

# 國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

變斷面 TLCD 抗風減震系統之試驗與分析

**Experimental and Analytical Study of V-TLCD systems for**

**Wind and Earthquake-resistance of Tall Buildings**

研究生：張恩杰

指導教授：王彥博 博士

李建良 博士

中華民國九十五年七月

# 變斷面 TLCD 抗風減震系統之試驗與分析

## Experimental and Analytical Study of V-TLCD systems for Wind and Earthquake-resistance of Tall Buildings

研究生：張恩杰

Student：En-Chieh Chang

指導教授：王彥博 博士

Advisor：Dr. Yen-Po Wang

李建良 博士

Dr. Chien-Liang Lee

國立交通大學

土木工程學系碩士班



Submitted to Institute 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  
July 2006  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年七月

# 變斷面TLCD抗風減震系統之試驗與分析

研究生：張恩杰

指導教授：王彥博 博士

李建良 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘 要

本研究主要針對變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper, VTLCD)系統進行理論分析與參數研究，並實際製作一組 VTLCD 模型進行元件測試與結構減振之性能測試(振動台試驗)，俾便充份掌握 VTLCD 元件之設計參數及評估其減振效益。此外，本研究亦針對氣密式 TLCD 系統應用於結構防震的可行性進行探討，瞭解密閉氣室之初始壓力對於結構減震效能的影響。

根據本文之分析與試驗結果顯示，三種不同孔口板開孔面積比( $\phi \geq 0.36$ )之 VTLCD 共振簡諧擾動試驗均有良好的減振效果，且水平段長度比採用  $\beta=0.54$  時有最佳之減振效果。簡諧波擾動試驗之頻率比為  $\gamma_s = 1.0$  時，VTLCD 系統之減振效果最佳，惟擾動頻率比  $\gamma_s \leq 0.75$  時，結構振動反應則有放大的現象。此外，根據試驗資料系統識別分析所得之水頭損失係數進行非線性數值模擬，其結果與試驗結果十分契合，驗證本文所提非線性理論分析模式之合理性及精確性。氣密式 TLCD 應用於結構防震具可行性，於相同質量比及孔口板開孔面積比之下，水平段長度比  $\beta$  愈長者，減振效果愈好。最後，本文並針對世界第一高樓「台北 101 大樓」進行抗風減振性能評估，考慮結構水平向及扭轉向之振動控制，證明 TLCD 系統可有效降低其水平向及扭轉向之振動反應。偏心距愈大，TLCD 系統對於結構扭轉反應之減振效果愈顯著，且減振效果隨 TLCD 與結構質心之距離增加之增大。

**關鍵字：**調諧水柱消能系統、振動台、氣密式調諧水柱消能系統、台北 101 大樓、

水頭損失

# **Experimental and Analytical Study of V-TLCD systems for Wind and Earthquake-resistance of Tall Buildings**

**Student : En-Chieh Chang**

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

**Dr. Chien-Liang Lee**

**Institute of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University**

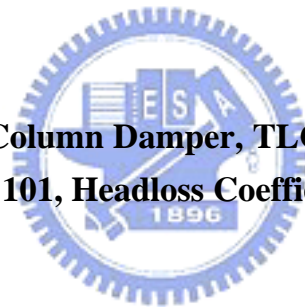
## **Abstract**

This thesis explores the theoretical analysis and parametric studies of VTLCD systems with a series of component test and performance test (by shaking table) of a prototype VTLCD system conducted to get more insight of the optimum design of VTLCD systems and its control efficiency. Moreover, the feasibility of using airtight TLCD systems for earthquake resistance of the structure is also investigated in this study. The effect of initial pressure in the air chamber of the airtight TLCD on seismic control performance is realized.

According to the analytical and experimental results under harmonic excitation, the VTLCD is proved effective in vibration control with various opening ratio ( $\phi \geq 0.36$ ) of the orifice considered, and the control efficiency is best as the horizontal length ratio  $\beta$  is 0.54. The control efficiency of VTLCD system in harmonic excitation is best for frequency ratio  $\gamma_s$  of 1.0, however, the vibration may be amplified if  $\gamma_s \leq 0.75$ . Moreover, simulation results based on the headloss coefficient identified by the proposed system

identification scheme agree very well with the test data, verifying adequacy of the proposed analytical model. Airtight TLCD system proves to be feasible for seismic protection of structures. For the same mass ratio and opening ratio of the orifice, systems with larger  $\beta$  perform better. Finally, this study assesses the wind-resisting performance of TLCD on both translational and torsional vibration modes of the world's tallest building--Taipei 101, with encouraging results achieved. The larger the eccentricity of the structure, the more pronounced the control effect of TLCD on the torsional responses, and the control efficiency increases as the TLCD pair disposes farther from the centroid of the structure.

**Keyword: Tuned Liquid Column Damper, TLCD, Shaking Table, Airtight TLCD, Taipei 101, Headloss Coefficient**



## 誌謝

感謝吾師 王彥博博士與李建良博士兩年來的悉心指導，使學生無論在研究上或待人處事上均有深刻的體會，並提供充分且優良的研究設備與環境。另外，吾師嚴謹的治學態度與努力不懈的研究精神，都給予我深遠的影響，在此衷心致上最誠摯的謝意。

論文口試期間，承蒙國立高雄第一科技大學 盧煉元教授、淡江大學 吳重成教授、崑山科技大學 黃武龍教授、交通大學 洪士林教授、交通大學 陳誠直教授撥冗指正，並提供諸多寶貴意見，使得論文之內容更為充實與完備，特別在此表示感激之意。

在交大的研究生求學生活中，感謝研究室諸學長廖偉信博士、李建良博士、嘉賞學長、逸軒學長、鈺文學長；畢業學長連杰、銘峰、明坤；同學科良、尚諺、怡婷；學弟欣晏、志軒、俊成等在學業及生活上之切磋討論與實驗上之協助；以及大學好友們在求學過程中的勉勵與關心，在此一併致上最誠摯之謝意。

最後，謹以本文獻給辛苦養育我的雙親及最愛護我的姊姊(まき)，感謝你們多年來給予我精神上的鼓勵、關懷與包容，讓我無後顧之憂的完成研究所的求學生涯，謝謝你們。

謹誌於交大工程二館 2006 年 7 月

# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
符號對照表.....	xviii
第一章 緒論.....	1
第二章 變斷面調諧水柱消能系統.....	9
2.1 變斷面 VTLCD 系統之運動方程式.....	9
2.2 解析模式.....	13
2.3 結構安裝變斷面 VTLCD 系統之運動方程式.....	17
2.4 系統識別.....	21
第三章 變斷面調諧液體消能系統之試驗與分析.....	25
3.1 變斷面 VTLCD 元件與單層樓鋁構架模型之設計.....	25
3.2 VTLCD 元件之模型安裝.....	26
3.3 試驗設備與感應器配置.....	26
3.4 試驗規劃.....	28
3.4.1 變斷面 VTLCD 系統之元件試驗.....	29
3.4.2 變斷面 VTLCD 系統之性能試驗.....	29
3.5 試驗結果.....	30
3.5.1 變斷面 VTLCD 元件試驗.....	30
3.5.2 結構系統識別試驗.....	32
3.5.3 變斷面 VTLCD 系統之性能試驗.....	33
第四章 氣密式調諧水柱消能系統之分析.....	37
4.1 氣密式 TLCD 系統之運動方程式.....	37
4.2 結構安裝氣密式 TLCD 系統之運動方程式.....	42
4.3 結構安裝氣密式 TLCD 系統之參數研究.....	45
4.3.1 氣密式 TLCD 之設計參數.....	45
4.3.2 分析結果.....	46

El Centro 地震 (PGA=0.33g) .....	46
Kobe 地震 (PGA=0.33g) .....	47
第五章 台北 101 大樓應用 TLCD 系統之抗風減振性能評估 .....	50
5.1 台北 101 大樓之結構設計 .....	50
5.2 風力作用模式 .....	50
順風向風力 .....	51
橫風向風力 .....	53
5.3 結構安裝等斷面 TLCD 系統之運動方程式(含扭轉效應) .....	54
5.4 台北 101 大樓安裝 TLCD 系統之參數研究 .....	63
5.4.1 TLCD 設計參數 .....	63
5.4.2 分析結果 .....	63
第六章 結論與建議 .....	66
參考文獻 .....	69





## 表目錄

表 3.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數 (元件測試).....	78
表 3.2 鋁材之材料性質.....	78
表 3.3 加速規之規格(亦可量測速度).....	79
表 3.4 結構系統識別之結構動力特性參數 El Centro (PGA=0.15g).....	79
表 3.5 變斷面 VTLCD 元件之設計參數 (性能測試).....	80
表 3.6 不同孔口板 VTLCD 之減振效益.....	80
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 25 秒).....	80
表 3.7 不同擾動頻率比與開孔面積試驗經識別所得之水頭損失係數.....	81
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	81
表 3.8 不同擾動頻率比與面積比試驗所得之水柱激盪位移峰值.....	82
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	82
表 3.9 不同擾動頻率比與面積比試驗所得之結構位移均方根值折減.....	83
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	83
表 3.10 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構加速度均方根值折減.....	84
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	84
表 3.11 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構位移峰值折減.....	85
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	85
表 3.12 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構加速度峰值折減.....	86
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	86
表 3.13 不同水平段長度(d=0.8m 與 d=0.95m)性能試驗結果之比較.....	87
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm).....	87
表 4.1 結構系統參數.....	88
表 4.2 氣密式 TLCD 系統之參數設計.....	89

表 4.3 氣密式 TLCD 系統最佳設計參數與結構反應均方根值折減率 .....	89
(El Centro 地震力擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ ).....	89
表 4.4 氣密式 TLCD 系統最佳設計參數與結構反應均方根值折減率 .....	90
(Kobe 地震力擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ ) .....	90
表 5.1 各種地況種類之 $\alpha$ 與 $Z_g$ 值 .....	91
表 5.2 台北 101 大樓之結構系統參數.....	91
表 5.3 TLCD 之尺寸設計 .....	91
表 5.4 TLCD 系統之結構反應均方根值折減率 .....	92
(扭轉向, $e_T=21 \text{ m}$ , 滿足水柱激盪位移限制) .....	92
表 5.5 TLCD 系統之結構反應均方根值折減率 .....	92
(X 方向, $e_T=21 \text{ m}$ , 滿足水柱激盪位移限制) .....	92



## 圖目錄

圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統.....	93
圖 1.2 不同型式之調諧液態消能系統.....	93
圖 1.3 Aqua Damper(Tuned Slushing Water Damper) .....	94
圖 1.4 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用 .....	94
圖 1.5 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用 .....	95
圖 1.6 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用 .....	95
圖 1.7 TLCD 系統於加拿大 Wall center 之減振應用 .....	96
圖 1.8 TLCD 系統於高塔之減振應用 .....	96
圖 2.1 變斷面 VTLCD 之示意圖 .....	97
圖 2.2 單自由度結構裝置變斷面 VTLCD 之示意圖 .....	97
圖 2.3 系統識別所得之水頭損失係數歷時.....	98
圖 3.1 變斷面 VTLCD 實體照片 (d=0.95m) .....	99
圖 3.2 變斷面 VTLCD 模型之前視圖 .....	100
圖 3.3 變斷面 VTLCD 模型之上視圖 .....	100
圖 3.4 不同孔勁孔口板之設計圖.....	101
圖 3.5 波高計(Wave1).....	101
圖 3.6 鋁架模型之前視圖.....	102
圖 3.7 鋁架模型之上視圖.....	103
圖 3.8 鋁架模型之三維構造圖.....	104
圖 3.9 樓頂鋼板孔位之設計圖.....	105
圖 3.10 振動台之設計尺寸詳圖.....	106
圖 3.11 微振加速規及訊號調節放大器.....	107
圖 3.12(a) 結構裝置變斷面 VTLCD 系統之量測儀器配置圖.....	107

圖 3.12(b) 結構裝置變斷面 VTLCD 系統試驗之量測儀器配置圖(頂樓).....	108
圖 3.13 變斷面 VTLCD 元件之安裝與波高計之架設圖 .....	108
圖 3.14(a) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	109
(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ).....	109
圖 3.14(b) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	110
(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ).....	110
圖 3.14(c) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	111
(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ).....	111
圖 3.14(d) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	112
(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ).....	112
圖 3.14(e) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	113
(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ).....	113
圖 3.14(f) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	114
(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ).....	114
圖 3.14(g) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	115
(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ).....	115
圖 3.14(h) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	116
(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ).....	116
圖 3.14(i) 元件測試之水柱激盪位移歷時.....	117
(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ).....	117
圖 3.15 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖.....	118
(簡諧擾動外力振幅=20mm) .....	118
圖 3.16 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖.....	119

(簡諧擾動外力振幅=30mm) .....	119
圖 3.17 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖 .....	120
(簡諧擾動外力振幅=40mm) .....	120
圖 3.18(a) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	121
(簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	121
圖 3.18 (b) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	122
(簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	122
圖 3.18 (c) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	123
(簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	123
圖 3.18 (d) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	124
(簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	124
圖 3.18 (e) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	125
(簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	125
圖 3.18 (f) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	126
(簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	126
圖 3.18 (g) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	127
(簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	127
圖 3.18 (h) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	128
(簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	128
圖 3.18 (i) 元件測試之水柱激盪加速度歷時 .....	129
(簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	129
圖 3.19 (a) 元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	130

	(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	130
圖 3.19 (b)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	131
	(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	131
圖 3.19 (c)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	132
	(簡諧擾動外力振幅=20mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	132
圖 3.19 (d)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	133
	(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	133
圖 3.19 (e)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	134
	(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	134
圖 3.19 (f)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	135
	(簡諧擾動外力振幅=30mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	135
圖 3.19 (g)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	136
	(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ ) .....	136
圖 3.19 (h)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	137
	(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	137
圖 3.19 (i)	元件測試之水頭損失係數識別歷時 .....	138
	(簡諧擾動外力振幅=40mm, 擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ ) .....	138
圖 3.20	不同外力振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響 .....	139
	(簡諧擾動, $\gamma_T=1.0$ ) .....	139
圖 3.21	不同共振擾動振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響 .....	140
	(簡諧擾動, $\gamma_T=1.0$ ) .....	140
圖 3.22	元件測試之遲滯迴圈 .....	141

	(簡諧擾動外力振幅=20mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	141
圖 3.23	元件測試之遲滯迴圈.....	142
	(簡諧擾動外力振幅=30mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	142
圖 3.24	元件測試之遲滯迴圈.....	143
	(簡諧擾動外力振幅=40mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ ) .....	143
圖 3.25	不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜.....	144
	(簡諧擾動外力振幅=20mm,VTLCD 設計頻率=0.5Hz).....	144
圖 3.26	不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜.....	144
	(簡諧擾動外力振幅=30mm,VTLCD 設計頻率=0.5Hz).....	144
圖 3.27	不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜.....	145
	(簡諧擾動外力振幅=40mm,VTLCD 設計頻率=0.5Hz).....	145
圖 3.28	不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜.....	145
	(簡諧擾動外力振幅=30mm,VTLCD 設計頻率=0.53Hz).....	145
圖 3.29	系統識別預測與振動台試驗之結構加速度反應比較.....	146
	(El Centro, PGA=0.15g).....	146
圖 3.30	不同孔口板之 VTLCD 控制與未控制結構之位移歷時 .....	147
	(共振簡諧擾動, 擾動振幅 3mm, $r_s = 1.0$ ).....	147
圖 3.31	不同孔口板之 VTLCD 控制與未控制結構之加速度歷時 .....	148
	(共振簡諧擾動, 擾動振幅 3mm, $r_s = 1.0$ ).....	148
圖 3.32	不同孔口板 VTLCD 之水柱激盪位移歷時 .....	149
	(共振簡諧擾動, 擾動振幅 3mm, $r_s = 1.0$ ).....	149
圖 3.33	VTLCD 控制結構與未控制結構之位移富氏頻譜 .....	150
	(共振簡諧擾動, 擾動振幅 3mm, $r_s = 1.0$ , $\Phi=1.00$ ).....	150

圖 3.34 VTLCD 控制結構與未控制結構之加速度富氏頻譜 .....	151
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ ， $\Phi=1.00$ ).....	151
圖 3.35 不同孔口板之 VTLCD 遲滯迴圈 .....	152
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ ).....	152
圖 3.36 不同孔口板孔徑之 VTLCD 水頭損失係數識別歷時 .....	153
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ ).....	153
圖 3.37 性能試驗與理論分析所得之結構位移歷時比較.....	154
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒).....	154
圖 3.38 性能試驗與理論分析所得之結構加速度歷時比較.....	155
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒).....	155
圖 3.39 性能試驗與理論分析所得之水柱激盪位移歷時比較.....	156
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒).....	156
圖 3.40 擾動頻率比對於水柱激盪位移峰值之影響.....	157
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	157
圖 3.41 擾動頻率比對於結構位移反應折減之影響.....	158
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	158
圖 3.42 擾動頻率比對於結構加速度反應折減之影響.....	159
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	159
圖 4.1 氣密式 TLCD 系統之示意圖 .....	160
圖 4.2 單自由度結構裝置氣密式 TLCD 系統之示意圖 .....	160
圖 4.3(a) El Centro 震波之加速度歷時圖 (正規化至 1g) .....	161
圖 4.3(b) El Centro 震波加速度之傅氏頻譜 (正規化至 1g) .....	161
圖 4.4(a) Kobe 震波加之速度歷時圖 (正規化至 1g) .....	162
圖 4.4(b) Kobe 震波加速度之富氏頻譜 (正規化至 1g) .....	162
圖 4.5 初始壓力與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖 .....	163



	(El Centro 地震波擾動, $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	163
圖 4.6	初始壓力與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖.....	163
	(El Centro 地震波擾動, $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	163
圖 4.7	水平段長度比與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖.....	164
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\lambda=1.0$ ).....	164
圖 4.8	水平段長度比與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\lambda=1.0$ ).....	164
圖 4.9	氣密式 TLCD 控制與未控制結構之位移歷時圖.....	165
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	165
圖 4.10	氣密式 TLCD 控制與未控制結構之加速度歷時圖.....	165
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	165
圖 4.11	氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜.....	166
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	166
圖 4.12	氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜.....	166
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	166
圖 4.13	氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖.....	167
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	167
圖 4.14	氣密式 TLCD 系統之遲滯迴圈.....	167
	(El Centro 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.65$ , $\lambda=1.0$ ).....	167
圖 4.15	初始壓力與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖.....	168
	(Kobe 地震波擾動, $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	168
圖 4.16	初始壓力與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖.....	168
	(Kobe 地震波擾動, $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	168
圖 4.17	水平段長度比與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖.....	169
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\lambda=1.0$ ).....	169
圖 4.18	水平段長度比與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖.....	169

	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\lambda=1.0$ ).....	169
圖 4.19	氣密式 TLCD 控制與未控制結構之位移歷時圖 .....	170
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	170
圖 4.20	氣密式 TLCD 控制與未控制結構之加速度歷時圖 .....	170
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	170
圖 4.21	氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜 .....	171
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	171
圖 4.22	氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜 .....	171
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	171
圖 4.23	氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖 .....	172
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	172
圖 4.24	氣密式 TLCD 系統之遲滯迴圈 .....	172
	(Kobe 地震波擾動, $P_0=0.3 \text{ atm}$ , $\beta=0.6$ , $\lambda=1.0$ ).....	172
圖 5.1	結構立面圖及平面圖(資料來源:永峻工程).....	173
圖 5.2	順風向與橫風向之風力示意圖.....	174
圖 5.3	結構裝置 TLCD 系統控制之分析模型 .....	174
圖 5.4	台北 101 順向風風力歷時.....	175
圖 5.5	台北 101 順向風風力頻譜.....	175
圖 5.6	風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構.....	176
	角位移均方根折減之影響.....	176
圖 5.7	風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構.....	176
	角加速度均方根折減之影響.....	176
圖 5.8	風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構.....	177
	位移均方根折減之影響.....	177
圖 5.9	風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構.....	177
	加速度均方根折減之影響.....	177

圖 5.10	結構扭轉向控制與未控制結構之角位移歷時比較.....	178
	( $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	178
圖 5.11	結構扭轉向控制與未控制結構之角加速度歷時比較.....	178
	( $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	178
圖 5.12	結構 x 向控制與未控制結構之位移歷時比較.....	179
	( $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	179
圖 5.13	結構 x 向控制與未控制結構之加速度歷時比較.....	179
	( $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	179
圖 5.14	TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖 .....	180
	(中心位置 , $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	180
圖 5.15	TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖 .....	180
	(Y 軸正向 , $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	180
圖 5.16	TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖 .....	181
	(Y 軸負向 , $e_y=2$ m , $e_T=21$ m).....	181

## 符號對照表

- $A$  : TLC D U 型管之截面積
- $A_1$  : 中心位置 TLC D 之 U 型管截面積
- $A_2$  : Y 軸前側 TLC D 之 U 型管截面積
- $A_3$  : Y 軸後側 TLC D 之 U 型管截面積
- $A_v$  : 變斷面 TLC D U 型管垂直段之截面積
- $A_h$  : 變斷面 TLC D U 型管水平段之截面積
- $A^*$  : 系統矩陣
- $A$  : 離散時間系統矩陣
- $a_i$  : 系統識別之輸出訊號係數
- $B$  : 系統之樓層側向力擾動向量
- $B_0$  : 前瞬時離散時間側向力分配矩陣
- $B_1$  : 後瞬時離散時間側向力分配矩陣
- $B^*$  : 側向力分配矩陣
- $B_w$  : 帶寬係數
- $b_i$  : 系統識別之輸入訊號係數
- $C$  : 系統之阻尼矩陣

- $C_z$  : 指數衰減係數
- $c_s$  : 結構之阻尼係數
- $D$  : 等斷面 TLCD 管徑
- $D_h$  : 變斷面 TLCD 之水平段管徑
- $d$  : TLCD 之水平段長度
- $d_1$  : 中心位置 TLCD 之水平段長度
- $d_2$  : Y 軸前側 TLCD 之水平段長度
- $d_3$  : Y 軸後側 TLCD 之水平段長度
- $\mathbf{E}$  : 系統之地表擾動向量
- $\mathbf{E}^*$  : 地表擾動力分配矩陣
- $\mathbf{E}_0$  : 前瞬時離散時間地表擾動力分配矩陣
- $\mathbf{E}_1$  : 後瞬時離散時間地表擾動力分配矩陣
- $er$  : 定義誤差
- $e_{T_1}$  : Y 軸前側 TLCD 之偏心距離
- $e_{T_2}$  : Y 軸後側 TLCD 之偏心距離
- $e_y$  : 風力之偏心距離
- $f$  : TLCD 自然振動頻率(Hz)
- $f(t)$  : 作用於結構之側向力

$f_s$  : 結構之振動頻率

$f_l$  : TLCD 系統之振動頻率

$f_o$  : 地表擾動頻率

$g$  : 重力加速度

$h_v$  : TLCD 之垂直段靜水位高度

$h_0$  : 未擾動前垂直管密閉氣室之高度

$h_i$  : 第  $i$  層樓之高程

$h^*$  : 結構之高寬比

$\mathbf{K}$  : 系統之勁度矩陣

$K_0$  : 地表粗糙係數

$k_s$  : 結構勁度

$k_{sx}$  :  $x$  向之結構勁度

$k_{s\theta}$  : 扭轉向之結構勁度

$L_e$  : TLCD 之有效長度

$\mathbf{M}$  : 系統之質量矩陣

$m_s$  : 結構質量

$m_{sx}$  :  $x$  向之結構質量

$m_{s\theta}$  : 扭轉向之轉動慣量



- $n_a$  : 系統識別輸出訊號係數之維度
- $n_b$  : 系統識別輸入訊號係數之維度
- $P_0$  : 未擾動前垂直管密閉氣室之氣壓
- $P_1$  : 液面變化後兩垂直管密閉氣室之氣壓
- $Q$  : 非保守力
- $S_t$  : 矩形建築物的史微荷數
- $T$  : 總動能
- $T_s$  : 結構瞬時總能量
- $U$  : 總重力位能
- $\bar{U}_i$  : 第  $i$  層樓之平均風速
- $\bar{U}_{10}$  : 距離地表 10 m 處之平均風速
- $u(\cdot)$  : 系統識別之輸入訊號
- $u_g$  : 基座水平擾動位移
- $V_0$  : 未擾動前垂直管密閉氣室之體積
- $W_l$  : TLC D 流體(水)重量
- $W_s$  : 結構之總重量
- $\bar{\omega}_i$  : 第  $i$  層樓之平均風力
- $\mathbf{w}(t)$  : 擾動向量



- $\mathbf{x}(t)$  : 系統之位移向量
- $x_f$  : 水柱激盪位移
- $x_{f_1}$  : 中心位置 TLCD 之水位變化
- $x_{f_2}$  : Y 軸前側 TLCD 之水位變化
- $x_{f_3}$  : Y 軸後側 TLCD 之水位變化
- $\dot{x}_f$  : TLCD 流體之流速
- $x_s$  : 結構頂樓相對於地表之位移
- $x_{sx}$  : 結構頂樓相對於地表之 x 向位移
- $\ddot{x}_f$  : 流體激盪加速度
- $x_h$  : 變斷面 TLCD 水平段水位變化
- $y(\cdot)$  : 系統識別之輸出訊號
- $\mathbf{z}(t)$  : 狀態向量
- $\alpha$  : TLCD 系統與結構之質量比
- $\beta$  : TLCD 水平段長度與有效長度之比值
- $\gamma$  : TLCD 系統之振動頻率與結構的振動頻率之比值  $(f_i/f_s)$
- $\gamma_T$  : 振動台之擾動頻率與 TLCD 元件自然振動頻率之比值
- $\gamma_s$  : 地表簡諧擾動頻率與結構頻率之比值
- $\theta$  : 系統識別之每一瞬時系統參數



$\omega$  : TLCD 自然振動頻率(rad/sec)

$\delta$  : 水頭損失係數

$\kappa$  : 遺忘因子

$\rho$  : 流體密度

$\varepsilon$  : 容許誤差

$\zeta_s$  : 結構之阻尼比

$\phi$  : 孔口板開孔面積與 TLCD 元件斷面積之面積比

$\lambda$  : 變斷面 TLCDU 型管垂直段與水平段之截面積比

$\sigma_{F_i}$  : 第 i 層樓之橫風向擾動力均方根值



# 第一章 緒論

風災與地震乃人類常見之天然災害。台灣因地處環太平洋地震帶及西太平洋熱帶氣旋區，因此常遭受颱風與地震之侵襲。颱風作用於柔性結構雖不至於造成結構的損壞，但卻會大幅降低居住的舒適度，而地震的發生則會引起大規模的結構倒塌及人員傷亡。因此，如何研發及應用新穎的結構防震系統進行抗風減震(振)遂成為世界各國十分熱門的研究課題。近年來，隨著材料科技的蓬勃發展，高強度的建築材料紛紛問世，遂導致各國相繼興建許多超高層大樓，以作為都市的新地標。高樓建築結構之設計有別於傳統的鋼筋混凝土結構，其具有質量輕、強度高、細長(高寬比大)且自然頻率及阻尼較低等特性，故對風力所造成的擾動十分敏感。基於安全性與舒適性的考量，風力設計往往是決定結構設計尺寸的重要因素。如何降低風力所引起的結構變位及加速度以改善其舒適性，遂成為結構工程控制領域之重要議題。

一般而言，要降低結構之動力反應不外乎增加結構的阻尼及改變結構的自然頻率等方法，此即結構控制的主要目標。若依控制系統之運作需要額外提供能量與否，可將其劃分為被動控制(Passive Control)與主動控制(Active Control)兩大類[1]，茲分述如下：

**被動控制**系統毋須提供能量即可運作，包括基礎隔震(Base Isolation)[2-5]、各式消能器[6-7]，及諧調質塊阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)[7-9]或調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column

Damper, TLCD)[65-66]。基礎隔震裝置適用於低矮的結構，主要是利用基礎與地表間之柔性或曲面滑動支承延長結構周期以隔絕地震能量輸入上部結構，並提供阻尼以降低隔震層之位移—如鉛心橡膠支承(LRB)與摩擦單擺支承(FPS)[10-18]。消能器藉由高阻尼材料或易降伏之鋼材，在反覆受力變形的狀況下增加結構之消能能力，如黏彈性阻尼器(Visco-elastic Damper)、加勁阻尼器(ADAS)及消能制震板[19]等。諧調質塊阻尼器則是利用與主結構振頻相近之次結構系統吸收大部份振動能量的特性來降低主結構的反應。

主動控制包括主動鋼鍵系統(Active Tendon System)、主動斜撐系統(Active Bracing System)，以及質塊制動器(Active Mass Damper, AMD)[20-27]。其中質塊制動器係由被動式的諧調質塊阻尼器演化而來。這些控制系統的目的在於改變結構之動力特性，特別是提高其阻尼。此外，尚有能量需求較小之半主動控制系統[28]，如調閥式阻尼器(Variable Orifice Dampers)及電流變異阻尼器(Electro-rheological Dampers)等。

高樓建築對風極度敏感，尤其在超高層大樓的結構設計中，抗風設計往往是最關鍵的技術瓶頸。為能同時滿足結構安全及舒適性的設計要求，常須採用結構控制技術加以克服。過去二十年中，調諧質塊阻尼系統是高樓抗風設計最常用的結構控制系統[29-30]，如加拿大多倫多 553 m 高的 CN Tower，美國波士頓 60 層高之 John Hancock 大樓，澳洲雪梨 305 m 高之 Center-point Tower 及 508 m 高的台北 101 大樓(圖 1.1)等。惟近年來，TMD 有逐漸被調諧液態消能系統(Tuned Liquid Damper, TLD)取代的趨勢，其中又以調諧水柱消能系統(Tuned

Liquid Column Damper, TLCD)的應用最具潛力。TLD 有利於取代傳統 TMD 的條件包括：

- **維修需求低** (Less maintenance) — TLD 毋須額外提供勁度及阻尼等機械裝置，需維修之項目較 TMD 少。
- **具雙重功能** (Dual functions) — TLD 兼具抗風與消防功能；TMD 則無消防用途。
- **經濟效益高** (Cost-Effective) — TLD 系統構造簡單，可因地制宜利用既有之消防蓄水，毋須額外提供質塊，可節省工程及材料費；TMD 則無此條件。
- **技術已成熟** (State-of-the-Practice) — 近年來有關 TLD 之理論已趨完備，不確定因素降低，有利於工程應用與推廣。

TLD 又分為調諧水波消能系統(Tuned Sloshing Water Damper, TSWD)與調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)，如圖 1.2 所示。茲將 TSWD 系統與 TLCD 系統之運作原理及其應用案例說明如下：

TSWD 主要是藉由水槽之幾何形狀與儲水深度調整其自然頻率，並透過篩網製造紊流產生消能作用。TSWD 依據水深與水運動方向長度之比值可分為淺水阻尼器與深水阻尼器，若比值小於 0.15 則視為淺水阻尼器。淺水阻尼器藉由流體的黏滯性與水面波的破壞提供消能的機制；深水阻尼器則是藉由設置隔板來增加阻尼。目前日本橫須賀市的 Shin Yokohama Prince Hotel (SYPH)及千葉市的 Gold Tower 均使用 TSWD 系統進行抗風減振。Gold Tower 於結構頂樓(高度 158m)安裝 16 組 MCC Aqua Damper<sup>TM</sup>(圖 1.3)，其為一盛水的方形容器，並

在容器上加裝多重鋼絲網，用以增加 Aqua Damper 的消能能力。16 組 MCC Aqua Damper<sup>TM</sup> 的總重量為 10ton，約為塔總重的 1%。

TLCD 系統最早被應用於船舶與海岸結構的晃動控制，主要藉由 U 型連通管內含之水柱總長度(有效長度)調整其自然頻率，並藉由閘門、孔口板(orifice)或變化斷面製造落水頭損失(headloss)而產生消能作用。相較於 TSWD 系統而言，TLCD 系統整個 U 型連通管內之水柱均為有效質量，因此控制效能較佳。有關 TLCD 的研究課題在 90 年代蔚為風潮，Saoka 等人[31]首先推導水柱消能系統之運動方程式，隨後由 Sakai 等人[32]經由一系列的試驗加以驗證，其結果顯示，TLCD 系統的阻尼為非線性阻尼，其大小與落水頭損失及液體激盪速度的平方成正比。此外，試驗的資料進一步指出，孔口阻尼(orifice damping)的非線性度(nonlinearity)並不顯著，因此對於窄頻寬(narrow-band)的反應可利用等效線性(equivqlent linearization)[33,34]的方法進行分析。Sakai 等人更將 TLCD 系統應用於斜張橋塔之振動控制(圖 1.4)，以增加其穩定性，為土木結構應用的首例。Xu 等人[35]亦評估以 U 型 TLCD 系統應用於細長結構受到零均值平穩高斯(zero-mean stationary Gaussian process)風力作用的減振效益，分析時將運動方程式中的非線性孔口阻尼項以一等效阻尼係數取代，因此可求得輸入與輸出之頻域反應函數，並將分析結果與 TMD 控制的結果進行比較。分析結果顯示，結構以 TLCD 系統進行控制的反應折減率可達到以 TMD 控制的效果。Hitchcock 等人[36]根據 U 型 TLCD 系統的運作原理發展液態水柱振動消能器(Liquid Column Vibration Damper, LCVD)，可依據所需之減振效果調整水平段斷面積與垂直段

斷面積的比例(變斷面系統)。文中探討面積比(垂直段斷面積/水平段斷面積)、垂直斷水柱高度、水平段長度及初始擾動振幅等參數對於 LCVD 之振動頻率及阻尼比的影響。Balendra[37]探討 TLCD 應用於高塔結構抗風的研究，其結果顯示，當 TLCD 系統與結構之振動頻率一致時，TLCD 具有良好的控制效果，且孔口板開孔比在 1.0 與 0.5 時，TLCD 系統之減振效益最佳。Gao[38]及 Chang、Hsu[39]則進行 TLCD 系統之最佳化參數設計分析，並評估其控制效益。由 Gao 的研究結果顯示，當結構受簡諧擾動時，TLCD 系統對於結構的峰值反應具有良好的折減效果。Xue 等人[40]利用 TLCD 系統針對橋面板受到風力作用所產生的扭轉運動(pitching motion)進行控制；Won[41]及 Sadek[42]則探討以 TLCD 應用於結構防震的性能表現。由於結構受到環境擾動的作用可能產生兩正交側向振動及扭轉反應，因此可將兩組 TLCD 分別置於兩正交軸向進行控制。此外，Shum 等人[43]則提出多重調諧水柱消能器(Multiple TLCDs)之設計，俾便同時控制結構數個振態的反應，如此不僅可降低每個 TLCD 的尺寸，使建造及安裝更為容易，並可於有限的空間上進行較佳的配置設計，以提升控制效果。Yalla 等人[44]利用半主動 TLCD 系統進行結構振動控制，根據結構的振動反應利用模糊(fuzzy)控制法則調整閥門(valve)的開孔大小，以達到較佳之減振效果。Chen 等人[45]則提出主動式 TLCD 系統針對單自由度擺動結構模型進行振動控制之理論分析與試驗驗證。主動控系統是由伺服馬達及螺旋槳(propeller)所構成，馬達驅動螺旋槳擾動液體所造成之作用力即為主動控制力。此外，CHANG 及 QU 等人[64]分別討論 TMD、TLCD、LCVA、C-TLD (圓柱)及 R-TLD

(矩形)等系統應用於高樓結構抗風減振之效益評估。沈瑛璋[65]建立一套結構受風力作用時之 TLCD 最佳參數設計表格，工程師進行 TLCD 之設計時可據以得到 TLCD 之水頭損失係數與頻率比等參數之最佳設計值。陳連杰[66]則利用變斷面 VTLCD 系統針對單層樓鋁構架進行參數研究及振動台試驗，其結果顯示，當水平段長度與有效長度之比值為  $\beta=0.55\sim 0.75$  時，減振效果較佳。

目前亞洲及北美地區應用 TLCD 的高樓抗風工程，主要均由日本及加拿大各一家公司承攬，這些案例在 2000 年前後已陸續完成。舉例來說，在亞洲地區完成的新建工程包括：

日本東京的 Cosima 旅館(圖 1.5)—該高樓建築為 26 層之鋼骨建築，總高 106.2m，屬細長型結構，易為風力誘發振動，故於頂樓安裝一組 TLCD(重約 58 噸)作為抗風之用。根據 Shimizu and Teramura<sup>11</sup> 的研究顯示，裝設 TLCD 可降低該大樓之加速度反應達 50-70%。另外，東京的千禧塔(Millennium Tower，圖 1.6)、大阪的 Hyatt 旅館以及 Ichida 大樓都安裝了 TLCD。

北美地區，有溫哥華 Wall Center 住宅大樓[46](48 層，圖 1.7)安裝 TLCD 進行結構抗風減振(總用水量約為 600 噸)，該 TLCD 系統，除可降低風力振動反應，改善住戶的舒適性外，亦可兼作緊急消防用水之功能。此外，在美國應用 TLCD 系統之案例包括紐約的 Random House 及芝加哥 South Dearborn 等大樓。此外，煙囪、高塔均可安裝 TLCD 系統進行抗風減震，如圖 1.8 所示，TLCD 系統可應用之領域極為廣泛。

茲歸納 TLCD 系統在實際應用時較 TSWD 系統有利的條件如下：

- **概念簡單 (Conceptually simple)** —TLCD之動力行為可模擬成單自由度系統；TSWD的理論分析模式則較複雜，結構動力特性不易掌握。
- **調頻容易 (Easy-tuning)** —無論是TLD或TMD，均係利用結構動力學原理—當控制系統與結構產生共振時，結構振動的能量轉移至控制系統而達到減振作用，調頻(frequency-tuning)之精準度將影響控制效能。TLCD之自振頻率只與水柱之總長度有關，動力特性明確，容易決定；TSWD具多重振頻，動力特性不易調控。
- **效能佳 (Efficient)** —TSWD只有接近水槽表面部分之液體因激盪運動(sloshing motion)而有減振貢獻；TLCD則整個U型連通管內之水柱都為有效質量。換言之，TLCD可以較少的水量達到較TSWD更佳之控制效能。
- **技術門檻低、成果易落實** —TLCD系統構造簡單，且能因地制宜，同時結合消防蓄水與抗風減振雙重功能，故其經濟效益遠超過其他抗風系統，未來勢必成為高樓減振系統之主流。

未來 TLCD 系統勢必成為高樓減振系統之主流，因此本研究除了建立 TLCD 系統之非線性理論分析模式外，並製作一組變斷面 VTLCD 元件模型進行元件測試與性能測試(振動台試驗)，俾便充份檢驗其減振效能。

本文第二章為變斷面調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導 VTLCD 之運動方程式與建立非線性數值解析模型，並介紹水頭損失係數之系統識別方法。第三章為變斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析，包括利用交通大學地震模擬振動台進行變斷面 VTLCD 系統之元



件測試與性能測試，以探討三段式變斷面 VTLCD 系統之減振效益，並驗證數值解析模式之精確性。第四章為氣密式調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導氣密式調諧水柱系統之運動方程式與壓力參數變化對於結構減震效能之影響。第五章則進行台北 101 大樓安裝 TLCD 系統進行抗風減振之性能評估，結構除了考慮單向水平振動之控制外，亦同時考慮結構扭轉振動之控制。第六章為結論與建議。



## 第二章 變斷面調諧水柱消能系統

### 2.1 變斷面 VTLCD 系統之運動方程式

U 型三段式變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper, VTLCD)之示意圖如圖 2.1 所示，VTLCD 之水平段截面積( $A_h$ )與垂直段截面積( $A_v$ )不同。當 VTLCD 基座受到水平擾動( $u_g$ )作用時，水柱激盪之振幅為  $x_f$ ，由於任何時刻液面不得低於 VTLCD 水平段管徑  $D_h$ ，因此須滿足

$$|x_f| \leq h_v - D_h \quad (2.1)$$

其中，

$h_v$ ：VTLCD 垂直段靜水位高度；

$D_h$ ：VTLCD 水平段管徑。



此外，若考慮流體(水)之不可壓縮性，即

$$A_v x_f = A_h x_h \quad (2.2)$$

$$x_h = \frac{A_v}{A_h} x_f \quad (2.3)$$

將(2.3)式等號兩邊同時對時間微分，可得 VTLCD 水平段流體之流速

$$\dot{x}_h = \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f \quad (2.4)$$

其中，

$A_v$  : VTLCD 垂直段之截面積；

$A_h$  : VTLCD 水平段之截面積；

$x_f$  : VTLCD 垂直段之水位變化；

$x_h$  : VTLCD 水平段之水位變化。

變斷面 VTLCD 系統之總動能 (Kinetic Energy),  $T$ , 及總重力位能 (Potential Energy),  $U$ , 可分別計算如下：

$$T = \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h (\dot{x}_h + \dot{u}_g)^2 dx \quad (2.5)$$

將式(2.4)帶入式(2.5)可得

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx \\ &\quad + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h \left( \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_h + \dot{u}_g \right)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v - x_f) \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_h d \left( \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{u}_g \right)^2 \\ &= \rho A_v \dot{x}_f^2 h_v + \rho A_v \dot{u}_g^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A_h d \left( \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{u}_g \right)^2 \quad (2.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v-x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v+x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left( \frac{1}{2} D_h \right) dx \\
&= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v-x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v+x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h \\
&= \rho A_v g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h
\end{aligned} \tag{2.7}$$

其中，

$\rho$ ：流體密度；

$g$ ：重力加速度；

$u_g$ ：基座水平位移；

$h_v$ ：VTLCD 垂直段之水位高度；

$d$ ：VTLCD 水平段長度。

吾人可將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's

Equation) —  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_f} + \frac{\partial U}{\partial x_f} = Q$  求取系統之運動方程式。

由於總動能僅為速度之函數，與位移函數無關，因此  $\partial T / \partial x_f = 0$ 。

經整理後可得：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = \left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{u}_g \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \tag{2.9}$$

此外，系統之非保守力為流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力，該阻尼力與流速的平方及流速的方向有關，可表示如下：

$$Q = \begin{cases} -\frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h > 0 \\ \frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\text{或 } Q = -\frac{1}{2}\rho A_h \delta |\dot{x}_h| \dot{x}_h \quad (2.11)$$

其中， $\delta$  為水頭損失係數。

將(2.4)式代入(2.11)式，則非保守力可以垂直段之液面波動速度表示如下：

$$Q = -\frac{1}{2}\rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (2.12)$$

根據式(2.8)、式(2.9)與式(2.12)，吾人可建立變斷面 VTLCD 系統之運動方程式如下：

$$\left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \frac{1}{2}\rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f = -\rho A_v d \ddot{u}_g \quad (2.13)$$

由式(2.13)之特徵分析，吾人可求得變斷面 VTLCD 之自然振動頻率  $\omega$ (rad/sec) 為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2\rho A_v g}{2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d}} = \sqrt{\frac{2g}{2h_v + \frac{A_v}{A_h} d}} \quad (2.14)$$

$$\text{令 } L_e = 2h_v + \lambda d \quad (2.15)$$

其中， $\lambda = \frac{A_v}{A_h}$  為 U 型管垂直段與水平段之截面積比，則(2.14)

式可進一步表示為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (2.16)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.17)$$

其中， $L_e$  為變斷面 VTLCD 之有效長度，可據以設計 VTLCD 之振動頻率。變斷面 VTLCD 之自然振動周期可表示為：

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g}} \quad (2.18)$$

綜上所述，變斷面 VTLCD 系統之運動方程式可模擬成一單自由度系統，其振動周期為液體有效長度之函數，有效長度可藉由管徑面積比調整。此外，變斷面 VTLCD 系統因阻尼力與落水頭損失係數及液體流速的平方有關，使得變斷面 VTLCD 系統為一非線性系統，本文將發展一套數學解析模式求得變斷面 VTLCD 系統之液體激盪及流速等振動反應。

## 2.2 解析模式

由式(2.13)可知，變斷面 VTLCD 系統之阻尼項為非線性，本文將採用狀態空間法(State Space Procedure, SSP)[47,48]，並利用迭代之

方式求得 VTLCD 之流速  $\dot{x}_f$  及水位變化  $x_f$ 。本文之解析方式說明如後：

首先將 VTLCD 系統之運動方程式(2.13)表示成：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (2.19)$$

其中，

$\mathbf{x}(t) = x_f$  為系統之位移向量(此處為單自由度系統，故為一常量函數)；

$\mathbf{w}(t) = \ddot{u}_g$  為擾動力向量；

$M = 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d$  為系統之質量矩陣；

$C = \frac{1}{2} \rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}|$  為系統之阻尼矩陣；

$K = 2\rho A_v g$  為系統之勁度矩陣；

$E = \rho A_v d$  為系統之擾動力配置矩陣；

式(2.19)可以狀態空間表示法寫成：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{z}(t) + \mathbf{E}^* \mathbf{w}(t) \quad (2.20)$$

其中，

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

為  $2n \times 1$  之狀態向量(此處為單自由度系統， $n=1$ )；

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

為  $2n \times 2n$  之系統矩陣；

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

為  $2n \times 1$  擾動力分配矩陣。

對式(2.20)取拉普拉氏轉換 (Laplace transformation) 可得：

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{z}(t_0) + \mathbf{H}(s)\mathbf{G}(s) \quad (2.24)$$

其中，

$$\mathbf{H}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{E}^* \mathbf{w}(s) \quad (2.26)$$

$\mathbf{z}(t_0)$  表示初始條件。

動力系統式(2.20)之解可由式(2.25)與式(2.26)取拉普拉氏逆轉換至時域如下：

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}^*(t-t_0)}\mathbf{z}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}^*(t-\tau)}[\mathbf{E}^* \mathbf{w}(\tau)]d\tau \quad (2.27)$$

式(2.27)中之積分式欲展開時， $\mathbf{w}(\tau)$ 在取樣周期內之連續函數須為已知。由於風力或地震記錄通常為離散訊號，因此假設擾動函數在兩連



續取樣點之間呈線性變化，令  $t_0 = (k-1)\Delta t$ ， $t = k\Delta t$  及  $\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$ ，  
則

$$\mathbf{w}(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} \mathbf{w}[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} \mathbf{w}[k\Delta t] \quad (2.28)$$

其中， $(k-1)\Delta t \leq \tau \leq k\Delta t$ 。

狀態方程式(2.20)之解析解可透過式(2.27)及式(2.28)得一離散時間差分方程式如下：

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] \quad (2.29)$$

其中，

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

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

為  $2n \times 1$  之前瞬時離散時間擾動力分配矩陣；

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

為  $2n \times 1$  之後瞬時離散時間擾動力分配矩陣。

VTLCD 動力反應之解析步驟說明如下：

1. 假設 VTLCD 於第  $k$  瞬時之液體激盪速度為  $\dot{x}_f = \dot{x}_{f,k}$ ；

2. 計算  $C_k = \frac{1}{2} \rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}_{f,k}|$ ，代入式(2.22)可得系統矩陣  $\mathbf{A}^*$ ，並計算

VTLCD 之速度反應  $\dot{x}_{f,k+1}$ ；

$$3. \text{ 定義誤差 } er = \frac{2(\dot{x}_{f,k+1} - \dot{x}_{f,k})}{|\dot{x}_{f,k+1}| + |\dot{x}_{f,k}|};$$

4. 令容許誤差為  $\varepsilon$ 。若  $er \leq \varepsilon$ ，則  $\dot{x}_{f,k+1}$  即為所求，可進行下一瞬時之反應分析；

5. 若  $er > \varepsilon$ ，則令  $\dot{x}_{f,k} = \dot{x}_{f,k+1}$ ，重覆步驟 (1) ~ (4) 直到  $er \leq \varepsilon$  為止。

### 2.3 結構安裝變斷面 VTLCD 系統之運動方程式

單自由度結構安裝變斷面 VTLCD 系統進行減振控制之分析模型如圖 2.2 所示。當結構物的基礎與樓層分別受到水平地表擾動  $u_g$  與側向力  $f(t)$  作用時，樓層將產生一相對於地表之水平側向位移  $x_s$ ，VTLCD 系統則因結構振動而產生一激盪位移  $x_f$ ，此時仍必須滿足液面激盪不得低於變斷面 VTLCD 水平段管徑  $D_h$  之限制，如式(2.1)所示。變斷面 VTLCD 控制結構之總動能， $T$ ，與總重力位能， $U$ ，可分別計算如下：

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx \\ &+ \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h \left( \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g \right)^2 dx + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\ &= \rho A_v h_v \dot{x}_f^2 + \rho A_v h_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h d \left( \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g \right)^2 \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left( \frac{1}{2} D_h \right) dx + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\ &= \rho A_v g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

其中，

$x_s$ ：結構頂樓相對於地表之位移；

$m_s$ ：結構質量；

$c_s$ ：結構阻尼；

$k_s$ ：結構勁度。



將式(2.30)及式(2.31)帶入拉格朗治方程式如下：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_f} + \frac{\partial U}{\partial x_f} = Q_1$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_s} + \frac{\partial U}{\partial x_s} = Q_2$$

因總動能僅為速度之函數，與位移函數無關，因此  $\frac{\partial T}{\partial x_f} = 0$ 、

$\frac{\partial T}{\partial x_s} = 0$ ，經整理後可得：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = \left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{x}_s + \rho A_v d \ddot{u}_g \quad (2.32)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) = \rho A_v d \ddot{x}_f + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{x}_s + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{u}_g \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \quad (2.35)$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失所產生之阻尼力  $Q_1$  與作用於結構之固有阻尼力及外力  $Q_2$ ，二者可分別表示如下：

$$Q_1 = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} \dot{x}_f^2 & \dot{x}_f > 0 \\ \frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} \dot{x}_f^2 & \dot{x}_f < 0 \end{cases}$$

或整理如下：

$$Q_1 = -\frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (2.36)$$

$$Q_2 = -c_s \dot{x}_s + f(t) \quad (2.37)$$

根據拉格朗治方程式，式(2.32)、式(2.34)及式(2.36)可整理如下：

$$\left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{x}_s + \frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f = -\rho A_v d \ddot{u}_g \quad (2.38)$$

同理，式(2.33)、式(2.35)及式(2.37)可整理如下：

$$\begin{aligned} & \rho A_v d \ddot{x}_f + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s \ddot{u}_g \\ & = -(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{u}_g + f(t) \end{aligned} \quad (2.39)$$

若將(2.38)及(2.39)式整理成矩陣的型式，吾人可得變斷面 VTLCD 控制結構之運動方程式為：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} |\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho A_v d \\ (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \end{aligned} \quad (2.40)$$

或將式(2.40)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\ddot{u}_g(t) + \mathbf{B}f(t) \quad (2.41)$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \left( 2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \text{ 為系統之質量矩陣；}$$

陣；

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho \delta \frac{A_v^2}{A_h} |\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \text{ 為系統之阻尼矩陣；}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \text{ 為系統之勁度矩陣；}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho A_v d \\ (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \text{為系統之地表擾動向量；}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{為系統之樓層側向力擾動向量。}$$

## 2.4 系統識別

本節首先介紹結構系統識別[49-51]的方法，俾便進行結構系統識別試驗，以求得單層樓鋁構架模型之振動頻率與阻尼比等動力特性參數。隨後結合變斷面 VTLCD 系統之運動方程式與結構系統識別的方法，俾便發展水頭損失係數之系統識別模式。

線性結構動力系統之等效離散時間模式，若以單一輸入-單一輸出(Single Input Single Output, SISO)的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2.42)$$

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；

根據 ARX 模型可進一步表示為：

$$y(k) = \boldsymbol{\psi}^T(k) \boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (2.43)$$

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n_a), u(k) \dots u(k-n_b)] \quad (2.44)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \cdots a_{n_a}, b_0 \cdots b_{n_b}]^T \quad (2.45)$$

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)。

利用遞迴預測誤差法 (Recursive Prediction Error Method)，經運算整理後可得系統參數之遞迴型式解如下：

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + L(k)[\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\psi}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k-1)] \quad (2.46)$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)}{\kappa(k) + \boldsymbol{\psi}^T(k)P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)} \quad (2.47)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\kappa(k) + \boldsymbol{\psi}^T(k)P(k-1)\boldsymbol{\psi}(k)} \quad (2.48)$$

$$\kappa(k) = \kappa_0\kappa(k-1) + 1 - \kappa_0$$

$\kappa$  稱為遺忘因子 (forgetting factor)，通常採用  $\kappa_0 = 0.99$ ， $\kappa(0) = 0.95$ 。通常選擇初始條件  $P(0) = 10^8 \sim 10^{10}$  以加速其收斂速度。

由於結構系統的振動特性與係數  $a_i$ 's 有關，識別出系統的最佳係數  $a_i$ 's 後，即可計算結構之振動頻率及阻尼比如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi\Delta t} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (2.49)$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (2.50)$$

其中， $\Delta t$  為取樣周期；

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

$p_j$  為以  $a_i$ 's 作為多項式係數所得之第  $j$  個複數根。

本文嘗試應用上述之系統識別的技巧求取變斷面 VTLCD 系統之水頭損失係數。首先將變斷面 VTLCD 系統之運動方程式(2.13)等號兩邊同除以  $\rho A_v$  修正如下：

$$-\left(4h_v + 2\frac{A_v}{A_h}d\right)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g = \frac{A_v}{A_h}\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f \quad (2.51)$$

其中， $x_f$  為 VTLCD 之激盪振幅，可由波高計量測而得。分別將  $x_f$  對時間微分一次與兩次可得 VTLCD 系統之液體流速( $\dot{x}_f$ )及液體激盪加速度( $\ddot{x}_f$ )。由於式(2.51)中， $h_v$ 、 $A_v$ 、 $A_h$ 、 $d$ 、 $\ddot{u}_g$ 、 $x_f$ 、 $\dot{x}_f$  及  $\ddot{x}_f$  均為已知，僅水頭損失係數  $\delta$  未知，若令

$y[k] = -\left(4h_v + 2\frac{A_v}{A_h}d\right)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g$ ，則式(2.51)可表示如下：

$$y[k] = \left[ \frac{A_v}{A_h}|\dot{x}_f|\dot{x}_f \right] \delta = \psi^T \theta \quad (2.52)$$

其中， $\psi^T = \left[ \frac{A_v}{A_h}|\dot{x}_f|\dot{x}_f \right]$ ， $\theta = \delta$ 。

式(2.52)可利用式(2.46)、式(2.47)及式(2.48)之遞迴預測誤差法求得每一瞬時之系統參數  $\theta$ ，即為 VTLCD 系統之水頭損失係數  $\delta$ 。

為驗證本文所發展之水頭損失係數識別方法的精確性，茲以



VTLCD 系統之振動頻率為 0.6 Hz、水頭損失係數為 5 及輸入地表擾動為 0.6 Hz 之簡谐波進行說明。首先利用第 2.2 節所述之解析模式，求得 VTLCD 之水柱激盪位移、水柱激盪速度與水柱激盪加速度，隨後將其帶入式 (2.51) 與式 (2.52) 進行系統識別，初始值採用  $P(0)=10^6$ ， $\theta(0)=0$ 。圖 2.3 為變斷面 VTLCD 元件系統識別所得之水頭損失係數歷時，其結果顯示，隨著識別筆數的增加(約 2000 筆，相當於 20 秒)，水頭損失係數逐步收斂並趨於定值，識別所得之水頭損失係數為  $\delta = 4.99$ ，理論值則為  $\delta = 5.0$ ，二者十分契合，顯示本文所提之識別方法可有效預測水頭損失係數。有關變斷面 VTLCD 系統之元件測試與性能測試將採用上述的方法識別不同元件設計與擾動條件下之水頭損失係數。



## 第三章 變斷面調諧液體消能系統之試驗與分析

### 3.1 變斷面 VTLCD 元件與單層樓鋁構架模型之設計

根據陳[66]所進行之研究可知，變斷面 VTLCD 系統之最佳設計參數如下：

(a) 當 VTLCD 系統之截面積比  $\lambda \leq 1.2$  時，最佳長度比介於  $\beta = 0.55 \sim 0.75$  時可達到較佳的減振效果；當截面積比  $\lambda \geq 1.3$  時，最佳的長度比介於  $\beta = 0.5 \sim 0.7$  時時可達到較佳的減振效果。

(b) VTLCD 系統的開孔面積比採用  $\phi \geq 0.36$  之設計時，VTLCD 具有良好之控制效果。



由於陳之研究僅進行  $d=0.80\text{m}$ ， $\beta=0.47$  之性能試驗，為進一步探討水平段長度比對於減振效益之影響，本研究遂設計一變斷面 VTLCD 元件，使其水平段長度再延長  $0.15\text{m}$  成為  $d=0.95\text{m}$ ，此時之長度比為  $\beta=0.54$ 。水平段直徑設計為  $D_h=124\text{mm}$ ，而垂直段直徑則設計為  $D_v=152\text{mm}$ ，即垂直段面積與水平段面積之比值  $\lambda=1.52$ (與陳之設計尺寸相同)。本研究所製作之 VTLCD 實體照片如圖 3.1 所示，進行元件測試時則將 VTLCD 系統之振動頻率調節為  $0.5\text{Hz}$ ，因此，VTLCD 元件之設計尺寸及系統之動力特性參數整理如表 3.1 所示。

### 3.2 VTLCD 元件之模型安裝

變斷面 VTLCD 元件模型主要由兩個 L 型之 PVC 管對鎖而成(圖 3.2, 圖 3.3), 兩 PVC 管中央可抽換不同孔徑之孔口板(圖 3.4), 共設計半徑分別為 62.5 mm(全開)、50 mm、37.5 mm、25mm 及 12.5mm、等 5 種不同孔徑之孔口板, 俾便探討孔徑大小對於落水頭及減振效能之影響。孔口板兩側則另外填塞橡膠墊片以防漏水, 最後利用螺栓將兩個 L 型之 PVC 管對鎖。此外, VTLCD 元件垂直管外側設有兩根支撐座, 除了用以架設波高計(圖 3.5)外, 亦可提供 VTLCD 垂直段之加勁效果, 避免垂直段於運動過程中產生晃動或變形, 進而影響試驗結果。

除了設計 VTLCD 模型進行元件測試外, 本研究亦設計一單層樓鋁構架模型(圖 3.6 至圖 3.8), 俾便進行 VTLCD 控制結構之性能測試。構架模型之梁、柱均採用相同尺寸之空心鋁方管材料製作, 其斷面尺寸及材料性質整理如表 3.2 所示。鋁構架模型之平面尺寸為 2m×2m, 總高度為 2.75 m, 樓層總重量為 245 kgf (含四塊厚度為 6 mm 之鋼板重量、未裝水之 VTLCD 元件重量及鋁構架柱高一半以上之大梁與小梁重量)。此外, 吾人於結構梁柱接頭處增焊加勁板 (10cm×10cm) 補強, 因此柱子實際之有效長度約為 2.5 m。圖 3.9 為頂樓鋼板之螺栓孔位設計圖, VTLCD 元件底板可利用螺栓固定於樓板上。鋁模型構架之自然振動頻率與阻尼比等結構動力特性參數將由結構系統識別試驗求得。

### 3.3 試驗設備與感應器配置

VTLCD 系統之元件測試與性能測試係於交通大學土木結構實驗室進行，元件測試與性能測試主要利用單軸向地震模擬振動台完成。茲將試驗時使用之相關儀器設備及其規格說明如下：

### 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以表露無遺，因此也最適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之台面尺寸為 3 公尺見方(圖 3.10)，振動台之質量為 5 公噸，試體結構之最大質量可達 10 公噸。振動台係由一支油壓致動器來驅動，其最大行程為 $\pm 12.5$  公分，最大加速度為  $1g$ 。



### 2. 控制系統與資料擷取系統

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，輸入之訊號為經基線修正積分之地震位移歷時記錄。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，若配合數位訊號輸入模組即可模擬隨機訊號及任意形式之地表擾動。

振動台系統的資料擷取係採用德國 IMC 公司所開發之  $\mu$ -Musycs 系統，其可同時量測 32 個頻道。測試資料的儲存可透過個人電腦工具與網路介面將其快速的轉換到其他的電腦進行後期處理。

### 3.微振加速規

由於單層樓鋁構架模型的周期為 1.85sec，結構較軟(模擬高層建築)，經初步測試得知，結構於容許位移內(12cm)所測得之樓層加速度振幅僅約數十 gal，因此考慮使用微振加速規(圖 3.11，含訊號調節放大器)進行振動量測，以提高量測的精度。加速規之規格如表 3.3 所示，其可量測之頻率範圍為 0.1Hz 至 450Hz，可量測之最大加速度為 $\pm 0.5g$ 。吾人於振動台及結構樓板各安裝一顆微振加速規(圖 3.12 (a))，俾便量測地表及結構頂樓之加速度反應。

#### 4. 位移計(LVDT)

位移計(KYOWA, DLT-300AS)主要量測結構頂樓之位移，其動態量測範圍為 $\pm 30\text{ cm}$ 。試驗設置係以振動台前方之五層樓鋼結構模型(圖 3.12(b))作為固定參考架安裝位移計，以監測結構樓層之位移。

#### 5. 波高計

波高計(圖 3.5，ARC 公司生產)主要量測 VTLCD 垂直段之液體激盪位移。圖 3.5 所示為型號 WHA-600(30512A)之波高計，其量測範圍為 $\pm 30\text{ cm}$ ；另有一支型號為 WHA-800(30512B)之波高計，其量測範圍為 $\pm 40\text{ cm}$ 。將波高計將分別以 C 形夾具固定於 U 型 VTLCD 元件垂直段之支撐架(圖 3.13)，俾便量測 VTLCD 系統之液體激盪振幅。

### 3.4 試驗規劃

振動台試驗主要規劃進行 VTLCD 元件測試與 VTLCD 性能測

試，以瞭解 VTLCD 系統之振動特性及探討 VTLCD 系統應用於結構振動控制之減振效益。

#### 3.4.1 變斷面 VTLCD 系統之元件試驗

本研究以水平段長度  $d=0.95\text{m}$  之 VTLCD 進行元件試驗，且將 VTLCD 之設計頻率調成  $0.5\text{Hz}$ ，相當於液體之總長度  $L_e=1.99\text{m}$ ， $h_v=0.39\text{m}$ 。試驗前將水倒入 VTLCD 管內，使液體之總長度(有效長度)達  $1.99\text{m}$ ，隨後於水中添加紅色廣告顏料，以便觀察液體於 U 型管內振盪之情形。試驗時由控制器輸入振動台之命令振幅分別為  $20\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$  及  $40\text{mm}$ ，每一振幅所進行之擾動頻率分別為  $0.2\text{Hz}$ 、 $0.3\text{Hz}$ 、 $0.4\text{Hz}$ 、 $0.5\text{Hz}$ 、 $0.6\text{Hz}$ 、 $0.7\text{Hz}$  及  $0.8\text{Hz}$  等七種頻率之簡諧波擾動，並於上述試驗完成後更換不同孔徑之孔口板再重複以上試驗(依序分別更換孔徑為  $62.5\text{mm}$ (全開)、 $50\text{mm}$  及  $37.5\text{mm}$  之孔口板，其對應之開孔率分別為  $A_o/A_h=1.0$ (全開)、 $0.64$  及  $0.36$ ； $A_o$ =孔口板之開孔面積， $A_h$ =水平段截面積)。

#### 3.4.2 變斷面 VTLCD 系統之性能試驗

試驗時將 VTLCD 元件吊至單層樓鋁構架模型的頂樓安裝(圖 3.12(a))，俾便進行 VTLCD 系統之性能試驗。進行性能試驗前首先進行結構系統識別試驗，分別輸入 El Centro 地震(PGA 均為  $0.15\text{g}$ )，同時量測振動台之加速度輸入與樓層之加速度反應輸出，應用第 2.4 節所述之結構系統識別單一輸入-單一輸出之迴歸模式識別結構動力特

性參數，包括振動頻率與阻尼比。根據結構系統識別所得之振動頻率即可調整 VTLCD 元件的有效長度，使其振動頻率與結構之振動頻率一致，即可進行性能試驗。

性能試驗主要為簡谐波之地表擾動試驗，擾動振幅設定為 3mm，其對應之擾動頻率分別為 0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.53Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz 及 0.9Hz。此外，本試驗亦進行孔徑依序為 62.5mm(全開)、50mm 及 37.5mm 之性能試驗，以探討 VTLCD 系統於不同孔口板開孔面積比時之減振效益。

### 3.5 試驗結果

#### 3.5.1 變斷面 VTLCD 元件試驗




圖 3.14 為不同擾動頻率比與擾動振幅試驗所得之液體激盪位移歷時。由圖可知，外力振幅愈大，液體的激盪位移愈大。此外，面積比愈小，阻力愈大，液體的激盪位移愈小。

圖 3.15 至圖 3.17 則為面積比與擾動頻率比對於液體激盪位移峰值之影響，其結果顯示，當擾動頻率與 VTLCD 之自然振頻產生共振時( $\gamma_T=1.0$ )，VTLCD 之液體激盪位移最大，其中，於孔口板全開的情況下( $\phi=1$ )，外力振幅為 20mm、30mm 及 40mm 時所對應之激盪位移峰值約可達 9.5 cm、12 cm 及 14 cm，且隨著孔口板之面積比愈小，液體激盪位移亦隨之降低； $\phi=0.36$  之激盪位移峰值約為 4 cm、4.6 cm 及 5 cm。

圖 3.18 為不同擾動頻率比與擾動振幅試驗所得之液體激盪加速

度歷時，其中，液體激盪加速度為將液體激盪位移對時間微分兩次所得之結果，微分前吾人首先將波高計量所量測之液體激盪位移 2Hz 以上之振動反應進行濾波處理。由圖可知，液體激盪加速度振幅的變化趨勢與液體激盪位移的情況相同，外力振幅愈大，液體的激盪加速度愈大。

圖 3.19 為不同擾動頻率比與擾動振幅試驗經識別所得之 VTLCD 元件水頭損失係數歷時。水頭損失係數之識別係根據第 2.4 節所述之方法，利用波高計所量測之液體激盪振幅( $x_f$ )、液體流速( $\dot{x}_f$ ，激盪振幅對時間微分一次所得)、液體激盪加速度( $\ddot{x}_f$ ，液體激盪振幅對時間微分兩次所得)及地表加速度( $\ddot{u}_g$ )等已知反應，識別未知之水頭損失係數。其結果顯示，水頭損失係數僅須少數資料進行識別即可迅速收斂並趨於穩定值(約 10 秒，相當於液面激盪振幅達穩態的時間)。

圖 3.20 為不同外力振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響。由結果可知，擾動振幅一定時，孔口板孔徑愈小，水頭損失係數愈大，孔口板孔徑愈大，水頭損失係數愈小；孔口板孔徑一定時，擾動振幅愈大，水頭損失係數愈小，擾動振幅愈小，水頭損失係數愈大。此外，在共振頻率擾動( $\gamma_T=1.0$ )下，水頭損失係數最小，於不同面積比  $\phi=1.0$ 、0.64 及 0.36 所對應之水頭損失係數分別為  $\delta_{20}=4.2$ 、6.8 及 20.2， $\delta_{30}=3.3$ 、5.9 及 19.5， $\delta_{40}=2.6$ 、5.3 及 19.4。

圖 3.21 為不同共振擾動振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響，其結果顯示，開孔率愈小，水頭損失係數愈大，惟水頭損失係數與擾動振幅之關係曲線平緩，即共振擾動條件下，擾動振幅對於水頭損失係數的影響不大。



圖 3.22 至圖 3.24 為擾動頻率比  $\gamma_T = 1.0$  時，不同外力擾動振幅之 VTLCD 遲滯迴圈，其中，阻尼力是由運動方程式中的阻尼項求得。其結果顯示，當孔口板孔徑較大時，阻尼力小，液體之激盪位移較大；反之，當孔口板孔徑較小時，阻尼力大，液體之激盪位移較小。整體而言，於共振條件下， $\phi=1.0$  之遲滯迴圈消能面積較  $\phi=0.64$  及  $\phi=0.36$  大。

由於元件測試之擾動時間約為 60sec，試驗記錄之時間為 120sec，因此吾人將 60sec 至 120sec 之自由振動反應歷時記錄進行富氏頻譜所得之結果如圖 3.25 至圖 3.28 所示。其結果顯示，不同孔口板孔徑( $\phi=1$ 、0.64 及 0.36)與外力振幅(20mm、30mm 及 40mm)試驗所得之元件自然振動頻率為 0.51Hz，理論設計值為 0.5Hz(有效長度為 1.99 m)，二者之誤差為 2.0%。此外，本文亦改變 VTLCD 管內之液體長度(1.77m)，並配合不同孔口板孔徑( $\phi=1$ 、0.64 及 0.36)與外力擾動振幅為 30mm (擾動頻率為 0.8Hz)試驗所得之自然振動頻率為 0.54 Hz，理論設計值為 0.53 Hz，二者之誤差為 1.9%。由上述之結果可知，利用液體之有效長度計算 VTLCD 元件之振動頻率十分精確，調頻容易且可靠。

### 3.5.2 結構系統識別試驗

本研究亦進行結構系統識別之振動台試驗，輸入 El Centro 地震波(PGA 為 0.15g)，並完成單層樓鋁構架模型含空 VTLCD 元件之系統識別分析。由 El Centro 地震波識別所得之結構動力特性參數整理

如表 3.4 所示，識別所得之結構頻率為 0.53Hz，阻尼比約為 0.1%，且利用  $k_s = \omega^2 m_s$  與  $c_s = 2m_s \omega \zeta_s$  即可得到結構之勁度與阻尼係數。圖 3.29 為系統識別預測與試驗之結構加速度歷時比較，其結果顯示，預測結果與試驗結果相當一致，顯示吾人已充份掌握結構的動力特性參數，可據以進行後續 VTLCD 控制結構之數值模擬分析。

### 3.5.3 變斷面 VTLCD 系統之性能試驗

由於系統識別所得之結構振動頻率為 0.53Hz，本文遂調節 VTLCD 之水量，使 VTLCD 之液體有效長度為  $L_e = 1.77\text{m}$ ，俾使 VTLCD 系統與結構之頻率比為  $\gamma = 1.00$ ，此時 VTLCD 系統之水平段長度與有效長度之長度比為  $\beta = 0.54$ 。此外，根據液體之有效長度、VTLCD 系統之斷面積及水的密度，可求得液體的重量為 26.9kgf。VTLCD 系統之設計參數如表 3.5 所示。

圖 3.30 與圖 3.31 分別為振動台輸入振幅為 3mm，地表簡諧波擾動頻率與結構頻率之比值  $\gamma_s = 1.0$  時(即地表簡諧波共振擾動時)，VTLCD 控制結構與未控制結構之位移與加速度歷時。由於未裝置 VTLCD 系統之結構於地表簡諧波共振擾動下，結構的位移將隨時間持續放大，為防止結構產生破壞，本試驗於 25 秒後便停止振動台輸入簡諧波擾動，隨後結構即產生自由振動反應；有裝置 VTLCD 系統之結構則持續輸入簡諧波擾動，擾動的時間為 40 秒。其結果顯示，三種孔口板( $\phi \geq 0.36$ )之試驗於共振擾動下均有良好的減振效果(70% 以上)，當開孔面積比為  $\phi = 1.0$  時，結構位移均方根與峰值之折減率

分別為 78 %與 83 % (表 3.6); 結構加速度均方根與峰值之折減率分別達 80 %與 84 %，減振效果十分良好。圖 3.32 為不同孔口板 VTLCD 於共振簡諧擾動之液體激盪位移歷時，最大激盪振幅約為 4.1 cm。

圖 3.33 與圖 3.34 分別為 VTLCD 控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。由圖可知，結構安裝 VTLCD 系統可有效降低結構主要頻率之振動反應。

圖 3.35 為不同孔口板之 VTLCD 遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 VTLCD 元件所消耗之系統振動能量(包括結構與 VTLCD 元件之振動能量)。

此外，為進行理論數值模擬分析，吾人首先識別 VTLCD 元件之水頭損失係數，識別前將波高計與微振加速規所量測之振動訊號進行濾波處理(2Hz 以上之反應濾掉)，以降低雜訊對於液體激盪位移微分後之速度與加速度的影響。圖 3.36 為  $\gamma_s = 1$  時，不同孔口板孔徑試驗經識別所得之 VTLCD 元件水頭損失係數歷時。其結果顯示，水頭損失係數收斂的情況良好，約在第 15 秒便能收斂並趨於穩定。表 3.7 為不同擾動頻率比與孔口板面積比試驗經識別分析所得之水頭損失係數。

圖 3.37、圖 3.38 及圖 3.39 分別為利用識別之水頭損失係數進行理論分析所得之結構位移、結構加速度及 VTLCD 水柱激盪位移與試驗結果之比較( $\gamma_s = 1.0$ )。其結果顯示，理論分析與試驗結果十分契合，驗證利用識別之水頭損失係數配合非線性解析模式可精確預測結構及 VTLCD 液體之振動反應。

表 3.8 為不同擾動頻率比與面積比試驗所得之水柱激盪位移峰

值。由表可知，當擾動頻率比位於共振頻率兩側時，VTLCD 系統之液體激盪位移最大(圖 3.40)，結構將移轉較多之振動能量至 VTLCD 元件。

表 3.9 與表 3.10 分別為不同擾動頻率比與面積比試驗所得之結構位移與加速度均方根折減；表 3.11 與表 3.12 則分別為不同擾動頻率比與面積比試驗所得之結構位移與加速度峰值之折減。上述之減振效益與頻率比之關係如圖 3.41 及 3.42 所示。由以上結果可知，當  $\gamma_s$  接近共振時，VTLCD 系統之減振效果最好，惟當  $\gamma_s < 0.75$  時，結構的反應則有放大的現象。

表 3.13 為不同水平段長度( $d=0.8\text{m}$ 與 $d=0.95\text{m}$ )性能試驗結果之比較。由表可知，當  $d=0.8\text{m}$ ， $\beta=0.45$ ， $\lambda=1.52$ 時[65]，孔口板面積比於  $\phi=0.64$ 之減振效果較佳，結構位移及加速度之均方根值與峰值折減率分別為76%、77%、81%及79%；當 $d=0.95\text{m}$ ， $\beta=0.54$ ， $\lambda=1.52$ 時，孔口板面積比於 $\phi=1.0$ 之減振效果最佳，結構位移及加速度之均方根值與峰值折減率分別為78%、80%、83%及84%，較文獻65之減振效果略微提昇。此外，本文之試驗結果亦可印證陳[65]之參數分析結果，當截面積比 $\lambda \geq 1.3$ 時，最佳長度比調整於 $\beta=0.5 \sim 0.7$ 之間(本文為 $\beta=0.54$ )，可達到較佳的減振效果。

綜合上述之 VTLCD 元件測試與性能測試所得之結果，吾人可歸納以下幾點結論：

1. 根據 VTLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率與元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示藉由調節液體之有效長度可

精確掌握 VTLCD 元件之動力特性。

2. 結構受到共振簡諧擾動作用時，三種孔口板開孔面積比 ( $\phi \geq 0.36$ ) 之 VTLCD 系統均有良好之減振效果。
3. VTLCD 於共振擾動時之減振效果較佳，惟當擾動頻率比  $\gamma_s \leq 0.75$  時則有放大的現象。
4. 本研究之試驗結果印證當截面積比  $\lambda \geq 1.3$  時(本文為  $\lambda=1.52$ )，最佳長度比調整於  $\beta=0.5 \sim 0.7$  之間(本文為  $\beta=0.54$ )，已可達到不錯之減振效果。
5. 元件測試與性能測試之理論分析與試驗結果均十分契合，充份驗證本文所提之解析模式的精確性。



## 第四章 氣密式調諧水柱消能系統之分析

### 4.1 氣密式 TLCD 系統之運動方程式

U 型等斷面氣密式調諧水柱消能系統之示意圖如圖 4.1 所示，其運動方程式推導之基本假設如下：

(a) 當氣密式 TLCD 基座受到水平擾動( $u_g$ )作用時，水柱激盪振幅為  $x_f$ ，由於任何時刻液面不得低於氣密式 TLCD 之水平段管徑， $D$ ，因此需滿足：

$$|x_f| \leq h_v - D \quad (4.1)$$



其中，

$h_v$ ：氣密式 TLCD 之垂直段靜水位高度；

$D$ ：氣密式 TLCD 之水平段管徑。

(b) 考慮流體(水)之不可壓縮性。

根據圖 4.1，吾人可推導氣密式 TLCD 系統之總動能， $T$ ，及總重力位能， $U$ ，如下：

$$T = \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 dx \\ + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 dx$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 (h_v - x_f) \\
&+ \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \\
&= \rho A \dot{x}_f^2 h_v + \rho A \dot{u}_g^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \tag{4.2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A g x dx + \int_0^d \rho A g \left( \frac{1}{2} D \right) dx \\
&= \frac{1}{2} \rho A g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g d D \\
&= \rho A g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A g d D \tag{4.3}
\end{aligned}$$

其中，



$\rho$ ：流體密度；

$g$ ：重力加速度；

$u_g$ ：基座水平擾動位移；

$A$ ：氣密式 TLCD U 型管之截面積；

$x_f$ ：氣密式 TLCD 之水位變化；

$d$ ：氣密式 TLCD 之水平段長度。

將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式如下：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_f} + \frac{\partial U}{\partial x_f} = Q \quad (4.4)$$

由於總動能僅為速度之函數，因此， $\frac{\partial T}{\partial x_f} = 0$ ，第一項及第三項則

可分別計算如下：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho Ah_v + \rho Ad)\ddot{x}_f + \rho Ad\ddot{u}_g \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho Agx_f \quad (4.6)$$

此外，系統之非保守力說明如下：

(1) 流體因落水頭損失所產生之阻尼力  $Q_1$  與流速的平方及流速的方向有關，可表示如下：

$$Q_1 = \begin{cases} -\frac{1}{2}\rho A\delta\dot{x}_f^2 & \dot{x}_f > 0 \\ \frac{1}{2}\rho A\delta\dot{x}_f^2 & \dot{x}_f < 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\text{或} \quad Q_1 = -\frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f \quad (4.8)$$

其中， $\delta$  為水頭損失係數

(2) 假設密閉氣室之氣體滿足波以耳定律 (Boyle's Law) 則

$$P_0V_0 = P_1(V_0 - Ax_f) = P_2(V_0 + Ax_f) \quad (4.9)$$

由式 (4.9) 可得：



$$P_1 = \frac{P_0 V_0}{V_0 - Ax_f} \quad (4.10)$$

$$P_2 = \frac{P_0 V_0}{V_0 + Ax_f} \quad (4.11)$$

其中，

$P_0$ ：未擾動前垂直管密閉氣室之氣壓；

$P_1, P_2$ ：分別為液面變化後兩垂直管密閉氣室之氣壓；

$V_0$ ：未擾動前垂直管密閉氣室之體積；

$x_f$ ：氣密式 TLCD 之水柱激盪位移。

兩密閉氣室因體積變化引致氣壓差所產生之力量為：

$$Q_2 = -(P_1 - P_2)A \quad (4.12)$$

將式 (4.10)、式 (4.11) 代入式 (4.12) 中，可得：

$$\begin{aligned} Q_2 &= -(P_1 - P_2)A \\ &= -\left( \frac{P_0 V_0}{V_0 - Ax_f} - \frac{P_0 V_0}{V_0 + Ax_f} \right) A \\ &= -P_0 A \left( \frac{1}{1 - \frac{A}{V_0} x_f} - \frac{1}{1 + \frac{A}{V_0} x_f} \right) \\ &= -P_0 A \left( \left( 1 - \frac{Ax_f}{V_0} \right)^{-1} - \left( 1 + \frac{Ax_f}{V_0} \right)^{-1} \right) \\ &= -P_0 A \left( 1 + \frac{Ax_f}{V_0} - 1 + \frac{Ax_f}{V_0} \right) \\ &= -\frac{2P_0 Ax_f}{h_0} \end{aligned} \quad (4.13)$$

其中， $h_0$  為未擾動前垂直管密閉氣室之高度。

因此，系統之非保守力可表示如下：

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 \\ &= -\frac{1}{2} \rho A d |\dot{x}_f| \dot{x}_f - \frac{2P_0 A x_f}{h_0} \end{aligned} \quad (4.14)$$

根據式(4.5)、式(4.6)與式(4.14)，可建立氣密式 TLCD 系統之運動方程式如下：

$$(2\rho A h_v + \rho A d) \ddot{x}_f + \frac{1}{2} \rho A d |\dot{x}_f| \dot{x}_f + (2\rho A g + \frac{2P_0 A}{h_0}) x_f = -\rho A d \ddot{u}_g \quad (4.15)$$

由式(4.15)之特徵分析可求得氣密式 TLCD 之自然頻率  $\omega$  (rad/sec) 為

$$\omega = \sqrt{\frac{2\rho A g + \frac{2P_0 A}{h_0}}{2\rho A h_v + \rho A d}} = \sqrt{\frac{2g + \frac{2P_0}{\rho h_0}}{2h_v + d}} \quad (4.16)$$

令  $L_e = 2h_v + d$ ，則式 (4.16) 可簡潔地表示為

$$\omega = \sqrt{\frac{2g + \frac{2P_0}{\rho h_0}}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (4.17)$$

或

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g + \frac{P_0}{\rho h_0}}{2L_e}} \quad (\text{Hz}) \quad (4.18)$$

其中， $L_e$  為液體之總長度（沿斷面中心線），或稱為有效長度。

氣密式 TLCD 的自然振動周期可根據式(4.18)計算如下：

$$T = \frac{1}{f} = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g + \frac{P_0}{\rho h_0}}} \quad (4.19)$$

綜上所述，氣密式 TLCD 系統之振動周期為液體有效長度與未擾動前密閉氣室壓力之函數，因此，可藉由調整密閉氣室之壓力來改變 TLCD 之自然振動周期。此外，氣密式 TLCD 系統因阻尼力與落水頭損失係數及液體流速的平方有關，使得氣密式 TLCD 系統為一非線性系統，吾人可利用 2.2 節之數學解析模式來求得氣密式 TLCD 系統之液體激盪及流速等振動反應。

## 4.2 結構安裝氣密式 TLCD 系統之運動方程式

本文考慮於一單自由度結構安裝氣密式 TLCD 系統進行減震控制，如圖 4.2 所示。當結構物之基礎與樓層分別受到水平地表擾動  $u_g$  與側向力  $f(t)$  作用時，樓層將產生一相對於地表之水平側向位移  $x_s$ ，氣密式 TLCD 系統則因結構振動而產生激盪位移  $x_f$  (仍須滿足液面不得低於氣密式 TLCD 水平段管徑  $D$  之限制，如式(4.1)所示)。氣密式 TLCD 控制結構之總動能， $T$ ，與總重力位能， $U$ ，可分別計算如下：

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx \\ &+ \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 (h_v - x_f) \\ &+ \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\ &= \rho A \dot{x}_f^2 h_v + \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \end{aligned}$$

(4.20)

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A g x dx + \int_0^d \rho A g \left( \frac{1}{2} D \right) dx + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \frac{1}{2} \rho A g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g d D + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \rho A g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A g d D + \frac{1}{2} k_s x_s^2
\end{aligned} \tag{4.21}$$

其中，

$x_s$ ：結構頂樓相對於地表之位移；

$m_s$ ：結構質量；

$k_s$ ：結構勁度。



將式(4.20)及式(4.21)帶入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho A h_v + \rho A d) \ddot{x}_f + \rho A d \ddot{x}_s + \rho A d \ddot{u}_g \tag{4.22}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) = \rho A d \ddot{x}_f + (2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{x}_s + (2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{u}_g \tag{4.23}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A g x_f \tag{4.24}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \tag{4.25}$$

此外，系統之非保守力包括：(1) 流體因落水頭損失所產生之阻

尼力及兩密閉氣室內體積變化引致氣壓差所造成之力量  $Q_1$ ；(2) 作用於結構之固有阻尼力及外力  $Q_2$ ，二者可分別表示如下：

$$Q_1 = -\frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f - \frac{2P_0Ax_f}{h_0} \quad (4.26)$$

$$Q_2 = -c_s\dot{x}_s + f(t) \quad (4.27)$$

其中， $c_s$  為結構之阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，式 (4.22)、式 (4.24) 及式 (4.26) 可整理如下：

$$(2\rho Ah_v + \rho Ad)\ddot{x}_f + \rho Ad\ddot{x}_s + \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f + (2\rho Ag + \frac{2P_0A}{h_0})x_f = -\rho Ad\ddot{u}_g \quad (4.28)$$

同理，式 (4.23)、式 (4.25) 及式 (4.27) 可整理如下：

$$\begin{aligned} & \rho Ad\ddot{x}_f + (2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s)\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_sx_s \\ & = -(2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s)\ddot{u}_g + f(t) \end{aligned} \quad (4.29)$$

若進一步將式(4.28)與式(4.29)表示成矩陣的型式，則吾人可得氣密式 TLCD 控制結構之運動方程式為：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 2\rho Ah_v + \rho Ad & \rho Ad \\ \rho Ad & 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 2\rho Ag + \frac{2P_0A}{h_0} & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho Ad \\ 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \end{aligned} \quad (4.30)$$

或將式(4.30)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\ddot{u}(t) + \mathbf{B}f(t) \quad (4.31)$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2\rho Ah_v + \rho Ad & \rho Ad \\ \rho Ad & 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix} \text{為系統之質量矩陣；}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \text{為系統之阻尼矩陣；}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2\rho Ag + \frac{2P_0A}{h_0} & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \text{為系統之勁度矩陣；}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho Ad \\ 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix} \text{為系統之地表擾動向量；}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{為系統之樓層側向力擾動向量。}$$



### 4.3 結構安裝氣密式 TLCD 系統之參數研究

本節將針對氣密式 TLCD 系統之參數變化對於結構減震效能之影響進行探討。分析時採用之結構周期為 0.7sec，其結構系統參數整理如表 4.1 所示。地表震波輸入分別採用 El Centro 地震及 Kobe 地震，其震波歷時圖與頻譜圖分別如圖 4.3 及圖 4.4 所示。進行參數分析時將探討氣密式 TLCD 系統之初始壓力 ( $P_0$ ) 及氣密式 TLCD 系統之長度比 (水平段長度與有效長度之比值) 對於減震效能之影響。

#### 4.3.1 氣密式 TLCD 之設計參數

令氣密式 TLCD 系統之振動頻率為  $f_l$ ，結構之振動頻率為  $f_s$ ，本研究將考慮氣密式 TLCD 系統之頻率比  $\gamma=1$ （即  $f_l/f_s=1$ ）之條件進行參數研究。此外，吾人設定氣密式 TLCD 系統之初始壓力  $P_0$  介於 0.3 atm ~ 1.8 atm 之間，並以 0.1 atm 為增量進行數值分析，氣密式 TLCD 系統之截面積比( $\lambda$ )設計為 1.0（等斷面）。氣密式 TLCD 系統之長度比（水平段長度與有效長度之比值）則考慮  $\beta=0.45、0.5、0.55、0.6$  及 0.65 等情況。由於氣密式 TLCD 系統的設計須滿足液面激盪振幅( $h_v=(L_e-d)/2$ )小於水平段管徑高度的限制( $h_v \geq D_h$ )，吾人可由  $W_l=(2h_v A_v+dA_h)\rho$  求出滿足上述條件之氣密式 TLCD 系統，如表 4.2 所示。氣密式 TLCD 系統之水頭損失係數( $\delta$ )則考慮  $\delta$  為 1、5、10、15 及 20 等情況進行分析。



#### 4.3.2 分析結果

##### El Centro 地震 (PGA=0.33g)

圖 4.5 及圖 4.6 分別為水平段長度比  $\beta=0.65$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，初始壓力變化與氣密式 TLCD 控制結構之位移及加速度均方根值折減關係圖。由結果可知，當初始壓力  $P_0=0.3$  atm 時，結構位移及加速度均方根之折減效果最佳，隨著初始壓力  $P_0$  增加到 1.1 atm 時，其結構位移及加速度均方根之折減則呈現遞減的趨勢，而在  $1.1 \text{ atm} \leq P_0 \leq 1.8 \text{ atm}$  時，結構位移及加速度均方根之折減則又逐漸呈現遞增的趨勢。

圖 4.7 及圖 4.8 分別為初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及截面積比  $\gamma=1.0$  之條

件下，水平段長度比與氣密式 TLCD 控制結構之位移及加速度均方根值折減關係圖。由結果可知，水平段長度比愈大，結構位移及加速度均方根值折減效果愈好。

表 4.3 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及水平段長度比  $\beta=0.65$  時，氣密式 TLCD 控制結構之結構反應均方根值及峰值折減率，結構位移及加速度之均方根值與峰值之折減率分別為 40 %、43 %、8 % 及 10 %。

圖 4.9 及圖 4.10 分別為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.65$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度歷時。其結果顯示，氣密式 TLCD 系統於 El Centro 地震波擾動之控制效果良好。

圖 4.11 及圖 4.12 分別為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.65$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。其結果顯示，氣密式 TLCD 系統可有效抑制結構主要振頻之振動反應。

圖 4.13 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.65$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖，其中，水柱激盪位移峰值約可達到 30 cm。圖 4.14 為氣密式 TLCD 系統之遲滯迴圈，其面積即為氣密式 TLCD 系統消散之振動能量。

Kobe 地震 (PGA=0.33g)

圖 4.15 及圖 4.16 分別為水平段長度比  $\beta=0.6$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，初始壓力變化與氣密式 TLCD 控制結構之位移及加速度均



方根值折減關係圖。由結果可知，當初始壓力  $P_0=0.3$  atm 時，結構位移及加速度均方根之折減效果最佳，隨著初始壓力  $P_0$  增加到 1.0 atm 時，其結構位移及加速度均方根之折減則呈現遞減的趨勢，而在  $1.0 \text{ atm} \leq P_0 \leq 1.8 \text{ atm}$  時，結構位移及加速度均方根之折減則又逐漸呈現遞增的趨勢。

圖 4.17 及圖 4.18 分別為初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，水平段長度比與氣密式 TLCD 系統控制之位移及加速度均方根折減關係圖。由結果可知，水平段長度比愈大，結構位移及加速度均方根值折減效果愈好。

表 4.4 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及水平段長度比  $\beta=0.6$  時，氣密式 TLCD 系統之結構反應均方根值及峰值折減率，結構位移及加速度之均方根值與峰值之折減率分別為 30%、34%、28% 及 31%。

圖 4.19 及圖 4.20 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.6$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度歷時比較。其結果顯示，氣密式 TLCD 系統於 Kobe 地震波擾動下之控制效果良好。

圖 4.21 及圖 4.22 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.6$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜比較。其結果顯示，氣密式 TLCD 系統可有效抑制結構主要振頻之振動反應。

圖 4.23 為初始壓力  $P_0=0.3$  atm、水平段長度比  $\beta=0.6$  及截面積比  $\gamma=1.0$  之條件下，氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖，其中，水柱激盪位移峰值約可達到 45 cm。圖 4.24 為氣密式 TLCD 系統之遲

滯迴圈，其面積即為氣密式 TLCD 系統消散之振動能量。

綜合上述氣密式 TLCD 系統之參數研究分析結果，吾人可歸納以下幾點結論：

1. 結構受地震力作用時，在相同質量比與孔口板開孔面積比之下，水平段長度比  $\beta$  愈長，結構位移及加速度均方根之折減效果愈好。

2. 在初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及  $\beta=0.65$  之條件下，結構受到 El Centro 地震擾動之最佳結構位移及加速度均方根折減率可達 40% 及 43%；在初始壓力  $P_0=0.3$  atm 及  $\beta=0.60$  之條件下，結構受到 Kobe 地震擾動之最佳結構位移及加速度均方根折減率分別為 30% 及 34%。

整體而言，氣密式 TLCD 系統應用於結構防震具有減震效果。

3. 對於中低樓層之結構而言，其振動頻率較高，若採用開放式 TLCD 之設計方式，其液體之有效長度較短，減震效能有限，除非設置為數眾多之 TLCD 系統。反之，氣密式 TLCD 系統可藉由調整密閉室內之初始壓力，進而延長水平段之長度，且振動周期亦可與中低樓層結構之周期一致。因此，氣密式 TLCD 系統可考慮應用於結構防震，可再深入進行相關參數研究(例如氣密式 TLCD 之振動頻率與結構自然振動頻率之比值對於減震效果之影響)。

## 第五章 台北 101 大樓應用 TLCD 系統之抗風減振性能評估

### 5.1 台北 101 大樓之結構設計

台北 101 金融大樓主要包括地下 5 層及地上 101 層，總高度為 508m，上部結構為鋼骨構造，地下結構為 RC-SRC，最大樓板面積約為 267000m<sup>2</sup>，大樓採用巨型結構(mega structure)系統，該巨型結構乃由八根巨型柱所組成，而邊柱則由 16 根巨柱所構成，其立面圖與平面圖如圖 5.1 所示。

由於超高層大樓之結構周期較長，因此其結構設計往往由風力控制而非地震力，風力雖不至於造成結構體太大之應力與層間位移，惟其所引起的振動加速度卻會導致舒適度的問題。早期之高樓設計主要以位移量作為設計檢核標準，惟舒適度與加速度反應較為相關，因此我國規範亦規定半年回歸期之風力作用下，頂樓加速度不得大於 5 cm/s<sup>2</sup> 之上限值。一般而言，超高大樓設計之層間位移角仍以千分之五上限值，以不危害到次要結構為準則。由於台北 101 大樓之細長比大，第一振態周期長達 7 sec (第一振態頻率  $f_s=0.14$  Hz)，於半年回歸期風力作用下，其加速度達 6.2 cm/s<sup>2</sup> (無颱風)或 7.4 cm/s<sup>2</sup>(有颱風)，已超過規範容許值 5 cm/s<sup>2</sup>，故為滿足舒適度之設計要求而加裝抗風控制元件，如單擺式 TMD 系統[67]。

### 5.2 風力作用模式

高層建築受風力作用時，其振動分為順風向 ( along-wind

response) 與橫風向反應 (across-wind response) 兩種型式。順風向反應為紊流風場逼近流 (approach flow) 於結構物迎風面形成之正壓力與背風面之負壓力，共同合成拖曳力而產生結構振動的現象。橫風向反應的成因分別為渦流逸散 (vortex shedding) 與氣動力效應 (aerodynamic effect)，當風流經高層建築時，會在其左右兩側形成分離剪力層，並產生漩渦交互作用於結構物側面，此現象即為渦流逸散，會造成結構周期性之振動。當渦流逸散頻率與結構自然頻率接近時，渦流逸散頻率不再隨平均風速的增加而遞增，其值會固定在結構自然頻率，此現象稱為鎖定 (lock-in)，鎖定會產生共振效應而使結構振動加劇[68][69]。

作用於高層建築的風力可分解如圖 5.2 所示之順風向與橫風向兩個分量，其分別平行及垂直於風向。順風向及橫風向風力常分別使用 Davenport 與 Ohkuma & Kanaya 風力頻譜加以描述。

### 順風向風力

順風向風力由紊流風場逼近流所形成，Davenport[70]提出如下所示之高層建築第  $i$ 、 $j$  層順風向單邊 (one-sided) 風力交互頻譜 (cross spectrum) 如下所示：

$$S_{F_D}(\omega) = \frac{8\bar{\omega}_i\bar{\omega}_j K_0 \bar{U}_{10}^2}{\bar{U}_i \bar{U}_j |\omega|} \frac{(600\omega / \pi \bar{U}_{10})^2}{[1 + (600\omega / \pi \bar{U}_{10})^2]^{4/3}} \exp\left[-\frac{C_z |\omega| |h_i - h_j|}{\pi (\bar{U}_i + \bar{U}_j)}\right] \quad (5.1)$$

其中，

$S_{F_D}(\omega)$ ：Davenport 風力頻譜；

$h_i$ ：第  $i$  層樓之高程；

$\bar{U}_i$ ：第  $i$  層樓之平均風速；

$\bar{\omega}_i$ ：第  $i$  層樓之平均風力；

$\bar{U}_{10}$ ：距離地表 10 m 處之平均風速；

$K_0$ ：地表粗糙係數；

$C_z$ ：指數衰減係數。

式中指數項乃描述兩層樓間風力之相關性函數 (coherence function)。

假設平均風速為冪律分佈 (power law distribution)，亦即：

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad ; \quad 0 \leq z \leq Z_g \quad (5.2)$$

其中，

$\bar{U}(z)$ ：高度  $Z$  處之平均風速 (m/sec)；

$\bar{U}_{10}$ ：距地 10 公尺高之平均風速 (m/sec)；

$\alpha$ ：與地況種類有關之常數 (詳表 5.1)；

$Z_g$ ：梯度高 (m)，與地況種類有關 (詳表 5.1)。

依照建築物風力規範條文，解說及示範例之研訂[71]內容可知，地況種類與建築物所在位置及其附近之地表特性有關，可分為以下四種：

- (1) 地況 A：大城市市中心區，至少有 50% 之建築物高度大於 20 公尺者。建築物迎風向之前方至少 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍 (兩者取大值) 係屬此種條件下，才可使用地況 A。
- (2) 地況 B：大城市市郊，小市鎮或有許多像民舍高度，或較民舍為高之障礙物分佈其間之地區者。建築物迎風向之前方至少

500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍（兩者取大值）係屬此種條件下，方可使用地況 B。

- (3) 地況 C：平坦開闊之地面或草原，其分散之障礙物高度小於 10 公尺者。
- (4) 地況 D：平坦無障礙物之海岸或湖岸地區，風係由水面吹過來的方向才適用。距海岸線 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍（兩者取大值）才適用此地況。

因順風向氣動力效應甚小，可予以忽略，故第  $i$  層樓順風向平均風力可以下式表示：

$$\bar{\omega}_i = 0.5 \rho_a A_i C_D \bar{U}_i^2 \quad (5.3)$$

其中， $\rho_a$  為空氣密度； $A_i$  為第  $i$  層樓之迎風面面積； $C_D$  則為阻力係數（drag coefficient）。



### 橫風向風力

Ohkuma & Kanaya[72]提出如下所示之高層建築第  $i$ 、 $j$  層樓橫風向單邊風力交互頻譜：

$$S_{F_L}(\omega) = \frac{8B_w \sigma_{F_i} \sigma_{F_j}}{\omega} \frac{(\eta_i \eta_j / S_i^2)}{[1 - (\eta_i \eta_j / S_i^2)]^2 + 4B_w^2 (\eta_i \eta_j / S_i^2)} \exp\left[-\frac{C_z |\omega|}{\pi} \frac{|h_i - h_j|}{(\bar{U}_i + \bar{U}_j)}\right] \quad (5.4)$$

其中：

$S_{F_L}(\omega)$ ：Ohkuma & Kanaya 風力頻譜；

$\eta_i = \omega B_i / 2\pi \bar{U}_i$  ， 其中  $B_i$  為第  $i$  層樓之迎風面寬度；

$\sigma_{F_i}$ ：第  $i$  層樓之橫風向擾動力均方根值；

$h^*$ ：結構之高寬比；

$S_i = 0.135 - 0.069 \exp(-0.056h^*)$ ，為矩形建築物的史徹荷數；

$B_w = 0.6 \exp(-0.3h^*)$ ，為帶寬係數。

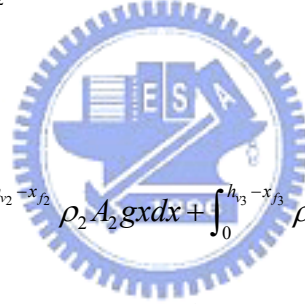
### 5.3 結構安裝等斷面 TLCD 系統之運動方程式(含扭轉效應)

當結構受到一偏心風力作用時，結構除了會產生水平振動外，亦會引起扭轉振動反應。因此本文將考慮一單自由度系統（取 101 大樓之水平及扭轉基本模態進行模擬）受到一偏心風力作用時，利用 TLCD 系統同時針對水平及扭轉振動反應進行控制，如圖 5.3 所示。吾人可將兩組 TLCD 系統之自然振動頻率分別調成與結構之水平及扭轉振動頻率一致，如此即可達到抗風減振之目的。當結構物的基礎與樓層分別受到水平地表擾動  $u_g$  與側向風力  $f_x(t)$  作用時，樓層將產生一相對於地表之  $x$  向水平位移  $x_{sx}$  與扭轉位移  $\theta$ ，TLCD 系統則因結構振動而產生激盪位移  $x_f$  (仍須滿足液面不得低於 TLCD 水平段管徑  $D$  之限制： $|x_f| \leq h_v - D$ )。TLCD 控制結構之總動能， $T$ ，與總重力位能， $U$ ，可分別計算如下：

$$T = \int_{x_{f1}}^{h_1} \frac{1}{2} \rho_1 A_1 (\dot{x}_{f1})^2 dx + \int_{x_{f2}}^{h_2} \frac{1}{2} \rho_2 A_2 (\dot{x}_{f2} + e_{T1} \dot{\theta})^2 dx + \int_{x_{f3}}^{h_3} \frac{1}{2} \rho_3 A_3 (\dot{x}_{f3} + e_{T2} \dot{\theta})^2 dx$$

$$+ \int_{-x_{f1}}^{h_1} \frac{1}{2} \rho_1 A_1 (\dot{x}_{f1})^2 dx + \int_{-x_{f2}}^{h_2} \frac{1}{2} \rho_2 A_2 (\dot{x}_{f2} + e_{T1} \dot{\theta})^2 dx + \int_{-x_{f3}}^{h_3} \frac{1}{2} \rho_3 A_3 (\dot{x}_{f3} + e_{T2} \dot{\theta})^2 dx$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{x_{f1}}^{h_1} \frac{1}{2} \rho_1 A_1 (\dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_{x_{f2}}^{h_2} \frac{1}{2} \rho_2 A_2 (\dot{x}_{sx} + e_{T_1} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_{x_{f3}}^{h_3} \frac{1}{2} \rho_3 A_3 (\dot{x}_{sx} + e_{T_2} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx \\
& + \int_{-x_{f1}}^{h_1} \frac{1}{2} \rho_1 A_1 (\dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_{-x_{f2}}^{h_2} \frac{1}{2} \rho_2 A_2 (\dot{x}_{sx} + e_{T_1} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_{-x_{f3}}^{h_3} \frac{1}{2} \rho_3 A_3 (\dot{x}_{sx} + e_{T_2} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx \\
& + \int_0^{d_1} \frac{1}{2} \rho_1 A_1 (\dot{x}_{f_1} + \dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^{d_2} \frac{1}{2} \rho_2 A_2 (\dot{x}_{f_2} + \dot{x}_{sx} + e_{T_1} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^{d_3} \frac{1}{2} \rho_3 A_3 (\dot{x}_{f_3} + \dot{x}_{sx} + e_{T_2} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 dx \\
& + \frac{1}{2} m_{sx} (\dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_{s\theta} \dot{\theta}^2 \\
& = \rho_1 A_1 (\dot{x}_{f_1})^2 h_{v_1} + \rho_2 A_2 (\dot{x}_{f_2} + e_{T_1} \dot{\theta})^2 h_{v_2} + \rho_3 A_3 (\dot{x}_{f_3} + e_{T_2} \dot{\theta})^2 h_{v_3} \\
& + \rho_1 A_1 (\dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 h_{v_1} + \rho_2 A_2 (\dot{x}_{sx} + e_{T_1} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 h_{v_2} + \rho_3 A_3 (\dot{x}_{sx} + e_{T_2} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 h_{v_3} \\
& + \frac{1}{2} \rho_1 A_1 d_1 (\dot{x}_{f_1} + \dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} \rho_2 A_2 d_2 (\dot{x}_{f_2} + \dot{x}_{sx} + e_{T_1} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} \rho_3 A_3 d_3 (\dot{x}_{f_3} + \dot{x}_{sx} + e_{T_2} \dot{\theta} + \dot{u}_g)^2 \\
& + \frac{1}{2} m_{sx} (\dot{x}_{sx} + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_{s\theta} \dot{\theta}^2 \tag{5.5}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
U & = \int_0^{h_1 - x_{f1}} \rho_1 A_1 g x dx + \int_0^{h_2 - x_{f2}} \rho_2 A_2 g x dx + \int_0^{h_3 - x_{f3}} \rho_3 A_3 g x dx \\
& + \int_0^{h_1 + x_{f1}} \rho_1 A_1 g x dx + \int_0^{h_2 + x_{f2}} \rho_2 A_2 g x dx + \int_0^{h_3 + x_{f3}} \rho_3 A_3 g x dx \\
& + \int_0^{d_1} \rho_1 A_1 g \left( \frac{1}{2} D_1 \right) dx + \int_0^{d_2} \rho_2 A_2 g \left( \frac{1}{2} D_2 \right) dx + \int_0^{d_3} \rho_3 A_3 g \left( \frac{1}{2} D_3 \right) dx \\
& + \frac{1}{2} k_{sx} x_{sx}^2 + \frac{1}{2} k_{s\theta} \theta^2 \\
& = \rho_1 A_1 g (h_{v_1}^2 + x_{f_1}^2) + \rho_2 A_2 g (h_{v_2}^2 + x_{f_2}^2) + \rho_3 A_3 g (h_{v_3}^2 + x_{f_3}^2) \\
& + \frac{1}{2} \rho_1 A_1 g D_1 d_1 + \frac{1}{2} \rho_2 A_2 g D_2 d_2 + \frac{1}{2} \rho_3 A_3 g D_3 d_3 + \frac{1}{2} k_{sx} x_{sx}^2 + \frac{1}{2} k_{s\theta} \theta^2 \tag{5.6}
\end{aligned}$$

其中，

$x_{sx}$ ：結構頂樓相對於地表之 x 向位移；



$\theta$  : 結構頂樓相對於地表之扭轉向位移 ;

$m_{sx}$  : x 向之結構質量 ;

$m_{s\theta}$  : 扭轉向之轉動慣量 ;

$k_{sx}$  : x 向之結構勁度 ;

$k_{s\theta}$  : 扭轉向之結構勁度 ;

$e_{r_1}$  : Y 軸正向 TLCD 之偏心距離 ;

$e_{r_2}$  : Y 軸負向 TLCD 之偏心距離 ;

$e_y$  : 風力之偏心距離 ;

$x_{f_1}$  : 中心位置 TLCD 之水位變化 ;

$x_{f_2}$  : Y 軸正向 TLCD 之水位變化 ;

$x_{f_3}$  : Y 軸負向 TLCD 之水位變化 ;

$A_1$  : 中心位置 TLCD 之 U 型管截面積 ;

$A_2$  : Y 軸正向 TLCD 之 U 型管截面積 ;

$A_3$  : Y 軸負向 TLCD 之 U 型管截面積 ;

$d_1$  : 中心位置 TLCD 之水平段長度 ;



$d_2$  : Y 軸正向 TLCD 之水平段長度；

$d_3$  : Y 軸負向 TLCD 之水平段長度；

將式 (5.5) 及式 (5.6) 代入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{f_1}} \right) = (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1) \ddot{x}_{f_1} + \rho_1 A_1 d_1 \ddot{x}_{sx} + \rho_1 A_1 d_1 \ddot{u}_g \quad (5.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{f_2}} \right) = (2\rho_2 A_2 h_{v_2} + \rho_2 A_2 d_2) \ddot{x}_{f_2} + \rho_2 A_2 d_2 \ddot{x}_{sx} + (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) \ddot{\theta} + \rho_2 A_2 d_2 \ddot{u}_g \quad (5.8)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{f_3}} \right) = (2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_3 A_3 d_3) \ddot{x}_{f_3} + \rho_3 A_3 d_3 \ddot{x}_{sx} + (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{\theta} + \rho_3 A_3 d_3 \ddot{u}_g \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{sx}} \right) &= \rho_1 A_1 d_1 \ddot{x}_{f_1} + \rho_2 A_2 d_2 \ddot{x}_{f_2} + \rho_3 A_3 d_3 \ddot{x}_{f_3} \\ &+ (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \ddot{x}_{sx} \\ &+ (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{\theta} \\ &+ (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) &= (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) \ddot{x}_{f_2} + (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{x}_{f_3} \\ &+ (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{x}_{sx} \\ &+ (4\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1}^2 + 4\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2}^2 + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}^2 + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}^2 + m_{s\theta}) \ddot{\theta} \end{aligned}$$

$$+(2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{u}_g \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{f_1}} = 2\rho_1 A_1 g x_{f_1} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{f_2}} = 2\rho_2 A_2 g x_{f_2} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{f_3}} = 2\rho_3 A_3 g x_{f_3} \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{sx}} = k_{sx} x_{sx} \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = k_{s\theta} \theta \quad (5.16)$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失所產生之阻尼力  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  與作用於結構之固有阻尼力及外力  $Q_4$ 、 $Q_5$ ，可分別表示如下：

$$Q_1 = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta \dot{x}_{f_1}^2 & \dot{x}_{f_1} > 0 \\ \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta \dot{x}_{f_1}^2 & \dot{x}_{f_1} < 0 \end{cases}$$

或

$$Q_1 = -\frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| \dot{x}_{f_1} \quad (5.17)$$

同理：

$$Q_2 = -\frac{1}{2} \rho_2 A_2 \delta |\dot{x}_{f_2}| \dot{x}_{f_2} \quad (5.18)$$

$$Q_3 = -\frac{1}{2} \rho_3 A_3 \delta |\dot{x}_{f_3}| \dot{x}_{f_3} \quad (5.19)$$

$$Q_4 = -c_{sx} \dot{x}_{sx} + f_x(t) \quad (5.20)$$

$$Q_5 = -c_{s\theta}\dot{\theta} + f_x(t)e_y \quad (5.21)$$

其中， $c_{sx}$  為 x 向之結構阻尼係數； $c_{s\theta}$  為扭轉向之結構阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，吾人可分別求得 TLCD 系統之液體激盪方程式、結構水平振動方程式及結構扭轉振動方程式如下：

$$(2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1)\ddot{x}_{f_1} + \rho_1 A_1 d_1 \ddot{x}_{sx} + \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| \dot{x}_{f_1} + 2\rho_1 A_1 g x_{f_1} = -\rho_1 A_1 d_1 \ddot{u}_g \quad (5.22)$$

$$(2\rho_2 A_2 h_{v_2} + \rho_2 A_2 d_2)\ddot{x}_{f_2} + \rho_2 A_2 d_2 \ddot{x}_{sx} + (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1})\ddot{\theta} + \frac{1}{2} \rho_2 A_2 \delta |\dot{x}_{f_2}| \dot{x}_{f_2} + 2\rho_2 A_2 g x_{f_2} = -\rho_2 A_2 d_2 \ddot{u}_g \quad (5.23)$$

$$(2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_3 A_3 d_3)\ddot{x}_{f_3} + \rho_3 A_3 d_3 \ddot{x}_{sx} + (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2})\ddot{\theta} + \frac{1}{2} \rho_3 A_3 \delta |\dot{x}_{f_3}| \dot{x}_{f_3} + 2\rho_3 A_3 g x_{f_3} = -\rho_3 A_3 d_3 \ddot{u}_g \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 A_1 d_1 \ddot{x}_{f_1} + \rho_2 A_2 d_2 \ddot{x}_{f_2} + \rho_3 A_3 d_3 \ddot{x}_{f_3} \\ & + (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \ddot{x}_{sx} \\ & + (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{\theta} + c_{sx} \dot{x}_{sx} + k_{sx} x_{sx} \\ & = -(2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \ddot{u}_g + f_x(t) \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned}
& (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) \ddot{x}_{f_2} + (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{x}_{f_3} \\
& + (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{x}_{sx} \\
& + (4\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1}^2 + 4\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2}^2 + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}^2 + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}^2 + m_{s\theta}) \ddot{\theta} + c_{s\theta} \dot{\theta} + k_{s\theta} \theta \\
& = -(2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \ddot{u}_g + f_\theta(t)
\end{aligned} \tag{5.26}$$

若進一步將式(5.22)、式(5.23)、式(5.24)、式(5.25)與式(5.26)表示成矩陣的型式，則吾人可得 TLCD 控制結構之運動方程式為：

$$\begin{bmatrix}
(2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1) & 0 & 0 & \rho_1 A_1 d_1 & 0 \\
0 & (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1) & 0 & \rho_2 A_2 d_2 & (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) \\
0 & 0 & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_3 A_3 d_3) & \rho_3 A_3 d_3 & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \\
\rho_1 A_1 d_1 & \rho_2 A_2 d_2 & \rho_3 A_3 d_3 & \begin{pmatrix} 2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} \\ +\rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 \\ +m_{sx} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} \\ +\rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2} \end{pmatrix} \\
0 & (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) & \begin{pmatrix} 2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} \\ +\rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 4\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1}^2 + 4\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2}^2 \\ +\rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}^2 + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}^2 \\ +m_{s\theta} \end{pmatrix}
\end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{f_1} \\ \dot{x}_{f_2} \\ \dot{x}_{f_3} \\ \dot{x}_{sx} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix}
\frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{2} \rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & c_{sx} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & c_{s\theta}
\end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{f_1} \\ \dot{x}_{f_2} \\ \dot{x}_{f_3} \\ \dot{x}_{sx} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 2\rho_1 A_1 g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\rho_2 A_2 g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\rho_3 A_3 g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{s\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{f_1} \\ x_{f_2} \\ x_{f_3} \\ x_{sx} \\ \theta \end{Bmatrix} \\
& = - \begin{bmatrix} \rho_1 A_1 d_1 \\ \rho_2 A_2 d_2 \\ \rho_3 A_3 d_3 \\ (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \\ (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \end{bmatrix} \ddot{u}_g \\
& + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_x(t) \\ f_x(t)e_y \end{bmatrix} \tag{5.27}
\end{aligned}$$

或將式(5.27)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}_x(t) + \mathbf{D}\mathbf{f}_\theta(t) \tag{5.28}$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1) & 0 & 0 & \rho_1 A_1 d_1 & 0 \\ 0 & (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + \rho_1 A_1 d_1) & 0 & \rho_2 A_2 d_2 & (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) \\ 0 & 0 & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_3 A_3 d_3) & \rho_3 A_3 d_3 & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \\ \rho_1 A_1 d_1 & \rho_2 A_2 d_2 & \rho_3 A_3 d_3 & \begin{pmatrix} 2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} \\ + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 \\ + m_{sx} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} \\ + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2} \end{pmatrix} \\ 0 & (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}) & (2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) & \begin{pmatrix} 2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} \\ + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 4\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1}^2 + 4\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2}^2 \\ + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1}^2 + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}^2 \\ + m_{s\theta} \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

為系統之質量矩陣；

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\rho_1 A_1 \delta |\dot{x}_{f_1}| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{s\theta} \end{bmatrix}$$

為系統之阻尼矩陣；

$$K = \begin{bmatrix} 2\rho_1 A_1 g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\rho_2 A_2 g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\rho_3 A_3 g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{s\theta} \end{bmatrix}$$

為系統之勁度矩陣；

$$E = \begin{bmatrix} \rho_1 A_1 d_1 \\ \rho_2 A_2 d_2 \\ \rho_3 A_3 d_3 \\ (2\rho_1 A_1 h_{v_1} + 2\rho_2 A_2 h_{v_2} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} + \rho_1 A_1 d_1 + \rho_2 A_2 d_2 + \rho_3 A_3 d_3 + m_{sx}) \\ (2\rho_2 A_2 h_{v_2} e_{T_1} + 2\rho_3 A_3 h_{v_3} e_{T_2} + \rho_2 A_2 d_2 e_{T_1} + \rho_3 A_3 d_3 e_{T_2}) \end{bmatrix}$$

為系統之地表擾動向量；

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

為系統樓層 x 向之側向風力擾動向量；

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 為系統樓層扭轉向之擾動力向量。}$$

## 5.4 台北 101 大樓安裝 TLCD 系統之參數研究

本節將針對結構於順向風力擾動下，探討風力擾動偏心距 ( $e_y$ ) 及 TLCD 距離形心位置 ( $e_r$ ) 對於 TLCD 減振效能之影響。

### 5.4.1 TLCD 設計參數

台北 101 大樓之結構系統參數整理如表 5.2 所示。本研究將考慮 TLCD 系統之頻率比  $\gamma=1$  之設計條件進行分析。由於台北 101 大樓之第一振態頻率為 0.14Hz (X 向)，第三振態頻率為 0.21Hz (扭轉向)，因此由式(2.17)可知，控制水平振動之 TLCD (中心位置) 有效長度為  $L_e=24.5$  m；控制扭轉振動之 TLCD (Y 軸正向及負向) 有效長度為  $L_e=11.4$  m。TLCD 系統之尺寸設計整理如表 5.3 所示。此外，吾人設定偏心距  $e_y=1.0$  m、1.5 m 及 2.0 m 等情況進行分析，而 TLCD 距離形心位置則為  $e_r=3$  m 至 21 m 之間，並以 3 m 為增量進行數值模擬分析。TLCD 系統之截面積比( $\lambda$ )設計為 1.0 (等斷面 TLCD)。

### 5.4.2 分析結果

圖 5.4 及圖 5.5 分別為作用於結構樓層之順向風力擾動歷時及其



富氏頻譜，其結果顯示，隨機擾動風力最大為 120 ton，且其頻率內涵主要分佈於 1 Hz 以內。

圖 5.6 及圖 5.7 分別為風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置與 TLCD 系統扭轉向之結構角位移及角加速度均方根值折減關係圖。其結果顯示，風力擾動偏心距 ( $e_y$ ) 愈大 (即扭轉擾動力愈大)，TLCD 系統對於結構扭轉加速度反應之減振效果愈好，且隨著 TLCD 距離形心 ( $e_r$ ) 愈遠，TLCD 對於結構扭轉反應之減振效果則有增加的趨勢。圖 5.8 及圖 5.9 為風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置與 TLCD 系統 X 向之結構位移及加速度反應之均方根值折減關係圖。其結果顯示，風力擾動偏心距愈大，TLCD 系統對於 X 向之減振效果愈好 (即控制扭轉向之 TLCD 對於 X 向亦有減振貢獻)，惟隨著 TLCD 距離形心愈遠，TLCD 對於結構 X 向反應之減振效果影響不大。由於改變擾動偏心距僅會增加扭轉擾動外力，對於 X 向擾動力則完全無影響，故本分析之結果合理。

表 5.4 與表 5.5 分別為扭轉向及 X 向於在  $e_r = 21$  m 的條件下，TLCD 系統之結構反應均方根值折減率。其結果顯示，扭轉向結構角位移與角加速度之均方根值及峰值折減率分別為 64 %、66 %、65 % 及 66 %；X 向結構位移與加速度之均方根值及峰值折減率分別為 26 %、29 %、29 % 及 43 %。

圖 5.10 及圖 5.11 為  $e_y = 2$  m 及  $e_r = 21$  m 之條件下，結構扭轉向控制與未控制結構之角位移及角加速度歷時比較；圖 5.12 及圖 5.13 為  $e_y = 2$  m 及  $e_r = 21$  m 之條件下，結構 X 向控制與未控制結構之位移及加速度歷時比較。其結果顯示，TLCD 系統對於結構之扭轉振動

具有良好之減振效果。圖 5.14 為中心位置 TLCD 之水柱激盪位移歷時圖，水柱激盪位移峰值可達 25 cm。圖 5.15 及圖 5.16 分別為 Y 軸正向及負向 TLCD 之水柱激盪位移歷時圖，其水柱激盪位移峰值分別為 4 cm 及 5 cm。

本節探討 TLCD 系統應用於台北 101 大樓受扭轉擾動作用之抗風減振性能評估，綜合上述之分析結果，吾人歸納以下幾點結論：

1. 風力擾動偏心距 ( $e_y$ ) 愈大，TLCD 系統對於結構扭轉反應之減振效果愈好，且隨著 TLCD 距離形心 ( $e_T$ ) 愈遠，TLCD 對於結構扭轉反應之減振效果則有增加的趨勢。
2. 風力擾動偏心距愈大，TLCD 系統對於 X 向之減振效果愈好，惟隨著 TLCD 距離形心愈遠，TLCD 對於結構 X 向反應之減振效果影響不大。
3. 於  $e_y = 2 \text{ m}$ ， $e_T = 21 \text{ m}$  之條件下，X 向結構位移及加速度之峰值折減率分別為 29% 及 43%。因此 TLCD 系統可降低結構之加速度至  $4.1 \text{ cm/s}^2 < 5 \text{ cm/s}^2$  (未加裝 TLCD 系統，結構物加速度為  $7.1 \text{ cm/s}^2$ )，滿足我國規範規定半年回歸期之風力作用下，頂樓加速度不得大於  $5 \text{ cm/s}^2$  之上限值。

## 第六章 結論與建議

本文除了針對變斷面 VTLCD 系統進行理論分析與參數研究外，並實際製作一組 VTLCD 模型進行元件測試及 VTLCD 系統之結構減振性能測試(振動台試驗)，俾便充份掌握 VTLCD 元件之設計參數及評估其減振效益。此外，吾人亦針對氣密式 TLCD 系統應用於結構防震的可行性進行模擬分析，探討密閉氣室之初始壓力對於結構減震效能的影響。本文最後則以世界第一高樓「台北 101 大樓」進行 TLCD 系統之抗風減振性能評估分析，同時考慮結構水平向及扭轉向之振動控制。根據本文所進行之理論模擬分析與試驗驗證之結果，吾人歸納幾點結論與建議如下：

- 1、 根據 VTLCD 系統之液體有效長度估算公式所得之理論振動頻率與 VTLCD 元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示以有效長度計算變斷面 VTLCD 系統之振動頻率相當精確可靠，吾人可藉由調節液體的有效長度充份掌握 VTLCD 元件之動力特性。
- 2、 結構共振簡諧擾動試驗之結果顯示，本案所進行之三種不同孔口板開孔面積比之 VTLCD 設計( $\phi=1.0$ 、 $\phi=0.64$  及  $\phi=0.36$ )均有良好的減振效果，且由 VTLCD 系統之性能測試可知，本案採用長度比  $\beta=0.54$  之設計已具有十分良好之減振效果。
- 3、 簡諧波擾動試驗之結果顯示，擾動頻率與結構頻率之比值

$\gamma_s = 1.0$  時，VTLCD 系統(自然振動頻率與結構之頻率比為 1.0)之減振效果最佳，惟擾動頻率比  $\gamma_s \leq 0.75$  時，VTLCD 系統之結構振動反應則有放大的現象。

- 4、 本文根據系統識別分析所得之水頭損失係數進行非線性數值模擬分析與試驗之結果相當契合，驗證本文所提非線性理論分析模式之合理性及精確性。
- 5、 氣密式 TLCD 系統可藉由調整密閉室內之初始壓力進而延長水平段之長度(增加系統的質量)，使得其振動周期可與中低樓層結構之周期一致。此外，結構安裝氣密式 TLCD 系統(自然振動頻率與結構之頻率比為 1.0)具有減震效果，於相同質量比及孔口板開孔面積比之下，水平段長度比  $\beta$  愈長，結構位移及加速度均方根之折減效果愈好。
- 6、 TLCD 系統可有效降低台北 101 大樓之水平向及扭轉向之振動反應，當風力擾動偏心距( $e_y$ )愈大，TLCD 系統對於結構扭轉反應之減振效果愈好，且隨著 TLCD 配置距離形心( $e_T$ )愈遠，TLCD 之減振效果則有增加的趨勢。
- 7、 本文之分析結果為 VTLCD 系統與結構之頻率比設定為 1.0 之條件下所得，未來可將 VTLCD 系統與結構之頻率比亦作為參數進行分析，俾便求得 VTLCD 或 TLCD 系統之最佳設計參數，尤其是氣密式 TLCD 系統應用於結構防震之分析，因地震的頻率內涵較為寬廣，VTLCD 系統與結構之頻率比亦可能影響減震的效果。
- 8、 未來可針對氣密式 TLCD 系統應用於中高樓層之減震進行

相關深入研究，並評估進行試驗驗證的可行性(壓力計的規格、加壓設備的選用、氣密室 TLCD 試體之製作等)。

- 9、 台北 101 大樓應用 TLCD 系統進行抗風減振之模擬分析僅考慮順風向之風力作用，未來可將橫風向風力亦納入分析模型，以期更詳實模擬結構受雙向風力作用之減振效益評估。



## 参考文献

1. G.W. Housner, et. al., (1997), "Special Issue, Structural Control : Past, Present, and Future.," Eng. Mech., Vol. 123, No.9.
2. Farzad Naeim and James M. Kelly, (1999) "Design of Seismic Isolated Structure From Theory to Practice", John Wiley & Sons, Inc., New York.
3. Buckle, I.G., and Mayes, R.L., "Seismic isolation: history, application and performance-a world review," Earthquake Spectra, Vol. 6, pp. 161-201 (1990).
4. Martelli, A., Parducci, A., and Forni, M., "State-of-the-art on development and application of seismic isolation and innovative seismic design techniques in Italy," ATC-17-1 Technical Papers on Seismic Isolation, pp. 401-402 (1993).
5. Kelly, J.M., "Aseismic base isolation: review and bibliography," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 202-216 (1986).
6. Soong, T.T. and Spencer Jr B.F.(2002), "Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice," Eng. Struct., Vol. 24, pp. 243-259.
7. Soong, T.T. and Dargush, G.F. "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley and Sons Inc., New York, 1997.
8. Frahm, H., "Device for Damping Vibration of Bodies," U.S. Patent No. 958-989, 1911.
9. Rana, Rahul., and Soong, T. T.(1998), "Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers," Engineering Structures, Vol.20, No.3, pp193-204.

10. Zayas, V.A., Low, S.S., and Main, S.A., "The FPS earthquake resisting system, experimental report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California (1987).
11. Mokha, A.S., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M., "Experimental study and analytical prediction of earthquake response of a sliding isolation system with a spherical surface," Report No. NCEER-90-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, N.Y. (1990).
12. Mokha, A.S., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., and Zayas, V.A., "Experimental study of friction pendulum isolation system," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 4, pp. 1201-1217 (1991).
13. Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kim, Y.S., and Okamoto, S., "NCEER-Taisei coporation research program on sliding seismic isolation system for bridges and analytical study of a friction pendulum system (FPS)," Report No NCEER-93-0020, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY (1993).
14. Wang, Yen-Po, Chung, Lap-Loi and Liao, Wei-Hsin(1998), "Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1069-1093.
15. Wang, Y.P., Chung. L.L, Teng, M.C, Lee, C.L. (1998), "Experimental Study of Seismic Structural Isolation using Sliding Bearings," 2WCSC, Kyoto, Japan, pp.83-92.
16. Wang, Yen-Po, and Wei-Hsin Liao (2000), 'Dynamic Analysis of Sliding Structures with Unsynchronized Support Motions',

- Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, pp. 297-313.
17. Yen-Po Wang, Min-C. Teng and Chien-Liang Lee (2000), "Dynamic Analysis and Shaking Table Tests of Structures Isolated by Friction Pendulum Bearings", Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Vol.12, No.2, pp.301-310 (in Chinese).
  18. 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.
  19. 王彥博(2004) , 「降伏式金屬制震板之建築防震應用」 , 海峽兩岸結構抗風減震工程實務研討會 , 台灣新竹 , 第 120~146 頁。
  20. Soong, T.T. " Active Structural Control: Theory and Practice " , John Wiley and Sons Inc., New York, 1990.
  21. Soong, T.T., Masri, S.F. and Housner, G.W.(1991), "An Overview of Active Structural Control under Seismic Loads," Earthquake Spectra, Vol. 7, No. 3, pp. 483-505.
  22. Soong, T.T.(1988),"State-of-the-art-review: Active Structural Control on Civil Engineering," Eng. Struct., Vol. 10, April, pp. 74-84.
  23. Reinhorn. A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Riley, M.A. Wang, Y.P., Aizawa,S. and Higashino, M. (1992), "Active Bracing System: A Full Scale Implementation of Active Control," Technical Report, NCEER-92-0020, NCEER/SUNY/Buffalo.
  24. Reinhorn. A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Wang, Y.P., Fukao, Y., Abe, H. and Nakai, M. (1989)," 1:4 Scaled Model Studies of Active Tendon Systems and Active Mass Dampers for Aseismic Protection, "Technical Report, NCEER-89-0026, NCEER/SUNY/Buffalo.
  25. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikeda Y.



- (1991), "Seismic-Response-Controlled Structure with Active Mass Driver System. Part 1: Design," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 20, pp.133-149.
26. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikeda Y. (1991), "Seismic-Response-Controlled Structure with Active Mass Driver System. Part 2: Verification," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, pp.151-166.
27. Chien-Liang Lee and Wang, Yen-Po (2004), "Seismic Structural Control Using an Electric Servomotor Active Mass Driver System," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33 (6), pp. 737-754.
28. Michael D. Symans and Michael C. Constantinou (1999), "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 469-487.
29. McNamara, R.J. (1977), "Tuned mass dampers for buildings", *Journal of the Structure Division, ASCE*, Vol.103, No.ST9, pp.1985-1988.
30. Luft, R. W. (1979), "Optimal tuned mass dampers for buildings", *Journal of the Structure Division, ASCE*, Vol.105, No.ST12, pp.1985-1988.
31. Saoka, Y., Sakai, F., Takaeda, S., Tamaki, T. (1988). "On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers." Annual Meeting of JSCE, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
32. Sakai, F. *et al.* (1989), "Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations," *Proc. Int. Conf. on High Rise Buildings, Nanjing, China, March 25-27.*
33. Caughey, T.K. (1963). "Equivalent linearization techniques." *Journal Acoustical Society of America*, 35(11), 1706-1711.

34. Wen, Y.K. (1980). "Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation." *Journal of Appl. Mech.*, 47, 150-154.
35. Xu, Y.L, Samali, B. and Kwok, K.C.S. (1992), "Control of Along-wind Response of Structures by Mass and Liquid Dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, 118(1), 20-39.
36. Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D. and Samali, B. (1997), "Characteristics of Liquid column vibration absorbers (LCVA) -I and II", *Engineering Structures*, 19(2).
37. Balendra, T., Wang, C.M. and Cheong, H.F. (1995) "Effectiveness of Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Towers", *Engineering Structures*, 17(9), 668-675.
38. Gao, H., Kwok, K.C.S. and Samali, B. (1997), "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers", *Engineering Structures*, 19, 476-486.
39. Chang, C.C. and Hsu, C.T. (1999), "Control performance of Liquid column vibration absorber," *Engineering Structures*, 20(7), 580-586.
40. Xue, S.D., Ko, J.M. and Xu, Y.L. (2000), "Tuned Liquid Column Damper for suppressing pitching motion of structures," *Engineering Structures*, 23, 1538-1551.
41. Won, A.Y.J., Pires, J.A. and Haroun, M.A. (1996) "Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers", *Earthquake Engng & Structural Dynamics*, 25, 1259-1274.
42. Sadek, F., Mohraz, B. and Lew, H.S. (1998) "Single- and Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," *Earthquake Engng. and Struc. Dyn.*, 27, 439-463.
43. K. M. Shum and Y. L. Xu (2002) "Multiple-tuned liquid column dampers for torsional vibration control of structures: experimental investigation," *Earthquake Engng Struct. Dyn.* , 31, 977-991
44. Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. (2001c), "Semi-Active

- Tuned Liquid Column Dampers for vibration control of structures,”  
Engineering Structures (in press).
45. Chen Y.H. and Ko C.H (2003), “Active tuned liquid column damper with propellers.” Earthquake Engng Struct. Dyn. , 32, 1627-1638.
  46. Irwin, P. and Breukelman, B “Recent Applications of Damping Systems for Wind Response.” RWDI Inc.
  47. Lopez-Almansa, F., Barbat, A. H., and Rodellar, J.(1988), “SSP Algorithm for Linear and Non-linear Dynamic Response Simulation,” Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, 2687-2706.
  48. 鍾立來、王彥博、楊創盛(1996)，「結構動力數值分析之穩定性及精確性」，中華民國結構工程學會，結構工程，第十一卷，第四期，第 55~66 頁。
  49. Ljung, Lennart. (1987) “System Identification: Theory for the Users“, Prentice Hall PTR, New Jersey.
  50. 王彥博、卓建全(1996)，「推測適應過濾法在系統識別之應用」，中華民國第三屆結構工程研討會論文集，墾丁，第 2023~2032 頁。
  51. 卓建全(1996) ，「非線性結構系統識別之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
  52. 閻石、林蓓、白克偉(1999)，「高層建築利用特殊水箱的減振性能」，瀋陽建築工程學院學報，第 15 卷，第 3 期。
  53. 殷永煒、閻石、楊金賢(1999)，「調頻液體柱型阻尼器振動控制

參數的再研究」，瀋陽建築工程學院學報，第 15 卷，第 4 期。

54. Sakai, F., and Takaeda. S. (1991), "Tuned Liquid Column Damper (TLCD) for cable stayed bridges," Innovation in Cable-stayed Bridges, Fukonova, Japan.
55. Sadek, F., Mohraz, B. and Lew, H.S. (1998) "Single- and Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," Earthquake Engng. and Struc. Dyn., 27, 439-463.
56. Chang, P.M., Lou, J.Y.K. and Lutes, L.D. (1997), "Model Identification and Control of a tuned liquid damper," Engineering Structures.
57. Kareem, A. (1993), "Liquid Tuned Mass Dampers: Past, Present and Future," Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Wind Engineering, Vol. I, Los Angeles.
58. Wu, Jong-Shyong, Hsieh, Mang(2002),"Study on the dynamic characteristic of a U-type tuned liquid damper," Ocean Engineering ,29, 689-709.
59. Yalla, S.K and Kareem, A. (2000a) "Optimum Absorber Parameters for Tuned Liquid Column Dampers ," ASCE Journal of Structural Engineering, 125(8), 906-915.
60. Yalla S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. (1998), "Semi-Active Control Strategies for Tuned Liquid Column Dampers to Reduce Wind and Seismic Response of Structures," 2nd World Conference on Structural Control, Kyoto, John Wiley and Sons, 559-568.
61. Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C. (2000b), "Semi-Active Variable Damping Tuned Liquid Column Dampers," Proc. of the 7th SPIE Conf. on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA.
62. Breukelman, B., Irwin, P., Gamble, S. and Stone, G. (1998), "The practical application of vibration absorbers in controlling wind

- serviceability and fatigue problems,”Proceedings of Structural engineers World Congress, San Francisco, July.
63. Gao, H., Kwok, K.C.S. and Samali, B. (1999),“Charcteristics of multiple Tuned Liquid Column Dampers in suppressing Structural Vibration,” Engineering Structures, 21,316-331.
64. C.C. CHANG and W.L.QU (1998) “Unified Dynamic Absorber Design Formulas for Wind-Induced Vibration Control Tall Buildings
65. 沈瑛璋 (2004),「受風下調頻液柱阻尼器之最佳參數設計」, 淡江大學土木工程學系碩士班碩士論文。
66. 陳連杰 (2005),「高樓抗風 TLCD 系統之分析與試驗」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
67. 吳賴雲、鍾立來、陳家乾、黃國倫(2004), 「台北 101 結構風力振動之控制模擬」, 海峽兩岸結構抗風減震工程實務研討會論文集, 第 259~273 頁。
68. 林偉傑 (2003),「高層建築風力與結構側向及扭轉向反應之互制效應研究」, 淡江大學土木工程學系碩士班碩士論文。
69. 林世陞 (2000),「高樓結構裝設調和液柱阻尼器減振效應之風洞實驗研究」, 國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
70. Davenport, A.G., “Vibration of Structures Induced by Wind”, Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, Inc., New York, USA (1976)
71. 蔡益超、陳瑞華、項維邦 (1996), 「建築物風力規範條文、解說及示範例之研訂」, 內政部建築研究所專題研究計畫成果報告,

台北，台灣。

72. Ohkuma, T. and Kanaya, A., “On the Correlation between the Shape of Rectangular Cylinders and Characteristics of Fluctuating Lifts on Them”, Proceedings of 5<sup>th</sup> Symposium on Wind Effects on Structures, Tokyo, Japan, pp.147-154 (1978)(in Japanese)



表 3.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數 (元件測試)

物理量	大小
設計頻率 $f$ (Hz)	0.5
有效長度 $L_e$ (m)	1.99
水面垂直高度 $h_v$ (m)	0.39
水平段長度比 $\beta$	0.48
VTLCD 管徑 $D_h$ (m)	0.124
截面積 $A_h$ ( $m^2$ )	0.0121
截面積比 $\lambda = \frac{A_v}{A_h}$	1.52

表 3.2 鋁材之材料性質

物理量	大小
楊氏模數	70 GPa
剪力模數	26 GPa
降伏應力 $\sigma_y$	270 MPa
密度	2700 kg/m <sup>3</sup>
斷面尺寸	25mm×25mm×2mm
斷面積	1.840 cm <sup>2</sup>
慣性矩	1.635 cm <sup>4</sup>

表 3.3 加速規之規格(亦可量測速度)

Model		731A
		Power unit/Amplifier
Frequency Range	Acceleration	0.1~450Hz(3dB deviation)
	Velocity	1.5~150Hz(3dB deviation)
Dynamic Range	Acceleration	± 0.5g
	Velocity	± 50in/sec
Sensitivity	Acceleration	10 , 100 , 1000V/g
	Velocity	0.1 , 1 , 10V/(in/sec)
Noise	0.1~10Hz	1.0 μ g (Peak to Peak)
	10~450Hz	0.2 μ g rms



表 3.4 結構系統識別之結構動力特性參數 El Centro(PGA=0.15g)

	結構 阻尼比%	結構阻尼 (kgf*sec/m)	結構勁度 (kgf/m)	結構頻率 (Hz)
VTLCD	0.1	0.17	280.8	0.53



表 3.5 變斷面 VTLCD 元件之設計參數 (性能測試)

物理量	大小
設計頻率 $f$ (Hz)	0.53
有效長度 $L_e$ (m)	1.77
水面垂直高度 $h_v$ (m)	0.28
水平段長度比 $\beta$	0.54
VTLCD 管徑 $D_h$ (m)	0.124
截面積 $A_h$ (m <sup>2</sup> )	0.0121
截面積比 $\lambda = \frac{A_v}{A_h}$	1.52

表 3.6 不同孔口板 VTLCD 之減振效益  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 25 秒)

孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$	結構位移均方根值折減 (%)	結構加速度均方根值折減 (%)	結構位移峰值折減 (%)	結構加速度峰值折減 (%)
1.00	78	80	83	84
0.64	74	76	78	81
0.36	70	72	77	78

表 3.7 不同擾動頻率比與開孔面積試驗經識別所得之水頭損失係數  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

擾動頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	7.40	14.11	6.78
0.75	28.94	28.08	46.24
0.94	7.64	10.63	24.57
1.00	7.97	10.51	23.97
1.13	4.75	7.73	23.68
1.32	6.78	12.14	28.12
1.51	2.89	11.60	16.49
1.70	2.95	2.89	2.43
	水頭損失係數 $\delta$		

表 3.8 不同擾動頻率比與面積比試驗所得之水柱激盪位移峰值  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

簡諧波擾動頻率 與結構之頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	1.4	1.2	0.9
0.75	1.8	1.6	1.4
0.94	6.8	6.3	5.1
1.00	4.8	4.1	3.7
1.13	5.9	4.4	2.5
1.32	2.2	1.5	1.5
1.51	2.0	1.0	1.1
1.70	1.5	1.2	1.6
	最大水柱激盪位移 (cm)		

表 3.9 不同擾動頻率比與面積比試驗所得之結構位移均方根值折減  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

簡諧波擾動頻率 與結構之頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	-71	-77	-69
0.75	-62	-72	-61
0.94	41	43	41
1.00	78	74	70
1.13	34	35	54
1.32	38	40	45
1.51	56	53	56
1.70	63	65	66
	結構位移均方根值折減 (%)		

表 3.10 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構加速度均方根值折減  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

簡諧波擾動頻率 與結構之頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	33	25	39
0.75	1	-7	4
0.94	50	51	49
1.00	80	76	72
1.13	19	21	44
1.32	2	4	10
1.51	9	9	12
1.70	12	15	16
	結構加速度均方根值折減 (%)		

表 3.11 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構位移峰值折減  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

簡諧波擾動頻率 與結構之頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	-29	-42	-28
0.75	-48	-58	-36
0.94	44	45	50
1.00	83	78	77
1.13	46	46	63
1.32	30	38	50
1.51	52	43	44
1.70	50	61	54
	結構位移峰值折減 (%)		

表 3.12 不同擾動頻率與面積比試驗所得之結構加速度峰值折減  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

簡諧波擾動頻率 與結構之頻率比 $\gamma_s$	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 $\phi$		
	1.00	0.64	0.36
0.57	30	25	37
0.75	1	-8	13
0.94	53	45	57
1.00	84	81	78
1.13	35	37	56
1.32	2	11	26
1.51	20	16	17
1.70	21	28	33
	結構加速度峰值折減 (%)		

表 3.13 不同水平段長度(d=0.8m 與 d=0.95m)性能試驗結果之比較

(簡諧擾動，擾動振幅 3mm)

孔口板 開口面積 比 $\phi$	變斷面 VTLCD (d=0.8m)				變斷面 VTLCD (d=0.95m)			
	$\beta=0.47$				$\beta=0.54$			
	結構位移 均方根 折減(%)	結構加速 度均方根 折減(%)	結構位移 峰值折減 (%)	結構加速 度峰值 折減(%)	結構位移 均方根 折減(%)	結構加速 度均方根 折減(%)	結構位移 峰值折減 (%)	結構加速 度峰值 折減(%)
1.0	74	76	79	78	78	80	83	84
0.64	76	77	81	79	74	76	78	81
0.36	71	71	77	75	70	71	77	78



表 4.1 結構系統參數

參數	數值 (單位)
結構質量	53.7 (ton-sec <sup>2</sup> /m)
結構阻尼	20.3 (ton-sec/m)
結構勁度	4771.5 (ton/m)
結構週期	0.7 (sec)
結構頻率	1.5 (Hz)



表 4.2 氣密式 TLCD 系統之參數設計

初始壓力 $P_0$ (atm)	有效長度 $L_e$ (m)	靜水位高度 $h_v$ (m)	管徑截面積比 $\lambda$	水平段 長度比 $\beta$	水平段長度 $d$ (m)	質量比 $\alpha$ (%)
0.3	7.07	1.93	1	0.45	3.2	0.0202
0.3	7.07	1.73	1	0.5	3.6	0.0202
0.3	7.07	1.53	1	0.55	4.0	0.0202
0.3	7.07	1.38	1	0.6	4.3	0.0202
0.3	7.07	1.23	1	0.65	4.6	0.0202
0.4	9.35	2.37	1	0.65	4.6	0.0268
0.5	11.63	3.52	1	0.65	4.6	0.0333
0.6	13.91	4.66	1	0.65	4.6	0.0398
0.7	16.20	5.80	1	0.65	4.6	0.0436
0.8	18.48	6.94	1	0.65	4.6	0.0529
0.9	20.76	8.08	1	0.65	4.6	0.0594
1.0	23.04	9.22	1	0.65	4.6	0.0659
1.1	25.33	10.36	1	0.65	4.6	0.0725
1.2	27.61	11.50	1	0.65	4.6	0.0790
1.3	29.89	12.64	1	0.65	4.6	0.0855
1.4	32.17	13.79	1	0.65	4.6	0.0921
1.5	34.45	14.93	1	0.65	4.6	0.0986
1.6	36.74	16.07	1	0.65	4.6	0.1051
1.7	39.02	17.21	1	0.65	4.6	0.1117
1.8	41.30	18.35	1	0.65	4.6	0.1182

表 4.3 氣密式 TLCD 系統最佳設計參數與結構反應折減率

(El Centro 地震力擾動， $P_0=0.3$  atm， $\beta=0.65$ )

初始壓力 $P_0$ (atm)	水平段長度 比 $\beta$	水平段長度 $d$ (m)	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)	結構位移 峰值折減 (%)	結構加速度 峰值折減 (%)
0.3	0.65	4.6	40	43	8	10

表 4.4 氣密式 TLCD 系統最佳設計參數與結構反應折減率

(Kobe 地震力擾動， $P_0=0.3 \text{ atm}$ ， $\beta=0.6$ )

初始壓力 $P_0$ (atm)	水平段長度 比 $\beta$	水平段長度 d(m)	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)	結構位移 峰值折減 (%)	結構加速度 峰值折減 (%)
0.3	0.6	4.3	30	34	28	31



表 5.1 各種地況種類之  $\alpha$  與  $Z_g$  值

地況種類	$\alpha$	$Z_g$ (m)
A	0.36	500
B	0.25	400
C	0.15	300
D	0.11	233

表 5.2 台北 101 大樓之結構系統參數

參數	第一振態 (X 方向)	第三振態 (扭轉方向)
結構質量	5371.7 (ton-sec <sup>2</sup> /m)	2998900 (ton-sec <sup>2</sup> /rad)
結構阻尼	192.38 (ton-sec/m)	157000 (ton-sec/rad)
結構勁度	4306.3 (ton/m)	5136900 (ton/rad)
結構頻率	0.14 (Hz)	0.21 (Hz)

表 5.3 TLCD 之尺寸設計

參數	TLCD (中心位置)	TLCD (Y 軸正向及負向)
水平段長度	14.5 (m)	8.0 (m)
垂直段靜水位高度	5.0 (m)	1.7 (m)
水平段管直徑	4.5 (m)	3.0 (m)
TLCD 頻率	0.14 (Hz)	0.21 (Hz)

表 5.4 TLCD 系統之結構反應均方根值折減率

(扭轉向,  $e_T=21$  m, 滿足水柱激盪位移限制)

偏心距 $e_y$ (m)	TLCD 距離 形心位置 $e_T$ (m)	結構角位移 均方根折減 (%)	結構角加速度 均方根折減 (%)	結構角位移 峰值折減 (%)	結構角加速度 峰值折減 (%)
1.0	21	62	56	57	54
1.5	21	64	64	62	63
2.0	21	64	66	65	66

表 5.5 TLCD 系統之結構反應均方根值折減率

(X 方向,  $e_T=21$  m, 滿足水柱激盪位移限制)

偏心距 $e_y$ (m)	TLCD 距離 形心位置 $e_T$ (m)	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減(%)	結構位移 峰值折減 (%)	結構加速度 峰值折減 (%)
1.0	21	23	27	28	38
1.5	21	24	28	28	41
2.0	21	26	29	29	43

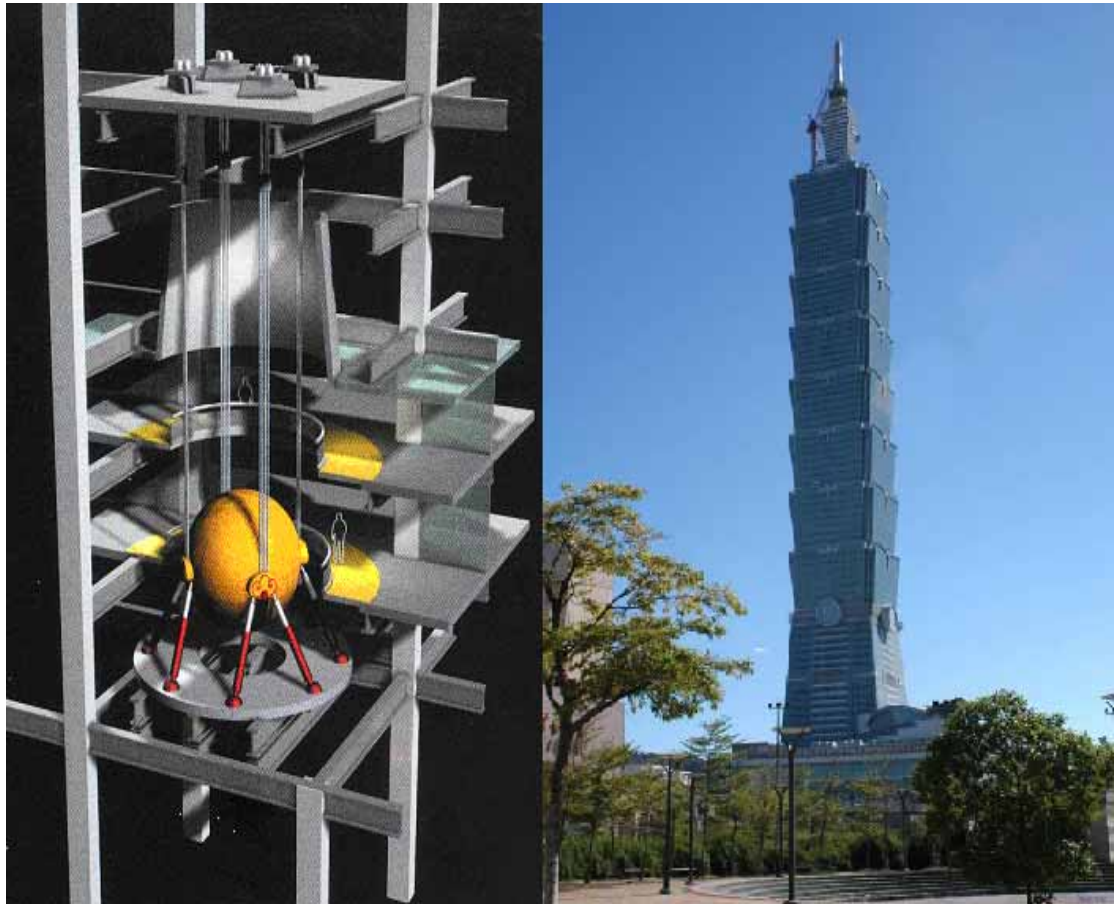


圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統

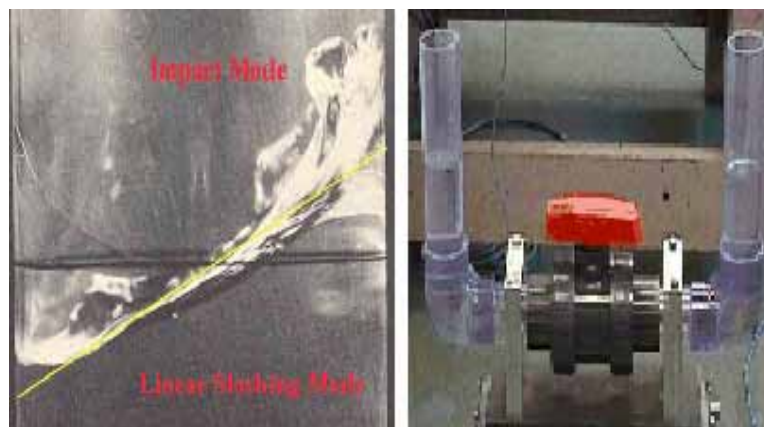


圖 1.2 不同型式之調諧液態消能系統

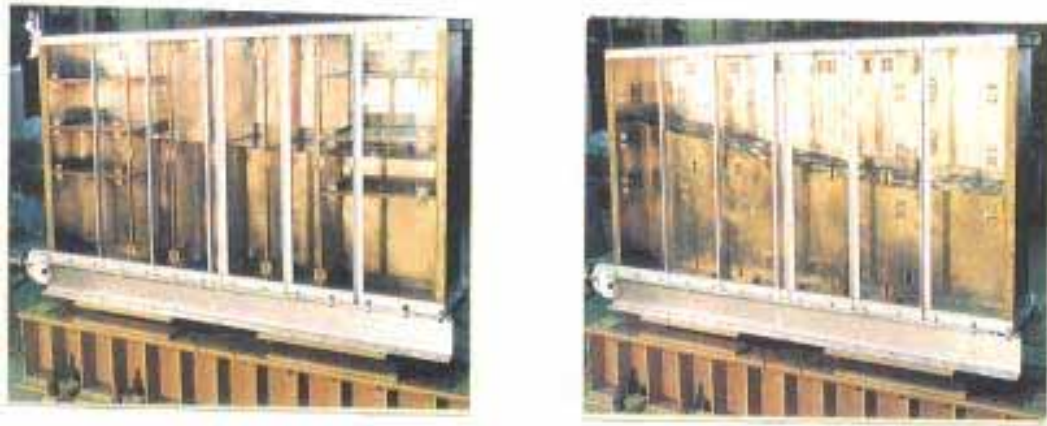


圖 1.3 Aqua Damper(Tuned Slushing Water Damper)

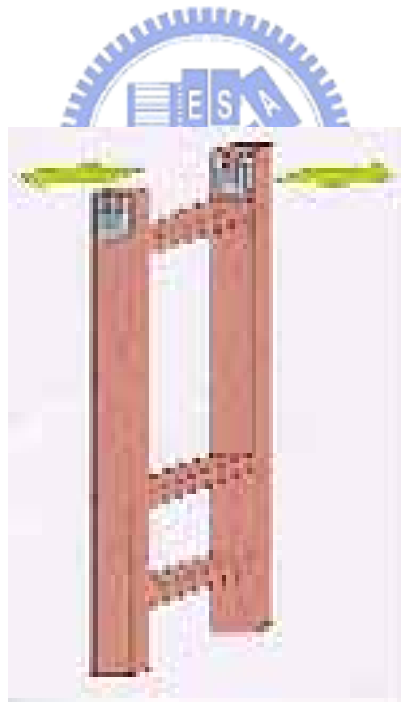


圖 1.4 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用

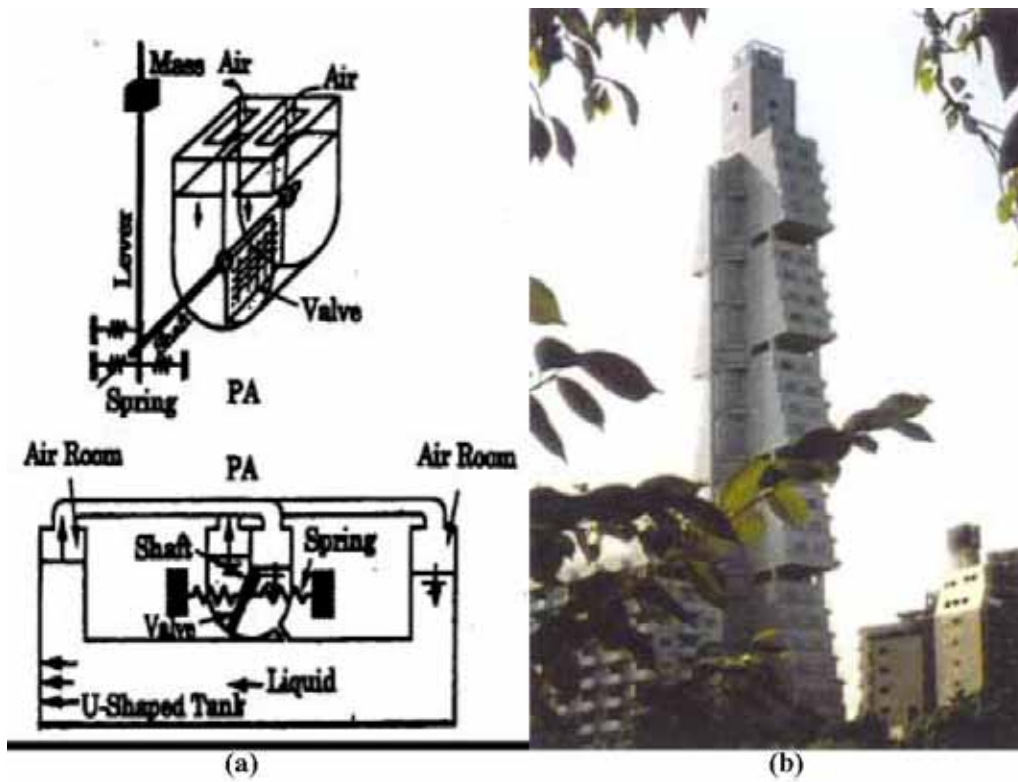


圖 1.5 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用

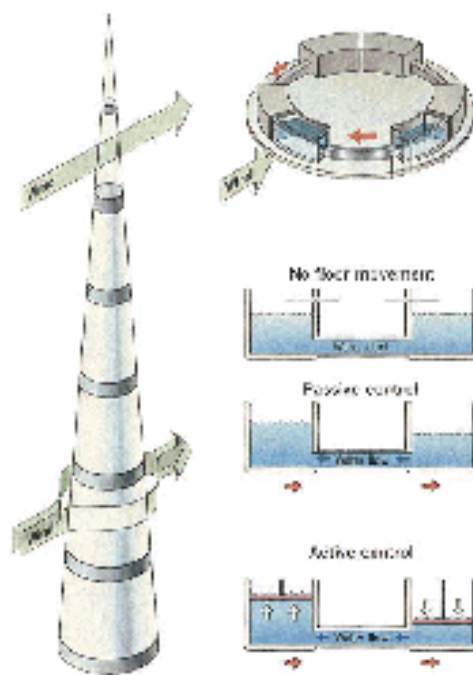


圖 1.6 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用



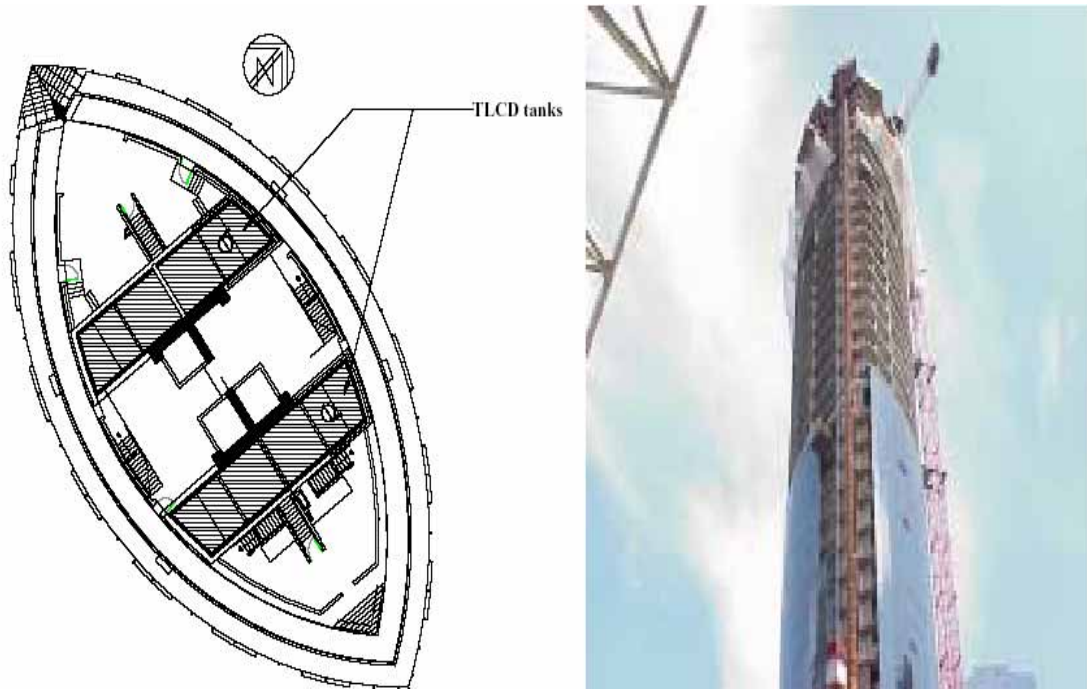


圖 1.7 TLCD 系統於加拿大 Wall center 之減振應用

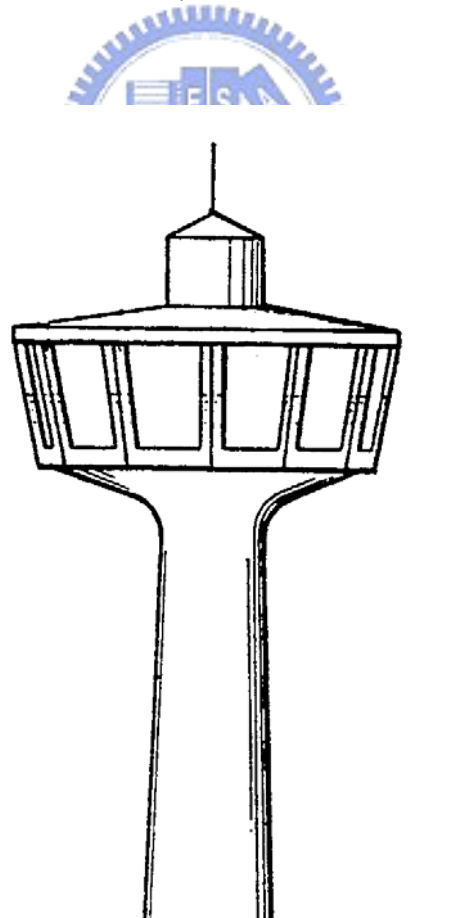


圖 1.8 TLCD 系統於高塔之減振應用

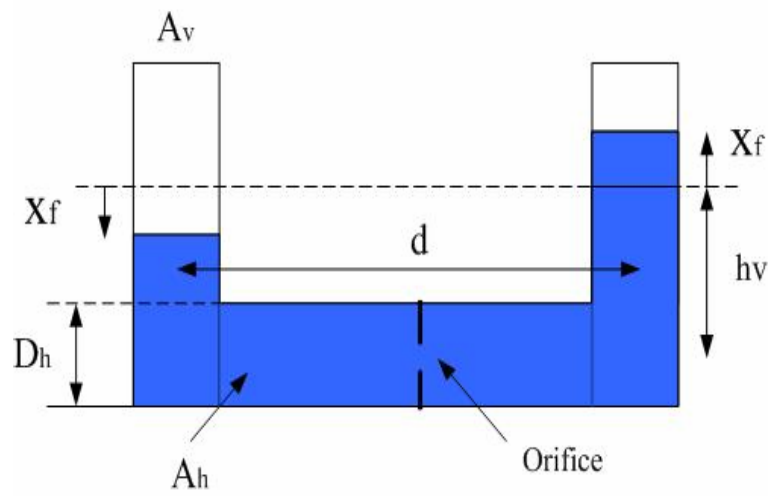


圖 2.1 變斷面 VTLCD 之示意圖

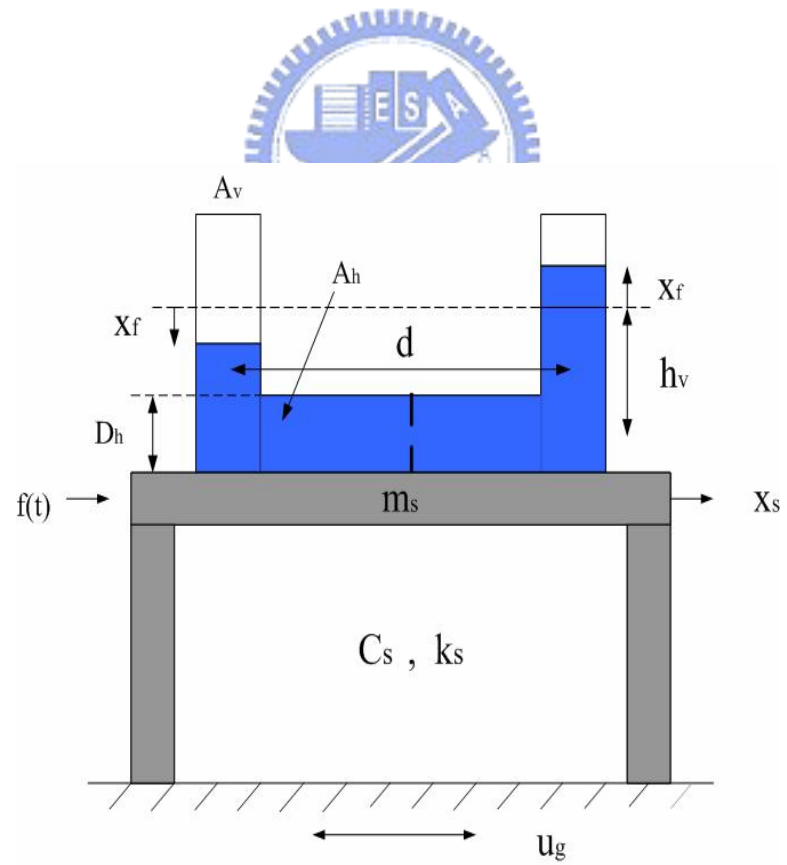


圖 2.2 單自由度結構裝置變斷面 VTLCD 之示意圖

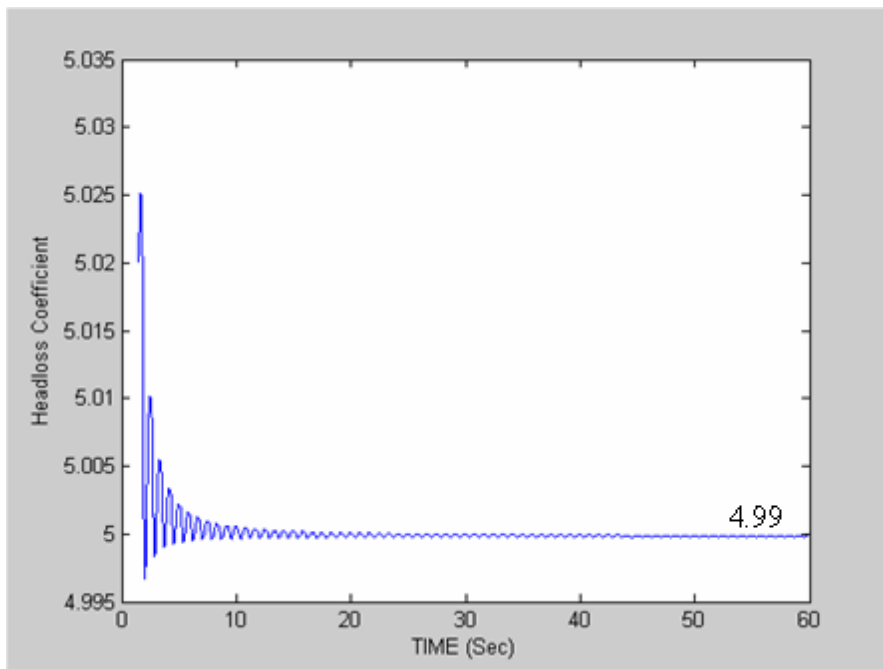
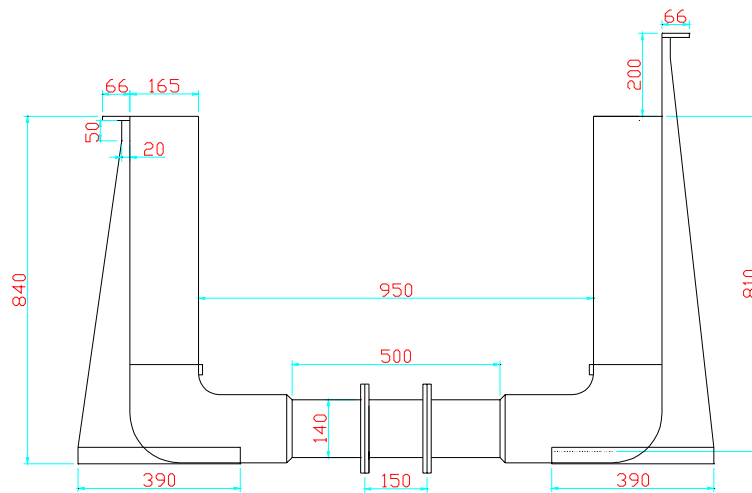


圖 2.3 系統識別所得之水頭損失係數歷時





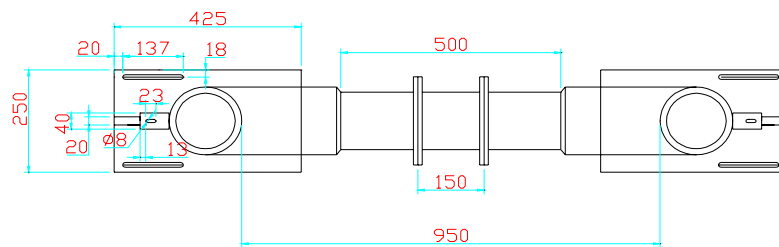
圖 3.1 變斷面 VTLCD 實體照片 ( $d=0.95\text{m}$ )



單位：mm

前視圖

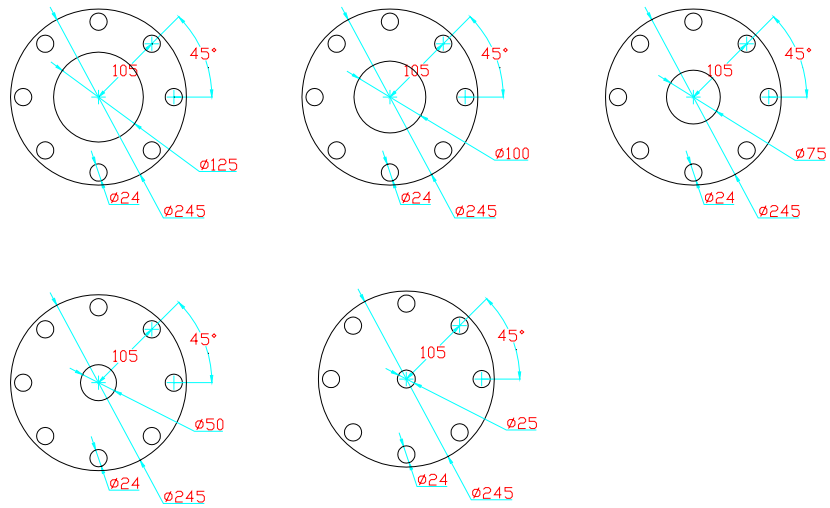
圖 3.2 變斷面 VTLCD 模型之前視圖



單位：mm

上視圖

圖 3.3 變斷面 VTLCD 模型之上視圖



單位：mm  
 厚度：5mm  
 變斷面孔口板

圖 3.4 不同孔勁孔口板之設計圖



圖 3.5 波高計(Wave1)

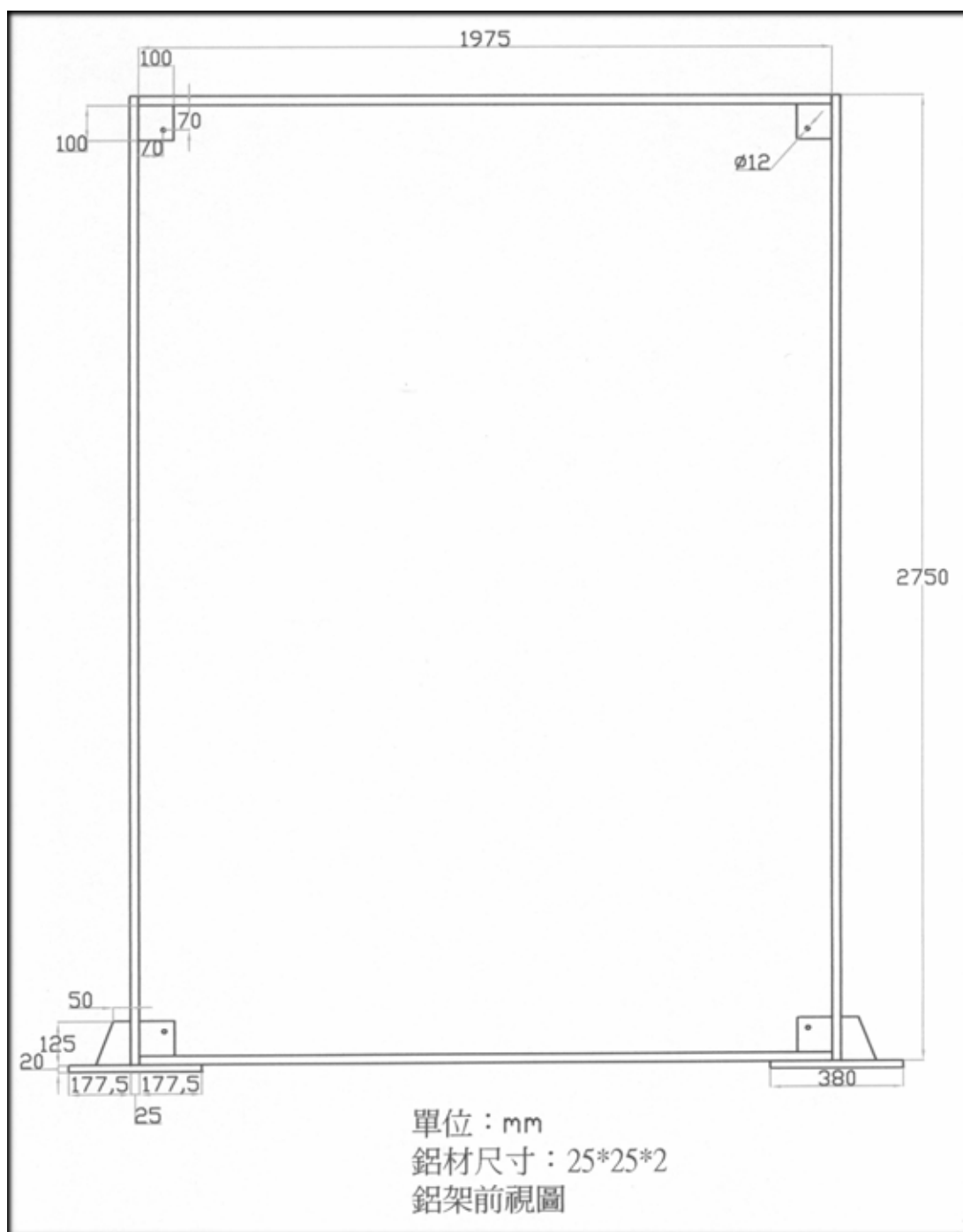


圖 3.6 鋁架模型之前視圖

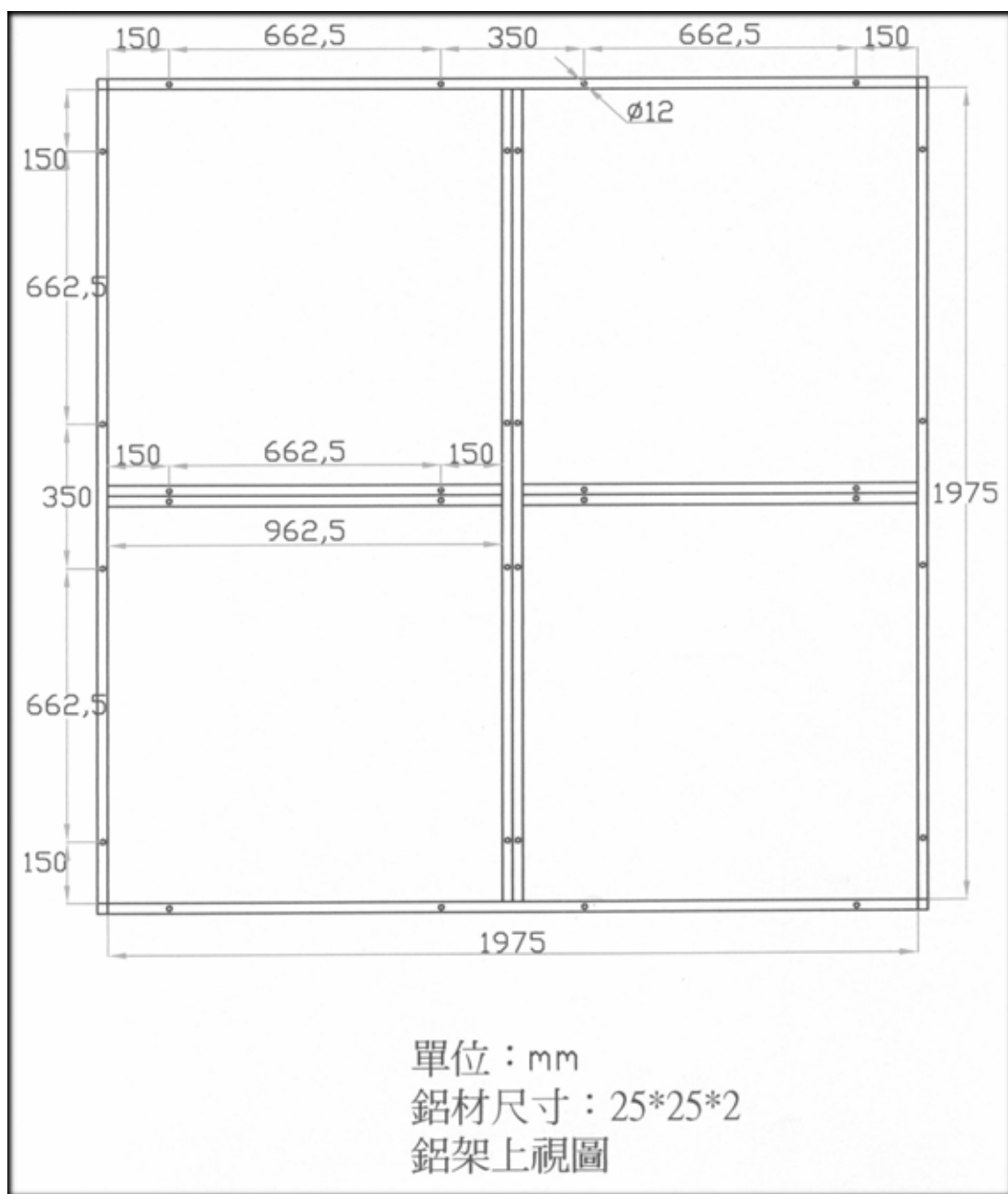


圖 3.7 鋁架模型之上視圖



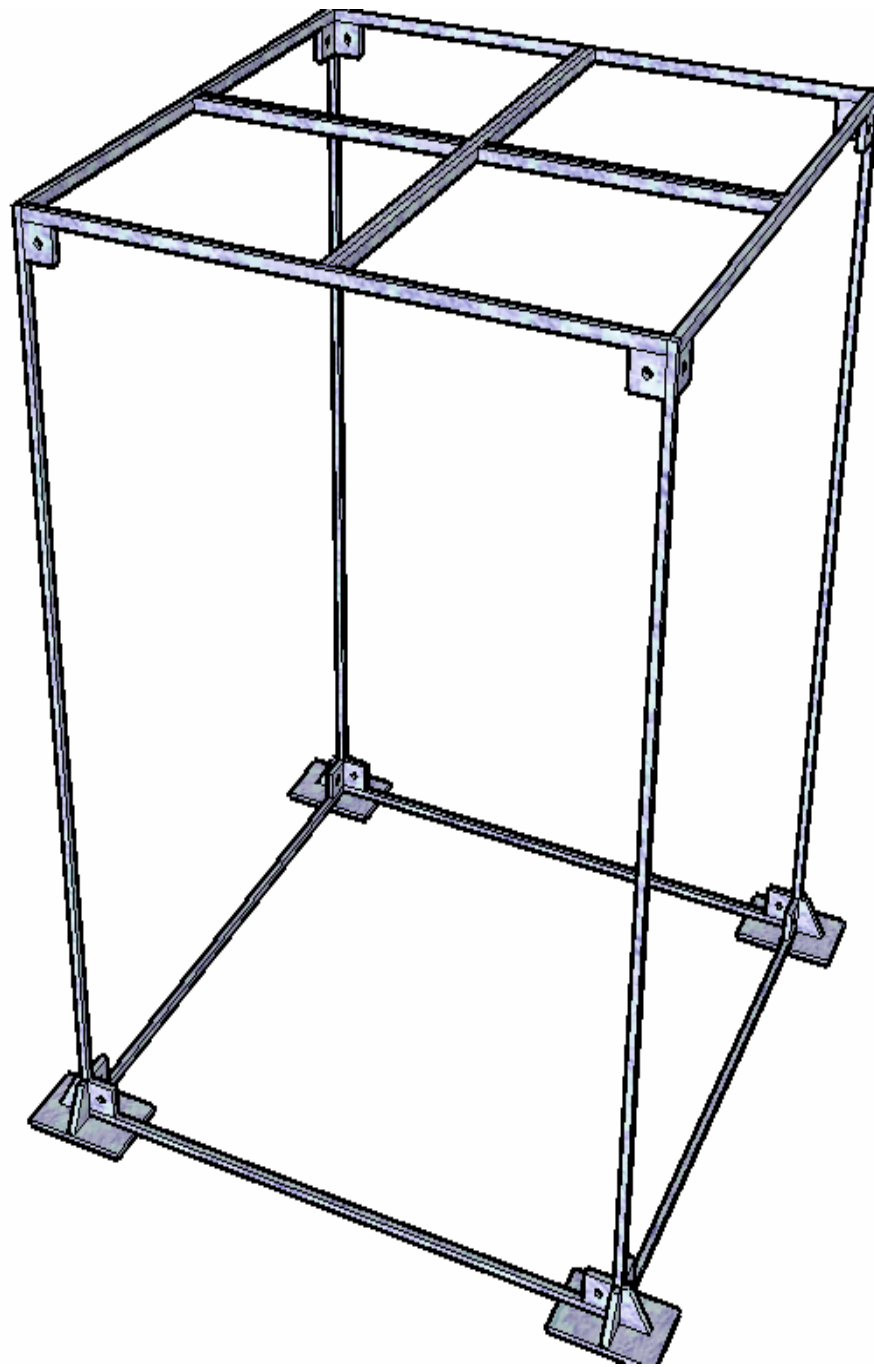


圖 3.8 鋁架模型之三維構造圖

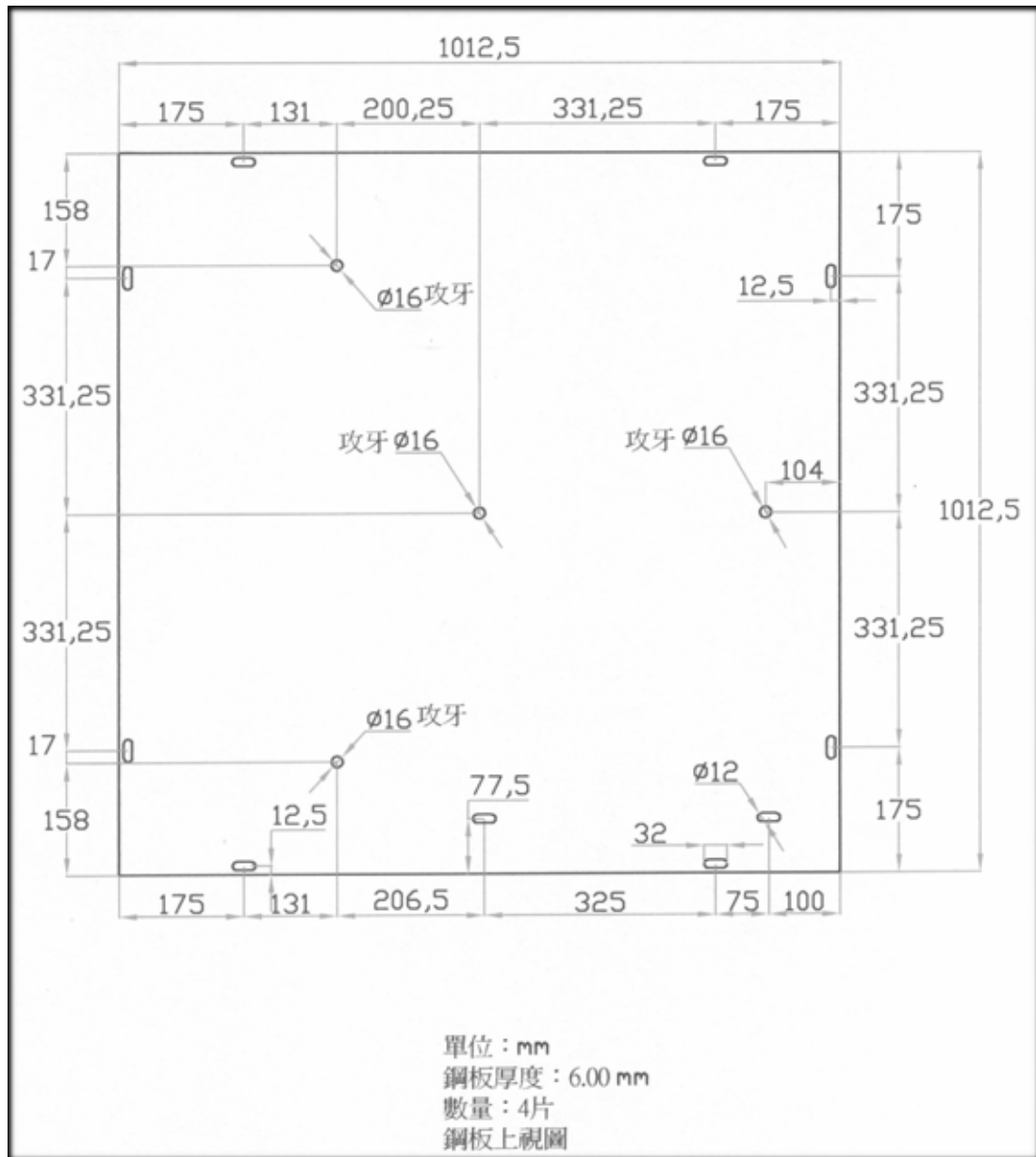
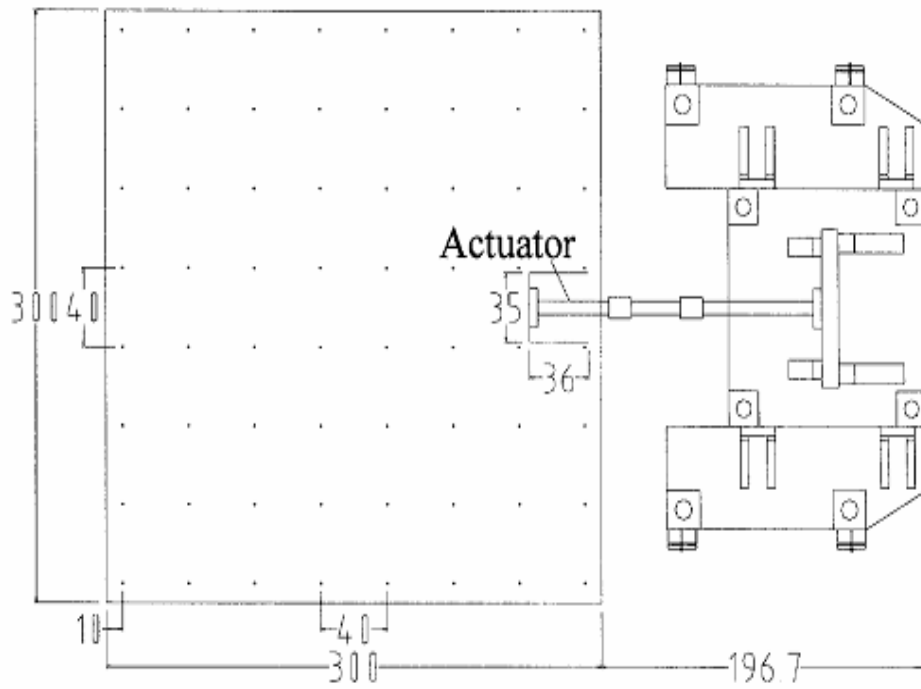
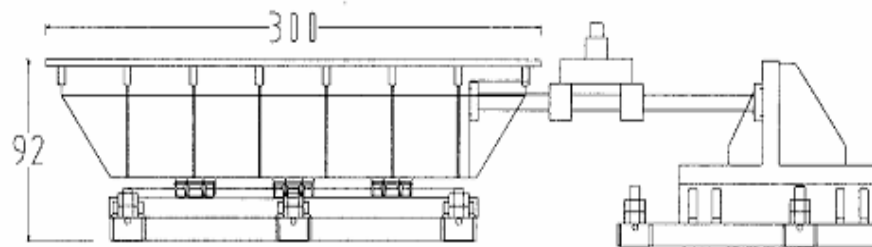


圖 3.9 樓頂鋼板孔位之設計圖



地震模擬振動台上視圖  
單位：cm



地震模擬振動台側視圖  
單位：cm

圖 3.10 振動台之設計尺寸詳圖



圖 3.11 微振加速規及訊號調節放大器

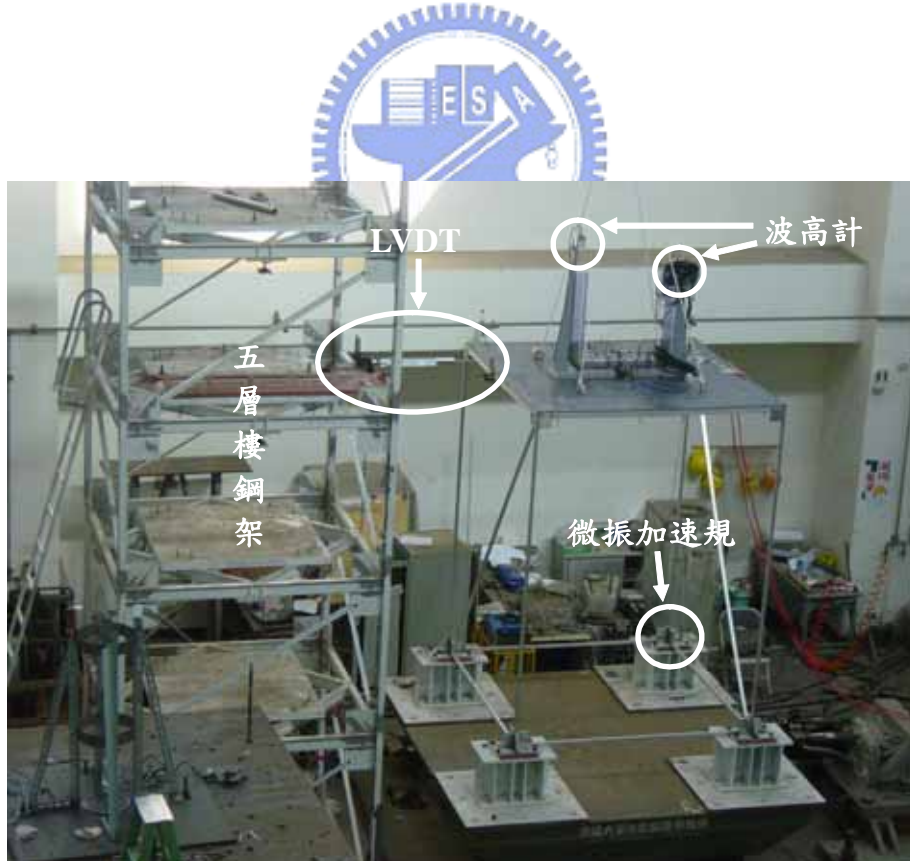


圖 3.12(a) 結構裝置變斷面 VTLCD 系統之量測儀器配置圖

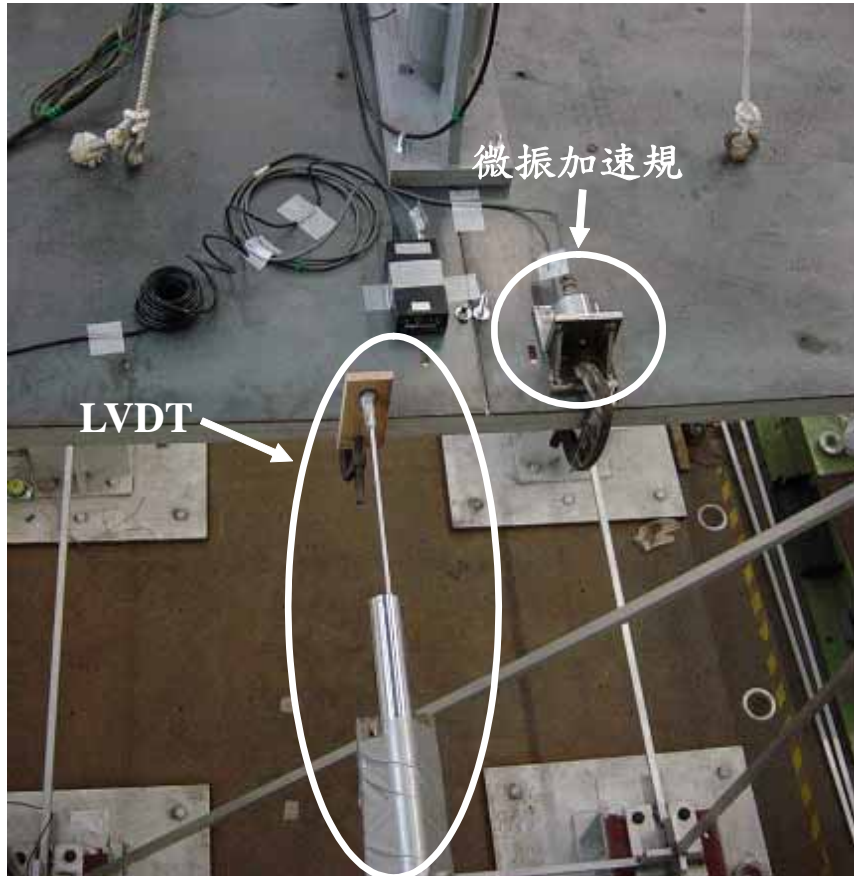


圖 3.12(b) 結構裝置變斷面 VTLCD 系統試驗之量測儀器配置圖  
(頂樓)

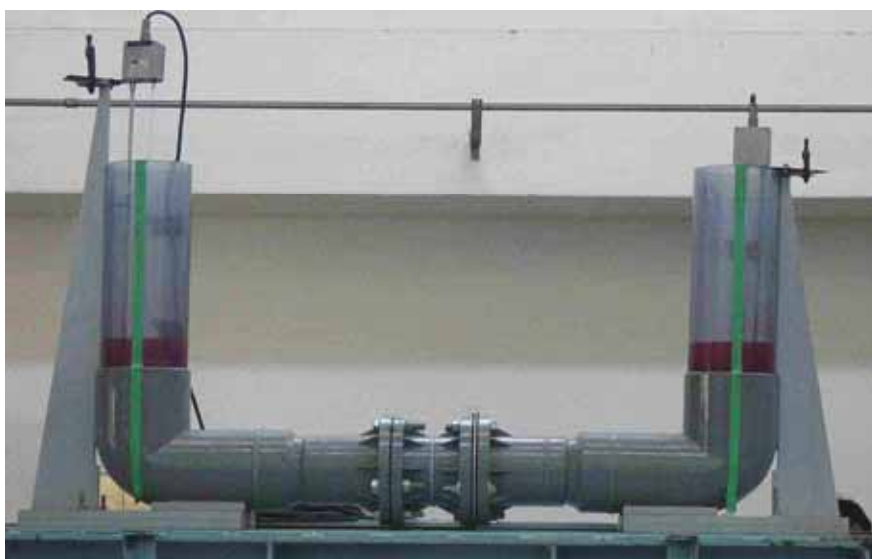


圖 3.13 變斷面 VTLCD 元件之安裝與波高計之架設圖

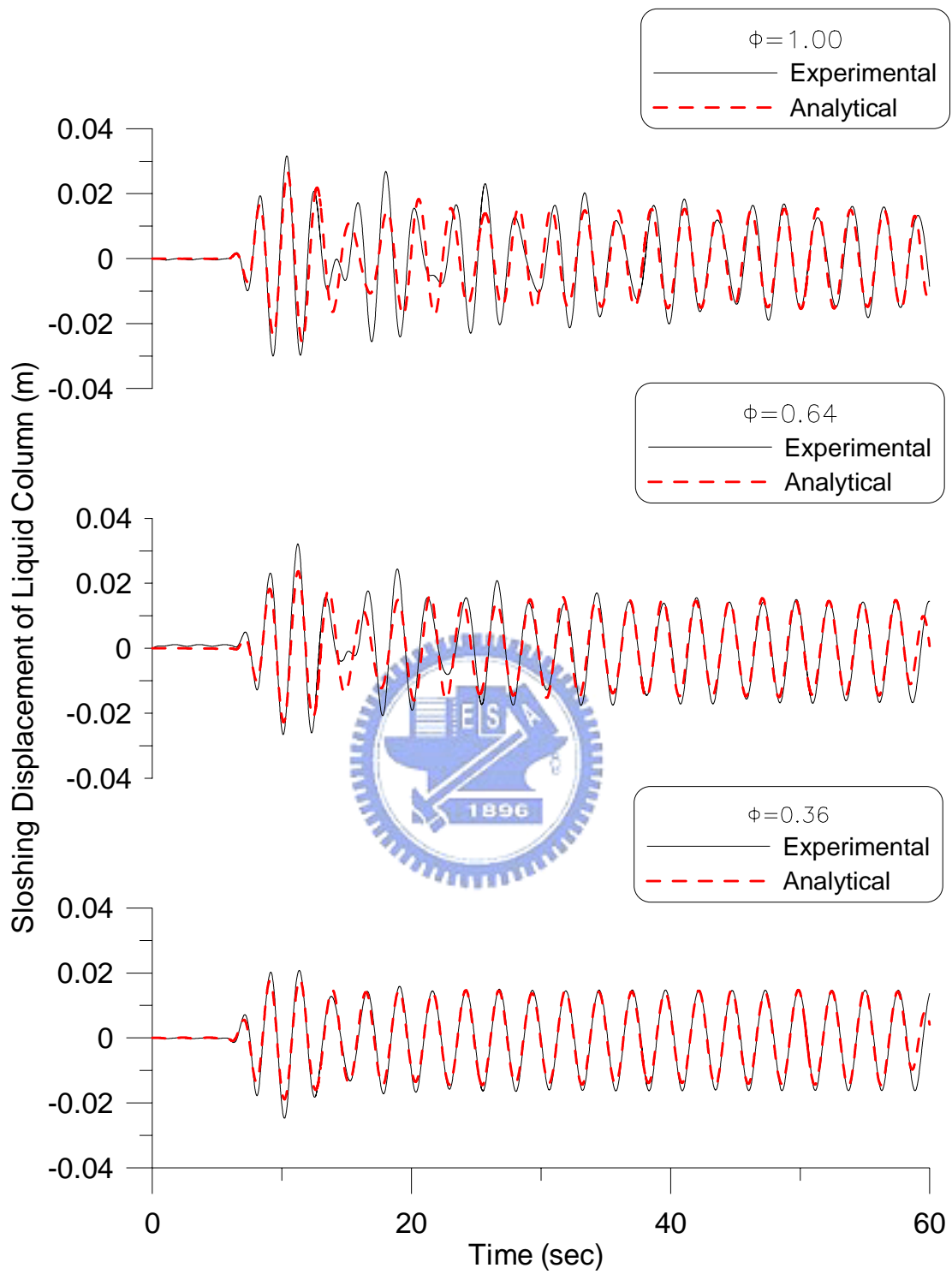


圖 3.14(a) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

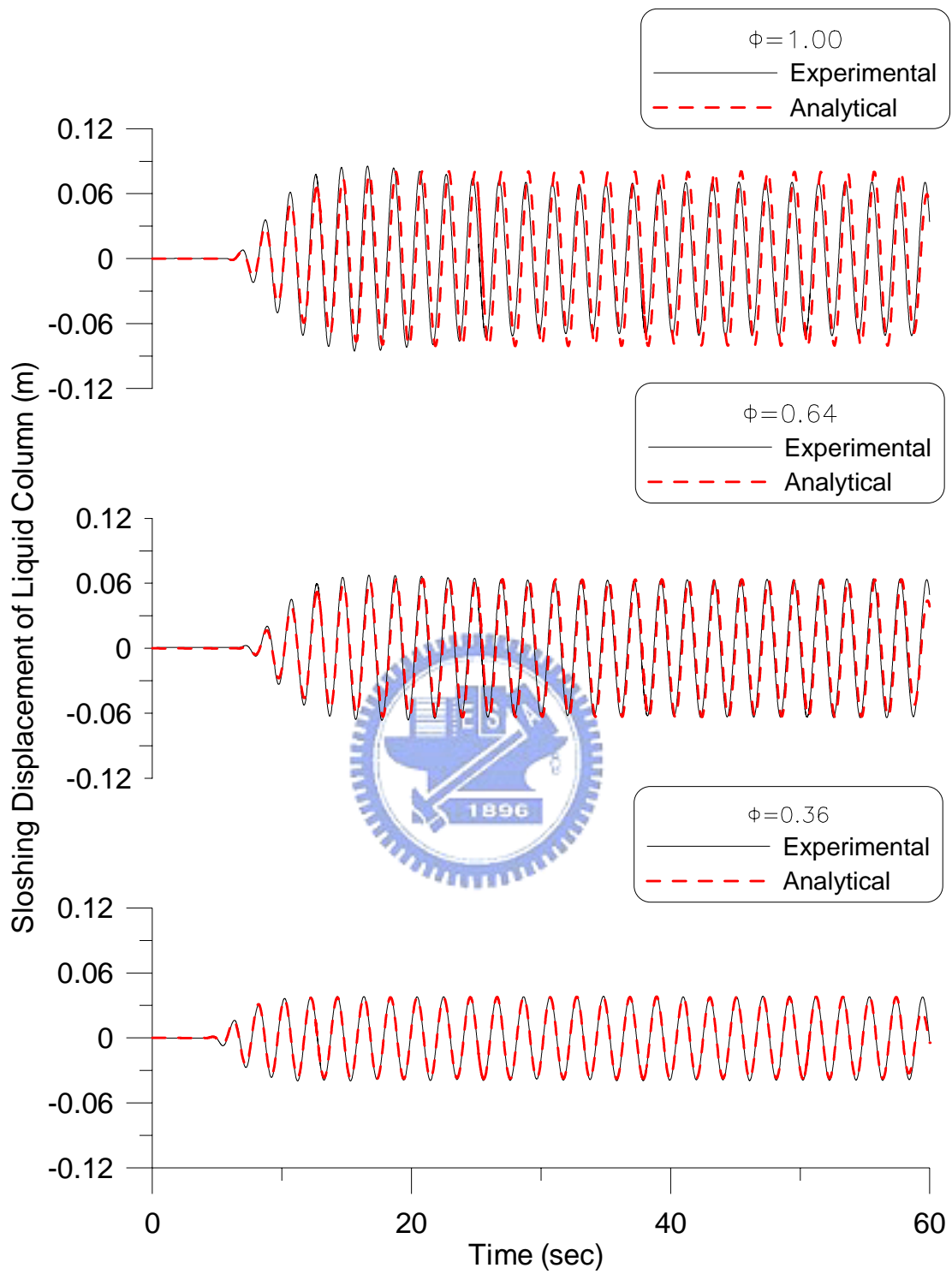


圖 3.14(b) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

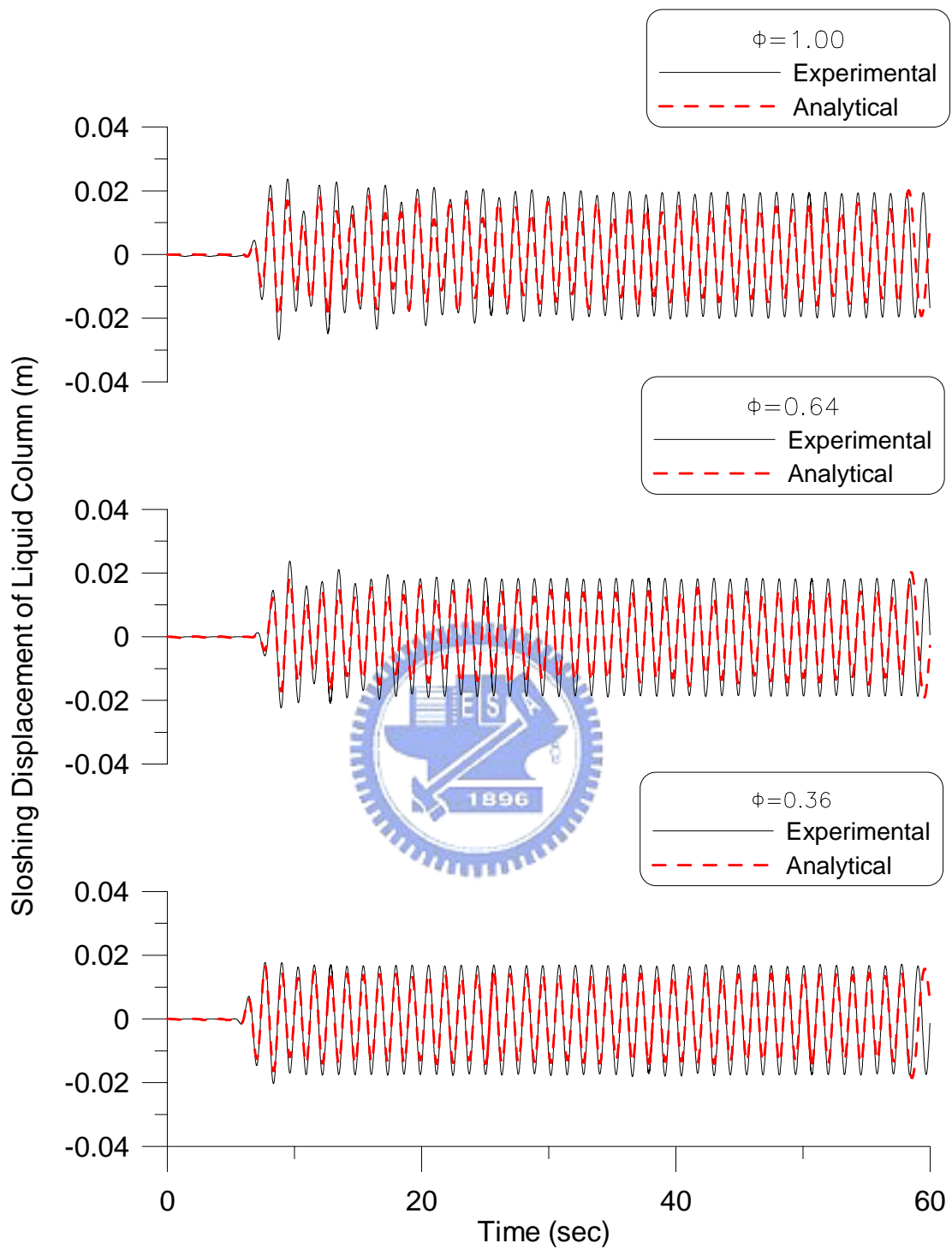


圖 3.14(c) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )



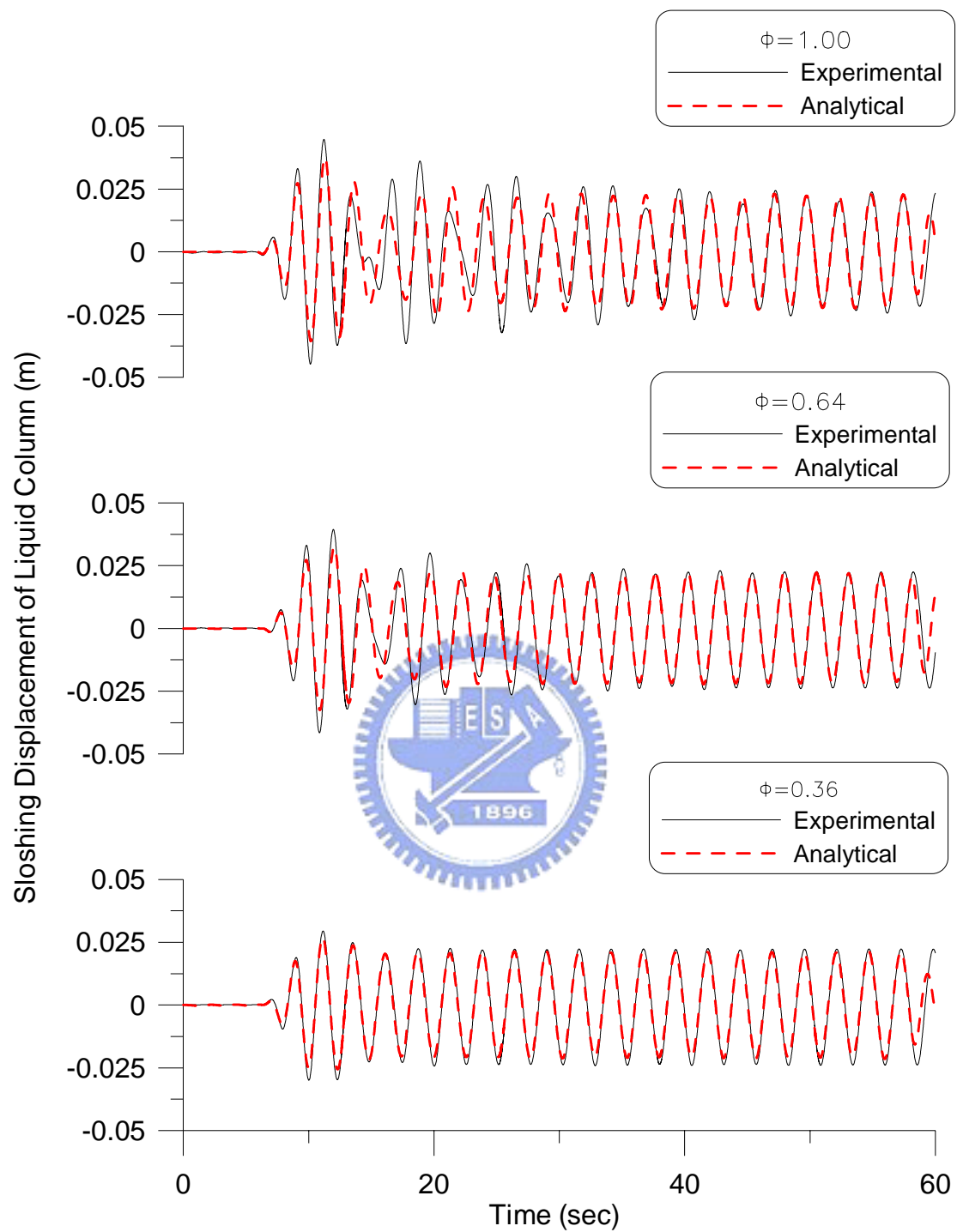


圖 3.14(d) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

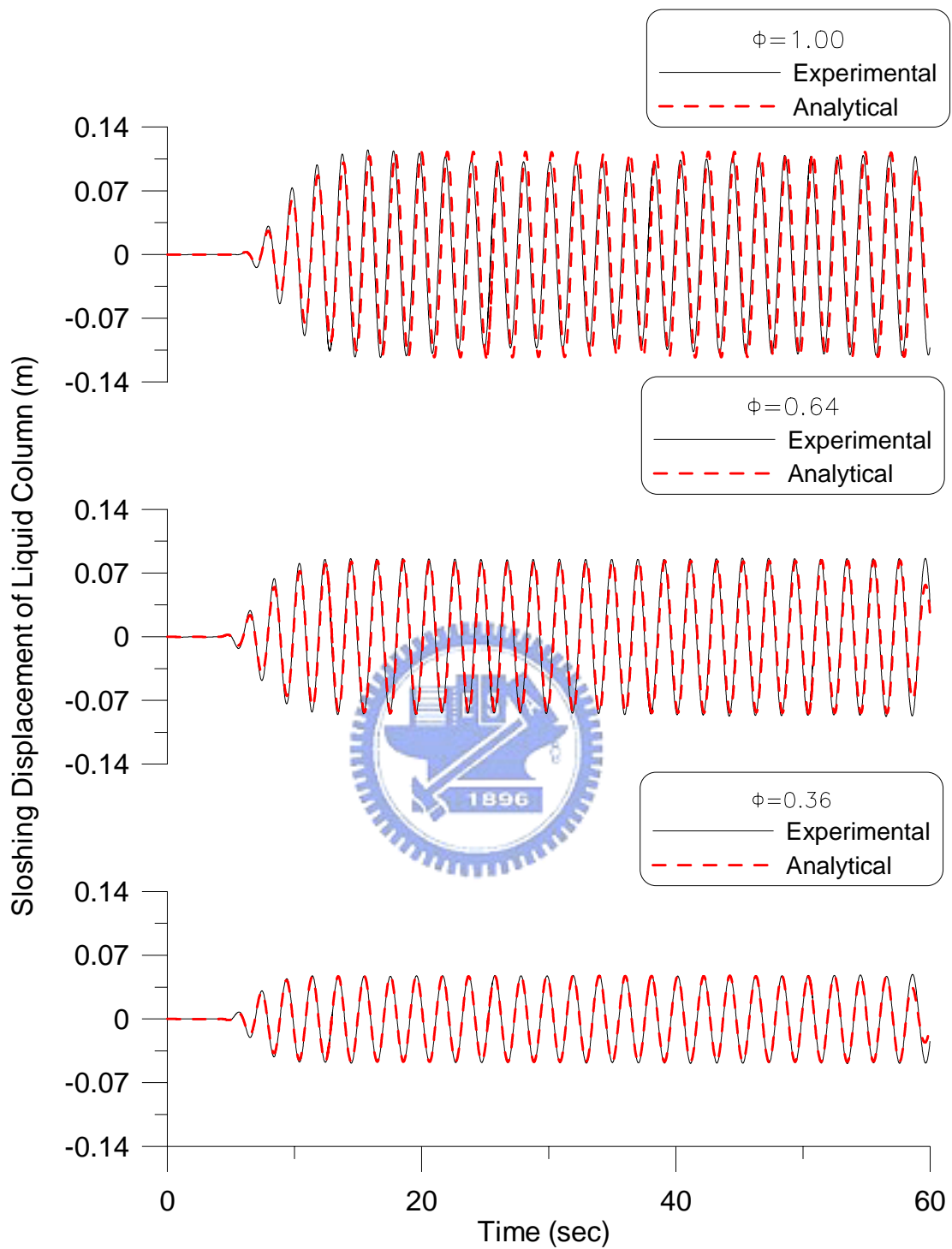


圖 3.14(e) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

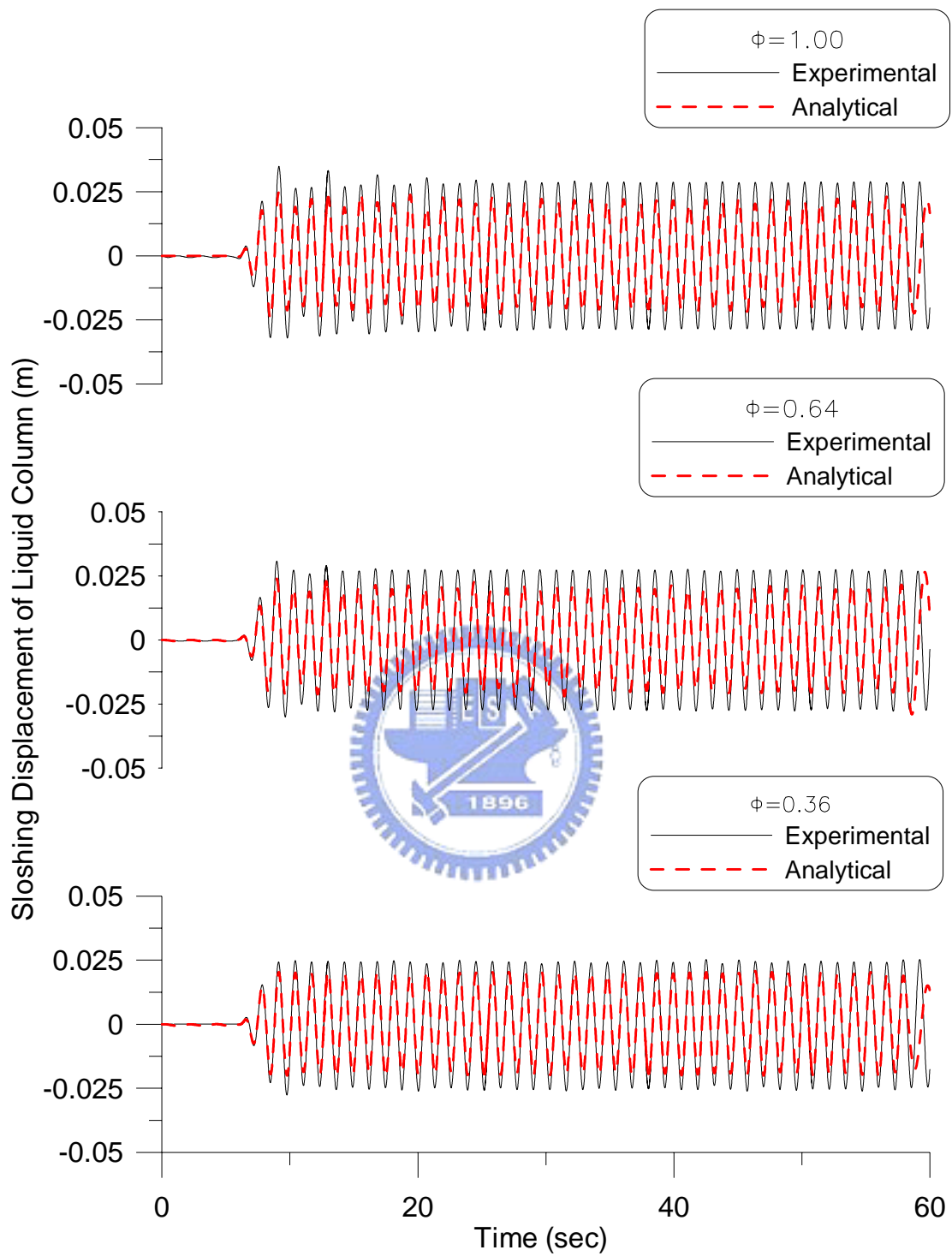


圖 3.14(f) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

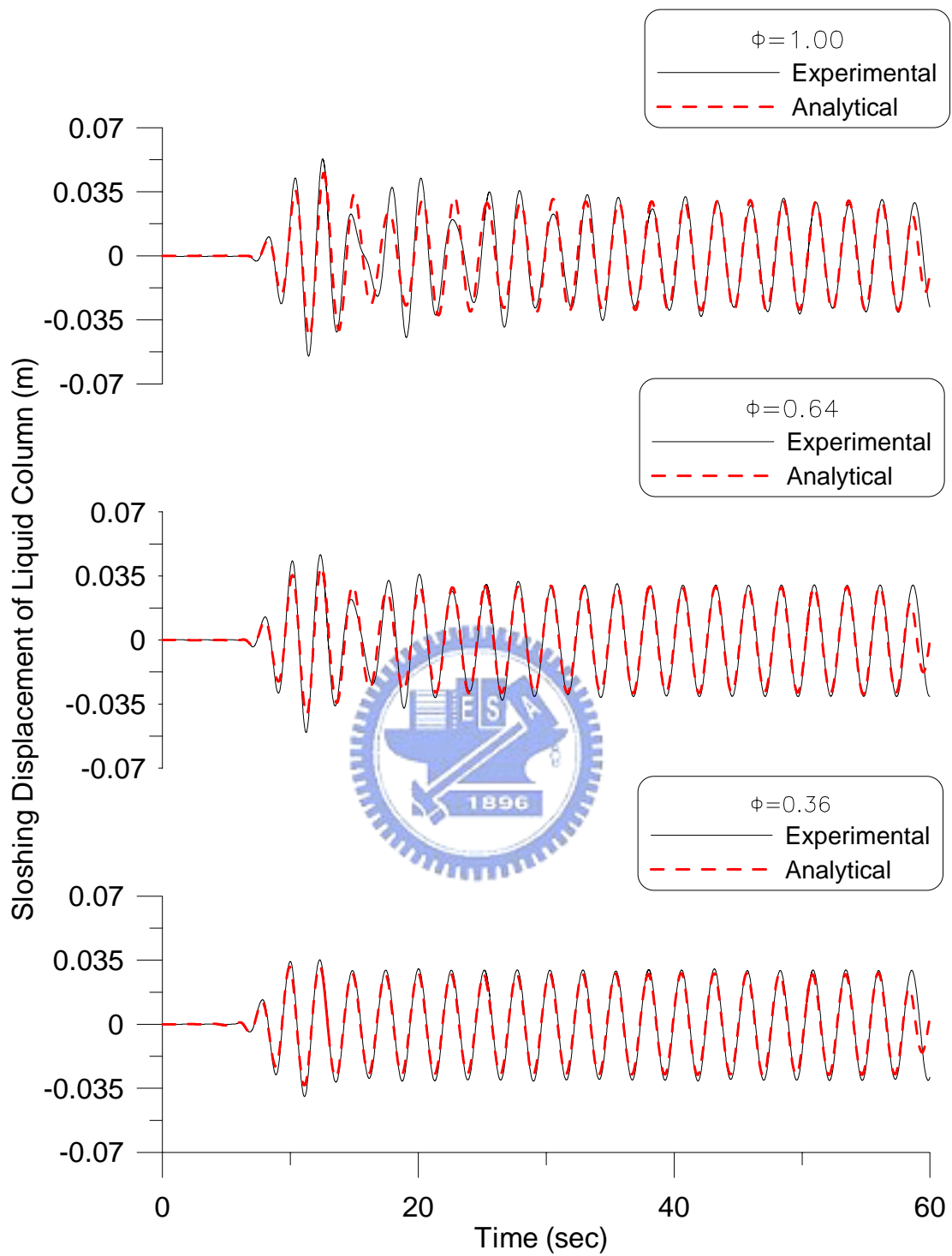


圖 3.14(g) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

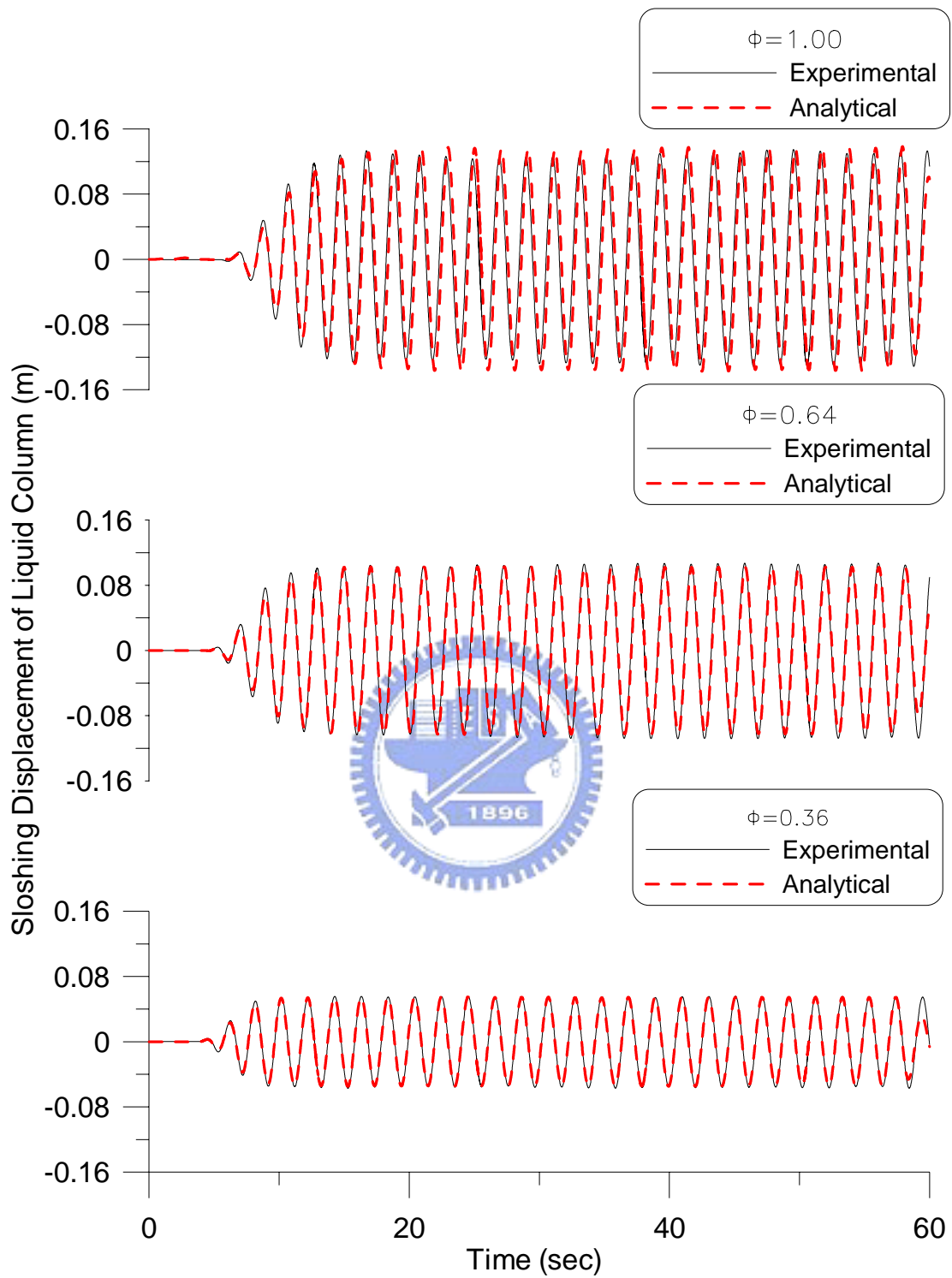


圖 3.14(h) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

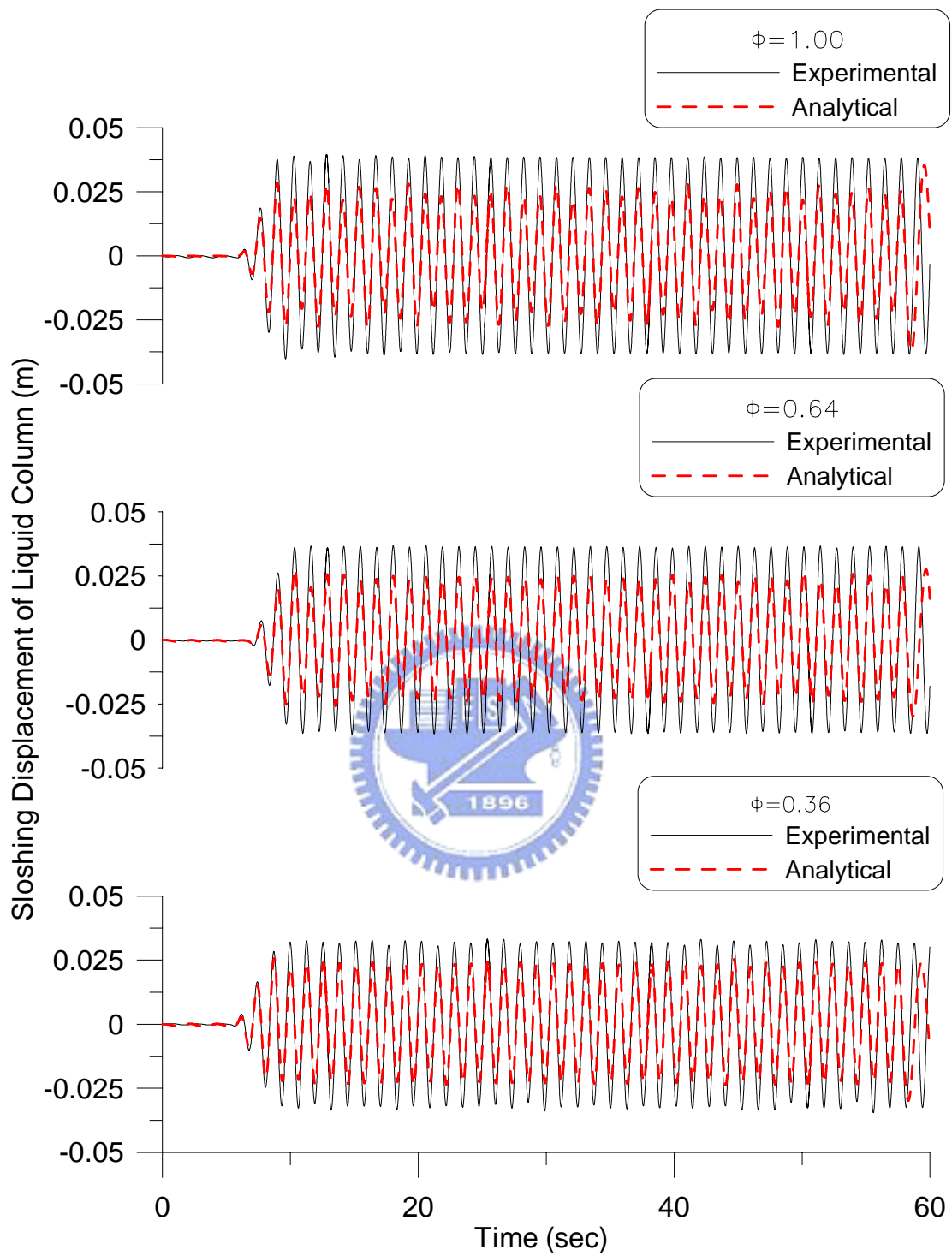


圖 3.14(i) 元件測試之水柱激盪位移歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

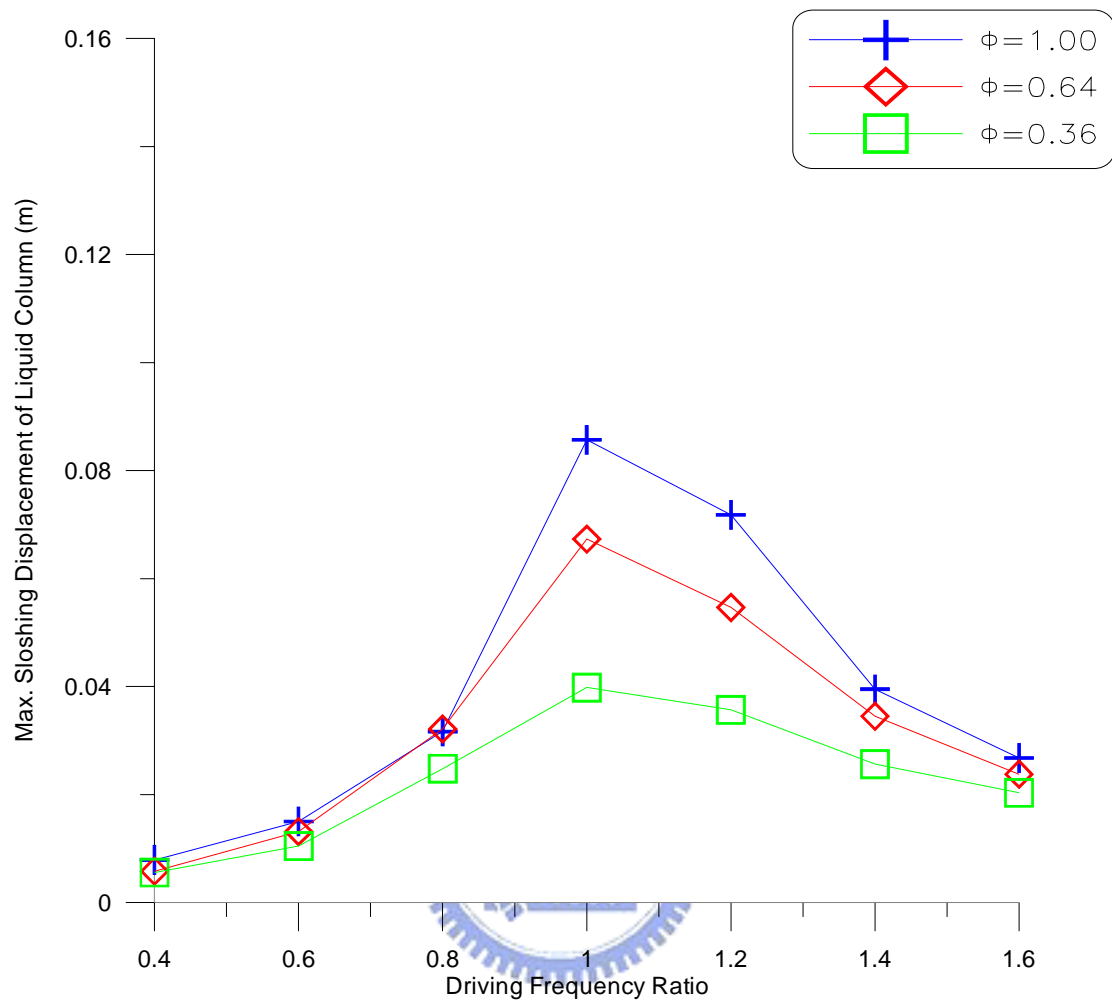


圖 3.15 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖  
(簡諧擾動外力振幅=20mm)

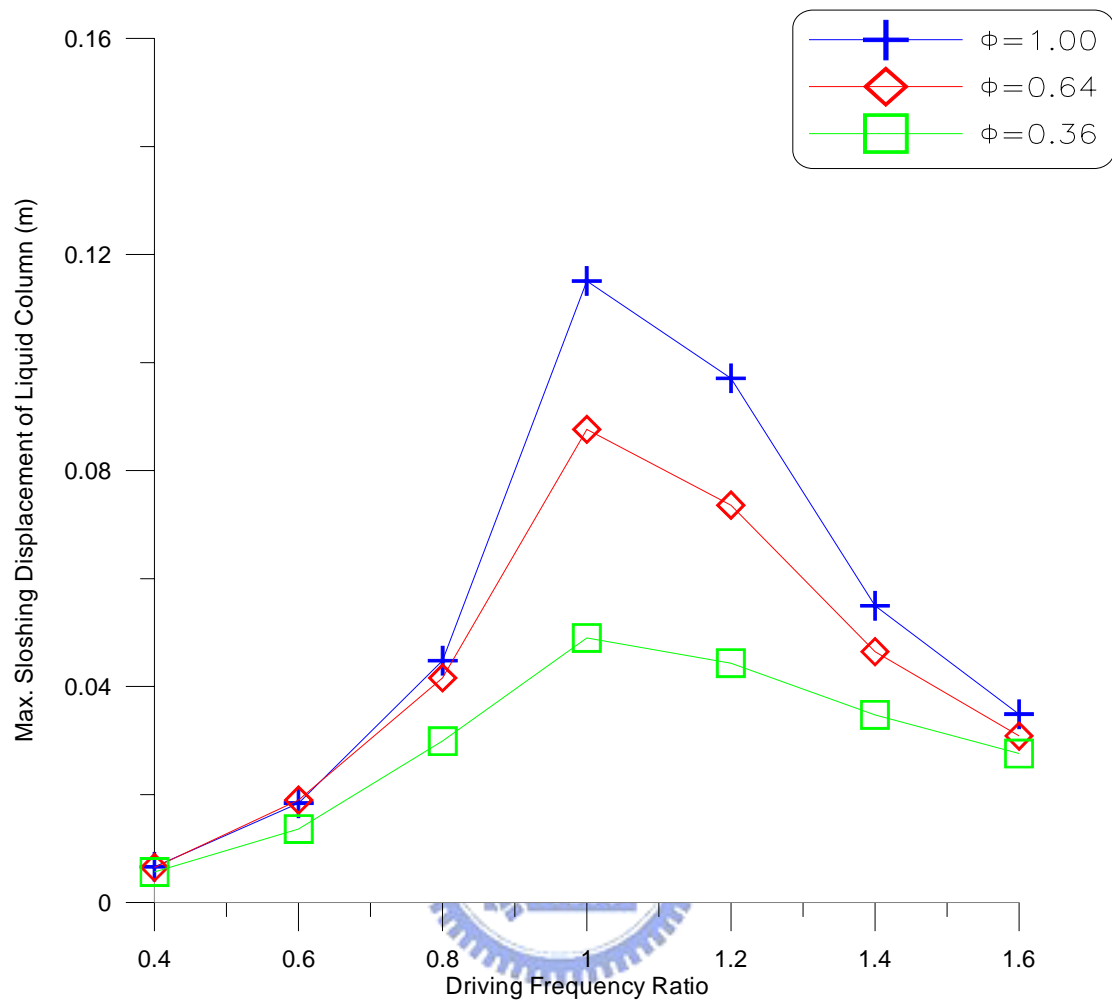


圖 3.16 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖  
(簡諧擾動外力振幅=30mm)



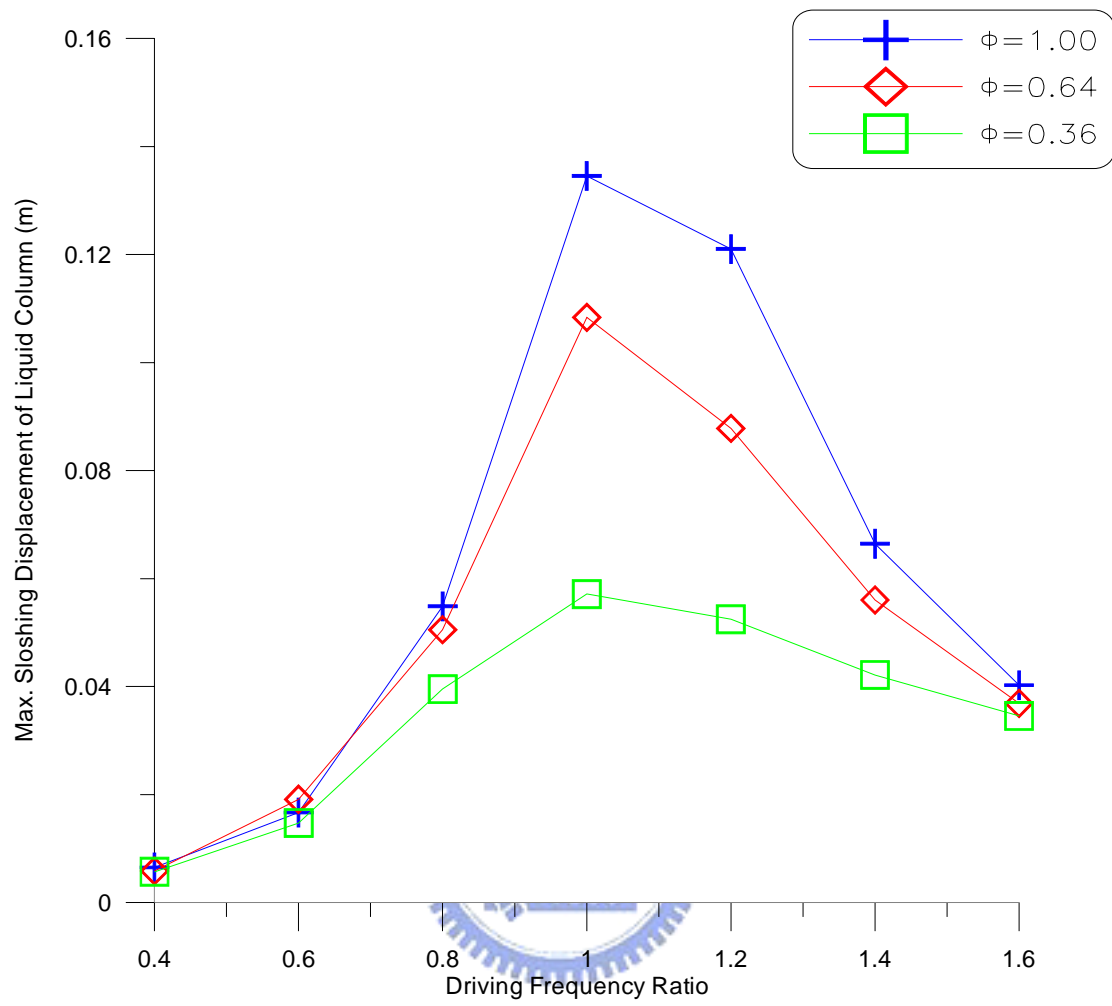


圖 3.17 擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係圖  
(簡諧擾動外力振幅=40mm)

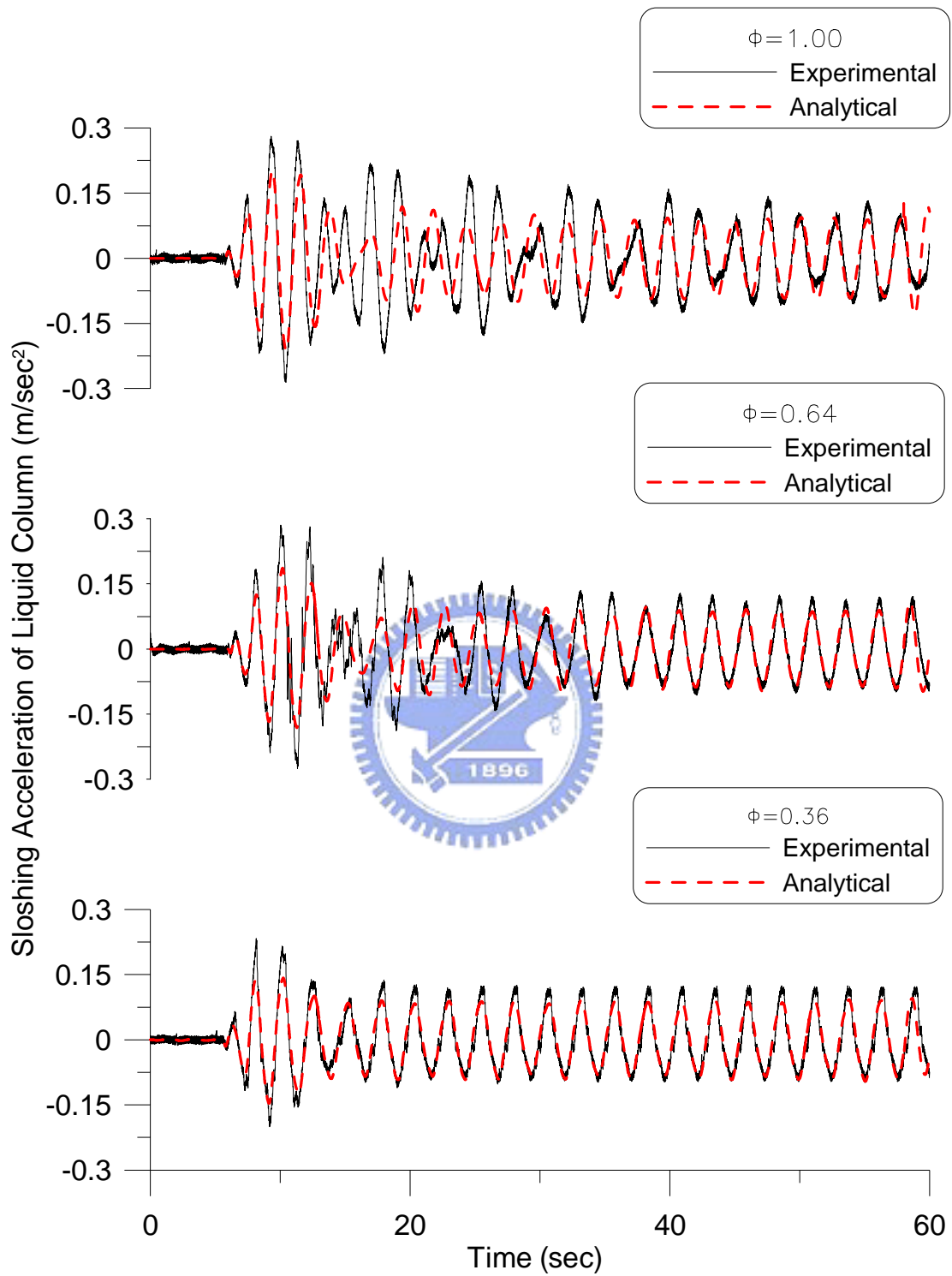


圖 3.18(a) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

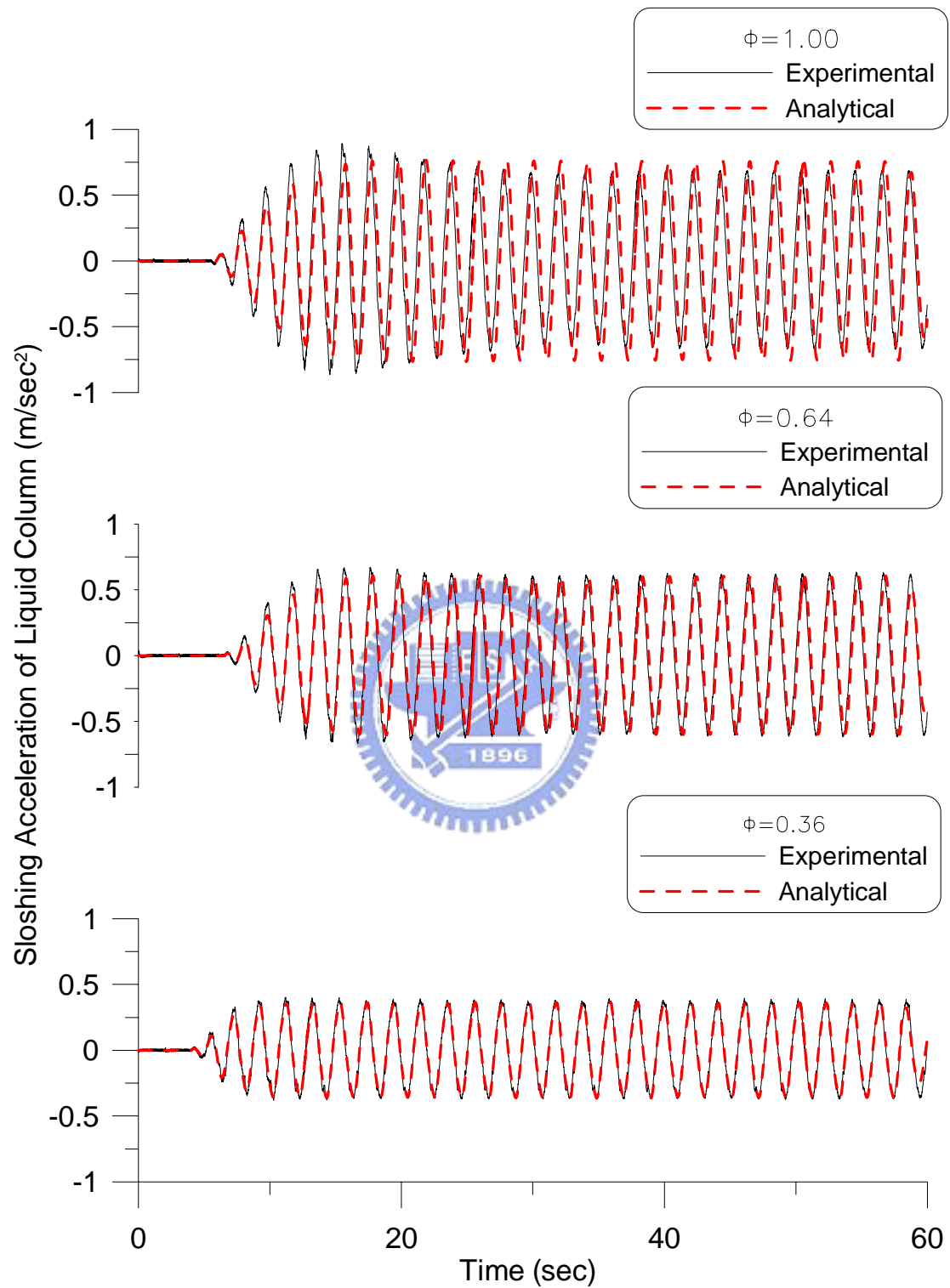


圖 3.18 (b) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

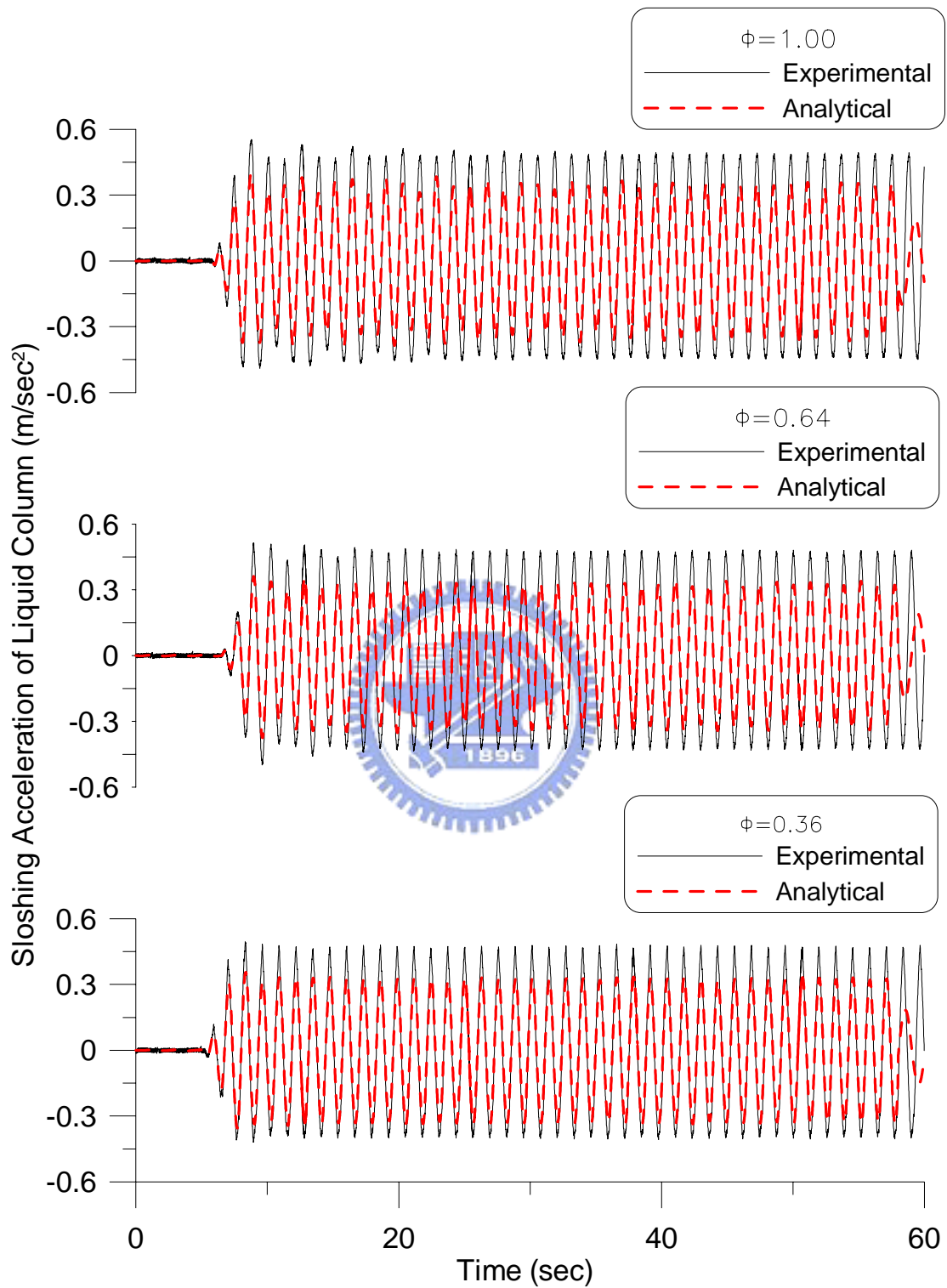


圖 3.18 (c) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

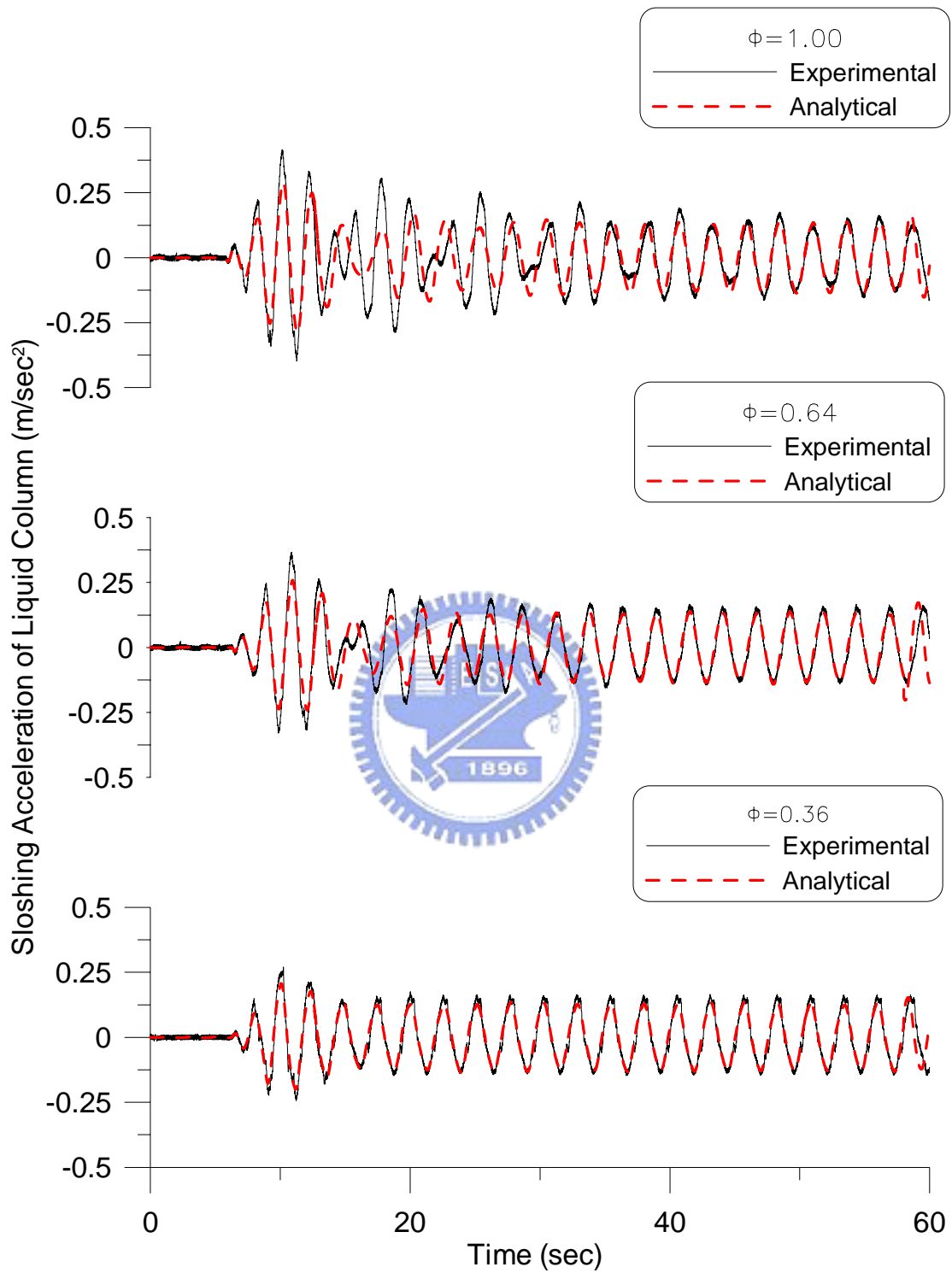


圖 3.18 (d) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

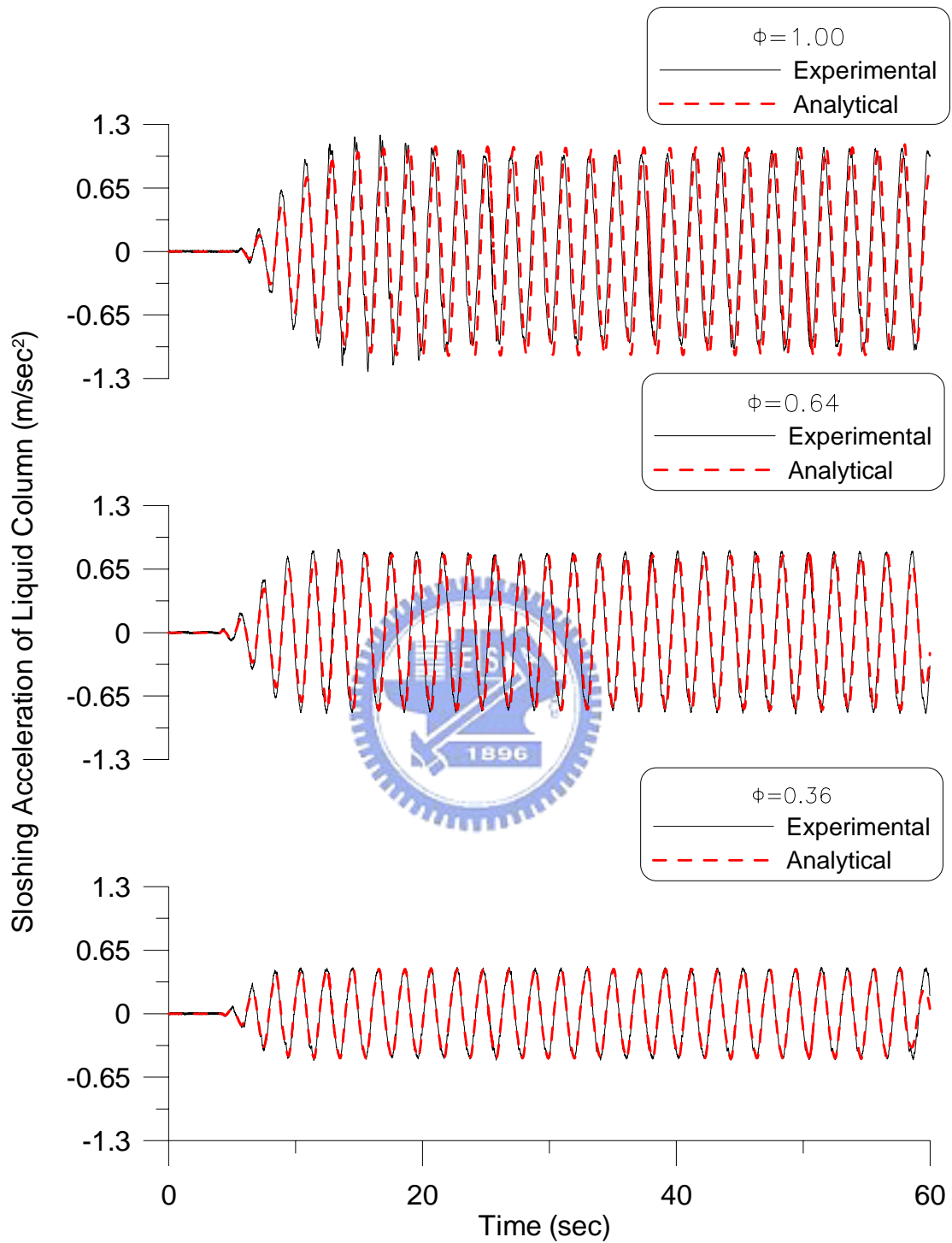


圖 3.18 (e) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

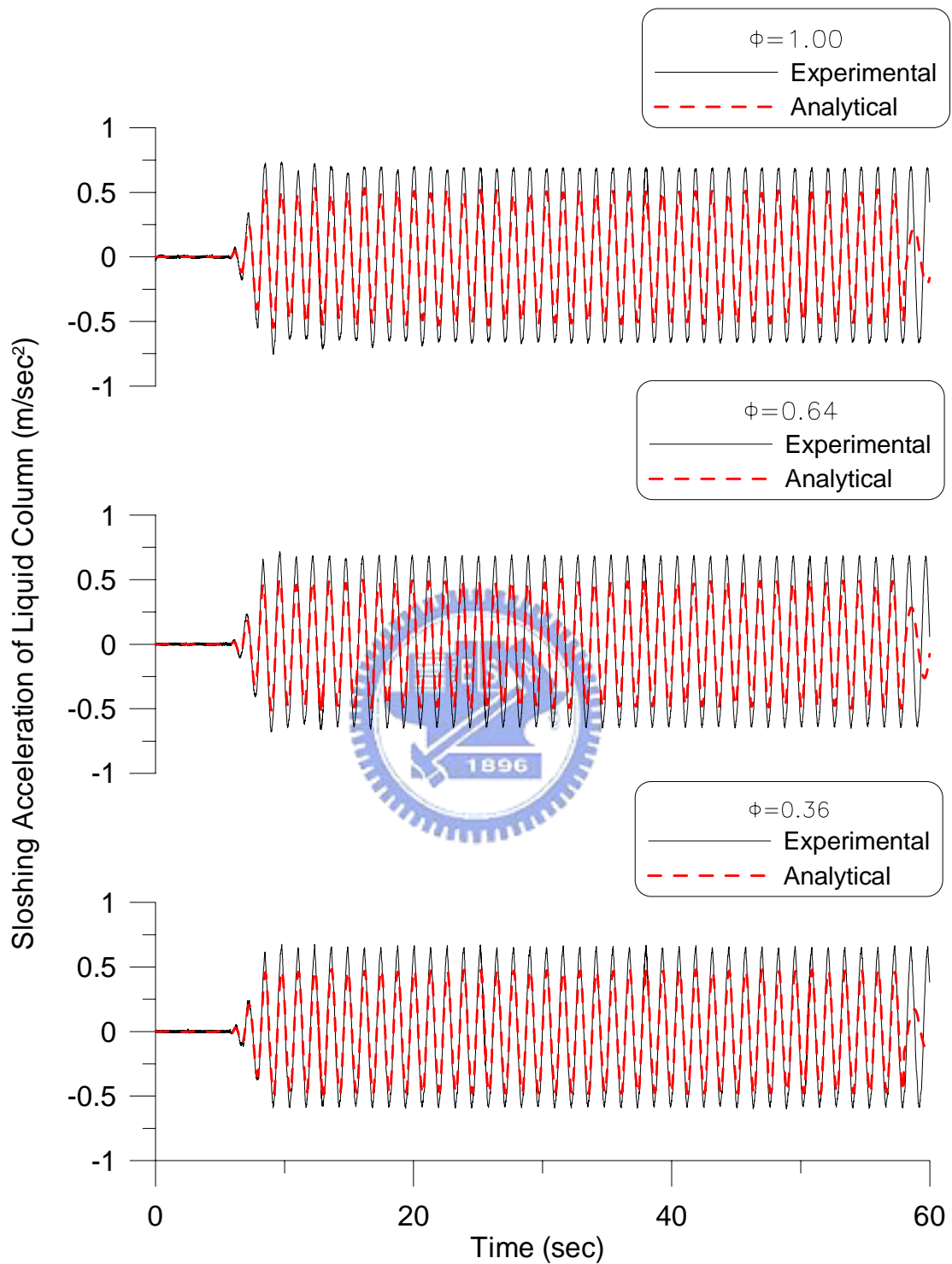


圖 3.18 (f) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

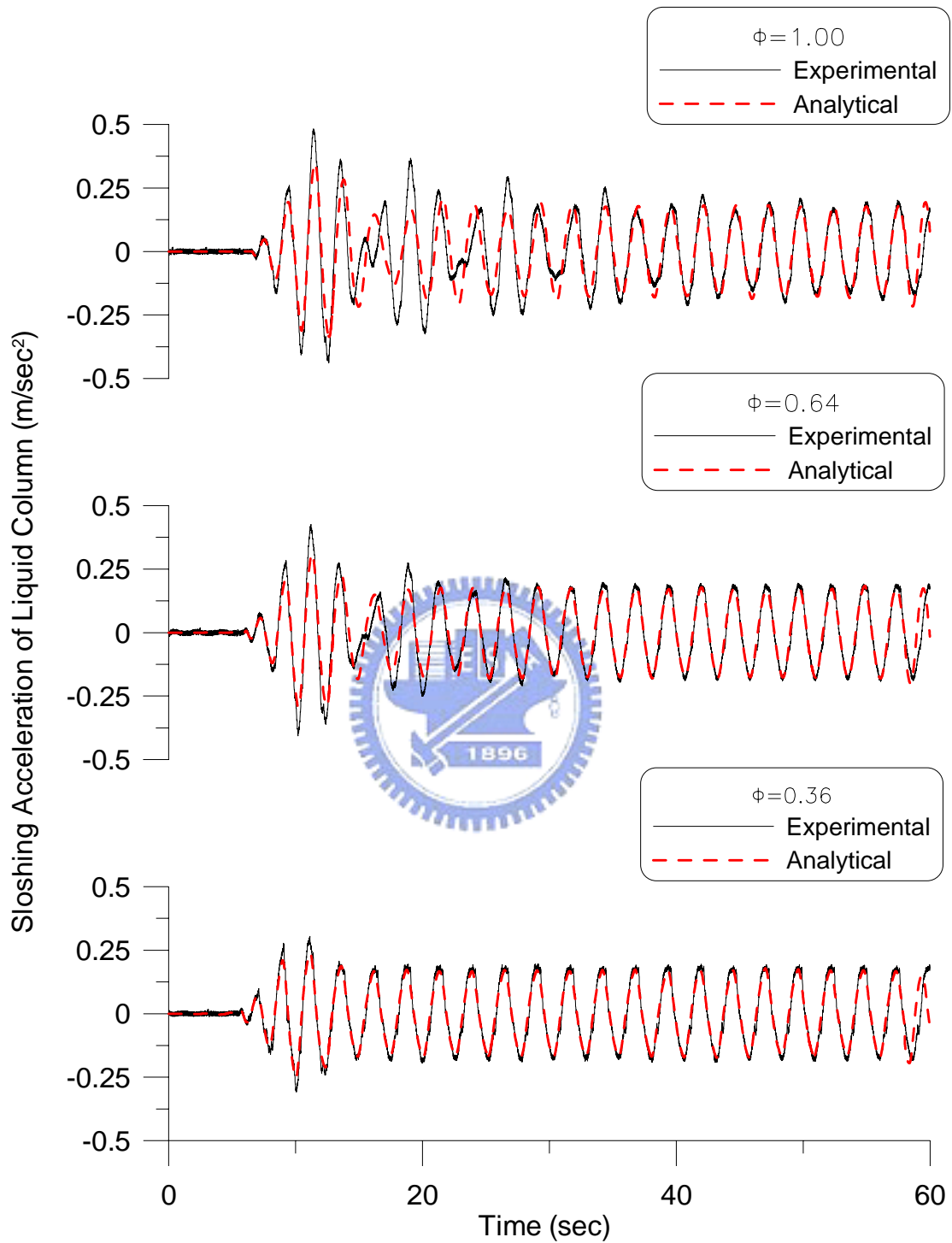


圖 3.18 (g) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )



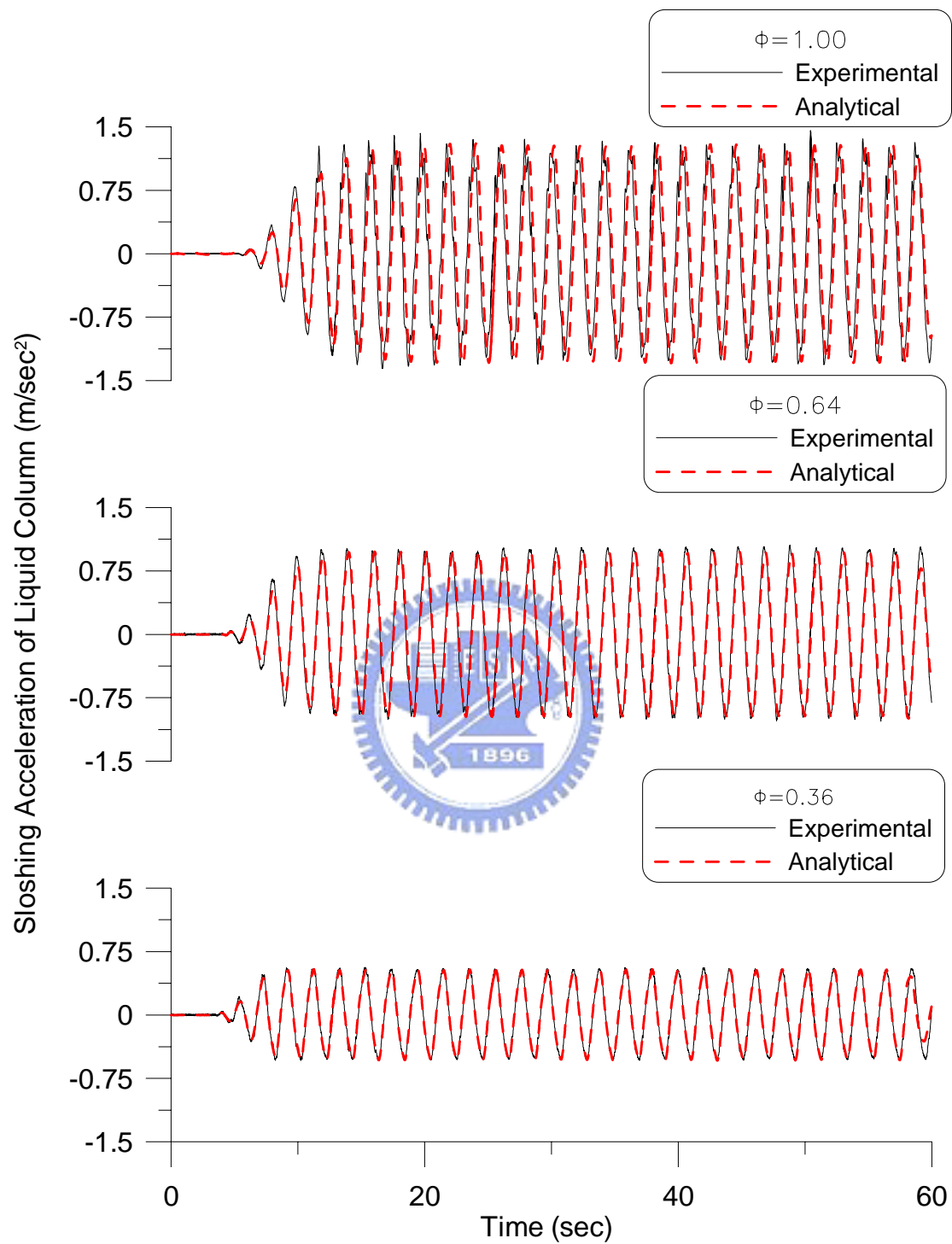


圖 3.18 (h) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

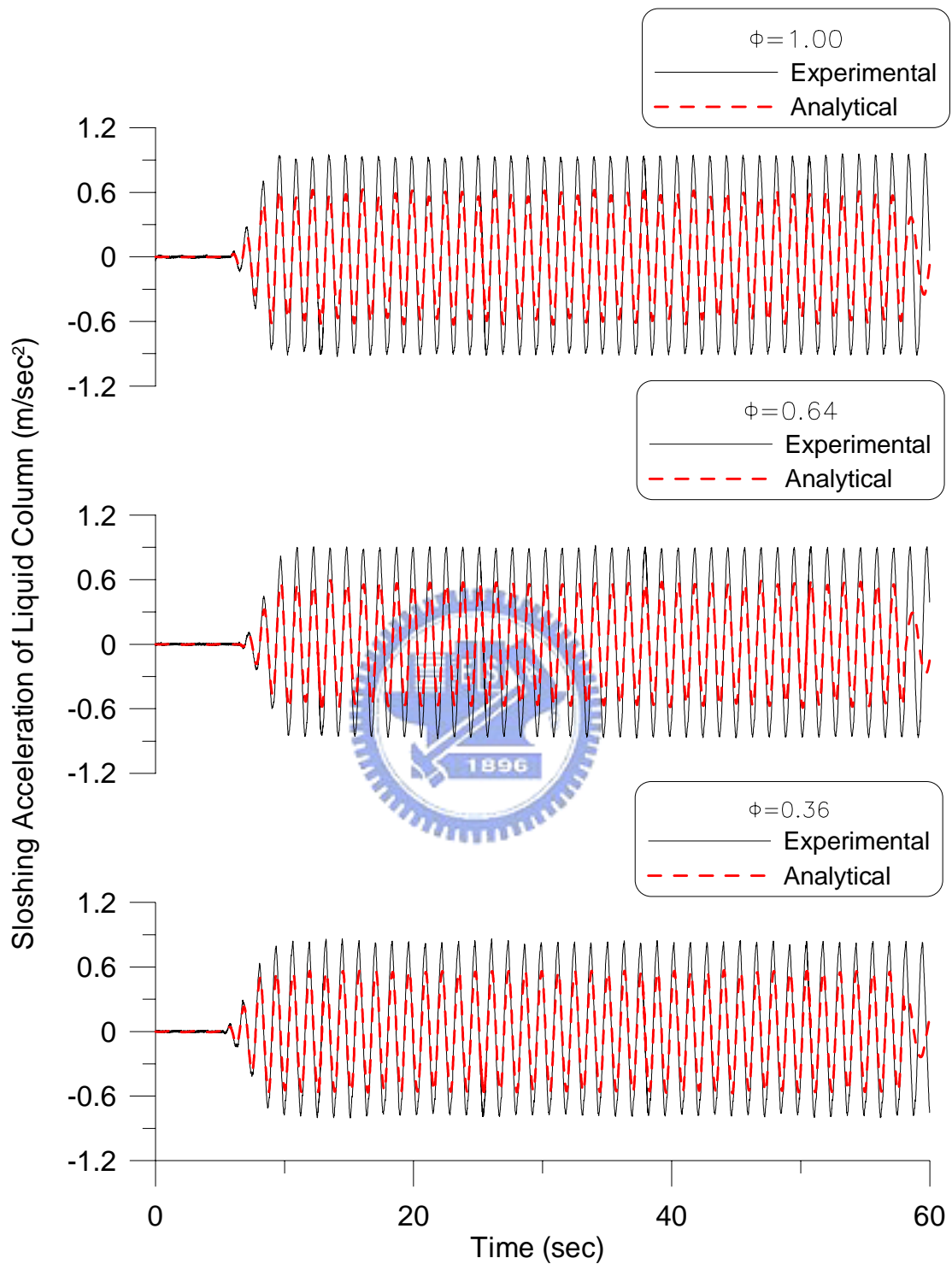


圖 3.18 (i) 元件測試之水柱激盪加速度歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

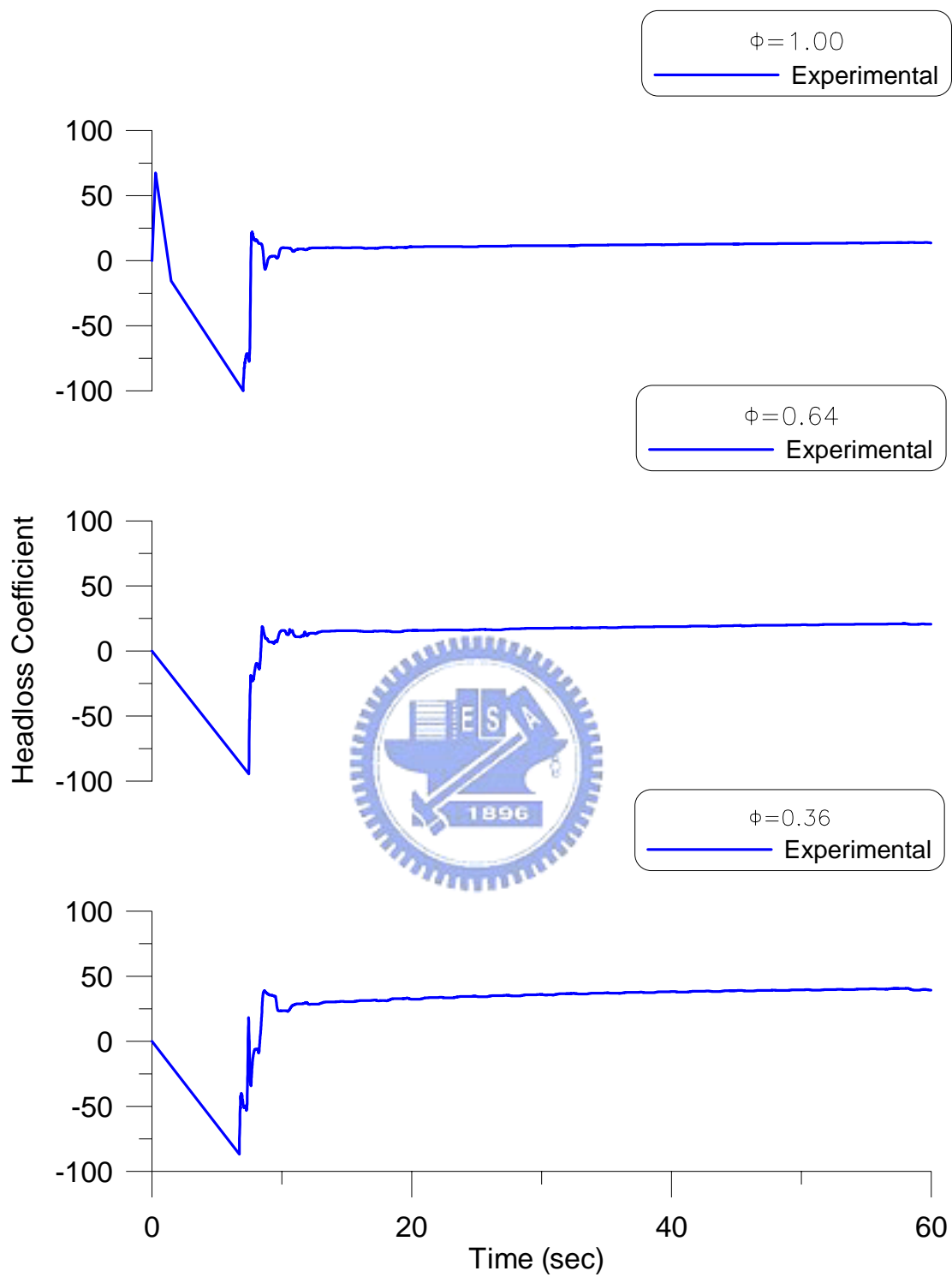


圖 3.19 (a) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
(簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

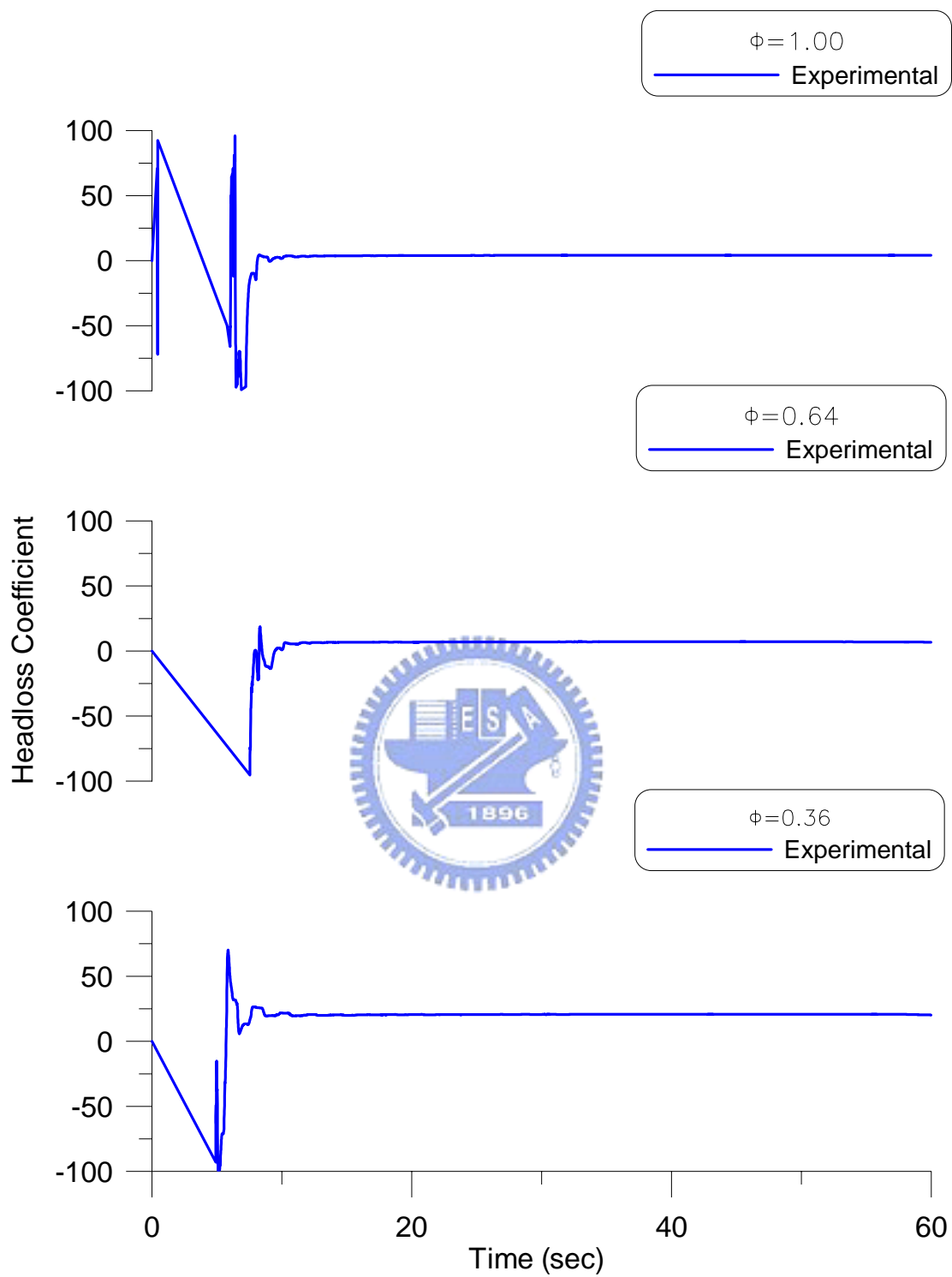


圖 3.19 (b) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

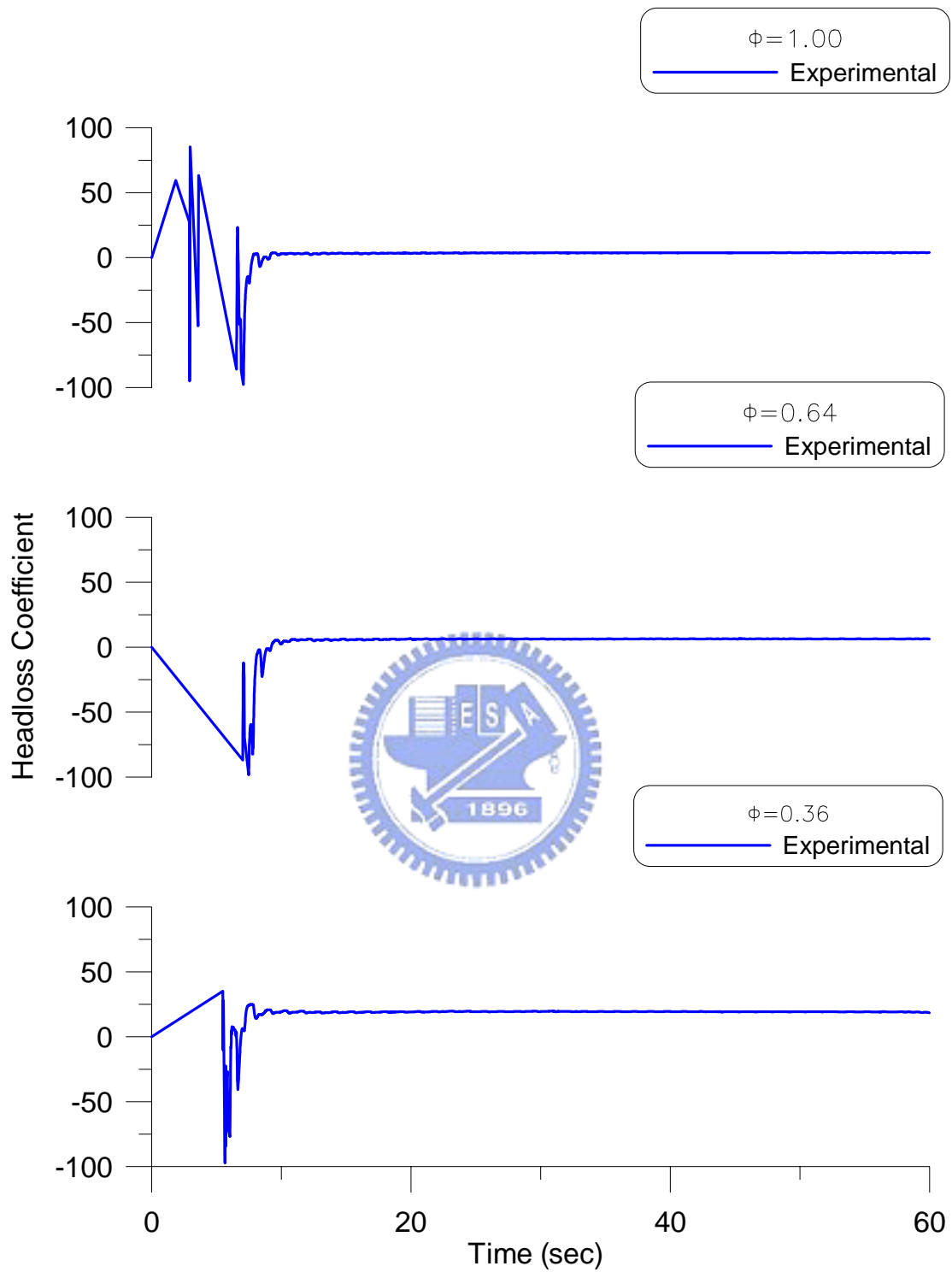


圖 3.19 (c) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

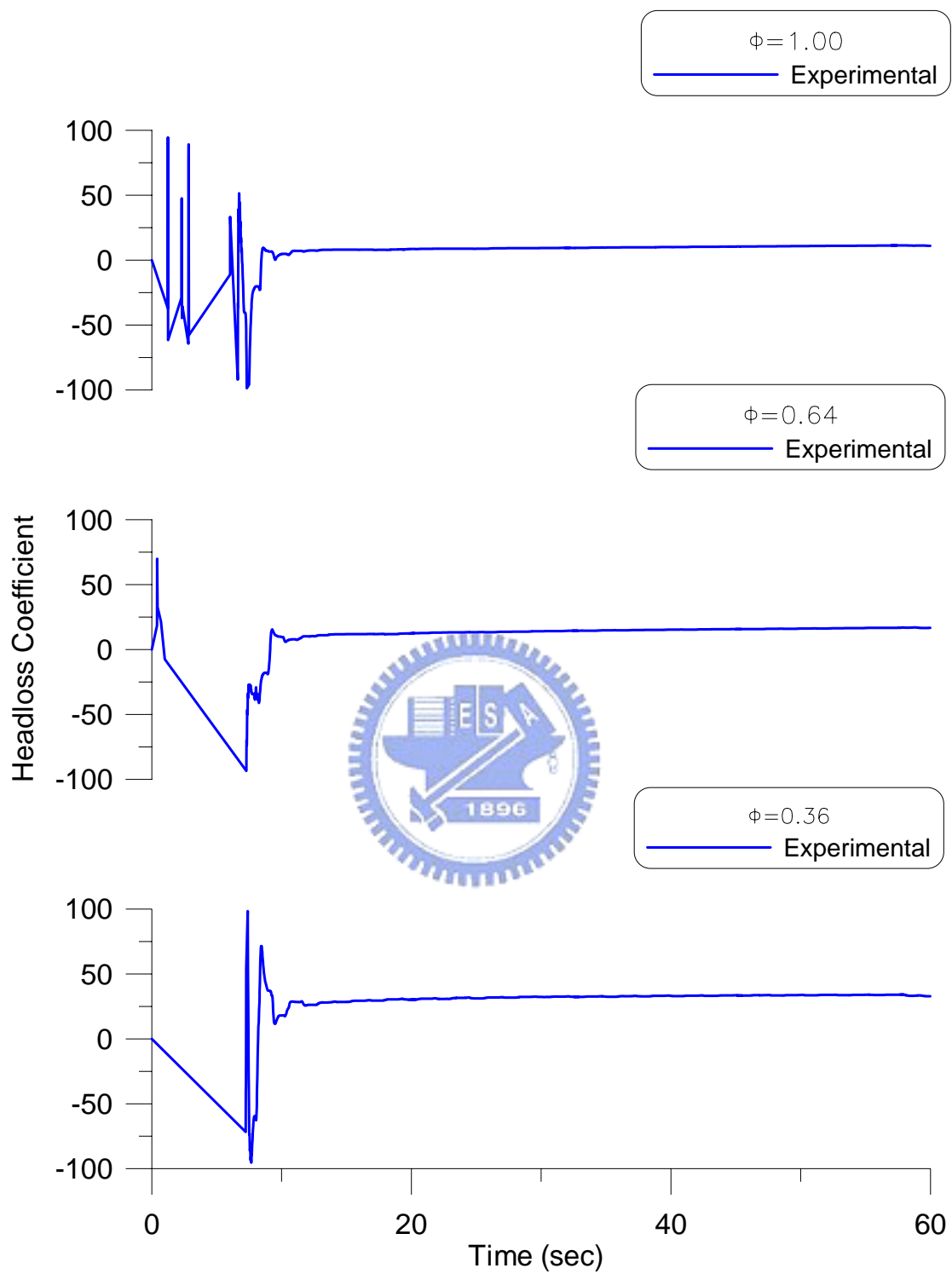


圖 3.19 (d) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
(簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

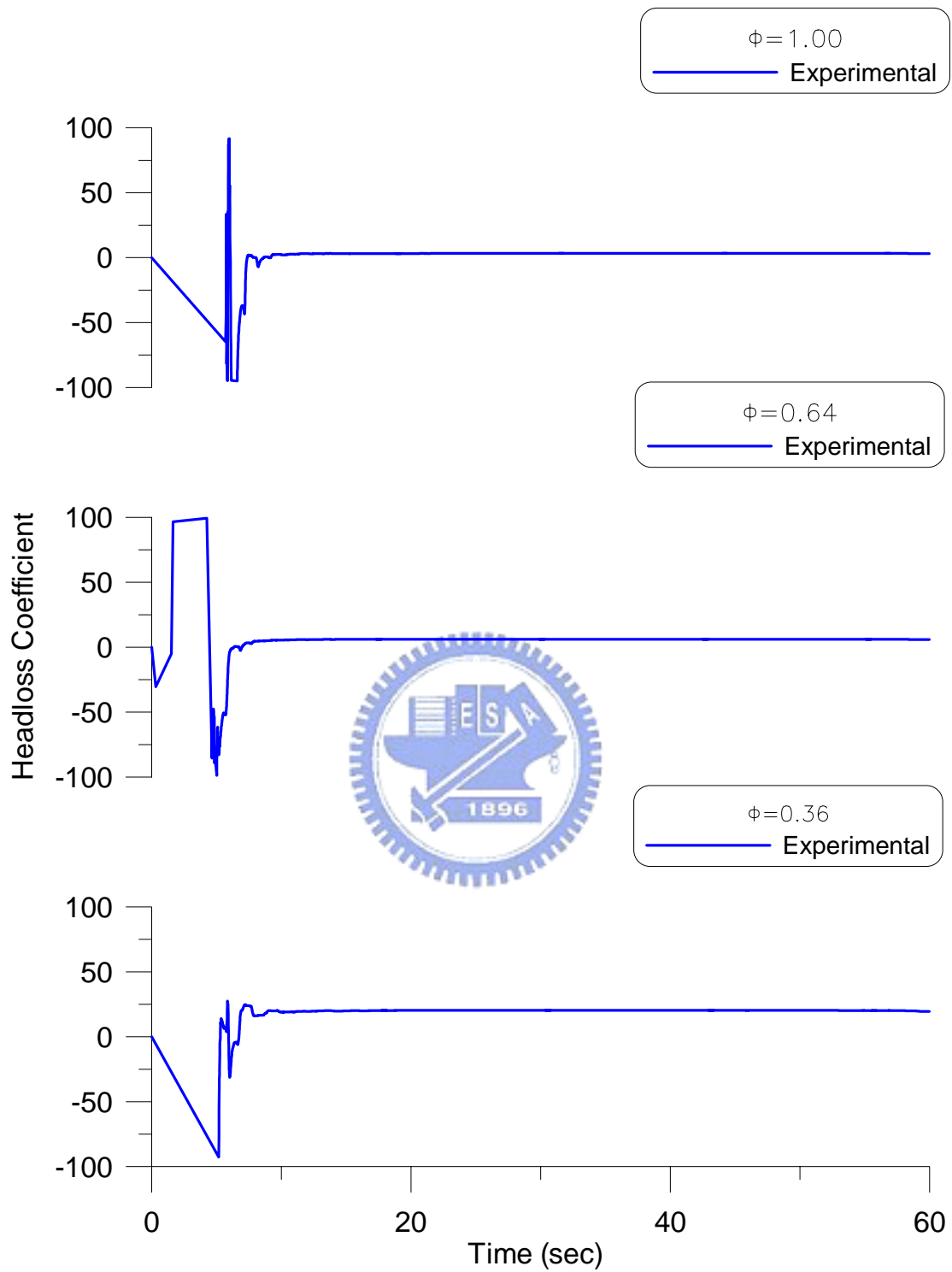


圖 3.19 (e) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
(簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

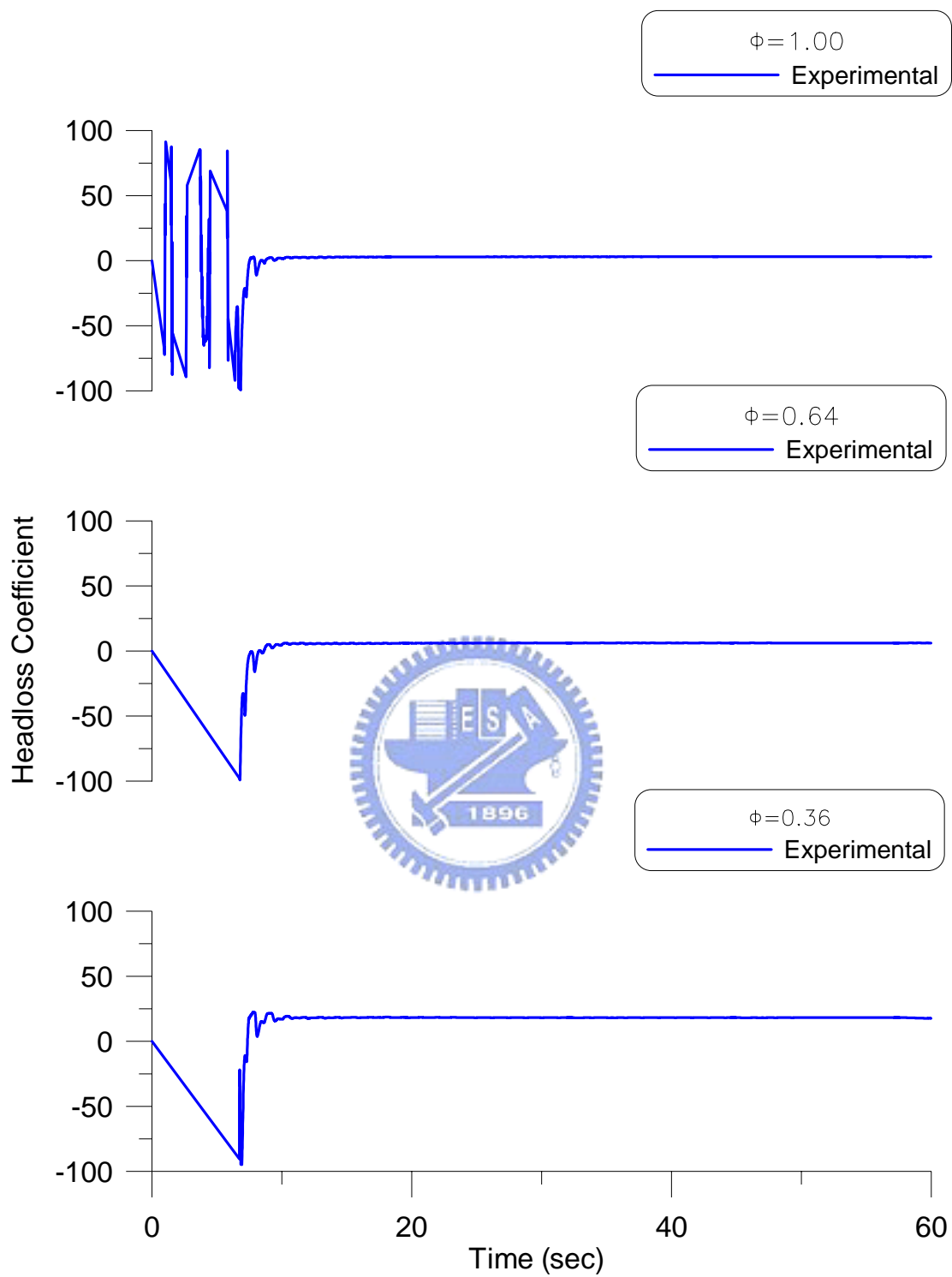


圖 3.19 (f) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )



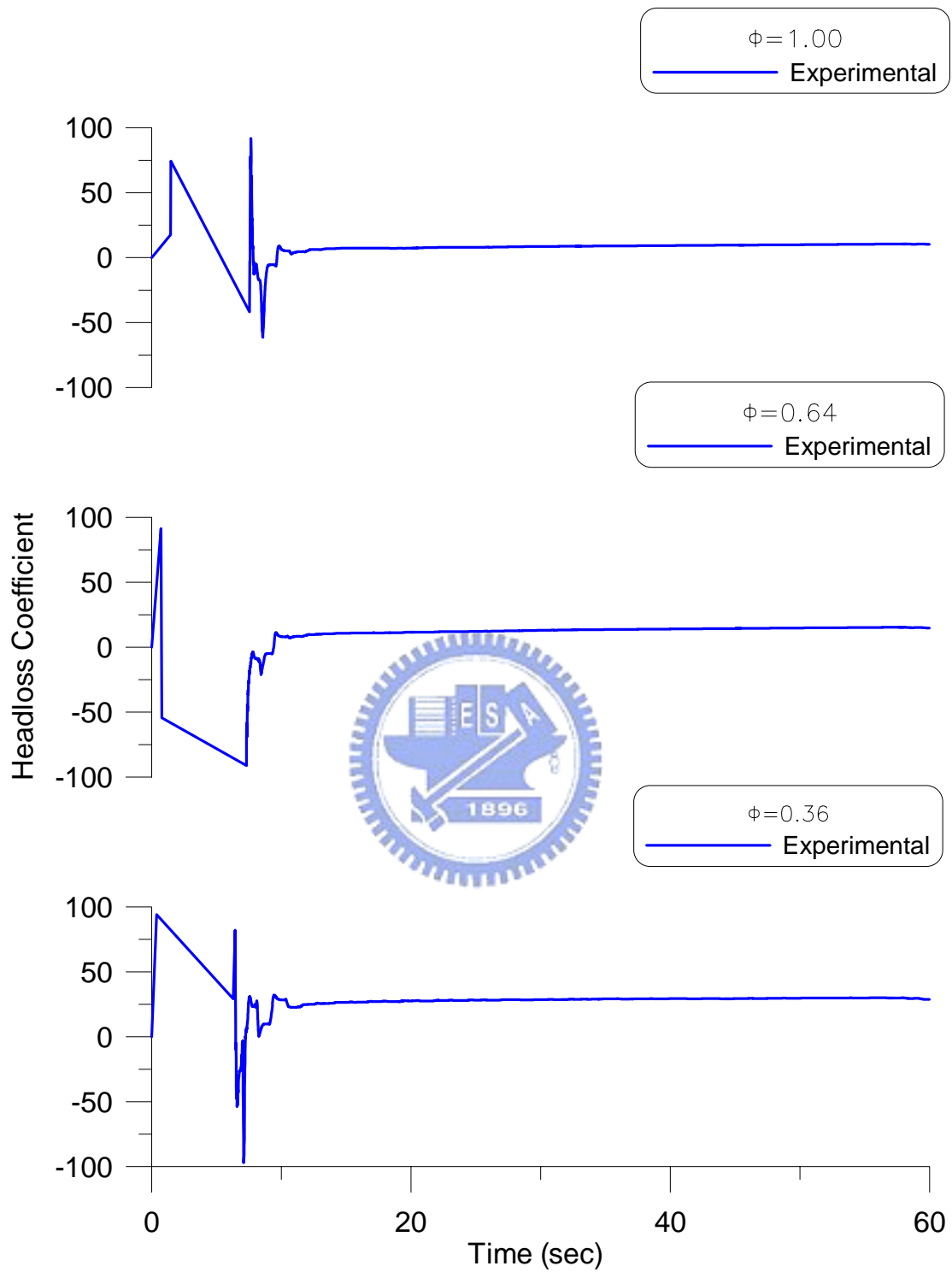


圖 3.19 (g) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
(簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=0.8$ )

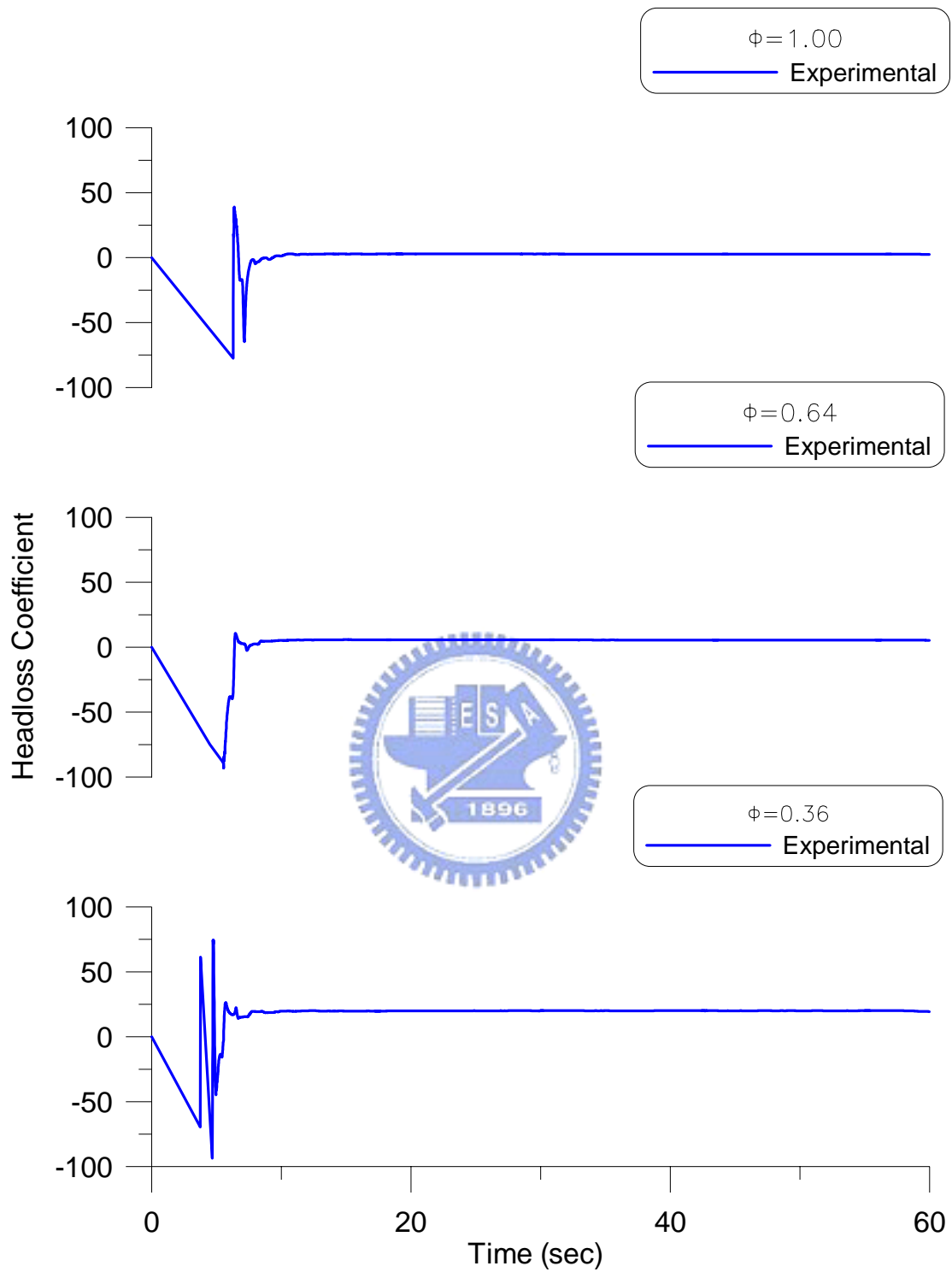


圖 3.19 (h) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

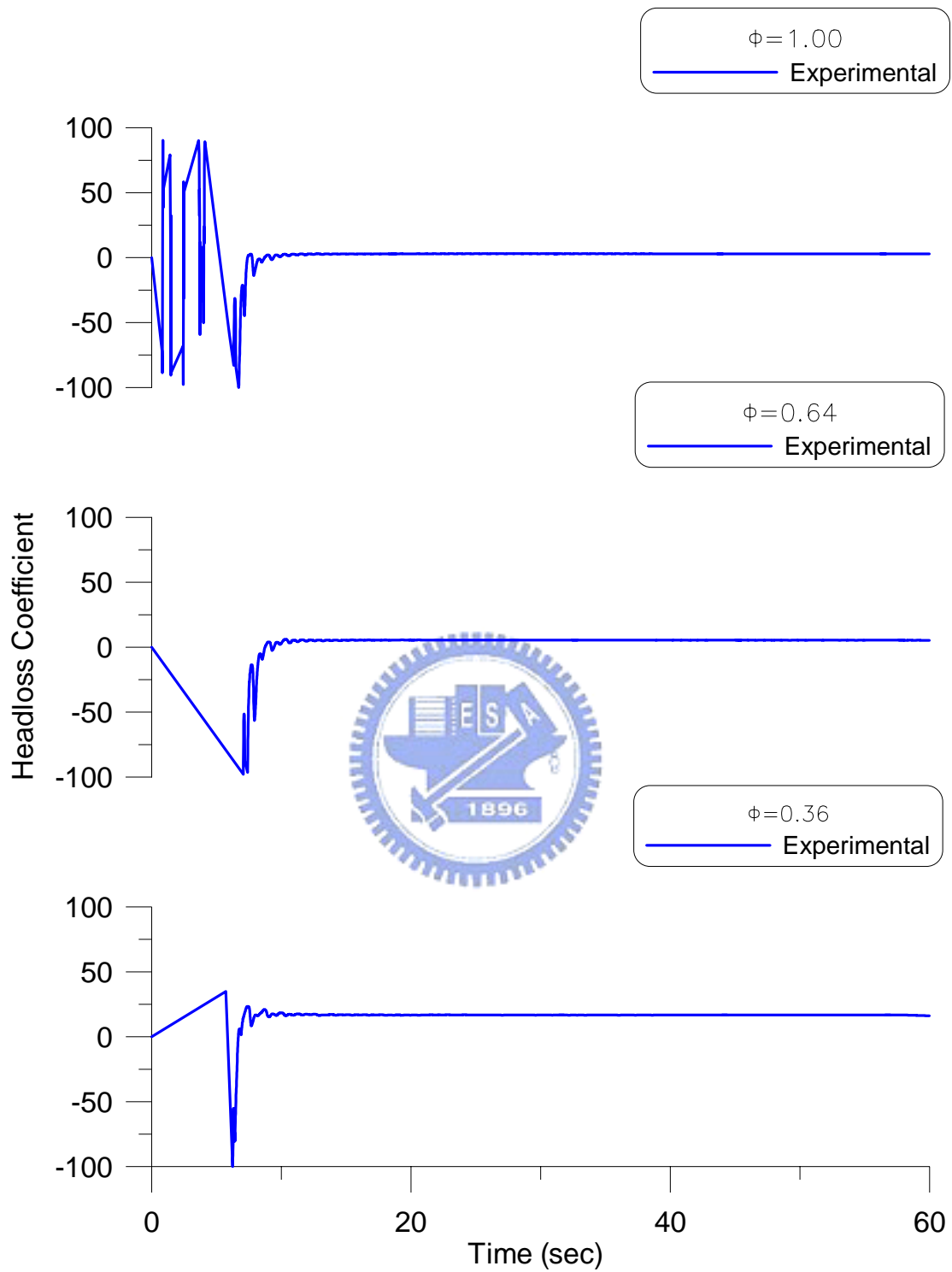


圖 3.19 (i) 元件測試之水頭損失係數識別歷時  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm，擾動頻率比 $\gamma_T=1.6$ )

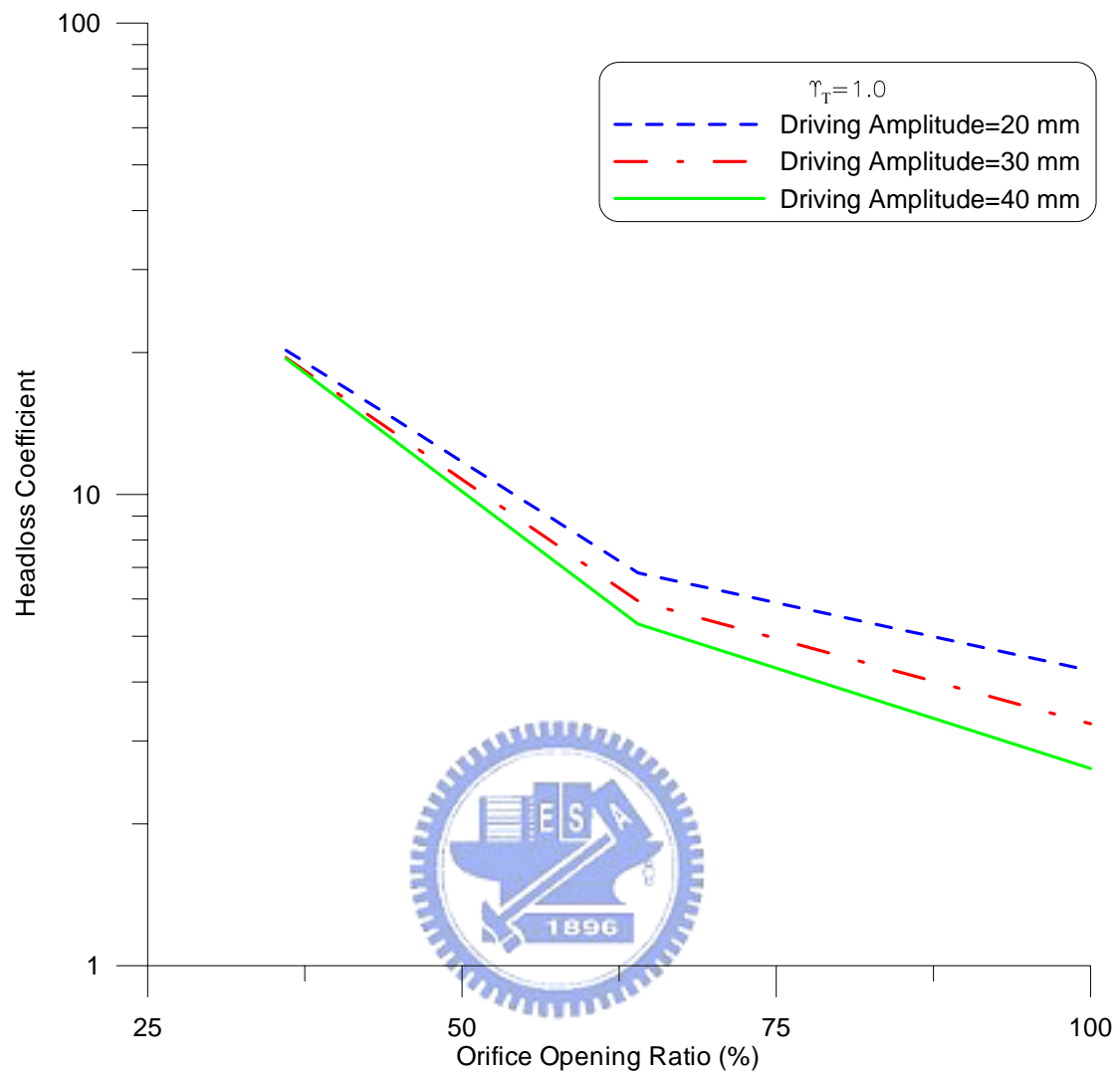


圖 3.20 不同外力振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響  
(簡諧擾動,  $\gamma_T=1.0$ )

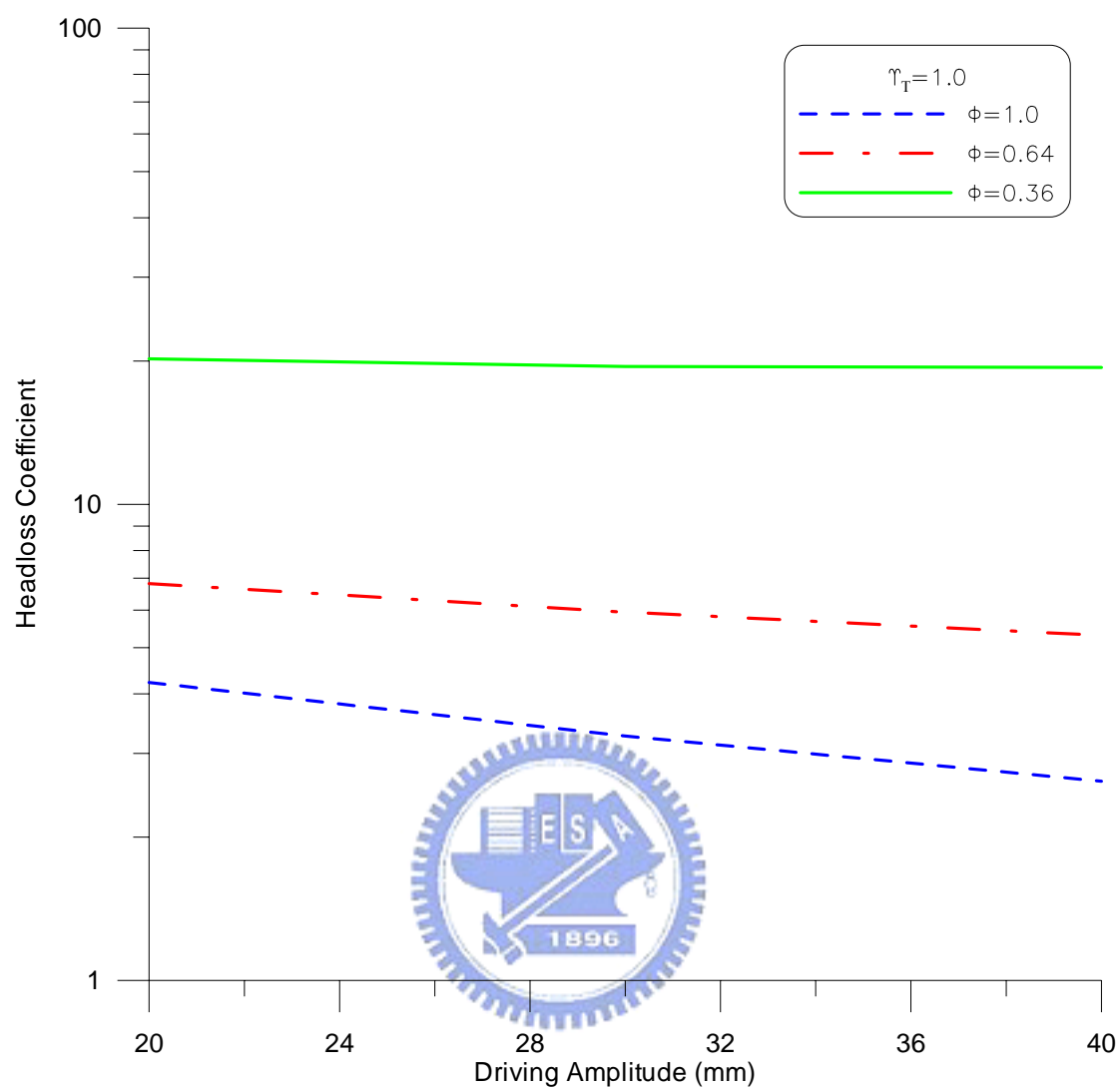


圖 3.21 不同共振擾動振幅與開孔面積比對於水頭損失係數之影響  
 (簡諧擾動,  $\gamma_T=1.0$ )

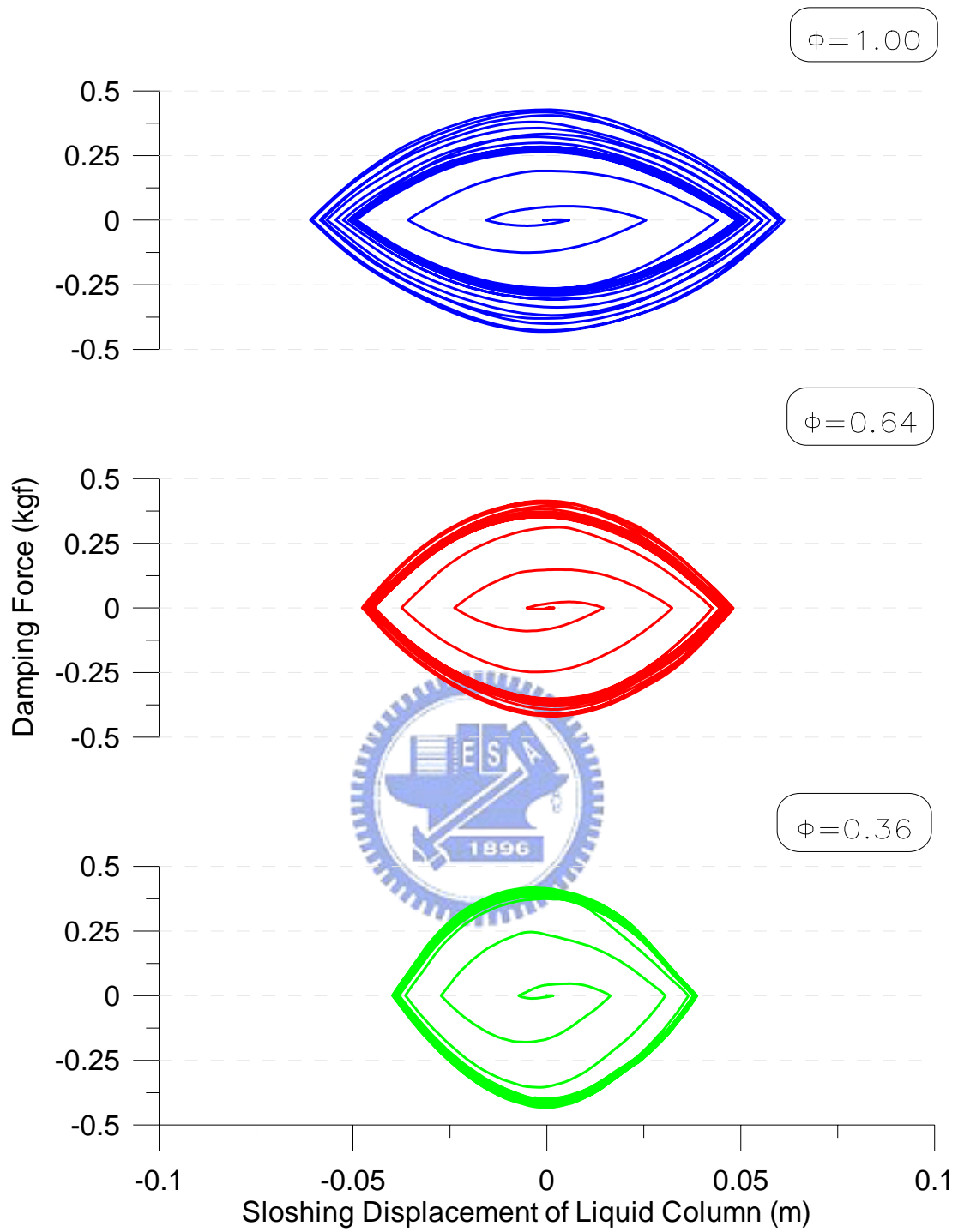


圖 3.22 元件測試之遲滯迴圈  
 (簡諧擾動外力振幅=20mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

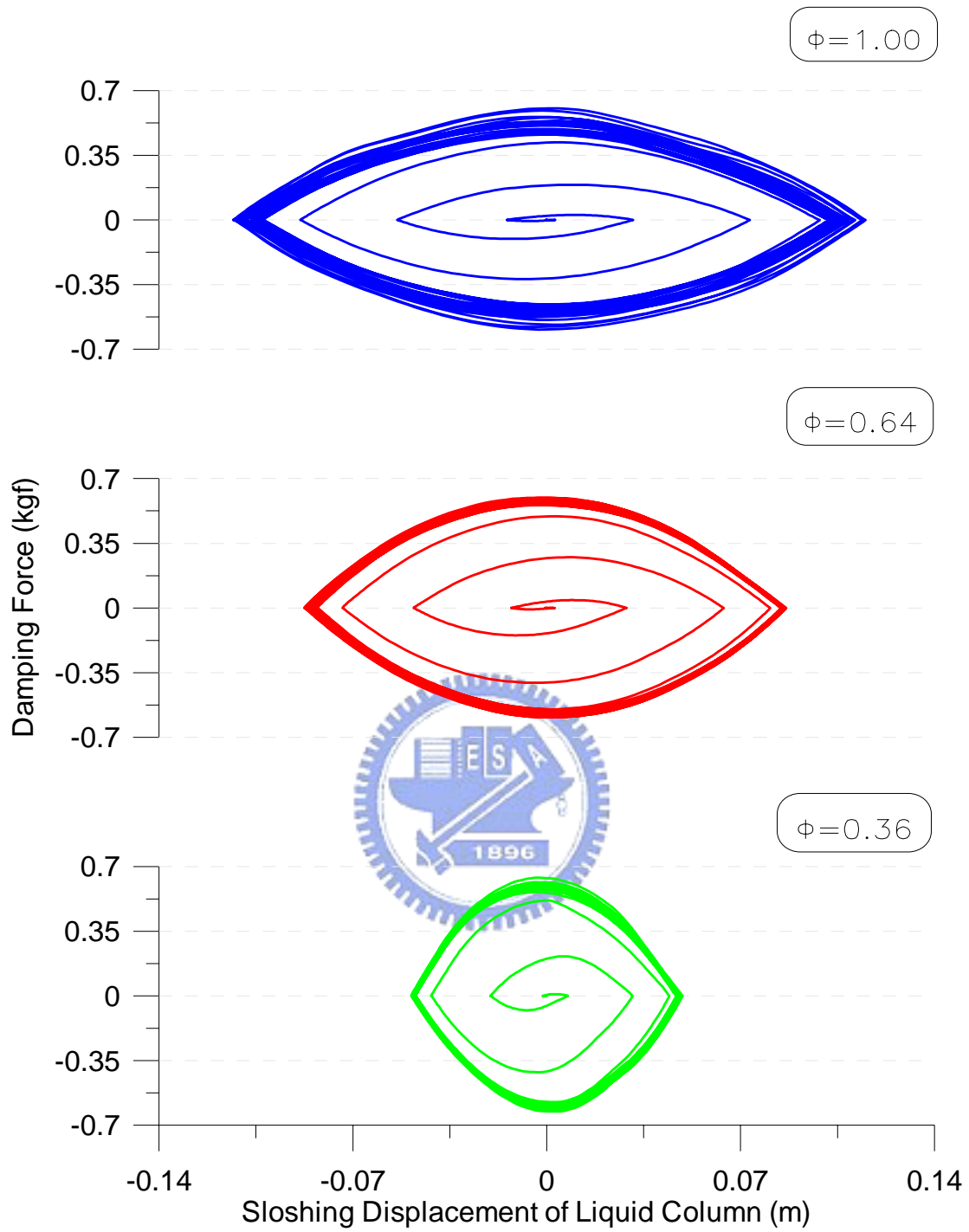


圖 3.23 元件測試之遲滯迴圈  
 (簡諧擾動外力振幅=30mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )

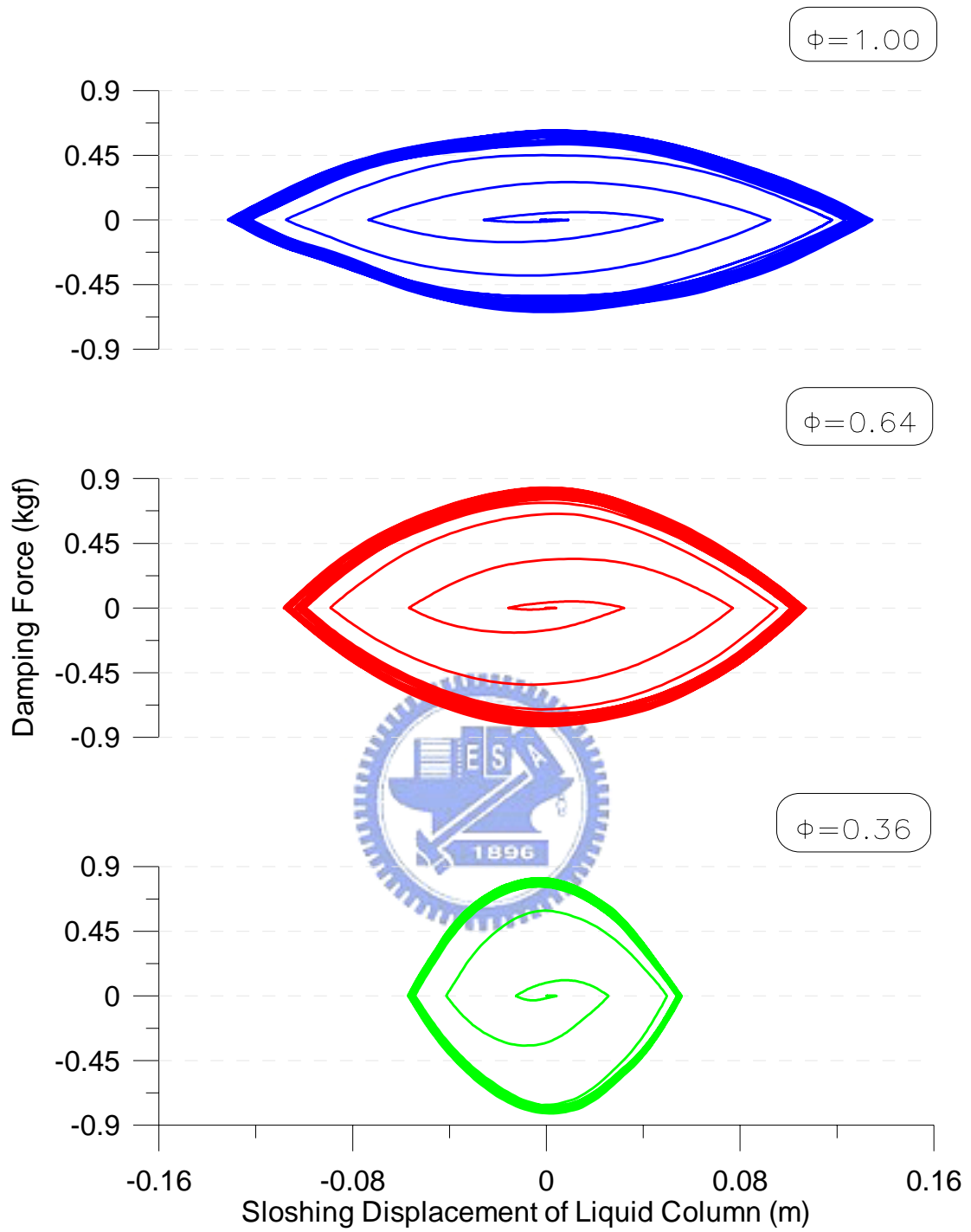


圖 3.24 元件測試之遲滯迴圈  
 (簡諧擾動外力振幅=40mm,擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$ )



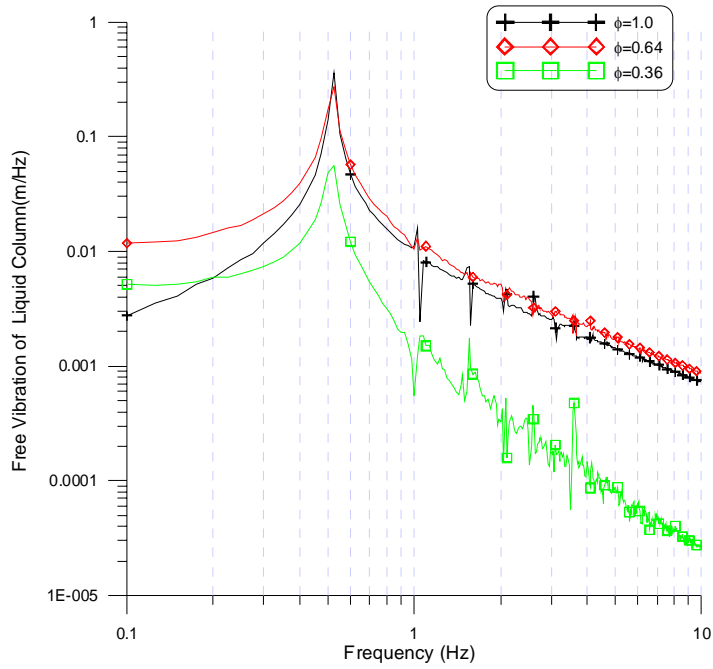


圖 3.25 不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜  
(簡諧擾動外力振幅=20mm,VTLCD 設計頻率=0.5Hz)

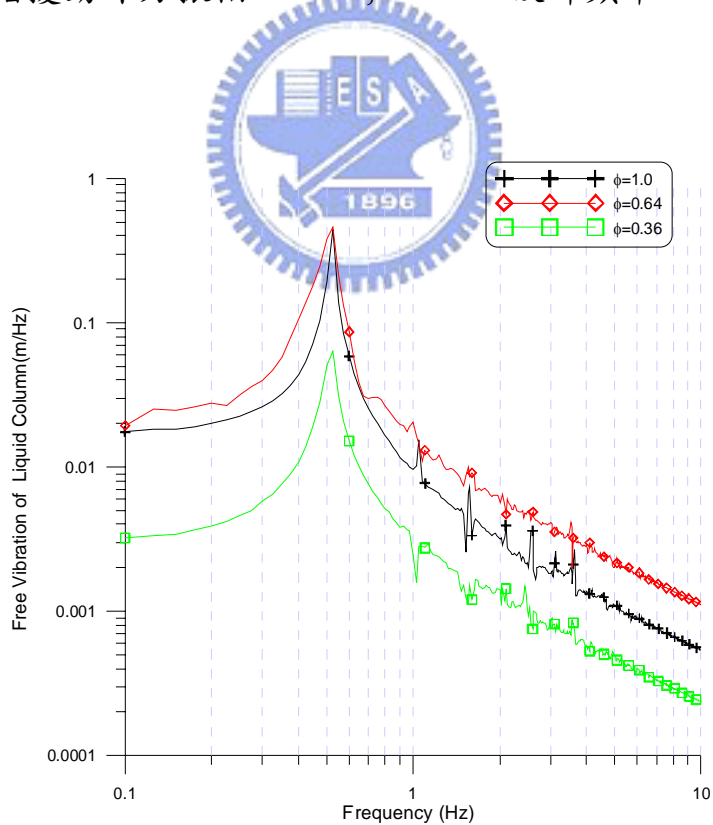


圖 3.26 不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜  
(簡諧擾動外力振幅=30mm,VTLCD 設計頻率=0.5Hz)

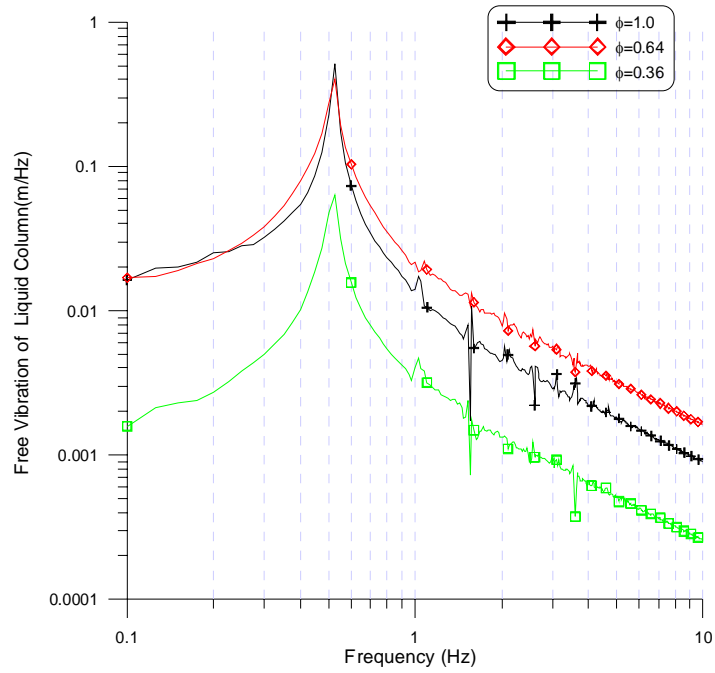


圖 3.27 不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜  
(簡諧擾動外力振幅=40mm, VTLCD 設計頻率=0.5Hz)

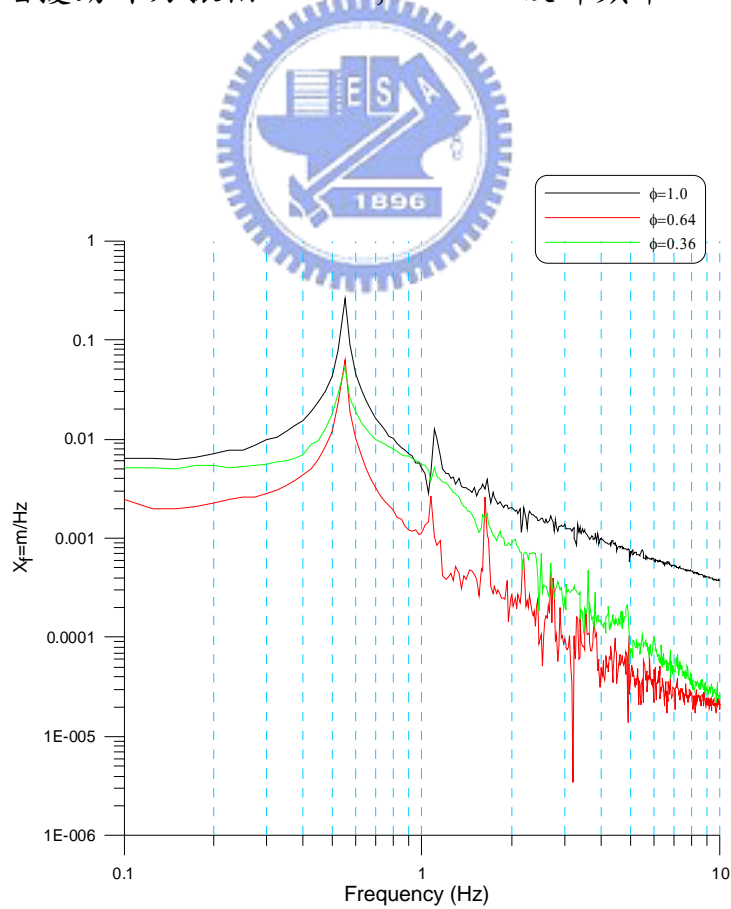


圖 3.28 不同面積比之水柱自由激盪振幅富氏頻譜  
(簡諧擾動外力振幅=30mm, VTLCD 設計頻率=0.53Hz)

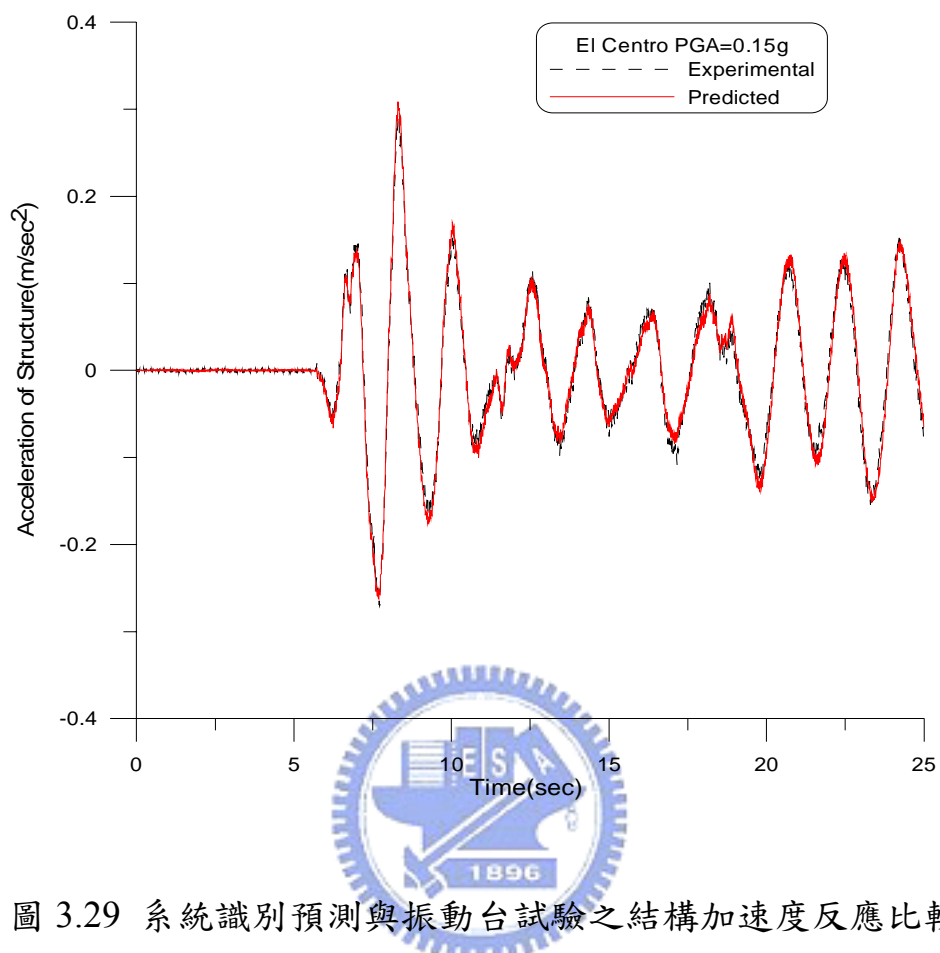


圖 3.29 系統識別預測與振動台試驗之結構加速度反應比較  
(El Centro, PGA=0.15g)

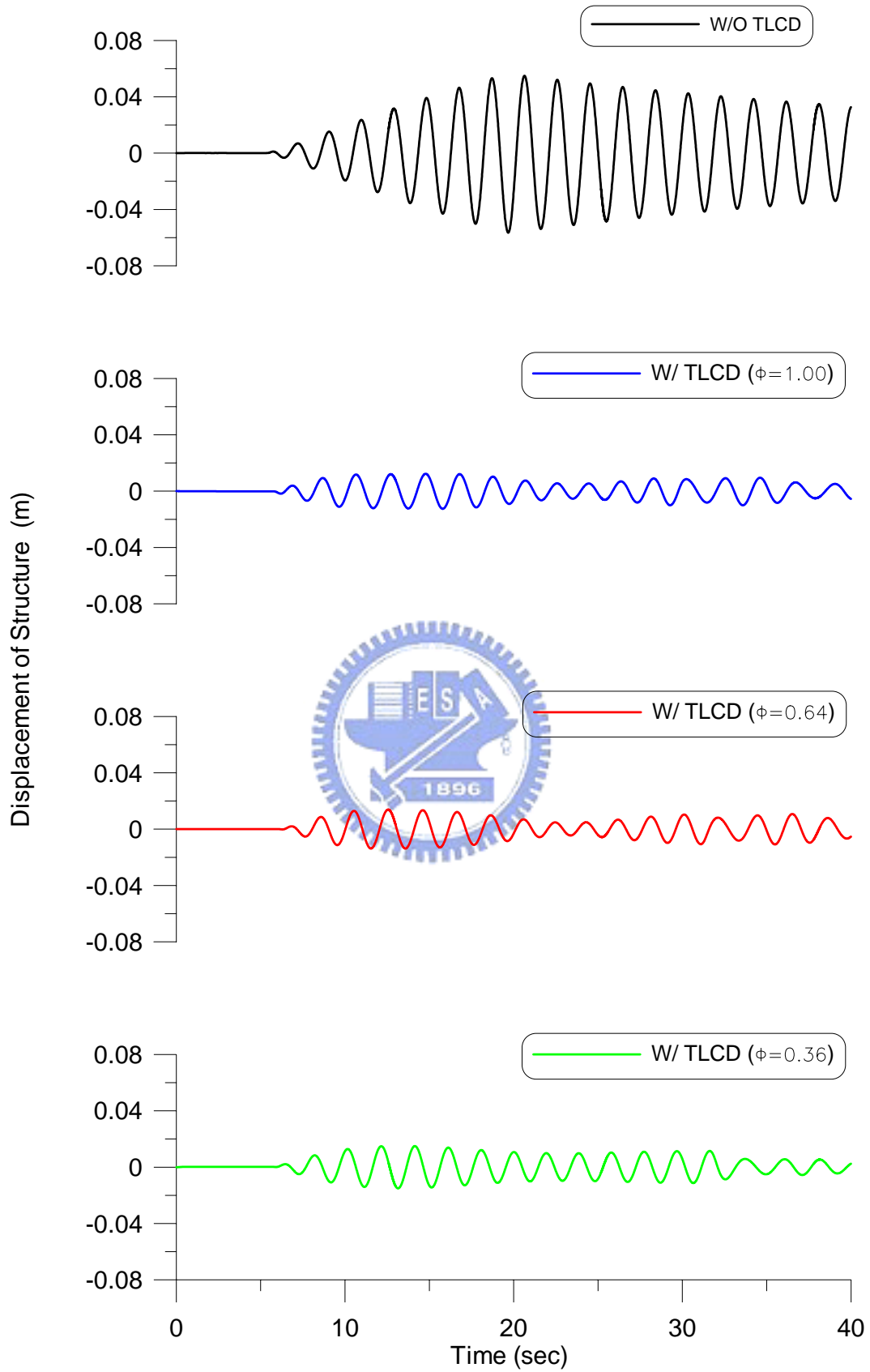


圖 3.30 不同孔口板之 VTLCD 控制與未控制結構之位移歷時  
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ )

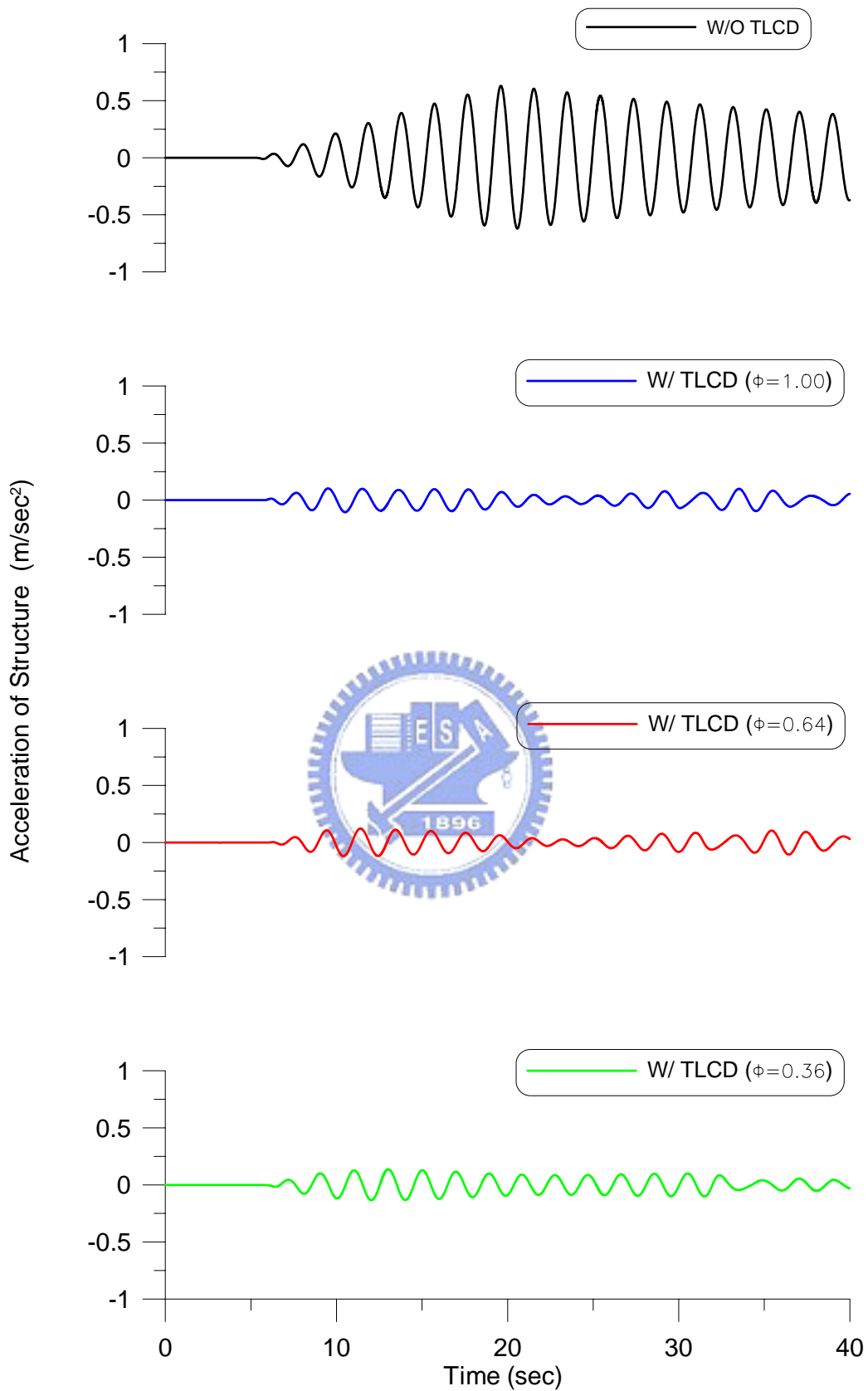


圖 3.31 不同孔口板之 VTLCD 控制與未控制結構之加速度歷時  
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ )

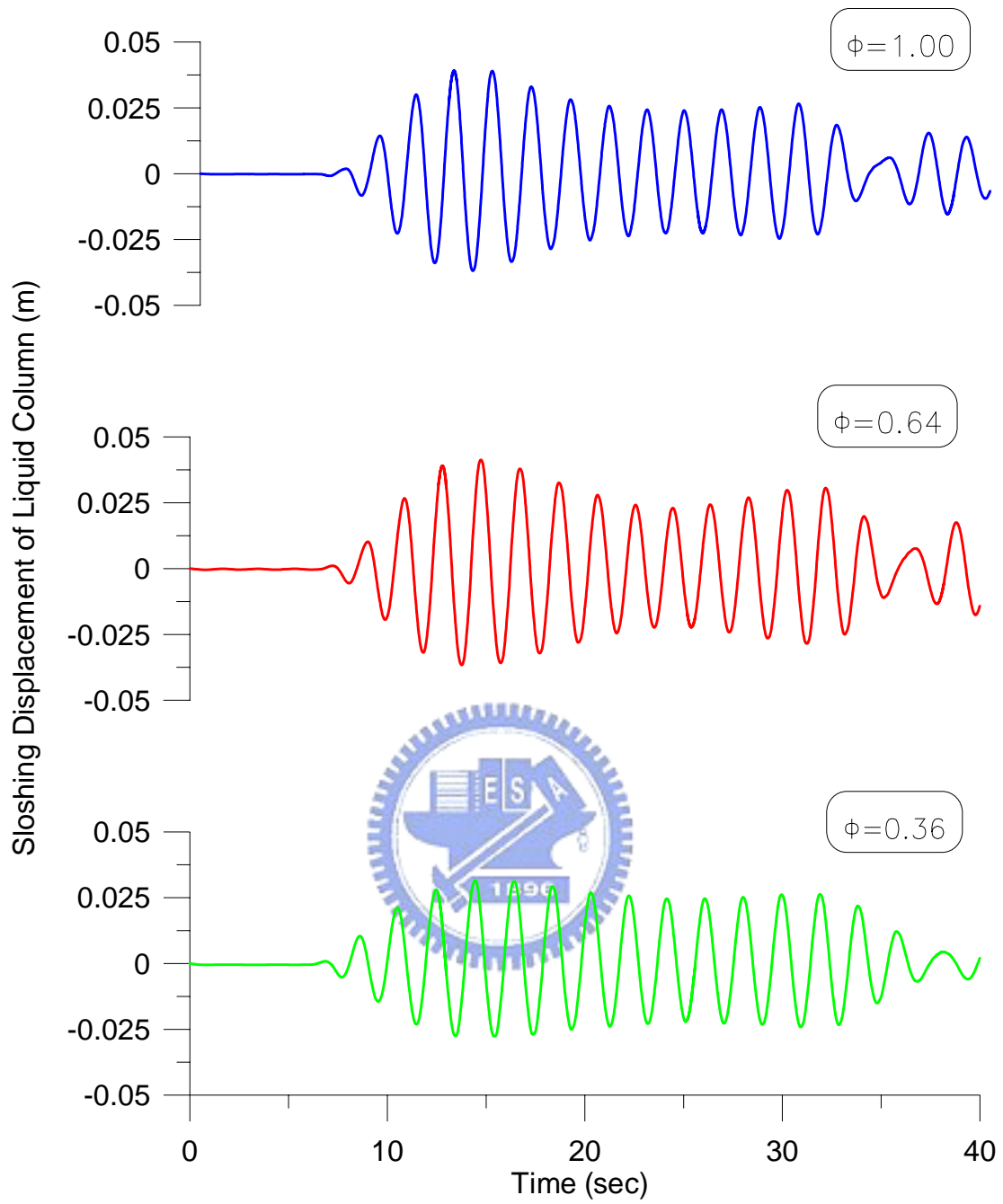


圖 3.32 不同孔口板 VTLCD 之水柱激盪位移歷時  
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ )

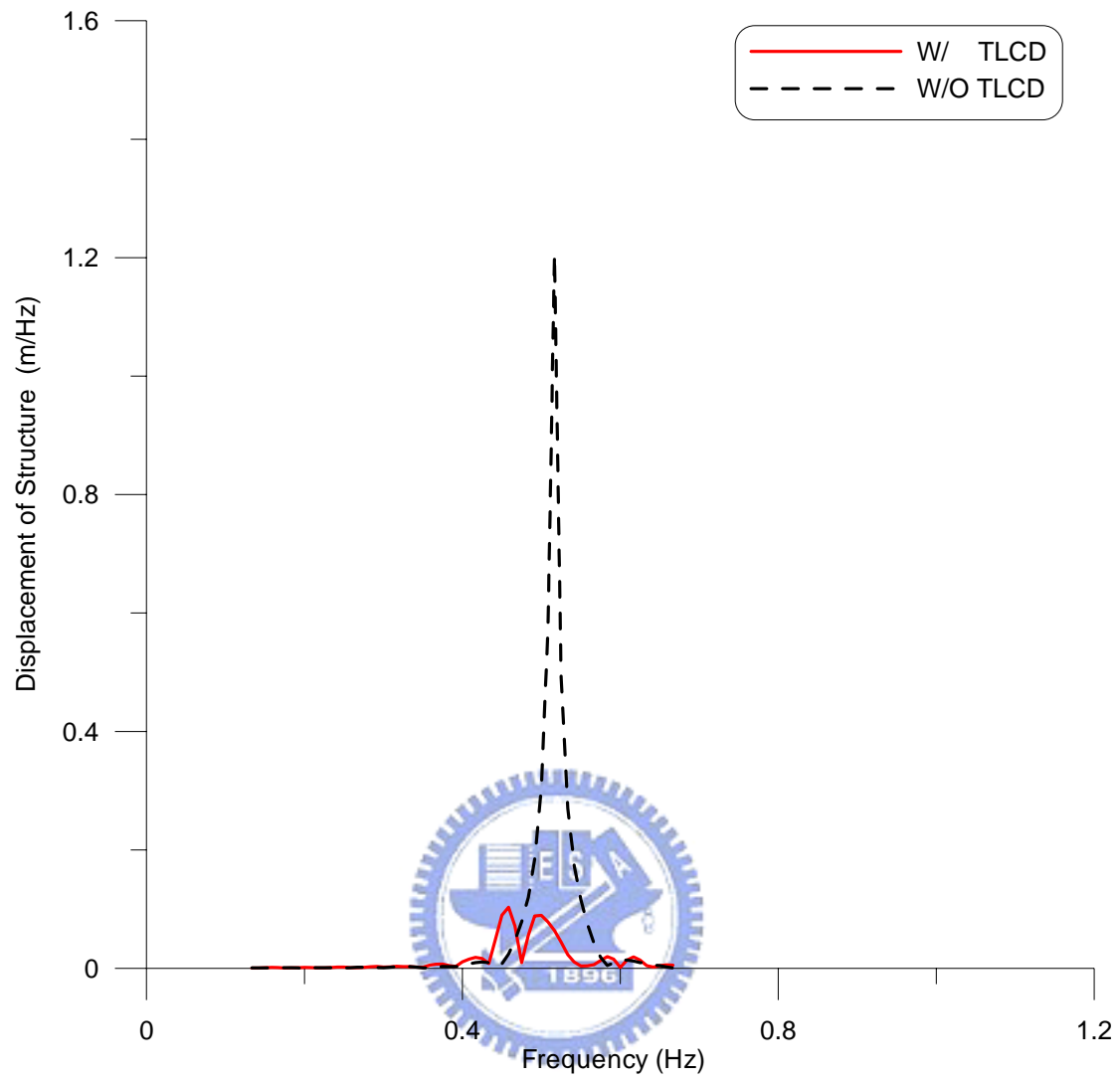


圖 3.33 VTLCD 控制結構與未控制結構之位移富氏頻譜  
 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ ， $\Phi = 1.00$ )

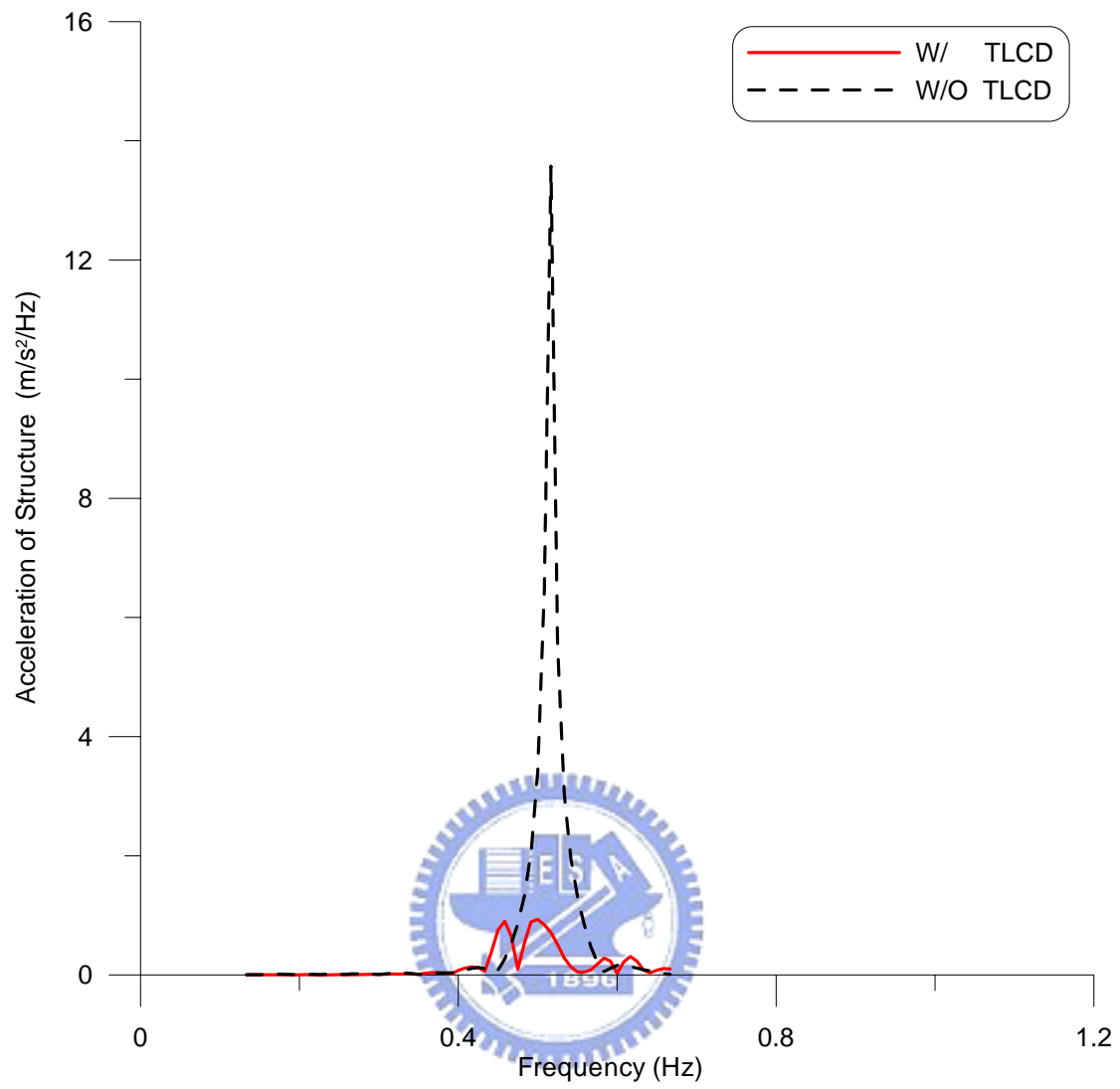


圖 3.34 VTLCD 控制結構與未控制結構之加速度富氏頻譜  
 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$ ， $\Phi = 1.00$ )



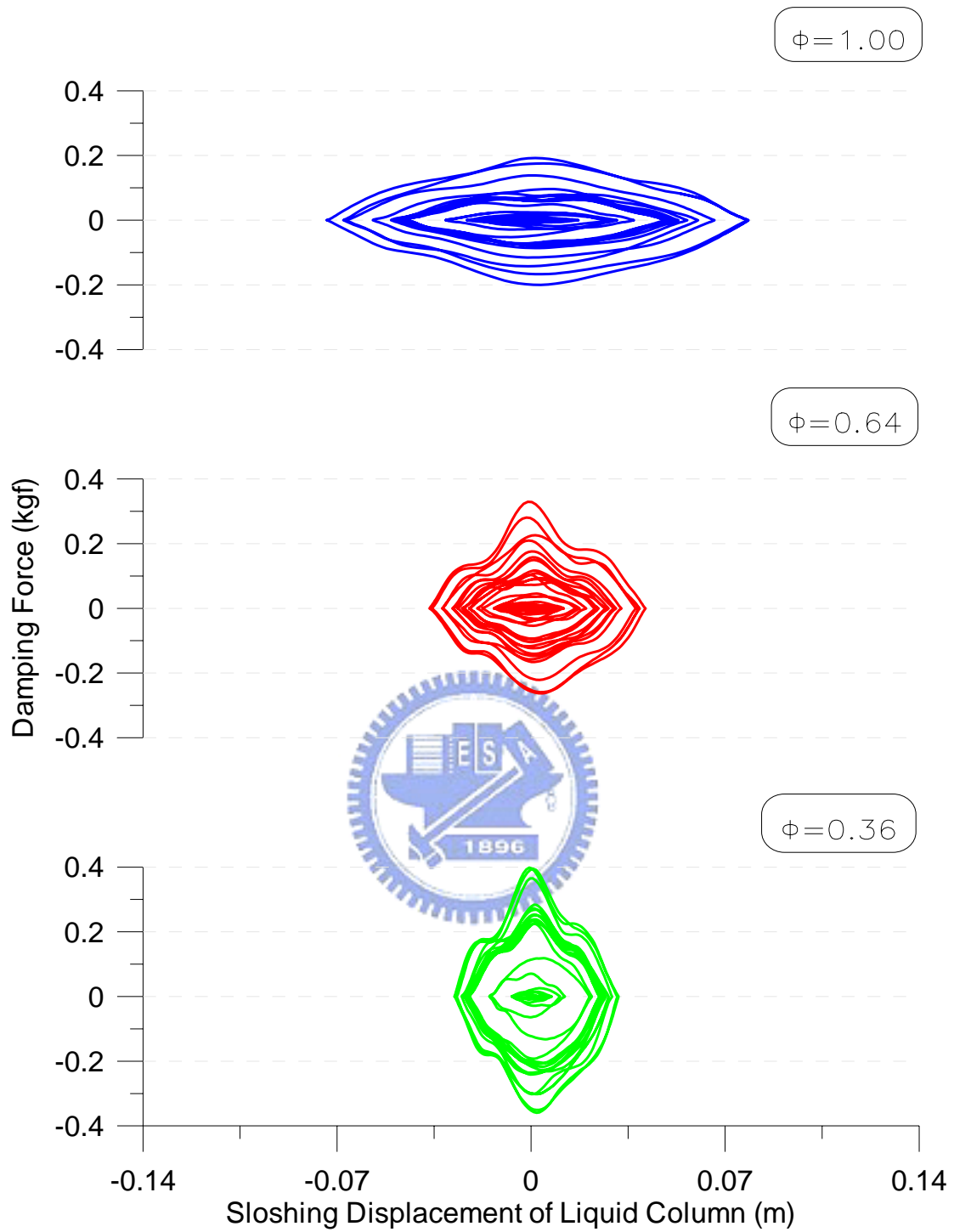


圖 3.35 不同孔口板之 VTLCD 遲滯迴圈  
 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ )

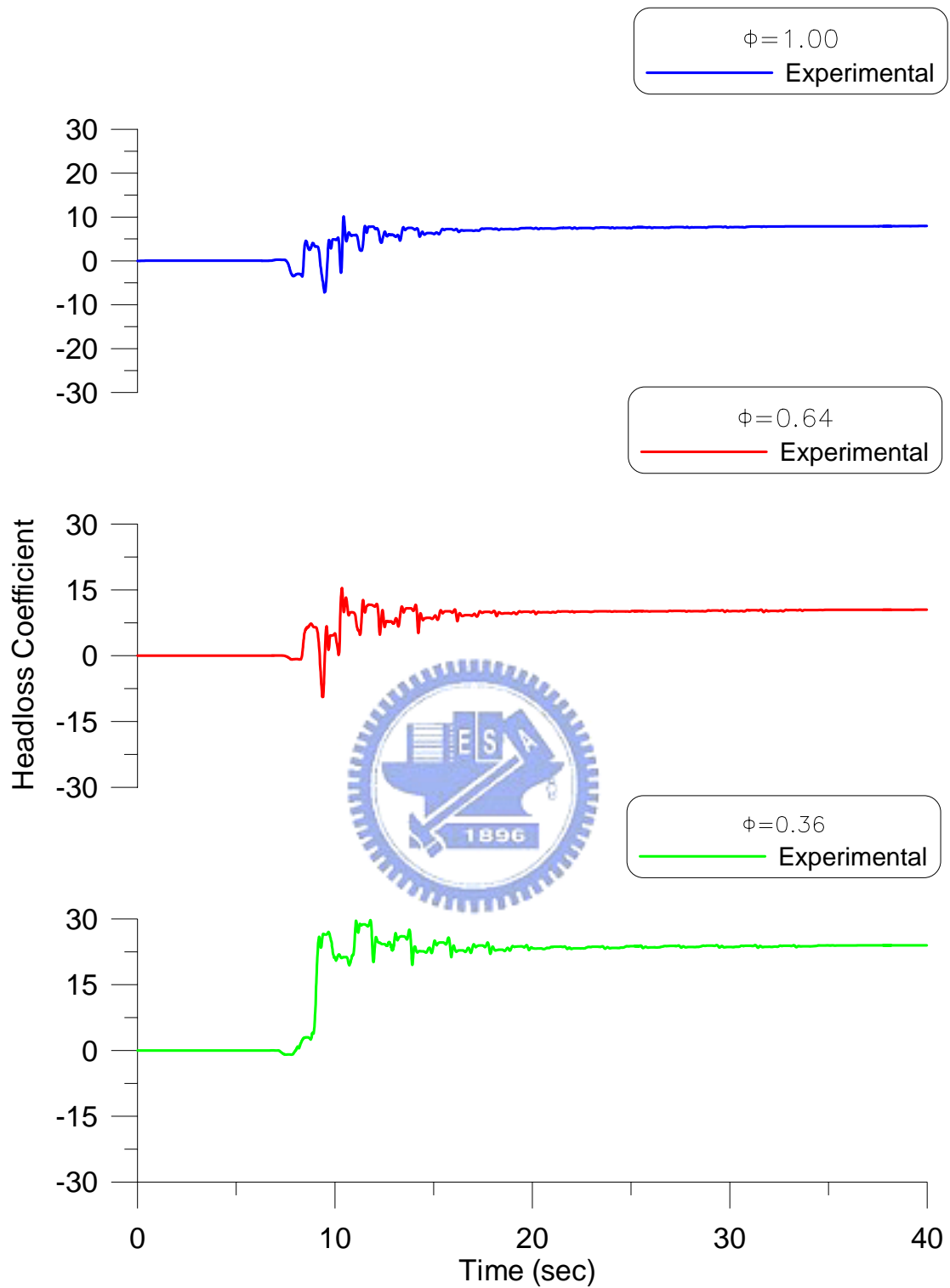


圖 3.36 不同孔口板孔徑之 VTLCD 水頭損失係數識別歷時  
(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ )

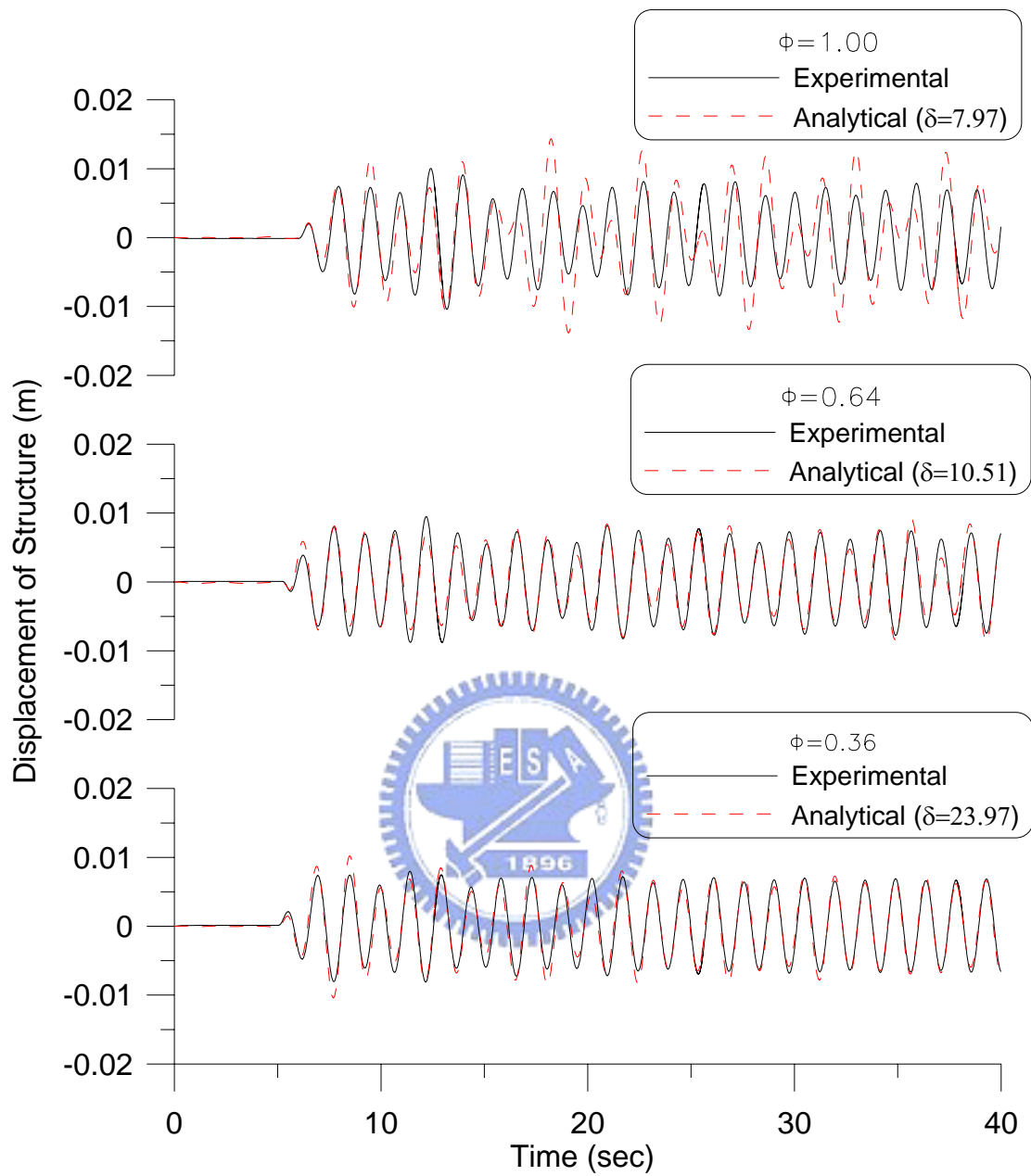


圖 3.37 性能試驗與理論分析所得之結構位移歷時比較  
 (簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒)

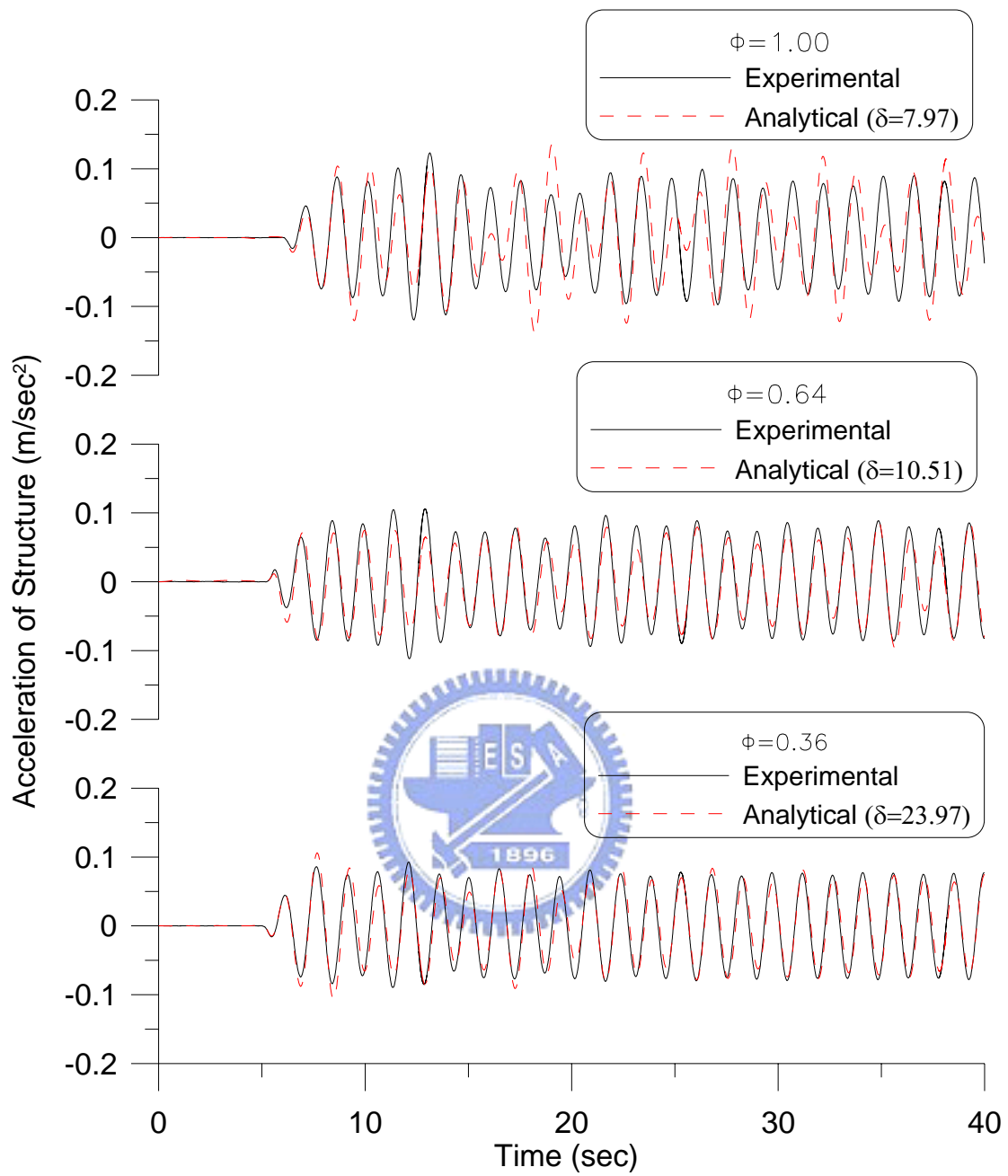


圖 3.38 性能試驗與理論分析所得之結構加速度歷時比較  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒)

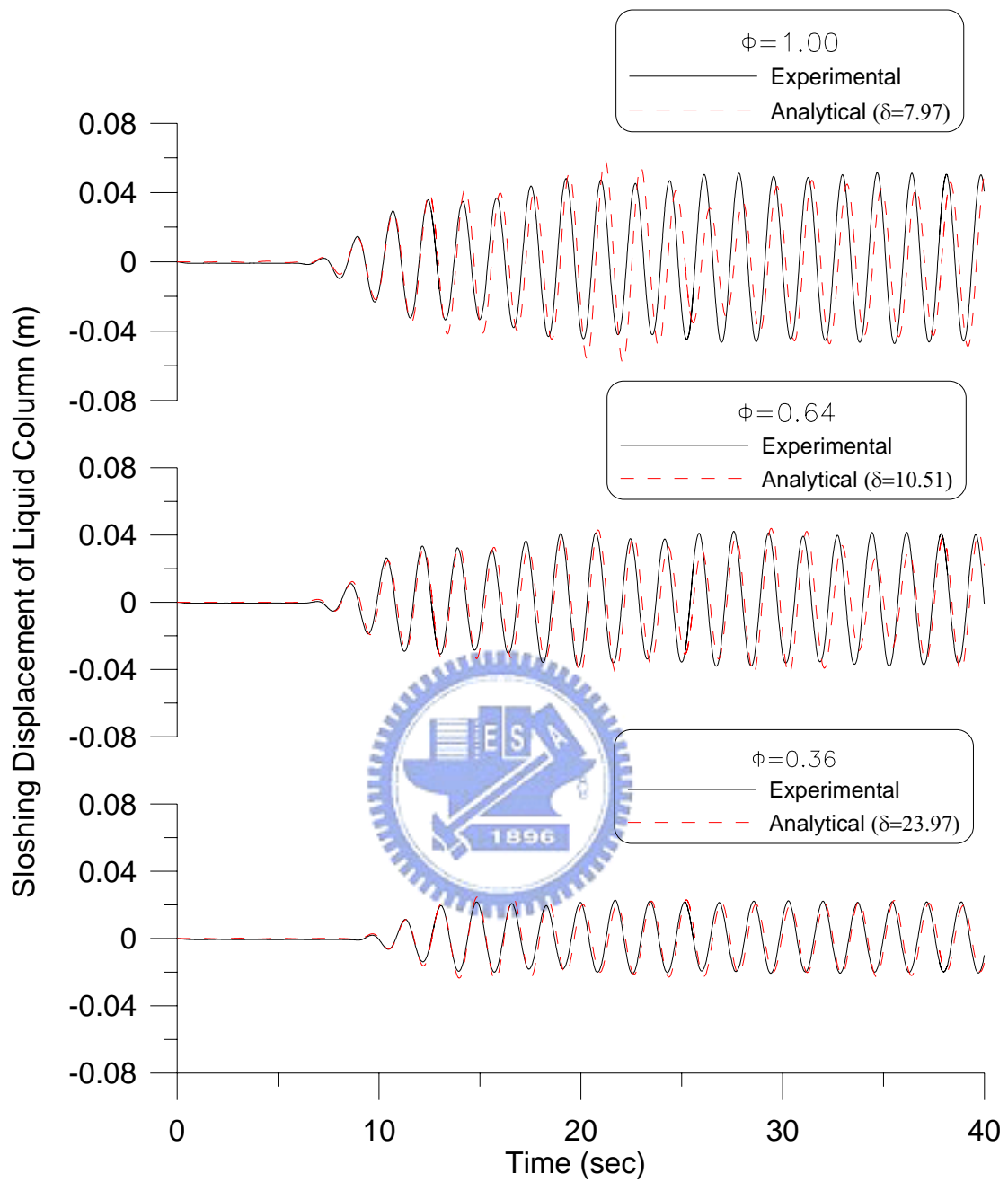


圖 3.39 性能試驗與理論分析所得之水柱激盪位移歷時比較  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 40 秒)

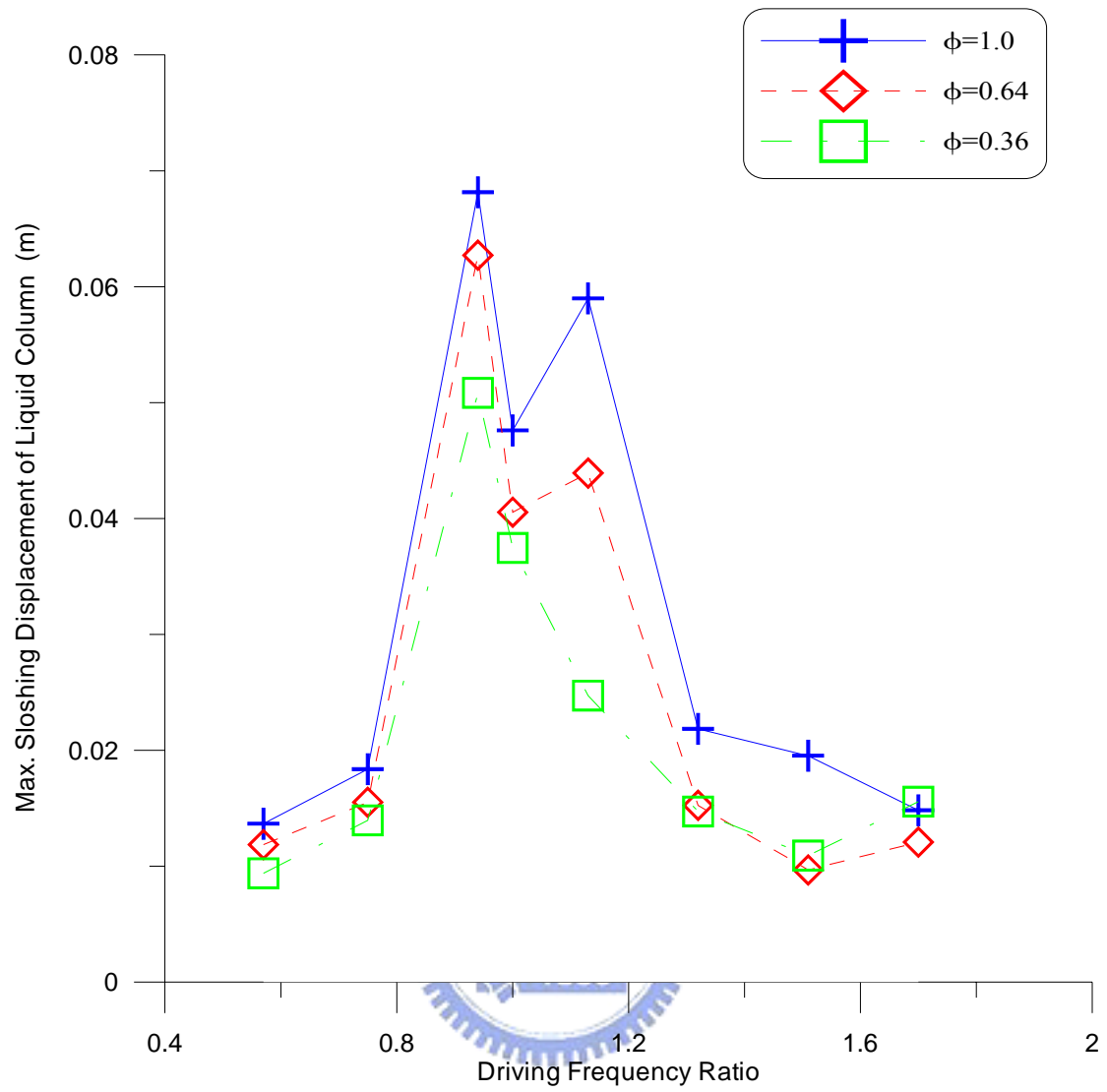


圖 3.40 擾動頻率比對於水柱激盪位移峰值之影響  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

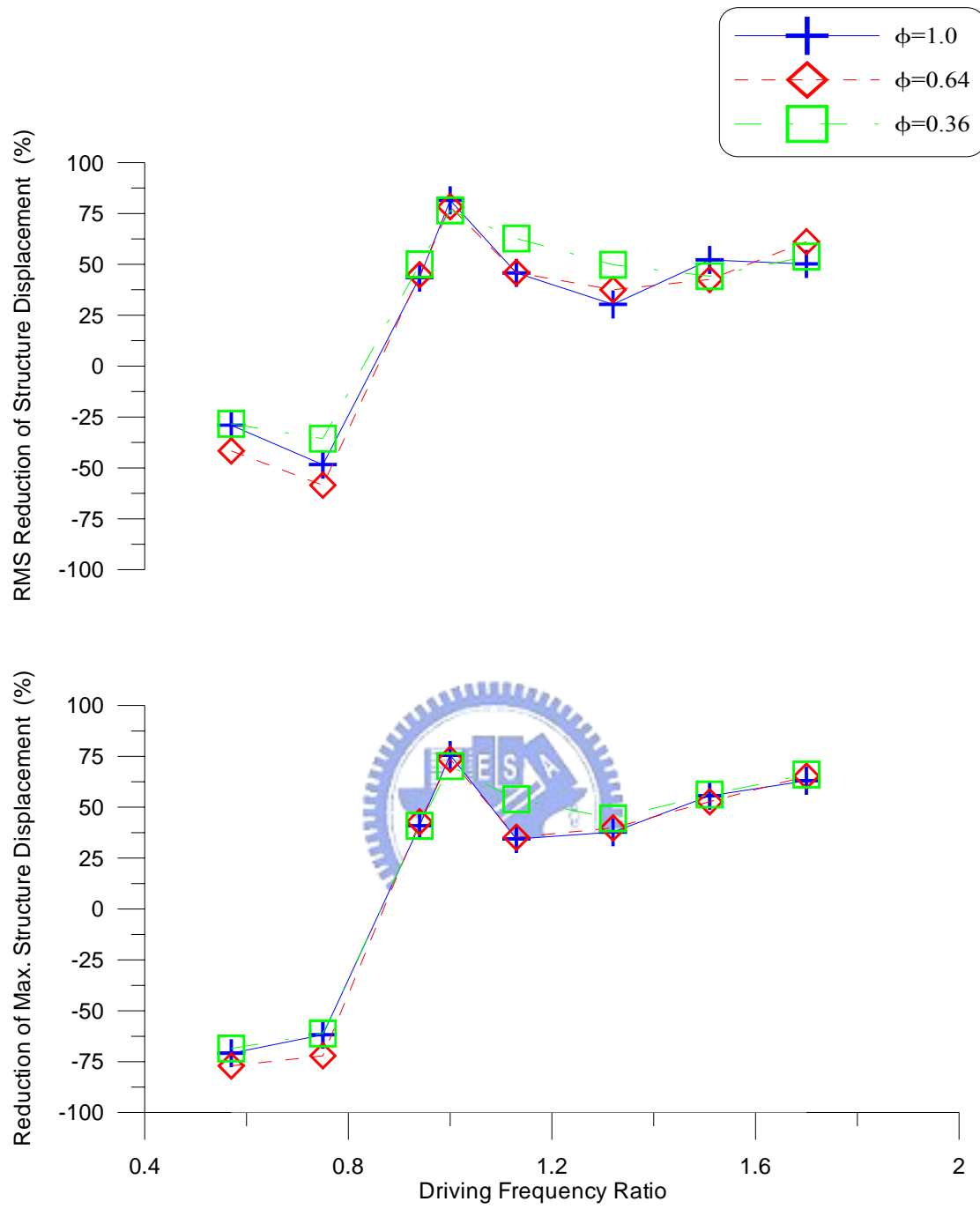


圖 3.41 擾動頻率比對於結構位移反應折減之影響  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

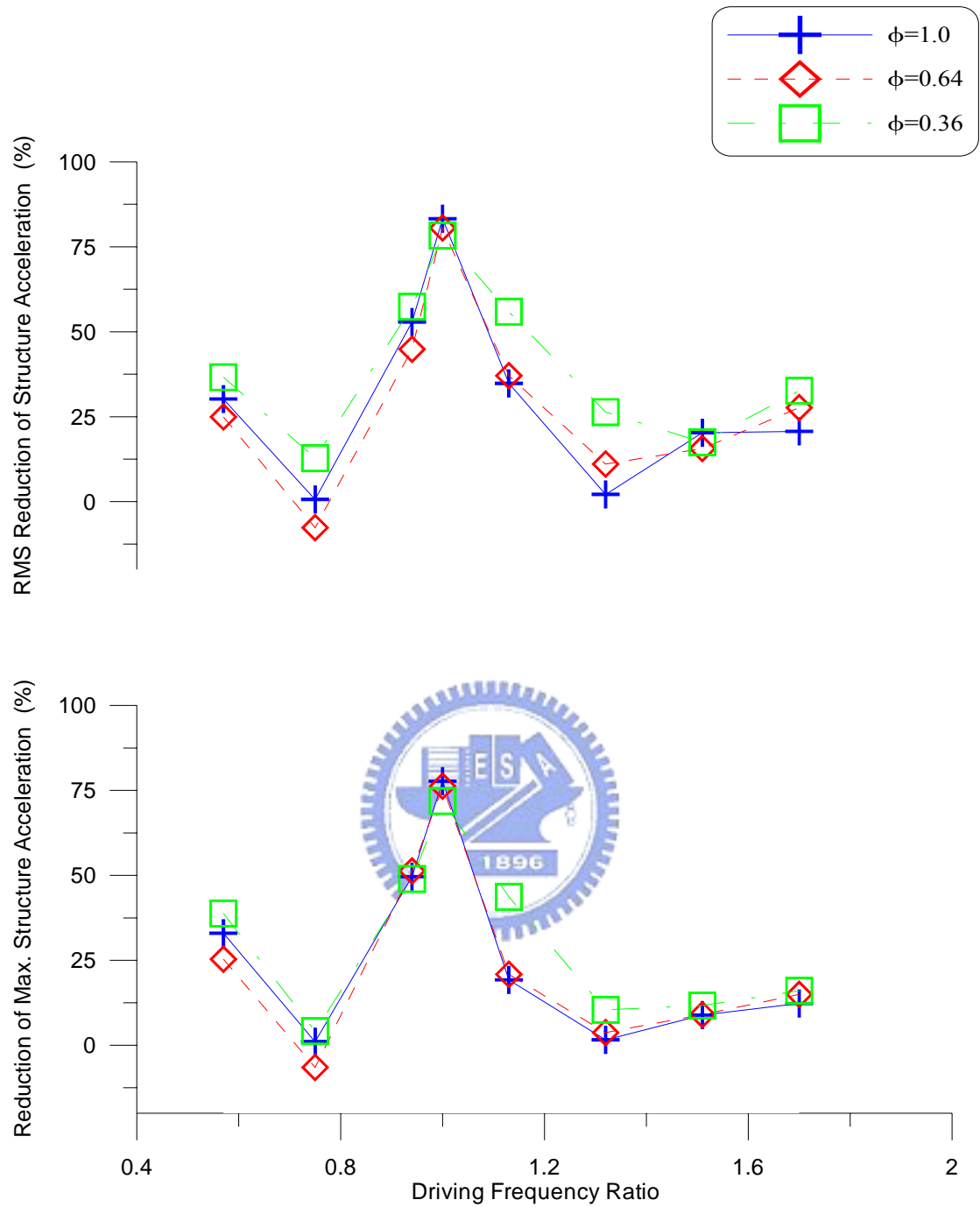


圖 3.42 擾動頻率比對於結構加速度反應折減之影響  
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)



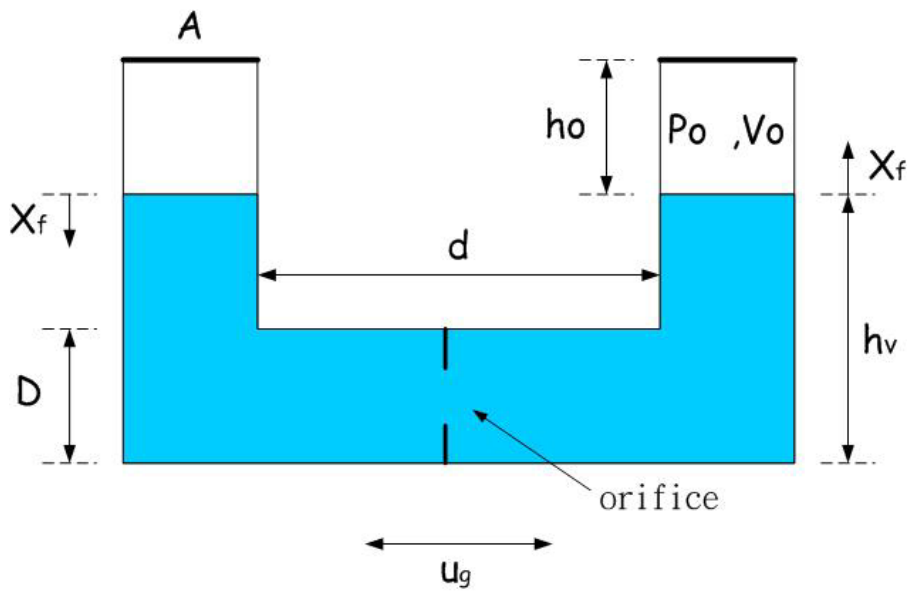


圖 4.1 氣密式 TLCD 系統之示意圖

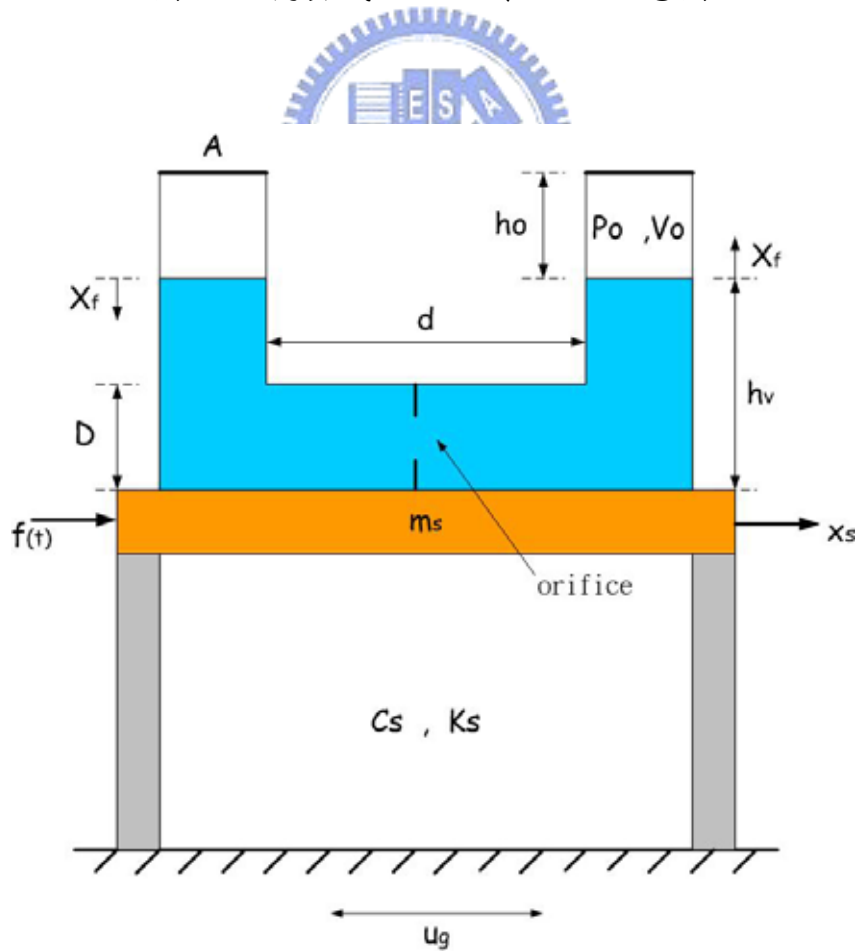


圖 4.2 單自由度結構裝置氣密式 TLCD 系統之示意圖

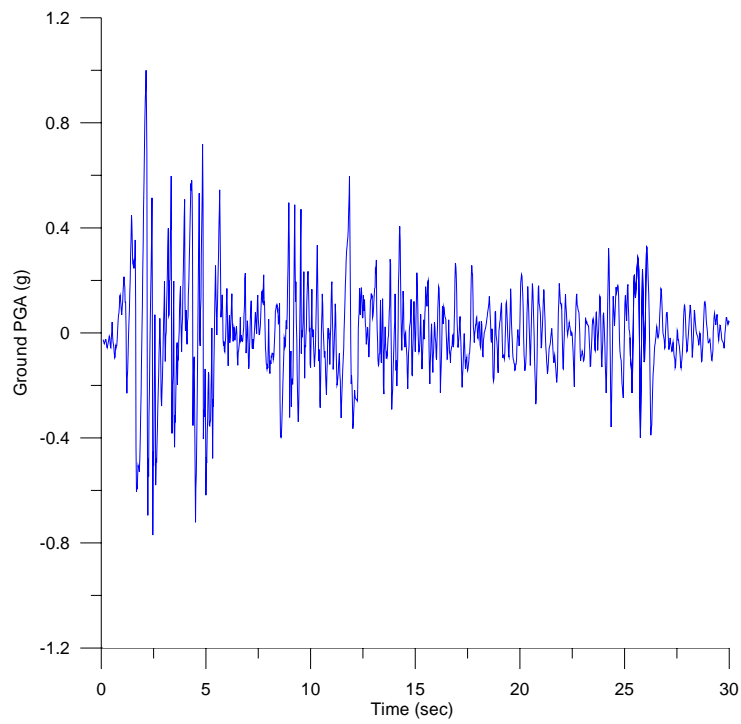


圖 4.3(a) El Centro 震波之加速度歷時圖 (正規化至 1g)

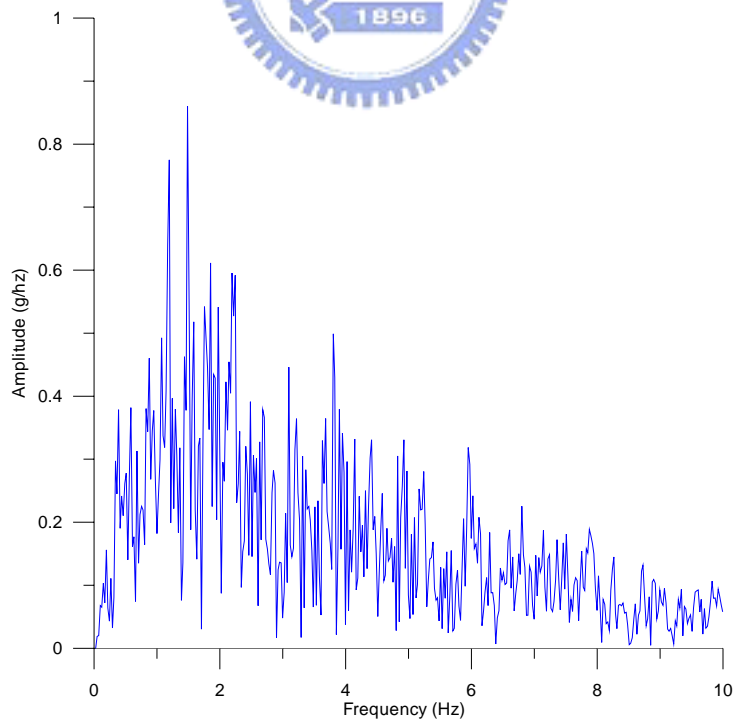


圖 4.3(b) El Centro 震波加速度之傅氏頻譜 (正規化至 1g)

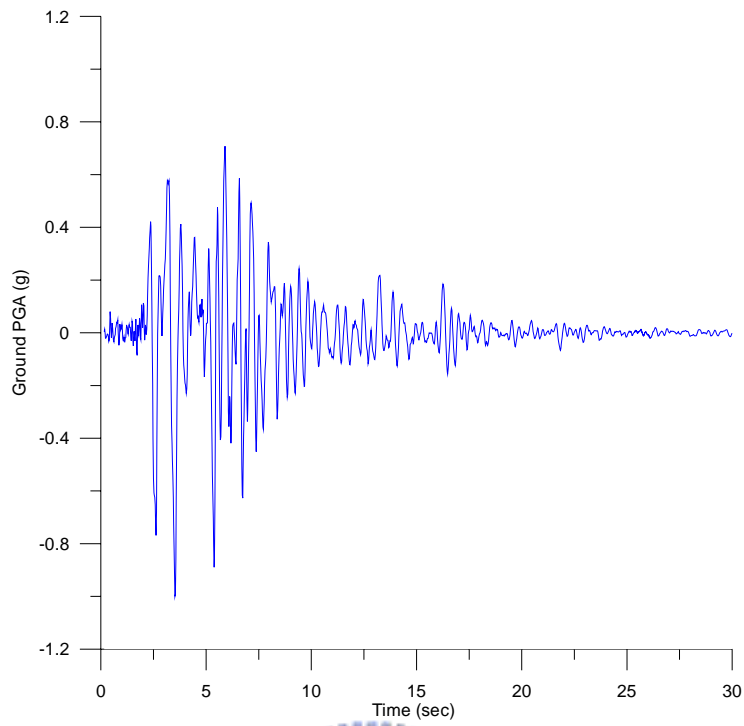


圖 4.4(a) Kobe 震波加之速度歷時圖 (正規化至 1g)

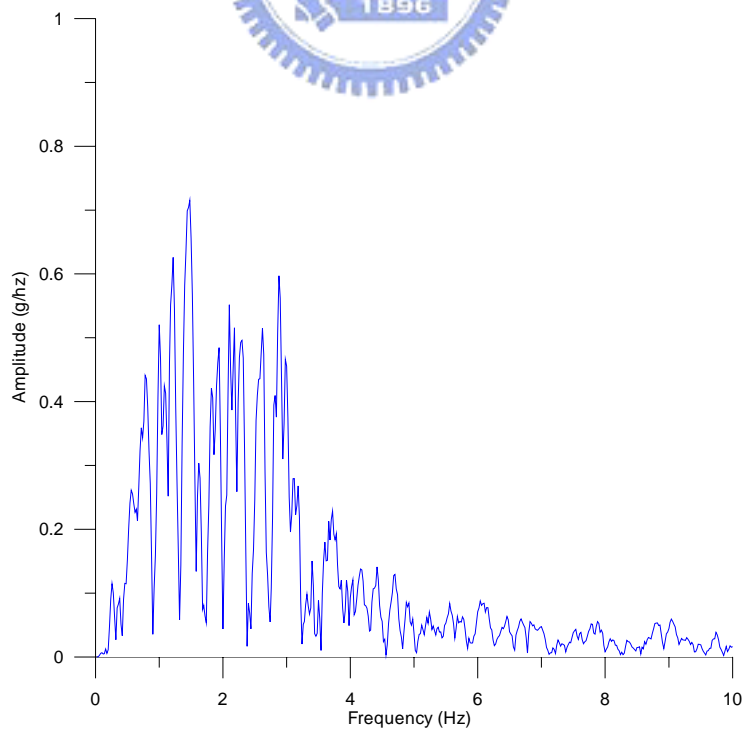


圖 4.4(b) Kobe 震波加速度之富氏頻譜 (正規化至 1g)

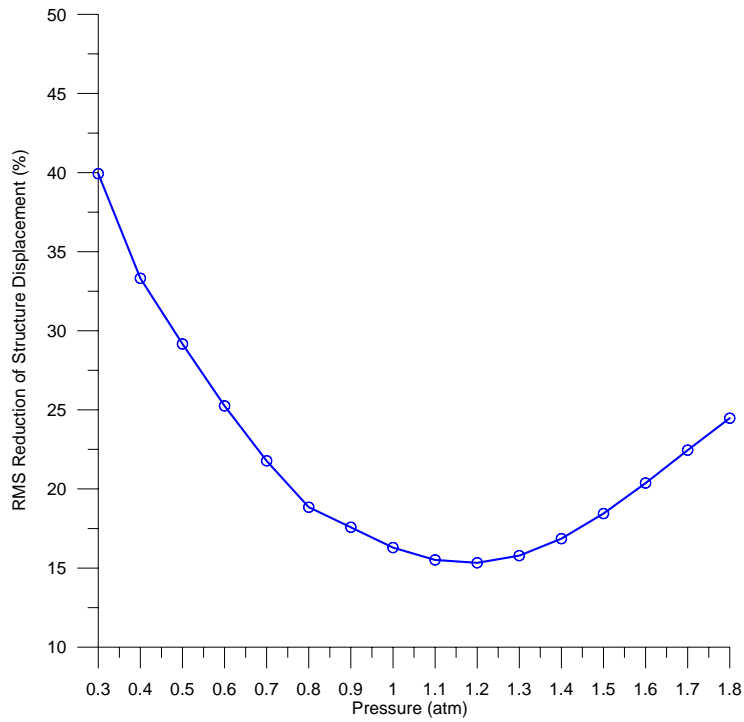


圖 4.5 初始壓力與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖  
(El Centro 地震波擾動， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )

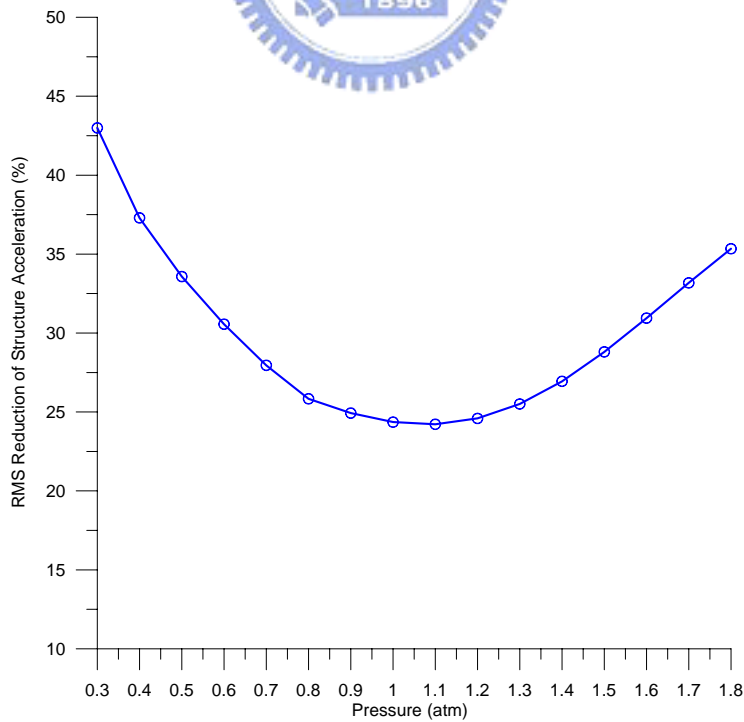


圖 4.6 初始壓力與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖  
(El Centro 地震波擾動， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )

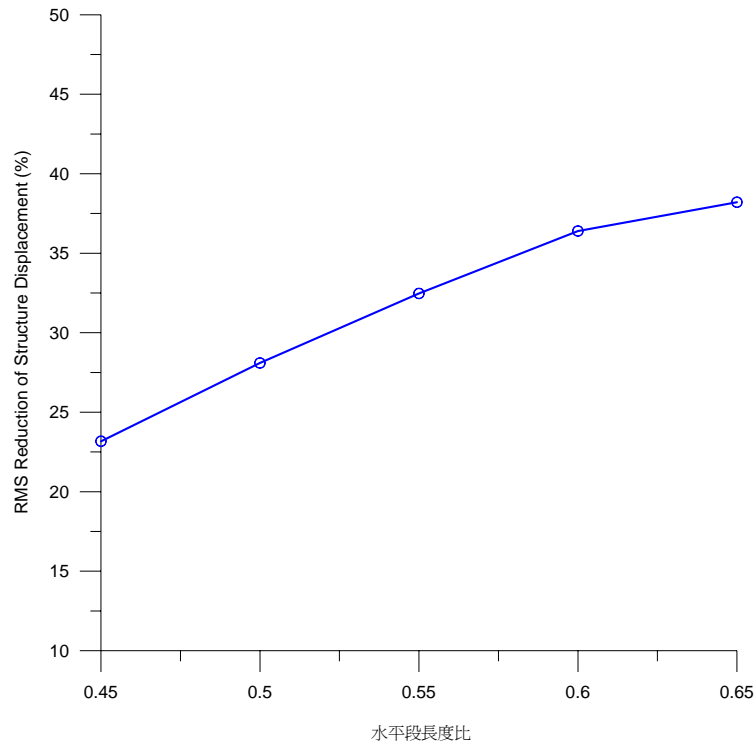


圖 4.7 水平段長度比與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖  
(El Centro 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\lambda=1.0$ )

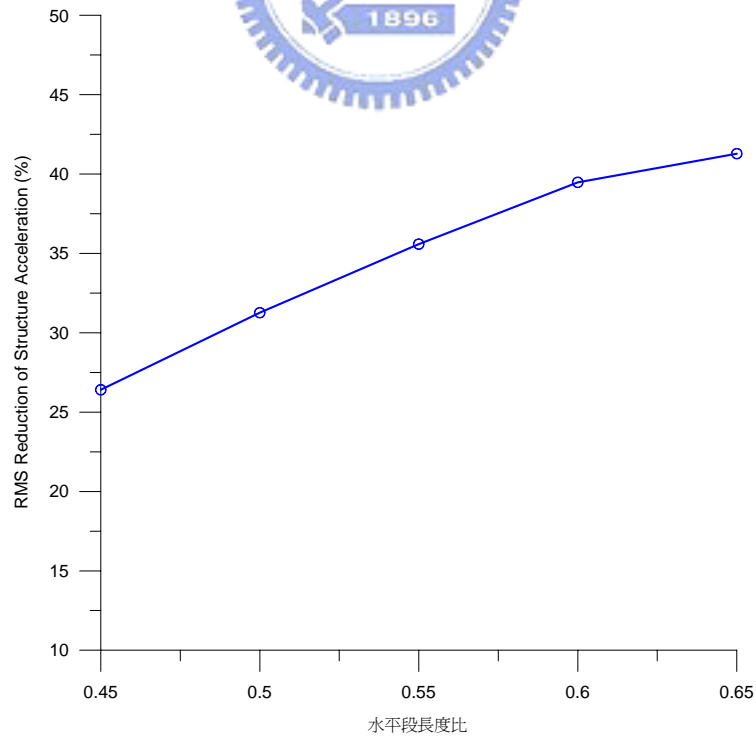


圖 4.8 水平段長度比與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖  
(El Centro 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\lambda=1.0$ )

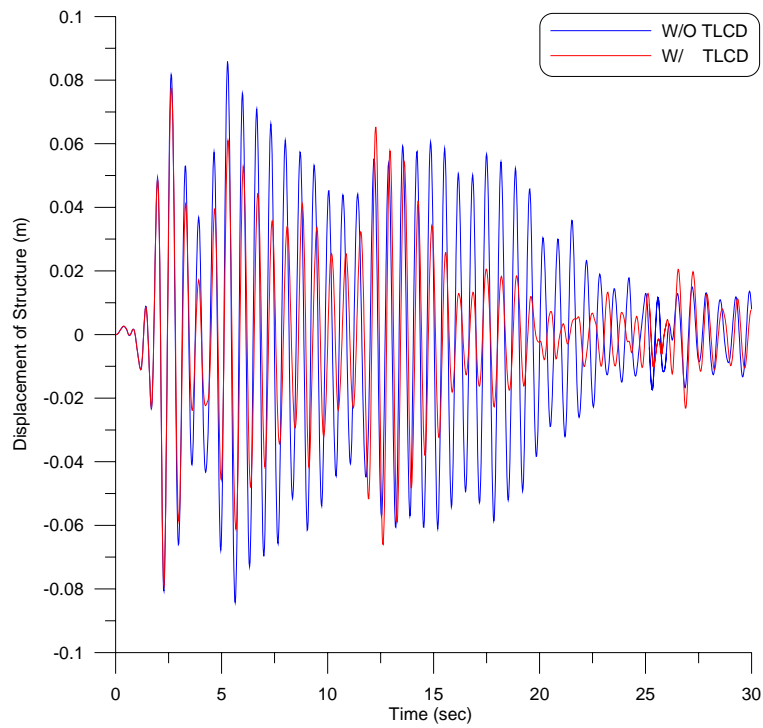


圖 4.9 氣密式 TLCD 控制與未控制結構之位移歷時圖  
(El Centro 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.65$ ,  $\lambda=1.0$ )

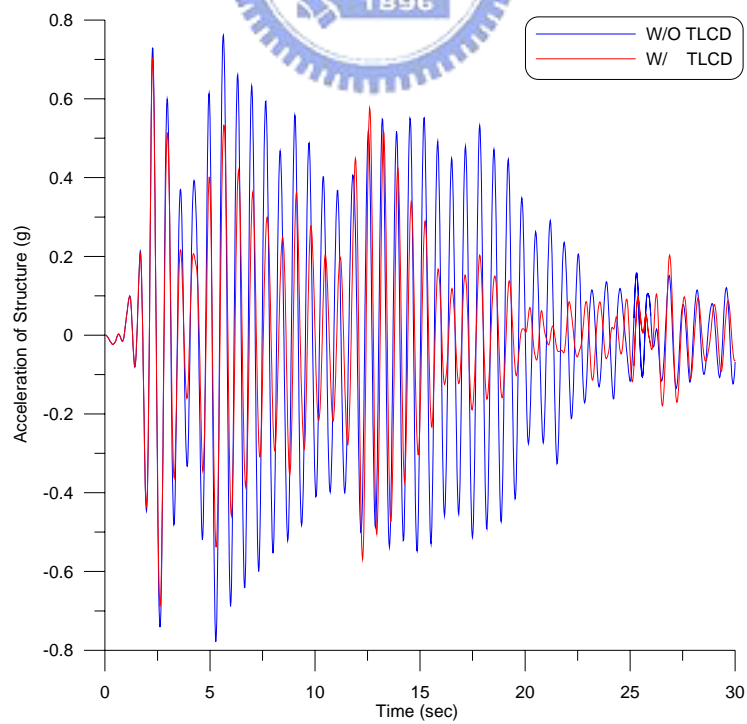


圖 4.10 氣密式 TLCD 控制與未控制結構之加速度歷時圖  
(El Centro 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.65$ ,  $\lambda=1.0$ )

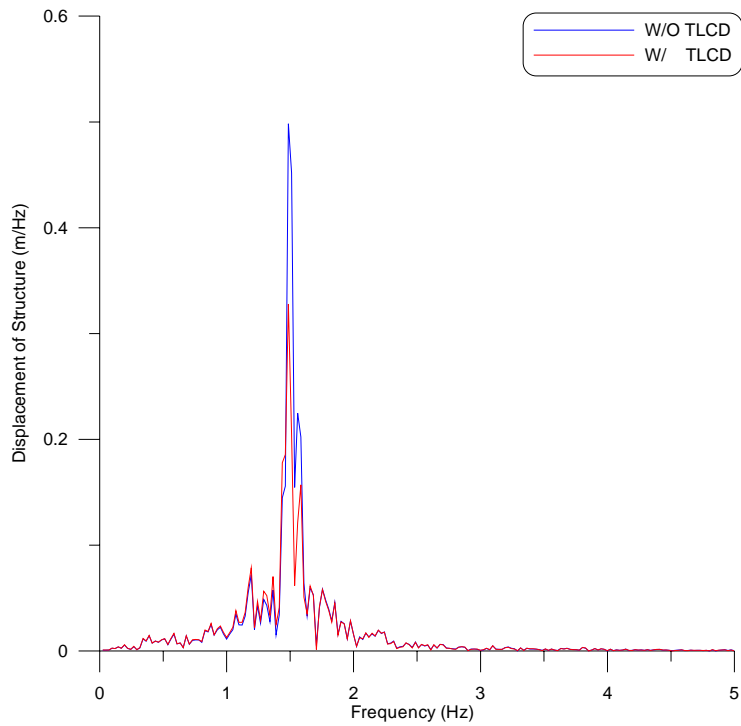


圖 4.11 氣密式 TLCDC 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜  
(El Centro 地震波擾動， $P_0=0.3$  atm， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )

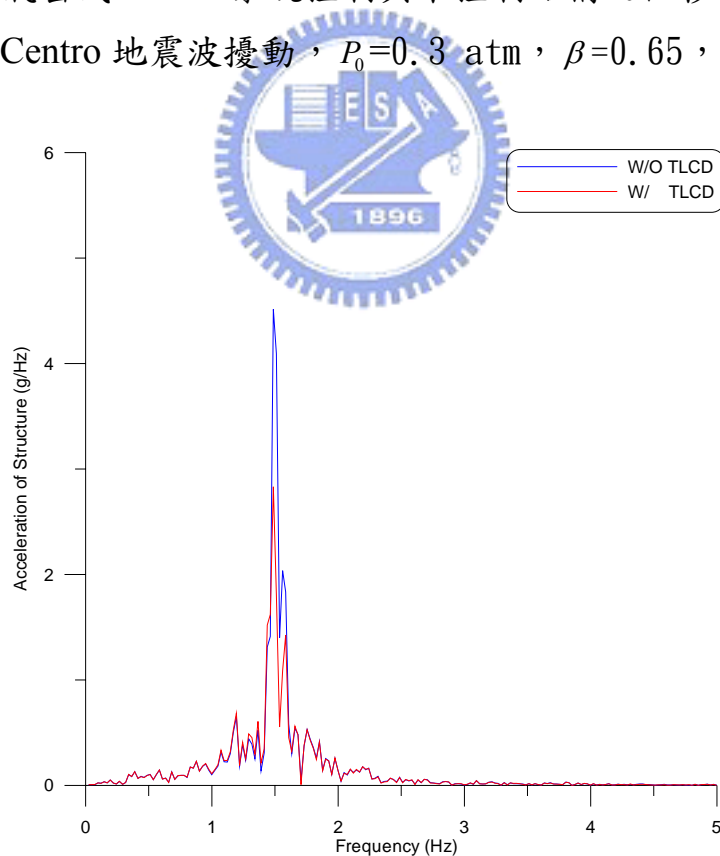


圖 4.12 氣密式 TLCDC 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜  
(El Centro 地震波擾動， $P_0=0.3$  atm， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )

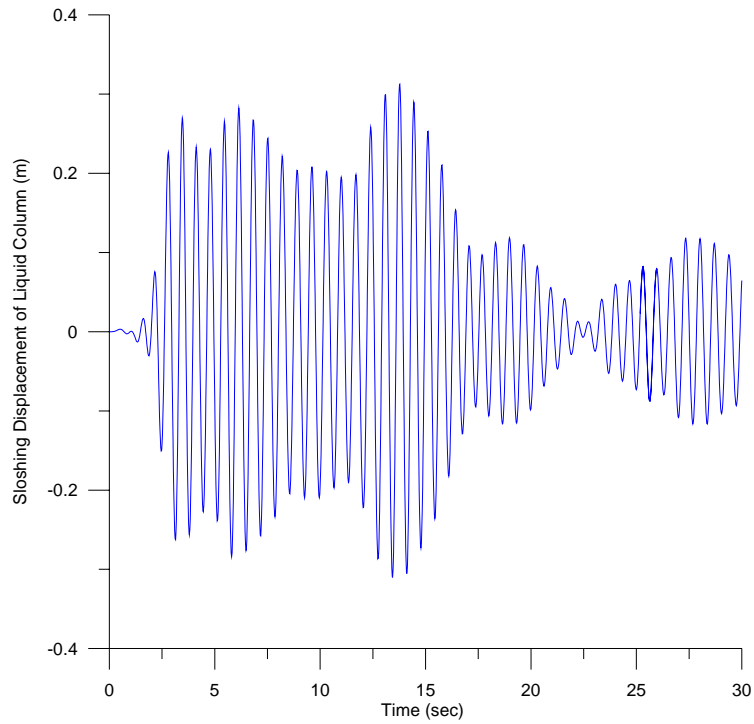


圖 4.13 氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖  
 (El Centro 地震波擾動， $P_0=0.3 \text{ atm}$ ， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )

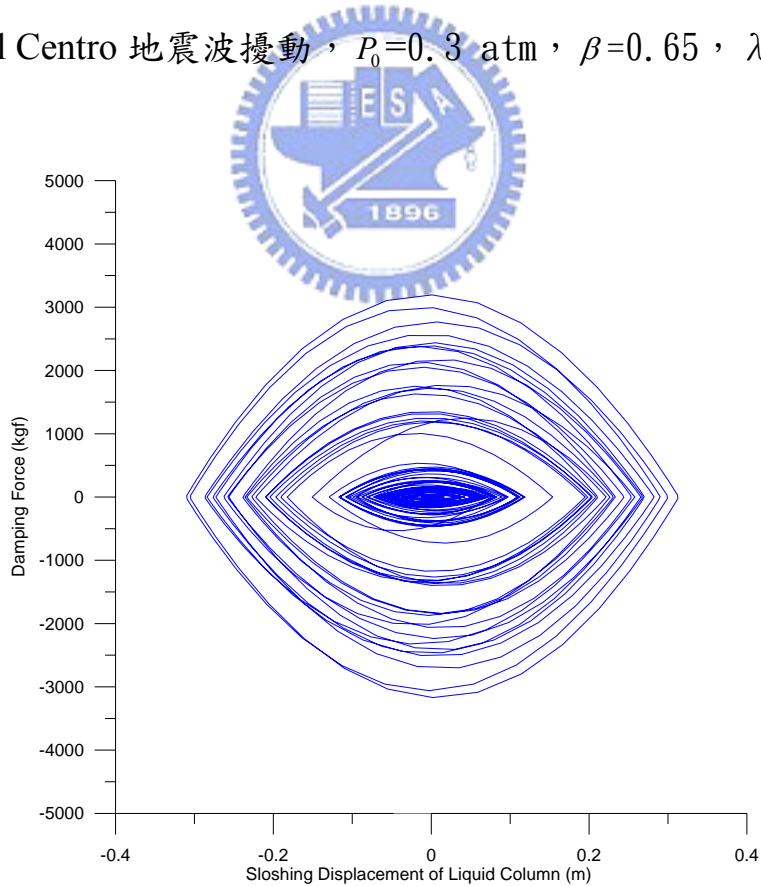


圖 4.14 氣密式 TLCD 系統之遲滯迴圈  
 (El Centro 地震波擾動， $P_0=0.3 \text{ atm}$ ， $\beta=0.65$ ， $\lambda=1.0$ )



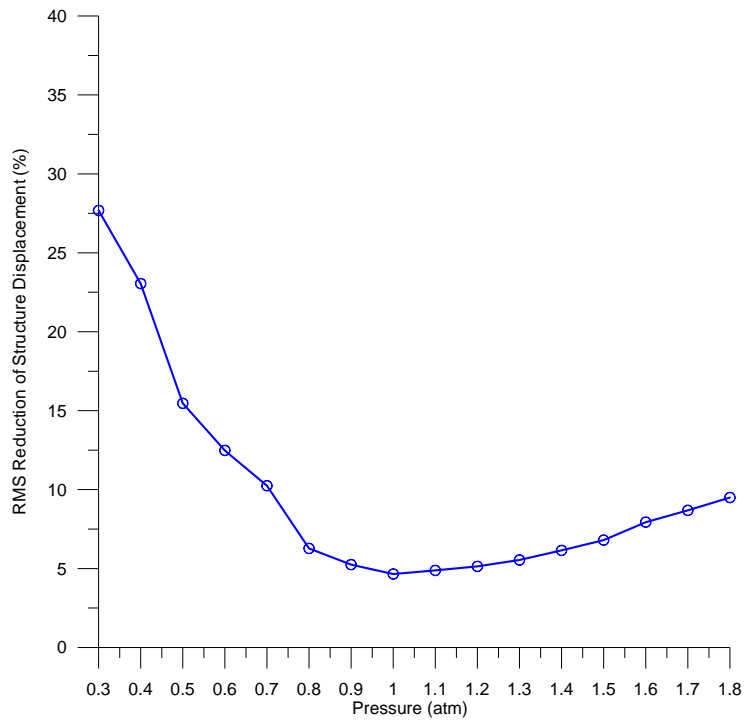


圖 4.15 初始壓力與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖  
(Kobe 地震波擾動， $\beta=0.6$ ， $\lambda=1.0$ )

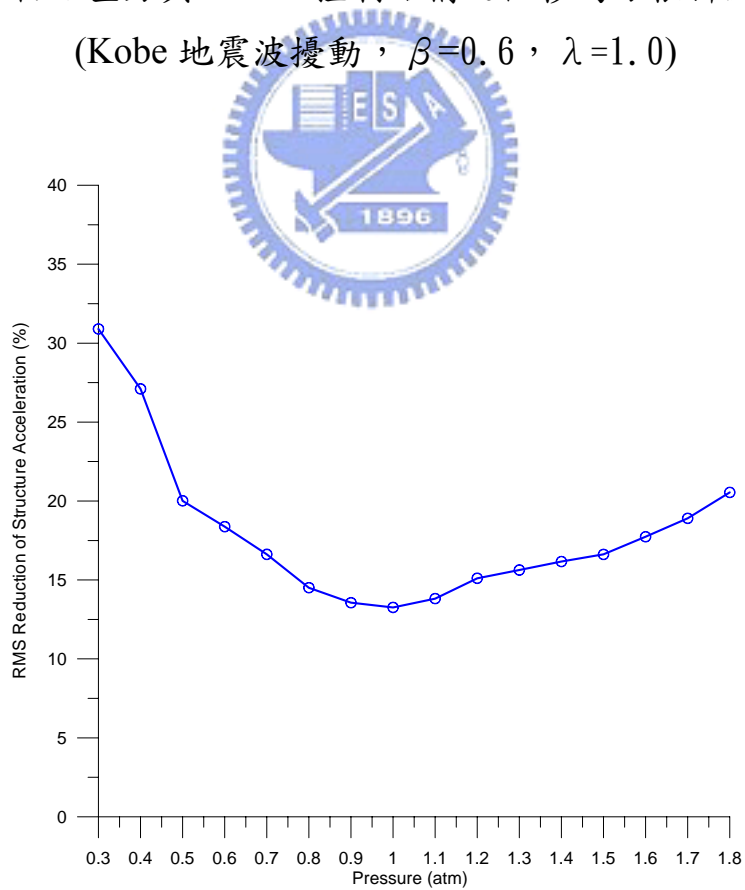


圖 4.16 初始壓力與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖  
(Kobe 地震波擾動， $\beta=0.6$ ， $\lambda=1.0$ )

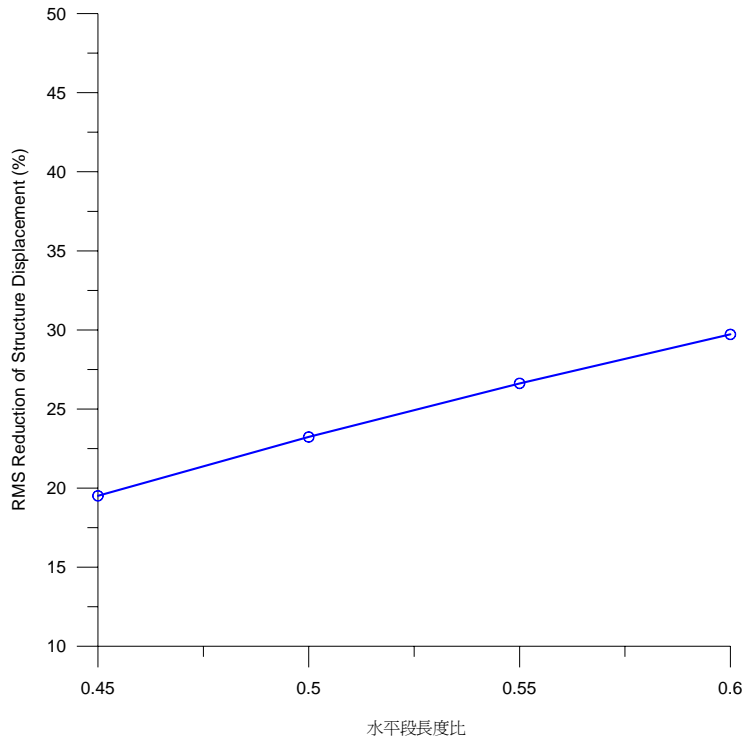


圖 4.17 水平段長度比與 TLCD 控制結構之位移均方根折減關係圖  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\lambda=1.0$ )

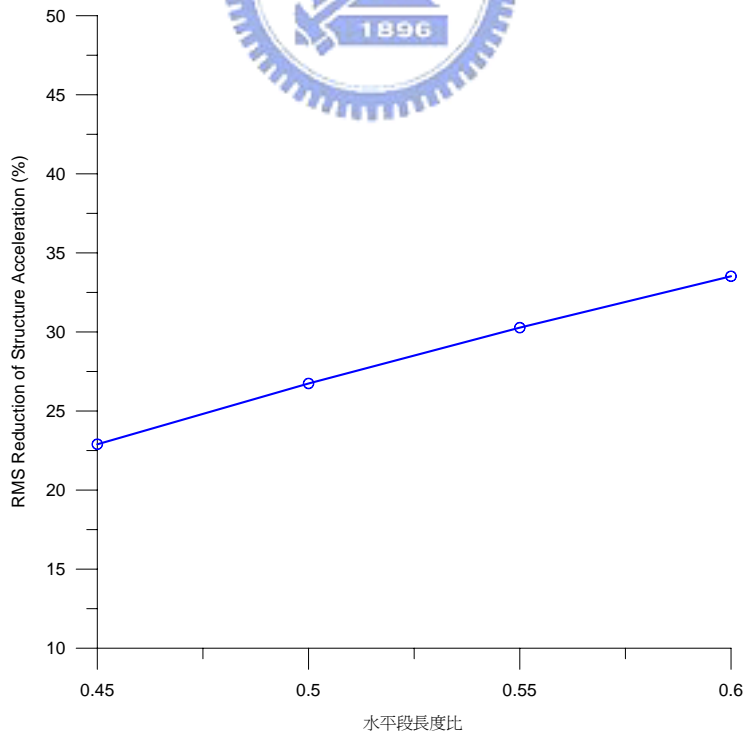


圖 4.18 水平段長度比與 TLCD 控制結構之加速度均方根折減關係圖  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\lambda=1.0$ )

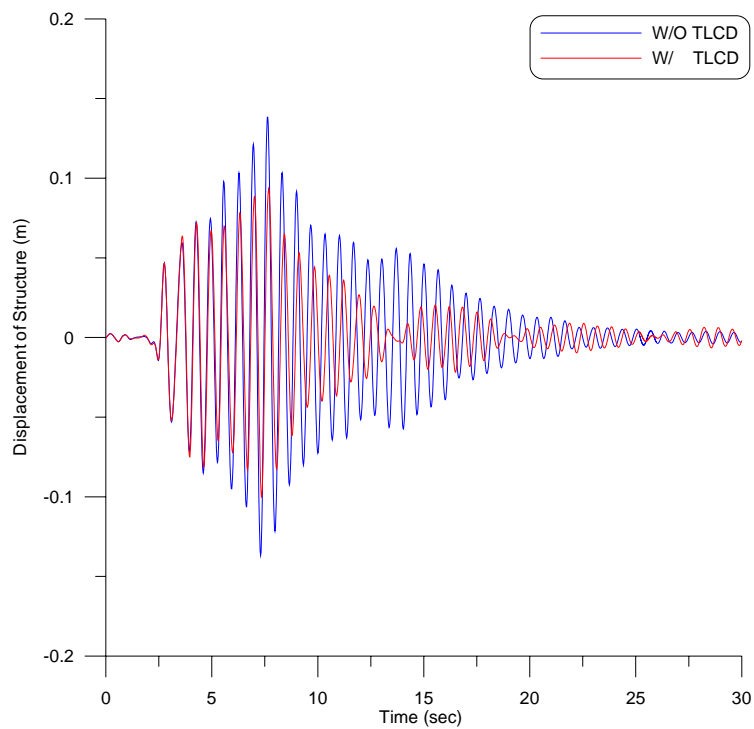


圖 4.19 氣密式 TLCD 控制與未控制結構之位移歷時圖  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.6$ ,  $\lambda=1.0$ )

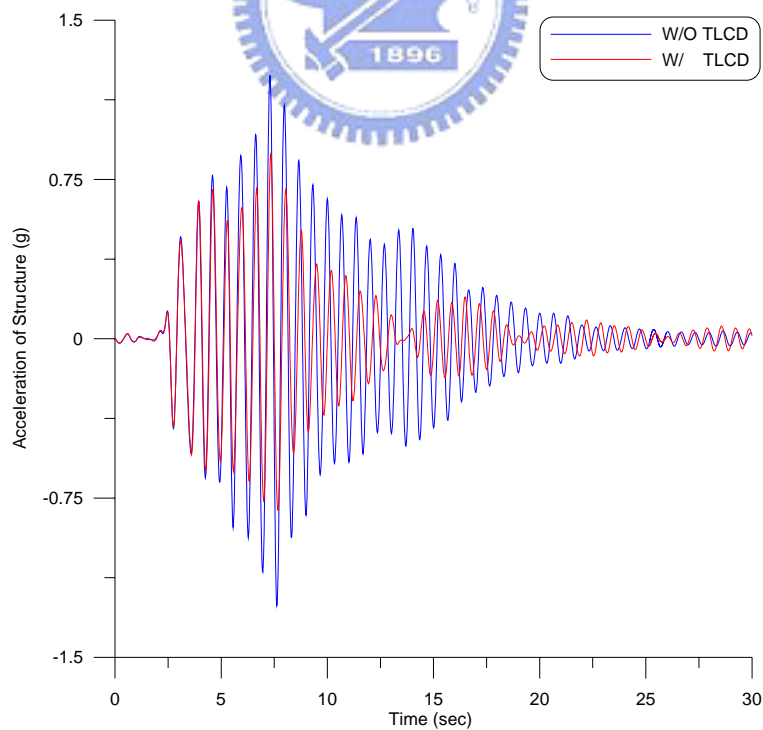


圖 4.20 氣密式 TLCD 控制與未控制結構之加速度歷時圖  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.6$ ,  $\lambda=1.0$ )

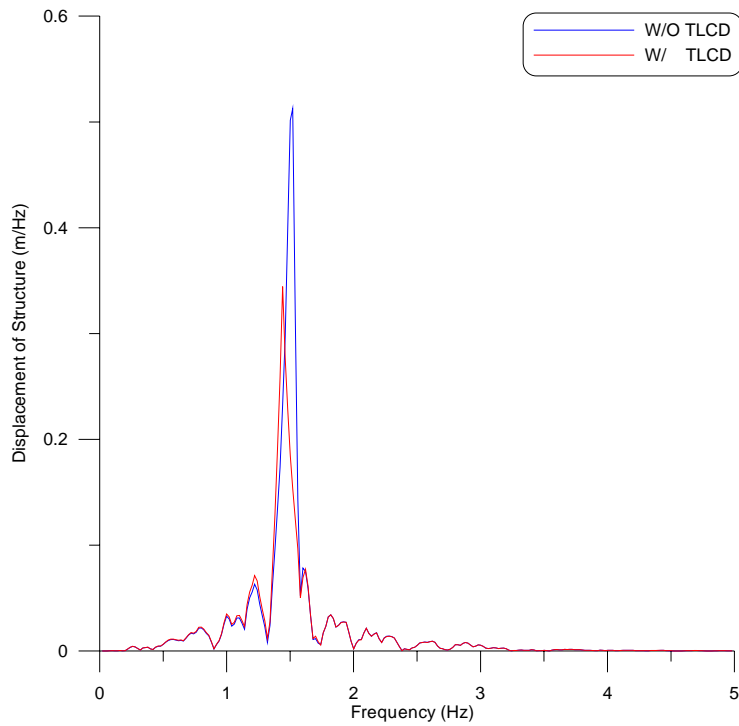


圖 4.21 氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.6$ ,  $\lambda=1.0$ )

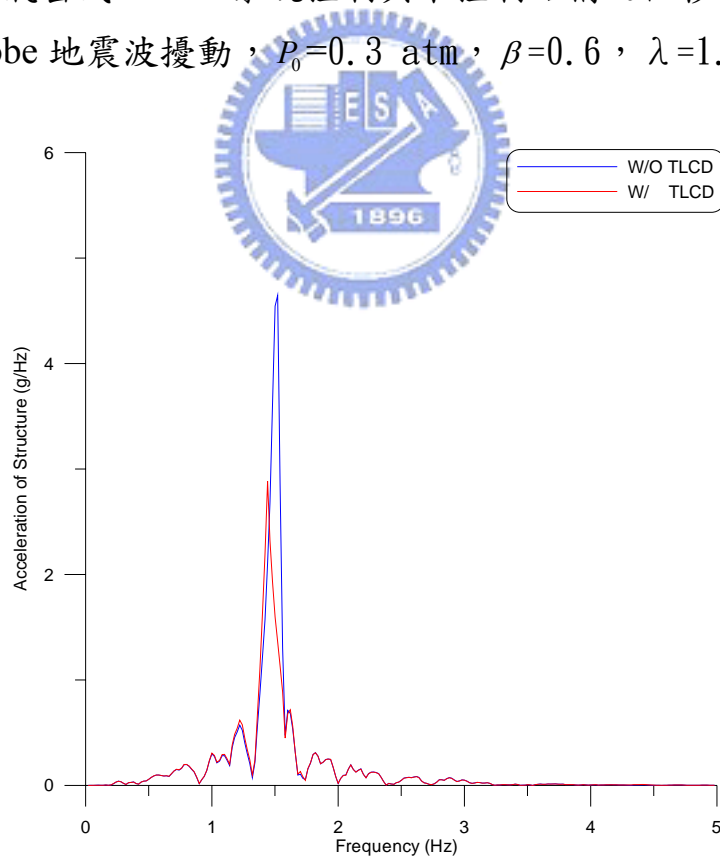


圖 4.22 氣密式 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜  
(Kobe 地震波擾動,  $P_0=0.3 \text{ atm}$ ,  $\beta=0.6$ ,  $\lambda=1.0$ )

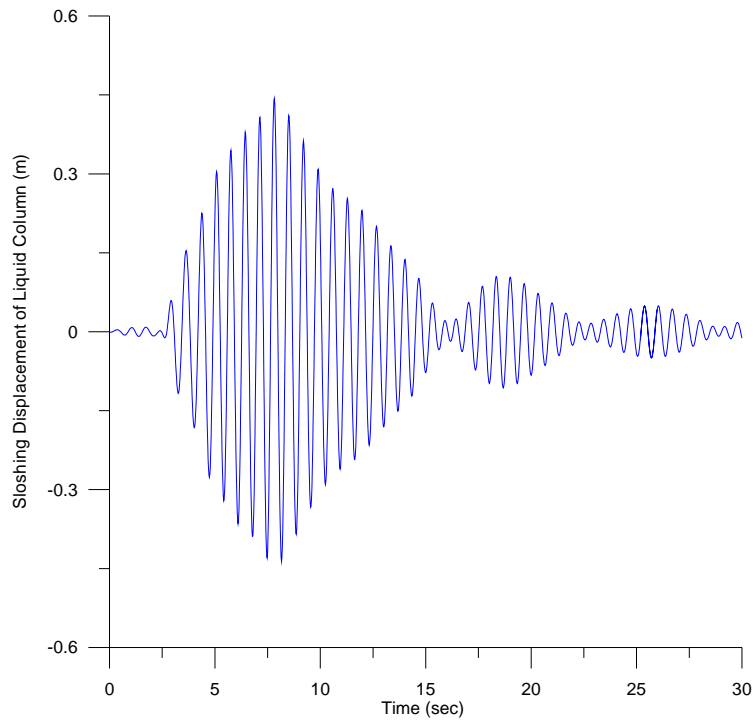


圖 4.23 氣密式 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖  
(Kobe 地震波擾動， $P_0=0.3 \text{ atm}$ ， $\beta=0.6$ ， $\lambda=1.0$ )

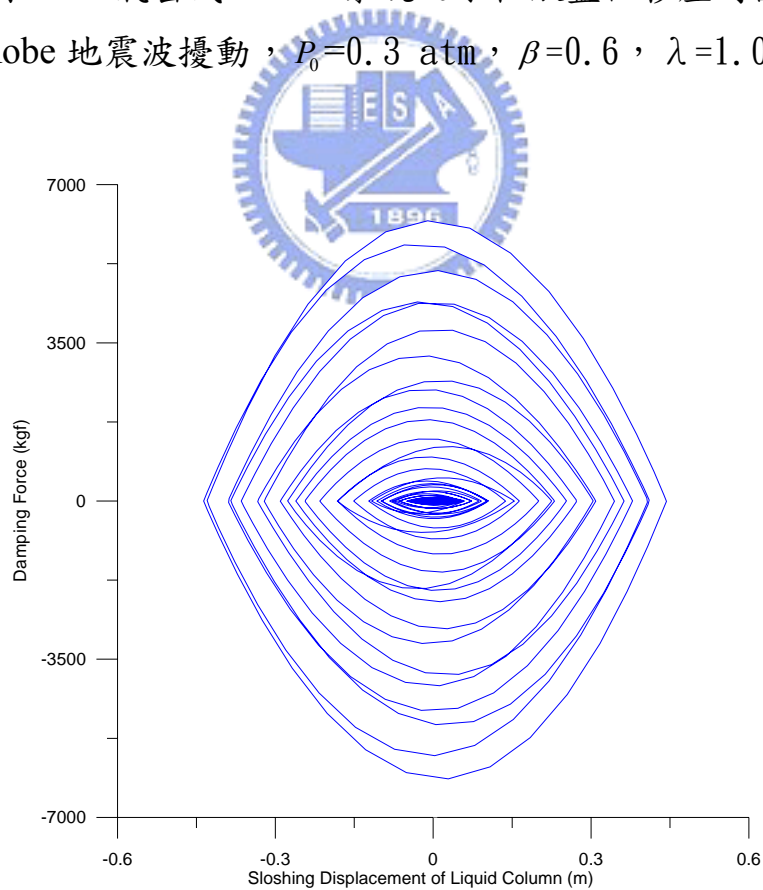


圖 4.24 氣密式 TLCD 系統之遲滯迴圈  
(Kobe 地震波擾動， $P_0=0.3 \text{ atm}$ ， $\beta=0.6$ ， $\lambda=1.0$ )

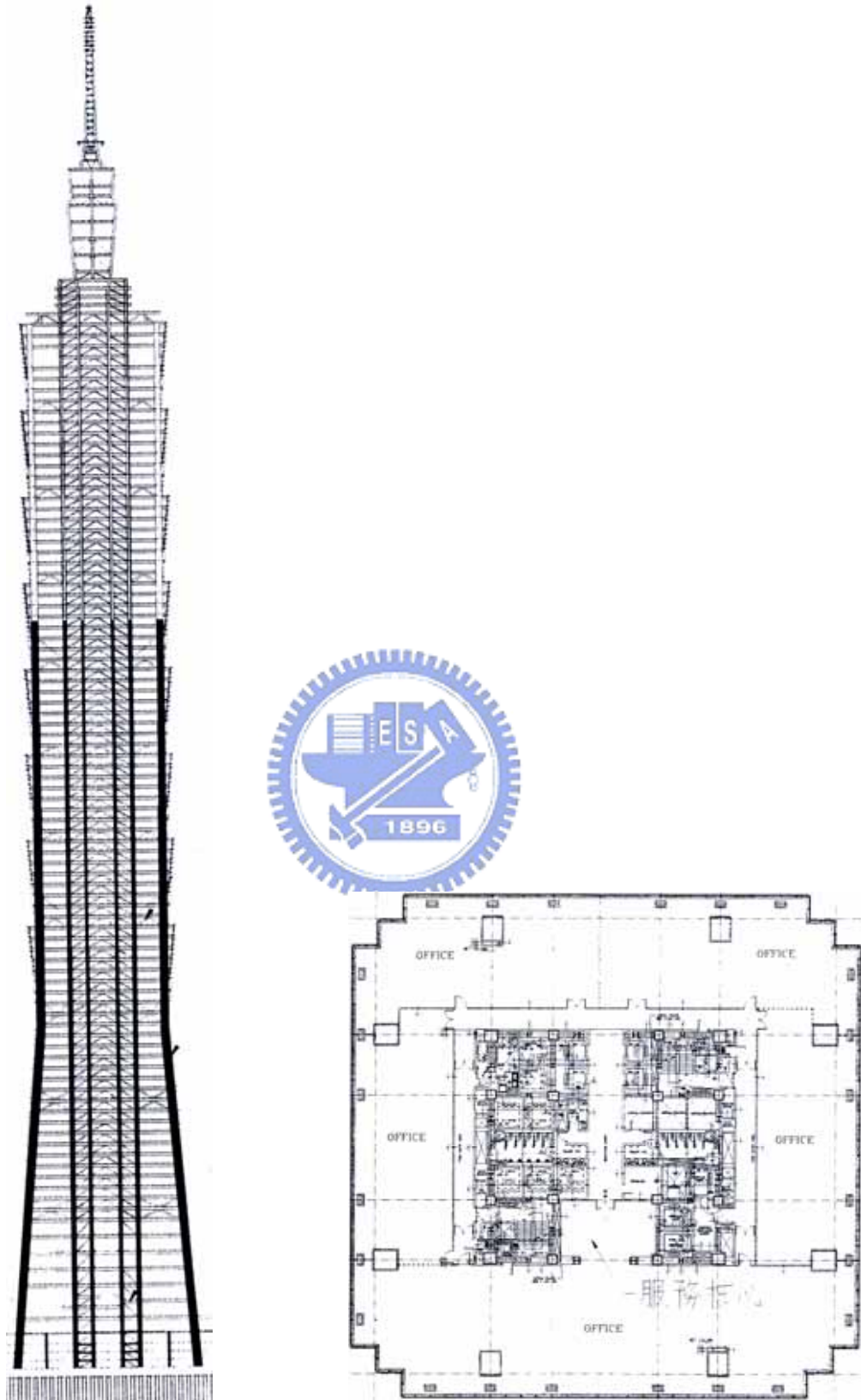


圖 5.1 結構立面圖及平面圖(資料來源:永峻工程)

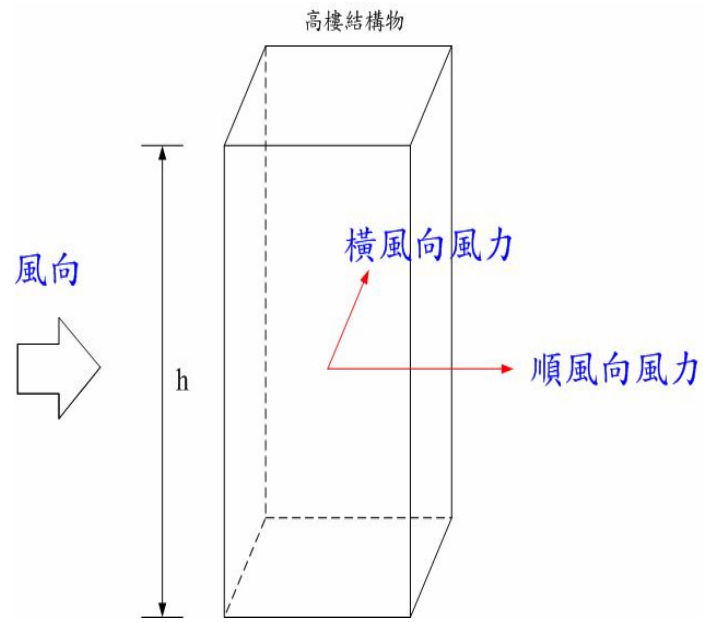


圖 5.2 順風向與橫風向之風力示意圖

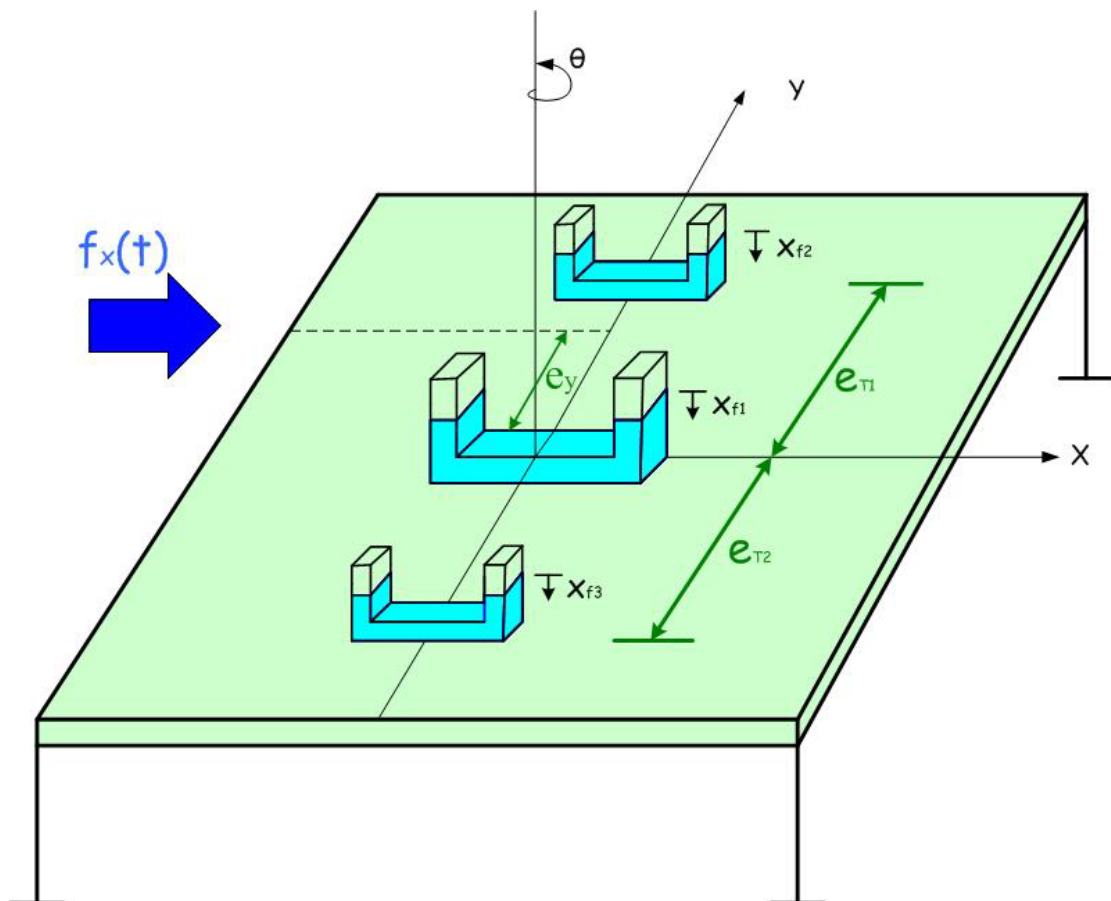


圖 5.3 結構裝置 TLCD 系統控制之分析模型

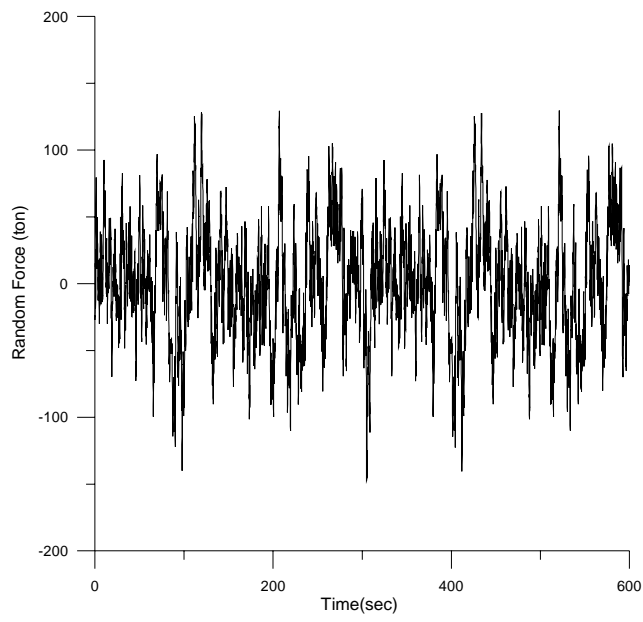


圖 5.4 台北 101 順向風風力歷時

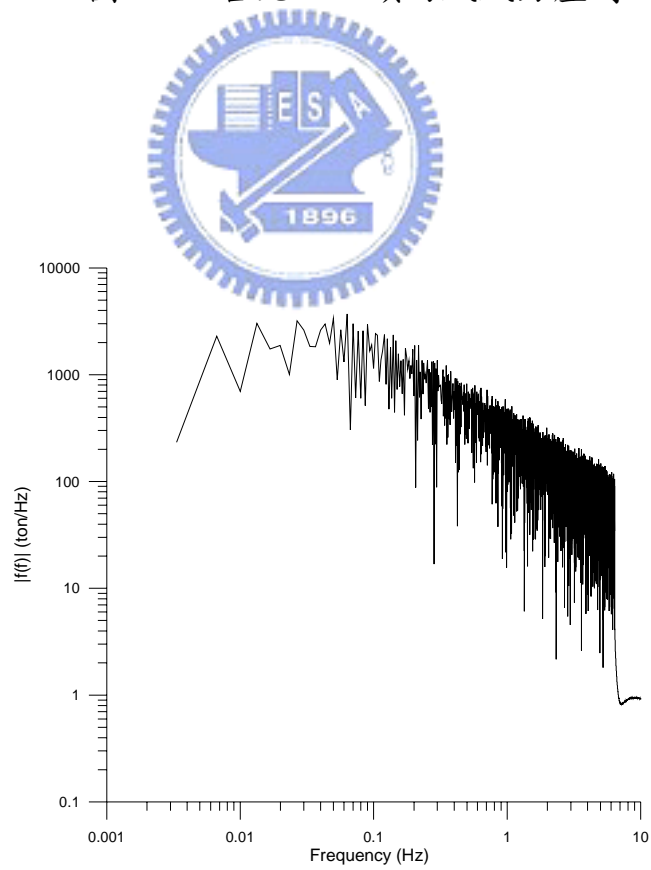


圖 5.5 台北 101 順向風風力頻譜



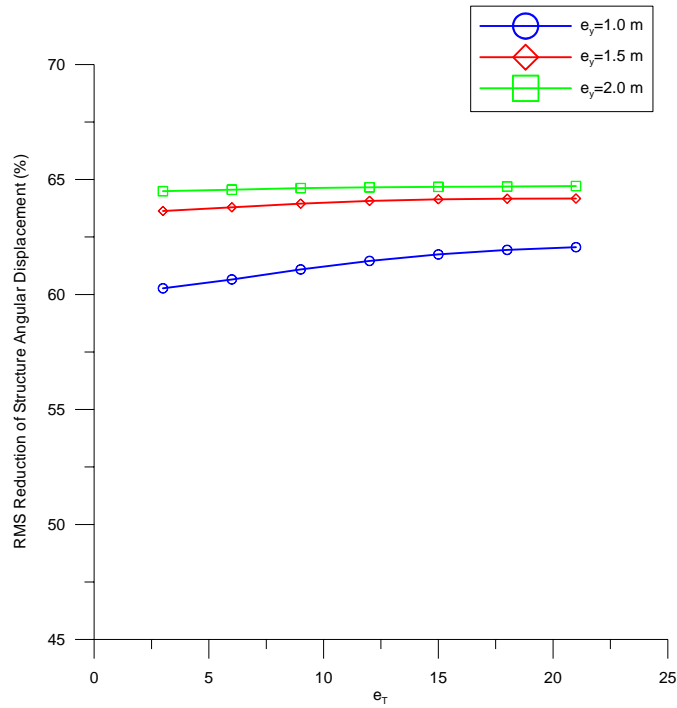


圖 5.6 風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構角位移均方根折減之影響

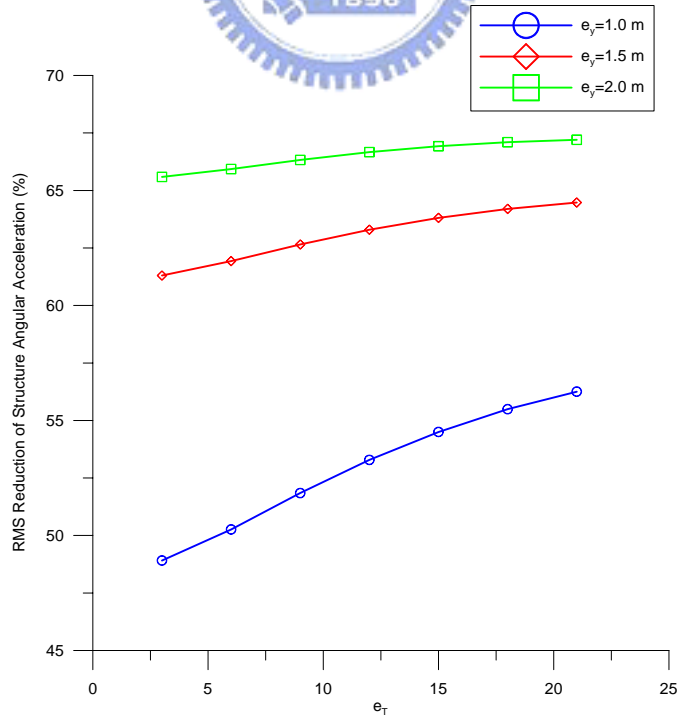


圖 5.7 風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構角加速度均方根折減之影響

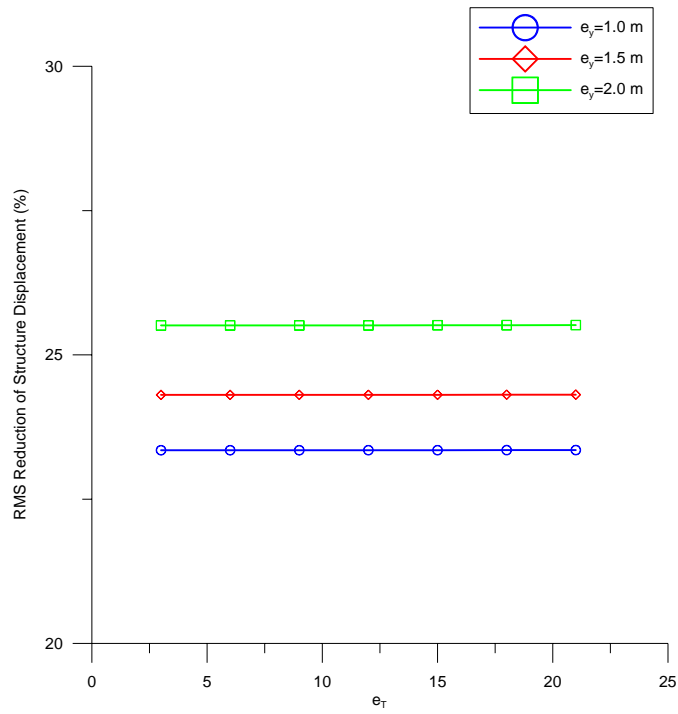


圖 5.8 風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構  
位移均方根折減之影響

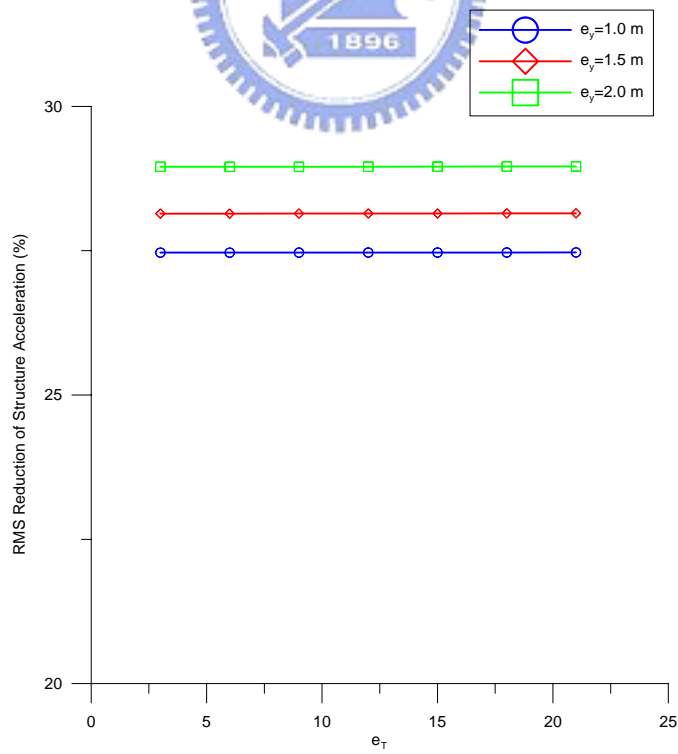


圖 5.9 風力擾動偏心距與 TLCD 距離形心位置對於 TLCD 結構  
加速度均方根折減之影響

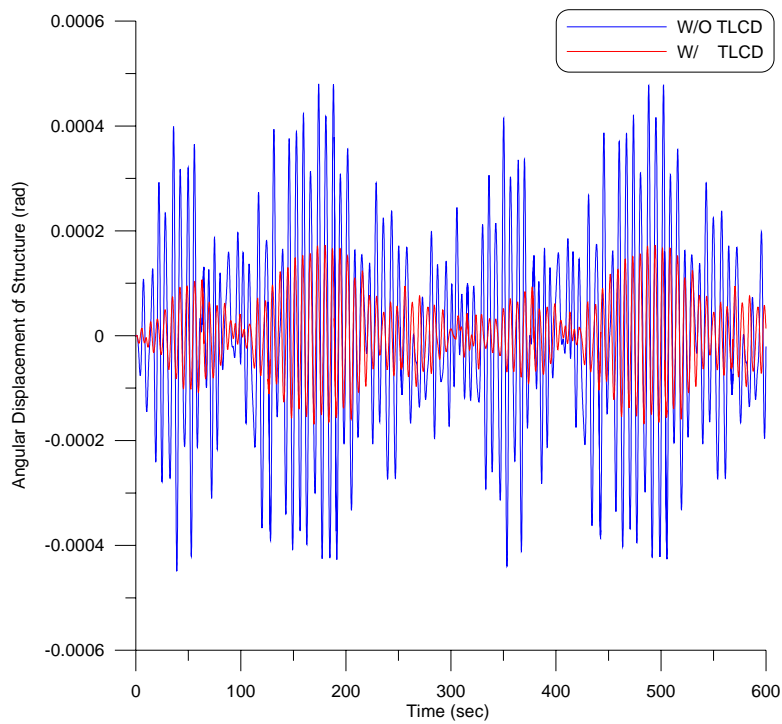


圖 5.10 結構扭轉向控制與未控制結構之角位移歷時比較

$(e_y = 2 \text{ m}, e_T = 21 \text{ m})$

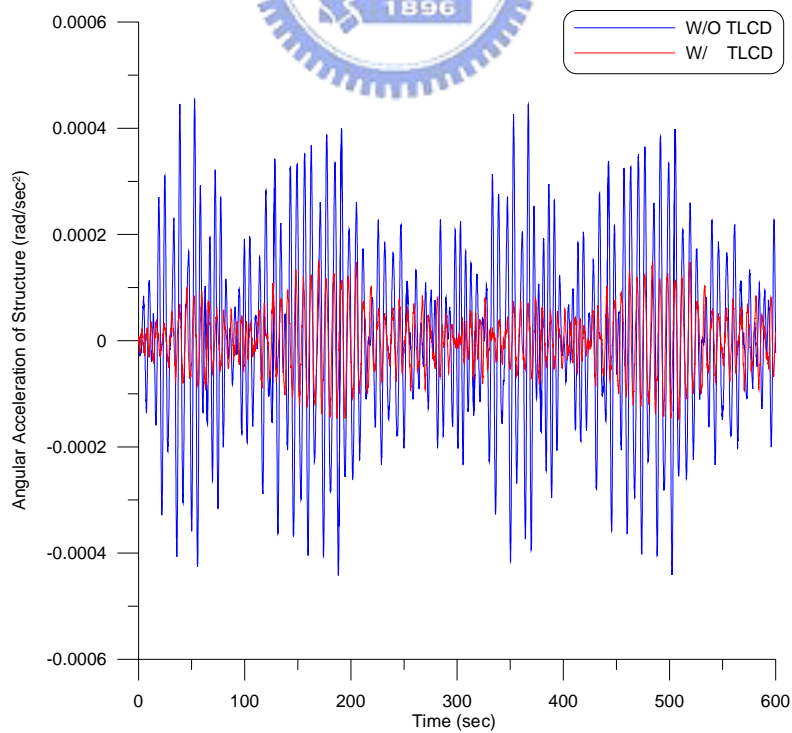


圖 5.11 結構扭轉向控制與未控制結構之角加速度歷時比較

$(e_y = 2 \text{ m}, e_T = 21 \text{ m})$

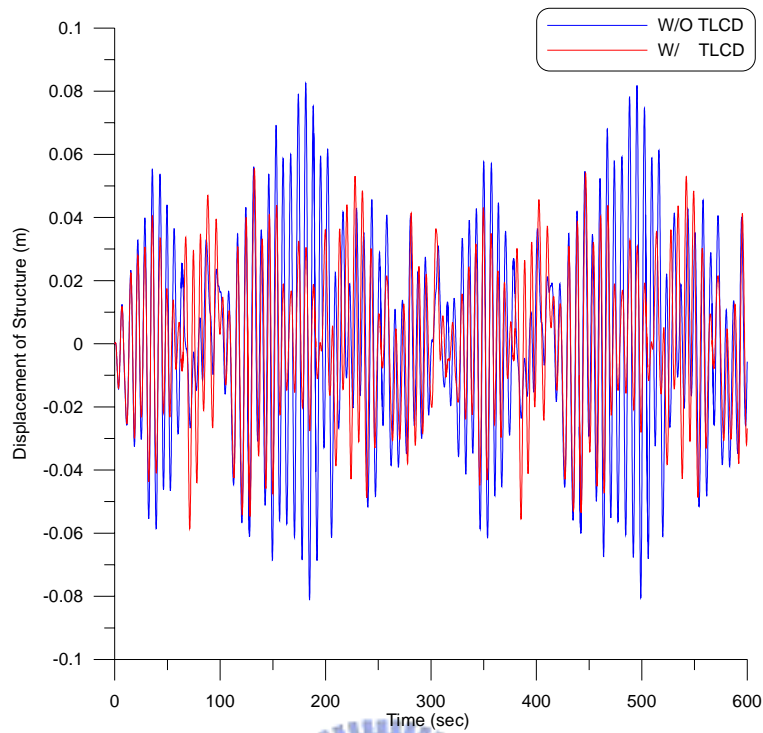


圖 5.12 結構 X 向控制與未控制結構之位移歷時比較  
 $(e_y=2 \text{ m}, e_T=21 \text{ m})$

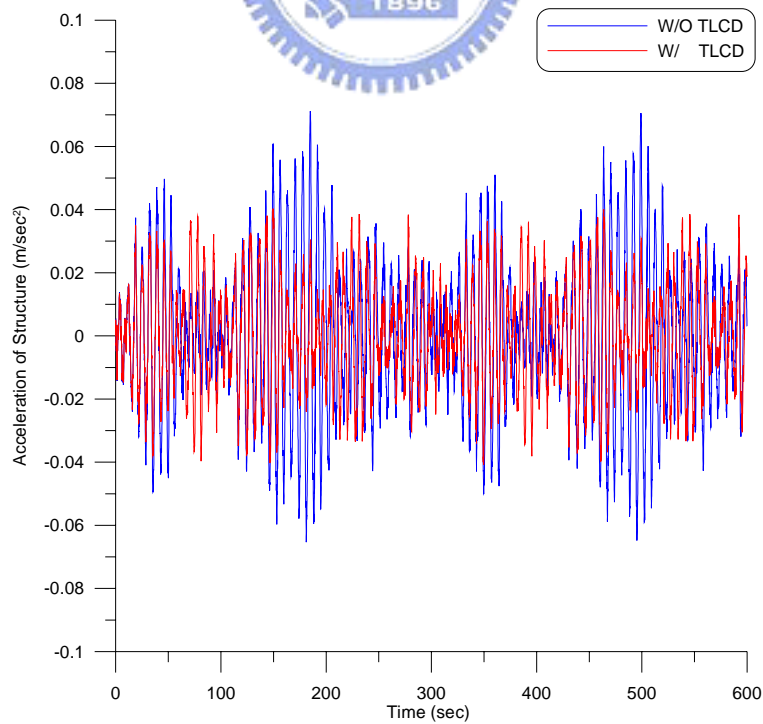


圖 5.13 結構 X 向控制與未控制結構之加速度歷時比較  
 $(e_y=2 \text{ m}, e_T=21 \text{ m})$

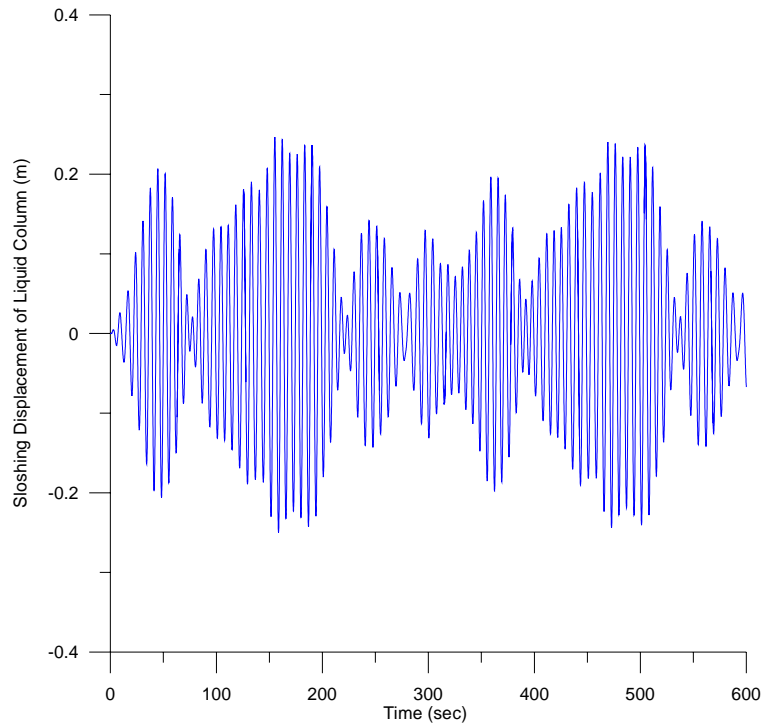


圖 5.14 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖  
(中心位置,  $e_y=2$  m,  $e_T=21$  m)

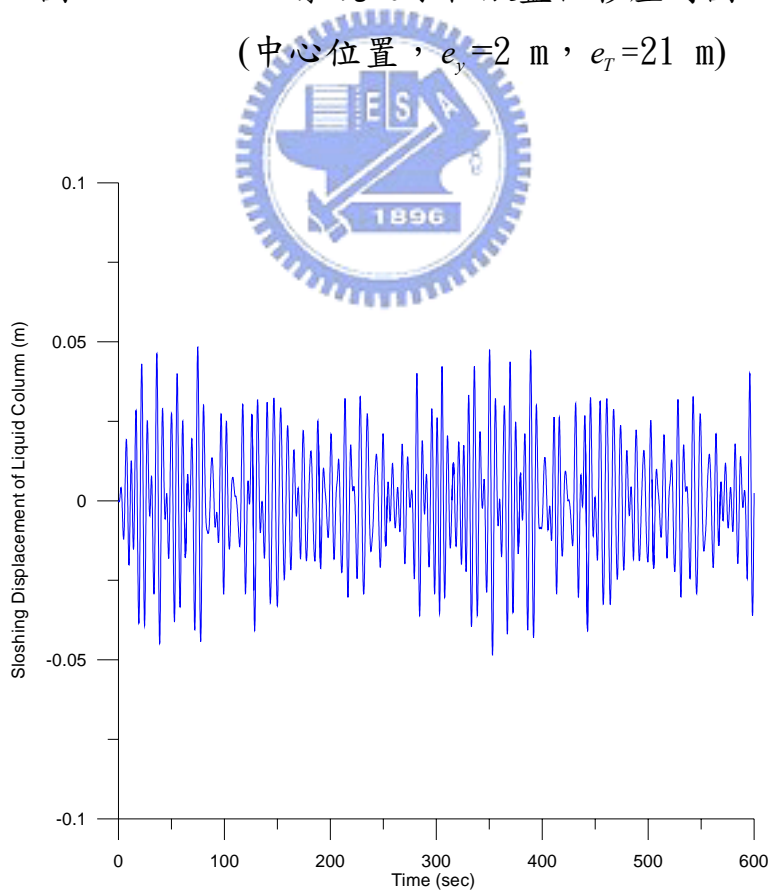


圖 5.15 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖  
(Y 軸正向,  $e_y=2$  m,  $e_T=21$  m)

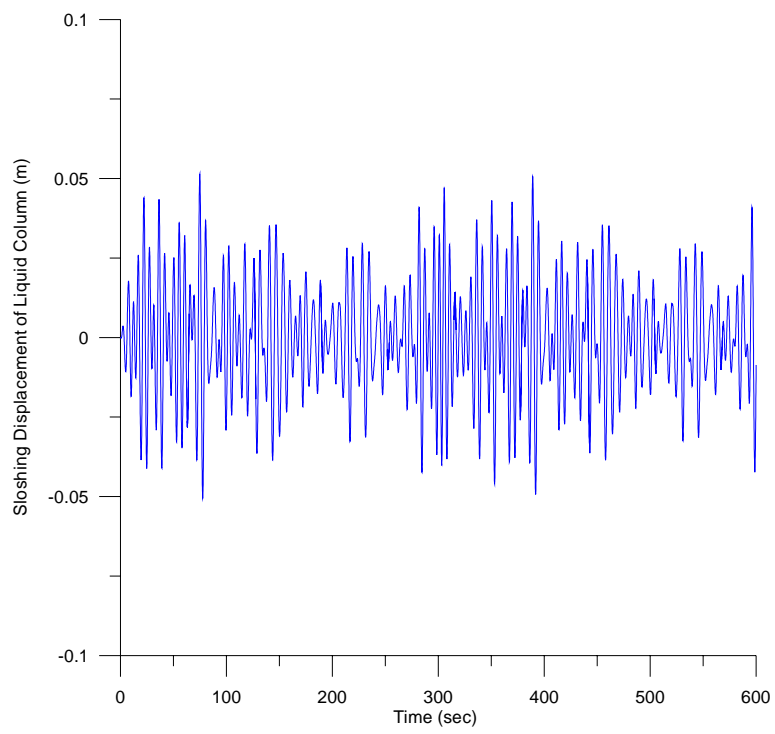


圖 5.16 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時圖  
(Y 軸負向,  $e_y=2$  m,  $e_T=21$  m)

