

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高科技廠房防震策略研究--子計畫:位移設計法於加被動消 能裝置高科技廠房之應用(I) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 95-2625-Z-002-031-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：張國鎮
共同主持人：林裕淵
計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：陳長佑
碩士班研究生-兼任助理：王秋文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月07日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

(計畫名稱)

高科技廠房防震策略研究(III)—子計畫：被動消能裝置於高科技廠房性能設計之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC95-2625-Z002-031

執行期間： 95 年 08 月 01 日至 96 年 07 月 31 日

計畫主持人：張國鎮

共同主持人：

計畫參與人員：陳長佑、王秋文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學土木工程學系

中 華 民 國 96 年 9 月 20 日

摘要

對於被動調諧質量阻尼器裝設於建築物的相關研究，一直以控制風力振動為主，或是控制中小度地震力為主，鮮少討論建築物承受強震後進入非線性行為時，PTMD 對結構物的效益為何，且裝設 PTMD 的相關實驗也很少有文獻提出。因此，為了瞭解被動調諧質量阻尼器在強震下的行為，且確立 PTMD 是否可作為抵抗地震的良好機構，本文的重點著重於裝設 PTMD 鋼構架之震動台實驗以瞭解加裝 PTMD 建築物於地震力下實際的行為，也經由數值模擬比對，確立數值參數的正確性，並更進一步利用數值模擬來討論加裝 PTMD 建築物於不同大小之地震力下，結構物保持彈性與降伏後 PTMD 的效益，以便對 PTMD 能有更進一步的瞭解。

此外，為了瞭解裝設 PTMD 建築物於不同地震反應下的耐震能力，也將研究相關耐震的評估方法。本文提出以一等效線性系統模擬非線性系統為基礎之結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估方法。其一是設定結構頂層最大相對位移為目標位移，利用等效線性系統找出目標位移在特定地震歷時下所對應的最大地表加速度。其二是在特定地震歷時其最大地表加速度下求出結構之頂層最大相對位移。

關鍵詞：PTMD、耐震性能評估、替代結構法、非線性靜力側推分析、離頻效應

Abstract

This thesis reviews the passive tuned mass damper design methods and seismic performance under structures yield. The results of shaking table test which is a 3 story steel frame equipped bilinear-elastic tuned mass damper are proposed. The EL Centro and TCU129 excitations are used for the test. Summarizing the results of a parametric study performed to understand some important characteristics of passive tuned mass damper. The effect of structures equipped three different passive tuned mass damper while prime structures before and after yield. The contribution of the equivalent damping ratio which is from the linear optimal passive tuned mass damper for a SDOF structure before and after prime structure yield. Using the substitute structure approach, the evaluation of seismic performance of structures with passive tuned mass damper is proposed, and the results are verified by dynamic inelastic time history analyses.

目錄

中文摘要	I
Abstract.....	II
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究內容.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 TMD 簡介.....	3
2.2 考慮含阻尼結構受基底外力下最小穩態反應之最佳化 TMD 參數設計	4
2.3 雙線性遲滯結構加裝被動調諧質量阻尼器參數設計	6
第三章 鋼結構加裝 PTMD 振動台試驗.....	11
3.1 試驗構架說明：	11
3.2 試驗設計：	11
3.2.1 試驗目的：	11
3.2.2 試驗歷時：	11
3.2.3 PTMD 裝置.....	11
3.3 量測裝置與試驗過程	12
3.3.1 量測裝置.....	12
3.3.2 試驗過程	13
3.4 試驗結果.....	13
3.4.1 結構動力特性	13
3.4.2 樓層相對位移比較.....	13
3.4.3 樓層絕對加速度比較.....	14
3.4.4 樓層最大剪力與樓層最大側向位移角.....	14
3.5 小結.....	15
第四章 參數分析.....	77
4.1 模擬實驗構架裝設三種不同被動調諧質量阻尼器之比較	77

4.1.1 被動調諧質量阻尼器之設計參數.....	77
4.1.2 試驗與模擬被動調諧質量阻尼器之比較.....	77
4.1.3 模擬實驗結構加裝三種被動調諧質量阻尼器反應比較.....	78
4.2 含線性最佳化被動調諧質量阻尼器單自由度結構之參數分析 ...	79
4.2.1 結構勁度與質量比的影響.....	79
4.2.2 結構在彈性與進入非線性階段 PTMD 對結構反應的影響... 80	
4.2.3 底層構架在降伏前後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻的比較	81
第五章 結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估	150
5.1 等效線性系統.....	150
5.1.1 非線性靜力側推分析	150
5.1.2 控制模態	150
5.1.3 等效阻尼與等效勁度.....	151
5.2 結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估	153
5.2.1 特定目標位移所對應之最大地表加速度.....	153
5.2.2 特定歷時最大地表加速度所對應之頂層最大位移.....	154
5.3 結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估案例	155
5.3.1 由特定目標位移求出對應特定地震之最大地表加速度.....	155
5.3.2 由特定歷時最大地表加速度對應之結構頂層最大位移.....	158
5.3.3 結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估結果與非線性動力歷時分析之比較	161
5.4 小結.....	162
第六章 結論與建議.....	168
6.1 結論	168
6.2 建議.....	169
參考文獻.....	170

圖目錄

圖 2.1 TMD-STRUCTURE 示意圖.....	10
圖 2.2 雙線性模型力-位移關係圖.....	10
圖 3.1 樓層構架平面圖.....	24
圖 3.2 連接板尺寸.....	24
圖 3.3 樓層尺寸.....	25
圖 3.4 鋼結構立面尺寸.....	25
圖 3.5 梁-柱連接處細部尺寸.....	26
圖 3.6 基底板尺寸.....	26
圖 3.7 試驗鋼構架立體示意圖.....	27
圖 3.8 梁柱連接處立體示意圖.....	27
圖 3.9 雙線性壓簧力-位移關係圖.....	28
圖 3.10 滑軌前視圖.....	28
圖 3.11 滑軌上視圖.....	28
圖 3.12 滑軌側視圖.....	29
圖 3.14 PTMD 上視圖.....	30
圖 3.15 加速度計與位移計裝設位置圖.....	30
圖 3.16 TMD 位移計與加速度計位置圖.....	31
圖 3.17 應變計裝設位置圖.....	31
圖 3.18(A)WHITE NOISE 200GAL-TRANSFER FUNCTION(WITHOUT TMD).....	32
圖 3.18(B)WHITE NOISE 250GAL-TRANSFER FUNCTION(WITH TMD).....	32
圖 3.19(A)EL CENTRO 50GAL 1F 相對位移比較.....	32
圖 3.19(B) EL CENTRO 100GAL 1F 相對位移比較.....	33
圖 3.19(C) EL CENTRO 150GAL 1F 相對位移比較.....	33
圖 3.19(D) EL CENTRO 200GAL 1F 相對位移比較.....	33
圖 3.19(E) EL CENTRO 250GAL 加裝 PTMD 構架 1F 相對位移歷時.....	34

圖 3.19(F) EL CENTRO 500GAL 加裝 PTMD 構架 1F 相對位移歷時..	34
圖 3.20(A)EL CENTRO 50GAL 2F 相對位移比較.....	34
圖 3.20(B)EL CENTRO 100GAL 2F 相對位移比較	35
圖 3.20(C)EL CENTRO 150GAL 2F 相對位移比較	35
圖 3.20(D)EL CENTRO 200GAL 2F 相對位移比較.....	35
圖 3.20(E) EL CENTRO 250GAL 加裝 PTMD 構架 2F 相對位移歷時 .	36
圖 3.20(F) EL CENTRO 500GAL 加裝 PTMD 構架 2F 相對位移歷時..	36
圖 3.21(A) EL CENTRO_50GAL 頂層相對位移比較.....	36
圖 3.21(B) EL CENTRO_100GAL 頂層相對位移比較.....	37
圖 3.21(C) EL CENTRO_150GAL 頂層相對位移比較.....	37
圖 3.21(D) EL CENTRO_200GAL 頂層相對位移比較	37
圖 3.21(E) EL CENTRO 250GAL 加裝 PTMD 構架頂層相對位移歷時	38
圖 3.21(F) EL CENTRO 500GAL 加裝 PTMD 構架頂層相對位移歷時	38
圖 3.22(A) TCU129_50GAL 1F 相對位移比較	38
圖 3.22(B) TCU129_100GAL 1F 相對位移比較	39
圖 3.22(C) TCU129_150GAL 1F 相對位移比較	39
圖 3.22(D) TCU129_200GAL 1F 相對位移比較.....	39
圖 3.22(E) TCU129_250GAL 1F 相對位移比較	40
圖 3.22(F) TCU129 300GAL 加裝 PTMD 構架 1F 相對位移歷時.....	40
圖 3.22(G) TCU129 350GAL 加裝 PTMD 構架 1F 相對位移歷時.....	40
圖 3.23(A) TCU129_50GAL 2F 相對位移比較	41
圖 3.23(B) TCU129_100GAL 2F 相對位移比較	41
圖 3.23(C) TCU129_150GAL 2F 相對位移比較	41
圖 3.23(D) TCU129_200GAL 2F 相對位移比較.....	42
圖 3.23(E) TCU129_250GAL 2F 相對位移比較	42
圖 3.23(F) TCU129 300GAL 加裝 PTMD 構架 2F 相對位移歷時.....	42
圖 3.23(G) TCU129 350GAL 加裝 PTMD 構架 2F 相對位移歷時.....	43
圖 3.24(A) TCU129_50GAL 頂層相對位移比較.....	43
圖 3.24(B) TCU129_100GAL 頂層相對位移比較.....	43

圖 3.24(C) TCU129_150GAL 頂層相對位移比較.....	44
圖 3.24(D) TCU129_200GAL 頂層相對位移比較.....	44
圖 3.24(E) TCU129_250GAL 頂層相對位移比較.....	44
圖 3.24(F) TCU129_300GAL 加裝 PTMD 構架頂層相對位移歷時.....	45
圖 3.24(G) TCU129_350GAL 加裝 PTMD 構架頂層相對位移歷時.....	45
圖 3.25(A) EL CENTRO50GAL 1F 絕對加速度比較.....	45
圖 3.25(B) EL CENTRO100GAL 1F 絕對加速度比較.....	46
圖 3.25(C) EL CENTRO150GAL 1F 絕對加速度比較.....	46
圖 3.25(D) EL CENTRO200GAL 1F 絕對加速度比較.....	46
圖 3.25(E) EL CENTRO_250GAL 加裝 PTMD 構架 1F 絕對加速度歷時.....	47
圖 3.25(F) EL CENTRO_500GAL 加裝 PTMD 構架 1F 絕對加速度歷時.....	47
圖 3.26(A) EL CENTRO50GAL 2F 絕對加速度比較.....	47
圖 3.26(B) EL CENTRO100GAL 2F 絕對加速度比較.....	48
圖 3.26(C) EL CENTRO150GAL 2F 絕對加速度比較.....	48
圖 3.26(D) EL CENTRO200GAL 2F 絕對加速度比較.....	48
圖 3.26(E) EL CENTRO_250GAL 加裝 PTMD 構架 2F 絕對加速度歷時.....	49
圖 3.26(F) EL CENTRO_500GAL 加裝 PTMD 構架 2F 絕對加速度歷時.....	49
圖 3.27(A) EL CENTRO50GAL 頂層絕對加速度比較.....	49
圖 3.27(B) EL CENTRO100GAL 頂層絕對加速度比較.....	50
圖 3.27(C) EL CENTRO150GAL 頂層絕對加速度比較.....	50
圖 3.27(D) EL CENTRO200GAL 頂層絕對加速度比較.....	50
圖 3.27(E) EL CENTRO 250GAL 加裝 PTMD 構架頂層絕對加速度歷時.....	51
圖 3.27(F) EL CENTRO 500GAL 加裝 PTMD 構架頂層絕對加速度歷時.....	51
圖 3.28(A) TCU129_50GAL 1F 絕對加速度比較.....	51
圖 3.28(B) TCU129_100GAL 1F 絕對加速度比較.....	52
圖 3.28(C) TCU129_150GAL 1F 絕對加速度比較.....	52
圖 3.28(D) TCU129_200GAL 1F 絕對加速度比較.....	52
圖 3.28(E) TCU129_250GAL 1F 絕對加速度比較.....	53
圖 3.28(F) TCU129_300GAL 加裝 PTMD 構架 1F 絕對加速度歷時.....	53

圖 3.28(G) TCU129_350GAL 加裝 PTMD 構架 1F 絕對加速度歷時	53
圖 3.29(A) TCU129_50GAL 2F 絕對加速度比較	54
圖 3.29(B) TCU129_100GAL 2F 絕對加速度比較	54
圖 3.29(C) TCU129_150GAL 2F 絕對加速度比較	54
圖 3.29(D) TCU129_200GAL 2F 絕對加速度比較	55
圖 3.29(E) TCU129_250GAL 2F 絕對加速度比較	55
圖 3.29(F) TCU129_300GAL 加裝 PTMD 構架 2F 絕對加速度歷時	55
圖 3.29(G) TCU129_350GAL 加裝 PTMD 構架 2F 絕對加速度歷時	56
圖 3.30(A) TCU129_50GAL 頂層絕對加速度比較	56
圖 3.30(B) TCU129_100GAL 頂層絕對加速度比較	56
圖 3.30(C) TCU129_150GAL 頂層絕對加速度比較	57
圖 3.30(D) TCU129_200GAL 頂層絕對加速度比較	57
圖 3.30(E) TCU129_250GAL 頂層絕對加速度比較	57
圖 3.30(F) TCU129_300GAL 加裝 PTMD 構架頂層絕對加速度歷時	58
圖 3.30(G) TCU129_350GAL 加裝 PTMD 構架頂層絕對加速度歷時	58
圖 3.31(A) EL CENTRO_50GAL TMD 相對頂層位移歷時	58
圖 3.31(B) EL CENTRO_100GAL TMD 相對頂層位移歷時	59
圖 3.31(C) EL CENTRO_150GAL TMD 相對頂層位移歷時	59
圖 3.31(D) EL CENTRO_200GAL TMD 相對頂層位移歷時	59
圖 3.31(E) EL CENTRO_250GAL TMD 相對頂層位移歷時	60
圖 3.32(A) TCU129_50GAL TMD 相對頂層位移歷時	60
圖 3.32(B) TCU129_100GAL TMD 相對頂層位移歷時	60
圖 3.32(C) TCU129_150GAL TMD 相對頂層位移歷時	61
圖 3.32(D) TCU129_200GAL TMD 相對頂層位移歷時	61
圖 3.32(E) TCU129_250GAL TMD 相對頂層位移歷時	61
圖 3.32(F) TCU129_300GAL TMD 相對頂層位移歷時	62
圖 3.32(G) TCU129_350GAL TMD 相對頂層位移歷時	62
圖 3.33 EL CENTRO50GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	63
圖 3.34 EL CENTRO100GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	64

圖 3.35 EL CENTRO150GAL 樓層剪力與樓層側向位移比.....	65
圖 3.36 EL CENTRO200GAL 樓層剪力與樓層側向位移比.....	66
圖 3.37 EL CENTRO250GAL、500GAL 樓層剪力與樓層側向位移比 .	67
圖 3.38 TCU129_50GAL 樓層剪力與樓層側向位移比.....	68
圖 3.39 TCU129_100GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	69
圖 3.40 TCU129_150GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	70
圖 3.41 TCU129_200GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	71
圖 3.42 TCU129_250GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	72
圖 3.43 TCU129_300GAL、350GAL 樓層剪力與樓層側向位移比	73
圖 4.1 EL CENTRO_50GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較	93
圖 4.2 EL CENTRO_100GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	94
圖 4.3 EL CENTRO_150GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	95
圖 4.6 EL CENTRO_500GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	98
圖 4.7 TCU129_50GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	99
圖 4.8 TCU129_100GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	100
圖 4.9 TCU129_150GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較.....	101
圖 4.10 TCU129_200GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較	102
圖 4.12 TCU129_300GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較	104
圖 4.13 TCU129_350GAL 實驗與模擬樓層相對位移歷時比較	105
圖 4.14 EL CENTRO_50GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較..	106
圖 4.15 EL CENTRO_100GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	107
圖 4.16 EL CENTRO_150GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	108
圖 4.17 EL CENTRO_200GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	109
圖 4.18 EL CENTRO_250GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	110
圖 4.19 EL CENTRO_500GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	111
圖 4.20 TCU129_50GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較	112
圖 4.21 TCU129_100GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	113
圖 4.22 TCU129_150GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	114
圖 4.23 TCU129_200GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	115

圖 4.24 TCU129_250GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	116
圖 4.25 TCU129_300GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	117
圖 4.26 TCU129_350GAL 實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較.....	118
圖 4.27 EL CENTRO_50GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	119
圖 4.28 EL CENTRO_100GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	120
圖 4.29 EL CENTRO_150GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	121
圖 4.30 EL CENTRO_200GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	122
圖 4.31 EL CENTRO_250GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	123
圖 4.32 EL CENTRO_500GAL 實驗與模擬樓層剪力比較.....	124
圖 4.33 TCU129_50GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	125
圖 4.34 TCU129_100GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	126
圖 4.35 TCU129_150GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	127
圖 4.36 TCU129_200GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	128
圖 4.37 TCU129_250GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	129
圖 4.38 TCU129_300GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	130
圖 4.39 TCU129_350GAL 實驗與模擬樓層剪力歷時比較.....	131
圖 4.40 EL CENTRO 模擬與實驗 TMD 位移歷時比較.....	133
圖 4.41 TCU129 模擬與實驗 TMD 位移歷時比較.....	135
圖 4.42 EL CENTRO 模擬與實驗 TMD 加速度歷時比較.....	137
圖 4.43 TCU129 模擬與實驗 TMD 加速度歷時比較.....	139
圖 4.44 EL CENTRO 在不同 PGA 下最大頂層相對位移反應.....	140
圖 4.45 TCU129 歷時在不同 PGA 下最大頂層相對位移反應.....	140
圖 4.46 結構裝置三種 PTMD 在 EL CENTRO 頂層最大相對位移反應效益比.....	141
圖 4.47 結構裝置三種 PTMD 在 TCU129 頂層最大相對位移反應效益比.....	141
圖 4.48 結構裝置三種 PTMD 在降伏前後頂層最大相對位移反應平均效益比.....	142
圖 4.49 地震加速度歷時與對應之加速度反應譜.....	145

圖 4.50 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響..	146
圖 4.51 改變底層結構周期與質量比對頂層最大絕對加速度反應之影響	
.....	146
圖 4.52 TCU059 歷時純構架與裝置 PTMD 構架等效阻尼比對應之位移反應譜.....	147
圖 4.53 TCU059 歷時純構架與裝置 PTMD 構架等效阻尼比對應之位移反應譜.....	147
圖 4.54 TCU059 歷時純構架與裝置 PTMD 構架等效阻尼比對應之擬加速度反應譜	148
圖 4.55 TCU059 歷時純構架與裝置 PTMD 構架等效阻尼比對應之擬加速度反應.....	148
圖 4.56 結構在彈性與非線性階段改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響.....	149
圖 4.57 結構在彈性與非線性階段改變底層結構周期與質量比對頂層最大絕對加速度反應之影響	149
圖 5.1 等效線性系統.....	163
圖 5.2 替代結構力與位移關係	163
圖 5.3 評估流程-特定目標位移所對應之最大地表加速度	164
圖 5.4 評估流程-特定歷時最大地表加速度所對應之頂層最大位移...165	
圖 5.5 EL CENTRO_1000GAL 加速度歷時.....	166
圖 5.6 HU2_600GAL 加速度歷時.....	166
圖 5.7 目標位移為 0.25M 之非線性側推分析曲線	167
圖 5.8 目標位移為 0.2M 之非線性側推曲線	167

表目錄

表 2.1 OPTIMUM PARAMETERS FOR FIXED-DISPLACEMENT SUPPORT EXCITATION[2].....	9
表 2.2 OPTIMUM PARAMETERS FOR FIXED-ACCELERATION SUPPORT EXCITATION[2].....	9
表 3.3A 滑軌、滑塊細部尺寸(參照圖 3.10~圖 3.12).....	16
表 3.3B 滑軌、滑塊細部尺寸(參照圖 3.10~圖 3.12).....	16
表 3.4 空構架與含 PTMD 構架基本特性.....	17
表 3.5 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大相對位移比.....	17
表 3.6 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大相對位移比.....	17
表 3.7 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大相對位移比.....	17
表 3.8 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大相對位移比.....	18
表 3.9 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大相對位移比.....	18
表 3.10 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大相對位移比較.....	18
表 3.11 EL CENTRO 歷時 PTMD 最大恢復力.....	18
表 3.12 TCU129 歷時 PTMD 最大恢復力.....	19
表 3.13 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大絕對加速度比較.....	19
表 3.14 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大絕對加速度比較.....	19
表 3.15 EL CENTRO 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大絕對加速度比較.....	19
表 3.16 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大絕對加速度比較.....	20
表 3.17 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大絕對加速度比較.....	20
表 3.18 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大絕對加速度比較.....	20
表 3.19 EL CENTRO 歷時純構架之最大樓層剪力.....	20
表 3.20 EL CENTRO 歷時含 PTMD 構架之最大樓層剪力.....	21
表 3.21 TCU129 歷時純構架之最大樓層剪力.....	21
表 3.22 TCU 129 歷時含 PTMD 構架之最大樓層剪力.....	21
表 3.23 EL CENTRO 歷時空構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比.....	21
表 3.24 EL CENTRO 歷時含 TMD 構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比.....	22

表 3.25 TCU129_歷時空構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比	22
表 3.26 TCU129_歷時含 TMD 構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比	23
表 4.1 三種 PTMD 設計參數	86
表 4.2 裝置三種 PTMD 結構在 EL CENTRO 不同 PGA 下頂層相對位移的反應 ...	86
表 4.3 裝置三種 PTMD 結構在 TCU129 不同 PGA 下頂層相對位移的反應	87
表 4.4 裝置三種 PTMD 結構在 EL CENTRO 不同 PGA 下頂層相對位移的效益比 ..	87
表 4.5 結構裝置三種 PTMD 在 TCU129 不同 PGA 下頂層相對位移的效益比	88
表 4.6 裝置三種 PTMD 結構在基底構架降伏前後頂層相對位移平均效益比	88
表 4.7 $T_p=1\text{SEC}$ ， $\Gamma=0.01\sim 0.1$ ，最佳化線性 PTMD 設計參數	89
表 4.8 $T_p=0.75\text{SEC}$ ， $\Gamma=0.01\sim 0.1$ ，最佳化線性 PTMD 設計參數	89
表 4.9 $T_p=0.5\text{SEC}$ ， $\Gamma=0.01\sim 0.1$ ，最佳化線性 PTMD 設計參數	90
表 4.10 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響	90
表 4.11 改變底層結構周期與質量比對頂層絕對最大加速度之影響	90
表 4.12 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響(地震加速度縮放 0.2PGA)	91
表 4.13 改變底層結構周期與質量比對頂層絕對最大加速度之影響(地震加速度縮放 0.2PGA)	91
表 4.14 裝設 PTMD 構架在 TCU059 歷時下，基底構架保持彈性 PTMD 等效阻尼之貢 獻	91
表 4.15 裝設 PTMD 構架在 TCU059 歷時下，基底構架降伏後 PTMD 等效阻尼之貢獻	92

相片目錄

照片 3.1 實驗空構架	74
照片 3.2 實驗設計之 PTMD	74
照片 3.3 PTMD 裝設於頂板	75
照片 3.4 PTMD 裝設於構架	75
照片 3.5 PTMD 位移計與加速度計裝設位置	76
照片 3.6 應變計位置	76

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著工程技術的發展，隔減震技術在近年來已大量的被工程師所使用，世界上各種阻尼器與隔震系統之相關研究也一直在進行中。對於被動調諧質量阻尼器（Passive Tuned Mass Damper）裝設於建築物的相關研究卻是一直以控制風力振動為主，或是控制中小度地震力為主，鮮少討論建築物承受地震力而進入非線性行為時，PTMD 是否提供的正面的助益。

目前世界第一高樓台北 101 金融中心，也加裝 PTMD 來控制風力所造成的振動，但對於這類加裝 PTMD 建築物，在真正面臨地震力時的是否能夠如同控制風力般的對建築物產生正面的助益，卻是現代工程師所缺少的知識。

為了瞭解被動調諧質量阻尼器在強震下的行為，且確立 PTMD 是否可作為抵抗地震的良好機構，因此決定著手於裝設 PTMD 鋼構架之震動台實驗以瞭解加裝 PTMD 建築物於地震力下實際的行為，也經由數值模擬比對，確立數值參數的正確性，並更進一步利用數值模擬來討論加裝 PTMD 建築物於不同大小之地震力下的行為，以便對 PTMD 能有更進一步的瞭解。

此外，為了瞭解裝設 PTMD 建築物於不同地震反應下的耐震能力，也將研究相關耐震的評估方法。以便工程師未來於設計加裝 PTMD 建築物時，能夠更有信心的掌控 PTMD 在不同地震力下的行為。

1.2 研究內容

本文提出研究裝設被動調諧質量阻尼器結構於結構在彈性階段與降伏階段被動調諧質量阻尼器對於結構反應的影響。此外針對裝設被動調諧質量阻尼器結構提出耐震性能評估的兩種方法，並且用非線性動力歷時分析加以驗證。

- 1 第二章—簡單介紹裝設調諧質量阻尼器結構，並介紹考慮含阻尼結構之調諧質量阻尼器最佳化的參數設計公式，與考慮結構進入降伏後調

諧質量阻尼器參數設計之文獻回顧。

- 2 第三章—介紹裝設雙線性彈性被動調諧質量阻尼器之振動台試驗，內容包括雙線性彈性被動調諧質量阻尼器之設計參數、試驗目標、試驗設計、試驗過程及試驗的結果。
- 3 第四章—本章探討裝設三種不同 PTMD 結構之反應比較外，更進一步研究裝設線性最佳化 PTMD 於單自由度結構之參數分析。其中包括結構勁度與質量比的影響、結構在彈性階段與進入非線性階段 PTMD 對結構反應的影響，與結構在彈性階段與進入非線性階段 PTMD 等效阻尼比的貢獻。
- 4 第五章—本章提出以一等效線性系統模擬非線性系統為基礎之結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估方法。其一是設定結構頂層最大相對位移為目標位移，利用等效線性系統找出目標位移在特定地震歷時下所對應的最大地表加速度。其二是在特定地震歷時其最大地表加速度下求出結構之頂層最大相對位移。
- 5 第六章—由前面各章的研究的結果做個總結

第二章 文獻回顧

2.1 TMD 簡介

一個簡單的調諧質量阻尼器的型式是由一個質量-彈簧-黏性阻尼系統所組成，如圖 2.1，將其錨錠或黏附主結構上以減少結構反應。主要是使調諧質量阻尼器的自然頻率調到主要系統的自然頻率附近，主系統的振動造成阻尼器共振而經由調諧質量阻尼器來消散能量。調諧質量阻尼器應用於結構消能系統上的觀念，最早是由 1909 年 Frahm 所研究的振動吸收器的振動控制裝置。Frahm 對於振動吸收器的研究並不考慮結構含阻尼的部分，只有在吸收器的自然頻率非常接近外力頻率才能發生效應。而當外力頻率遠離吸收器的頻率時，吸收器的性能會快速折減。Den Hartog[3]推導出主結構不含阻尼的情況下受到諧和外力作用時，使主結構在最小穩態反應下的最佳化調諧質量阻尼器的阻尼比和最佳化頻率比的公式。Warburton[5]推導出對於結構不含阻尼之單自由度系統受到諧和外力與白噪音隨機外力下的最佳化 TMD 的設計參數公式。

實際上，結構多少都含有一些阻尼，所以在設計 TMD 的最佳化參數時仍然需要將結構阻尼的影響列入考慮。Warburton[4]利用數值方法，研究主質量與 TMD 質量比和主結構含阻尼的狀態下，最佳化的 TMD 的設計參數，並製成表格。Tsai 和 Lin[2]利用曲線擬合(curve-fitting)方法迴歸出最佳化 TMD 的設計參數的公式。本章 2.3 節將介紹 Tsai 和 Lin[2]考慮結構含阻尼下最佳化調諧質量阻尼的參數設計。

一般在設計 TMD 參數時，都是考慮結構在線彈性階段且受到諧和外力時所得到的公式或表格。而結構在地震下的反應，由於地震頻含範圍較廣，不同地震的特性對於 TMD 的效應有不同的影響。但對於利用結構受諧和外力推導得到的表格來設計 TMD，使其在地震作用下結構物仍保持彈性時，TMD 仍然可達到減振的效果。T. T. Soong and Rahul Rana[6]研究單自由度結構裝設 TMD，且 TMD 的設計參數即是利用諧和外力推導出來的公式，在 EL Centro and Mexico 地震下，歷時分析結果顯示出對於減振的效益是有用的。由於 PTMD 對於地震特性 PTMD 結構受到強烈地震作用下，在結構進

入降伏後主結構系統的自然頻率隨著勁度的折減而降低，導致 TMD 的效益因離頻效應而有所折減。P. Lukkunaprasit and A. Wanitkorkul[13]研究裝設 TMD 於 5 層樓結構在受到 1985 Mexico City (SCT) 和 1995 Bangkok 地震力下(PGA scaled to 0.1g)，在結構降伏後能降低結構物反應且減少樓層累積遲滯能。T. Pinkaew , P. Lukkunaprasit, P. Chatupote [14]將一 20 層樓結構模擬成等值單自由度系統，在受到 1985 Mexico City (SCT) 地震作用後，裝設 TMD 結構在降伏後無法降低結構最大位移，但是可以減少結構損壞。Masato Abe'[1]提出雙線性遲滯型 TMD，在假設主結構系統其力與位移關係為彈塑性行為下，使結構在降伏後仍可使 TMD 頻率與主結構頻率一致，讓 TMD 能發揮作用，本章 2.3 節即是要介紹雙線性遲滯型調諧質量阻尼器的參數設計。

2.2 考慮含阻尼結構受基底外力下最小穩態反應之最佳化 TMD 參數設計

此篇文獻[2]提出結構受二種不同型式的基底外力下，最小穩態反應的最佳化 TMD 設計參數的表格與數值回歸的公式，並且將回歸的公式與數值迭代求出的值做比較。

結構裝設 TMD 如圖 2.1，主結構系統被簡化為一含有堆積質量 m_p ，勁度為 k_p ，阻尼比為 ξ_p 之系統。調諧質量阻尼器為一質量為 m_s ，勁度為 k_s ，阻尼比為 ξ_s 之系統。 u_p 為主質量相對於地表的位移， u_s 為 TMD 相對於地表的位移。對於整個系統受到地表加速度 \ddot{u}_g 情況下之運動方程式如下所示：

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_p \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p + c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_p \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_p \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_p \\ m_s \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2.1)$$

在特定質量比 γ 與特定結構固有阻尼比 ξ_p 下利用數值迭代計算出最佳化頻率比 f 與 TMD 最佳化阻尼比 ξ_s ，其迭代流程如下所述：

1. 由式 2.2 或式 2.5 固定 f 變換不同的 ξ_s 找到每個 ξ_s 所對應的最大的振幅值
2. 由步驟 1 中不同 ξ_s 對應最大振幅值中找出最小的最大振幅值所對應的 ξ_s
3. 則此最小的最大振幅值即為 f 所對應的最小反應

4. 重覆由上述的過程找出不同 f 所對應的最小反應
5. 不同 f 所對應的最小反應中的最小值即為結構系統中的最小反應。此時 f 與 ξ_s 即為最佳化的頻率比與最佳化的 TMD 阻尼比。

其中頻率比 f 為 TMD 自然圓周頻率與主結構自然圓周頻率之比值

$$f = \omega_s / \omega_p$$

本篇文獻將主結構阻尼為 $\xi_p = 0.02, \xi_p = 0.05, \xi_p = 0.1$ ，質量比為 0.005~0.1 以 0.005 為增量的情況下，將結構受二種不同型式的基底外力下最佳化的頻率比 f 與最佳化的 TMD 阻尼比 ξ_s 迭代結果製成表格如表 2.1、表 2.2 所示。

Support excitation of fixed-displacement amplitude

當主結構系統在支承處受到位移振幅大小固定的支承擾動，即 $u_g = He^{i\omega t}$ ，則主結構系統位移反應振幅與支承擾動位移之比為：

$$\frac{|u_p|}{H} = \frac{g^2 \sqrt{[f^2(1+\gamma) - g^2]^2 + 4g^2 f^2 \xi_s^2 (1+\gamma)^2}}{\sqrt{[\gamma f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2) + 4\xi_p \xi_s f g^2]^2 + (2\xi_s f g)^2 [g^2(1+\gamma) - 1]^2}} \quad (2.2)$$

其中

f 為 TMD 自然圓周頻率與主結構自然圓周頻率之比值

g 為外力圓周頻率與主結構自然圓周頻率之比值

γ 為 TMD 質量與主結構質量之比值

ξ_p 為主結構之固有阻尼比

ξ_s 為 TMD 最佳化阻尼比

H 為支承擾動位移振幅值

利用曲線擬合(curve-fitting)方法之最佳化的頻率比與最佳化的 TMD 阻尼比的回歸曲線公式，其公式如下：

$$f = \left(\frac{\sqrt{1+0.5\gamma}}{1+\gamma} + \frac{1}{\sqrt{1-2\xi_p^2}} - 1 \right) - (0.288 - 0.661\sqrt{\gamma} + 1.12\gamma)\sqrt{\gamma}\xi_p - (2.298 - 6.739\sqrt{\gamma} + 8.316\gamma)\sqrt{\gamma}\xi_p^2 \quad (2.3)$$

$$\xi_s = \sqrt{\frac{3\gamma}{8(1+\gamma)}} + 0.151\xi_p - 0.187\xi_p^2 + 0.238\xi_p\gamma \quad (2.4)$$

回歸曲線公式中最佳化頻率比與表格 2.1 之誤差值為 0.02% 幾乎可以忽

略，而回歸曲線公式中最佳化 TMD 阻尼比 ξ_p 與表格 2.1 之誤差值為 1.5%。

Support excitation of fixed acceleration amplitude

當主結構系統在支承處受到加速度振幅固定的支承擾動，即 $\ddot{u}_g = Ge^{i\omega t}$ ，主結構系統振動振幅與輸入振幅比為：

$$\frac{\omega_p^2 |u_p|}{G} = \frac{\sqrt{[f^2(1+\gamma) - g^2]^2 + 4g^2 f^2 \xi_s^2 (1+\gamma)^2}}{\sqrt{[\gamma f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2) + 4\xi_p \xi_s f g^2]^2 + f g^2 [\xi_s f (g^2 + \gamma g^2 - 1) + \xi_p (g^2 - f^2)]^2}} \quad (2.5)$$

其中

f 為 TMD 自然圓周頻率與主結構自然圓周頻率之比值

g 為外力圓周頻率與主結構自然圓周頻率之比值

γ 為 TMD 質量與主結構質量之比值

ξ_p 為主結構之固有阻尼比

ξ_s 為 TMD 最佳化阻尼比

G 為支承擾動加速度振幅值

ω_p 為主結構自然圓周頻率

主結構系統在支承處受到加速度振幅固定之最佳化頻率比 f 與最佳化 TMD 阻尼比 ξ_s 之回歸曲線公式如下：

$$f = \left(\frac{\sqrt{1-0.5\gamma}}{1+\gamma} + \sqrt{1-2\xi_p^2} - 1 \right) - (2.375 - 1.034\sqrt{\gamma} - 0.426\gamma)\sqrt{\gamma}\xi_p - (3.73 - 16.903\sqrt{\gamma} + 20.496\gamma)\sqrt{\gamma}\xi_p^2 \quad (2.6)$$

$$\xi_s = \sqrt{\frac{3\gamma}{8(1+\gamma)(1-0.5\gamma)}} + (0.151\xi_p - 0.17\xi_p^2) + (0.163\xi_p + 4.98\xi_p^2)\gamma \quad (2.7)$$

回歸曲線公式最佳化頻率比與表格 2.2 之誤差值小於 0.04% 幾乎可以忽略，而回歸曲線公式最佳化 TMD 阻尼比 ξ_p 與表格 2.1 之誤差值為 2.0%。

2.3 雙線性遲滯結構加裝被動調諧質量阻尼器參數設計

由於結構進入降伏後主結構的自然頻率隨著勁度的折減而下降。因此最佳化線性的 TMD 會因為離頻效應而失敗。雙線性遲滯 TMD 由 Masato Abe'[1]提出，此篇文獻是針對主結構系統在結構進入降伏後假設為雙線性

遲滯的行為如圖 2.2 來設計 TMD。其基本概念是使 TMD 力與變形的關係為雙線性遲滯行為讓 TMD 的等效自然頻率在結構降伏後仍然能調頻至結構的頻率，而使 TMD 在結構降伏後仍然可以發揮其效用。

對雙線性遲滯 TMD 的設計使其與主結構的雙線性性質相似，即是使 TMD 與主結構模態位移比值的絕對值等同於 TMD 與主結構降伏位移的比值，因此 TMD 與主結構的自然頻率在較大外力下仍然一致，所以認為雙線性 TMD 是有效的。振幅比由單自由度結構加裝 TMD 系統的模態反應推導得到。

在推導前有幾項假設：(1) TMD 的質量相對於結構的質量要來得小 (2) TMD 的阻尼比要小於 1 (3) 結構阻尼比必需小於 TMD 阻尼比。(Abe' 1992; Fujino and Abe' 1993; Abe' 1995)。對於大多數土木工程應用上都符合上述條件。符合上述條件下，最佳化設計單自由度結構加裝 TMD 系統模態振幅比如下式：

$$|\phi^{TMD} / \phi^{Structure}| = 1 / \sqrt{\mu} \quad (2.8)$$

其中

ϕ^{TMD} 為 TMD 模態位移

$\phi^{Structure}$ 為結構模態位移

μ 為 TMD 對結構的質量比值 ($m^{TMD} / M^{Structure}$)

利用 (2.8) 式關係可由雙線性遲滯結構初始降伏位移 $x_0^{Structure}$ 和降伏勁度因子 $\eta^{Structure}$ 來設計 TMD：

$$x_0^{TMD} = x_0^{Structure} / \sqrt{\mu} \quad (2.9)$$

$$\eta^{TMD} = \eta^{Structure} \quad (2.10)$$

其中

x_0^{TMD} 為 TMD 初始降伏位移

η^{TMD} 為 TMD 降伏因子

TMD 初始的自然頻率和阻尼比由最佳化線性 TMD (Den Hartog 1956) 計

算

$$\omega^{TMD} = \omega^{Structure} / (1 + \mu)$$

$$\xi^{TMD} = \sqrt{[3\mu / 8(1 + \mu)]}$$

ω^{TMD} 為 TMD 自然圓周頻率

$\omega^{Structure}$ 為主結構自然圓周頻率

ξ^{TMD} 為 TMD 最佳化阻尼比

μ 為 TMD 對主結構質量之比值

表 2.1 Optimum parameters for fixed-displacement support excitation[2]

Optimum parameters for fixed-displacement support excitation									
γ	$\xi_p=0.02$			$\xi_p=0.05$			$\xi_p=0.10$		
	f	ξ_s	$ u_p /H$	f	ξ_s	$ u_p /H$	f	ξ_s	$ u_p /H$
0.005	0.9963	0.0465	11.700	0.9975	0.0499	7.096	1.0030	0.0557	4.252
0.010	0.9925	0.0636	9.455	0.9935	0.0683	6.236	0.9986	0.0741	3.950
0.015	0.9887	0.0774	8.244	0.9896	0.0811	5.702	0.9944	0.0876	3.743
0.020	0.9850	0.0887	7.442	0.9858	0.0923	5.318	0.9903	0.1007	3.583
0.025	0.9813	0.0986	6.857	0.9820	0.1023	5.019	0.9863	0.1106	3.453
0.030	0.9777	0.1075	6.403	0.9782	0.1126	4.778	0.9826	0.1186	3.343
0.035	0.9741	0.1165	6.038	0.9746	0.1194	4.576	0.9785	0.1259	3.248
0.040	0.9706	0.1230	5.734	0.9709	0.1285	4.404	0.9747	0.1333	3.165
0.045	0.9671	0.1309	5.476	0.9674	0.1349	4.254	0.9709	0.1415	3.090
0.050	0.9636	0.1366	5.254	0.9638	0.1410	4.122	0.9672	0.1493	3.024
0.055	0.9601	0.1437	5.059	0.9603	0.1470	4.004	0.9636	0.1541	2.963
0.060	0.9568	0.1489	4.887	0.9569	0.1528	3.898	0.9599	0.1618	2.907
0.065	0.9533	0.1554	4.733	0.9534	0.1585	3.801	0.9564	0.1668	2.856
0.070	0.9500	0.1601	4.594	0.9500	0.1638	3.713	0.9529	0.1718	2.808
0.075	0.9468	0.1648	4.469	0.9467	0.1692	3.633	0.9494	0.1769	2.764
0.080	0.9434	0.1706	4.354	0.9433	0.1742	3.558	0.9460	0.1818	2.723
0.085	0.9402	0.1748	4.248	0.9400	0.1791	3.489	0.9425	0.1867	2.685
0.090	0.9369	0.1802	4.151	0.9367	0.1839	3.425	0.9392	0.1916	2.648
0.095	0.9337	0.1842	4.061	0.9335	0.1886	3.365	0.9358	0.1964	2.614
0.100	0.9306	0.1880	3.977	0.9302	0.1930	3.309	0.9326	0.1994	2.582

表 2.2 Optimum parameters for fixed-acceleration support excitation[2]

Optimum parameters for fixed-acceleration support excitation									
γ	$\xi_p=0.02$			$\xi_p=0.05$			$\xi_p=0.10$		
	f	ξ_s	$\omega_p^2 u_p /G$	f	ξ_s	$\omega_p^2 u_p /G$	f	ξ_s	$\omega_p^2 u_p /G$
0.005	0.9901	0.0465	11.740	0.9826	0.0500	7.124	0.9653	0.0559	4.271
0.010	0.9826	0.0635	9.530	0.9732	0.0680	6.286	0.9526	0.0474	3.984
0.015	0.9756	0.0781	8.339	0.9647	0.0820	5.77	0.9418	0.0897	3.790
0.020	0.9687	0.0887	7.557	0.9567	0.0938	5.402	0.9316	0.1006	3.642
0.025	0.9621	0.0997	6.989	0.9490	0.1039	5.119	0.9223	0.1115	3.524
0.030	0.9555	0.1080	6.551	0.9416	0.1134	4.891	0.9134	0.1211	3.425
0.035	0.9491	0.1166	6.200	0.9343	0.1213	4.702	0.9048	0.1296	3.341
0.040	0.9428	0.1245	5.909	0.9273	0.1295	4.542	0.8965	0.1375	3.267
0.045	0.9366	0.1320	5.664	0.9204	0.1369	4.403	0.8884	0.1446	3.203
0.050	0.9305	0.1392	5.453	0.9136	0.1435	4.282	0.8808	0.1526	3.145
0.055	0.9244	0.1452	5.270	0.9070	0.1504	4.175	0.8732	0.1593	3.093
0.060	0.9184	0.1512	5.109	0.9004	0.1561	4.079	0.8656	0.1649	3.046
0.065	0.9125	0.1571	4.965	0.8941	0.1622	3.992	0.8584	0.1713	3.004
0.070	0.9067	0.1631	4.837	0.8877	0.1681	3.914	0.8514	0.1777	2.964
0.075	0.9009	0.1682	4.721	0.8815	0.1738	3.842	0.8443	0.1828	2.928
0.080	0.8952	0.1735	4.615	0.8753	0.1787	3.777	0.8376	0.1889	2.895
0.085	0.8895	0.1781	4.519	0.8693	0.1842	3.717	0.8308	0.1939	2.864
0.090	0.8839	0.1828	4.431	0.8633	0.1890	3.66	0.8243	0.1995	2.835
0.095	0.8785	0.1886	4.350	0.8574	0.1938	3.609	0.8178	0.2045	2.809
0.100	0.8730	0.1929	4.275	0.8515	0.1980	3.561	0.8113	0.2089	2.783

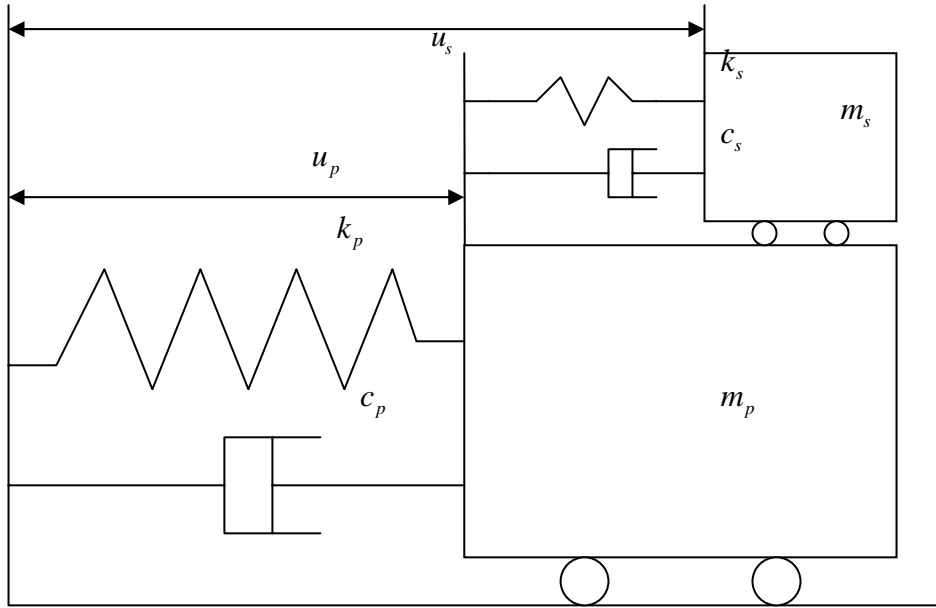


圖2.1 TMD-Structure 示意圖

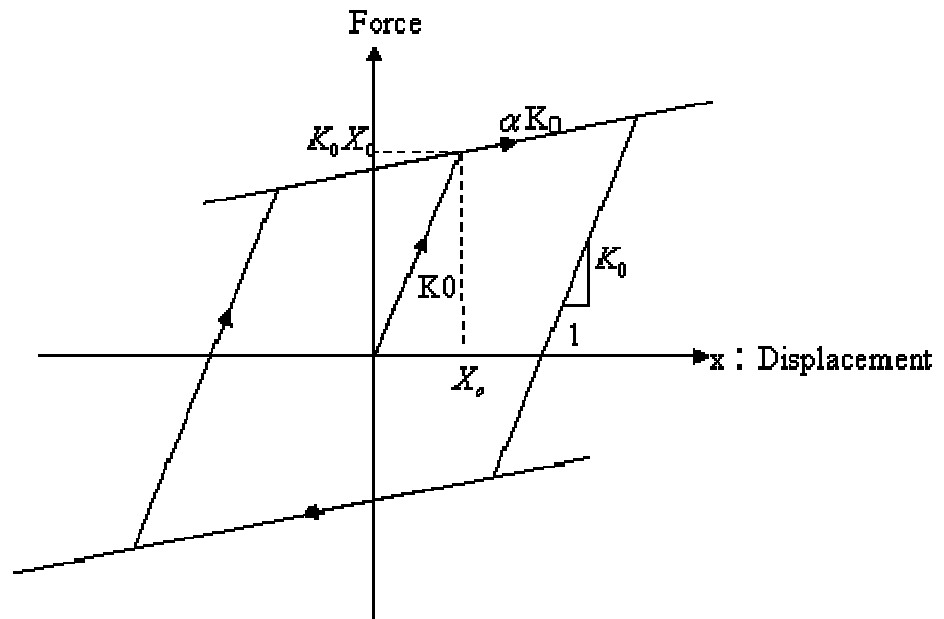


圖2.2 雙線性模型力-位移關係圖

第三章 鋼結構加裝 PTMD 振動台試驗

3.1 試驗構架說明：

試驗構架為三層樓鋼結構，每層樓高 3m，其中梁斷面和柱斷面皆使用 H 型鋼，尺寸為 H150X150X7X10，細部設計圖如圖 3.1~圖 3.8 所示。除了基本鋼構架外，在每層皆加上混凝土塊並固定於樓板上。每層加載重量分別為：第一層和第二層皆約為 5 頓重，第三層約為 6.2 頓重。空構架照片如照片 3.1 所示。

3.2 試驗設計：

3.2.1 試驗目的：

目前文獻中皆指出結構物加裝被動調諧質量阻尼器對於抵抗地震的效益並沒有抵抗風力來得顯著，而且對於結構加裝被動調諧質量阻尼器的實驗並沒有多少實例可參考。因此本試驗的目的為結構加裝被動調諧質量阻尼器在地震下的效益，並且在 EL Centro 歷時 PGA500gal 時讓基底構架降伏，探討結構降伏後 TMD 的效益為何。

3.2.2 試驗歷時：

本次試驗有兩個歷時，分別為 EL Centro、TCU129。試驗時各歷時 PGA 以每 50gal 為增量如表 3.1 所示。

3.2.3 PTMD 裝置

試驗的被動調諧質量阻尼器主要以雙線性彈性壓簧做設計。雙線性彈性壓簧是以兩線性壓簧並聯而成，彈簧設計性質如表 3.2 所示。彈簧第一段彈性勁度為 22kN/m，在第一段彈性壓縮量超過 0.4m 後才會進入第二段彈性。第二段彈性勁度為兩壓簧並聯其值為 44kN/m，彈簧力與位移關係如圖 3.9 所示。設計的 PTMD 重量約為 0.5 頓重與構架第一模態質量之質量比為 4.45%。

PTMD 滑軌使用型號 BRH30AL 之線性型滑軌，其尺寸與細部設計如

圖 3.10~圖 3.12 且基本性質如表 3.3a、表 3.3b 所示。為了使 PTMD 平穩滑動，除了將滑軌固定於 H 型鋼(H100X100X6X8)上，且在 H 型鋼表面作了拋光特殊處理以降低摩擦力的影響。此外為了將彈簧固定於構架上，在彈簧中心穿過一空心鋼管，並將鋼管焊於兩側檔板上。

PTMD 細部設計圖如圖 3.13、圖 3.14 與照片 3.2~照片 3.4 所示。

3.3 量測裝置與試驗過程

3.3.1 量測裝置

本次試驗使用量測裝置有加速度計、位移計和應變計。加速度計用以量測每層樓加速度以及 PTMD 之加速度。位移計量測每層樓側向位移以及 PTMD 相對於頂層之位移。

量測安裝位置由下面來說明：

(1) 加速度計：

加速度計共設有四個，其中三個裝置於每層樓板側邊中間處如圖 3.15 所示，用以測量每層樓平行地震輸入方向之絕對加速度。另一個裝置於 PTMD 上，位置參考圖 3.16、照片 3.5，用以量測 PTMD 平行地震輸入方向之絕對加速度。加速度計輸出單位為 g。

(2) 位移計：

位移計共設有四個。如圖 3.15 其中三個裝置於每層樓板側邊中間處，用以測量每層樓平行地震輸入方向之相對位移。另一個裝置於 PTMD 上，位置參考圖 3.16、照片 3.5，用以量測 PTMD 相對於樓板的位移。位移計輸出單位為 mm。

(3) 應變計：

在一樓柱底和柱頂還有二樓柱底 H 型鋼翼緣外側分別貼上應變計其位置如圖 3.17，且應變計位置皆遠離梁、柱接頭處約 15cm 如照片 3.6 以免量測到應力集中的數值而有誤判之疑。此實驗裝設應變計主要目的在於判斷在各個地震歷時下，構架是否仍在彈性階段，並且在最後 EL Centro 歷時下 PGA500gal 時構架是否有降伏。

3.3.2 試驗過程

為了得到空構架的基本振動周期，在開始主要地震歷時試驗前，先進行白噪音(White Noise)歷時試驗。接著進行空構架在 EL Centro、TCU129 兩個歷時下震動台試驗。每個歷時其 PGA 間隔每 50gal 作一次震動，如表 3.1 所示，並且在每一次震動試驗後都檢核柱底應變是否仍在彈性階段。

在裝上雙線性彈性被動調諧質量阻尼器之後，仍然先進行白噪音歷時試驗來識別結構加裝 PTMD 後結構的基本振動周期。接著進行裝 PTMD 構架在 EL Centro、TCU129 歷時下震動台試驗。每個歷時其 PGA 每間隔 50gal 作一次試驗，如表 3.1 所示。最後在地震歷時 EL Centro PGA500gal(在振動台上實際輸入地震歷時 PGA 接近 0.6g)時，雙線性彈性 PTMD 的第一段線性彈簧已經鬆弛，因此無法再進行更大 PGA 的地震反應，而此時結構仍在彈性階段，所以無法對結構進入降伏後裝設 PTMD 的效應作比較，但在本文第四章，4.1 節將利用模擬的方式來對結構進入非線性後 PTMD 的效應做比較。

3.4 試驗結果

3.4.1 結構動力特性

在實驗一開始先進行 White Noise 歷時以進行系統識別構架之基本周期。將輸入至結構的地震歷時和結構頂層相對位移歷時分別作快速傅立葉轉換後求得轉換函數(Transfer function)。空構架在 White Noise200gal 的轉換函數如圖 3.18(a)所示，空構架在第一模態的頻率是 1.025Hz。含 PTMD 構架在 White Noise250gal 的轉換函數如圖 3.18(b)所示，含 PTMD 構架第一模態頻率是 1.001Hz。且利用系統識別出來空構架第一模態阻尼比為 0.02，含 PTMD 構架第一模態阻尼比為 0.059，第二模態阻尼比為 0.076，其詳細模態特性參照表 3.4。

3.4.2 樓層相對位移比較

對於 EL Centro 歷時樓層相對位移，在 PGA50gal 時 PTMD 沒有發生作用，而且相對位移甚至有一點放大。所以對於位移反應無法控制。但在 PGA 較大時，PTMD 克服靜摩擦力後開始滑動，結構因裝置 PTMD 而使一樓最

大位移降低約 10%；二樓最大位移降低約 20%；頂樓最大位移降低約 10%~25%，如圖 3.19~圖 3.21，表 3.5~表 3.7 所示。在 EL Centro PGA50gal 加裝 PTMD 沒有效果的原因推測是 PTMD 滑軌和滑塊間的靜摩擦力而使得 PTMD 無法滑動所造成的。PTMD 相對於頂層的位移歷時反應由圖 3.31 所示，由圖 3.31(a)可觀察出在 EL Centro PGA 50gal 時 PTMD 幾乎沒有滑動。

在 TCU129 歷時下，樓層最大相對位移反應如表 3.8~表 3.10 所示，含 PTMD 構架並沒有降低構架各個樓層的最大相對位移，與空構架頂層最大位移接近。由 PTMD 相對頂層樓板位移的歷時反應觀察如圖 3.32 所示，PTMD 在 TCU129 歷時 50gal、100gal 時幾乎是沒有滑動的。但觀察 TCU129 樓層的整段位移歷時記錄，加 PTMD 構架的位移反應大致上比空構架位移反應有所折減，其空構架與加 PTMD 構架樓層相對位移歷時比較如圖 3.22~圖 3.24 所示。

PTMD 最大恢復力如表 3.11、表 3.12 所示。

3.4.3 樓層絕對加速度比較

在 EL Centro 歷時下，樓層最大絕對加速度反應如表 3.13~表 3.15 所示。含 PTMD 構架並沒有降低構架一樓的最大絕對加速度。但觀察一樓的整段絕對加速度歷時記錄，如圖 3.25，加 PTMD 構架的絕對加速度反應比空構架反應有所折減。而對於二樓與頂層最大絕對加速度反應，大約減少約 5%~15%。其空構架與裝設 PTMD 構架樓層絕對加速度歷時比較如圖 3.25~圖 3.27 所示。

在 TCU129 歷時下，裝設 PTMD 後對於樓層絕對加速度的控制效益很好，使樓層絕對加速度反應減少許多。如圖 3.28~圖 3.30 所示。裝設 TMD 後，可使構架一樓最大絕對加速度反應折減約 30%~40%，二樓反應折減約 20%~30%，頂層反應降低約 10%~40%，如表 3.16~表 3.18 所示。

3.4.4 樓層最大剪力與樓層最大側向位移角

樓層最大剪力反應，如表 3.19~表 3.22 所示。在 EL Centro 歷時較大 PGA 下，含 PTMD 構架頂層最大剪力折減約 10%~20%，二樓最大剪力折減約

18%~25%，基底最大剪力折減約 10%，但對於 PGA 50gal，樓層剪力皆是放大或與空構架接近的情形。在 TCU129 歷時下，含 PTMD 構架頂層最大剪力折減約 25%~40%，二樓最大剪力折減約 10%~18%，對於基底最大剪力有放大的情形。

樓層側向位移角，如表 3.23~表 3.26，在 EL Centro 歷時下，樓層側位移角在較小 PGA 時，裝設 PTMD 構架比純構架側向位移角有些放大，但在較大 PGA 時，裝設 PTMD 構架樓層側位移角比純構架側向位移角有縮小的情況；對於 TCU129 歷時，底層與二樓側向位移比，含 PTMD 構架與空構架接近。對於頂層側向位移角，含 PTMD 構架較純構架反應有減少的趨勢。

空構架與含 PTMD 構架在 EL Centro、TCU129 歷時不同 PGA 下樓層最大剪力與最大側向位移比反應如圖 3.33~圖 3.43 所示。圖表縱軸為樓層最大剪力與構架總重量無因次之比值。

3.5 小結

1. 裝設雙線性彈性 PTMD 鋼結構之振動台實驗在 EL Centro、TCU129 地震歷時下，樓層相對位移反應歷時在 EL Centro、TCU129 歷時下有減少。但對於最大頂層相對位移，在 TCU129 歷時下，含 PTMD 構架與純構架反應接近。
2. 頂層絕對加速度反應在 EL Centro、TCU129 歷時下都有減少。
3. 在 EL Centro 和 TCU129 地震歷時下，對頂層與二樓的最大樓層剪力都有折減，但基底的最大剪力在 EL Centro 歷時下有些微減少，在 TCU129 歷時下卻是放大的反應。
4. 由於 PTMD 與滑軌間的摩擦力使得 PTMD 在 PGA 較小時無法滑動得很平順，但是克服靜摩擦後，動摩擦反而提供了額外的消能機制。
5. 結構在 EL Centro PGA500gal 時，由應變計數值判斷結構仍在彈性階段，但此時彈簧已經失去彈性，無法再進行下一次振動台實驗。因此在第四章將會利用模擬的方式來對結構進入非線性 PTMD 的行為做比較。

表3.1 試驗歷時(以50gal為增量)

	EL Centro	TCU129
w/oTMD(PGA)	50gal~200gal	50gal~250gal
wiTMD(PGA)	50gal~250gal and 500gal	50gal~350gal

表3.2 兩支壓簧設計參數

	彈簧係數(kN/m)	彈簧長度(m)	最大壓位移(m)	最大出力(kN)
彈簧 1	22	1.8	0.8	17.64
彈簧 2	22	0.6	0.4	8.79

表 3.3a 滑軌、滑塊細部尺寸(參照圖 3.10~圖 3.12)

型號	組合尺寸(mm)				滑座尺寸(mm)						
	H	W	W2	E	L	BXJ	MQX1	L1	油孔	T1	N
BRH30AL	42	90	31	9	131.3	72X52	M10X12	94.3	M6X1	7	6.5

表 3.3b 滑軌、滑塊細部尺寸(參照圖 3.10~圖 3.12)

型號	參考資料 (mm)		基本荷重(kgf)		容許靜力矩 (kgf·m)			重量	
	Lmax	G	動額定負荷 (G)	靜額定負荷 (G)	Mx	My	Mz	滑塊 (kgf)	滑軌 (kgf/m)
BRH30AL	4000	20	3900	7190	78.5	65	65	1.4	5.2

表 3.4 空構架與含 PTMD 構架基本特性

	MRF		MRF+PTMD	
	f(Hz)	ξ	f(Hz)	ξ
Mode1	1.025	0.02	1.001	0.059
Mode2	3.198	0.002	1.099	0.076
Mode3			3.186	0.005

表 3.5 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大相對位移比

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(1)Max.D1 ^{MRF} (cm)	0.91	1.60	2.33	2.99		
(2)Max.D1 ^{MRF+TMD} (cm)	1.00	1.64	2.06	2.63	3.07	5.86
D1 ratio (2)/(1)	1.10	1.02	0.88	0.88		

表 3.6 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大相對位移比

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(1)Max.D2 ^{MRF} (cm)	1.63	2.99	4.40	5.65		
(2)Max.D2 ^{MRF+TMD} (cm)	1.74	2.78	3.47	4.33	5.11	10.39
D2 ratio (2)/(1)	1.06	0.93	0.79	0.77		

表 3.7 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大相對位移比

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(1)Max.D3 ^{MRF} (cm)	2.05	3.78	5.57	7.14		
(2)Max.D3 ^{MRF+TMD} (cm)	2.07	3.33	4.14	5.20	6.55	13.81
D3 ratio (2)/(1)	1.01	0.88	0.74	0.73		

表 3.8 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大相對位移比

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(1)Max.D1 ^{MRF} (cm)	0.44	0.90	1.38	1.91	2.27		
(2)Max.D1 ^{MRF+TMD} (cm)	0.42	0.92	1.31	1.90	2.33	2.76	3.23
D1 ratio (2)/(1)	0.96	1.03	0.95	1.00	1.03		

表 3.9 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大相對位移比

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(1)Max.D2 ^{MRF} (cm)	0.83	1.61	2.37	3.16	3.76		
(2)Max.D2 ^{MRF+TMD} (cm)	0.80	1.68	2.34	3.39	4.02	4.49	5.14
D2 ratio (2)/(1)	0.97	1.04	0.99	1.07	1.07		

表 3.10 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大相對位移比較

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(1)Max.D3 ^{MRF} (cm)	1.10	2.20	3.25	4.44	5.30		
(2)Max.D3 ^{MRF+TMD} (cm)	1.03	2.18	3.10	4.50	5.41	6.13	7.12
D3 ratio (2)/(1)	0.94	0.99	0.95	1.01	1.02		

表 3.11 EL Centro 歷時 PTMD 最大恢復力

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
F _{TMD} (kN)	0.001	0.94	2.14	4.44	7.17

表 3.12 TCU129 歷時 PTMD 最大恢復力

TCU 129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
$F_{TMD}(kN)$	0.001	0.11	0.45	1.39	2.33	3.20	4.70

表 3.13 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大絕對加速度比較

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(3)Max.A1 ^{MRF} (m/s ²)	1.328	2.138	2.981	3.681		
(4)Max.A1 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	1.264	2.087	2.791	3.815	4.527	8.431
A1 ratio (4)/(3)	0.95	0.98	0.94	1.04		

表 3.14 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大絕對加速度比較

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(3)Max.A2 ^{MRF} (m/s ²)	0.932	1.583	2.275	2.955		
(4)Max.A2 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	0.883	1.512	1.963	2.552	3.028	5.730
A2 ratio (4)/(3)	0.95	0.95	0.86	0.86		

表 3.15 EL Centro 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大絕對加速度比較

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
(3)Max.A3 ^{MRF} (m/s ²)	1.470	2.650	3.840	4.930		
(4)Max.A3 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	1.410	2.370	3.200	4.260	4.220	10.210
A3 ratio (4)/(3)	0.96	0.89	0.83	0.86		

表 3.16 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 1F 最大絕對加速度比較

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(3)Max.A1 ^{MRF} (m/s ²)	1.426	3.066	4.478	5.995	7.263		
(4)Max.A1 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	0.996	1.824	2.553	3.729	5.108	6.883	8.920
A1 ratio (4)/(3)	0.70	0.60	0.57	0.62	0.70		

表 3.17 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架 2F 最大絕對加速度比較

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(3)Max.A2 ^{MRF} (m/s ²)	0.660	1.401	2.025	2.671	3.361		
(4)Max.A2 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	0.518	0.938	1.370	1.919	2.503	3.095	4.010
A2 ratio (4)/(3)	0.79	0.67	0.68	0.72	0.74		

表 3.18 TCU129 歷時空構架與加 PTMD 構架頂層最大絕對加速度比較

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
(3)Max.A3 ^{MRF} (m/s ²)	1.109	2.455	3.612	4.745	4.662		
(4)Max.A3 ^{MRF+TMD} (m/s ²)	0.727	1.42	2.142	3.133	4.178	4.328	6.863
A3 ratio (4)/(3)	0.66	0.58	0.59	0.66	0.90		

表 3.19 EL Centro 歷時純構架之最大樓層剪力

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal
V ₃ (kN)	10.41	18.81	27.26	34.92
V ₂ (kN)	10.11	18.20	26.44	33.85
V _{Base} (kN)	13.38	23.12	32.84	41.52

表 3.20 EL Centro 歷時含 PTMD 構架之最大樓層剪力

EL Centro	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
V_3 (kN)	10.46	16.59	21.87	28.56	34.80	69.36
V_2 (kN)	9.98	14.84	19.81	26.93	34.23	70.43
V_{Base} (kN)	14.48	23.13	29.80	38.10	47.82	85.12

表 3.21 TCU129 歷時純構架之最大樓層剪力

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
V_3 (kN)	7.86	17.40	25.61	33.64	40.15
V_2 (kN)	5.34	11.66	17.58	24.08	29.03
V_{Base} (kN)	5.48	11.69	17.44	23.64	28.47

表 3.22 TCU 129 歷時含 PTMD 構架之最大樓層剪力

TCU129	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
V_3 (kN)	5.53	10.50	15.35	22.43	29.75	37.98	48.61
V_2 (kN)	4.77	10.47	14.46	20.61	25.92	31.44	36.78
V_{Base} (kN)	5.62	12.33	17.29	24.84	30.83	37.06	42.72

表 3.23 EL Centro 歷時空構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比

(a) MRF 構架 1F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_1F	50gal	100gal	150gal	200gal
Max.Drift Ratio(%)	0.30	0.53	0.78	1.00
Max. V_1/W	0.07	0.12	0.17	0.22

(b) MRF 構架 2F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_2F	50gal	100gal	150gal	200gal
Max.Drift Ratio(%)	0.29	0.51	0.75	0.95
Max. V_2/W	0.05	0.10	0.14	0.18

(c) MRF 構架 3F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_3F	50gal	100gal	150gal	200gal
Max.Drift Ratio(%)	0.23	0.41	0.61	0.79
Max.V _{base} /W	0.06	0.10	0.14	0.18

表 3.24 EL Centro 歷時含 TMD 構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比

(a) 含 TMD 構架 1F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_1F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
Max.Drift Ratio(%)	0.33	0.55	0.69	0.88	1.02	1.95
Max.V ₁ /W	0.03	0.12	0.16	0.20	0.25	0.45

(b) 含 TMD 構架 2F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_2F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
Max.Drift Ratio(%)	0.29	0.43	0.56	0.74	0.98	2.08
Max.V ₂ /W	0.05	0.08	0.10	0.14	0.18	0.37

(c) 含 TMD 構架 3F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

EL Centro_3F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	500gal
Max.Drift Ratio(%)	0.23	0.35	0.46	0.59	0.70	1.45
Max.V _{base} /W	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.37

表 3.25 TCU129_歷時空構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比

(a) MRF 構架 1F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_1F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
Max.Drift Ratio(%)	0.15	0.30	0.46	0.64	0.76
Max.V ₁ /W	0.03	0.06	0.09	0.13	0.15

(b) MRF 構架 2F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_2F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
Max.Drift Ratio(%)	0.15	0.3	0.46	0.64	0.76
Max.V ₂ /W	0.03	0.06	0.09	0.13	0.15

(c) MRF 構架 3F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_3F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal
Max.Drift Ratio(%)	0.15	0.3	0.46	0.64	0.76
Max.V _{base} /W	0.03	0.06	0.09	0.13	0.15

表 3.26 TCU129_歷時含 TMD 構架樓層最大剪力與樓層最大側位移比

(a) 含 TMD 構架 1F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_1F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
Max.Drift Ratio(%)	0.14	0.31	0.44	0.63	0.78	0.92	1.08
Max.V ₁ /W	0.03	0.07	0.09	0.13	0.16	0.20	0.23

(b) 含 TMD 構架 2F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_2F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
Max.Drift Ratio(%)	0.15	0.32	0.44	0.62	0.75	0.90	1.04
Max.V ₂ /W	0.03	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19

(c) 含 TMD 構架 3F 樓層最大剪力與樓層最大側位移比

TCU129_3F	50gal	100gal	150gal	200gal	250gal	300gal	350gal
Max.Drift Ratio(%)	0.12	0.22	0.3	0.46	0.62	0.8	1.02
Max.V _{base} /W	0.03	0.06	0.08	0.12	0.16	0.20	0.26

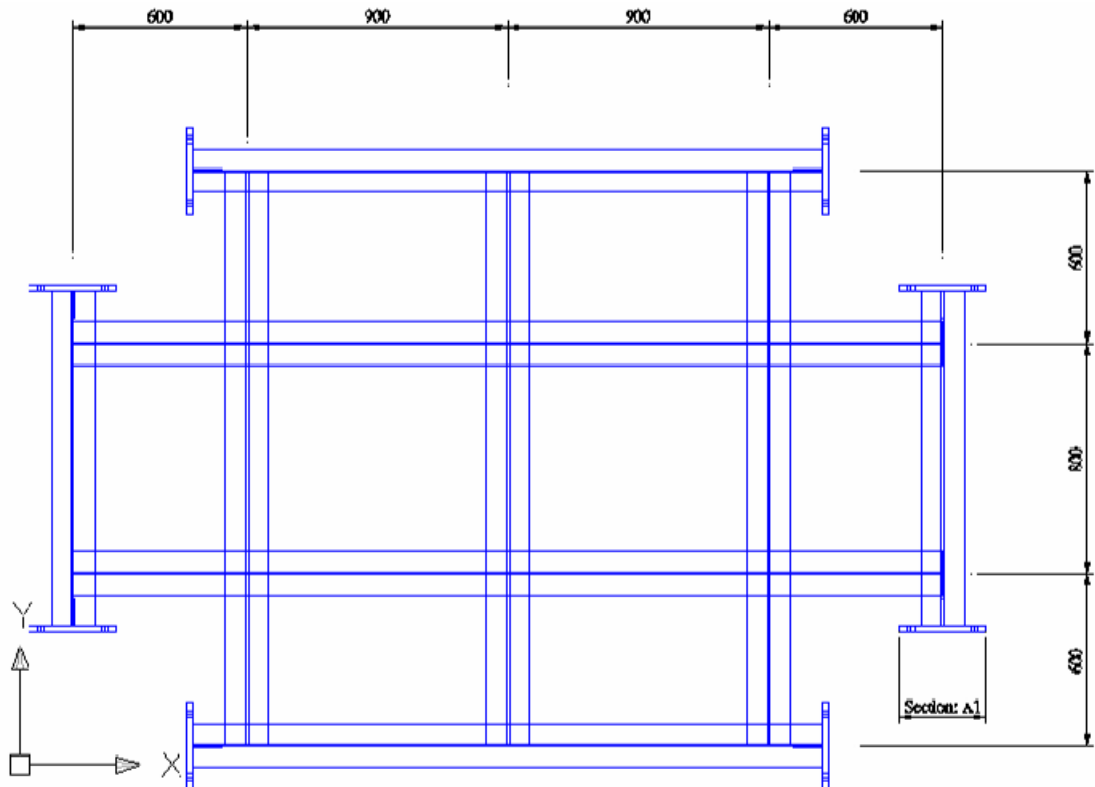


圖3.1樓層構架平面圖(梁：H150X150X7X10)

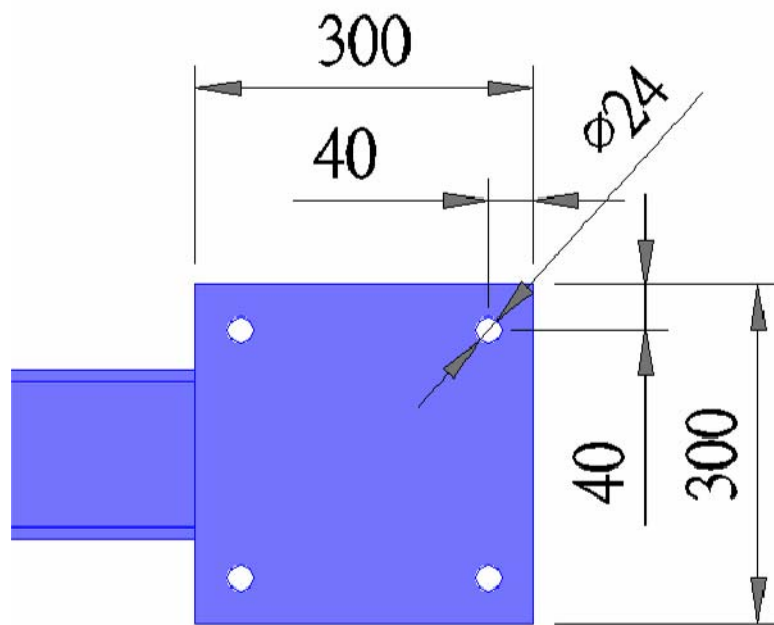


圖3.2 連接板尺寸(厚度：20mm，section:A1)

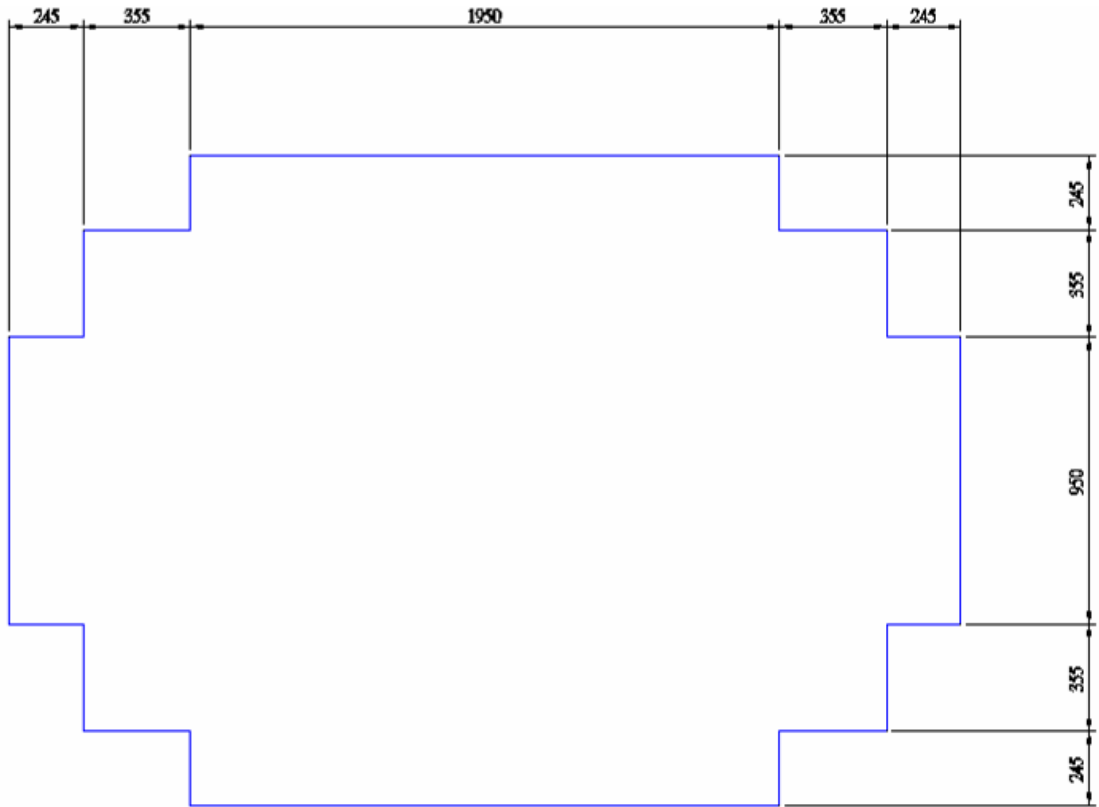


圖3.3樓層尺寸(厚度：25mm)

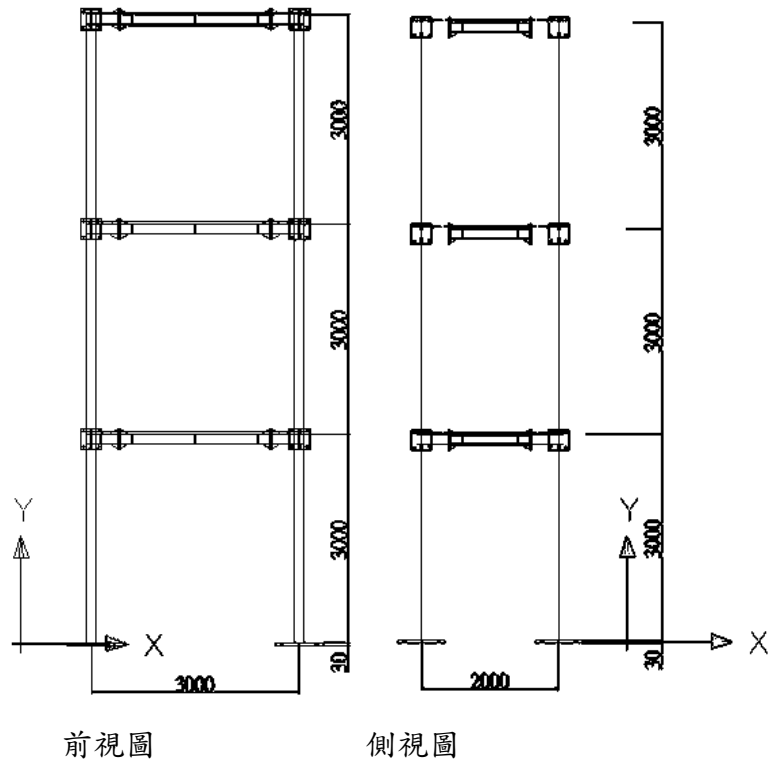
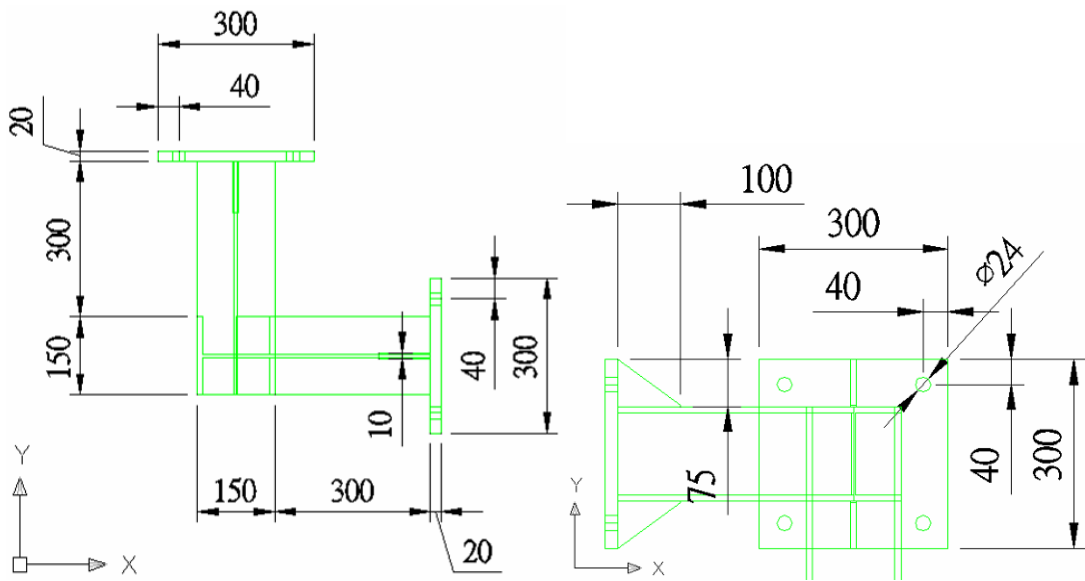


圖3.4 鋼結構立面尺寸(柱：H150X150X7X10)



上視圖

側視圖

圖3.5梁-柱連接處細部尺寸(梁、柱：H150X150X7X10，連接板Section：A1)

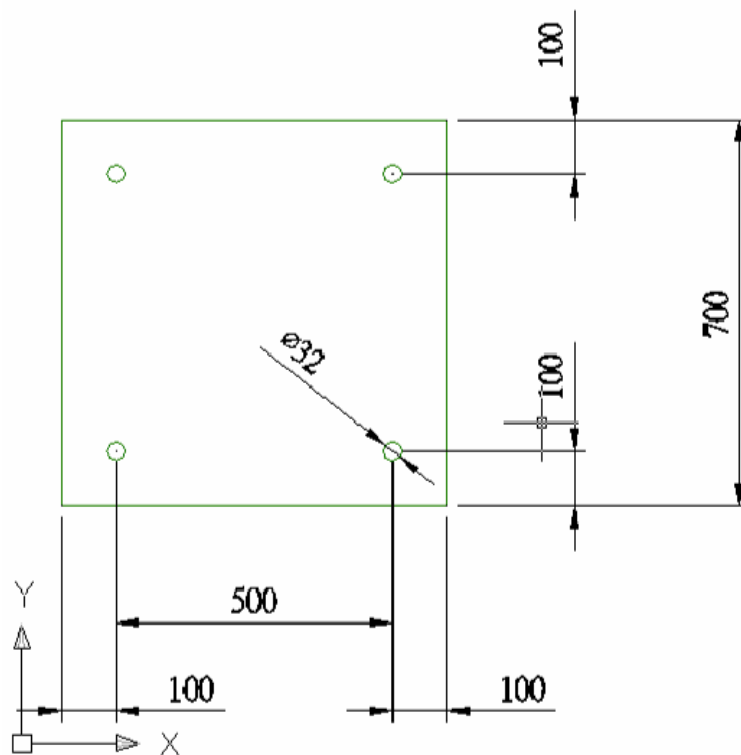


圖3.6基礎板尺寸(厚度30mm)

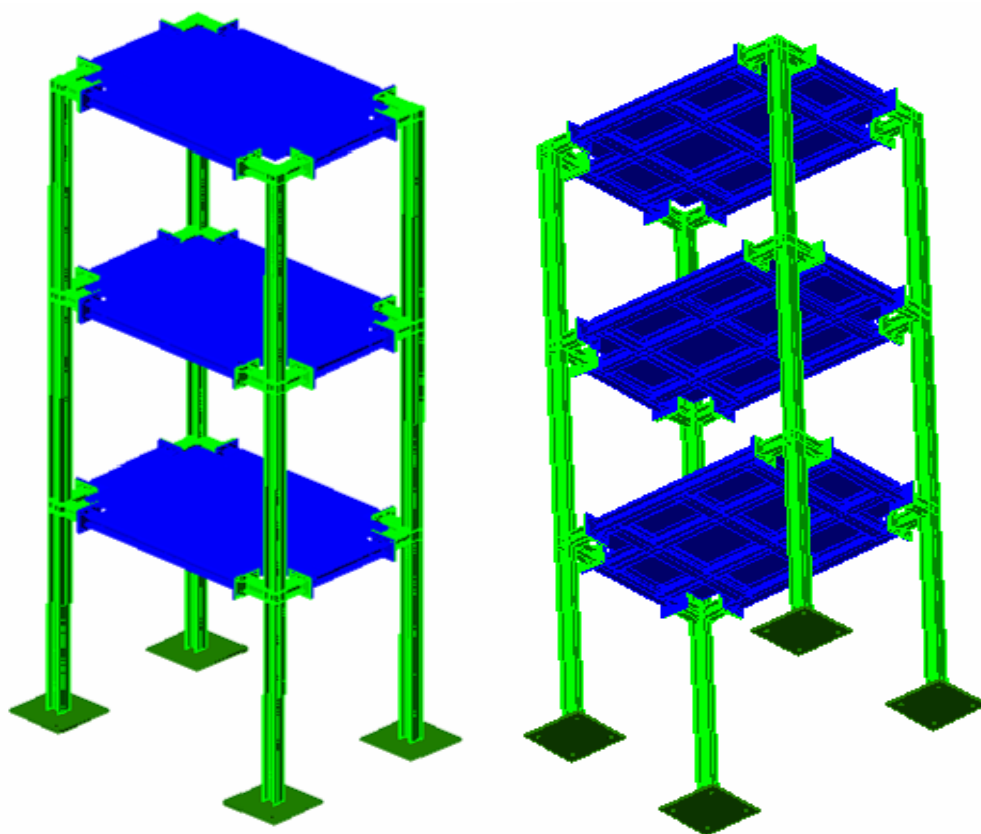


圖3.7 試驗鋼構架立體示意圖

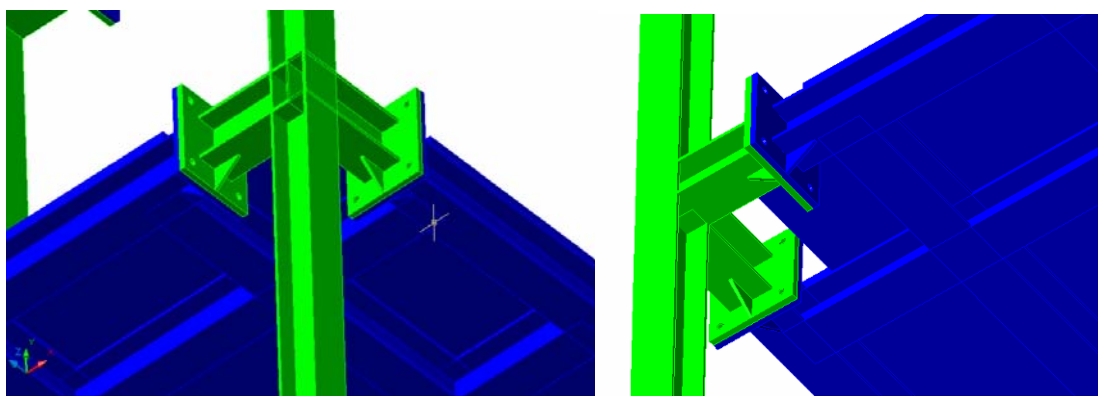


圖3.8 梁柱連接處立體示意圖

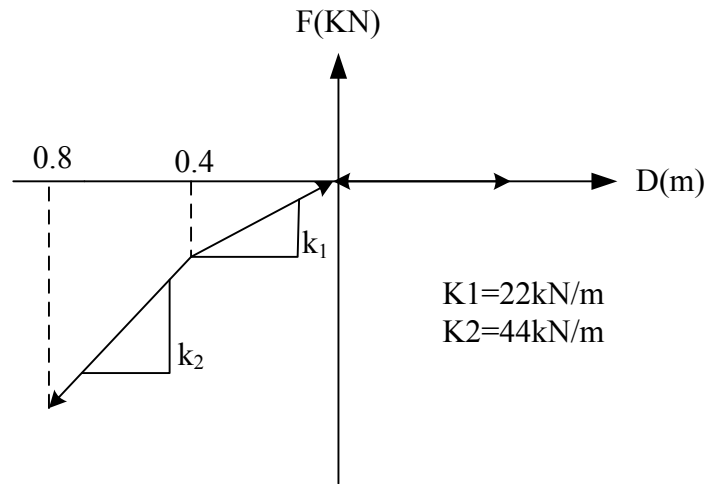


圖3.9雙線性壓簧力-位移關係圖($k_1 : 22\text{KN/m}$, $k_2:44\text{KN/m}$)

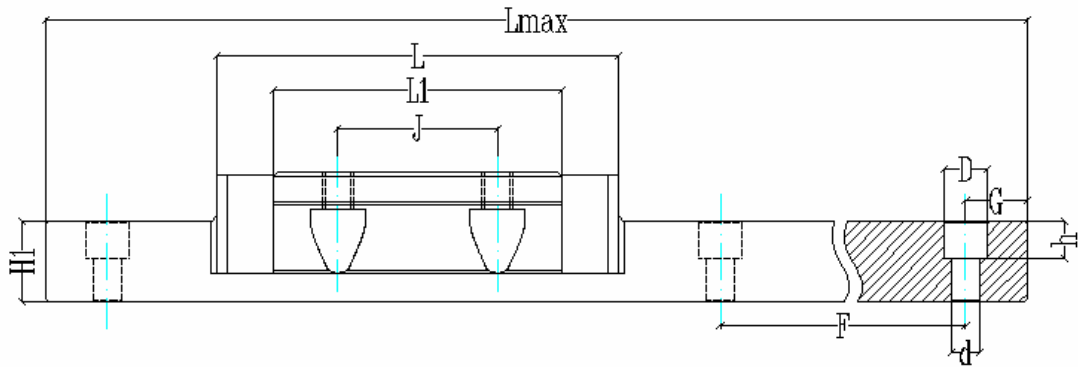


圖3.10 滑軌前視圖

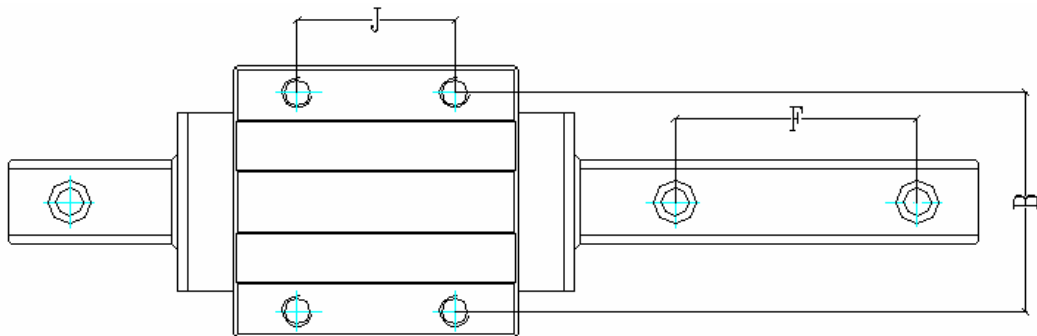


圖3.11 滑軌上視圖

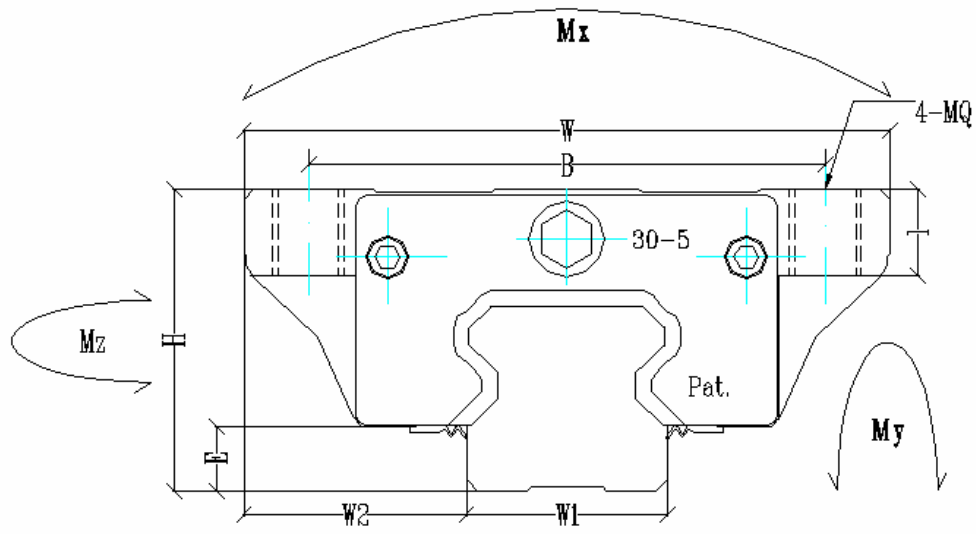


圖3.12 滑軌側視圖

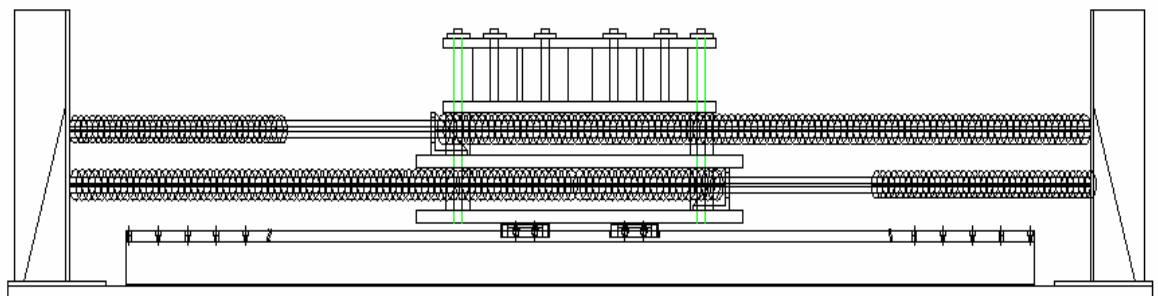


圖 3.13 PTMD 前視圖

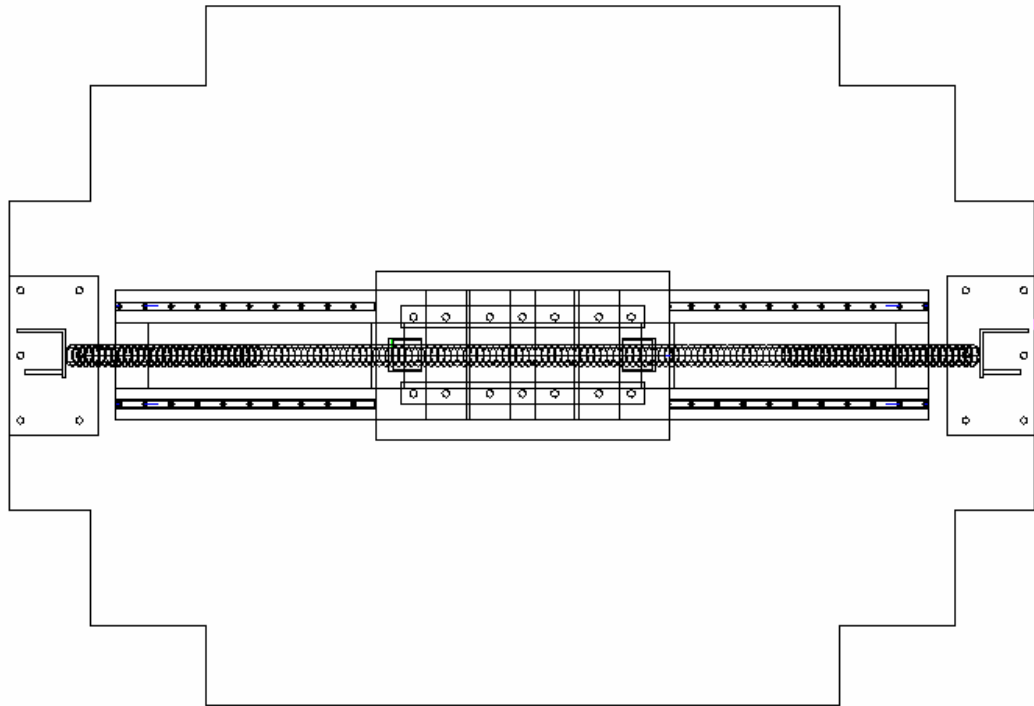


圖3.14 PTMD上視圖

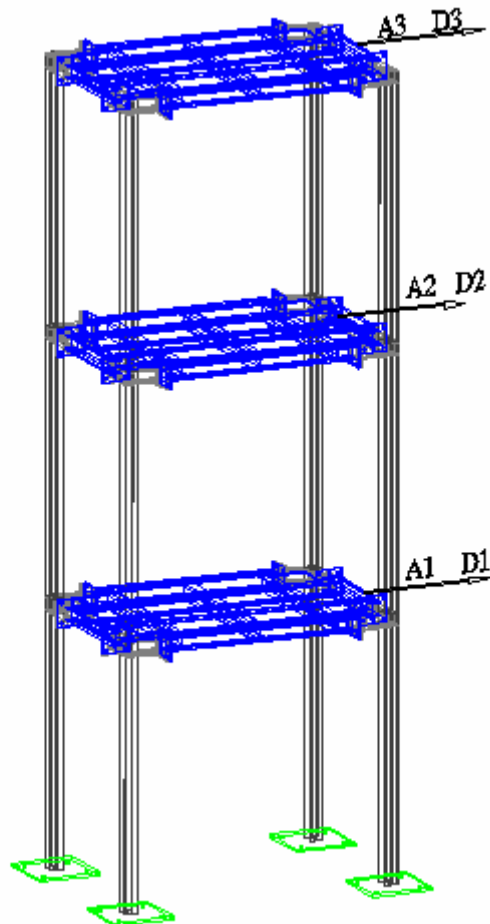


圖3.15 加速度計與位移計裝設位置圖

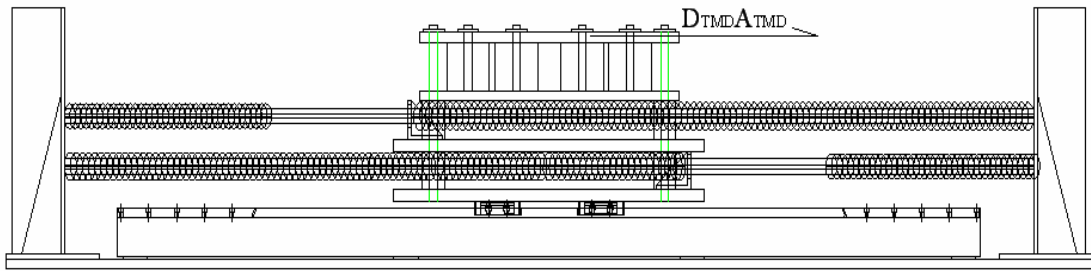


圖3.16 TMD位移計與加速度計位置圖

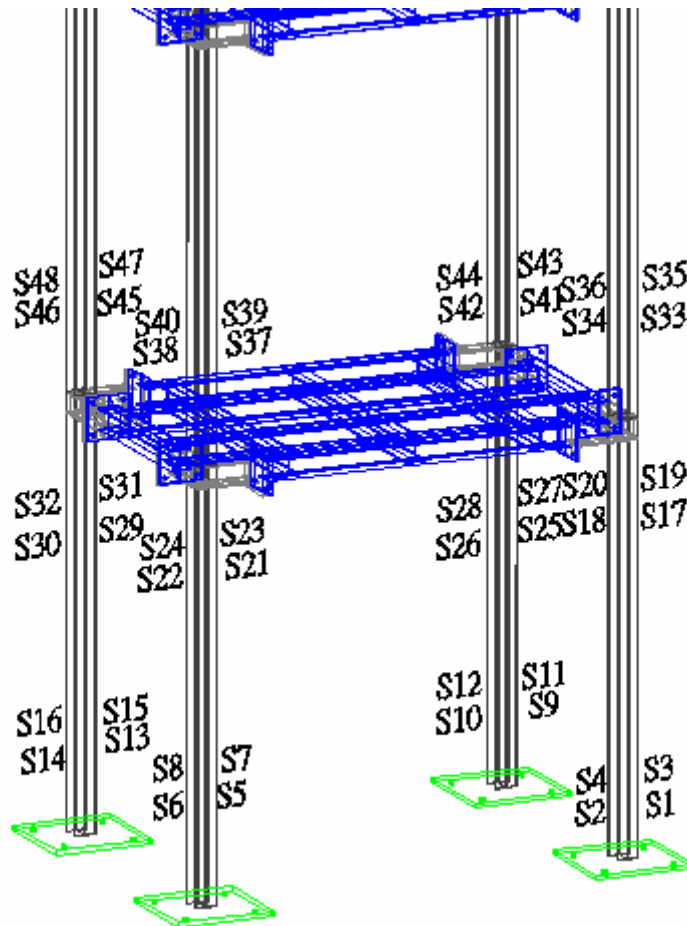


圖3.17 應變計裝設位置圖

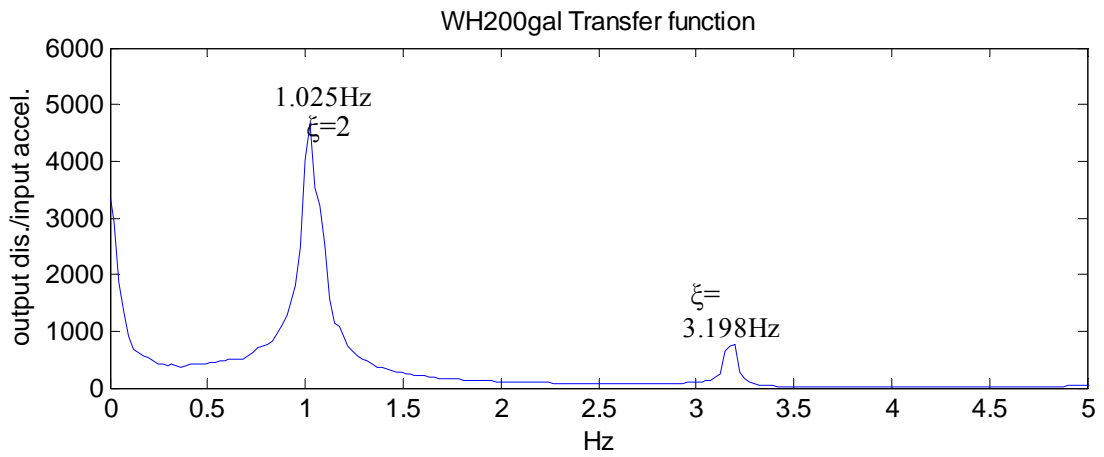


圖3.18(a)White Noise 200gal-Transfer function(without TMD)

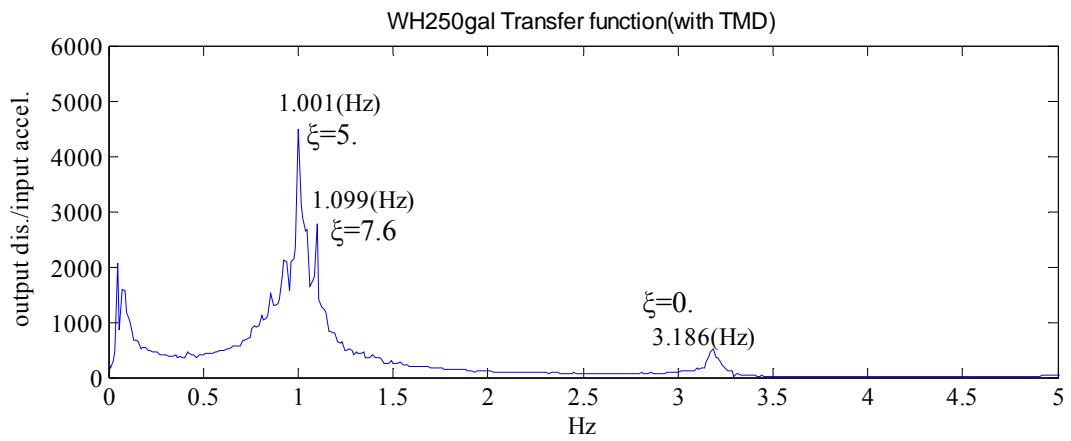


圖3.18(b)White Noise 250gal-Transfer function(with TMD)

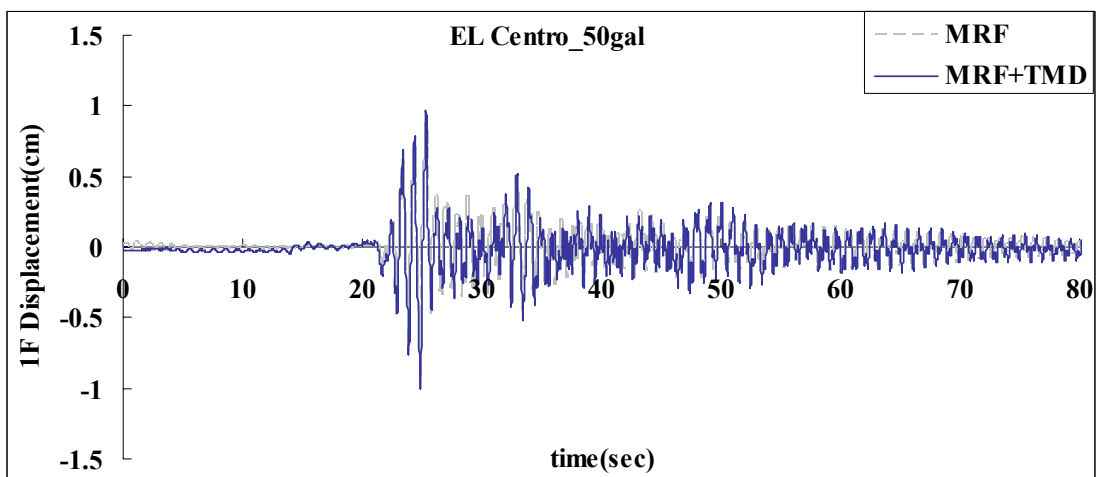


圖3.19(a)EL Centro 50gal 1F相對位移比較

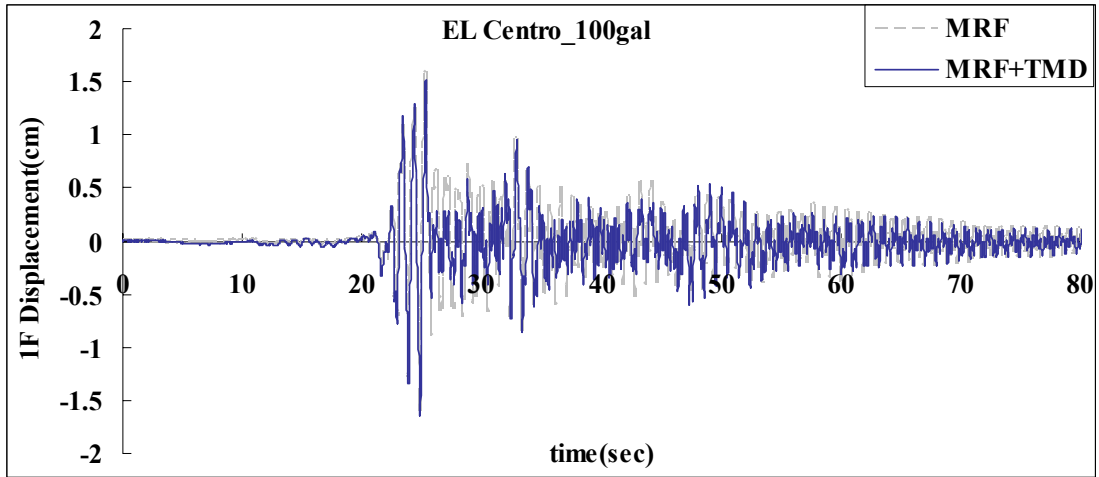


圖3.19(b) EL Centro 100gal 1F相對位移比較

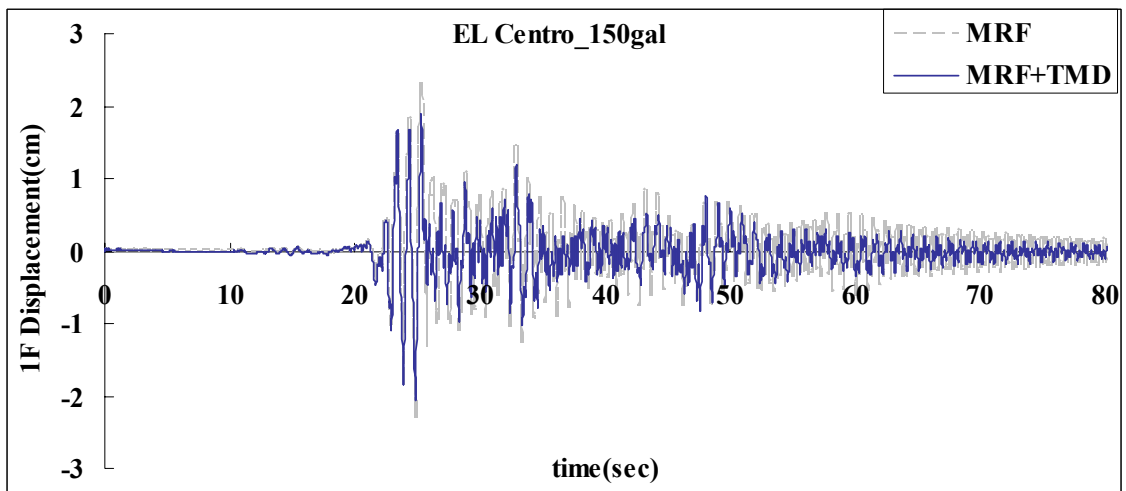


圖3.19(c) EL Centro 150gal 1F相對位移比較

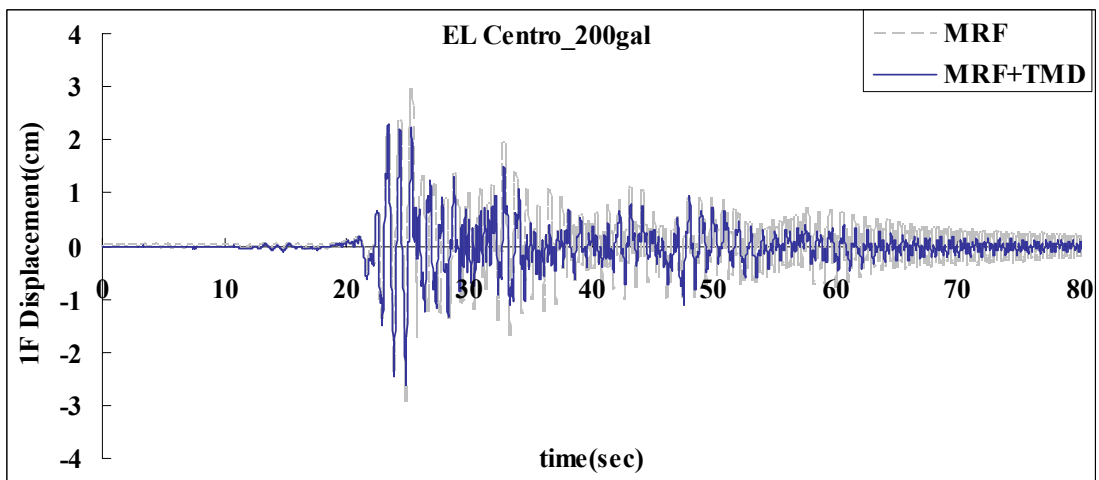


圖3.19(d) EL Centro200gal 1F相對位移比較

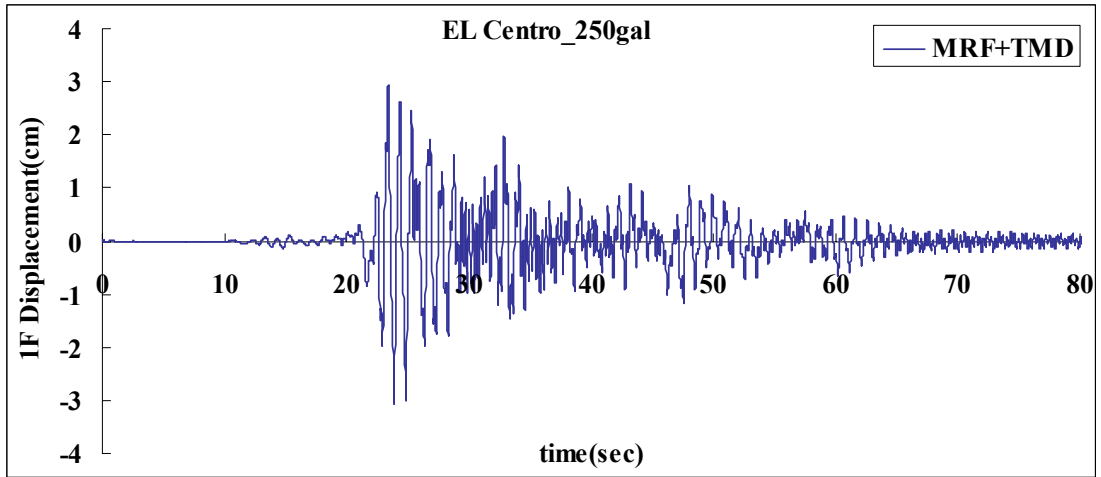


圖3.19(e) EL Centro 250gal 加裝PTMD構架1F相對位移歷時

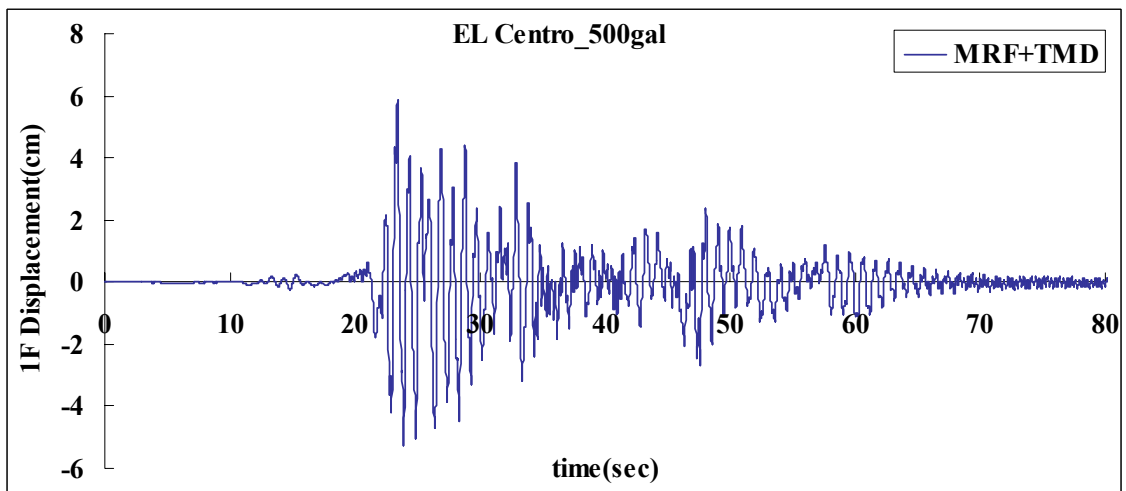


圖3.19(f) EL Centro 500gal 加裝PTMD構架1F相對位移歷時

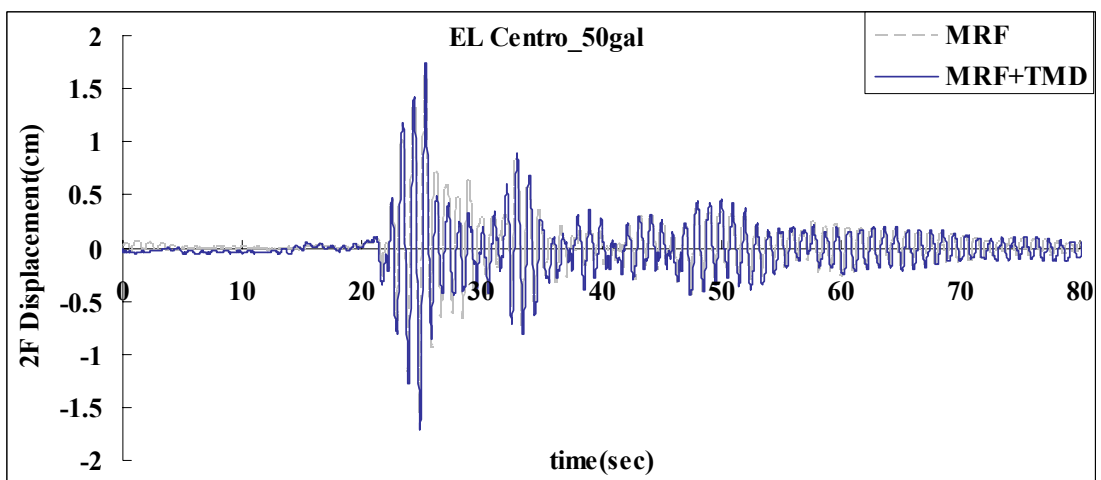


圖3.20(a)EL Centro 50gal 2F相對位移比較

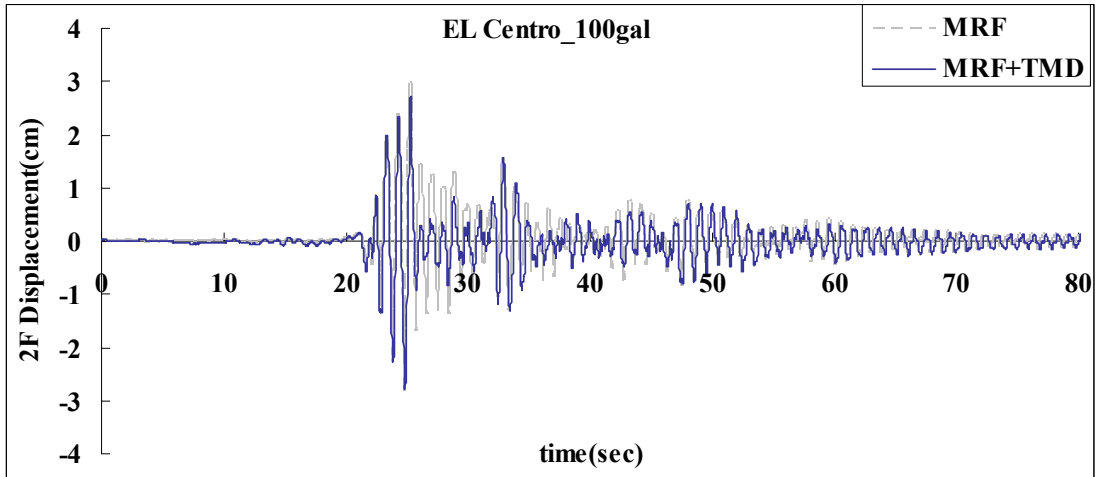


圖3.20(b)EL Centro 100gal 2F相對位移比較

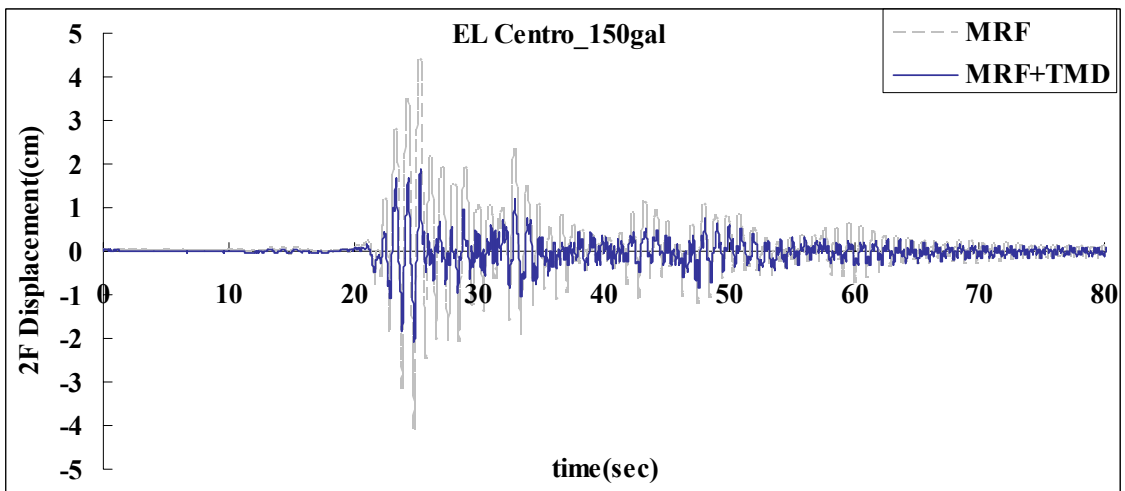


圖3.20(c)EL Centro 150gal 2F相對位移比較

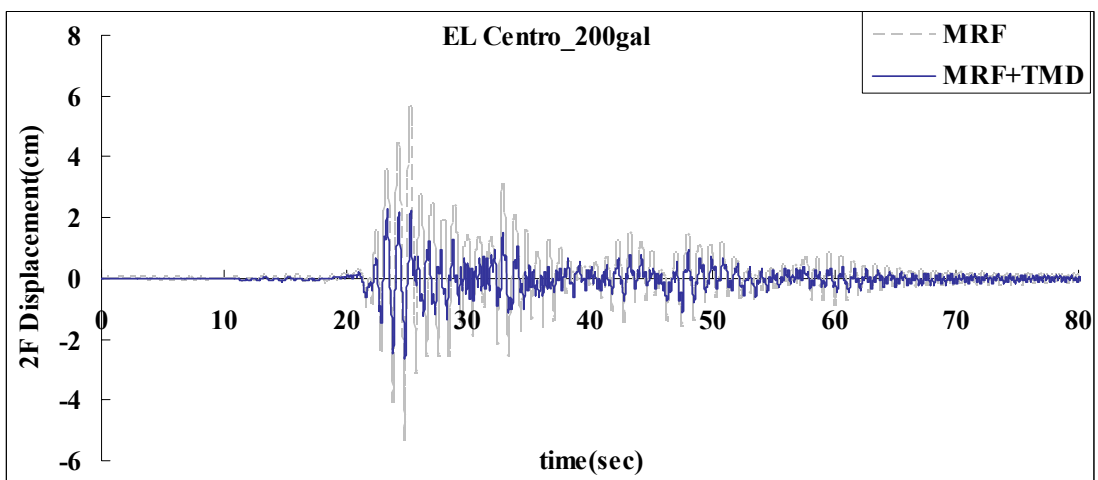


圖3.20(d)EL Centro 200gal 2F相對位移比較

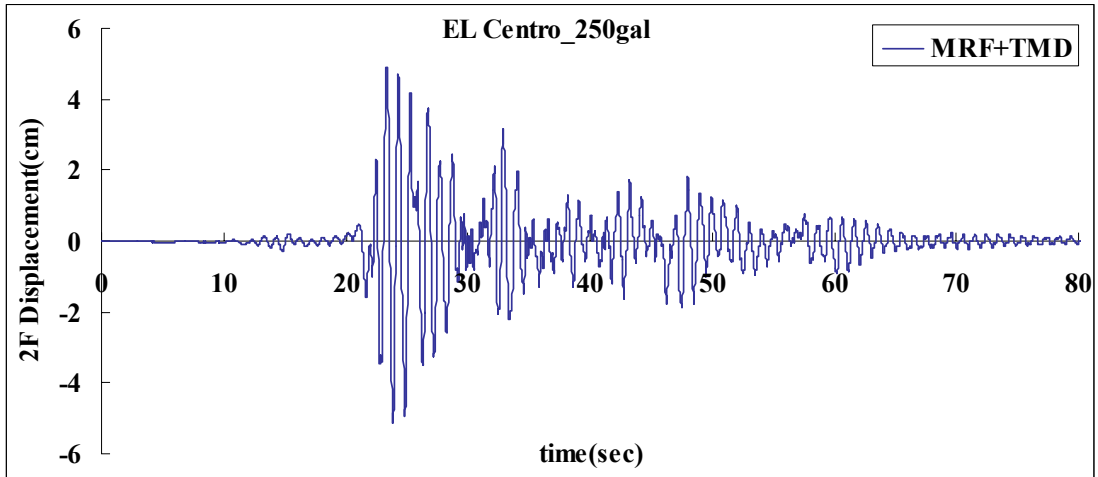


圖3.20(e) EL Centro 250gal 加裝PTMD構架2F相對位移歷時

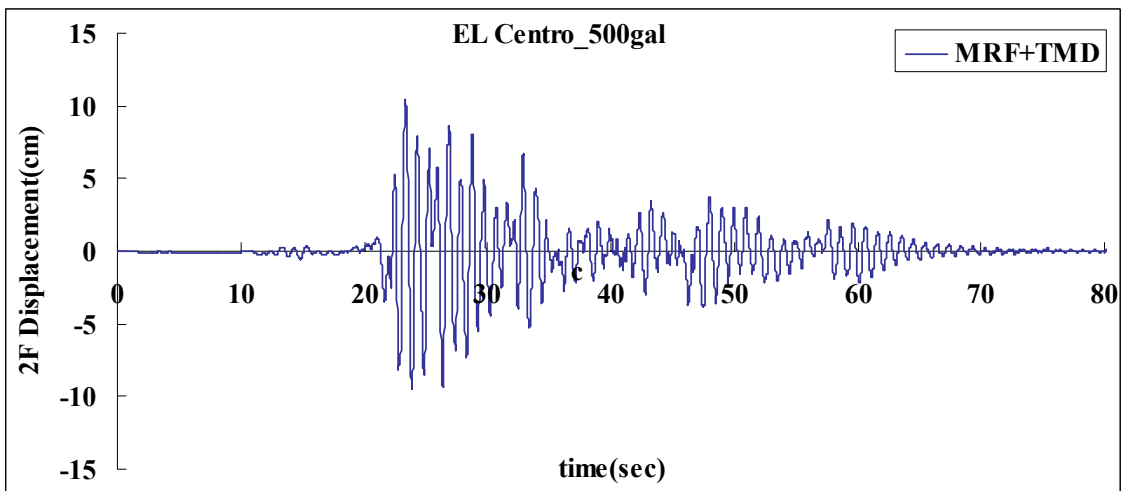


圖3.20(f) EL Centro 500gal 加裝PTMD構架2F相對位移歷時

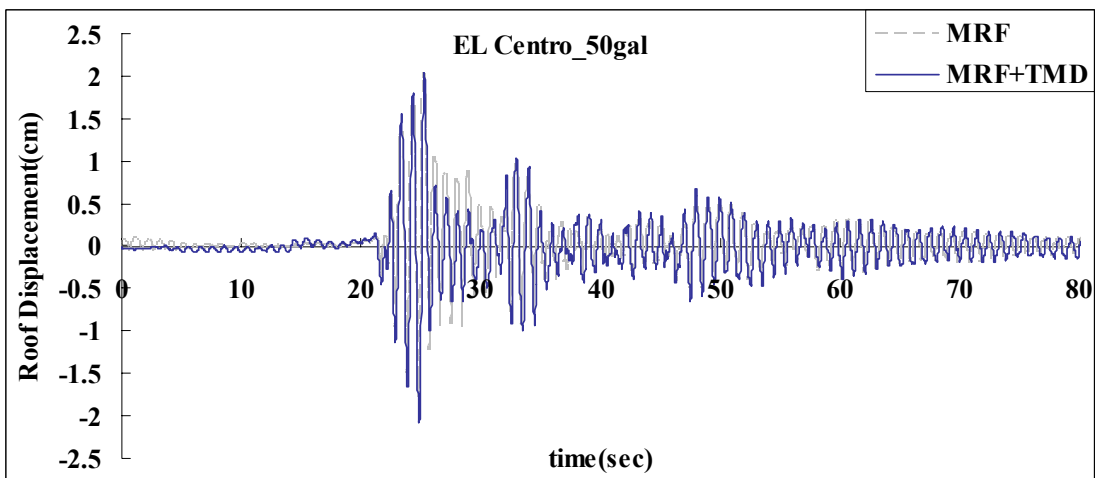


圖3.21(a) EL Centro_50gal 頂層相對位移比較

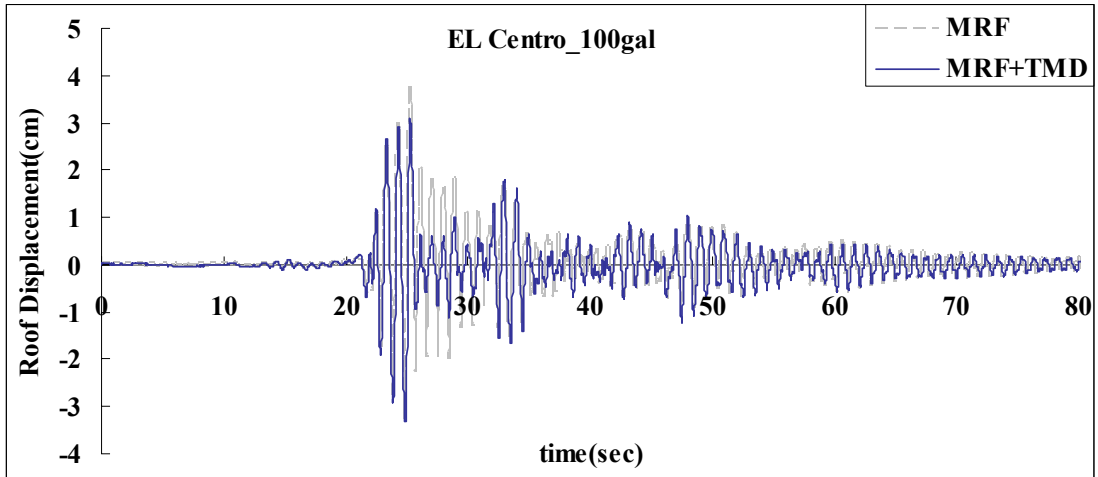


圖3.21(b) EL Centro_100gal 頂層相對位移比較

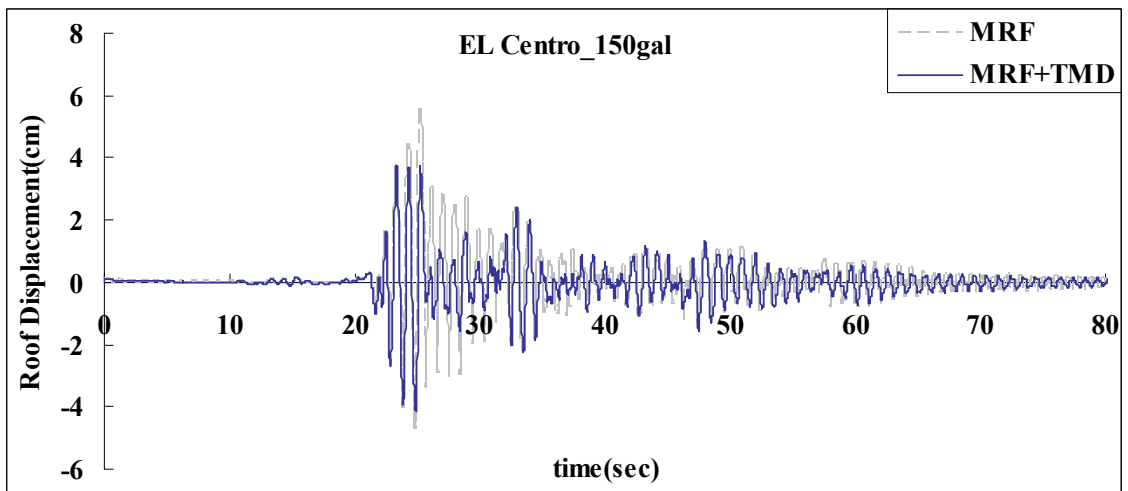


圖3.21(c) EL Centro_150gal 頂層相對位移比較

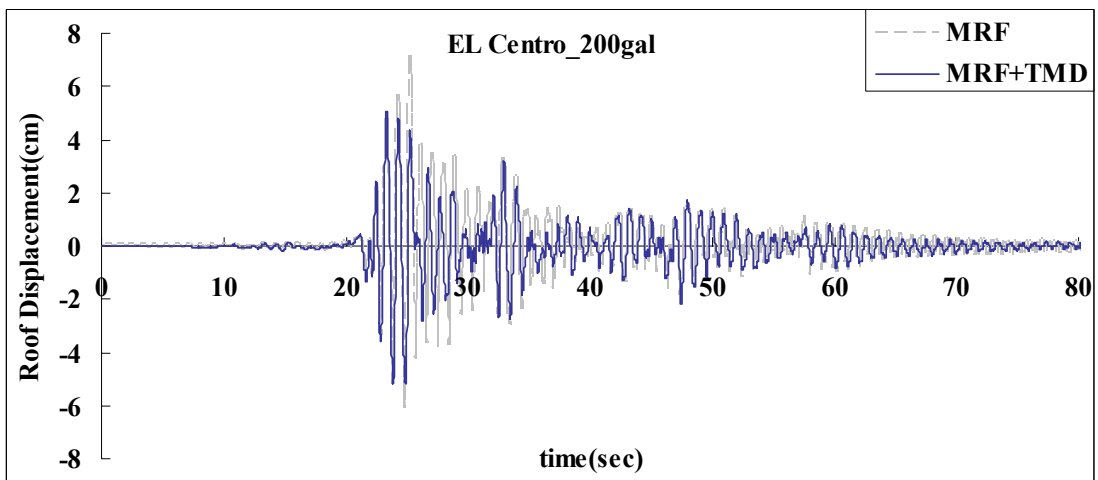


圖3.21(d) EL Centro_200gal 頂層相對位移比較

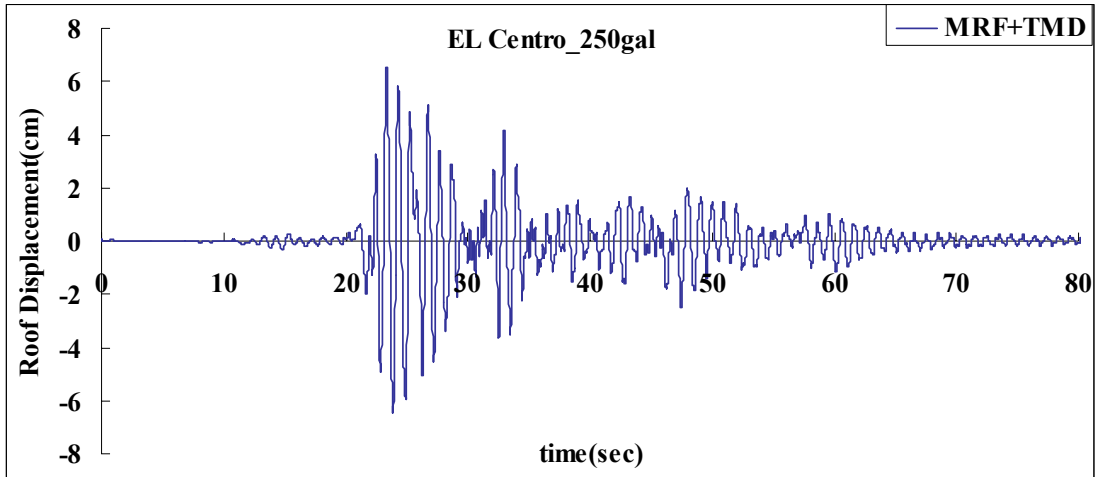


圖3.21(e) EL Centro 250gal 加裝PTMD構架頂層相對位移歷時

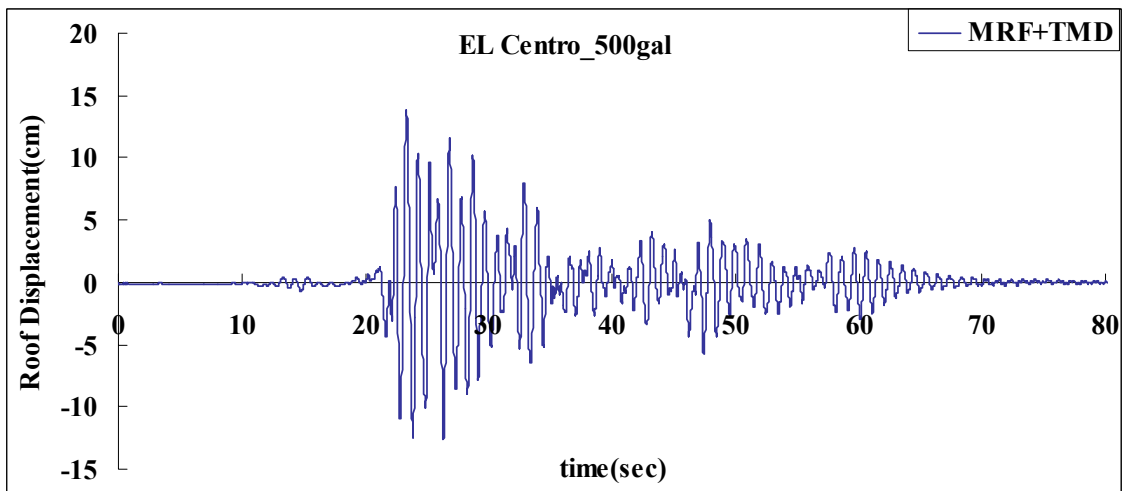


圖3.21(f) EL Centro 500gal 加裝PTMD構架頂層相對位移歷時

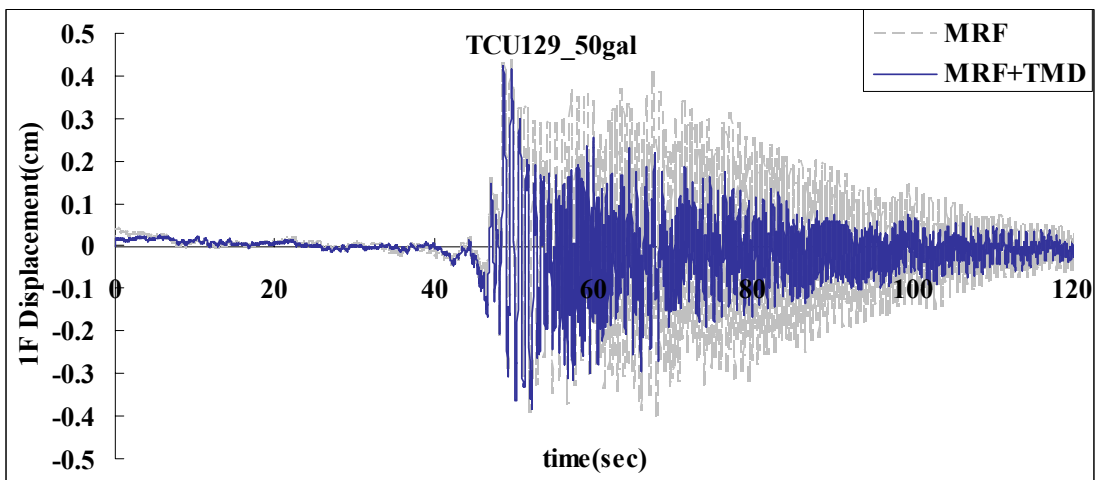


圖3.22(a) TCU129_50gal 1F相對位移比較

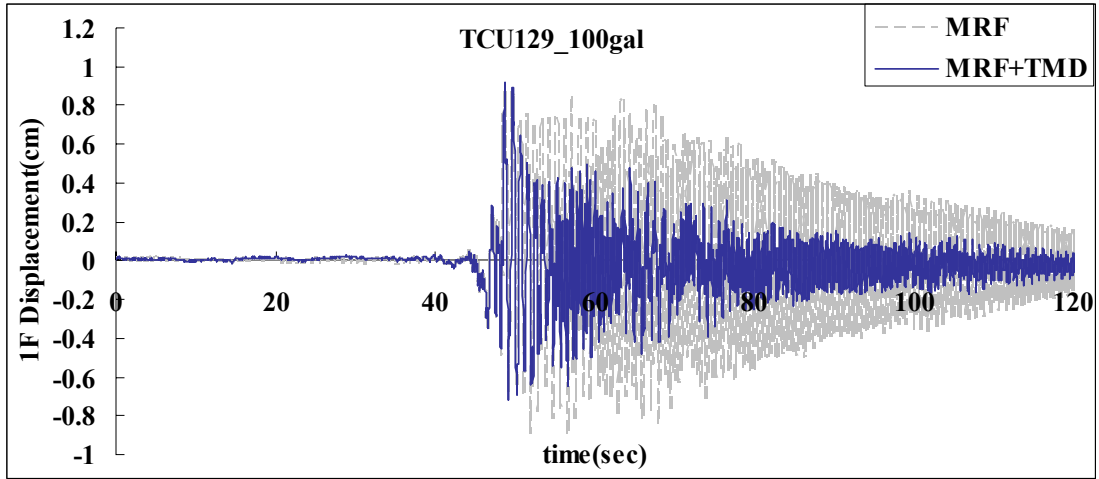


圖3.22(b) TCU129_100gal 1F相對位移比較

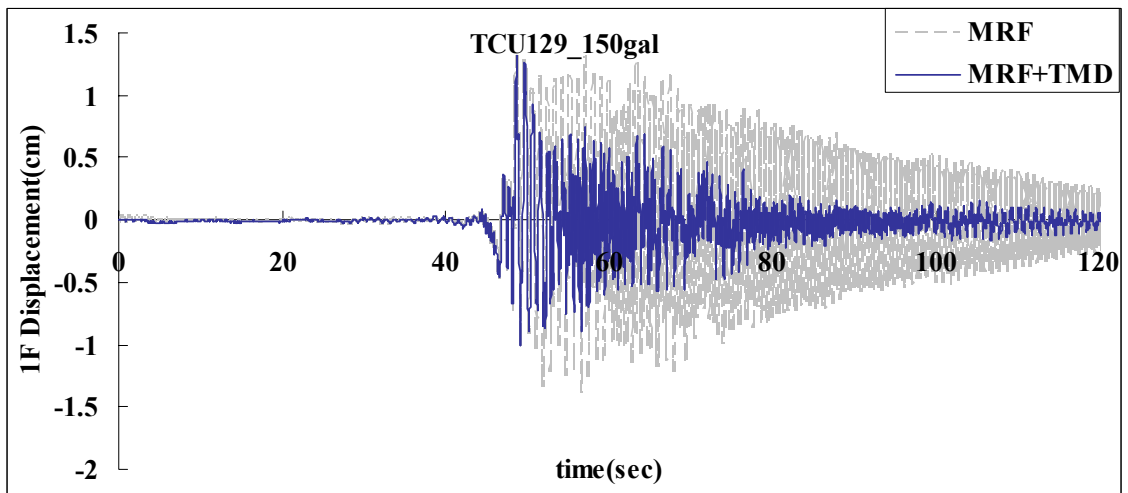


圖3.22(c) TCU129_150gal 1F相對位移比較

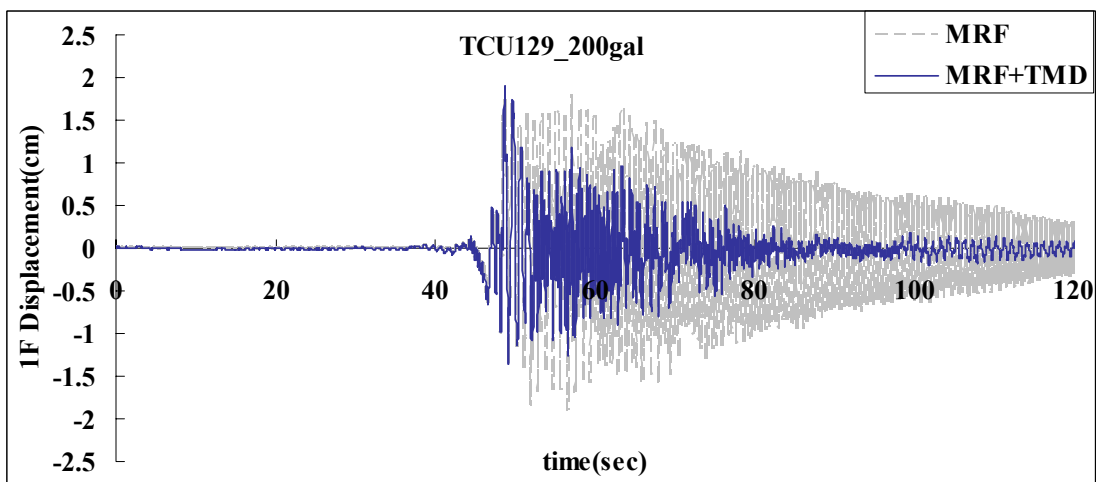


圖3.22(d) TCU129_200gal 1F相對位移比較

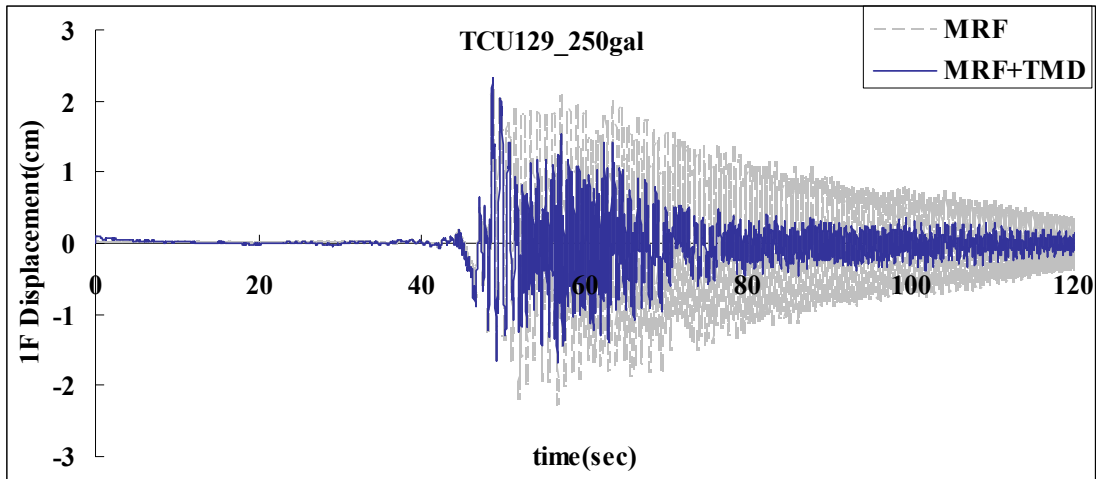


圖3.22(e) TCU129_250gal 1F相對位移比較

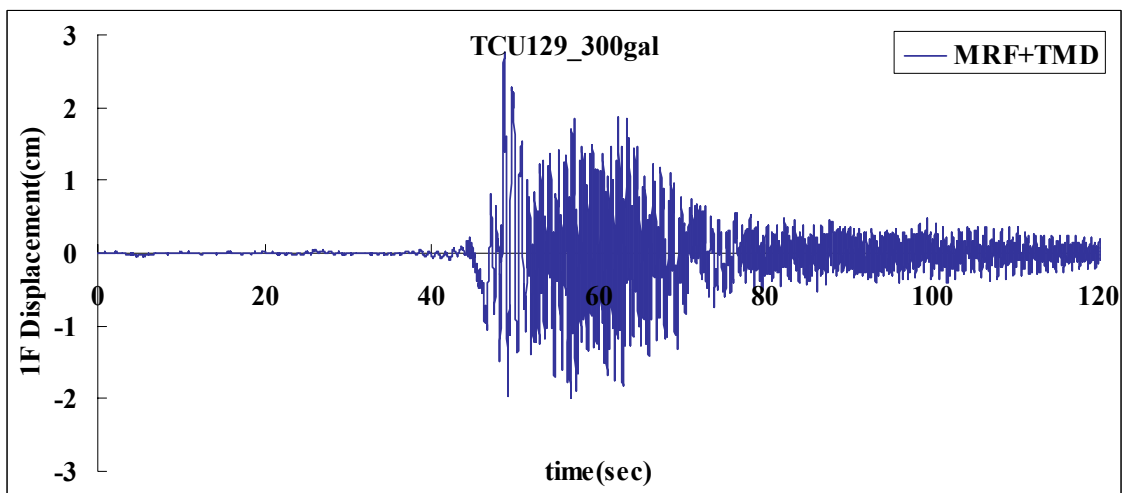


圖3.22(f) TCU129 300gal 加裝PTMD構架1F相對位移歷時

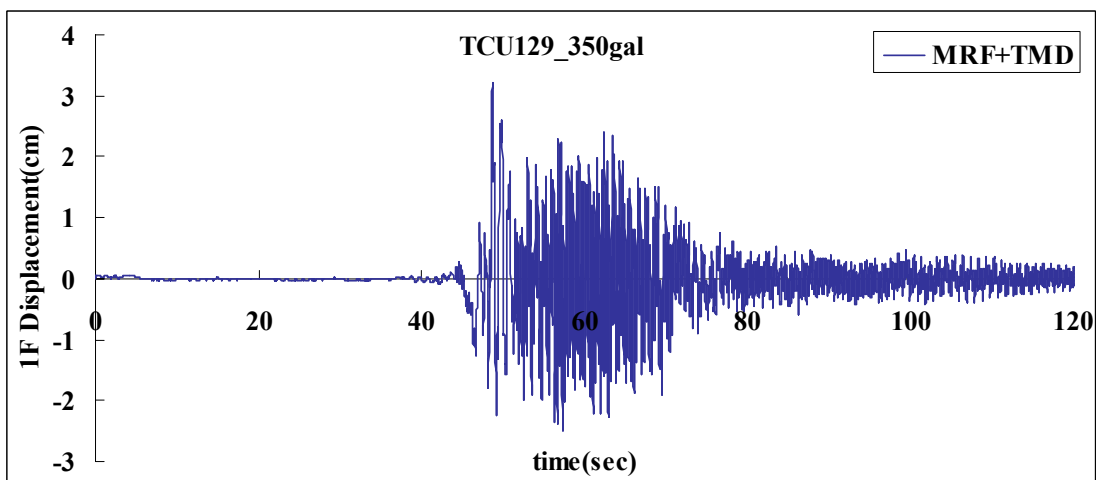


圖3.22(g) TCU129 350gal 加裝PTMD構架1F相對位移歷時

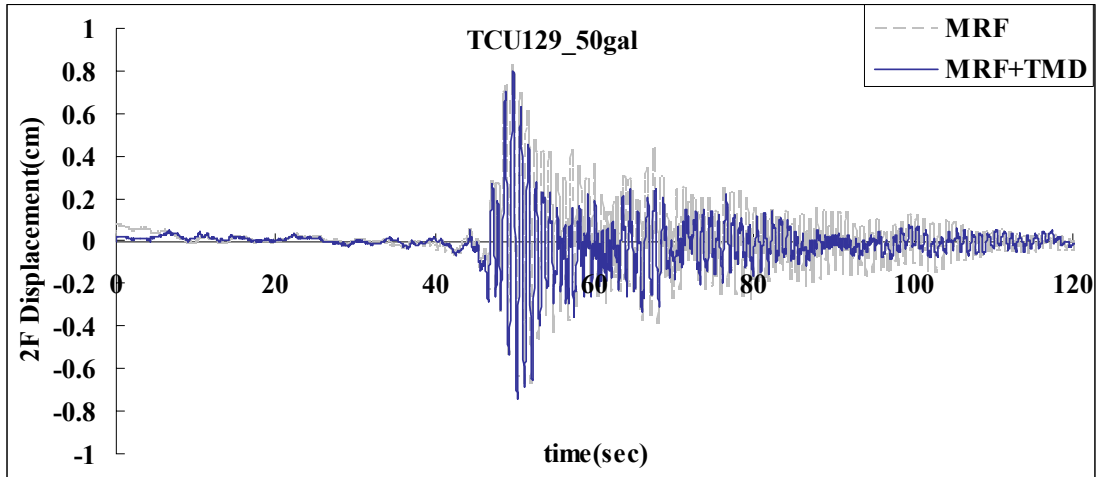


圖3.23(a) TCU129_50gal 2F相對位移比較

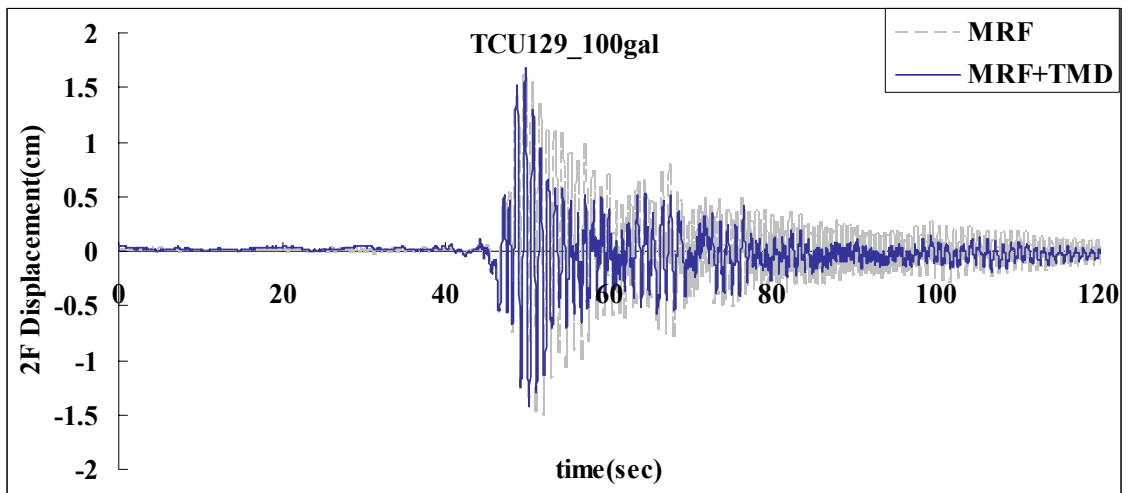


圖3.23(b) TCU129_100gal 2F相對位移比較

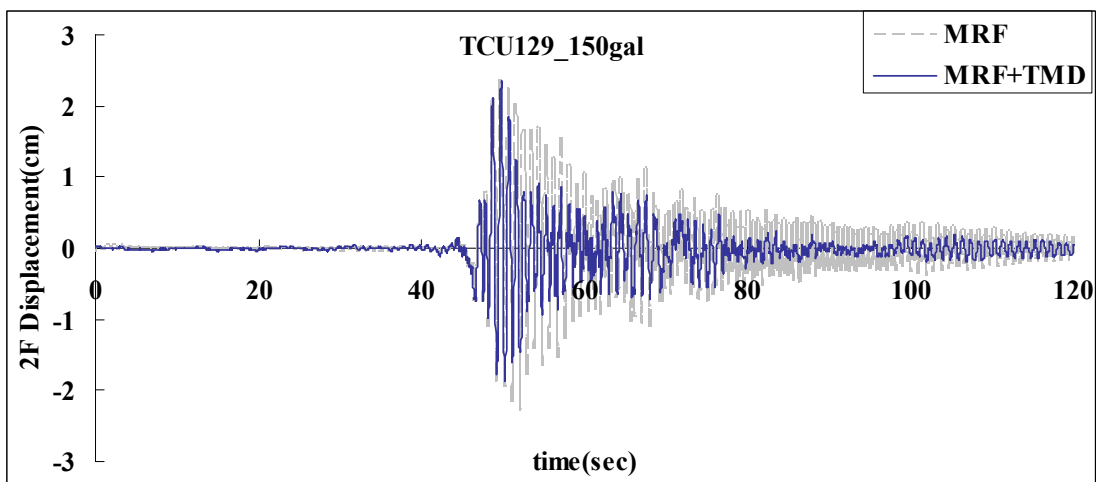


圖3.23(c) TCU129_150gal 2F相對位移比較

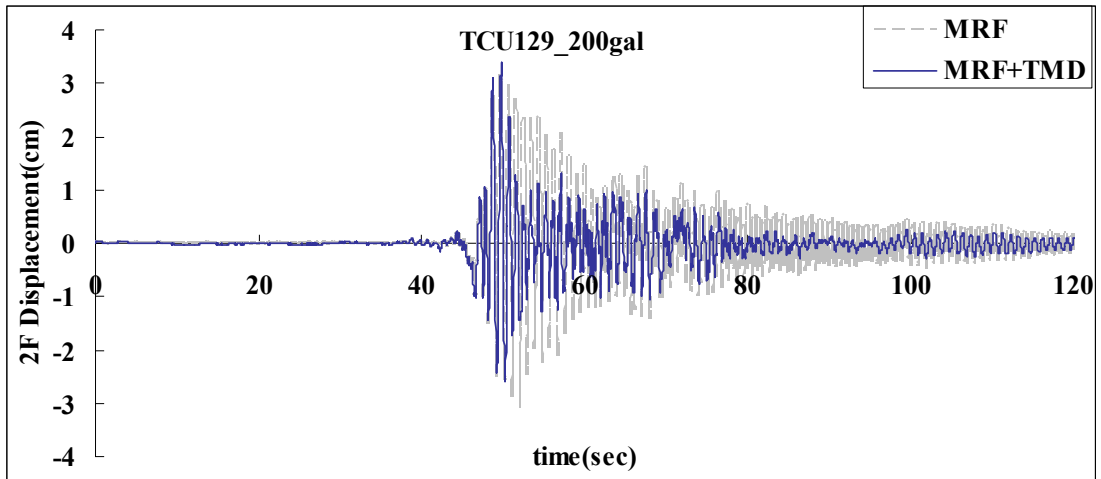


圖3.23(d) TCU129_200gal 2F相對位移比較

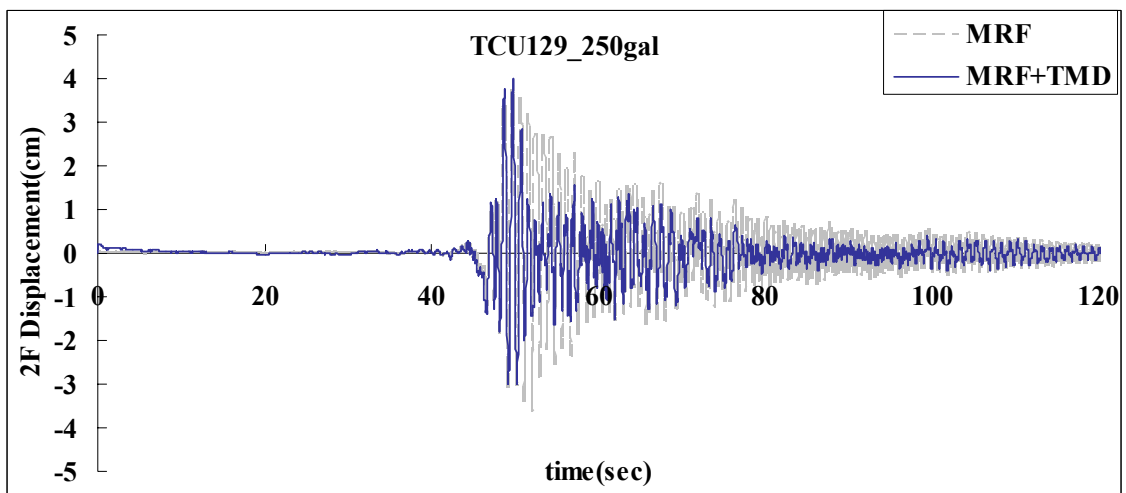


圖3.23(e) TCU129_250gal 2F相對位移比較

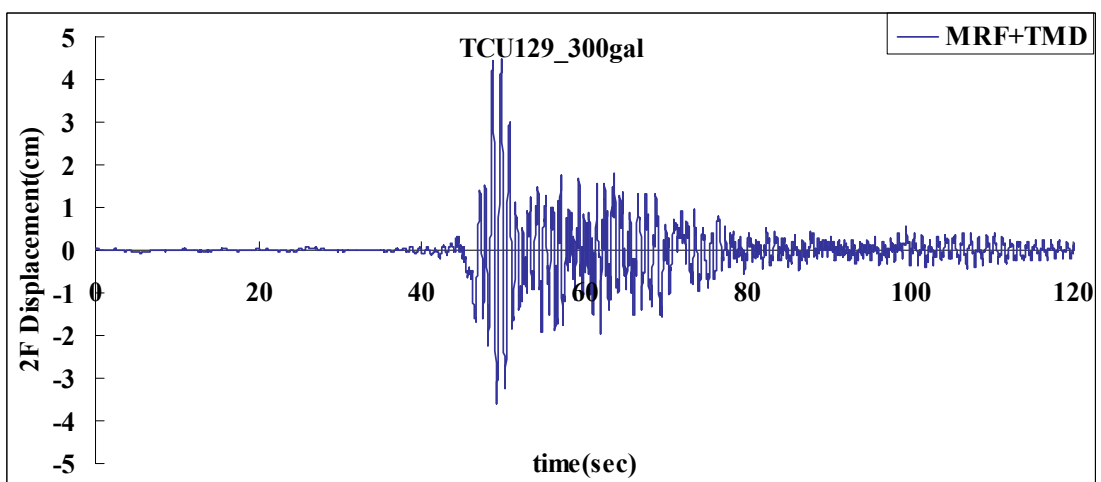


圖3.23(f) TCU129 300gal 加裝PTMD構架2F相對位移歷時

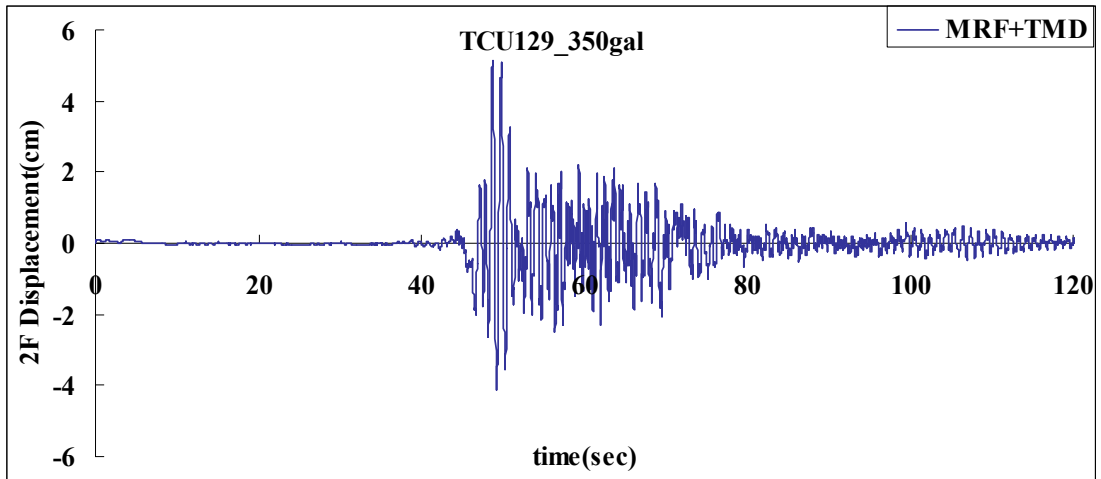


圖3.23(g) TCU129 350gal 加裝PTMD構架2F相對位移歷時

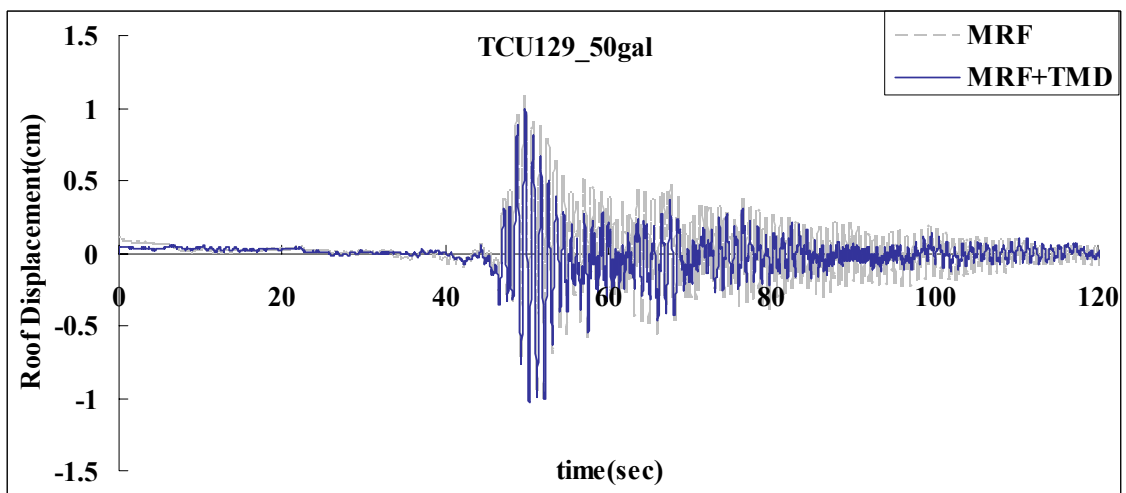


圖3.24(a) TCU129_50gal 頂層相對位移比較

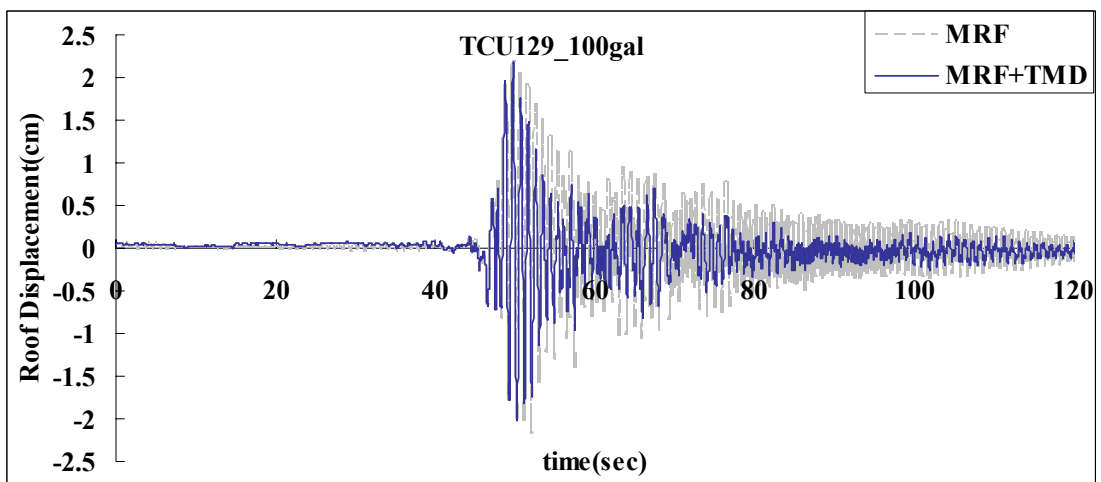


圖3.24(b) TCU129_100gal 頂層相對位移比較

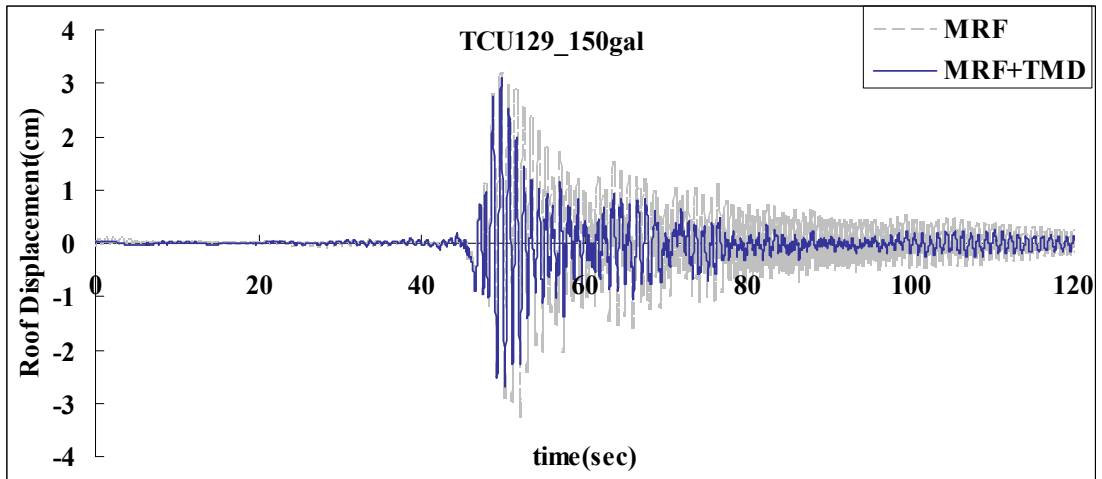


圖3.24(c) TCU129_150gal 頂層相對位移比較

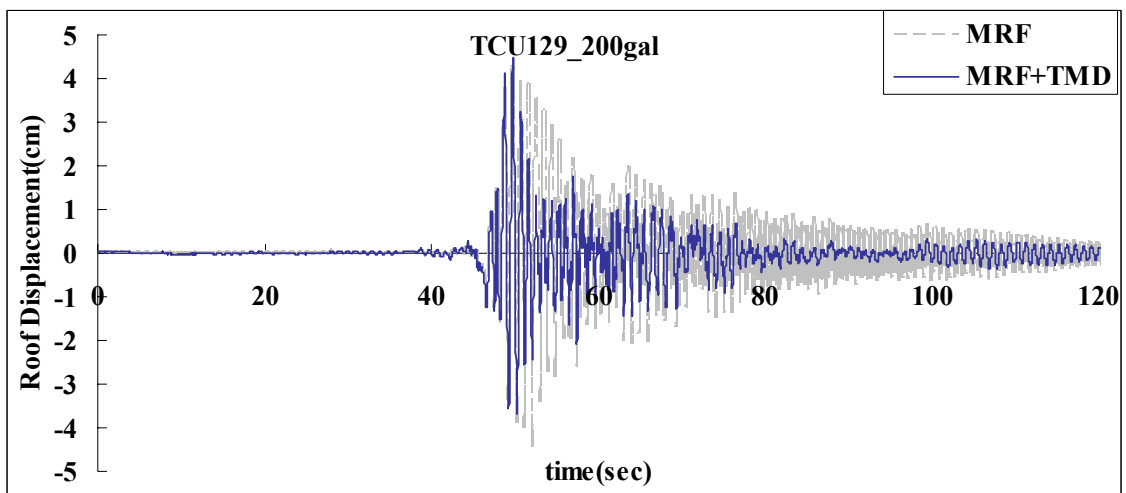


圖3.24(d) TCU129_200gal 頂層相對位移比較

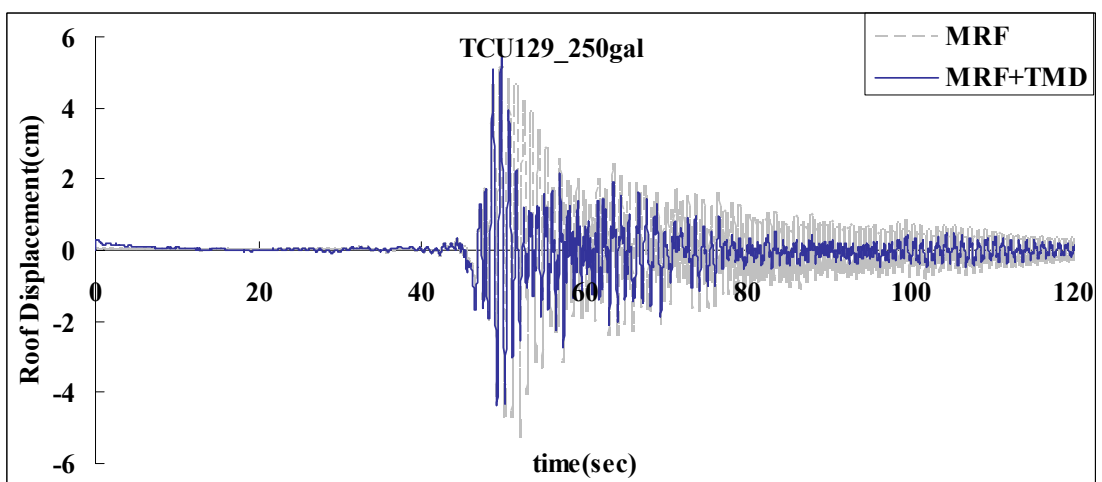


圖3.24(e) TCU129_250gal 頂層相對位移比較

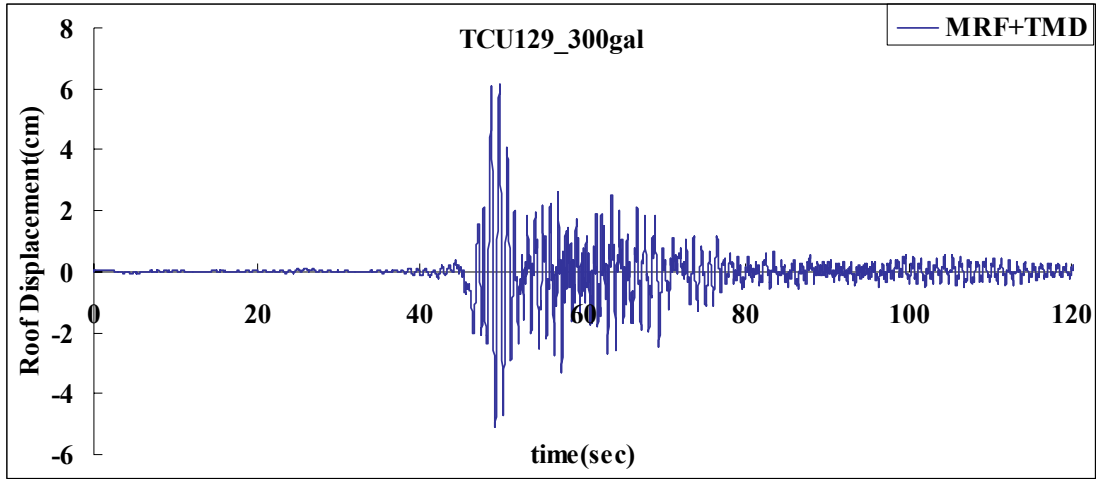


圖3.24(f) TCU129_300gal 加裝PTMD構架頂層相對位移歷時

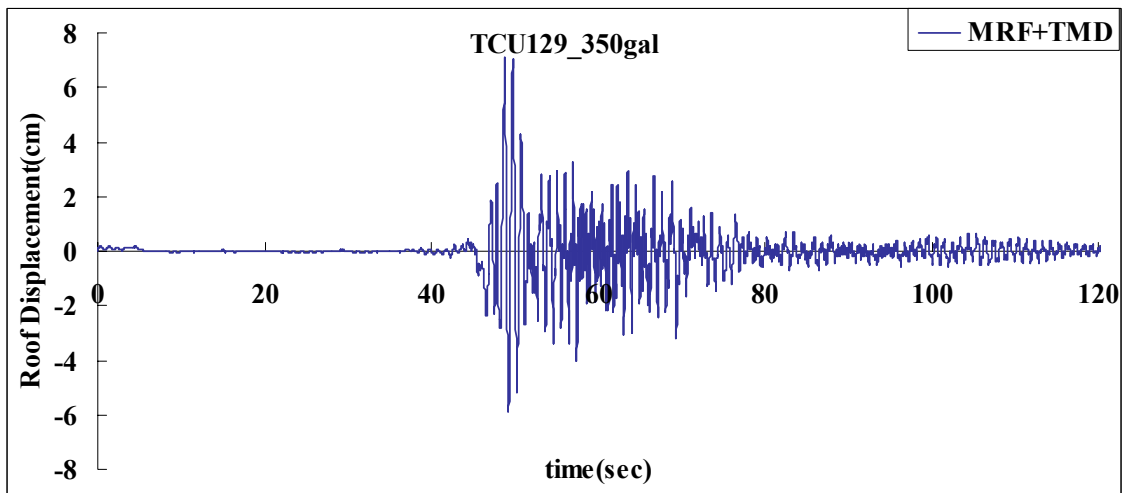


圖3.24(g) TCU129_350gal 加裝PTMD構架頂層相對位移歷時

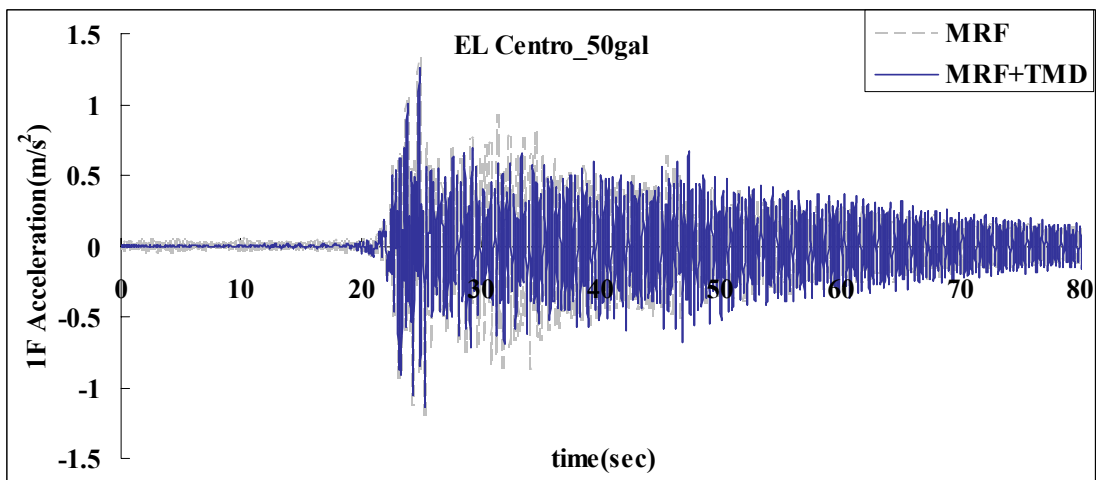


圖3.25(a) EL Centro50gal 1F絕對加速度比較

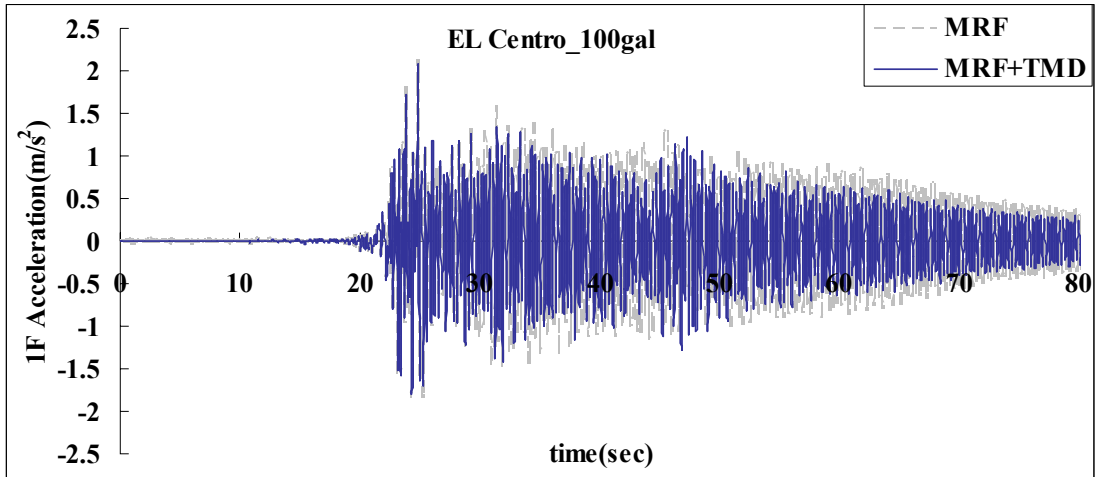


圖3.25(b) EL Centro100gal 1F絕對加速度比較

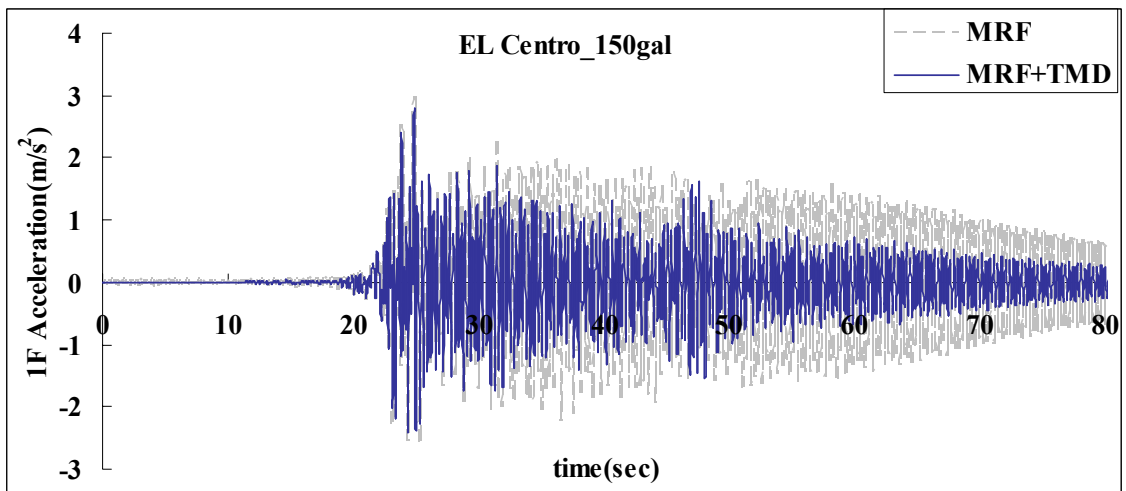


圖3.25(c) EL Centro150gal 1F絕對加速度比較

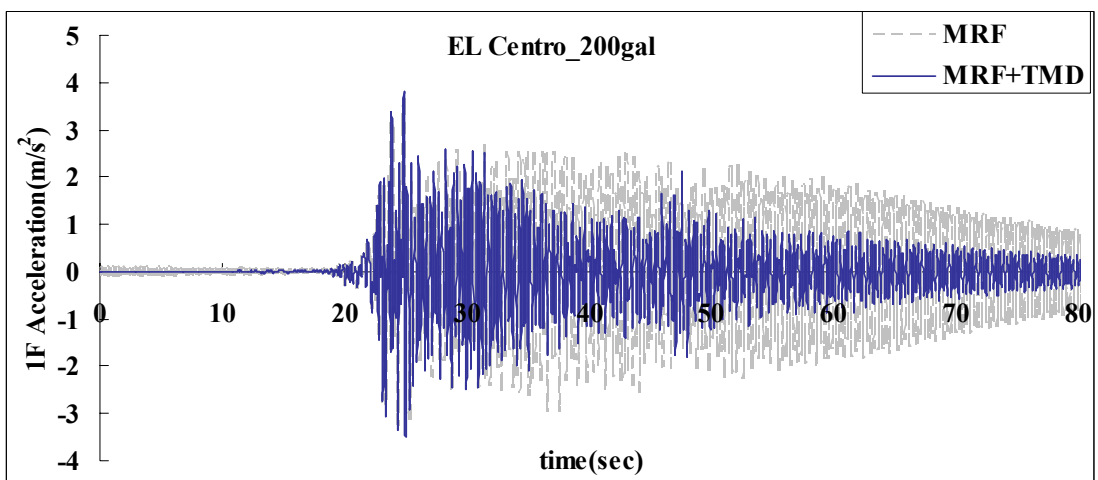


圖3.25(d) EL Centro200gal 1F絕對加速度比較

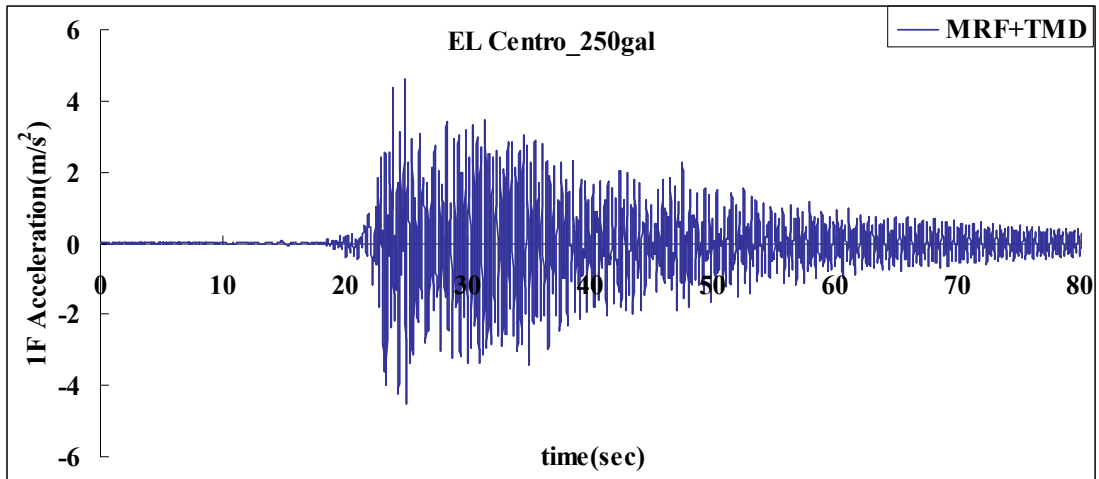


圖3.25(e) EL Centro_250gal 加裝PTMD構架1F絕對加速度歷時

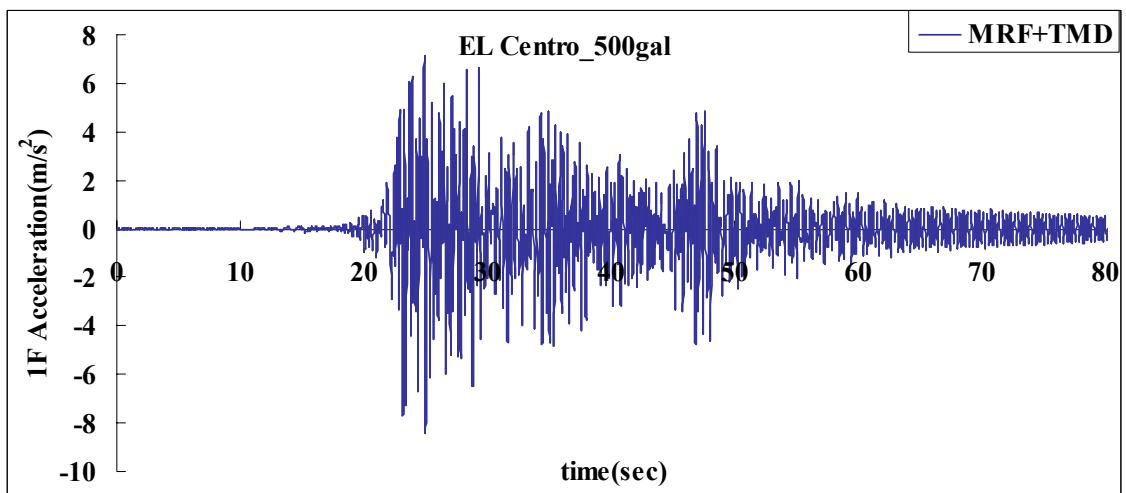


圖3.25(f) EL Centro_500gal 加裝PTMD構架1F絕對加速度歷時

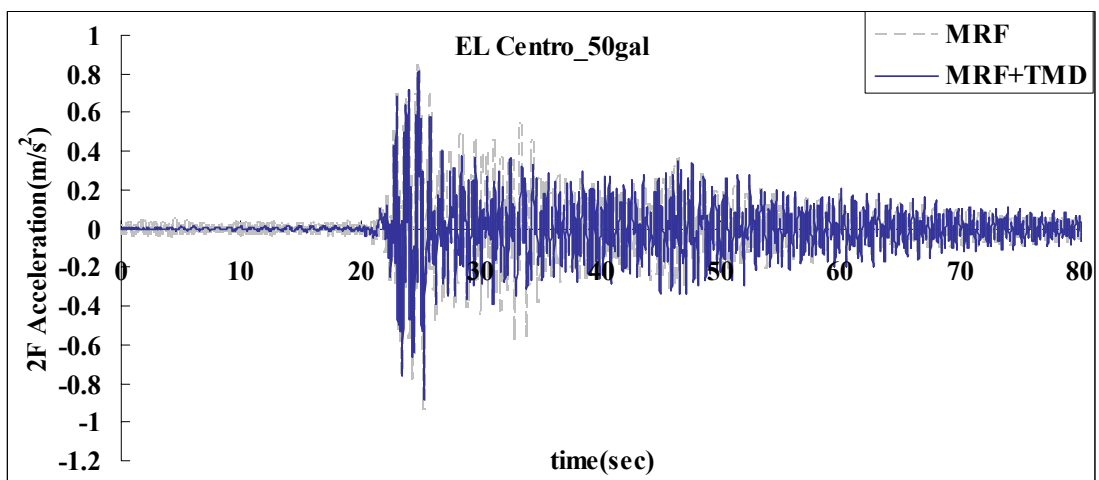


圖3.26(a) EL Centro50gal 2F絕對加速度比較

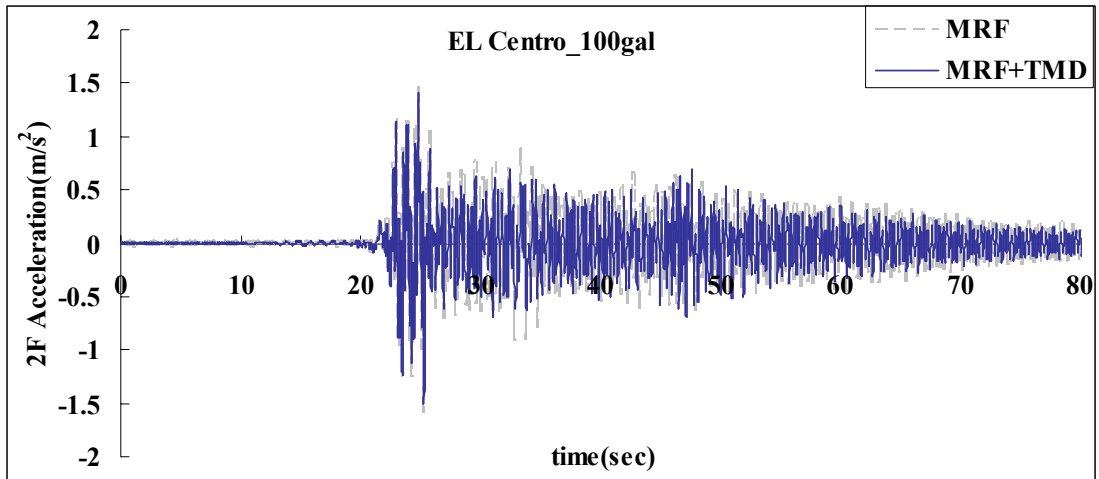


圖3.26(b) EL Centro100gal 2F絕對加速度比較

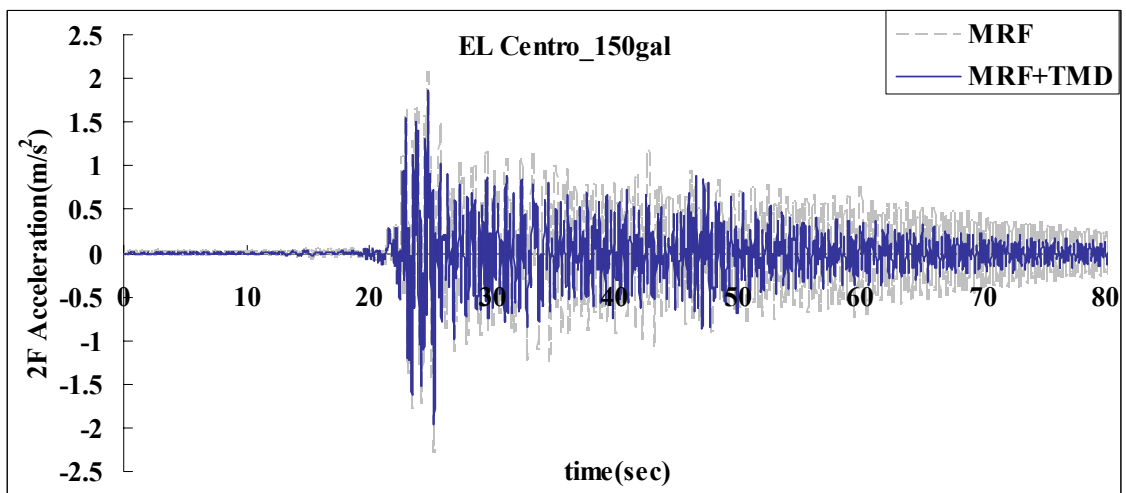


圖3.26(c) EL Centro150gal 2F絕對加速度比較

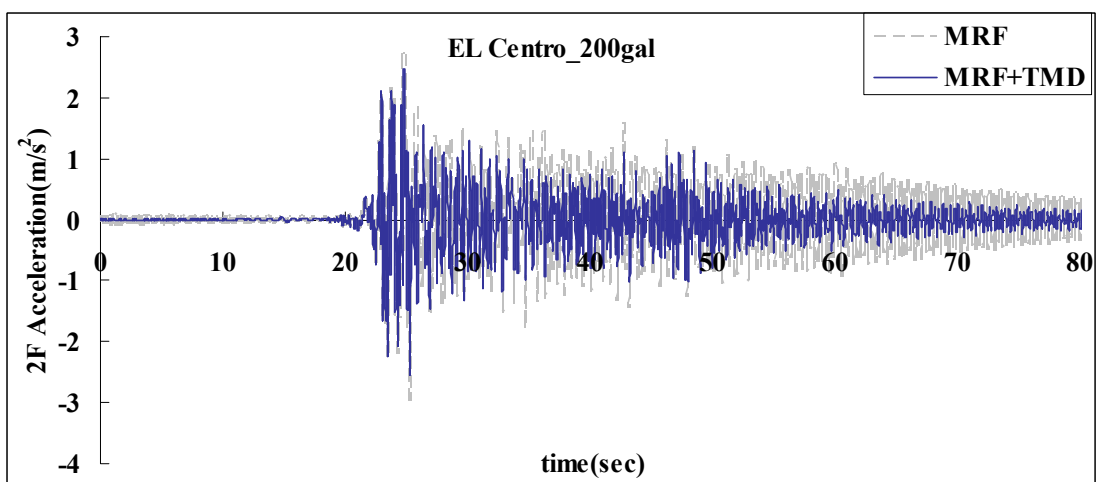


圖3.26(d) EL Centro200gal 2F絕對加速度比較

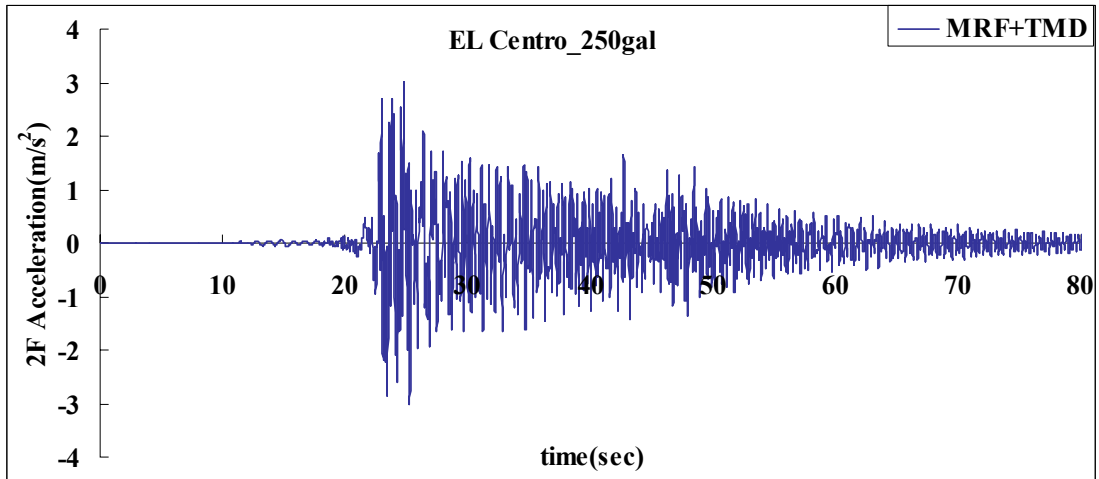


圖3.26(e) EL Centro_250gal 加裝PTMD構架2F絕對加速度歷時

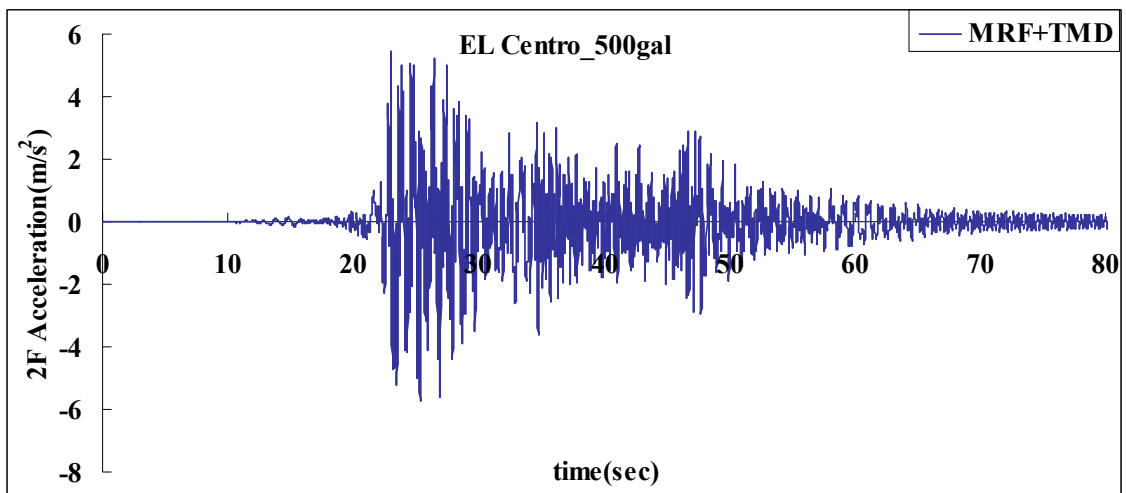


圖3.26(f) EL Centro_500gal 加裝PTMD構架2F絕對加速度歷時

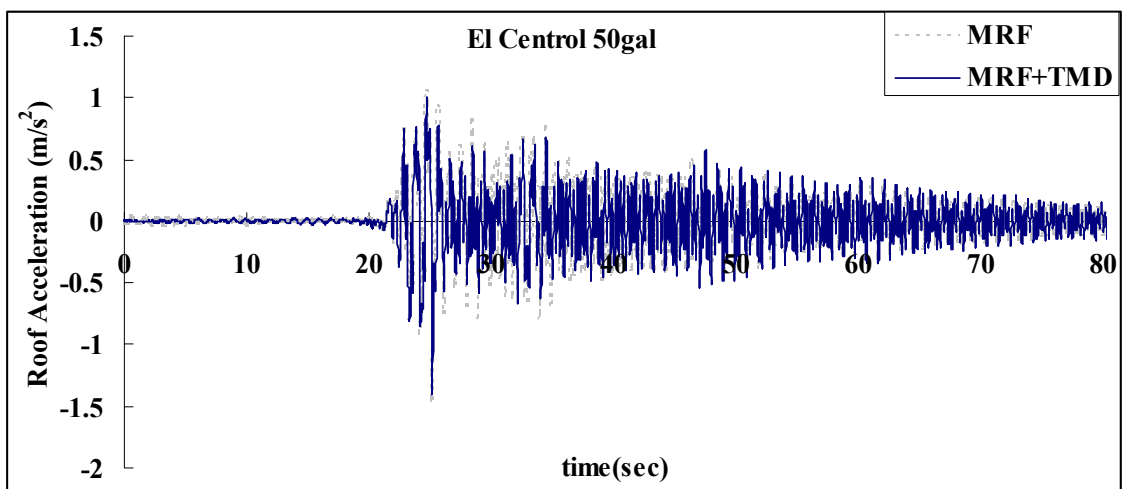


圖3.27(a) EL Centro50gal 頂層絕對加速度比較

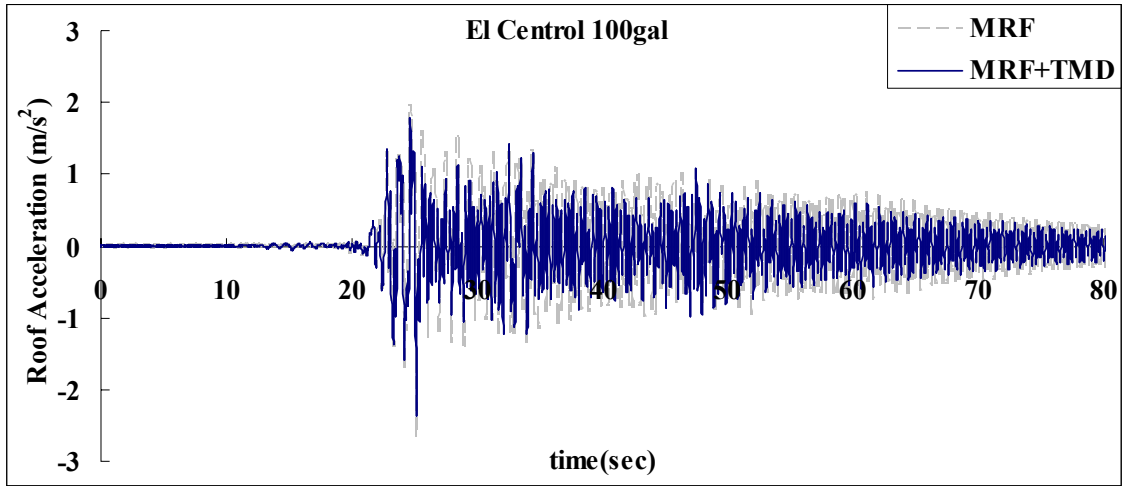


圖3.27(b) EL Centro100gal 頂層絕對加速度比較

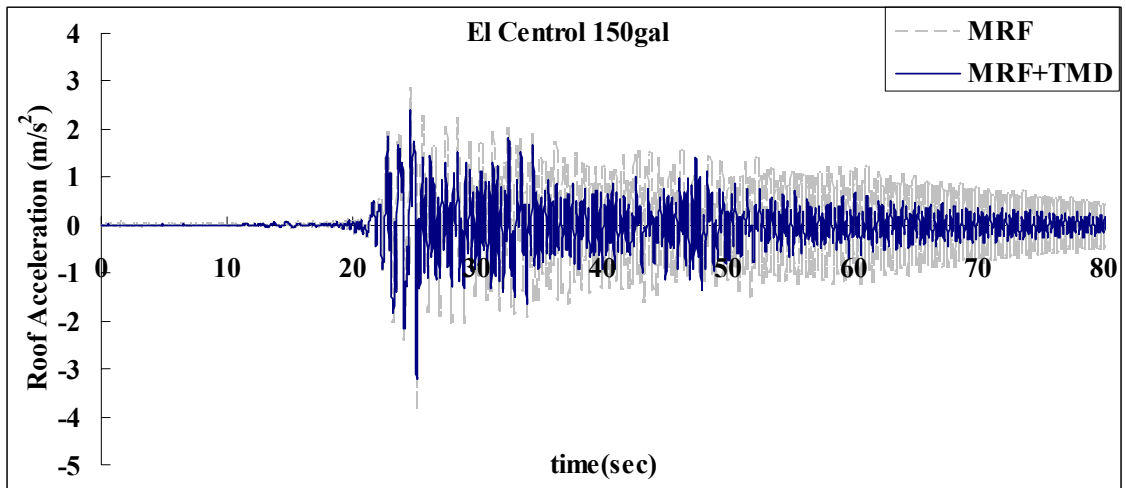


圖3.27(c) EL Centro150gal 頂層絕對加速度比較

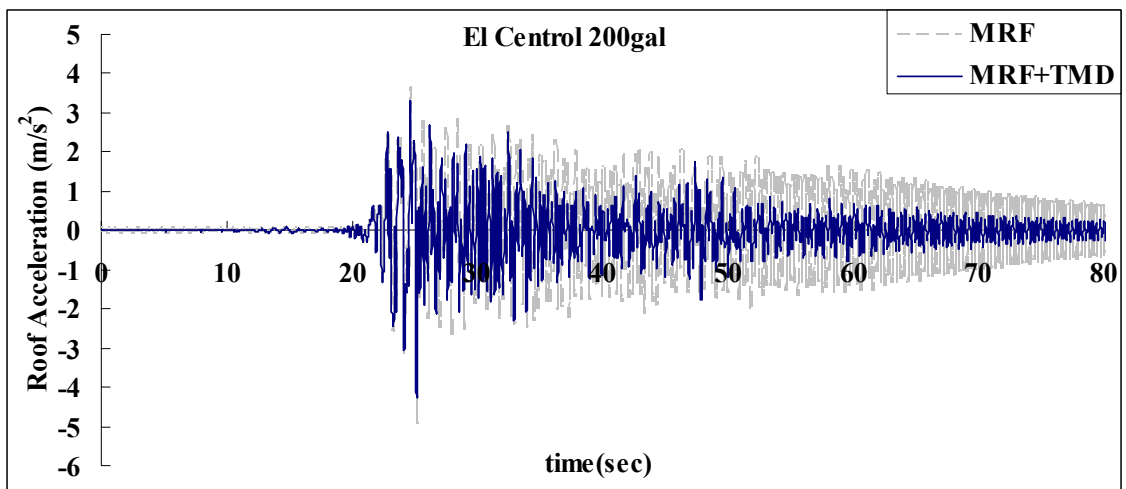


圖3.27(d) EL Centro200gal 頂層絕對加速度比較

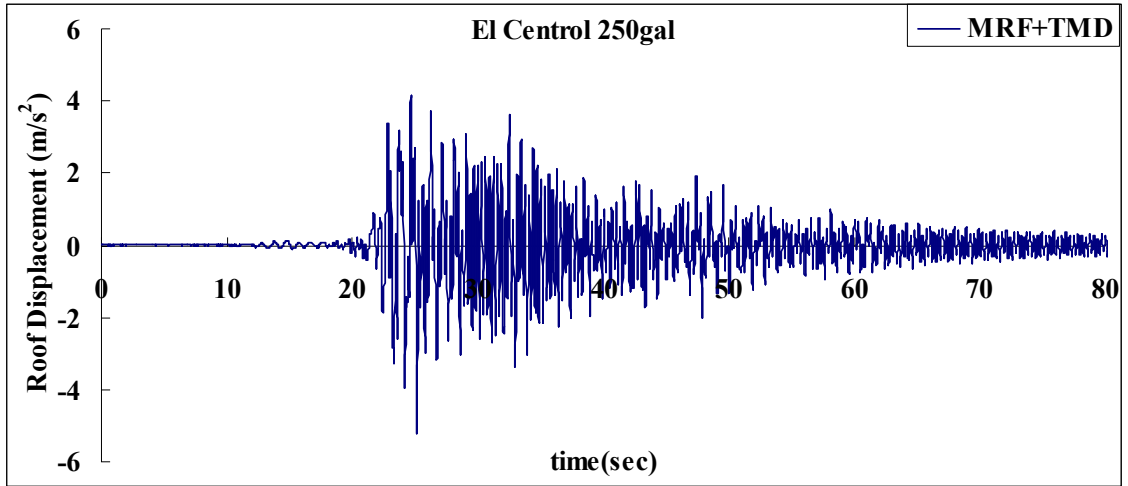


圖3.27(e) EL Centro 250gal 加裝PTMD構架頂層絕對加速度歷時

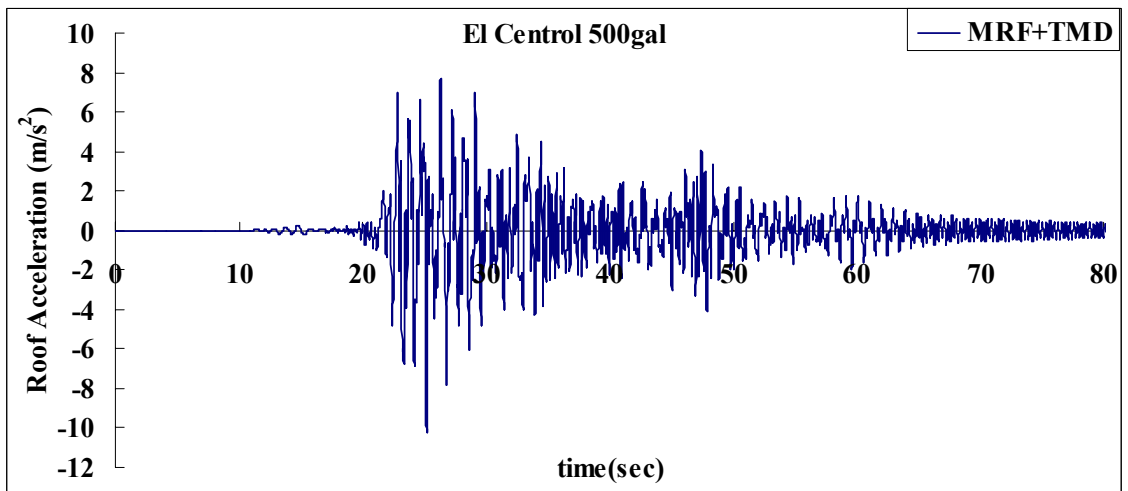


圖3.27(f) EL Centro 500gal 加裝PTMD構架頂層絕對加速度歷時

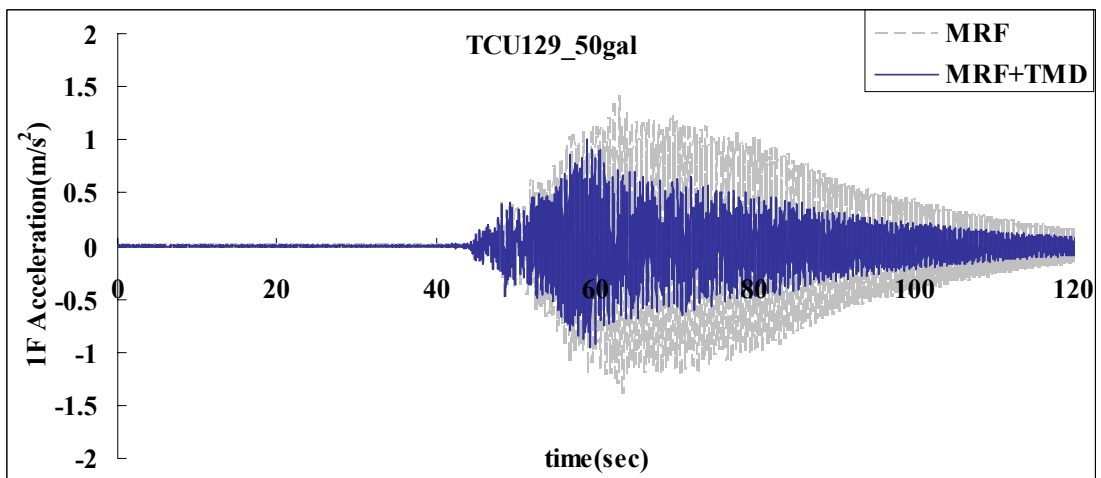


圖3.28(a) TCU129_50gal 1F絕對加速度比較

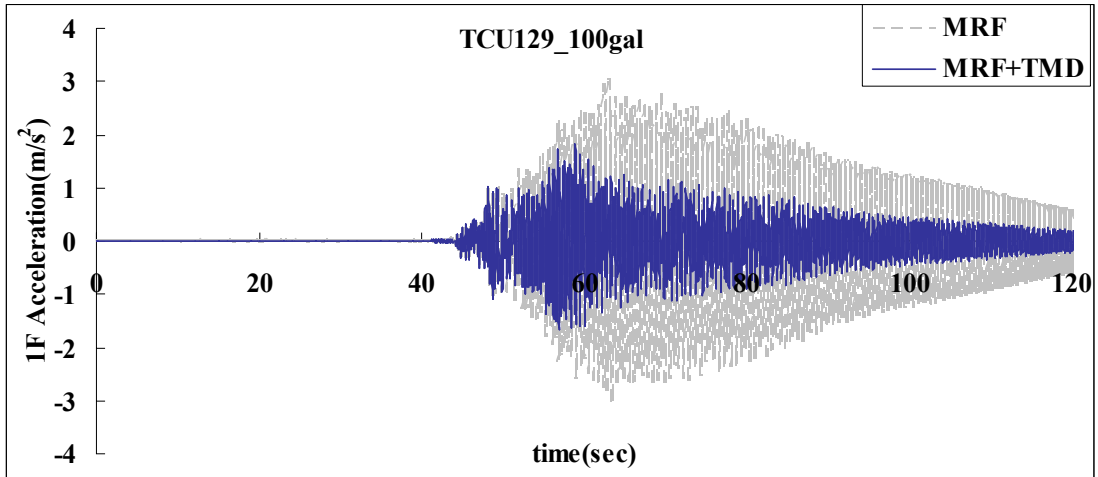


圖3.28(b) TCU129_100gal 1F絕對加速度比較

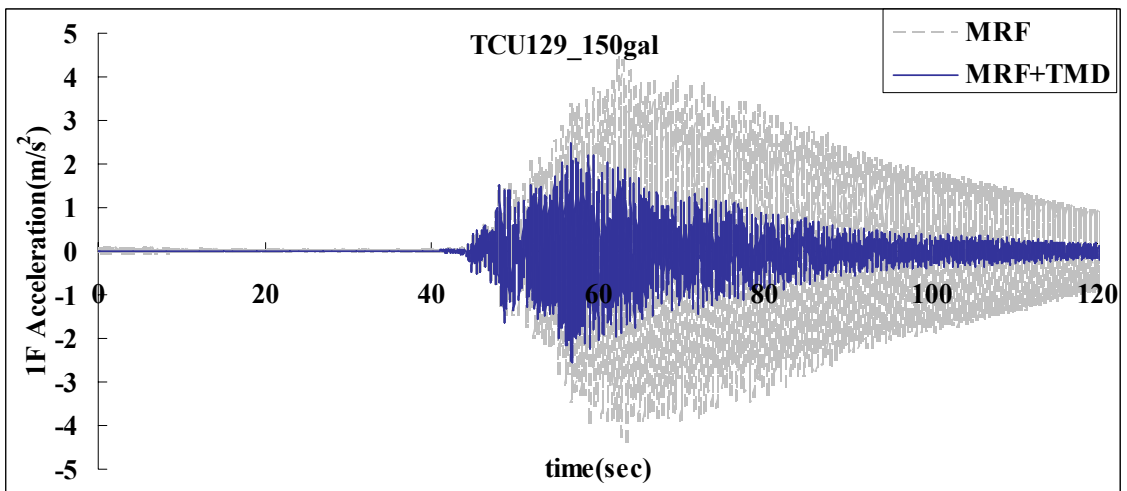


圖3.28(c) TCU129_150gal 1F絕對加速度比較

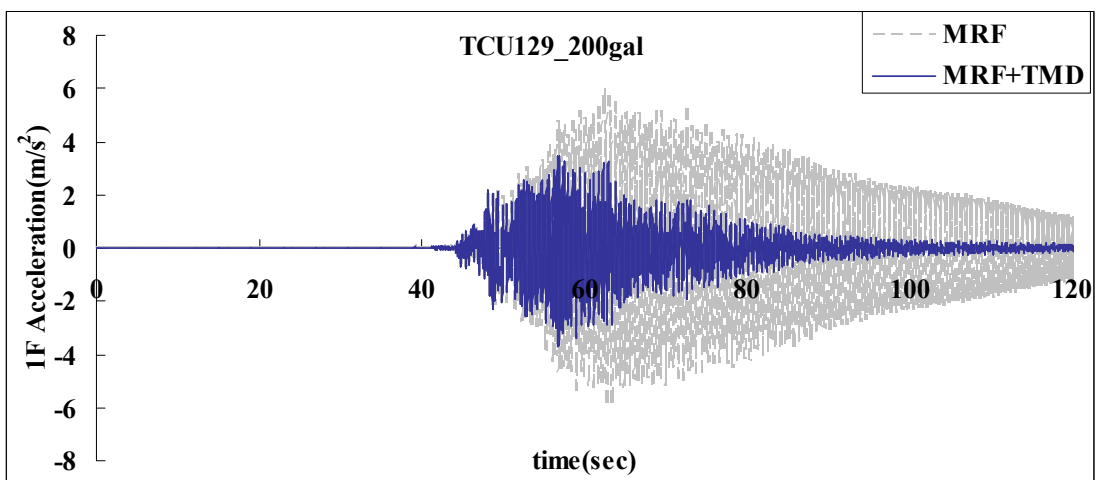


圖3.28(d) TCU129_200gal 1F絕對加速度比較

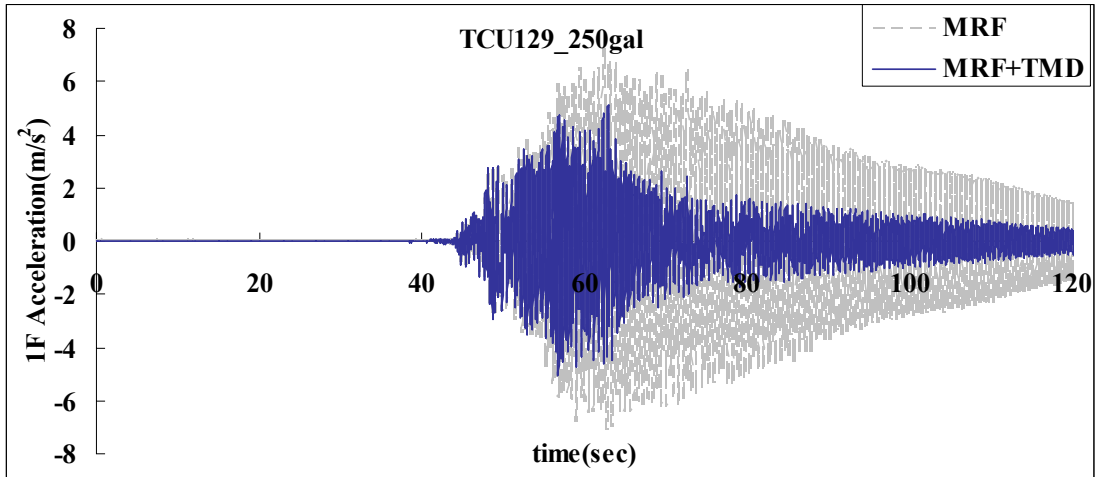


圖3.28(e) TCU129_250gal 1F絕對加速度比較

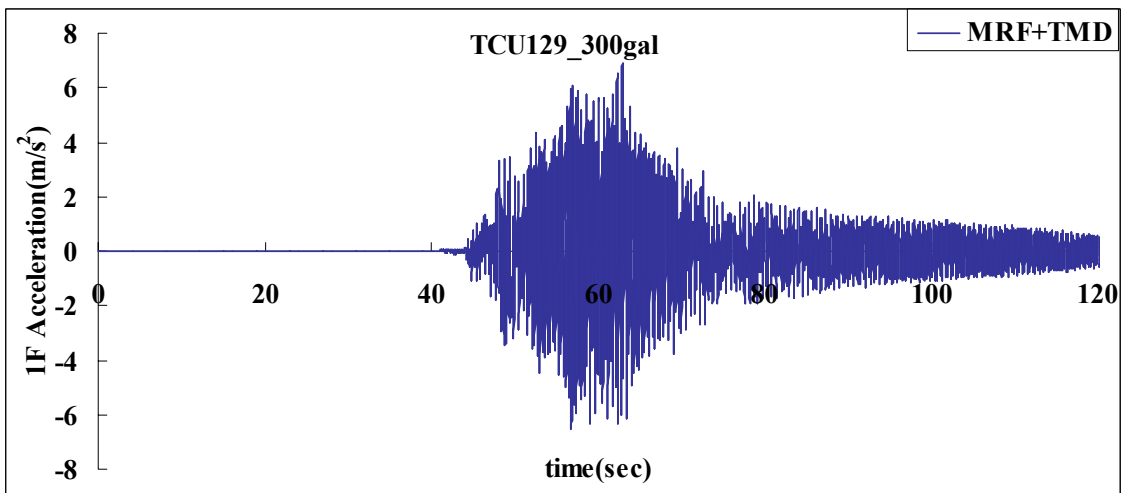


圖3.28(f) TCU129_300gal 加裝PTMD構架1F絕對加速度歷時

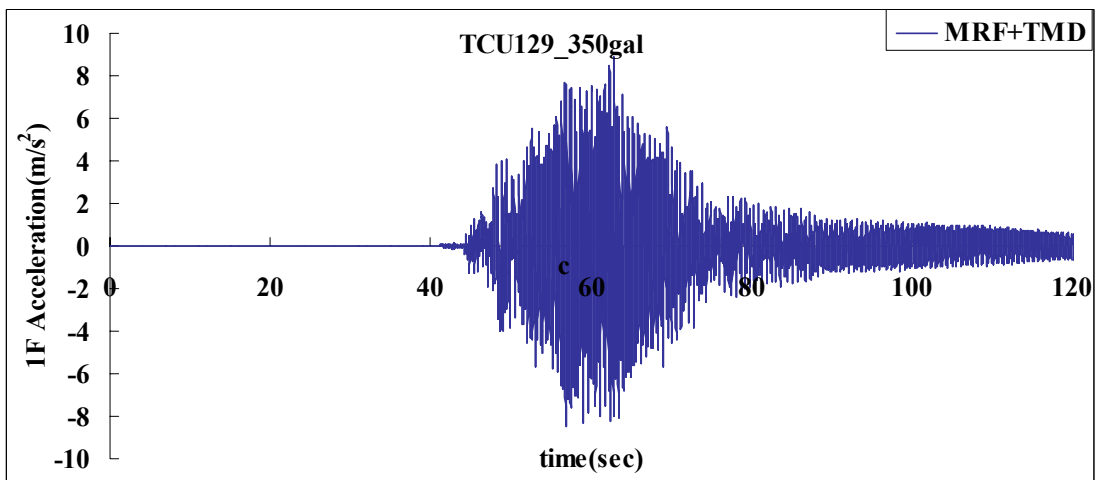


圖3.28(g) TCU129_350gal 加裝PTMD構架1F絕對加速度歷時

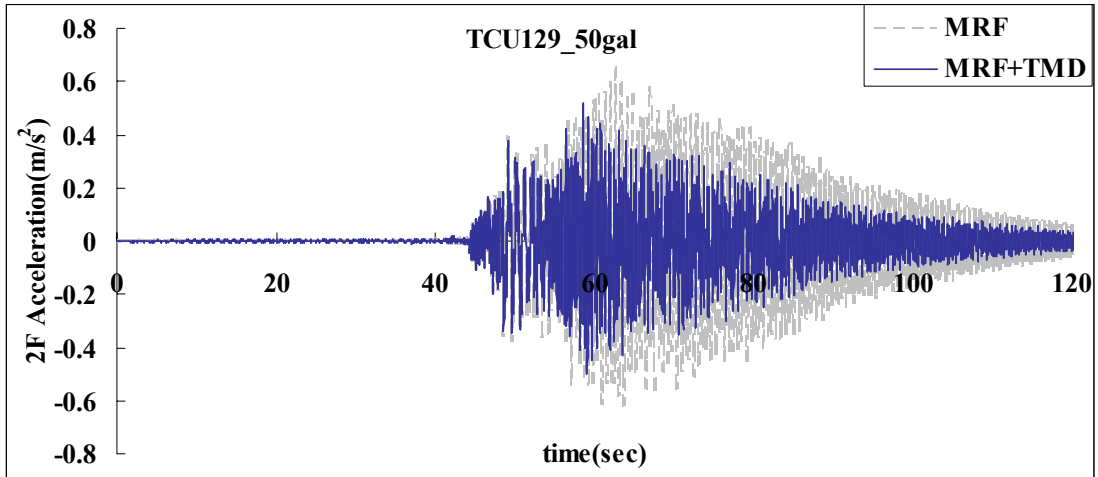


圖3.29(a) TCU129_50gal 2F絕對加速度比較

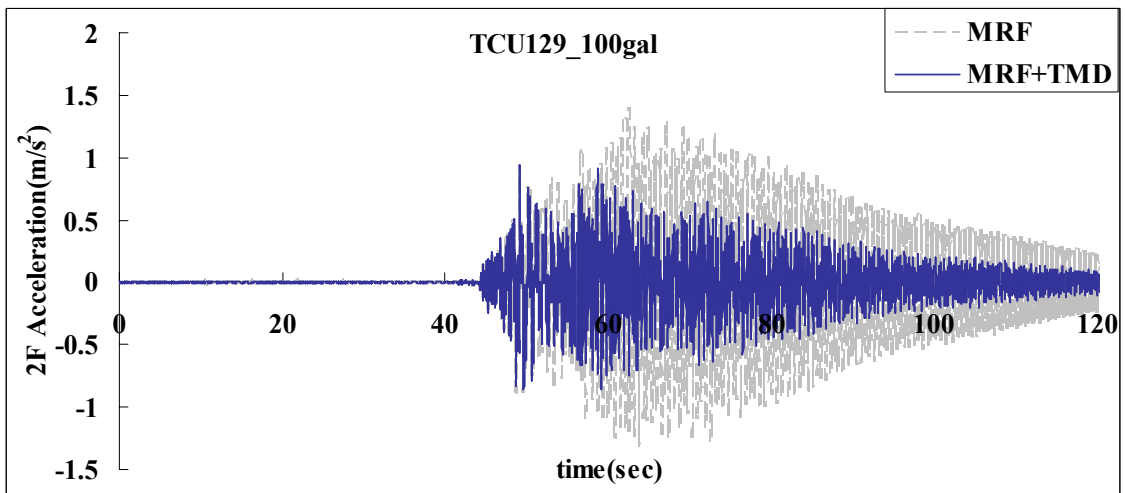


圖3.29(b) TCU129_100gal 2F絕對加速度比較

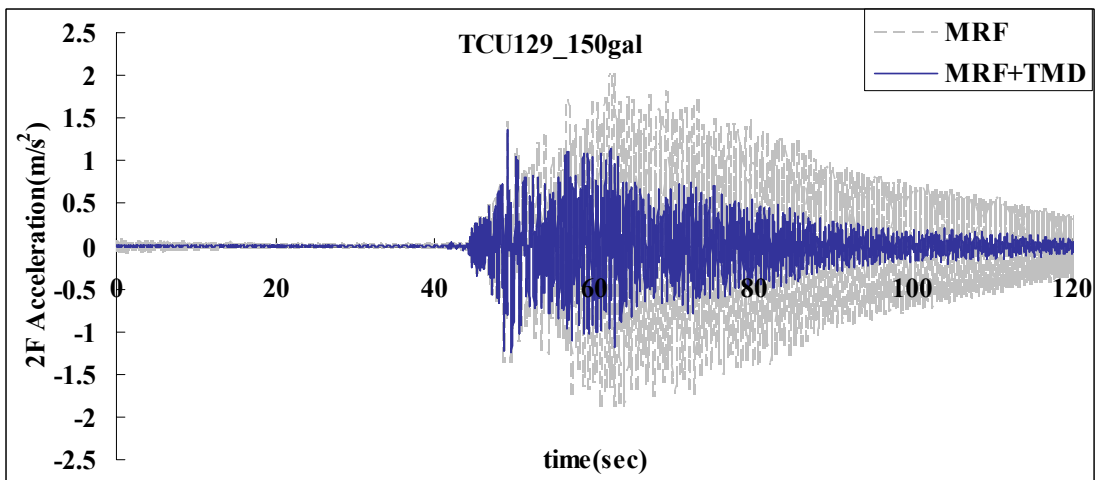


圖3.29(c) TCU129_150gal 2F絕對加速度比較

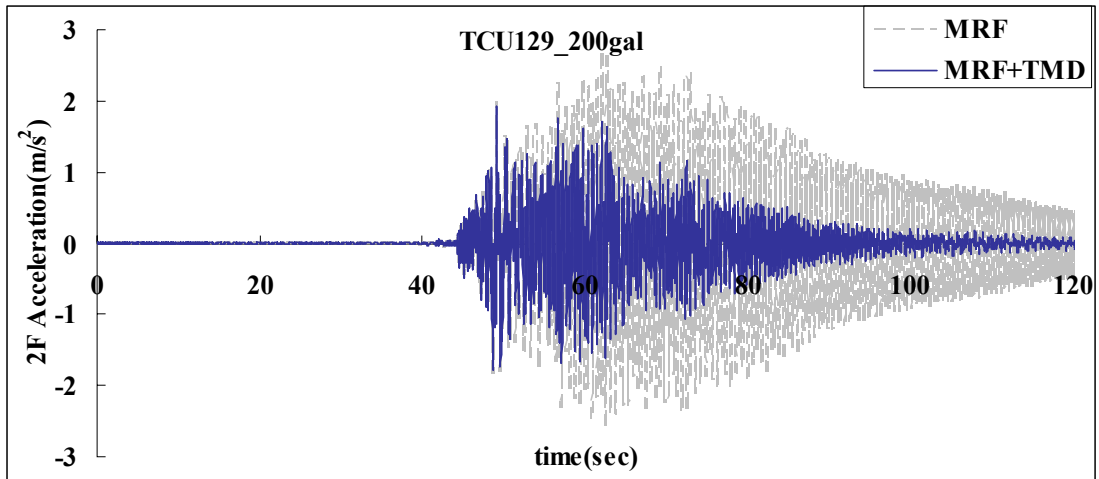


圖3.29(d) TCU129_200gal 2F絕對加速度比較

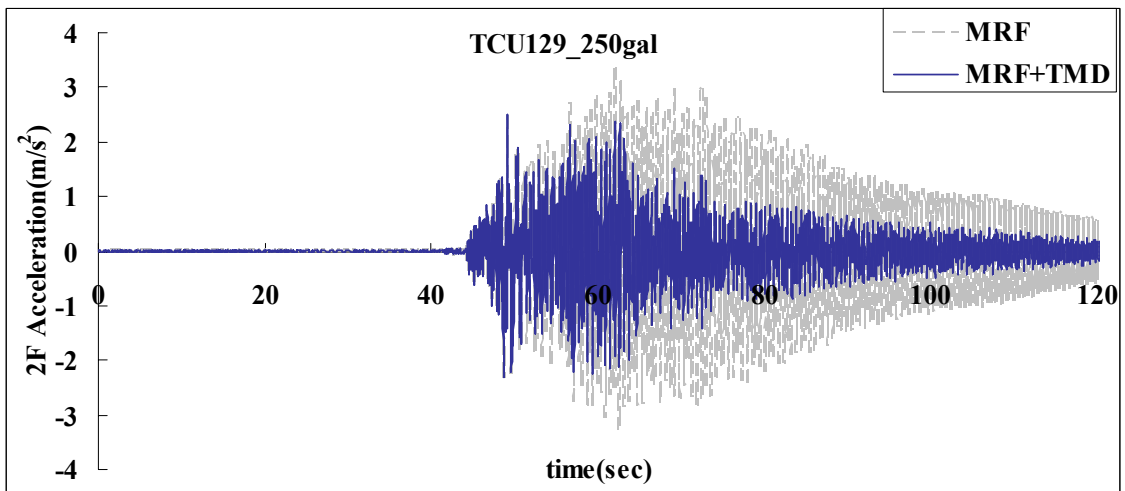


圖3.29(e) TCU129_250gal 2F絕對加速度比較

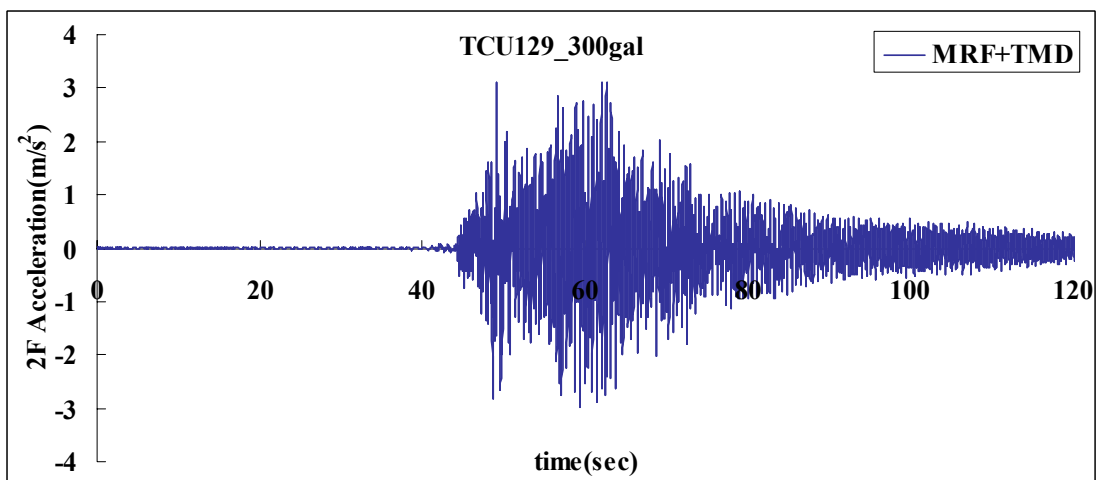


圖3.29(f) TCU129_300gal 加裝PTMD構架2F絕對加速度歷時

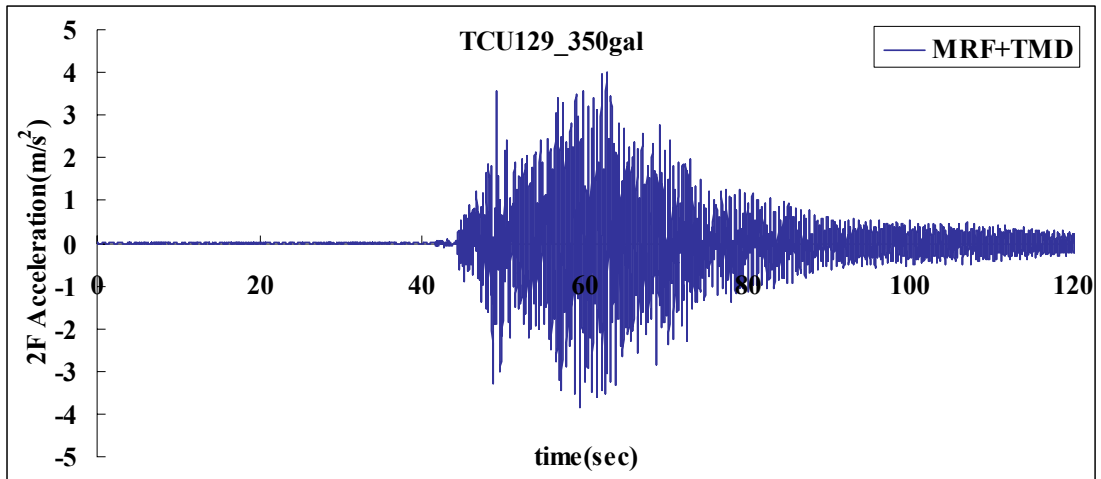


圖3.29(g) TCU129_350gal 加裝PTMD構架2F絕對加速度歷時

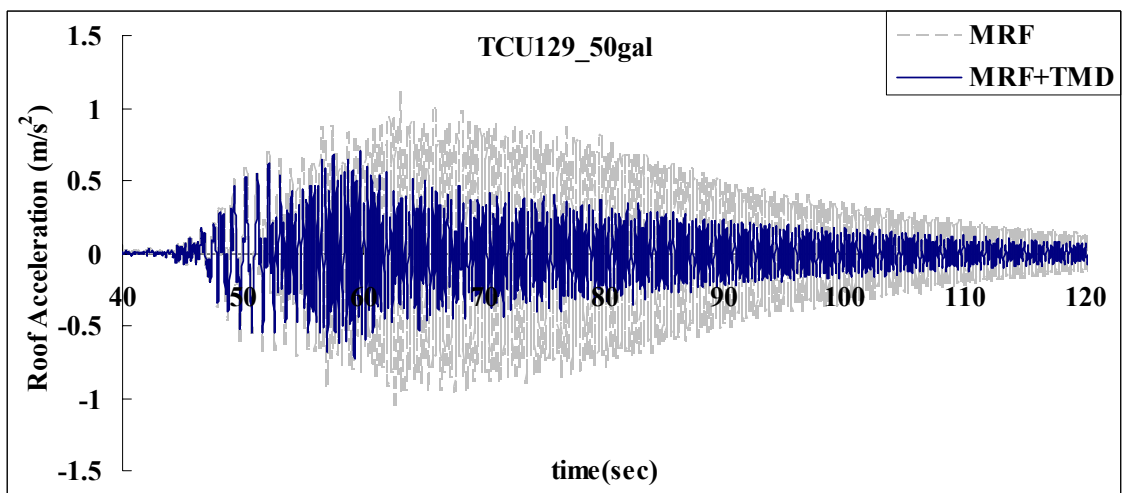


圖3.30(a) TCU129_50gal 頂層絕對加速度比較

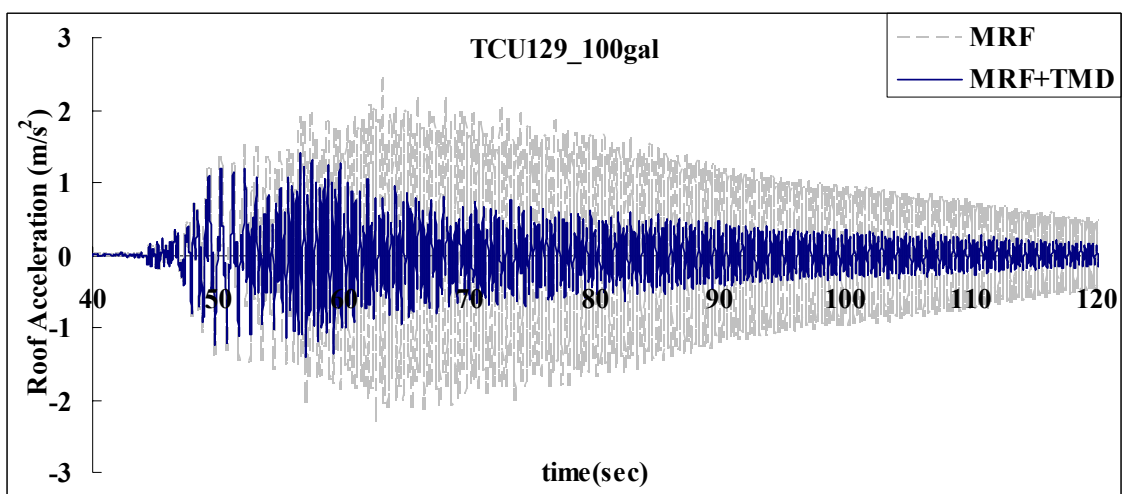


圖3.30(b) TCU129_100gal 頂層絕對加速度比較

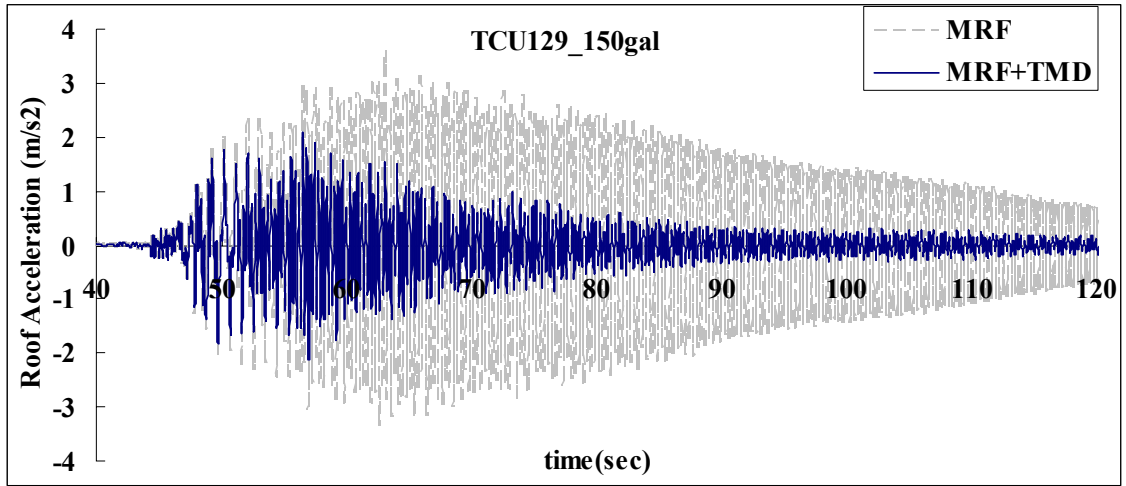


圖3.30(c) TCU129_150gal 頂層絕對加速度比較

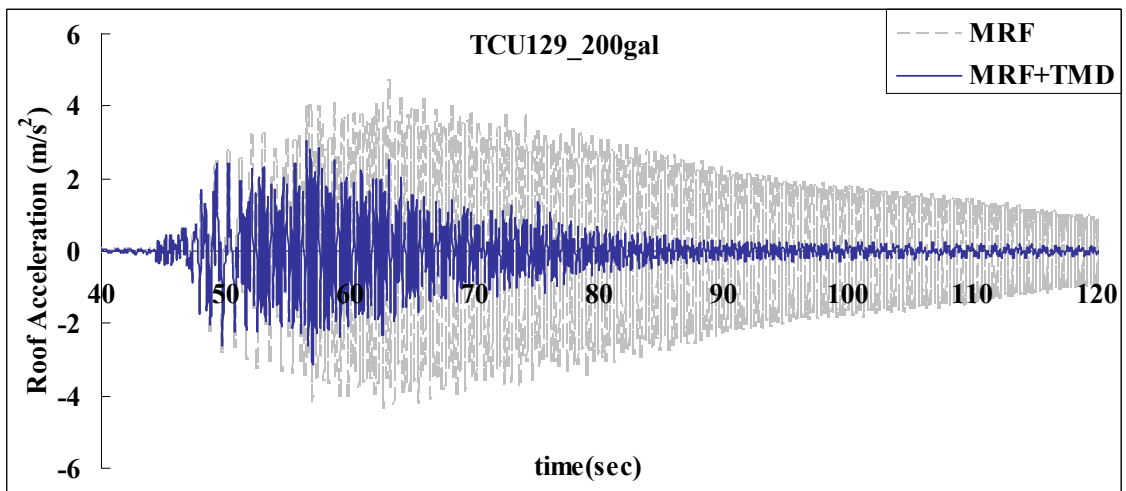


圖3.30(d) TCU129_200gal 頂層絕對加速度比較

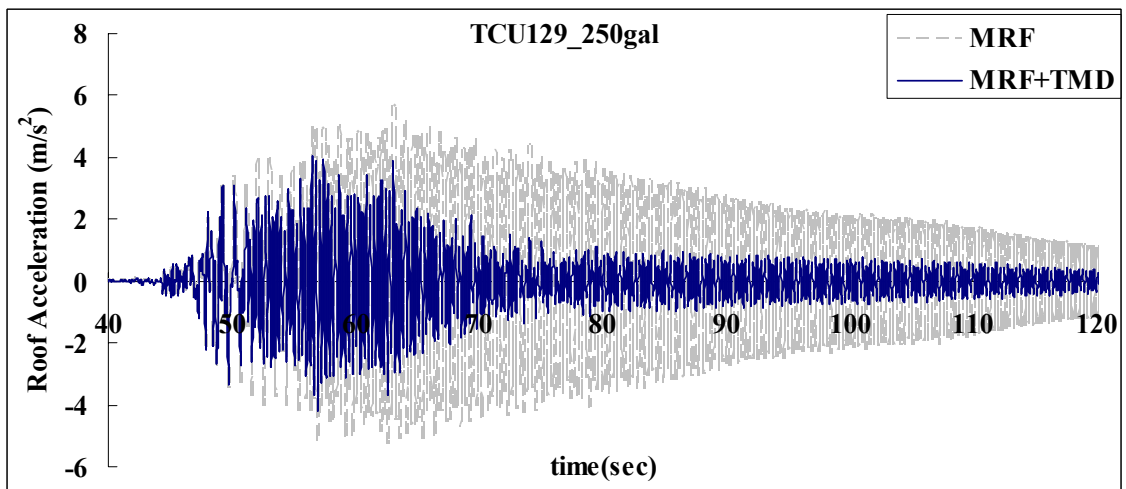


圖3.30(e) TCU129_250gal 頂層絕對加速度比較

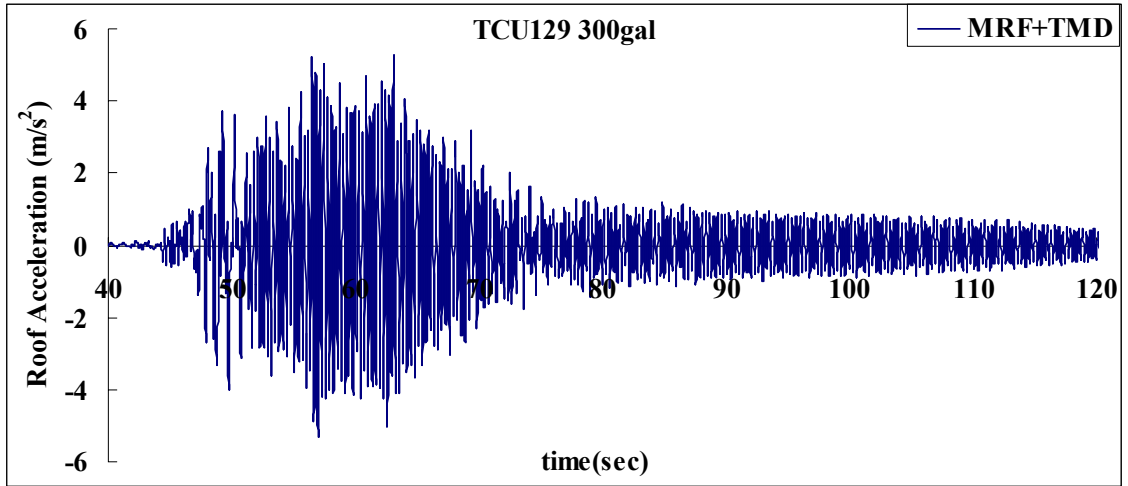


圖3.30(f) TCU129_300gal 加裝PTMD構架頂層絕對加速度歷時

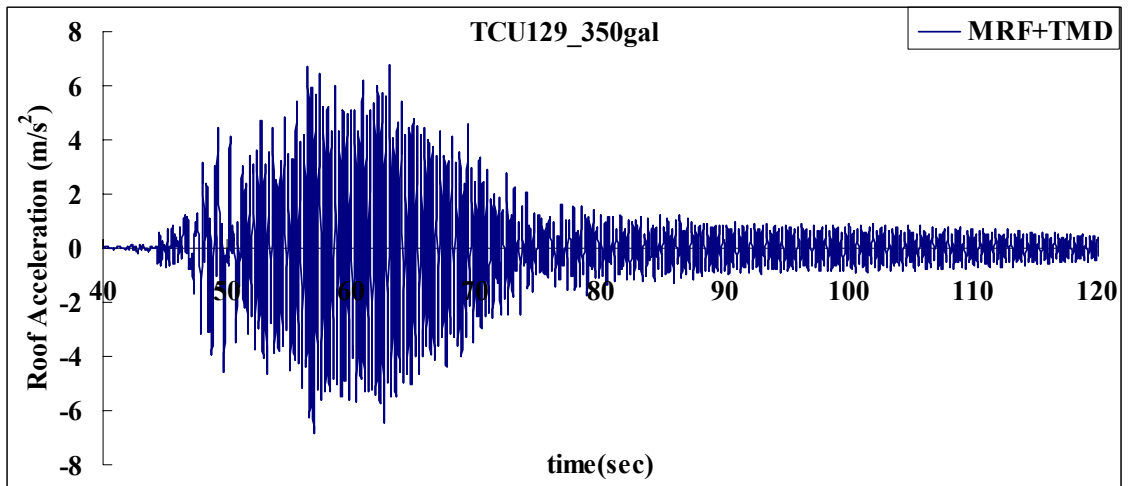


圖3.30(g) TCU129_350gal 加裝PTMD構架頂層絕對加速度歷時

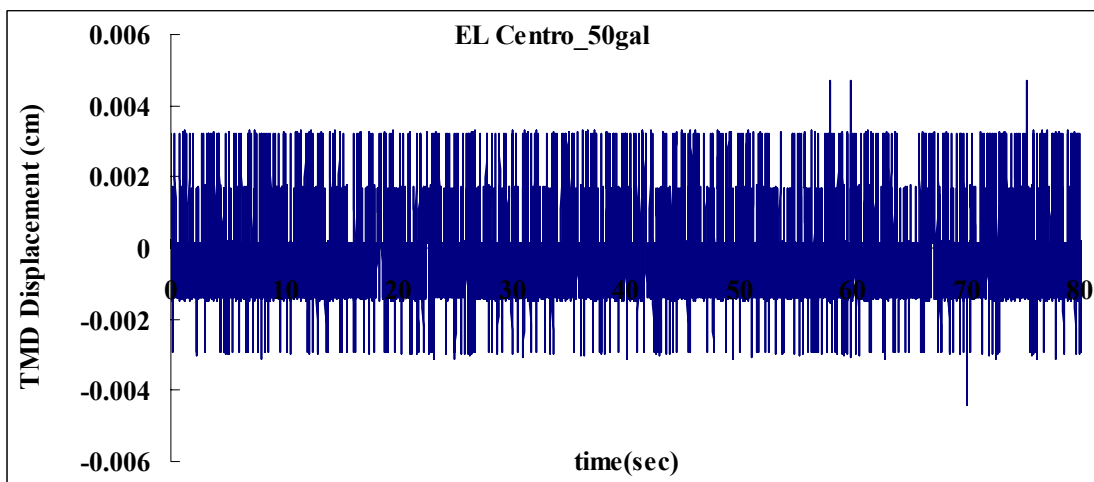


圖3.31(a) EL Centro_50gal TMD相對頂層位移歷時

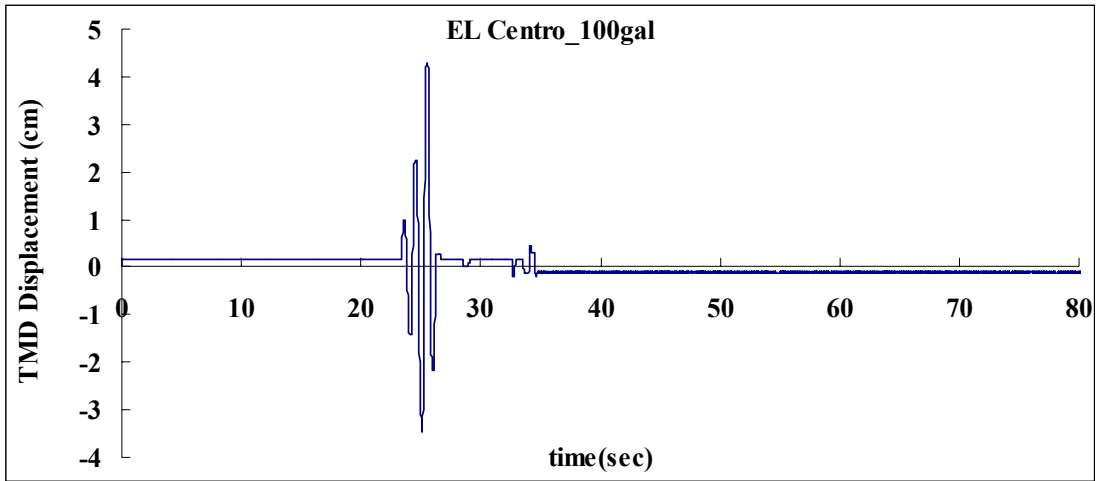


圖3.31(b) EL Centro_100gal TMD相對頂層位移歷時

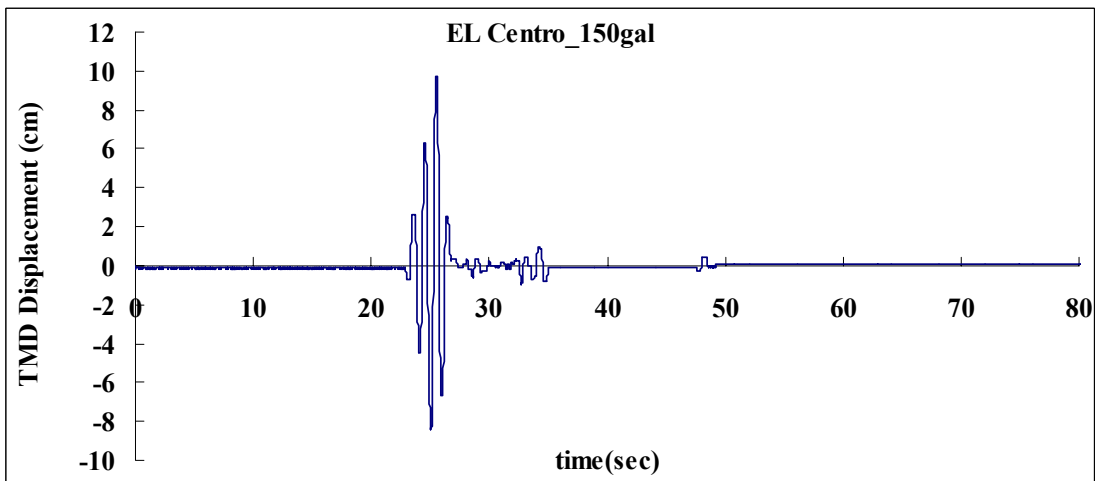


圖3.31(c) EL Centro_150gal TMD相對頂層位移歷時

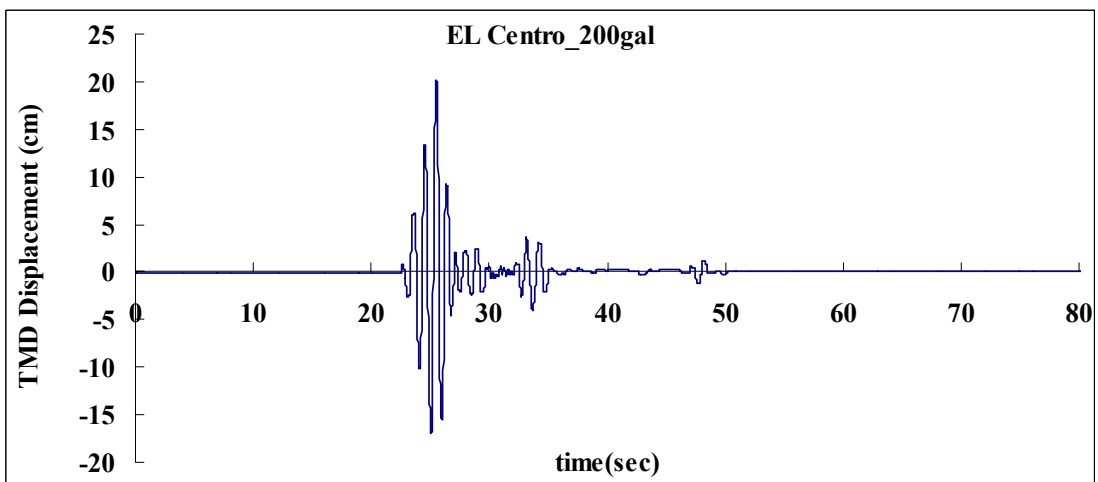


圖3.31(d) EL Centro_200gal TMD相對頂層位移歷時

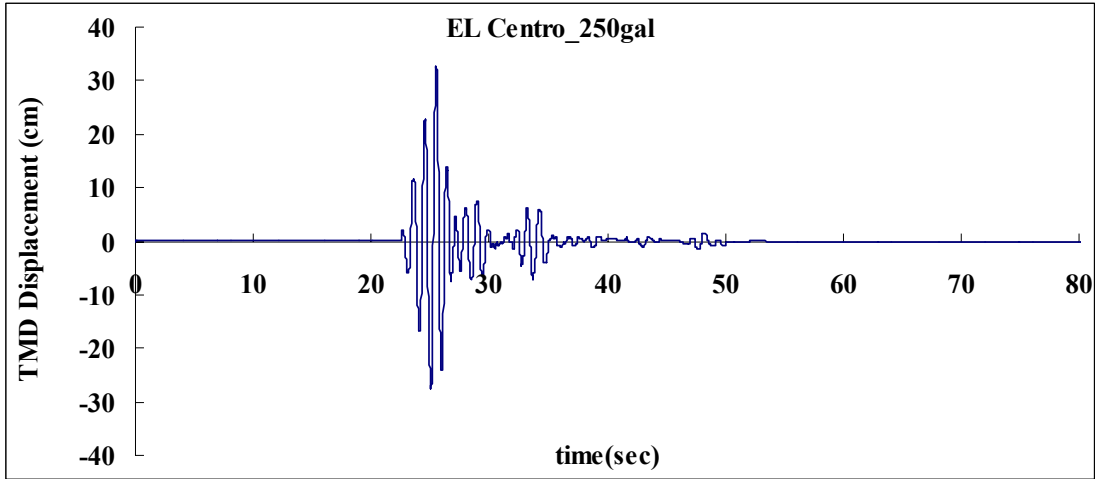


圖3.31(e) EL Centro_250gal TMD相對頂層位移歷時

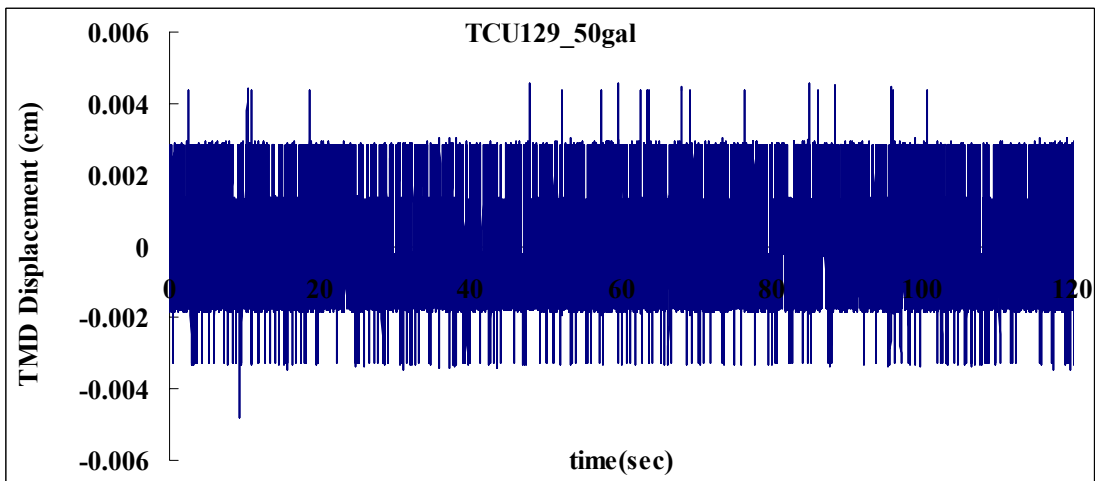


圖3.32(a) TCU129_50gal TMD相對頂層位移歷時

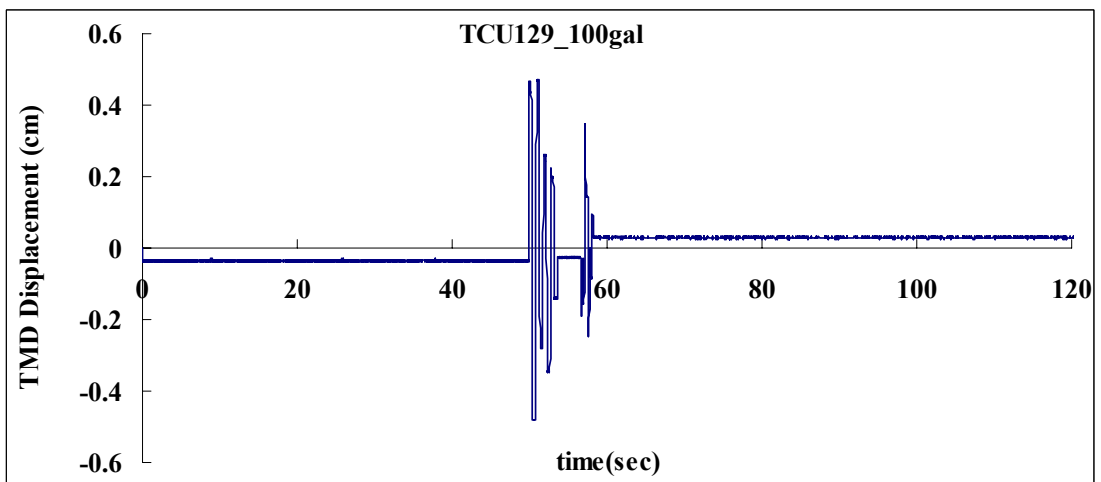


圖3.32(b) TCU129_100gal TMD相對頂層位移歷時

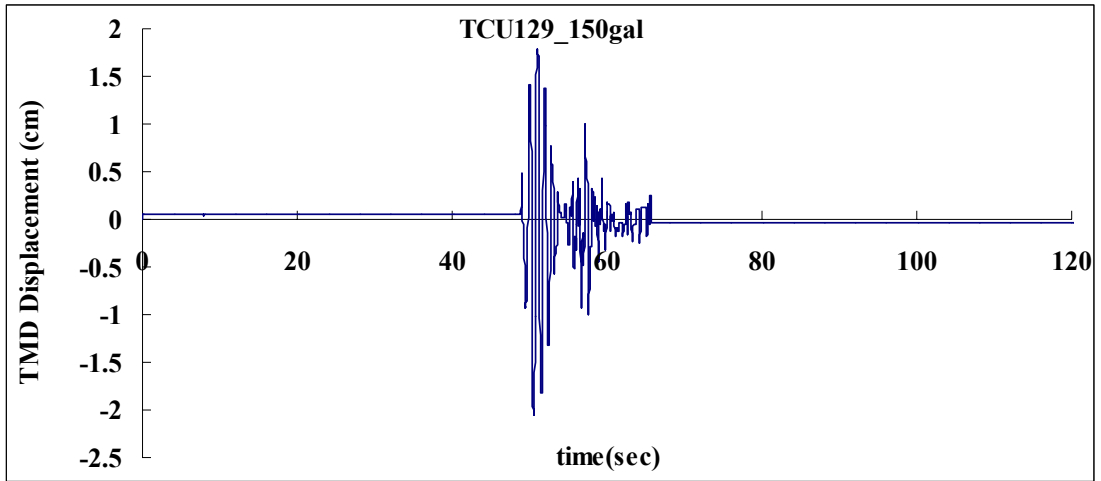


圖3.32(c) TCU129_150gal TMD相對頂層位移歷時

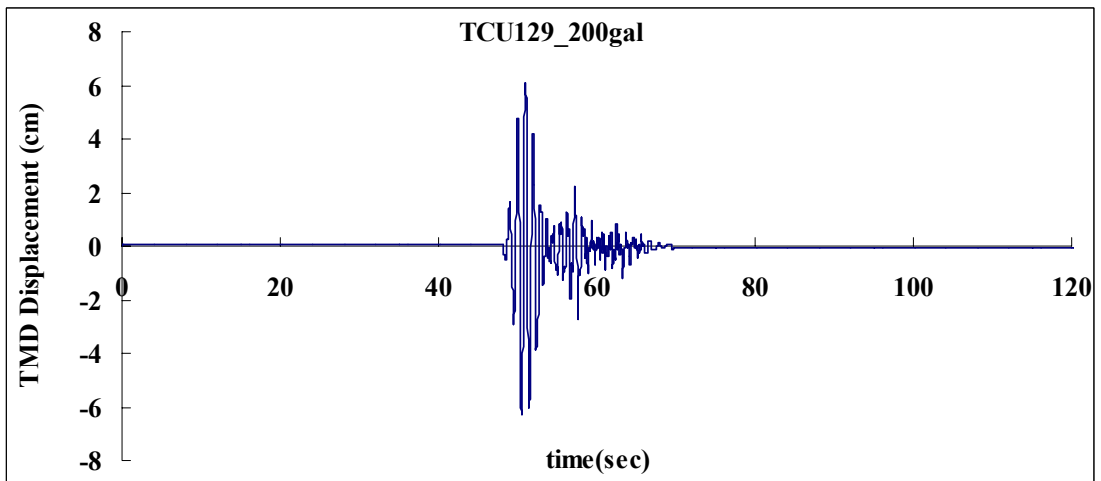


圖3.32(d) TCU129_200gal TMD相對頂層位移歷時

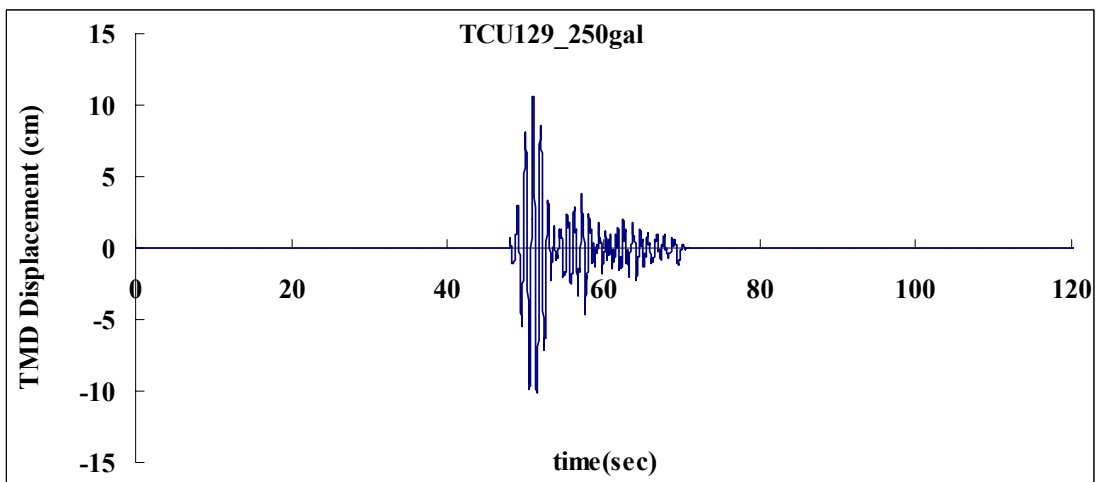


圖3.32(e) TCU129_250gal TMD相對頂層位移歷時

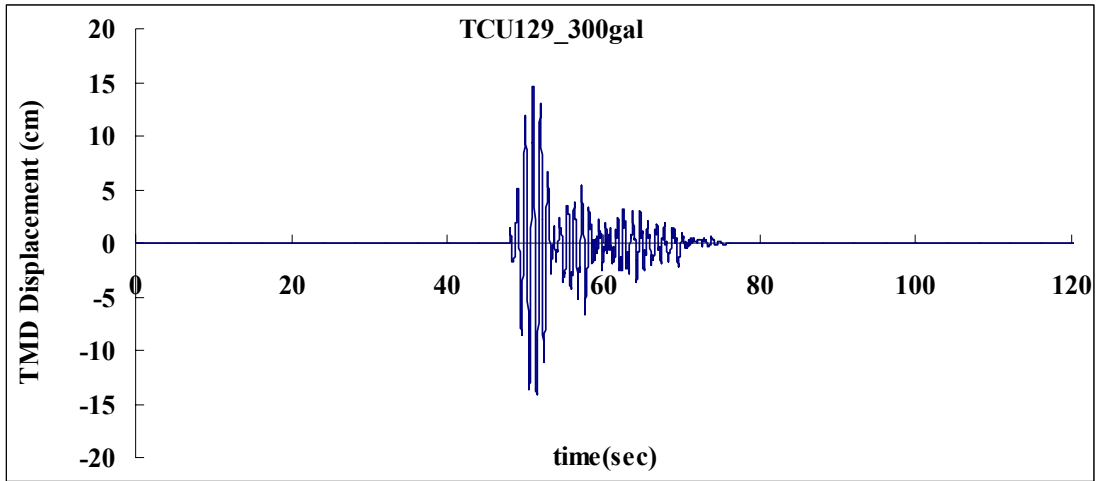


圖3.32(f) TCU129_300gal TMD相對頂層位移歷時

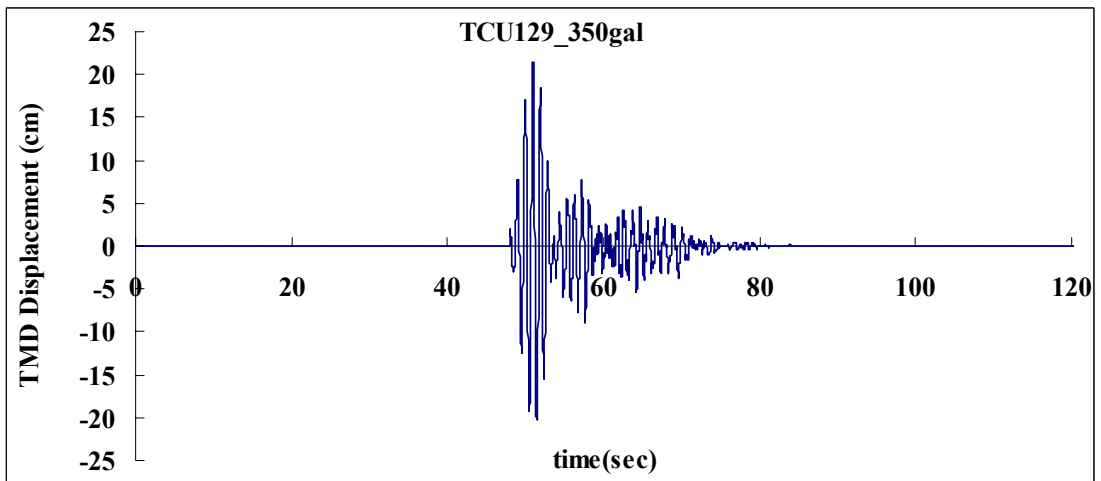


圖3.32(g) TCU129_350gal TMD相對頂層位移歷時

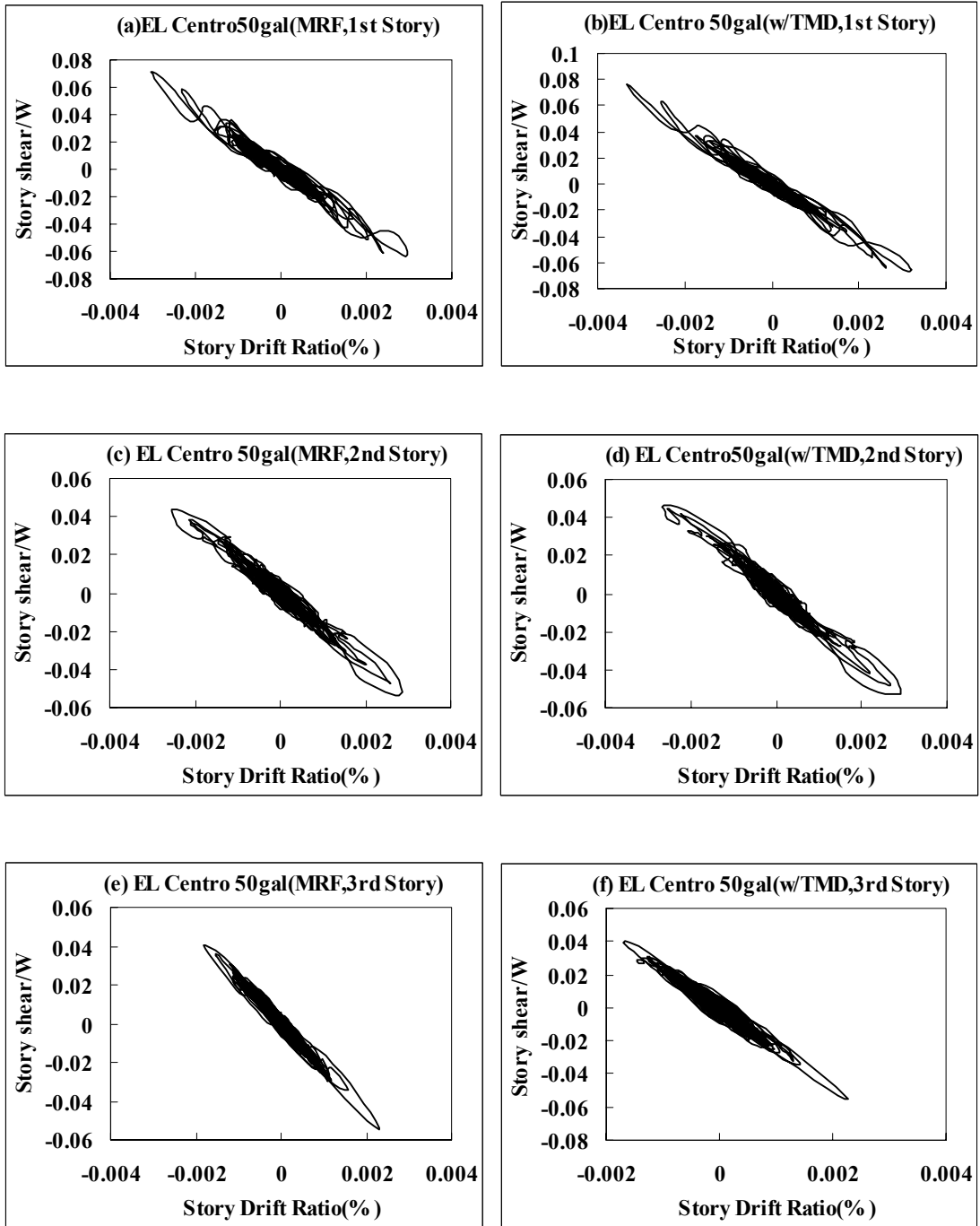


圖3.33 EL Centro 50gal 樓層剪力與樓層側向位移比

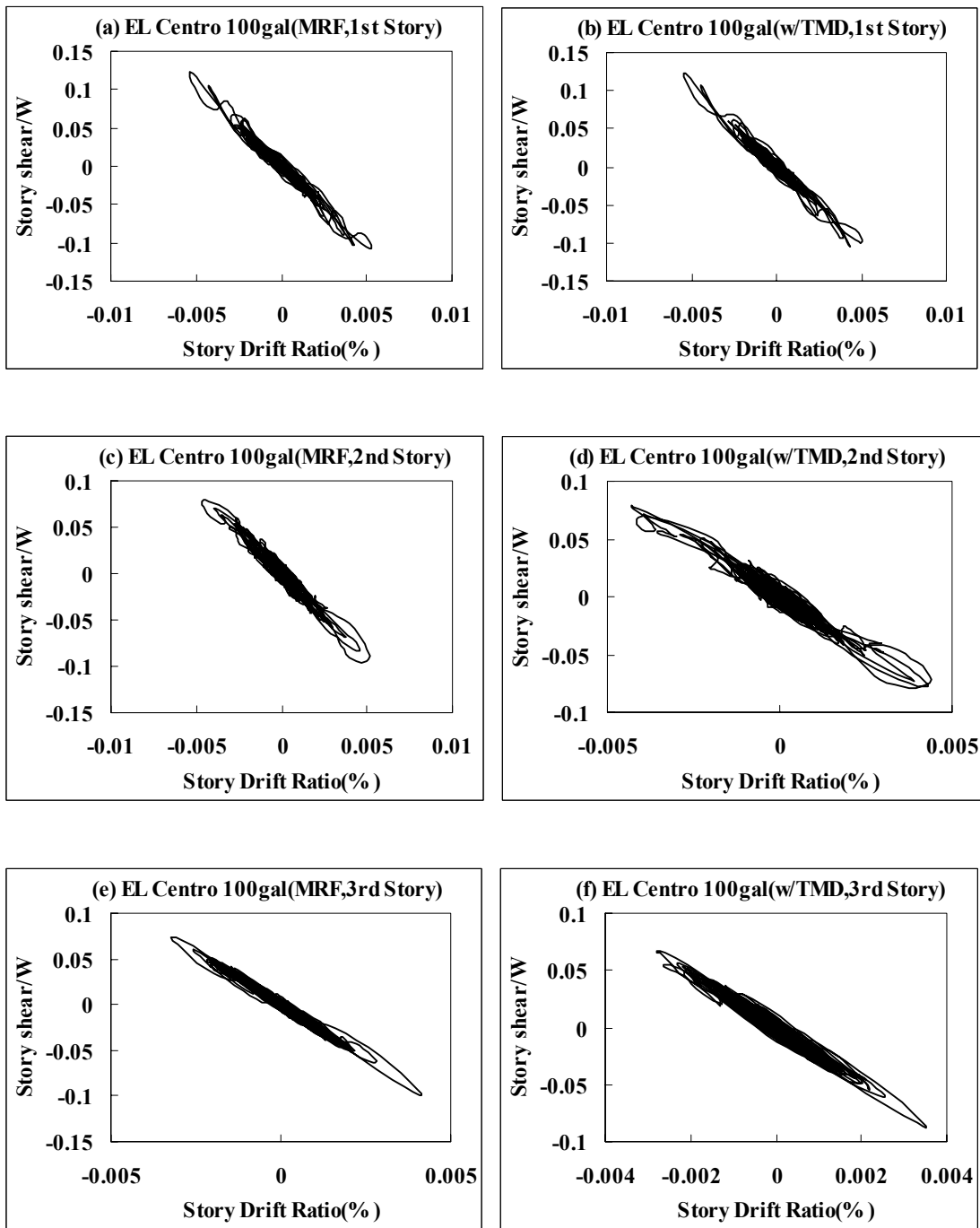


圖3.34 EL Centro100gal樓層剪力與樓層側向位移比

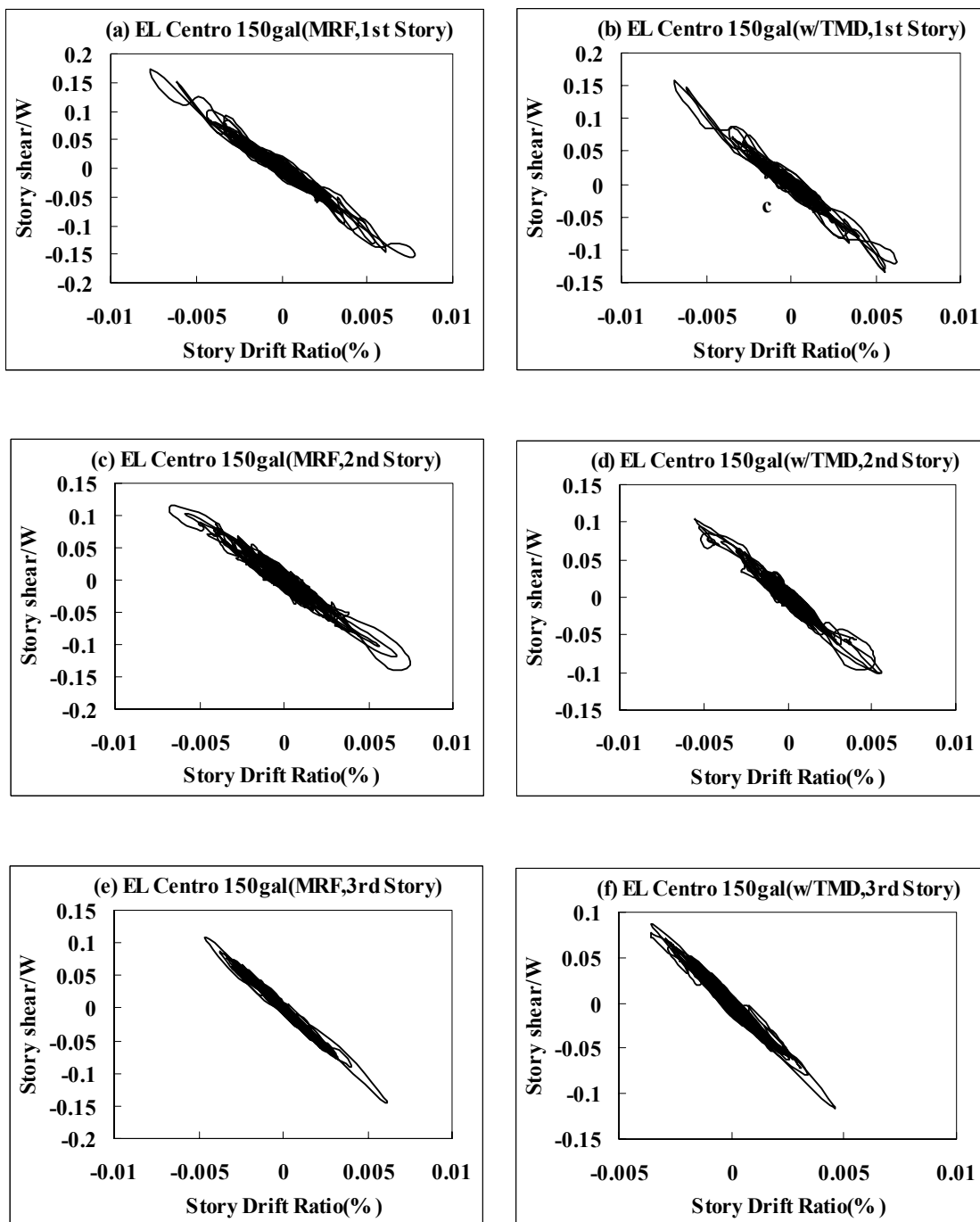


圖3.35 EL Centro150gal樓層剪力與樓層側向位移比

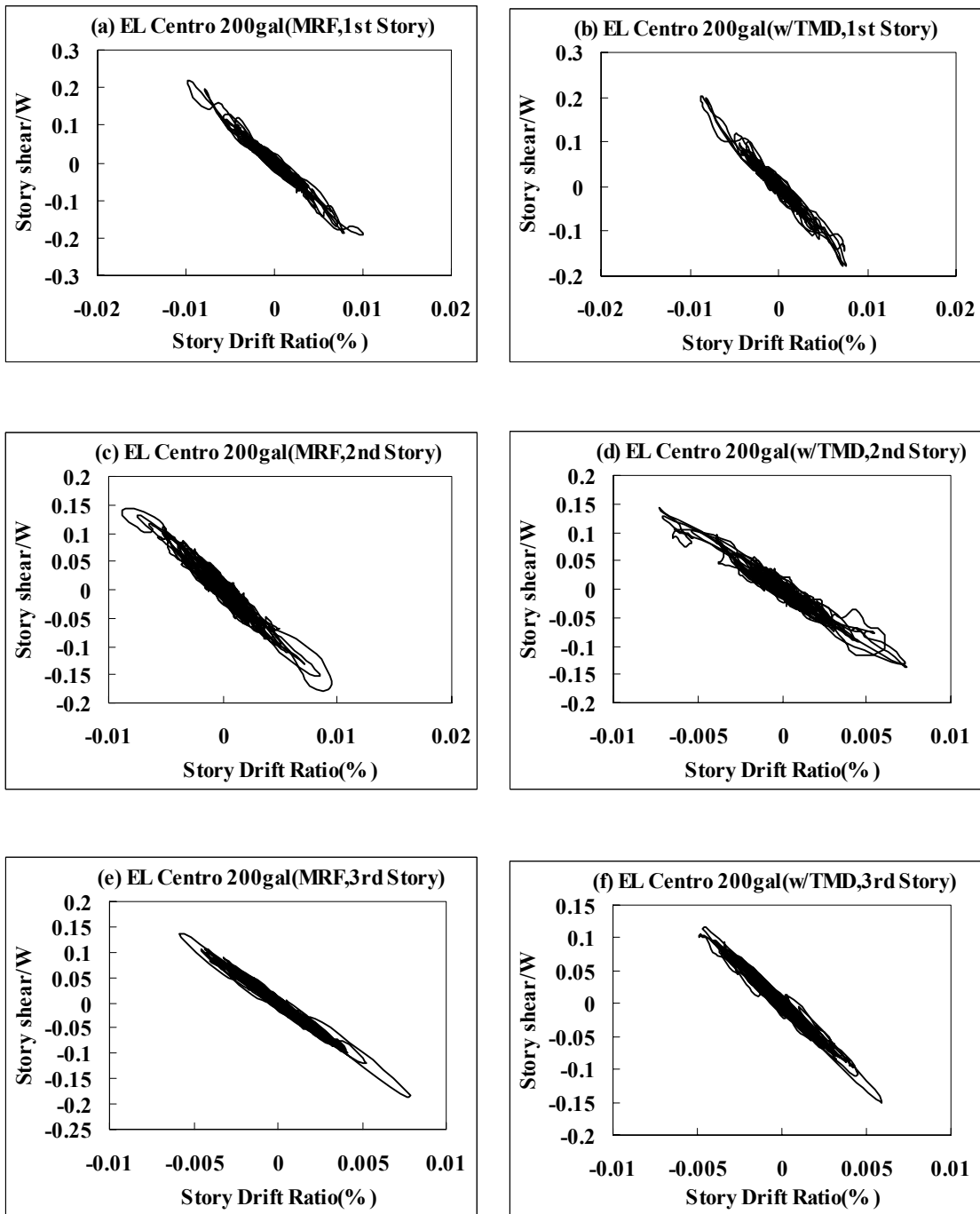


圖3.36 EL Centro200gal樓層剪力與樓層側向位移比

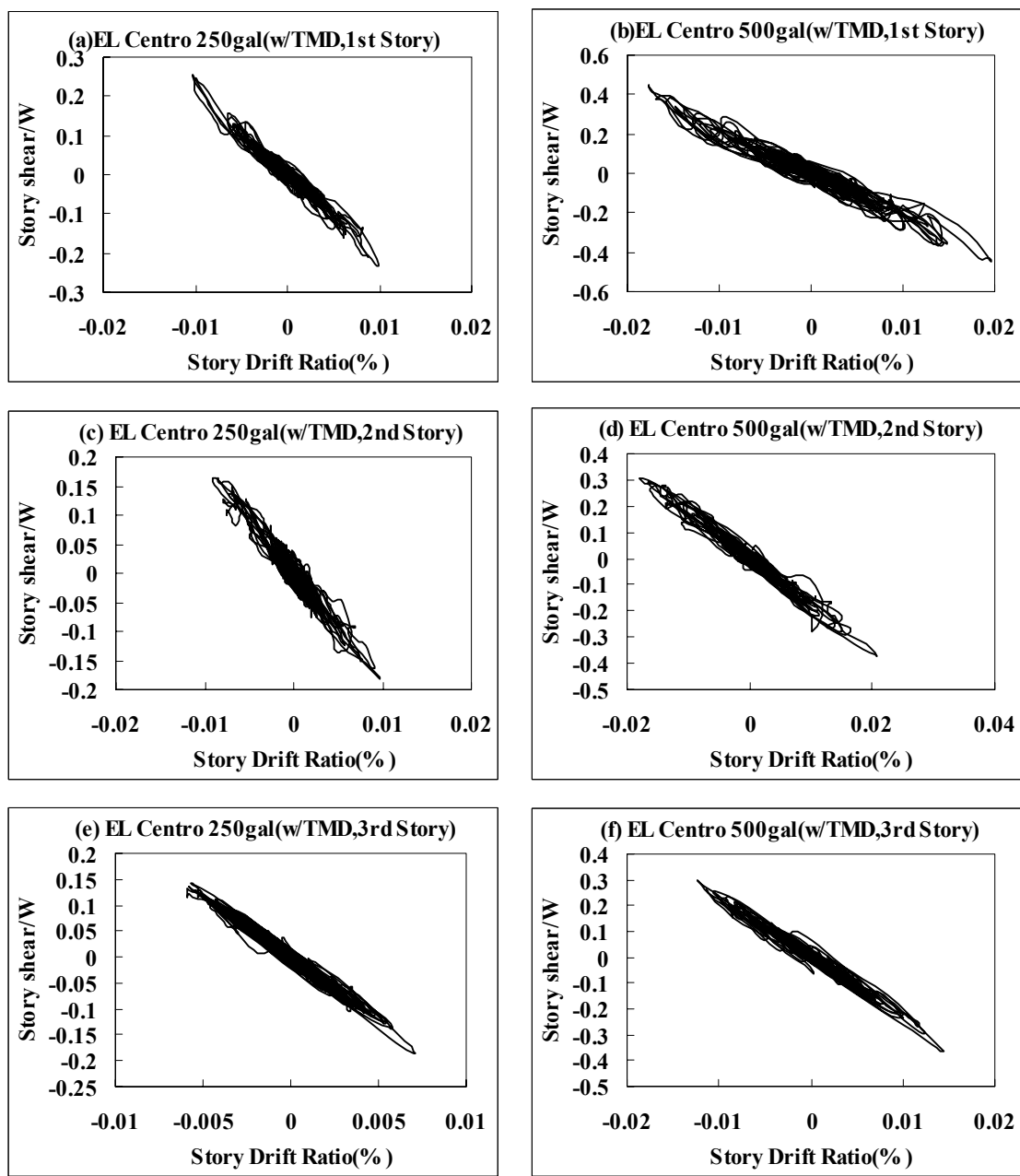


圖3.37 EL Centro250gal、500gal樓層剪力與樓層側向位移比

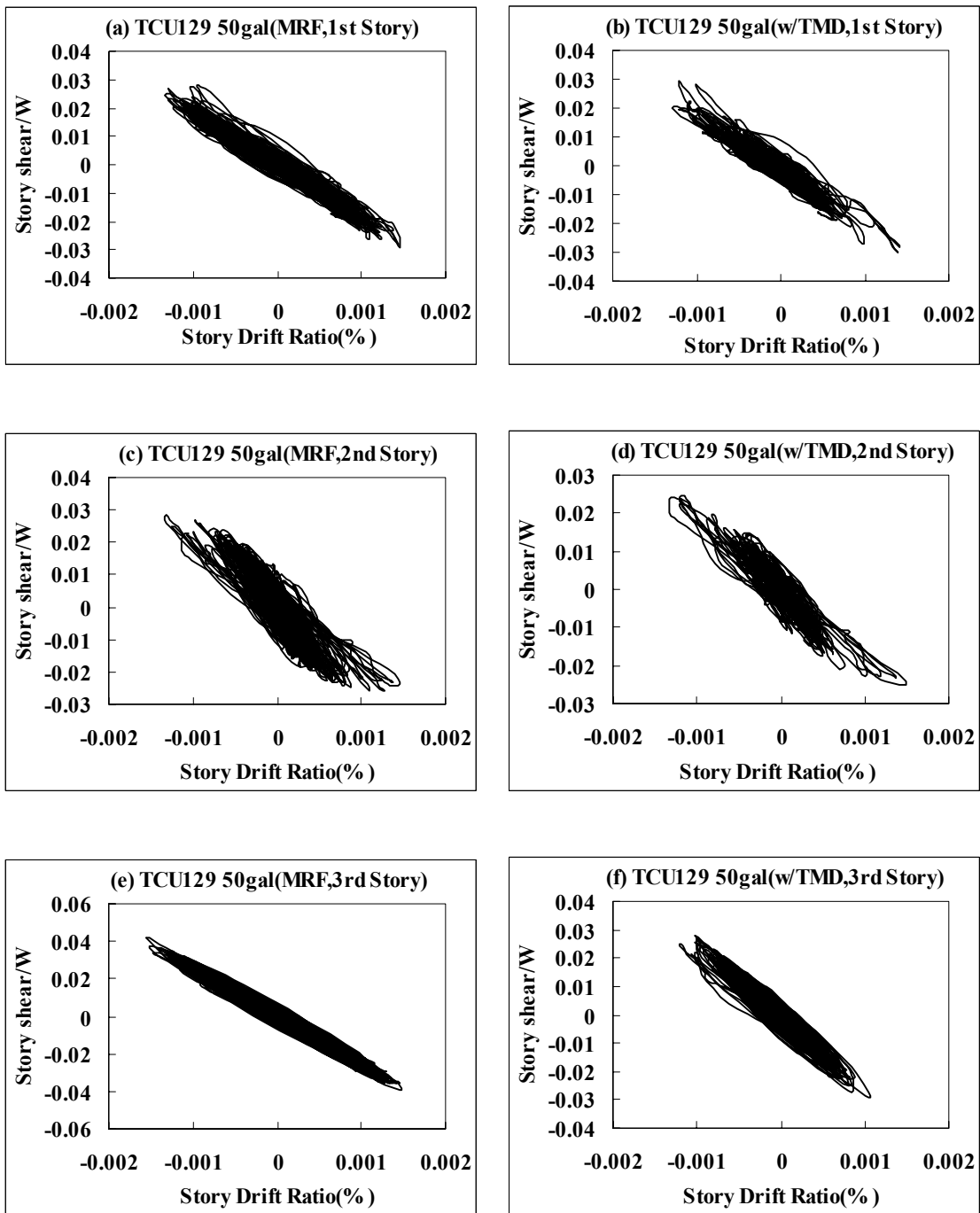


圖3.38 TCU129_50gal樓層剪力與樓層側向位移比

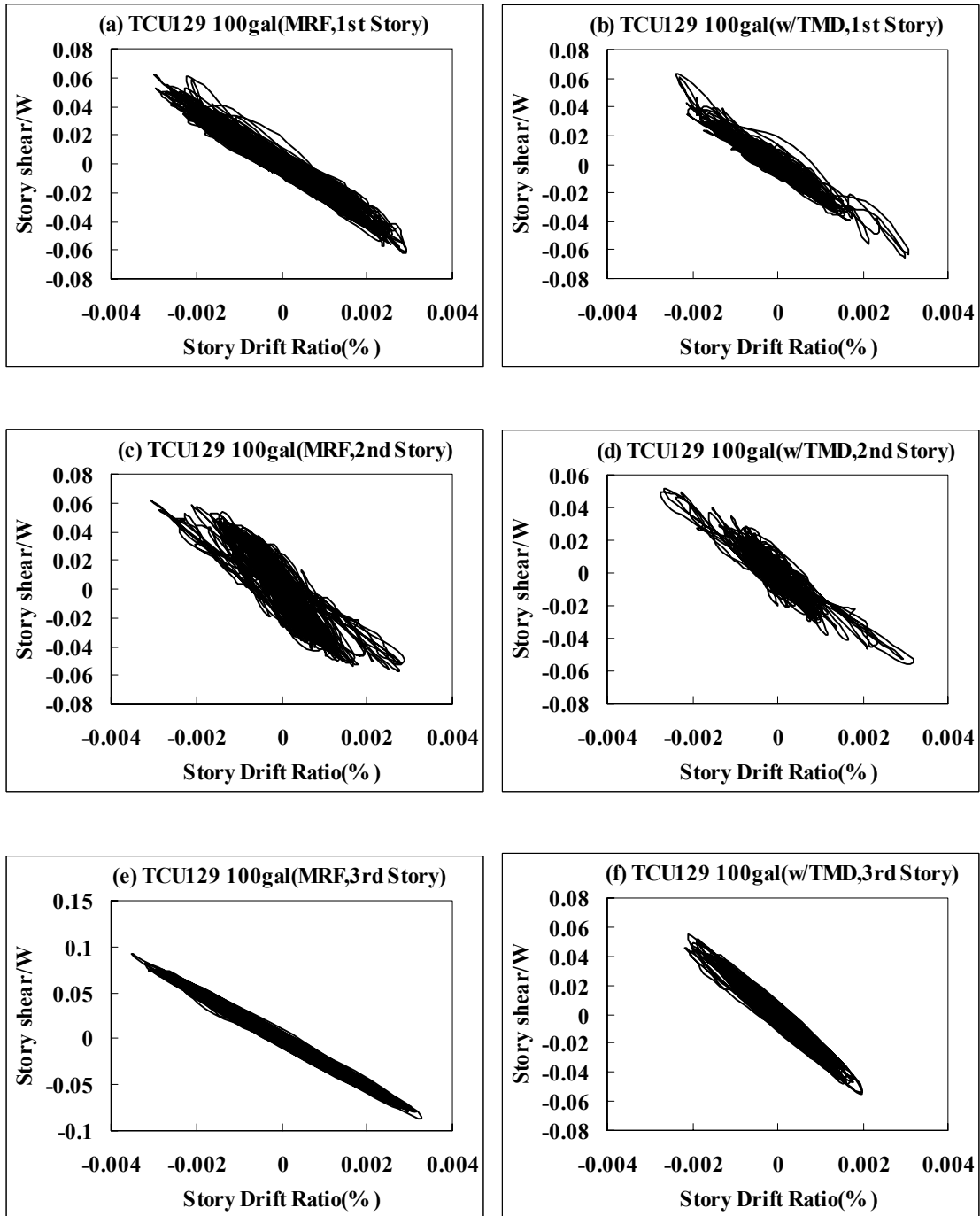


圖3.39 TCU129_100gal樓層剪力與樓層側向位移比

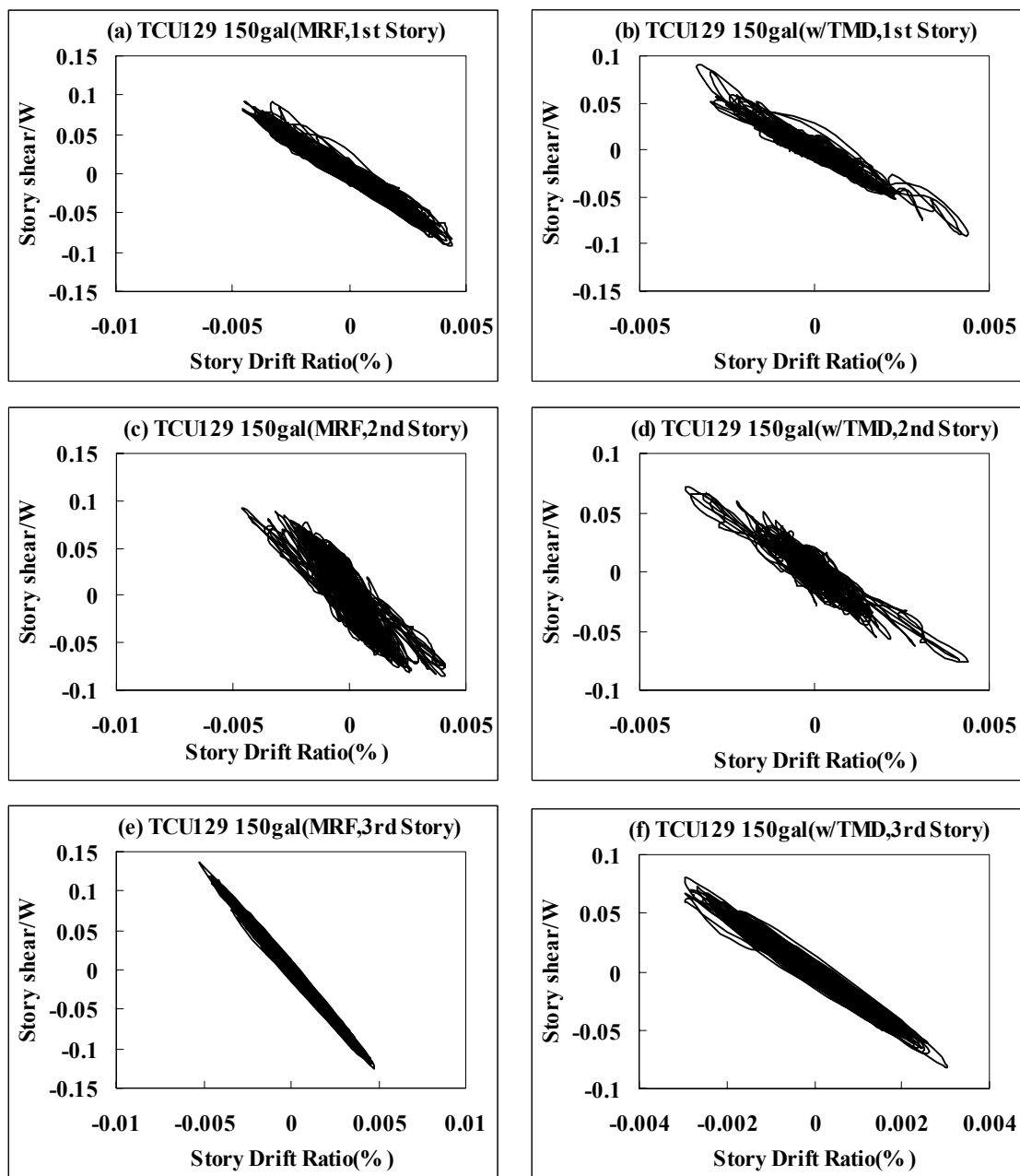


圖3.40 TCU129_150gal樓層剪力與樓層側向位移比

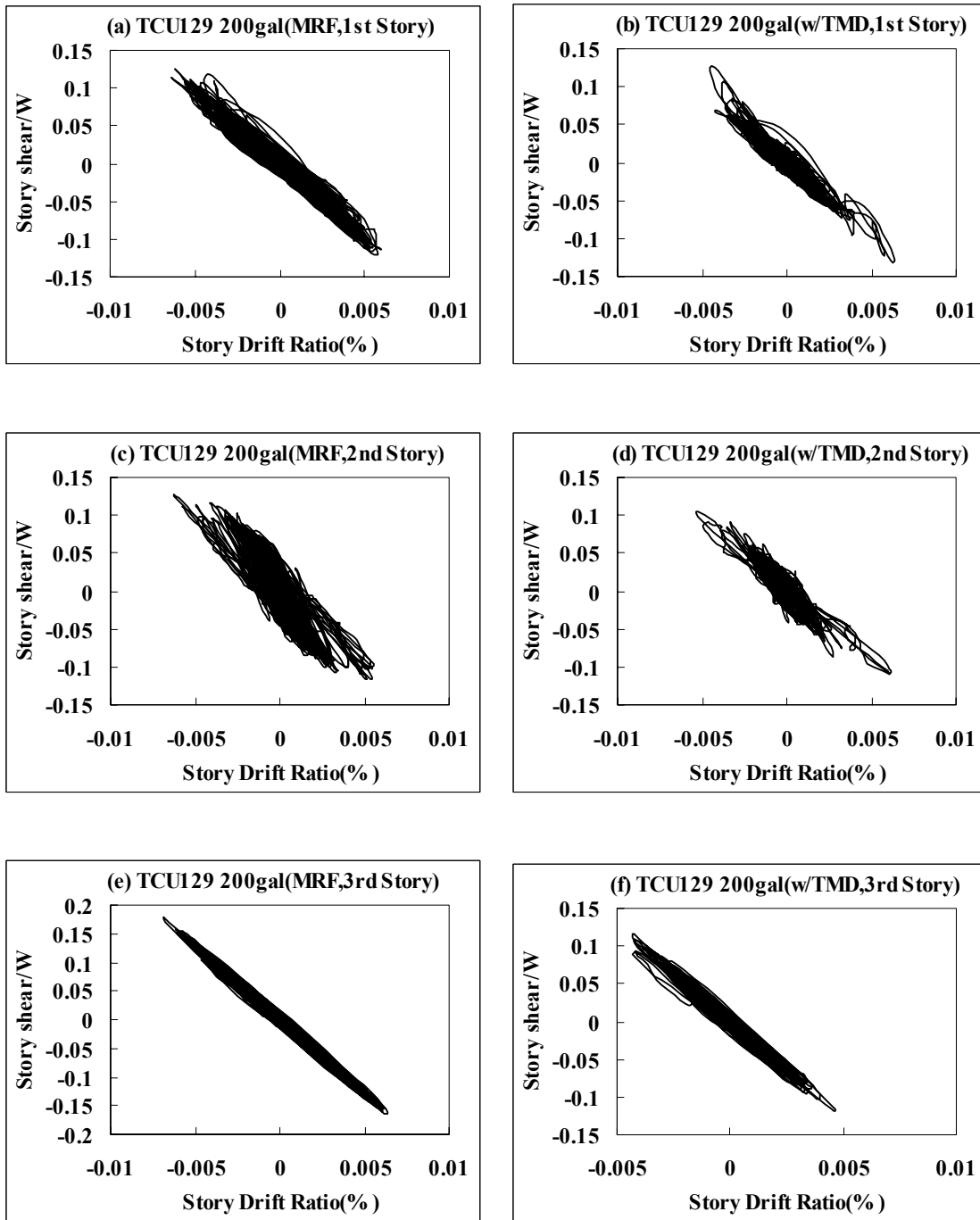


圖3.41 TCU129_200gal樓層剪力與樓層側向位移比

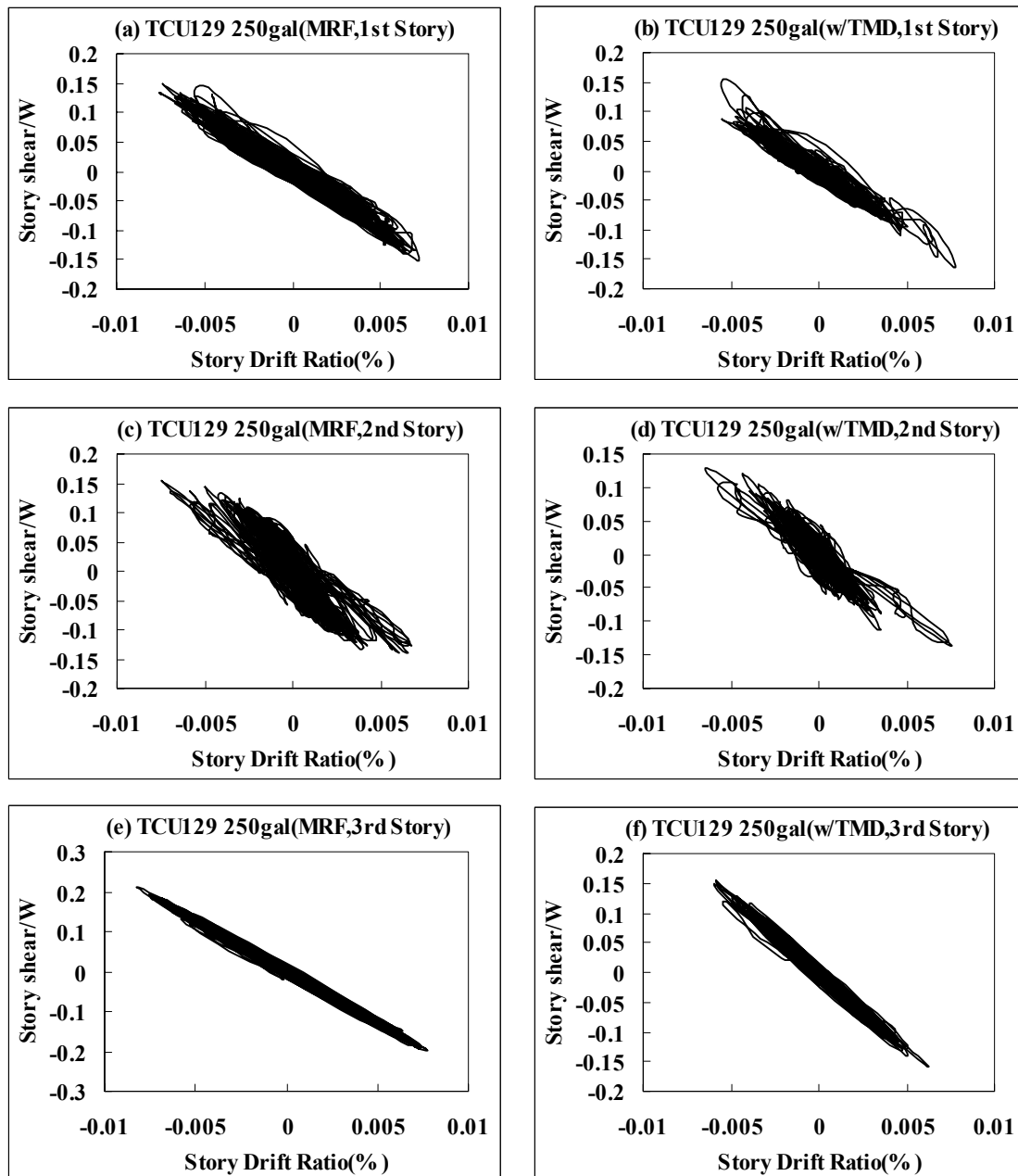


圖3.42 TCU129_250gal樓層剪力與樓層側向位移比

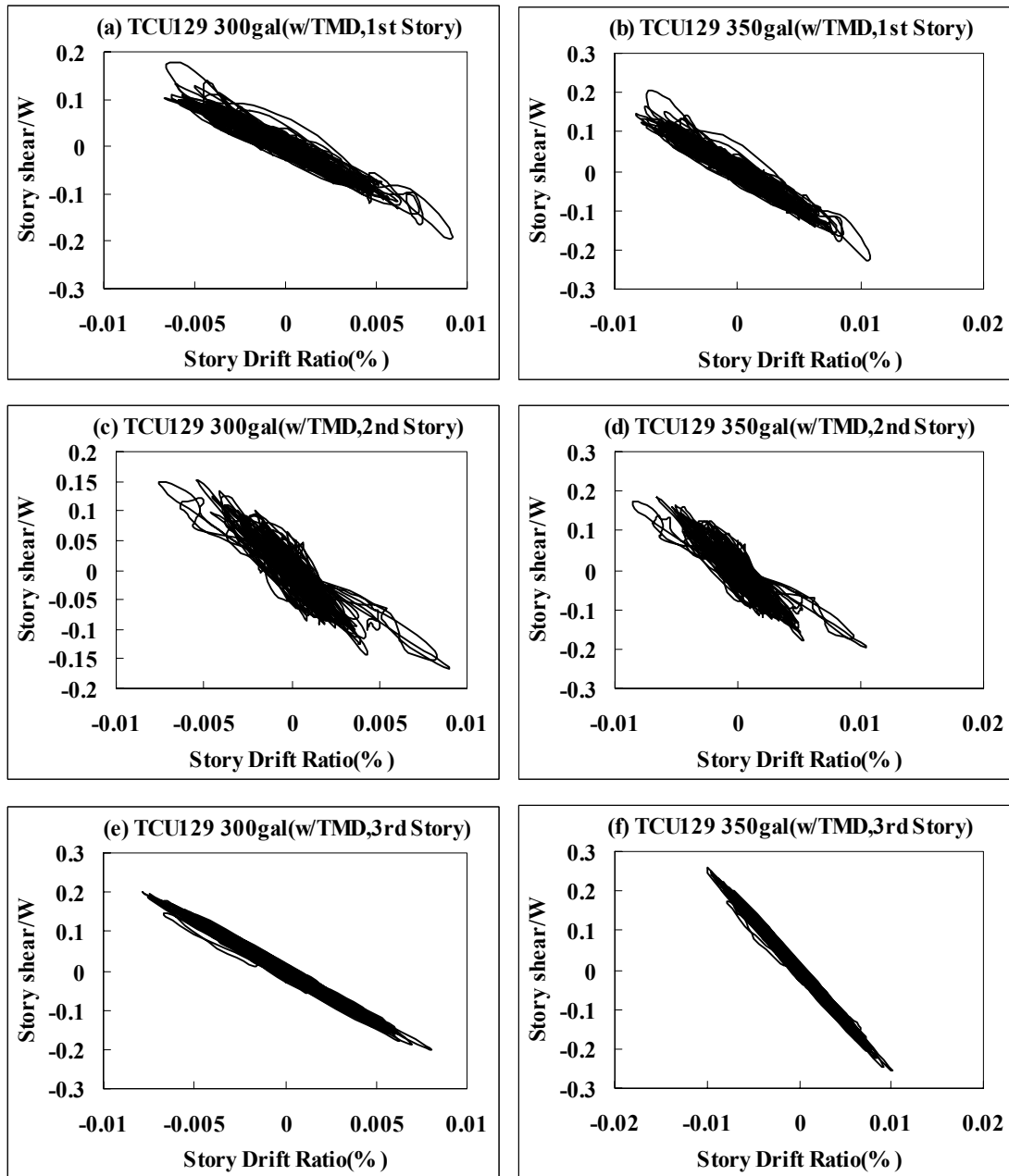


圖3.43 TCU129_300gal、350gal樓層剪力與樓層側向位移比



照片 3.1 實驗空構架



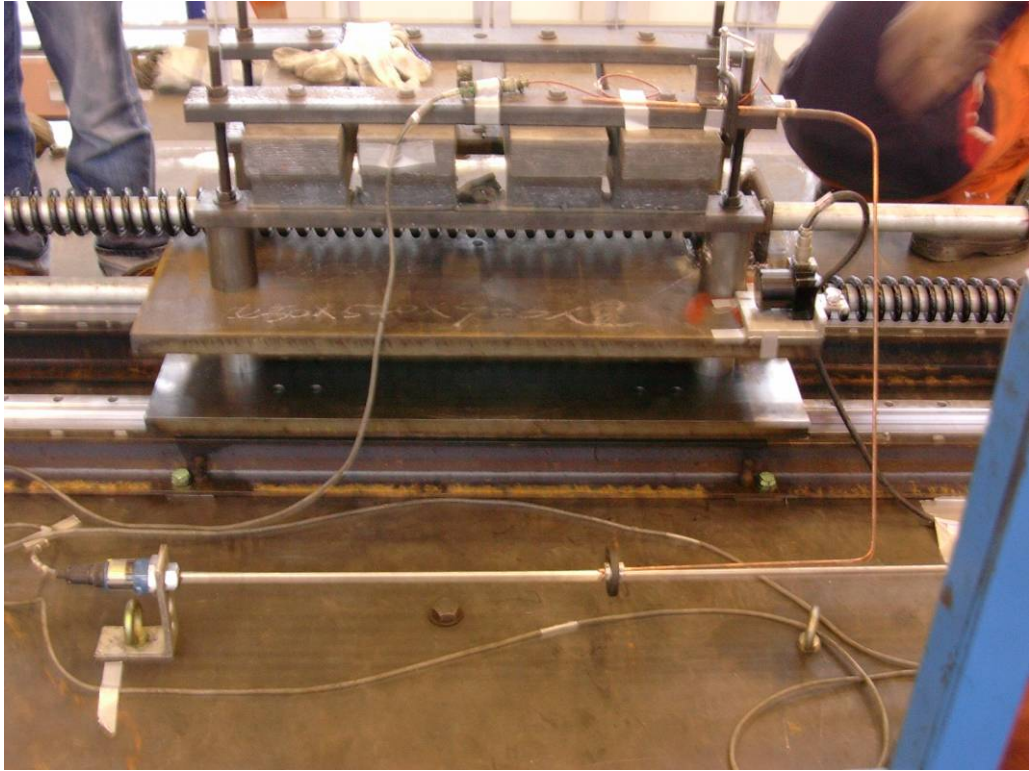
照片 3.2 實驗設計之 PTMD



照片 3.3 PTMD 裝設於頂板



照片 3.4 PTMD 裝設於構架



照片 3.5 PTMD 位移計與加速度計裝設位置



照片 3.6 應變計位置

第四章 參數分析

4.1 模擬實驗構架裝設三種不同被動調諧質量阻尼器之比較

4.1.1 被動調諧質量阻尼器之設計參數

本節所要探討的是實驗構架裝置各種不同型式 PTMD 在構架降伏前和降伏後其頂層相對位移與頂層絕對加速度反應。模擬 PTMD 的型式有三種：第一種型式的 PTMD 即是實驗所設計的 PTMD，主要是以雙線性彈簧做設計，但是把試驗摩擦力的影響也模擬進去；第二種型式 PTMD 是以 1993 年 Tsai 和 Lin[2]所提出結構物含阻尼最佳化線性 PTMD 的公式來做為設計 PTMD 的參數。線性 PTMD 主要是由一線性彈簧和一個線性黏性阻尼所構成。本篇所使用的公式是文獻中提出基底受諧合外力，其外力的加速度振幅固定之公式。第三種型式為雙線性遲滯行為的 PTMD，由 1996 年 Masato Abe'[1]所提出，雙線性遲滯行為的 PTMD 主要是考慮結構進入非線性後，PTMD 的自然頻率仍然能與結構降伏後的週期一致來做為設計 PTMD 的參數。構架裝設三種不同 PTMD 的設計參數及 PTMD 位移與力量的關係如表 4.1 所示。

4.1.2 試驗與模擬被動調諧質量阻尼器之比較

在模擬試驗構架含 PTMD 的行為前，我們必須檢核模擬的雙線性彈性 PTMD 行為和真實試驗 PTMD 的行為是否符合。因此我們針對樓層相對位移、樓層絕對加速度、樓層剪力、PTMD 的相對於頂層的位移和 PTMD 的絕對加速度在 EL Centro、TCU129 兩個試驗歷時下比較試驗與模擬分析的結果。由於實驗後發現摩擦力對結果有所影響，因此在這一節是以含有雙線性彈性彈簧和摩擦力的 PTMD 當作模擬試驗的模型與試驗結果來做比較。試驗歷時參考表 3.1，雙線性彈性 PTMD 的性質參考表 3.2。

對於樓層相對位移，由圖 4.1~圖 4.13 可看到在 EL Centro、TCU129 二個地震歷時下，模擬值和實驗值樓層位移歷時的比較，在 PGA 較大時不管在相位或是尖峰值都可以模擬的很準確。對於樓層絕對加速度與樓層剪力試驗和模擬的比較由圖 4.14~圖 4.39 所示 EL Centro 實驗值與模擬值接近，

對於 TCU129 歷時的頂層絕對加速度與頂層剪力模擬誤差大，但一樓與二樓頂層絕對加速度與樓層剪力實驗值與模擬值還算接近，推測原因為摩擦力造成的影響。PTMD 對頂層的相對位移在 PGA 比較小的歷時，實驗 PTMD 幾乎沒有位移，和模擬的差異大，但隨著二個歷時反應的 PGA 漸增實驗和模擬的 PTMD 位移歷時就非常準確，PTMD 相對於頂層之位移歷時比較參考圖 4.40~圖 4.41。在 PTMD 絕對加速度模擬和實驗歷時比較後，發現在小地震下模擬值會有低估的情形，但是隨著 PGA 增大，模擬值和實驗值會越來越相近，而且對於尖峰值和相位的準確性也越好。如圖 4.42~圖 4.43 所示。由上述模擬與實驗的 PTMD 在三個地震歷時下反應的比較，可發現模擬的 PTMD 在小地震下雖然有些不準確，但是 PGA 較大時，模擬和實驗值的準確性也越好。因此若以模擬的雙線性彈性含有摩擦力 PTMD 來預測實驗 PTMD 在大地震下對實驗構架的行為，其準確性是可靠的。

在模擬 PTMD 受摩擦力影響的反應時，由於模擬只考慮平均摩擦力的部分，所以只要 PTMD 克服平均摩擦力就產生滑動。反觀實驗 PTMD 必需先克服靜摩擦力才會運動，所以在 PGA 比較小的時候 PTMD 沒有幾乎沒有位移反應。但在 PGA 較大的歷時下，當 PTMD 克服靜摩擦力後，PTMD 的位移反應就和模擬 TMD 含有平均摩擦力的位移反應非常相近。

4.1.3 模擬實驗結構加裝三種被動調諧質量阻尼器反應比較

本節除了探討加裝三種 PTMD 結構在底層構架降伏前頂層相對位移反應更進一步探討底層構架降伏後結構的反應。

純構架在 PGA400gal EL Centro 歷時下開始降伏，裝設最佳化線性型調諧質量阻尼器與雙線性遲滯型調諧質量阻尼器之基底構架在 PGA600gal 才開始降伏，而雙線性彈性調諧質量阻尼器之基底構架在 700gal 開始降伏；對於 TCU129 歷時，純構架在 PGA700gal 開始降伏，裝設三種調諧質量阻尼器之基底構架皆在 PGA900gal 開始降伏。

含 PTMD 結構在 EL Centro、TCU129 兩個歷時下不同 PGA 之最大頂層相對位移的反應由圖 4.44、圖 4.45、表 4.2、表 4.3 所示。由圖可知：

1. 裝置 PTMD 構架在降伏前可使頂層最大相對位移反應降低，而且降低

的效益比如表 4.4、表 4.5、圖 4.46~圖 4.47 所示，在降伏前頂層位移反應對於 EL Centro 最多可減少約 42%，對於 TCU129 歷時最多可減少 27% 的反應。其中效益比指的是裝設 PTMD 結構與純構架頂層最大相對位移反應之差值與純構架頂層最大相位移反應之比值。

2. 結構降伏後由於離頻效應使得 PTMD 的效益降低，位移的控制不如降伏前那麼有效。如表 4.6、圖 4.48 所示構架在降伏後位移反應的效益減少約是結構在降伏前的一半。
3. 對於裝設雙線性彈性含摩擦力 PTMD 的結構，由於 PTMD 需要克服摩擦力後才會開始作用，因此在 PGA 較小的時候，對於位移的控制沒有另外兩種型式的 PTMD 來得佳。

4.2 含線性最佳化被動調諧質量阻尼器單自由度結構之參數分析

本節假設基底構架為一個雙線性遲滯行為的結構。且此節是考慮構架在七個與規範第二類地盤設計反應譜相符的人造地震歷時下的平均反應，其中七個原始的地震歷時與規範第二類地盤設計反應譜相符的人造地震歷時，如圖 4.49

4.2.1 結構勁度與質量比的影響

本節探討底層構架(未加被動調諧質量阻尼器之構架)其自然周期(T_p)為 0.5 秒、0.75 秒、1 秒時，在不同質量比 γ (被動調諧質量阻尼器與主結構質量之比值)下，對結構頂層最大位移反應及頂層絕對加速度的影響。其中底層為一單自由度構架其質量為 $1.157tf \cdot s^2/m$ ，且令構架降伏強度為 $0.2W$ ，其中 W 為結構的重量。最佳化線性被動調諧質量阻尼器的設計參數是根據公式 (2.6)、(2.7) 計算。設計參數結果如表 4.7~表 4.9 所示。分析結果如圖 4.50、圖 4.51、表 4.10、表 4.11 所示，其中縱軸為最大位移反應比是指在七個地震歷時下頂層最大位移反應的平均值與底層構架降伏時頂層位移的比值。由表可知：

1. 當基底構架自然周期愈短，加裝 PTMD 構架的頂層相對位移反應愈大，頂層絕對加速度也愈大。

2. 當基底構架自然周期為 0.5 秒時，增加被動調諧質量阻尼器的質量對於結構最大位移反應會有增加的趨勢，但對頂層絕對加速度有稍微減少。
3. 當基底構架降伏後，增加被動調諧質量阻尼器的質量對於結構最大位移反應和最大頂層絕對加速度並不會有多大的改善，甚至有放大的趨勢，無法減少反應。
4. 由圖 4.50、圖 4.51 可發現結構物自然周期 T_p 對於最大位移反應比的影響較大，對頂層最大絕對加速度的影響較小。

最大位移反應與頂層絕對加速度的結果可由位移反應譜與擬加速度反應譜來解釋。下面只以 TCU059 歷時，純構架自然周期 T_p 為 0.75 秒，質量比為 0.1 為例來做說明。純構架在 TCU059 歷時下結構等效周期為 1.01 秒，等效阻尼比為 24.87%，裝置被動調諧質量阻尼器後構架等效周期延長為 1.09 秒，等效阻尼比增加為 26.8%。由位移反應譜，如圖 4.52 可知裝設被動調諧質量阻尼器在結構降伏後對於阻尼比的增加僅有約 2%，對於整個結構的位移反應影響並不大，將位移反應譜取周期 0.7 秒~1.4 秒區間來看，如圖 4.53 所示，位移有放大的反應。由擬加速度反應譜如圖 4.54 可知裝置被動調諧質量阻尼器在結構降伏後對於阻尼比的增加約 2%，對於加速度反應影響亦不大，將擬加速度反應譜取周期 0.8 秒~1.6 秒區間來看，如圖 4.55 所示，加速度反應有些微減少。由位移反應譜與加速度反應譜來說明結構在降伏後由於被動調諧質量阻尼器對於整體所貢獻的等效阻尼比並不大，加上周期延長的效應，所以對於位移反應與加速度反應影響的效應並不大。

4.2.2 結構在彈性與進入非線性階段 PTMD 對結構反應的影響

結構進入非線性階段由 4.2.1 節所示。為了使結構在彈性階段，將七個地震加速度歷時調降為 0.2PGA，在底層構架(未加被動調諧質量阻尼器之構架)其自然周期(T_p)為 0.5 秒、0.75 秒、1 秒時，在不同質量比 γ (被動調諧質量阻尼器與主結構質量之比值)下，對結構頂層最大位移反應及頂層絕對加速度的影響。底層為一單自由度構架其質量為 $1.157if \cdot s^2/m$ ，且令構架降伏強度為 0.2W，其中 W 為結構的重量。最佳化線性被動調諧質量阻尼器的設計參數是跟據公式 (2.6)、(2.7) 計算。設計參數結果如表 4.7~表 4.9 所示。

分析結果如圖 4.56、圖 4.57、表 4.11、表 4.12 所示，其中最大位移反應比是指在七個地震歷時下頂層最大位移反應的平均值與底層構架開始降伏時頂層位移的比值。由表可知：

1. 當結構在彈性階段，增加質量比會使頂層位移反應比與絕對加速度反應都減少，但是隨著質量比的增加，被動調諧質量阻尼器的效益對於反應的降幅有一定的限度。
2. 被動調諧質量阻尼器是跟據結構在彈性階段的自然頻率設計，而結構降伏後勁度折減，周期的增加使得 PTMD 出現離頻效應，所以可預期結構在降伏後無法降低其反應。

4.2.3 底層構架在降伏前後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻的比較

本節首先提出含被動調諧質量阻尼結構在底層構架降伏前後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的計算步驟，再來針對底層構架不同周期時，對被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻的影響。

A. 含被動調諧質量阻尼結構在底層構架降伏前被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的計算步驟如下所示：

1. 使用線性積分（Newmark 平均加速度法）找到在特定歷時下底層構架保持彈性時之頂層位移 Δ_{Roof}
2. 利用等效模態參與係數 $\bar{\Gamma}$ 將頂層位移轉成等效單自由度位移 δ ，其中 $\bar{\Gamma}$ 利用公式 5.13 計算

$$\delta = \frac{\Delta_{Roof}}{\bar{\Gamma}} \quad (4.1)$$

3. 利用彈性位移反應譜調整不同阻尼比，直到基底構架自然周期 T_p 與特定阻尼比所查出的位移接近步驟 2 所求得 δ ，則此阻尼比即為含被動調諧質量阻尼器結構在基底構架保持彈性時整體的等效阻尼比 ξ_e 。

$$S_d(T_p, \xi_e) \approx \delta \quad (4.2)$$

4. 被動調諧質量阻尼器阻尼比的貢獻，即為整體的等效阻尼比扣除結構固有阻尼的部分

$$\xi_{e(PTMD\ contribution)} = \xi_e - \xi_{inherent} \quad (4.3)$$

B. 含被動調諧質量阻尼結構在底層構架降伏後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的計算步驟如下所示：

I. 計算純構架在特定歷時下之等效阻尼 $\xi_{e(MRF)}$

1. 使用非線性直接積分 (Newmark 平均加速度法) 找到在特定歷時下純構架之頂層位移 Δ_{Roof}
2. 將 Δ_{Roof} 當作目標位移進行非線性側推分析，將分析後的非線性靜力側推曲線理想化為雙線性曲線(利用曲線下面積與雙線性曲線下面積相等)後可得韌性比 $\mu = \frac{D_{max}}{D_y}$ 和後降伏勁度比 α
3. 利用公式 (4.4) 計算純構架進入非線性後等效的遲滯阻尼

$$\xi_{e(inelasticity)} = \frac{1}{\pi} \frac{(1-\alpha) \left[\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) - \left(\frac{1}{\mu^2} - \frac{1}{\mu^3} \right) \right]}{\frac{1}{6\mu^3} + \frac{1}{4\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) + \frac{\alpha}{6} \left(1 - \frac{1}{\mu^3} \right) - \frac{\alpha}{4\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right)} \quad (4.4)$$

4. 純構架在特定歷時下構架之等效阻尼 $\xi_{e(MRF)}$ 即為等效的遲滯阻尼比 $\xi_{e(inelasticity)}$ 與結構固有阻尼 $\xi_{inherent}$ 之合

$$\xi_{e(MRF)} = \xi_{e(inelasticity)} + \xi_{inherent} \quad (4.5)$$

II. 計算含被動調諧質量阻尼器構架在特定歷時下之等效阻尼 $\xi_{e(MRF+PTMD)}$

1. 使用非線性直接積分 (Newmark 平均加速度法) 找到在特定歷時下含被動調諧質量阻尼器構架之頂層位移 Δ_{Roof} 。
2. 將 Δ_{Roof} 當作目標位移進行非線性側推分析，將分析後的非線性靜力側推曲線理想化為雙線性曲線(利用曲線下面積與雙線性曲線下面積相等)後可得韌性比 $\mu = \frac{D_{max}}{D_y}$ 和後降伏勁度比 α 。
3. 利用公式 (5.10) 計算等效線性系統被動調諧質量阻尼器阻尼係數所貢獻的等效阻尼比 $\xi_{e(PTMD_C)}$ 。
4. 利用公式 (5.11) 計算結構進入非線性後基底構架遲滯阻尼比與被動調諧質量阻尼器勁度貢獻的等效阻尼比 $\xi_{e(MRF_inelasticity+PTMD_K)}$ 。由於被動調諧

質量阻尼器勁度對於基底結構遲滯能有所影響，在公式(5.11)計算時，實際上是包含底層構架降伏後遲滯阻比與被動調諧質量阻尼器勁度的貢獻。

5. 含被動調諧質量阻尼器構架在特定歷時下構架之等效阻尼 $\xi_{e(MRF+PTMD)}$ 即為被動調諧質量阻尼器阻尼係數所貢獻的等效阻尼比 $\xi_{e(PTMD_C)}$ 與基底構架的等效遲滯阻尼比與被動調諧質量阻尼器勁度貢獻 $\xi_{e(MRF_inelasticity+PTMD_K)}$ 和結構固有阻尼 $\xi_{inherent}$ 之合

$$\xi_{e(MRF+PTMD)} = \xi_{e(MRF_inelasticity+PTMD_K)} + \xi_{e(PTMD_C)} + \xi_{inherent}$$

(4.6)

III. 裝設被動調諧質量阻尼器結構，基底降伏後被動調諧質量阻尼器之等效阻尼比貢獻

由於含被動調諧質量阻尼結構在利用公式 5.11 計算時，同時包含了被動調諧質量阻尼器勁度對底層構架的影響與底層構架遲滯消能的部分，無法將兩者的貢獻獨立出來。所以在計算被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻時只能利用純構架與含被動調諧質量阻尼器構架之韌性需求大概的估計其上限值。其估計的方法將會以下面例子做說明。

底層構架在降伏前後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻的比較

此部分將探討底層構架(未加被動調諧質量阻尼器之構架)其自然周期 (T_p) 為 0.5 秒、0.75 秒、1 秒、質量比 $\gamma=0.1$ 時，在 TCU059 歷時下，裝設最佳化線性調諧質量阻尼器結構其底層構架為降伏前與降伏後 PTMD 等效阻尼比貢獻的比較。其中底層為一單自由度構架其質量為 $1.157tf \cdot s^2/m$ ，且令構架降伏強度為 $0.2W$ ，其中 W 為結構的重量。最佳化線性 PTMD 的設計參數是跟據公式 (2.6)、(2.7) 計算。設計參數結果如表 4.7~表 4.9 所示。分析結果如表 4.14、表 4.15 所示，由表可知：

1. 底層構架在彈性階段時，當純構架自然周期愈長，被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻愈多。
2. 底層構架進入降伏後，被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻非常少。
3. 含被動調諧質量阻尼器結構，在底層構架降伏前被動調諧質量阻尼器等

效阻尼比貢獻較底層構架進入降伏後大。

4. 基底構架降伏後，結構等效遲滯阻尼占了大部分結構消能的部分，而被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻才些微增加，在考慮周期延長的效應後，對於位移的控制不盡理想。

對於結構進入降伏後被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻如表 4.15 之結果將由下面的例子來做說明來。

$T_p = 1$ 秒時，純構架的韌性需求 μ_{MRF} 為 1.9457 其所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.143，含 PTMD 構架的韌性需求 $\mu_{(MRF+TMD)} = 1.9457$ 所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.143。由於 $\mu_{(MRF+TMD)}$ 幾乎近似於 μ_{MRF} ，因此我們瞭解到 PTMD 構架的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 幾乎由構架遲滯行為所提供，由 PTMD 勁度所提供的阻尼比 $\xi_{e(TMD_k)}$ 幾乎為零。所以由公式 (4.7) 計算 PTMD 貢獻的等效阻尼比

$$\xi_{e(PTMD\ contribution)} = 0.45\% + 0 = 0.45\%$$

$$\xi_{e(PTMD\ contribution)} = \xi_{e(PTMD_C)} + \xi_{e(PTMD_K)} \quad (4.7)$$

$T_p = 0.75$ 秒時，純構架的韌性需求 μ_{MRF} 為 2.841 所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.229，含 PTMD 構架的韌性需求 $\mu_{(MRF+TMD)}$ 為 3.112，其所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.245。由 $\mu_{(MRF+TMD)}$ 大於 μ_{MRF} ，我們瞭解到含 PTMD 構架的遲滯阻尼比必定大於純構架所提供的遲滯阻尼比。所以 PTMD 勁度所提供的阻尼比小於 $24.5\% - 22.9\% = 1.6\%$ 。由 4.7 式 PTMD 貢獻的等效阻尼比

$$\xi_{e(PTMD\ contribution)} \leq 0.3\% + 1.6\% = 1.9\%$$

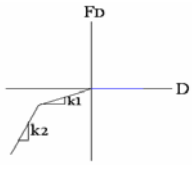
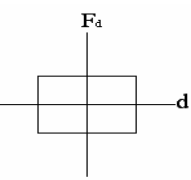
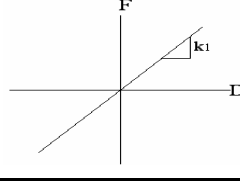
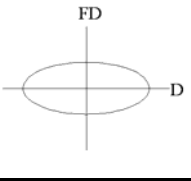
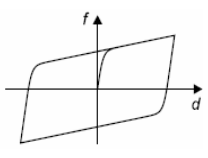
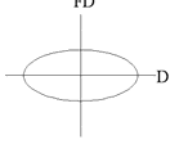
在 $T_p = 0.5$ 秒時，純構架的韌性需求 μ_{MRF} 為 3.486 所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.263，含 PTMD 構架的韌性需求 $\mu_{(MRF+TMD)}$ 為 4.19，其所對應的 $\xi_{e(inelasticity)}$ 為 0.286。由 $\mu_{(MRF+TMD)}$ 大於 μ_{MRF} ，我們瞭解到含 PTMD 構架的遲滯阻尼比必定大於純構架所提供的遲滯阻尼比。所以 PTMD 勁度所提供的阻尼比必定小於 $28.6\% - 26.3\% = 2.3\%$ 。由 4.7 式 PTMD 貢獻的等效阻尼比

$$\xi_{e(PTMD\ contribution)} \leq 2.6\% + 2.3\% = 4.9\%$$

對於被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻，上述的方法僅能找出一個大概的上限值。但仍可觀察出在結構進入降伏後，PTMD 等效阻尼比的貢獻相對於基底構架遲滯消能的部分僅占一小部分，所以對於結構進入非

線性行為後，PTMD 的效益明顯的就少了很多。

表 4.1 三種 PTMD 設計參數

	k_1 (tf/m)	k_2 (tf/m)	c_{TMD} ($tf \cdot s/m$)		
雙線性彈性 含摩擦力 PTMD	2.14	4.38	註一		
線性最佳化 PTMD	1.93	0	0.083		
雙線性遲滯 PTMD	1.93	0.20	0.083		

註一：雙線性彈性 TMD 平均摩擦係數為 0.08， $F_d=0.0405 tf$

表 4.2 裝置三種 PTMD 結構在 EL Centro 歷時不同 PGA 下頂層相對位移的反應

EL Centro_Relative displacement of the top floor				
PGA(gal)	Base frame	Opt. linear TMD	Bilinear-elastic with frictional force TMD	Bi-hysteresis TMD
100	4.24	2.59	3.53	2.61
200	8.47	5.18	5.22	5.22
300	12.71	7.77	7.39	7.83
400	16.94	10.36	9.67	10.43
500	17.81	12.94	11.98	13.04
600	19.60	15.18	14.34	15.24
700	20.55	17.06	16.70	17.07
800	22.17	19.49	19.06	19.50
900	24.12	21.07	20.78	21.08
1000	26.38	22.12	21.75	22.13
1100	27.42	21.91	21.59	22.19
1200	27.56	22.51	22.75	22.53

unit : cm

表 4.3 裝置三種 PTMD 結構在 TCU129 歷時不同 PGA 下頂層相對位移的反應

TCU129_Relative displacement of the top floor				
PGA(gal)	Base frame	Opt linear TMD	Bilinear-elastic with frictional force TMD	Bi-hysteresis TMD
100	2.30	1.73	2.09	1.73
200	4.55	3.47	3.66	3.46
300	6.89	5.20	5.20	5.20
400	9.19	6.93	6.78	6.93
500	11.49	8.66	8.41	8.66
600	13.79	10.40	10.06	10.39
700	16.08	12.13	11.76	12.12
800	17.71	13.86	13.43	13.85
900	18.78	15.59	15.14	15.59
1000	19.15	17.36	16.85	17.35
1100	20.23	19.15	18.56	19.16
1200	22.28	20.22	19.82	20.23

unit : cm

表 4.4 裝置三種 PTMD 結構在 EL Centro 歷時不同 PGA 下頂層相對位移的效益比

EL Centro_Effective ratio of the Roof displacement			
PGA(gal)	Opt. linear TMD	Bilinear-elastic with frictional force TMD	Bi-hysteresis TMD
100	38.9%	16.8%	38.4%
200	38.9%	38.4%	38.4%
300	38.9%	41.8%	38.4%
400	38.8%	42.9%	38.4%
500	27.3%	32.7%	26.8%
600	22.6%	26.8%	22.2%
700	17.0%	18.7%	16.9%
800	12.1%	14.0%	12.0%
900	12.6%	13.8%	12.6%
1000	16.1%	17.6%	16.1%
1100	20.1%	21.3%	19.1%
1200	18.3%	17.5%	18.3%

表 4.5 結構裝置三種 PTMD 在 TCU129 歷時不同 PGA 下頂層相對位移的效益比

TCU129_Effective ratio of the Roof displacement			
PGA(gal)	Opt. linear TMD	Bilinear-elastic with frictional force TMD	Bi-hysteresis TMD
100	24.6%	9.2%	24.6%
200	23.8%	19.5%	23.8%
300	24.6%	24.5%	24.6%
400	24.6%	26.2%	24.6%
500	24.6%	26.8%	24.6%
600	24.6%	27.0%	24.7%
700	24.6%	26.9%	24.6%
800	21.7%	24.2%	21.8%
900	17.0%	19.4%	17.0%
1000	9.3%	12.0%	9.4%
1100	5.3%	8.3%	5.3%
1200	9.2%	11.0%	9.2%

表 4.6 裝置三種 PTMD 結構在基底構架降伏前後頂層相對位移平均效益比

底層構架降伏前後頂層相對位移平均效益比				
	EL Centro		TCU129	
	降伏前	降伏後	降伏前	降伏後
Optimal linear PTMD	34%	16%	23%	8%
Bi-linear elastic PTMD	31%	17%	23%	10%
Bi-hysteresis TMD	34%	16%	23%	8%

表 4.7 $T_p=1\text{sec}$, $\gamma=0.01\sim 0.1$, 最佳化線性 PTMD 設計參數

T_p (sec)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\gamma = (m_{TMD} / M_p)$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$M_p (tf \cdot s^2/m)$	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157
$m_{TMD} (tf \cdot s^2/m)$	0.012	0.023	0.035	0.046	0.058	0.069	0.081	0.093	0.104	0.116
$K_p (tf / m)$	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7	45.7
ξ_{TMD}	0.064	0.089	0.108	0.124	0.139	0.151	0.163	0.173	0.183	0.193
$k_{TMD} (tf / m)$	0.441	0.857	1.251	1.624	1.977	2.311	2.628	2.927	3.211	3.480
$c_{TMD} (tf \cdot s/m)$	0.009	0.025	0.045	0.068	0.094	0.121	0.150	0.181	0.212	0.245

表 4.8 $T_p=0.75\text{sec}$, $\gamma=0.01\sim 0.1$, 最佳化線性 PTMD 設計參數

T_p (sec)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$\gamma = (m_{TMD} / M_p)$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$M_p (tf \cdot s^2/m)$	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157
$m_{TMD} (tf \cdot s^2/m)$	0.012	0.023	0.035	0.046	0.058	0.069	0.081	0.093	0.104	0.116
$K_p (tf / m)$	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2	81.2
ξ_{TMD}	0.064	0.089	0.108	0.124	0.139	0.151	0.163	0.173	0.183	0.193
$k_{TMD} (tf / m)$	0.784	1.524	2.224	2.886	3.514	4.108	4.671	5.204	5.709	6.186
$c_{TMD} (tf \cdot s/m)$	0.012	0.034	0.060	0.091	0.125	0.161	0.200	0.241	0.283	0.326

表 4.9 $T_p=0.5\text{sec}$ ， $\gamma=0.01\sim 0.1$ ，最佳化線性 PTMD 設計參數

$T_p(\text{sec})$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\gamma = (m_{TMD} / M_p)$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$M_p(tf \cdot s^2/m)$	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157	1.157
$m_{TMD}(tf \cdot s^2/m)$	0.012	0.023	0.035	0.046	0.058	0.069	0.081	0.093	0.104	0.116
$K_p(tf/m)$	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7	182.7
ξ_{TMD}	0.064	0.089	0.108	0.124	0.139	0.151	0.163	0.173	0.183	0.193
$k_{TMD}(tf/m)$	1.764	3.428	5.003	6.494	7.906	9.244	10.510	11.710	12.845	13.919
$c_{TMD}(tf \cdot s/m)$	0.018	0.050	0.090	0.136	0.187	0.242	0.300	0.361	0.424	0.490

表 4.10 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比(D_{\max} / Dy)之影響

γ	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$T_p = 1(\text{sec})$	2.50	2.58	2.63	2.63	2.63	2.63	2.60	2.57	2.54	2.53	2.52
$T_p = 0.75(\text{sec})$	3.08	3.01	3.03	3.05	3.06	3.08	3.08	3.08	3.08	3.08	3.09
$T_p = 0.5(\text{sec})$	3.64	3.86	4.04	4.14	4.19	4.22	4.23	4.24	4.25	4.26	4.28

表 4.11 改變底層結構周期與質量比對頂層絕對最大加速度之影響

γ	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$T_p = 1(\text{sec})$	2.275	2.268	2.285	2.291	2.287	2.293	2.293	2.292	2.292	2.295	2.301
$T_p = 0.75(\text{sec})$	2.394	2.356	2.337	2.316	2.311	2.314	2.319	2.317	2.316	2.319	2.323
$T_p = 0.5(\text{sec})$	2.500	2.519	2.511	2.485	2.465	2.448	2.434	2.420	2.399	2.378	2.363

表 4.12 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比(D_{max} / Dy)之影響(地震加速度縮放 0.2PGA)

γ	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$T_p = 1(\text{sec})$	0.718	0.580	0.531	0.501	0.484	0.474	0.467	0.458	0.448	0.426	0.427
$T_p = 0.75(\text{sec})$	0.889	0.763	0.708	0.668	0.638	0.628	0.613	0.602	0.593	0.585	0.577
$T_p = 0.5(\text{sec})$	1.053	0.788	0.713	0.680	0.660	0.645	0.632	0.618	0.607	0.600	0.594

表 4.13 改變底層結構周期與質量比對頂層絕對最大加速度之影響(地震加速度縮放 0.2PGA)

γ	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$T_p = 1(\text{sec})$	1.409	1.142	1.043	1.001	0.942	0.797	0.894	0.873	0.853	0.699	0.813
$T_p = 0.75(\text{sec})$	1.743	1.482	1.365	1.282	1.217	1.195	1.161	1.136	1.114	1.094	1.076
$T_p = 0.5(\text{sec})$	1.956	1.531	1.366	1.293	1.249	1.210	1.175	1.143	1.114	1.093	1.075

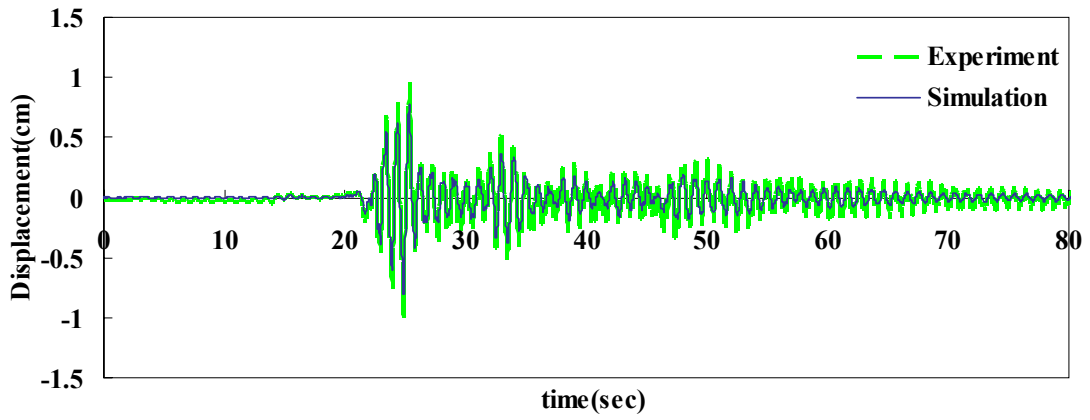
表 4.14 裝設 PTMD 構架在 TCU059 歷時下，基底構架保持彈性 PTMD 等效阻尼之貢獻

	$\xi_{inherent}$	ξ_e	$\xi_e(\text{PTMD contribution})$
$T_p = 0.5(\text{sec})$	2%	5.08%	3.08%
$T_p = 0.75(\text{sec})$	2%	6.75%	4.75%
$T_p = 1(\text{sec})$	2%	8.80%	6.8%

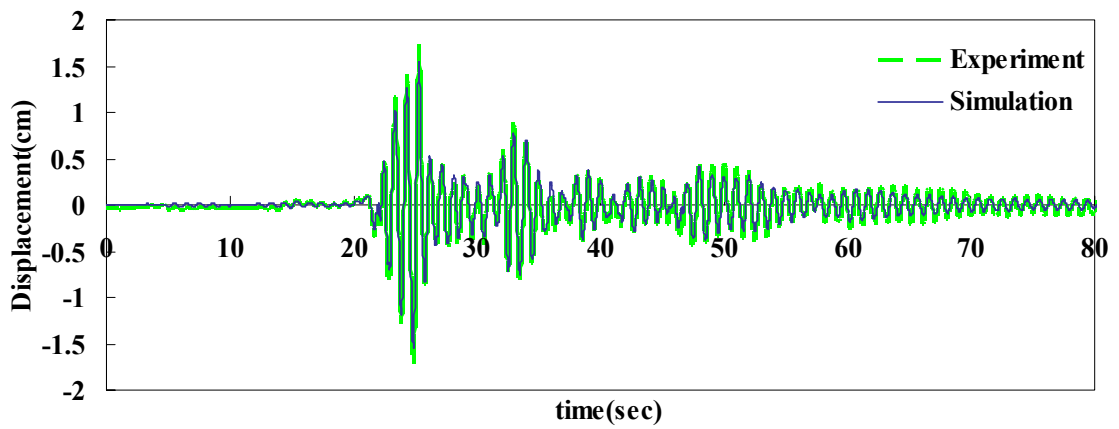
表 4.15 裝設 PTMD 構架在 TCU059 歷時下，基底構架降伏後 PTMD 等效阻尼之貢獻

$$(\xi_{inherent} = 0.02)$$

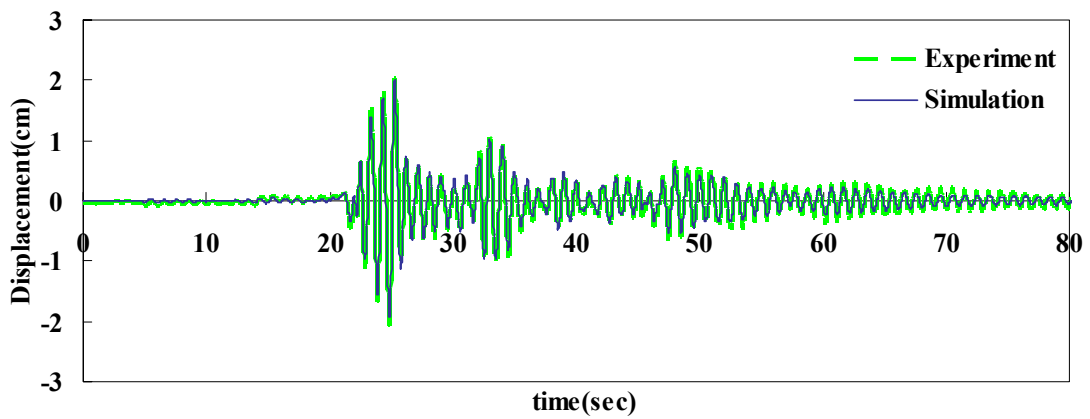
		$T_e(s)$	μ	$\xi_{e(inelasticity)}$	$\xi_{e(damper)}$	ξ_e	$\xi_{e(PTMD\ contribution)}$
$T_p = 1(s)$	MRF	1.17	1.9457	0.143	0	0.163	0.45%
	MRF+TMD	1.21	1.9459	0.142	0.0045	0.1667	
$T_p = 0.75(s)$	MRF	1.01	2.841	0.229	0	0.249	$\leq 1.9\%$
	MRF+TMD	1.09	3.12	0.245	0.003	0.268	
$T_p = 0.5(s)$	MRF	0.72	3.486	0.263	0	0.283	$\leq 4.9\%$
	MRF+TMD	0.78	4.19	0.286	0.026	0.33	



(a) EL Centro_50gal(1st Story)

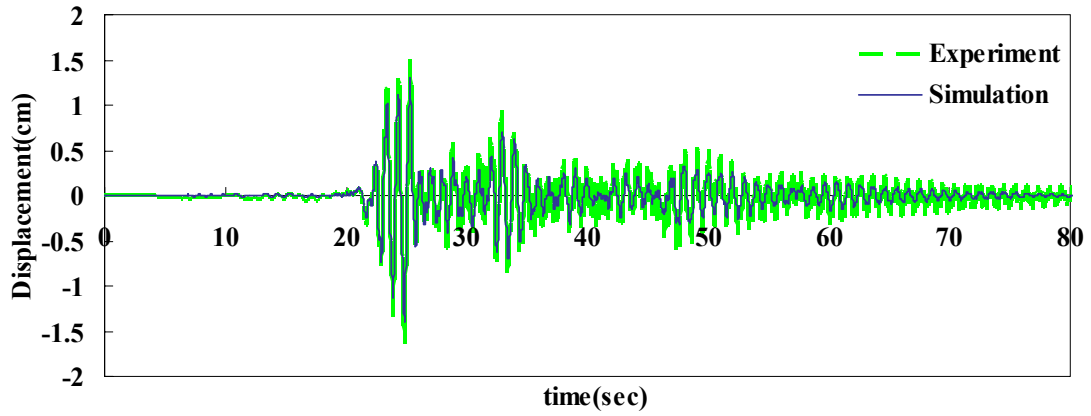


(b) EL Centro_50gal(2nd Story)

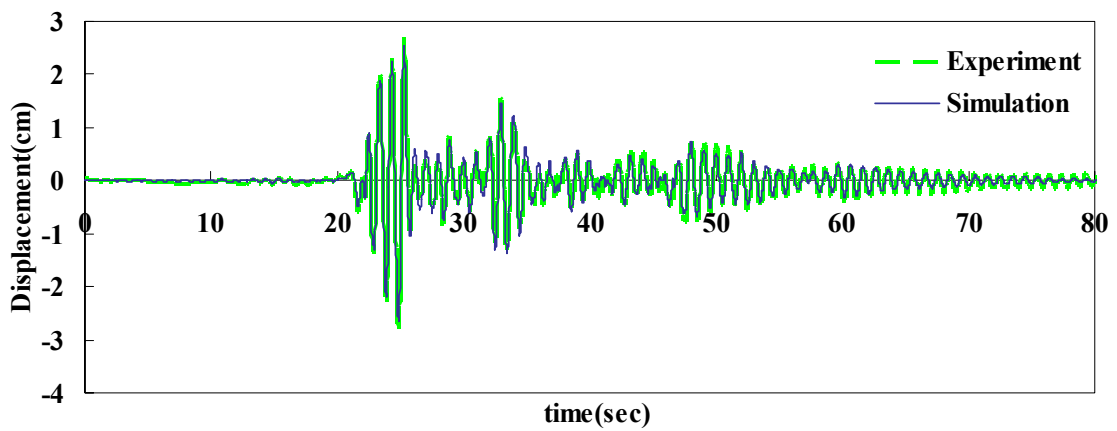


(c) EL Centro_50gal(Roof)

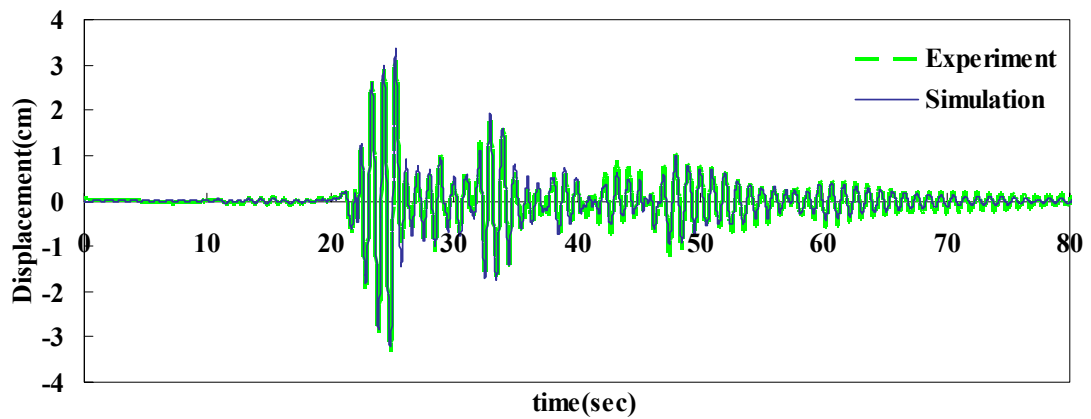
圖4.1 EL Centro_50gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_100gal(1st Story)

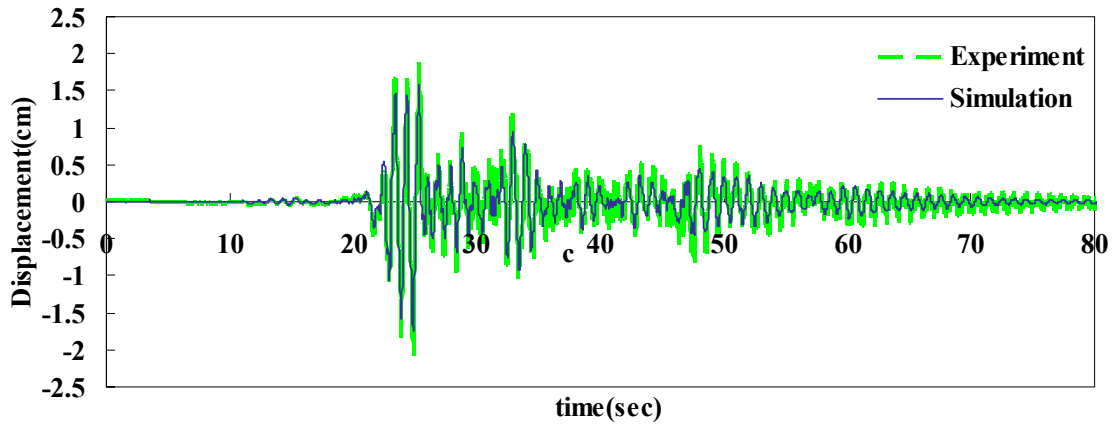


(b) EL Centro_100gal(2nd Story)

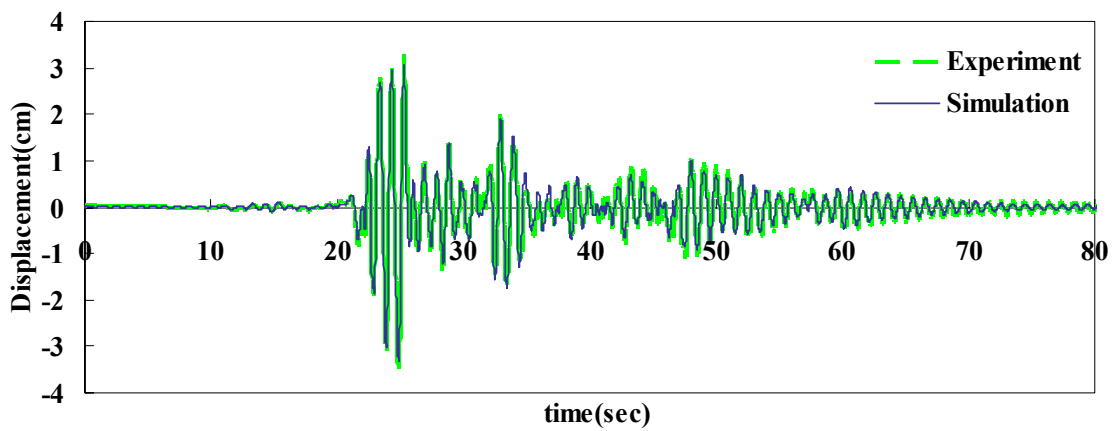


(c) EL Centro_100gal(Roof)

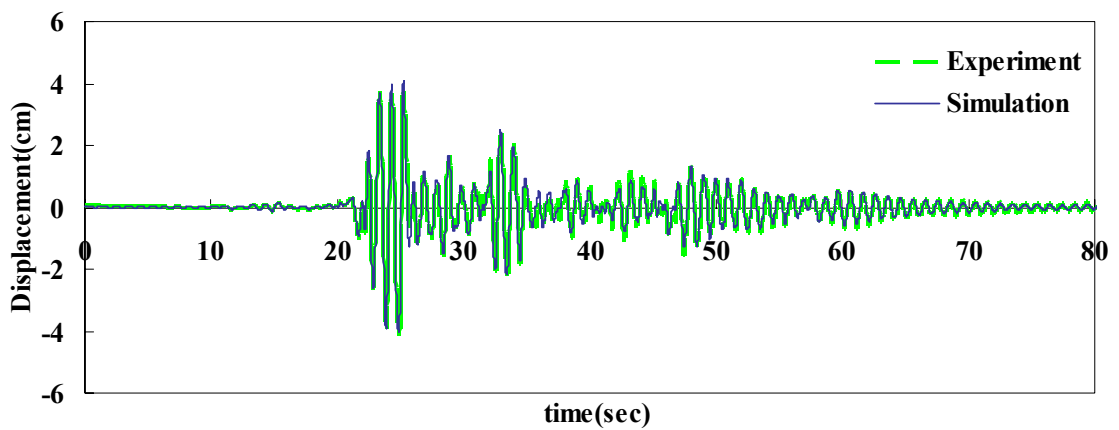
圖4.2 EL Centro_100gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_150gal(1st Story)

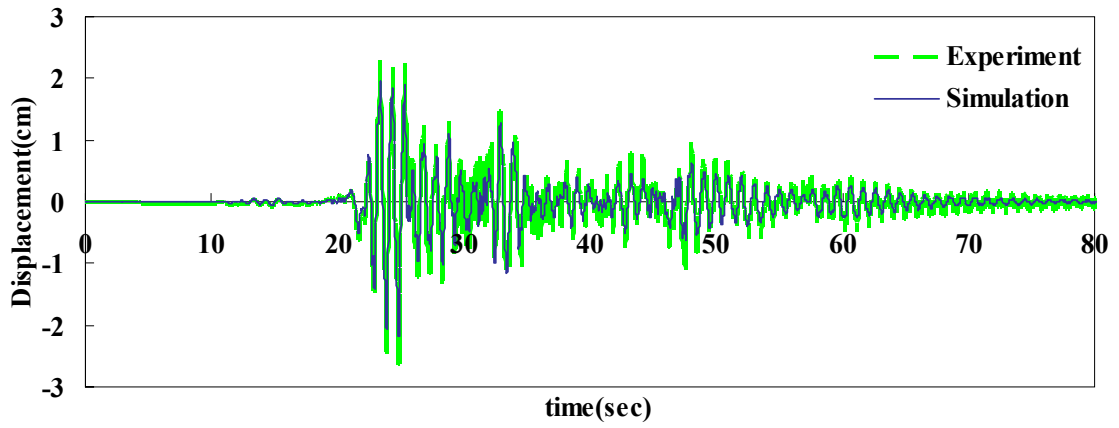


(b) EL Centro_150gal(2nd Story)

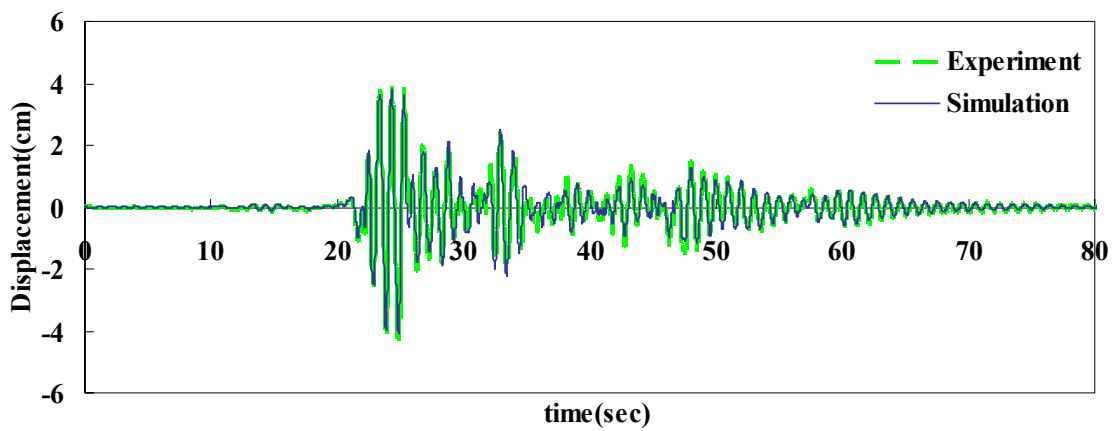


(c) EL Centro_150gal(Roof)

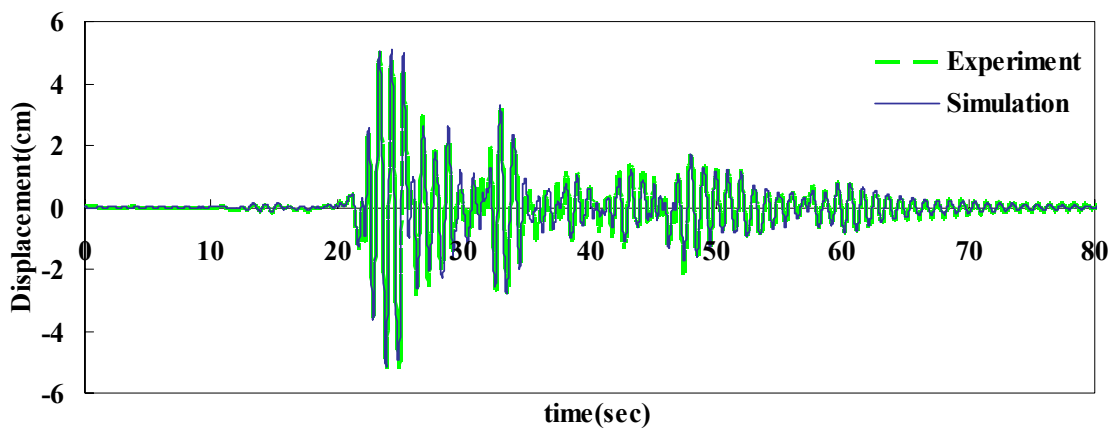
圖4.3 EL Centro_150gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_200gal(1st Story)

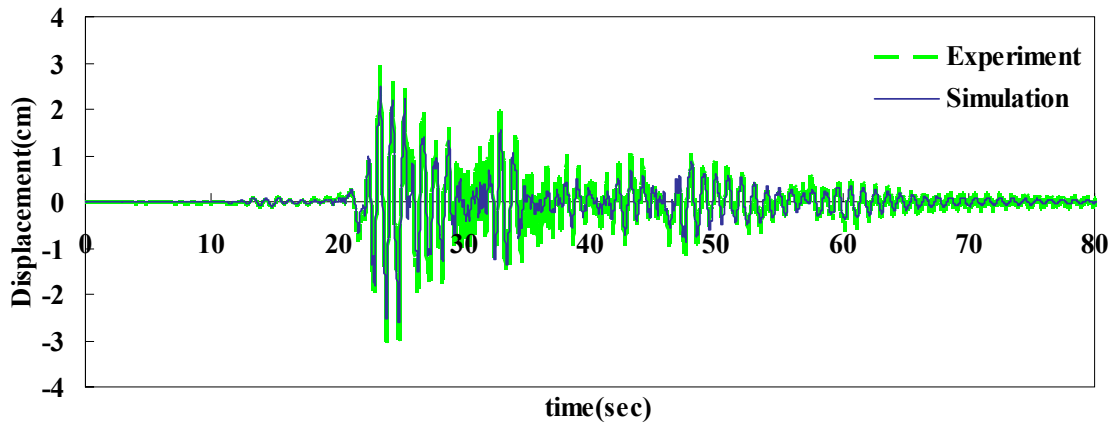


(b) EL Centro_200gal(2nd Story)

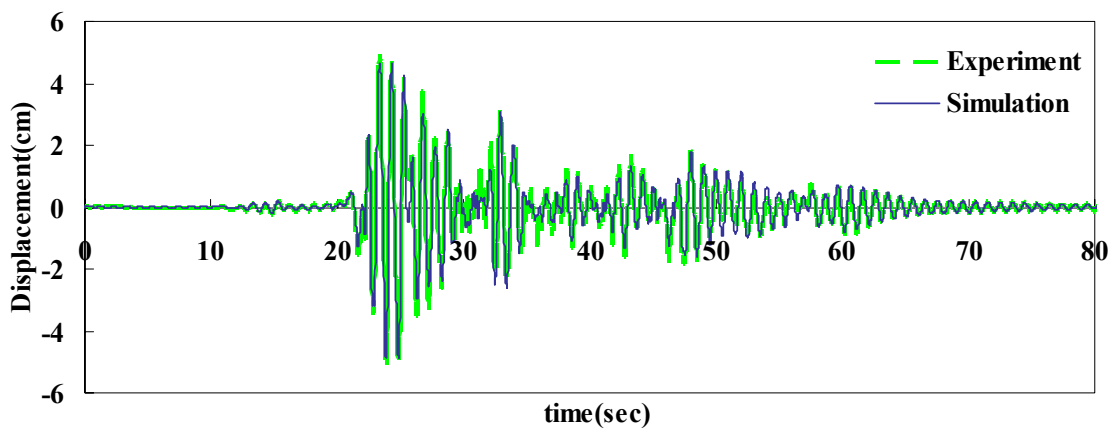


(c) EL Centro_200gal(Roof)

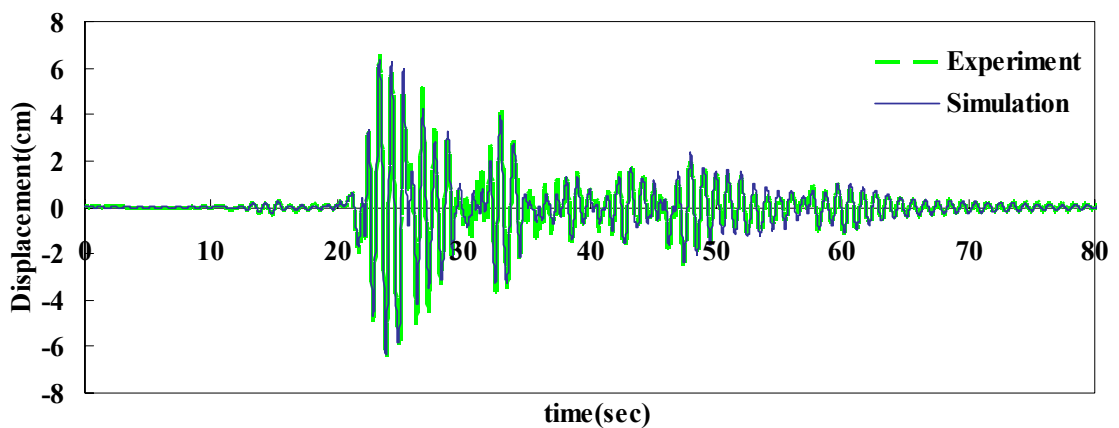
圖4.4 EL Centro_200gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_250gal(1st Story)

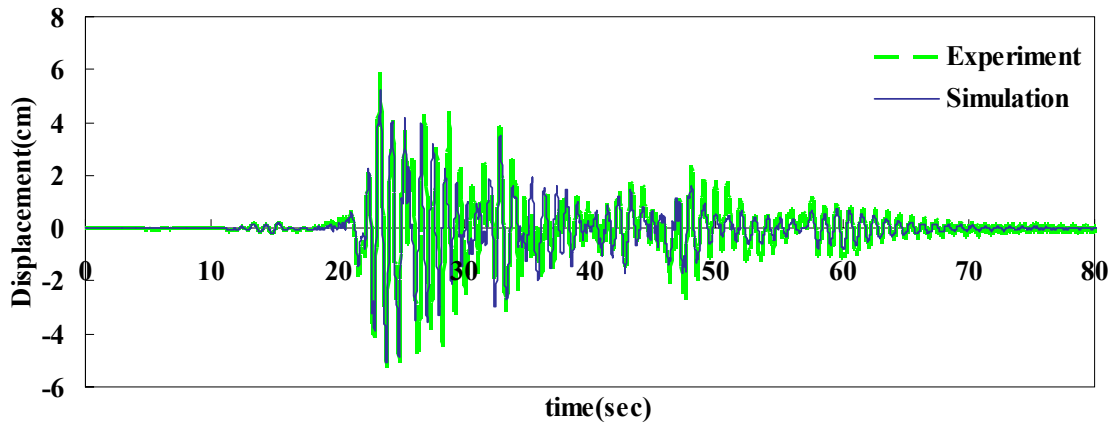


(b) EL Centro_250gal(2nd Story)

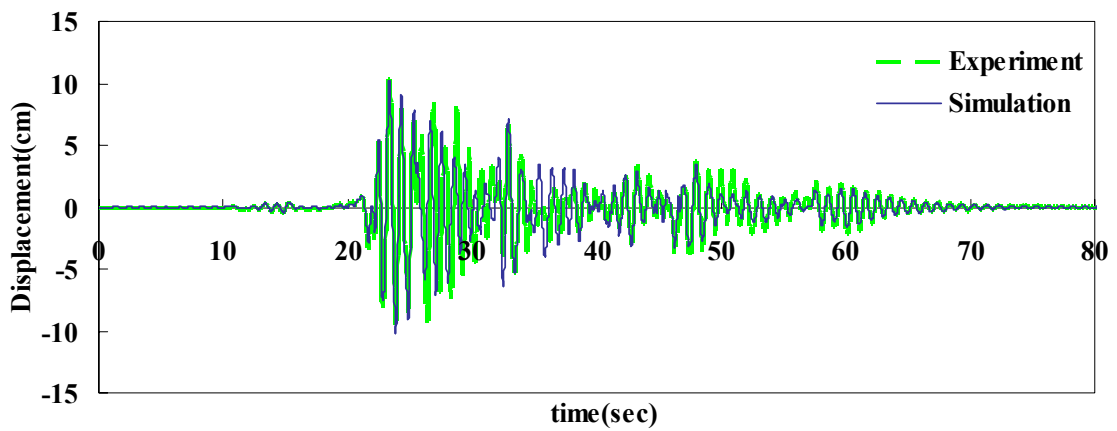


(c) EL Centro_250gal(Roof)

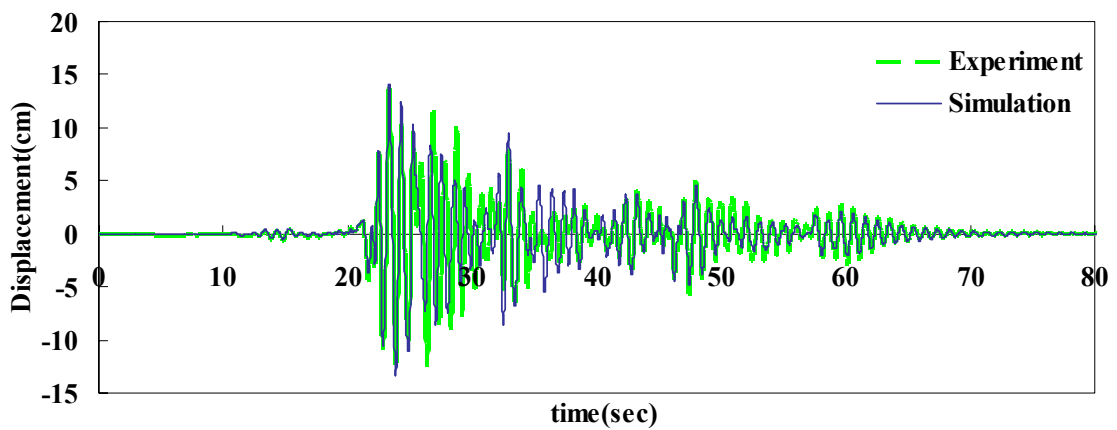
圖4.5 EL Centro_250gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_500gal(1st Story)

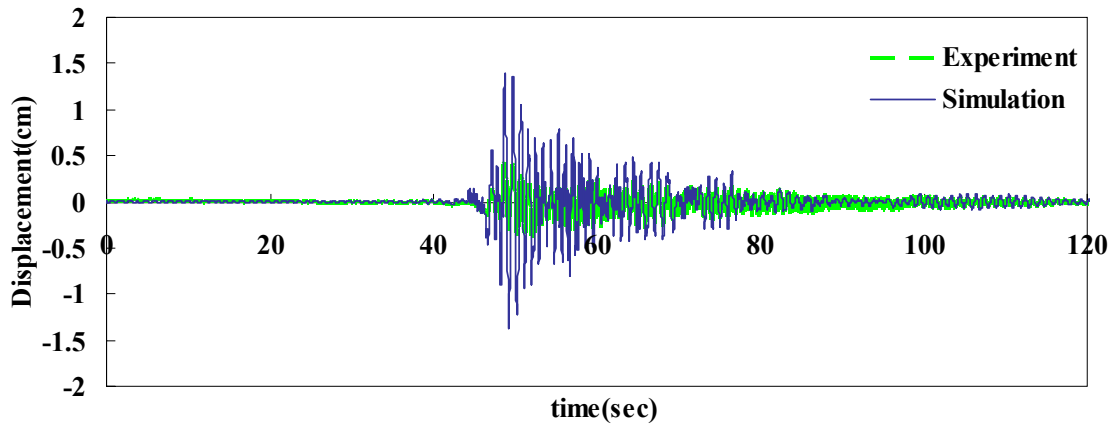


(b) EL Centro_500gal(2nd Story)

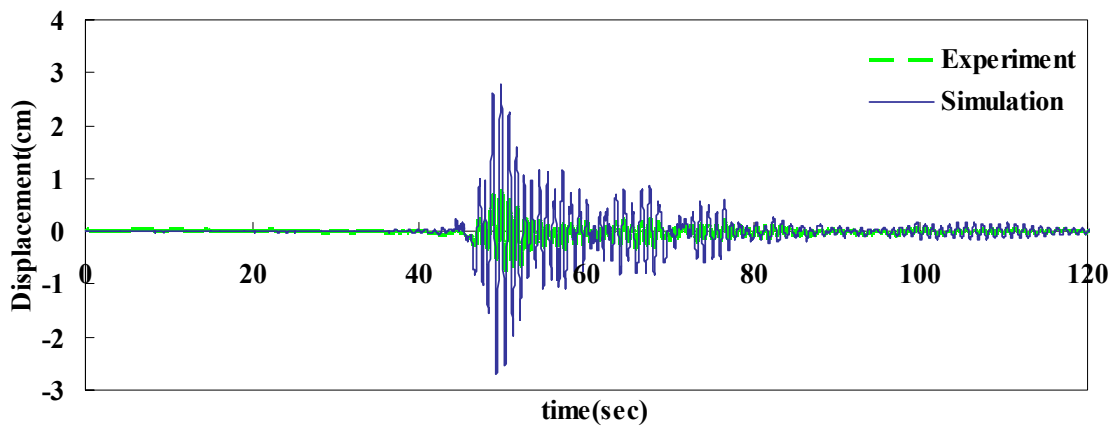


(c) EL Centro_500gal(Roof)

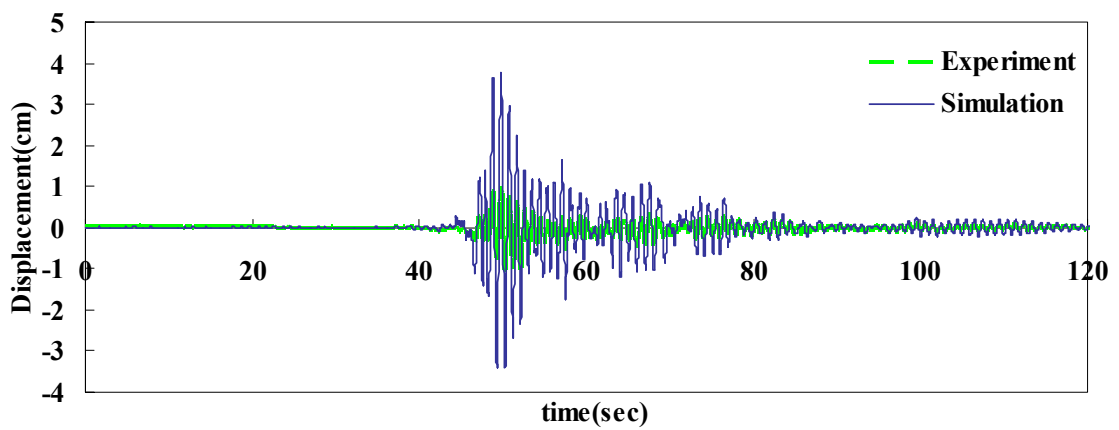
圖4.6 EL Centro_500gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_50gal(1st Story)

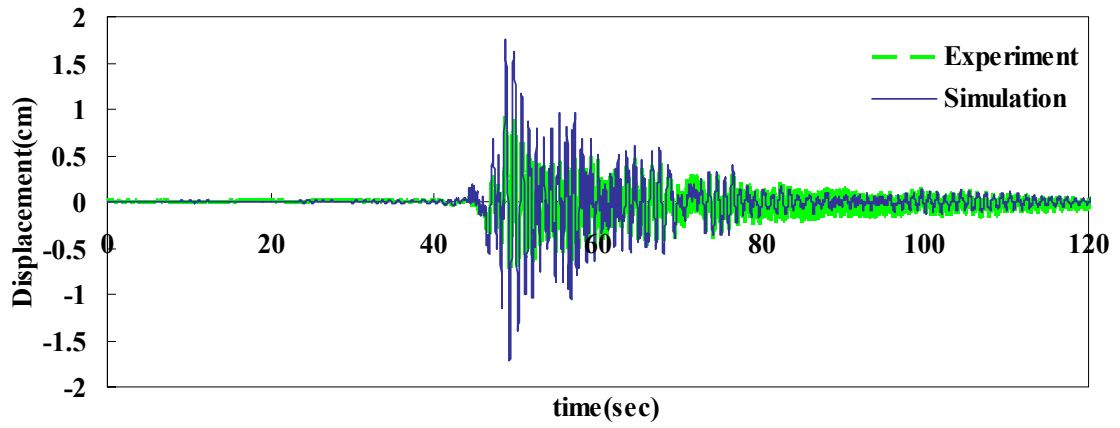


(b) TCU129_50gal(2nd Story)

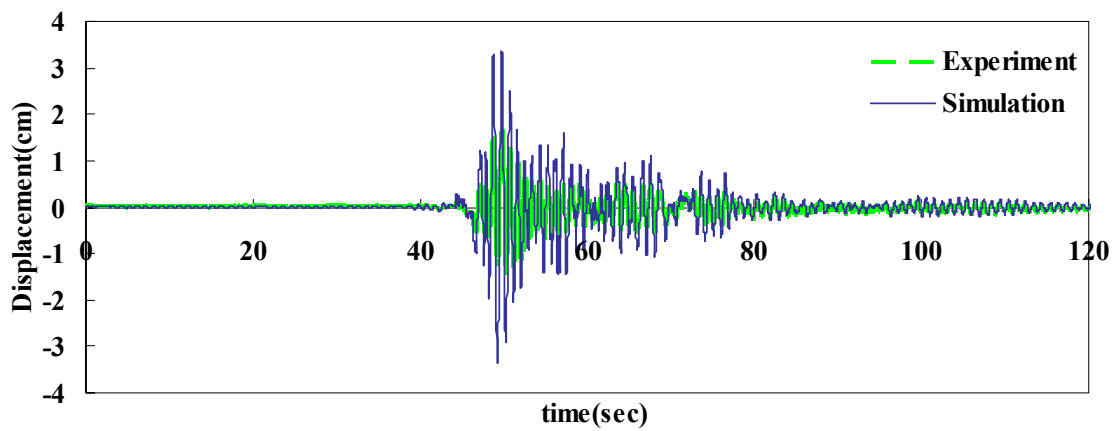


(c) TCU129_50gal(Roof)

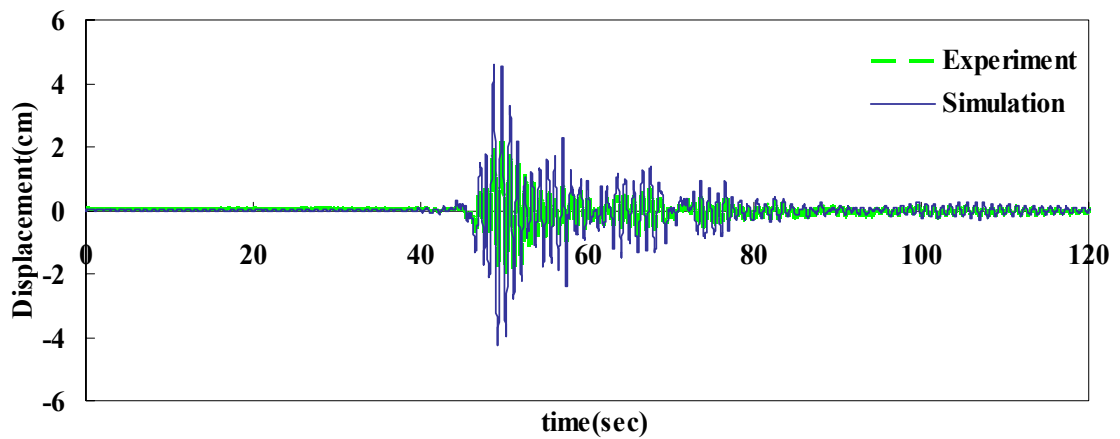
圖4.7 TCU129_50gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_100gal(1st Story)

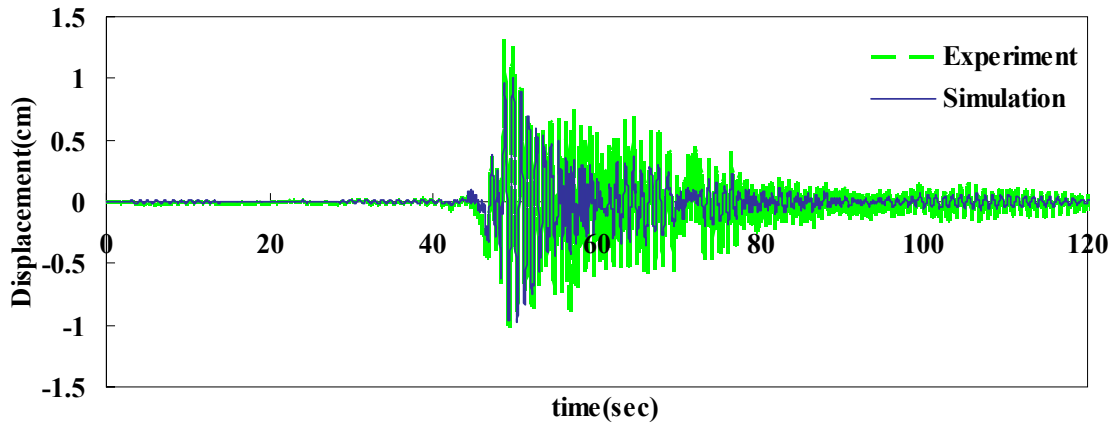


(b) TCU129_100gal(2nd Story)

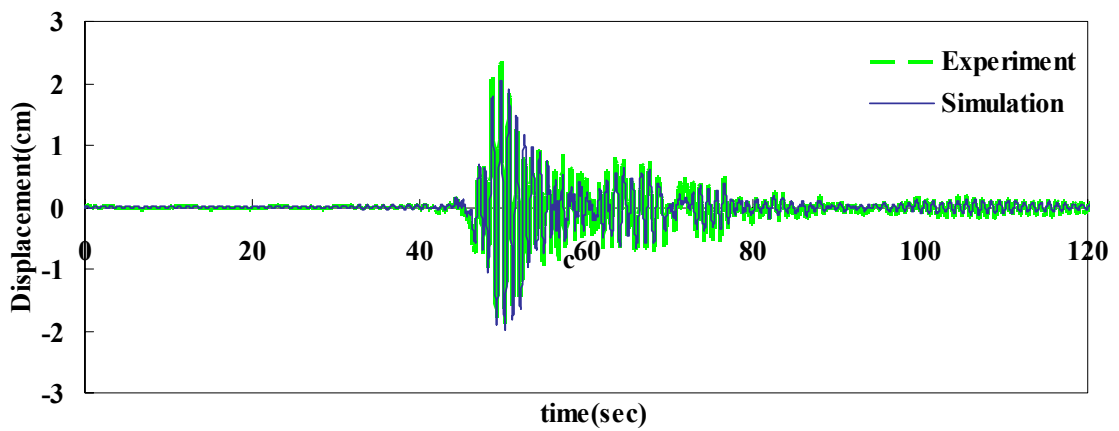


(c) TCU129_100gal(Roof)

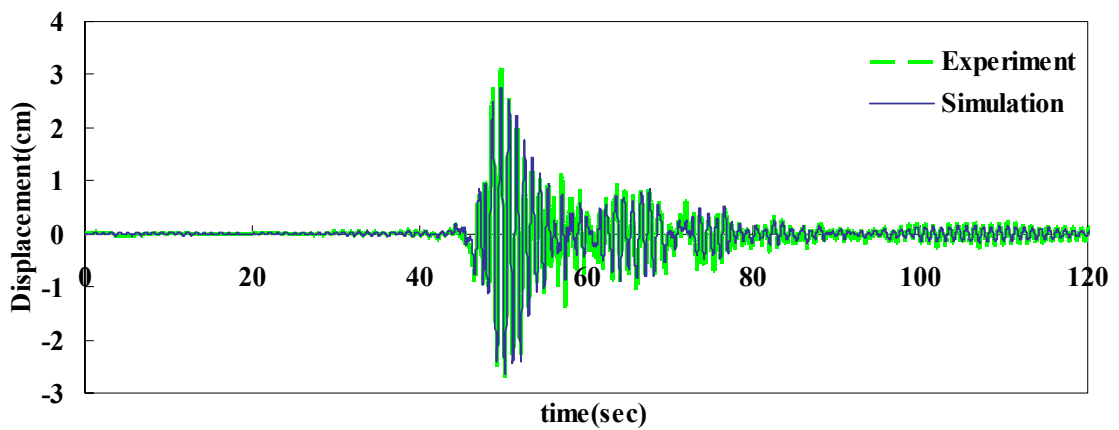
圖4.8 TCU129_100gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_150gal(1st Story)

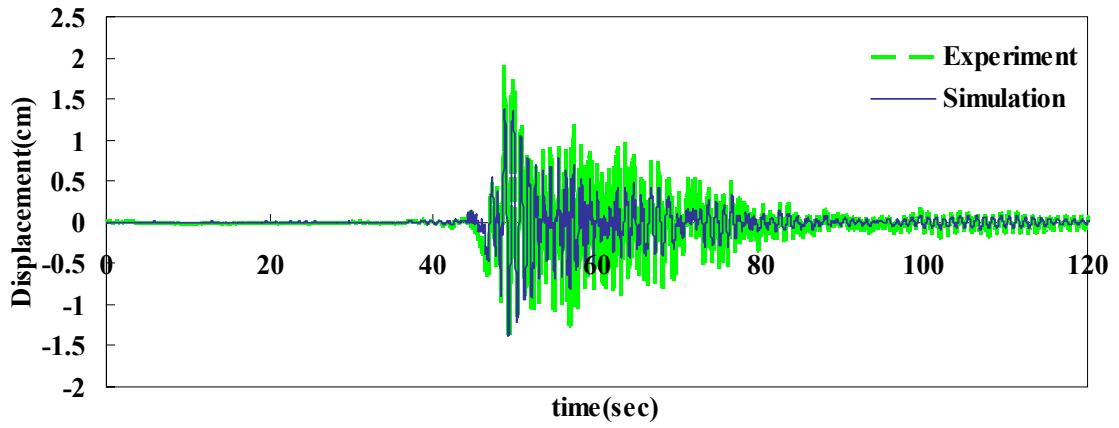


(b) TCU129_150gal(2nd Story)

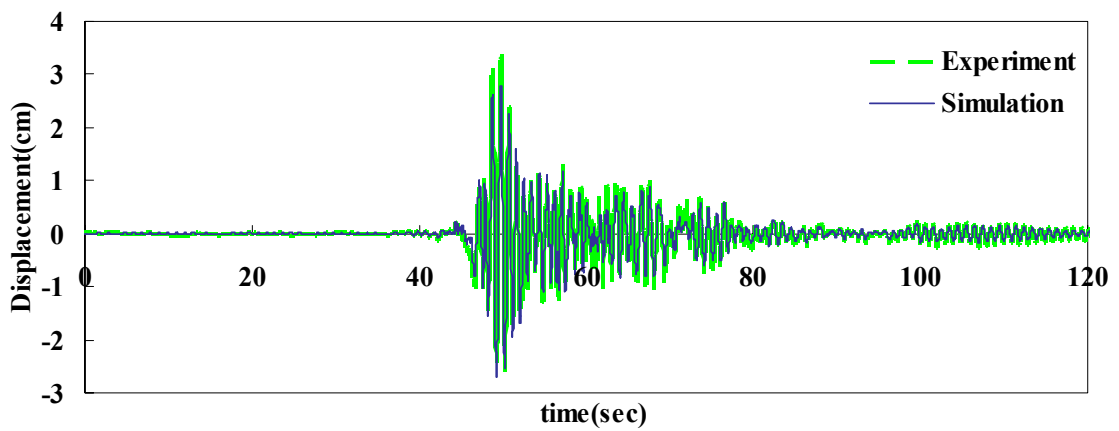


(c) TCU129_150gal(Roof)

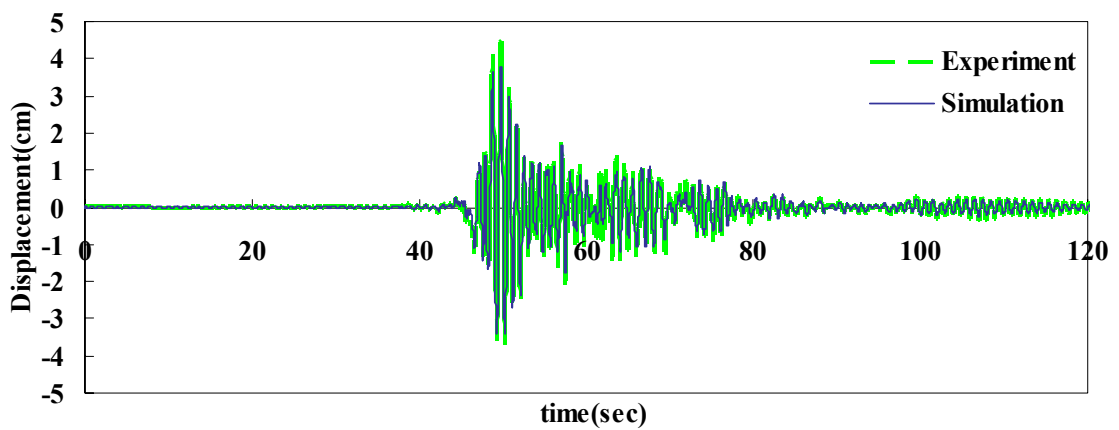
圖4.9 TCU129_150gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_200gal(1st Story)

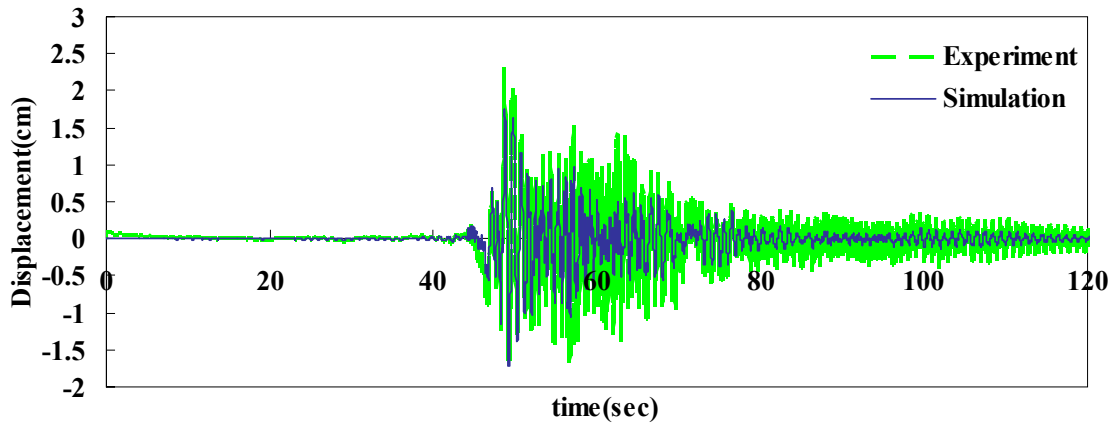


(b) TCU129_200gal(2nd Story)

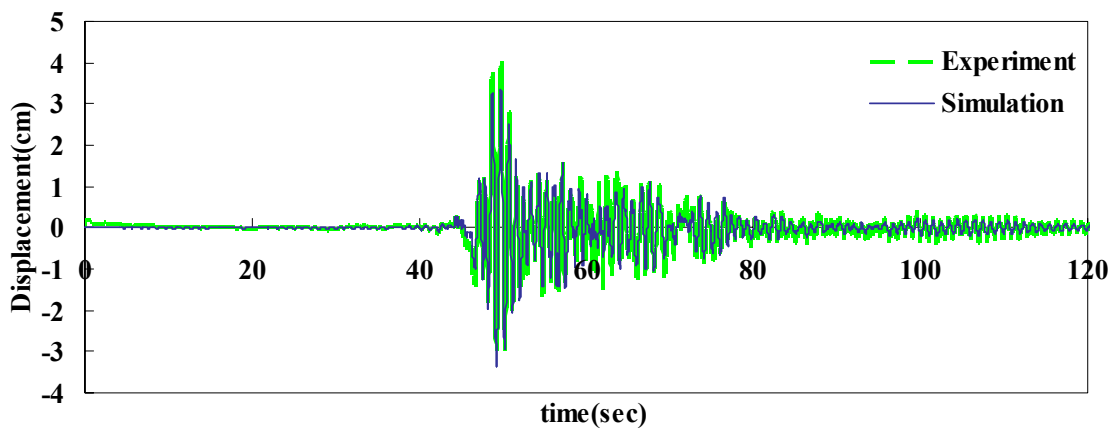


(c) TCU129_200gal(Roof)

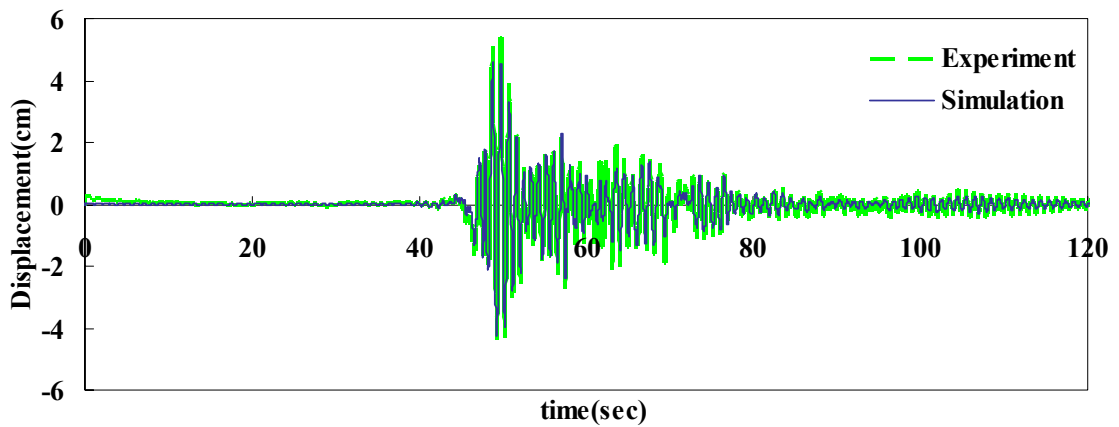
圖4.10 TCU129_200gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_250gal(1st Story)

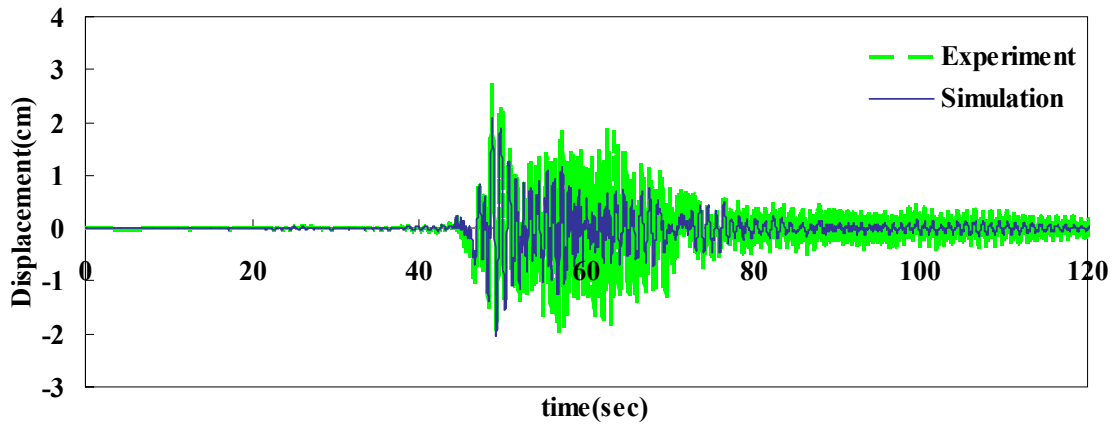


(b) TCU129_250gal(2nd Story)

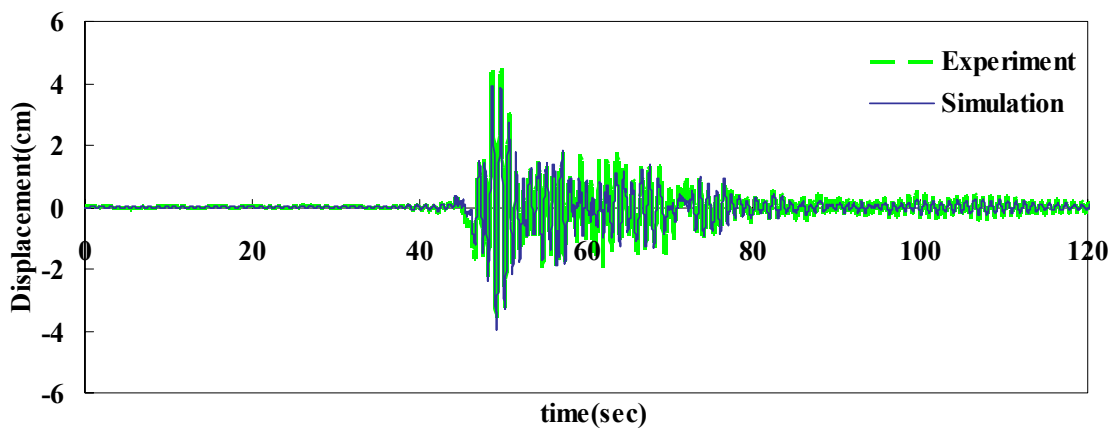


(c) TCU129_250gal(Roof)

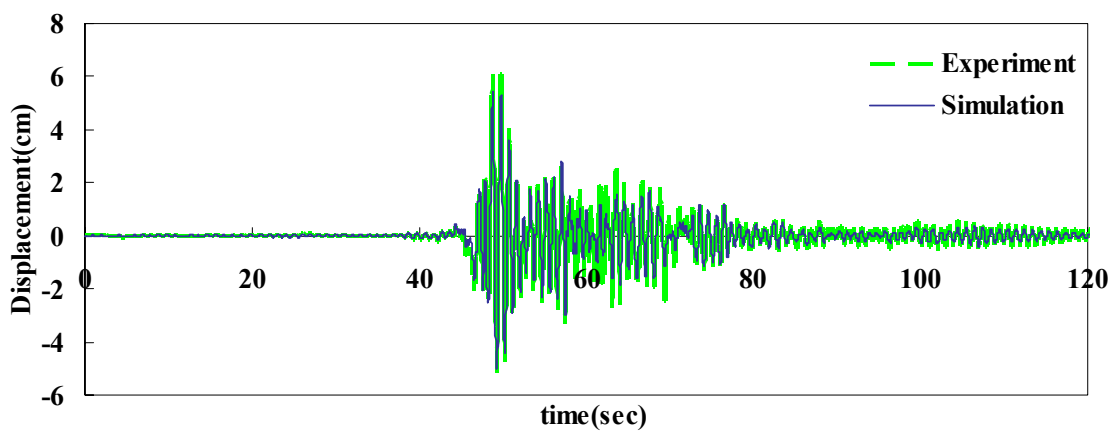
圖4.11 TCU129_250gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_300gal(1st Story)

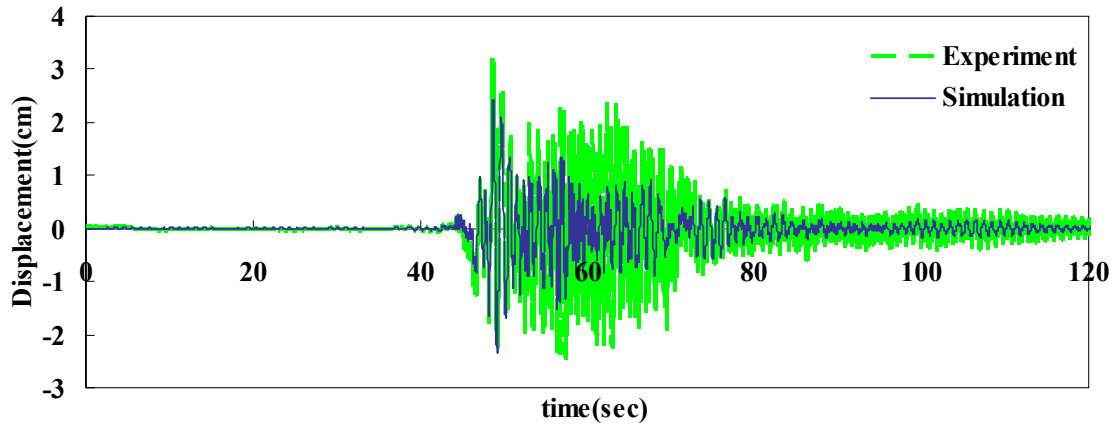


(b) TCU129_300gal(2nd Story)

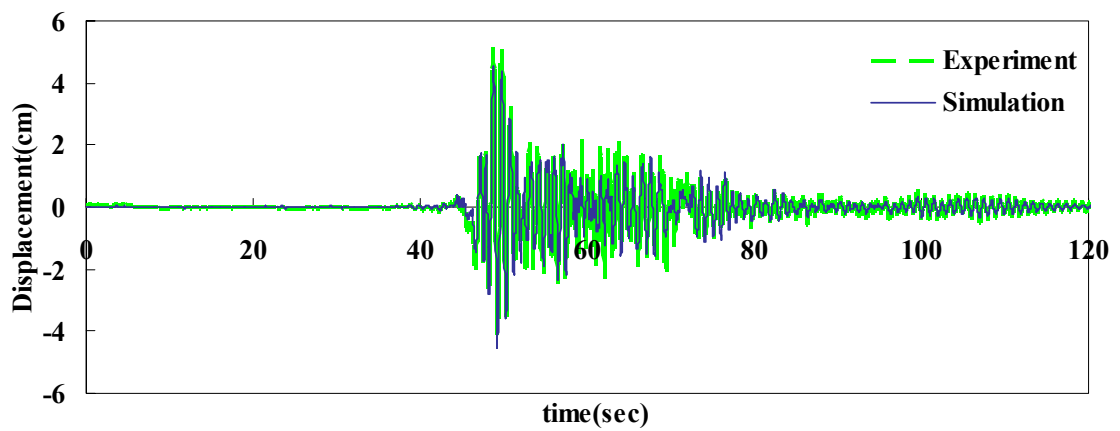


(c) TCU129_300gal(Roof)

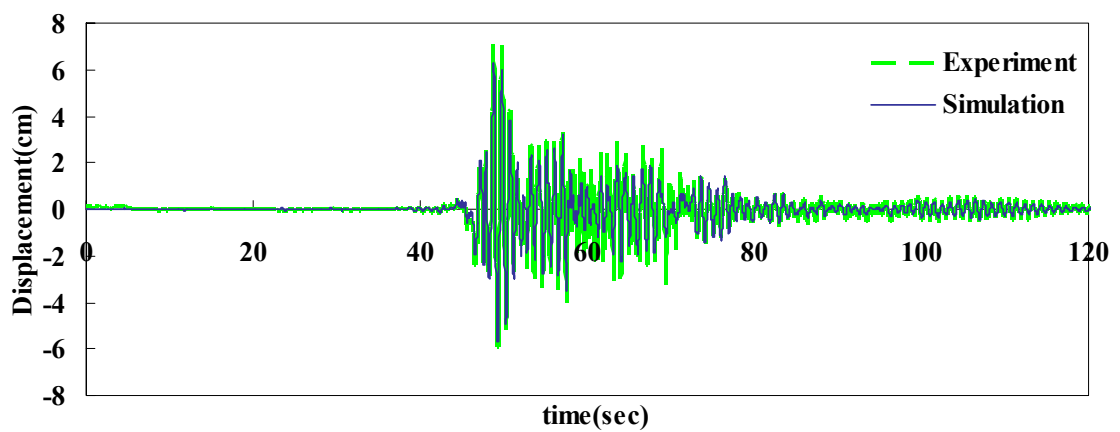
圖4.12 TCU129_300gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) TCU129_350gal(1st Story)

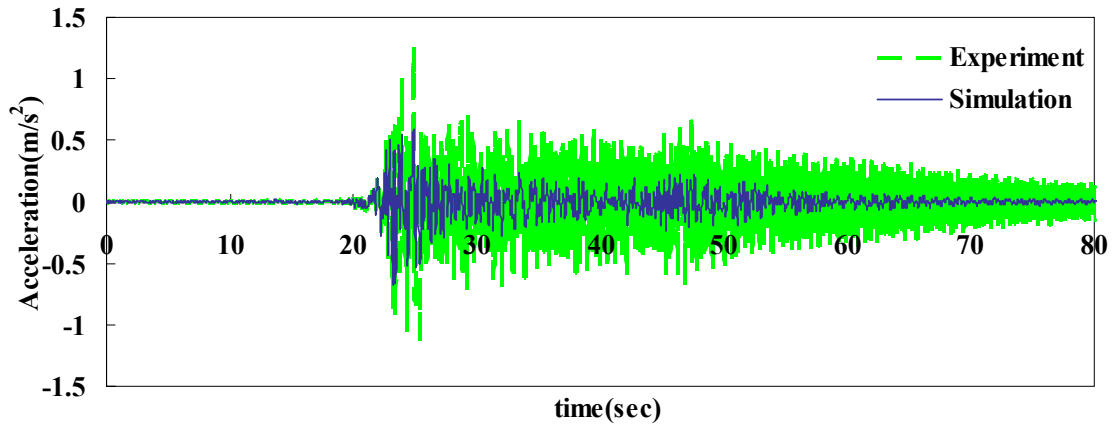


(b) TCU129_350gal(2nd Story)

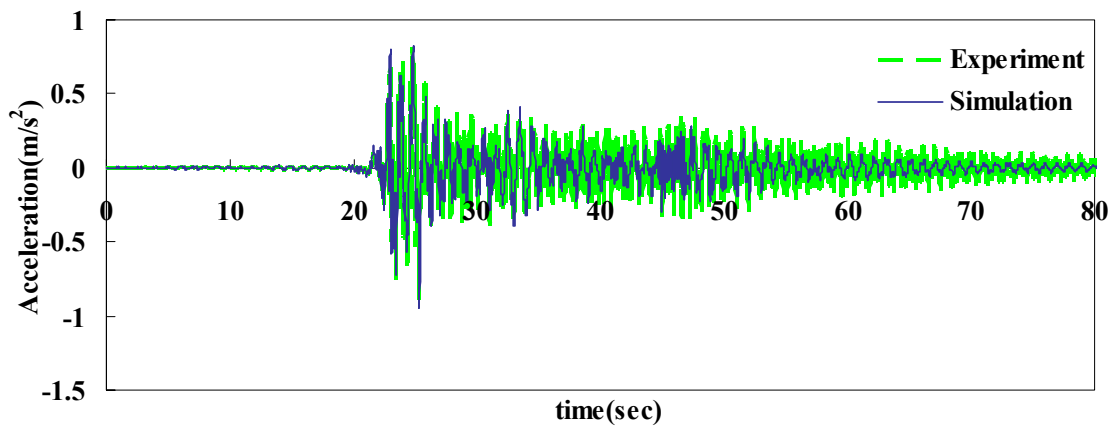


(c) TCU129_350gal(Roof)

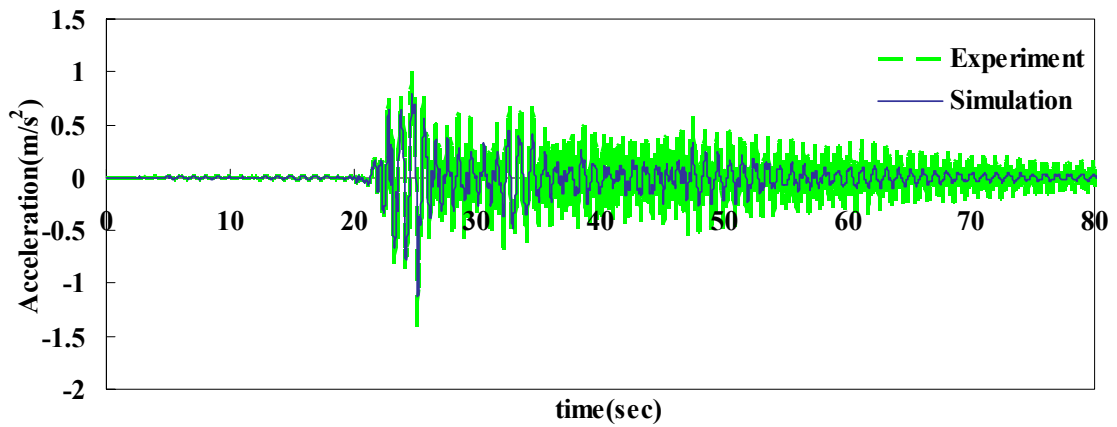
圖4.13 TCU129_350gal實驗與模擬樓層相對位移歷時比較



(a) EL Centro_50gal(1st Story)

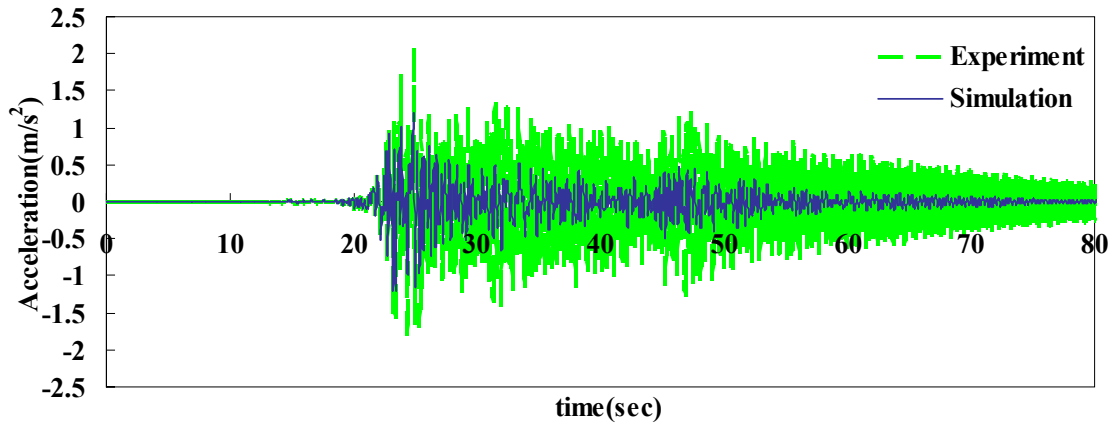


(b) EL Centro_50gal(2nd Story)

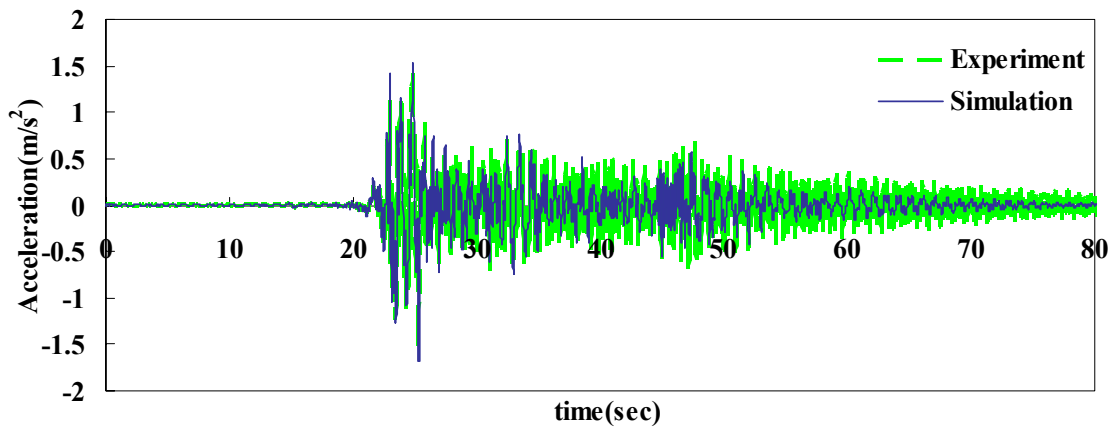


(c) EL Centro_50gal(Roof)

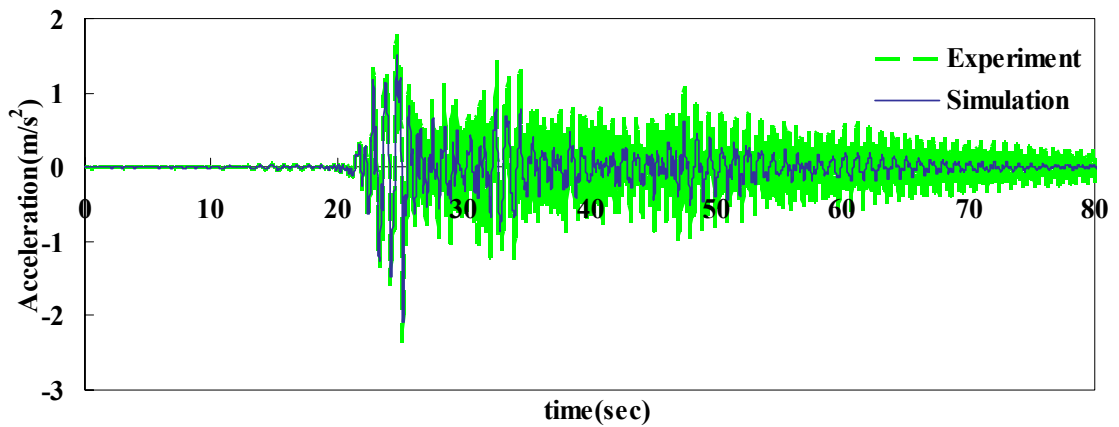
圖4.14 EL Centro_50gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) EL Centro_100gal(1st Story)

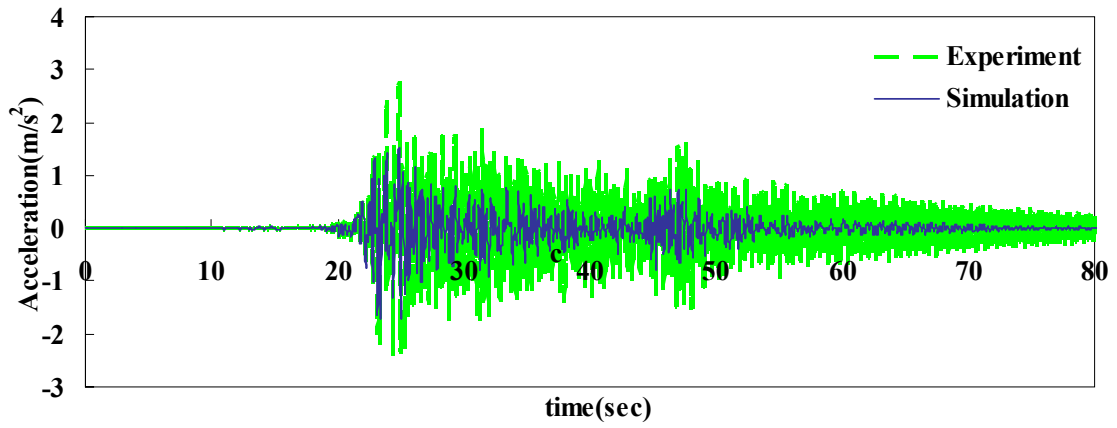


(b) EL Centro_100gal(2nd Story)

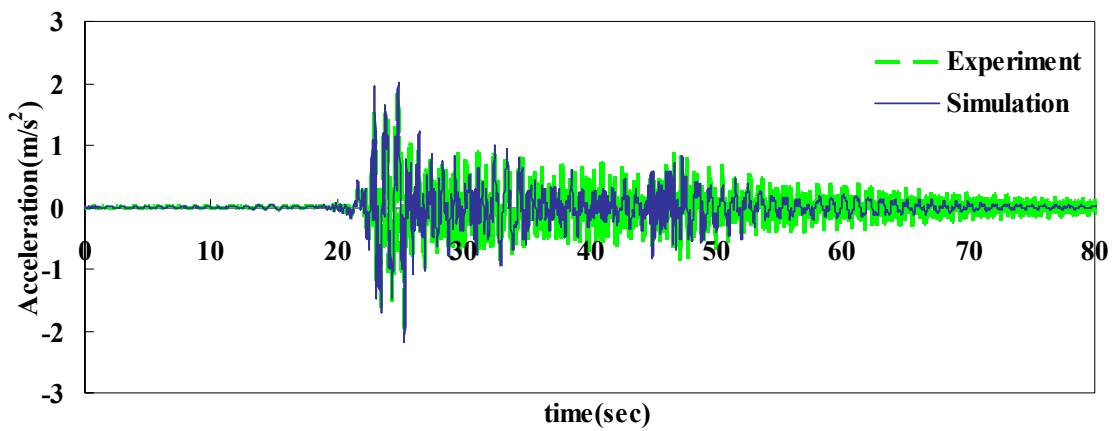


(c) EL Centro_100gal(Roof)

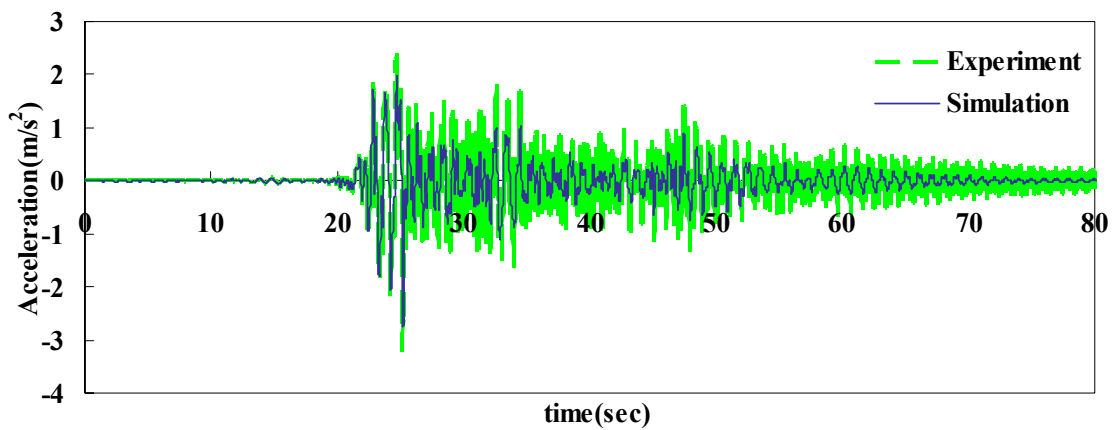
圖4.15 EL Centro_100gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) EL Centro_150gal(1st Story)

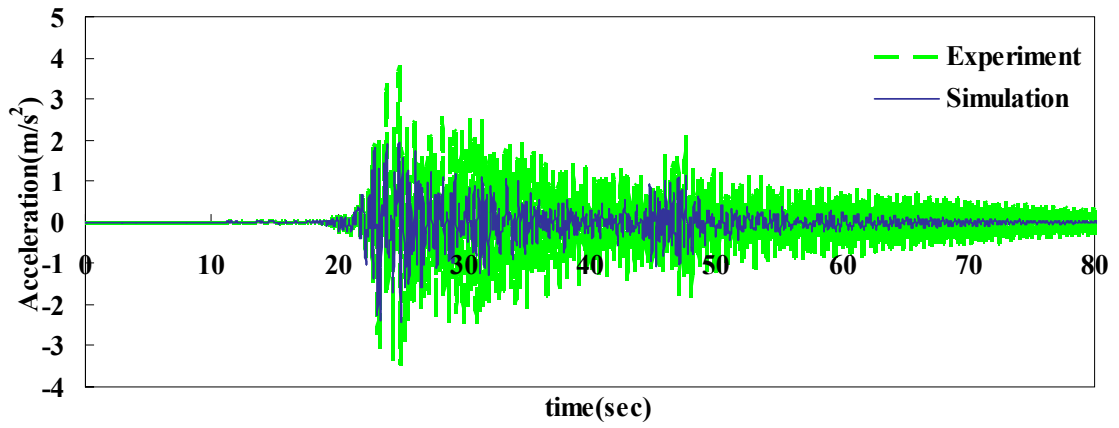


(b) EL Centro_150gal(2nd Story)

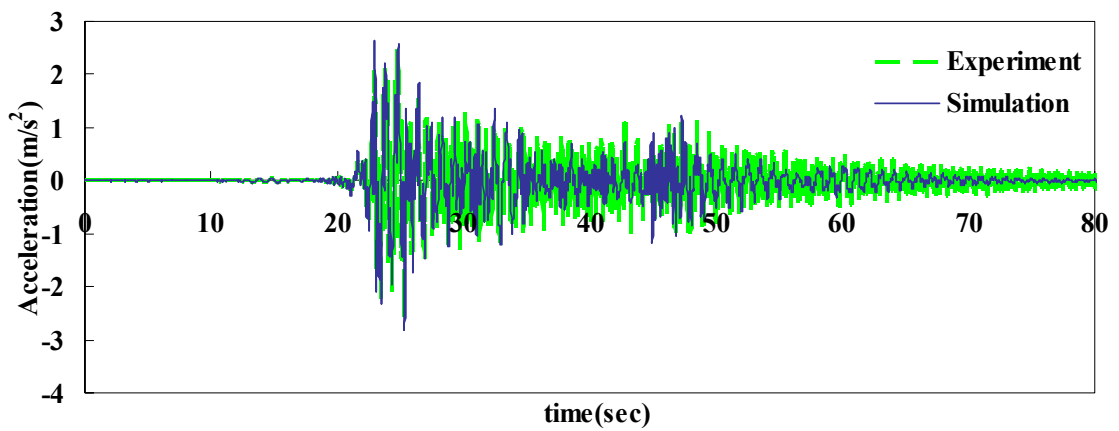


(c) EL Centro_150gal(Roof)

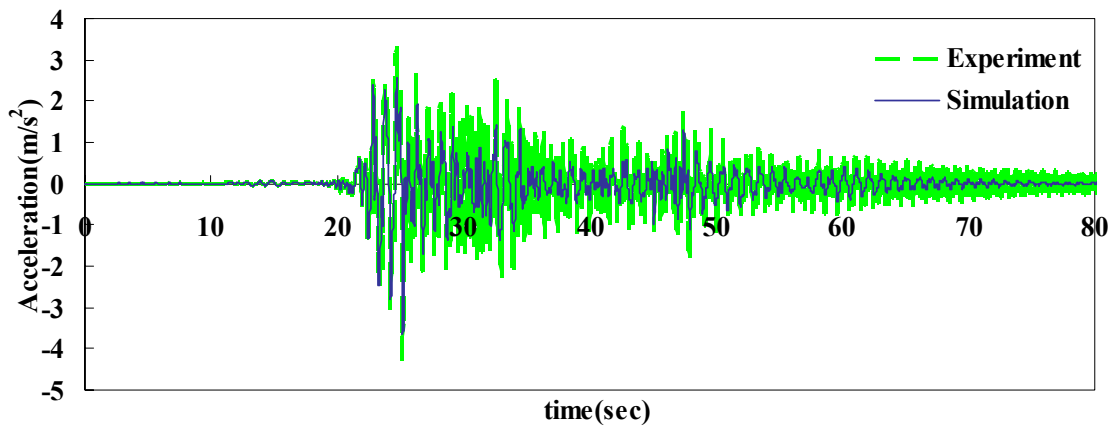
圖4.16 EL Centro_150gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) EL Centro_200gal(1st Story)

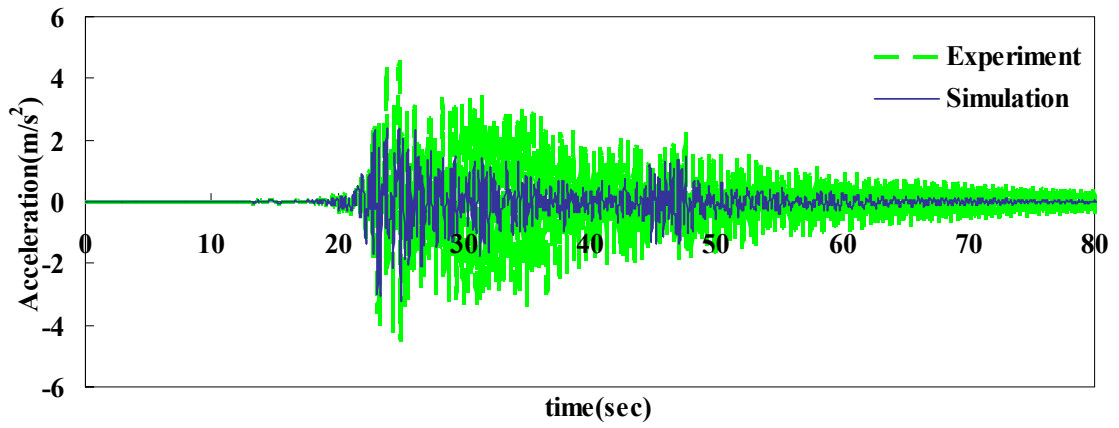


(b) EL Centro_200gal(2nd Story)

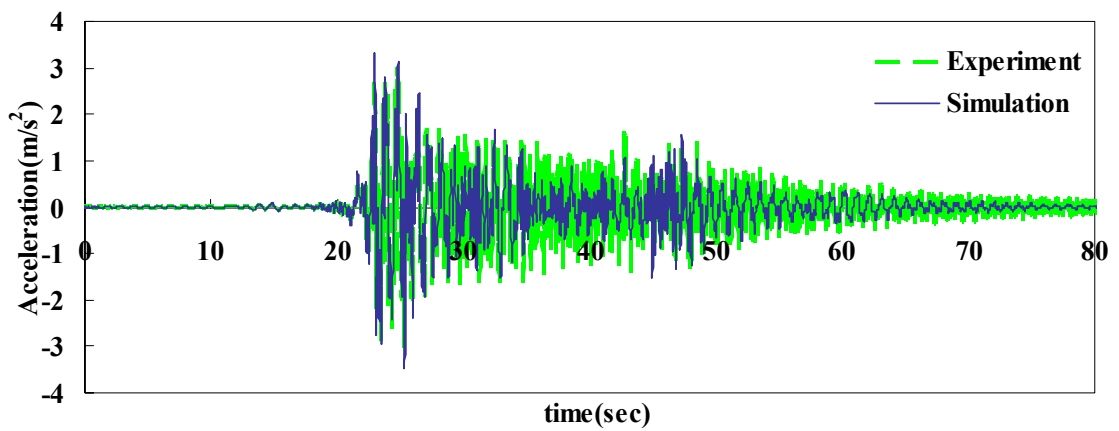


(c) EL Centro_200gal(Roof)

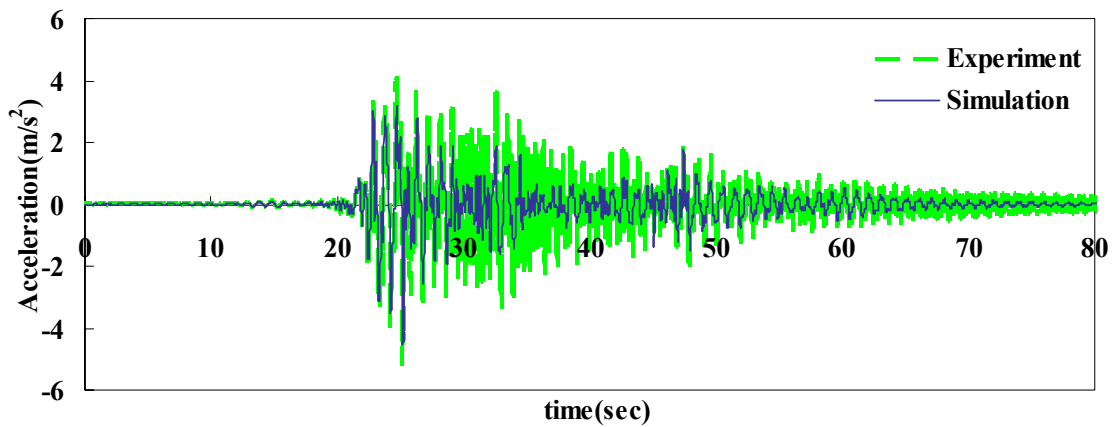
圖4.17 EL Centro_200gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) EL Centro_250gal(1st Story)

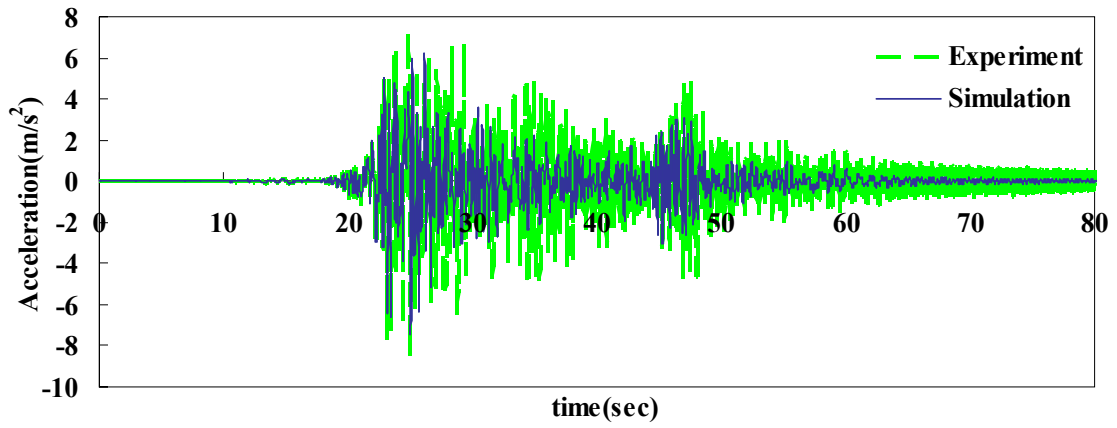


(b) EL Centro_250gal(2nd Story)

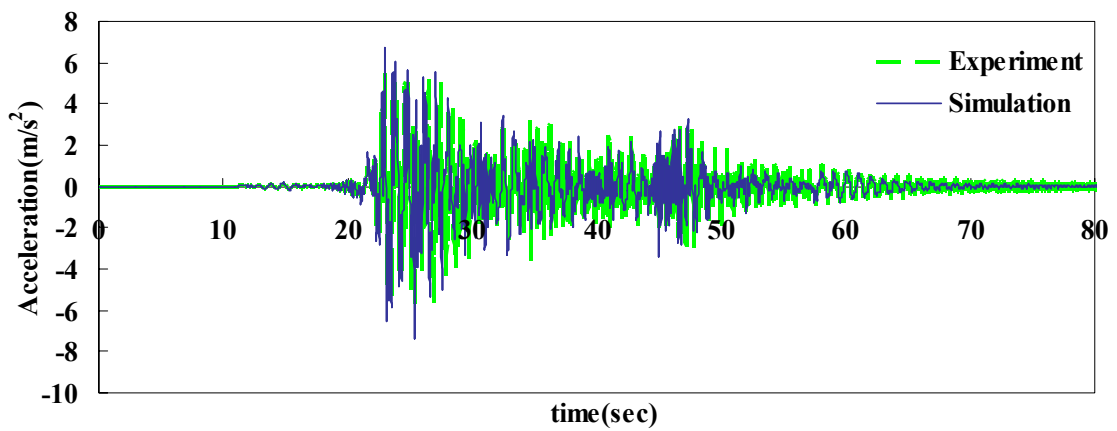


(c) EL Centro_250gal(Roof)

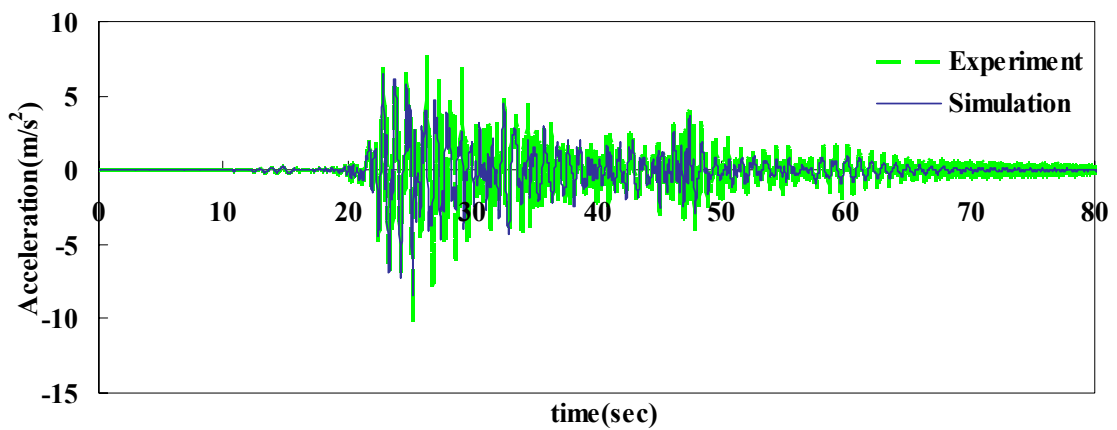
圖4.18 EL Centro_250gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) EL Centro_500gal(1st Story)

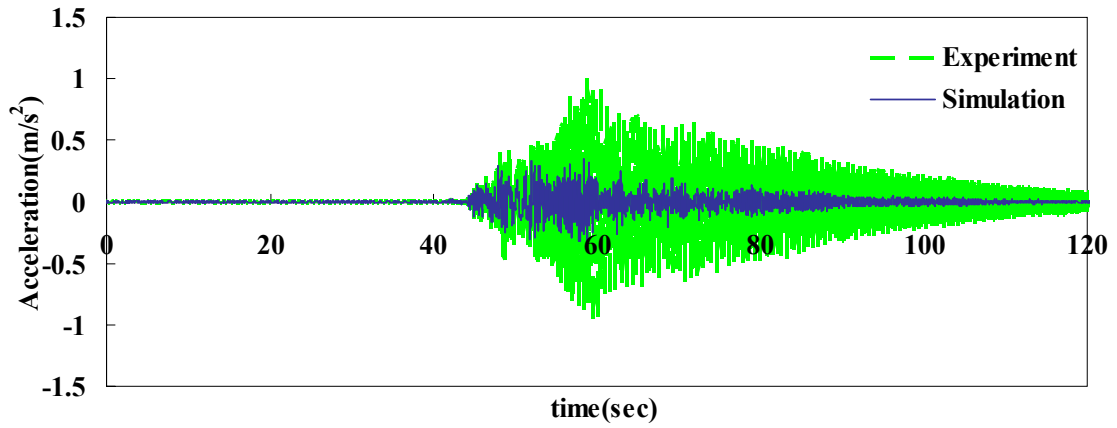


(b) EL Centro_500gal(2nd Story)

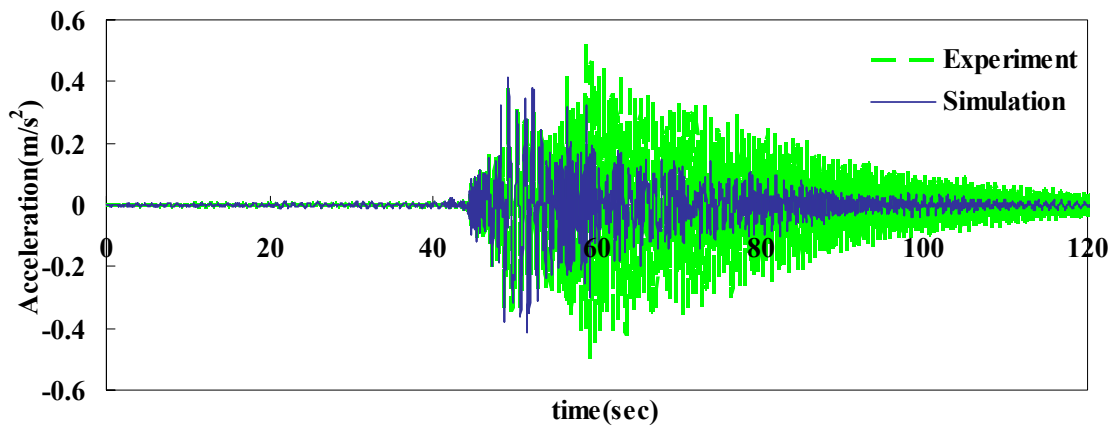


(c) EL Centro_500gal(Roof)

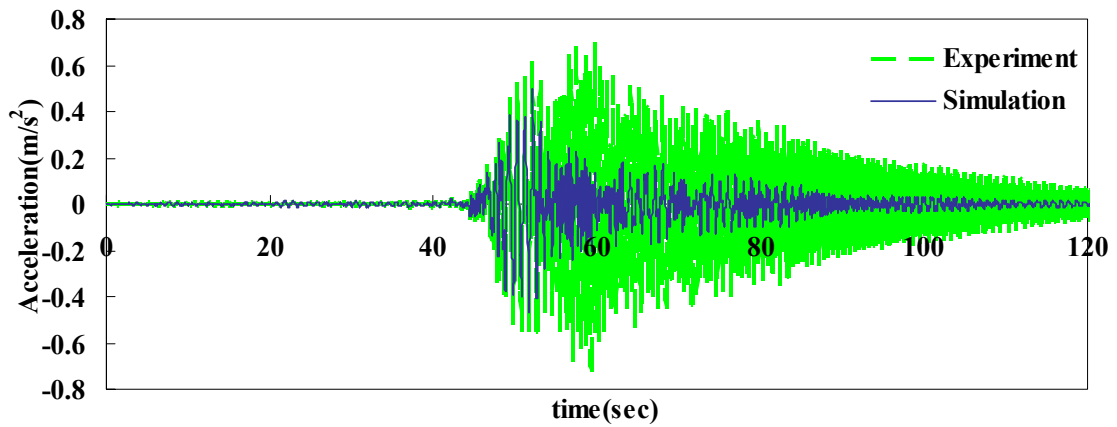
圖4.19 EL Centro_500gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_50gal(1st Story)

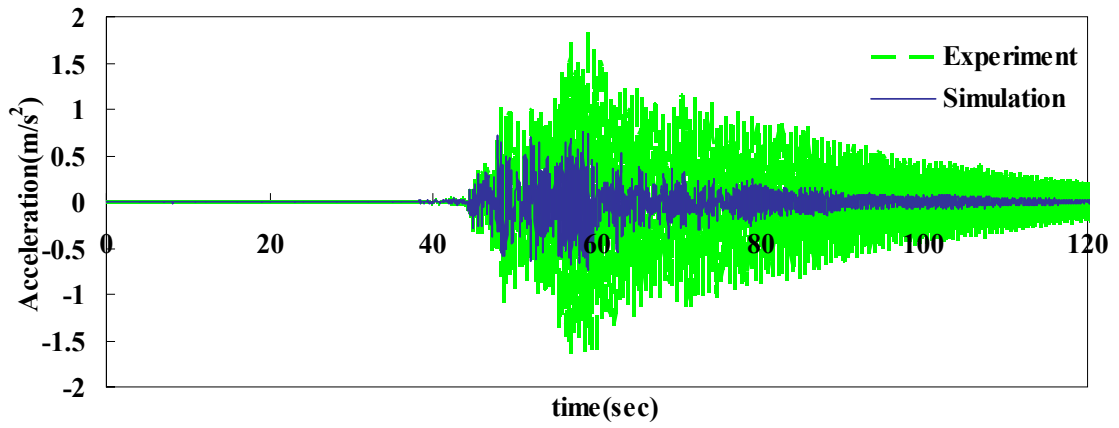


(b) TCU129_50gal(2nd Story)

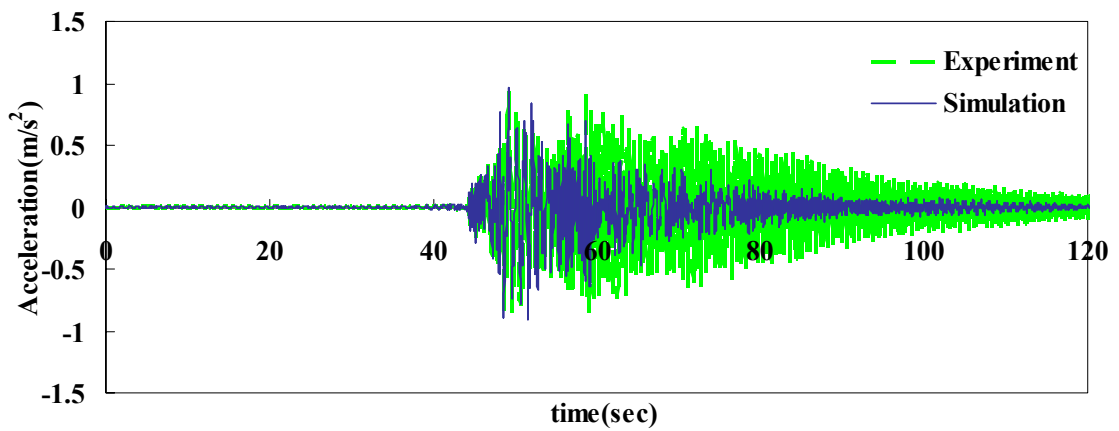


(c) TCU129_50gal(Roof)

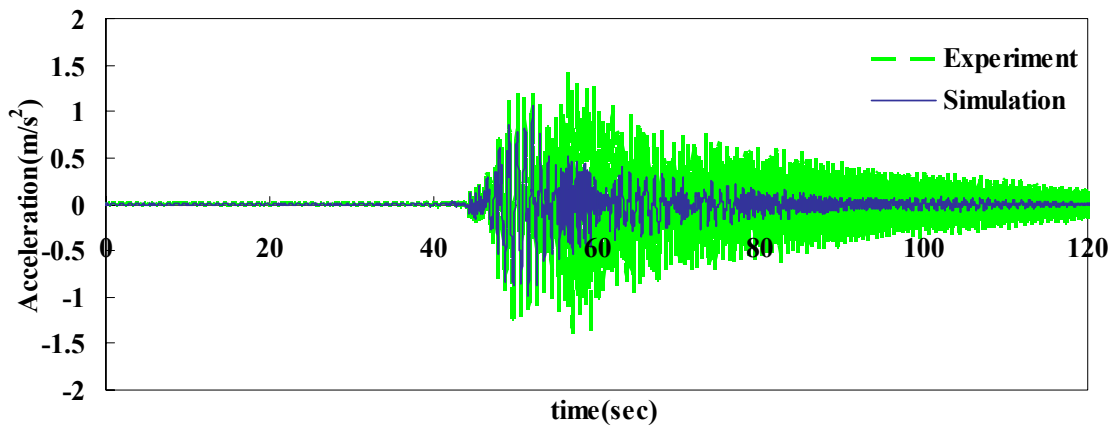
圖4.20 TCU129_50gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_100gal(1st Story)

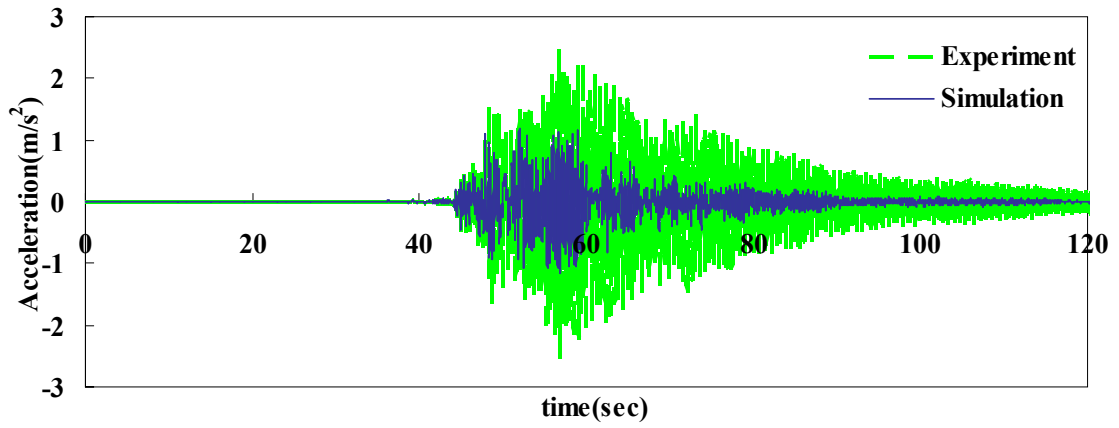


(b) TCU129_100gal(2nd Story)

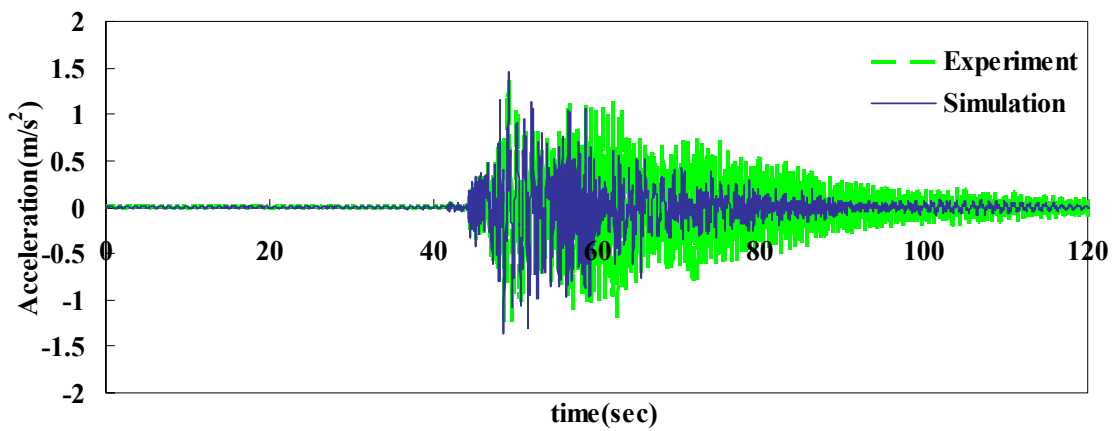


(c) TCU129_100gal(Roof)

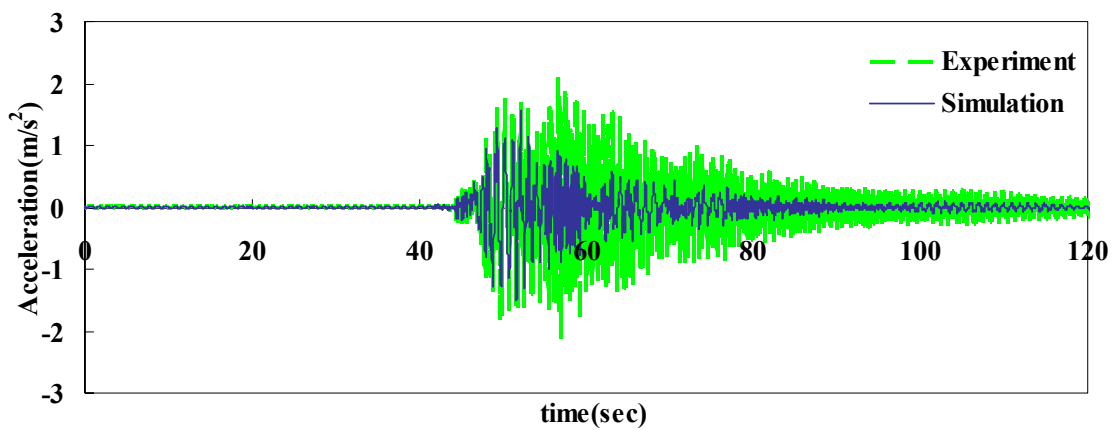
圖4.21 TCU129_100gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_150gal(1st Story)

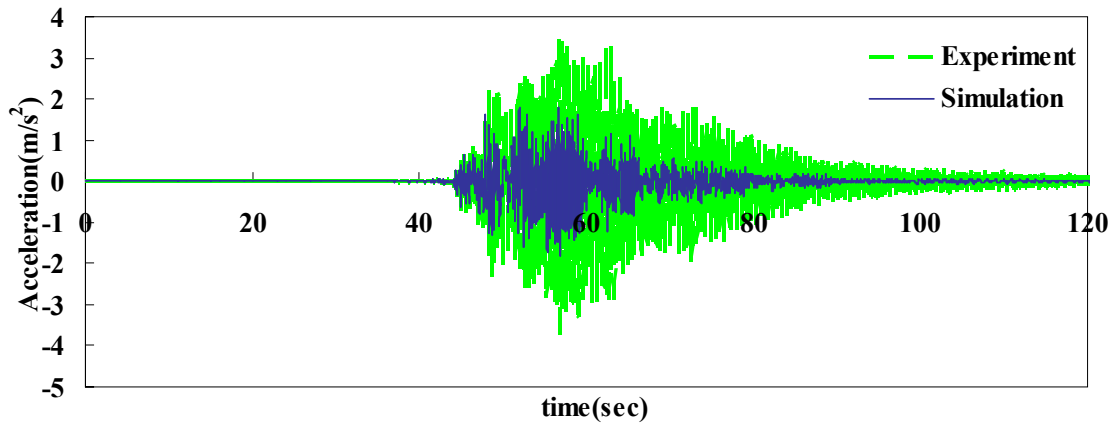


(b) TCU129_150gal(2nd Story)

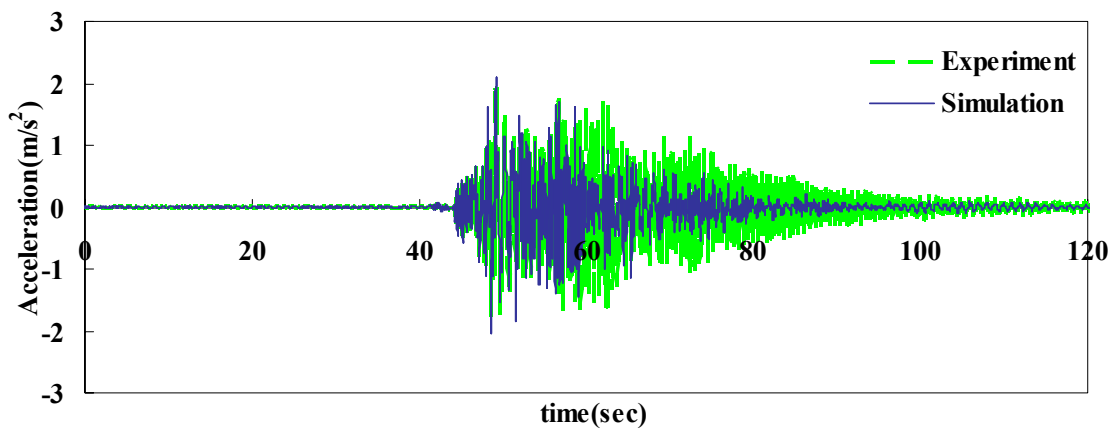


(c) TCU129_150gal(Roof)

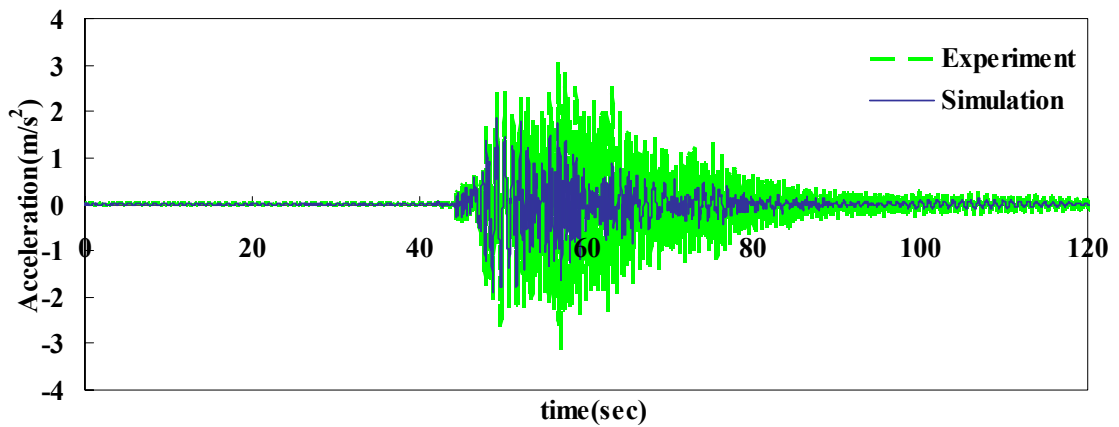
圖4.22 TCU129_150gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_200gal(1st Story)

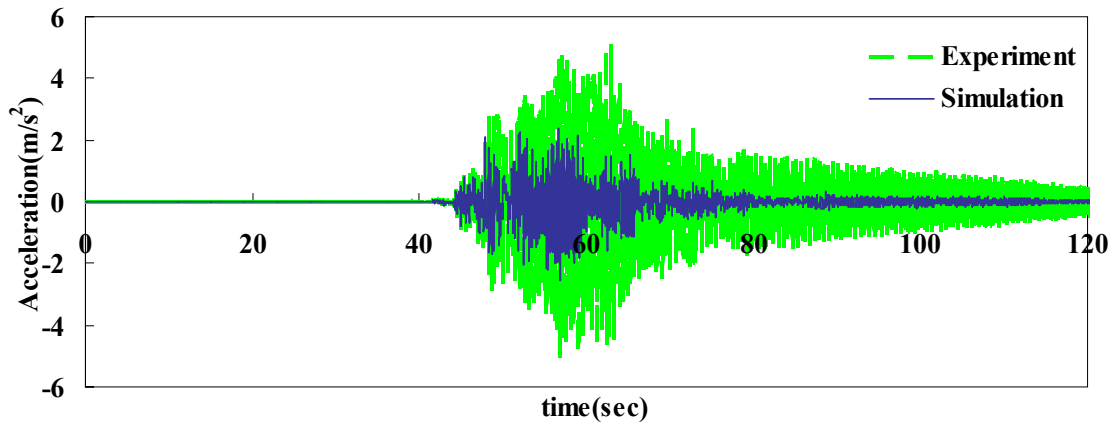


(b) TCU129_200gal(2nd Story)

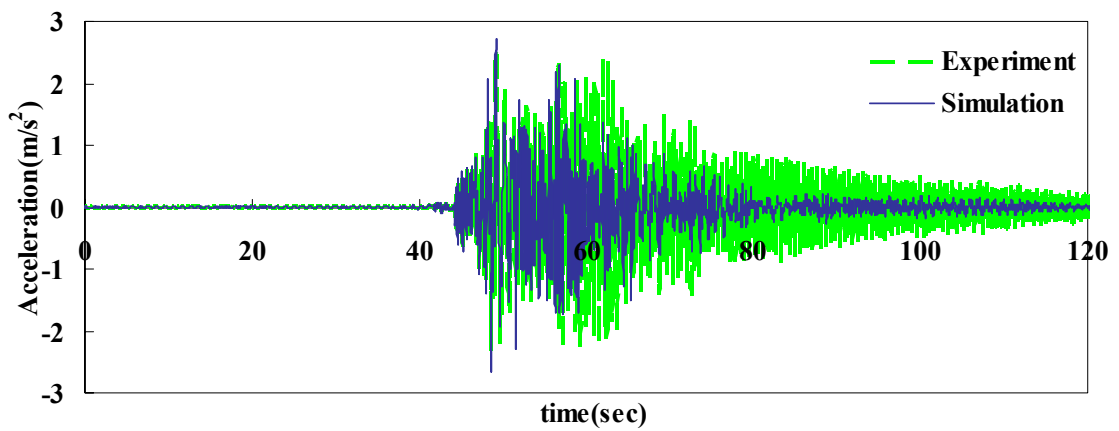


(c) TCU129_200gal(Roof)

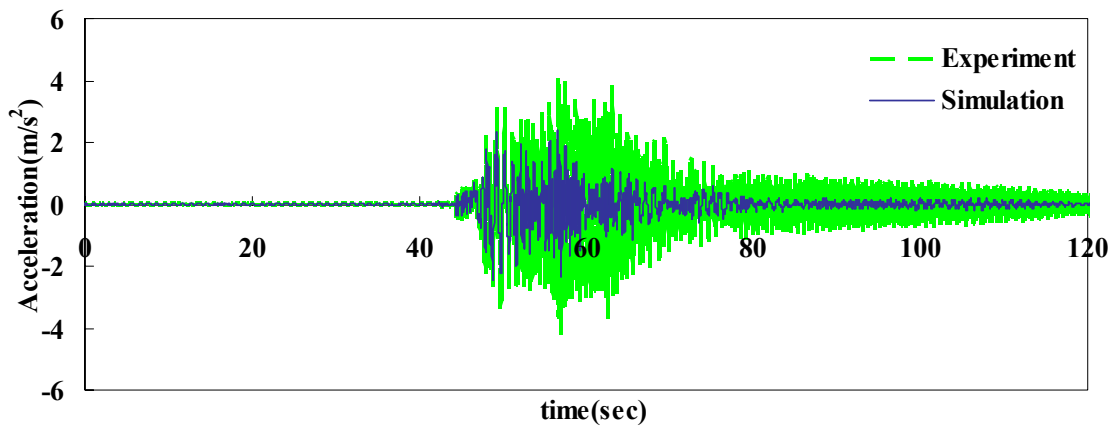
圖4.23 TCU129_200gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_250gal(1st Story)

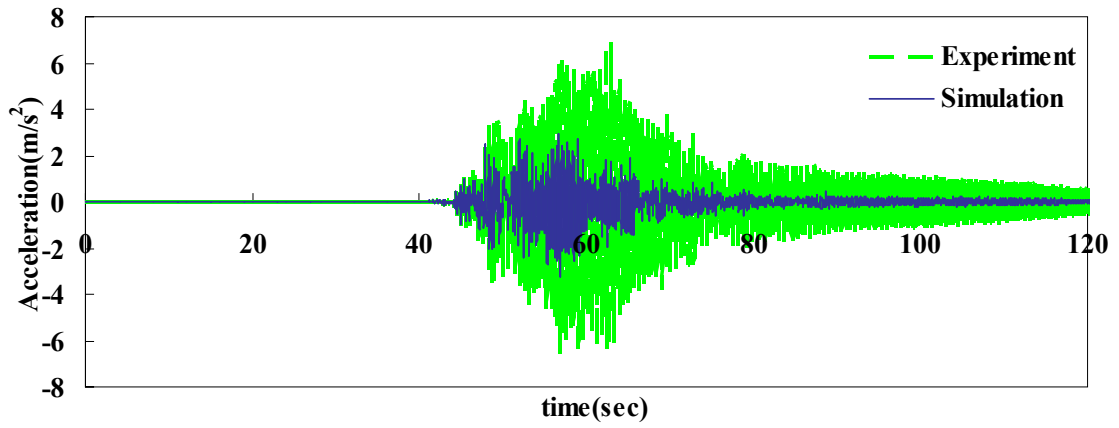


(b) TCU129_250gal(2nd Story)

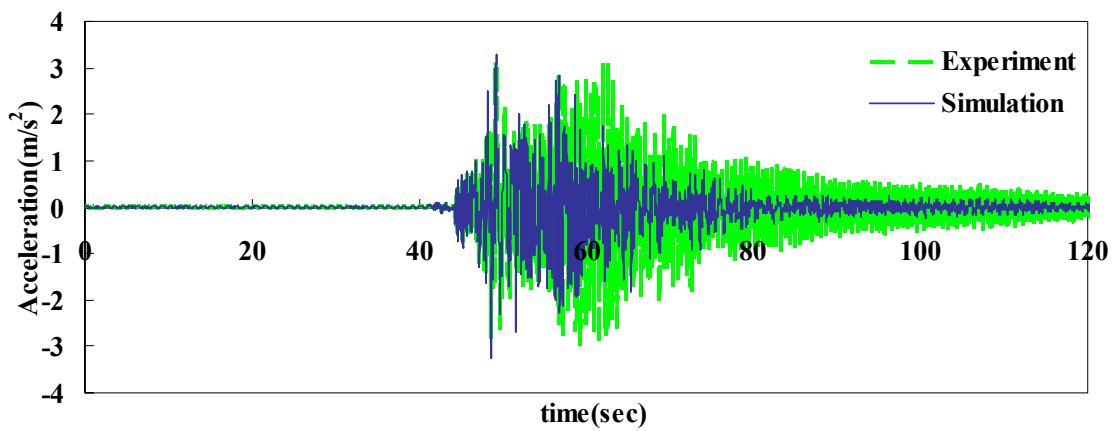


(c) TCU129_250gal(Roof)

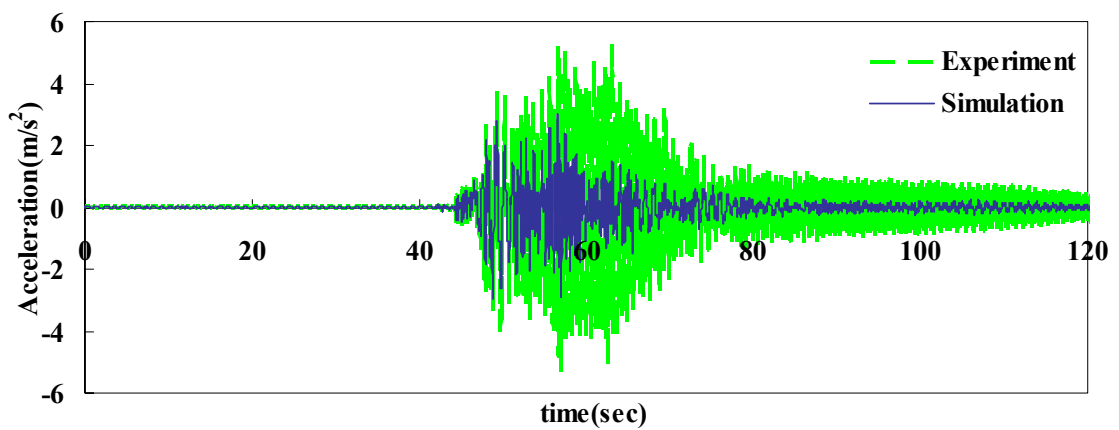
圖4.24 TCU129_250gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_300gal(1st Story)

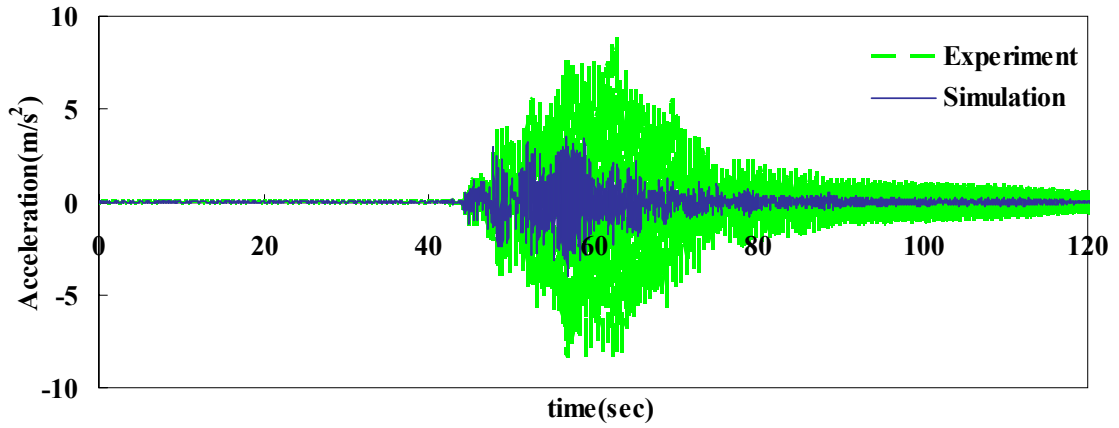


(b) TCU129_300gal(2nd Story)

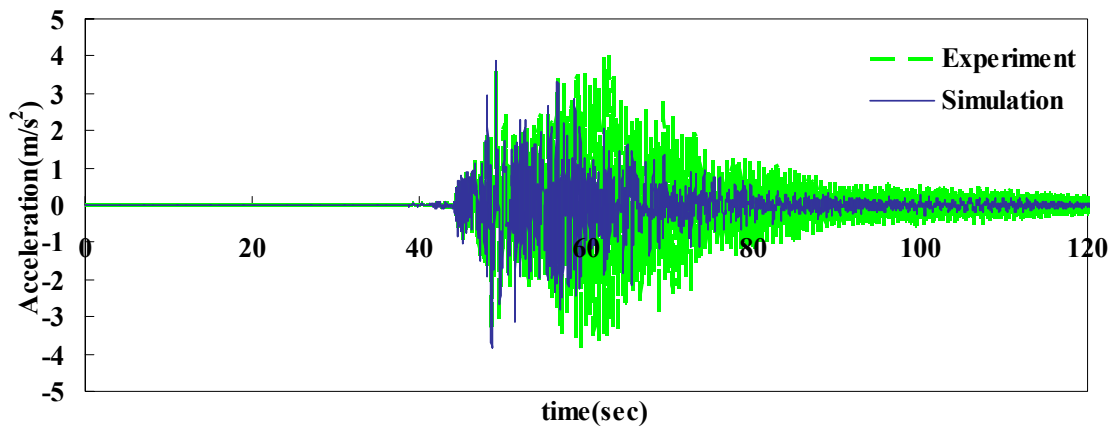


(c) TCU129_300gal(Roof)

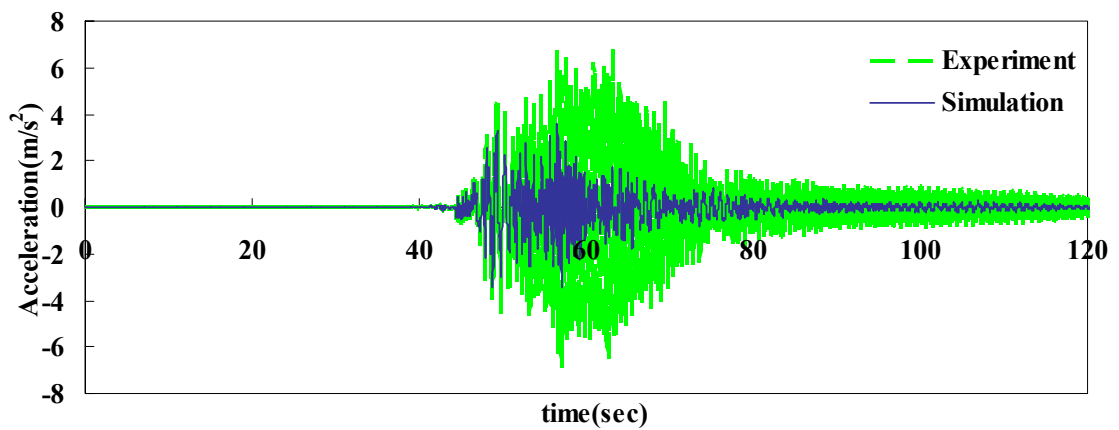
圖4.25 TCU129_300gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a) TCU129_350gal(1st Story)

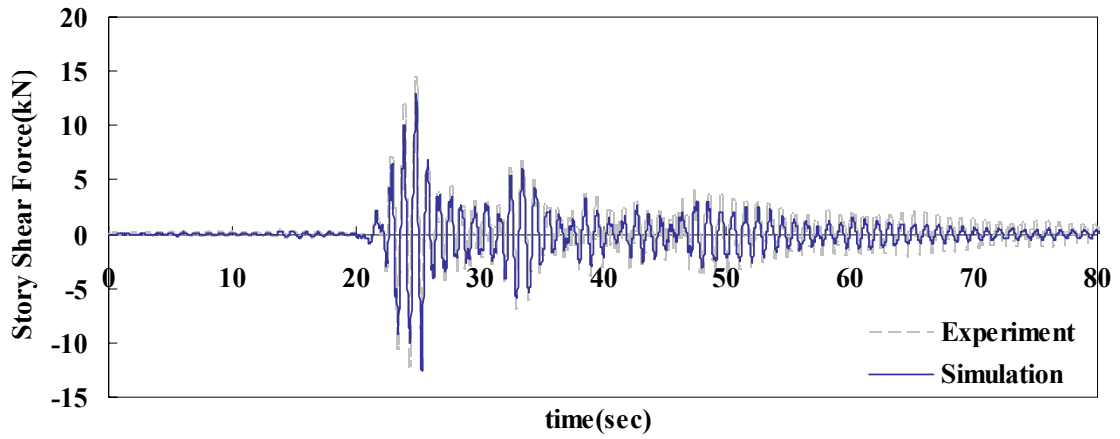


(b) TCU129_350gal(2nd Story)

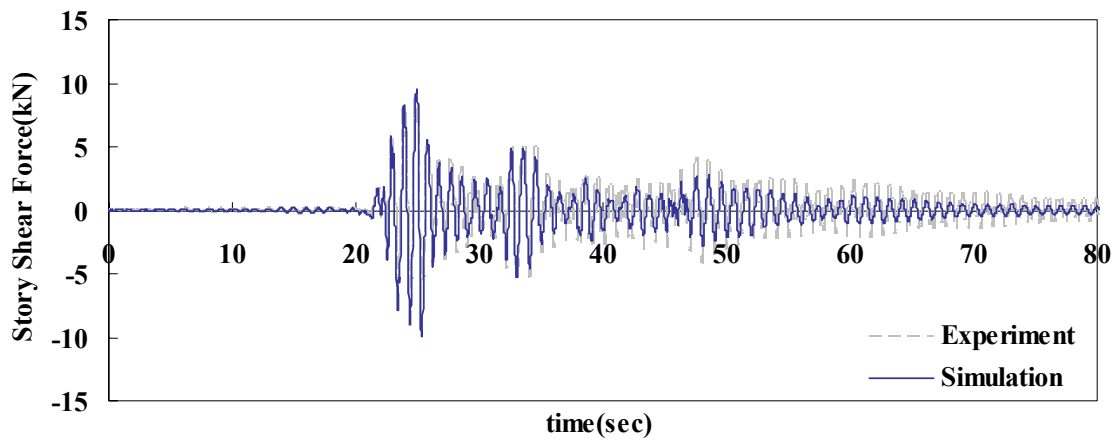


(c) TCU129_350gal(Roof)

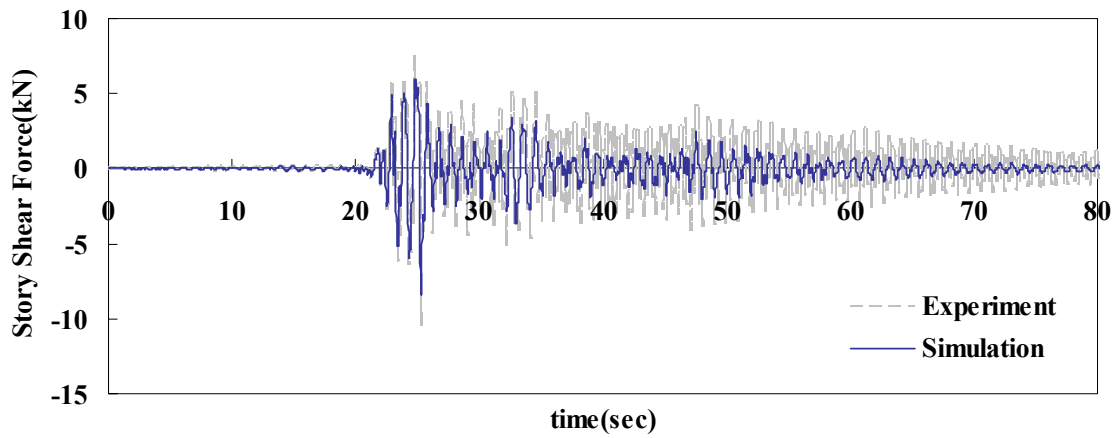
圖4.26 TCU129_350gal實驗與模擬樓層絕對加速度歷時比較



(a)EL Centro_50gal(1st Story)

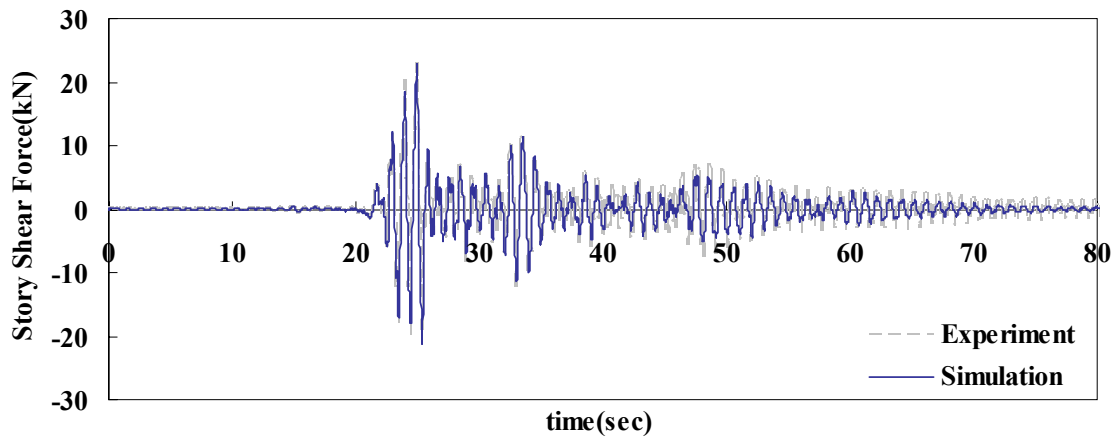


(b)EL Centro_50gal(2nd Story)

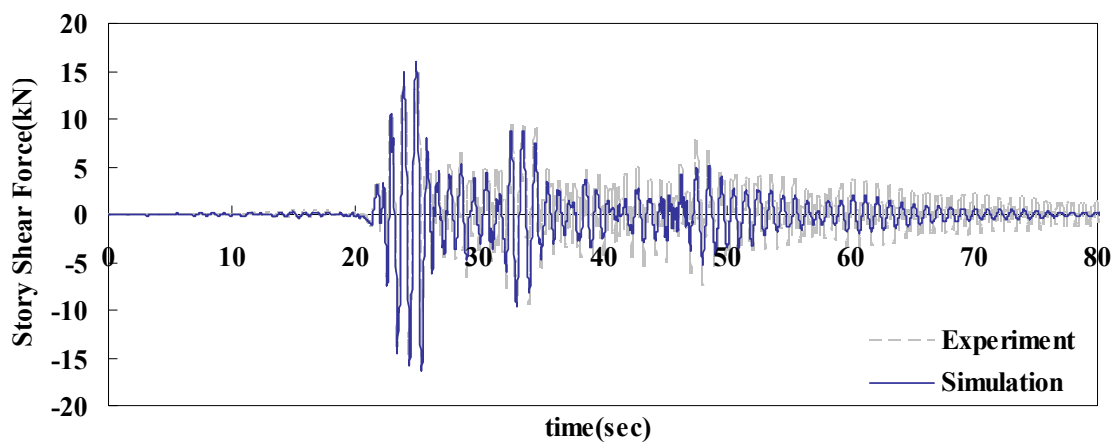


(c)EL Centro_50gal(Roof)

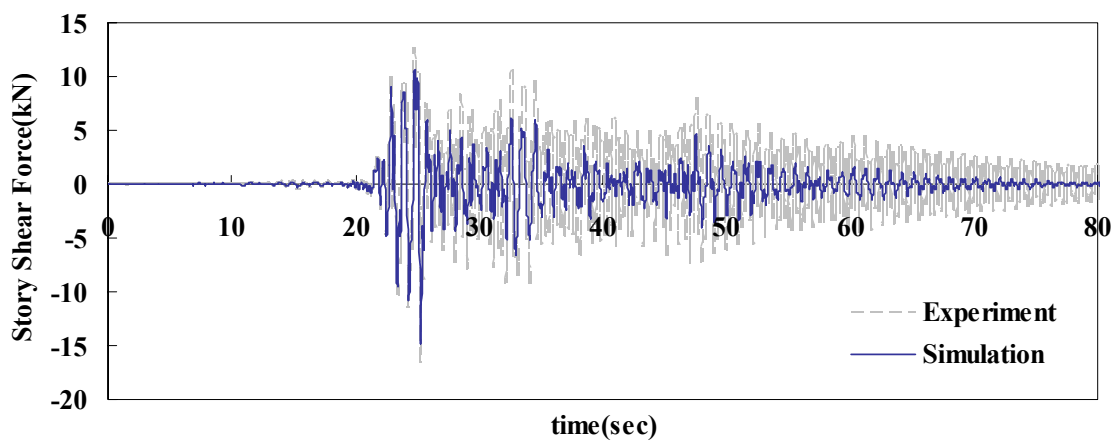
圖4.27 EL Centro_50gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)EL Centro_100gal(1st Story)

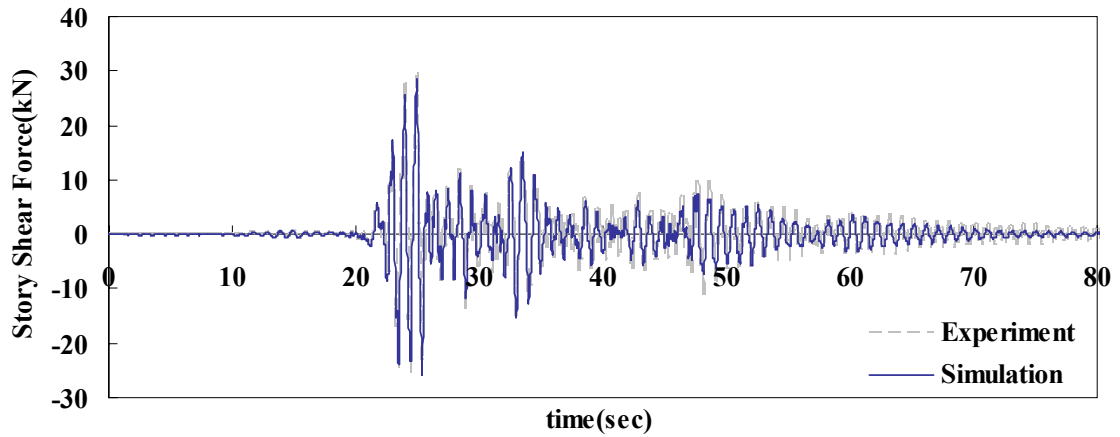


(b)EL Centro_100gal(2nd Story)

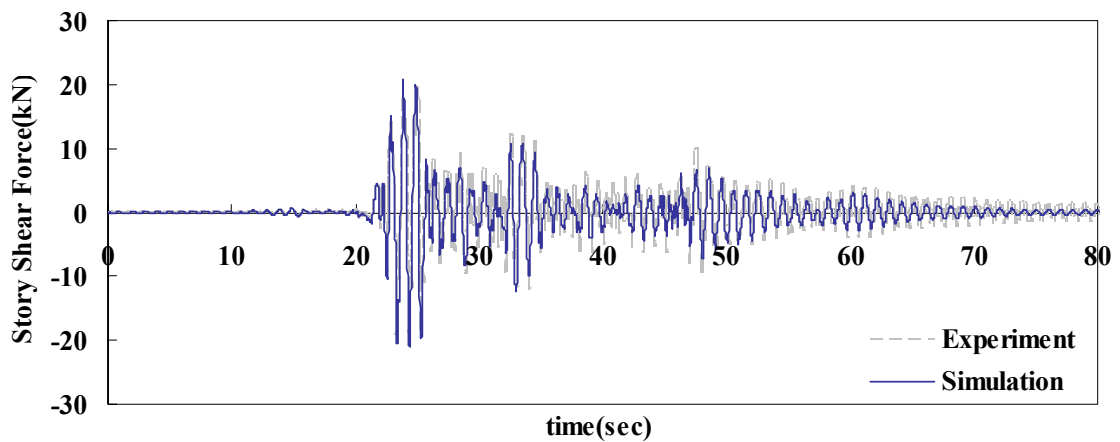


(c)EL Centro_100gal(Roof)

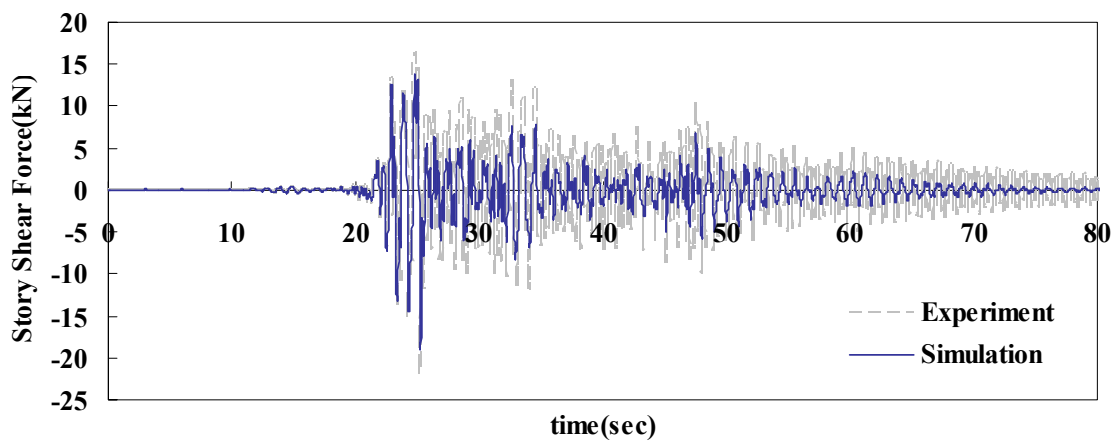
圖4.28 EL Centro_100gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)EL Centro_150gal(1st Story)

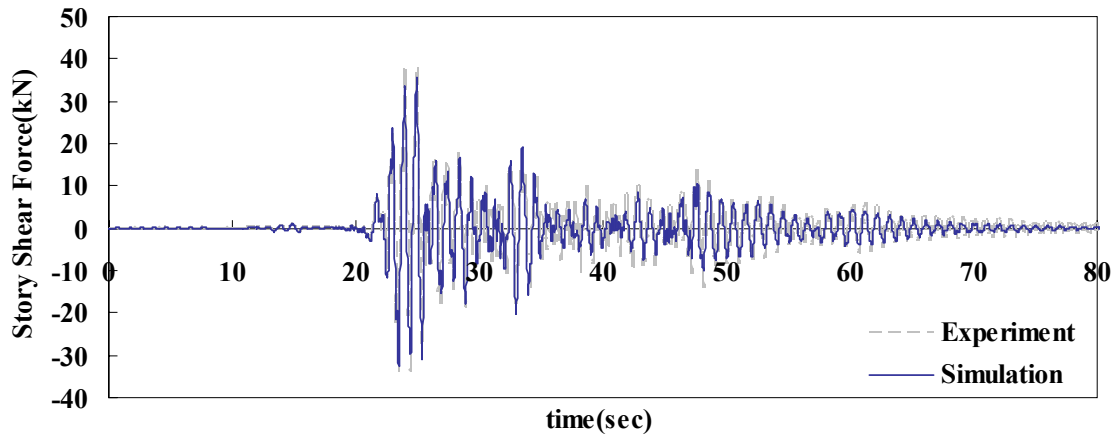


(b)EL Centro_150gal(2nd Story)

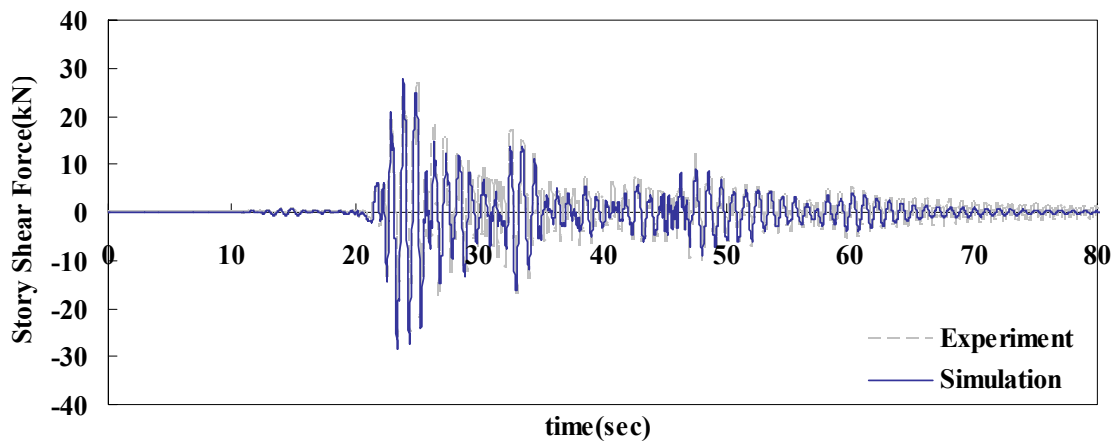


(c)EL Centro_150gal(Roof)

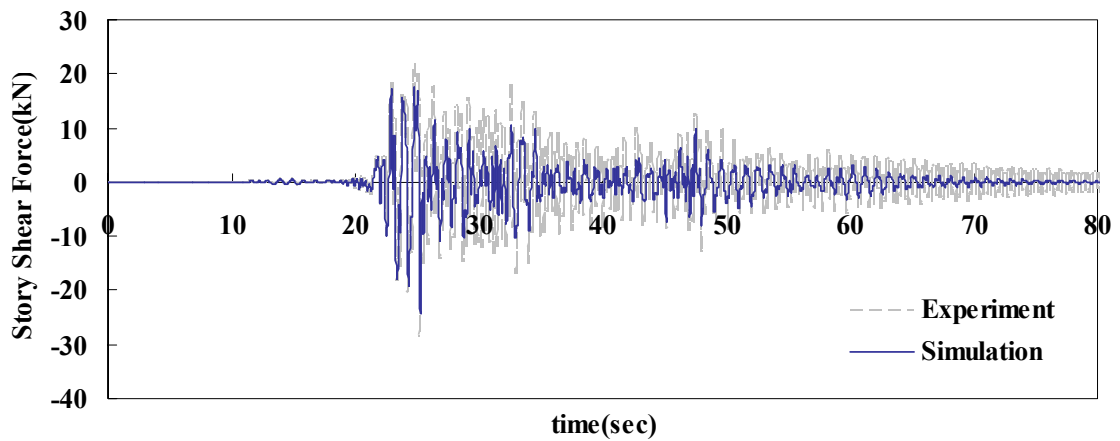
圖4.29 EL Centro_150gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)EL Centro_200gal(1st Story)

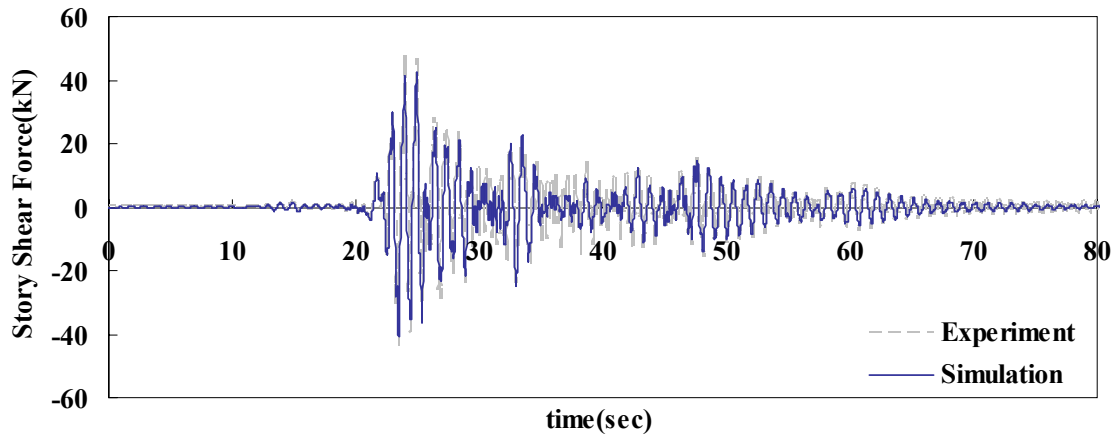


(b)EL Centro_200gal(2nd Story)

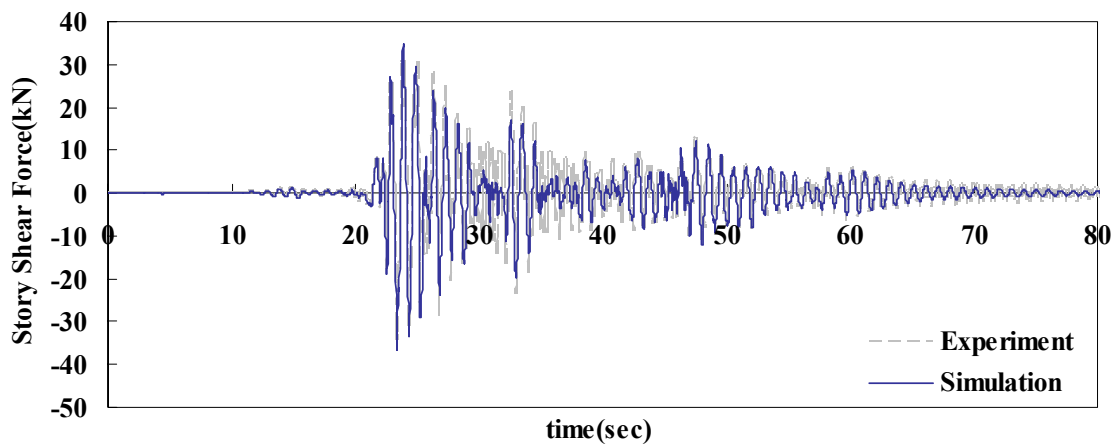


(c)EL Centro_200gal(Roof)

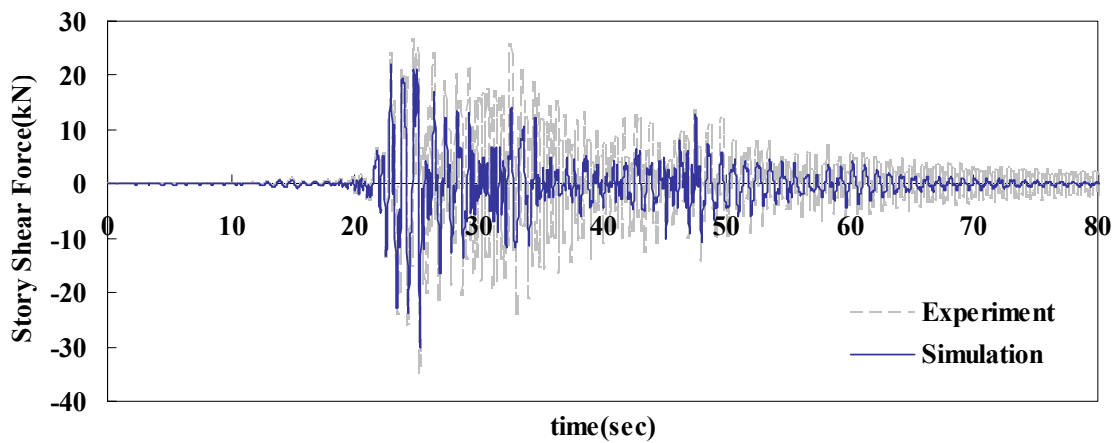
圖4.30 EL Centro_200gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)EL Centro_250gal(1st Story)

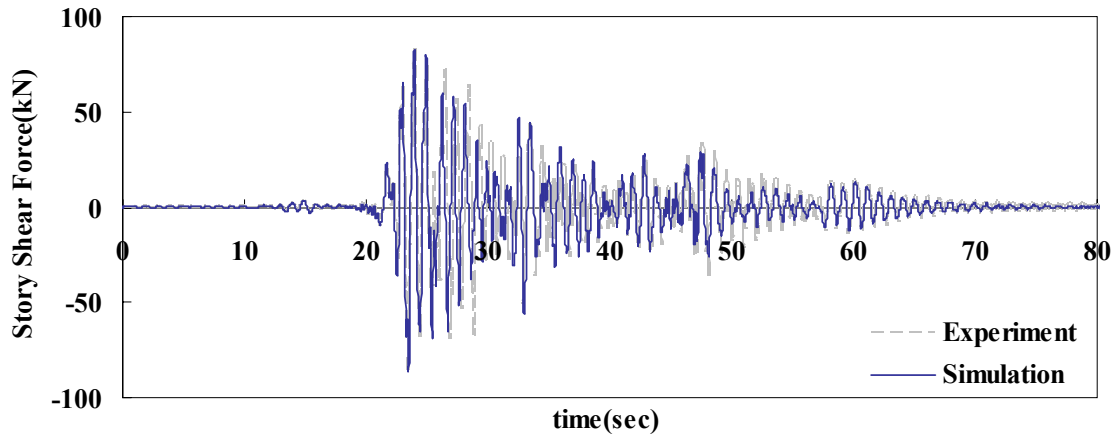


(b)EL Centro_250gal(2nd Story)

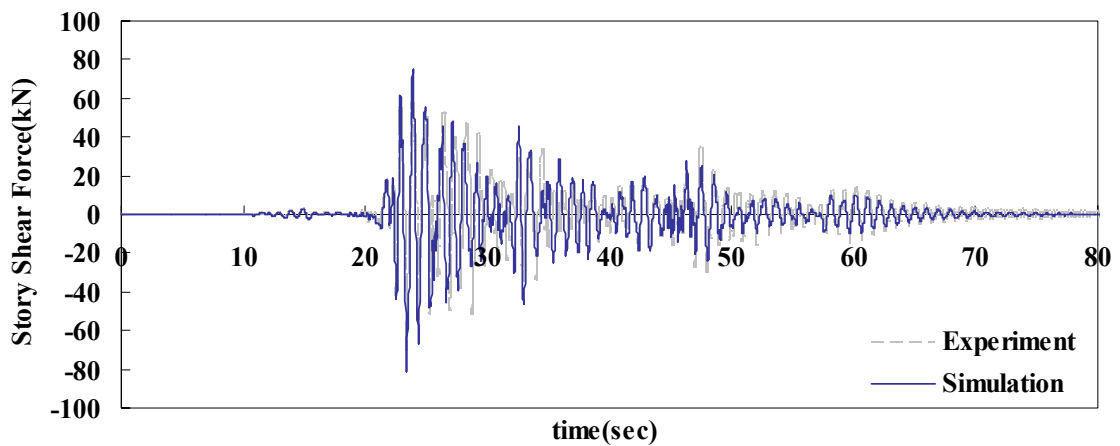


(c)EL Centro_250gal(Roof)

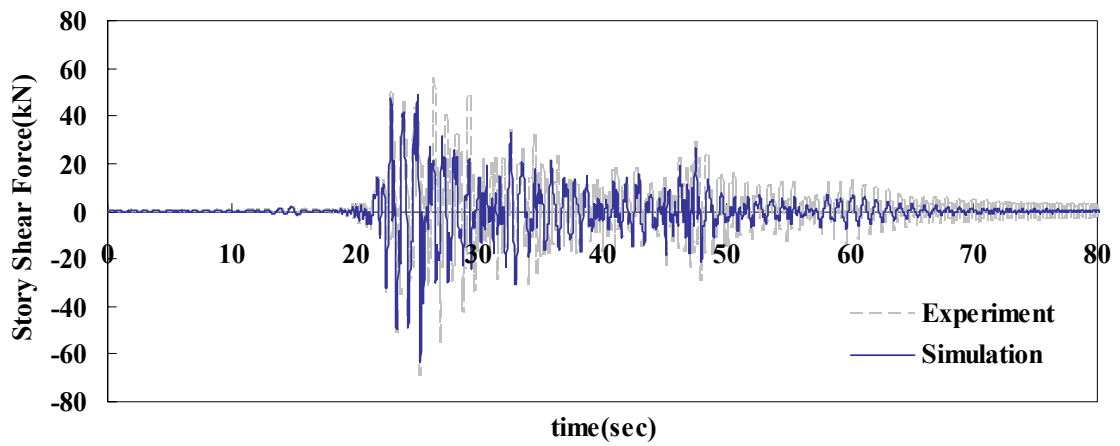
圖4.31 EL Centro_250gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)EL Centro_500gal(1st Story)

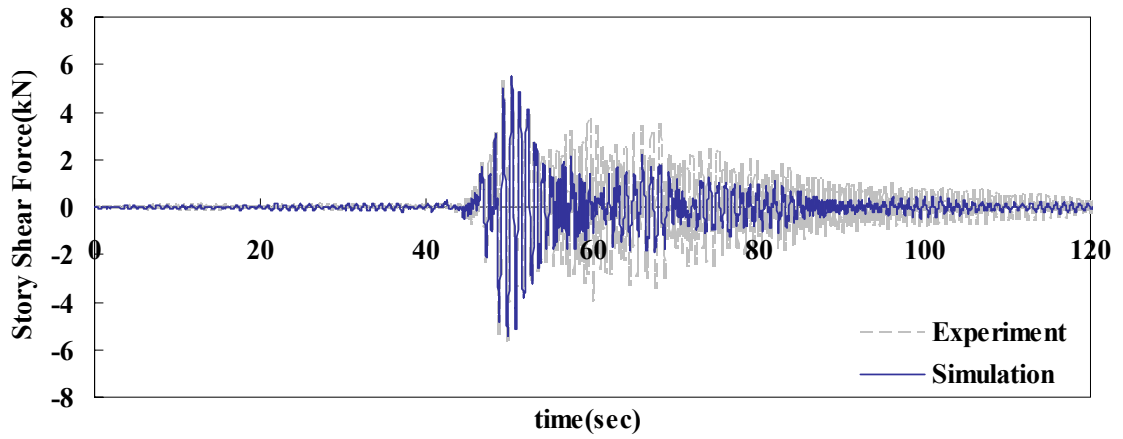


(b)EL Centro_500gal(2nd Story)

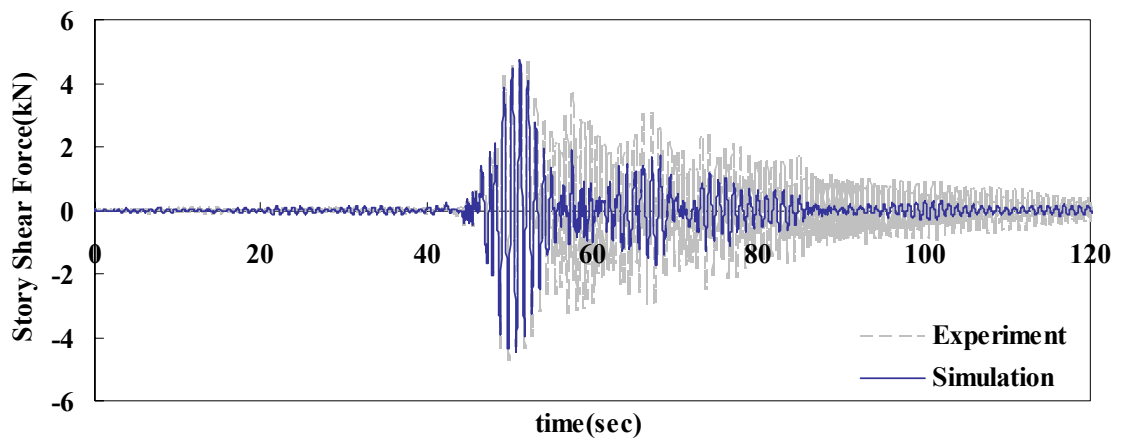


(c)EL Centro_500gal(Roof)

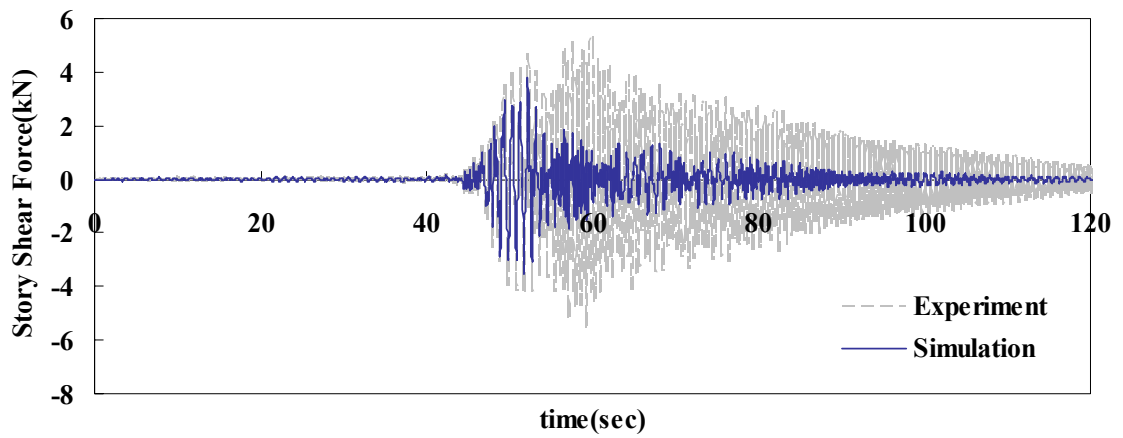
圖4.32 EL Centro_500gal實驗與模擬樓層剪力比較



(a)TCU129_50gal(1st Story)

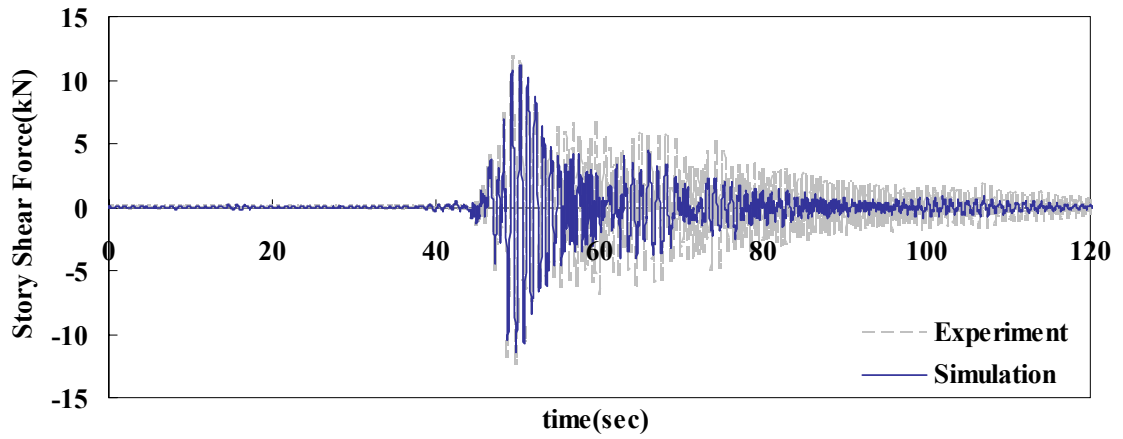


(b)TCU129_50gal(2nd Story)

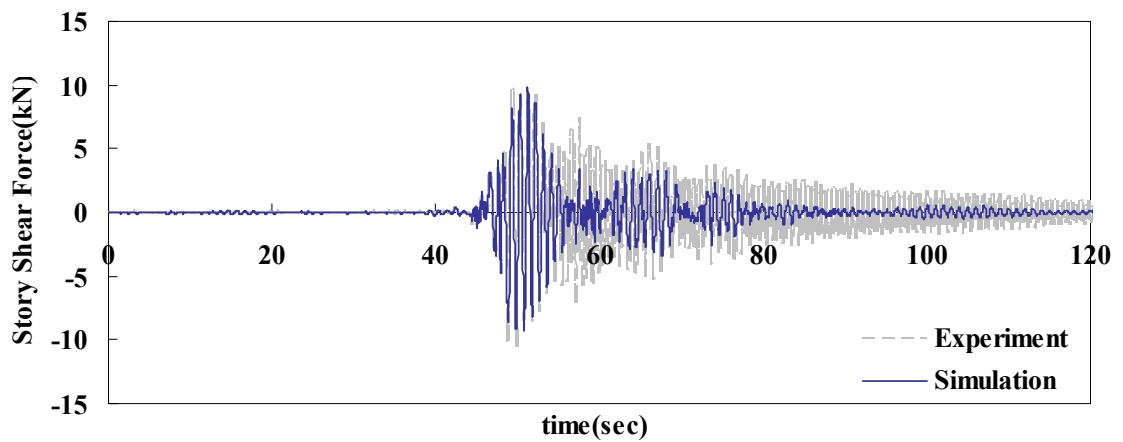


(c)TCU129_50gal(Roof)

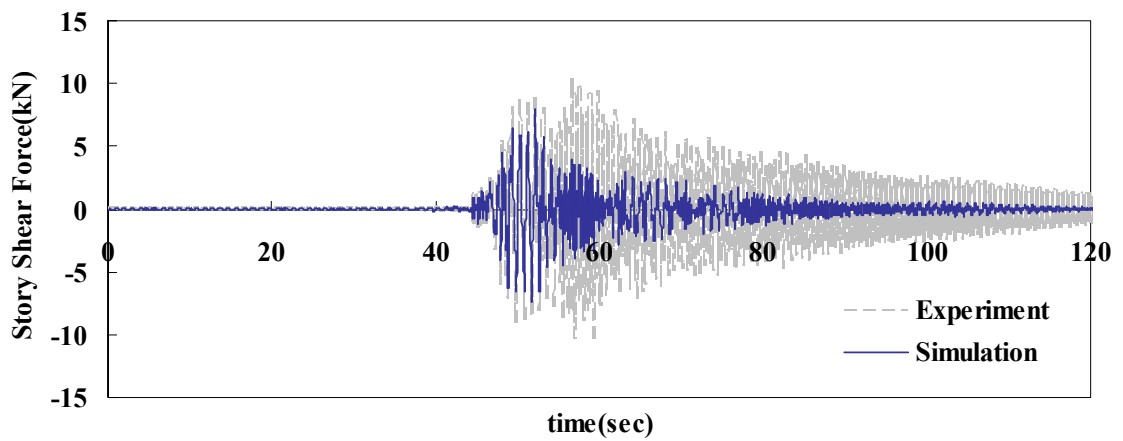
圖4.33 TCU129_50gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_100gal(1st Story)

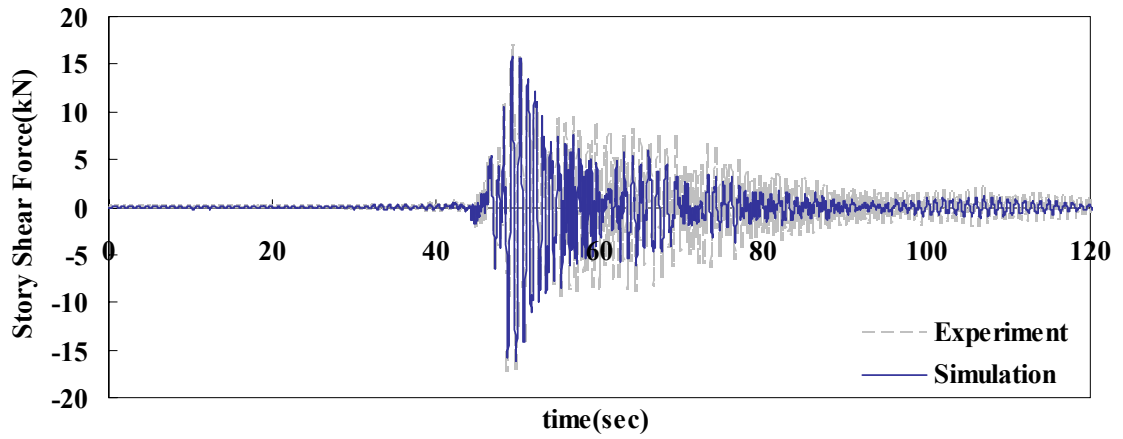


(b)TCU129_100gal(2nd Story)

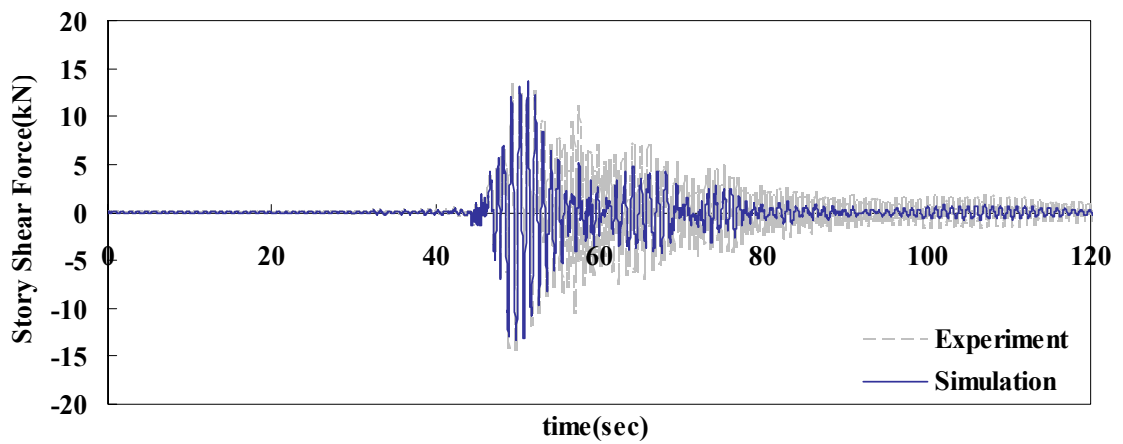


(c)TCU129_100gal(Roof)

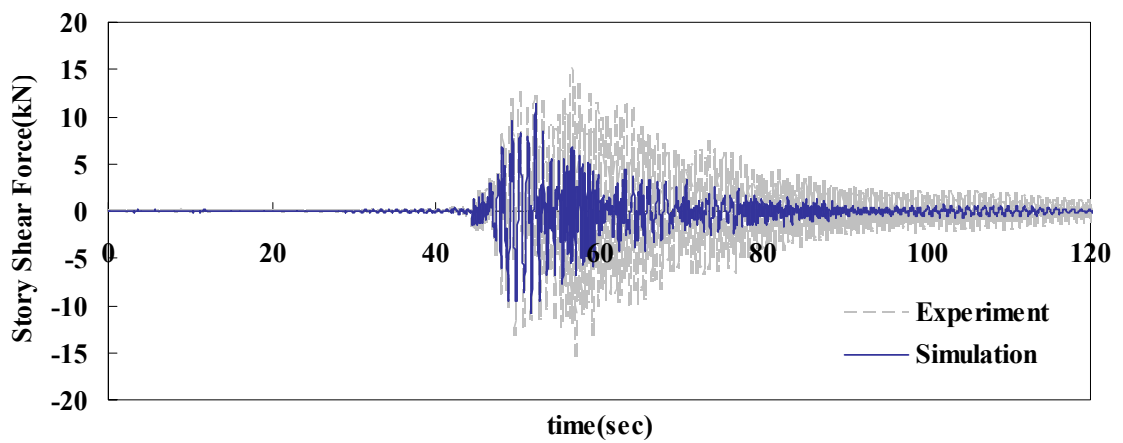
圖4.34 TCU129_100gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_150gal(1st Story)

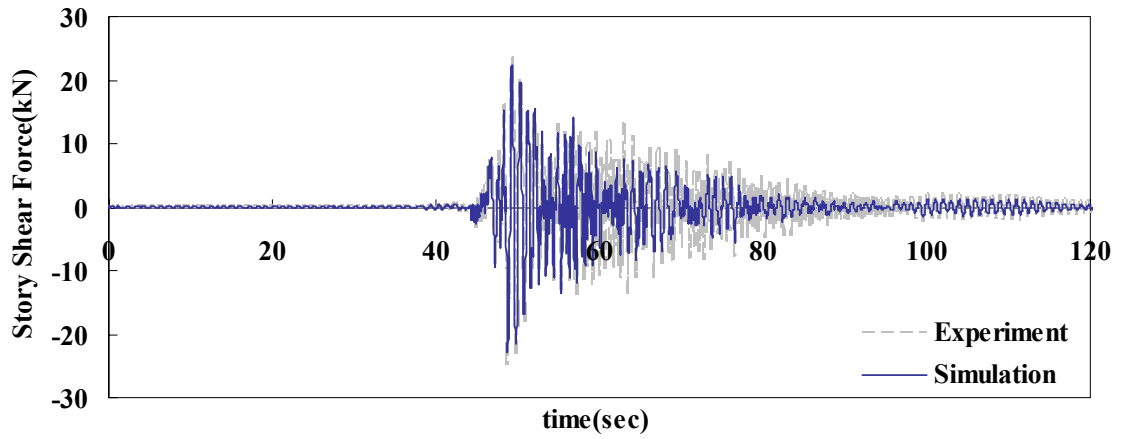


(b)TCU129_150gal(2nd Story)

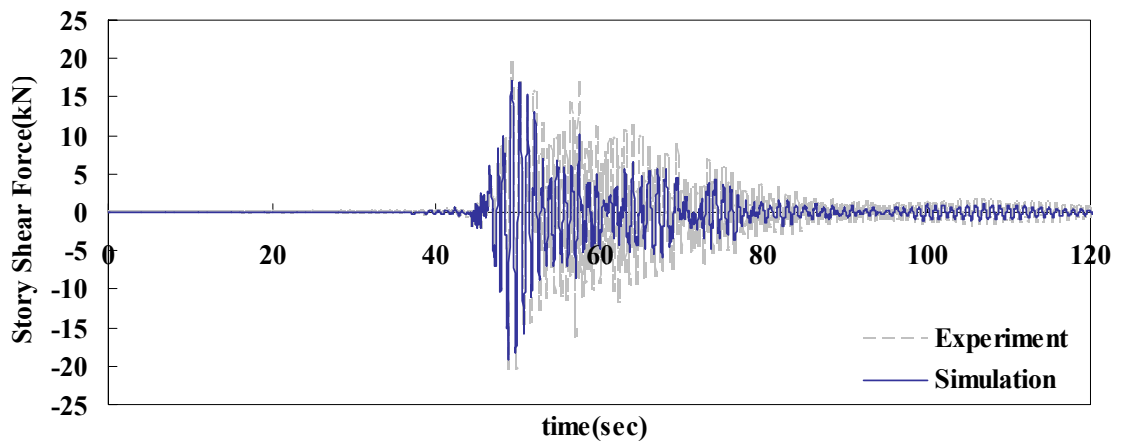


(c)TCU129_150gal(Roof)

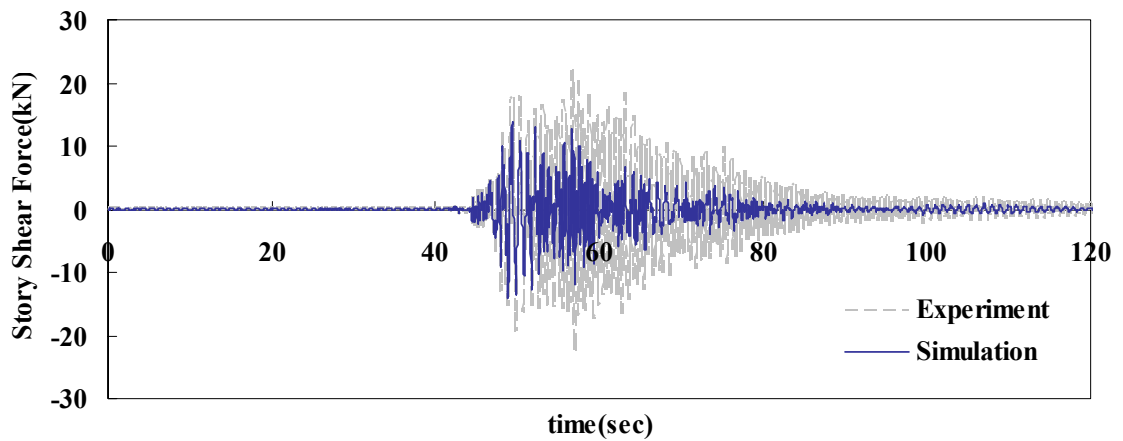
圖4.35 TCU129_150gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_200gal(1st Story)

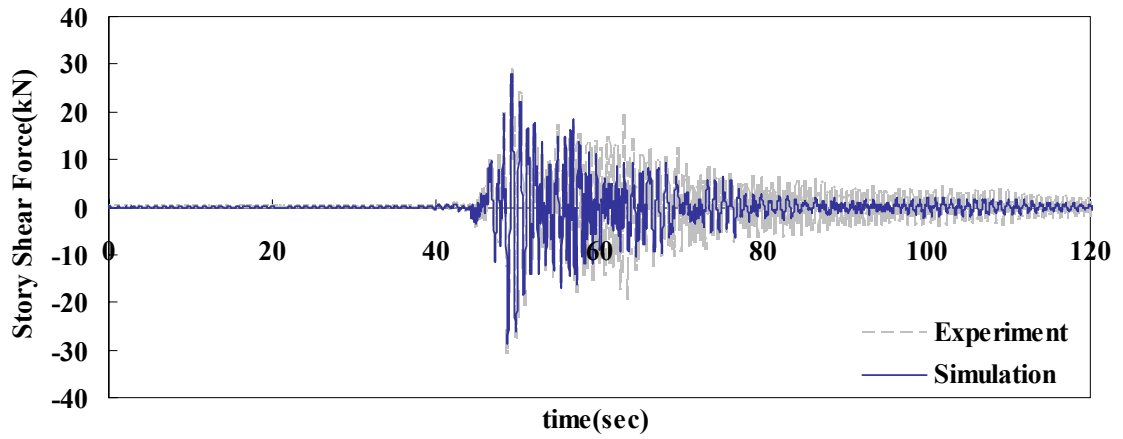


(b)TCU129_200gal(2nd Story)

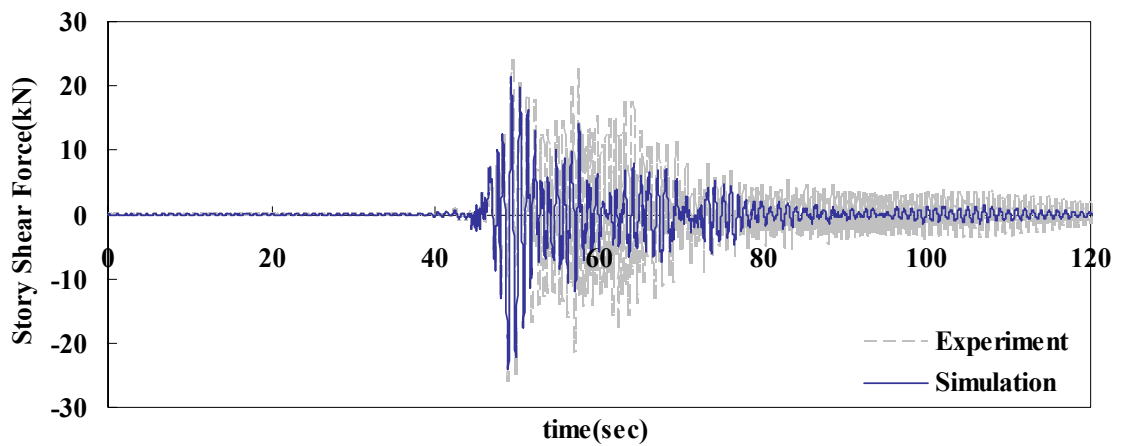


(c)TCU129_200gal(Roof)

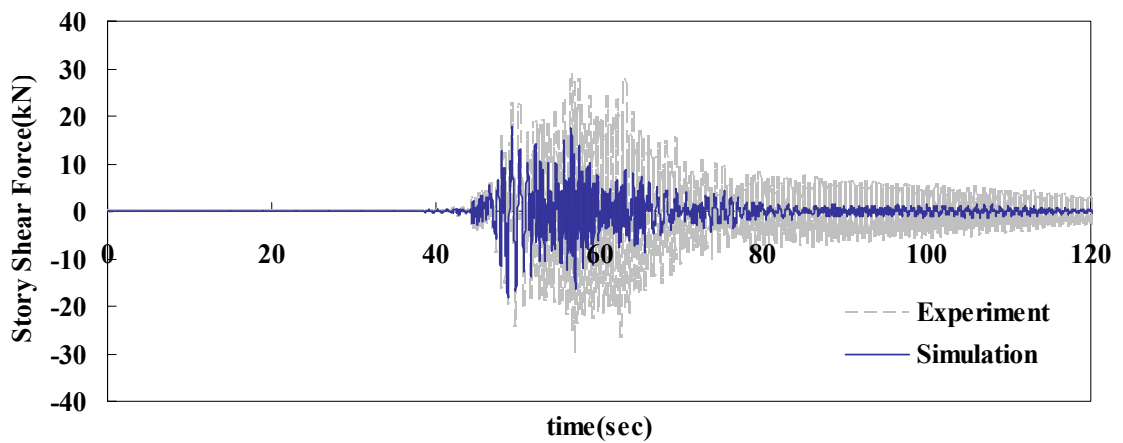
圖4.36 TCU129_200gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_250gal(1st Story)

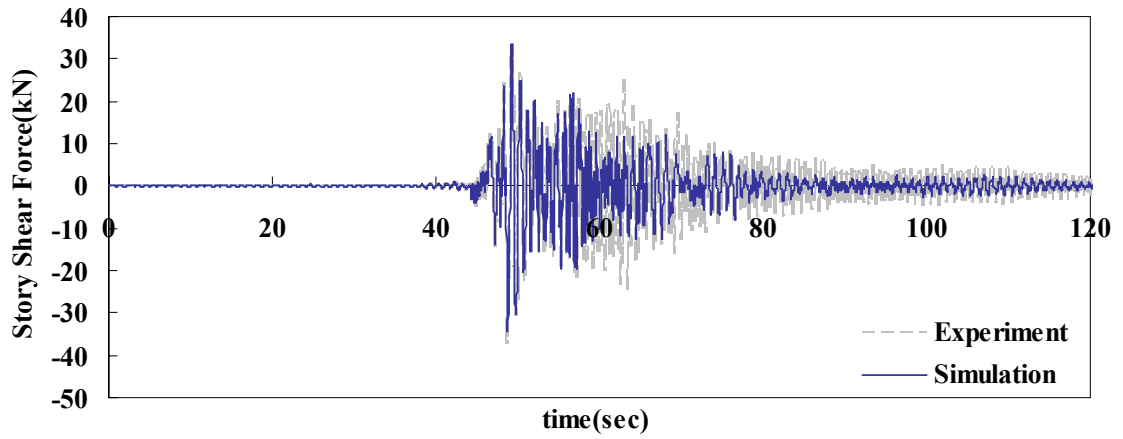


(b)TCU129_250gal(2nd Story)

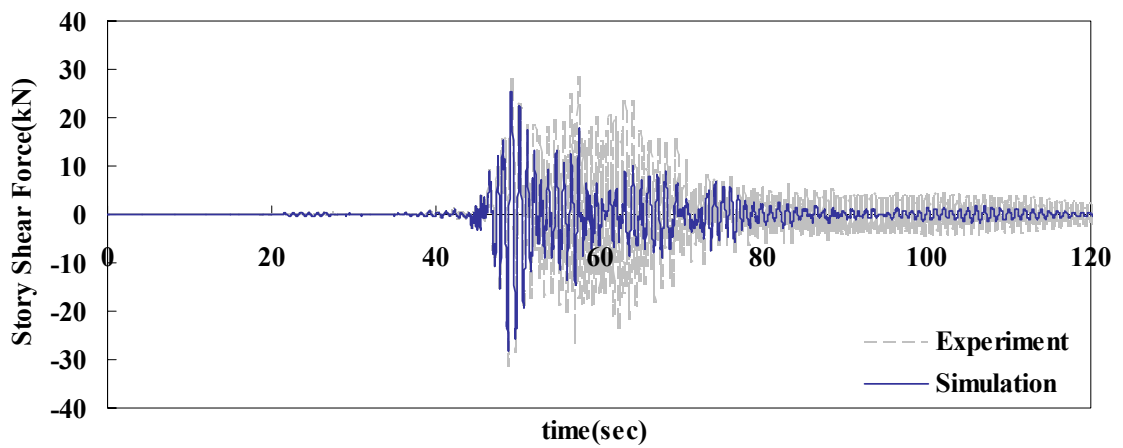


(c)TCU129_250gal(Roof)

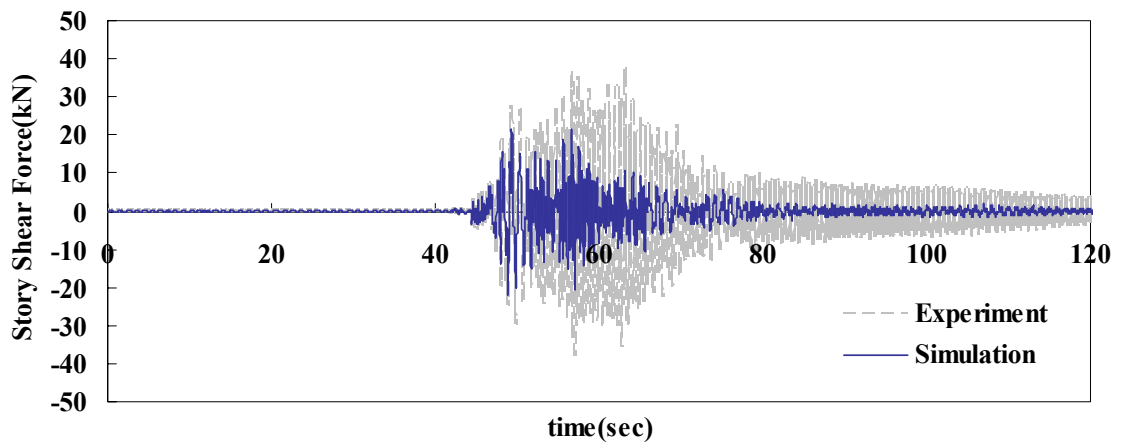
圖4.37 TCU129_250gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_300gal(1st Story)

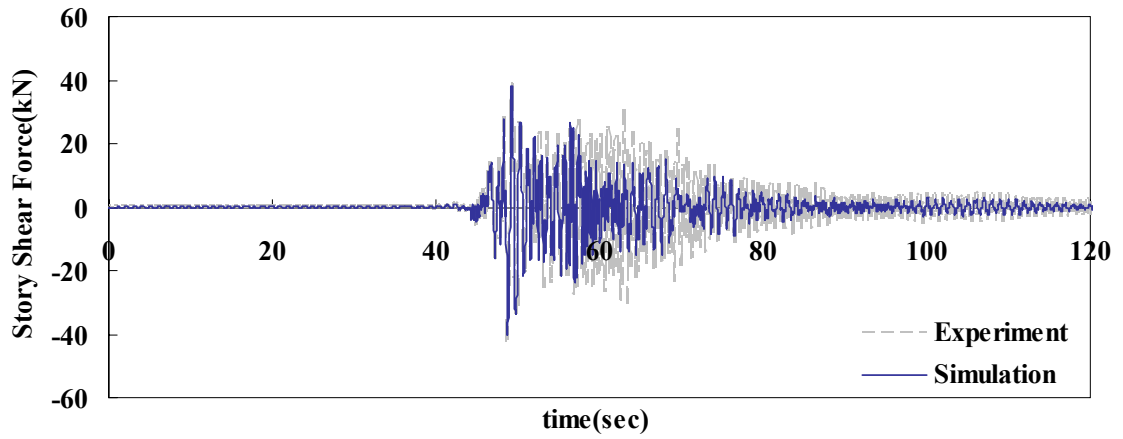


(b)TCU129_300gal(2nd Story)

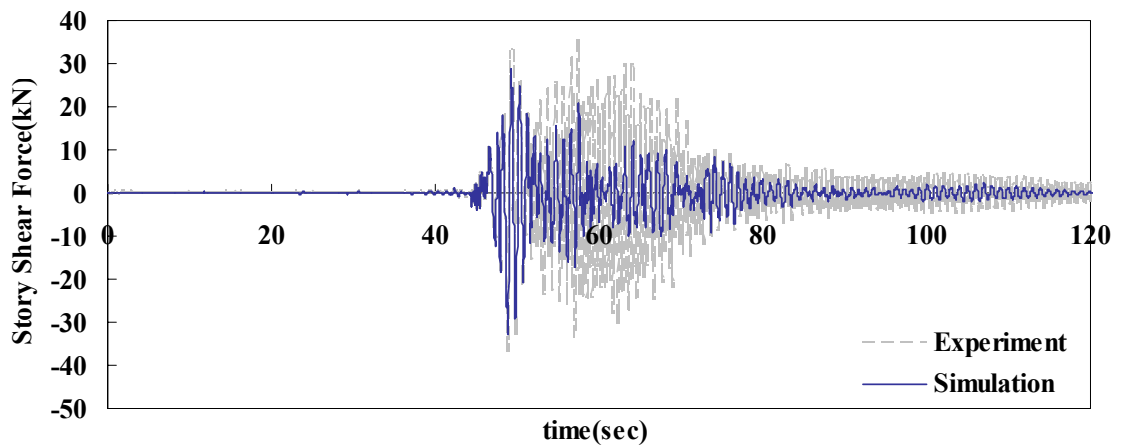


(c)TCU129_300gal(Roof)

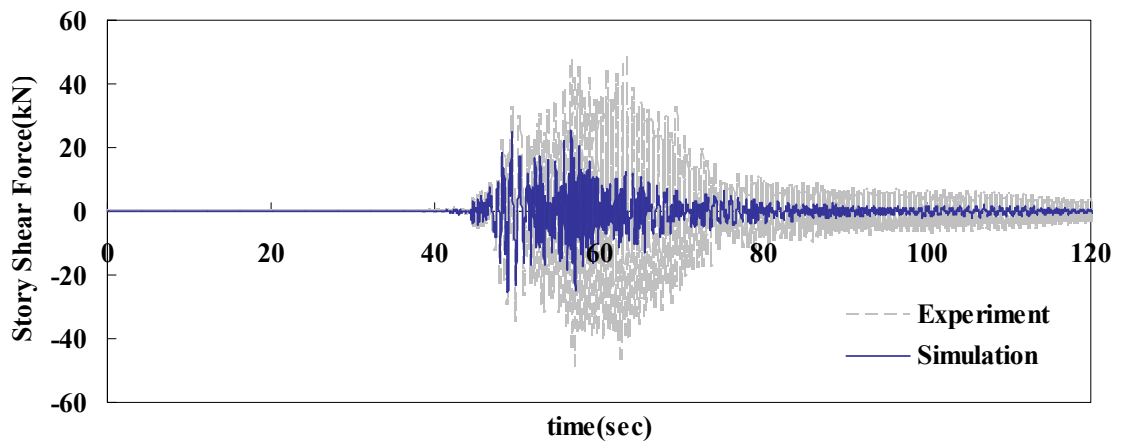
圖4.38 TCU129_300gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較



(a)TCU129_350gal(1st Story)



(b)TCU129_350gal(2nd Story)



(c)TCU129_350gal(Roof)

圖4.39 TCU129_350gal實驗與模擬樓層剪力歷時比較

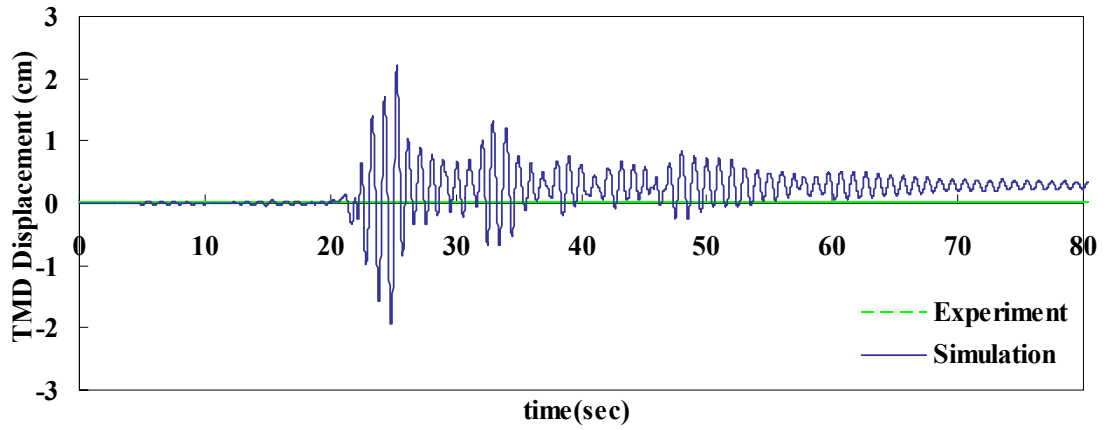


Fig 4.40 (a) EL Centro_50gal

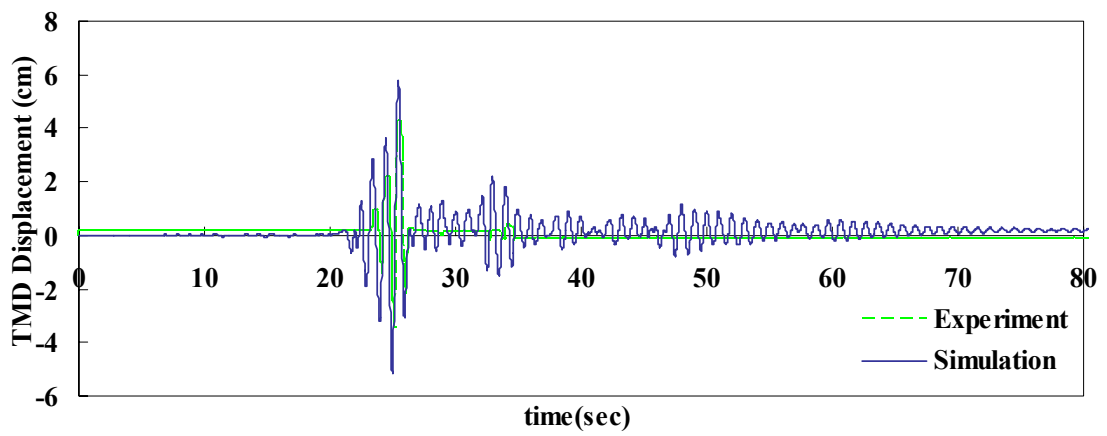


Fig 4.40 (b) EL Centro_100gal

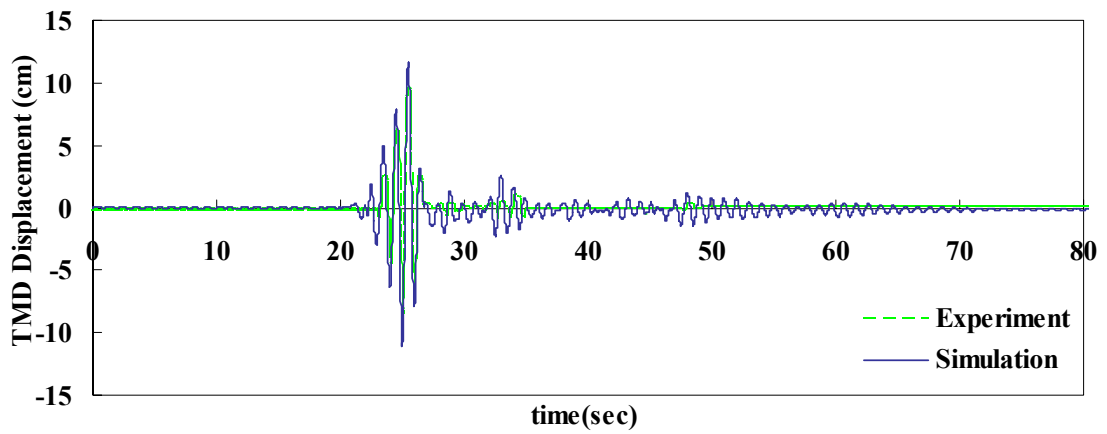


Fig 4.40 (c) EL Centro_150gal

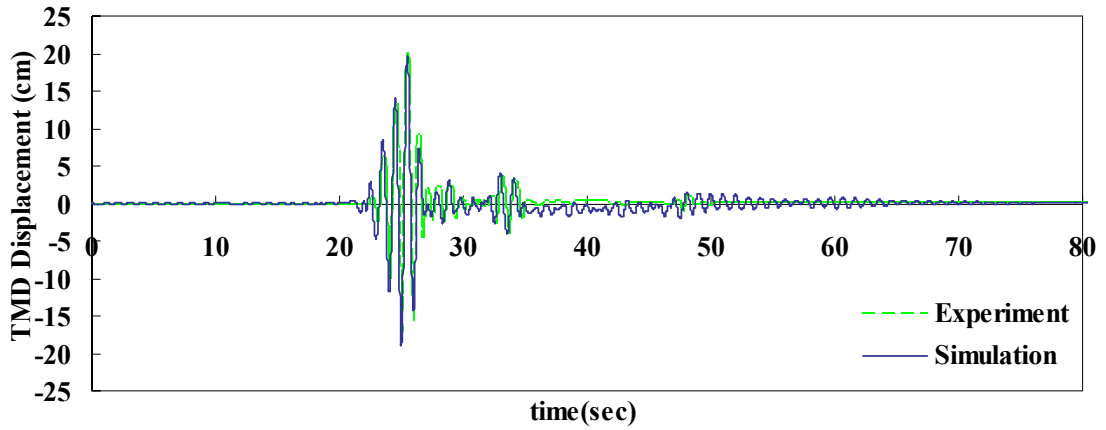


Fig 4.40(d) EL Centro_200gal

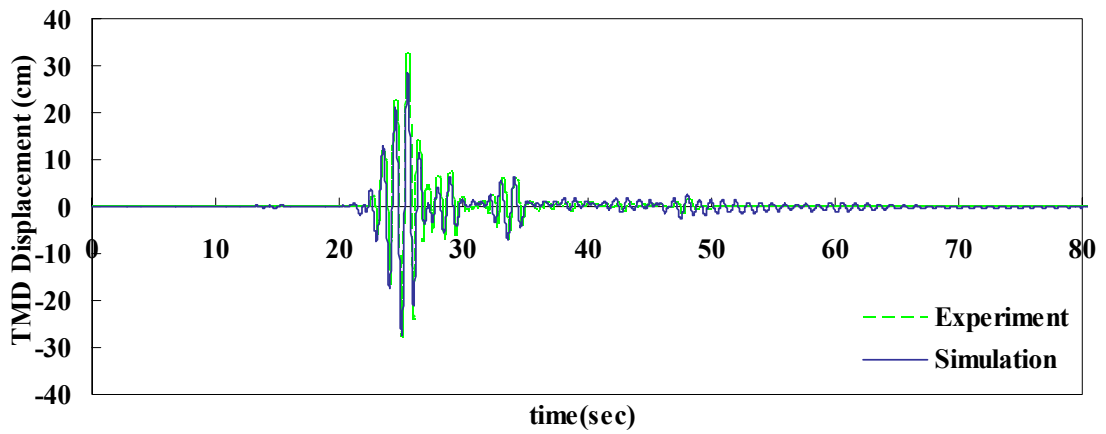


Fig 4.40 (e) EL Centro_250gal

圖4.40 EL Centro模擬與實驗TMD位移歷時比較

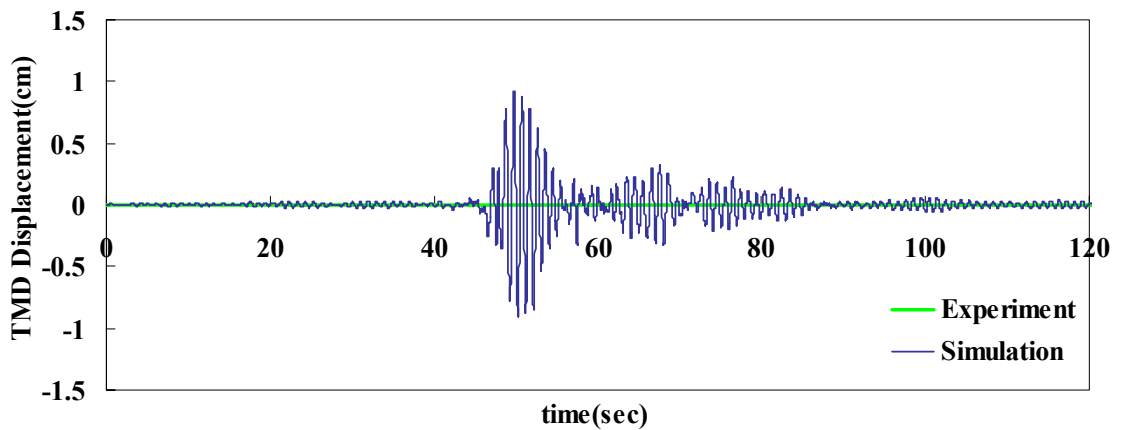


Fig 4.41(a) TCU129_50gal

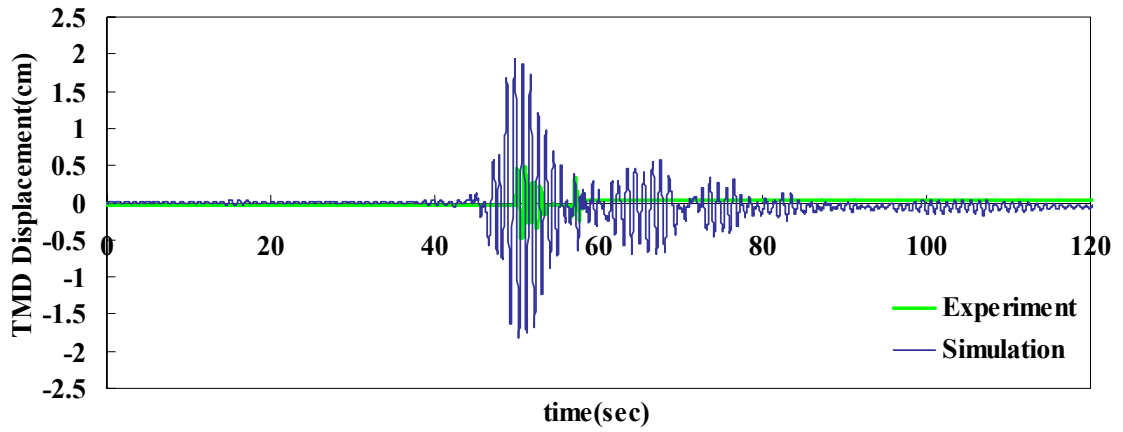


Fig 4.41(b) TCU129_100gal

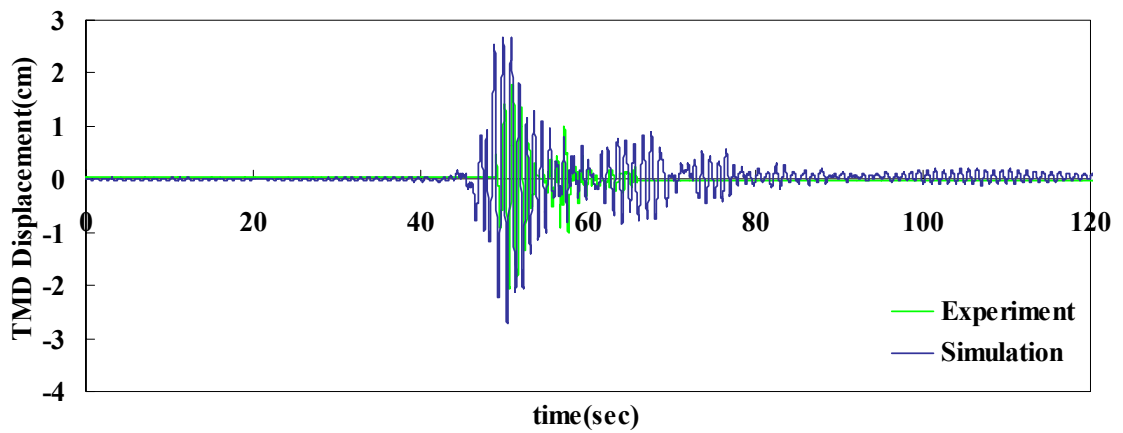


Fig 4.41(c) TCU129_150gal

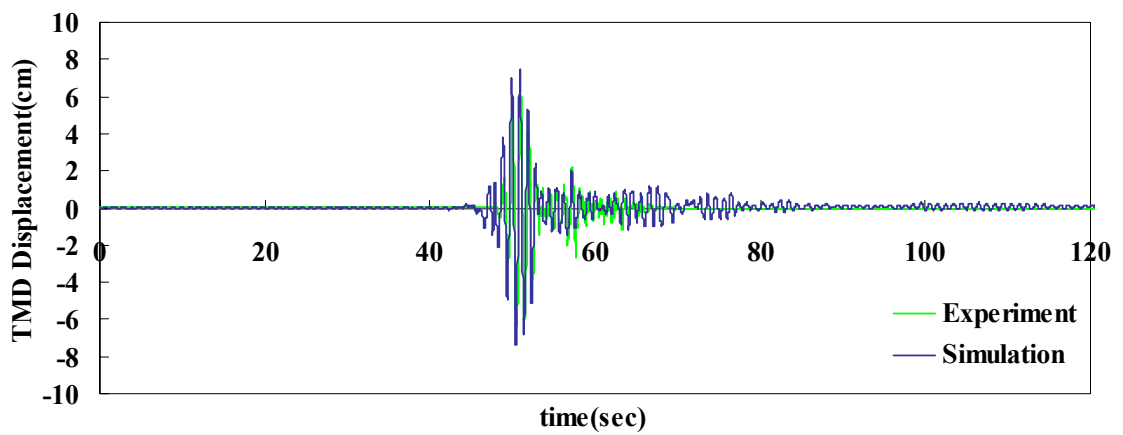


Fig 4.41(d) TCU129_200gal

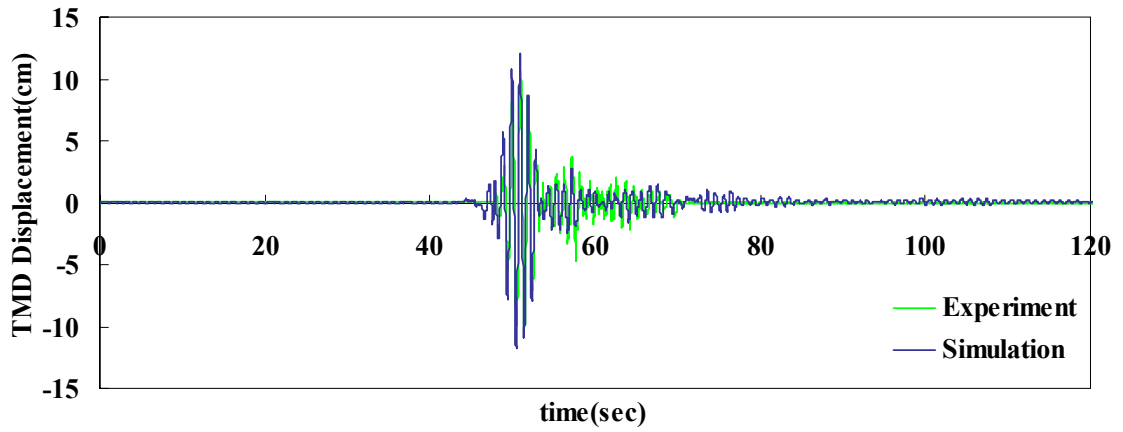


Fig 4.41(e) TCU129_250gal

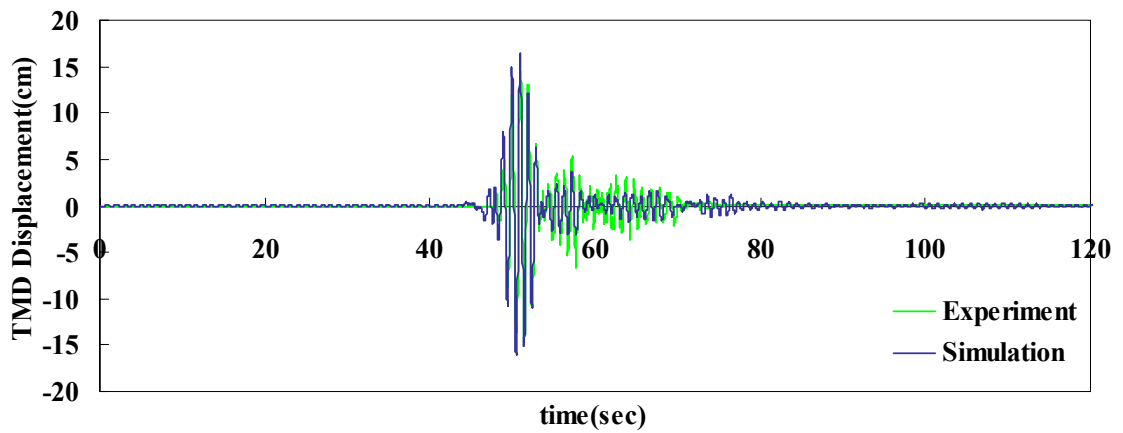


Fig 4.41(f) TCU129_300gal

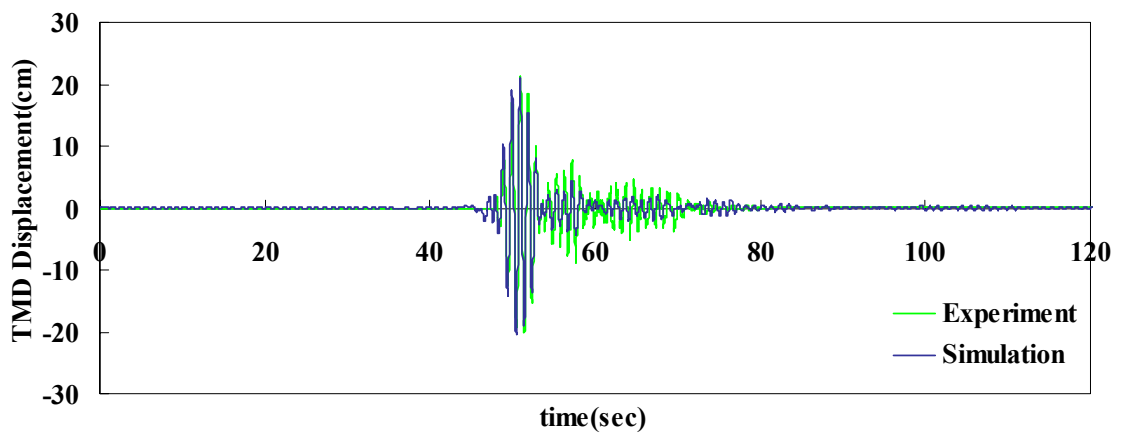


Fig 4.41 (g) TCU129_350gal

圖4.41 TCU129模擬與實驗TMD位移歷時比較

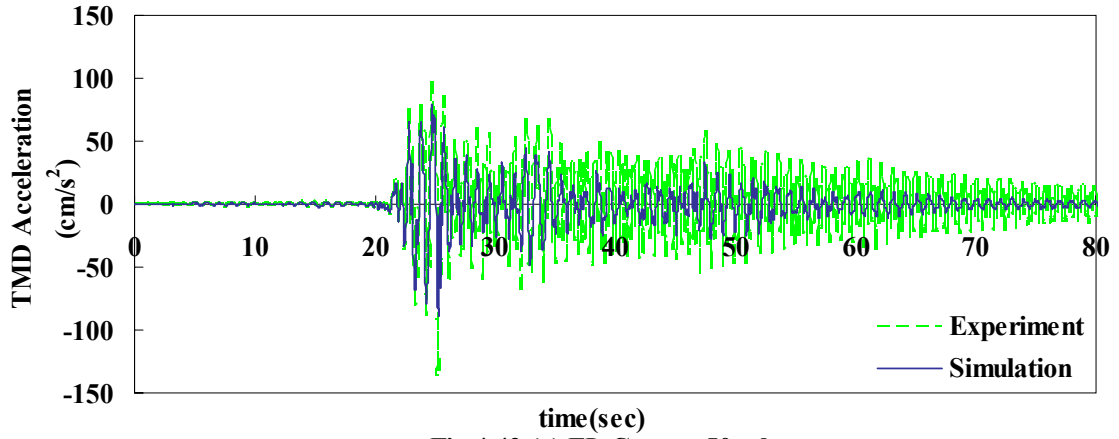


Fig 4.42 (a) EL Centro_50gal

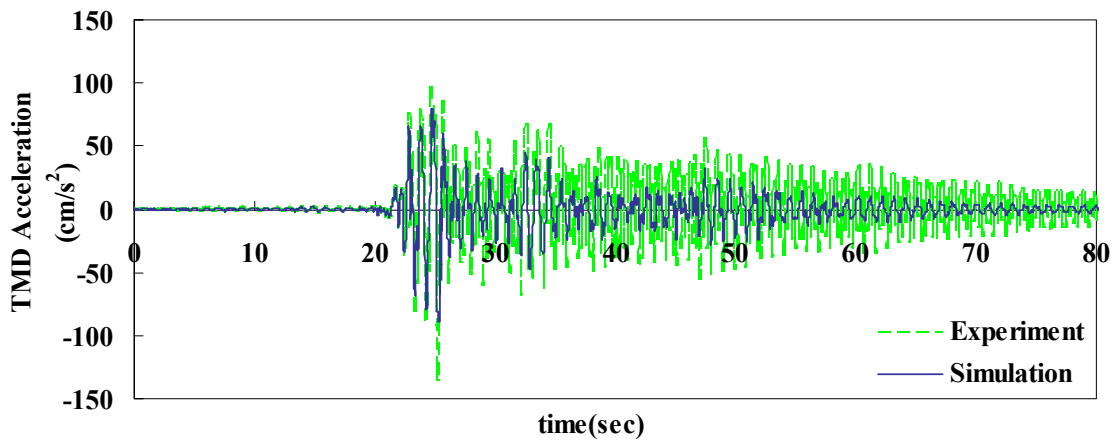


Fig 4.42 (b) EL Centro_100gal

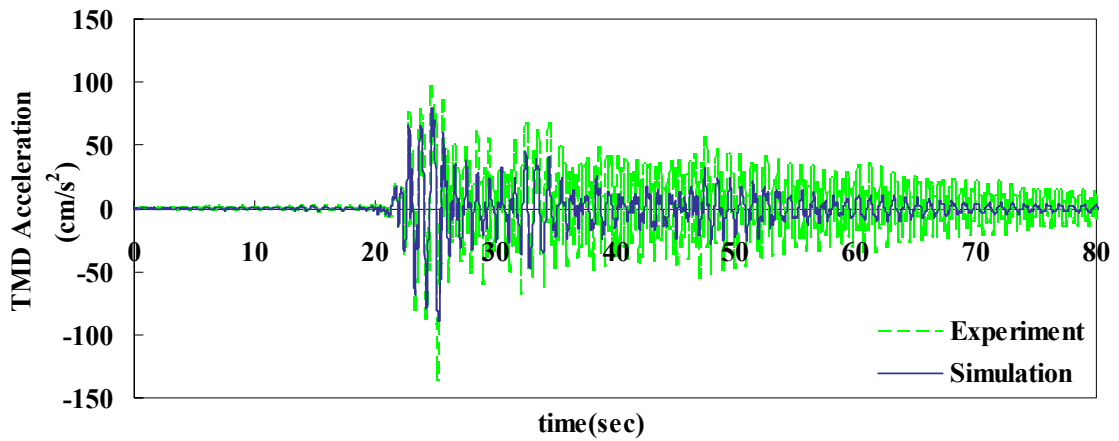


Fig 4.42 (c) EL Centro_150gal

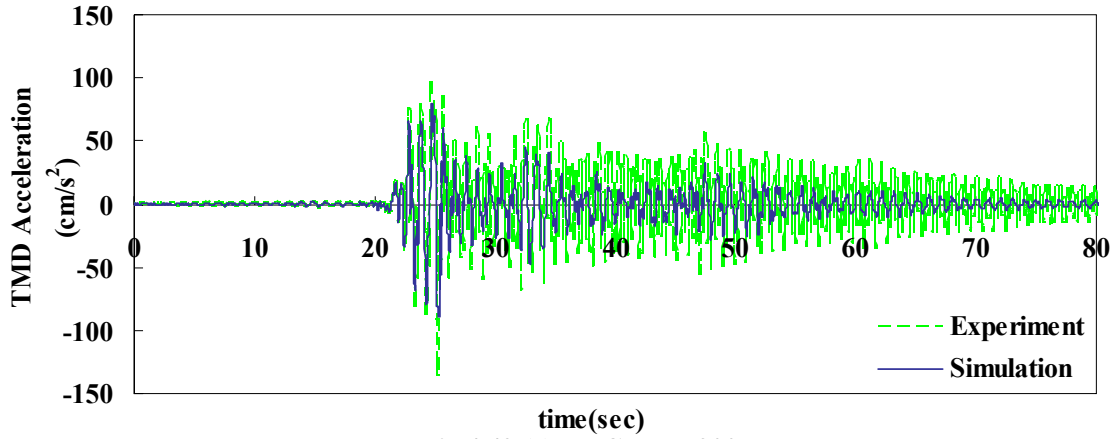


Fig 4.42 (d) EL Centro_200gal

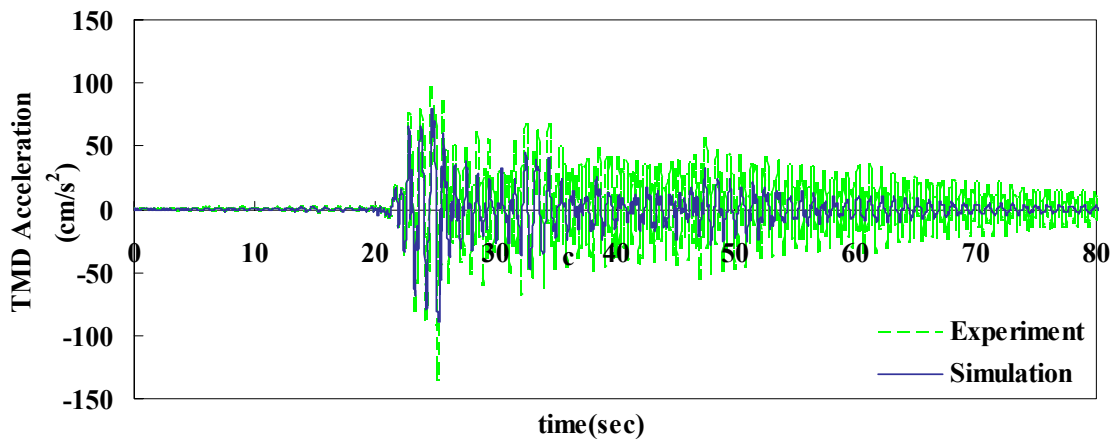


Fig 4.42 (e) EL Centro_250gal

圖4.42 EL Centro模擬與實驗TMD加速度歷時比較

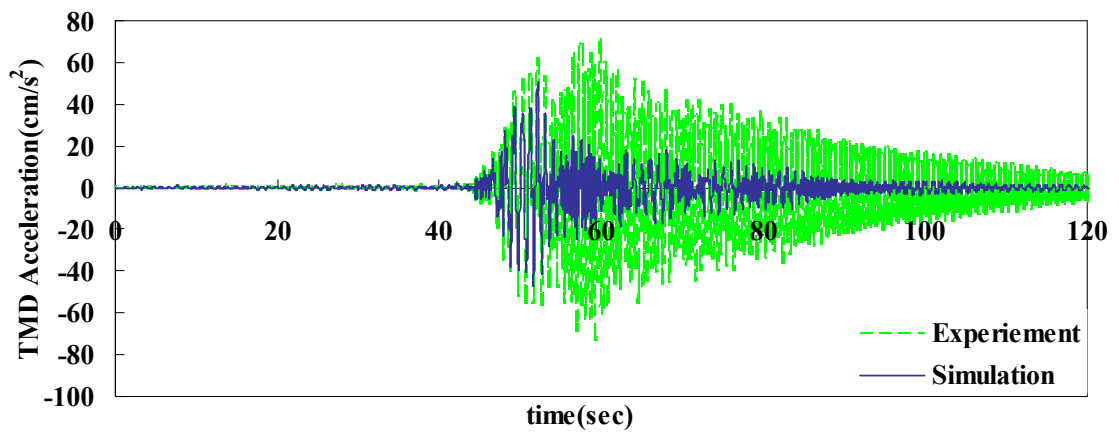


Fig 4.43 (a) TCU129_50gal

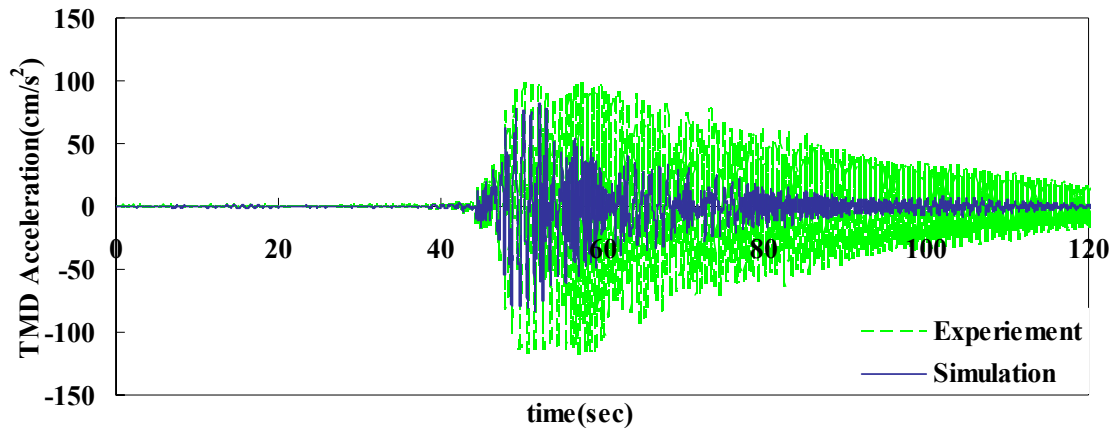


Fig 4.43 (b) TCU129_100gal

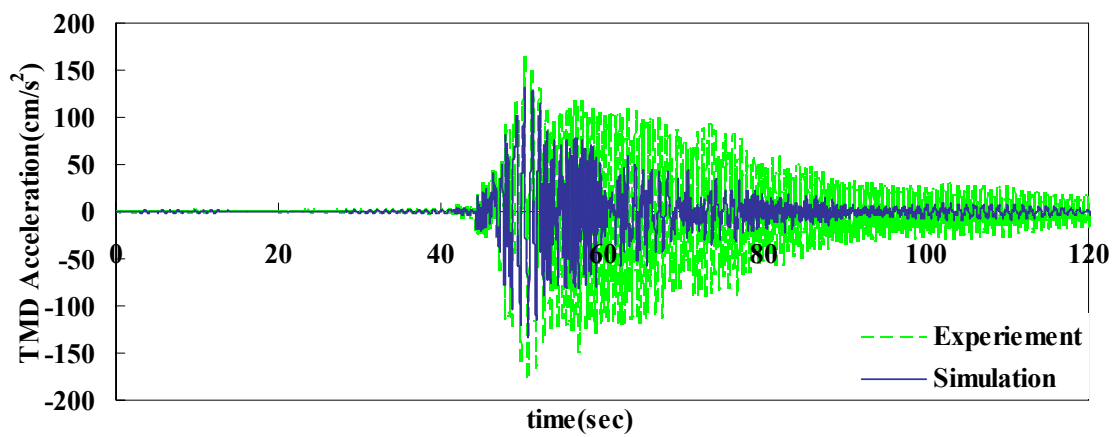


Fig 4.43 (c) TCU129_150gal

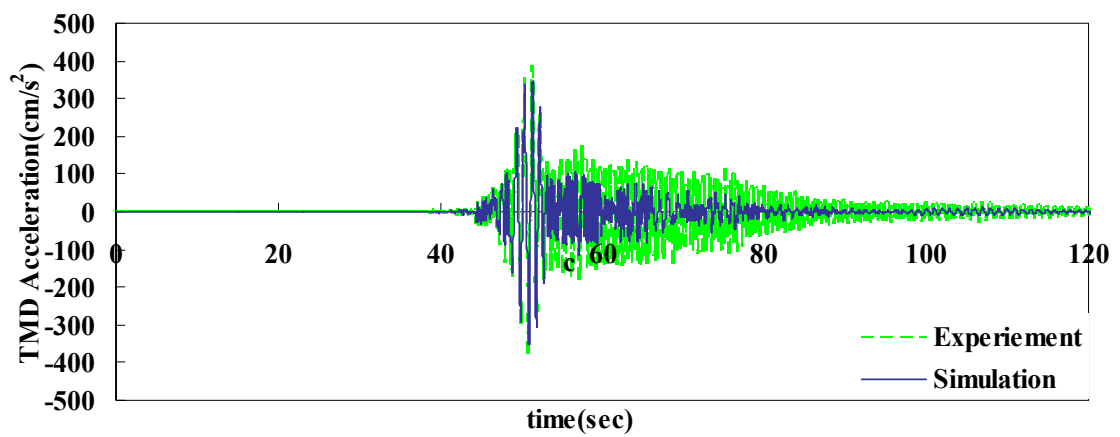


Fig 4.43 (d) TCU129_200gal

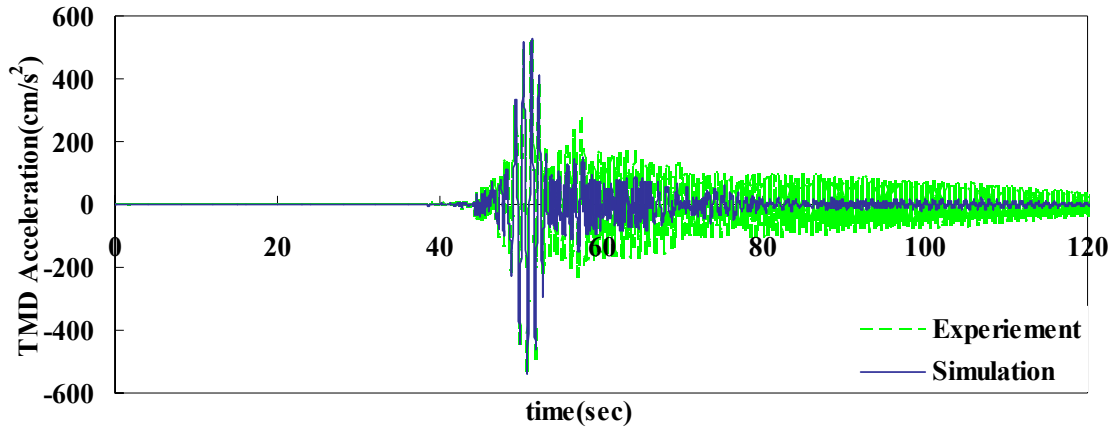


Fig 4.43 (e) TCU129_250gal

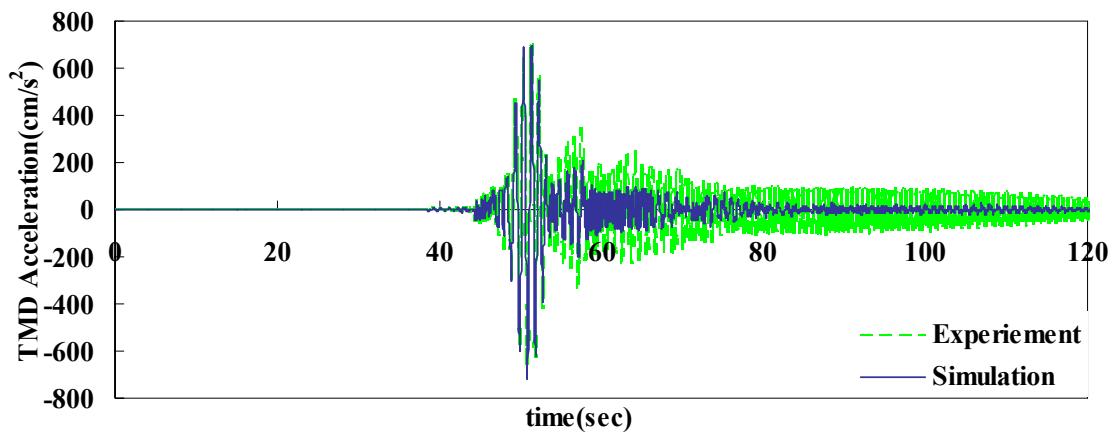


Fig 4.43 (f) TCU129_300gal

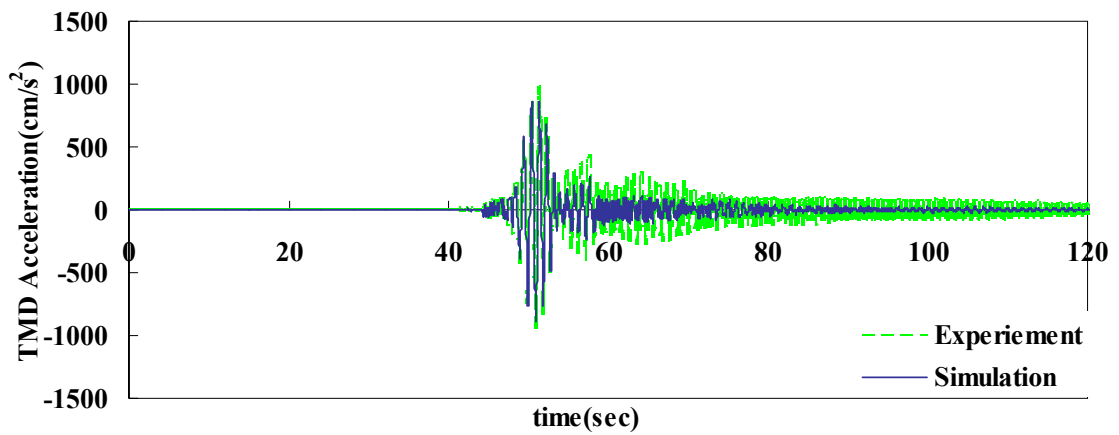


Fig 4.43 (a) TCU129_350gal

圖4.43 TCU129 模擬與實驗TMD加速度歷時比較

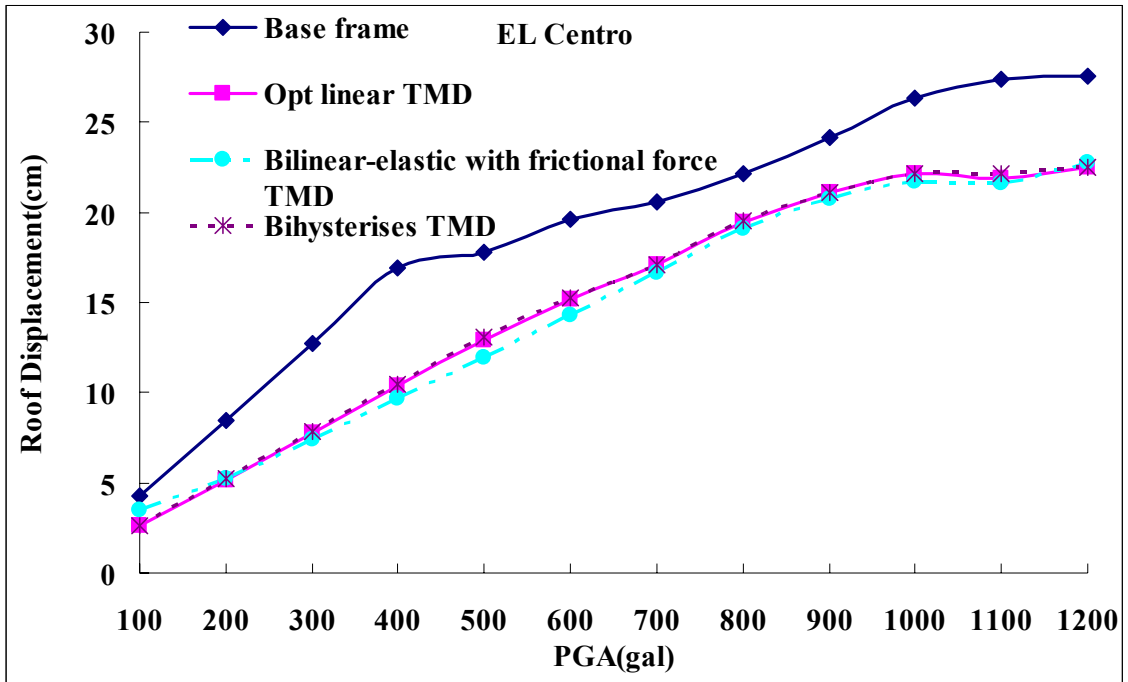


圖4.44 EL Centro在不同PGA下最大頂層相對位移反應

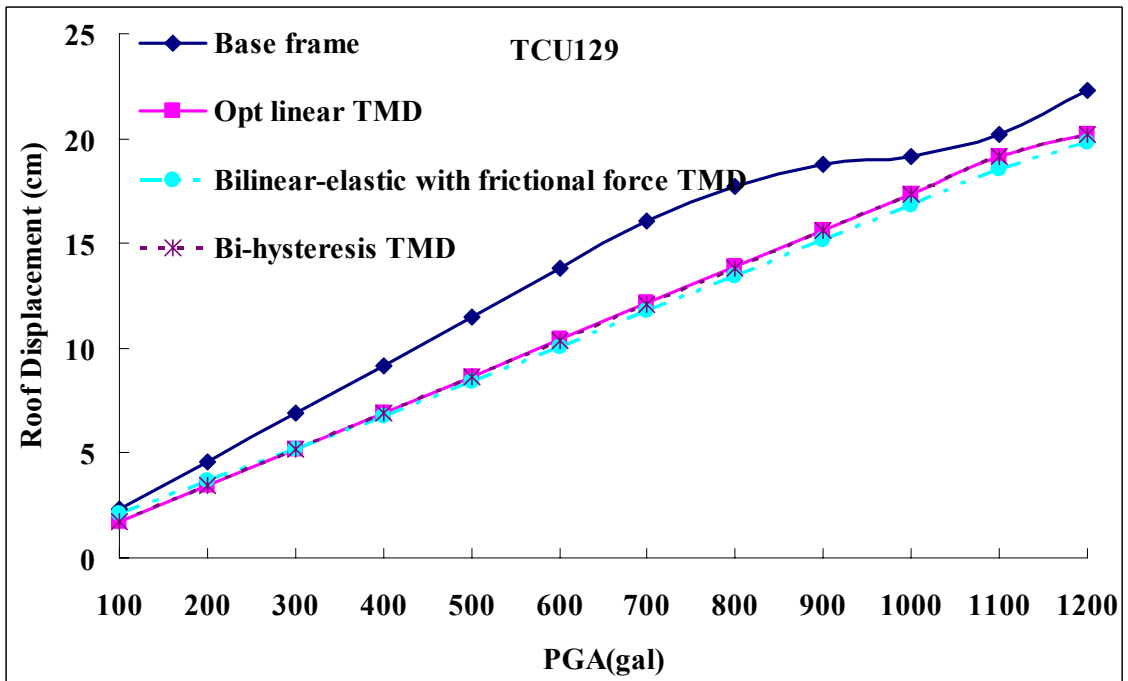


圖4.45 TCU129歷時在不同PGA下最大頂層相對位移反應

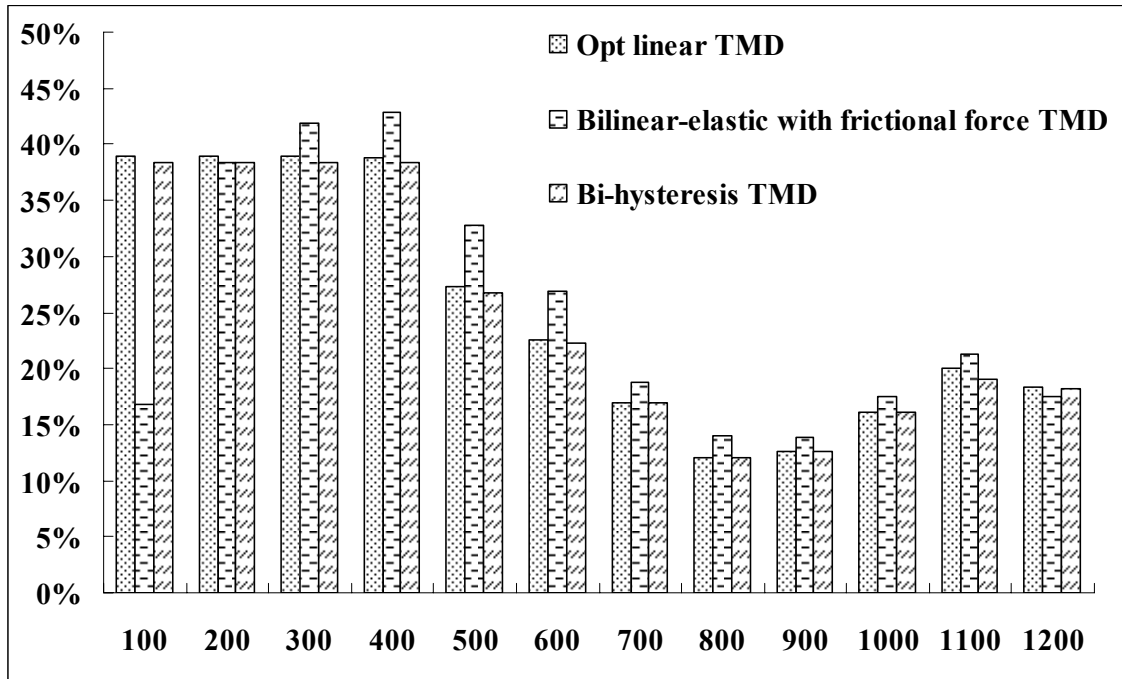


圖4.46 結構裝置三種PTMD在EL Centro不同PGA頂層最大相對位移反應效益比

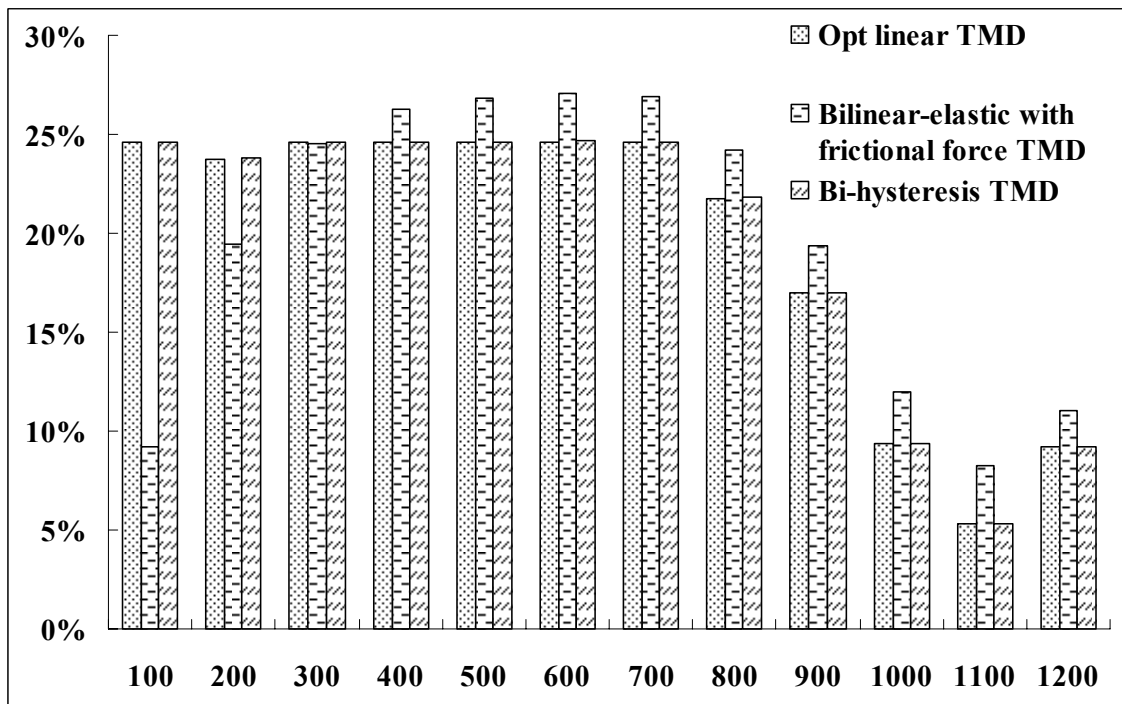


圖4.47 結構裝置三種PTMD在TCU129不同PGA頂層最大相對位移反應效益比

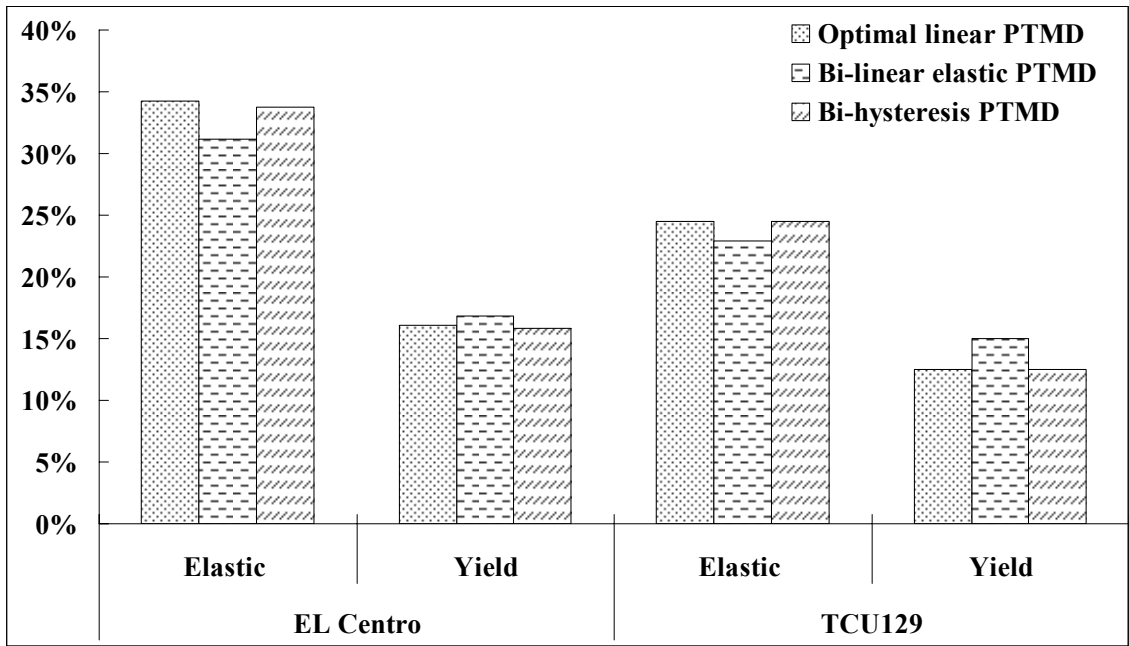


圖4.48 結構裝置三種PTMD在降伏前後頂層最大相對位移反應平均效益比

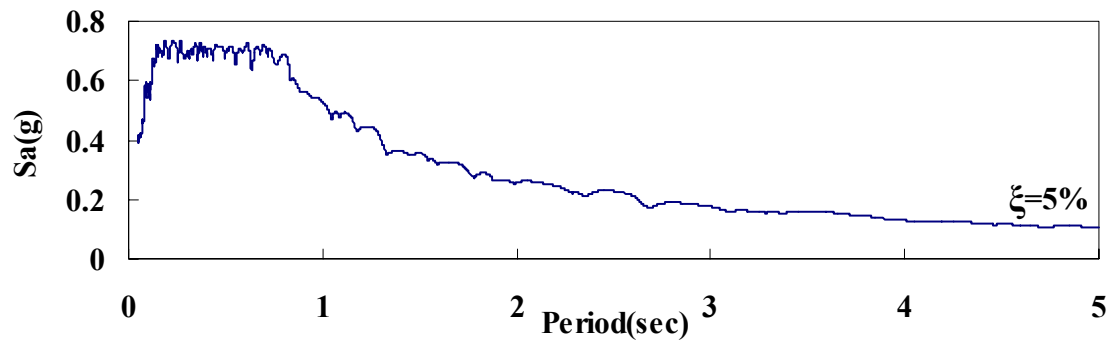
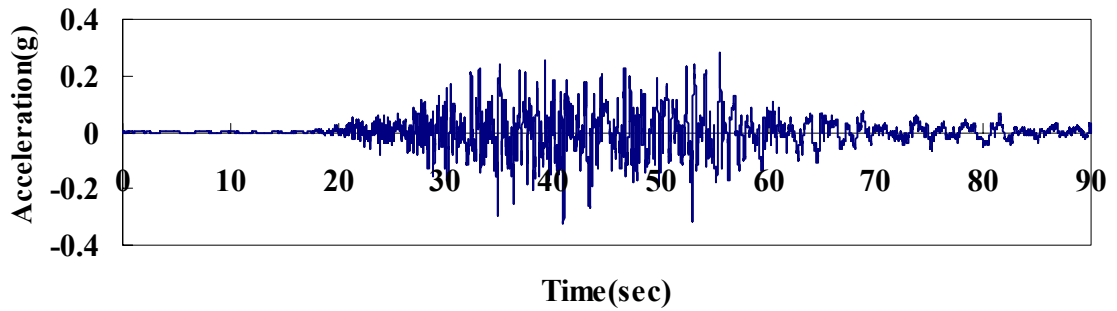


Fig. 4.49(a)TCU059

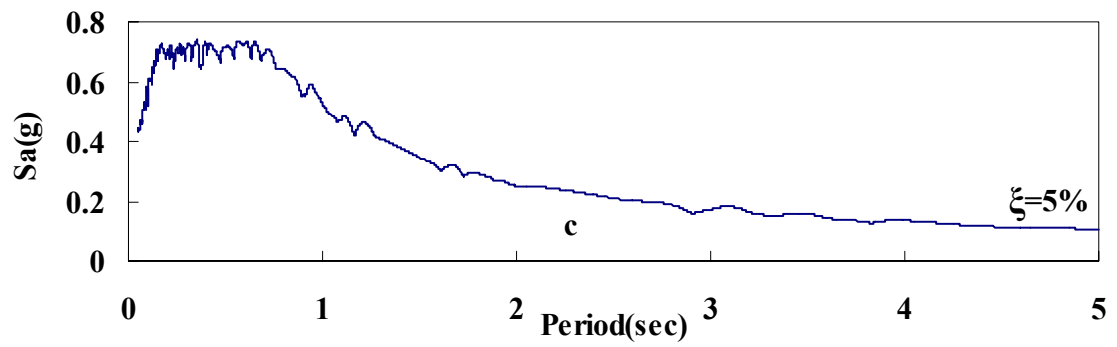
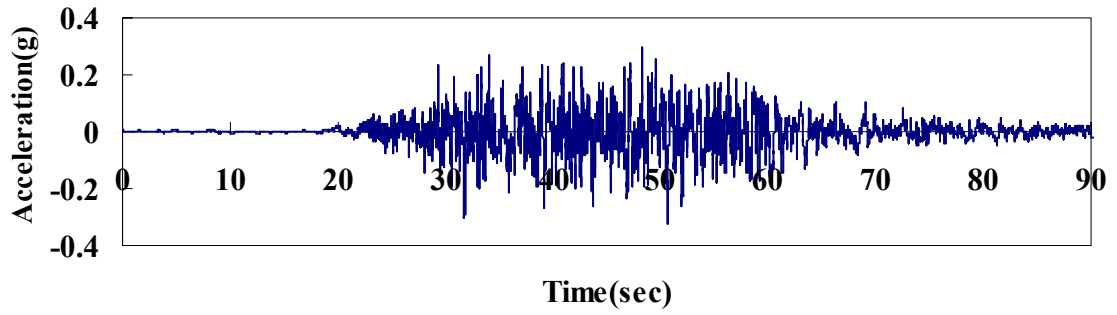


Fig. 4.49(b)TCU061

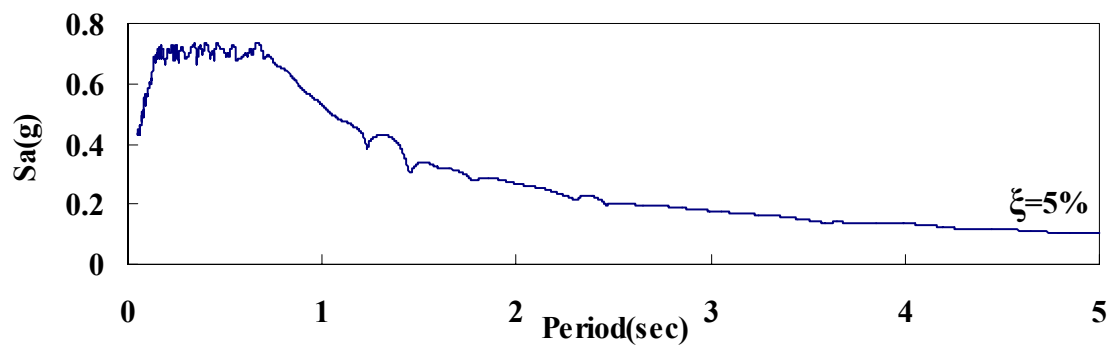
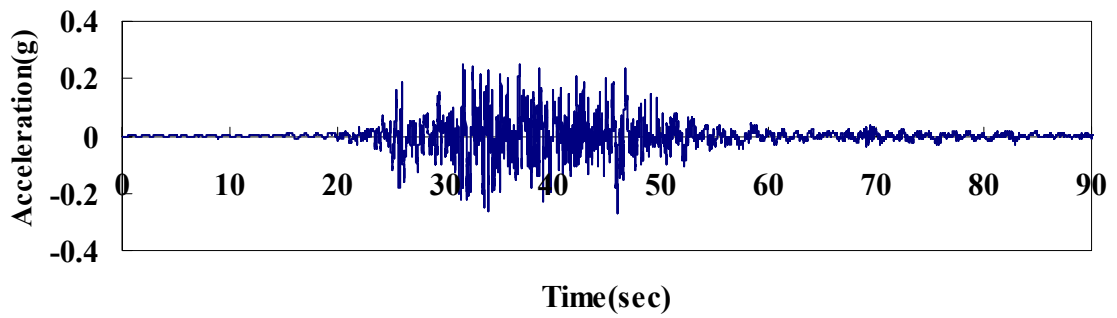


Fig. 4.49(c)TCU072

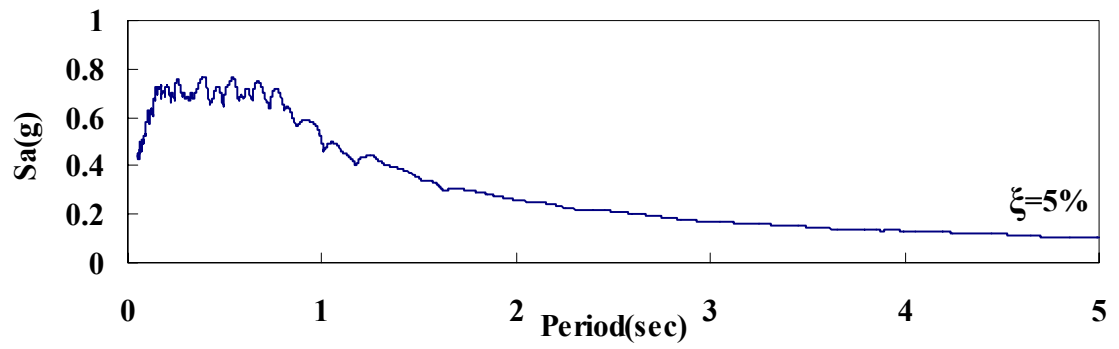
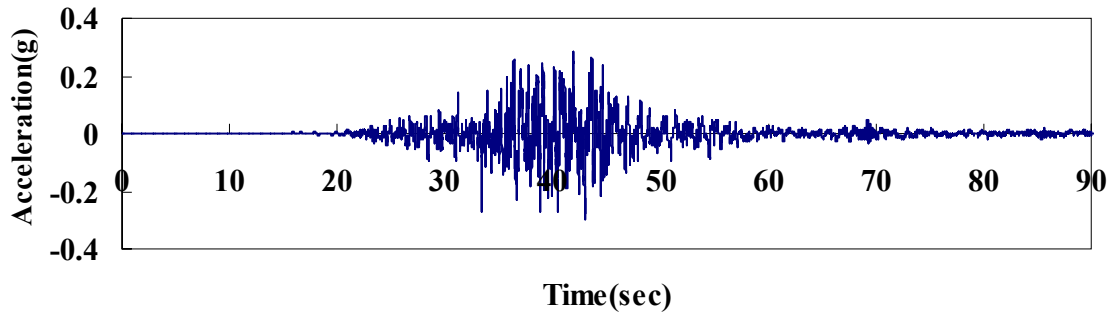


Fig. 4.49(d)TCU074

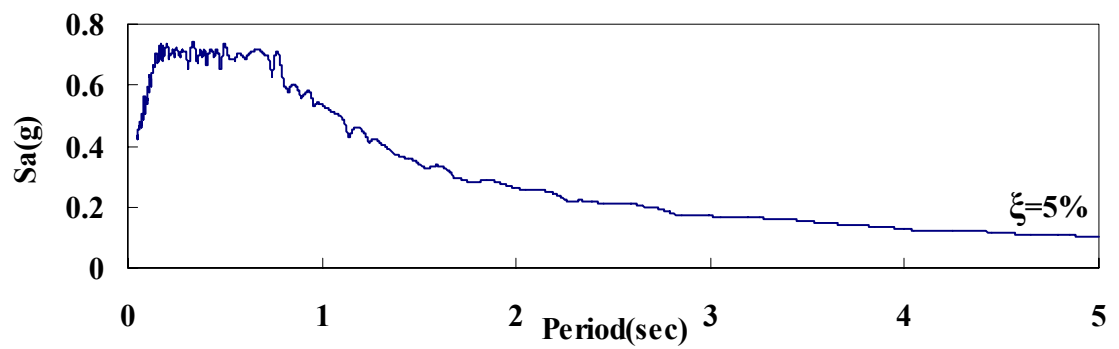
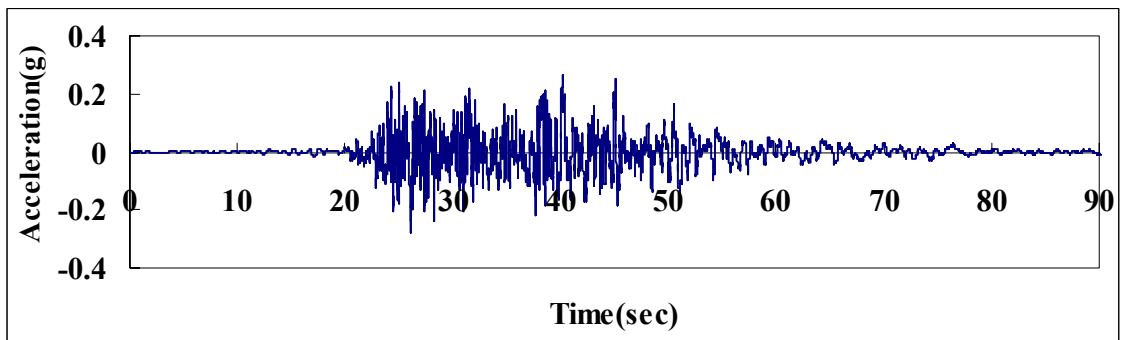


Fig. 4.49(e)TCU078

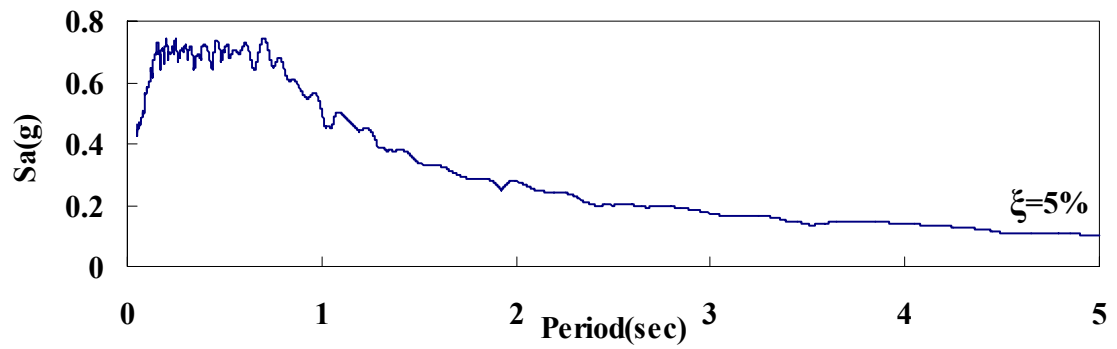
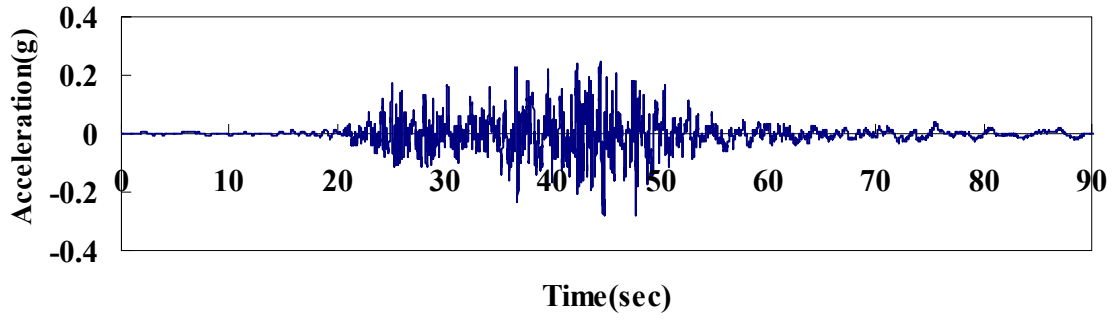


Fig. 4.49(f)TCU079

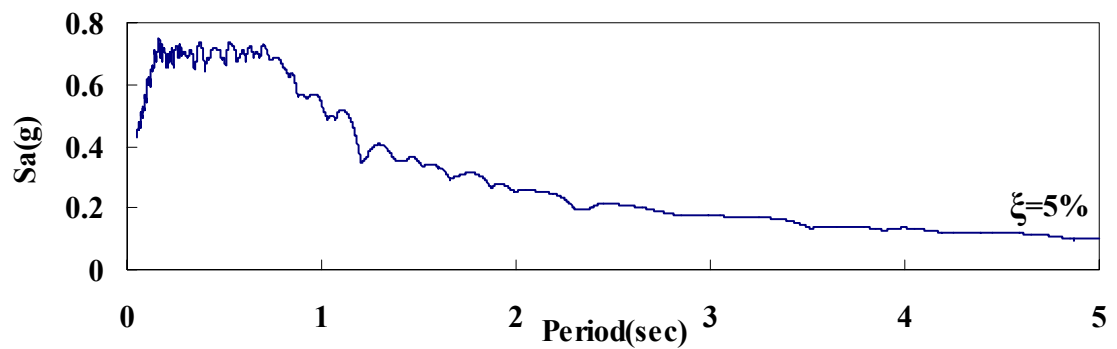
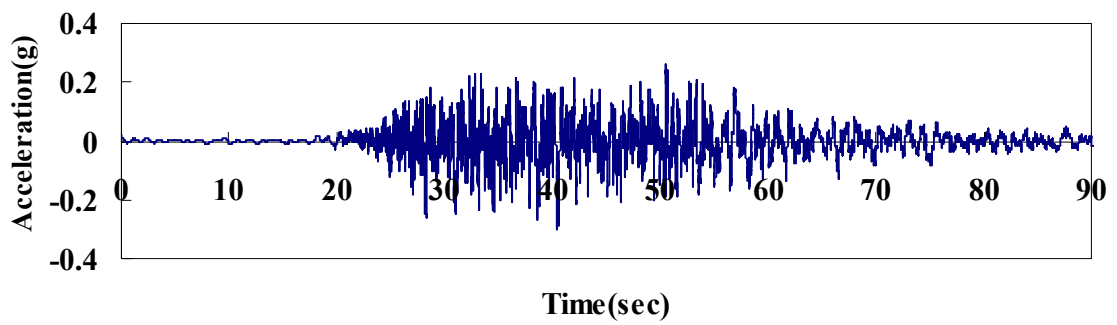


Fig. 4.49(g)TCU109

圖4.49 地震加速度歷時與對應之加速度反應譜

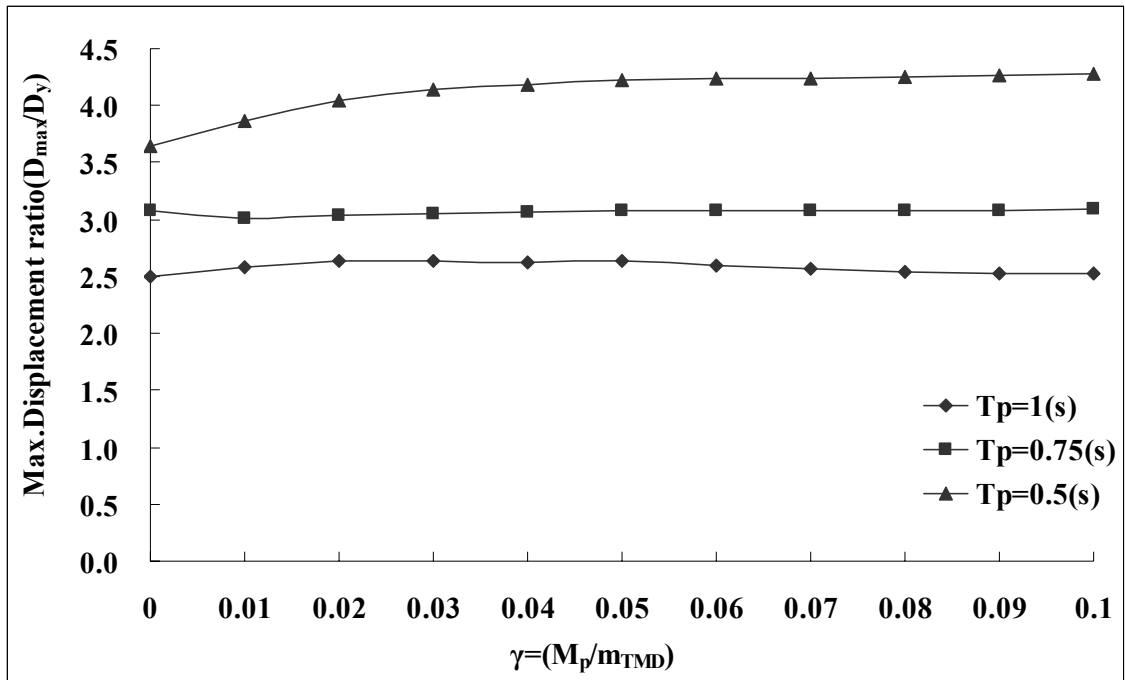


圖4.50 改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響

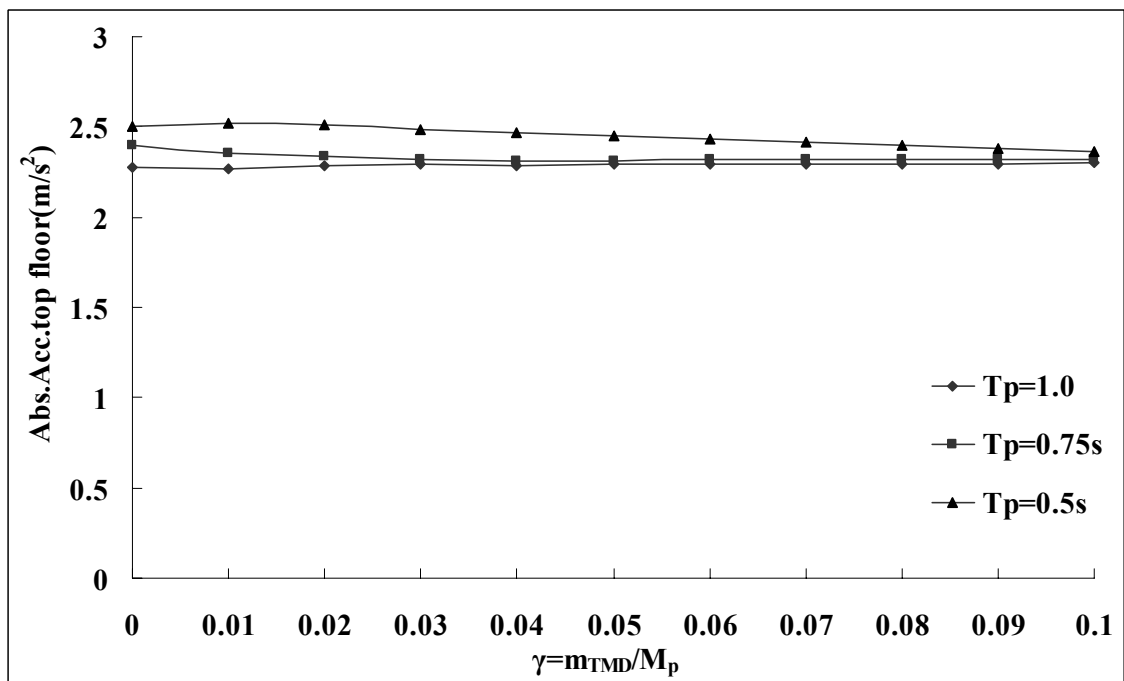


圖4.51 改變底層結構周期與質量比對頂層最大絕對加速度反應之影響

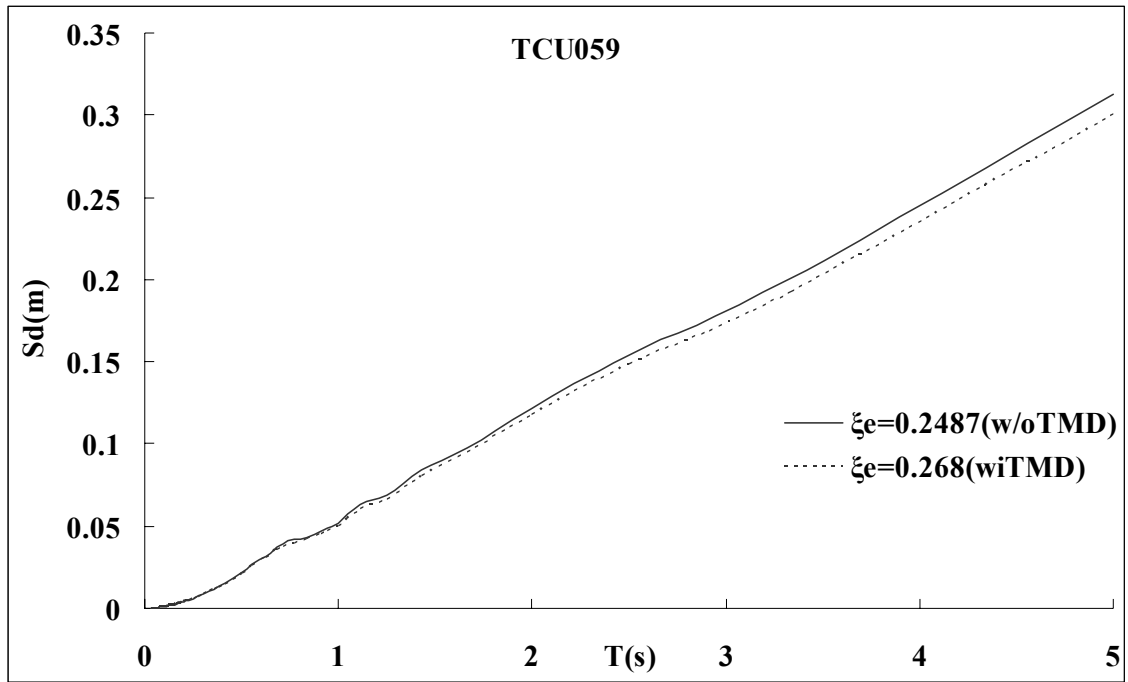


圖4.52 TCU059歷時純構架與裝置PTMD構架等效阻尼比所對應之位移反應譜

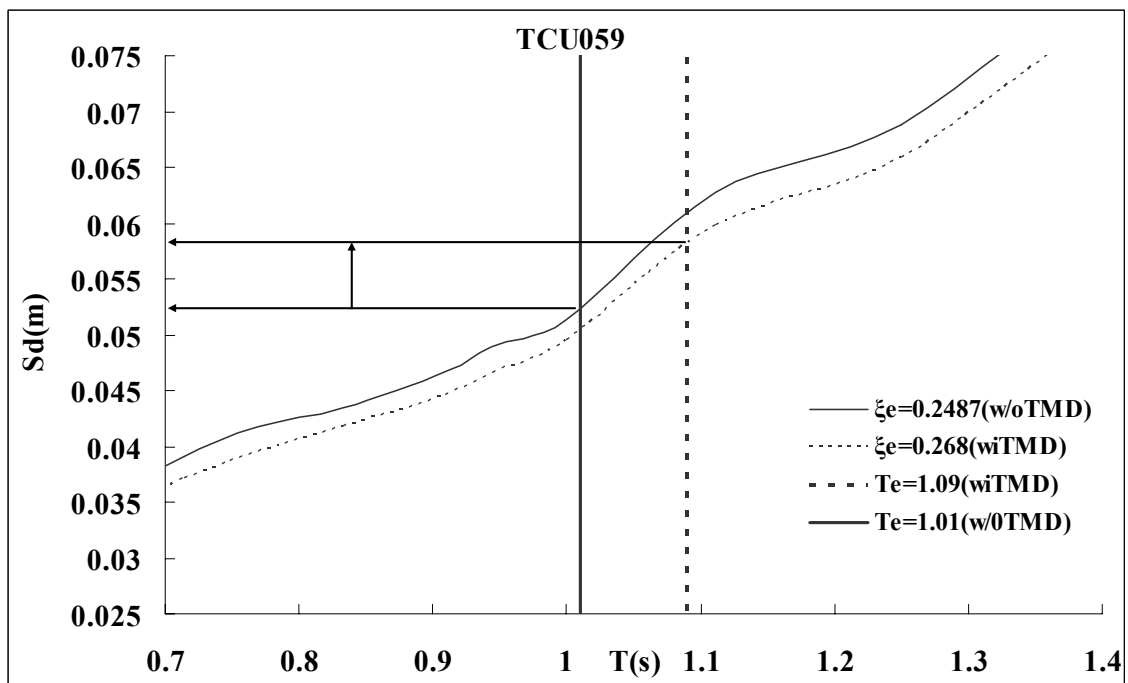


圖4.53 TCU059歷時純構架與裝置PTMD構架等效阻尼比所對應之位移反應譜

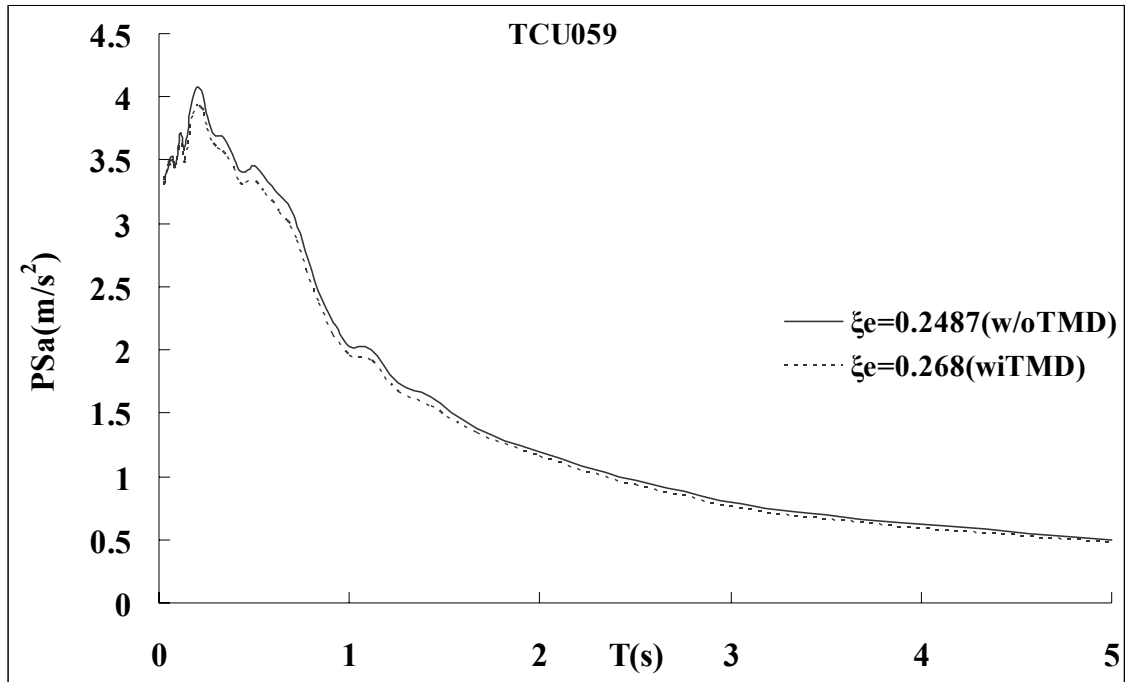


圖4.54 TCU059歷時純構架與裝置PTMD構架等效阻尼比所對應之擬加速度反應譜

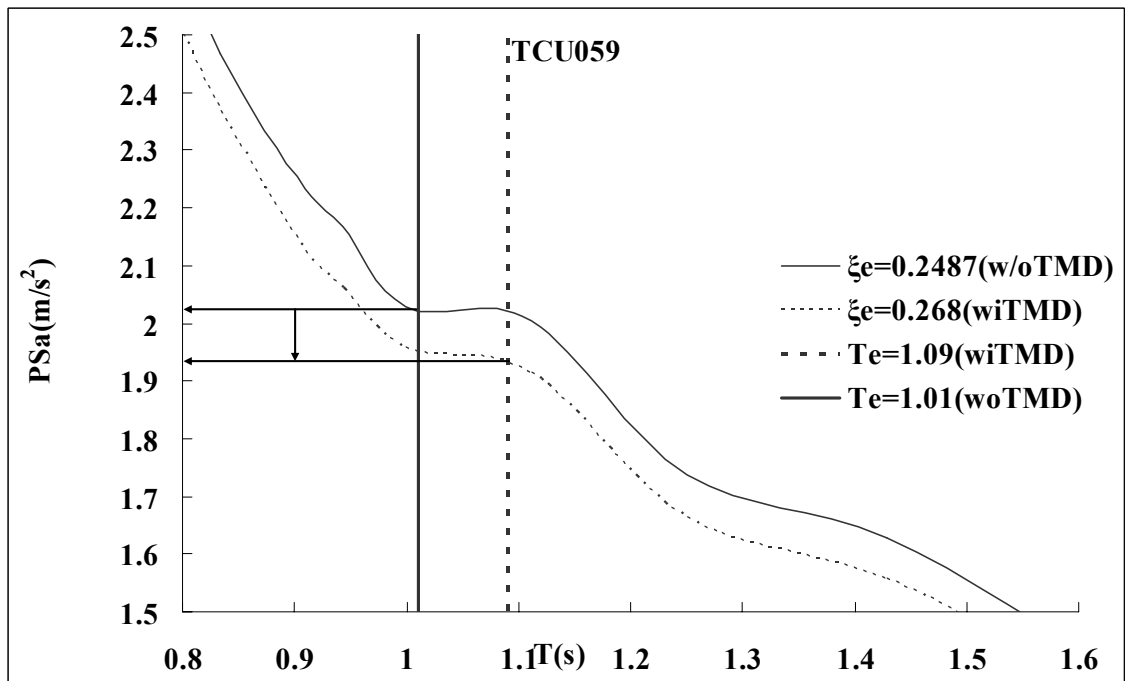


圖 4.55 TCU059 歷時純構架與裝置 PTMD 構架等效阻尼比對應之擬加速度反應譜

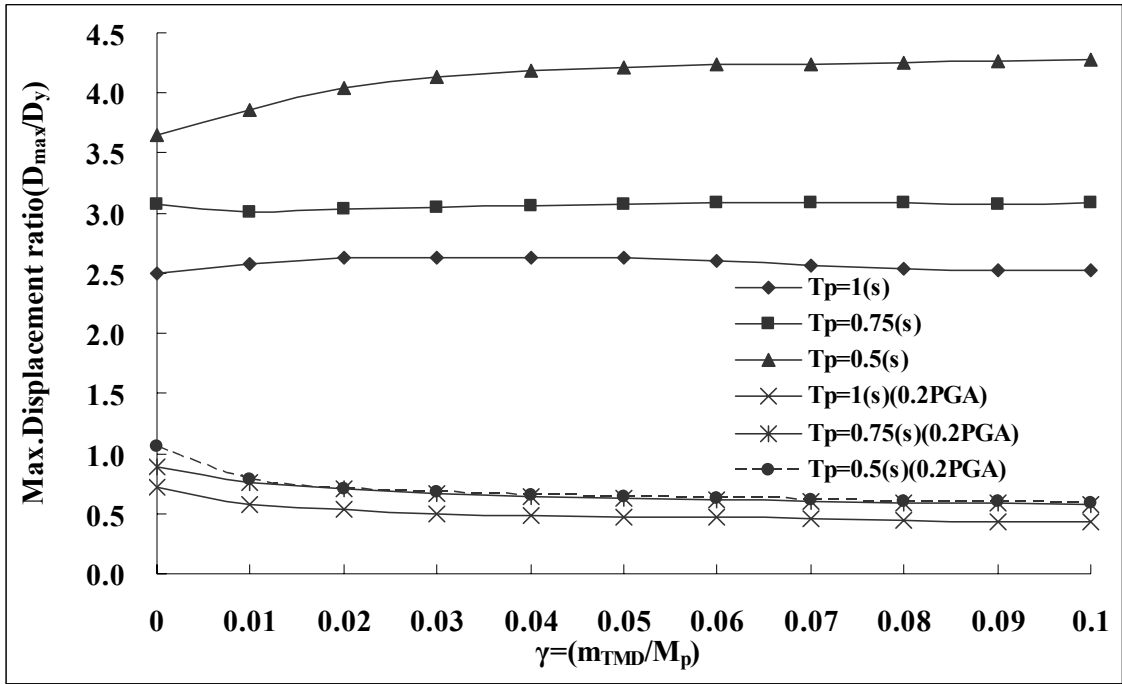


圖4.56 結構在彈性與非線性階段改變底層結構周期與質量比對頂層最大位移反應比之影響

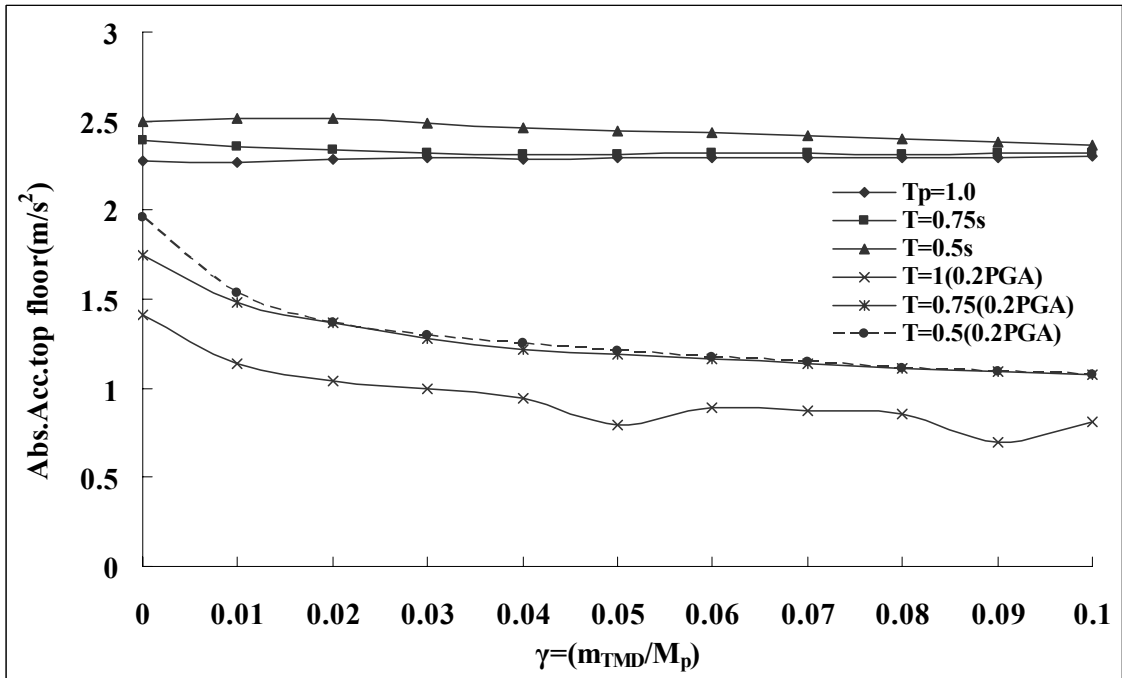


圖4.57 結構在彈性與非線性階段改變底層結構周期與質量比對頂層最大絕對加速度反應之影響

第五章 結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估

5.1 等效線性系統

本文在提出結構加裝被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估其流程中，使用替代結構的觀念並以等效線性系統來模擬非線性系統。其中替代結構即是考慮了結構進入非線性行為時阻尼比增加與周期拉長而將原本結構非線性行為由一具有等效勁度 K_e 與等效阻尼比 ξ_e 的等效線性系統來取代，如圖 5.1 所示。再者，替代結構與非線性結構有相同的最大位移(目標位移)和極限力(相對應目標位移之基底剪力) 如圖 5.2 所示，因此可以利用替代結構來函括非線性結構的遲滯行為與韌性需求。加裝被動調諧質量阻尼器的結構物，即是利用替代結構具有等效線性的特性，而結合彈性位移反應譜來分析評估結構物的行為。

5.1.1 非線性靜力側推分析

結構裝置被動調諧質量阻尼器在進行非線性靜力側推分析時其側推力的分佈依公式 (5.1) 式作分配。

$$[F] = [K][\bar{\phi}] = \omega_i^2 [M][\bar{\phi}] \quad (5.1)$$

其中

F_i 為各層分配的側力

$[M]$ 為含 TMD 結構系統之質量矩陣

$[K]$ 為含 TMD 結構系統之勁度矩陣

ω_i 為第 i 個模態的自然圓周頻率

$\bar{\phi}$ 為控制模態 (以頂層模態為 1 之模態分佈)

側推力的分佈考慮了二個因素的影響：第一，被動調諧質量阻尼器其勁度對於結構的影響；第二，由於結構裝設被動調諧質量阻尼器後第一模態和第二模態對於系統的貢獻甚大，因此不能只考慮第一模態的效應。為了考量第一模態和第二模態的貢獻，因此提出控制模態 $[\bar{\phi}]$ 。

5.1.2 控制模態

控制模態主要是考慮第一模態與第二模態貢獻的影響，其計算方式如下：

$$[\bar{\phi}] = \Gamma_1 S_d(\xi_1, \omega_1) \phi_1 + \Gamma_2 S_d(\xi_2, \omega_2) \phi_2 \quad (5.2)$$

Γ_i 為含 TMD 結構系統第 i 個模態的模態參與因子

$$\Gamma_i = \frac{[\phi]_i^T [M] \mathbf{1}}{[\phi]_i^T [M] [\phi]_i} \quad (5.3)$$

ϕ_i 為第 i 個模態(頂層分量為 1)

$S_d(\xi_i, \omega_i)$ 為含 TMD 結構系統在第 i 個模態之譜位移

ξ_i 為結構固有阻尼比與 PTMD 第 i 模態等效黏性阻尼比之總合

$$\xi_i = \xi_i^{inherent} + \xi_i^{damper} \quad (5.4)$$

$$\xi_1^{damper} = \frac{T_1 C(\phi_{1,r})^2}{4\pi M_1} \quad (5.5)$$

$$\xi_2^{damper} = \frac{T_2 C(\phi_{2,r})^2}{4\pi M_2} \quad (5.6)$$

T_i 為含 PTMD 構架第 i 個模態的自然周期

M_i 為含 PTMD 構架第 i 個模態的模態質量

$$M_i = [\phi]_i^T [M] [\phi]_i \quad (5.7)$$

C 為調諧質量阻尼器之阻尼係數

$\phi_{i,r}$ 為第 i 個模態 PTMD 與頂層模態分量之差值(模態分佈之頂層分量為 1)

5.1.3 等效阻尼與等效勁度

本文等效線性系統中等效阻尼與等效勁度的計算是採用陳長佑[11]既有建築物加裝消能器補強之位移設計法文獻中提出的公式。其公式如下：

等效勁度：

$$K_e = K_0 \left[\frac{1}{\mu^3} + \alpha \left(1 - \frac{1}{\mu^3} \right) + \frac{3}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) - \frac{3\alpha}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) \right] \quad (5.8)$$

等效阻尼比：

等效線性系統的等效阻尼比即為非線性結構因韌性行為而產生的遲滯阻尼比 $\xi_{e(inelasticity-MRF+TMD_k)}$ ，並加上結構本身的固有阻尼比 $\xi_{inherent}$ ，及被動調諧質量阻尼器黏滯阻尼係數所提供的等效阻尼比 $\xi_{e(TMD_c)}$ 之總合。其中，在計算構架遲滯阻尼比的部分 $\xi_{e(inelasticity-MRF+TMD_k)}$ ，由於結構裝設被動調諧質量阻尼器於構架時，PTMD 提供的勁度對於基底構架在遲滯消散能上會有所影響，因此在公式(5.11)之計算，其實就考慮了 PTMD 勁度的貢獻與基底構架遲滯消能的部分。

$$\xi_e = \xi_{e(inelasticity(structure+PTMD))} + \xi_{e(damper)} + \xi_{inherent} \quad (5.9)$$

$$\xi_{e(TMD_c)} = \frac{T_e C(\bar{\phi}_{1r})^2}{4\pi M_{eq}} \quad (5.10)$$

$$\xi_{e(inelasticity-MRF+TMD_k)} = \frac{1}{\pi} \frac{(1-\alpha) \left[\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) - \left(\frac{1}{\mu^2} - \frac{1}{\mu^3} \right) \right]}{\frac{1}{6\mu^3} + \frac{1}{4\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) + \frac{\alpha}{6} \left(1 - \frac{1}{\mu^3} \right) - \frac{\alpha}{4\mu} \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right)} \quad (5.11)$$

其中

K_e 為等效線性系統之等效勁度

K_0 為基底剪力-頂層位移曲線之單自由度化彈性勁度

$$K_0 = \frac{\text{非線性靜力側推曲線彈性勁度}}{\bar{\Gamma}} \quad (5.12)$$

α 為基底剪力-頂層位移曲線在雙線性化後之後降伏勁度比

$\mu = \frac{X_m}{X_y}$ 為頂層最大相對位移與降伏時頂層位移之比值

X_m 為頂層最大位移

X_y 為降伏時頂層位移

$\bar{\Gamma}$ 為控制模態的模態參與係數

$$\bar{\Gamma} = \frac{[\bar{\phi}]^T [M] \mathbf{1}}{[\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}]} \quad (5.13)$$

T_e 為等效線性系統的等效周期

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{K_e}} \quad (5.14)$$

$$M_{eq} = [\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}] \quad (5.15)$$

C 為調諧質量阻尼器之黏滯阻尼係數

ϕ_{ir} 為第 i 個模態 PTMD 與頂層模態之差(模態分佈以頂層為 1)

5.2 結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估

本文提出之結構裝設被動調諧質量阻尼器之耐震性能評估方法，主要是以一等效線性系統模擬非線性系統為基礎所提出的兩種評估方法：其一是設定結構頂層最大相對位移為目標位移，利用等效線性系統找出目標位移在特定地震歷時下所對應的最大地表加速度。其二是在特定地震歷時其最大地表加速度下求出結構之頂層最大相對位移。下面將針對本文提出結構裝置 PTMD 耐震性能評估的方法做詳細說明。

5.2.1 特定目標位移所對應之最大地表加速度

結構加裝被動調諧質量阻尼器在特定頂層最大相對位移所對應的特定地震最大地表加速度評估流程如圖 5.3 所示，其步驟如下：

1. 決定目標位移 Δ ，並假設在特定地震下所對應的 PGA 大小
2. 利用 5.1.2 節計算控制模態 $\bar{\phi}$
3. 將裝置被動消能質量阻尼器結構進行非線性靜力側推分析，其側推力依 (5.1) 式作分配。將分析後的非線性靜力側推曲線理想化為雙線性曲線(利用曲線下面積與雙線性曲線下面積相等)後可得韌性比 $\mu = \frac{D_{max}}{D_y}$ 和

後降伏勁度比 α

4. 利用公式 (5.8)、(5.9)、(5.10)、(5.11)、(5.14) 計算等效線性系統的等效勁度 K_e 、等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e
5. 利用等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e ，查出在特定地震歷時假設 PGA 下的彈性位移反應譜值 δ

$$S_d(T_e, \xi_e) = \delta'$$

6. 將目標位移 Δ 轉成單自由度的位移 δ

利用式 (5.16) 將目標位移轉成單自由度的位移，其中等效模態參與係數利用式 (5.13) 計算

$$\delta = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad (5.16)$$

7. 檢核步驟6單自由度的頂層目標位移 δ 是否等於步驟5所求得的等效單自由度系統的譜位移 δ' 。若相等則迭代完成，則此歷時之PGA即為此目標位移所對應之最大地表加速度。若不相等則將歷時的PGA依 δ'/δ 等比例縮放，則縮放後的地震歷時最大地表加速度即為此目標位移所對應特定歷時之最大地表加速度。

5.2.2 特定歷時最大地表加速度所對應之頂層最大位移

結構加裝被動調諧質量阻尼器在特定地震最大地表加速度所對應頂層最大相對位移評估流程如圖 5.4 所示，評估步驟如下：

1. 假設目標位移 Δ
2. 利用 5.1.2 節計算控制模態 $\bar{\phi}$
3. 將假設的目標位移 Δ 轉成單自由度的位移 δ
 利用式 (5.16) 將目標位移轉成單自由度的位移，其中等效模態參與係數利用式 (5.13) 計算
4. 將裝置被動消能質量阻尼器結構進行非線性靜力側推分析，其側推力依 (5.1) 式作分配。將分析後的非線性靜力側推曲線理想化雙線性曲線後可得韌性比 $\mu = \frac{D_{\max}}{D_y}$ 和後降伏勁度比 α
5. 利用公式 (5.8)、(5.9)、(5.10)、(5.11)、(5.14) 計算等效線性系統的等效勁度 K_e 、等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e
6. 利用等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e 查出在特定地震歷時的彈性位移反應譜值 δ'

$$S_d(T_e, \xi_e) = \delta'$$

7. 檢核步驟3單自由度的頂層目標位移 δ 是否接近步驟5所求得的等效單自由度系統的位移 δ' 。若接近則迭代完成，則此假設的目標位移即為特定地震下最大地表加速度所對應的頂層最大位移。若不相等則將步驟5得到的等效單自由度系統的位移 δ' 乘上等效模態參與係數 $\bar{\Gamma}$ 當作下一次迭代的目標位移 Δ' 。重複步驟2~7直到步驟3計算所得的 δ 趨近於步驟6的等效單自由度位移 δ' 為止。

5.3 結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估案例

本節將依本文所提出的兩種不同結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估的方法進行案例評估，最後將評估的結果與非線性歷時分析做比較。

5.3.1 由特定目標位移求出對應特定地震之最大地表加速度

此案例為評估出構架頂層最大位移為0.25m時其對應EL Centro地震最大地表加速度。結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估構架即為此次實驗的構架如圖(3.7)所示，為三層樓鋼構架，每層高3m。跨徑長x寬為3m x 2m。梁、柱尺寸皆為H150x150x7x10(mm)。其中被動調諧質量阻尼器為最佳化線性阻尼，且參數設計使用公式(2.6)(2.7)所計算。被動調諧質量阻尼器參數如下表所示：

	$M_{TMD}(kg)$	$K_{TMD}(kN/m)$	$C_{TMD}(kN \cdot s/m)$	Mass ratio(1st mode)
Linear opt.TMD 1993(Tsai,Lin) [2]	500	19.15	0.824	4.45%

1. 決定目標位移 $\Delta=0.25m$
2. 利用式(5.2)計算控制模態 $\bar{\phi}$ ，先假設目標位移所對應之EL Centro歷時最大地表加速度為1000gal，EL Centro加速度歷時如圖5.5所示。

$$[\bar{\phi}] = \Gamma_1 S_d(\xi_1, \omega_1) \phi_1 + \Gamma_2 S_d(\xi_2, \omega_2) \phi_2$$

各層的堆積質量($tf \cdot s^2/m$)：

$$[M]^T = \begin{bmatrix} m_{TMD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.052 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.632 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.502 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.502 \end{bmatrix}$$

裝置 TMD 構架模態分佈：

$$[\phi]^T_1 = [\phi_{TMD1} \phi_{31} \phi_{21} \phi_{11}] = [7.135 \quad 1 \quad 0.732 \quad 0.348]$$

$$[\phi]^T_2 = [\phi_{TMD2} \phi_{32} \phi_{22} \phi_{12}] = [-3.098 \quad 1 \quad 0.777 \quad 0.384]$$

$$\Gamma_1 = \frac{[\phi]^T_1 [M][1]}{[\phi]^T_1 [M][\phi]_1} = 0.428$$

$$\Gamma_2 = \frac{[\phi]^T_2 [M][1]}{[\phi]^T_2 [M][\phi]_2} = 0.698$$

裝置 TMD 構架彈性週期：

$$T_1 = 1.10631(\text{s})$$

$$T_2 = 0.89194(\text{s})$$

$$M_1 = [\phi]^T_1 [M][\phi]_1 = 3.611(\text{tf} \cdot \text{s}^2 / \text{m})$$

$$M_2 = [\phi]^T_2 [M][\phi]_2 = 1.509(\text{tf} \cdot \text{s}^2 / \text{m})$$

$$\xi_{inherent} = 0.02$$

$$\xi_{1damp} = \frac{T_1 C(\phi_{1,r})^2}{4\pi M_1} = 0.077$$

$$\xi_{2damp} = \frac{T_2 C(\phi_{2,r})^2}{4\pi M_2} = 0.066$$

$$S_d(T_1, \xi_1) = S_d(1.10631, 0.097) = 0.17168$$

$$S_d(T_2, \xi_2) = S_d(0.89194, 0.086) = 0.16322$$

$$[\bar{\phi}]^T = [0.912 \quad 1 \quad 0.759 \quad 0.487]$$

3. 將裝置被動消能質量阻尼器結構進行非線性靜力側推分析，其側推力

依 (5.1) 式作分配。將分析後的非線性靜力側推曲線理想化雙線性曲線如圖 (5.7) 所示，得韌性比 μ 和後降伏勁度比 α

$$\text{後降伏勁度比 } \alpha = 0.0973$$

$$\text{韌性比 } \mu = 1.5203$$

4. 利用公式 (5.8)、(5.9)、(5.10)、(5.11)、(5.14) 計算等效線性系統的等效勁度 K_e 計、等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e

等效模態參與係數：

$$\bar{\Gamma} = \frac{[\bar{\phi}]^T [M] \mathbf{1}}{[\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}]} = 1.204$$

等效單自由度質量：

$$M_{eq} = [\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}] = 1.804 \text{ tf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$$

等效勁度：

$$K_0 = \frac{\text{非線性靜力側推曲線彈性勁度}}{\bar{\Gamma}} = \frac{60.8}{1.204} = 50.49 (\text{tf} / \text{m})$$

$$K_e = 43.39 \text{ tf} / \text{m}$$

等效周期：

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{K_e}} = 0.9929 (\text{s})$$

等效阻尼比：

$$\xi_{e(damper)} = \frac{T_e C(\bar{\phi}_{1r})^2}{4\pi M_{eq}} = 4.7\text{E-}05$$

$$\xi_{e(inelasticity)} = 0.0773$$

$$\xi_{e(inherent)} = 0.02$$

$$\xi_e = \xi_{e(inelasticity)} + \xi_{e(damper)} + \xi_{e(inherent)} = 0.0973$$

5. 利用等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e 查出在特定地震歷時下的彈性位移反應譜值 δ'

$$S_d(T_e, \xi_e) = \delta' = 0.1659(m)$$

6. 將目標位移 Δ 轉成單自由度的位移 δ

利用式 (5.16) 將目標位移轉成單自由度的位移，其中等效模態參與係數利用式 (5.13) 計算

$$\delta = \frac{\Delta}{\Gamma} = 0.20759$$

7. 檢核步驟 6 單自由度的頂層目標位移 δ 是否等於步驟 5 所求得的等效單自由度系統的位移 δ' 。

將原先假設 EL Centro 最大地表加速度 1000gal 依 $\delta'/\delta = 1.25$ 的比例放大，則目標位移 0.25m 所對應 EL Centro 歷時最大地表加速度為 1250gal

5.3.2 由特定歷時最大地表加速度對應之結構頂層最大位移

此案例評估出構架在 HU2 歷時下地表最大加速度 600gal 所對應頂層最大位移。HU2_600gal 加速度歷時如圖 5.6 所示。結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估構架即為此次實驗的構架如圖 3.7 所示，為三層樓鋼構架，每層高 3m。跨徑長 x 寬為 3mx2m。梁、柱尺寸皆為 H150x150x7x10(mm)。其中被動調諧質量阻尼器為最佳化線性阻尼，且參數設計使用公式(2.6)、(2.7)所計算。被動調諧質量阻尼器參數如下表所示：

	$M_{TMD}(kg)$	$K_{TMD}(kN/m)$	$C_{TMD}(kN \cdot s/m)$	Mass ratio(1st mode)
Linear opt.TMD 1993(Tsai, Lin) [2]	500	19.15	0.824	4.45%

1. 假設目標位移 $\Delta = 0.20m$
2. 利用式 (5.2) 計算控制模態 $\bar{\phi}$ ，假設 HU2 歷時最大地表加速度 600gal 時所對應的頂層最大位移為步驟 1 所假設的目標位移

$$\bar{\phi} = \Gamma_1 S_d(\xi_1, \omega_1) \phi_1 + \Gamma_2 S_d(\xi_2, \omega_2) \phi_2$$

各層的堆積質量 ($tf \cdot s^2/m$) :

$$[M]^T = \begin{bmatrix} m_{TMD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.052 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.632 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.502 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.502 \end{bmatrix}$$

裝置 TMD 構架模態分佈 :

$$[\phi]^T_1 = [\phi_{TMD1} \phi_{31} \phi_{21} \phi_{11}] = [7.135 \quad 1 \quad 0.732 \quad 0.348]$$

$$[\phi]^T_2 = [\phi_{TMD2} \phi_{32} \phi_{22} \phi_{12}] = [-3.098 \quad 1 \quad 0.777 \quad 0.384]$$

$$\Gamma_1 = \frac{[\phi]^T_1 [M][1]}{[\phi]^T_1 [M][\phi]_1} = 0.428$$

$$\Gamma_2 = \frac{[\phi]^T_2 [M][1]}{[\phi]^T_2 [M][\phi]_2} = 0.698$$

裝置 TMD 構架彈性週期 :

$$T_1 = 1.10631(s)$$

$$T_2 = 0.89194(s)$$

$$M_1 = [\phi]^T_1 [M][\phi]_1 = 3.611(tf \cdot s/m)$$

$$M_2 = [\phi]^T_2 [M][\phi]_2 = 1.509(tf \cdot s/m)$$

$$\xi_{inherent} = 0.02$$

$$\xi_{1damp} = \frac{T_1 C(\phi_{1,r})^2}{4\pi M_1} = 0.077$$

$$\xi_{2damp} = \frac{T_2 C(\phi_{2,r})^2}{4\pi M_2} = 0.066$$

$$S_d(T_1, \xi_1) = S_d(1.10631, 0.097) = 0.154$$

$$S_d(T_2, \xi_2) = S_d(0.89194, 0.086) = 0.1229$$

$$[\bar{\phi}]^T = [1.346 \quad 1 \quad 0.757 \quad 0.486]$$

3. 將裝置被動消能質量阻尼器結構進行非線性靜力側推分析，其側推力依 (5.1) 式作分配。將分析後的非線性靜力側推曲線理想化雙線性曲線如圖 5.8 所示，得韌性比 μ 和後降伏勁度比 α

$$\text{後降伏勁度比 } \alpha = 0.2543$$

$$\text{韌性比 } \mu = 1.2417$$

4. 利用公式 (5.8)、(5.9)、(5.10)、(5.11)、(5.14) 計算等效線性系統的等效勁度 K_e 、等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e

等效模態參與係數：

$$\bar{\Gamma} = \frac{[\bar{\phi}]^T [M] \mathbf{1}}{[\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}]} = 1.171$$

等效單自由度質量：

$$M_{eq} = [\bar{\phi}]^T [M] [\bar{\phi}] = 1.329 \text{ tf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$$

等效勁度：

$$K_0 = \frac{\text{非線性靜力側推曲線彈性勁度}}{\bar{\Gamma}} = \frac{60.4}{1.171} = 51.58 (\text{tf} / \text{m})$$

$$K_e = 49.548 \text{ tf} / \text{m}$$

等效周期：

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{K_e}} = 0.950 (\text{s})$$

等效阻尼比：

$$\xi_{e(\text{damper})} = \frac{T_e C(\bar{\phi}_{1r})^2}{4\pi M_{eq}} = 6.73\text{E-}04$$

$$\xi_{e(\text{inelasticity})} = 0.0226$$

$$\xi_{(inherent)} = 0.02$$

$$\xi_e = \xi_{e(inelasticity)} + \xi_{e(damper)} + \xi_{(inherent)} = 0.0433$$

5. 利用等效週期 T_e 與等效阻尼比 ξ_e 查出在特定地震歷時下的彈性位移反應譜值 δ'

$$S_d(T_e, \xi_e) = \delta' = 0.1749(m)$$

6. 將目標位移 Δ 轉成單自由度的位移 δ

利用式 (5.16) 將目標位移轉成單自由度的位移，其中等效模態參與係數利用式 (5.13) 計算

$$\delta = \frac{\Delta}{\Gamma} = 0.171(m)$$

7. 檢核步驟 6 單自由度的頂層目標位移 δ 是否接近步驟 5 所求得的等效單自由度系統的位移 δ' 。重新假設 $\Delta = \delta \times \bar{\Gamma}$ 重複步驟 3~6。下面列出三次迭代結果：

Iteration	Δ (m)	δ (m)	δ'
1	0.2	0.171	0.1749
2	0.205	0.1749	0.1723
3	0.202	0.1723	0.1742
4	0.2039		

由於第三次 $\delta' \approx \delta$ 已經收斂，所以 $\Delta = 0.2039m$ 即為 HU2 歷時 PGA600gal 時所對應頂層的最大位移。

5.3.3 結構裝設被動調諧質量阻尼器耐震性能評估結果與非線性動力歷時分析之比較

案例 1：由特定目標位移求出對應特定地震之最大地表加速度

裝設被動調諧質量阻尼器實驗構架耐震性能評估結果為在目標位移 0.25m，所對應 EL Centro 歷時 PGA 為 1250gal。將評估結果與非線性動力歷時分析在 EL Centro 歷時 PGA1250gal 時，頂層最大位移做比較。

非線性動力歷時分析頂層最大位移(m)	0.2456
目標位移 (m)	0.25

案例 2：由特定歷時最大地表加速度對應之結構頂層最大位移

裝設被動調諧質量阻尼器實驗構架耐震性能評估結果為在 HU2 歷時 PGA600gal 時，所對應的頂層最大位移為 0.2030m。將評估結果與非線性動力歷時分析在 HU2 歷時 PGA600gal 時之頂層最大位移做比較。

非線性動力歷時分析之頂層最大位移(m)	0.2055
耐震性能評估之目標位移(m)	0.2039

由上述結果顯示，本文所提出的裝置被動調諧質量阻尼器結構之耐震性能評估的方法與非線性動力歷時分析的結果是接近的。

5.4 小結

1. 由於結構裝置 PTMD 後第一模態和第二模態對系統的貢獻甚大，不能只考慮第一模態的效應，因而提出了控制模態。
2. 裝置 PTMD 結構在非線性靜力側推分析時，其側推外力分佈大小必需考慮 PTMD 勁度對結構的影響並包括 PTMD 結構第一模態與第二模態對系統的貢獻。
3. 本文提出裝設 PTMD 結構耐震性能評估的兩種方法是以等效線性系統模擬非線性系統為基礎所提出的方法。此二種耐震性能評估的方法，其一是設定結構頂層最大相對位移為目標位移，利用等效線性系統找出目標位移在特定地震歷時下所對應的最大地表加速度。其二是在特定地震歷時其最大地表加速度下求出結構之頂層最大相對位移。
4. 在案例討論下，將此二種耐震性能評估的方法與非線性動力歷時分析比較下，頂層相對位移的結果是非常相近的。

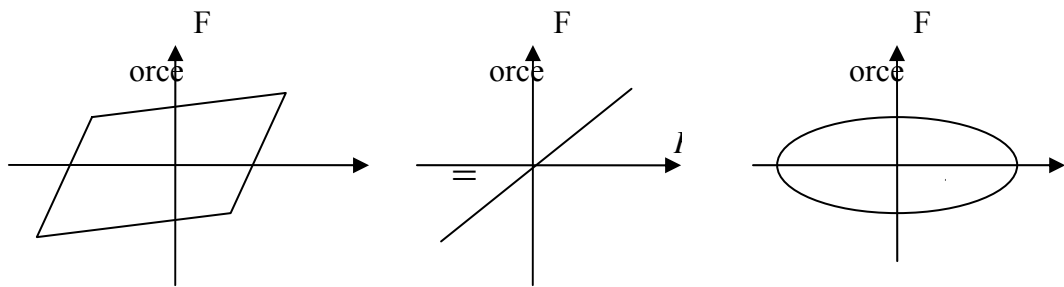


圖5.1 等效線性系統

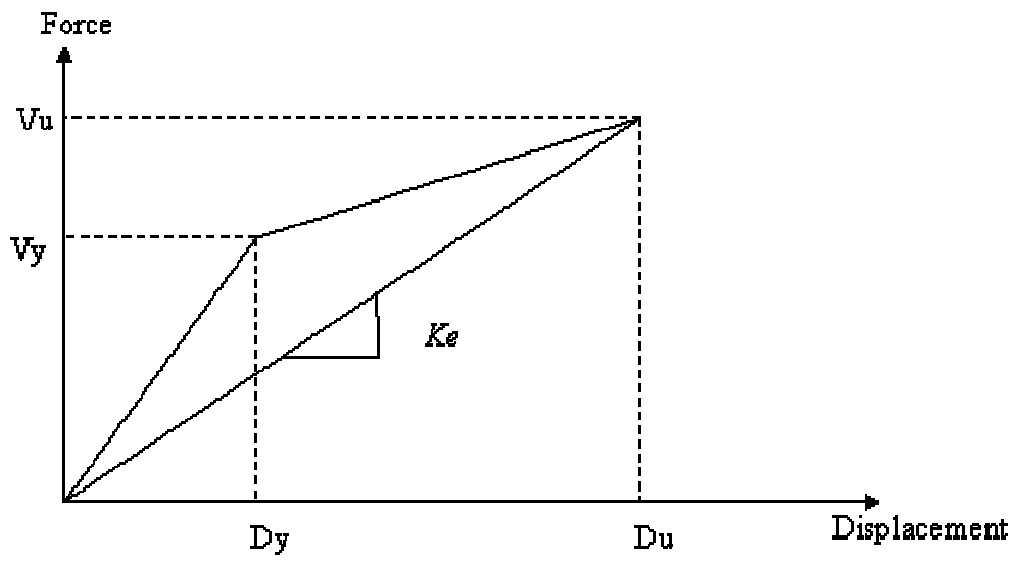


圖5.2 替代結構力與位移關係

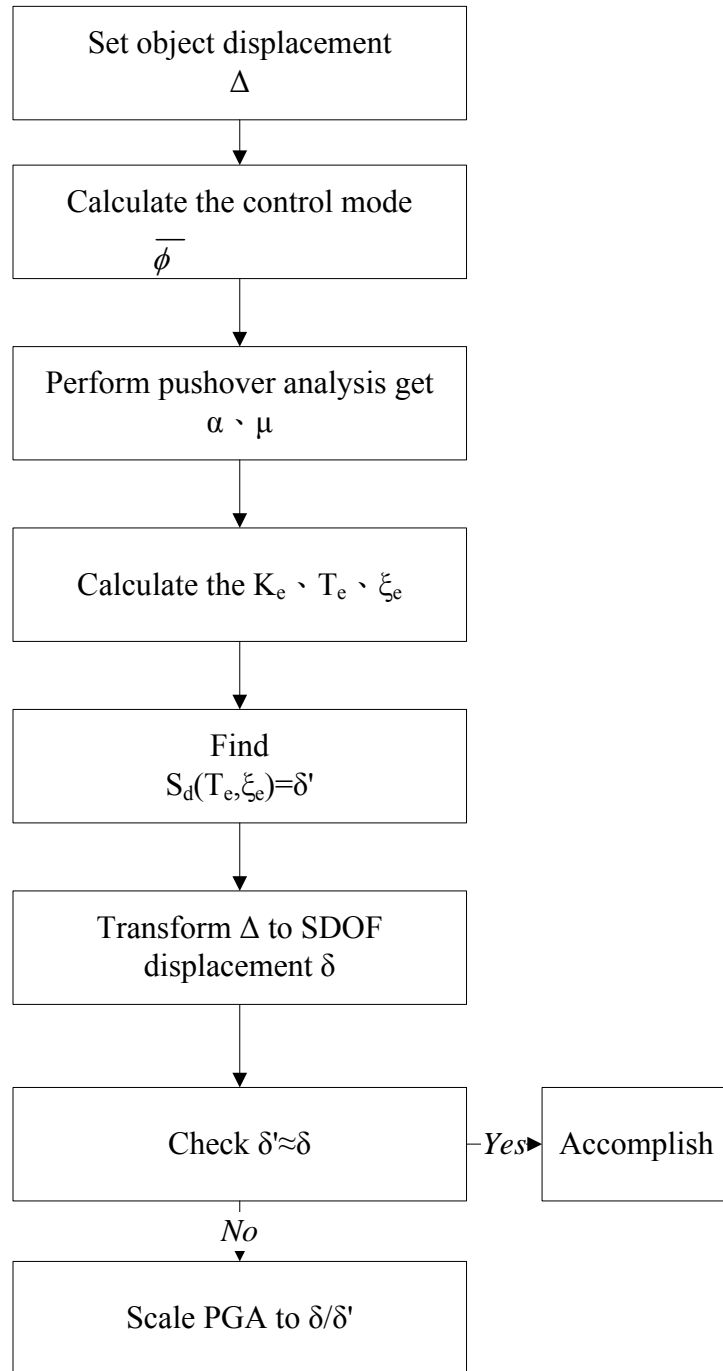


圖5.3 評估流程-特定目標位移所對應之最大地表加速度

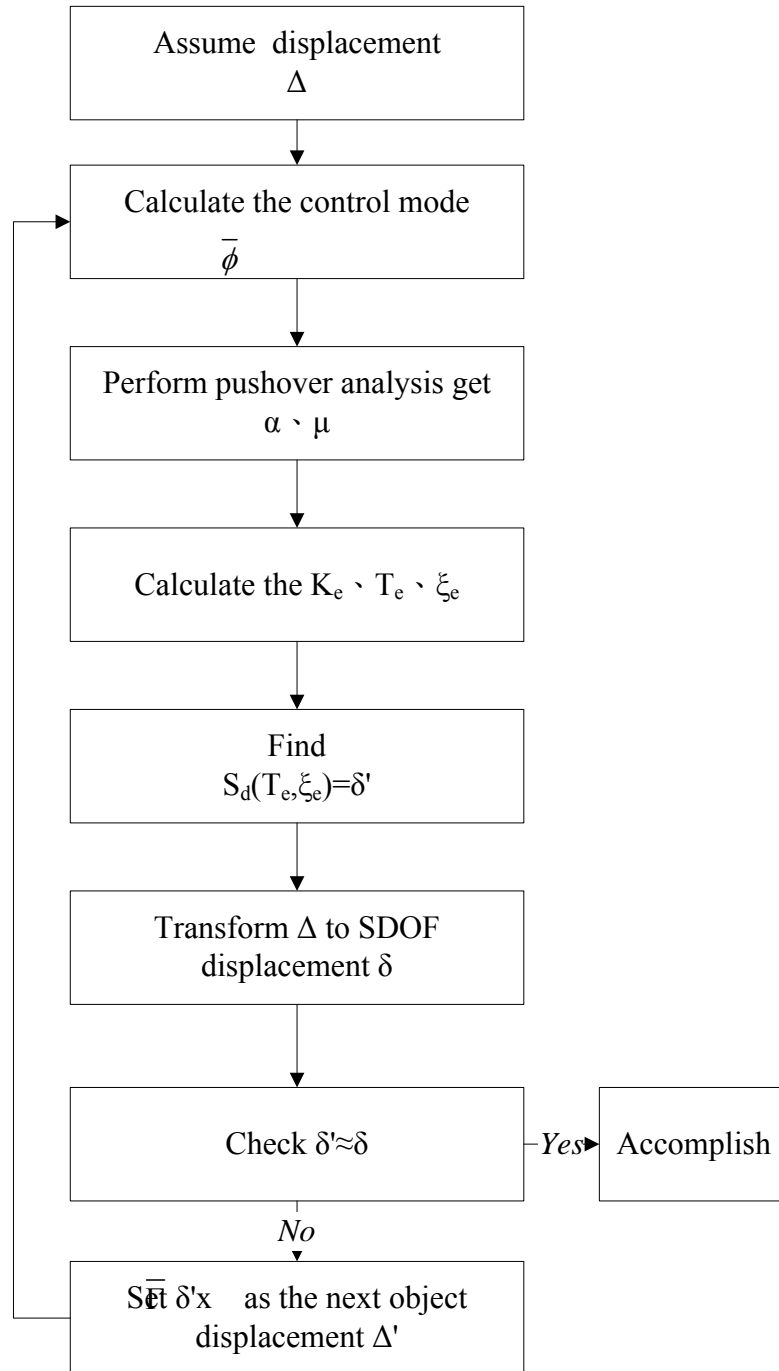


圖5.4 評估流程-特定歷時最大地表加速度所對應之頂層最大位移

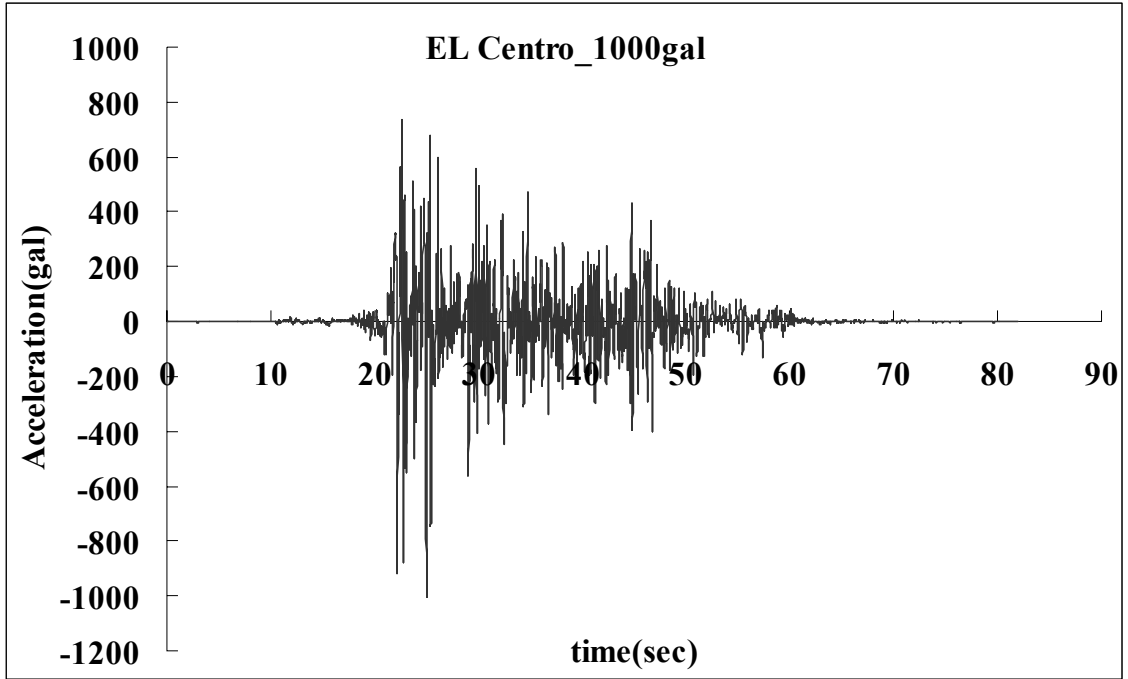


圖5.5 EL Centro_1000gal 加速度歷時

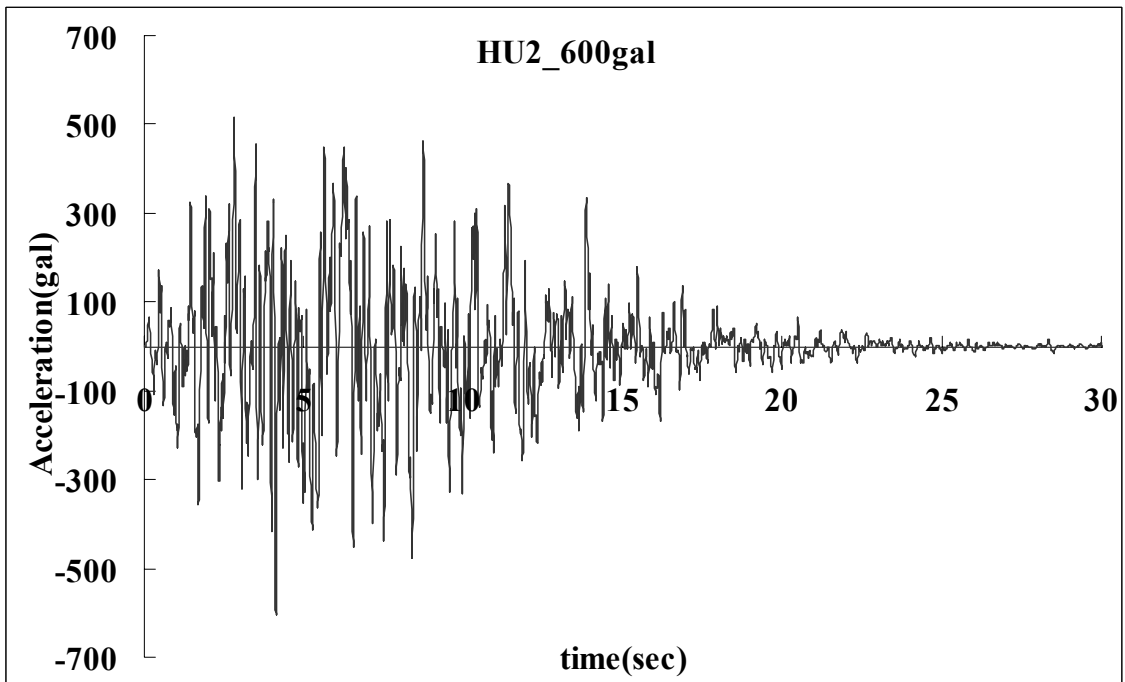


圖 5.6 HU2_600gal 加速度歷時

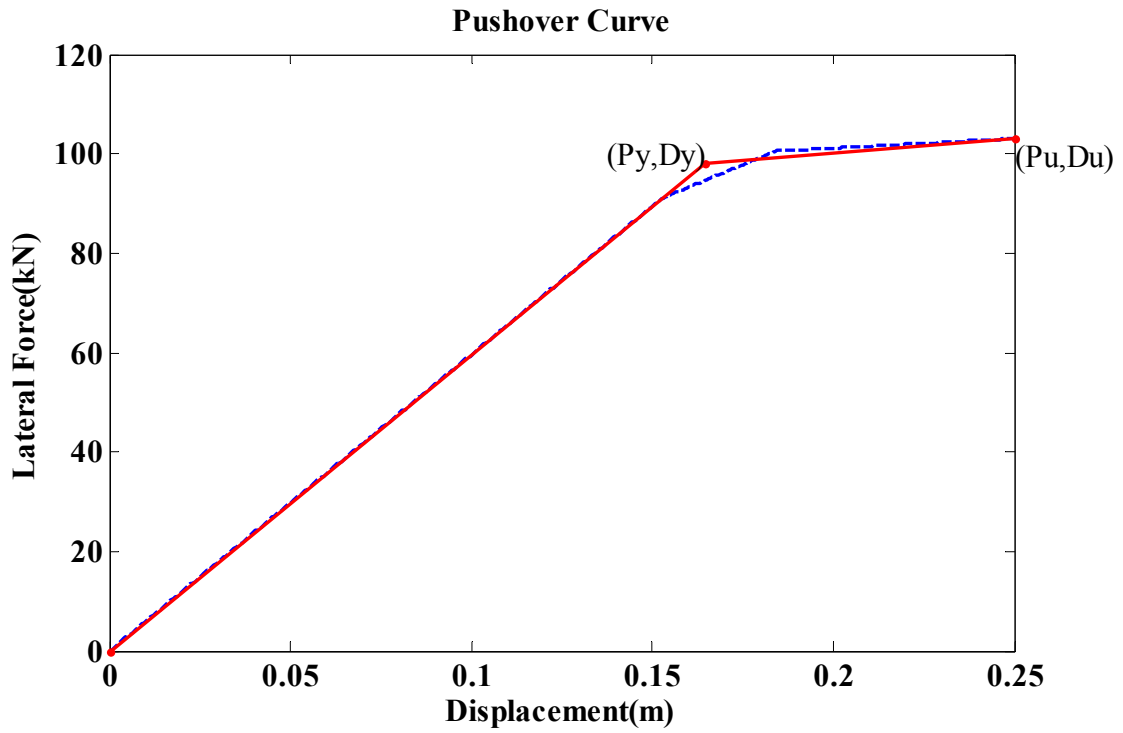


圖5.7 目標位移為0.25m之非線性側推分析曲線

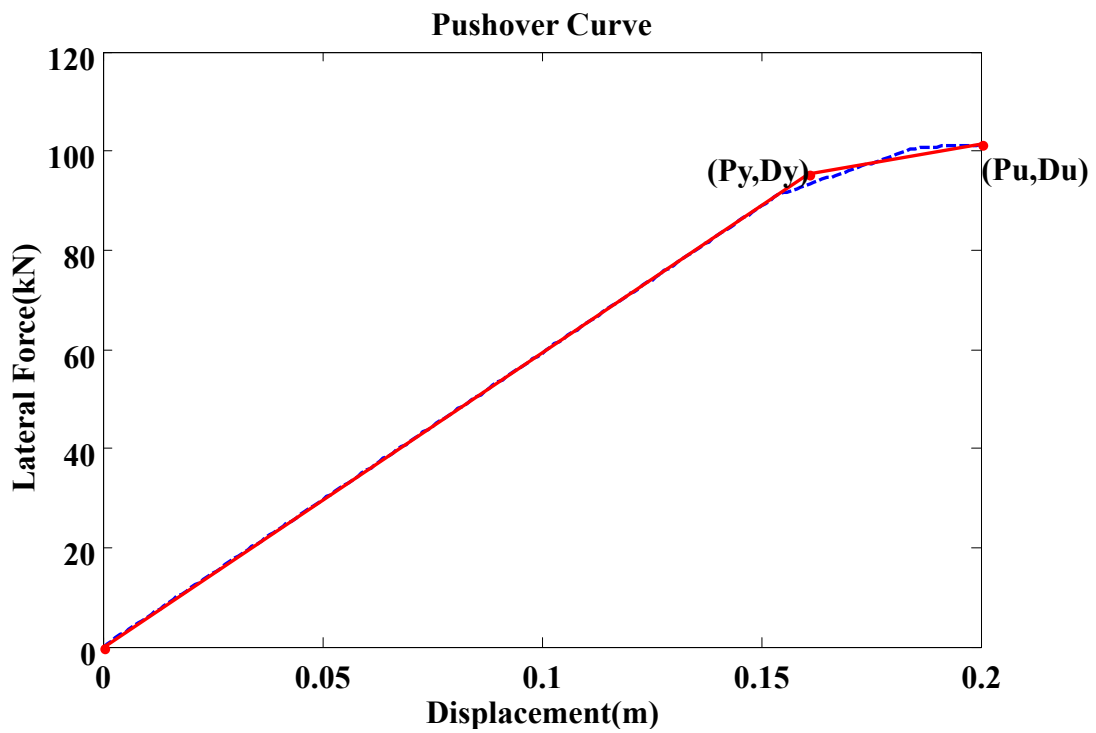


圖5.8 目標位移位0.2m之非線性側推曲線

第六章 結論與建議

6.1 結論

本文先以結構裝設雙線性彈性被動調諧質量阻尼器進行振動台實驗，了解被動調諧質量阻尼器之行為後，接著以模擬方式來比較實驗構架裝設不同型式被動調諧質量阻尼器在結構降伏前後之效益比，然後針對單自由度結構模擬裝置線性最佳化被動調諧質量阻尼器進行參數研究與分析比較最後提出兩種含被動調諧質量阻尼器結構之耐震性能評估的方法。由前面各章的研究可得下面的結論：

1. 裝設雙線性彈性被動調諧質量阻尼器於三層樓鋼結構上之振動台實驗，在 EL Centro、TCU129 兩個地震歷時下，對於樓層相對位移與樓層絕對加速度皆可使反應減少，此時結構仍在彈性階段。
2. 當結構保持在彈性階段，增加質量比可使頂層最大位移反應比與頂層絕對加速度反應都減少，但是隨著質量比的增加，反應的降幅有一定的限度。當基底構架降伏後，增加被動調諧質量阻尼器的質量對於結構最大位移反應比和最大頂層絕對加速度並不會有多大的改善，甚至會使反應放大。
3. 當基底構架自然周期愈長，含被動調諧質量阻尼器構架的頂層最大位移反應比愈大，頂層絕對加速度也愈大。
4. 構架在彈性階段時，當基底構架自然周期愈長，被動調諧質量阻尼器等效阻尼比貢獻愈多。構架降伏後，基底結構的等效遲滯阻尼比占了整體結構消能的絕大部分，而被動調諧質量阻尼器等效阻尼比的貢獻才些微增加，在考慮周期延長的影響後，被動調諧質量阻尼器對於位移的控制不盡理想。
5. 本文提出裝設被動調諧質量阻尼器結構耐震性能評估的兩種方法是以等效線性系統模擬非線性系統為基礎所提出的方法。在進行非線性靜力側推分析時，其側推外力分佈大小必需考慮被動調諧質量阻尼器勁度對結構的影響並包含結構第一模態與第二模態對系統的貢獻。而且在案例討論下，將此二種耐震性能評估的方法與非線性動力歷時分析比較下，

最大頂層相對位移的結果是非常相近的。

6.2 建議

由於被動調諧質量阻尼器在主結構降伏前對於建築物控制反應效果較主結構降伏後的效益大。所以，被動調諧質量阻尼器若要應用於減震上，可搭配位移型阻尼器如挫屈束制斜撐來設計，應可使被動調諧質量阻尼器在小地震下發揮其效益，也可使在大地震下由位移型阻尼器來消散能量，不僅可使梁、柱斷面減少，也可達到消能的功效，在經濟與安全性上皆可達到一舉兩得的效果。

參考文獻

1. Masato Abe' (1996) , “Tuned Mass Dampers for Structures with Bilinear Hysteresis,” Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No. 8, 797~800.
2. Hsiang-Chuan Tsai and Guan-Cheng Lin (1993), “Optimum Tuned-Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support-Excited and Damped Systems,” Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, 957-973.
3. J. P. Den Hartog, Mechanical Vibrations, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956.
4. G. B. Warburton and E.O. Ayorinde (1980), “Optimum Absorber Parameters for Simple Systems,” Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, 197-217.
5. G. B. Warburton(1982), “Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters,” Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, 381-401.
6. Rahul Rana and T. T. Song (1998), “Parametric study and simplified design of tuned mass dampers,” Journal of Engineering Structures, Vol. 20, No.3, 193-204.
7. T. T. Soong and G. F. Dargush (1997), “Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, “John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD,England.
8. Jinkoo Kim and Hyunhoon Choi (2006), “Displacement-Based Design of Supplemental dampers for Seismic Retrofit of a Framed Structure,” Journal of Structural engineering, vol. 132, No. 6, 873-883.
9. Y. Y. Lin ,M. H. Tsai, J. S. Hwang, K. C. Chang (2003), “Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems,” Journal of Engineering Structures, Vol. 25, 25-37.
- 10.林裕淵(2000), “功能設計消能減震結構之位移設計法,” 國立台灣大學

土木工程學研究所博士論文。

11. 陳長佑(2003), “既有建築物加裝消能器補強之位移設計法,” “國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
12. K. S. Jagadish、B. K. Rachu Prasad and P. Vasudeva Rao (1979), “The Inelastic Vibration Absorber Subjected to Earthquake Ground Motions,” *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, 317-326.
13. P. Lukkunaprasit and A. Wanitkorkul (2001), “Inelastic building with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes,” *Journal of Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 537-551.
14. T. Pinkaew, P. Lukkunaprasit, P. Chatupote(2003), “Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures,” *Journal of Engineering Structures*, Vol. 25, 39-46.
15. Jerome J. Connor (2003) “Introduction to Structural Motion Control ,” Prentice Hall