

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



調諧水柱消能系統之分析與試驗
**Analytical and Experimental Study of Tuned
Liquid Column Damper**

研究生：黃啟晉

指導教授：王彥博 博士

李建良 博士

中華民國九十三年六月

調諧水柱消能系統之分析與試驗

**Analytical and Experimental Study of Tuned
Liquid Column Damper**

研究生：黃啟晉

Student : Chi-Jinn Huang

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
June 2004
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

調諧水柱消能系統之分析與試驗

研究生：黃啟晉

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

調諧水柱消能系統(TLCD)為單自由度之非線性動力系統，具備調頻容易、效能佳、兼具消防及抗振功能、維修需求低、經濟效益高等優於調諧質塊消能系統(TMD)之優勢，未來有成為高樓減振系統主流之勢。TLCD 本研究的目的是發展 TLCD 系統之核心技術以利未來之實際應用包括建立 TLCD 系統之非線性理論分析模式，分別考慮等斷面與三段式變斷面 U 型管之情況，並製作一組等斷面 TLCD 系統進行元件測試與性能測試(振動台試驗)。此外，並完成參數分析以掌握 TLCD 系統之最佳設計。元件測試結果顯示，TLCD 系統之理論振動頻率與元件試驗所得之頻率十分吻合。儘管 TLCD 研究之相關文獻多將水頭損失係數考慮成常數，本研究發現水頭損失係數其實與閥門孔徑大小及擾動振幅等有關，閥門孔徑愈小時，水頭損失係數愈大；水柱激盪振幅愈大時，水頭損失係數愈小。性能測試結果顯示，結構安裝 TLCD 系統後，無論結構自由振動試驗或地表簡諧波擾動試

驗均顯示 TLCD 系統有良好的減振效果。參數分析結果顯示，TLCD 系統之水平段長度與有效長度之比在 0.55~0.75 間效率較佳，在此範圍內比值愈大時，控制效果愈好；當水平段長度受限時，增加 U 型管垂直段之管徑可提升控制效果。此外，根據本文所提出之系統識別方法識別水頭損失係數進行非線性數值分析，水柱激盪位移及結構振動反應預測值均與試驗結果相當契合，驗證本文所提非線性理論分析模式之精確性，可供未來實際應用時設計分析之用。

關鍵字：調諧水柱消能系統、振動控制、系統識別、水頭損失係數



Analytical and Experimental Study of Tuned Liquid Column Damper

Student : Chi-Jinn Huang

Advisor : Dr. Yen-Po Wang

Dr. Chien-Liang Lee

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

ABSTRACT

Tuned Liquid Column Damper (TLCD) is a nonlinear single-degree-of-freedom system that possesses advantageous features such as easy-tuning, efficient, dual functions (fire protection and vibration damper), less maintenance and cost-effective as compared with TMD systems. It is expected to become the main-stream system for vibration control of high-rise buildings. The objective of this study is to develop the know-how of TLCD systems for real-world application. The tasks include establishing analytical models for the nonlinear TLCD systems of uniform as well as 3-segment variable tube diameters, and conducting a series of component test and performance test (shaking table test) of a prototype uniform TLCD system. Moreover, parametric studies have been explored to get more insight of the optimum design of TLCD systems.

Experimental results from the component test indicate agreement of the fundamental frequency with the theoretical prediction. While the headloss coefficient has been considered a constant in the literature, it is found to actually depend on the opening size of the valve and disturbing amplitude. The smaller the opening size, the larger the headloss coefficient.; and, the stronger the disturbing amplitude, the smaller the headloss coefficient. Experimental results from the performance test indicate that TLCD is effective in structural vibration control in both free vibration and harmonic excitation. Parametric analysis further indicates that the efficient length of the horizontal portion of the U-tube ranges from 0.55~0.75 of the effective length, within which the longer the horizontal part the better the controlling effect. However, if the horizontal portion is constrained due to practical considerations, increasing the diameter of the vertical tube (variable diameter case) also promotes the controlling effect. Moreover, the numerical predictions of the liquid sloshing displacement and structural responses with the headloss coefficient identified by the proposed system identification scheme agree very well with the test data, verifying adequacy of the proposed analytical model that provides the basis for design and analysis of practical application in the future.

Keyword: Tuned Liquid Column Damper, TLCD, Vibration Control, System Identification, Headloss Coefficient

誌 謝

至風城交大求學已逾二年，如今即將告一段落。首先最要感謝吾師 王彥博教授提供學生一個良好的研究環境，並給予學生最豐富的指導，使學生具備從事研究工作的基本功夫。此外，吾師對於學術研究所保有的熱忱與致力於解決工程實務問題的用心，亦為學生師法的典範。吾師亦常常提供許多新穎的觀念，以增加學生思考的空間，並且在學生的生涯規劃上提供許多寶貴的建議，在此特向吾師致上最誠摯的謝意。

感謝交大防災中心 李建良博士二年來給予學生的指導，使學生在學習上有十足的收穫。此外，學生也要特別感謝黃武龍博士提供計劃經費的支助，使得學生的研究可以持續進行。

論文口試承蒙 翁正強教授、黃武龍博士及 胡宗和博士親臨交大指導，並提供諸多珍貴的意見，使得論文的組織及疏漏之處得以獲得改進，在此學生亦要表示感激之意。

感謝 107A-5 研究室諸位師兄弟-學長鄧敏政博士、廖偉信博士、李建良博士、嘉賞學長、連杰及黃經理銘峰，學弟明坤等於研究上的討論與實驗上的鼎力協助，使得諸多試驗得以如期完成。希望這份心繫彼此的革命情感可以一直延續下去。此外，感謝新竹的同窗好友逸軒、峻毅、雅婷等於學習過程中的相互勉勵與日常生活中的互動，有了你們的陪伴，碩士班生活並不孤單。

最後，謹以本文獻給我最敬愛的雙親、姊姊、弟弟及女友 滄瑗，由於你們熱情的支持與包容，使得這本論文可以在無後顧之憂下完成，謝謝你們。

謹誌於工程二館 2004 年 7 月

目錄

第一章 緒論	1
第二章 等斷面調諧水柱消能系統	8
2.1 TLCDC 系統之運動方程式	8
2.2 解析模式	11
2.3 等斷面 TLCDC 元件之自由振動分析	14
2.4 結構安裝等斷面 TLCDC 系統之運動方程式	15
2.5 單自由結構安裝等斷面 TLCDC 系統之參數研究	19
2.5.1 TLCDC 設計參數	19
2.5.2 單自由度結構之自由振動分析	20
2.5.3 地表簡諧波共振擾動分析	23
2.5.4 隨機擾動力分析(作用於樓層)	25
2.6 系統識別	27
2.7 結論	30
第三章 等斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析	32
3.1 TLCDC 元件與單層樓架模型之設計	32
3.2 試驗設備與感應器配置	33
3.3 試驗規劃	35
3.3.1 TLCDC 系統之元件試驗	36
3.3.2 TLCDC 系統之性能試驗	36
3.4 試驗結果	37
3.4.1 TLCDC 元件試驗	37
3.4.2 結構系統識別試驗	40
3.4.3 TLCDC 系統之性能試驗	41
(a)自由振動試驗	41
(b)地表簡諧波擾動試驗	43
第四章 變斷面調諧水柱消能系統之理論分析	48
4.1 變斷面 TLCDC 系統之運動方程式	48

4.2 變斷面 TLCD 元件之自由振盪分析.....	52
4.3 結構安裝變斷面 TLCD 系統之運動方程式.....	53
4.4 單自由度結構安裝變斷面 TLCD 系統之參數研究.....	56
4.4.1 變斷面 TLCD 設計參數	57
4.4.2 單自由度結構之自由振動分析.....	58
4.4.3 地表簡諧波共振擾動分析.....	60
4.4.4 隨機擾動力分析(作用於樓頂).....	62
4.5 結論	65
第五章 結論與建議.....	67
參考文獻.....	70
符號對照表.....	78



表目錄

表 2.1(a) TLCDC 系統之設計參數.....	82
表 2.1(b) TLCDC 系統之設計參數	83
表 2.1(c) TLCDC 系統之設計參數.....	84
表 2.1(d) TLCDC 系統之設計參數	85
表 2.1(e) TLCDC 系統之設計參數.....	86
表 2.2(a) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 0.87\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$).....	87
表 2.2(b) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 1.97\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$).....	88
表 2.2(c) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 3.50\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$).....	89
表 2.2(d) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 5.46\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$).....	90
表 2.2(e) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 7.87\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$).....	91
表 2.2(f) TLCDC 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 10.71\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)	92
表 2.3(a) TLCDC 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 0.87\%$ ， $\gamma = 1$).....	93
表 2.3(b) TLCDC 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 1.97\%$ ， $\gamma = 1$).....	94
表 2.3(c) TLCDC 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 3.50\%$ ， $\gamma = 1$).....	95
表 2.3(d) TLCDC 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 5.46\%$ ， $\gamma = 1$).....	96
表 2.3(e) TLCDC 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 7.87\%$ ， $\gamma = 1$).....	97

表 2.3(f) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 10.71\%$ ， $\gamma = 1$).....	98
表 2.4(a) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 0.87\%$ ， $\gamma = 1$).....	99
表 2.4(b) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 1.97\%$ ， $\gamma = 1$).....	100
表 2.4(c) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 3.50\%$ ， $\gamma = 1$).....	101
表 2.4(d) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 5.46\%$ ， $\gamma = 1$).....	102
表 2.4(e) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 7.87\%$ ， $\gamma = 1$).....	103
表 2.4(f) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 10.71\%$ ， $\gamma = 1$).....	104
表 3.1 鋁材之材料性質.....	105
表 3.2 加速規之規格(亦可量測速度).....	105
表 3.3 結構參數分析.....	106
表 3.4 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構位移與加速度均方根值折減之值(結 構自由振動， $x_s(0) = 3.45$ cm).....	106
表 3.5 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構反應之折減值(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 15 秒).....	107
表 3.6 不同擾動頻率比與孔口板所識別出之水頭損失係數(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	107
表 3.7 不同擾動頻率比與面積比試驗之最大水柱激盪位移(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	108
表 3.8 不同擾動頻率比與面積比之試驗結構位移均方根值折減(簡諧擾動，擾動 振幅 3mm，前 40 秒).....	108
表 3.9 不同擾動頻率與面積比之試驗結構加速度均方根值折減(簡諧擾動，擾動 振幅 3mm，前 40 秒).....	109

表 3.10 不同擾動頻率與面積比之試驗結構位移峰值折減(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	109
表 3.11 不同擾動頻率與面積比之試驗結構加速度峰值折減(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	110
表 4.1 變斷面 TLCD 系統之設計參數($W_l = 10.84\text{kgf}$ ， $L_e = 1.38\text{m}$ ， $d = 0.65\text{m}$)	111
表 4.2(a) 變斷面 TLCD 系統裝置於單自由度結構之設計參數($L_e = 1.71\text{m}$ ， $d = 0.94\text{m}$ ， $\beta = 0.55$).....	112
表 4.2(b) 變斷面 TLCD 系統裝置於單自由度結構之設計參數($L_e = 1.71\text{m}$ ， $d = 0.94\text{m}$ ， $\beta = 0.55$).....	113
表 4.3(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	114
表 4.3(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	114
表 4.3(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	115
表 4.3(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	115
表 4.3(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	116
表 4.3(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	116
表 4.4(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	117
表 4.4(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	117
表 4.4(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$).....	118
表 4.4(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動，	

$\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	118
表 4.4(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	119
表 4.4(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡諧擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	119
表 4.5(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	120
表 4.5(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	120
表 4.5(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	121
表 4.5(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	121
表 4.5(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	122
表 4.5(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨機擾動， $\gamma = 1, \beta = 0.55$).....	122
表 4.6 TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動， $\alpha = 5.46\%$ ， $\gamma = 1$).....	123

圖目錄

圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統.....	124
圖 1.2 不同型式之調諧液態消能系統.....	124
圖 1.3 Aqua Damper(Tuned Slushing Water Damper)	125
圖 1.4 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用	125
圖 1.5 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用	126
圖 1.6 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用	126
圖 1.7 TLCD 系統於加拿大 Wall centre 之減振應用	127
圖 1.8 TLCD 系統於高塔之減振應用	127
圖 1.9 TLCD 系統於儲存槽之減振應用	128
圖 2.1 等斷面 TLCD 之示意圖	129
圖 2.2 水柱激盪位移反應歷時(自由振動, $x_f(0) = 0.265\text{ m}$).....	130
圖 2.3 水柱激盪加速度反應歷時(自由振動, $x_f(0) = 0.265\text{ m}$).....	131
圖 2.4 水柱激盪位移之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.265\text{ m}$).....	132
圖 2.5 水柱加速度反應之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.265\text{ m}$).....	132
圖 2.6 單自由度結構物裝置等斷面 TLCD 示意圖	133
圖 2.7(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.1$)	134
圖 2.7(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.2$).....	135
圖 2.7(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.3$).....	136
圖 2.7(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.4$).....	137
圖 2.7(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.5$).....	138
圖 2.7(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.6$).....	139

圖 2.7(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.7$).....	140
圖 2.8(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 0.0$)	141
圖 2.8(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 0.2$)	142
圖 2.8(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 0.4$)	143
圖 2.8(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 0.8$)	144
圖 2.8(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 2.0$)	145
圖 2.8(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 4.0$)	146
圖 2.8(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 8.0$).....	147
圖 2.8(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\delta = 20$)	148
圖 2.9 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	149
圖 2.10 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	149
圖 2.11 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	150
圖 2.12 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	150
圖 2.13 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	151
圖 2.14 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$,	

$\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	151
圖 2.15 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$,	
$\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	152
圖 2.16(a) TLCD 系統之水柱激盪位移富氏頻譜(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$,	
$\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	153
圖 2.16(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(自由振動 ,	
$x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	153
圖 2.17(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度富氏頻譜(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$,	
$\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	154
圖 2.17(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(自由振動 ,	
$x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	154
圖 2.18 TLCD 系統之遲滯迴圈(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$,	
$\beta = 0.7$, $\delta = 8$).....	155
圖 2.19(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.1$).....	156
圖 2.19(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.2$).....	157
圖 2.19(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.3$).....	158
圖 2.19(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.4$).....	159
圖 2.19(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.5$).....	160
圖 2.19(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.6$).....	161
圖 2.19(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.7$).....	162
圖 2.20(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方	
根折減之影響 (共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.0$).....	163

圖 2.20(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.2$).....	164
圖 2.20(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.4$).....	165
圖 2.20(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.8$).....	166
圖 2.20(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 2$).....	167
圖 2.20(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 4$).....	168
圖 2.20(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 8$).....	169
圖 2.20(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 20$).....	170
圖 2.21 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	171
圖 2.22 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	171
圖 2.23 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	172
圖 2.24 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	172
圖 2.25 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	173
圖 2.26 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	173
圖 2.27 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	174
圖 2.28(a) TLCD 系統之水柱激盪位移之富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$,	

$\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	175
圖 2.28(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧擾動 , $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	175
圖 2.29(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度之富氏頻譜圖(共振簡諧擾動 , $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	176
圖 2.29(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧擾動 , $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	176
圖 2.30 TLCD 系統之遲滯迴圈(共振簡諧擾動 , $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 1$).....	177
圖 2.31 隨機擾動力之歷時.....	178
圖 2.32 隨機擾動力之富氏頻譜圖.....	178
圖 2.33(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.1$).....	179
圖 2.33(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.2$).....	180
圖 2.33(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.3$).....	181
圖 2.33(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.4$).....	182
圖 2.33(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.5$).....	183
圖 2.33(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.6$).....	184
圖 2.33(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\beta = 0.7$).....	185
圖 2.34(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\delta = 0.0$).....	186
圖 2.34(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方 根折減之影響(隨機擾動 , $\gamma = 1$, $\delta = 0.2$).....	187

圖 2.34(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.4$)	188
圖 2.34(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.8$)	189
圖 2.34(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 2$)	190
圖 2.34(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 4$)	191
圖 2.34(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 8$)	192
圖 2.34(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 20$)	193
圖 2.35 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	194
圖 2.36 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	194
圖 2.37 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	195
圖 2.38 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	195
圖 2.39 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	196
圖 2.40 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	196
圖 2.41 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	197
圖 2.42(a) TLCD 系統之水柱激盪位移富氏頻譜(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	198
圖 2.42(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動, $\gamma = 1$,	

$\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	198
圖 2.43(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度富氏頻譜(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	199
圖 2.43(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	199
圖 2.44 TLCD 系統之遲滯迴圈(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)	200
圖 2.45 系統識別所得之水頭損失係數歷時.....	200
圖 3.1 波高計(Wave1).....	201
圖 3.2 TLCD 模型設計前視圖	201
圖 3.3 TLCD 模型設計上視圖	202
圖 3.4 孔口板設計圖.....	202
圖 3.5 TLCD 3D 模型示意圖	203
圖 3.6 TLCD 實體圖	203
圖 3.7 鋁架模型前視圖.....	204
圖 3.8 鋁架模型上視圖.....	205
圖 3.9 鋁架 3D 模型示意圖.....	206
圖 3.10 樓頂鋼板設計圖.....	207
圖 3.11 振動台尺寸詳圖.....	208
圖 3.12 微振加速規及訊號調節放大器.....	209
圖 3.13(a) 結構裝置 TLCD 系統之量測儀器配置圖.....	209
圖 3.13(b) 結構裝置 TLCD 系統試驗之量測儀器配置圖(頂樓).....	210
圖 3.14 TLCD 元件之安裝與波高計之架設圖	210
圖 3.15(a) 自由振盪試驗之側向施力示意圖	211
圖 3.15(b) 自由振盪試驗之側向施力示意圖	211
圖 3.16(a) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)	212
圖 3.16(b) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$)	213
圖 3.16(c) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)	214
圖 3.17 TLCD 元件之開孔面積比、擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係 ...	215

圖 3.18(a) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)	216
圖 3.18(b) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$)	217
圖 3.18(c) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)	218
圖 3.19(a) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)	219
圖 3.19(b) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$)	220
圖 3.19(c) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)	221
圖 3.20 TLCD 元件之面積比與擾動頻率比對於水頭損失係數之影響	222
圖 3.21 不同面積比之 TLCD 系統遲滯迴圈(擾動頻率比 $\gamma_T=0.1$)	223
圖 3.22 TLCD 系統於不同孔口板之水柱自由激盪振幅富氏頻譜	224
圖 3.23 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)	225
圖 3.24 系統識別預測與振動台試驗之結構加速度反應比較(Kobe, PGA=0.15g)	225
圖 3.25 TLCD 系統於不同孔口板孔徑下,控制與未控制結構之位移歷時(結構自由 振動, $x_s(0) = 3.45$ cm)	226
圖 3.26 TLCD 系統於不同孔口板孔徑下,控制與未控制結構之加速度歷時(結構 自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm)	227
圖 3.27 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm, $\phi = 1.00$)	228
圖 3.28 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm, $\phi = 0.64$)	228
圖 3.29 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm, $\phi = 0.36$)	229
圖 3.30 不同面積比之 TLCD 系統遲滯迴圈(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm)	230
圖 3.31 TLCD 系統於不同孔口板孔徑之水柱激盪位移歷時(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm)	231
圖 3.32 水頭損失係數收斂情形(結構自由振動, $x_s(0) = 3.45$ cm, $\phi = 0.36$, $\delta = 19.82$)	232

圖 3.33 試驗與分析之結構位移歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$).....	232
圖 3.34 試驗與分析之結構加速度歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$).....	233
圖 3.35 試驗與分析之 TLCD 水柱激盪位移歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$).....	233
圖 3.36 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構控制與未控制之位移歷時 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$).....	234
圖 3.37 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構控制與未控制之加速度歷時 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$).....	235
圖 3.38 不同孔口板 TLCD 系統之水柱激盪位移(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$).....	236
圖 3.39 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 1.00$).....	237
圖 3.40 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 0.64$).....	237
圖 3.41 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 0.36$).....	238
圖 3.42 不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$).....	239
圖 3.43 不同孔口板孔徑之 TLCD 水頭損失係數收斂情形(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$).....	240
圖 3.44 擾動與結構之頻率比對於水頭損失係數之影響(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒).....	241
圖 3.45 TLCD 系統試驗與理論分析之結構位移歷時比較(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$).....	242
圖 3.46 TLCD 系統試驗與理論分析之結構加速度歷時比較(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$).....	243
圖 3.47 TLCD 系統試驗與理論分析之水柱激盪位移歷時比較(簡諧擾動，擾動振	

幅 3mm, $\gamma_s = 1.00$).....	244
圖 3.48 擾動與結構之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).....	245
圖 3.49 不同孔口板孔徑之 TLCD 系統水柱激盪位移峰值與水頭損失係數關係(簡諧擾動, 擾動振幅 3mm, 前 40 秒).....	245
圖 3.50 孔口板孔徑與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).....	246
圖 3.51 孔口板孔徑與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).....	247
圖 3.52 TLCD 控制結構之位移富氏頻譜圖(自由振動, $\phi = 1.0$).....	248
圖 3.53 TLCD 控制結構之加速度富氏頻譜圖(自由振動, $\phi = 1.0$).....	248
圖 4.1 變斷面 TLCD 示意圖	249
圖 4.2 管徑截面積比與水柱激盪位移均方根值之關係(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$)	249
圖 4.3 不同管徑管徑截面積比之變斷面 TLCD 遲滯迴圈(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\delta = 5$)	250
圖 4.4 水柱激盪位移反應歷時(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\lambda = 1.6$).....	251
圖 4.5 水柱激盪加速度反應歷時(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\lambda = 1.6$).....	252
圖 4.6 水柱激盪位移之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\delta = 5$)....	253
圖 4.7 水柱激盪加速度之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\delta = 5$)	253
圖 4.8 單自由度結構裝置變斷面 TLCD 示意圖	254
圖 4.9(a) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1 \text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$)	255
圖 4.9(b) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1 \text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$)	256
圖 4.9(c) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1 \text{ m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.8$)	

.....	257
圖 4.9(d) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.0$)	258
.....	259
圖 4.9(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.2$)	260
.....	261
圖 4.9(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.4$)	262
.....	263
圖 4.10(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.4$)	264
.....	265
圖 4.10(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.8$)	266
.....	267
圖 4.10(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=2.0$)	268
.....	269
圖 4.10(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=4.0$)	270
.....	271
圖 4.10(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=8.0$)	272
.....	273
圖 4.10(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=20$)	274
.....	275
圖 4.11 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$,	

$\gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$).....267

圖 4.12 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....267

圖 4.13 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....268

圖 4.14 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....268

圖 4.15 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....269

圖 4.16 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1,$
 $\alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$).....269

圖 4.17 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m},$
 $\gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$).....270

圖 4.18(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....271

圖 4.18(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....271

圖 4.19(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(自由振動，

$x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....272

圖 4.19(b) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(自由振

動， $x_s(0) = 0.1\text{m}, \gamma = 1, \alpha = 5.0\%, \beta = 0.55, \delta = 4, \lambda = 1.2$)
.....272

圖 4.20 變斷面 TLCD 系統之遲滯迴圈(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 4$, $\lambda = 1.2$).....	273
圖 4.21(a) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$).....	274
圖 4.21(b) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$).....	275
圖 4.21(c) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.8$).....	276
圖 4.21(d) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.0$).....	277
圖 4.21(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.2$).....	278
圖 4.21(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.4$).....	279
圖 4.22(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.4$).....	280
圖 4.22(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.8$).....	281
圖 4.22(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 2.0$).....	282
圖 4.22(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 4.0$).....	283
圖 4.22(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 8.0$).....	284
圖 4.22(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 20$).....	285
圖 4.23 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	286
圖 4.24 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$,	

	$\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	286
圖 4.25	TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	287
圖 4.26	TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	287
圖 4.27	TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	288
圖 4.28	變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	288
圖 4.29	變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	289
圖 4.30(a)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	290
圖 4.30(b)	變斷面 TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧 擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	290
圖 4.31(a)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	291
圖 4.31(b)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧 擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	291
圖 4.32	變斷面 TLCD 系統之遲滯迴圈(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$).....	292
圖 4.33(a)	質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$).....	293
圖 4.33(b)	質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$).....	294
圖 4.33(c)	質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.8$).....	295
圖 4.33(d)	質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根 折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.0$).....	296

圖 4.33(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.2$).....	297
圖 4.33(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.4$).....	298
圖 4.34(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.4$).....	299
圖 4.34(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.8$).....	300
圖 4.34(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 2.0$).....	301
圖 4.34(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 4.0$).....	302
圖 4.34(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 8.0$).....	303
圖 4.34(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 20$).....	304
圖 4.35 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	305
圖 4.36 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	305
圖 4.37 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	306
圖 4.38 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	306
圖 4.39 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	307
圖 4.40 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$).....	307
圖 4.41 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$,	

	$\beta = 0.55, \delta = 6, \lambda = 1.4$).....	308
圖 4.42(a)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55, \delta = 6, \lambda = 1.4$).....	309
圖 4.42(b)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動, $\gamma = 1, \alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55, \delta = 6, \lambda = 1.4$).....	309
圖 4.43(a)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55, \delta = 6, \lambda = 1.4$).....	310
圖 4.43(b)	變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(隨機擾 動, $\gamma = 1, \alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55, \delta = 6, \lambda = 1.4$).....	310
圖 4.44	變斷面 TLCD 系統遲滯迴圈(隨機擾動, $\gamma = 1, \alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 6, \lambda = 1.4$).....	311
圖 5.1	TLCD 應用之分析設計流程	312



第一章 緒論

近年來國內外相繼出現超高層建築(如台北新地標 101 大樓)，這些高樓建築物有別於傳統的鋼筋混凝土結構，具有質量輕、強度高、高寬比大且自然振動頻率及阻尼較低等特性，故對風力擾動十分敏感。基於安全性與使用者的舒適性考量，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、加速度以改善其舒適性，遂為土木結構工程領域之重要課題。

一般而言，要降低結構動力反應的方法不外乎增加結構的阻尼及改變結構的自然頻率等方向，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：

被動控制系統不需提供能量即可運作，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)。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週期以隔絕地震能量輸入上部結構，並提供阻尼降低基層之位移—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 508m 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 不需額外提供勁度及阻尼等機械裝置，需要維修之項目較 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 DamperTM(圖 1.3)，其為一盛水的方形容器，並在容器中加裝多重鋼絲網，用以增加 Aqua Damper 的消能能力。16 組 MCC Aqua DamperTM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(equivalent 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、安裝更為容易，並可於有限的空間上進行較佳的配置設計，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所提出之模糊(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。主動控制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。

上述研究當中皆將 TLCD 之非線性阻尼以等效阻尼的方式探討 TLCD 之動力特性，因此本研究將提出一套非線性之分析模式，以更真實之情況討論 TLCD 設計參數對結構減振之影響。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 Teramura¹¹ 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；中國大陸，則有上海經貿大樓採用 TLCD 作為抗風系統。

北美地區，有溫哥華 Wall Centre 住宅大樓[46](48 層，圖 1.7)安裝 TLCD 進行結構抗風控制(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，亦兼作緊急消防用水之功能。此外，在美國應用 TLCD 系統之案例還包括紐約的 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 及圖 1.9 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** (Eazy-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，因此本研究有關高樓調諧水波消能系統技術之研發遂選擇從 TLCD 系統切入，除了建立 TLCD 系統之非線性理論分析模式外，並製作一組 TLCD 元件進行元件測試與性能測試(振動台試驗)。

本文第二章為等斷面調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導運動方程式與建立非線性數值解析模型，並進行參數分析以掌握 TLCD 系統之最佳設計參數。第三章為等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 TLCD 系統之元件測試以及性能測試，探討 TLCD 系統之減振效益，並驗證數值解析模式之精確性。第四章為變斷面調諧水柱消能系統之理論分析，針對漸變或三段式斷面 TLCD 系統建立理論分析模式。變斷面 TLCD 系統之動力特性仍然十分明確，但由於多了一組斷面比的參數，在設計上提供了更多的彈性。本章將進行參數分析以探討變斷面 TLCD 系統之最佳設計。第五章為結論。

第二章 等斷面調諧水柱消能系統

2.1 TLCD 系統之運動方程式

圖 2.1 所示為一 U 型等斷面調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)，其水平段截面積(A)與垂直段截面積相同。當 TLCD 基座受到水平擾動(u_g)作用時，水柱激盪的振幅為 x_f ，由於任何時刻液面不得低於 TLCD 水平段管徑 D ，因此須滿足

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

其中，

h_v ：TLCD 垂直段靜水位高度

D ：TLCD 水平段管徑

此外，若進一步考慮流體(水)之不可壓縮性，則 TLCD 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：

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 dx \\ &\quad + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 (h_v - x_f) \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho A \dot{u}_g^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \\ &= \rho A \dot{x}_f^2 h_v + \rho A \dot{u}_g^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

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

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \rho A g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g d D \\
&= \rho A g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A g d D
\end{aligned} \tag{2.3}$$

其中，

ρ ：流體密度

g ：重力加速度

u_g ：基座水平位移

A ：TLCD U 型管之截面積

x_f ：TLCD 水位變化

d ：TLCD 水平段長度

將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's Equation)

可得：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho A h_v + \rho A d) \ddot{x}_f + \rho A d \ddot{u}_g \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A g x_f \tag{2.5}$$

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：

$$Q = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho A \delta \dot{x}_f^2 & \dot{x}_f > 0 \\ \frac{1}{2} \rho A \delta \dot{x}_f^2 & \dot{x}_f < 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

$$\text{或 } Q = -\frac{1}{2} \rho A \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \tag{2.7}$$

其中， δ 為水頭損失係數

根據式(2.4)、式(2.5)與式(2.7)，可建立 TLCD 系統之運動方程式如下：

$$(2\rho Ah_v + \rho Ad)\ddot{x}_f + \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f + 2\rho Agx_f = -\rho Ad\ddot{u}_g \quad (2.8)$$

由式(2.8)之特徵分析可求得等斷面 TLCD 之自然頻率 ω (rad/sec)為

$$\omega = \sqrt{\frac{2\rho Ag}{2\rho Ah_v + \rho Ad}} = \sqrt{\frac{2g}{2h_v + d}} \quad (2.9)$$

令 $L_e = 2\left(h_v - \frac{D}{2}\right) + \left[d + 2\left(\frac{D}{2}\right)\right] = 2h_v + d$ ，則式(2.9)可簡潔地

表示為

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (2.10)$$

或

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.11)$$



其中， L_e 為液體之總長度（沿斷面中心線），或稱為有效長度，可據以設計 TLCD 之振動頻率。

TLCD 的自然振動週期可根據式(2.11)計算如下：

$$T = \frac{1}{f} = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g}} \quad (2.12)$$

綜上所述，TLCD 系統之運動方程式可模擬成一單自由度系統，其振動週期為液體有效長度的函數。有效長度愈長，振動週期也愈長。此外，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 TLCD 系統為一非線性的單自由度系統，本文將發展一套數學解析模式以求得 TLCD 系統之液體激盪及流速等振動反應。

2.2 解析模式

由式(2.8)可知，TLCD 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 TLCD 之流速 \dot{x}_f 及水位變化 x_f ，解析方式說明如後。

首先將 TLCD 系統之運動方程式(2.8)表示成：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) \quad (2.13)$$

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)；

$\mathbf{w}(t) = \ddot{u}_g$ 為擾動向量；

$\mathbf{M} = 2\rho Ah_v + \rho Ad$ 為系統之質量矩陣；

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

$\mathbf{K} = 2\rho Ag$ 為系統之勁度矩陣；

$\mathbf{E} = \rho Ad$ 為系統之擾動力配置矩陣；

式(2.11)可以狀態空間表示法寫成：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}^* \mathbf{z}(t) + \mathbf{E}^* \mathbf{w}(t) \quad (2.14)$$

其中，

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

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

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

為 $2n \times 2n$ 之系統矩陣；

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

為 $2n \times 1$ 擾動力分配矩陣。

對式(2.14)取拉普拉氏轉換 (Laplace transformation) 可得到：

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{z}(t_0) + \mathbf{H}(s)\mathbf{G}(s) \quad (2.18)$$

其中，

$$\mathbf{H}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{E}^* \mathbf{w}(s) \quad (2.20)$$

$\mathbf{z}(t_0)$ 表示初始條件。

動力系統式(2.14)之解可由式(2.19)與式(2.20)取拉普拉氏逆轉換至時域而得到：

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}^*(t-t_0)}\mathbf{z}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}^*(t-\tau)}[\mathbf{E}^* \mathbf{w}(\tau)]d\tau \quad (2.21)$$

式(2.21)中之積分式欲展開時， $\mathbf{w}(\tau)$ 在取樣週期內之連續函數須為已知。由於風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

$$\mathbf{w}(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} \mathbf{w}[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} \mathbf{w}[k\Delta t] \quad (2.22)$$

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

狀態方程式(2.14)之解析解可由式(2.21)及式(2.22)之差分方程表示：

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] \quad (2.23)$$

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。

TLCD 動力反應之解析步驟說明如下：

1. 假設 TLCD 第 k 瞬時之速度為 $\dot{x}_f = \dot{x}_{f,k}$ ；
2. 計算 $C_k = \frac{1}{2} \rho A \delta |\dot{x}_{f,k}|$ ，代入式(2.16)可得系統矩陣 \mathbf{A}^* ，並計算 TLCD 之速度反應 $\dot{x}_{f,k+1}$ ；
3. 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 ε 。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 等斷面 TLCD 元件之自由振動分析

為初步探討 TLCD 元件之動力特性(含振盪反應衰減)，本節將進行等斷面 TLCD 系統之自由振動分析。假設所設計之 TLCD 的振動頻率 $f = 0.60\text{Hz}$ ，即週期 $T = 1.67$ 秒，經由式(2.12)可求得 TLCD 之有效長度(L_e)為 1.38 m。此外，令 TLCD 水平段長度 $d = 0.65$ m(與液體有效長度之比值為 0.47)，U 型管管徑 $D = 0.10$ m。根據 $L_e = 2h_v + d$ 之關係式可求得 TLCD 垂直段靜水位高度(h_v)為 0.365 m。由於 TLCD 系統之最大水柱激盪位移必須滿足 $|x_f| \leq h_v - D$ 之限制，亦即 $|x_f| \leq (0.365 - 0.1) = 0.265$ m。因此，吾人將以此最大水柱激盪位移作為 TLCD 之初始位移，同時考慮水頭損失係數(δ)分別為 0、1、5、10 之情況，分析其自由振盪反應。TLCD 系統之斷面尺寸及系統動力特性等參數分別整理如下：

$$\text{TLCD 自然振動頻率 } \omega = 2\pi f = 3.77 \text{ rad/sec}$$

$$\text{TLCD 振動週期 } T = \frac{1}{f} = 1.67 \text{ sec}$$

$$\text{TLCD 有效長度 } L_e = 1.38 \text{ m}$$

$$\text{TLCD 水平段長度 } d = 0.65 \text{ m}$$

$$\text{TLCD U 型管管徑 } D = 0.1 \text{ m}$$

$$\text{TLCD 截面積 } A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi = 0.00785 \text{ m}^2$$

$$\text{TLCD 垂直段靜水位高度 } h_v = \frac{L-d}{2} = 0.365 \text{ m}$$

$$\text{TLCD 流體(水)重量 } W_l = (2h_v + d)A\rho = 10.84 \text{ kgf}$$

圖 2.2 與圖 2.3 分別為利用 2.2 節之解析模式所求得之水柱激盪位移及水柱激盪加速度反應歷時。圖中由上而下分別代表不同水頭損失係數(0、1、5、10)所得之結果。當水頭損失係數為 0 時，TLCD 系統之阻尼係數為 0(無阻尼系統)，因此 TLCD 系統之自由振盪反應不會衰減。隨著水頭損失係數增大，水柱激盪位移與加速度反應衰減的現象愈顯著。圖 2.4 與圖 2.5 分別為水柱激盪位移及加速度之富氏頻譜，其結果顯示，水頭損失係數對於 TLCD 系統之振動頻率影響不大，均保持在 0.6Hz；而水頭損失係數愈大，TLCD 系統之頻域反應峰值愈小，即 TLCD 系統的等效阻尼比將隨之增加。

2.4 結構安裝等斷面 TLCD 系統之運動方程式

考慮於一單自由度結構安裝 TLCD 系統進行減振控制，如圖 2.6 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 ，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)，如式(2.1)所示。TLCD 控制結構之總動能(Kinetic Energy)， T ，與總重力位能(Potential Energy)， U ，可分別計算如下：

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

$$\begin{aligned}
& + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\
& = \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 (h_v - x_f) \\
& + \frac{1}{2} \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\
& = \rho A \dot{x}_f^2 h_v + \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A d (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
U & = \int_0^{h_v - x_f} \rho A g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A g x dx + \int_0^d \rho A g \left(\frac{1}{2} D \right) dx + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
& = \frac{1}{2} \rho A g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A g d D + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
& = \rho A g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A g d D + \frac{1}{2} k_s x_s^2
\end{aligned} \tag{2.25}$$

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(2.24)及式(2.25)帶入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho A h_v + \rho A d) \ddot{x}_f + \rho A d \ddot{x}_s + \rho A d \ddot{u}_g \tag{2.26}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) = \rho A d \ddot{x}_f + (2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{x}_s + (2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{u}_g \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A g x_f \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \quad (2.29)$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失(headloss)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：

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

或
$$Q_1 = -\frac{1}{2}\rho A \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (2.30)$$

$$Q_2 = -c_s \dot{x}_s + f(t) \quad (2.31)$$

其中， c_s 為結構之阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，式 (2.26)、式 (2.28) 及式 (2.30) 可整理如下：

$$(2\rho A h_v + \rho A d) \ddot{x}_f + \rho A d \ddot{x}_s + \frac{1}{2}\rho A \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A g x_f = -\rho A d \ddot{u}_g \quad (2.32)$$

同理，式 (2.27)、式 (2.29) 及式 (2.31) 可整理如下：

$$\begin{aligned} & \rho A d \ddot{x}_f + (2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s \\ & = -(2\rho A h_v + \rho A d + m_s) \ddot{u}_g + f(t) \end{aligned} \quad (2.33)$$

若進一步將式(2.32)與式(2.33)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：

$$\begin{bmatrix} 2\rho A h_v + \rho A d & \rho A d \\ \rho A d & 2\rho A h_v + \rho A d + m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho A \delta |\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 2\rho Ag & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho Ad \\ 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \quad (2.34)$$

或將式(2.34)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t) \quad (2.35)$$

其中，

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

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

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

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

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

在得知整體系統之運動方程式(2.35)後，可將 2.2 節所述之解析模式重新推導，可得：

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] + \mathbf{B}_0\mathbf{F}[k-1] + \mathbf{B}_1\mathbf{F}[k] \quad (2.36)$$

其中，

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

為 $2n \times 1$ 之前瞬時離散時間側向力分配矩陣(此處 $n = 2$)；

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

為 $2n \times 1$ 之後瞬時離散時間側向力分配矩陣；

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \text{ 為 } 2n \times 1 \text{ 之側向力分配矩陣。}$$

2.5 單自由結構安裝等斷面 TLCD 系統之參數研究

為探討等斷面 TLCD 系統之設計對於結構減振效益的影響，本文將針對 TLCD 系統之長度比 β (水平段長度與有效長度之比值)、TLCD 系統之質量比 (TLCD 系統質量與結構質量之比值) 及 TLCD 系統之水頭損失係數等進行參數研究，並利用交通大學土木結構實驗室之單層樓鋁架模型為分析的對象。該鋁架結構之總重量 (含未裝水之空 TLCD) $W_s = 245 \text{ kgf}$ ，經結構系統識別所得之振動頻率 (f_s) 為 0.54 Hz ，阻尼比 $\zeta_s = 0.019$ (詳 2.6 節-結構系統識別)，因此吾人可分別計算結構的勁度為 $k_s = (2\pi f_s)^2 (W_s / g) = 288.57 \text{ kgf/m}$ ，阻尼係數 c_s 為 3.22 kgf-sec/m 。結構受到不同擾動之 TLCD 系統參數分析將於以下各節中說明。

2.5.1 TLCD 設計參數

根據前人 (T. Balendra, C. M. Wang and H. F. Cheong 等) 的研究顯示 [37]，當 TLCD 系統之振動頻率 (f_l) 與結構的振動頻率 (f_s) 一致時，即頻率比 $\gamma = 1$ ，TLCD 系統對於結構的振動反應將有較好的減振效果。因此，本研究亦將考慮 TLCD 系統與結構之頻率比 $\gamma = 1$ 的條件

進行參數研究。由於單層樓鋁架結構之振動頻率為 0.54 Hz，因此由式(2.11)可計算得知達到該共振頻率所需 TLCD 之有效長度為 $L_e = 1.71\text{m}$ 。在質量比的決定方面，由於 TLCD 系統的管徑大小與 TLCD 系統整體的質量有關，若設定 TLCD 系統與鋁架結構之質量比 (α) 介於 1%~10% 之間，此即相當於 TLCD 系統之管徑 (D) 介於 0.04m~0.14m 之間，因此參數分析時將取 $D = 0.04\text{m} \sim 0.14\text{m}$ ，並以 0.02m 為解析度。此外，考慮 TLCD 水平段長度 (d) 與有效長度 (L_e) 之比 $\beta = 0.05 \sim 1$ 進行參數分析，並以 0.05 為解析度。由於 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 ($h_v \geq D$)，滿足上述條件之 TLCD 系統共計 105 組可能的設計組合，如表 2.1 所示。此外，為能廣泛瞭解水頭損失係數對於結構減振效能的影響，吾人考慮水頭損失係數 δ 為 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1、2、4、6、8、10、20、40、60、80、100、150、200 等情況進行分析，以探討水頭損失係數與結構減振效能變化的趨勢。本文乃針對上述 105 組 TLCD 系統的設計進行參數研究，包括自由振動分析、共振頻率之簡諧波擾動分析(作用於基礎)與隨機擾動分析(作用於頂樓)，以探討 TLCD 系統之設計參數對於結構減振效益，以及水柱激盪反應之影響，俾便決定 TLCD 系統最佳設計尺寸之範圍。

2.5.2 單自由度結構之自由振動分析

考慮在結構頂樓給予一水平向初始位移 $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ，而 TLCD 系統之水柱初始狀態為靜止之自由振動分析。

圖 2.7(a)~圖 2.7(g)分別為不同水平段長度比的條件下，質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，結構反應均方根折減呈現先增後減的趨勢，結構位移均方根折減率於水頭損失係數較小時($\delta \leq 1$)，TLCD 質量比小者，減振效果較佳；隨著水頭損失係數的增加($\delta \geq 5$)，TLCD 質量比愈大者，減振效果愈好。結構加速度均方根折減百分比則隨著 TLCD 質量比愈大，減振效果愈好。整體而言，結構反應均方根折減效果較佳的情況為水頭損失係數介於 1~20 之間。

圖 2.8 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，當水平段長度愈長，滿足水柱激盪位移限制之筆數愈少。且質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水平段長度比 β 增加，水柱激盪位移峰值則呈現遞增趨勢。在結構減振效益方面，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高；隨著水平段長度比的增加，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與有效長度 L_e 之下，增加 TLCD 系統水平段的長度，可提升 TLCD 系統對於結構反應的減振效果。

表 2.2 為不同質量比時，TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率。由表可知，滿足水柱激盪位移之限制且可達到最佳控制效果之水平段長度比 β 介於 0.55~0.70 之間(質量比愈大，水平段

所須之長度比愈長)。此外亦如預期地，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 $\alpha = 3.50\%$ ，最佳之結構反應均方根值折減率可達 31%，惟當質量比大於 5.46% 後呈飽和狀態，最佳之結構反應均方根值折減率雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。

圖 2.9 與圖 2.10 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.46\%$ 、長度比 $\beta = 0.7$ 、水頭損失係數 $\delta = 8$ 等條件下，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，TLCD 系統對於結構自由振動反應有良好的控制效果，結構的位移反應於 10 秒左右便能由初始位移 10cm 迅速衰減至 0.6cm，且結構之加速度反應亦能迅速被抑制下來。圖 2.11 與圖 2.12 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.46\%$ 、長度比 $\beta = 0.7$ 、水頭損失係數 $\delta = 8$ 等條件下，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，TLCD 系統能有效抑制結構主要振頻的能量。圖 2.13 為 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時。結構瞬時總能量 (T_s) 為每一瞬時之結構動能與結構位能的總和，即 $T_s = m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 / 2 + k_s x_s^2 / 2$ 。其結果顯示，結構於第 10 秒時，其瞬時總能量已趨近於 0，說明大多數結構之振動能量已由 TLCD 系統吸收。

圖 2.14 與圖 2.15 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值可達 15cm。圖 2.16 與圖 2.17 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 2.18 為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量，由於 TLCD 之阻尼並非線性黏滯阻尼，因此其遲滯迴圈不呈橢圓狀。

2.5.3 地表簡諧波共振擾動分析

本節將進一步探討 TLCD 系統應用於單自由度結構受到地表擾動之減振效益。假設結構受到一地表擾動，其擾動頻率與結構之振動頻率(f_s)相同，亦即 $u_g(t) = 3 \sin(2\pi f_s t)$ mm，其中， $f_s = 0.54$ Hz，同時沿用表 2.1 所示之 TLCD 設計尺寸進行減振控制之最佳設計參數研究。

圖 2.19(a)~圖 2.19(g)分別為不同水平段長度比的條件下，質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減趨勢，與結構自由振動分析的趨勢相同。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高；隨著水頭損失係數的增加，結構反應均方根折減反而則呈現遞減的趨勢，當水頭損失係數大於 40 之後，其折減的趨勢漸趨平穩。一般而言，在共振擾動下，結構反應均方根折減效果最好的情況為水頭損失係數介於 0.2~1 的情況，惟若水頭損失係數為 0，結構大多數振動的能量仍可轉移至 TLCD 系統成為液體激盪的動能，而當地表擾動停止後，TLCD 系統之液體激盪的動能將成為結構額外的擾動振源，可能引起結構的振動，尤以結構本身的阻尼比較小時為甚。上述水頭損失係數為 0 的情況為一理想狀態，實際上 TLCD 系統的管壁與液體間存在摩擦力，且液體流體經 U 型管的轉折處亦有消能的效果，因此 TLCD 系統本身仍存在落水頭損失，使得液體的

激盪振幅不致隨時間持續放大，也不會對結構造成影響。

圖 2.20 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水平段長度比 β 增加，質量比較小者 ($\alpha \leq 1.97\%$)，水柱激盪位移峰值呈現遞增的趨勢；質量比較大者 ($\alpha \geq 3.50\%$)，水柱激盪位移峰值於 $\beta = 0.05 \sim 0.2$ 間呈現遞增的趨勢， $\beta > 0.2$ 以後則呈現遞減 ($\delta \leq 0.2$) 或仍平穩的趨勢 ($\delta \geq 0.4$)。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減百分率愈高，且隨著長度比的增加，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與有效長度 L_e 之下，TLCD 系統水平段的長度愈長，TLCD 系統對於結構反應的減振效果愈好，此與結構自由振動分析所得之結論相同。

表 2.3 為不同質量比時，TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應峰值及均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之水平段長度比為 β 介於 0.6~0.75 之間。此外，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 $\alpha = 3.50\%$ ，最佳之結構反應峰值及均方根值折減率即可達 70% 以上，惟當質量比大於 5.46% 後，最佳之結構反應均方根值折減率即趨於平穩。

圖 2.21 與圖 2.22 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.46\%$ 、長度比 $\beta = 0.75$ 、水頭損失係數 $\delta = 1$ 等條件下，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，TLCD 系統對於結構受到與結構頻率共振簡諧地表擾動的控制效果相當良好，結構的位移及加速度反應均方根值與峰值折減率均可達 70% 以上。圖 2.23 與圖 2.24

為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.46\%$ 、長度比 $\beta = 0.75$ 、水頭損失係數 $\delta = 1$ 等條件下，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，TLCD 系統能有效抑制結構主要振頻的能量。圖 2.25 為 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時，其結果顯示，結構於第 10 秒時，其瞬時總能量已趨近於 0，幾乎全數的振動能量已移轉至 TLCD 系統並被消散。

圖 2.26 與圖 2.27 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 12cm。圖 2.28 與圖 2.29 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度富氏頻譜及頻譜相位角。圖 2.30 為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量。



2.5.4 隨機擾動力分析(作用於樓層)

本節將進一步探討 TLCD 系統應用於結構樓層受到隨機外在擾動力作用的減振效果，以評估 TLCD 對於結構抗風應用的可行性。圖 2.31 與圖 2.32 分別為作用於結構樓層之隨機擾動力歷時及其富氏頻譜，其結果顯示，隨機擾動力最大振幅為 10kgf，其頻率內涵主要分佈於 2Hz 以內。

圖 2.33(a)~圖 2.33(g)分別為不同水平段長度比的條件下，質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢，與結構自

由振動及地表簡諧共振擾動分析的趨勢相同。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高；隨著水頭損失係數增加，結構反應均方根折減呈現先增後減的趨勢，當水頭損失係數大於 40 後，其折減趨勢漸趨平緩。一般而言，結構反應控制效果較佳的情況為水頭損失係數介於 1~20 之間(最佳控制效果為水頭損失係數 $\delta=10$ 附近)。

圖 2.34 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著水平段長度比 β 的增加，質量比較小者($\alpha \leq 3.05\%$)，水柱激盪位移峰值呈現遞增的趨勢；質量比較大者($\alpha \geq 5.46\%$)，水柱激盪位移峰值則呈現遞增隨後再遞減的趨勢。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減百分率愈高，且隨著長度比的增加，於水頭損失係數 $\delta \geq 2$ 的情況下，結構反應均方根折減將呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與有效長度 L_e 之下，TLCD 系統水平段的長度愈長，配合適當的水頭損失係數，可有良好的減振效果，此與結構自由振動及地表簡諧共振擾動分析所得之趨勢相同。

表 2.4 為不同質量比時，TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應峰值及均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之水平段長度比為 β 介於 0.7~0.75。此外，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 α 大於 5.46%，最佳之結構反應峰值及均方根值折減率均可達 30%以上，惟當質量比大於 5.46%後，最佳之結構反應均方根值折減率即趨於平穩。

圖 2.35 與圖 2.36 為頻率比 $\gamma=1$ 、質量比 $\alpha=5.46\%$ 、長度比 $\beta=0.75$ 、水頭損失係數 $\delta=6$ 等條件下，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，TLCD 系統對於結構樓層受到隨機擾動力作用的控制效果相當良好，結構的位移及加速度反應均方根值與峰值折減率可達 30% 以上。圖 2.37 與圖 2.38 為頻率比 $\gamma=1$ 、質量比 $\alpha=5.46\%$ 、長度比 $\beta=0.75$ 、水頭損失係數 $\delta=6$ 等條件下，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，TLCD 系統能有效抑制隨機擾動力(頻寬位於結構主要頻率附近)所引起之結構振動反應。圖 2.39 為 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。其結果顯示，適當設計之 TLCD 系統可發揮消散振動能量的功能，有效降低結構的振動反應。

圖 2.40 與圖 2.41 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 10cm。圖 2.42 與圖 2.43 則分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 2.44 為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量。

2.6 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。隨後將結合 TLCD 系統之運動方程式與結構系統識別的方法，以發展水頭損失係數之理論識別模式。

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：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2.37)$$

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：

$$y(k) = \boldsymbol{\psi}^T(k) \boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (2.38)$$

$$\boldsymbol{\psi}^T(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n_a), u(k) \dots u(k-n_b)] \quad (2.39)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \dots a_{n_a}, b_0 \dots b_{n_b}]^T \quad (2.40)$$

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：

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + L(k) [\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\psi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k-1)] \quad (2.41)$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1) \boldsymbol{\psi}(k)}{\lambda(k) + \boldsymbol{\psi}^T(k) P(k-1) \boldsymbol{\psi}(k)} \quad (2.42)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\lambda(k) + \boldsymbol{\psi}^T(k) P(k-1) \boldsymbol{\psi}(k)} \quad (2.43)$$

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：

$$f_j = \frac{1}{2\pi\Delta t} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (2.44)$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (2.45)$$

其中， Δt 為取樣週期；

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

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 TLCD 系統之水頭損失係數。首先將 TLCD 系統之運動方程式(2.8)等號兩邊同除以 ρA 修正如下：

$$-(4h_v + 2d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g = \delta \left| \dot{x}_f \right| \dot{x}_f \quad (2.46)$$

其中， x_f 為 TLCD 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 TLCD 系統之液體流速(\dot{x}_f)及液體激盪加速度(\ddot{x}_f)。由於式(2.46)中， h_v 、 d 、 \ddot{u}_g 、 x_f 、 \dot{x}_f 及 \ddot{x}_f 均為已知，僅水頭損失係數 δ 未知，若令 $y[k] = -(4h_v + 2d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g$ ，則式(2.46)可表示如下：

$$y[k] = \left[\dot{x}_f \mid \dot{x}_f \right] \delta = \psi^T \theta \quad (2.47)$$

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

式(2.47)可利用式(2.41)、式(2.42)及式(2.43)之遞迴預測誤差法求得每

一瞬時之系統參數 θ ，即為 TLCD 系統之水頭損失係數 δ 。

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 TLCD 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 之簡諧波進行說明。首先利用第 2.2 節所述之解析模式，求得 TLCD 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(2.46)與式(2.47)進行系統識別，初始值採用 $P(0)=10^6$ ， $\theta(0)=0$ 。圖 2.45 為 TLCD 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 $\delta = 5.0$ ，二者契合度極佳，顯示本文所提之識別方法可有效預測水頭損失係數。有關 TLCD 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。

2.7 結論

本章以 TLCD 系統進行結構減振之參數分析，綜合結構自由振動分析、結構受到地表簡諧波共振擾動分析與隨機擾動力作用於結構樓層等分析(TLCD 系統之振動頻率與結構頻率之比值設定 $\gamma=1$ 的條件下)的結果可知：

1. 結構自由振動之控制在 $\delta \geq 5$ 後，質量比 α 愈大，控制效果愈好。
2. TLCD 系統的質量比 α 愈大，在結構受地表簡諧波共振擾動或隨機擾動之情況，控制效果愈好。

3. TLCD 系統的水平段長度比 β 介於 0.55~0.75 時，控制效果最佳。
4. 在上述設計參數範圍內，TLCD 系統之水頭損失係數 δ 在 0.2~20 之間時，可達到較佳的減振效果。
5. 本文所提之系統識別方法可精確識別水頭損失係數。



第三章 等斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析

3.1 TLCD 元件與單層樓鋁構架模型之設計

為驗證 TLCD 系統非線性理論分析模式之精確性與採用 TLCD 系統作為結構控制之可行性，本研究遂設計一 TLCD 元件與單層樓鋁構架模型，俾便進行 TLCD 系統之元件測試與性能測試(振動台試驗)。

由於設計 TLCD 元件時，尚未完成參數之最佳化設計分析，故僅以 TLCD 系統之振動頻率可調整在介於 0.50~0.60Hz 間作為設計目標，以配合單層樓鋁構架模型之基本振動頻率。考量 TLCD 系統之垂直段須裝設波高計(圖 3.1，寬度約為 5cm)以量測水柱的激盪位移，且為降低液面波動的影響，故將波高計的測線設置於 TLCD 斷面中心(即圓心)，因此，TLCD 元件之半徑至少須為 5cm。基於經濟性考量，本研究將考慮採用等斷面 U 型管之 TLCD 元件其斷面為半徑 5cm 之圓管(管壁厚 5mm)。

等斷面 TLCD 元件模型主要由兩個 L 型之 PVC 管對鎖而成(圖 3.2 及 3.3)，兩 PVC 管中間可抽換不同孔徑之孔口板(圖 3.4)，共設計半徑分別為 50 mm(全開)、40 mm、30 mm、20 mm 及 10 mm 等 5 種不同孔徑之孔口板，以探討孔徑大小對落水頭之影響，在孔口板兩側塞有橡膠墊片以防漏水，最後利用螺栓將兩個 L 型之 PVC 管栓緊(圖 3.5 及圖 3.6)。此外，TLCD 元件垂直段外側設有兩根支撐座，除了用以架設波高計外，亦可提供 TLCD 垂直段之加勁效果，避免垂直段

在運動過程中產生晃動或變形，而影響試驗結果。除了波高計外，吾人亦在 U 型管之水平段與垂直段預留 8 個螺孔，以供安裝水壓計，俾便量測孔口板及 U 型管轉彎處之水壓變化。圖 3.5 與圖 3.6 分別為 TLCD 模型之示意圖與實體圖，其總重量(未裝水時)約為 25.46 kgf。

除了設計 TLCD 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 3.7~圖 3.9)以供進行 TLCD 元件之性能測試。該構架之梁、柱均採用相同尺寸的空心鋁方管進行製作，其斷面尺寸及材料性質整理如表 3.1 所示。鋁構架模型的平面尺寸為 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 TLCD 元件重量及鋁架柱高一半以上之大梁與小梁的重量)。此外，並於結構梁柱接頭處增焊加勁板(10cm×10cm)補強，因此柱子之實際有效長度約為 2.5 m。圖 3.10 為頂樓鋼板之螺栓孔位設計圖，TLCD 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之分析結果求得。

3.2 試驗設備與感應器配置

TLCD 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，性能測試係利用單軸向地震模擬振動台所完成。茲將試驗時使用之相關儀器設備說明如下：

1.地震模擬振動台

結構動力試驗方法中，以振動臺最能模擬真實之地動環境，在振動臺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臺之臺面尺寸為 3 公尺見方(圖 3.11)，振動臺之質量為 5 公噸，試體結構之最大質量可達 10 公噸。振動臺係由一支油壓致動器來驅動，其最大行程為 ± 12.5 公分，最大加速度為 1g。

2. 控制系統與資料擷取系統

控制系統為振動臺之中樞所在，吾人使用 MTS 407 控制器之位移控制模式操控振動臺，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。

資料擷取系統採用德國 IMC 公司之產品，主要功能為輸出地震命令訊號至 407 控制器以驅動振動臺，同時記錄各感應計之振動訊號。資料擷取系統包含類比/數位(A/D)、數位/類比(D/A)及數位輸入/輸出(Digital I/O)等功能，並提供 32 組單端式(Single-ended)接線法類比輸入、8 組單端式(Single-ended)接線法類比輸出、32 組單端式(Single-ended)接線法數位輸入/輸出，最大總取樣頻率(Sample Rate)為 80kHz。

3. 微振加速規

由於單層樓鋁構架模型的週期為 1.85sec(詳 3.4.2 節)，結構較軟

(模擬高層結構)，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 3.12，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 3.2 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則為 $\pm 0.5g$ 。吾人於振動台及結構樓板各安裝一顆微振加速規(圖 3.13)，以量測地表及結構之加速度反應。

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 3.13)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 3.1，ARC 公司生產)主要量測 TLCD 垂直段之水柱激盪位移。圖 3.1 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 $\pm 40\text{ cm}$ 。兩根波高計將分別以 C 形夾具固定於 U 型 TLCD 元件垂直段之支撐架(圖 3.14)，俾便量測 TLCD 系統之水柱激盪振幅。

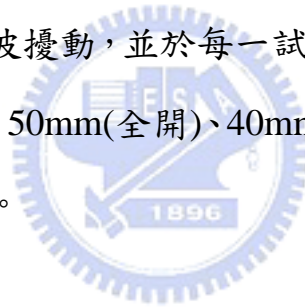
3.3 試驗規劃

振動台試驗主要規劃進行 TLCD 元件測試與 TLCD 性能測試，以瞭解 TLCD 系統之振動特性及探討 TLCD 系統應用於結構振動控

制之減振效益。

3.3.1 TLCD 系統之元件試驗

元件測試時係利用四個大型 C 形夾具將 U 型 TLCD 元件底座固定於振動台上，如圖 3.14 所示。試驗前以水倒入 TLCD 管內，使液體之總長度(有效長度)達 1.38m，相當於 TLCD 元件之振動頻率為 0.6Hz。吾人並於水中添加紅色廣告顏料，以便於觀察液體在 U 型管內振盪的情形。試驗時由控制器輸入振動台命令振幅為 50mm、擾動頻率分別為 0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz 與 0.9Hz 之等七種不同頻率之簡諧波擾動，並於每一試驗完成後更換不同孔徑之孔口板(依序分別為孔徑 50mm(全開)、40mm、30mm、20mm、10mm)，再重複進行上述之試驗。



3.3.2 TLCD 系統之性能試驗

將 TLCD 元件吊至單層樓鋁構架模型的樓頂安裝(圖 3.13)，俾便進行 TLCD 系統之性能試驗。進行性能試驗前先進行結構系統識別試驗，分別輸入 El Centro 與 Kobe 地震(PGA 均為 0.15g)，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 2.6 節所述之結構系統識別單一輸入-單一輸出自迴歸模式(Single Input-Single Output ARX Model)[49-51]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 TLCD 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。

性能試驗之內容包括結構自由振動試驗與簡諧波之地表擾動試驗。自由振動試驗是利用繩索的一端拉住結構的樓板，另一端則跨過滑輪組(圖 3.15)並懸吊一重量為 12kgf 的質塊，產生約為 10.41kgf 之水平側向力，結構初始側向位移為 3.45cm。試驗進行時吾人以打火機將繩索燒斷，結構隨即產生自由振動。分別針對無控制結構(TLCD 未裝水)與 TLCD 控制結構(含五種半徑不同之孔口板)進行試驗，量測其振動反應，以討論 TLCD 系統之減振效益。

簡諧波地表擾動試驗方面，除了進行振幅為 3mm、頻率分別為 0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz、0.9Hz 之簡諧波擾動外，吾人並輸入一振幅同為 3mm、頻率為與結構產生共振之簡諧波擾動(0.54Hz)，分別量測無控制結構(TLCD 未裝水)與 TLCD 控制結構(含五種半徑不同之孔口板)之振動反應，以探討 TLCD 系統之減振效益。

3.4 試驗結果

3.4.1 TLCD 元件試驗

若令孔口板開孔面積與 TLCD 元件斷面積(半徑 5cm)之面積比為 ϕ ($\phi=1$ 、0.64 及 0.36 分別對應孔口板之開孔半徑為 5cm、4cm 及 3cm)，則面積比與擾動頻率比對於水柱激盪位移之影響如圖 3.16 所示。擾動頻率比(γ_T)定義為振動台之擾動頻率與 TLCD 元件自然振動頻率(0.6Hz)之比值($\gamma_T=0.5$ 、1.0 及 1.5 分別對應振動台之擾動頻率為

0.3Hz、0.6Hz 及 0.9Hz)。圖 3.17 為面積比與擾動頻率比對於水柱激盪位移峰值之影響，其結果顯示，當擾動頻率與 TLCD 之自然振頻產生共振時($\gamma_T=1.0$)，TLCD 之水柱激盪位移最大，孔口板全開的情況($\phi=1$)約可達 17.15cm，且隨著孔口板之面積比愈小，水柱激盪位移亦隨之降低($\phi=0.36$ 的情況約為 7.87cm)。擾動頻率快($\gamma_T=1.5$)之水柱激盪振幅較擾動頻率慢($\gamma_T=0.5$)之水柱激盪振幅大，惟兩種擾動頻率下，水柱激盪振幅隨著孔口板之面積比愈小，其位移亦隨之降低的趨勢則不若共振頻率($\gamma_T=1.0$)時顯著。此外，由開孔全開且擾動頻率比為 1 的水柱激盪歷時(圖 3.16(b))可發現，水柱激盪振幅並無持續放大的發散現象，而是漸趨於一穩態振幅，顯示即使孔口板開孔為全開的狀態下，TLCD 元件仍有阻尼，可能是液體通過 U 型 TLCD 元件垂直段與水平段之轉彎處產生落水頭損失或液體與管壁間之摩擦力所造成的結果。圖 3.18 則為面積比與擾動頻率比對於水柱激盪加速度之影響。水柱激盪加速度為將水柱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水柱激盪位移 2Hz 以上之振動反應進行濾波處理。由圖 3.18 之結果可知，水柱激盪加速度振幅的變化趨勢與水柱激盪位移的情況相同。

圖 3.19 為不同面積比與擾動頻率比時，系統識別所得之水頭損失係數歷時。水頭損失係數之識別係根據第 2.6 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，當擾動頻率較慢時($\gamma_T=0.5$)，水柱激盪位移較小(峰值僅

約 0.75cm)，水頭損失係數識別的結果波動較大；隨著擾動頻率變快 ($\gamma_T = 1.0$ 及 1.5)，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 TLCD 元件之面積比與擾動頻率比對於水頭損失係數之影響，其結果顯示，整體而言，孔徑愈小，水頭損失係數愈大，且當擾動頻率比 $\gamma_T \leq 1.0$ 時(擾動較慢)，不同孔徑之水頭損失係數均呈現遞減的趨勢；當擾動頻率比 $\gamma_T > 1.0$ 時(擾動較快)，不同孔徑之水頭損失係數均呈現平穩的現象。共振頻率擾動時($\gamma_T = 1.0$)，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 $\delta = 2.69$ 、4.33 及 14.98。由上述試驗分析結果可知，水頭損失係數與孔口板的孔徑及擾動頻率比有關。

根據系統識別所得之水頭損失係數，配合第 2.2 節之非線性解析模式分析所得之水柱激盪位移及水柱激盪加速度與試驗結果之比較分別如圖 3.16 及圖 3.18 所示。其結果顯示，在水柱激盪位移方面，除了擾動頻率比較大時($\gamma_T = 1.5$)，試驗之振幅稍大於理論分析之振幅外，理論預測結果與試驗結果契合的程度相當高，驗證本文所提非線性理論分析模式之精確性。而在水柱激盪加速度方面，水柱激盪加速度係由波高計量測之水柱激盪位移(2Hz 以上之反應濾掉)對時間微分兩次所得，當 $\gamma_T = 1.0$ 時，微分所得之水柱激盪加速度與理論預測所得之結果十分契合；當 $\gamma_T = 0.5$ 時，由於水柱激盪位移峰值甚小(僅約 0.75cm，相對而言雜訊較多)，因此微分所得之水柱激盪加速度有較多高頻的反應，且大於理論預測的結果，然反應的趨勢仍與理論預測結果十分一致。此外，本研究由試驗的觀察(均全程錄影)可發現，振

動台擾動頻率較快時($\gamma_T = 1.5$)，由於 TLCD 元件之整體水柱激盪位移較小(相對於共振頻率擾動的情況)，水柱液面之局部波動反應相形之下則較為明顯，即水柱液面之局部波動反應有被激發的現象，此應為試驗結果稍大的原因。由於 TLCD 系統之理論分析模式僅考慮水柱之整體激盪行為，並未考慮液面波動的因素，因此理論分析結果較小應屬合理。

圖 3.21 為頻率比 $\gamma_T = 1.0$ ，面積比 $\phi = 1.0$ 、 0.64 及 0.36 時，TLCD 系統之遲滯迴圈。其結果顯示，當孔口板孔徑較大時，阻尼力小，水柱激盪位移大；反之，孔口板孔徑較小時，阻尼力大，水柱激盪位移隨之降低。整體而言，於共振條件下， $\phi = 1.0$ 時之遲滯迴圈消能面積仍大於 $\phi = 0.36$ 的情況(阻尼力雖僅為 $0.4/0.5 = 0.8$ 倍，惟水柱激盪位移峰值可達 2 倍)。

由於元件測試之擾動時間約為 60sec，試驗記錄之時間則為 120sec，因此吾人將 60sec~120sec 之自由振動反應歷時記錄進行頻譜分析所得之結果如圖 3.22 所示。其結果顯示，不同孔口板孔徑所得之主要振動頻率均為 0.61Hz，與 TLCD 元件之理論振動頻率 0.60Hz(測試時倒入 U 型管之液體有效長度為 1.38m)極為接近，顯示利用液體之有效長度計算 TLCD 元件之振動頻率十分精確，調頻相當容易而且可靠。

3.4.2 結構系統識別試驗

不同於單頻之簡諧擾動，地震波擾動的頻率內涵較為豐富。本研

究亦進行振動台試驗，分別輸入 El Centro 與 Kobe 地震波(PGA 均為 0.15g)，完成單層樓鋁構架模型之結構系統識別。由兩種震波識別所得之結構動力特性參數整理於表 3.3，識別所得之平均結構頻率為 0.54Hz，平均阻尼比為 0.019，並利用 $k_s = \omega^2 m_s$ 與 $c_s = 2m_s \omega \zeta_s$ 即可求得結構之勁度與阻尼係數。圖 3.23(El Centro 地震)與圖 3.24(Kobe 地震)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 TLCD 控制結構之數值模擬分析。

3.4.3 TLCD 系統之性能試驗

(a) 自由振動試驗

由於系統識別所得之結構振動頻率為 0.54Hz，本文遂調節 TLCD 的儲水量，使 TLCD 之液體有效長度為 $L_e = 1.70\text{m}$ ，將 TLCD 系統與結構之頻率比設計為 $\gamma = 1.00$ 。水平段長度與有效長度之長度比 β 為 $0.66/1.70 = 0.39$ 。此外，根據液體之有效長度、TLCD 系統之斷面積及水的密度，可求得液體的重量為 13.28kgf，質量比約為 $\alpha = 5.42\%$ (液體重與結構總重之比值)。

圖 3.25 與圖 3.26 分別 TLCD 控制與未控制結構之位移及加速度歷時。由圖 3.25 可知，當結構受到 10.41kgf 之側向力作用時，位移計所量得之結構最大初始位移為 3.45cm，與根據系統識別之結構勁度 ($k_s = 289.78 \text{ kgf/m}$) 所求得之靜力位移 ($x_s = 10.41/k_s = 3.50\text{cm}$) 十分接近 (誤差約 1.4%)。由表 3.4 TLCD 系統之減振效益可知，當面積比

$\phi = 0.36$ 時，TLCD 系統對於結構的控制效果最好，結構位移均方根值折減率為 48.43%，結構加速度之折減率則可達 51.75%。圖 3.27、圖 3.28 與圖 3.29 為不同孔口板面積比之 TLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 TLCD 瞬時總能量歷時，其中，TLCD 之瞬時總能量為 TLCD 每一瞬時之動能與重力位能的總和，可計算如下：

$$T_i = \rho A \dot{x}_f^2 h_v + \rho A (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 h_v + \rho A d (\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 / 2 + \rho A g (h_v^2 + x_f^2)$$

。其結果顯示，TLCD 元件可大幅吸收結構的振動能量，並透過孔口板阻隔液體所造成之落水頭來消耗系統的振動能量。TLCD 元件藉由上述之振動能量轉移與消耗的運作方式，可有效降低結構的振動反應，進而達成結構減振的目標。

圖 3.30 為不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 TLCD 元件所消耗之系統總振動能量(包括結構與 TLCD 元件之振動能量)。圖 3.31 為不同孔口板之 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(由於 $\phi = 0.16$ 及 $\phi = 0.04$ 之水柱激盪位移不大，峰值分別為 2.25cm 及 0.6cm，因此圖中僅顯示 $\phi = 1.00$ 、0.64 及 0.36 之結果)，其峰值由上而下分別為 7.20cm、6.74cm 及 4.43cm。

此外，為進行理論數值模擬分析，本文首先識別不同面積比之 TLCD 元件水頭損失係數，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)，以降低雜訊對於水柱激盪位移微分後之速度與加速度的影響。不同面積比 $\phi = 1.00$ 、0.64、0.36、0.16 及 0.04 的情況下，根據第 2.6 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)

及樓層之加速度(\ddot{x}_s)等已知反應，識別未知之水頭損失係數。系統識別所得之水頭損失係數分別為 $\delta=6.07$ 、 8.71 、 19.82 、 81.32 及 971.98 。圖 3.32 為 $\phi=0.36$ 時，系統識別所得之水頭損失係數歷時，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值(19.82)。

圖 3.33、圖 3.34 與圖 3.35 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 TLCD 水柱激盪位移與試驗結果之比較($\phi=0.36$ ， $\delta=19.82$)。其結果顯示，理論分析所得之結果與試驗結果十分吻合，說明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 TLCD 液體之振動反應。

(b)地表簡諧波擾動試驗

圖 3.36 與圖 3.37 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)，TLCD 控制結構與未控制結構之位移與加速度歷時。由於未裝置 TLCD 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 16 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 TLCD 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，當孔口板開孔面積與 U 型管之截面積比 $\phi=1.0$ 時，TLCD 系統的控制效果最好，結構位移均方根與峰值之折減率分別為 36.71%與 47.80%(表 3.5)；結構加速度均方根與峰值之折減率可分別達 39.34%與 49.76%，減振效果十分良好。當孔口板開孔面積較小時($\phi=0.04$)，TLCD 系統

之液體激盪位移峰值僅約 0.9cm(圖 3.38)，結構安裝 TLCD 系統猶如在結構上增加一質量，因此結構之位移及加速度均方根均有些許放大的現象。

圖 3.39、圖 3.40 與圖 3.41 分別為不同孔口板面積比之 TLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 TLCD 瞬時總能量歷時，其結果顯示，結構裝置 TLCD 系統後，結構之振動能量可移轉至 TLCD 元件，其中，以孔口板面積比為 1.0 之 TLCD 元件吸收較多的結構振動能量，因此結構的振動能量最小。圖 3.42 為不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 TLCD 元件所消耗之系統振動能量(包括結構與 TLCD 元件之振動能量)。

此外，為進行理論數值模擬分析，吾人首先識別不同面積比之 TLCD 元件水頭損失係數，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)，以降低雜訊對於水柱激盪位移微分後之速度與加速度的影響。圖 3.42 為 $\gamma_s = 1$ 時，不同孔口板之 TLCD 水頭損失係數收斂情形，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 3.6 為不同擾動頻率比與孔口板面積比時，系統識別所得之水頭損失係數，其關係如圖 3.43 所示，面積比愈小，水頭損失係數愈大，且當擾動頻率與結構頻率之比值 $\gamma_s = 1.0$ 時，TLCD 系統之水頭損失係數最小，其值分別為 5.15、6.84 與 17.34(分別對應於面積比 $\phi = 1.00$ 、0.64 與 0.36)。隨著擾動頻率遠離結構的自然振動頻率，水頭損失係數有增加的趨勢。

圖 3.44、圖 3.45 與圖 3.46 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 TLCD 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，再次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 TLCD 液體之振動反應。

表 3.7 為不同擾動頻率比與孔口板面積比之 TLCD 系統水柱激盪位移峰值。由表可知，當擾動頻率與結構頻率接近時，TLCD 系統之水柱激盪位移最大(圖 3.48)，結構將移轉較多的振動能量至 TLCD 元件。

圖 3.49 為不同孔口板之水柱激盪位移峰值與水頭損失係數之關係，其結果顯示，當水頭損失係數於小於 25 時，TLCD 之水柱激盪位移峰值的變化較大；當水頭損失係數於大於 25 時，TLCD 之水柱激盪位移峰值的變化則趨於平穩，其趨勢與第二章理論分析的結果相同。

表 3.8 與表 3.9 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結構位移與加速度均方根折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 3.50 所示。表 3.10 與表 3.11 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結構位移與加速度峰值之折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 3.51 所示。由以上結果可知(配合表 3.5)，在 $\gamma_s = 0.55 \sim 1.48$ 時($\gamma_s = 1.0$ 除外)， $\phi = 0.36$ 皆可達最佳之控制效果，且當 $\gamma_s = 1.0$ 對結構之控制效果僅差最佳控制效果($\phi = 1.0$)約 3%，此外，當 γ_s 介於 1.0~1.11 時，TLCD 系統之減振效果最好；當 $\gamma_s < 0.92$ 時，結構的反應則有放大的現象，其可能的原因為結構裝置 TLCD 系統後，總質量增加，使得結構的自然振動頻率由 0.54Hz(無控制結構)降至約 0.5Hz(圖 3.52、圖

3.53)，與擾動頻率產生共振。由於本文之理論分析與試驗僅針對 TLCD 系統之頻率比 $\gamma = 1.0$ (TLCD 元件之振動頻率與結構振動頻率之比值) 進行研究，在此前提之下，TLCD 系統之有效控制頻寬為 γ_s 介於 1.0~1.11 (擾動頻率與結構振動頻率之比值) 之間。未來進行 TLCD 元件設計時，可考慮將 TLCD 系統之頻率比與擾動之頻率比亦納入參數研究，俾便進行 TLCD 系統之最佳化設計，以提升 TLCD 系統之可控制擾動頻寬範圍。

綜合上述之 TLCD 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. 結構於自由振動時，在開孔面積比 $\phi = 0.36$ 時有最佳之控制效果；而共振簡諧擾動下則在 $\phi = 1$ 時有最佳之控制效果。整體而言，孔口板開口與等斷面 TLCD 之截面積比採用 $\phi \geq 0.36$ 之設計，均有良好之控制效果。
2. 根據 TLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率與 TLCD 元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示吾人可藉由調節液體的有效長度決定 TLCD 元件之動力特性。
3. 根據系統識別所得之水頭損失係數進行非線性數值分析所得之水柱激盪位移及結構振動反應與試驗的結果相當契合，驗證本文所提非線性理論分析模式之精確性。
4. 結構在裝置 TLCD 系統後，可大幅吸收結構的振動能量，並透過孔口板阻隔液體所造成之落水頭損失來消耗系統的振動能量，藉由上述之振動能量轉移與消耗的運作方式，可有效降低結構的振動反應。根據簡諧波擾動試驗的結果顯示，

頻率比 $\gamma = 1.0$ 之 TLCD 設計可有效控制地表擾動頻寬為 $\gamma_s = 1.0 \sim 1.29$ 所引起之結構振動反應。



第四章 變斷面調諧水柱消能系統之理論分析

4.1 變斷面 TLCD 系統之運動方程式

U 型三段式變斷面調諧水柱消能系統之示意圖如圖 4.1 所示，TLCD 之水平段截面積(A_h)與垂直段截面積(A_v)不同。當 TLCD 基座受到水平擾動(u_g)作用時，水柱激盪的振幅為 x_f ，由於任何時刻液面不得低於 TLCD 水平段管徑 D_h ，因此需滿足

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

其中，

h_v ：TLCD 垂直段靜水位高度

D_h ：TLCD 水平段管徑

此外，若考慮流體(水)之不可壓縮性，即

$$A_v x_f = A_h x_h \quad (4.2)$$

$$x_h = \frac{A_v}{A_h} x_f \quad (4.3)$$

將(4.3)式等號兩邊同時對時間微分，可得 TLCD 水平段流體之流速

$$\dot{x}_h = \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f \quad (4.4)$$

其中，

A_v ：TLCD U 型管垂直段之截面積

A_h ：TLCD U 型管水平段之截面積

x_f : TLCD 垂直段水位變化

x_h : TLCD 水平段水位變化

則變斷面 TLCD 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:

$$T = \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h (\dot{x}_h + \dot{u}_g)^2 dx \quad (4.5)$$

將式(4.4)帶入式(4.5)可得

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx \\ &+ \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h \left(\frac{A_v}{A_h} \dot{x}_h + \dot{u}_g \right)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v - x_f) \\ &+ \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_h d \left(\frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{u}_g \right)^2 \\ &= \rho A_v \dot{x}_f^2 h_v + \rho A_v \dot{u}_g^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A_h d \left(\frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{u}_g \right)^2 \quad (4.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= \int_0^{h_v-x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v+x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left(\frac{1}{2} D_h \right) dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h \\ &= \rho A_v g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h \quad (4.7) \end{aligned}$$

其中,

ρ : 流體密度

g : 重力加速度

u_g : 基座水平位移

h_v : TLC D 垂直段之水位高度

d : TLC D 水平段長度

將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's Equation)可得：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = \left(2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{u}_g \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \quad (4.9)$$

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：

$$Q = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h > 0 \\ \frac{1}{2} \rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\text{或 } Q = \frac{1}{2} \rho A_h \delta |\dot{x}_h| \dot{x}_h \quad (4.11)$$

其中， δ 為水頭損失係數。

將(4.4)式代入(4.11)式，則非保守力可以垂直段之液面波動速度表示如下：

$$Q = -\frac{1}{2} \rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (4.12)$$

根據式(4.8)、式(4.9)與式(4.12)，吾人可建立變斷面 TLC D 元件之運動方程式如下：

$$\left(2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d\right) \ddot{x}_f + \frac{1}{2} \rho \frac{A_v^2}{A_h} \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f = -\rho A_v d \ddot{u}_g \quad (4.13)$$

由式 (4.13) 之特徵分析，吾人可求得變斷面 TLCD 之自然頻率 ω (rad/sec) 為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2\rho A_v g}{2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d}} = \sqrt{\frac{2g}{2h_v + \frac{A_v}{A_h} d}} \quad (4.14)$$

$$\text{令 } L_e = 2h_v + \lambda d \quad (4.15)$$

$\lambda = \frac{A_v}{A_h}$ ，則(4.14)式可表示為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (4.16)$$

$$\text{或 } f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad (\text{Hz}) \quad (4.17)$$

其中， λ 為 U 型管垂直段與水平段之截面積比， L_e 為變斷面 TLCD 之有效長度，可據以設計 TLCD 之振動頻率。

變斷面 TLCD 之自然振動週期可表示為：

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g}} \quad (4.18)$$

綜上所述，變斷面 TLCD 系統之運動方程式可模擬成一單自由度系統，其振動週期為液體有效長度的函數，有效長度可藉由管徑面積比調整。此外，變斷面 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，使得變斷面 TLCD 系統為一非線性系統，吾人可利用 2.2 節之數學解析模式求得變斷面 TLCD 系統之液體激盪及流速等

振動反應。

4.2 變斷面 TLCD 元件之自由振盪分析

為初步探討變斷面 TLCD 元件之動力特性(含振盪反應衰減)，本節將進行變斷面 TLCD 系統之自由振動分析。假設所設計之 TLCD 的振動頻率 $f = 0.60\text{Hz}$ ，即週期 $T = 1.67$ 秒，經由式(4.17)可求得 TLCD 之有效長度(L_e)為 1.38 m。此外，令 TLCD 水平段長度 $d = 0.65$ m(與液體有效長度之比值為 0.47)，流體總重 $W_l = 10.84\text{kgf}$ (同 2.3 節等斷面 TLCD 之重量)，截面積比 $\lambda = 0.4 \sim 1.6$ ，並以 0.2 為解析度，則在固定變斷面 TLCD 之總重量(W_l)、有效長度(L_e)與水平段長度(d)的條件下，由 $W_l = (2h_v A_v + d A_h) \rho$ 與式(4.15)之關係，吾人可求得 7 筆變斷面 TLCD 之設計參數，如表 4.1 所示。由於 TLCD 系統之最大水柱激盪位移必須滿足 $|x_f| \leq h_v - D$ 之限制，即液面不得低於 TLCD 水平段直徑的高度，在 7 筆 TLCD 設計參數中，水柱激盪位移最小的限制為 0.062m，因此，進行 7 組不同 TLCD 分析時，將以此最大水柱激盪位移 0.062m 作為變斷面 TLCD 之初始位移，並考慮水頭損失係數(δ)分別為 0、1、5、10 之情況，分析其自由振盪反應。

圖 4.2 為變斷面 TLCD 水柱自由振動時，不同水頭損失係數與截面積比之水柱激盪位移均方根值，其結果顯示，隨著水頭損失係數增大，水柱激盪位移之均方根值愈小，此外，隨著截面積比的增加，水柱激盪位移均方根值有減小的趨勢，圖 4.3 為水頭損失係數為 5 時， $\lambda = 0.4$ 、1.0 及 1.6 之遲滯迴圈，顯示當面積比愈大，即 A_v/A_h 之值

愈大，變斷面 TLCD 系統對流體之阻尼力愈大。圖 4.4 與圖 4.5 分別為截面積比 1.6，水頭損失係數 $\delta = 0、1、5$ 及 10 時，水柱激盪之位移與加速度歷時。其結果顯示，水頭損失係數愈大對水柱激盪之控制效果愈佳。圖 4.6 與圖 4.7 為水頭損失係數 5，不同截面積比時，水柱激盪位移與加速度之富氏頻譜圖，其結果顯示，TLCD 之振動頻率在 0.6Hz，與設計之振動頻率相同，此外，當截面積比大時，變斷面 TLCD 系統之頻域反應峰值愈小，即 TLCD 系統的等效阻尼比將隨之增加。

4.3 結構安裝變斷面 TLCD 系統之運動方程式

考慮單自由度結構安裝變斷面 TLCD 系統進行減振控制，如圖 4.8 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 ，TLCD 系統則因結構振動而產生一激盪位移 x_f ，在此仍必須滿足液面不得低於變斷面 TLCD 水平段管徑 D_h 之限制，如式(4.1)所示。變斷面 TLCD 控制結構之總動能 (Kinetic Energy)， T ，與總重力位能 (Potential Energy)， U ，可分別計算如下：

$$\begin{aligned}
 T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx \\
 &+ \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h \left(\frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g \right)^2 dx + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\
 &= \rho A_v h_v \dot{x}_f^2 + \rho A_v h_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h d \left(\frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g \right)^2 \\
 &+ \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \tag{4.19}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left(\frac{1}{2} D_h \right) dx + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \rho A_v g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d D_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \quad (4.20)
\end{aligned}$$

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(4.19)及(4.20)式帶入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = \left(2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) \ddot{x}_f + \rho A_v \ddot{x}_s + \rho A_v \ddot{u}_g \quad (4.21)$$

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

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \quad (4.24)$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失(headloss)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：

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

$$\text{或 } Q_1 = \frac{1}{2}\rho\delta\frac{A_v^2}{A_h}|\dot{x}_f|\dot{x}_f \quad (4.25)$$

$$Q_2 = -c_s\dot{x}_s + f(t) \quad (4.26)$$

其中， c_s 為結構之阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，式 (4.21)、式 (4.23) 及式 (4.25) 可整理如下：

$$\left(2\rho A_v h_v + \rho\frac{A_v^2}{A_h}d\right)\ddot{x}_f + \rho A_v d\ddot{x}_s + \frac{1}{2}\rho\delta\frac{A_v^2}{A_h}|\dot{x}_f|\dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f = -\rho A_v d\ddot{u}_g \quad (4.27)$$

同理，式 (4.22)、式 (4.24) 及式 (4.26) 可整理如下：

$$\begin{aligned} & \rho A_v d\ddot{x}_f + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s)\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s \ddot{u}_g \\ & = -(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) + f(t) \end{aligned} \quad (4.28)$$

將(4.27)及(4.28)式整理成矩陣的型式，則可得變斷面 TLCD 控制結構

之運動方程式為：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \left(2\rho A_v h_v + \rho\frac{A_v^2}{A_h}d\right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho\delta\frac{A_v^2}{A_h}|\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho A_v d \\ (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \end{aligned} \quad (4.29)$$

或將式(4.29)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t) \quad (4.30)$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \left(2\rho A_v h_v + \rho \frac{A_v^2}{A_h} d \right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix}$$

為系統之質量矩陣；

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

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

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

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

4.4 單自由度結構安裝變斷面 TLCD 系統之參數研究

為探討變斷面 TLCD 系統之設計對於結構減振效益的影響，並比較變斷面與等斷面 TLCD 系統對結構控制的差異性，本文將針對變斷面 TLCD 系統之截面積比 λ (U 型管垂直段截面積與水平段截面積之比值)、TLCD 系統之質量比(變斷面 TLCD 系統質量與結構質量之比值)及 TLCD 系統之水頭損失係數等進行參數研究，並利用交通大學土木結構實驗室之單層樓鋁架模型為分析的對象。鋁架結構之總重量(含未裝水之空 TLCD) $W_s = 245 \text{ kgf}$ ，經結構系統識別所得之振動頻率

$f_s = 0.54$ Hz，阻尼比 $\zeta_s = 0.019$ (詳 2.6 節-系統識別)，結構的勁度為 $k_s = (2\pi f_s)^2 (W_s / g) = 288.57$ kgf/m，阻尼係數 c_s 為 3.22 kgf-sec/m。結構受到不同擾動之變斷面 TLCD 系統參數分析將於以下各節中說明。

4.4.1 變斷面 TLCD 設計參數

令變斷面 TLCD 系統之振動頻率為 f_l ，結構的振動頻率為 f_s 。本研究亦將考慮 TLCD 系統之頻率比 $\gamma=1$ 的條件(同 2.5 節)下進行參數研究。即頻率比 $f_l/f_s=1$ 時，分析變斷面 TLCD 系統對於結構振動反應的減振效果。由於單層樓鋁架結構之振動頻率為 0.54 Hz，因此由式(4.17)可計算得知達到該共振頻率所需 TLCD 之有效長度 $L_e = 1.71$ m。在質量比的決定方面，設定變斷面 TLCD 系統與鋁架結構之質量比 $\alpha = 1\%$ 、 3% 、 5% 、 7% 、 9% 及 11% 。TLCD 系統之截面積比(λ)設計於 0.4~1.6 之間，並以 0.2 為解析度進行參數分析。在 TLCD 水平段長度 d 與 TLCD 有效長度之比值 β ，由第二章之結論，吾人取 $\beta = 0.55$ 進行參數分析。由於 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($h_v \geq D_h$)，此外，可由 $W_l = (2h_v A_v + d A_h) \rho$ 與式(4.15)求出滿足上述條件之變斷面 TLCD 系統共計 36 組可能的尺寸設計，如表 4.2 所示。為能廣泛瞭解水頭損失係數對於結構減振效能的影響，吾人考慮水頭損失係數 δ 為 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1、2、4、6、8、10、20、40、60、80、100、150、200 等情況進行分析，以探討水頭損失係數與結構減振效能變化的趨勢。吾人將針對上述 36 組變斷面 TLCD 系統的設計進行參數

研究，包括結構的自由振動分析、共振頻率之簡諧波擾動分析(作用於基礎)與隨機擾動分析(作用於頂樓)，以探討變斷面 TLCD 系統之設計參數對於結構減振效益及水柱激盪反應之影響，俾便決定變斷面 TLCD 系統之最佳設計尺寸範圍。

4.4.2 單自由度結構之自由振動分析

考慮在結構頂樓給予一水平向初始位移 $x_s(0)=0.1\text{m}$ ，而 TLCD 系統之水柱初始狀態為靜止之自由振動分析。

圖 4.9(a)~圖 4.9(f)分別為不同截面積比的條件下，質量比與水頭損失係數對於變斷面 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之關係圖。其結果顯示，當水頭損失係數為任一定值時，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，當水平段長度比固定，水頭損失係數 $\delta < 10$ ，增加質量比，對結構位移均方根折減百分比並無提升之效果，在 $\delta \geq 10$ 之後，質量比之增加則能明顯提升結構位移均方根值的折減率；對於結構加速之均方根折減率，增加質量比均能對其有所提升，惟在 $\delta > 1$ 後，增加較為明顯。而隨著水頭損失係數的增加，結構反應均方根折減則呈現先遞增後遞減的趨勢，當水頭損失係數大於 20 後，其折減的趨勢漸趨平穩。一般而言，結構反應均方根折減效果較佳的情況為水頭損失係數介於 0.2~20 之間。若檢視水頭損失係數($\delta = 0.2\sim 20$)的情況，當水頭損失係數介於 0.2~20 時，TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減的變化較為顯

著，此後的變化對於水頭損失係數則較不敏感。

圖 4.10 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與截面積比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著管徑截面積比 λ 的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效益方面，隨著截面積比的增加，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與長度比 β 之下，變斷面 TLCD 系統 A_v/A_h 的值愈大，變斷面 TLCD 系統對於結構反應的減振效果愈好。

表 4.3 為不同質量比時，變斷面 TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之截面積比為 $\lambda = 1.2$ 。此外，如預期地，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 $\alpha = 5.0\%$ ，最佳之結構位移均方根值折減率可達 32.57%，加速度均方根值折減率可達 36.55%，惟當質量比大於 5.0% 後，最佳之結構反應均方根值折減率雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。

圖 4.11 與圖 4.12 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.0\%$ 、長度比 $\beta = 0.55$ 、截面積比 $\lambda = 1.2$ 、水頭損失係數 $\delta = 4$ 等條件下，變斷面 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，TLCD 系統對於結構自由振動反應有良好的控制效果，結構的位移反應於 10 秒左右便能由初始位移 10cm 迅速衰減至 1cm，且結構之加速度反應亦能迅速被抑制下來。圖 4.13 與圖 4.14 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5.0\%$ 、長度比 $\beta = 0.55$ 、截面積比 $\lambda = 1.2$ 、水頭損失係數 $\delta = 4$ 等條件下，變斷面 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，以 TLCD 系統進行結構振動控制能有效抑制結構主要振頻的能量。結構之瞬時總能量(結構動能與位能) $T_s = m_s(\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2/2 + k_s x_s^2/2$ ，圖 4.15 為 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。由圖可知，結構於第 10 秒時，其瞬時總能量已趨近於 0。

圖 4.16 與圖 4.17 分別為變斷面 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值可達 15.88cm。圖 4.18 與圖 4.19 則分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 4.20 變斷面為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其阻尼力最大為 0.63kgf，所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量，由於變斷面 TLCD 之阻尼並非線性黏滯阻尼，因此其遲滯迴圈不呈橢圓狀。

4.4.3 地表簡諧波共振擾動分析

進一步探討變斷面 TLCD 系統應用於單自由度鋁模型結構受到地表擾動之減振效益，假設結構受到一地表擾動，其擾動頻率(f_o)與結構之振動頻率(f_s)相同，亦即 $u_g(t) = 3 \sin(2\pi f_s t)$ mm，其中， $f_s = f_o = f_l = 0.54 \text{ Hz}$ ，同時沿用表 4.2 所示之變斷面 TLCD 設計尺寸進行減振控制之最佳設計參數研究。

圖 4.20(a)~圖 4.20(g)分別為不同截面積比的條件下，質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，當水頭損失係數為任一定值時，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值

呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，當水平段截面積比固定，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高，隨著水頭損失係數的增加，結構反應均方根折減反而呈現持平而後遞減的趨勢，當水頭損失係數大於 20 之後，其折減的趨勢漸趨平穩。檢視局部水頭損失係數(δ)的情況，當水頭損失係數介於 0.2~20 時，TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減的變化較為顯著，此後的變化對於水頭損失係數則較不敏感。一般而言，在共振擾動下，結構受共振之簡諧波擾動時，結構反應均方根折減效果最好的情況在水頭損失係數為 0.2~2 的情況。

圖 4.21 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與截面積比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著截面積比的增加，水柱激盪位移峰值亦呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高，且隨著截面積比的增加，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與長度比 β 之下，截面積比愈大，變斷面 TLCD 系統對於結構反應的減振效果愈好，此與結構自由振動分析所得之結論相同。

表 4.4 為不同質量比時，變斷面 TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應峰值及均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之截面積比為 λ 至少須大於 1。此外，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 α 大於 3%，最佳之結構反應均方根值折減率即可達 80%以上，結構反應峰值亦可達約 70%惟當質量比大於 5%後，最佳之結構反應峰值與均方根值折減率即趨於平穩。

圖 4.23 與圖 4.24 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5\%$ 、長度比 $\beta = 0.55$ 、截面積比 $\lambda = 1.2$ 、水頭損失係數 $\delta = 0.6$ 等條件下，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，TLCD 系統對於結構受到與結構頻率共振之簡諧地表擾動的控制效果相當良好，結構的位移及加速度反應峰值折減率可達 80% 以上。圖 4.25 與圖 4.26 為頻率比 $\gamma = 1$ 、質量比 $\alpha = 5\%$ 、長度比 $\beta = 0.55$ 、截面積比 $\lambda = 1.2$ 、水頭損失係數 $\delta = 0.6$ 等條件下，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，TLCD 系統能有效抑制結構主要振頻的能量。圖 4.27 為 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量（結構動能與位能）歷時。其結果顯示，結構擾動後 15 秒時，其瞬時總能量已趨近於 0，幾乎全數的振動能量已移轉至變斷面 TLCD 系統並被消散。

圖 4.28 與圖 4.29 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 13cm。圖 4.30 與圖 4.31 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 4.32 為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量。

4.4.4 隨機擾動力分析(作用於樓頂)

本節將進一步探討 TLCD 系統應用於結構樓層受到隨機外在擾動力作用的減振效果，以探討 TLCD 對於結構抗風應用的可行性。圖 2.31 與圖 2.32 分別為作用於結構樓層之隨機擾動力歷時及其富氏頻

譜，其結果顯示，隨機擾動力最大振幅為 10kgf，其頻率內涵主要分佈於 2Hz 以內。

圖 4.33(a)~圖 4.33(g)分別為不同水平段長度比的條件下，質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，當水頭損失係數為任一定值時，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢，與結構自由振動及地表簡諧波共振擾動分析的趨勢相同。在結構減振效能方面，當截面積比固定，質量比愈大，結構反應均方根折減率愈高，隨著水頭損失係數增加，結構反應均方根折減呈現先遞增後遞減的趨勢，當水頭損失係數大於 20 後，其折減趨勢漸趨平緩。一般而言，結構反應控制效果最好的情況為水頭損失係數介於 1~20 之間。若檢視水頭損失係數(δ)介於 1~20 的情況，當水頭損失係數介於 1~20 時，TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減的變化較為顯著，此後的變化對於水頭損失係數並不敏感。

圖 4.34 為滿足水柱激盪位移限制的條件下，質量比與截面積比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，質量比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著截面積比 λ 的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，質量比愈大，結構反應均方根折減百分比愈高，且隨著截面積比的增加，結構反應均方根折減將呈現遞增的趨勢，顯示在相同的水頭損失係數與長度比 β 之下，變斷面 TLCD 系統之截面積比愈大，減振效果愈好，此與結構自由振動及地表簡諧波共振擾動分析所得之趨勢相同。

表 4.5 為不同質量比時，TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應

峰值及均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之水平段長度比為 λ 介於 1.2~1.4 之間。此外，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比 α 大於 5%，最佳之結構反應峰值及均方根值折減率均可達 30% 以上，惟當質量比大於 5% 後，最佳之結構反應均方根值折減率即趨於平穩。

圖 4.35 與圖 4.36 為頻率比 $\gamma=1$ 、質量比 $\alpha=5\%$ 、長度比 $\beta=0.55$ 、截面積比 $\lambda=1.4$ 、水頭損失係數 $\delta=6$ 等條件下，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，TLCD 系統對於結構樓層受到隨機擾動力作用的控制效果相當良好，結構的位移及加速度反應均方根值與峰值折減率可達 30% 以上。圖 4.37 與圖 4.38 為頻率比 $\gamma=1$ 、質量比 $\alpha=5\%$ 、長度比 $\beta=0.55$ 、截面積比 $\lambda=1.4$ 、水頭損失係數 $\delta=6$ 等條件下，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，TLCD 系統能有效抑制隨機擾動力(頻寬位於結構主要頻率附近)所引起之結構振動反應。圖 4.39 為變斷面 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。其結果顯示，適當設計之 TLCD 系統可發揮消散振動能量的功能，降低結構的反應。

圖 4.40 與圖 4.41 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 10cm。圖 4.42 與圖 4.43 則分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 4.44 為 TLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量。

此外，本節亦對變斷面 TLCD 在受隨機擾動時的長度比進行探

討，以瞭解變斷面與等斷面 TLCD 對結構控制效果的差異。表 4.6 為變斷面 TLCD 質量比 $\alpha = 5.46\%$ ，在不同長度比時，調整截面積比(λ)與水頭損失係數(δ)後，TLCD 對結構最佳之控制效果，其結果顯示， $\lambda = 1.0$ (即等斷面)時 TLCD 對結構有最佳控制效果。比較表 2.4(d)與表 4.6 可知，雖等斷面 TLCD 對結構有最佳之控制效果，但當 TLCD 之設計受建物之限制無法達到最佳的長度比時，可藉由調整截面積比(λ)之大小，增加 TLCD 對結構之消能減振控制。

4.5 結論

本節以變斷面 TLCD 系統進行結構減振之參數分析，綜合結構自由振動分析、結構受到地表共振簡諧波擾動之分析與隨機擾動力作用於結構樓層等分析(變斷面 TLCD 系統之振動頻率與結構頻率之比值設定 $\gamma = 1$ 的條件下)的結果可知：

1. 結構自由振動之控制在 $\delta \geq 10$ 後，質量比 α 愈大，控制效果愈好。
2. 變斷面 TLCD 系統的質量比 α 愈大，在結構受地表簡諧波共振擾動或隨機擾動之情況，控制效果愈好。
3. 變斷面 TLCD 系統在 $\beta = 0.55$ 時時，截面積比 λ 介於 1~1.4 之間，控制效果最佳。
4. 在上述設計參數之範圍內，變斷面 TLCD 系統之水頭損失係數 δ 在 0.2~20 之間時，可達到較佳的減振效果。
5. 在隨機擾動的情況，等斷面 TLCD 對結構有最佳之控制效果，且當 TLCD 之設計受建物之限制無法達到最佳的長度比

時，可藉由調整截面積比(λ)之大小，增加 TLCD 對結構之消能減振控制。



第五章 結論與建議

綜合本研究對 TLCD 元件及 TLCD 系統裝置在結構上進行自由振動、簡諧擾動及隨機擾動之分析與試驗結果，茲將應用 TLCD 於高樓結構之分析步驟整理如圖 5.1 所示，並歸納結論如下：

1. 儘管 TLCD 研究之相關文獻多將水頭損失係數考慮成常數，本研究發現水頭損失係數其實與閥門孔徑大小及擾動振幅等有關，閥門孔徑愈小時，水頭損失係數愈大；水柱激盪振幅愈大時，水頭損失係數愈小。
2. 結構自由振動受等斷面 TLCD 系統之控制，在 $\delta \geq 5$ 後，質量比 α 愈大，控制效果愈好。
3. 結構自由振動受變斷面 TLCD 系統之控制，在 $\delta \geq 10$ 後，質量比 α 愈大，控制效果愈好。
4. TLCD(含變斷面 TLCD)系統之質量比 α 愈大，在結構受地表簡諧波共振擾動或隨機擾動之情況，控制效果愈好。
5. 等斷面 TLCD 系統的水平段長度比 β 介於 0.55~0.75 時，控制效果較佳。
6. 變斷面 TLCD 系統在 $\beta = 0.55$ 時，截面積比 λ (垂直段截面積比上水平段截面積)介於 1~1.4 之間，控制效果較佳。
7. 整體而言，TLCD(含變斷面 TLCD)系統之水頭損失係數 δ 於 0.2~20 之間時，可達到較佳的減振效果。
8. 在隨機擾動的情況下，等斷面 TLCD 對結構有最佳之控制效

果，惟當 TLCD 之設計受空間之限制而無法根據最佳之長度比設計時，可藉由調整截面積比(λ)之大小，提昇 TLCD 對結構之減振控制效果。

9. 結構於自由振動時，在開孔面積比 $\phi=0.36$ 時有最佳之控制效果；而共振簡諧擾動下則在 $\phi=1$ 時有最佳之控制效果。整體而言，孔口板開口與等斷面 TLCD 之截面積比採用 $\phi \geq 0.36$ 之設計，均有良好之控制效果。
10. 根據 TLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率與 TLCD 元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示吾人可藉由調節液體的有效長度決定 TLCD 元件之動力特性。
11. 根據系統識別所得之水頭損失係數進行非線性數值分析所得之水柱激盪位移及結構振動反應與試驗的結果相當契合，驗證本文所提非線性理論分析模式之精確性。
12. 簡谐波擾動試驗的結果顯示，頻率比 $\gamma=1.0$ 之 TLCD 設計可有效控制地表擾動頻寬為 $\gamma_s=1.0\sim 1.29$ 所引起之結構振動反應。

此外，本研究仍有未盡之處，提供建議如下：

1. 可對變斷面 TLCD 之長度比，在不同擾動下進行探討，深入瞭解變斷面 TLCD 之特性。
2. 本文尚未針對最佳水平段長度之等斷面 TLCD 及變斷面 TLCD 進行模型試驗，此為後續研究之優先項目。
3. 進行不同擾動與不同擾動振幅之元件測試及性能測試，並建立完整之資料庫，以瞭解水頭損失係數與擾動頻率、振幅及

閥門孔徑之關係，增加設計上之可靠度。

4. 目前流速的數據是將水柱激盪位移作數值微分而得，未來試驗時可考慮以流速計量測流體之流速，以增加試驗結果之精確性。



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.



符號對照表

- A : TLC D U 型管之截面積
- 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_i : 系統識別之輸入訊號係數
- C : 系統之阻尼矩陣
- c_s : 結構之阻尼係數
- D : 等斷面 TLC D 管徑
- D_h : 變斷面 TLC D 水平段管徑
- d : TLC D 水平段長度
- 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
- f : TLCDC 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 : TLCDC 系統之振動頻率
- f_o : 地表擾動頻率
- g : 重力加速度
- h_v : TLCDC 垂直段靜水位高度
- \mathbf{K} : 系統之勁度矩陣
- k_s : 結構勁度
- L_e : TLCDC 之有效長度
- \mathbf{M} : 系統之質量矩陣
- m_s : 結構質量
- 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
- Q : 非保守力



T : 總動能

T_s : 結構瞬時總能量

U : 總重力位能

$u(\cdot)$: 系統識別之輸入訊號

u_g : 基座水平位移

W_l : TLCDC 流體(水)重量

W_s : 結構之總重量

$\mathbf{w}(t)$: 擾動向量

$\mathbf{x}(t)$: 系統之位移向量

x_f : 水柱激盪位移

\dot{x}_f : TLCDC 流體之流速

x_s : 結構頂樓相對於地表之位移

\ddot{x}_f : 流體激盪加速度

x_h : 變斷面 TLCDC 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

α : TLCDC 系統與結構之質量比

β : TLCDC 水平段長度與有效長度之比值

γ : TLCDC 系統之振動頻率與結構的振動頻率之比值 (f_l/f_s)



γ_T : 振動台之擾動頻率與 TLCD 元件自然振動頻率之比值

γ_s : 地表簡諧擾動頻率與結構頻率之比值

θ : 系統識別之每一瞬時系統參數

ω : TLCD 自然振動頻率(rad/sec)

δ : 水頭損失係數

ρ : 流體密度

ε : 容許誤差

ζ_s : 結構之阻尼比

ϕ : 孔口板開孔面積與 TLCD 元件斷面積之面積比

λ : 變斷面 TLCDU 型管垂直段與水平段之截面積比



表 2.1(a) TLCD 系統之設計參數

Case	TLCD 水平段長度 d (m)	TLCD 垂直段靜水位 高度 h_v (m)	TLCD U 型管管徑 D (m)	水平段 長度比 β	質量比 α (%)
1	0.085	0.810	0.04	0.05	0.87
2	0.085	0.810	0.06	0.05	1.97
3	0.085	0.810	0.08	0.05	3.50
4	0.085	0.810	0.10	0.05	5.46
5	0.085	0.810	0.12	0.05	7.87
6	0.085	0.810	0.14	0.05	10.71
7	0.170	0.767	0.04	0.10	0.87
8	0.170	0.767	0.06	0.10	1.97
9	0.170	0.767	0.08	0.10	3.50
10	0.170	0.767	0.10	0.10	5.46
11	0.170	0.767	0.12	0.10	7.87
12	0.170	0.767	0.14	0.10	10.71
13	0.256	0.724	0.04	0.15	0.87
14	0.256	0.724	0.06	0.15	1.97
15	0.256	0.724	0.08	0.15	3.50
16	0.256	0.724	0.10	0.15	5.46
17	0.256	0.724	0.12	0.15	7.87
18	0.256	0.724	0.14	0.15	10.71
19	0.341	0.682	0.04	0.20	0.87
20	0.341	0.682	0.06	0.20	1.97
21	0.341	0.682	0.08	0.20	3.50
22	0.341	0.682	0.10	0.20	5.46
23	0.341	0.682	0.12	0.20	7.87
24	0.341	0.682	0.14	0.20	10.71

表 2.1(b) TLCD 系統之設計參數

Case	TLCD 水平段長度 d (m)	TLCD 垂直段靜水位 高度 h_v (m)	TLCD U 型管管徑 D (m)	水平段 長度比 β	質量比 α (%)
25	0.426	0.639	0.04	0.25	0.87
26	0.426	0.639	0.06	0.25	1.97
27	0.426	0.639	0.08	0.25	3.50
28	0.426	0.639	0.10	0.25	5.46
29	0.426	0.639	0.12	0.25	7.87
30	0.426	0.639	0.14	0.25	10.71
31	0.511	0.597	0.04	0.30	0.87
32	0.511	0.597	0.06	0.30	1.97
33	0.511	0.597	0.08	0.30	3.50
34	0.511	0.597	0.10	0.30	5.46
35	0.511	0.597	0.12	0.30	7.87
36	0.511	0.597	0.14	0.30	10.71
37	0.597	0.554	0.04	0.35	0.87
38	0.597	0.554	0.06	0.35	1.97
39	0.597	0.554	0.08	0.35	3.50
40	0.597	0.554	0.10	0.35	5.46
41	0.597	0.554	0.12	0.35	7.87
42	0.597	0.554	0.14	0.35	10.71
43	0.682	0.511	0.04	0.40	0.87
44	0.682	0.511	0.06	0.40	1.97
45	0.682	0.511	0.08	0.40	3.50
46	0.682	0.511	0.10	0.40	5.46
47	0.682	0.511	0.12	0.40	7.87
48	0.682	0.511	0.14	0.40	10.71

表 2.1(c) TLCD 系統之設計參數

Case	TLCD 水平段長度 d (m)	TLCD 垂直段靜水位 高度 h_v (m)	TLCD U 型管管徑 D (m)	水平段 長度比 β	質量比 α (%)
49	0.767	0.469	0.04	0.45	0.87
50	0.767	0.469	0.06	0.45	1.97
51	0.767	0.469	0.08	0.45	3.50
52	0.767	0.469	0.10	0.45	5.46
53	0.767	0.469	0.12	0.45	7.87
54	0.767	0.469	0.14	0.45	10.71
55	0.852	0.426	0.04	0.50	0.87
56	0.852	0.426	0.06	0.50	1.97
57	0.852	0.426	0.08	0.50	3.50
58	0.852	0.426	0.10	0.50	5.46
59	0.852	0.426	0.12	0.50	7.87
60	0.852	0.426	0.14	0.50	10.71
61	0.937	0.383	0.04	0.55	0.87
62	0.937	0.383	0.06	0.55	1.97
63	0.937	0.383	0.08	0.55	3.50
64	0.937	0.383	0.10	0.55	5.46
65	0.937	0.383	0.12	0.55	7.87
66	0.937	0.383	0.14	0.55	10.71
67	1.023	0.341	0.04	0.60	0.87
68	1.023	0.341	0.06	0.60	1.97
69	1.023	0.341	0.08	0.60	3.50
70	1.023	0.341	0.10	0.60	5.46
71	1.023	0.341	0.12	0.60	7.87
72	1.023	0.341	0.14	0.60	10.71

表 2.1(d) TLCD 系統之設計參數

Case	TLCD 水平段長度 d (m)	TLCD 垂直段靜水位 高度 h_v (m)	TLCD U 型管管徑 D (m)	水平段 長度比 β	質量比 α (%)
73	1.108	0.298	0.04	0.65	0.87
74	1.108	0.298	0.06	0.65	1.97
75	1.108	0.298	0.08	0.65	3.50
76	1.108	0.298	0.10	0.65	5.46
77	1.108	0.298	0.12	0.65	7.87
78	1.108	0.298	0.14	0.65	10.71
79	1.193	0.256	0.04	0.70	0.87
80	1.193	0.256	0.06	0.70	1.97
81	1.193	0.256	0.08	0.70	3.50
82	1.193	0.256	0.10	0.70	5.46
83	1.193	0.256	0.12	0.70	7.87
84	1.193	0.256	0.14	0.70	10.71
85	1.278	0.213	0.04	0.75	0.87
86	1.278	0.213	0.06	0.75	1.97
87	1.278	0.213	0.08	0.75	3.50
88	1.278	0.213	0.10	0.75	5.46
89	1.278	0.213	0.12	0.75	7.87
90	1.278	0.213	0.14	0.75	10.71
91	1.363	0.170	0.04	0.80	0.87
92	1.363	0.170	0.06	0.80	1.97
93	1.363	0.170	0.08	0.80	3.50
94	1.363	0.170	0.10	0.80	5.46
95	1.363	0.170	0.12	0.80	7.87
96	1.363	0.170	0.14	0.80	10.71

表 2.1(e) TLCD 系統之設計參數

Case	TLCD 水平段長度 d (m)	TLCD 垂直段靜水位 高度 h_v (m)	TLCD U 型管管徑 D (m)	水平段 長度比 β	質量比 α (%)
97	1.449	0.128	0.04	0.85	0.87
98	1.449	0.128	0.06	0.85	1.97
99	1.449	0.128	0.08	0.85	3.50
100	1.449	0.128	0.10	0.85	5.46
101	1.449	0.128	0.12	0.85	7.87
102	1.534	0.085	0.04	0.90	0.87
103	1.534	0.085	0.06	0.90	1.97
104	1.534	0.085	0.08	0.90	3.50
105	1.619	0.043	0.04	0.95	0.87

表 2.2(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 0.87\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
0.87	0.05	0	0.17	1.04
0.87	0.1	0	1.65	2.53
0.87	0.15	0.2	3.28	4.15
0.87	0.2	0.2	5.04	5.91
0.87	0.25	0.4	6.74	7.60
0.87	0.3	0.4	8.46	9.32
0.87	0.35	0.4	10.10	10.94
0.87	0.4	0.6	11.78	12.61
0.87	0.45	0.6	13.43	14.25
0.87	0.5	0.6	15.02	15.83
0.87	0.55	1	16.21	17.01
0.87	0.6	2	15.98	16.75
0.87	0.65	4	14.70	15.47
0.87	0.7	6	14.18	14.95
0.87	0.75	8	14.02	14.78
0.87	0.8	20	10.87	11.65

表 2.2(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 1.97\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
1.97	0.05	0	0.19	2.15
1.97	0.1	0.2	2.53	4.50
1.97	0.15	0.4	5.06	7.03
1.97	0.2	0.6	7.62	9.57
1.97	0.25	0.8	10.15	12.08
1.97	0.3	1	12.60	14.50
1.97	0.35	1	15.01	16.88
1.97	0.4	1	17.23	19.08
1.97	0.45	1	19.22	21.05
1.97	0.5	1	21.02	22.83
1.97	0.55	1	22.68	24.47
1.97	0.6	2	24.47	26.17
1.97	0.65	4	24.11	25.74
1.97	0.7	6	23.87	25.46
1.97	0.75	10	22.57	24.14
1.97	0.8	40	15.54	17.18

表 2.2(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 3.50\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
3.50	0.05	0.2	-0.24	3.22
3.50	0.1	0.8	2.73	6.20
3.50	0.15	1	6.10	9.55
3.50	0.2	1	9.43	12.86
3.50	0.25	1	12.60	16.00
3.50	0.3	2	15.68	18.96
3.50	0.35	2	18.53	21.76
3.50	0.4	2	21.11	24.29
3.50	0.45	2	23.46	26.59
3.50	0.5	2	25.55	28.65
3.50	0.55	2	27.42	30.48
3.50	0.6	2	29.11	32.13
3.50	0.65	4	30.73	33.52
3.50	0.7	6	31.25	33.92
3.50	0.75	20	26.11	28.72
3.50	0.8	40	22.84	25.49

表 2.2(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 5.46\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
5.46	0.05	2	-1.15	4.17
5.46	0.1	2	2.30	7.61
5.46	0.15	2	6.40	11.67
5.46	0.2	2	10.52	15.73
5.46	0.25	2	14.31	19.46
5.46	0.3	2	17.65	22.74
5.46	0.35	4	20.63	25.42
5.46	0.4	4	23.57	28.28
5.46	0.45	4	26.21	30.83
5.46	0.5	4	28.58	33.12
5.46	0.55	4	30.70	35.17
5.46	0.6	4	32.59	37.00
5.46	0.65	4	34.29	38.64
5.46	0.7	8	35.27	39.23
5.46	0.75	20	32.47	36.23
5.46	0.8	60	26.17	30.06

表 2.2(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 7.87\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
7.87	0.05	4	-2.31	5.25
7.87	0.1	4	1.40	8.89
7.87	0.15	4	5.98	13.35
7.87	0.2	4	10.61	17.84
7.87	0.25	4	14.92	22.01
7.87	0.3	4	18.81	25.76
7.87	0.35	4	22.22	29.05
7.87	0.4	6	25.22	31.69
7.87	0.45	6	28.04	34.38
7.87	0.5	6	30.54	36.77
7.87	0.55	6	32.76	38.88
7.87	0.6	6	34.73	40.75
7.87	0.65	8	36.58	42.29
7.87	0.7	10	38.07	43.52
7.87	0.75	40	32.76	37.93
7.87	0.8	150	24.05	29.64

表 2.2(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $\alpha = 10.71\%$ ， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
10.71	0.05	10	-3.68	6.44
10.71	0.1	6	0.15	10.17
10.71	0.15	6	5.06	14.87
10.71	0.2	6	10.10	19.66
10.71	0.25	6	14.82	24.14
10.71	0.3	6	19.04	28.14
10.71	0.35	8	22.78	31.47
10.71	0.4	8	26.14	34.63
10.71	0.45	8	29.10	37.39
10.71	0.5	8	31.69	39.82
10.71	0.55	10	34.05	41.81
10.71	0.6	10	36.18	43.79
10.71	0.65	10	38.07	45.54
10.71	0.7	20	38.72	45.51
10.71	0.75	60	33.96	40.65

表 2.3(a) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 0.87\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
0.87	0.05	0	0.78	1.64	2.27	3.12
0.87	0.1	0	5.00	5.84	9.21	10.02
0.87	0.15	0.2	8.66	9.47	13.91	14.68
0.87	0.2	0.2	14.36	15.13	20.33	21.07
0.87	0.25	0.2	20.65	21.37	26.22	26.91
0.87	0.3	0.2	27.23	27.91	31.50	32.15
0.87	0.35	0.4	28.15	28.81	34.28	34.92
0.87	0.4	0.4	33.74	34.37	38.70	39.31
0.87	0.45	0.4	39.22	39.81	42.62	43.20
0.87	0.5	0.6	39.62	40.20	44.73	45.31
0.87	0.55	0.8	40.63	41.19	46.68	47.25
0.87	0.6	1	41.92	42.47	48.48	49.05
0.87	0.65	2	36.38	36.95	42.65	43.20
0.87	0.7	4	30.68	31.28	35.54	36.15
0.87	0.75	6	28.49	29.10	32.80	33.43
0.87	0.8	10	25.05	25.69	28.72	29.40
0.87	0.85	40	14.57	15.29	16.69	17.49

表 2.3(b) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 1.97\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
1.97	0.05	0	4.19	6.07	8.42	10.22
1.97	0.1	0	12.81	14.56	17.42	19.08
1.97	0.15	0	24.97	26.54	25.96	27.47
1.97	0.2	0.2	30.30	31.76	32.27	33.69
1.97	0.25	0.2	40.53	41.81	38.67	39.97
1.97	0.3	0.2	49.90	51.01	44.09	45.29
1.97	0.35	0.2	57.97	58.94	48.69	49.81
1.97	0.4	0.2	64.55	65.42	52.65	53.68
1.97	0.45	0.2	69.69	70.53	56.06	57.03
1.97	0.5	0.2	73.61	74.45	59.05	59.96
1.97	0.55	0.4	73.31	74.17	61.31	62.20
1.97	0.6	0.6	73.54	74.41	63.38	64.23
1.97	0.65	0.8	74.16	75.02	65.31	66.14
1.97	0.7	2	66.48	67.33	65.77	66.68
1.97	0.75	4	59.49	60.38	64.66	65.64
1.97	0.8	10	48.07	49.10	53.69	54.71
1.97	0.85	40	30.97	32.28	35.43	36.79

表 2.3(c) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 3.50\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
3.50	0.05	0	12.49	15.51	17.82	20.65
3.50	0.1	0	24.92	27.62	26.37	28.97
3.50	0.15	0	40.22	42.39	34.75	37.12
3.50	0.2	0	53.43	54.93	41.96	44.12
3.50	0.25	0	62.49	63.35	47.97	49.94
3.50	0.3	0	68.54	69.04	52.99	54.78
3.50	0.35	0	72.93	73.43	57.15	58.80
3.50	0.4	0.2	76.16	77.21	60.48	62.03
3.50	0.45	0.2	78.98	80.15	63.57	65.02
3.50	0.5	0.2	81.08	82.36	66.20	67.55
3.50	0.55	0.2	82.80	84.13	68.46	69.71
3.50	0.6	0.4	84.21	85.56	70.41	71.56
3.50	0.65	0.4	85.52	86.92	72.19	73.33
3.50	0.7	0.6	86.40	87.85	73.72	74.75
3.50	0.75	2	83.66	84.89	74.62	75.72
3.50	0.8	8	70.93	72.13	73.23	74.67
3.50	0.85	60	43.14	45.05	48.83	50.74

表 2.3(d) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 5.46\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
5.46	0.05	0	25.78	29.73	28.24	32.02
5.46	0.1	0	38.93	42.26	35.17	38.70
5.46	0.15	0	52.74	55.08	42.48	45.71
5.46	0.2	0	63.02	64.25	48.96	51.88
5.46	0.25	0	70.18	70.72	54.43	57.10
5.46	0.3	0	74.91	75.47	58.96	61.38
5.46	0.35	0.2	78.51	79.79	62.64	64.90
5.46	0.4	0.2	81.06	82.49	65.90	67.97
5.46	0.45	0.4	83.08	84.57	68.52	70.47
5.46	0.5	0.4	84.83	86.30	70.87	72.66
5.46	0.55	0.4	86.15	87.67	72.99	74.60
5.46	0.6	0.6	87.21	88.88	74.69	76.27
5.46	0.65	0.8	88.05	89.84	76.30	77.71
5.46	0.7	1	88.79	90.66	77.59	78.99
5.46	0.75	1	89.44	91.42	78.95	80.31
5.46	0.8	10	80.25	81.70	78.29	80.03
5.46	0.85	200	43.81	46.68	49.62	52.42

表 2.3(e) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 7.87\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
7.87	0.05	0	40.00	44.47	37.91	42.50
7.87	0.1	0	50.45	54.11	43.18	47.52
7.87	0.15	0	61.05	63.41	49.20	53.18
7.87	0.2	0	69.59	70.70	54.72	58.36
7.87	0.25	0	75.33	75.94	59.56	62.85
7.87	0.3	0.2	79.40	80.74	63.45	66.49
7.87	0.35	0.2	82.03	83.52	66.86	69.65
7.87	0.4	0.4	84.11	85.73	69.71	72.27
7.87	0.45	0.6	85.74	87.43	72.21	74.54
7.87	0.5	0.8	87.02	88.84	74.22	76.49
7.87	0.55	1	88.06	90.01	76.08	78.11
7.87	0.6	1	88.93	90.97	77.67	79.67
7.87	0.65	1	89.62	91.72	79.21	80.94
7.87	0.7	2	90.23	92.37	80.25	81.98
7.87	0.75	2	90.75	93.01	81.40	83.13
7.87	0.8	20	81.15	82.94	80.26	82.52

表 2.3(f) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(共振簡諧擾動， $\alpha = 10.71\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
10.71	0.05	0	51.02	55.83	46.19	51.46
10.71	0.1	0	58.74	62.68	50.11	55.16
10.71	0.15	0	67.36	69.84	54.85	59.55
10.71	0.2	0	74.38	75.44	59.47	63.78
10.71	0.25	0.2	79.28	80.62	63.52	67.51
10.71	0.3	0.2	82.34	83.80	67.10	70.77
10.71	0.35	0.4	84.39	86.21	70.07	73.45
10.71	0.4	0.6	86.12	88.02	72.63	75.71
10.71	0.45	0.8	87.51	89.49	74.96	77.72
10.71	0.5	1	88.56	90.65	76.72	79.42
10.71	0.55	2	89.32	91.51	78.42	80.88
10.71	0.6	2	90.09	92.38	79.79	82.13
10.71	0.65	2	90.65	93.08	81.13	83.43
10.71	0.7	2	91.08	93.63	82.45	84.37
10.71	0.75	4	91.50	94.02	83.22	85.16
10.71	0.8	60	76.68	79.14	79.08	81.71

表 2.4(a) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，
 $\alpha = 0.87\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
0.87	0.05	0	2.49	2.92	1.96	2.65
0.87	0.1	0	2.71	3.07	2.33	2.63
0.87	0.15	0	3.05	3.28	2.92	2.57
0.87	0.2	0	3.46	3.54	3.70	2.44
0.87	0.25	0	3.93	3.81	4.64	2.21
0.87	0.3	0	4.42	4.07	5.72	1.83
0.87	0.35	0	4.91	4.32	6.93	1.30
0.87	0.4	0.2	5.36	4.61	8.10	0.74
0.87	0.45	2	6.08	5.59	8.64	1.98
0.87	0.5	2	6.90	6.23	10.11	2.07
0.87	0.55	2	7.79	6.95	11.73	2.26
0.87	0.6	2	8.76	7.73	13.47	2.52
0.87	0.65	4	9.45	8.51	13.28	4.29
0.87	0.7	4	10.45	9.34	14.85	4.80
0.87	0.75	6	10.87	9.78	14.67	5.72
0.87	0.8	20	9.07	8.42	10.72	5.67
0.87	0.85	40	8.02	7.56	9.01	5.27

表 2.4(b) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，

$$\alpha = 1.97\% , \gamma = 1)$$

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
1.97	0.05	0	5.50	6.41	4.66	5.71
1.97	0.1	0	6.22	6.94	5.73	6.24
1.97	0.15	0	7.18	7.61	7.26	6.41
1.97	0.2	0	8.14	8.24	9.01	6.29
1.97	0.25	0	8.94	8.67	10.82	5.67
1.97	0.3	0	9.51	8.87	12.59	4.43
1.97	0.35	2	10.16	9.81	13.66	4.87
1.97	0.4	2	11.33	10.72	16.18	4.72
1.97	0.45	2	12.67	11.77	18.08	4.82
1.97	0.5	2	14.18	12.95	18.89	5.19
1.97	0.55	2	15.84	14.25	19.57	5.99
1.97	0.6	2	17.64	15.66	20.05	7.28
1.97	0.65	2	19.55	17.15	20.82	9.06
1.97	0.7	4	21.00	18.70	23.13	12.31
1.97	0.75	8	20.93	18.87	24.88	13.33
1.97	0.8	20	18.62	17.14	22.90	12.37
1.97	0.85	60	14.93	14.18	16.80	10.47

表 2.4(c) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，
 $\alpha = 3.50\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
3.50	0.05	0	9.69	11.17	9.01	10.09
3.50	0.1	0	11.11	12.25	10.99	11.49
3.50	0.15	0	12.61	13.34	13.39	11.75
3.50	0.2	0	13.56	13.89	15.52	10.92
3.50	0.25	0	13.80	13.77	17.30	8.67
3.50	0.3	4	14.57	14.87	18.51	9.70
3.50	0.35	4	16.08	16.05	21.19	9.76
3.50	0.4	4	17.85	17.43	22.13	10.31
3.50	0.45	4	19.87	19.01	22.90	11.45
3.50	0.5	4	22.11	20.75	24.12	13.18
3.50	0.55	4	24.52	22.60	25.71	15.53
3.50	0.6	4	27.01	24.50	27.62	18.39
3.50	0.65	4	29.52	26.38	29.80	20.45
3.50	0.7	4	31.97	28.19	32.18	22.99
3.50	0.75	8	32.21	28.72	32.94	24.25
3.50	0.8	20	29.12	26.53	31.97	20.88
3.50	0.85	100	21.07	20.31	23.89	15.79

表 2.4(d) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，

$$\alpha = 5.46\% , \gamma = 1)$$

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
5.46	0.05	0	14.50	16.70	14.84	16.71
5.46	0.1	0	16.14	17.99	17.22	17.21
5.46	0.15	0	17.33	18.82	19.62	16.52
5.46	0.2	0	17.45	18.65	20.38	13.93
5.46	0.25	4	18.14	19.37	22.39	13.81
5.46	0.3	6	19.90	20.78	24.04	14.91
5.46	0.35	4	22.11	22.34	24.75	14.69
5.46	0.4	4	24.75	24.33	27.19	16.69
5.46	0.45	4	27.63	26.48	29.79	19.31
5.46	0.5	4	30.54	28.62	32.63	21.48
5.46	0.55	4	33.31	30.61	35.55	24.50
5.46	0.6	4	35.84	32.38	38.40	27.02
5.46	0.65	4	38.11	33.92	40.54	28.28
5.46	0.7	4	40.09	35.22	38.23	28.95
5.46	0.75	6	41.75	36.63	41.91	32.51
5.46	0.8	40	34.02	31.59	36.86	26.04

表 2.4(e) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，
 $\alpha = 7.87\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
7.87	0.05	0	17.98	21.44	20.98	21.75
7.87	0.1	0	19.24	22.44	23.43	21.36
7.87	0.15	0	20.04	22.96	23.31	19.96
7.87	0.2	6	20.93	23.56	25.00	20.00
7.87	0.25	6	23.21	25.25	26.59	20.77
7.87	0.3	4	26.05	27.23	28.89	21.67
7.87	0.35	4	29.20	29.52	33.53	23.36
7.87	0.4	4	32.31	31.75	37.26	25.46
7.87	0.45	6	35.08	33.95	39.69	28.99
7.87	0.5	6	37.61	35.70	42.04	31.50
7.87	0.55	6	39.81	37.17	43.13	32.76
7.87	0.6	6	41.70	38.37	41.15	31.85
7.87	0.65	6	43.26	39.28	40.34	32.18
7.87	0.7	8	44.57	40.18	43.50	35.76
7.87	0.75	8	45.54	40.52	44.18	37.67
7.87	0.8	60	39.00	36.77	41.39	31.99

表 2.4(f) TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，
 $\alpha = 10.71\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
10.71	0.05	0	19.95	25.13	26.66	27.18
10.71	0.1	0	21.65	26.48	26.90	27.60
10.71	0.15	0	23.69	27.95	27.34	28.45
10.71	0.2	4	26.74	30.08	31.41	29.70
10.71	0.25	4	30.13	32.46	36.22	30.77
10.71	0.3	6	33.34	34.85	40.98	32.96
10.71	0.35	6	36.10	36.80	44.30	34.44
10.71	0.4	6	38.36	38.32	46.07	35.63
10.71	0.45	8	40.36	39.78	45.61	35.79
10.71	0.5	8	42.11	40.88	43.90	34.45
10.71	0.55	10	43.67	41.95	45.46	36.40
10.71	0.6	10	44.99	42.65	45.65	37.47
10.71	0.65	10	46.01	43.04	45.80	39.36
10.71	0.7	10	46.68	43.09	46.38	41.91
10.71	0.75	20	47.02	43.68	47.88	40.77
10.71	0.8	200	38.14	38.02	42.01	35.19

表 3.1 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 σ_y	270 MPa
密 度	2700 kg/m ³
斷面尺寸	25mm×25mm×2mm
斷 面 積	1.840 cm ²
慣 性 矩	1.635 cm ⁴

表 3.2 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 3.3 結構參數分析

	結構 阻尼比	結構阻尼 (kgf*sec/m)	結構勁度 (kgf/m)	結構頻率 (Hz)
EL Centro (PGA=0.15g)	0.017	2.88	289.78	0.54
Kobe (PGA=0.15g)	0.021	3.56	289.78	0.54
平均值	0.019	3.22	289.78	0.54

表 3.4 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構位移與加速度均方根值折減之值(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$)

孔口板開孔面積 與 U 型管截面積 之比值 ϕ	結構位移 均方根值折減 (%)	結構加速度 均方根值折減 (%)
1.00	24.74	31.87
0.64	30.31	36.54
0.36	48.43	51.75
0.16	34.48	38.30
0.04	30.89	34.92

表 3.5 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構反應之折減值(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.0$ ，前 15 秒)

孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ	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	36.71	39.34	47.80	49.76
0.64	33.05	35.59	46.06	48.06
0.36	34.74	36.38	41.52	42.95
0.16	12.06	14.73	17.30	20.48
0.04	-4.81	-1.60	5.61	8.40

表 3.6 不同擾動頻率比與孔口板所識別出之水頭損失係數(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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ		
	1.00	0.64	0.36
0.55	31.07	25.87	23.23
0.74	21.25	25.54	38.57
0.92	7.08	8.79	20.60
1.00	5.15	6.84	17.34
1.11	4.97	7.57	17.51
1.29	13.58	12.32	23.71
1.48	21.93	20.95	30.23
1.66	23.87	24.78	27.32
	水頭損失係數 δ		

表 3.7 不同擾動頻率比與面積比試驗之最大水柱激盪位移(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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ				
	1.00	0.64	0.36	0.16	0.04
0.55	0.009	0.012	0.005	0.006	0.003
0.74	0.017	0.016	0.013	0.010	0.004
0.92	0.081	0.074	0.049	0.026	0.007
1.00	0.096	0.088	0.062	0.033	0.009
1.11	0.080	0.064	0.042	0.020	0.005
1.29	0.023	0.025	0.017	0.011	0.003
1.48	0.012	0.012	0.010	0.008	0.003
1.66	0.006	0.009	0.007	0.006	0.002
最大水柱激盪位移 (m)					

表 3.8 不同擾動頻率比與面積比之試驗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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ				
	1.00	0.64	0.36	0.16	0.04
0.55	-5.98	-10.06	-5.65	-10.28	-12.71
0.74	-20.06	-22.79	-10.83	-18.94	-9.95
0.92	-97.56	-123.14	-76.66	-64.48	-56.41
1.11	34.56	34.34	39.06	35.13	36.02
1.29	13.31	7.68	15.77	8.65	14.10
1.48	3.24	7.91	8.93	1.79	5.17
1.66	8.51	-3.77	2.51	-5.17	-0.79
結構位移均方根值折減 (%)					

表 3.9 不同擾動頻率與面積比之試驗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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ				
	1.00	0.64	0.36	0.16	0.04
0.55	-40.02	-48.82	-5.02	-19.87	-7.57
0.74	-32.85	-25.01	-11.80	-21.33	-10.21
0.92	-96.09	-116.11	-69.33	-60.28	-53.06
1.11	32.19	32.46	37.30	34.85	35.76
1.29	12.28	8.81	12.86	7.60	14.59
1.48	5.51	8.34	8.60	1.53	7.24
1.66	9.98	2.69	5.48	1.40	3.08
	結構加速度均方根值折減 (%)				



表 3.10 不同擾動頻率與面積比之試驗結構位移峰值折減(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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ				
	1.00	0.64	0.36	0.16	0.04
0.55	-39.54	-61.37	-3.73	-7.99	-16.44
0.74	-29.67	-36.29	-16.66	-24.52	-11.50
0.92	-87.88	-88.65	-41.58	-51.66	-48.86
1.11	40.61	41.29	43.19	32.06	31.63
1.29	17.95	12.86	22.35	13.96	12.49
1.48	2.79	9.01	9.12	10.27	-0.15
1.66	9.58	-12.42	-7.99	-25.00	-26.40
	結構位移峰值折減 (%)				

表 3.11 不同擾動頻率與面積比之試驗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 γ_s	孔口板開孔面積與 U 型管截面積之比值 ϕ				
	1.00	0.64	0.36	0.16	0.04
0.55	-55.90	-62.24	-2.01	-19.18	5.93
0.74	-19.50	-12.23	-7.80	-11.37	1.08
0.92	-80.89	-77.31	-34.64	-44.02	-42.77
1.11	39.45	40.21	43.20	33.30	33.53
1.29	16.79	12.87	20.76	14.88	15.91
1.48	9.61	10.15	11.90	8.13	6.66
1.66	11.06	-2.10	2.80	-6.62	-2.06
	結構加速度峰值折減 (%)				

表 4.1 變斷面 TLCD 系統之設計參數($W_l = 10.84 \text{ kgf}$, $L_e = 1.38 \text{ m}$,
 $d = 0.65 \text{ m}$)

Case	變斷面 TLCD 垂直段管徑 D_v (m)	變斷面 TLCD 水平段管徑 D_h (m)	變斷面 TLCD 管徑截面積比 λ	變斷面 TLCD 靜水位高度 h_v (m)
1	0.070	0.112	0.4	0.56
2	0.082	0.106	0.6	0.50
3	0.090	0.102	0.8	0.43
4	0.1	0.1	1	0.37
5	0.110	0.1	1.2	0.30
6	0.122	0.102	1.4	0.24
7	0.136	0.108	1.6	0.17

表 4.2(a) 變斷面 TLCD 系統裝置於單自由度結構之設計參數

$$(L_e = 1.71\text{m}, d = 0.94\text{m}, \beta = 0.55)$$

Case	變斷面 TLCD 垂直段管徑 D_v (m)	變斷面 TLCD 水平段管徑 D_h (m)	變斷面 TLCD 管徑截面積 比 λ	變斷面 TLCD 靜水位高度 h_v (m)	質量比 α (%)
1	0.015	0.023	0.4	0.66	1
2	0.017	0.022	0.6	0.57	1
3	0.019	0.021	0.8	0.48	1
4	0.021	0.021	1.0	0.38	1
5	0.024	0.022	1.2	0.29	1
6	0.027	0.023	1.4	0.20	1
7	0.025	0.040	0.4	0.66	3
8	0.029	0.038	0.6	0.57	3
9	0.033	0.037	0.8	0.48	3
10	0.037	0.037	1.0	0.38	3
11	0.041	0.038	1.2	0.29	3
12	0.047	0.040	1.4	0.20	3
13	0.033	0.052	0.4	0.66	5
14	0.038	0.049	0.6	0.57	5
15	0.043	0.048	0.8	0.48	5
16	0.048	0.048	1.0	0.38	5
17	0.054	0.049	1.2	0.29	5
18	0.061	0.051	1.4	0.20	5

表 4.2(b) 變斷面 TLCD 系統裝置於單自由度結構之設計參數

$$(L_e = 1.71\text{m}, d = 0.94\text{m}, \beta = 0.55)$$

Case	變斷面 TLCD 垂直段管徑 D_v (m)	變斷面 TLCD 水平段管徑 D_h (m)	變斷面 TLCD 管徑截面積 比 λ	變斷面 TLCD 靜水位高度 h_v (m)	質量比 α (%)
19	0.039	0.061	0.4	0.66	7
20	0.045	0.058	0.6	0.57	7
21	0.051	0.057	0.8	0.48	7
22	0.057	0.057	1.0	0.38	7
23	0.063	0.058	1.2	0.29	7
24	0.072	0.061	1.4	0.20	7
25	0.044	0.069	0.4	0.66	9
26	0.051	0.066	0.6	0.57	9
27	0.057	0.064	0.8	0.48	9
28	0.064	0.064	1.0	0.38	9
29	0.072	0.066	1.2	0.29	9
30	0.081	0.069	1.4	0.20	9
31	0.048	0.076	0.4	0.66	11
32	0.056	0.073	0.6	0.57	11
33	0.064	0.071	0.8	0.48	11
34	0.071	0.071	1.0	0.38	11
35	0.079	0.072	1.2	0.29	11
36	0.090	0.076	1.4	0.20	11

表 4.3(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
1	0.4	1	11.74	12.70
1	0.6	0.8	13.89	14.83
1	0.8	0.8	15.77	16.70
1	1	1	17.41	18.32
1	1.2	2	17.61	18.49
1	1.4	6	15.06	15.93



表 4.3(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
3	0.4	2	18.71	21.54
3	0.6	2	21.72	24.48
3	0.8	2	24.15	26.84
3	1	2	26.40	29.02
3	1.2	2	28.70	31.26
3	1.4	10	25.98	28.28

表 4.3(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
5	0.4	4	21.86	26.38
5	0.6	4	25.13	29.48
5	0.8	4	27.70	31.91
5	1	4	30.10	34.19
5	1.2	4	32.57	36.55
5	1.4	20	28.62	32.22



表 4.3(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
7	0.4	6	23.37	29.47
7	0.6	6	26.88	32.72
7	0.8	6	29.61	35.25
7	1	6	32.13	37.58
7	1.2	6	34.71	40.00
7	1.4	40	28.37	33.24

表 4.3(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
9	0.4	10	24.19	31.65
9	0.6	8	27.86	35.12
9	0.8	8	30.74	37.72
9	1	8	33.37	40.11
9	1.2	8	36.04	42.56
9	1.4	40	31.83	37.76



表 4.3(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(自由振盪， $x_s(0)=0.1\text{m}$ ， $\gamma=1$ ， $\beta=0.55$)

質量比 $\alpha(\%)$	截面積比 λ	搭配之 水頭損失係數 δ	結構位移 均方根折減 (%)	結構加速度 均方根折減 (%)
11	0.4	10	24.36	33.42
11	0.6	10	28.38	36.99
11	0.8	10	31.42	39.68
11	1	10	34.15	42.12
11	1.2	10	36.89	44.59
11	1.4	80	29.15	36.39

表 4.4(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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	0.4	0.6	35.71	36.42	39.31	39.99
1	0.6	0.6	40.35	41.02	43.63	44.28
1	0.8	0.6	44.37	45.00	47.13	47.75
1	1	0.8	44.82	45.43	49.40	50.03
1	1.2	2	36.90	37.55	43.25	43.86
1	1.4	4	32.80	33.47	37.86	38.53

表 4.4(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
3	0.4	0.2	72.81	73.65	56.80	58.24
3	0.6	0.2	76.76	77.73	60.93	62.26
3	0.8	0.2	79.32	80.44	64.07	65.26
3	1	0.2	81.46	82.70	66.82	67.94
3	1.2	0.2	83.47	84.77	69.48	70.54
3	1.4	2	77.11	78.18	71.16	72.30

表 4.4(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
5	0.4	0.2	78.96	80.18	63.36	65.34
5	0.6	0.4	81.81	83.26	66.91	68.72
5	0.8	0.4	83.91	85.36	69.71	71.37
5	1	0.4	85.61	87.08	72.13	73.75
5	1.2	0.6	87.02	88.63	74.37	75.84
5	1.4	2	86.49	88.04	76.57	77.91

表 4.4(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
7	0.4	0.4	82.16	83.68	67.08	69.58
7	0.6	0.6	84.56	86.13	70.38	72.65
7	0.8	0.6	86.22	87.86	72.94	74.99
7	1	0.8	87.49	89.31	75.15	77.13
7	1.2	1	88.66	90.62	77.19	78.98
7	1.4	1	89.80	91.88	79.52	81.06

表 4.4(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
9	0.4	0.8	84.13	85.85	69.66	72.57
9	0.6	0.8	86.17	87.96	72.77	75.39
9	0.8	1	87.56	89.51	75.18	77.55
9	1	1	88.69	90.75	77.11	79.39
9	1.2	1	89.66	91.80	79.20	81.18
9	1.4	2	90.63	92.93	81.07	83.04



表 4.4(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(簡
諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
11	0.4	1	85.46	87.38	71.69	74.89
11	0.6	1	87.32	89.29	74.60	77.52
11	0.8	1	88.51	90.59	76.67	79.43
11	1	2	89.44	91.66	78.65	81.08
11	1.2	2	90.36	92.72	80.37	82.75
11	1.4	6	90.17	92.41	82.07	84.37

表 4.5(a) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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	0.4	0.4	5.80	5.11	8.45	1.27
1	0.6	2	6.69	6.10	9.71	1.92
1	0.8	2	7.69	6.94	11.44	2.22
1	1	2	8.84	7.89	13.41	2.68
1	1.2	2	10.27	9.07	15.87	3.31
1	1.4	4	11.63	10.42	16.39	5.69



表 4.5(b) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
3	0.4	6	15.09	14.80	20.45	8.43
3	0.6	4	17.22	16.41	21.11	8.67
3	0.8	4	19.43	18.22	22.28	10.56
3	1	2	21.86	19.72	22.58	10.93
3	1.2	2	25.03	22.16	25.07	13.62
3	1.4	6	27.40	24.66	28.48	19.14

表 4.5(c) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
5	0.4	8	21.89	21.86	25.01	14.48
5	0.6	4	25.11	24.07	26.91	15.97
5	0.8	4	28.32	26.56	29.98	18.89
5	1	4	31.53	28.98	33.15	22.35
5	1.2	4	34.92	31.46	36.71	26.54
5	1.4	6	38.03	33.92	39.56	29.42



表 4.5(d) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
7	0.4	8	28.19	28.17	31.80	22.10
7	0.6	6	32.00	30.94	35.77	24.48
7	0.8	6	35.06	33.22	38.77	27.92
7	1	6	37.85	35.22	41.29	30.88
7	1.2	6	40.61	37.11	43.09	32.92
7	1.4	8	43.00	38.76	44.87	35.70

表 4.5(e) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
9	0.4	8	33.77	33.75	40.03	28.98
9	0.6	8	37.03	36.15	42.92	32.14
9	0.8	8	39.47	37.89	44.34	34.37
9	1	8	41.67	39.38	44.26	34.48
9	1.2	8	43.76	40.67	43.97	35.26
9	1.4	20	43.85	40.90	45.22	36.90



表 4.5(f) TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率(隨
機擾動， $\gamma = 1$ ， $\beta = 0.55$)

質量比 α (%)	截面積比 λ	搭配之 水頭損失 係數 δ	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 (%)
11	0.4	10	37.73	38.11	45.73	35.85
11	0.6	10	40.23	39.88	45.27	35.56
11	0.8	10	42.19	41.21	44.96	35.49
11	1	10	43.94	42.31	45.47	36.54
11	1.2	10	45.54	43.15	45.65	38.77
11	1.4	40	44.01	42.35	45.84	37.91

表 4.6 TLCD 系統之最佳設計參數及結構反應折減率(隨機擾動，
 $\alpha = 5.46\%$ ， $\gamma = 1$)

質量比 α (%)	水平段 長度比 β	截面積比 λ	搭配之 水頭損 失係數 δ	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 (%)
5.46	0.05	1.6	0	14.53	16.72	14.88	16.73
5.46	0.1	1.6	0	16.30	18.11	17.48	17.20
5.46	0.15	1.6	0	17.45	18.86	20.12	16.06
5.46	0.2	0.6	0	17.51	18.81	20.87	15.11
5.46	0.25	1.6	4	19.42	20.40	23.58	14.58
5.46	0.3	1.6	4	22.41	22.67	25.79	15.77
5.46	0.35	1.6	4	26.40	25.69	28.91	18.88
5.46	0.4	1.6	4	31.07	29.14	33.11	22.88
5.46	0.45	1.6	4	35.81	32.51	38.00	27.62
5.46	0.5	1.4	4	36.62	33.03	39.00	27.75
5.46	0.55	1.4	6	39.66	35.37	41.59	30.88
5.46	0.6	1.2	4	39.33	34.80	39.81	29.47
5.46	0.65	1	4	38.10	33.91	40.55	28.27
5.46	0.7	1	4	40.08	35.21	38.24	28.96
5.46	0.75	1	6	41.74	36.62	41.91	32.50
5.46	0.8	0.8	6	39.50	35.15	41.74	30.25



圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統

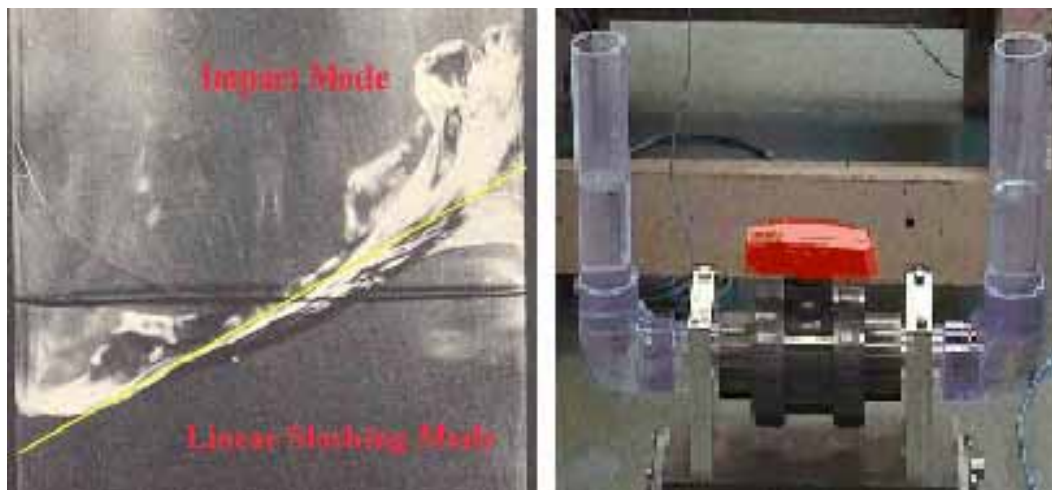


圖 1.2 不同型式之調諧液態消能系統

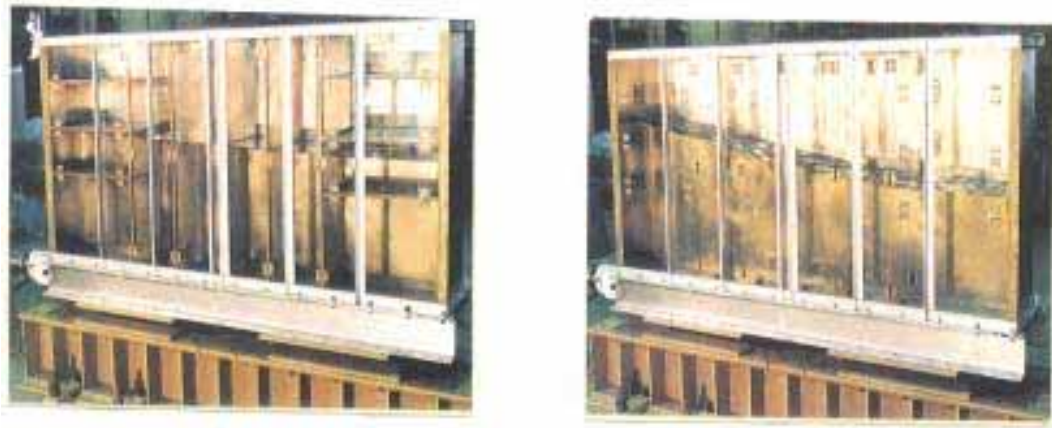


圖 1.3 Aqua Damper(Tuned Slushing Water Damper)

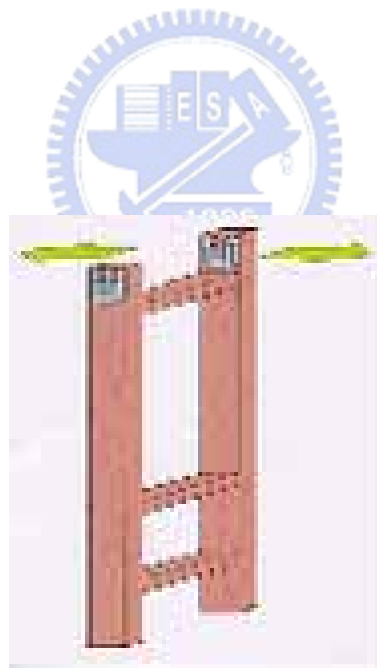


圖 1.4 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用

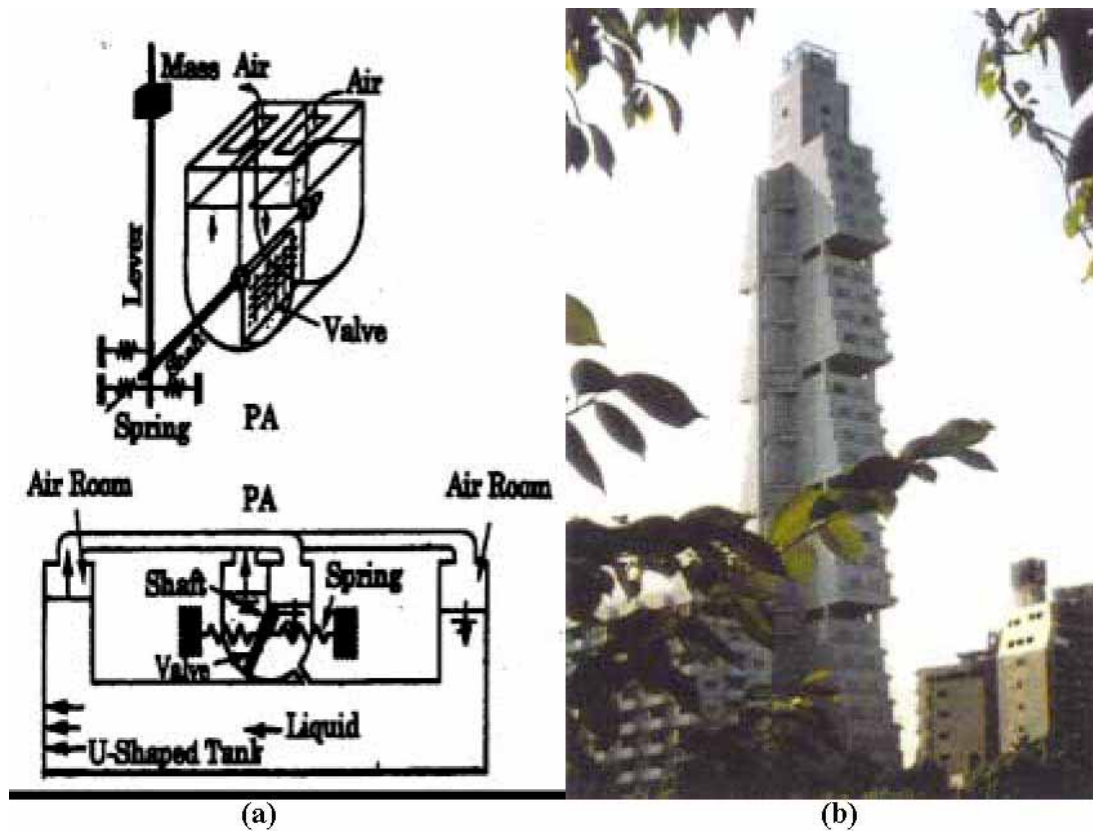


圖 1.5 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用

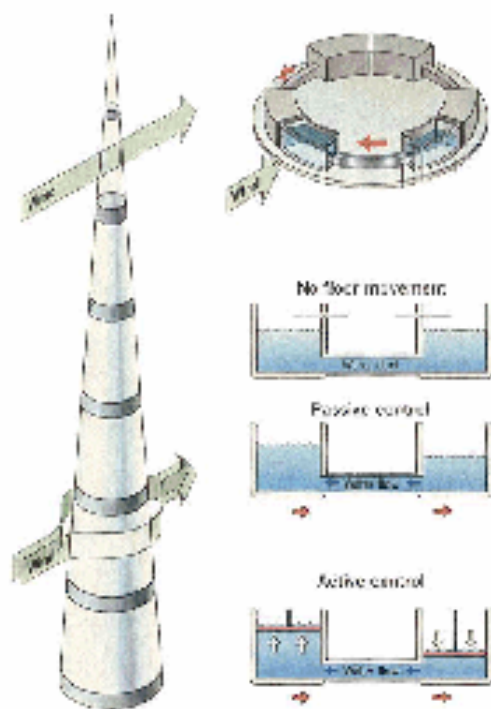


圖 1.6 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用

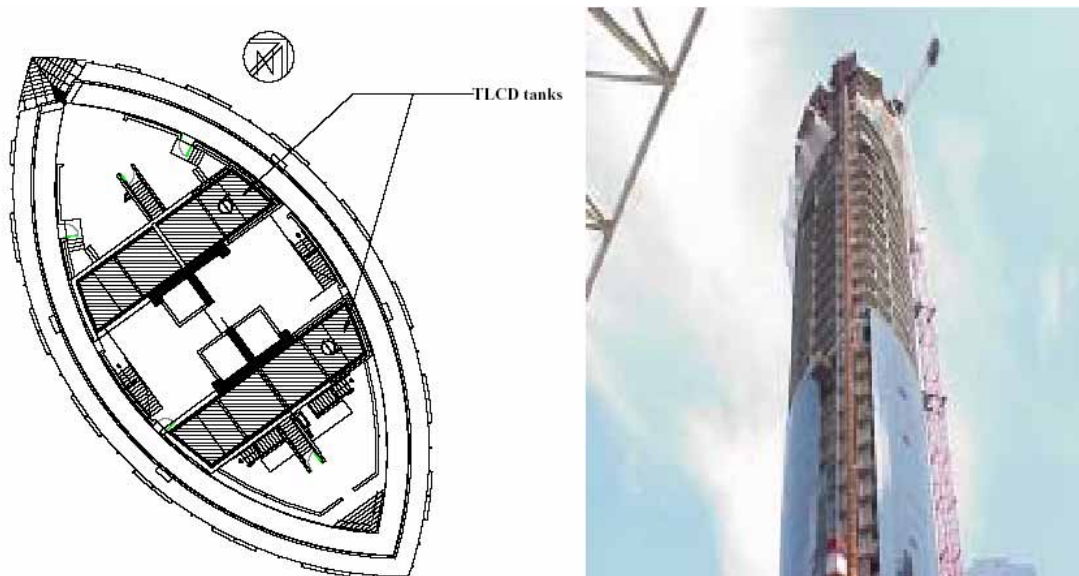


圖 1.7 TLCD 系統於加拿大 Wall centre 之減振應用

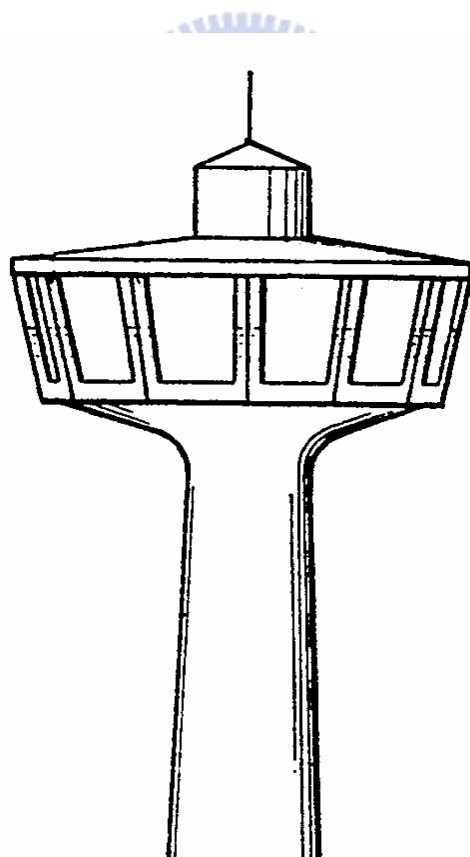


圖 1.8 TLCD 系統於高塔之減振應用

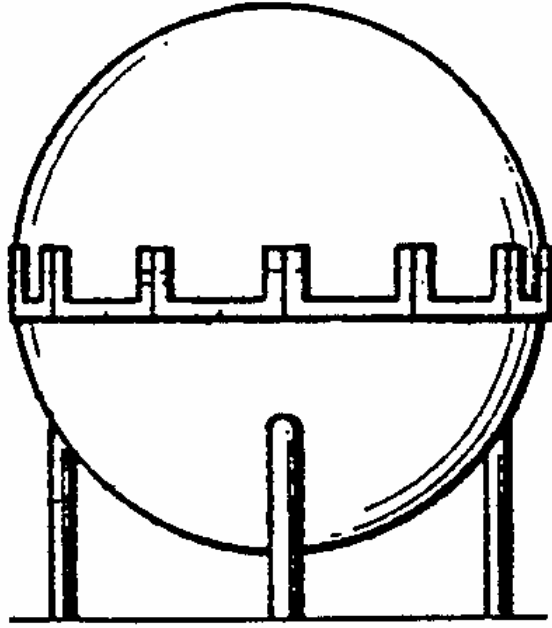


圖 1.9 TLCD 系統於儲存槽之減振應用



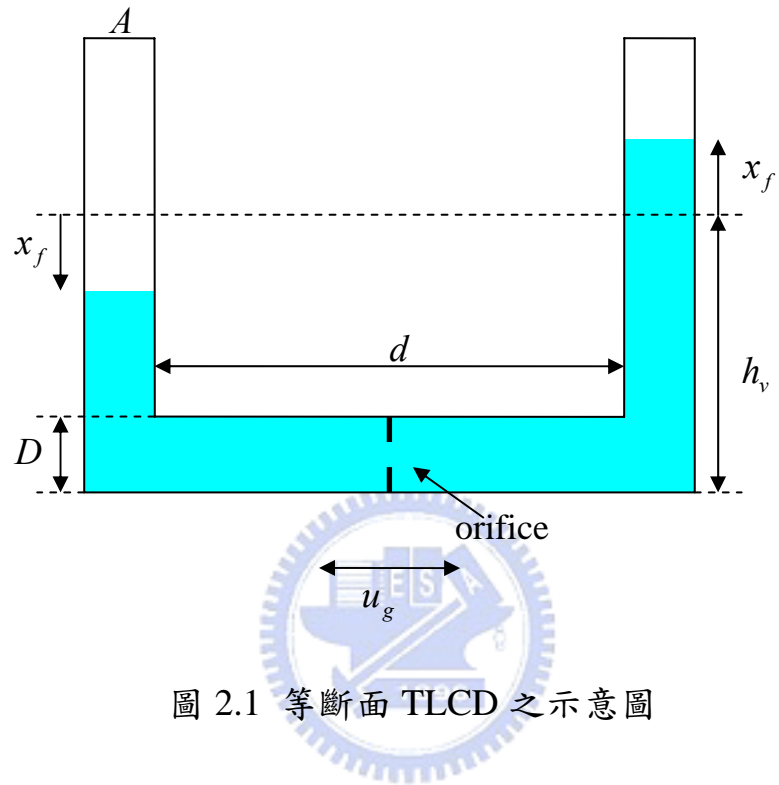


圖 2.1 等斷面 TLCD 之示意圖

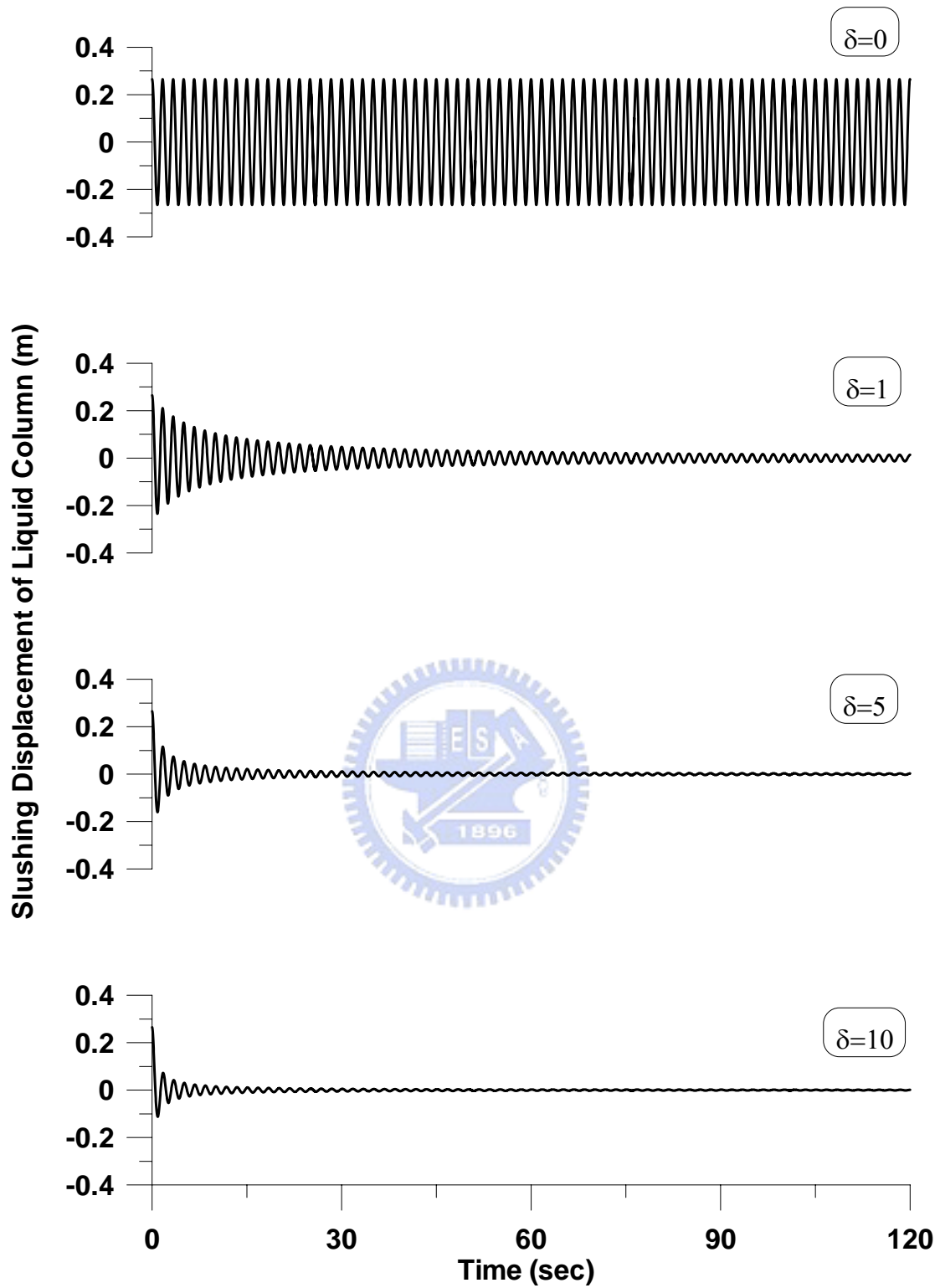


圖 2.2 水柱激盪位移反應歷時(自由振動， $x_f(0) = 0.265 \text{ m}$)

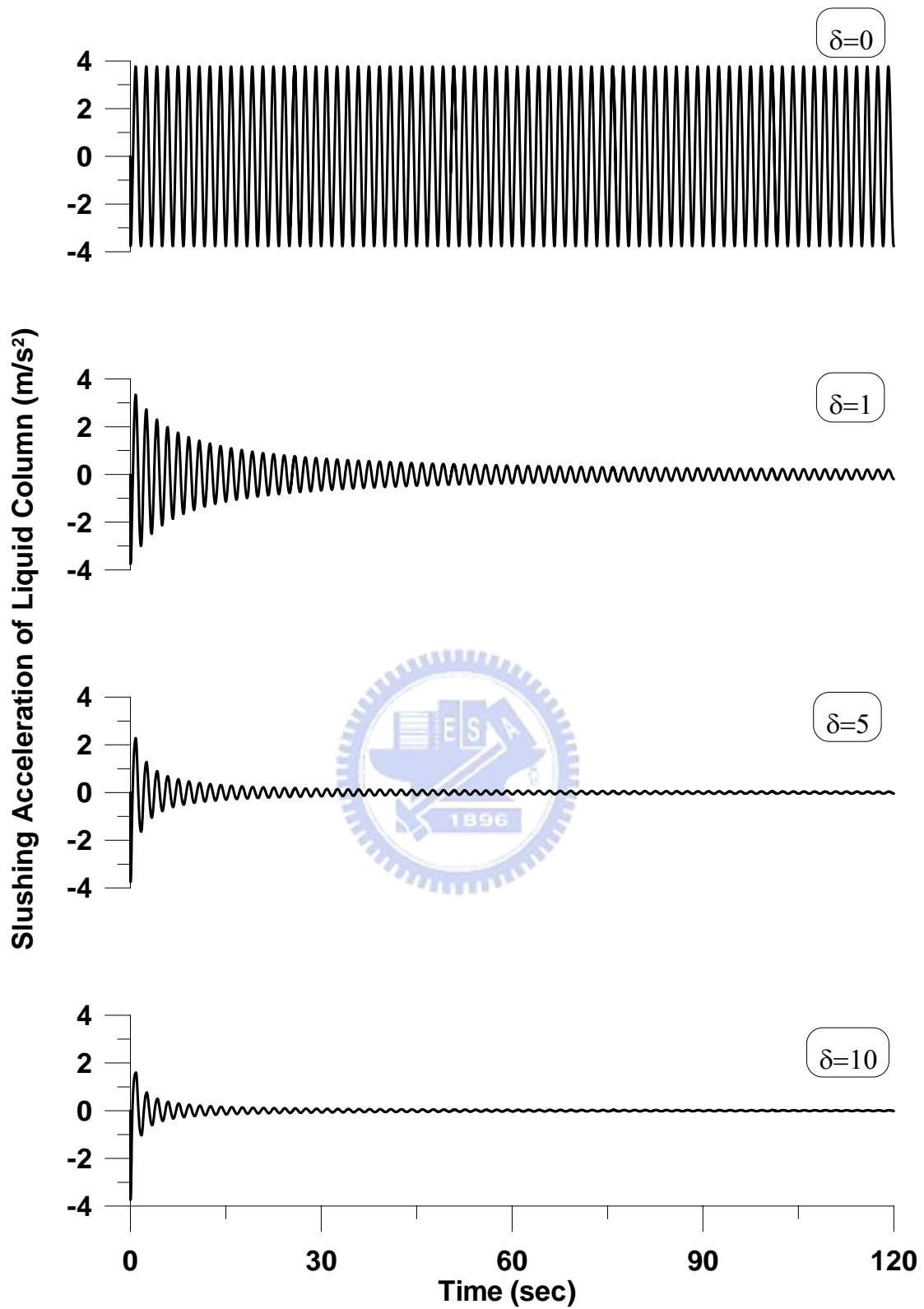


圖 2.3 水柱激盪加速度反應歷時(自由振動， $x_f(0)=0.265$ m)

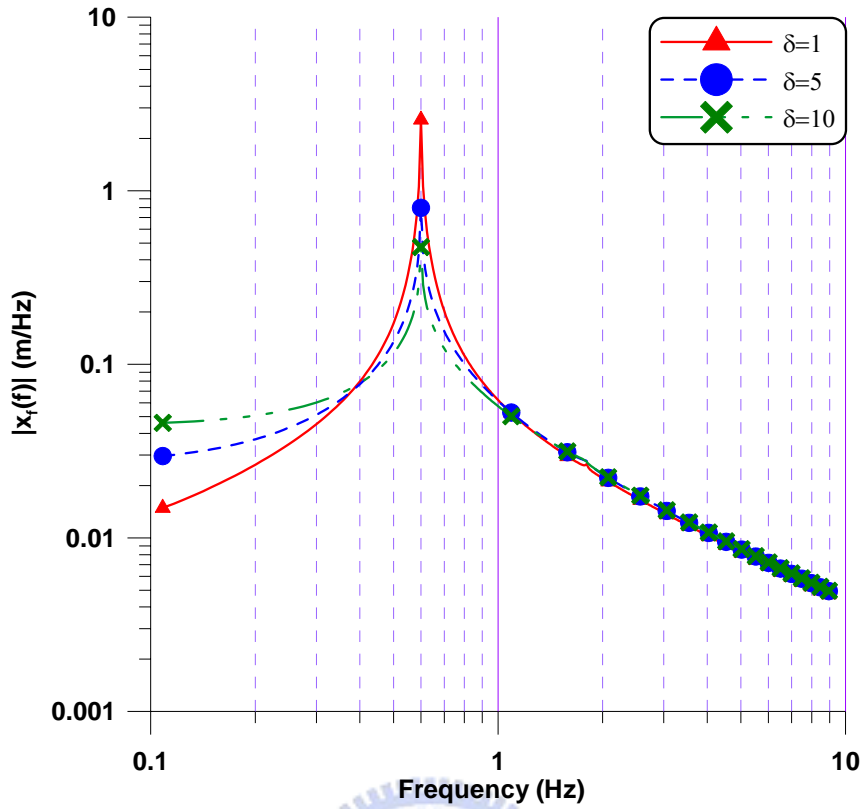


圖 2.4 水柱激盪位移之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.265$ m)

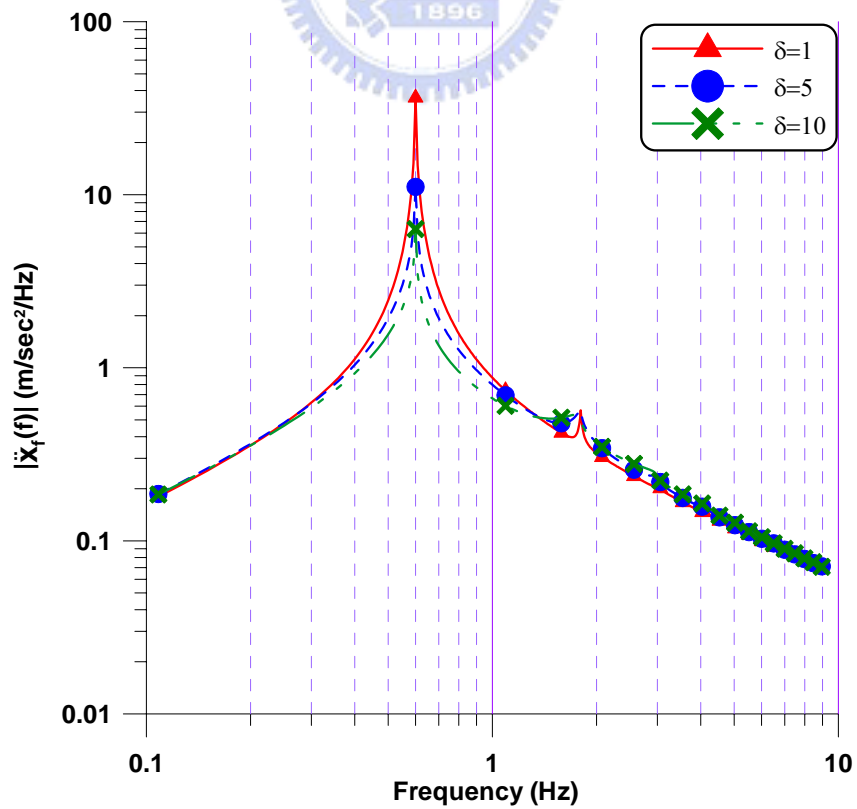


圖 2.5 水柱加速度反應之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.265$ m)

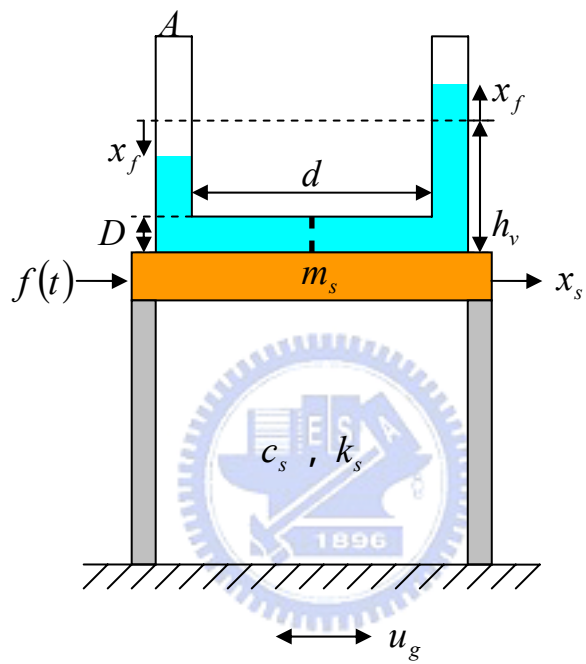


圖 2.6 單自由度結構物裝置等斷面 TLCD 示意圖

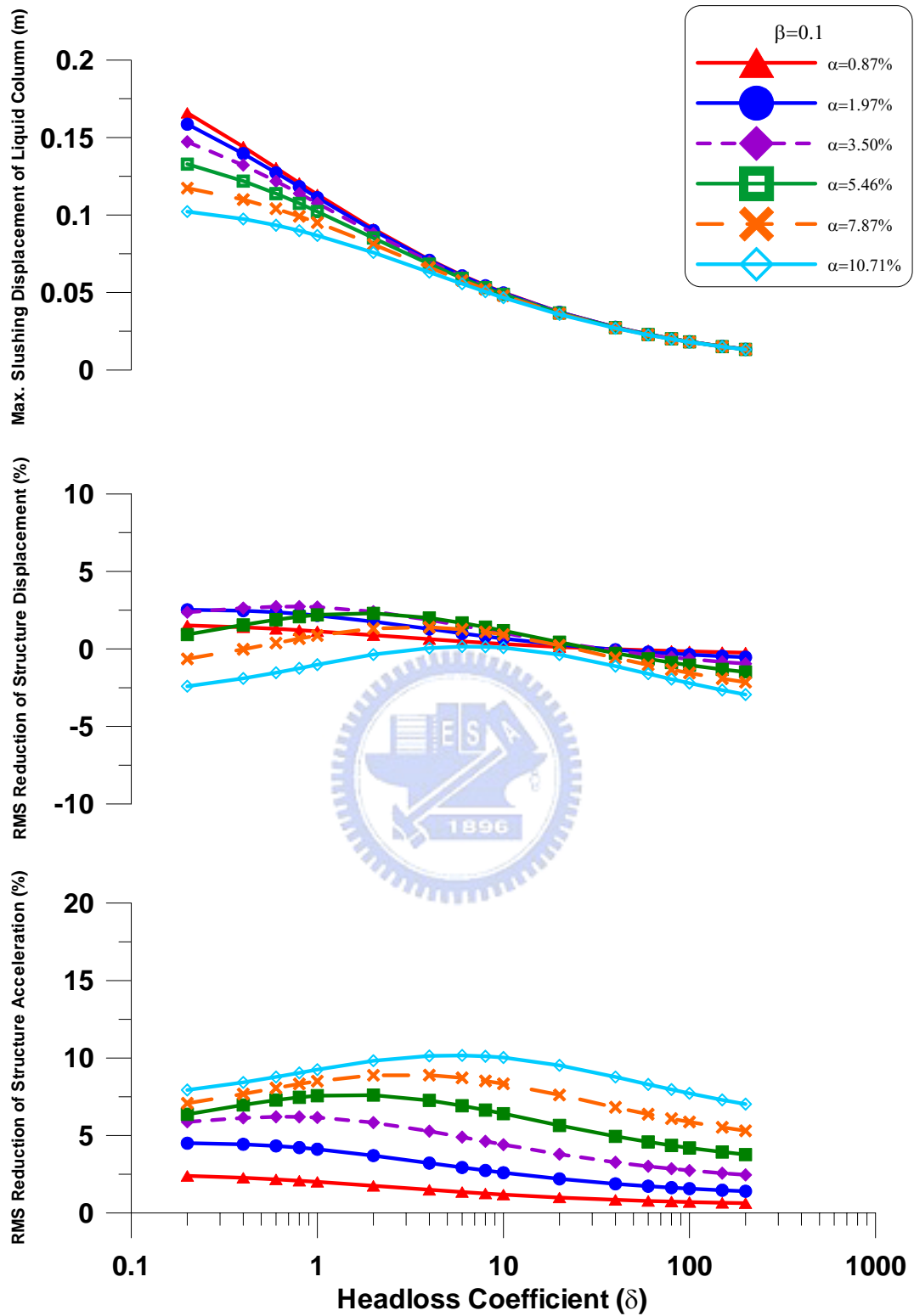


圖 2.7(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.1$)

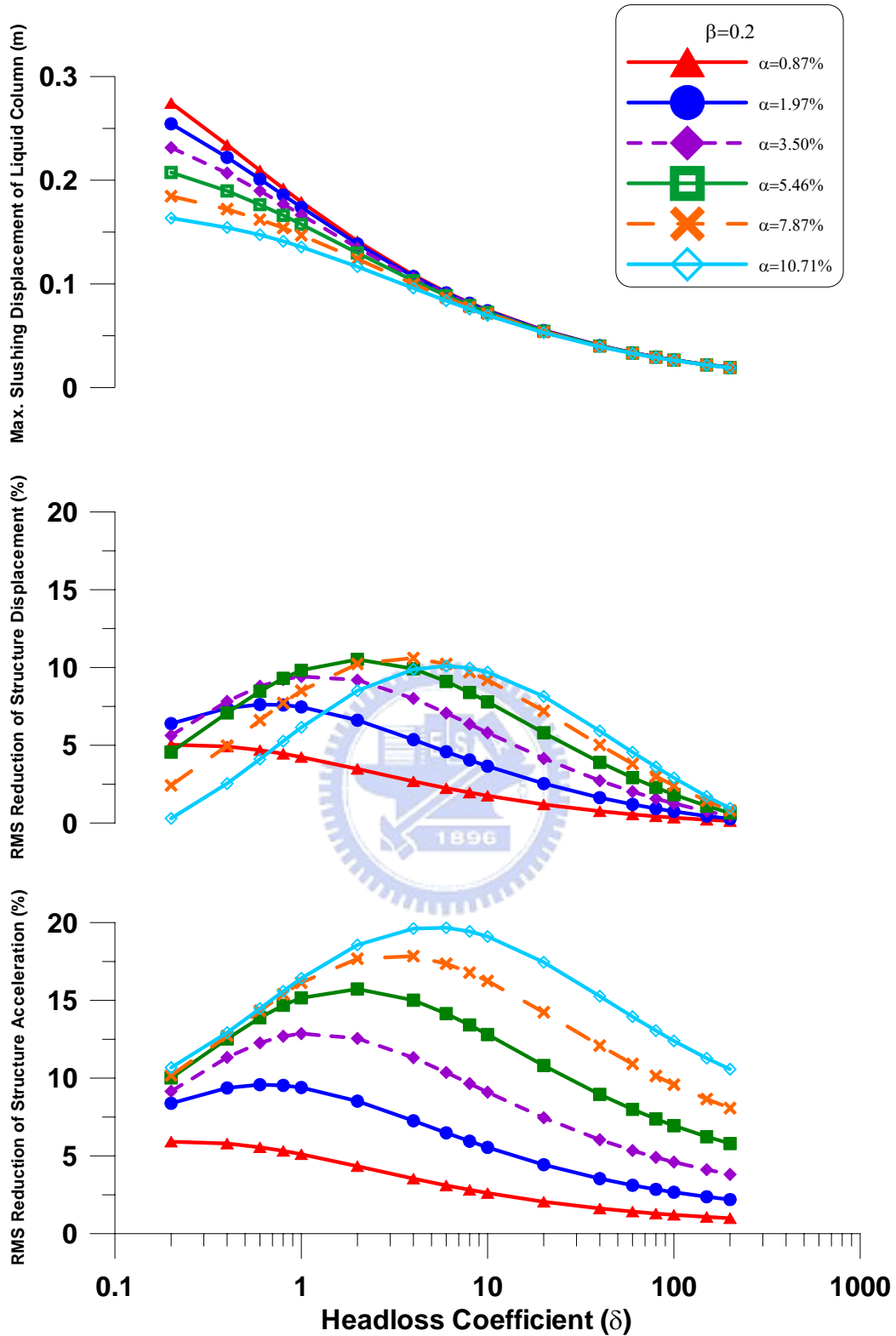


圖 2.7(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.2$)

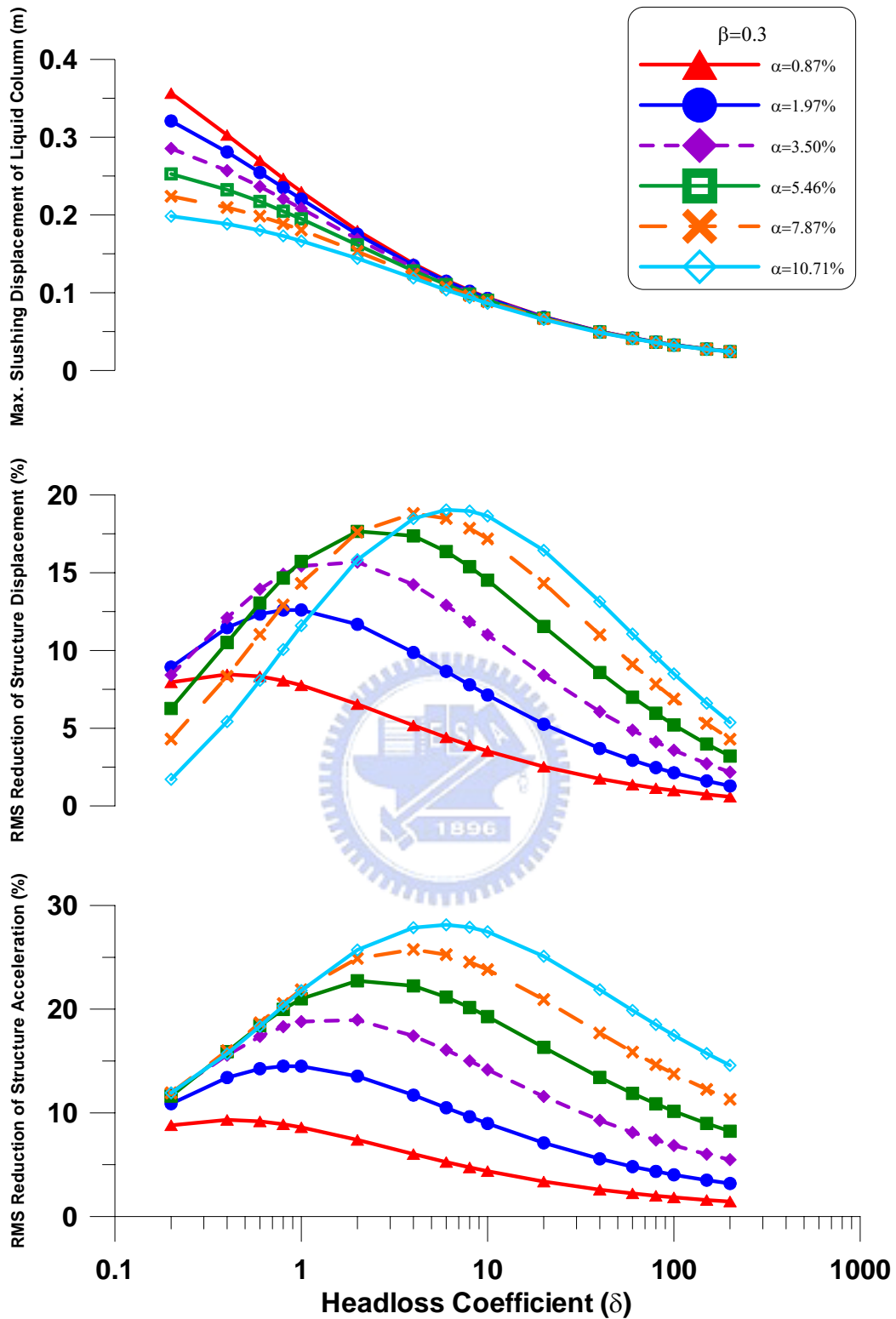


圖 2.7(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.3$)

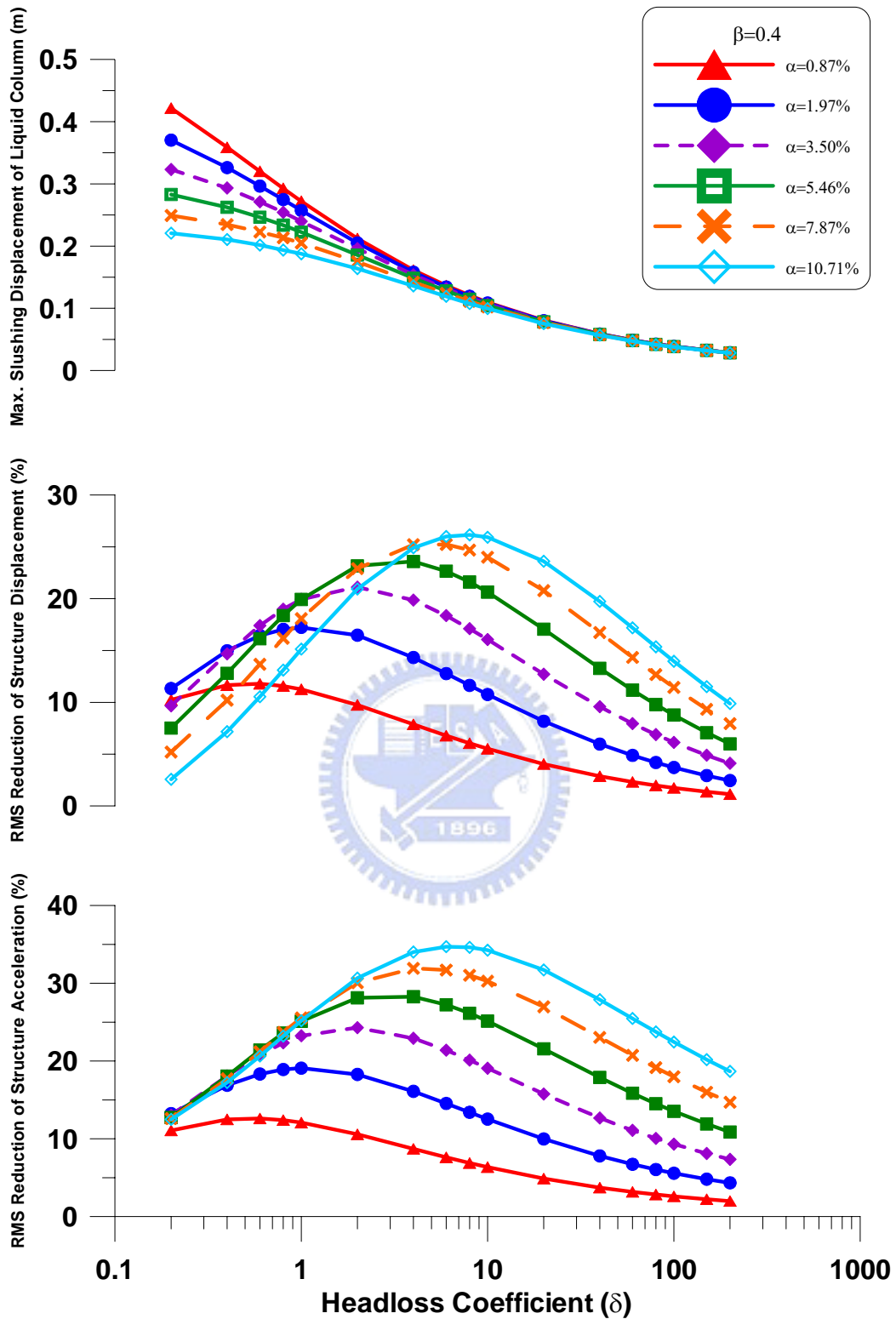


圖 2.7(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.4$)

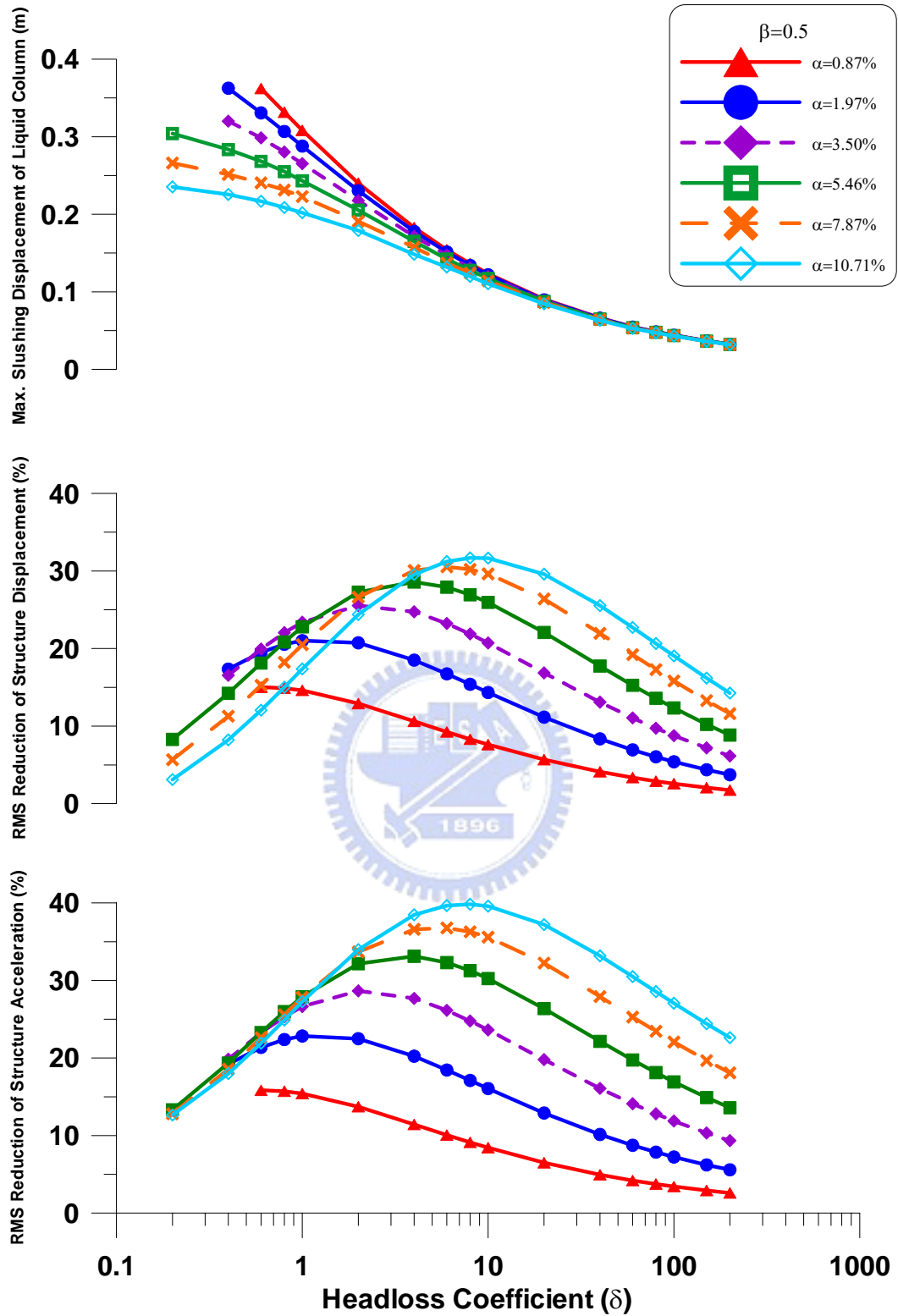


圖 2.7(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.5$)

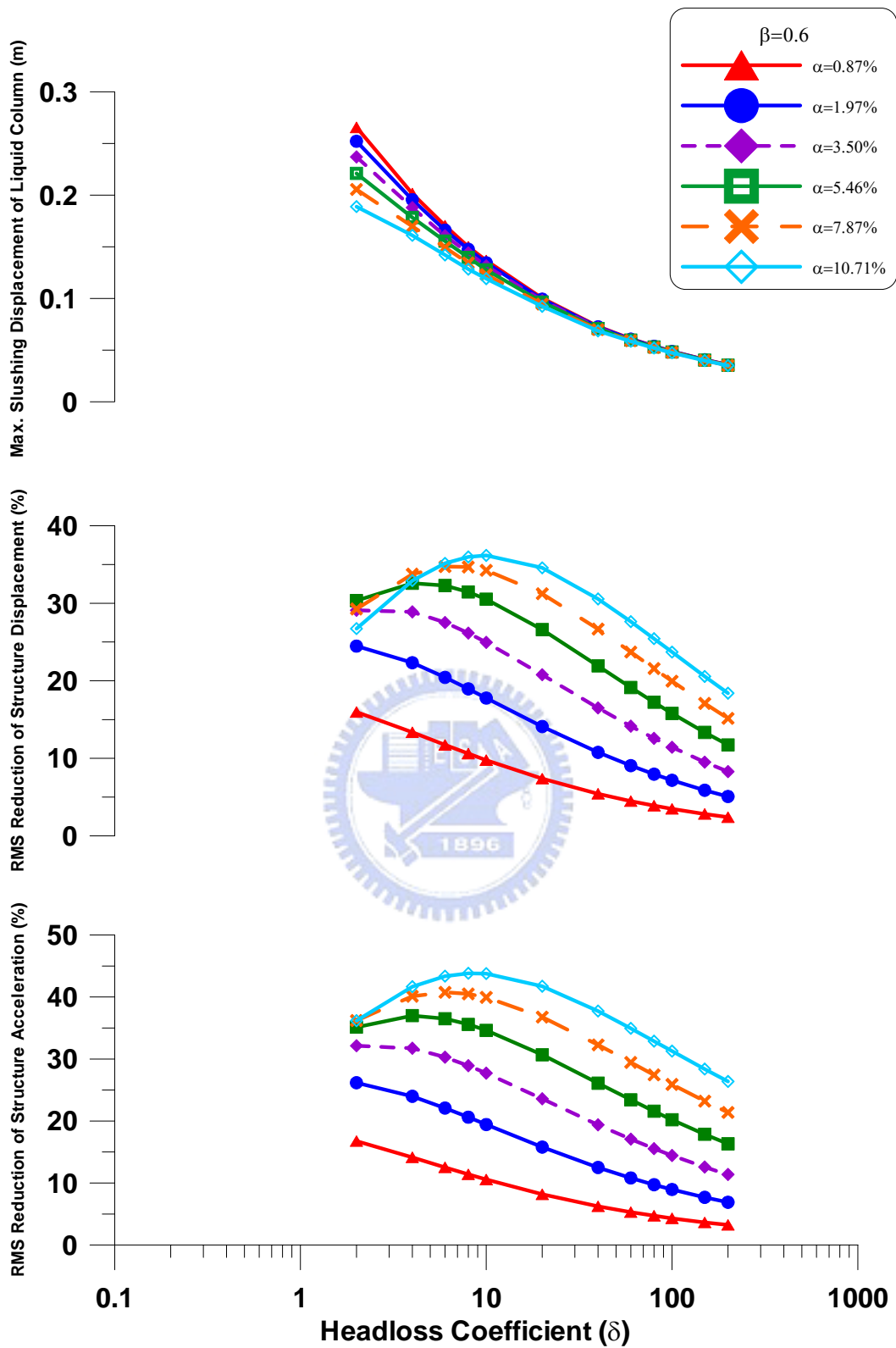


圖 2.7(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.6$)

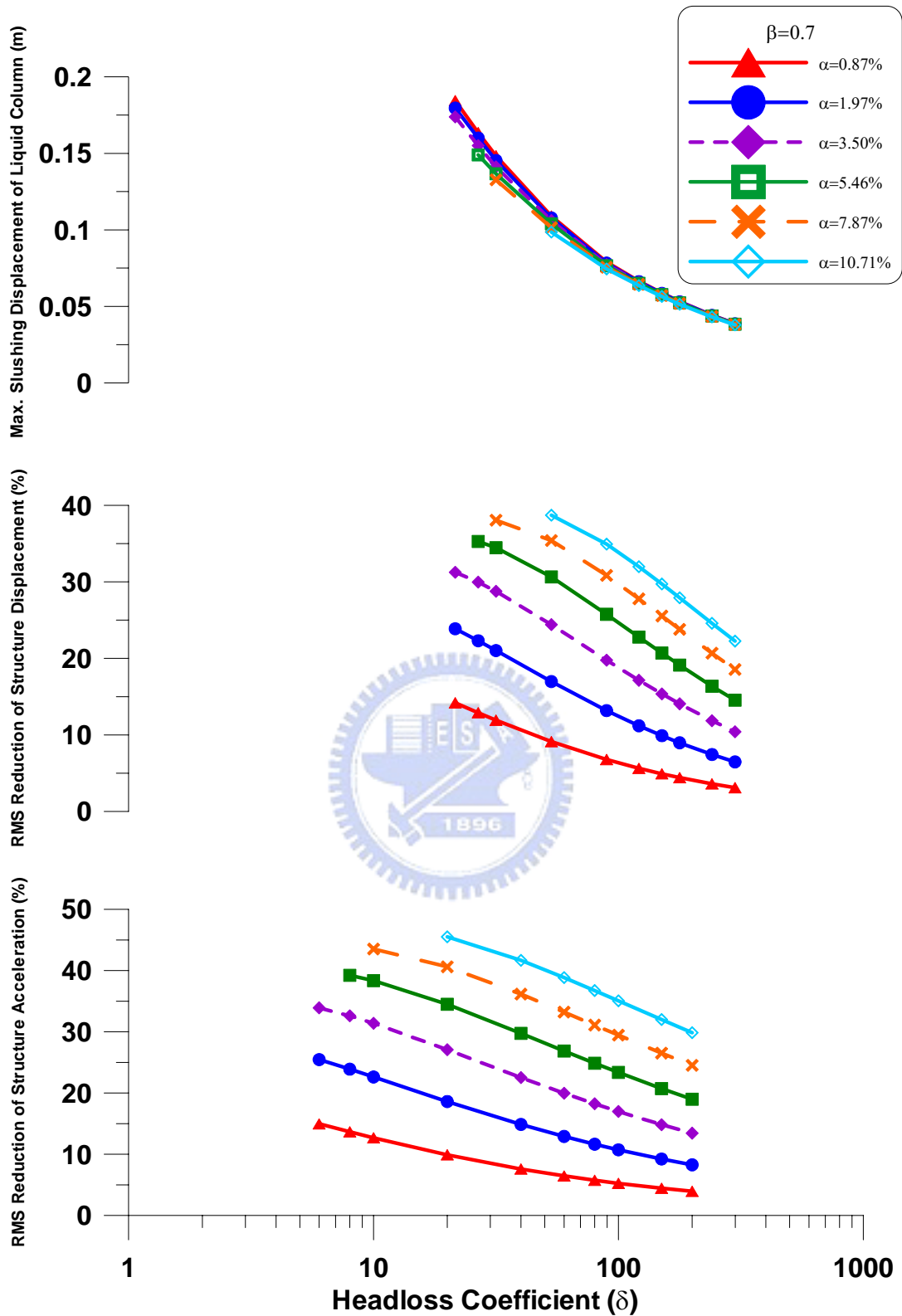


圖 2.7(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.7$)

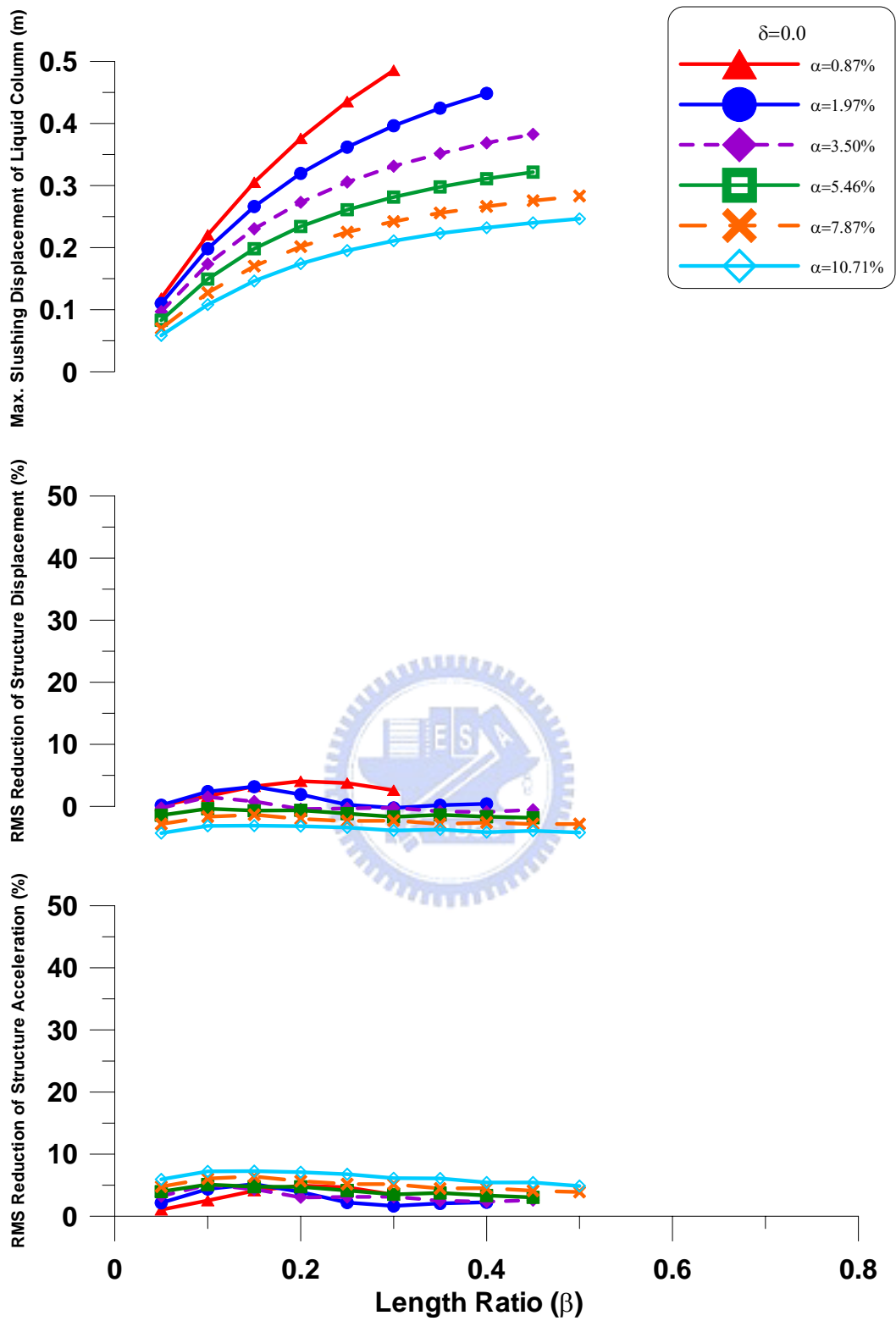


圖 2.8(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=0.0$)

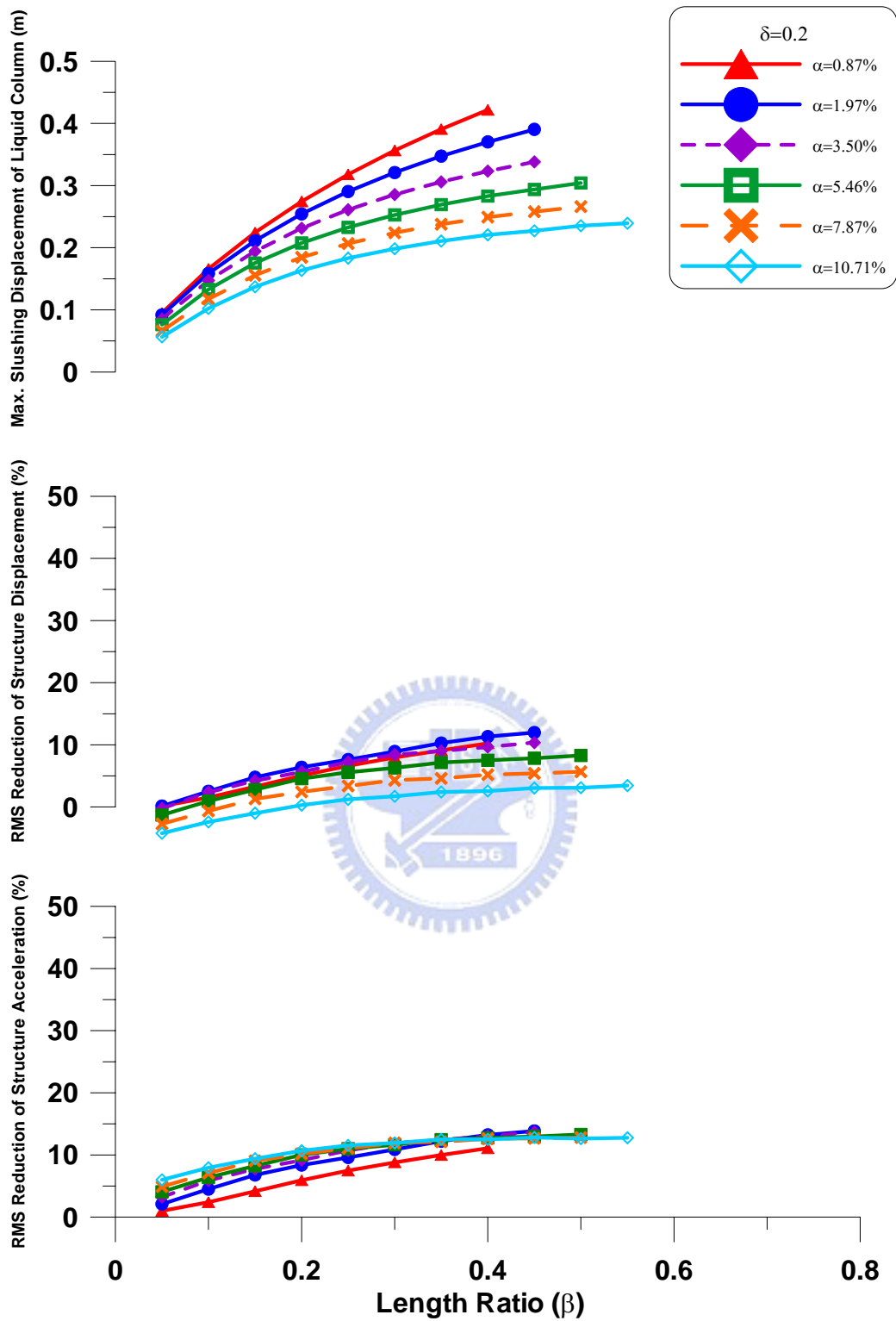


圖 2.8(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=0.2$)

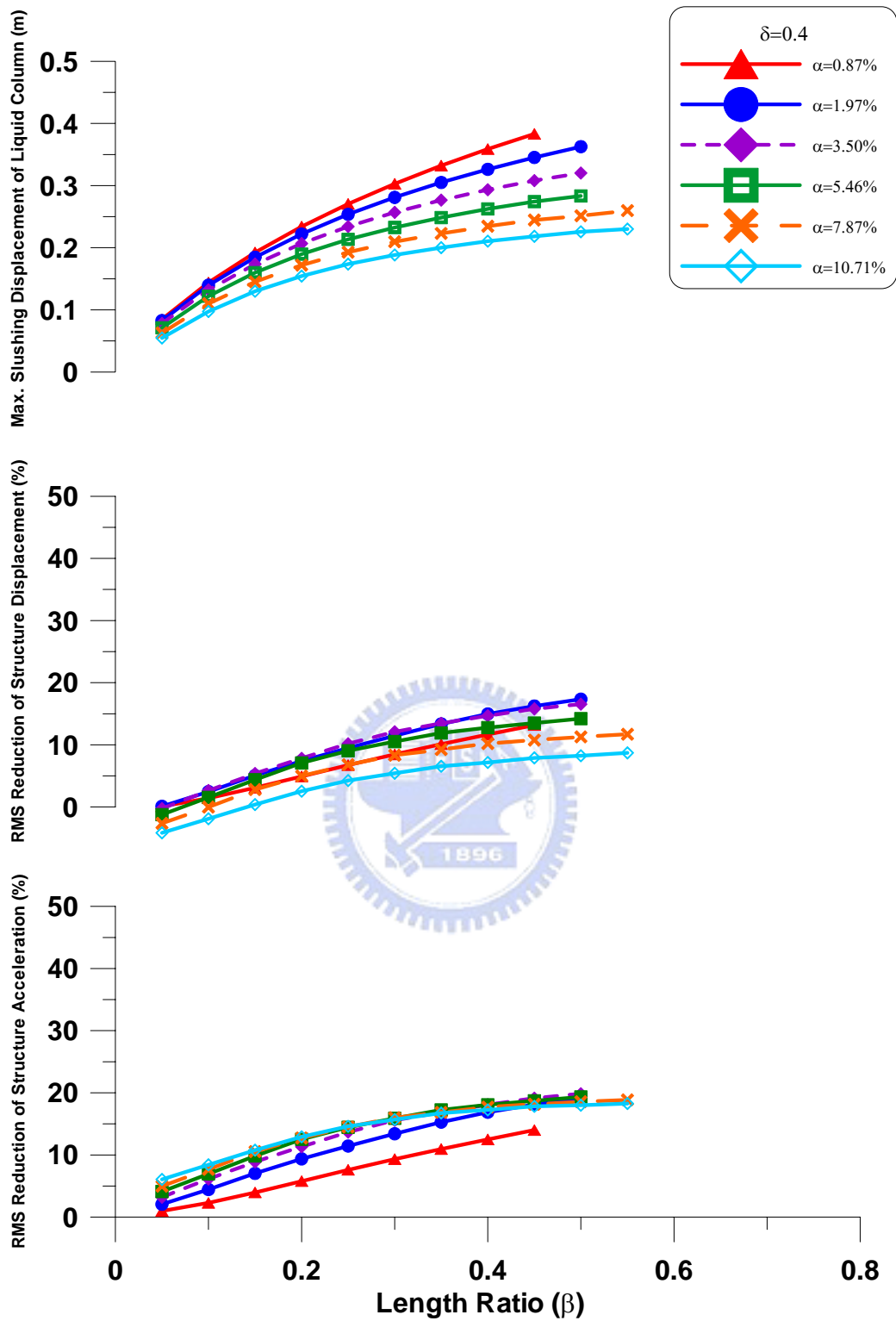


圖 2.8(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=0.4$)

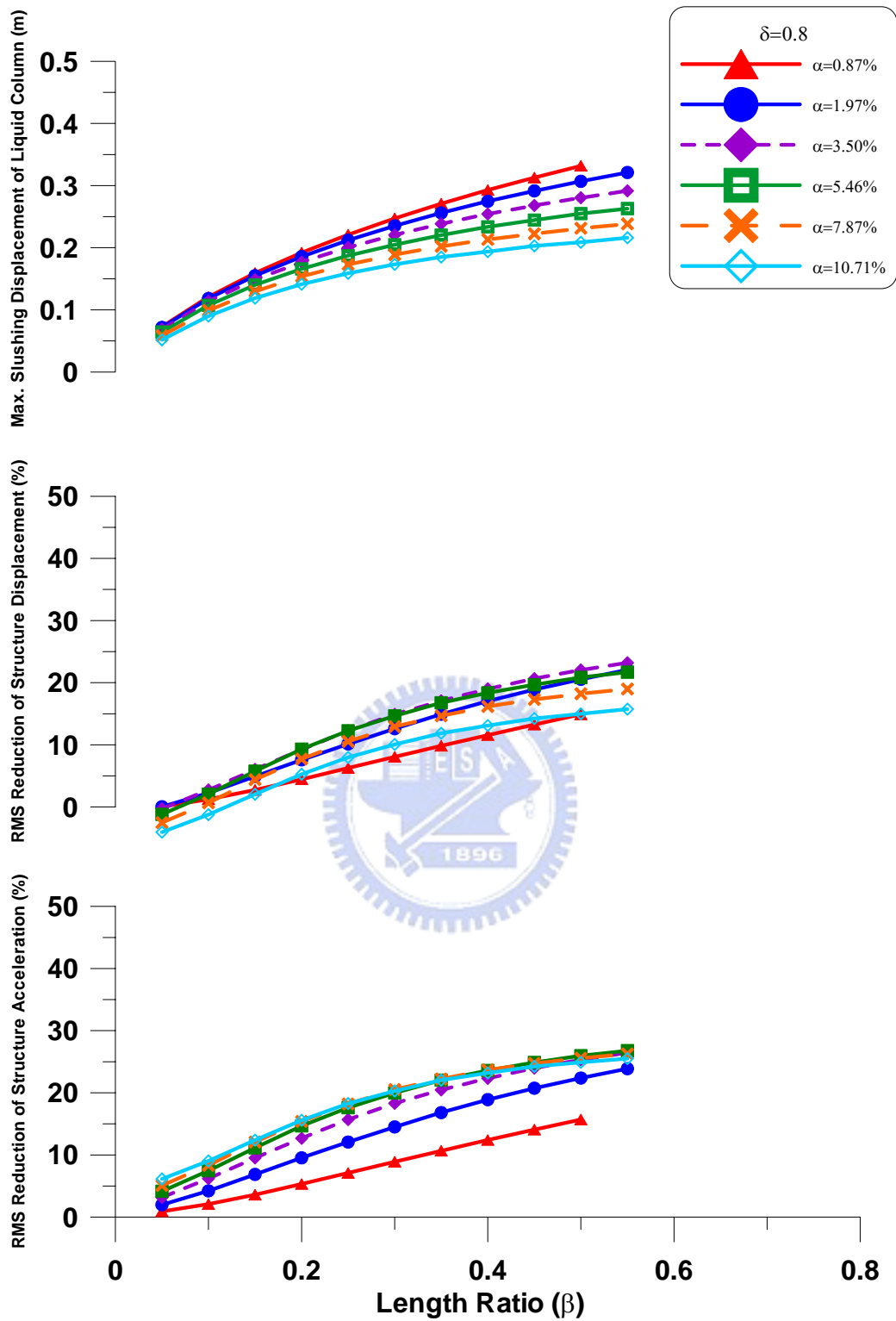


圖 2.8(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=0.8$)

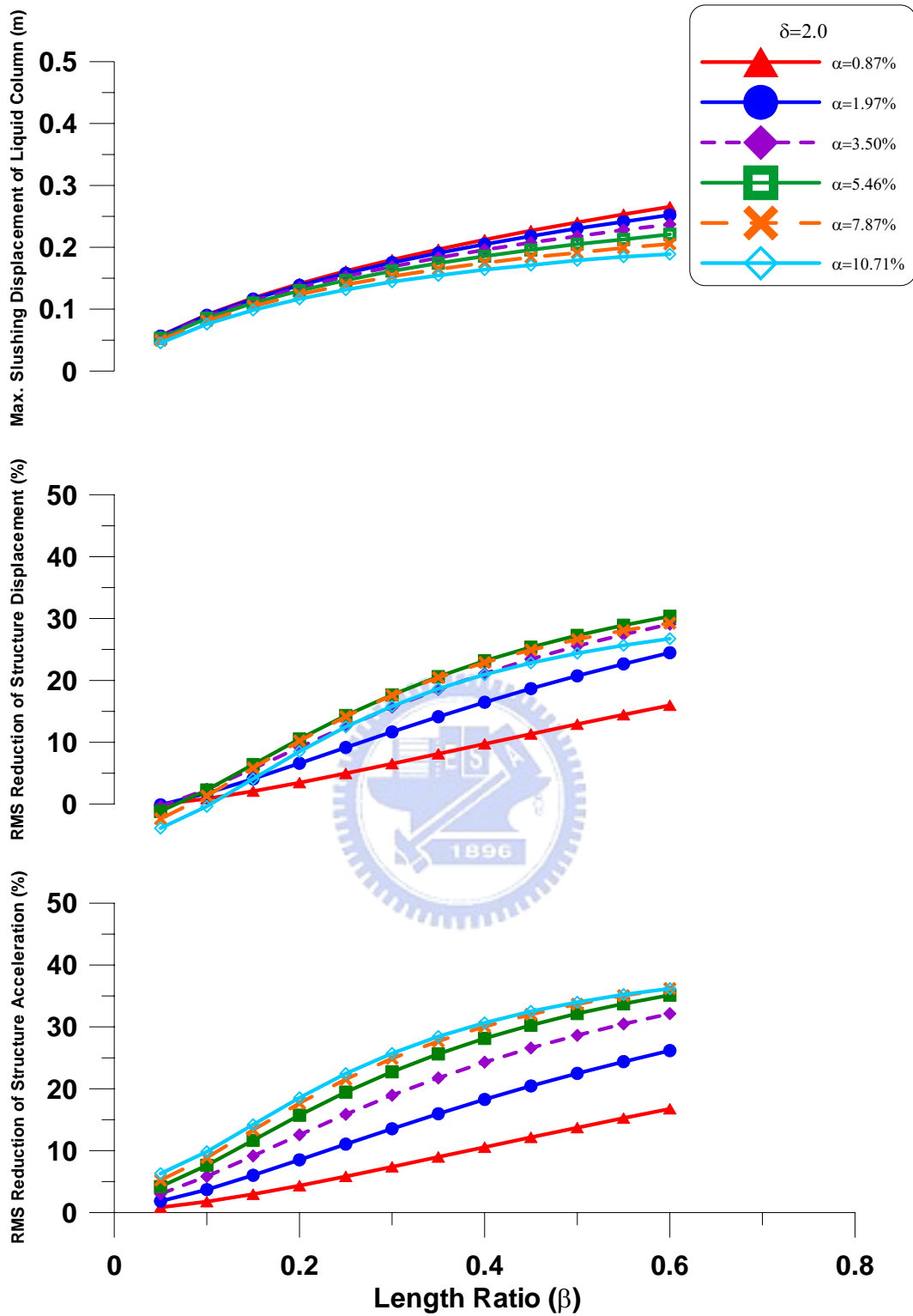


圖 2.8(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=2.0$)

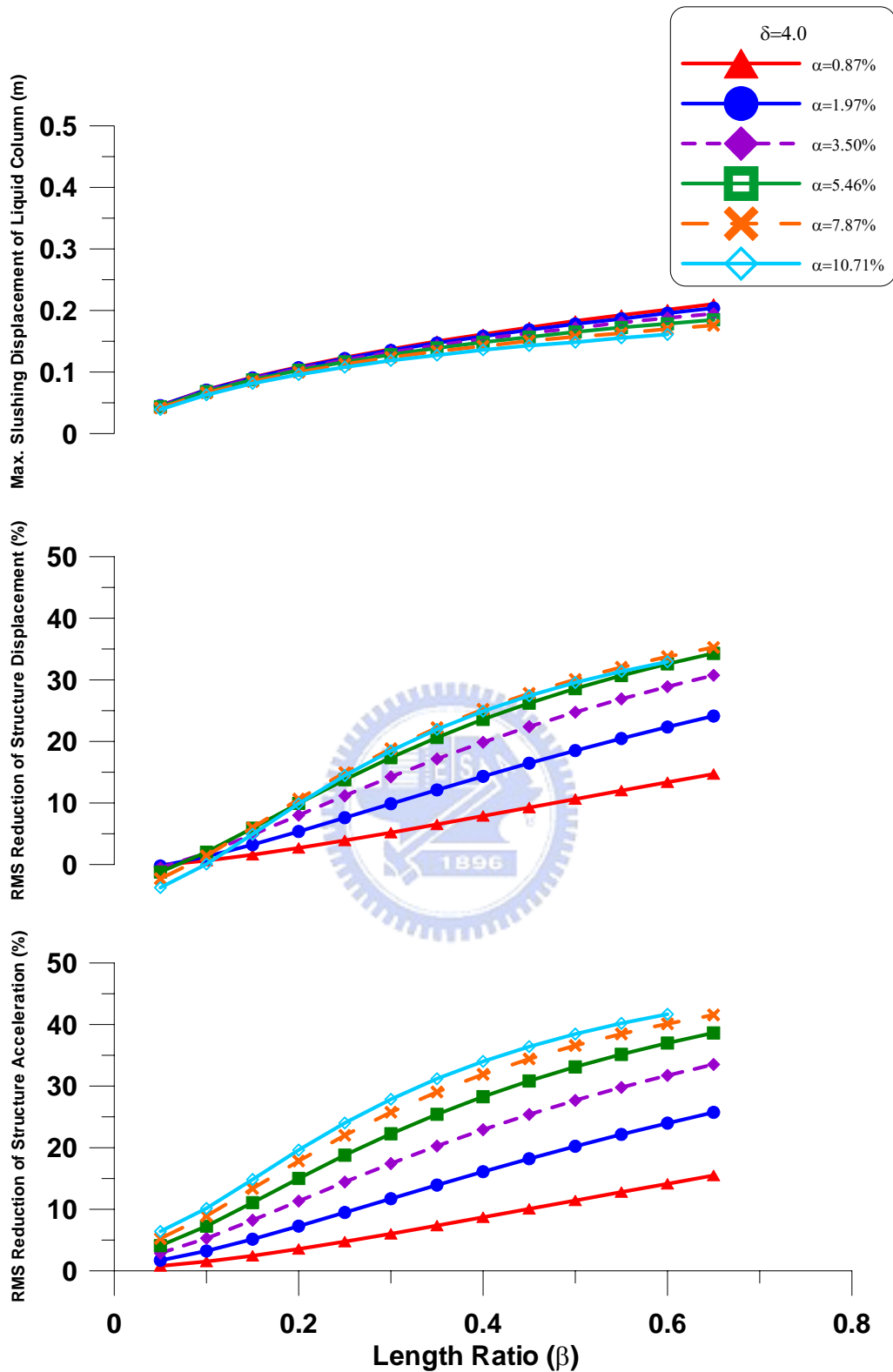


圖 2.8(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=4.0$)

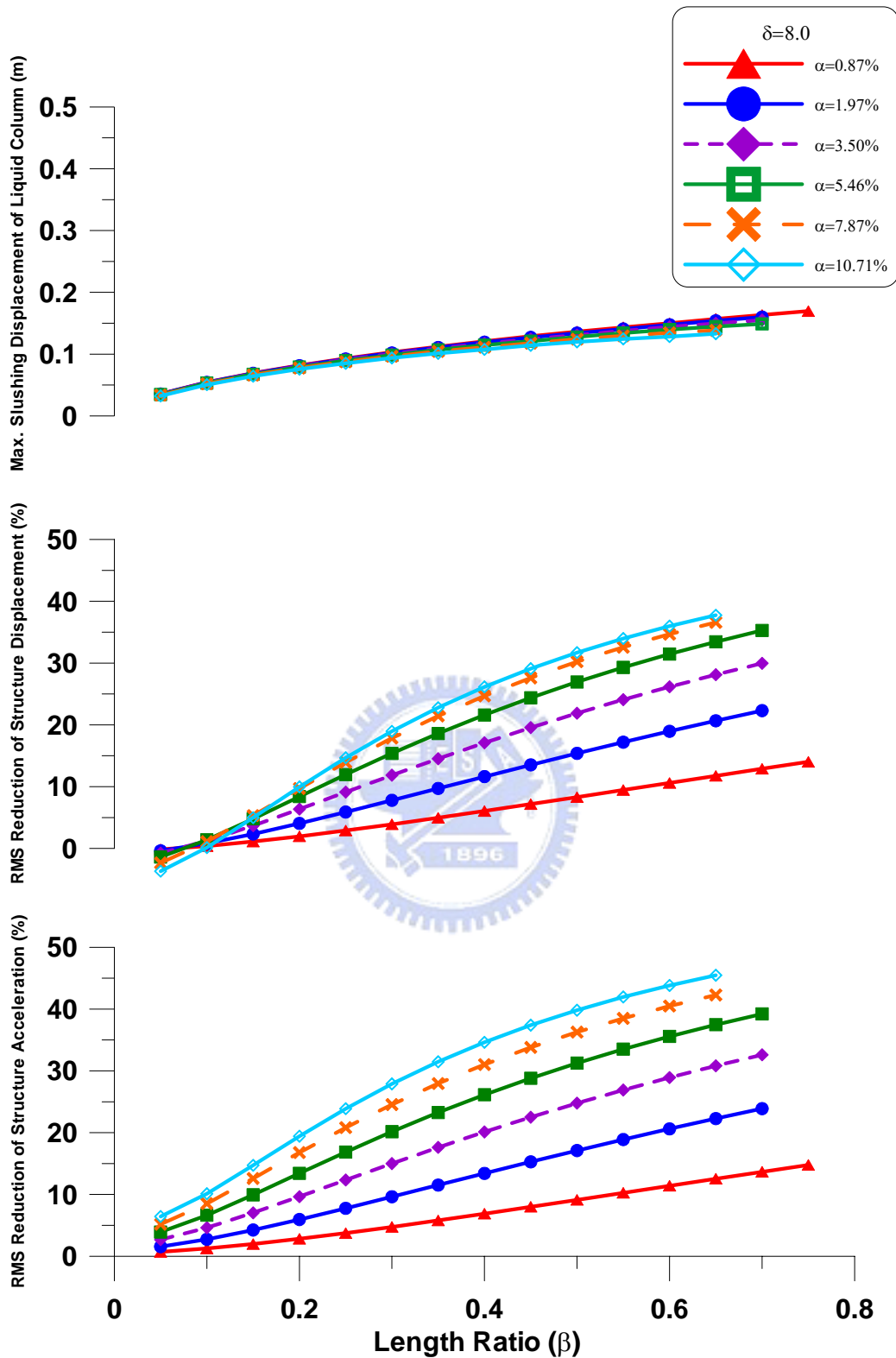


圖 2.8(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=8.0$)

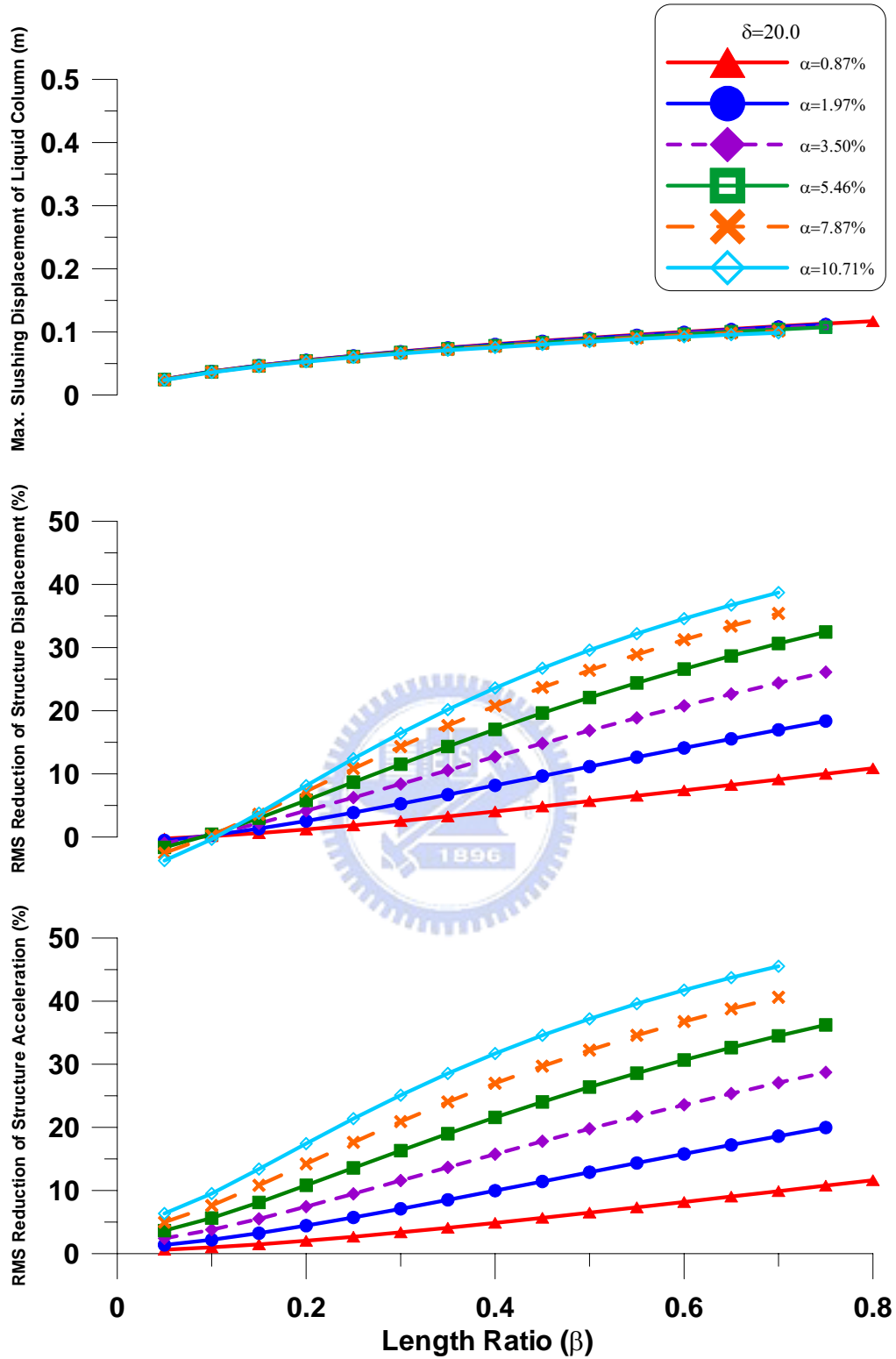


圖 2.8(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\delta=20$)

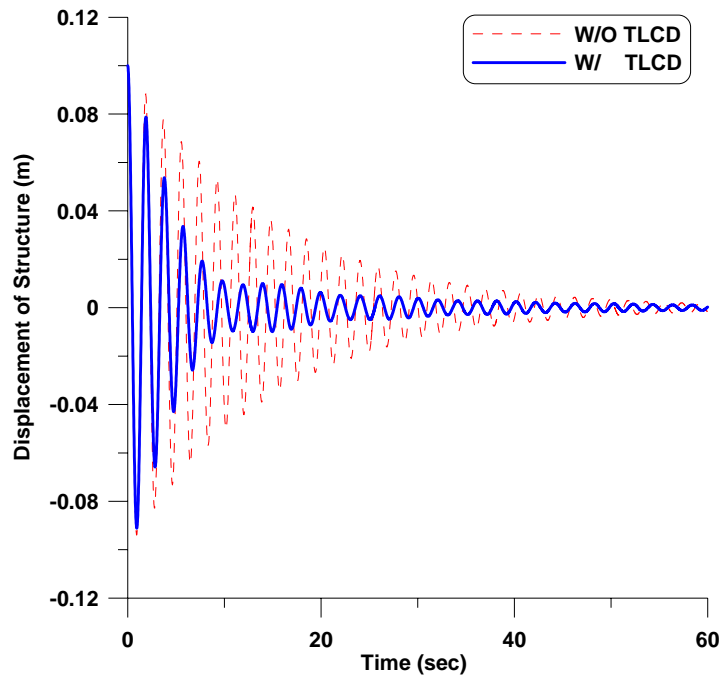


圖 2.9 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

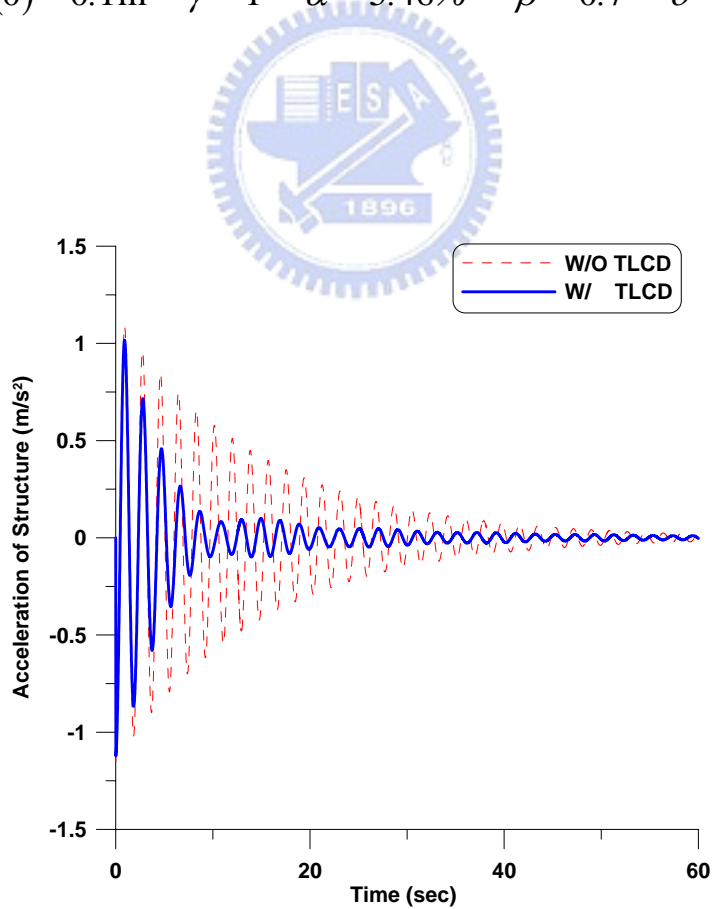


圖 2.10 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

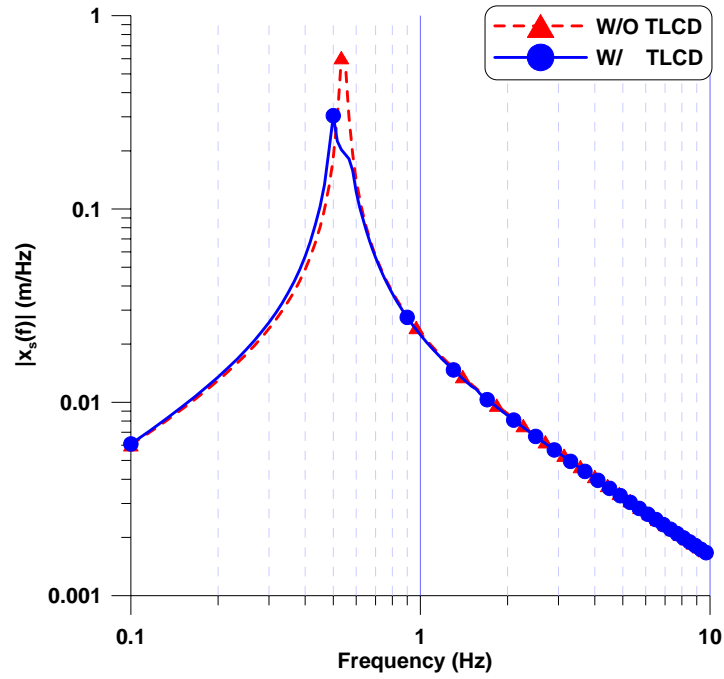


圖 2.11 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

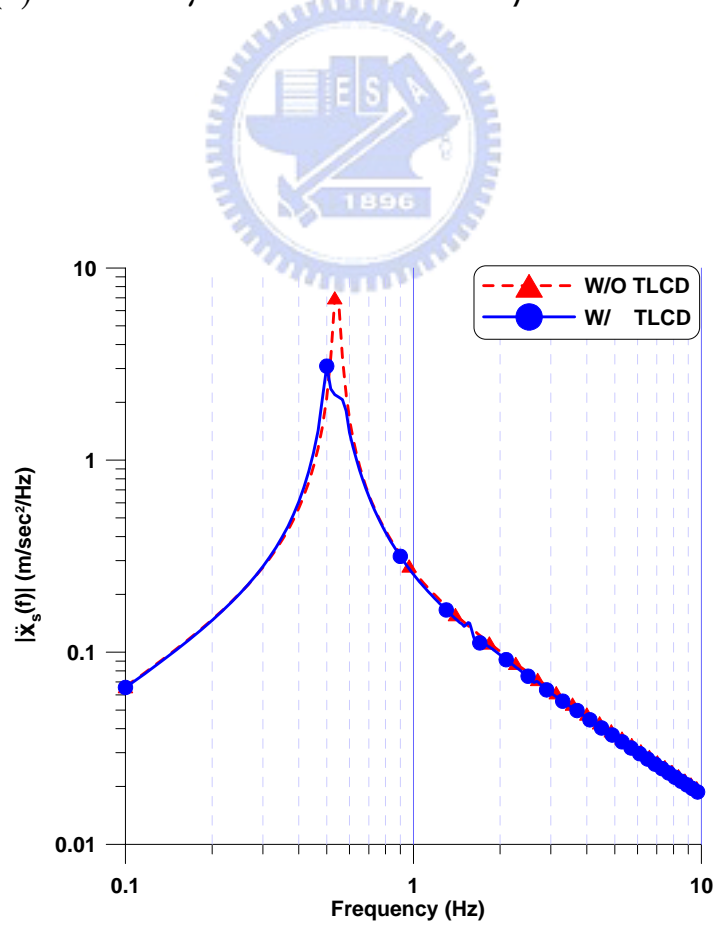


圖 2.12 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

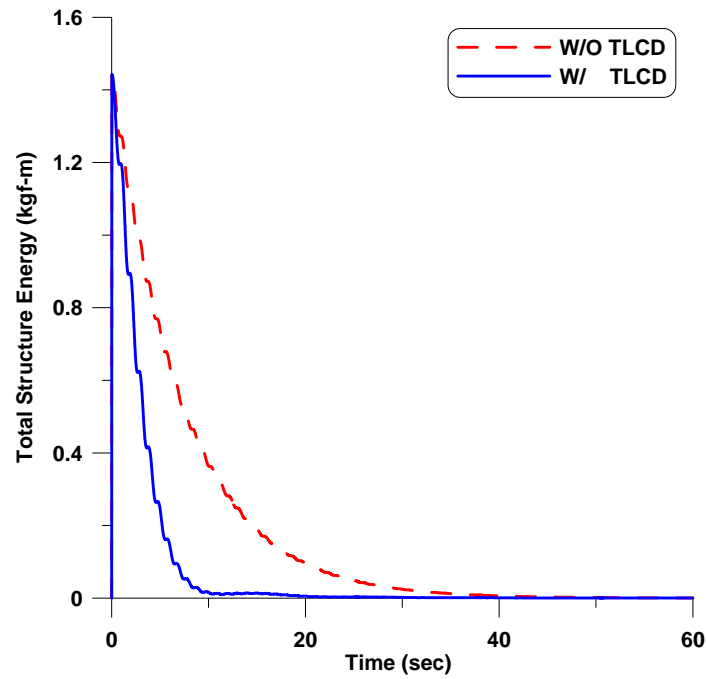


圖 2.13 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

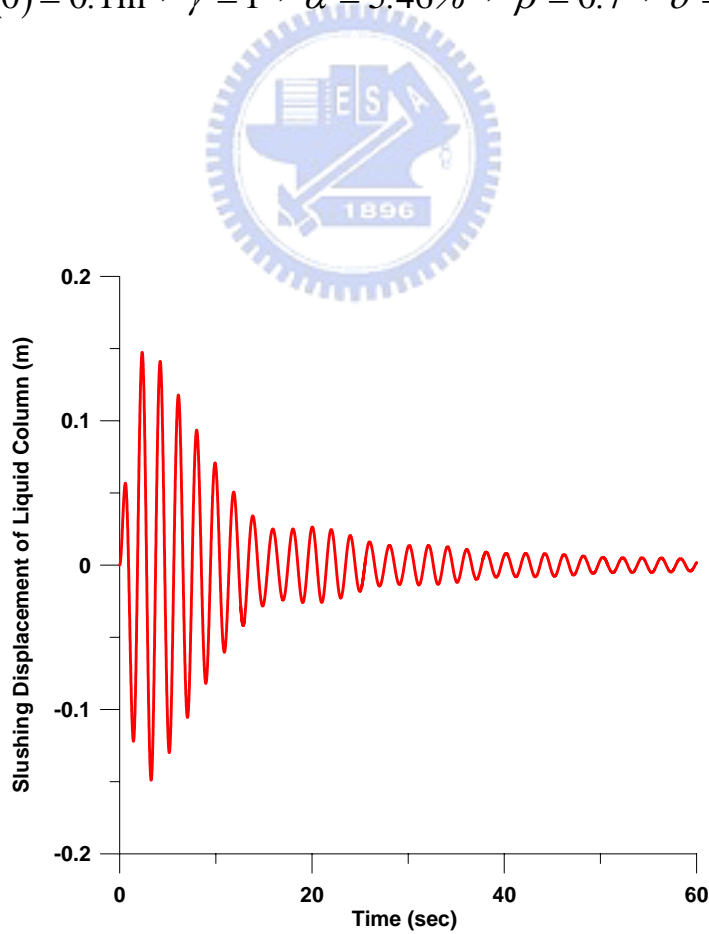


圖 2.14 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

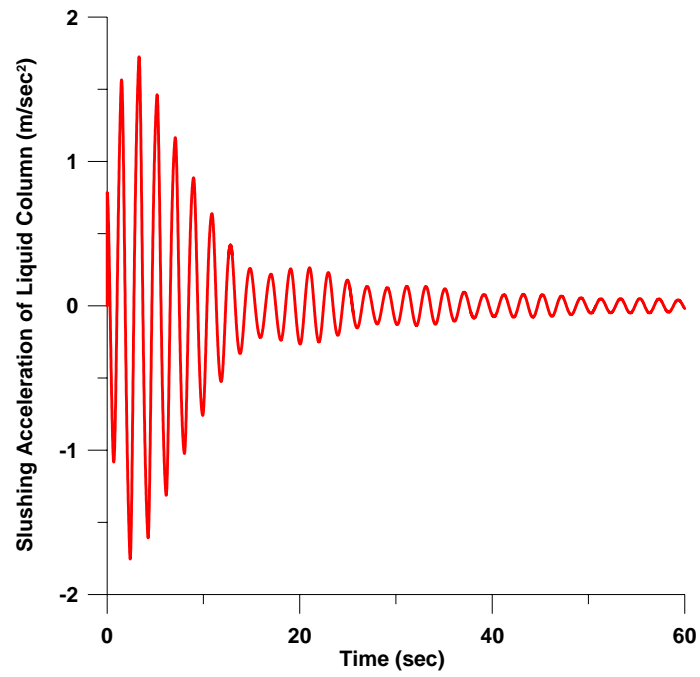


圖 2.15 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)



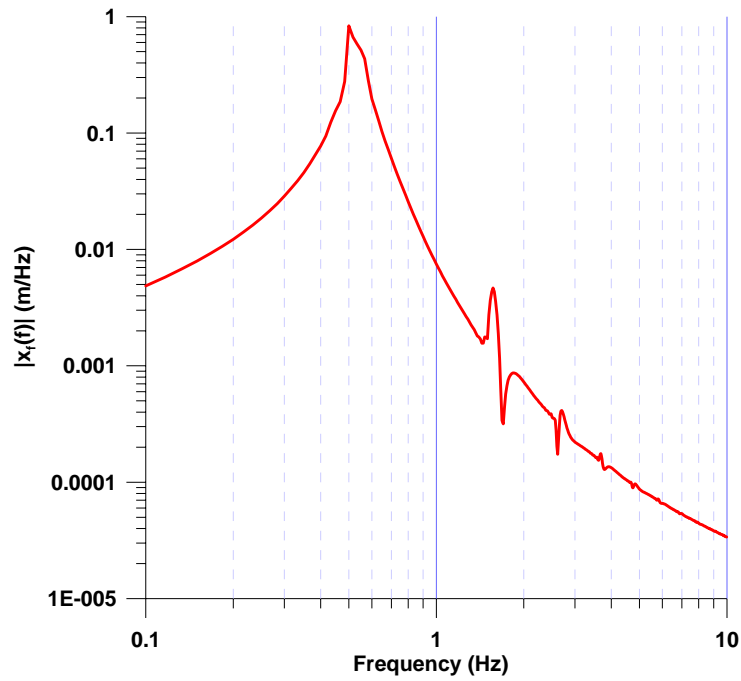


圖 2.16(a) TLCD 系統之水柱激盪位移富氏頻譜(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

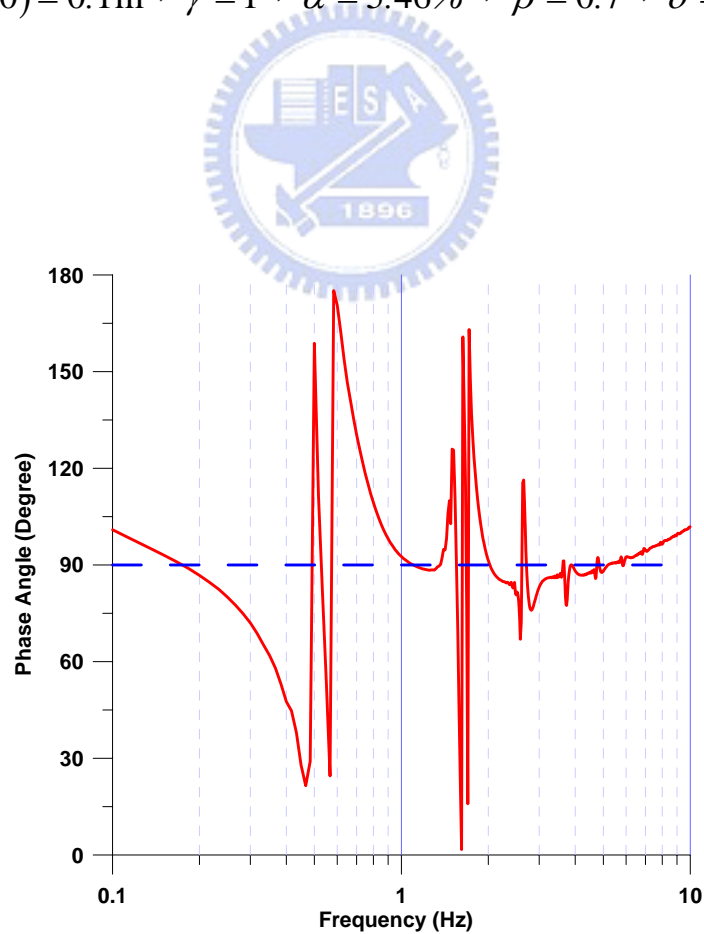


圖 2.16(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

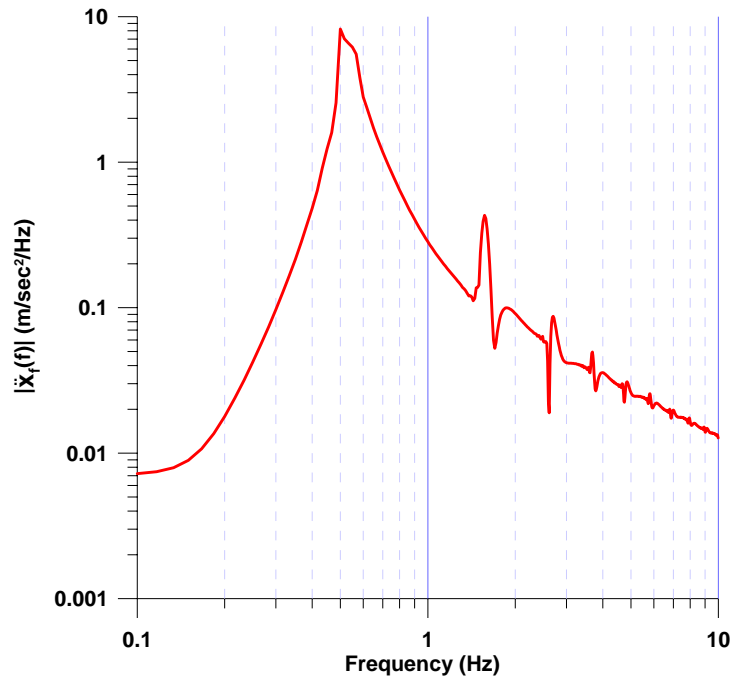


圖 2.17(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度富氏頻譜(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

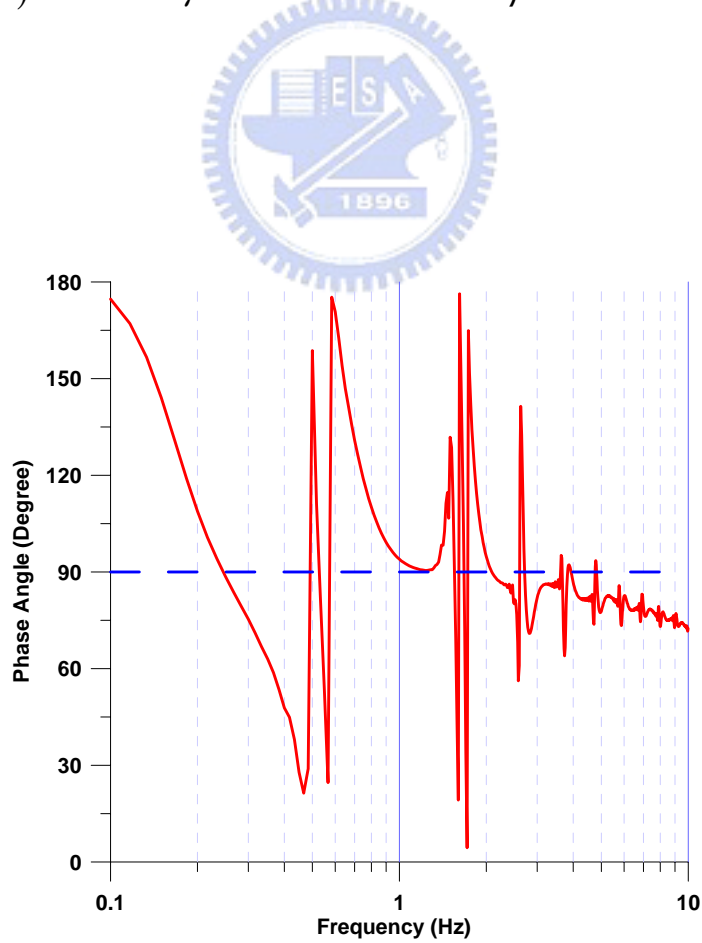


圖 2.17(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)

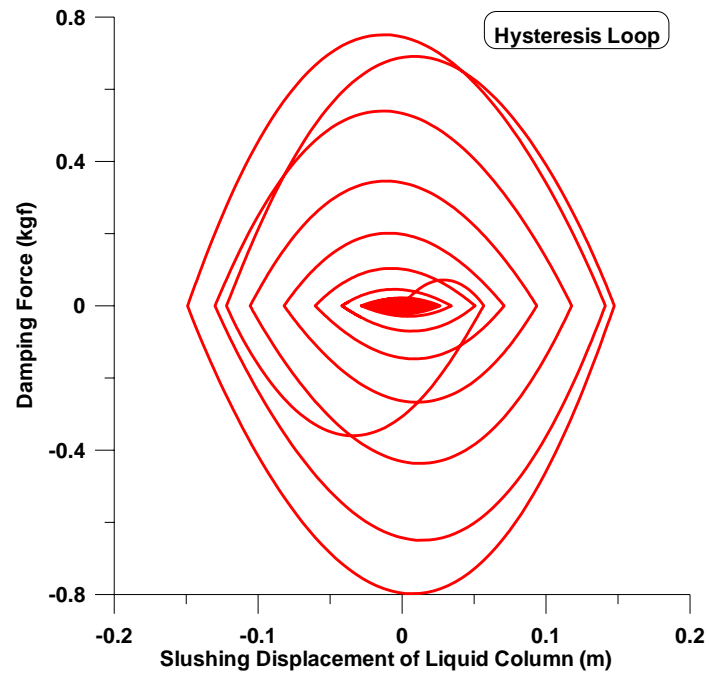


圖 2.18 TLCD 系統之遲滯迴圈(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.7$ ， $\delta = 8$)



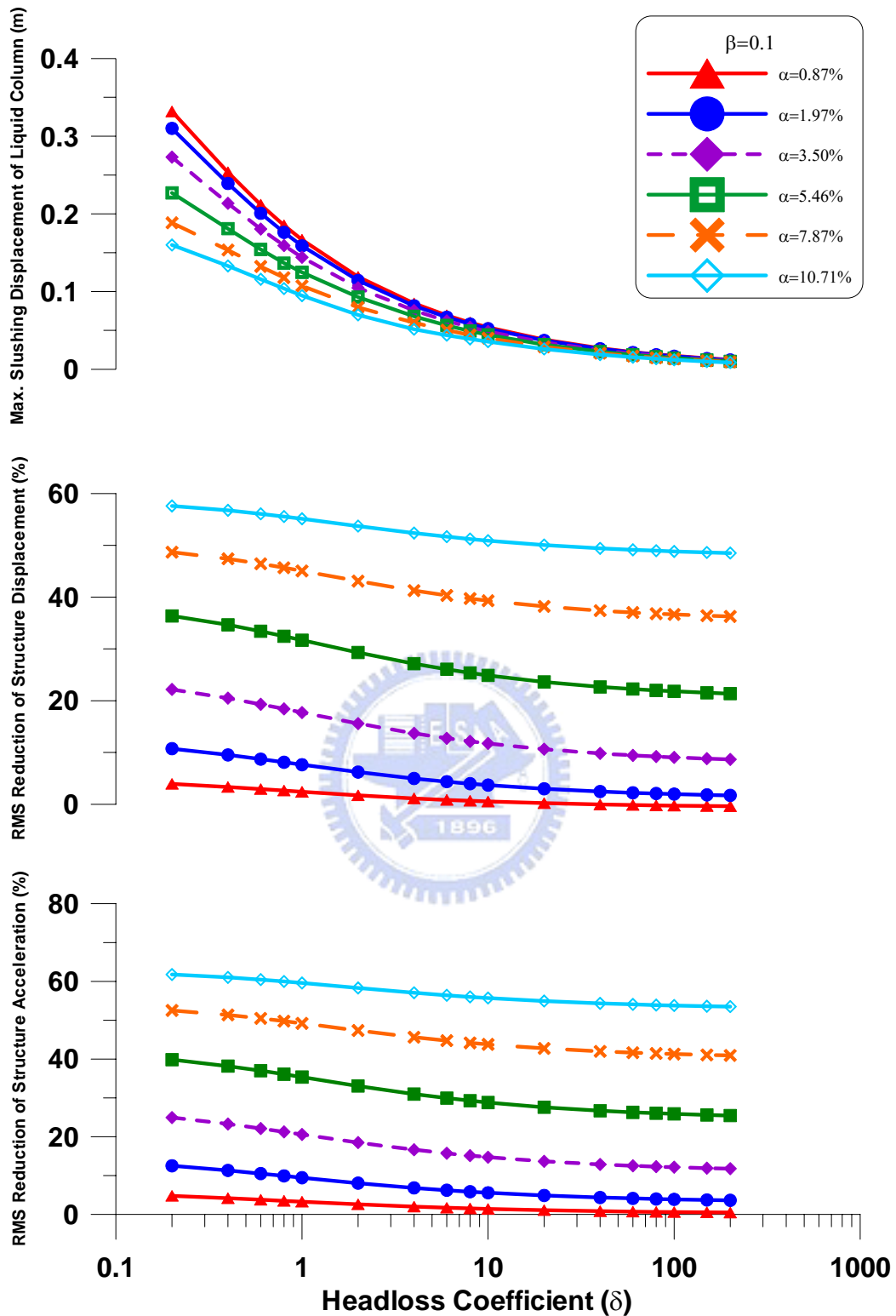


圖 2.19(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動， $\gamma=1$ ， $\beta=0.1$)

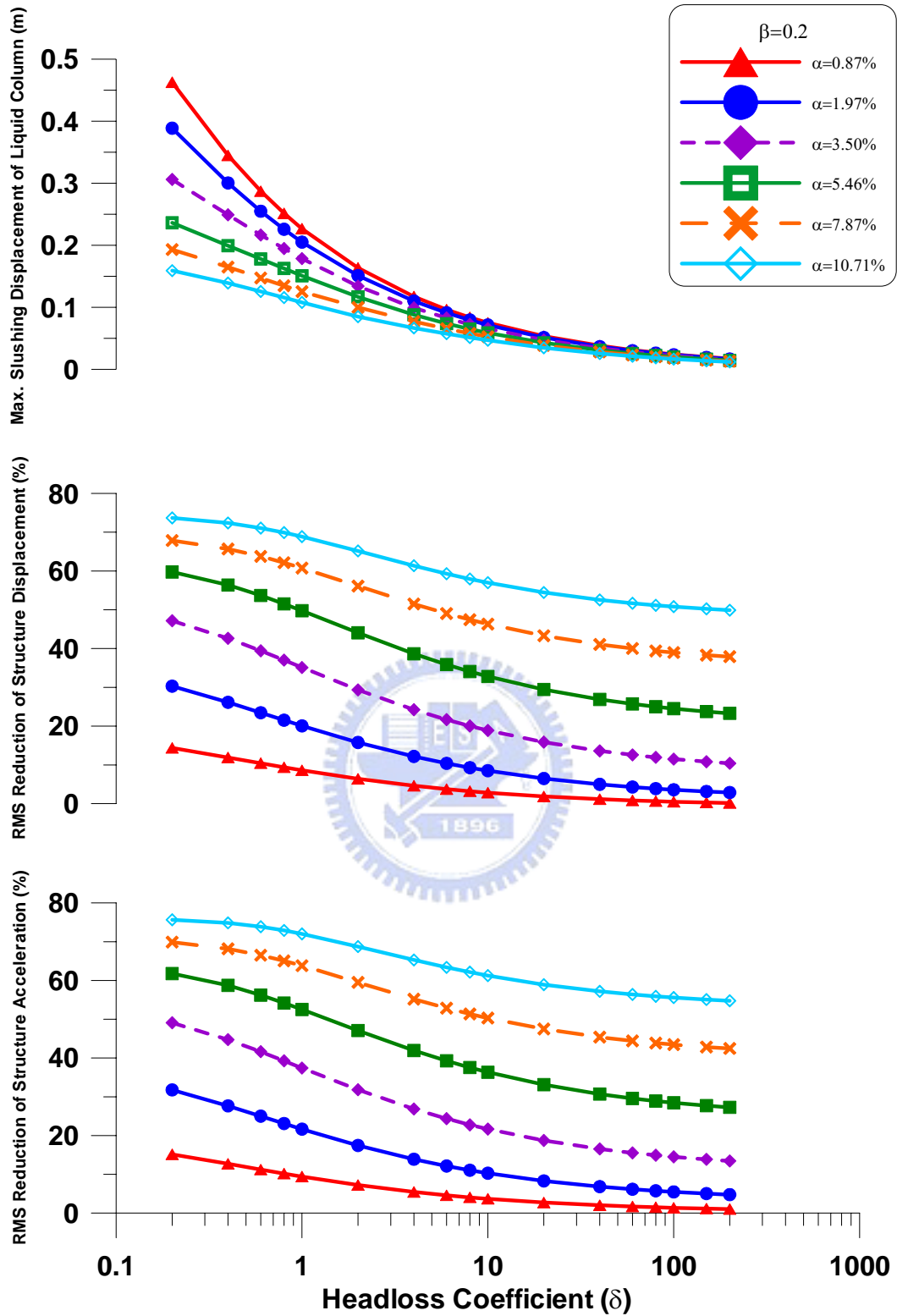


圖 2.19(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.2$)

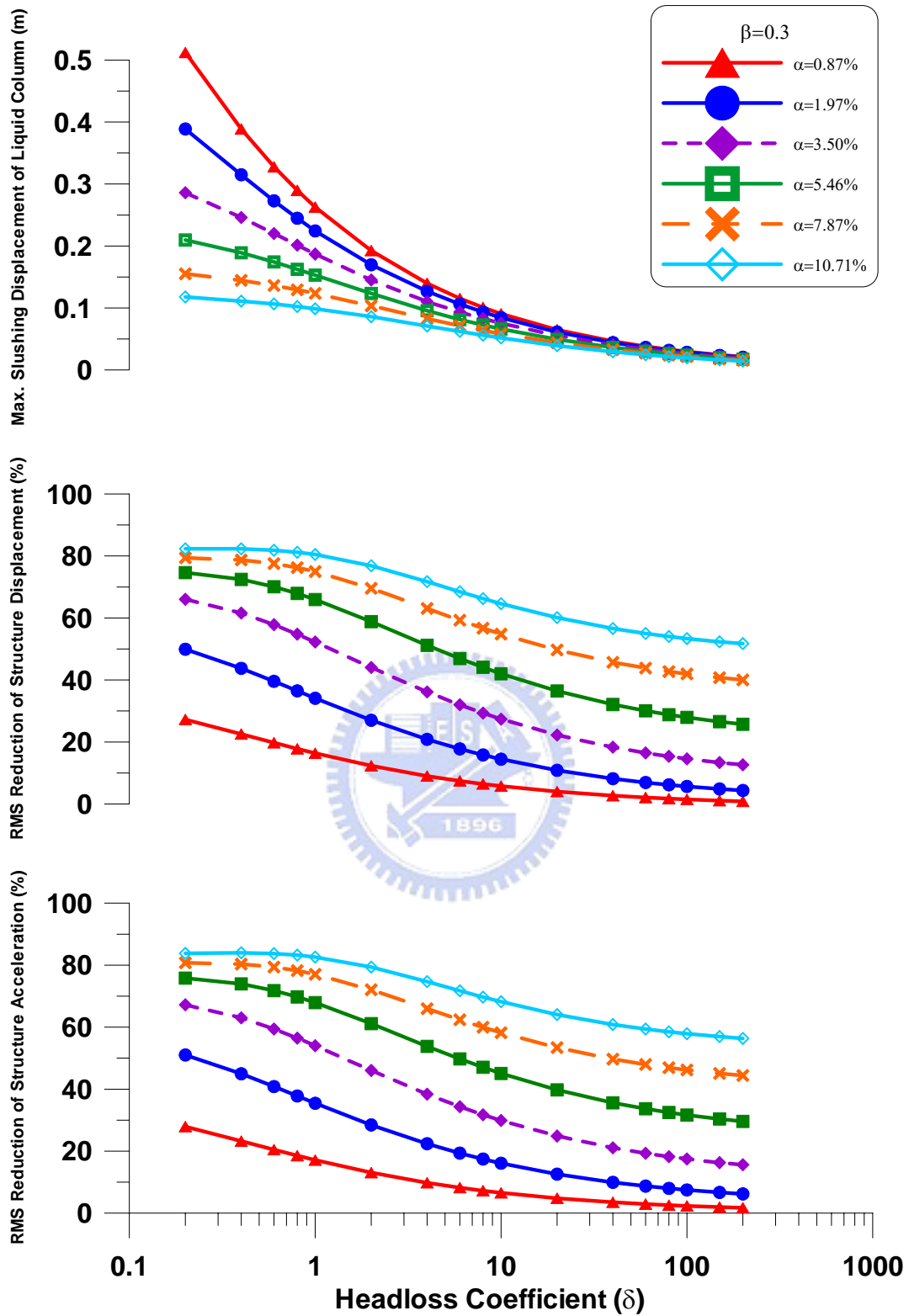


圖 2.19(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.3$)

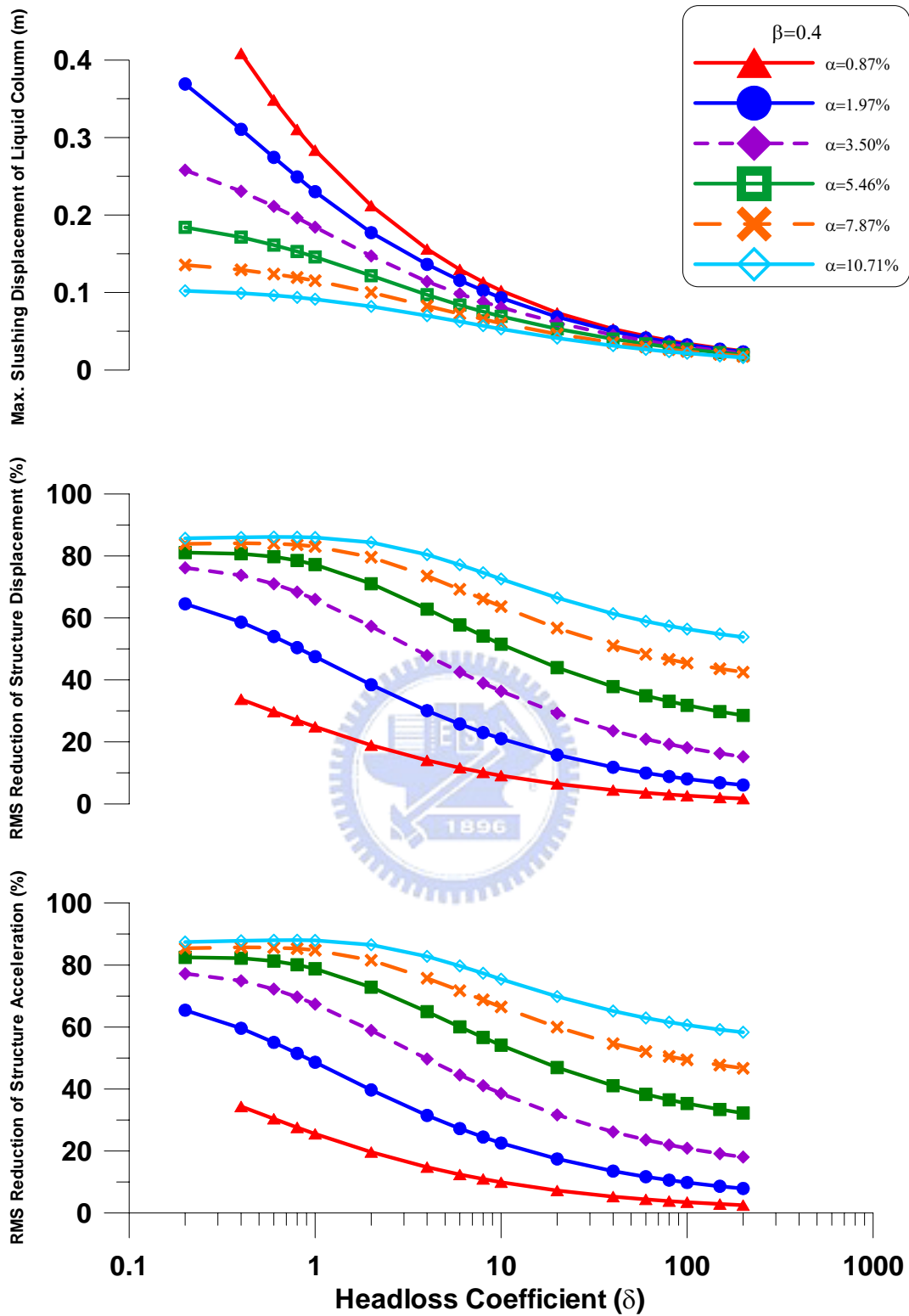


圖 2.19(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.4$)

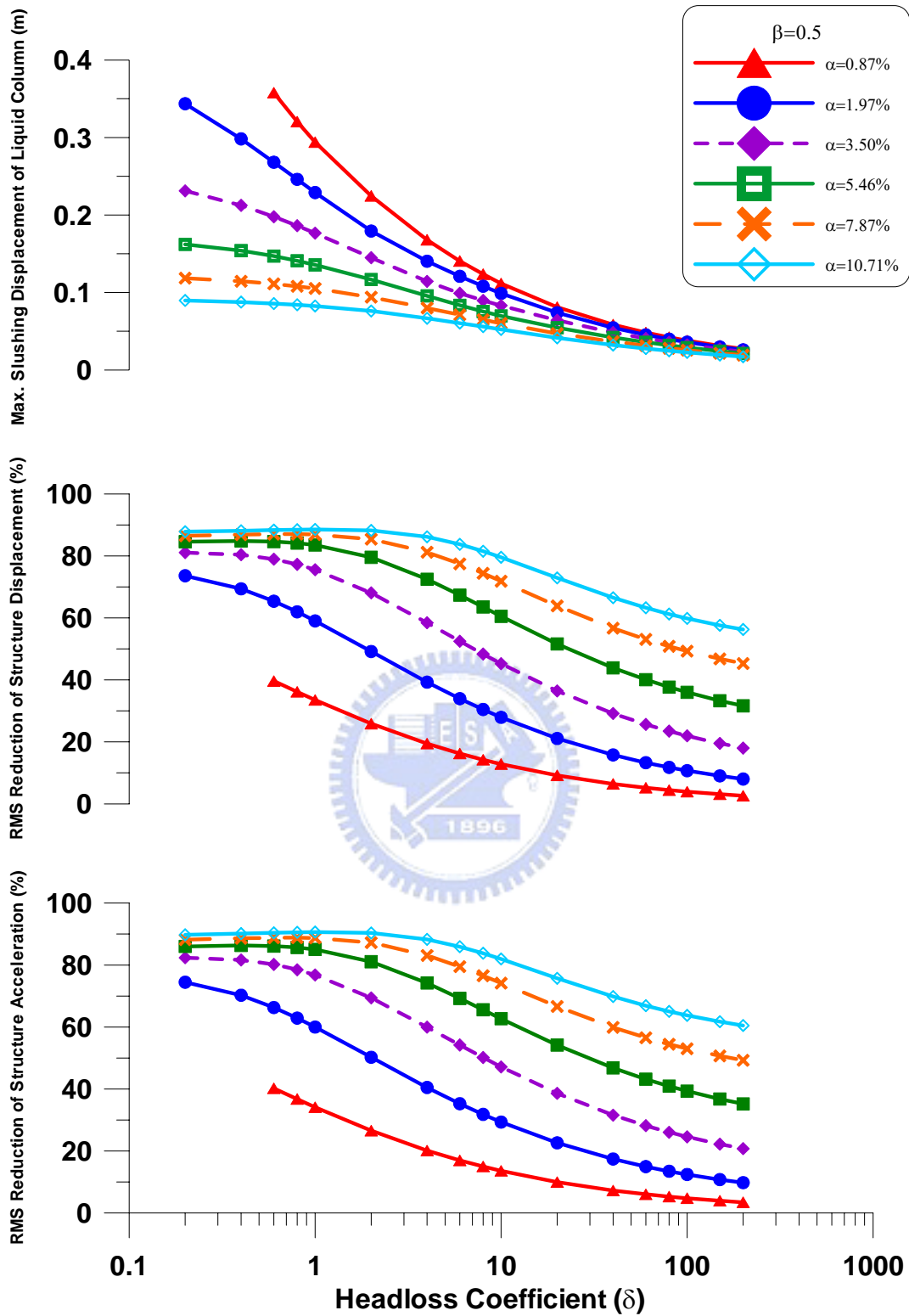


圖 2.19(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.5$)

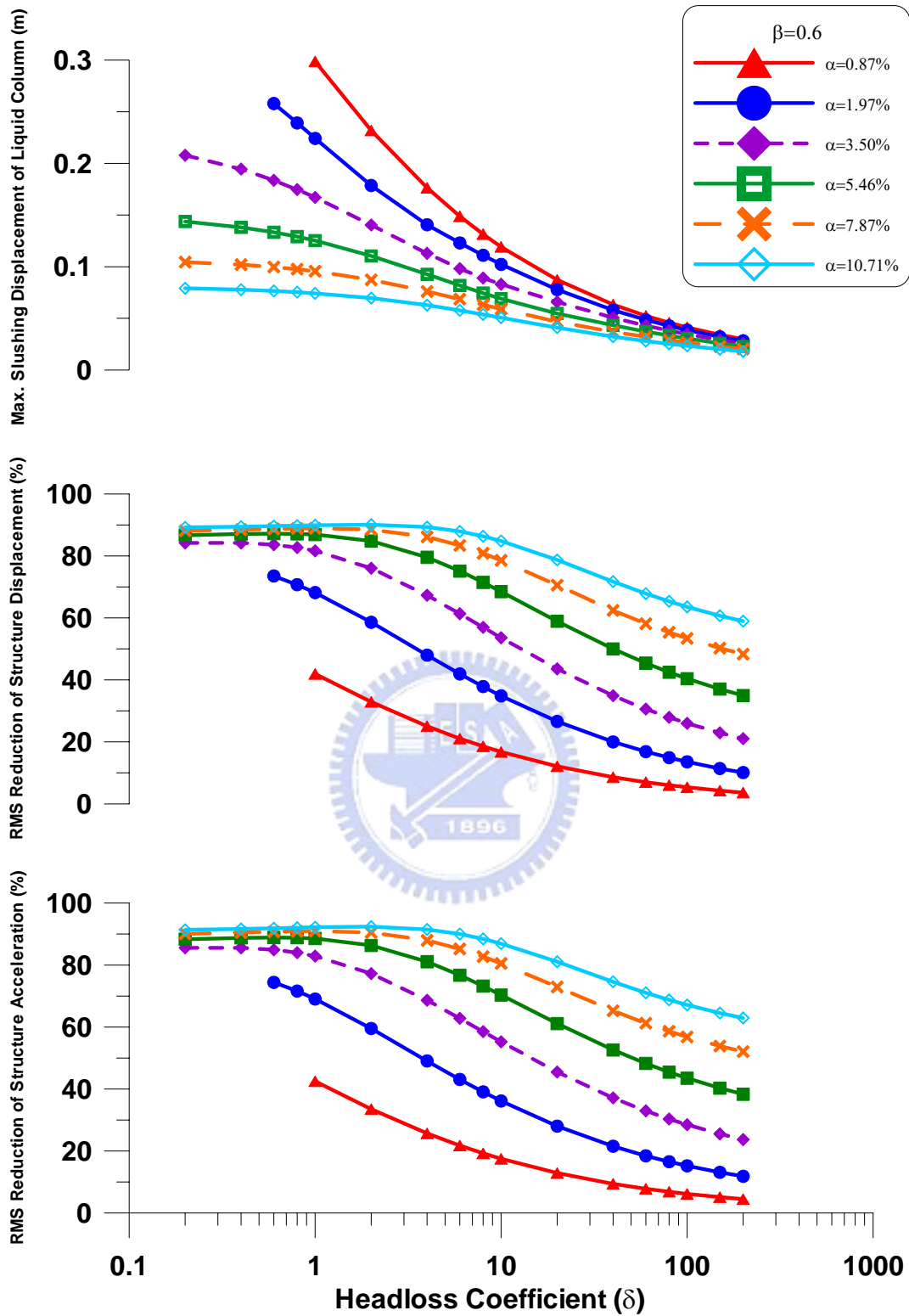


圖 2.19(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.6$)

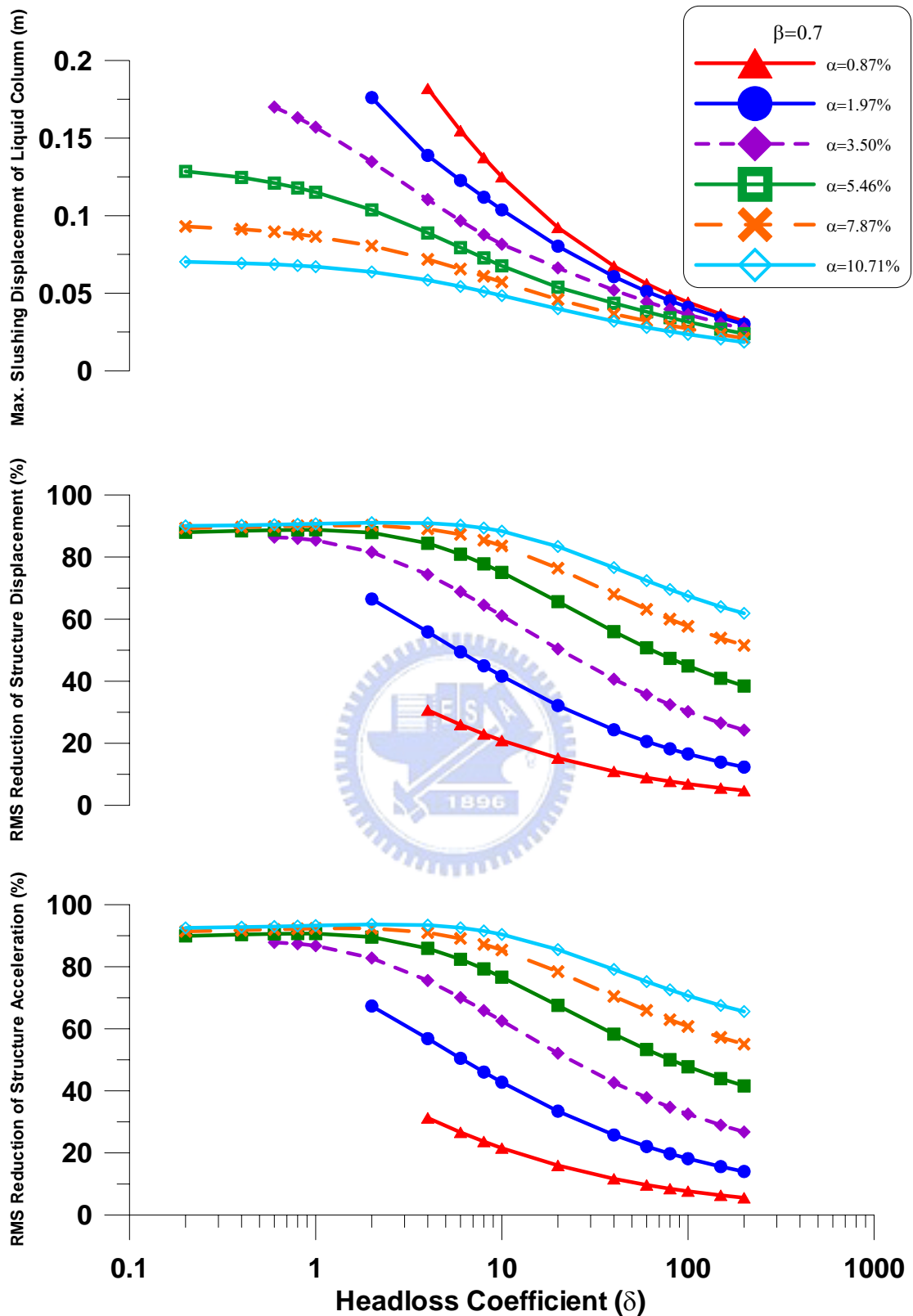


圖 2.19(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.7$)

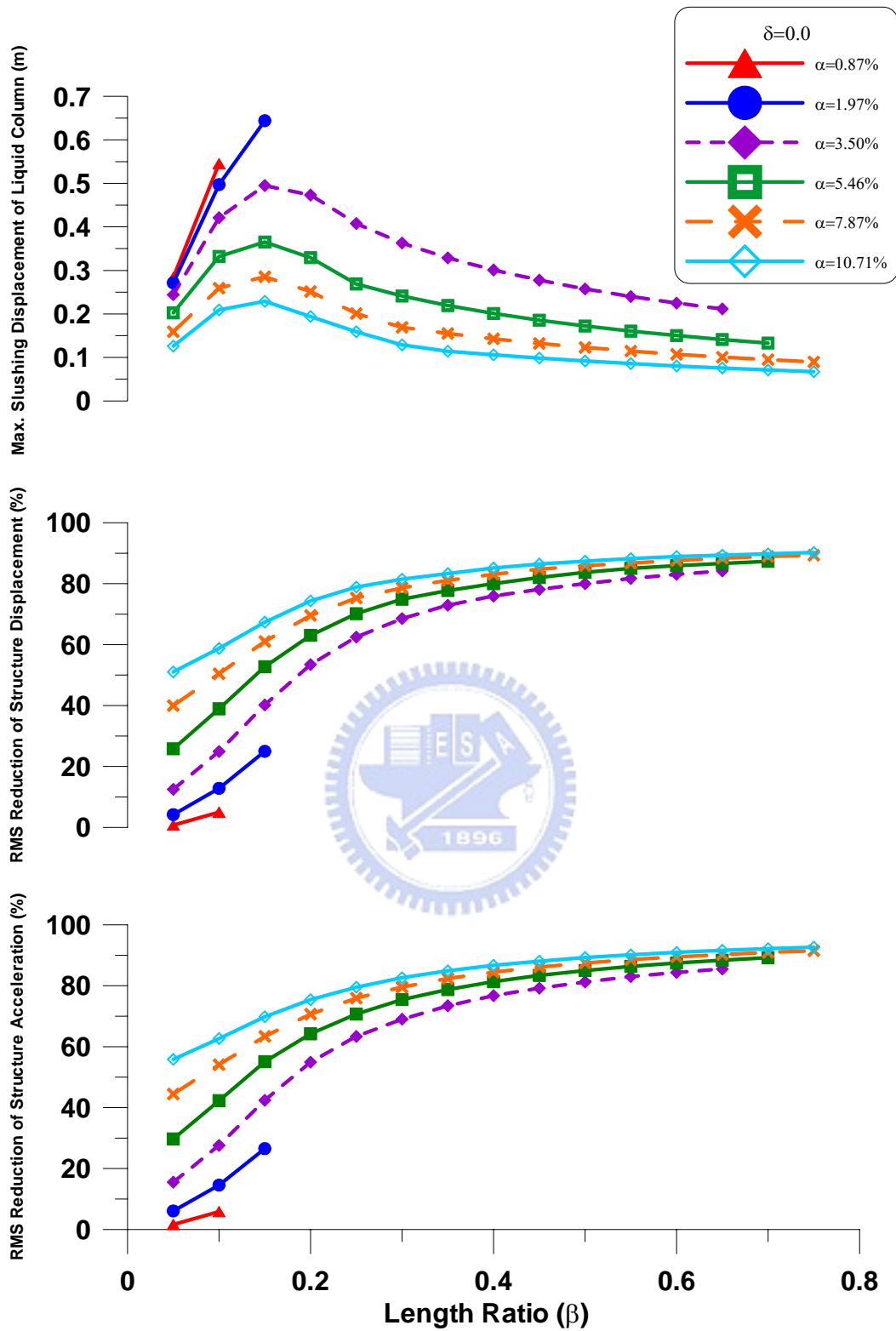


圖 2.20(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響 (共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.0$)

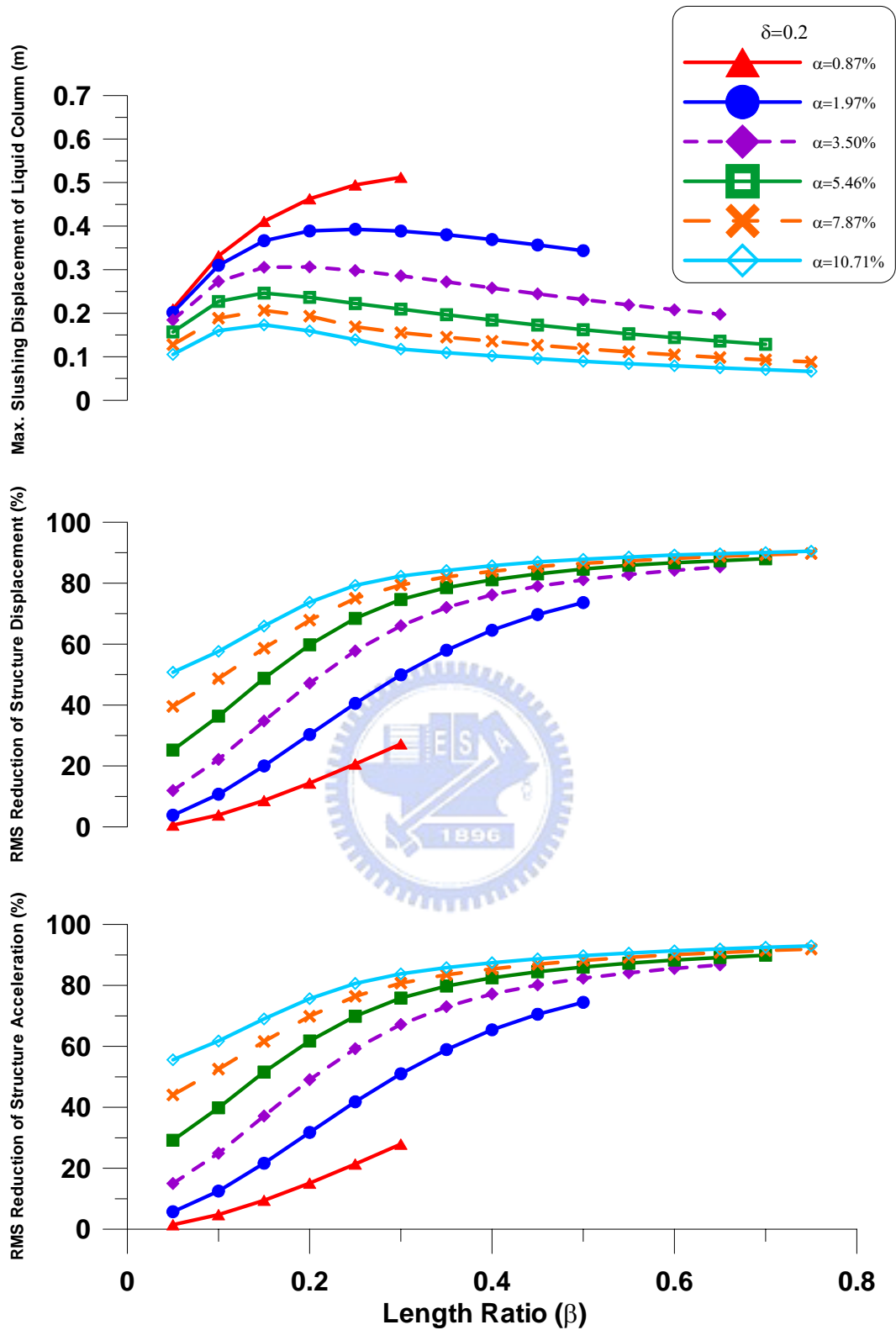


圖 2.20(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\delta=0.2$)

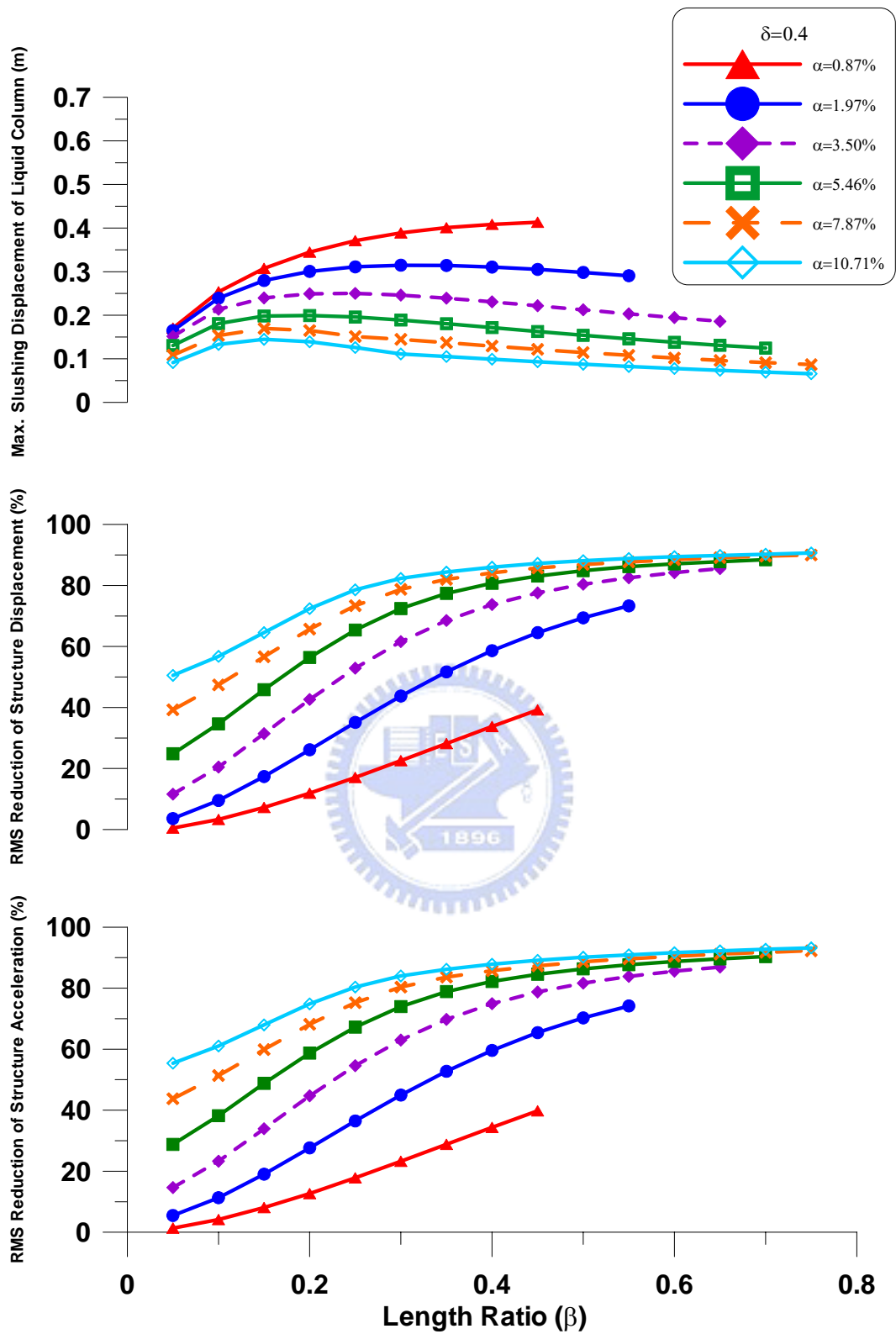


圖 2.20(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\delta=0.4$)

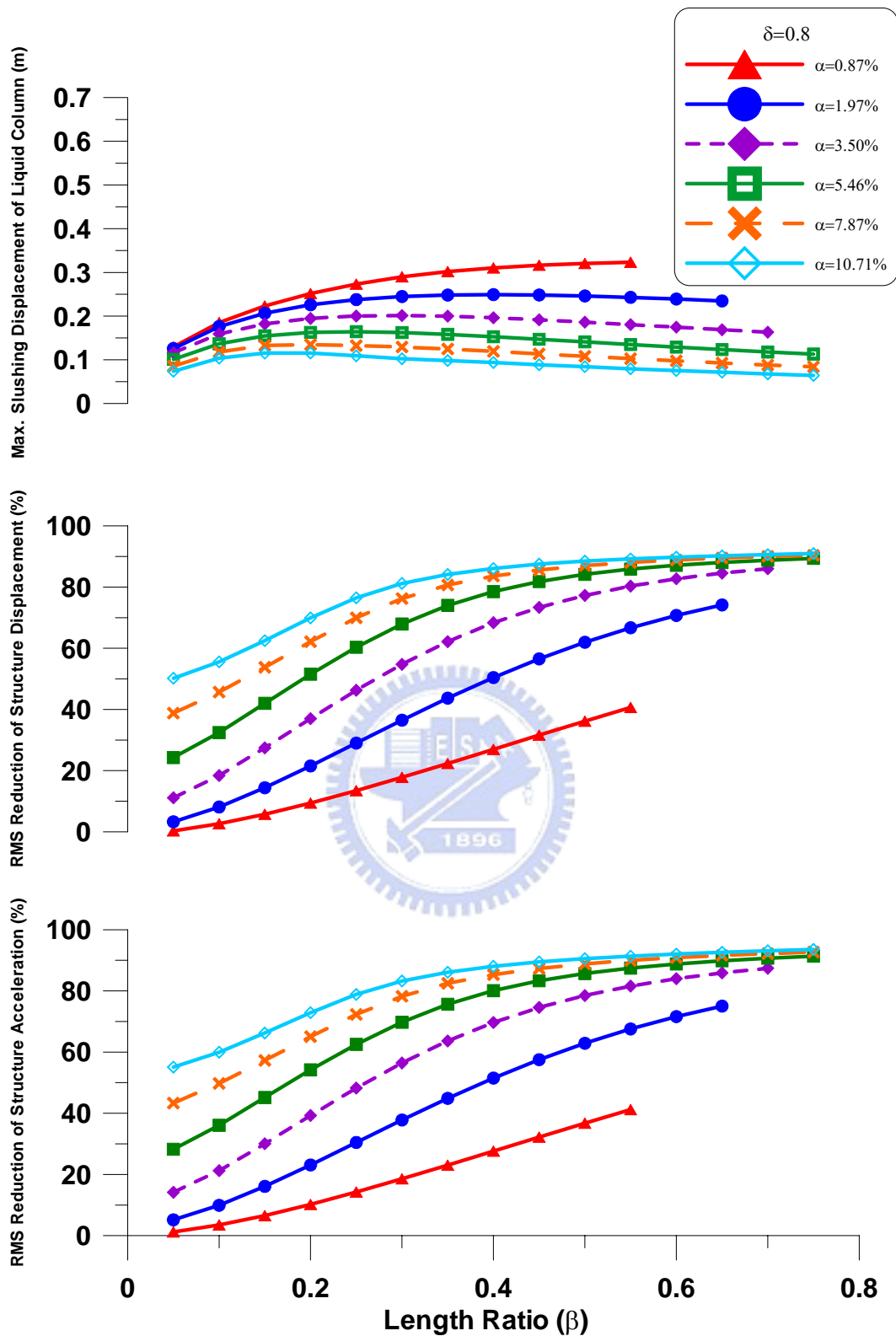


圖 2.20(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\delta=0.8$)

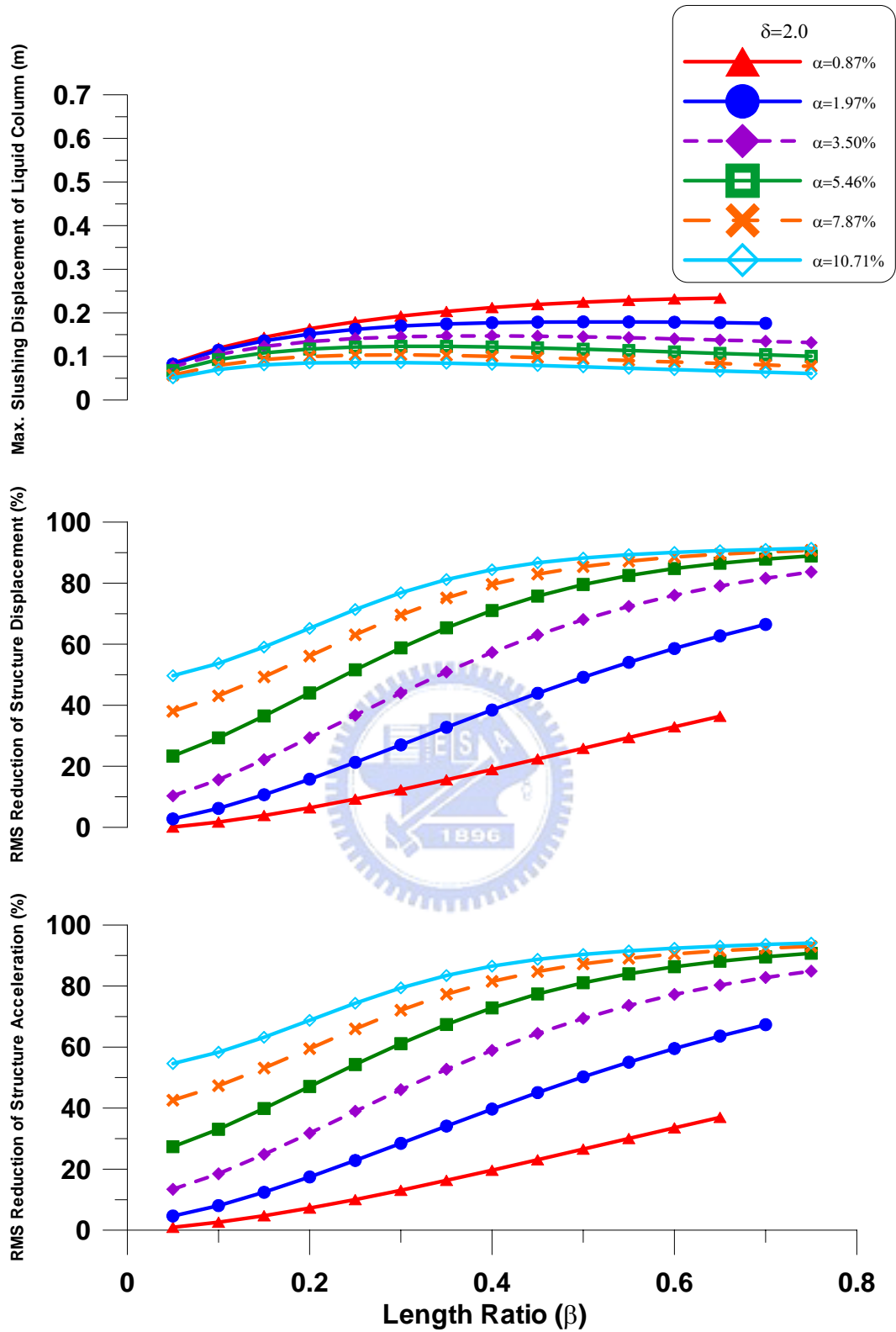


圖 2.20(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\delta=2$)

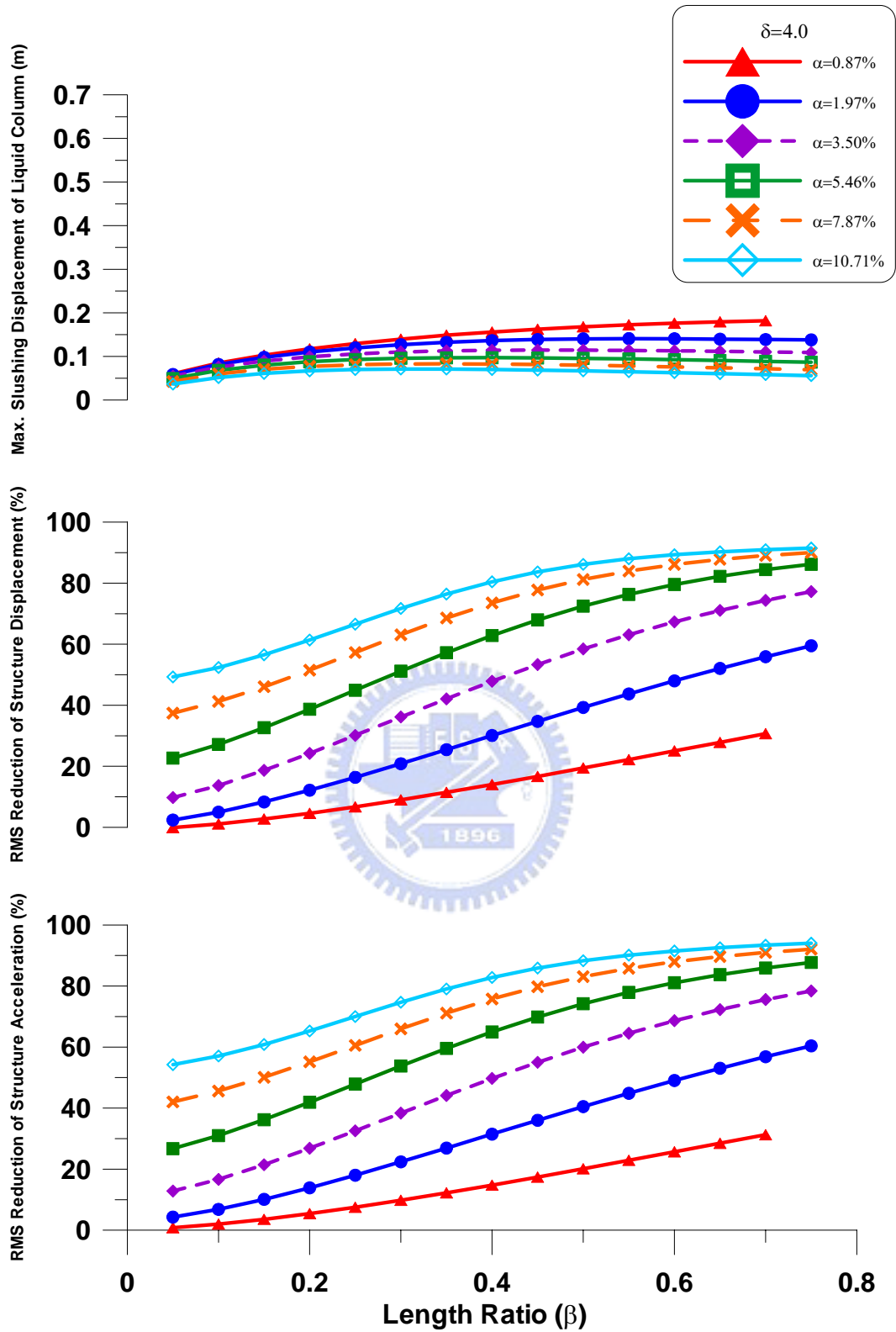


圖 2.20(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 4$)

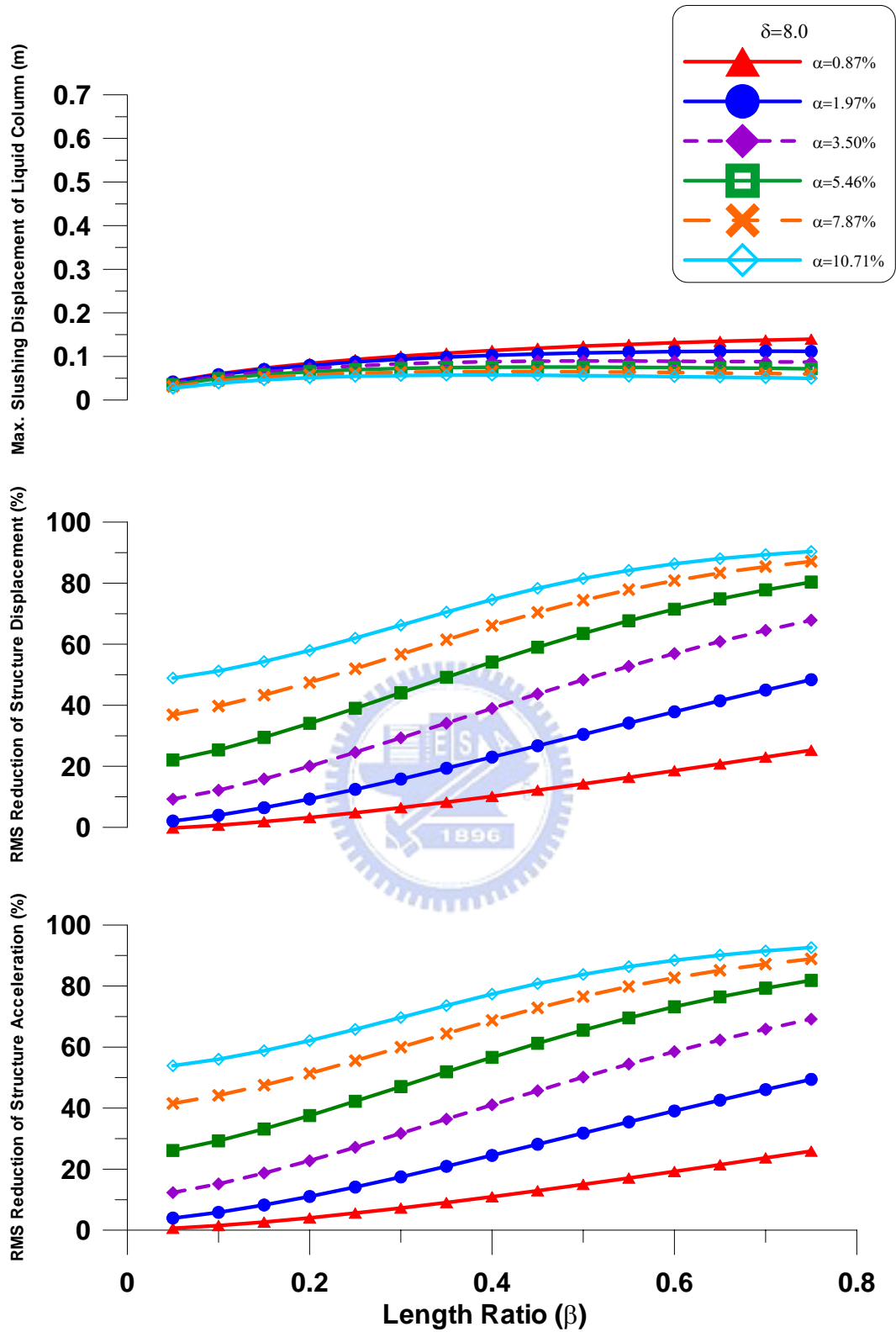


圖 2.20(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\delta=8$)

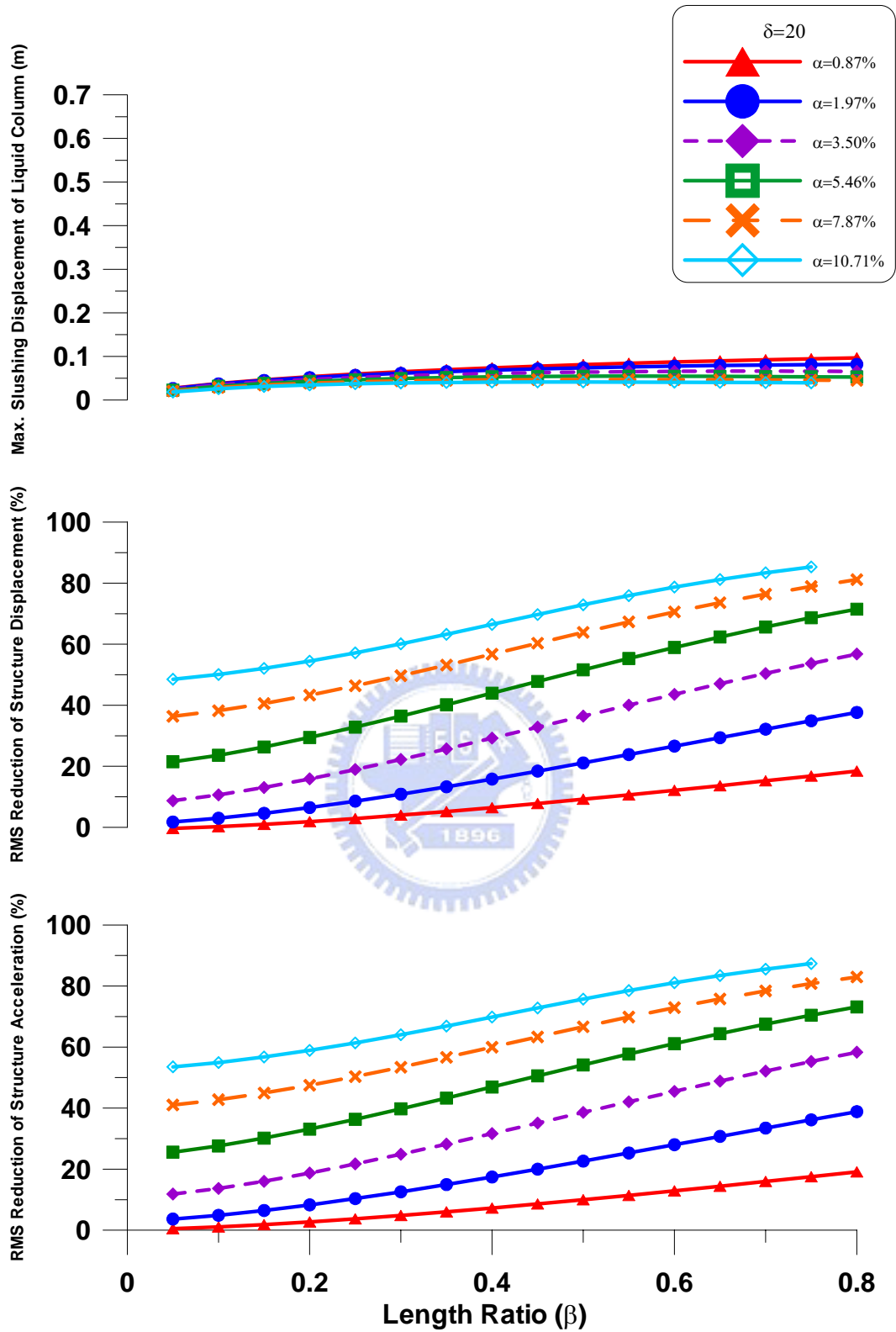


圖 2.20(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 20$)

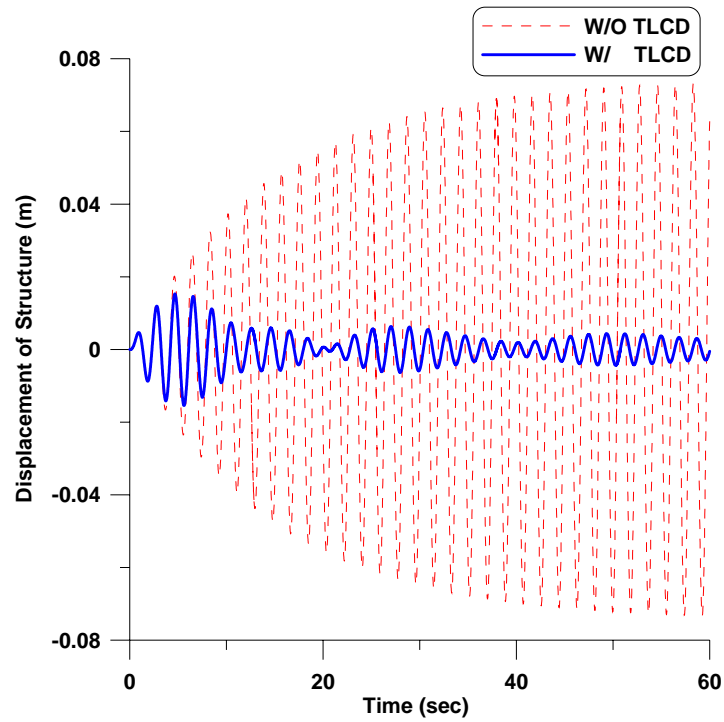


圖 2.21 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

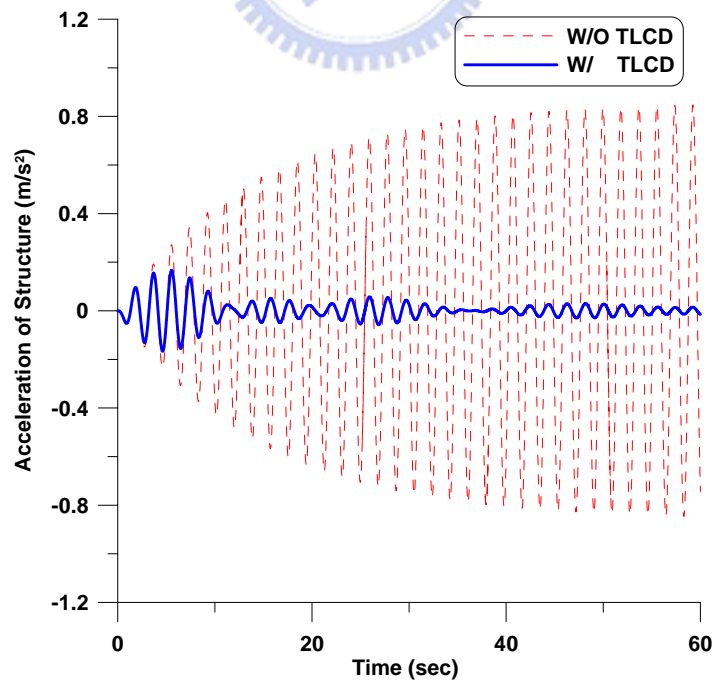


圖 2.22 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

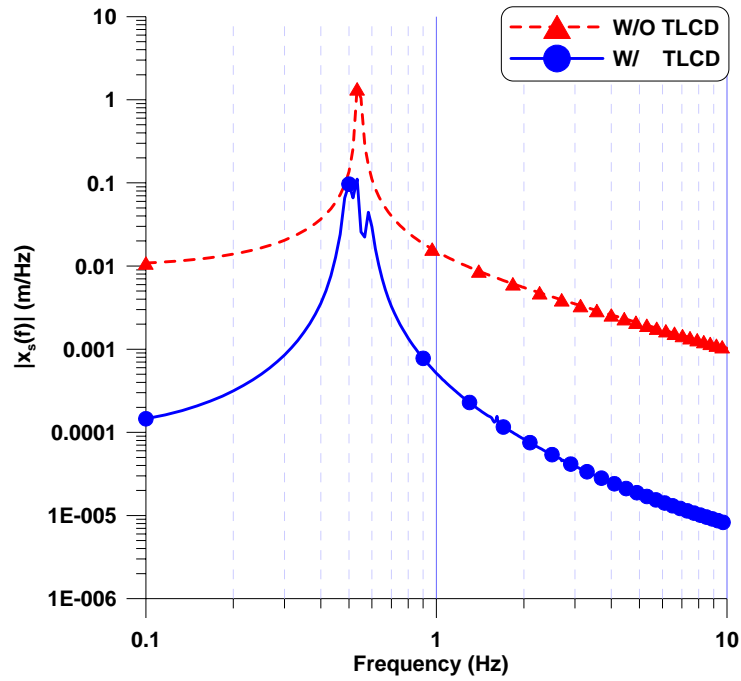


圖 2.23 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\alpha=5.46\%$, $\beta=0.75$, $\delta=1$)

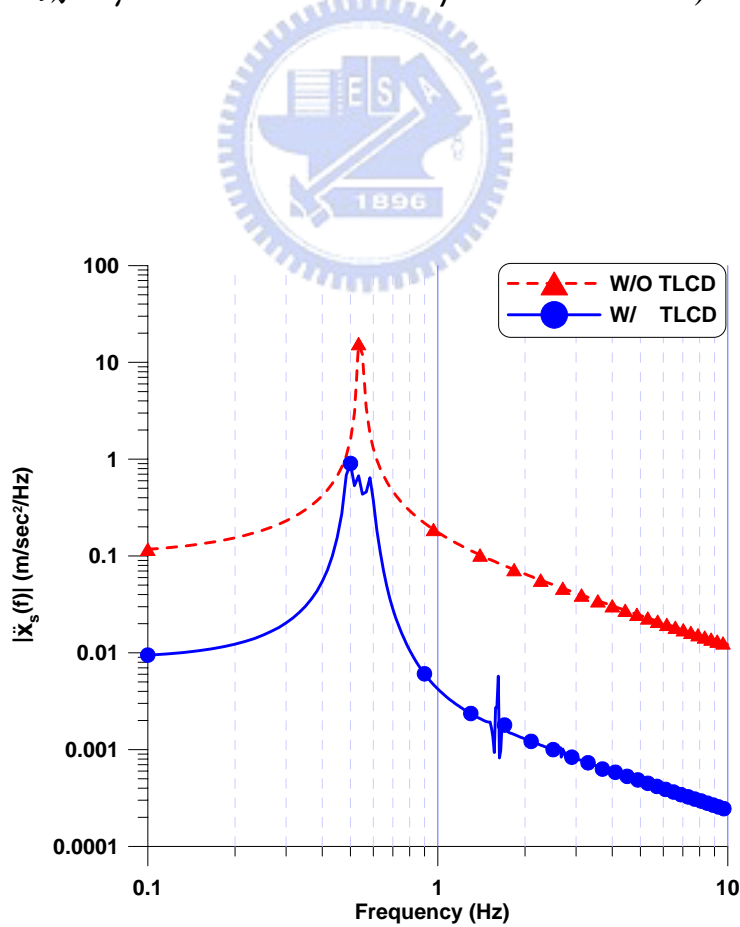


圖 2.24 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\alpha=5.46\%$, $\beta=0.75$, $\delta=1$)

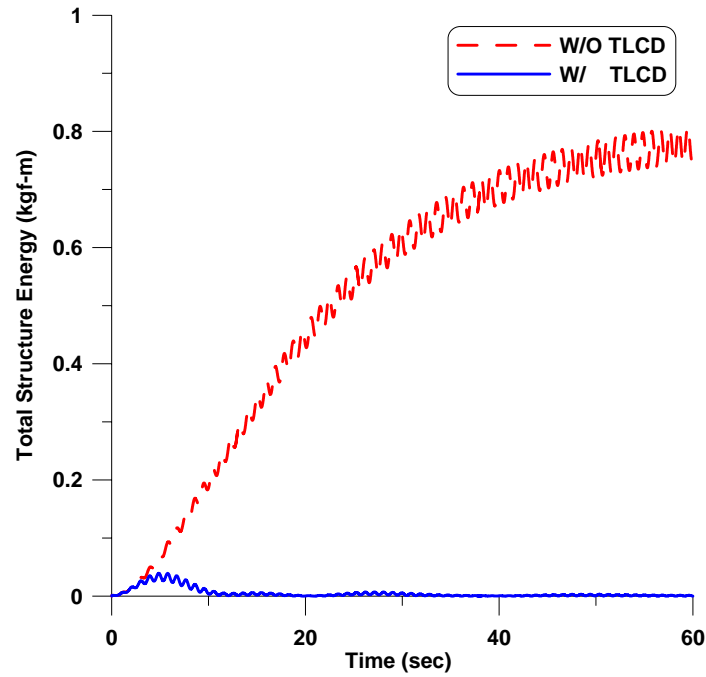


圖 2.25 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量圖(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

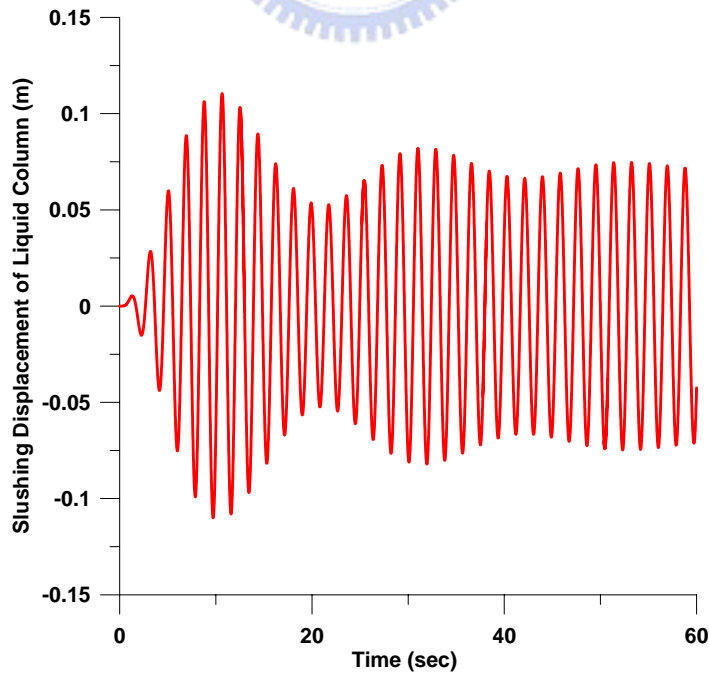


圖 2.26 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

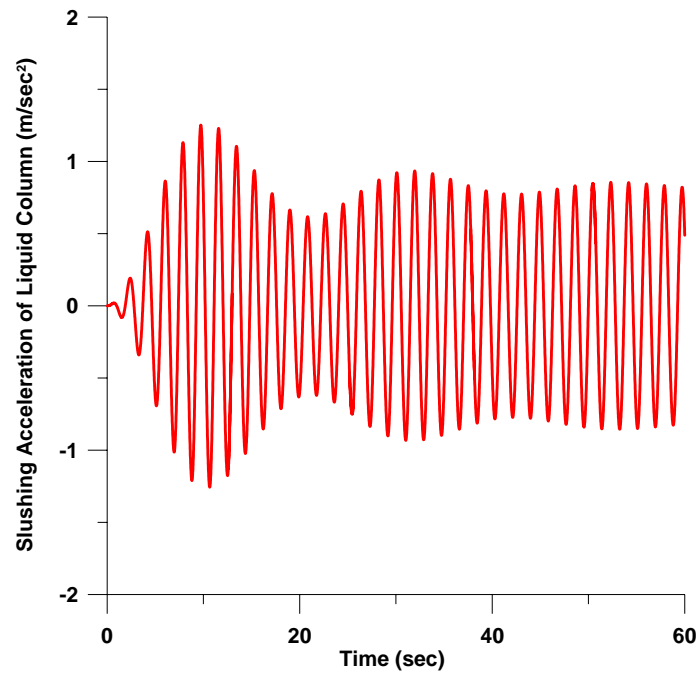


圖 2.27 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)



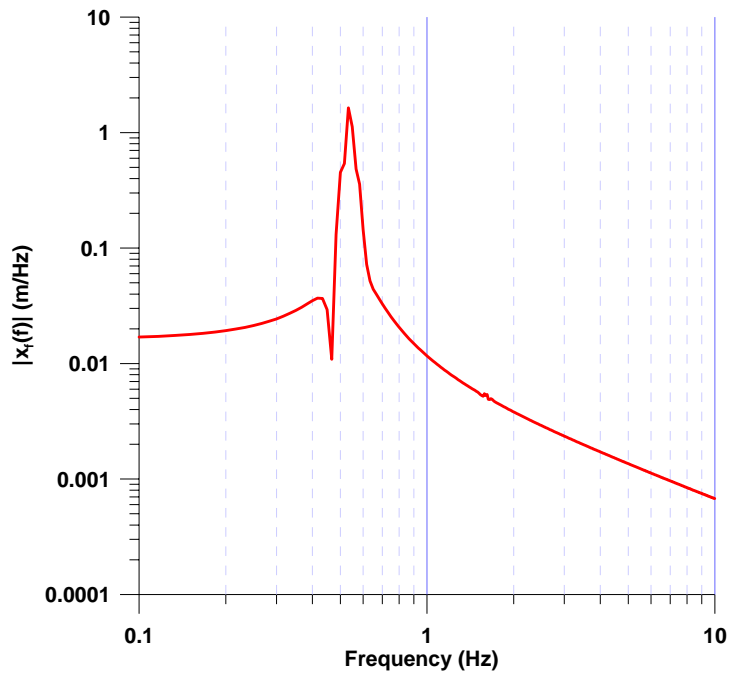


圖 2.28(a) TLCD 系統之水柱激盪位移之富氏頻譜圖(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

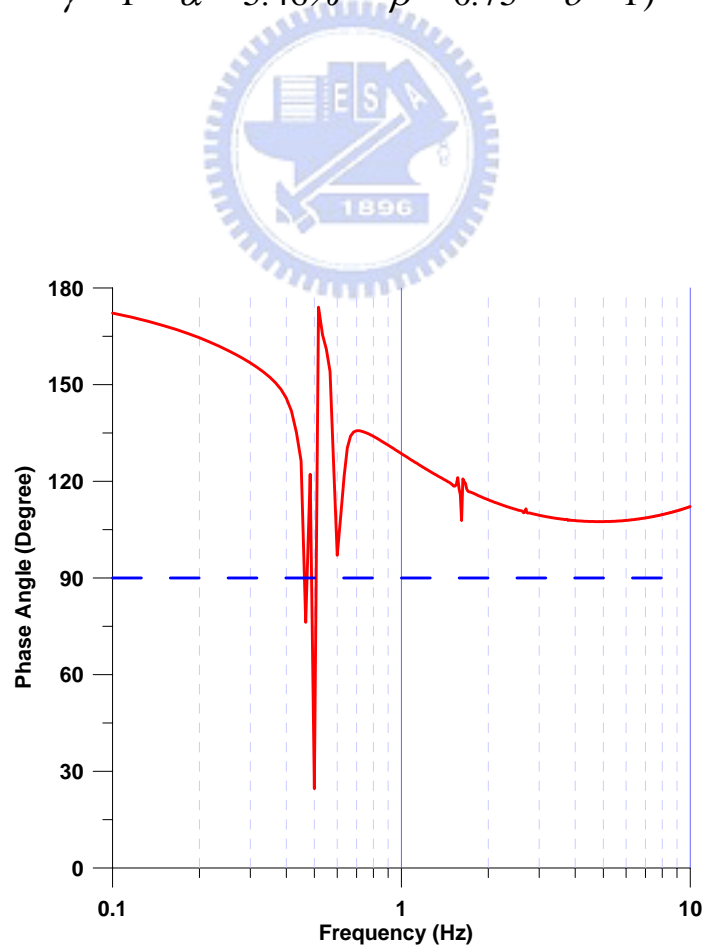


圖 2.28(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)

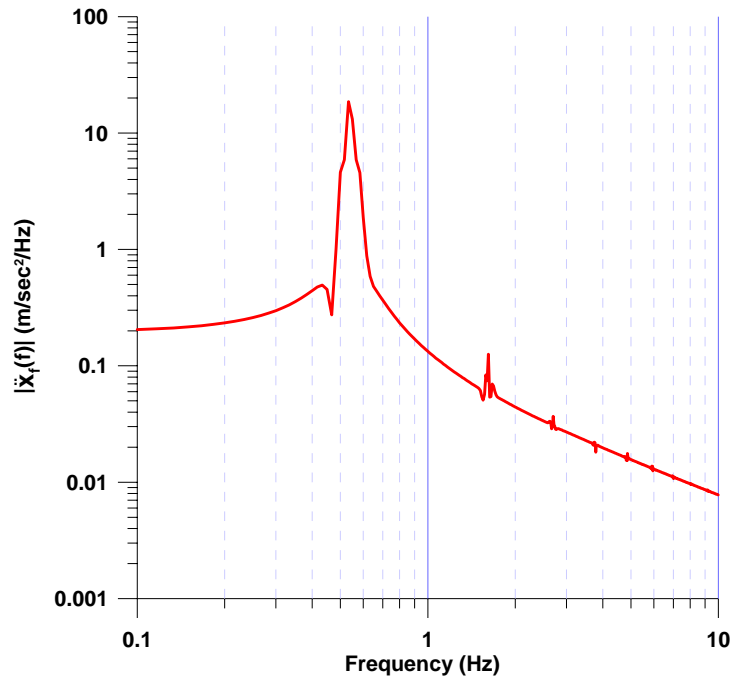


圖 2.29(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度之富氏頻譜圖(共振簡諧擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.46\%$ ， $\beta=0.75$ ， $\delta=1$)

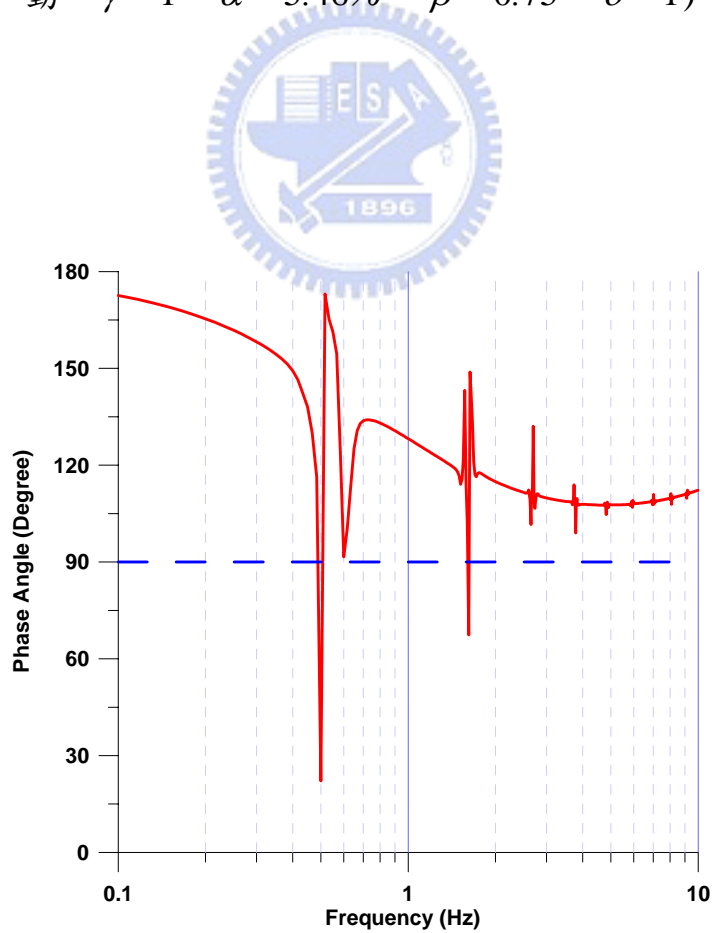


圖 2.29(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(共振簡諧擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.46\%$ ， $\beta=0.75$ ， $\delta=1$)

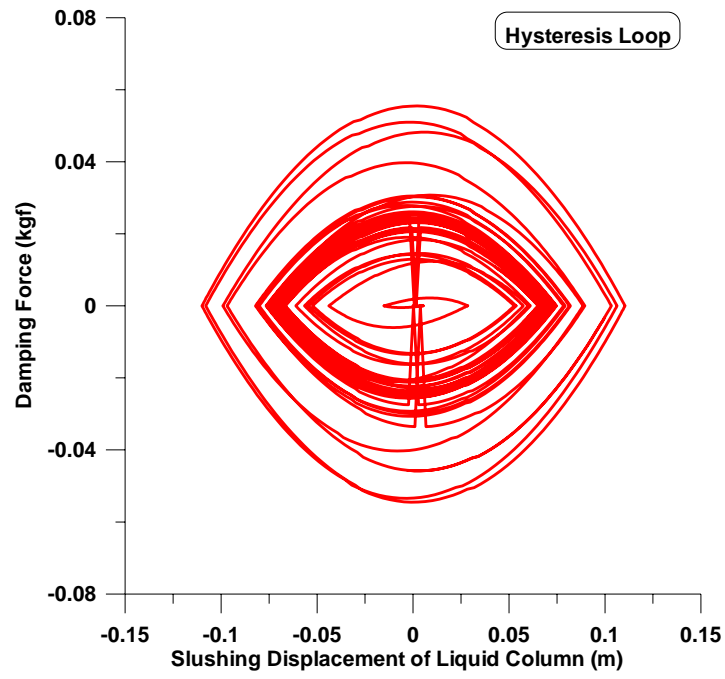


圖 2.30 TLCD 系統之遲滯迴圈(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 1$)



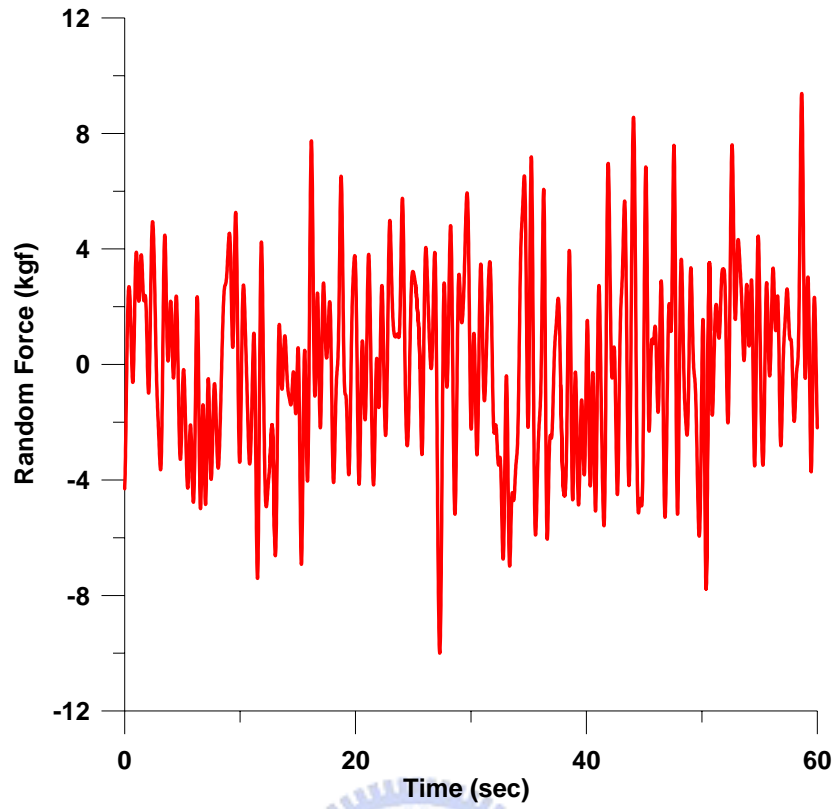


圖 2.31 隨機擾動力之歷時

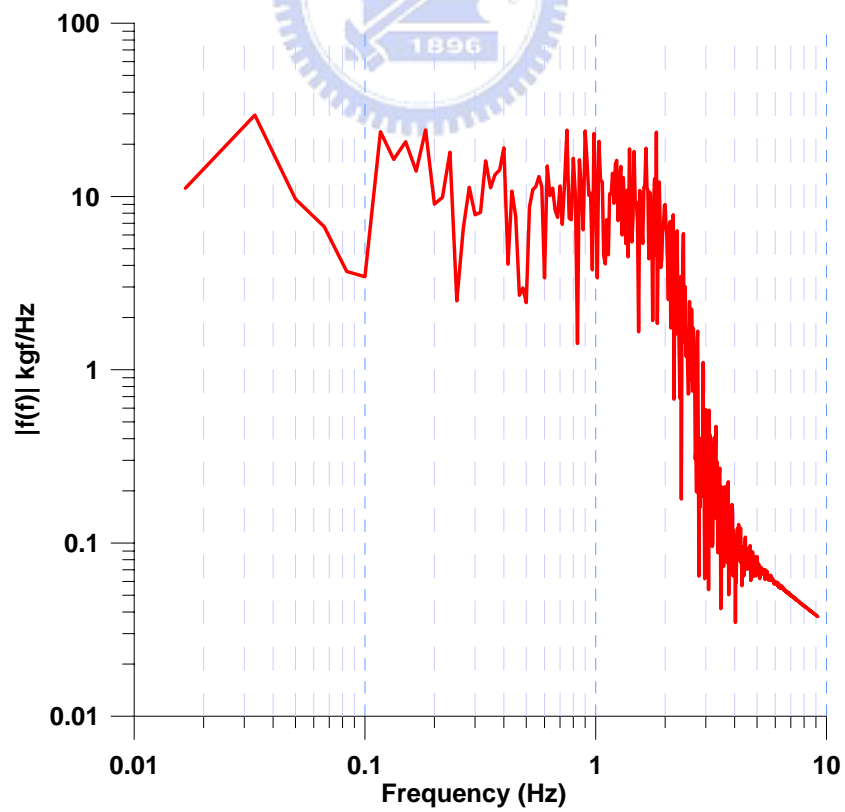


圖 2.32 隨機擾動力之富氏頻譜圖

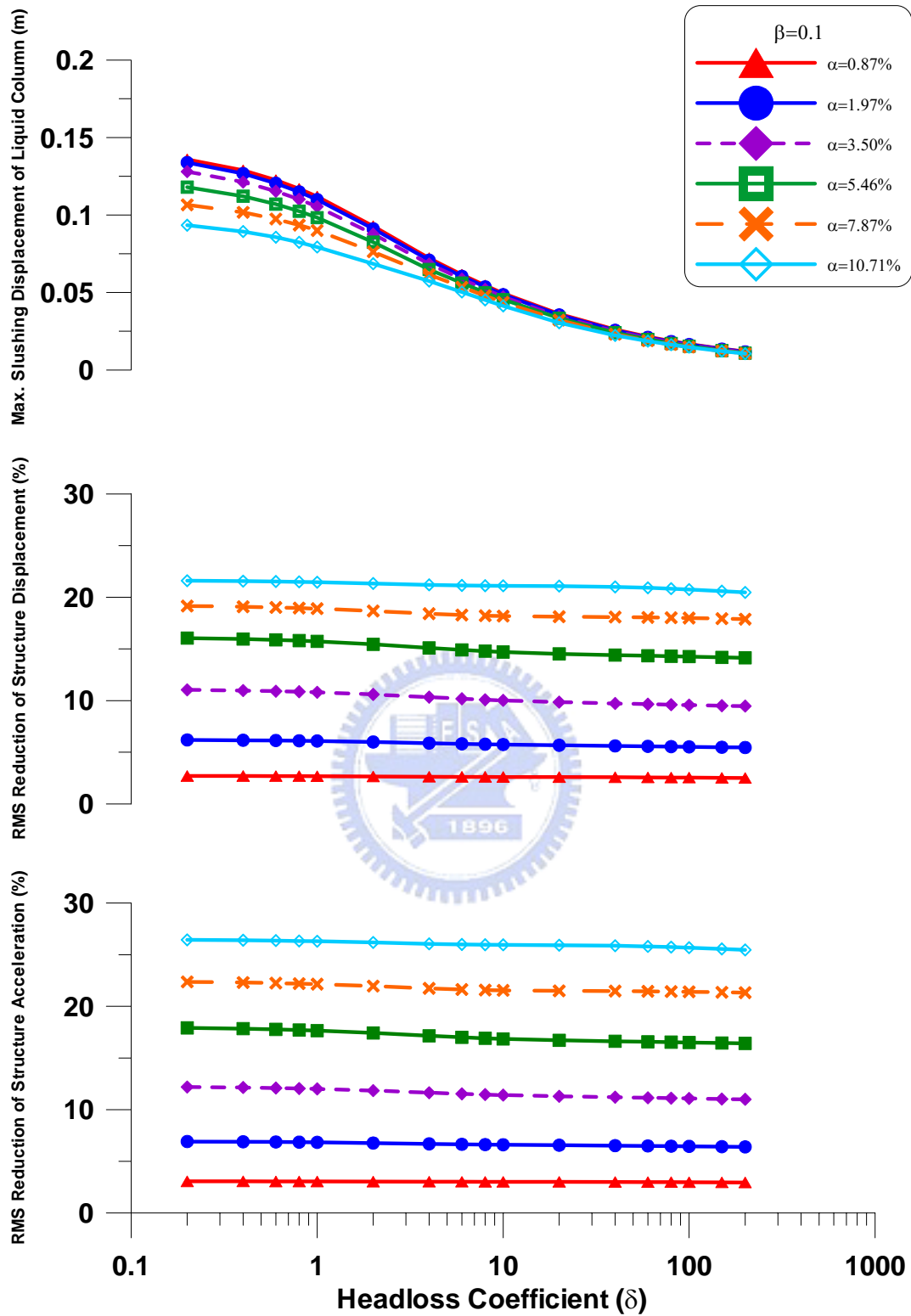


圖 2.33(a) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.1$)

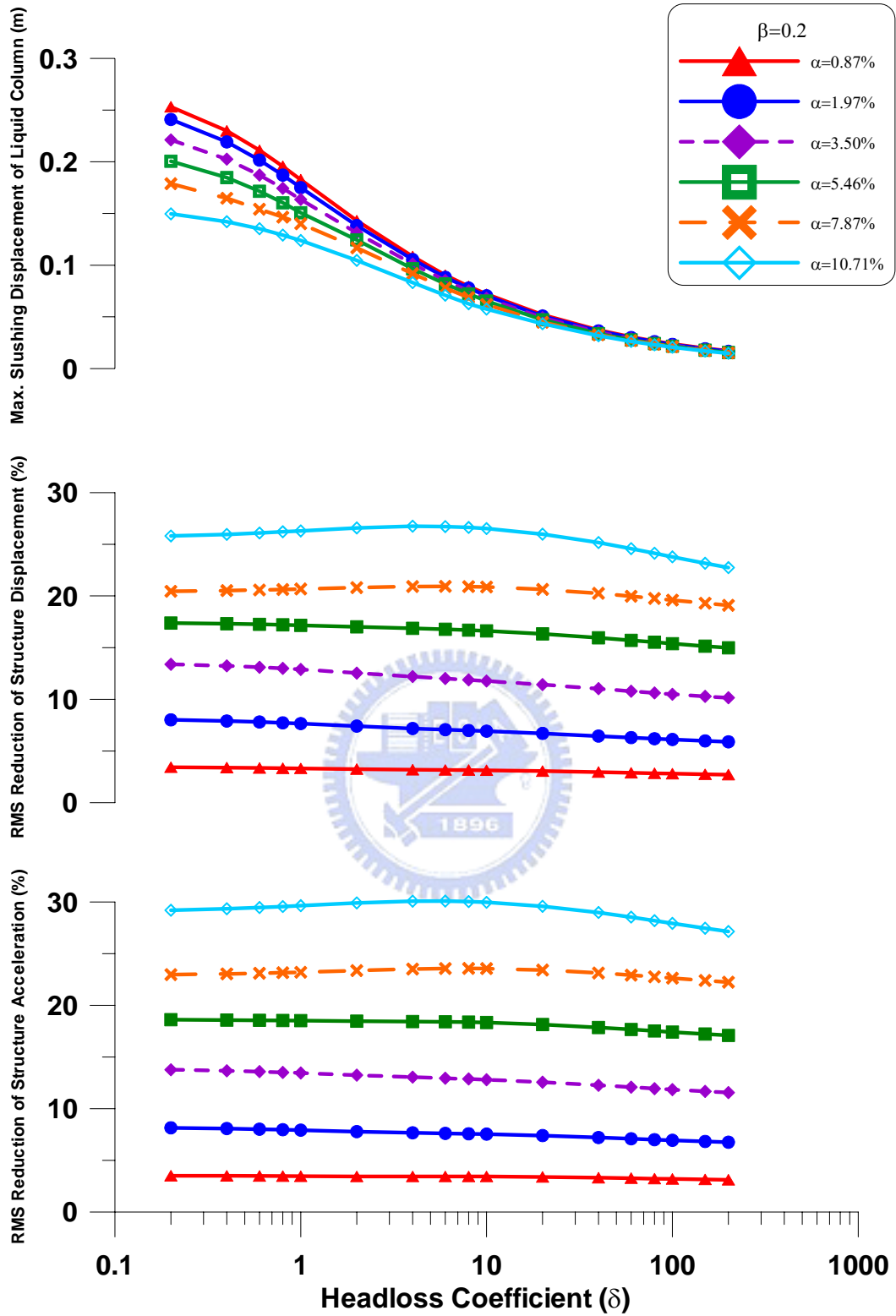


圖 2.33(b) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.2$)

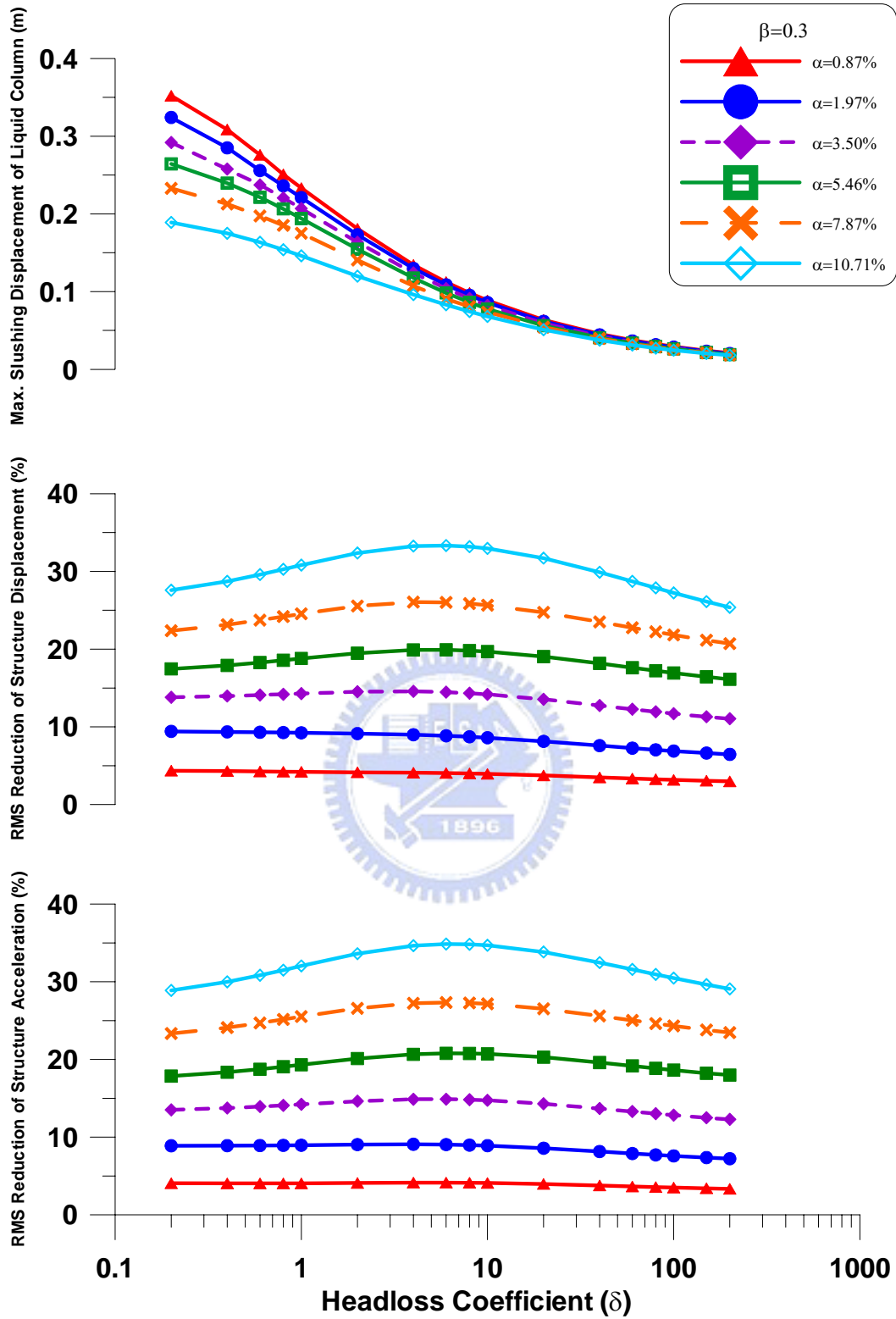


圖 2.33(c) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.3$)

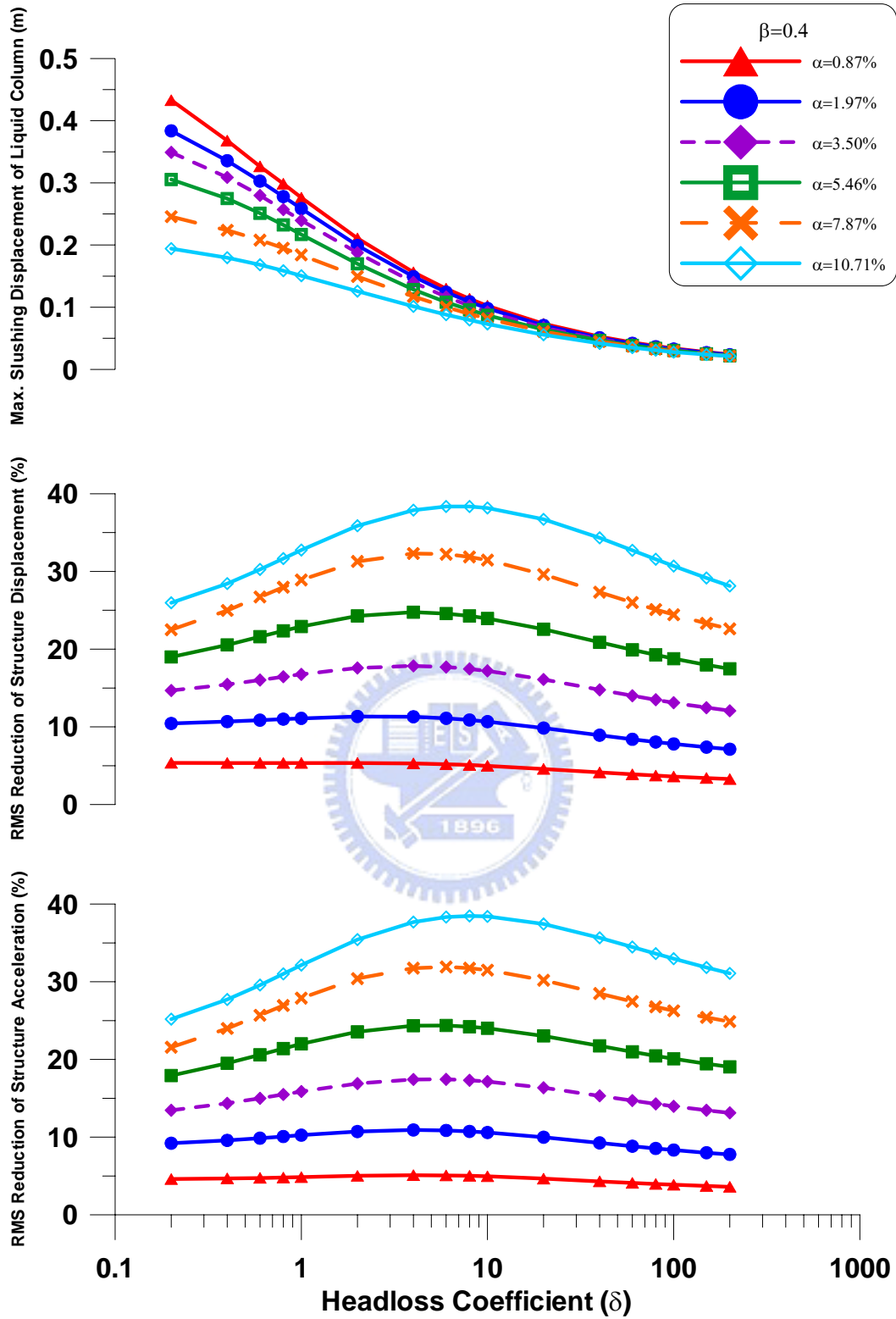


圖 2.33(d) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.4$)

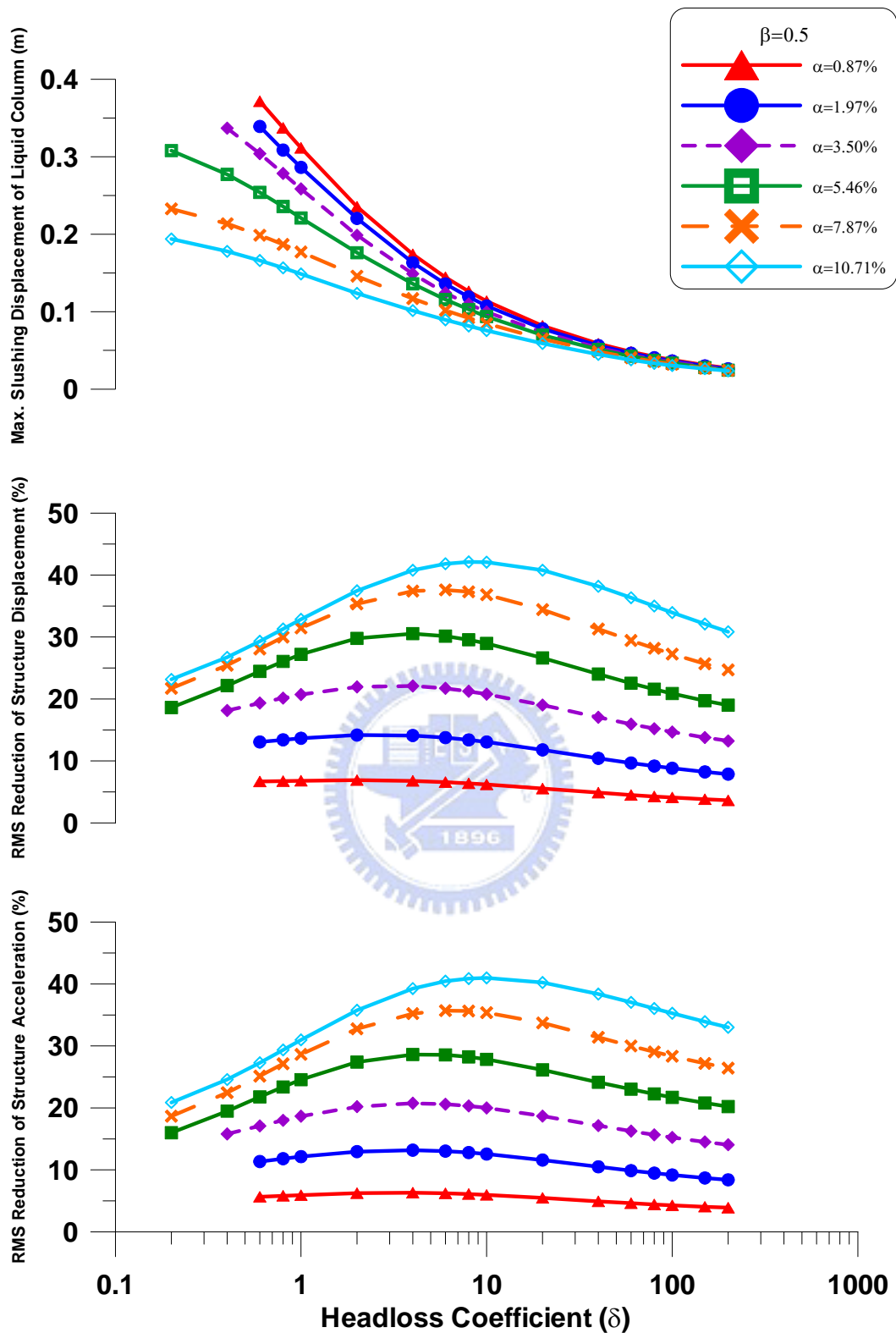


圖 2.33(e) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.5$)

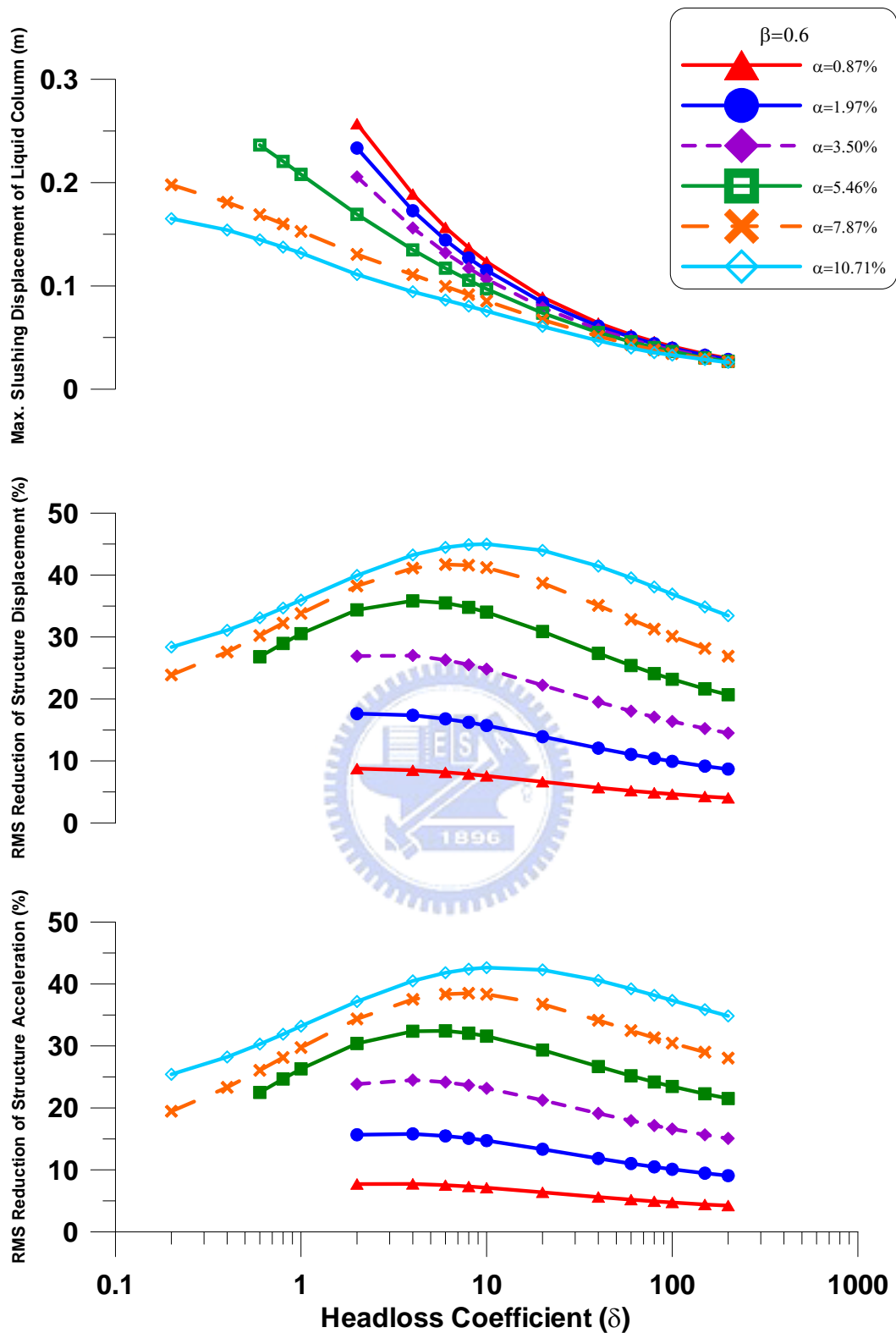


圖 2.33(f) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.6$)

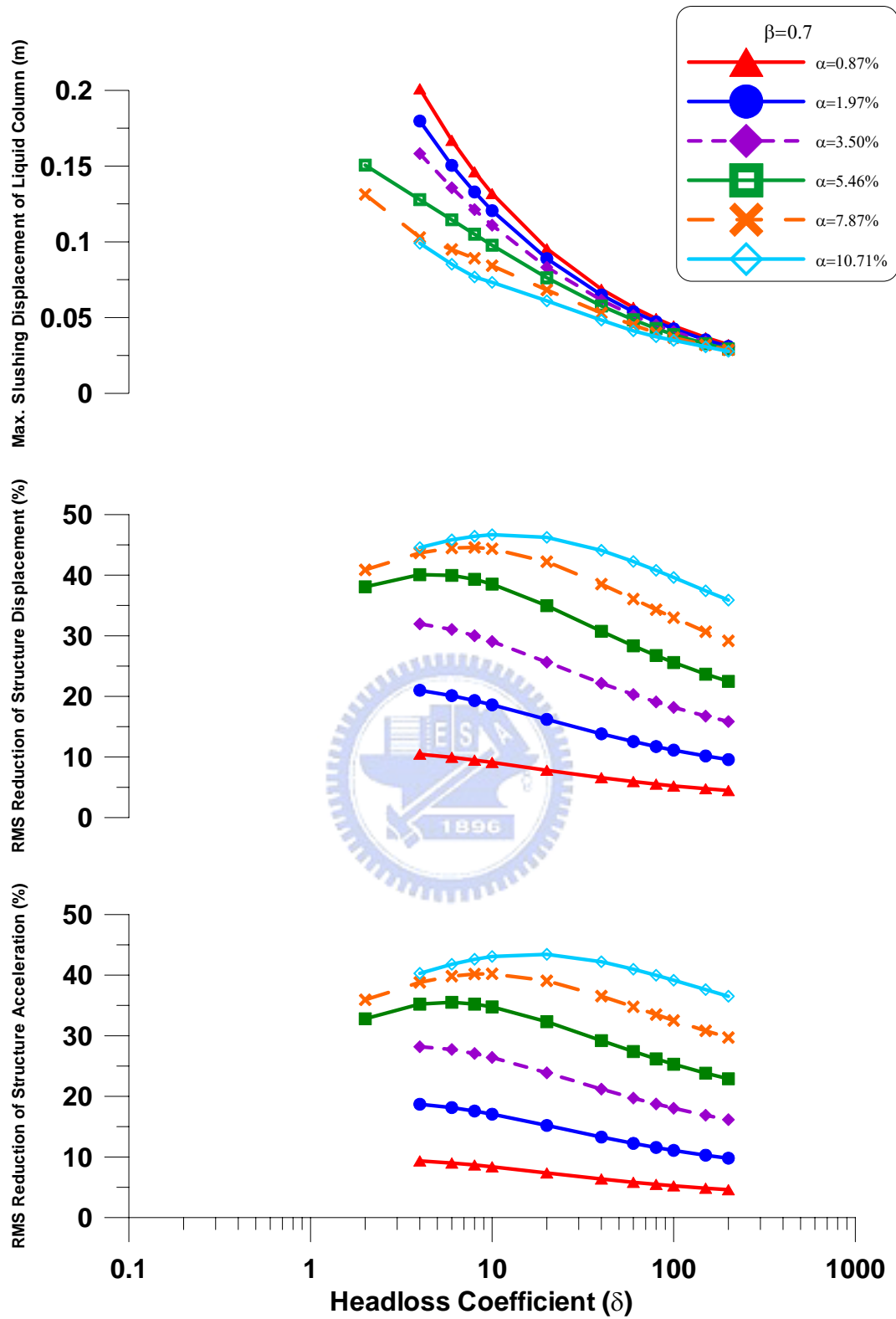


圖 2.33(g) 質量比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.7$)

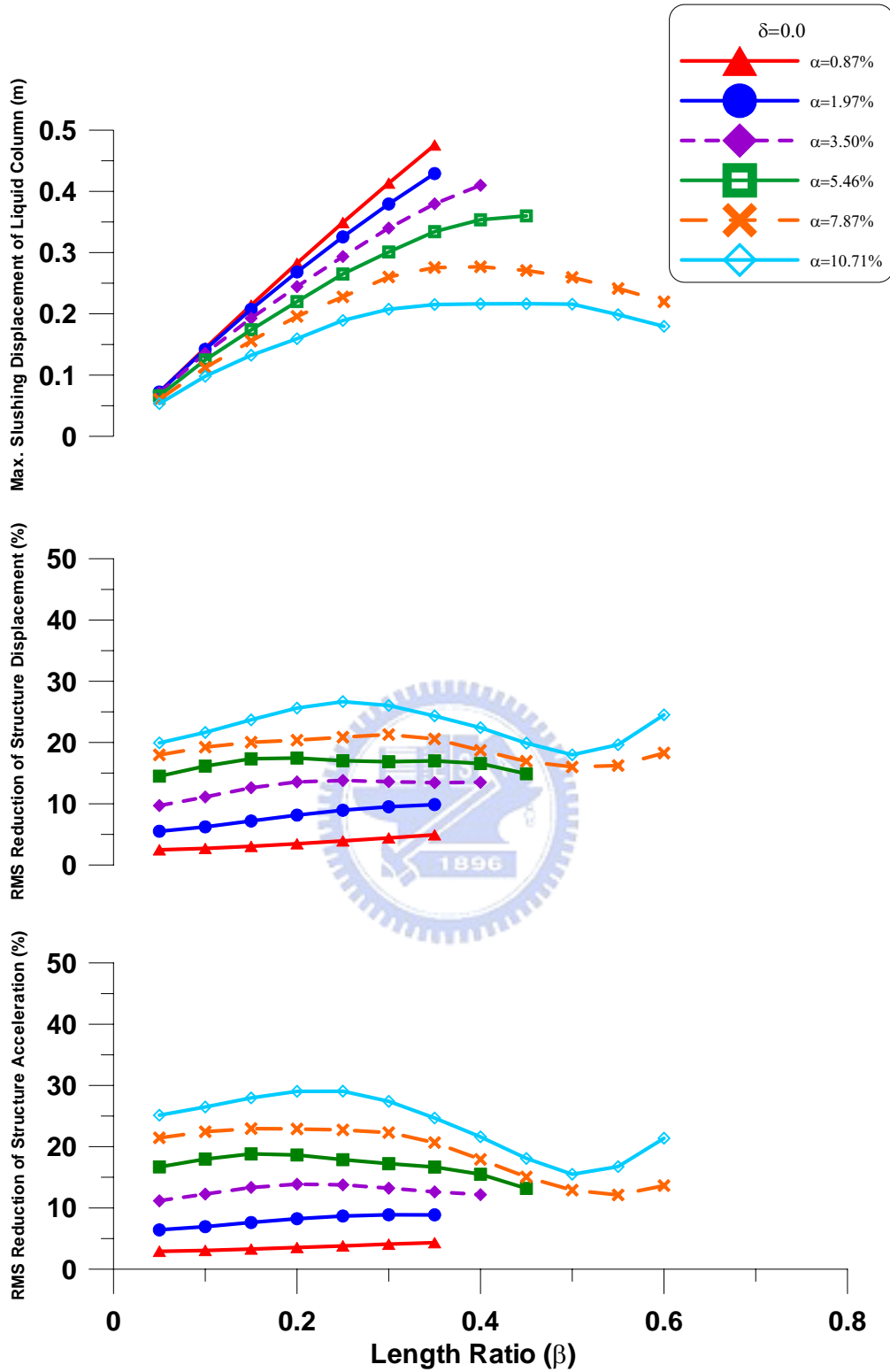


圖 2.34(a) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.0$)

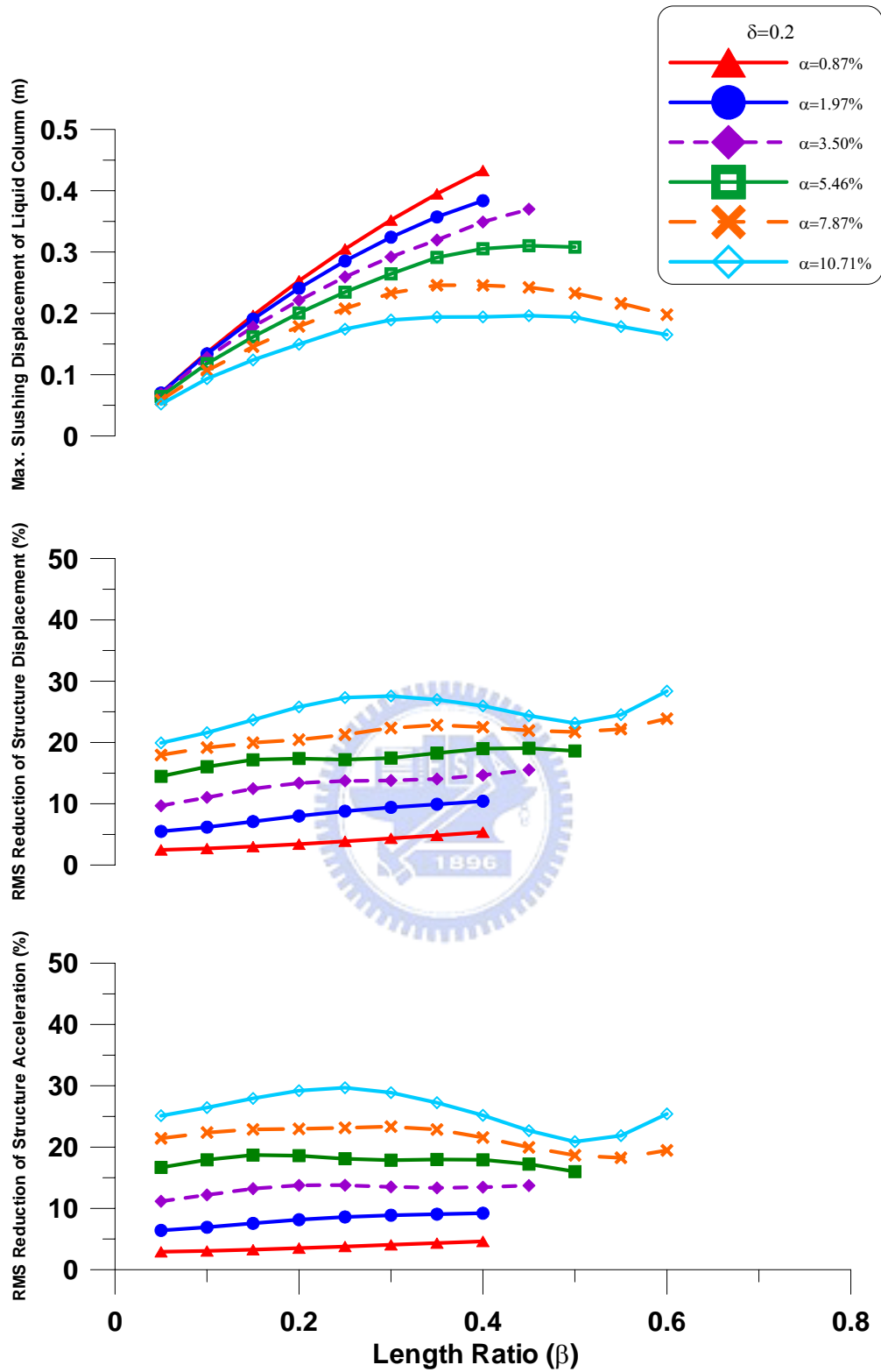


圖 2.34(b) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.2$)

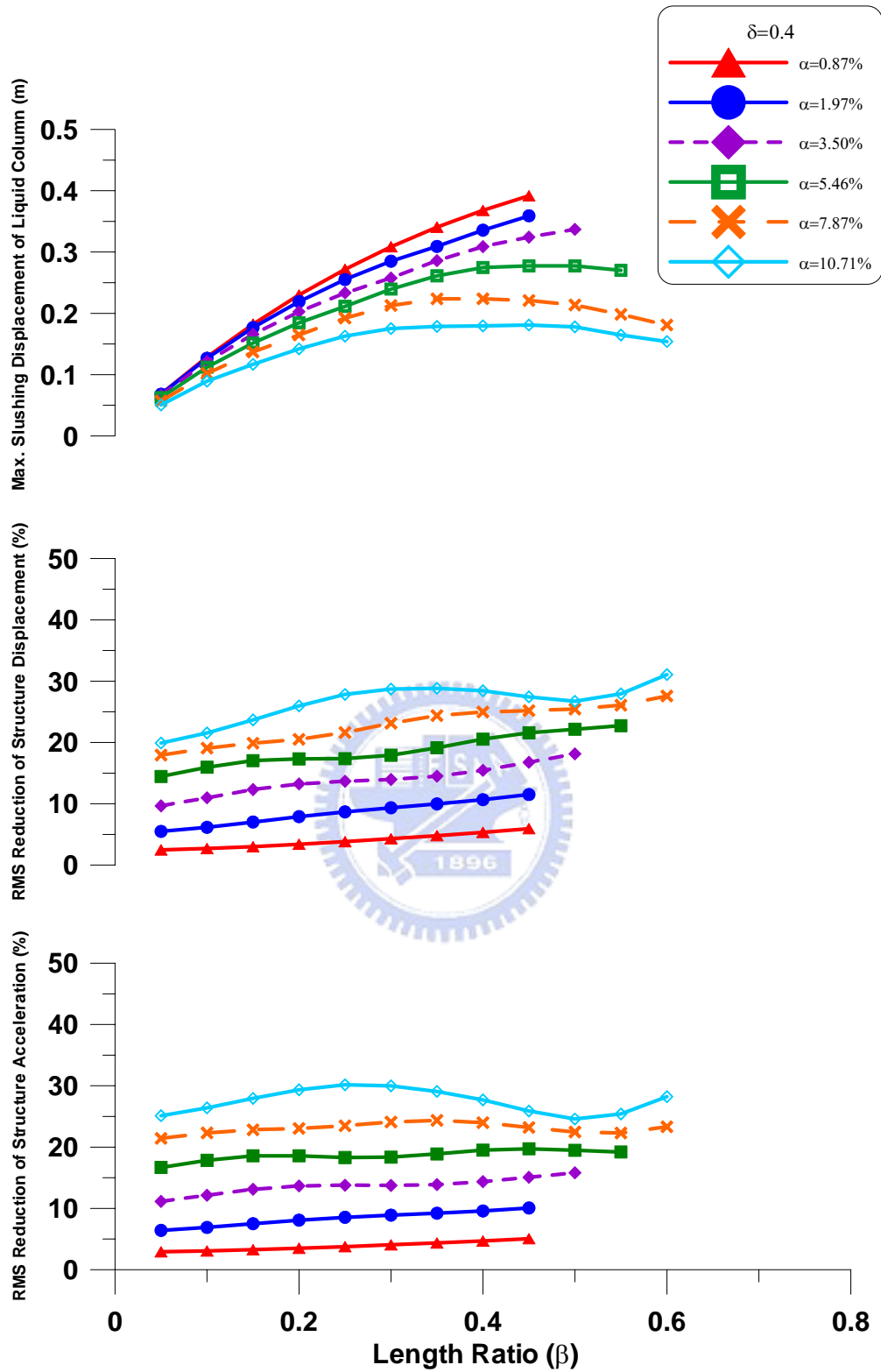


圖 2.34(c) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\delta = 0.4$)

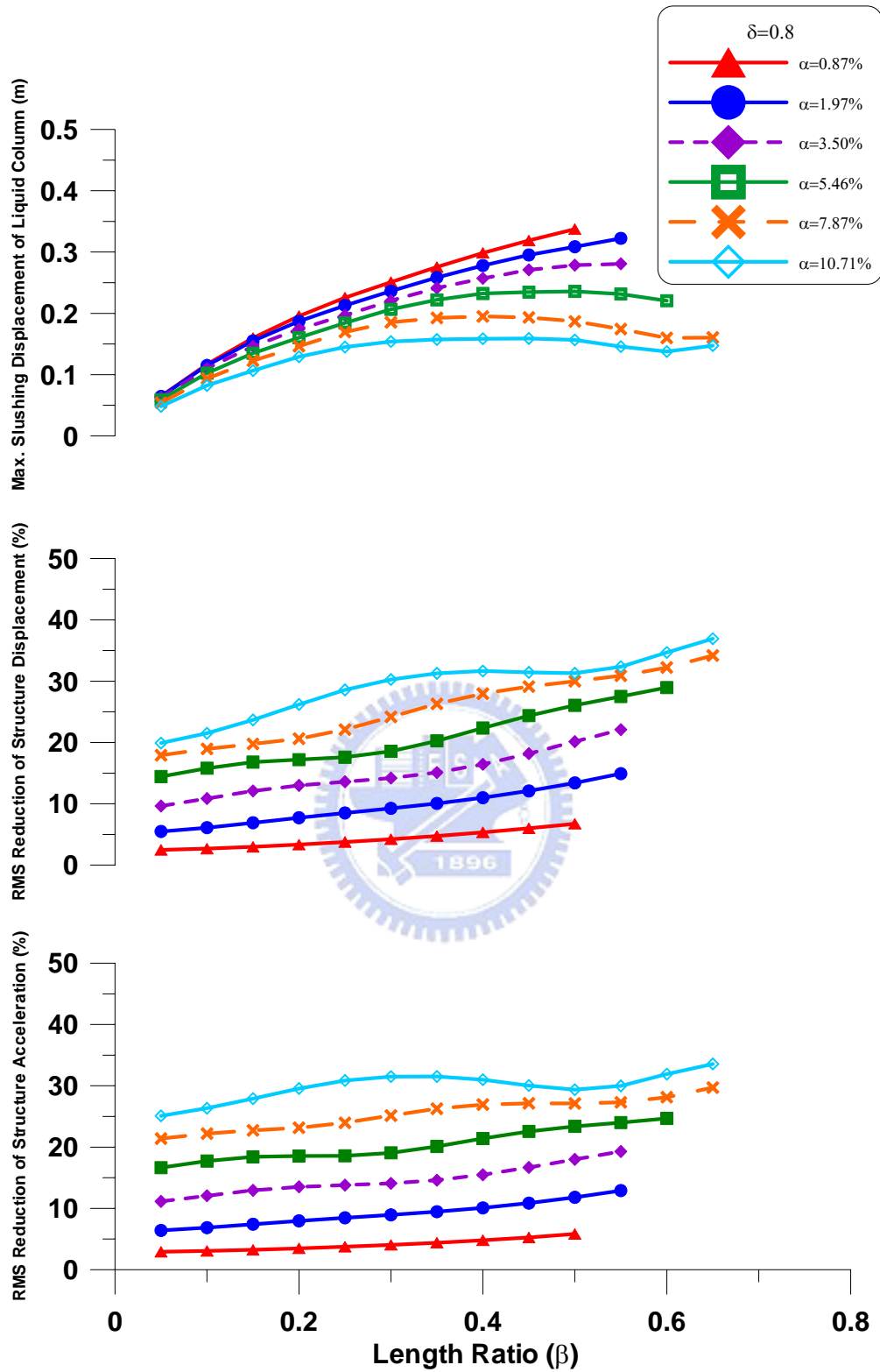


圖 2.34(d) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\delta=0.8$)

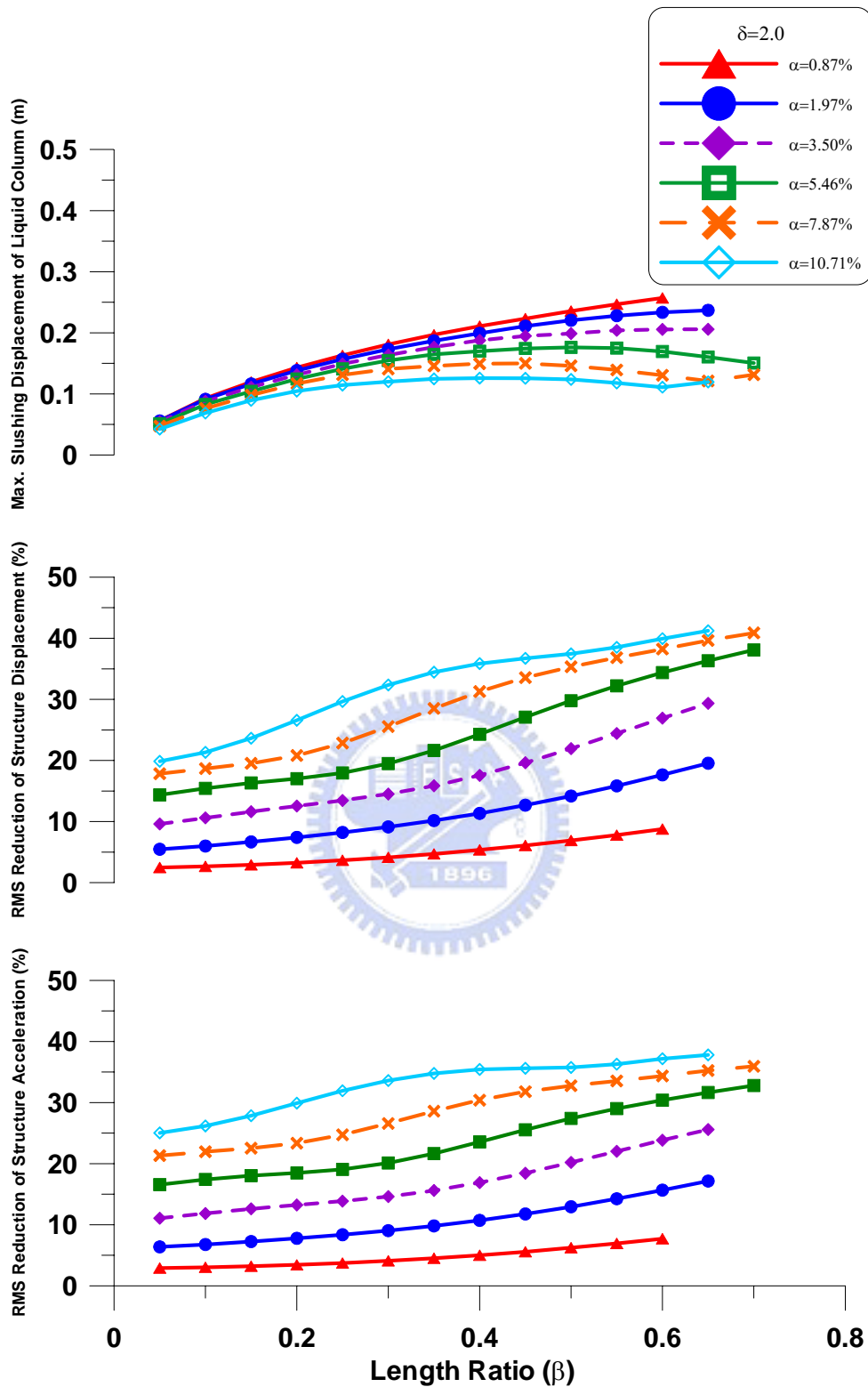


圖 2.34(e) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\delta=2$)

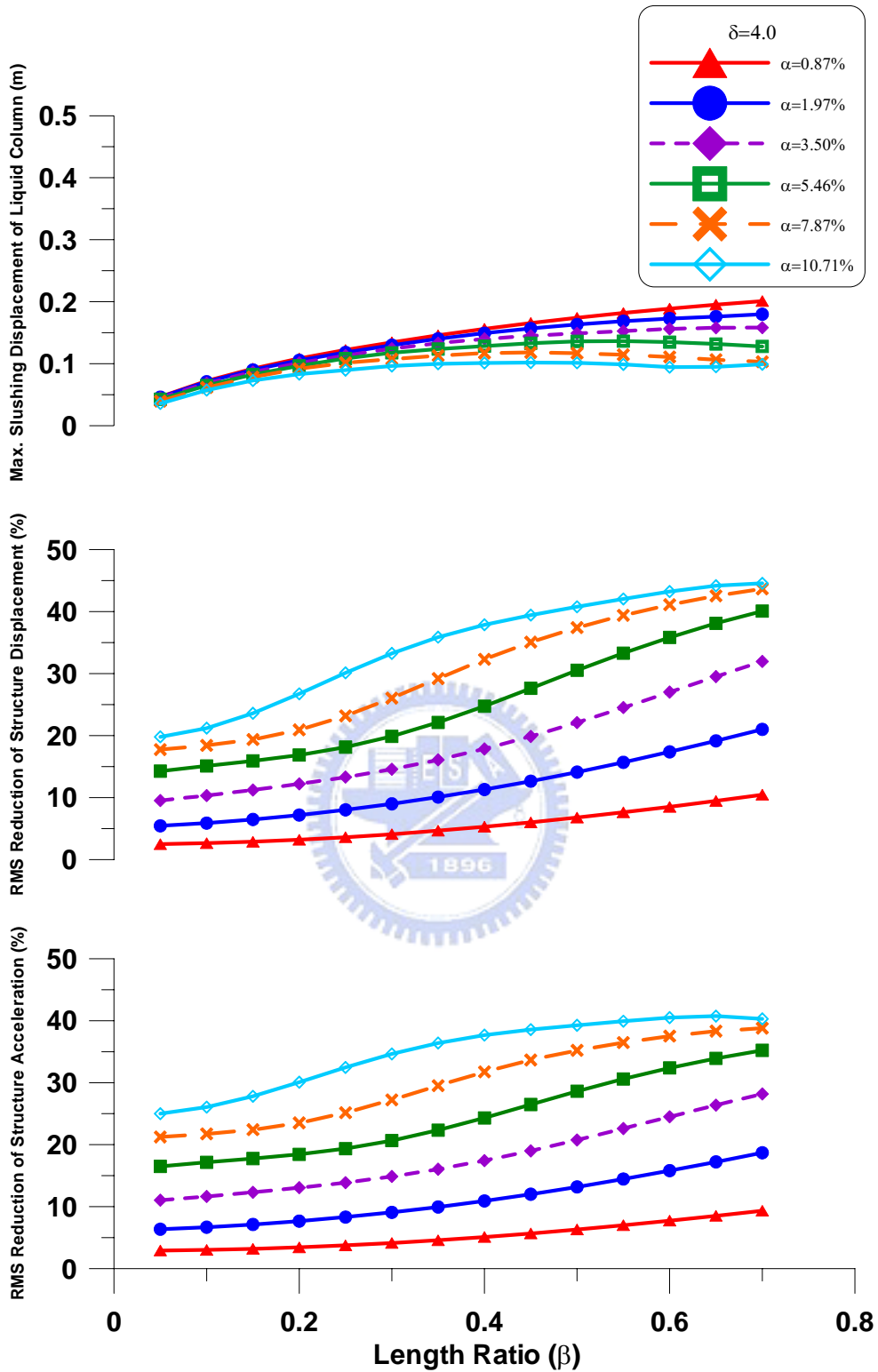


圖 2.34(f) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\delta=4$)

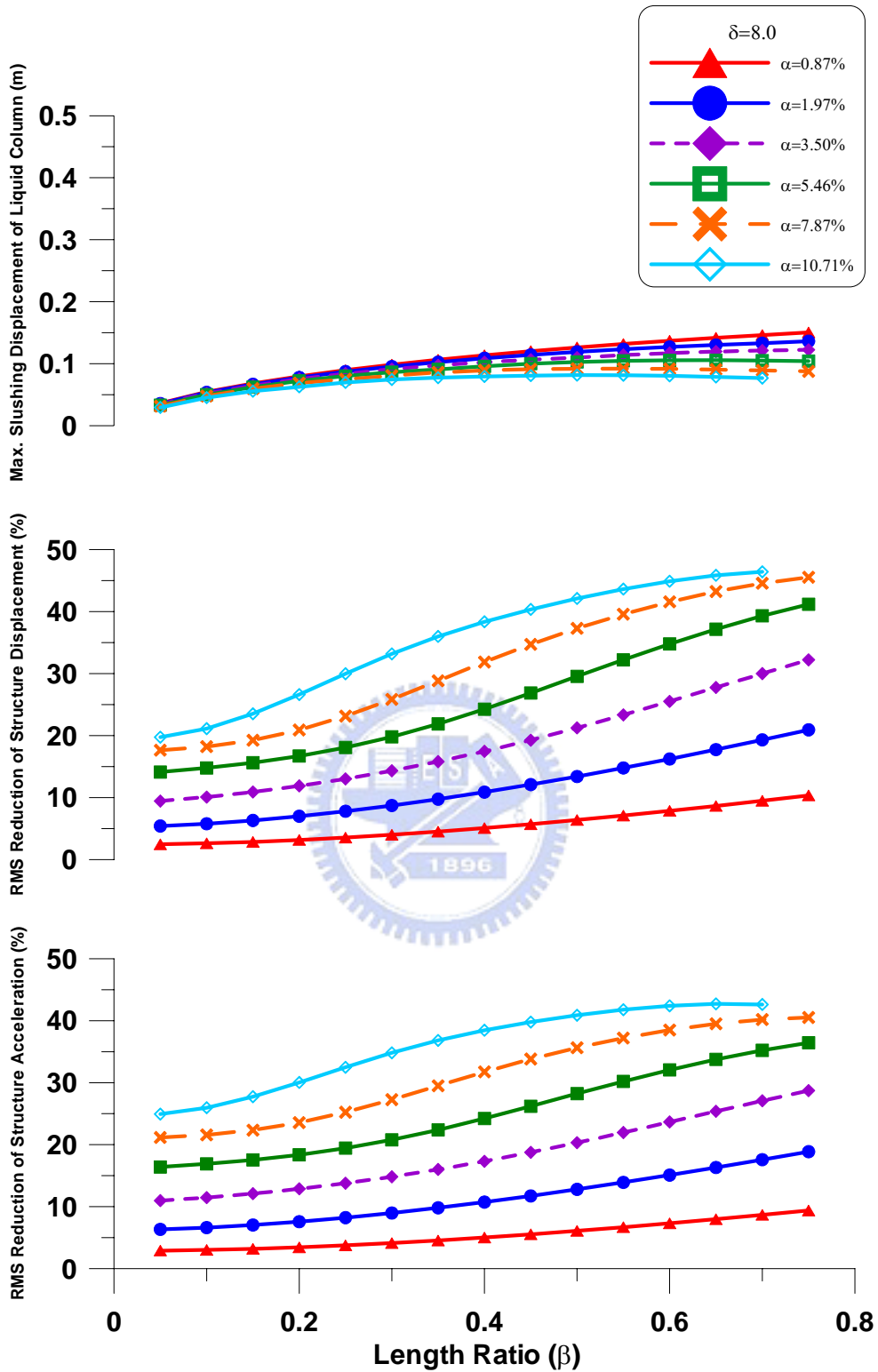


圖 2.34(g) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\delta=8$)

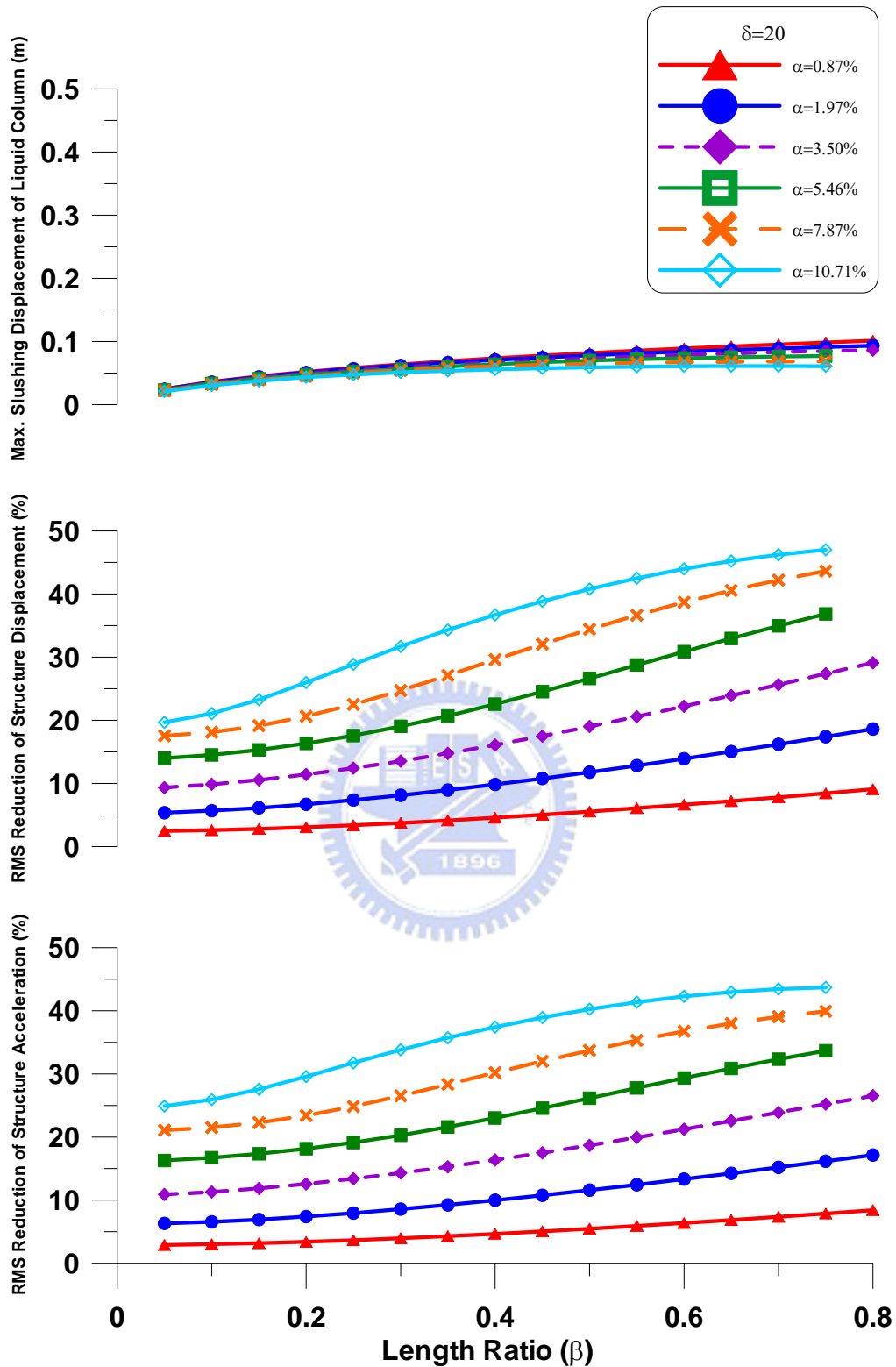


圖 2.34(h) 質量比與水平段長度比對於 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\delta=20$)

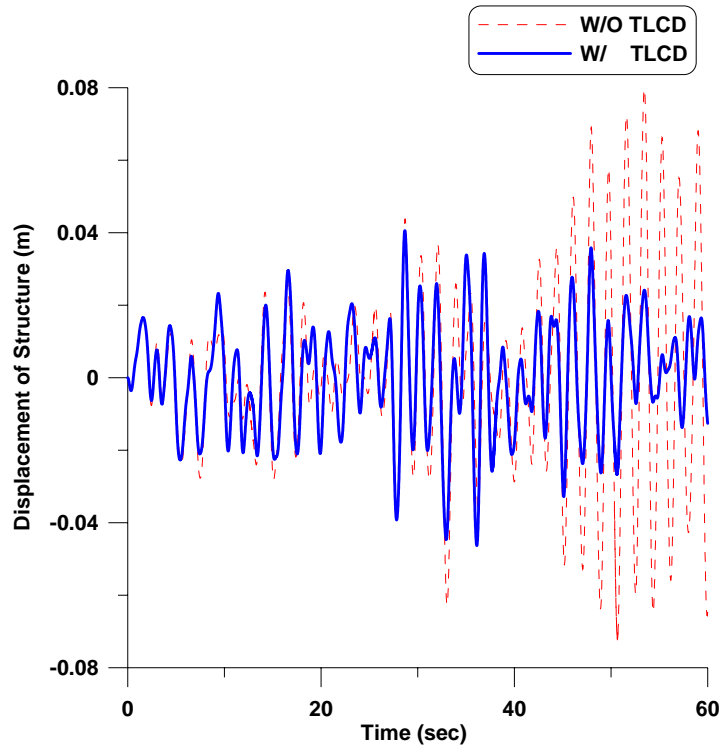


圖 2.35 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

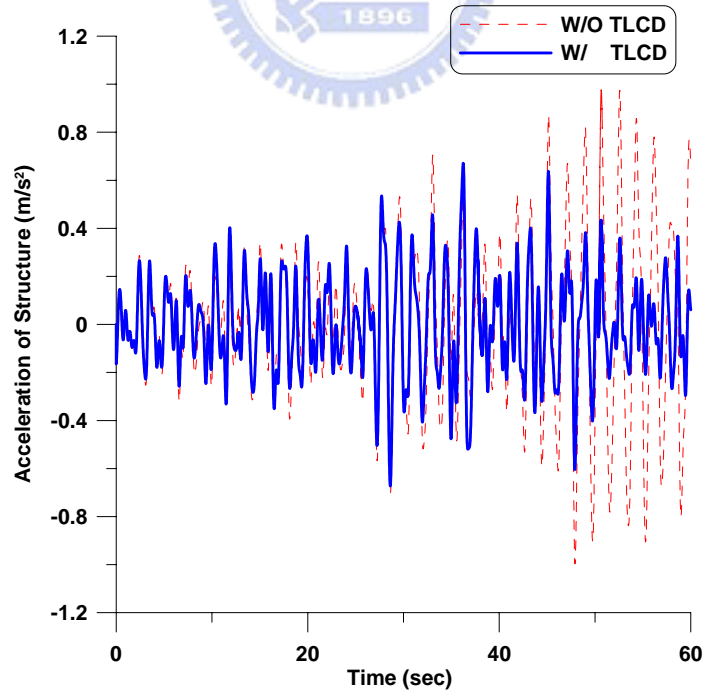


圖 2.36 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

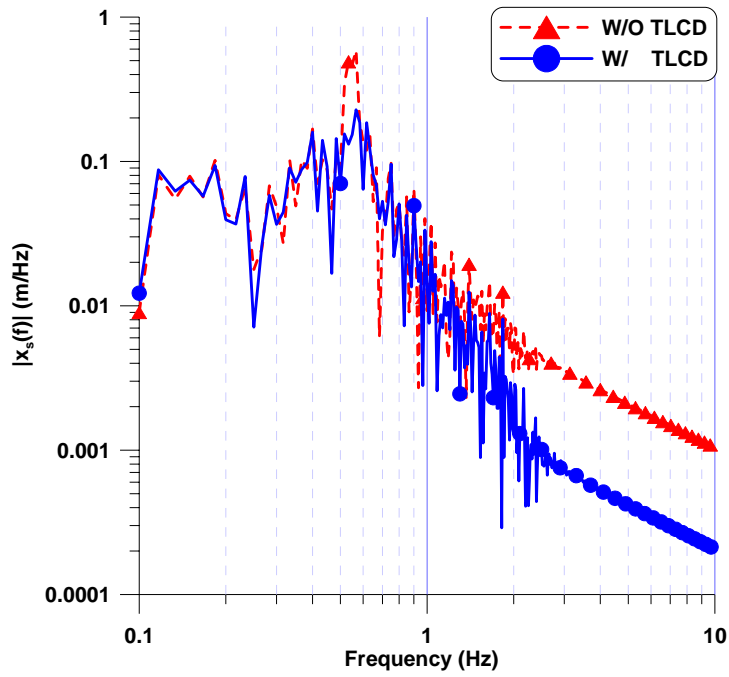


圖 2.37 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

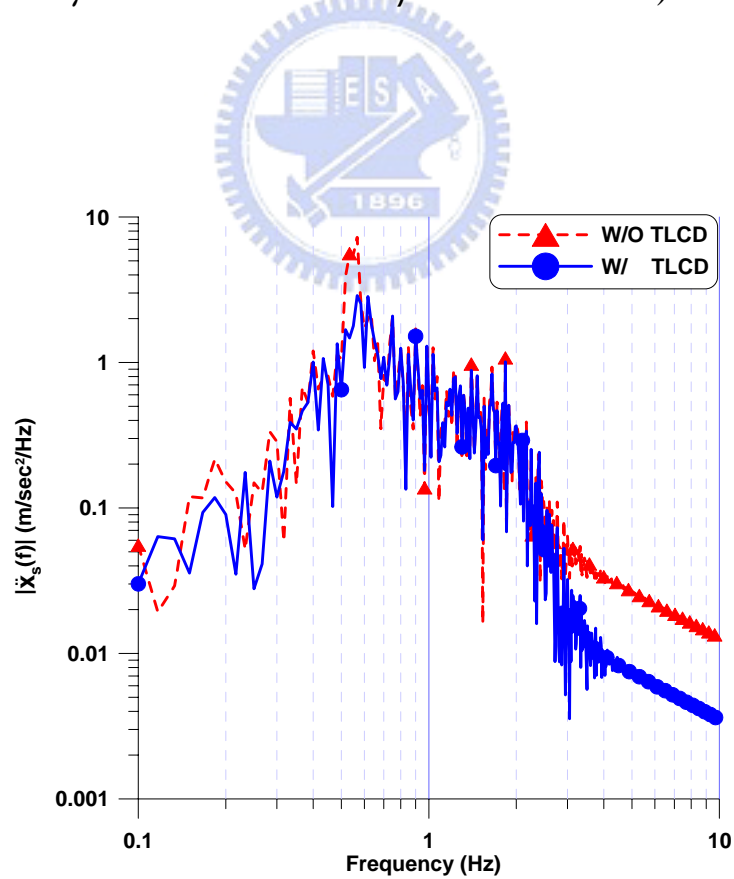


圖 2.38 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

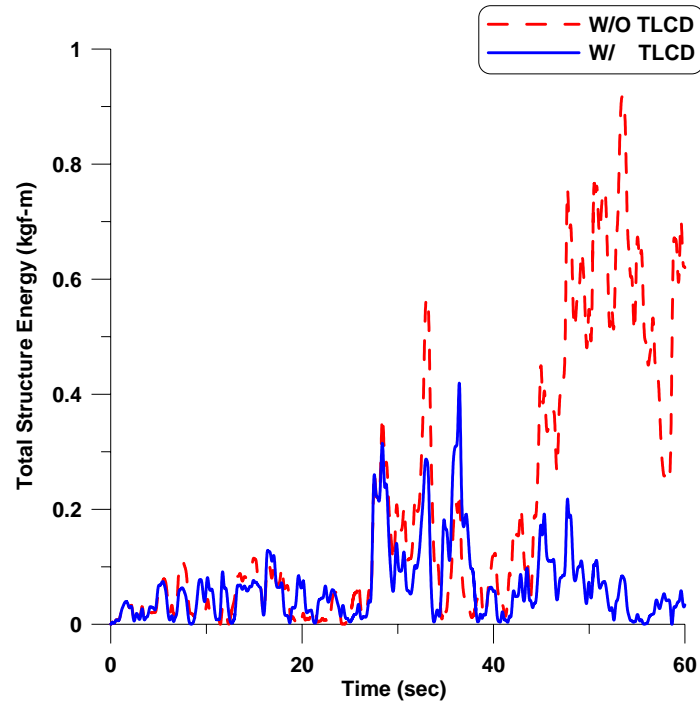


圖 2.39 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

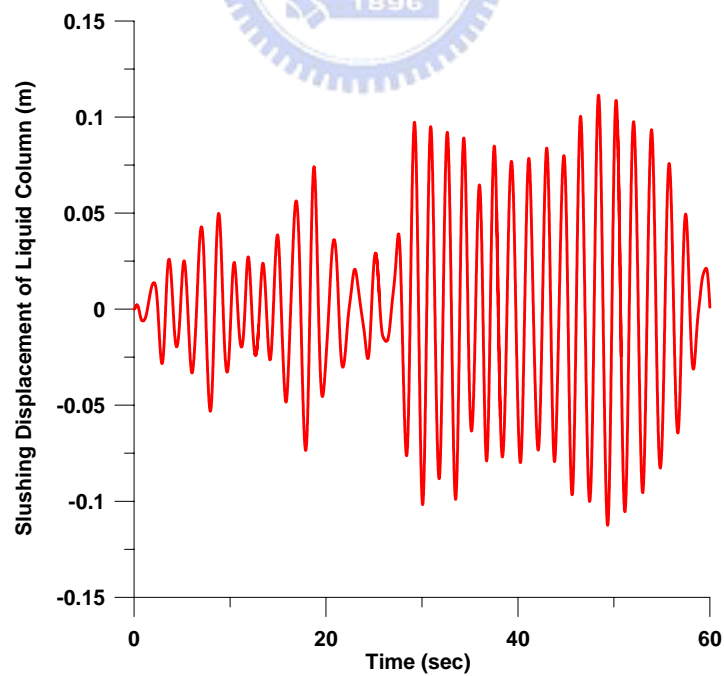


圖 2.40 TLCD 系統之水柱激盪位移歷時(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)

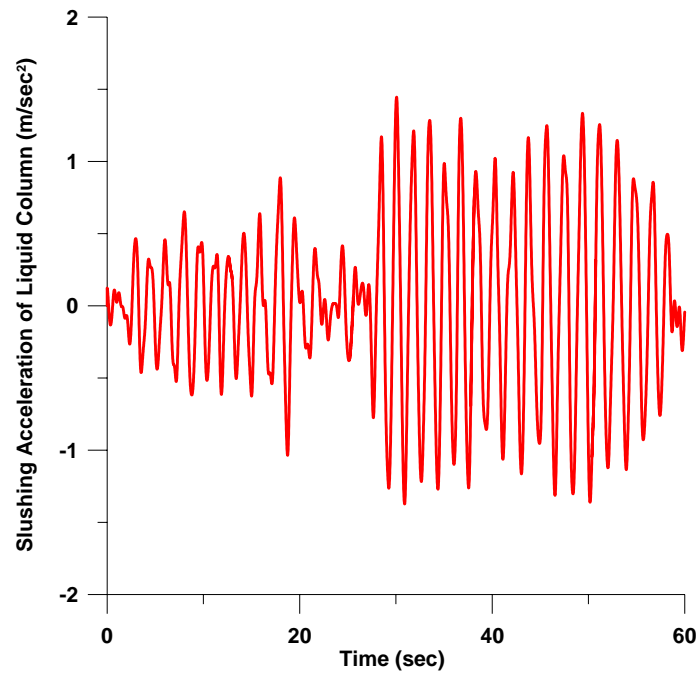


圖 2.41 TLCD 系統之水柱激盪加速度歷時(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.46\%$ ， $\beta = 0.75$ ， $\delta = 6$)



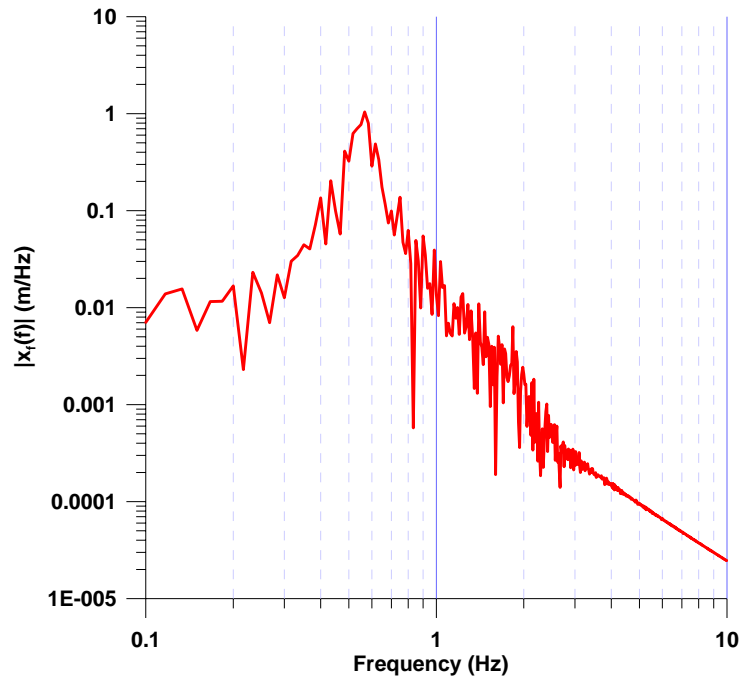


圖 2.42(a) TLCD 系統之水柱激盪位移富氏頻譜(隨機擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.46\%$ ， $\beta=0.75$ ， $\delta=6$)

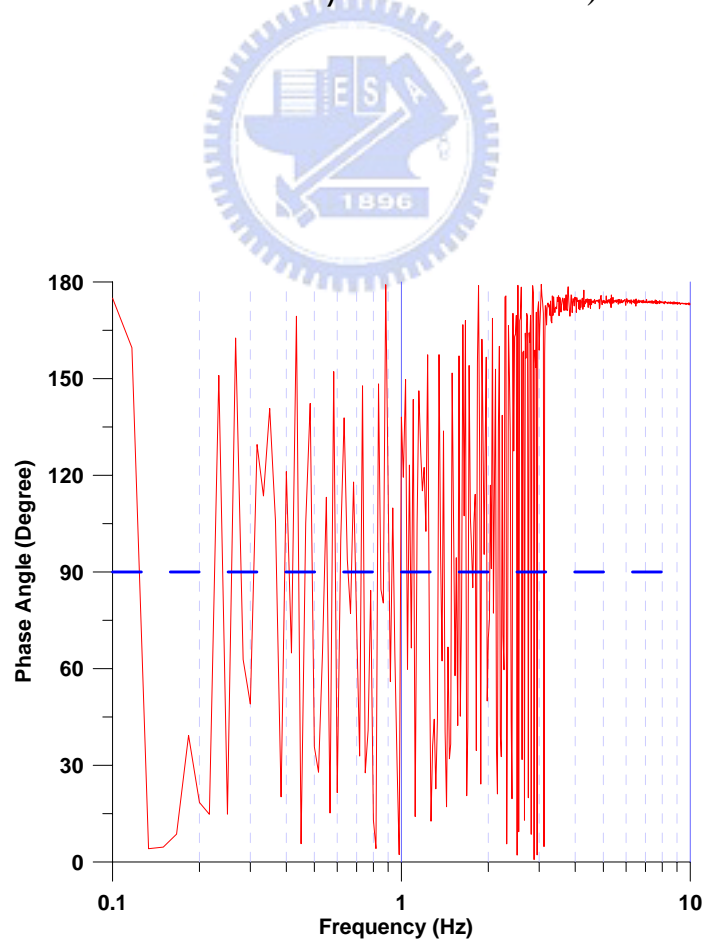


圖 2.42(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.46\%$ ， $\beta=0.75$ ， $\delta=6$)

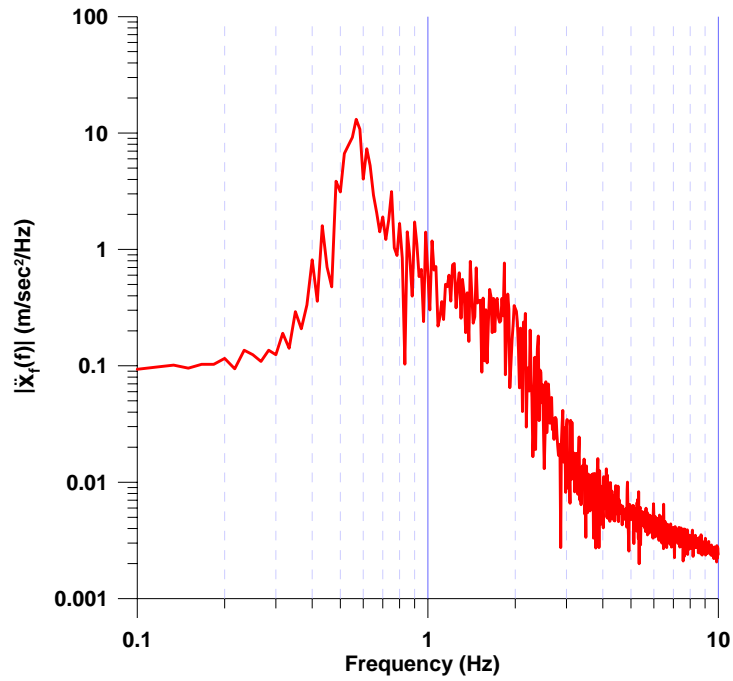


圖 2.43(a) TLCD 系統之水柱激盪加速度富氏頻譜(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)

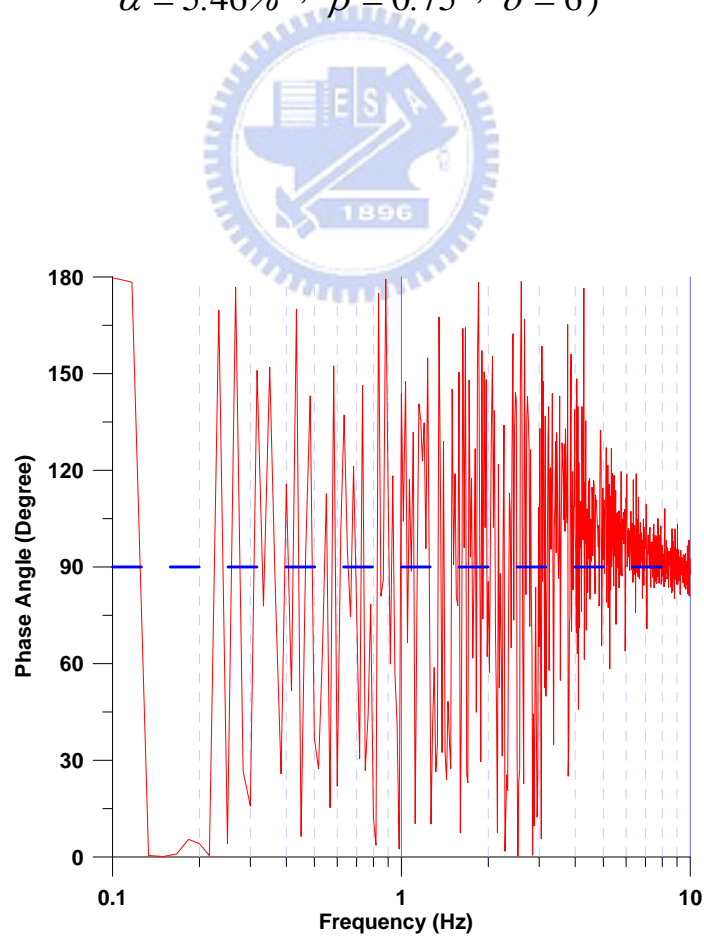


圖 2.43(b) TLCD 系統之水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$, $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)

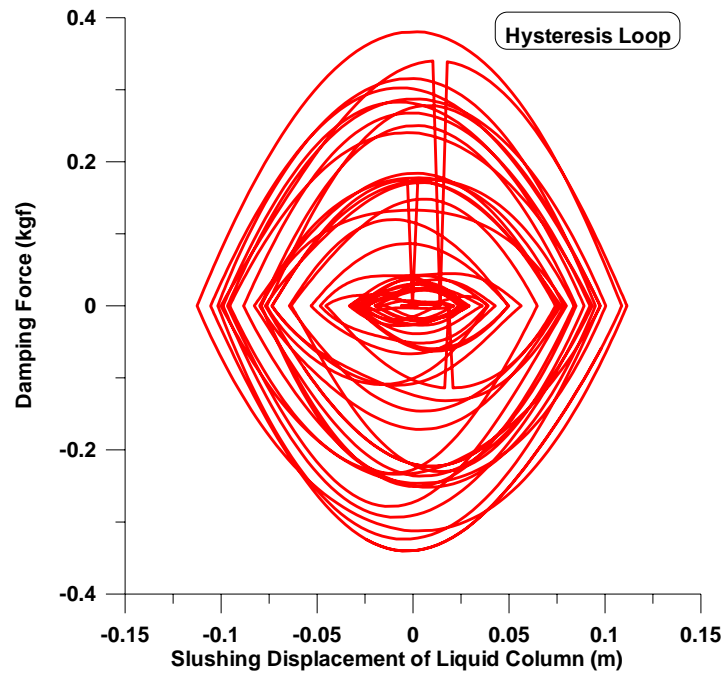


圖 2.44 TLCD 系統之遲滯迴圈(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.46\%$,
 $\beta = 0.75$, $\delta = 6$)

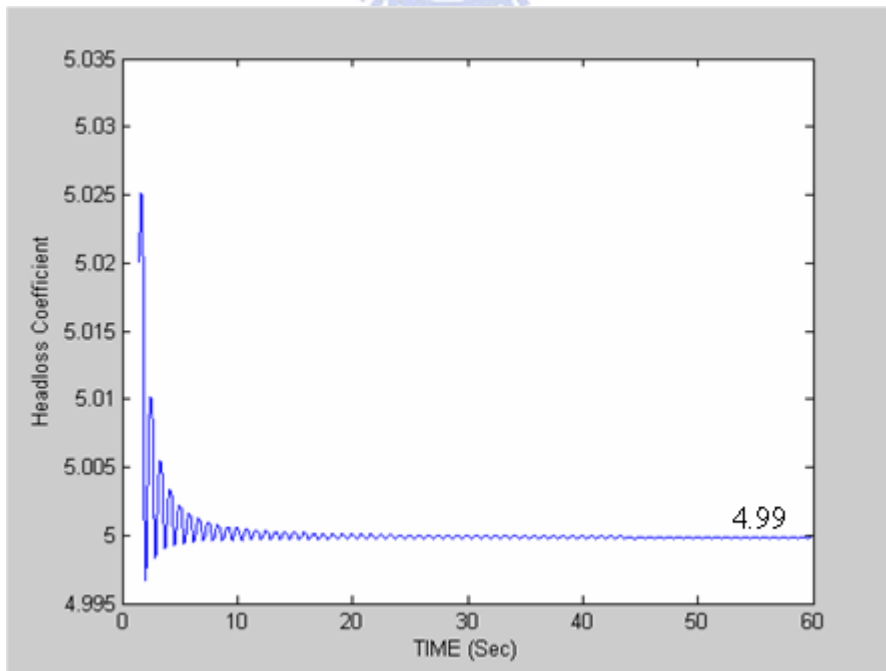


圖 2.45 系統識別所得之水頭損失係數歷時



圖 3.1 波高計(Wave1)

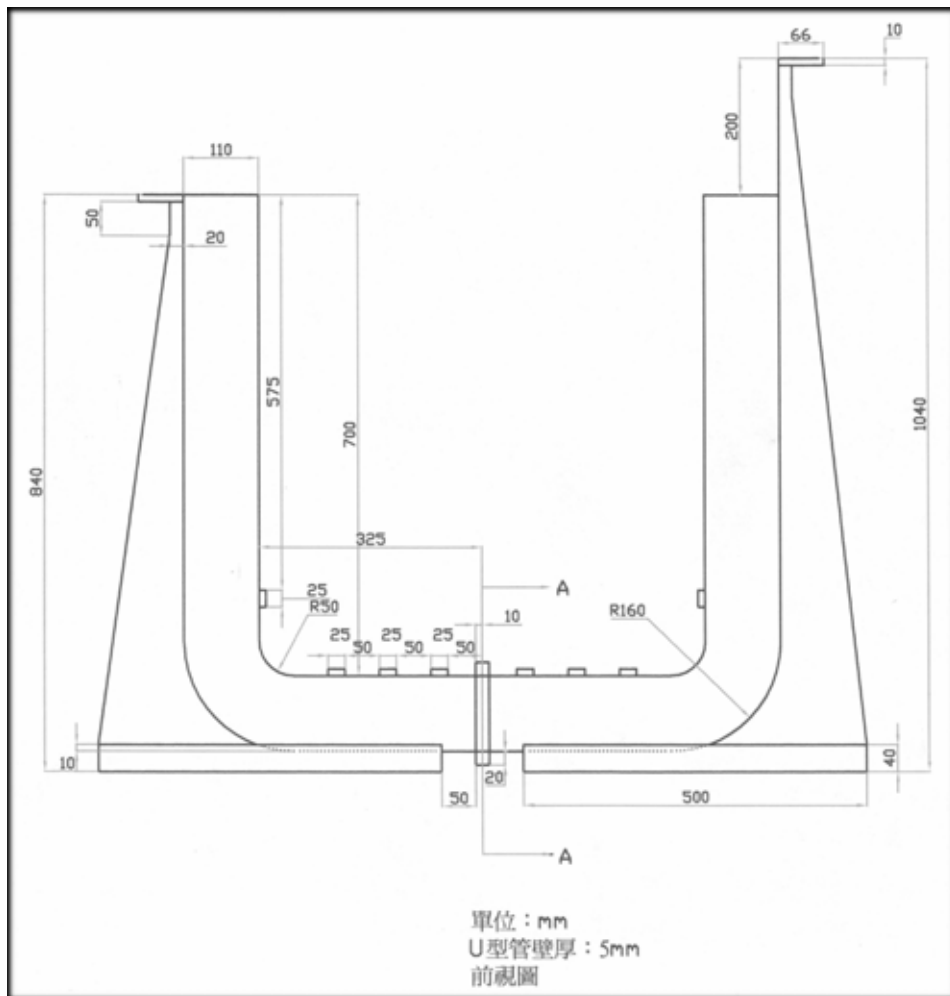


圖 3.2 TLC 模型設計前視圖

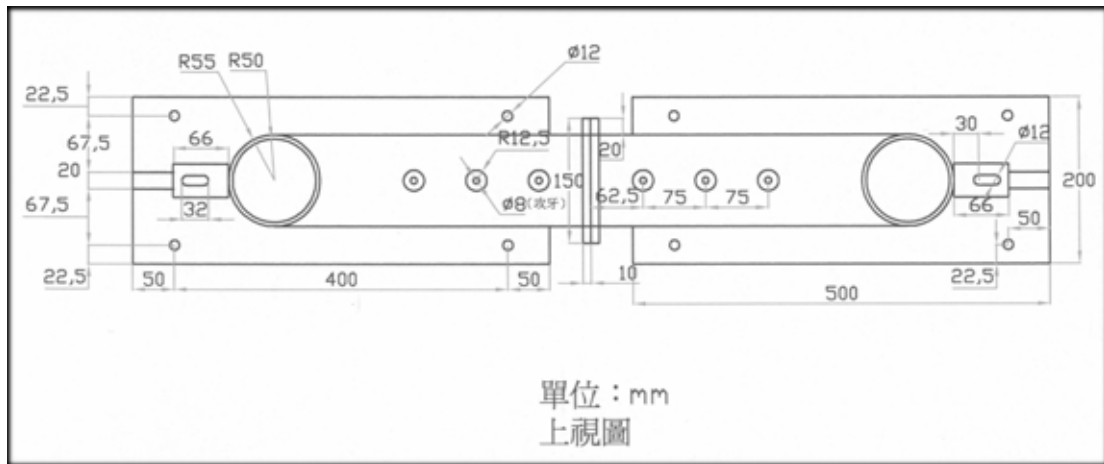


圖 3.3 TLCD 模型設計上視圖

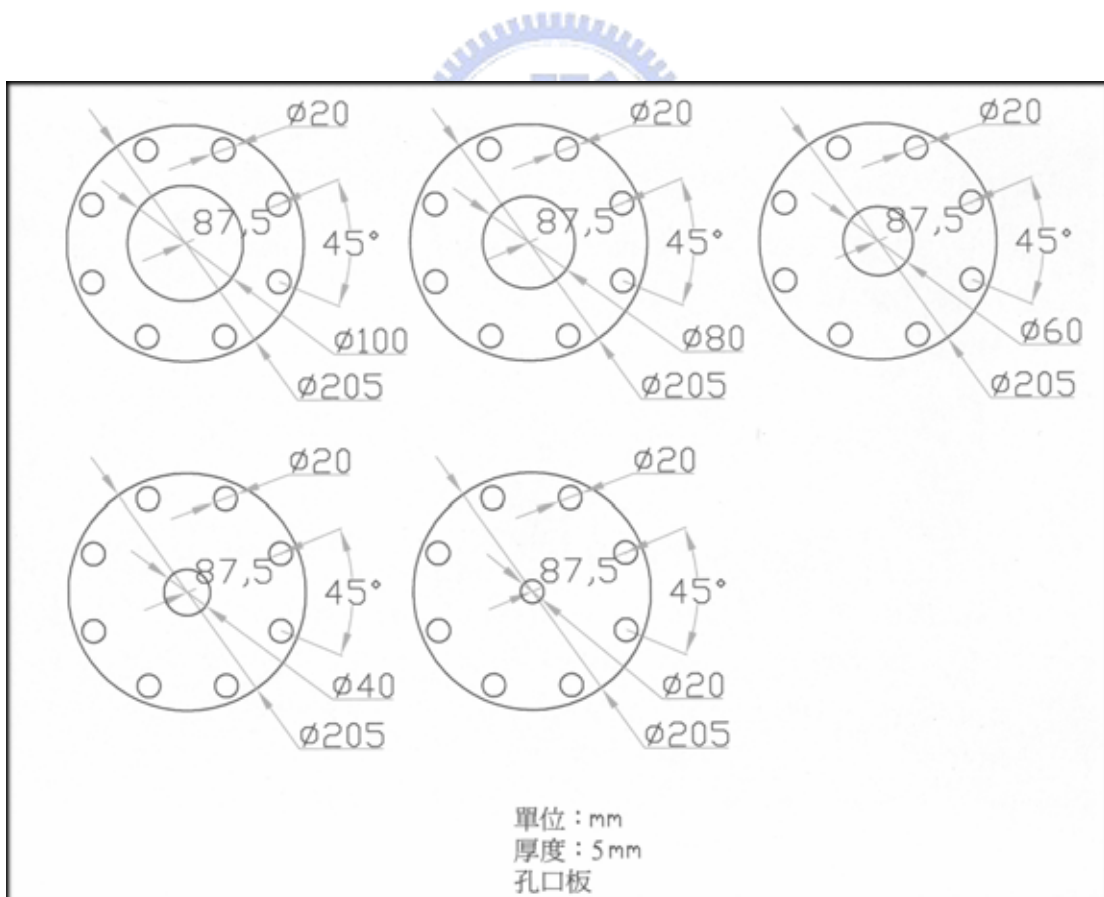


圖 3.4 孔口板設計圖

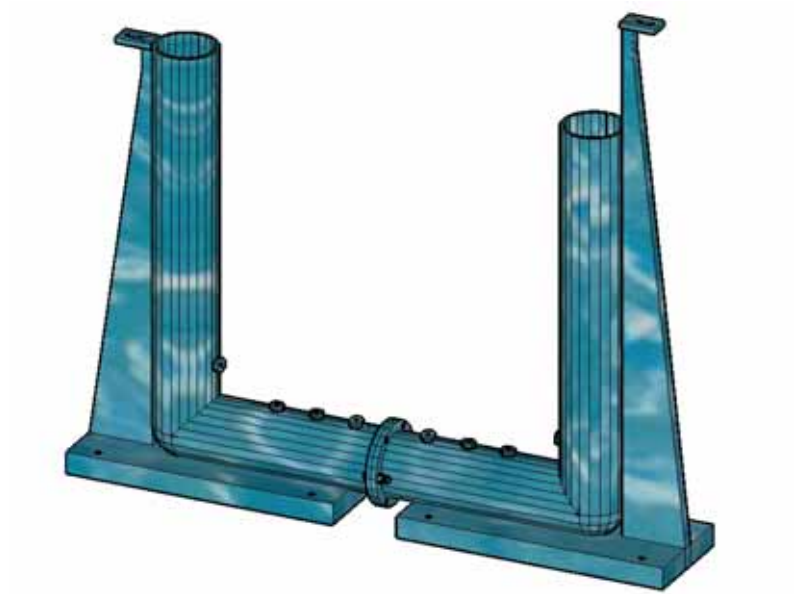


圖 3.5 TLCD 3D 模型示意圖



圖 3.6 TLCD 實體圖

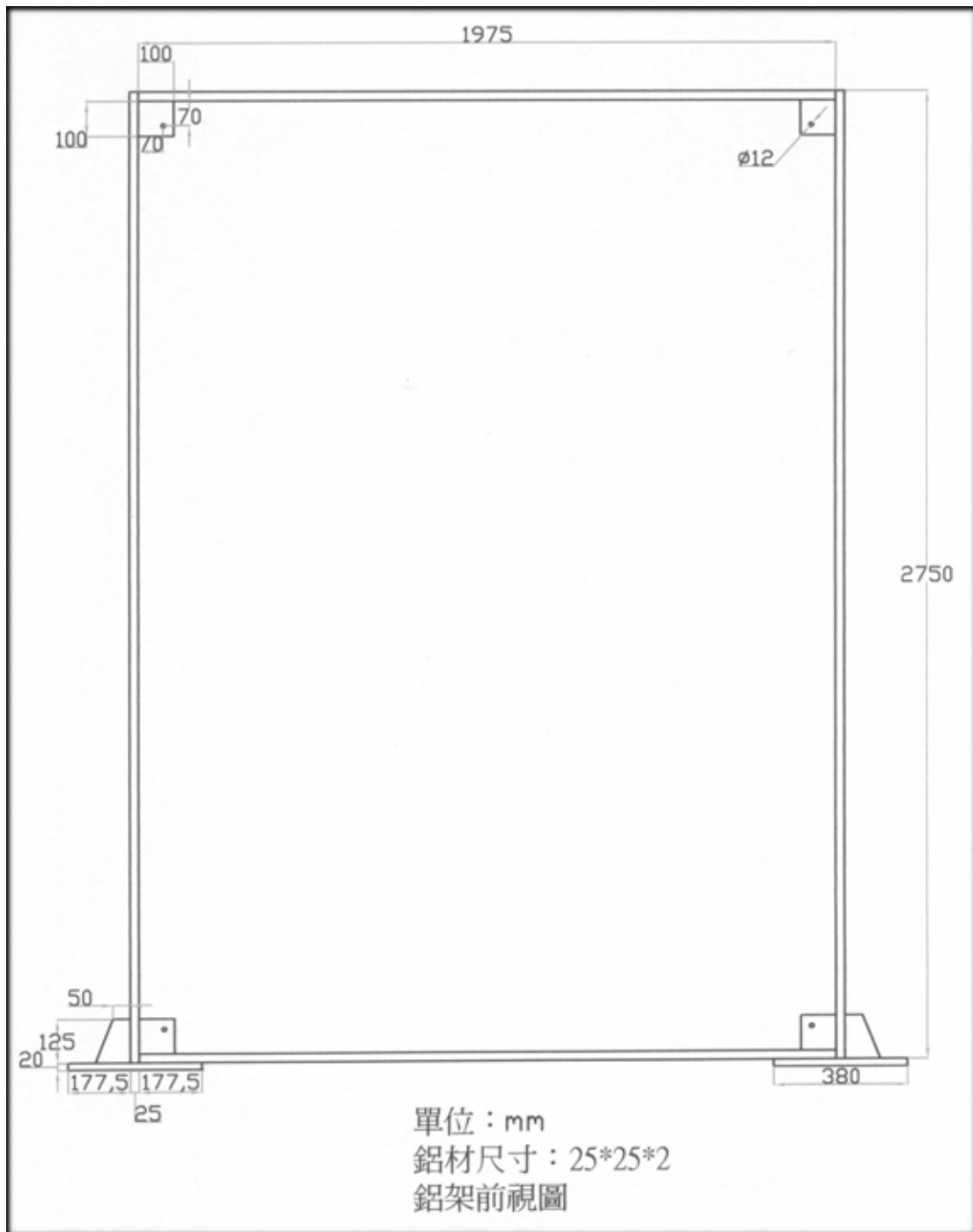


圖 3.7 鋁架模型前視圖

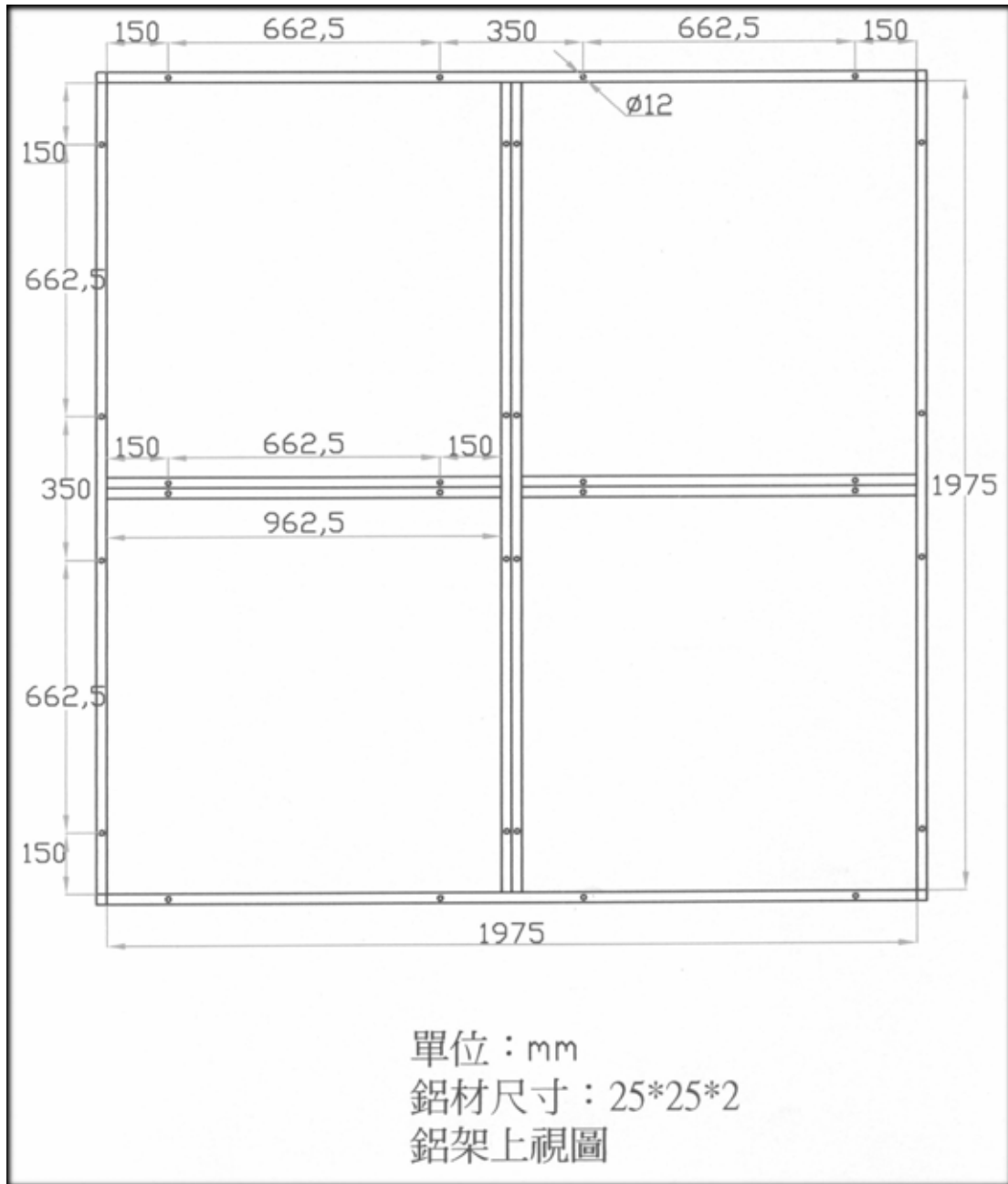


圖 3.8 鋁架模型上視圖

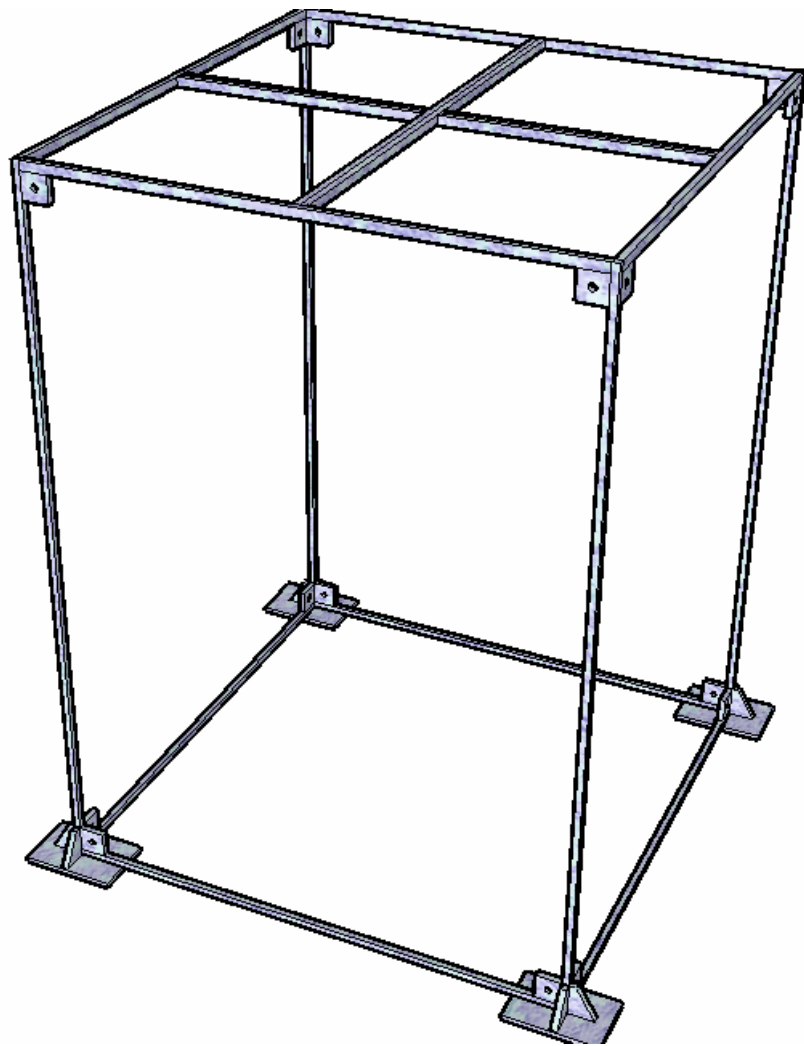


圖 3.9 鋁架 3D 模型示意圖

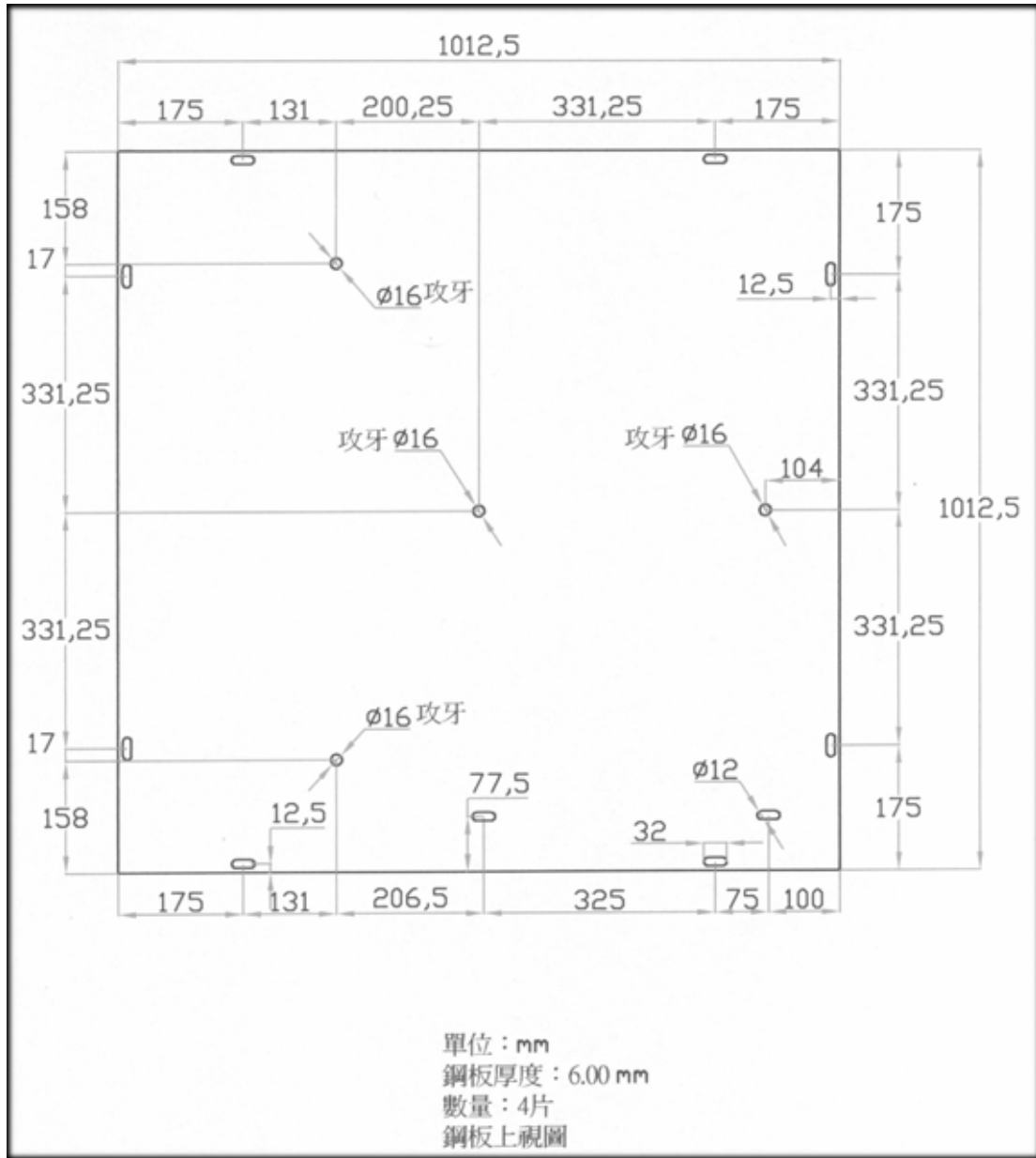
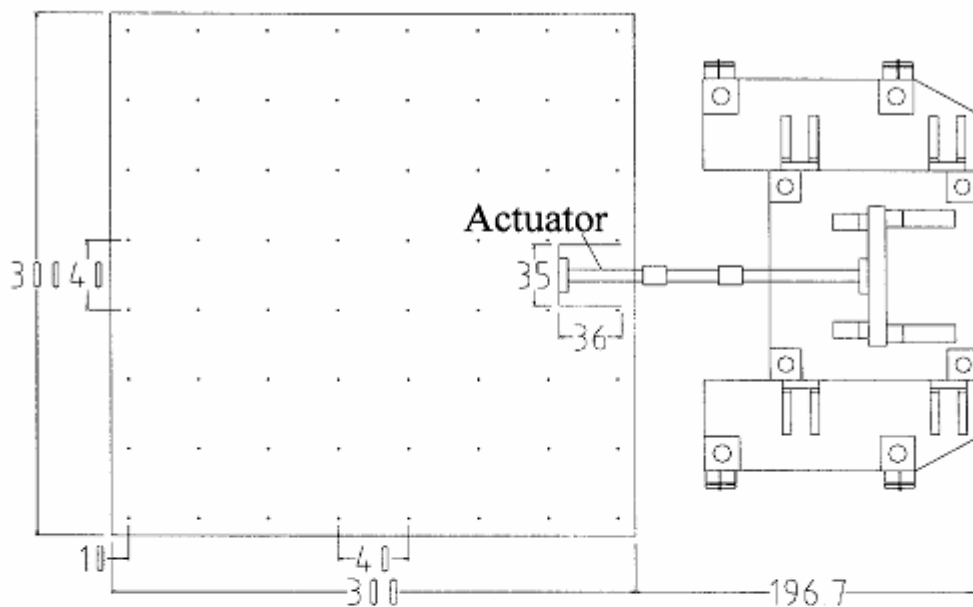
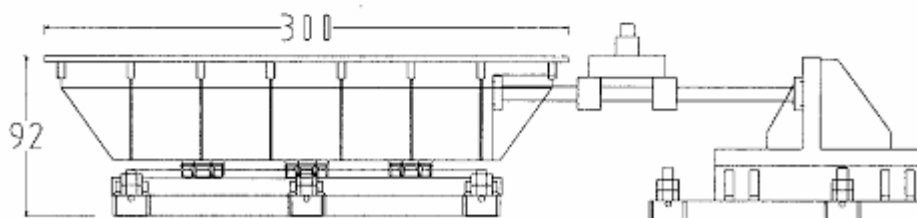


圖 3.10 樓頂鋼板設計圖



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 3.11 振動台尺寸詳圖



圖 3.12 微振加速規及訊號調節放大器

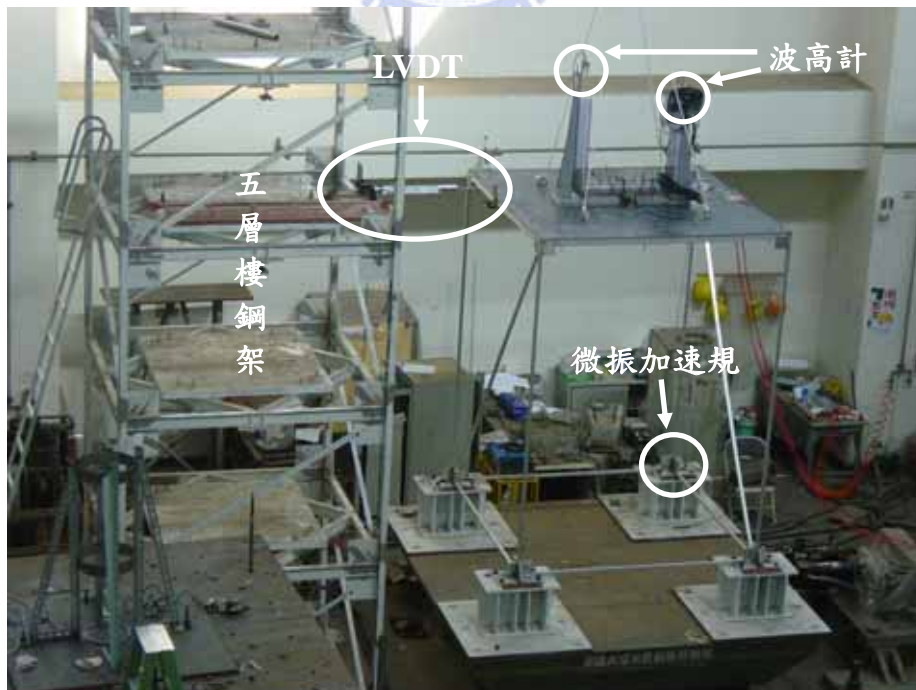


圖 3.13(a) 結構裝置 TLCD 系統之量測儀器配置圖

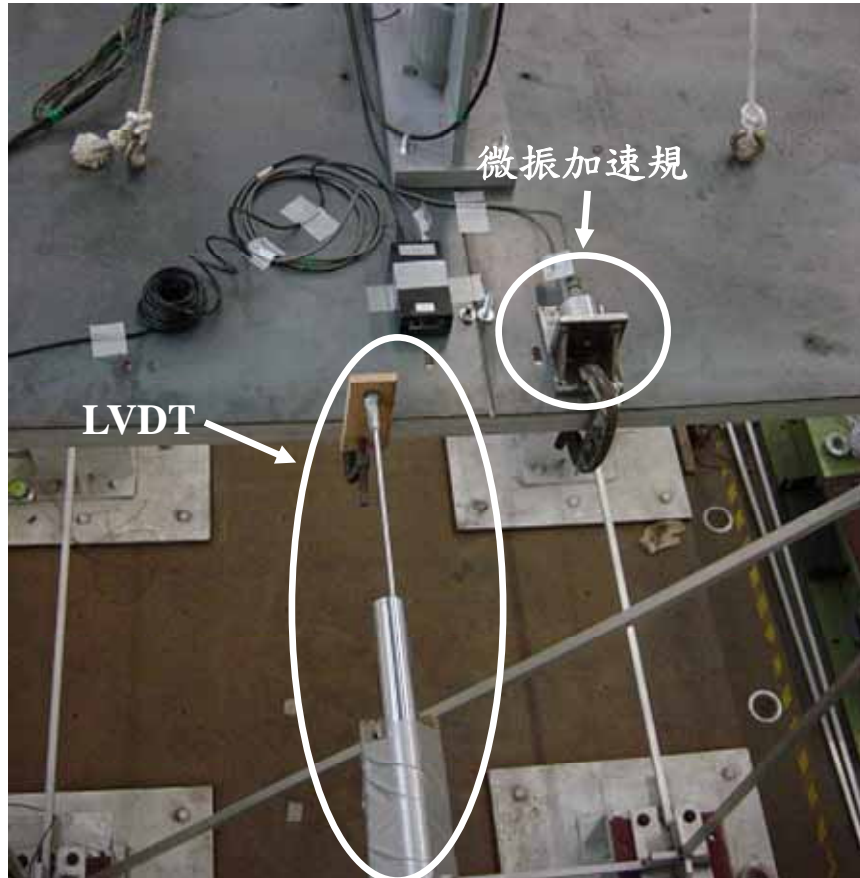


圖 3.13(b) 結構裝置 TLCD 系統試驗之量測儀器配置圖(頂樓)

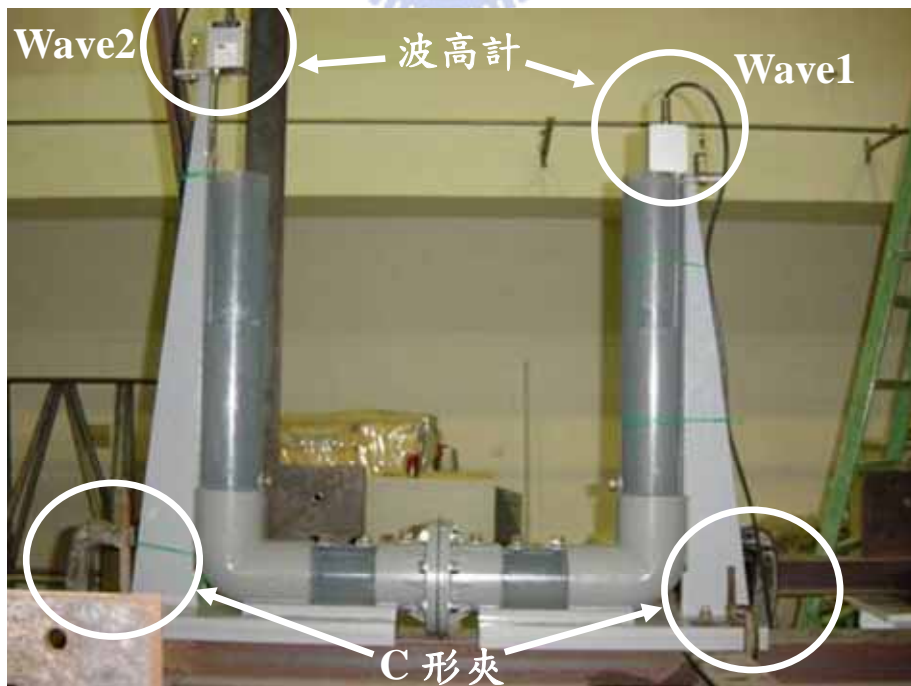


圖 3.14 TLCD 元件之安裝與波高計之架設圖

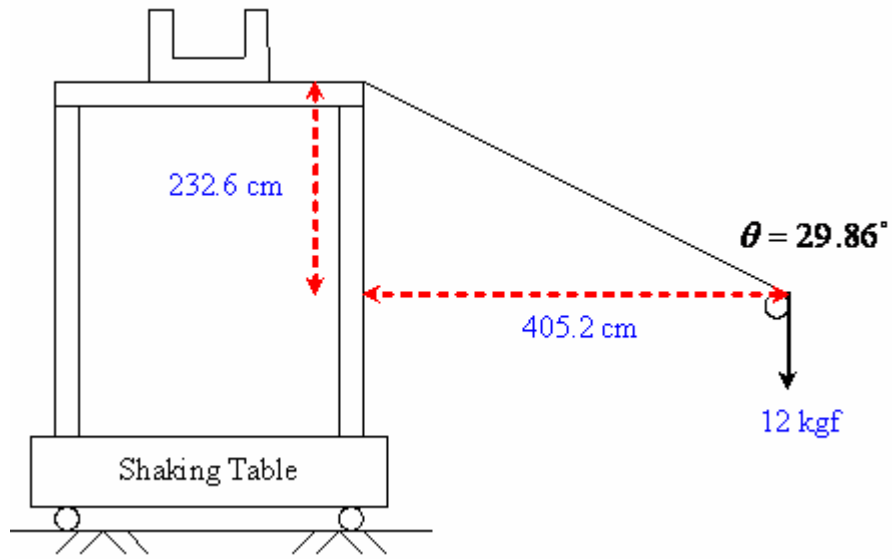


圖 3.15(a) 自由振盪試驗之側向施力示意圖



圖 3.15(b) 自由振盪試驗之側向施力示意圖

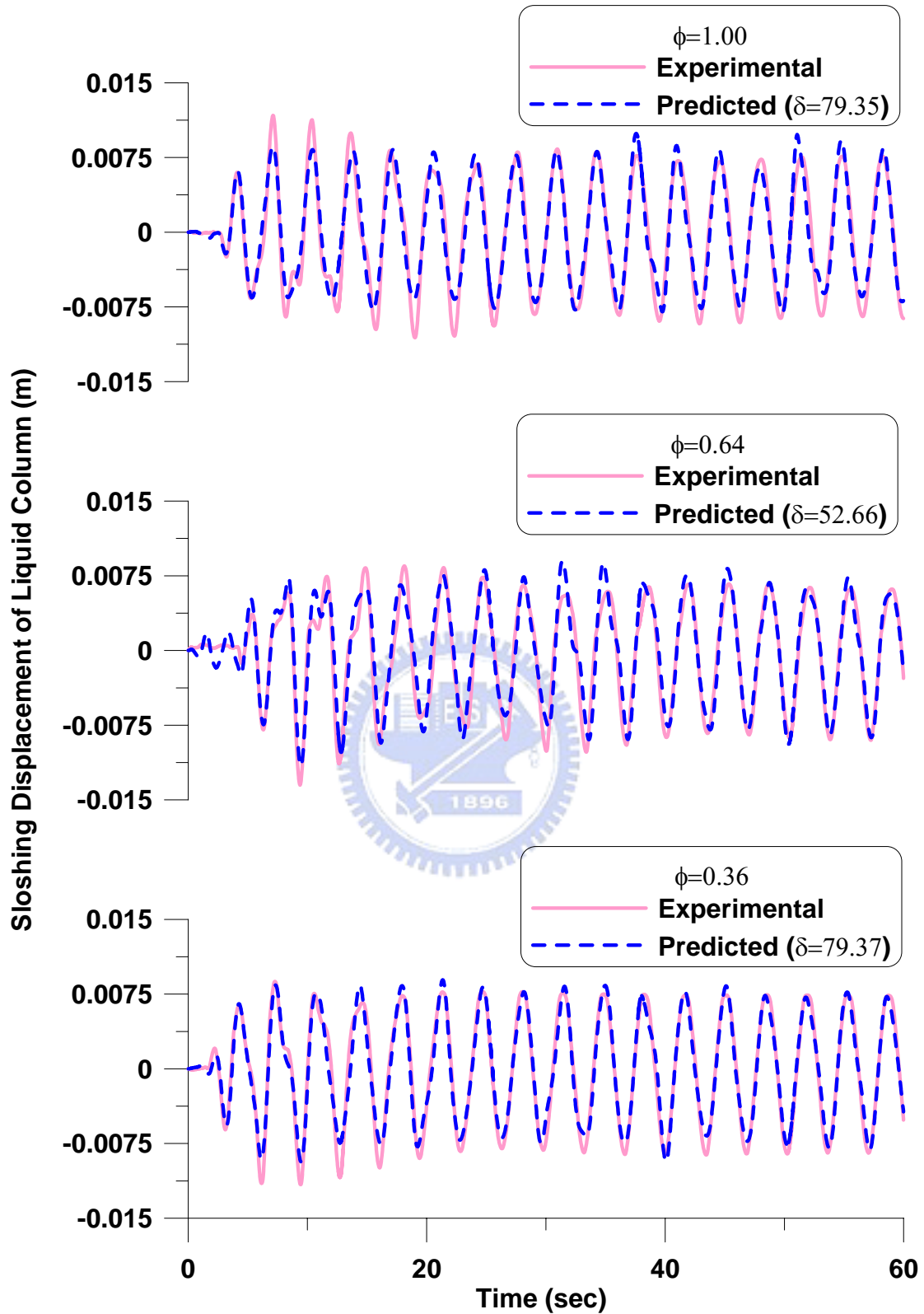


圖 3.16(a) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)

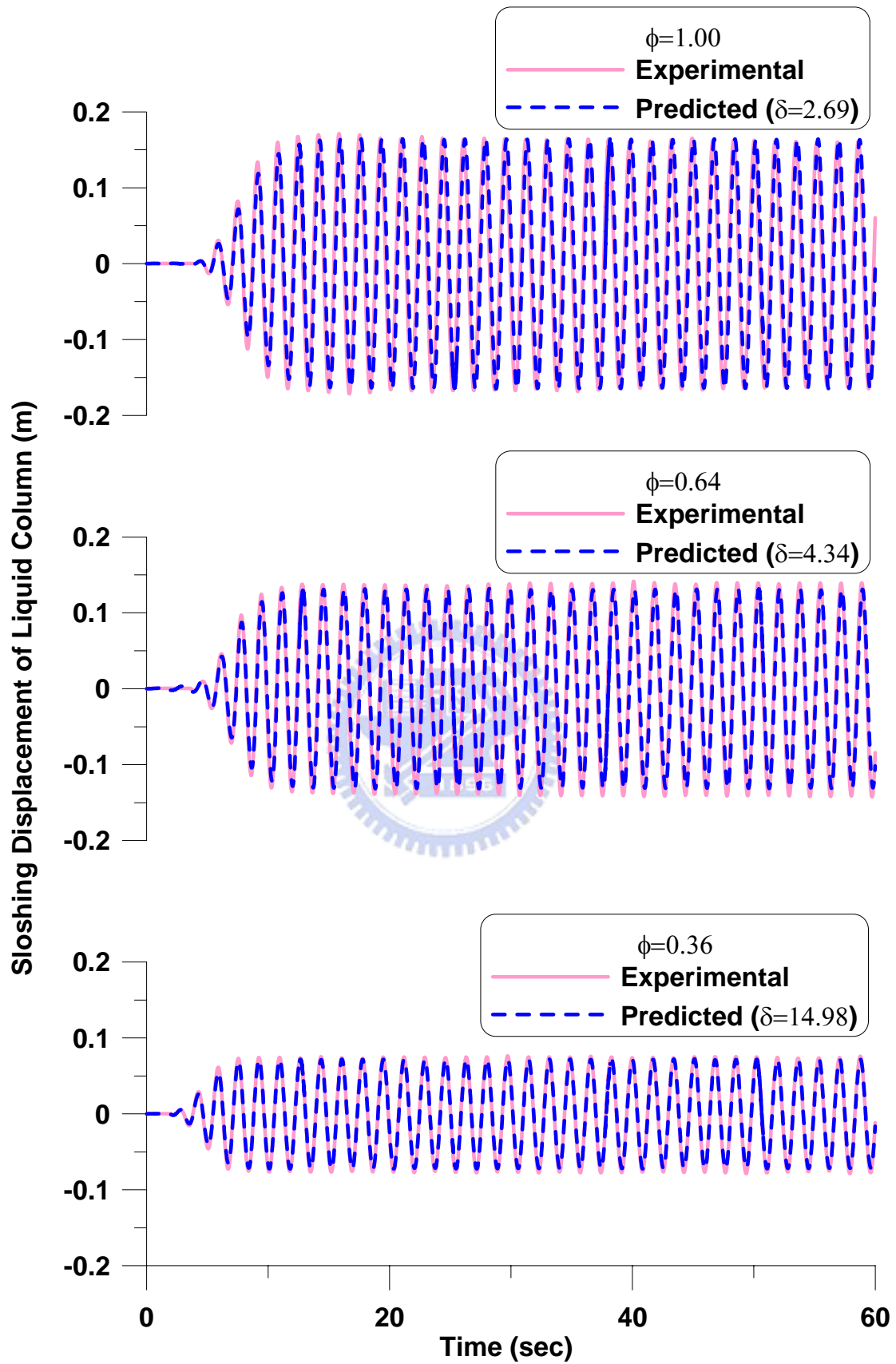


圖 3.16(b) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$)

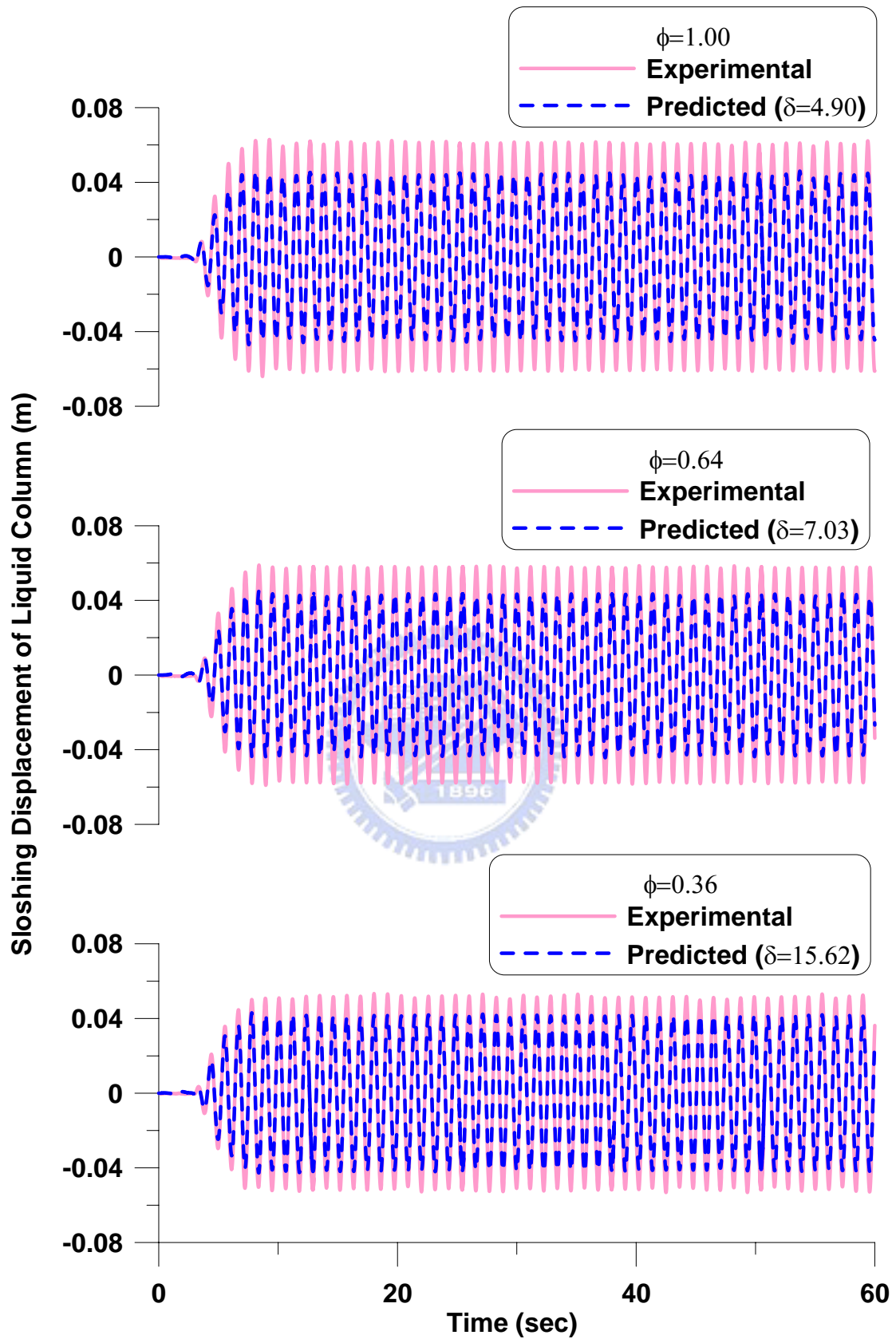


圖 3.16(c) 元件測試之水柱激盪位移歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)

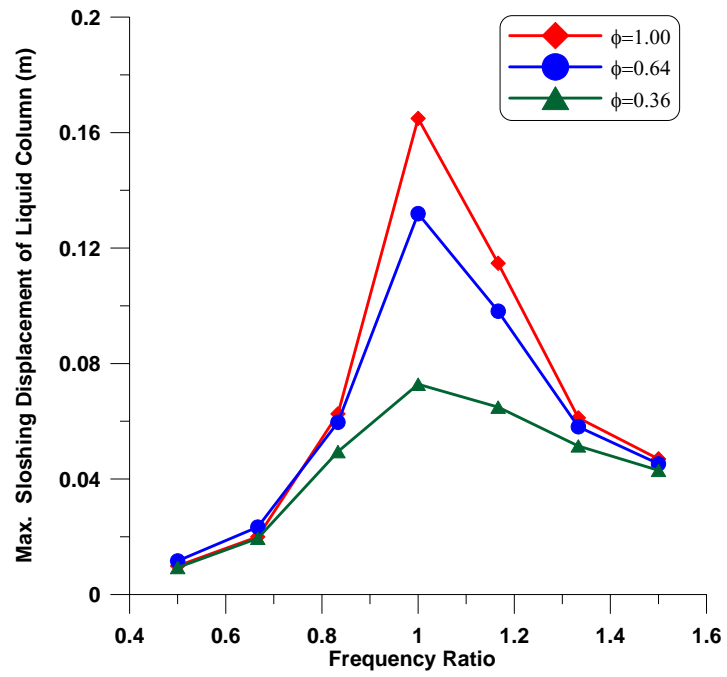


圖 3.17 TLCD 元件之開孔面積比、擾動頻率比與水柱激盪位移峰值之關係



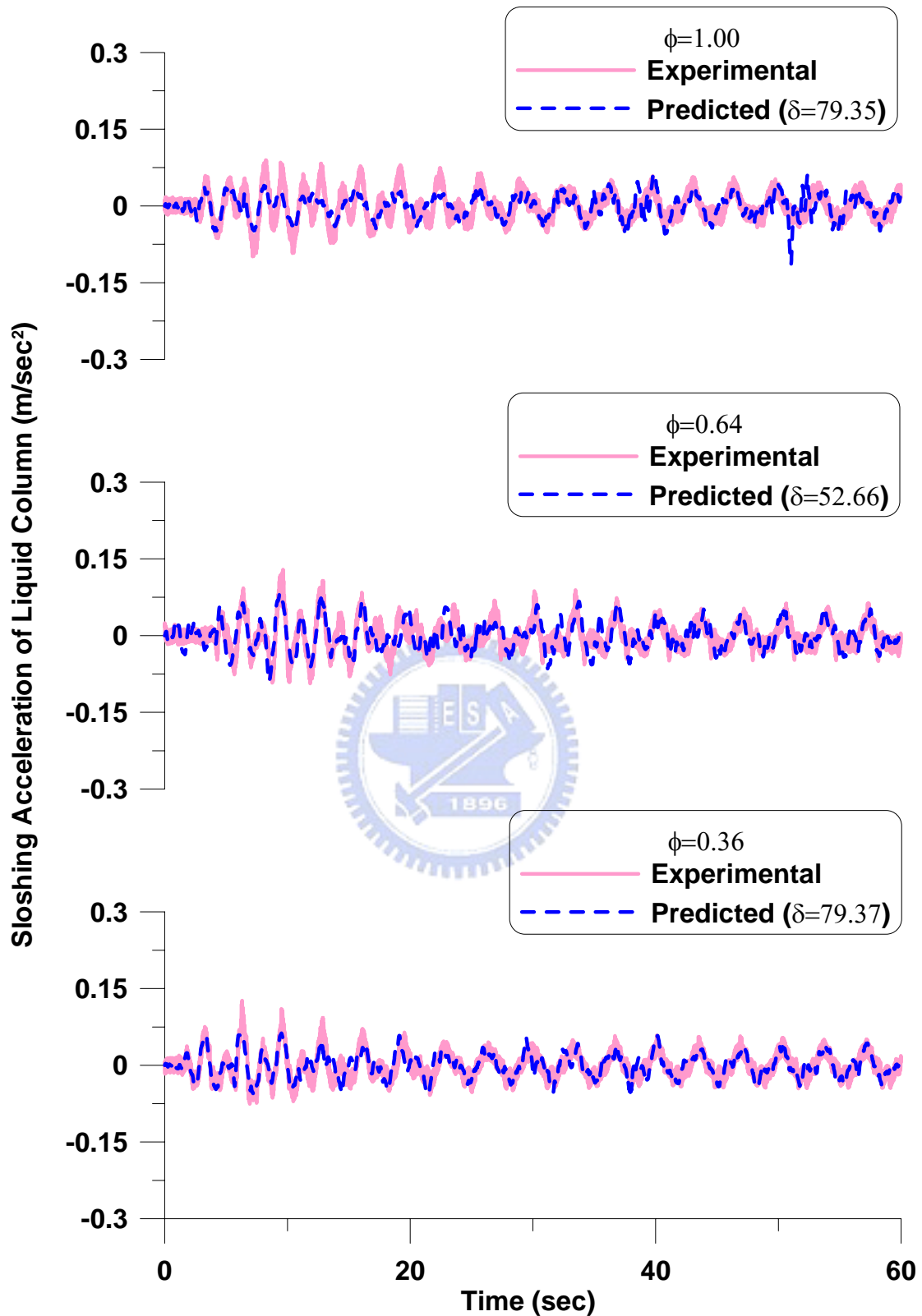


圖 3.18(a) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)

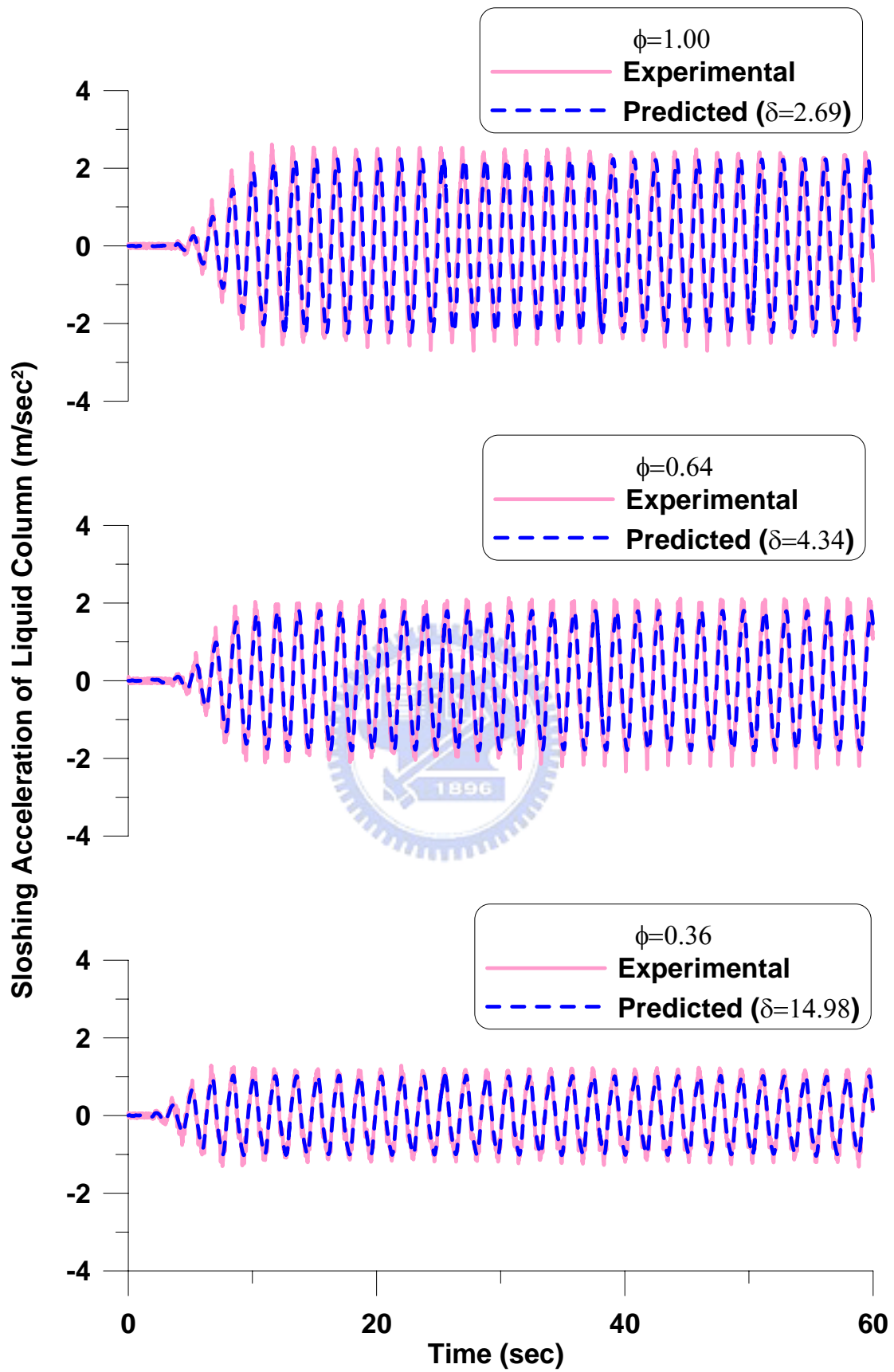


圖 3.18(b) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.0$)

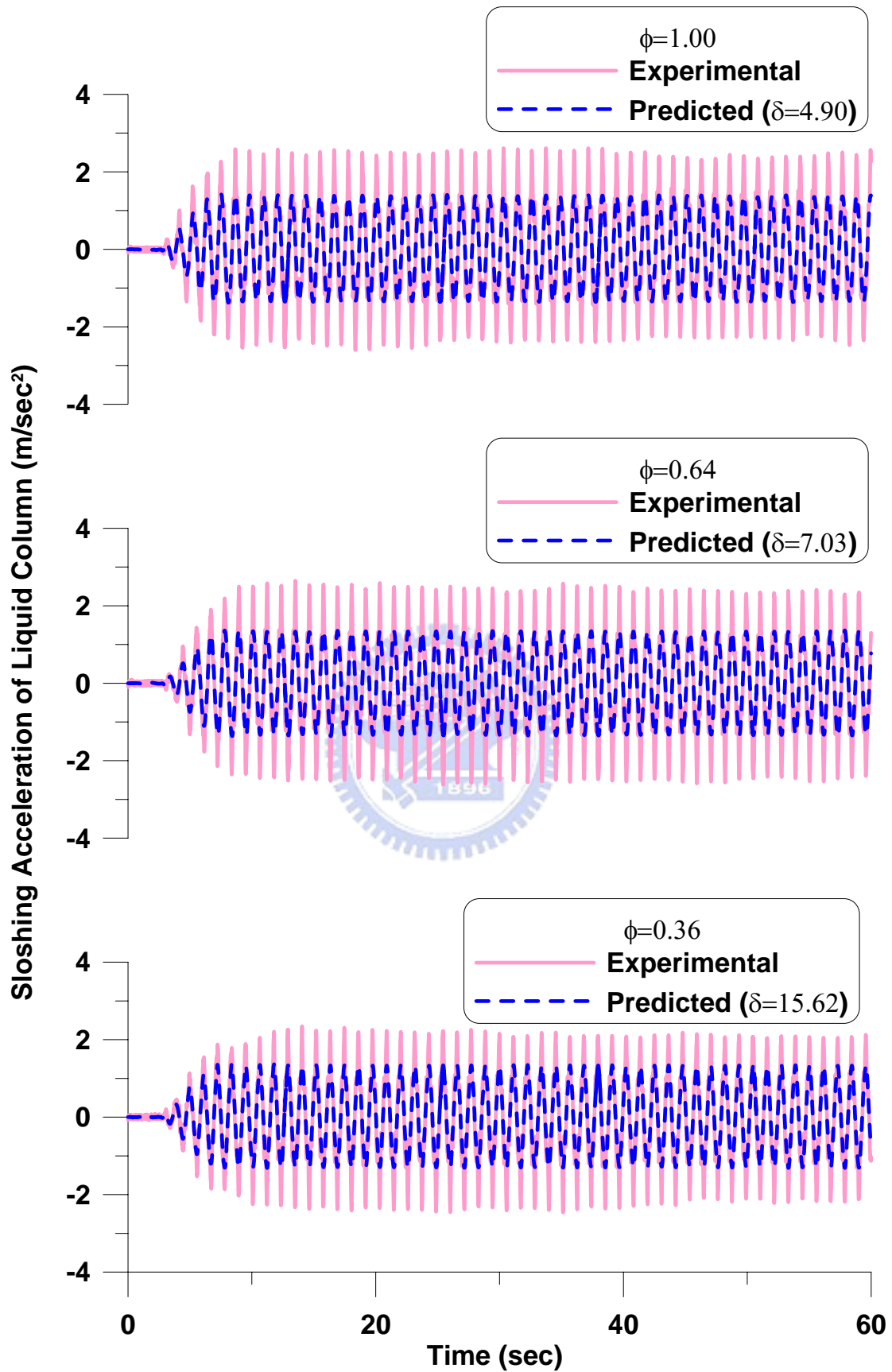


圖 3.18(c) 元件測試之水柱激盪加速度歷時(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)

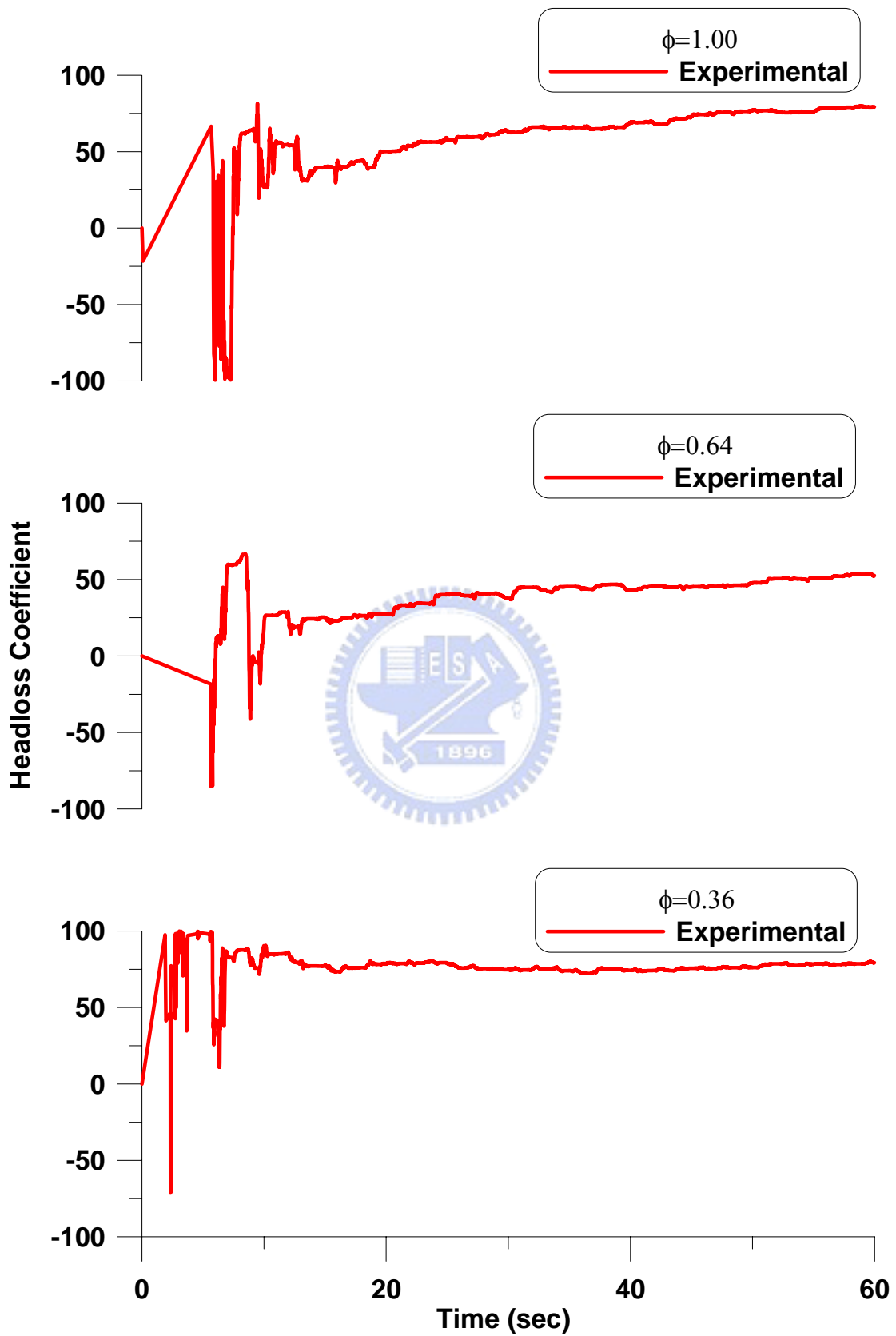


圖 3.19(a) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T=0.5$)

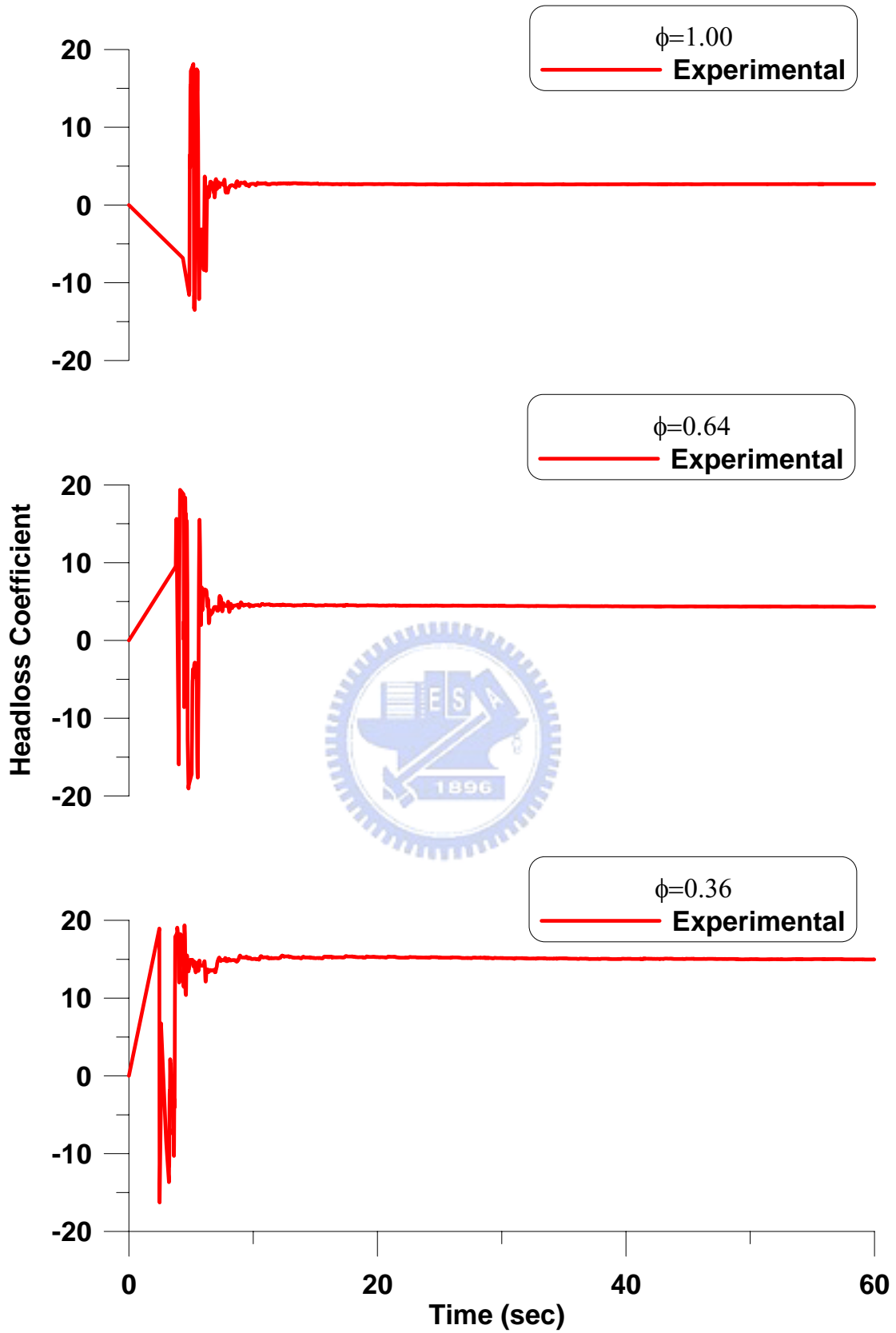


圖 3.19(b) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T = 1.0$)

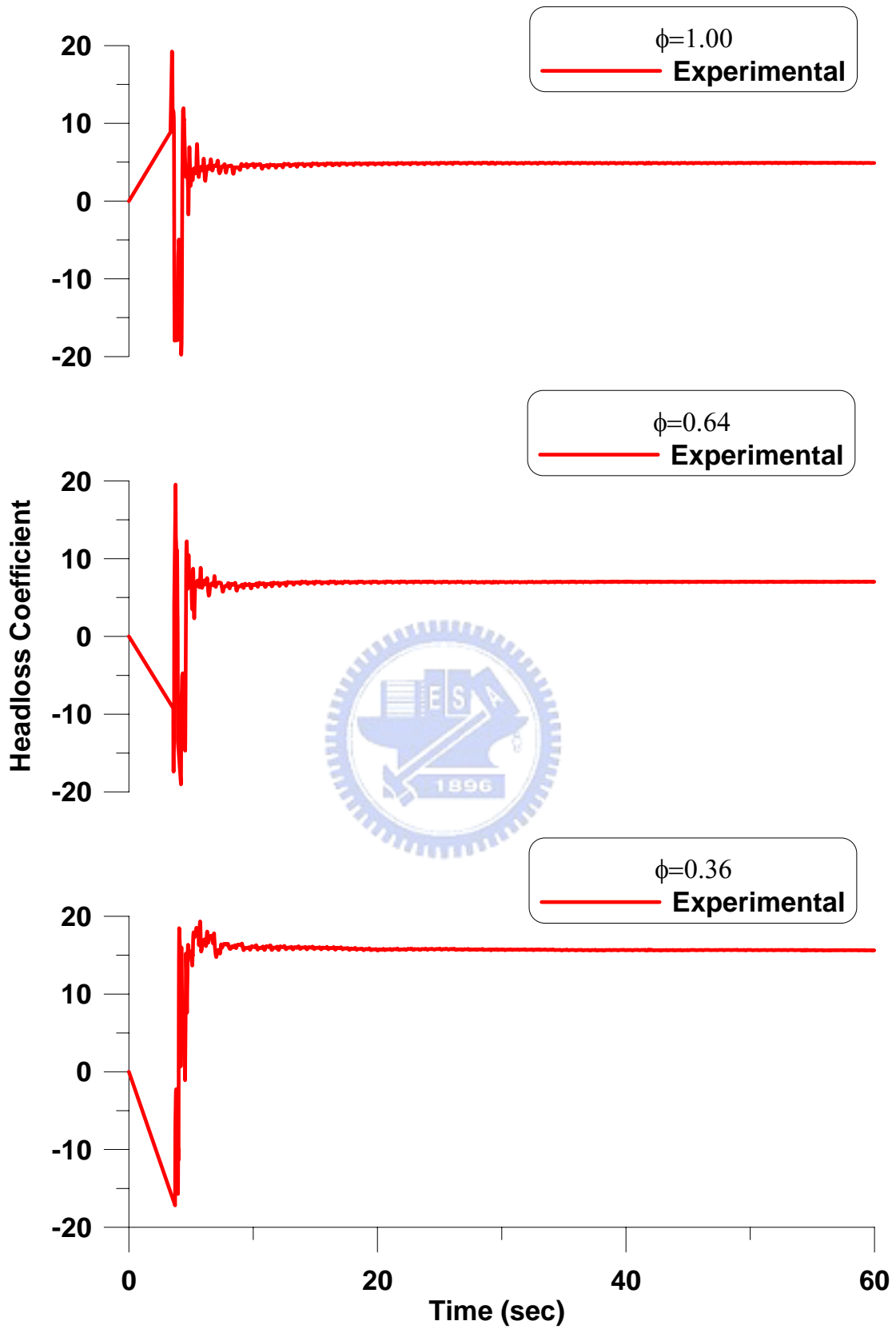


圖 3.19(c) 元件測試之水頭損失係數收斂情形(擾動頻率比 $\gamma_T=1.5$)

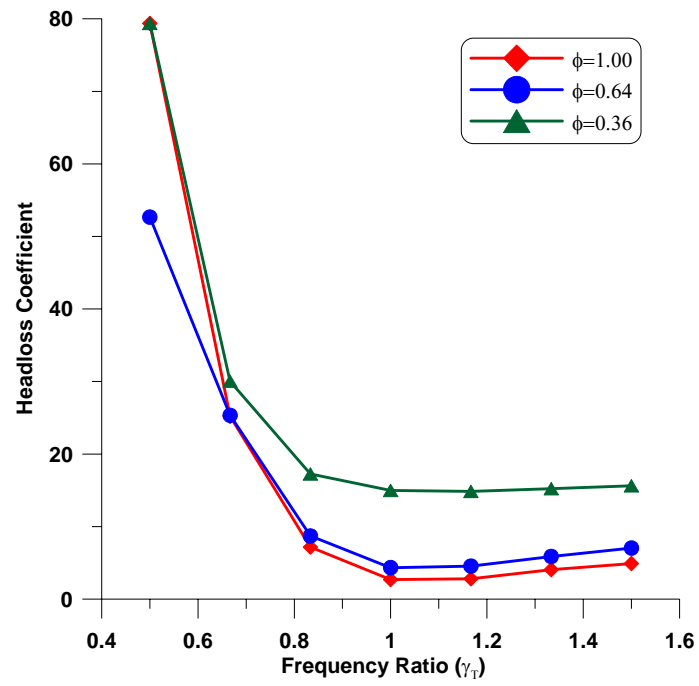


圖 3.20 TLCD 元件之面積比與擾動頻率比對於水頭損失係數之影響



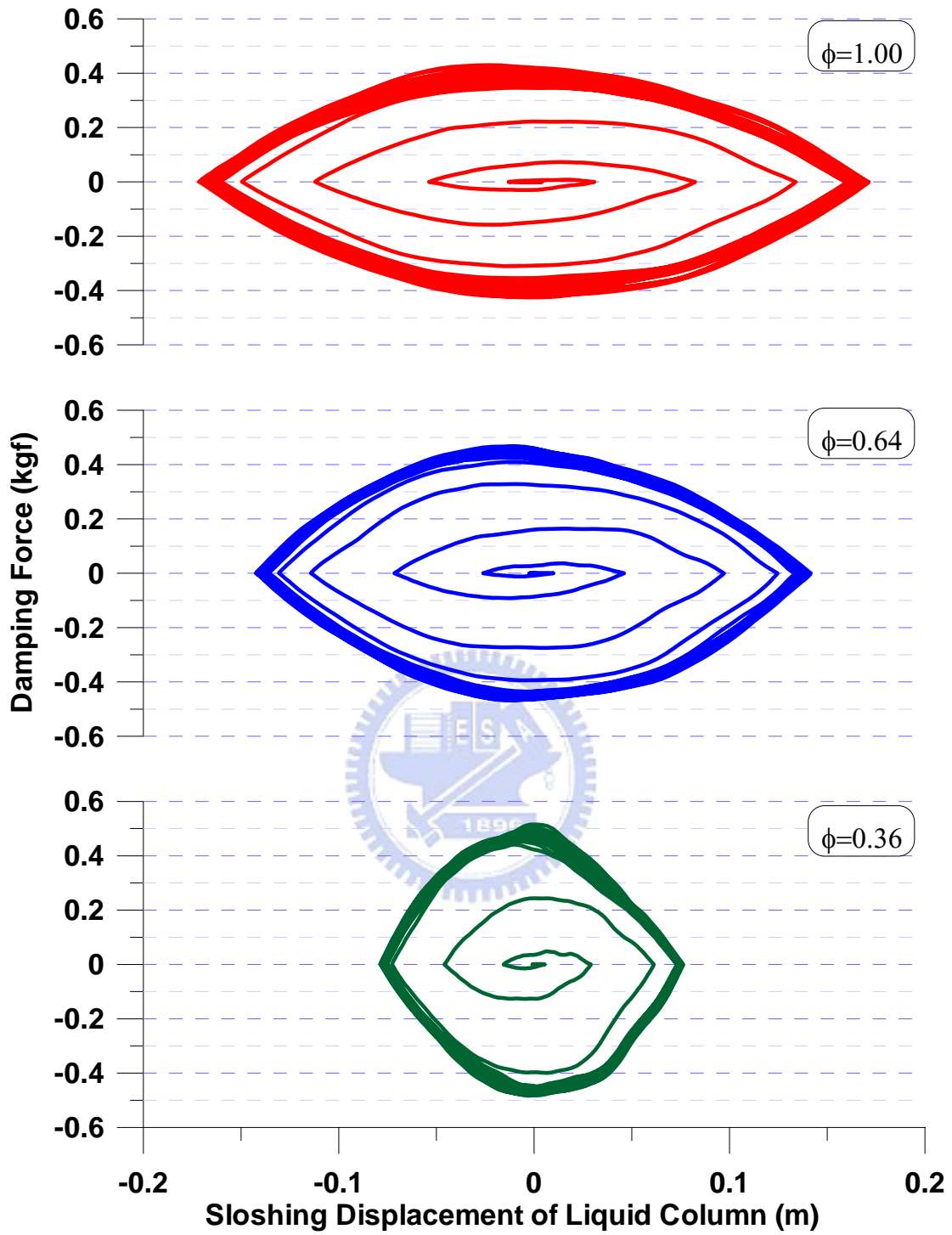


圖 3.21 不同面積比之 TLCD 系統遲滯迴圈(擾動頻率比 $\gamma_T=0.1$)

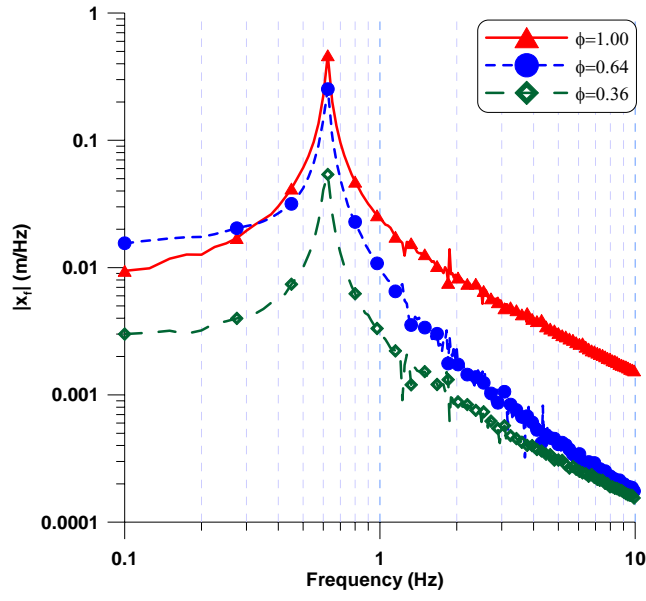


圖 3.22 TLCD 系統於不同孔口板之水柱自由激盪振幅富氏頻譜



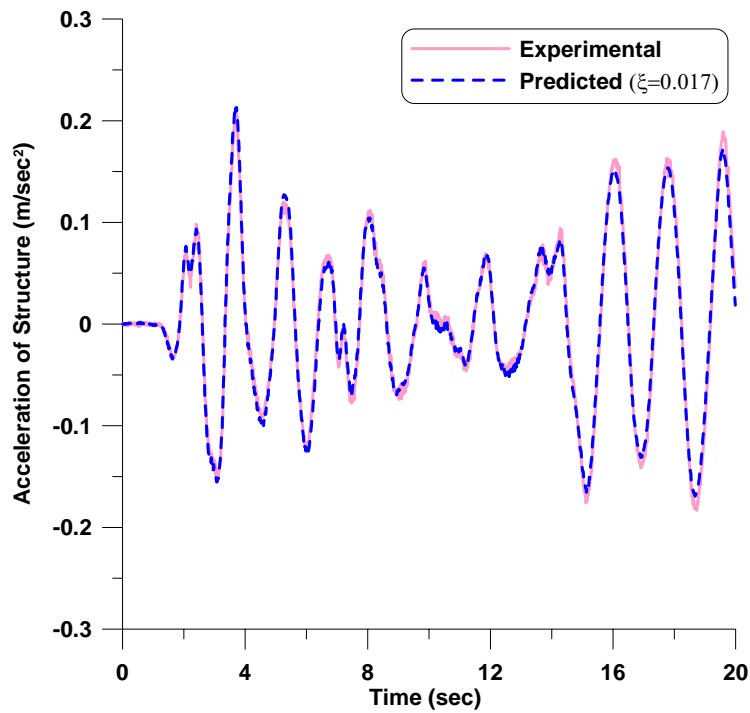


圖 3.23 系統識別預測與振動台試驗之結構加速度反應比較(El Centro, PGA=0.15g)

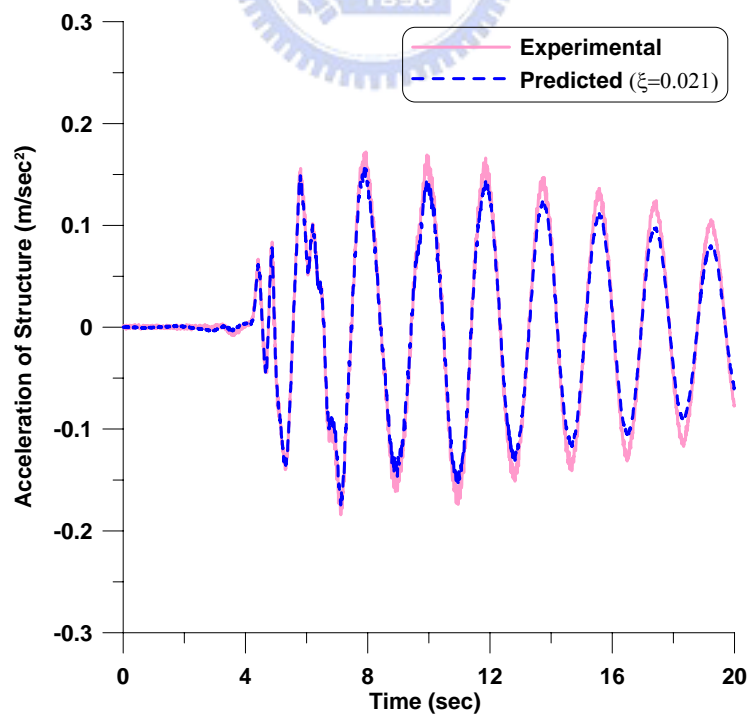


圖 3.24 系統識別預測與振動台試驗之結構加速度反應比較(Kobe, PGA=0.15g)

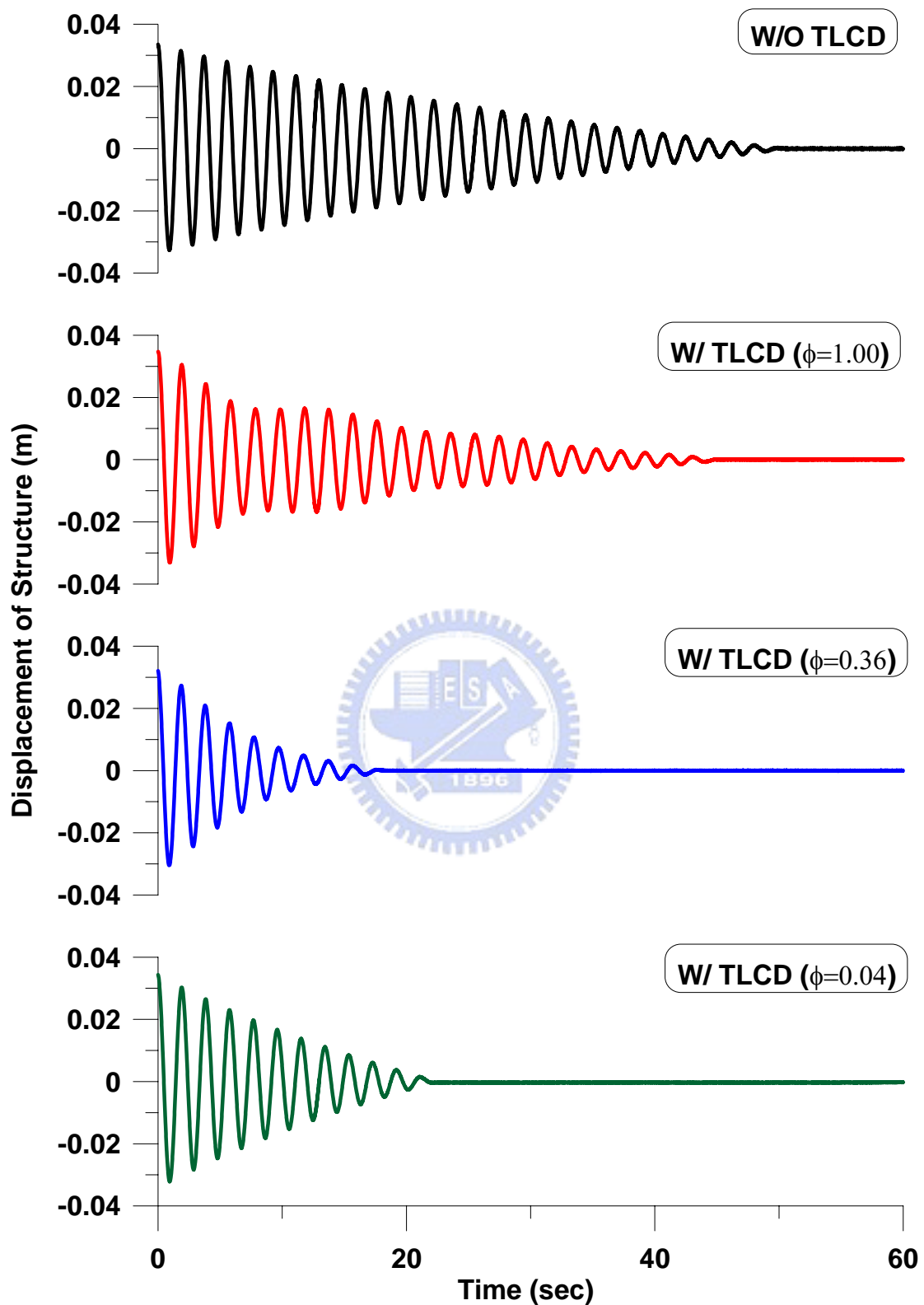


圖 3.25 TLCD 系統於不同孔口板孔徑下，控制與未控制結構之位移歷時 (結構自由振動， $x_s(0) = 3.45$ cm)

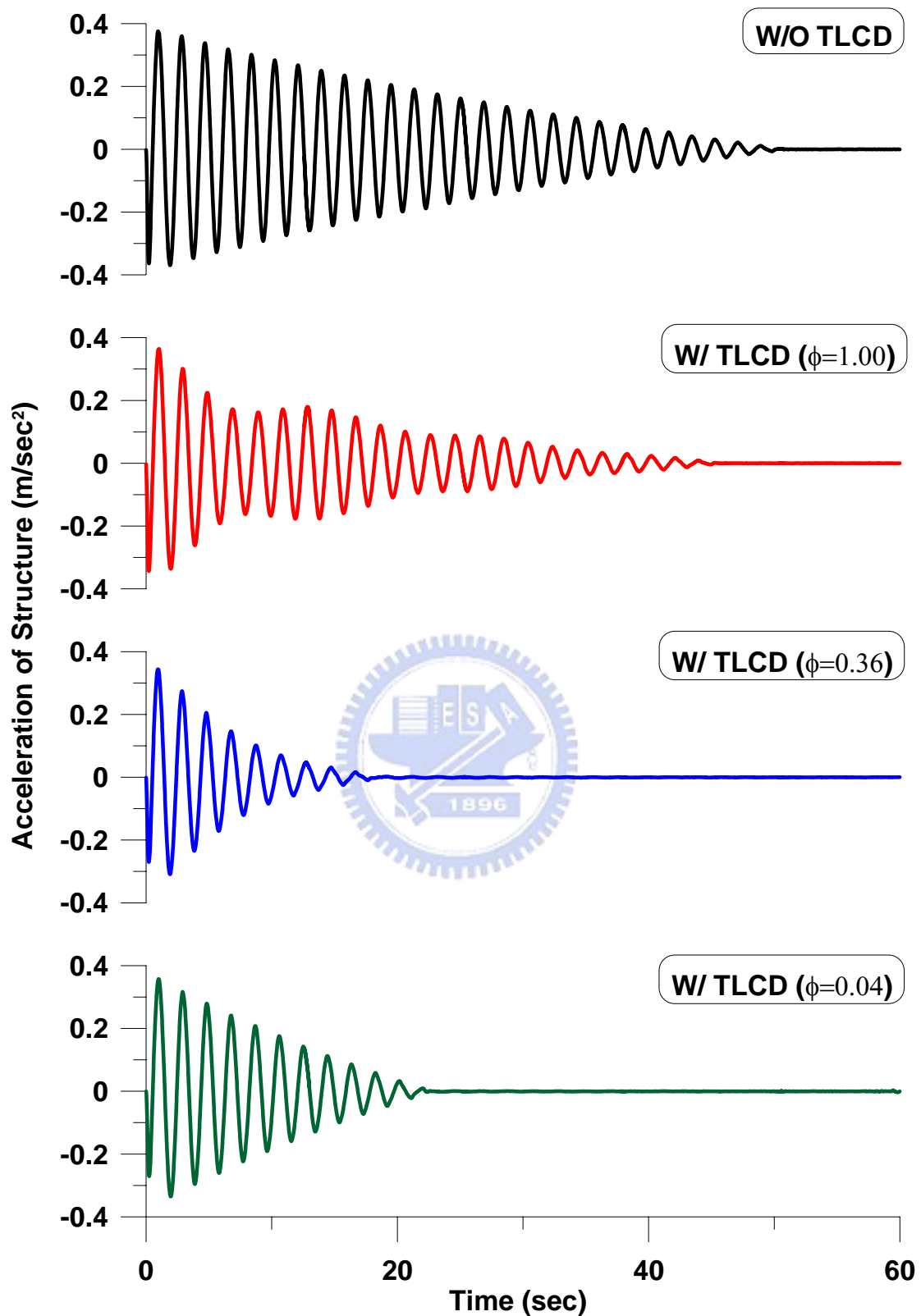


圖 3.26 TLCD 系統於不同孔口板孔徑下，控制與未控制結構之加速度歷時 (結構自由振動， $x_s(0) = 3.45$ cm)

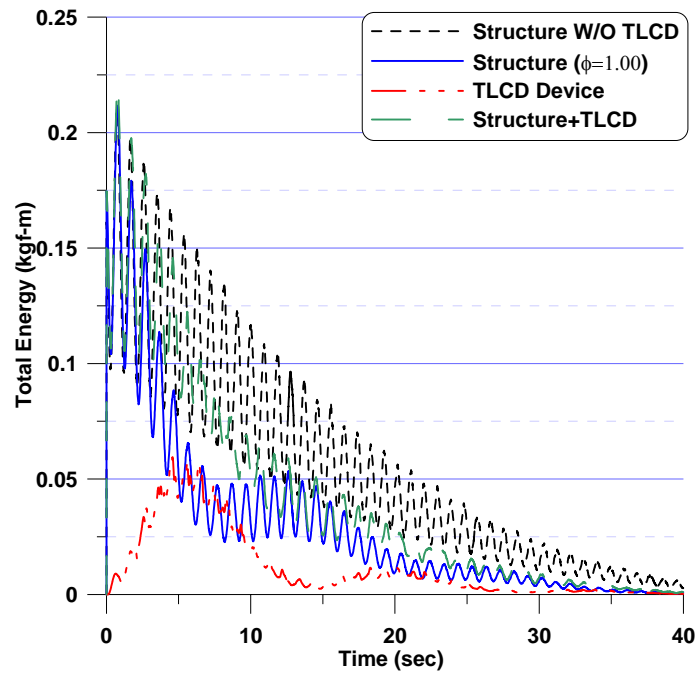


圖 3.27 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 1.00$)

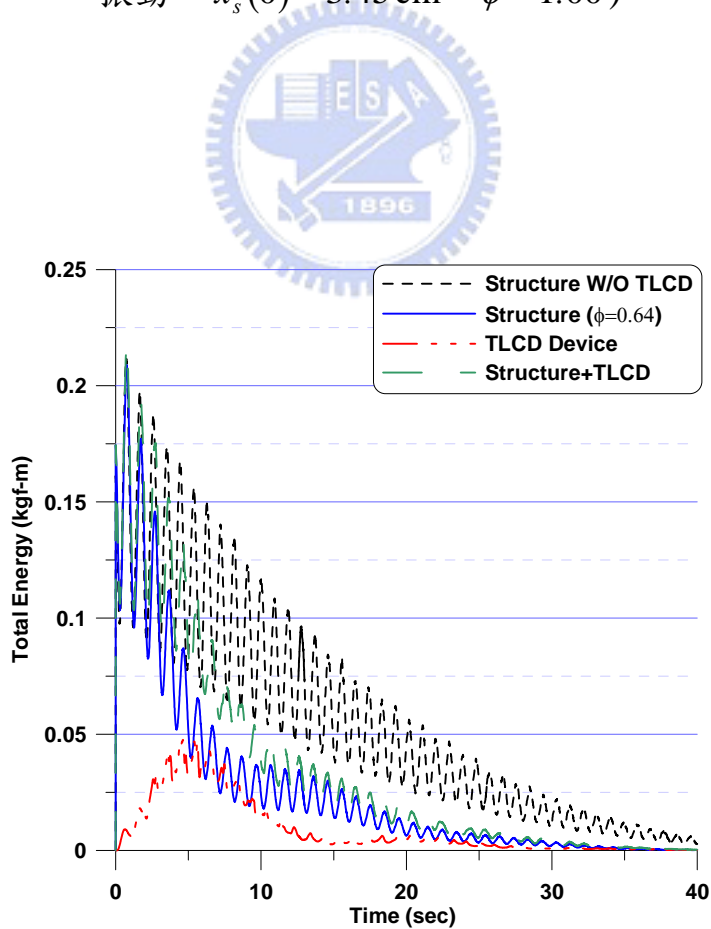


圖 3.28 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.64$)

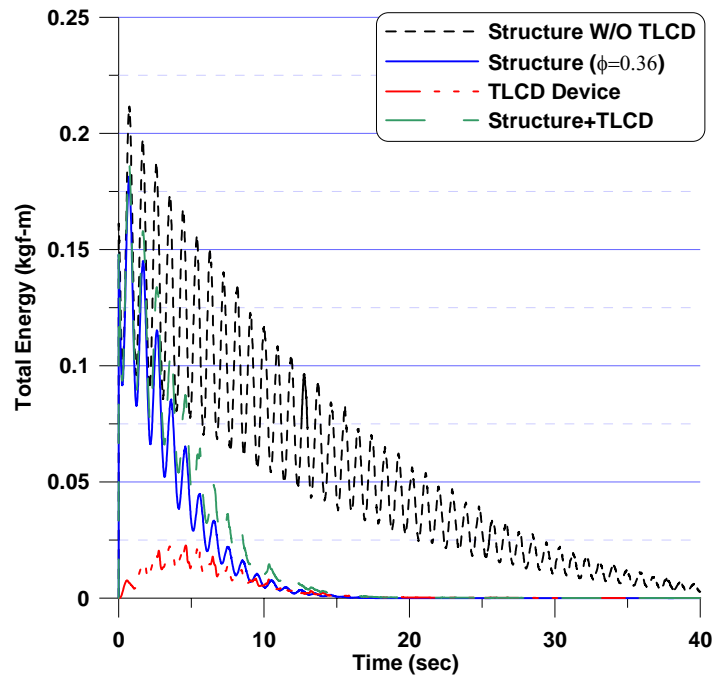


圖 3.29 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$)



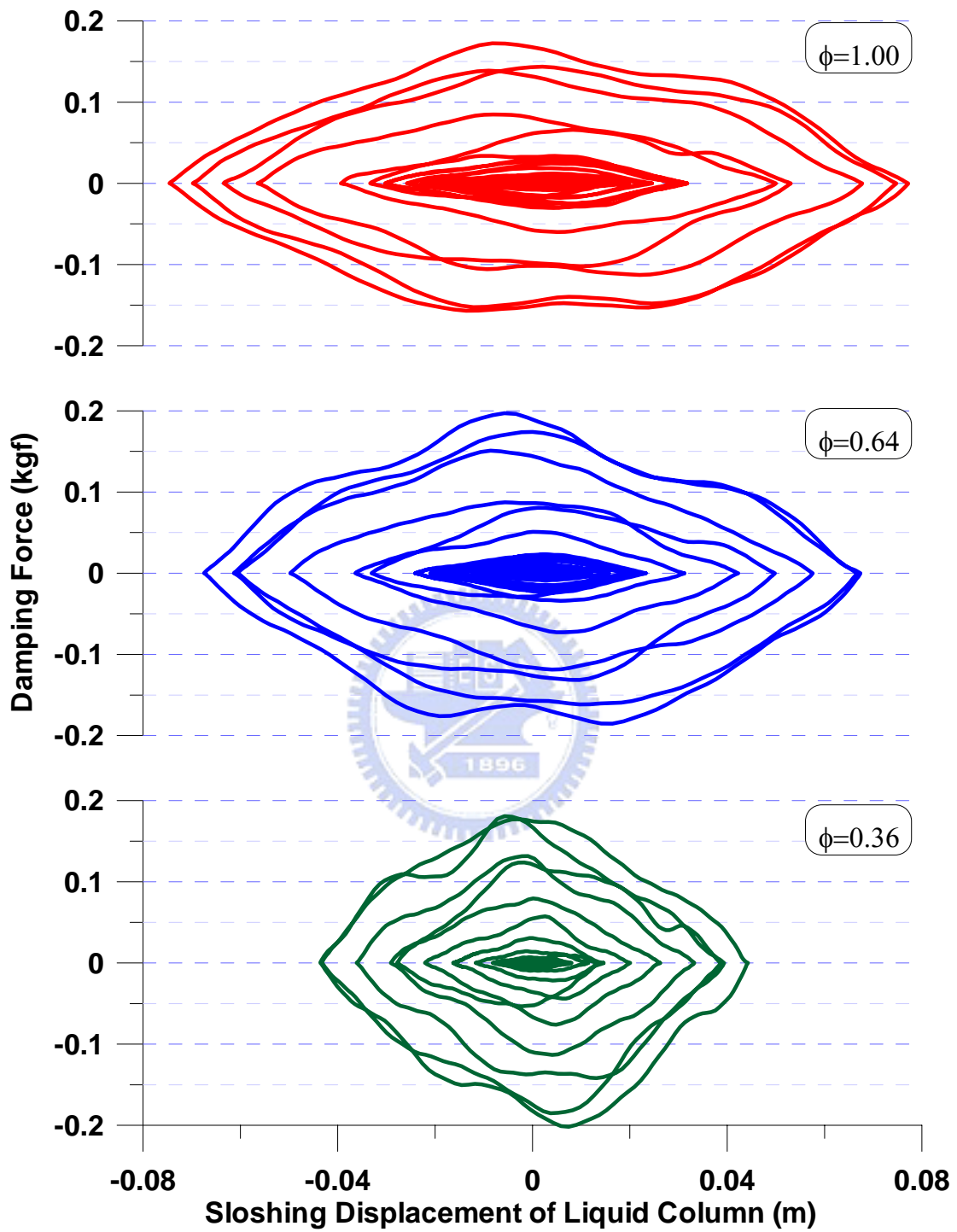


圖 3.30 不同面積比之 TLCD 系統遲滯迴圈(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$)

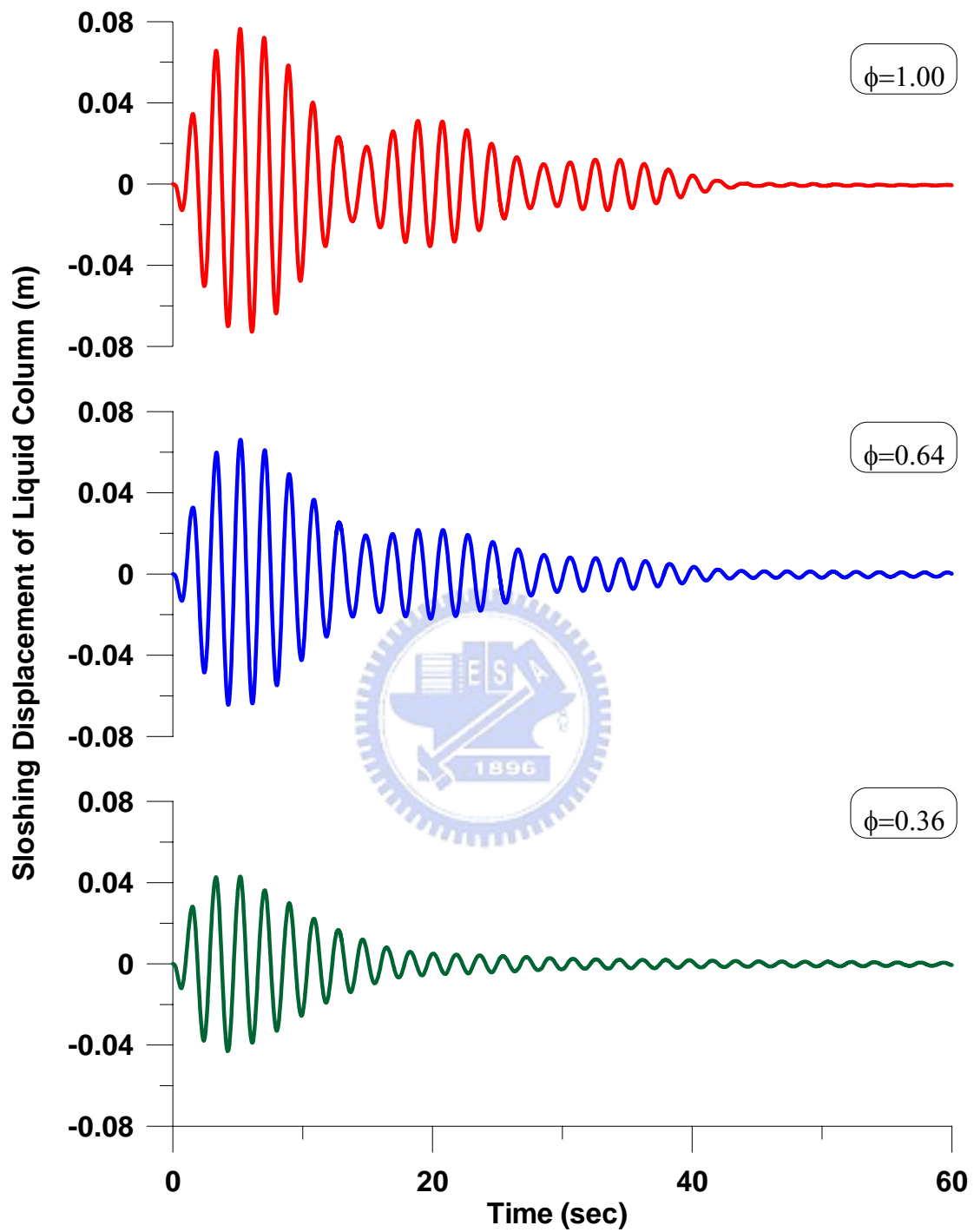


圖 3.31 TLCD 系統於不同孔口板孔徑之水柱激盪位移歷時(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$)

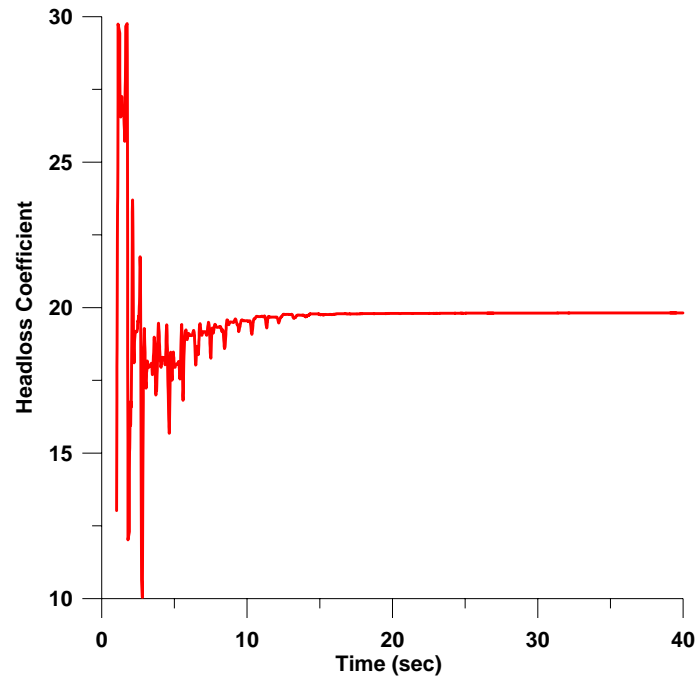


圖 3.32 水頭損失係數收斂情形(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$ ， $\delta = 19.82$)

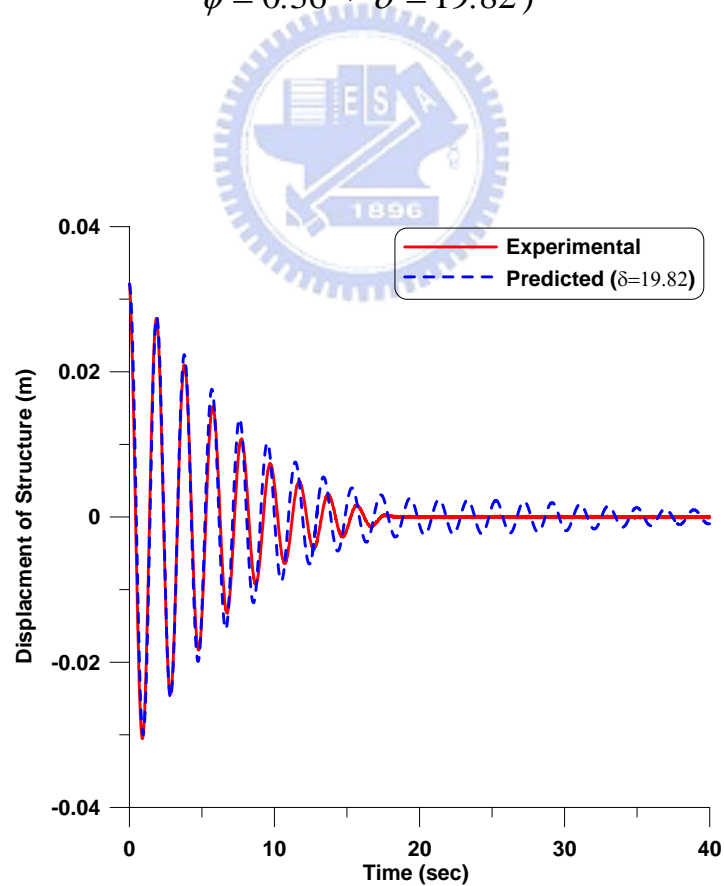


圖 3.33 試驗與分析之結構位移歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$)

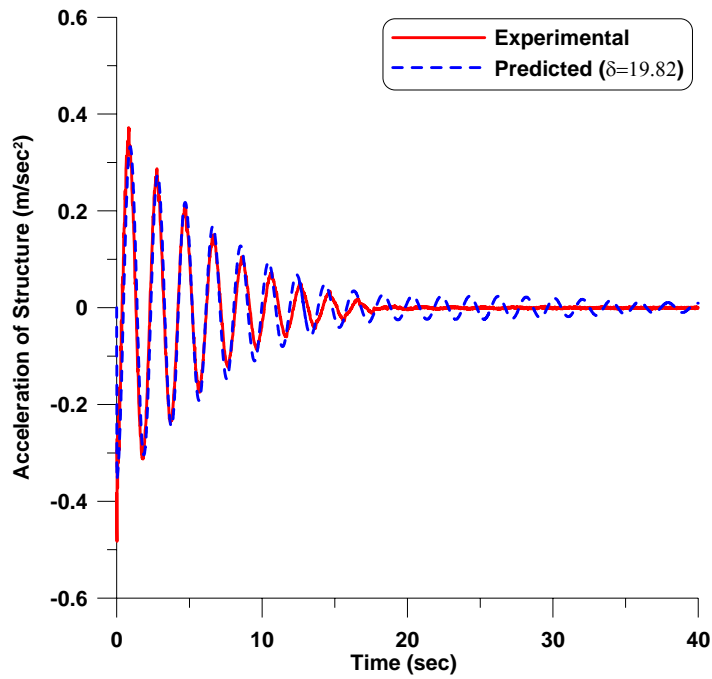


圖 3.34 試驗與分析之結構加速度歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$)

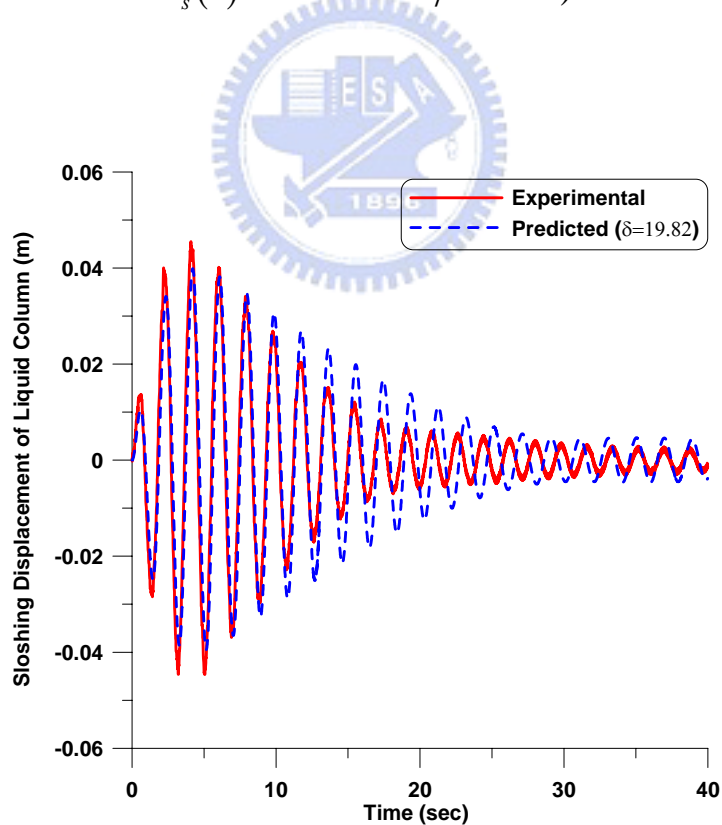


圖 3.35 試驗與分析之 TLCD 水柱激盪位移歷時比較(結構自由振動， $x_s(0) = 3.45 \text{ cm}$ ， $\phi = 0.36$)

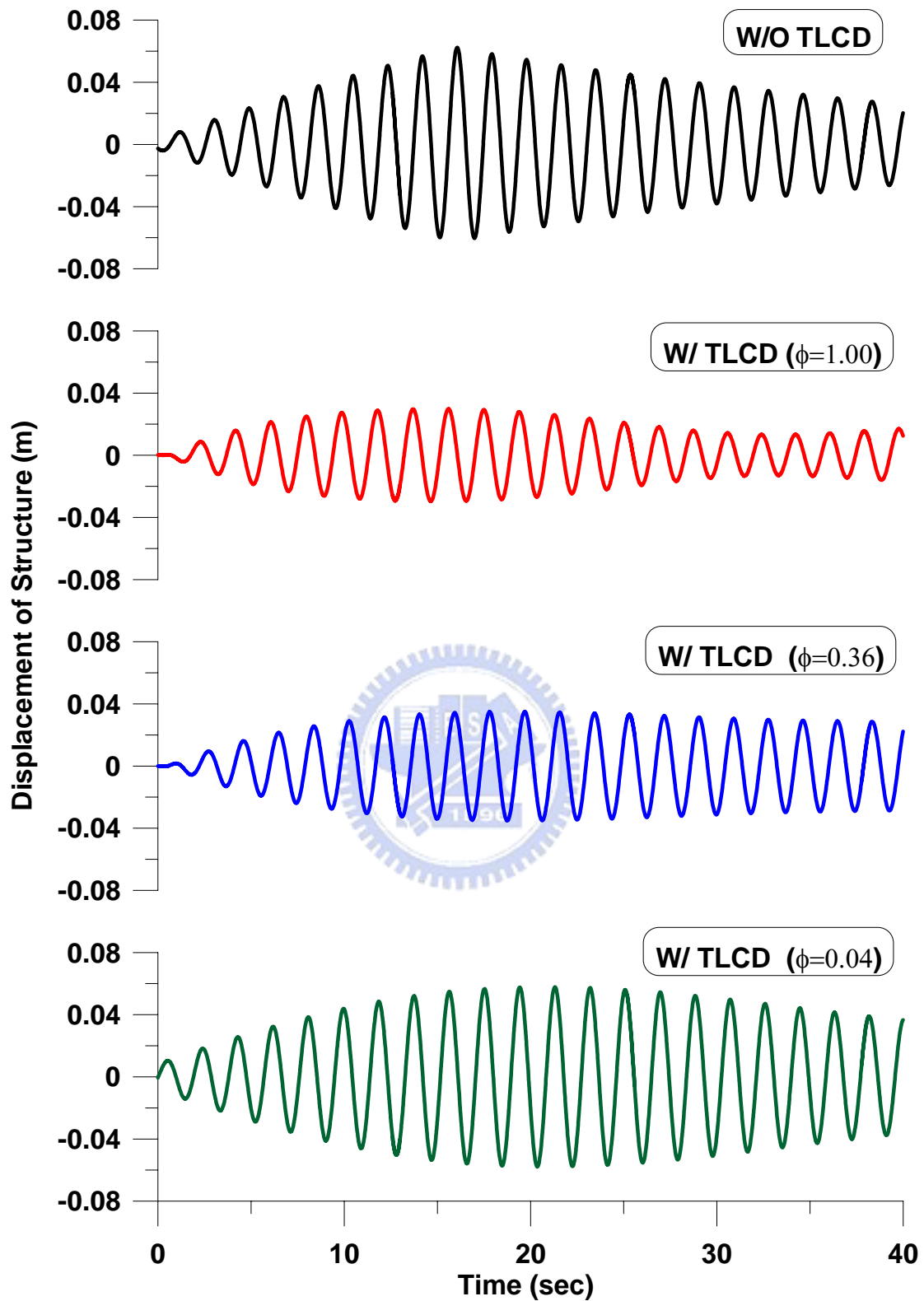


圖 3.36 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構控制與未控制之位移歷時 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$)

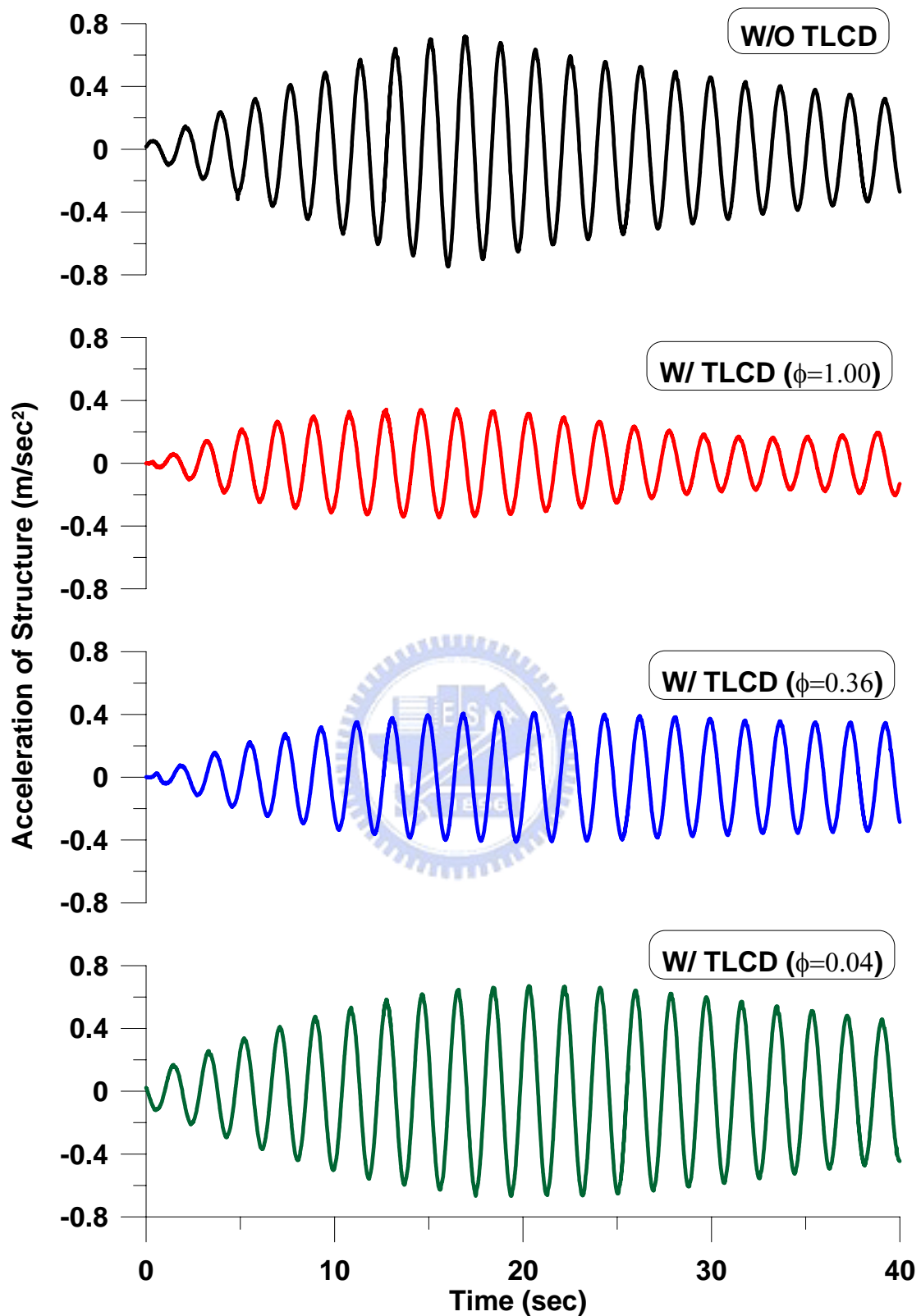


圖 3.37 裝置不同孔口板之 TLCD 系統對結構控制與未控制之加速度歷時 (共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $r_s = 1.0$)

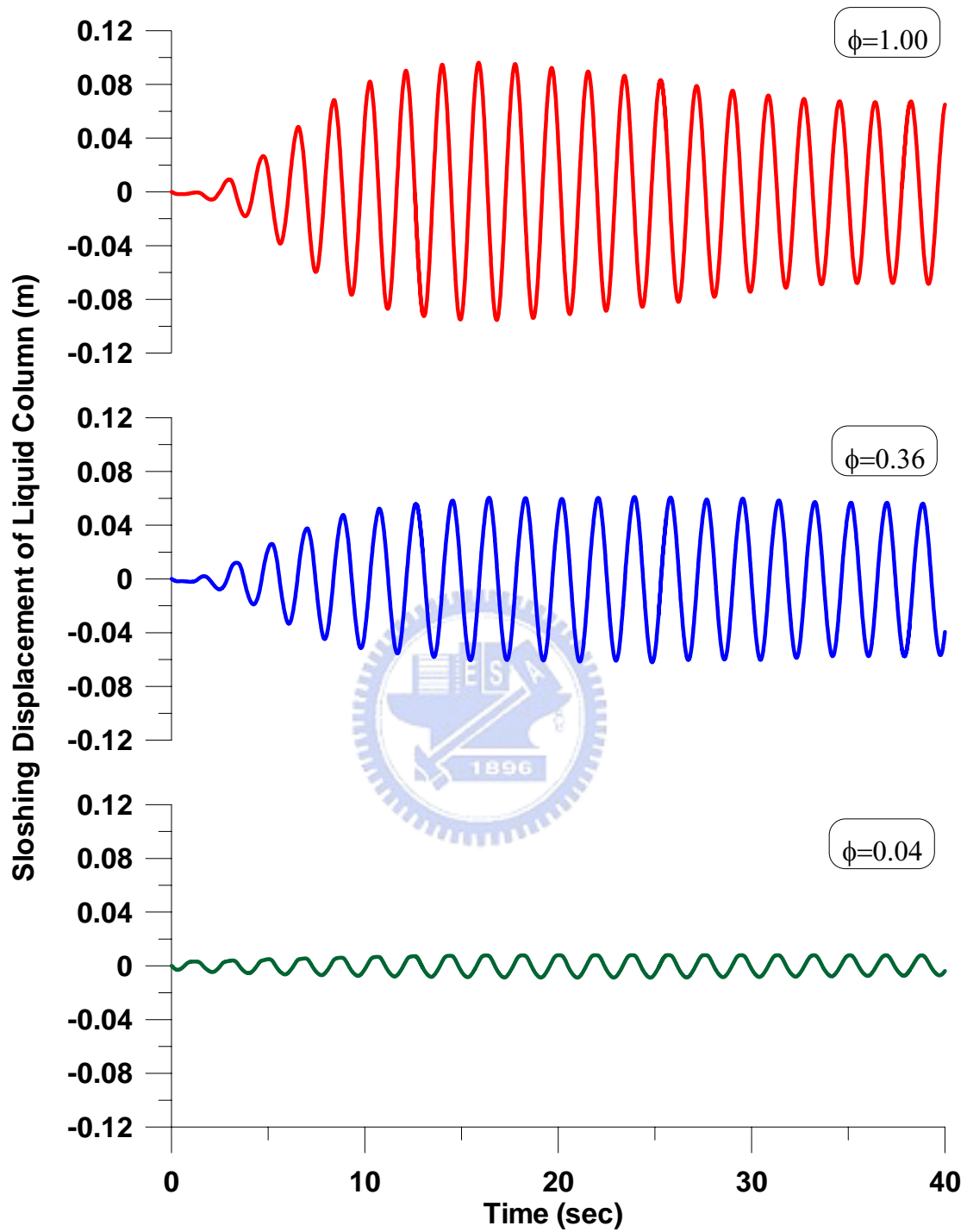


圖 3.38 不同孔口板 TLCD 系統之水柱激盪位移(共振簡諧擾動，擾動
振幅 3mm， $r_s = 1.0$)

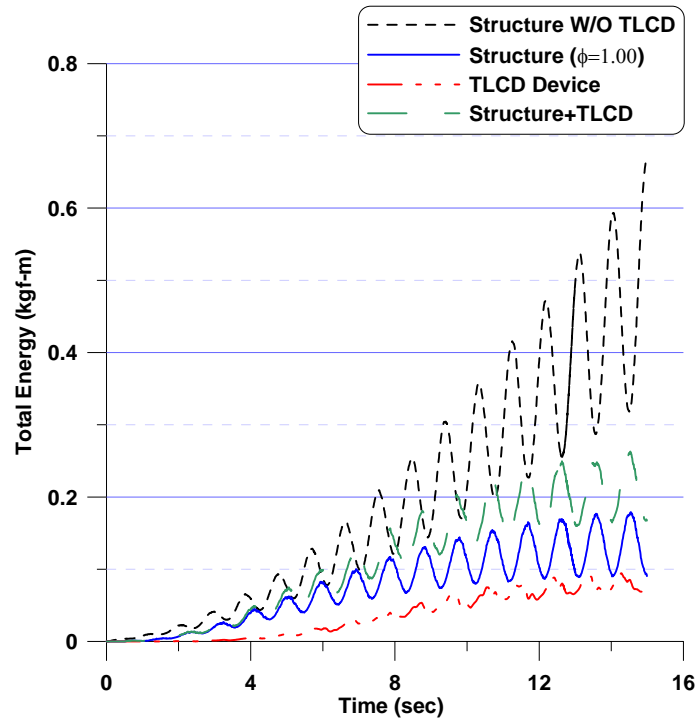


圖 3.39 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 1.00$)

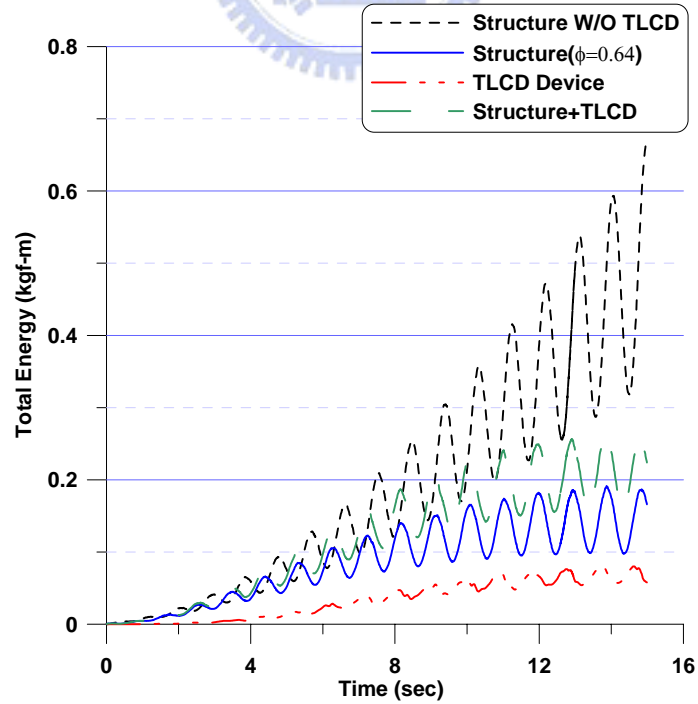


圖 3.40 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 0.64$)

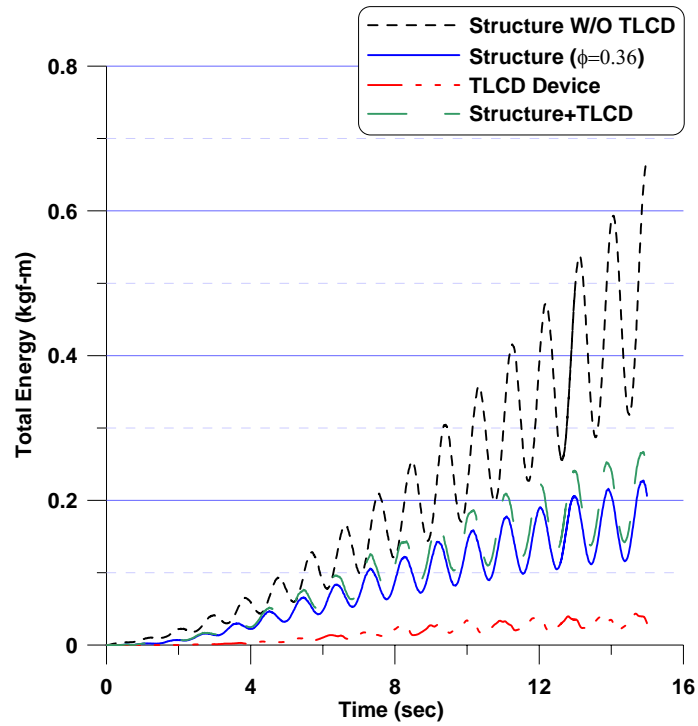
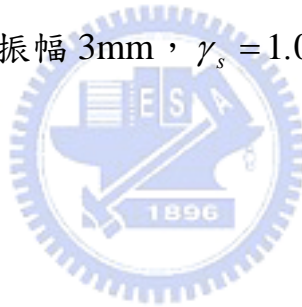


圖 3.41 控制與未控制結構及 TLCD 元件之瞬時總能量歷時(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$ 、 $\phi = 0.36$)



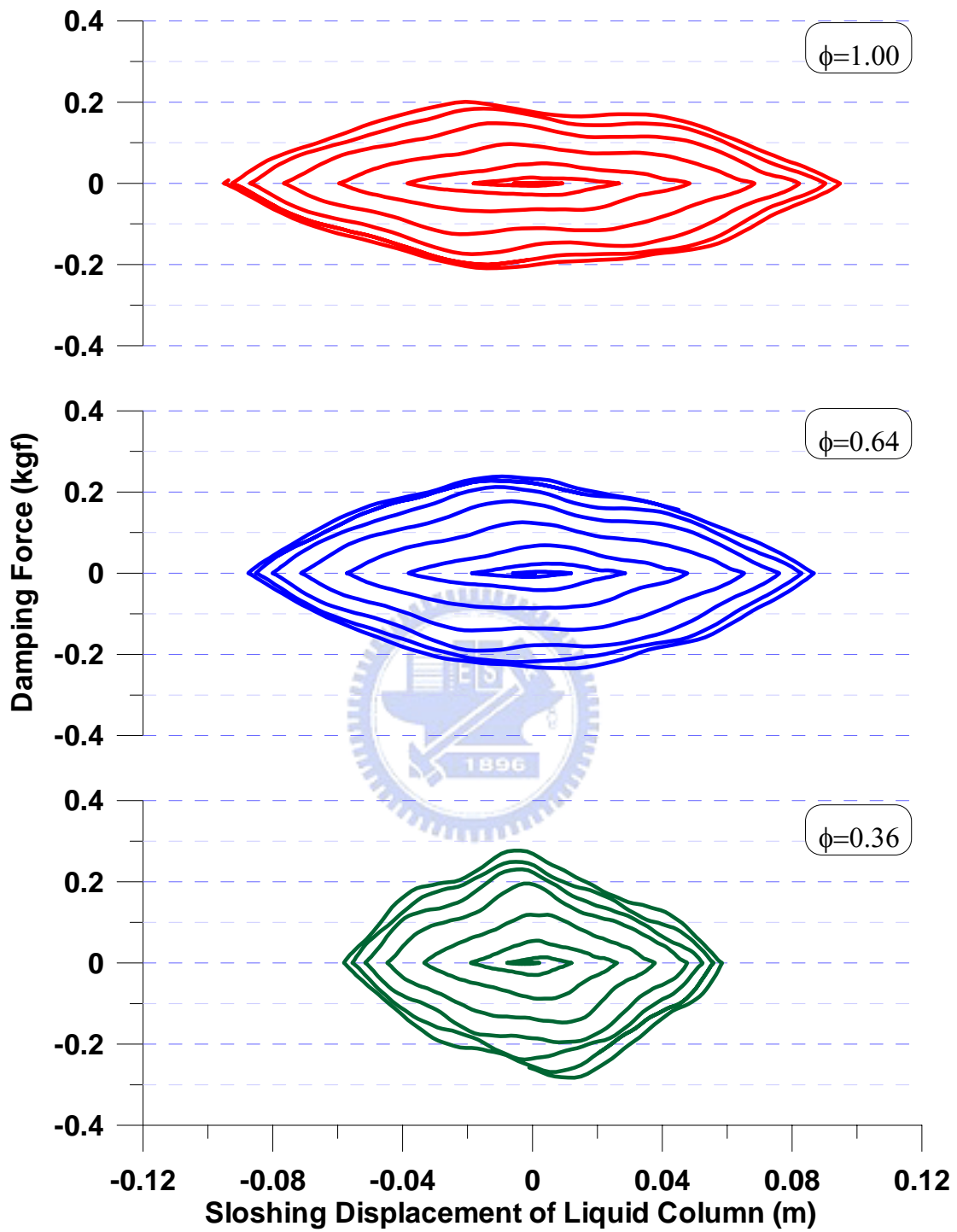


圖 3.42 不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$)

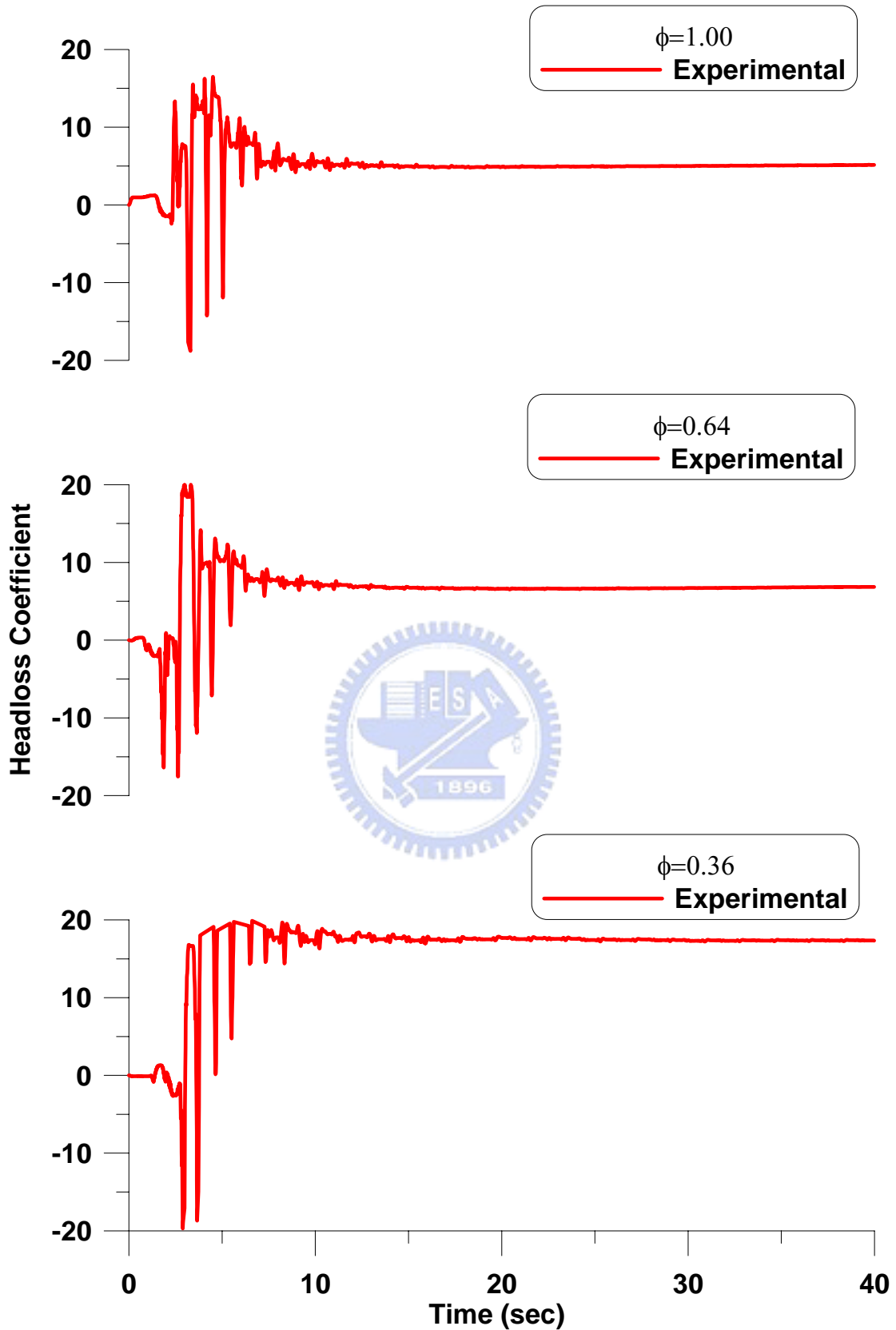


圖 3.43 不同孔口板孔徑之 TLCD 水頭損失係數收斂情形(共振簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$)

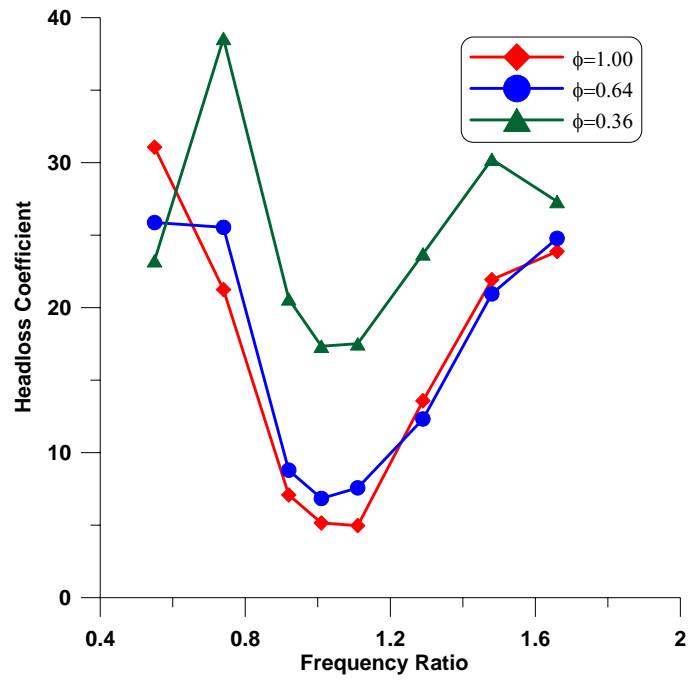


圖 3.44 擾動與結構之頻率比對於水頭損失係數之影響(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)



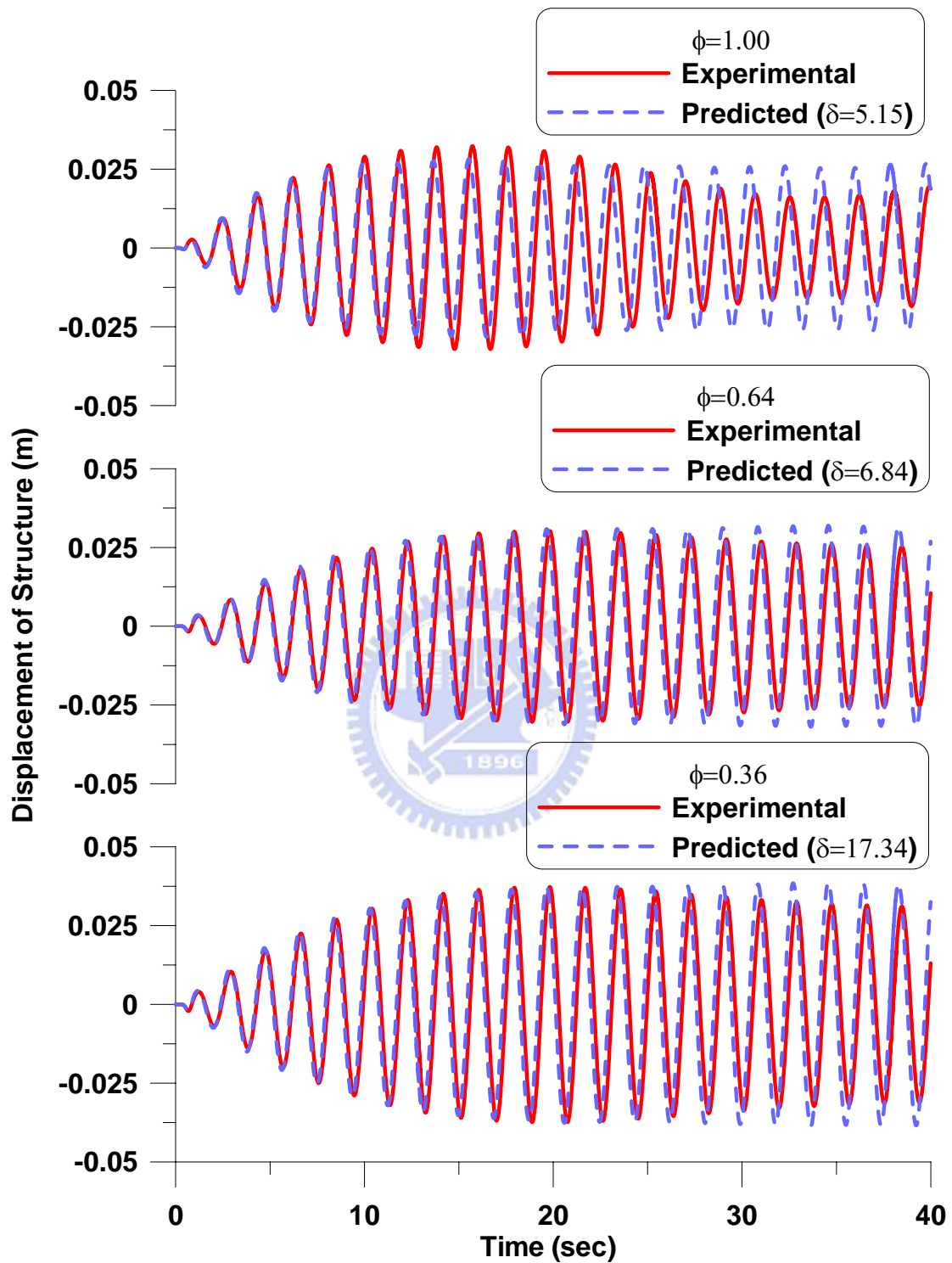


圖 3.45 TLCD 系統試驗與理論分析之結構位移歷時比較(簡諧擾動，
擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$)

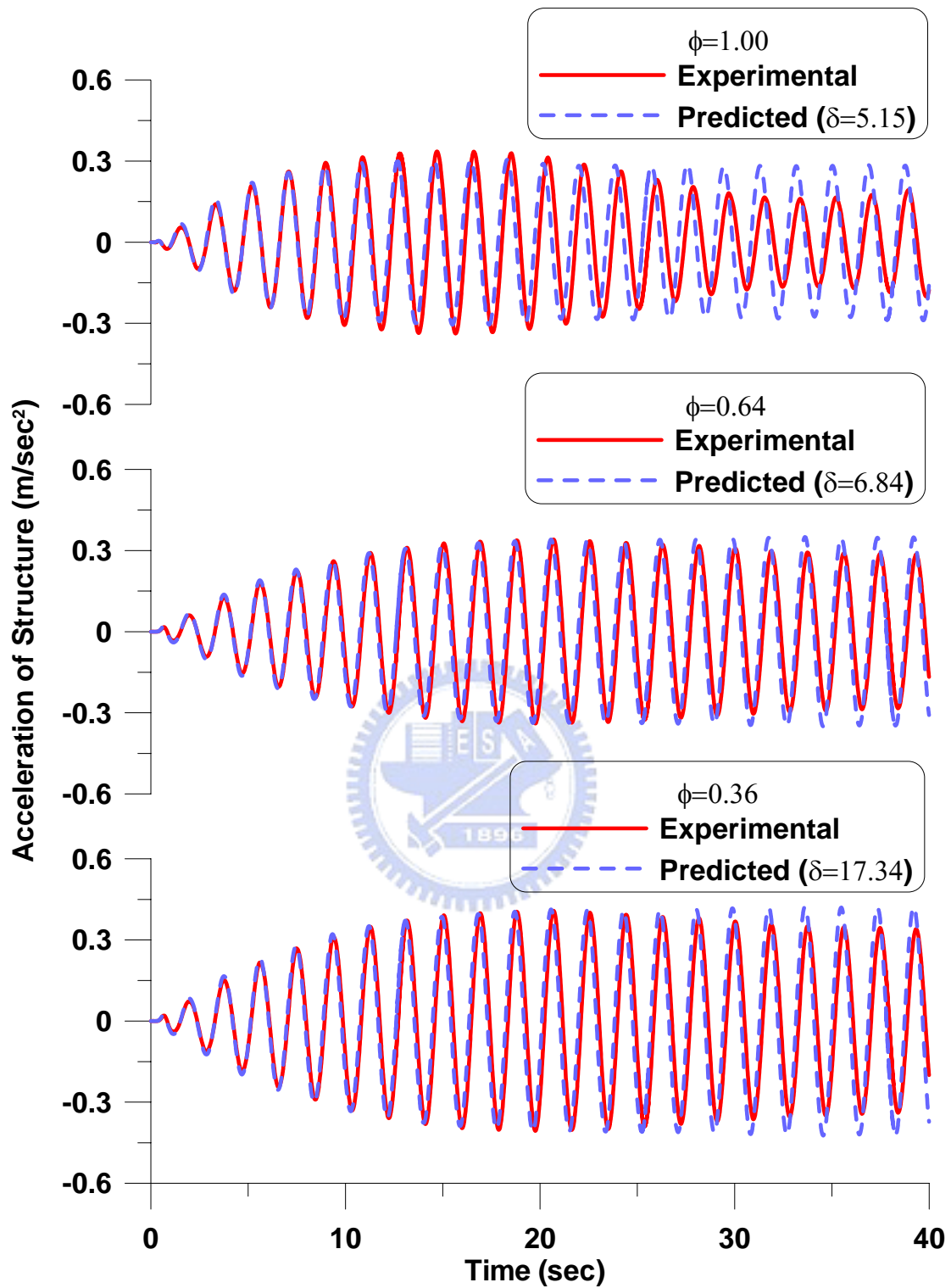


圖 3.46 TLCD 系統試驗與理論分析之結構加速度歷時比較(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$)

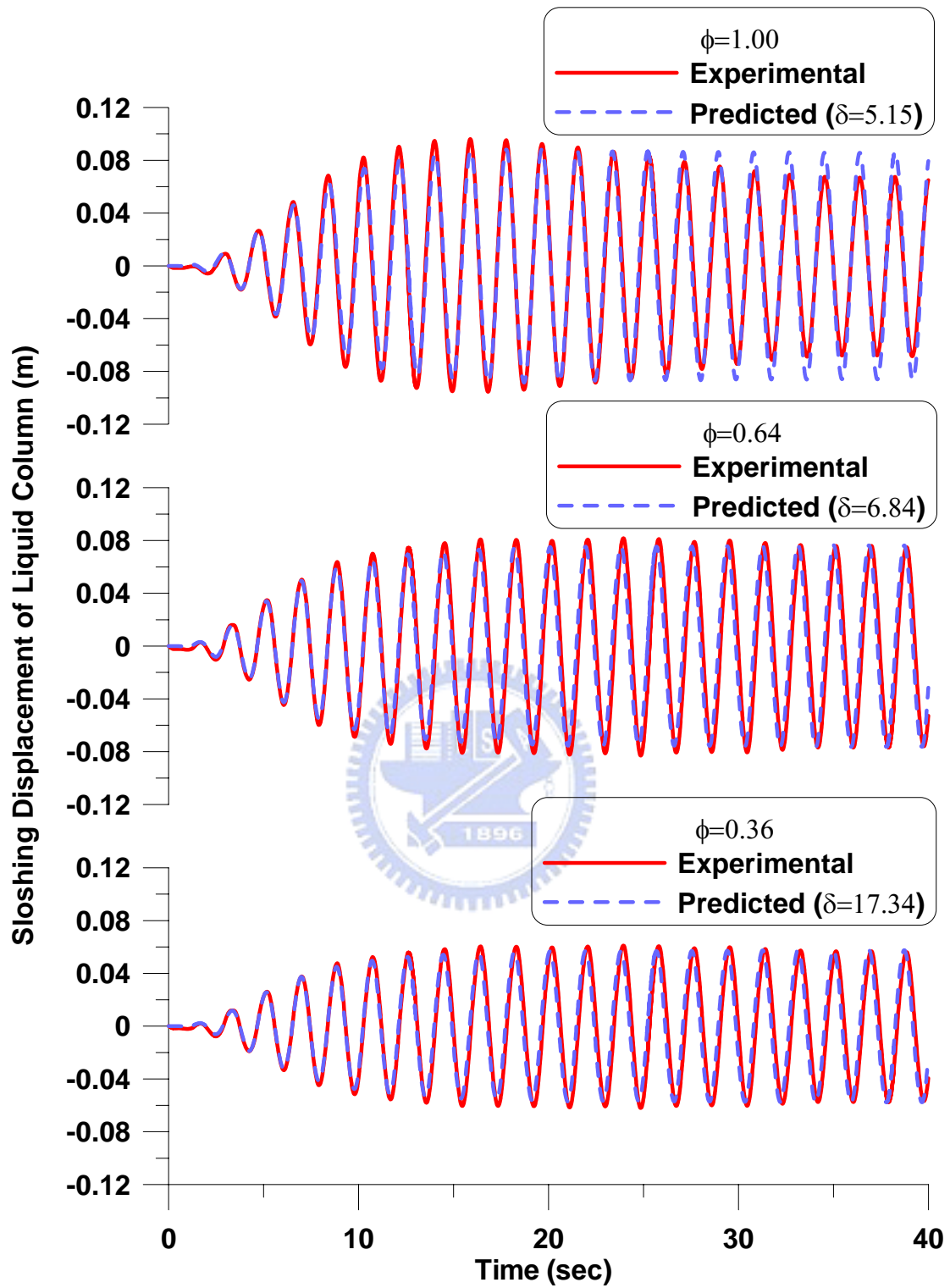


圖 3.47 TLCD 系統試驗與理論分析之水柱激盪位移歷時比較(簡諧擾動，擾動振幅 3mm， $\gamma_s = 1.00$)

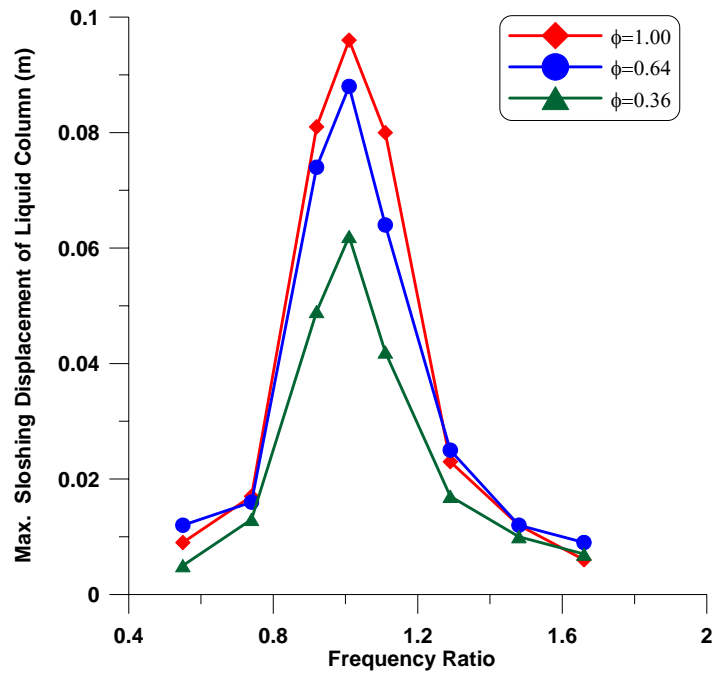


圖 3.48 擾動與結構之頻率比對於水柱激盪位移峰值之影響(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

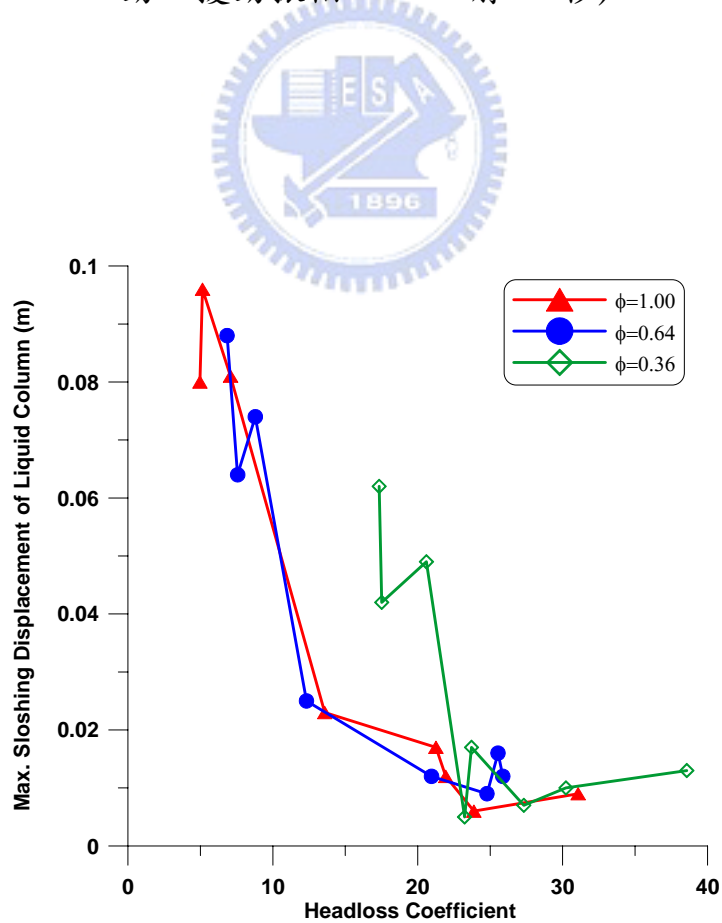


圖 3.49 不同孔口板孔徑之 TLCD 系統水柱激盪位移峰值與水頭損失係數關係(簡諧擾動，擾動振幅 3mm，前 40 秒)

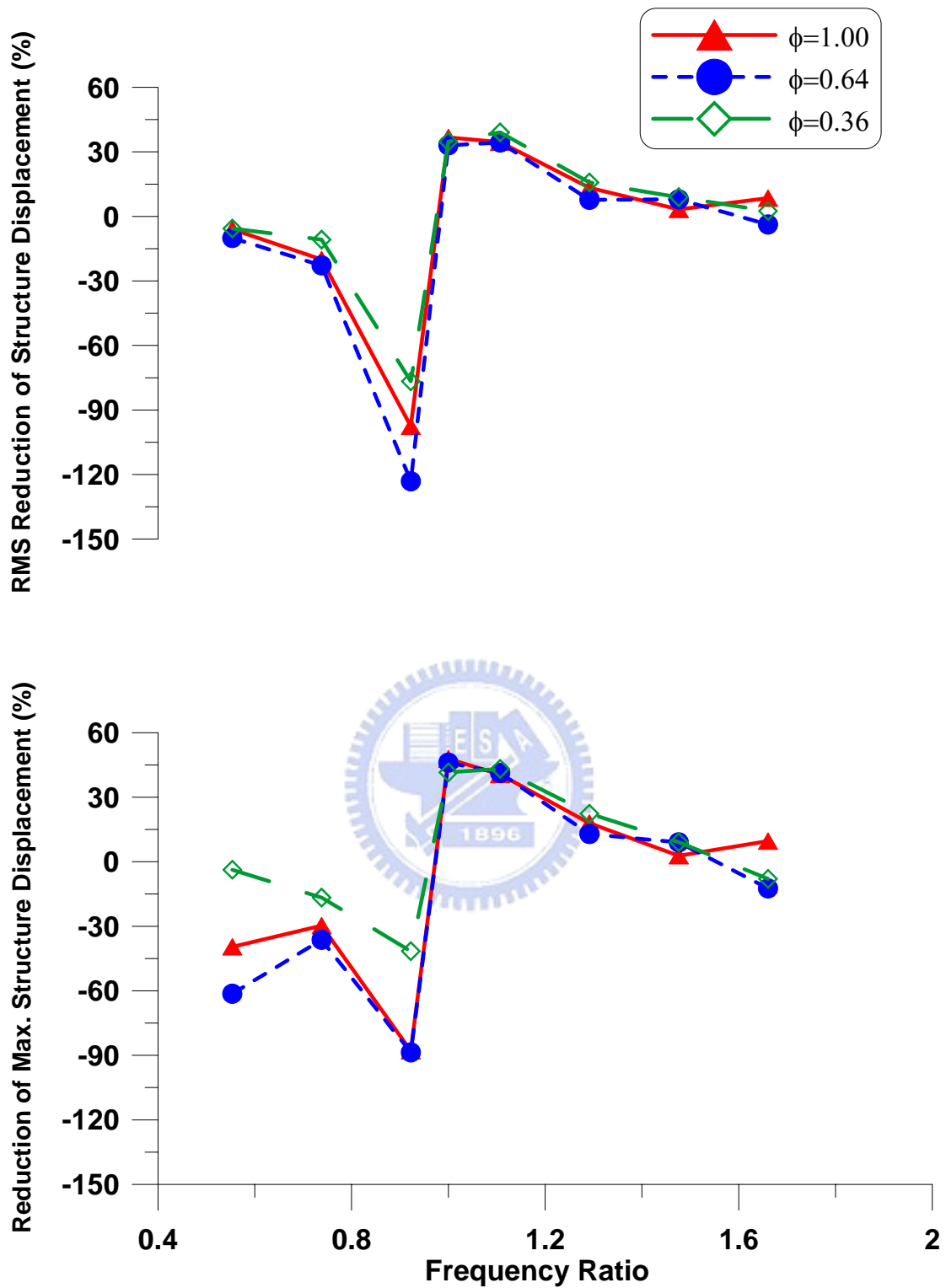


圖 3.50 孔口板孔徑與擾動頻率比對於結構位移反應折減之影響(簡諧擾動，擾動振幅 3mm)

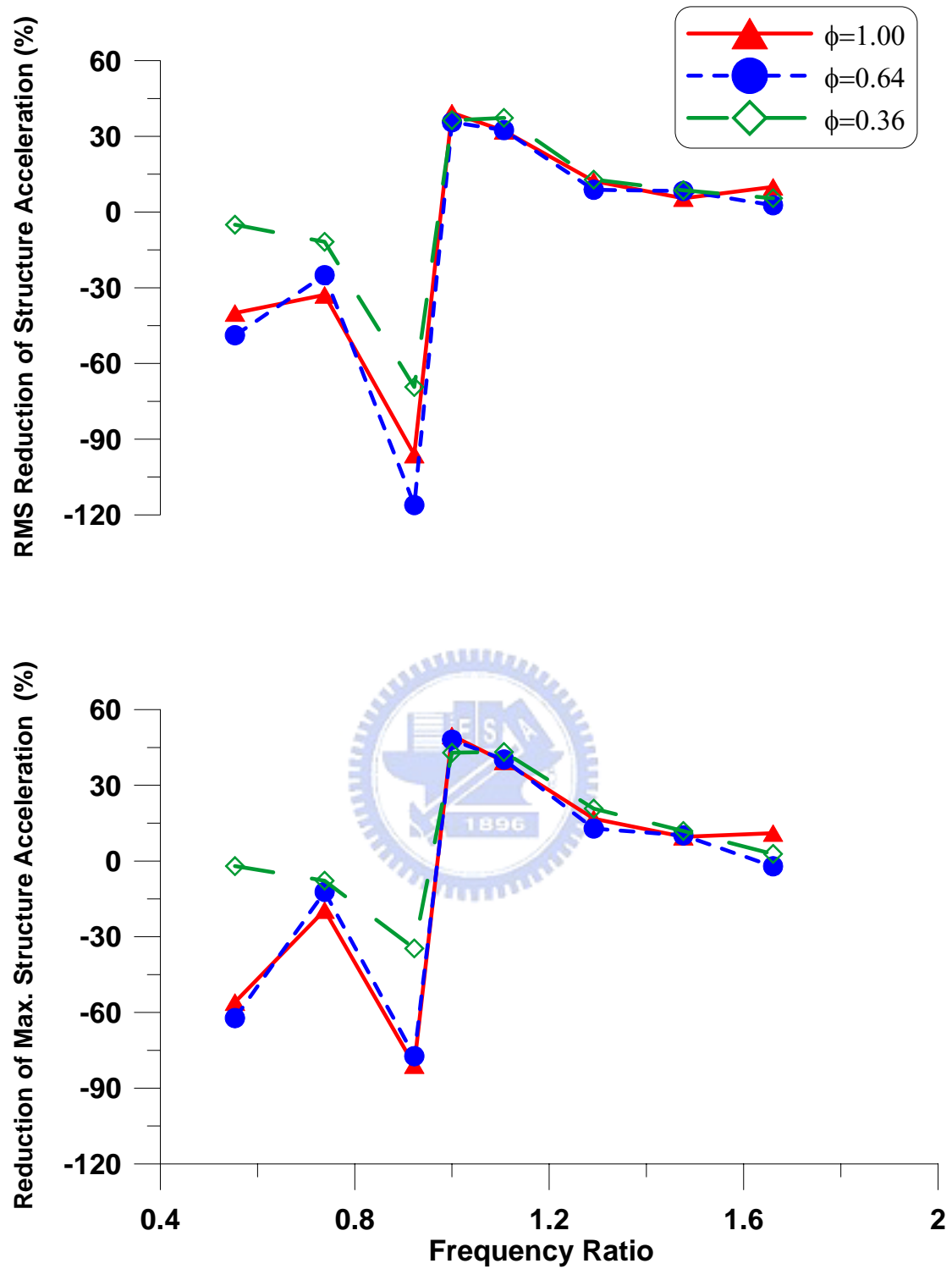


圖 3.51 孔口板孔徑與擾動頻率比對於結構加速度反應折減之影響
(簡諧擾動，擾動振幅 3mm)

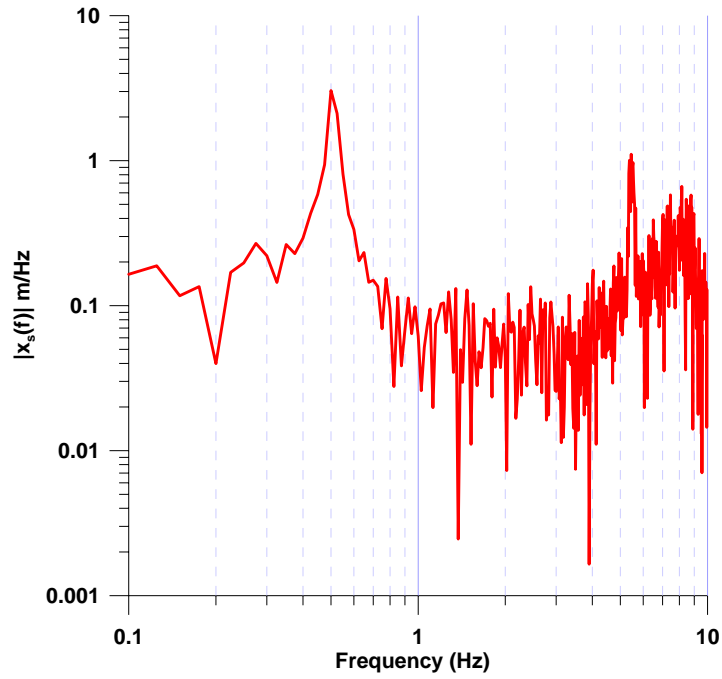


圖 3.52 TLCD 控制結構之位移富氏頻譜圖(自由振動， $\phi = 1.0$)

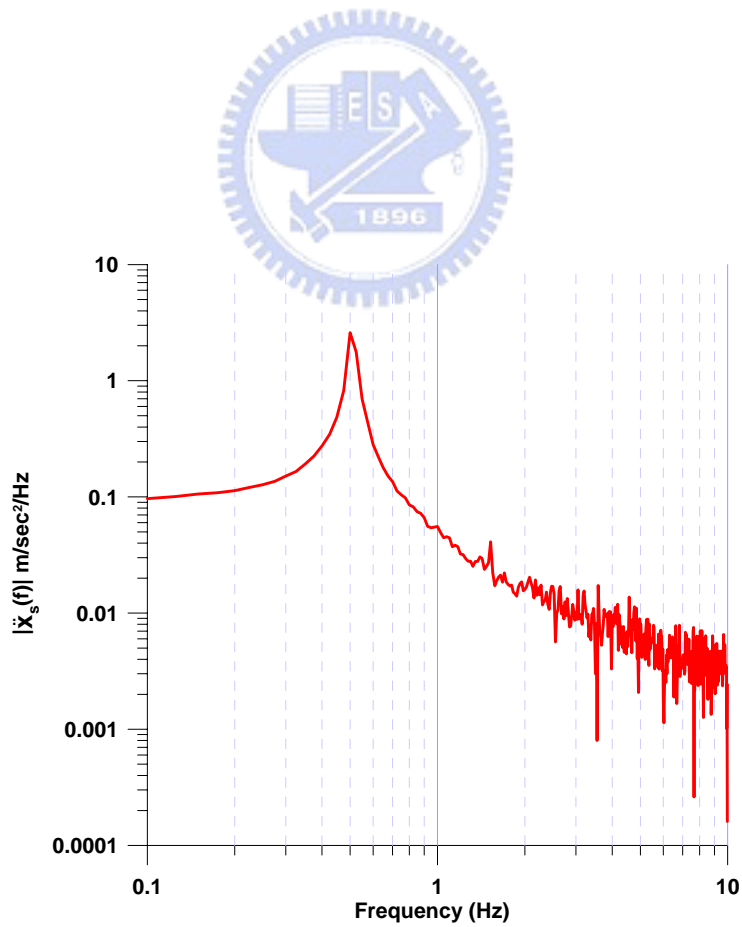


圖 3.53 TLCD 控制結構之加速度富氏頻譜圖(自由振動， $\phi = 1.0$)

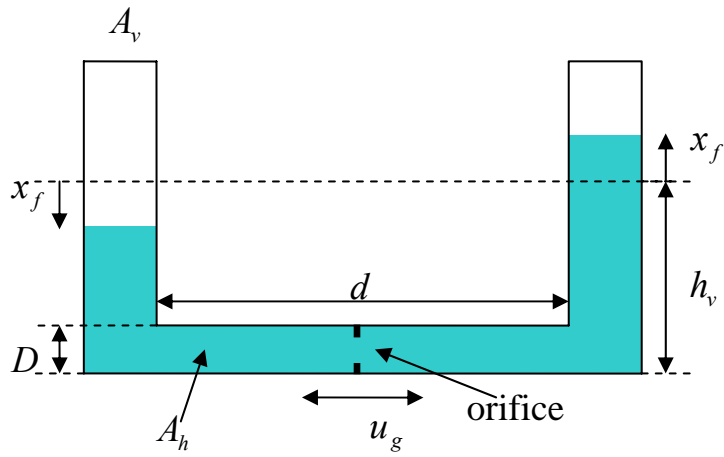


圖 4.1 變斷面 TLCD 示意圖

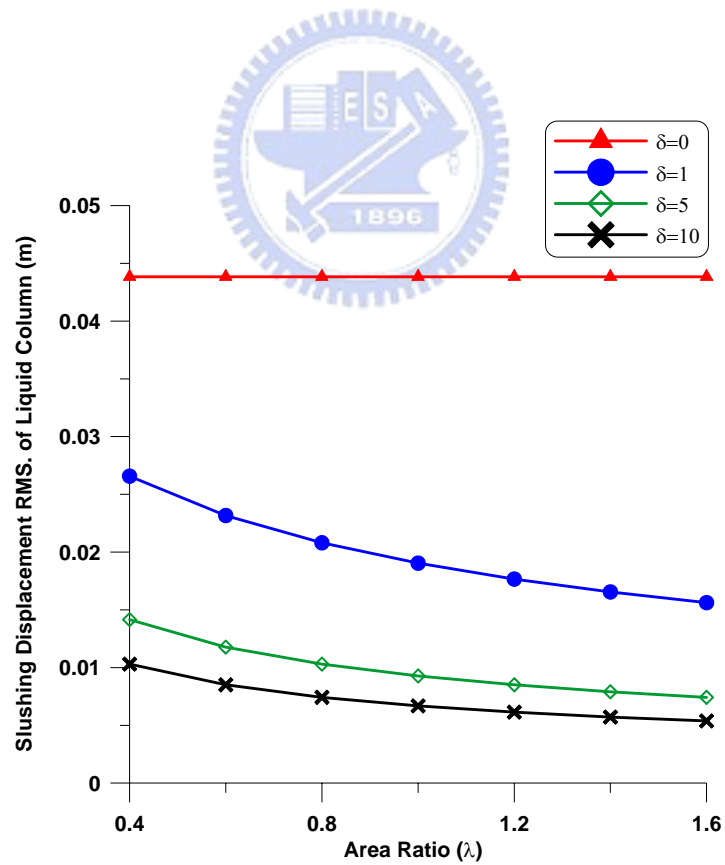


圖 4.2 管徑截面積比與水柱激盪位移均方根值之關係(自由振動， $x_f(0) = 0.062$ m)

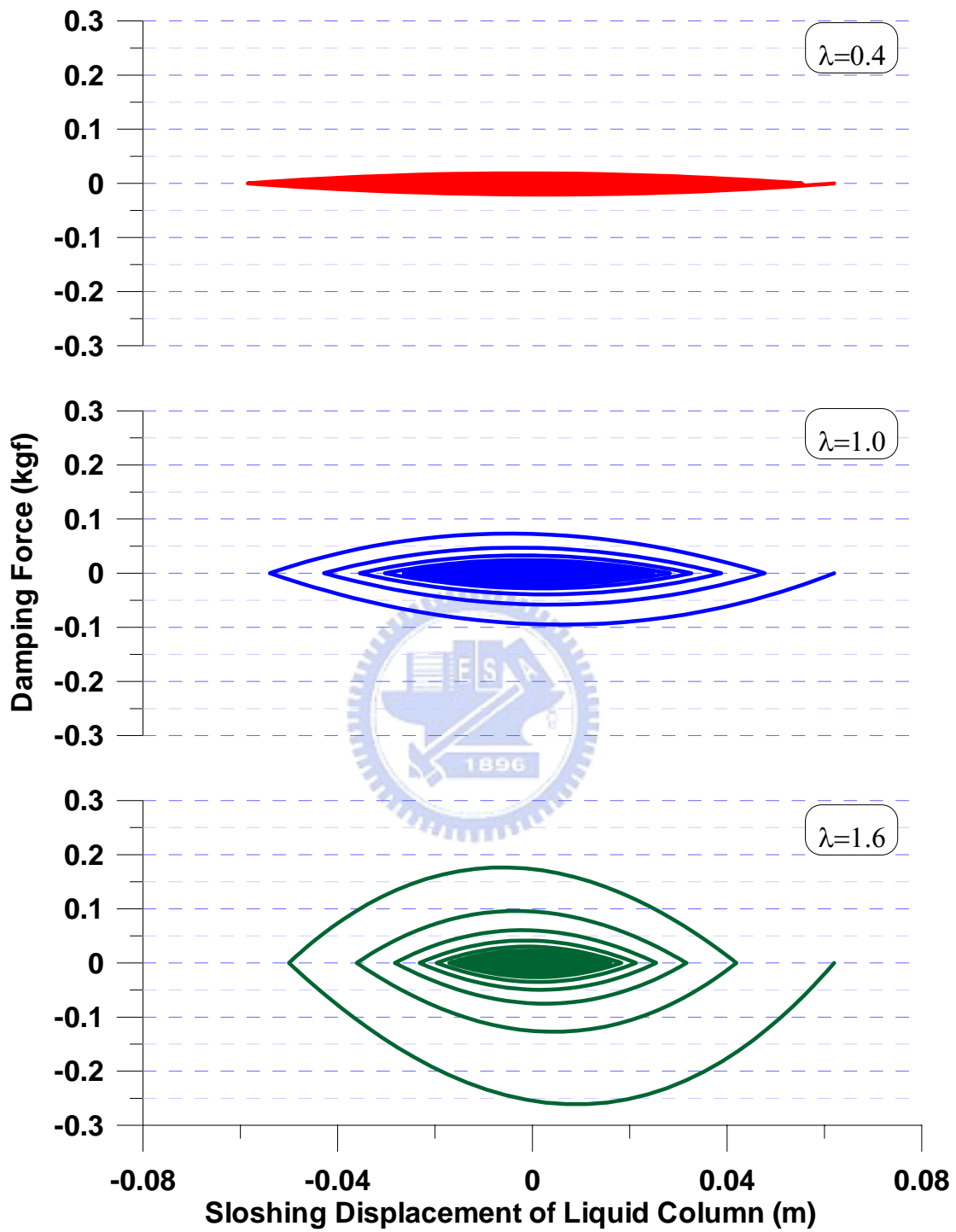


圖 4.3 不同管徑管徑截面積比之變斷面 TLCD 遲滯迴圈(自由振動， $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$ ， $\delta = 5$)

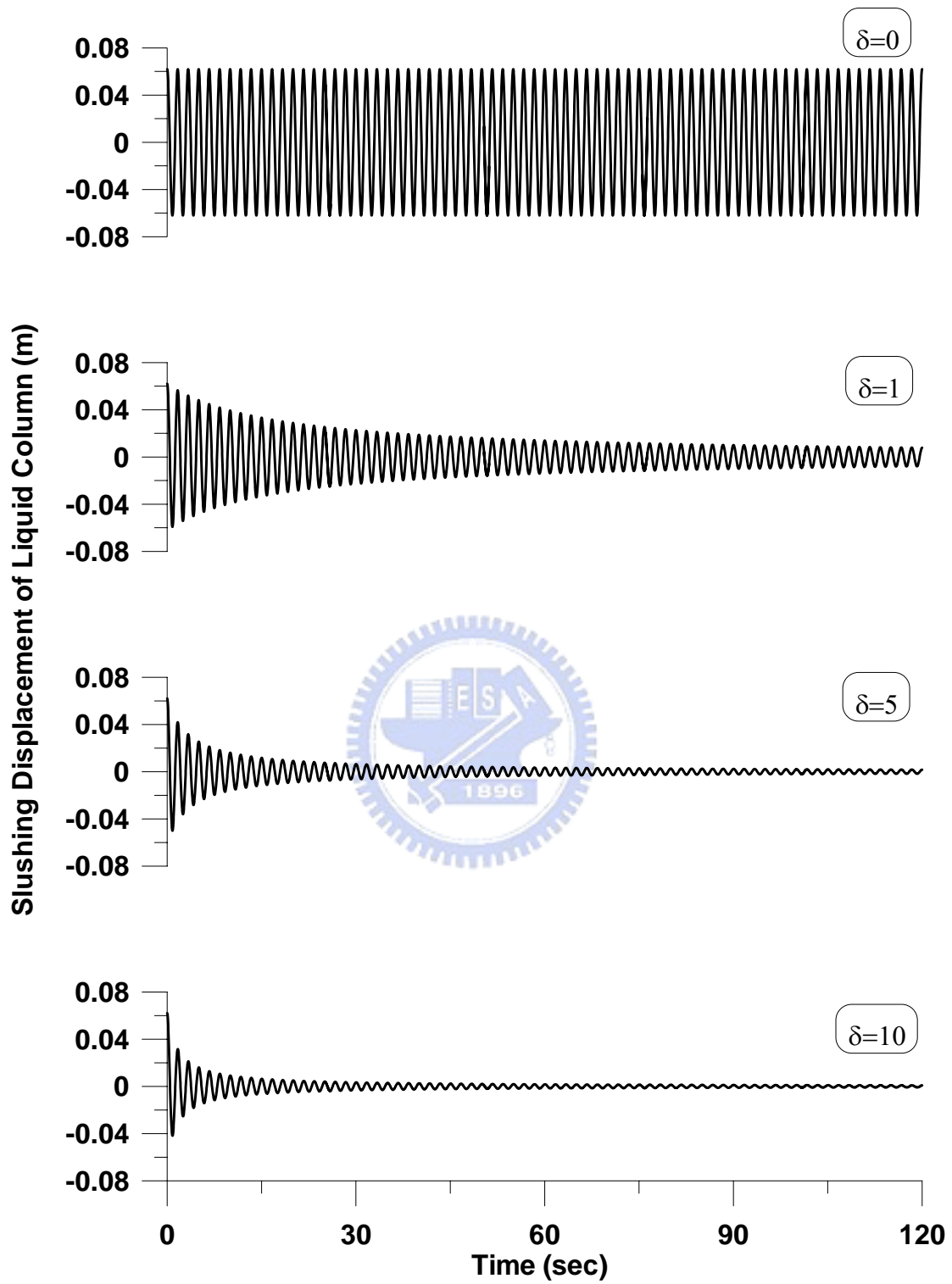


圖 4.4 水柱激盪位移反應歷時(自由振動， $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$ ， $\lambda = 1.6$)

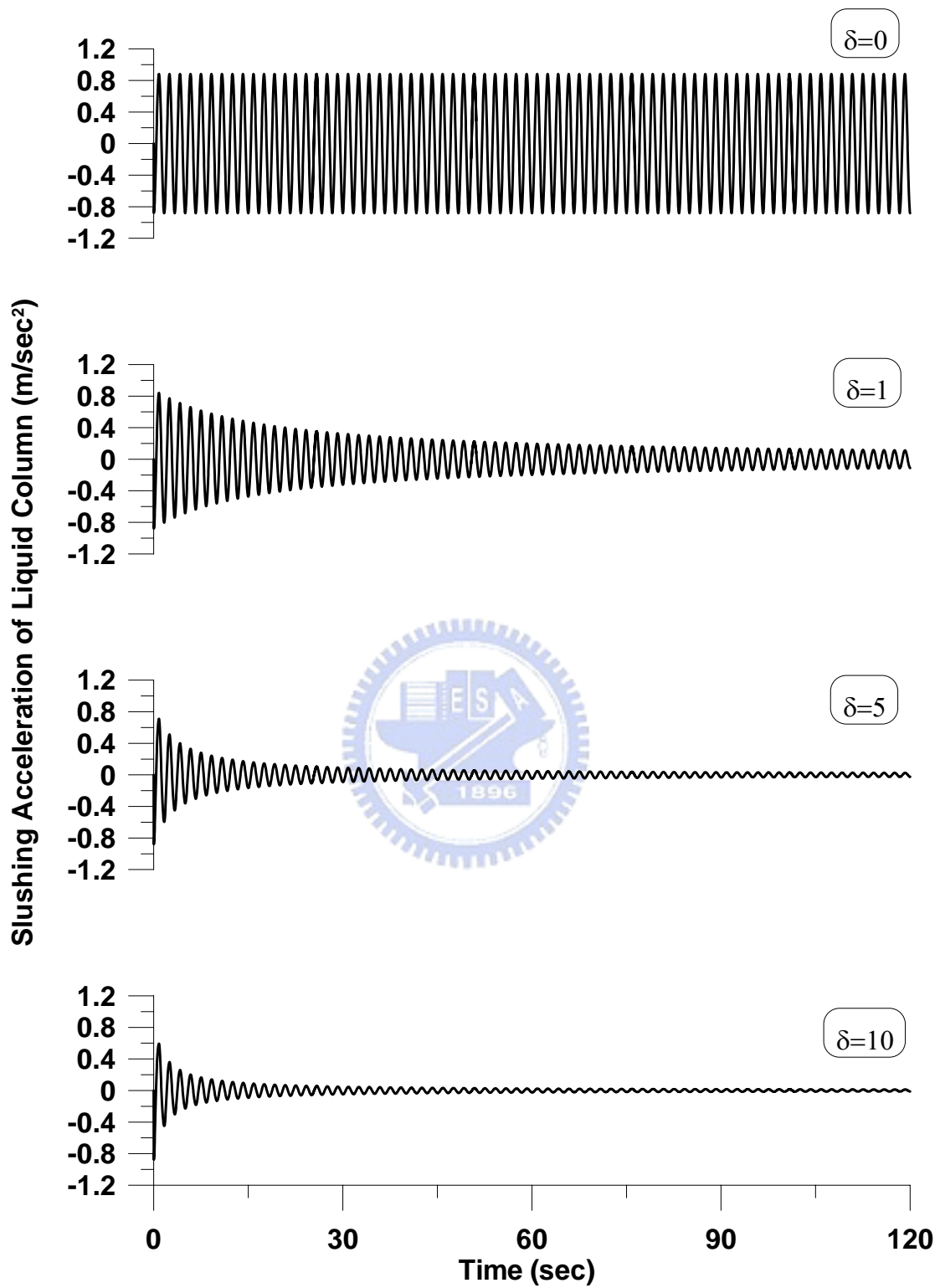


圖 4.5 水柱激盪加速度反應歷時(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\lambda = 1.6$)

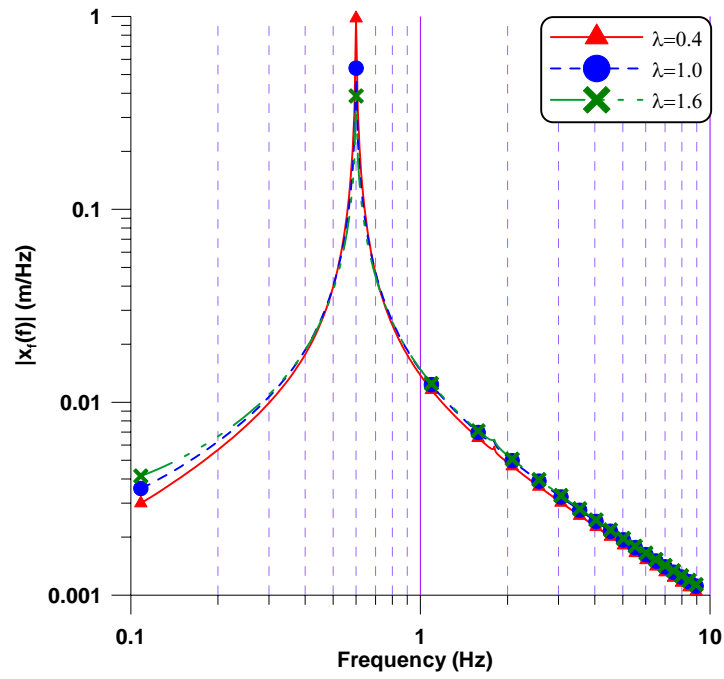


圖 4.6 水柱激盪位移之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\delta = 5$)

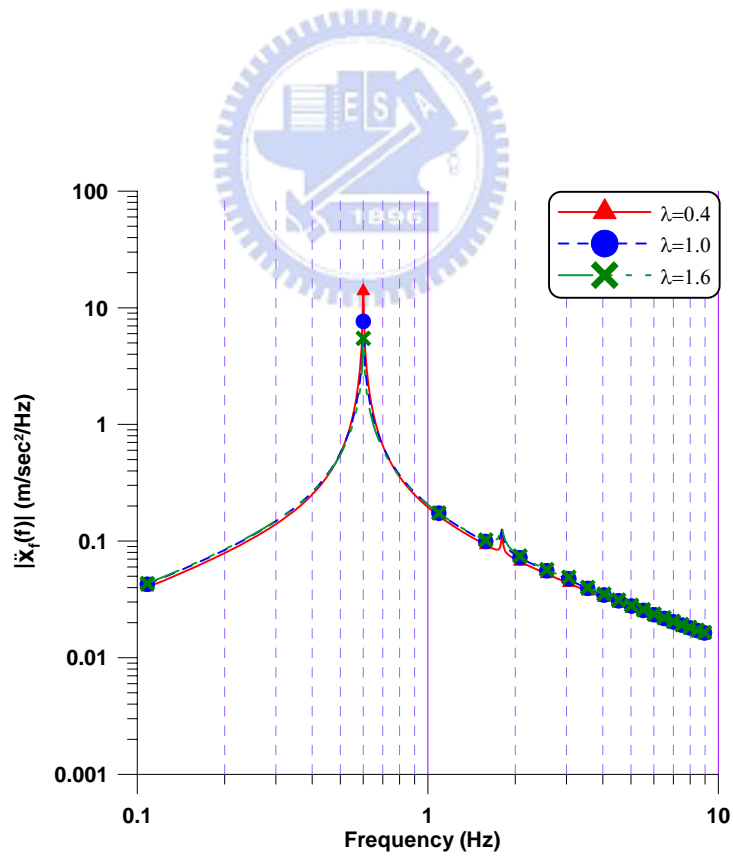


圖 4.7 水柱激盪加速度之富氏頻譜圖(自由振動, $x_f(0) = 0.062 \text{ m}$, $\delta = 5$)

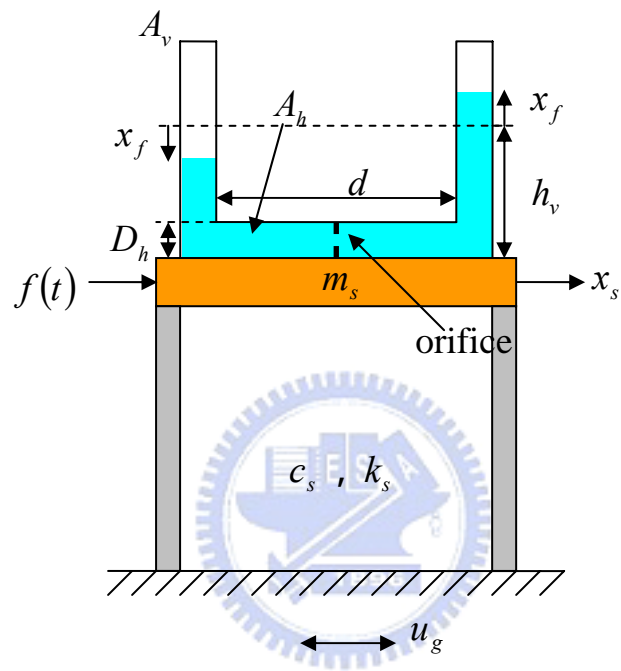


圖 4.8 單自由度結構裝置變斷面 TLCD 示意圖

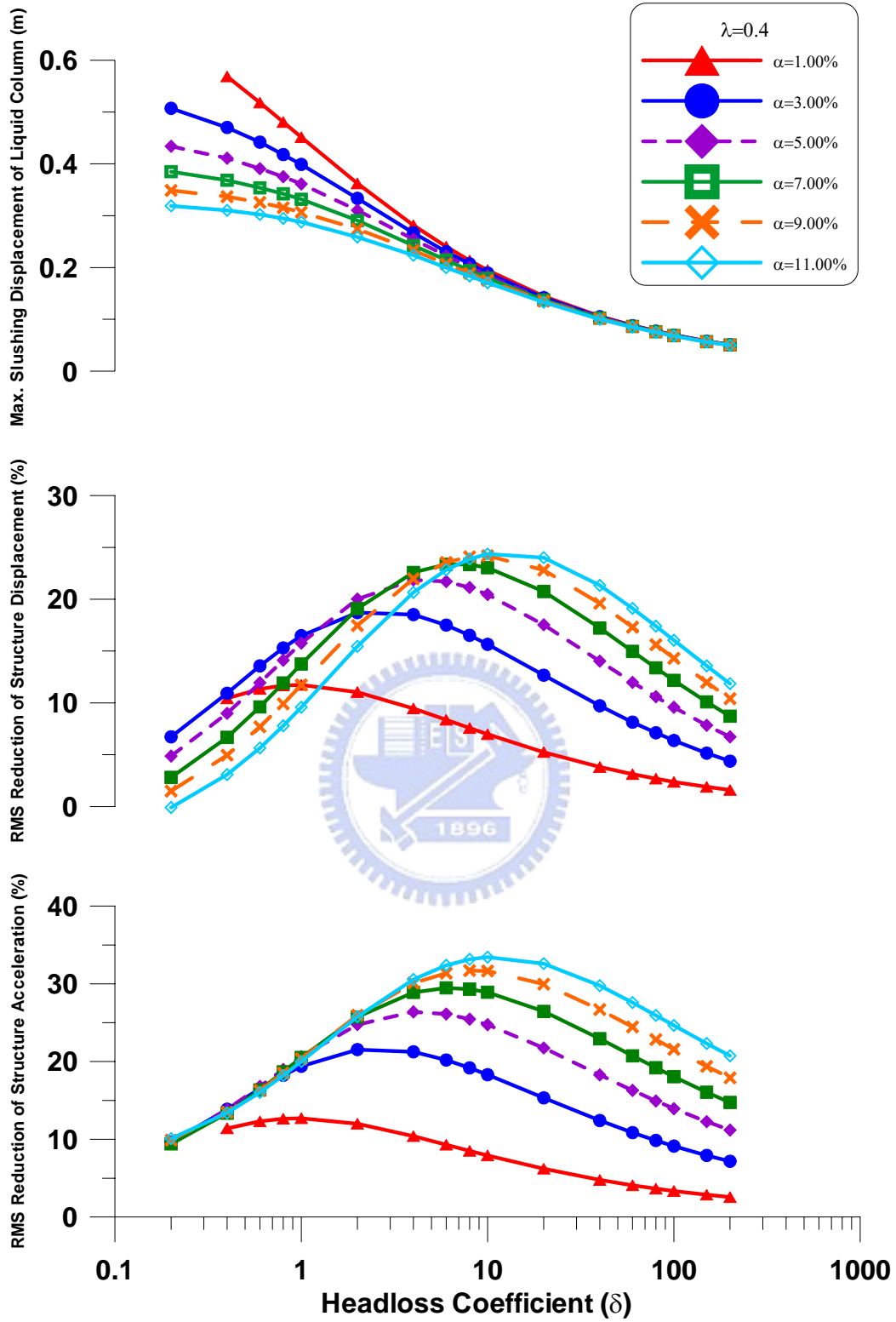


圖 4.9(a) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$)

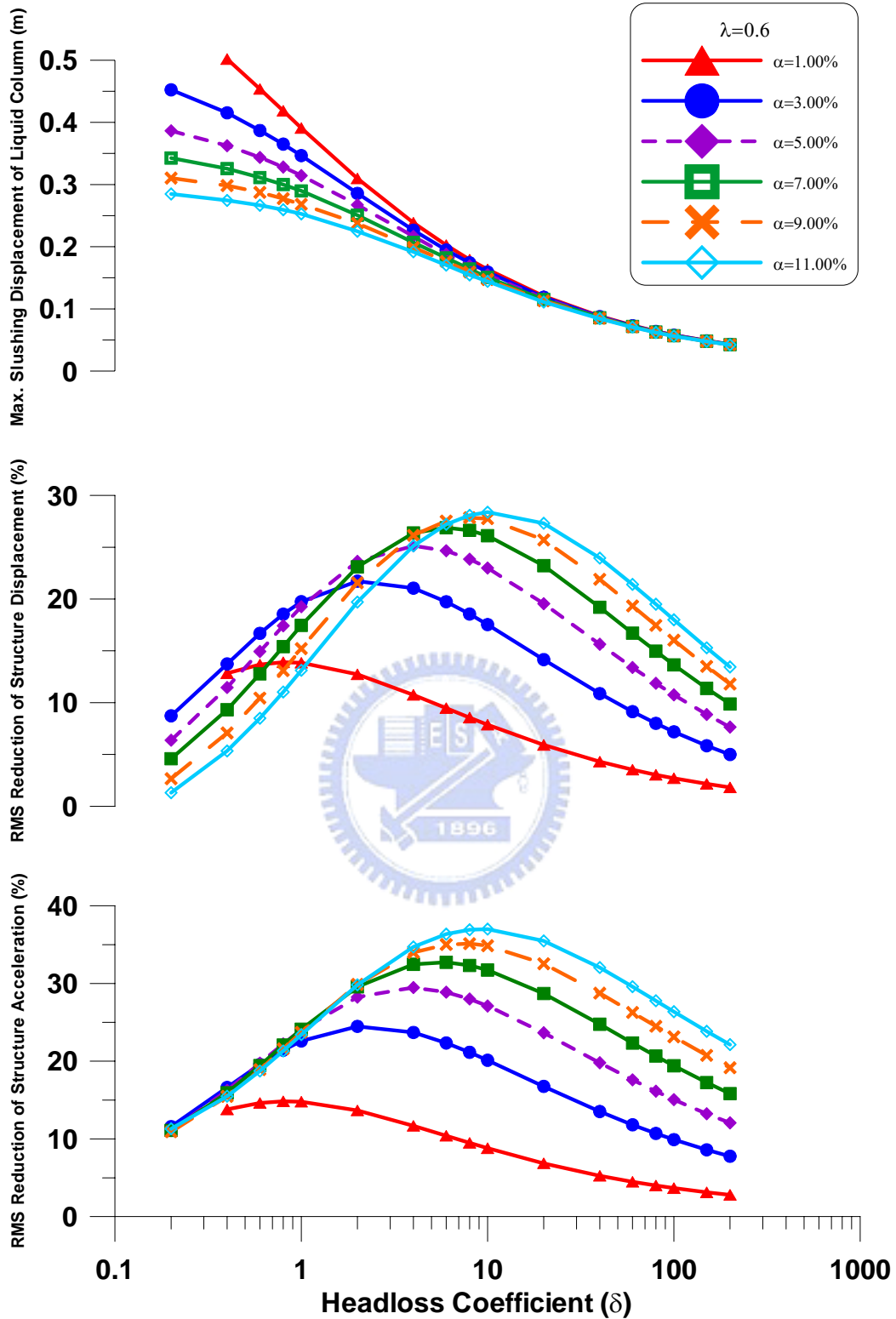


圖 4.9(b) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$)

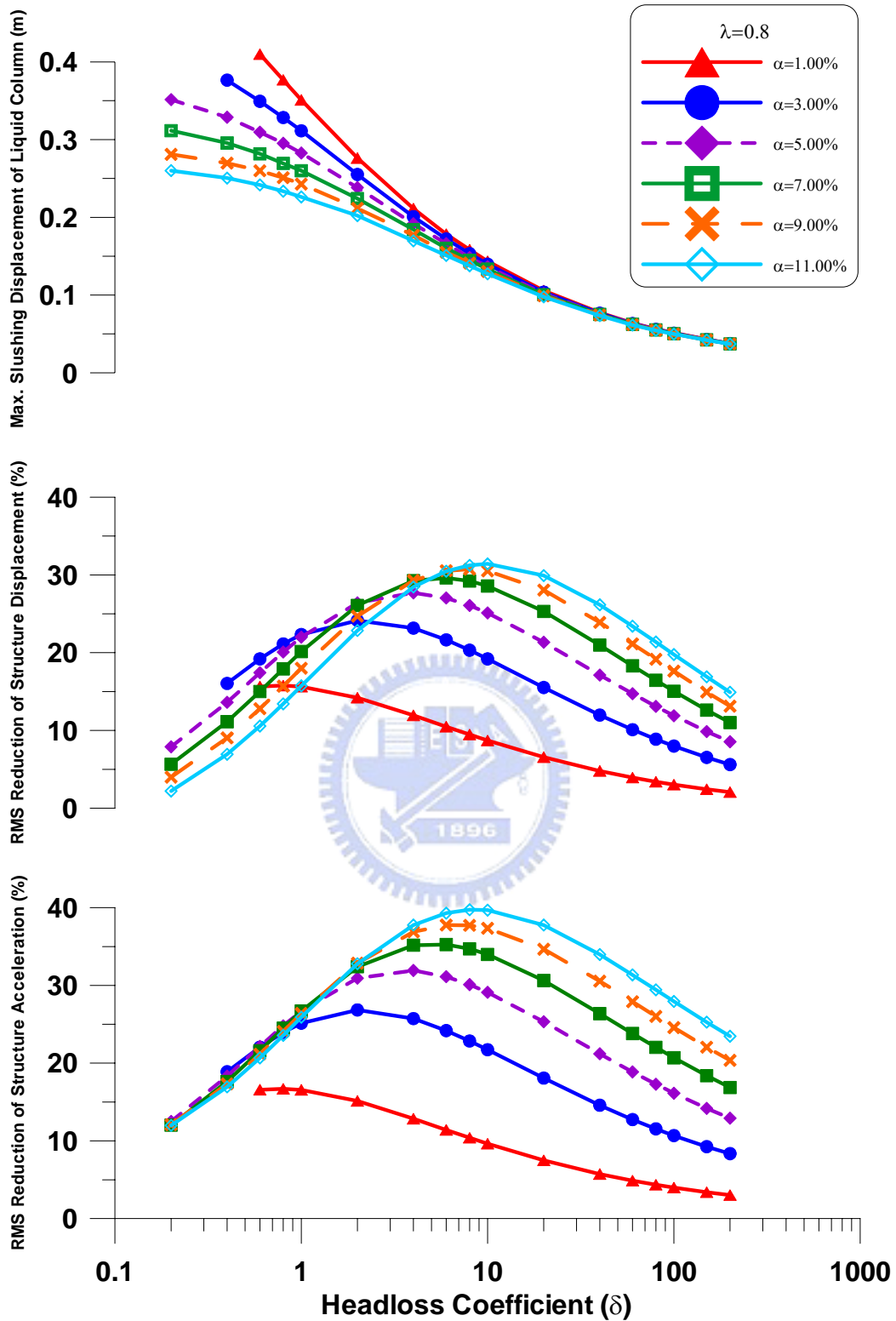


圖 4.9(c) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.8$)

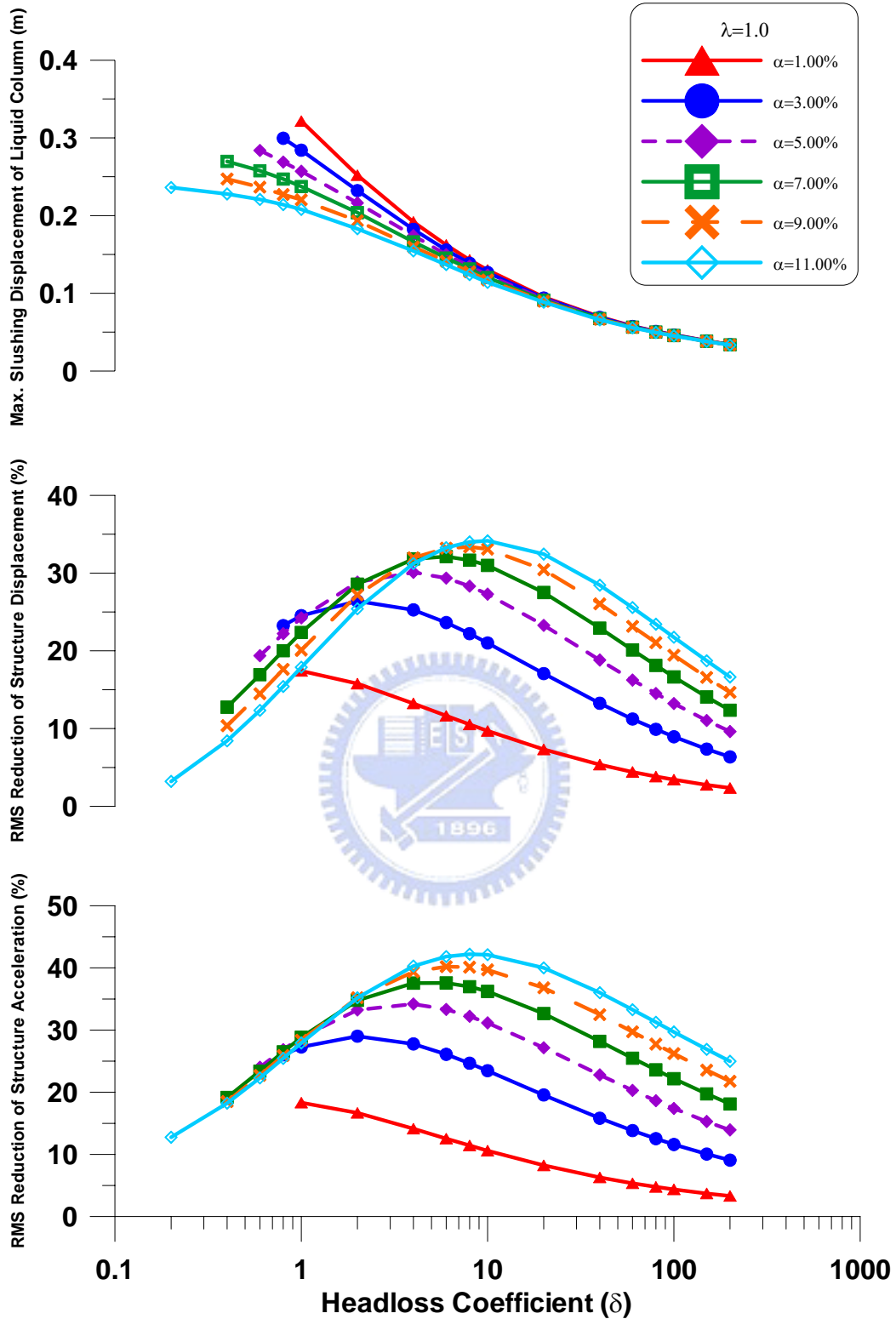


圖 4.9(d) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0) = 0.1\text{m}$, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.0$)

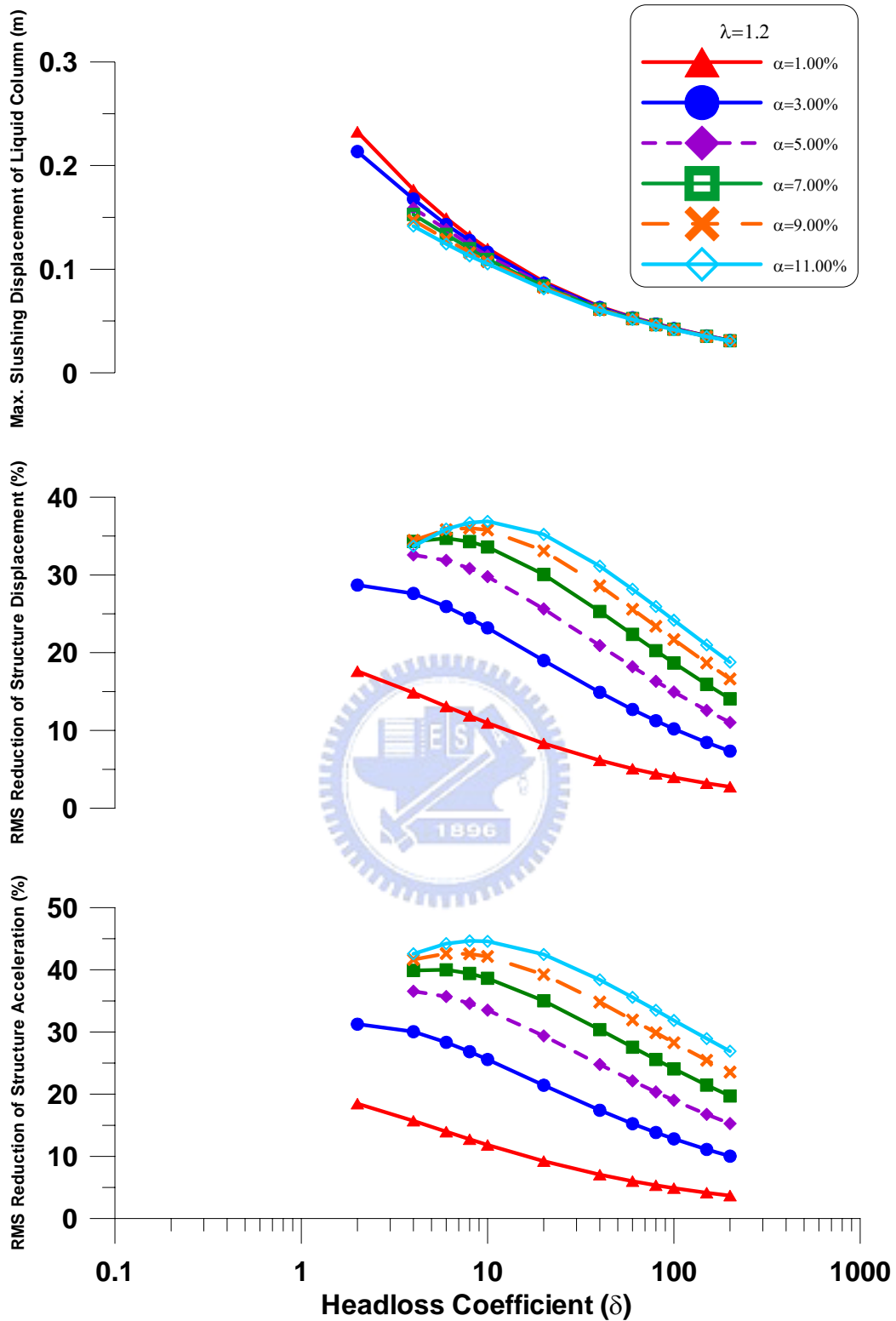


圖 4.9(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.2$)

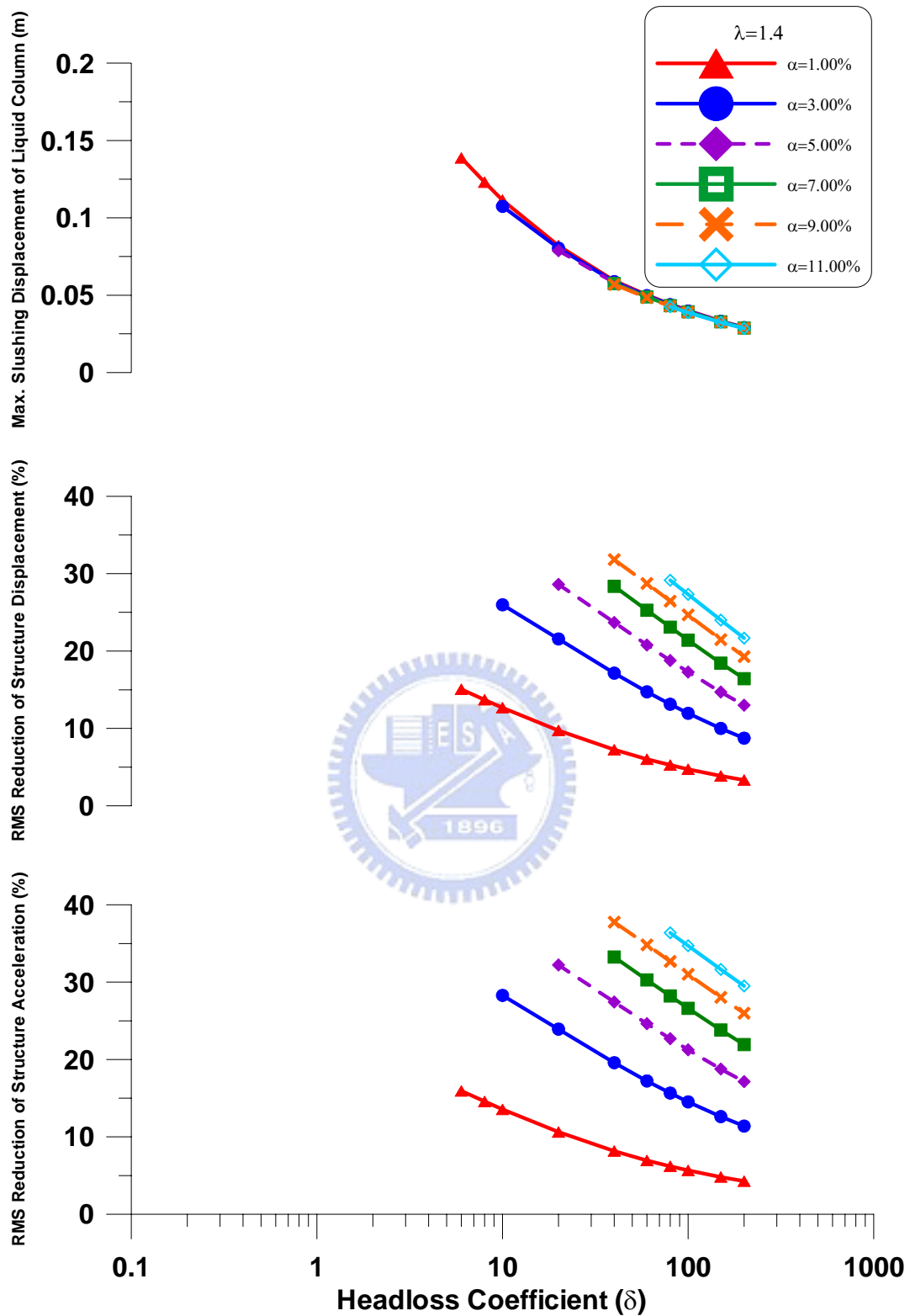


圖 4.9(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.4$)

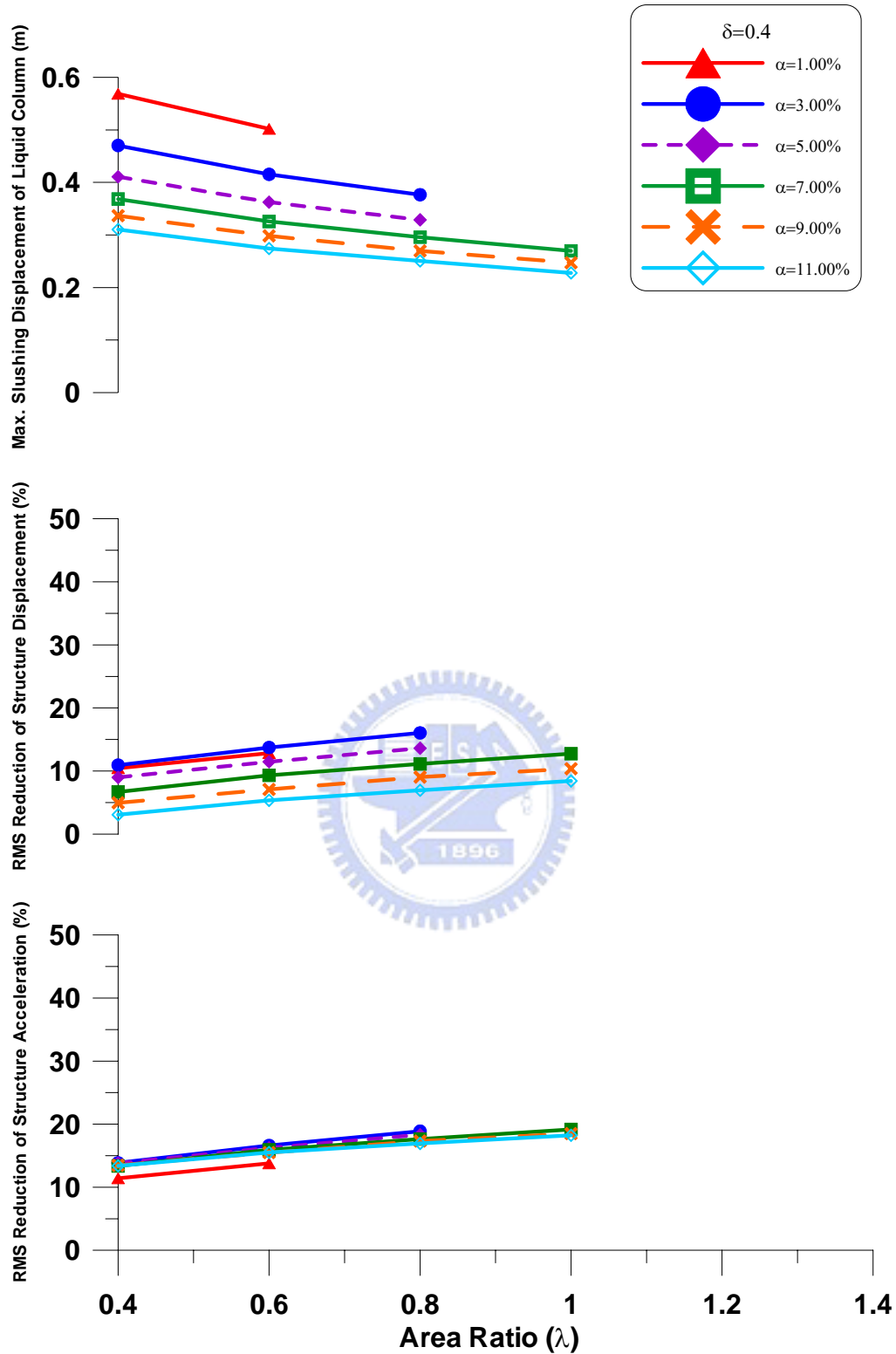


圖 4.10(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.4$)

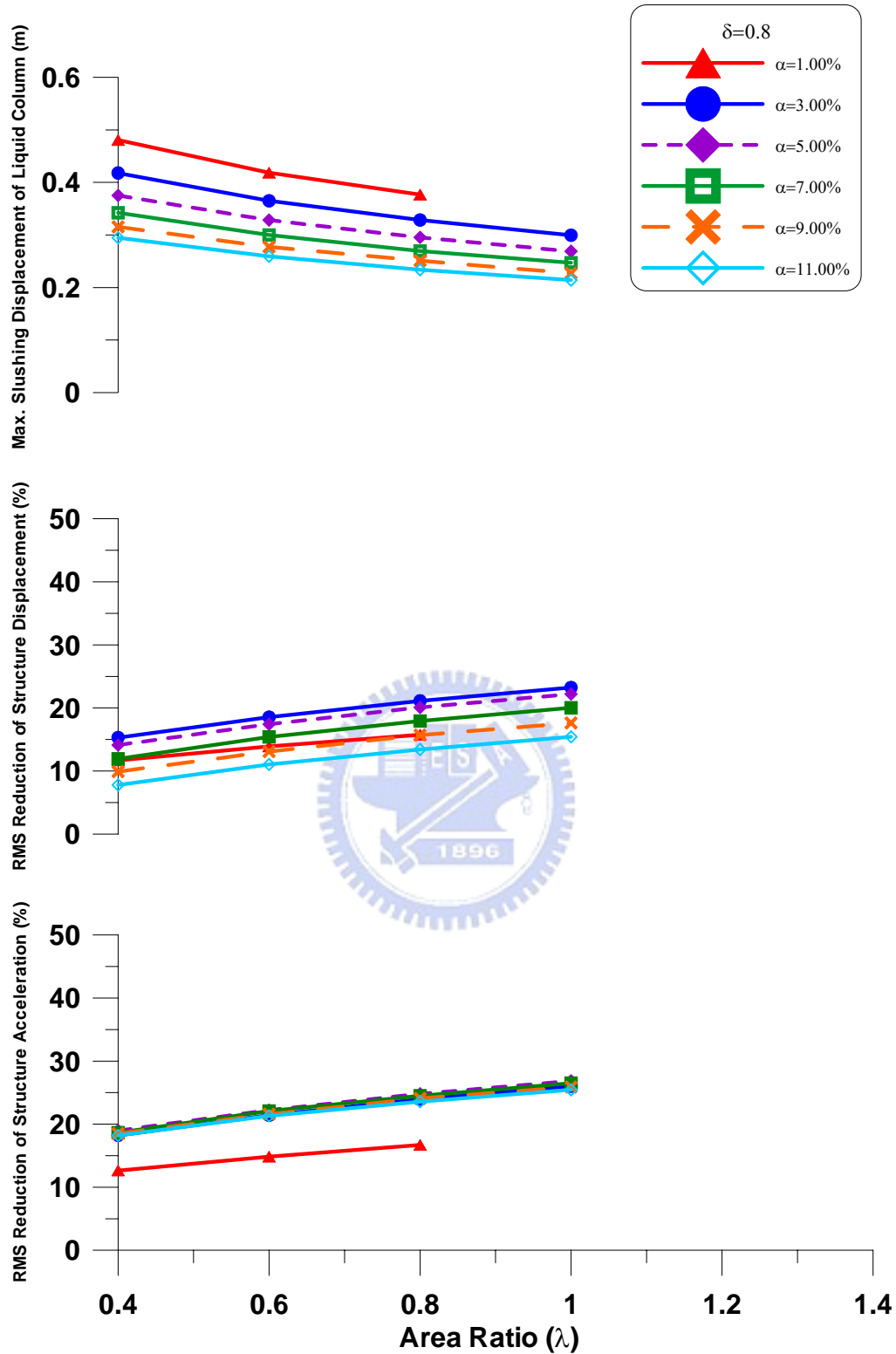


圖 4.10(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.8$)

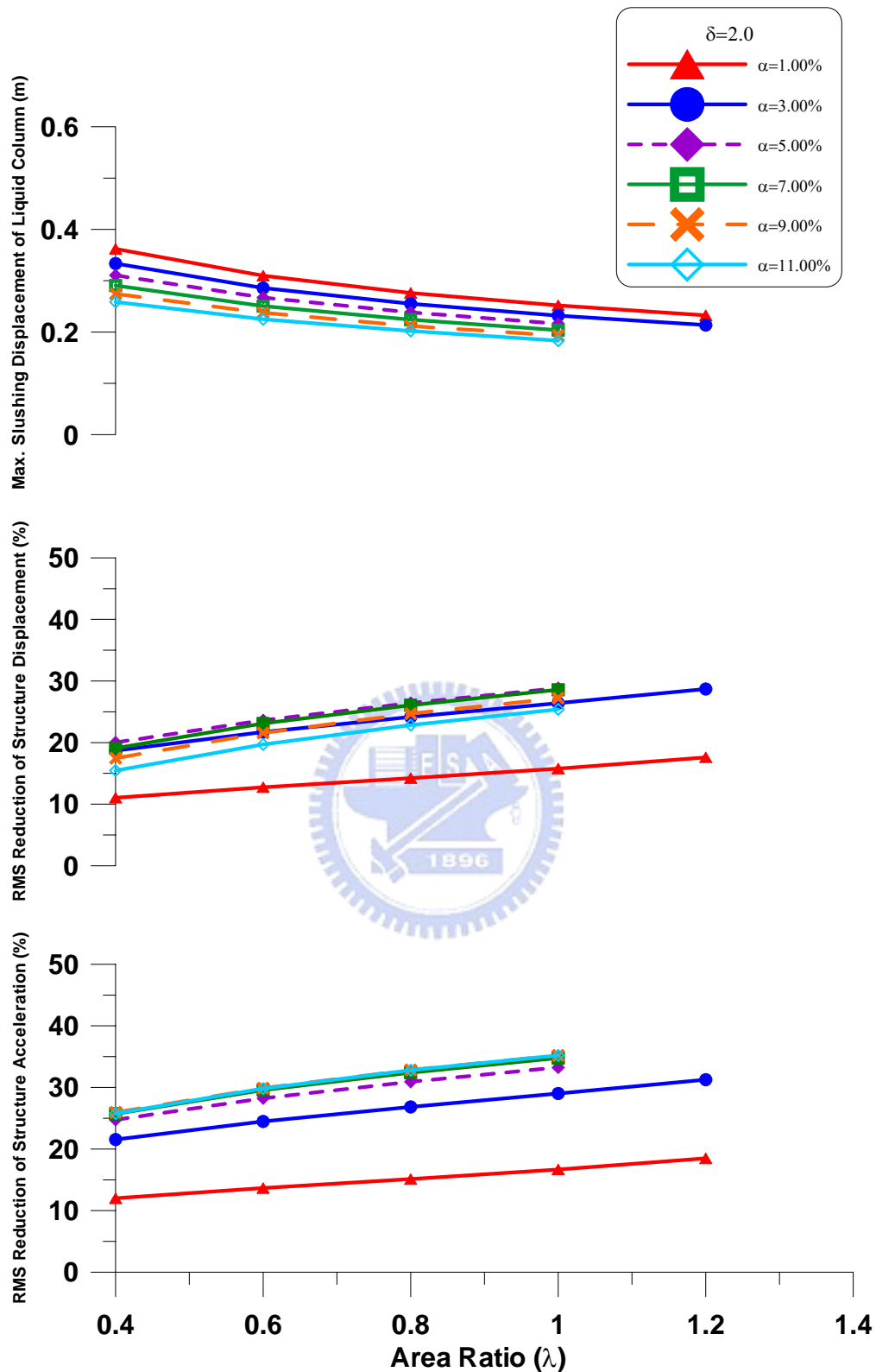


圖 4.10(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=2.0$)

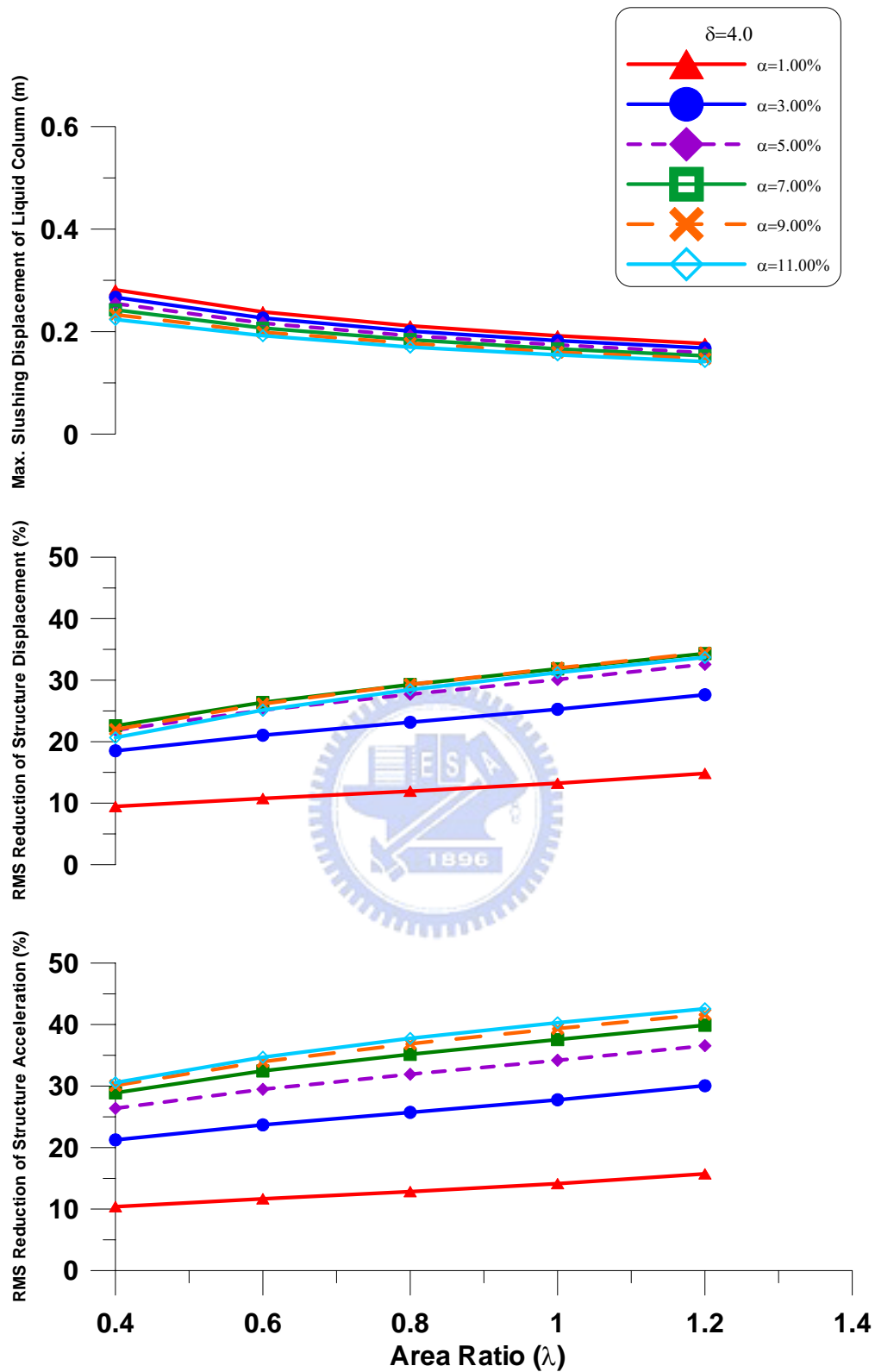


圖 4.10(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=4.0$)

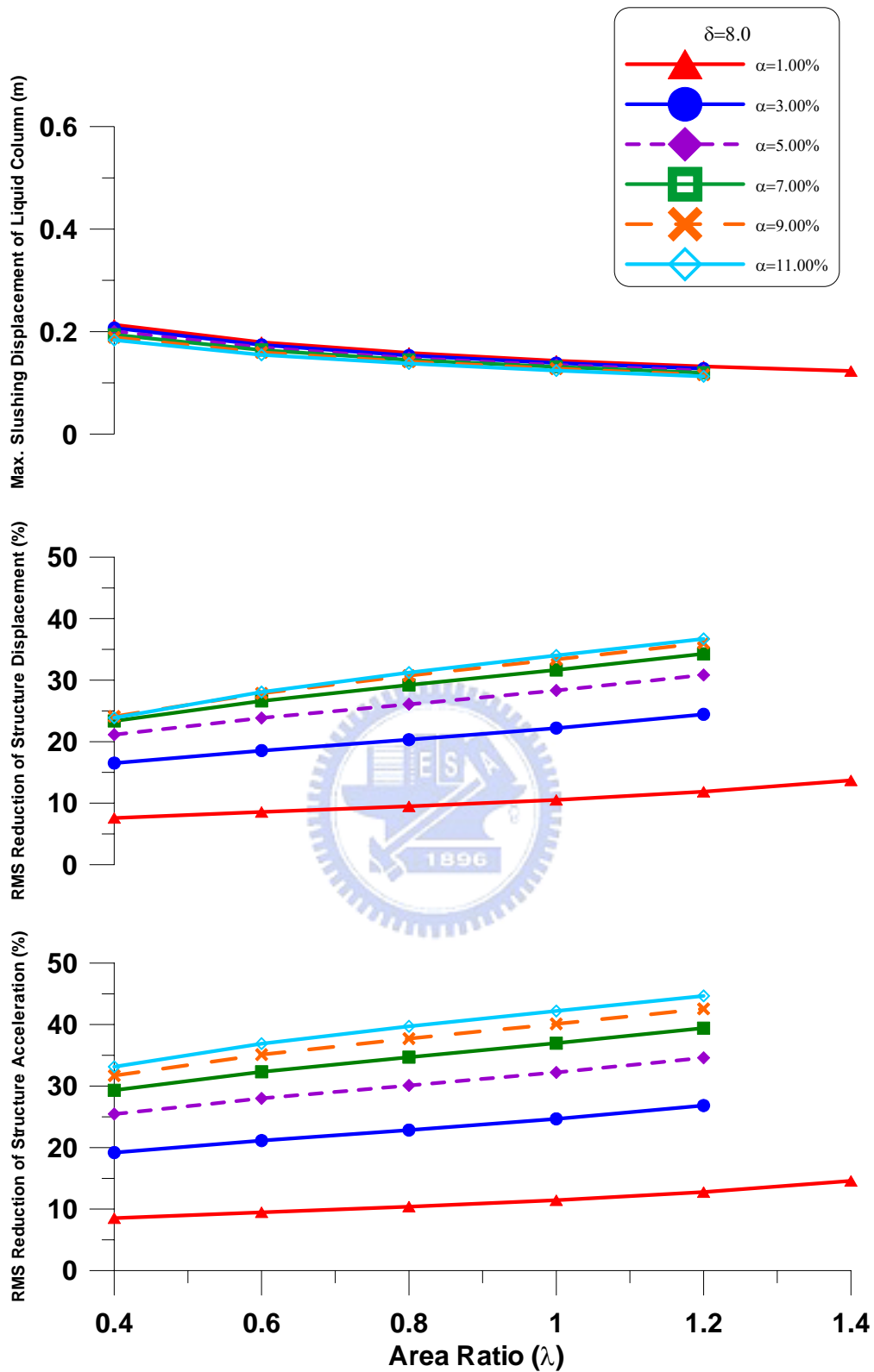


圖 4.10(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=8.0$)

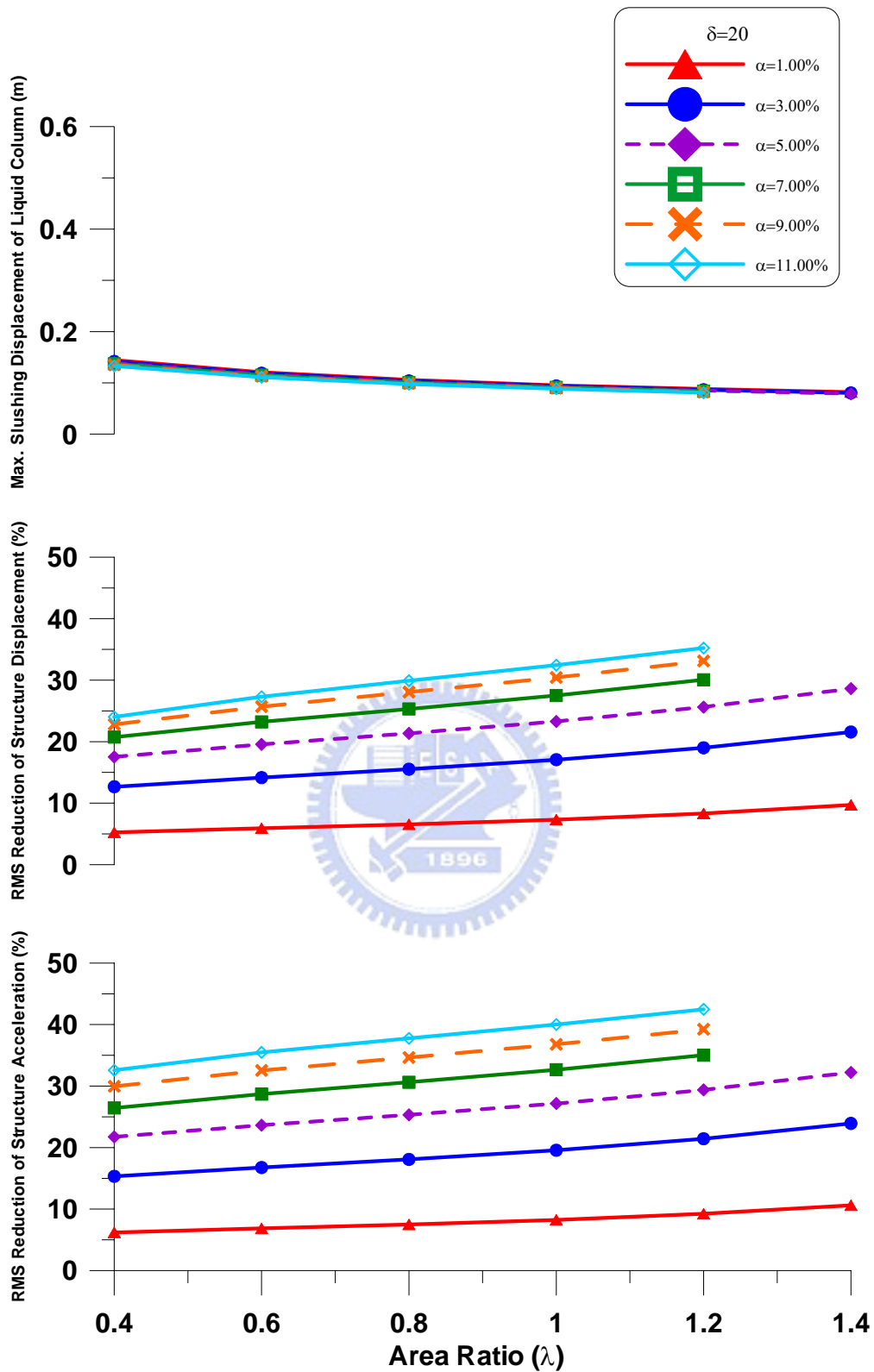


圖 4.10(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCDC 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=20$)

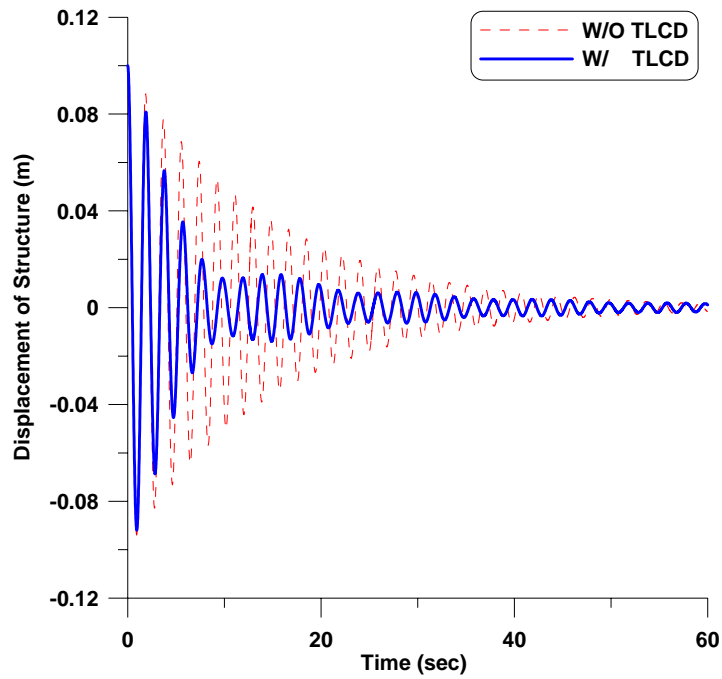


圖 4.11 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

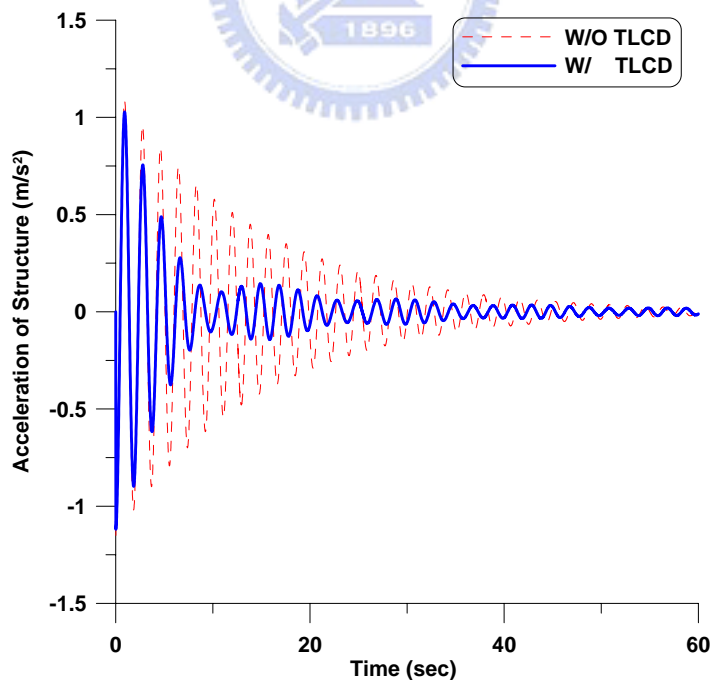


圖 4.12 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

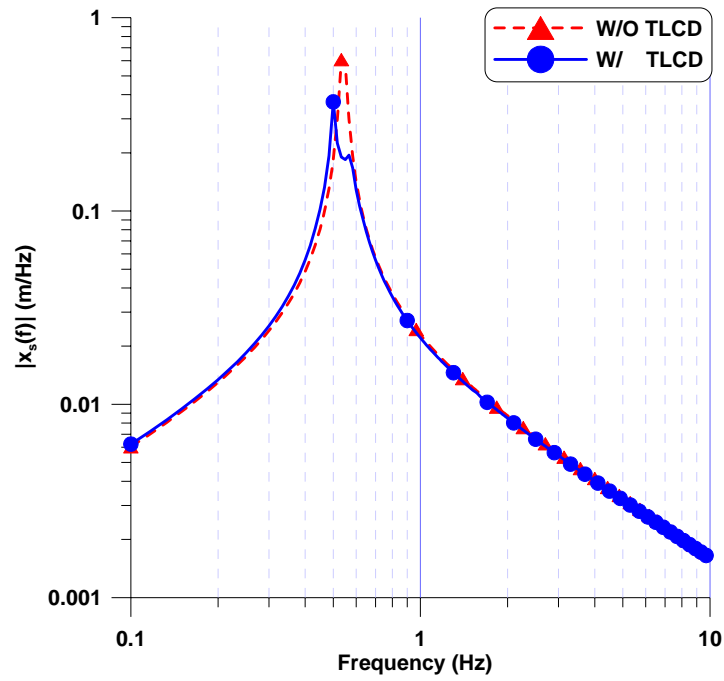


圖 4.13 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

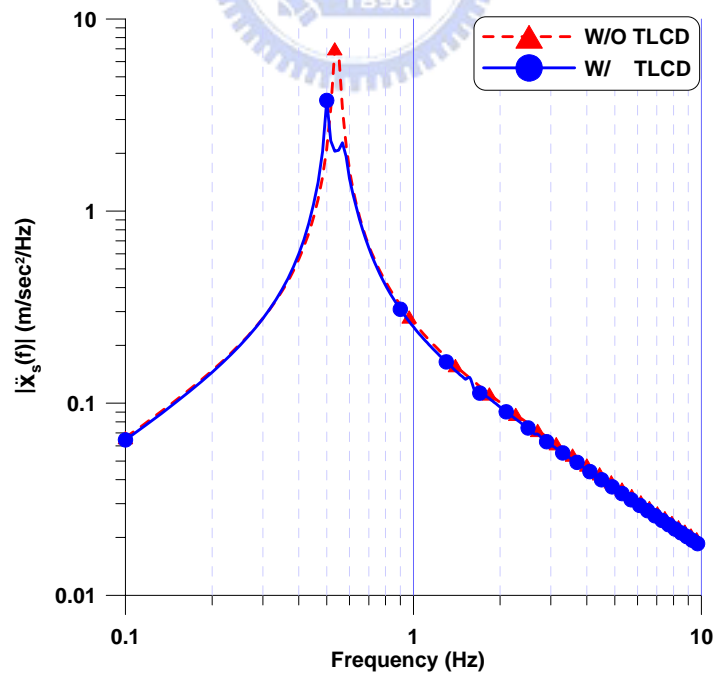


圖 4.14 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

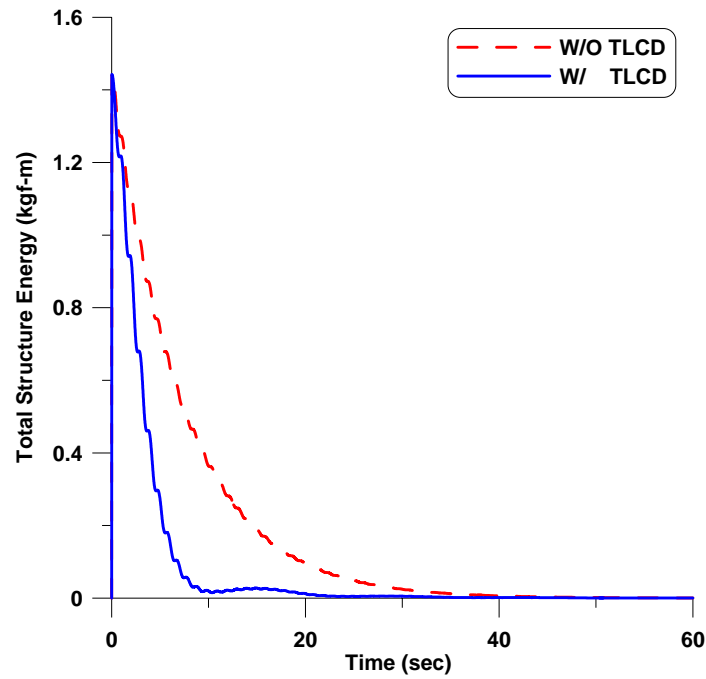


圖 4.15 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

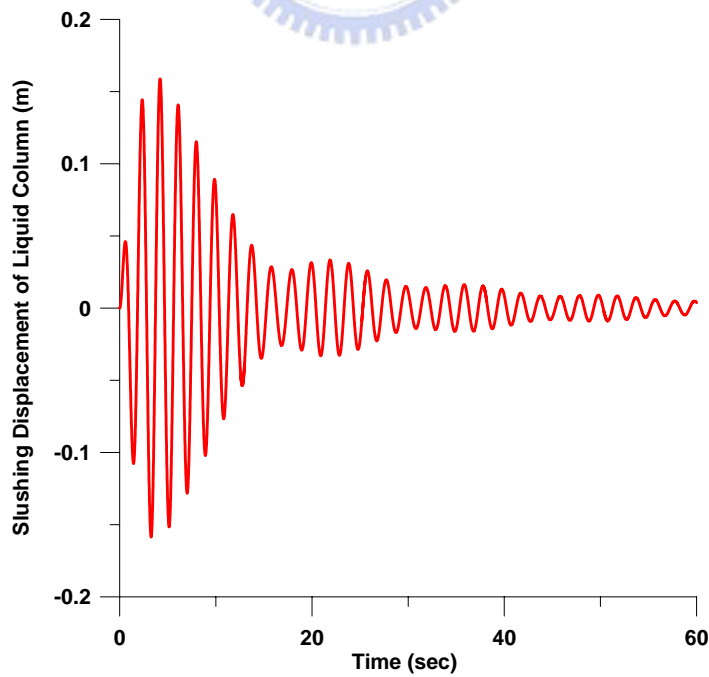


圖 4.16 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

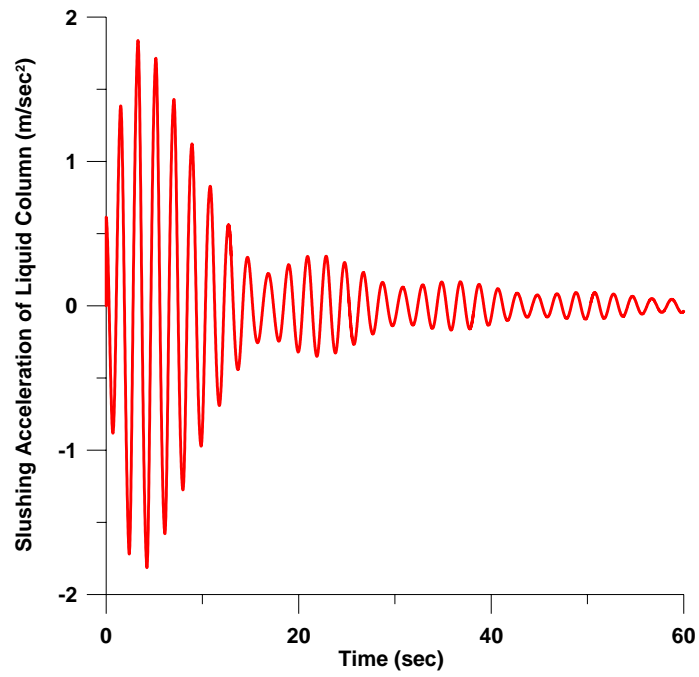


圖 4.17 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)



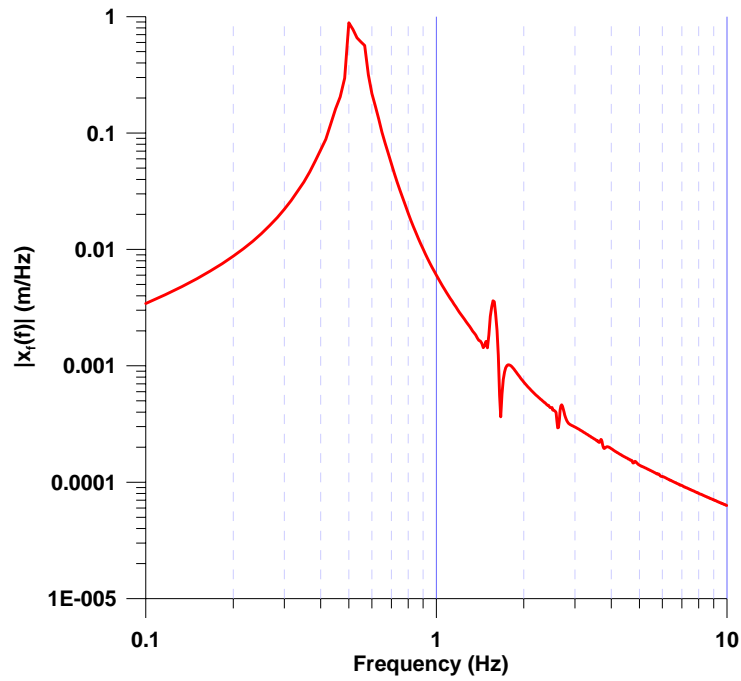


圖 4.18(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

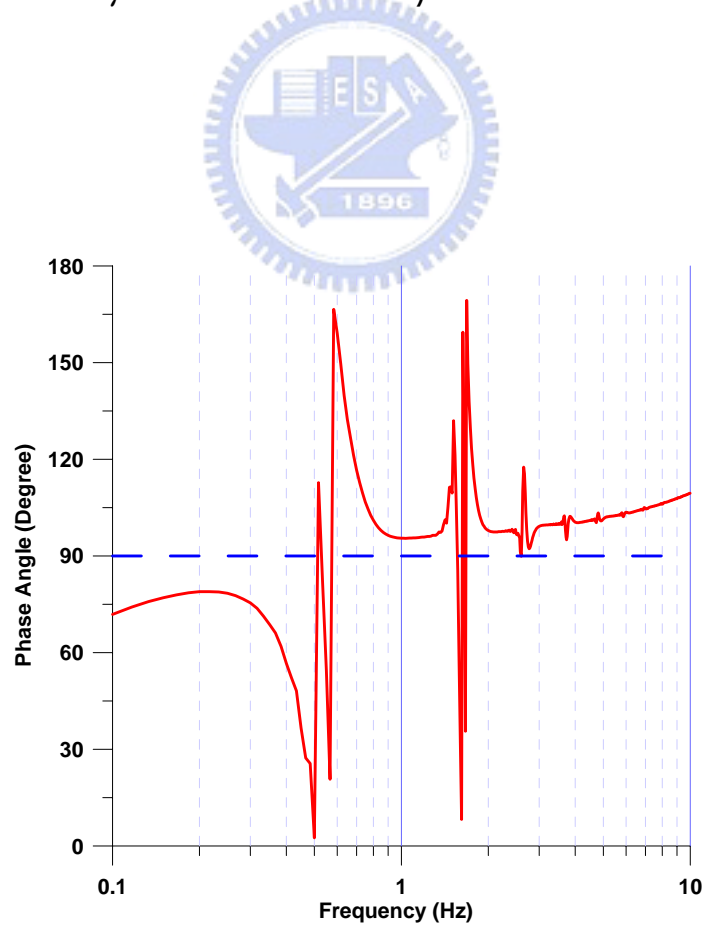


圖 4.18(b) TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)

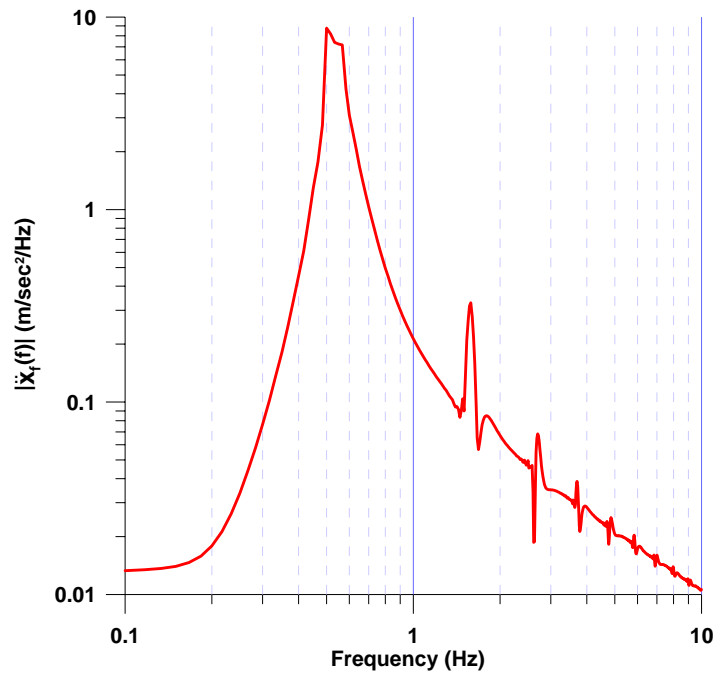


圖 4.19(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\alpha=5.0\%$, $\beta=0.55$, $\delta=4$, $\lambda=1.2$)

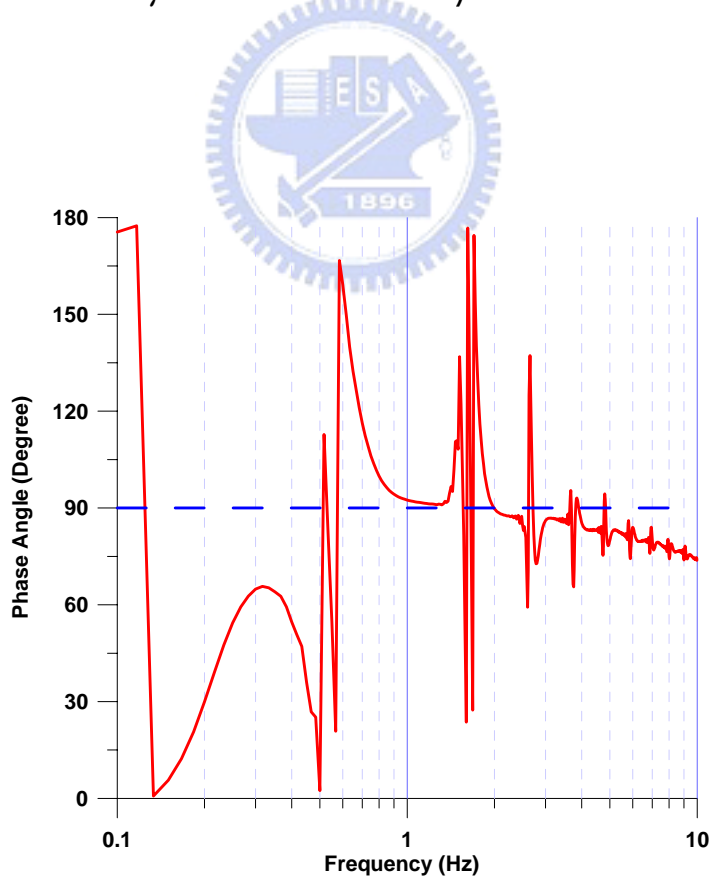


圖 4.19(b) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(自由振動, $x_s(0)=0.1\text{m}$, $\gamma=1$, $\alpha=5.0\%$, $\beta=0.55$, $\delta=4$, $\lambda=1.2$)

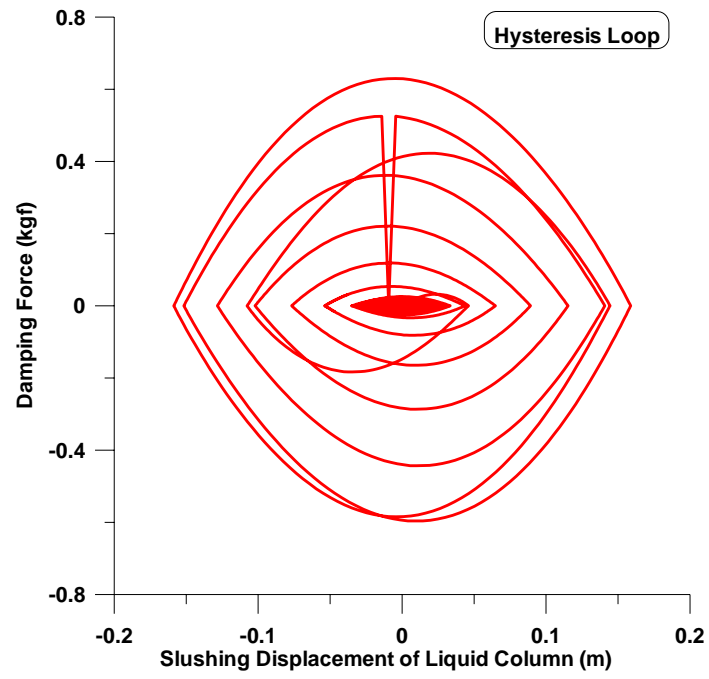


圖 4.20 變斷面 TLCD 系統之遲滯迴圈(自由振動， $x_s(0) = 0.1\text{m}$ ， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 4$ ， $\lambda = 1.2$)



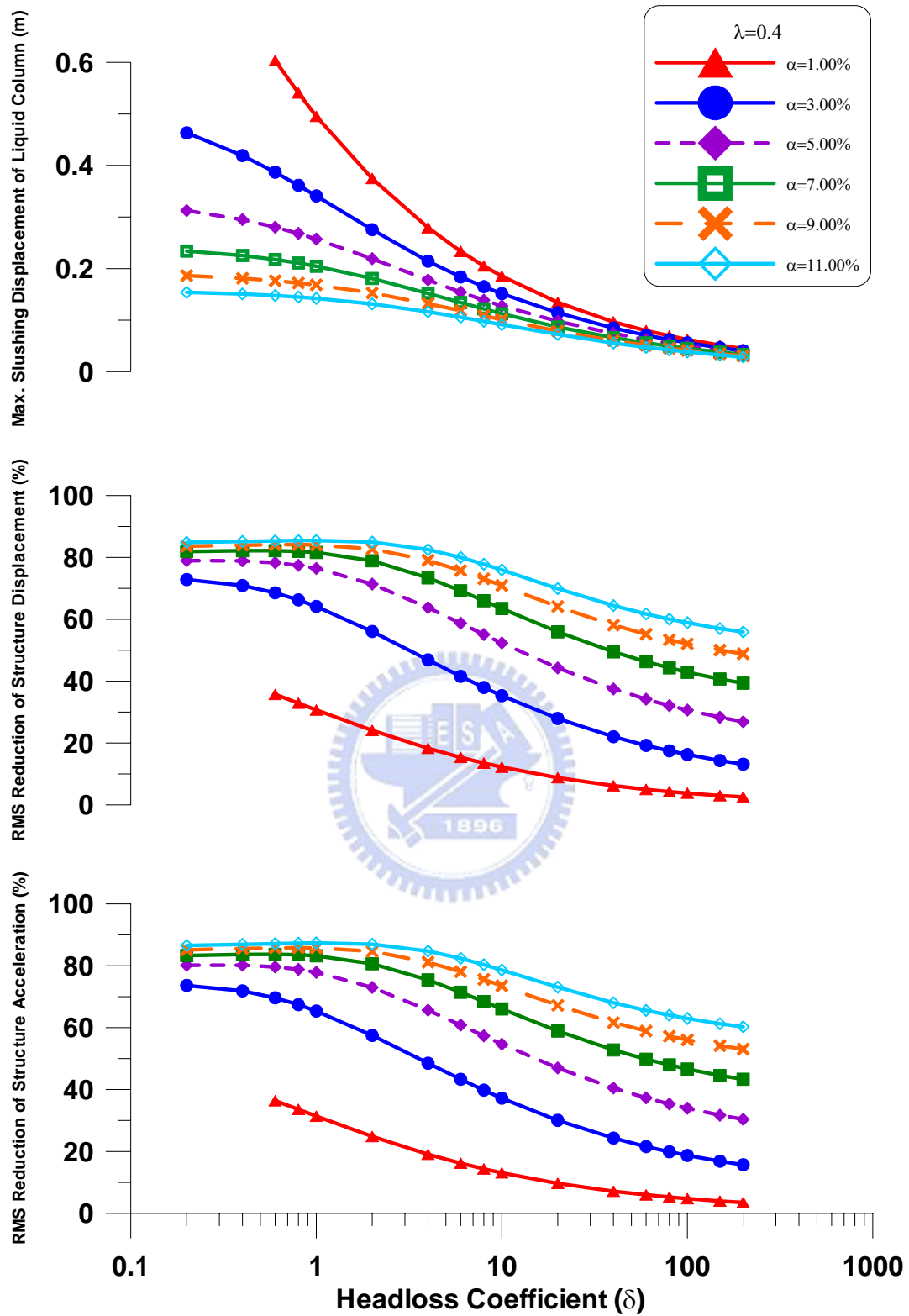


圖 4.21(a) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$)

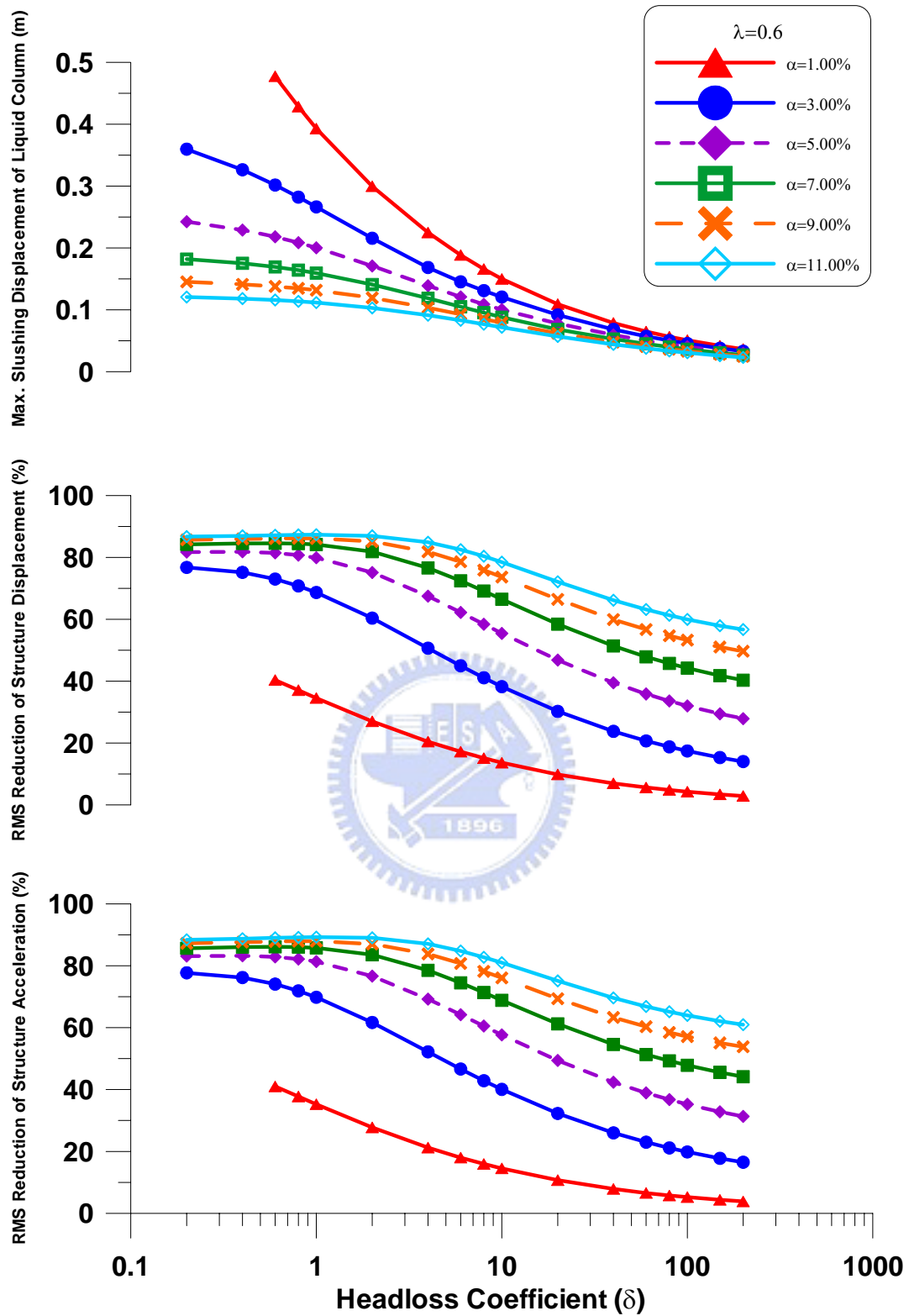


圖 4.21(b) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$)

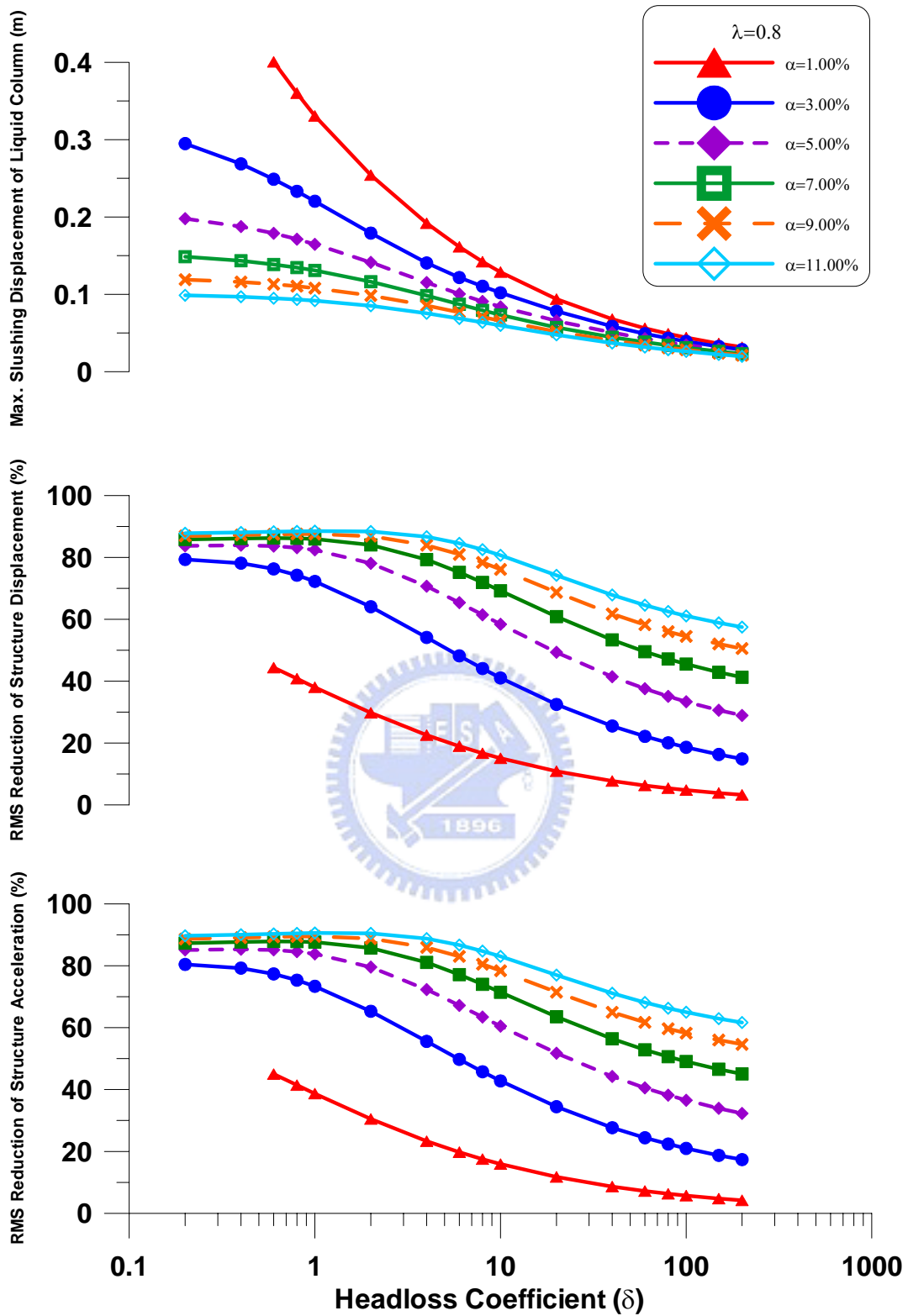


圖 4.21(c) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=0.8$)

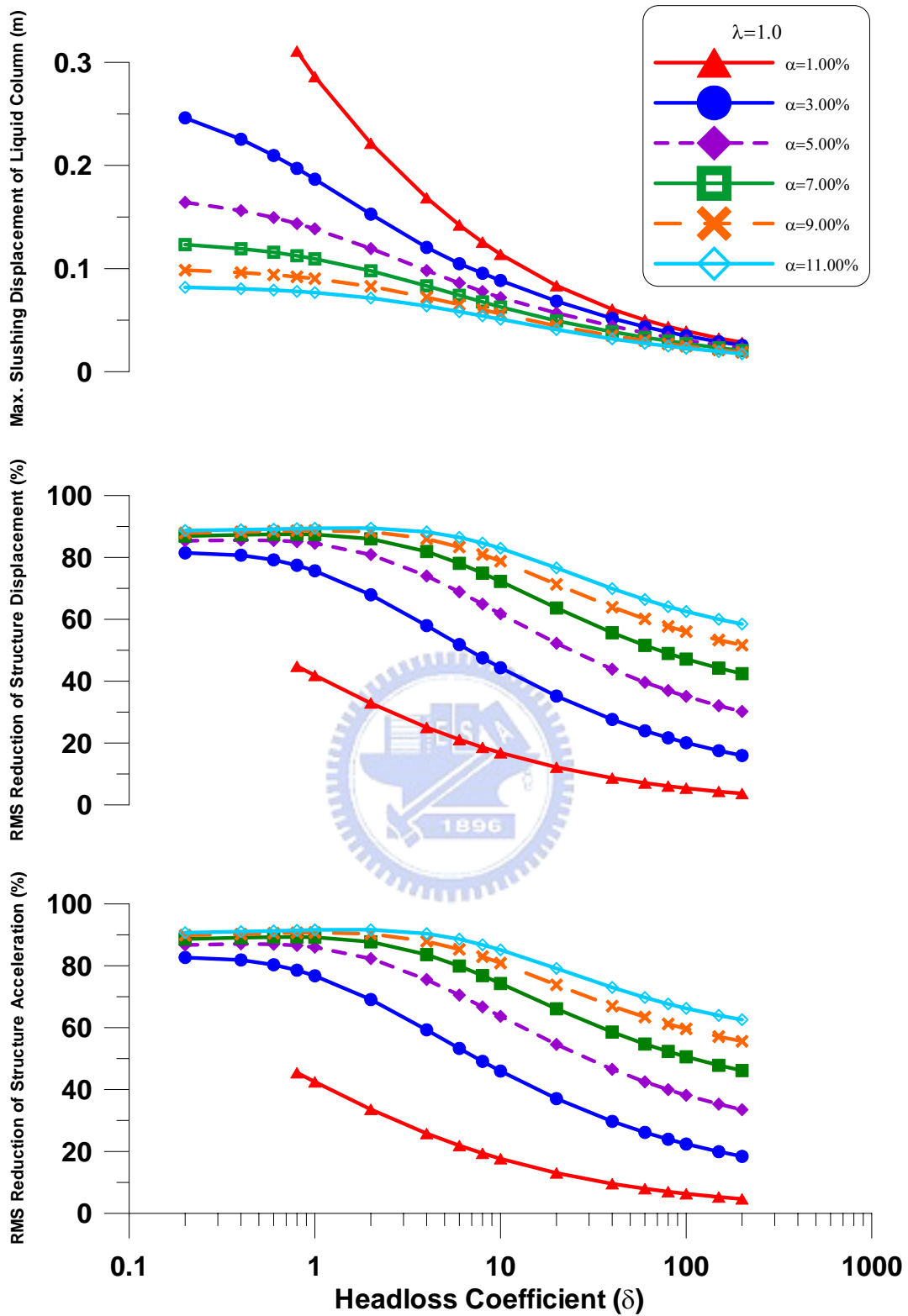


圖 4.21(d) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.0$)

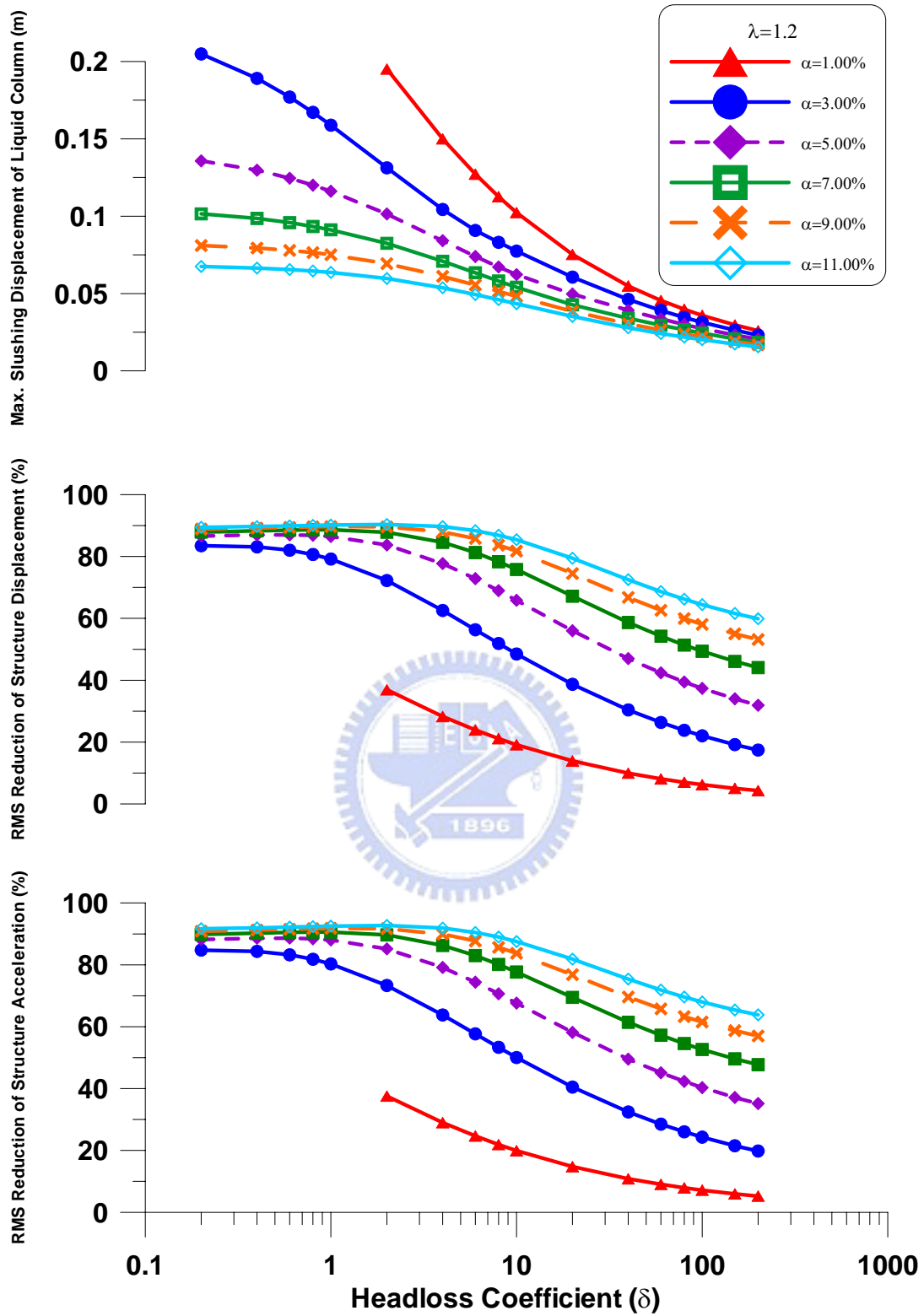


圖 4.21(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=1.2$)

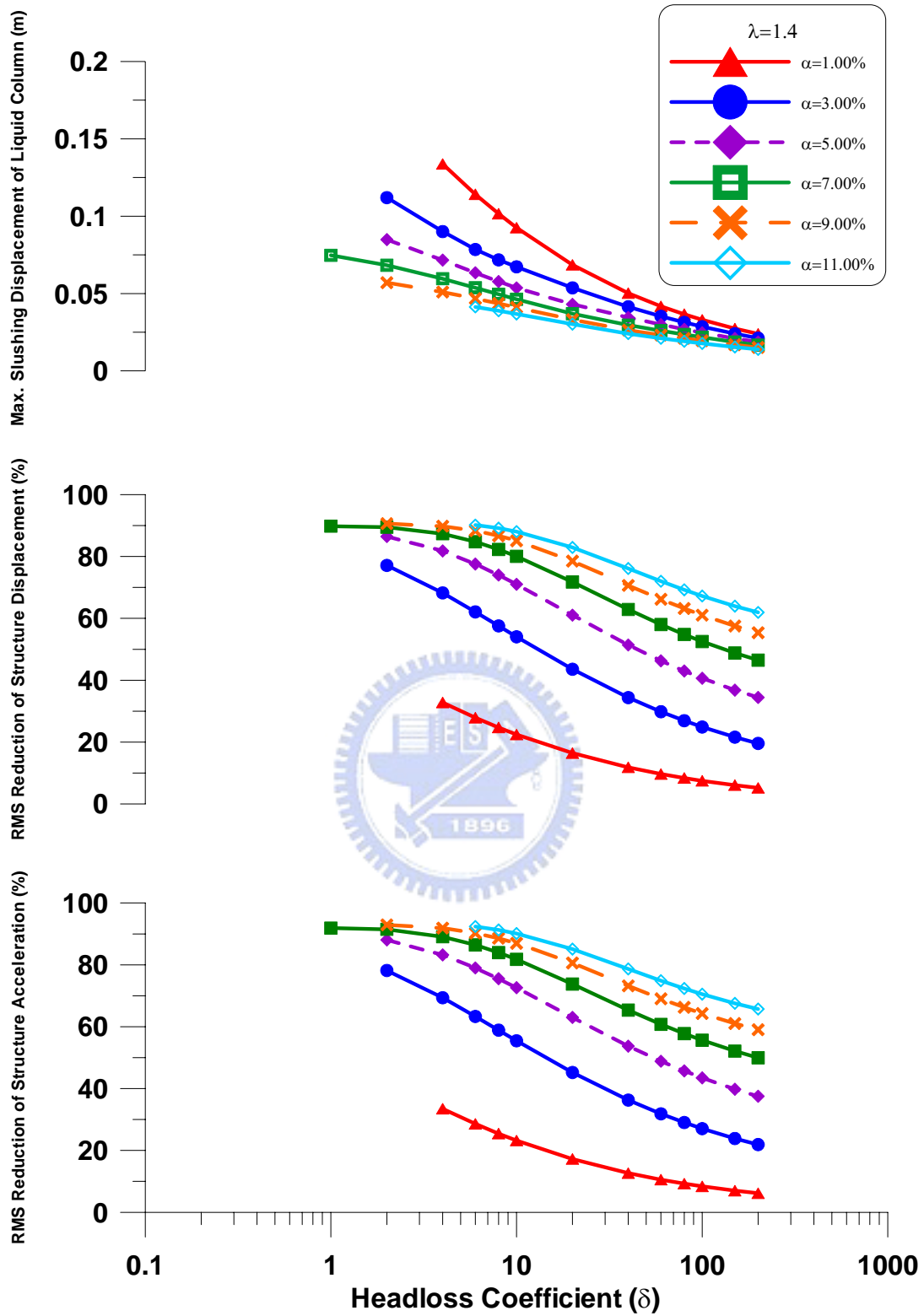


圖 4.21(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.4$)

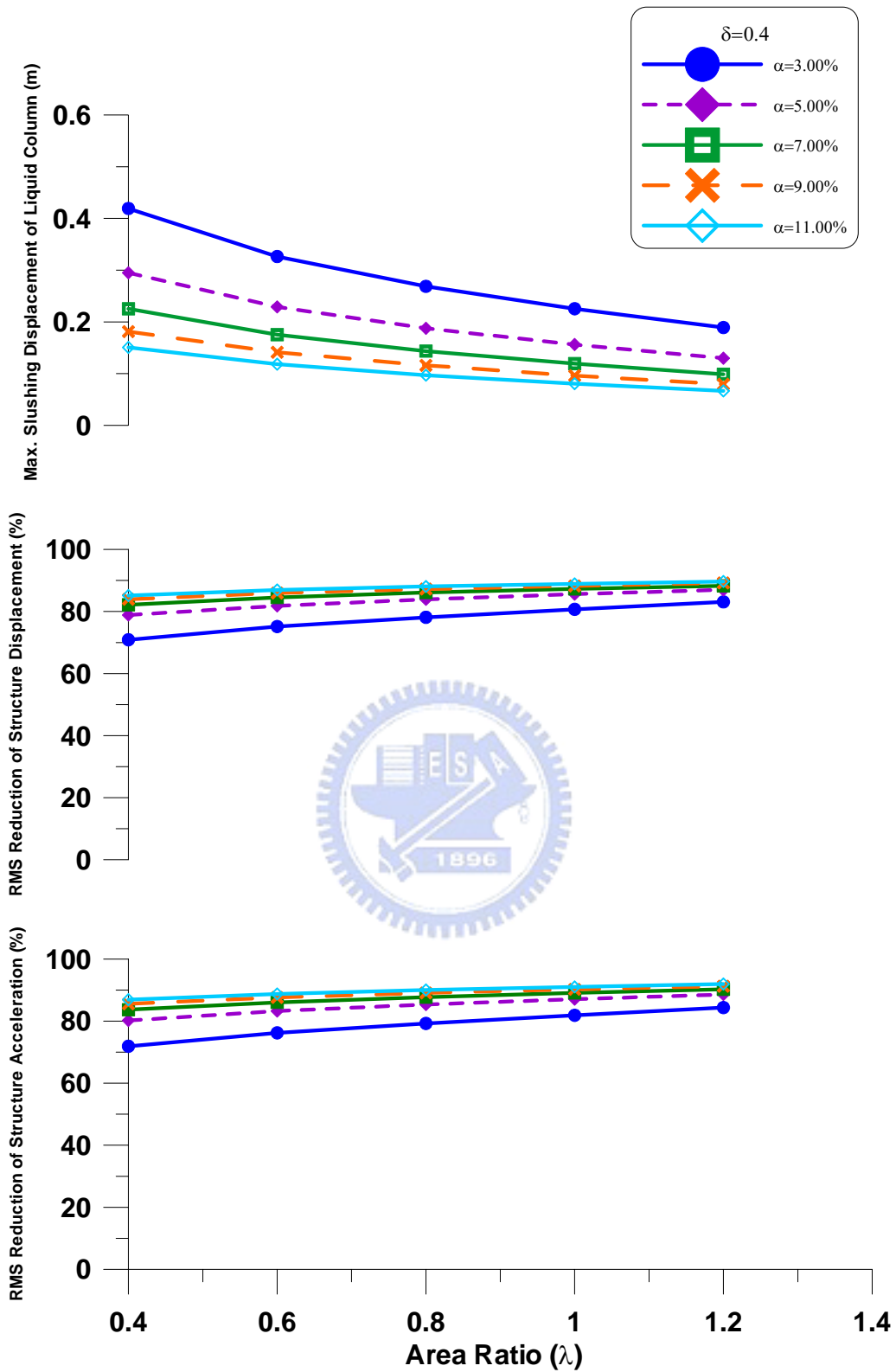


圖 4.22(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.4$)

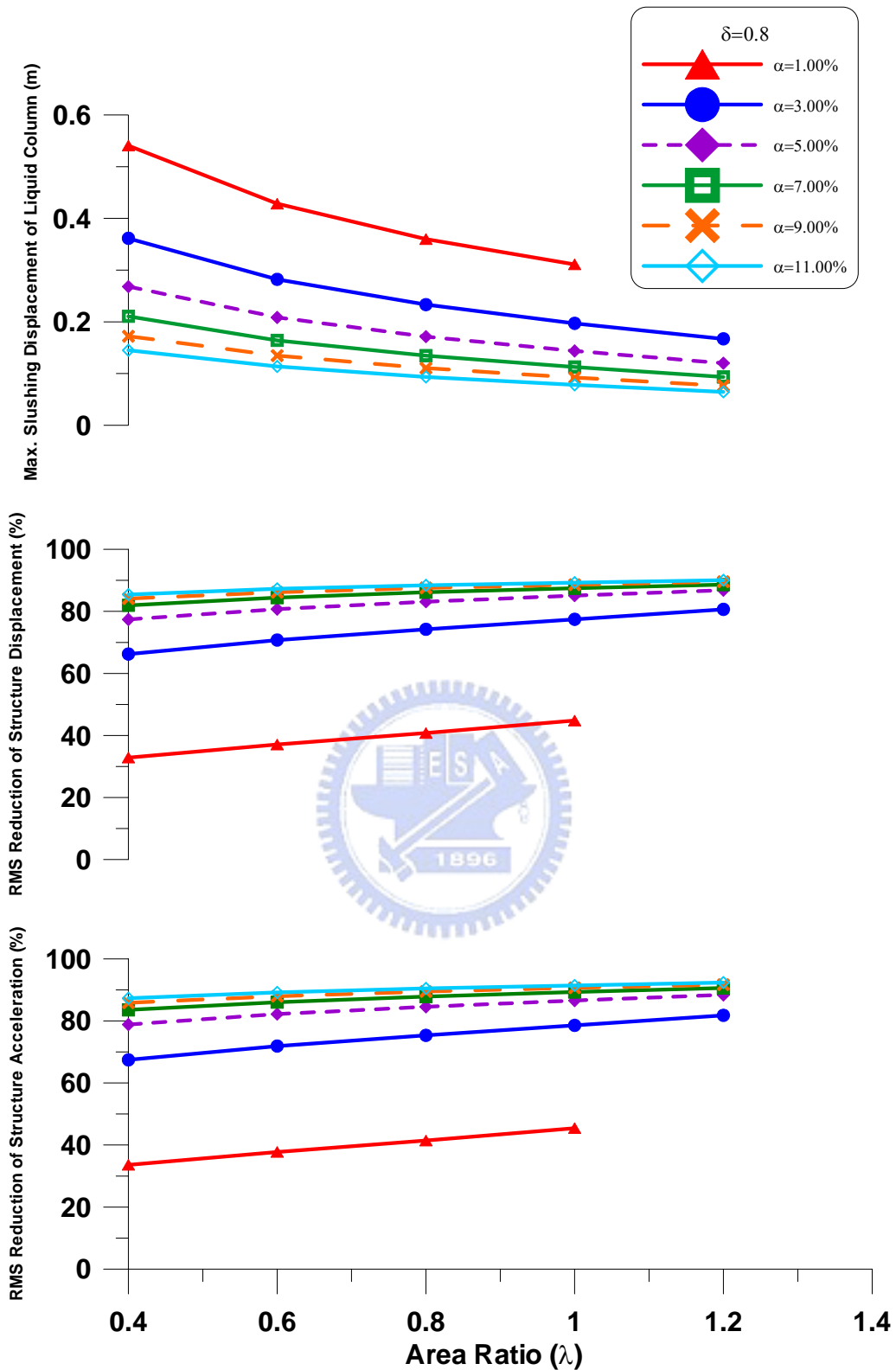


圖 4.22(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.8$)

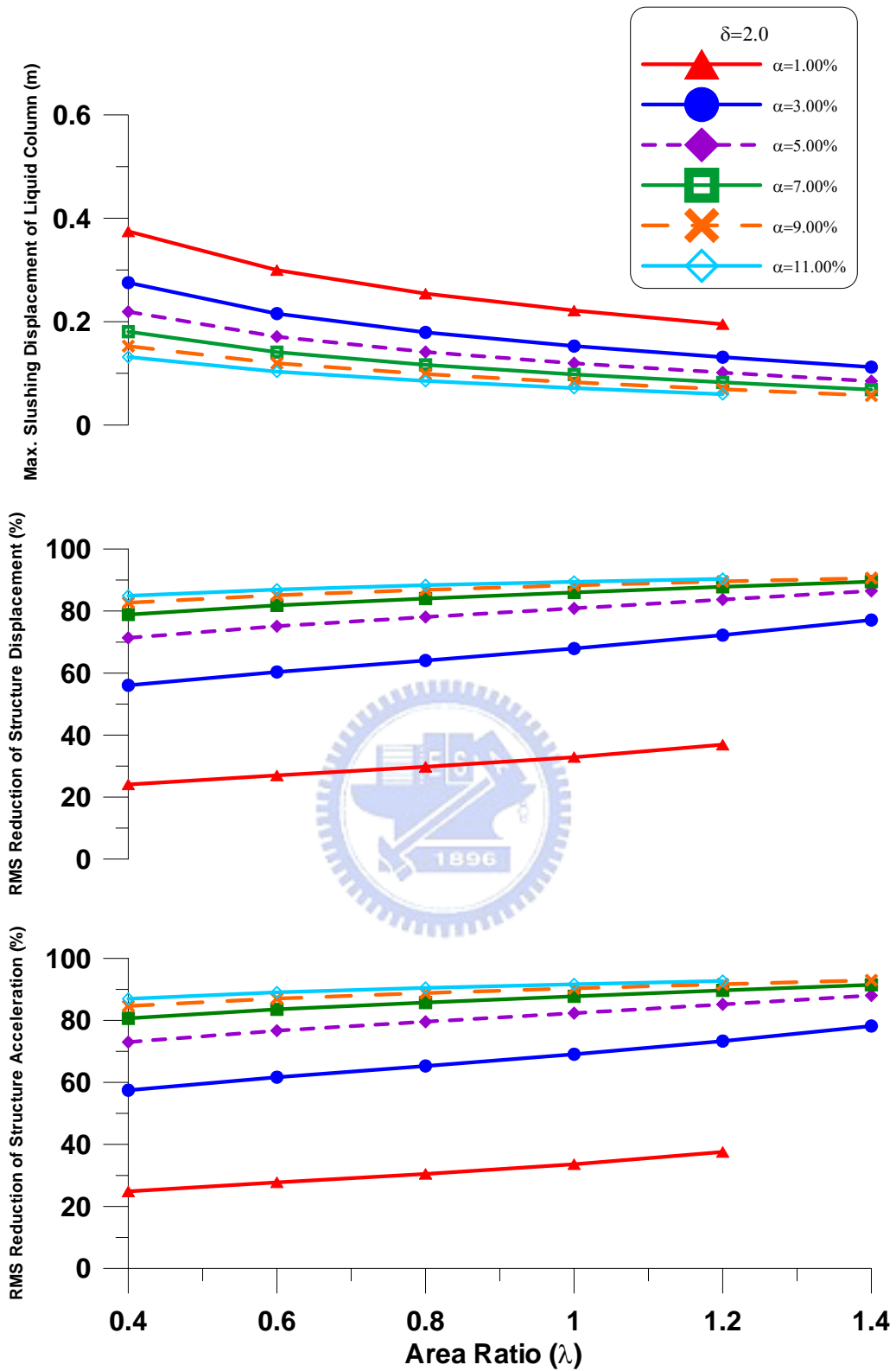


圖 4.22(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=2.0$)

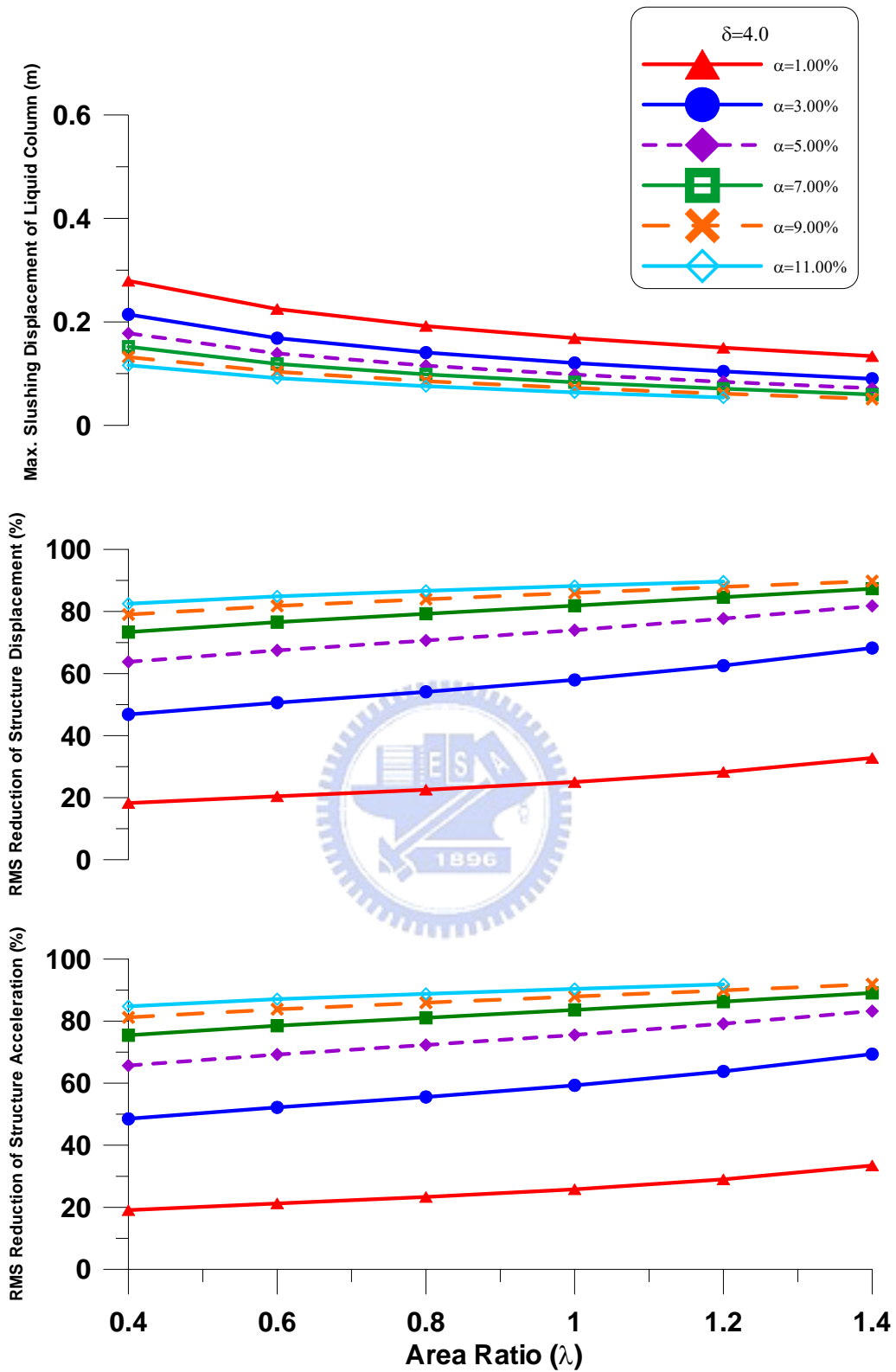


圖 4.22(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=4.0$)

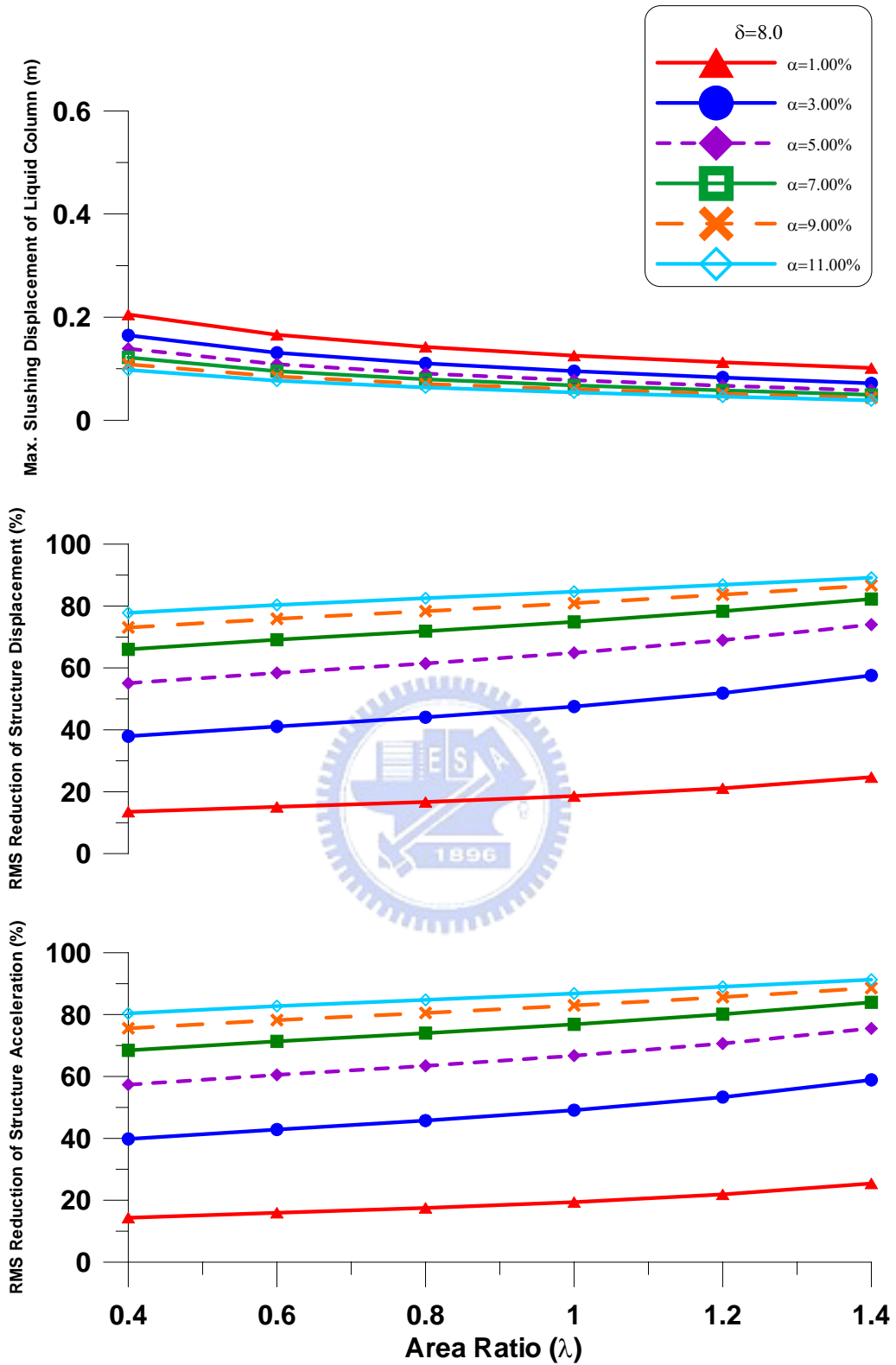


圖 4.22(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=8.0$)

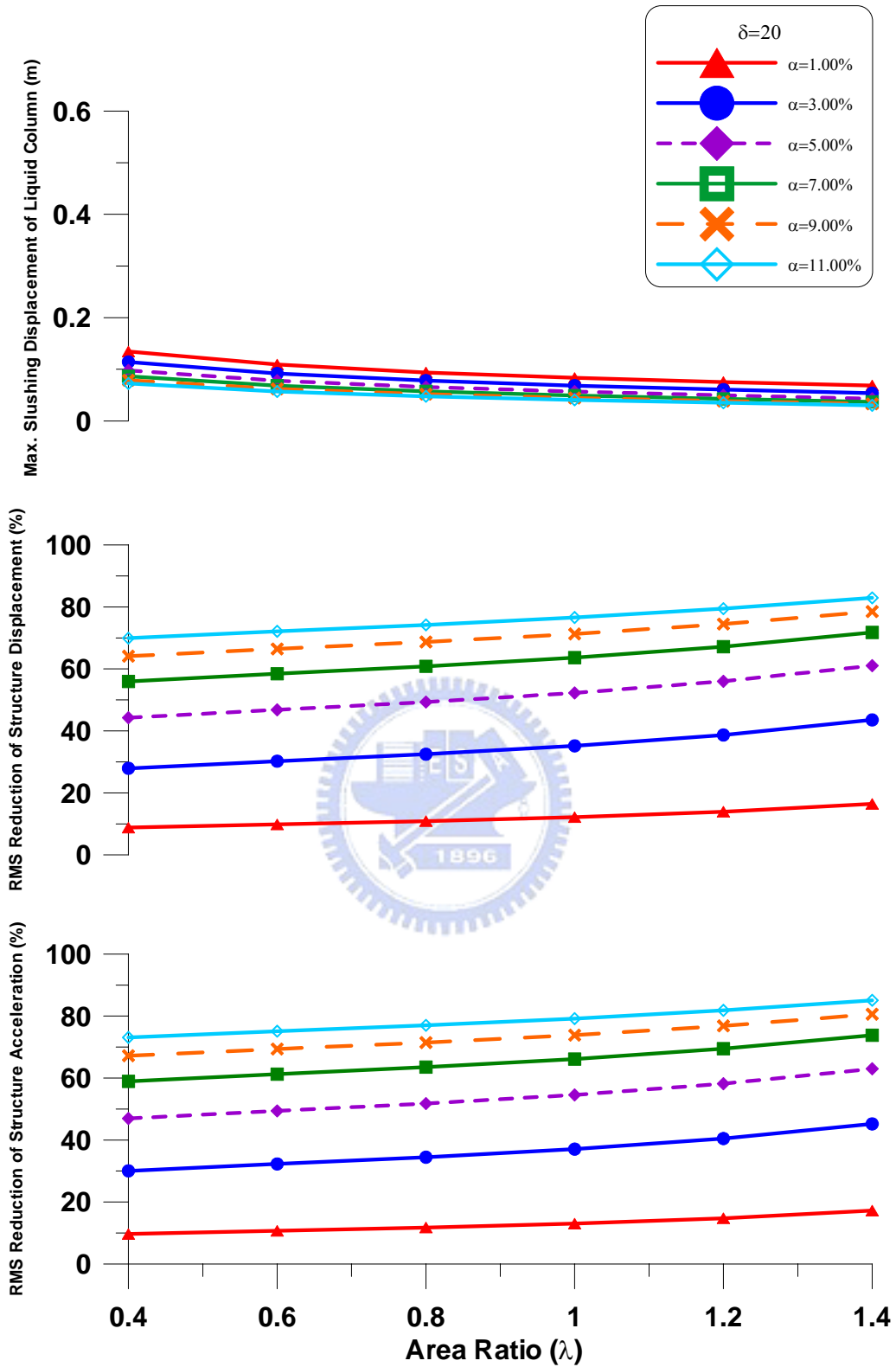


圖 4.22(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=20$)

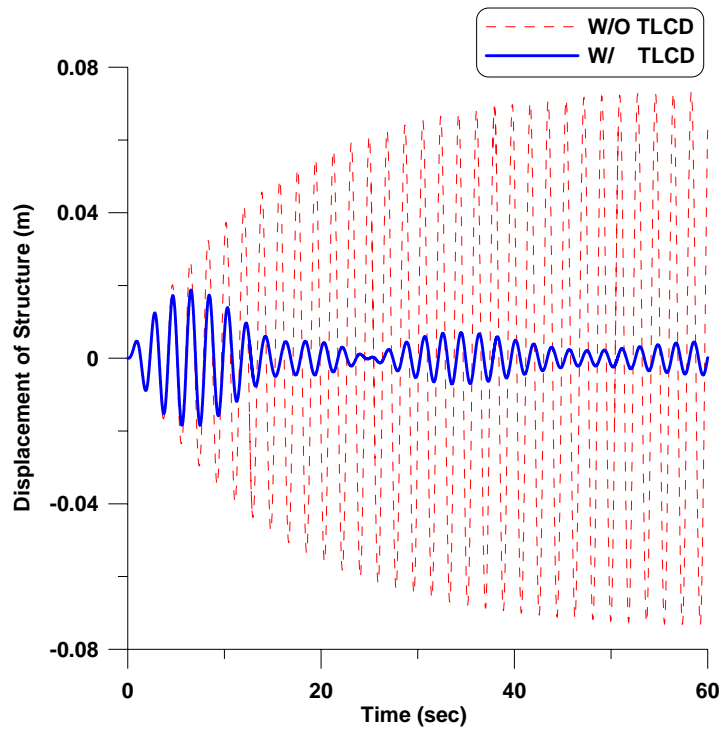


圖 4.23 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)

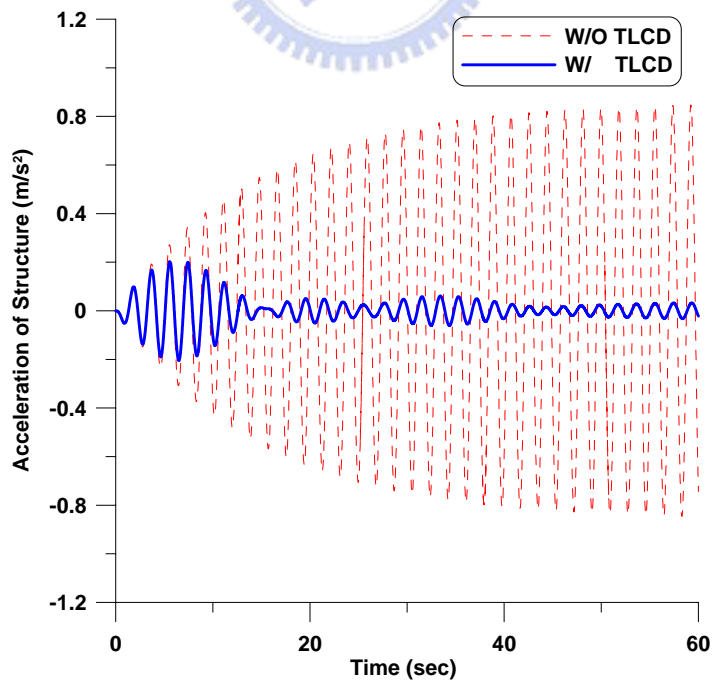


圖 4.24 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)

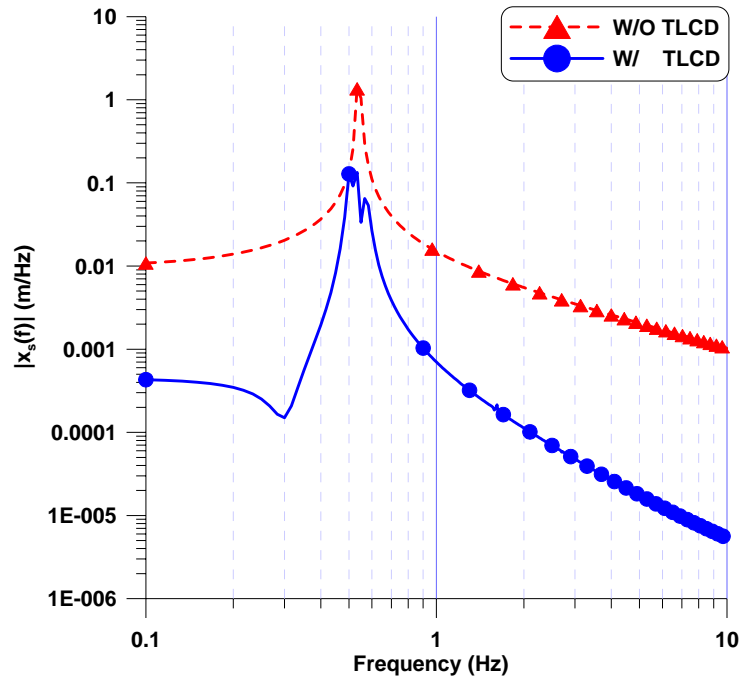


圖 4.25 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\alpha=5.0\%$, $\beta=0.55$, $\delta=0.6$, $\lambda=1.2$)

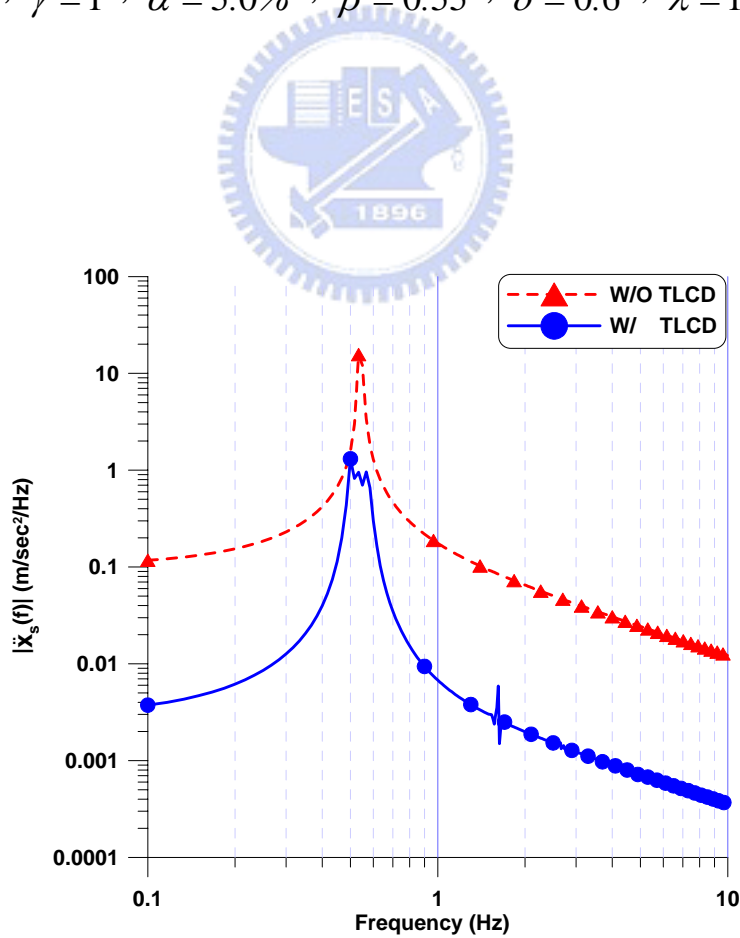


圖 4.26 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma=1$, $\alpha=5.0\%$, $\beta=0.55$, $\delta=0.6$, $\lambda=1.2$)

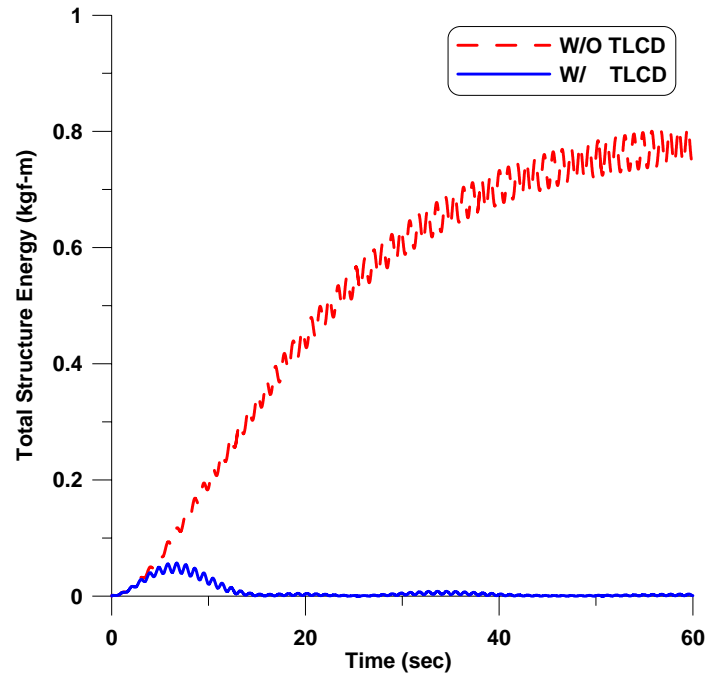


圖 4.27 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時能量圖(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)

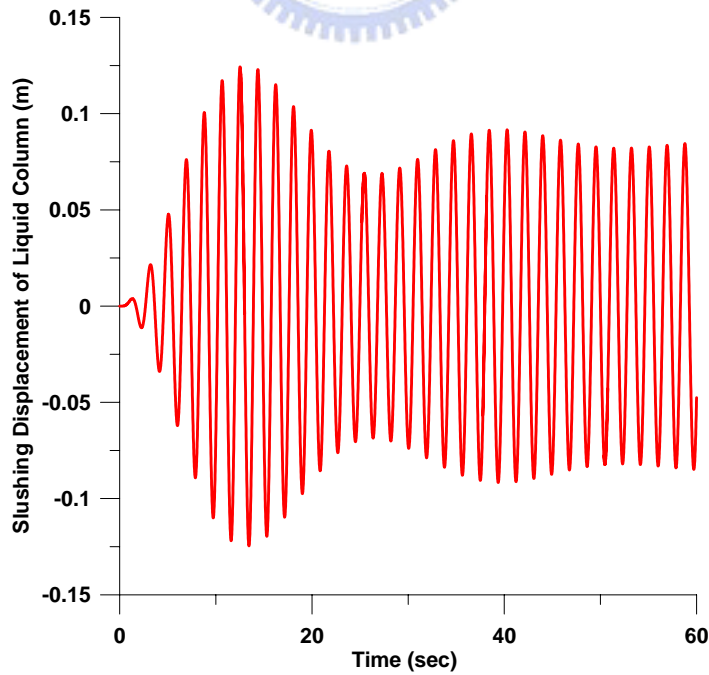


圖 4.28 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)

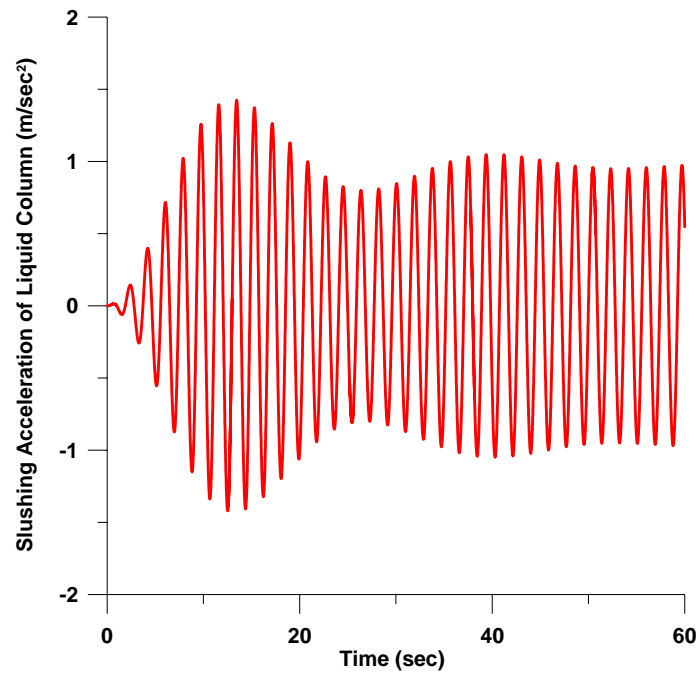


圖 4.29 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)



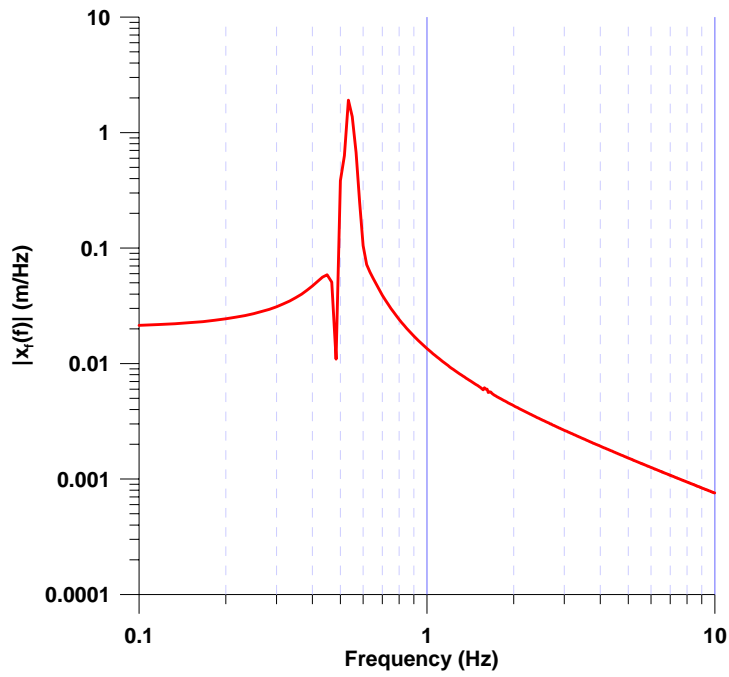


圖 4.30(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$)

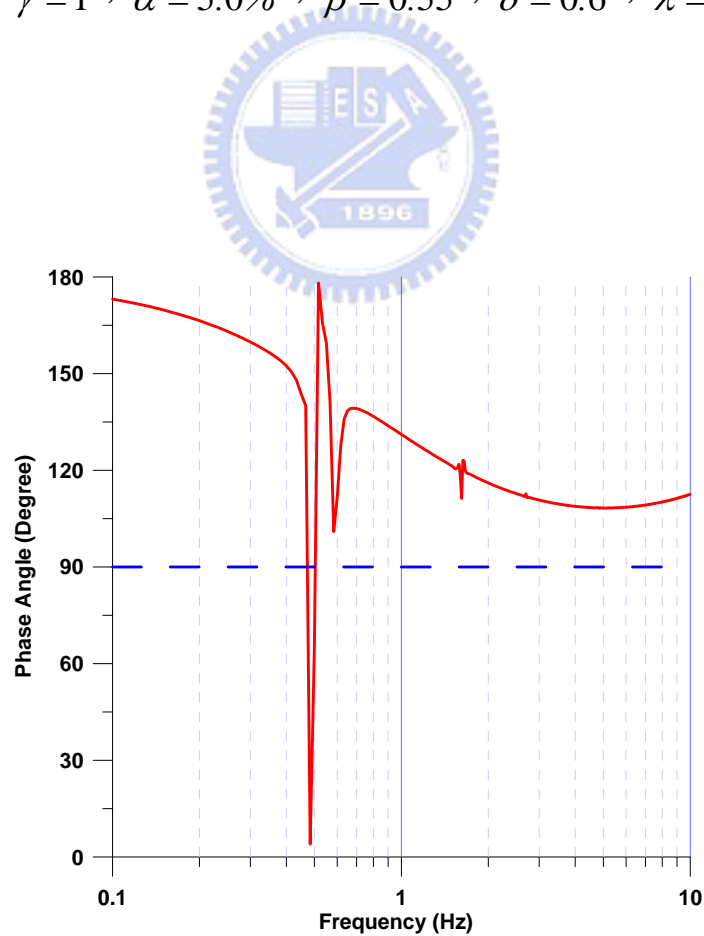


圖 4.30(b) 變斷面 TLCD 系統之水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角 (共振簡諧擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$, $\beta = 0.55$, $\delta = 0.6$, $\lambda = 1.2$)

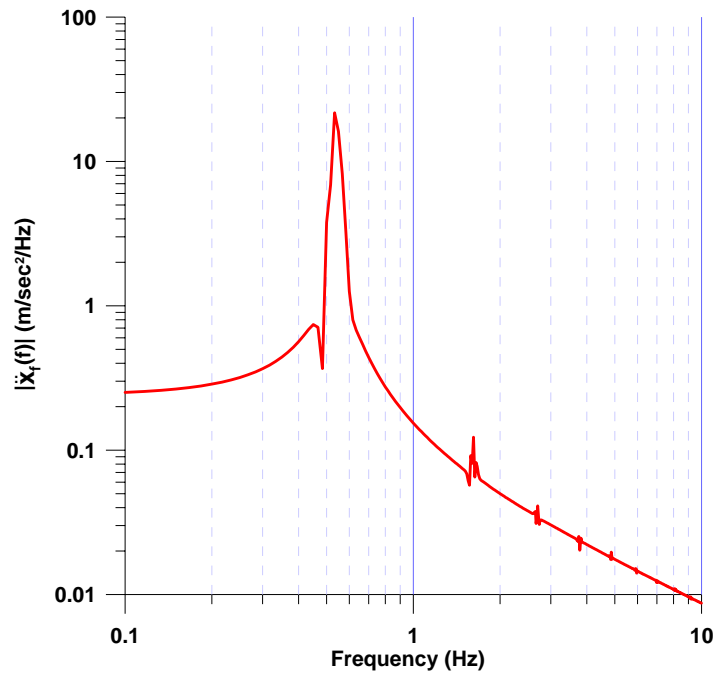


圖 4.31(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(共振簡諧擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.0\%$ ， $\beta=0.55$ ， $\delta=0.6$ ， $\lambda=1.2$)

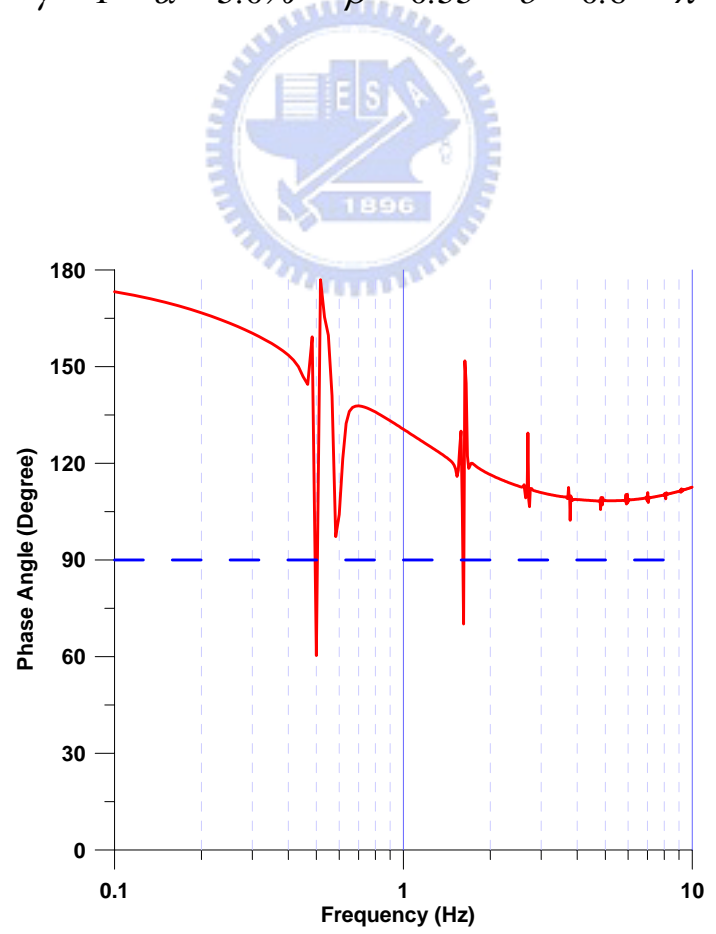


圖 4.31(b) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角 (共振簡諧擾動， $\gamma=1$ ， $\alpha=5.0\%$ ， $\beta=0.55$ ， $\delta=0.6$ ， $\lambda=1.2$)

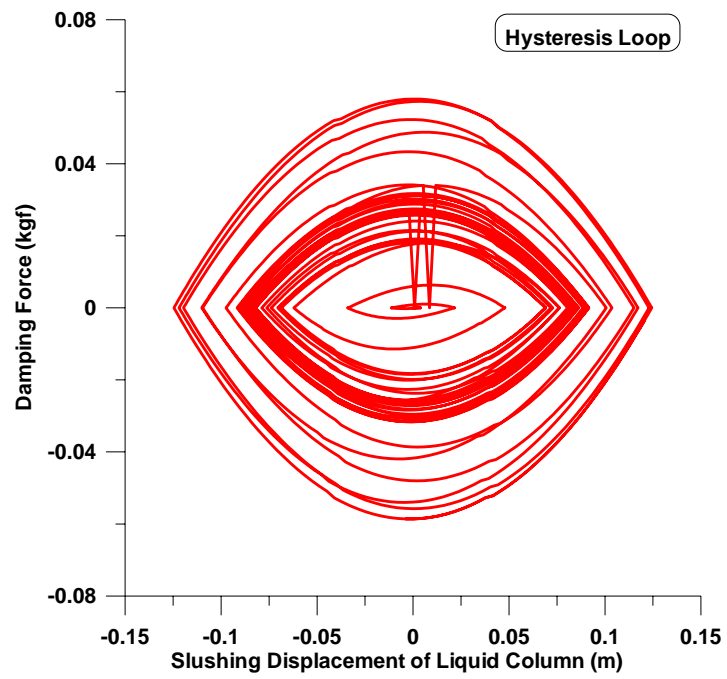


圖 4.32 變斷面 TLCD 系統之遲滯迴圈(共振簡諧擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 0.6$ ， $\lambda = 1.2$)



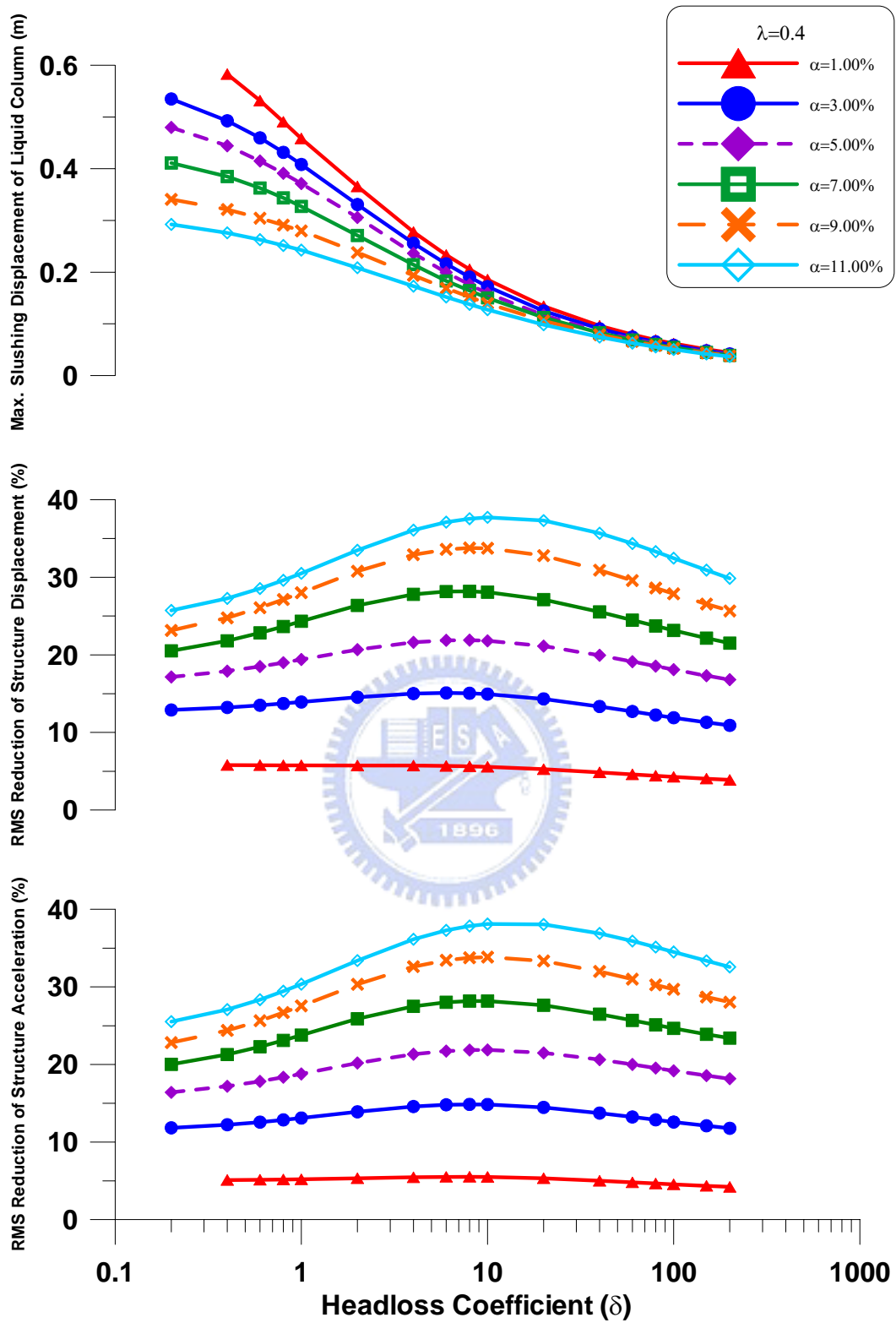


圖 4.33(a) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.4$)

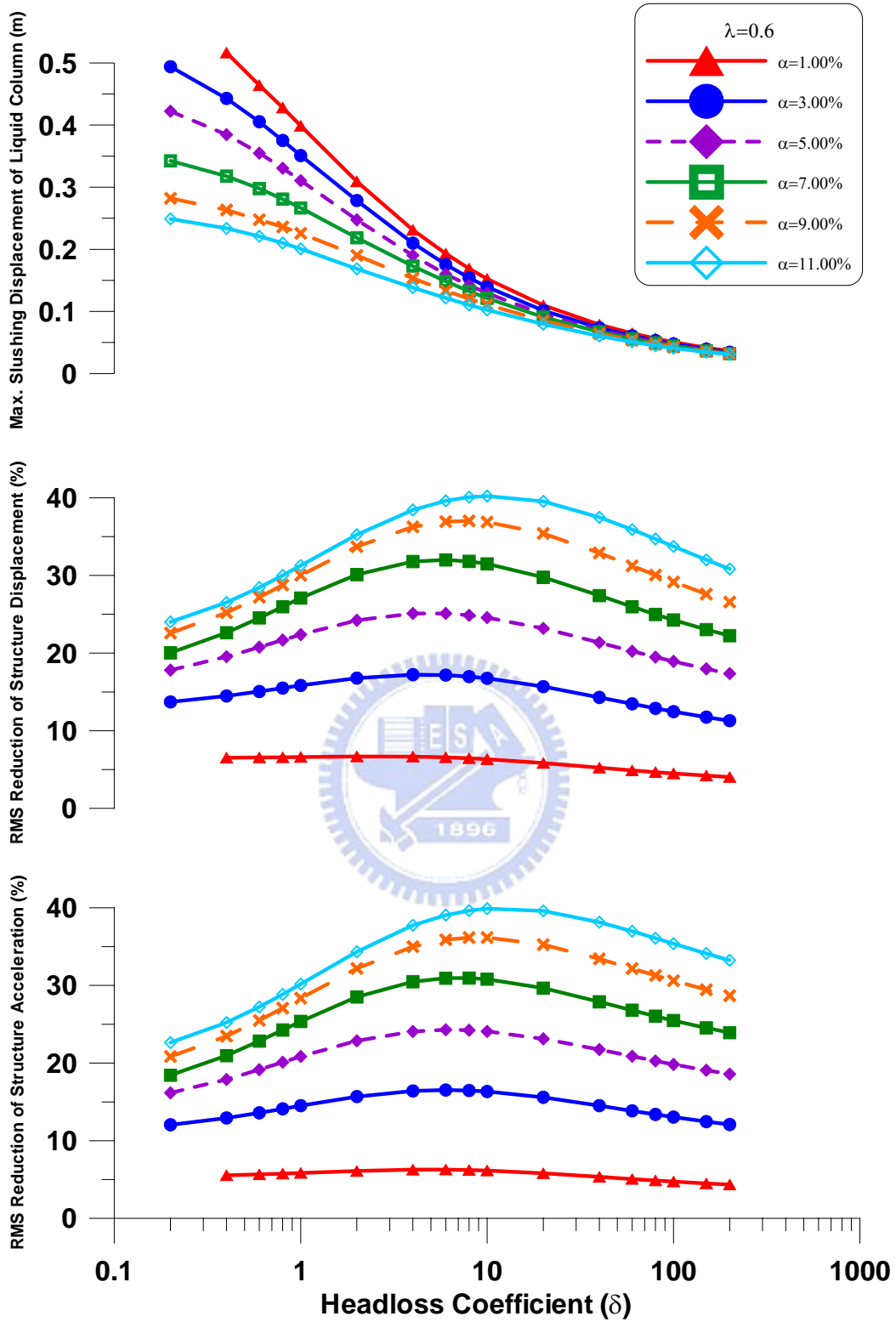


圖 4.33(b) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 0.6$)

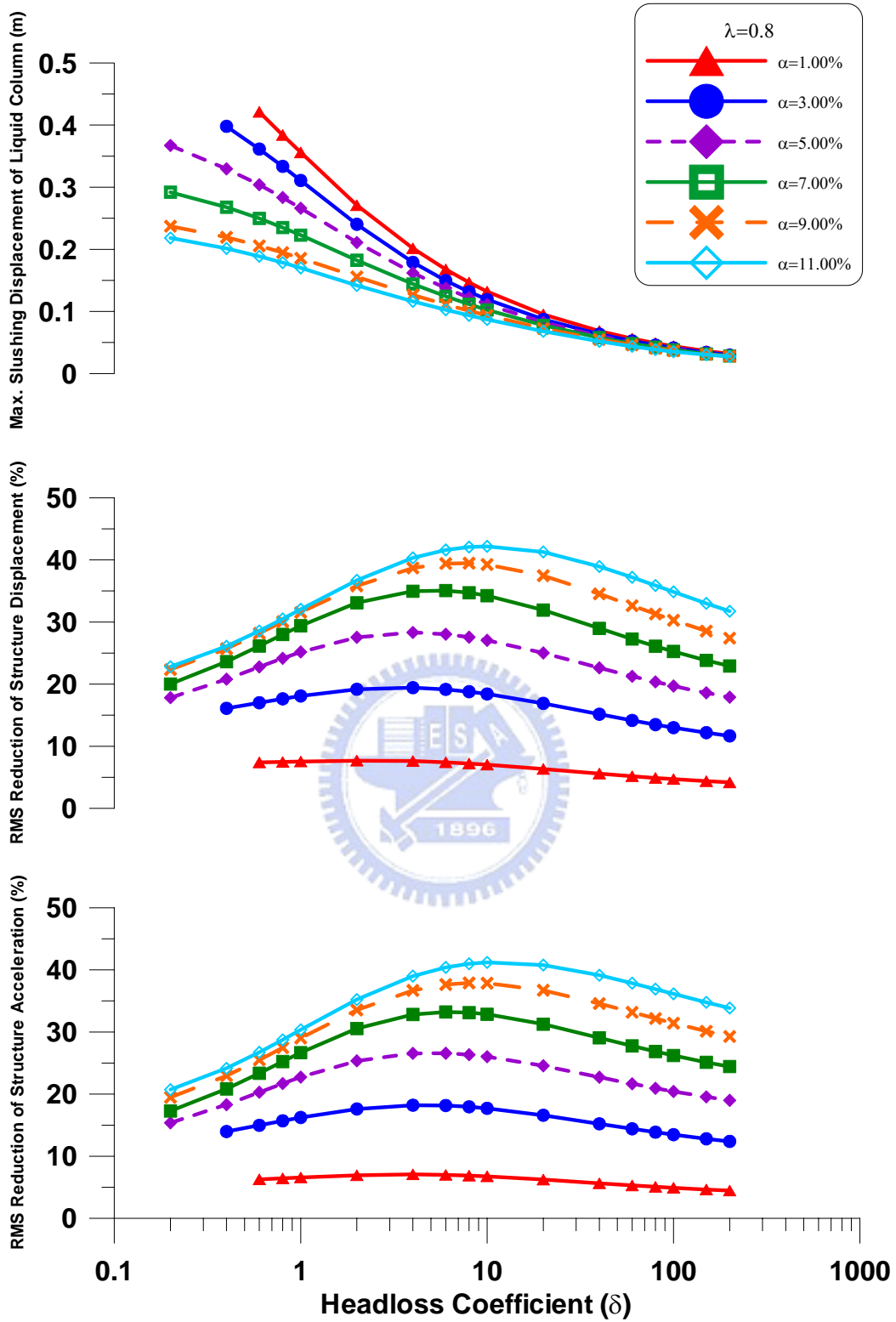


圖 4.33(c) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\lambda=0.8$)

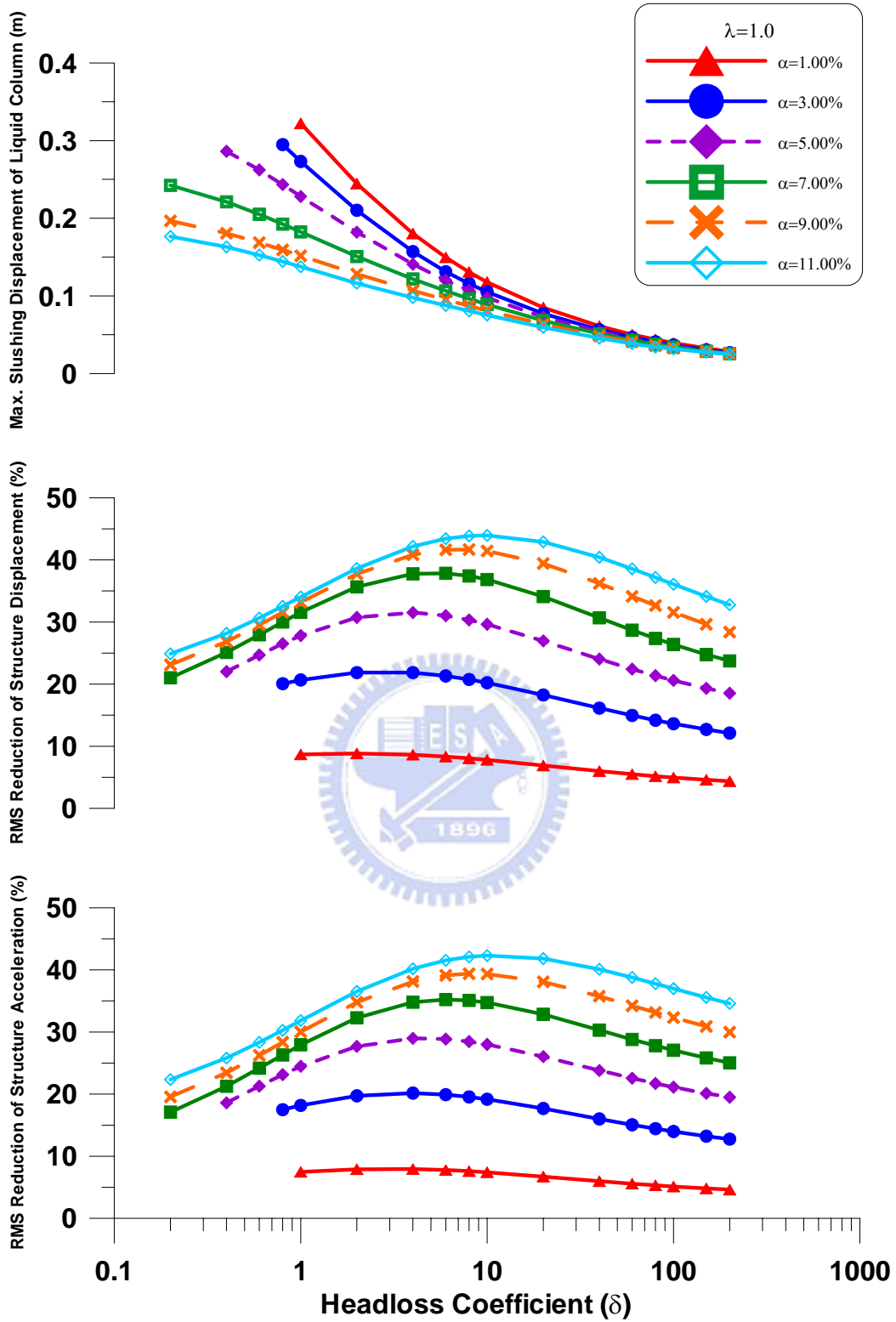


圖 4.33(d) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.0$)

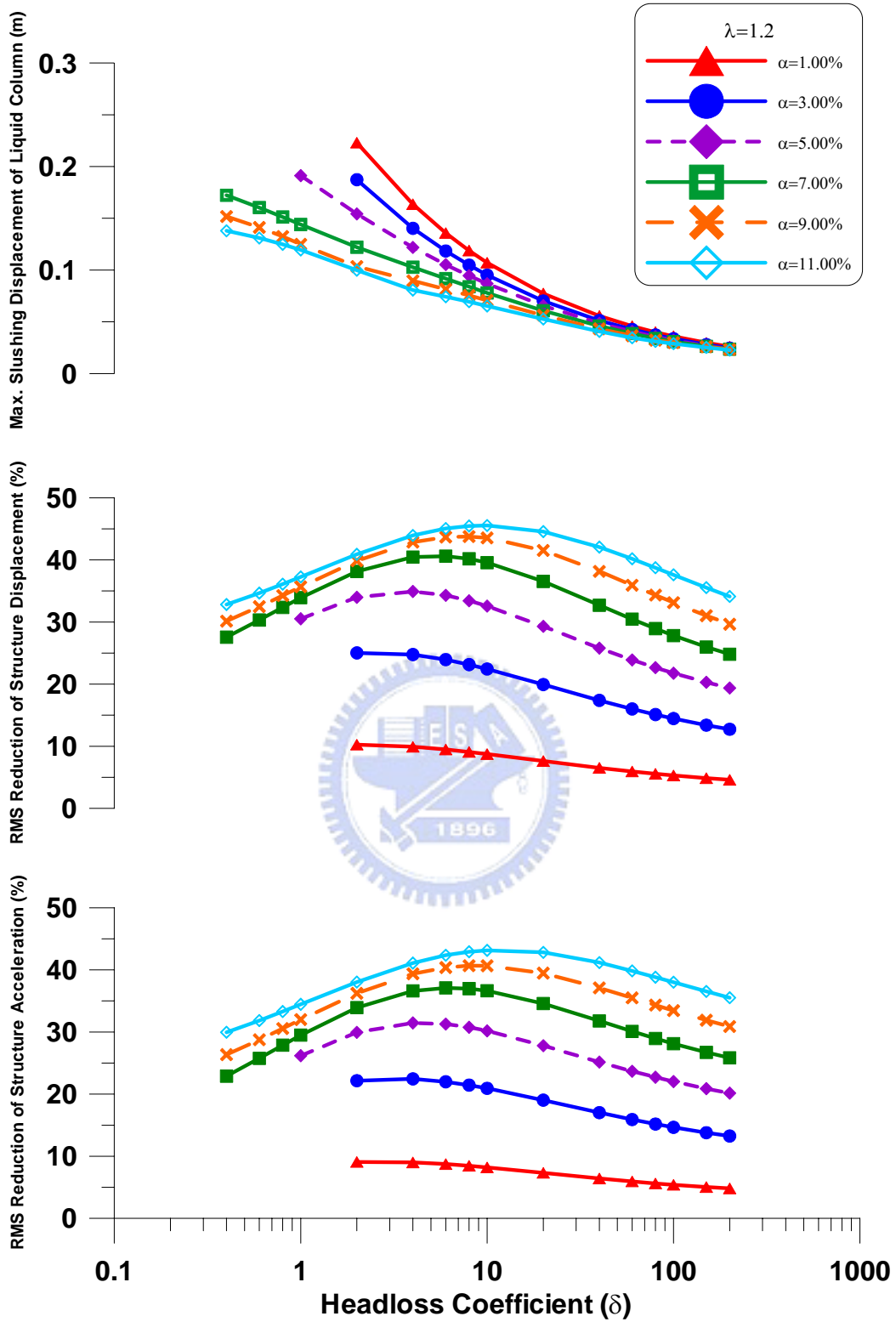


圖 4.33(e) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.2$)

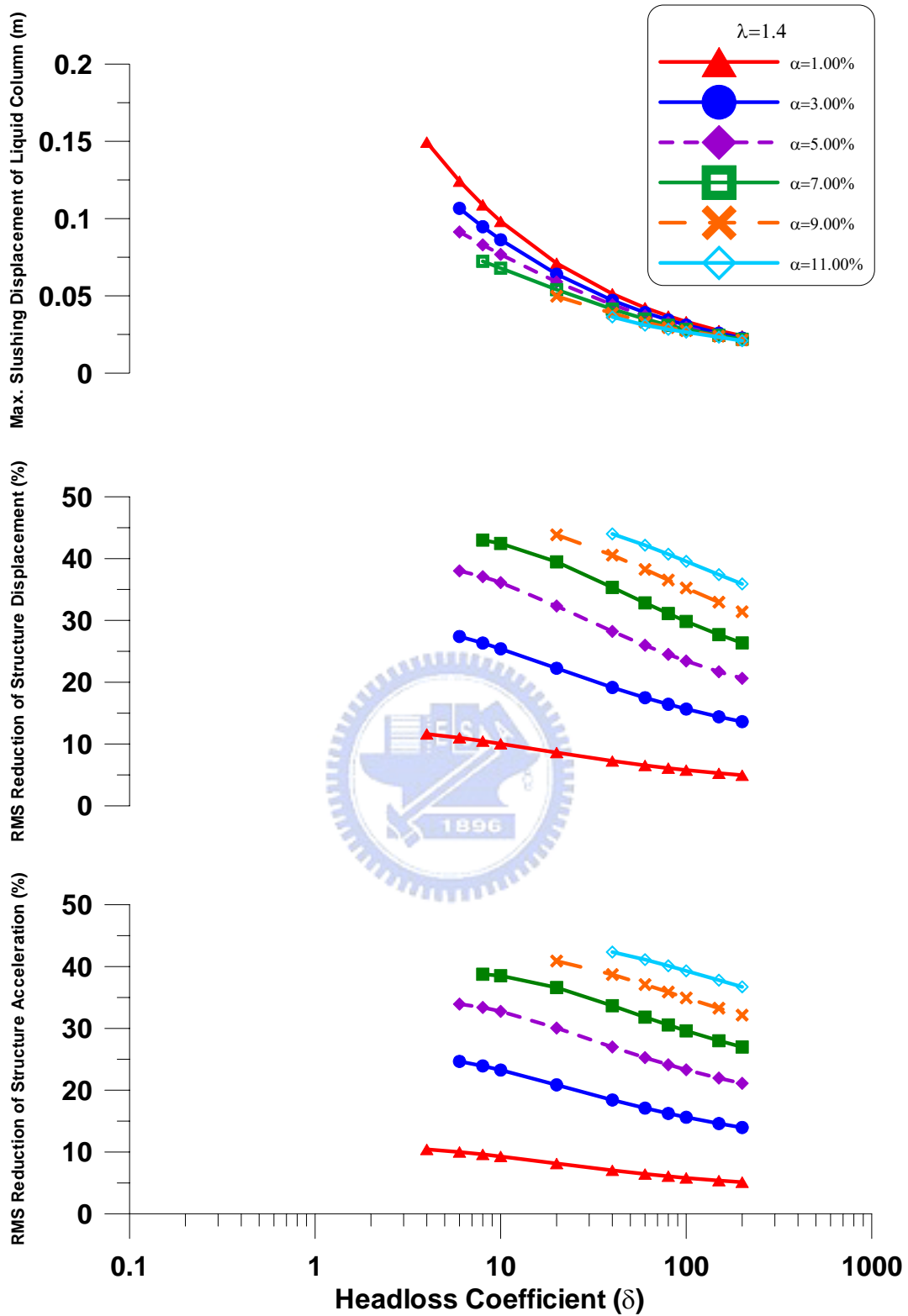


圖 4.33(f) 質量比與水頭損失係數對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\lambda = 1.4$)

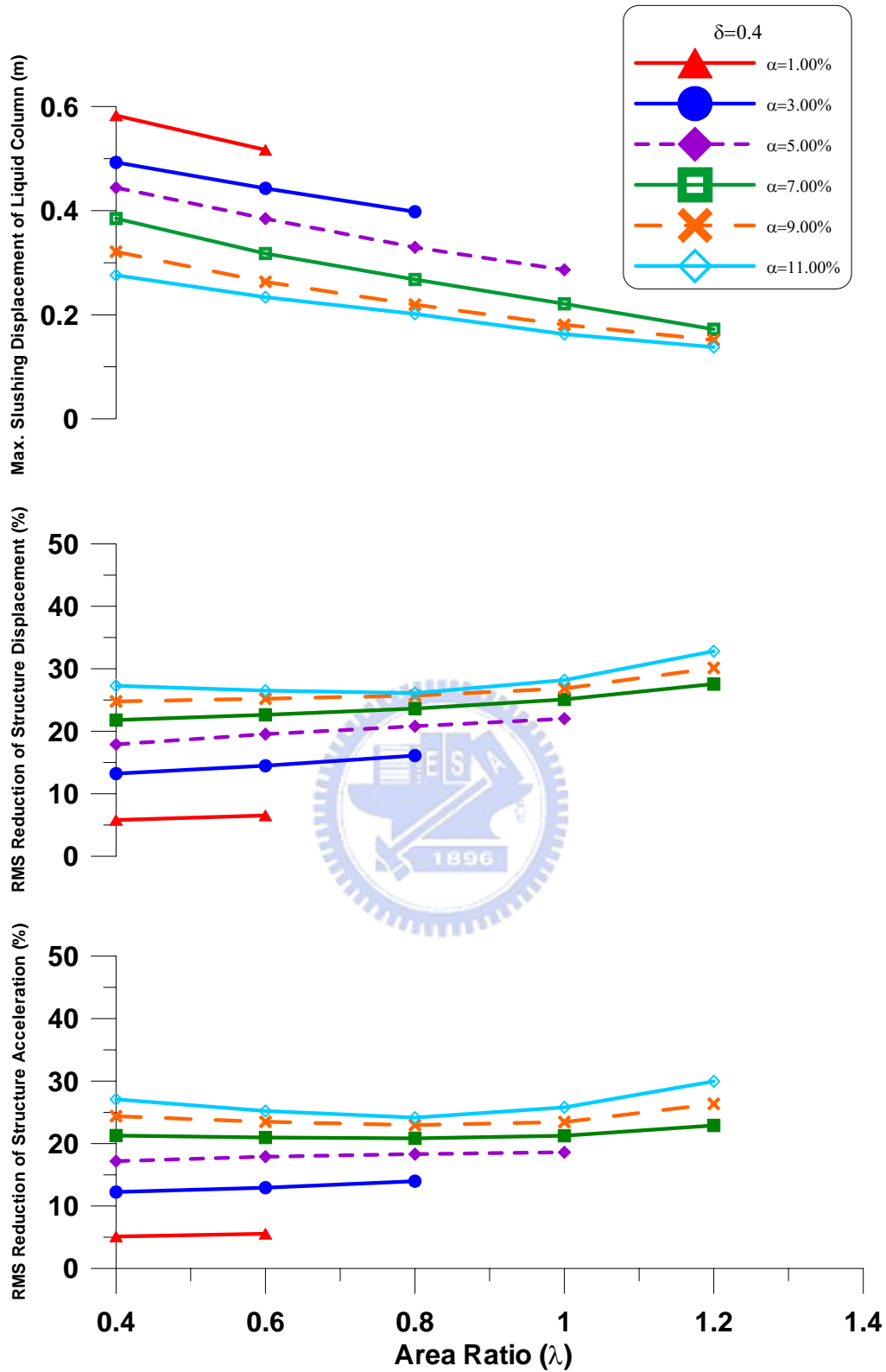


圖 4.34(a) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.4$)

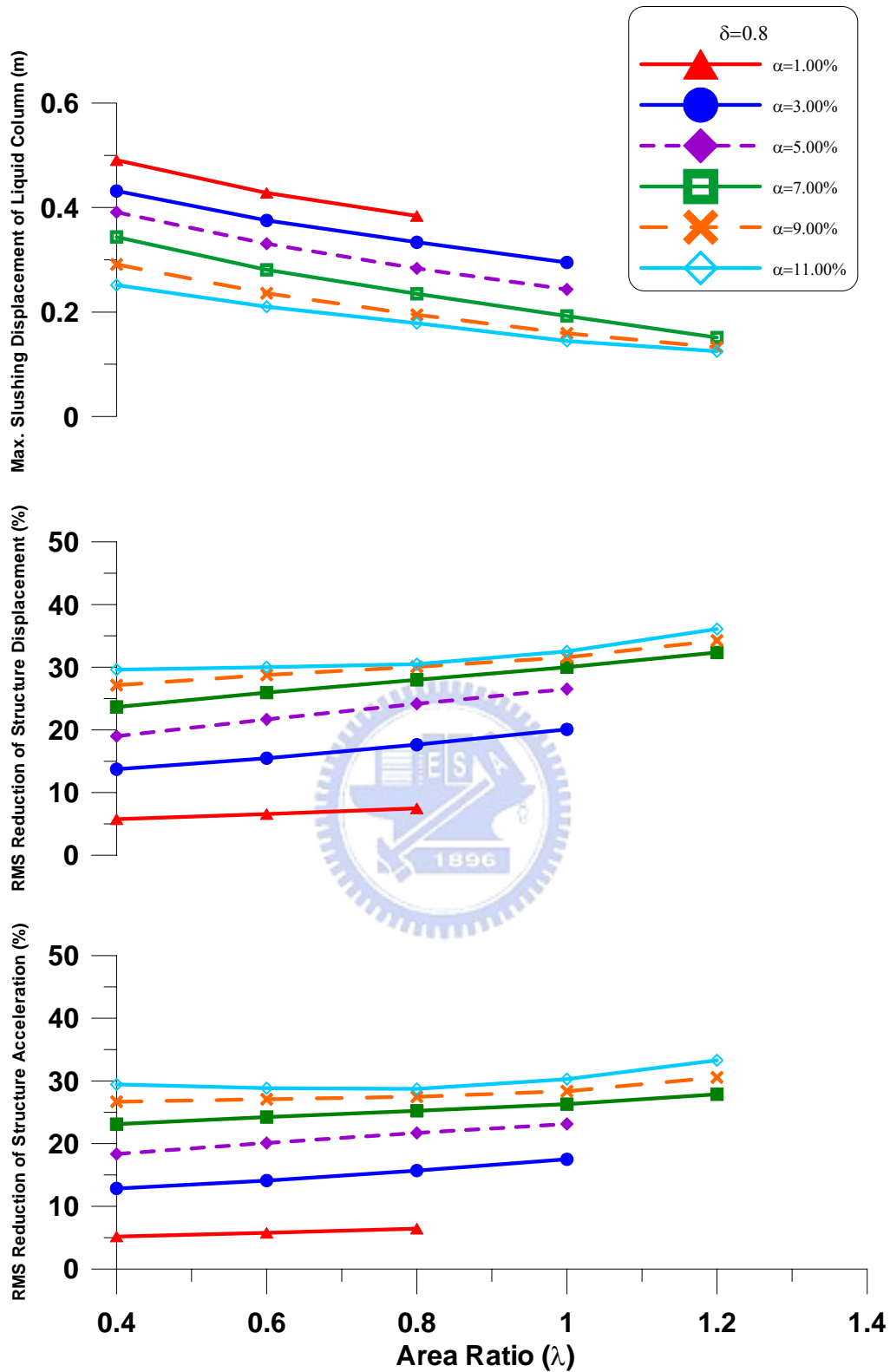


圖 4.34(b) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=0.8$)

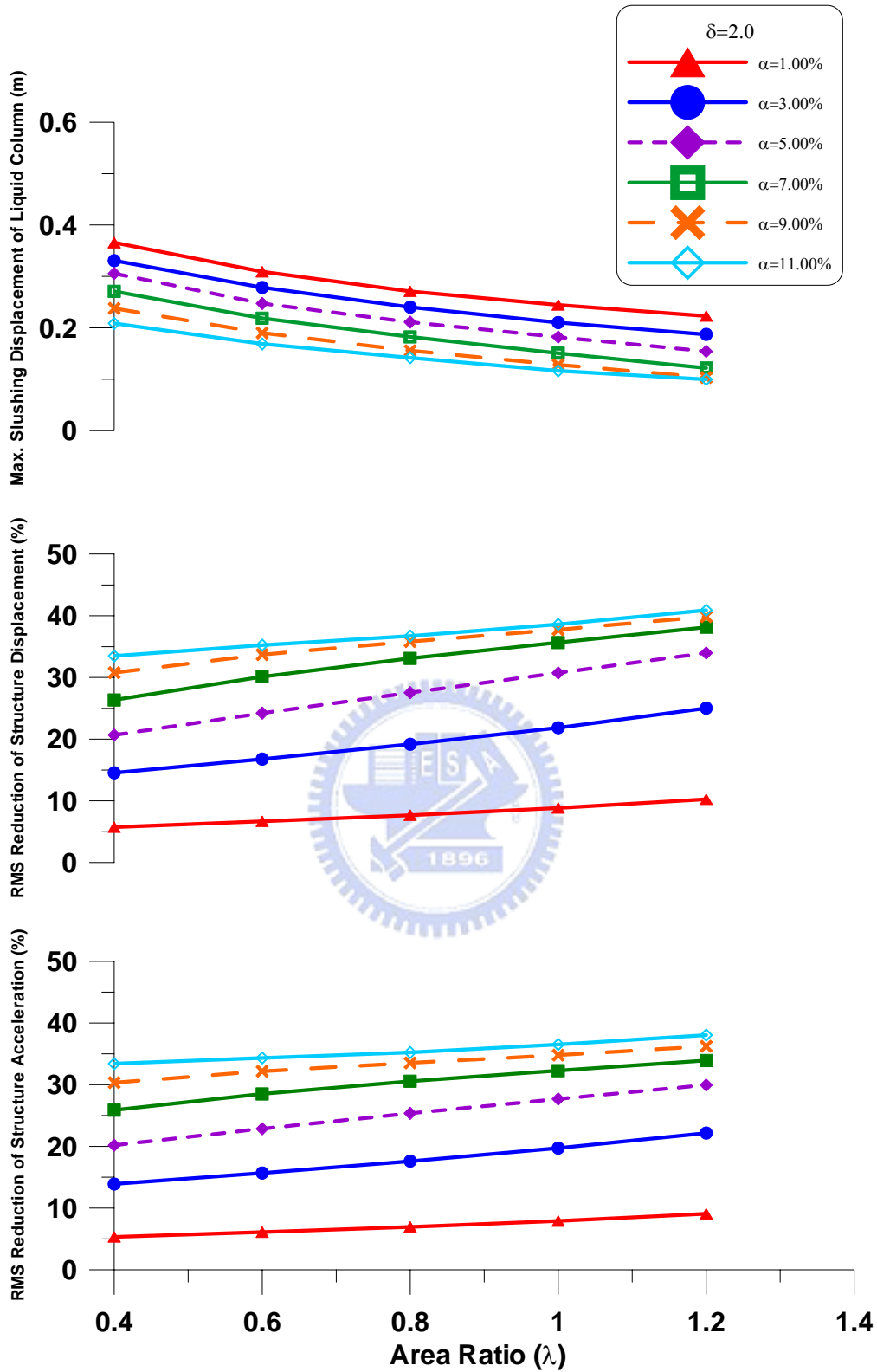


圖 4.34(c) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 2.0$)

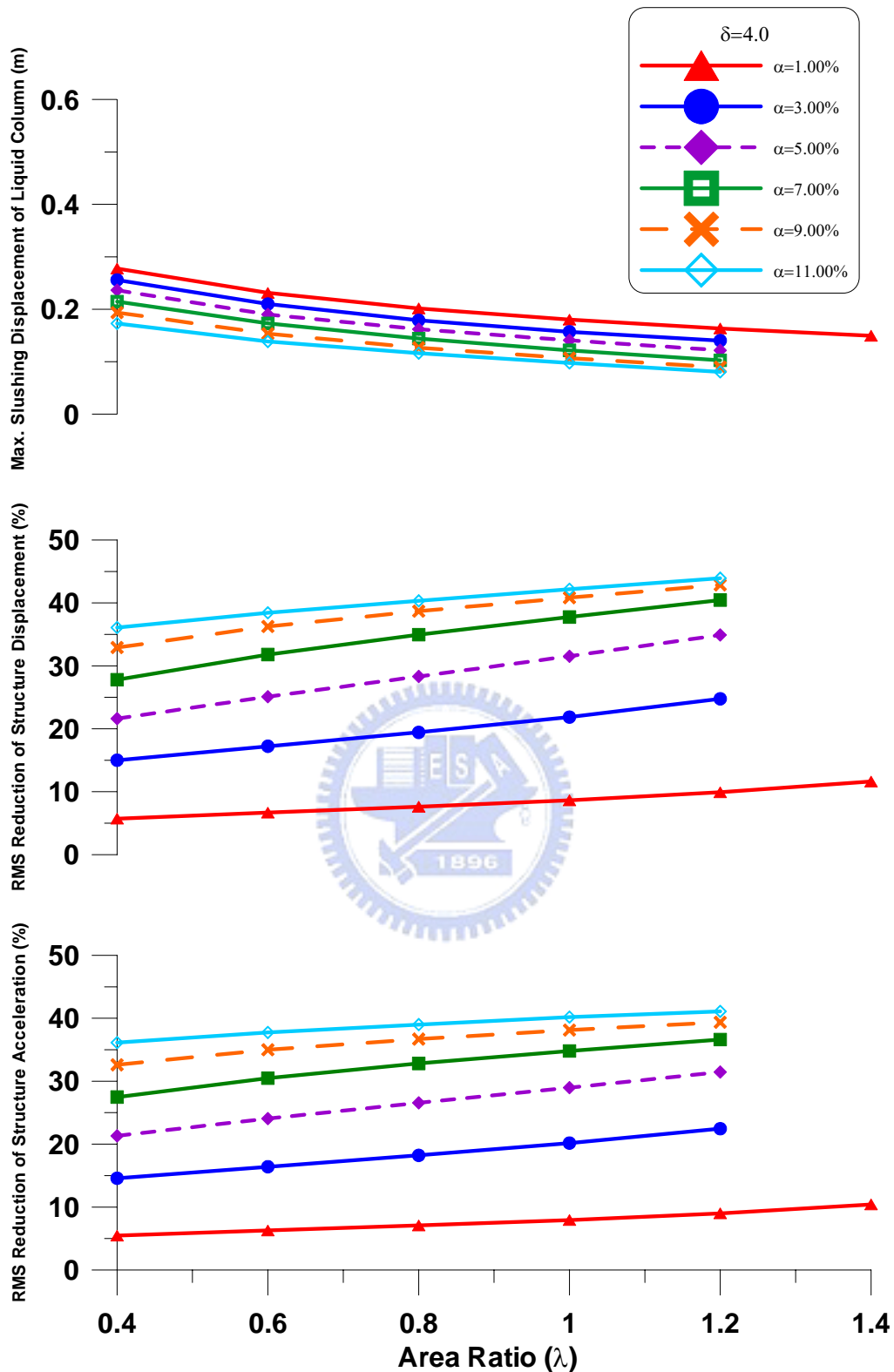


圖 4.34(d) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=4.0$)

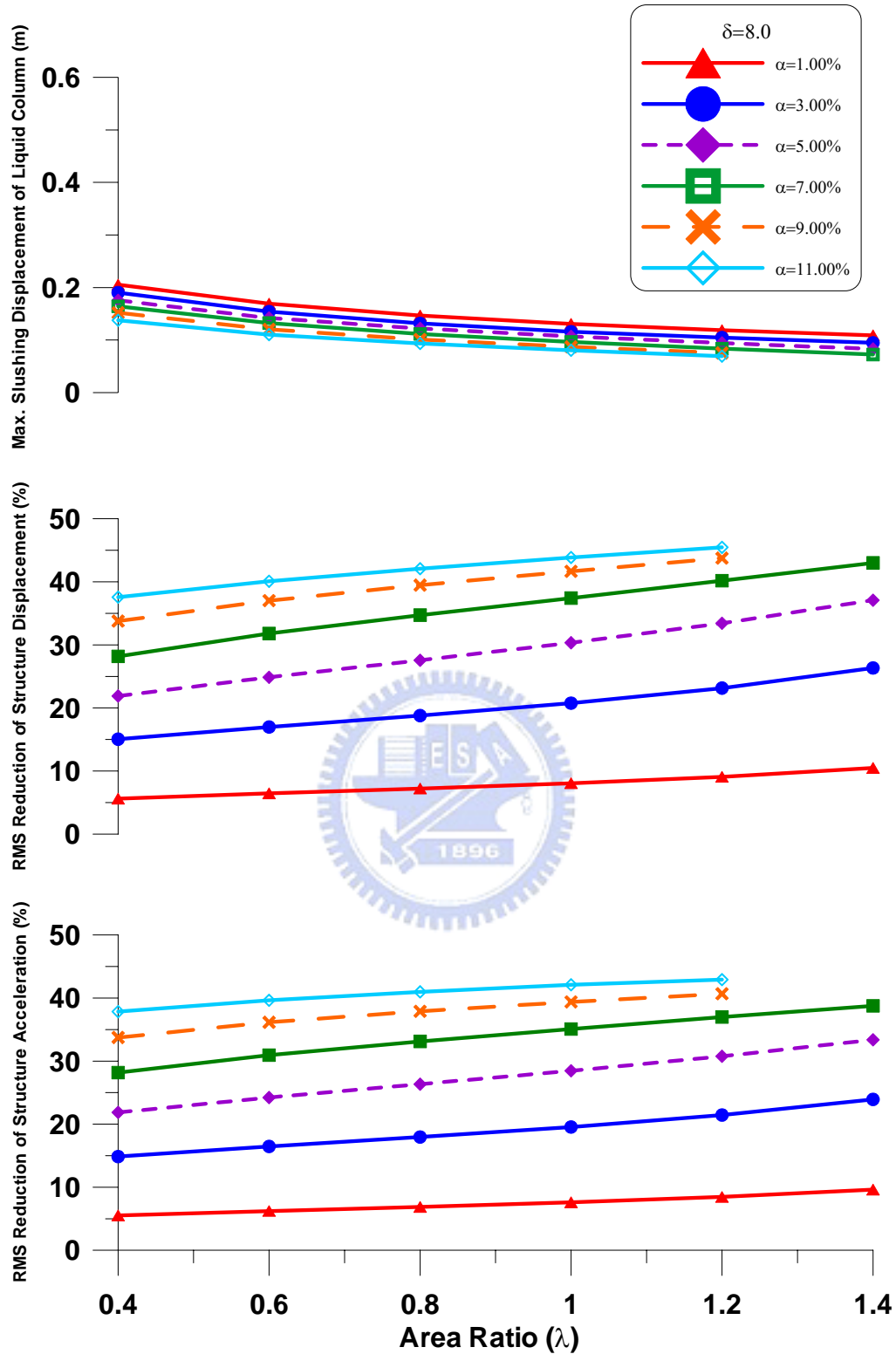


圖 4.34(e) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\beta = 0.55$, $\delta = 8.0$)

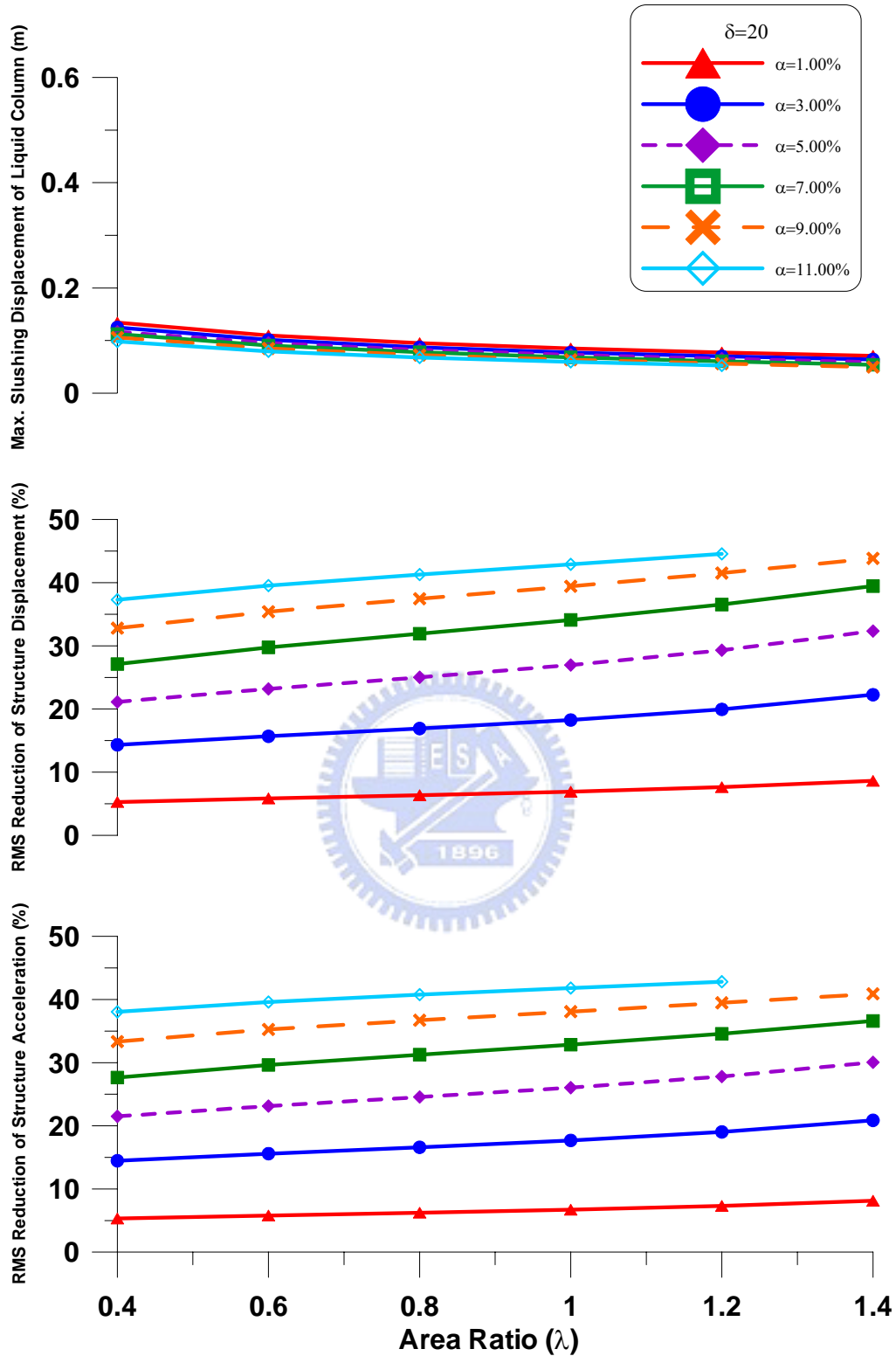


圖 4.34(f) 質量比與管徑截面積比對 TLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響(隨機擾動, $\gamma=1$, $\beta=0.55$, $\delta=20$)

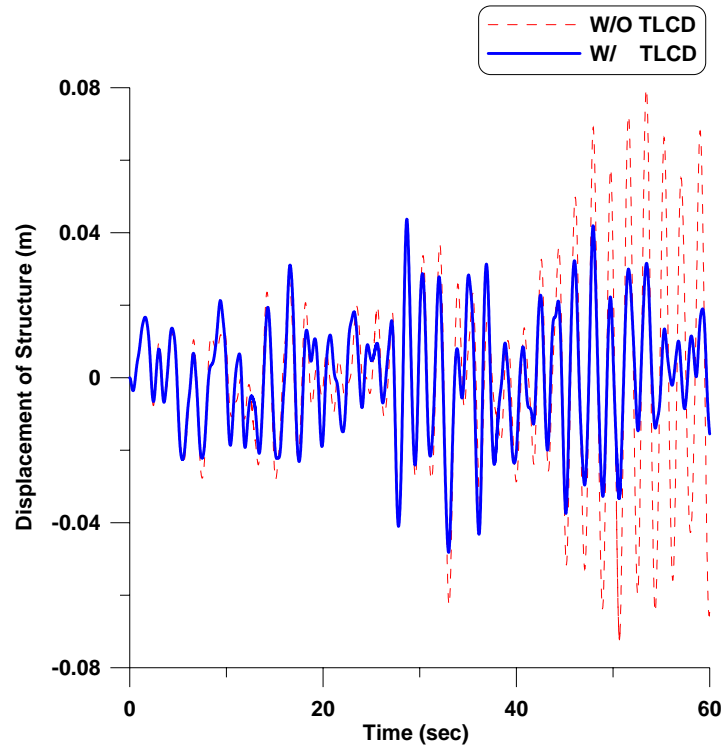


圖 4.35 TLCD 系統控制與未控制結構之位移歷時比較(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

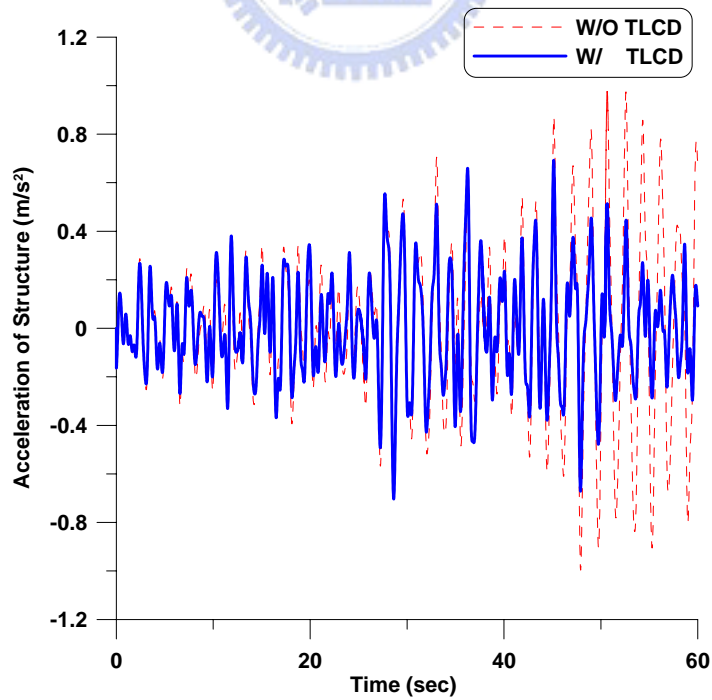


圖 4.36 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度歷時比較(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

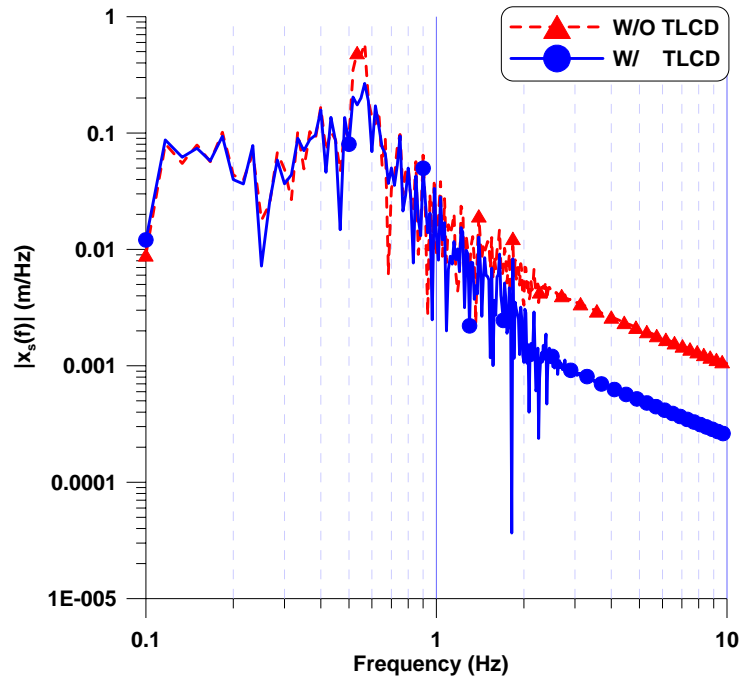


圖 4.37 TLCD 系統控制與未控制結構之位移富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

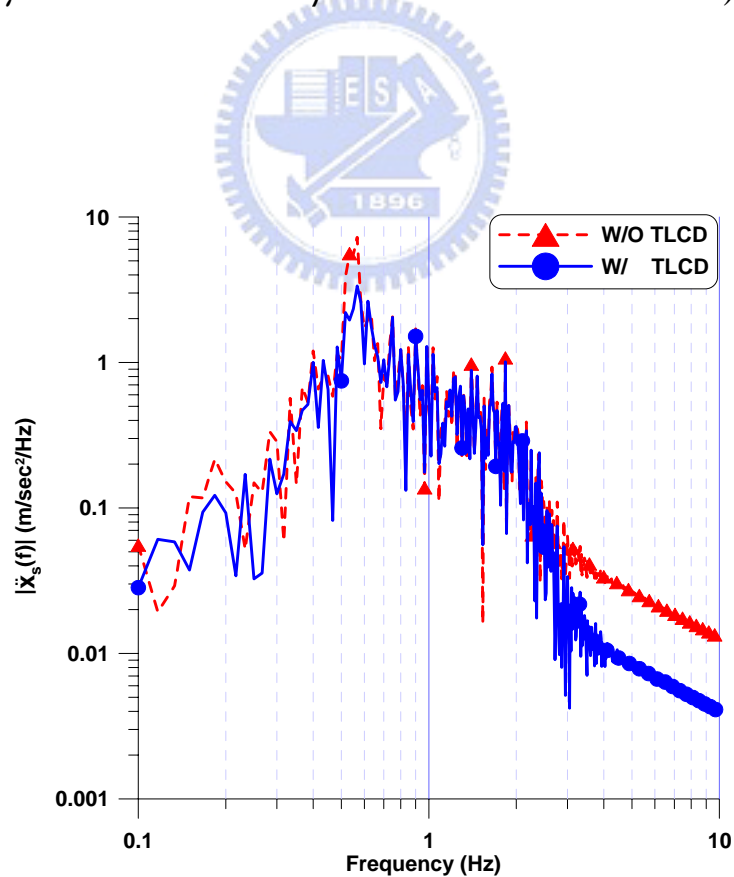


圖 4.38 TLCD 系統控制與未控制結構之加速度富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

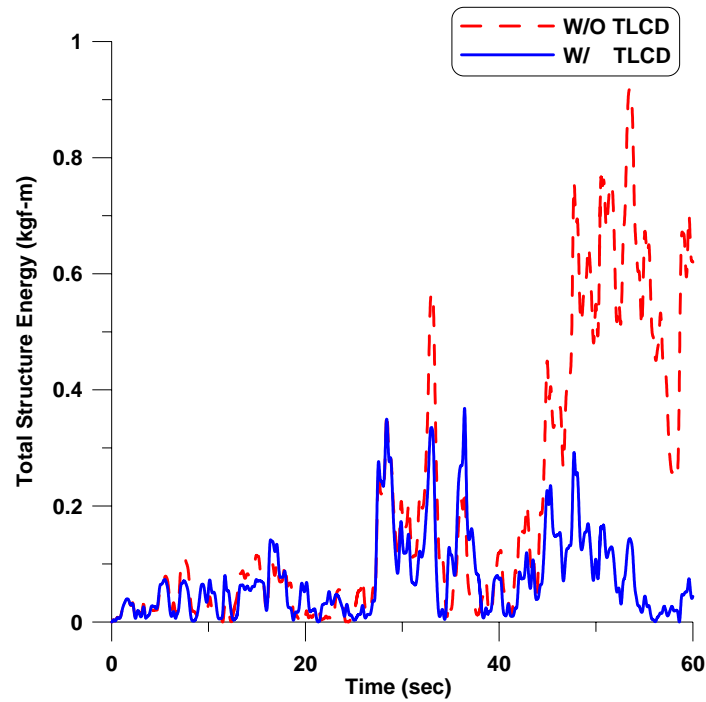


圖 4.39 TLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量歷時(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

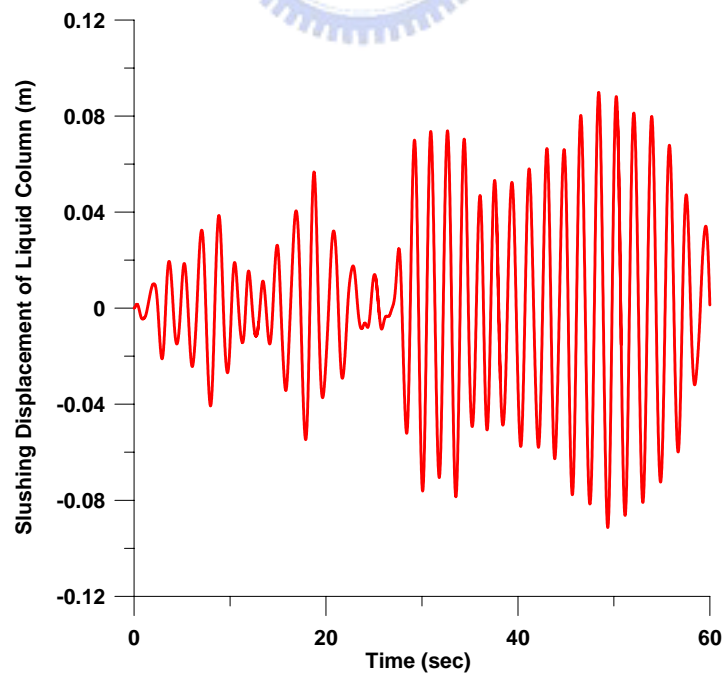


圖 4.40 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移歷時(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

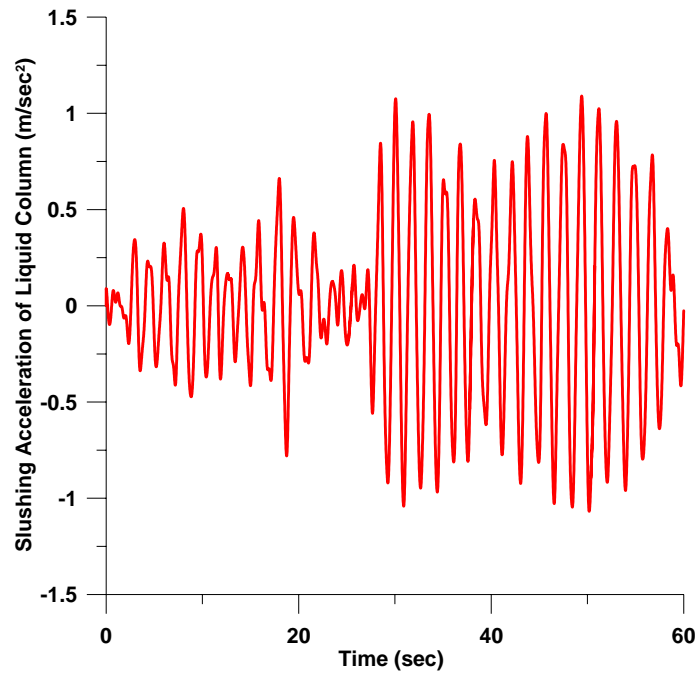


圖 4.41 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度歷時(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)



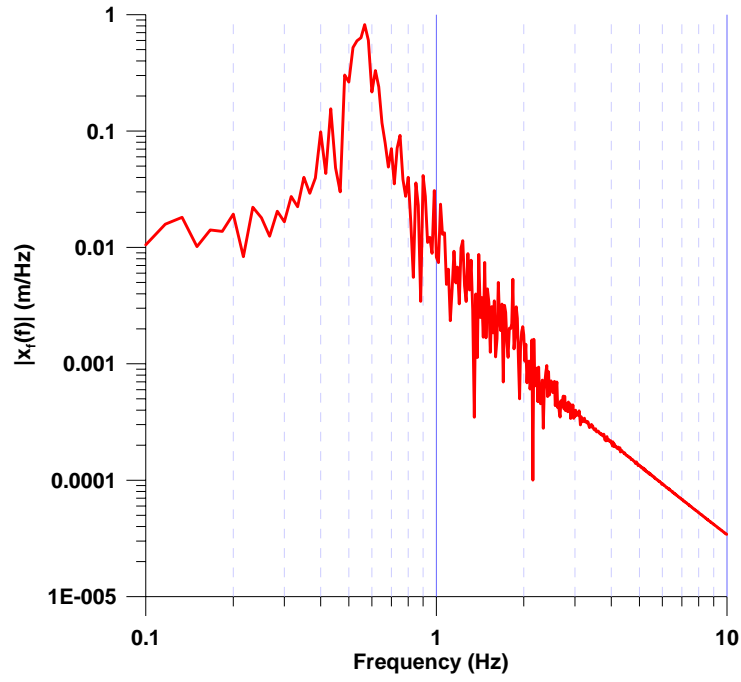


圖 4.42(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

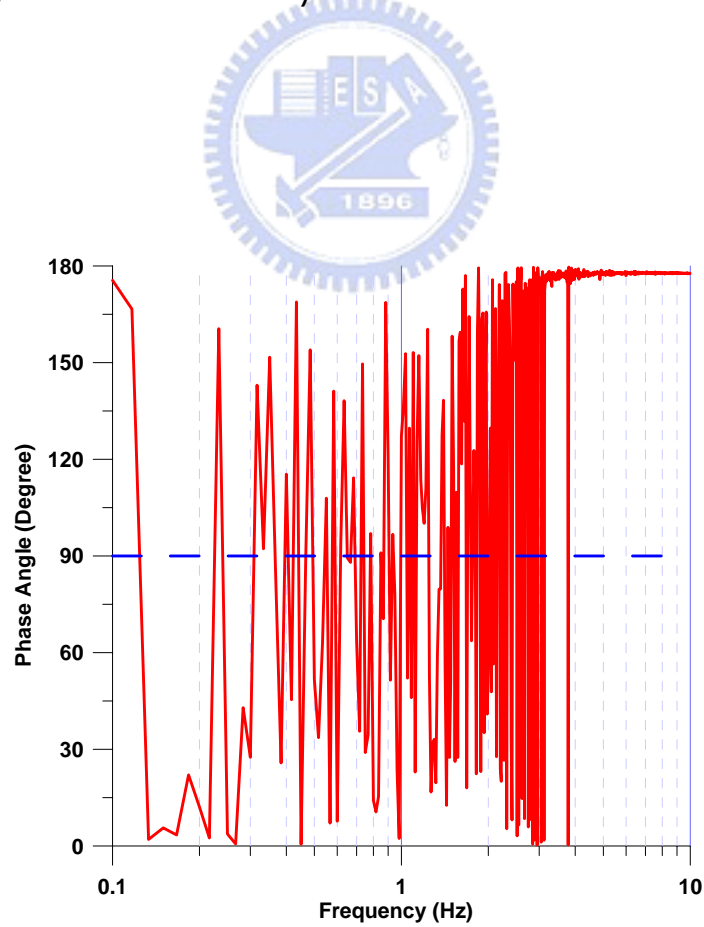


圖 4.42(b) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪位移反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

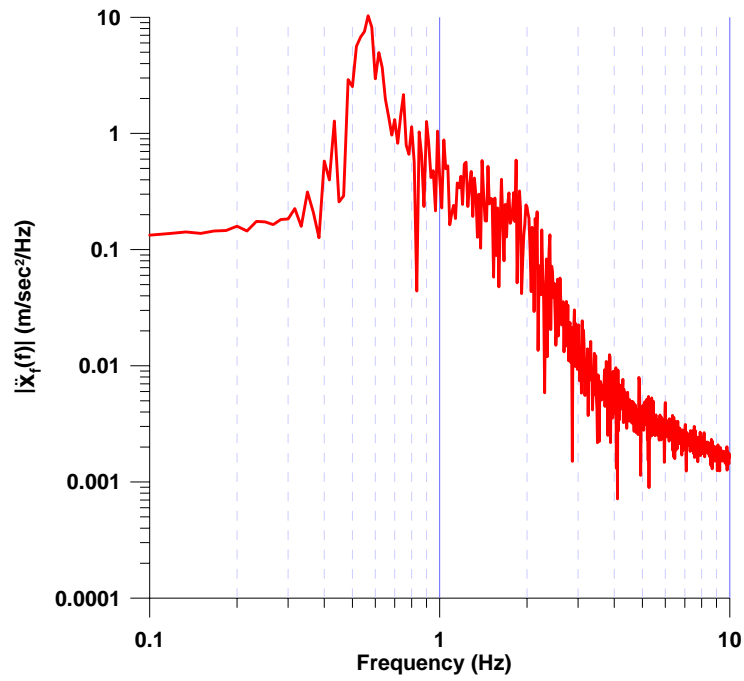


圖 4.43(a) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度富氏頻譜圖(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

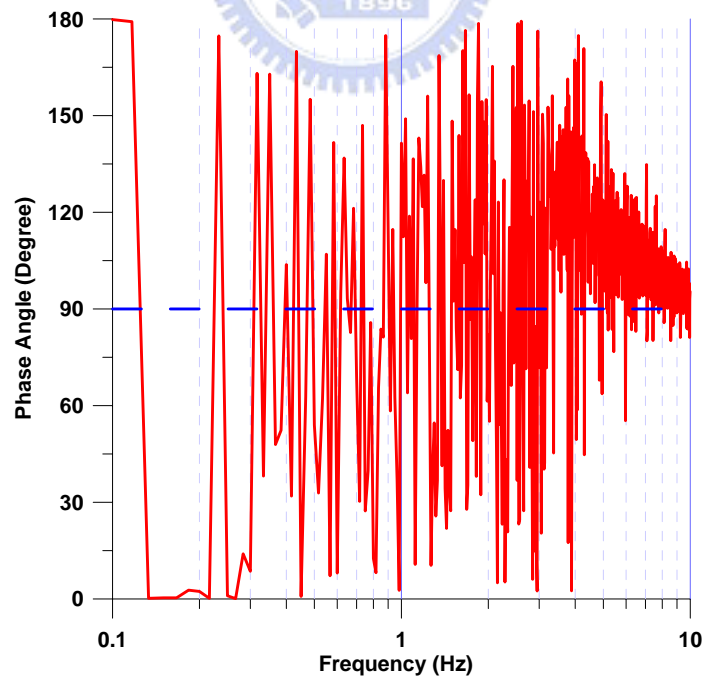


圖 4.43(b) 變斷面 TLCD 系統水柱激盪加速度反應富氏頻譜之相位角(隨機擾動， $\gamma = 1$ ， $\alpha = 5.0\%$ ， $\beta = 0.55$ ， $\delta = 6$ ， $\lambda = 1.4$)

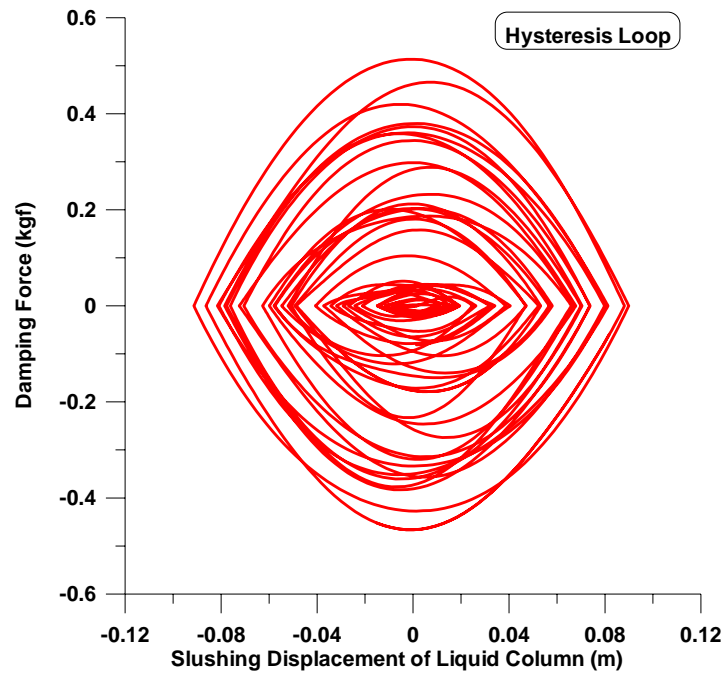


圖 4.44 變斷面 TLCD 系統遲滯迴圈(隨機擾動, $\gamma = 1$, $\alpha = 5.0\%$,
 $\beta = 0.55$, $\delta = 6$, $\lambda = 1.4$)



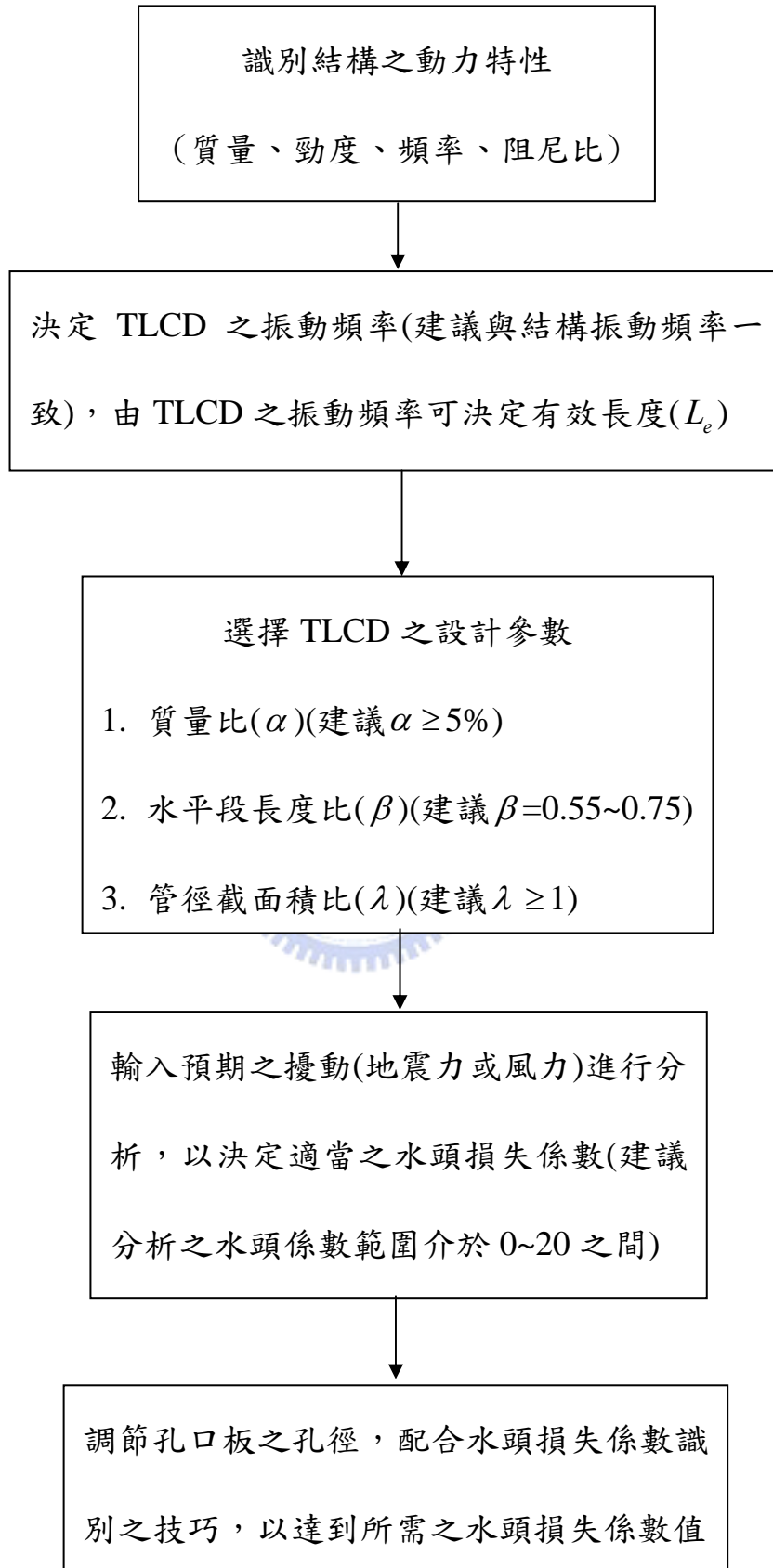


圖 5.1 TLCD 應用之分析設計流程