.7			
2F	0.2752	0.0877	68.1			

表 5.9 結構之等效頻率與阻尼比(Input=Hachinohe)

<i>Input=Hachinohe Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.09g</i>		<i>PGA=0.14g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	1.45	0.29	2.07	10.9	2.11	11.3
2	4.53	0.33	6.34	11.0	6.46	10.6
3	7.59	0.25	8.96	4.3	9.04	4.3
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.19g</i>		<i>PGA=0.24g</i>		<i>PGA=0.30g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.14	10.5	2.13	10.8	2.16	11.4
2	6.63	10.0	6.68	9.8	6.71	9.7
3	9.28	5.3	9.31	5.5	9.36	5.6



表 5.10 液流阻尼器最大出力(Input=Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
液流阻尼器	最大出力 (kgf)	<i>Earthquake Intensity</i>				
		<i>0.09g</i>	<i>0.14g</i>	<i>0.19g</i>	<i>0.24g</i>	<i>0.30g</i>
西側	拉力	208	276	439	508	590
	壓力	-183	-250	-405	-473	-561
東側	拉力	86	148	320	407	514
	壓力	-106	-175	-332	-419	-527

表 5.11 各樓層加速度峰值反應比較(Input= El Centro)

<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
<i>PGA=0.05g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.154	0.144	6.3	0.404	0.404	0.0
5F	0.131	0.106	19.5	0.345	0.345	0.2
4F	0.113	0.113	-0.2	0.296	0.281	5.1
3F	0.104	0.121	-16.3	0.273	0.317	-16.2
2F	0.106	0.097	9.2	0.279	0.250	10.7
<i>PGA=0.18g</i>				<i>PGA=0.25g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.498	0.467	6.3	0.685	0.685	0.0
5F	0.426	0.399	6.3	0.586	0.579	1.1
4F	0.365	0.323	11.6	0.502	0.430	14.4
3F	0.336	0.326	3.0	0.462	0.412	10.8
2F	0.344	0.282	18.0	0.474	0.336	29.0
<i>PGA=0.30g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.828	0.661	20.1			
5F	0.708	0.592	16.4			
4F	0.607	0.403	33.6			
3F	0.558	0.414	25.9			
2F	0.572	0.346	39.5			

表 5.12 各樓層加速度均方根值比較(Input= El Centro)

<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
<i>PGA=0.05g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.0636	0.0202	68.2	0.1672	0.0646	61.4
5F	0.0620	0.0202	67.4	0.1629	0.0586	64.1
4F	0.0464	0.0193	58.3	0.1220	0.0440	64.0
3F	0.0417	0.0137	67.2	0.1095	0.0377	65.5
2F	0.0346	0.0255	26.2	0.0910	0.0406	55.4
<i>PGA=0.18g</i>				<i>PGA=0.25g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.2062	0.0813	60.6	0.2837	0.1169	58.8
5F	0.2009	0.0733	63.5	0.2764	0.1068	61.4
4F	0.1504	0.0541	64.0	0.2069	0.0758	63.4
3F	0.1349	0.0468	65.3	0.1857	0.0655	64.7
2F	0.1122	0.0477	57.4	0.1544	0.0640	58.5
<i>PGA=0.30g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.3427	0.1125	67.2			
5F	0.3338	0.1028	69.2			
4F	0.2499	0.0736	70.6			
3F	0.2242	0.0642	71.4			
2F	0.1865	0.0628	66.3			

表 5.13 裝設阻尼器模型結構之等效頻率與阻尼比(Input=El Centro)

<i>Input= El Centro Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.05g</i>		<i>PGA=0.14g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	1.45	0.29	1.92	9.8	2.06	9.06
2	4.53	0.33	5.84	6.5	6.03	6.58
3	7.59	0.25	8.48	3.0	8.77	5.2
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.18g</i>		<i>PGA=0.25g</i>		<i>PGA=0.30g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.08	9.2	2.1	11.0	2.09	9.7
2	6.11	7.7	6.12	8.3	6.09	7.8
3	8.85	6.8	8.83	6.0	8.81	5.2

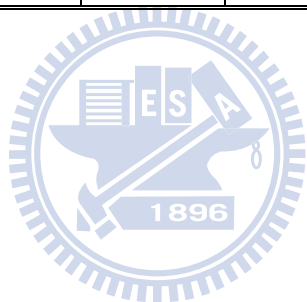


表 5.14 液流阻尼器最大出力(Input= El Centro)

<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
<i>液流阻尼器</i>	<i>最大出力 (kgf)</i>	<i>Earthquake Intensity</i>				
		<i>0.05g</i>	<i>0.14g</i>	<i>0.18g</i>	<i>0.25g</i>	<i>0.30g</i>
西側	拉力	137	416	475	626	589
	壓力	-125	-363	-422	-579	-537
東側	拉力	53	297	380	589	551
	壓力	-21	-259	-330	-549	-496

表 5.15 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.206	0.207	-0.6	0.307	0.347	-13.0
5F	0.179	0.197	-10.5	0.267	0.301	-12.9
4F	0.134	0.136	-2.2	0.199	0.211	-5.6
3F	0.156	0.138	11.5	0.233	0.179	23.0
2F	0.124	0.126	-1.3	0.186	0.225	-21.2
<i>PGA=0.22g</i>				<i>PGA=0.34g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.620	0.751	-21.1	0.912	0.783	14.1
5F	0.539	0.637	-18.2	0.792	0.686	13.4
4F	0.403	0.374	7.2	0.592	0.383	35.4
3F	0.470	0.498	-6.0	0.690	0.521	24.6
2F	0.375	0.436	-16.3	0.551	0.461	16.3
<i>PGA=0.37g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.982	1.008	-2.7			
5F	0.853	0.872	-2.2			
4F	0.638	0.517	19.0			
3F	0.744	0.593	20.2			
2F	0.594	0.574	3.2			

表 5.16 各樓層加速度均方根值比較(Input=Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.14g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.0601	0.0215	64.3	0.0897	0.0329	63.4
5F	0.0577	0.0191	66.9	0.0861	0.0290	66.3
4F	0.0418	0.0165	60.6	0.0624	0.0224	64.1
3F	0.0411	0.0137	66.6	0.0614	0.0201	67.2
2F	0.0317	0.0122	61.6	0.0474	0.0178	62.5
<i>PGA=0.22g</i>				<i>PGA=0.34g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.1812	0.0691	61.9	0.2665	0.0714	73.2
5F	0.1740	0.0611	64.9	0.2558	0.0634	75.2
4F	0.1261	0.0429	66.0	0.1854	0.0441	76.2
3F	0.1240	0.0394	68.3	0.1823	0.0406	77.8
2F	0.0958	0.0355	62.9	0.1408	0.0368	73.9
<i>PGA=0.37g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.2869	0.0850	70.4			
5F	0.2754	0.0766	72.2			
4F	0.1996	0.0510	74.4			
3F	0.1963	0.0456	76.8			
2F	0.1516	0.0413	72.8			

表 5.17 裝設阻尼器模型結構之等效頻率與阻尼比(Input=Kobe)

<i>Input= Kobe Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.08g</i>		<i>PGA=0.14g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	1.45	0.29	2.04	11.3	2.09	10.8
2	4.53	0.33	6.15	5.5	6.21	5.1
3	7.59	0.25	9.62	4.4	9.72	3.8
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.22g</i>		<i>PGA=0.34g</i>		<i>PGA=0.37g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.14	11.2	2.13	12	2.14	11.9
2	6.37	5.6	6.33	5.6	6.36	6.3
3	9.67	5.0	9.69	5.2	9.64	5.3

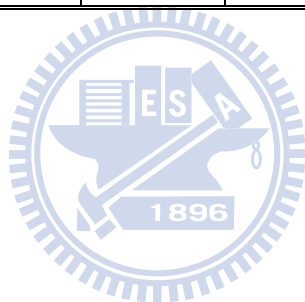


表 5.18 液流阻尼器最大出力(Input= Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
液流阻尼器	最大出力 (kgf)	<i>Earthquake Intensity</i>				
		<i>0.08g</i>	<i>0.14g</i>	<i>0.22g</i>	<i>0.34g</i>	<i>0.37g</i>
西側	拉力	212	301	530	546	674
	壓力	-238	-329	-613	-636	-802
東側	拉力	64	133	415	451	605
	壓力	-76	-174	-523	-566	-765

表 5.19 二層樓木造模型結構之細部尺寸

<i>Length(m)</i>	2
<i>Width(m)</i>	2
<i>Height of 2nd floor(m)</i>	2.59
<i>Height of 1st floor(m)</i>	2.45
<i>m2(kgf- sec²/m)</i>	16.53
<i>m1(kgf- sec²/m)</i>	16.53
<i>Cross section of the column(mm)</i>	140x90
<i>Cross section of the beam(mm)</i>	140x90
<i>Cross-sectional area of the column(m²)</i>	0.126
<i>Cross-sectional area of the beam(m²)</i>	0.126



表 5.20 二層樓木造模型結構之動力特性

<i>Mode</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Frequency (Hz)</i>	2.45	11.52
<i>Damping Ratio(%)</i>	3.64	2.26

表 5.21 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.12g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.211	0.168	20.2	0.290	0.244	15.8
2F	0.106	0.105	0.9	0.146	0.144	1.3
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.25g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.463	0.446	3.6	0.618	0.516	16.5
2F	0.233	0.226	3.0	0.311	0.255	17.8
<i>PGA=0.28g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.661	0.560	15.3			
2F	0.333	0.303	9.1			

表 5.22 各樓層加速度均方根值比較(Input=Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.12g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.039	0.032	18.5	0.054	0.042	22.0
2F	0.020	0.018	11.5	0.028	0.024	16.7
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.25g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.086	0.065	23.7	0.114	0.075	34.6
2F	0.045	0.036	20.6	0.060	0.040	32.6
<i>PGA=0.28g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.123	0.081	33.9			
2F	0.064	0.044	31.8			

表 5.23 木造結構之等效頻率與阻尼比(Input=Kobe)

<i>Input=Kobe Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.12g</i>		<i>PGA=0.19g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.45	3.64	2.62	8.2	2.49	8.6
2	11.52	2.26	12.12	3.2	12.11	3.5
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.19g</i>		<i>PGA=0.25g</i>		<i>PGA=0.28g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.49	8.6	2.44	9.1	2.41	9.5
2	12.11	3.5	12.00	3.5	11.91	4.1

表 5.24 液流阻尼器最大出力(Input= Kobe)

<i>Input = Kobe Earthquake</i>						
液流阻尼器	最大出力 (kgf)	<i>Earthquake Intensity</i>				
		<i>0.08g</i>	<i>0.12g</i>	<i>0.19g</i>	<i>0.25g</i>	<i>0.28g</i>
S-W	拉力	18	24	38	48	60
	壓力	-35	-62	-143	-178	-199
N-W	拉力	22	30	63	80	94
	壓力	-27	-39	-79	-94	-104
S-E	拉力	14	17	22	23	24
	壓力	-27	-43	-102	-129	-145
N-E	拉力	14	22	33	37	38
	壓力	-10	-15	-23	-33	-37

表 5.25 各樓層加速度峰值反應比較(Input= Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.15g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.160	0.166	-3.5	0.296	0.301	-1.6
2F	0.151	0.132	12.7	0.279	0.239	14.1
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.22g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.384	0.394	-2.5	0.435	0.435	0.0
2F	0.362	0.317	12.4	0.410	0.370	9.9
<i>PGA=0.26g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.516	0.458	11.3			
2F	0.486	0.364	25.0			

表 5.26 各樓層加速度均方根值比較(Input=Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
<i>PGA=0.08g</i>				<i>PGA=0.15g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.042	0.036	6.4	0.077	0.071	7.9
2F	0.040	0.031	23.3	0.073	0.056	23.7
<i>PGA=0.19g</i>				<i>PGA=0.22g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.099	0.090	9.5	0.113	0.101	10.8
2F	0.095	0.072	25.0	0.108	0.079	26.5
<i>PGA=0.26g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.134	0.104	22.0			
2F	0.128	0.081	36.3			

表 5.27 裝設阻尼器木造結構之等效頻率與阻尼比(Input=Hachinohe)

<i>Input= Hachinohe Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.08g</i>		<i>PGA=0.15g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.45	3.64	2.84	7.1	2.72	7.4
2	11.52	2.26	12.02	3.4	11.79	3.8
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.19g</i>		<i>PGA=0.22g</i>		<i>PGA=0.26g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.64	7.5	2.61	8.4	2.61	7.9
2	11.66	3.8	11.55	3.2	11.56	3.1

表 5.28 液流阻尼器最大出力(Input= Hachinohe)

<i>Input = Hachinohe Earthquake</i>						
液流阻尼器	最大出力 (kgf)	<i>Earthquake Intensity</i>				
		<i>0.08g</i>	<i>0.15g</i>	<i>0.19g</i>	<i>0.22g</i>	<i>0.26g</i>
S-W	拉力	15	20	25	26	26
	壓力	-23	-46	-62	-73	-73
N-W	拉力	16	26	31	35	34
	壓力	-19	-32	-45	-51	-52
S-E	拉力	11	16	18	20	20
	壓力	-19	-34	-45	-50	-51
N-E	拉力	9	17	21	24	24
	壓力	-8	-13	-17	-18	-19

表 5.29 各樓層加速度峰值反應比較(Input= El Centro)

<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
<i>PGA=0.10g</i>				<i>PGA=0.16g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.209	0.211	-0.9	0.333	0.351	-5.3
2F	0.135	0.156	-15.2	0.215	0.230	-6.6
<i>PGA=0.20g</i>				<i>PGA=0.23g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.417	0.421	-1.0	0.478	0.453	5.1
2F	0.270	0.271	-0.5	0.309	0.300	3.0
<i>PGA=0.29g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.602	0.549	8.9			
2F	0.390	0.355	8.9			

表 5.30 各樓層加速度均方根值比較(Input= El Centro)

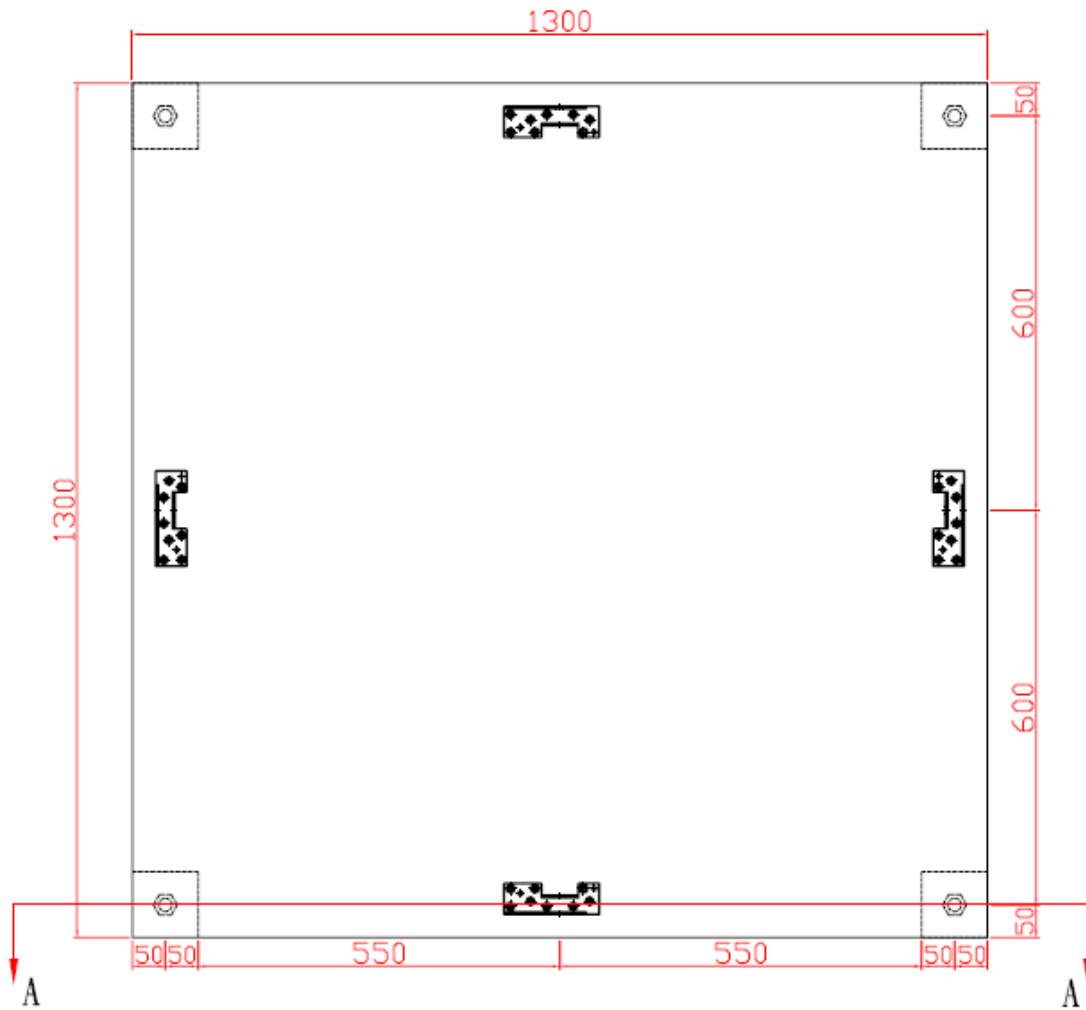
<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
<i>PGA=0.10g</i>				<i>PGA=0.16g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.051	0.047	7.5	0.082	0.078	4.4
2F	0.033	0.030	7.5	0.052	0.048	6.6
<i>PGA=0.20g</i>				<i>PGA=0.23g</i>		
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)
RF	0.102	0.093	8.8	0.117	0.109	6.7
2F	0.065	0.057	11.6	0.075	0.067	10.1
<i>PGA=0.29g</i>						
	w/o damper(g)	w/ damper(g)	Reduction (%)			
RF	0.148	0.127	13.9			
2F	0.094	0.076	18.7			

表 5.31 裝設阻尼器木造結構之等效頻率與阻尼比(Input= El Centro)

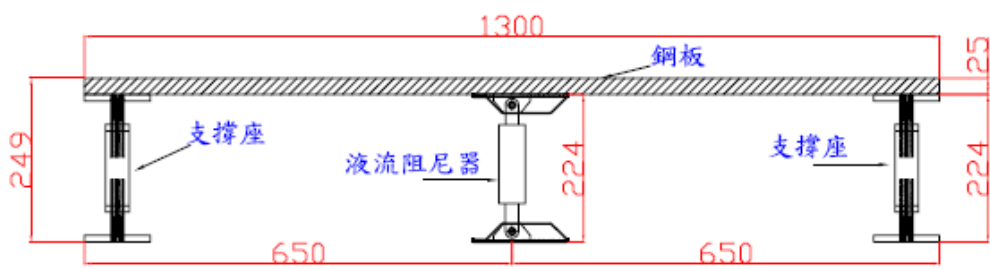
<i>Input= El Centro Earthquake</i>						
<i>Mode</i>	<i>w/o damper</i>		<i>PGA=0.10g</i>		<i>PGA=0.16g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.45	3.64	2.85	8.7	2.69	9.8
2	11.52	2.26	12.07	3.2	11.59	4.7
<i>Mode</i>	<i>PGA=0.20g</i>		<i>PGA=0.23g</i>		<i>PGA=0.29g</i>	
	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>	<i>Freq.</i>	<i>Damping</i>
	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>	<i>(Hz)</i>	<i>Ratio (%)</i>
1	2.57	9.6	2.52	10.6	2.41	12.1
2	11.53	3.4	11.71	3.8	11.41	4.5

表 5.32 液流阻尼器最大出力(Input= El Centro)

<i>Input = El Centro Earthquake</i>						
液流阻尼器	最大出力	<i>Earthquake Intensity</i>				
	(kgf)	<i>0.10g</i>	<i>0.16g</i>	<i>0.20g</i>	<i>0.23g</i>	<i>0.29g</i>
S-W	拉力	21	30	43	55	94
	壓力	-45	-84	-117	-136	-186
N-W	拉力	25	41	55	68	93
	壓力	-34	-59	-81	-98	-120
S-E	拉力	15	19	23	25	28
	壓力	-35	-65	-84	-94	-132
N-E	拉力	15	24	29	32	36
	壓力	-24	-38	-42	-43	-54



上視圖 (單位：mm)



A-A剖面側視圖 (單位：mm)

圖 5.1 基座減振測試構架設計圖



圖 5.2 支撐架



圖 5.3 加速規/速度規



圖 5.4 資料擷取系統



圖 5.5 激振器(Shaker)



圖 5.6 基座安裝完成照片



圖 5.7 激振器安裝完成



圖 5.8 加速規安裝完成

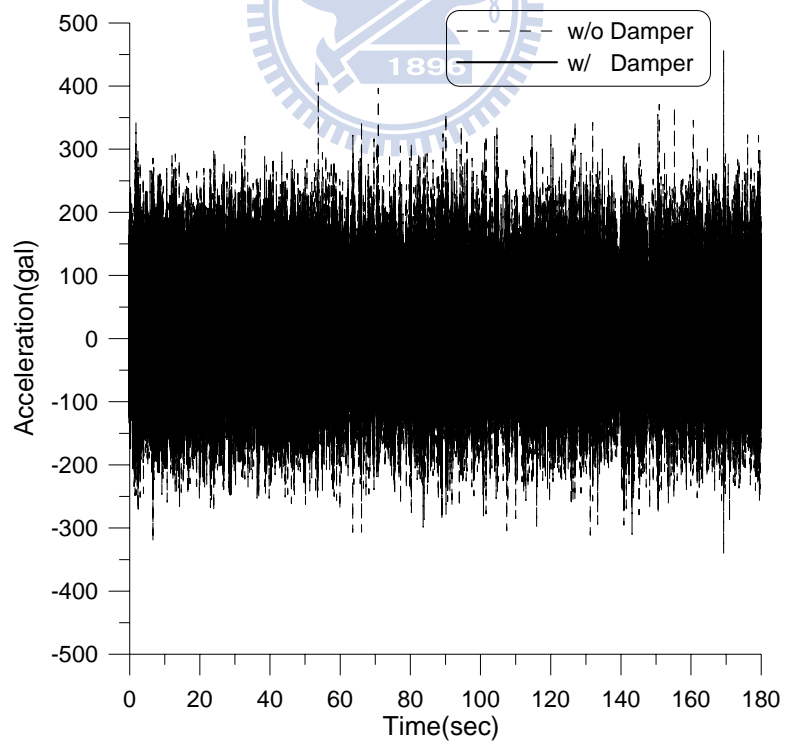


圖 5.9 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test1)

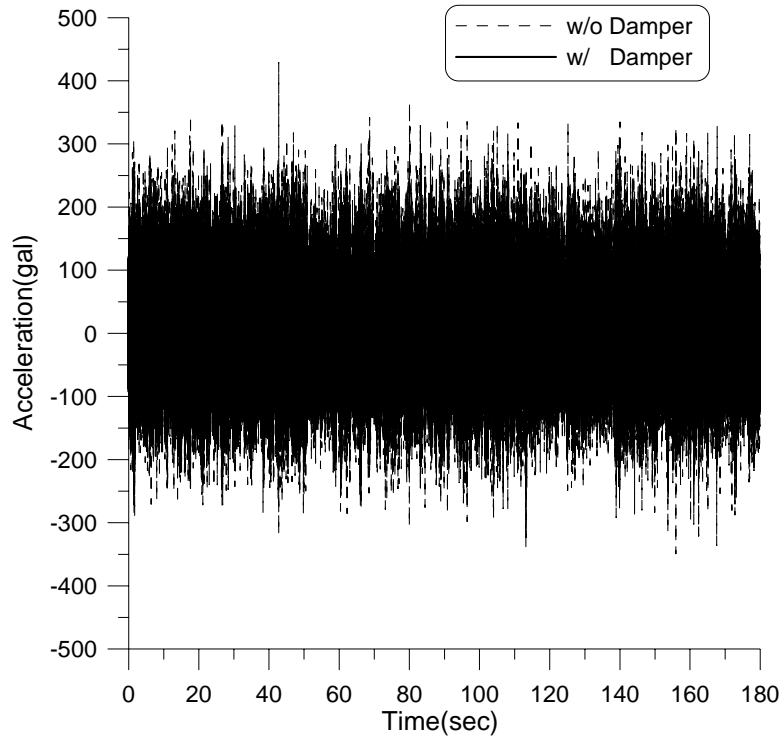


圖 5.10 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test2)

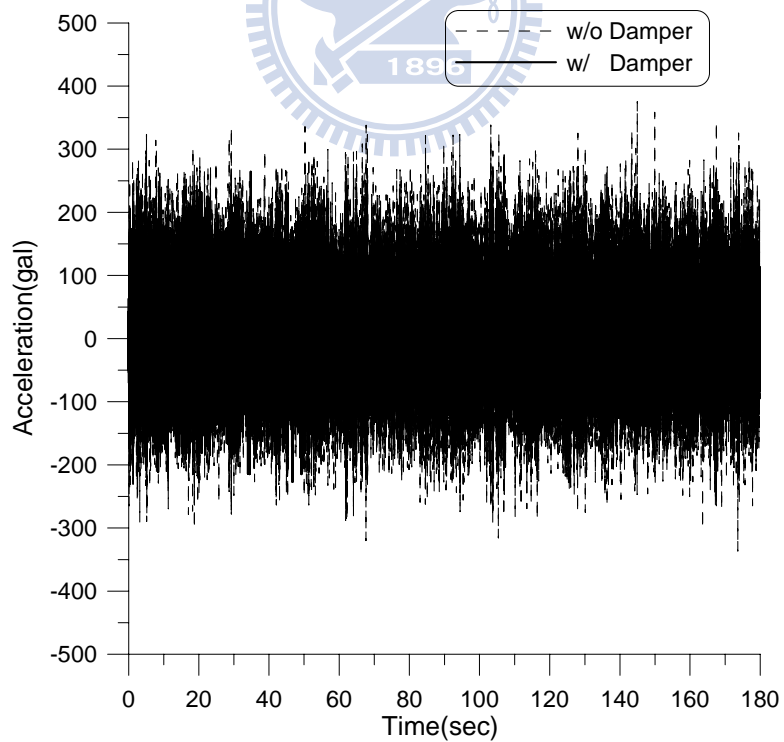


圖 5.11 基座加裝減振器前、後之樓板加速度歷時比較(Test3)

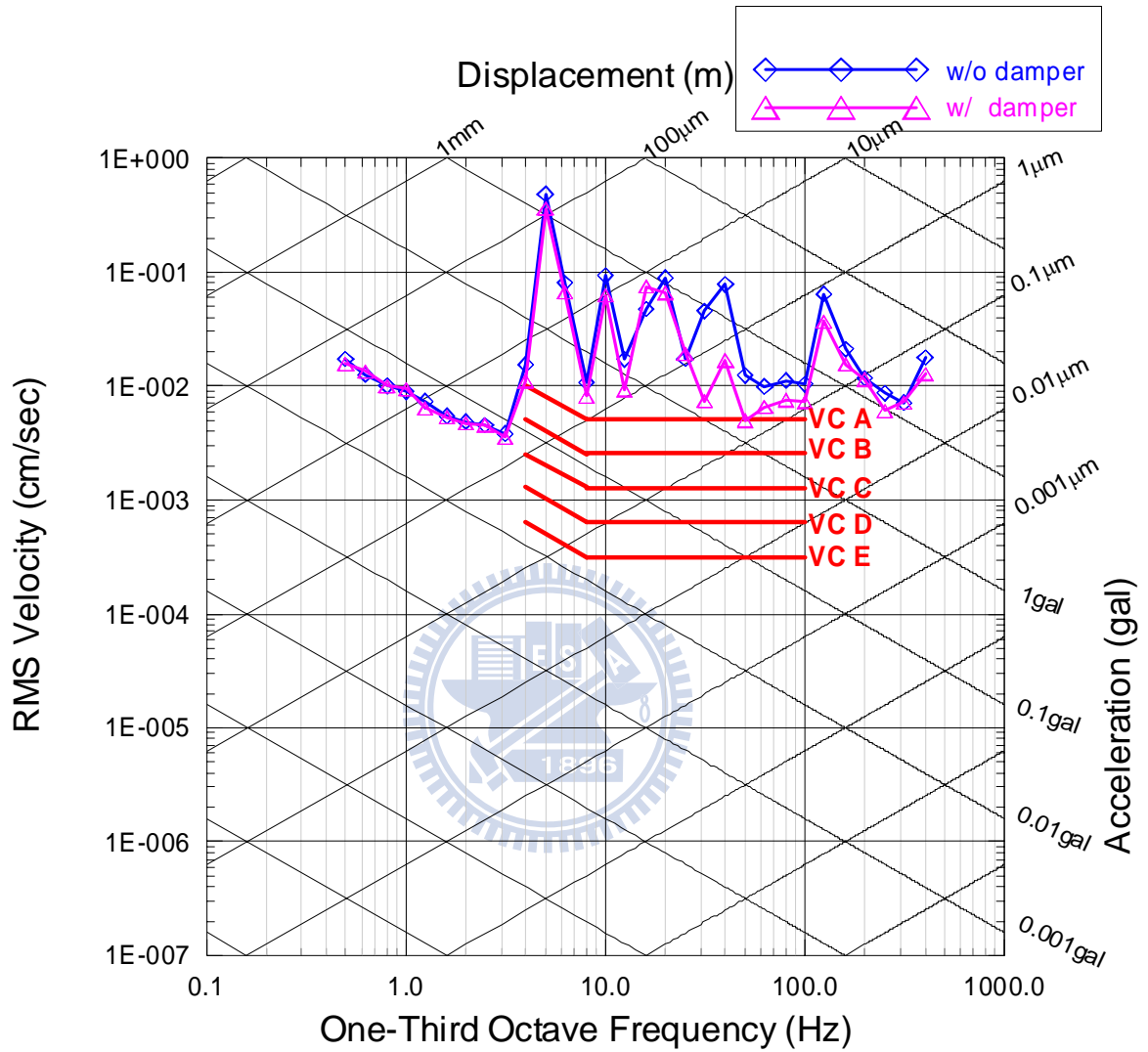


圖 5.12 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test1)

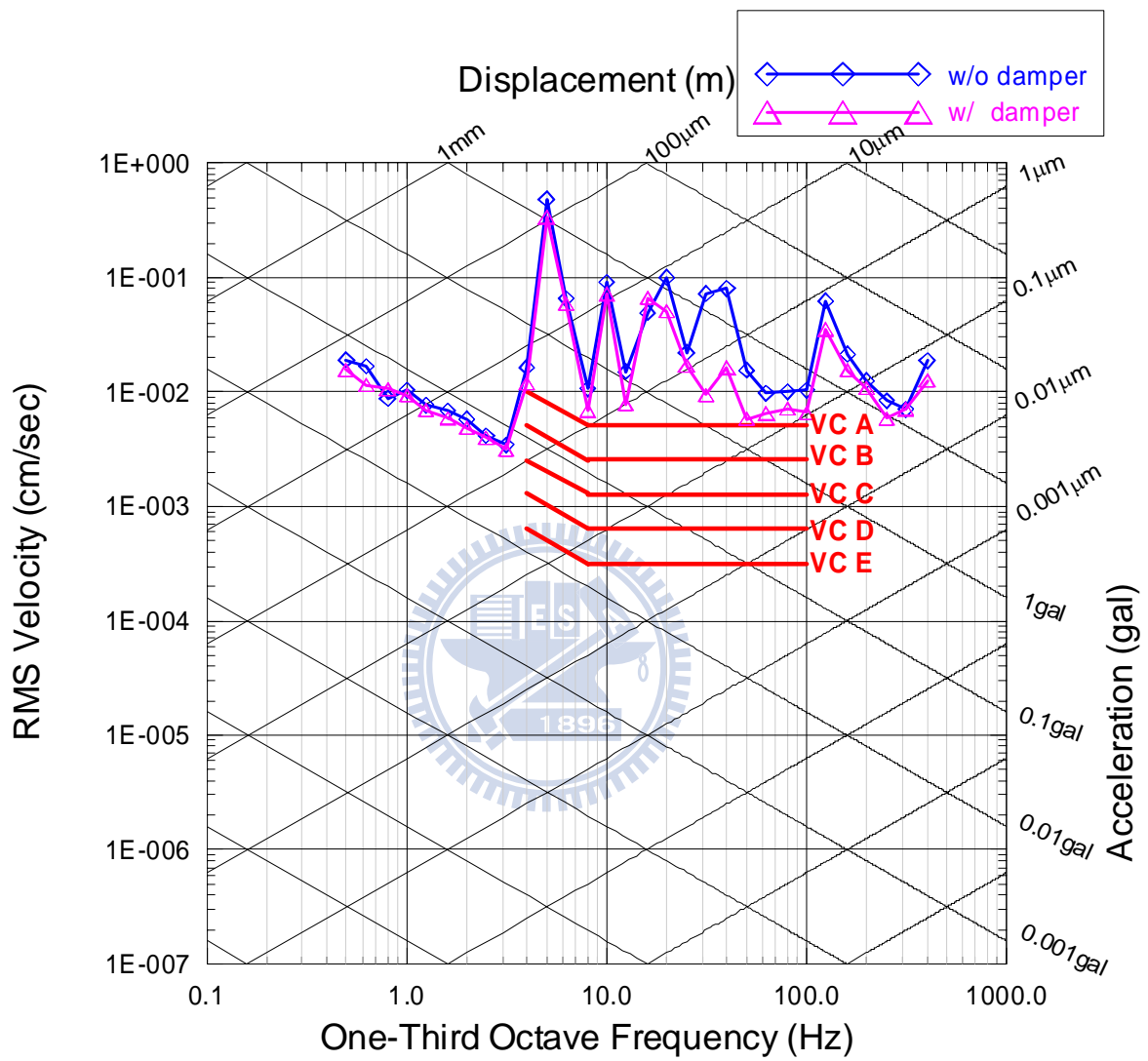


圖 5.13 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test2)

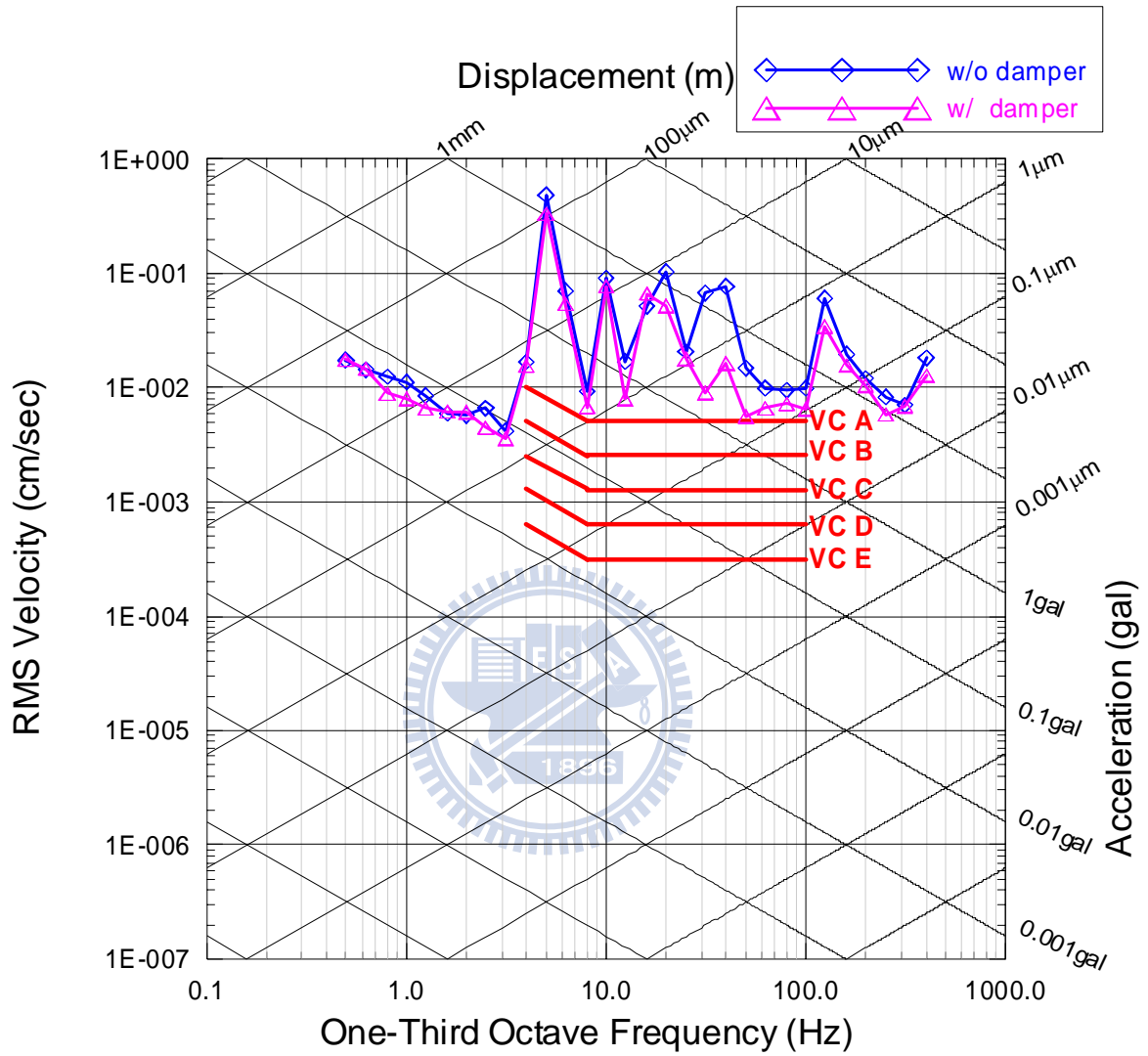


圖 5.14 基座加裝減振器前、後之樓板 1/3 倍頻圖比較(Test3)



圖 5.15 振動台油壓致動器



圖 5.16 地震模擬振動台

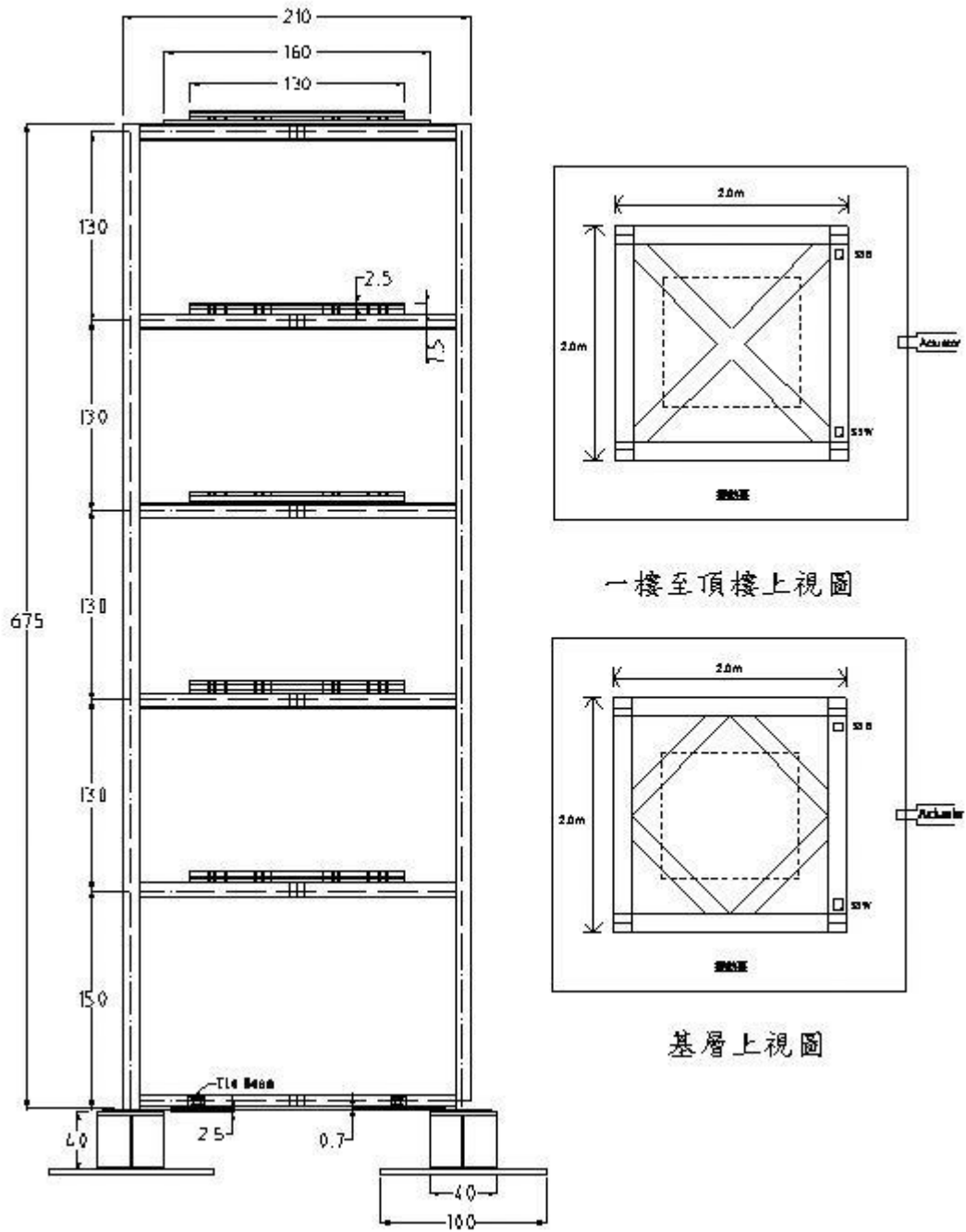


圖 5.17 五層樓鋼結構模型



圖 5.18 407 控制器



圖 5.19 IMC 資料擷取系統



(a) 加速度規 (Accelerometers)

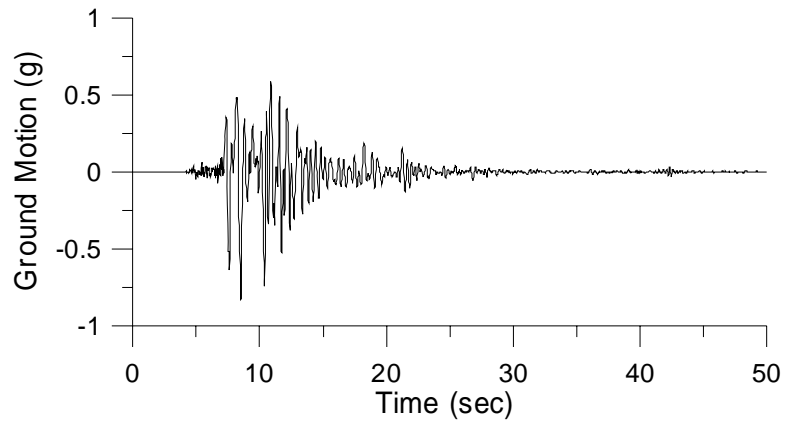


(b) 雷射位移計

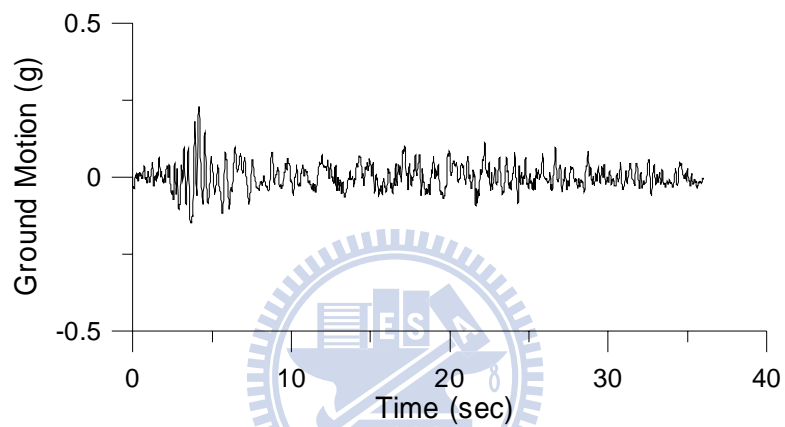


(c) 荷重元 (Load Cell)

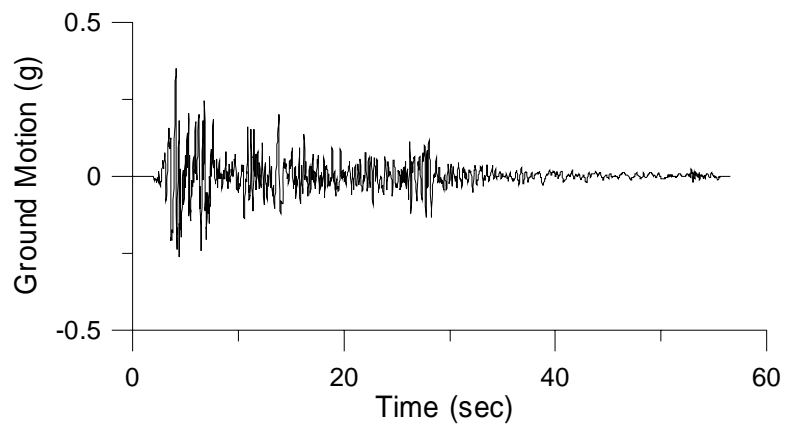
圖 5.20 耐震性能測試所使用之感測計



(a) Kobe Earthquake

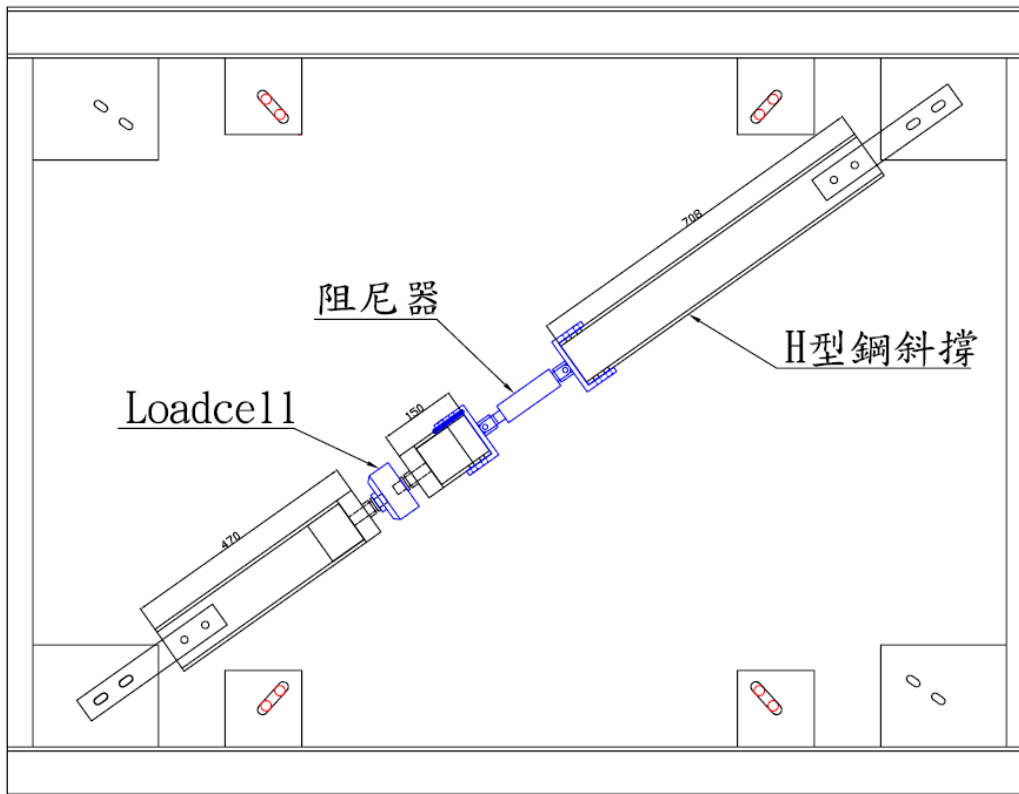


(b) Hachinohe Earthquake



(c) El Centro Earthquake

圖 5.21 輸入震波歷時



(a)液流阻尼器組裝設計圖(單位：mm)



(b)液流阻尼器安裝完成照片

圖 5.22 液流阻尼器之安裝



圖 5.23 五層樓鋼構耐震性能測試構架組裝完成照片

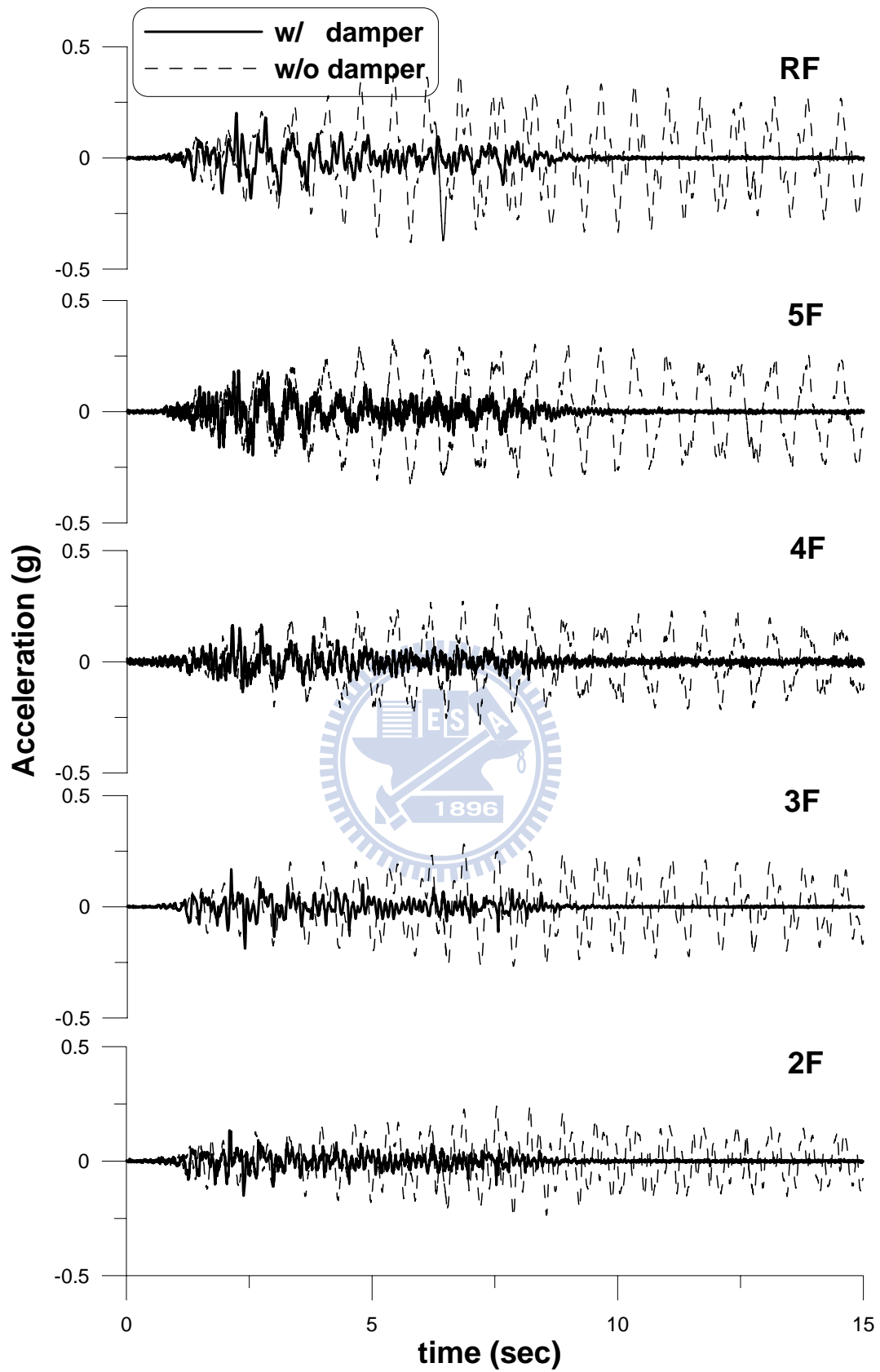


圖 5.24 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.09g)

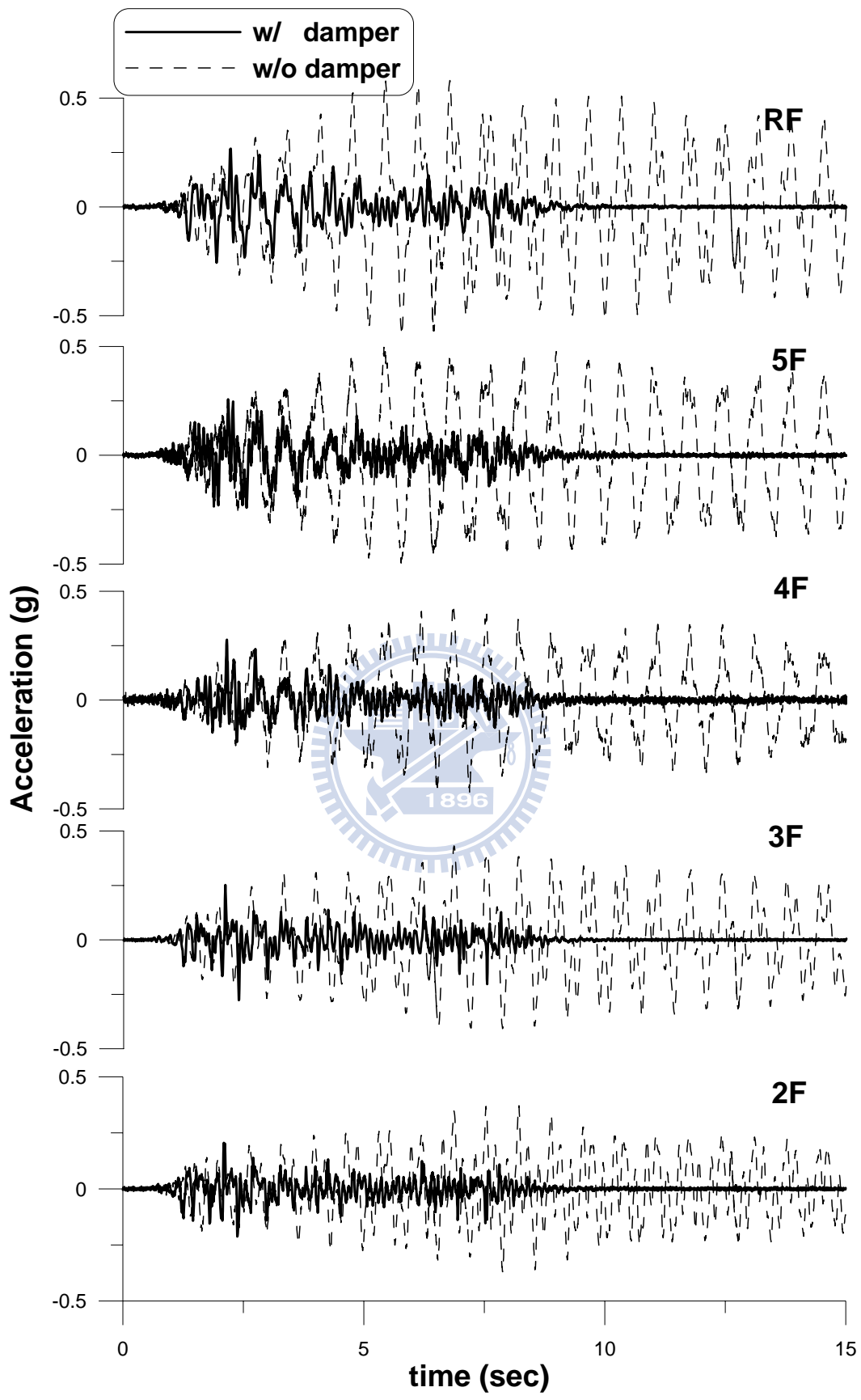


圖 5.25 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.14g)

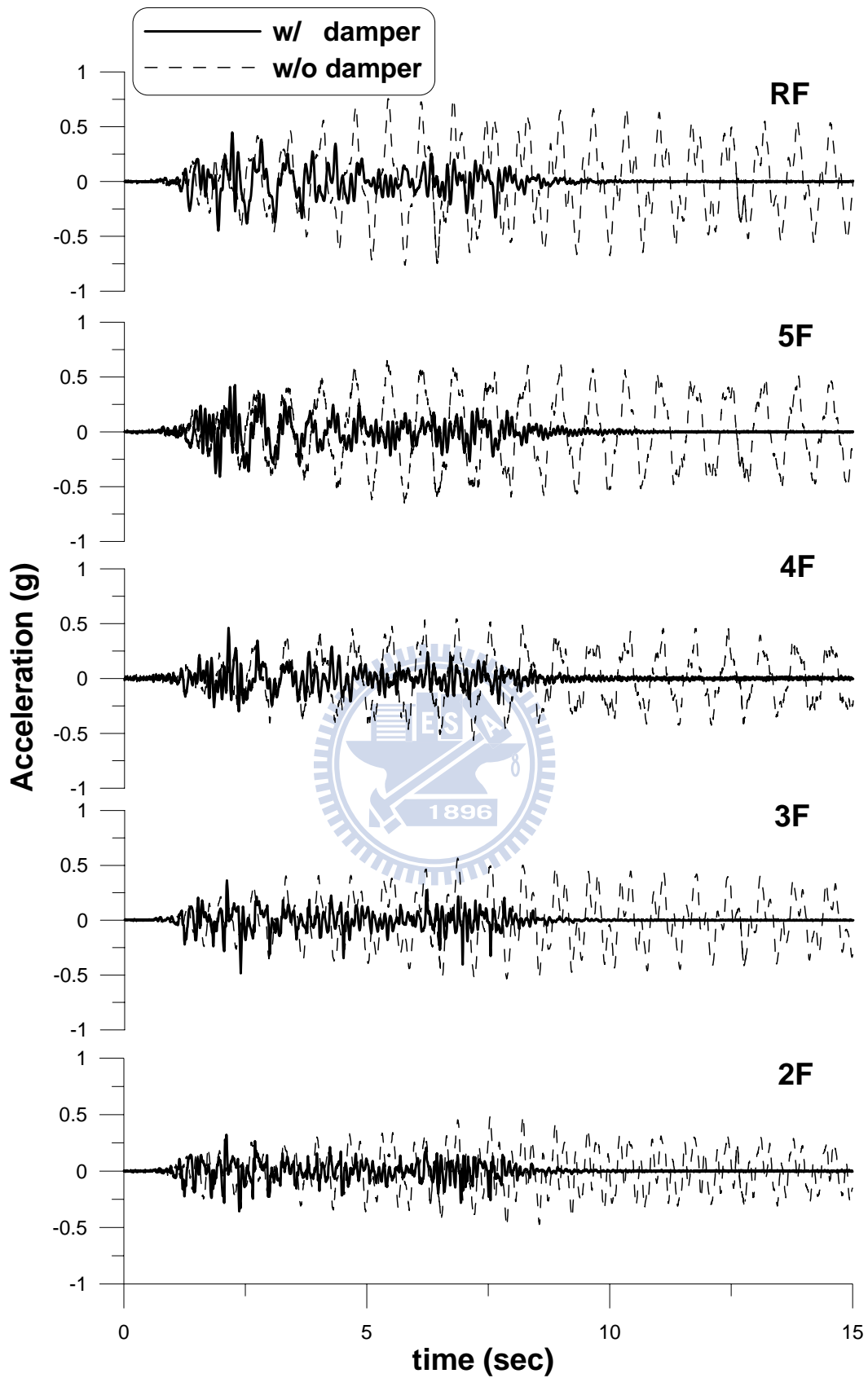


圖 5.26 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.19g)

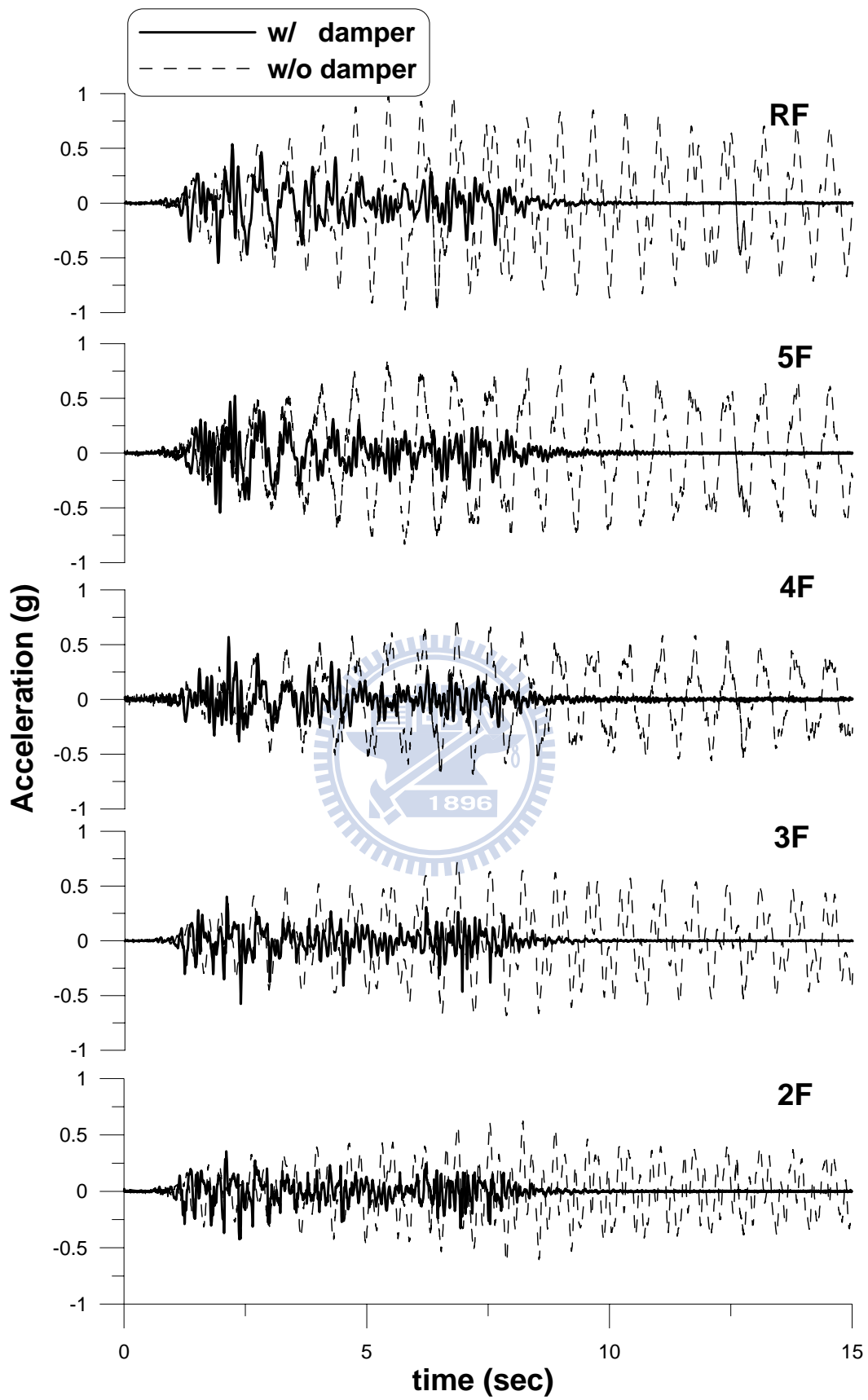


圖 5.27 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.24g)

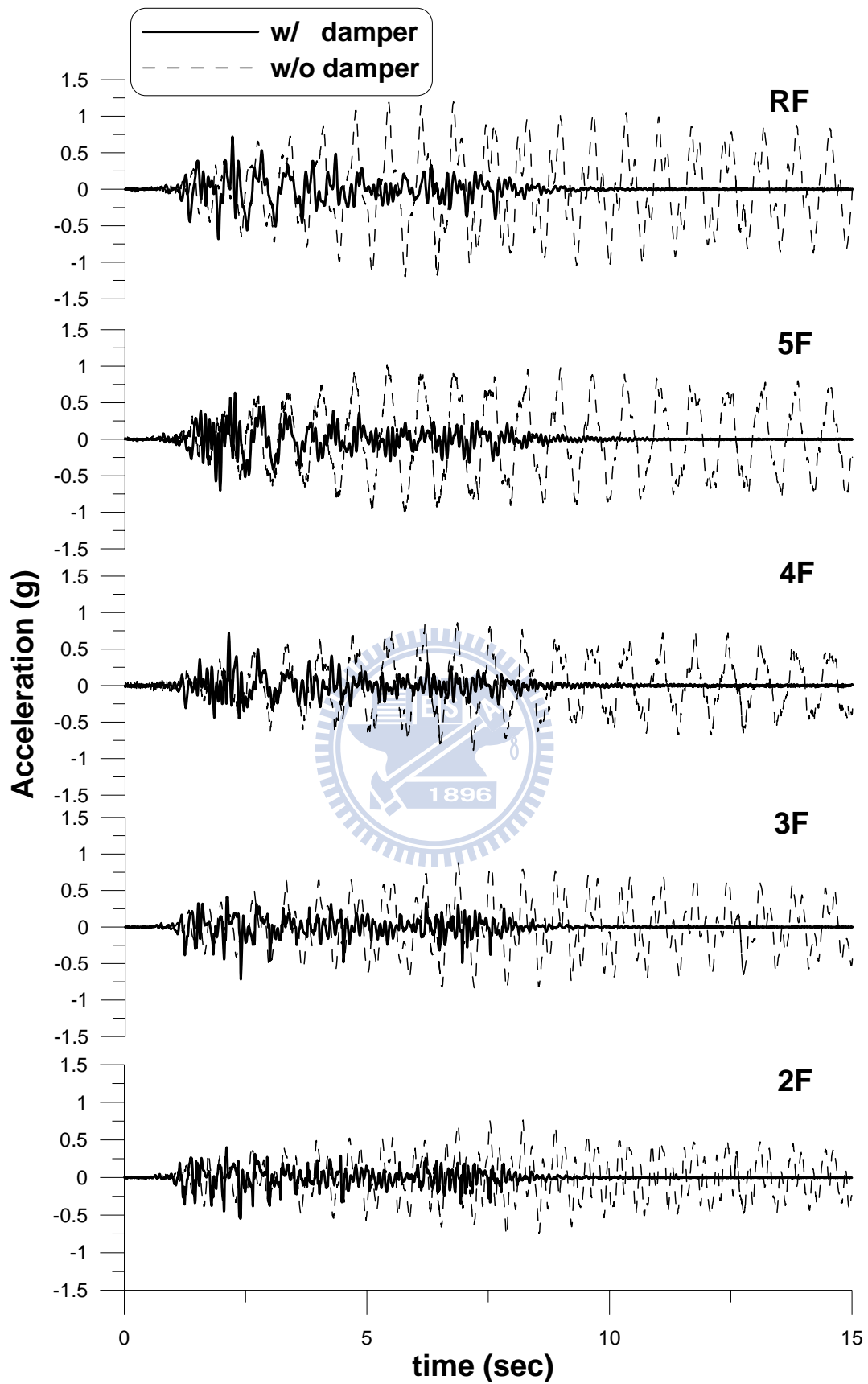


圖 5.28 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.30g)

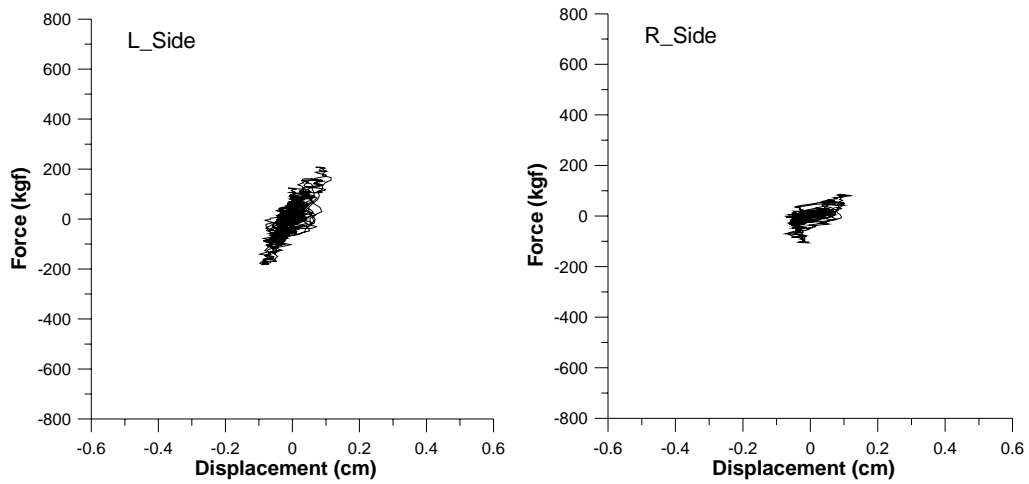


圖 5.29 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.09g)

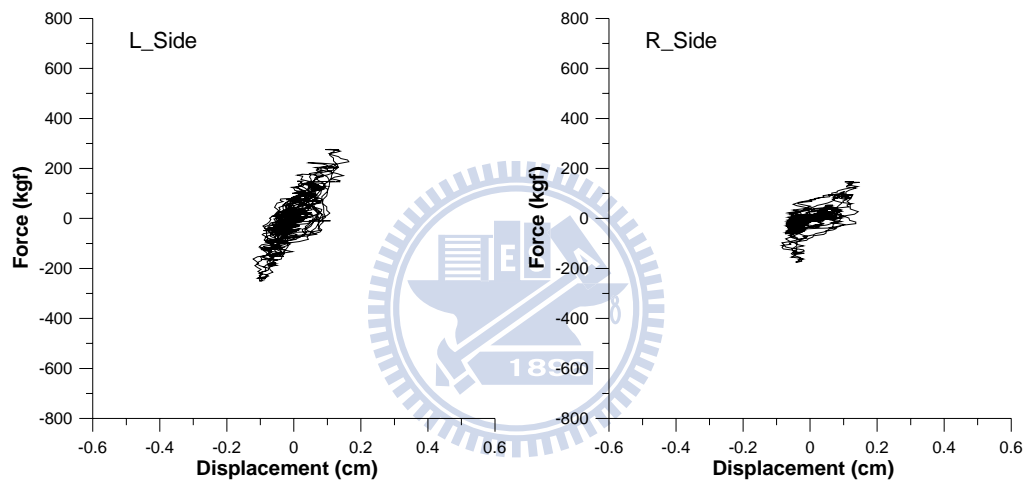


圖 5.30 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.14g)

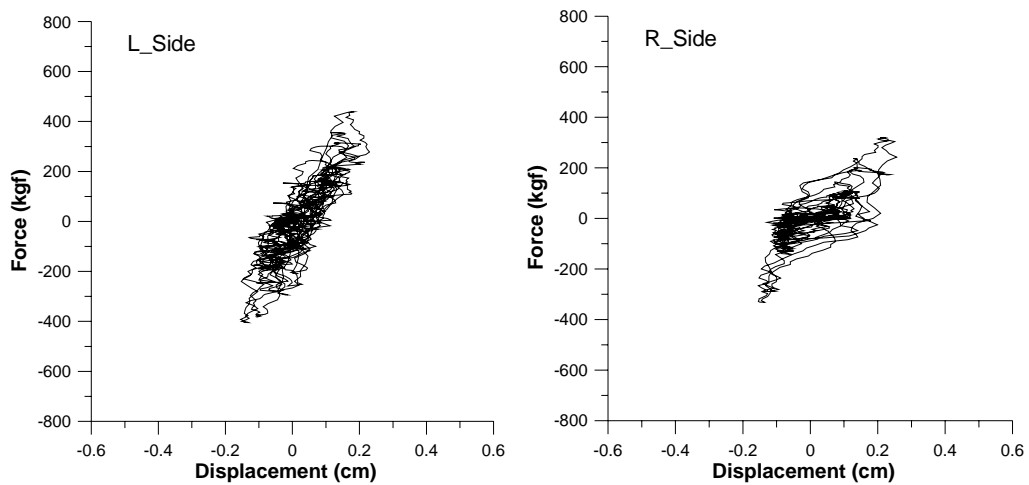


圖 5.31 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.19g)

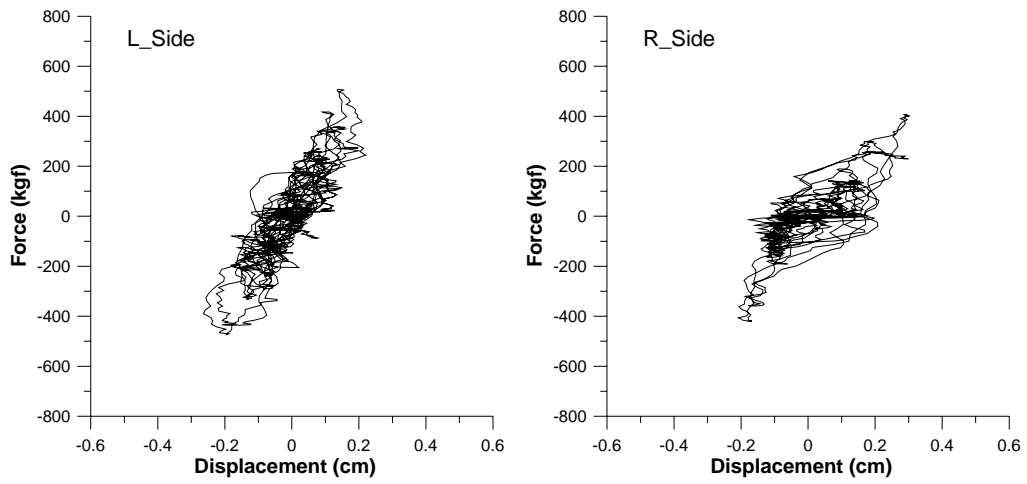


圖 5.32 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.24g)

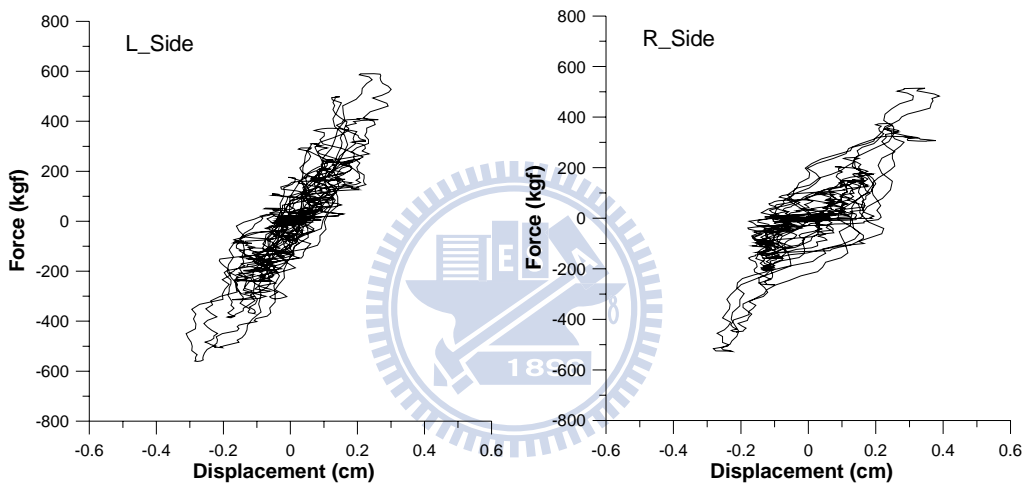


圖 5.33 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Hachinohe ; PGA=0.30g)

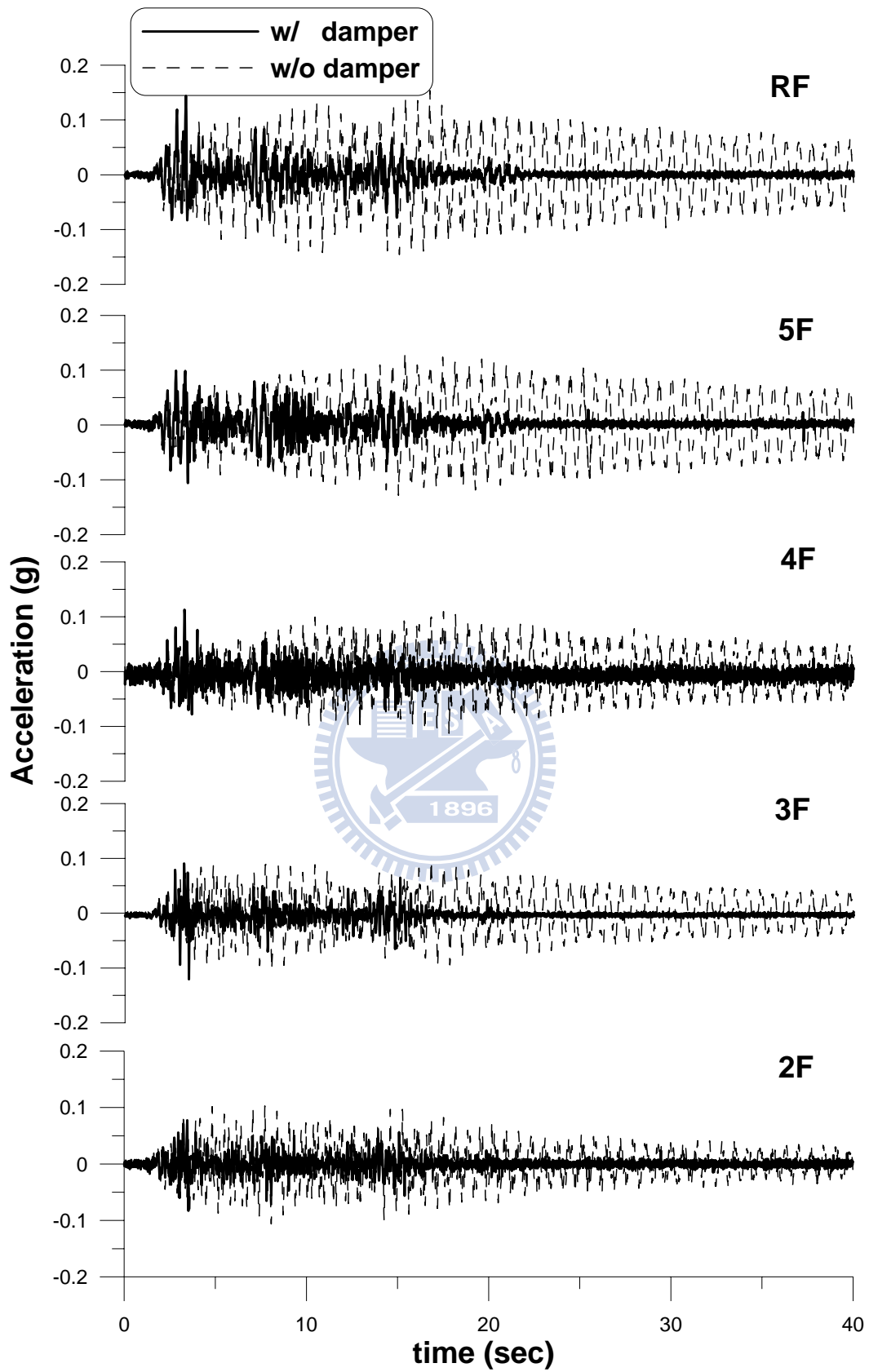


圖 5.34 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.05g)

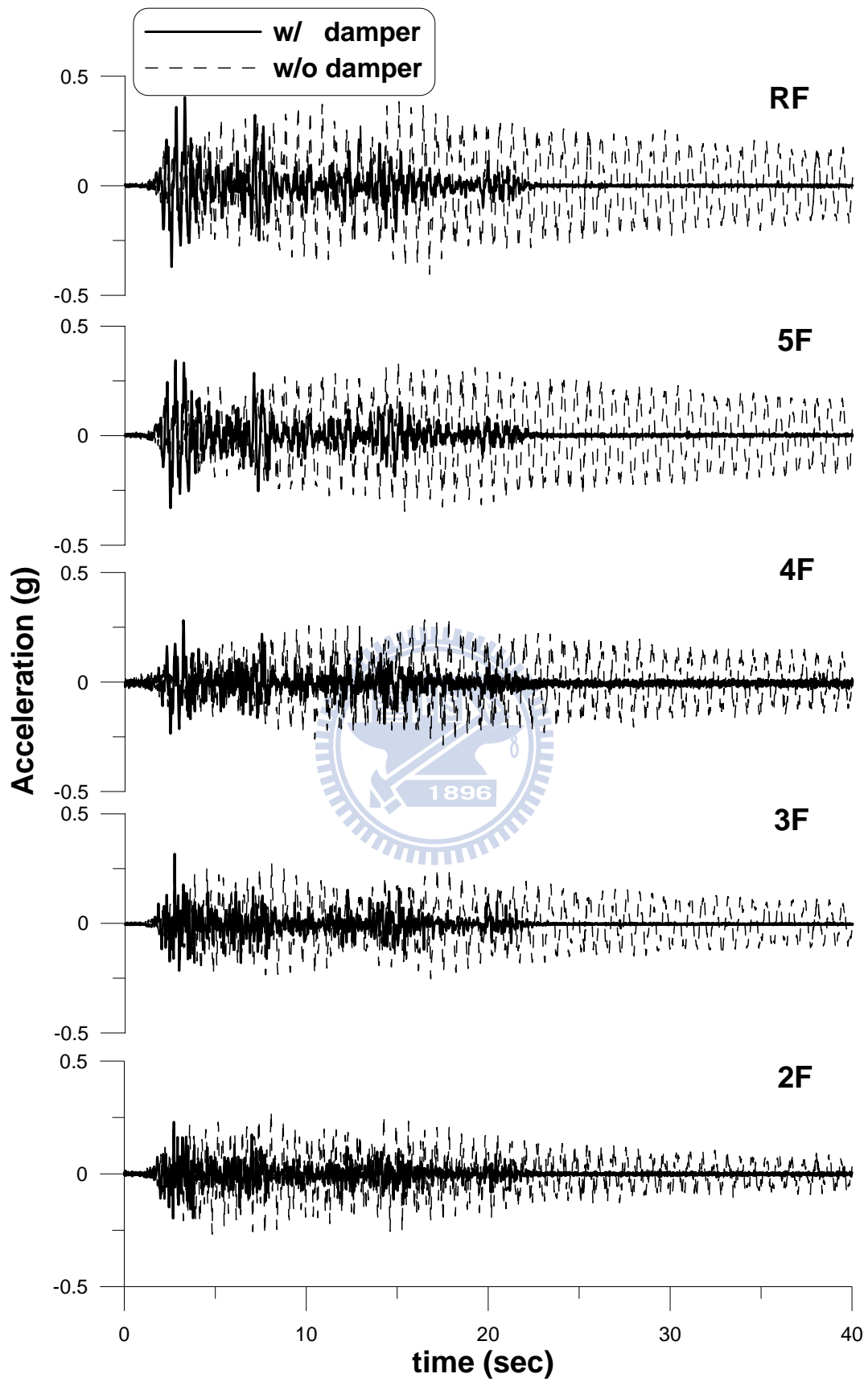


圖 5.35 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.14g)

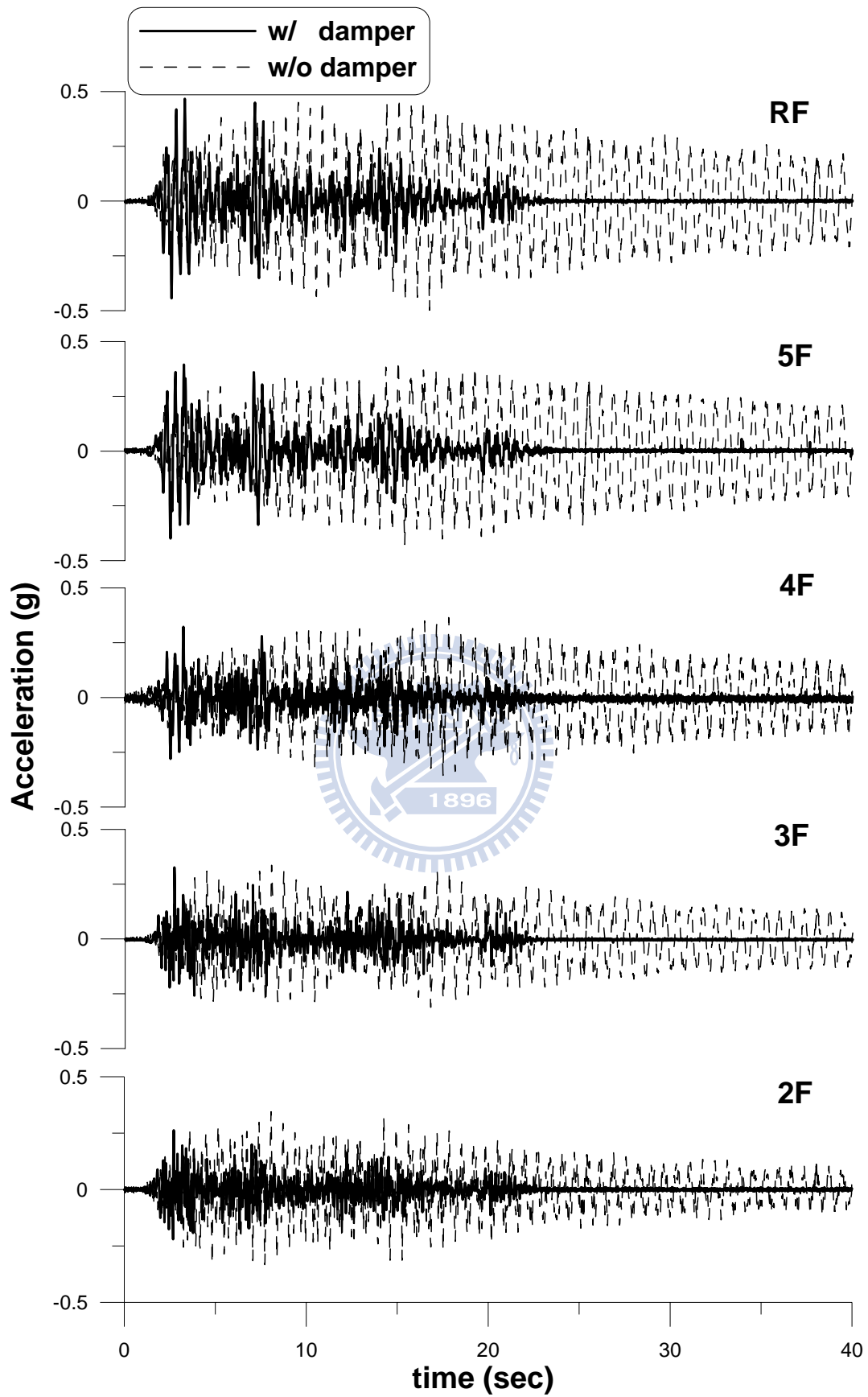


圖 5.36 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.18g)

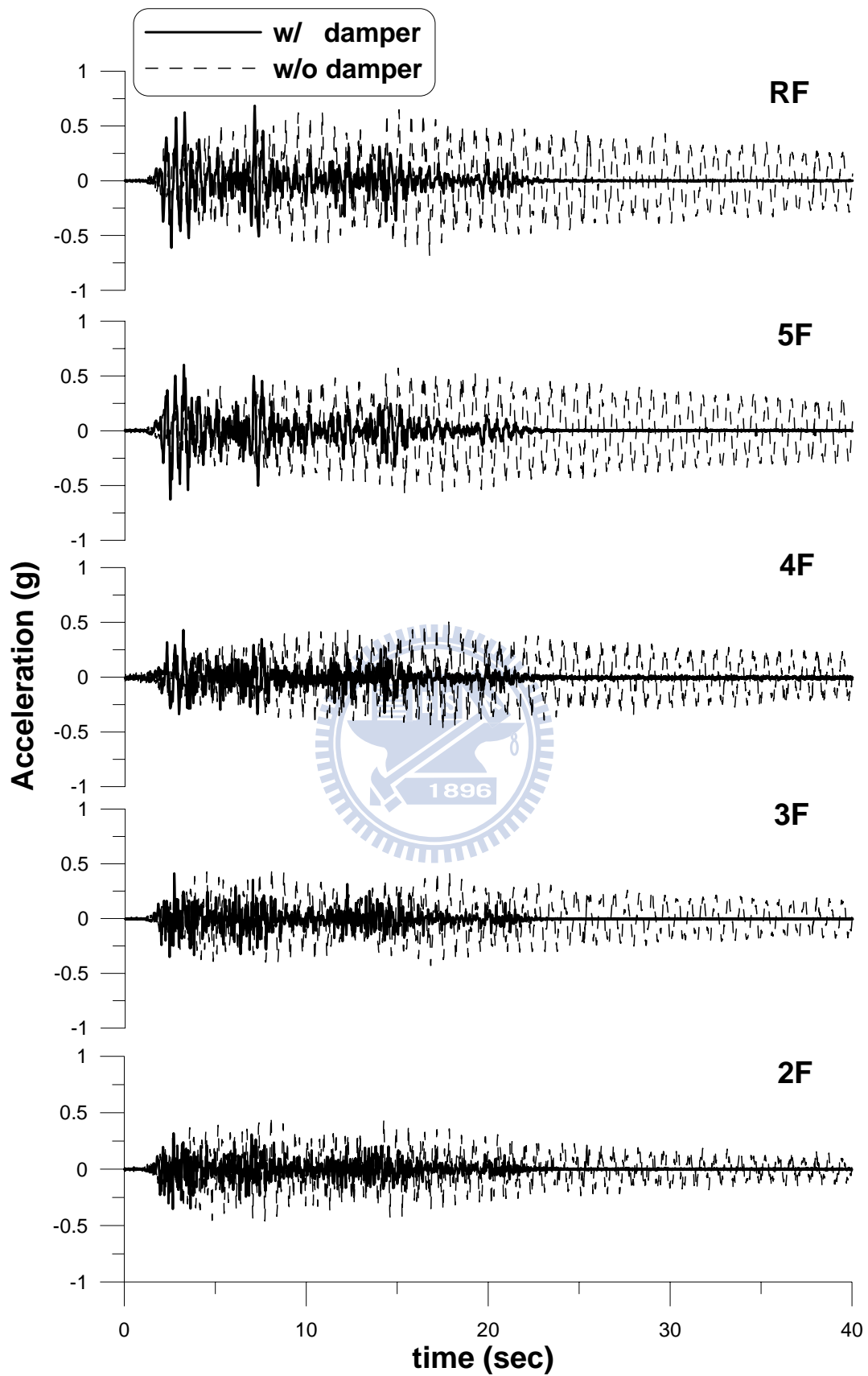


圖 5.37 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.25g)

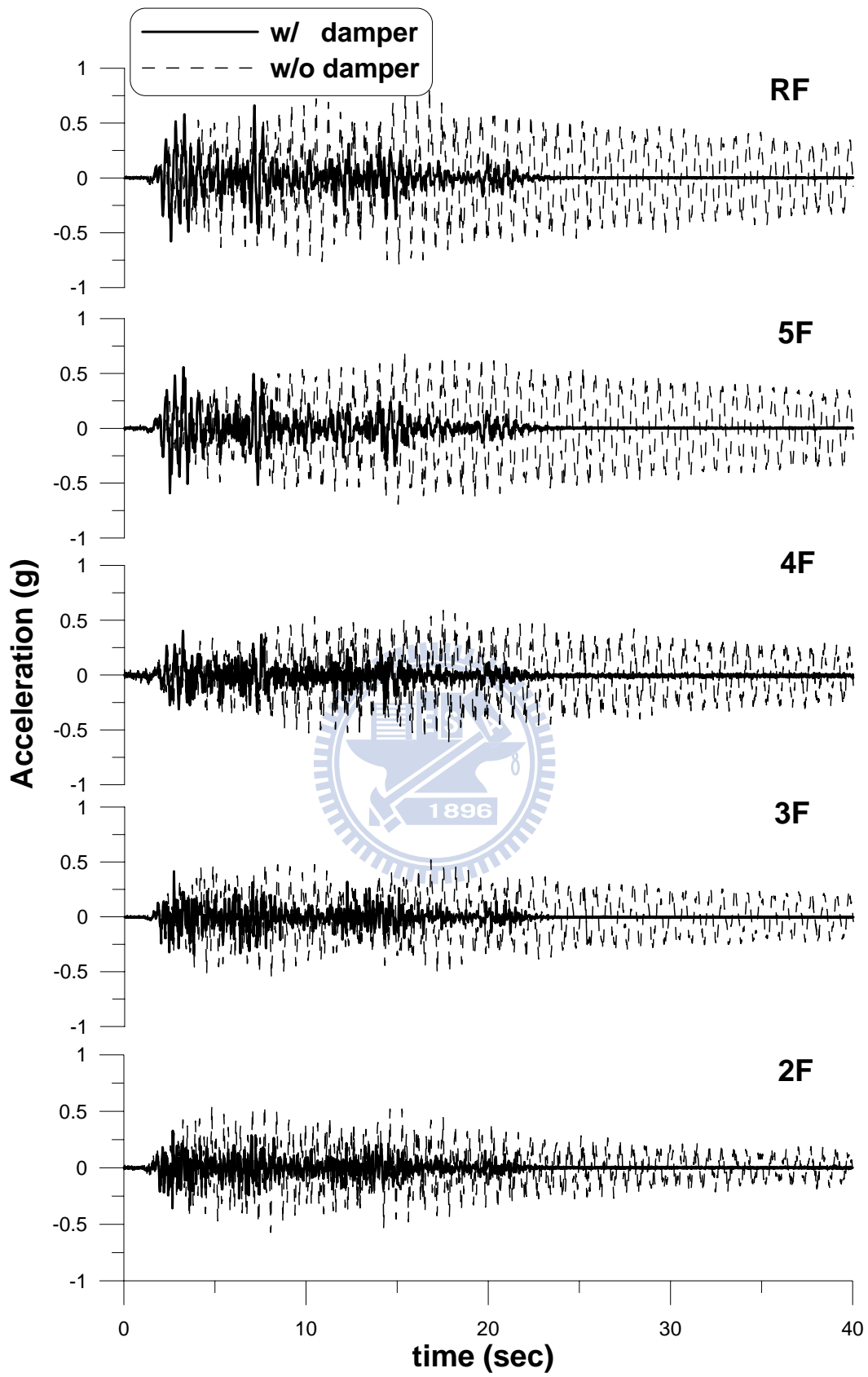


圖 5.38 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.30g)

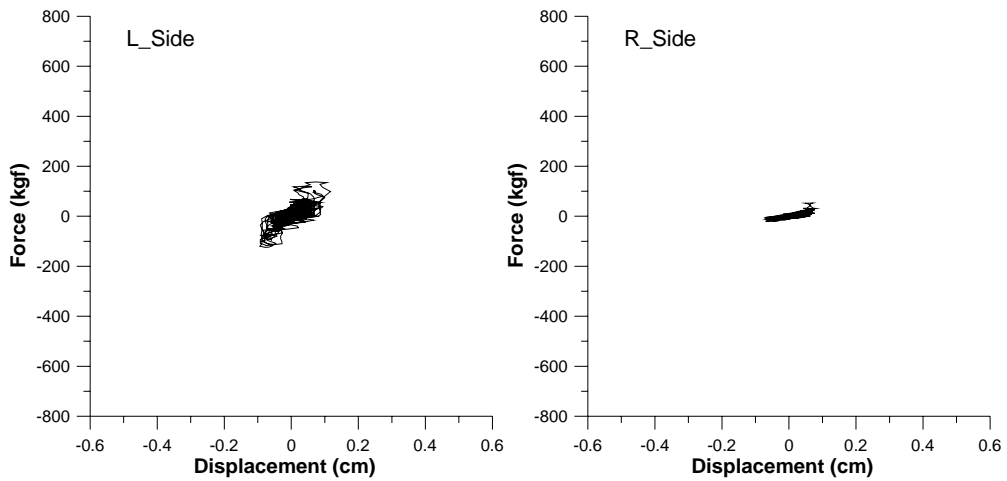


圖 5.39 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.05g)

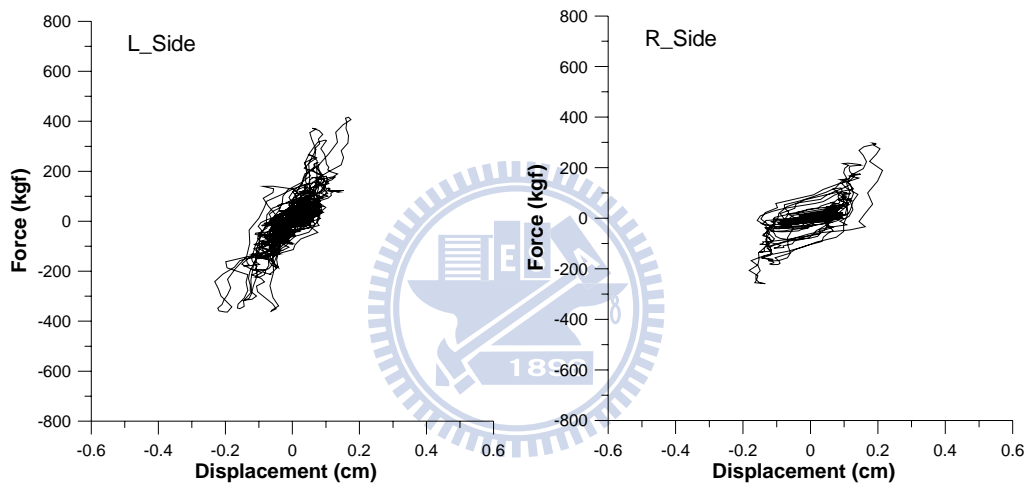


圖 5.40 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.14g)

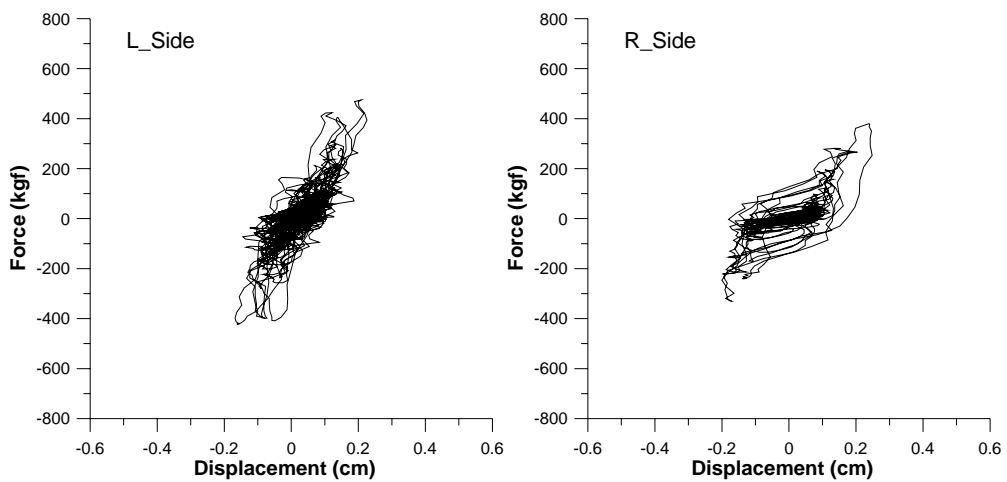


圖 5.41 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.18g)

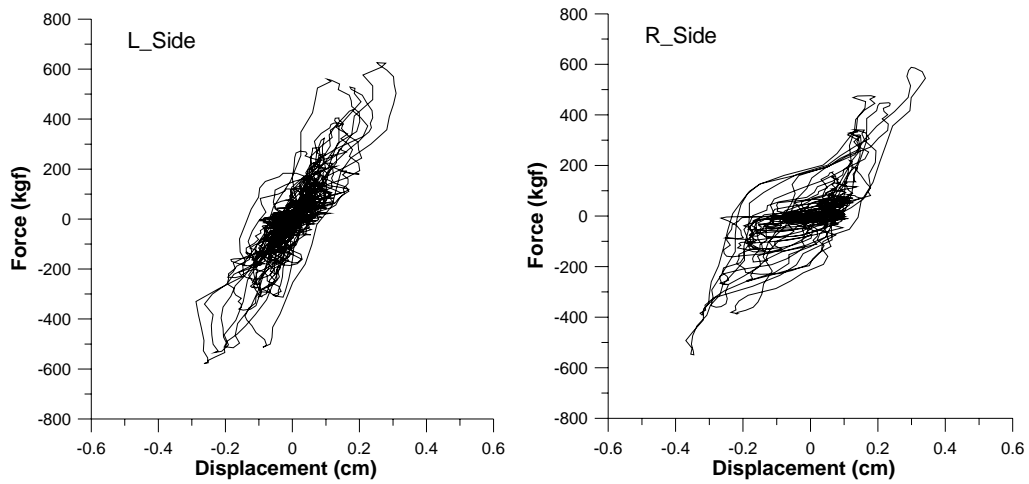


圖 5.42 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.25g)

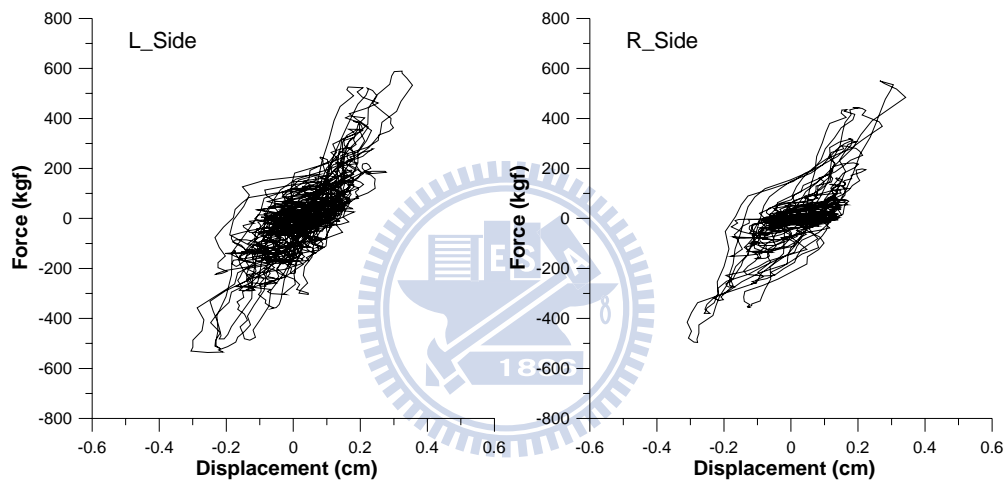


圖 5.43 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(El Centro ; PGA=0.30g)

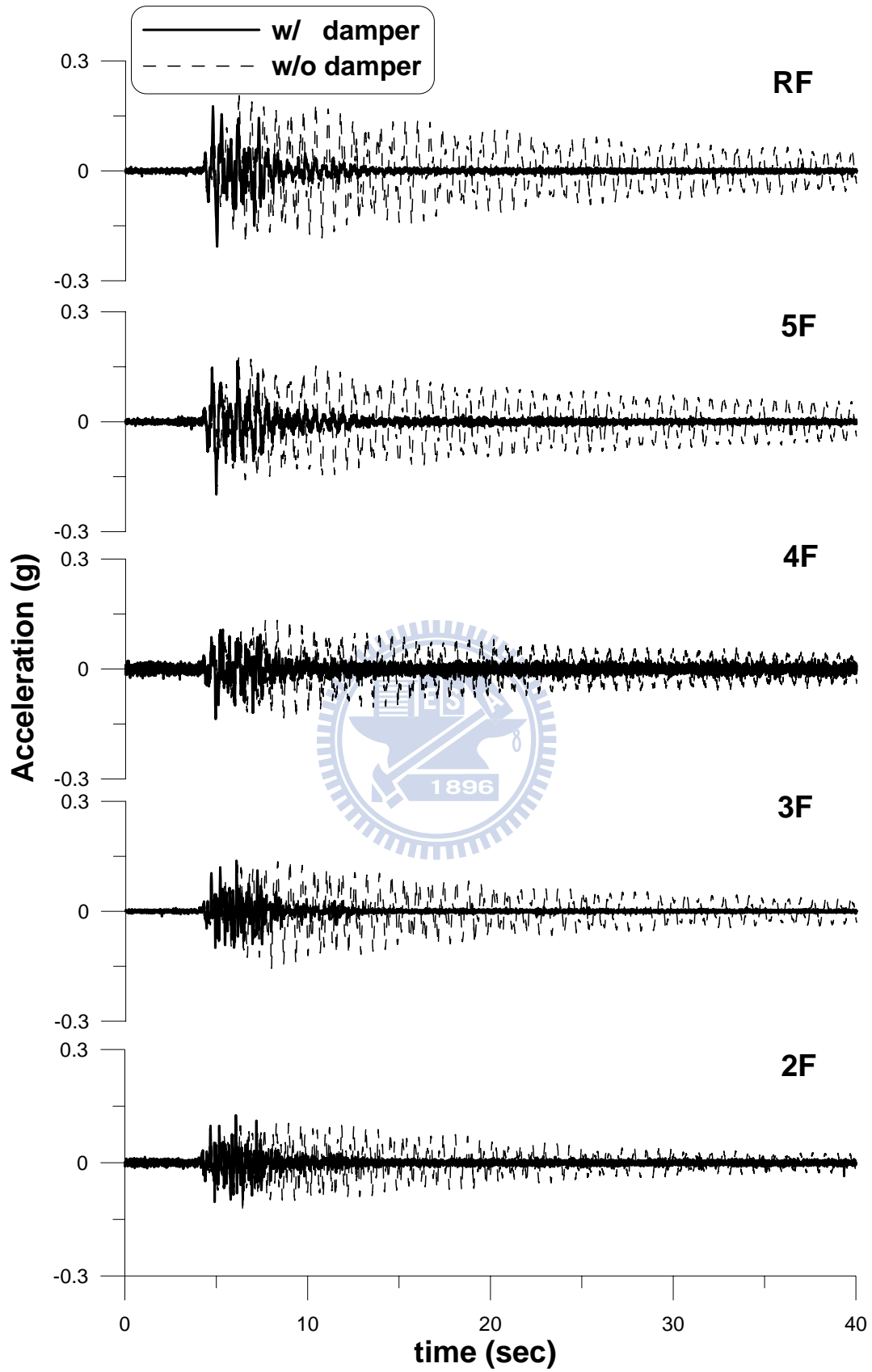


圖 5.44 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.08g)

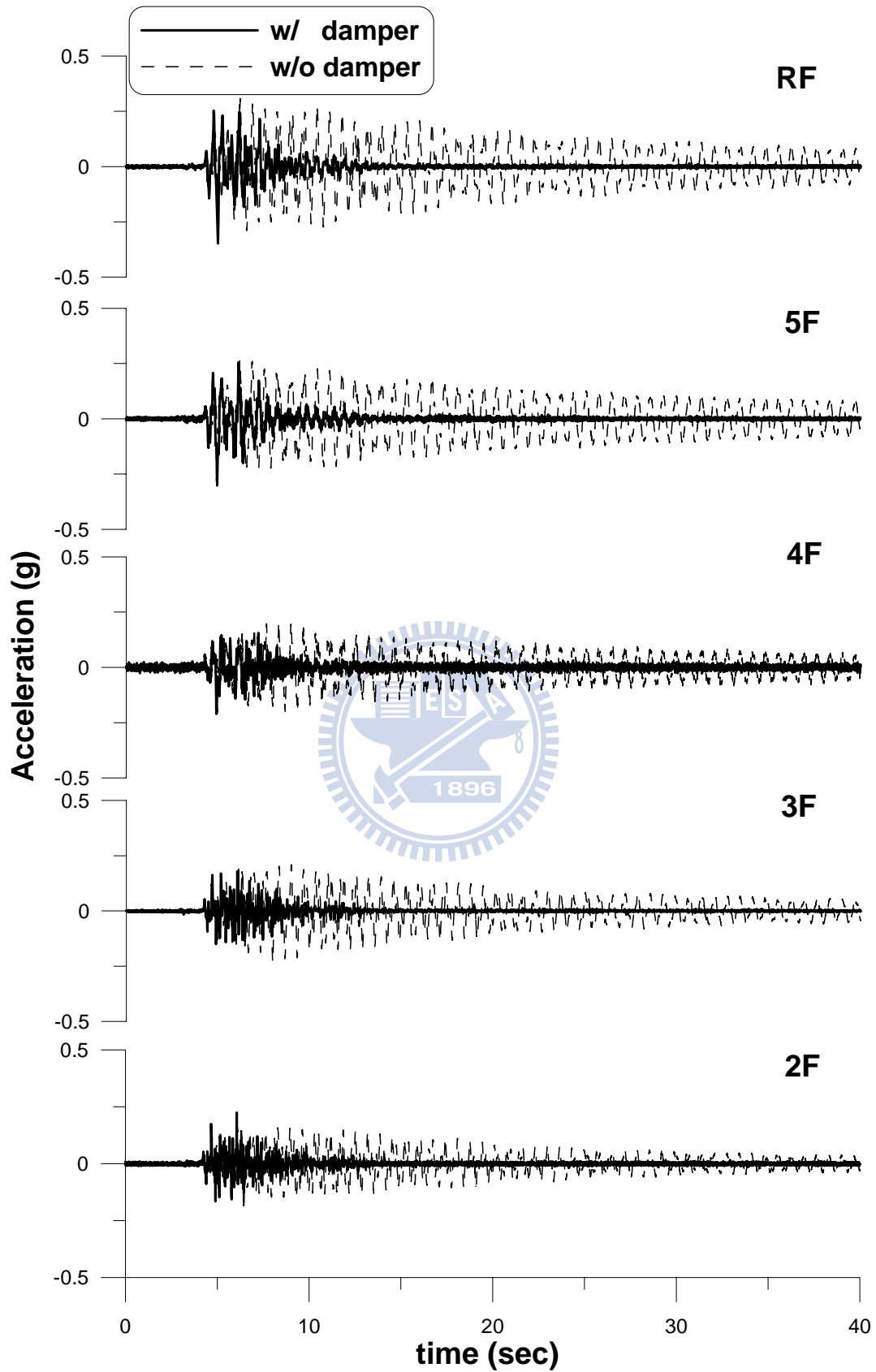


圖 5.45 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.14g)

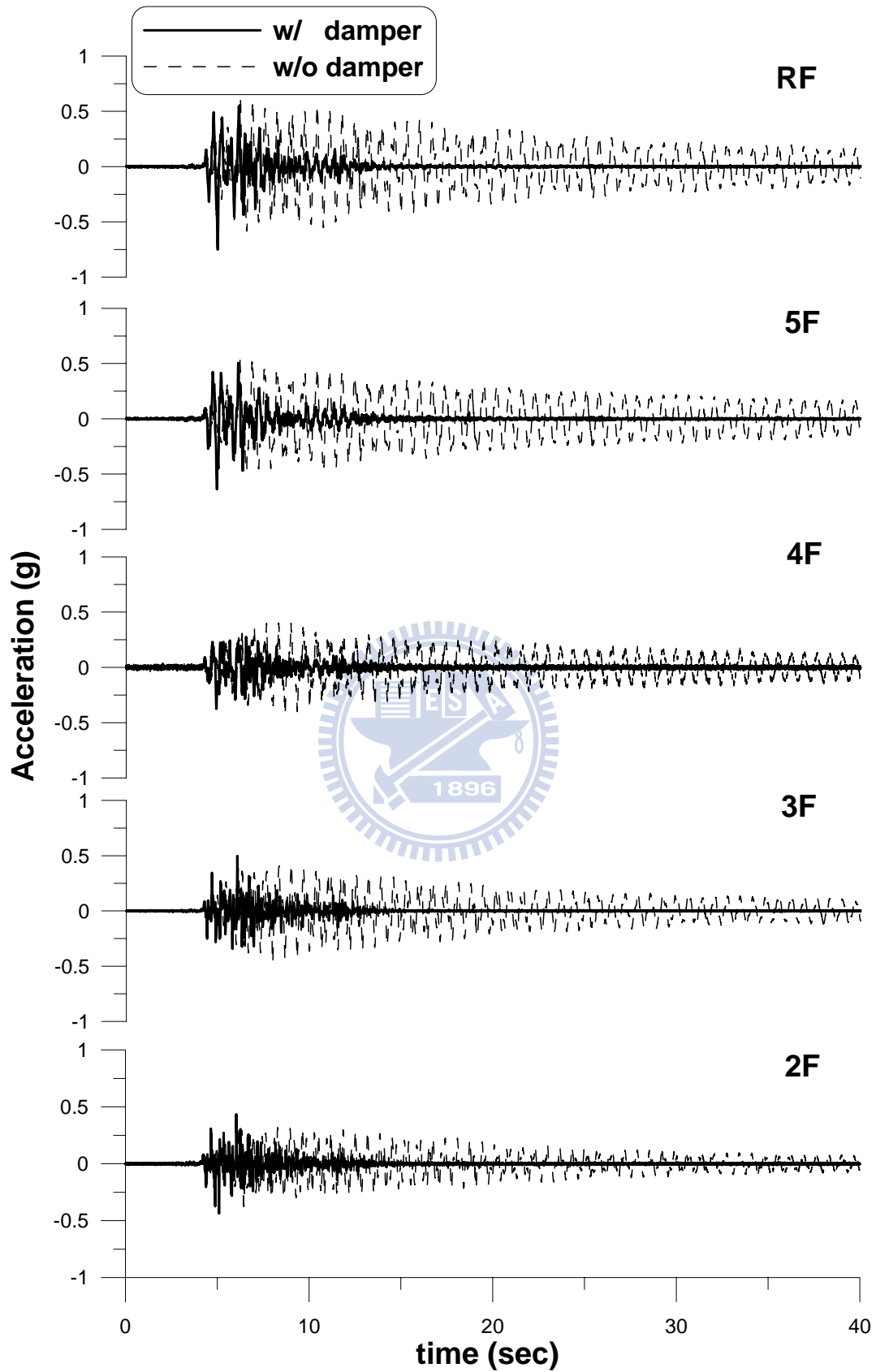


圖 5.46 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.22g)

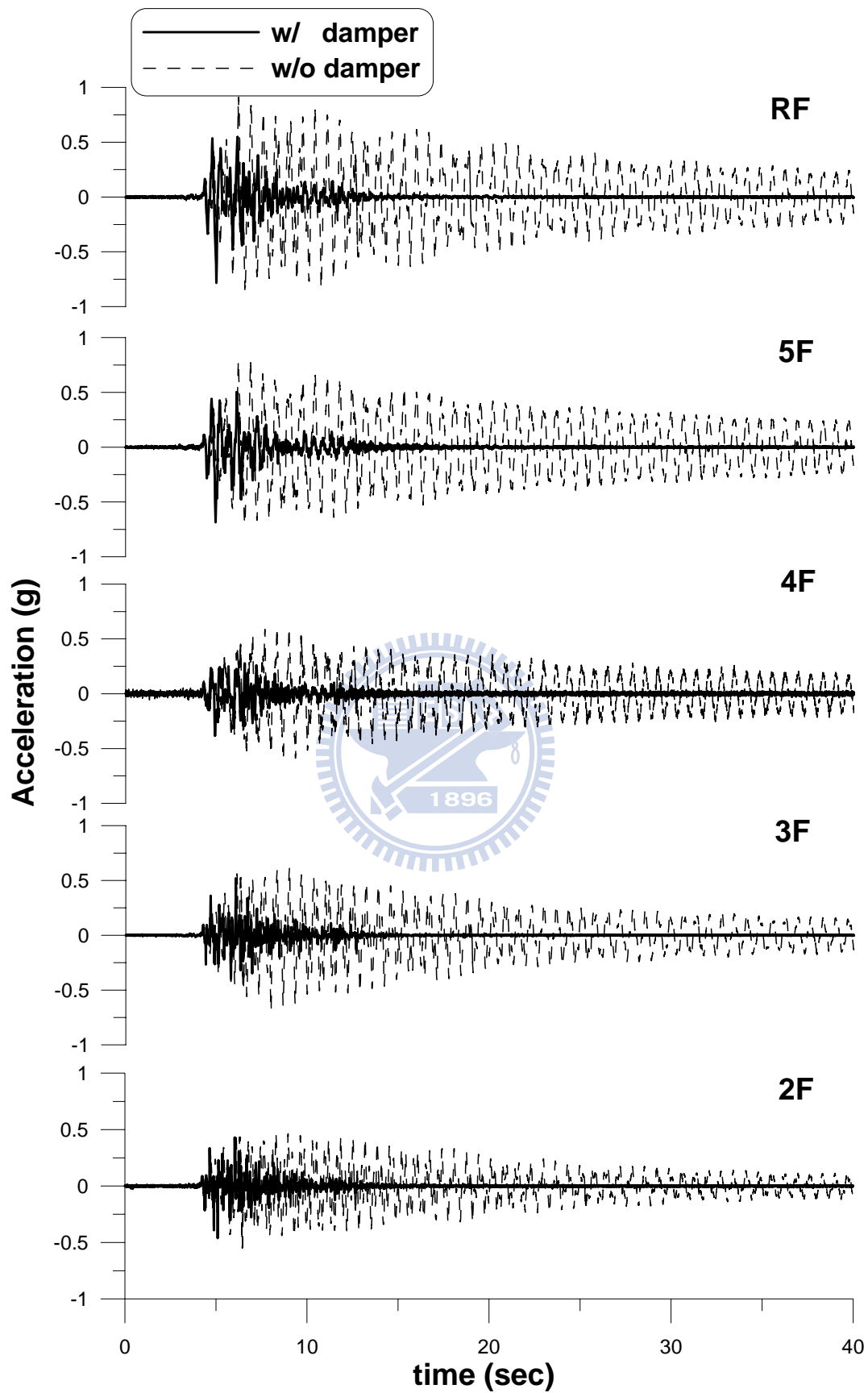


圖 5.47 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.34g)

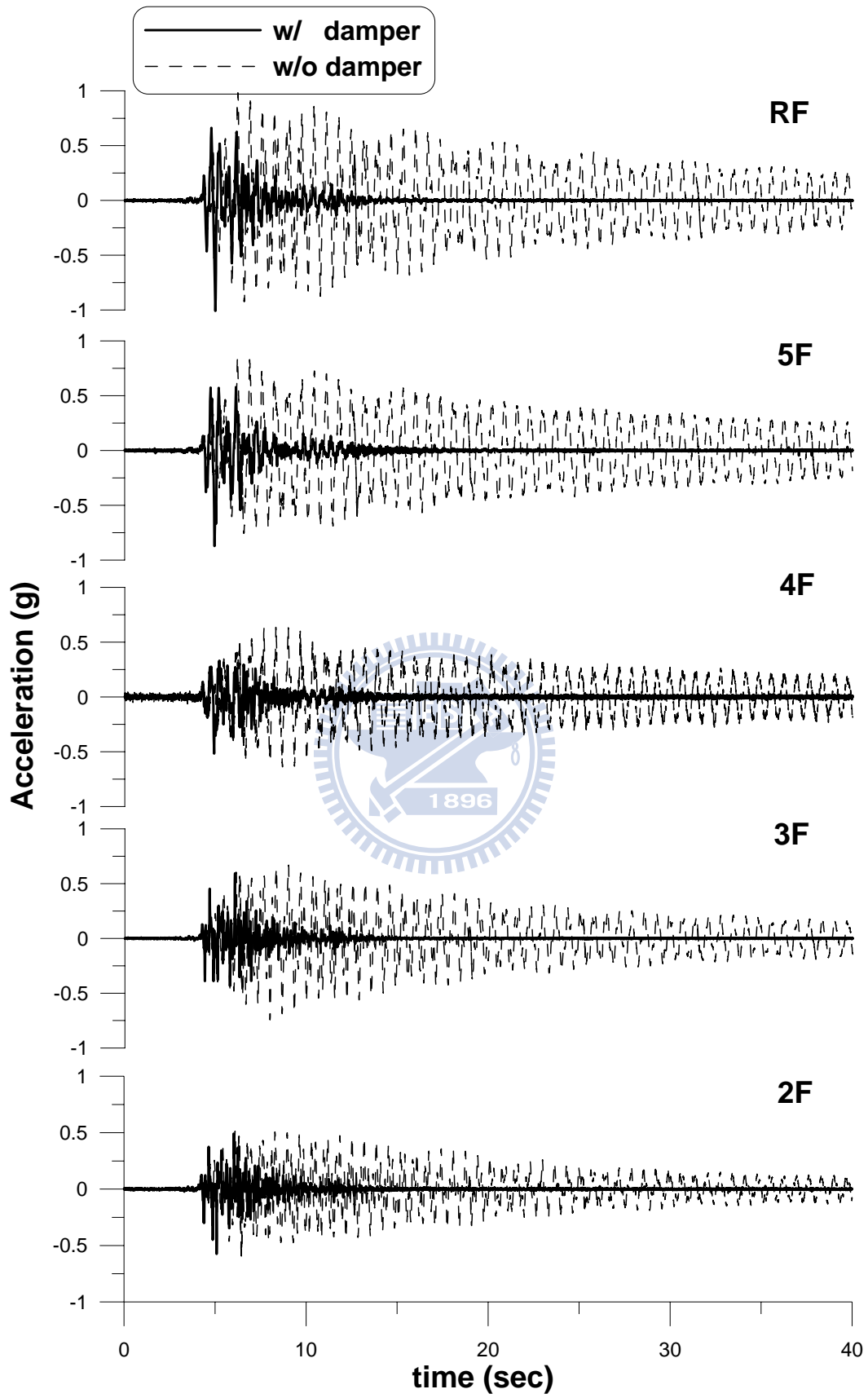


圖 5.48 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.37g)

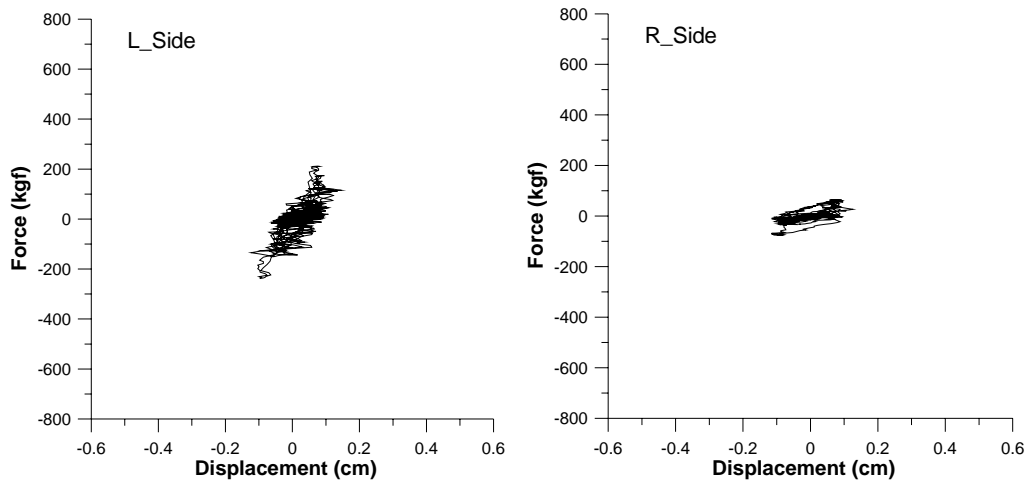


圖 5.49 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.08g)

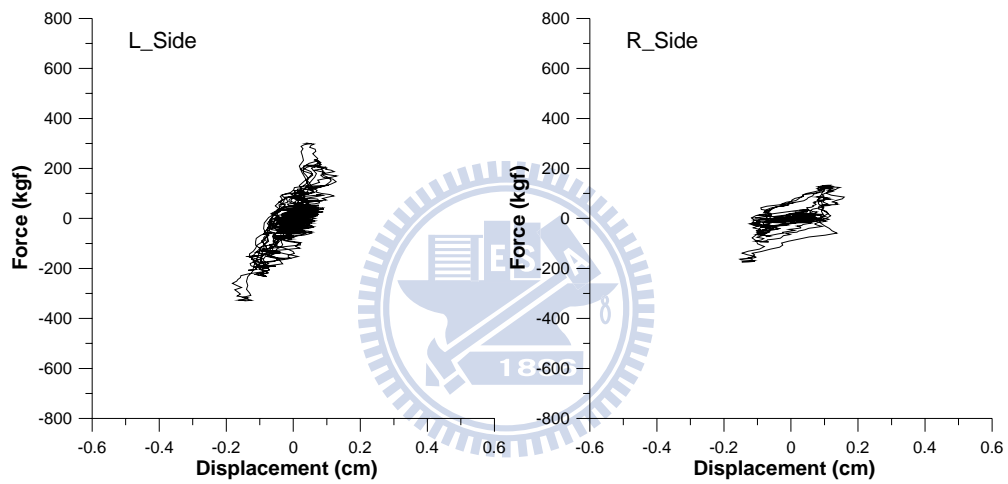


圖 5.50 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.14g)

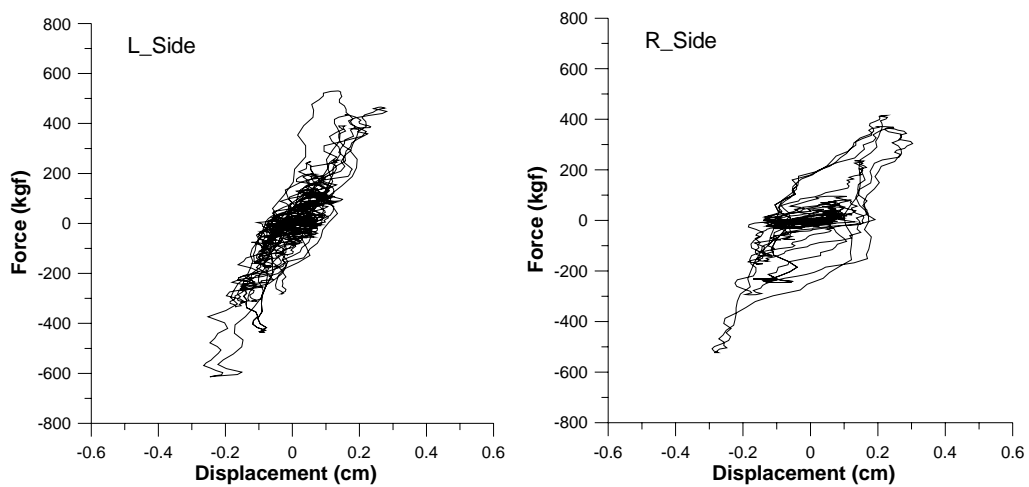


圖 5.51 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.22g)

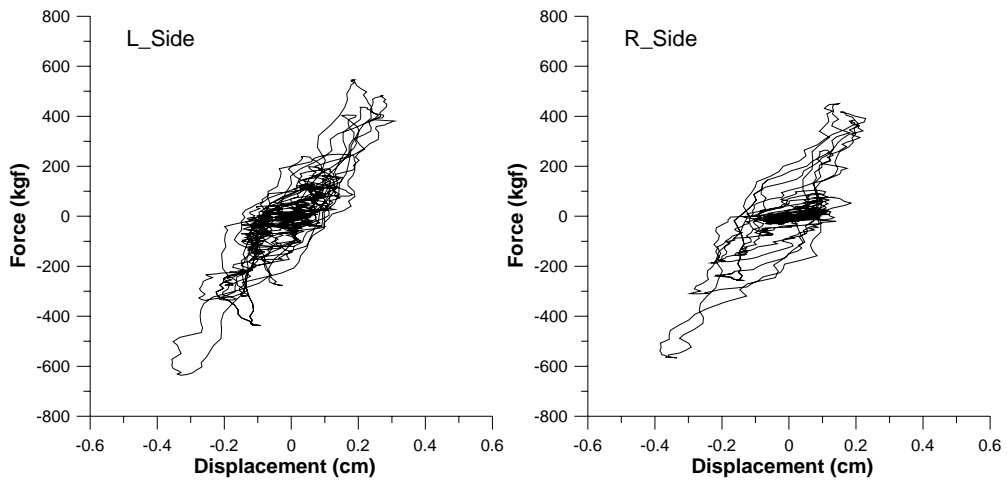


圖 5.52 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.34g)

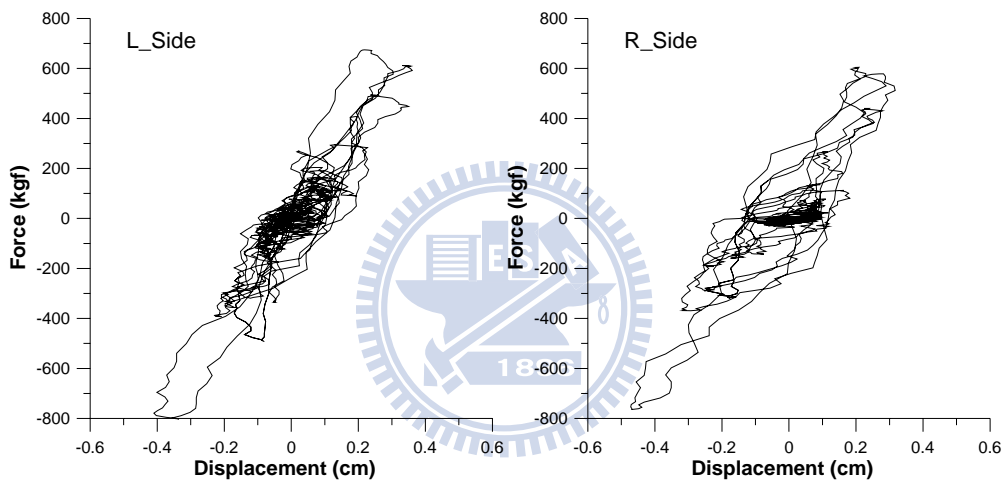
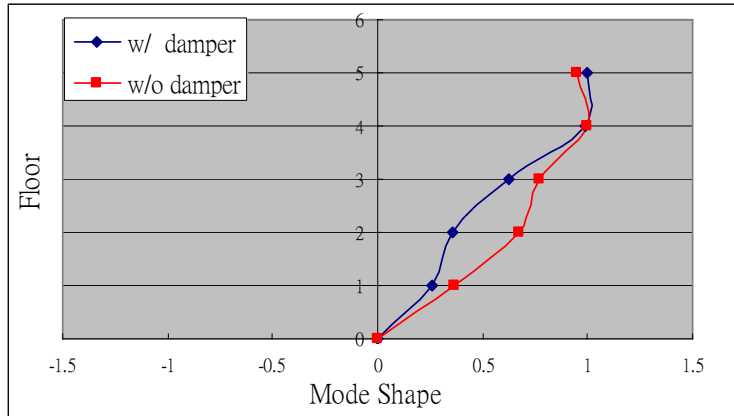
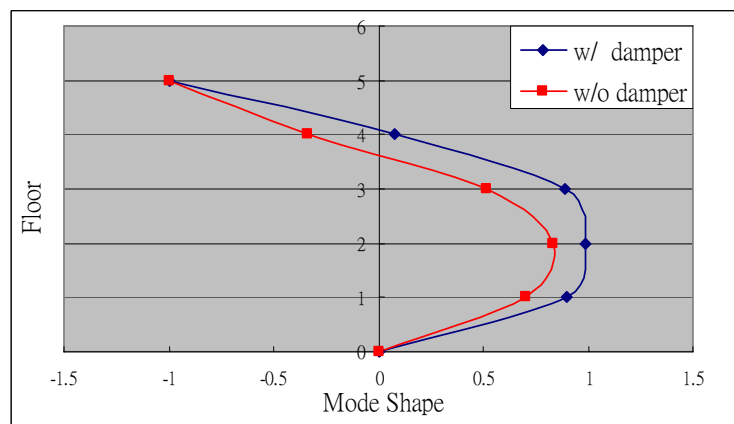


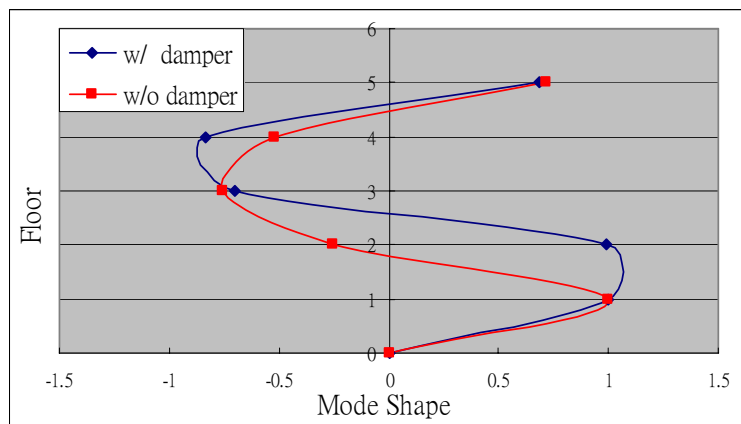
圖 5.53 一樓液流阻尼器斜撐消能遲滯迴圈(Kobe ; PGA=0.37g)



(a) First Mode

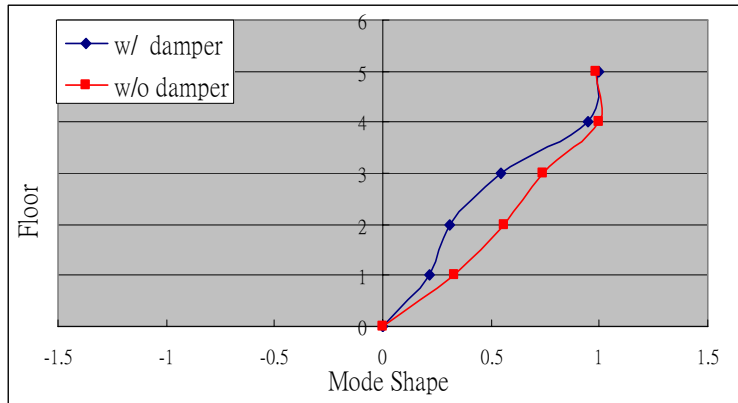


(b) Second Mode

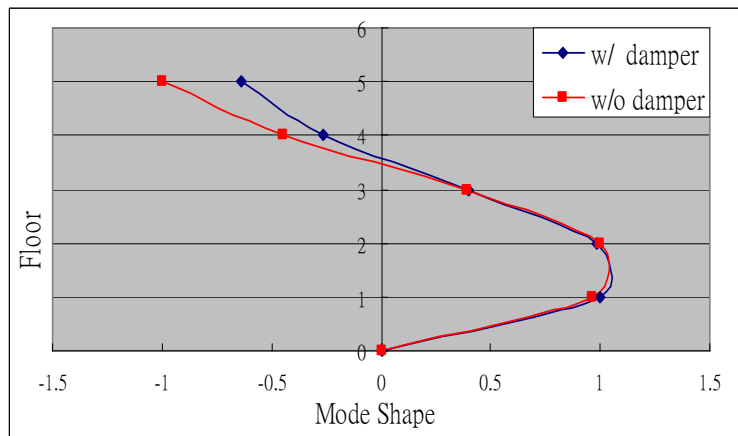


(c) Third Mode

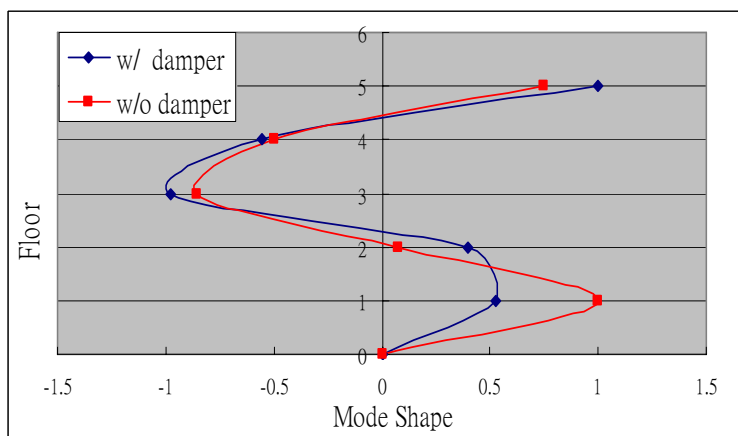
圖 5.54 結構之振態分析(Hachinohe,PGA=0.14g)



(a) First Mode

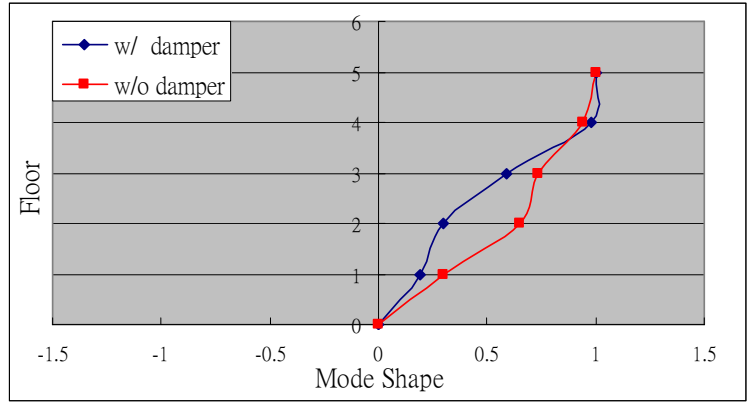


(b) Second Mode

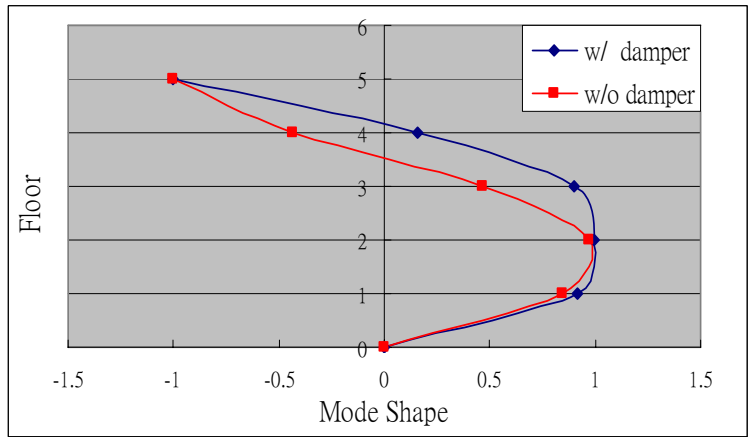


(c) Third Mode

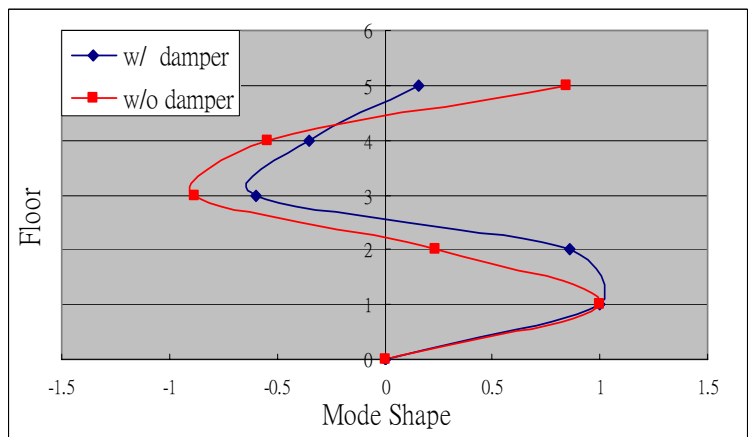
圖 5.55 結構之振態分析(El Centro,PGA=0.14g)



(a) First Mode



(b) Second Mode



(c) Third Mode

圖 5.56 結構之振態分析(Kobe,PGA=0.14g)

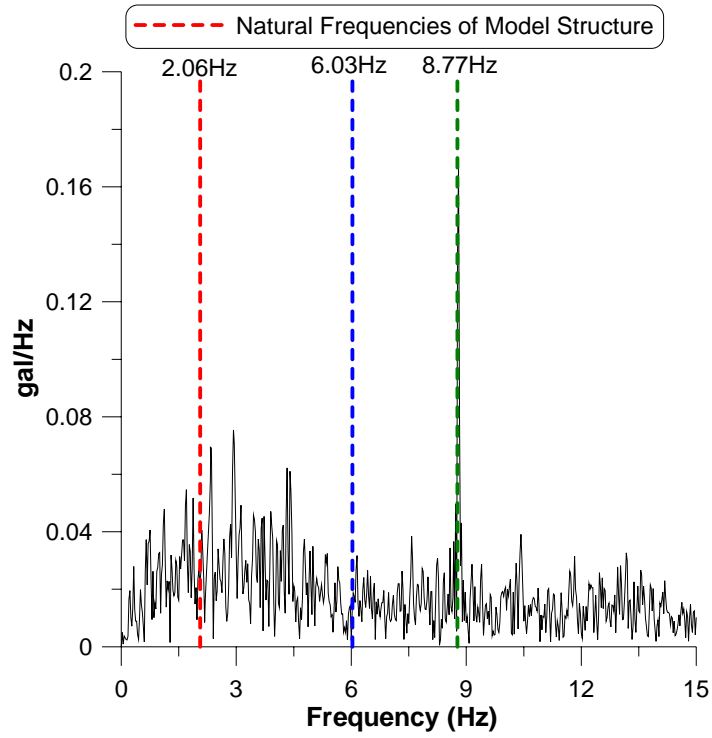


圖 5.57 El Centro 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g)

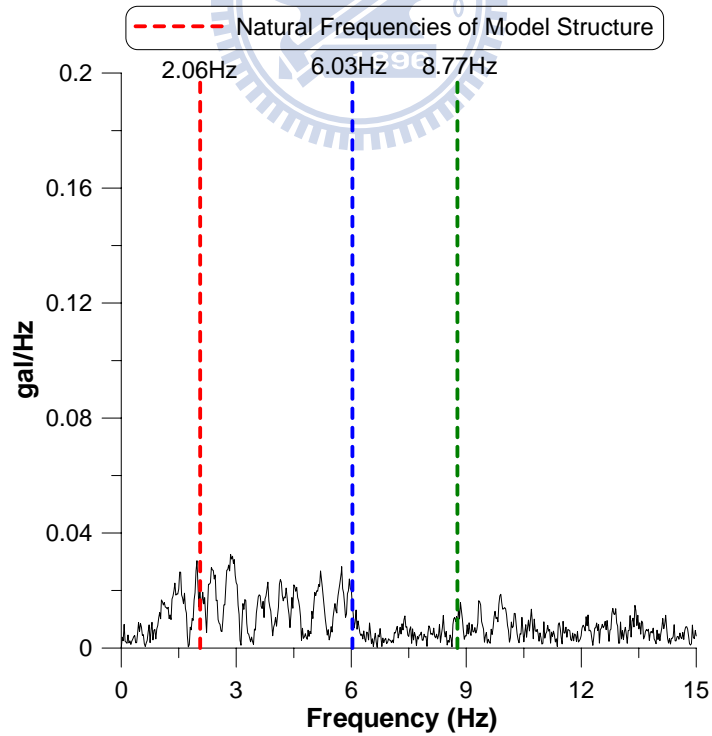


圖 5.58 Kobe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g)

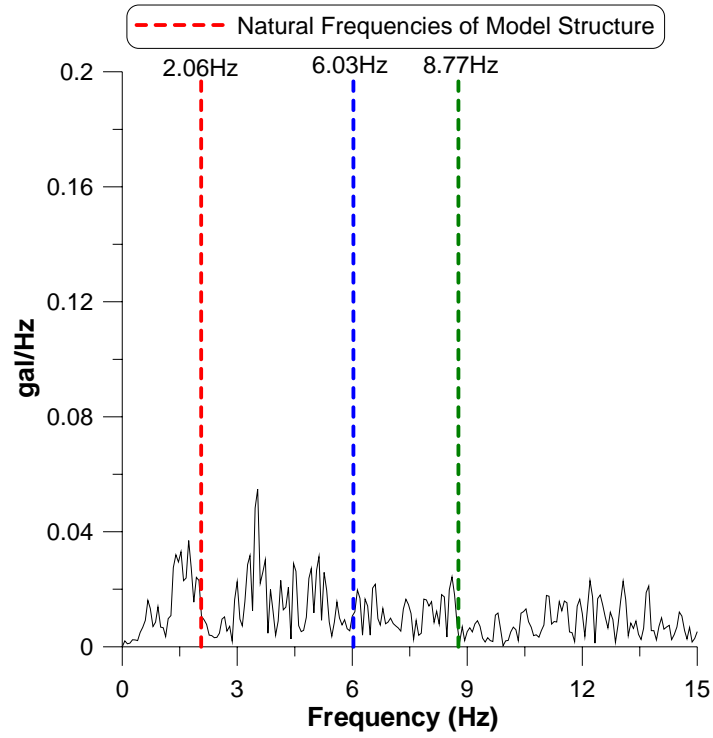


圖 5.59 Hachinohe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g)

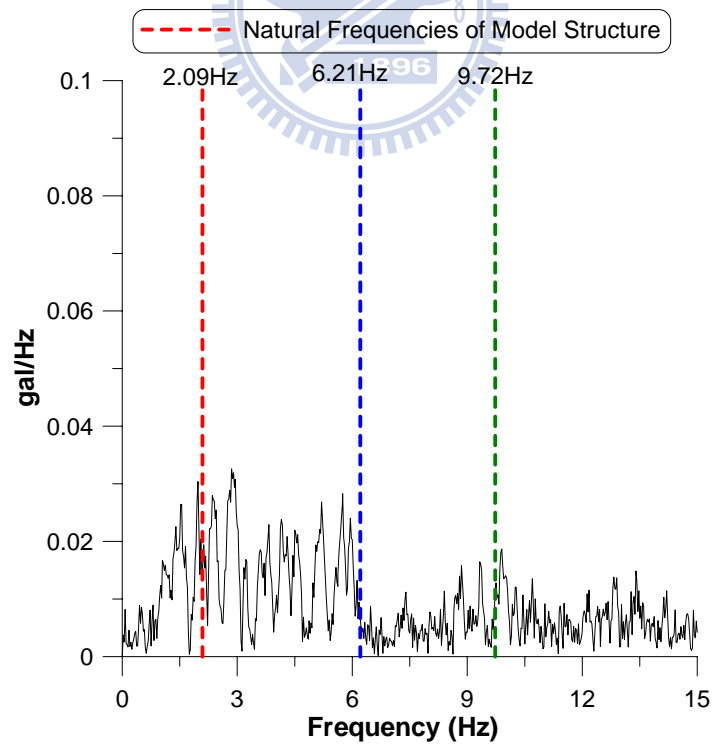


圖 5.60 Kobe 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g)

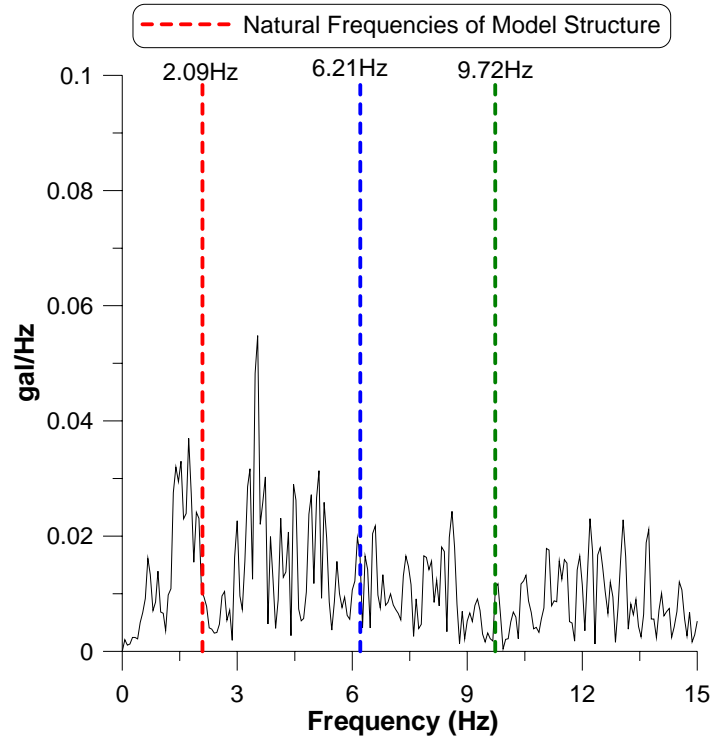


圖 5.61 Hachinohe 震波頻譜圖與結構頻率比較(PGA=0.14g)

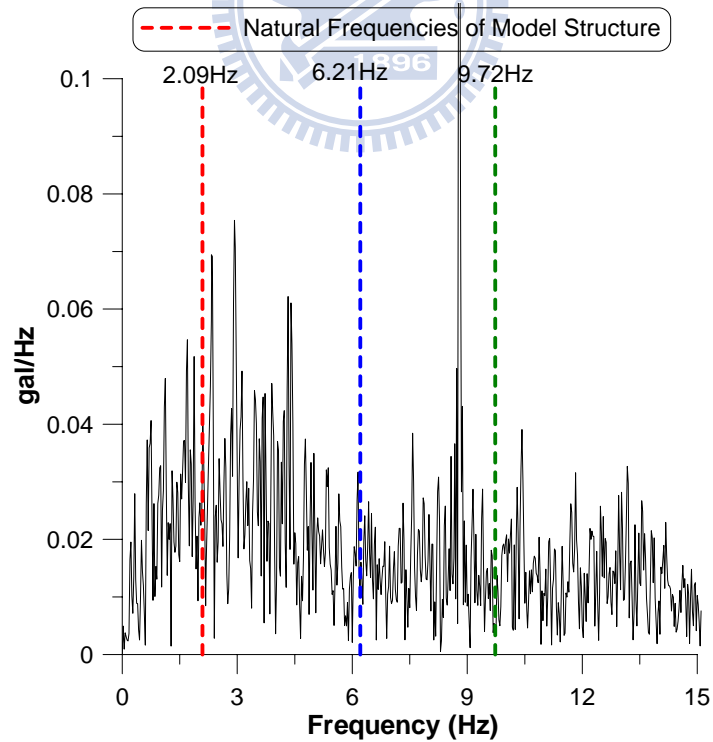


圖 5.62 El Centro 震波頻譜與結構頻率比較圖(PGA=0.14g)

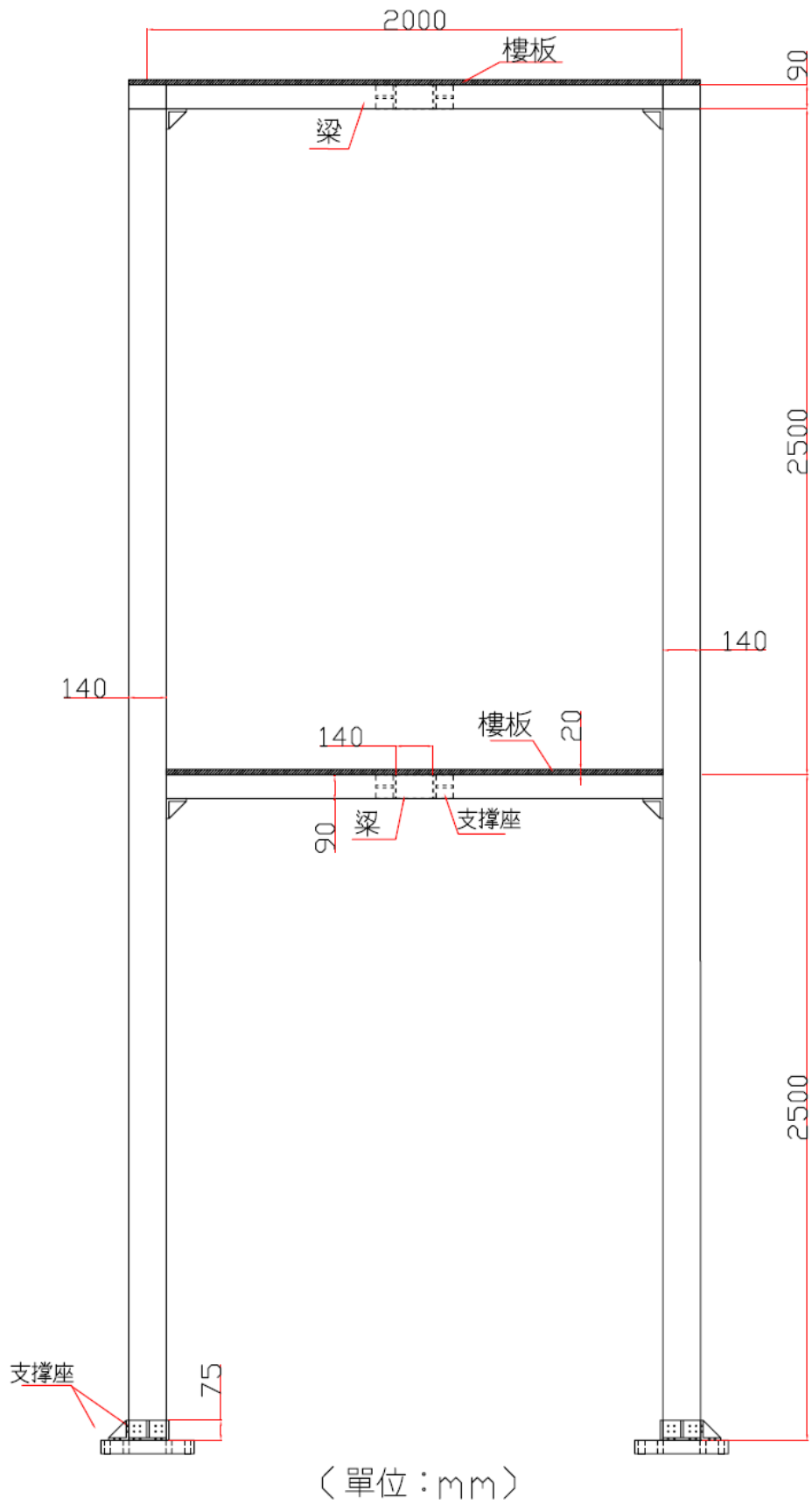


圖 5.63 二層樓木造模型結構之立面圖



圖 5.64 一樓液流阻尼器之安裝圖

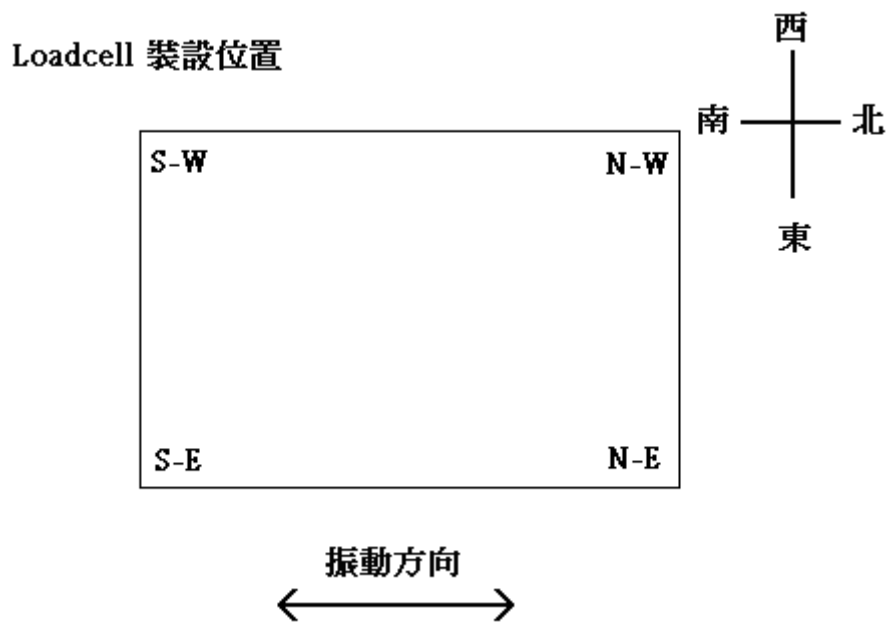


圖 5.65 一樓液流阻尼器之安裝位置圖



圖 5.66 裝設液流阻尼器之二層樓模型結構

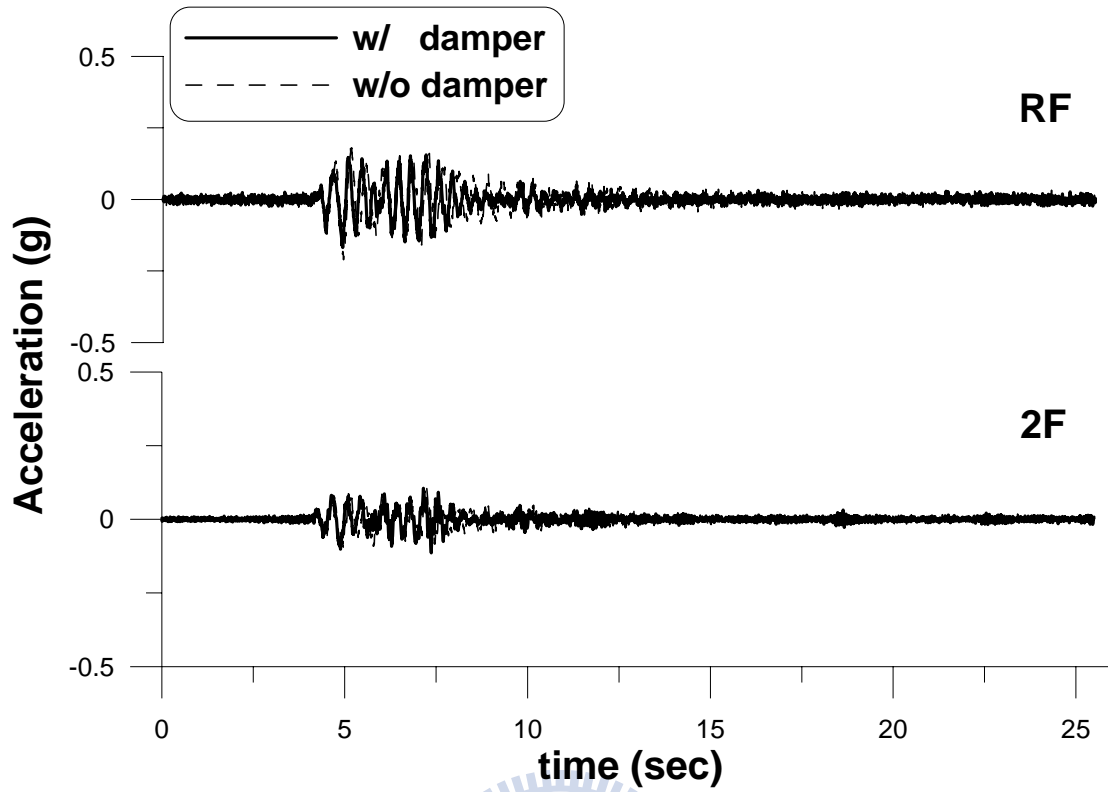


圖 5.67 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.08g)

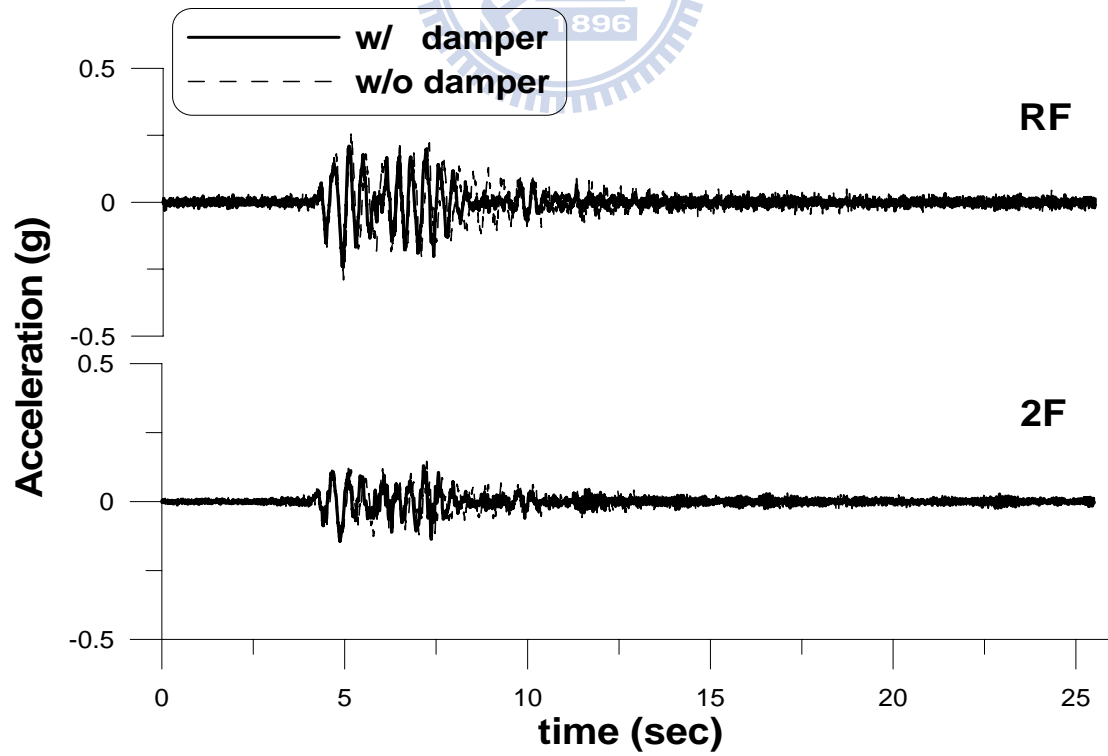


圖 5.68 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.12g)

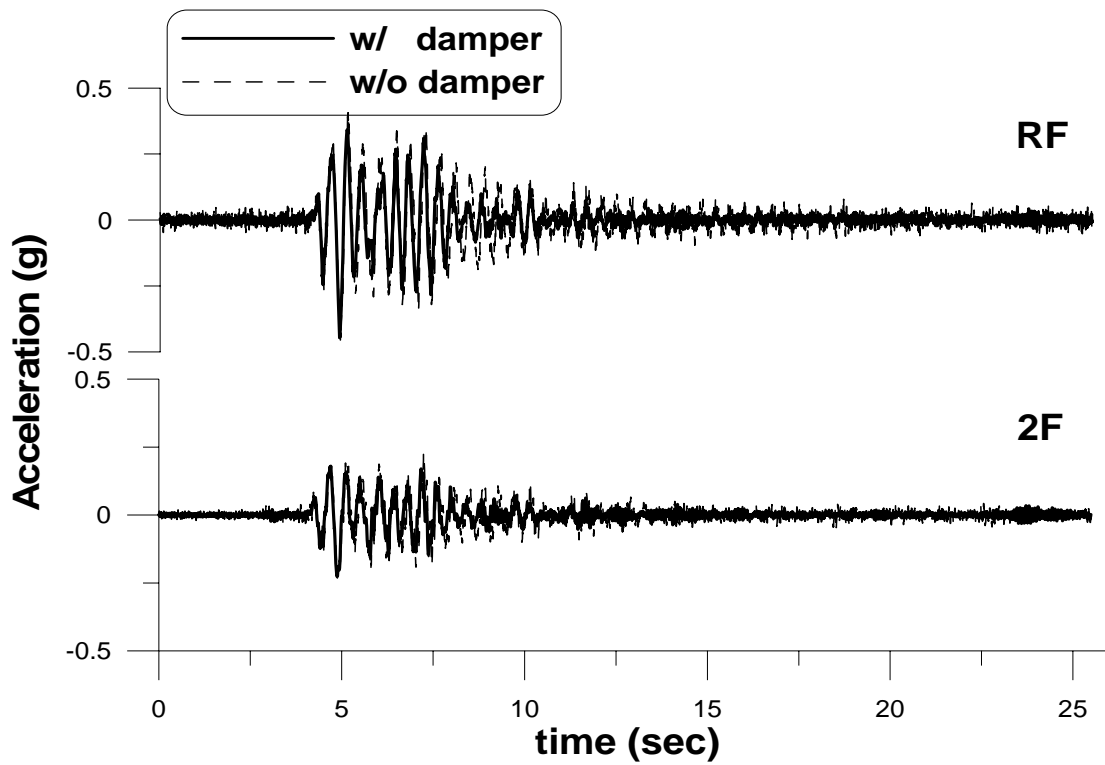


圖 5.69 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.19g)

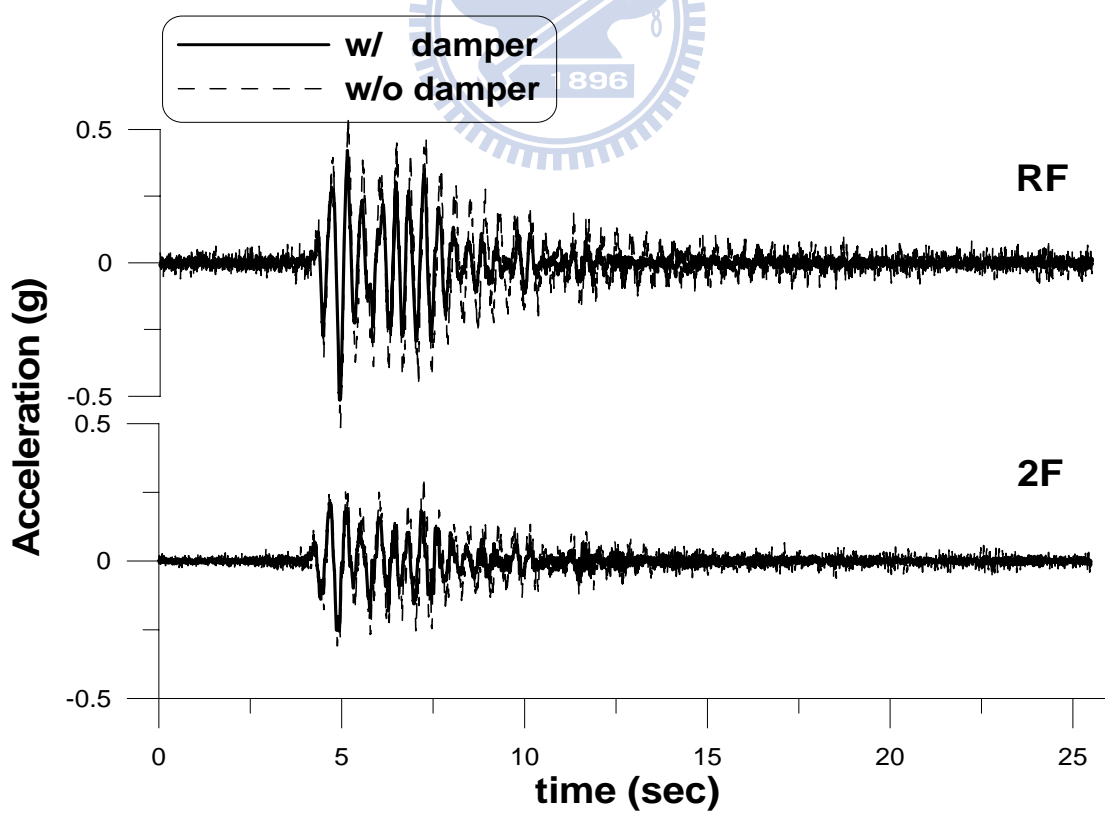


圖 5.70 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.25g)

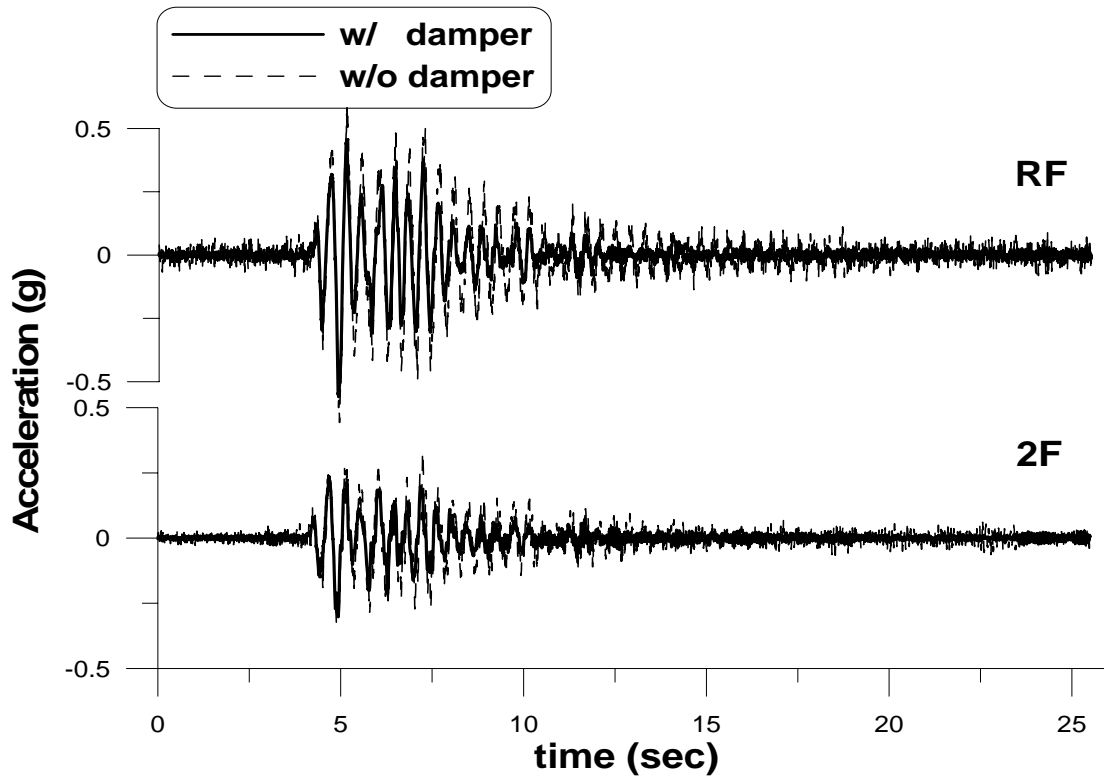


圖 5.71 各樓層加速度反應歷時比較(Kobe ; PGA=0.28g)

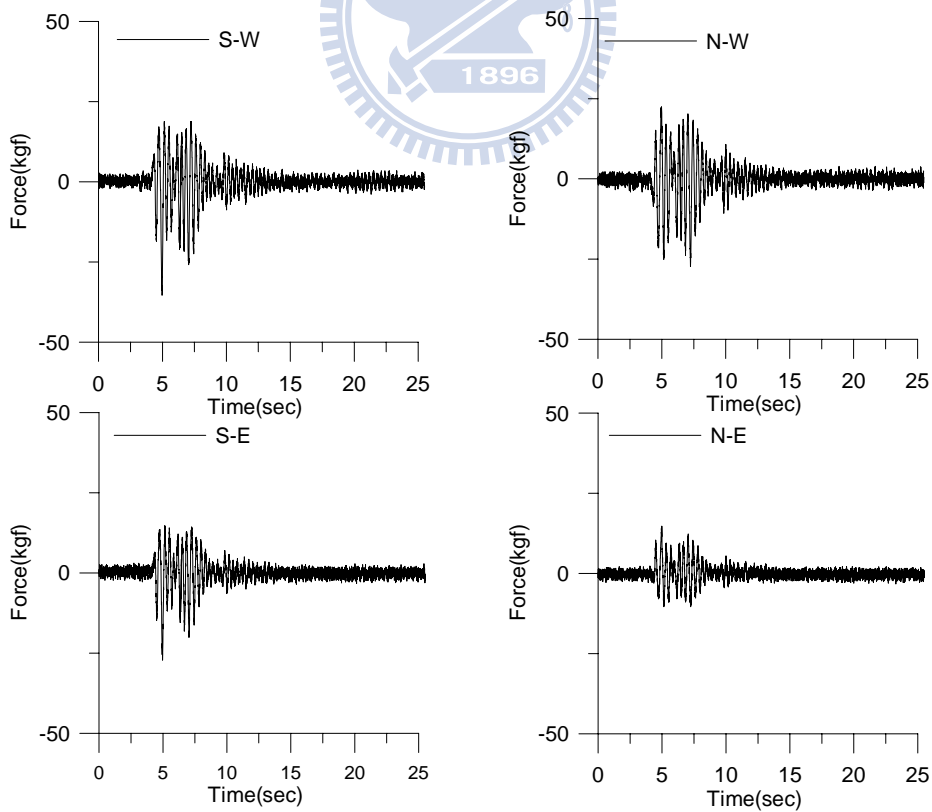


圖 5.72 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.08g)

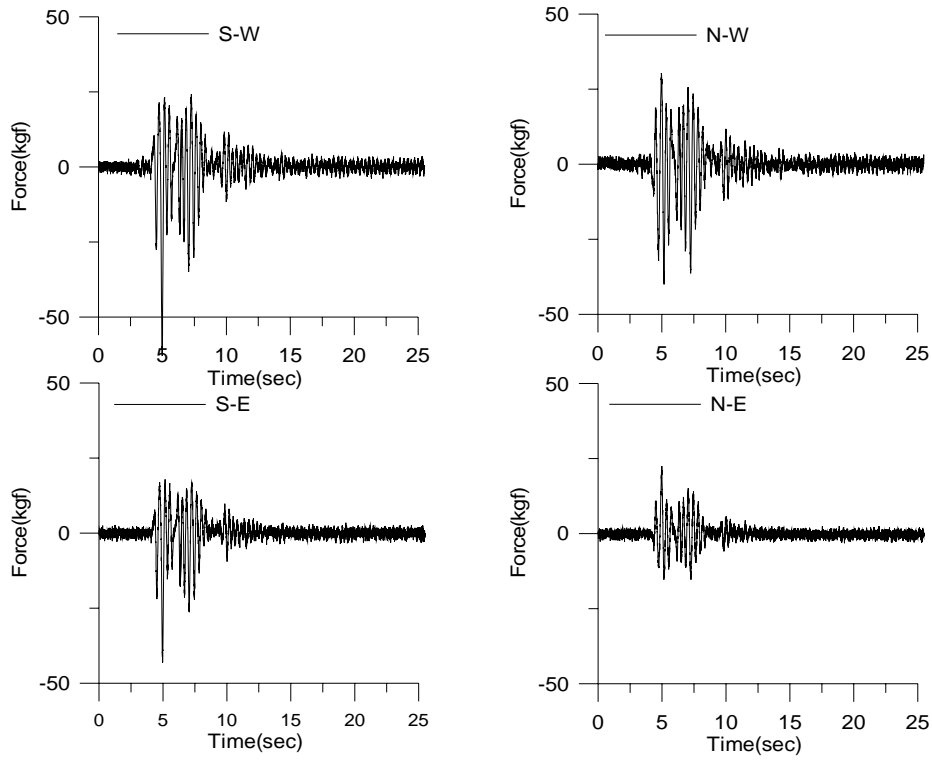


圖 5.73 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.12g)

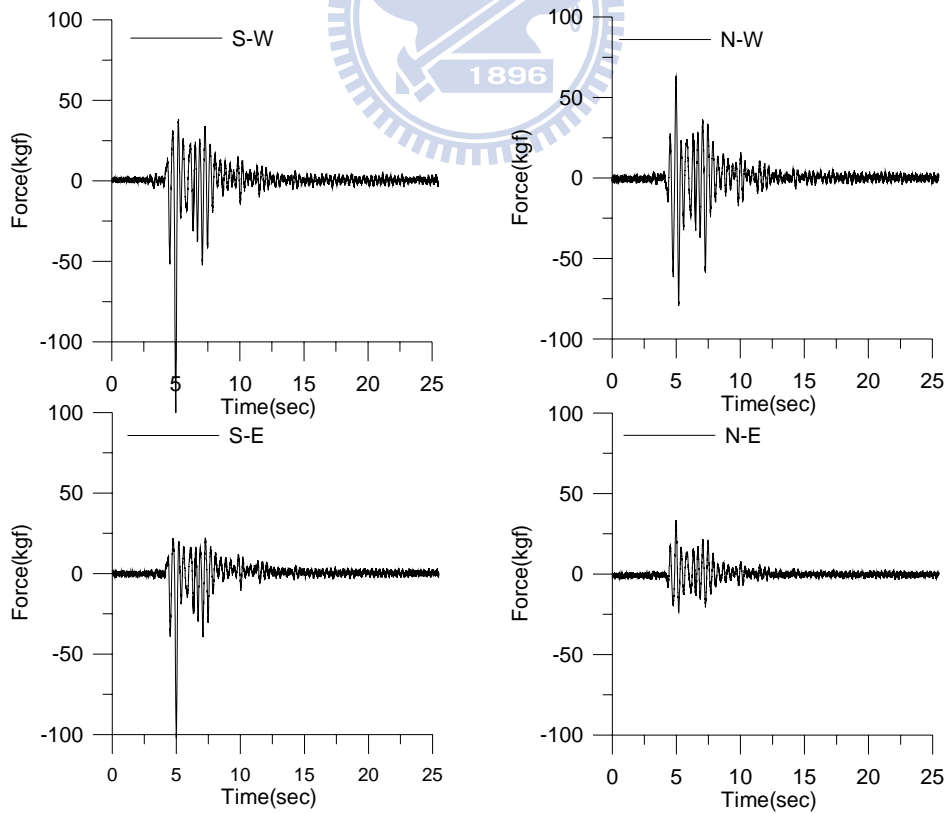


圖 5.74 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.19g)

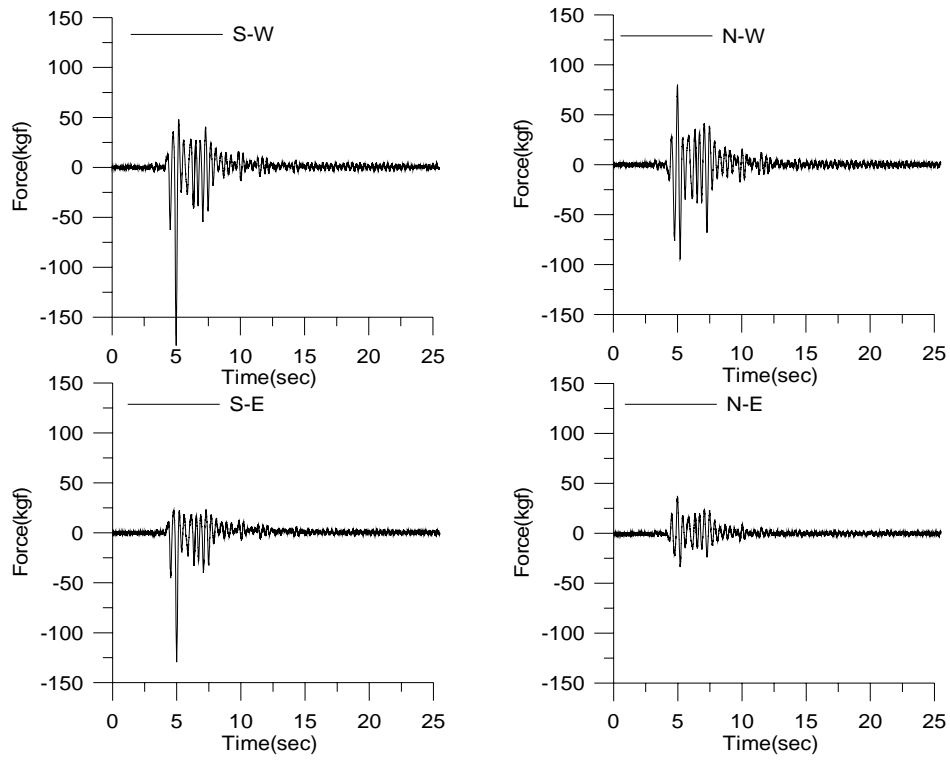


圖 5.75 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.25g)

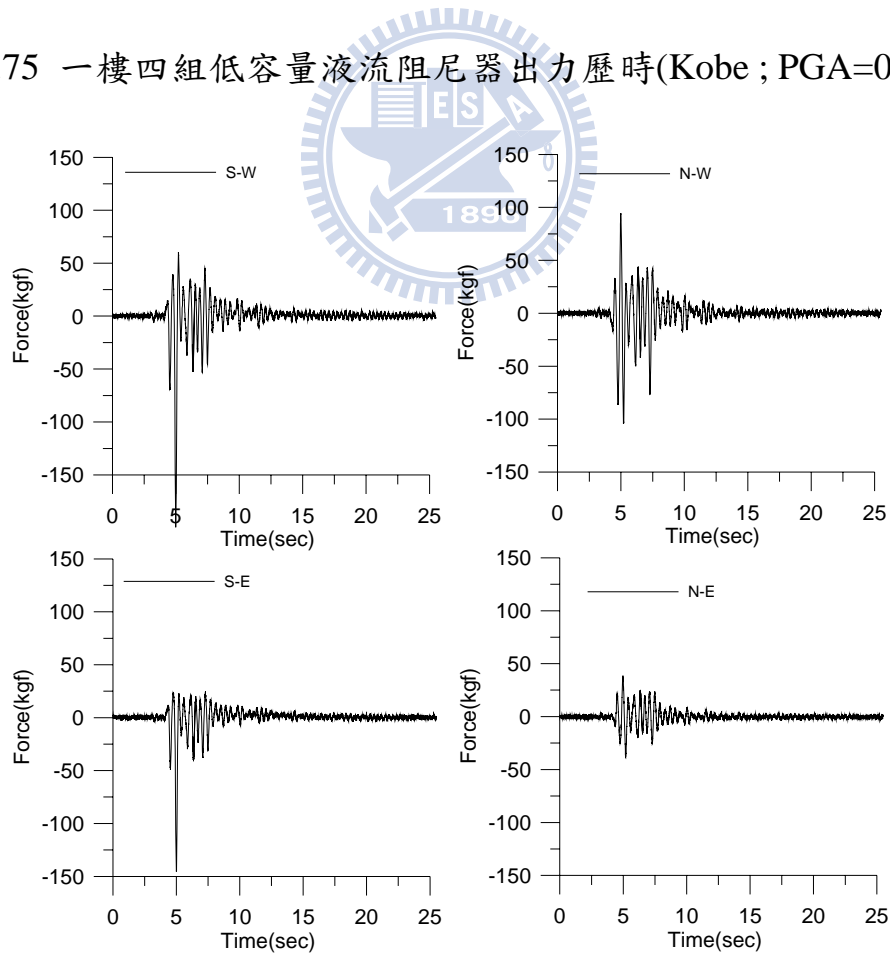


圖 5.76 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Kobe ; PGA=0.28g)

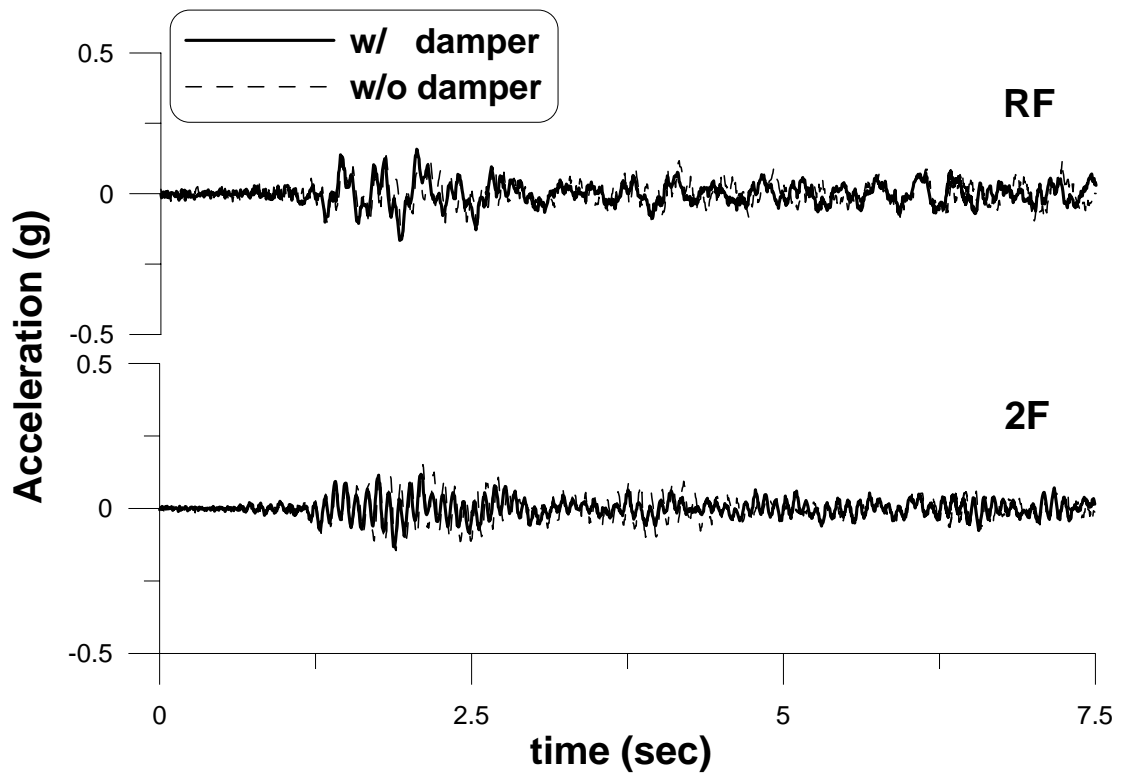


圖 5.77 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.08g)

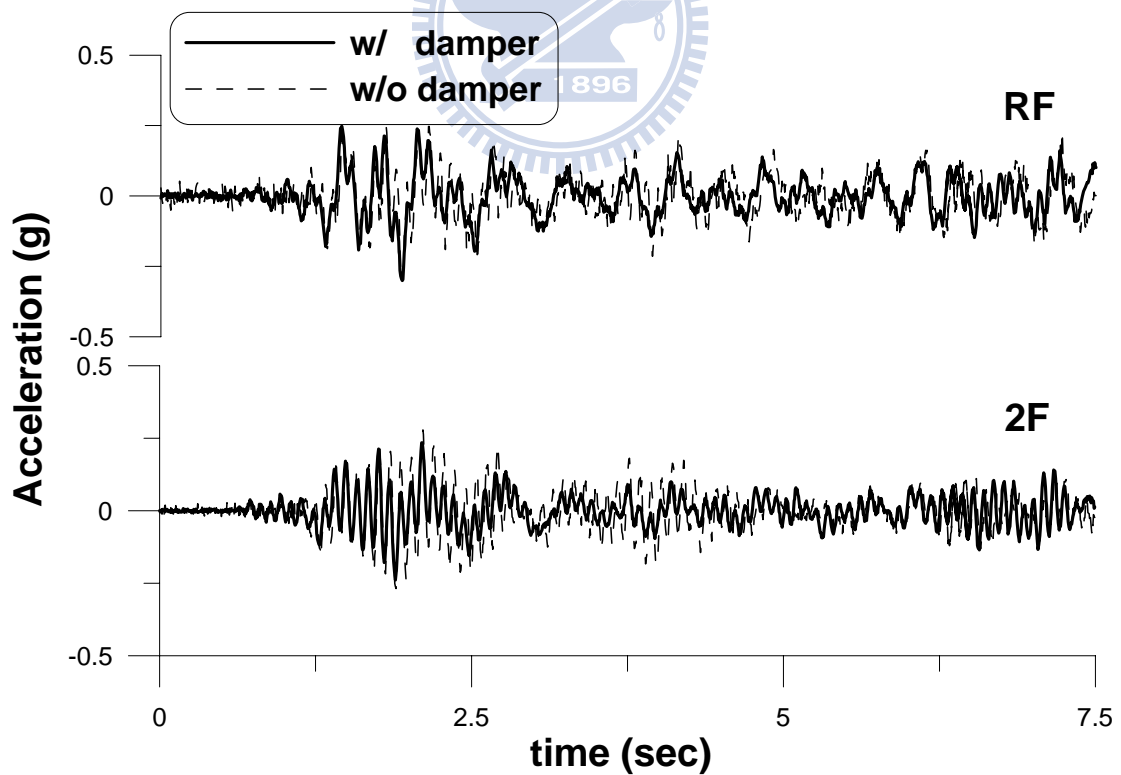


圖 5.78 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.15g)

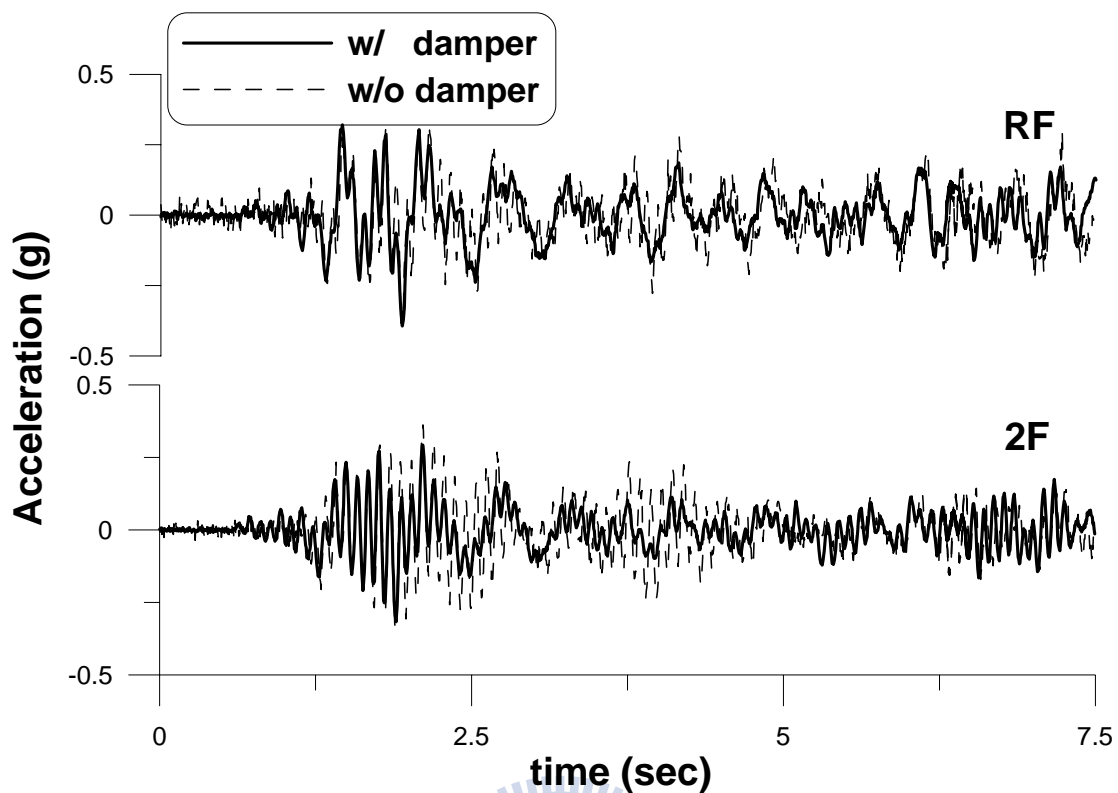


圖 5.79 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.19g)

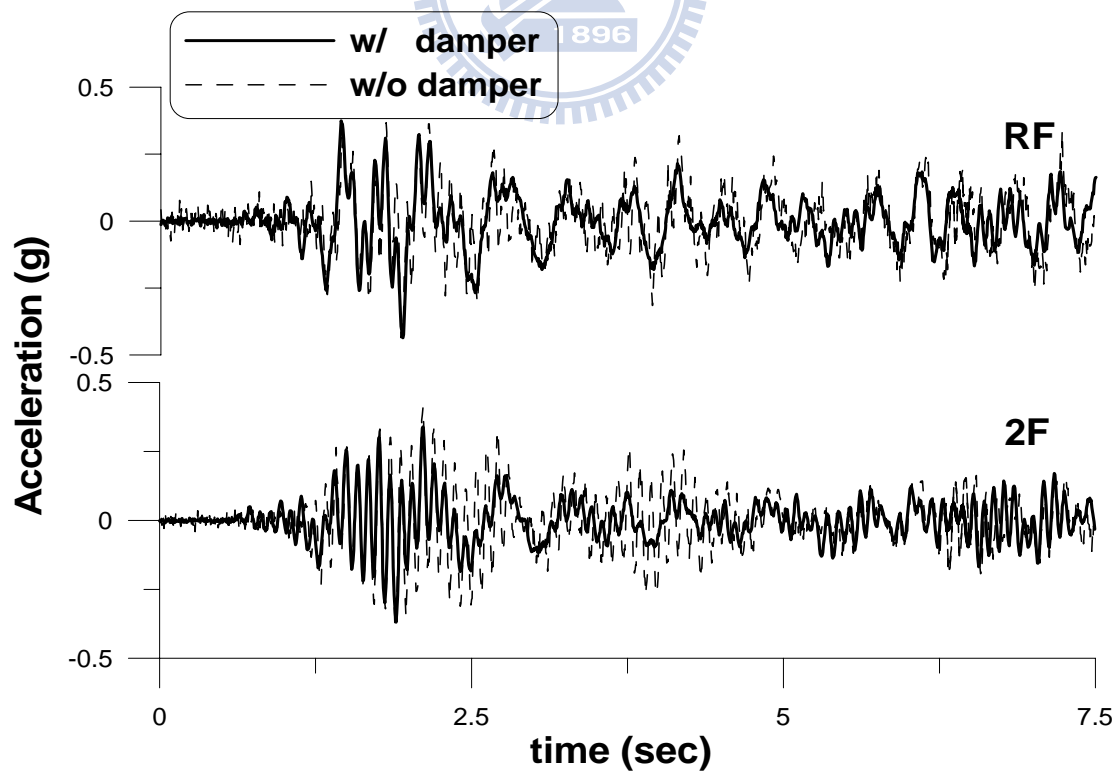


圖 5.80 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.22g)

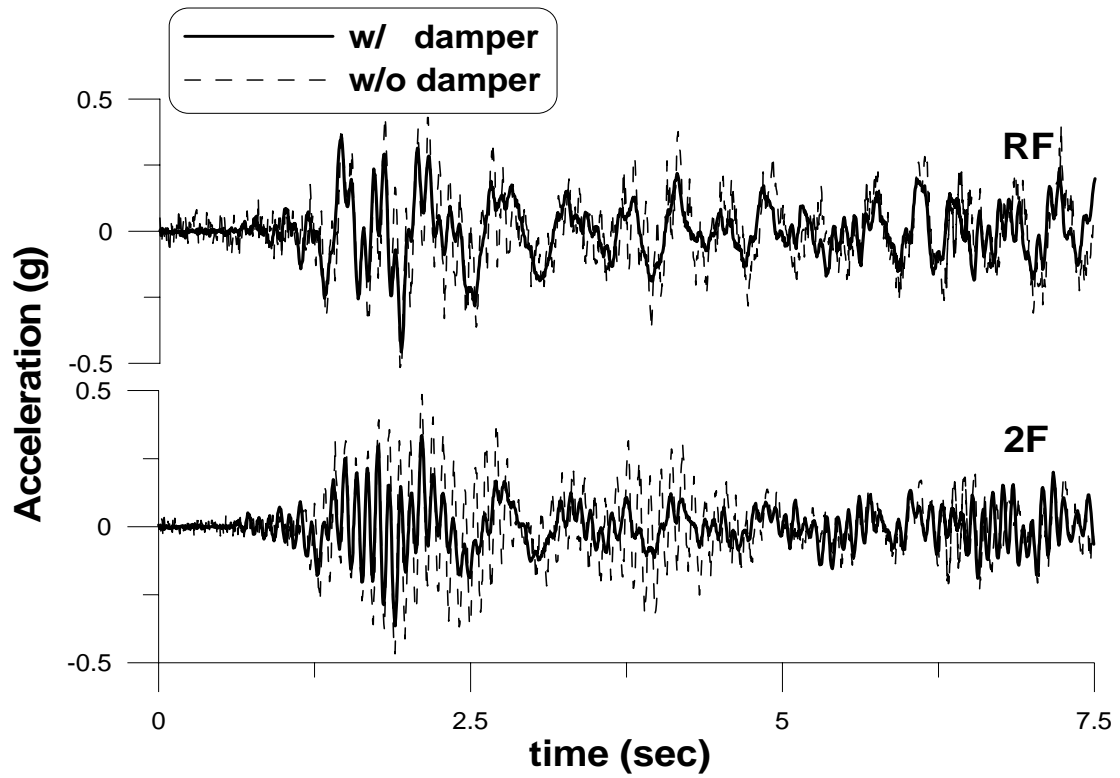


圖 5.81 各樓層加速度反應歷時比較(Hachinohe ; PGA=0.26g)

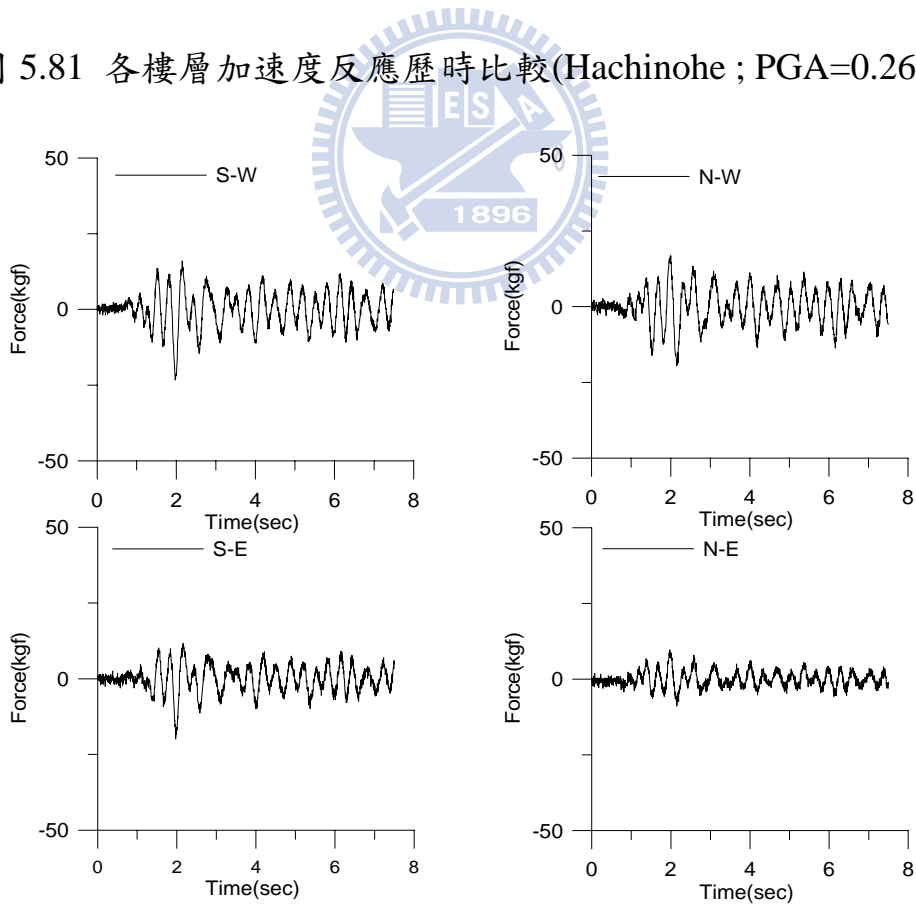


圖 5.82 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.08g)

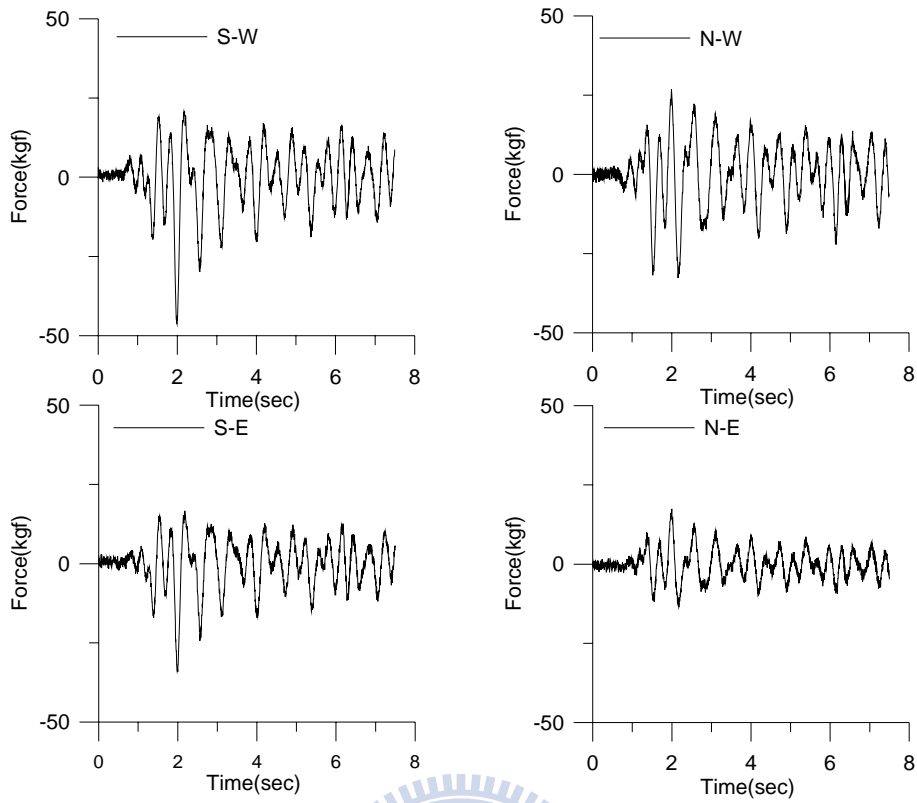


圖 5.83 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.15g)

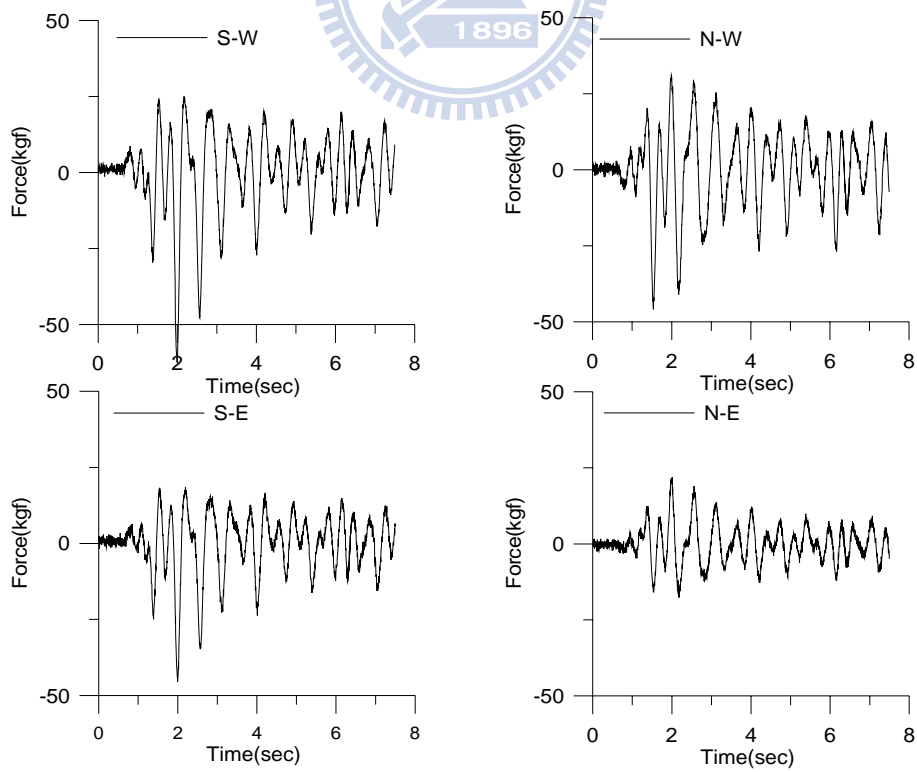


圖 5.84 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.19g)

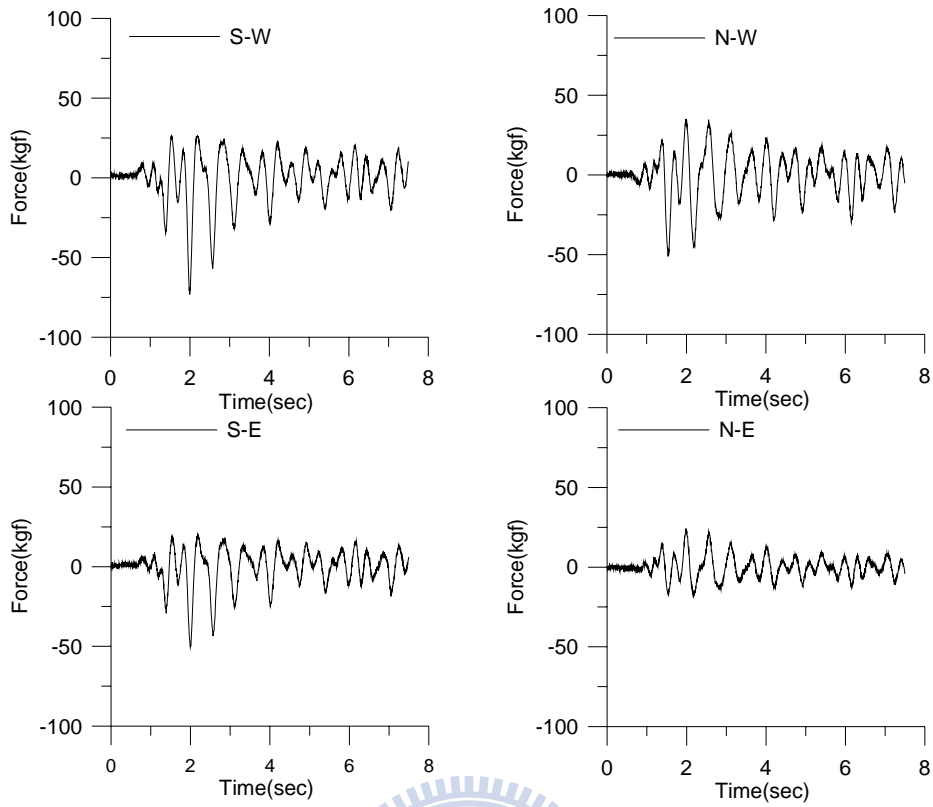


圖 5.85 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.22g)

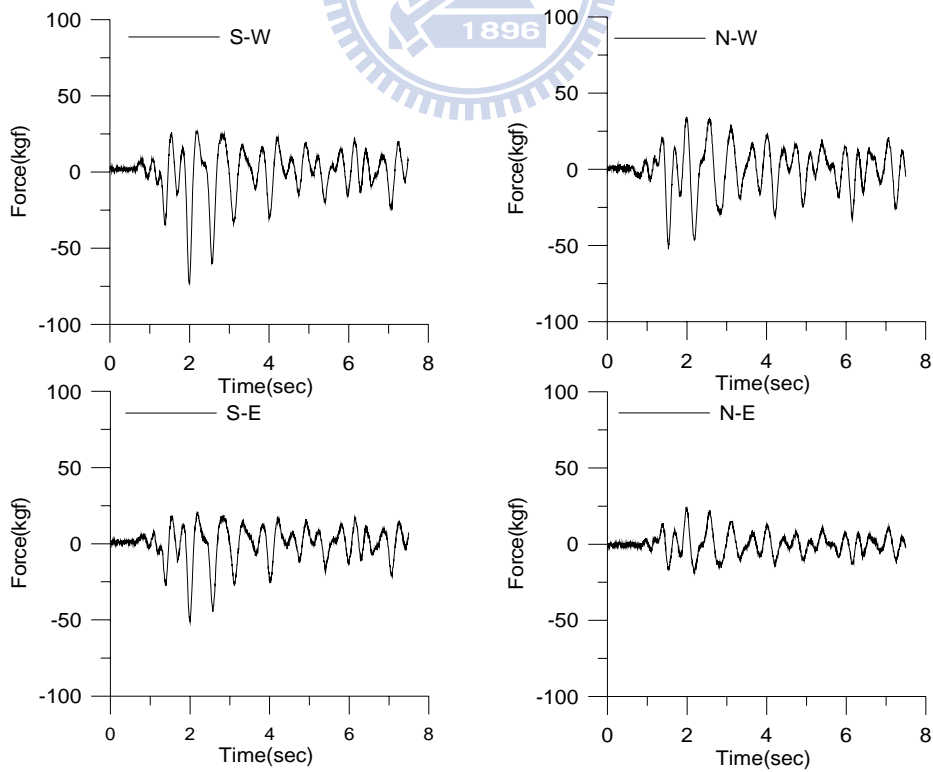


圖 5.86 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(Hachinohe;PGA=0.26g)

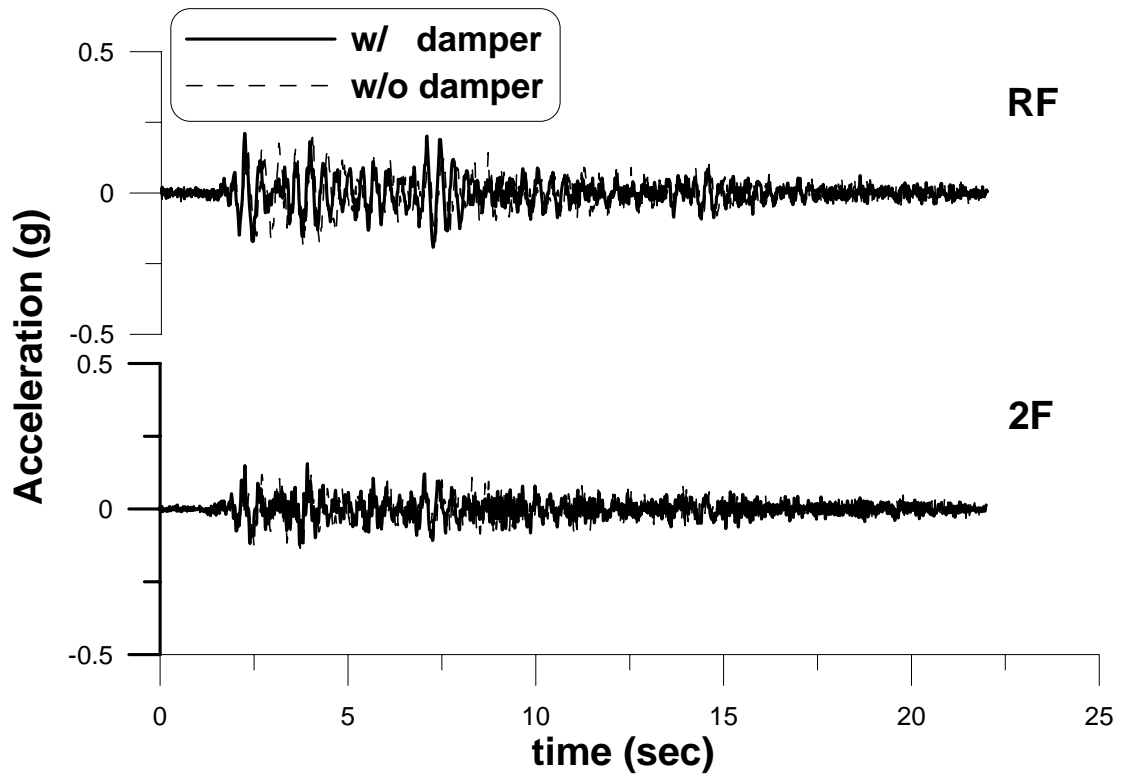


圖 5.87 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.10g)

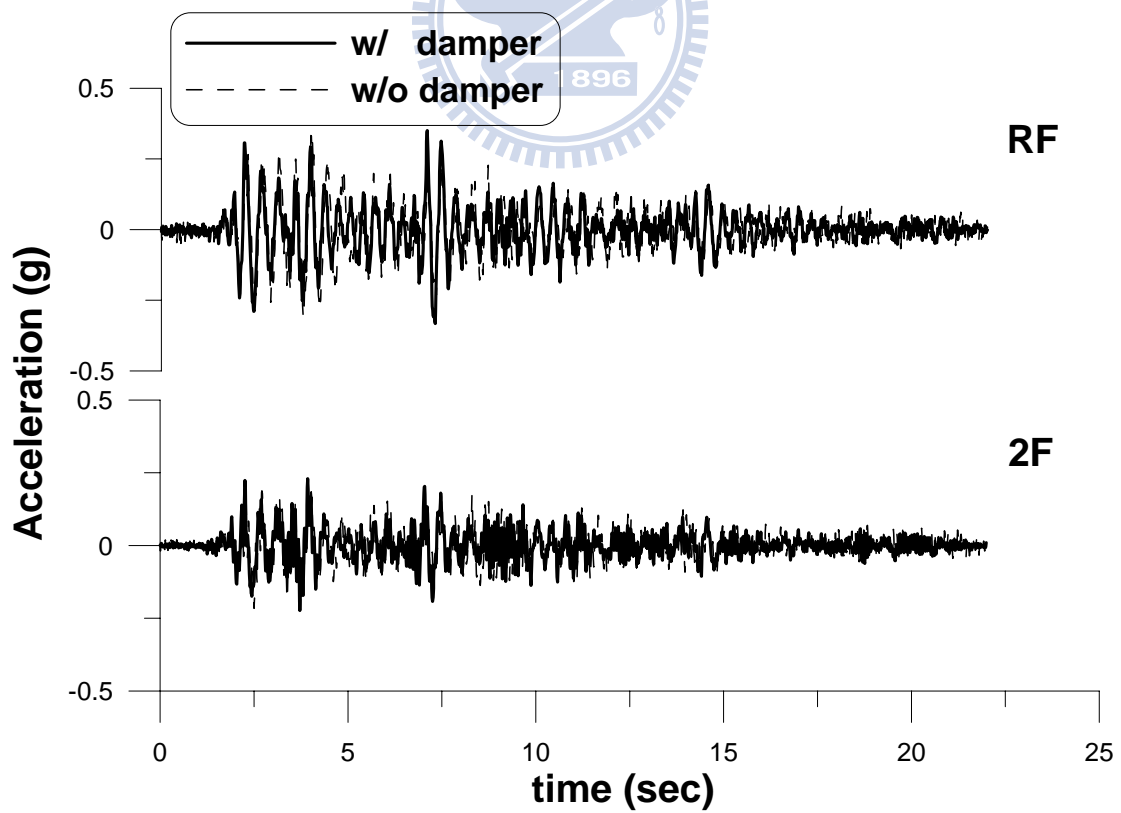


圖 5.88 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.16g)

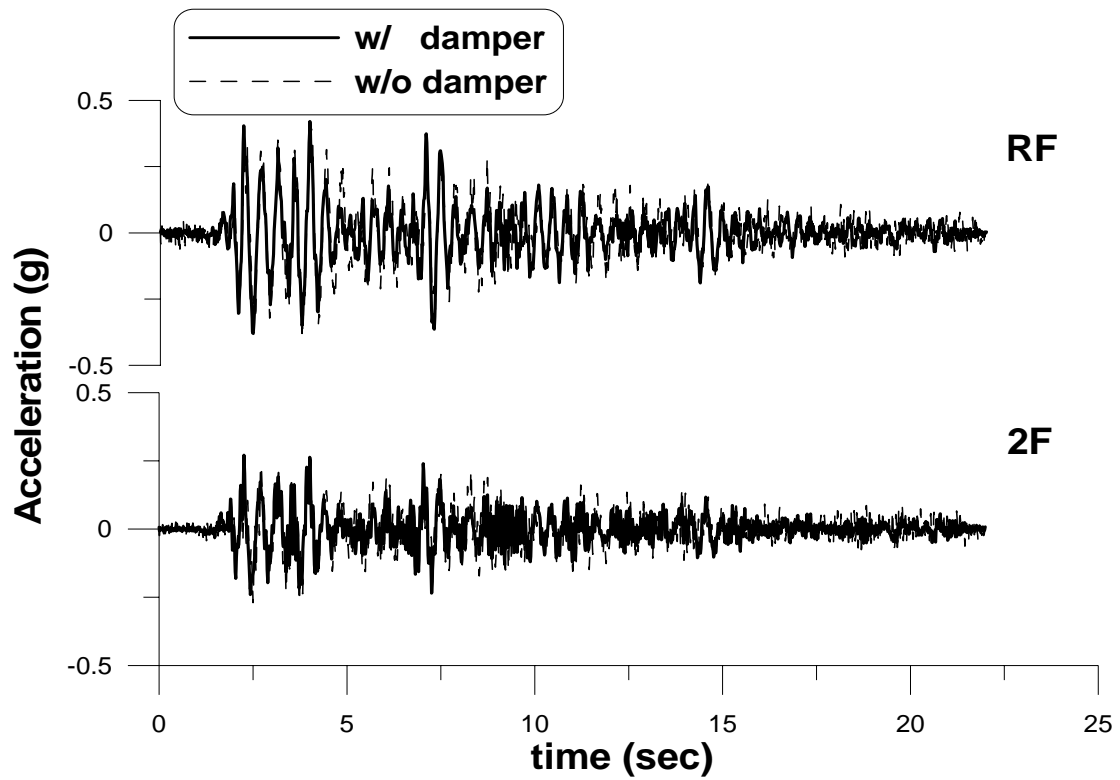


圖 5.89 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.20g)

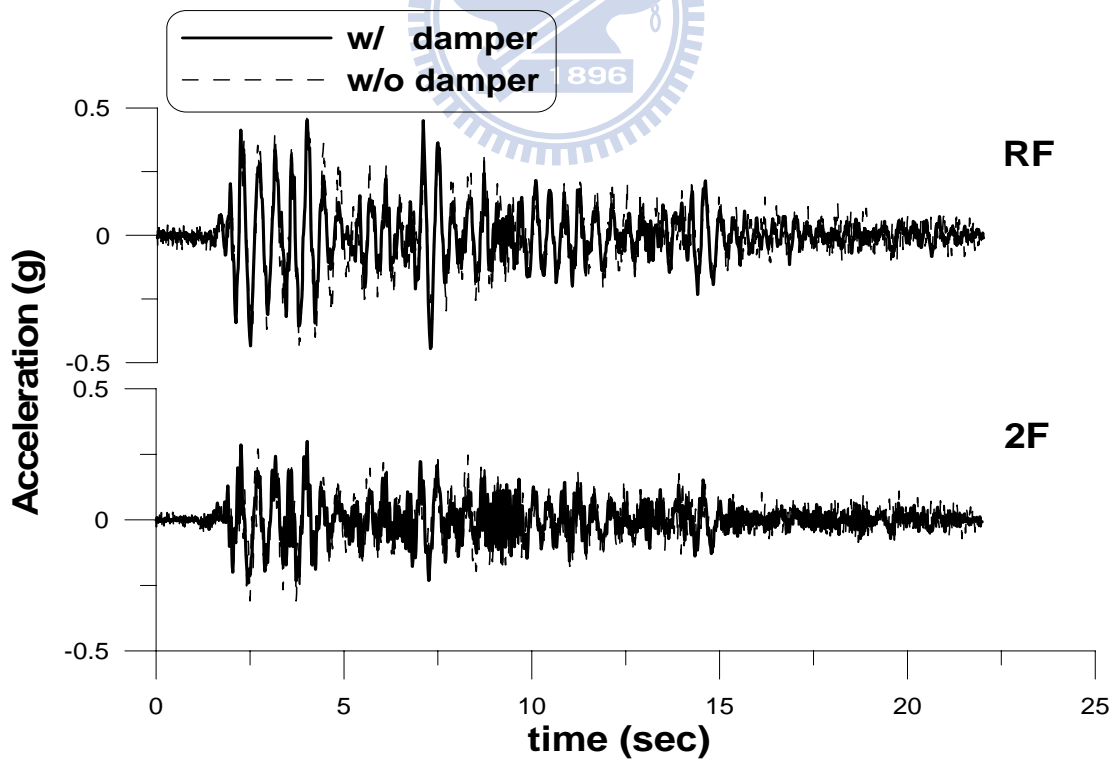


圖 5.90 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.23g)

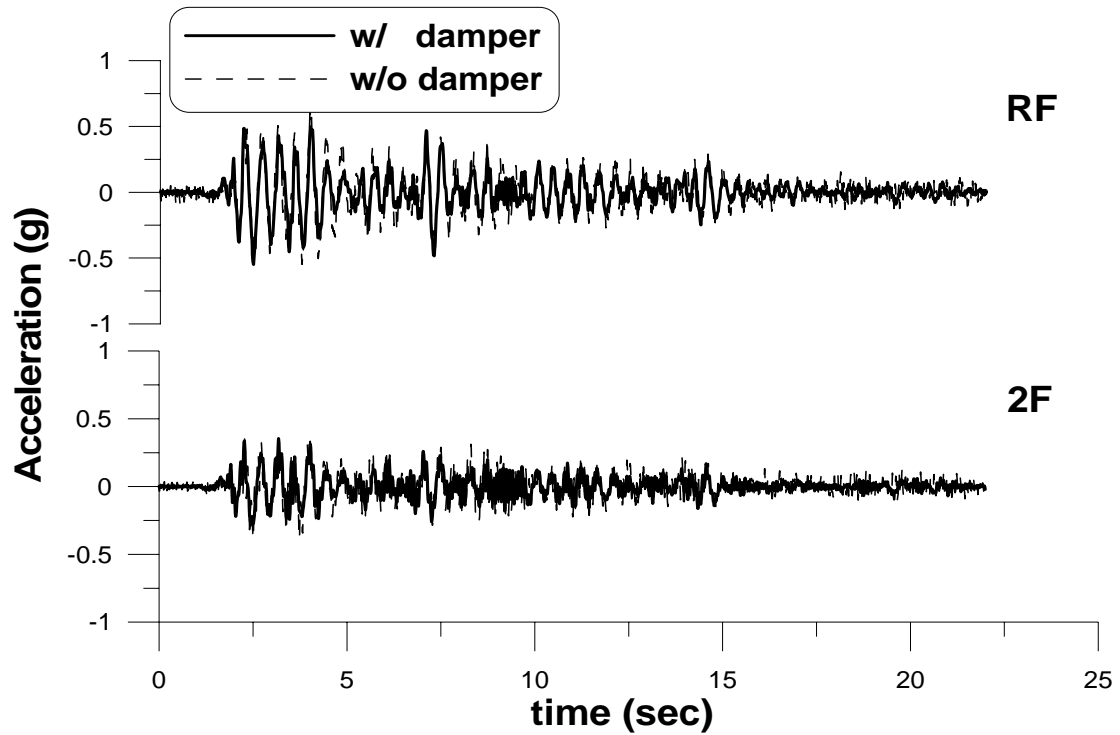


圖 5.91 各樓層加速度反應歷時比較(El Centro ; PGA=0.29g)

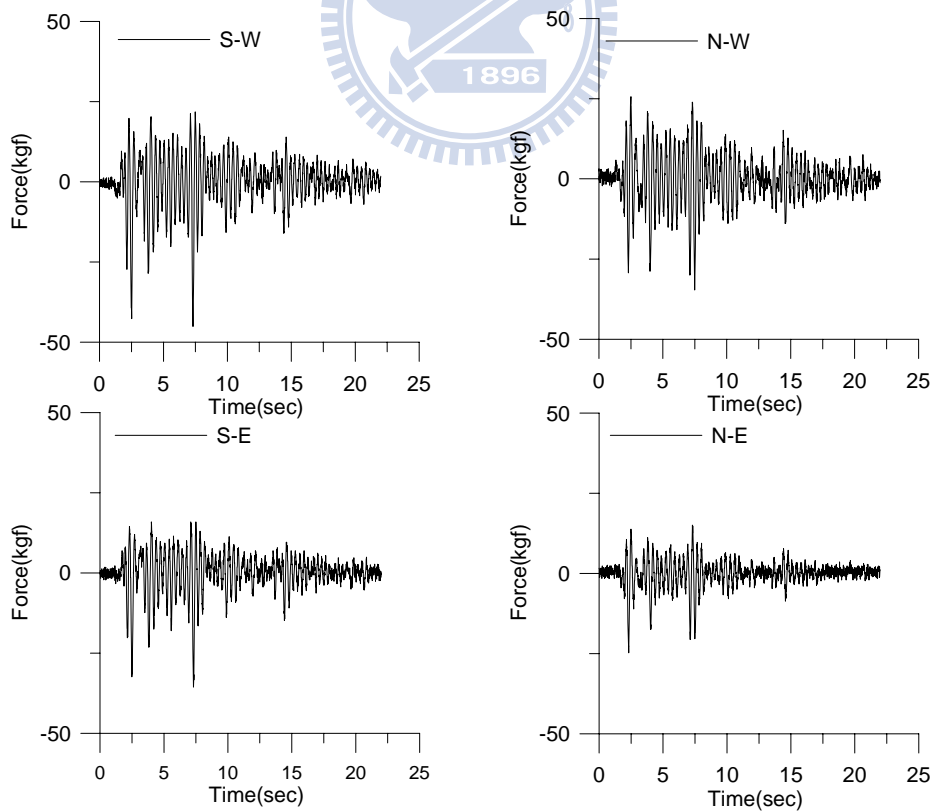


圖 5.92 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.10g)

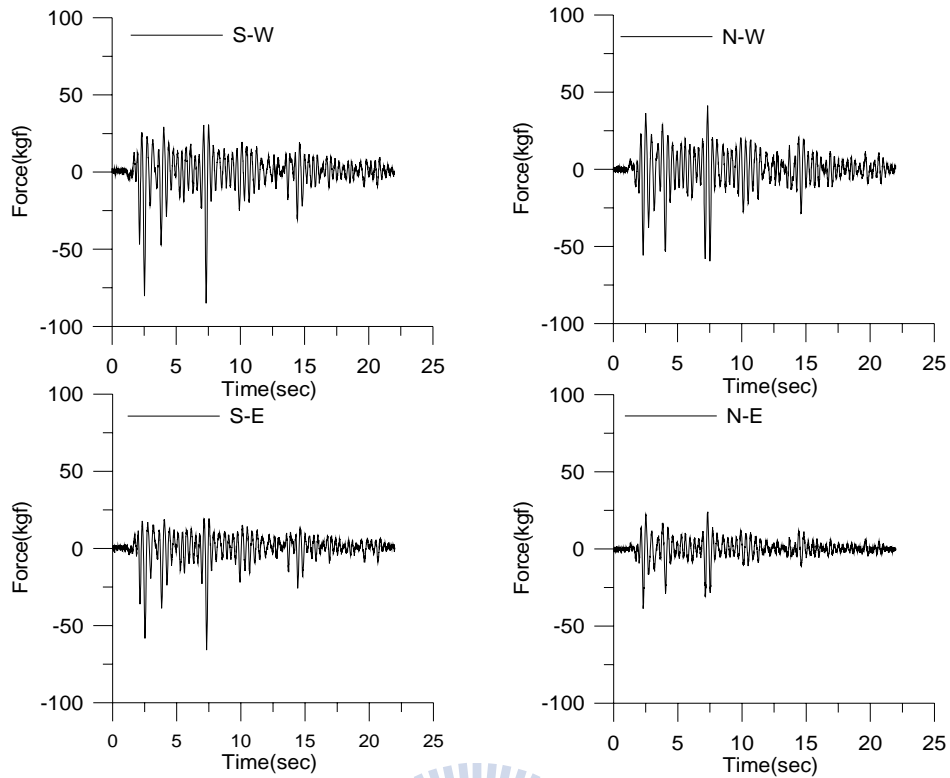


圖 5.93 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.16g)

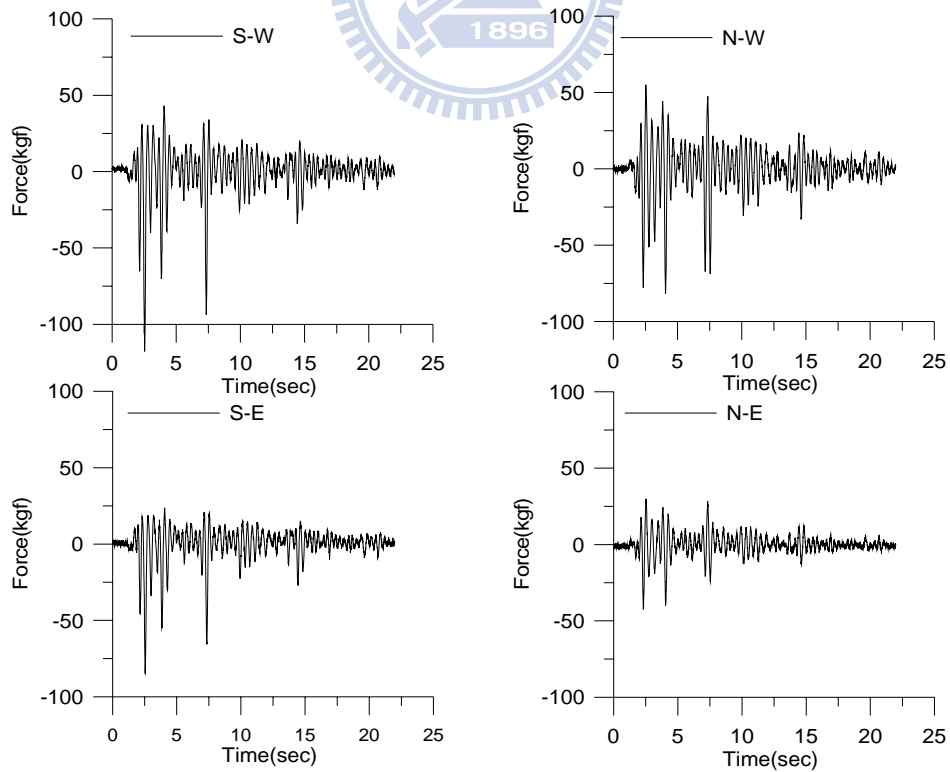


圖 5.94 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.20g)

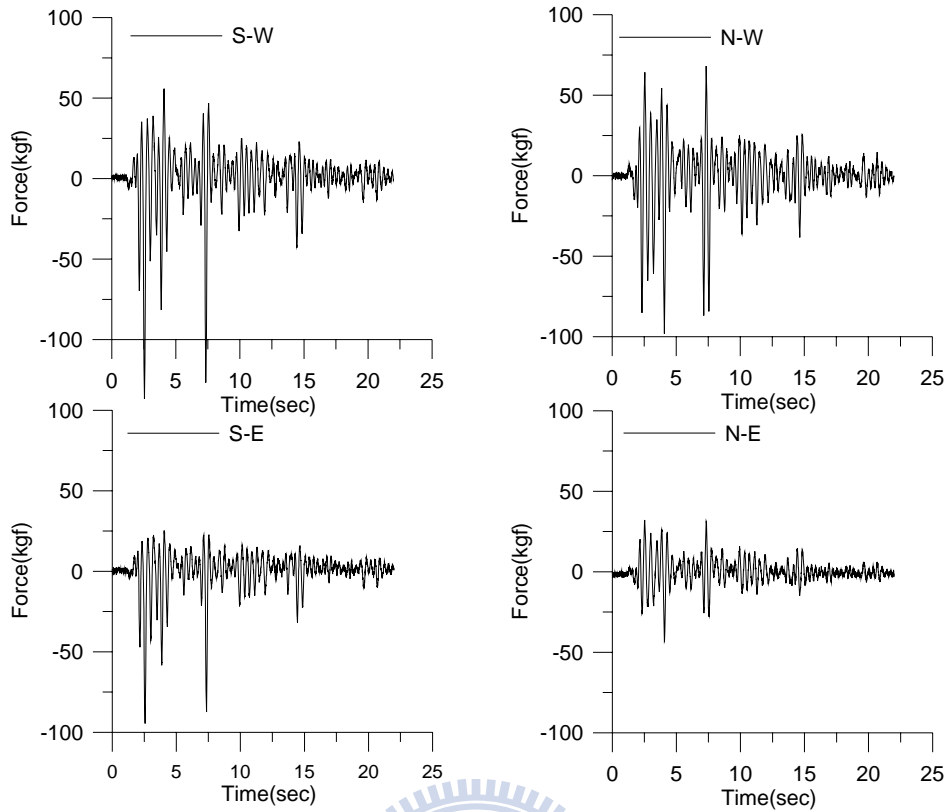


圖 5.95 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.23g)

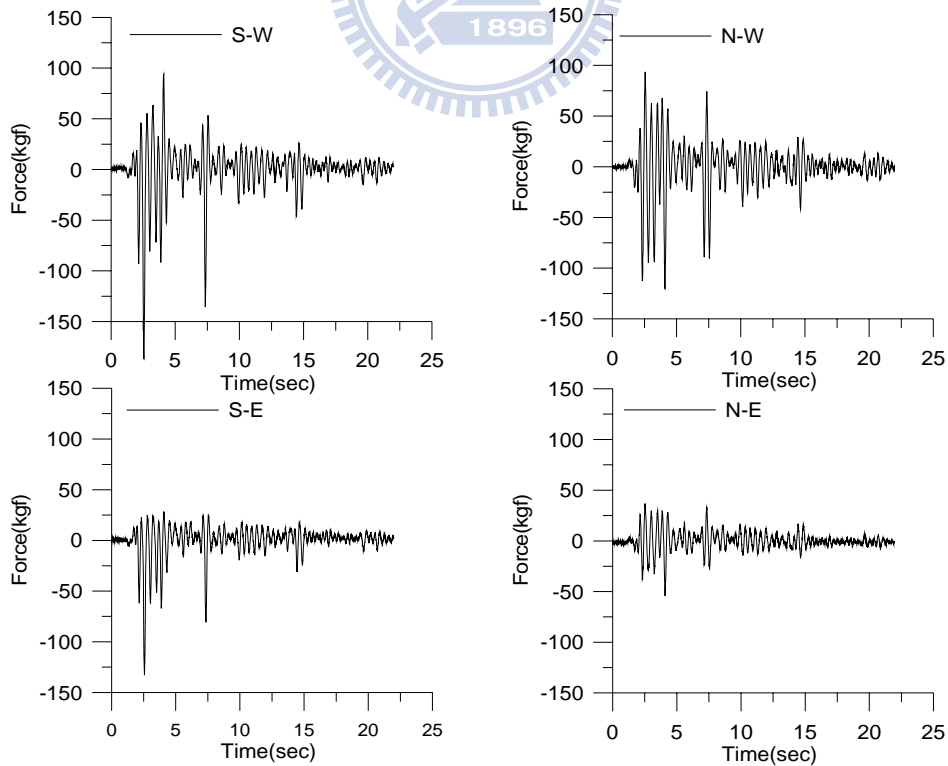


圖 5.96 一樓四組低容量液流阻尼器出力歷時(El Centro ; PGA=0.29g)

第六章 結論與建議

本研究主要在探討液流阻尼器之消能機制，以流體力學理論與液體黏度特性推導液流阻尼器受任意外力之非線性力學行為。以狀態空間法求解含油壓阻尼結構之運動方程式，以 MATLAB 程式進行數值模擬分析，探討其減震效益，並將樓層加速度與液流阻尼器遲滯迴圈為基準與商用軟體 ETABS 之阻尼元件參數進行擬合，建立其關聯性，做為未來分析設計之依據。此外，本研究與國內廠商（清瑞機械有限公司）合作進行低容量液流阻尼器之性能測試，經由元件測試瞭解低容量液流阻尼器之力學行為特性，期間針對測試結果多次改進缺失，以提高耐久性及穩定性，並進行一系列之防振(震)應用，包括設備基座之減振、鋼結構之耐震性能測試及木造結構之耐震性能測試。根據本文之研究結果，歸納結論如下：

1. 由流體動力學考量非牛頓流體而建立之液流阻尼器流體動力模式，可以模擬出填充矽油之液流阻尼器的非線性力學行為及頻率相依特性(Frequency-dependent characteristics)。經由參數分析，探討活塞面積、活塞厚度及孔隙大小對於液流阻尼器力學行為之影響，並發現阻尼係數與勁度之頻率相依特性，此乃習用之 Kelvin model 所無法模擬者。

2. 將液流阻尼器之流體力學動態方程與結構動力系統結合，以 MATLAB 完成之數值分析結果顯示，本研究所提之解析方法應可合理有效地模擬結構之地震反應。
3. 使用 ETABS 程式內建之消能控制元件經參數擬合，與 MATLAB 數值分析模擬結果比較，顯示其無論是各樓層之加速度歷時反應與液流阻尼器遲滯迴圈均相當吻合，且活塞半徑 R 值與阻尼係數 C 值對應之關係為二次曲線。應為地震波之頻率內涵主要集中在低頻部分，因此阻尼器之頻率相依特性並不顯著。
4. 元件測試結果顯示，低容量液流阻尼器呈現穩定的消能特性，且隨擾動之頻率與振幅增大時，液流阻尼器之遲滯迴圈更趨飽滿且出力增加。經由一系列之液流阻尼器測試，顯示油品的黏稠度將影響到阻尼器出力。
5. 基座減振測試顯示，於設備基座安裝低容量液流阻尼器可以吸收激振器擾動產生之振動，降低傳遞至樓板的加速度反應。由 $1/3$ 倍頻結果顯示低容量液流阻尼器所能控制的擾動頻寬範圍極大，尤其在 $30\text{Hz}\sim 100\text{Hz}$ 的部份最為顯著，證明應用低容量液流阻尼器於高科技廠房設備之減振相當可行。

6. 五層樓鋼結構耐震性能測試結果顯示，安裝低容量液流阻尼器之樓層加速度峰值與均方根值均有折減效果，具有成為結構抗震阻尼器之應用潛力。
7. 木造結構之耐震性能測試結果顯示，將低容量液流阻尼器安裝於木構架梁柱接頭角隅上，能有效降低樓層加速度峰值及加速度均方根值。木造結構加裝低容量液流阻尼器後，對結構之自然頻率影響不大，而其等效阻尼比則顯著增加，顯示低容量液流阻尼器產生具體之消能作用。藉由本研究試驗結果可以瞭解梁柱間配置之減震效果，提供實際木造建築之耐震補強參考。
8. 建議以 MATLAB 數值分析含油壓阻尼結構之運動時，可改變活塞頭厚度及孔隙寬度值作參數分析，再與 ETABS 程式進行擬合，探討所對應之阻尼係數及速度指數關聯性。
9. 油壓致動器在高頻時位移之輸出有延遲現象，其阻尼效應增加將可能影響到元件測試結果，與流體動力預估結果產生落差。建議未來在液流阻尼器元件測試時，應設法將油壓致動器本身之阻尼特性排除，才能測得液流阻尼器之特性。

參考文獻

- 【1】 Yang, J. N.(1996),”Overview of Protective System,” *Workshop on Application of Various Protective Systems to Bridge and Structure*, Taipei, Taiwan pp.1-86.
- 【2】 盧煉元、鍾立來(1999), 「國內外結構控制技術之進展」, *防災科技土木技術*, 四月號, 第 14 期, pp.81-95.
- 【3】 Wang Y.P., Teng M.C. and Chung, K.W.(2001),”Seismic Isolation of Rigid Cylindrical Tanks Using Friction Pendulum Bearings,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 30, Issue 7, July, pp. 1083-1099.
- 【4】 Wang Y.P., Chang Chien C.S.(2009), ”A study on using pre-bent steel strips as seismic energy-dissipative devices,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* ; v38:pp.1009-1026.
- 【5】 Wang Y.P., Chang Chien C.S., Lin C.S., Lee C.L. (2008),”Development of a Buckling-Type Metallic Damper,” *The 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and mechanics*”, Jeju, Korea; pp.3325-3338.
- 【6】 Pall A.S., Marsh, C.(1982), ” Response of Friction Damped Braced Frames,” *Journal of the Structural Division*, ASCE, 108(No. ST6), pp.1313–1323.
- 【7】 Whittaker, A. and Constantinou, M.C.(2000), “Fluid Viscous Dampers for Building Construction,” *First International Symposium on Passive Control*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo,pp.133-142.
- 【8】 Fu, Y. M. and Kasai, K.(1998), “Comparative Study of Frames Using Viscoelastic and Viscous Damper,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.5, pp.513-522.
- 【9】 Constantinus, M.C., and Symans, M.D.(1992), *Experimental and*

Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers, Report No. NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

- 【10】 Soong, T.T., and Constantinou, M.C.(1994), “Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering,” Springer-Verlag, New York.
- 【11】 <http://www.taylordevices.com>
- 【12】 徐德修、李永峰(1998), “結構液體阻尼器之設計及應用”, *結構工程*,第十三卷,第二期,pp.31-42.
- 【13】 黃賜琳(2002), “線性液流阻尼器阻尼係數之探討”, 碩士論文, 國立成功大學土木工程研究所.
- 【14】 李永峰(2006), “足尺寸液流阻尼器之研發”, 博士論文, 國立成功大學土木工程研究所.
- 【15】 Federal Emergency Management Agency (FEMA).(1997), “Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings.” *FEMA Publication No.273*.
- 【16】 Verma, V., Ghosh, A. K., and Kushwaha, H. S.(2002), “Dynamic characteristics of a hydraulic damper.” *J. Pressure Vessel Technol.*,445(2), pp.149-156.
- 【17】 Constantinou, M. C., and Symans, M. D.(1992), “Experimental investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers,” *National Center for Earthquake Engineering Research Rep. No. NCEER-92-0032*, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.

- 【18】 Seleemah, A. A., and Constantinou, M. C.(1997), “Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers,” *National Center for Earthquake Engineering Research Rep. No. NCEER-97-0004*, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- 【19】 Makris, N., Burton, S., Hill, D., and Jordan, M.(1996), “Analysis and design of ER damper for seismic protection of structures,” *J. Eng. Mech.*, ASCE, 122(10),pp.1003-1011.
- 【20】 Chien-Yuan Hou(2008), “Fluid Dynamics of Nonlinear Viscous Damper,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 56-63.
- 【21】 Carreau, P. J.(1972), “Rheological equations from molecular network theories.” *Trans. Soc. Rheol.*, 16(1),pp.99-128.
- 【22】 Yasuda, K.(1979), “Investigation of the analogies between viscometric and linear viscoelastic properties of polystyrene fluids,” Ph.D. thesis, MIT, Cambridge, Mass.
- 【23】 “木構造建築物設計及施工技術規範”(1995),內政部台內營字第 8486750 號函訂頒。
- 【24】 詹明勳、王亞男、黃憶汝、林瑞進(2005),“老樹巨木樹齡估測之研究,” *中華林學季刊*,38(2),pp.139-150.

附錄 A. ARX 系統識別理論

■ 系統識別之理論介紹

線性動力系統之等效離散時間模式，以單一輸入與單一輸出 (SISO) 的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (\text{A.1})$$

其中， $y(\cdot)$ 代表系統之輸出， a_i 's 為輸出訊號係數， n_a 為其維度； $u(\cdot)$ 代表系統之輸入， b_i 's 為輸入訊號係數， n_b 為其維度。

應用後移運算子(backward shift operator)，則可將(A.1)式表示為

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) = H(q) u(k) \quad (\text{A.2})$$

其中，

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (\text{A.3})$$

$$B(q) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (\text{A.4})$$

若對式 (A.2) 取 z 轉換，得

$$y(z) = H(z) u(z) \quad (\text{A.5})$$

$$\text{其中，頻率響應函數 } H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (\text{A.6})$$

$y(z)$ 與 $u(z)$ 分別為 $y(k)$ 與 $u(k)$ 之 z -轉換， $A(z)$ 、 $B(z)$ 的定義類似

於式(A.3)及式(A.4)，只是將 q 改為 z 。頻率響應函數的分子多項式 $B(z)=0$ 之根稱為其零點(zeros)，而頻率響應函數的分母多項式 $A(z)=0$ 之根稱為其極點(poles)。系統的自然頻率與阻尼比僅與傳遞函數的極點有關，而零點則決定振態反應的大小。當 $n_a \leq n_b$ 時，假設頻率響應函數 $H(z)$ 的極點無重根且均為共軛複數根，根據部份分式展開可將式(A.6)改成

$$H(z) = \sum_{j=1}^{n_a/2} H_j(z) \quad (\text{A.7})$$

其中，

$$H_j(z) = \frac{2R(q_j) - 2R(q_j p_j)z^{-1}}{1 - 2R(p_j)z^{-1} + |p_j|^2 z^{-2}} \quad (\text{A.8})$$

p_j 為分母多項式 $A(z)=0$ 的第 j 個複數根；

$$q_j = \lim_{z=p_j} (1 - p_j z^{-1}) H(z) = \frac{b_1 p_j^{-1} + \dots + b_{n_b} p_j^{-n_b}}{\prod_{k=1, k \neq j}^{n_a} (1 - p_k p_j^{-1})} \quad (\text{A.9})$$

系統的自然頻率 f_j 及阻尼比 ξ_j 可計算如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (\text{A.10})$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (\text{A.11})$$

其中，

$$r_j^2 = p_j \bar{p}_j, \phi_j = \tan^{-1} \left[\frac{I(p_j)}{R(p_j)} \right] \quad (\text{A.12})$$

T 為取樣週期。只要將式(A.1)中之係數 a_j 's, b_j 's 識別出來，即可得知結構之自然頻率、阻尼比以及頻率響應函數。

■ 含噪音系統模型與預測誤差

式(A.1)所示為理想化之動力系統。實際量測之訊號中多少會有雜訊存在，因此我們可將系統模式修正為

$$A(q) y(k) = B(q) u(k) + C(q) e(k) \quad (\text{A.13})$$

其中， $e(k)$ 代表雜訊，通常假設其為零均值(zero mean)之白雜訊(white noise)。多項式 $C(q)$ 之定義為

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \cdots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (\text{A.14})$$

其中， c_i 's 為雜訊係數， n_c 為其維度。實際應用時，並不一定須要利用到每一多項式，可視情況予以簡化。例如

$$\text{AR 模型：} A(q) y(k) = e(k) \quad (\text{A.15})$$

$$\text{ARX 模型：} A(q) y(k) = B(q) u(k) + e(k) \quad (\text{A.16})$$

$$\text{ARMAX 模型: } A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (\text{A.17})$$

$$\text{ARMA 模型: } A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad (\text{A.18})$$

根據式(A.13)，ARX 模型可進一步表示成

$$y(k) = \boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (\text{A.19})$$

其中，

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1) \cdots -y(k-n_a), u(k) \cdots u(k-n_b)] \quad (\text{A.20})$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_0 \cdots b_{n_b}]^T \quad (\text{A.21})$$

若為單一輸入多重輸出(SIMO)模式時，

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(k) & \mathbf{u}(k) & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{y}_2(k) & \mathbf{0} & \mathbf{u}(k) & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{y}_m(k) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

其中，

$$\mathbf{y}_m = [-y_m(k-1) \cdots -y_m(k-n_a)] \quad (\text{A.23a})$$

$$\mathbf{u}(k) = [u(k) \cdots u(k-n_b)] \quad (\text{A.23b})$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_{10} \cdots b_{1n_b}, b_{20} \cdots b_{2n_b}, \cdots, b_{m0} \cdots b_{mn_b}] \quad (\text{A.23c})$$

對式(A.19)取期望值，並利用白雜訊之零均值性質，可得

$$\bar{\mathbf{y}}(k, \boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta} \quad (\text{A.24})$$

輸出訊號期望值 $\bar{\mathbf{y}}(k, \boldsymbol{\theta})$ 代表已知之系統參數 $\boldsymbol{\theta}$ 下預測之輸出值。將其估測誤差定義為

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{y}}(k, \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.25})$$

若識別出來之系統參數 $\boldsymbol{\theta}$ 完全正確，則 $\boldsymbol{\varepsilon}(k, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{e}(k)$ 。

■ 遞迴預測誤差法 (Recursive Prediction Error Method)

今根據加權最小平方法之原理，定義系統之整體預測誤差為

$$V(k, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) \boldsymbol{\varepsilon}^2(s, \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.26})$$

其中， $\beta(k, s)$ 為加權因子， $\gamma(k)$ 則為 $\beta(k, s)$ 之正規化因子(normalization factor)，其定義為

$$\gamma(k) \sum_{s=1}^k \beta(k, s) = 1 \quad (\text{A.27})$$

若系統為非時變性時可令加權因子為 1，此時即相當於最小平方法。

對於時變性系統而言，加權因子可以追蹤系統參數隨時間變化的特性，愈接近瞬時 k 的資料所給予的權重愈大。選擇指數視窗

$$\beta(k, s) = \lambda(k) \beta(k-1, s) \quad (\text{A.28})$$

其中，

$$\beta(k, k) = 1 \quad (\text{A.29})$$

$$\lambda(k) = \lambda_0 \lambda(k-1) + 1 - \lambda_0 \quad (\text{A.30})$$

λ 稱為遺忘因子(forgetting factor)，通常採用 $\lambda_0 = 0.99$ ， $\lambda(0) = 0.95$ 。為避免識別結果因雜訊影響而隨時間改變，我們將極小化的標準以期望值表示為

$$E[V(k, \theta)] = 0 \quad (\text{A.31})$$

或(A.31)可根據牛頓-瑞福森之迭代法，解出系統模型參數

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \alpha_t [V''[k, \theta(k-1)]]^{-1} V[k, \theta(k-1)] \quad (\text{A.32})$$

上式中令 $\alpha_t = 1$ ，並經運算整理後可得到遞迴形式解

$$\theta(k) = \theta(k-1) + L(k) [y(k) - \psi^T(k) \theta(k-1)] \quad (\text{A.33})$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1) \psi(k)}{\lambda(k) + \psi^T(k) P(k-1) \psi(k)} \quad (\text{A.34})$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\lambda(k) + \psi^T(k) P(k-1) \psi(k)} \quad (\text{A.35})$$

通常選擇初始條件 $P(0) = 10^8 \sim 10^{10}$ 以加速其收斂速度。利用(A.33)式至(A.35)式之遞迴預測誤差法即可求得未知數 θ ，進而求得結構之自然振動頻率((A.10)與(A.11)式)。