

# 次結構法分析土壤-結構互制行為

研究生：羅博智

指導教授：劉俊秀 教授

國立交通大學土木工程學系

## 摘 要

一般耐震工程設計均以剛性地盤進行分析，然而在過去許多案例皆顯示出土壤-結構之間的互制效應確實存在，此效應不但與土壤有關，亦受結構物動態特性、基礎幾何形式等諸多因素所影響，使得剛性地盤假設並不能完全適用於結構物受震反應時的分析。

因此，本研究以次結構法，推導出簡單的土壤-結構互制效應的分析模式。首先以有限元素軟體 ABAQUS 求出土壤-基礎的阻抗矩陣，繼而以模態分析法推導出上部次結構物的運動方程式後，與下部結構物於力平衡、位移一致下結合，得到土壤-結構互制效應的控制方程式並進行分析。

研究結果顯示，在考慮土壤-結構互制效應下，歷時反應較小，顯示出在某些情況下，以往的剛性地盤分析下，有過於高估其反應的情況，但並非所有的情況皆如此，端視結構物的週期、地震反應譜、土壤-基礎阻抗的大小而定。

# Analysis of Soil-structure Interaction

## By Sub-structure Method

Student: Po-Chi Lo

Advisor: Prof. Gin-Show Liou

Institute of Civil Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University



For the analysis of structure subjected to seismic excitation, the foundations of the structure are usually assumed to be rigid. However, for some case this assumption may not be valid. Therefore, the paper is trying to derive a simple soil-structure interaction scheme by substructure technique, which can easily employ the existing commercial program.

In this method, the soil-structure interaction problem is solving in frequency domain, since the impedance matrix for foundation is frequency dependent. To obtain the impedance matrix, the commercial program ABAQUS of finite element method is employed. Since using finite element method to solve the problem of wave propagation in

half-space medium, one must pay attention to some precautions that are element size and domain size of finite element method. These effects will be investigated.

After the equations of motion for soil-structure interaction analysis are derived and the impedance matrix is found. A numerical example of one seven-story building subjected to earthquake excitation is investigated in order to shed some light on soil-structure interaction effect on the responses of a building structure to seismic excitations.



## 誌 謝

本論文得以完成，仰賴吾師 劉俊秀教授細心的指導，在老師的指導下，對於結構與數值的觀念更加清晰，也在這樣的過程中瞭解老師學術上的成就遠超過我們所能想像，老師為人處事的風範更是為人所敬仰，在此特地感謝老師兩年的教導。

在研究初期對 ABAQUS 非常陌生時，幸有陳界文技師挺身而出，為我指點迷津到台大上課，在此也展現學術是無私、無國界的，台大的鄭富書教授非常樂意的讓我旁聽，台大的許尚逸學長更是不厭其煩的幫助我，由衷感謝。

在學校裡，鐘瑜隆學長讓我見識到對於學術研究的熱忱與他驚人的實力，學長對於我們平常論文的進度猶加關切，更是除了劉老師以外，最熱心的指導老師，每每切中核心，讓我們知道關鍵在哪裡、錯誤在哪裡，在這邊也希望學長能夠以傲人的研究成果迅速得到博士學位。

在研究室的生活裡，有了賴俊仁學長的打點，一切都是那麼井然有序，學長對於老師的行事風格鉅細靡遺，在學長指點下，我們更懂得如何與老師溝通，使老師與我們之間沒有任何的溝通斷層，感謝學長的指導，也希望學長往後能順順利利。

施俊陽同學，在土壤-結構互制的崎嶇道路上，給我最適時的攙扶，這位我五專、二技的同學，一路走來都是頂尖的優秀，也多虧了他，我的許多疑問才得到解答，在他身上我能深深的體會到，學無止盡，不進則退。

在嚴肅的研究路上，一同嬉鬧、打球的伙伴不可欠缺，研究所同

期的同學們，阿凱、建銘、昭剛、凱明、小老闆、啟竟、金毛、阿蛇、小新、程香腸、鐘小威、老大、奉哥、柏濤、曹哥等繁族不及備載，沒有你們這些打球、打屁的伙伴們，這兩年恐怕又是空白渡過，平日大家互相討論研究的辛苦，享受贏球的快感，這種同甘共苦的情誼將成為我們共同的回憶。

台科大管理組最優秀的博士班學長，李威憲同學，一路走來始終如一，總是在背後最支持我、最幫助我的那個人，學長的學術知識是無庸置疑的，他那永遠的熱情才是令人感動。

感謝我親愛的那塔莎，在研究所忙碌的生活中，常常沒有時間能夠陪他，儘管偶有抱怨，依然很貼心的體諒我時間上的不便，她會在我最忙碌、最無奈的時候安慰我，給我加油打氣，我很幸運能夠認識那塔莎，能成為她的男朋友是我的榮幸。

最後我要感謝我的家人，他們給我最大信任，讓我能順利有自信的一路走來，再一次感謝父母對我的養育之恩，讓我完成碩士學業，這份榮耀與你們共享。

# 目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	IV
目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1-1 研究動機 .....	1
1-2 研究方法 .....	2
1-3 論文內容 .....	3
<b>第二章 有限元素程式簡介與阻抗矩陣 .....</b>	<b>4</b>
2-1 程式介紹 .....	4
2-2 模型建立 .....	5
2-2-1 幾何形狀.....	5
2-2-2 使用元素 .....	6
2-2-3 材料參數與土壤阻尼.....	6
2-2-4 受力狀況與邊界條件.....	9
2-3 收斂性分析 .....	9
2-3-1 元素大小收斂性分析.....	9
2-3-2 分析區域收斂性分析.....	11
<b>第三章 土壤-結構互制效應之控制方程式 .....</b>	<b>14</b>

3-1 前言 .....	14
3-2 上部次結構物運動方程式 .....	14
3-3 下部次結構物運動方程式 .....	21
3-4 控制方程式與靜態濃縮(Static condensation) .....	22
<b>第四章 分析案例 .....</b>	<b>25</b>
4-1 程式流程 .....	25
4-2 案例簡介 .....	26
4-3 阻抗矩陣 .....	27
4-3-1 幾何形狀 .....	27
4-3-2 使用元素 .....	27
4-3-3 土壤材料性質 .....	28
4-3-4 受力狀況與邊界條件 .....	28
4-4 分析土壤-結構互制效應 .....	29
4-4-1 剛性地盤假設與土壤-結構互制效應比較 .....	29
4-4-2 阻抗矩陣對反應歷時的影響 .....	32
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>35</b>
5-1 結論 .....	35
5-2 建議 .....	36
<b>參考文獻 .....</b>	<b>38</b>

## 表目錄

表 2-1 低頻(1-5Hz)元素尺寸分割表(m).....	40
表 2-2 低頻(1-5Hz)元素尺寸無因次表 .....	40
表 2-3 高頻(5-10Hz)元素尺寸分割表(m) .....	40
表 2-4 高頻(5-10Hz)元素尺寸無因次表 .....	41
表 2-5 分析區域擴大無因次表 .....	41
表 2-6 分析區域擴大元素數量表 .....	41
表 4-1 樓層質量表 .....	42
表 4-2 結構物週期與頻率表 .....	42
表 4-3(a) 各模態振態 .....	43
表 4-3(b) 各模態振態 .....	44
表 4-3(c) 各振態模態 .....	45
表 4-3(d) 各振態模態 .....	46
表 4-4 埋入基礎元素切割表 .....	47
表 4-5 埋入基礎元素切割無因次表 .....	47
表 4-6 埋入基礎分析區域無因次表 .....	47



## 圖目錄

圖 2-1 低頻(1-5 Hz)元素切割示意圖(m) .....	48
圖 2-2 高頻(5-10 Hz)元素切割示意圖(m) .....	49
圖 2-3 元素深度方向切割示意圖(m) .....	50
圖 2-4 三維實體元素示意圖 .....	51
圖 2-5 三維實體無限元素示意圖 .....	51
圖 2-6 實部垂直向平移勁度收斂性分析 .....	52
圖 2-7 虛部垂直向平移勁度收斂性分析 .....	52
圖 2-8 實部平面扭轉勁度收斂性分析 .....	53
圖 2-9 虛部平面扭轉勁度收斂性分析 .....	53
圖 2-10 實部長向翻轉自由度收斂性分析 .....	54
圖 2-11 虛部長向翻轉自由度收斂性分析 .....	54
圖 2-12 實部長向耦合自由度收斂性分析 .....	55
圖 2-13 虛部長向耦合自由度收斂性分析 .....	55
圖 2-14 實部長向平移自由度收斂性分析 .....	56
圖 2-15 虛部長向平移自由度收斂性分析 .....	56
圖 2-16 實部短向翻轉平移自由度收斂性分析 .....	57
圖 2-17 虛部短向翻轉平移自由度收斂性分析 .....	57
圖 2-18 實部短向耦合自由度收斂性分析 .....	58
圖 2-19 虛部短向耦合自由度收斂性分析 .....	58
圖 2-20 實部短向平移自由度收斂性分析 .....	59
圖 2-21 虛部短向平移自由度收斂性分析 .....	59
圖 2-22 低頻(1-5 Hz)分析區域示意圖(m) .....	60

圖 2-23 高頻(5-10 Hz)分析區域示意圖(m) .....	61
圖 2-24 實部垂直向平移勁度收斂性分析 .....	62
圖 2-25 虛部垂直向平移勁度收斂性分析 .....	62
圖 2-26 實部垂直向旋轉勁度收斂性分析 .....	63
圖 2-27 虛部垂直向旋轉勁度收斂性分析 .....	63
圖 2-28 實部長向翻轉自由度收斂性分析 .....	64
圖 2-29 虛部長向翻轉自由度收斂性分析 .....	64
圖 2-30 實部長向耦合自由度收斂性分析 .....	65
圖 2-31 虛部長向耦合自由度收斂性分析 .....	65
圖 2-32 實部長向平移自由度收斂性分析 .....	66
圖 2-33 虛部長向平移自由度收斂性分析 .....	66
圖 2-34 實部短向翻轉自由度收斂性分析 .....	67
圖 2-35 虛部短向翻轉自由度收斂性分析 .....	67
圖 2-36 實部短向耦合自由度收斂性分析 .....	68
圖 2-37 虛部短向耦合自由度收斂性分析 .....	68
圖 2-38 實部短向平移自由度收斂性分析 .....	69
圖 2-39 虛部短向平移自由度收斂性分析 .....	69
圖 3-1 土壤-結構系統示意圖 .....	70
圖 4-1 程式流程圖 .....	71
圖 4-2 台電變電所立面示意圖 .....	72
圖 4-3 低頻(1-5Hz)分析模型元素切割示意圖 .....	73
圖 4-4 高頻(5-10Hz)分析模型元素切割示意圖 .....	74
圖 4-5 低頻(1-5Hz)深度方向元素切割示意圖 .....	75
圖 4-6 高頻(5-10Hz)深度方向元素切割示意圖 .....	75
圖 4-7 北嶺地震歷時記錄 .....	76

圖 4-8 茄定國小 EW(X 向)地震歷時記錄 .....	76
圖 4-9 茄定國小 NS(Y 向)地震歷時記錄 .....	76
圖 4-10 北嶺地震反應譜 .....	77
圖 4-11 茄定國小東西向(X 向)反應譜.....	78
圖 4-12 茄定國小南北向(Y 向)反應譜 .....	79
圖 4-13(a) 屋頂層剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震).	80
圖 4-13(b) 七樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震) ....	81
圖 4-13(c) 六樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震).....	82
圖 4-13(d) 五樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震) ....	83
圖 4-13(e) 四樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震).....	84
圖 4-13(f) 三樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震).....	85
圖 4-13(g) 二樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震) ....	86
圖 4-14 各樓層最大位移(北嶺地震) .....	87
圖 4-15(a) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震).....	88
圖 4-15(b) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震) .....	89
圖 4-15(c) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震).....	90
圖 4-15(d) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震) .....	91
圖 4-15(e) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震).....	92
圖 4-15(f) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震).....	93
圖 4-15(g) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震) .....	94
圖 4-16(a) 屋頂層剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小).	95
圖 4-16(b) 七樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小) ....	96
圖 4-16(c) 六樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小).....	97
圖 4-16(d) 五樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小) ....	98
圖 4-16(e) 四樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小).....	99

圖 4-16(f) 三樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)...	100
圖 4-16(g) 二樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小) ..	101
圖 4-17 各樓層最大位移(茄定國小) .....	102
圖 4-18(a) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小).....	103
圖 4-18(b) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小) .....	104
圖 4-18(c) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小).....	105
圖 4-18(d) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小) .....	106
圖 4-18(e) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小).....	107
圖 4-18(f) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小) .....	108
圖 4-18(g) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小) .....	109
圖 4-19(a) 屋頂層變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震).....	110
圖 4-19(b) 七樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震) .....	111
圖 4-19(c) 六樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震).....	112
圖 4-19(d) 五樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震) .....	113
圖 4-19(e) 四樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震).....	114
圖 4-19(f) 三樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震) .....	115
圖 4-19(g) 二樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震) .....	116
圖 4-20(a) 屋頂層 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震) .....	117
圖 4-20(b) 七樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)	118
圖 4-20(c) 六樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)	119
圖 4-20(d) 五樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震) .....	120
圖 4-20(e) 四樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)	121
圖 4-20(f) 三樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)	122

圖 4-20(g) 二樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)	123
圖 4-21 各樓層在剛性地盤、1.5GFF、0.5GFF 最大位移(北嶺地震)	124
圖 4-22(a) 屋頂層變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	125
圖 4-22(b) 七樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	126
圖 4-22(c) 六樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	127
圖 4-22(d) 五樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	128
圖 4-22(e) 四樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	129
圖 4-22(f) 三樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	130
圖 4-22(g) 二樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)	131
圖 4-23(a) 屋頂層 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	132
圖 4-23(b) 七樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	133
圖 4-23(c) 六樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	134
圖 4-23(d) 五樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	135
圖 4-23(e) 四樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	136
圖 4-23(f) 三樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	137
圖 4-23(g) 二樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)	138
圖 4-24 各樓層在剛性地盤、1.5GFF、0.5GFF 的最大位移(茄定國小)	139



# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機

由於台灣位於環太平洋地震帶，地震頻繁，台灣在經歷了 921 地震之後，對於設計規範全面的檢討，為了不再重蹈覆轍，結構物在承受動態力作用後之諸多效應，在設計時必須全面加以考慮，其中土壤-結構互制效應便是其一，值得重視與研究。

目前一般的設計，均假設大地之土壤性質為剛性，實際上結構及其基礎與大地交接並非剛接，其間存在有一定的柔性，且大地也非剛性不可變形，故結構基礎與其座落位置附近的土壤，在受力作用下，存在力與變形的關係。

一般來說，結構物將其自重及所受的外力傳至基礎及其周圍的土壤，而引致土壤發生變形，然後影響力的傳遞，彼此交互作用至力平衡與位移諧和為止，此一過程稱為土壤-結構互制效應。

以往剛性地盤的設計，皆以自由場的運動作為基礎輸入運動，即認為所有地震波傳送來的能量由結構物單獨承受，無法考慮結構物受地震或其他外力所引起的振動能量由基礎向外擴散出去的行為。

許多實際的工程案例中皆顯示土壤-結構互制作用的存在，所以合理的設計應包含此一作用，由於土壤-結構互制作用的影響因子並非獨立而常常是相互關連，且在動力作用下的行為分析更是複雜，以致於一般設計仍然採用剛性地盤分析模式，本研究將發展有效的土壤-結構互制效應的分析，以利工程上的應用。

## 1-2 研究方法

本研究在於探討在土壤-結構互制作用下，研究結構物受動力作用下之反應，並進一步比較結構物在剛性地盤分析模式下與土壤-結構互制分析模式下兩個分析結果的差異。

結構物案例將採用某一台電變電所的設計案例。首先利用次結構法(Sub-structure)將土壤-結構系統分成彈性層狀半無限空間之土壤系統與結構系統。利用有限元素軟體 ABAQUS 在頻率域進行彈性分析求解其穩態解，以求取土壤系統在結構基礎位置之阻抗矩陣 (Impedance matrix)。然後再將此阻抗與結構系統結合做土壤-結構互制分析以推導出多自由度結構物在考慮土壤-結構互制分析之下的控制方程式，解出控制方程式求得考慮土壤-結構互制作用下結構物的反應，並進一步比較在沒有考慮土壤-結構互制效應下的差異。

## 1-3 論文內容

本論文之內容共分為五章。

第一章旨在說明研究動機、研究方法。

第二章為有限元素程式簡介與如何利用程式求取阻抗矩陣，先簡介數值模擬分析所採用的套裝程式，接著介紹模型，包括幾何條件、材料性質、施力方式與邊界條件，還有阻尼的施加方式；並對元素與分析區域作收斂性分析，將模擬分析之結果與解析解比較再作討論。

第三章為推導土壤-結構互制效應的控制方程式，利用次結構法 (Sub structure) 將土壤-結構系統，分為上部次結構與下部次結構，先利用有限元素法程式求取土壤系統在結構基礎位置之阻抗 (Impedance)。然後再將此阻抗與結構系統結合做土壤-結構互制分析以求得土壤阻抗對結構物的地震反應之影響。

第四章為分析土壤-結構互制效應的影響，本章我們將對一案例以不同的地震記錄況進行分析，包括比較土壤-結構互制效應與剛性地盤假設的地震歷時反應的差異與每一個模態的貢獻，比較不同強度的阻抗矩陣的結構物反應的差異。

第五章為結論與建議，將研究結果作一總結陳述。



## 第二章 有限元素程式簡介與阻抗矩陣

### 2-1 程式介紹

本研究中所採用的之分析軟體為 ABAQUS 有限元素分析軟體，該程式由美國 Hibbit、Karlsson& Sorensen, Inc 公司所發展，目前已發展至 6.4 版，即為目前我們所使用的版本。

ABAQUS 是套非常強的工程分析軟體，其基本原理為有限元素法，應用範圍廣泛，包括線性、非線性、靜力、動力等問題。ABAQUS 包含了極為廣泛的元素種類，包括實體元素(Solid element)、樑元素(Beam element)等各式各樣的元素，可模擬接近真實的幾何條件；也包含了各式各樣的材料性質可以模擬一般工程上常用的材料，包括橡膠(Rubber)、聚合物(Polymer)、複合材料(Composite)、鋼筋混凝土(Reinforced concrete)、土壤、岩石。ABAQUS 分析包含一般應力、應變的分析問題，還可以模擬熱傳(Heat transfer analyses)、聲學(Acoustics analyses)、土壤中的孔隙水壓(Coupled pore fluid-stress analyses)等問題也在分析的範圍內。我們利用 ABAQUS 將半無限空間模擬成有限元素模型進行數值分析，以求得在彈性半無限域中剛性基礎的阻抗矩陣。

因為有限元素程式具有較大變化的空間，可以任意改變基礎的形式、土壤的性質等等，與解析解具特定條件下才能應用比較下，以有限元素法來求取阻抗矩陣較能符合實際的狀況。

以 ABAQUS 分析問題，必須先將問題簡化後再進行模型的建立，其中包括幾何條件、材料性質、邊界條件、受力狀況、分析方法，而建立一個輸入檔先由定義幾何條件開始，再分別建立元素網格大小和定義元素的種類，之後描述幾何的邊界條件、定義受力的大小、方向、位置，最後給定分析的方法，整個輸入檔的建立才算完成。

## 2-2 模型建立



### 2-2-1 幾何形狀

我們所分析的模型，基礎的面積為  $72\text{m} * 32\text{m}$ ，其半無限空間的土壤深度部分為一層相同的材料性質，在座標系統方面，定基礎長向為 X 向，短向為 Y 向，立面為 Z 向，並考慮低頻(1-5 Hz)與高頻(5-10 Hz)的波長不同，我們對於這兩種模型的分析範圍作調整，低頻方面，有效的分析範圍水平尺寸為  $288\text{m} * 248\text{m}$ ，如圖 2-1；高頻分析的模型方面，有效的分析範圍水平尺寸為  $200\text{m} * 144\text{m}$ ，如圖 2-2；在深度方向，低頻與高頻的模型分別為  $108\text{m}$ 、 $84\text{m}$ ，如圖 2-3。

用有限元素法模擬無質量剛性基礎版受動力載重的問題，有兩個主要的課題，第一個問題是關於元素的長度，對於 ABAQUS 求解阻抗矩陣的精確度無法預知，必須在電腦資源的許可下，以最精確的元素長度來求得穩態解(Steady state)；第二個問題是分析區域的大小，電腦資源有限，不可能將分析範圍無限的延伸，同樣也必須在電腦可以運作的範圍內訂出合理的分析範圍，文章後面將會對這兩個問題做出收斂性的分析。

## 2-2-2 使用元素

在近域的分析範圍內採用三維二十節點實體元素 C3D20(Quadratic element)，如圖 2-4；土壤的波傳屬無限域的問題，受限於無法真實模擬無限域的空間，在遠域的土壤採用無限元素(infinite element)分析，如圖 2-5，以模擬吸能邊界，使邊界反射波傳能量不會傳回近域的土壤中。

## 2-2-3 材料參數與土壤阻尼

### (1)材料參數


土壤的楊氏模數  $E_s$ (Young's Module) 為  $4.68 \times 10^8$  Pa，剪力模數  $G$ (Shear module) 為  $1.8 \times 10^8$  Pa，密度  $\rho$  為  $2000 \text{ t/m}^3$ ，包松比  $\nu$  (Poisson

ratio)為 0.3，阻尼比  $\xi$  (Damping ratio)為 0.1，剪力波速  $V_s$  為 300 m/s，壓力波速  $V_p$  為 561m/s。

## (2)土壤阻尼

對於動力反應分析問題，欲正確分析出能量在土壤中的消耗，必須加入適當的阻尼，才能有效模擬系統的動態行為。在 ABAQUS 中，採用的阻尼方式為雷利阻尼(Rayleigh Damping)，其阻尼矩陣是由質量矩陣與勁度矩陣線性疊加而成，即

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$



$\alpha$  為質量比例阻尼係數， $\beta$  為勁度比例阻尼係數，雷利阻尼屬於黏滯性阻尼(viscous damping)，而土壤的行為與遲滯性阻尼(hysteretic damping)較為接近，其阻尼力與位移成正比；為了將雷利阻尼表為遲滯性阻尼，我們將推導其運動方程式如下。

由於在頻率域求取阻抗矩陣(Impedance matrix)，因此可利用 ABAQUS 程式以頻率域求解穩態解的分析方法，若土壤結構系統受一頻率為  $\omega$  之簡諧外力作用時，系統的反應可寫成：

$$u(t) = Ue^{i\omega t} \tag{2-1}$$

將  $u(t)$  分別對時間微分一次、二次，可得到速度、加速度反應，

$$\dot{u}(t) = i\omega U e^{i\omega t} = i\omega \times u(t) \quad (2-2)$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 U e^{i\omega t} = -\omega^2 \times u(t) \quad (2-3)$$

將(2-1)、(2-2)、(2-3)代入運動方程式可表為下式：

$$-\omega^2 M u(t) + i\omega C u(t) + K u(t) = P(t) \quad (2-4)$$

令  $\alpha=0$ ，可得阻尼力  $C=\beta K$  為純勁度阻尼，代入(2-4)，

$$-\omega^2 M u(t) + (1 + i\omega\beta) K u(t) = P(t) \quad (2-5)$$

因遲滯性阻尼的運動方程式為

$$-\omega^2 M u(t) + (1 + 2i\xi) K u(t) = P(t) \quad (2-6)$$

令  $\omega\beta = 2\xi$  即可得  $\beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{\xi}{\pi f}$ ，就可以模擬具遲滯性阻尼之運動方

程式；在 ABAQUS 的分析中，均假設  $\alpha=0$ ， $\beta = \frac{\xi}{\pi f}$  以模擬遲滯性阻

尼的行為。

## 2-2-4 受力狀況與邊界條件

求取阻抗矩陣的方法為在剛性基礎版的中央施加一單位簡諧載重，本次分析使用的單位為牛頓(N)，故施加  $1 \cdot e^{i\omega t}$ N 的力在剛性基礎版中央，求得剛性基礎版的位移，分別在剛性基礎版的六個自由度(X、Y、Z 的平移與轉角自由度)，施加  $1 \cdot e^{i\omega t}$ N 的力求其位移，等於求剛性基礎版的柔度矩陣(Compliance matrix)，經過逆轉換後可得其阻抗矩陣。

由於我們模擬的為彈性半無限域空間，所以邊界條件為在土壤無限遠的地方位移為零。



## 2-3 收斂性分析

除了正確的模擬實際情況外，元素的大小與分析區域的大小對於分析的結果佔有很重要的部分，本節將對這兩個重要的部分分析其收斂性，以便於決定以後分析所用的元素尺寸與區域。

### 2-3-1 元素大小收斂性分析

元素的長度對於結果的正確性有相當重要的影響，而元素的長度通常因為壓力波速、剪力波速不同而改變，也因外力頻率的大小而有

所改變，由於剪力波速為 300m/sec，而分析的外力頻率最大到 10Hz，所以在決定元素尺寸時應小於 30 公尺才能得到較合理的解，本節將基於元素尺寸小於 30 公尺的原則下，對不同長度的元素進行分析來比較其間的差異。

因考慮高、低頻的波長不一樣，在高頻的時候波長較短，我們用較短的元素來計算較短的波長，應能得到較準確的結果，所以在分析中將對低頻(1~5 Hz)、高頻(5~10 Hz)作不同元素長度的分析；在 5Hz 作不同元素切割的分析比較其差異性。

本分析中依據對剛性基礎版位置遠近之同分為兩個區域，並同時改變 X、Y、Z 三個方向上元素的分割進行分析，分割區域的示意圖如圖 2-1~圖 2-3，在 X、Y 和 Z 方向來改變元素的尺寸進行收斂性分析，其中分割尺寸較大的為模型一，漸漸縮小元素尺寸到模型三，低頻分析模型的分割尺寸，如表 2-1。

分析頻率共分為低頻(1-5Hz)與高頻(5-10Hz)，間隔為 1Hz，我們以頻率在低頻最大值 5Hz 時的剪力波長(60m)以及高頻最大值 10Hz 時的剪力波長(30m)，與元素尺寸作無因次化，其無因次化過程如下：

$$\text{剪力波長} = \frac{\text{剪力波速}}{\text{頻率}}$$



$$A = \frac{\text{元素尺寸}}{\text{剪力波長}}$$

低頻分析模型分割尺寸如表 2-1，無因次化如表 2-2，高頻分析模型分割尺寸，如表 2-3，無因次化如表 2-4，其分析阻抗矩陣的結果如圖 2-6~圖 2-21。

如圖 2-6~圖 2-21 可知，Model-3 分割尺寸較小的結果較接近由解波動方程式得到的解析解<sup>9</sup>，雖然 Model-1 和 Model-2 也相差不多，但是我們在頻率等於 5 Hz 時，分別依照高頻與低頻的元素分割尺寸建立兩個模型，比較其在圖形上跳躍的程度，也就是數值的差異性，結果皆顯示 Model-3 的元素分割尺寸有較好的收斂性。

以無因次來比較，在低頻的時候，Model-3 之 A 值介於 0.15~0.2 之間，可以在電腦資源允許下得到較佳的解，而在高頻時，Model-3 之 A 值介於 0.178~0.267 之間；事實上證明當元素切割愈小的時候，能得到愈精確的解，但基於電腦資源的限制，總是有所限度。

### 2-3-2 分析區域收斂性分析

瞭解元素尺寸對結果的影響之後，決定分析區域的大小也非常重要；我們將前面對元素尺寸做收斂性分析的 Model-3 做為我們的基礎模型，分別在 X、Y 和 Z 方向上將分析區域擴大，考慮低頻的波長



較長，需要較大的分析區域，所以將低頻的 Model-3 模型長、寬、高各擴大 36m (元素大小為 12\*12\*12)，高頻的模型則不需要太大的分析區域，但是要求較小的元素尺寸，所以將高頻的 Model-3 長、寬、高各擴大 24m (元素大小為 8\*8\*8)，低頻與高頻同樣擴大兩次，分別為 Model-4 與 Model-5，低頻模型的平面、立面示意圖，如圖 2-22，高頻模型的平面、立面示意圖，如圖 2-23。

我們將以基礎長邊(X 向)、短邊(Y 向)的尺寸與分析區域長邊、短邊尺寸作無因次化，其無因次化過程如下：

$$B = \frac{\text{分析區域長邊尺寸}}{\text{基礎長邊尺寸}}$$

$$C = \frac{\text{分析區域短邊尺寸}}{\text{基礎短邊尺寸}}$$



在深度方向的無因次化，以等值基礎面積的方形面積邊長與深度作無因次化，其過程如下：

$$\text{等值邊長} = \sqrt{\text{基礎面積}}$$

$$D = \frac{\text{分析區域深度尺寸}}{\text{等值邊長}}$$

無因次化如表 2-5，其元素跟節點的數量如表 2-6，分析的結果如圖 2-24~圖 2-39。

由分析的結果可以得知在分析區域愈大的時候，解愈趨於穩定，也比較接近於解析解；以無因次比較低頻時，B 值在介於 4~6 之間、C 值介於 7.75~12.25 之間、D 值介於 2.25~3.75 之間，結果都可接受；在高頻時 B 值在介於 2.8~4 之間、C 值介於 4.5~7.5 之間、D 值介於 1.75~2.75 之間屬適用範圍。

在長向(X 方向)及短向(Y 方向)的翻轉自由度(Rocking)、平移自由度(Horizontal)方面，ABAQUS 的解無論是在實部或是虛部與解析解相差不多，但是在耦合自由度(Coupling，平移自由度與翻轉自由度的耦合)，僅只有實部方面較為接近，虛部部分具有和解析解一致的趨勢，但在到了高頻的部分與解析解就無法吻合。

在垂直自由度(Vertical)部分，ABAQUS 的解與解析解很接近，在扭轉自由度(Torsion)部分差異甚大，因扭力為剪力波，而剪力波的波長較短，對於 ABAQUS 而言，可能無法掌握其精確度，或者是有其他更好的模擬方式可以接近解析解，但是總和來說，ABAQUS 的解和解析解的差異還在可以接受的範圍內，而且趨勢都相同，我們還是以收斂性分析的元素尺寸、分析區域做為我們以後的分析。

## 第三章 土壤-結構互制效應之控制方程式

### 3-1 前言

土壤-結構為龐大的結構系統，為了求解在考慮土壤-結構互制效應下的歷時反應，我們可以利用次結構法(Sub-structure)求解；首先將一多自由度的整體結構視為兩個結構的結合，分別為結構體的上部次結構物，和土壤的下部次結構物，如圖 3-1，先推導出上部次結構物的運動方程式，再利用前面章節提到 ABAQUS 求取阻抗矩陣的方法求取下部次結構物基礎-土壤的阻抗矩陣(Impedance matrix)，將兩個運動方程式於力平衡、位移一致的狀態下結合，即可得到土壤-結構互制效應下的控制方程式。

### 3-2 上部次結構物運動方程式

首先推導上部次結構物(如圖 3-1(b))的運動方程式，考慮一多自由度  $n$  的結構系統，其運動方程式可表為：

$$\underline{m}\ddot{\underline{v}} + \underline{c}\dot{\underline{v}} + \underline{k}\underline{v} = \underline{p}(t) \quad n = n_s + n_b \quad (3-1)$$

其中

$$p(t) = \begin{Bmatrix} \underline{0} \\ -\underline{F}^I(t) \end{Bmatrix} \quad (3-2)$$

$$\ddot{v}^t = \begin{Bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_b^I \end{Bmatrix} + [B_x \quad B_y \quad B_z] \ddot{v}_g \quad (3-3)$$

$\underline{m}$  為結構物質量矩陣， $\underline{c}$  為阻尼矩陣， $\underline{k}$  為勁度矩陣， $\underline{n}$  為上部結構物的總自由度， $\underline{n}_s$  為結構物的自由度， $\underline{n}_b$  為基礎的自由度，一般來說，三度空間中均假設一層樓的自由度有兩個方向的平移自由度，以及面內(In-plane)旋轉自由度，而剛性基礎的版自由度六個，分別為三個方向的平移自由度，和與其相對應的旋轉自由度。

$\underline{F}^I(t)$  為上部次結構物與下部次結構物的互制力，其中包含了

$$\underline{F}^I(t) = \begin{Bmatrix} F_1^I(t) \\ F_2^I(t) \\ F_3^I(t) \\ F_4^I(t) \\ F_5^I(t) \\ F_6^I(t) \end{Bmatrix}$$

上部次結構物的總位移  $\underline{v}^t$ ，包括結構物的相對位移  $\underline{v}_s$ ，和基礎的位移  $\underline{v}_b^I$ ，加上自由場位移  $\underline{v}_g$ ，其中  $\underline{v}_b^I$  為土壤-結構互制作用下，基礎與結構的相對位移。

$B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  定義為地震力影響係數，其意義為：當地表在 X、Y、

Z 方向產生一單位位移，其相對應於上部次結構物自由度所產生的位移。

將(3-2)式跟(3-3)式代入(3-1)式整理可得

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sb} \\ m_{bs} & m_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{sb} \\ c_{bs} & c_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{v}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sb} \\ k_{bs} & k_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_s \\ v_b \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sb} \\ m_{bs} & m_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_s \\ B_b \end{bmatrix} \ddot{v}_g + \begin{Bmatrix} 0 \\ -F^I(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3-4)$$

(3-4)式即為上部次結構物的運動方程式，其中  $B_s$ 、 $B_b$  分別表示結構物與基礎在 X、Y、Z 三個方向的地震力影響係數。

在傳統的設計中，通常採用剛性地盤之假設以簡化分析，配合模態分析法(Modal analysis)選取幾個主要的振動模態進行分析可以有效的降低其運算量，因此我們將在模態分析法的架構之下推導控制方程式。首先求各個模態的頻率及振態，如下式

$$[k_{ss} - \omega^2 m_{ss}] \hat{v}_s = 0 \quad (3-5)$$

由上式可求得頻率與振態，我們可以考慮只選取結構物前面的幾個主要振態進行分析

$$\left. \begin{matrix} \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m \\ \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m \end{matrix} \right\} \quad m \leq n_s$$

令結構物的反應歷時為

$$\underline{v} = \begin{Bmatrix} v_s \\ v_b' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & \phi_b \\ \underline{0} & \underline{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_s \\ Y_b \end{Bmatrix} = \underline{QY} \quad (3-6)$$

其中

$$\Phi = \{\phi_1 \quad \dots \quad \phi_m\} = \left[ \begin{array}{c|c|c} \left\{ \begin{array}{c} \phi_{11} \\ \vdots \\ \phi_{n1} \end{array} \right\} & \dots & \left\{ \begin{array}{c} \phi_{1m} \\ \vdots \\ \phi_{nm} \end{array} \right\} \\ \hline \end{array} \right]$$

$Y_s$  為剛性地盤的振態座標向量

$\underline{I}$  為一  $6 \times 6$  的單位矩陣



$$\phi_b = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n_s,1} & \dots & a_{n_s,6} \end{bmatrix}$$

$\Phi$  為在剛性地盤分析模式下的模態矩陣。

$\phi_b$  為剛體靜態位移影響係數，也是我們所假設的模態；因為在土壤-結構互制的影響下結構物的振動模態事實上是改變的，而模態 (Mode shape) 本來就是一組在空間中互相獨立的座標系統，因此，只要我們假設的模態是互相獨立的即可。

所以我們可以定義基礎模態  $\phi_b$  為：基礎分別在其自由度，平移、轉角產生一單位位移時，其相對應於結構物自由度所產生的位移。

將(3-6)式代入(3-4)式，並且在各項前面乘上  $\underline{Q}^T$  得

$$\underline{Q}^T \underline{m} \underline{Q} \ddot{\underline{Y}} + \underline{Q}^T \underline{c} \underline{Q} \dot{\underline{Y}} + \underline{Q}^T \underline{k} \underline{Q} \underline{Y} = -\underline{Q}^T \underline{m} \underline{B} \ddot{v}_g + \underline{Q}^T \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -\underline{F}'(t) \end{array} \right\} \quad (3-7)$$

或整理為

$$\underline{M} \ddot{\underline{Y}} + \underline{C} \dot{\underline{Y}} + \underline{K} \underline{Y} = \underline{P}_e(t) \quad (3-7-1)$$

其中

$$\underline{M} = \underline{Q}^T \underline{m} \underline{Q} = \begin{bmatrix} \Phi^T m_{ss} \Phi & \Phi^T m_{ss} \phi_b + \Phi^T m_{sb} \\ \phi_b^T m_{ss} \Phi + m_{sb}^T \Phi & \phi_b^T m_{ss} \phi_b + m_{sb}^T \phi_b + \phi_b^T m_{sb} + m_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\underline{C} = \underline{Q}^T \underline{c} \underline{Q} = \begin{bmatrix} \Phi^T c_{ss} \Phi & \Phi^T c_{ss} \phi_b + \Phi^T c_{sb} \\ \phi_b^T c_{ss} \Phi + c_{sb}^T \Phi & \phi_b^T c_{ss} \phi_b + c_{sb}^T \phi_b + \phi_b^T c_{sb} + c_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\underline{K} = \underline{Q}^T \underline{k} \underline{Q} = \begin{bmatrix} \Phi^T k_{ss} \Phi & \Phi^T k_{ss} \phi_b + \Phi^T k_{sb} \\ \phi_b^T k_{ss} \Phi + k_{sb}^T \Phi & \phi_b^T k_{ss} \phi_b + k_{sb}^T \phi_b + \phi_b^T k_{sb} + k_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\underline{P}_e(t) = -\underline{Q}^T \underline{m} \underline{B} \ddot{v}_g + \underline{Q}^T \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -\underline{F}'(t) \end{array} \right\}$$

其中

$$\Phi^T m_{ss} \Phi = \begin{bmatrix} M_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & M_m \end{bmatrix} \text{為模態質量矩陣}$$

$$\Phi^T k_{ss} \Phi = \begin{bmatrix} \omega_1^2 M_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \omega_m^2 M_m \end{bmatrix} \text{為模態勁度矩陣}$$

$$\Phi^T c_{ss} \Phi = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 M_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 2\xi_m \omega_m M_m \end{bmatrix} \text{為模態阻尼矩陣}$$

假設  $c_{ss}$  為 Rayleigh damping

因為  $\phi_b$  為我們假設的模態，所以並不是真實的模態，使得模態之間彼此正交的特性在這裡並不適用，在  $M$ 、 $C$ 、 $K$  裡的子矩陣 (Submatrix) 裡面會有不為零的現象。

但是，基於虛功原理 (Virtual work)，平衡的力在剛體運動中所做的功等於零，我們可以證明如下。

$$\phi_b^T k_{ss} \Phi + I k_{bs} \Phi = 0$$

$k_{ss}$  為，當結構物產生一單位位移時，結構物本身所需要施加的力； $\Phi$  可看做為結構物的位移，所以  $k_{ss} \Phi$  為剛性地盤振動模態位移所產生的結構物彈性力 (Spring force)。



$k_{bs}$  為，當結構物產生一單位位移時，基礎所要施加的力，所以  $k_{bs}\Phi$  為剛性地盤振動模態位移所產生基礎反力， $k_{ss}\Phi$ 、 $k_{bs}\Phi$  對剛體運動所做的功為零。

$$\phi_b^T k_{ss} \phi_b + I k_{bs} \phi_b + \phi_b^T k_{sb} I + I^T k_{bb} I = 0$$

$k_{ss}\phi_b$  為基礎單位位移造成結構物位移，而產生的結構物彈性力， $k_{bs}\phi_b$  為基礎位移所產生的基礎反力， $k_{ss}\phi_b$ 、 $k_{bs}\phi_b$  對剛體運動所做的功為零。 $k_{sb}I$  為基礎產生單位位移所產生的結構物彈性力， $k_{bb}I$  為基礎產生單位位移基礎的反力， $k_{sb}I$ 、 $k_{bb}I$  對剛體運動所做的功為零。

同理，假設阻尼是與勁度成比例，我們可以得到

$$\phi_b^T c_{ss} \Phi + I c_{bs} \Phi = 0$$

$$\phi_b^T c_{ss} \phi_b + I c_{bs} \phi_b + \phi_b^T c_{sb} I + I^T c_{bb} I = 0$$

若假設阻尼是與其他性質成比例，因其影響很小，可近似其為零

$$\phi_b^T c_{ss} \Phi + I c_{bs} \Phi \approx 0$$

$$\phi_b^T c_{ss} \phi_b + I c_{bs} \phi_b + \phi_b^T c_{sb} I + I^T c_{bb} I \approx 0$$

將(3-7)式右邊的項目展開可得





$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_s(i\omega) \\ \bar{Y}_b(i\omega) \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1(i\omega) \\ P_2(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (3-10a)$$

因  $K_{11}$  為一對角矩陣(Diagonal matrix)，計算其反矩陣的計算量很少，所以欲解得(3-10a)式可以利用靜態濃縮(static condensation)的方式求解，我們將(3-10a)乘開得

$$K_{11}\bar{Y}_s + K_{12}\bar{Y}_b = P_1 \quad (3-10b)$$

$$K_{21}\bar{Y}_s + K_{22}\bar{Y}_b = P_2 \quad (3-10c)$$

將  $\bar{Y}_s$  表示成下式

$$\bar{Y}_s = K_{11}^{-1}(P_1 - K_{12}\bar{Y}_b) \quad (3-11)$$



將(3-11)式代入(3-10c)得

$$K_{21}K_{11}^{-1}(P_1 - K_{12}\bar{Y}_b) + K_{22}\bar{Y}_b = P_2$$

整理後可得

$$(K_{22} - K_{21}K_{11}^{-1}K_{12})\bar{Y}_b = P_2 - K_{21}K_{11}^{-1}P_1 \quad (3-11a)$$

$(K_{22} - K_{21}K_{11}^{-1}K_{12})$  為 6\*6 的矩陣，求其反矩陣計算量不大；所以從(3-11a)式可解得  $\bar{Y}_b(i\omega)$ ，將  $\bar{Y}_b(i\omega)$  代入(3-11)式可得  $\bar{Y}_s(i\omega)$ ，即可解得

在每一個外力頻率作用下的  $\bar{Y}_b(i\omega)$ 、 $\bar{Y}_s(i\omega)$ 。

將在頻率域求得的解作傅立葉反轉換，轉回時間域的  $\bar{Y}_b(t)$ 、 $\bar{Y}_s(t)$

後，將結果代回(3-6)式

$$\underline{v} = \begin{Bmatrix} v_s \\ v_b' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & \phi_b \\ \underline{0} & \underline{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_s \\ Y_b \end{Bmatrix} = \underline{QY} \quad (3-6)$$

即可得到考慮土壤-結構互制效應下，結構物因為地震力所產生的時間歷時反應。



## 第四章 分析案例

### 4-1 程式流程

由前章的(3-10)式我們可以得知控制方程式為外力頻率 $\omega$ 的函數，意即每一個外力頻率的增量 $\Delta\omega$ 即可求得相對應的 $\bar{Y}_b(i\omega)$ 、 $\bar{Y}_s(i\omega)$ ，如此反覆的計算，我們可以藉由 FORTRAN 或是其他的程式語言來計算。

首先必須知道結構物的基本性質，包括結構自由度總數、阻尼比、各樓層總質量、結構物的自然頻率、振動模態等；然後將外力或是地震歷時作傅立業轉換再開始運算。

停止分析的條件有兩個，分別與結構物週期和傅立業轉換有關；考慮到結構物週期到 10 Hz 已經是高頻的部分，所以在外力頻率增量 $\Delta\omega$ 累積到超過 62.83 rad/sec，也就是 10 Hz 時我們就結束分析。也因為傅立業轉換後有對稱的特性，我們只需要作 $(N/2)+1$  次的分析，其他的為對稱，僅在虛部相差一個負號。計算所有的 $\bar{Y}_b(i\omega)$ 、 $\bar{Y}_s(i\omega)$ 後作傅立業反轉換(Inverse Fourier transform)，利用(3-6)式即得到結構物歷時反應，程式分析流程圖如圖 4-1

## 4-2 案例簡介

分析的案例為台電的松湖超高壓變電所，該案例為不規則斷面基地面積，地下一層的面積為  $2528\text{m}^2$ ，地面層為  $2528\text{m}^2$ ，二層為  $896\text{m}^2$ ，三層為  $2248\text{m}^2$ ，四層為  $368\text{m}^2$ ，五層為  $1184\text{m}^2$ ，六層為  $2248\text{m}^2$ ，七層為  $2248\text{m}^2$ ，屋頂層為  $2248\text{m}^2$ 。

X 方向為長向 72m，Y 方向為短向 40m，地上七層，共 35m 高，地下一層 3.6m，結構物模態與週期由 ETABS 假設結構物與地盤為剛性接合所求得；每一層樓皆假設為三個自由度，分別為 X、Y 方向的平移與面外(out of plane)旋轉自由度。結構物的樓層質量與轉動慣量如表 4-1，每個模態的自然頻率如表 4-2，各振態如表 4-3，結構物的阻尼比為 5%。

在基礎的質量矩陣方面，由於我們將地面層與地下一層視為一個剛性的箱型體，所以在水平向的質量為地面層加上地下一層的總質量；而垂直向的質量則為全部樓層的總質量，因為上面樓層並未考慮到垂直向的自由度；在面內(In-plane)轉角的自由度為地面層與地下一層轉動慣量的總和；長向與短向的翻轉(Rocking)自由度為上面每一樓層的力，乘以樓高，加上每一個樓層本身轉動慣量的貢獻，如圖 4-2。

## 4-3 阻抗矩陣

### 4-3-1 幾何形狀

本案例的基礎形式採用筏式基礎，基礎位置在地下一層連接，屬於埋入基礎(Embedded foundation)的形式，埋入深度為八公尺；由於應用 ETABS 在分析時，固定點放在地面層，所以在求阻抗矩陣時，我們把控制點放在地面，而將整個地下一層與基礎當作剛性箱體(Rigid box)計算其阻抗矩陣。

同樣的，考慮高頻與低頻的波長不同，我們將模型分為低頻與高頻的模型，低頻的模型相對與高頻的較大，元素尺寸相對也較大；分析的範圍與元素尺寸的大小我們以 2-3 節所做的收斂性分析為準，採用模型五相近的分析區域及元素尺寸，低頻的分析模型如圖 4-3，高頻的分析模型如圖 4-4，低頻與高頻深度方向的的分析模型，分別為圖 4-5、圖 4-6，元素尺寸分割如表 4-4，我們以元素長度與剪力波長作無因次化，如表 4-5；再以前述基礎尺寸、等值邊長的方式作分析區域的無因次化，如表 4-6。

### 4-3-2 使用元素

在分析範圍內採用三維二十節點實體元素 C3D20(Quadratic



element)；在分析範圍以外的土壤採用無限元素(infinite element)模擬吸能邊界，使邊界反射波傳能量不會傳回近域的土壤中。

### 4-3-3 土壤材料性質

土壤的楊氏模數  $E_s$ (Young's Module) 為  $4.68 \times 10^8$  Pa，剪力模數  $G$ (Shear module) 為  $1.8 \times 10^8$  Pa，密度  $\rho$  為  $2000 \text{ t/m}^3$ ，包松比  $\nu$  (Poisson ratio) 為 0.3，阻尼比  $\xi$  (Damping ratio) 為 0.1，剪力波速為 300 m/s。土壤的阻尼部分依照前面 2-2-3 節所導，令 ABAQUS 裡的雷利阻尼常數  $\alpha=0$ ， $\beta = \frac{\xi}{\pi f}$ ， $f$  為外力頻率。

### 4-3-4 受力狀況與邊界條件

分別在剛性基礎版的六個自由度(X、Y、Z 的平移與轉角自由度)，施加  $1 \cdot e^{i\omega t}$  N 的力求其變形，等於求剛性基礎版的柔度矩陣 (Compliance matrix)，經過逆轉換後可得其阻抗矩陣。因基礎為不規則的斷面，所以其阻抗矩陣為全矩陣(Full matrix)。由於我們模擬的為彈性半無限域空間，所以邊界條件為在土壤無限遠處位移為零。

我們將以此分析作為後面分析台電變電所的阻抗矩陣，進而求解結構物的歷時反應。

## 4-4 分析土壤-結構互制效應

我們將以兩個地震記錄對一個結構物作分析，分別為北嶺地震與，比較結構物在一般剛性地盤設計與考量土壤-結構互制效應的差別。

(1) 北嶺地震(如圖 4-7):時間間隔為 0.02sec, 共有 4096 筆資料, 地震歷時為 81.92sec, 最大的地震加速度為  $3.13 \text{ m/sec}^2$ 。以此地震記錄作為 X 與 Y 向的地震力輸入, 垂直向則取其一半當作輸入地震力。

圖 4-10 為北嶺地震的地震反應譜。

(2) 茄定國小(如圖 4-8、圖 4-9): 1999 年 9 月 21 日之地震記錄, 時間間隔為 0.005sec, 共有 16384 筆資料, 地震歷時為 81.92sec, X 方向與 Y 方向的最大的地震加速度為  $3.13 \text{ m/sec}^2$ , 垂直向的地震力假設為零。圖 4-11 為東西向的地震反應譜, 圖 4-12 為南北向的地震反應譜。

### 4-4-1 剛性地盤假設與土壤-結構互制效應比較

#### (1) 北嶺地震

首先我們比較在沒有考慮土壤-結構互制效應, 也就是剛性地盤設計與有考慮土壤-結構互制效應的差異, 結果如圖 4-13, X、Y 為長

向與短向，旋轉(Torsion)方向自由度單位為公尺，即該樓層旋轉角度除以該樓層之迴轉半徑。

由圖中可以明顯看出，本案例中，在考慮土壤結構互制效應下位移反應較小，屋頂層 X 方向的最大位移將近 8.61cm，而剛性地盤的分析屋頂層 X 方向的最大位移將近 9.17cm，在位移方面減少將近 6%。

以相同的地震力作為 X 向 Y 向的地震力輸入而言，由結構的平面圖(圖 4-3)可知，Y 方向為弱向，所以在有考慮土壤-結構互制效應下，屋頂層 Y 方向的最大位移為 10.3cm，而在剛性地盤分析下，最大位移為 12cm，減少了有 14%。各樓層的最大位移如圖 4-14，由圖中可以看出樓層愈高，其土壤-結構互制效應與傳統的設計有愈大的差異，顯示出剛性地盤無法表現出能量由基礎向下傳出去的行為，而由結構物單獨承受，使得變形較為高估。

本結構物的第一個模態(First mode)週期為 0.74sec，頻率為 1.35Hz，從歷時反應後端的自由震盪(Free vibration)可以看出震盪的週期約為 0.7sec，非常接近第一模態的 0.74sec，而在考慮了土壤-結構互制效應下，結構物的週期稍微增加約為 0.8sec，顯示土壤如同彈簧一般的作用，延長了結構物的週期。

如圖 4-15，我們比較有考慮土壤-結構互制與剛性地盤在正規振

態座標(Normal mode coordinate) $Y_s$ ，也就是每一個模態的貢獻度，由圖中可看出，在有考慮土壤-結構互制效應下，其在每一個模態的貢獻度均比剛性地盤假設少，僅在第六個模態，剛性地盤假設比土壤-結構互制效應小了很多，究其原因，乃矩陣運算時出現相互抵銷的情形，且分析時採用 X 方向與 Y 方向皆為相同的地震記錄，所以在第六個模態才會出現這樣的情形，若將 X 方向與 Y 方向的地震力採用不同的地震記錄即不會有這種現象。

#### (2) 茄定國小 1999 年 9 月 21 日地震記錄

由圖 4-16 可以看出有考慮土壤結構互制與剛性地盤的比較，與前面的北嶺地震比較起來，在考慮土壤-結構互制效應下，屋頂層 X 向最大位移為 15.4cm，而假設剛性地盤的屋頂層 X 向最大位移為 15.9cm，僅僅減少 3%，其所減少的位移反應在 X 向並沒有非常的明顯。

圖 4-17 為各樓層最大位移，在考慮土壤-結構互制下，屋頂層 Y 方向最大位移為 12.3cm，在剛性地盤的假設下，屋頂層 Y 方向最大位移為 14.3cm，位移減少了 14%，由兩個案例看來，在弱向的差異會比在強向來的多

如北嶺地震一般，在歷時反應後段的自由震盪，假設為剛性基

礎，週期約為 0.72sec，若考慮土壤-結構互制時，週期則稍微拉長為 0.82sec，兩個案例都顯示出，如果考慮土壤的影響，猶如加上彈簧一般。

圖 4-18 為有考慮土壤-結構互制與剛性地盤在正規振態座標 (Normal mode coordinate) $Y_s$  的比較，由圖中可看出，每一個  $Y_s$  在有考慮土壤互制效應下會比剛性地盤假設少，且因為 X 方向與 Y 方向為不同的地震力，所以不會有之前北嶺地震的現象。

#### 4-4-2 阻抗矩陣對反應歷時的影響

考慮到阻抗矩陣的大小對於結構物週期的改變，而造成在考慮土壤-結構互制效應下，可能造成結構物位移反應放大的效果，本節跟針對不同的阻抗矩陣比較其位移反應的差異。

我們將前面得到的阻抗矩陣分別放大 50%、減少 50%與原來剛性地盤假設的位移作比較。

##### (1)北嶺地震

在 X 向與 Y 向為相同的地震力下，考慮不同倍數的阻抗矩陣，其分析結果如圖 4-19，顯然的，當阻抗矩陣為 1.5 倍(1.5GFF)時，其位移反應比 0.5 倍(0.5GFF)時要來的大，因為當阻抗矩陣愈大時，也

就是土壤與基礎之間的位移會愈小，當阻抗矩陣無限大時，也就是一般的剛性地盤設計。

比較剛性基礎假設與 0.5 倍的阻抗矩陣的位移反應，如圖 4-20，可以明顯看出剛性地盤的位移大許多，而因為阻抗矩陣變小，而將結構物的週期延長，以一般的反應譜而言，周期長的結構物受到的地震力愈小，所以阻抗矩陣愈小，可以預期結構物的位移愈小。

屋頂層 X 方向的最大位移在剛性地盤假設、1.5 倍阻抗矩陣與 0.5 倍阻抗矩陣分別為 9.17cm、8.73cm、8.2cm，樓高愈高，其差異愈大。

各樓層最大位移如圖 4-21



#### (2) 茄定國小 1999 年 9 月 21 日地震記錄

由圖 4-22 可以看出 X 方向的位移，在阻抗矩陣放大 1.5 倍時其歷時反應與 0.5 倍的阻抗矩陣相比，在整個歷時過程中，1.5 倍的阻抗矩陣雖然比 0.5 倍的阻抗矩陣反應稍大，但其實相差不多，甚至 0.5 倍阻抗矩陣的最大位移，相較 1.5 倍阻抗矩陣稍大了點。圖 4-23 為剛性地盤與 0.5 倍阻抗矩陣的比較，明顯可看出剛性位移反應大出許多。

由圖 4-24 看出，屋頂層 X 方向的最大位移在剛性地盤假設、1.5 倍阻抗矩陣、0.5 倍阻抗矩陣分別為 15.9cm、15.3cm、15.8cm，顯示不論在北嶺地震或是茄定國小的地震反應下，對比較強的 X 方向而

言差異不太，因 X 方向較強，相對應的頻率也愈高。

屋頂層 Y 方向的最大位移在剛性地盤假設、1.5 倍阻抗矩陣、0.5 倍阻抗矩陣分別為 14.2cm、13cm、11.7cm，但是在低樓層的位置，0.5 倍的阻抗矩陣有比 1.5 倍的阻抗矩陣稍大的趨勢，可能因為能量在平衡時，在較低樓層的位置，阻抗矩陣愈弱，愈有放大的效果。





## 第五章 結論與建議

本研究乃採用 ABAQUS 有限元素法套裝程式進行土壤-基礎阻抗矩陣模擬，並將模擬分析所得與解析解進行比對，以檢驗 ABAQUS 程式對於大地波傳的適用性，並且以 ABAQUS 求得的阻抗矩陣進一步作土壤-結構物互制效應的分析，探討在互制效應之下結構物的反應與傳統剛性地盤假設的差異，以下將對本文分析所得到之一些結論與建議。

### 5-1 結論




1. 以 ABAQUS 求取土壤-基礎阻抗函數，可得到與解析解吻合的結果，可見 ABAQUS 在求解大地波傳的問題，在精度方面尚可接受。有限元素法求取阻抗矩陣的優點為變化性高，不論是何種的基礎幾何、或是層狀土壤皆可適用，但須注意元素尺寸、分析區域必須適當，否則準確性大打折扣，電腦運算量畢竟有其限度，如何在有限的資源內去拿捏出最準確的解，則需要不斷反覆的測試。
2. 以北嶺地震與茄定國小測站的地震記錄作歷時反應，在有考慮土壤-結構互制效應下，其位移反應較小。一般的剛性地盤



設計，表示承載結構物的地盤勁度為無限大，而土壤-結構互制效應代表土壤為可變形的，若假設土壤勁度等於零，猶如水中的船，感受不到地表的加速度，而真正土壤的勁度介於無限大與零之間，所以其位移反應較小，但並非所有的案例皆如此，端視阻抗矩陣的大小，若因阻抗矩陣把整體結構物的週期拉長，與地震反應譜最大值的週期一樣，反而對於最初的剛性地盤假設的設計是不利的。

## 5-2 建議



以有限元素法來求取阻抗矩陣還是有其缺點，論其計算時間，當節點數目將近十萬點時，運算單一個外力頻率的時間就需要將近 12 個小時；數值的準確性，愈高頻愈不能吻合解析解；分析區域的大小到底要取多大才能更接近彈性半無限空間的行為等等問題。期望能夠快又有效的解出層狀土壤、不規則基礎斷面的解析解程式能夠發展，以解決目前有限元素法求阻抗矩陣計算量的問題。

1. 阻抗矩陣在旋轉(Torsion)自由度方面和解析解有蠻大的差距，也無法從元素尺寸與分析區域的大小來改善其精度，應可嘗試其他的模擬方式或是改用其他的有限程式軟體對照。

2. 本研究僅分析一個台電變電所案例，應可分析更多極端的案例，如結構物週期特別短和結構物週期特別長，或是質量特別大的案例，以更瞭解結構物在土壤-結構互制效應下不同種類的結構物的反應



## 參考文獻

1. Computer program ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, 2002.
2. Clough, R. W., and J. Penzien, Dynamics of Structures, McGraw-Hill, New York, 1993.
3. Ashraf Habibullah, "ETABS Three Dimensional Analysis of Building System User Manual", University of California, 1994.
4. Akira Mita and J. Enrique Luco, "Impedance Functions and Input Motions For Embedded Square Foundations", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 4, April, 1989, ASCE, pp.491.
5. George Gazetas, " Formulas and Charts For Impedances of Square and Embedded Foundations", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, NO. 9, 1991.
6. Lysmer, J., and Roger L. Kuhlemeyer, "Finite Dynamic Model for Infinite Media," Journal of the Engineering Mechanics Division of the ASCE, August 1969, pp. 859–877.
7. Luco, J.E. and Westmann R.A., ASCE, "Dynamic Response of Circular Footing", Journal of the Engineering Mechanics Division, 1971, pp.1381-1395.
8. Liou, Gin-Show, "Impedance for Rigid Square Foundation on Layered Medium", Structural Engineering/Earthquake Engineering, v10, n2, July 1994, p47-57.

9. Liou, Gin-Show, "Vibration of Surface Foundation of Arbitrary Shapes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v 20, n 12, Dec, 1991, p1115-1125.
10. Liou, Gin-Show, "Analytic Solution For Dynamic Loading On Half-Space Medium", *Journal of the Engineering Mechanics*, v117, n7, July, 1991, p1485-1494.
11. Roger L. Kuhlemeyer and John Lysmer, "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 99, No. 5, May 1973, pp. 421-427.
12. 楊樹華, "土壤-結構互制作用對結構物動力反應的影響", 國立台灣大學, 碩士論文, 民國八十九年.
13. 范書田, "宜蘭農工教學大樓之地震反應的分析", 國立交通大學, 碩士論文, 民國 86 年.



表 2-1 低頻(1-5Hz)元素尺寸分割表(m)

	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Z-1	Z-2	Node	Element
Model-1	15.43	12	15.43	8	18	18	12440	2976
Model-2	13.5	9	13.5	8	14.4	12	20744	5024
Model-3	12	7.2	12	8	12	9	30070	7776

表 2-2 低頻(5Hz)元素尺寸無因次表

	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Z-1	Z-2
Model-1	0.2572	0.2	0.2572	0.1333	0.3	0.3
Model-2	0.225	0.15	0.225	0.1333	0.24	0.2
Model-3	0.2	0.12	0.2	0.1333	0.2	0.15

表 2-3 高頻(5-10Hz)元素尺寸分割表(m)

	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Z-1	Z-2	Node	Element
Model -1	10.67	9	11.2	5.33	12	9	14464	3456
Model-2	9.14	7.2	9.33	5.33	9.6	7.2	23132	5592
Model-3	8	6	8	5.33	8	6	32572	8432

表 2-4 高頻(10Hz)元素尺寸無因次表

	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Z-1	Z-2
Model-1	0.3557	0.3	0.3733	0.1777	0.4	0.3
Model-2	0.3047	0.24	0.311	0.1777	0.32	0.24
Model-3	0.2667	0.2	0.2667	0.1777	0.2667	0.2

表 2-5 分析區域擴大無因次表

低頻 (1-5 Hz)	X 向	Y 向	Z 向	高頻 (5-10 HZ)	X 向	Y 向	Z 向
Model-3	4	7.75	2.25	Model-3	2.778	4.5	1.75
Model-4	5	10	3	Model-4	3.444	6	2.25
Model-5	6	12.25	3.75	Model-5	4.111	7.5	2.75

表 2-6 分析區域擴大元素數量表

低頻 (1-5 Hz)	Node	Element	高頻 (5-10 HZ)	Node	Element
Model-3	30070	7776	Model-3	32572	8432
Model-4	57886	14940	Model-4	61726	15944
Model-5	99022	25488	Model-5	104488	26912

表 4-1 樓層質量表

	樓層總質量(t)	轉動慣量(t-m <sup>2</sup> )
屋頂層	3934	1835023.76453
7F	4068.88	1897938.86503
6F	3686.72	1719679.41362
5F	2841.6	1079894.48649
4F	2469.28	1057121.01797
3F	6339.36	2957009.72342
2F	3368.96	1551761.31048
地面層	6143.04	3020542.57823
B1	12336.6	6065945.58920

表 4-2 結構物週期與頻率表

Mode	Period (sec)	Frequency (Hz)
1	0.74209	1.34755
2	0.70781	1.41281
3	0.59789	1.67254
4	0.23971	4.17170
5	0.23732	4.21374
6	0.19849	5.03799
7	0.14527	6.88396
8	0.14322	6.98210
9	0.11972	8.35316
10	0.11140	8.97695
11	0.09712	10.29651
12	0.08146	12.27579
13	0.06995	14.29493
14	0.06587	15.18069
15	0.05163	19.36755
16	0.04672	21.40336
17	0.04334	23.07113
18	0.04163	24.01864
19	0.03900	25.63971
20	0.03584	27.90394
21	0.03150	31.74420



表 4-3(a) 各模態振態

樓層	方向	MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4	MODE 5
RFL	X	-3.4654E-03	-2.8188E-02	3.2283E-03	-1.3240E-02	2.4671E-02
RFL	Y	3.0429E-02	-3.4869E-03	3.7613E-04	2.3432E-02	1.3039E-02
RFL	ROTZ	1.0223E-04	-1.2450E-04	-1.3506E-03	-2.8409E-04	3.4906E-05
7FL	X	-3.0504E-03	-2.5339E-02	2.8212E-03	-3.8371E-03	7.3957E-03
7FL	Y	2.6029E-02	-3.0046E-03	6.6656E-04	4.8805E-03	2.6726E-03
7FL	ROTZ	8.0791E-05	-1.1016E-04	-1.1853E-03	-1.5909E-04	-1.1005E-05
6FL	X	-2.5977E-03	-2.1952E-02	2.3600E-03	4.3236E-03	-7.7532E-03
6FL	Y	2.1478E-02	-2.4892E-03	8.9500E-04	-9.9735E-03	-5.6289E-03
6FL	ROTZ	5.9888E-05	-9.4429E-05	-1.0059E-03	-3.1769E-05	-4.2884E-05
5FL	X	-1.9228E-03	-1.9327E-02	-3.1680E-03	9.2174E-03	-1.6888E-02
5FL	Y	1.7292E-02	-1.6395E-03	5.2768E-03	-1.8244E-02	-9.8718E-03
5FL	ROTZ	4.3716E-05	-7.9699E-05	-8.5046E-04	3.6528E-05	-5.3072E-05
4FL	X	-1.7961E-03	-1.5141E-02	2.8991E-03	1.2014E-02	-2.3187E-02
4FL	Y	1.3109E-02	-1.0380E-03	7.1320E-03	-2.4988E-02	-1.3644E-02
4FL	ROTZ	3.1122E-05	-6.5612E-05	-6.7800E-04	1.9343E-06	-1.3834E-04
3FL	X	-8.9968E-04	-7.9763E-03	8.4294E-04	9.8848E-03	-1.8261E-02
3FL	Y	5.9857E-03	-7.0849E-04	5.6169E-04	-1.7085E-02	-9.5740E-03
3FL	ROTZ	1.1789E-05	-3.2761E-05	-3.5054E-04	1.0337E-04	-4.2937E-05
2FL	X	-4.4024E-04	-4.2695E-03	-4.1250E-04	6.4159E-03	-1.1381E-02
2FL	Y	3.1553E-03	-2.4793E-04	1.7281E-03	-1.1356E-02	-5.8393E-03
2FL	ROTZ	5.3034E-06	-1.8446E-05	-1.8877E-04	7.3940E-05	-2.9229E-05

表 4-3(b) 各模態振態

樓層	方向	MODE 6	MODE 7	MODE 8	MODE 9	MODE 10
RFL	X	-2.7446E-03	-2.0553E-02	-5.8975E-03	4.6831E-03	3.3738E-03
RFL	Y	3.5279E-03	5.3250E-03	-1.9752E-02	-3.1967E-03	1.1145E-02
RFL	ROTZ	1.2358E-03	-1.6355E-04	5.6607E-05	-9.7756E-04	9.0861E-05
7FL	X	-3.6563E-04	8.9491E-03	2.5913E-03	-3.6102E-03	-3.3814E-03
7FL	Y	-1.1964E-03	-2.4459E-03	9.5469E-03	3.6408E-03	-1.1609E-02
7FL	ROTZ	3.1957E-04	1.9223E-05	2.5972E-05	4.3580E-04	-7.3107E-05
6FL	X	1.5526E-03	2.1314E-02	6.1237E-03	-5.3212E-03	-3.7140E-03
6FL	Y	-4.0341E-03	-5.5147E-03	2.0631E-02	3.8625E-03	-1.2705E-02
6FL	ROTZ	-4.4675E-04	1.2597E-04	-2.3670E-05	1.0164E-03	-1.1021E-04
5FL	X	-2.4607E-03	1.7530E-02	4.6185E-03	1.9257E-03	-2.1718E-04
5FL	Y	-8.4723E-04	-4.6896E-03	1.5633E-02	-2.8722E-03	-1.2105E-05
5FL	ROTZ	-9.0508E-04	1.1561E-04	-4.3731E-05	8.4554E-04	3.9305E-05
4FL	X	6.0566E-03	2.3436E-03	9.3886E-04	1.1459E-04	1.1490E-02
4FL	Y	2.1982E-03	-3.0807E-04	1.7490E-03	-4.0605E-03	4.2172E-02
4FL	ROTZ	-1.2598E-03	3.4210E-05	-4.1557E-05	2.0397E-04	1.3985E-03
3FL	X	3.1169E-03	-2.2303E-02	-6.3135E-03	3.7898E-03	-2.0920E-03
3FL	Y	-3.7166E-03	6.1798E-03	-2.4059E-02	-2.3963E-03	-1.0605E-02
3FL	ROTZ	-9.7961E-04	-1.7480E-04	-1.4251E-05	-1.0344E-03	-2.0870E-04
2FL	X	-1.0186E-03	-1.8896E-02	-5.1205E-03	-1.2987E-03	-3.3019E-03
2FL	Y	2.5073E-03	6.1823E-03	-1.9217E-02	5.8459E-03	-8.7536E-03
2FL	ROTZ	-6.3273E-04	-1.5982E-04	2.0445E-05	-8.8796E-04	-1.5707E-04

表 4-3(c) 各振態模態

樓層	方向	MODE 11	MODE 12	MODE 13	MODE 14	MODE 15
RFL	X	1.4549E-02	1.7977E-03	8.0131E-03	9.6587E-03	-2.7782E-03
RFL	Y	-3.5213E-03	9.7584E-03	9.2950E-03	-7.5377E-03	-2.0601E-03
RFL	ROTZ	7.7198E-05	-6.7748E-04	3.9068E-04	-8.2157E-05	4.7808E-04
7FL	X	-1.9383E-02	-2.8817E-03	-1.8108E-02	-2.3366E-02	8.5437E-03
7FL	Y	4.7734E-03	-1.7284E-02	-2.1411E-02	1.8740E-02	6.6483E-03
7FL	ROTZ	-7.4210E-05	8.6637E-04	-6.9031E-04	1.4404E-04	-1.2630E-03
6FL	X	-1.2642E-02	-8.5936E-04	5.9125E-03	1.1584E-02	-1.0281E-02
6FL	Y	3.2033E-03	-2.9505E-03	7.0333E-03	-9.4796E-03	-7.5798E-03
6FL	ROTZ	-7.7136E-05	6.4462E-04	-1.3010E-04	5.3681E-06	8.5115E-04
5FL	X	8.9538E-03	2.1169E-03	2.0740E-02	2.2151E-02	2.4335E-03
5FL	Y	-2.2191E-03	1.3991E-02	2.1842E-02	-1.8010E-02	-4.8016E-03
5FL	ROTZ	-1.2697E-04	-3.6513E-04	7.3646E-04	-3.4754E-04	1.1633E-03
4FL	X	4.3476E-02	3.7525E-03	-1.7076E-02	-2.1979E-02	4.0495E-03
4FL	Y	-1.1026E-02	1.1493E-02	-1.3340E-02	1.7544E-02	1.2464E-02
4FL	ROTZ	-9.1124E-05	-1.7052E-03	6.6592E-05	-4.0714E-04	-1.1283E-03
3FL	X	-1.0224E-02	-1.7685E-03	8.1779E-04	-2.3913E-05	-1.7638E-04
3FL	Y	2.9229E-03	-1.9814E-03	-1.3435E-03	3.0179E-04	2.5807E-03
3FL	ROTZ	1.2332E-04	3.0453E-04	-1.2320E-04	5.1501E-05	-9.9699E-05
2FL	X	-1.3549E-02	1.4921E-04	-4.7595E-04	3.0158E-03	-1.0955E-03
2FL	Y	2.4660E-03	-9.6775E-03	5.3168E-04	-2.4921E-03	-1.1747E-02
2FL	ROTZ	8.8330E-05	4.9142E-04	-2.5768E-04	1.9103E-04	2.9717E-04

表 4-3(d) 各振態模態

樓層	方向	MODE 16	MODE 17	MODE 18	MODE 19	MODE 20	MODE 21
RFL	X	6.5728E-04	-4.6307E-04	-1.0538E-03	-3.5529E-03	1.0410E-05	-3.4516E-04
RFL	Y	4.7464E-04	3.3142E-04	-3.7653E-03	9.9999E-04	6.9318E-05	-6.3991E-04
RFL	ROTZ	1.8012E-05	9.1353E-05	-1.0305E-04	-7.5439E-05	9.8810E-06	1.2221E-04
7FL	X	-2.3016E-03	1.6794E-03	4.1229E-03	1.4573E-02	-3.4198E-05	1.5779E-03
7FL	Y	-1.7537E-03	-1.3397E-03	1.5419E-02	-4.3378E-03	-3.5310E-04	3.0880E-03
7FL	ROTZ	-5.4995E-05	-2.9891E-04	3.5350E-04	2.7042E-04	-4.2413E-05	-5.2953E-04
6FL	X	3.4345E-03	-2.9939E-03	-8.2960E-03	-3.1763E-02	7.3605E-05	-4.2050E-03
6FL	Y	2.8675E-03	2.6142E-03	-3.1758E-02	9.6148E-03	1.3217E-03	-8.8998E-03
6FL	ROTZ	5.7499E-05	3.8385E-04	-5.2814E-04	-4.5172E-04	1.0154E-04	1.2686E-03
5FL	X	-1.7446E-03	2.5566E-03	7.7358E-03	3.5096E-02	-1.6590E-04	6.6225E-03
5FL	Y	-1.1078E-03	-4.1189E-03	3.2170E-02	-1.0208E-02	-3.7145E-03	1.4860E-02
5FL	ROTZ	8.9041E-06	-8.4936E-05	6.2816E-04	-3.0960E-04	-2.5818E-04	-2.0167E-03
4FL	X	7.7928E-03	1.2532E-03	1.7406E-04	-9.8509E-03	1.2513E-03	-4.3085E-03
4FL	Y	-2.5043E-03	9.7215E-03	-6.5074E-03	1.8429E-03	1.0375E-03	-9.6529E-03
4FL	ROTZ	1.4211E-04	-4.9141E-04	-4.4599E-05	6.7664E-05	-1.4685E-04	7.4777E-04
3FL	X	-1.8670E-02	-3.5345E-03	-2.5725E-03	-1.7531E-03	-2.4367E-03	6.1862E-04
3FL	Y	2.0529E-03	-1.6707E-02	-2.3966E-03	1.2376E-03	8.0889E-03	1.0574E-03
3FL	ROTZ	-3.5065E-04	5.9868E-04	9.2126E-05	-8.2959E-05	6.5924E-04	-9.9462E-05
2FL	X	4.4636E-02	8.2002E-03	5.2003E-03	3.0412E-03	5.9422E-03	-6.3062E-04
2FL	Y	-3.6366E-03	3.8381E-02	3.4902E-03	-2.0615E-03	-2.1530E-02	-8.0481E-04
2FL	ROTZ	2.9149E-04	-6.3634E-04	-2.8432E-04	7.1147E-05	-2.0026E-03	1.1640E-04

表 4-4 埋入基礎元素切割表

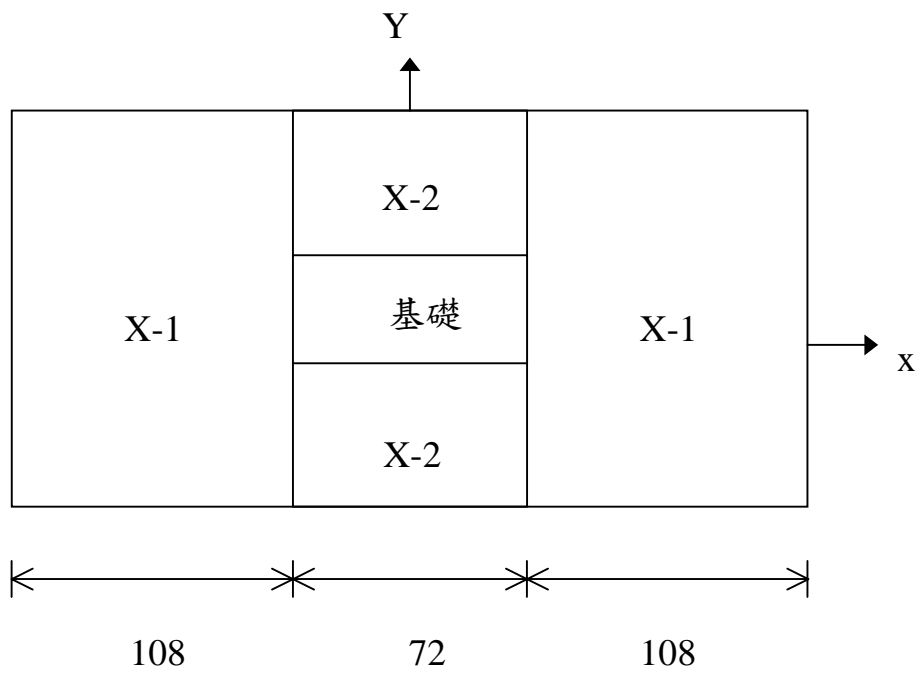
低頻模型	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4	Node	Element
(m)	12	8	12	7	8	9	12	10	9	8	99093	25533
高頻模型	X-1	X-2	X-3	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Z-1	Z-2	Z-4	Node	Element
(m)	8	5.6	8	8	7	8	6	8	7	8	103329	26643

表 4-5 埋入基礎元素切割無因次表

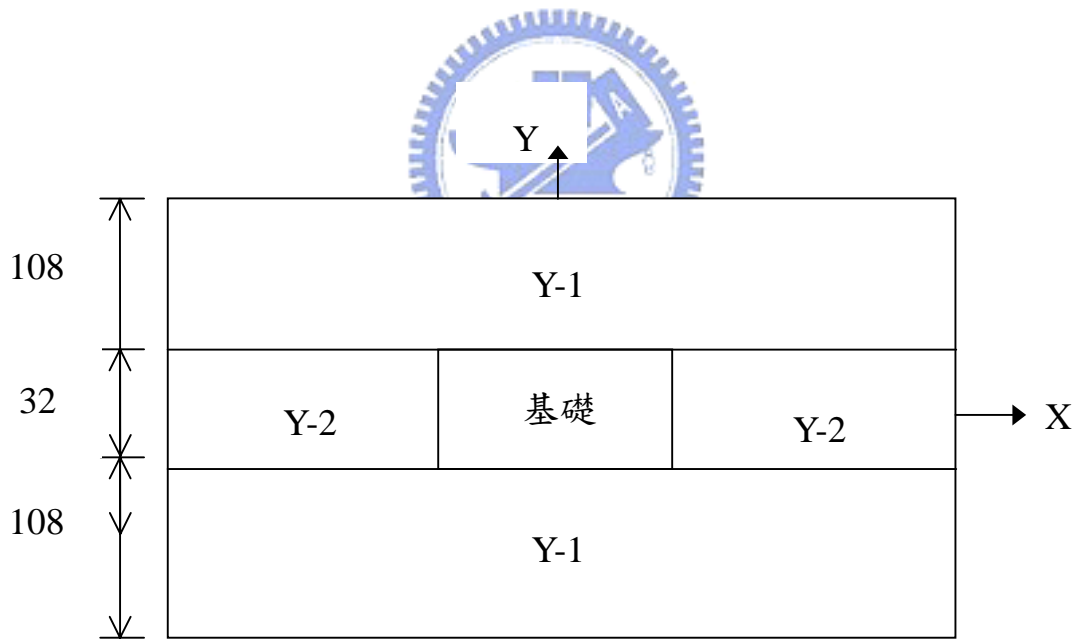
低頻	X-1	X-2	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4
模型	0.2	0.1333	0.2	0.1167	0.1333	0.15	0.2	0.1667	0.15	0.1333
高頻	X-1	X-2	X-3	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Z-1	Z-2	Z-4
模型	0.2667	0.1867	0.2667	0.2667	0.2333	0.2667	0.2	0.2667	0.2333	0.2667

表 4-6 埋入基礎分析區域無因次表

低頻 (1-5 Hz)	X 向	Y 向	Z 向	高頻 (5-10 HZ)	X 向	Y 向	Z 向
分析區域	6	10	3.354	Model-3	4.11	6.2	2.46



(a) X 方向



(Y) 方向

圖 2-1 低頻(1-5 Hz)元素切割示意圖(m)

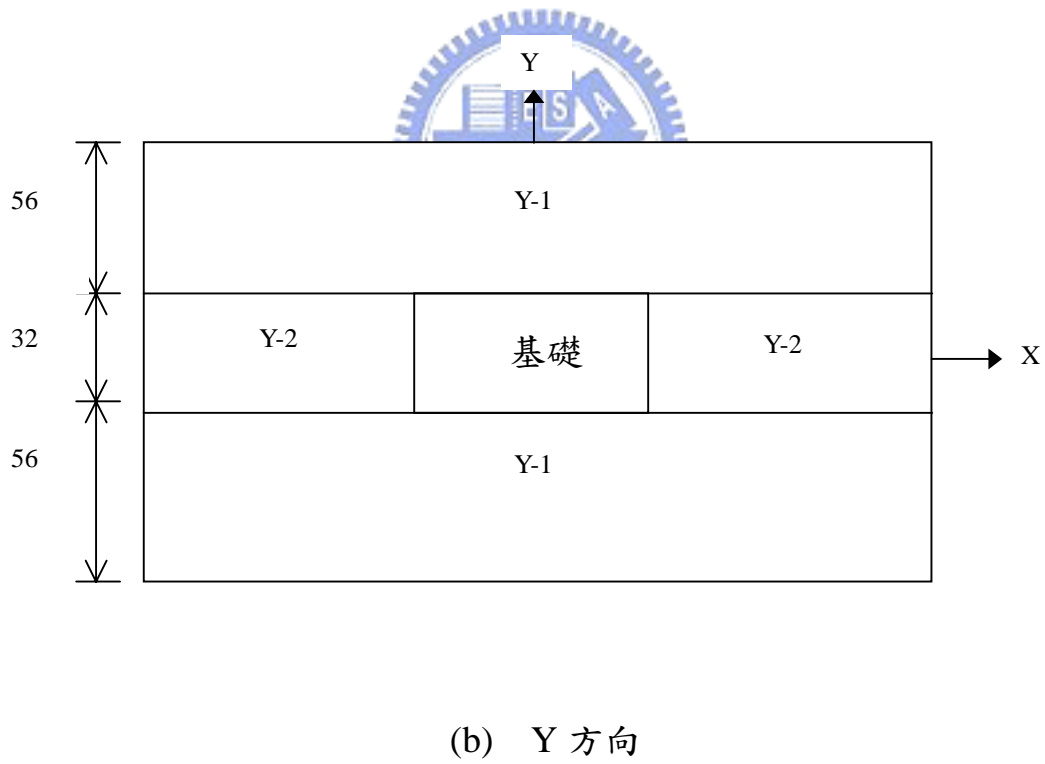
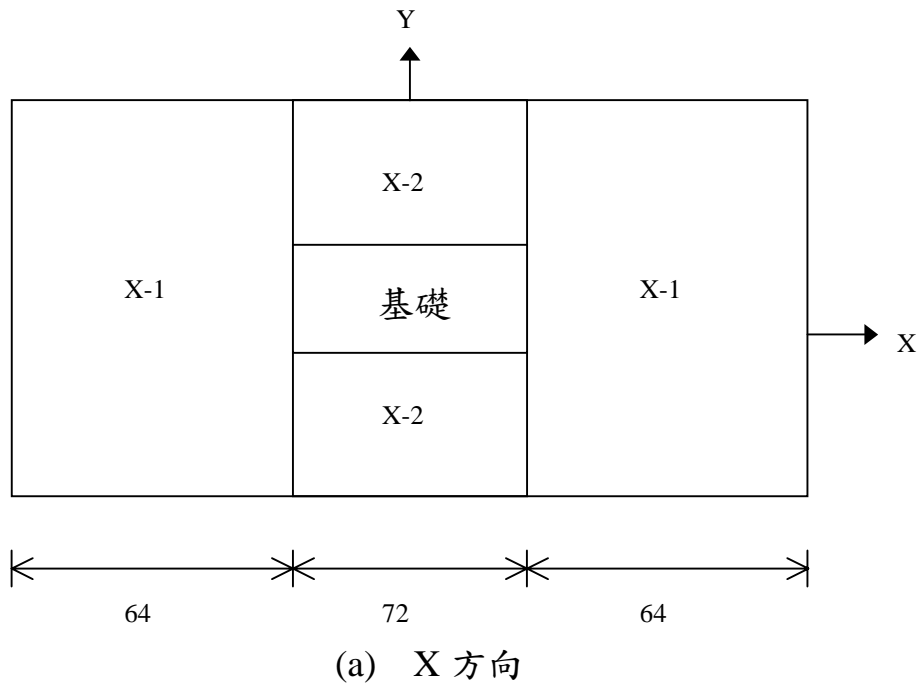
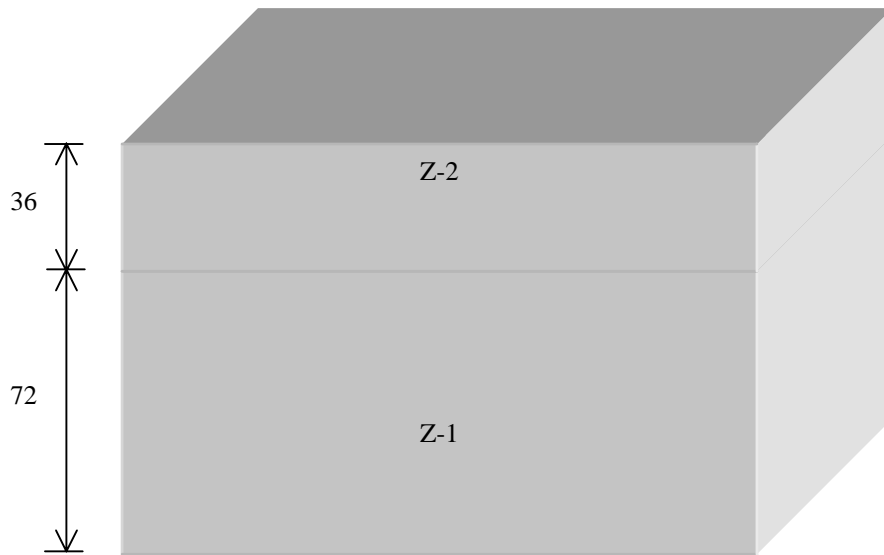
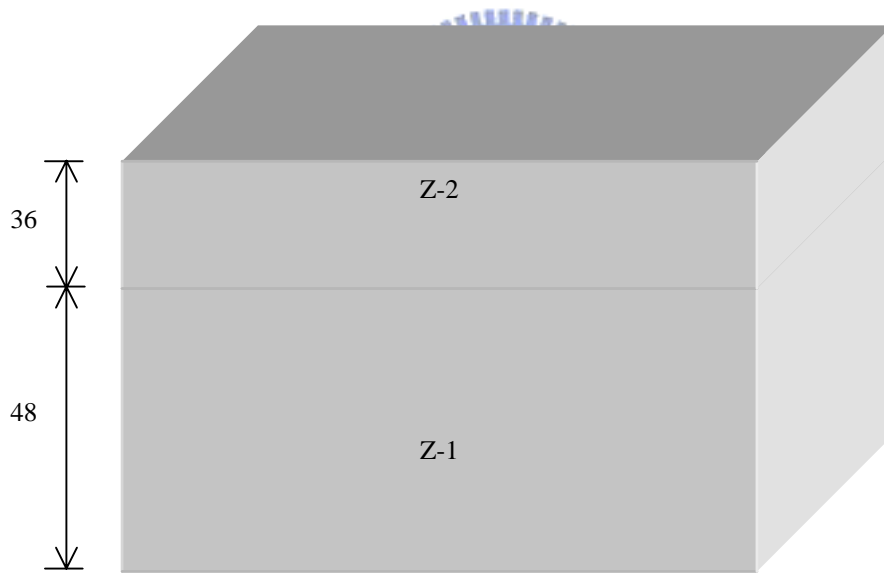


圖 2-2 高頻(5-10 Hz)元素切割示意圖(m)





(a) 低頻(1-5 Hz)



(b) 高頻(5-10 Hz)

圖 2-3 元素深度方向切割示意圖(m)

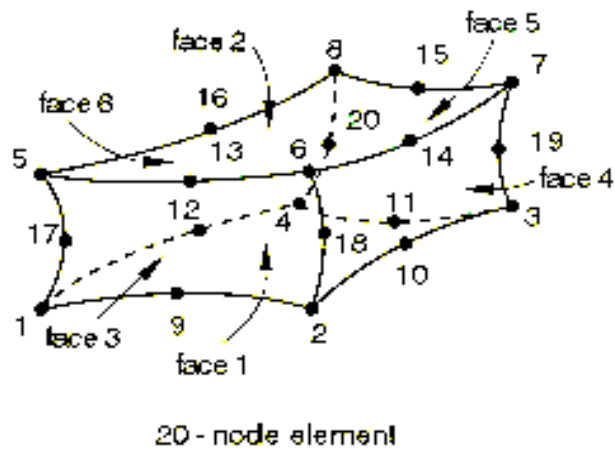


圖 2-4 三維實體元素示意圖

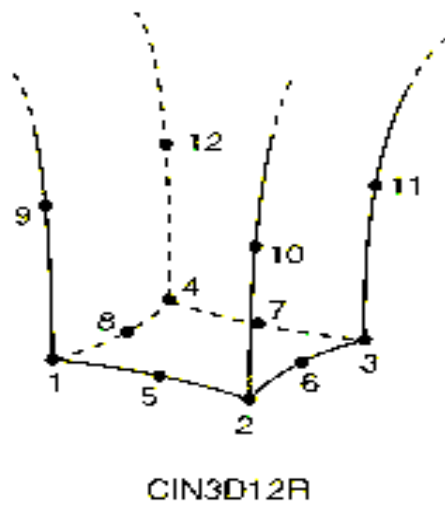


圖 2-5 三維實體無限元素示意圖

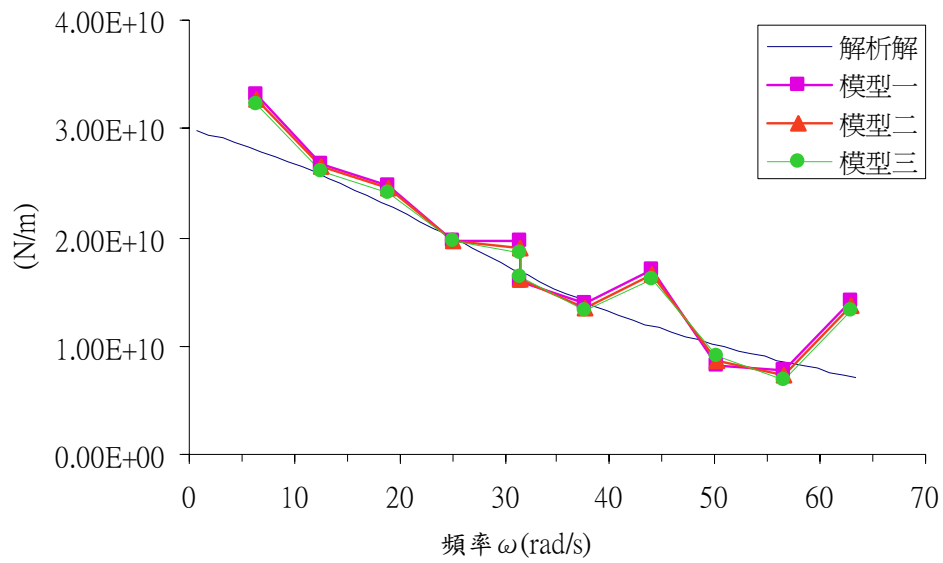


圖 2-6 實部垂直向平移勁度收斂性分析

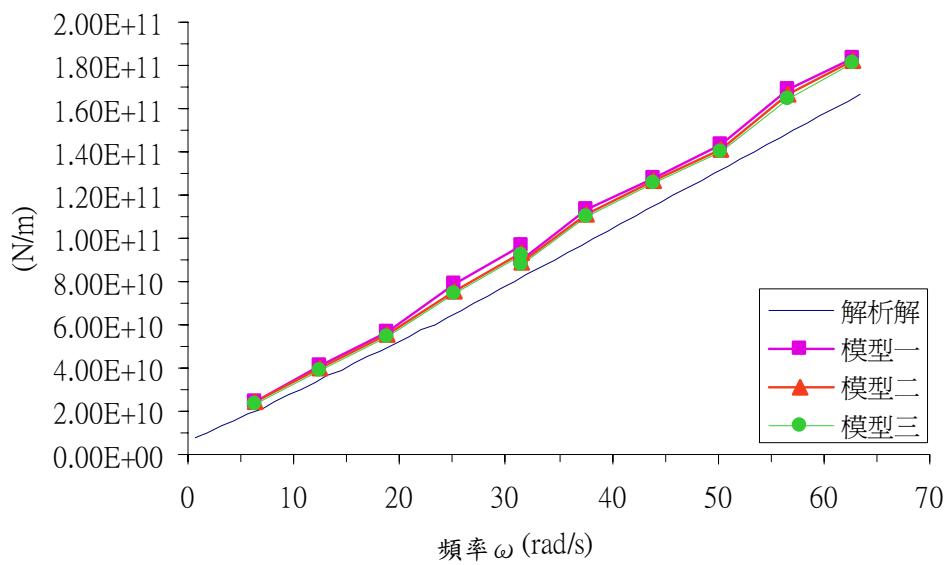


圖 2-7 虛部垂直向平移勁度收斂性分析

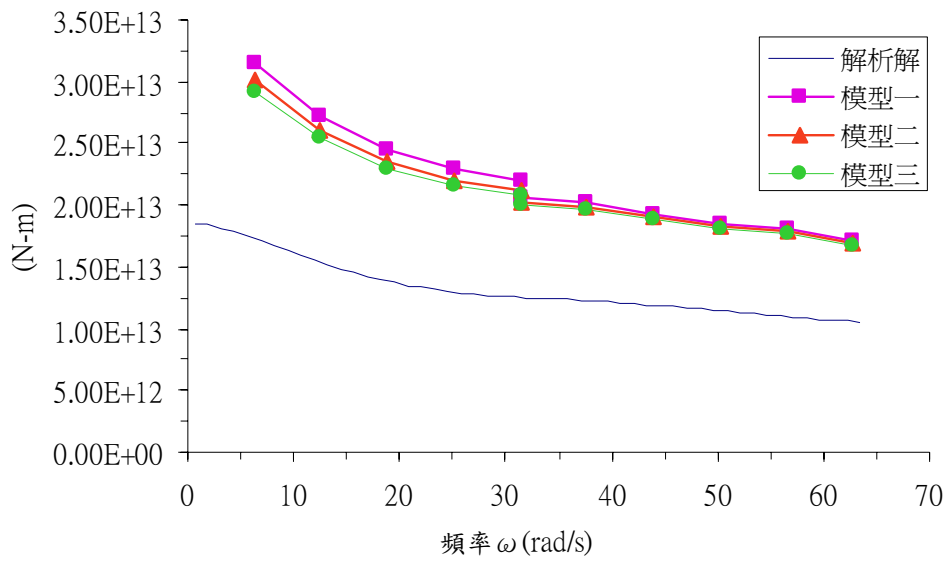


圖 2-8 實部平面扭轉勁度收斂性分析

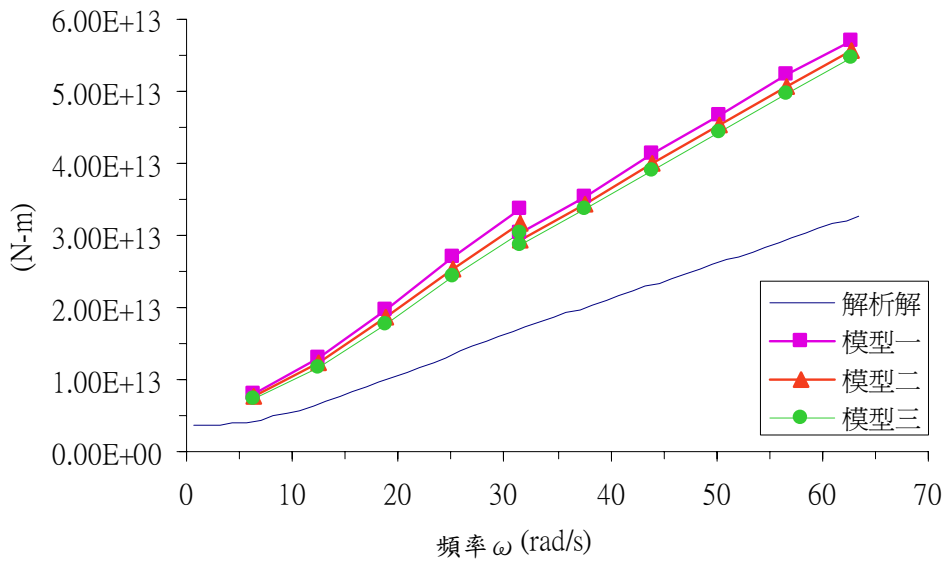


圖 2-9 虛部平面扭轉勁度收斂性分析

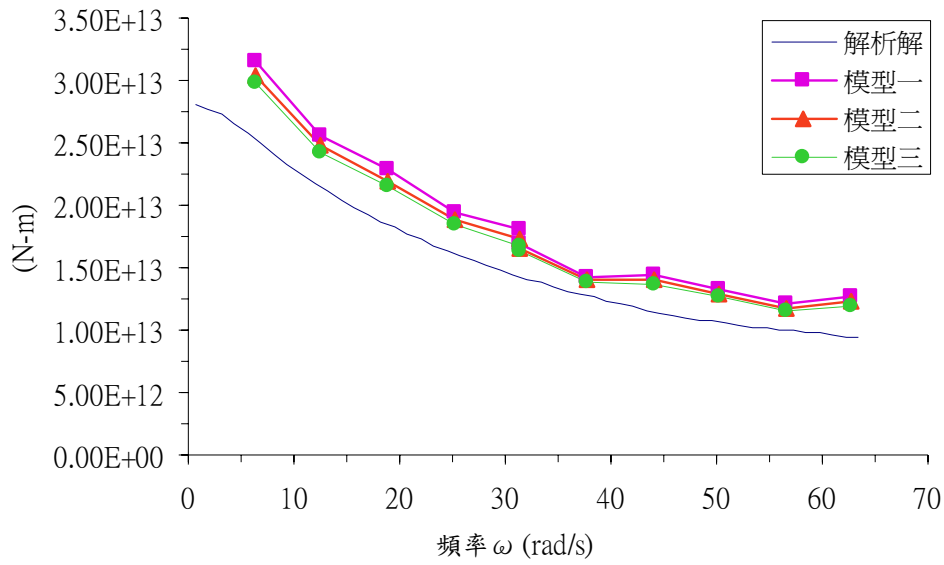


圖 2-10 實部長向翻轉自由度收斂性分析

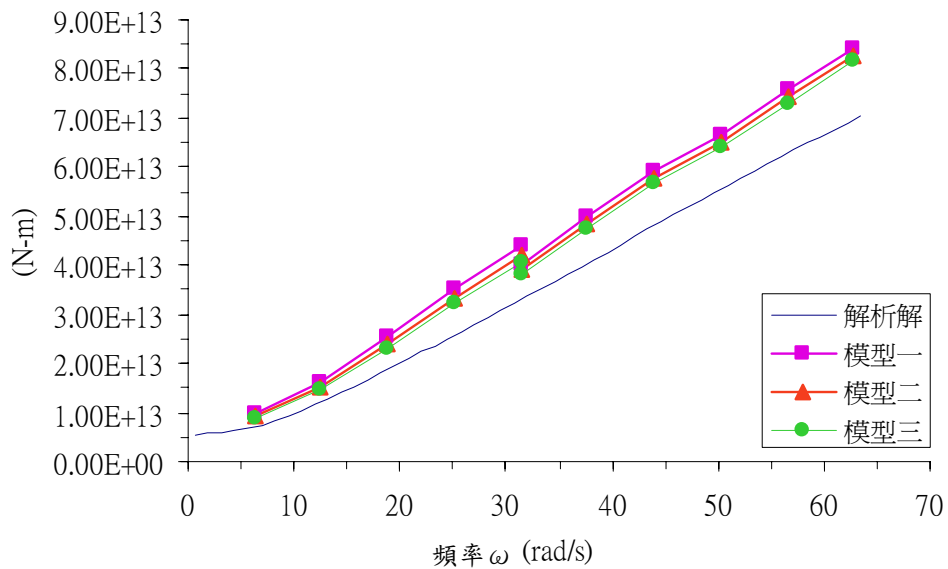


圖 2-11 虛部長向翻轉自由度收斂性分析

長向X-Coupling-Real

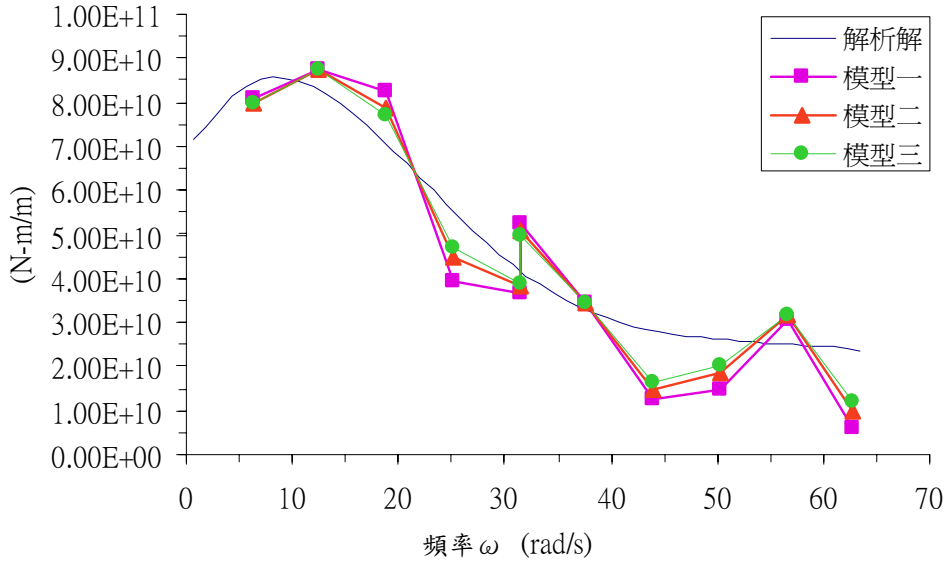


圖 2-12 實部長向耦合自由度收斂性分析

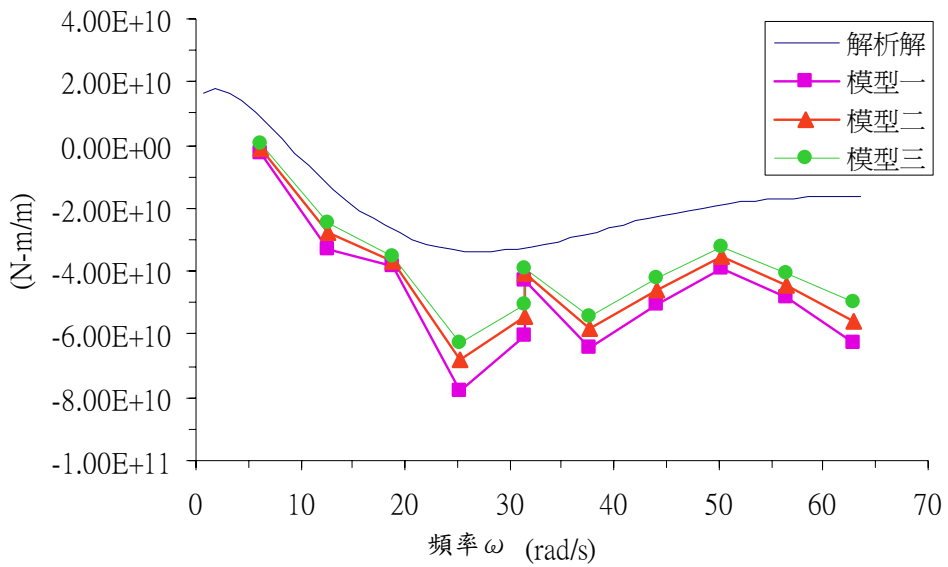


圖 2-13 虛部長向耦合自由度收斂性分析

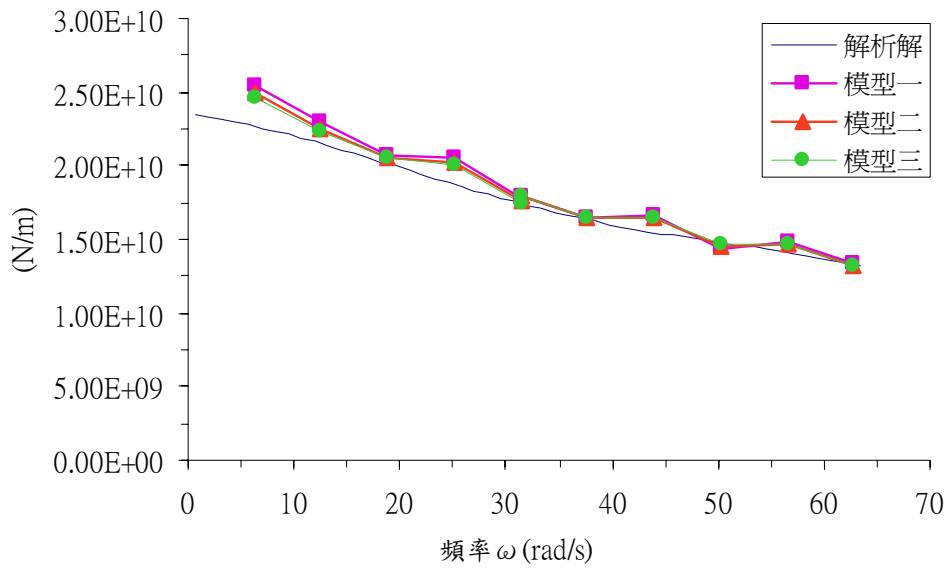


圖 2-14 實部長向平移自由度收斂性分析

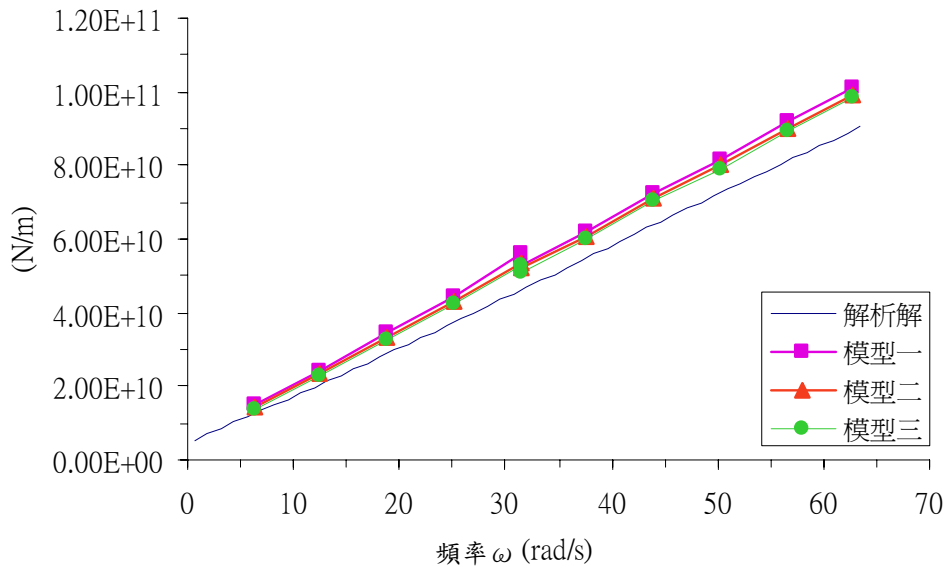


圖 2-15 虛部長向平移自由度收斂性分析



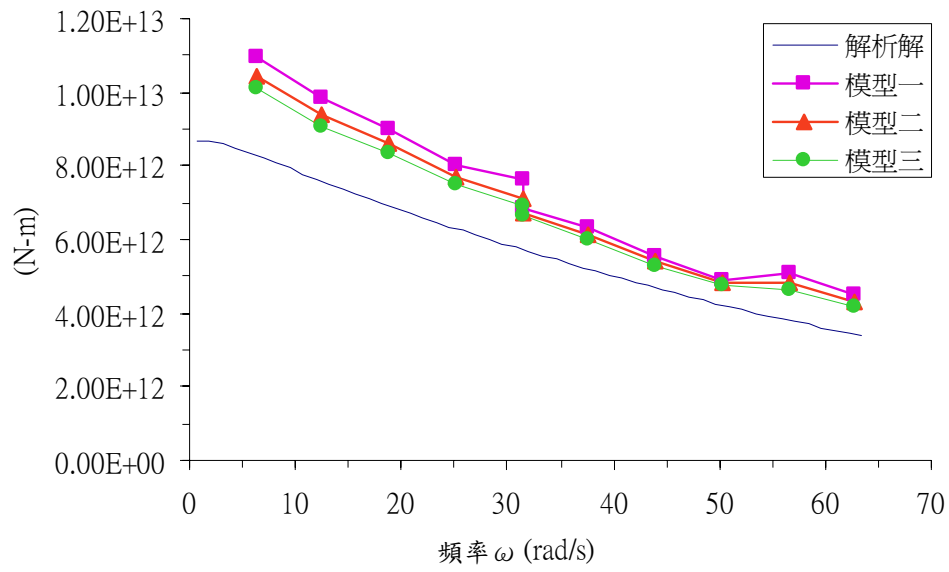


圖 2-16 實部短向翻轉平移自由度收斂性分析

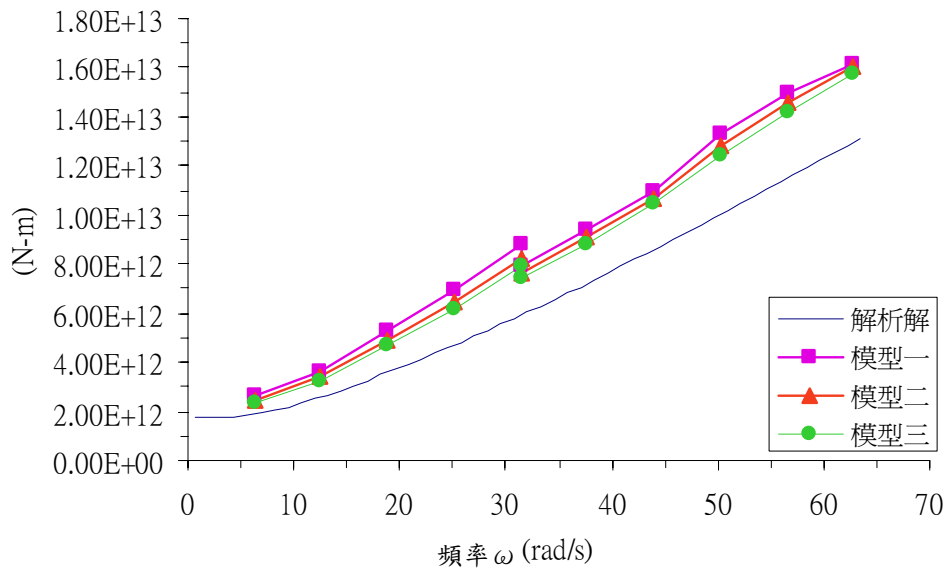


圖 2-17 虛部短向翻轉平移自由度收斂性分析

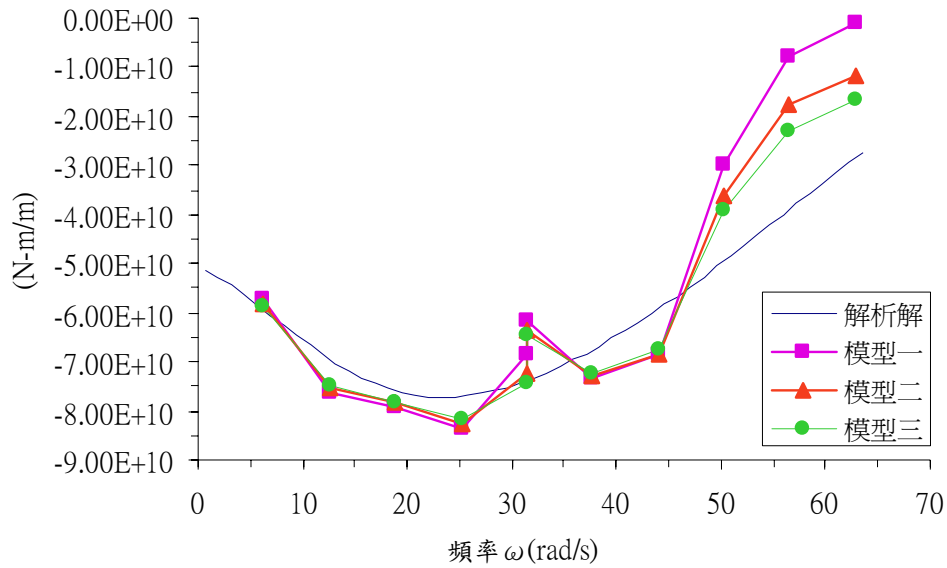


圖 2-18 實部短向耦合自由度收斂性分析

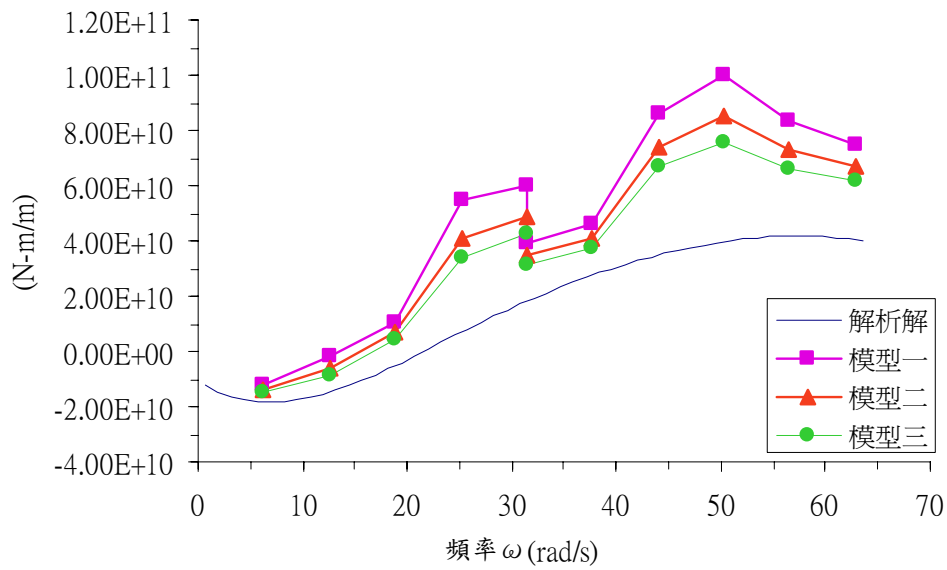


圖 2-19 虛部短向耦合自由度收斂性分析

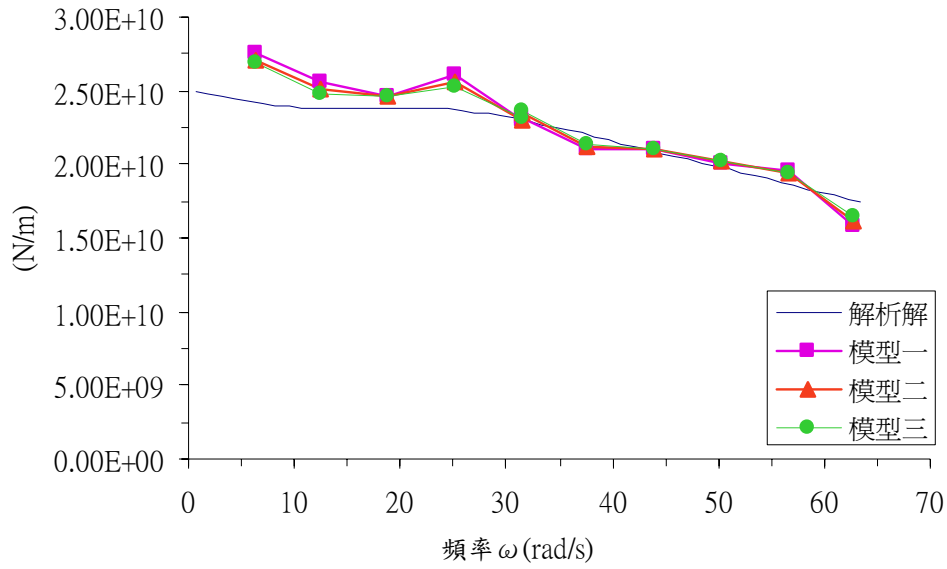


圖 2-20 實部短向平移自由度收斂性分析

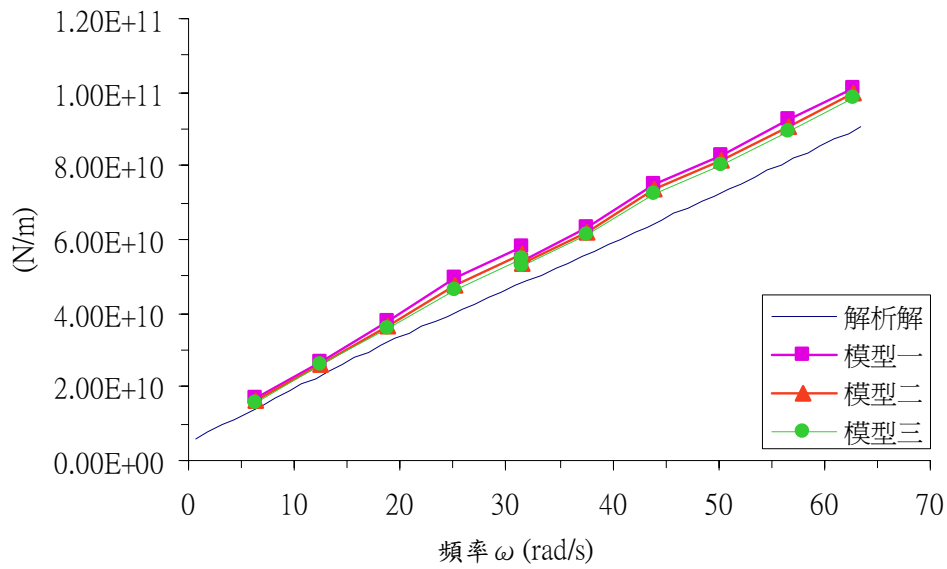


圖 2-21 虛部短向平移自由度收斂性分析

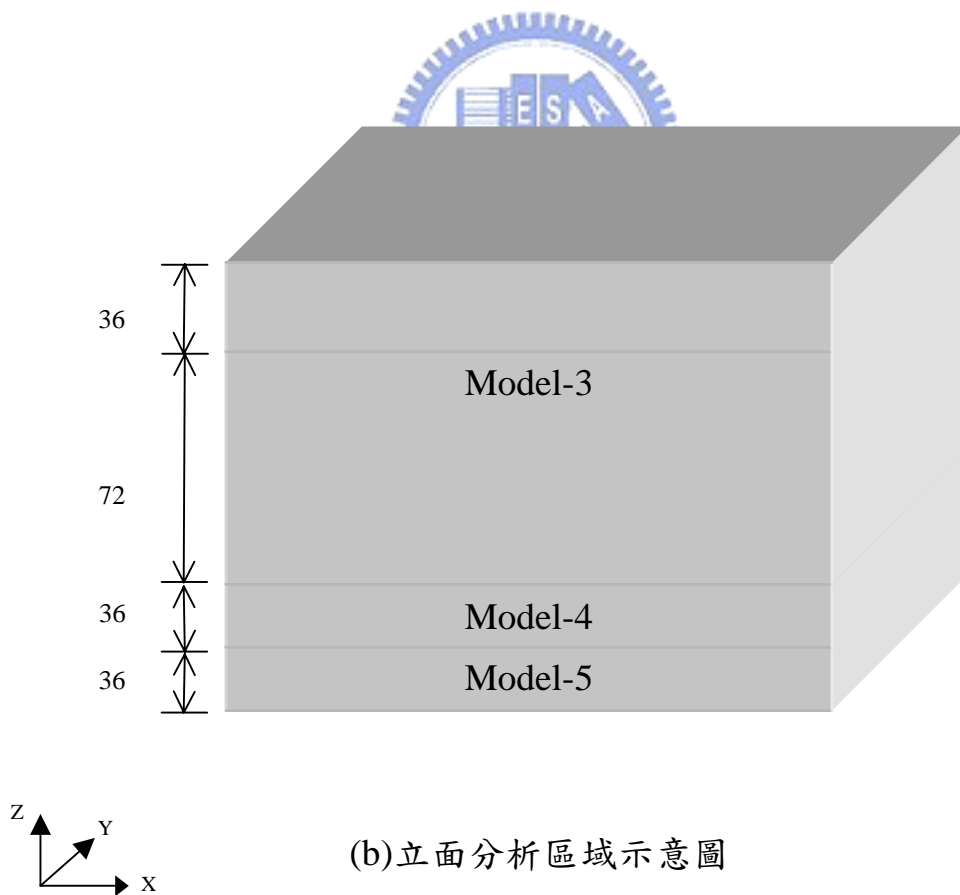
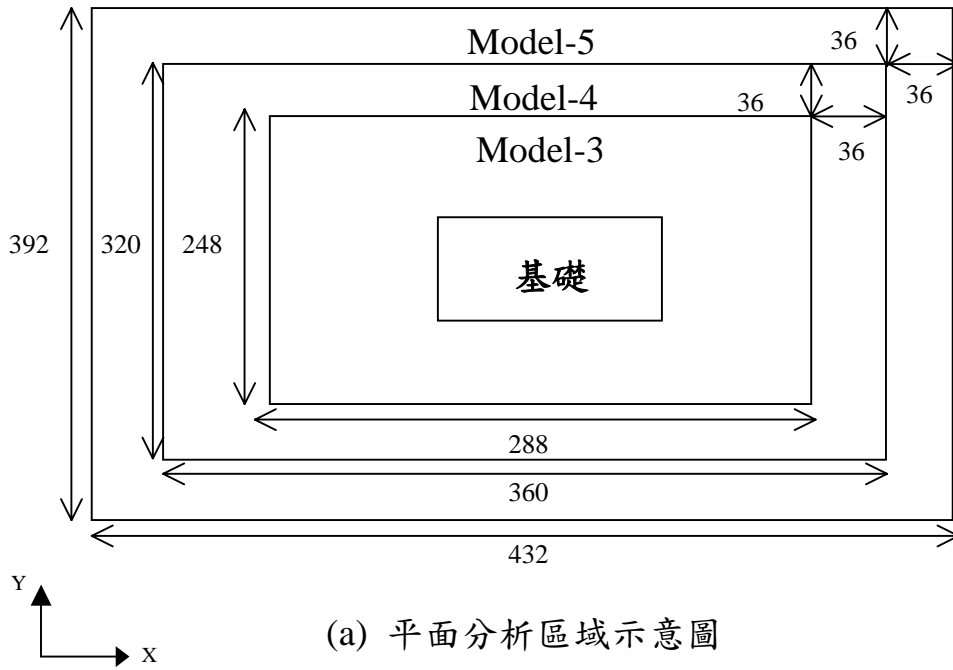
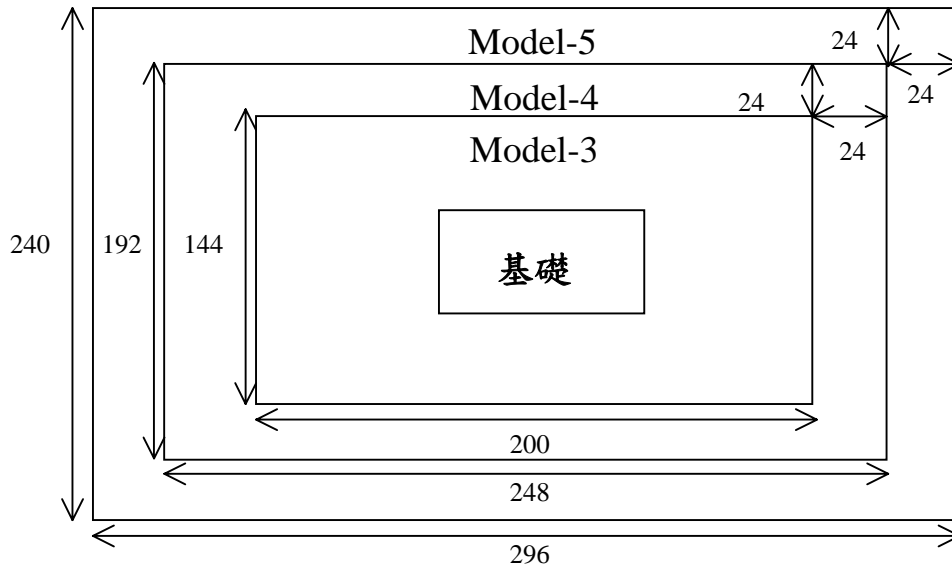
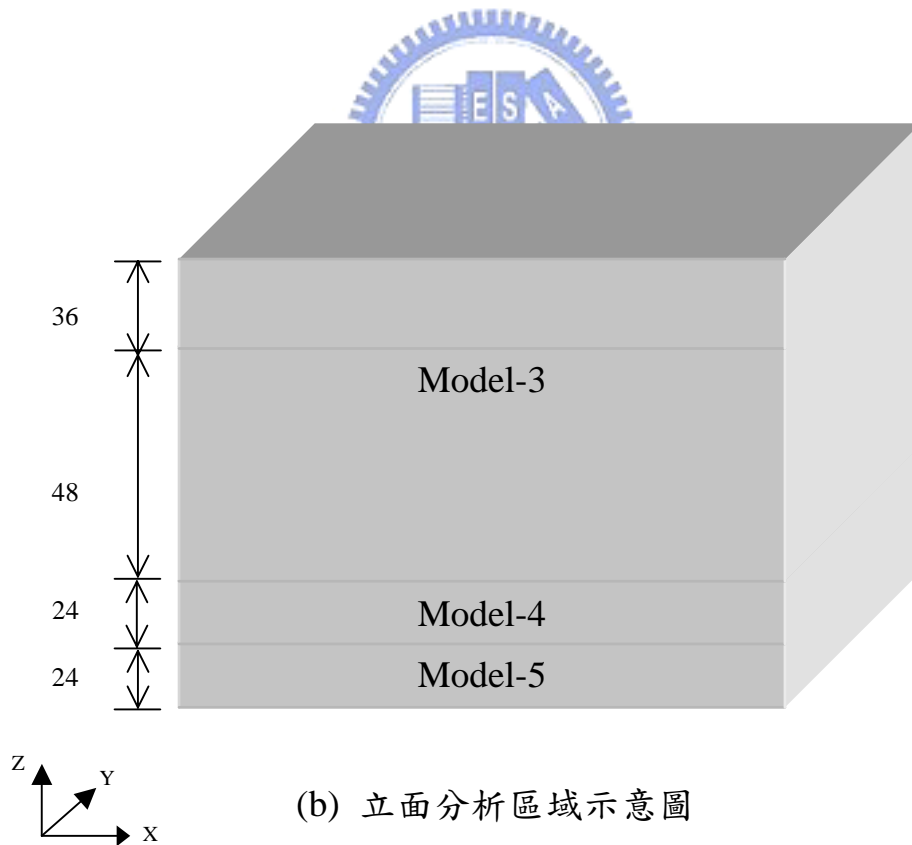


圖 2-22 低頻(1-5 Hz)分析區域示意圖(m)



(a) 平面分析區域示意圖



(b) 立面分析區域示意圖

圖 2-23 高頻(5-10 Hz)分析區域示意圖(m)

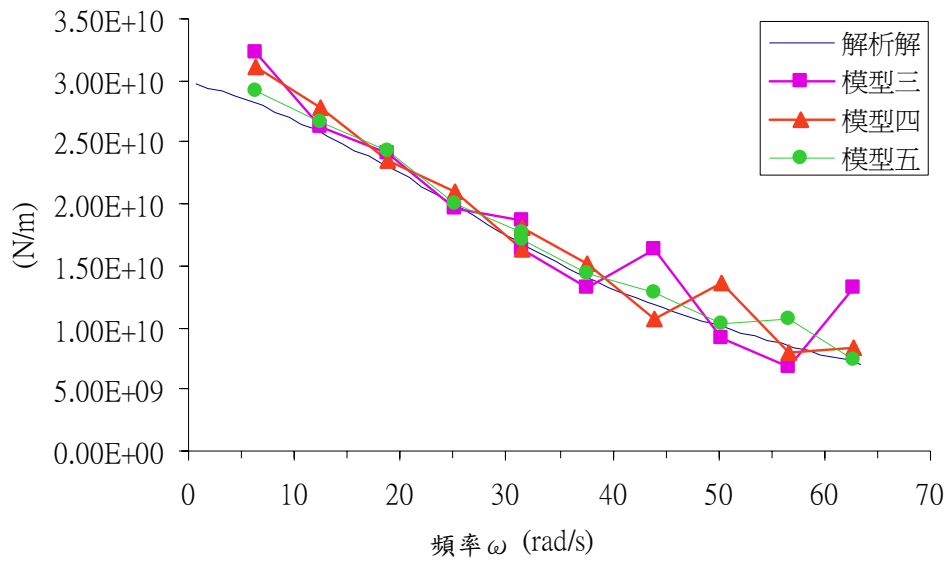


圖 2-24 實部垂直向平移勁度收斂性分析

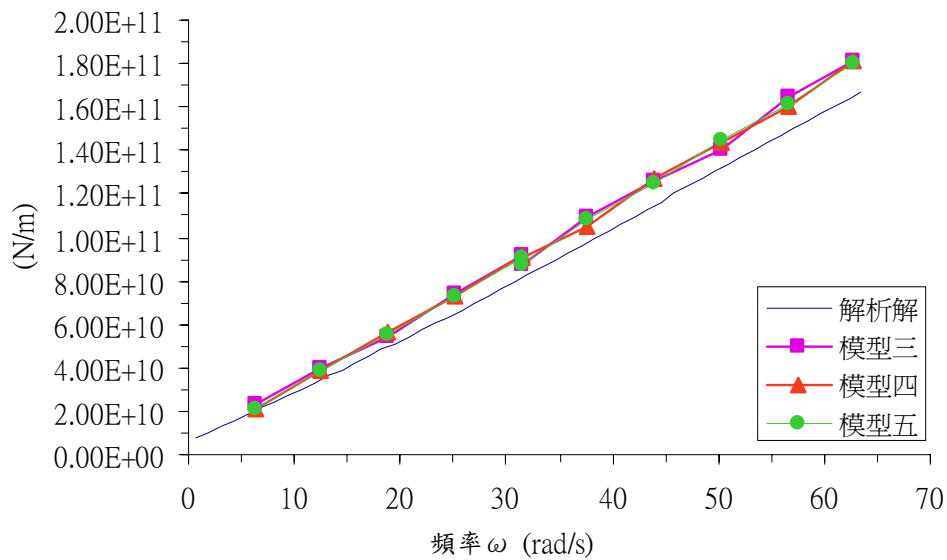


圖 2-25 虛部垂直向平移勁度收斂性分析

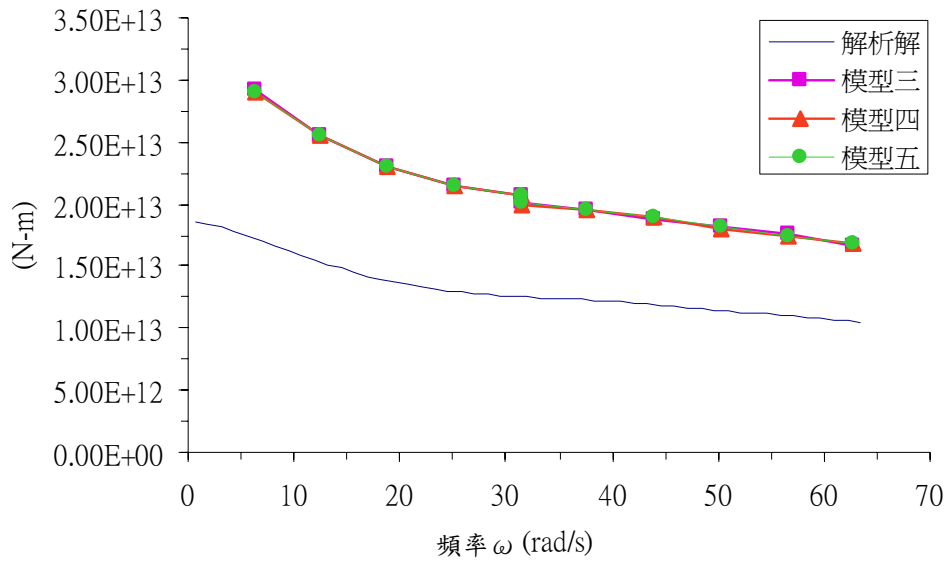


圖 2-26 實部垂直向旋轉勁度收斂性分析

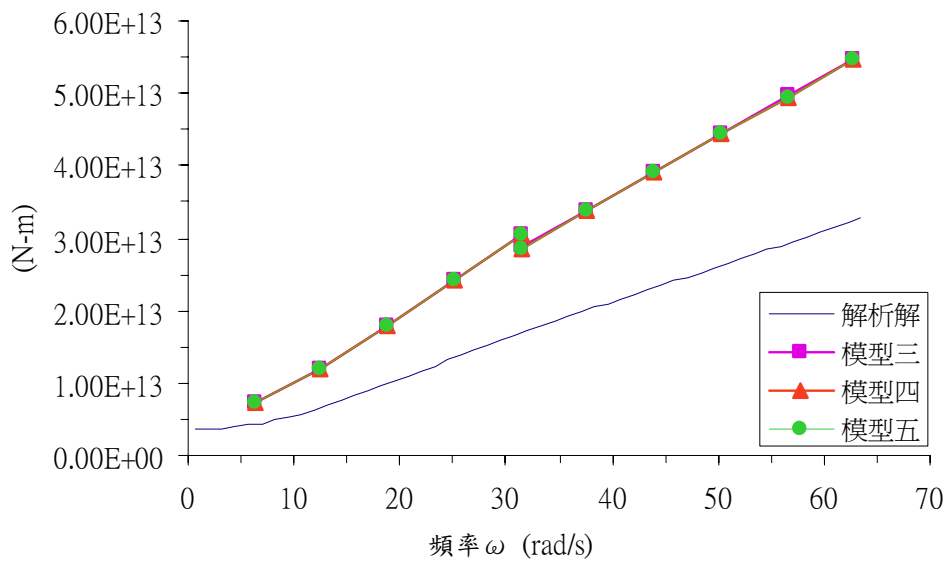


圖 2-27 虛部垂直向旋轉勁度收斂性分析

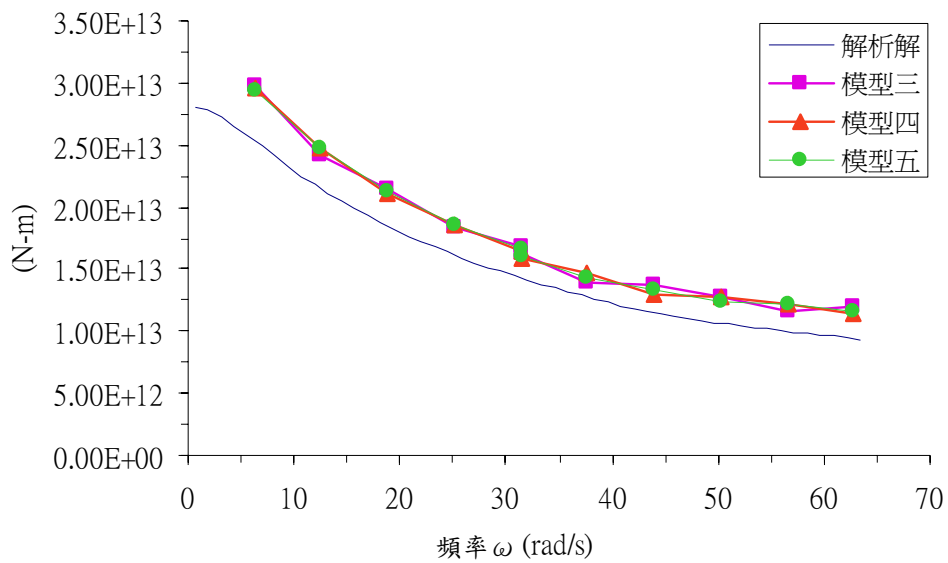


圖 2-28 實部長向翻轉自由度收斂性分析

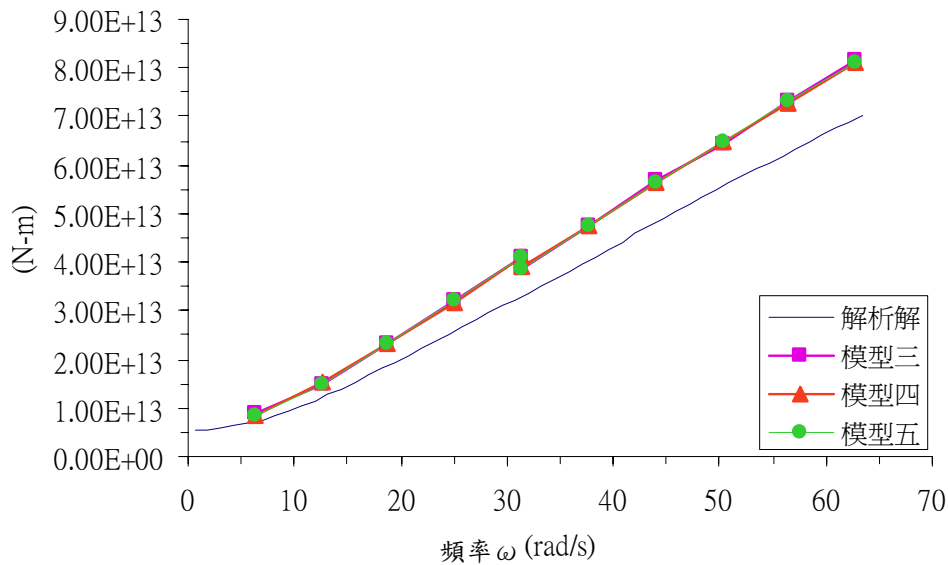


圖 2-29 虛部長向翻轉自由度收斂性分析



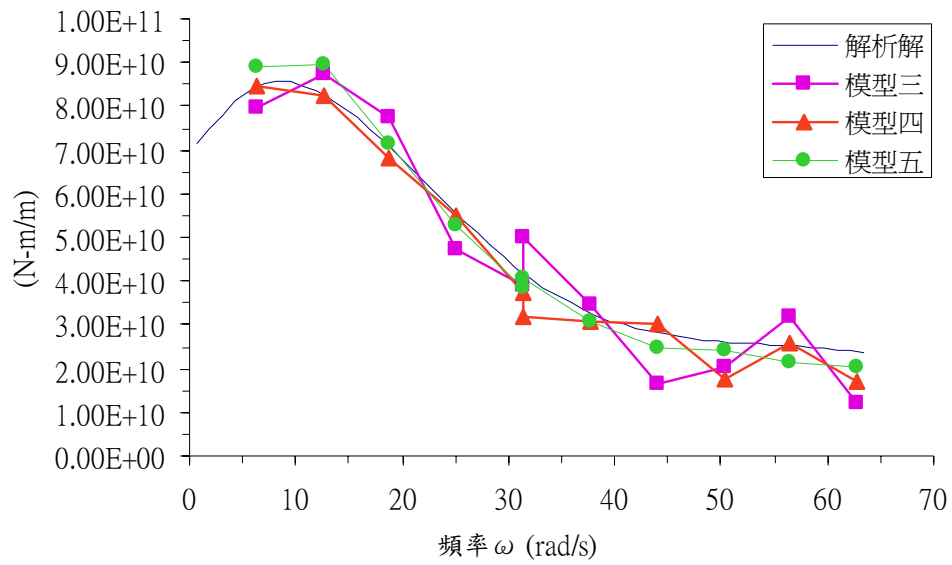


圖 2-30 實部長向耦合自由度收斂性分析

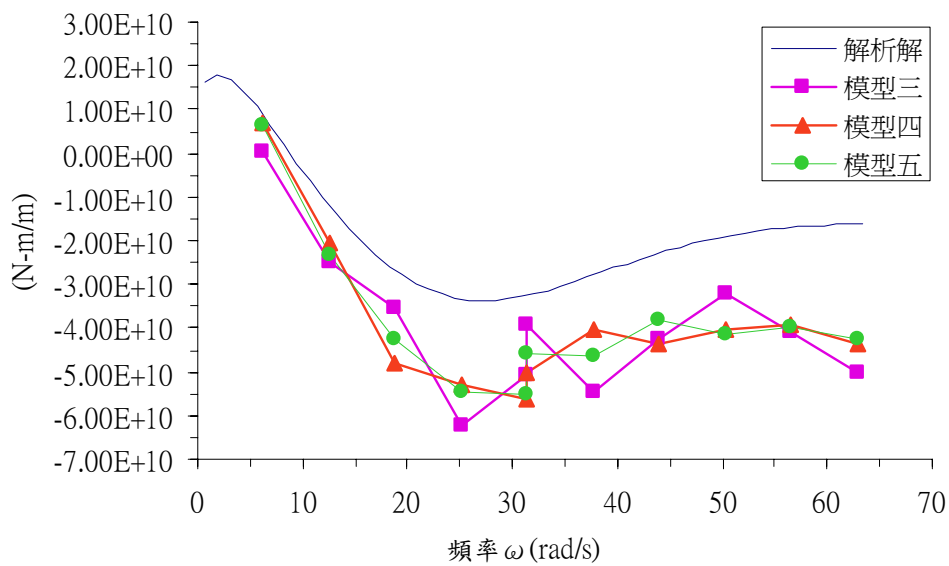


圖 2-31 虛部長向耦合自由度收斂性分析

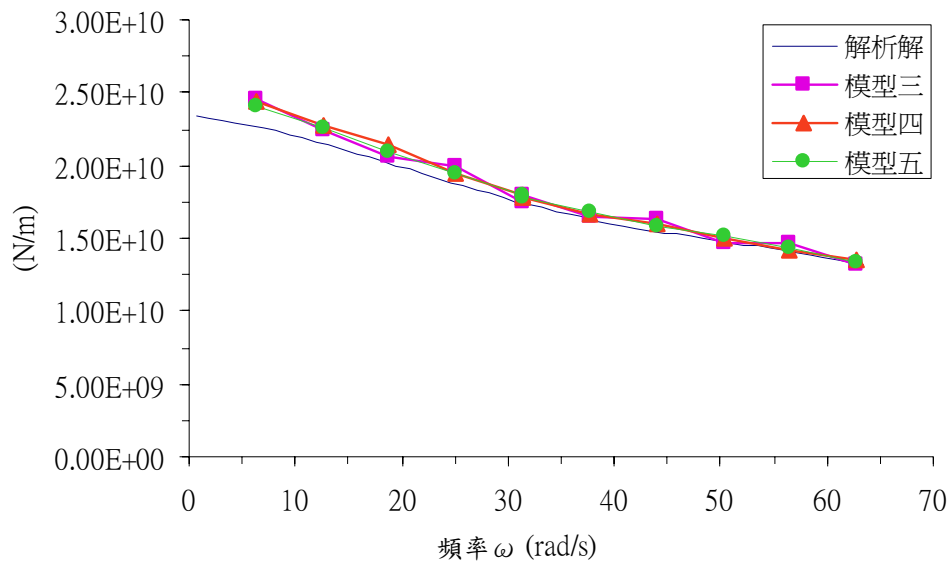


圖 2-32 實部長向平移自由度收斂性分析

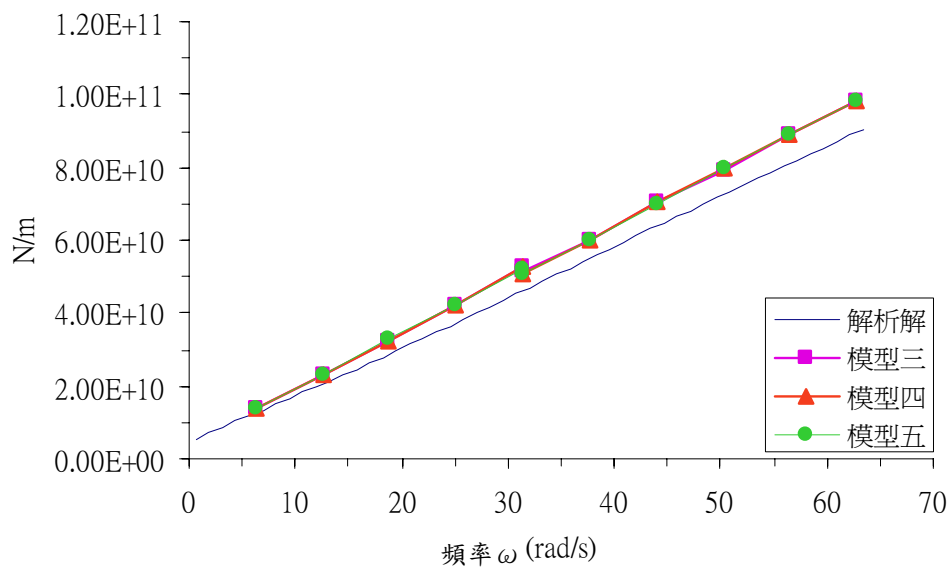


圖 2-33 虛部長向平移自由度收斂性分析

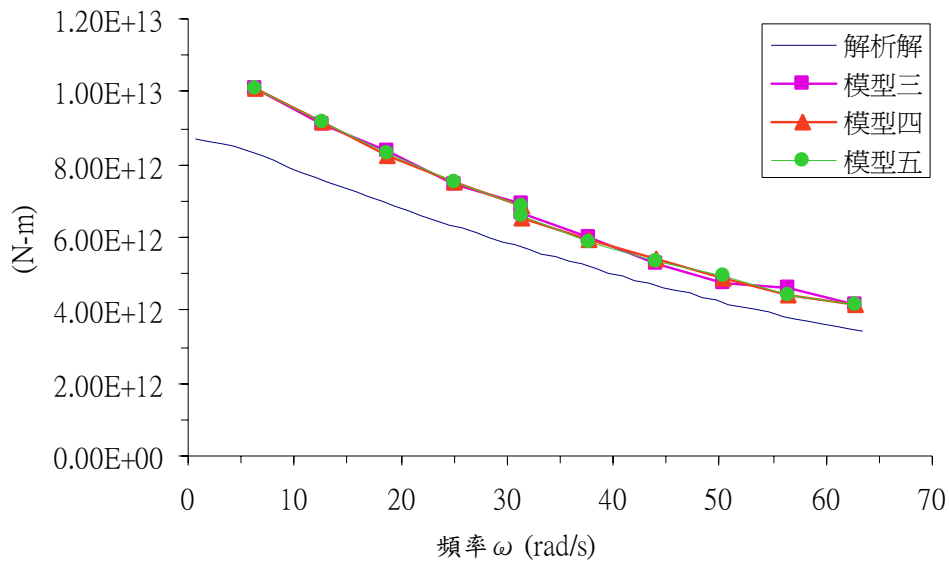


圖 2-34 實部短向翻轉自由度收斂性分析

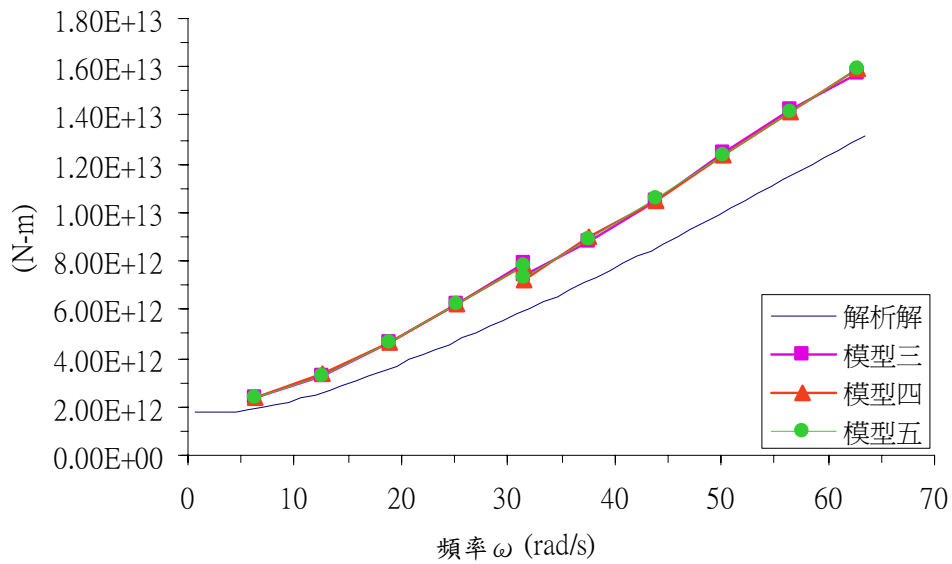


圖 2-35 虛部短向翻轉自由度收斂性分析

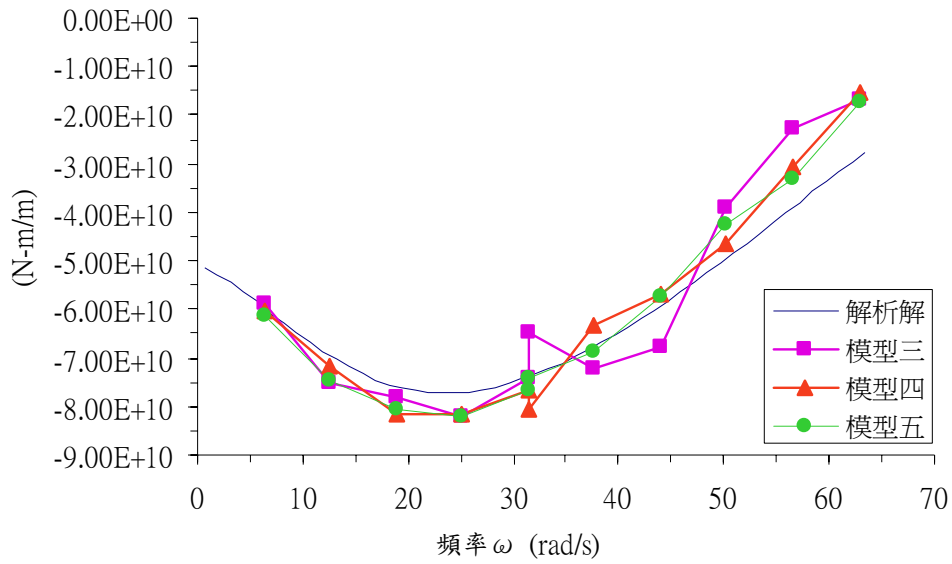


圖 2-36 實部短向耦合自由度收斂性分析

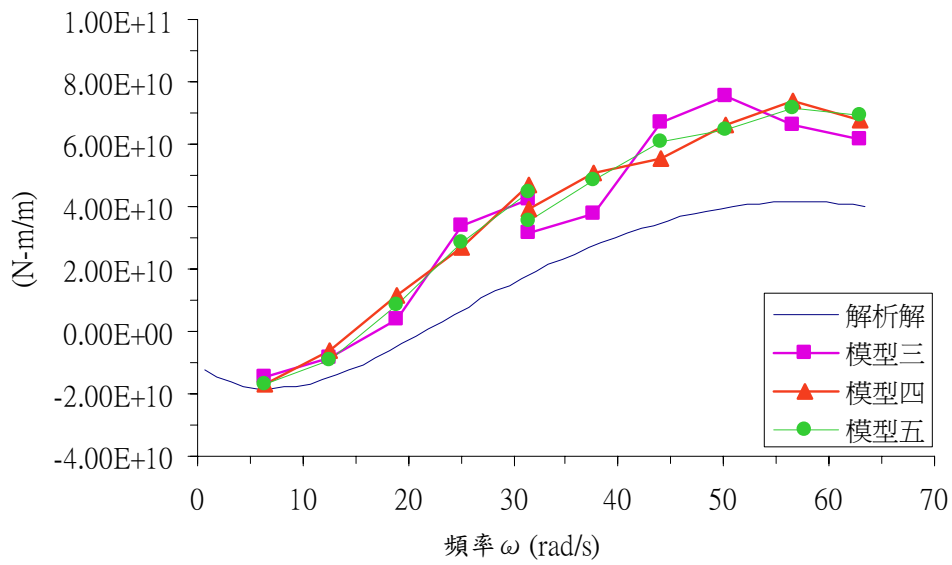


圖 2-37 虛部短向耦合自由度收斂性分析

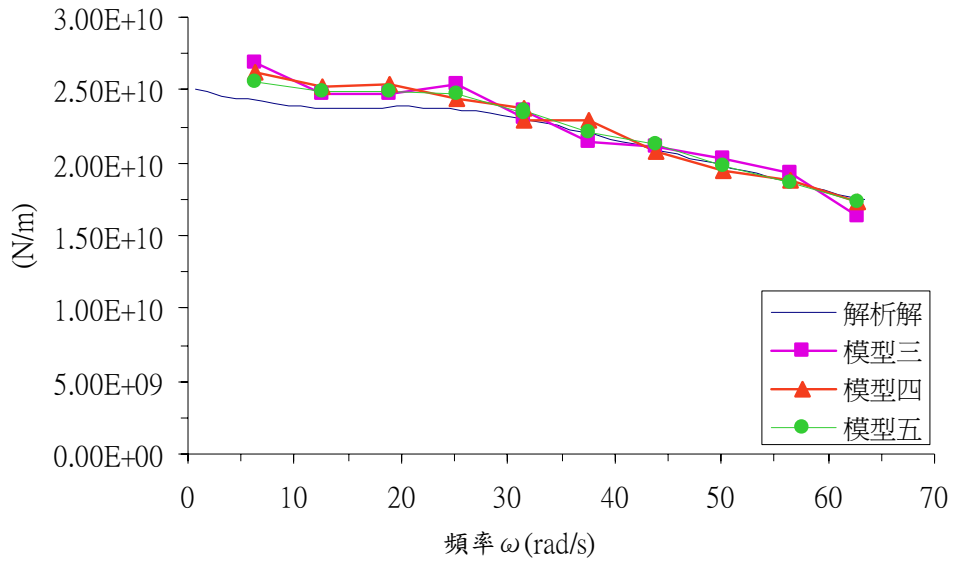


圖 2-38 實部短向平移自由度收斂性分析

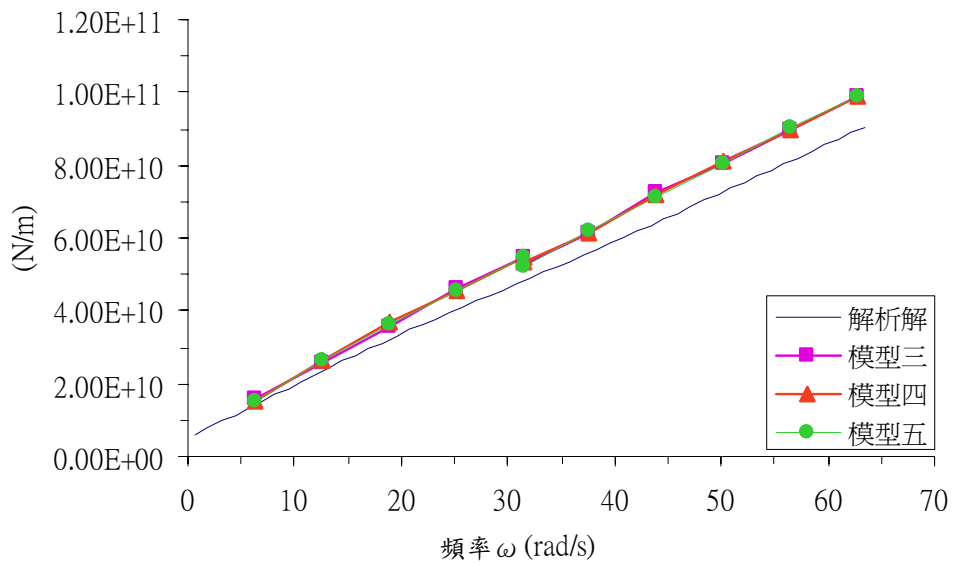


圖 2-39 虛部短向平移自由度收斂性分析

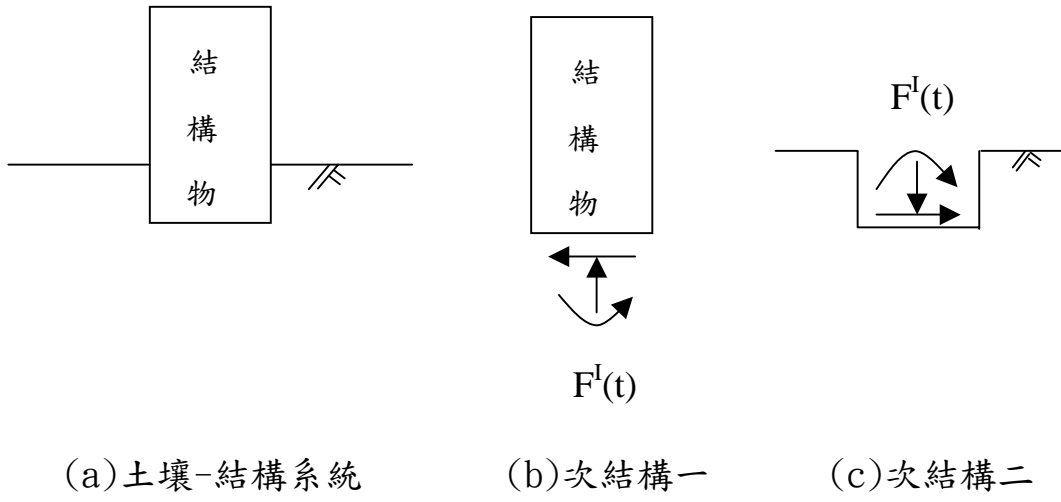


圖 3-1 土壤-結構系統示意圖

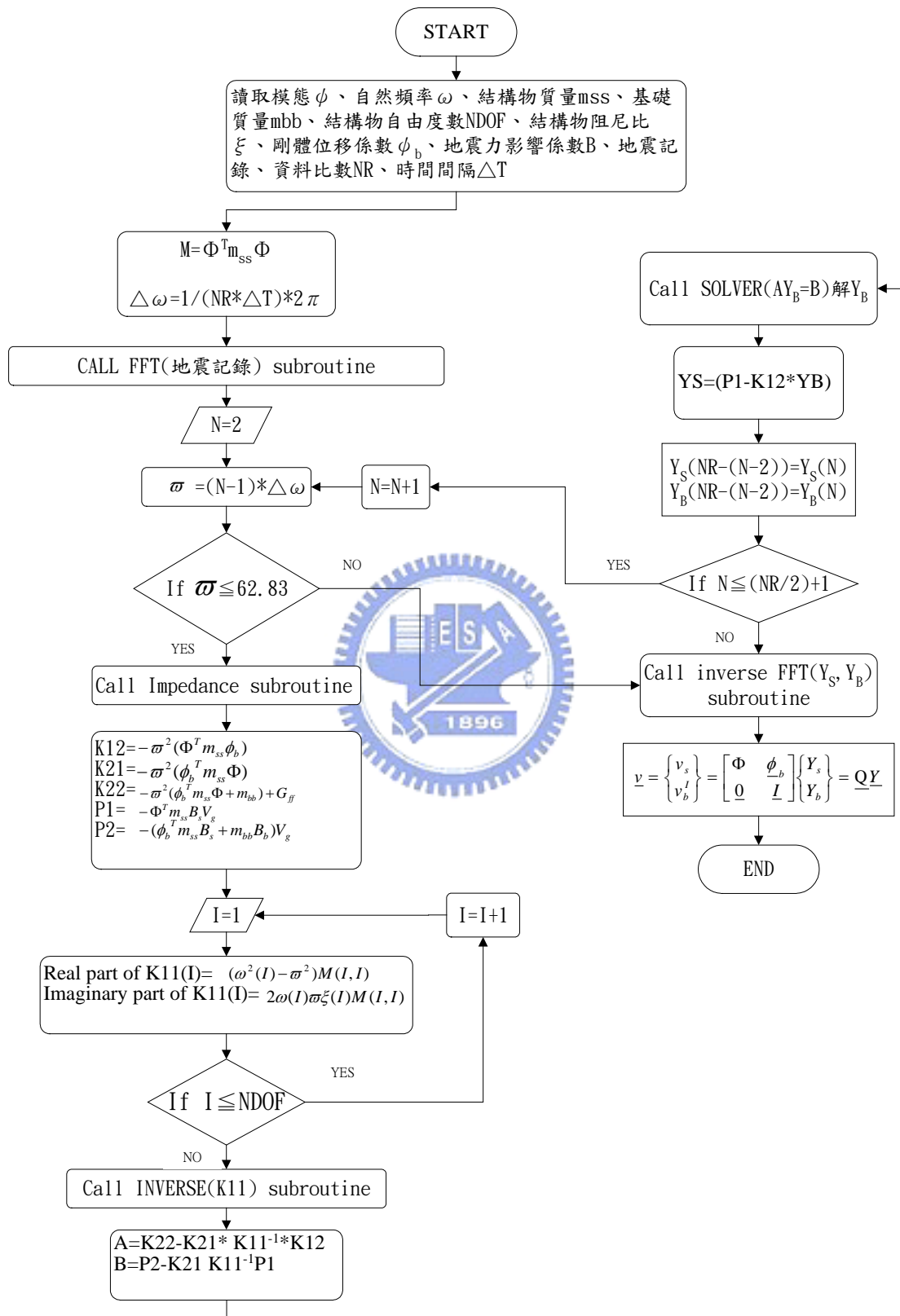


圖 4-1 程式流程圖

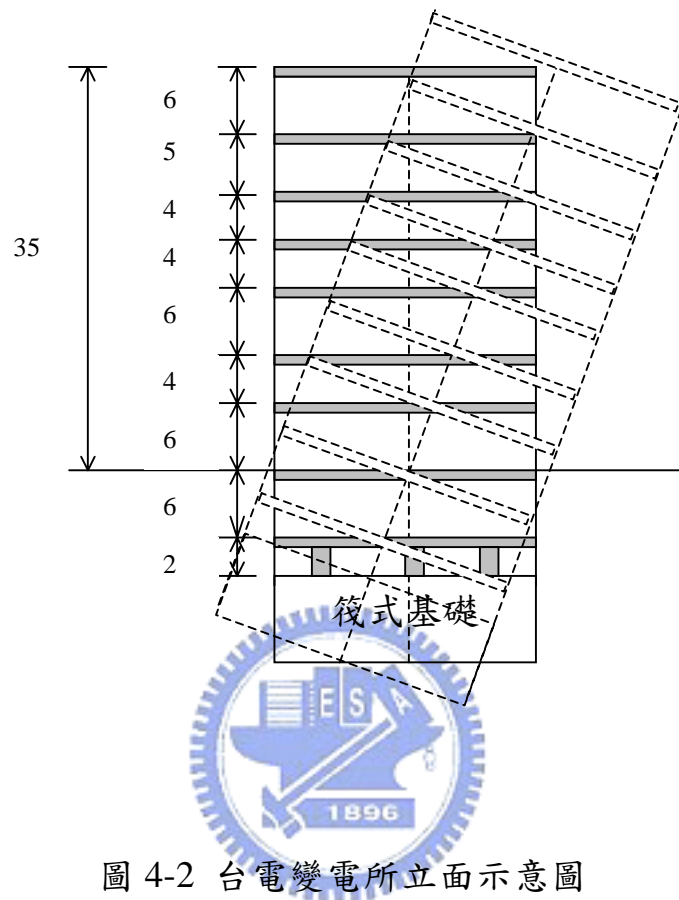
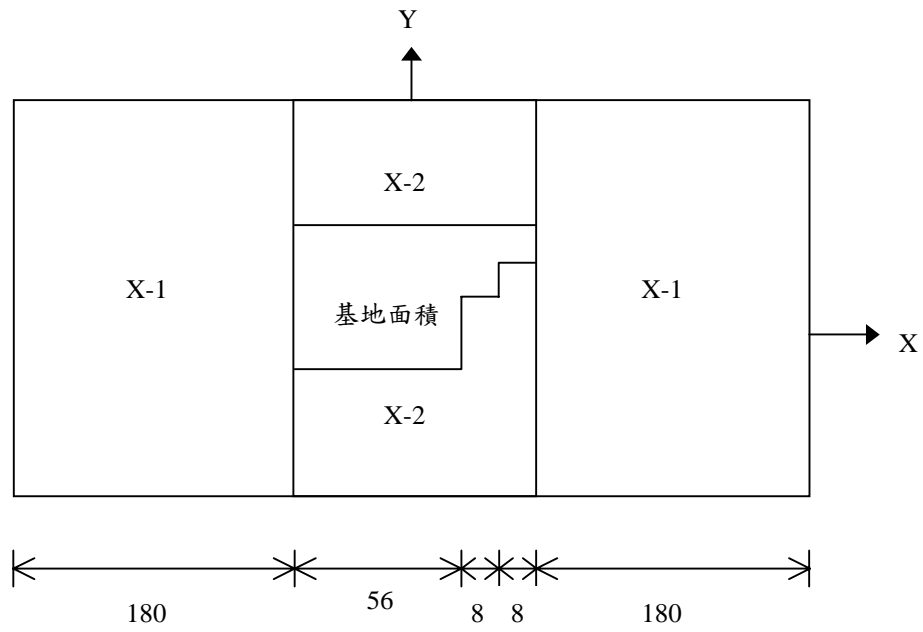
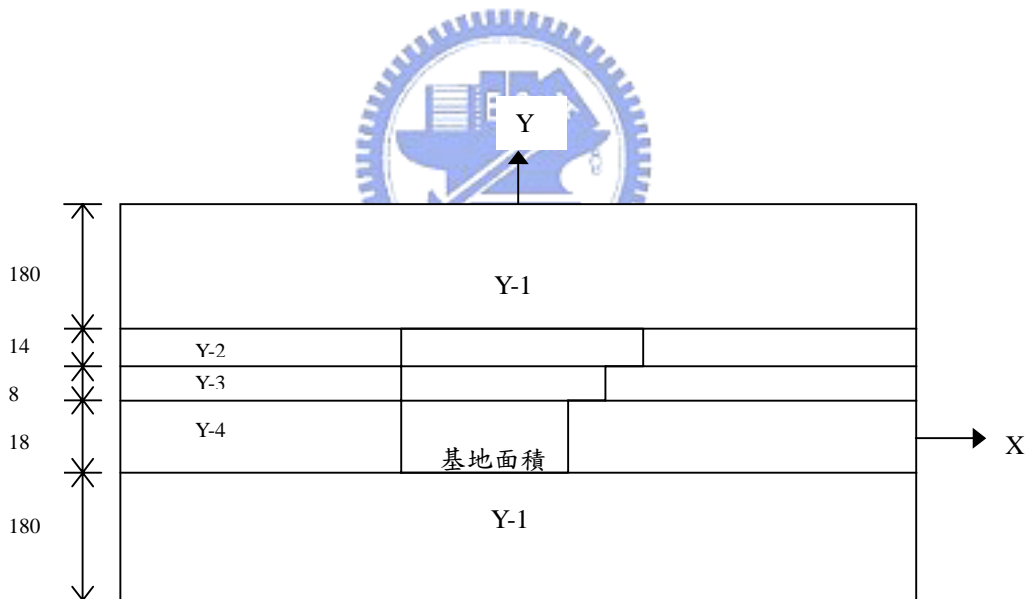


圖 4-2 台電變電所立面示意圖





(a) X 方向



(b) Y 方向

圖 4-3 低頻(1-5Hz)分析模型元素切割示意圖

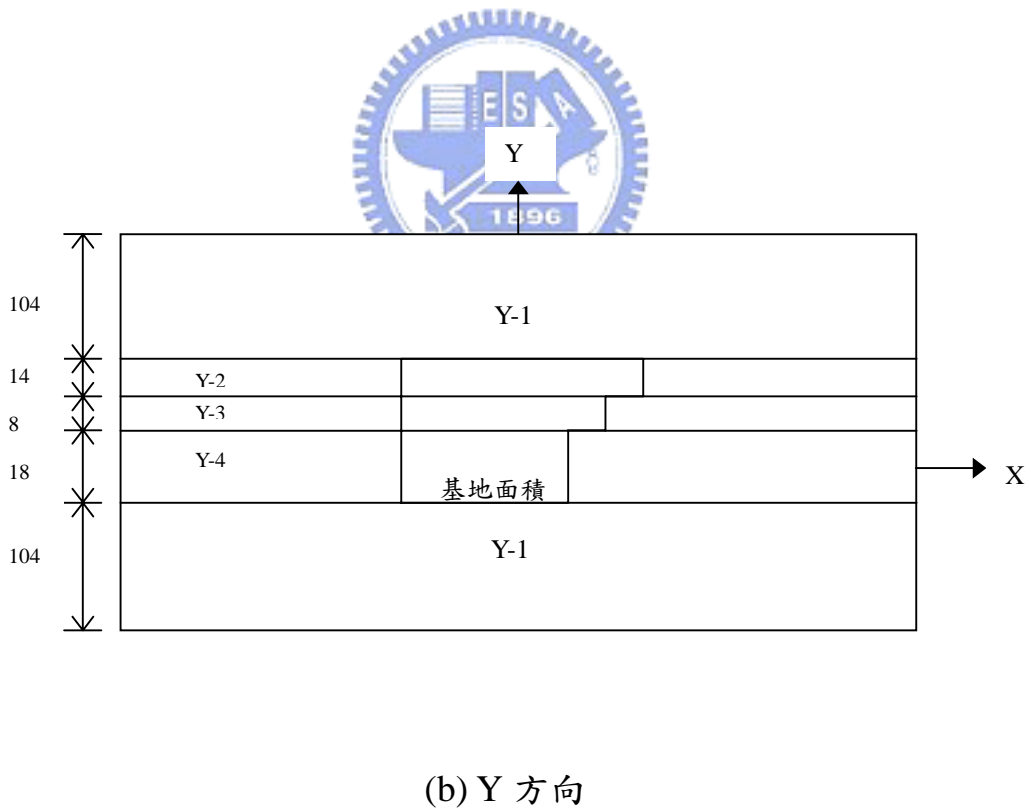
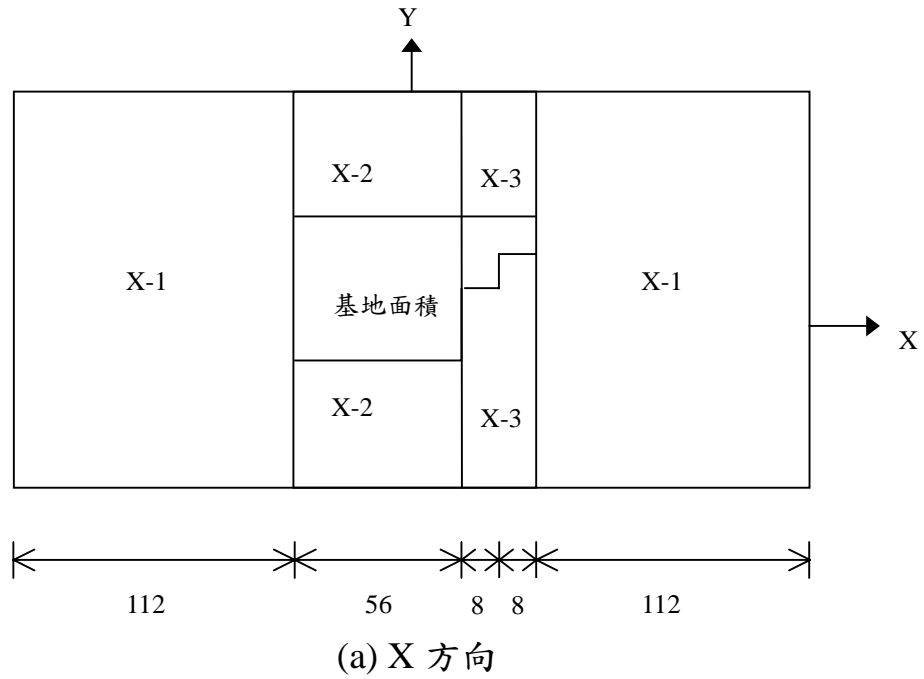


圖 4-4 高頻(5-10Hz)分析模型元素切割示意圖

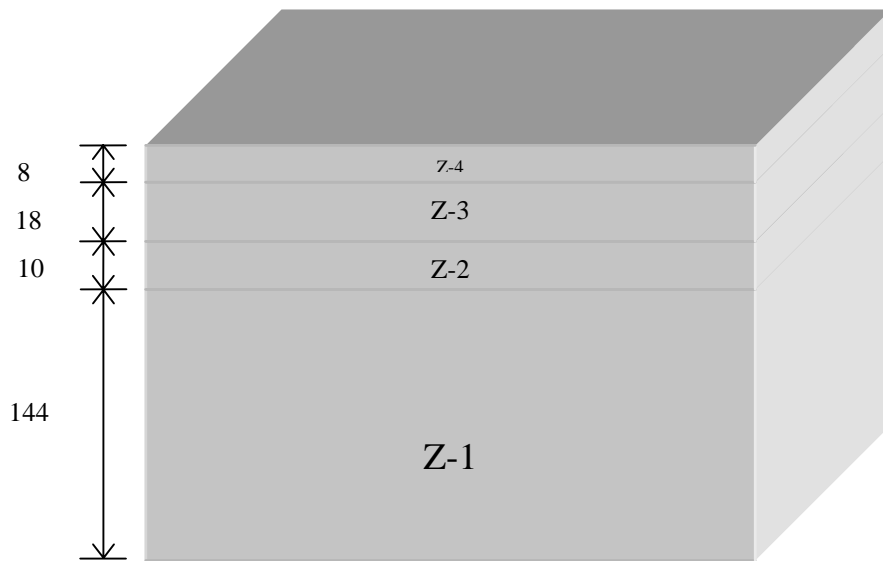


圖 4-5 低頻(1-5Hz)深度方向元素切割示意圖

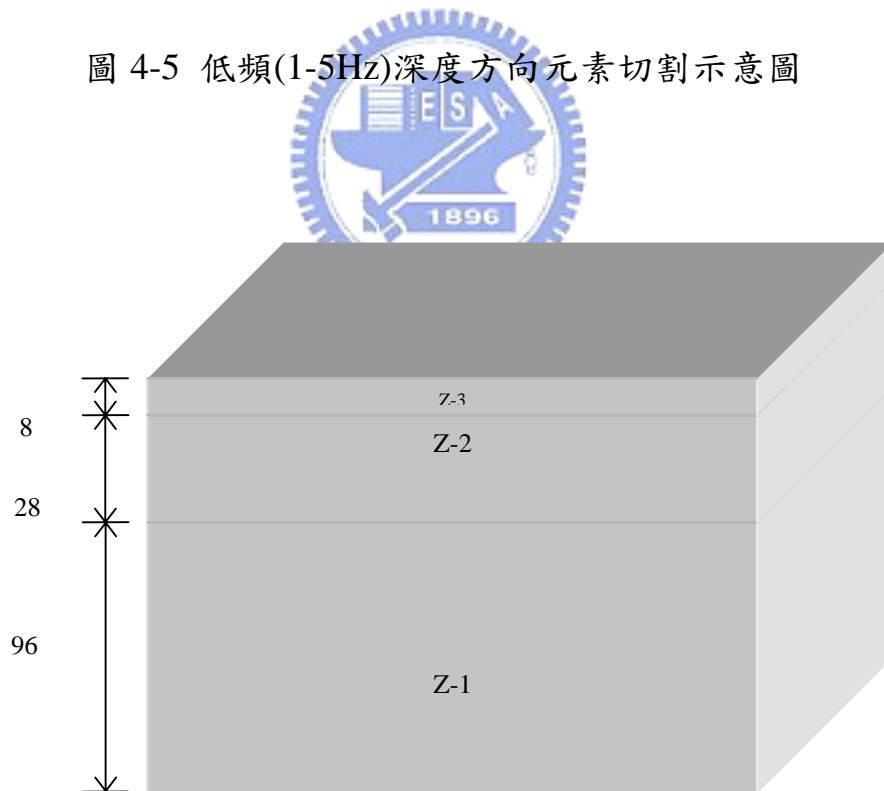


圖 4-6 高頻(5-10Hz)深度方向元素切割示意圖

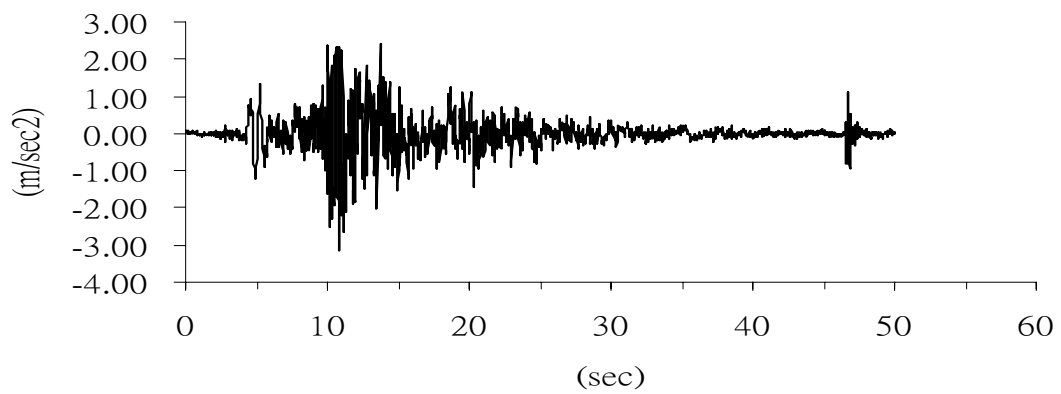


圖 4-7 北嶺地震歷時記錄

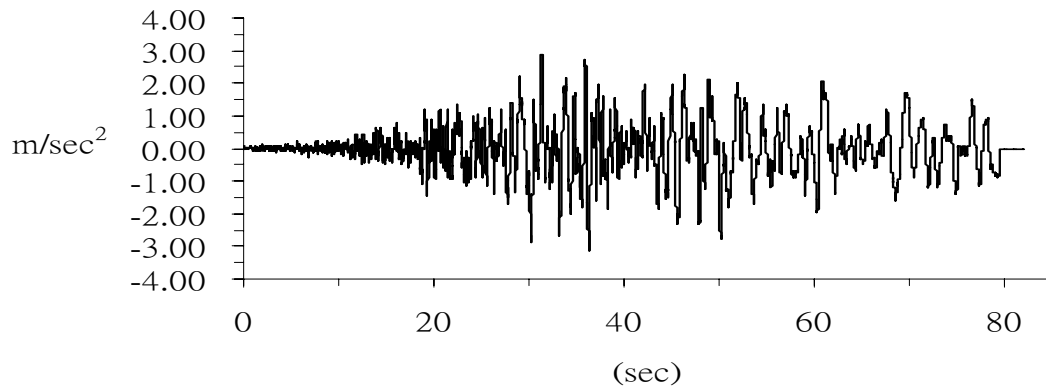


圖 4-8 茄定國小 EW(X 向)地震歷時記錄

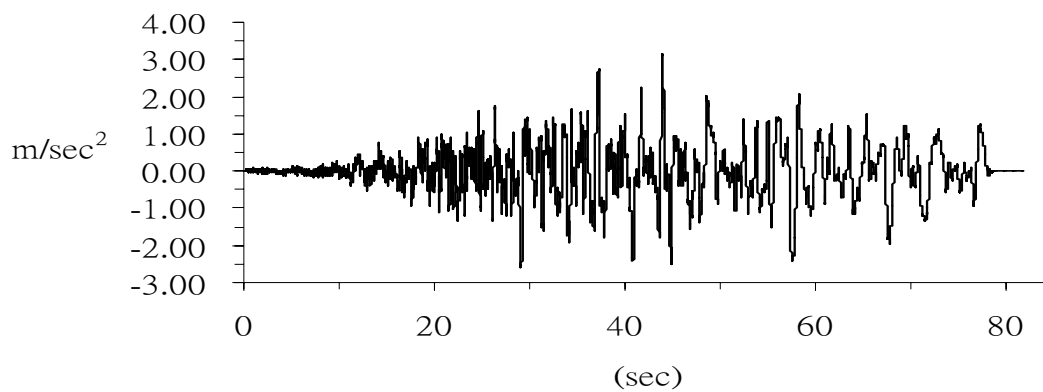


圖 4-9 茄定國小 NS(Y 向)地震歷時記錄

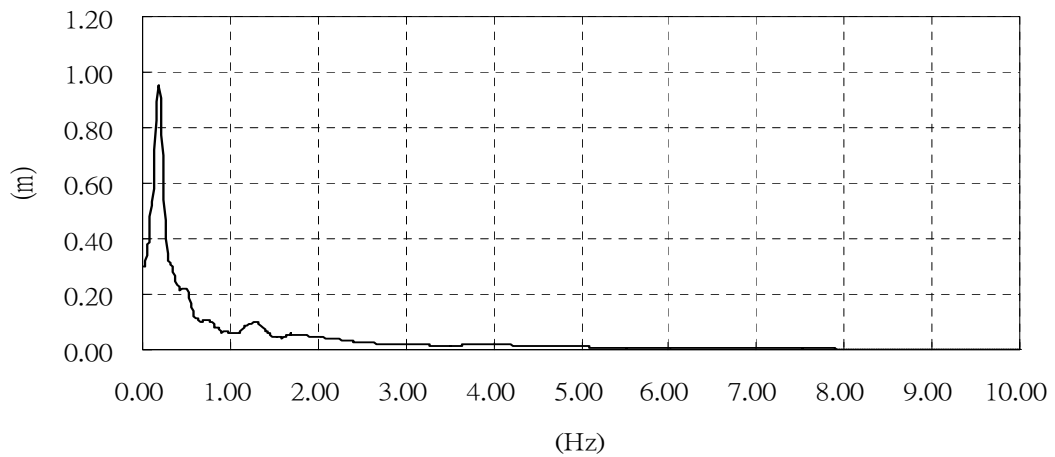
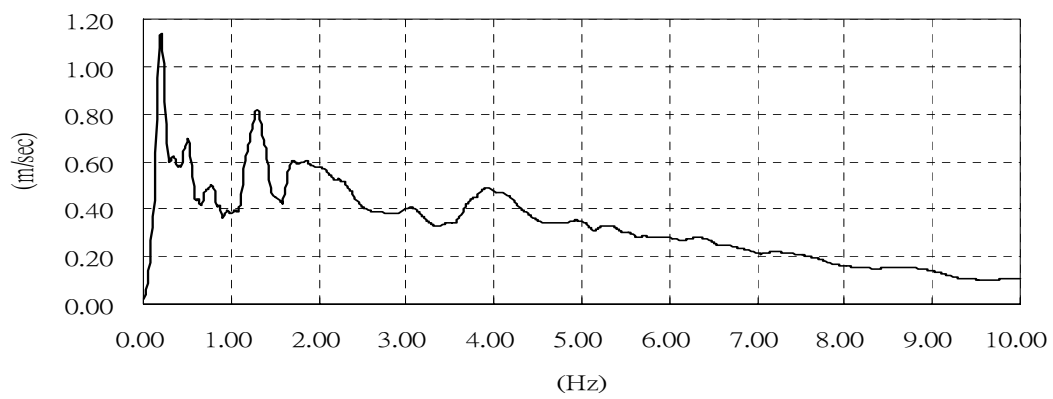
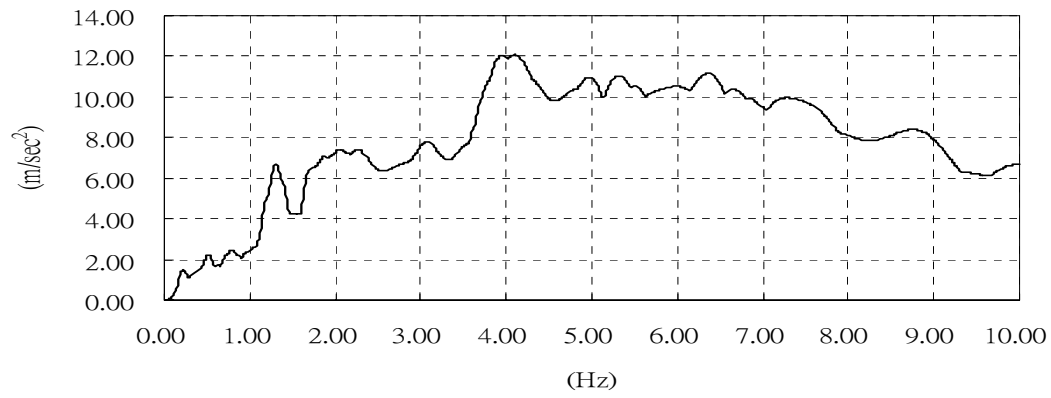
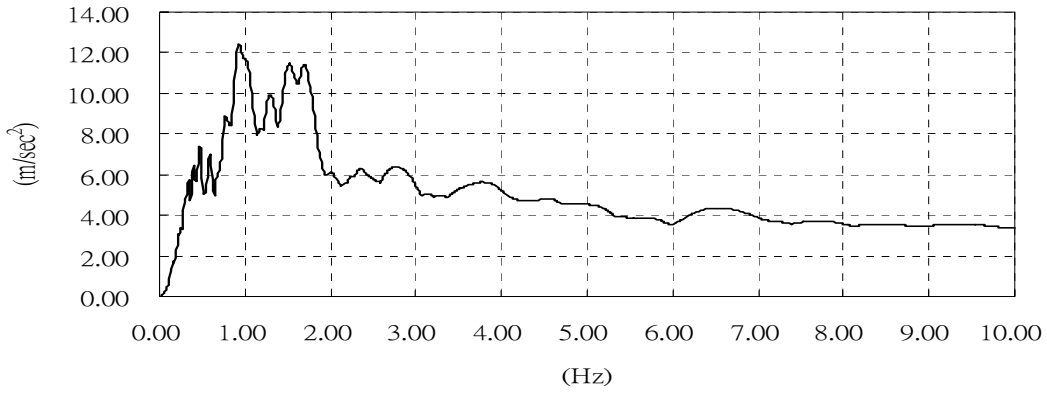
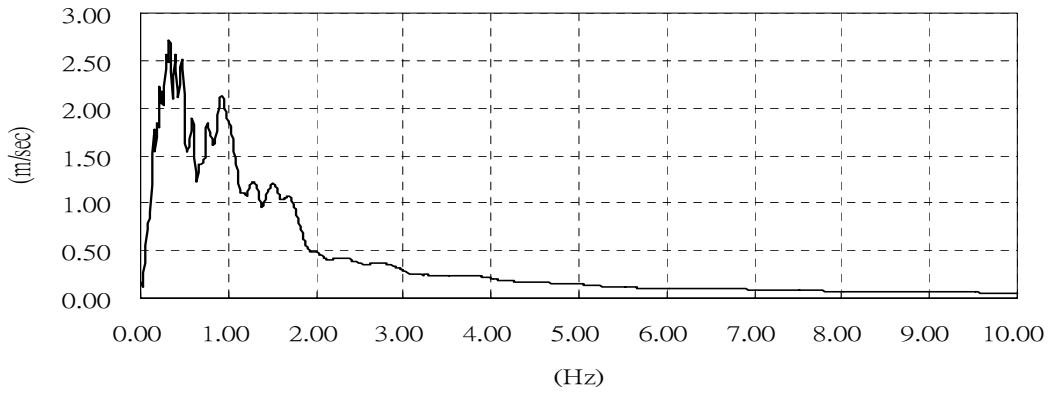


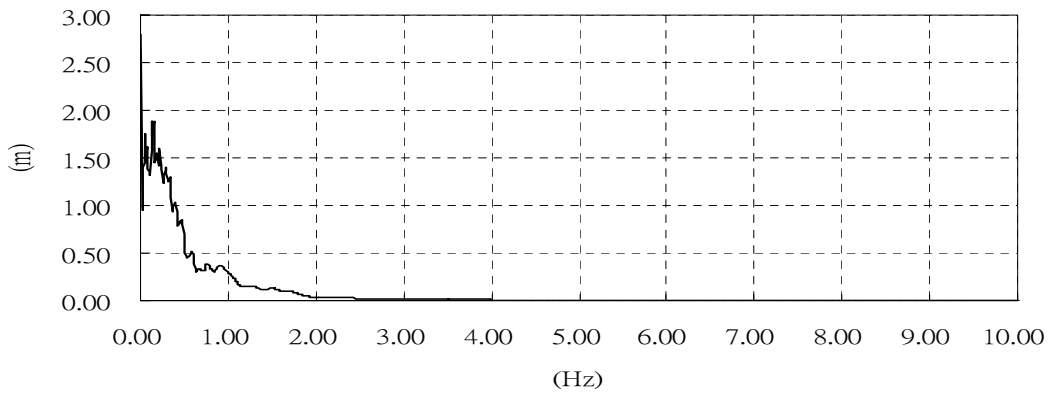
圖 4-10 北嶺地震反應譜



(a) 加速度反應譜

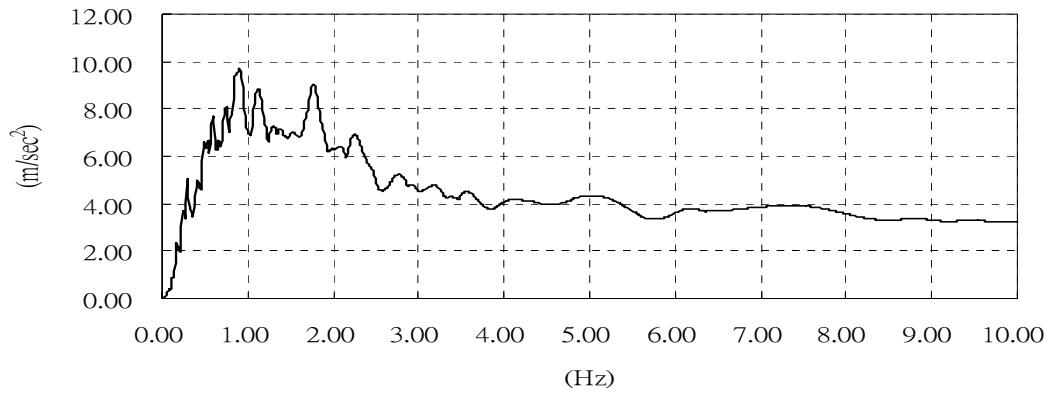


(b) 速度反應譜

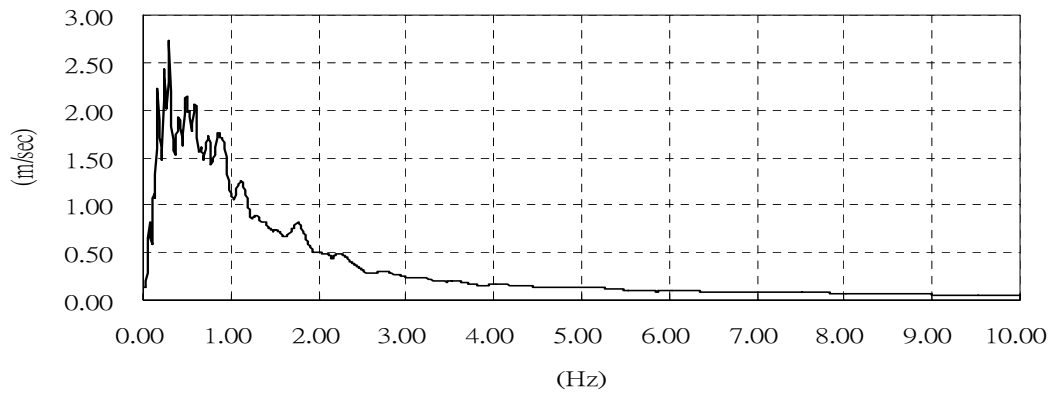


(c) 位移反應譜

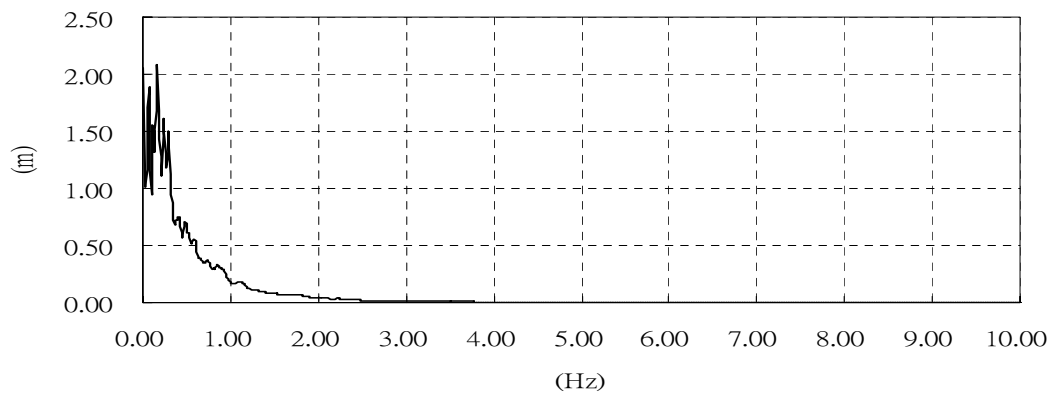
圖 4-11 茄定國小東西向(X向)反應譜



(a) 加速度反應譜



(b) 速度反應譜



(c) 位移反應譜

圖 4-12 茄定國小南北向(Y 向)反應譜

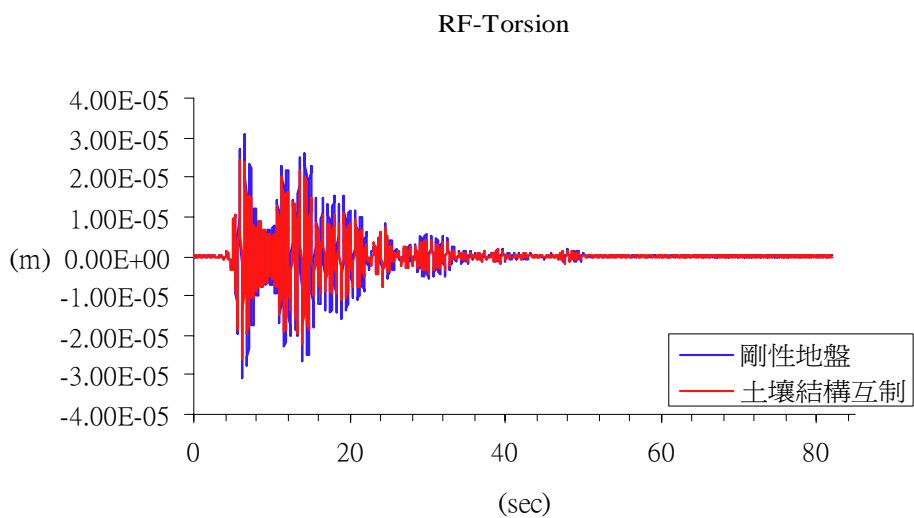
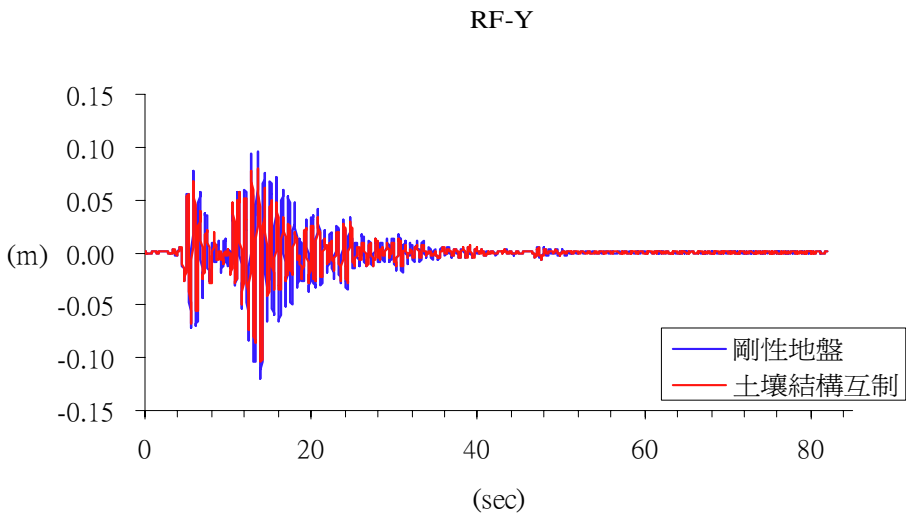
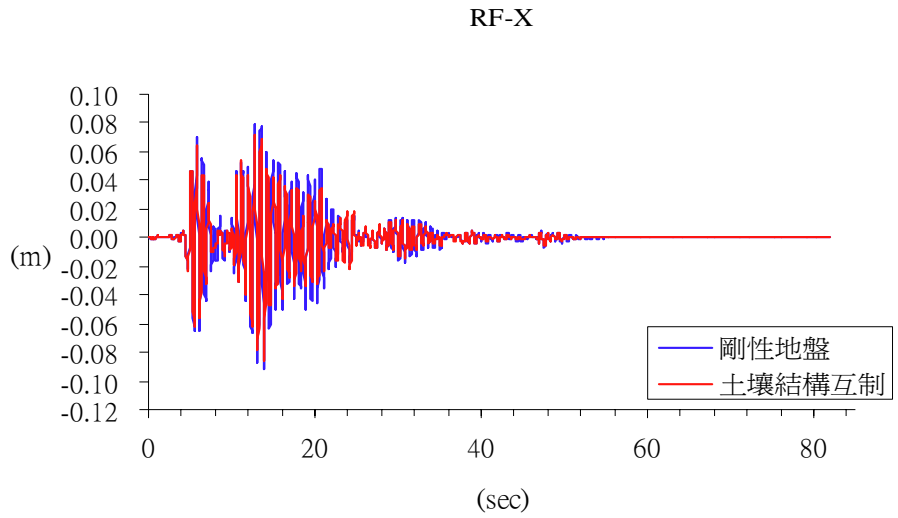


圖 4-13(a) 屋頂層剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)



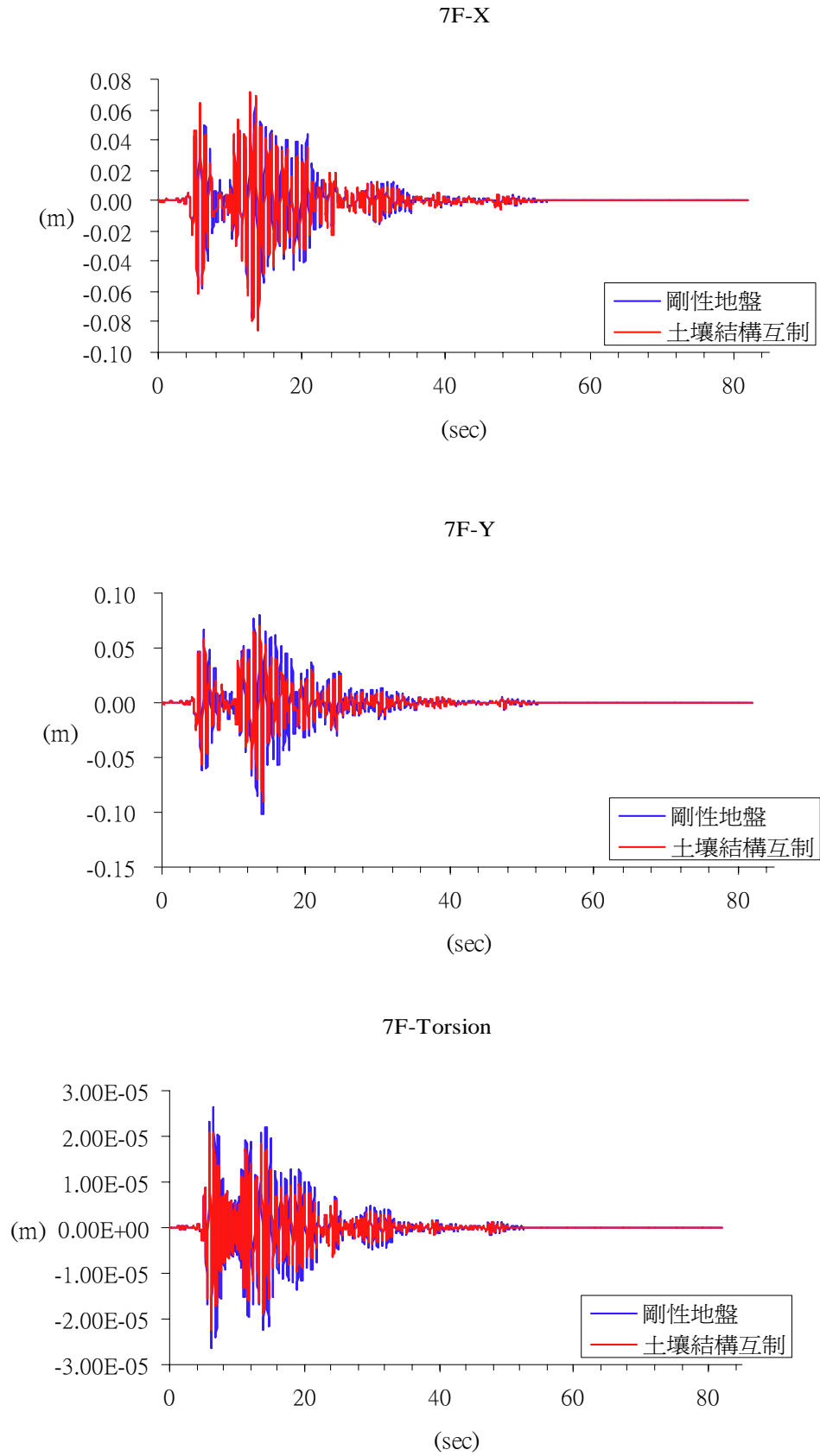


圖 4-13(b) 七樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)

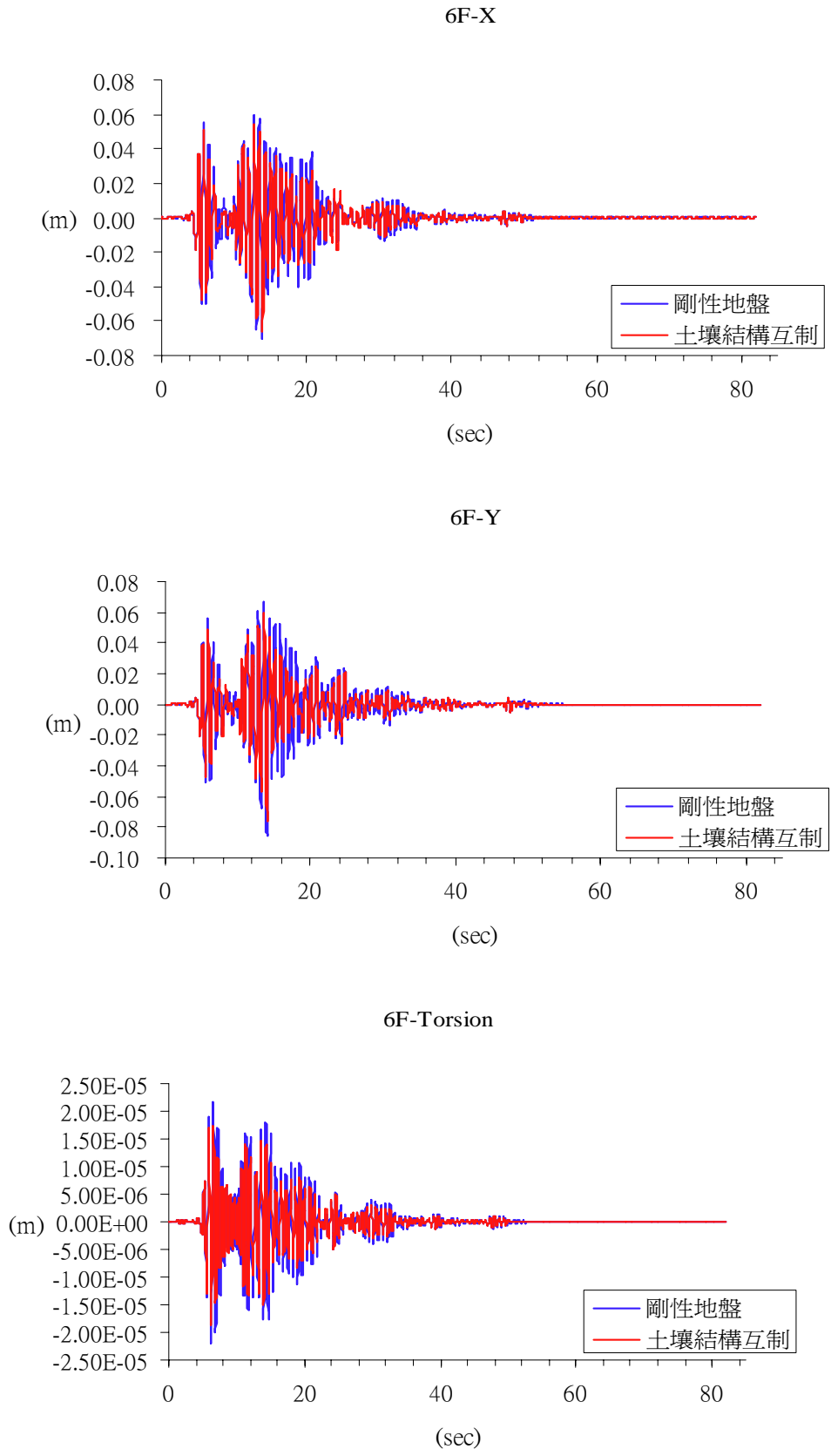


圖 4-13(c) 六樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)

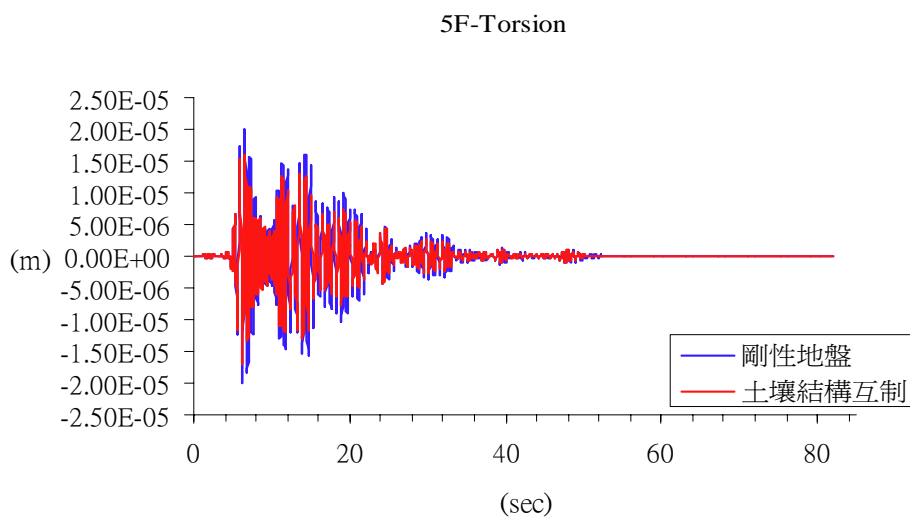
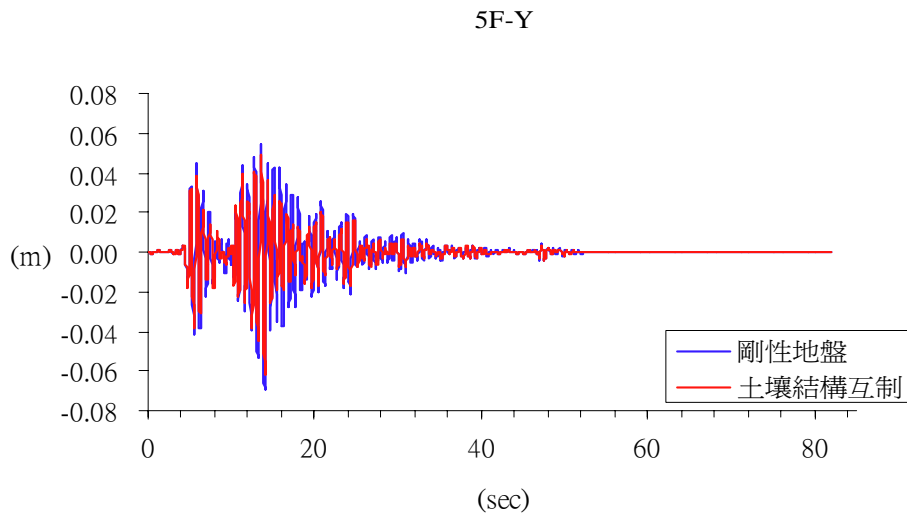
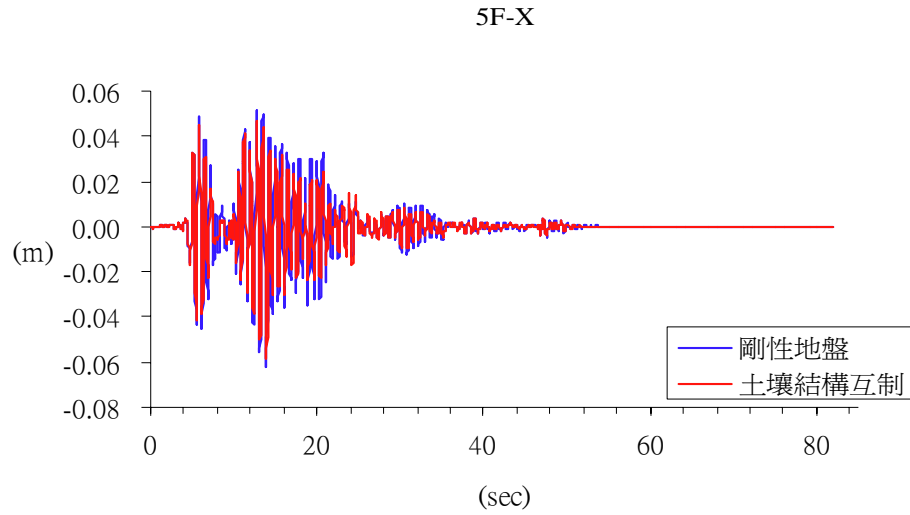


圖 4-13(d) 五樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)

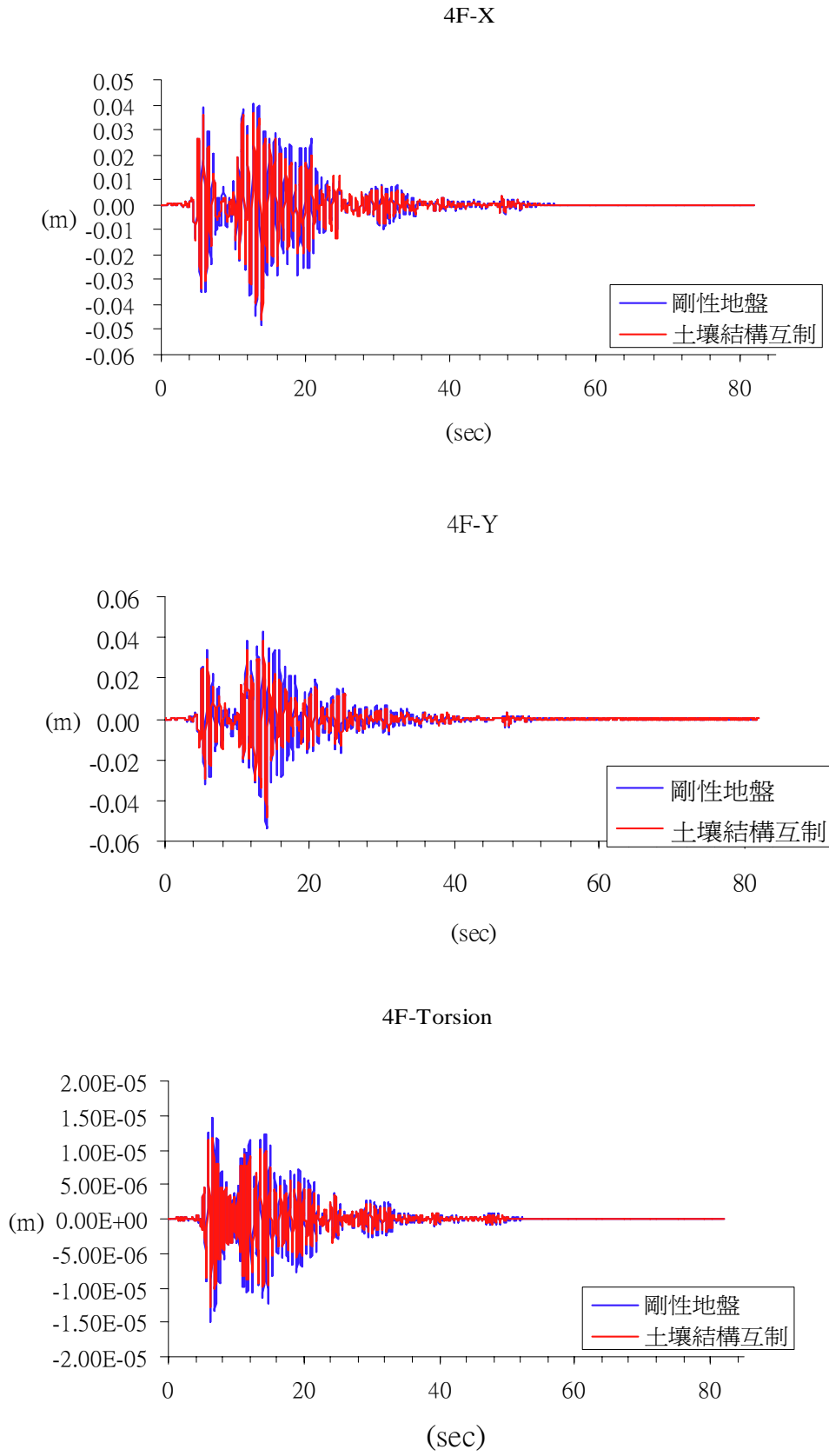


圖 4-13(e) 四樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)

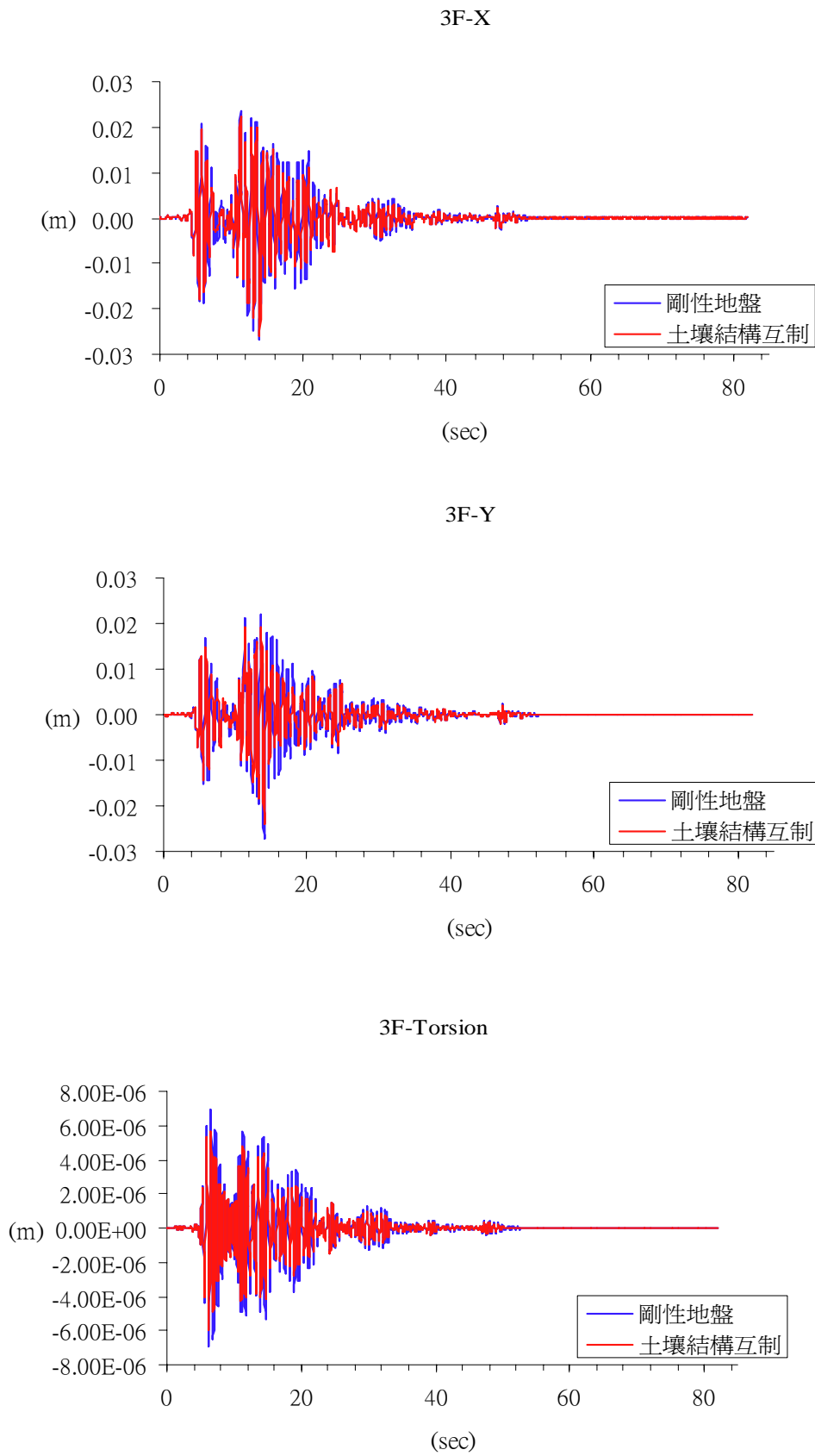


圖 4-13(f) 三樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)

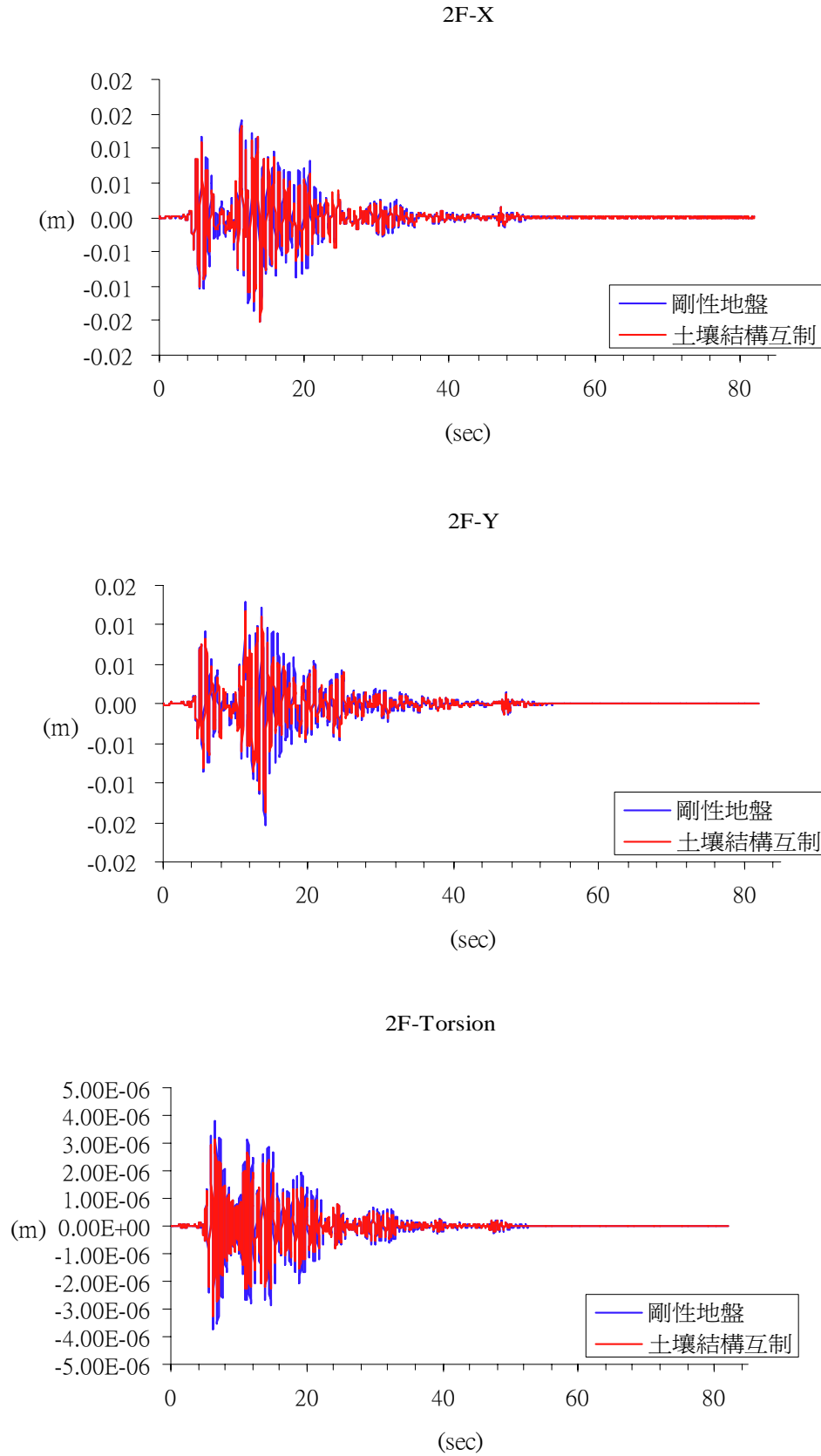
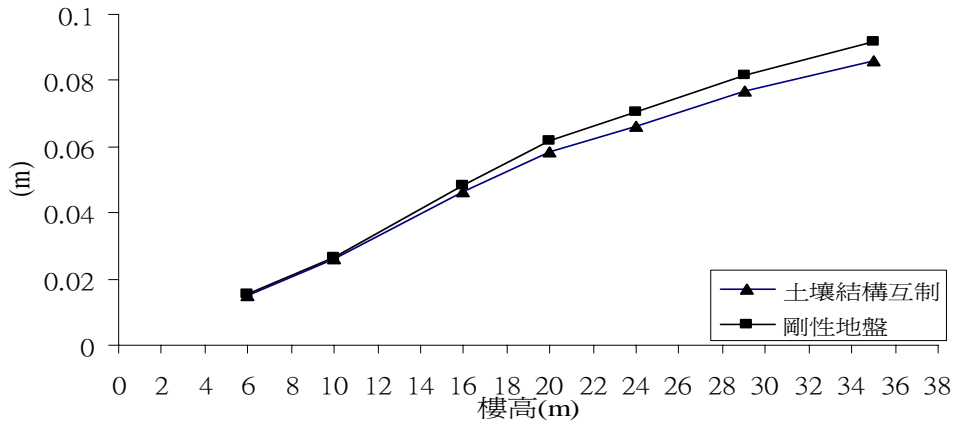
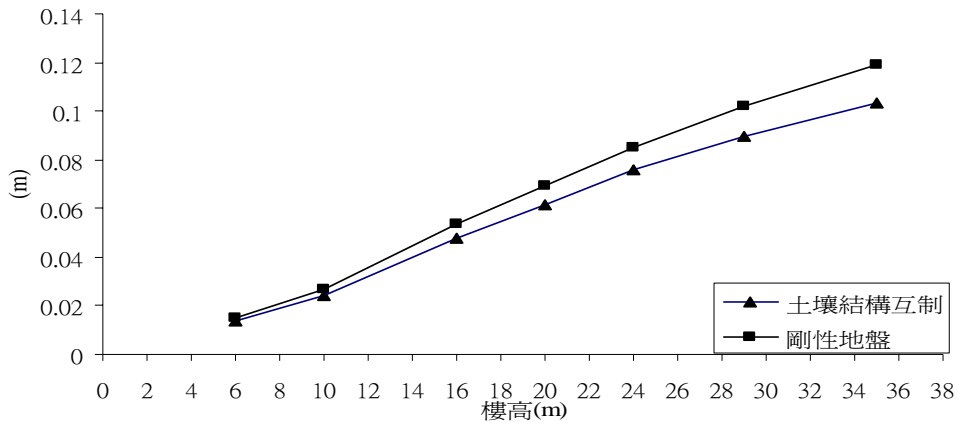


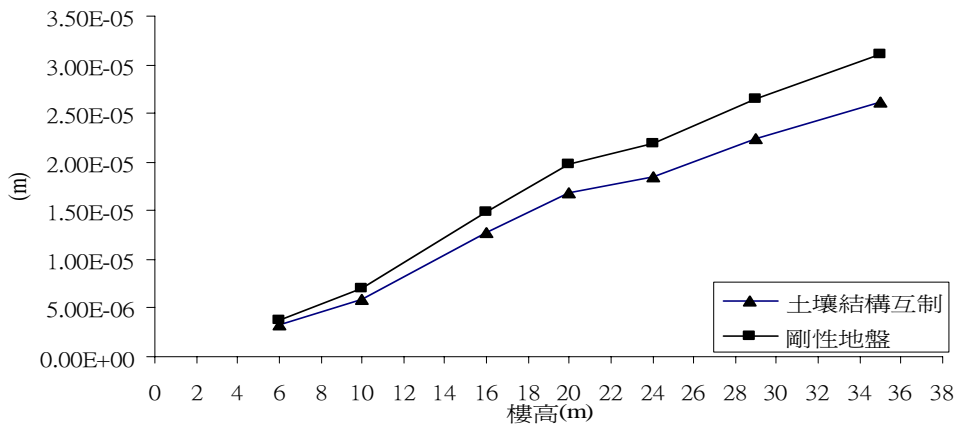
圖 4-13(g) 二樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(北嶺地震)



(a) X 向最大位移



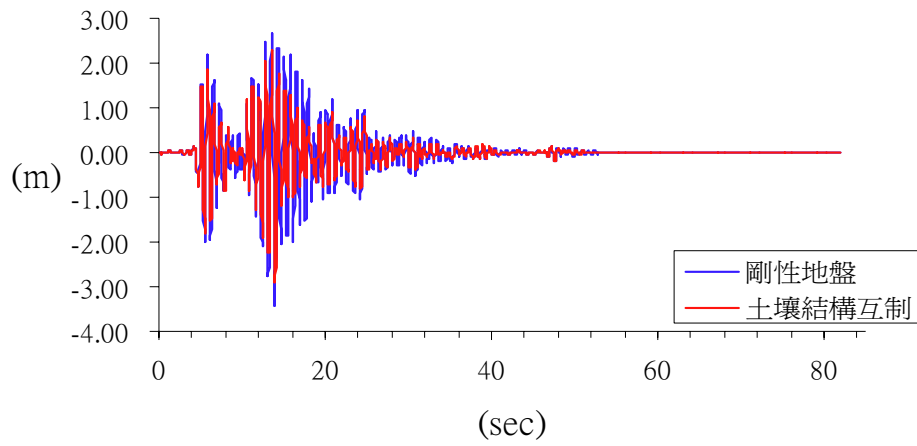
(b) Y 向最大位移



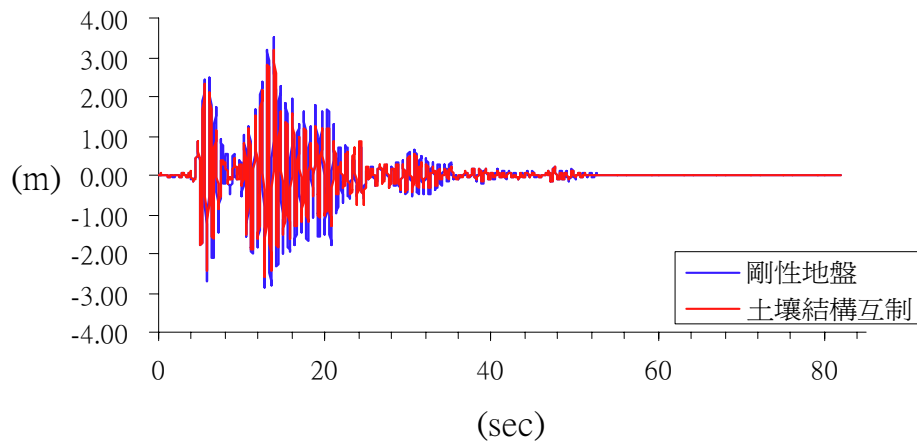
(c) Z 向(Torsion)最大位移

圖 4-14 各樓層最大位移(北嶺地震)

YS-1



YS-2



YS-3

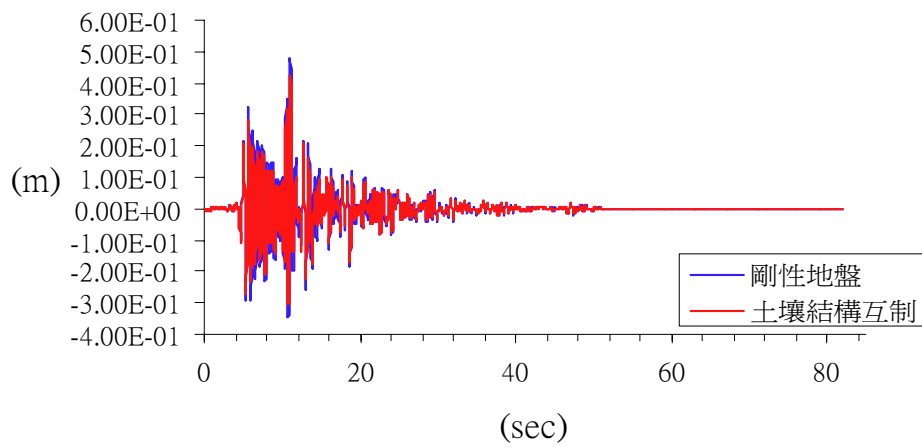
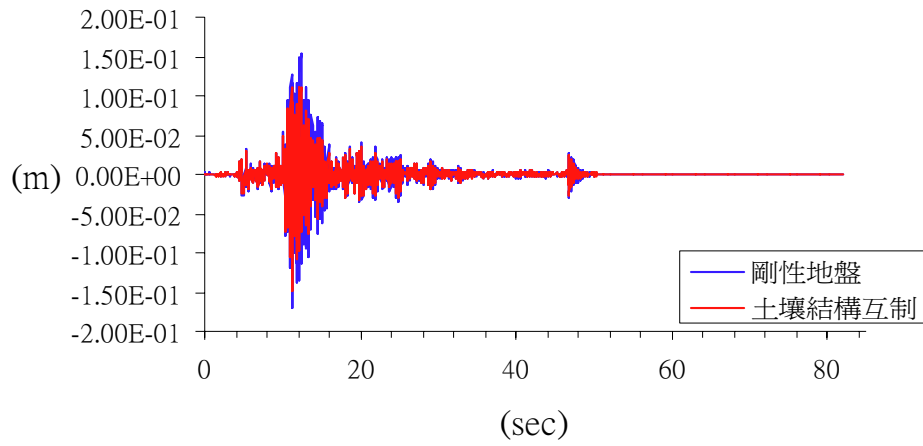


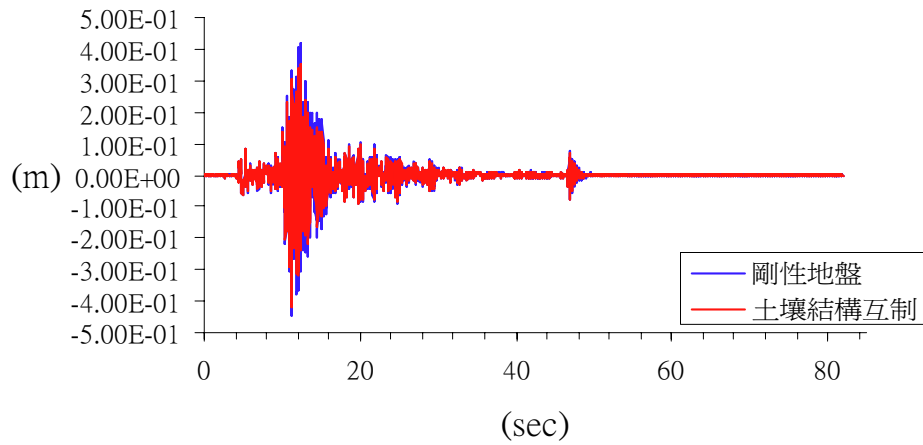
圖 4-15(a) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)



YS-4



YS-5



YS-6

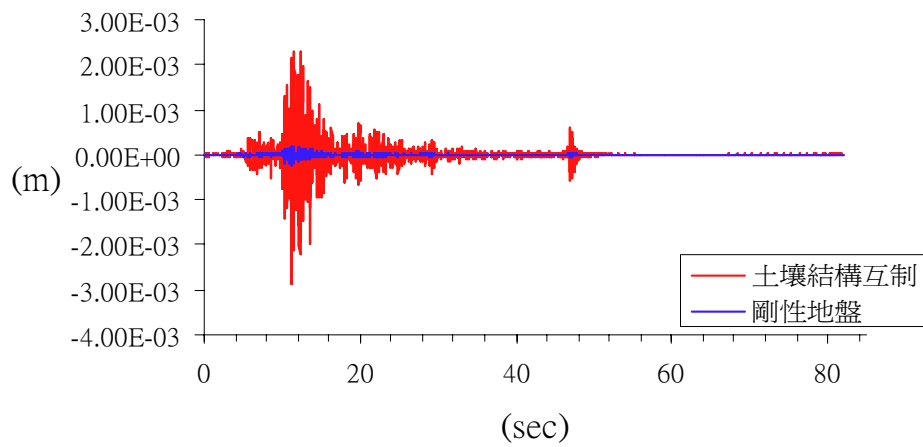
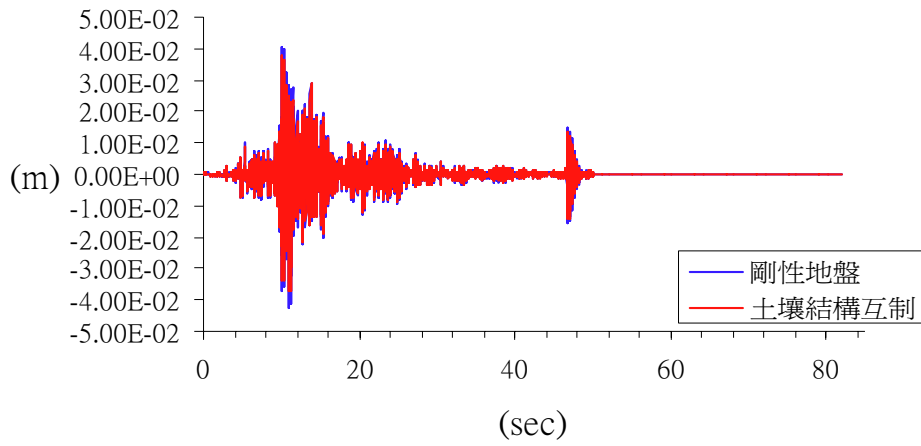
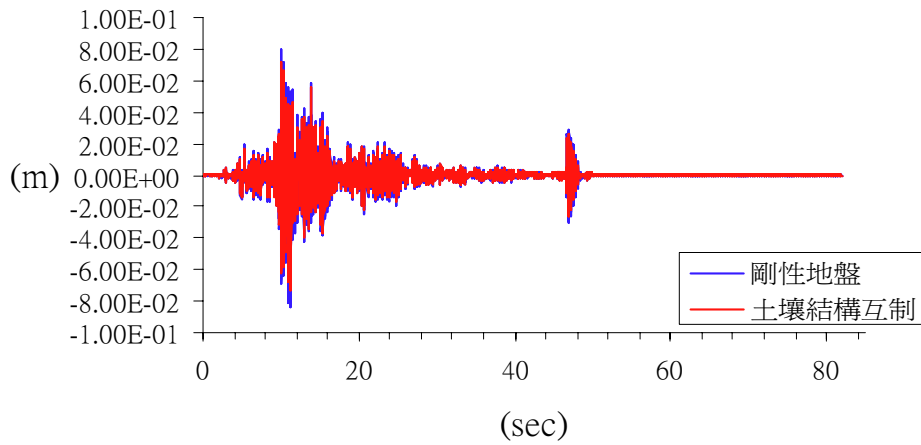


圖 4-15(b) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

YS-7



YS-8



YS-9

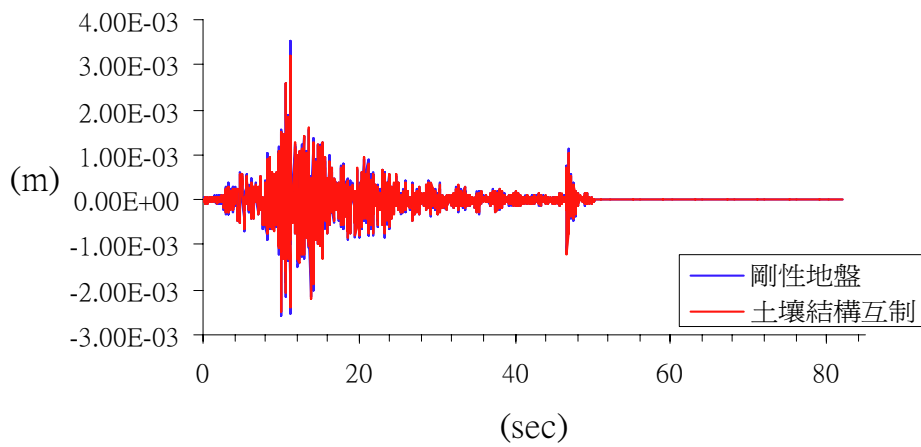
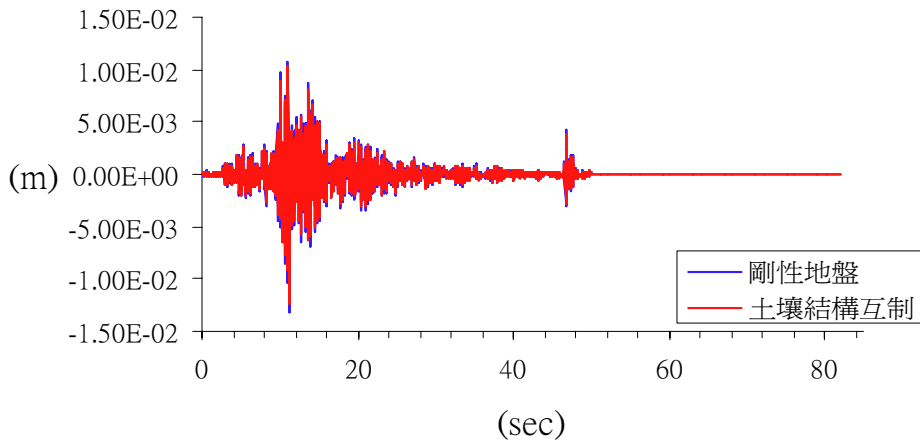
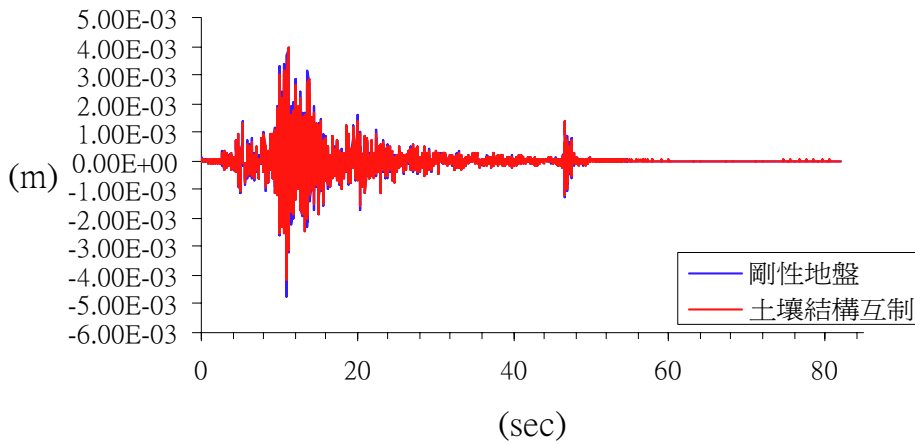


圖 4-15(c) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

YS-10



YS-11



YS-12

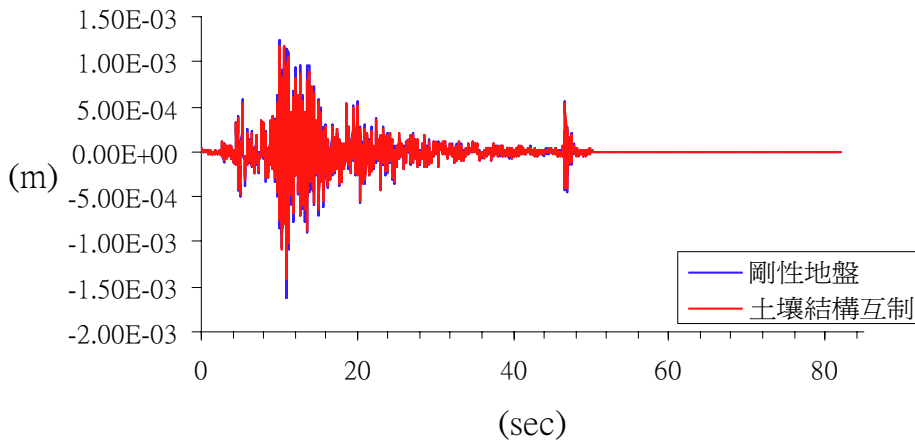
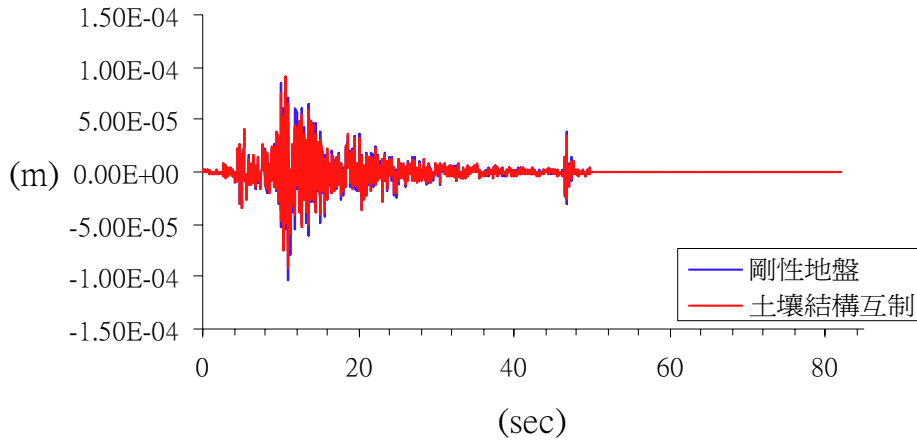
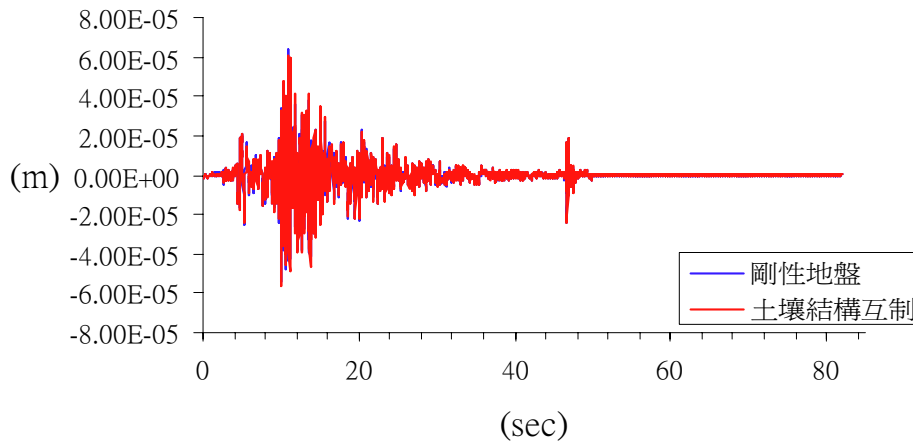


圖 4-15(d) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

YS-13



YS-14



YS-15

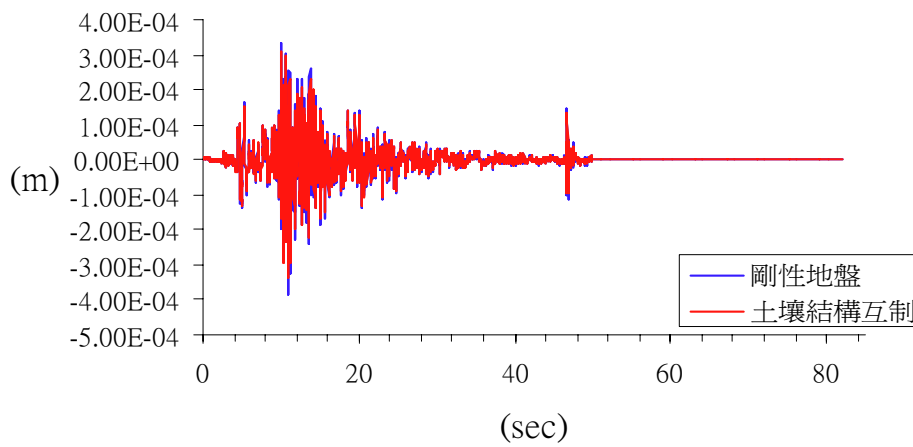
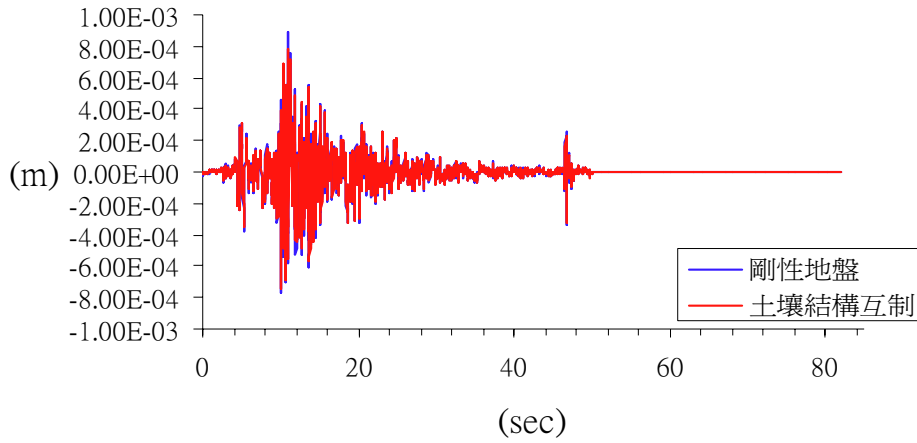
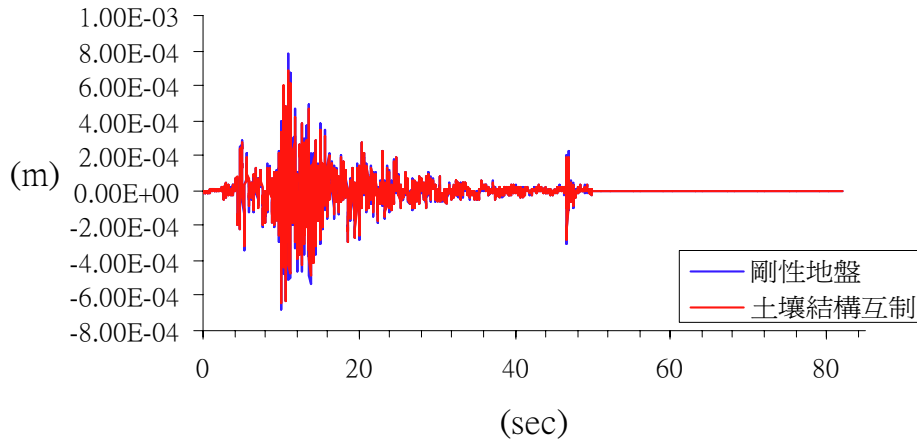


圖 4-15(e) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

YS-16



YS-17



YS-18

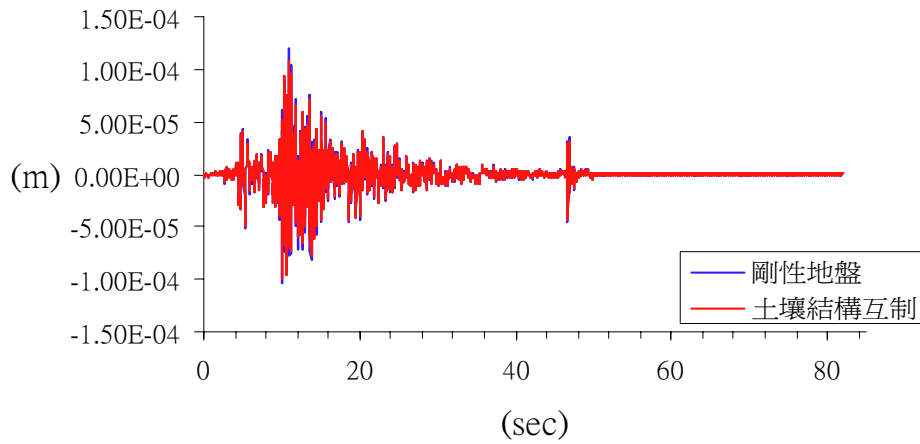
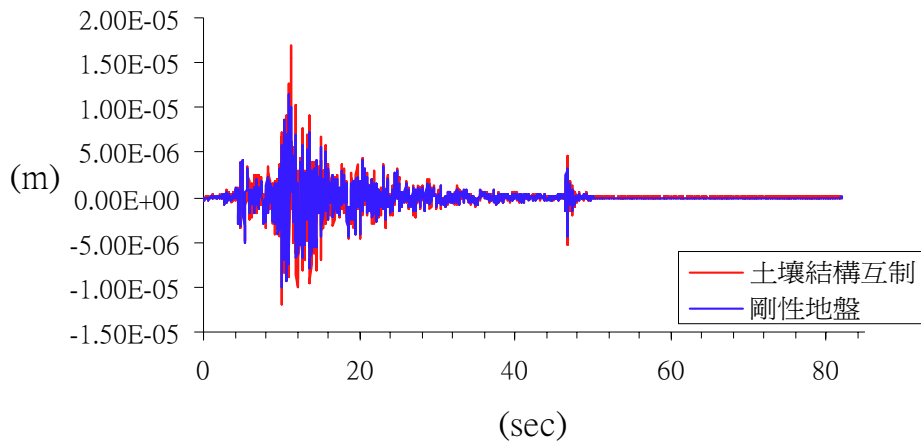
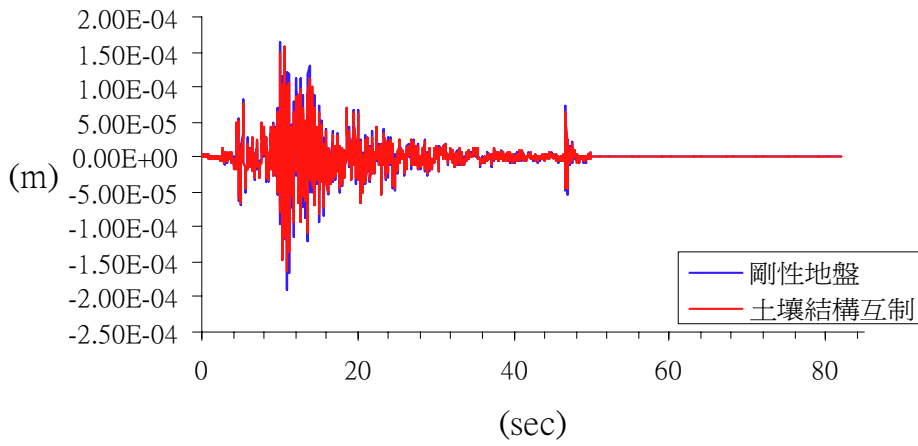


圖 4-15(f) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

YS-19



YS-20



YS-21

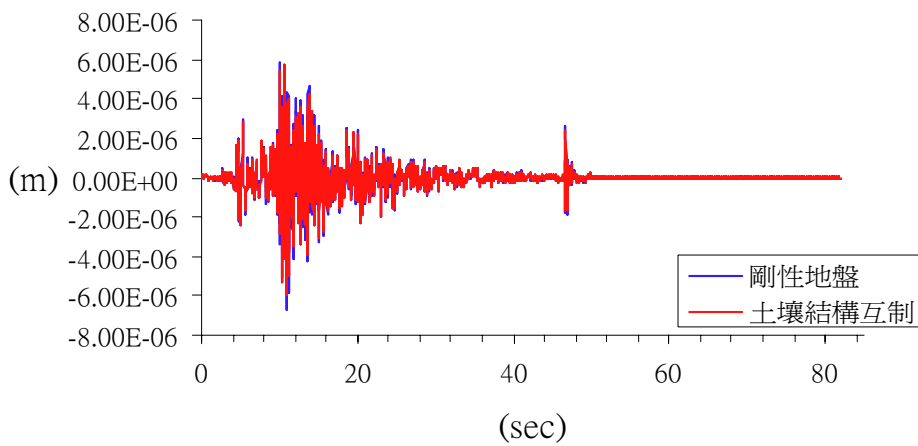


圖 4-15(g) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(北嶺地震)

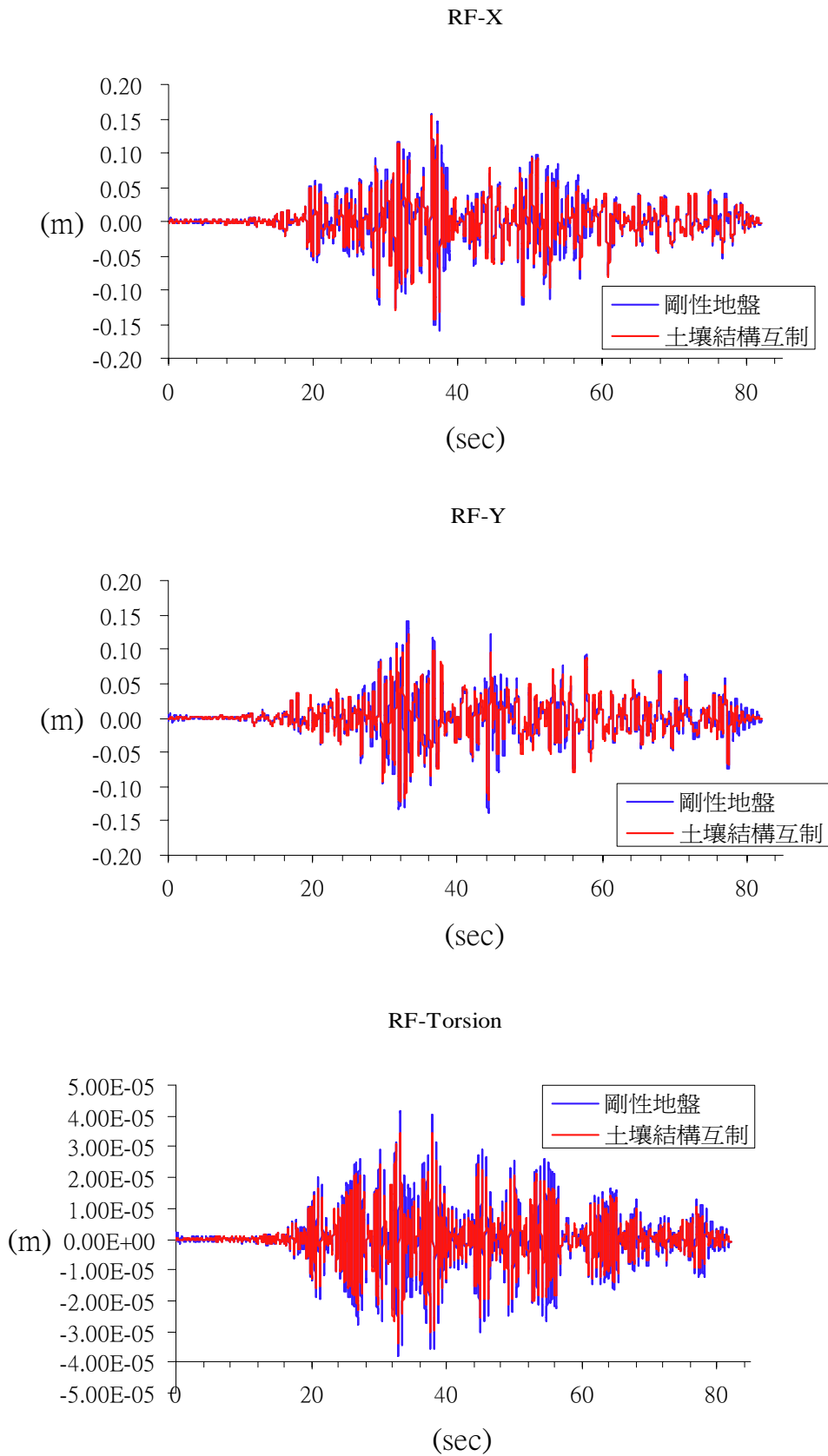


圖 4-16(a) 屋頂層剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)

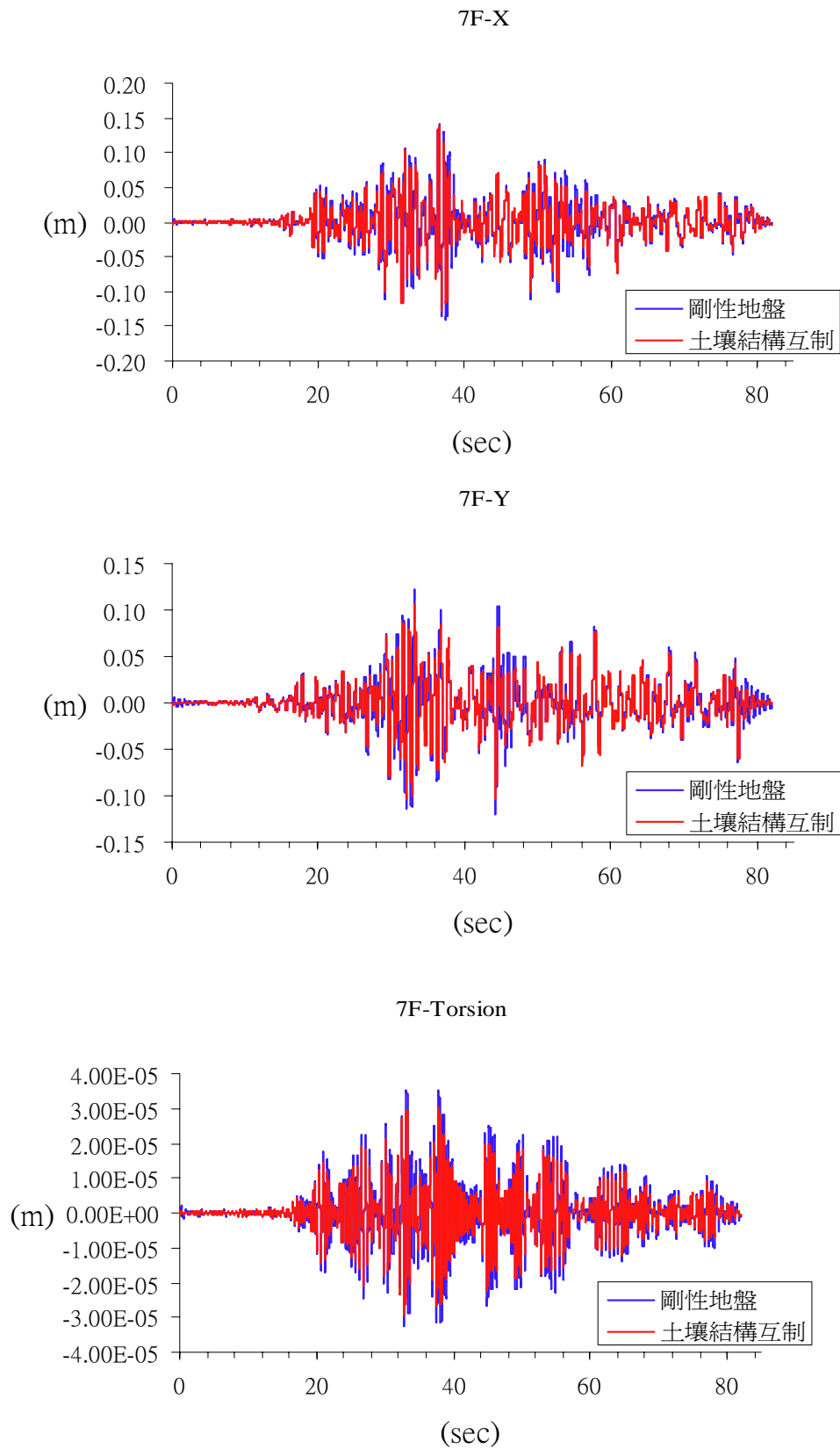


圖 4-16(b) 七樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)



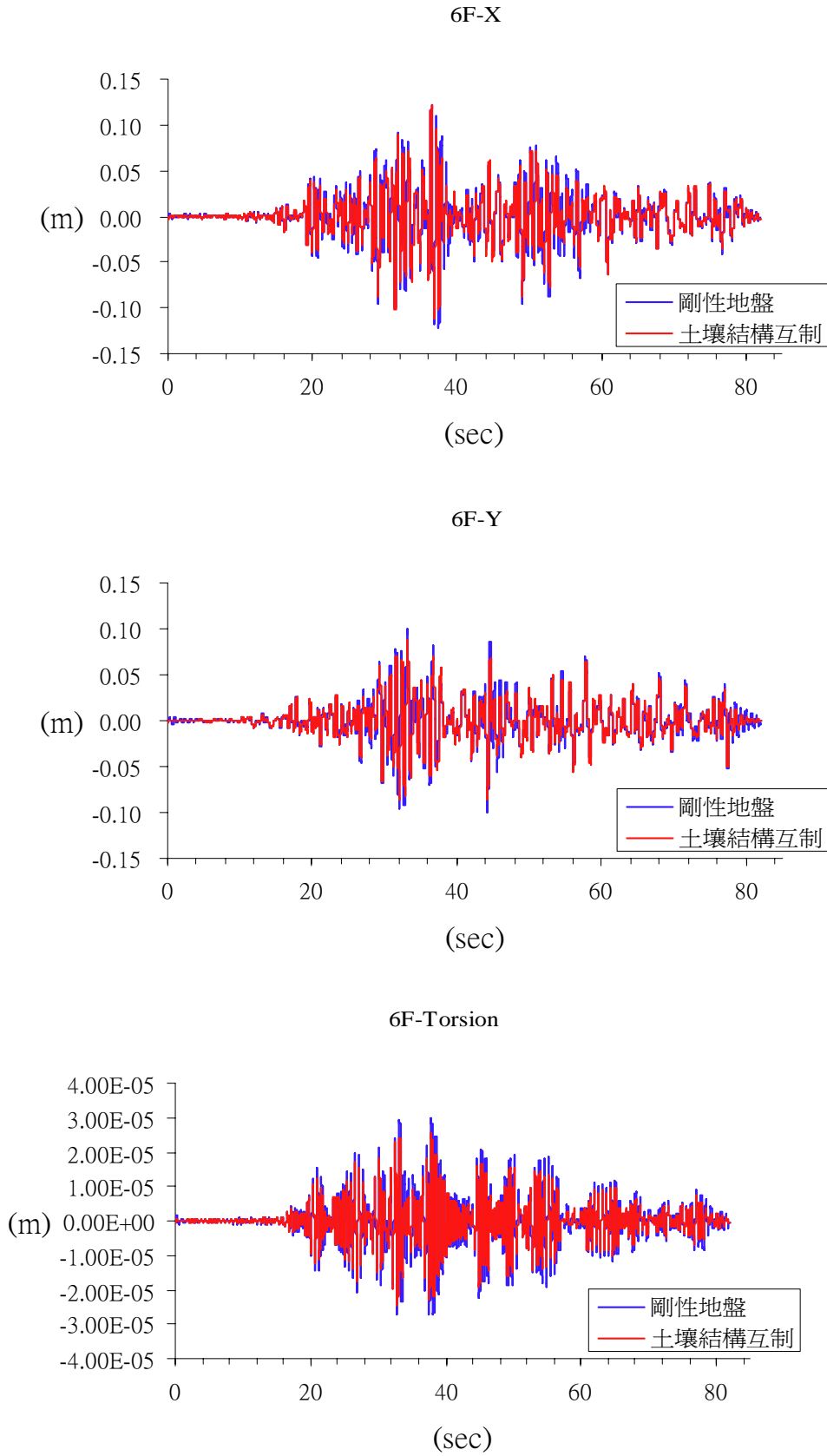


圖 4-16(c) 六樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)

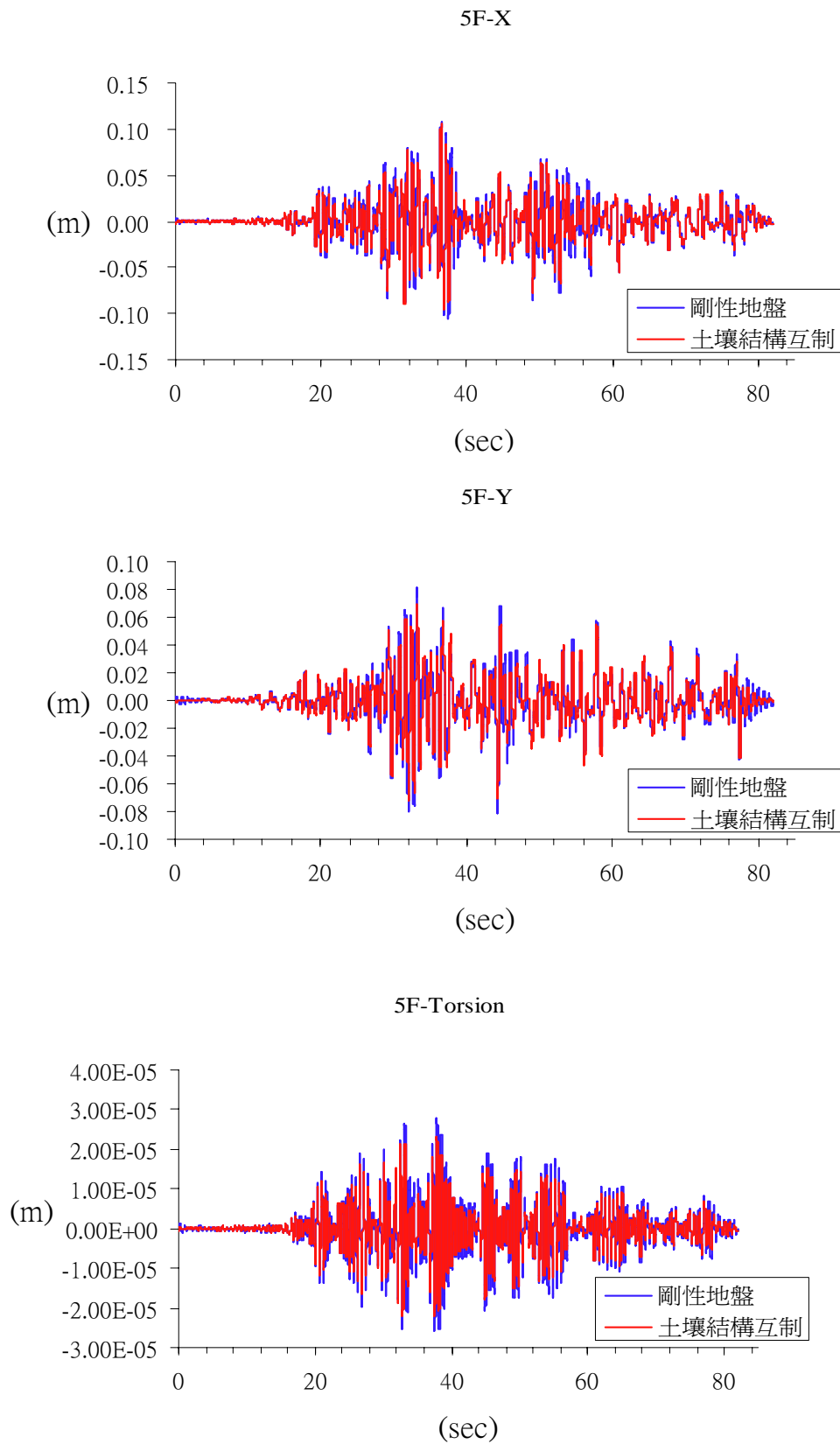


圖 4-16(d) 五樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)

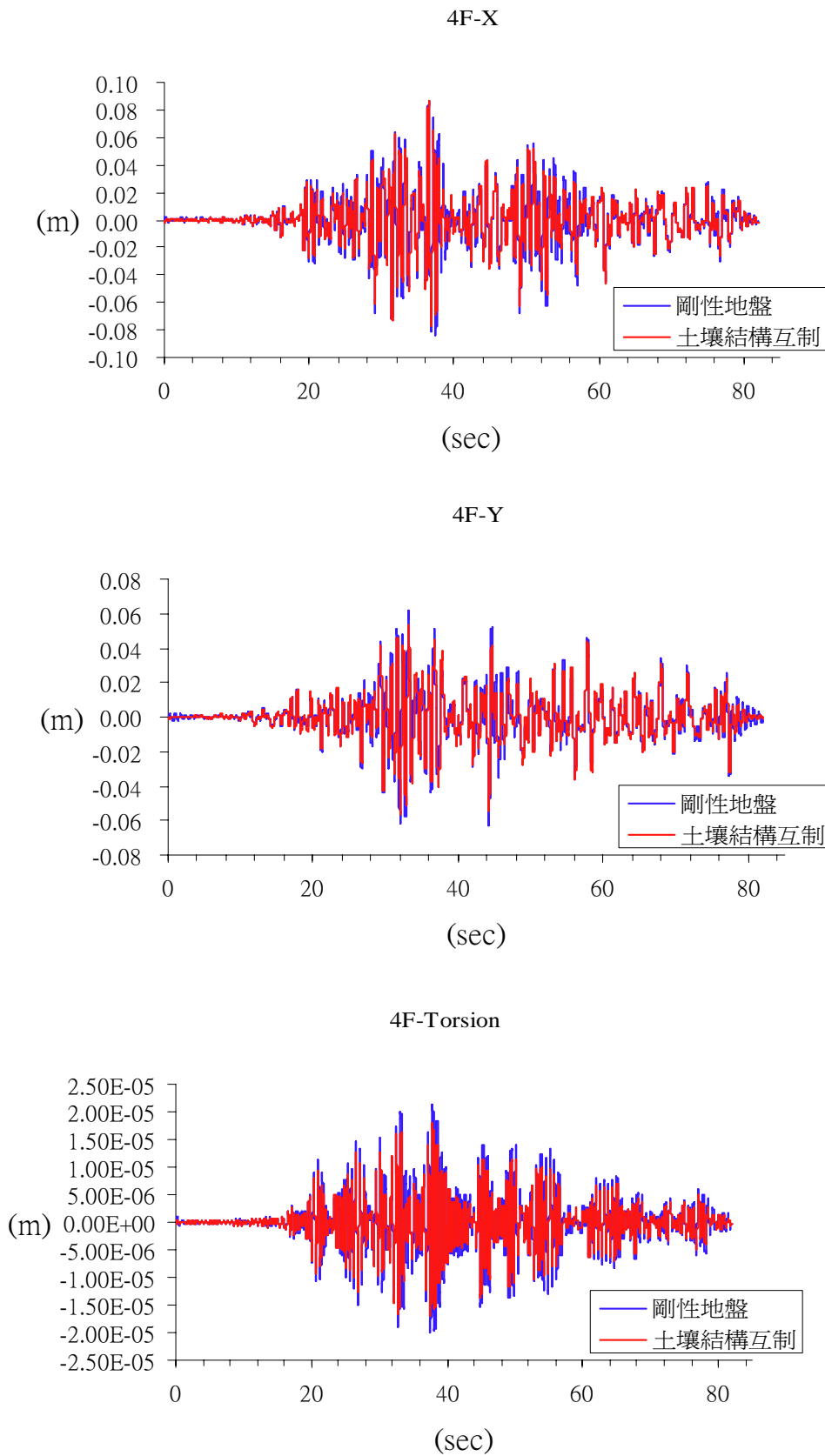


圖 4-16(e) 四樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)

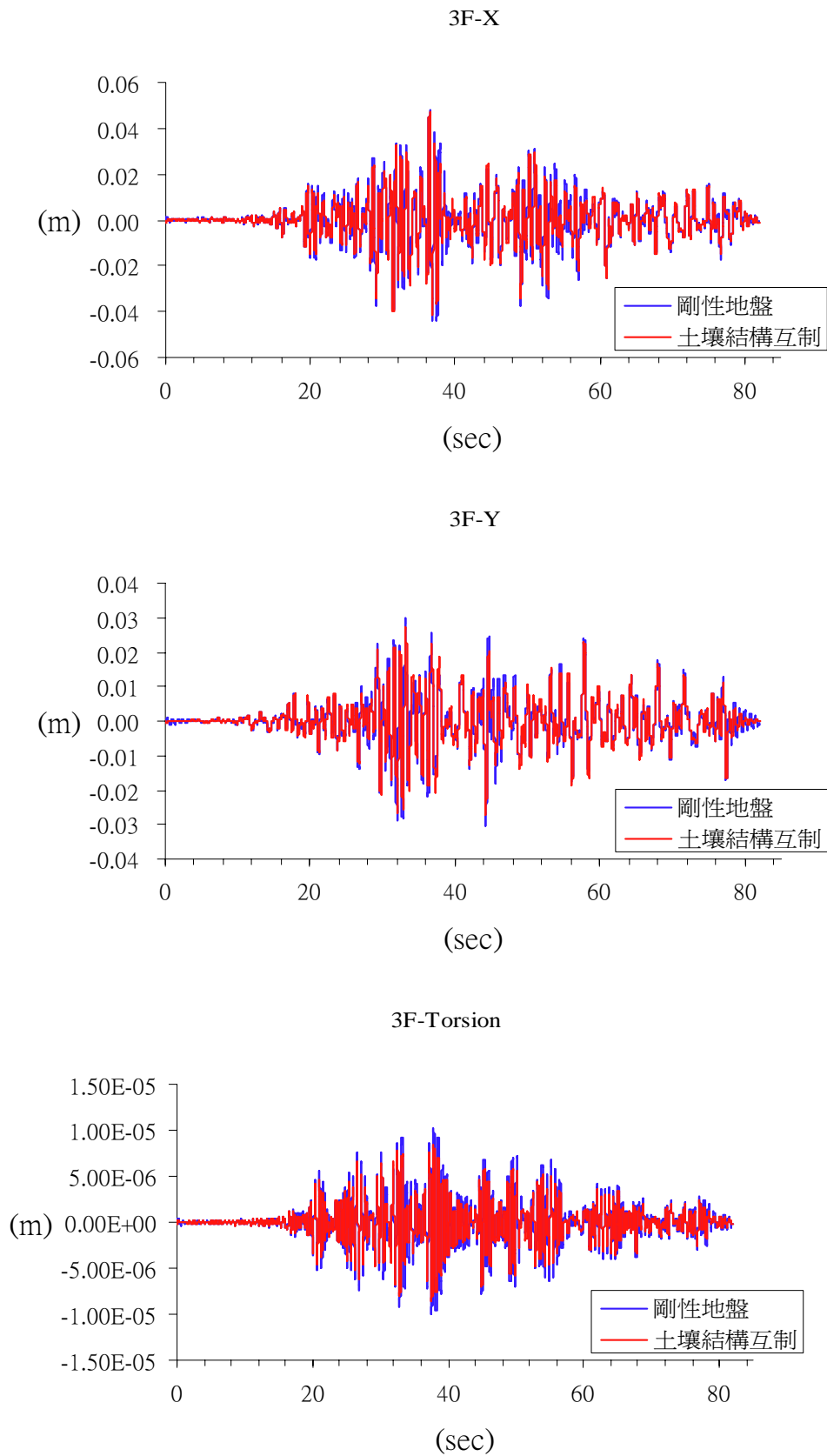


圖 4-16(f) 三樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)

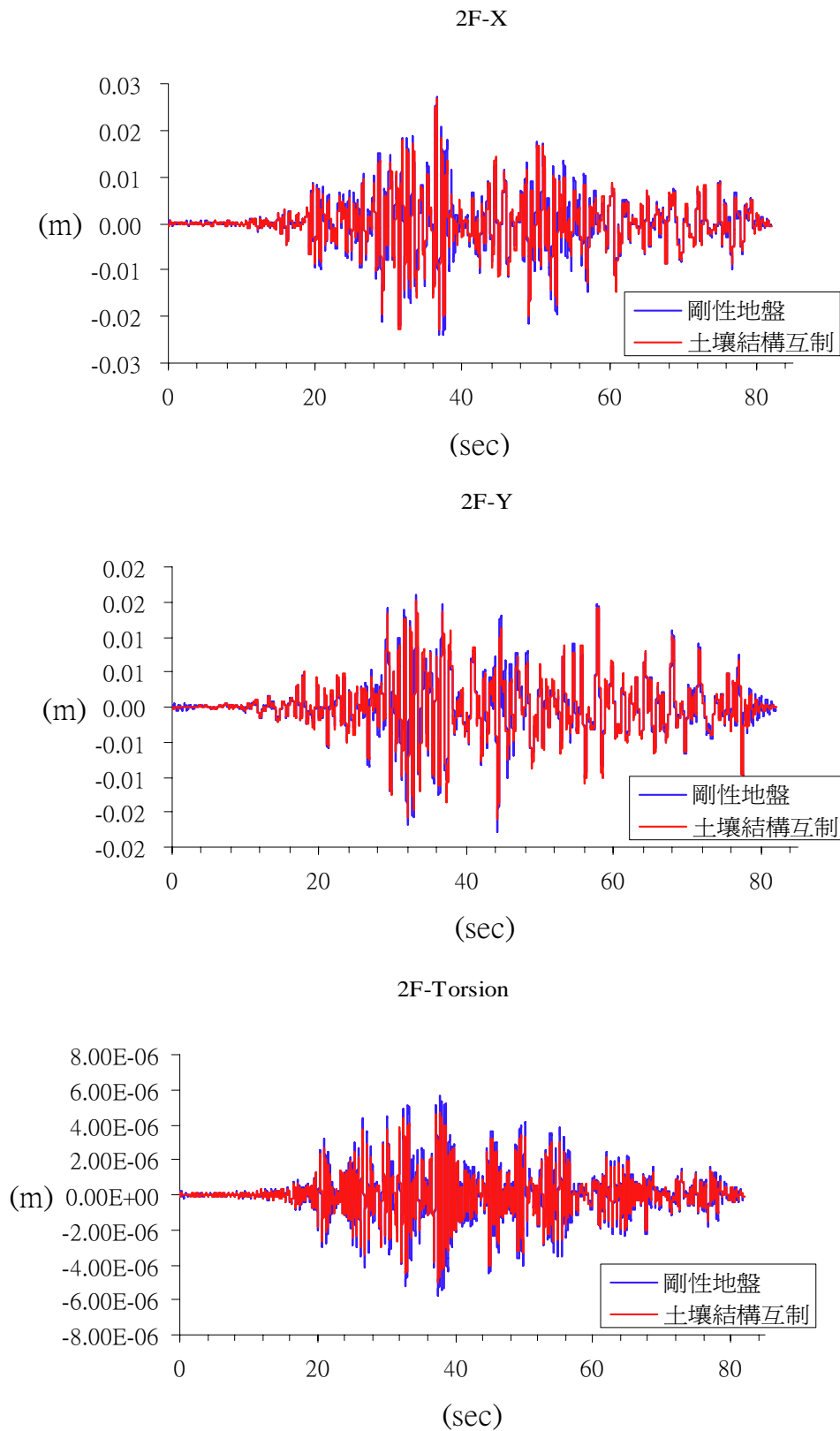
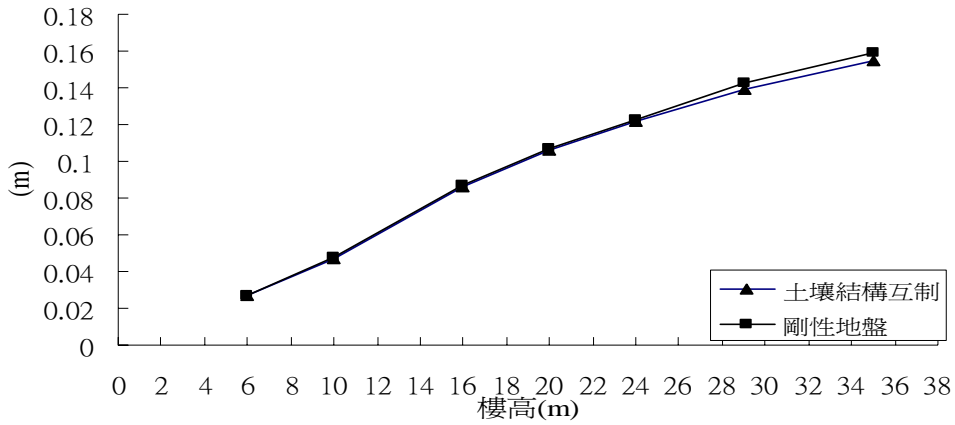
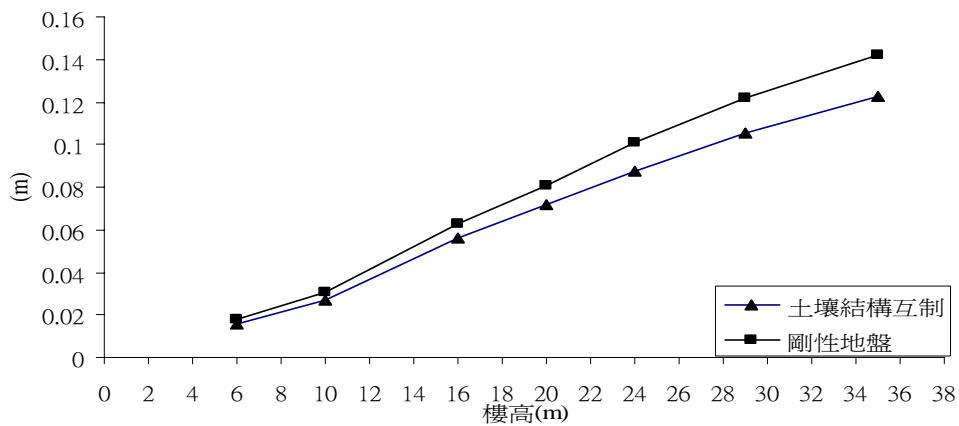


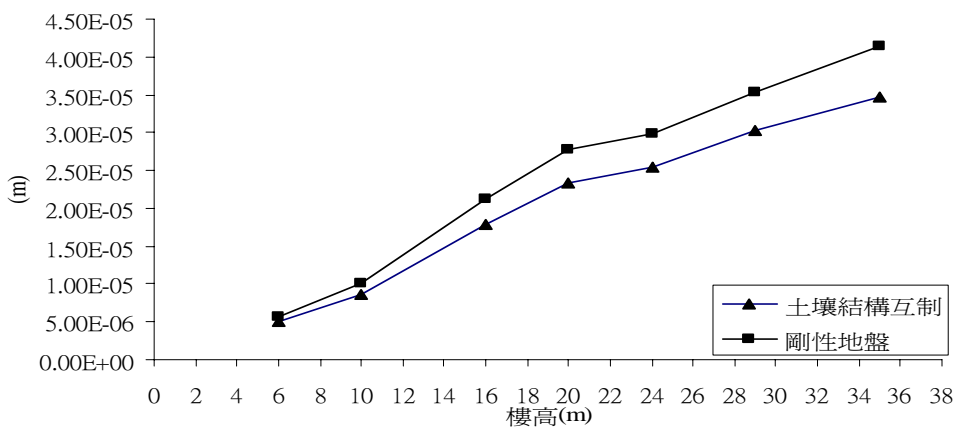
圖 4-16(g) 二樓剛性地盤與土壤結構互制位移比較圖(茄定國小)



(a) X 方向最大位移



(b) Y 方向最大位移



(c) Z 方向(Torsion)最大位移

圖 4-17 各樓層最大位移(茄定國小)

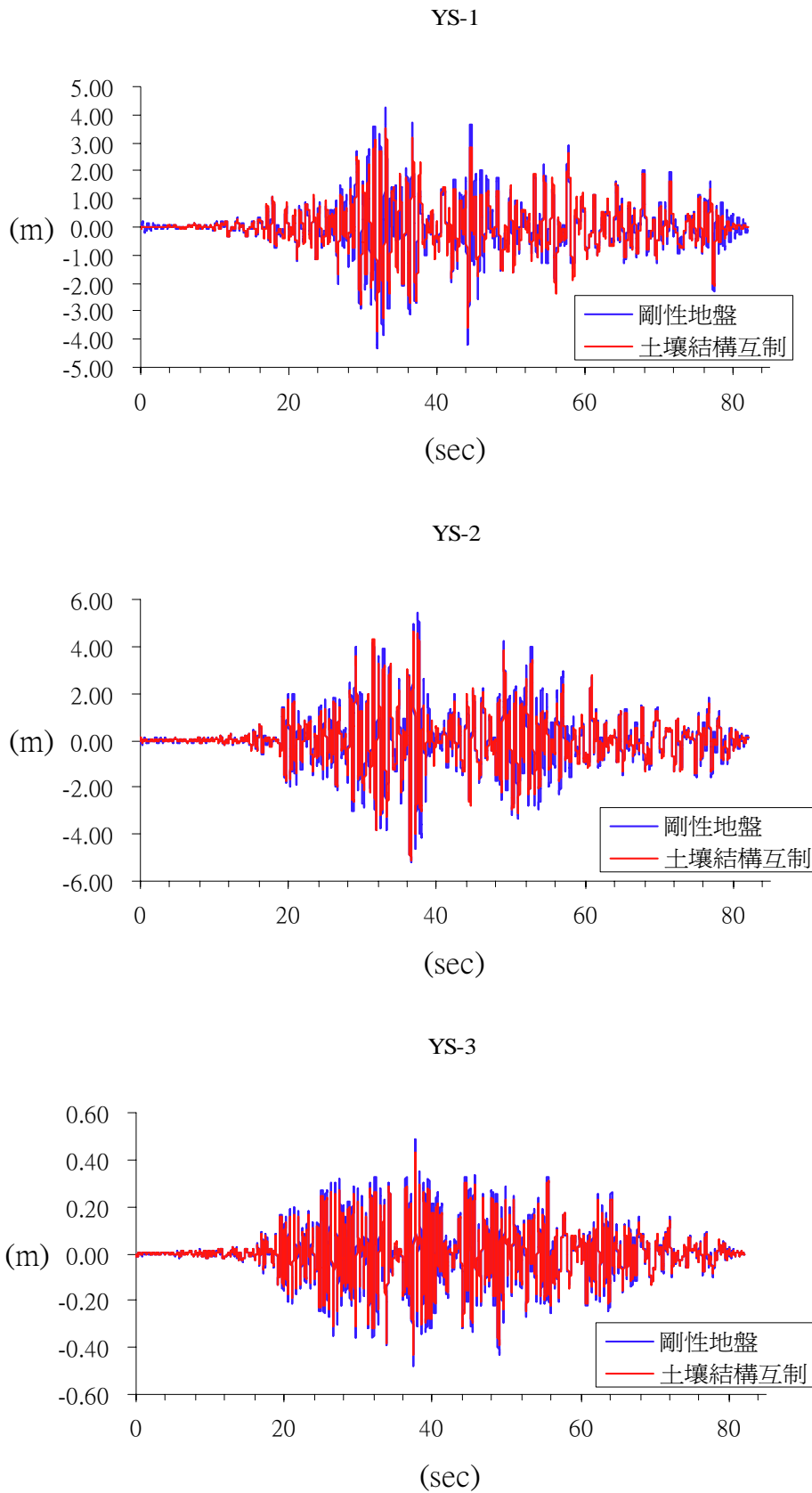


圖 4-18(a) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

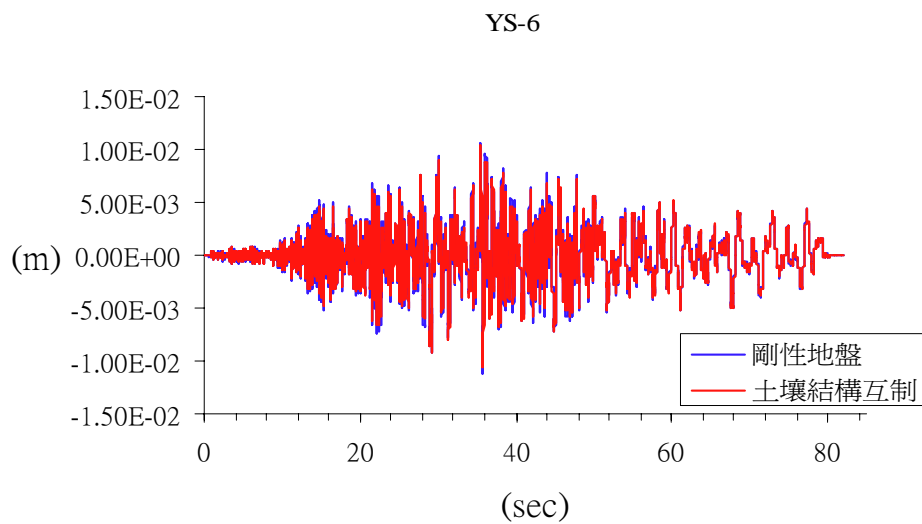
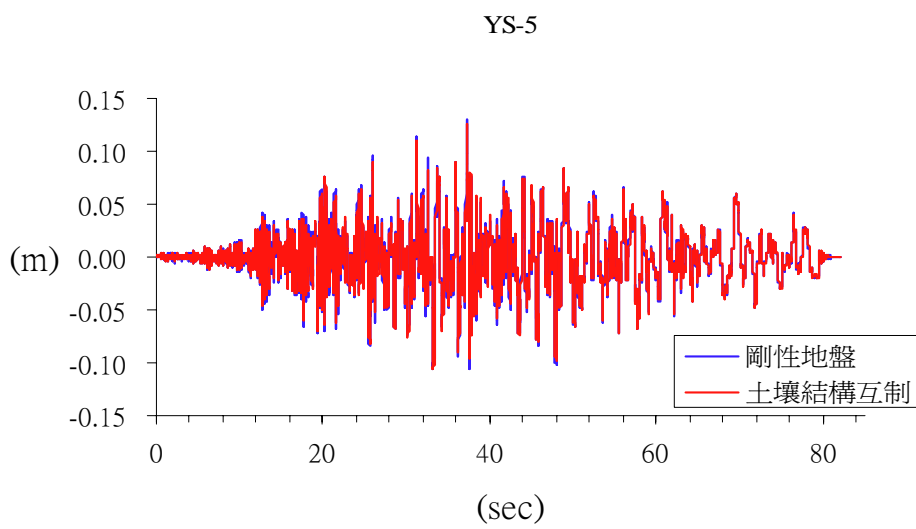
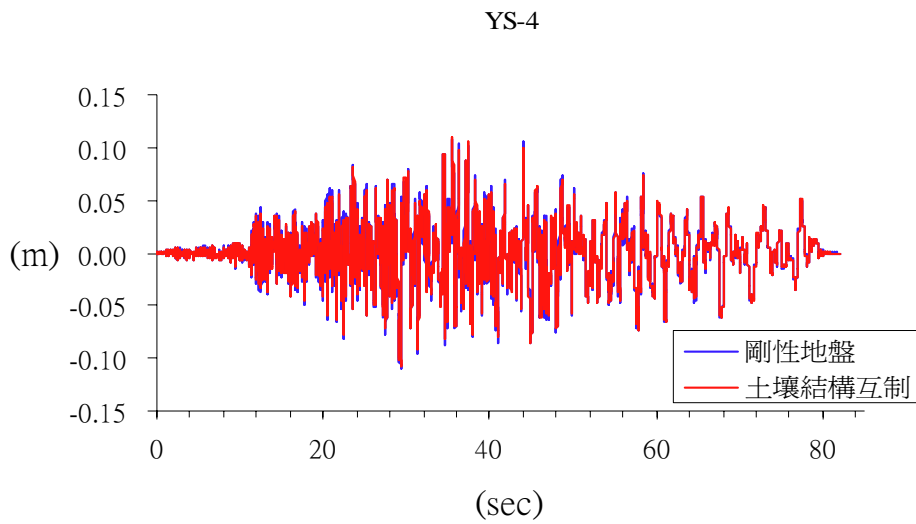


圖 4-18(b) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)



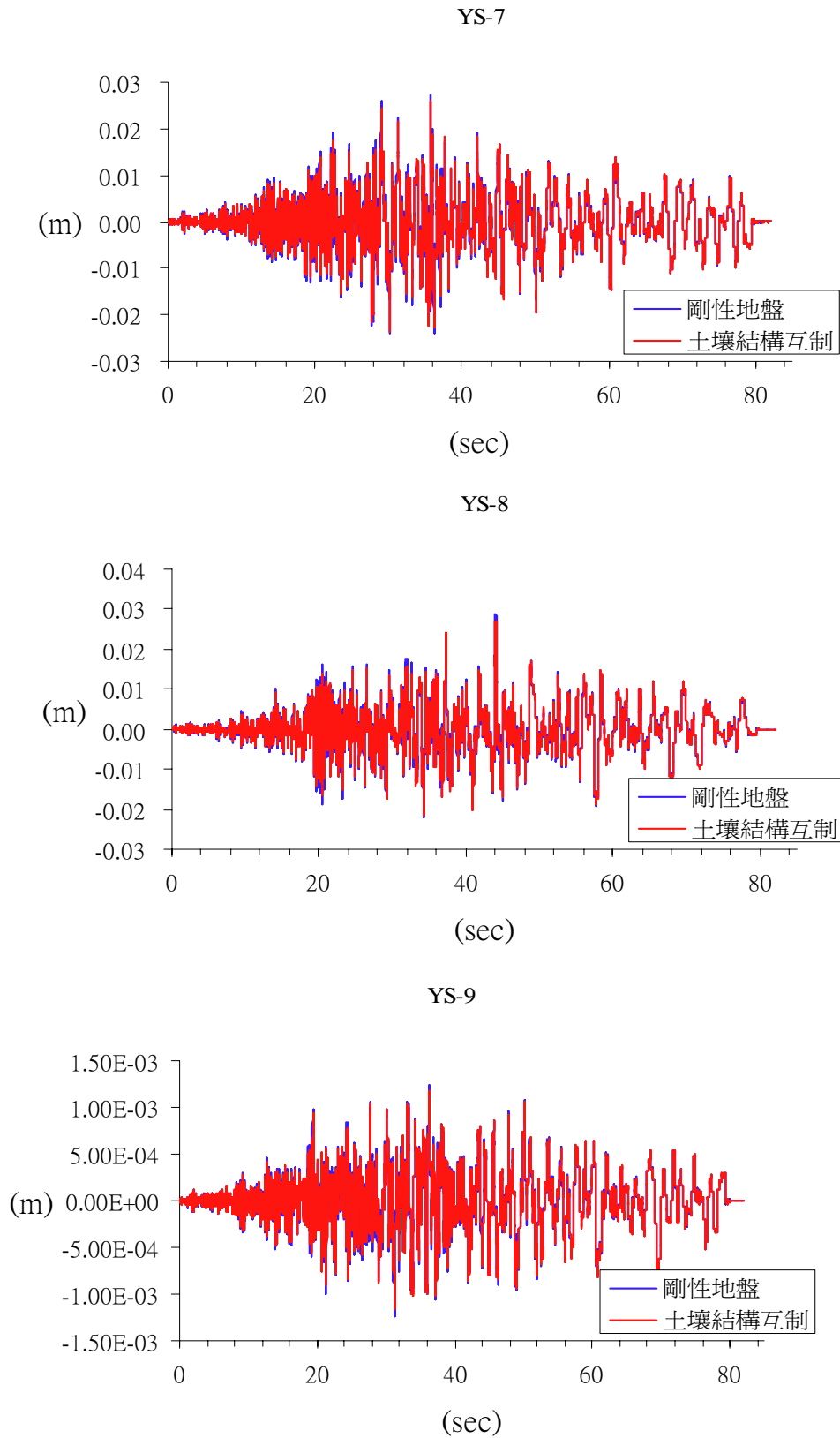


圖 4-18(c) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

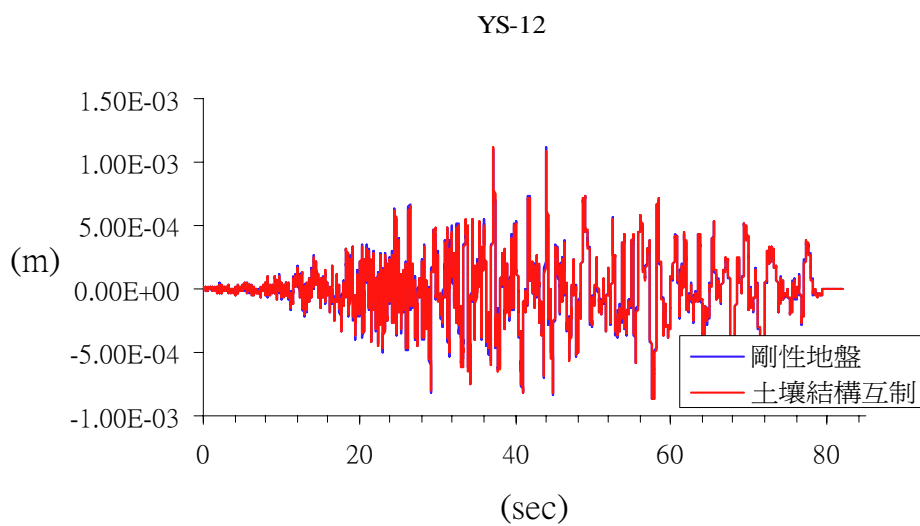
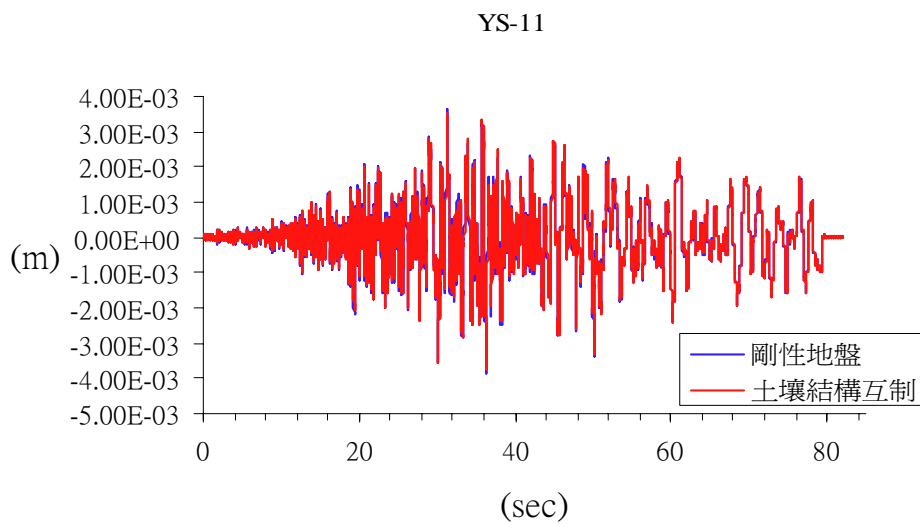
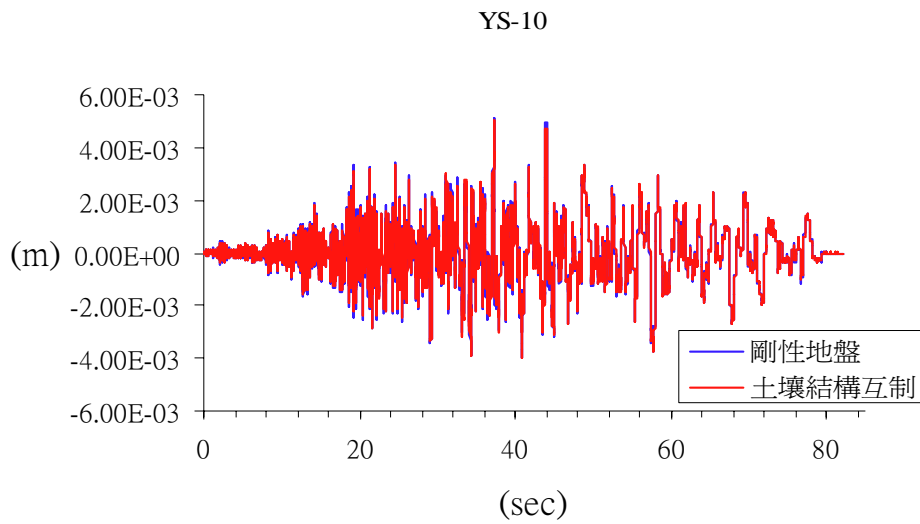
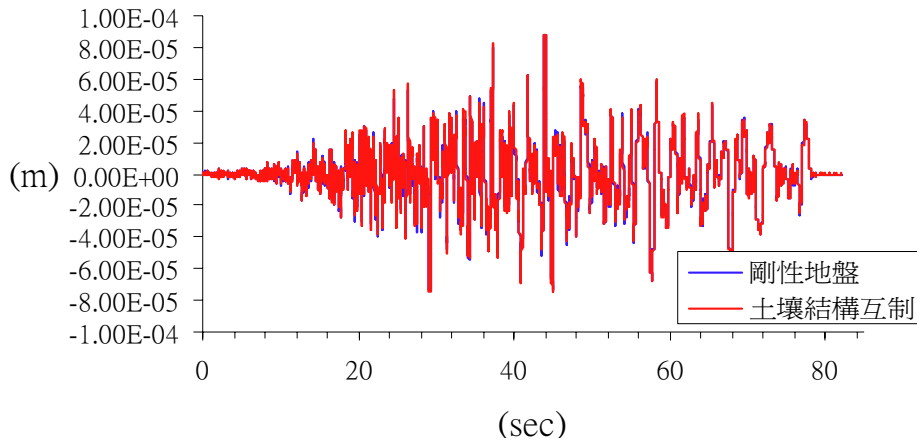
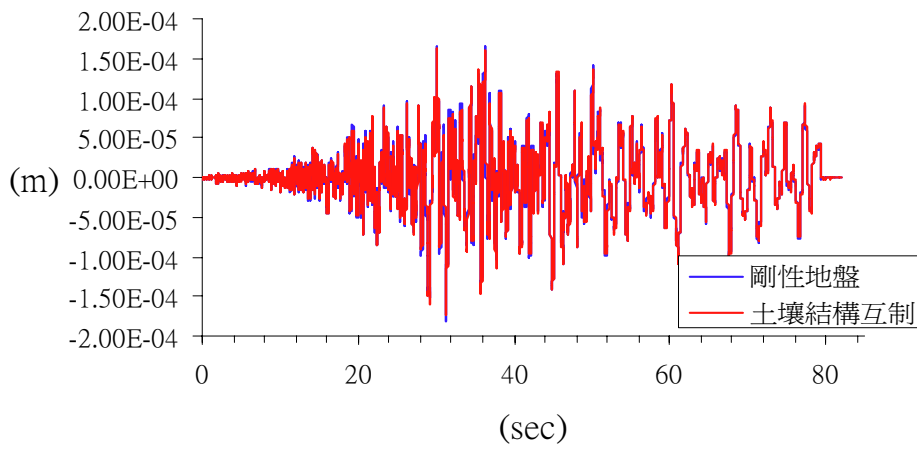


圖 4-18(d) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

YS-13



YS-14



YS-15

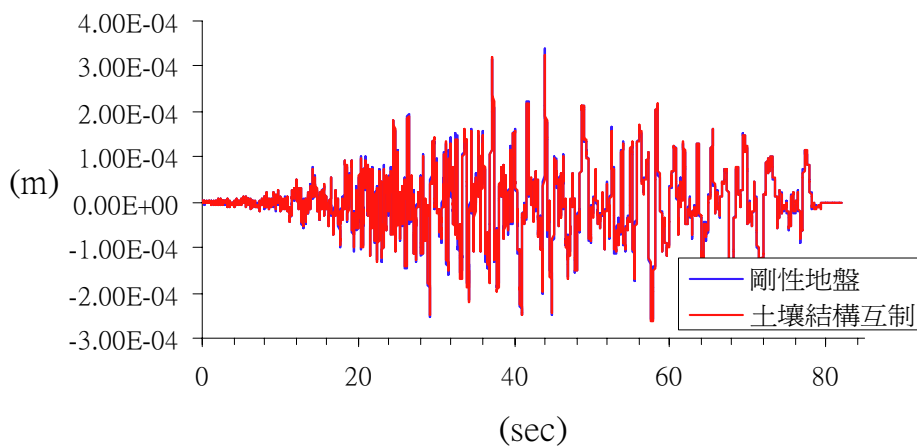


圖 4-18(e) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

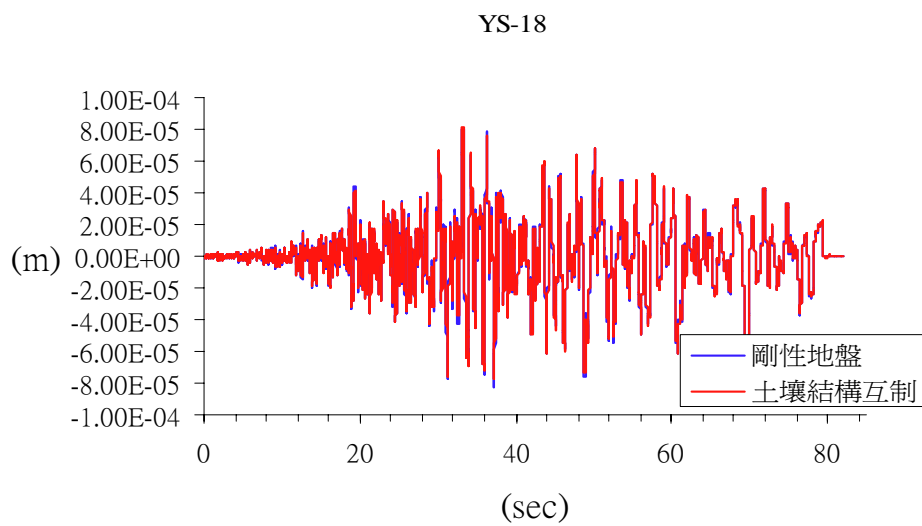
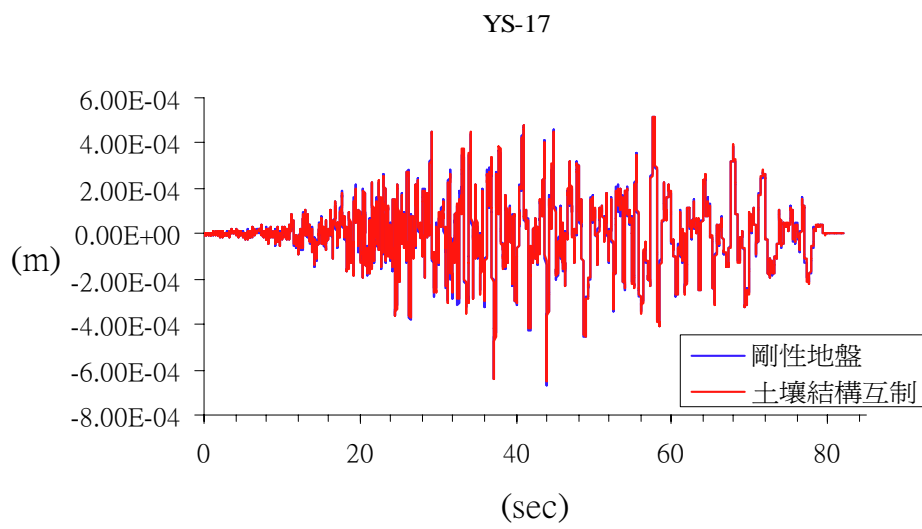
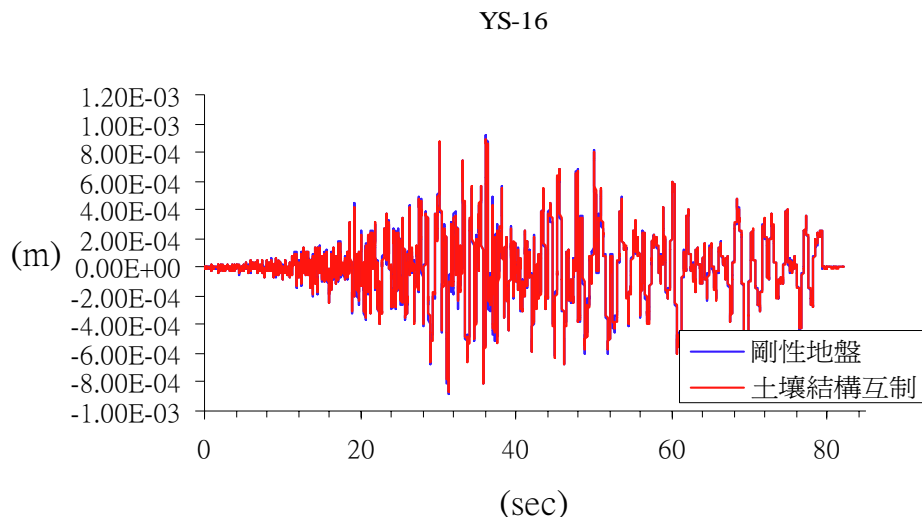
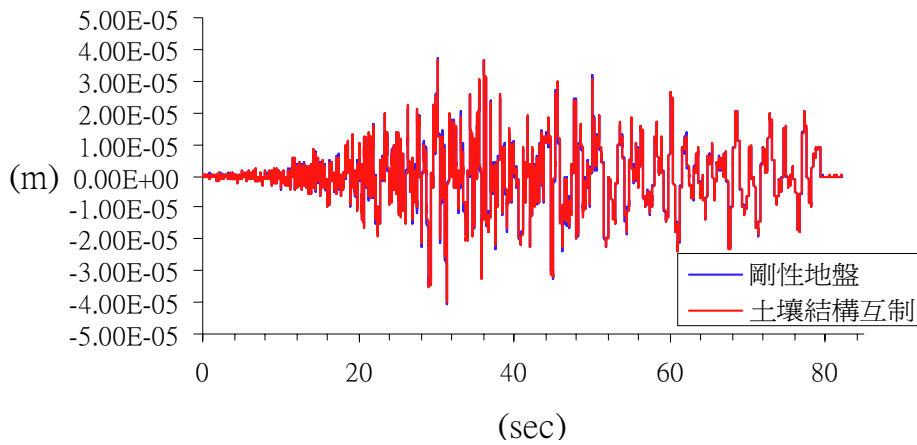
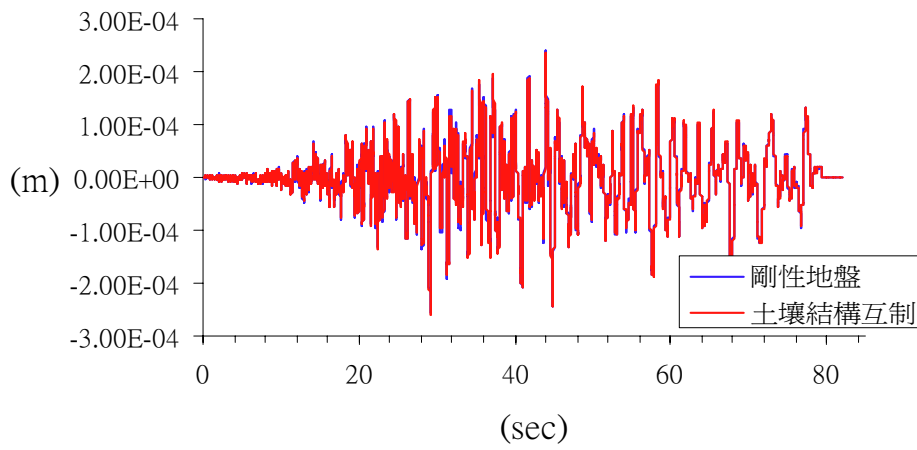


圖 4-18(f) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

YS-19



YS-20



YS-21

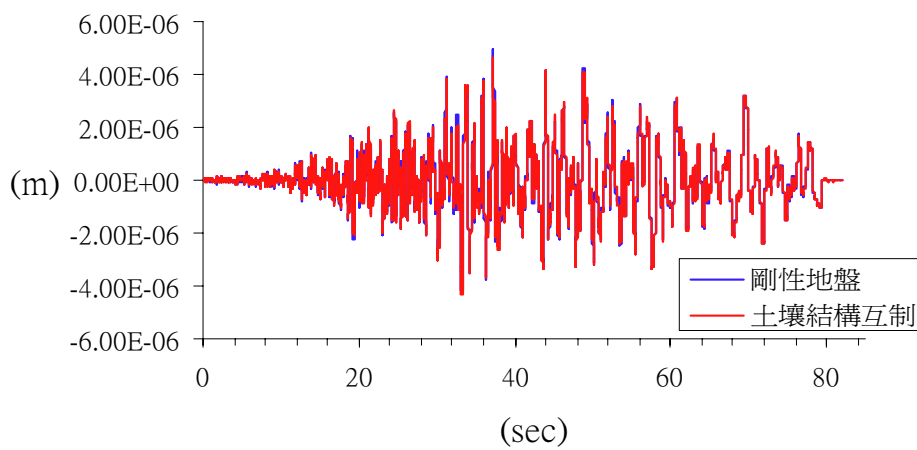


圖 4-18(g) 各模態在剛性地盤與互制效應下比較(茄定國小)

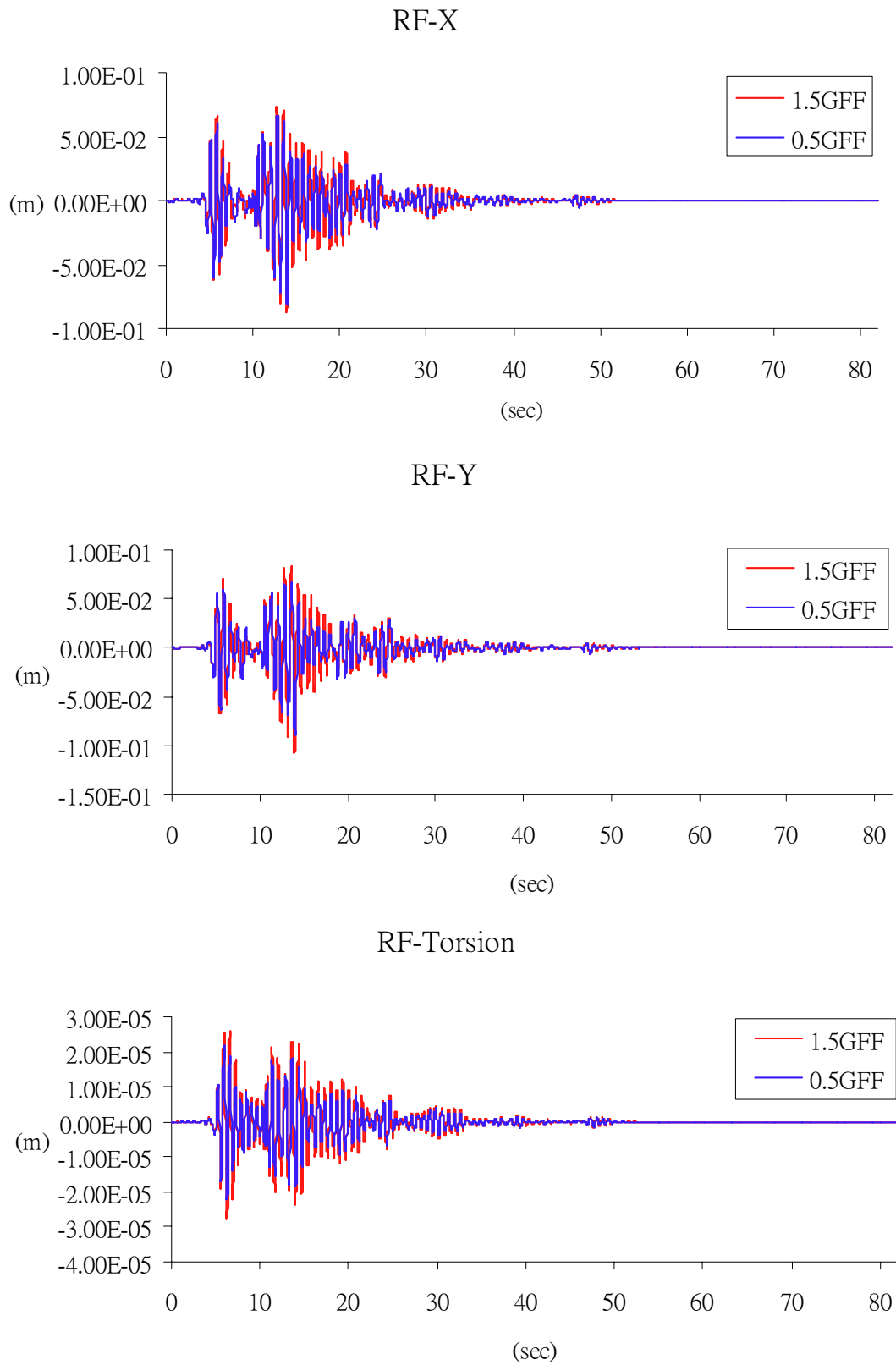


圖 4-19(a) 屋頂層變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

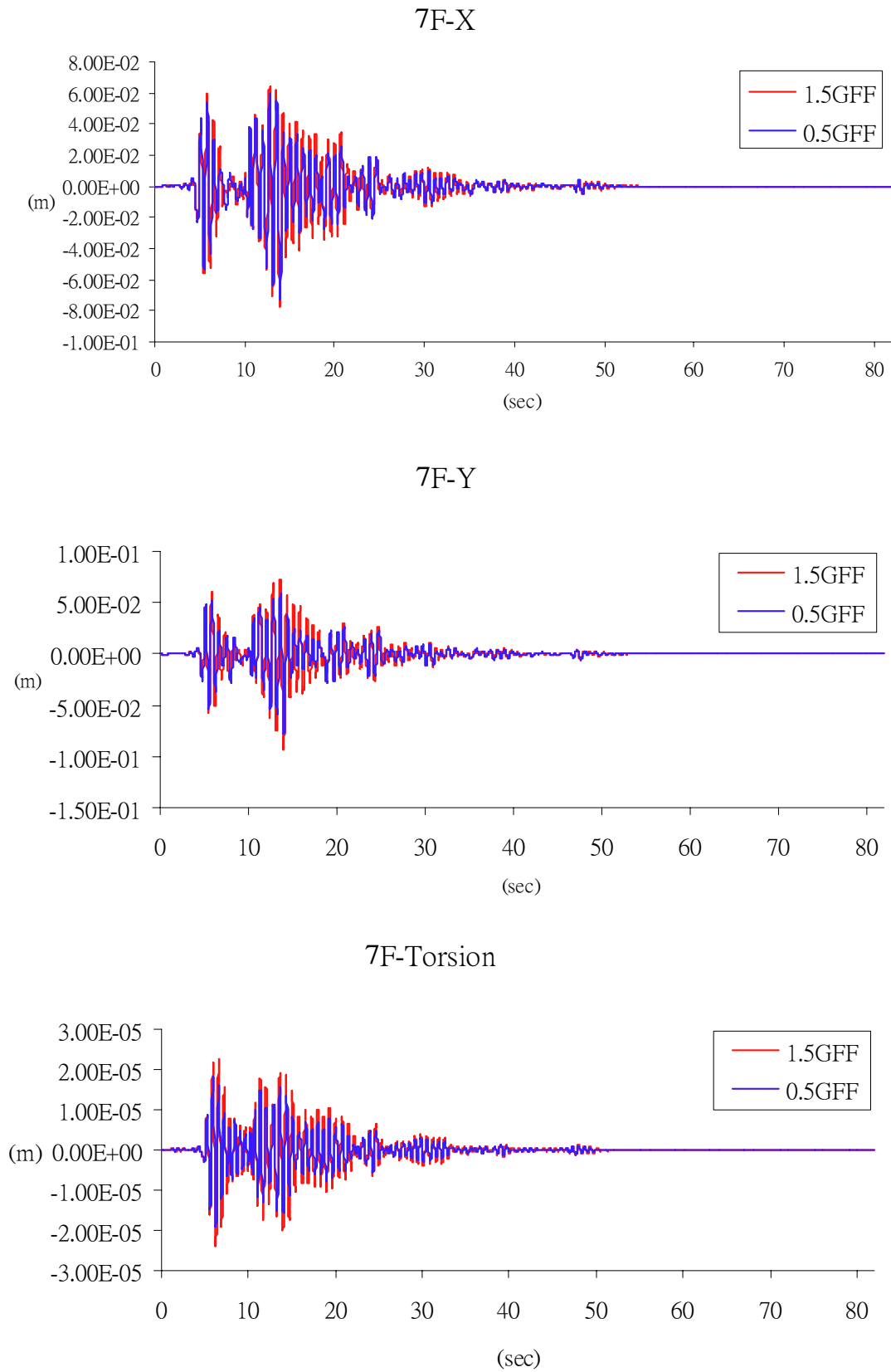


圖 4-19(b) 七樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

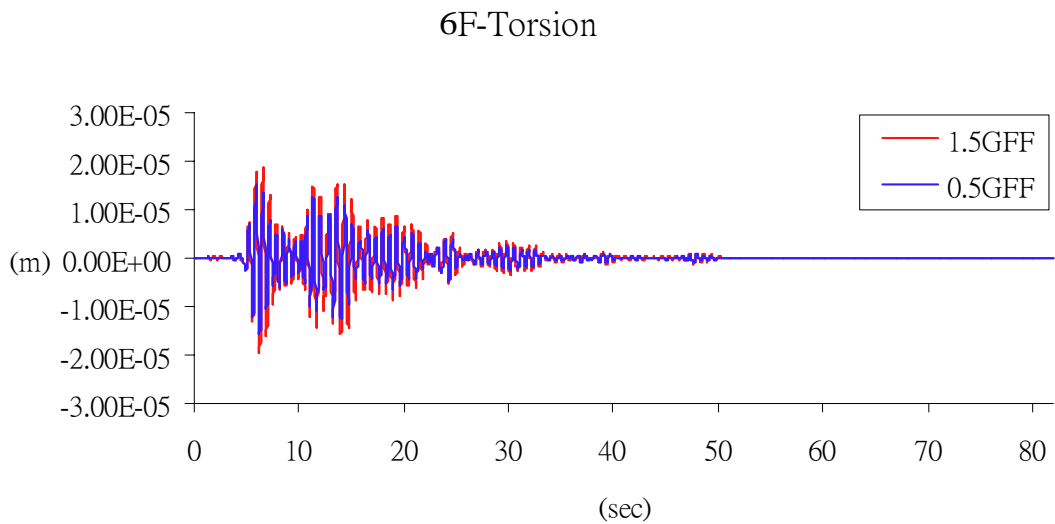
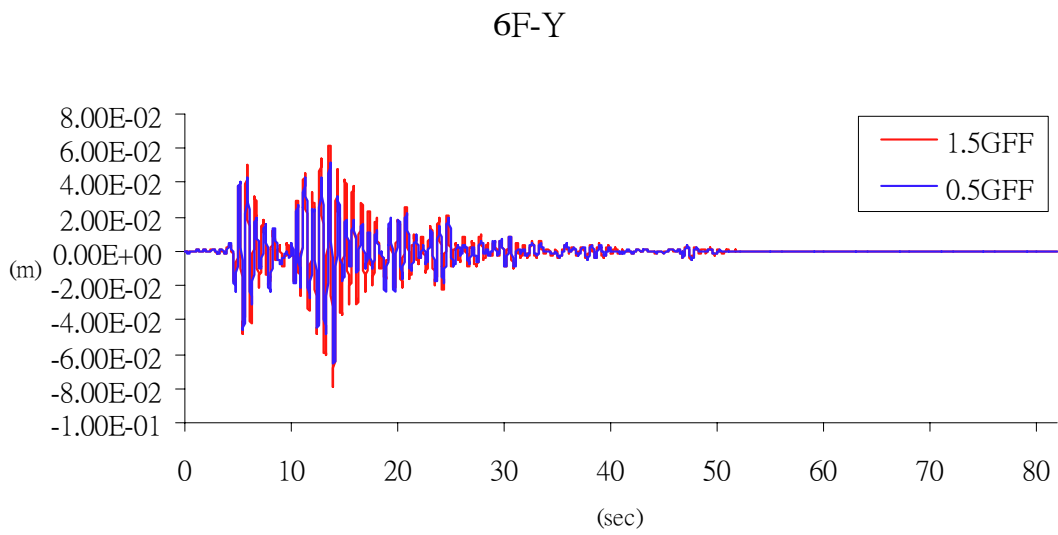
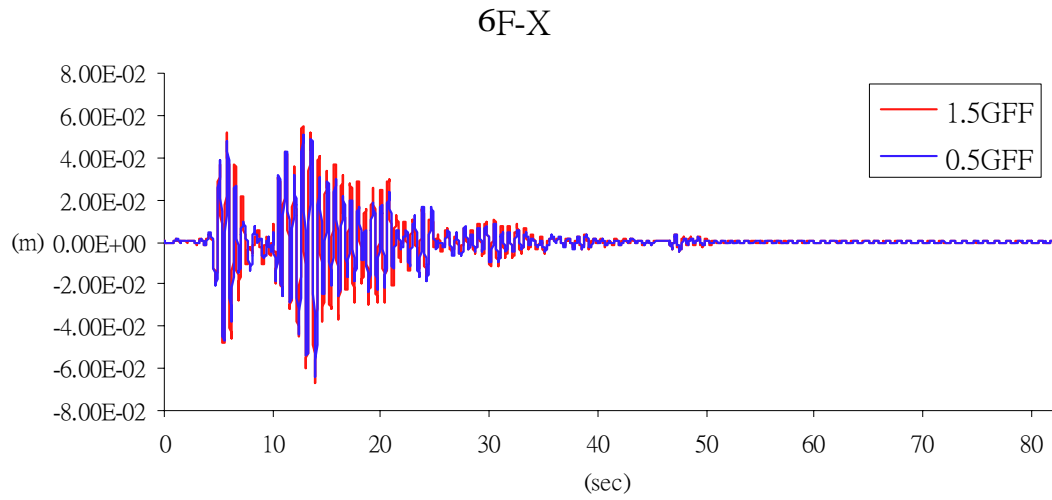


圖 4-19(c) 六樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)



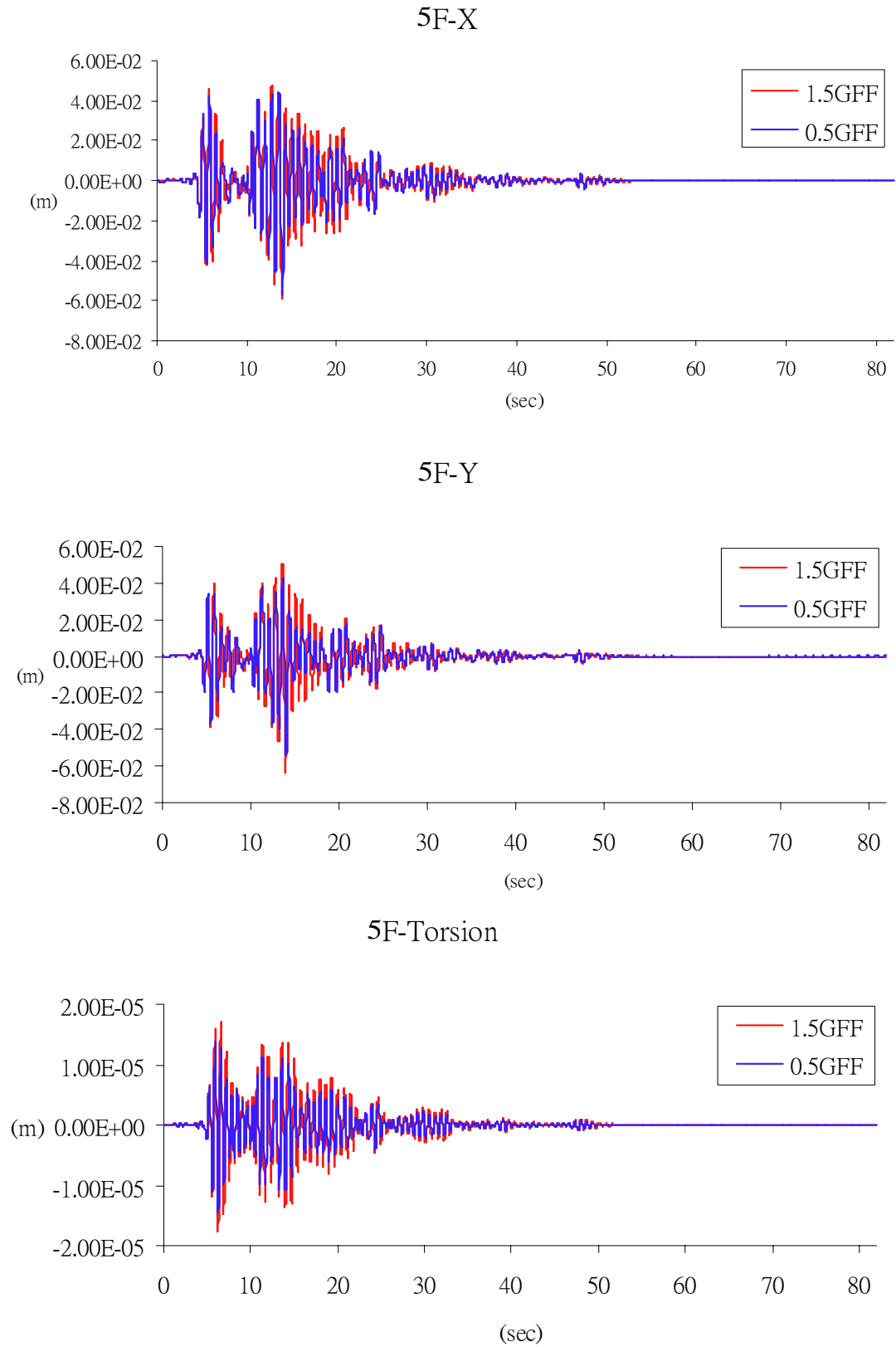


圖 4-19(d) 五樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

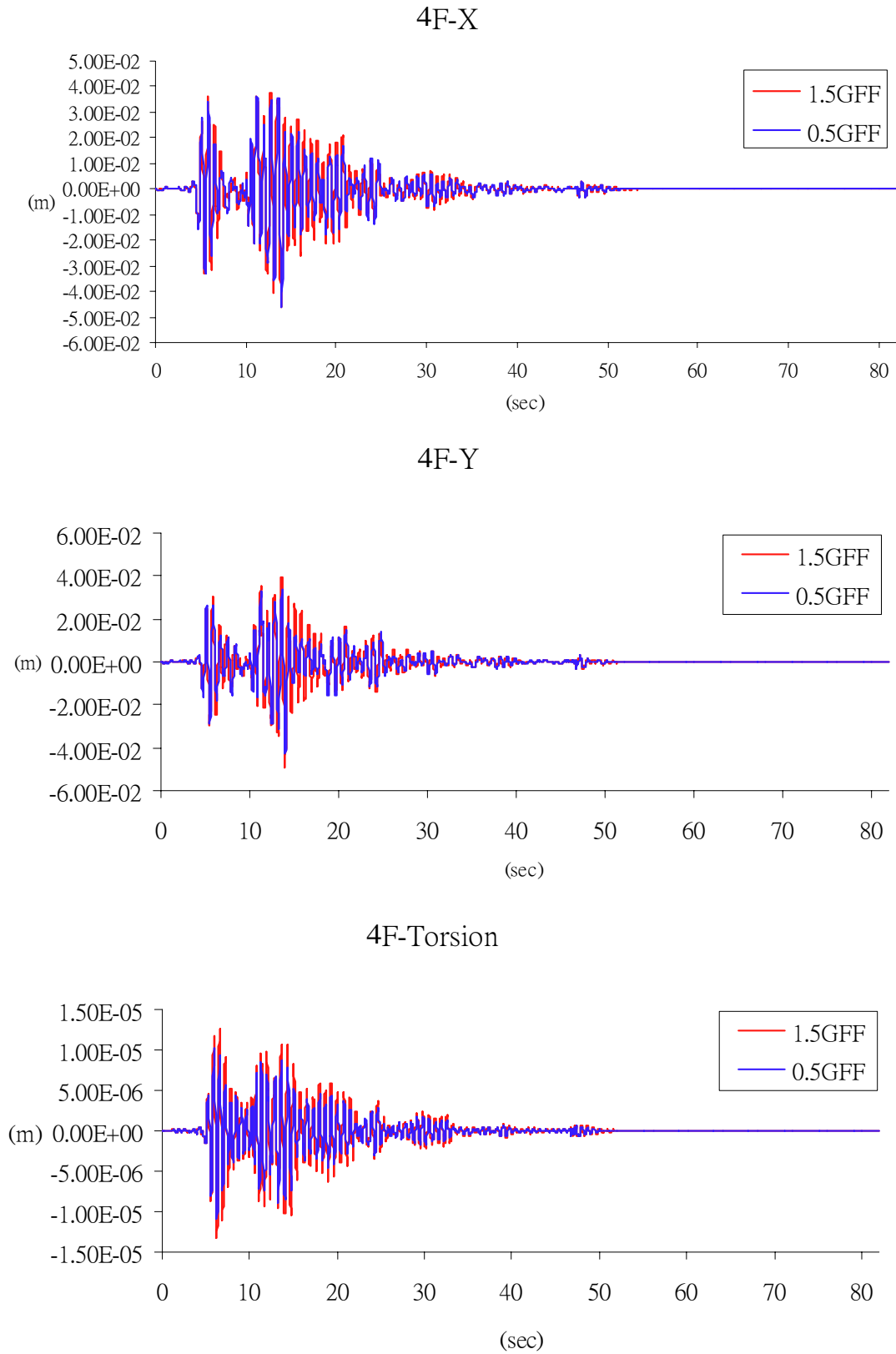


圖 4-19(e) 四樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

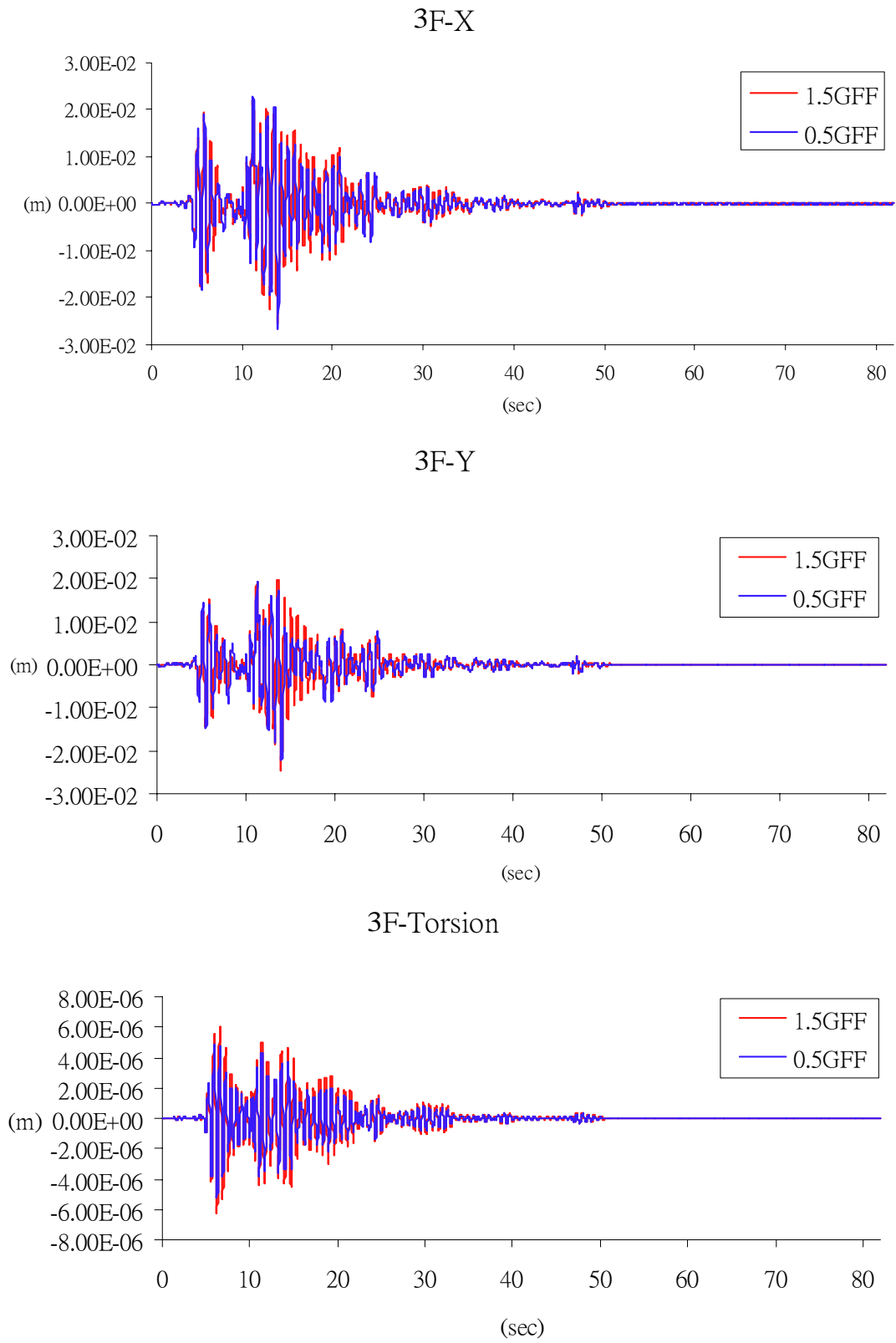


圖 4-19(f) 三樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

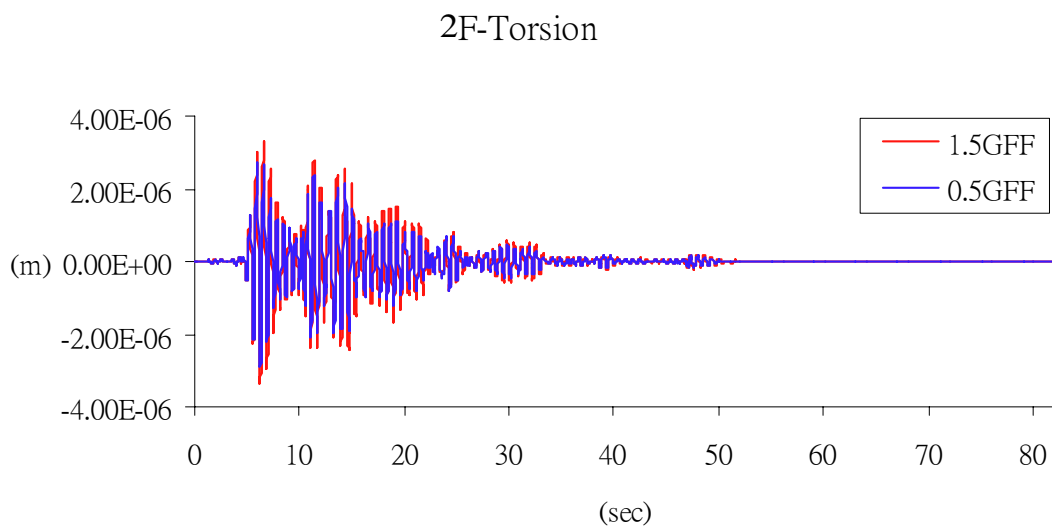
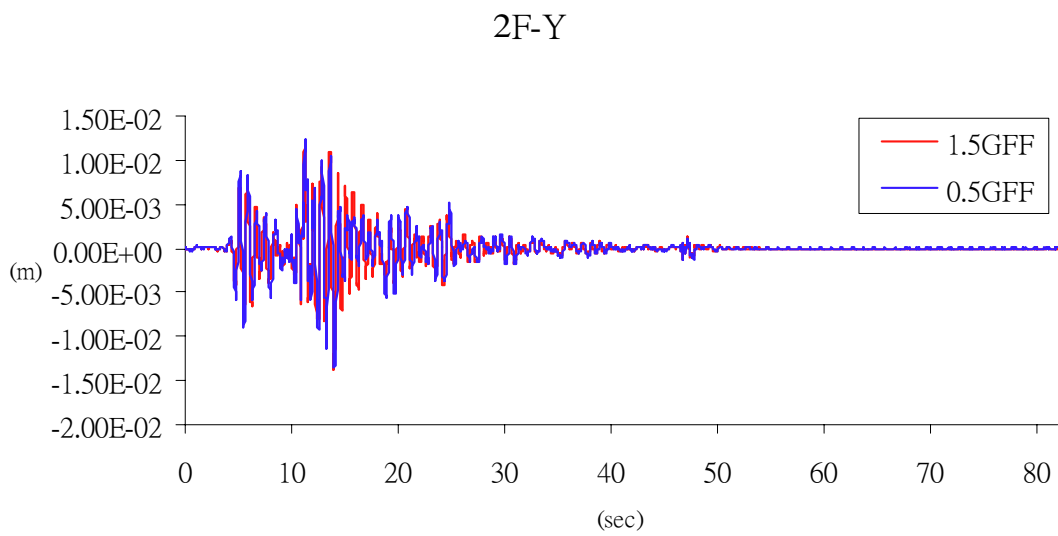
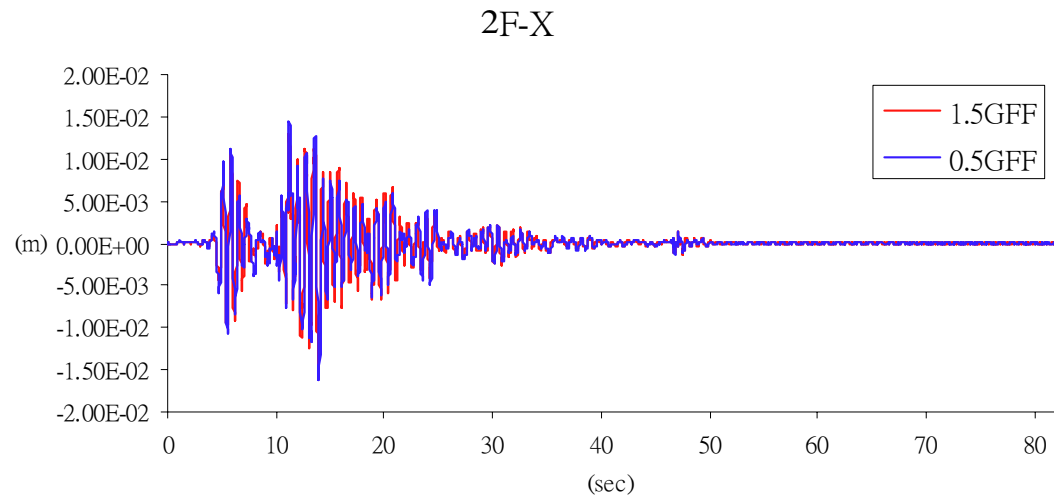


圖 4-19(g) 二樓變化阻抗矩陣位移比較圖(北嶺地震)

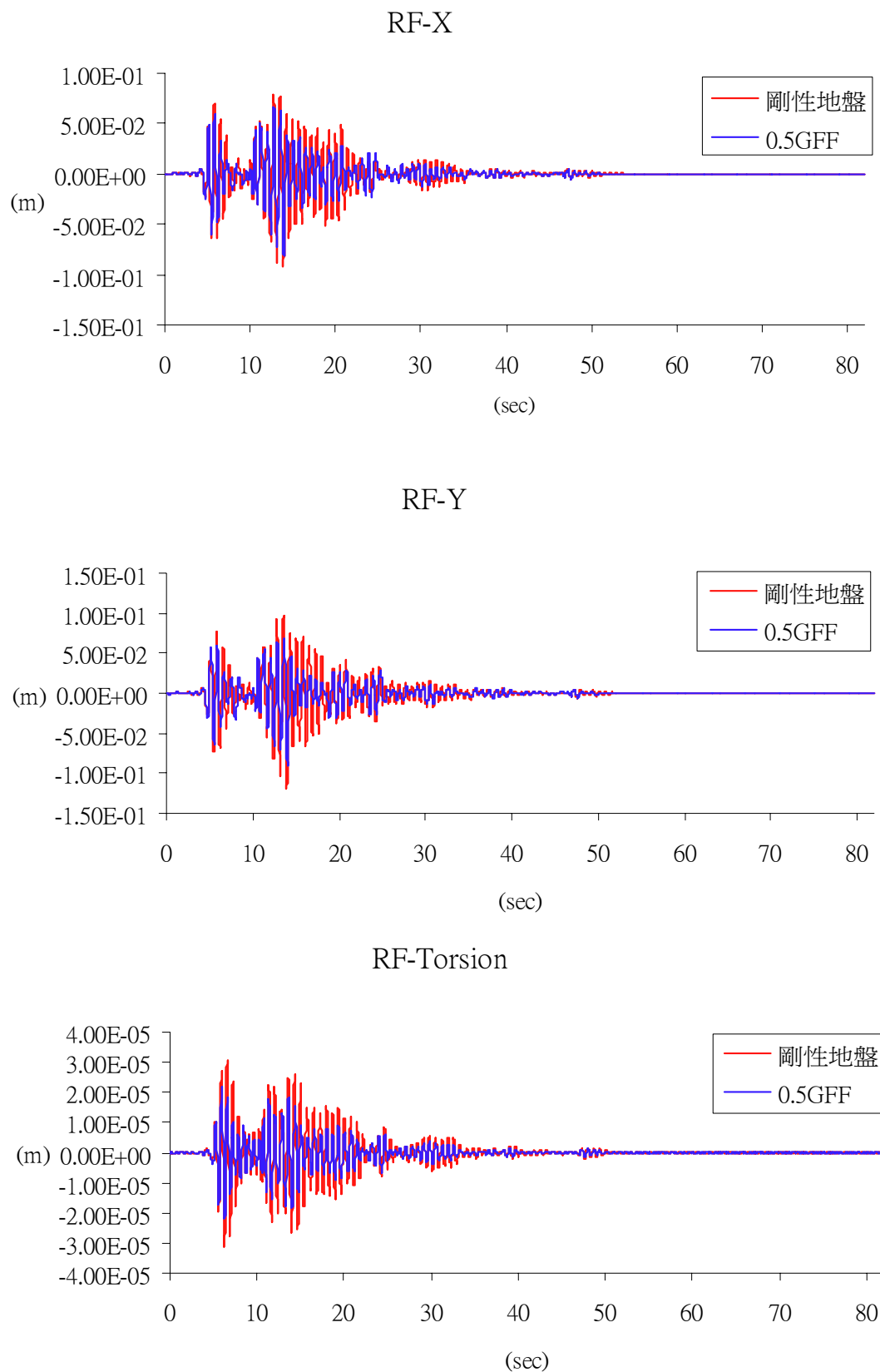


圖 4-20(a) 屋頂層 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)

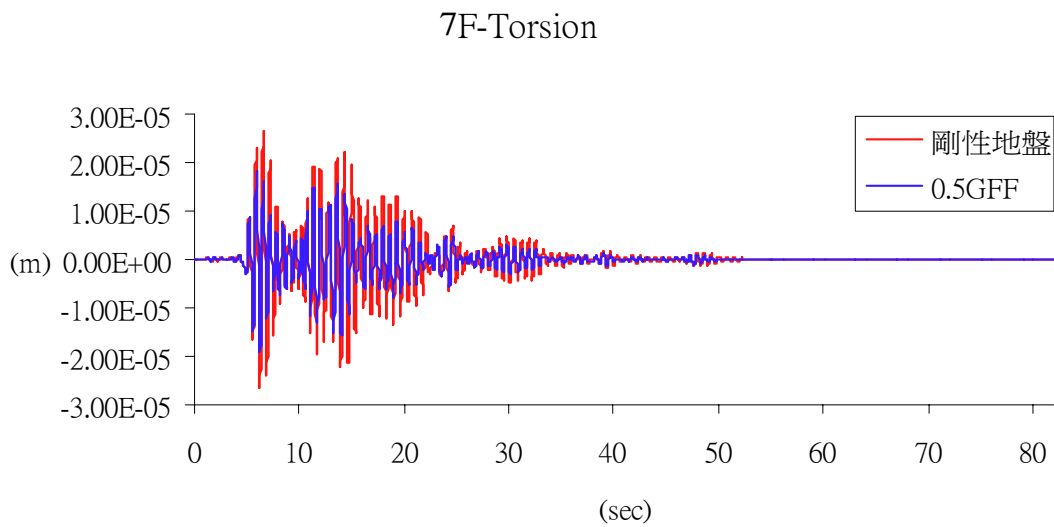
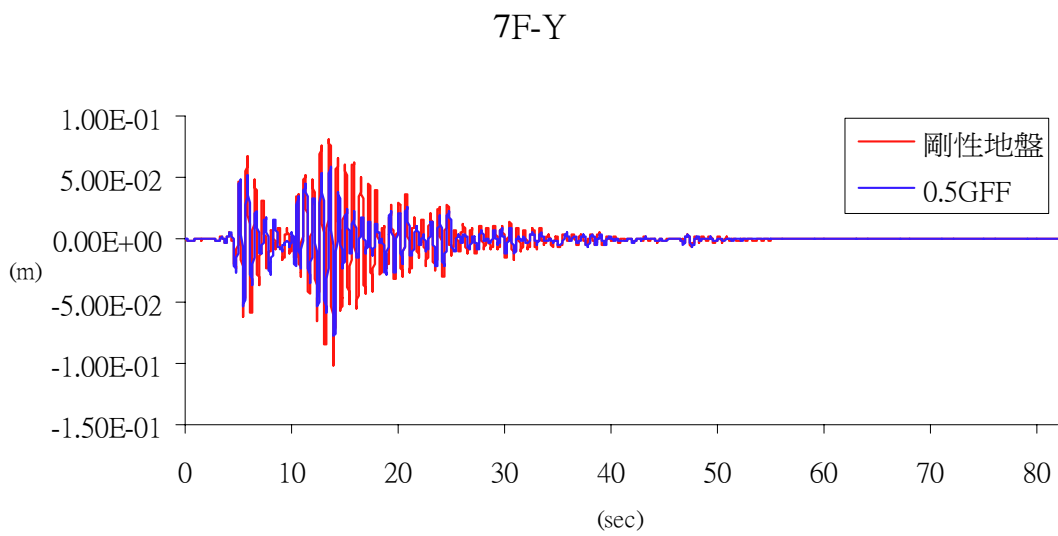
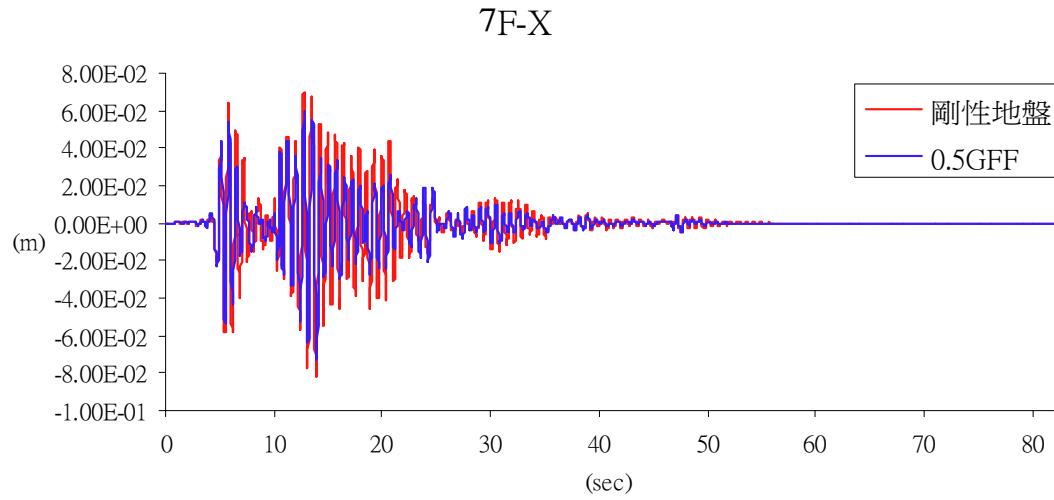


圖 4-20(b) 七樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)

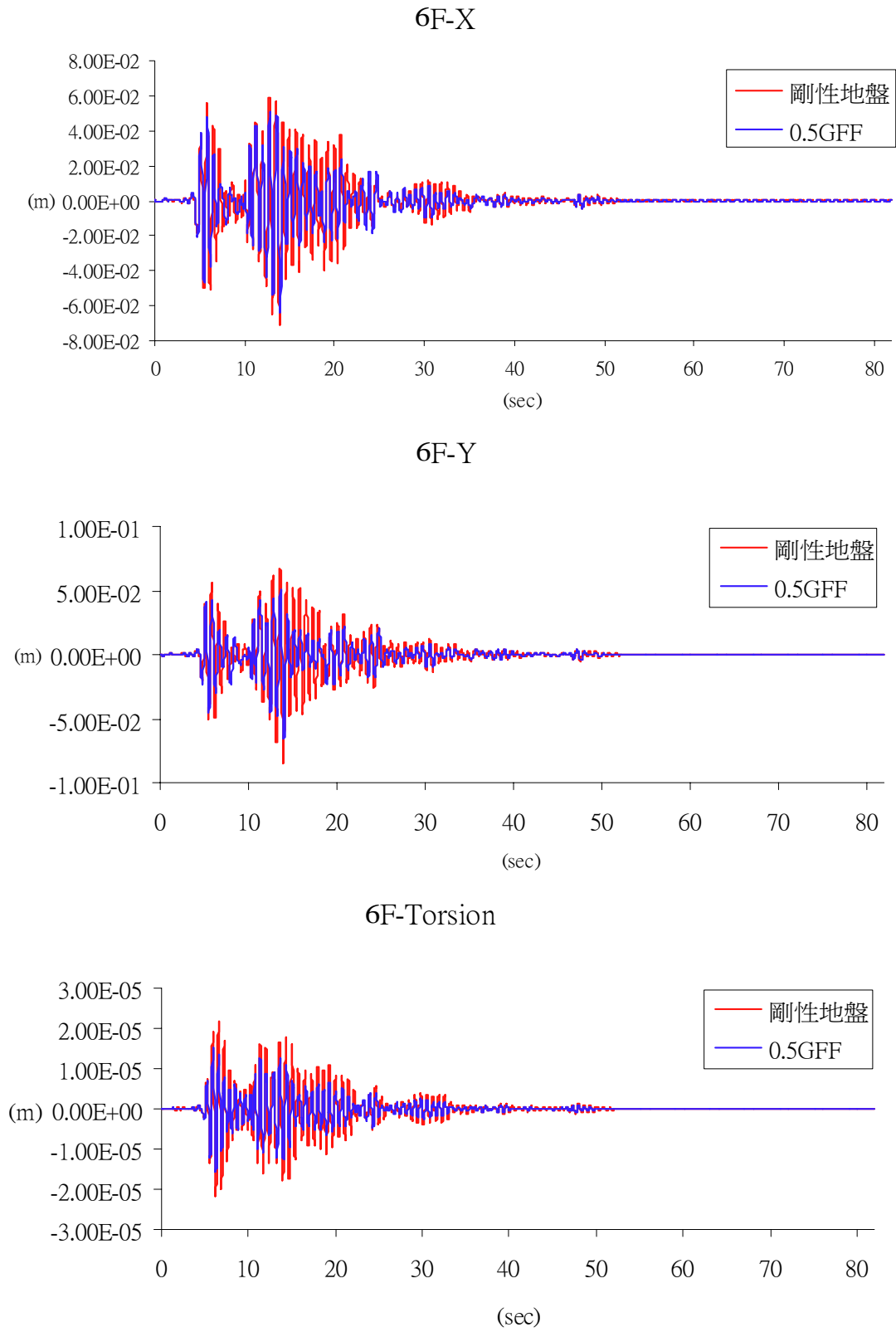


圖 4-20(c) 六樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)

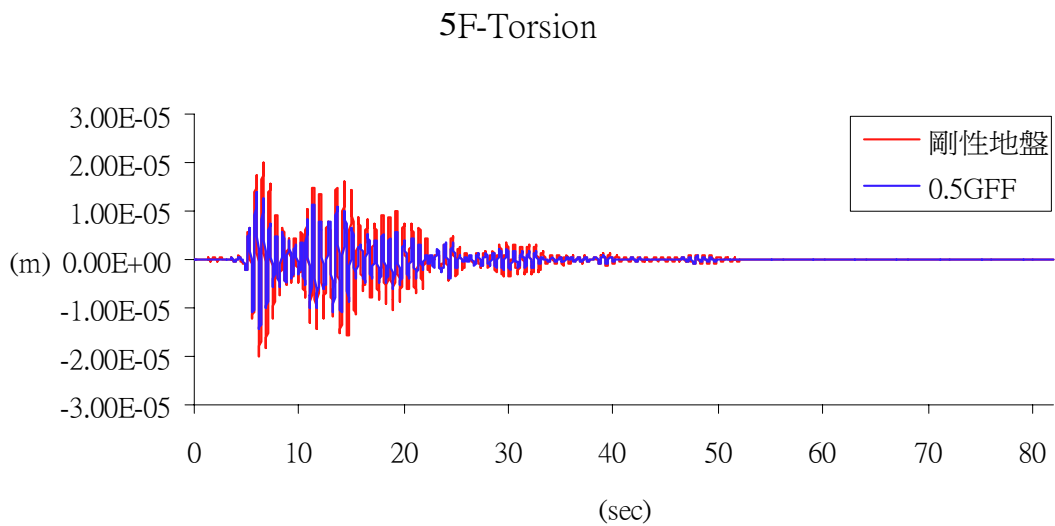
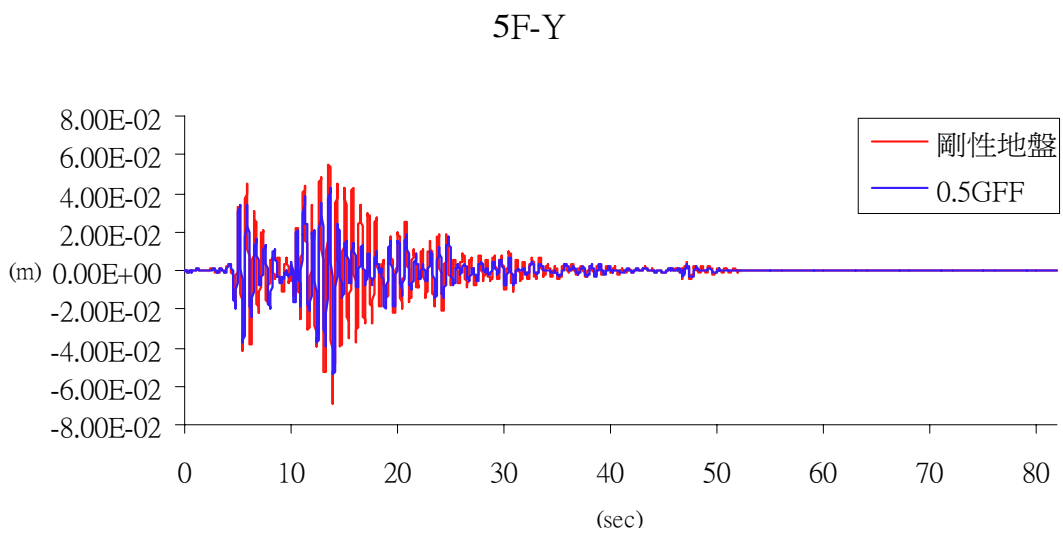
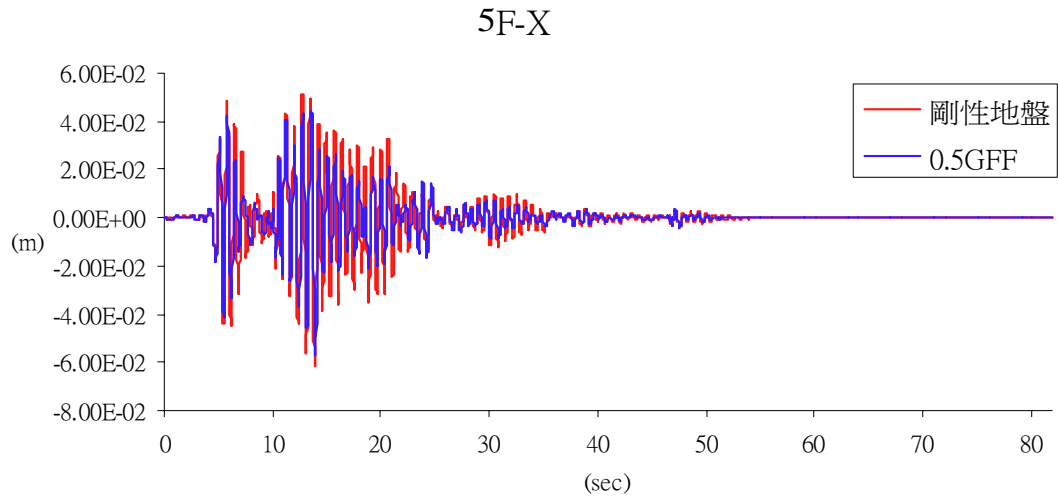


圖 4-20(d) 五樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)



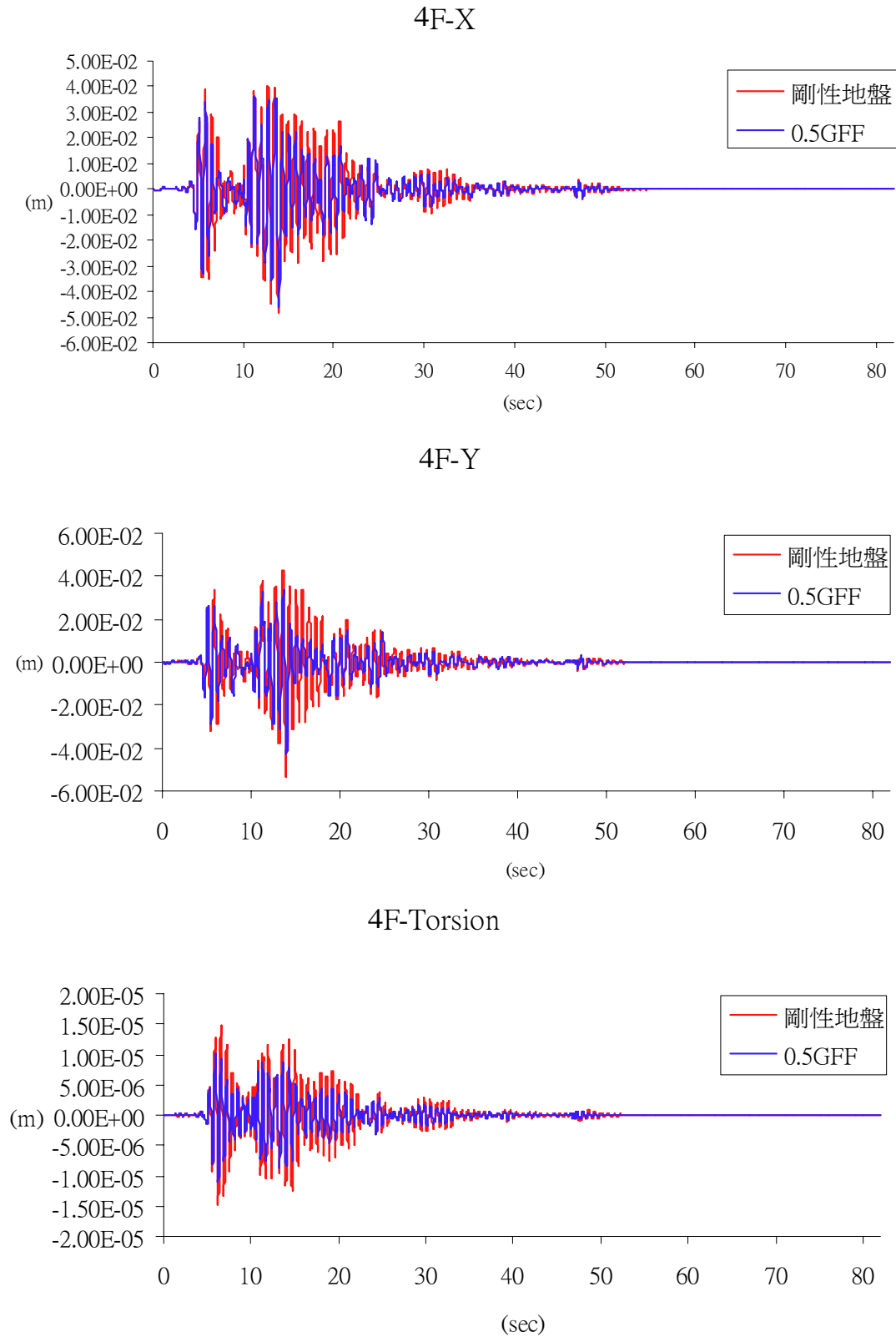


圖 4-20(e) 四樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)

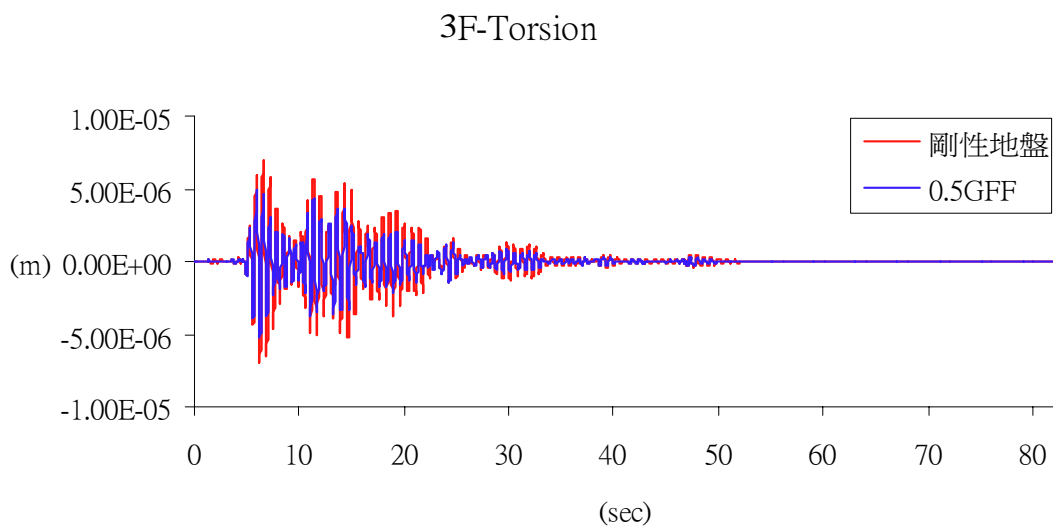
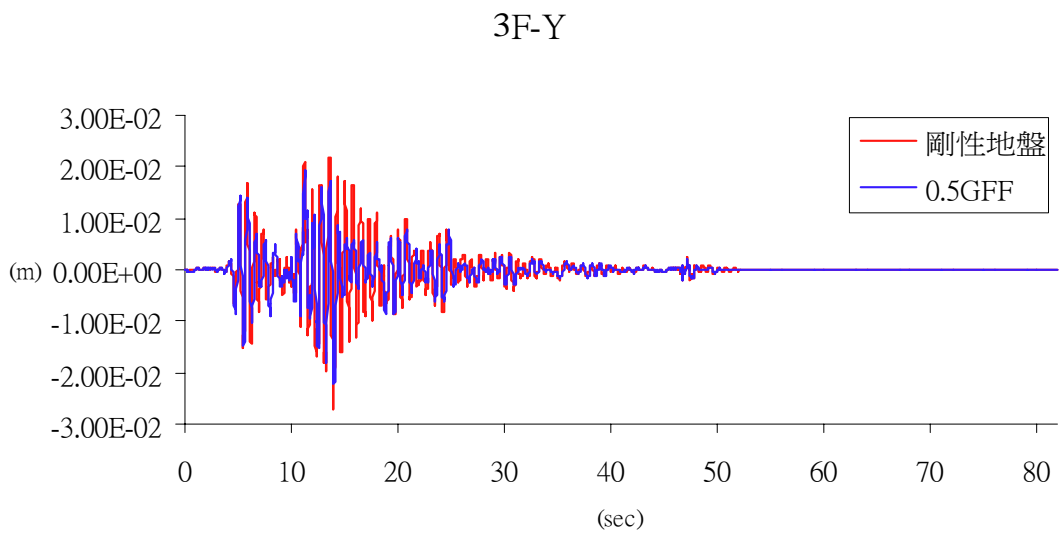
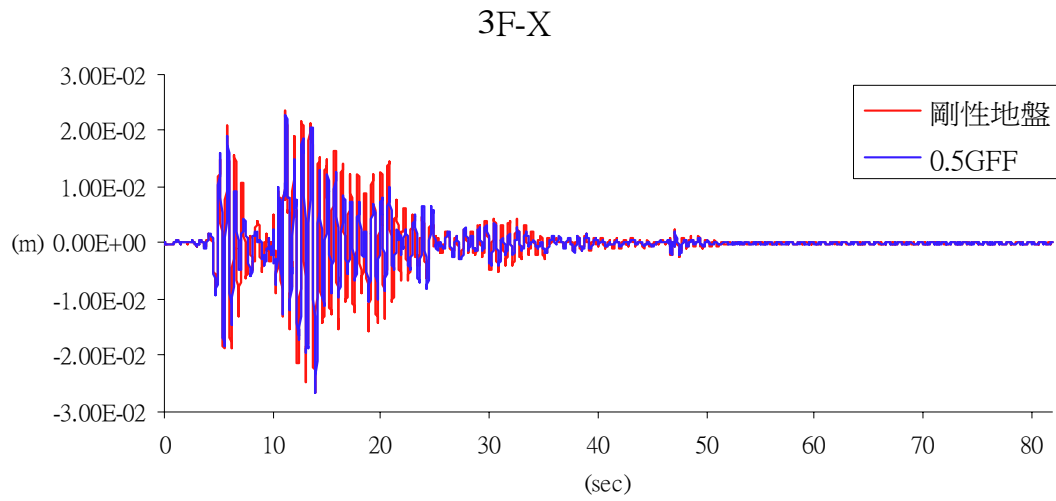


圖 4-20(f) 三樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)

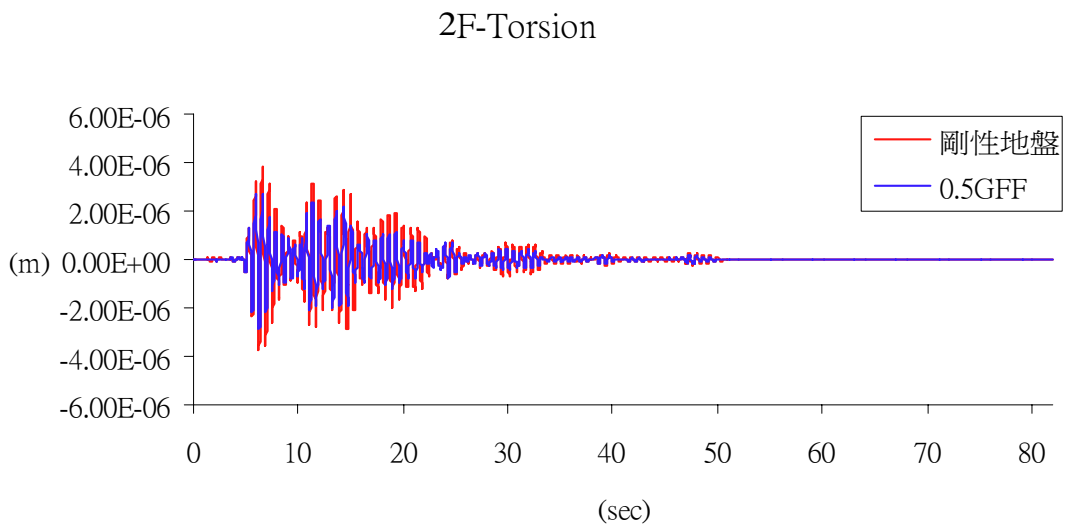
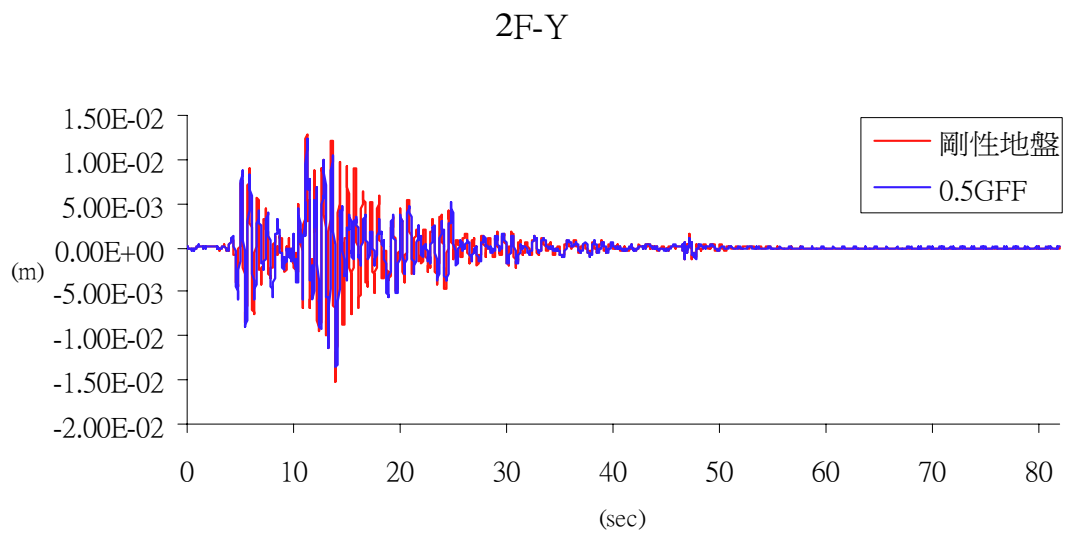
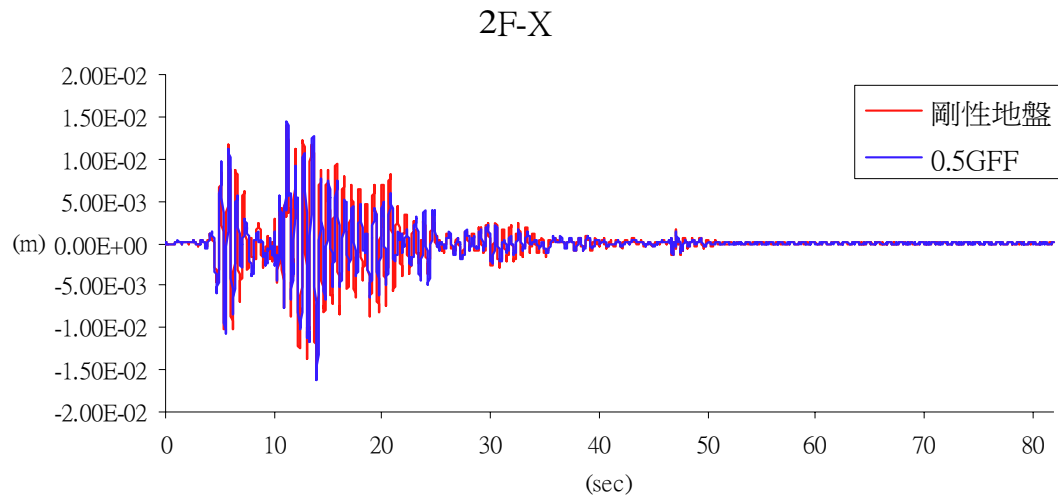
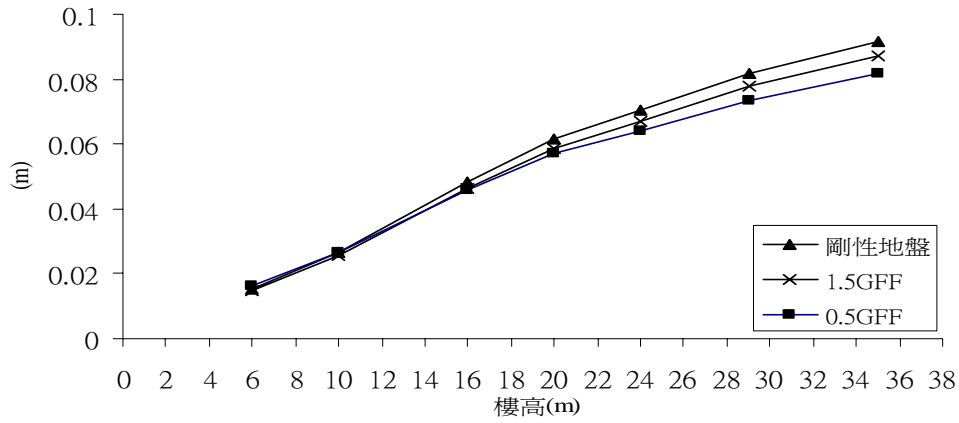
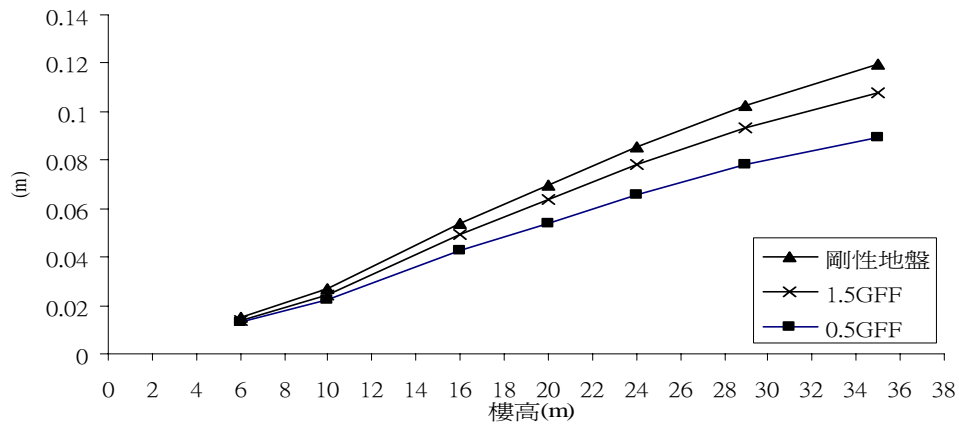


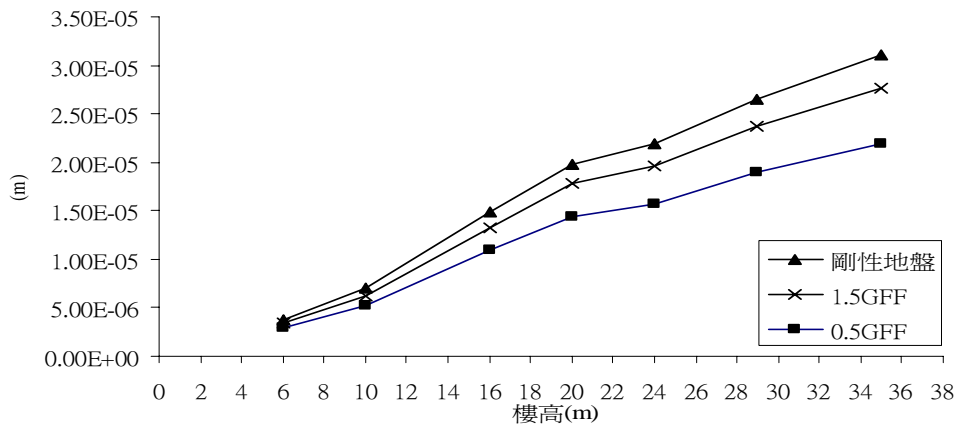
圖 4-20(g) 二樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(北嶺地震)



(a) X 方向最大位移



(b) Y 方向最大位移



(c) Z 方向(Torsion)最大位移

圖 4-21 各樓層在剛性地盤、1.5GFF、0.5GFF 最大位移(北嶺地震)

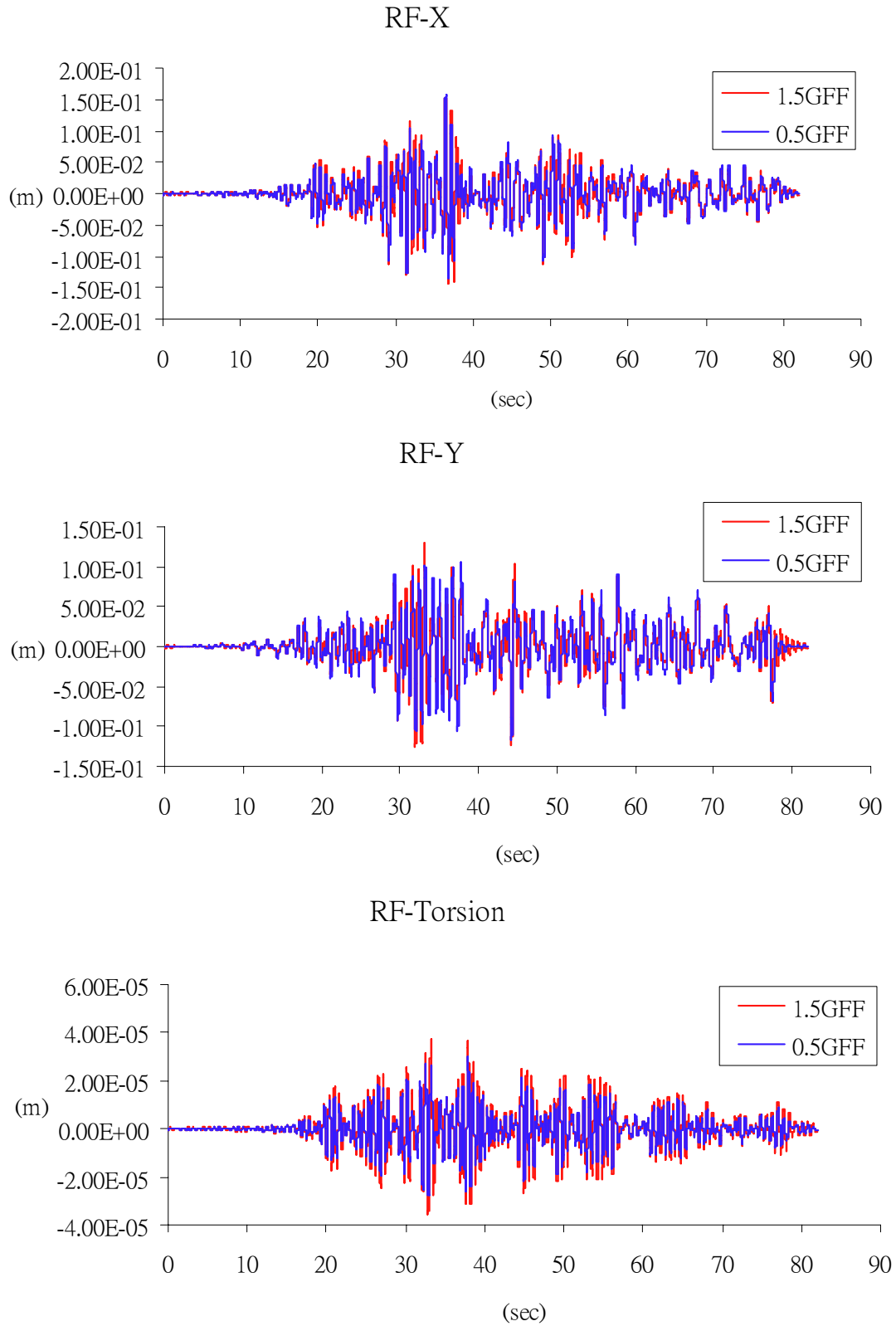


圖 4-22(a) 屋頂層變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

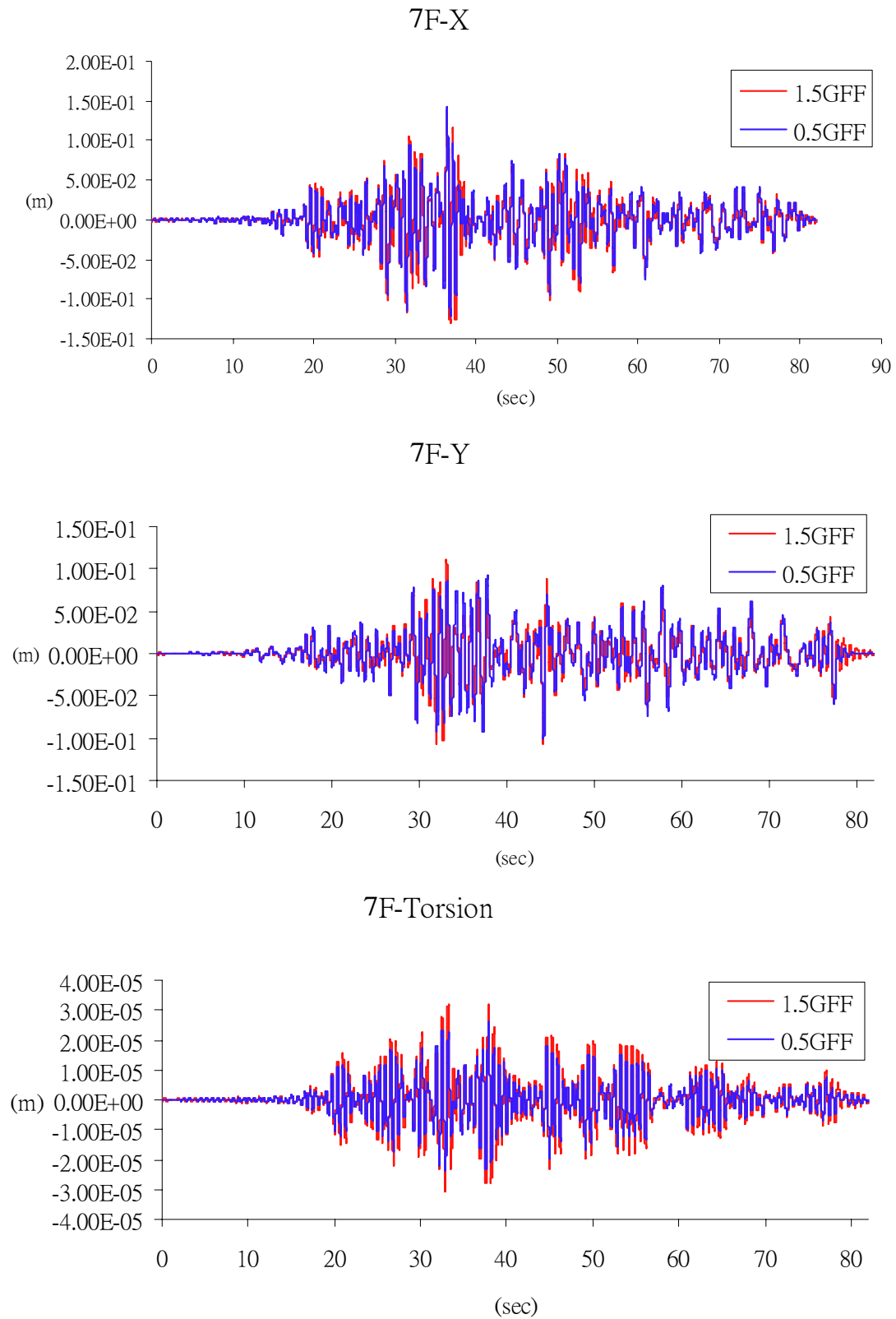


圖 4-22(b) 七樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

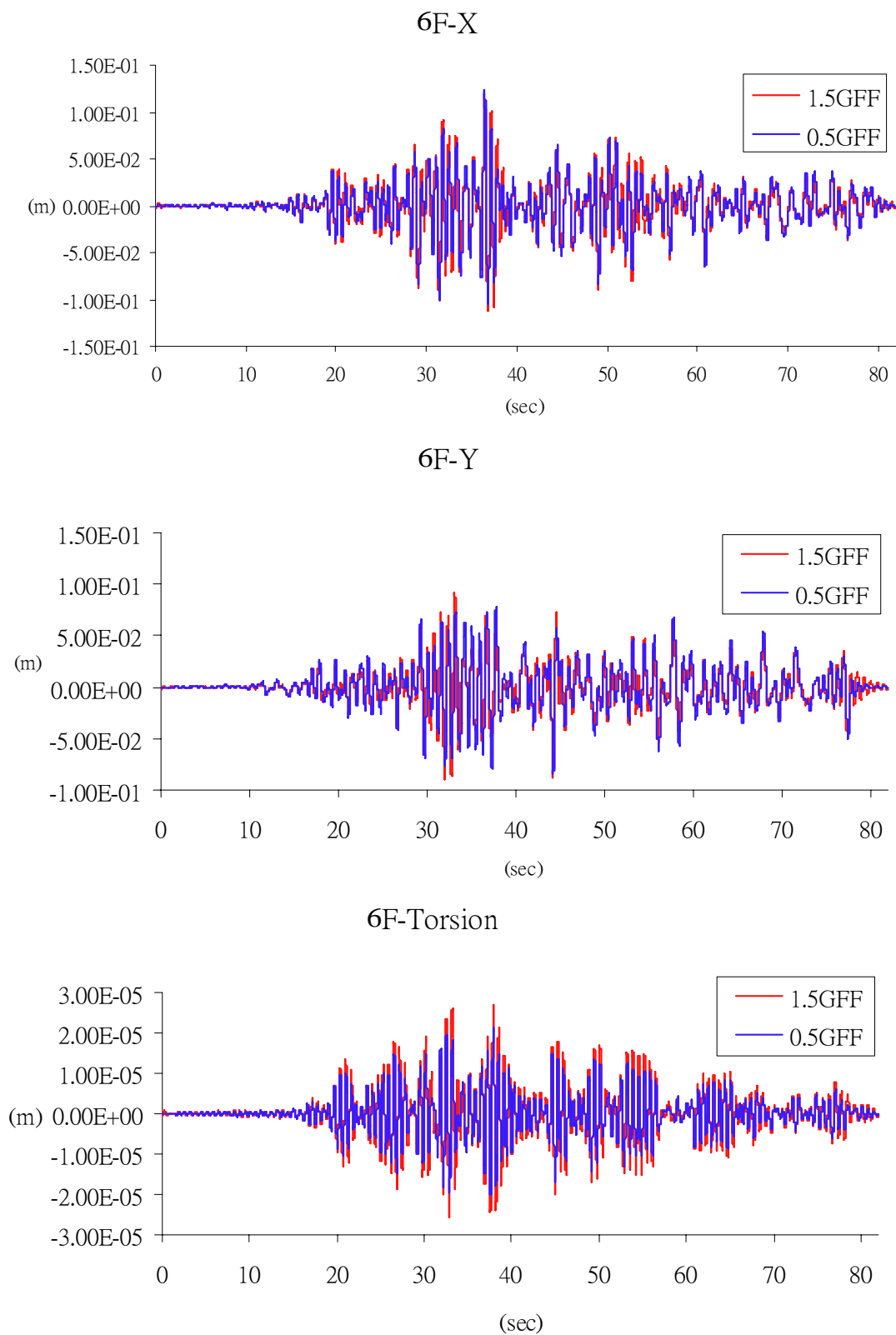


圖 4-22(c) 六樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

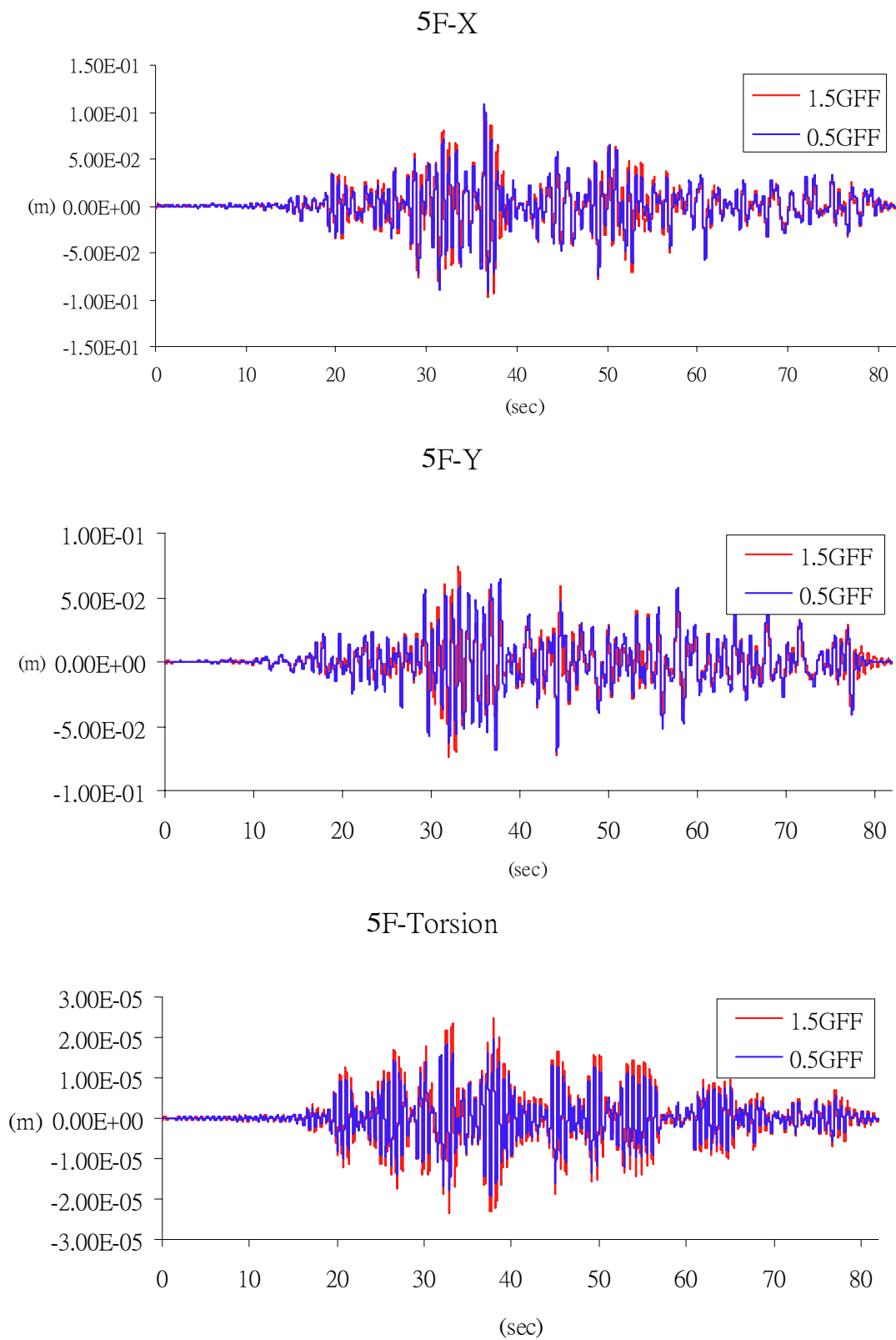


圖 4-22(d) 五樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)



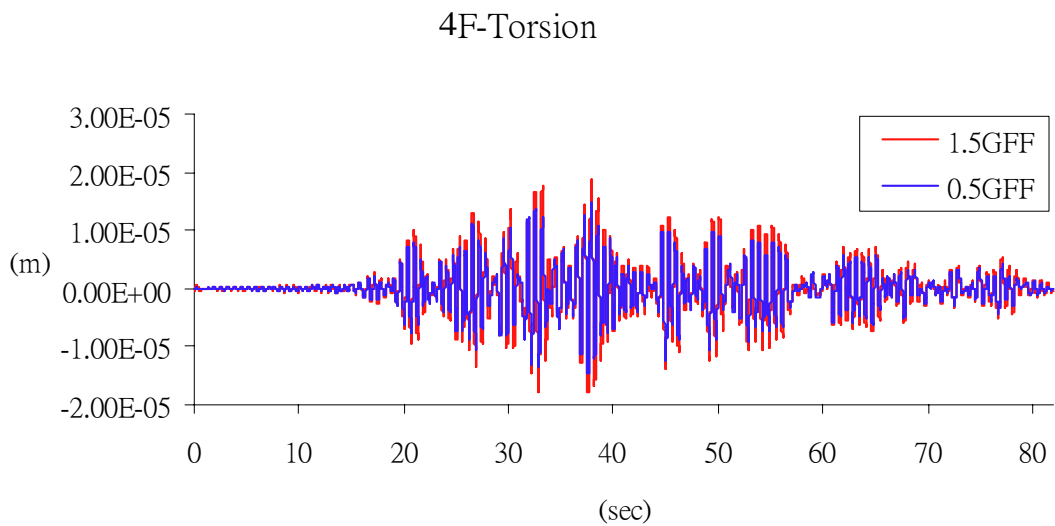
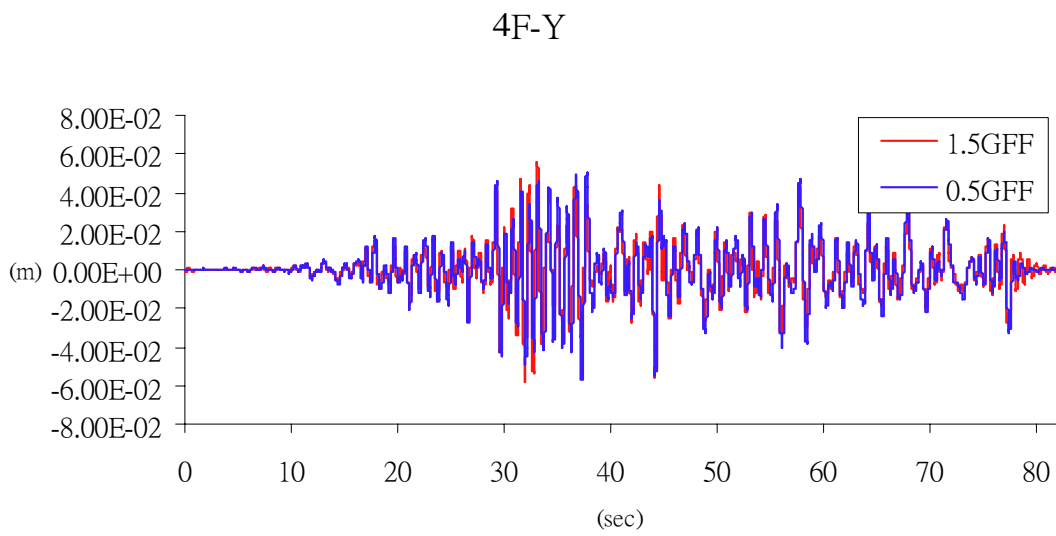
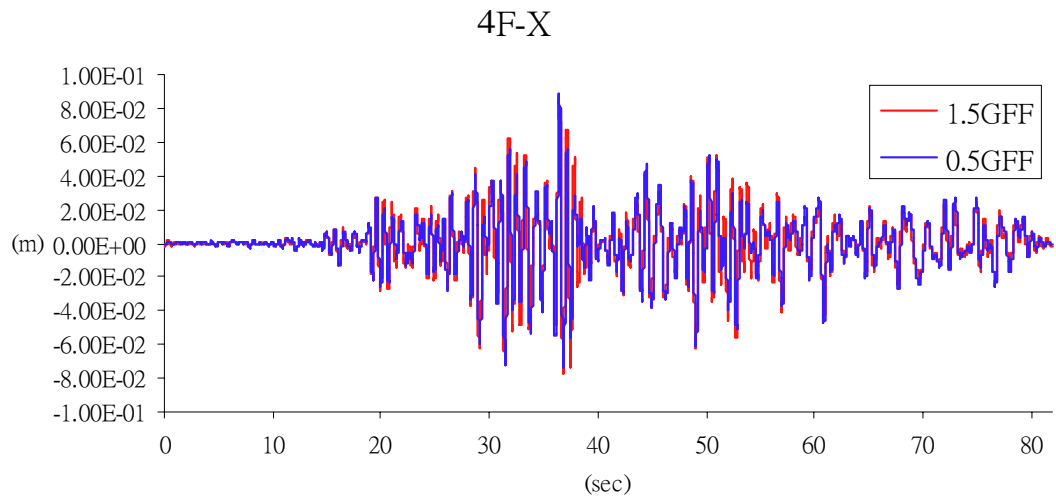


圖 4-22(e) 四樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

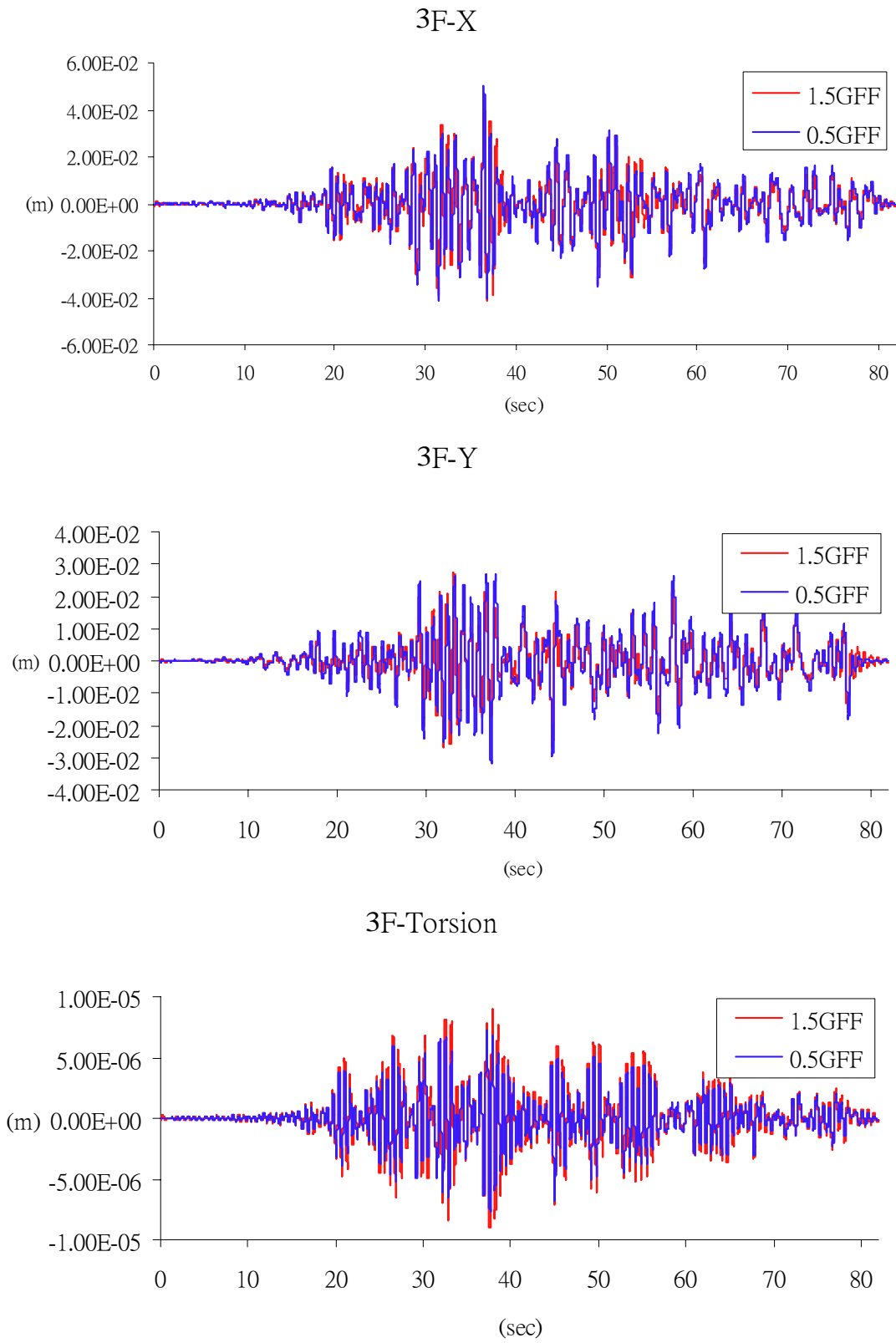


圖 4-22(f) 三樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

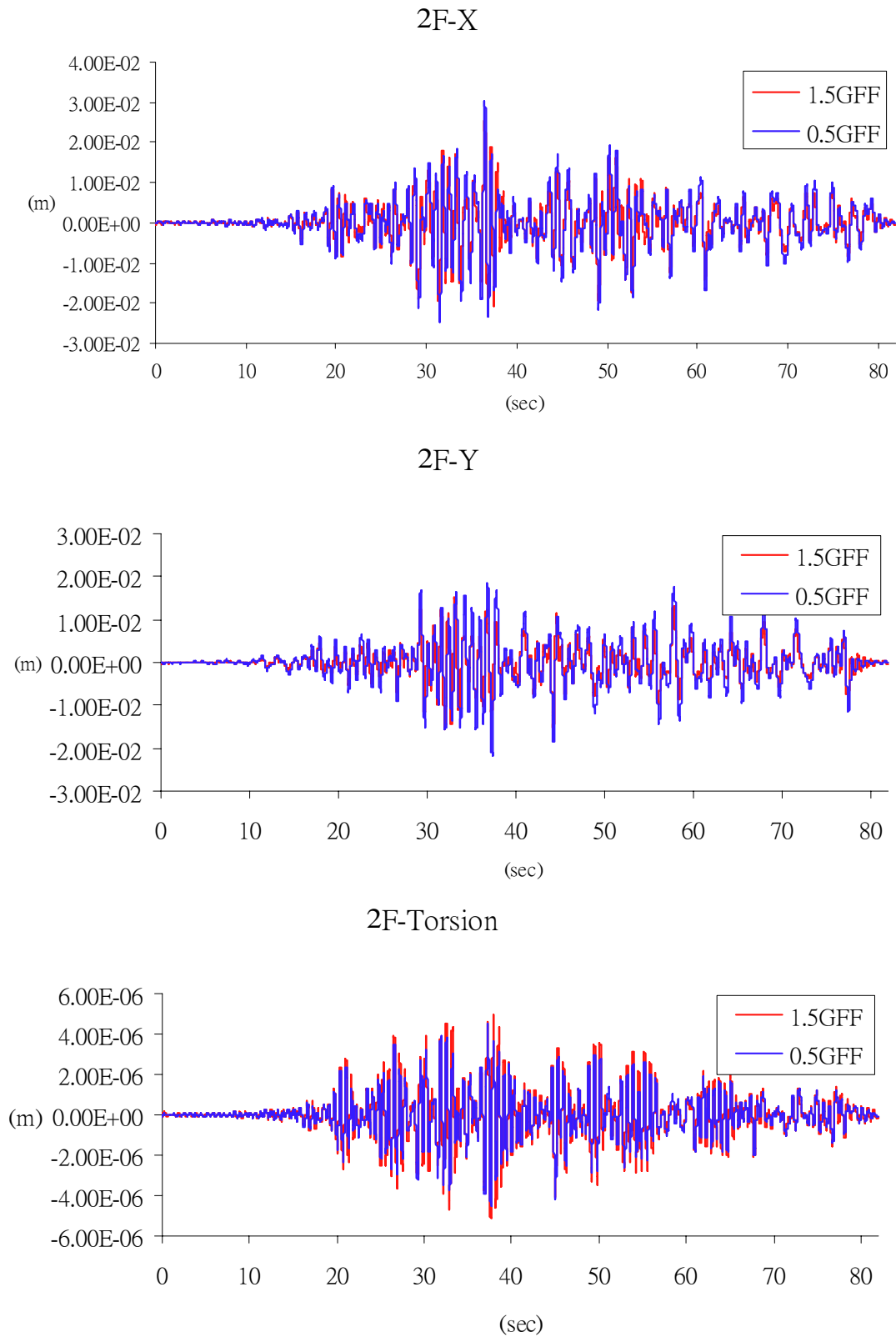


圖 4-22(g) 二樓變化阻抗矩陣位移比較圖(茄定國小)

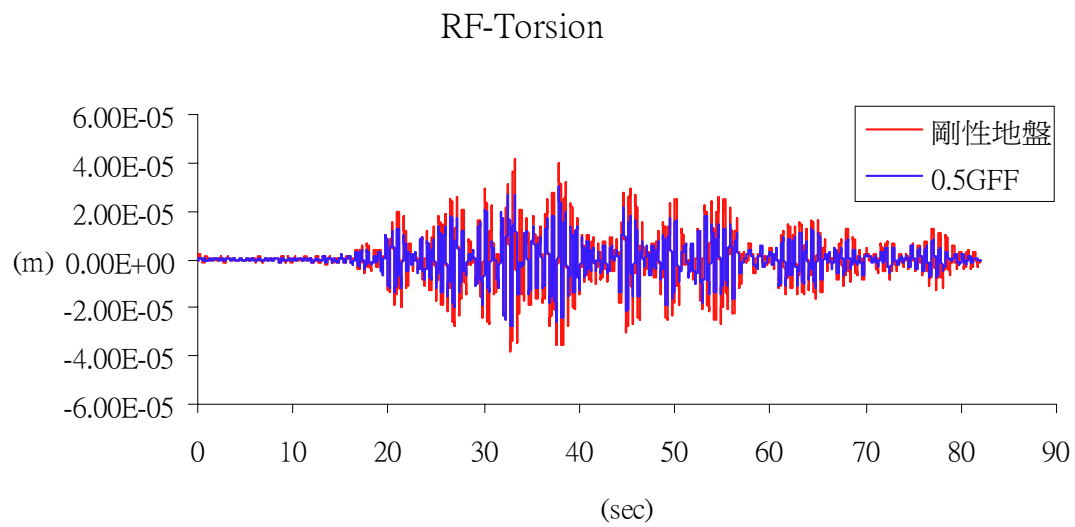
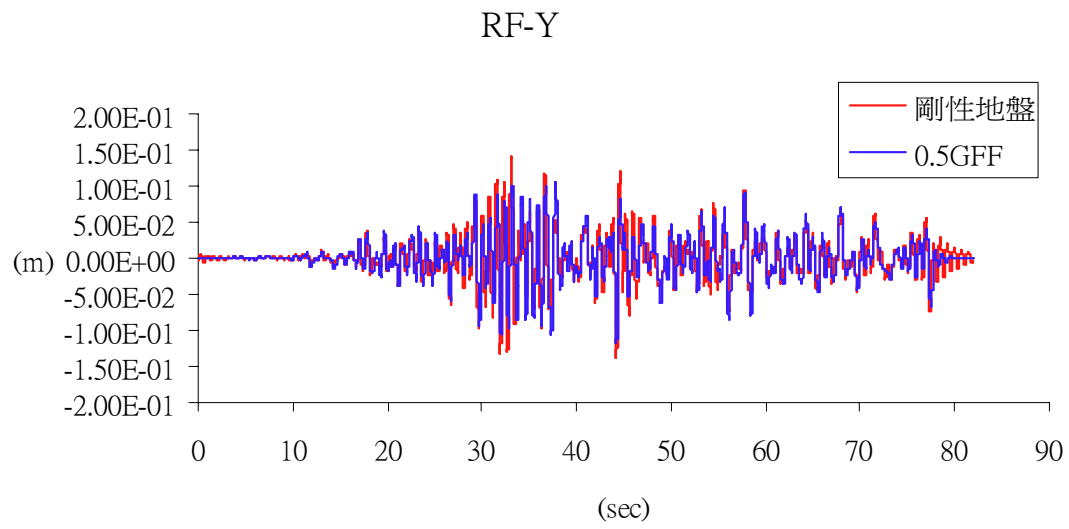
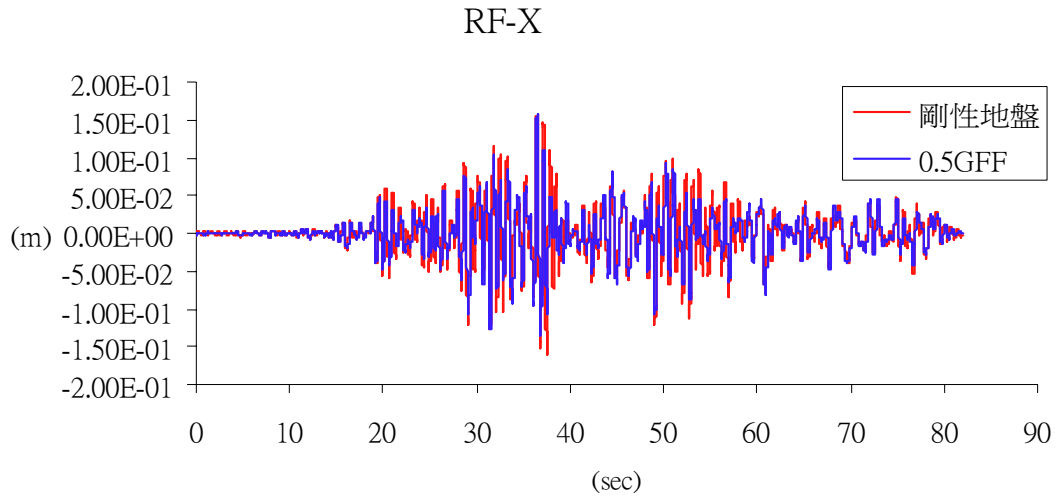


圖 4-23(a) 屋頂層 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)

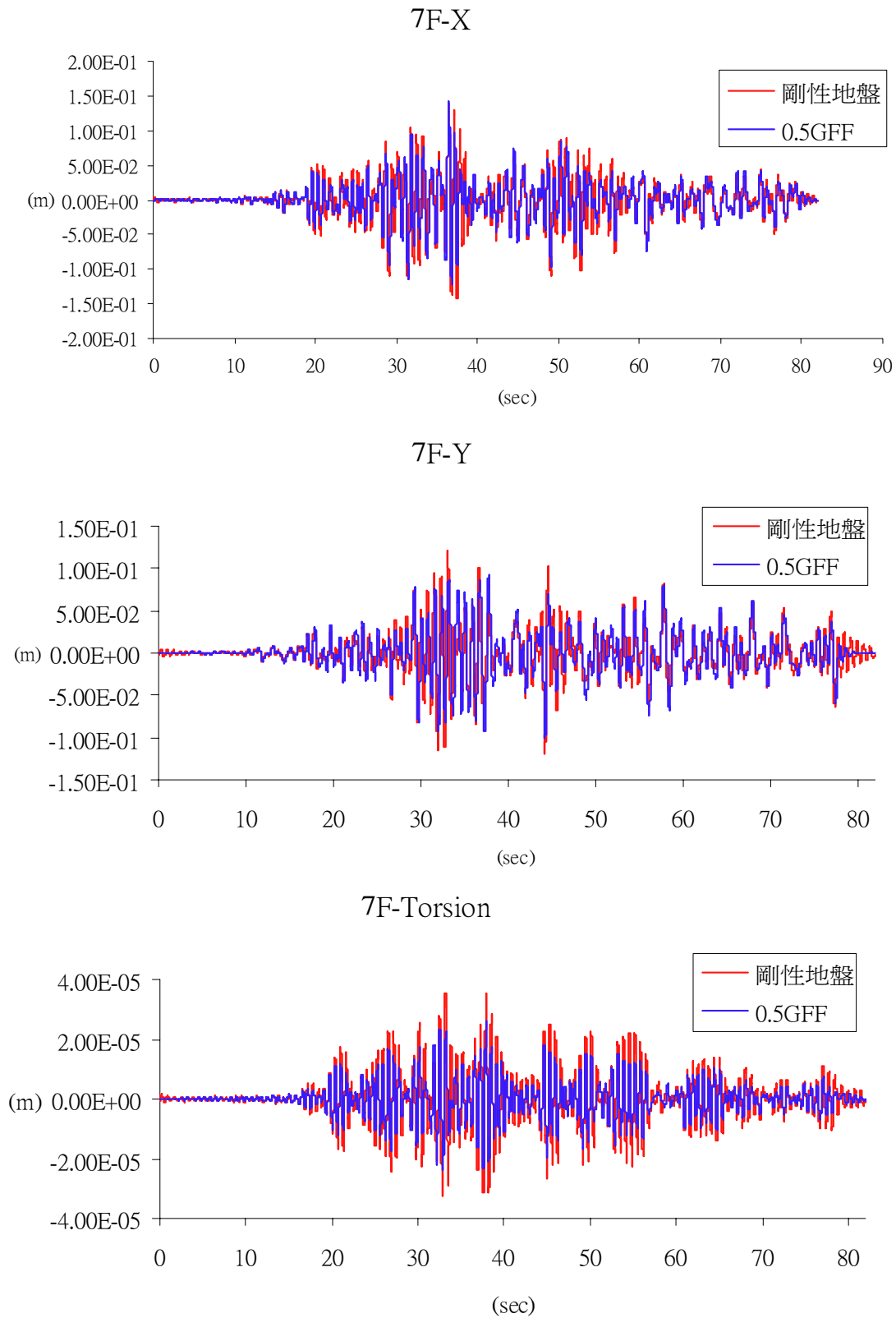


圖 4-23(b) 七樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)

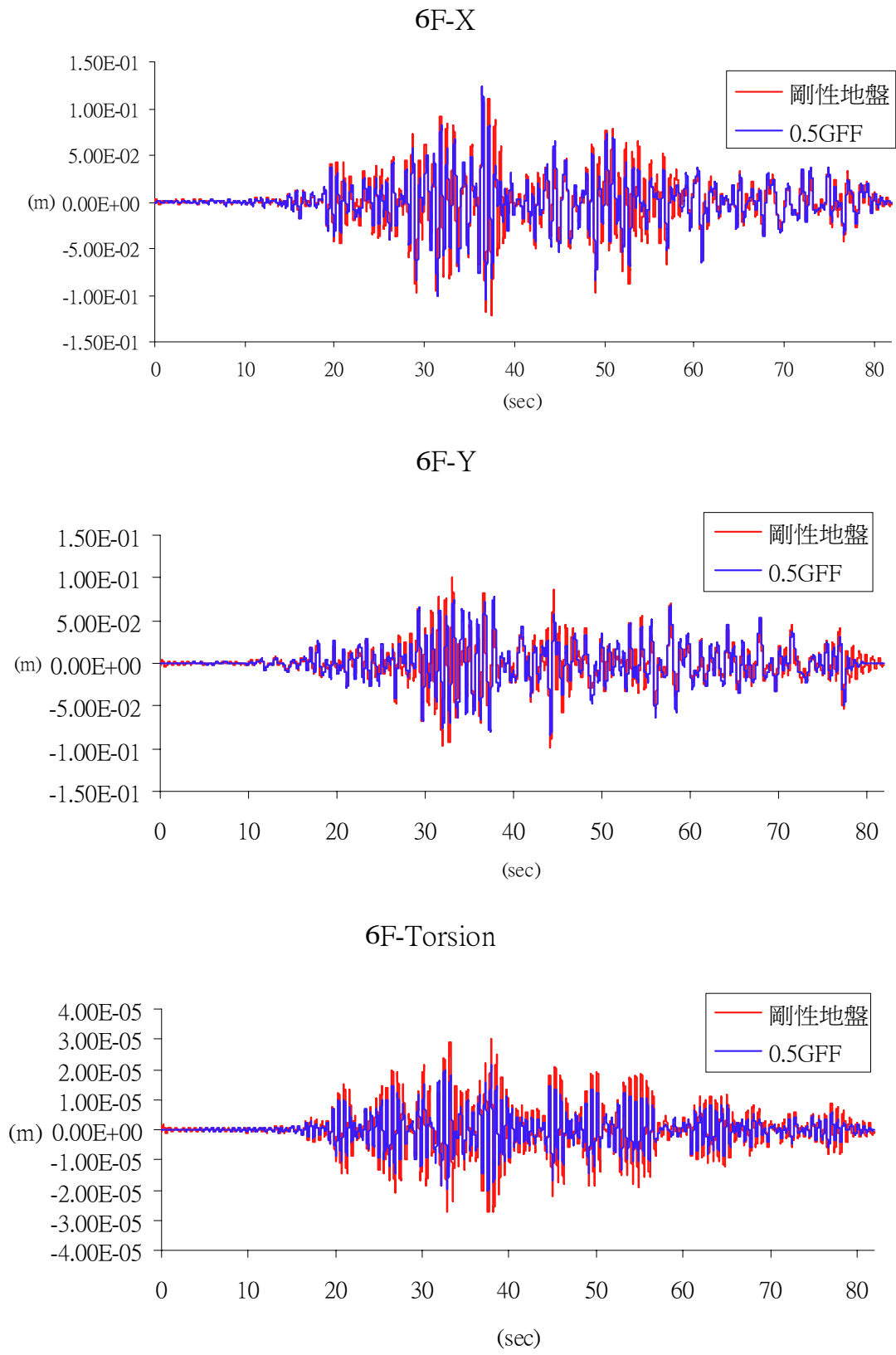


圖 4-23(c) 六樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)

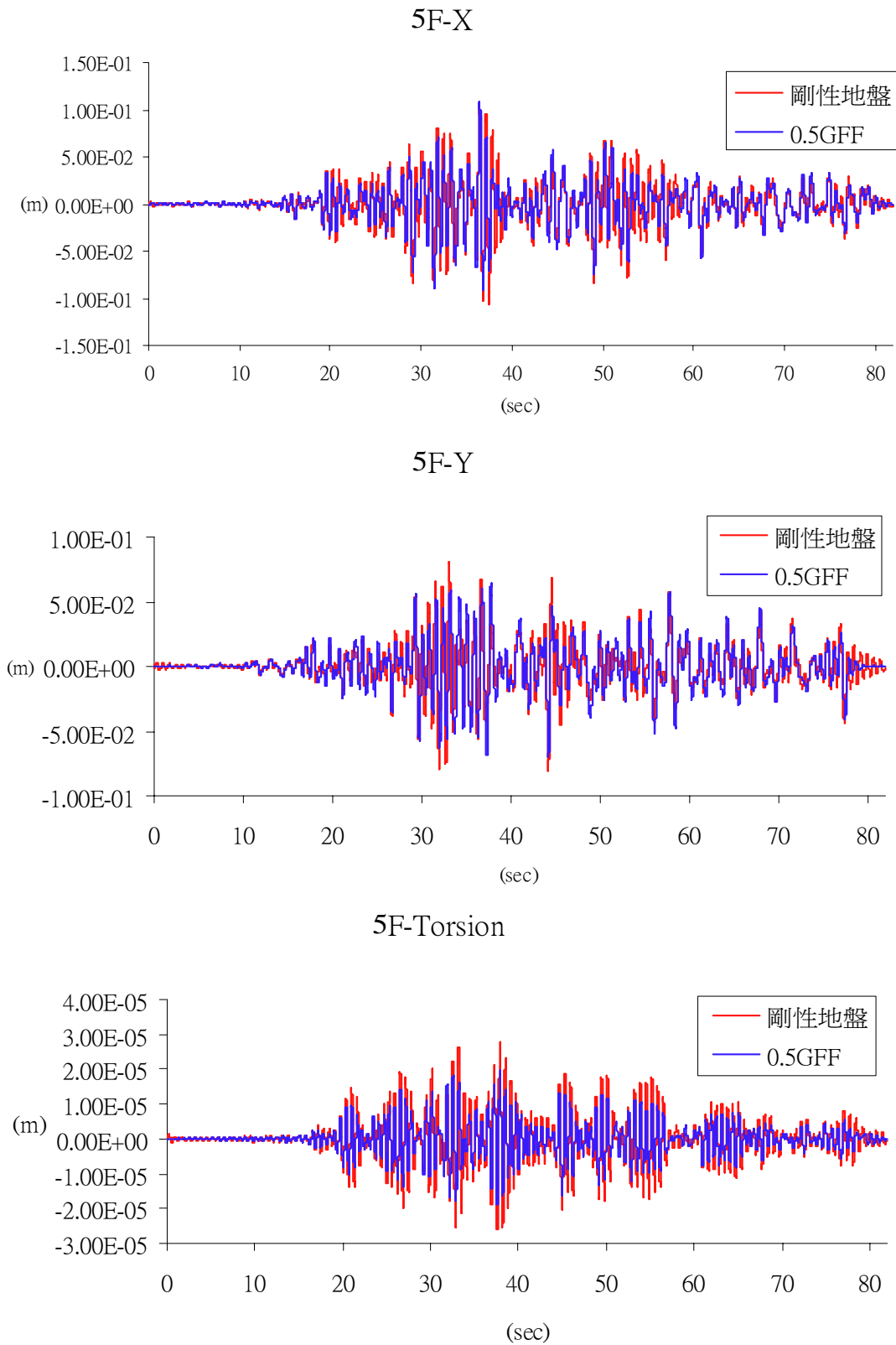


圖 4-23(d) 五樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)

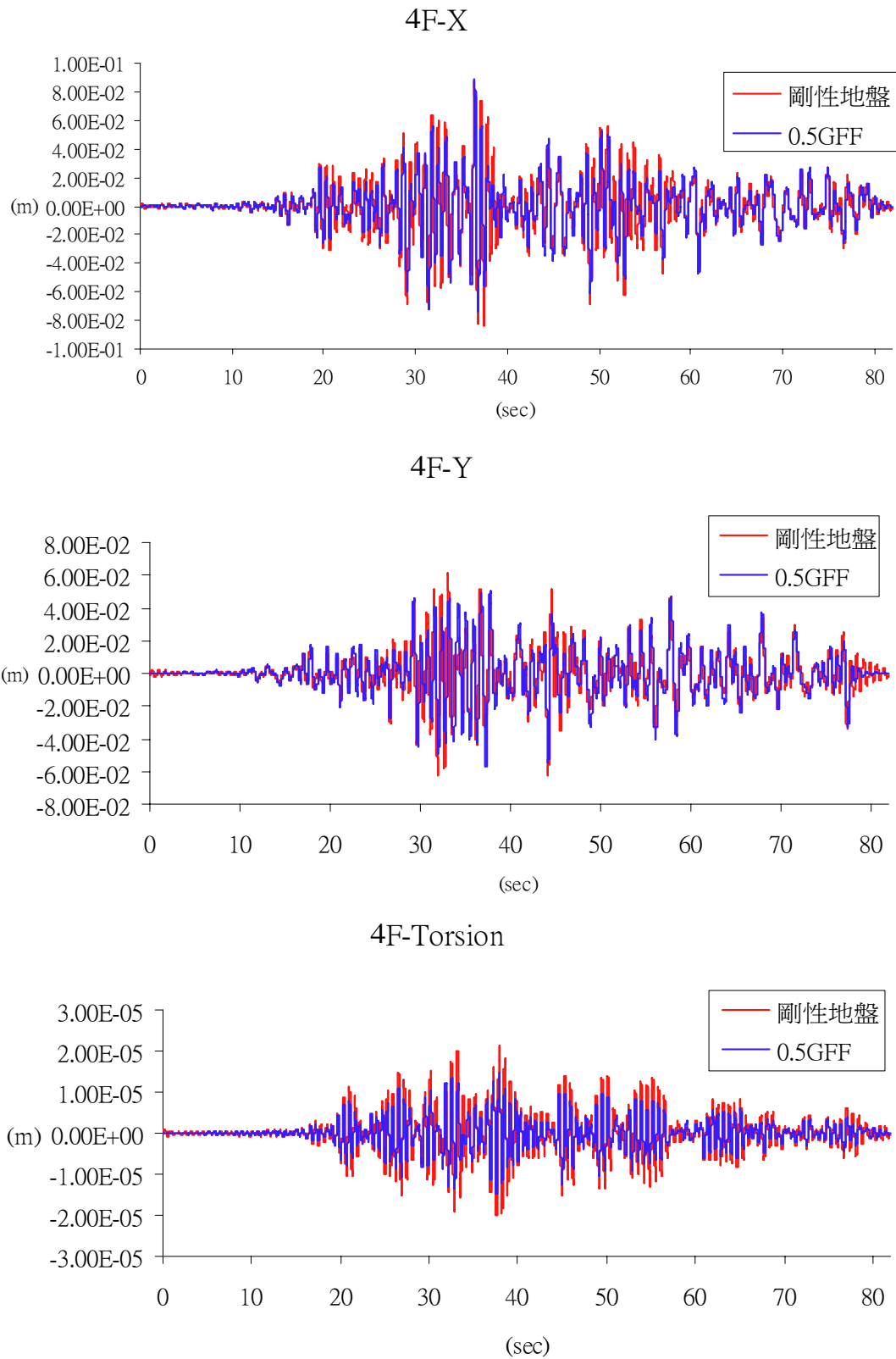


圖 4-23(e) 四樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)



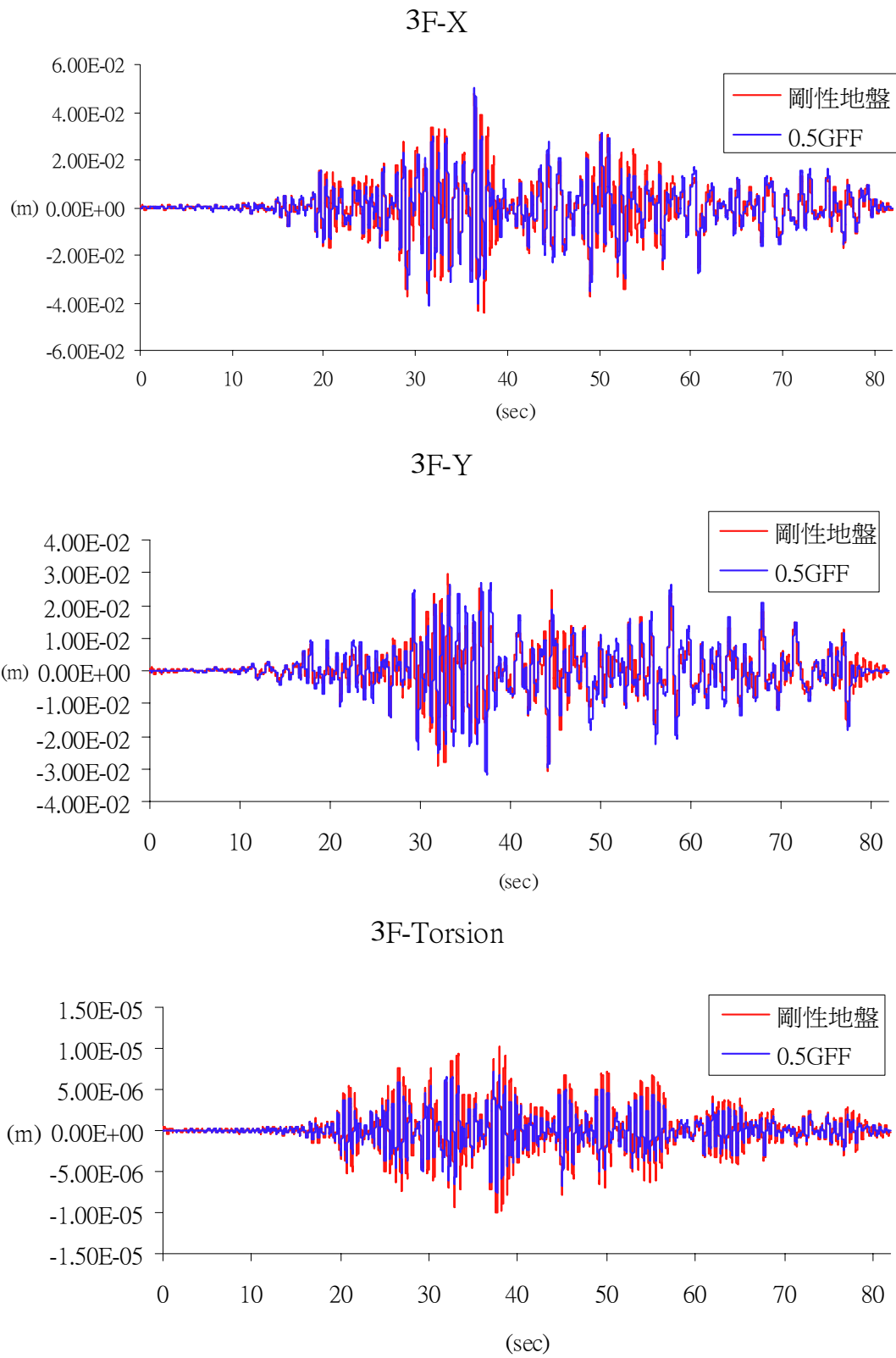


圖 4-23(f) 三樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)

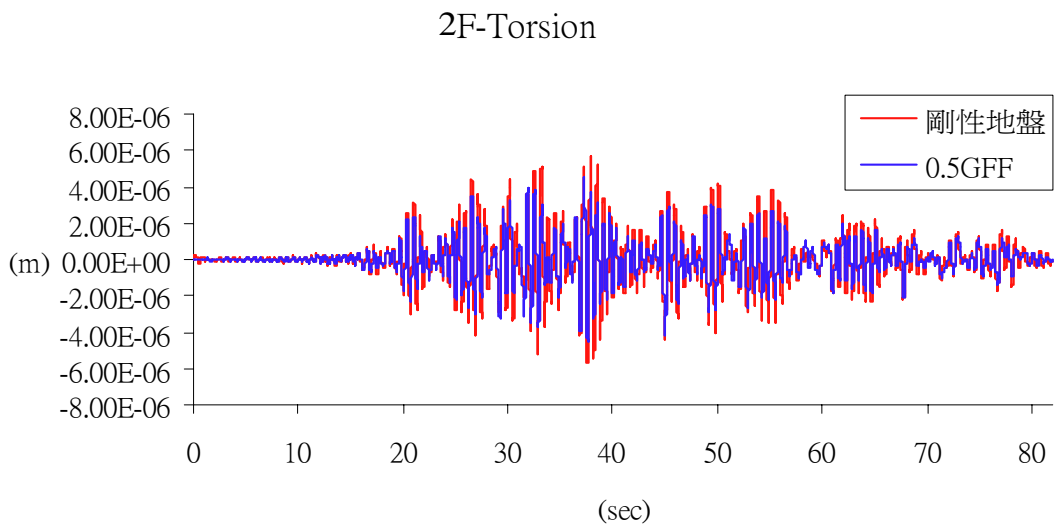
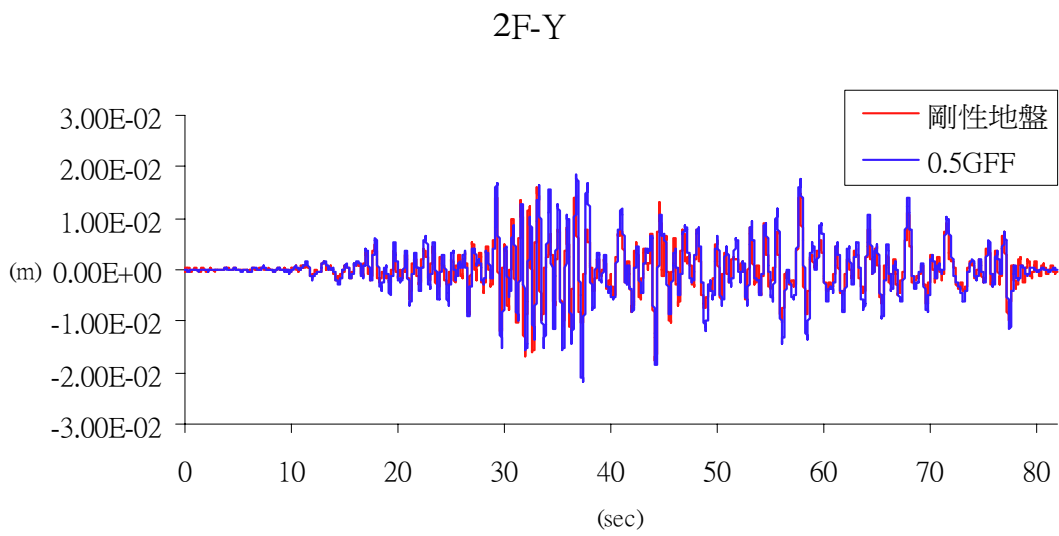
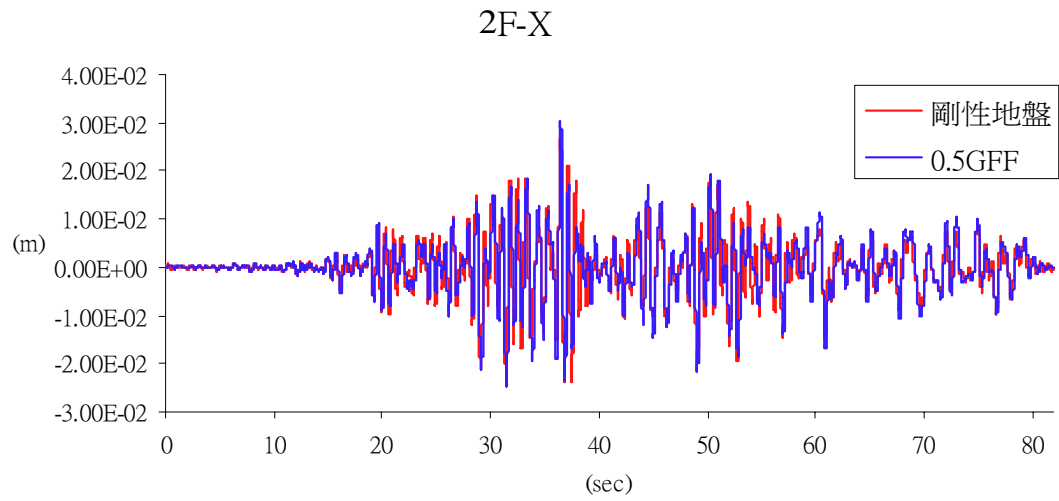
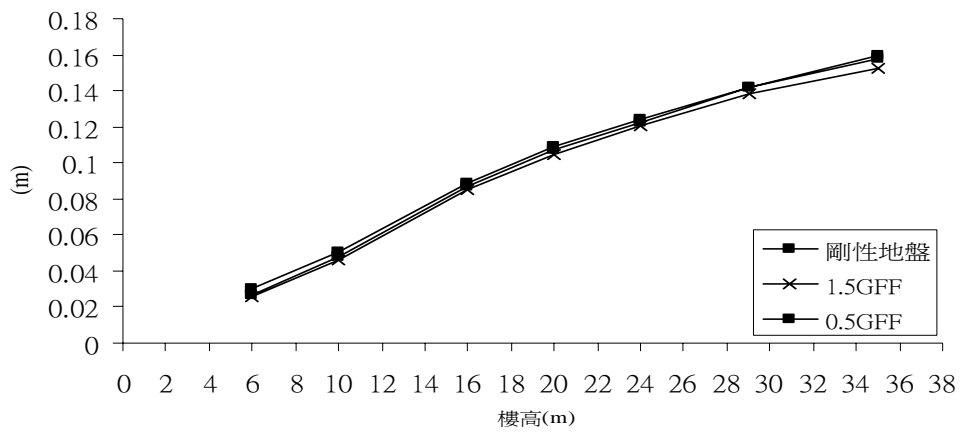
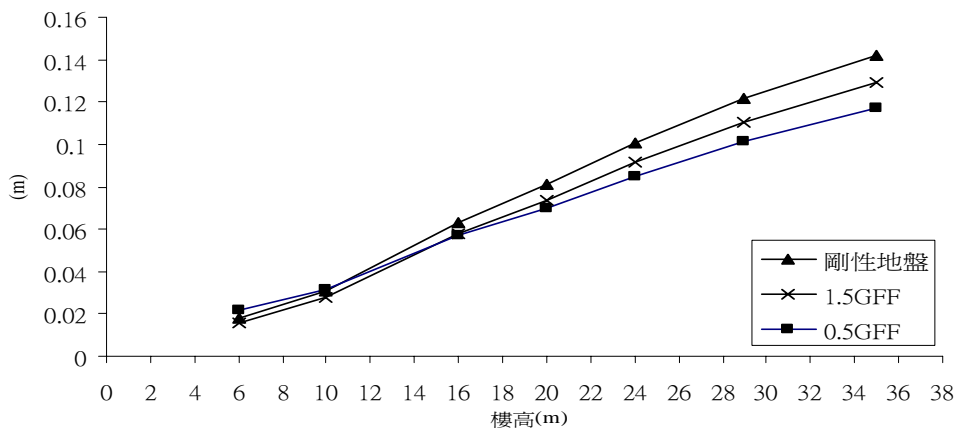


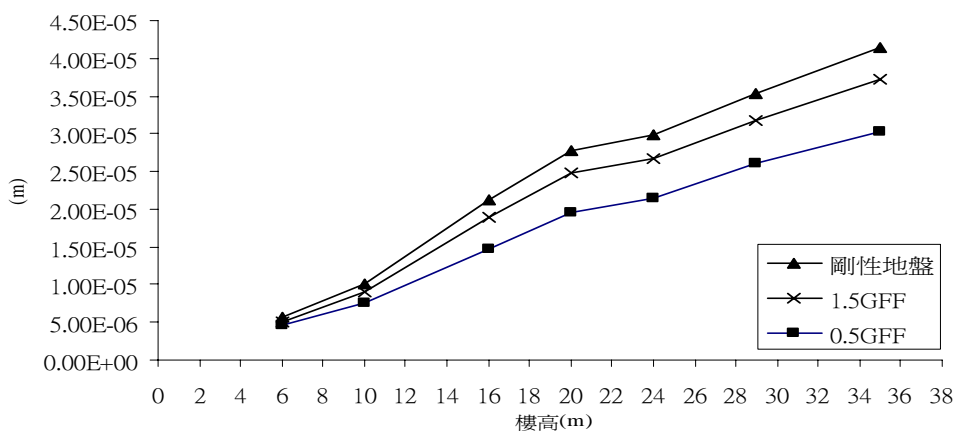
圖 4-23(g) 二樓 0.5 倍阻抗矩陣與剛性地盤位移比較圖(茄定國小)



(a) X 方向最大位移



(b) Y 方向最大位移



(c) Z 方向(Torsion)最大位移

圖 4-24 各樓層在剛性地盤、1.5GFF、0.5GFF 的最大位移 (茄定國小)