

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



TLCD 之高樓抗風設計與應用
**Design and Application of TLC D for
High-rise Buildings**

研究生：曾建華

指導教授：王彥博 博士

中華民國九十七年七月

TLCD 之高樓抗風設計與應用

Design and Application of TLCD for High-rise Buildings

研究生：曾建華

Student : Chien-Hua Tseng

指導教授：王彥博 博士

Advisor : Dr. Yen-Po Wang



Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年七月

變斷面TLCD抗風減震系統之試驗與分析

研究生：曾建華

指導教授：王彥博 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘 要

本研究針對水平及旋轉運動之變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper, VTLCD)系統進行動力特性試驗，參考並修正 Wu' s formula 建立水頭損失係數之經驗公式，以供日後 VTLCD 系統工程實務設計之用。根據本文之理論推導結果，VTLCD 系統之水頭損失係數與斷面比 (β) 成正比，此與斷面比 $\beta \geq 1$ 之 VTLCD 試驗結果相符；本研究提出之 modified Wu' s formula 水頭損失係數經驗公式中考慮了斷面比的影響，可將 Wu' s formula 分別針對斷面比 $\beta=1, 2$ 及 3 等三組經驗公式統合為一。當 VTLCD 之斷面比 $\beta < 1$ 時，試驗結果所得之水頭損失係數並未呈現與斷面比 (β) 成正比之關係，應為尺寸效應。小尺寸 VTLCD 之流體運動行為受邊界層流影響較大，以經驗公式預估其落水頭損失係數會偏低。此外，本研究針對一座 31 層樓之細長結構進行 VTLCD 之抗風減振效能評估，證明其減振效能。針對本文分析案例之參數研究結果顯示，VTLCD 對於結構位移及加速度反應之折減率，基本上隨阻塞率之增加而增加，當阻塞率為 80% 時達到最佳。

關鍵字：調諧水柱消能系統、斷面比、阻塞率、水頭損失

Design and Application of TLCD for High-rise Buildings

Student : Chien-Hua Tseng

Advisor : Dr. Yen-Po Wang

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

Abstract

The horizontal and pitching motions of variable tuned liquid column damper (VTLCD) have been explored through a series of dynamic component tests in this study. An empirical formula of the headloss coefficient for practical engineering design of VTLCD has been proposed based on the Wu's design formula. In accordance with the theoretical derivation results, the headloss coefficient of VTLCD is proportional to the cross-section area ratio (β), which is consistent with the experimental results of $\beta \geq 1$. The modified Wu's empirical formula proposed in this study takes the cross-section area ratio into account and integrates the three empirical formulas as a single one for the cross-section area ratios of $\beta=1,2$ and 3, respectively. In the case of $\beta < 1$, the experimental headloss coefficient is not proportional to the cross-section area ratio (β). This result may be due to the size effect of the scale-down VTLCD system. The liquid motion of the scale-down VTLCD is influenced by the boundary layer flow and the headloss coefficient predicted by the modified formula will be underestimated. Moreover, the feasibility of wind-induced vibration control of VTLCD system for a 31-story slender building structure has been confirmed through numerical simulations. The parametric study results indicate that

the control effectiveness of structural displacement and acceleration increases with the blocking ratio and the optimal control performance is achieved as the blocking ratio is 80%.

Keyword: Tuned Liquid Column Damper, TLCD, Cross-Section Area Ratio, Blocking Ratio, Headloss Coefficient



誌謝

感謝吾師 王彥博教授兩年來的悉心指導，使學生無論在研究上或做學問的態度上均有深刻的體會，並提供充分且優良的研究設備與環境。另外，吾師嚴謹的治學態度與努力不懈的研究熱忱，並以自身做為榜樣，給予我深遠的影響，在此衷心致上最誠摯的謝意。

感謝交大防災中心 李建良博士兩年來給予學生的指導，使學生在試驗及學習上均獲益良多。此外，學生也特別感謝文榮企業股份有限公司的 胡俊雄老闆在試驗元件上的建議及精準的元件製作，使本研究之試驗能順利完成。

論文口試承蒙淡江大學 吳重成教授、中興大學 林其璋教授、空軍航空技術學院 黃銘智教授、交通大學 陳誠直教授、交通大學 趙文成教授親臨指導，並提供諸多寶貴意見，使得論文之內容更為充實與完備，特別在此表示感激之意。

在交大的研究生活中，感謝研究室諸學長李建良博士、嘉賞學長、逸軒學長；畢業學長志軒、欣晏、俊成；同窗好友哲維、家杰、羅開；學弟顥勳、力邨、勵元、羿廷等在學業及生活上之切磋討論與實驗上之協助；以及諸多好友們在求學過程中的勉勵與關心，在此一併致上最誠摯之謝意。

最後，謹以本文獻給辛苦養育我的雙親及最愛的女友 Apple，感謝你們兩年來給予我精神上的鼓勵、支持與包容，讓我無後顧之憂的完成研究所的求學生涯，謝謝你們。

謹誌於交大工程二館 2008 年 7 月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
符號對照表.....	xvii
第一章 緒論.....	1
第二章 調諧水柱消能系統之理論解析.....	7
2.1 等斷面 TLCD 系統運動方程式.....	7
2.2 變斷面 VTLCD 系統運動方程式.....	9
2.3 VTLCD 系統旋轉向之運動方程式.....	12
2.4 解析模式.....	14
2.5 結構安裝 VTLCD 系統之運動方程式.....	16
2.6 系統識別.....	19
第三章 變斷面調諧液柱消能系統之試驗與分析.....	23
3.1 變斷面 VTLCD 落水頭損失預估.....	23
3.2 VTLCD 元件之模型安裝.....	24
3.3 試驗設備與感應器配置.....	24
3.4 試驗規劃.....	25
3.4.1 水平運動 VTLCD 系統之元件測試.....	26
3.4.2 旋轉運動 VTLCD 系統之元件測試.....	26

3.4.2 變斷面 VTLCD 之尺寸效應試驗.....	27
3.5 試驗結果.....	27
3.5.1 水平運動 VTLCD 試驗結果	27
3.5.2 旋轉運動 VTLCD 試驗結果	29
3.5.3 VTLCD 尺寸效應試驗結果	30
第四章 變斷面 VTLCD 之高樓抗風設計	33
4.1 前言.....	33
4.2 結構物安裝 VTLCD 系統之設計規劃	33
4.3 高層結構物安裝 VTLCD 系統之風力分析	34
4.4 風力分析結果.....	38
4.5 實尺寸 VTLCD 系統設計流程.....	39
4.6 變斷面 VTLCD 之厚度檢核.....	41
4.6.1 VTLCD 之變形量之設計要求	43
4.6.2 ANSYS 有限元素分析軟體知簡介	43
4.6.3 變斷面 VTLCD 模型之建立.....	45
4.6.4 元素種類之選取及描述.....	45
4.6.5 材料參數之定義.....	46
4.6.6 網格建立.....	46
4.6.7 邊界條件之設定及荷載之定義.....	46
4.6.8 VTLCD 系統變形量分析.....	47
4.7 ANSYS 分析結果.....	47
第五章 結論與建議.....	51
參考文獻.....	53

表目錄

表 3.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(小尺寸, $\beta=0.31$)	58
表 3.2 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸, $\beta=0.31$)	59
表 3.3 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(小尺寸, $\beta=0.6$)	60
表 3.4 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸, $\beta=1.0$)	61
表 3.5 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸, $\beta=2.0$)	62
表 3.6 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸, $\beta=3.0$)	63
表 3.7 各元件之擾動頻率輸入值.....	64
表 3.8(a) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(小尺寸 $\beta=0.31$).....	64
表 3.8(b) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(大尺寸 $\beta=0.31$).....	64
表 3.8(c) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(小尺寸 $\beta=0.6$).....	65
表 3.8(d) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(大尺寸 $\beta=1.0$).....	65
表 3.8(e) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(大尺寸 $\beta=2.0$).....	65
表 3.8(f) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果(大尺寸 $\beta=3.0$)	66
表 3.9(a) 小尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.31$).....	66
表 3.9(b) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.31$).....	66
表 3.9(c) 小尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.6$).....	67
表 3.9(d) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=1.0$).....	67
表 3.9(e) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=2.0$).....	67
表 3.9(f) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=3.0$).....	68
表 3.10(a) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數(大尺寸 $\beta=1.0$).....	68
表 3.10(b) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數(大尺寸 $\beta=2.0$).....	68
表 3.10(c) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數(大尺寸 $\beta=3.0$).....	69
表 3.11 尺寸效應試驗結果之差異百分比.....	69

表 4.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(實尺寸斷面比 $\beta=0.31$)	70
表 4.2 御盟建設 20 代建案結構系統參數.....	70
表 4.3 變斷面 VTLCD 於不同孔口板之減振效益	70
表 4.4 變斷面 VTLCD 厚度設計參數	70
表 4.5 水之物理性質(SI 制)	72
表 4.6 VTLCD 垂直段壁面(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果.....	72
表 4.7 孔口板(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果.....	73
表 4.8 變斷面 VTLCD 整體(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果.....	73



圖目錄

圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統.....	74
圖 1.2 TLCD 系統於加拿大 Wall center 之減振應用	74
圖 1.3 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用	75
圖 1.4 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用	75
圖 1.5 TLCD 系統於高塔之減振應用	76
圖 1.6 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用	76
圖 2.1 等斷面 TLCD 理論推導示意圖	77
圖 2.2 變斷面 VTLCD 理論推導示意圖	77
圖 2.3 旋轉向 VTLCD 理論推導示意圖	78
圖 2.4 單自由度結構裝置變斷面 VTLCD 理論推導示意圖	78
圖 3.1 VTLCD 元件設計詳圖(小尺寸, $\beta = 0.31$)	79
圖 3.2 VTLCD 元件設計詳圖(小尺寸, $\beta = 0.6$)	79
圖 3.3 VTLCD 元件設計詳圖(大尺寸, $\beta = 0.31$)	80
圖 3.4 孔口板設計詳圖.....	80
圖 3.5 VTLCD 旋轉運動試驗配置圖	81
圖 3.6 振動台之設計尺寸詳圖.....	82
圖 3.7 MTS 407 控制器	83
圖 3.8 雷射位移計.....	83
圖 3.9 波高計(WHA-600 和 WHA-800)	84
圖 3.10(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta = 0.31$) ...	85
圖 3.10(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta = 0.31$) ...	86
圖 3.10(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta = 0.31$) ...	87
圖 3.10(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta = 0.31$) ...	88

圖 3.10(e)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=0.31$) ...	89
圖 3.11(a)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=0.31$) ...	90
圖 3.11(b)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=0.31$) ...	91
圖 3.11(c)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=0.31$) ...	92
圖 3.11(d)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=0.31$) ...	93
圖 3.11(e)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=0.31$) ...	94
圖 3.12(a)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=0.6$) ...	95
圖 3.12(b)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=0.6$) ...	96
圖 3.12(c)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=0.6$) ...	97
圖 3.12(d)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=0.6$) ...	98
圖 3.12(e)	小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=0.6$) ...	99
圖 3.13(a)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=1.0$) ...	100
圖 3.13(b)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=1.0$) ...	101
圖 3.13(c)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=1.0$) ...	102
圖 3.13(d)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=1.0$) ...	103
圖 3.13(e)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=1.0$) ...	104
圖 3.14(a)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=2.0$) ...	105
圖 3.14(b)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=2.0$) ...	106
圖 3.14(c)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=2.0$) ...	107
圖 3.14(d)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=2.0$) ...	108
圖 3.14(e)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=2.0$) ...	109
圖 3.15(a)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=3.0$) ...	110
圖 3.15(b)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=3.0$) ...	111
圖 3.15(c)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=3.0$) ...	112
圖 3.15(d)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=3.0$) ...	113
圖 3.15(e)	大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=3.0$) ...	114

圖 3.16(a) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(小尺寸, $\beta=0.31$)	115
圖 3.16(b) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(大尺寸, $\beta=0.31$)	115
圖 3.16(c) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(小尺寸, $\beta=0.6$)	116
圖 3.16(d) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(大尺寸, $\beta=1.0$)	116
圖 3.16(e) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(大尺寸, $\beta=2.0$)	117
圖 3.16(f) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係(大尺寸, $\beta=3.0$)	117
圖 3.17(a) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(小尺寸, $\beta=0.31$)	118
圖 3.17(b) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(大尺寸, $\beta=0.31$)	118
圖 3.17(c) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(小尺寸, $\beta=0.6$)	119
圖 3.17(d) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(大尺寸, $\beta=1.0$)	119
圖 3.17(e) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(大尺寸, $\beta=2.0$)	120
圖 3.17(f) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係(大尺寸, $\beta=3.0$)	120
圖 3.18 不同斷面比之阻塞率與水頭損失係數之關係($\lambda=1.0$)	121
圖 3.19 不同阻塞率之斷面比與水頭損失係數之關係($\lambda=1.0$)	121
圖 3.20(a) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=20\%$)	122
圖 3.20(b) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=40\%$)	122
圖 3.20(c) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=60\%$)	123
圖 3.20(d) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=80\%$)	123
圖 3.21(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)	124
圖 3.21(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)	125
圖 3.21(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)	126
圖 3.21(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)	127
圖 3.21(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)	128
圖 3.22(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)	129
圖 3.22(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)	130
圖 3.22(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)	131

圖 3.22(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)	132
圖 3.22(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)	133
圖 3.23(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=0.6$)	134
圖 3.23(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=0.6$)	135
圖 3.23(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=0.6$)	136
圖 3.23(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=0.6$)	137
圖 3.23(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=0.6$)	138
圖 3.24(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)	139
圖 3.24(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)	140
圖 3.24(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)	141
圖 3.24(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)	142
圖 3.24(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)	143
圖 3.25(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)	144
圖 3.25(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)	145
圖 3.25(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)	146
圖 3.25(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)	147
圖 3.25(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)	148
圖 3.26(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)	149
圖 3.26(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)	150
圖 3.26(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)	151
圖 3.26(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)	152
圖 3.26(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)	153
圖 3.27(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)	154
圖 3.27(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)	155
圖 3.27(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)	156
圖 3.27(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)	157

圖 3.27(e)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)	....158
圖 3.28(a)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)	....159
圖 3.28(b)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)	....160
圖 3.28(c)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)	....161
圖 3.28(d)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)	....162
圖 3.28(e)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)	....163
圖 3.29(a)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)	....164
圖 3.29(b)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)	....165
圖 3.29(c)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)	....166
圖 3.29(d)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)	....167
圖 3.29(e)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)	....168
圖 3.30	VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=1$)	.....169
圖 3.31	VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=2$)	.....169
圖 3.32	VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=3$)	.....170
圖 3.33(a)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)	.....171
圖 3.33(b)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)	.....172
圖 3.33(c)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)	.....173
圖 3.33(d)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)	.....174
圖 3.33(e)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)	.....175
圖 3.34(a)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)	.....176
圖 3.34(b)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)	.....177
圖 3.34(c)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)	.....178
圖 3.34(d)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)	.....179
圖 3.34(e)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)	.....180
圖 3.35(a)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)	.....181
圖 3.35(b)	大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)	.....182

圖 3.35(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)	183
圖 3.35(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)	184
圖 3.35(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)	185
圖 3.36(a) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=0.6)	186
圖 3.36(b) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=0.9)	186
圖 3.36(c) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.0)	187
圖 3.36(d) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.1)	187
圖 3.36(e) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.4)	188
圖 4.1 御盟建設 20 代建案頂樓結構平面圖	189
圖 4.2 御盟建設 20 代建案結構立面圖	190
圖 4.3 御盟建設 20 代建案結構物模型示意圖	191
圖 4.4 御盟建設 20 代建案結構物模型頂樓平面圖	191
圖 4.5 實尺寸 VTLCD 系統尺寸設計詳圖($\beta=0.31$)	192
圖 4.6 順風向與橫風向之風力示意圖	192
圖 4.7 順風向風力歷時圖	193
圖 4.8 順風向風力頻譜圖	193
圖 4.9 結構物頂樓加速度均方根折減值	194
圖 4.10 結構物頂樓位移均方根折減值	194
圖 4.11 VTLCD 阻塞率 80%之加速度折減	195
圖 4.12 變斷面 VTLCD 尺寸標示示意圖	195
圖 4.13 穩態流流線管之能量示意圖	196
圖 4.14 VTLCD 系統管壁內液體壓力分佈圖	196
圖 4.15 剛性儲存槽理論推導示意圖	197
圖 4.16 VTLCD 管壁內流體慣性力分佈圖	197
圖 4.17 ANSYS 幾何模型水位交界面示意	198
圖 4.18 實尺寸變斷面 VTLCD 之幾何模型	198

圖 4.19 實尺寸變斷面 VTLCD 孔口板(阻塞率 80%)之幾何模型	199
圖 4.20 SOLID45 元素示意圖	199
圖 4.21 ANSYS 分析模型材料性質輸入(輸入內容：彈性模數及包松比).....	200
圖 4.22 ANSYS 分析模型材料性質輸入(輸入內容：材料密度).....	200
圖 4.23 變斷面 VTLCD 模型邊界固接設定	201
圖 4.24(a) ANSYS 表面壓力設定值(斜率、作用方向及最終質設定)	201
圖 4.24(b) ANSYS 表面壓力設定值(初始質設定).....	202
圖 4.25 變斷面 VTLCD 局部分析-垂直段管壁邊界條件設定	202
圖 4.26 ANSYS 表面壓力示意圖	203
圖 4.27 ANSYS 流體作用力之模擬	203
圖 4.28 孔口板邊界條件設定.....	204
圖 4.29 孔口板邊荷載之施加.....	204
圖 4.30 變斷面 VTLCD 網格劃分示意圖	205
圖 4.31 變斷面 VTLCD 荷載施加示意圖	205
圖 4.32 變斷面 VTLCD 局部分析變形量示意圖	206
圖 4.33(a) 變斷面 VTLCD 局部分析 X 軸應力分佈圖	206
圖 4.33(b) 變斷面 VTLCD 局部分析 Y 軸應力分佈圖.....	207
圖 4.33(c) 變斷面 VTLCD 局部分析 Z 軸應力分佈圖	207
圖 4.33(d) 變斷面 VTLCD 局部分析 XY 平面剪應力分佈圖	208
圖 4.33(e) 變斷面 VTLCD 局部分析 XZ 平面剪應力分佈圖	208
圖 4.33(f) 變斷面 VTLCD 局部分析 YZ 平面剪應力分佈圖.....	209
圖 4.33(g) 變斷面 VTLCD 局部分析 Von Mises 應力分佈圖.....	209
圖 4.34 孔口板變形量示意圖.....	210
圖 4.35(a) 孔口板 X 軸應力分佈圖	210
圖 4.35(b) 孔口板 Y 軸應力分佈圖	211
圖 4.35(c) 孔口板 Z 軸應力分佈圖.....	211

圖 4.35(d) 孔口板 XY 平面剪應力分佈圖	212
圖 4.35(e) 孔口板 XZ 平面剪應力分佈圖	212
圖 4.35(f) 孔口板 YZ 平面剪應力分佈圖	213
圖 4.35(g) 孔口板 Von Mises 應力分佈圖	213
圖 4.36 變斷面 VTLCD 變形量示意圖	214
圖 4.37 變斷面 VTLCD 最大變形量位置	214
圖 4.38(a) 變斷面 VTLCD X 向應力分佈圖	215
圖 4.38(b) 變斷面 VTLCD Y 向應力分佈圖	215
圖 4.38(c) 變斷面 VTLCD Z 向應力分佈圖	216
圖 4.38(d) 變斷面 VTLCD XY 面剪應力分佈圖	216
圖 4.38(e) 變斷面 VTLCD XZ 面剪應力分佈圖	217
圖 4.38(f) 變斷面 VTLCD YZ 面剪應力分佈圖	217
圖 4.38(g) 變斷面 VTLCD Von Mises 應力分佈圖	218



符號對照表

- A : TLCDC U 型管之截面積
- A_h : VTLCDC 水平段截面積
- A_i : 節點 i 受風截面積
- A_v : VTLCDC 垂直段截面積
- 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_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 TLCDC 管徑
- d : 水平段長度
- E : 系統之擾動配置矩陣
- E^* : 地表擾動力分配矩陣
- E_0 : 前瞬時離散時間地表擾動力分配矩陣
- E_1 : 後瞬時離散時間地表擾動力分配矩陣
- er : 定義誤差
- f : VTLCDC 自然振動頻率 (H_z)
- f_s : 結構之振動頻率



- $f(t)$: 作用於結構之側向力
- g : 重力加速度
- H : VTLCD 之總高度
- h : VTLCD 蓄水高度
- h_v : TLCDC 垂直段有效長度
- J_α : 結構之質量慣性矩
- K : 系統之勁度矩陣
- K_α : 結構旋轉向勁度
- k_0 : 地表粗糙度
- k_s : 結構勁度
- L : VTLCD 系統總長度
- L_e : TLCDC 之有效長度
- M : 系統之質量矩陣
- m_s : 結構質量
- m_w : VTLCD 系統流體質量
- n_a : 系統識別輸出訊號之維度
- n_b : 系統識別輸入訊號之維度
- Q : 非保守力
- Re : 雷諾數
- S_1 : 右邊垂直段液柱中心至橋面板旋轉中心之距離
- S_2 : 左邊垂直段液柱中心至橋面板旋轉中心之距離
- T : 系統之總動能



U : 系統之總重力位能

$u(\cdot)$: 系統識別輸入訊號

u_g : 基座之水平位移

\dot{u}_g : 基座之移動速度

\ddot{u}_g : 基座之加速度

V_r : 距地 10 公尺之平均風速

\bar{V}_i : 第 i 層樓之平均風速

$w(t)$: 擾動向量

$x(t)$: 系統之位移向量

x_f : VTLCD 垂直段液柱激盪振幅

\dot{x}_f : VTLCD 垂直段液柱激盪速度

\ddot{x}_f : VTLCD 垂直段液柱激盪加速度

x_h : VTLCD 水平段液柱位移

\dot{x}_h : VTLCD 水平段液柱速度

x_s : 結構頂樓相對於地表之位移

y_0 : 橋面板旋轉中心到 VTLCD 系統水平段中心之距離

$y(\cdot)$: 系統識別之輸出訊號

$z(t)$: 狀態向量

α : VTLCD 系統之旋轉角

β : VTLCD 之斷面比

θ : 系統識別之每一瞬時系統參數



ω : VTLCD 系統之自然頻率 (rad/sec)

δ : 落水頭損失係數

κ : 遺忘因子

μ : 流體之黏滯度

ρ : 流體密度

ε : 容許誤差

ζ_s : 結構之阻尼比

ψ : 孔口板之阻塞率



第一章 緒論

風災地震乃自古以來人類便無法抗拒的災害。台灣地處環太平洋地震帶及西太平洋熱帶氣旋區，因此深受颱風及地震所困擾。

近年在建築技術不斷進步下，各國相繼興建許多超高層大樓做為城市的新地標。高樓建築結構與一般結構之主要差別在於其質量輕、細長(高寬比大)及自然頻率與阻尼較低等，故對風力擾動相對敏感。基於安全及舒適性考量，風力設計通常是影響結構設計尺寸的重要因素。如何降低受風力擾動下結構的變位及加速度以提升其舒適性，乃結構工程控制領域之重要議題。

一般而言，要降低結構動力反應，不外乎增加結構的阻尼或改變結構的基本振動頻率等方法，此即結構控制的主要目標。若依控制系統之運作需要額外提供能量與否，可將其劃分為主動控制(Active Control)與被動控制(Passive Control)兩大類[1]，茲分述如下：

主動控制包括主動斜撐系統(Active Bracing System)、主動鋼鍵系統(Active Tendon System)以及質塊制動器(Active Mass Damper, AMD)[2-9]。其中質塊制動器係由被動式的調諧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[10]，如調閥式阻尼器(Variable Orifice Dampers)及電流變異阻尼器(Electro-rheological Dampers)等。

被動控制系統不需提供能量即可運作，包括基礎隔震(Base Isolation)[11-14]、各式消能器[15-16]，及調諧質塊阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)[16-18]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)[19-27]。消能器藉由高阻尼材料或鋼材之降伏，在反覆受力變形所產生之遲滯迴圈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[28]等。調諧質塊阻尼器則是利用與主結構振頻相近之次結構系統在接近共振的情況下吸收大部分振動能量以降低主結構的反應。

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所在。為能同時滿足結構安全及舒適性的設計條件，常需採用結構控制技術加以克服。過去二十年中，調諧質塊阻尼系統是高樓抗風設計最常用的結構控制系統[29-30]，如加拿大多倫多 553 m 高的 CN Tower，美國波士頓 60 層高之 John Hancock 大樓，澳洲雪梨 305 m 高之 Center-point Tower 及 508 m 高的台北 101 大樓(圖 1.1)等。惟近年來，TMD 有逐漸被調諧液態消能系統(Tuned Liquid Damper, TLD)取代的趨勢，其中又以調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)的應用最具潛力。

目前北美及亞洲地區應用 TLCD 的高樓抗風工程，主要均由加拿大及日本各一家公司承攬，這些案例在 2000 年前後已陸續完成。舉例來說，北美地區完成的工程案例包括：溫哥華 Wall Center 住宅大樓[31](48 層，圖 1.2)安裝 TLCD 進行結構抗風減震(總用水量約 600 噸)，該 TLCD 系統除可降低風力振動反應，改善住戶的舒適性外，亦可兼作消防用水之功能。此外，在美國應用 TLCD 系統之案例包括紐約 Random House 及芝加哥 South Dearborn 等大樓。亞洲地區的案例包括，日本東京的 Cosima 旅館(圖 1.3)－該高樓建築為 26 層之鋼骨建築，總高 106.2 m，屬細長結構，易為風力作用所影響，固於頂樓安裝一組 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 1.4)、

大阪的 Hyatt 旅館以及 Ichida 大樓都安裝了 TLCD。此外，煙囪、高塔均可安裝 TLCD 系統進行抗風減震，如圖 1.5 所示。TLCD 系統可應用之領域極為廣泛，未來 TLCD 系統有機會成為高樓減振系統之主流。本研究除建立 TLCD 系統之非線性理論分析模式外，並對一系列變斷面 VTLCD 元件模型進行元件測試，俾便充分掌握其設計。

TLCD 系統最早被應用於船舶與離岸結構(off-shore structure)的搖晃控制，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。TLCD 系統整個 U 連通管內之水柱均為有效質量，因此控制效能較佳。有關 TLCD 的研究課題在 90 年代蔚為風潮-Saoka 等人[32]首先推導水柱消能系統之運動方程式，Saoka 等人[33] 隨後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，試驗結果進一步指出，孔口阻尼的非線性度並不顯著，因此對於窄頻寬(narrow-band)的反應可利用等效線性(equivalent linearization)[34,35]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 1.6)，以增加其穩定性，為土木結構應用的首例。Xu 等人[36]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。其結果顯示，結構以 TLCD 進行控制的反應折減率可達到與 TMD 控制相當的效果。Hitchcock 等人[37]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)，可藉由調整水平段斷面積與垂直段斷面積的比例(變斷面系統)得到較佳之減振效果。該文探討面積比(垂直段斷面積/水平段斷面積)，垂直段水柱高度、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[38]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[39]及 Chang、Hsu[40]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[41]利用 TLCD 系統針對橋面板受到風力作用所產生得扭轉運動(pitching motion)進行控制；Won[42]及 Sadek[43]則探討以 TLCD 應用於結構防震的性能表現，由於結構受到外力擾動的作用可能產生兩正交側向振動及扭轉反應，因此 Sadek 考慮以兩組 TLCD 分別置於兩正交軸向進行控制之情況。此外，Shum 等人[44]則提出多重調諧水柱消能器(Multiple)之設計，俾便同時控制結構數個振態的反應，如此不僅可降低每個 TLCD 的尺寸，使建造及安裝更為容易，並可於有限的空間上進行較佳的設計配置，以提升控制效果。Yalla 等人[45]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以模糊(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[46]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。該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。此外，Chang 及 Qu 等人[47]分別討論 TMD、TLCD、LCVA、C-TLD(圓柱)及 R-TLD(矩形)等系統應用於高樓結構抗風減振之效益評估。沈瑛璋[48]建立一套結構受風力作用時之 TLCD 最佳參數設計表格，工程師進行 TLCD 之設計時可據以得到 TLCD 之水頭損失係數與頻率比等參數之最佳設計值。陳連杰[49]利用變斷面 VTLCD 系統針對單層鋁構架進行參數研究及振動台試驗，其結果顯示，當水平段長度與有效長度比值為 $\beta = 0.55 \sim 0.75$ 時，減振效果較佳。張恩杰[50]則提出氣密式調諧水柱消能系統之運動方程式，藉由調整密閉氣式之壓力改變 TLCD 之自然振動頻

率，增加 TLCD 應用範圍，並利用數值模擬研究 101 大樓安裝 TLCD 於水平向及扭轉向之減振效益。Wu 等人[51]探討 TLCD 應用於結構受風力作用下之水平向控制及最佳化參數演算，其試驗結果顯示，等斷面 TLCD 於結構水平向控制效果最好，並根據試驗結果提出 TLCD 落水頭損失係數之經驗公式。該經驗公式對於等斷面 TLCD 在共振擾動條件下之水頭損失係數能準確預估，有助於 TLCD 之工程實務設計。吳重成、廖佩巨等人[52-54]研究 TLCD 與結構旋轉向(pitch mode)之互制行為，推導 TLCD 與結構互制行為之運動方程式，並提出一項其他文獻未曾提及之修正項。其試驗結果顯示，在考慮修正項之情況下，理論分析更接近試驗結果。此外，水頭損失係數除隨著阻塞率之增加而增大外，亦隨著面積比(垂直段斷面積/水平段斷面積)之增加而增大，其中廖[53]經由 VTLCD 系統旋轉向之試驗結果提出斷面比 $\beta=1、2、3$ 之水頭損失經驗公式，此三組預估公式均能準確預估其所對應之水頭損失係數。

本研究主旨在探討變斷面 TLCD 系統之水頭損失係數之經驗公式，Wu[51]所提出之水頭損失係數經驗公式能準確預估等斷面 TLCD 系統於共振擾動下，對應於各阻塞率之水頭損失係數，但在變斷面的條件下，經驗公式應予修正[52-53]。本研究經由變斷面 TLCD 系統之理論推導發現，VTLCD 系統之阻尼力應與斷面比 β 成正比，可據此修正 Wu 的水頭損失係數經驗公式。VTLCD 之元件測試結果顯示，當斷面比大於 1 時，修正後之經驗公式能準確預估水頭損失係數，惟當斷面比小於 1 時，該修正公式對於水頭損失係數之預估並不準確。為釐清此是否為尺寸效應所致，本研究遂再以等比例大尺寸之試體進行試驗。其結果顯示，當 VTLCD 系統尺寸變大時，水頭損失係數有降低之趨勢，此現象與流體力學之邊界層流(Boundary Layer Flow)有關。VTLCD 之試驗結果將在本文第三章詳細討論。

本文第二章為變斷面調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導

VTLCD 之運動方程式與建立非線性數值解析模型，並介紹水頭損失係數之系統識別方法。第三章為變斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析，包括利用振動台進行 VTLCD 系統之元件測試，探討 VTLCD 系統之斷面比與水頭損失係數之關係，並經由修正後之公式預測系統識別結果。此外本文也將探討尺寸效應對落水頭損失係數影響之原因。第四章將介紹 VTLCD 系統安裝於高層結構物之風力分析，本章將以御盟建設二十代建案為例，該結構物為一棟 31 層之鋼骨構造物，高度為 145.6 m，高寬比為 8:1，屬細長型結構，故對風力較為敏感，本研究將兩組 VTLCD 系統安裝於結構頂樓，以變換阻塞率為條件，分析 VTLCD 系統抗風減振效益，並決定系統設計參數；此外，本文建立一套 VTLCD 系統之尺寸設計流程，盼能供日後 VTLCD 系統實務設計之參考。第五章為結論與建議。



第二章 調諧水柱消能系統之理論解析

2.1 等斷面 TLCD 系統運動方程式

U 型等斷面調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)之示意圖如圖 2.1 所示，建立其運動方程式之基本假設如下：

- (1) 當 TLCD 基座受到水平擾動(u_g)作用時，液柱激盪為(x_f)，由於任何時刻液面不得低於 TLCD 水平段高度 B_h ，因此需滿足

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

其中， h_v ：TLCD 垂直段有效長度。

B_h ：TLCD 水平段之高度。

- (2) 考慮流體(水)之不可壓縮性。
(3) 不產生任何波浪。

此外，綜合上述(a)(b)兩點，TLCD 系統之動能(Kinetic Energy)， T ，及重力位能(Potential Energy)， U ，可分別計算如下：

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

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

$$= \rho Ag(h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho AgdB_h \quad (2.3)$$

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 垂直段液柱激盪振幅

d ：TLCD 水平段有效長度

將動能及重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's Equation)如下：

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

因總動能是速度之函數，而非位移之函數， $\frac{\partial T}{\partial x_f} = 0$ ，故可整理如下式：

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

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho Agx_f \quad (2.5)$$

此外，系統之非保守力乃由奧席恩(Oseen)延伸史托克(Stokes)定律 [55,56] 所推導之方程式加以應用，其中流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力，該阻尼力與流體之動壓力有關，可表示如下：

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

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

其中， δ 為水頭損失系數

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

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

式(2.8)忽略阻尼項進行特徵分析，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 $L_e = 2h_v + d$ ，則式(2.9)可表示為

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

2.2 變斷面 VTLCD 系統運動方程式

U 型三段式變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper, 以下簡稱 VTLCD)之示意圖如圖 2.2 所示，其水平段截面積(A_h)與垂直段截面積(A_v)不同。若考慮流體(水)之不可壓縮性，則

$$A_v x_f = A_h x_h \quad (2.11)$$

$$x_h = \frac{A_v}{A_h} x_f \quad (2.12)$$

將(2.12)式等號兩邊同時對時間微分，可得 VTLCD 水平段流體之流速

$$\dot{x}_h = \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f \quad (2.13)$$

$$\text{令 } \beta = \frac{A_v}{A_h} \quad (2.14)$$

$$\text{則 } \dot{x}_h = \beta \dot{x}_f \quad (2.15)$$

其中，

A_v : VTLCD 垂直段之截面積

A_h :VTLCD 水平段之截面積

x_h :VTLCD 水平段液柱激盪振幅

β :斷面比

變斷面 VTLCD 系統之動能(Kinetic Energy), T , 及重力位能(Potential Energy), U , 計算如下:

$$T = \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_h \dot{u}_g^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h (\dot{x}_h + \dot{u}_g)^2 dx \quad (2.16)$$

將(2.15)式代入(2.16)式可得

$$\begin{aligned} T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_h \dot{u}_g^2 dx \\ &+ \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h (\beta \dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v - x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v - x_f) \\ &+ \frac{1}{2} \rho A_v \dot{u}_g^2 (h_v + x_f) + \frac{1}{2} \rho A_h d (\beta \dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \\ &= \rho A_v \dot{x}_f^2 h_v + \rho A_v \dot{u}_g^2 h_v + \frac{1}{2} \rho A_h d (\beta \dot{x}_f + \dot{u}_g)^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left(\frac{1}{2} B_h \right) dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d B_h \\ &= \rho A_v g (h_v^2 - x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d B_h \end{aligned} \quad (2.18)$$

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

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{u}_g \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \quad (2.20)$$

系統之非保守力以垂直段液面激盪速度表示如下:

$$Q = \begin{cases} -\frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h > 0 \\ \frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^2 & \dot{x}_h < 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

將(2.15)式代入(2.21)式，則系統之非保守力可表示如下：

$$Q = -\frac{1}{2}\rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (2.22)$$

根據(2.19)、(2.20)式與(2.22)式，建立 VTLCD 系統之運動方程式如下：

$$(2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d)\ddot{x}_f + \frac{1}{2}\rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f = -\rho A_v d\ddot{u}_g \quad (2.23)$$

(2.23)式忽略阻尼向進行特徵分析，吾人可求得 VTLCD 之自然振動頻率 ω (rad/sec) 為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2\rho A_v g}{2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d}} = \sqrt{\frac{2g}{2h_v + \beta d}} \quad (2.24)$$

$$\text{令 } L_e = 2h_v + \beta d \quad (2.25)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (2.26)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.27)$$

VTLCD 之自然振動週期可表示為：

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g}} \quad (2.28)$$

綜上所述，變斷面 VTLCD 系統之運動方程式可模擬成單一自由度系統，其振動週期為液體有效長度之函數，可由有效長度與管徑面積比(垂直段之面積/水平段之面積)調整。此外，變斷面 VTLCD 系統因阻尼力與落水頭損失係數及流體流速的平方有關，使得變斷面 VTLCD 系統為一非線性系統。本文將發展一套數學解析模式來求變斷面 VTLCD 系統之動態反應。

2.3 VTLCD 系統旋轉向之運動方程式

U 型變斷面 VTLCD 旋轉向(pitch motion)運動之示意圖如圖 2.3 所示，其運動方程式之推導如下：

系統之動能 T ，及重力位能 U 分別計算如下：

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} \rho (h_v + x_f) A_v \left(\dot{x}_f + \frac{d}{2} \dot{\alpha} \right)^2 + \frac{1}{2} \rho (h_v - x_f) A_v \left(\dot{x}_f + \frac{d}{2} \dot{\alpha} \right)^2 \\
 &+ \frac{1}{2} \rho A_v \int_{y_0}^{y_0+h_v+x_f} (h\dot{\alpha})^2 dh + \frac{1}{2} \rho A_v \int_{y_0}^{y_0+h_v-x_f} (h\dot{\alpha})^2 dh \\
 &+ \frac{1}{2} \rho A_h d (\beta \dot{x}_f - y_0 \dot{\alpha})^2 + \int_{-2/d}^{2/d} \frac{1}{2} \rho A_h (l\dot{\alpha})^2 dl + \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2 \\
 &= \rho A_v h_v \left(\dot{x}_f + \frac{d}{2} \dot{\alpha} \right)^2 + \frac{1}{3} \rho A_v \dot{\alpha}^2 [3y_0^2 h_v + 3y_0 h_v^2 + h_v^3 + 3x_f^2 (y_0 + h_v)] \\
 &+ \frac{1}{2} \rho A_h h_v (\beta \dot{x}_f - y_0 \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{3} \rho A_h \dot{\alpha}^2 \left(\frac{d}{2} \right)^3 + \frac{1}{2} J_\alpha \dot{\alpha}^2 \tag{2.29}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U &= \rho A_v g (h_v - x_f) [S_1 \cos(\theta_1 + \alpha)] + \rho A_v g (h_v + x_f) [S_2 \cos(\theta_2 - \alpha)] \\
 &+ \rho A_h g dy_0 \cos \alpha + \frac{1}{2} K_\alpha \alpha^2 \tag{2.30}
 \end{aligned}$$

其中，

y_0 ：橋面板旋轉中心到 VTLCD 系統水平段中心之距離

J_α ：結構之質量慣性矩

K_α ：結構旋轉向勁度

S_1 ：右邊垂直段液柱中心至橋面板旋轉中心之距離

S_2 ：左邊垂直段液柱中心至橋面板旋轉中心之距離

α ：VTLCD 系統之旋轉角

系統之位能項，可由下列關係式整理：

$$\begin{aligned}
S_1 \cos(\theta_1 + \alpha) &= S_1 \cos \theta_1 \cos \alpha - S_1 \sin \theta_1 \sin \alpha \\
&= \left(y_0 + \frac{h_v - y}{2} \right) \cos \alpha - \frac{d}{2} \sin \alpha
\end{aligned} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned}
S_2 \cos(\theta_2 - \alpha) &= S_2 \cos \theta_2 \cos \alpha + S_2 \sin \theta_2 \sin \alpha \\
&= \left(y_0 + \frac{h_v + y}{2} \right) \cos \alpha + \frac{d}{2} \sin \alpha
\end{aligned} \tag{2.32}$$

則(2.30)式經由關係式整理得：

$$\begin{aligned}
U &= \rho g A_v h_v y_0 \cos \alpha + 2 \rho g A_v h_v y_0 \cos \alpha + \rho g A_v (h_v^2 + x_f^2) \cos \alpha \\
&\quad + \rho g A_v h_v \sin \alpha + \frac{1}{2} K_\alpha \alpha^2
\end{aligned} \tag{3.33}$$

將動能及重力位能代入拉格朗治方程式，整理如下式：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} = \rho A_v (2h_v + \beta d) \ddot{x}_f + \rho A_v d (h_v + y_0) \ddot{\alpha} \tag{3.34}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial x_f} = 2 \rho A_v g x_f + \rho g A_v h_v \alpha \tag{3.35}$$

液柱激盪之非保守力為落水頭損失係數所提供之阻尼力，表示如下：

$$Q = -\frac{1}{2} \rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \tag{3.36}$$

將(2.29)式、(2.33)式及(2.36)式代入拉格朗治方程式，可得旋轉向之液柱激盪位移運動方程式如下所示：

$$\begin{aligned}
&(2 \rho A_v h_v + \rho A_v \beta d) \ddot{x}_f + \frac{1}{2} \rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2 \rho A_v g x_f \\
&= -\rho A_v d (h_v + y_0) \ddot{\alpha} - \rho g A_v h_v \alpha
\end{aligned} \tag{3.37}$$

則 VTLCD 旋轉向之自然頻率 ω (rad/sec) 為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \rho A_v g}{2 \rho A_v h_v + \rho A_v \beta d}} = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (\text{rad/sec}) \tag{3.38}$$

VTLCD 旋轉向之自然振動週期可表示為：

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L_e}{g}} \quad (3.39)$$

2.4 解析模式

由(2.23)式可知，變斷面 VTLCD 系統之阻尼項為非線性，本文將採用狀態空間法(State Space Procedure, SSP)[57,58]，並利用迭代過程求得 VTLCD 之流速 \dot{x}_f 及水位變化 x_f 。本文之解析方式說明如後：

首先將 VTLCD 系統之運動方程式(2.23)表示成：

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -Ew(t) \quad (2.40)$$

其中，

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

$w(t) = \ddot{u}_g$ 為擾動力向量；

$M = 2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d$ 為系統之質量矩陣；

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

$K = 2\rho A_v g$ 為系統之勁度矩陣；

$E = \rho A_v d$ 為系統之擾動力配置矩陣；

(2.40)式可以狀態空間法表示為：

$$\dot{z}(t) = A^* z(t) + E^* w(t) \quad (2.41)$$

其中，

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

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

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

為 $2n \times 2n$ 之系統矩陣；

$$E^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

為 $2n \times 1$ 擾動力分配矩陣。

對式(2.41)取拉普拉氏轉換(Laplace transformation)可得：

$$z(s) = H(s)z(t_0) + H(s)G(s) \quad (2.45)$$

其中，

$$H(s) = (sI - A^*)^{-1} \quad (2.46)$$

$$G(s) = E^* w(s) \quad (2.47)$$

$z(t_0)$ 表示初始條件。

動力系統式(2.41)之解可由式(2.46)與式(2.47)取拉普拉氏逆轉換至時域如下：

$$z(t) = e^{A^*(t-t_0)} z(t_0) + \int_0^t e^{A^*(t-\tau)} [E^* w(\tau)] d\tau \quad (2.48)$$

欲展開式(2.48)中之積分式時， $w(\tau)$ 在取樣週期內須為已知之連續函數。由於風力或地震紀錄通常為離散訊號，因此假設擾動函數在兩連續點之間呈線性變化，令 $t_0 = (k-1)\Delta t$ ， $t = k\Delta t$ 及 $z[k] = z(k\Delta t)$ ，則

$$w(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t} w[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t} w[k\Delta t] \quad (2.49)$$

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

狀態方程式(2.41)之解析解可透過式(2.48)及式(2.49)得一離散時間差分方程式如下：

$$z[k] = Az[k-1] + E_0 w[k-1] + E_1 w[k] \quad (2.50)$$

其中，

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

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

為 $2n \times 1$ 之前瞬時離散時間擾動力分配矩陣；

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

為 $2n \times 1$ 之後瞬時離散時間擾動力分配矩陣；

VTLCD 動力反應之解析步驟說明如下：

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

(2) 計算 $C_k = \frac{1}{2} \rho A_v \beta \delta |\dot{x}_{f,k}|$ ，代入式(2.43)可得系統矩陣 A^* ，並計算

VTLCD 之速度反應 $\dot{x}_f = \dot{x}_{f,k+1}$ ；

(3) 定易誤差 $er = \frac{2(\dot{x}_{f,k+1} - \dot{x}_{f,k})}{|\dot{x}_{f,k+1}| + |\dot{x}_{f,k}|}$ ；

(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 $\dot{x}_f = \dot{x}_{f,k+1}$ ，重複步驟(1)~(4)直到 $er \leq \varepsilon$ 為止。

2.5 結構安裝 VTLCD 系統之運動方程式

單自由度結構安裝 VTLCD 系統進行結構控制之分析模型如圖 2.4 所示。當結構物的基礎與樓層受到水平地表擾動 u_g 作用時，樓層將產生一相對於地表之水平側向位移 x_s ，VTLCD 系統則因結構振動而產生一液柱激盪位移 x_f ，此時必須滿足液面激盪不得低於變斷面 VTLCD 水平段管徑 B_h ，且不得高於垂直段高度 H 之限制，如式(2.1)所示。VTLCD 控制結構之動能， T ，與重力位能， U ，可分別計算如下：

$$\begin{aligned}
T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v \dot{x}_f^2 dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx \\
&+ \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2} \rho A_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2} \rho A_h (\beta \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 dx + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\
&= \rho A_v h_v \dot{x}_f^2 + \rho A_v h_v (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h d (\beta \dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \\
&+ \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{u}_g)^2 \tag{2.51}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A_v g x dx + \int_0^d \rho A_h g \left(\frac{1}{2} B_h \right) dx + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v - x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_v g (h_v + x_f)^2 + \frac{1}{2} \rho A_h g d B_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \\
&= \rho A_v g (h_v^2 + x_f^2) + \frac{1}{2} \rho A_h g d B_h + \frac{1}{2} k_s x_s^2 \tag{2.52}
\end{aligned}$$

將(2.51)式及(2.52)式代入拉格朗治方程式如下：

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

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

因動能僅為速度之函數，與位移函數無關，因此 $\frac{\partial T}{\partial x_f} = \frac{\partial T}{\partial x_s} = 0$ 。經整

理後可得：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f} \right) = (2\rho A_v h_v + \rho A_h \beta d) \ddot{x}_f + \rho A_v \ddot{x}_s + \rho A_h \ddot{u}_g \tag{2.53}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) &= \rho A_v \ddot{x}_f + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{x}_s \\
&+ (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{u}_g \tag{2.54}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A_v g x_f \tag{2.55}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \tag{2.56}$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失所產生之阻尼力 Q_1 與作用

於結構之固有阻尼力 Q_2 ，兩者可分別表示如下：

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

或整理如下：

$$Q_1 = -\frac{1}{2}\rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f \quad (2.57)$$

$$Q_2 = -c_s \dot{x}_s \quad (2.58)$$

將(2.53)式、(2.55)式及(2.57)式代入拉格朗治方程式，可整理如下：

$$\begin{aligned} & (2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d) \ddot{x}_f + \rho A_v d \ddot{x}_s + \frac{1}{2}\rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| \dot{x}_f + 2\rho A_v g x_f \\ & = -2\rho A_v d \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.59)$$

同理，(2.54)式、(2.56)式及(2.58)式亦可整理如下：

$$\begin{aligned} & \rho A_v d \ddot{x}_f + (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s \\ & = -(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.60)$$

若將(2.59)式及(2.60)式以矩陣的型式表示，則吾人可得 VTLCD 控制結構之運動方程式如下：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho A_v \beta \delta |\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} 2\rho A_v d \\ (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.61)$$

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 ;

或將(2.61)式表示如下 :

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -Ew(t) \quad (2.62)$$

其中 ,

$$M = \begin{bmatrix} (2\rho A_v h_v + \rho A_v \beta d) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & (2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s) \end{bmatrix}$$

為系統之質量矩陣 ;

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

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

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



2.6 系統識別

本節介紹 ARX 系統識別[59-61]方法，用以求得單層鋁構架模型之振動頻率與阻尼比等動力特性參數，並結合變斷面 VTLCD 系統之運動方程式與 ARX 系統識別方法，發展出水頭損失係數之識別模式。

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，可以線性差分方程式表示為：

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2.63)$$

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：

$$y(k) = \Psi^T(k)\theta + e(k) \quad (2.64)$$

$$\Psi^T(k) = [-y(k-1)\dots -y(k-n_a), u(k)\dots u(k-n_b)] \quad (2.65)$$

$$\theta = [a_1 \dots a_{n_a}, b_0 \dots b_{n_b}]^T \quad (2.66)$$

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：

$$\theta(k) = \theta(k-1) + L(k)[y(k) - \Psi^T(k)\theta(k-1)] \quad (2.67)$$

其中，

$$L(k) = \frac{P(k-1)\Psi(k)}{\kappa(k) + \Psi^T(k)P(k-1)\Psi(k)} \quad (2.68)$$

$$P(k) = \frac{P(k-1)}{\kappa(k) + \Psi^T(k)P(k-1)\Psi(k)} \quad (2.69)$$

$$\kappa(k) = \kappa_0\kappa(k-1) + 1 - \kappa_0 \quad (2.70)$$

κ 稱為遺忘因子(forgetting factor)，通常採用 $\kappa_0 = 0.99$ ， $\kappa(0) = 0.95$ 。

通常選擇初始條件 $P(0) = 10^8 \sim 10^{10}$ 以加速其收斂速度。

由於結構的振動特性與係數 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：

$$f_j = \frac{1}{2\pi\Delta t} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (2.71)$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (2.72)$$

其中， Δt 為取樣週期；

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

P_j 為以 a_i 's 作為多項式係數所得之第 j 個複數根。

本文以上述之系統識別的技巧求取變斷面 VTLCD 系統之水頭損失係數。首先將變斷面 VTLCD 系統之運動方程式(2.23)等號兩邊同除以 ρA_v 修正如下：

$$-(4h_v + 2\beta d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g = \beta\delta \left| \dot{x}_f \right| \dot{x}_f \quad (2.73)$$

其中， x_f 為 VTLCD 之液柱激盪振幅，可由波高計量得。分別將 x_f 對時間微分一次與兩次，可得 VTLCD 系統之液體流速 (\dot{x}_f) 及液體激盪加速度 (\ddot{x}_f)。至此(2.73)式僅餘水頭損失係數 δ 未知。

令：

$$y[k] = -(4h_v + 2\beta d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g \quad (2.74)$$

則(2.73)式可表示如下：

$$y[k] = \left[\beta \left| \dot{x}_f \right| \dot{x}_f \right] \delta = \psi^T \theta \quad (2.75)$$

其中，

$$\psi^T = \left[\beta \left| \dot{x}_f \right| \dot{x}_f \right]$$

$$\theta = \delta$$

(2.75)式可利用(2.67)式、(2.68)式及(2.69)式之遞迴預測誤差法求得每

一瞬時之系統參數 θ ，即為 VTLCD 系統之水頭損失係數 δ 。有關變斷面 VTLCD 系統之元件測試將採用上述的方法識別各元件於不同擾動頻率下之水頭損失係數。



第三章 變斷面調諧液柱消能系統之試驗與分析

3.1 變斷面 VTLCD 落水頭損失預估

Wu[51]針對等斷面 TLCD 在共振頻率擾動下所提出之落水頭損失係數經驗公式，僅與阻塞率有關，表示如下：

$$\delta = (-0.6\psi + 2.1\psi^{0.1})^{1.6} (1-\psi)^{-2} \quad (3.1)$$

其中， ψ 為 VTLCD 孔口板之阻塞率。

由等斷面 TLCD 與變斷面 VTLCD 之非保守力(2.7)式及(2.22)之比較，等斷面 TLCD 與變斷面 VTLCD 在非保守力項之間差一個斷面比(β)，因此(3.1)式可修正公式如下：

$$\delta = \beta (-0.6\psi + 2.1\psi^{0.1})^{1.6} (1-\psi)^{-2} \quad (3.2)$$

當 $\beta=1$ 時，即代表等斷面之條件。為進一步探討上述修正公式之準確性，吾人遂考慮斷面比(β)分別為 0.31、0.6、1、2 及 3，頻率比為 0.6Hz、0.9Hz、1.0Hz、1.1Hz 及 1.4Hz，阻塞率分別為 0%、20%、40%、60%及 80% 等條件下進行元件測試。

試驗項目主要包含變斷面 VTLCD 之旋轉模態(pitch mode)及水平運動模式之元件測試，並藉由第二章所介紹之系統識別模式求得試驗之水頭損失係數與本文之修正經驗公式比對。其結果顯示，變斷面 VTLCD 於斷面比(β)大於 1 時修正公式確能準確預估水頭損失係數，惟斷面比小於 1 時預估值與試驗不符。推測 TLCD 系統之水頭損失係數影響因素，除了阻塞率及斷面比外，可能亦須考慮尺寸效應之影響，因此，乃另製一組斷面比 0.31 之較大尺寸 VTLCD 模型進行元件測試，並與小尺寸 VTLCD 模型試驗之結果進行比較，元件尺寸如圖 3.1 至 3.4，元件設計參數如表 3.1 至 3.6。

3.2 VTLCD 元件之模型安裝

本系列試驗之 VTLCD 元件模型，主要由厚度 1 cm 之壓克力板所組成，模型中央可抽換不同阻塞率之孔口板，上方以泡棉材質製成之防水墊片覆蓋，並蓋上蓋板，再以螺栓固定於 VTLCD 系統，以達到良好的防水效果。VTLCD 系統於水平向之試驗以 L 型鋼配合 C 型夾具固定於振動台之基座上，以避免運動過程中系統晃動影響試驗結果。波高計則固定於 VTLCD 元件垂直段中央位置，並與垂直段保持平行，以減少液面激盪之影響。

VTLCD 旋轉向之試驗配置則是將 VTLCD 系統安裝於總長度為 2.65 m 之鋼結構上方，以 L 型鋼固定。鋼結構則透過模擬為鉸接之軸承裝置與中央之支承座連接，結構模型之兩端並加設彈簧元件，使結構能進行自由振動；結構模型之一端則架設 1.5 tf 致動器，並由致動器施予外力進行強迫振動之試驗，旋轉向試驗之詳細配置如圖 3.5 所示。

3.3 試驗設備與感應器配置

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

(1) 地震模擬振動台

結構動力試驗方法中，以振動台最能模擬真實之地動環境，在振動台試驗中結構之動力特性可以表露無遺，因此也最適於教學及研究成果之示範與檢驗。交通大學地震模擬振動台之台面尺寸為 3 m 見方，如圖 3.6 所示，振動台之質量為 5 tf，試體結構之最大質量可達 10 tf。振動台係由一支油壓致動器加以驅動，其最大行程為 ± 12.5 cm，最大加速度為 1g。

(2) 控制系統與資料結取系統

控制系統為振動台之中樞所在，吾人使用 MTS 407 控制器，如圖 3.7 所示之位移控制模式操控振動台，因此，輸入之訊號為經基線修正積分之地震位移歷時紀錄。407 控制器內部波型產生器可提供矩形波、三角波及正弦波等類比訊號輸出，若配合數位訊號輸入模組即可模擬隨機訊號及任意形式之地表擾動。

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

(3) 致動器

致動器總出力大小為 1.5 tf，吾人於試驗中以位移控制之形式給予鋼樑 Y 方向之位移，使結構產生適當之轉角作為輸入。

(4) 雷射位移計

雷射位移計如圖 3.8 所示，其動態量測範圍為 5cm 至 35cm(± 15 cm)，其主要為量測 VTLCD 系統旋轉向試驗中鋼樑之垂直位移。試驗設置係安裝於下方隻腳架上，作為固定參考架安裝位移計，以監測鋼樑之位移。

(5) 波高計

波高計(ARC 公司生產)主要量測 VTLCD 垂直段之液柱激盪位移。如圖 3.9 所示為型號 WHA-600(30512A)之波高計，其量測範圍為 ± 30 cm；另一支型號為 WHA-800(30512B)之波高計，其量測範圍為 ± 40 cm。將波高計分別固定於 U 型 VTLCD 元件之垂直段，俾便量測 VTLCD 系統之液柱激盪振幅。

3.4 試驗規畫

強迫振動試驗主要規劃進行 VTLCD 元件測試及尺寸效應，以瞭解其振動特性，並探討修正公式(3.2)式於變斷面 VTLCD 之適用範圍。尺寸效應之試驗部份則探討兩種不同尺寸 VTLCD 系統的行為與水頭損失係數之差異，並討論其影響因素。

3.4.1 水平運動 VTLCD 系統之元件測試

VTLCD 系統之元件測試是以振動台對 VTLCD 元件進行強迫振動，並以系統識別方法識別出落水頭損失係數，以探討落水頭損失係數與斷面比(β)之間的關係。

本研究以斷面比 $\beta = 0.31、0.6、1、2$ 及 3 之 VTLCD 進行元件試驗，元件設計參數如表 3.2 至 3.6。元件測試的內容包括 VTLCD 系統之水平向及旋轉向水頭損失係數系統識別，試驗前將水注入 VTLCD 管內，使液面高度達調頻所需之水位高，並於水中加入紅色廣告顏料，以利觀察液體於 U 型管內液柱激盪之情形。試驗時由控制器輸入振動台之水平向命令振幅為 4 cm ，每一振幅所進行之擾動頻率比分別為 0.6Hz 、 0.9Hz 、 1.0Hz 、 1.1Hz 及 1.4Hz 等 5 種頻率比之簡谐波擾動(各組元件之擾動頻率如表 3.7 所示)，並於各頻率比試驗完成後，更換不同阻塞率之孔口版重複進行上述試驗(依序分別更換阻塞率為 0% (全開)、 20% 、 40% 、 60% 及 80% 之孔口板)。

3.4.2 旋轉運動 VTLCD 系統之元件測試

本節主要探討 VTLCD 系統於水平向及旋轉向之擾動條件下，水頭損失係數之差異，並分析旋轉向運動之水頭損失係數與斷面比之間的關係。VTLCD 之旋轉向試驗係以 1.5 tf 致動器命令振幅為 3 cm 於 Y 方向施以位移，以試驗之旋轉角做為輸入。本試驗主要是模擬 VTLCD 安裝於橋面板之運動行為，試驗以斷面比 $1、2、3$ 之 VTLCD 進行元件試驗，

輸入頻率比分別為 0.4Hz、0.6Hz、0.9Hz、0.95Hz、1.0Hz、1.05Hz、1.1Hz、1.2Hz 及 1.4Hz 共 10 種頻率比之簡谐波擾動，並於各頻率比試驗完成後，更換不同阻塞率之孔口版並重複進行上述試驗。

3.4.3 變斷面 VTLCD 之尺寸效應試驗

由於本文修正之落水頭損失係數經驗公式於斷面比小於 1 時，其預估值與試驗結果不相符，本試驗遂針對斷面比固定 $\beta=0.31$ 之大小尺寸元件進行元件測試，其試驗步驟與 VTLCD 系統水平向之元件測試相同。

3.5 試驗結果

3.5.1 水平運動 VTLCD 試驗結果

圖 3.10 至圖 3.15 為 VTLCD 系統在不同擾動頻率所得之液體激盪位移歷時。圖 3.16 之結果顯示，當擾動頻率愈趨近 VTLCD 之自然振動頻率(頻率比=1.0)，液體的激盪位移愈大。其中，孔口板全開的情況(阻塞率 0%)下，液柱之激盪位移峰值可達 25.5 cm。隨著孔口板的阻塞率愈大，液體激盪位移亦隨之降低；阻塞率 80%之液柱激盪位移峰值則降為 7.5 cm。

水平運動 VTLCD 之水頭損失係數系統識別結果整理至表 3.8。圖 3.17 為不同擾動頻率與阻塞率對於水頭損失係數之影響。其結果顯示，當擾動頻率趨近 VTLCD 自然振動頻率時，水頭損失係數只與阻塞率有關，擾動頻率對水頭損失係數的影響不大。

元件試驗結果顯示，頻率比對水頭損失係數影響之大，惟 VTLCD 在擾動頻率低時，水頭損失係數有偏高之趨勢。流體力學中有許多無因次參數，本研究以雷諾數討論各組試驗流體黏滯力與慣性力之關係，根據奧斯本·雷諾(Osborne Reynolds)所提出之雷諾數[55]：

$$\text{Re} = \frac{\rho \dot{x}_f D}{\mu} \quad (3.3)$$

其中，

Re：雷諾數(Reynolds Number)；

D ：特性長度(Characteristic Length)，在此表示 VTLCD 垂直段管徑；

μ ：流體之動力滯度；

雷諾數可視為流體慣性力與黏滯力兩種效應之比值，其流場變化為：

- (1) 層流(Laminar Flow Regime)：Re < 2000 時，流體之黏滯效應大於慣性效應。
- (2) 過渡區(Transition Regime)：2000 < Re < 4000。
- (3) 紊流(Turbulent Flow Regime)：Re > 4000，流體之黏滯效應小於慣性效應。

吾人以 VTLCD 系統反應達穩態之流速 x_f ，特性長度 D 取各元件之寬度 w ，考慮流體溫度為 20°C 時之動力滯度為 $1.002E^{-3} \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ ，進行雷諾數之計算，其結果顯示，當擾動頻率比 0.6 時各組試體之雷諾數均較低，部分試體之流場型式屬於層流(Laminar Flow Regime)，當流體於層流狀態下其黏滯力之影響較慣性力明顯，因此水頭損失係數於流速緩慢時會有偏高之趨勢，雷諾數之計算整理至表 3.9。

由圖 3.18 之結果顯示，水頭損失係數會隨著阻塞率增加而增加，表示增加孔口板的阻塞可增加 VTLCD 之消能行為。

圖 3.19 為共振頻率下，不同斷面比與阻塞率對於水頭損失係數之影響。其結果顯示，水頭損失係數會隨著斷面比之變化而有所不同。若以等斷面 TLCD 之系統識別水頭損失係數為基準，則斷面比大於 1 者，其水頭損失係數均與所對應之斷面比呈比例關係。

系統識別之水頭損失係數與(3.2)式經驗公式之估算值進行比較如圖 3.20 所示，其結果顯示，當斷面比大於 1 時，系統識別之水頭損失係數均與經驗公式十分吻合。

落水頭損失係數之預估公式對於阻塞率 0%時不適用，(3.2)式中若以阻塞率 $\psi=0$ 代入，則 $\delta=0$ 。但影響水頭損失係數的因素很多，除了閘門(孔口板)外，流體粘滯度、管壁摩擦係數、水平段與垂直段接合方式，渦流及負壓、尺寸大小、垂直段液面之激盪等因素均會造成水頭損失。因此實際上即使阻塞率為 0%時，水頭損失係數仍不為零。

水頭損失係數之預估公式於斷面比小於 1 時誤差很大，且趨勢皆較預估值為高，可能之原因包括；(1)以流體力學角度而言，管徑之突增或突縮均會造成水頭損失之變化，管徑突縮則水頭損係數會增加，因此變斷面 VTLCD 於斷面比小於 1 時局部水頭損失之影響較大；(2)系統元件之尺寸效應。由雷諾數之計算結果，本次試驗 VTLCD 於共振頻率下之流體流動型態均為紊流，但由邊界層流(Boundary Layer Flow)理論可知，靠近邊界(管壁)由於流體黏滯力作用流速為零，故黏滯力之影響不可忽略，因此當管壁狹窄或系統尺寸較小時，流體黏滯特性之影響就會相對明顯。

圖 3.21 至圖 3.26 為不同阻塞率之 VTLCD 遲滯迴圈。其中，阻尼力是由運動方程式中的阻尼項求得。其結果顯示，當阻塞率小時，阻尼力小，液柱激盪位移較大；反之，當阻塞率大時，阻尼力大，液柱激盪位移則較小。整體而言，VTLCD 系統共振擾動下之遲滯迴圈較其他頻率比時飽滿。

3.5.2 旋轉運動 VTLCD 試驗結果

由圖 3.27 至圖 3.29 顯示，VTLCD 系統於旋轉向試驗其液柱激盪振幅會隨著阻塞率之增加而逐漸變小，且擾動頻率愈接近共振頻率時，液柱激盪振幅愈大。

旋轉運動 TLCD 水頭損失係數之系統識別結果如表 3.10 所示，其結果顯示。VTLCD 於旋轉向及水平向之水頭損失係數明顯不同，隨著孔口板阻塞率之增加，旋轉向 VTLCD 系統之水頭損失係數亦會上升，但變化速度更快。

根據廖[53]由等斷面 TLCD($\beta=1$)旋轉向之研究所提出之經驗公式：

$$\delta = (0.3\psi + 3.6\psi^{1.1})^{1.05} (1-\psi)^{-2} + 4.5 \quad (3.3)$$

變斷面 VTLCD($\beta=2$)旋轉向之經驗公式為：

$$\delta = (0.25\psi + 3.2\psi^{0.6})^{1.55} (1-\psi)^{-2} + 6.5 \quad (3.4)$$

變斷面 VTLCD($\beta=3$)旋轉向之經驗公式為：

$$\delta = (0.52\psi + 3.4\psi^{0.6})^{1.75} (1-\psi)^{-2} + 9.7 \quad (3.5)$$

圖 3.30 至圖 3.32 分別為(3.3)式、(3.4)式及(3.5)式之預估值與識別所得之水頭損失進行比較，其結果顯示，此三組公式皆能準確預估旋轉向之水頭損失係數。若以斷面比值(β)修正式(3.3)亦即：

$$\delta = \beta \left[(0.3\psi + 3.6\psi^{1.1})^{1.05} (1-\psi)^{-2} + 4.5 \right] \quad (3.6)$$

吾人以系統識別方法識別出水頭損失係數與式(3.6)之修正公式進行比較。整體而言變斷面 VTLCD 旋轉向之水頭損失係數與修正公式之預估值亦十分吻合。

圖 3.33 至圖 3.36 為 VTLCD 系統旋轉向試驗之遲滯迴圈，其結果顯示，液體激盪位移隨著阻塞率增加而減少，而阻尼力則隨阻塞率增加而增加，整體而言，VTLCD 系統於共振頻率下消能行為最佳，遲滯迴圈亦較飽滿。

3.5.3 VTLCD 尺寸效應試驗結果

由圖 3.37 顯示，VTLCD 之水頭損失係數確實有尺寸效應之因素存在，大小尺寸之差異如表 3.11 所示。水頭損失係數有隨著尺寸增大而降低之趨勢；且隨著阻塞率之增加，尺寸效應之影響因素較不明顯，由表 3.9 顯示，小尺寸之雷諾數均小於大尺寸，顯示小尺寸之流體黏滯效應較大尺寸明顯。此一現象與流體力學之邊界層流(Boundary Layer Flow)理論相符。

綜合上述之 VTLCD 元件測試所得之結果，吾人可歸納結論如下：

- (1) VTLCD 系統之振動頻率理論值與元件測試所得之頻率十分吻合，顯示吾人可精確掌握 VTLCD 系統之設計。
- (2) 根據 VTLCD 系統元件測試結果顯示，水頭損失係數隨著阻塞率的增加而增加，且水頭損失係數亦隨著斷面比變化而改變。
- (3) 根據理論推導顯示，VTLCD 系統之水頭損失係數與斷面比成正比關係，經由試驗結果顯示，當 VTLCD 之斷面比 $\beta > 1$ 時，修正公式可準確預估水頭損失係數。
- (4) 經由試驗結果顯示，VTLCD 系統斷面比 $\beta < 1$ 時，由於流體黏滯效應之影響，水頭損失係數偏高，修正公式預估不準確。
- (5) 由邊界層流之理論可知，VTLCD 若以安裝結構物之實際尺寸設計，主要之流體運動行為將由慣性力所控制，邊界層流額外水頭損失影響不明顯，則斷面比小於 1 之 VTLCD 系統其水頭損失係數將愈趨近預估值。





第四章 變斷面 VTLCD 之高樓抗風設計

4.1 前言

由於超高層建築物有結構週期較長與阻尼較低等特性，地震力之影響不及風力作用力明顯，因此結構設計主要由風力所控制。風力之作用雖不至使結構產生過大的應力或位移，但所引起的振動加速度卻導致舒適度的下降。早期高樓結構物設計主要以位移做為設計檢核之準則，惟舒適度與加速度反應較為相關，因此我國規範亦規定半年回歸期之風力作用下，頂樓加速度不得大於 5 gal 之上限值。一般而言，依建築技術規則規定，高層建築結構依設計風力求得之層間位移角上限值為千分之二·五，以不危害次要結構為準則。本章主要以高層結構物做為分析對象，並以御盟建設二十代建案為例，評估安裝 VTLCD 系統之抗風減振效益，再經由分析結果設計實際尺寸之 VTLCD 系統，作為日後工程應用之參考。

4.2 結構物安裝 VTLCD 系統之設計規劃

本研究將以御盟建設二十代建案作為風力分析對象進行探討(圖 4.1 及圖 4.2)。該結構物為一棟地下 6 層及地上 31 層之鋼骨結構，最大樓板面積約為 $1154.9 m^2$ ，總高度為 145.6 m，寬度為 17.9 m，高寬比約為 8:1，屬細長型之結構，結構總質量約為 665.2 ton；將此結構物以商用軟體 SAP2000 建立結構模型(圖 4.3 及圖 4.4)並進行模態分析，其前三個模態之振動週期分別為 3.27 sec、2.36 sec 及 1.86 sec，且結構系統之第一個模態為 Y 向振動模態(結構之短向)，第二個模態為 X 向振動模態，第三個模態則為扭轉振動模態。考慮以安裝 VTLCD 系統進行第一模態之控制，第一模態之質量為 $584.1 ton-sec^2/m$ ，阻尼比假設為 0.02。由於此結構屬長週期結構，

對風力作用較為敏感，故以半年回歸期順風向之風力作用下進行數值模擬，分析結果顯示，未安裝 VTLCD 系統之結構物頂樓加速度達 5.1gal，為使結構物滿足舒適度之設計訴求，由於第一模態對結構物影響較大，故安裝 VTLCD 系統於結構物頂樓進行第一模態之控制，依據結構頂樓平面圖進行 VTLCD 系統之配置，由於結構物控制水平向所能提供之最大空間約為 7.3 m，由陳[49]研究顯示，水平段有效長度之水量愈多減振效果愈好，因此 VTLCD 系統之總長度 L 設計以 7.1 m 設計；若考慮 VTLCD 系統自然頻率須調至與結構物相同，則 VTLCD 系統之有效長度為 5.32 m，依變斷面有效長度公式 $L_e = 2h_v + \beta d$ ，決定變斷面 VTLCD 之斷面比為 0.31，垂直段寬度 B_v 為 0.5 m，水平段高度 B_h 為 1.6，寬度 w 為 1.6m，因此 VTLCD 系統水平段有效長度為 6.6，垂直段之有效長度為 1.63 m，系統蓄水高度為 2.43 m，VTLCD 系統蓄水量約為 19.5 ton，系統管壁採用 1cm 之鋼板設計；若安裝兩組 VTLCD 系統於頂樓進行控制，則 VTLCD 系統總蓄水量約為 39 ton，VTLCD 系統蓄水總質量與第一模態質量之質量比為 6.7%，VTLCD 系統如圖 4.5 所示，設計參數如表 4.1 所示。

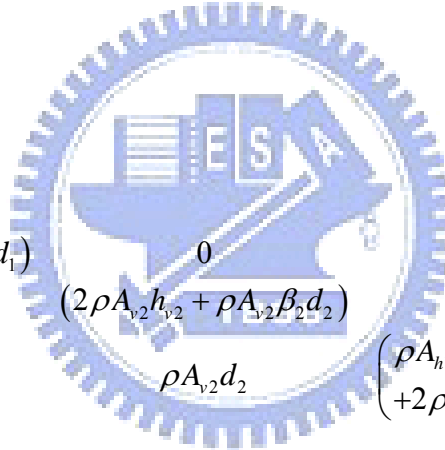
4.3 高層結構物安裝 VTLCD 系統之風力分析

高層建築受風力作用時，其作用方式可分為兩種型式；(1)順風向反應 (along-wind response)；(2)橫風向反應 (across-wind response)，如圖 4.6 所示。順風向反應為紊流風場逼近流 (approach flow) 於結構物迎風面形成正壓力與背風面之負壓力，合成拖曳力而使結構產生振動。橫風向反應的成因分別為氣動力效應 (aerodynamic effect) 與渦流逸散 (vortex shedding)，當風流經高層建築時，會在其左右兩側形成分離剪力層，並產生漩渦交互作用於結構物側面，此現象即為渦流逸散，形成結構週期性之振動。當渦流逸散頻率接近結構自然頻率時，渦流逸散頻率不再隨平均風速的增加而遞增，

其值會固定在結構自然頻率，此現象稱為鎖定(lock-in)，鎖定會產生共振效應而使結構振動加劇[62][63]。

本研究將結構物簡化為單自由度系統進行模擬，結構物之動力特性如表 4.2 所示，第一模態頻率為 0.31Hz，結構物頂樓則安置兩組斷面比為 0.31 之 VTLCD 系統(分別為 VTLCD1 及 VTLCD2)以控制結構第一模態，吾人將 VTLCD 之自然振動頻率調整至與結構物第一模態一致，以達到最佳消能減振效益，以隨機擾動之順風向風力做為輸入，並由第三章試驗所得之水頭損之係數代入所對應之阻塞率進行分析，評估該系統於阻塞率 0%、20%、40%、60%及 80%之減振效益。

由第二章所介紹之解析模式，結構安裝兩組 VTLCD 系統之運動方程式如下：



$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{ccc} (2\rho A_{v1}h_{v1} + \rho A_{v1}\beta_1d_1) & 0 & \rho A_{v1}d_1 \\ 0 & (2\rho A_{v2}h_{v2} + \rho A_{v2}\beta_2d_2) & \rho A_{v2}d_2 \\ \rho A_{v1}d_1 & \rho A_{v2}d_2 & (\rho A_{h1}d_1 + \rho A_{h2}d_2 + 2\rho A_{v1}h_{v1} + 2\rho A_{v2}h_{v2} + m_s) \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{f1} \\ \ddot{x}_{f2} \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} \\
 & + \left[\begin{array}{ccc} \frac{1}{2}\rho A_{v1}\beta_1\delta|\dot{x}_{f1}| & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho A_{v2}\beta_2\delta|\dot{x}_{f2}| & 0 \\ 0 & 0 & c_s \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \dot{x}_{f1} \\ \dot{x}_{f2} \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} \\
 & + \left[\begin{array}{ccc} 2\rho A_{v1}g & 0 & 0 \\ 0 & 2\rho A_{v2}g & 0 \\ 0 & 0 & k_s \end{array} \right] \begin{Bmatrix} x_{f1} \\ x_{f2} \\ x_s \end{Bmatrix} \\
 & = - \left[\begin{array}{ccc} \rho A_1d_1 & & \\ & \rho A_2d_2 & \\ (\rho A_{h1}d_1 + \rho A_{h2}d_2 + 2\rho A_{v1}h_{v1} + 2\rho A_{v2}h_{v2} + m_s) & & \end{array} \right] \ddot{u}_g
 \end{aligned}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_i(t) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

其中，

A_{v1} 、 A_{v2} 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之垂直段面積；

A_{h1} 、 A_{h2} 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之水平段面積；

B_{h1} 、 B_{h2} 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之水平段高度；

d_1 、 d_2 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之水平段有效長度；

h_{v1} 、 h_{v2} 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之垂直段有效長度；

x_{f1} 、 x_{f2} 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之液柱激盪振幅；

β_1 、 β_2 分別為 TLCD1 及 TLCD2 之斷面比；

順風向風力之計算如下：

$$S_{w_i w_i}(\omega) = R(\omega) A_i^2 \bar{V}_i^2 \quad (4.2)$$

$$R(\omega) = \frac{8\bar{\alpha}_i \bar{\alpha}_j K_0 \bar{V}_r^2 (600\omega/\pi V_r)^2}{\bar{V}_i \bar{V}_j |\omega| \left(1 + (600\omega/\pi V_r)^2\right)^{4/3}} \exp\left[-\frac{C_z |\omega| |h_i - h_j|}{\pi(\bar{V}_i + \bar{V}_j)}\right] \quad (4.3)$$

$$\bar{V}_i = \left(\frac{h}{10}\right)^{0.36} \times V_r \quad (4.4)$$

(4.4) 式中指數項乃描述兩層樓間風力之相關性函數 (coherence function)。假設平均風速為幂律分布 (power law distribution)，亦即：

$$\frac{\bar{V}_i}{V_r} = \left(\frac{h}{10}\right)^{\bar{\alpha}} \quad ; \quad 0 \leq h \leq h_g \quad (4.5)$$

其中，

$\bar{\alpha}$ ：與地況種類有關之常數。

h_g ：梯度高(m)，與地況種類有關。

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

- (1) 地況 A：大城市市中心，至少有 50%之建築物高度大於 20 公尺者。
建築物迎風向之前方至少 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，才可使用地況 A。
- (2) 地況 B：大城市市郊，小市鎮或許多像民舍高度，或較民舍為高之障礙物分佈期間之地區者。建築物迎風向之前方至少 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，才可使用地況 B。
- (3) 地況 C：平坦開闊之地面或草原，其分散之障礙物高度小於 10 公尺者。
- (4) 地況 D：平坦無障礙物之海岸或湖岸地區，風向係經由水面吹過來的方向才適用。距海岸線 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取大值)才適用此地況。

$S_{w_i w_i}(\omega)$ ：風力頻譜；

\bar{V}_i ：樓層各高度節點 i 平均風速；

V_r ：距地 10 m 平均風速= 30 m/s；

ρ ：空氣密度=1.22 kg/m³；

C_D ：平均阻力係數=1.3；

k_0 ：地表粗糙係數=0.025；

A_i ：節點 i 受風截面積；

ω ：風力自然頻率

$$\Delta\omega=0.02(\text{rad/s})$$

則作用於結構物之風力如下表示：

$$\begin{aligned} W_i(t) &= 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{l=1}^n \sqrt{S_{w_i w_i}(\omega_l)} \cos(\omega_l t + \phi_l) \\ &= 2A_i \bar{V}_i \sqrt{\Delta\omega} f(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$f(t) = \sum_{l=1}^n \sqrt{R(\omega_l)} \cos(\omega_l t + \phi_l) \quad (4.7)$$

$$\text{令 } 2\sqrt{\Delta\omega} f(t) = P(t) \quad (4.8)$$

$$W_i(t) = A_i \bar{V}_i P(t) \quad (4.9)$$

其中 ϕ_l 為隨機參數(0~2 π)。

各節點 i 所受之順向風力 $W_i(t)$ 與各節點之風速與面積成正比，由(4.9)式可知，將單位風速單位面積之風力歷時 $P(t)$ 乘以各節點之迎風面積 A_i 與風速 \bar{V}_i ，便為各節點之順向風力 $W_i(t)$ 。

4.4 風力分析結果

圖 4.7 及圖 4.8 分別為作用於結構頂樓之順向風力擾動歷時及富氏頻譜圖，其結果顯示，隨機擾動風力最大為 15.95 ton，且其頻率內涵主要分佈於 1 Hz 以內。

分析 VTLCD 於阻塞率 0%、20%、40%、60%及 80%安裝與未安裝於結構物之加速度歷時圖比較，其結果顯示當結構物受風力作用時，其結構物頂樓加速度峰值超過 5 gal，安裝 VTLCD 可以有效降低加速度峰值(低於 5 gal)，使頂樓加速度達到半年回歸期之風力作用下之設計標準(VTLCD 系統之結構頂樓反應均方根折減率如表 4.3 所示)。

圖 4.9 及圖 4.10 分別為 VTLCD 於各阻塞率條件下之結構加速度均方根折減率與位移均方根折減率，其結果顯示，隨著阻塞率愈大 VTLCD 折減效果愈好，當阻塞率到達 80%時結構頂樓加速度折減率為 14.7%、位移折減率為 9.1%。

由分析結果顯示，阻塞率 60%後加速度折減率便不再增加，由 Balendra[38]之研究顯示，阻塞率為 0%及 50%時減振效益最佳，由於 VTLCD 系統之阻尼力為流速的平方，因此過大之阻塞率會導致液體流動性下降，反而降低減振效益。

由風力分析結果顯示，本高層結構物安裝兩組阻塞率 80%之 VTLCD 系統可達最佳之抗風減振效益，如圖 4.11 所示。因此 VTLCD 系統將採阻塞率 80%進行設計。

4.5 實尺寸 VTLCD 系統設計流程

本節將建立一套 VTLCD 系統之尺寸設計，其中包含 VTLCD 系統尺寸之決定、VTLCD 系統內流體作用力之計算、系統厚度檢核。此設計流程可供日後 VTLCD 系統實際安裝之參考。

變斷面 VTLCD 的設計主要由頻率調整與斷面比尺寸，並配合空間上的考量，以決定 VTLCD 系統尺寸參數，設計流程如下所示：

當 VTLCD 系統與結構物自然振動頻率達一致時，可達到最大減振效果。假設結構物自然振動頻率 f 、斷面比 β 及架設 VTLCD 所需之空間 (VTLCD 總長度 L 、總高度 H 可調整之範圍) 均為已知，變斷面 VTLCD 尺寸標示如圖 4.12 所示，可計算如下：

(1) VTLCD 有效長度之決定

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad (4.10)$$

$$L_e = \frac{2g}{(2\pi f)^2} \quad (4.11)$$

由(4.11)式，可決定調頻所需之有效長度 L_e 。

(2) VTLCD 水平段寬度與垂直段高度之決定

$$\beta = \frac{A_v}{A_h} = \frac{B_v w}{B_h w} \quad (4.12)$$

由(4.12)式，可決定 B_v 及 B_h 之值。

(3) VTLCD 水平段與垂直段之有效長度決定

$$L_e = 2h_v + \beta d \quad (4.13)$$

$$d = L - B_v \quad (4.14)$$

$$h_v = \frac{L_e - \beta d}{2} \quad (4.15)$$

由(4.14)式及(4.15)式決定垂直段有效長度 h_v 與水平段有效長度 d 。

(4) VTLCD 蓄水高度之決定

$$h = h_v + \frac{B_h}{2} \quad (4.16)$$

由(4.16)式可決定調頻所需之液面高度。其中，蓄水高度需滿足 $h \leq H$ ，若 $h > H$ 則修正 L 或 H 並重複步驟(1)~(4)至條件滿足為止。

(5) VTLCD 寬度之決定

由於 TLCD 水量過多會造成結構物梁柱額外的負擔，因此設計要求質量比(水質量/結構物質量) $\leq 10\%$ 。

$$\frac{m_w}{m_s} = \frac{2(\rho B_v h w) + \rho B_h (L - 2B_v) w}{m_s} \leq 10\% \quad (4.17)$$

$$w = \frac{0.1 m_s}{2(\rho B_v h) + \rho B_h (L - 2B_v)} \quad (4.18)$$

由(4.18)式可得到容許最大設計寬度。

其中，

m_w : VTLCD 系統流體質量

m_s : 結構物樓板質量

w : VTLCD 系統寬度

(6) 液面激盪振幅之檢核

由風力分析之結果，可得到最大液柱位移 $x_{f_{\max}}$ 。當液面激盪振幅高於 VTLCD 總高度 H 時液體會溢出系統，造成系統自然頻率之變動，若激盪振幅低於 VTLCD 水平段高度 B_h ，則違反運動方程式之基本假設，其限制條件表示如下：

$$|x_{f_{\max}}| \leq H - h \quad (4.19)$$

$$|x_{f_{\max}}| \leq h - B_h \quad (4.20)$$

其中，若不滿足(4.19)或(4.20)式，則修正 L 或 H 並重複步驟(1)~(4)直至條件滿足為止。



4.6 變斷面 VTLCD 之厚度檢核

變斷面 VTLCD 於工程實際應用上，需考慮系統管壁受流體壓力及流體慣性力作用造成之應力集中及變形量，以此做為選擇 VTLCD 系統之材料並決定所需之厚度及接合所需之強度。

設計所需之液柱最大激盪振幅 $x_{f_{\max}}$ 、液柱最大速度 $\dot{x}_{f_{\max}}$ 、結構樓板最大加速度 $\ddot{x}_{s_{\max}}$ 可由風力分析(表 4.4)之結果求得。

流體壓力包括流體之靜壓力及流體運動時速度所產生之動壓力，假設黏滯剪應力所作之功為零，若無機械作功，可視為理想流體(圖 4.13)，以伯努力理想流體方程式表示如下：

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad (4.21)$$

其中若流速 V_1 表示為垂直段液柱激盪速度，則水平段流速 V_2 可由達西定律(Darcy's Law)表示：

$$V_2 = \frac{A_v}{A_h} V_1 \quad (4.22)$$

則(4.18)式可表示為

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \left(\frac{A_v}{A_h}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad (4.23)$$

$$p_2 = \left[(z_1 - z_2) + \frac{V_1^2}{2g} \left(1 - \left(\frac{A_v}{A_h}\right)^2 \right) \right] \gamma + p_1 \quad (4.24)$$

其中，

z_1 、 z_2 分別表示兩點離基準面之高程。

p_1 、 p_2 分別表示兩點之壓力。

將 p_1 設於 VTLCD 垂直段液面處，若忽略大氣壓力($p_1 = 0$)，則水平段之頂緣壓力 p_a 及底緣壓力 p_b 皆可由(4.24)式求得，則水平段之流體作用力可表示為：

$$\text{水平段之流體作用力} = \int_0^{B_h} p_a + \left(\frac{p_b - p_a}{B_h} \right) x dx \quad (4.25)$$

垂直段之流體壓力則由靜壓力(ρgh)提供，其作用力可表示如下：

$$\text{垂直段高水位之流體作用力} = \int_{B_h}^{h+x_f \max} \rho g x w dx \quad (4.26)$$

$$\text{垂直段低水位之流體作用力} = \int_{B_h}^{h-x_f \max} \rho g x w dx \quad (4.24)$$

VTLCD 系統管壁受流體作用力情形如圖 4.14 所示。

流體慣性力之考慮 (圖 4.15)，流體之慣性作用力可表示如下[64][65]：

$$p(x, z, t) = -\rho gz - \rho \frac{\partial \phi(x, z, t)}{\partial t} - \rho \left(x - \frac{a}{2}\right) \ddot{x}_s(t) \quad (4.25)$$

$$F_s = b \int_{-h}^0 [p(x, z, t)|_{x=a} - p(x, z, t)|_{x=0}] dz \quad (4.26)$$

其中 $\phi(x, z, t)$ 為速度勢，與以面激盪有關，TLCD 系統慣性力不考慮液面激盪之效應，則(4.26)積分後可得：

$$F_s = -\rho abh \ddot{x}_s \quad (4.27)$$

流體之慣性力計算可表示如下：

$$\text{垂直段高水位之流體慣性力} = \int_{B_h}^{h+x_f \max} \rho A_v w \ddot{x}_{s \max} dx \quad (4.28)$$

$$\text{垂直段低水位之流體慣性力} = \int_{B_h}^{h-x_f \max} \rho A_v w \ddot{x}_{s \max} dx \quad (4.29)$$

$$\text{水平段慣性力} = \int_0^{B_h} \rho w L \ddot{x}_{s \max} dx \quad (4.30)$$

VTLCD 系統管壁受流體作用力情形如圖 4.16 所示，流體之物理性質見表 4.5。



4.6.1 VTLCD 之變形量之設計要求

變斷面 VTLCD 系統受到流體壓力及風力擾動時，系統壁面會產生變形，該變形量或許仍在材料之容許範圍內，但過大的變形量會造成使用者心理上的不安全感，因此吾人對於變形量之要求不得大於 1 mm，並由管壁厚度控制 VTLCD 變形量之大小。此外，孔口板之變形量及應力亦不可超過材料之降伏強度；避免孔口板損壞減少阻塞率，導致消能效果降低。本節對變形量之分析採用 ANSYS 有限元素分析軟體，同時也檢核 VTLCD 系統各方向之應力有否超過材料之降伏強度。

4.6.2 ANSYS 有限元素分析軟體知簡介

ANSYS 為一廣泛性之商業套裝工程分析軟體，它所分析之工程問題包括結構、傳熱學、流體、電磁、聲學及爆破等，是一套被廣泛應用於土

木工程、地質礦產、石油化工、輕工、電子、水利、鐵路、汽車交通、國防軍事、航空太空、船舶、機械製造、核工業、電子、日用家電、生物醫學等各領域之分析軟體。ANSYS 公司成立於 1970 年，總部在美國賓州的匹茲堡，是目前 CAE 行業最大的公司。其創始人 John Swanson 博士為匹茲堡大學力學系教授，同時也是有線元素界的權威。在 30 多年的發展過程當中，ANSYS 不斷改進提升，功能不斷增強，如今 ANSYS 的使用者已經遍佈全球眾多科技研究院校及單位。

一般 ANSYS 分析流程主要包括前處理、加載與求解及後處理等三個步驟，分別敘述如下：

(1)前處理

- 定義單元類型。
- 定義材料特性。
- 建立幾合模型。
- 網格畫分。



(2)加載及求解

- 定義分析類型及分析選項。
- 施加荷載及束制條件。
- 分析求解。

(3)後處理

- 讀取計算數據。
- 將計算數據做各種圖形化顯示。
- 顯示計算結果表列。
- 進行其它各種後續分析

4.6.3 變斷面 VTLCD 模型之建立

ANSYS 模型建立方式大致上分為點(node)、線(line)、面(area)及體積(Volume)，建模時可因個人習慣不同選擇最適當的建模方式；變斷面 VTLCD 是由鋼板銲接所組成的，由於 VTLCD 系統形狀單純，故模型建立採用體積(Volume)建立，將各尺寸體積逐步建構成形，垂直斷管壁部分為增加荷載定義上的方便，於最高水位及最低水位各以體積做為液面交界面之區隔(圖 4.17)；同理孔口板之模型建立亦由不同大小之體積所組成。模型建立完成後由 ANSYS 中布林運算(Booleans)功能內的加運算(Add)將所建立之大小不同的幾何形狀組合成單一體積，則 VTLCD 系統之幾合模型便建立完成。變斷面 VTLCD 及孔口板之幾何模型如圖 4.18 及圖 4.19 所示。

4.6.4 元素種類之選取及描述

本研究進行變斷面 VTLCD 模型建立分析時採用 SOLID45 元素進行分析。SOLID45 是用來建構 3D 實體結構最基本的元素，也是 ANSYS 最早發展的元素(圖 4.20，該元素有八個位於頂點的節點(編號為 I、J、K、L、M、N、O、P)，屬於線性元素；每個節點有三個自由度，分別為 UX、UY、UZ，亦即 X、Y、Z 三個方向的變位。此元素的形狀通常為六面體(hexahedron)，但當某些節點重疊在一起時，這個元素可以退化成三角柱或四面體。因此當 ANSYS 自動切割網格，須採用三角柱或四面體時，會將某些節點重疊在一起。

SOLID45 除了支援線彈性問題外，還可支援塑性、潛變等非線性力學模式。SOLID45 雖包含很多功能，但並未包含較新發展的理論，導致分析精確度不佳，尤其是大變形理論及新的材料模式，因此後續又發展其它元素解決這些問題，但對一般線性或非線性分析而言，採用 SOLID45 與其它新元素，其結果是一致的。

4.6.5 材料參數之定義

ANSYS 分析過程中材料性質的定義是必須的，變斷面 VTLCD 系統整體構成均為鋼板，材料定義為線彈性均質材料，分析類型為靜定分析，所需要輸入之材料參數分別有密度 $0.00785\text{kgf}/\text{cm}^3$ 、彈性模數 $2.1\text{E}10^6\text{kgf}/\text{cm}^2$ 及包松比(poisson's ratio)0.3，材料參數設定如圖 4.21 及圖 4.22 所示。

4.6.6 網格建立

完成變斷面 VTLCD 模型知幾何外形、元素選取及定義材料性質參數後，接著就是網格的建立(mesh)。網格切割之特性在於，切割愈細，其分析結果就愈趨近於收斂值，但也相對的增加電腦運算時間，有時甚至需要運用多台電腦做平行運算。ANSYS 內建的切割網格功能相當強大，使用者只要依需求做一些簡單設定後，ANSYS 便自動對模型進行畫分網格的動作，且亦會對模型中較不易建立網格的地方(例如：不連續面、破裂面等)自動做適當的修正，增加使用之便利與效率。

進行單元網格劃分時有兩種方法，包括映射法(Mapped)及自由法(Free)。映射法是將面畫分成規則的四邊形單元，而自由法是將面劃分成四邊形單元及三邊形單元。映射法畫分的單元在計算上較為理想，不容易出現奇異點，能夠進行正常的求解；自由劃分法的單元較不利於計算，容易出現奇異點，有時將導致無法成功求解。

4.6.7 邊界條件之設定及荷載之定義

變斷面 VTLCD 的模型及網格劃分完成後，便可進行邊界條件之設定。VTLCD 系統整體均由鋼材所構成，在施工上選擇以銲接接合，因此鋼板間之接合方式模擬為一體成形，系統底板與樓板接合，故邊界條件則設定底板自由度各方向位移均為零，如圖 4.23。

變斷面 VTLCD 垂直段管壁所承受之荷載為流體運動所產生之壓力及慣性力，若是用 ANSYS 模擬，吾人以表面壓力(surface load)與力的施加配合加載，以模擬 VTLCD 液柱激盪達峰值時，流體作用於壁面之行為。表面壓力之加載需輸入斜率(slope)、斜率方向(slope direction)、最終值及初始值，其設定方式如圖 4.24 所示，表面壓力之施加可模擬流體壓力隨著深度增加而遞增之特性，因此流體靜壓力由表面壓力模擬；流體慣性力及流速所產生之壓力在於各自作用範圍內均為定值，因此可在其作用範圍內之各節點上做力的加載，將其近似為均佈載重進行分析。

4.6.8 VTLCD 系統變形量分析

本研究吾人以 ANSYS 分析時採用厚度 1cm 建立 VTLCD 模型，分析項目包含垂直段管壁局部分析、孔口板分析及變斷面 VTLCD 系統整體分析，其分析結果分述如下：

(1) 垂直管壁之局部分析

變斷面 VTLCD 垂直段管壁於液面激盪達到峰值時流體壓力最大，吾人以 ANSYS 建立厚度 1cm 之垂直段管壁模型，網格劃分採用自由劃分法，邊界條件為三邊以固端圍束模擬系統接合情況(圖 4.25)，荷載之施加分為表面壓力與力的施加；表面壓力作為近似流體靜壓力之用，以斜率 -0.001，初始值為 0.256 kgf/cm^2 沿 Y 方向變化至液面最終值為 0，水平段之慣性力與流體動壓力可疊加計算，其值為 $3.32 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$ ，垂直段之作用力為流體慣性力，其值為 $2.1 \times 10^{-4} \text{ kgf/cm}^2$ ，以力的加載型式輸入，結果如圖 4.26 及圖 4.27 所示。

(2) 孔口板厚度分析

孔口板功能在於增加 VTLCD 系統之水頭損失係數，提升系統消能效果。孔口板基本上安裝在 VTLCD 系統水平段位置，該區位於流體壓力及

慣性力最大處，且孔口板由於開孔以致有效面積不足，因此需對孔口板之厚度進行檢核。孔口板厚度試以1cm進行分析，阻塞率為80%，網格劃分採用自由劃分法，孔口板邊界條件以四邊固接圍束設定(圖 4.28)；荷載之設定分為流體壓力及慣性力，均以表面壓力輸入，以斜率-0.001初始值為0.2613 kgf/cm²沿 Y 方向變化至液面最終值為0.0993 kgf/cm² (圖 4.29)。

(3) 變斷面 VTLCD 系統整體分析

本研究主要是分析變斷面 VTLCD 系統受到流體壓力及慣性力作用時，整體變形量及應力集中位置，由 ANSYS 建立厚度1cm之變斷面 VTLCD 模型，系統模型接合形式採用布林運算中的加運算進行接合，網格劃分採用自由劃分法(圖 4.30)，系統四面八方皆承受流體之靜水壓力，而系統壁面部份則額外承受流體慣性力作用(圖 4.31)，由此設定模擬阻塞率 80%流體激盪振幅達最高時之系統變形量及各方向之應力分佈。

4.7 ANSYS 分析結果

由表 4.6 顯示 VTLCD 系統管壁局部分析最大變形量為0.009 cm(圖 4.32)，滿足對 VTLCD 變形量之設計要求；依照我國規範規定容許剪應力 $F_v = 0.4F_y$ ；容許張應力 $F_t = 0.6F_y$ ，若依一般常用之 SS400 鋼材進行設計，材料降伏強度為2500 kgf/cm²，分析結果顯示，最大張應力為45.82 kgf/cm² 小於材料之抗張強度1500 kgf/cm²，最大剪應力為52.61 kgf/cm² 小於材料之抗剪強度1000 kgf/cm²，Von Mises 應力值為91.14 kgf/cm² 小於材料之降伏強度2500 kgf/cm²，各方向應力分佈圖如圖 4.33 所示。

由表 4.7 顯示孔口板於四邊圍束設計下，最大變形量為0.009 cm(圖 4.34)，滿足對孔口板變形量之設計要求；最大張應力為39.15 kgf/cm² 小於

材料之抗張強度 1500 kgf/cm^2 ，最大剪應力為 52.14 kgf/cm^2 小於材料之抗剪強度 1000 kgf/cm^2 ，Von Mises 應力值為 90.57 kgf/cm^2 小於材料之降伏強度 2500 kgf/cm^2 ，各方向應力分佈圖如圖 4.35 所示。

由表 4.8 顯示變斷面 VTLCD 整體系統分析最大變形量為 0.002 cm (如圖 4.36)，最大變形量發生在 X 方向高水位之垂直斷管壁(圖 4.37)所示，其滿足對 VTLCD 變形量之設計要求；最大張應力為 77.36 kgf/cm^2 小於材料之抗張強度 1500 kgf/cm^2 ，最大剪應力為 29.20 kgf/cm^2 小於材料之抗剪強度 1000 kgf/cm^2 ，Von Mises 應力值為 40.23 kgf/cm^2 小於材料之降伏強度 2500 kgf/cm^2 ，各方向應力分佈圖如圖 4.38 所示。

綜合上述分析結果，變斷面 VTLCD 系統及孔口板採用厚度 1 cm 設計，均可滿足設計要求。

本章探討 VTLCD 應用於高層結構物控制水平向風力擾動作用之減振性能評估，並製定一套 VTLCD 系統尺寸設計流程，提供日後實際安裝參考之用。綜合上述分析結果歸納結論如下：

- (1) 當高層結構物安裝 2 組阻塞率為 80% 之 VTLCD 系統，對於樓板水平向之位移及加速度均有折減之效果(未安裝 VTLCD 系統，結構物加速度為 5.1 gal)，滿足我國規範規定半年回歸期之風力作用下，頂樓加速度不得大於 5 gal 之限制。
- (2) 根據變斷面 VTLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率可快速的設計出 VTLCD 系統尺寸，顯示 TLCD 系統概念簡單、調頻容易之優點。
- (3) 由分析結果顯示，VTLCD 系統之厚度設計主要由變形量所控制。本分析案例流體慣性力及流體速度所產生之作用力較不明顯，變形量之產生主要由流體靜壓力所提供，設計採用厚度 1 cm 可使 VTLCD 系統及孔口版整體接近剛性，符合設計要求。



第五章 結論與建議

本研究針對水平及旋轉運動之變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper, VTLCD)系統進行動力特性試驗，參考並修正 Wu' s formula 建立水頭損失係數之經驗公式，以供日後 VTLCD 系統工程實務設計之用。此外，本研究亦針對一座 31 層樓之細長結構進行 VTLCD 之抗風減振效能評估，並提出一套設計流程以供設計參考。茲根據本文完成之理論推導與試驗結果，歸納結論與建議如下：

- (1) 根據 VTLCD 理論所設計之各式模型，其振動頻率之理論值與元件測試結果十分吻合，證明相關理論之合理性，也凸顯 TLCD 系統調頻容易之優點。
- (2) VTLCD 系統之水頭損失係數與阻塞率及斷面比均有關，無論是水平向或旋轉向運動。
- (3) 根據本文之理論推導結果，VTLCD 系統之水頭損失係數與斷面比 (β) 成正比，此與斷面比 $\beta \geq 1$ 之 VTLCD 試驗結果相符；本研究提出之 modified Wu's formula 水頭損失係數經驗公式中考慮了斷面比的影響，可將 Wu's formula 分別針對斷面比 $\beta=1,2$ 及 3 等三組經驗公式統合為一。
- (4) 當 VTLCD 之斷面比 $\beta < 1$ 時，試驗結果所得之水頭損失係數並未呈現與斷面比 (β) 成正比之關係，應為模型尺寸較小受到邊界層流的摩擦力影響所致。影響水頭損失係數的因素除阻塞率外，還包括液體粘滯度、管壁摩擦係數、水平段與垂直段接合方式，渦流及負壓、垂直斷液面之激盪等因素。大尺寸 VTLCD 之流體運動行為主要由慣性力所控制，邊界層流對水頭損失之影響並不

顯著，經驗公式預測值與系統識別結果相當接近；小尺寸 VTLCD 之流體運動行為受邊界層流影響較大，以經驗公式預估其落水頭損失係數會偏低。

- (5) 根據系統識別分析所得之水頭損失係數進行非線性數值模擬分析，所得之流體激盪位移與試驗結果相當吻合，驗證本文所提非線性動態分析模式及系統識別方法之合理性與精確性。
- (6) 高樓建築安裝 VTLCD 確能達到抗風減振之效益。針對本文分析案例之參數研究，基本上 VTLCD 對於結構位移及加速度反應之折減率隨著阻塞率增加而增加，以阻塞率 80%時最佳；惟阻塞率過大時(例如 90%)將導致 VTLCD 系統之流動性變差，減振效益反而會降低。
- (7) 落水頭損失係數之影響因素除了阻塞率外尚有許多其他影響因素，其中主要與流體行為相關，未來可考慮從流體力學的角度探討落水頭損失係數之評估與設計決定方式。
- (8) 本文有關高樓 VTLCD 抗風減振之分析僅考慮順風向之風力，未來可同時納入橫風向風力之影響，以更實際模擬結構在風力下之動力行為及完整評估 VTLCD 之抗風減振效益。

參考文獻

1. Housner, G.W. et. al. “Special Issue, Structural Control : Past, Present, and Future.”, *Eng. Mech.*, Vol. 123, No.9, 1997.
2. Soong, T.T. “ Active Structural Control: Theory and Practice”, *John Wiley and Sons Inc.*, New York, 1990.
3. Soong, T.T., Masri, S.F. and Housner, G.W., “An Overview of Active Structural Control under Seismic Loads”, *Earthquake Spectra*, Vol. 7, No. 3, pp. 483-505 ,1991.
4. Soong, T.T., “State-of-the-art-review: Active Structural Control on Civil Engineering” , *Eng. Struct.*, Vol. 10, April, pp. 74-84, 1988.
5. Reinhorn. A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Riley, M.A. Wang, Y.P., Aizawa,S. and Higashino, M., “Active Bracing System: A Full Scale Implementation of Active Control”, *Technical Report*, NCEER-92-0020, NCEER/SUNY/Buffalo, 1992.
6. Reinhorn. A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Wang, Y.P., Fukao, Y., Abe, H. and Nakai, M., “1:4 Scaled Model Studies of Active Tendon Systems and Active Mass Dampers for Aseismic Protection”, *Technical Report*, NCEER-89-0026, NCEER/SUNY/Buffalo, 1989
7. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikeda Y., “Seismic-Response-Controlled Structure with Active Mass Driver System. Part 1: Design”, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 20, pp.133-149, 1991.
8. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikeda Y., “Seismic-Response-Controlled Structure with Active Mass Driver System.

Part 2: Verification”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, pp.151-166, 1991

9. Lee Chien-Liang and Wang, Y.P., “Seismic Structural Control Using an Electric Servomotor Active Mass Driver System”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33 (6), pp. 737-754, 2004.
10. Michael D. Symans and Michael C. Constantinou, “Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review ”, *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 469-487, 1999.
11. Farzad Naeim and James M. Kelly, “Design of Seismic Isolated Structure From Theory to Practice”, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1999.
12. Buckle, I.G., and Mayes, R.L., “Seismic isolation: history, application and performance-a world review”, *Earthquake Spectra*, Vol. 6, pp. 161-201, 1990.
13. Martelli, A., Parnucci, 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.
14. Kelly, J.M., “Aseismic base isolation: review and bibliography”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 202-216 , 1986.
15. Soong, T.T. and Spencer Jr B.F., “Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice”, *Eng. Struct.*, Vol. 24, pp. 243-259, 2002.
16. Soong, T.T. and Dargush, G.F. “ Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering”, *John Wiley and Sons Inc.*, New York, 1997.
17. Frahm, H., “Device for Damping Vibration of Bodies”, *U.S. Patent No.* 958-989, 1911.

18. Rana, Rahul., and Soong, T. T., “Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers”, *Engineering Structures*, Vol.20, No.3, pp193-204, 1998.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Wang, Y.P., Chung, Lap-Loi and Liao, Wei-Hsin, “Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 1069-1093, 1998.
24. Wang, Y.P., Chung. L.L, Teng, M.C, Lee, C.L., “Experimental Study of Seismic Structural Isolation using Sliding Bearings”, 2WCSC, Kyoto,

- Japan, pp.83-92, 1998.
25. Wang, Yen-Po, and Liao, Wei-Hsin'Dynamic Analysis of Sliding Structures with Unsynchronized Support Motions', *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, pp. 297-313, 2002.
 26. Wang, Y.P., Min-C. Teng and Lee Chien-Liang, "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), 2000.
 27. Wang, Y.P., Teng, M.C. and Chung, K.W., "Seismic Isolation of Rigid Cylindrical Tanks Using Friction Pendulum Bearings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 30, Issue 7, July, pp. 1083-1099, 2001.
 28. 王彥博,「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, 第 120~146 頁台灣新竹, 2004。
 29. McNamara, R.J., "Tuned mass dampers for buildings", *Journal of the Structure Division*, ASCE, Vol.103, No.ST9, pp.1985-1988, 1997.
 30. Luft, R. W., "Optimal tuned mass dampers for buildings", *Journal of the Structure Division*, ASCE, Vol.105, No.ST12, pp.1985-1988, 1979.
 31. Irwin, P. and Breukelman, B "Recent Applications of Damping Systems for Wind Response." *RWDI Inc.*
 32. Saoka, Y., Sakai, F., Takaeda, S., Tamaki, T. "On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers." Annual Meeting of JSCE, *Japan Society of Civil Engineers*, Tokyo, Japan, 1998.
 33. Sakai, F. et al., "Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations", *Proc. Int. Conf. on High Rise Buildings*, Nanjing, China, March 25-27, 1989.

34. Caughey, T.K. "Equivalent linearization techniques." *Journal Acoustical Society of America*, 35(11), 1706-1711, 1963.
35. Wen, Y.K. "Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation." *Journal of Appl. Mech.*, 47, 150-154, 1980.
36. Xu, Y.L., Samali, B. and Kwok, K.C.S., "Control of Along-wind Response of Structures by Mass and Liquid Dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, 118(1), 20-39, 1992.
37. Hitchcock, P.A., Kwok, K.C.S., Watkins, R.D. and Samali, B., "Characteristics of Liquid column vibration absorbers (LCVA) -I and II", *Engineering Structures*, 19(2), 1997.
38. Balendra, T., Wang, C.M. and Cheong, H.F. "Effectiveness of Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Towers", *Engineering Structures*, 17(9), 668-675, 1995.
39. Gao, H., Kwok, K.C.S. and Samali, B., "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers", *Engineering Structures*, 19, 476-486, 1997.
40. Chang, C.C. and Hsu, C.T., "Control performance of Liquid column vibration absorber", *Engineering Structures*, 20(7), 580-586, 1999.
41. Xue, S.D., Ko, J.M. and Xu, Y.L., "Tuned Liquid Column Damper for suppressing pitching motion of structures", *Engineering Structures*, 23, 1538-1551, 2000.
42. Won, A.Y.J., Pires, J.A. and Haroun, M.A. "Stochastic seismic performance evaluation of tuned liquid column dampers", *Earthquake Engng & Structural Dynamics*, 25, 1259-1274, 1996.
43. Sadek, F., Mohraz, B. and Lew, H.S. "Single- and Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications", *Earthquake Engng. and Struc. Dyn.*, 27, 439-463, 1998.

44. K. M. Shum and Y. L. Xu “Multiple-tuned liquid column dampers for torsional vibration control of structures: experimental investigation”, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* , 31, 977-991, 2002.
45. Yalla, S.K., Kareem, A. and Kantor, J.C., “Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for vibration control of structures”, *Engineering Structures* Vol 23 No.11 1469-1479, 2001.
46. Chen Y.H. and Ko C.H, “Active tuned liquid column damper with propellers.” *Earthquake Engng Struct. Dyn.* , 32, 1627-1638, 2003.
47. Irwin, P. and Breukelman, B “Recent Applications of Damping Systems for Wind Response.” *RWDI Inc.*
48. 沈瑛璋，「受風下調頻液柱阻尼器之最佳參數設計」，淡江大學土木工程學系，碩士論文，2004。
49. 陳連杰，「高樓抗風 TLCD 系統之分析與試驗」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文，2005。
50. 張恩杰，「變斷面 TLCD 抗風減震系統之試驗與分析」，國立交通大學土木工程研究所，碩士論文，2006。
51. Wu Jong-Cheng , Ming-Hsiang Shih , Yuh-Yi Lin , Ying-Chang Shen “Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind”, *Engineering Structures* 27 1893-1905, 2005.
52. 吳重成、王彥博、廖珮亘、李建良、陳逸軒「調頻液柱阻尼器(TLCD)與結構扭轉向之互制行為」，電子計算機於土木水利工程應用研討會，2007。
53. 廖珮亘，「調頻液柱阻尼器於受風結構扭轉向之形為探討」，淡江大學土木工程學系，碩士論文，2007。
54. Wu Jong-Cheng , Wang Y.P., Chien-Liang Lee , Pei-Hsuan Liao and Yi-Hsuan Chen “Wind-Induced Interaction of Non-Uniform Tuned Liquid Column Damper and Structure in Pitching Motion”, *Engineering*

Structures (in press).

55. 黃立政,「流體力學-原理與應用」,全華科技圖書股份有限公司,1999。
56. Victor L. Streeter, E. Benjamoin Wylie, Keith W. Bedford, 編譯 鄭耀智
「流體力學」, 蒼海書局。
57. Lopez-Almansa, F., Barbat, A. H., and Rodellar, J., “SSP Algorithm for Linear and Non-linear Dynamic Response Simulation”, *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.26, 2687-2706, 1988.
58. 鍾立來、王彥博、楊創盛,「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, 1996。
59. Ljung, Lennart. “System Identification: Theory for the Users”, *Prentice Hall PTR*, New Jersey, 1987.
60. 王彥博、卓建全,「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, 1996。
61. 卓建全,「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, 1996。
62. 林偉傑 (2003),「高層建築風力與結構側向及扭轉向反應之互制效應研究」, 淡江大學土木工程學系, 碩士論文, 2003。
63. 林世陞,「高樓結構裝設調和液柱阻尼器減振效應之風洞實驗研究」, 國立中央大學土木工程研究所, 碩士論文, 2000。
64. P.Warnitchai, “Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices”, *Engineering Structures* Vol.20 No.7 593-600, 1998.
65. 卓桂榮,「剛性儲存槽之隔振研究」, 國立交通大學土木工程研究所, 碩士論文, 1999。

表 3.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(小尺寸， $\beta=0.31$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.55
有效長度 L_e (m)	1.643
垂直段有效長度 h_v (m)	0.572
水平段有效長度 d (m)	0.914
VTLCD 全長 L (m)	1
VTLCD 高度 H (m)	1.2
VTLCD 寬度 w (m)	0.06
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.00516
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0168
斷面比 β	0.31
垂直段寬度 B_v (m)	0.086
水平段高度 B_h (m)	0.28
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.712
液體(水)質量(kg)	21.3
空系統質量(kg)	16.8

表 3.2 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸, $\beta=0.31$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.55
有效長度 L_e (m)	1.643
垂直段有效長度 h_v (m)	0.537
水平段有效長度 d (m)	1.85
VTLCD 全長 L (m)	1.9
VTLCD 高度 H (m)	1
VTLCD 寬度 w (m)	0.15
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.0069
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0225
斷面比 β	0.31
垂直段寬度 B_v (m)	0.046
水平段高度 B_h (m)	0.15
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.612
液體(水)質量(kg)	49.1
空系統質量(kg)	24.4

表 3.3 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(小尺寸, $\beta=0.6$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.55
有效長度 L_e (m)	1.643
垂直段有效長度 h_v (m)	0.572
水平段有效長度 d (m)	0.832
VTLCD 全長 L (m)	1
VTLCD 高度 H (m)	1.2
VTLCD 寬度 w (m)	0.06
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.0101
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0168
斷面比 β	0.6
垂直段寬度 B_v (m)	0.168
水平段高度 B_h (m)	0.28
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.60
液體(水)質量(kg)	23.3
空系統質量(kg)	20.2

表 3.4 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸， $\beta=1.0$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.45
有效長度 L_e (m)	2.5
垂直段有效長度 h_v (m)	0.375
水平段有效長度 d (m)	1.75
VTLCD 全長 L (m)	1.9
VTLCD 高度 H (m)	1.0
VTLCD 寬度 w (m)	0.15
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.0225
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0225
斷面比 β	1.0
垂直段寬度 B_v (m)	0.15
水平段高度 B_h (m)	0.15
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.45
液體(水)質量(kg)	56.5
空系統質量(kg)	28.3

表 3.5 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸， $\beta=2.0$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.36
有效長度 L_e (m)	3.87
垂直段有效長度 h_v (m)	0.483
水平段有效長度 d (m)	1.45
VTLCD 全長 L (m)	1.75
VTLCD 高度 H (m)	1.0
VTLCD 寬度 w (m)	0.15
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.045
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0225
斷面比 β	2.0
垂直段寬度 B_v (m)	0.3
水平段高度 B_h (m)	0.15
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.558
液體(水)質量(kg)	76.1
空系統質量(kg)	32.6

表 3.6 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(大尺寸， $\beta=3.0$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.31
有效長度 L_e (m)	5.32
垂直段有效長度 h_v (m)	0.4833
水平段有效長度 d (m)	1.45
VTLCD 全長 L (m)	1.9
VTLCD 高度 H (m)	1.0
VTLCD 寬度 w (m)	0.15
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.0675
水平段斷面積 A_h (m^2)	0.0225
斷面比 β	3.0
垂直段寬度 B_v (m)	0.45
水平段高度 B_h (m)	0.15
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	0.558
液體(水)質量(kg)	97.9
空系統質量(kg)	39.2

表 3.7 各元件之擾動頻率輸入值

頻率比 斷面比	擾動頻率(Hz)				
	0.6	0.9	1.0(共振頻率)	1.1	1.4
0.31(小)	0.33	0.495	0.55	0.605	0.77
0.31(大)	0.33	0.495	0.55	0.605	0.77
0.6	0.33	0.495	0.55	0.605	0.77
1.0	0.27	0.40	0.45	0.49	0.62
2.0	0.22	0.32	0.36	0.39	0.50
3.0	0.18	0.28	0.31	0.34	0.43

表 3.8(a) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(小尺寸 $\beta=0.31$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	171.43	16.01	39.85	16.01	28.02	16.01	25.25	16.01	28.40	16.01
60%	149.06	4.26	28.12	4.26	16.87	4.26	13.89	4.26	17.42	4.26
40%	140.95	1.97	25.64	1.97	14.91	1.97	11.69	1.97	14.91	1.97
20%	157.24	1.10	24.19	1.10	13.47	1.10	10.58	1.10	14.12	1.10
0%	154.20	--	24.53	--	13.47	--	9.45	--	14.27	--

表 3.8(b) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(大尺寸 $\beta=0.31$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	75.52	16.01	28.64	16.01	24.80	16.01	24.22	16.01	28.37	16.01
60%	64.82	4.26	16.82	4.26	11.56	4.26	10.67	4.26	15.23	4.26
40%	56.53	1.97	14.71	1.97	9.63	1.97	8.92	1.97	12.75	1.97
20%	58.78	1.10	13.08	1.10	8.64	1.10	8.04	1.10	11.45	1.10
0%	62.84	--	13.69	--	9.00	--	7.94	--	11.35	--

表 3.8(c) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(小尺寸 $\beta=0.6$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	128.91	30.98	53.80	30.98	38.88	30.98	35.39	30.98	41.22	30.98
60%	81.79	8.24	23.40	8.24	14.15	8.24	12.35	8.24	16.40	8.24
40%	88.26	3.81	17.64	3.81	9.54	3.81	8.23	3.81	9.20	3.81
20%	73.97	2.12	14.85	2.12	7.86	2.12	6.63	2.12	7.36	2.12
0%	116.34	--	14.95	--	7.47	--	5.41	--	8.06	--

表 3.8(d) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(大尺寸 $\beta=1.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	69.59	51.64	48.29	51.64	48.55	51.64	43.94	51.64	47.64	51.64
60%	32.77	13.73	13.71	13.73	11.55	13.73	11.51	13.73	12.05	13.73
40%	24.77	6.35	8.15	6.35	5.55	6.35	5.70	6.35	6.73	6.35
20%	26.67	3.54	6.51	3.54	3.64	3.54	3.84	3.54	4.84	3.54
0%	20.46	--	5.49	--	3.08	--	3.00	--	4.21	--

表 3.8(e) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(大尺寸 $\beta=2.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	136.99	103.28	97.01	103.28	93.75	103.28	94.33	103.28	88.14	103.28
60%	49.89	27.46	27.84	27.46	24.50	27.46	23.80	27.46	22.97	27.46
40%	34.51	12.70	13.89	12.70	11.43	12.70	10.80	12.70	10.79	12.70
20%	24.61	7.08	9.20	7.08	7.38	7.08	7.12	7.08	6.68	7.08
0%	23.32	--	8.16	--	6.24	--	5.94	--	5.31	--

表 3.8(f) 水平運動 VTLCD 水頭損失係數系統識別結果
(大尺寸 $\beta=3.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	196.63	154.92	146.74	154.92	142.36	154.92	140.98	154.92	135.70	154.92
60%	60.12	41.19	34.97	41.19	32.39	41.19	31.76	41.19	30.10	41.19
40%	39.06	19.05	17.12	19.05	14.05	19.05	13.63	19.05	13.58	19.05
20%	33.10	10.62	11.32	10.62	9.33	10.62	8.55	10.62	7.89	10.62
0%	25.22	--	9.22	--	7.65	--	7.00	--	5.80	--

表 3.9(a) 小尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.31$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	1076	8547	13736	17334	7950
60%	1183	8787	21518	22116	8129
40%	1124	8727	22714	23550	8667
20%	1154	8607	23909	24387	8667
0%	986	9325	23730	24806	8547

表 3.9(b) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.31$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	5828	40346	64255	67244	39151
60%	5678	44381	91900	94142	40197
40%	5230	44979	100717	100119	40645
20%	5828	43335	105797	103406	41841
0%	4483	45427	104154	103107	39300

表 3.9(c) 小尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=0.6$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	897	6396	9803	10759	6814
60%	1016	7770	16079	16617	7173
40%	956	8010	19127	19127	7292
20%	1016	8010	21219	21219	7412
0%	897	8129	21877	22355	7711

表 3.9(d) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=1.0$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	3586	19426	23909	25702	25702
60%	3885	28093	48565	49462	32277
40%	5529	29587	69635	66497	33622
20%	5230	29139	85325	76359	34070
0%	4782	28392	92498	82187	34369

表 3.9(e) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=2.0$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	1494	7173	8816	9414	14345
60%	2182	11058	17035	18231	14047
40%	2690	13299	24955	26001	15690
20%	2540	13748	30484	30783	14196
0%	2540	13299	32725	33622	16139

表 3.9(f) 大尺寸 VTLCD 系統之雷諾數($\beta=3.0$)

頻率比 阻塞率	雷諾數				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	747	3736	4931	5230	6127
60%	1494	7920	10610	11058	8667
40%	1345	10460	15840	15690	8966
20%	2092	11945	19426	18828	9713
0%	1943	13449	21369	20323	10460

表 3.10(a) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數
(大尺寸 $\beta=1.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	87.69	85.30	84.61	85.30	88.47	85.30	93.25	85.30	116.14	85.30
60%	37.30	19.02	24.93	19.02	24.15	19.02	26.50	19.02	50.29	19.02
40%	31.05	8.56	15.45	8.56	12.51	8.56	15.05	8.56	36.74	8.56
20%	25.84	5.53	12.79	5.53	8.96	5.53	26.50	5.53	33.03	5.53
0%	26.06	--	11.70	--	7.56	--	93.25	--	30.83	--

表 3.10(b) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數
(大尺寸 $\beta=2.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	143.10	170.60	149.96	170.60	156.64	170.60	162.94	170.60	197.03	170.60
60%	45.16	38.05	37.88	38.05	38.46	38.05	40.86	38.05	63.82	38.05
40%	28.97	17.11	19.91	17.11	18.80	17.11	20.80	17.11	40.91	17.11
20%	23.51	11.06	14.50	11.06	10.20	11.06	11.54	11.06	33.47	11.06
0%	22.43	--	13.38	--	10.40	--	11.40	--	27.58	--

表 3.10(c) VTLCD 旋轉向於系統識別所得之水頭損失係數
(大尺寸 $\beta=3.0$)

水頭損失係數 δ										
頻率比	0.6		0.9		1.0		1.1		1.4	
阻塞率	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值	識別值	預估值
80%	207.64	255.90	219.87	255.90	218.97	255.90	234.09	255.90	298.52	255.90
60%	54.12	57.07	49.69	57.07	51.07	57.07	56.03	57.07	81.90	57.07
40%	31.71	25.67	24.00	25.67	23.94	25.67	25.87	25.67	43.33	25.67
20%	25.53	16.59	16.49	16.59	15.21	16.59	16.35	16.59	32.65	16.59
0%	22.18	--	14.21	--	12.60	--	13.46	--	28.10	--

表 3.11 尺寸效應試驗結果之差異百分比

頻率比 阻塞率	差異百分比(%)				
	0.6	0.9	1.0	1.1	1.4
80%	55.9	28.1	11.5	4.1	0.1
60%	56.5	40.2	31.5	23.2	12.6
40%	59.9	42.6	35.4	23.7	14.5
20%	62.6	45.9	35.9	24.0	18.9
0%	59.2	44.2	33.2	16.0	20.5

表 4.1 變斷面 VTLCD 元件之設計參數(實尺寸斷面比 $\beta=0.31$)

物理量	大小
設計頻率 f (Hz)	0.31
有效長度 L_e (m)	5.32
垂直段有效長度 h_v (m)	1.63
水平段有效長度 d (m)	6.6
VTLCD 全長 L (m)	7.1
VTLCD 高度 H (m)	3.8
VTLCD 寬度 w (m)	1.6
垂直段斷面積 A_v (m^2)	0.79
水平段斷面積 A_h (m^2)	2.56
斷面比 β	0.31
垂直段寬度 B_v (m)	0.5
水平段高度 B_h (m)	1.6
VTLCD 管壁厚度 t (m)	0.01
設計加水高度 h (m)	2.43
液體(水)質量(ton)	19.49
空系統質量(ton)	9.8

表 4.2 御盟建設 20 代建案結構系統參數

參數	系統參數(單位)
結構第一振態質量	584.1(ton-sec ² /m)
結構第一振態阻尼	44.8(tf-sec/m)
結構第一振態勁度	2145.1(tf/m)
結構第一振態週期	3.27(sec)
結構第一振態頻率	0.31(Hz)

表 4.3 變斷面 VTLCD 於不同孔口板之減振效益

阻塞率(%)	結構頂樓位移 均方根折減值 (%)	結構頂樓加速度 均方根折減值 (%)
90%	-7.1	12.4
80%	9.1	14.7
70%	9.0	14.7
60%	9.0	14.7
40%	8.7	14.4
20%	8.5	14.1
0%	8.6	14.2

表 4.4 變斷面 VTLCD 厚度設計參數

設計參數	參數值
液柱最大激盪振幅 $x_{f_{\max}}$	0.13 m
液柱最大速度 $\dot{x}_{f_{\max}}$	0.25 m/sec
結構樓板最大加速度 $\ddot{x}_{s_{\max}}$	0.042 m/sec ²

表 4.5 水之物理性質(SI 制)

溫度 (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	單位重 γ (kN/m ³)	動力滯度 μ (N · sec/m ²)	運動滯度 ν (m ² /sec)	表面張力 σ (N/m)	蒸氣壓力 P (Pa)	容積彈性模數 K (Pa)	聲速 c (m/sec)
0	999.9	9.806	1.787E-3	1.787E-6	7.56E-2	6.11E+2	204E+7	1403
5	1000	9.807	1.519E-3	1.519E-6	7.49E-2	8.72E+2	206E+7	1427
10	999.7	9.804	1.307E-3	1.307E-6	7.42E-2	1.23E+3	211E+7	1447
20	998.2	9.789	1.002E-3	1.004E-6	7.28E-2	2.34E+3	220E+7	1481
30	995.7	9.765	7.975E-4	8.009E-7	7.12E-2	4.24E+3	223E+7	1507
40	992.2	9.731	6.529E-4	6.580E-7	6.96E-2	7.38E+3	227E+7	1526
50	988.1	9.690	5.468E-4	5.543E-7	6.79E-2	1.23E+4	230E+7	1541
60	983.2	9.642	4.665E-4	4.745E-7	6.62E-2	1.99E+4	228E+7	1552
70	977.8	9.589	4.042E-4	4.134E-7	6.44E-2	3.12E+4	225E+7	1555
80	971.8	9.530	3.547E-4	3.650E-7	6.26E-2	4.73E+4	221E+7	1555
90	965.3	9.467	3.147E-4	3.260E-7	6.08E-2	7.01E+4	216E+7	1550
100	958.4	9.399	2.818E-4	2.940E-7	5.89E-2	1.01E+5	207E+7	1543

表 4.6 VTLCD 垂直段壁面(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果

最大變形量	0.009cm	
	MAX	MIN
X 軸應力值(kgf/cm ²)	45.82	-44.01
Y 軸應力值(kgf/cm ²)	18.37	-14.30
Z 軸應力值(kgf/cm ²)	28.00	-22.17
XY 面剪應力值 kgf/cm ²	24.95	-51.4
XZ 面剪應力值 kgf/cm ²	52.61	-50.42
YZ 面剪應力值 kgf/cm ²	2.38	-2.30
Von Mises stress	91.14	--

表 4.7 孔口板(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果

最大變形量	0.009cm	
	MAX	MIN
X 軸應力值(kgf/cm^2)	39.15	-37.25
Y 軸應力值(kgf/cm^2)	14.63	-14.66
Z 軸應力值(kgf/cm^2)	33.55	-34.31
XY 面剪應力值 kgf/cm^2	32.97	-52.14
XZ 面剪應力值 kgf/cm^2	42.99	-50.95
YZ 面剪應力值 kgf/cm^2	6.31	-6.87
Von Mises stress	90.57	--

表 4.8 變斷面 VTLCD 整體(厚度 1 cm)變形量及應力分析結果

最大變形量	0.002cm	
	MAX	MIN
X 軸應力值(kgf/cm^2)	45.40	-46.65
Y 軸應力值(kgf/cm^2)	19.88	-38.42
Z 軸應力值(kgf/cm^2)	34.85	-77.36
XY 面剪應力值 kgf/cm^2	9.44	-11.85
XZ 面剪應力值 kgf/cm^2	20.51	-29.20
YZ 面剪應力值 kgf/cm^2	6.88	-10.97
Von Mises stress	40.23	0.0018

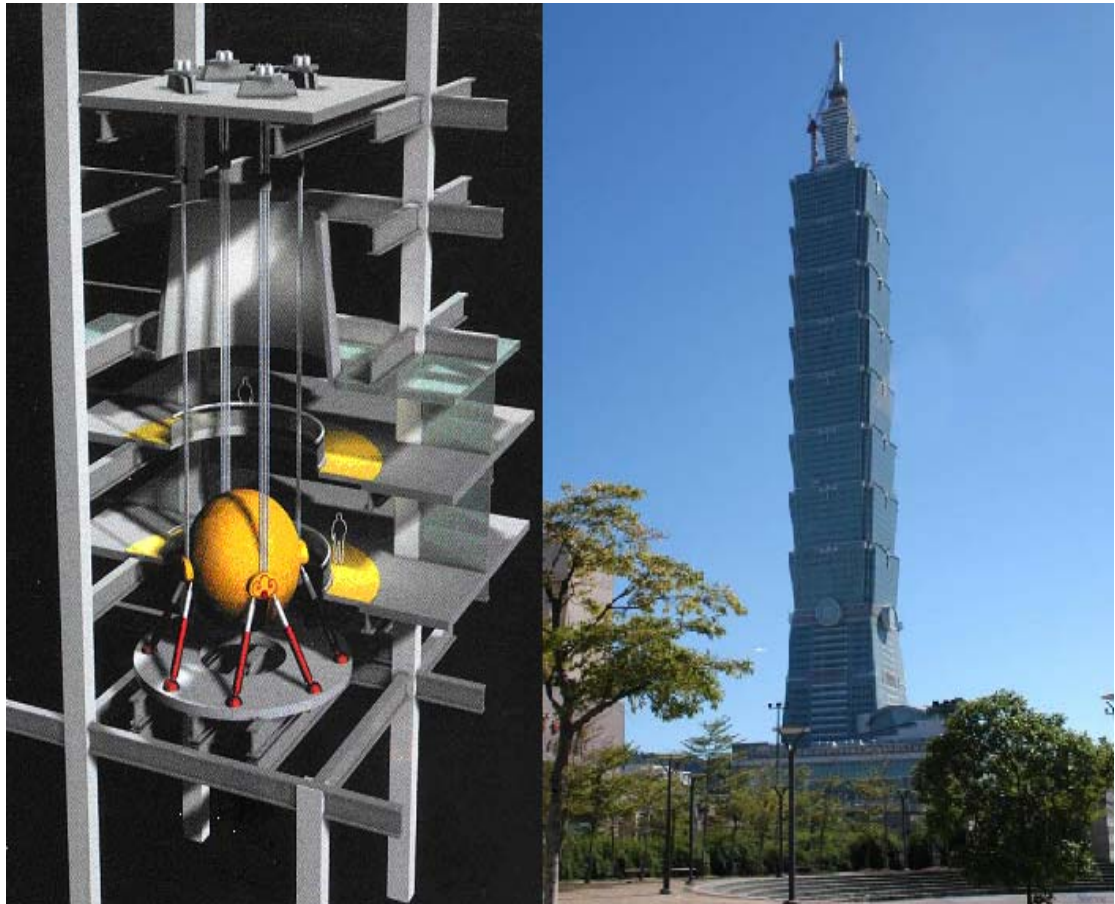


圖 1.1 台北國際金融大樓與單擺式 TMD 系統

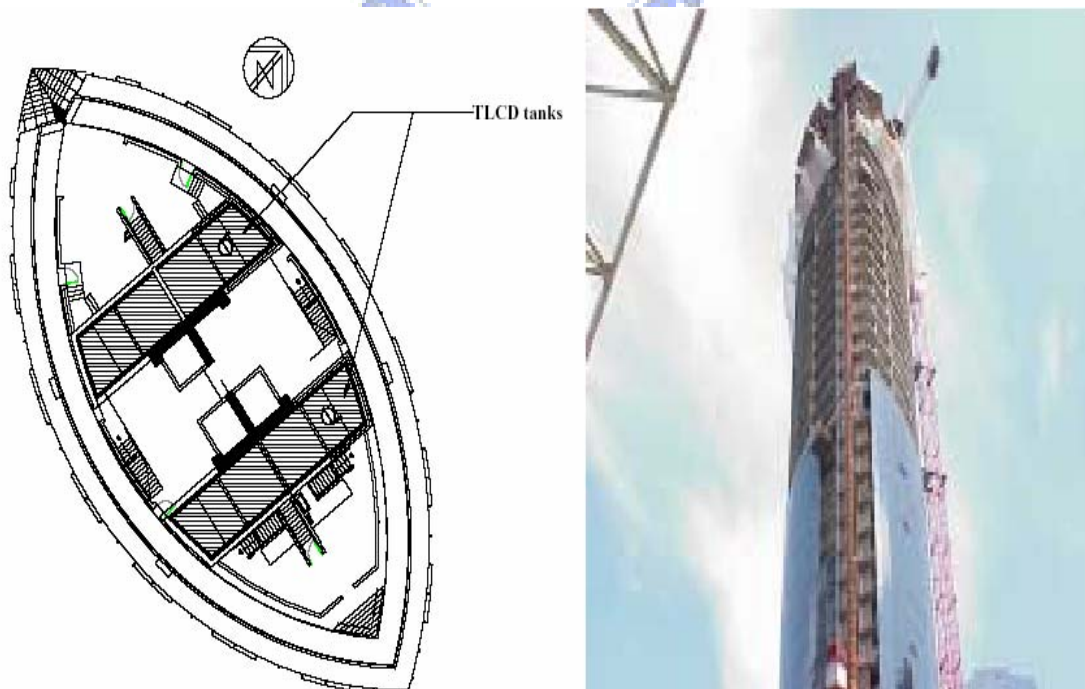


圖 1.2 TLCD 系統於加拿大 Wall center 之減振應用

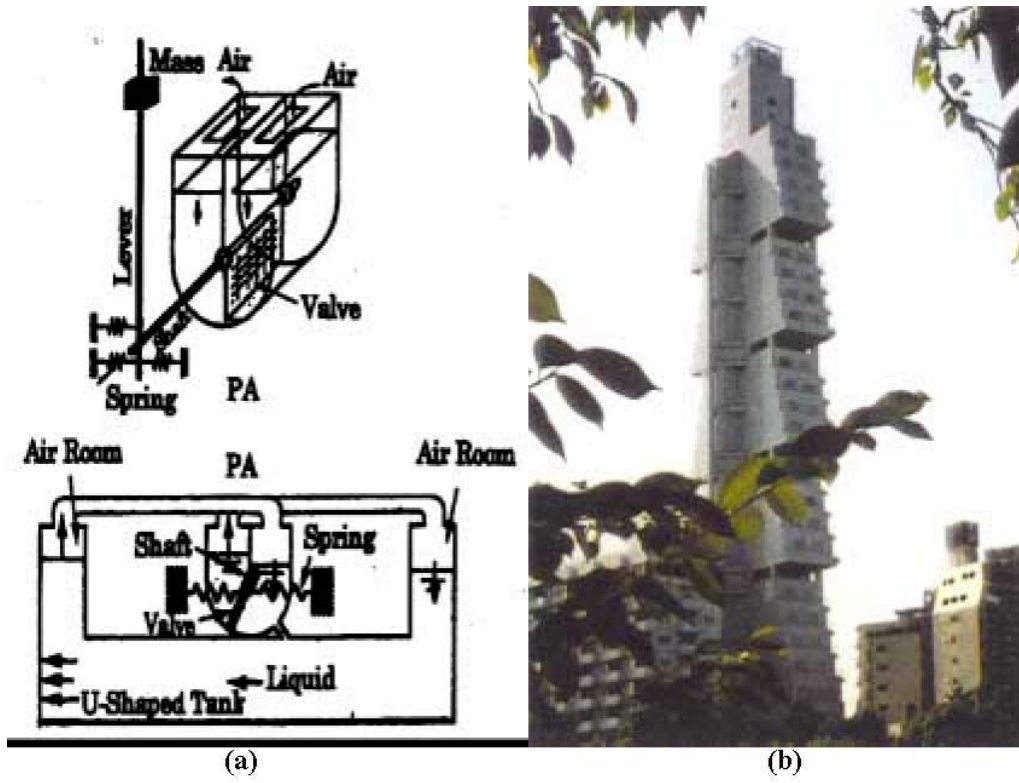


圖 1.3 TLCD 系統於東京 Cosima 旅館之減振應用

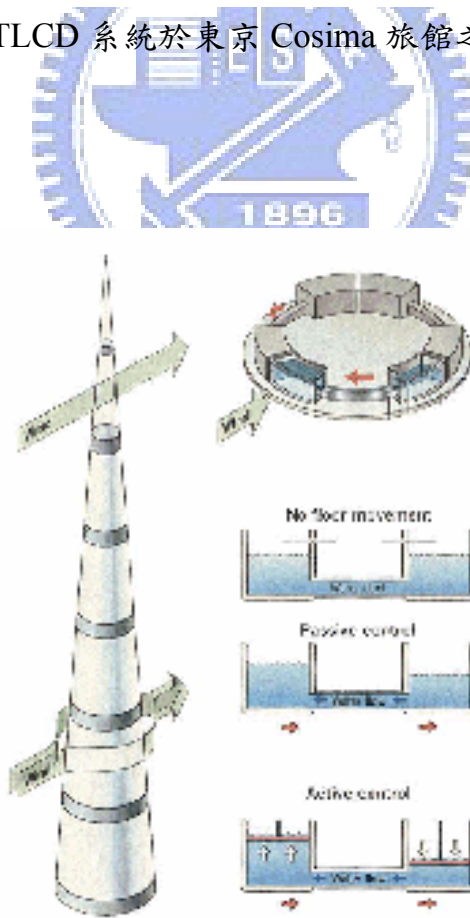


圖 1.4 TLCD 系統於東京千禧塔之減振應用

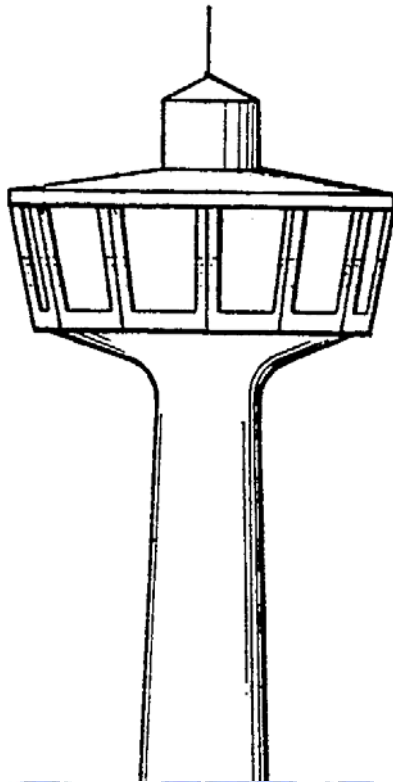


圖 1.5 TLCD 系統於高塔之減振應用

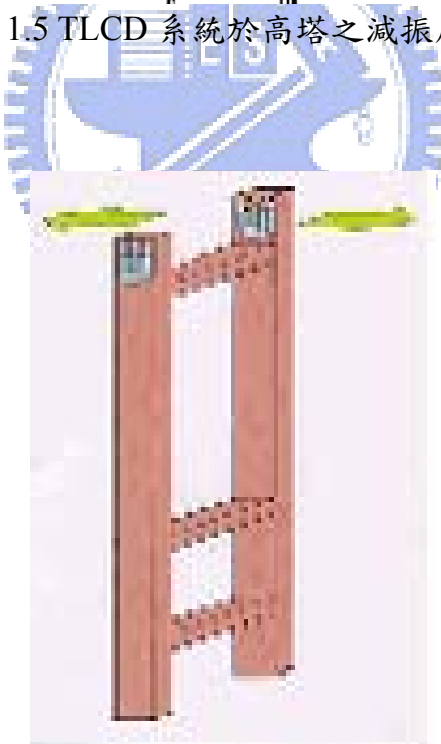


圖 1.6 U 形 TLCD 系統於橋塔之減振應用

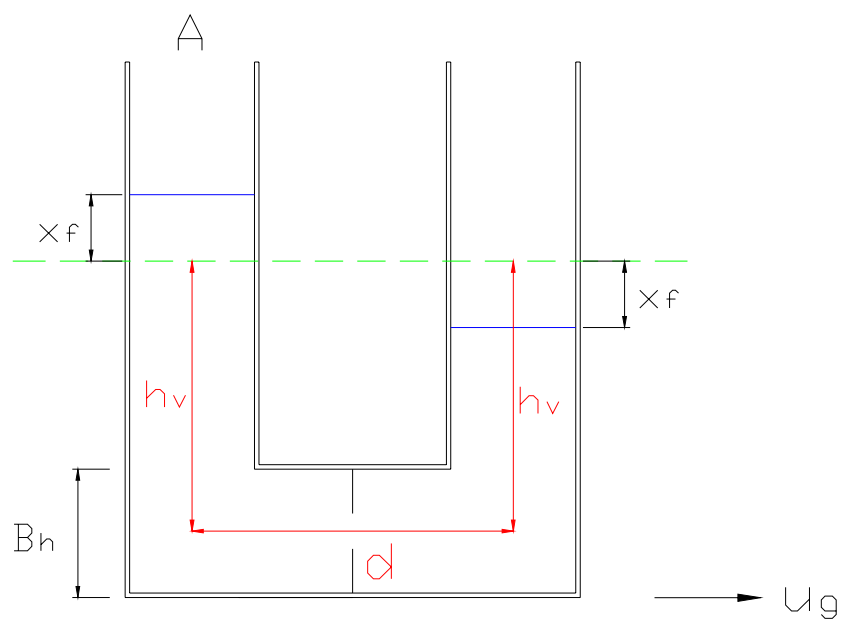


圖 2.1 等斷面 TLCD 理論推導示意圖

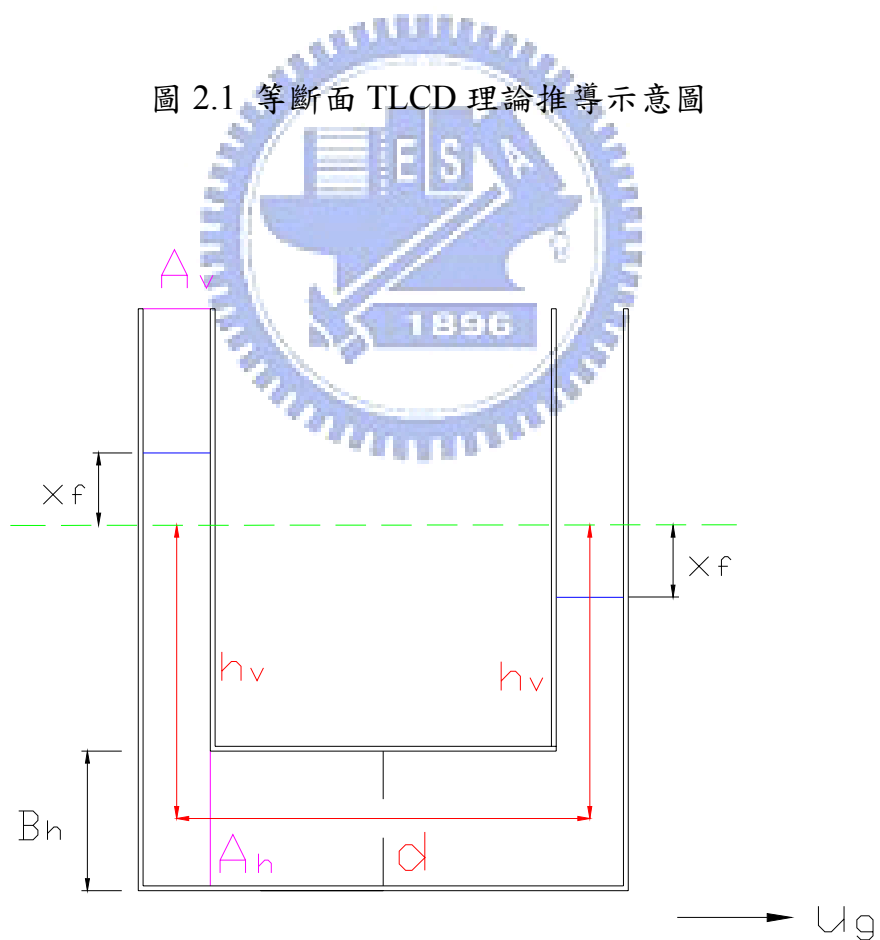
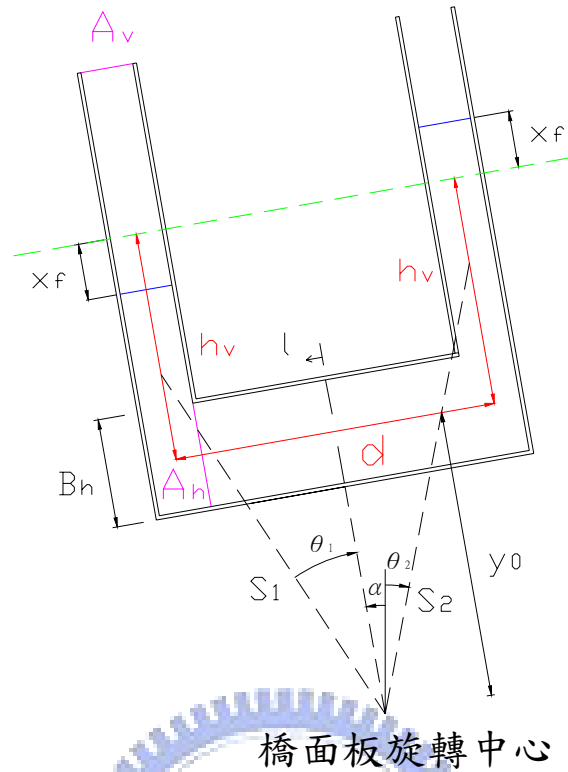


圖 2.2 變斷面 VTLCD 理論推導示意圖



橋面板旋轉中心

圖 2.3 旋轉向 VTLCD 理論推導示意圖

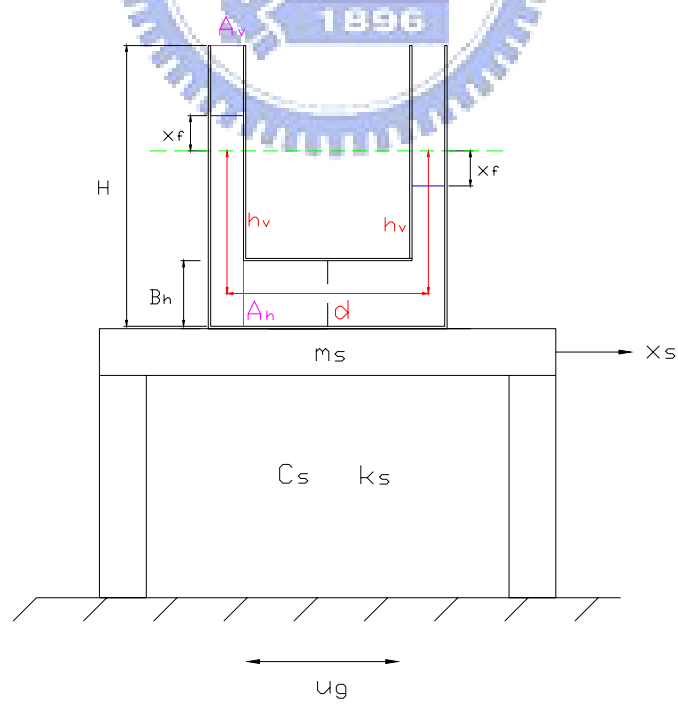
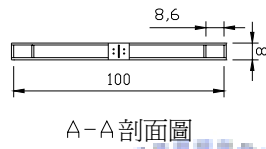
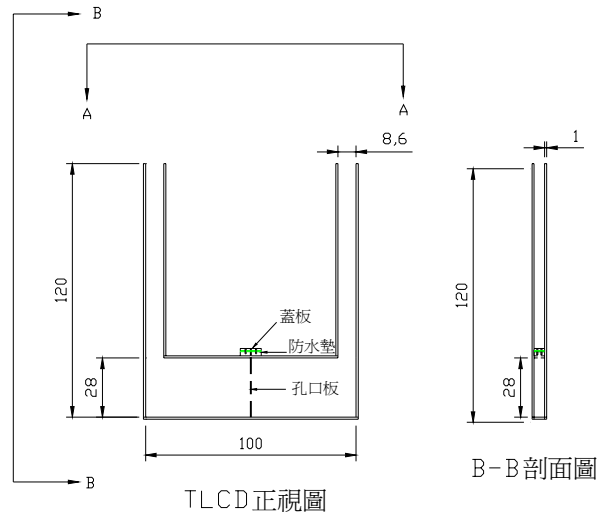
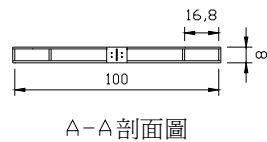
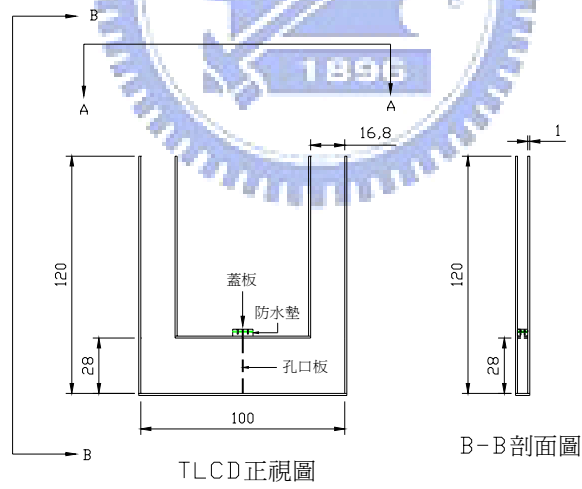


圖 2.4 單自由度結構裝置變斷面 VTLCD 理論推導示意圖



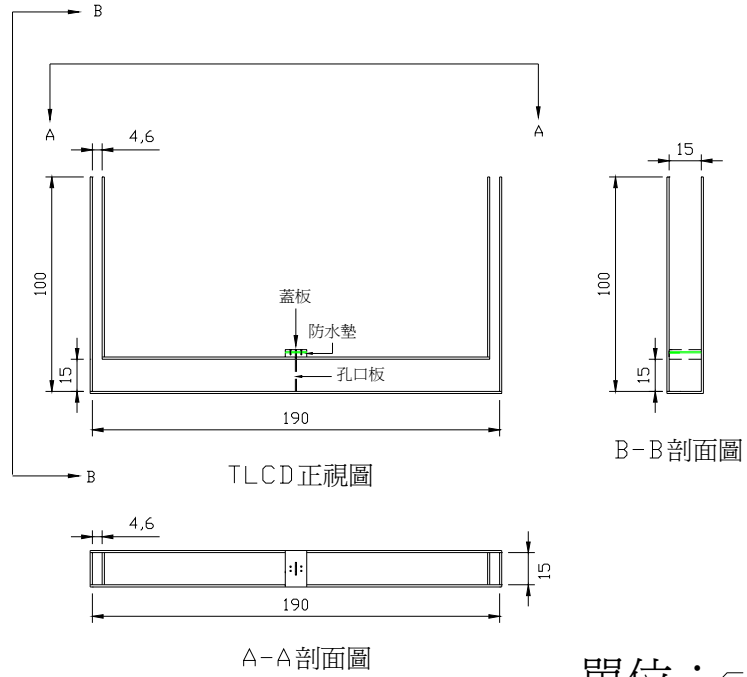
單位：cm

圖 3.1 VTLCD 元件設計詳圖(小尺寸, $\beta = 0.31$)



單位：cm

圖 3.2 VTLCD 元件設計詳圖(小尺寸, $\beta = 0.6$)



單位：cm

圖 3.3 VTLCD 元件設計詳圖(大尺寸, $\beta = 0.31$)

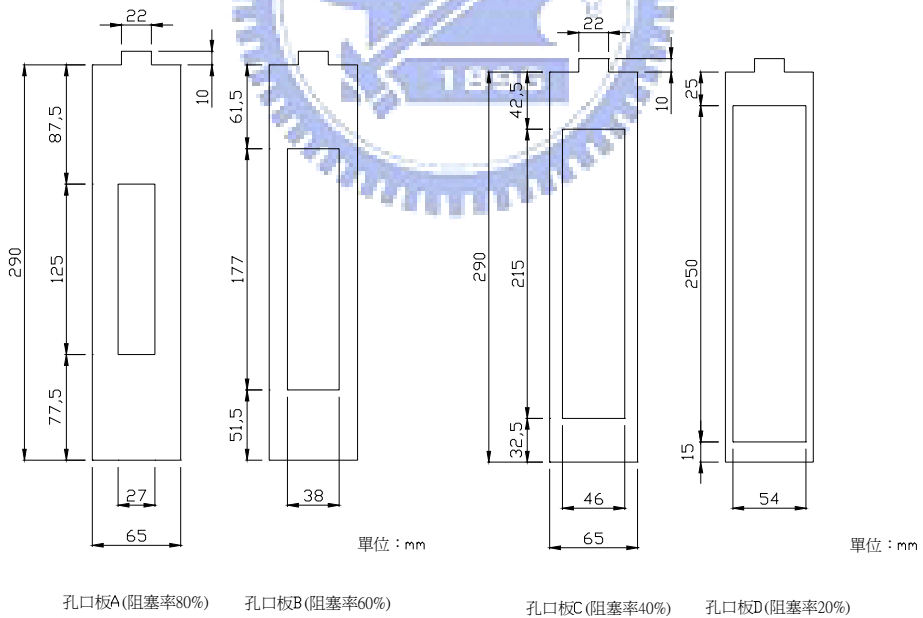


圖 3.4 孔口板設計詳圖

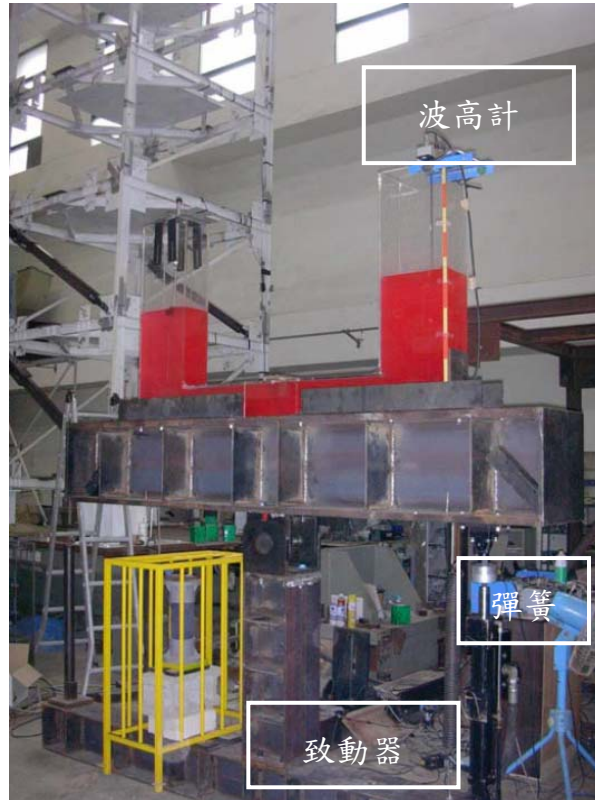
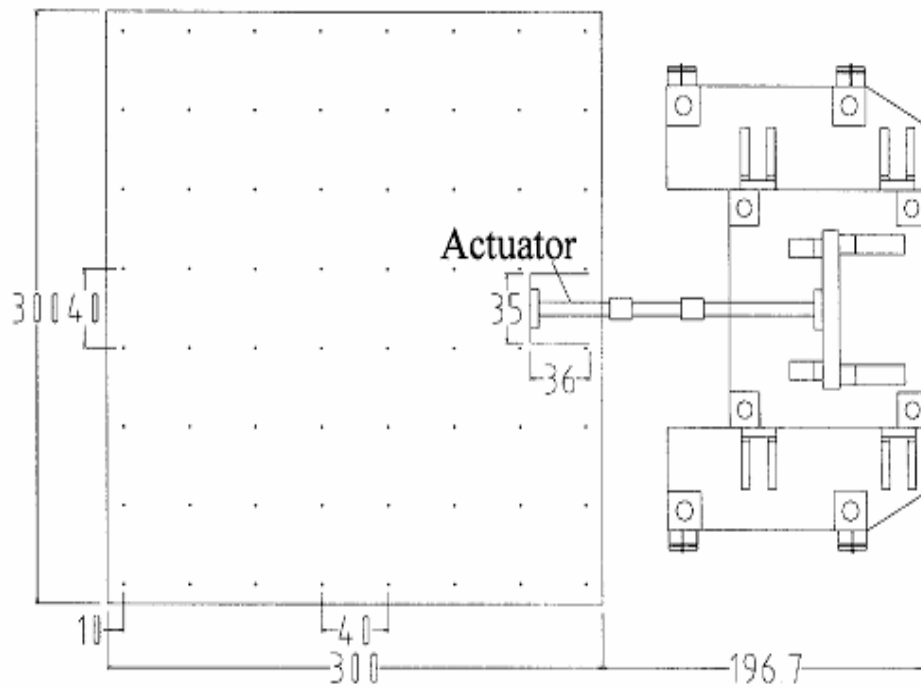
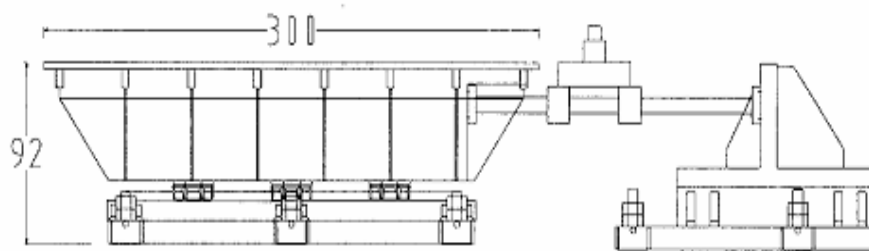


圖 3.5 VTLCD 旋轉運動試驗配置圖





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 3.6 振動台之設計尺寸詳圖



圖 3.7 MTS 407 控制器



圖 3.8 雷射位移計

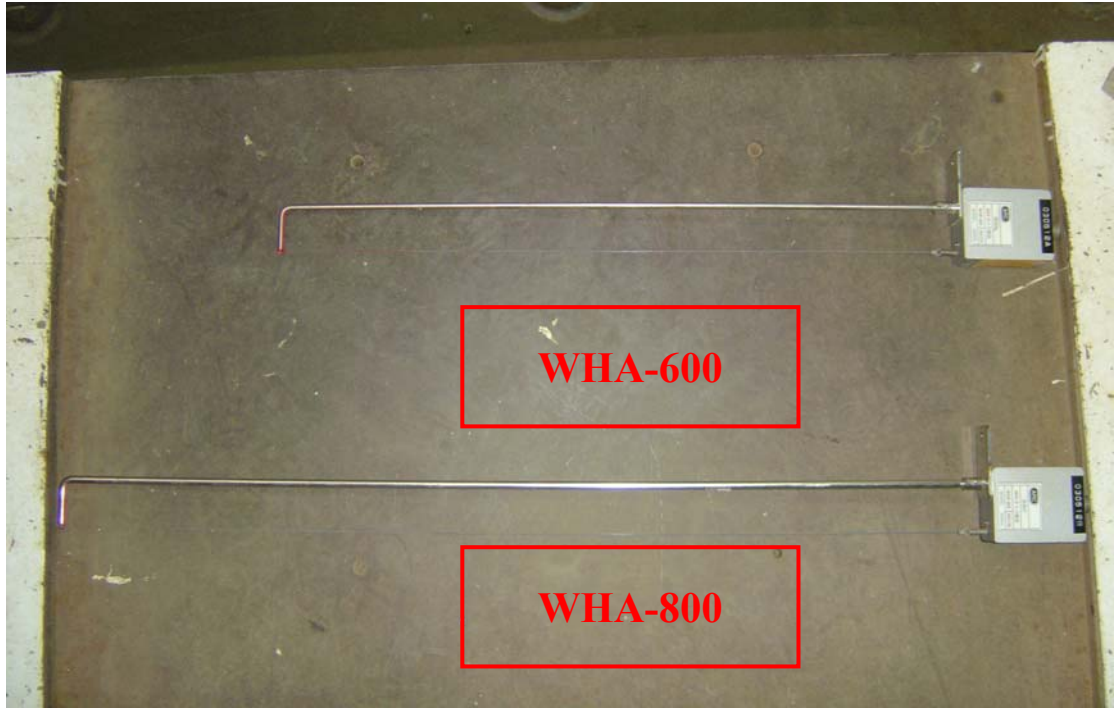


圖 3.9 波高計(WHA-600 和 WHA-800)



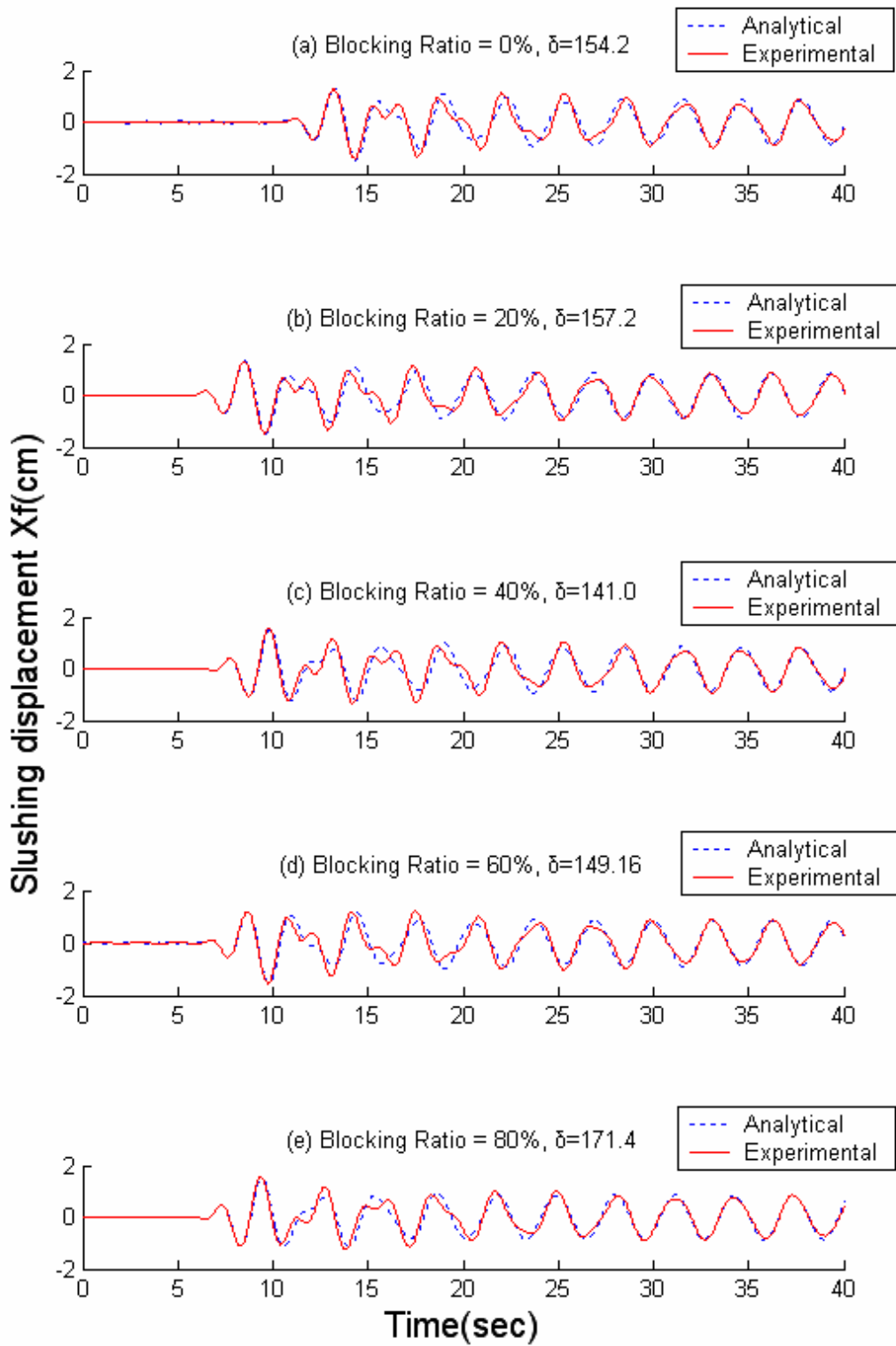


圖 3.10(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)

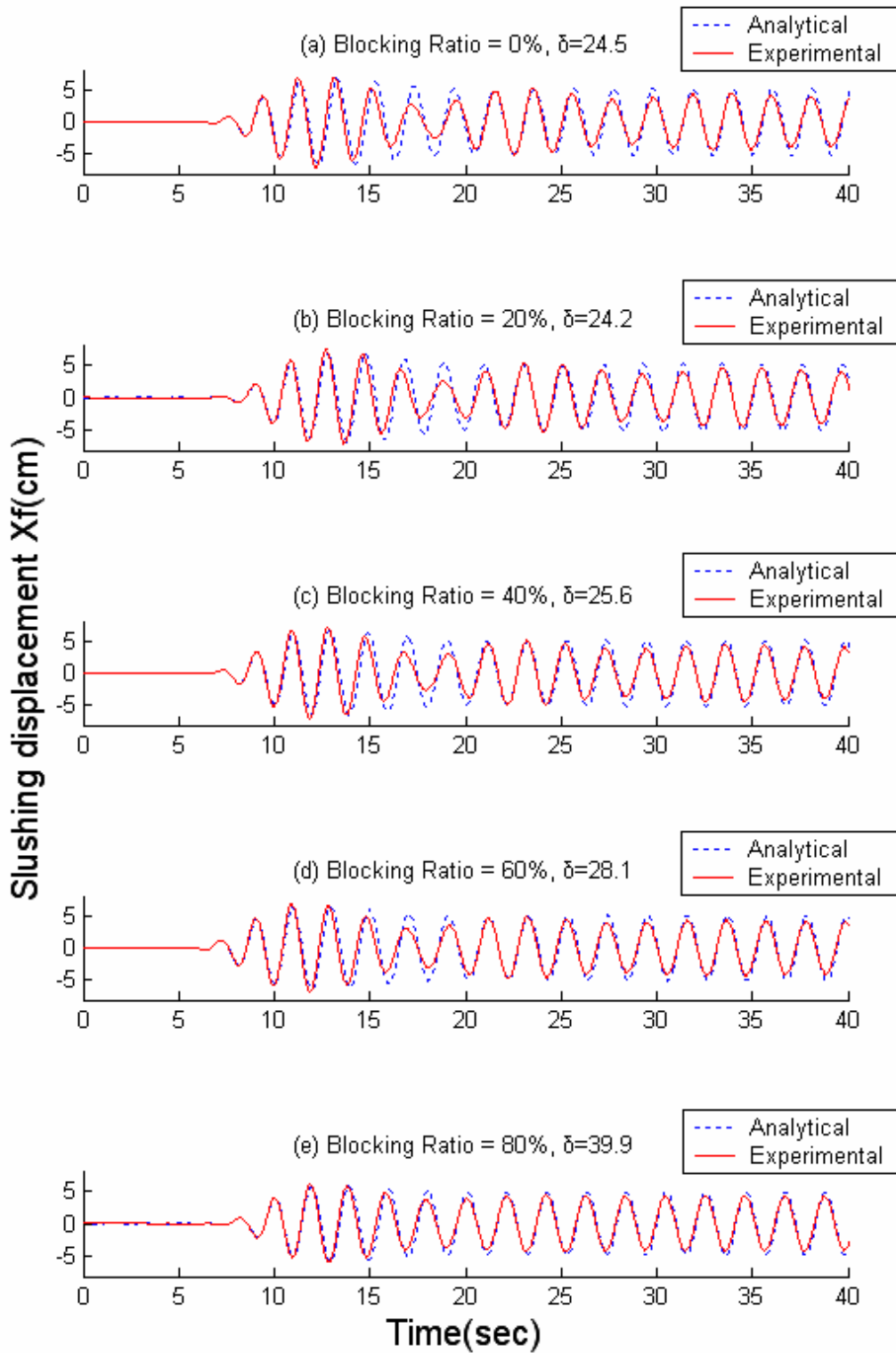


圖 3.10(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)

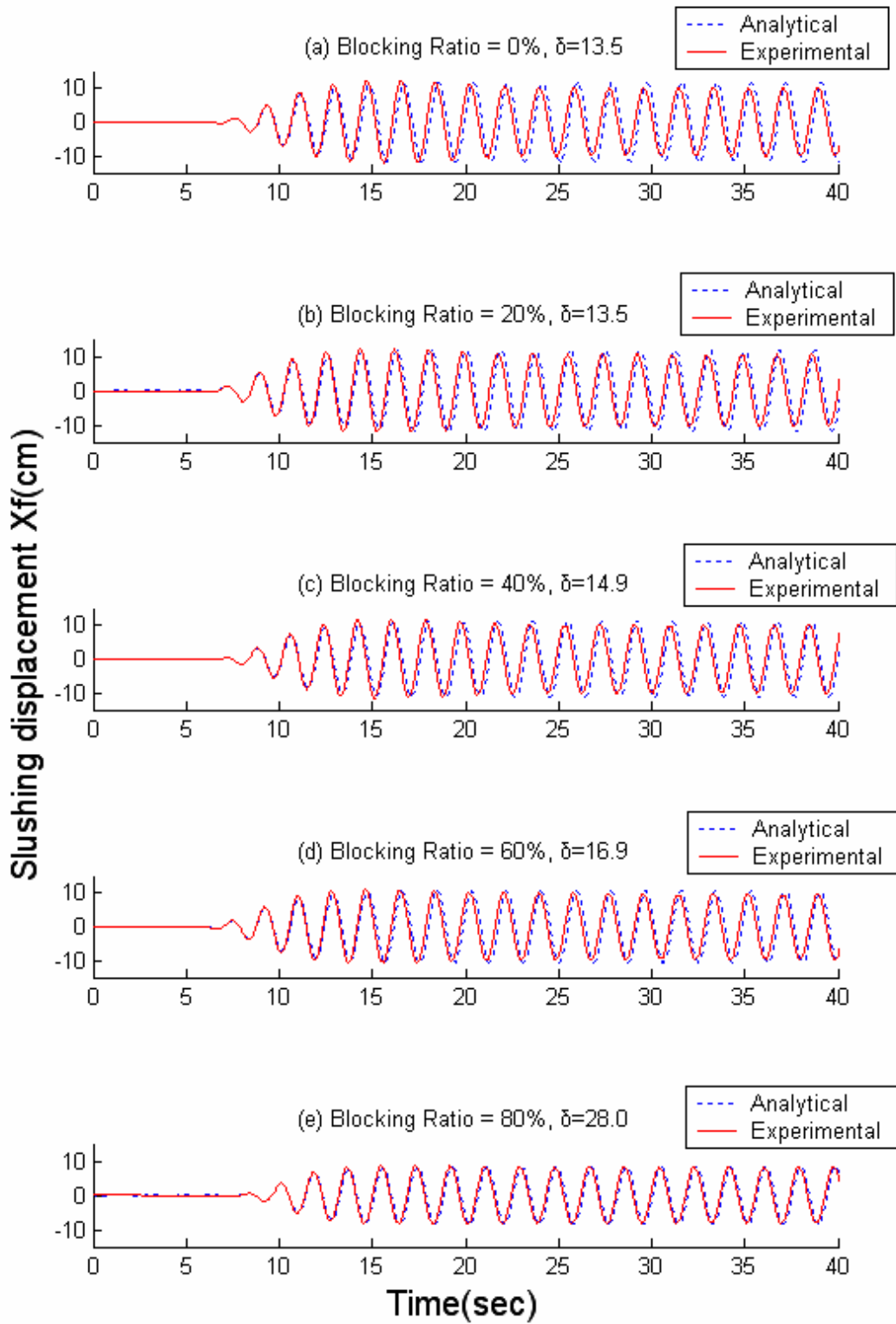


圖 3.10(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)

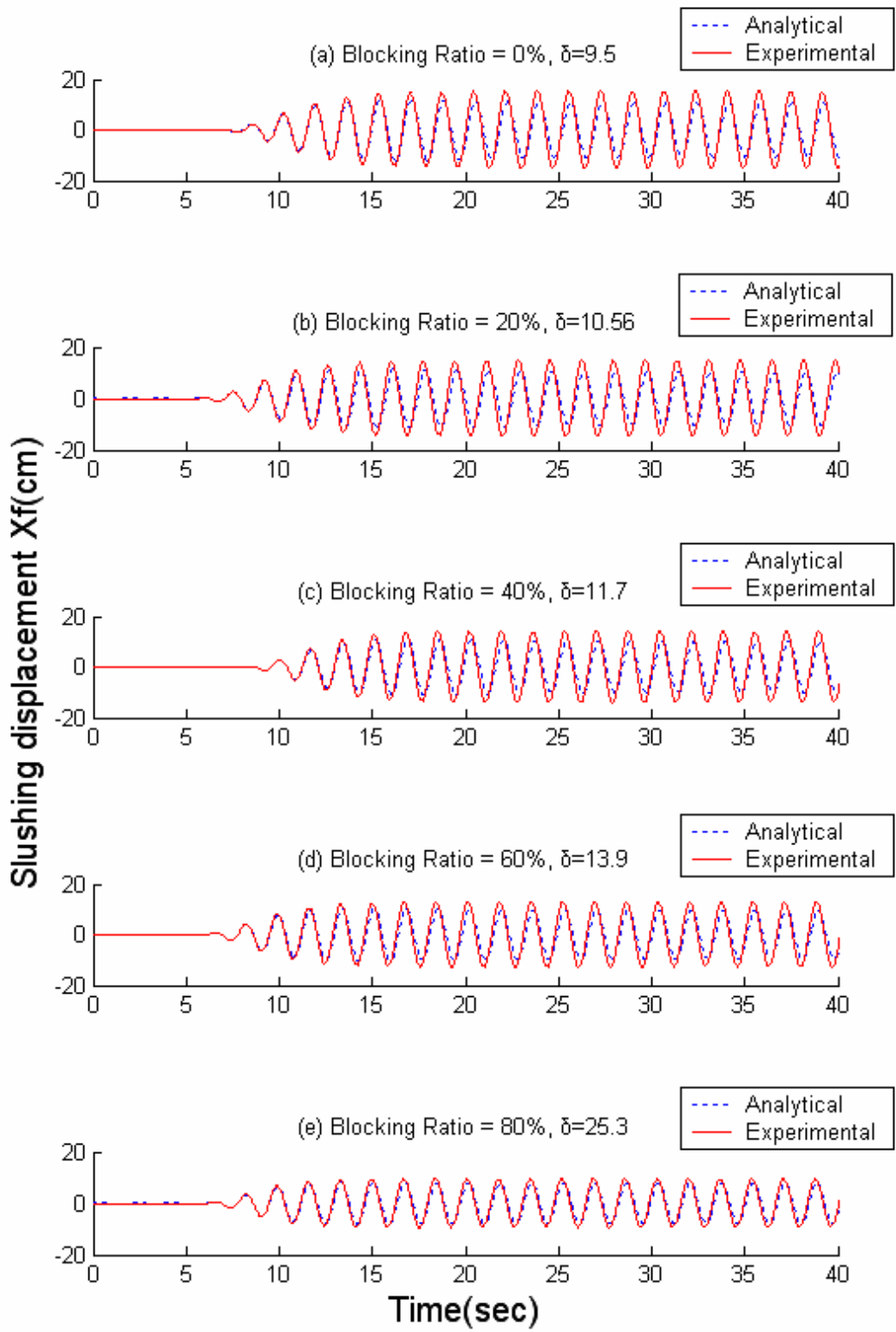


圖 3.10(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)

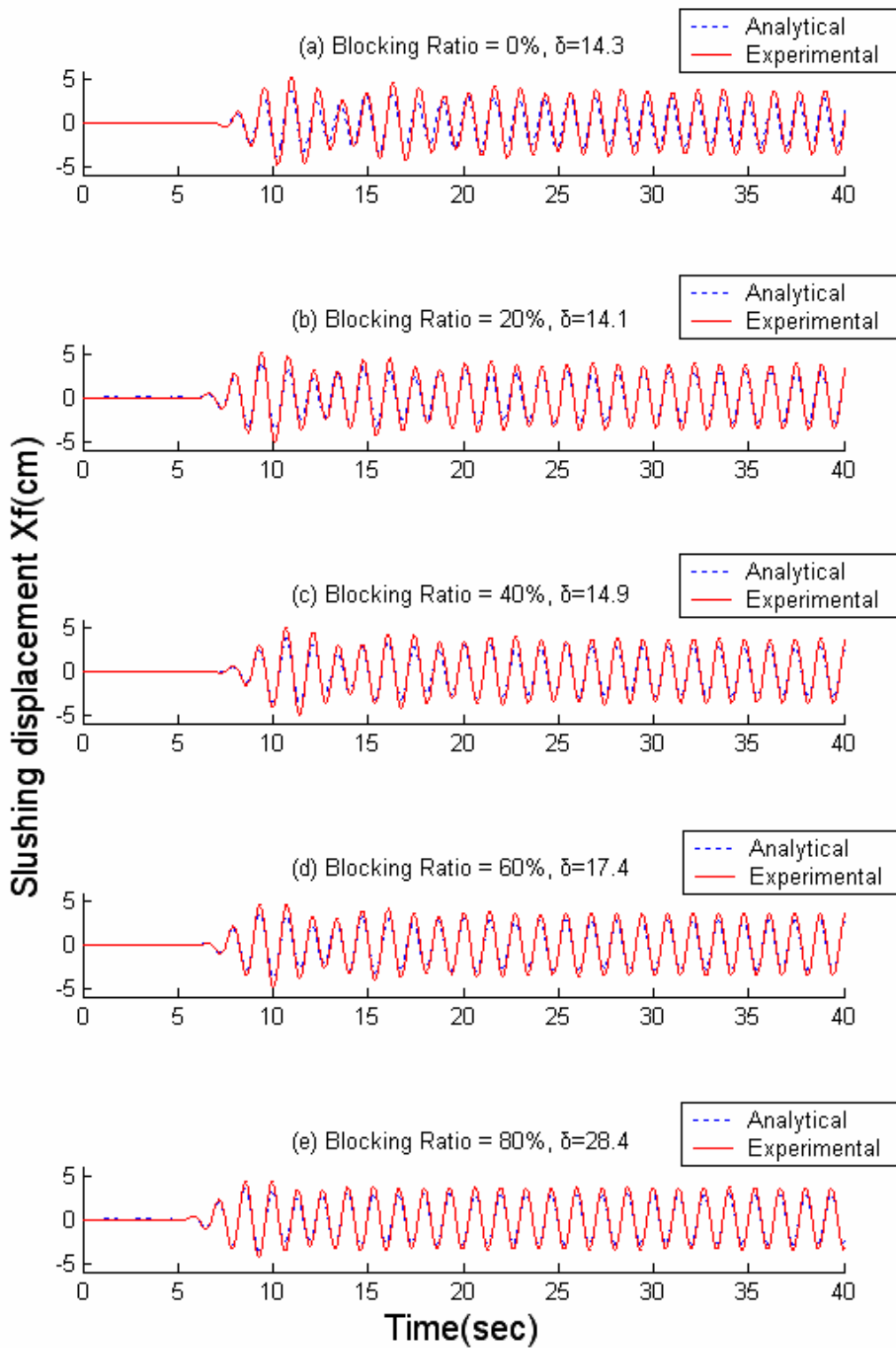


圖 3.10(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)

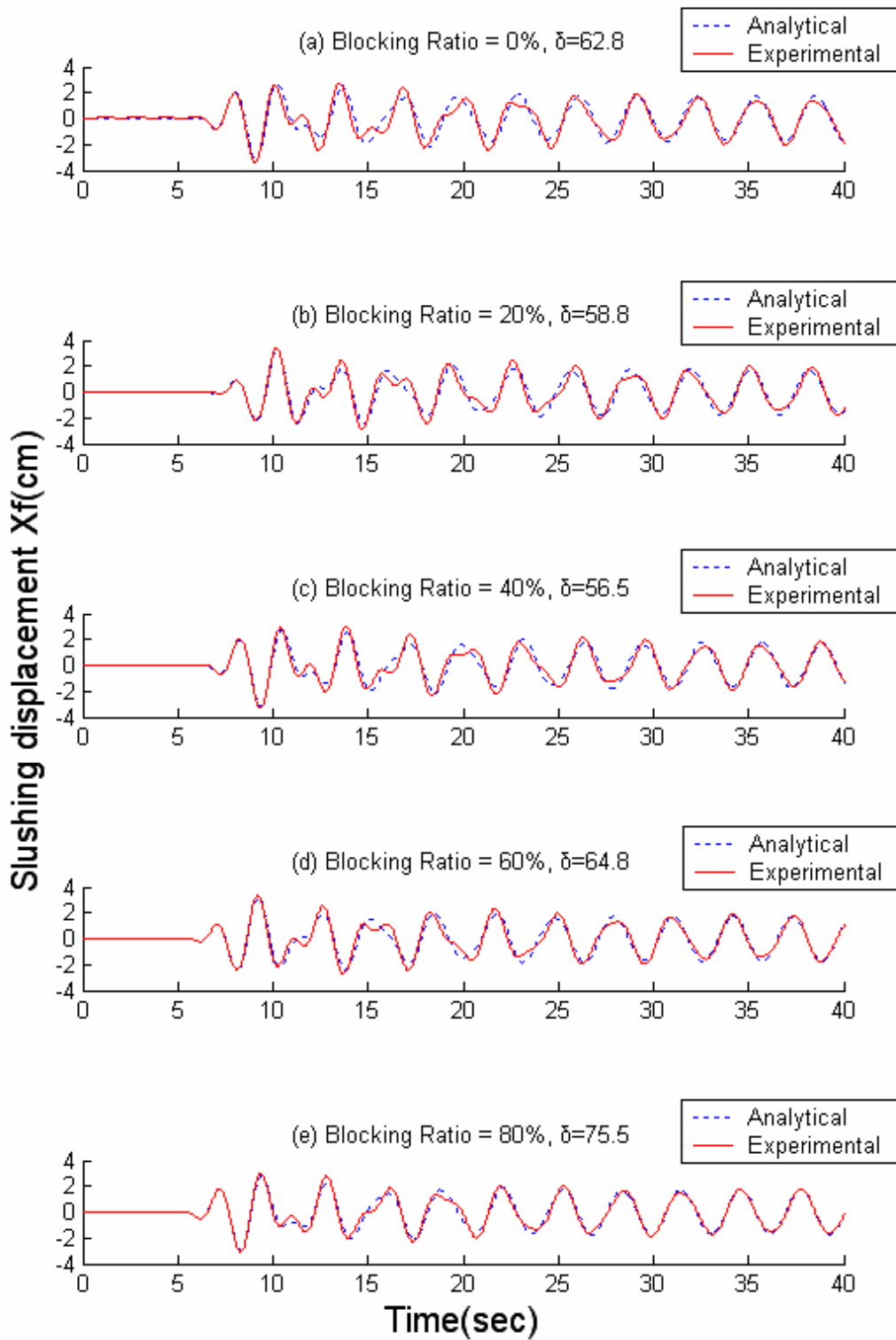


圖 3.11(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)

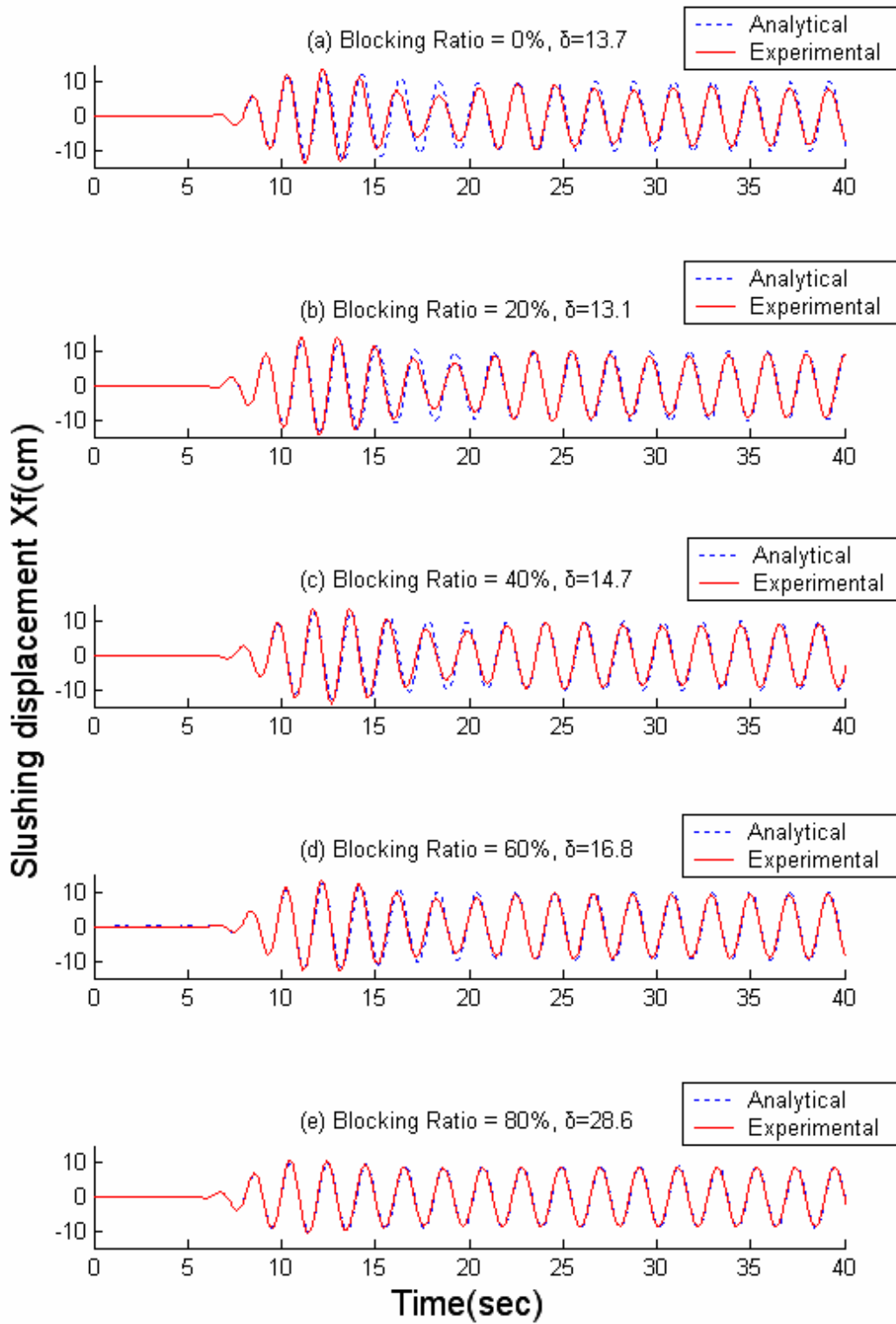


圖 3.11(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)

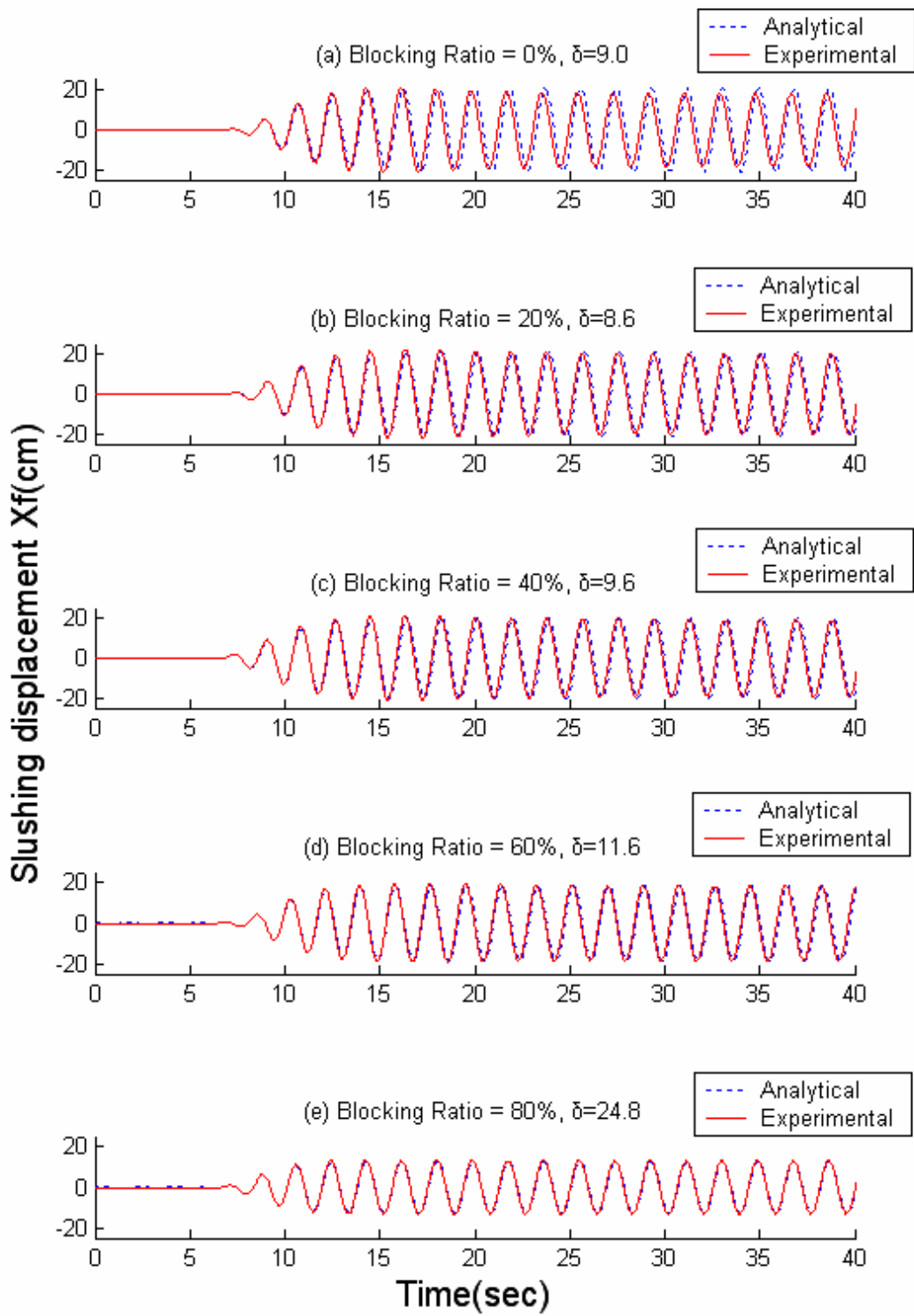


圖 3.11(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)

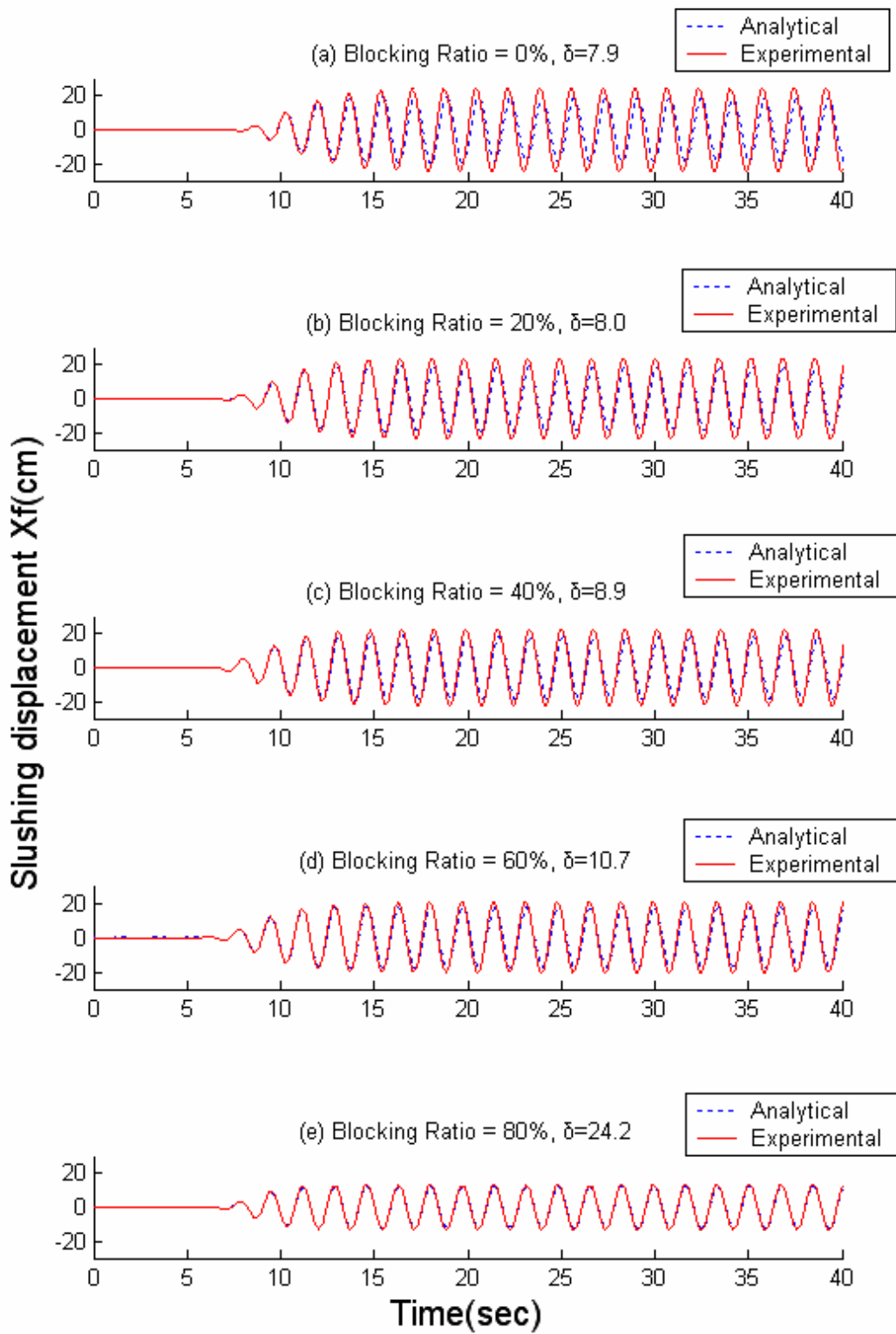


圖 3.11(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)

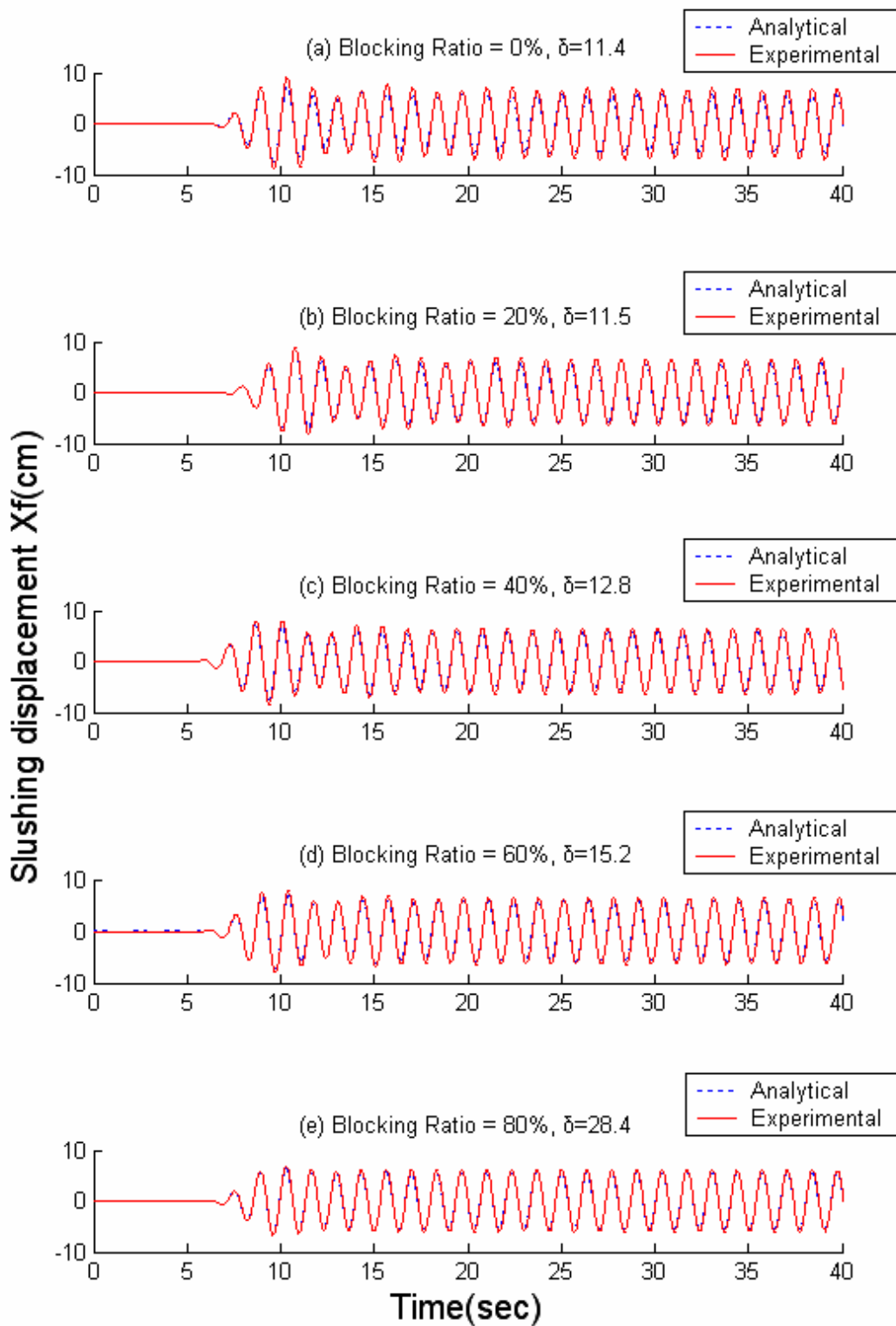


圖 3.11(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)

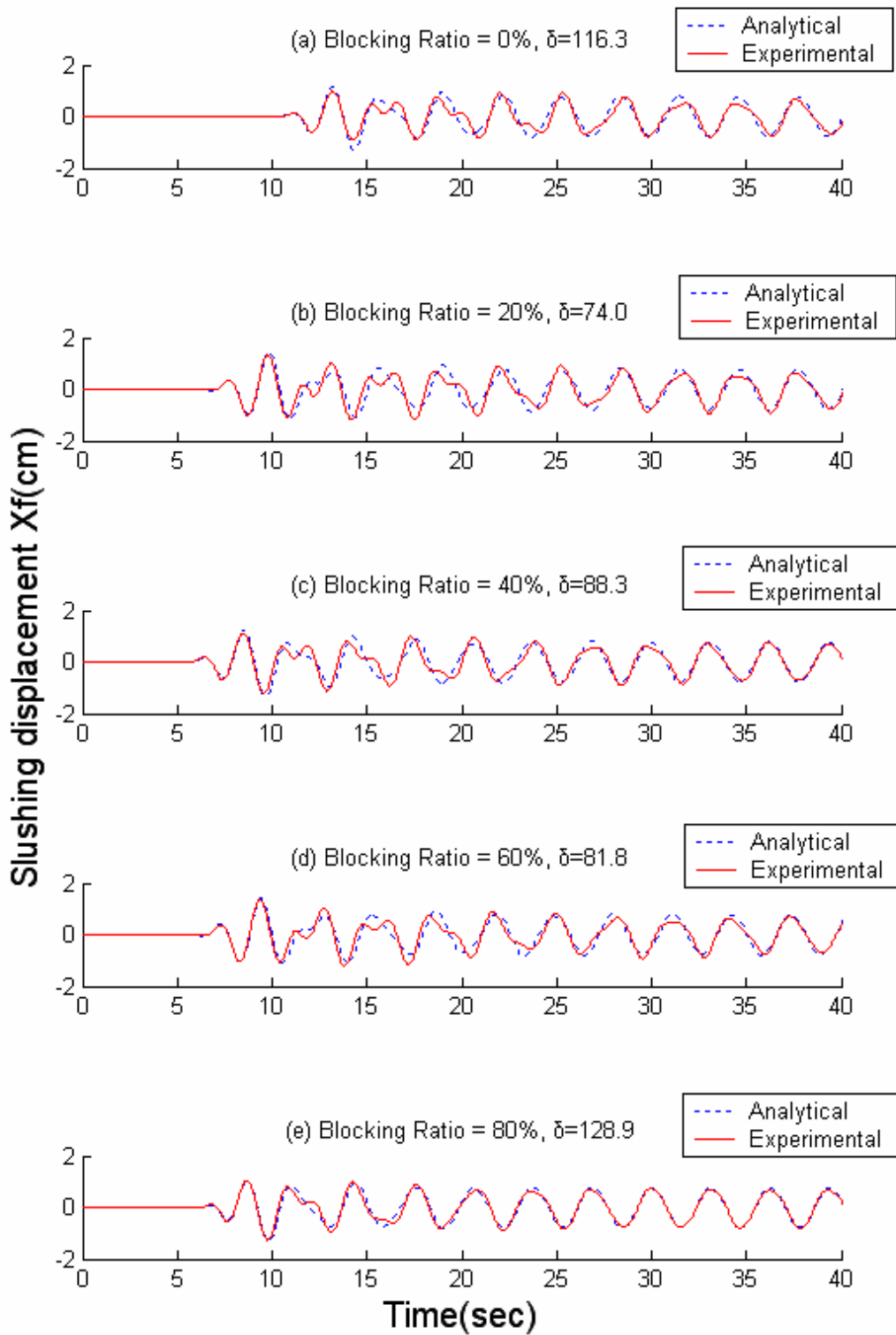


圖 3.12(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=0.6$)

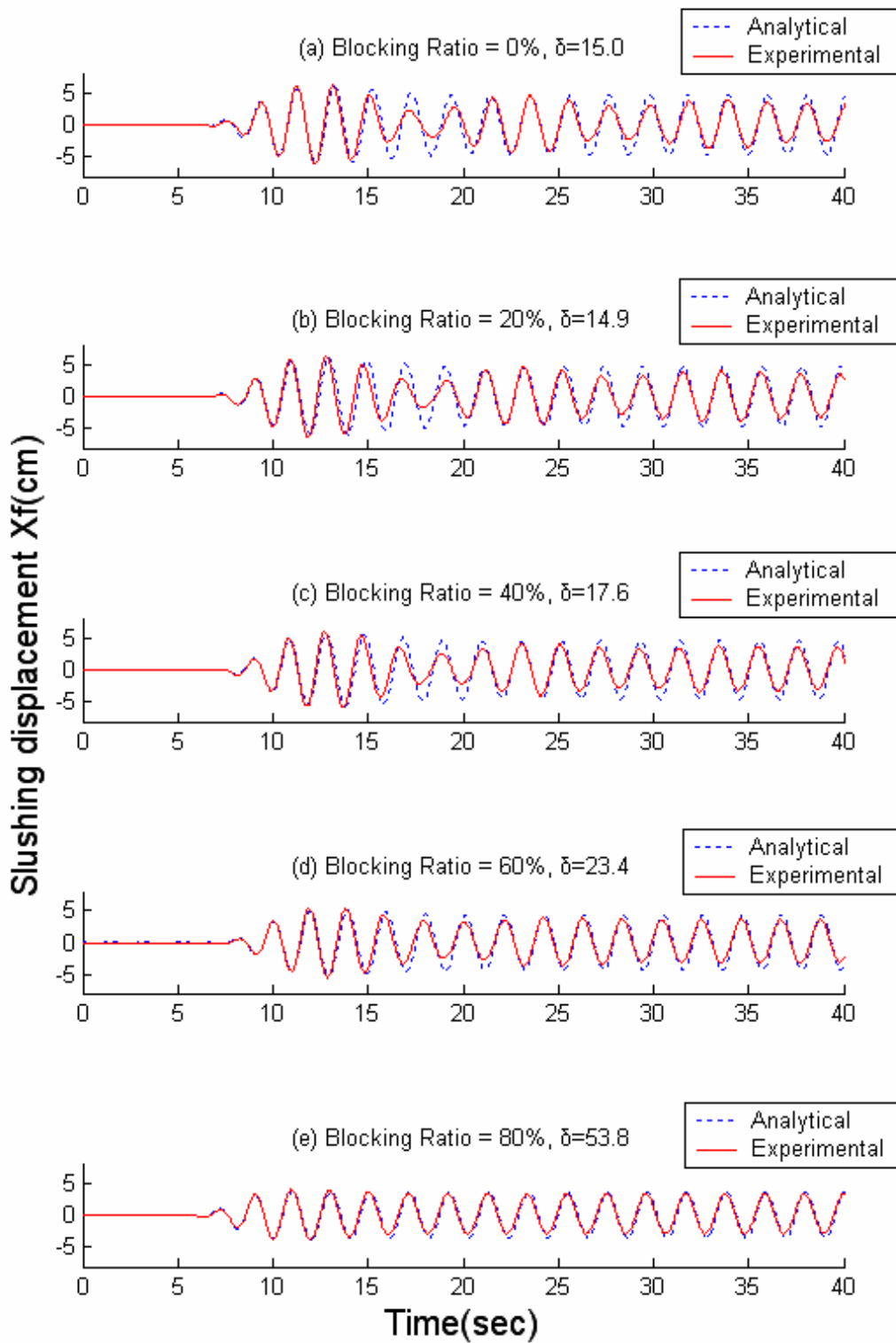


圖 3.12(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=0.6$)

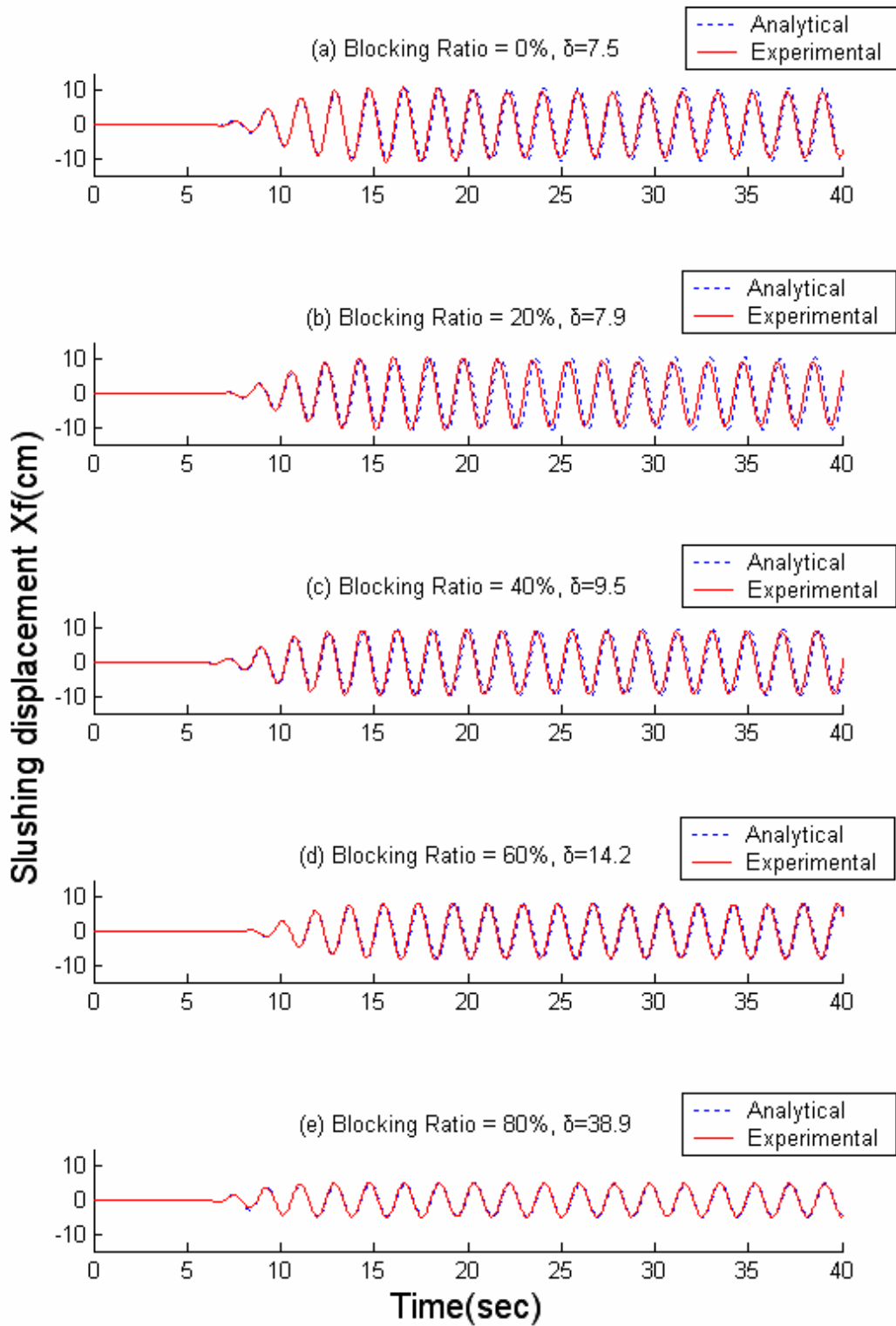


圖 3.12(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=0.6$)

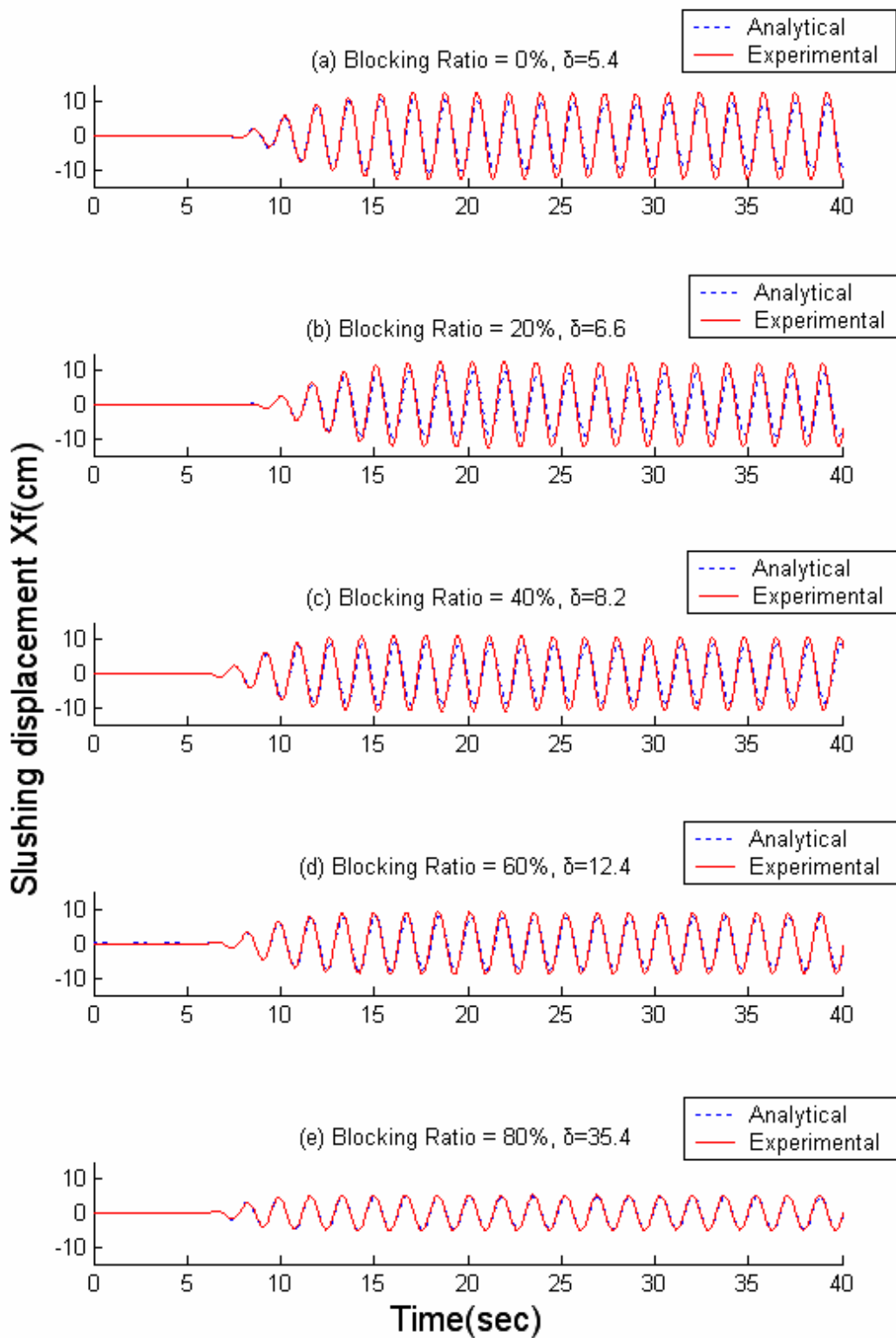


圖 3.12(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=0.6$)

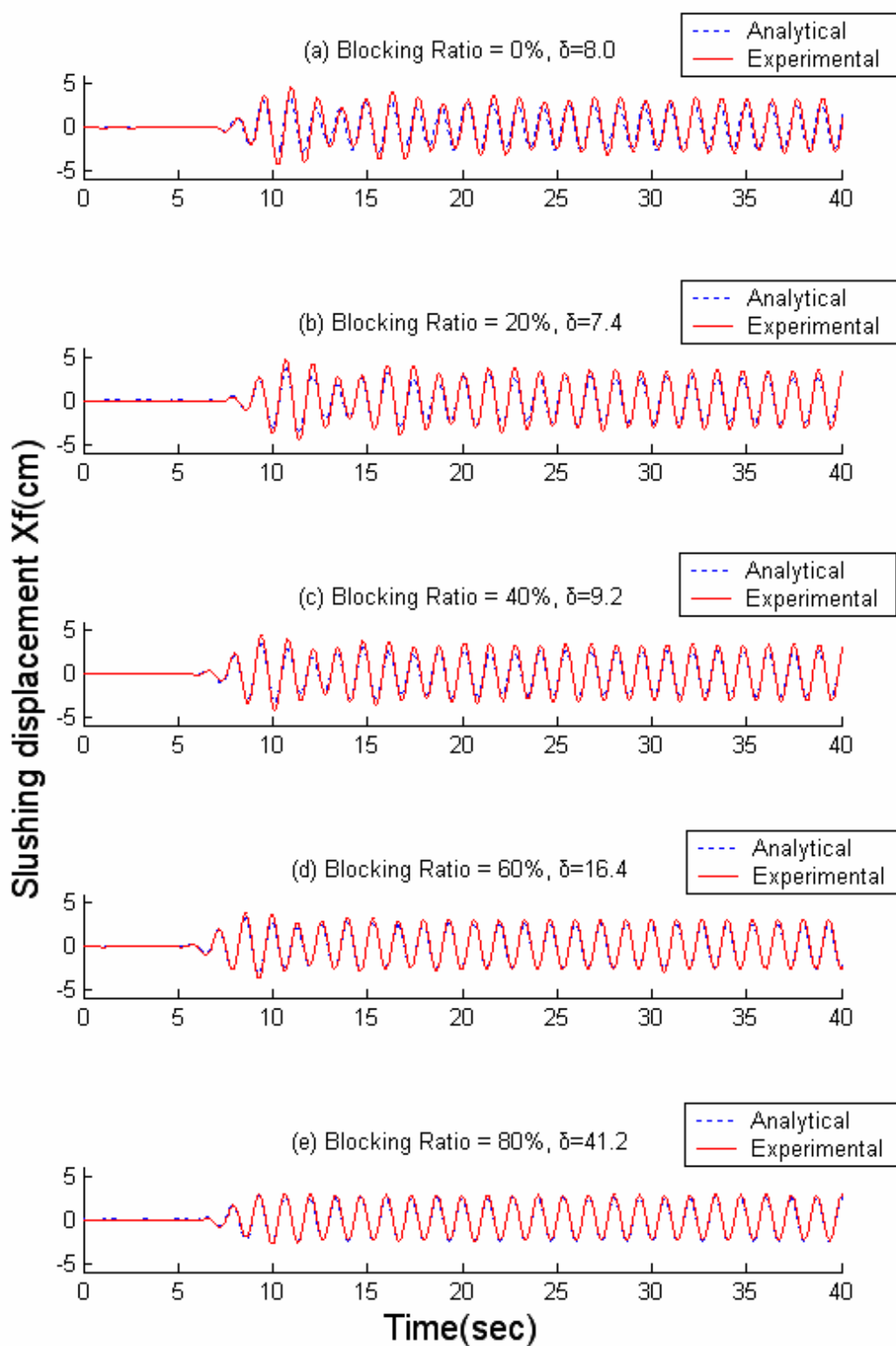


圖 3.12(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=0.6$)

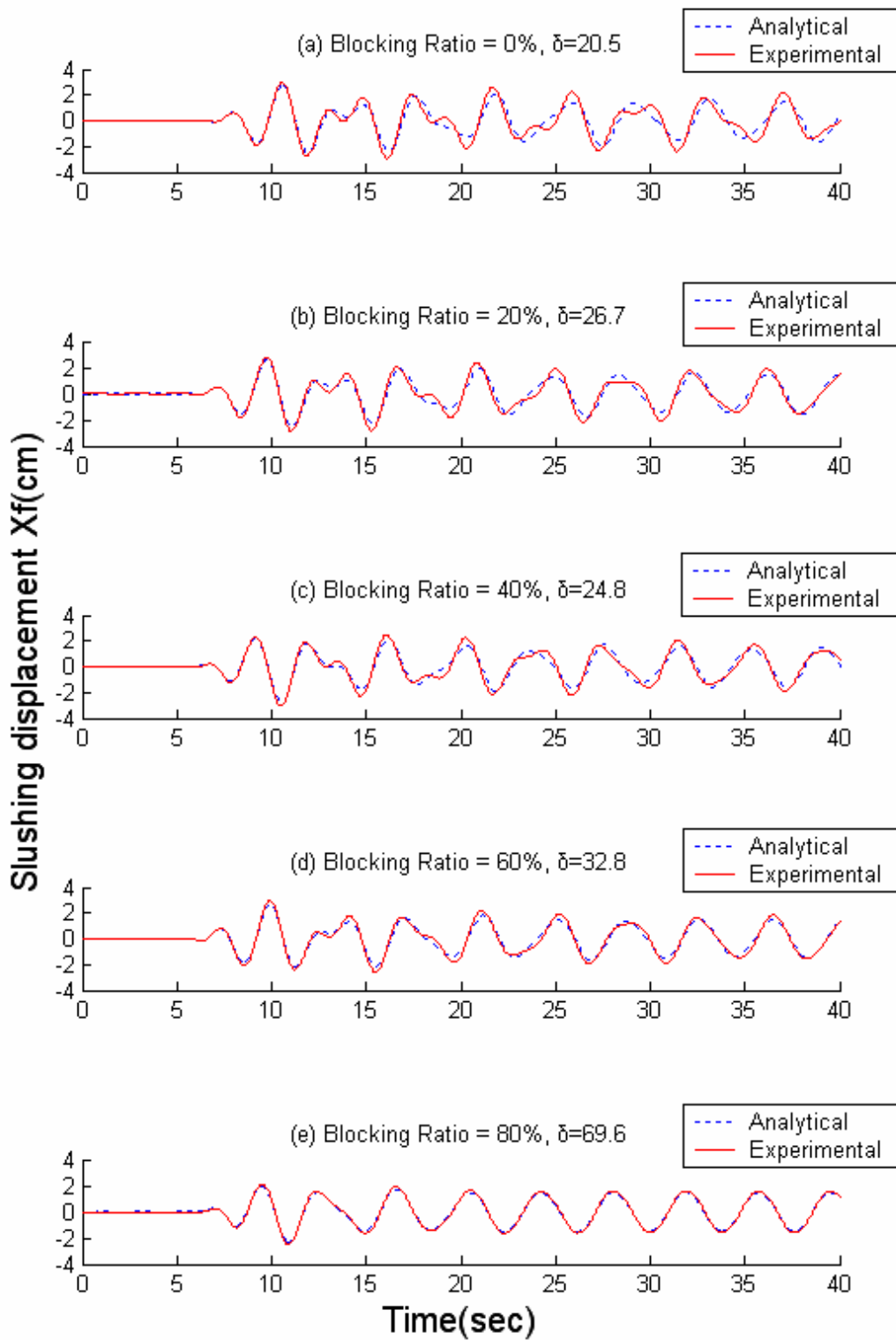


圖 3.13(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)

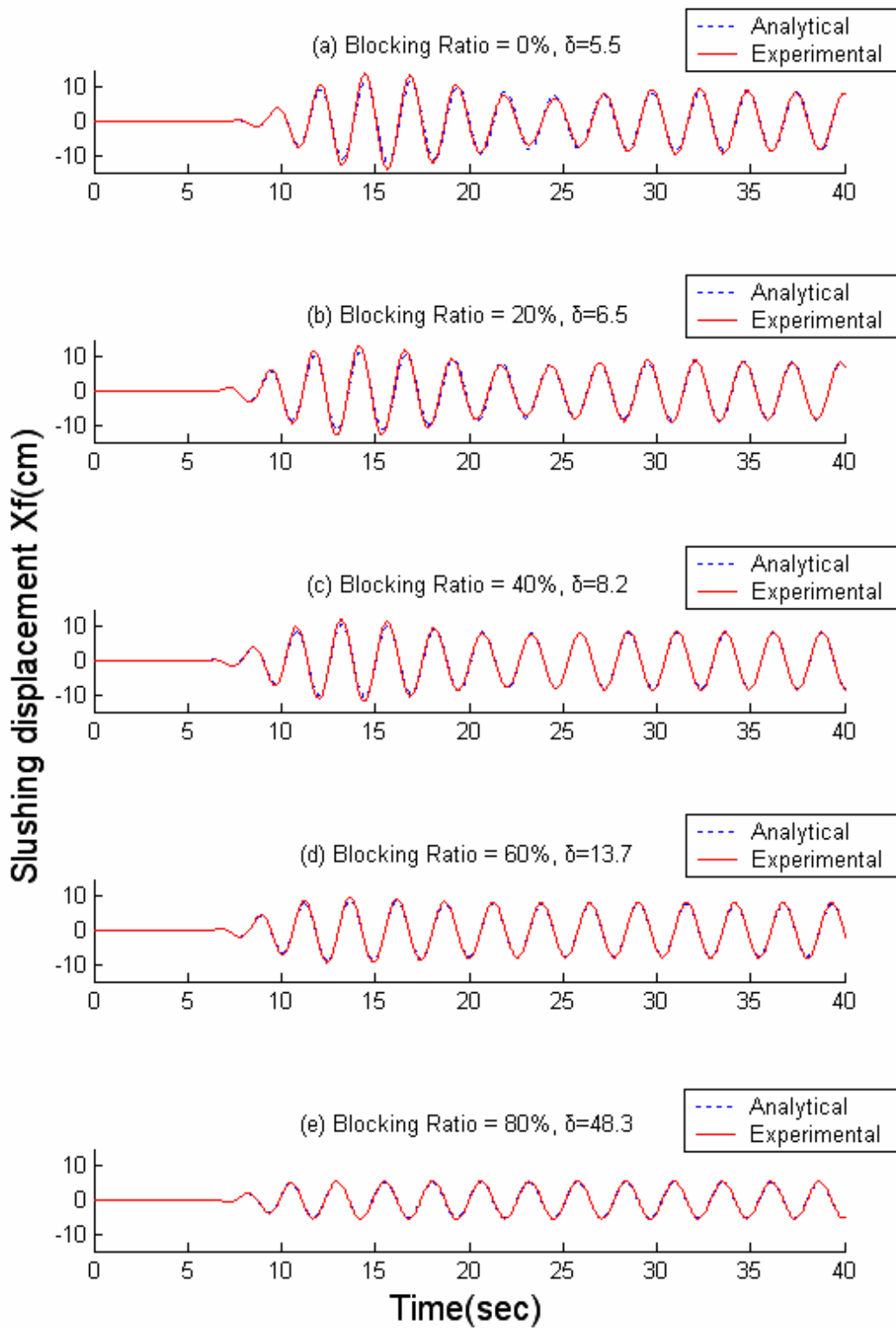


圖 3.13(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)

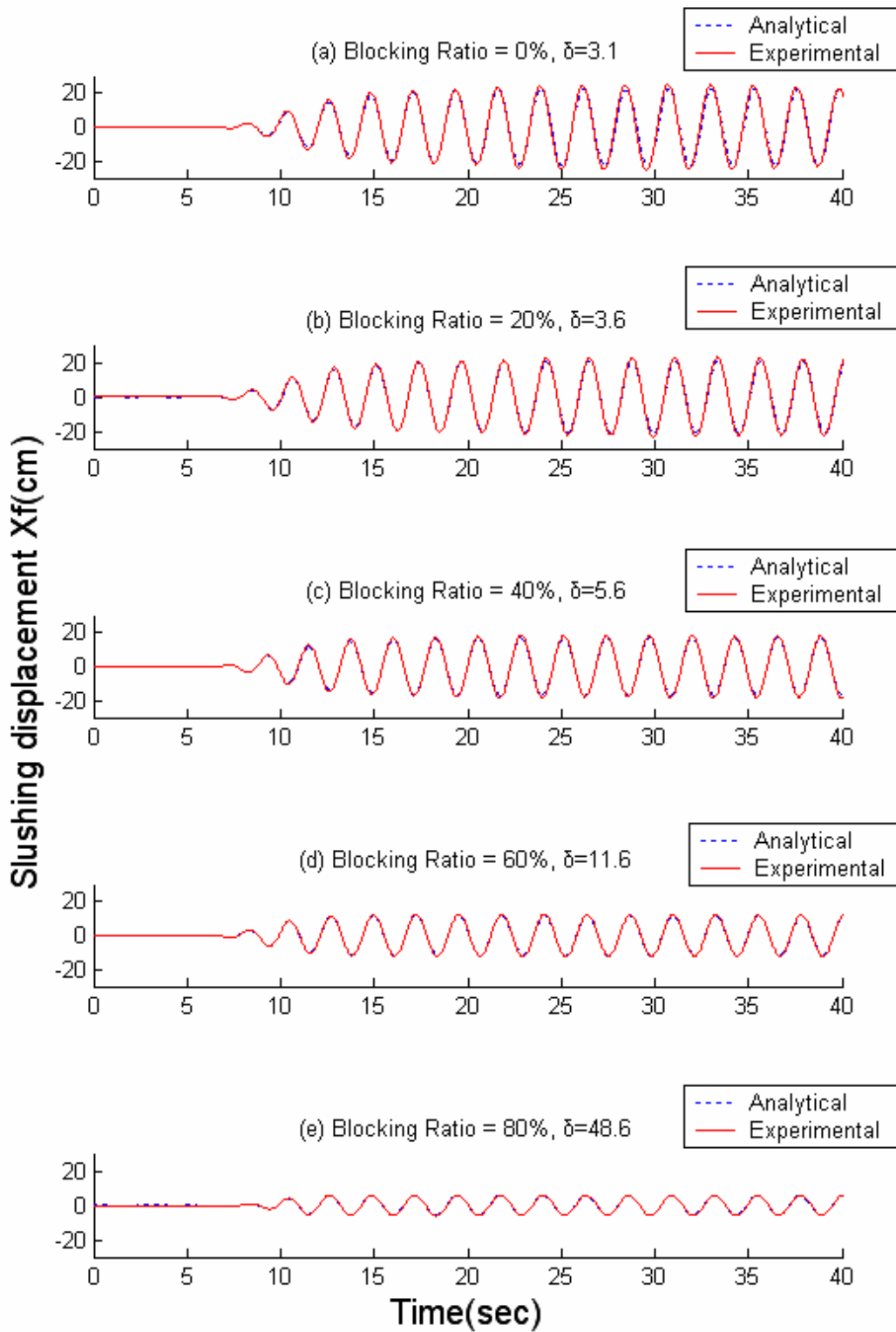


圖 3.13(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)

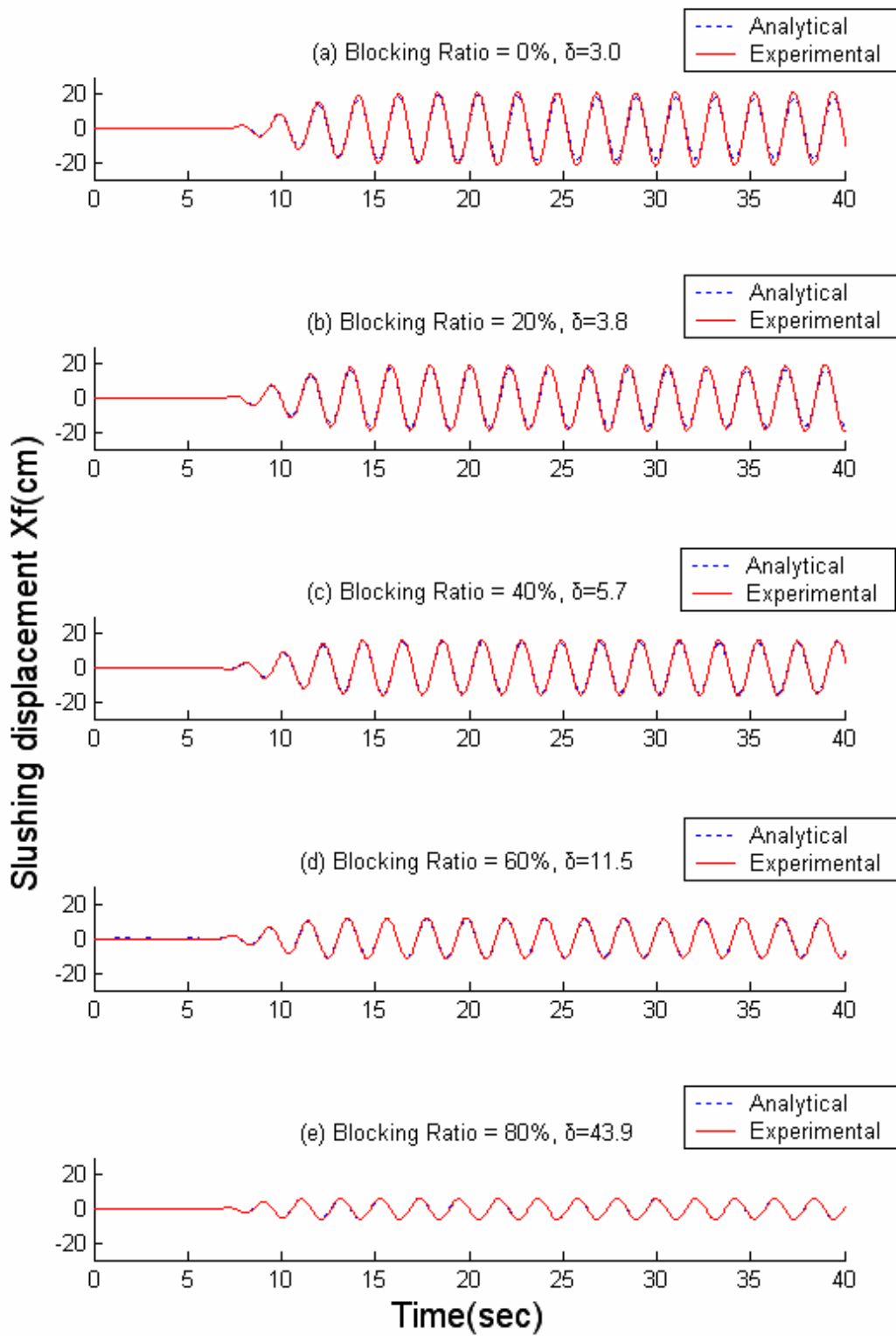


圖 3.13(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)

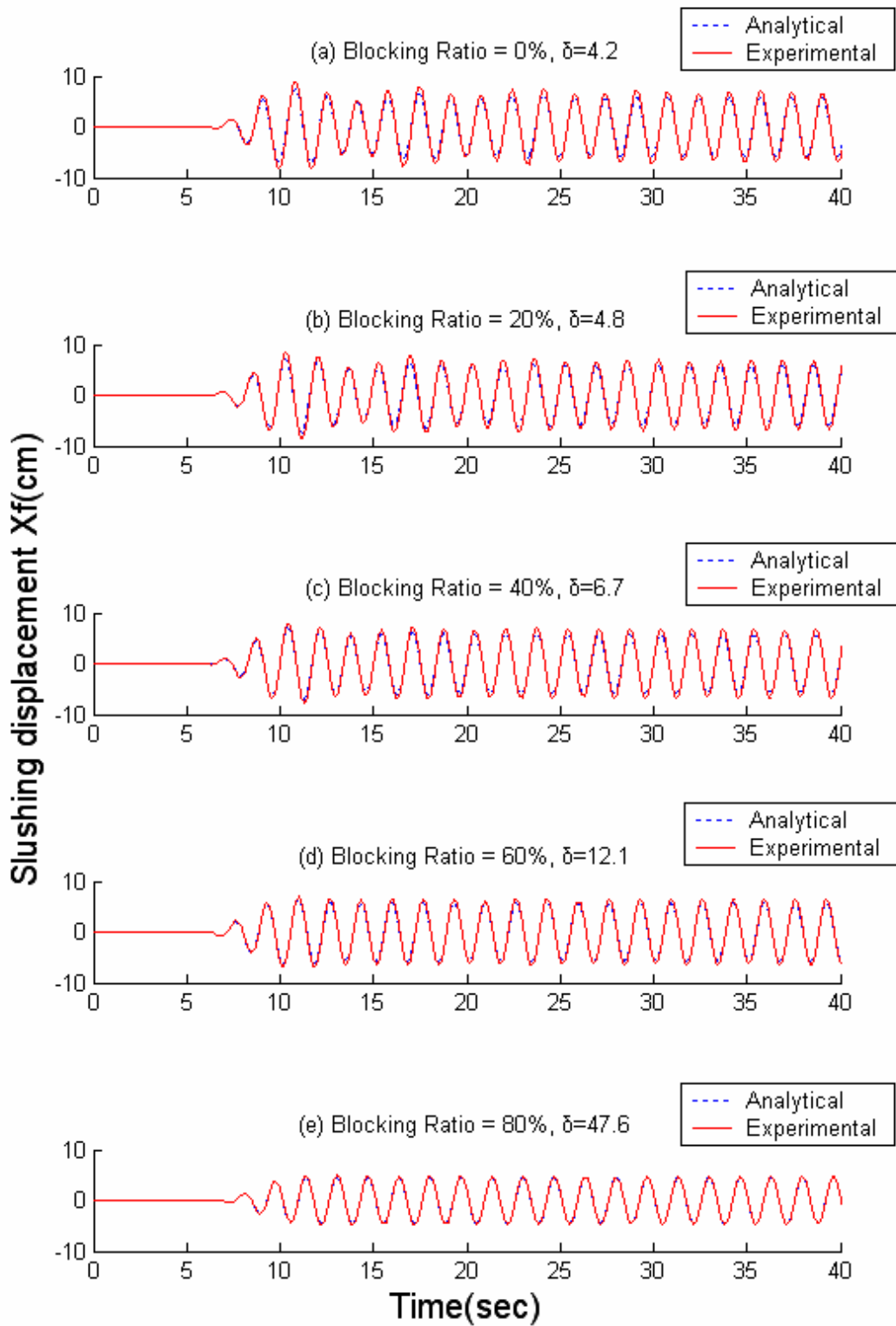


圖 3.13(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)

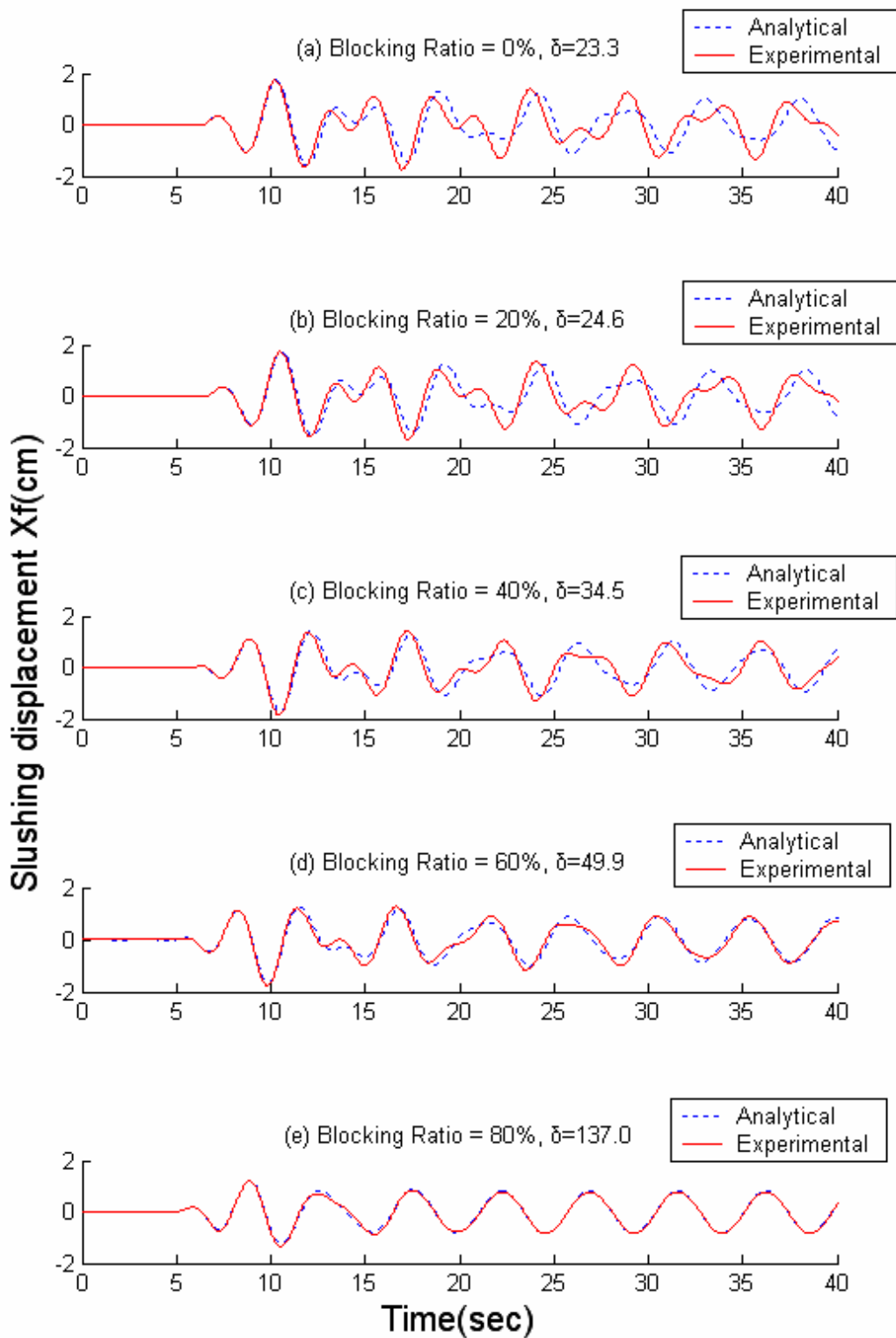


圖 3.14(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)

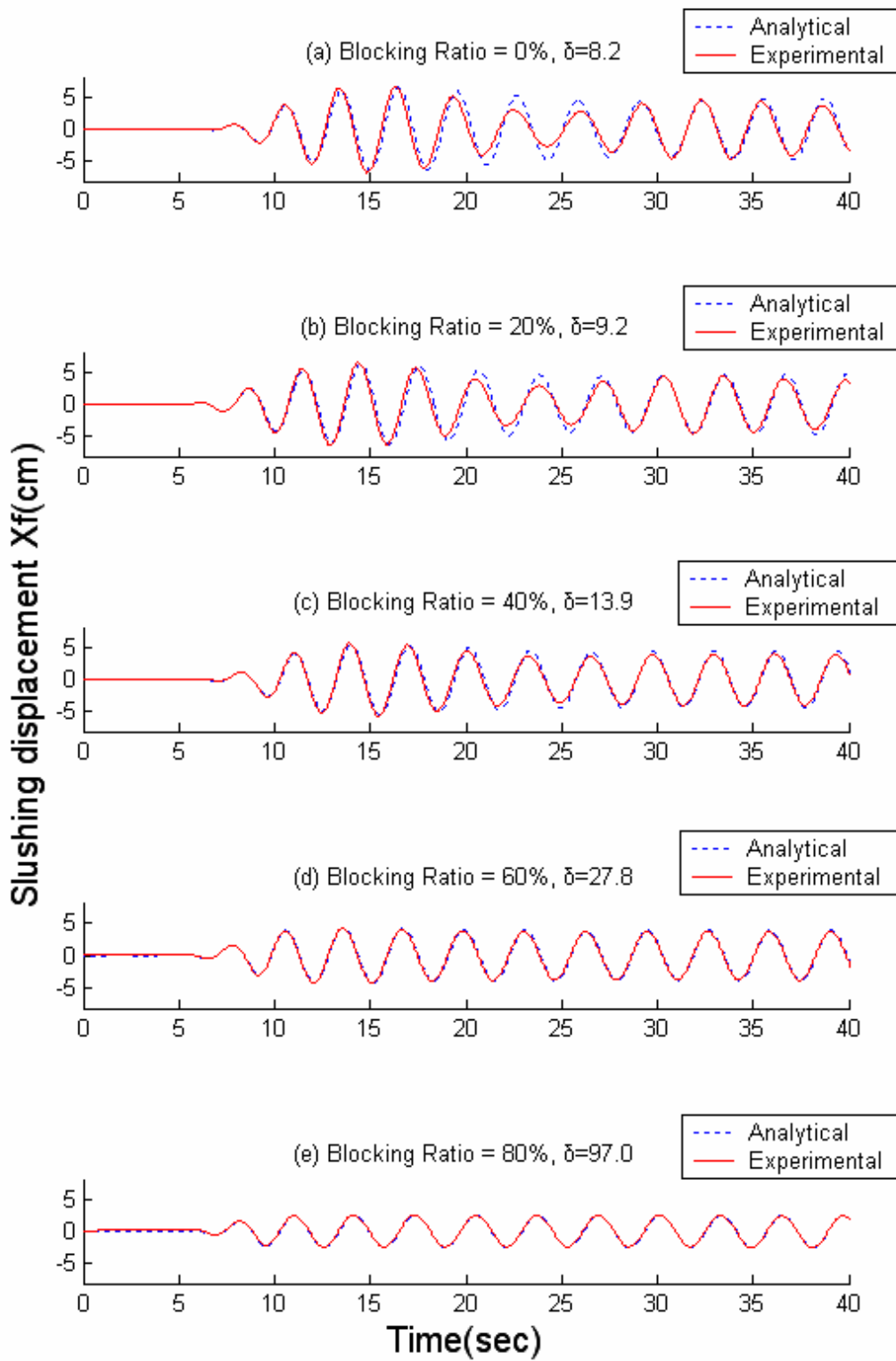


圖 3.14(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)

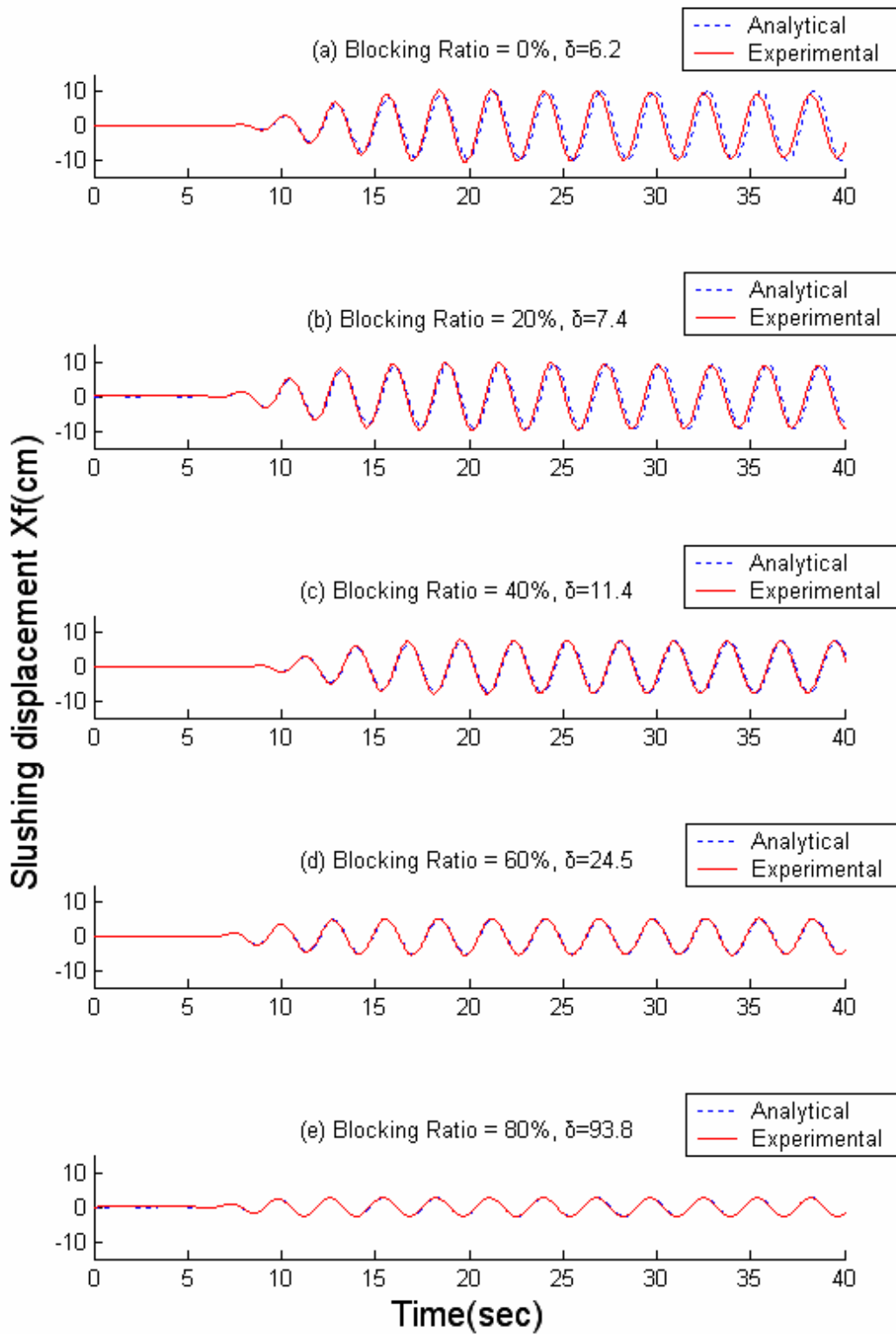


圖 3.14(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)

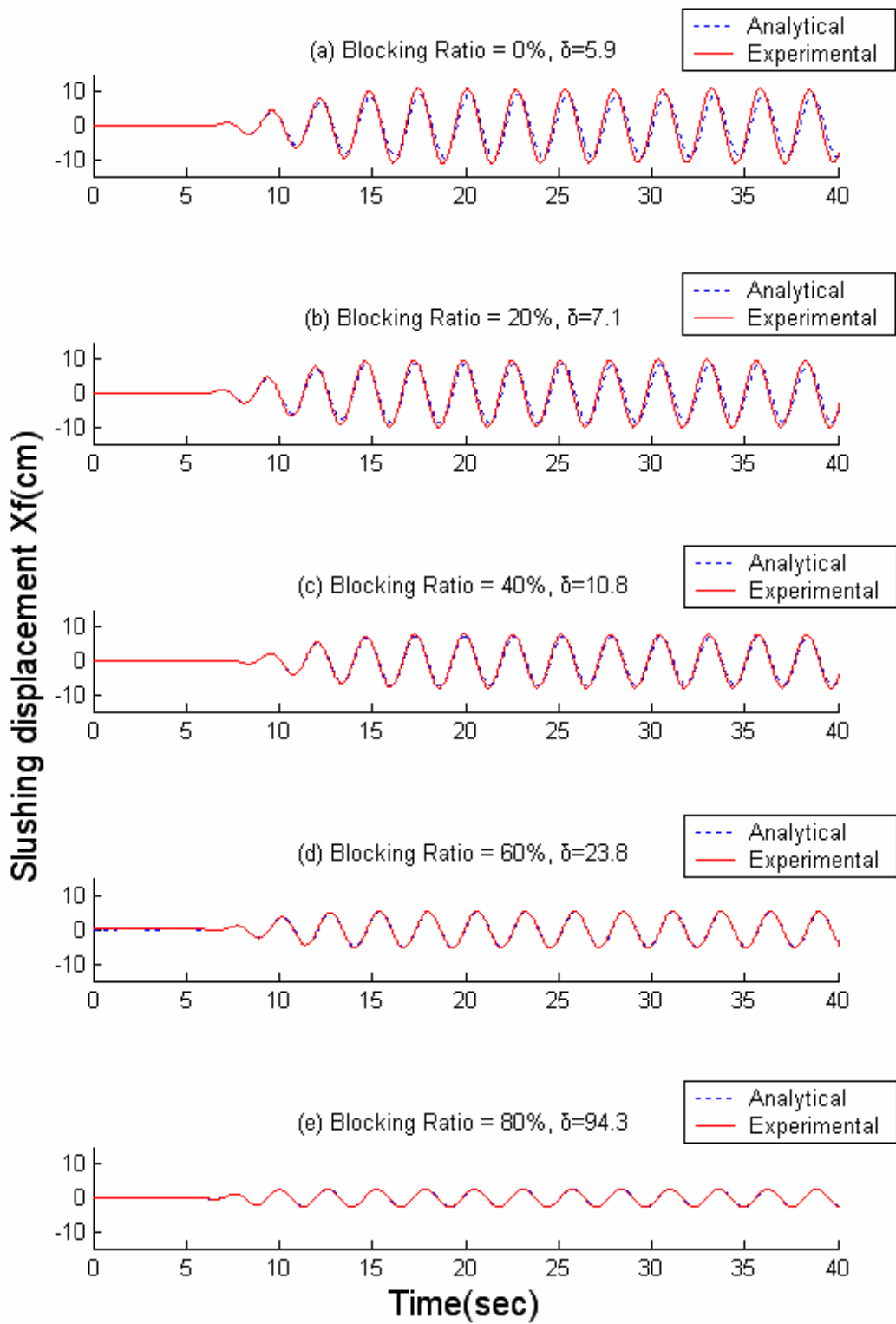


圖 3.14(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)

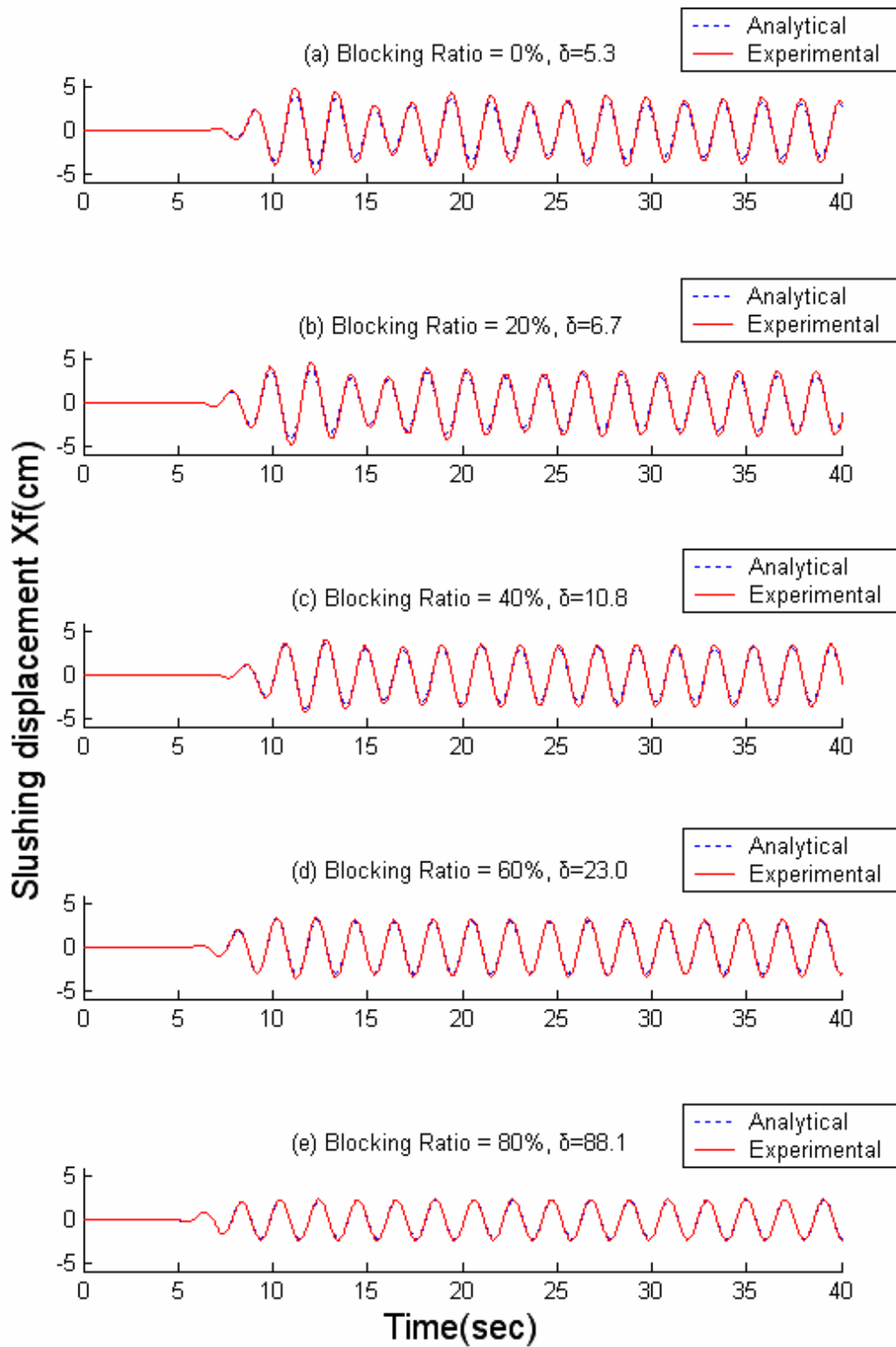


圖 3.14(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)

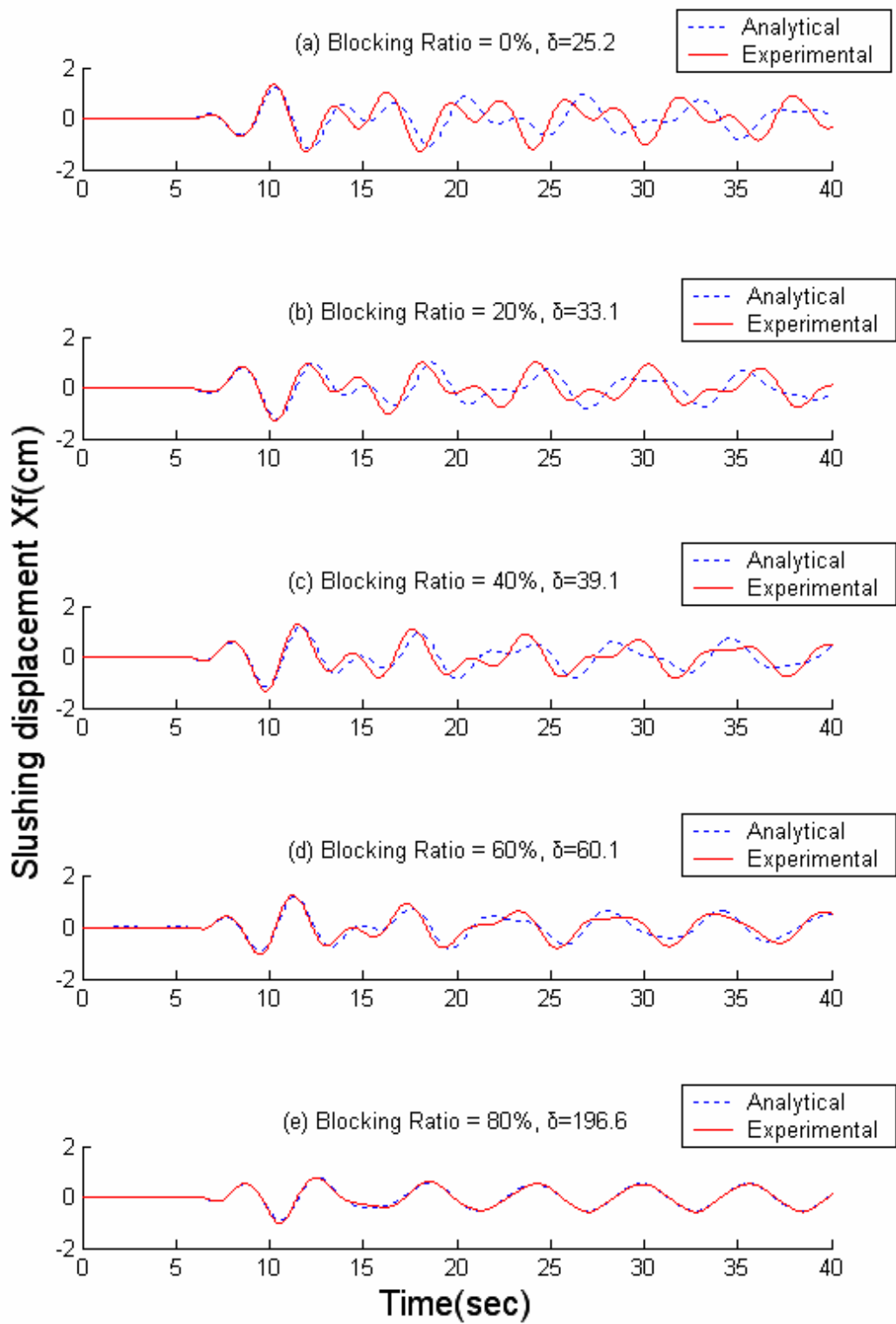


圖 3.15(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)

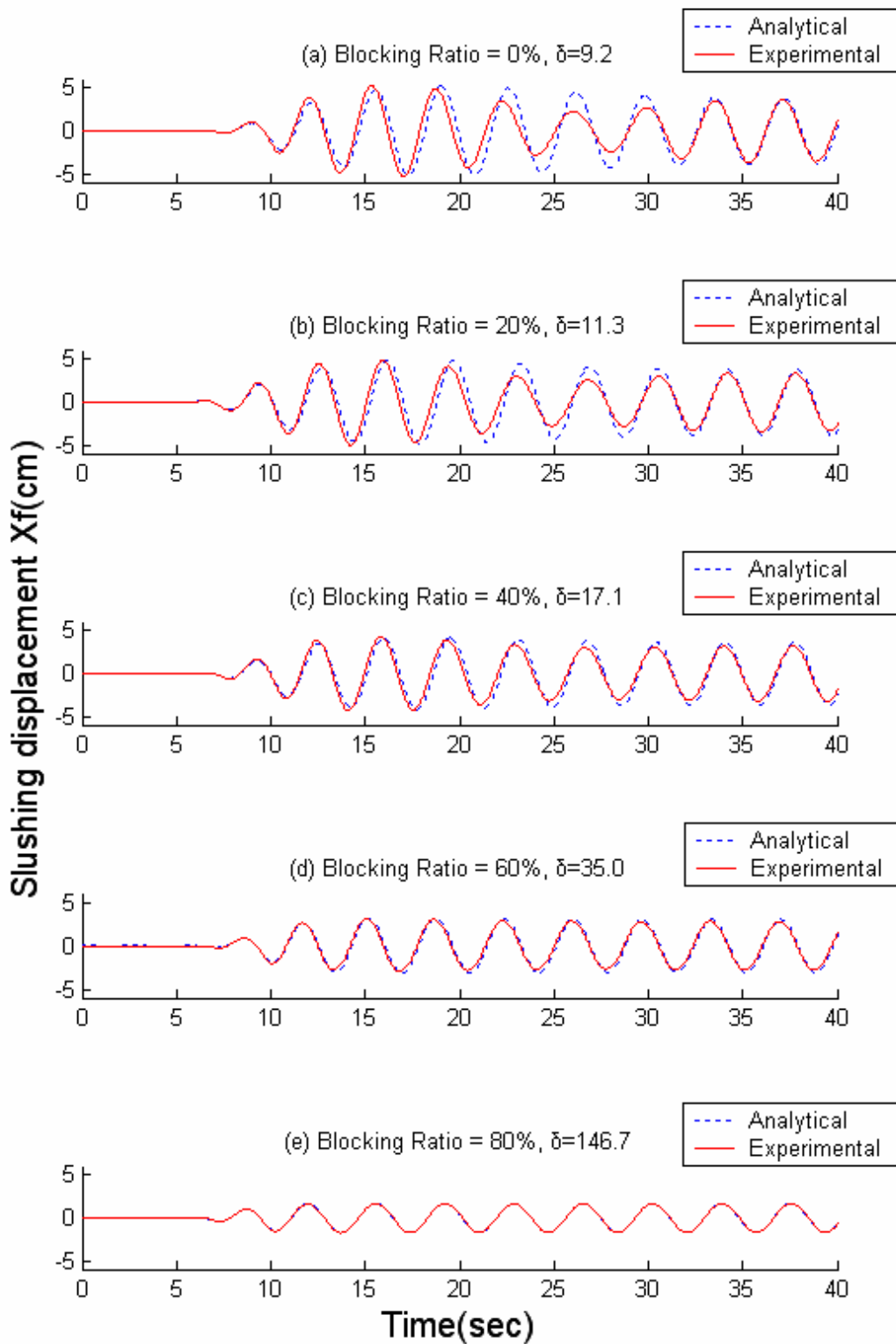


圖 3.15(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)

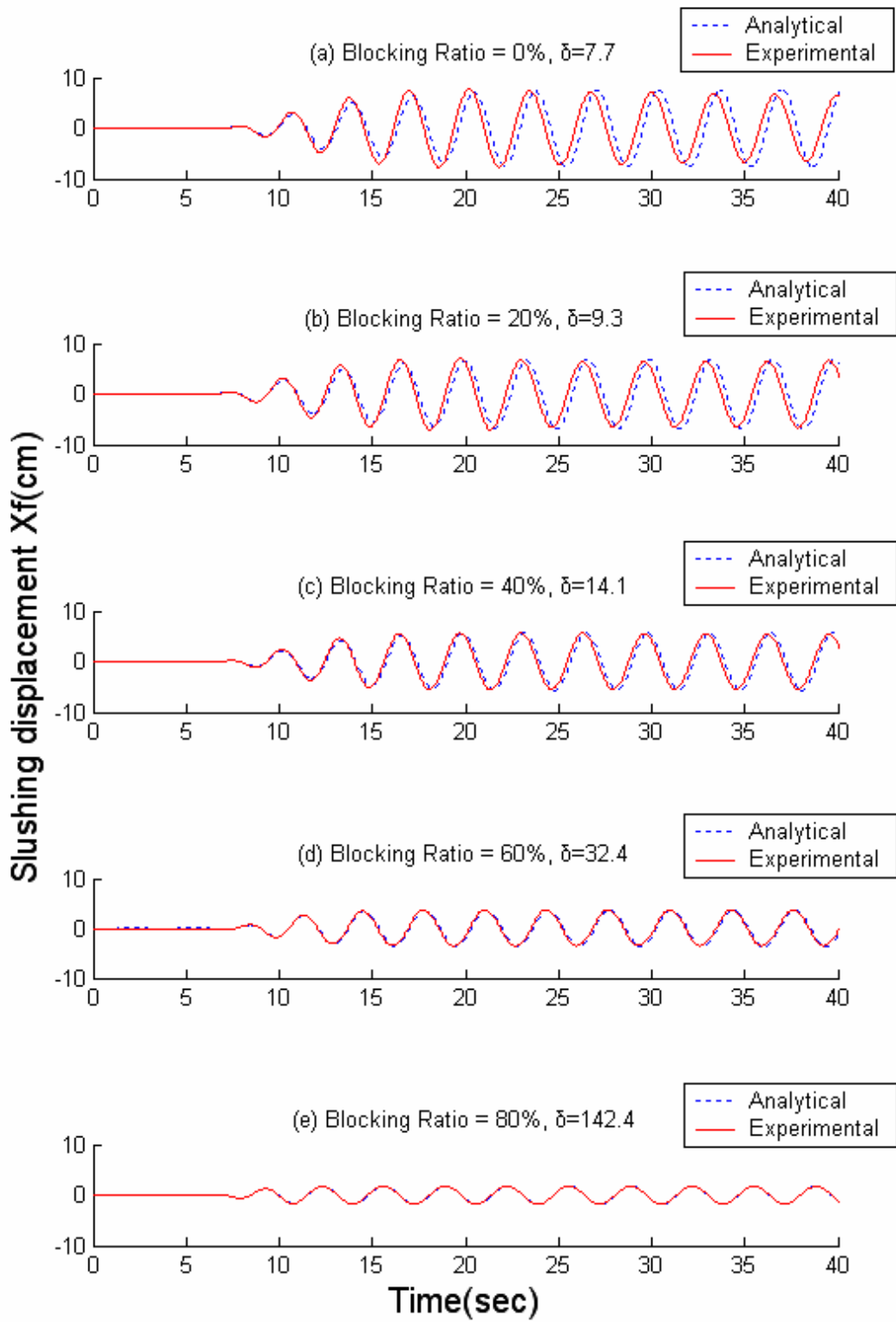


圖 3.15(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)

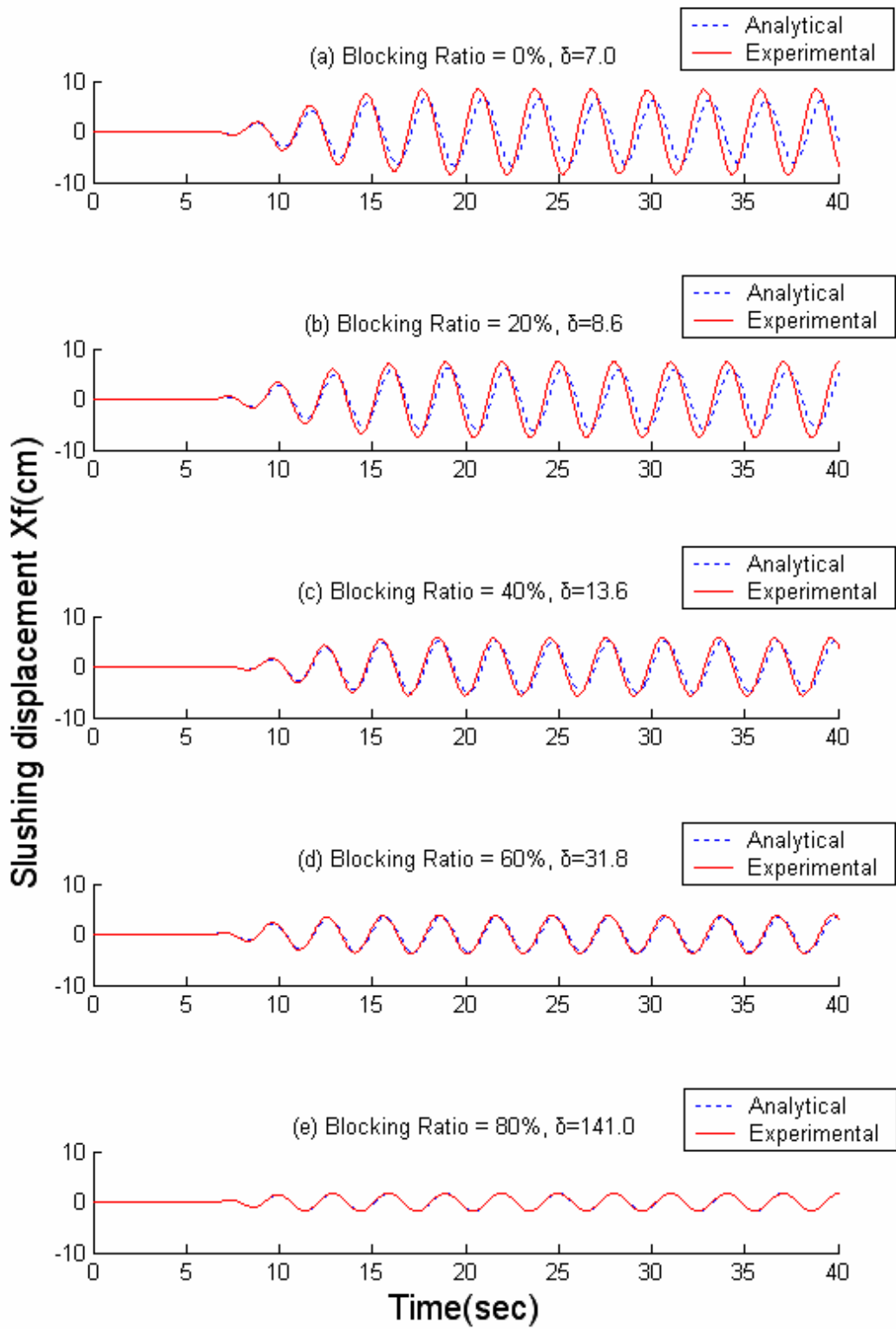


圖 3.15(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)

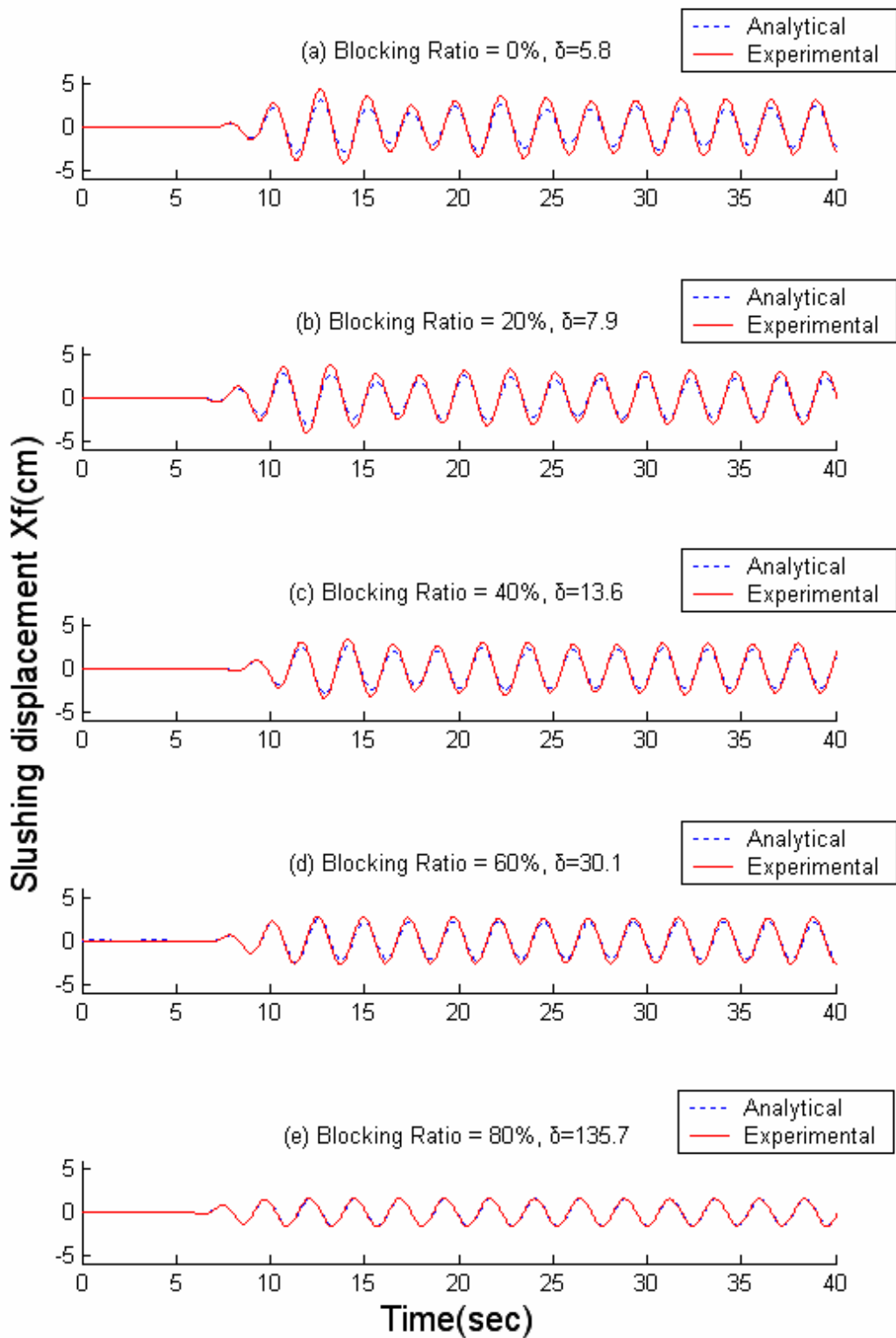


圖 3.15(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)

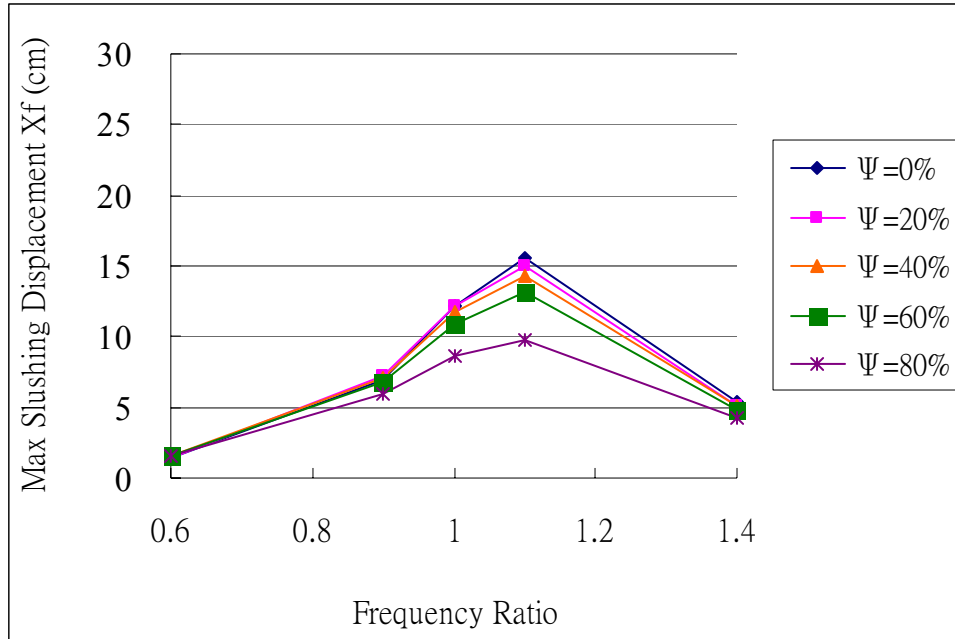


圖 3.16(a) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(小尺寸, $\beta=0.31$)

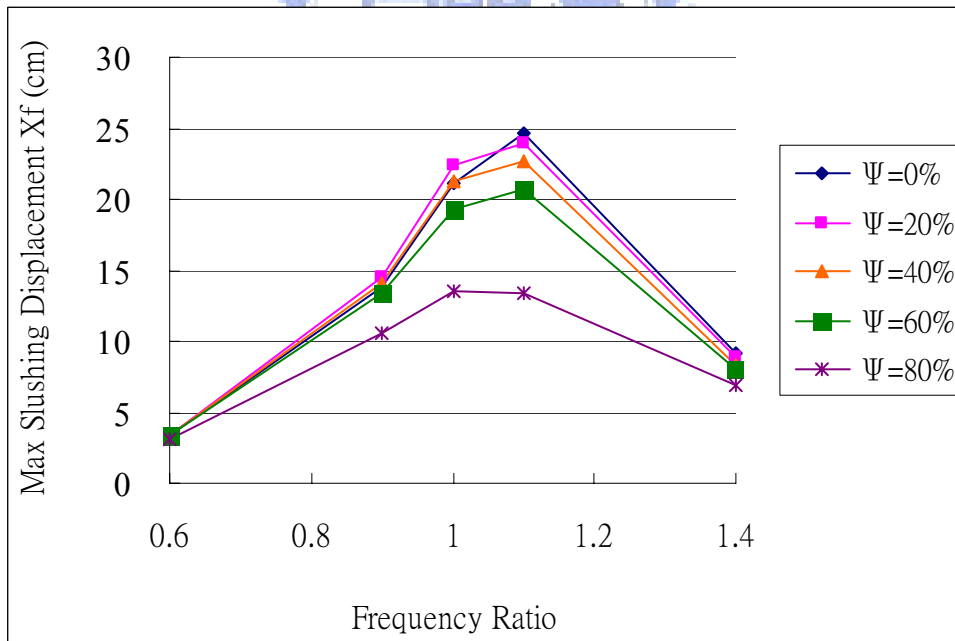


圖 3.16(b) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(大尺寸, $\beta=0.31$)

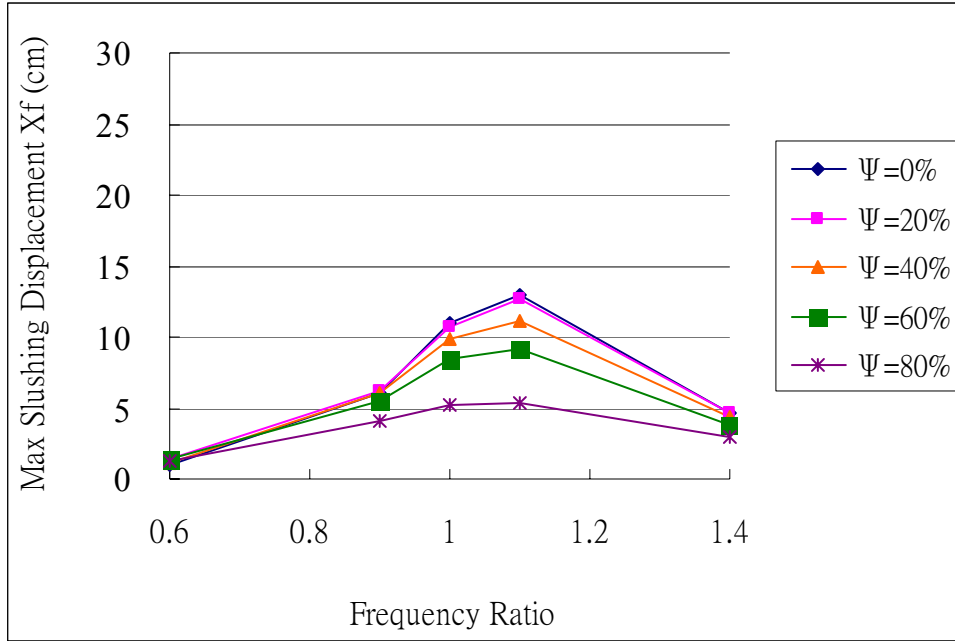


圖 3.16(c) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(小尺寸, $\beta=0.6$)

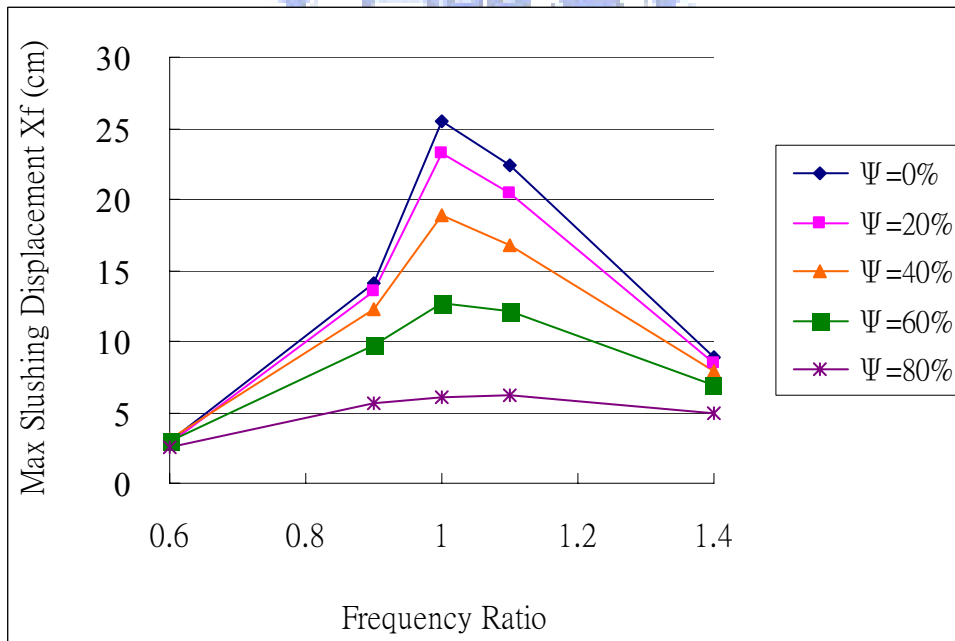


圖 3.16(d) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(大尺寸, $\beta=1.0$)

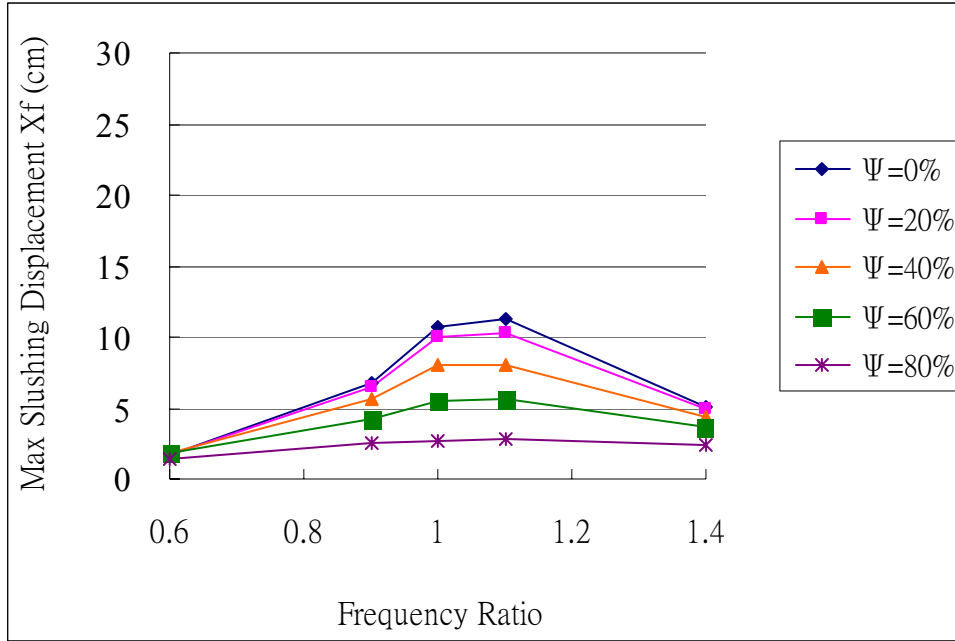


圖 3.16(e) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(大尺寸 $\beta=2.0$)

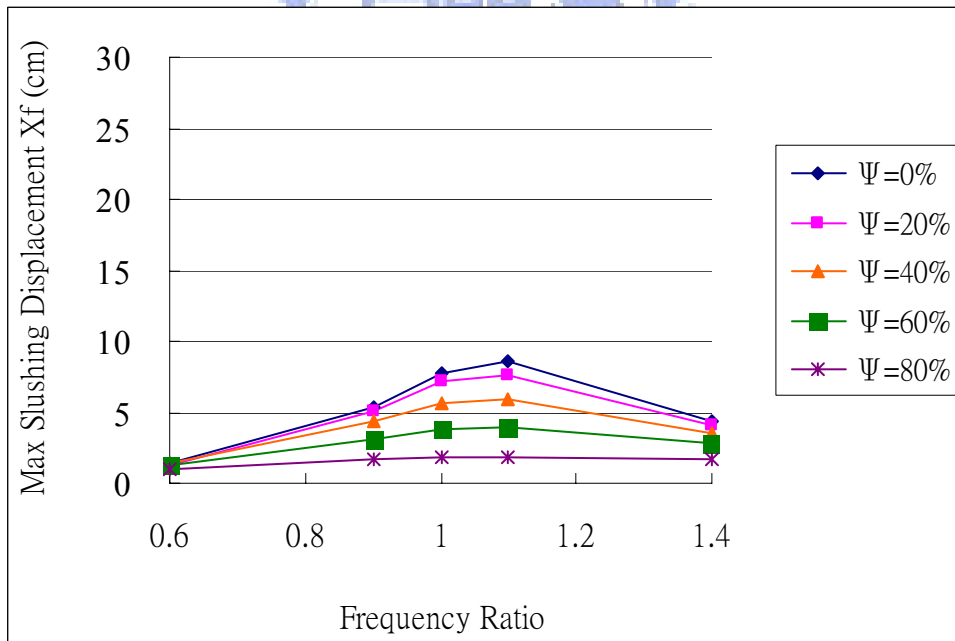


圖 3.16(f) 頻率比與水柱激盪位移峰值之關係
(大尺寸, $\beta=3.0$)

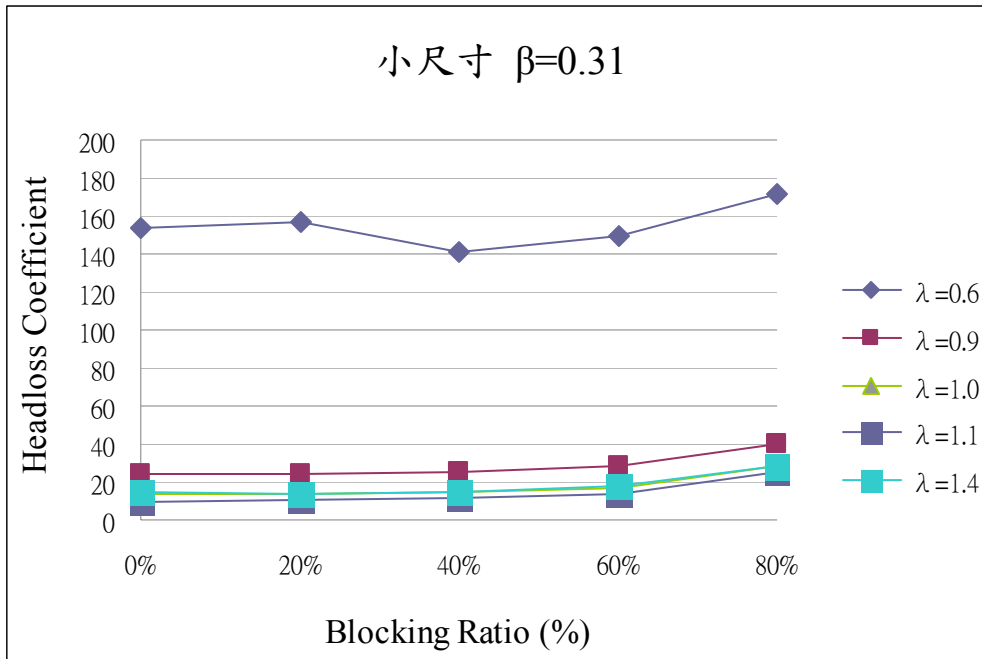


圖 3.17(a) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(小尺寸, $\beta=0.31$)

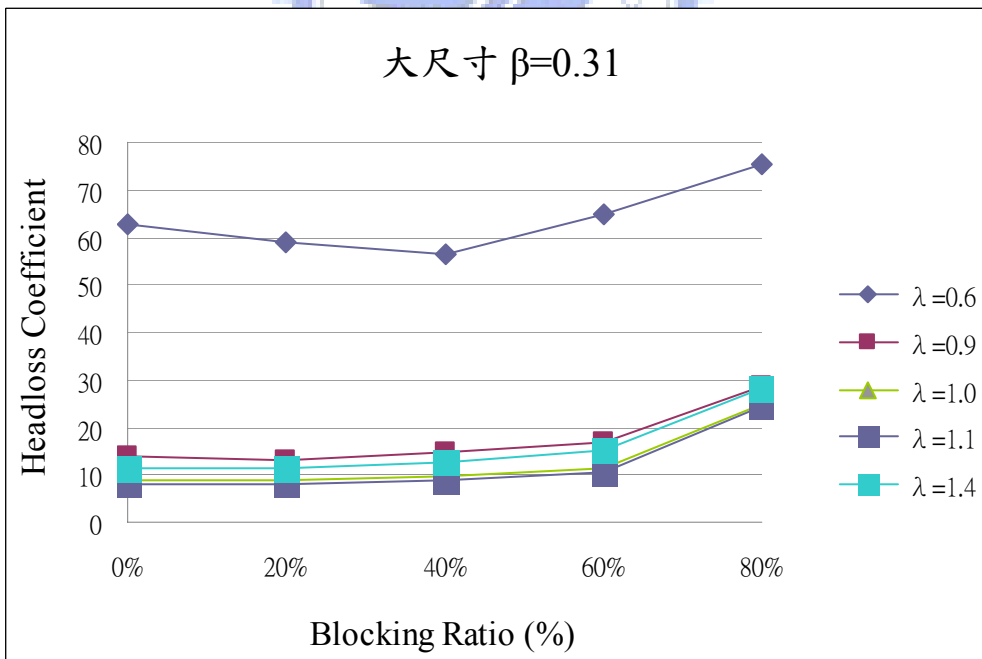


圖 3.17(b) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(大尺寸, $\beta=0.31$)

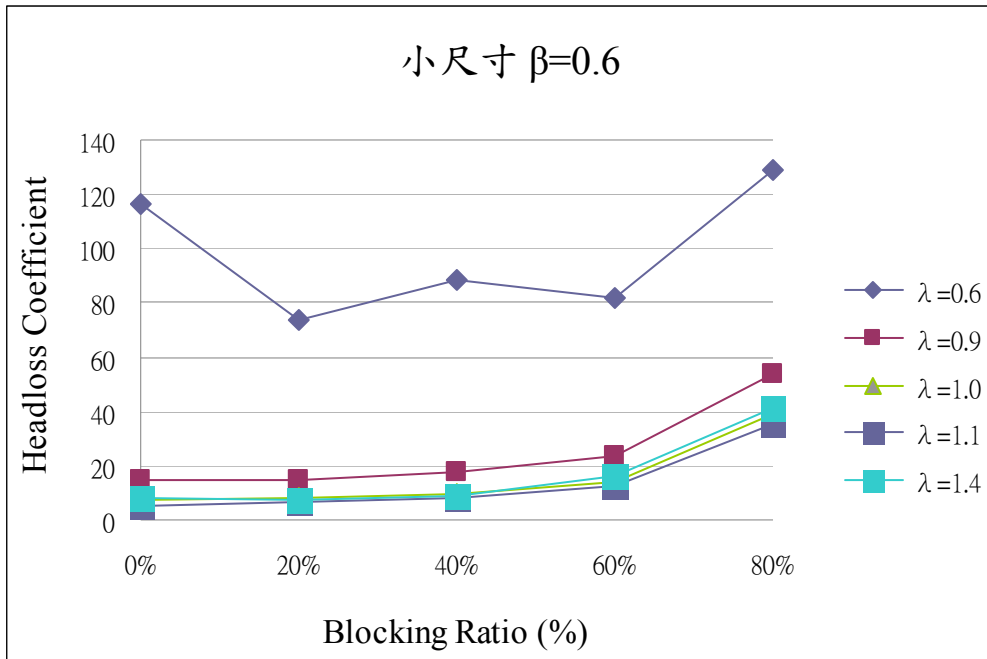


圖 3.17(c) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(大尺寸, $\beta=0.6$)

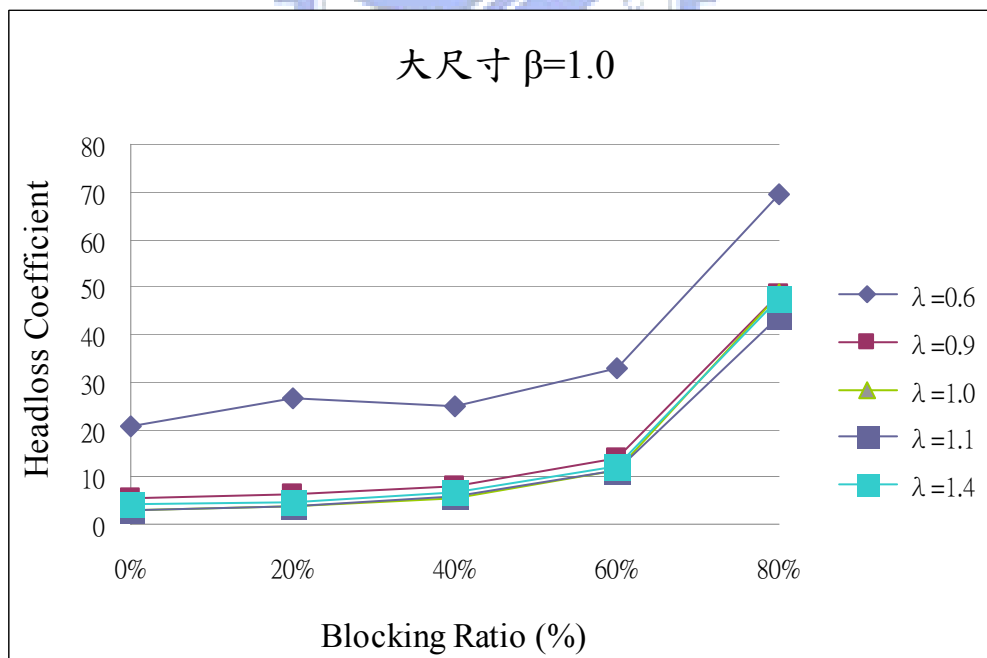


圖 3.17(d) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(大尺寸, $\beta=1.0$)

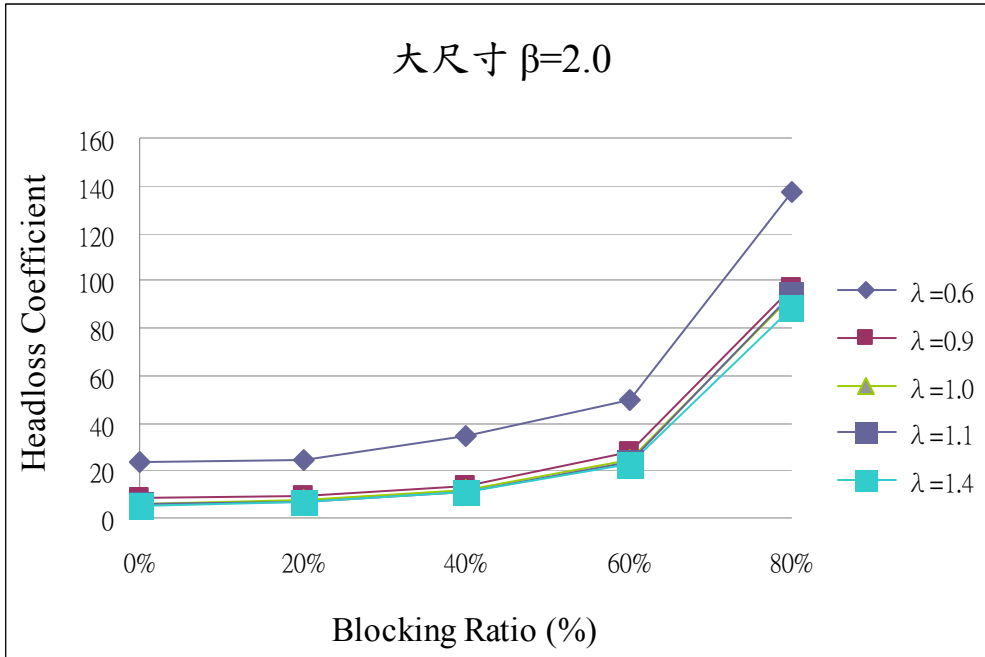


圖 3.17(e) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(大尺寸, $\beta=2.0$)

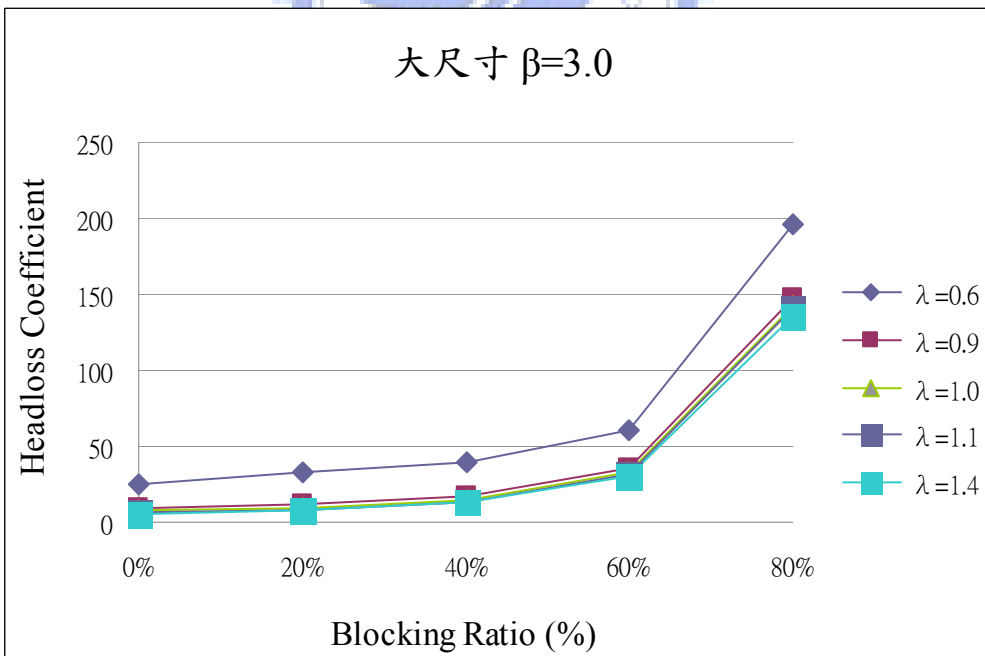


圖 3.17(f) 阻塞率 ψ 與水頭損失係數之關係
(大尺寸, $\beta=3.0$)

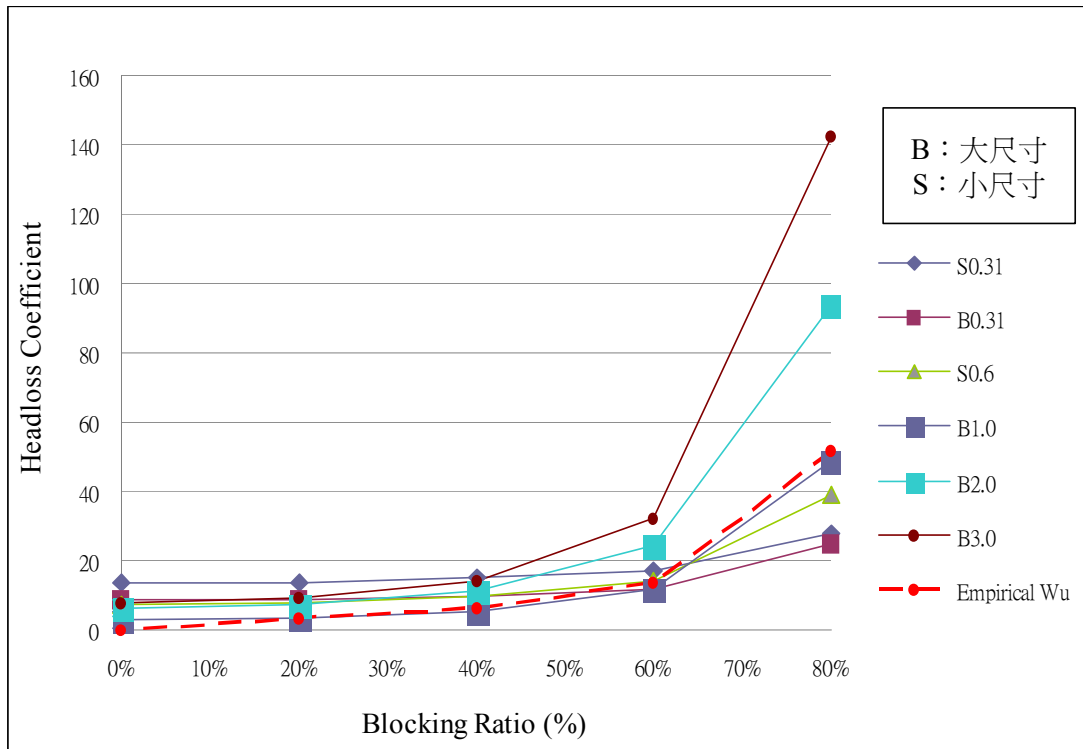


圖 3.18 不同斷面比之阻塞率與水頭損失係數之關係($\lambda=1.0$)

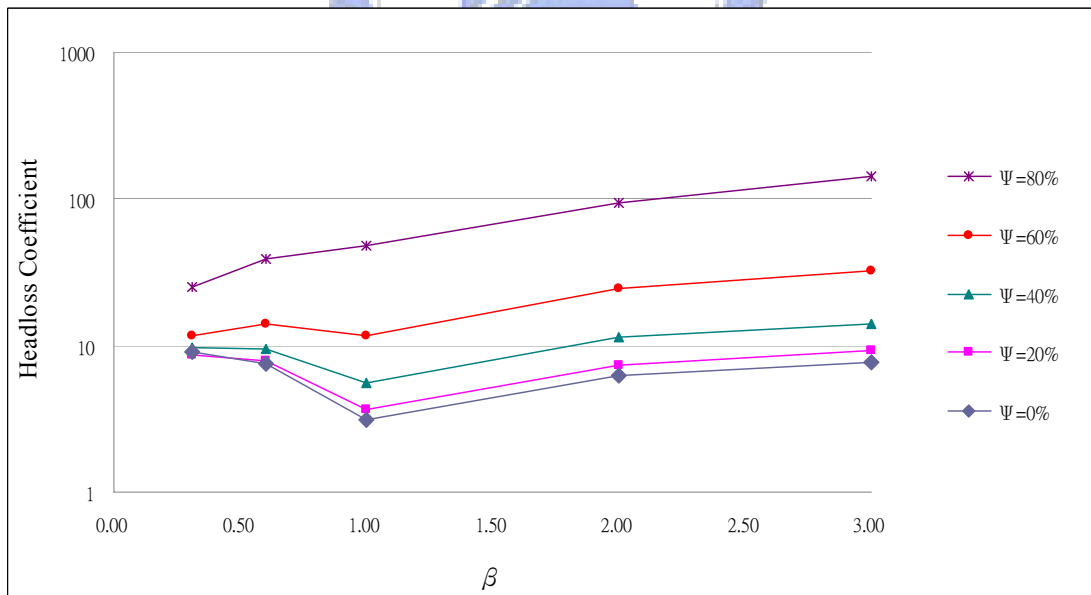


圖 3.19 不同阻塞率之斷面比與水頭損失係數之關係($\lambda=1.0$)

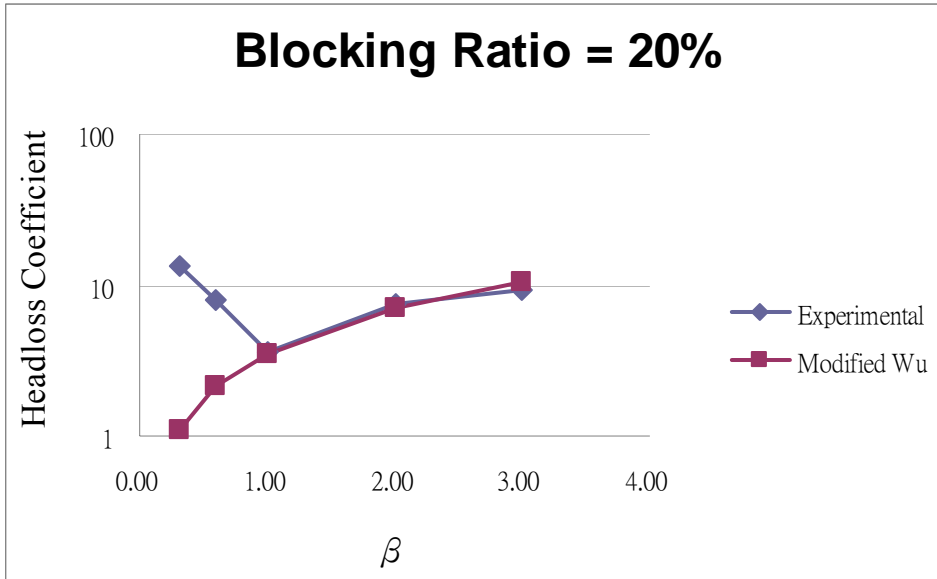


圖 3.20(a) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=20\%$)

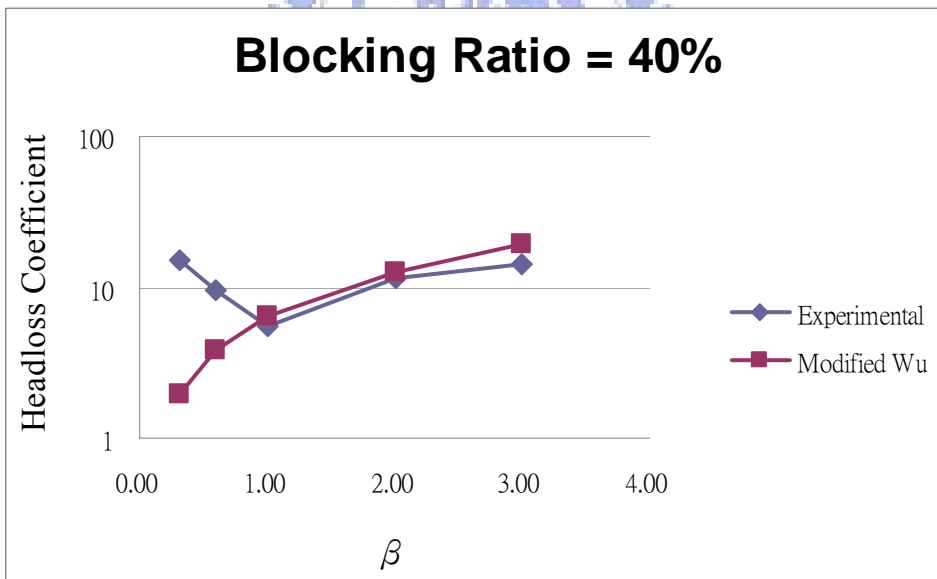


圖 3.20(b) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi=40\%$)

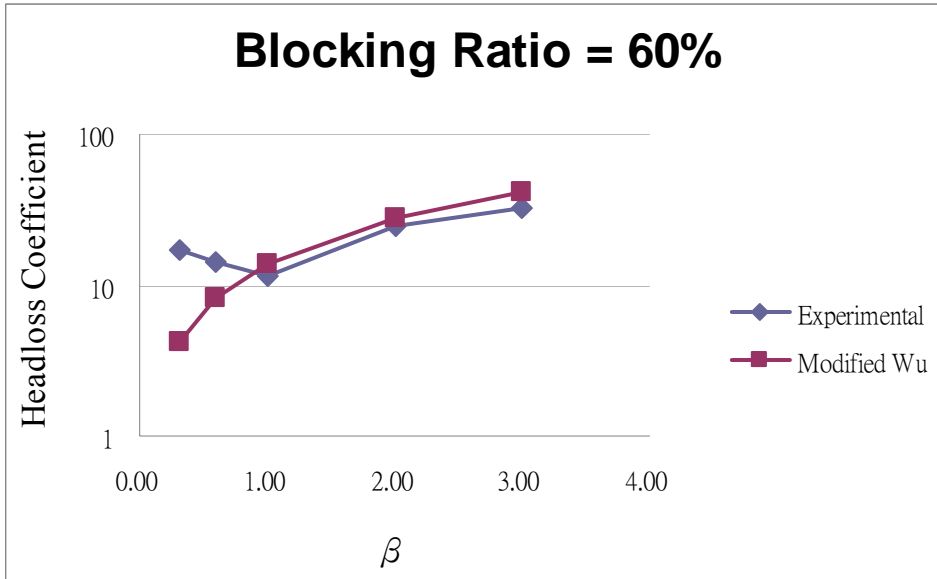


圖 3.20(c) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi = 60\%$)

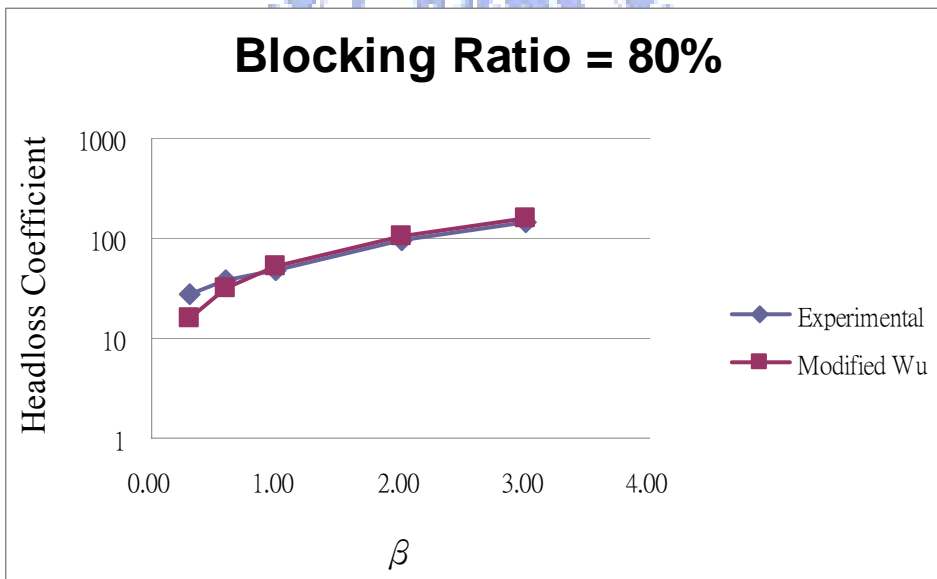


圖 3.20(d) 斷面比(β)與水頭損失係數(δ)之關係($\psi = 80\%$)

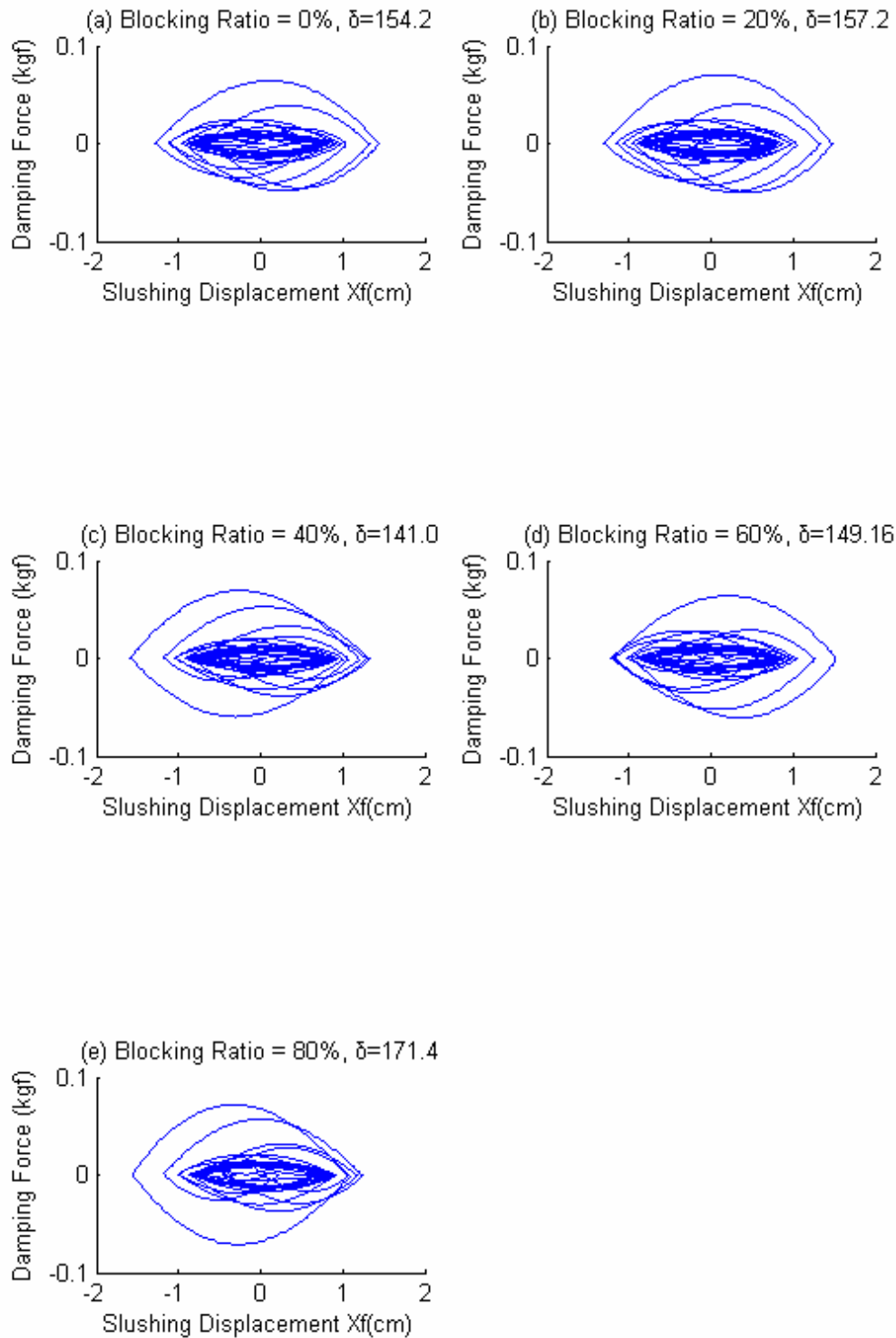


圖 3.21(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)

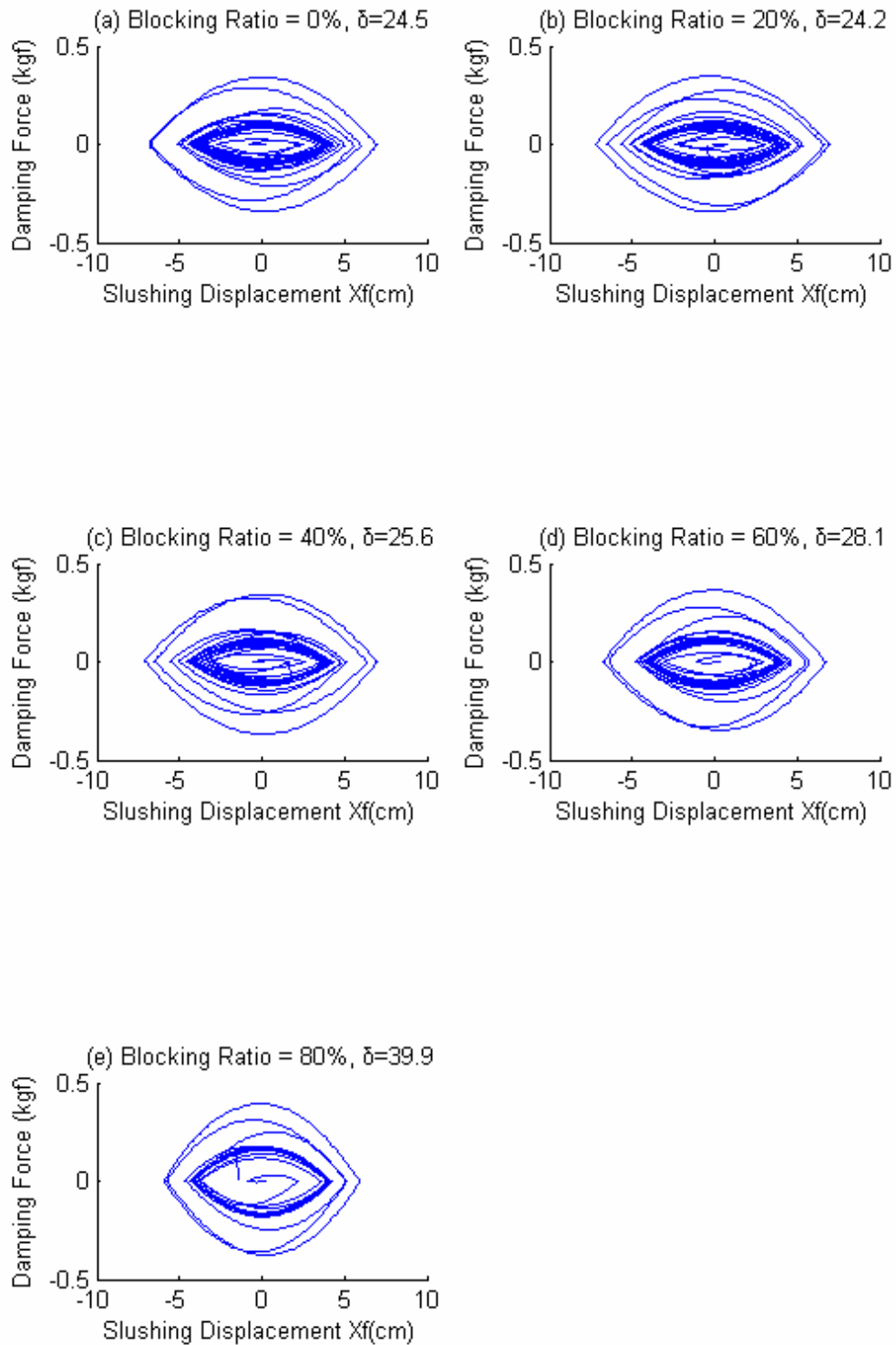


圖 3.21(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)

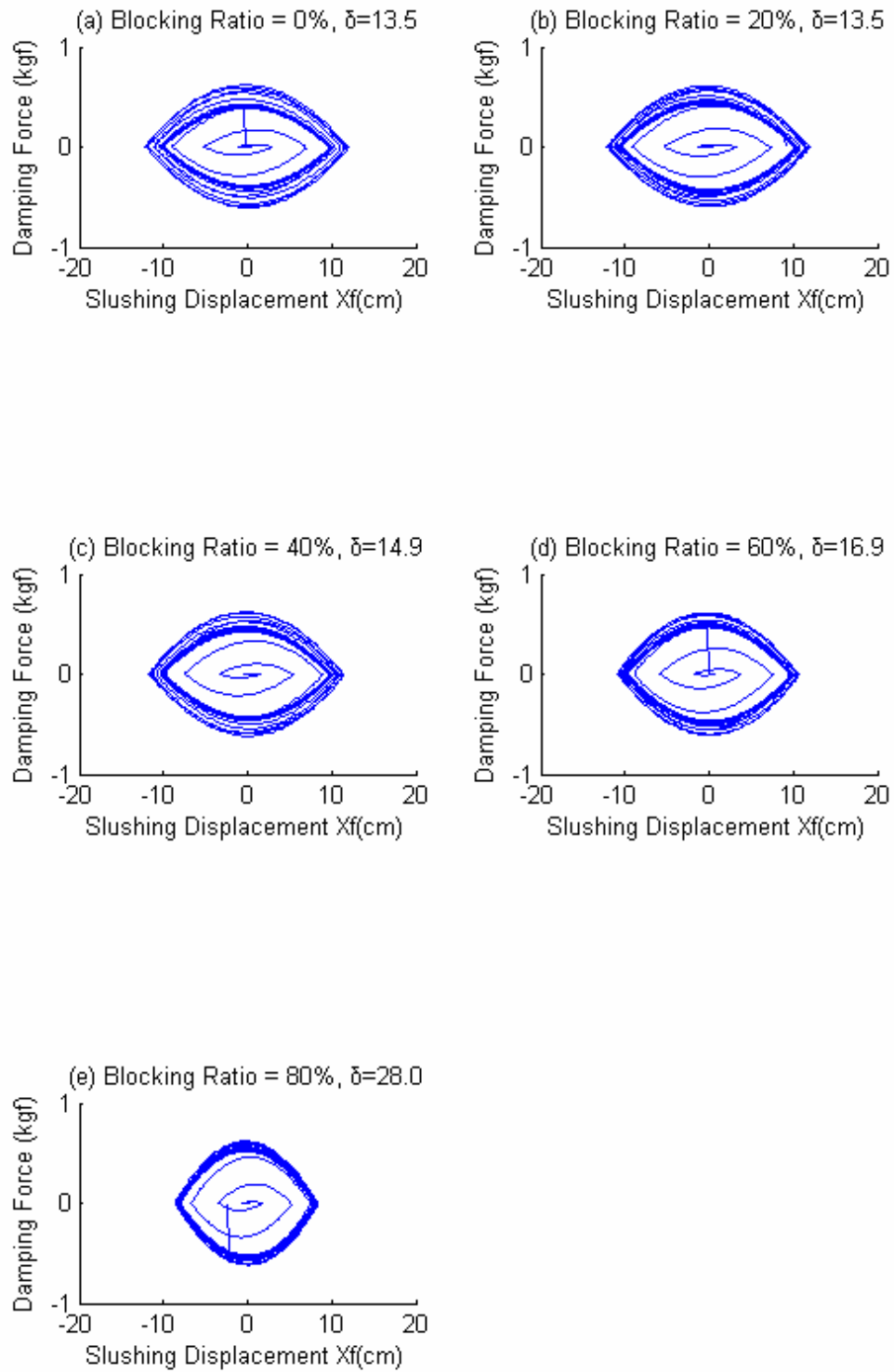


圖 3.21(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)

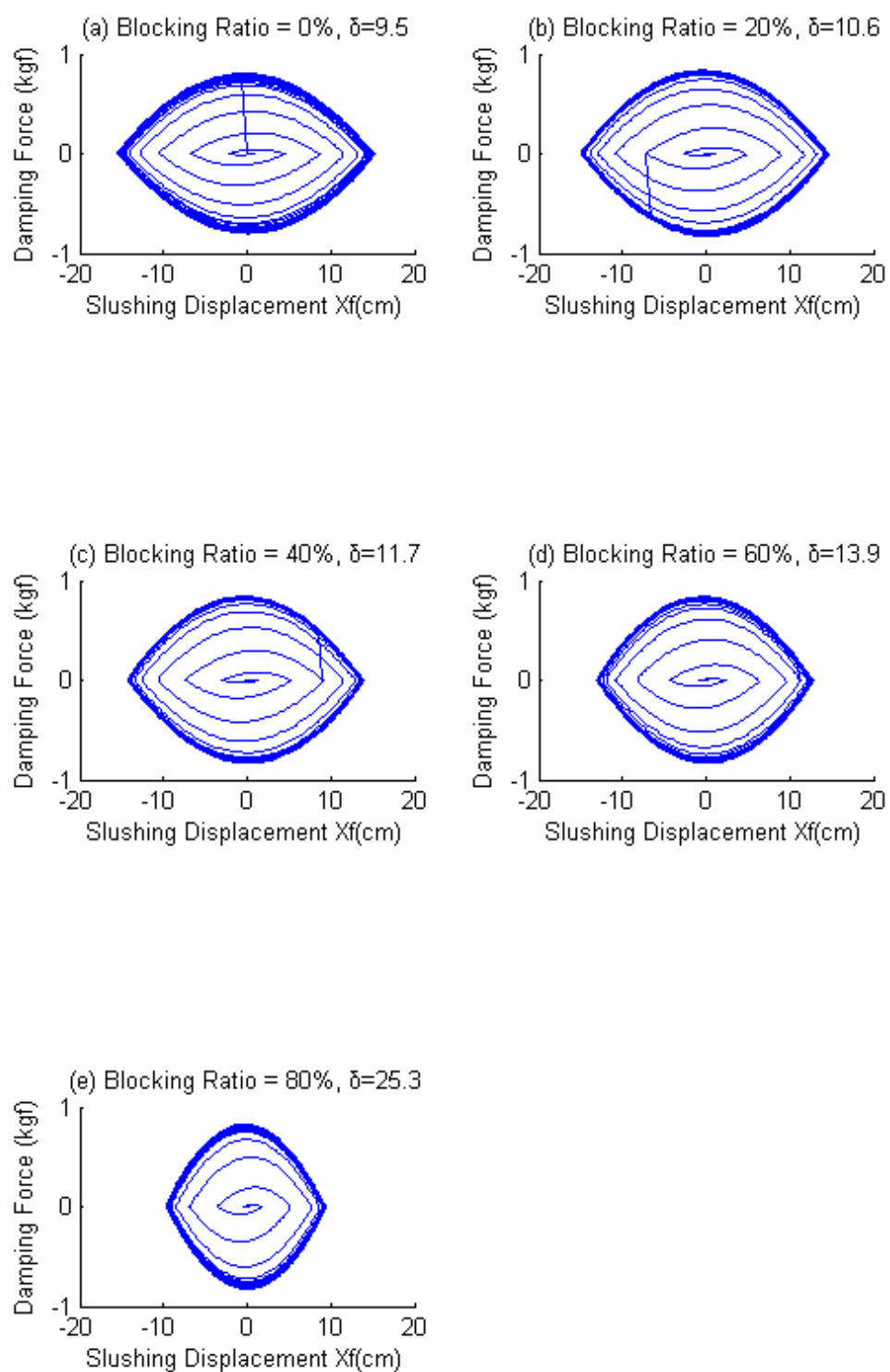


圖 3.21(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)

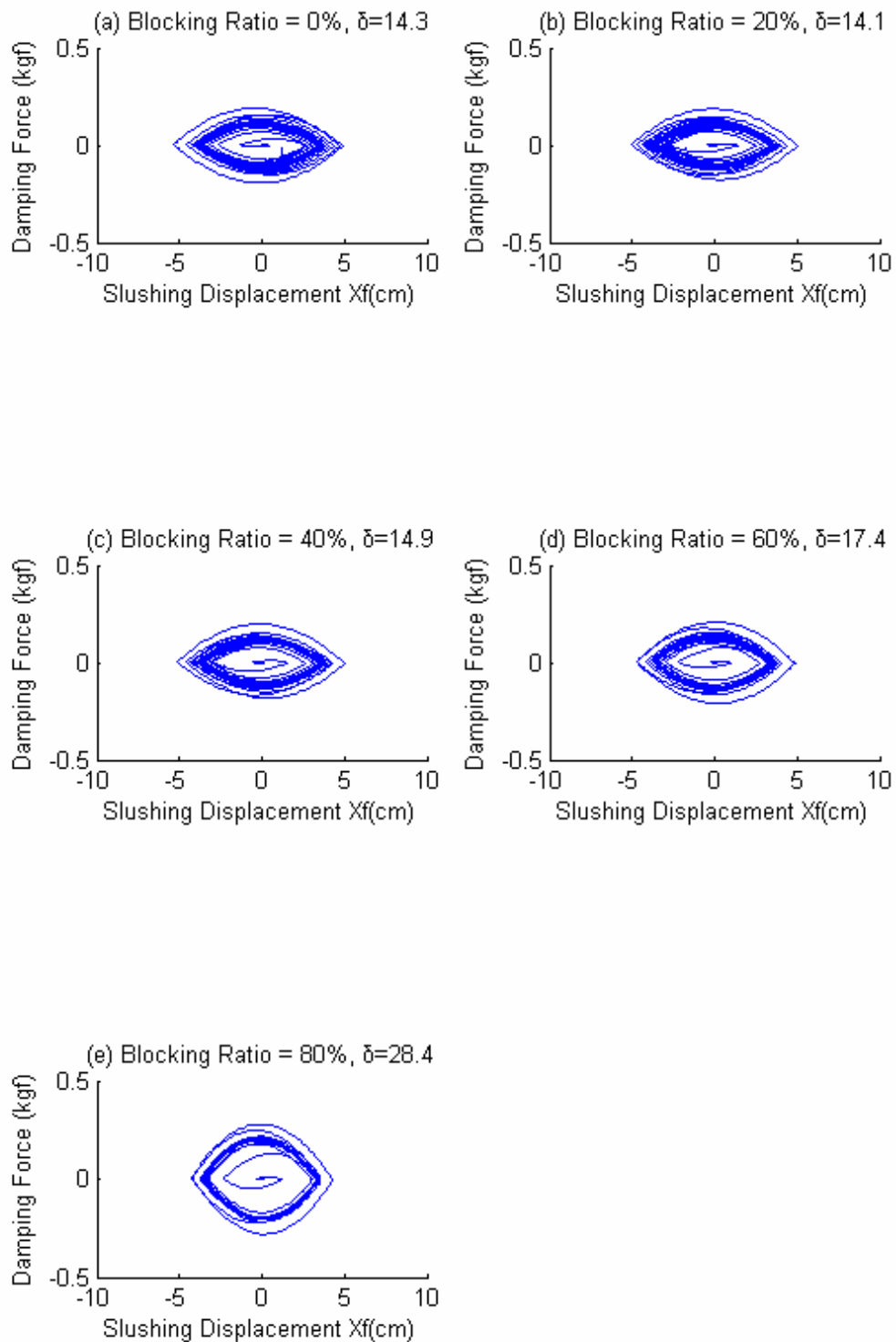


圖 3.21(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)

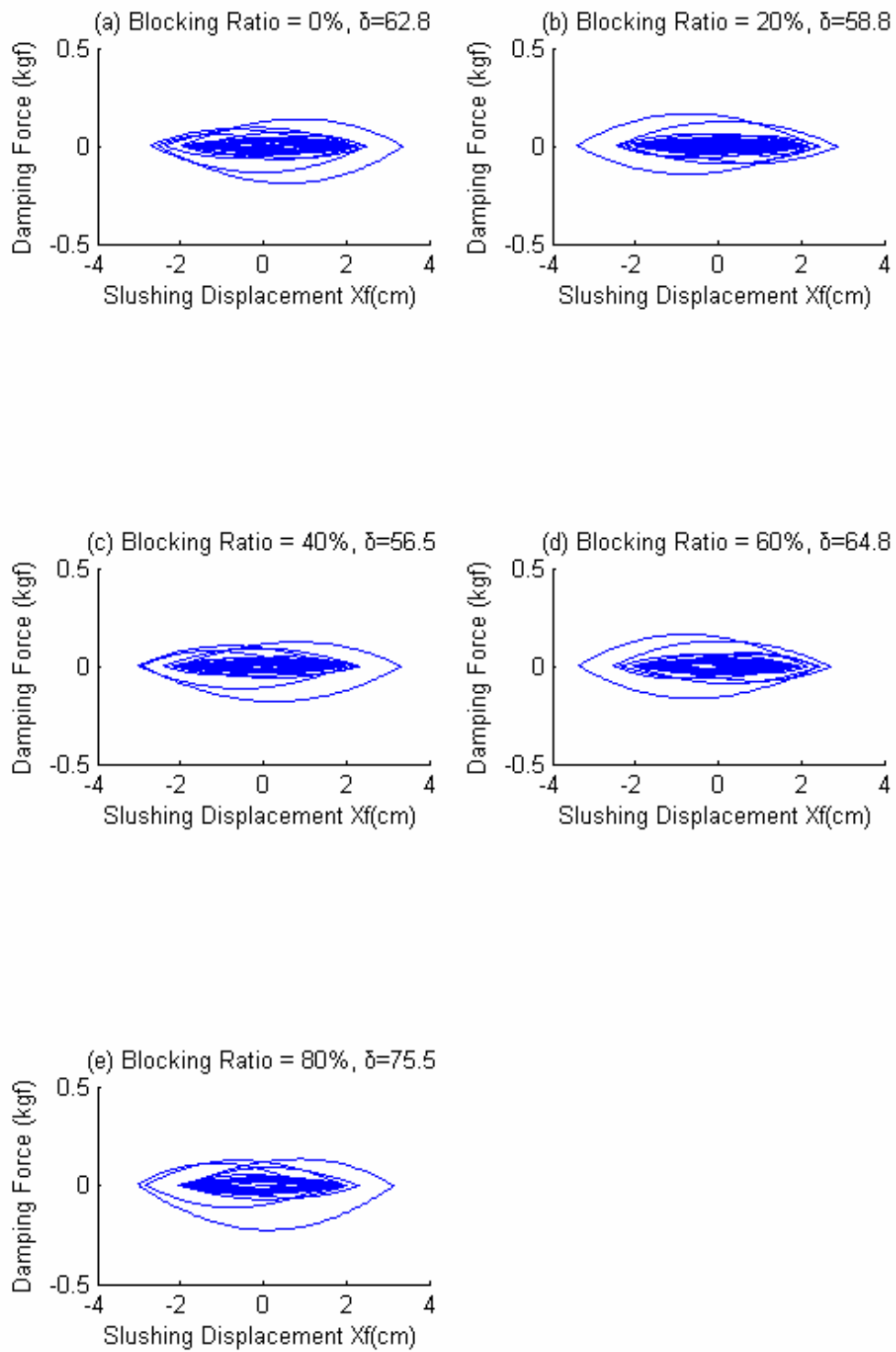


圖 3.22(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=0.31$)

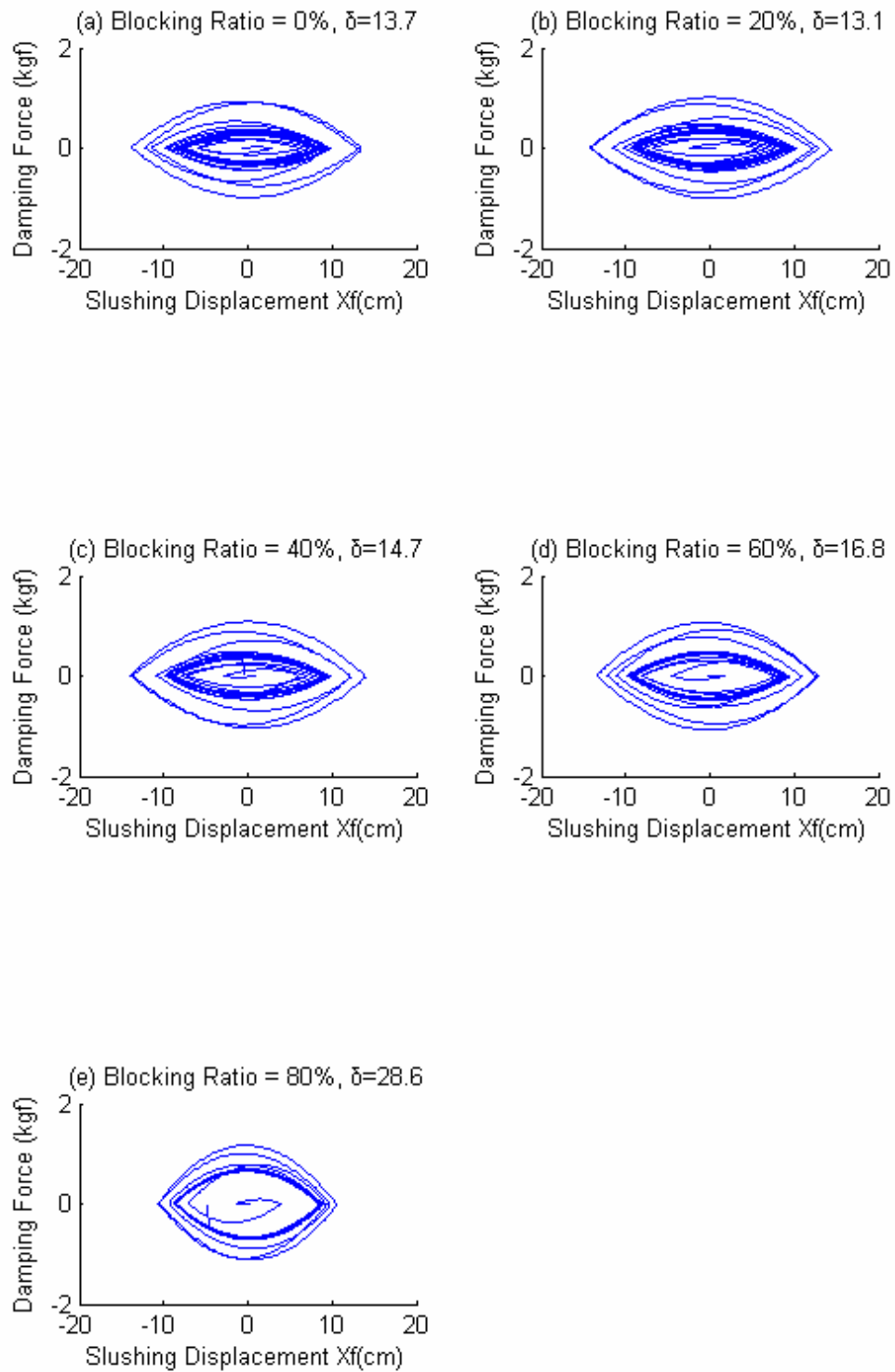


圖 3.22(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=0.31$)

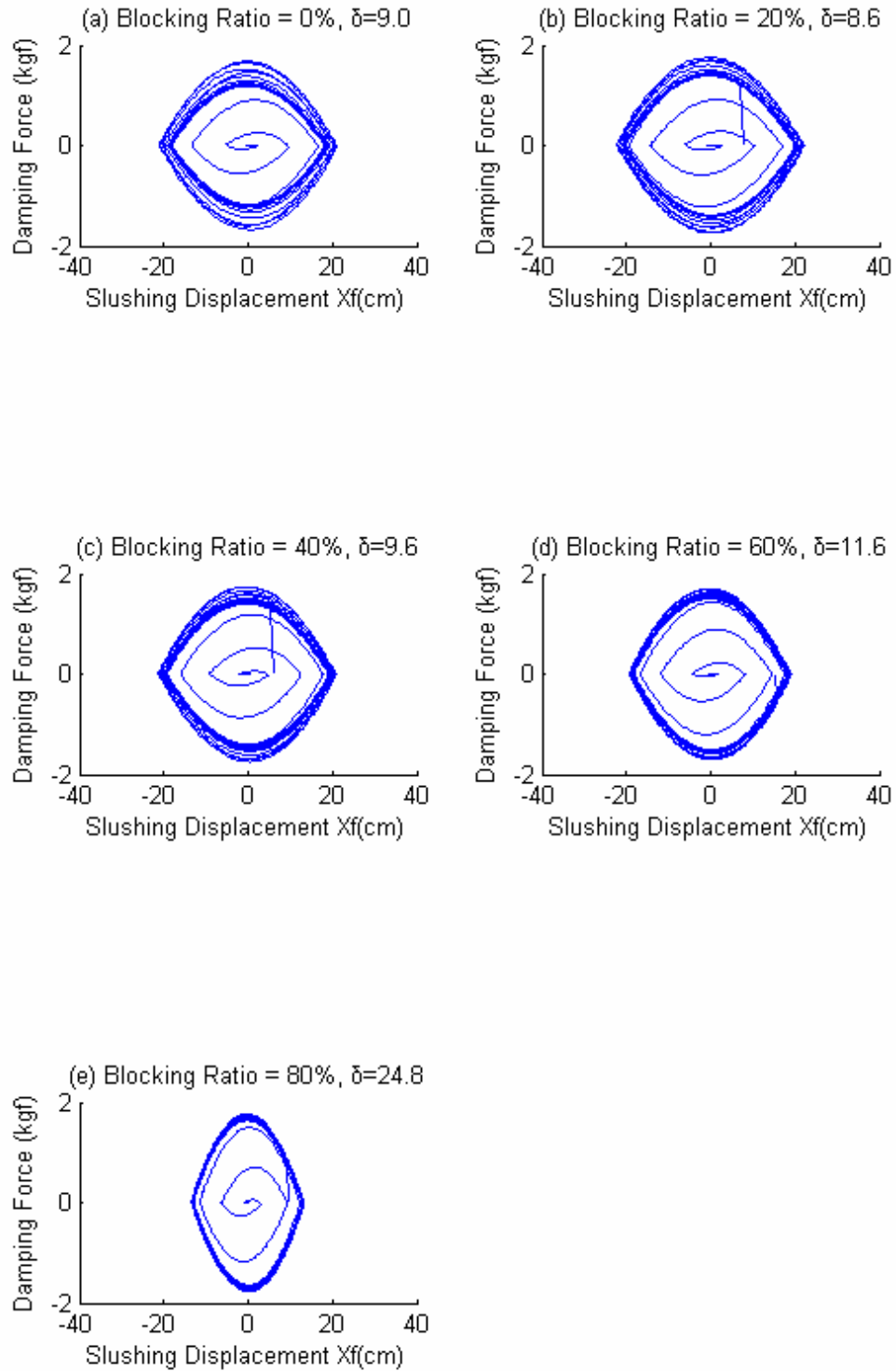


圖 3.22(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=0.31$)

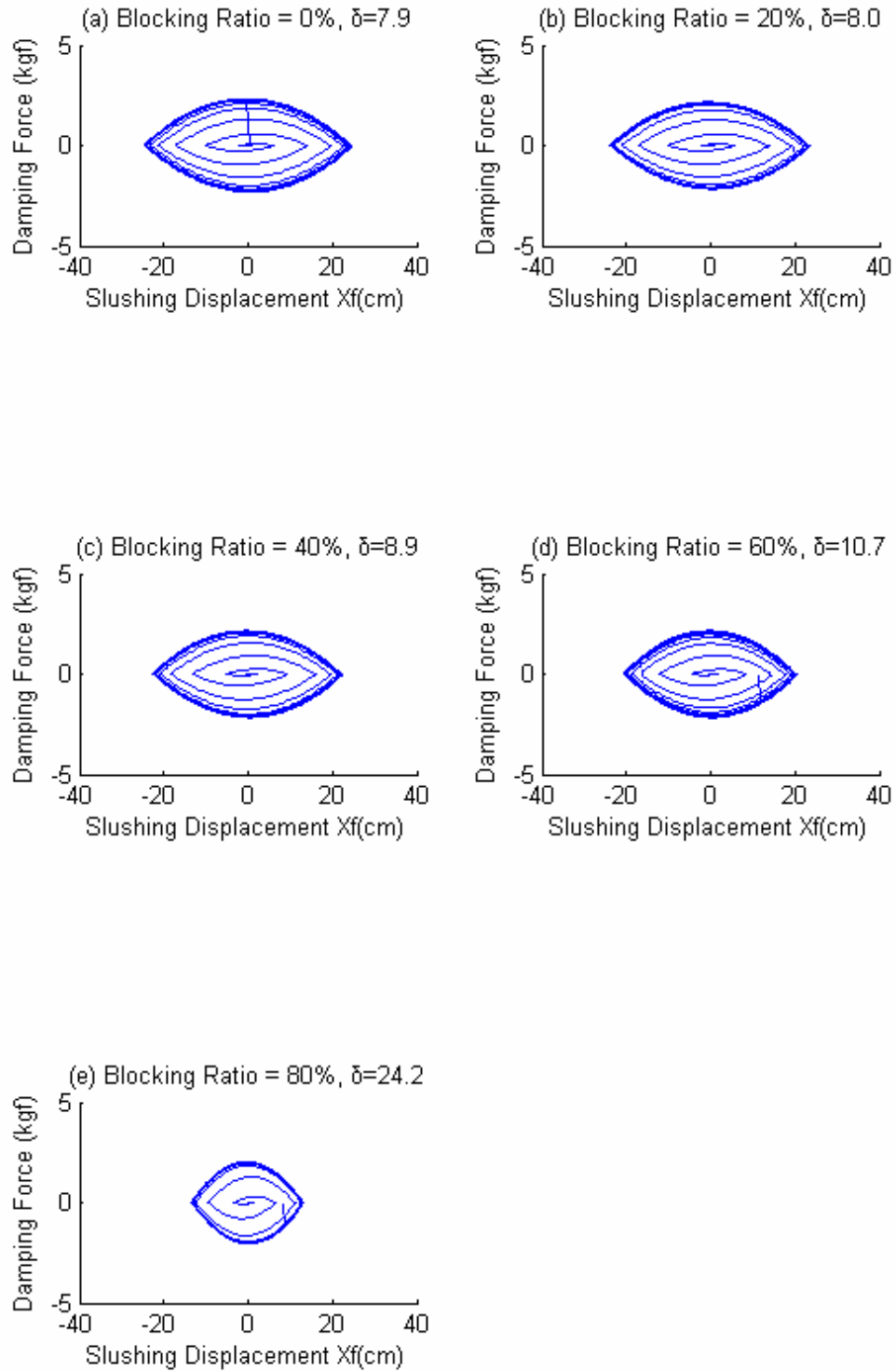


圖 3.22(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=0.31$)

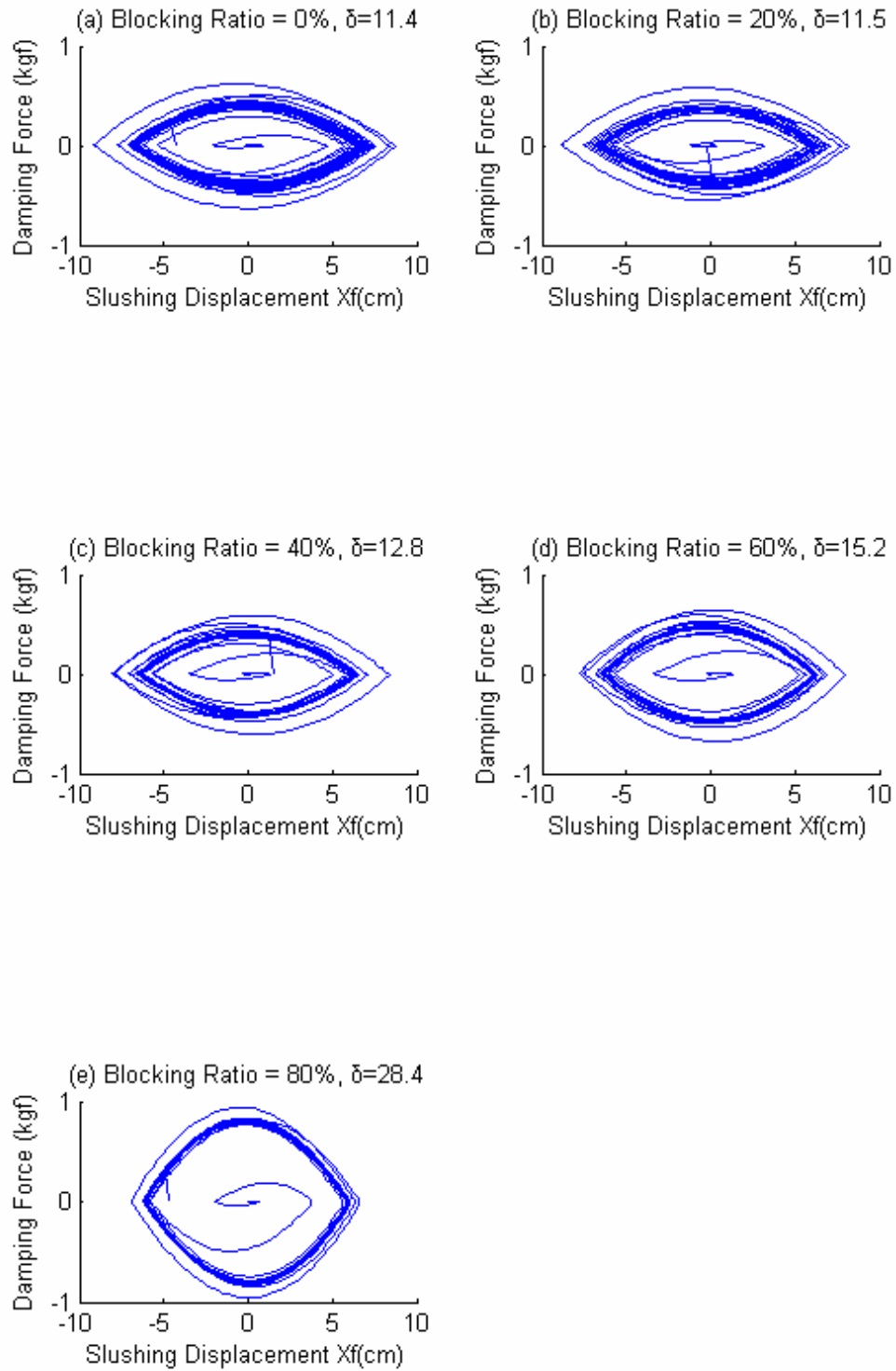


圖 3.22(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=0.31$)

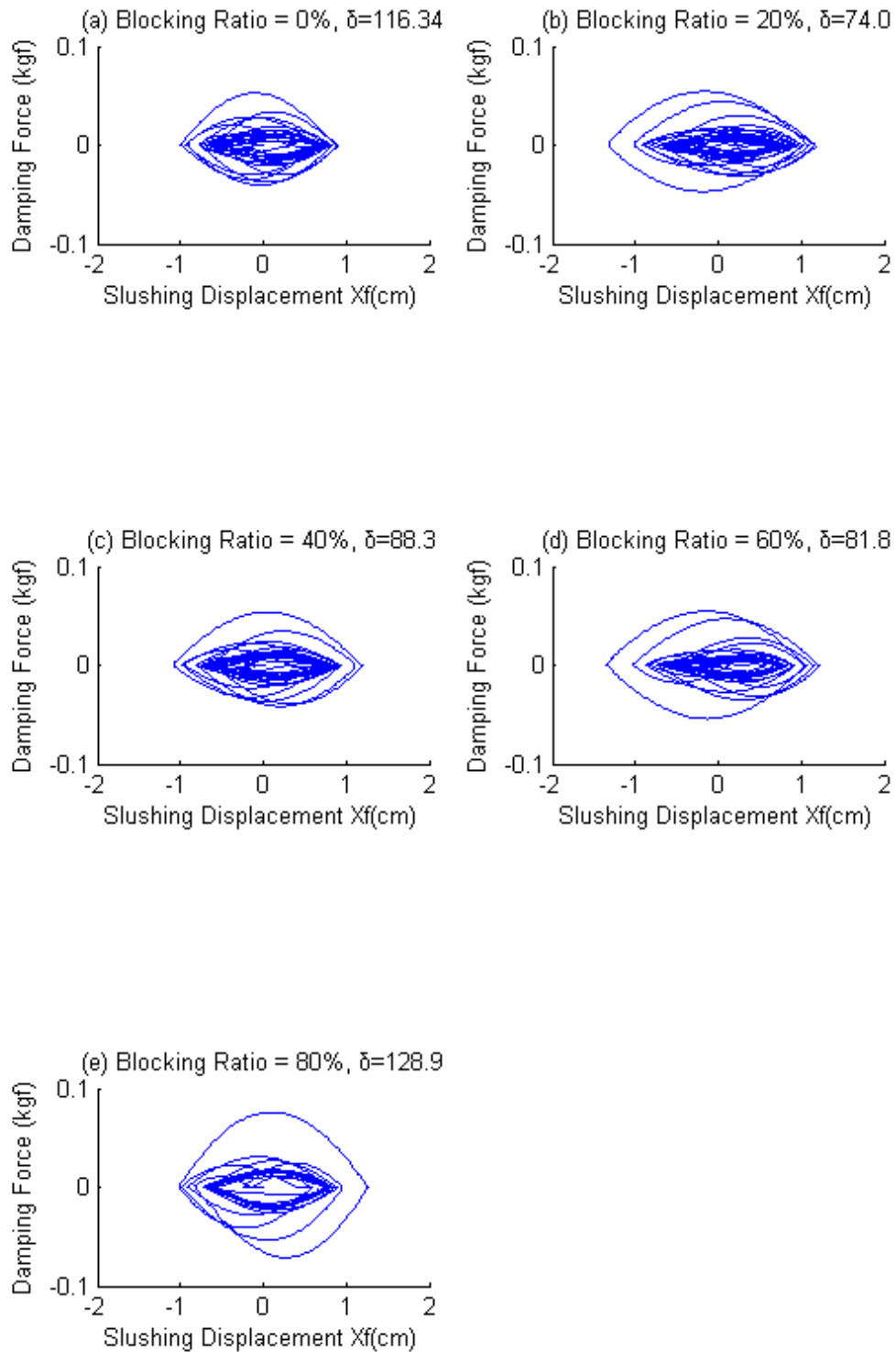


圖 3.23(a) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=0.6$)

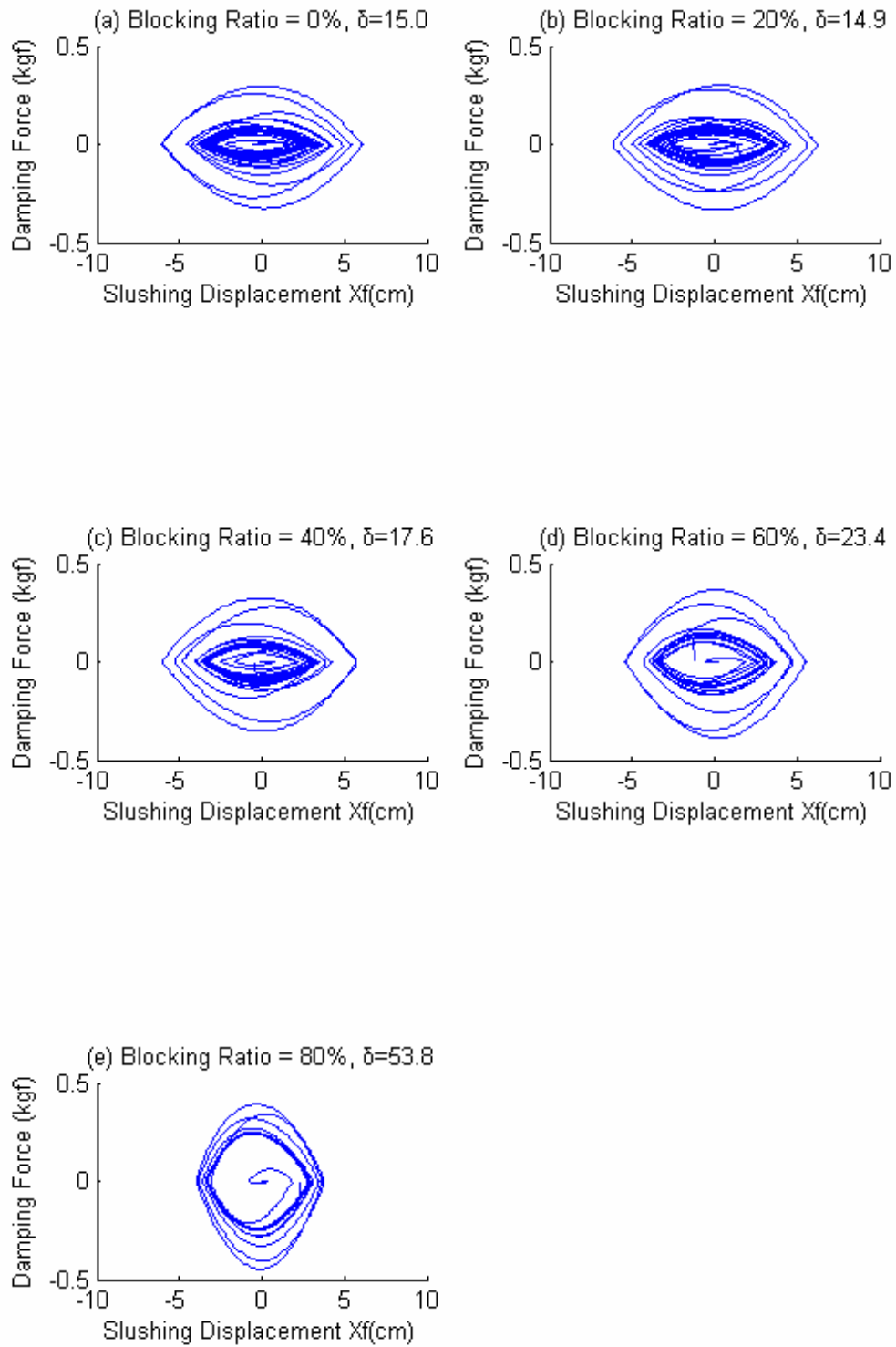


圖 3.23(b) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=0.6$)

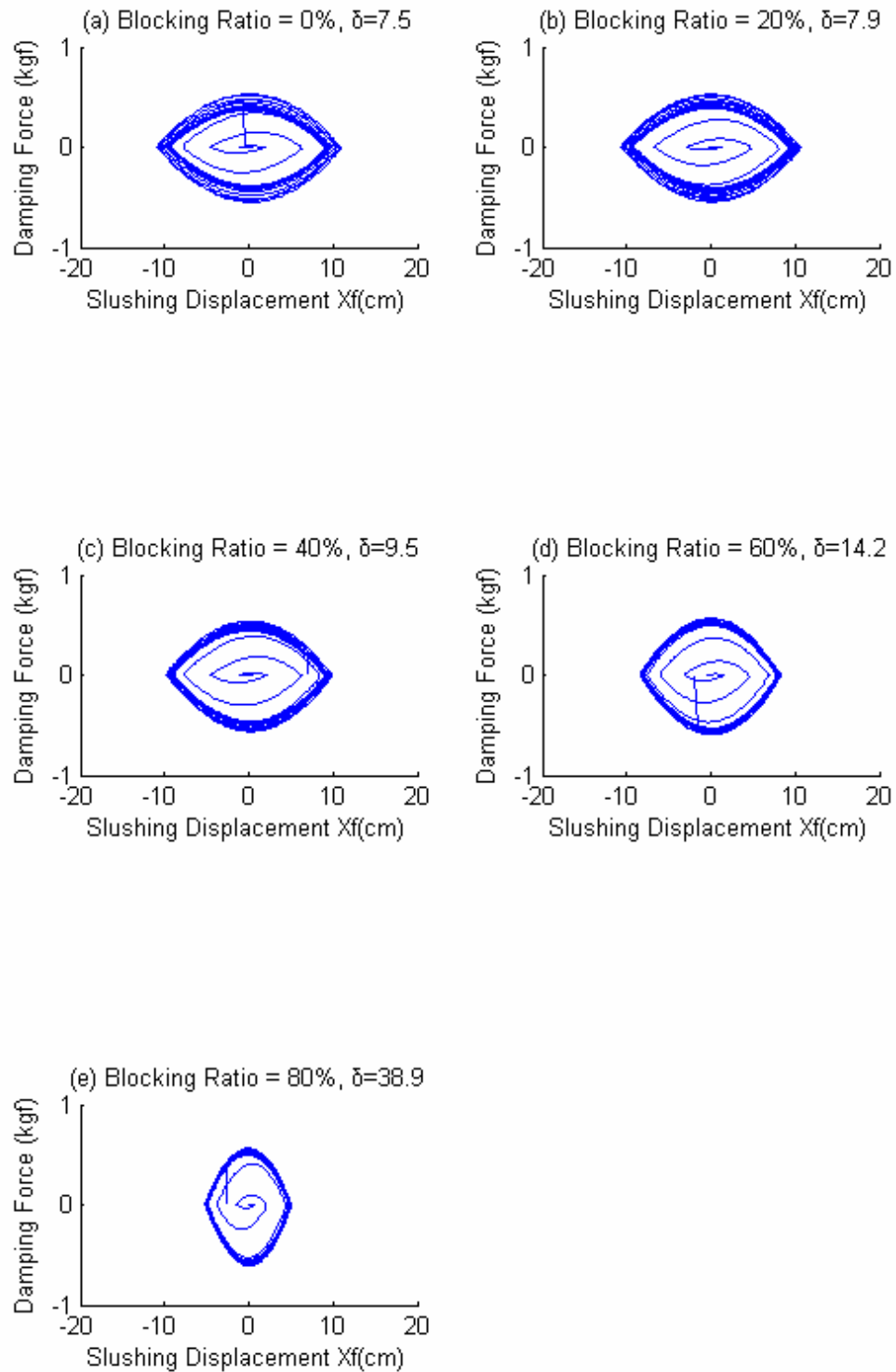


圖 3.23(c) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=0.6$)

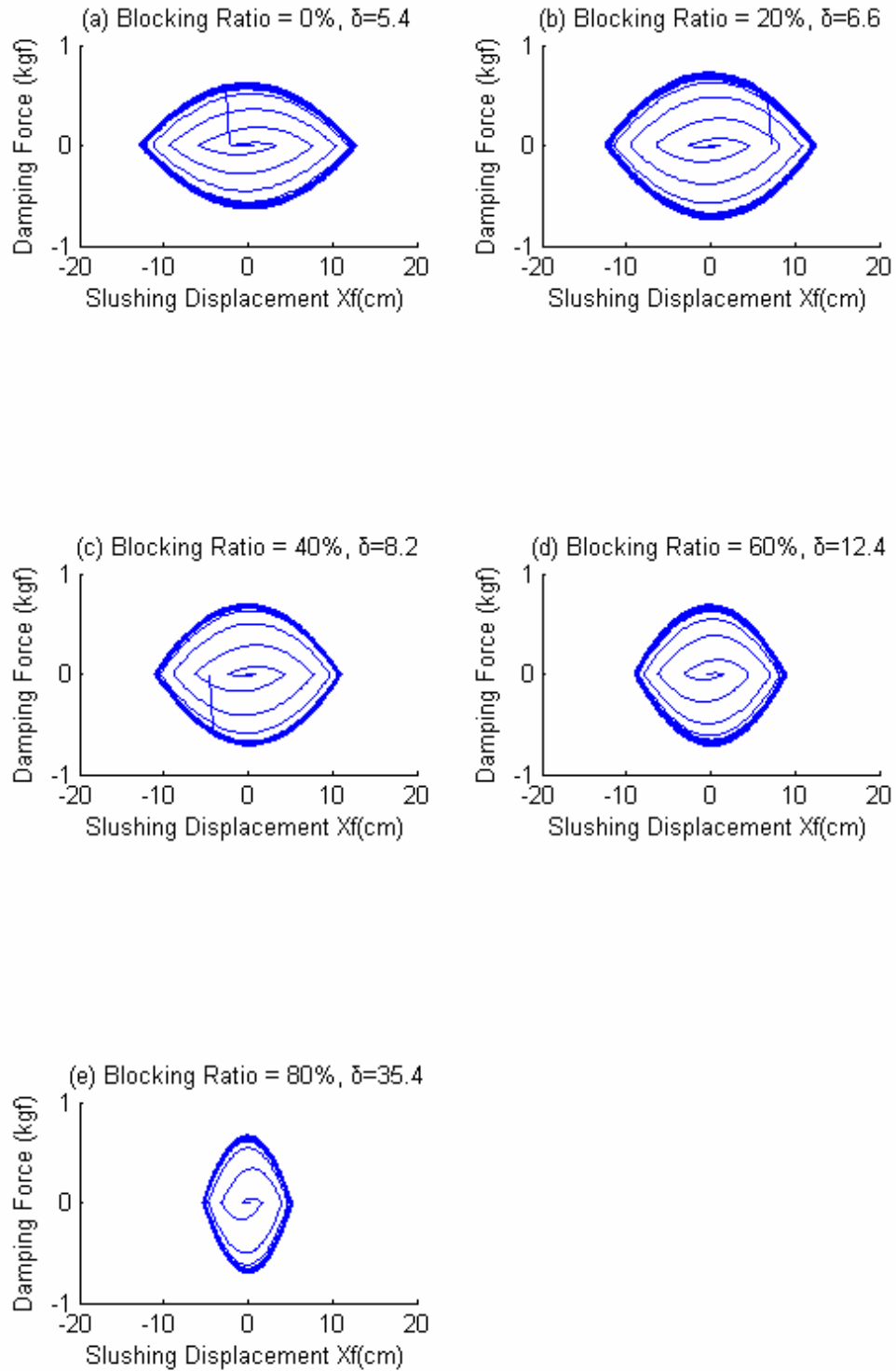


圖 3.23(d) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=0.6$)

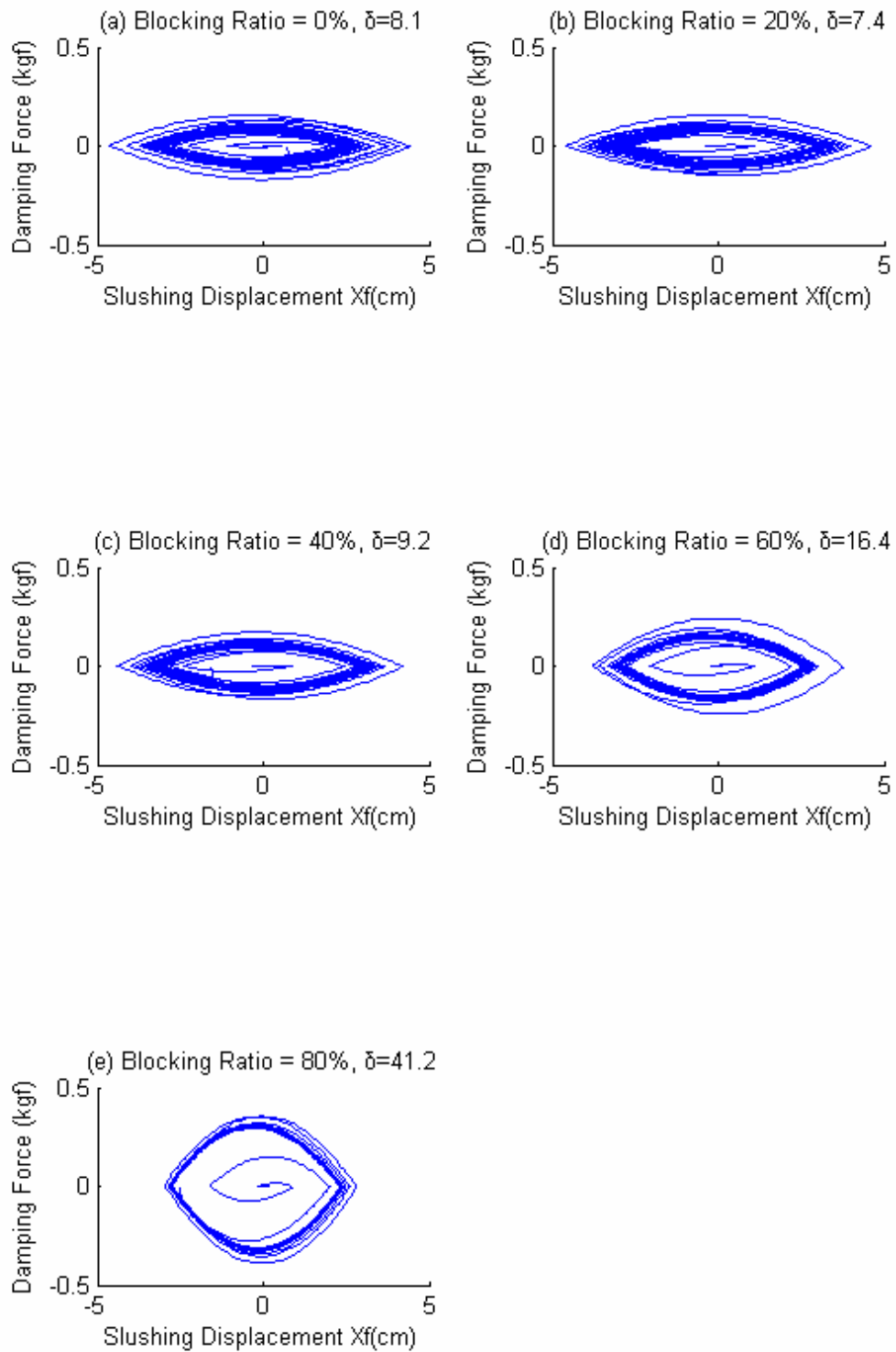


圖 3.23(e) 小尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=0.6$)

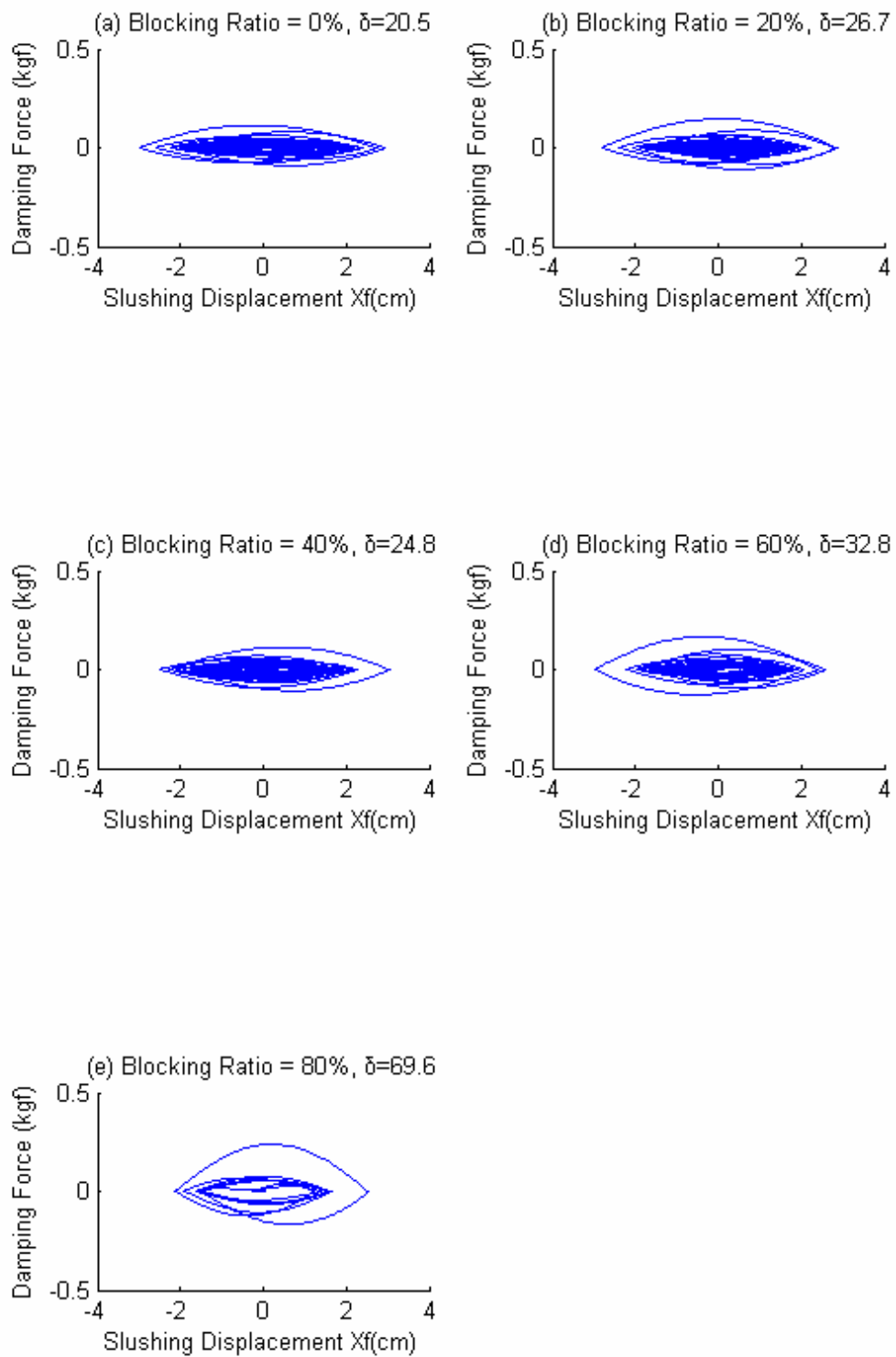


圖 3.24(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)

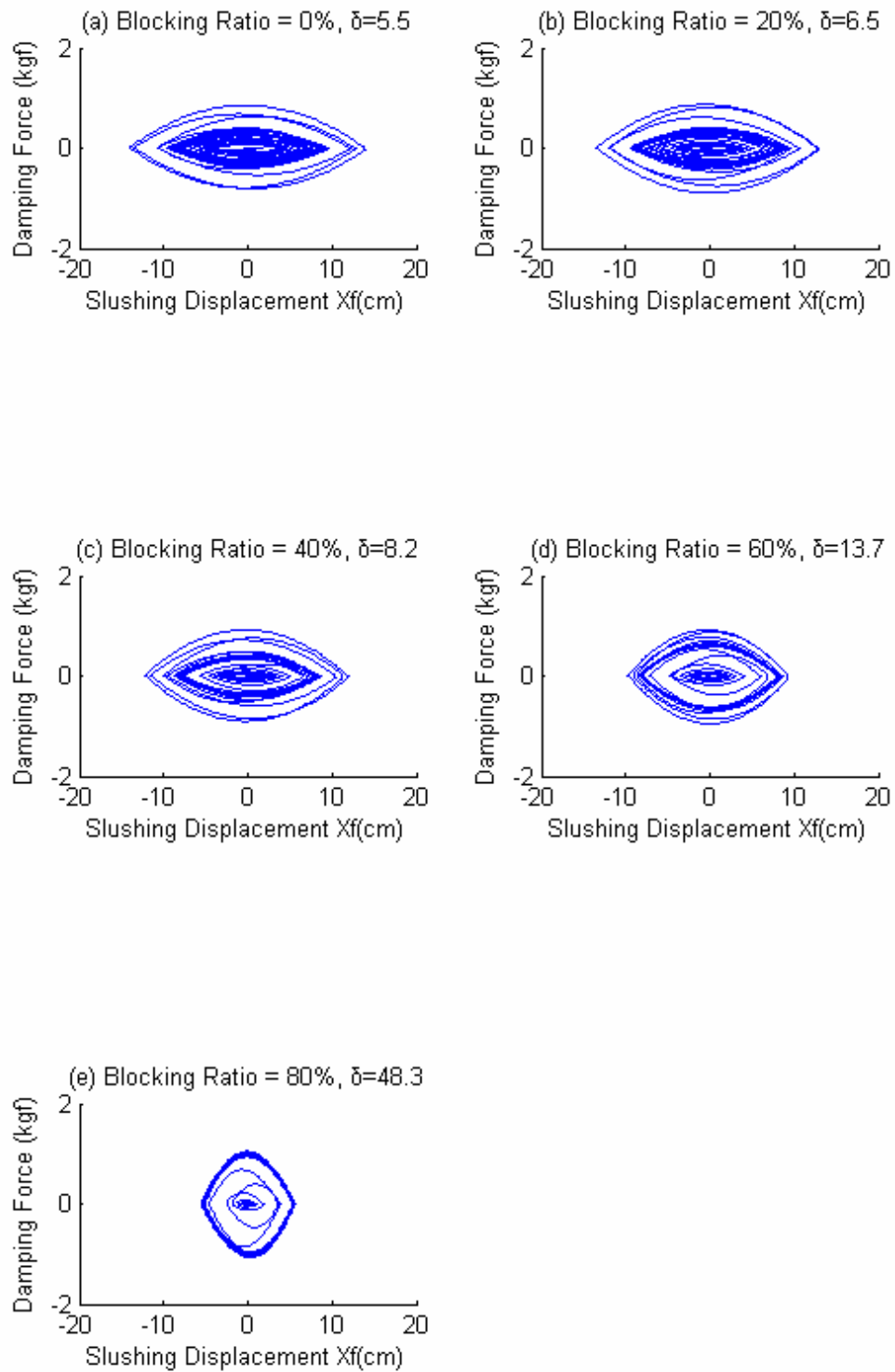


圖 3.24(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)

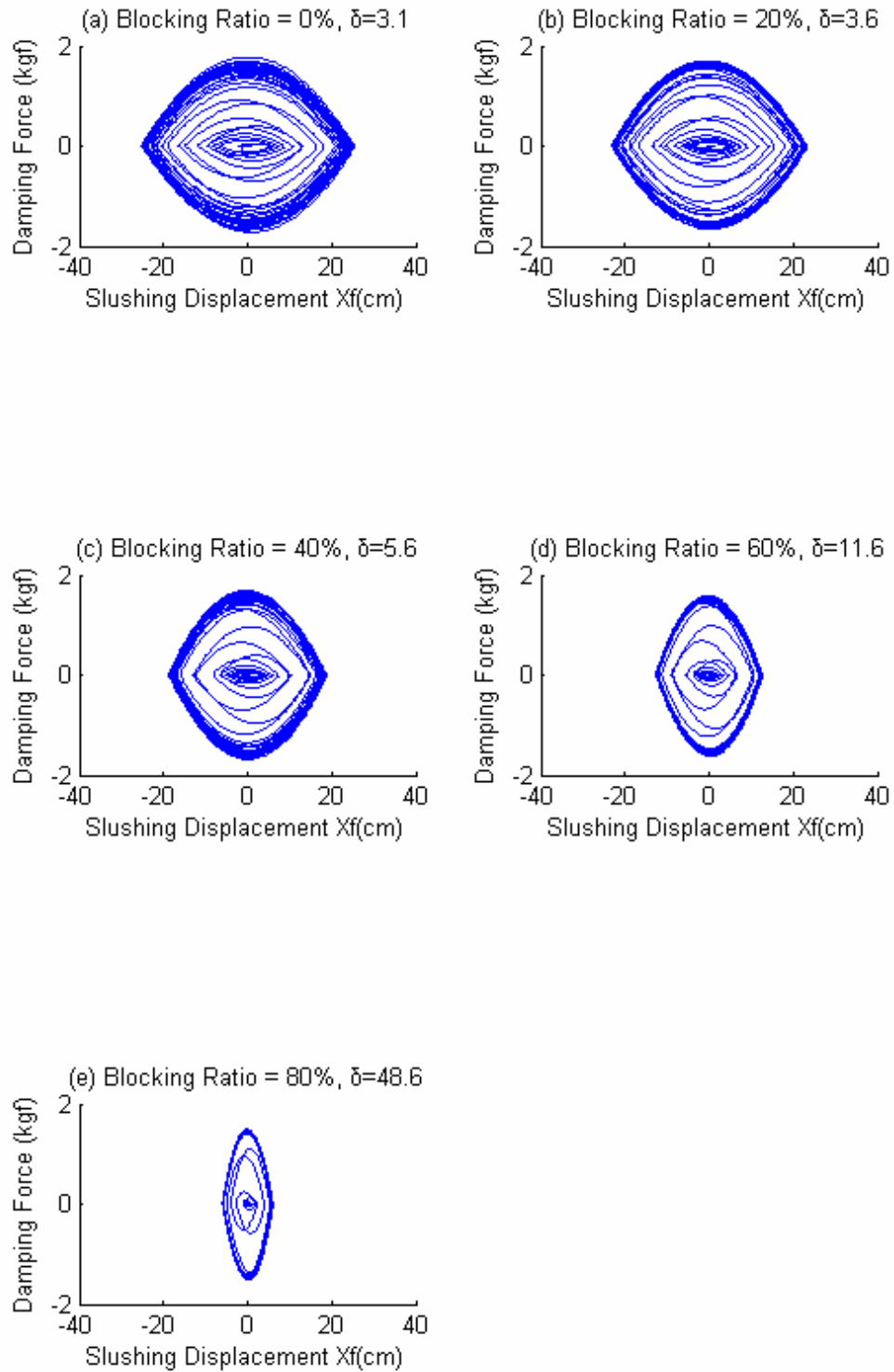


圖 3.24(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)

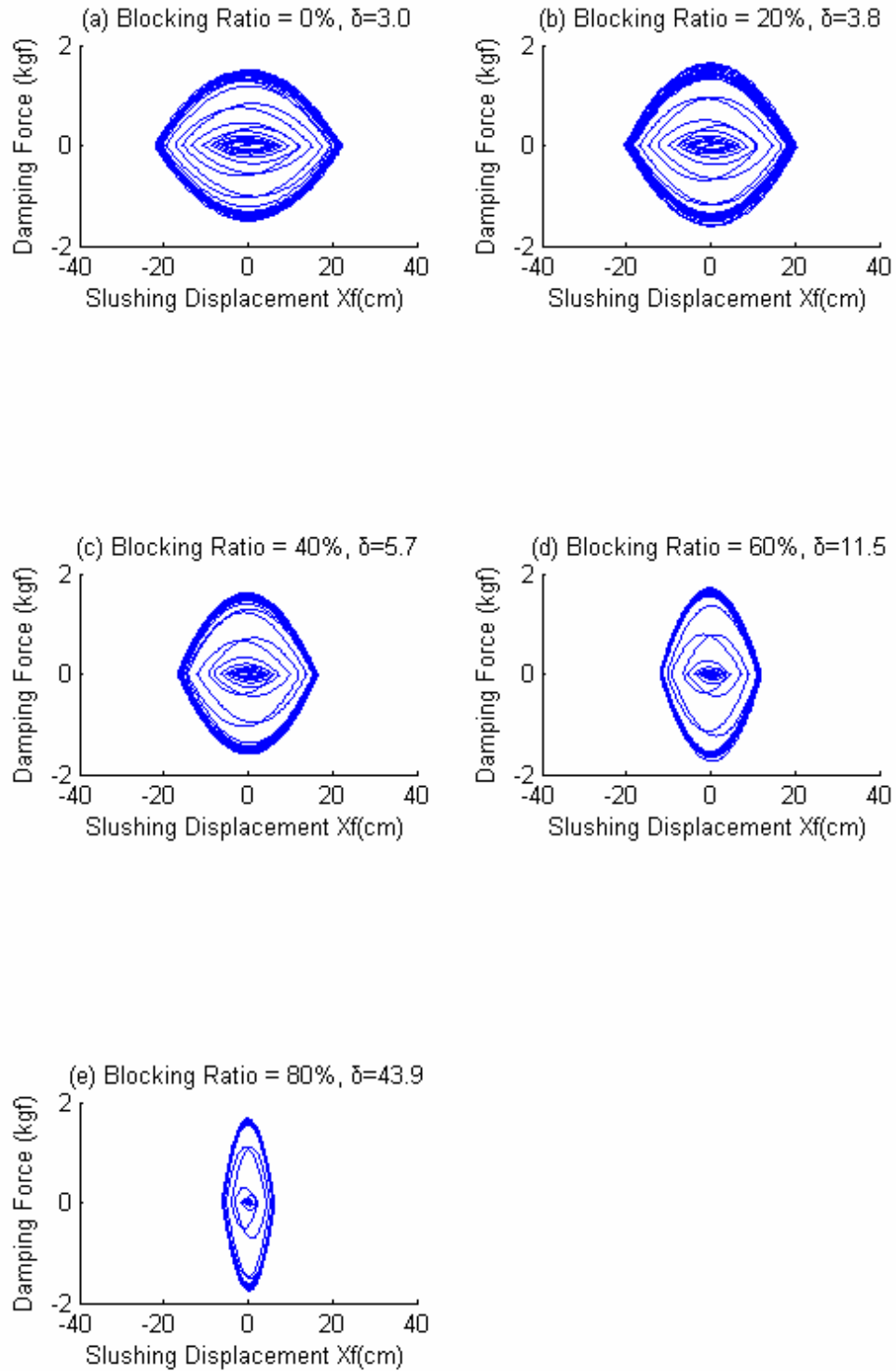


圖 3.24(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)

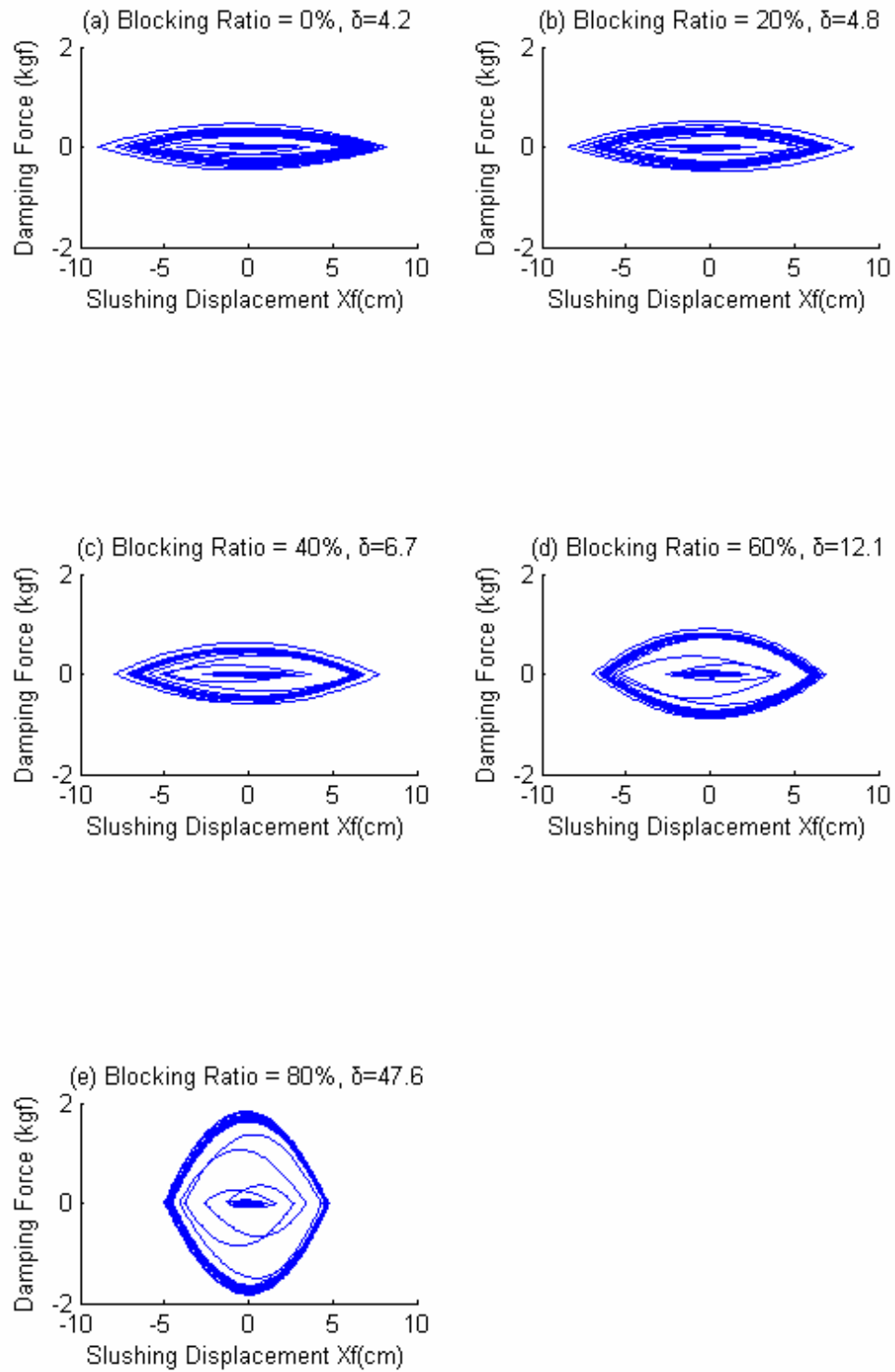


圖 3.24(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)

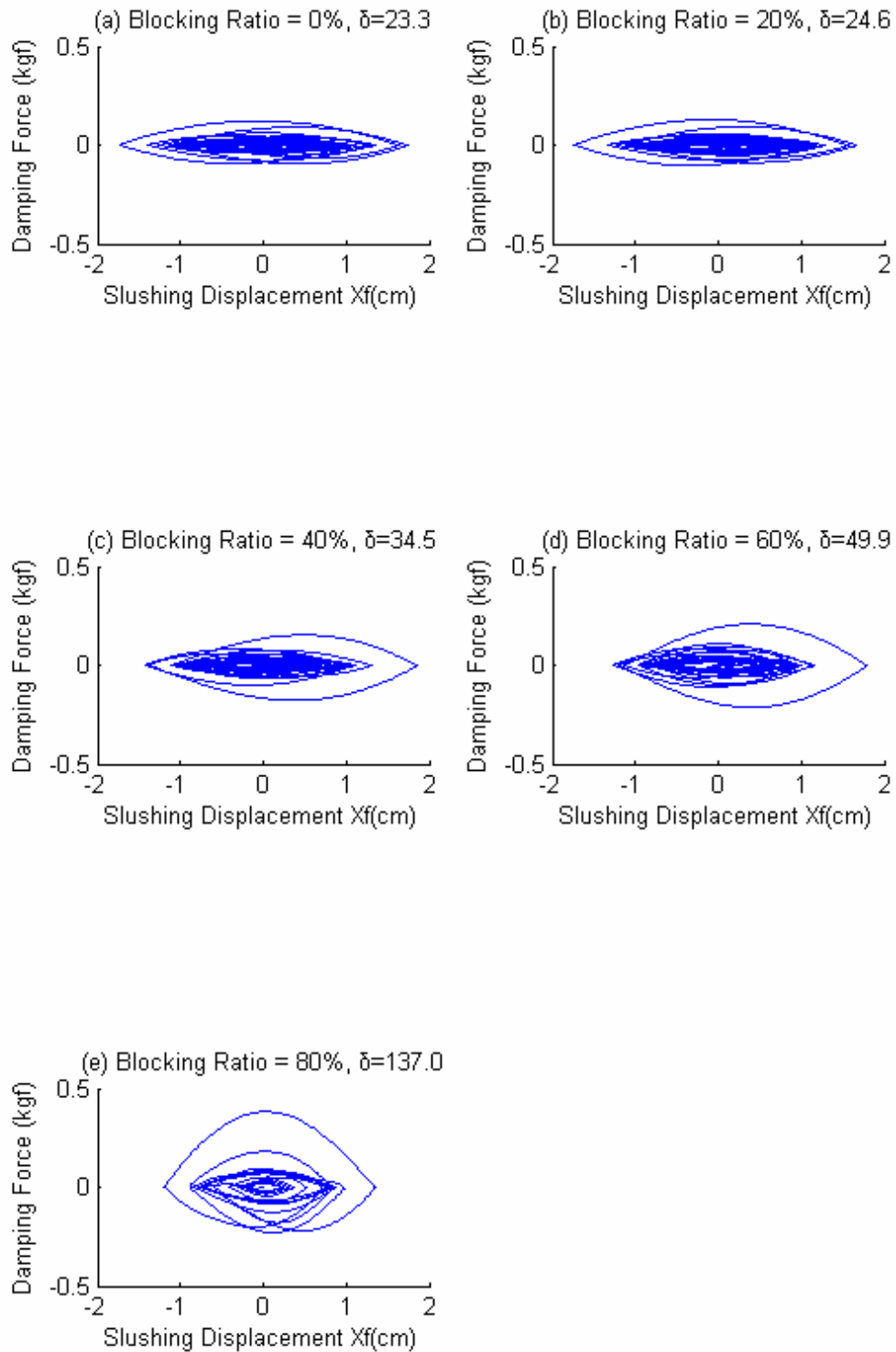


圖 3.25(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)

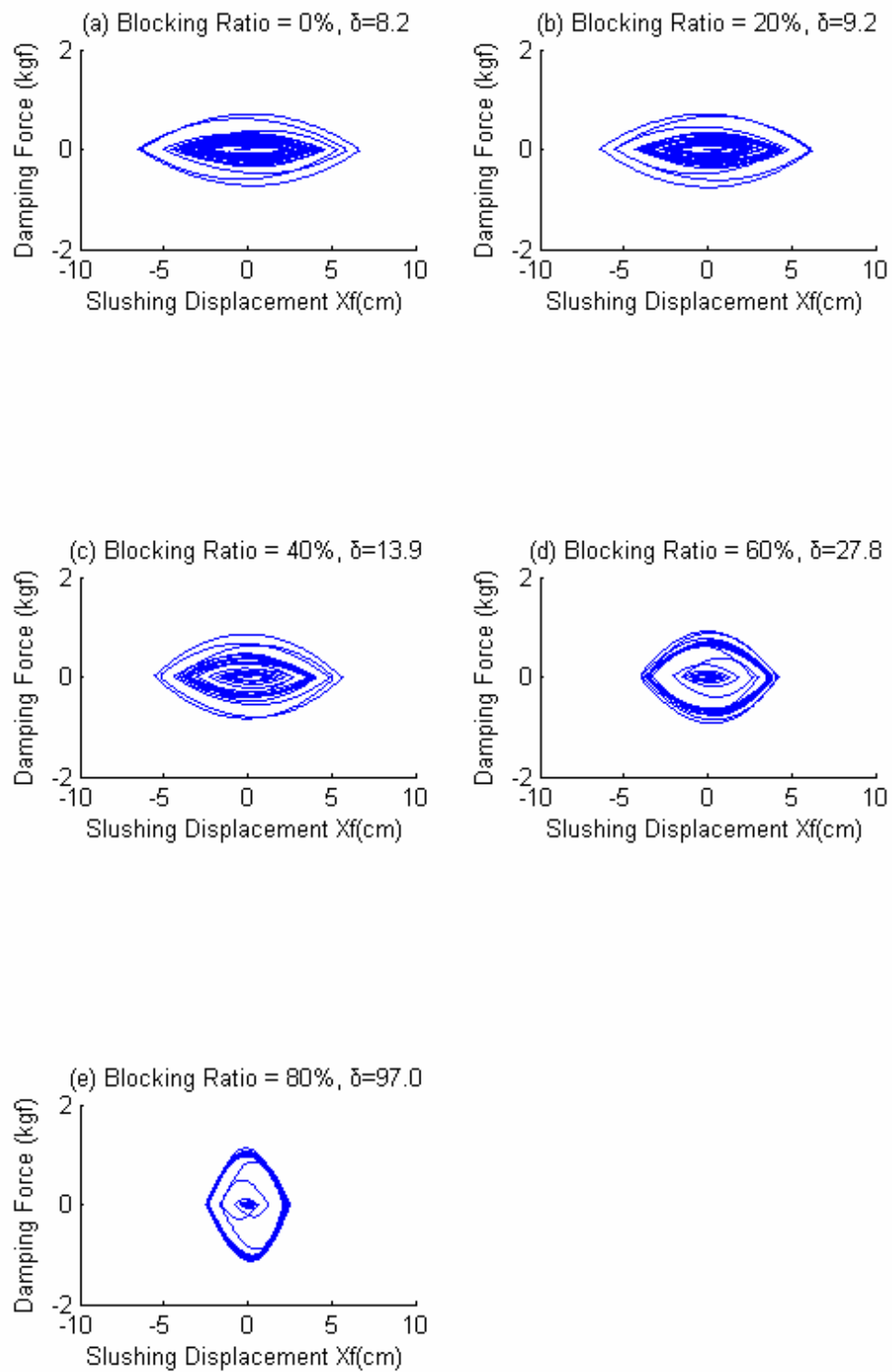


圖 3.25(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)

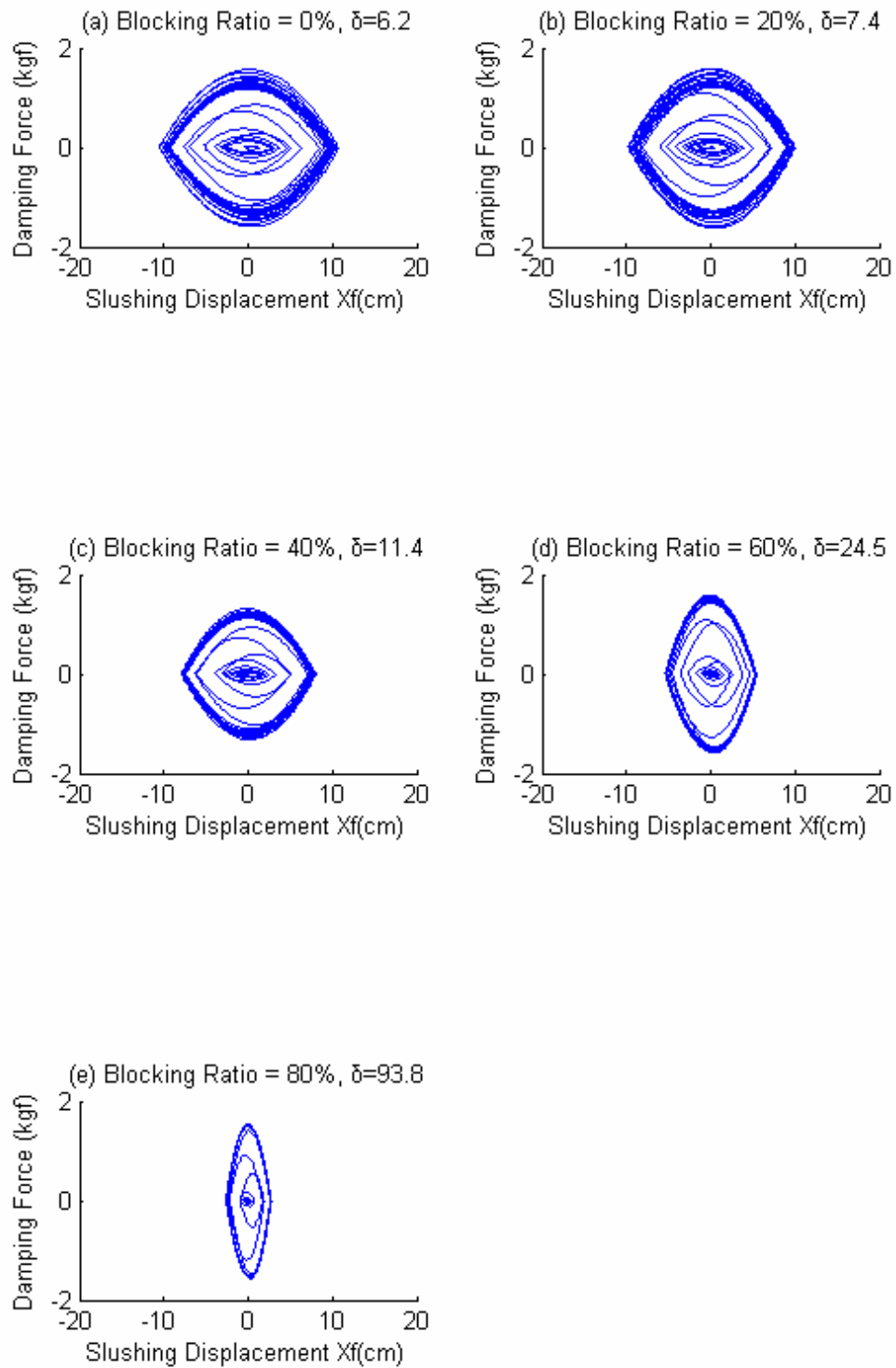


圖 3.25(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)

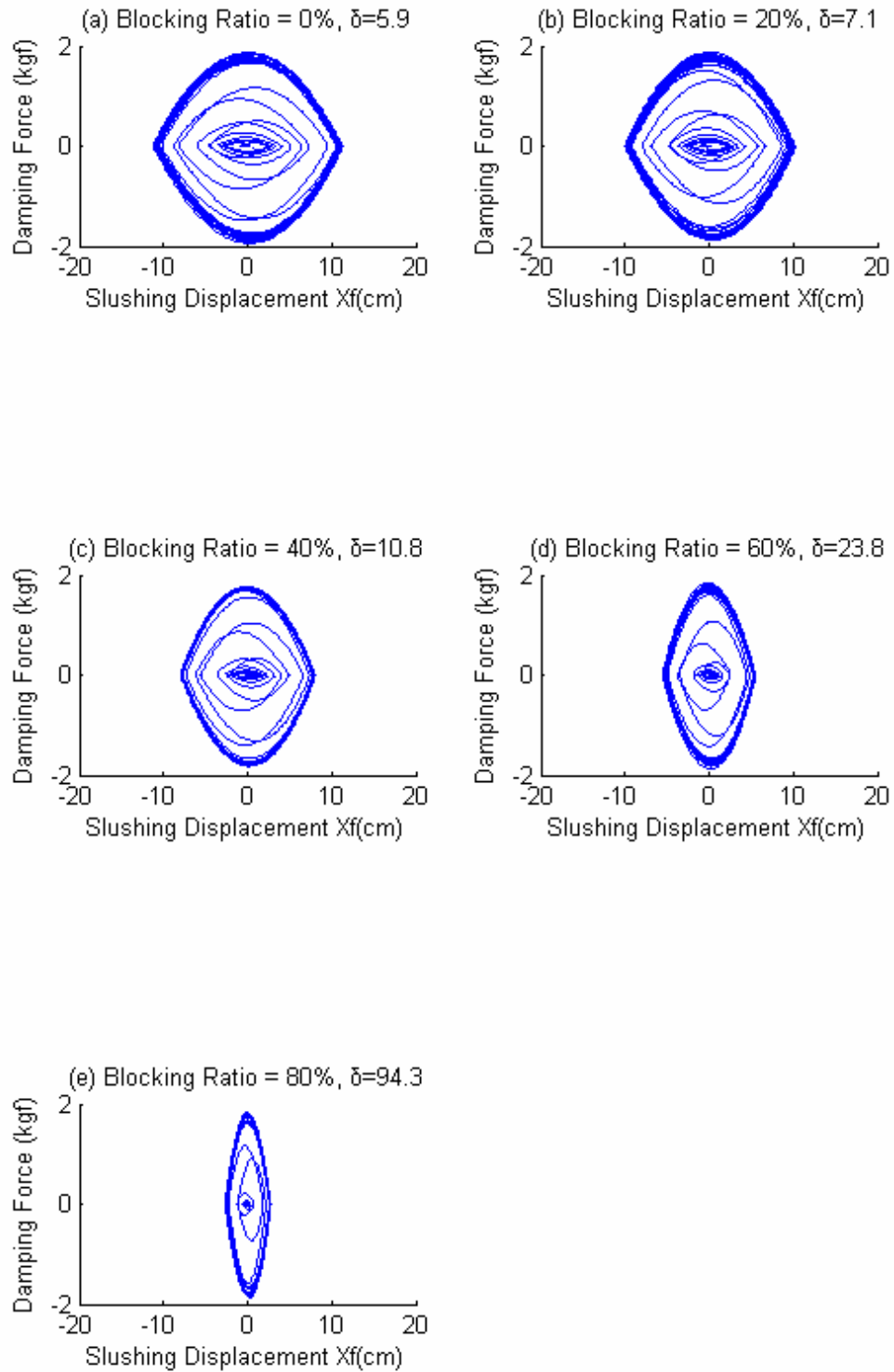


圖 3.25(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)

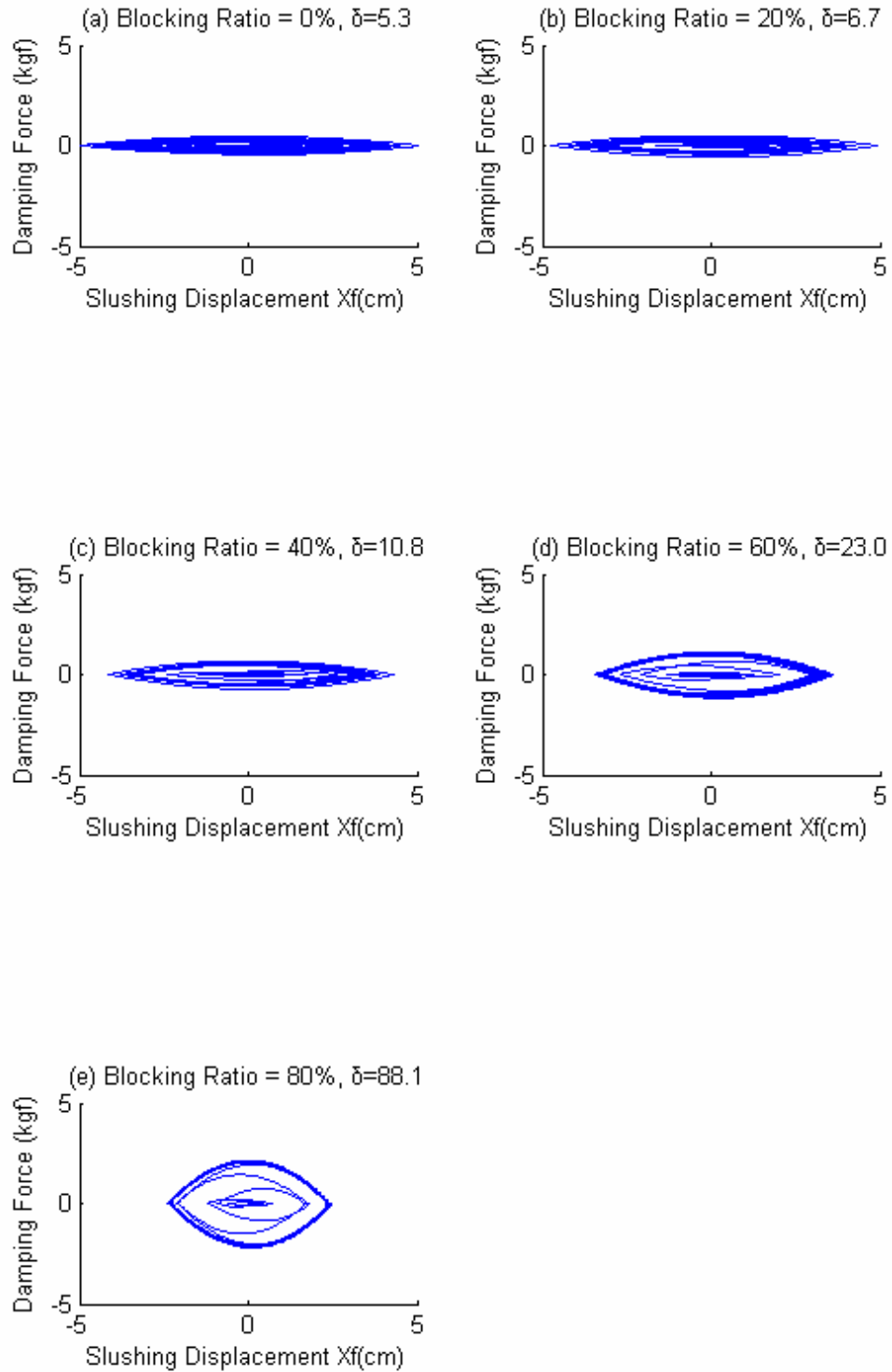


圖 3.25(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)

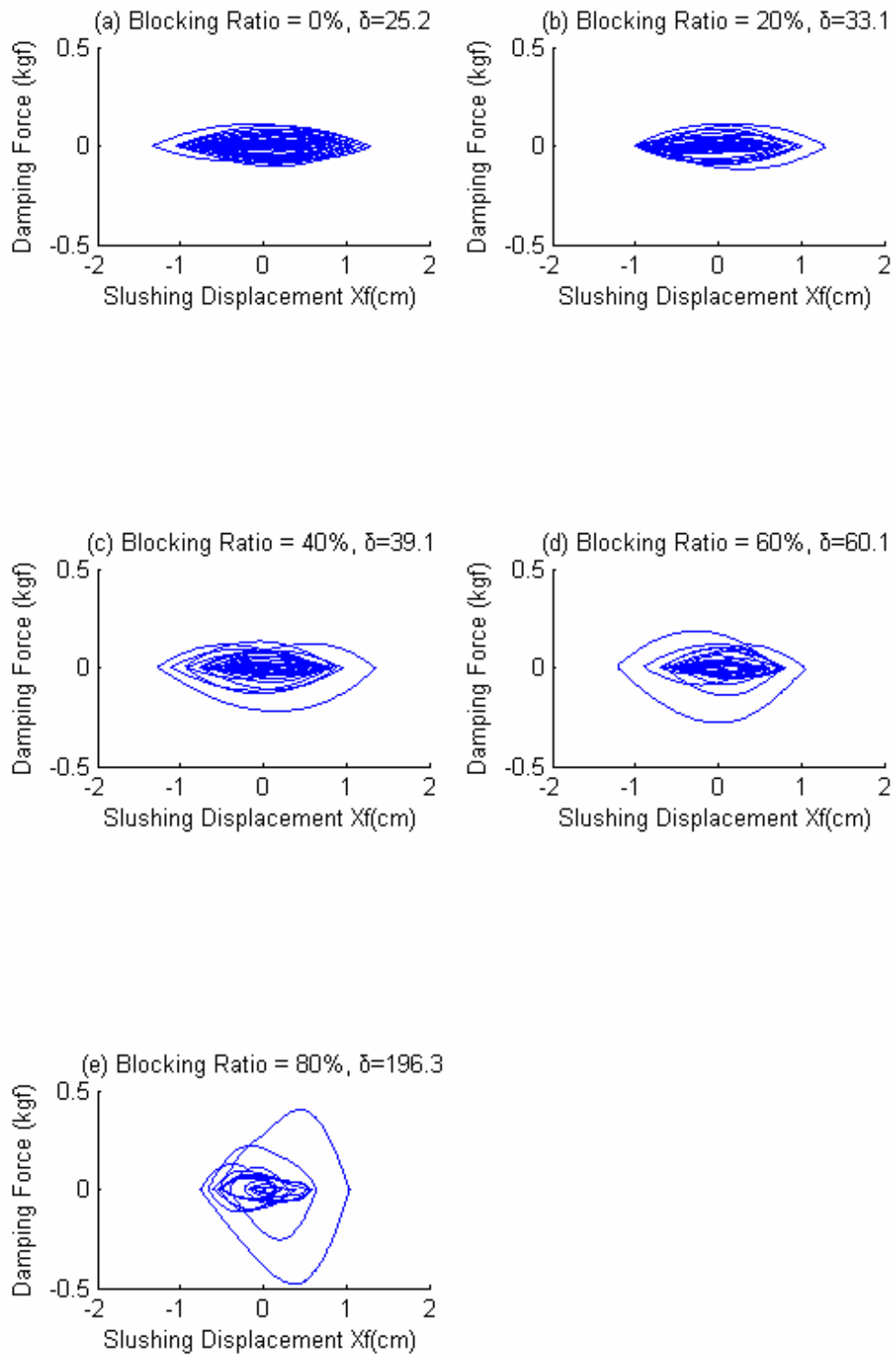


圖 3.26(a) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)

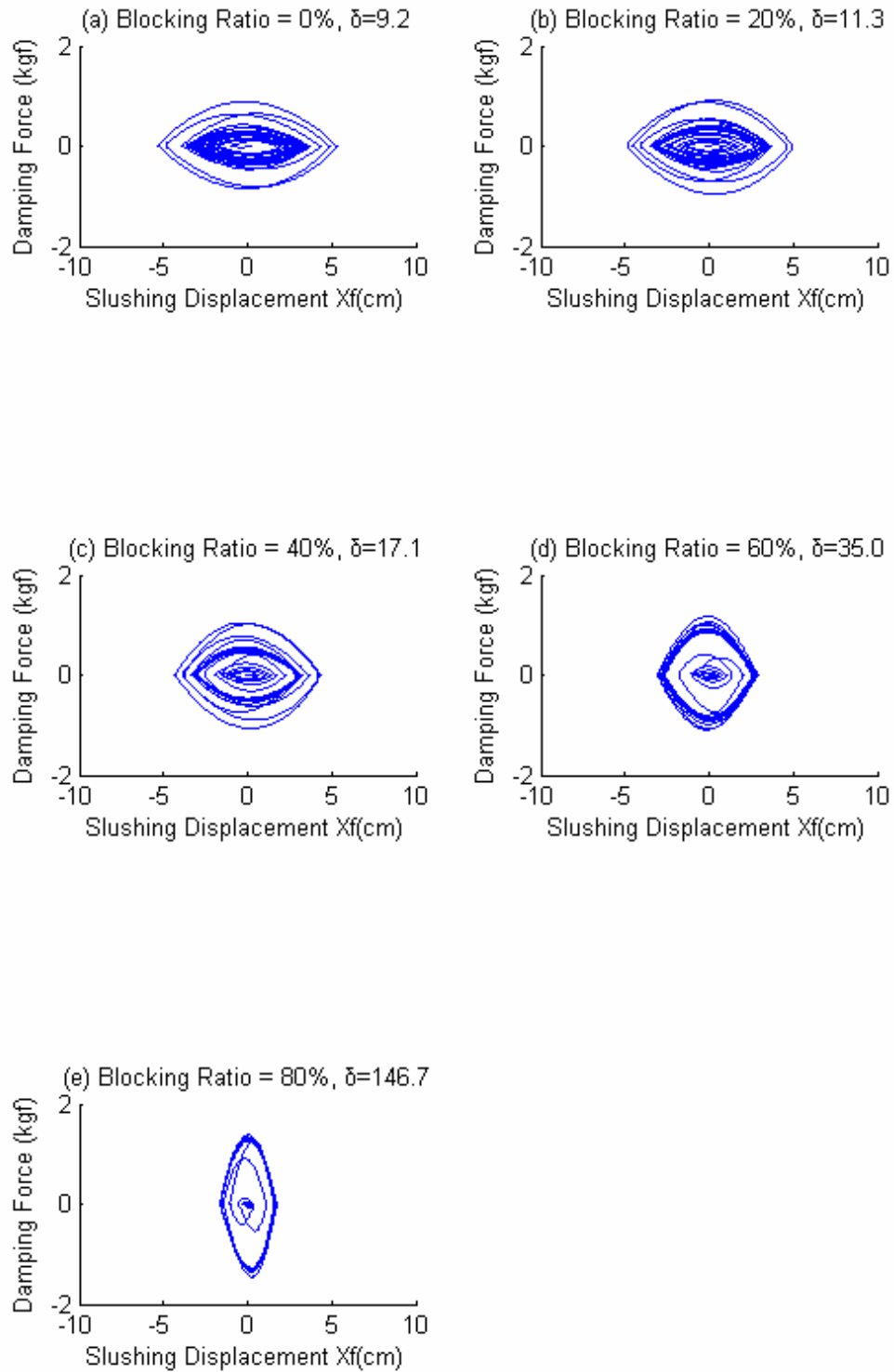


圖 3.26(b) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)

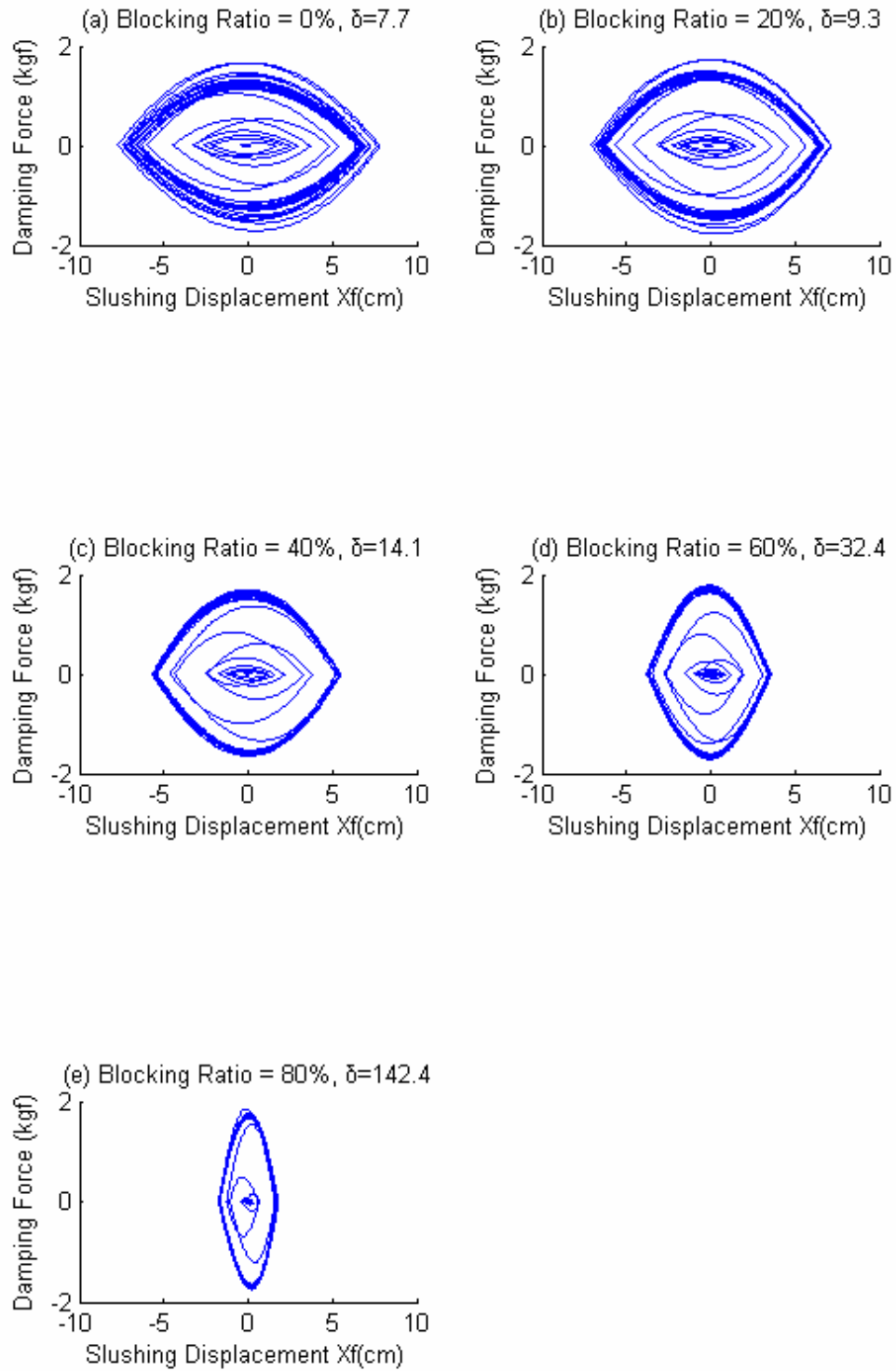


圖 3.26(c) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)

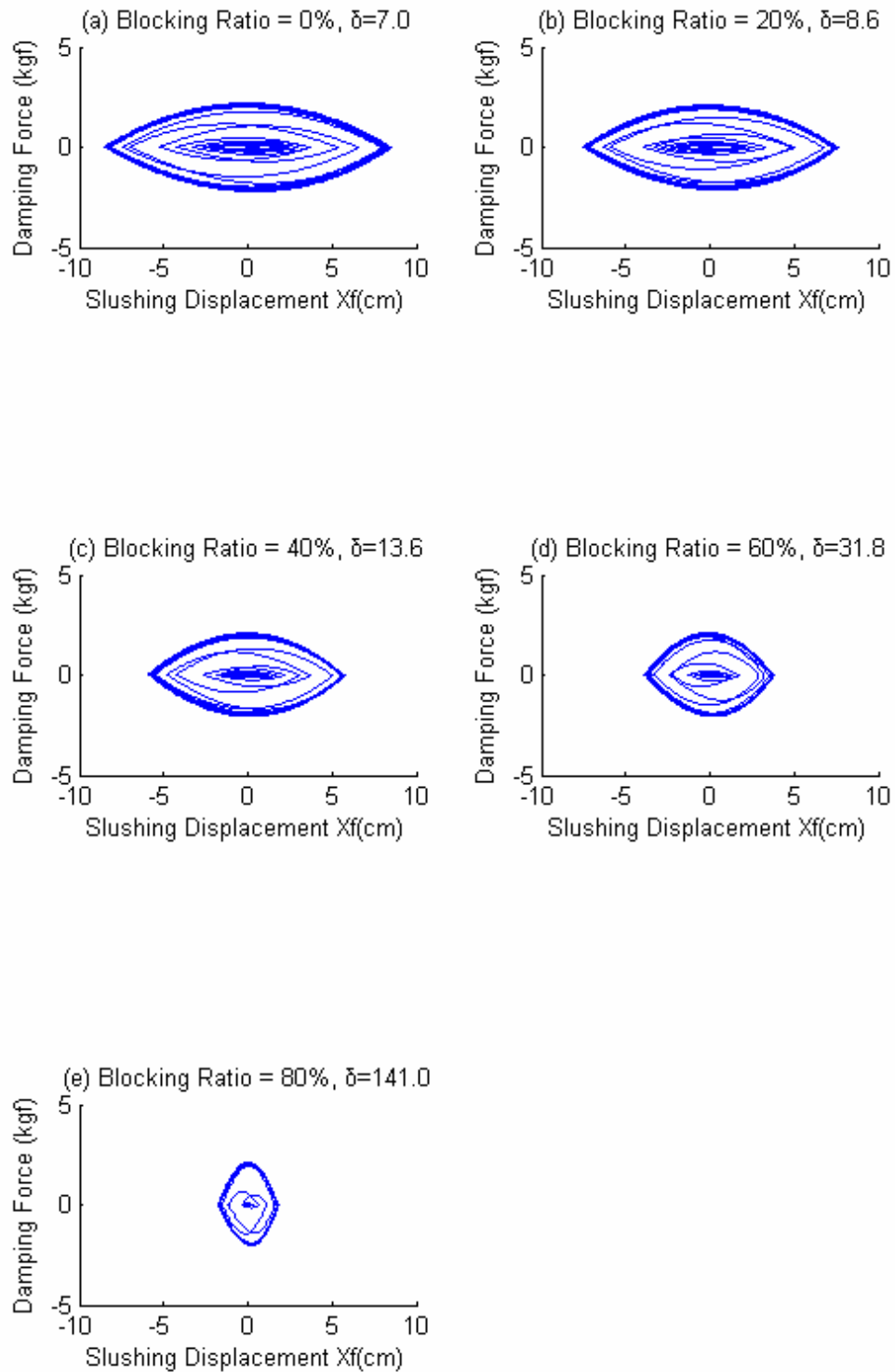


圖 3.26(d) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)

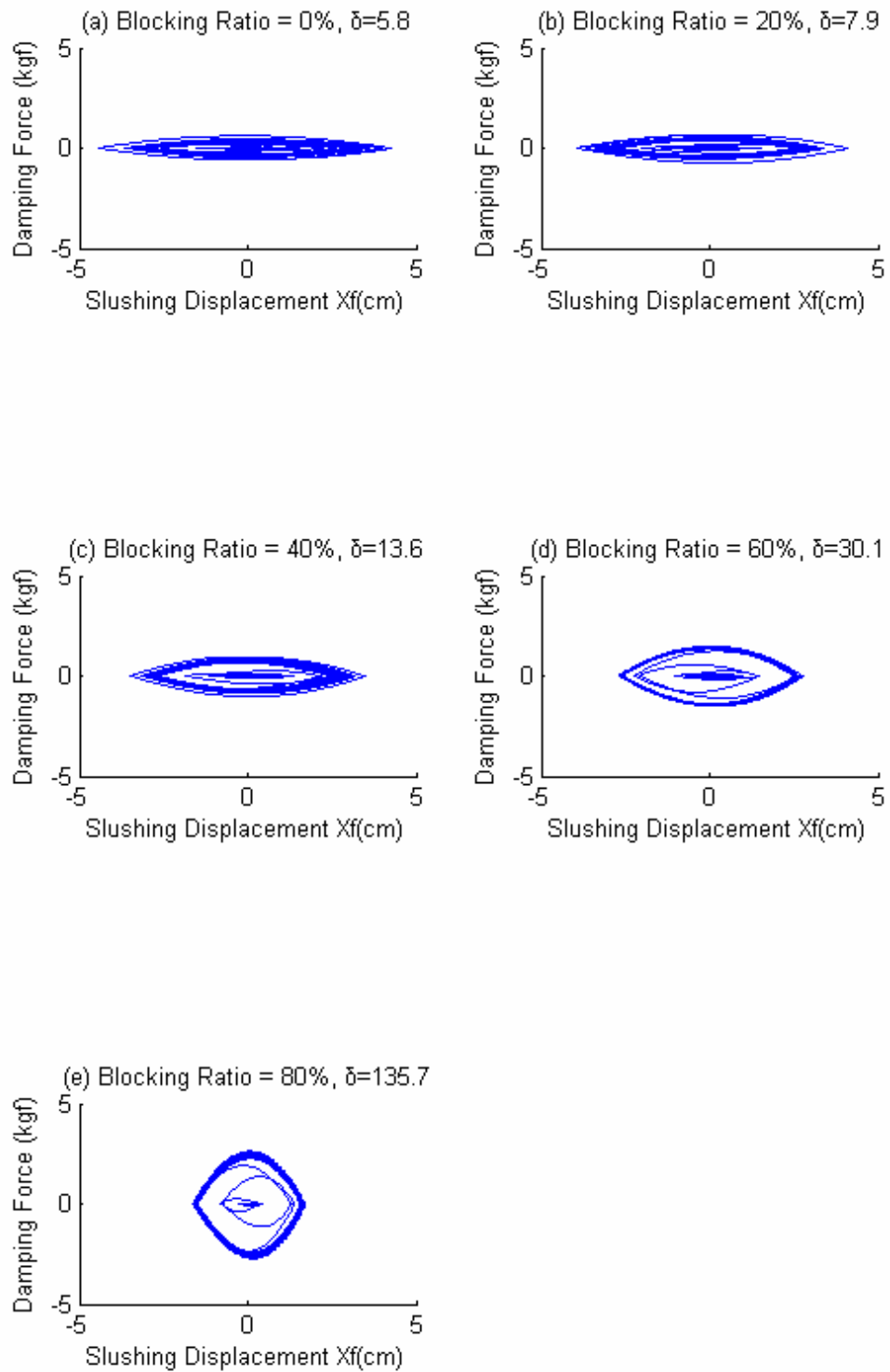


圖 3.26(e) 大尺寸水平運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)

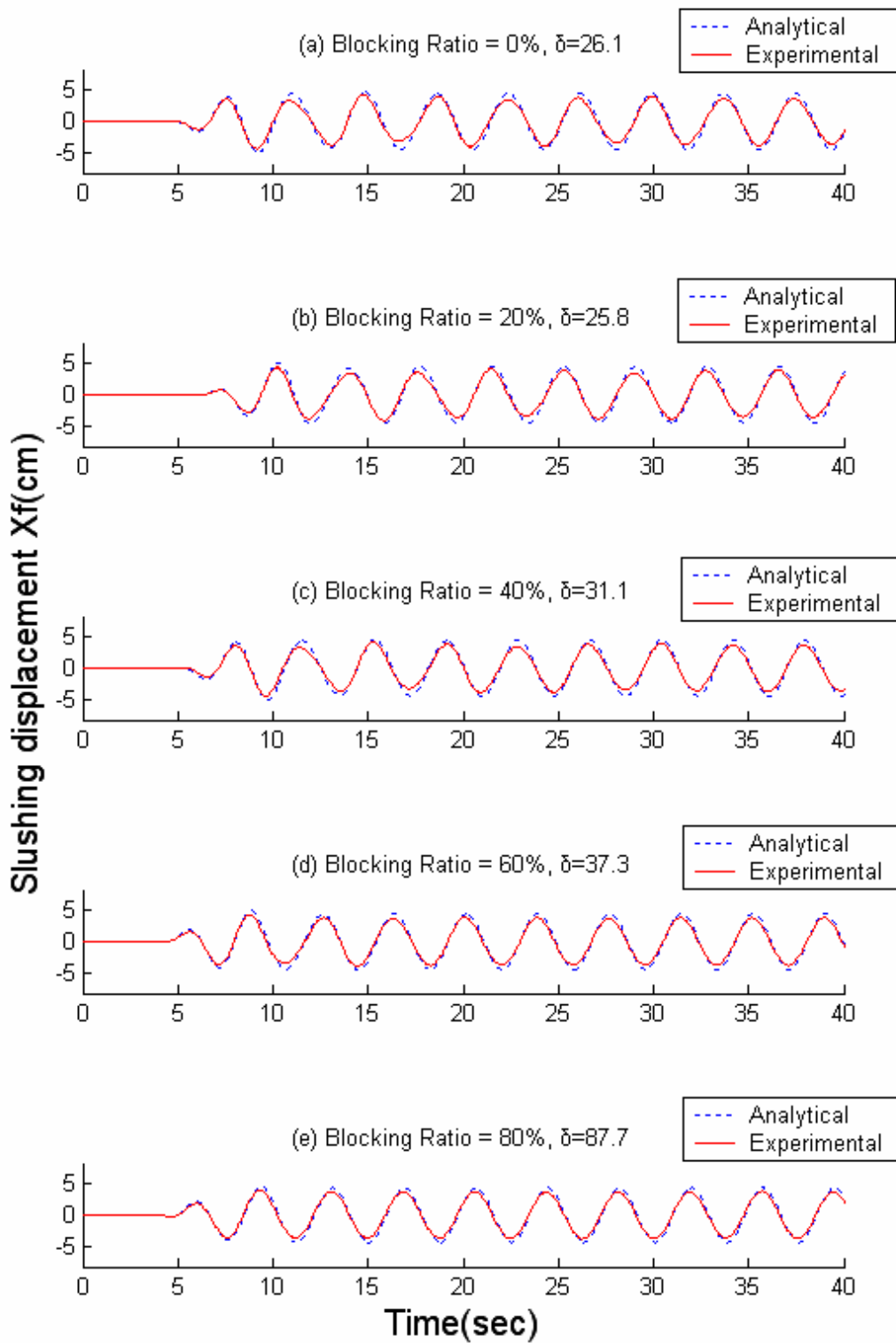


圖 3.27(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)

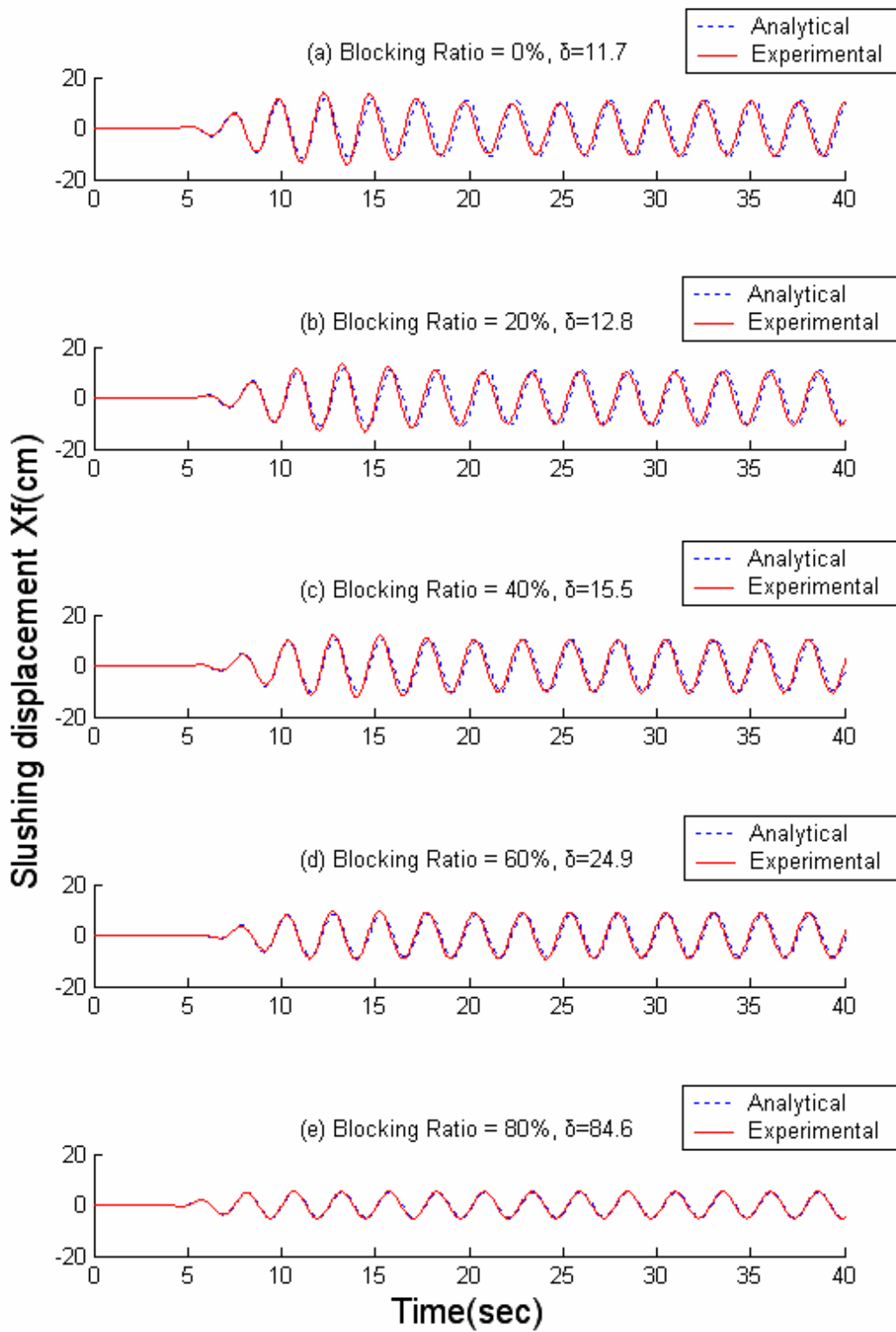


圖 3.27(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)

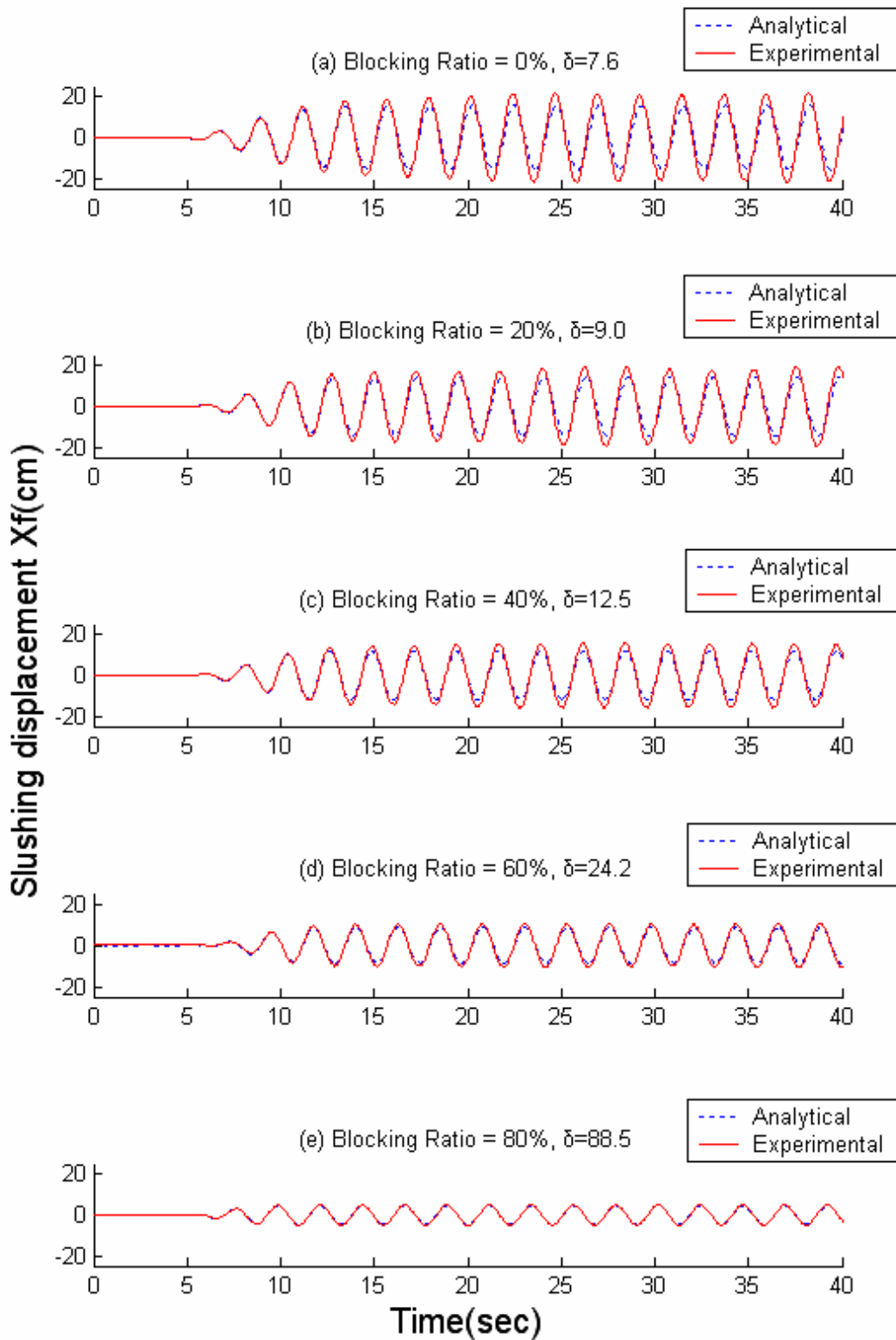


圖 3.27(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)

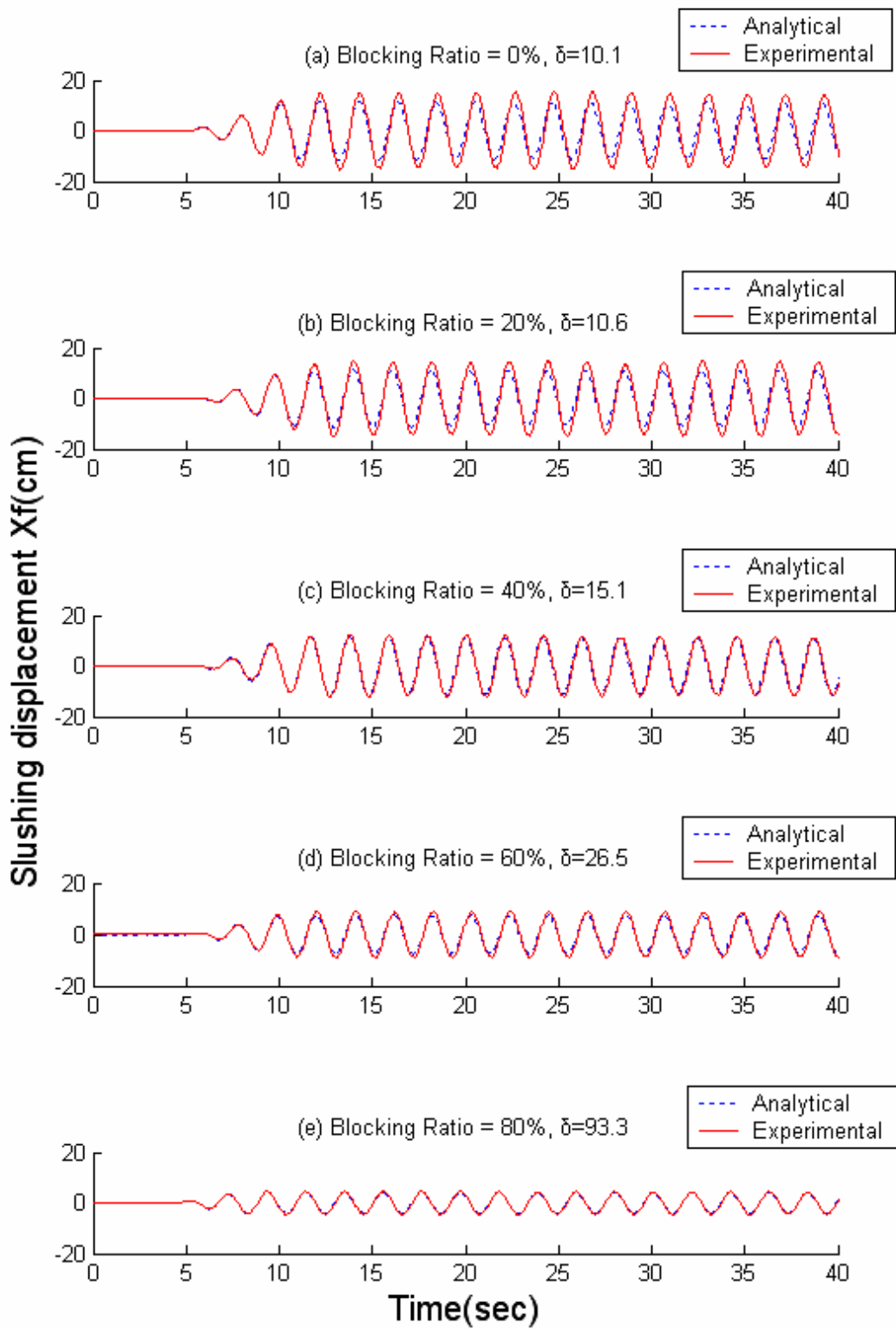


圖 3.27(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)

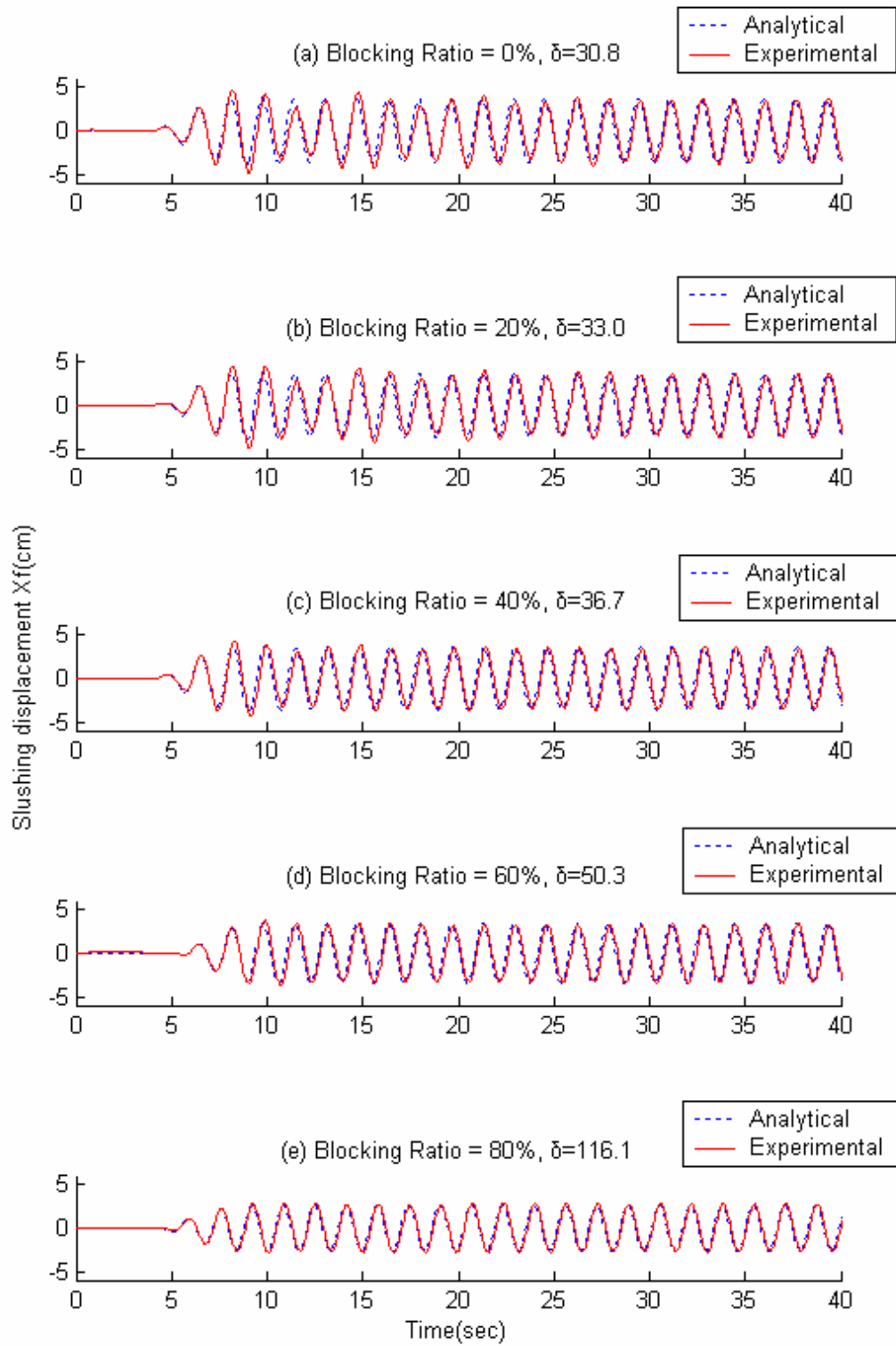


圖 3.27(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)

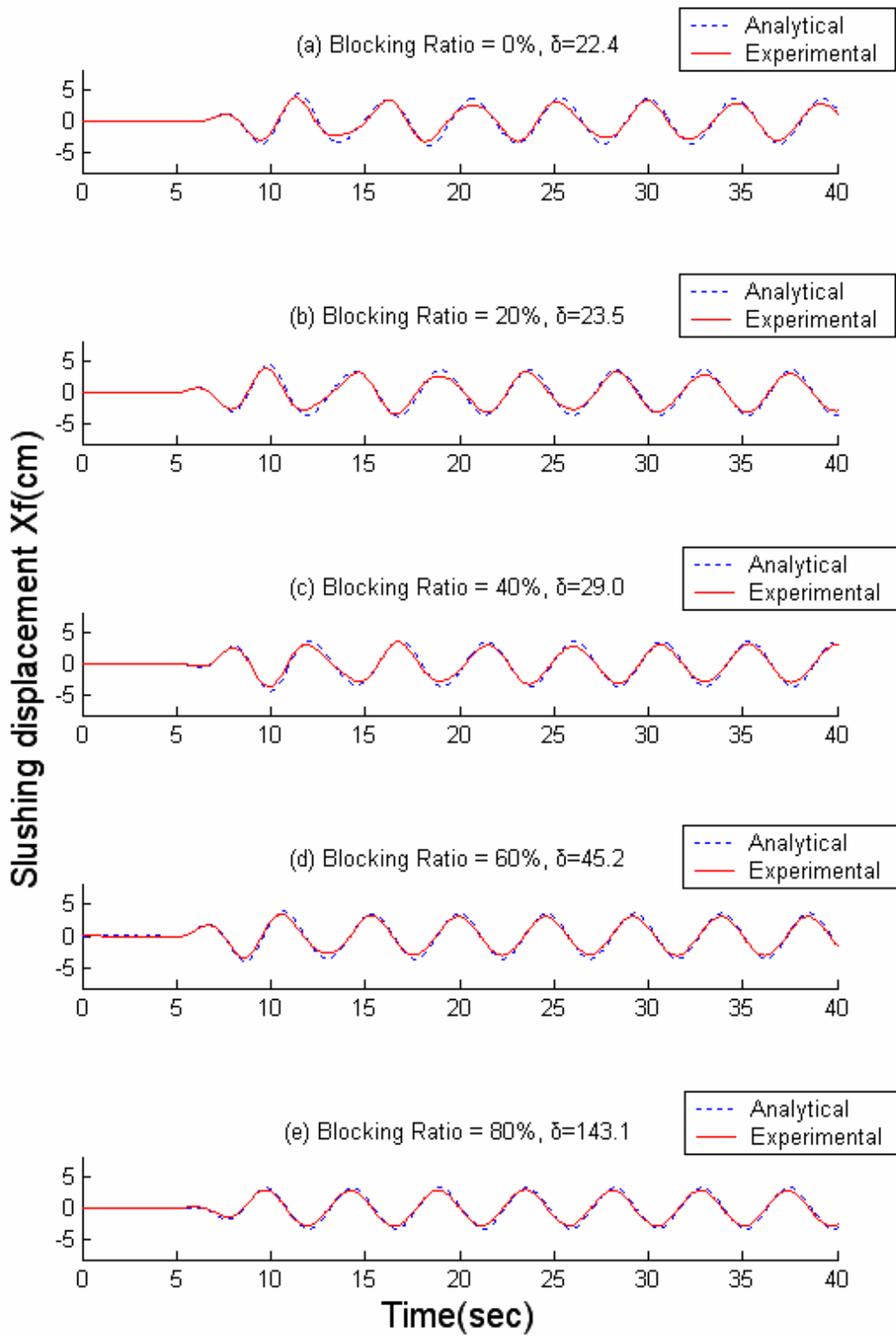


圖 3.28(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)

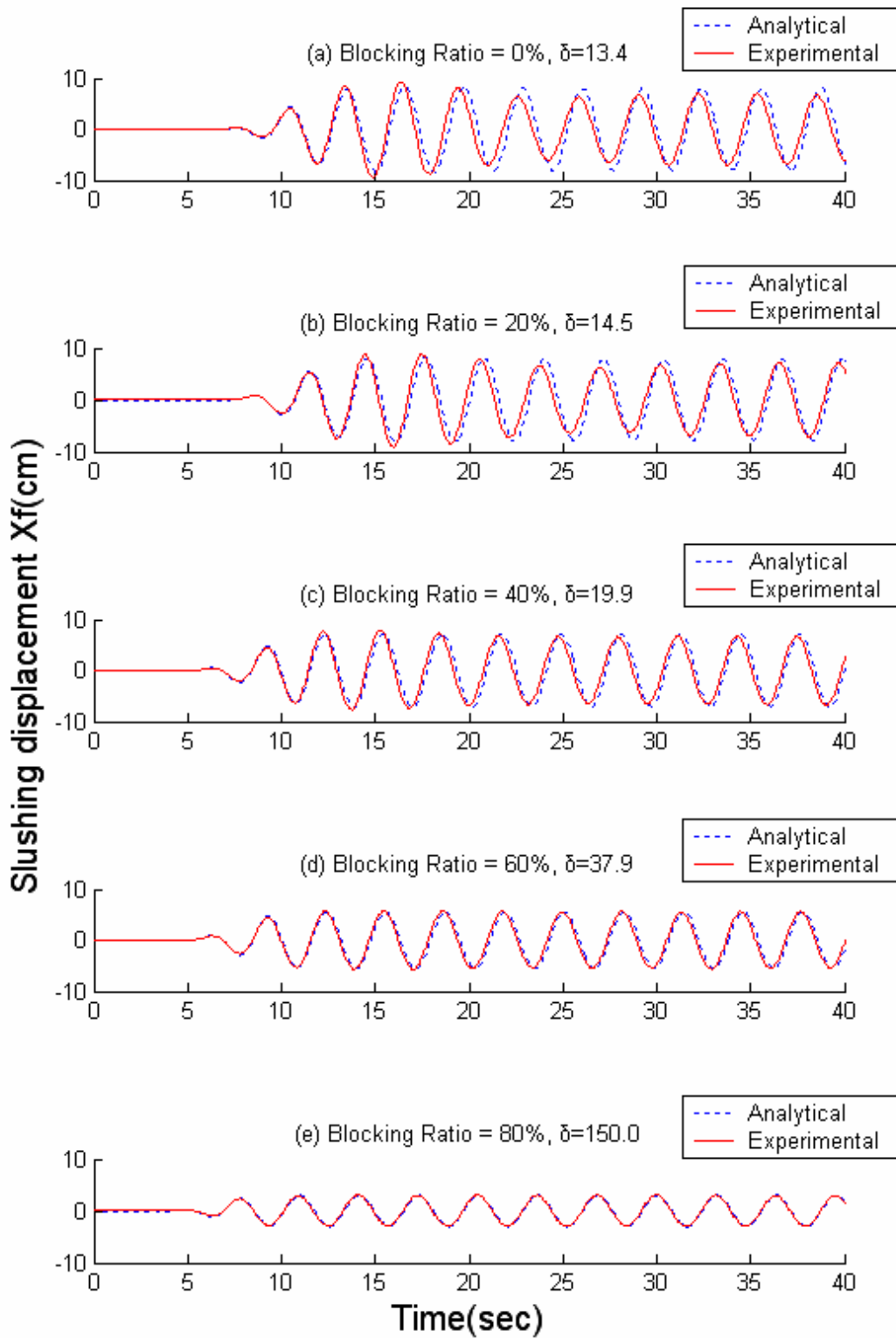


圖 3.28(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)

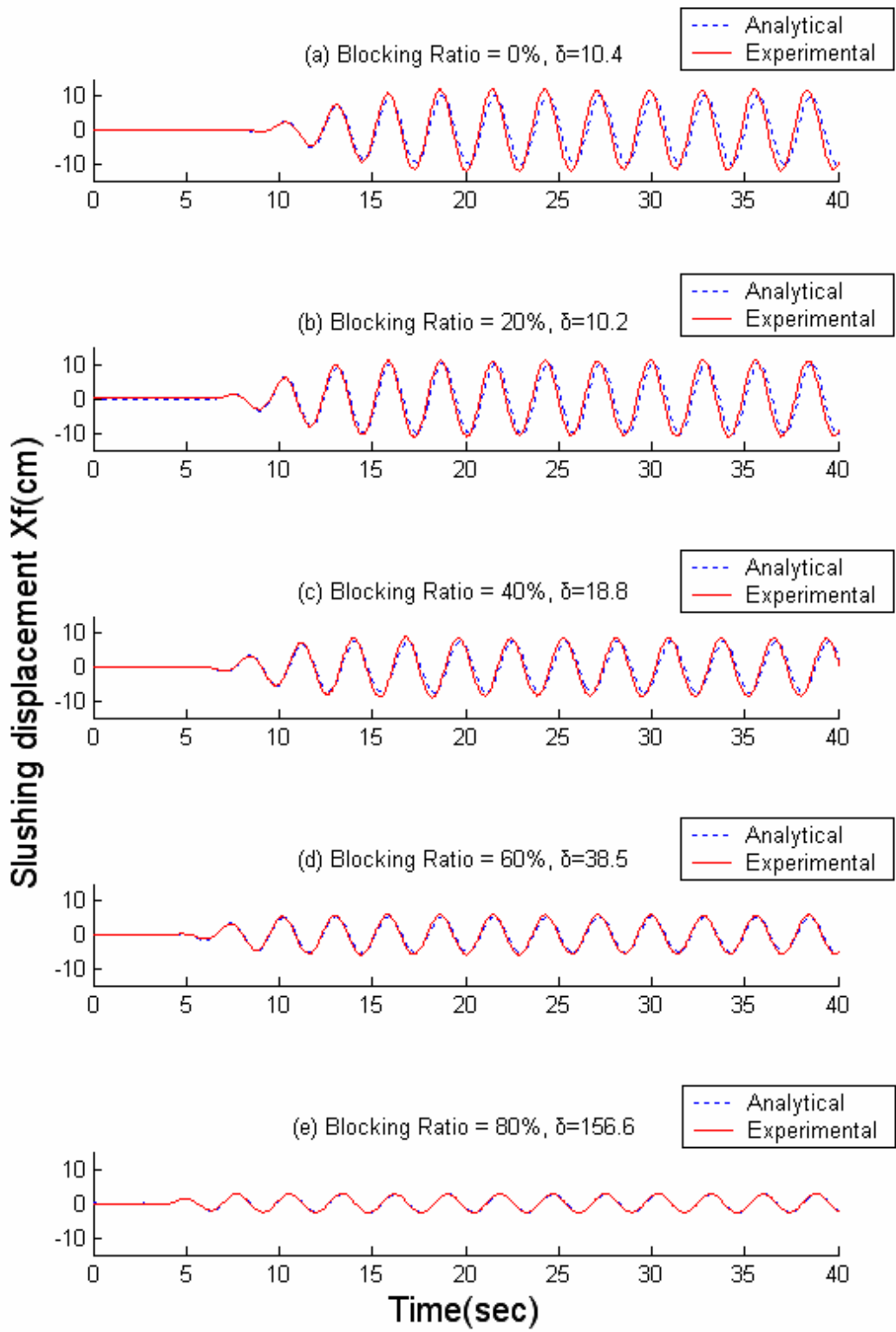


圖 3.28(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)

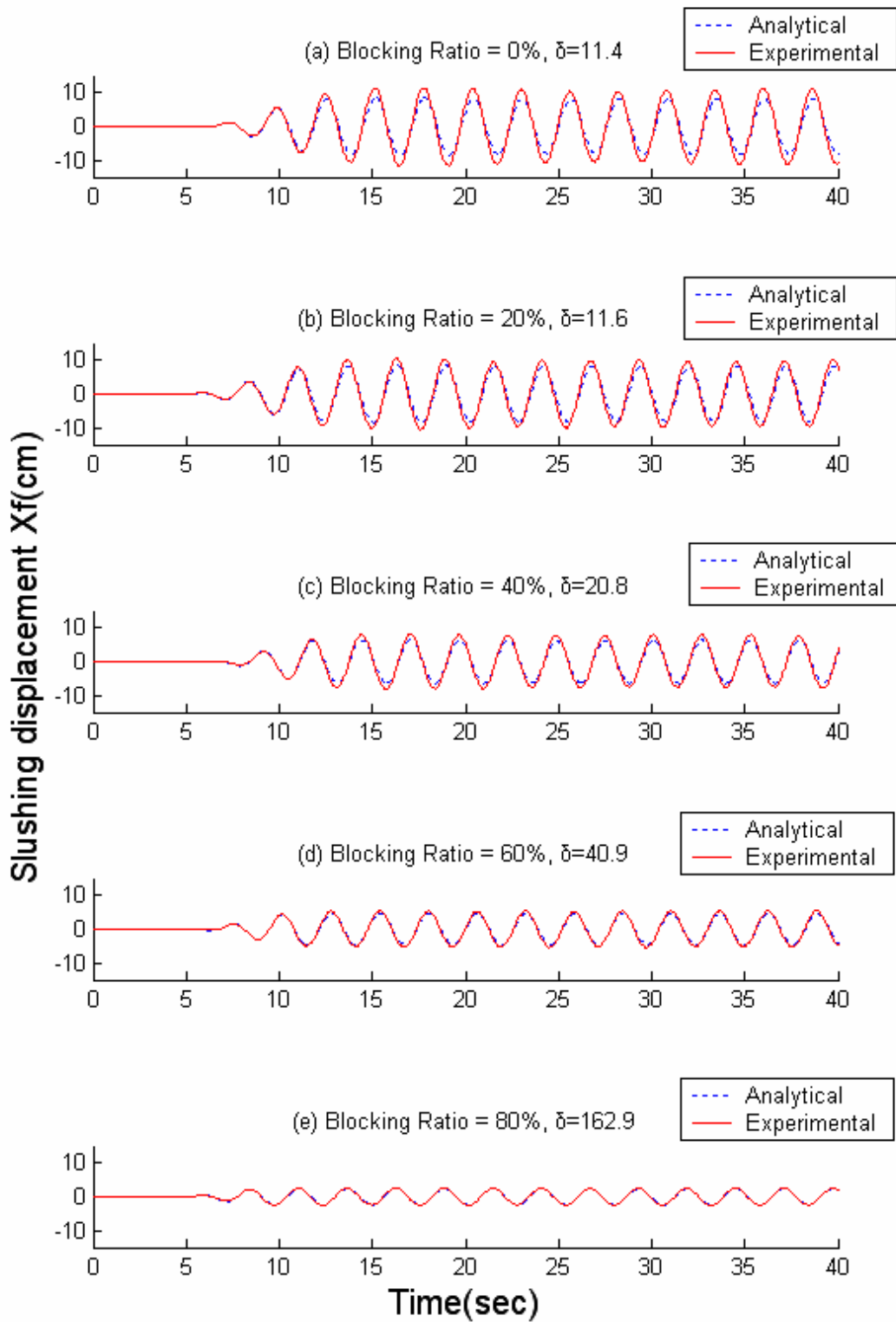


圖 3.28(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)

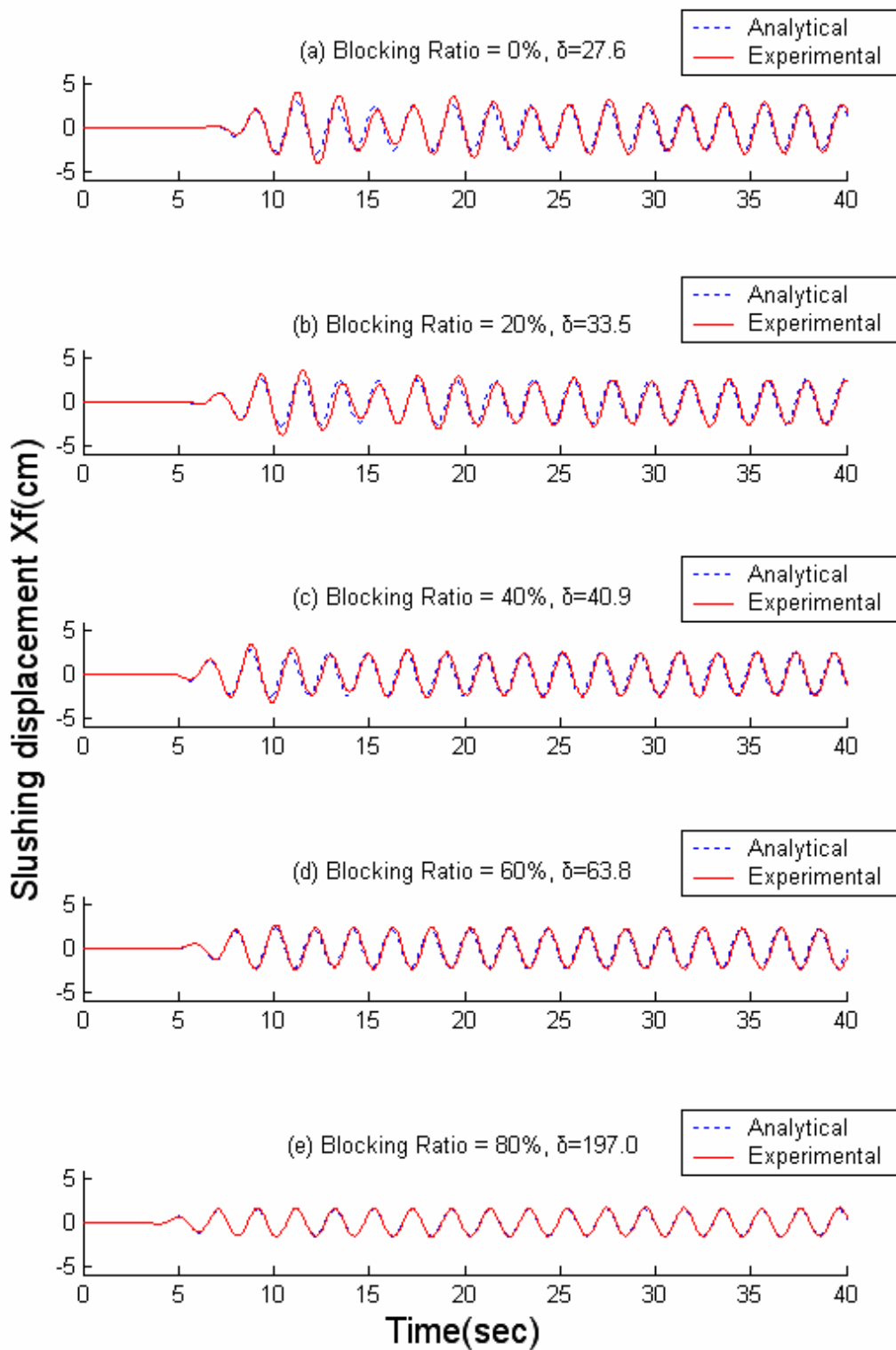


圖 3.28(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)

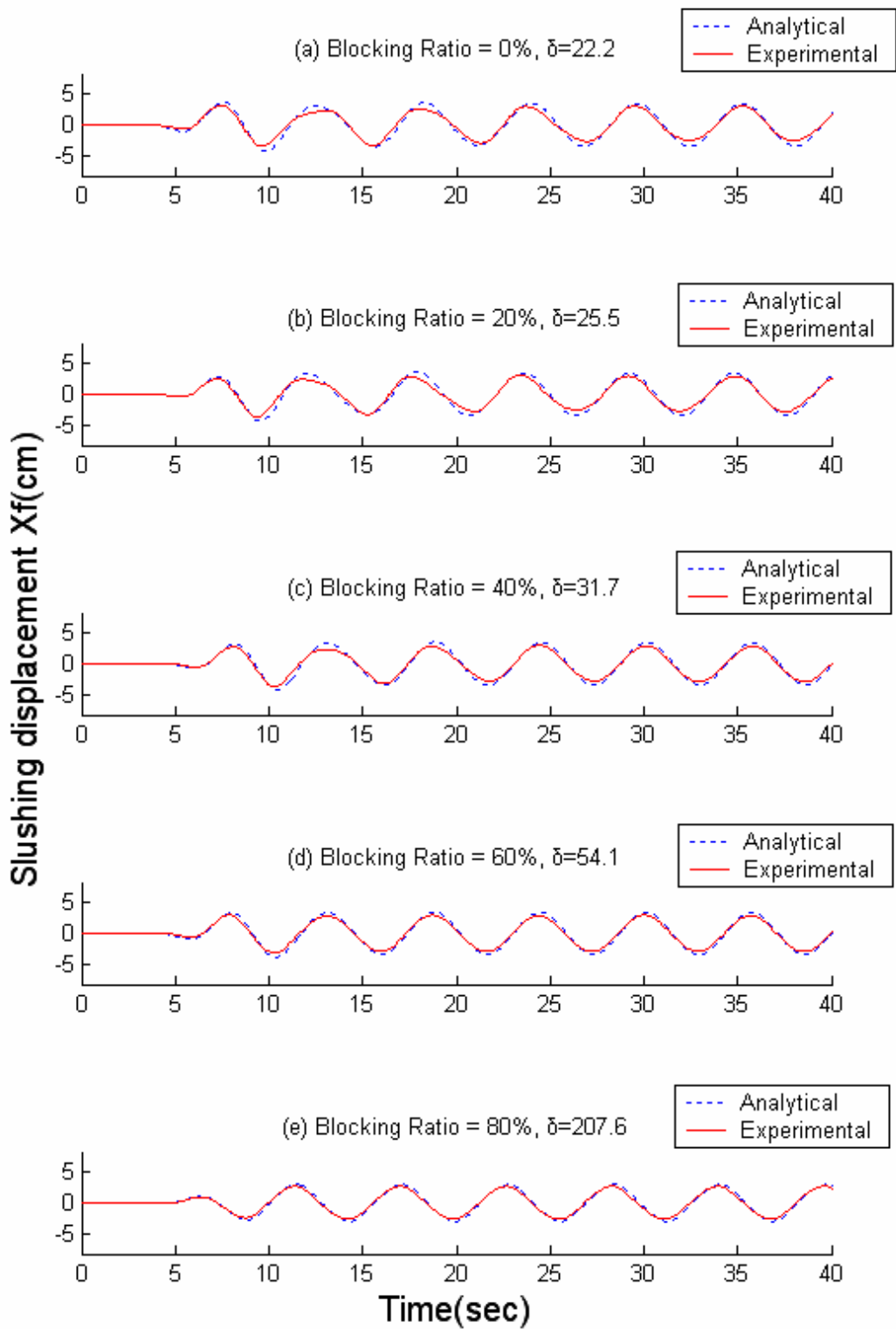


圖 3.29(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)

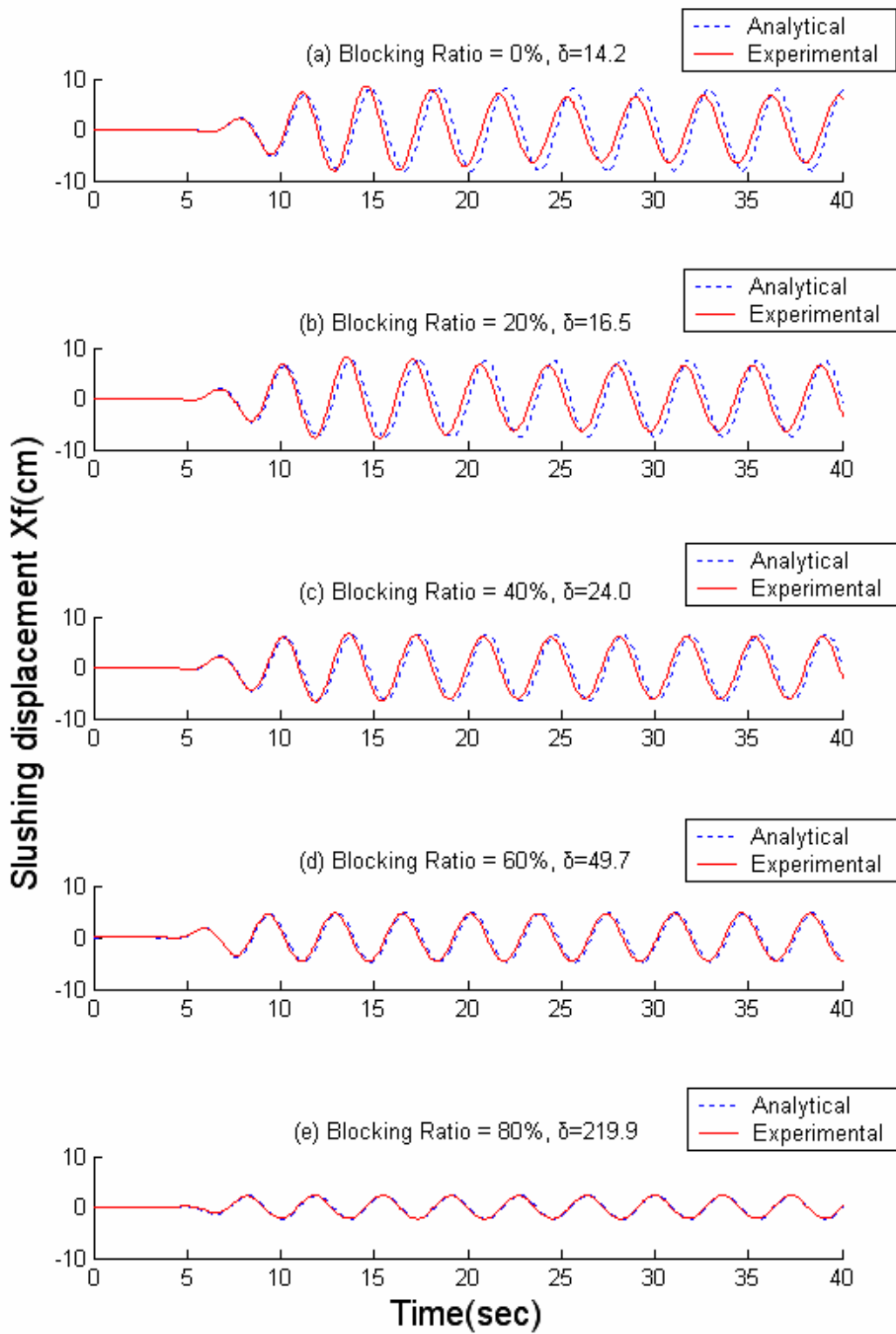


圖 3.29(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)

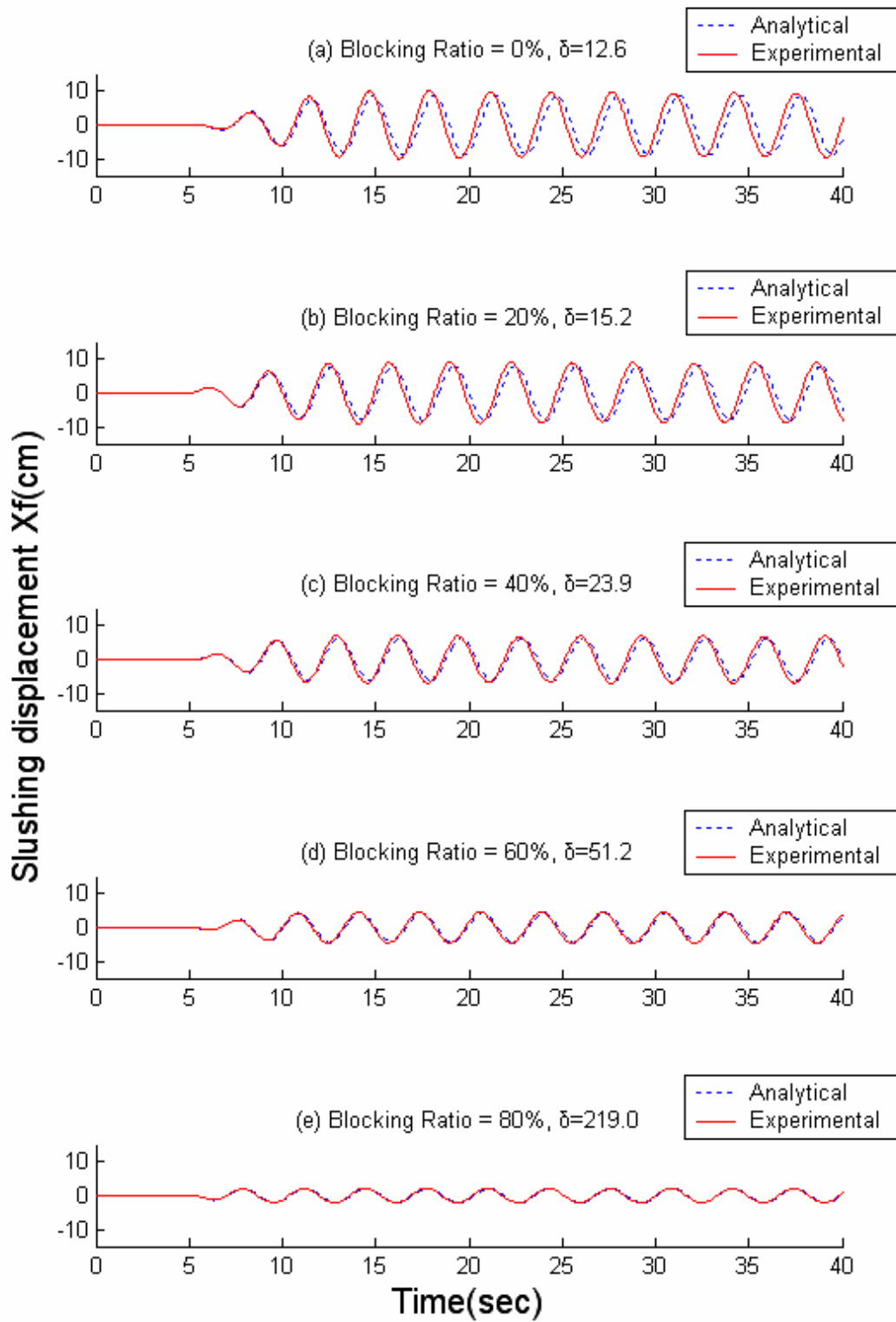


圖 3.29(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)

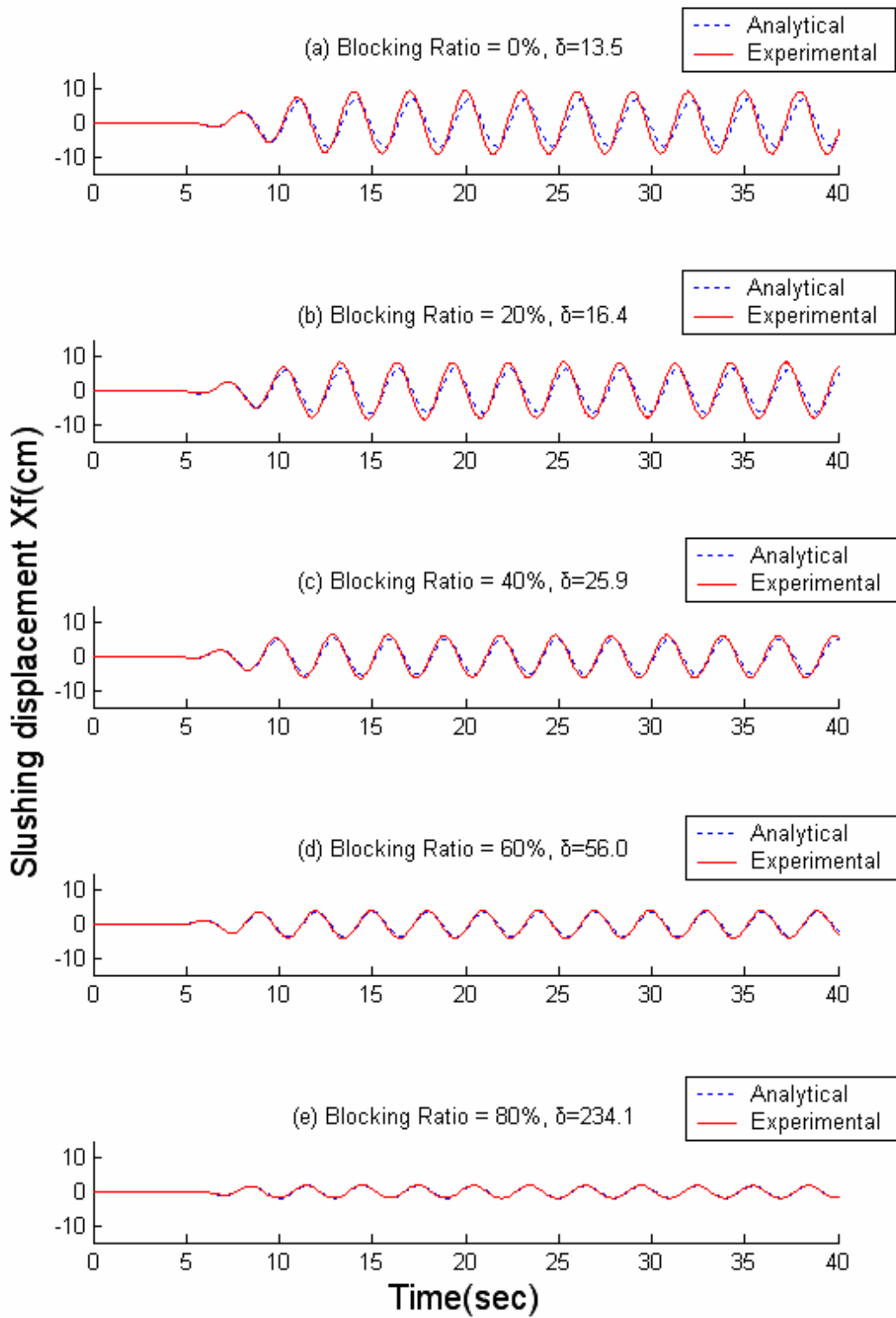


圖 3.29(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)

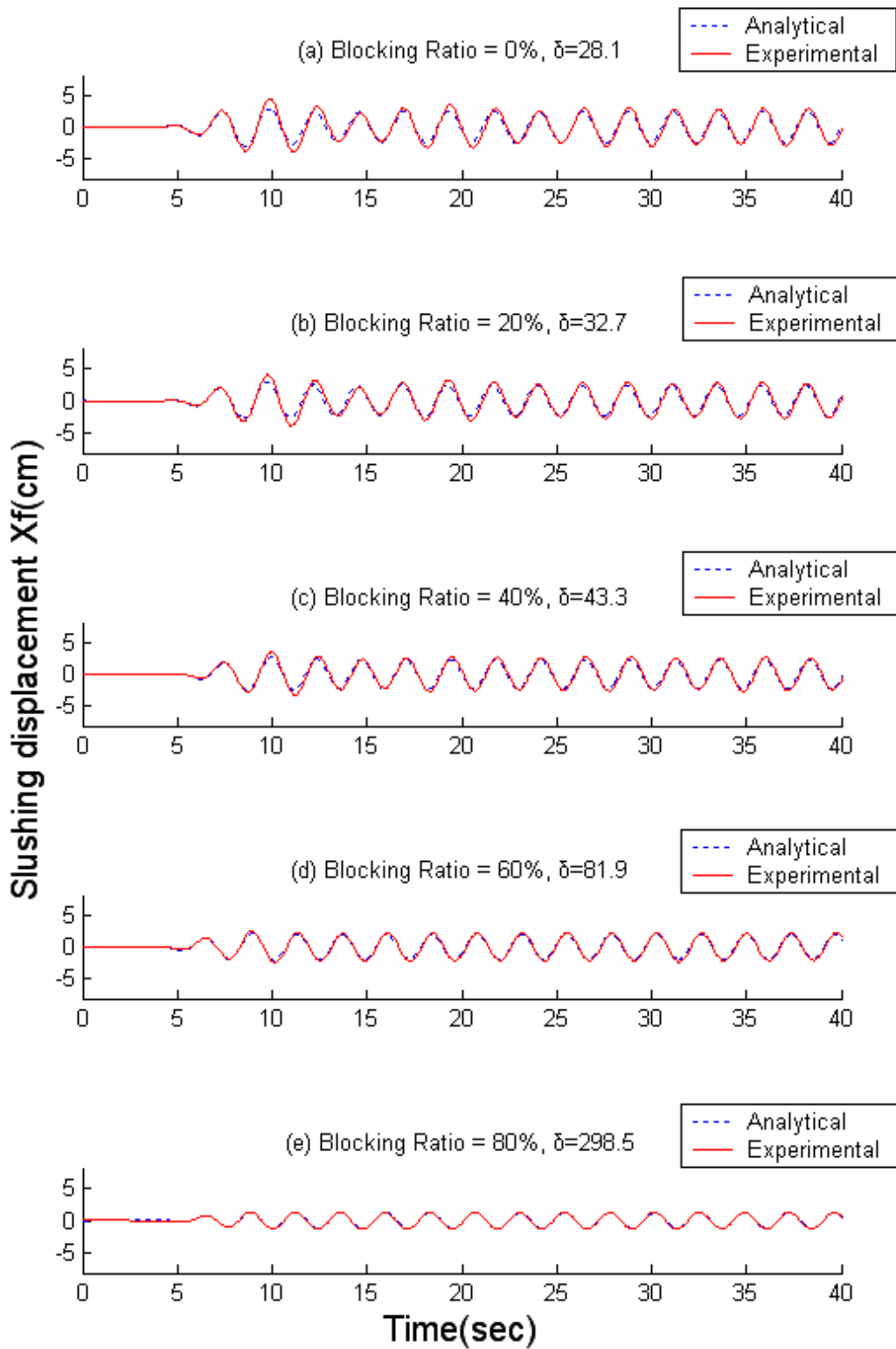


圖 3.29(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之水柱激盪位移歷時
(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)

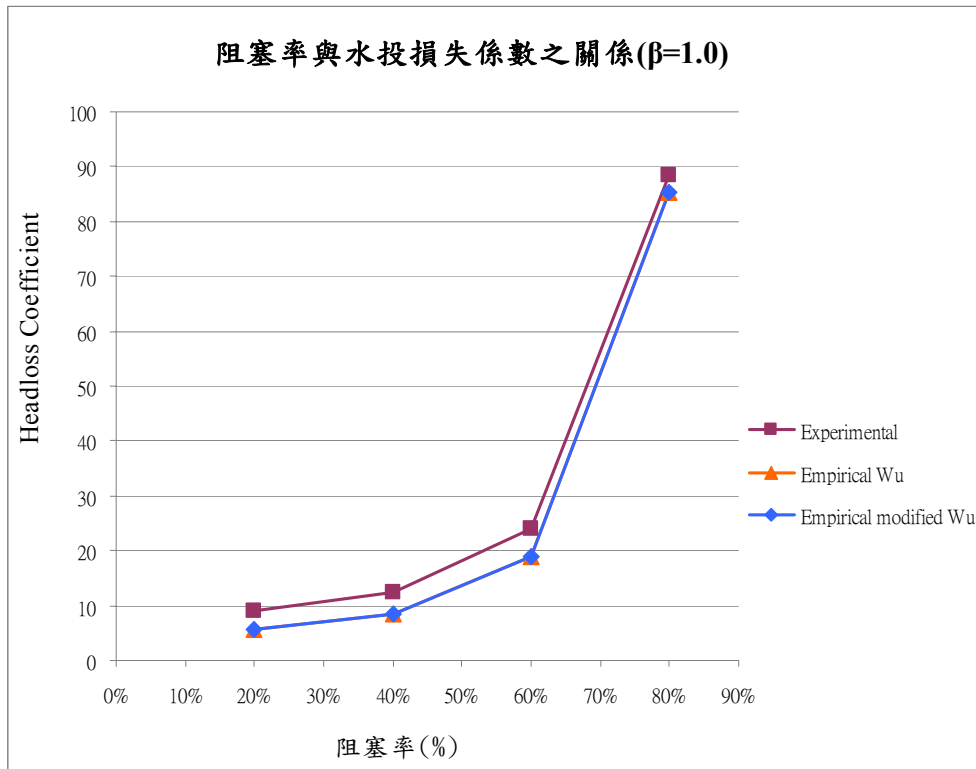


圖 3.30 VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=1$)

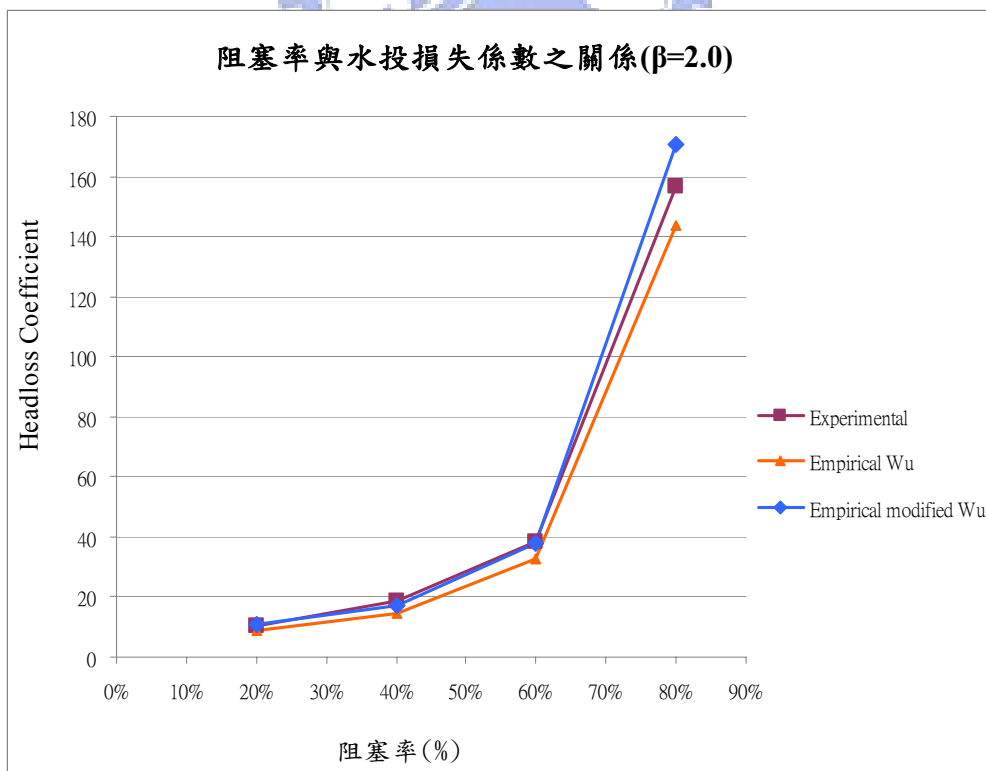


圖 3.31 VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=2$)

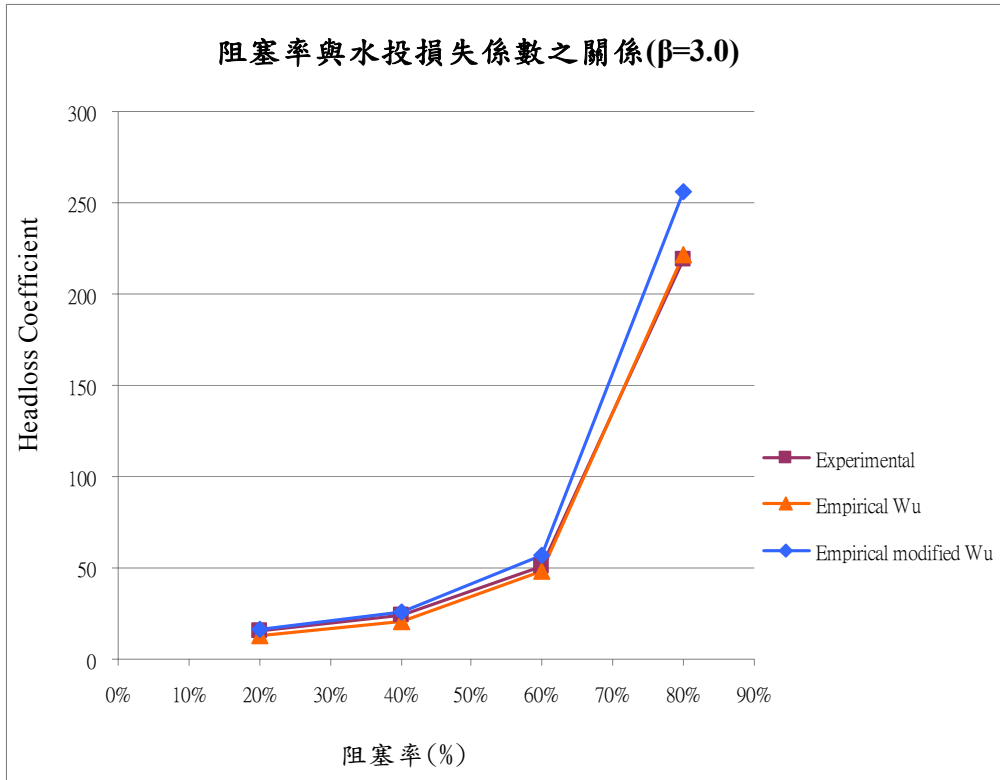


圖 3.32 VTLCD 旋轉運動試驗水頭損失係數與預估值之比較($\beta=3$)



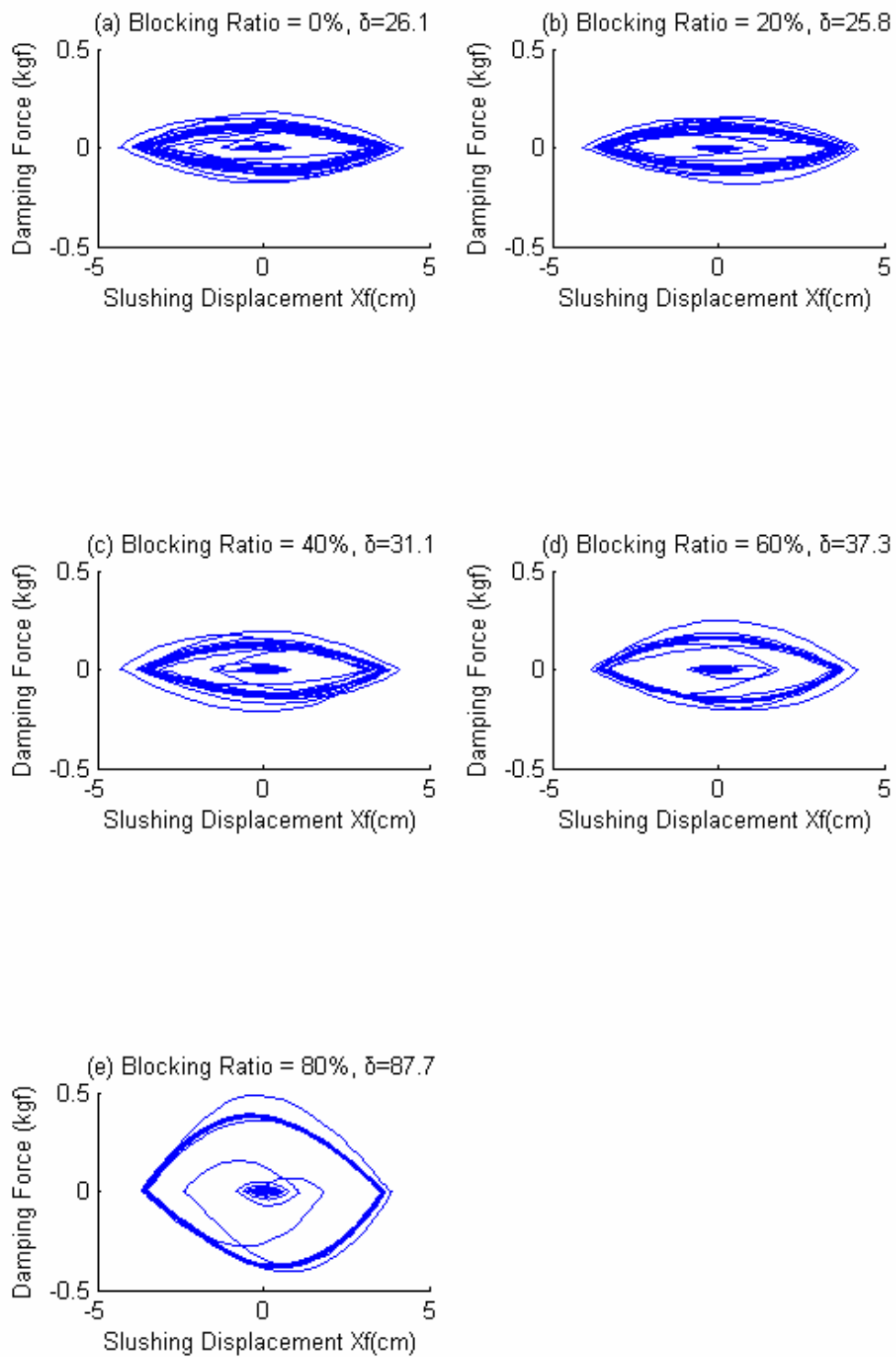


圖 3.33(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=1.0$)

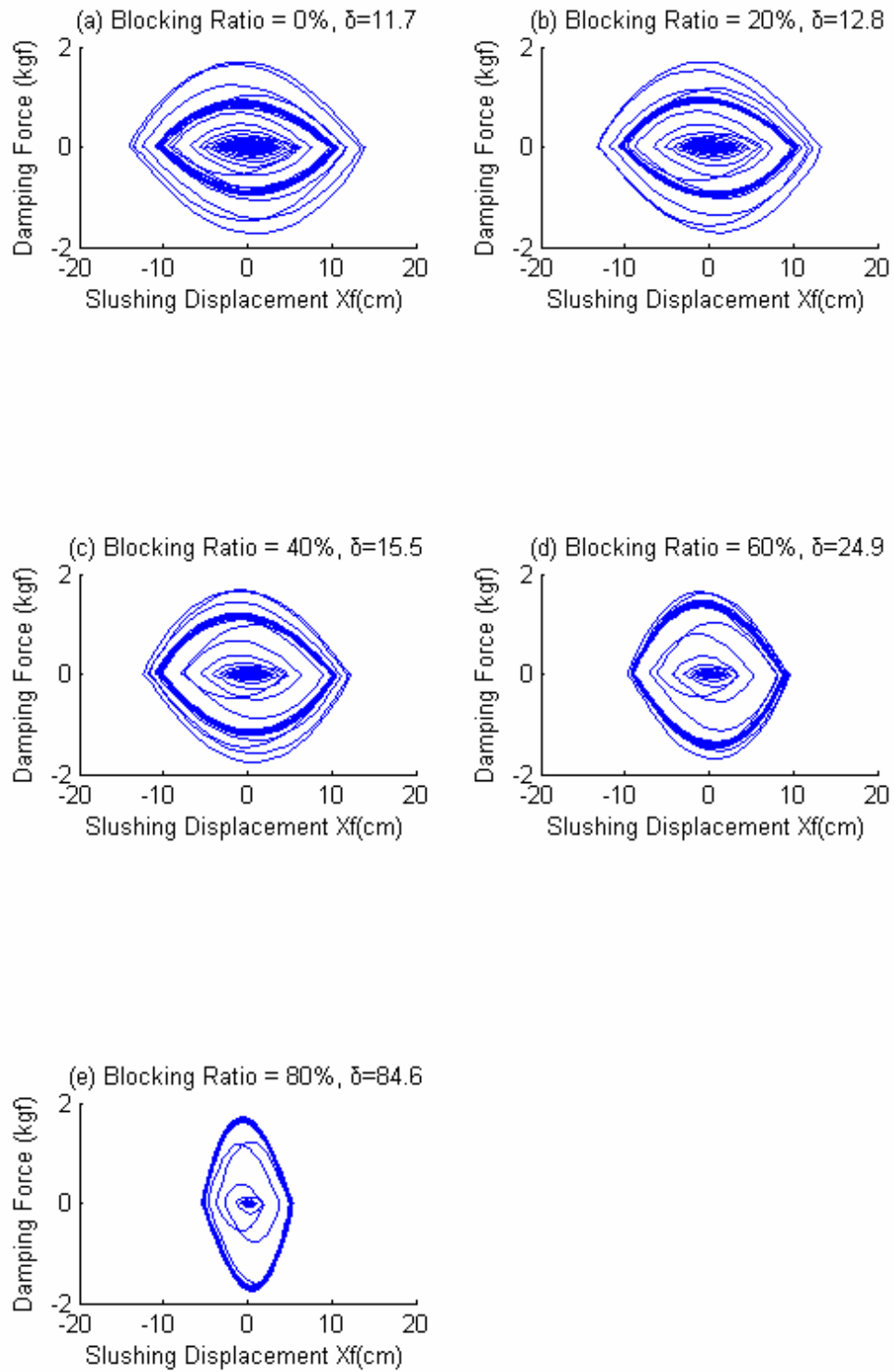


圖 3.33(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=1.0$)

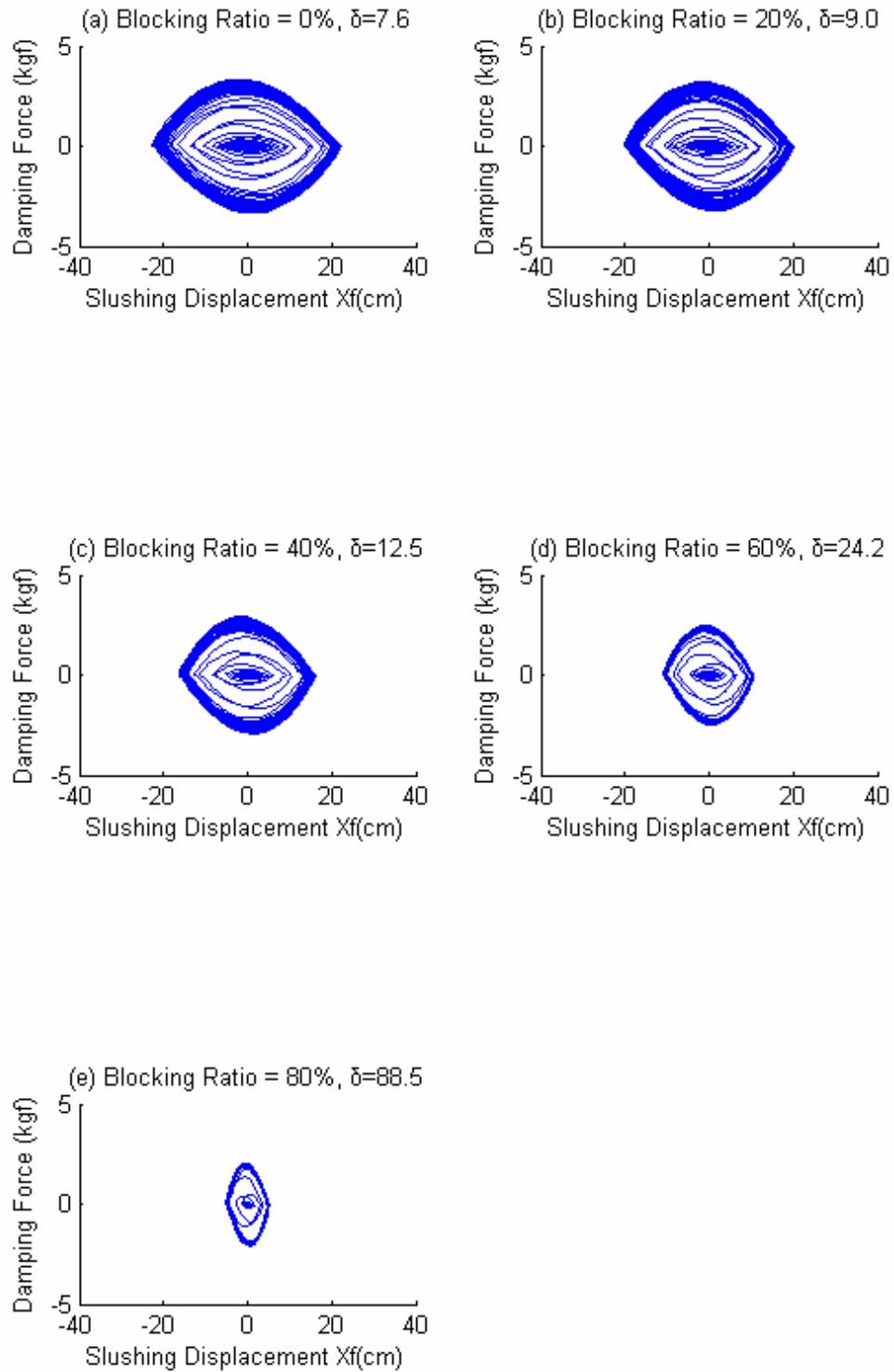


圖 3.33(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=1.0$)

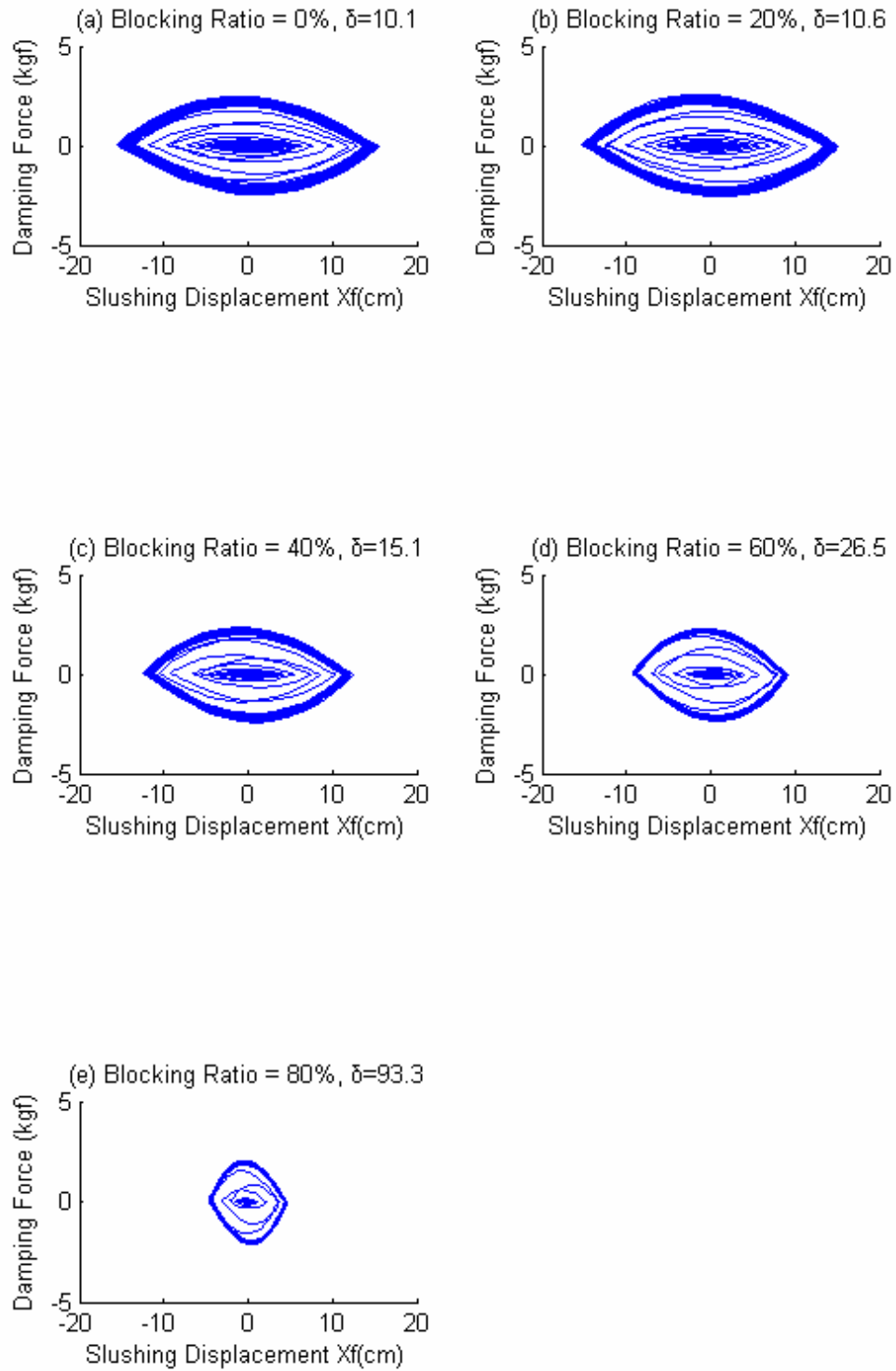


圖 3.33(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=1.0$)

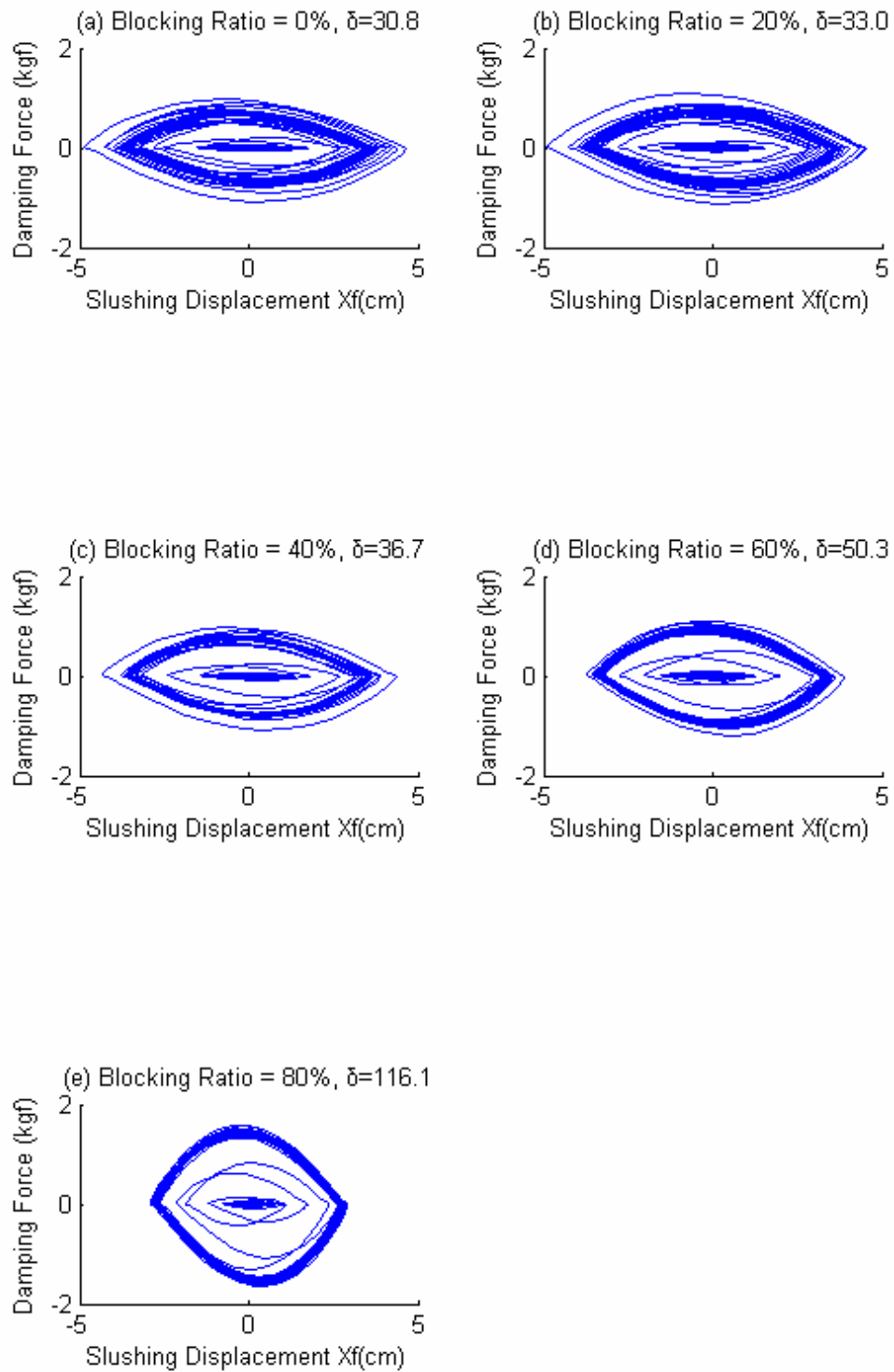


圖 3.33(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=1.0$)

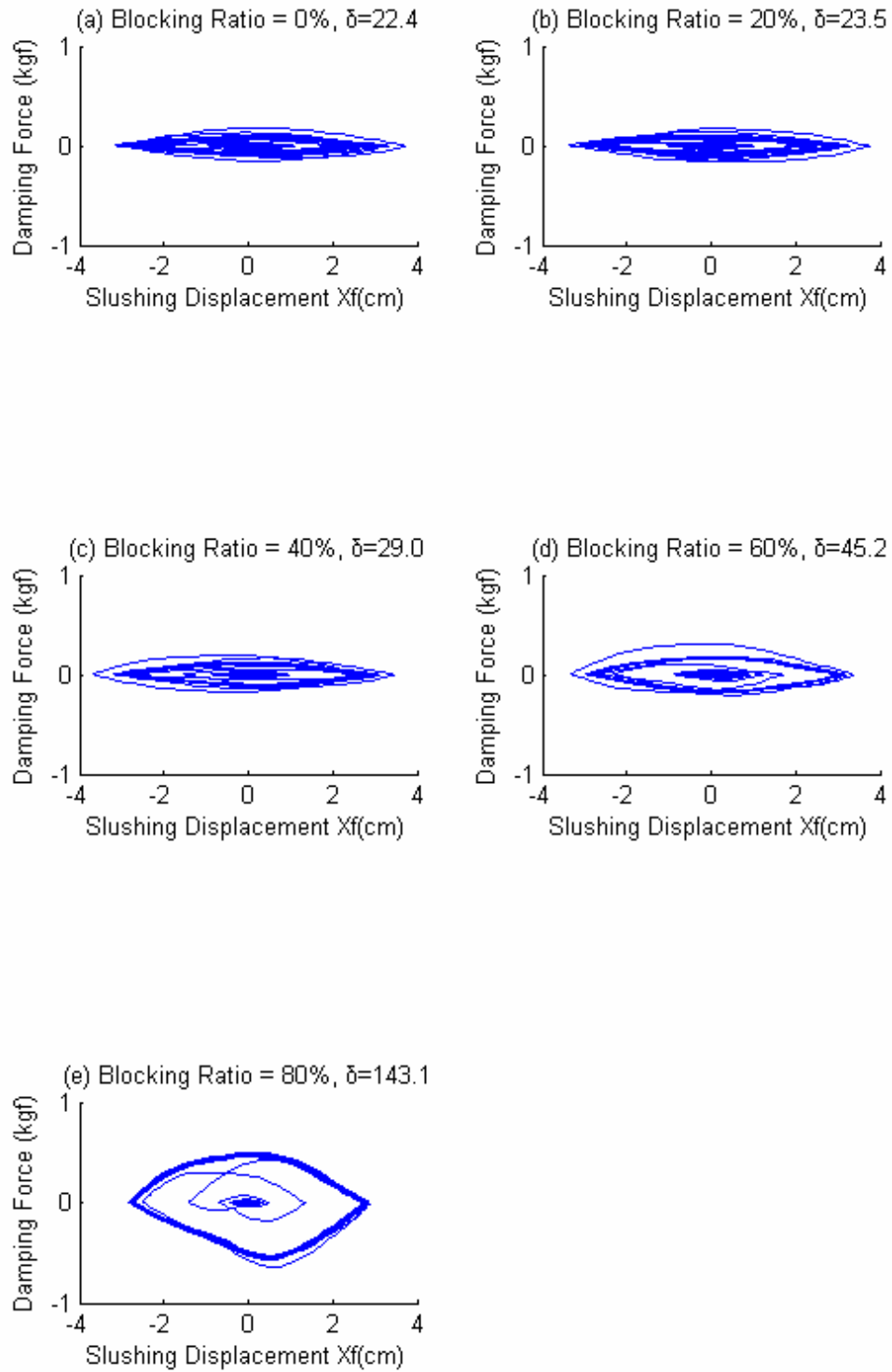


圖 3.34(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=2.0$)

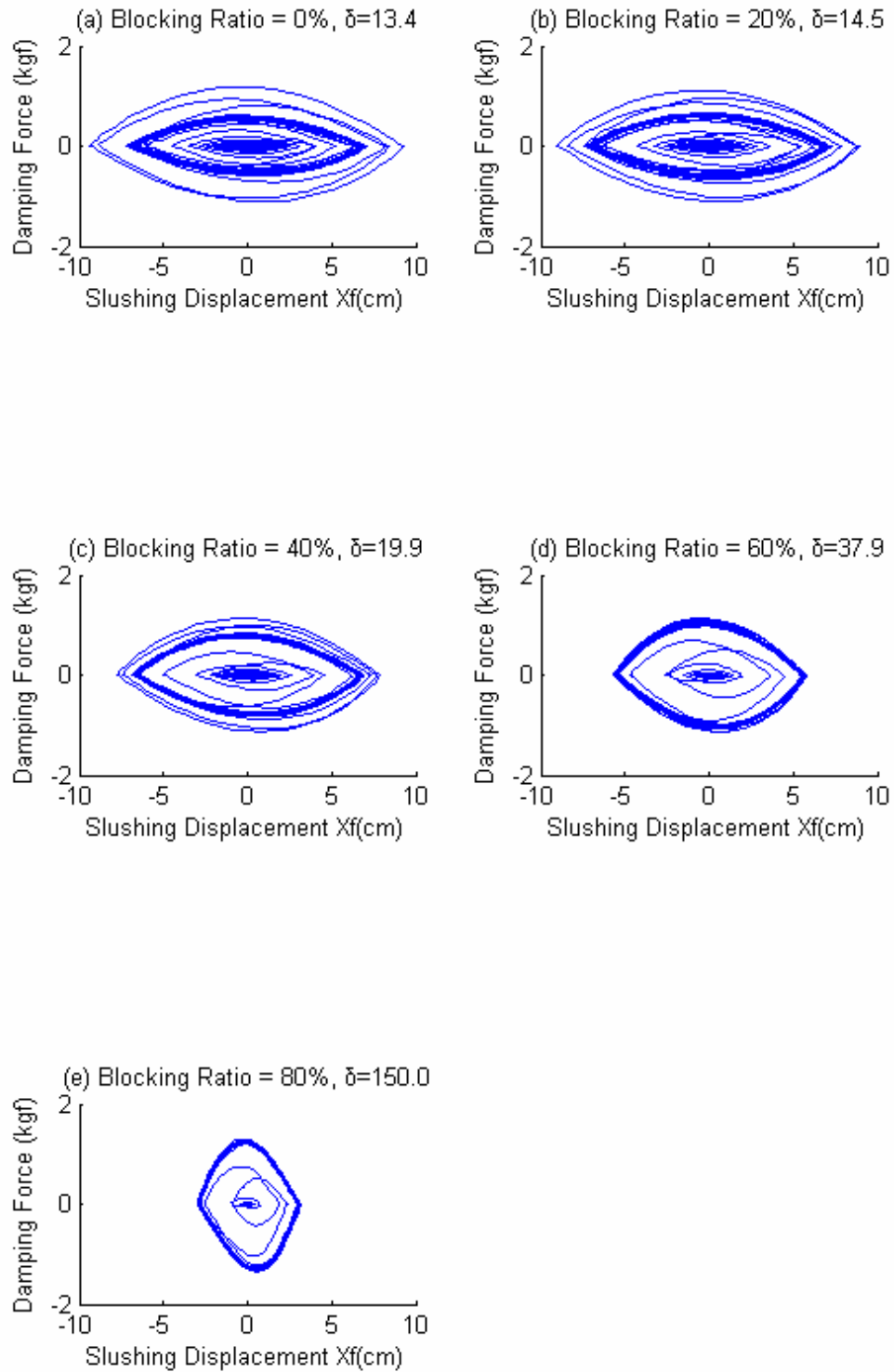


圖 3.34(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=2.0$)

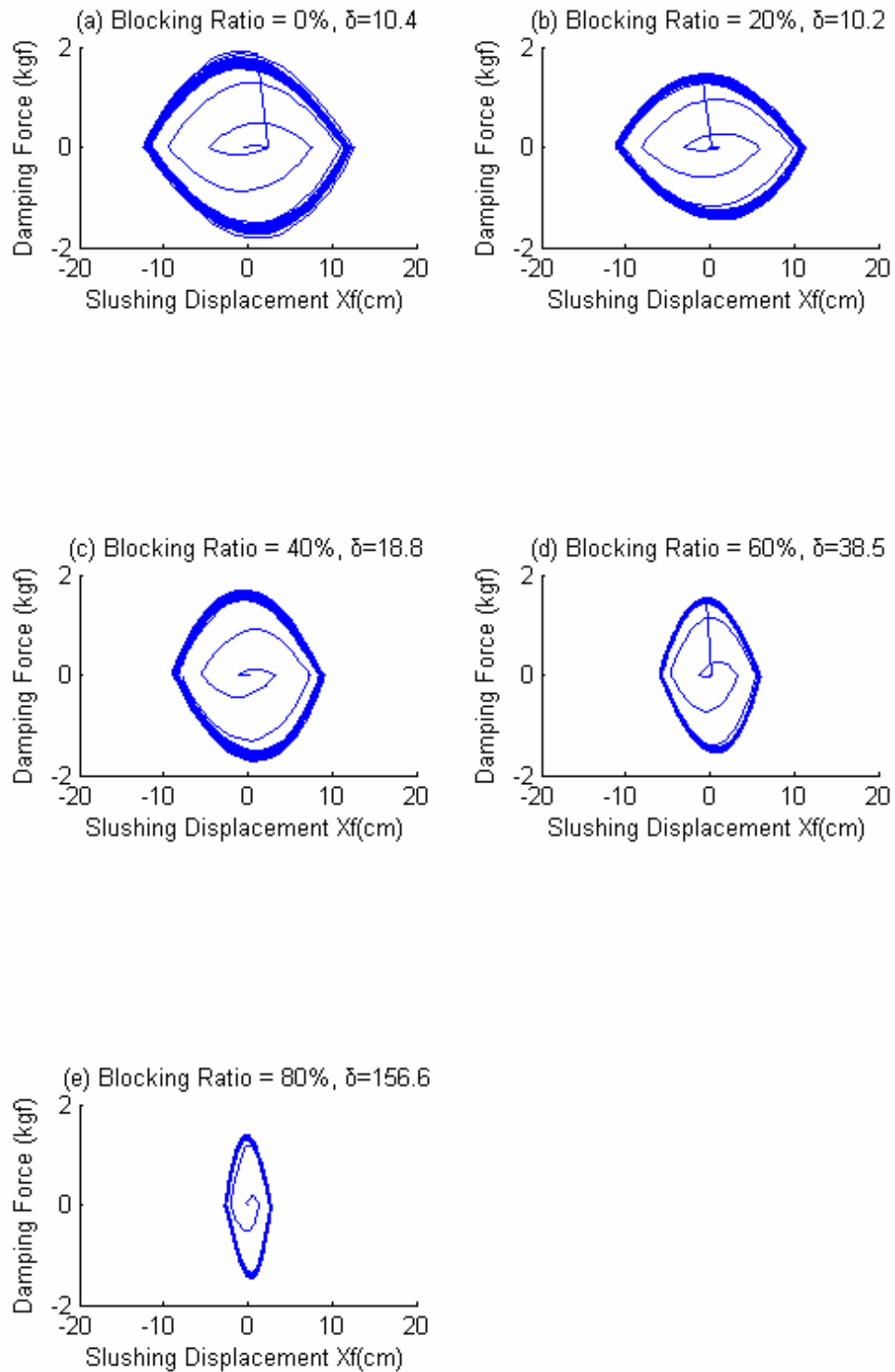


圖 3.34(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=2.0$)

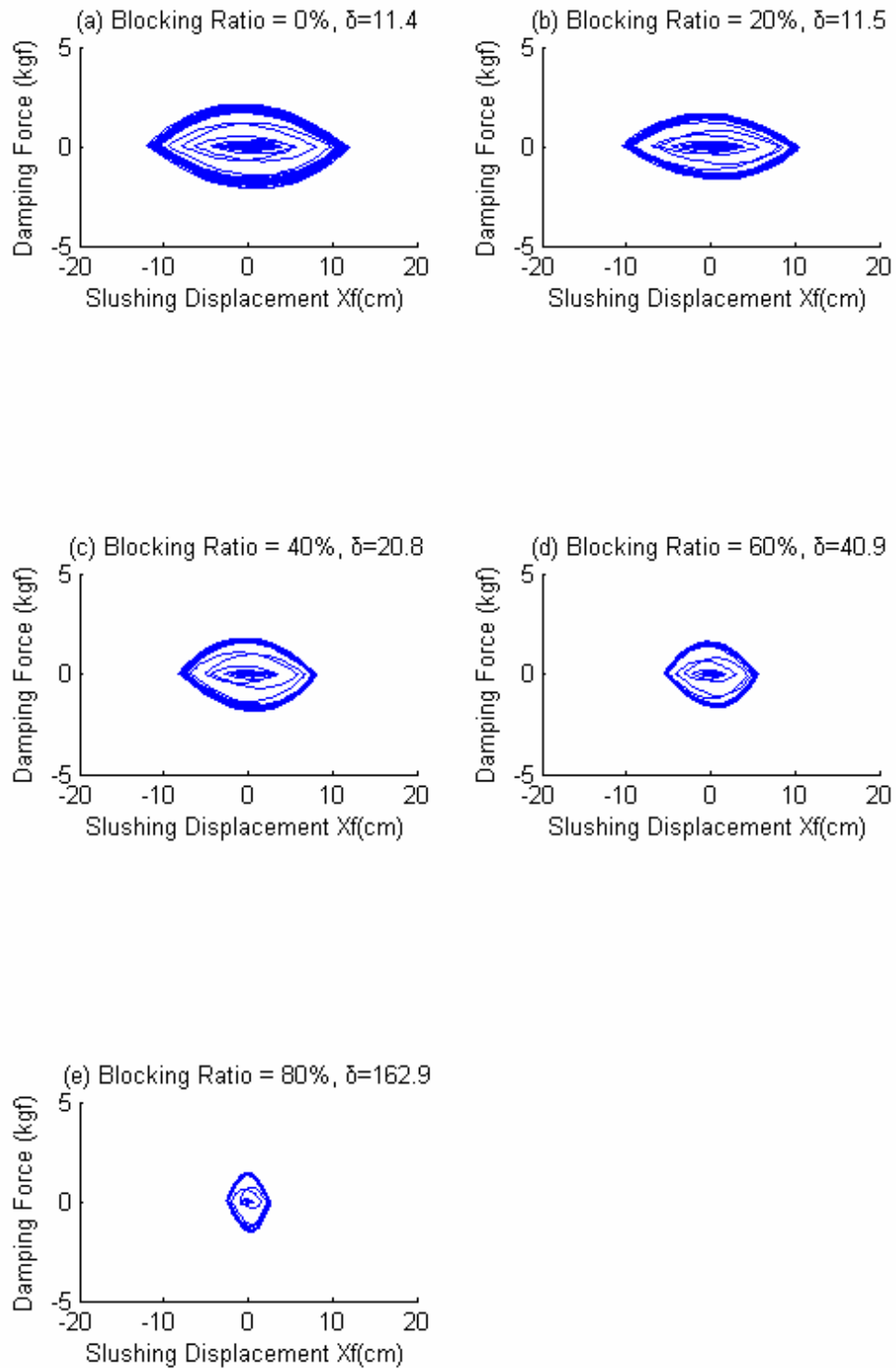


圖 3.34(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=2.0$)

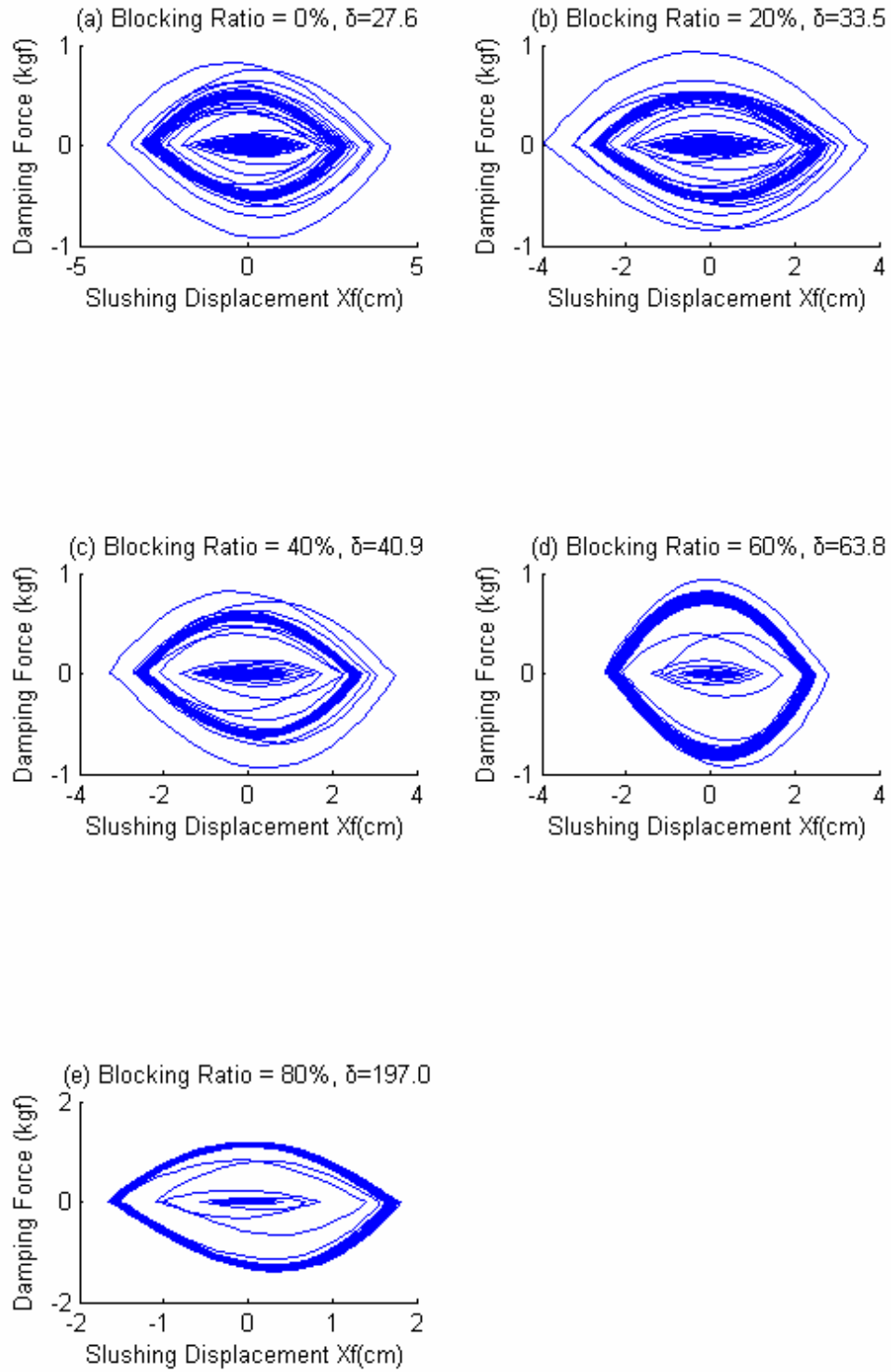


圖 3.34(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=2.0$)

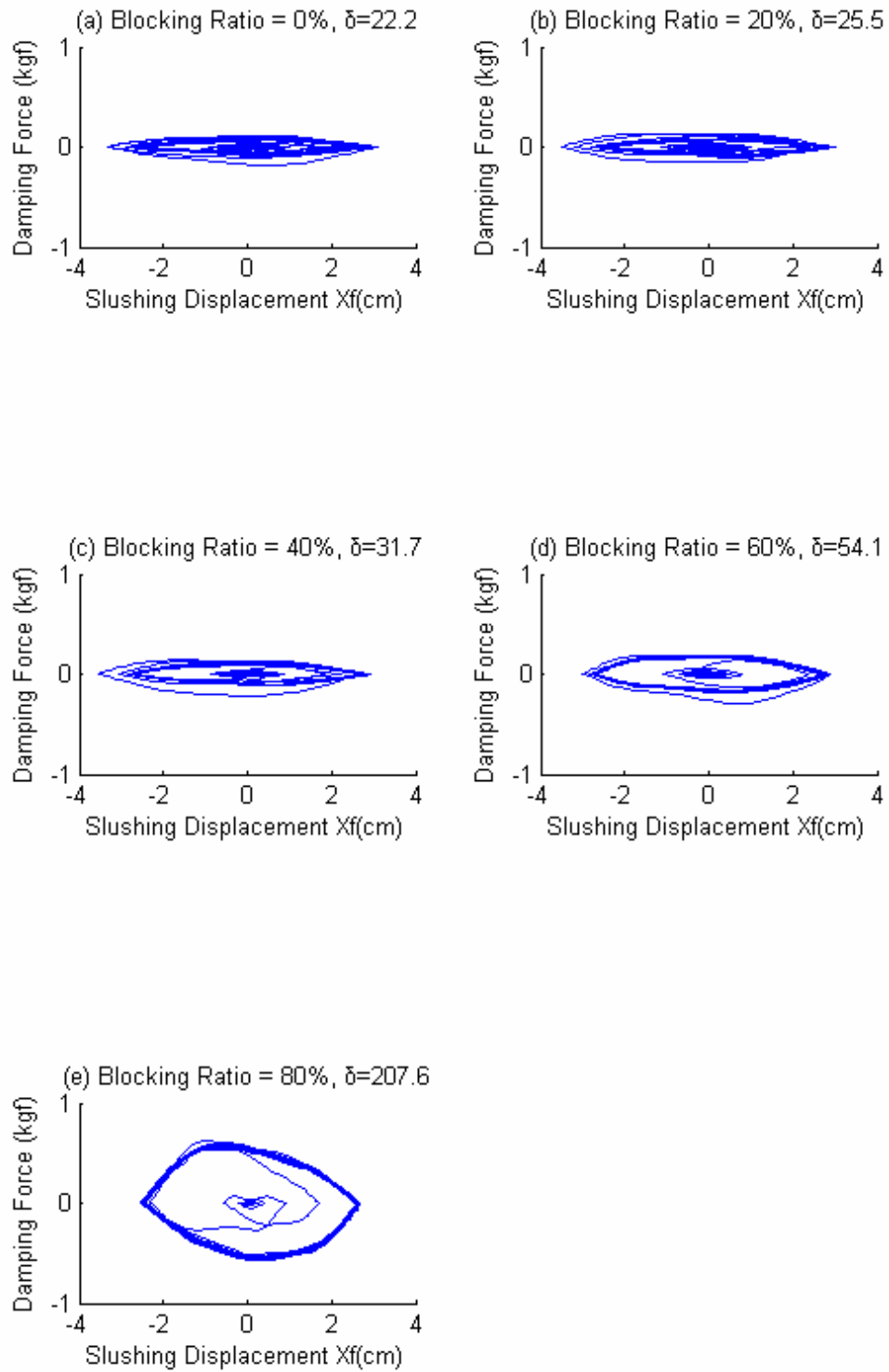


圖 3.35(a) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.6, $\beta=3.0$)

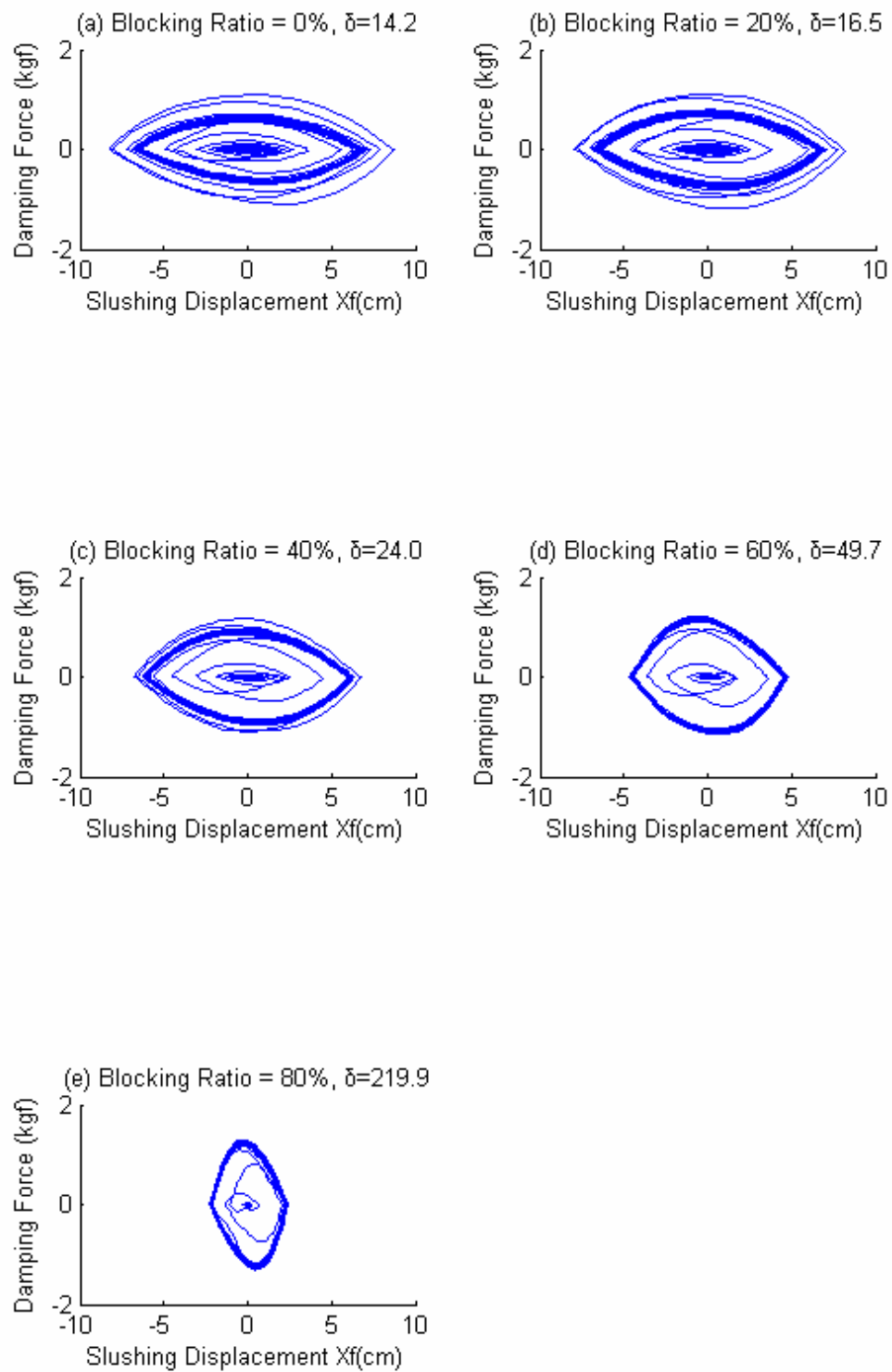


圖 3.35(b) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=0.9, $\beta=3.0$)

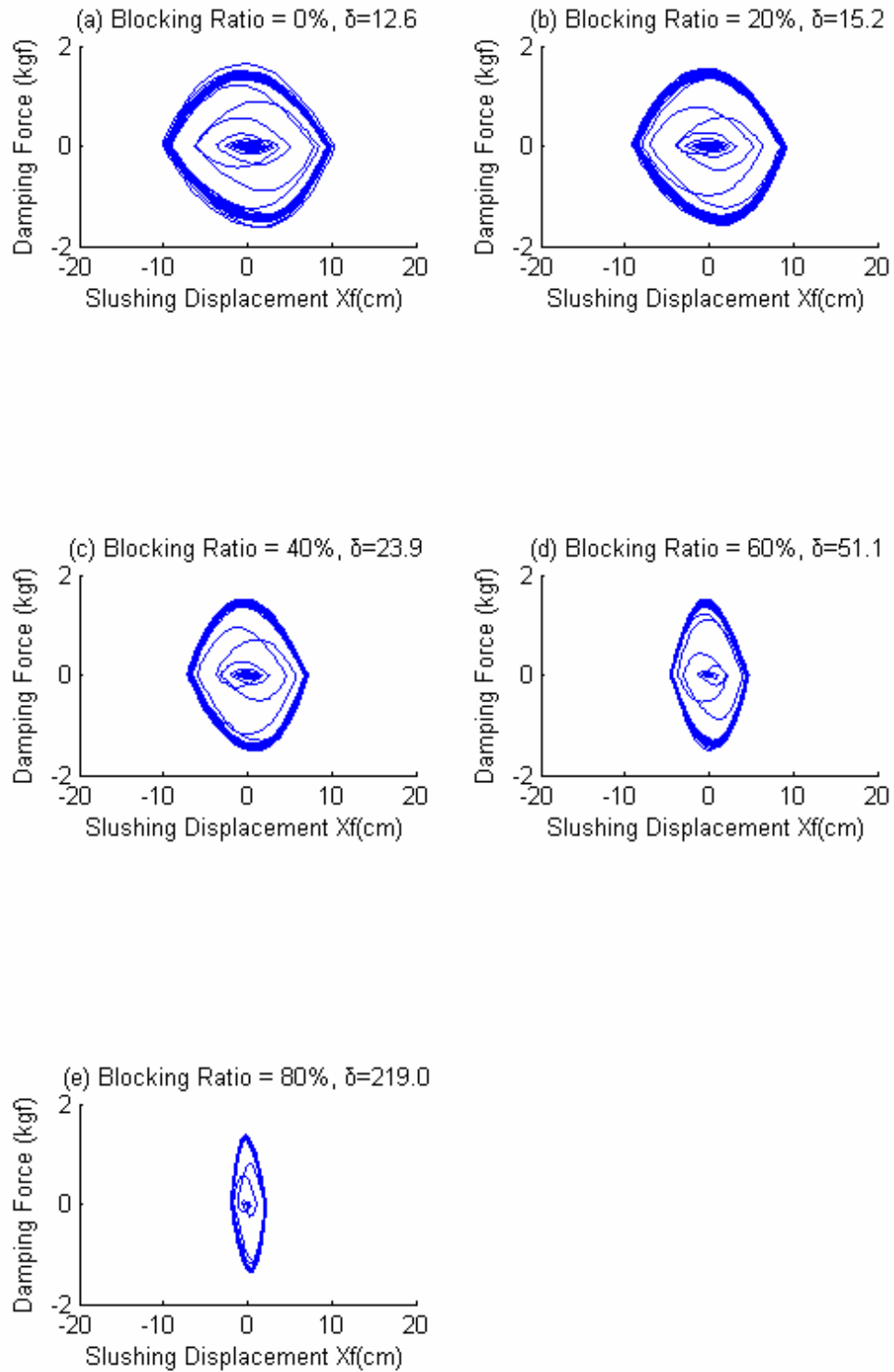


圖 3.35(c) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.0, $\beta=3.0$)

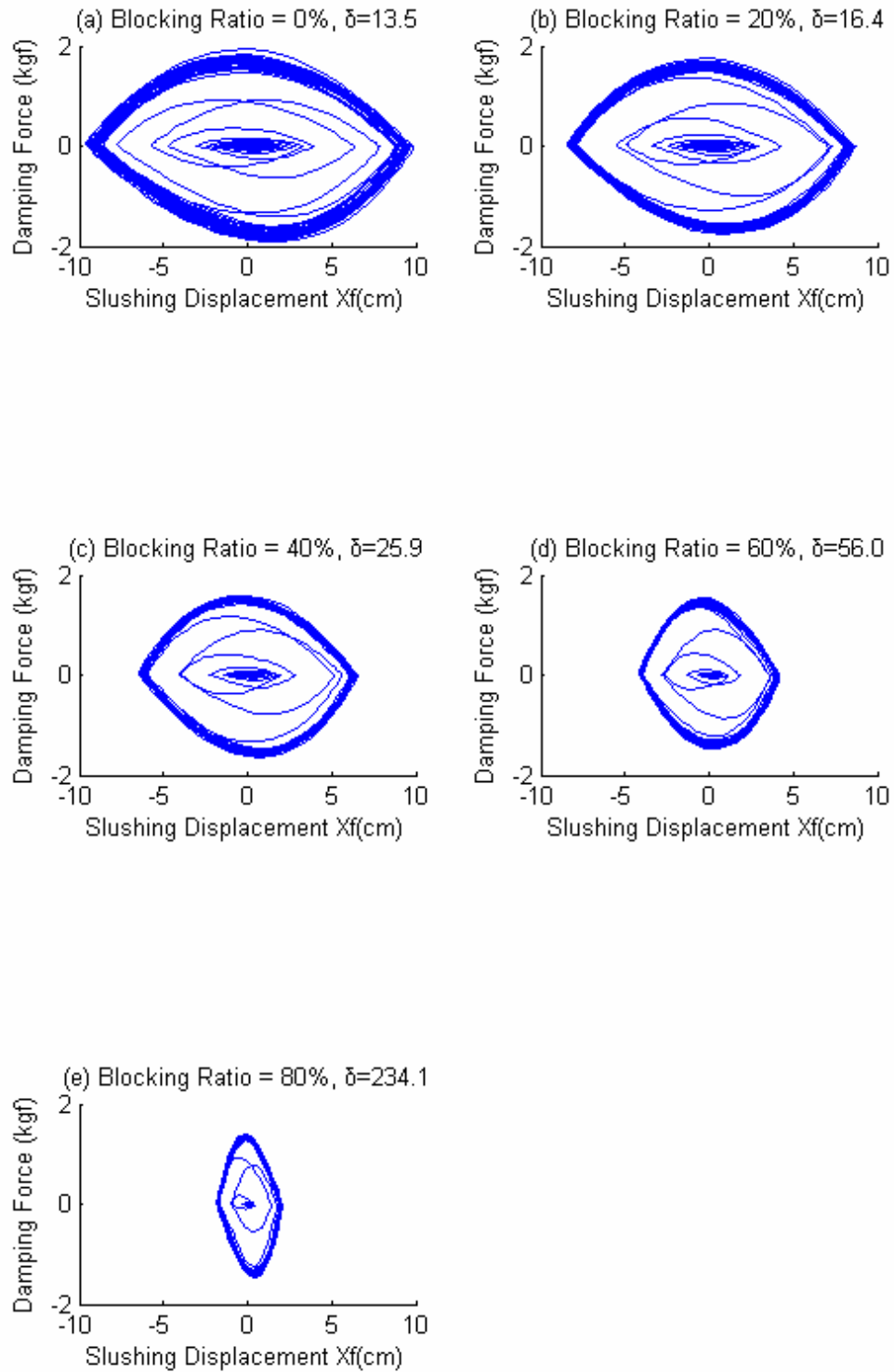


圖 3.35(d) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.1, $\beta=3.0$)

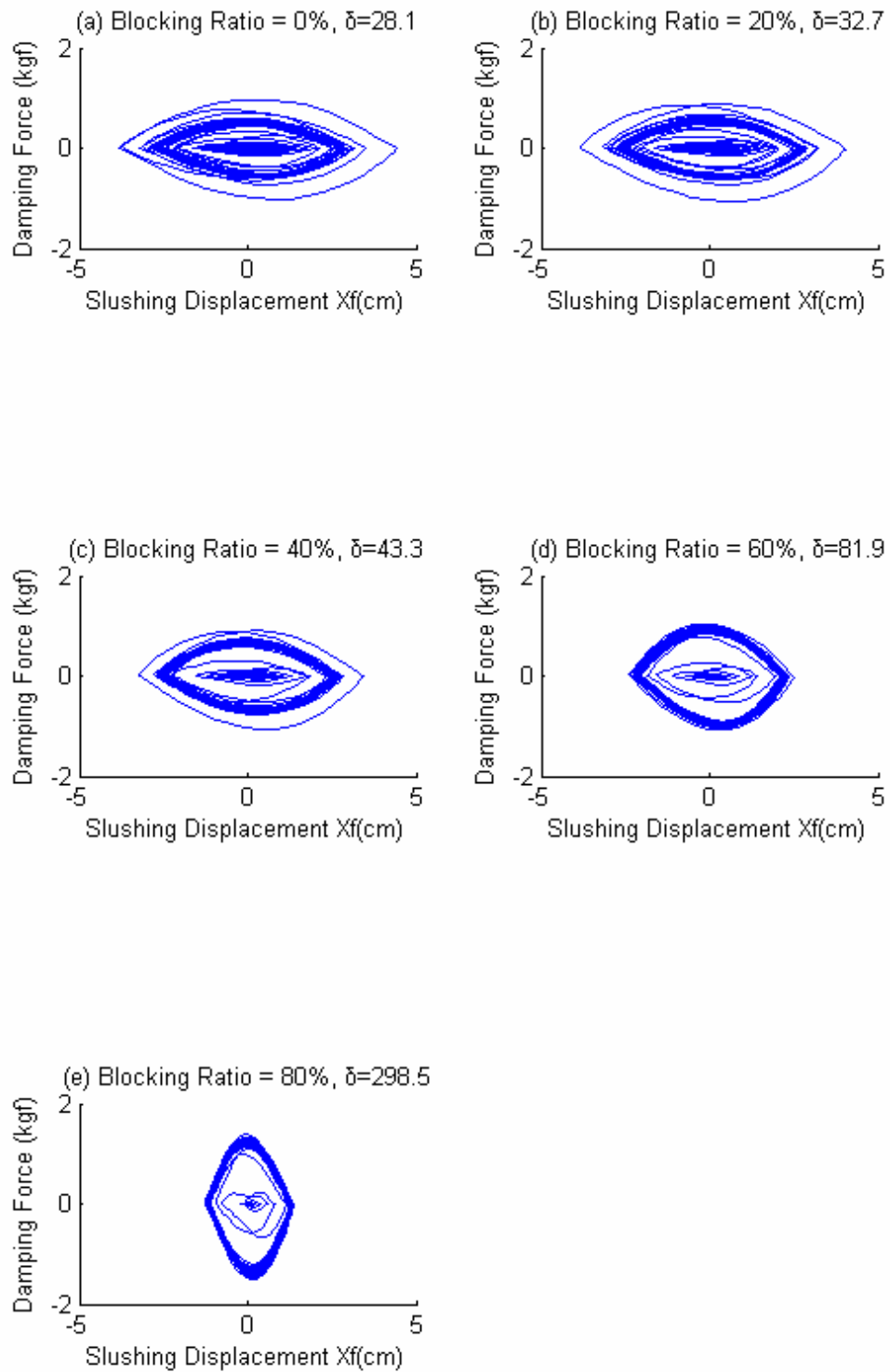


圖 3.35(e) 大尺寸旋轉運動 VTLCD 之遲滯迴圈
(頻率比=1.4, $\beta=3.0$)

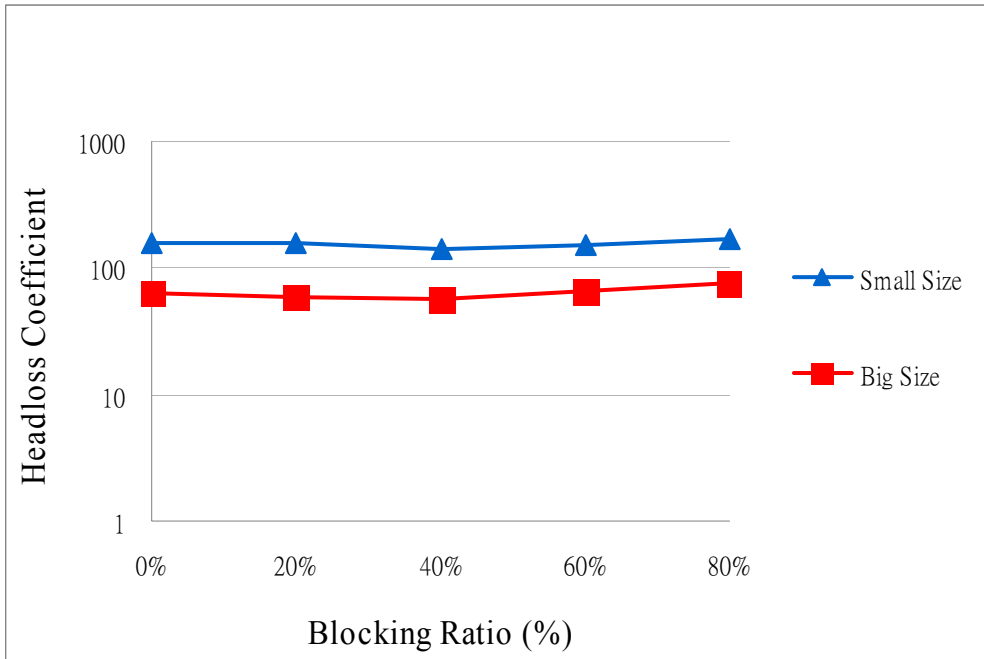


圖 3.36(a) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=0.6)

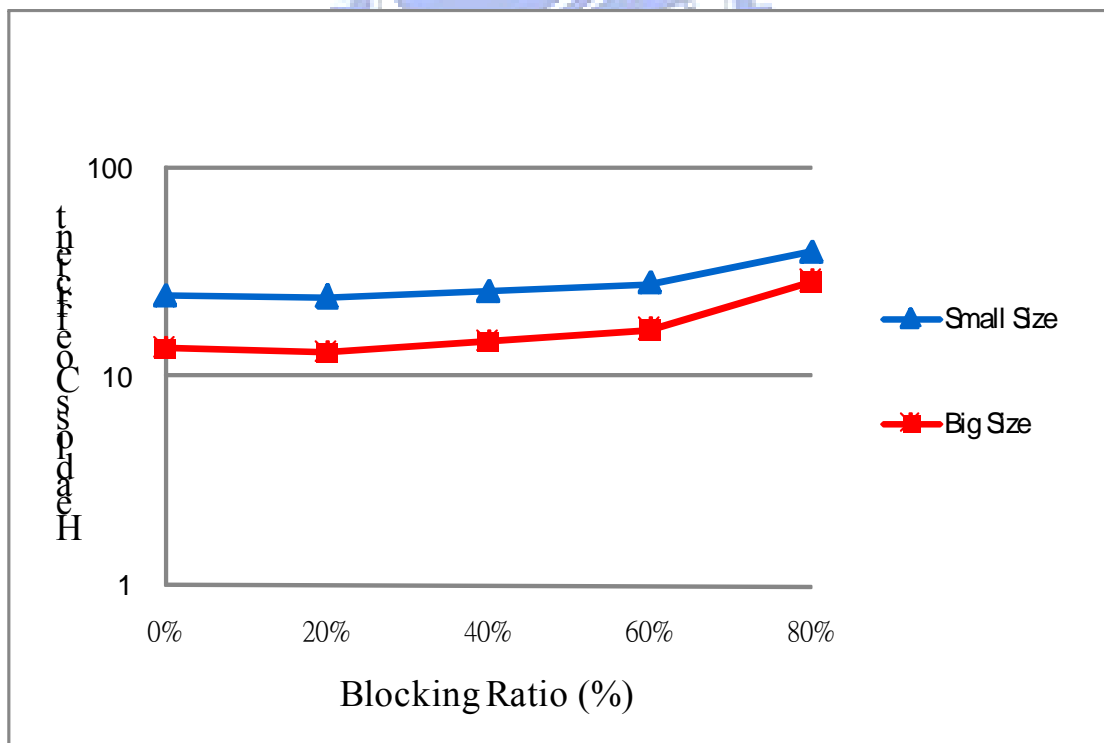


圖 3.36(b) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=0.9)

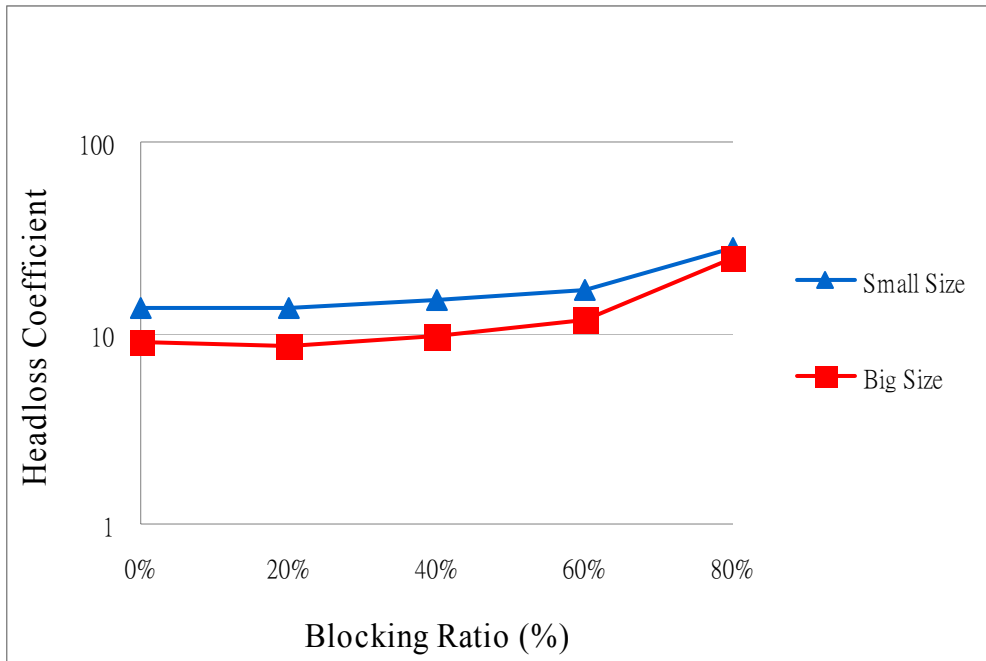


圖 3.36(c) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.0)

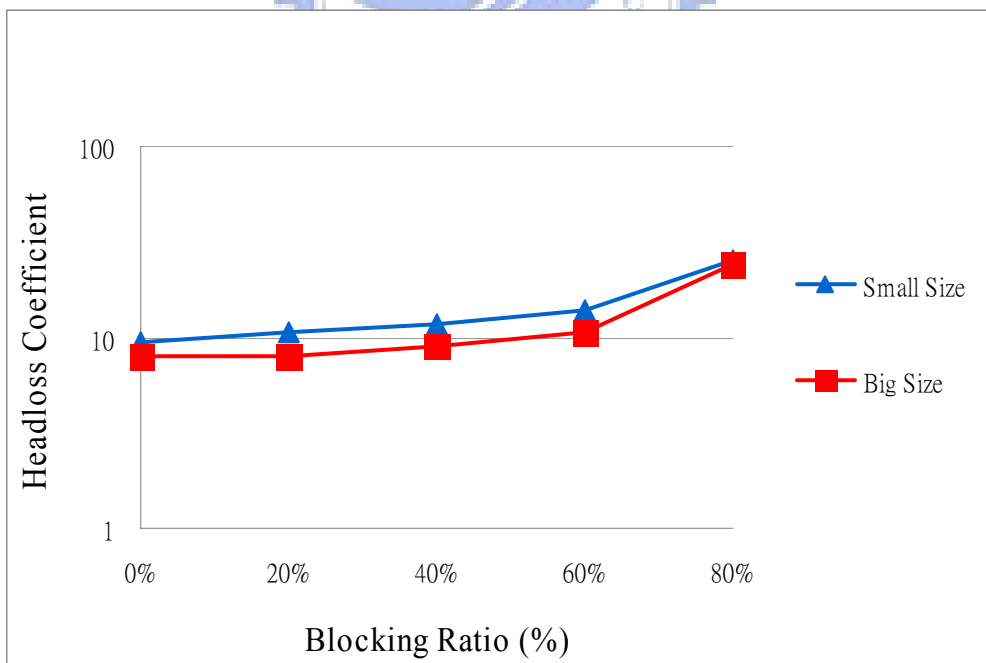


圖 3.36(d) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.1)

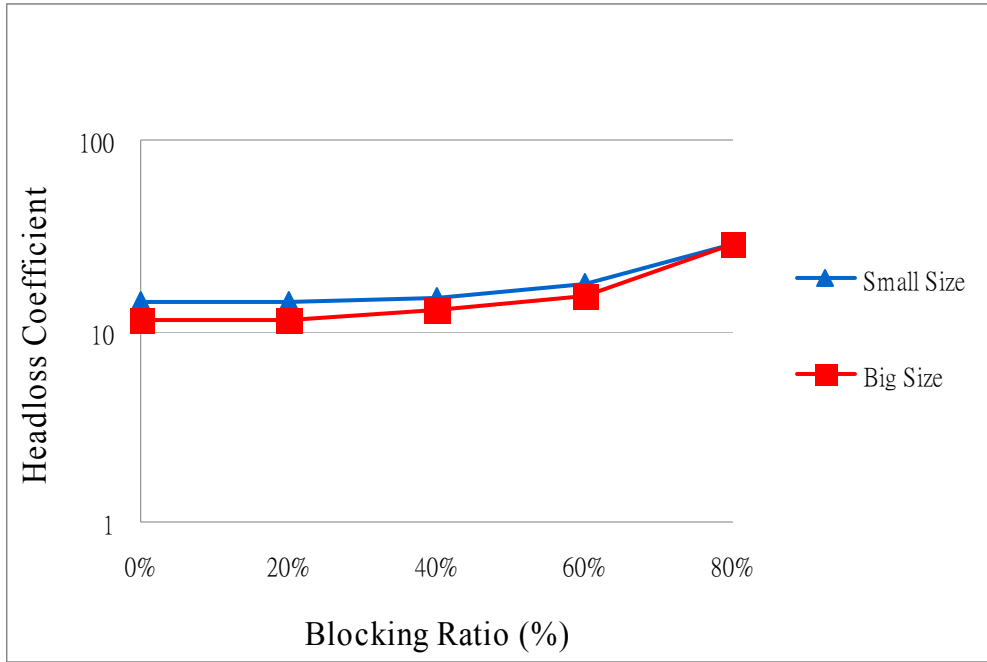


圖 3.36(e) 斷面比與水頭損失係數之尺寸效應關係圖(頻率比=1.4)



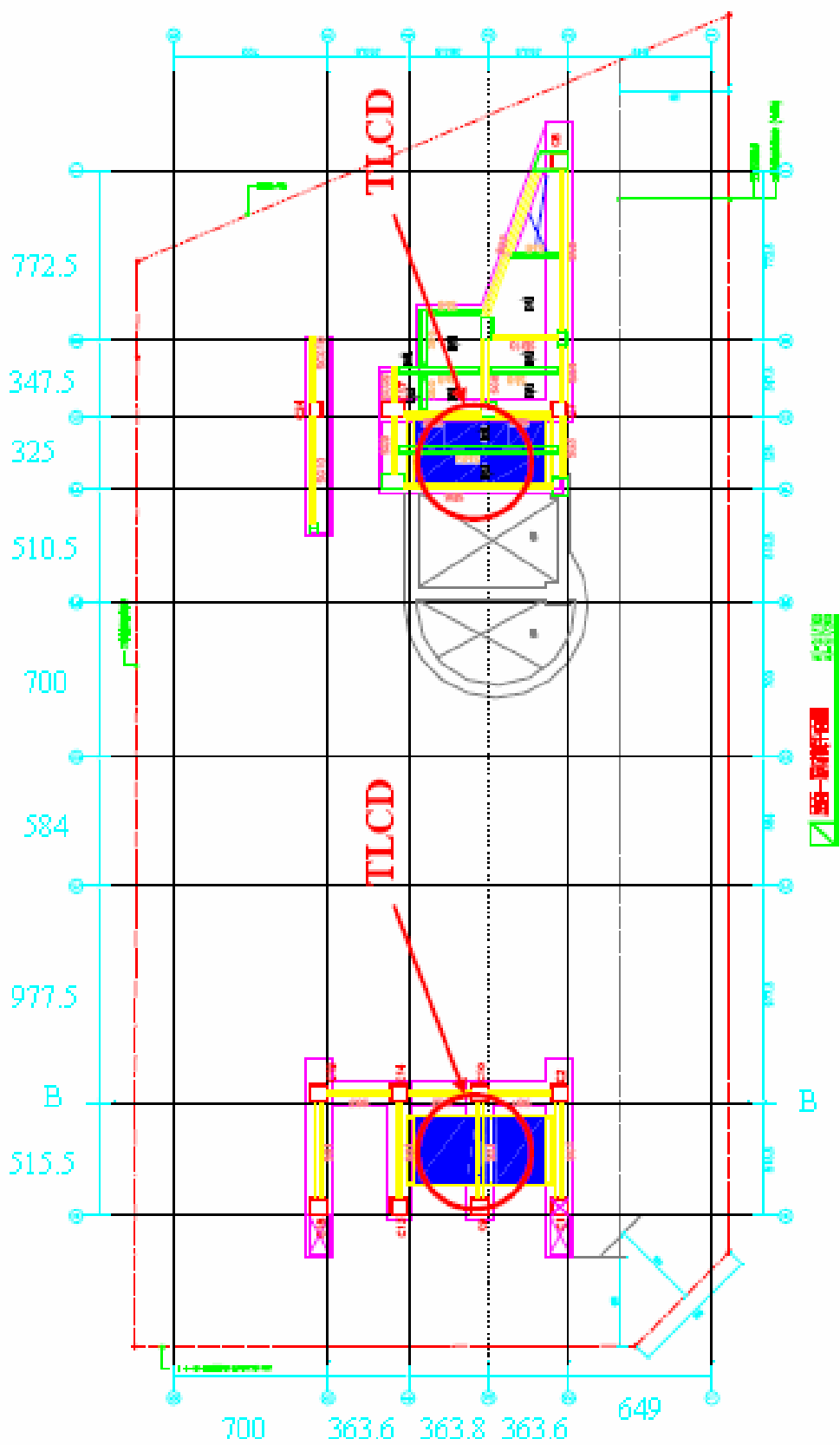


圖 4.1 御盟建設 20 代建案頂樓結構平面圖

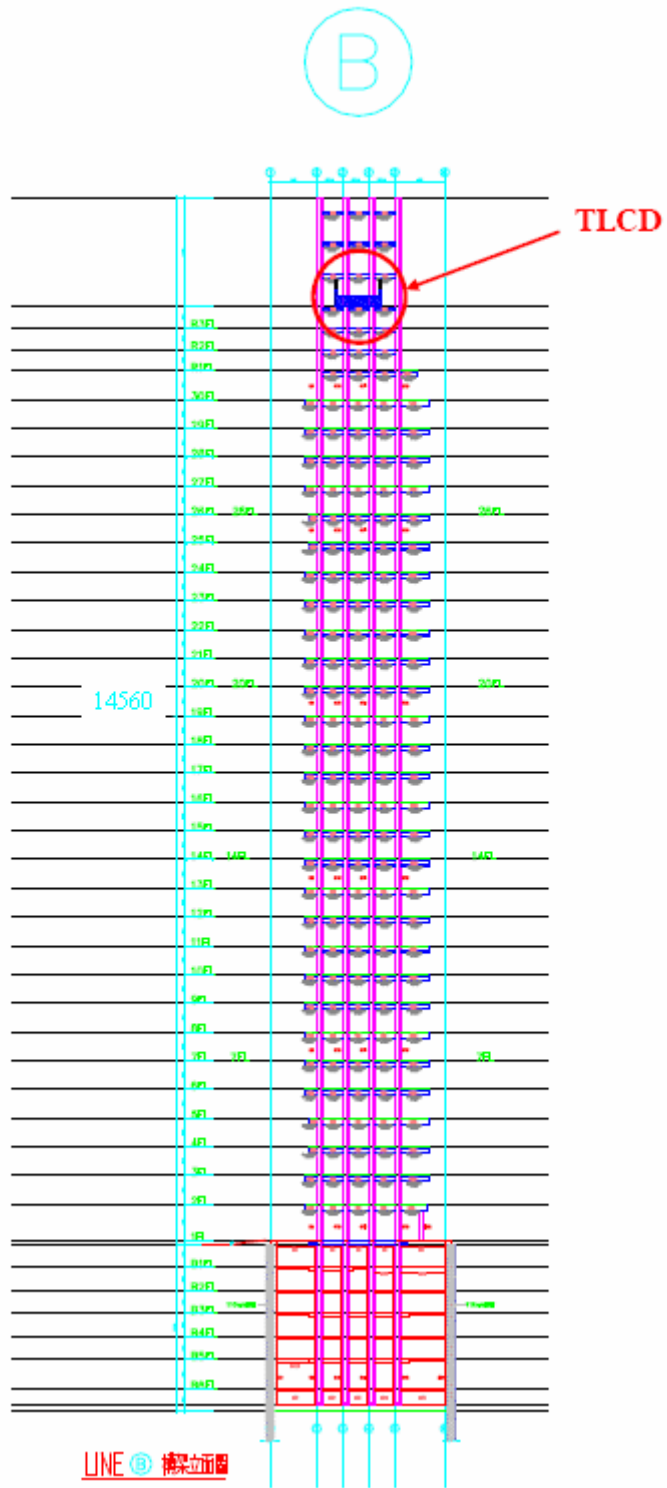


圖 4.2 御盟建設 20 代建案結構立面圖

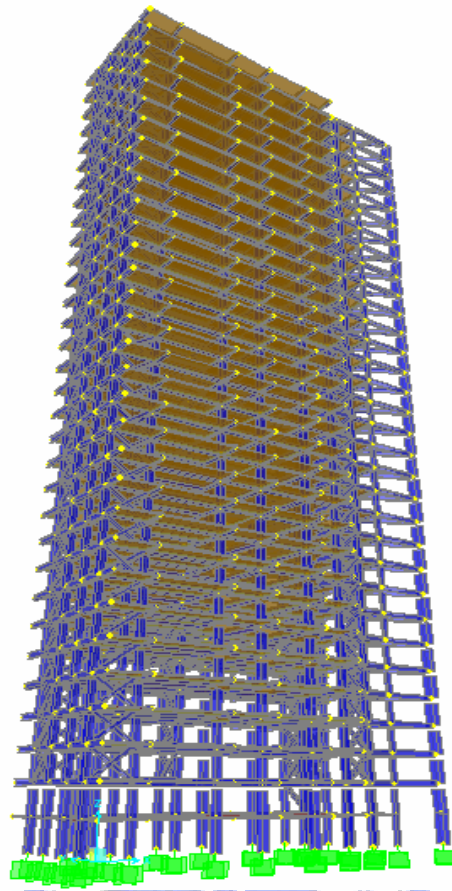


圖 4.3 御盟建設 20 代建案結構物模型示意圖

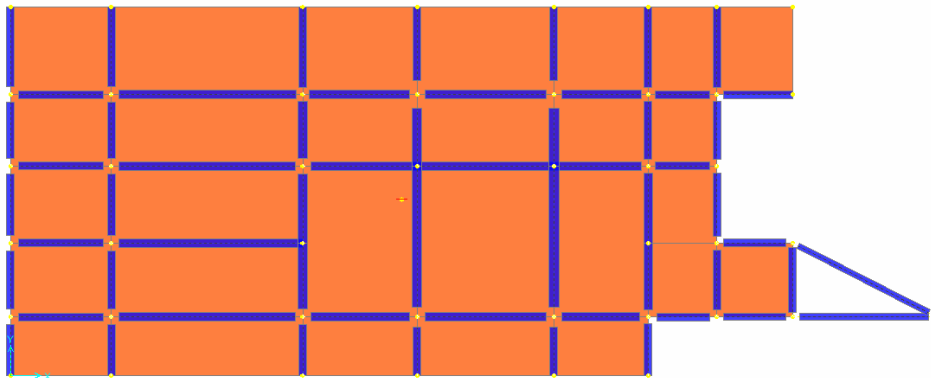


圖 4.4 御盟建設 20 代建案結構物模型頂樓平面圖

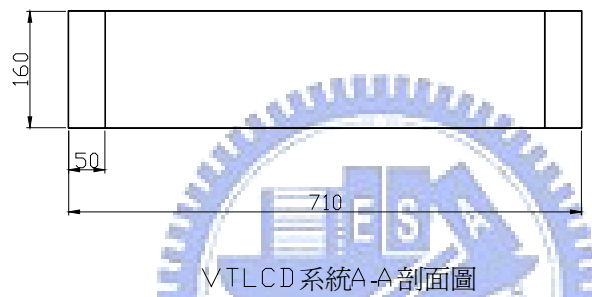
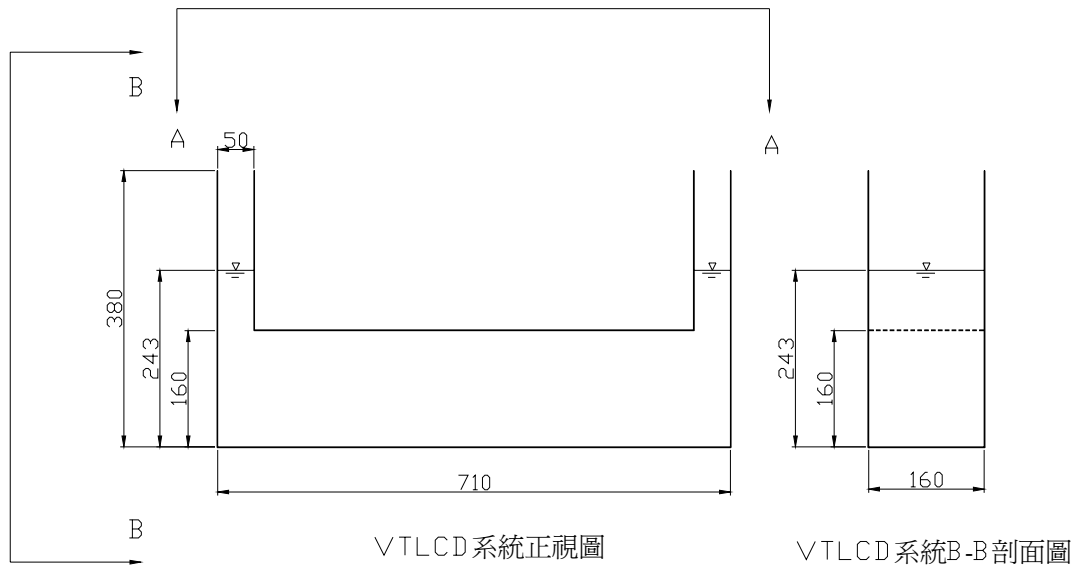


圖 4.5 實尺寸 VTLCD 系統尺寸設計詳圖($\beta=0.31$)

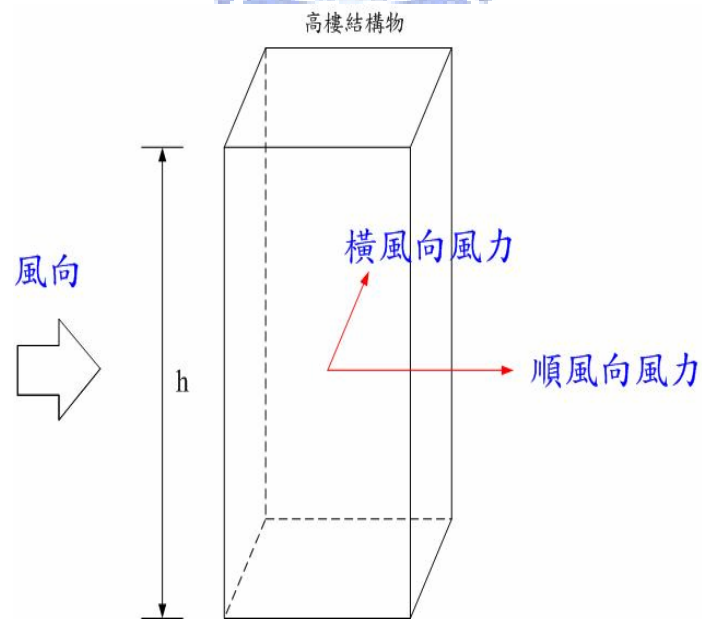


圖 4.6 順風向與橫風向之風力示意圖

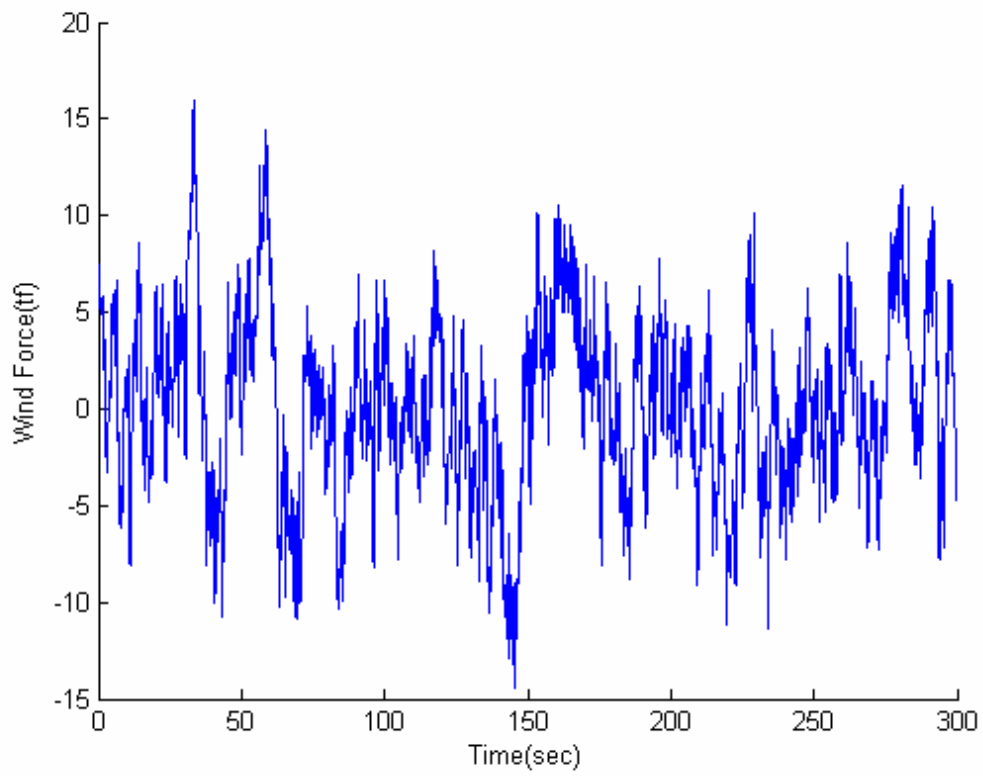


圖 4.7 順風向風力歷時圖

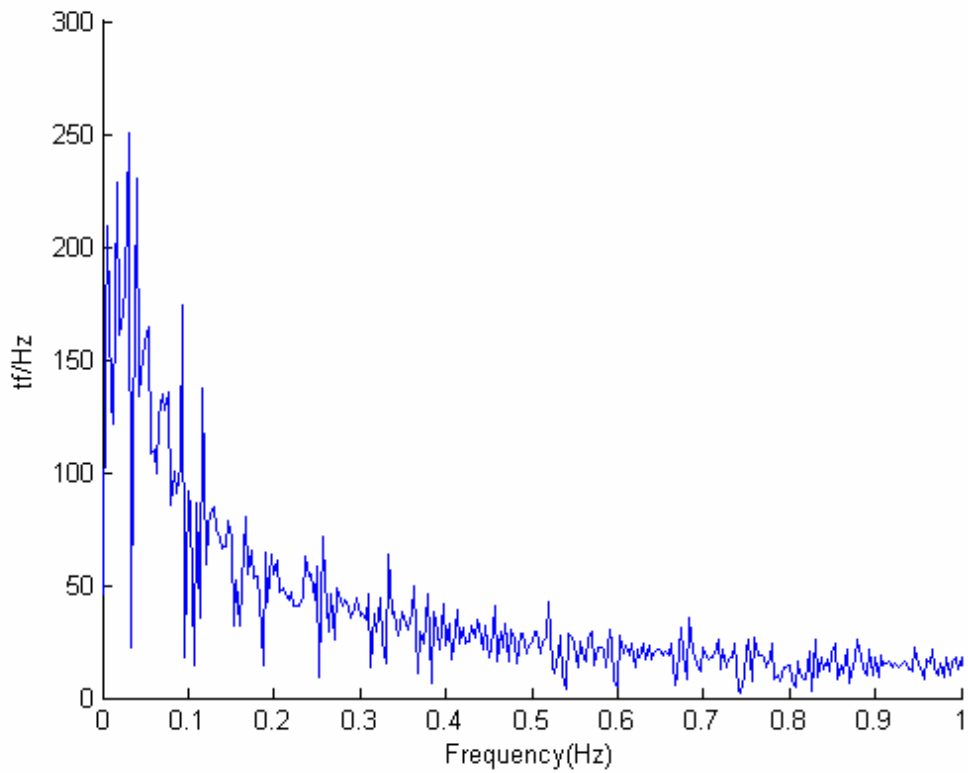


圖 4.8 順風向風力頻譜圖

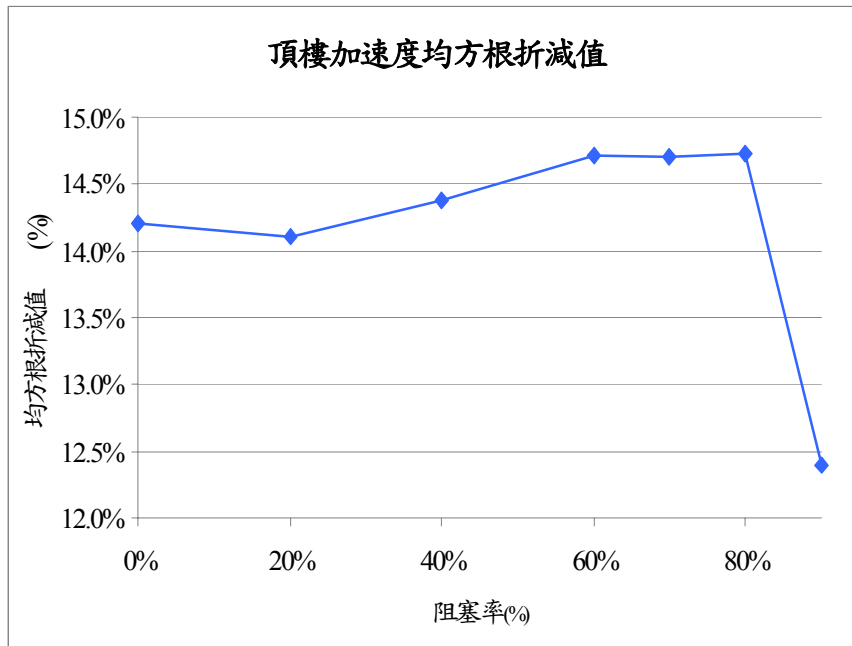


圖 4.9 結構物頂樓加速度均方根折減值

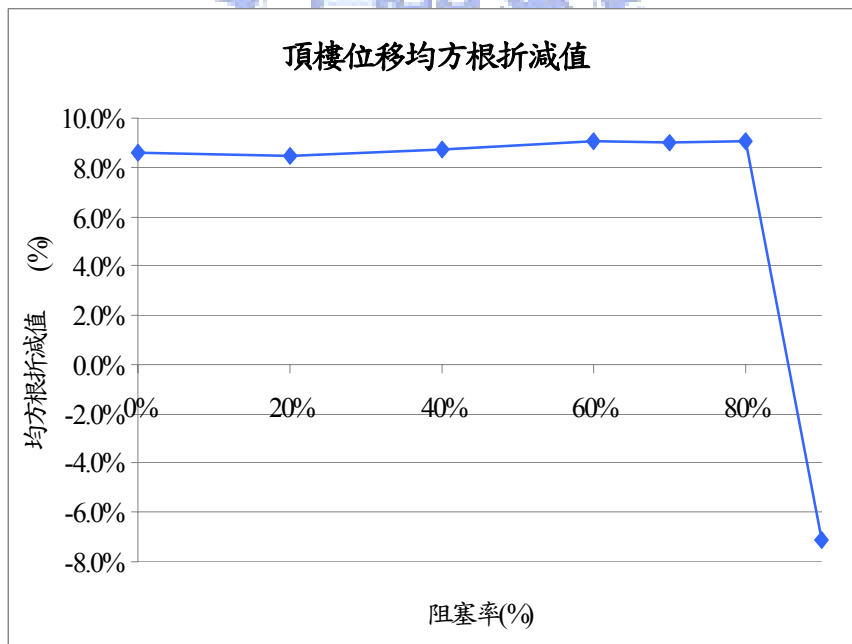


圖 4.10 結構物頂樓位移均方根折減值

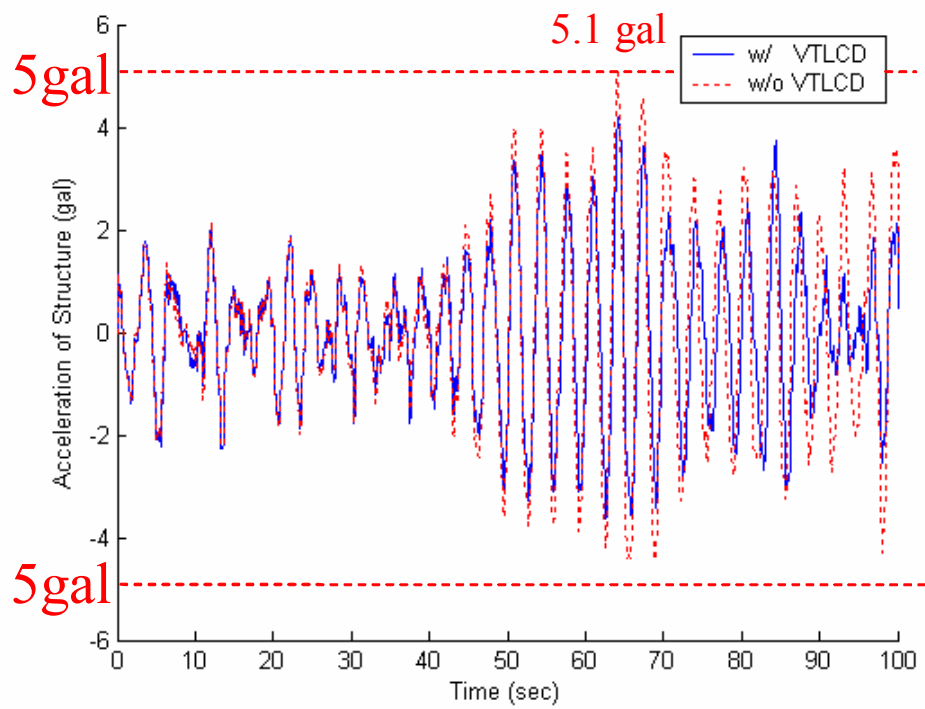


圖 4.11 VTLCD 阻塞率 80%之加速度折減

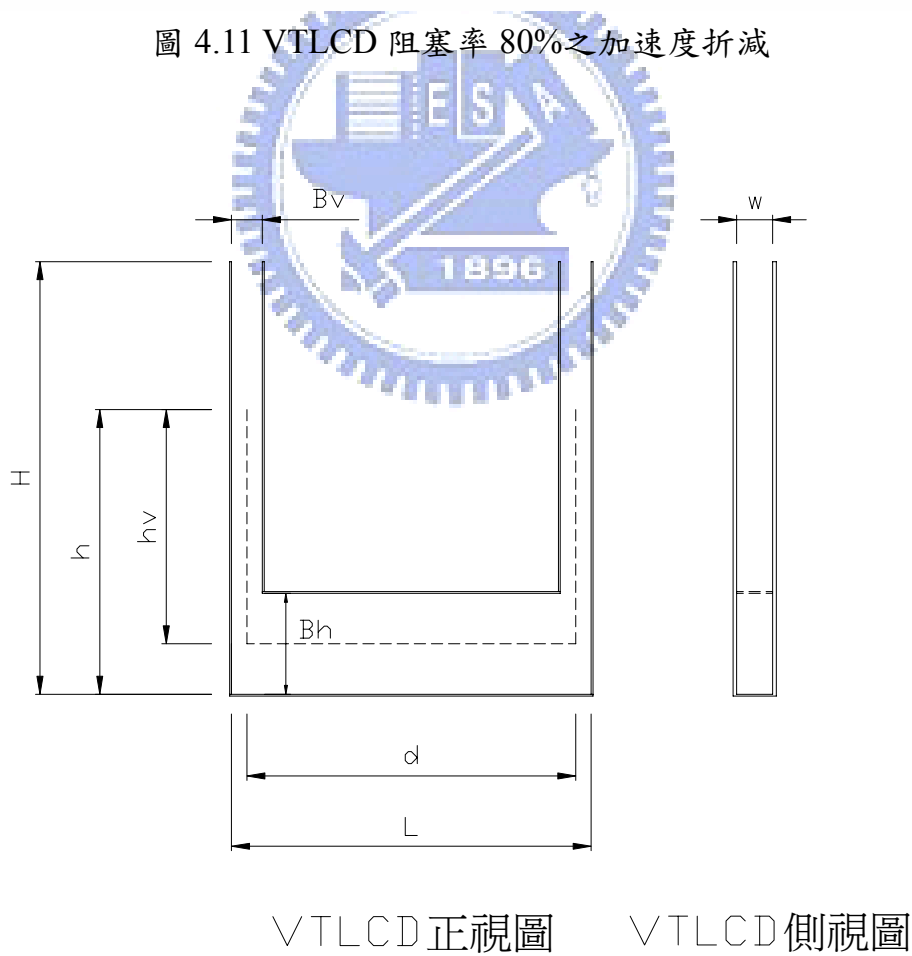


圖 4.12 變斷面 VTLCD 尺寸標示示意圖

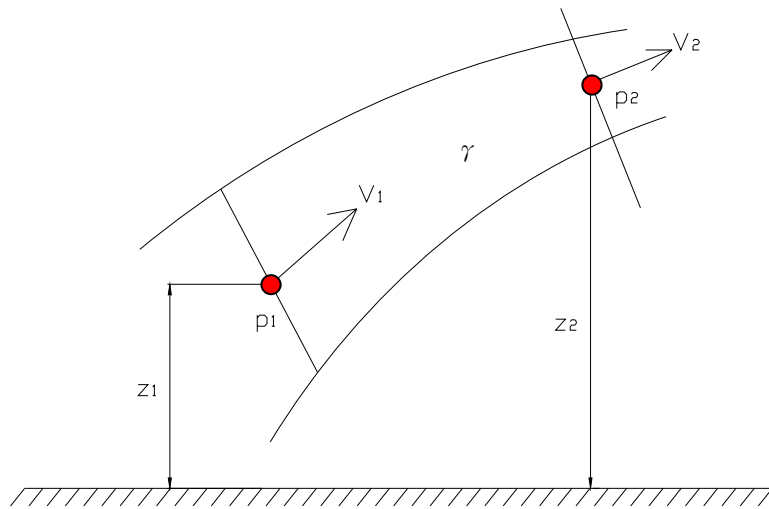


圖 4.13 穩態流流線管之能量示意圖

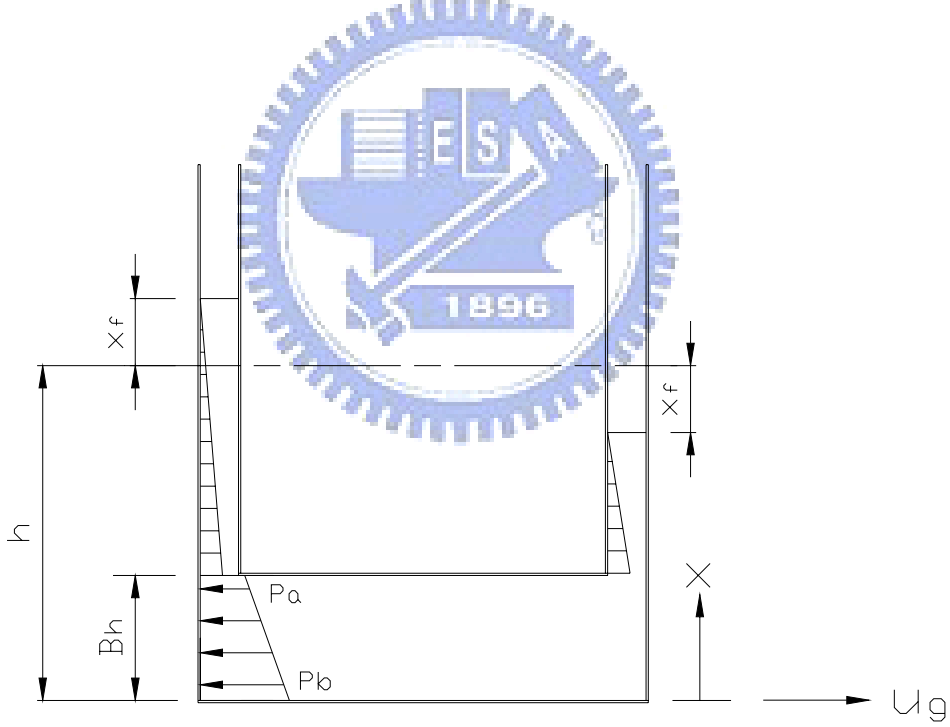


圖 4.14 VTLCD 系統管壁內液體壓力分佈圖

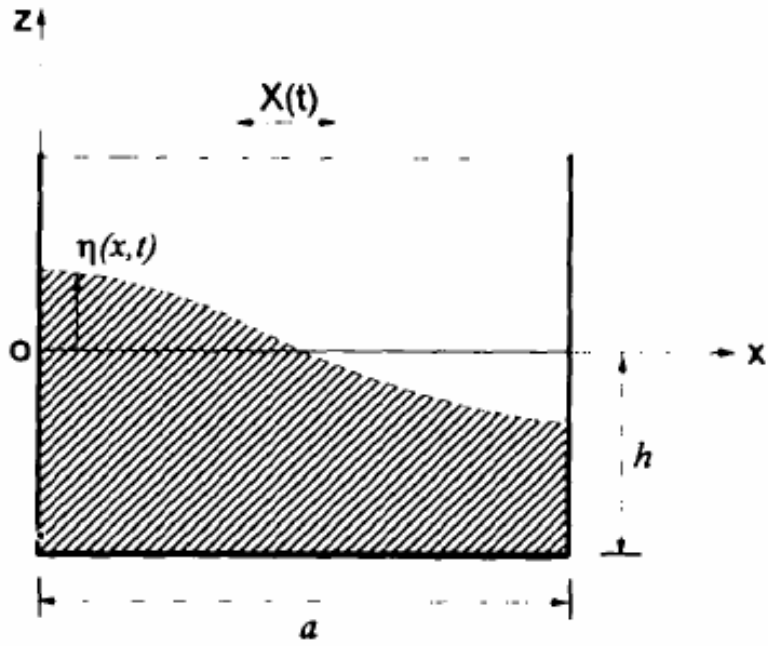


圖 4.15 刚性儲存槽理論推導示意圖

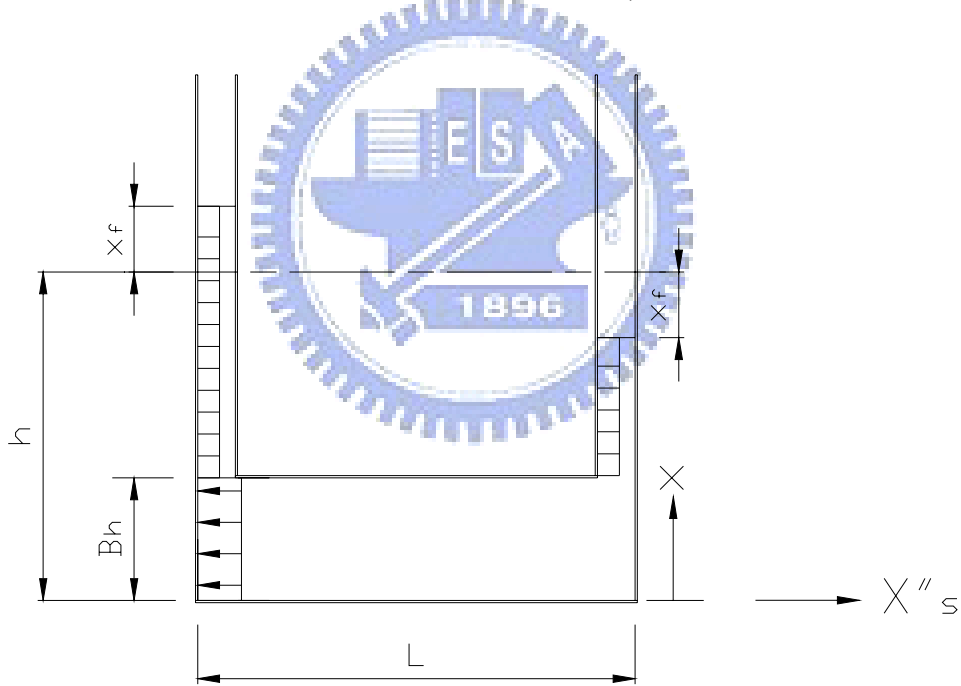


圖 4.16 VTLCD 管壁內流體慣性力分佈圖

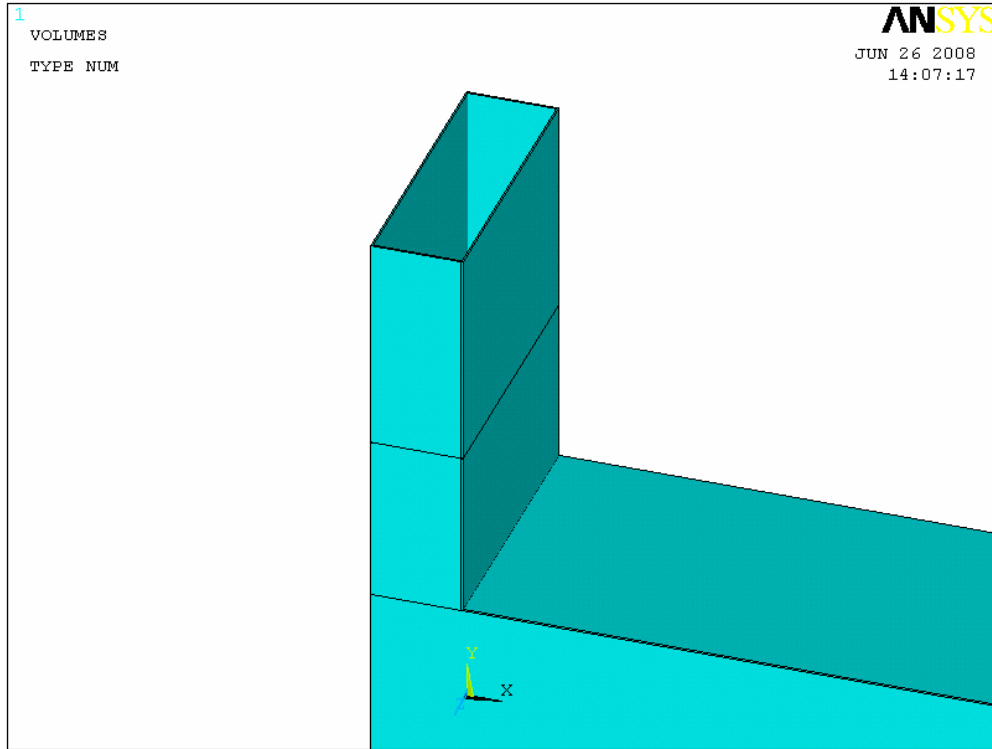


圖 4.17 ANSYS 幾何模型水位交界面示意

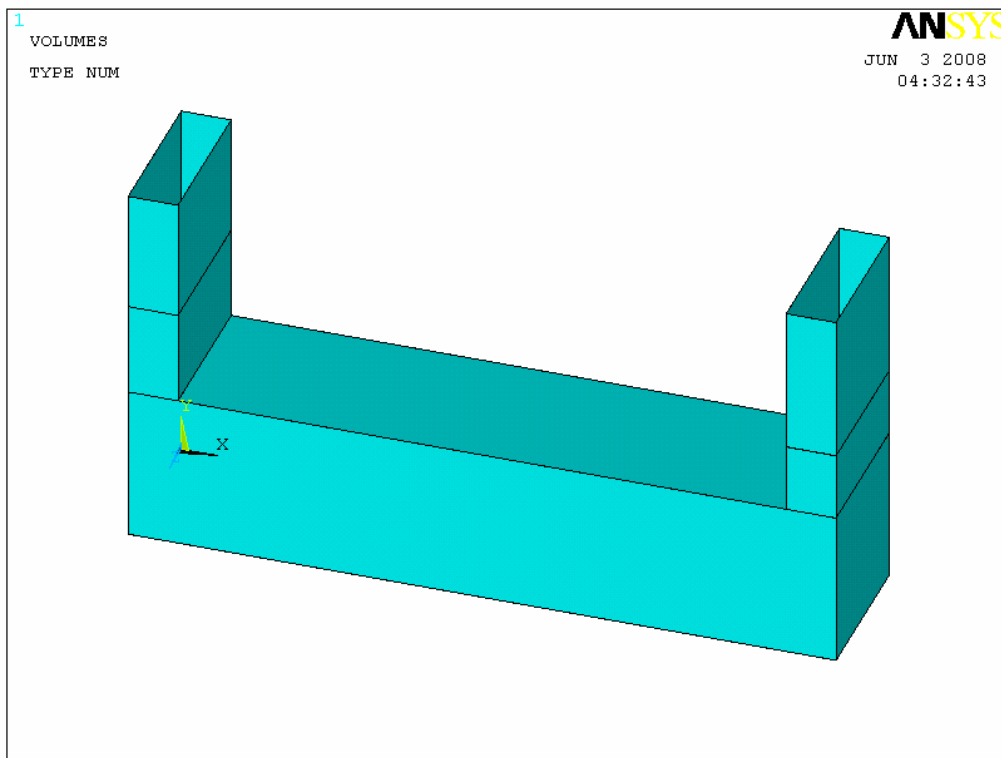


圖 4.18 實尺寸變斷面 VTLCD 之幾何模型

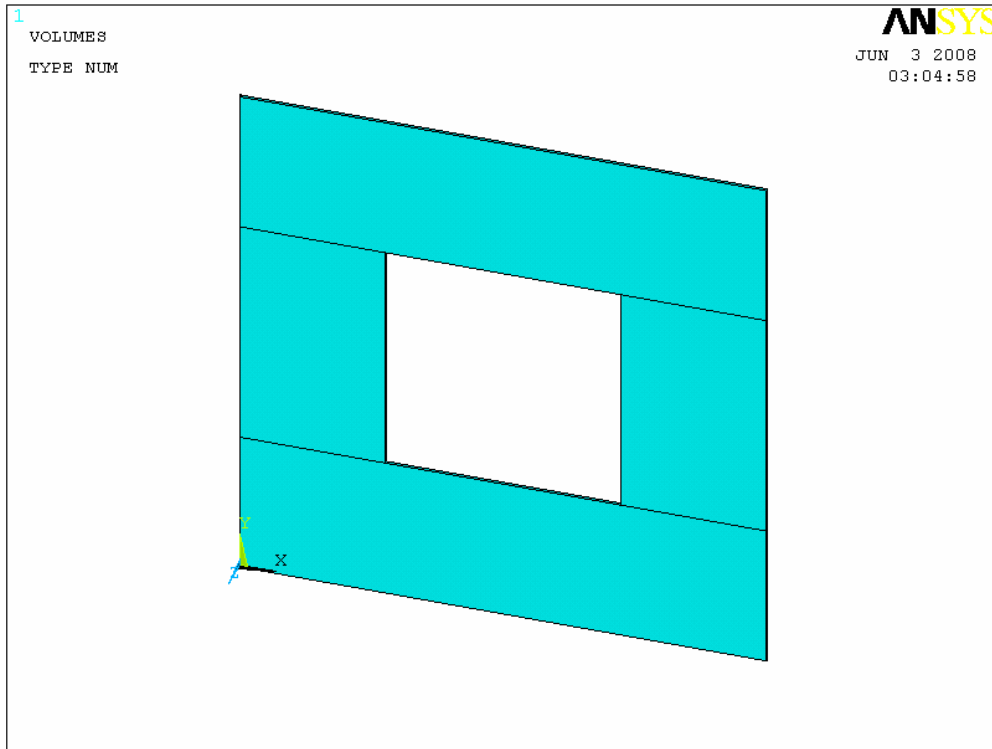


圖 4.19 實尺寸變斷面 VTLCD 孔口板(阻塞率 80%)之幾何模型

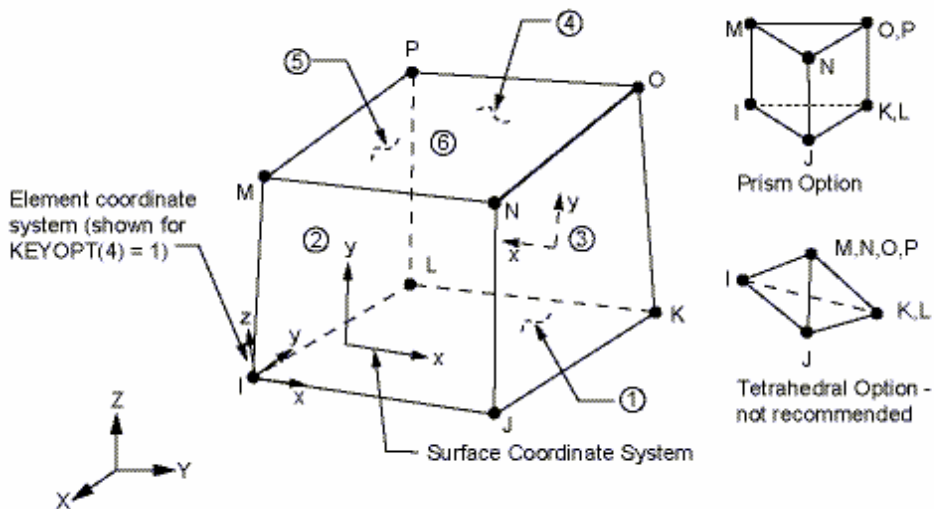


圖 4.20 SOLID45 元素示意圖

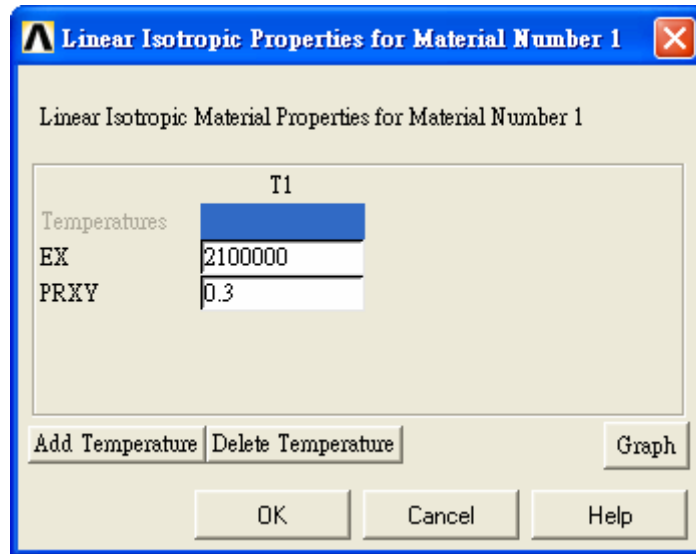


圖 4.21 ANSYS 分析模型材料性質輸入
(輸入內容：彈性模數及包松比)

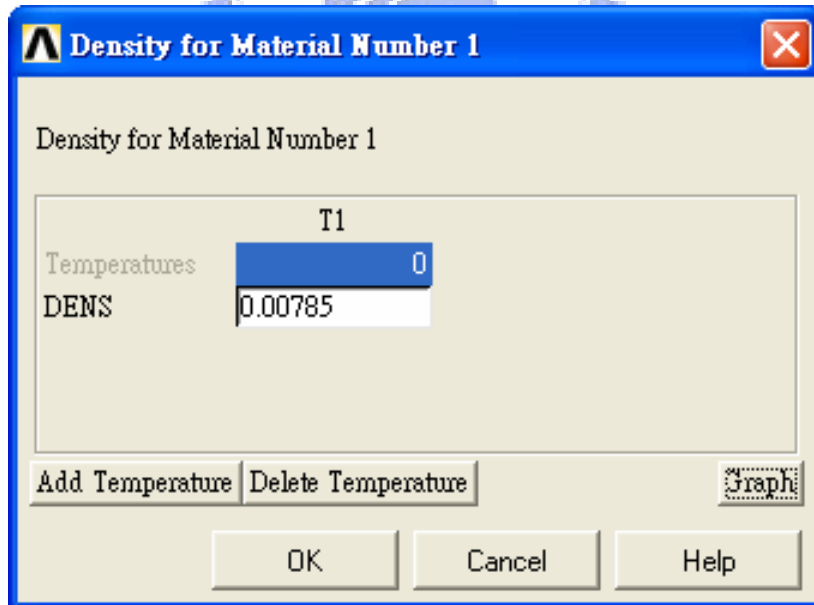


圖 4.22 ANSYS 分析模型材料性質輸入
(輸入內容：材料密度)

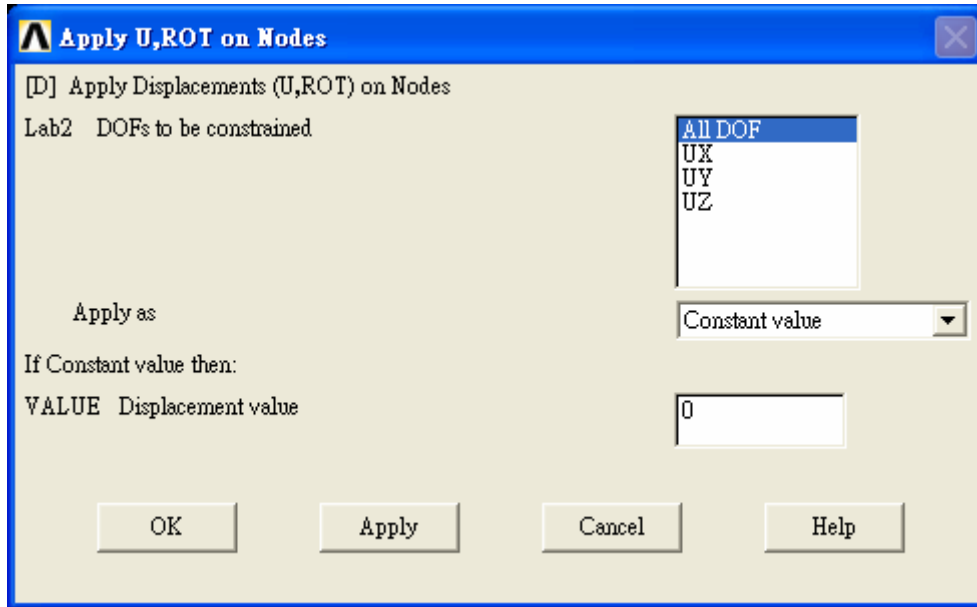


圖 4.23 變斷面 VTLCD 模型邊界固接設定

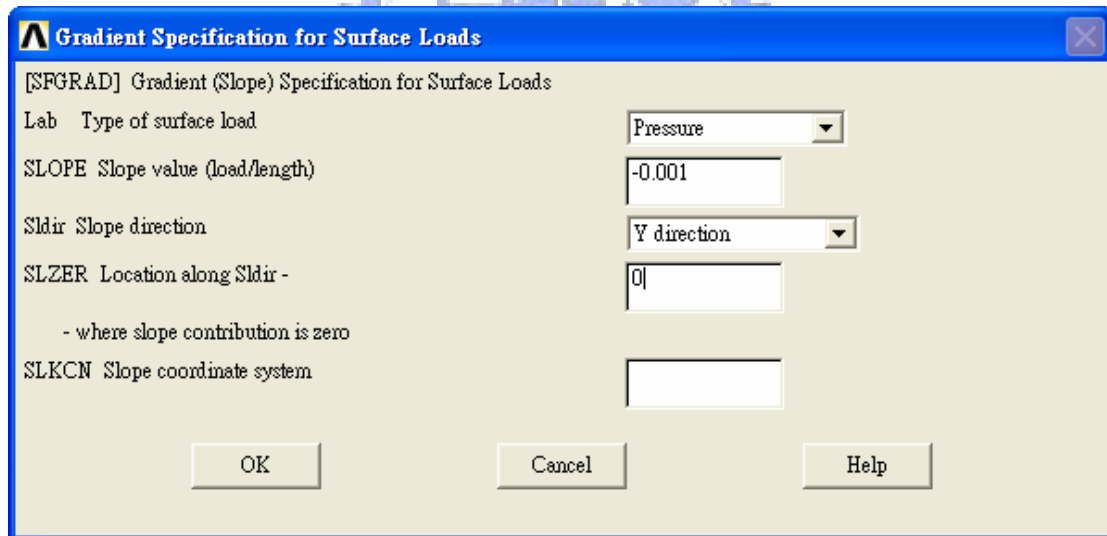


圖 4.24(a) ANSYS 表面壓力設定值(斜率、作用方向及最終質設定)

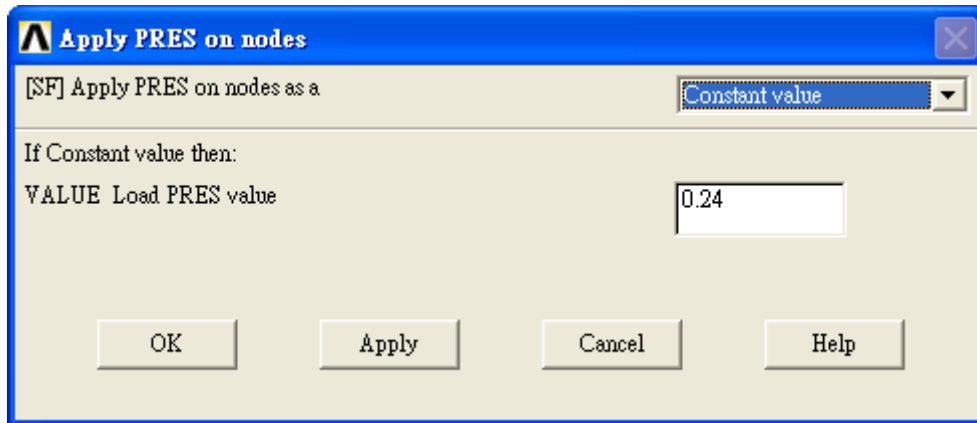


圖 4.24(b) ANSYS 表面壓力設定值(初始質設定)

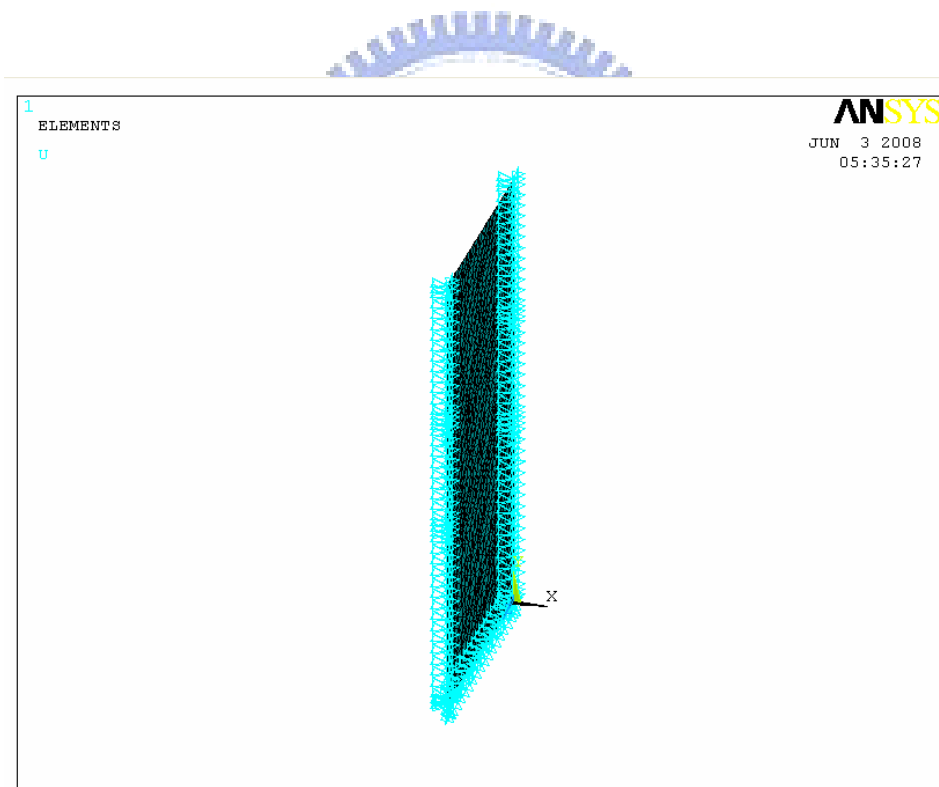


圖 4.25 變斷面 VTLCD 局部分析-垂直段管壁邊界條件設定

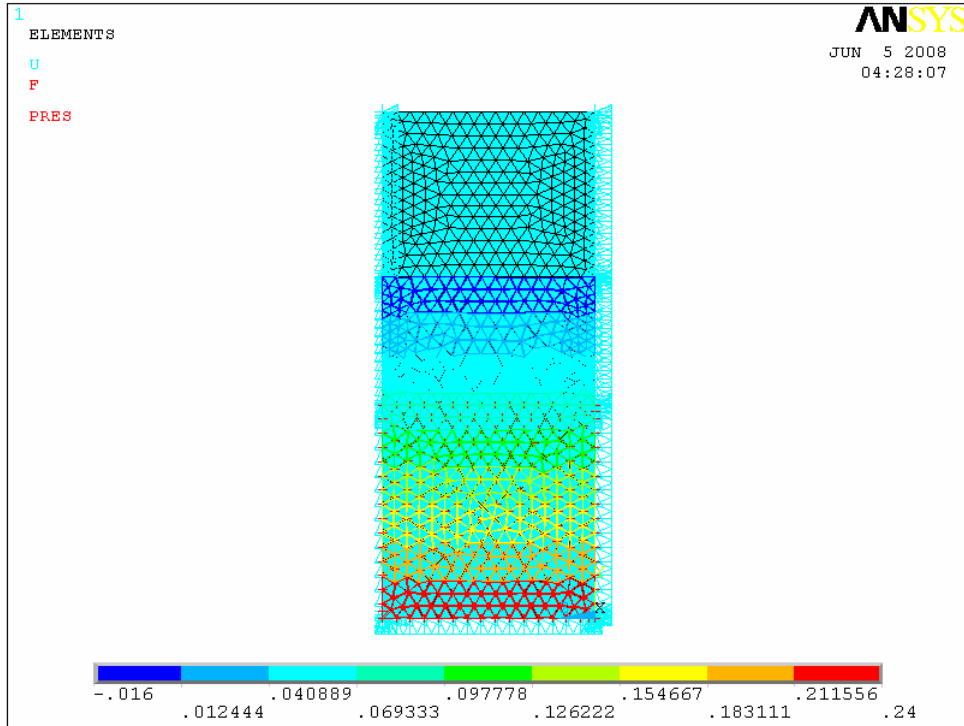


圖 4.26 ANSYS 表面壓力示意圖

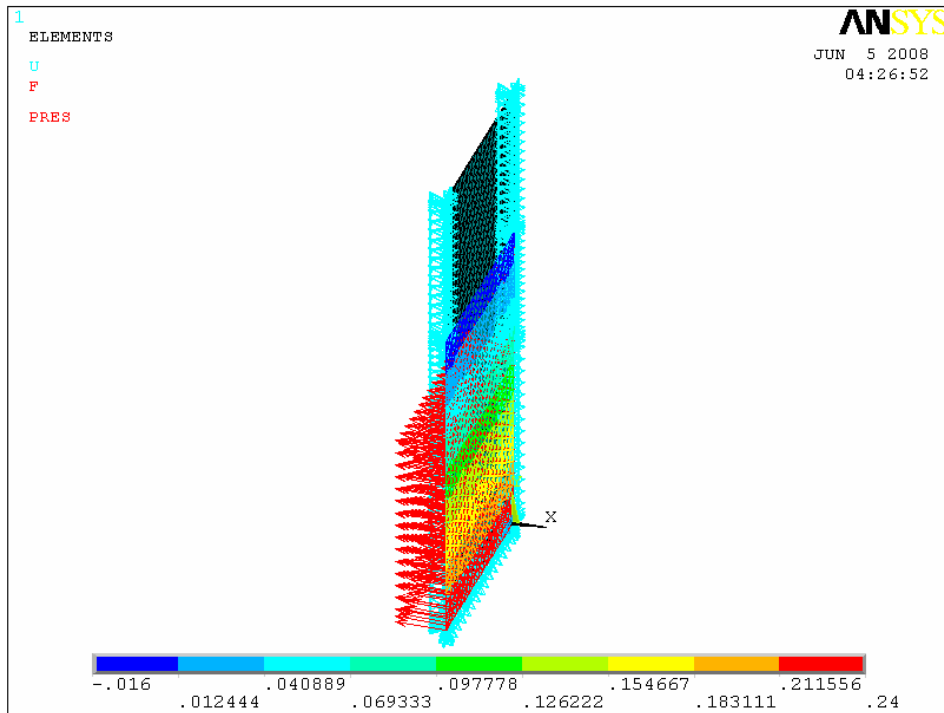


圖 4.27 ANSYS 流體作用力之模擬

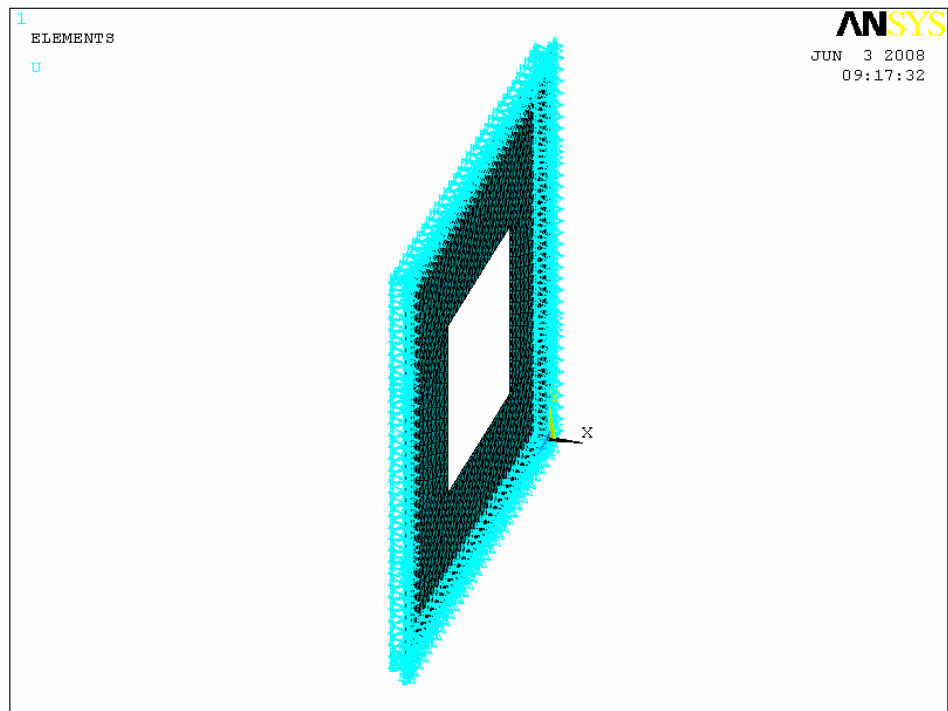


圖 4.28 孔口板邊界條件設定

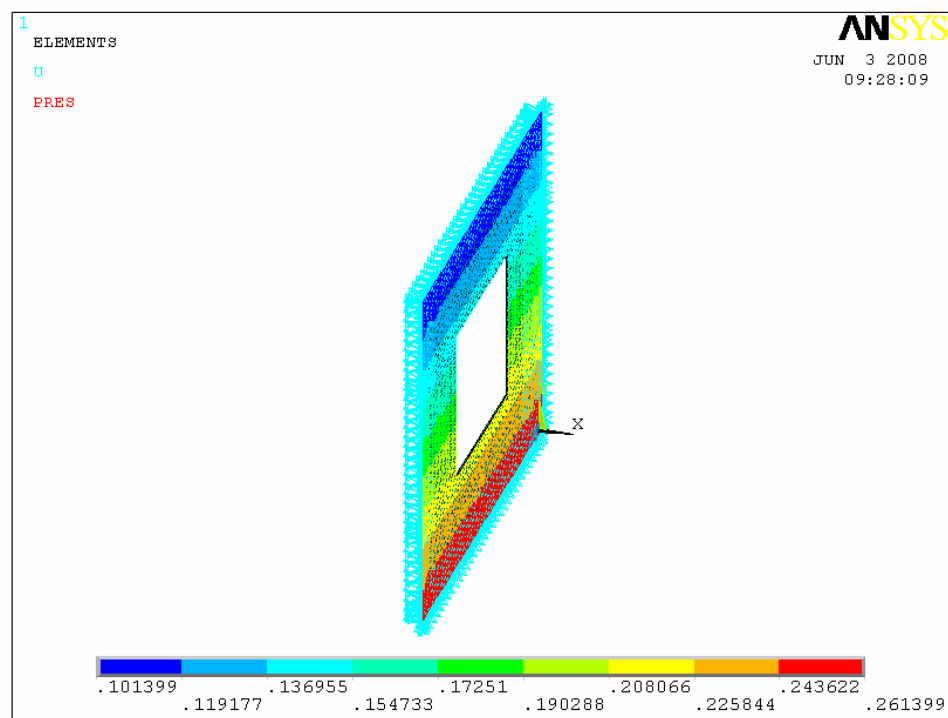


圖 4.29 孔口板邊荷載之施加

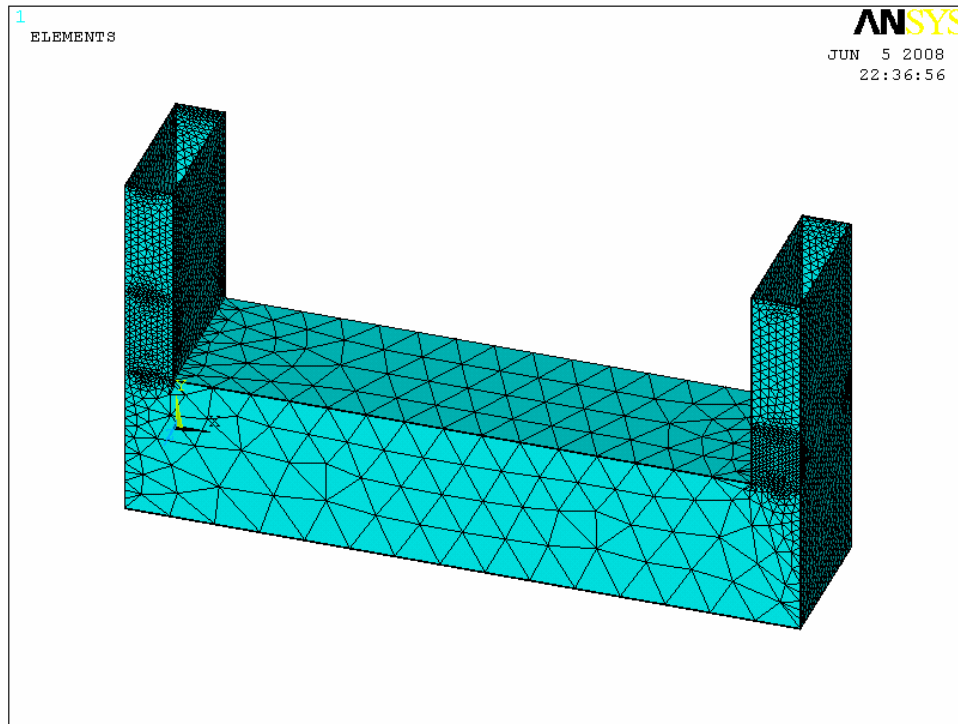


圖 4.30 變斷面 VTLCD 網格劃分示意圖

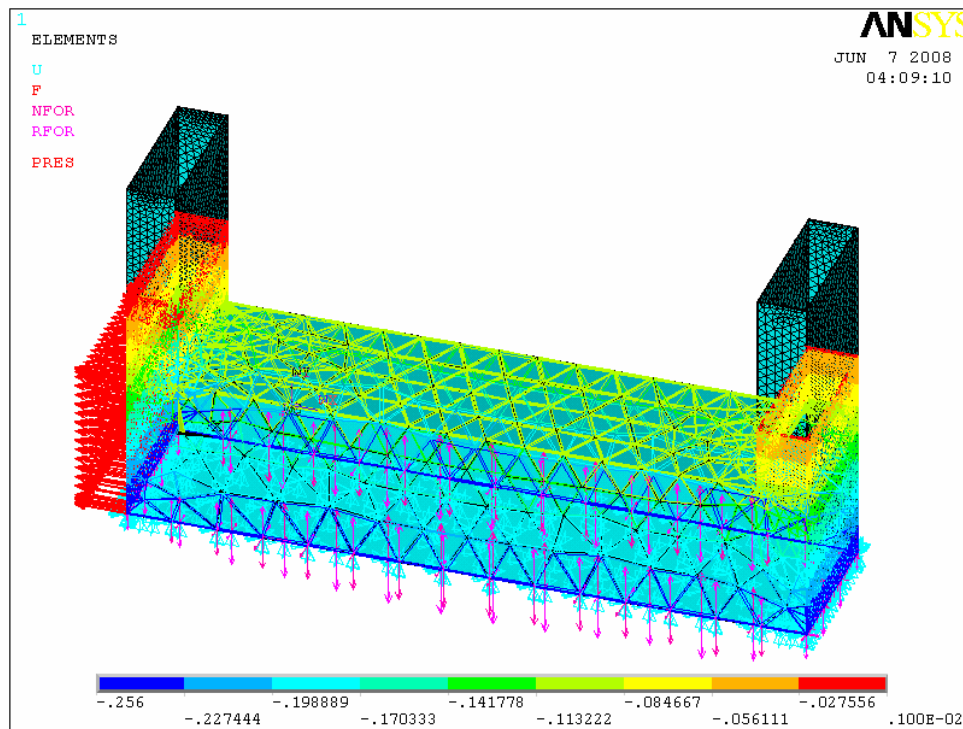


圖 4.31 變斷面 VTLCD 荷載施加示意圖

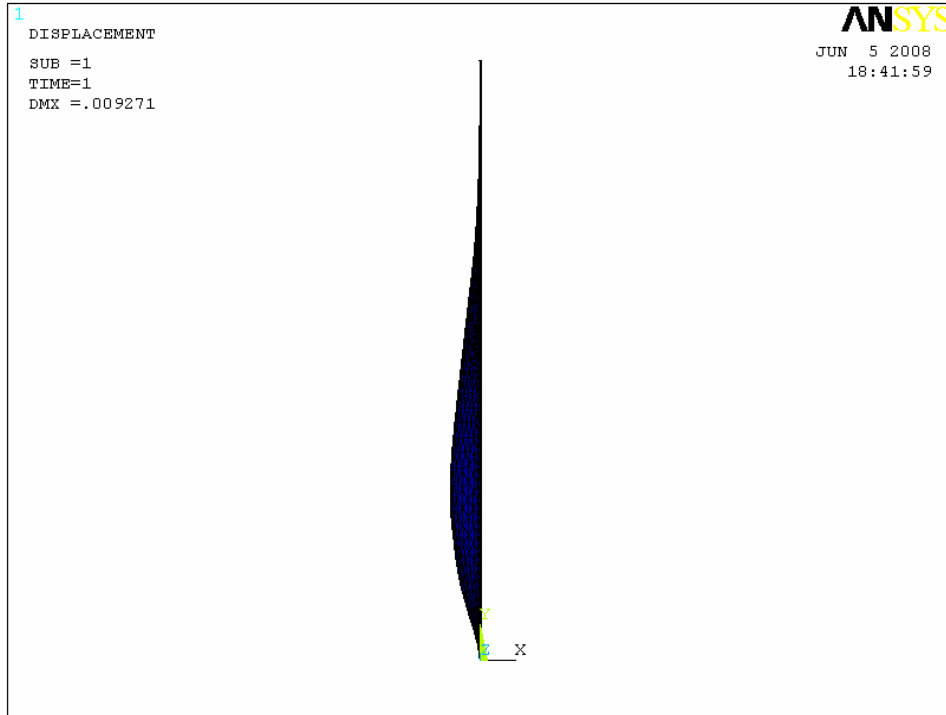


圖 4.32 變斷面 VTLCD 局部分析變形量示意圖

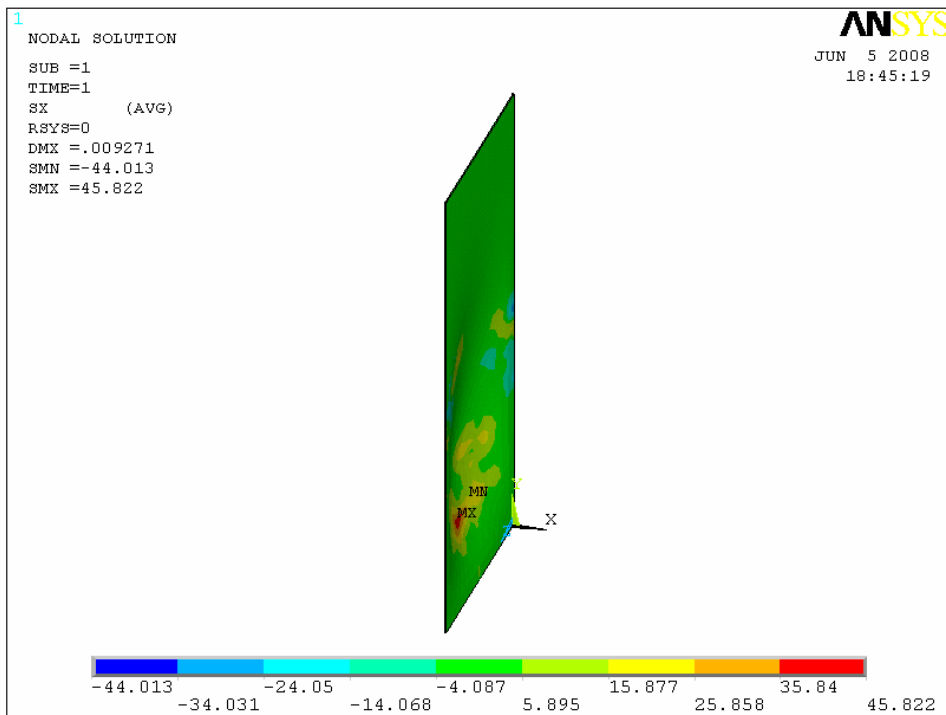


圖 4.33(a) 變斷面 VTLCD 局部分析 X 軸應力分佈圖

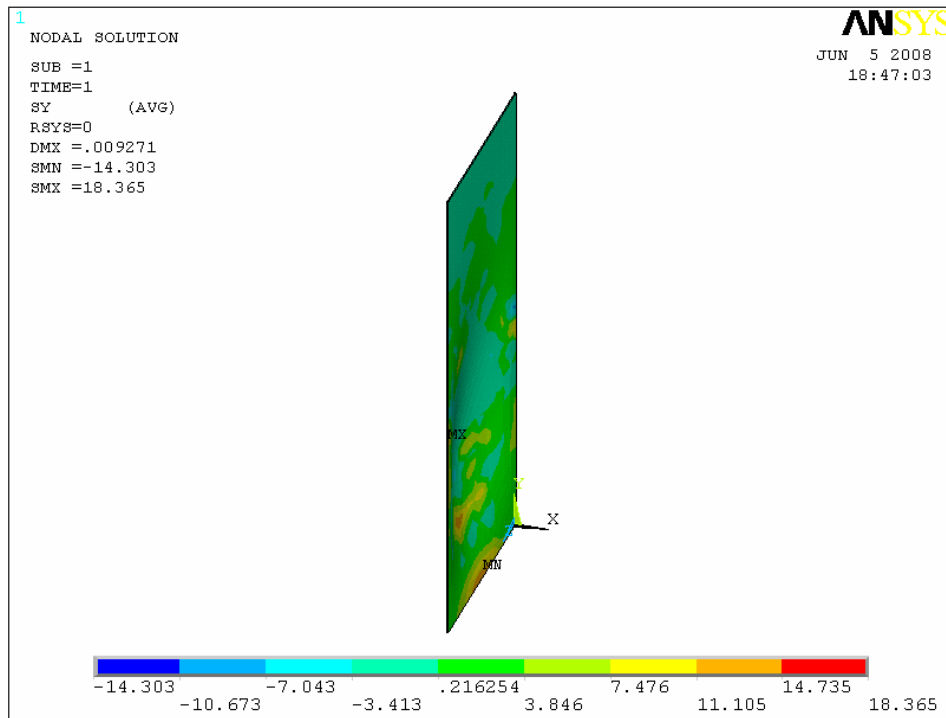


圖 4.33(b) 變斷面 VTLCD 局部分析 Y 軸應力分佈圖

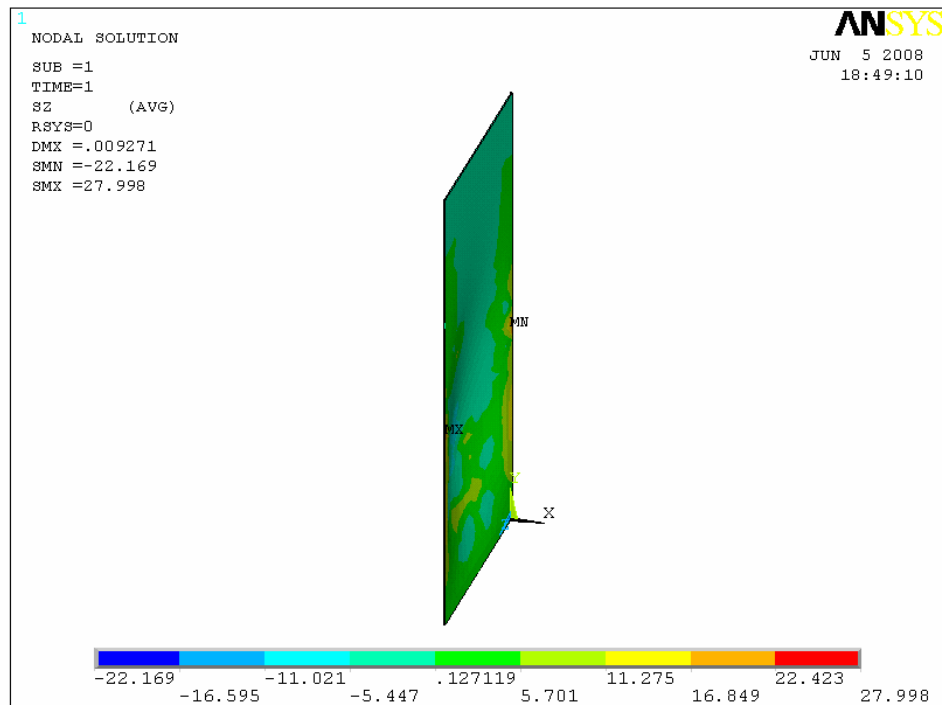


圖 4.33(c) 變斷面 VTLCD 局部分析 Z 軸應力分佈圖

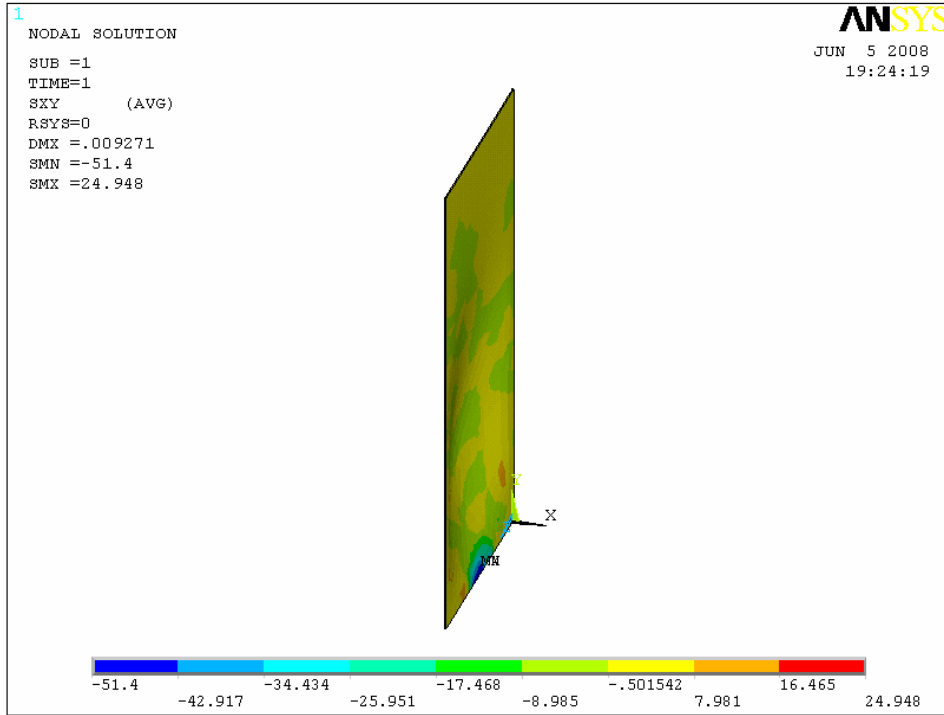


圖 4.33(d) 變斷面 VTLCD 局部分析 XY 平面剪應力分佈圖

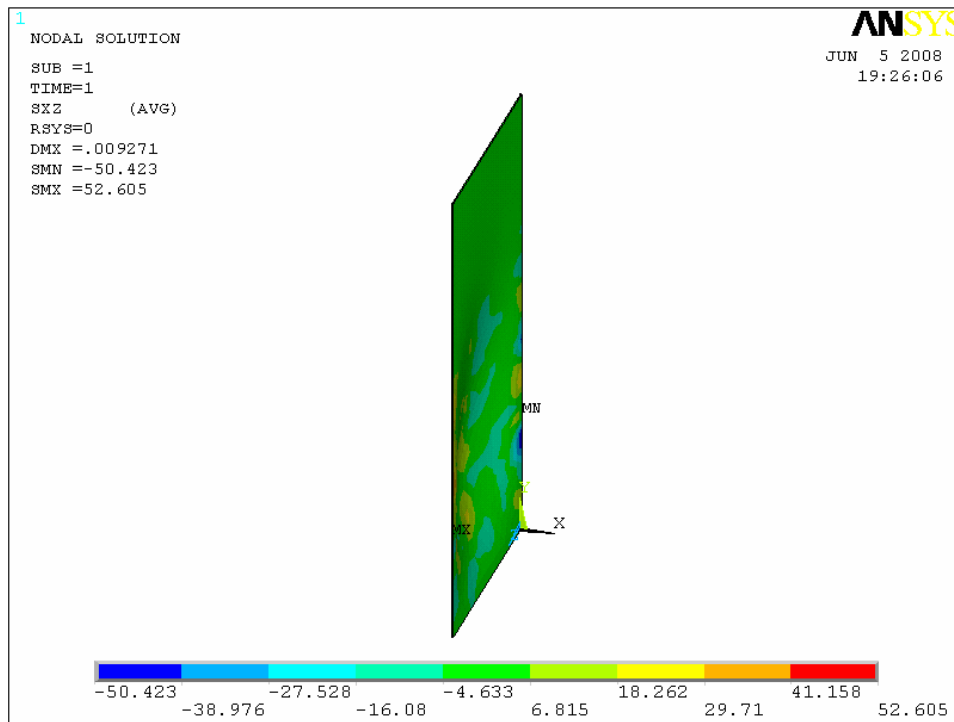


圖 4.33(e) 變斷面 VTLCD 局部分析 XZ 平面剪應力分佈圖

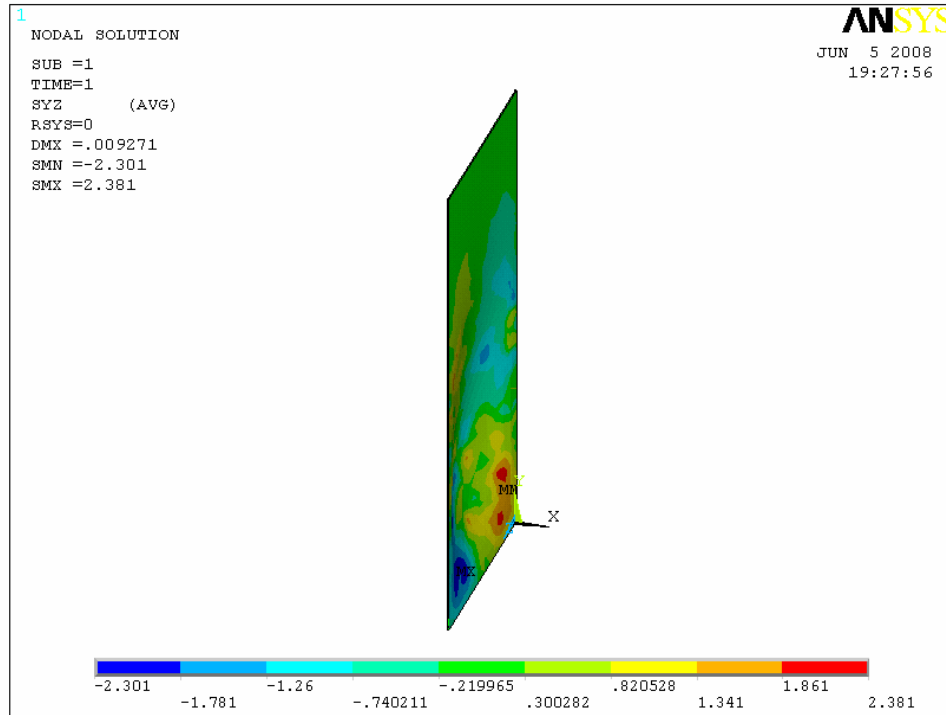


圖 4.33(f) 變斷面 VTLCD 局部分析 YZ 平面剪應力分佈圖

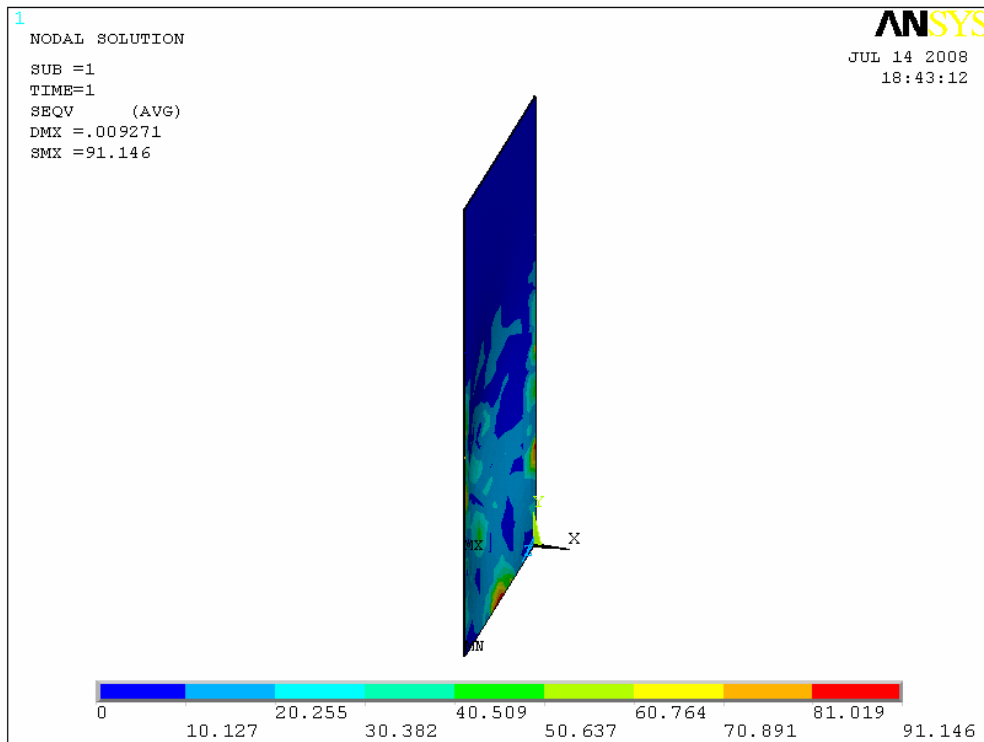


圖 4.33(g) 變斷面 VTLCD 局部分析 Von Mises 應力分佈圖

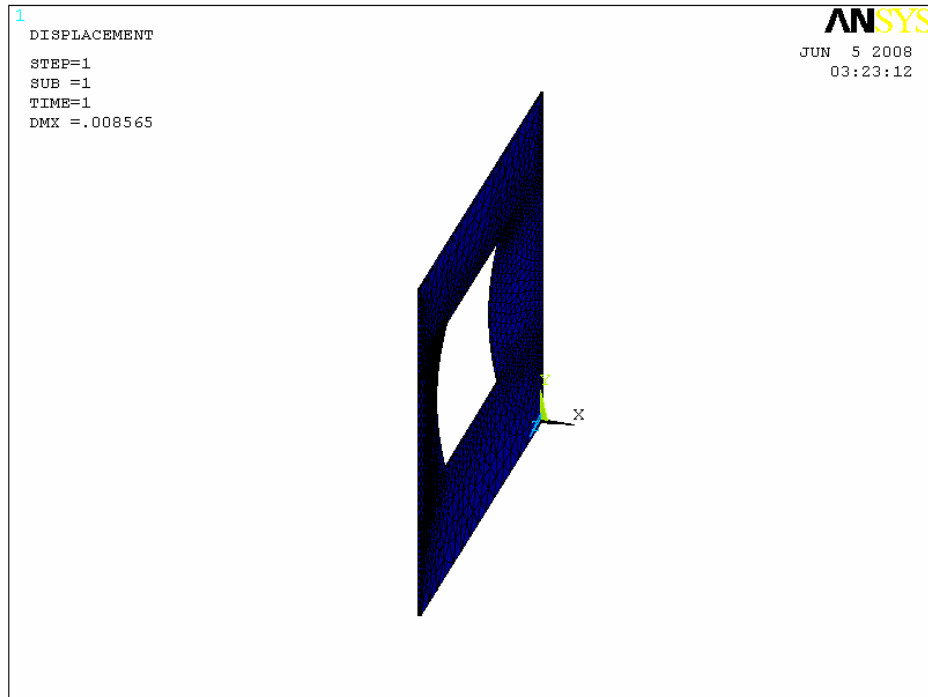


圖 4.34 孔口板變形量示意圖

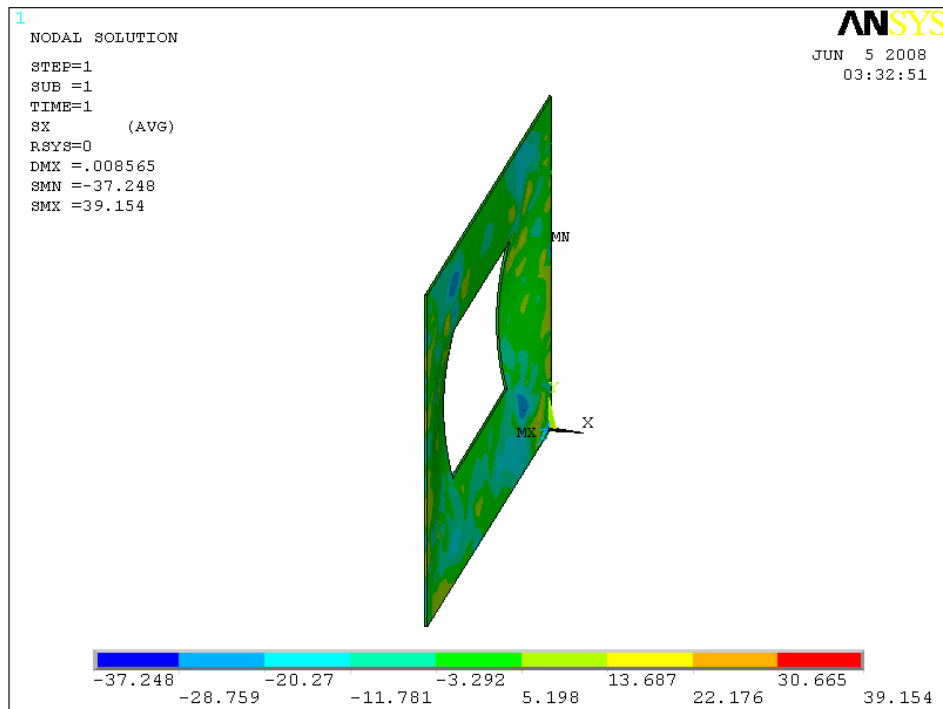


圖 4.35(a) 孔口板 X 軸應力分佈圖

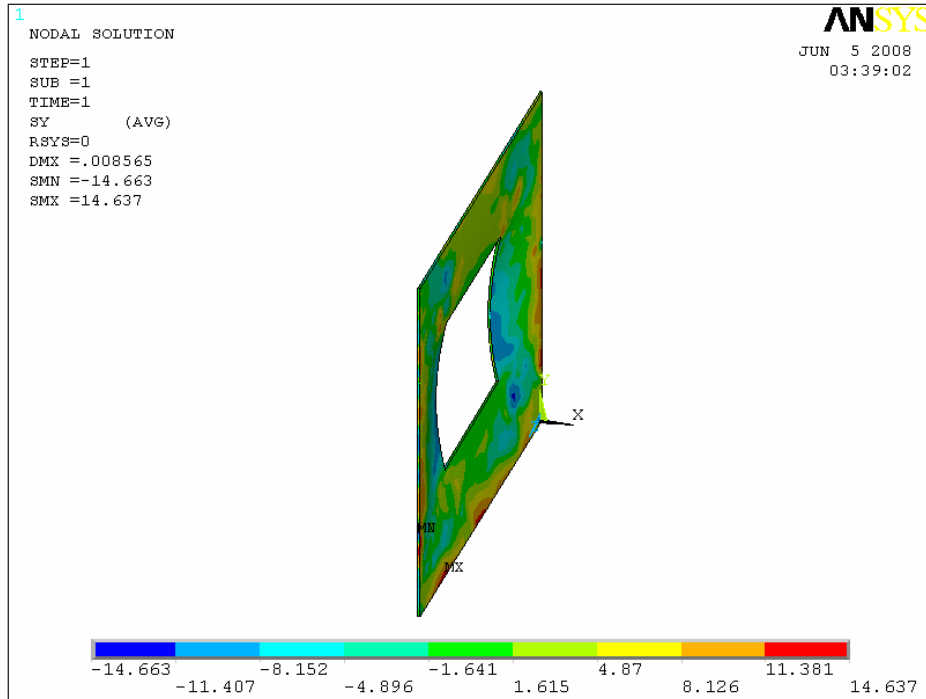


圖 4.35(b) 孔口板 Y 軸應力分佈圖

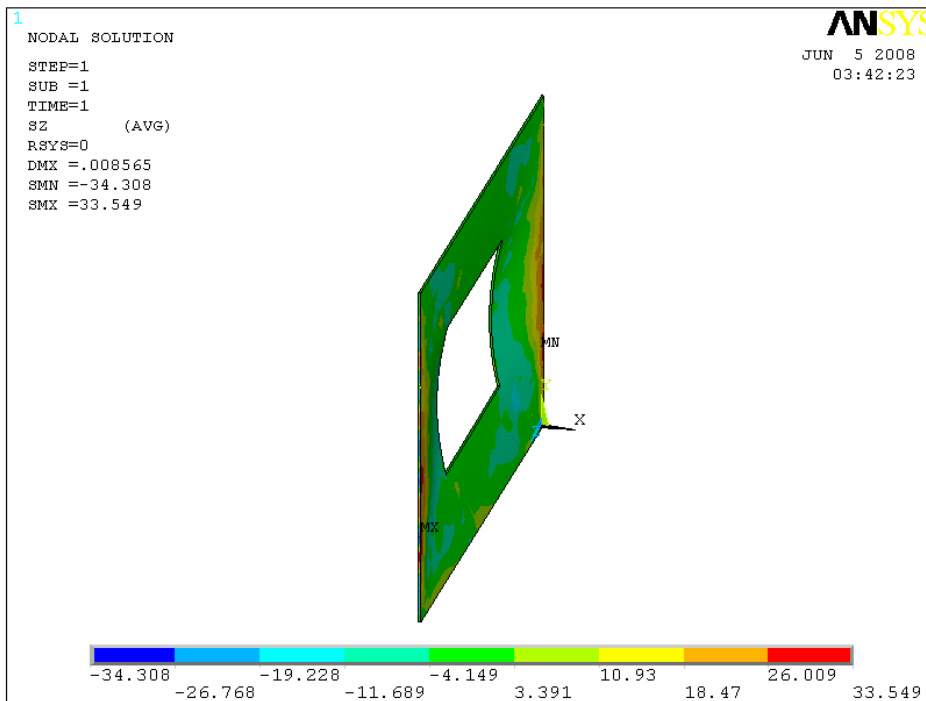


圖 4.35(c) 孔口板 Z 軸應力分佈圖

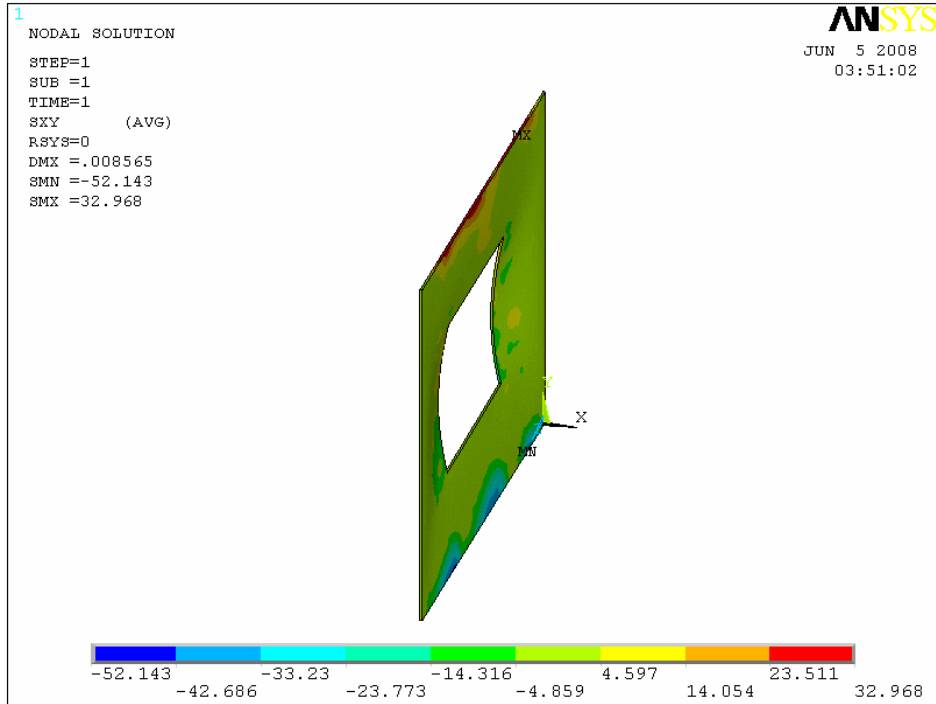


圖 4.35(d) 孔口板 XY 平面剪應力分佈圖

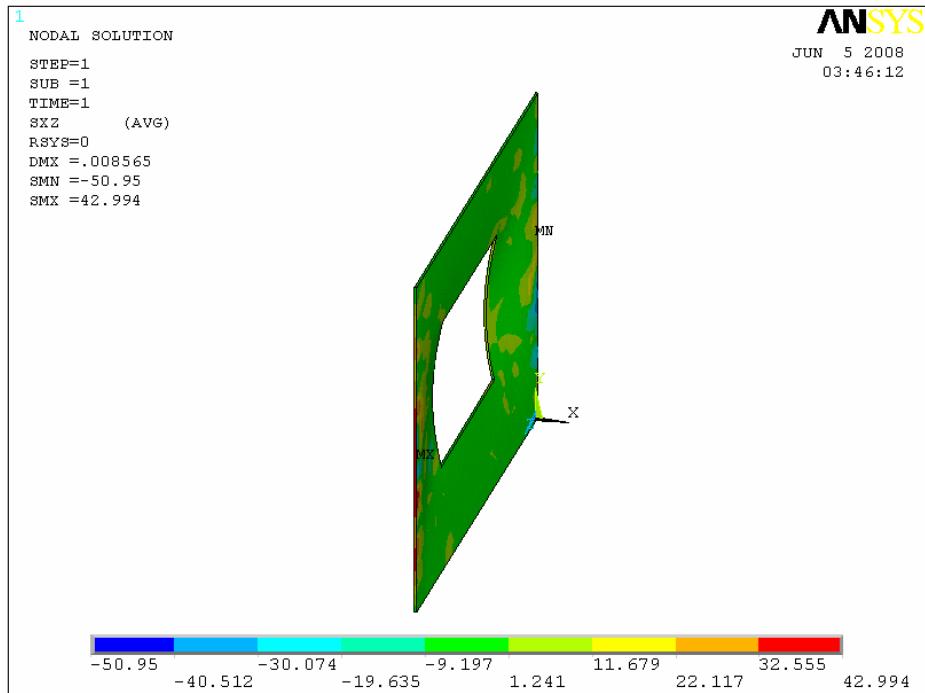


圖 4.35(e) 孔口板 XZ 平面剪應力分佈圖

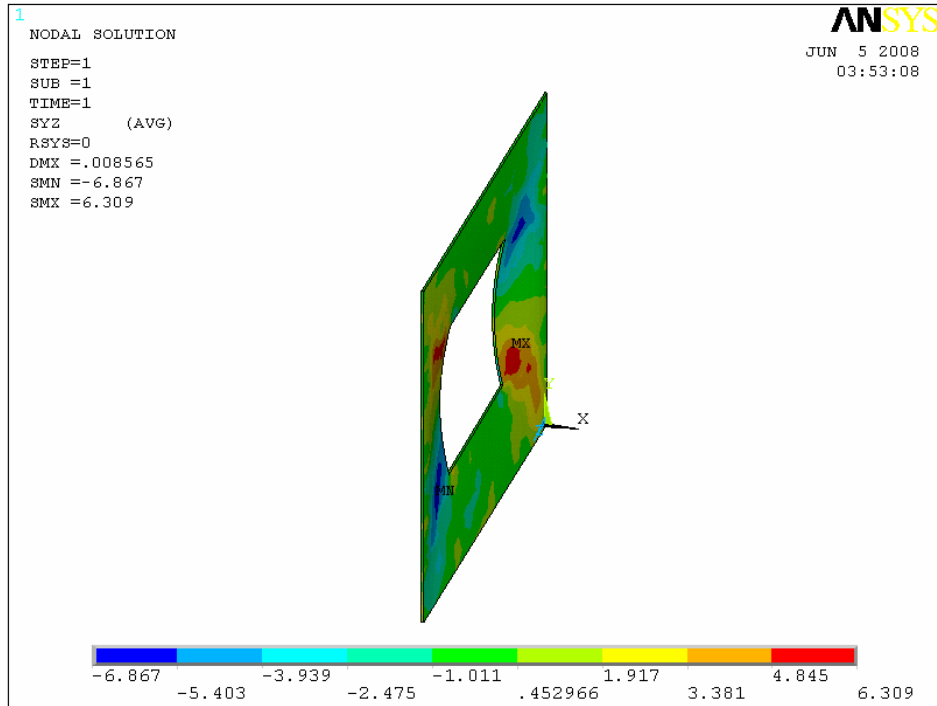


圖 4.35(f) 孔口板 YZ 平面剪應力分佈圖

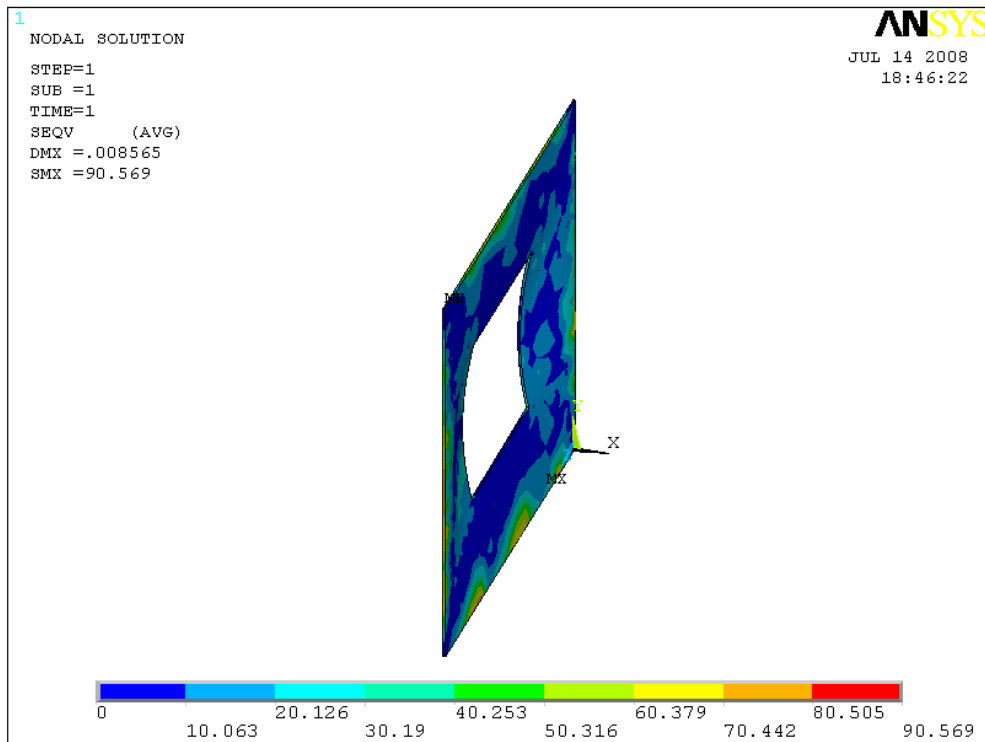


圖 4.35(g) 孔口板 Von Mises 應力分佈圖

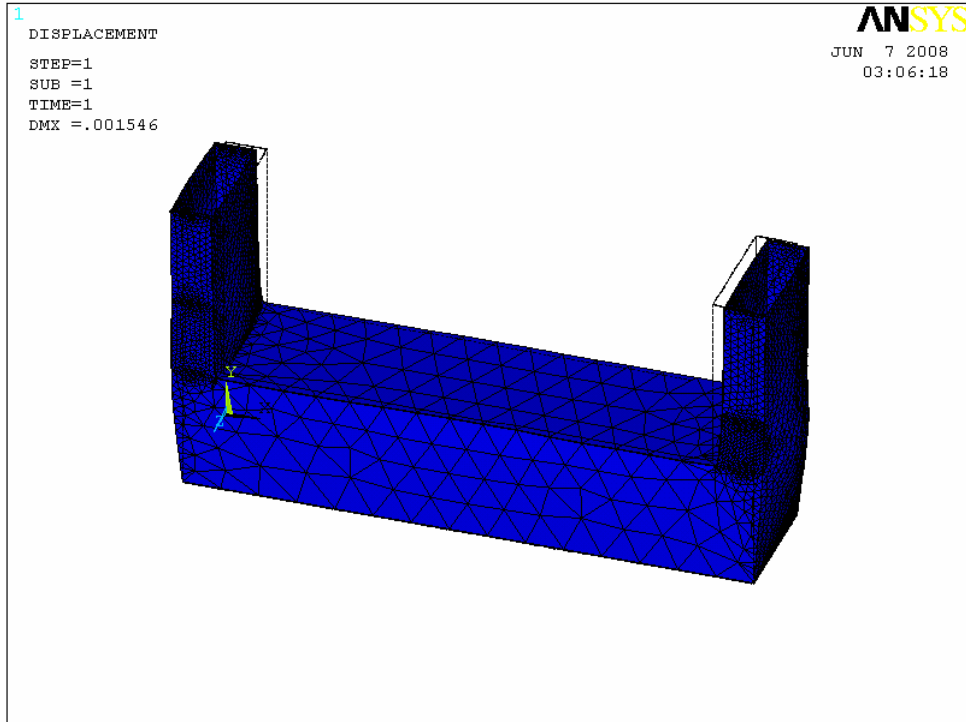


圖 4.36 變斷面 VTLCD 變形量示意圖

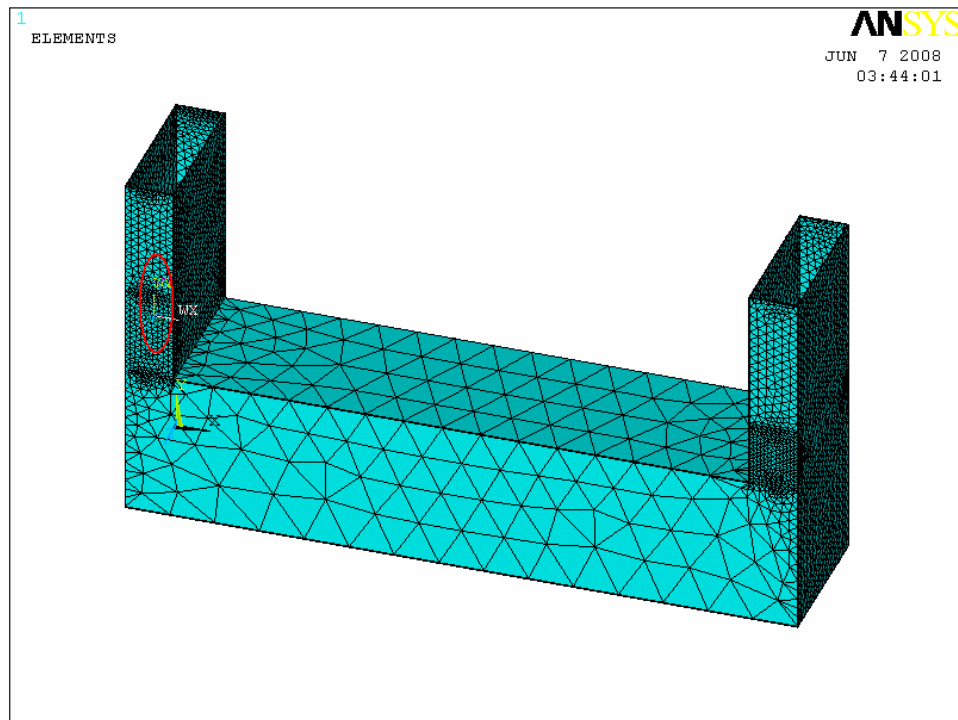


圖 4.37 變斷面 VTLCD 最大變形量位置

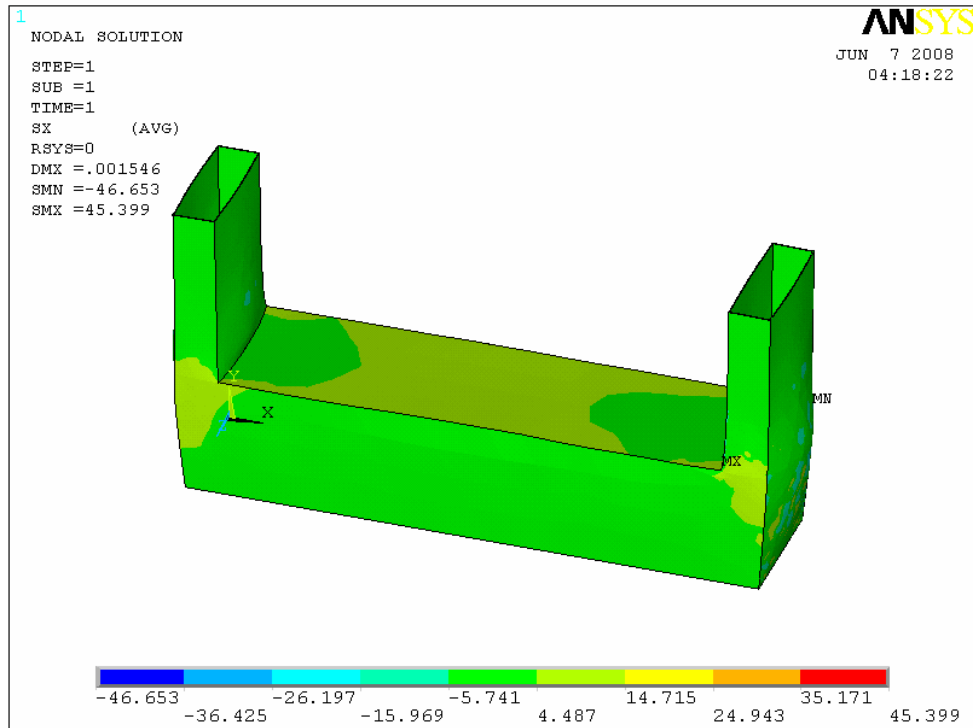


圖 4.38(a) 變斷面 VTLCD X 向應力分佈圖

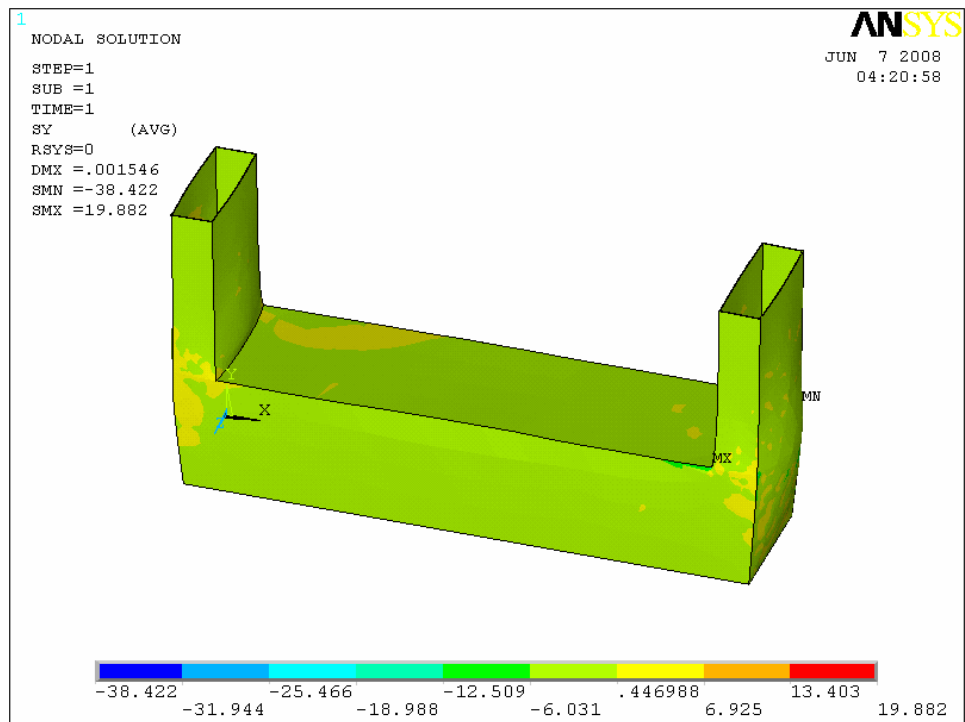


圖 4.38(b) 變斷面 VTLCD Y 向應力分佈圖

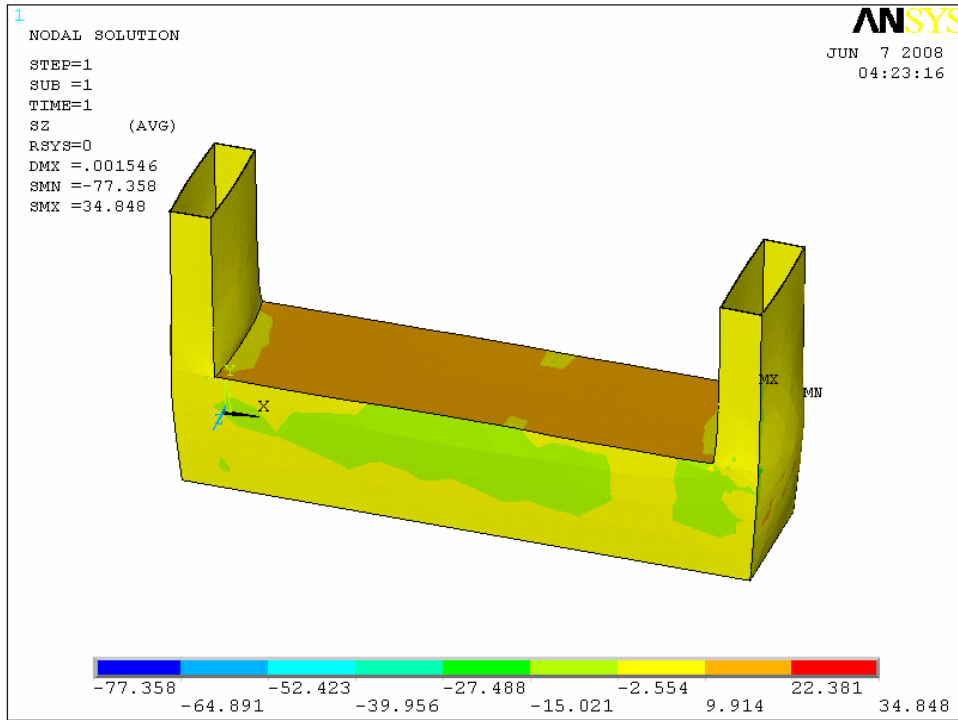


圖 4.38(c) 變斷面 VTLCD Z 向應力分佈圖

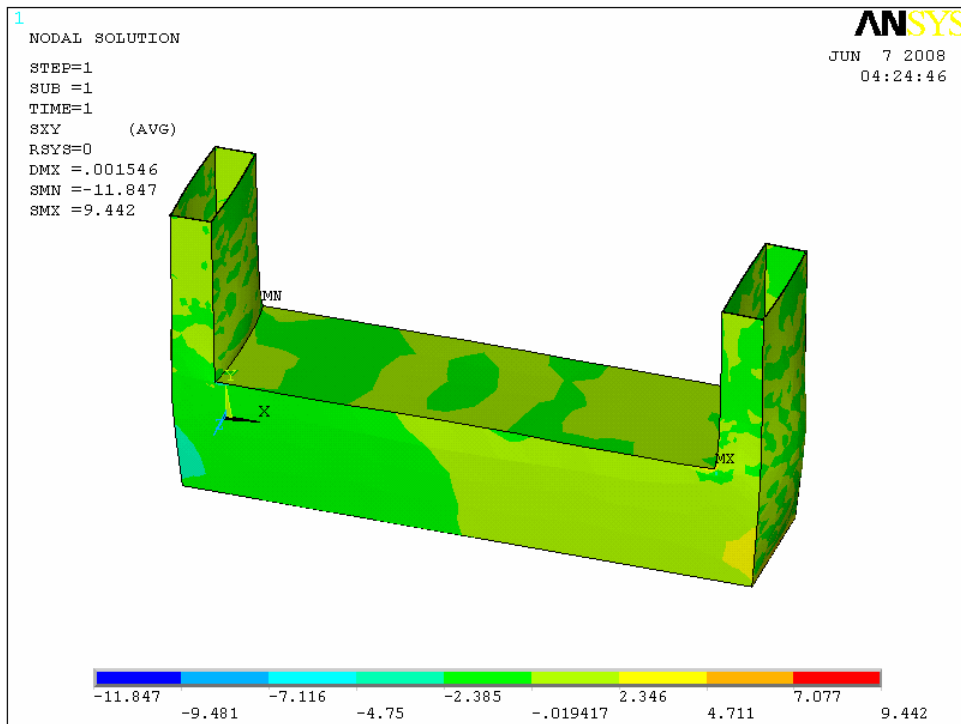


圖 4.38(d) 變斷面 VTLCD XY 面剪應力分佈圖

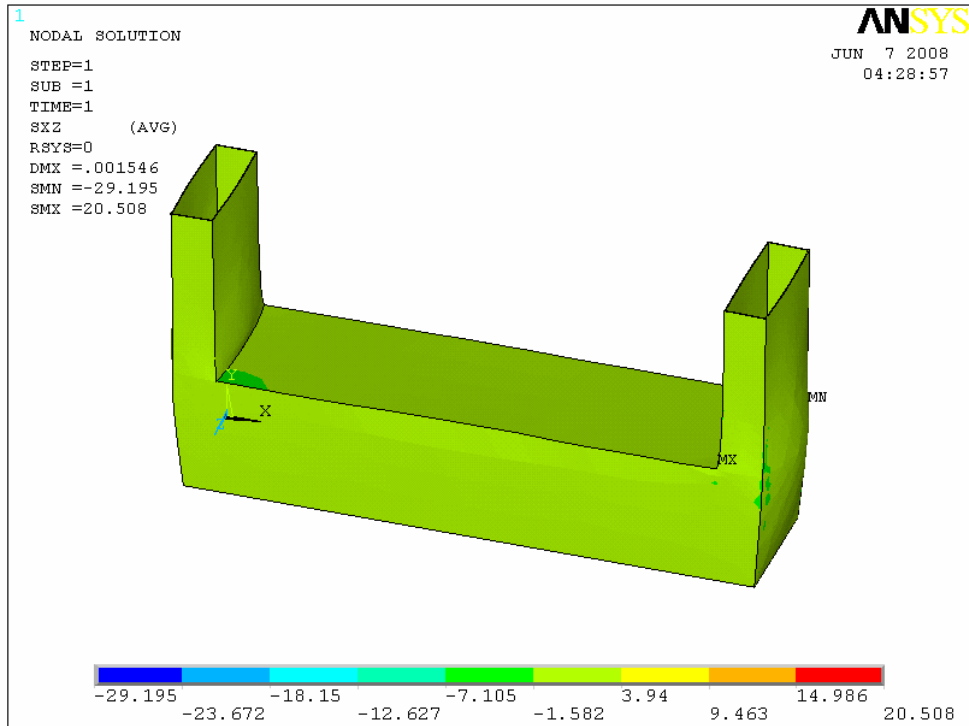


圖 4.38(e) 變斷面 VTLCD XZ 面剪應力分佈圖

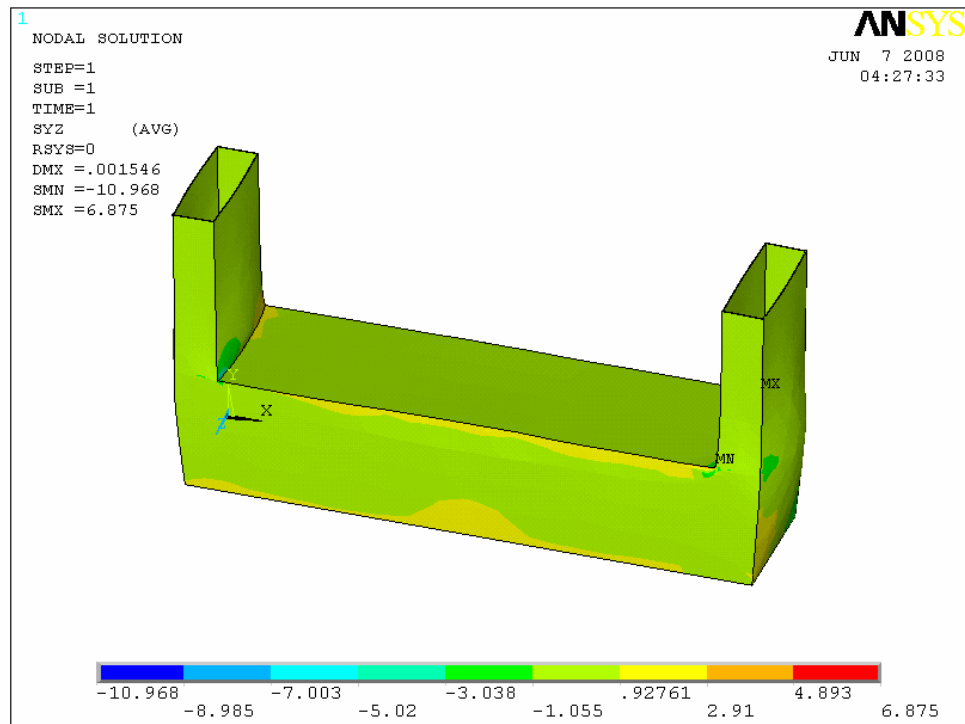


圖 4.38(f) 變斷面 VTLCD YZ 面剪應力分佈圖

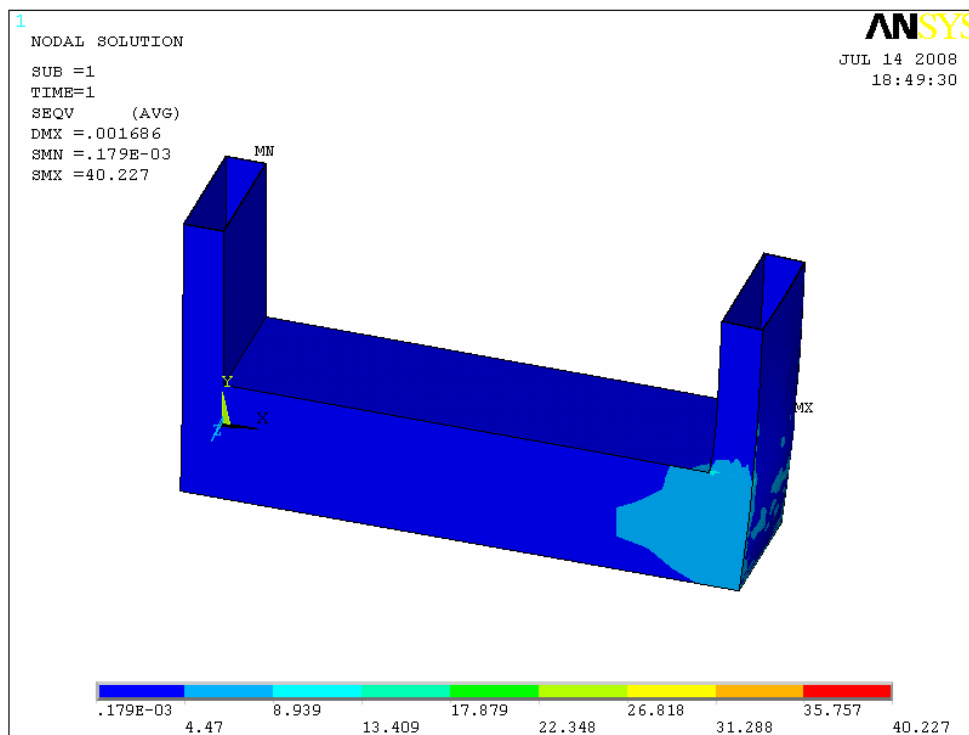


圖 4.38(g) 變斷面 VTLCD Von Mises 應力分佈圖

