

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

中間樓層隔震結構之模態耦合效應研究

A Study on Modal Coupling Effect for Building with

Mid-Story Isolation



Meng-Hui Lin

指導教授：張國鎮 博士

Advisor: Kuo-Chun Chang, Ph.D.

中華民國 97 年 6 月

June, 2008

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

中間樓層隔震結構之模態耦合效應研究

A Study on Modal Coupling Effect for Building with
Mid-Story Isolation

本論文係林孟慧君（學號 R95521219）在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 97 年 6 月 25 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。



口試委員：

張國鎮

(指導教授)

黃震興

蔡孟豪

林裕淵

張國鎮

黃震興

蔡孟豪

林裕淵

系主任、所長：

張國鎮

張國鎮

誌謝

首先要感謝的是恩師 張國鎮教授，兩年來在課業上的耐心指導，尤其在論文研究方面，給予許多指引，使學生獲益匪淺，生活上也總是給予溫暖的關懷與照顧，在此致上最誠摯的敬意與謝意。

感謝口試委員 黃震興老師、蔡孟豪老師以及林裕淵老師所提供的寶貴意見，使得本論文能夠更加完整而嚴謹。

論文能順利完成還要特別感謝汪向榮學長，研究期間細心的指導與周詳的思維，指正許多錯誤並給予建議，實驗期間也總是給予最大的協助。

實驗期間，感謝李俊龍副理提供本試驗用之鉛心橡膠支承墊；感謝陳總以及黃董製作實驗構架並給予專業建議；感謝地震中心標哥、李大哥、雄哥、阿華、阿剛、小吳、嘉欣、二師兄、小梁的專業技術指導與大力幫忙，使得實驗得以順利完成。

感謝研究室的學長在課業或生活上的建議與幫忙，尤其感謝俊仲學長兩年來總是給予支持與鼓勵；感謝柏翰學長指導協助資料處理的方法；感謝同學維晉、姿慧兩年當中，一起互相打氣加油，因為有你們的幫忙與陪伴，才有更往前的動力；感謝學弟妹在實驗時主動幫忙，研究室因為你們帶來歡樂的氣氛。

感謝我的姐姐麗雯以及哥哥天佑，在論文研究與撰寫期間，總是不厭其煩的開導我，在生活上處處體諒包容，給予我最大的支持。

最後要感謝我的爸媽，這段時間一直忙於學業的問題，相處的時間變得很少，因為你們的體諒，才能專心完成學業，在此表達由衷的感謝。

僅將本文獻給所有關心我的人。

摘要

近年來，我國隨著隔震技術逐漸成熟，除了基礎隔震建築物外，因應經濟預算考量、建物特性、高人口密度等因素，中間樓層隔震建築物亦與日俱增。然而中間樓層隔震建築物並無設計規範可遵循，僅能依照現行基礎隔震建築規範進行設計建照，除了下部結構勁度之考量外，設計興建時相對於基礎隔震是否還有其他特殊考量，需要多加探討。

從以前的文獻中得知中間樓層隔震結構相對於基底隔震結構動態行為更為複雜，不能單純考量下部結構勁度的影響，上部結構勁度同樣會影響隔震效果。其中非設計預期之模態耦合效應會造成中間樓層隔震結構無法發揮預期之隔震效果，然這方面的研究為現象性之描述，對於相關的結構動態特性並無實際試驗佐證，無法提供實務設計上有效之依據，仍有待進一步研究。

故本文主要研究模態耦合效應對中間樓層隔震結構的影響，希望以試驗結果驗證理論分析結果，研究方法由中間樓層隔震結構簡化模擬成三個堆積質量節點之三自由度結構，改變上下部結構之質量比與頻率比進行參數分析，以興建中的台大土木系研究大樓為中間樓層隔震結構之實例做分析研究，並設計規劃中間樓層隔震結構縮尺振動台試驗，進一步驗證模態耦合效應並探討結構動態特性。以期提供工程界實務設計一個良好的參考依據，更進一步於規範中列入考量，使有效發揮結構隔震效益。

關鍵詞：中間樓層隔震結構、動力特性、高模態、模態耦合效應、振動台試驗

Abstract

The excellent performance of seismically isolated buildings during the past earthquakes is encouraging for the extensive adoption of the isolation design. Correspondingly, isolation design guidelines have been implemented or refined in various seismic design codes. However, these design guidelines have been provided specifically for the base-isolated structures. For the mid-story isolation design in which the isolation layer is frequently designated at the top of the first or other lower stories of the buildings to facilitate the construction and efficiently utilize the limited site, there indeed exists the difference between the mid-story isolated and the base-isolated buildings such as the flexibility effect of the structure below the isolation layer as well as the interaction of the structures below and above the isolation layer.

Therefore, for the mid-story isolated structures, a simplified three-lumped-mass structural model is adopted to perform the equivalent linear analysis to appropriately reflect the effect of vibration characteristics of the structures above and below the isolation layer, and to have a better insight on the basic dynamic characteristics in this study. Accordingly, the shaking table tests on the scale-down models were conducted to validate the numerical analysis results. It is concluded that for the mid-story isolated buildings, the participation and the undesired coupling effect of the higher modes should be especially taken into account in the equivalent lateral response design procedure.

Key words : mid-story isolation, dynamic characteristic, higher mode, modal coupling, shaking table test.

目錄

誌謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
照片目錄.....	XII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	1
1.3 研究內容.....	3
第二章 參數分析與實例研究.....	8
2.1 參數定義.....	8
2.2 分析結果.....	9
2.3 中間樓層隔震結構之實例研究.....	10
第三章 中間樓層隔震縮尺結構振動台試驗.....	27
3.1 三軸向地震模擬振動台.....	27
3.2 三層樓縮尺中間層隔震結構試體.....	28
3.3 鉛心橡膠支承墊.....	30
3.3.1 基本構造與力學行為.....	30
3.3.2 設計與檢核程序.....	31
3.3.3 結構元件測試.....	35
3.4 量測機制.....	36
第四章 試驗結果.....	67
4.1 結構基本特性.....	67
4.2 歷時反應.....	68
4.2.1 位移歷時反應.....	68
4.2.2 加速度歷時反應.....	69
4.2.3 樓層剪力.....	71
4.2.4 遲滯迴圈.....	72
4.3 模態耦合效應.....	73
第五章 數值模擬.....	125
5.1 數值模擬模型.....	125
5.2 模擬分析結果.....	125
第六章 結論與未來展望.....	174
參考文獻.....	176

表目錄

表 2.3.1	LRB 設計與實體測試值	13
表 2.3.2	結構前三模態之模態質量參與因子	13
表 2.3.3	不同時間點下之基底剪力比較	13
表 2.3.4	簡化三自由度結構模型之設定參數	14
表 3.3.1	試驗之 LRB 設計值	38
表 3.3.2	結構元件測試結果	38
表 3.3.3	感測器種類與量測資訊	39
表 4.1.1	四組試體長向前三模態週期	74
表 4.1.2	四組試體長向前三模態之模態質量參與因子	74
表 4.1.3	四組試體長向前三模態之阻尼比(%)	74
表 4.2.1	隔震層相對位移最大值(單位：mm)	74
表 4.2.2	第一組試體各樓層對地表最大加速度比值	75
表 4.2.3	第三組試體各樓層對地表最大加速度比值	75
表 4.2.4	第四組試體各樓層對地表最大加速度比值	75
表 4.2.5	下部結構樓層剪力檢核(單位：kN)	75
表 4.3.1	第一組試體試驗與等效線性分析結果	76
表 4.3.2	第三組試體試驗與等效線性分析結果	76
表 4.3.3	第四組試體試驗與等效線性分析結果	76
表 5.1.1	LRB 模擬參數	128
表 5.2.1	SAP 模態分析結果	128
表 5.2.2	MIDAS 模態分析結果	128
表 5.2.3	第一組試體試驗與非線性歷時分析結果	128
表 5.2.4	第三組試體試驗與非線性歷時分析結果	128
表 5.2.5	第四組試體試驗與非線性歷時分析結果	129

圖目錄

圖 1.1.1 至 2009 年隔震建築物興建數量分布圖	5
圖 1.1.2 隔震建築物使用用途比例圖	5
圖 1.2.1 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應結構頻率之變化	5
圖 1.2.2 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應阻尼比之變化	6
圖 1.2.3 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值不同下之振態	6
圖 2.1.1 簡化之三自由度結構	14
圖 2.2.1 第一模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)	15
圖 2.2.2 第二模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)	15
圖 2.2.3 第三模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)	16
圖 2.2.4 第一模態下部結構樓層剪力比($m_3/m_1=10$)	16
圖 2.2.5 第二模態下部結構樓層剪力比($m_3/m_1=10$)	17
圖 2.2.6 第一模態阻尼比($m_3/m_1=10$)	17
圖 2.2.7 下部結構最大變位($m_3/m_1=10$)	18
圖 2.2.8 下部結構最大樓層剪力比($m_3/m_1=10$)	18
圖 2.2.9 下部結構對地表最大加速度比值($m_3/m_1=10$)	19
圖 2.2.10 高模態頻率差($m_3/m_1=10$)	19
圖 2.2.11 隔震層上方樓板對地表最大加速度比值($m_3/m_1=10$)	20
圖 2.2.12 第二模態阻尼比($m_3/m_1=10$)	20
圖 2.3.1 LRB 實體測試之遲滯迴圈	21
圖 2.3.2 台灣大學土木系研究大樓數值模型	21
圖 2.3.3 TAP097 於 921 地震下之東西向地震加速度歷時	22
圖 2.3.4 TAP097 於 921 地震下之東西向地震加速度反應譜	22
圖 2.3.5 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下於不同時間點之樓層剪力分布	23
圖 2.3.6 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下之絕對加速度歷時反應	24
圖 2.3.7 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下之位移歷時反應	24
圖 2.3.8 土木系研究大樓 921 地震測站 TAP097 東西向地震力 320gal 之傅立葉轉換	24
圖 2.3.9 前三模態之模態質量參與因子與高模態頻率差	25
圖 2.3.10 最大與前三模態下部結構樓層剪力比	25
圖 2.3.11 下部結構與隔震層上方樓板對地表最大加速度比值	25
圖 3.1.1 國家地震研究中心地震模擬實驗室之地震模擬振動台	39
圖 3.2.1 第一組實驗鋼構架設計圖(下部結構柱長 80 公分)	40
圖 3.2.2 第二組實驗鋼構架設計圖(下部結構柱長 200 公分)	40
圖 3.2.3 上部結構柱長 2.5 公尺(柱: H150×150×7×10)	41
圖 3.2.4 下部結構柱長 0.8 公尺(柱: H150×150×7×10)	42

圖 3.2.5 下部結構柱長 2 公尺(柱: H150×150×7×10).....	42
圖 3.2.6 連接板尺寸(厚度:20 公厘).....	43
圖 3.2.7 上部結構柱接頭尺寸(厚度:25 公厘).....	43
圖 3.2.8 下部結構柱與隔震層相接之接頭尺寸(厚度:25 公厘)-.....	44
圖 3.2.9 下部結構柱與基底相接之接頭尺寸(厚度:20 公厘).....	44
圖 3.2.10 剛性樓板.....	45
圖 3.2.11 上覆鋼板.....	45
圖 3.2.12 梁柱接頭尺寸 (梁/柱尺寸: H150x150x7x10).....	47
圖 3.2.13 轉接板尺寸 (厚度: 20 公厘).....	47
圖 3.2.14 現行建築物耐震設計規範台北三區最大考量水平加速度反應譜.....	48
圖 3.2.15 縮尺最大考量水平加速度反應譜.....	48
圖 3.2.16 331TAP097 正規化加速度歷時.....	49
圖 3.2.17 921TAP097 正規化加速度歷時.....	49
圖 3.2.18 614NCREE 正規化加速度歷時.....	49
圖 3.2.19 921NCREE 正規化加速度歷時.....	50
圖 3.2.20 331TAP097 Code Compatible 正規化加速度歷時.....	50
圖 3.2.21 921NCREE Code Compatible 正規化加速度歷時.....	50
圖 3.2.22 331TAP097 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g).....	51
圖 3.2.23 921TAP097 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g).....	51
圖 3.2.24 614NCREE 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g).....	51
圖 3.2.25 921NCREE 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g).....	52
圖 3.2.26 331TAP097 Code Compatible 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g). 52	
圖 3.2.27 921NCREE Code Compatible 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g). 52	
圖 3.2.28 331TAP097 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	53
圖 3.2.29 921TAP097 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	53
圖 3.2.30 614NCREE 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	53
圖 3.2.31 921NCREE 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	54
圖 3.2.32 331TAP097 Code Compatible 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	54
圖 3.2.33 921NCREE Code Compatible 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g).....	54
圖 3.3.1 LRB 基本構造.....	55
圖 3.3.2 LRB 雙線性遲滯迴圈表示圖.....	55
圖 3.3.3 結構元件測試裝置.....	55
圖 3.3.4 第一組東側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈.....	56
圖 3.3.5 第一組西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈.....	56
圖 3.3.6 第二組東側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈.....	57
圖 3.3.7 第二組西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈.....	57
圖 3.3.8 東側 LRB Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈.....	58
圖 3.3.9 西側 LRB Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈.....	58

圖 3.3.10 四個 LRB 於 Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈	59
圖 3.4.1 位移計配置圖	59
圖 3.4.2 加速規配置圖	60
圖 3.4.3 測力計配置圖	60
圖 3.4.4 應變計配置圖	61
圖 4.1.1 第一組試體之振態	77
圖 4.1.2 第一組試體於白訊試驗下之系統轉換函數	77
圖 4.1.3 第二組試體之振態	78
圖 4.1.4 第二組試體於白訊試驗下之系統轉換函數	78
圖 4.1.5 第三組試體之振態	79
圖 4.1.6 第三組試體於白訊試驗之系統轉換函數	79
圖 4.1.7 第四組試體之振態	80
圖 4.1.8 第四組試體於白訊試驗下之系統轉換函數	80
圖 4.2.1 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層位移反應	81
圖 4.2.2 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應	81
圖 4.2.3 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層位移反應	82
圖 4.2.4 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應	82
圖 4.2.5 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應	83
圖 4.2.6 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應	83
圖 4.2.7 第一組試體於 331TAP097-code X320gal 下各樓層位移反應	84
圖 4.2.8 第一組試體於 331TAP097-code X320gal 下各樓層層間位移反應	84
圖 4.2.9 第三組試體於 331TAP097 X320gal 下各樓層位移反應	85
圖 4.2.10 第三組試體於 331TAP097 X320gal 下各樓層層間位移反應	85
圖 4.2.11 第三組試體於 921TAP097 X320gal 下各樓層位移反應	86
圖 4.2.12 第三組試體於 921TAP097 X320gal 下各樓層層間位移反應	86
圖 4.2.13 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應	87
圖 4.2.14 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應	87
圖 4.2.15 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層位移反應	88
圖 4.2.16 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層層間位移反應	88
圖 4.2.17 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層位移反應	89
圖 4.2.18 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應	89
圖 4.2.19 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層位移反應	90
圖 4.2.20 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應	90
圖 4.2.21 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應	91
圖 4.2.22 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應	91
圖 4.2.23 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層位移反應	92
圖 4.2.24 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層層間位移反應	92
圖 4.2.25 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應	93

圖 4.2.26 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應.....	94
圖 4.2.27 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應.....	95
圖 4.2.28 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應.....	96
圖 4.2.29 第三組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應.....	97
圖 4.2.30 第三組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應.....	98
圖 4.2.31 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應.....	99
圖 4.2.32 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應.....	100
圖 4.2.33 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應.....	101
圖 4.2.34 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應.....	102
圖 4.2.35 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應.....	103
圖 4.2.36 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應.....	104
圖 4.2.37 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	105
圖 4.2.38 第一組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	105
圖 4.2.39 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	106
圖 4.2.40 第一組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	106
圖 4.2.41 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應.....	107
圖 4.2.42 第一組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	107
圖 4.2.43 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應.....	108
圖 4.2.44 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	108
圖 4.2.45 第三組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	109
圖 4.2.46 第三組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	109
圖 4.2.47 第三組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	110
圖 4.2.48 第三組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	110
圖 4.2.49 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應.....	111
圖 4.2.50 第三組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	111
圖 4.2.51 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應.....	112
圖 4.2.52 第三組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	112
圖 4.2.53 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	113
圖 4.2.54 第四組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	113
圖 4.2.55 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應.....	114
圖 4.2.56 第四組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	114
圖 4.2.57 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應.....	115
圖 4.2.58 第四組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	115
圖 4.2.59 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應.....	116
圖 4.2.60 第四組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布.....	116
圖 4.2.61 第一組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈.....	117
圖 4.2.62 第一組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈.....	117

圖 4.2.63 第一組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈	118
圖 4.2.64 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈	118
圖 4.2.65 第三組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈	119
圖 4.2.66 第三組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈	119
圖 4.2.67 第三組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈	120
圖 4.2.68 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈	120
圖 4.2.69 第四組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈	121
圖 4.2.70 第四組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈	121
圖 4.2.71 第四組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈	122
圖 4.2.72 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈	122
圖 4.3.1 第一組與第三組試體各模態之模態質量參與因子	123
圖 4.3.2 第一組與第三組試體結構反應	123
圖 4.3.3 第四組試體各模態之模態質量參與因子	124
圖 4.3.4 第四組試體結構反應	124
圖 5.1.1 SAP 數值模擬模型	130
圖 5.1.2 MIDAS 數值模擬模型	130
圖 5.2.1 第一組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)	131
圖 5.2.2 第一組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)	132
圖 5.2.3 第一組試體 921NCREEX320gal 歷時模擬(LRB 參數取元件測試值).....	133
圖 5.2.4 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)	134
圖 5.2.5 第一組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	135
圖 5.2.6 第一組試體 921TAP097X320gal 位移	136
圖 5.2.7 第一組試體 921NCREEX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值).....	137
圖 5.2.8 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值) ...	138
圖 5.2.9 第三組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	139
圖 5.2.10 第三組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	140
圖 5.2.11 第三組試體 921NCREEX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值).....	141
圖 5.2.12 第三組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值) .	142
圖 5.2.13 第四組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	143
圖 5.2.14 第四組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	144
圖 5.2.15 第四組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)	145
圖 5.2.16 第四組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值) .	146
圖 5.2.17 第一組試體 331TAP097X320gal 加速度	147
圖 5.2.18 第一組試體 921TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)	148
圖 5.2.19 第一組試體 921NCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)	149
圖 5.2.20 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)	

.....	150
圖 5.2.21 第一組試體 33ITAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	151
圖 5.2.22 第一組試體 92ITAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	152
圖 5.2.23 第一組試體 92INCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值).....	153
圖 5.2.24 第一組試體 33ITAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	154
圖 5.2.25 第三組試體 33ITAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	155
圖 5.2.26 第三組試體 92ITAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	156
圖 5.2.27 第三組試體 92INCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值).....	157
圖 5.2.28 第三組試體 33ITAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	158
圖 5.2.29 第四組試體 33ITAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	159
圖 5.2.30 第一組試體 92ITAP097X320gal 加速度.....	160
圖 5.2.32 第一組試體 33ITAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)	162
圖 5.2.33 第一組試體 33ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值) ..	163
圖 5.2.34 第一組試體 92ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值) ..	163
圖 5.2.35 第一組試體 92INCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)...	164
圖 5.2.36 第一組試體 33ITAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)	164
圖 5.2.37 第一組試體 33ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)	165
圖 5.2.38 第一組試體 92ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)	165
圖 5.2.39 第一組試體 92INCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值).....	166
圖 5.2.40 第一組試體 33ITAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值) .	166
圖 5.2.41 第三組試體 33ITAP097X320gal 遲滯迴圈 (LRB 參數取試驗值)	167
圖 5.2.42 第三組試體 92ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)	167
圖 5.2.43 第三組試體 92INCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值).....	168
圖 5.2.44 第三組試體 33ITAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值) .	168
圖 5.2.45 第四組試體 33ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)	169
圖 5.2.46 第四組試體 92ITAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)	169
圖 5.2.47 第四組試體 92INCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值).....	170
圖 5.2.48 第四組試體 33ITAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值) .	170
圖 5.2.49 第一組試體 33ITAP097X320gal 傅立葉轉換.....	171
圖 5.2.50 第一組試體 33ITAP097-codeX320gal 傅立葉轉換.....	171
圖 5.2.51 第三組試體 33ITAP097X320gal 傅立葉轉換.....	172
圖 5.2.52 第三組試體 33ITAP097X320gal 傅立葉轉換.....	172
圖 5.2.53 第四組試體 33ITAP097X320gal 傅立葉轉換.....	173
圖 5.2.54 第四組試體 92ITAP097X320gal 傅立葉轉換.....	173

照片目錄

照片 1.1.1 中間層隔震建築物實際案例	7
照片 2.3.1 台灣大學興建中之土木系研究大樓	26
照片 2.3.2 LRB 於設計位移 125%之變形	26
照片 3.2.1 第一組試體組裝配置	62
照片 3.2.2 第二組試體組裝配置	62
照片 3.2.3 第三組試體組裝配置	63
照片 3.2.4 第四組試體組裝配置	63
照片 3.3.1 元件測試裝置	64
照片 3.3.2 元件測試感測器裝置	64
照片 3.3.3 位移計	65
照片 3.3.4 加速度計	65
照片 3.3.5 測力計(Load Cell)	66
照片 3.3.6 應變計	66



第一章 緒論

1.1 前言

由於 1999 年台灣發生 921 集集大地震，國內結構物受到重大的損害，國人開始重視結構物的耐震性能，並快速發展被動控制的技術應用於新建或翻新結構物，隔震系統亦是其中一項應用廣泛的技術，根據內政部建築研究所統計[1]，預計至 2009 年底國內至少會有 29 棟建築物翻新或興建使用隔震系統如圖 1.1.1 所示，大多為住宅結構(圖 1.1.2)。為此，在結構隔震設計規範的擬訂方面，國內於 2002 年 4 月內政部建築研究所出版建築結構隔震設計規範[2]，2005 年 7 月新發行的建築物耐震設計規範及解說亦併入建築物裝設隔震系統與被動消能元件的設計規範 [3]，以助於國內隔震結構設計的推行。

基礎隔震的基本概念是將結構物的周期拉長，以有效降低傳遞至上部結構之地震力，在國內，相關專業人員積極推動隔減震技術下，基礎隔震設計應用日益普及，許多重要結構物皆採用基礎隔震系統以保護結構不受損害並於地震後迅速回復結構功能，近年來，隨著隔震技術逐漸成熟，除了基礎隔震建築物外，因應經濟預算考量、建物特性、高人口密度等因素，中間層隔震建築物亦應運而生，不同於基礎隔震將隔震系統設置在底版以上的樓板，國內最常見隔震層設計於一樓柱頂如台北公館捷運大樓及一般住宅大樓，如照片 1.1.1(a)(b)所示。然而中間層隔震建築卻無設計規範可遵循，除了下部結構勁度之考量外，設計興建時相對於基礎隔震是否還有其他特殊考量，需要多加探討。

1.2 研究動機與目的

截至目前為止，中間層隔震建築物的研究文獻不多，從 2000 年洪 忠憲與小林 正人[4, 5]研究中間層隔震結構在地震作用下振動特性與各樓層的位移及加速度反應，並提出非設計預期之模態耦合效應的影響。2004 年陳玫君[6]針對加裝速

度型阻尼器的中間層隔震建築做地震靜動力分析，在 2007 年蔡宜真[7]首次進行中間層隔震縮尺結構於振動台試驗探討下部結構勁度的影響，同年江春琴[8]簡化中間層隔震結構模擬成三自由度結構系統，給定不同參數作案例研究，探討中間層隔震結構之耐震行為及引發模態耦合效應之參數。

其中，模態耦合效應對中間層隔震結構之影響於幾篇文獻中提到，2000 年洪忠憲與小林正人[4, 5]所發表之文章中對模態耦合效應有提出幾點現象敘述，文中定義 $\beta = \omega_{FF}/\omega_1$ (上部基本頻率/下部基本頻率)，在此摘取幾點文中說明：

(1) 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應結構頻率之變化如圖

1.2.1 所示，可看出在二三模態、三四模態與四五模態中，皆會在某特定值下發生交錯的現象發生。

(2) 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應阻尼比之變化如圖 1.2.2

所示，可看到在二三模態、三四模態與四五模態頻率值相近時，兩者阻尼比產生急遽變化，如二三模態中於 $\beta=1$ 時第二模態急遽減少，而第三模態急遽增加。

(3) 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值不同下之振態如圖 1.2.3，發

現在二三模態相近之頻率值($\beta=1$)下，隔震層的變形有 180 度的相位差，而 $\beta=1.5$ 時則無此現象。

而在 2006 年江春琴[8]的文章中也以參數分析探討連成作用之現象，說明發生此效應時第二模態振態隔震層上方樓板似剛體或一般樓層無隔震現象與下部結構呈線性關係，並進一步提出引發連成作用參數取決於隔震層上方結構質量、上下部結構對隔震層上方樓板之頻率比，下部結構質量則會影響連成作用之放大比例。在文獻中定義此現象為連成作用，在本文中稱為模態耦合效應。

從以前的文獻結果發現上下部結構之頻率比皆會對模態耦合效應產生影響，

模態耦合效應也會影響中間層隔震結構無法發揮預期之隔震效果，故中間層隔震相對於基底隔震之動態行為更為複雜，不能只單純考量下部結構勁度之影響，上部結構勁度也會影響隔震效果，故在設計時需一併考量，然這方面的研究為現象性之描述，對於相關的結構動態特性並無實際試驗佐證，無法提供實務設計上有效之依據，仍有待進一步研究。

故模態耦合效應對中間層隔震結構的影響為本文主要研究方向，希望以實驗結果驗證文獻分析結果，研究方法由中間層隔震結構簡化模擬成三個堆積質量節點之三自由度結構，改變上下部結構之質量比與頻率比進行參數分析，以興建中的台大土木新系館為中間層隔震結構之實例做分析研究，並設計規劃中間層隔震結構縮尺振動台試驗，進一步驗證模態耦合效應並探討結構動態特性。以期提供工程界實務設計一個良好的參考依據，更進一步於規範中列入考量，使有效發揮結構隔震效益。



1.3 研究內容

本文各章節內容大綱如下：

第一章：緒論

包括前言、研究動機與目的及研究內容

第二章：參數分析與實例研究

將中間層隔震結構簡化模擬成三自由度結構系統，分別代表上部結構、隔震層與下部結構，定義本研究之參數，探討參數變化對結構的影響，說明模態耦合效應，並以台大土木新系館為中間層隔震真實結構案例做非線性歷時分析與反應譜分析研究。

第三章：中間層隔震縮尺振動台實驗

內容中間層隔震縮尺振動台介紹，為國家地震研究中心之三軸向地震模擬振動台簡介，三層樓中間層隔震縮尺結構試體，LRB 設計與檢核程序及結構控制元件測試結果，試體配置感測器之種類、數量與量測資訊，。

第四章: 試驗結果

說明中間層隔震縮尺振動台試驗結果，內容包括結構特性、歷時反應、遲滯行為以及模態耦合效應。

第五章: 數值模擬

建立中間層隔震縮尺結構之三自由度數值模擬分析模型，並說明模擬結果。

第六章: 結論與未來展望



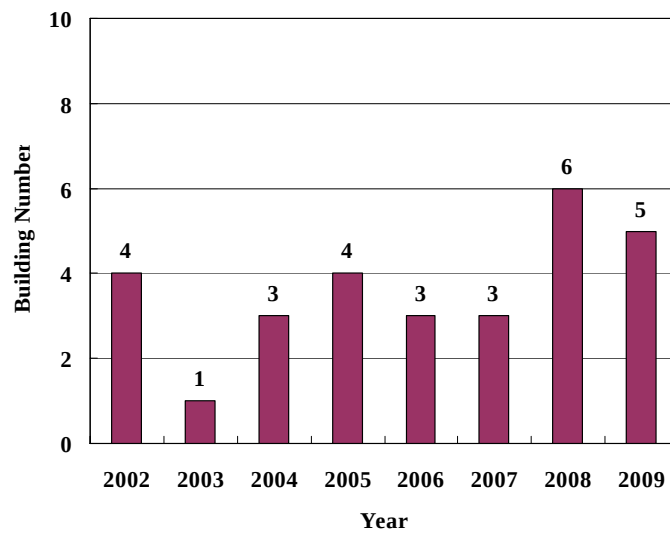


圖 1.1.1 至 2009 年隔震建築物興建數量分布圖

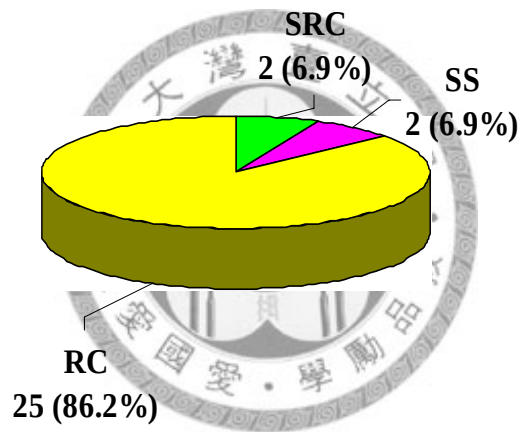


圖 1.1.2 隔震建築物使用用途比例圖

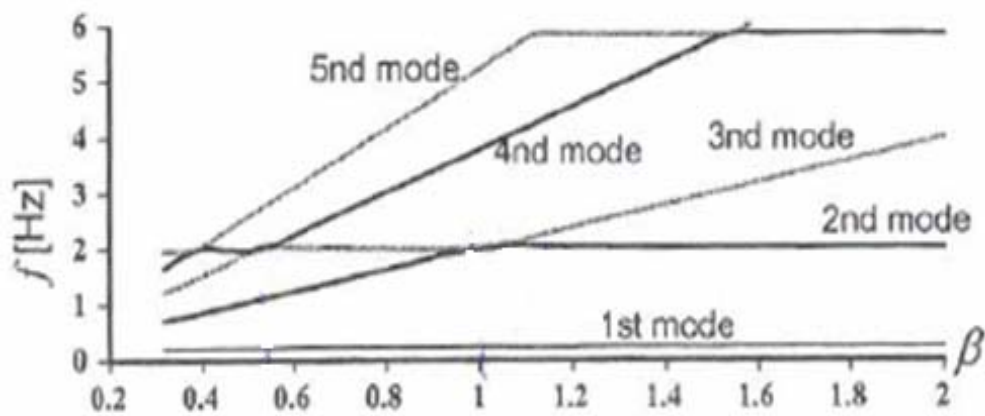


圖 1.2.1 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應結構頻率之變化

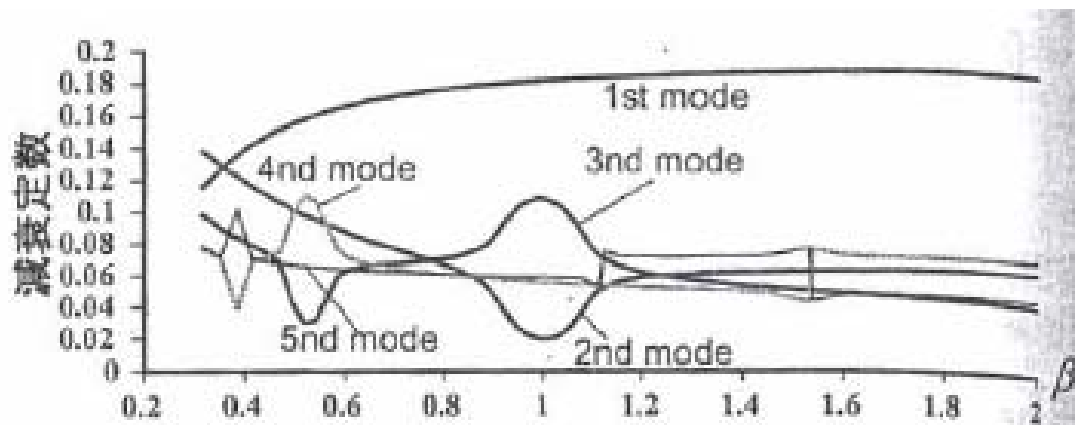


圖 1.2.2 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值對應阻尼比之變化

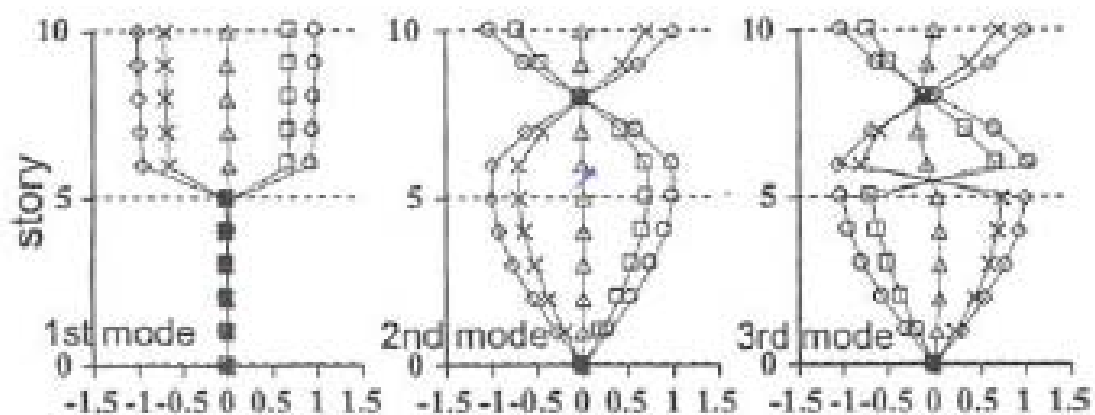


圖 3 固有振動モード ($\beta = 1$)

(a) 頻率比=1

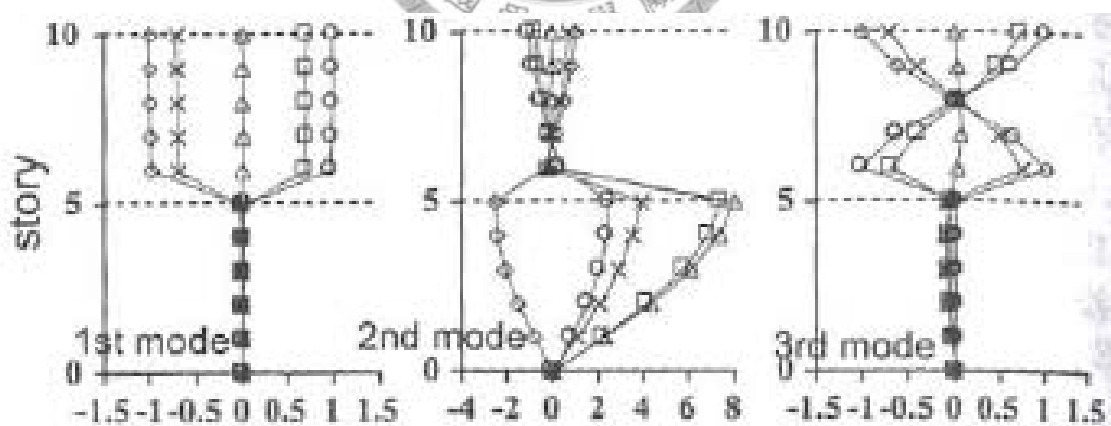


圖 4 固有振動モード ($\beta = 1.5$)

(b) 頻率比=1.5

圖 1.2.3 隔震層上方結構與隔震層下方結構頻率比值不同下之振態



(a) 公館聯合開發大樓



(b) 一般住宅大樓

照片 1.1.1 中間層隔震建築物實際案例

第二章 參數分析與實例研究

此章節將中間層隔震結構簡化成三個具堆積質量的三自由度系統，藉由改變上下部結構對隔震層上方樓板之質量比與頻率比探討參數變化，說明模態耦合效應及引發的反應，並以台灣大學土木系研究大樓為中間層隔震結構之實際案例做分析討論。

2.1 參數定義

在等效線性分析中，中間層隔震結構可以合理假設簡化成三個堆積質量節點之三自由度結構如圖 2.1.1 所示，在此不考慮土壤-結構互制效應，其運動方程式可表示如下：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = -m_1 \ddot{x}_g \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_2 (x_2 - x_1) - k_3 (x_3 - x_2) = -m_2 \ddot{x}_g \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) = -m_3 \ddot{x}_g \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2)$$

其中， $i=1, 2, 3$ 分別代表下部結構，隔震層上方樓板與上部結構； $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ 分別表示各樓層相對地表位移、速度與加速度。 $\ddot{x}_g$ 為地表輸入力， m_i : 各樓層質量； k_i : 各樓層有效側向勁度； c_i : 各樓層黏滯阻尼常數。

本文將第 i 層頻率定義如下：

$$\omega_1^* = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2^* = \sqrt{\frac{k_2}{m_2 + m_3}}, \quad \omega_3^* = \sqrt{\frac{k_3}{m_3}} \quad (3)$$

隔震層上下方結構頻率皆可單獨計算，適用於初步分析與已知下部結構欲使用中間層隔震系統增建上部結構之案例(2007，江春琴)。

2.2 分析結果

假設一隔震設計週期為 2 秒的真實結構，在考慮縮尺比例為 1/4 的情況下，則縮尺結構之隔震週期為 1 秒，隔震層設計阻尼比為 20%，利用簡化三自由度結構的觀念，假設上下部結構阻尼比為 5%，針對上部結構對隔震層上方樓板之質量質量比 m_3/m_2 、下部結構對隔震層上方樓板之質量比 m_1/m_2 、上部結構對隔震層之頻率比 ω_3^*/ω_2^* 與下部結構對隔震層之頻率比 ω_1^*/ω_2^* 四項參數進行分析探討。考慮到真實結構之隔震系統可能裝設於各個樓層，因此，將變數範圍定為 $\omega_3^*/\omega_2^*=1\sim50$ ， $\omega_1^*/\omega_2^*=1\sim50$ ， $m_1/m_2=1, 5$ 與 $m_3/m_2=10$ ，並採台北三區做為設計工址，以係數 $S_{MS}=0.8$ 與 $T_0=1.05\text{sec}$ 進行反應譜分析。分析結果如圖 2.2.1 至圖 2.2.12，討論如下：

(1) 高模態參與比例

當 ω_1^*/ω_2^* 增加，第一模態質量參與因子隨之減少並趨於定值(圖 2.2.1)，而當 m_1/m_2 增加，第一模態質量參與因子減少，第二、三模態質量參與因子則明顯增加，如圖 2.2.1 至圖 2.2.3 所示，顯示當 ω_1^*/ω_2^* 與 ω_3^*/ω_2^* 為一定值時，下部結構相對隔震層上方樓板質量比愈重，高模態對動態反應貢獻比例愈大。一般來說，結構各樓層的最大動態反應如層間變位與樓層剪力主要是由第一模態貢獻，然而，從圖 2.2.4 與圖 2.2.5 可得知當 m_1/m_2 增加，下部結構之樓層剪力比會隨著 m_1/m_2 增加，其第二模態之參與比例隨之上升。

(2) 阻尼比

如圖 2.2.6 所示，當 ω_1^*/ω_2^* 與 ω_3^*/ω_2^* 增加，第一模態阻尼比隨之增加並逐漸趨於隔震設計阻尼比。

(3) 動態反應

圖 2.2.7 至圖 2.2.9 分別為下部結構最大變位、最大樓層剪力比與對地表最大加速度比值，當 m_1/m_2 增加，下部結構變位隨之減少，而最大樓層剪力比與對地表最大加速度比值卻會增加；此外在上部結構方面，當 ω_3^*/ω_2^* 增加，其變位也會隨之減少。

(4) 模態耦合效應

由圖 2.2.2 與圖 2.2.3 中可看出，第二模態質量參與因子在通過一特定帶寬區急遽下降，而第三模態質量參與因子在通過此一帶寬區後亦呈現急遽上升的現象，二、三模態於此帶寬區發生交錯的情況，此時高模態之模態頻率相近，如圖 2.2.2 高模態頻率相近之斜帶寬區，即產生所謂的模態耦合效應，於此效應下之結構反應如圖 2.2.8 中(b)可看出下部最大結構樓層剪力於此帶寬區值放大、圖 2.2.9 與圖 2.2.11 下部結構與隔震層上方樓板對地表最大加速度比值一樣是放大的情況。而當 ω_1^*/ω_2^* 、 ω_3^*/ω_2^* 與 m_3/m_2 為定值時，此時模態耦合效應會隨著 m_1/m_2 值增加益加明顯。而從分析結果也可發現，高模態參與比例之大小與模態耦合效應並無絕對相關。

因此，設計中間層隔震建築結構，應避免相關參數落於模態耦合之帶寬區內，以減低模態耦合效應之影響以發揮隔震層效果，同時，亦須考慮高模態反應對於隔震效益之影響。

2.3 中間樓層隔震結構之實例研究

台灣大學興建中之土木系研究大樓(照片 2.3.1)，為地下一層地上九層(不含屋

突層)之中間樓層隔震建築物，隔震層設置於二樓，使用 19 個鉛心橡膠支承(Leader Rubber Bearing, LRB)，LRB 實體測試於設計位移 25%, 50%, 75%, 100%與 125% 下之遲滯迴圈如圖 2.3.1，LRB 於設計位移 125%之變形如照片 2.3.2 所示，設計與實體測試值見表 2.3.1，根據前節參數定義，以隔震層與隔震層上方樓板做區隔，其上方(3 樓至 9 樓)為上部結構，其下方(1 樓)為下部結構，利用等效線性模態質量的觀念[9]，將多自由度系統轉變為單自由度系統，公式如下：

$$L_n^h = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}, \quad L_n^\theta = \sum_{j=1}^N h_j m_j \phi_{jn}, \quad M_n^* = \Gamma_n L_n^h, \quad h_n^* = \frac{\Gamma_n L_n^\theta}{M_n^*} \quad (4)$$

其中， M_n^* 為第 n 個模態等效質量(Effective Mass)， h_n^* 為第 n 個模態等效高度(Effective Height)， m_j 為第 j 層樓質量， ϕ_{jn} 為第 j 層樓第 n 個模態振態(Mode Shape)， Γ_n 為第 n 個模態參與因子(Modal Participation Factor)， h_j 為第 j 層樓高度。

以上式計算後得到上部結構與下部結構有效模態質量分別 7000 為 $kN\text{-sec}^2/m$ 與 $2480 kN\text{-sec}^2/m$ ，隔震層上方樓板有效模態質量為 $1499.3 kN\text{-sec}^2/m$ 。

結構分析模型如圖 2.3.2，模態分析得到結構基本模態週期為 3.598 秒，表 2.3.2 為前三模態之模態質量參與因子，發現此結構扭轉效應明顯，且其第一模態質量參與因子僅占 62.97%，相較一般基礎隔震結構第一模態之模態參與因子相對低很多，高模態的參與比例較高，在動力分析方面使用非線性歷時直接積分法分析，歷時採 TAP097 於 921 地震下之東西向地震紀錄，圖 2.3.3 與圖 2.3.4 分別為加速度歷時圖與水平加速度反應譜，圖 2.3.5(a)至(e)分別為最大基底剪力、最大下部結構剪力、最大頂層位移、最大下部結構加速度與最大基底加速度時以及各樓層取最大值之樓層剪力分布情形，表 2.3.3 為各種情況下之時間點與基底剪力值，可發現各樓層最大剪力值並不會在同一時間點下，若僅考慮第一模態之層間剪力分布進行設計，可能不甚保守，且上部結構樓層反應存在相位差，以及下部結構層間剪力反應急遽放大，估計是由高模態參與所造成的效應。圖 2.3.6 與圖 2.3.7 顯示其加速度與位移歷時反應，顯示有良好的隔震效果，從加速度歷時反應看出高模態

的參與占相當的比例，圖 2.3.8 為 921 地震測站 TAP097 東西向地震力 320gal 之傅立葉轉換，RF、2F、ISOD 與 BASE 分別代表上部結構頂層、隔震層上方樓板、下部結構頂層與地表，得知各樓層有一定的高模態參與比例。

為進一步分析驗證高模態之參與情況，進行反應譜分析，地區為台北三區，採用最大考量地震需求下之係數 $S_{MS}=0.8$ 及 1.05 秒，上下部結構基本模態週期各為 0.878 秒與 0.095 秒，簡化三自由度結構模型之設定參數如表 2.3.4 所示，可得到分析所需之四項參數： $m_1/m_2=1.7$ ， $m_3/m_2=4.7$ ， $\omega_1^*/\omega_2^*=37.9$ 與 $\omega_3^*/\omega_2^*=4.3$ ，分析結果如圖 2.3.9 至圖 2.3.11，從高模態頻率差圖可得知土木系研究大樓高模態頻率並不相近，沒有落在高模態頻率差近似於零之斜帶寬區中，最大樓層剪力比與對地表最大加速度比值亦無放大，顯示土木系研究大樓並無模態耦合效應，但從高模態質量參與因子圖中，可得知土木系研究大樓之參數位於第三模態急遽上升的區域內，雖然第一模態仍為主要控制模態，但其質量參與因子減少，第三模態質量參與因子反而提高，具有較一般基礎隔震結構高的參與比例，故需多加考量高模態的影響。

表 2.3.1 LRB 設計與實體測試值

LRB 總高度	mm	342	
橡膠墊直徑	mm	920	
橡膠層數	枚	24	
鉛心數量	個	2	
鉛心直徑	mm	127	
設計位移	mm	300	
等效勁度 K_{eff}	kN/m	設計值	2350
		測試值	2108
能量消散面積	kN-m	設計值	349
		測試值	347
有效阻尼比 ξ_{eff}	%	設計值	26
		測試值	29.1

表 2.3.2 結構前三模態之模態質量參與因子

模態	週期(sec)	UX (%)	UY (%)	UZ (%)	RX (%)	RY (%)	RZ (%)
1	3.60	0.03	62.97	0	70.72	0.03	17.14
2	3.50	77.99	0.04	0	0.05	86.50	0.00
3	3.18	0.01	15.08	0	18.29	0.02	58.21

表 2.3.3 不同時間點下之基底剪力比較

	時間 (sec)	基底剪力(kN)
最大基底剪力	43.54	23948.2
最大下部結構剪力	43.54	23948.2
最大頂層位移	43.716	14060.5
最大下部結構加速度	38.436	6705.1
最大基底加速度	52.192	3277.7

表 2.3.4 簡化三自由度結構模型之設定參數

	下部結構		上部結構		隔震層上方樓板	
靜載重 (kN)	24329		68670		14708	
週期 (sec)	X 向	0.081	X 向	0.878	X 向	3.5
	Y 向	0.095	Y 向	0.834	Y 向	3.6

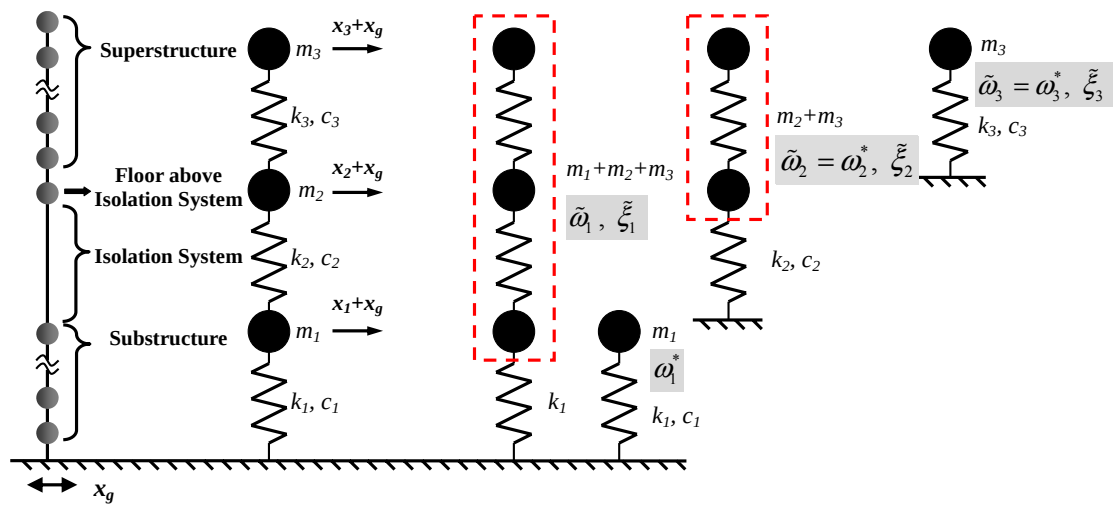
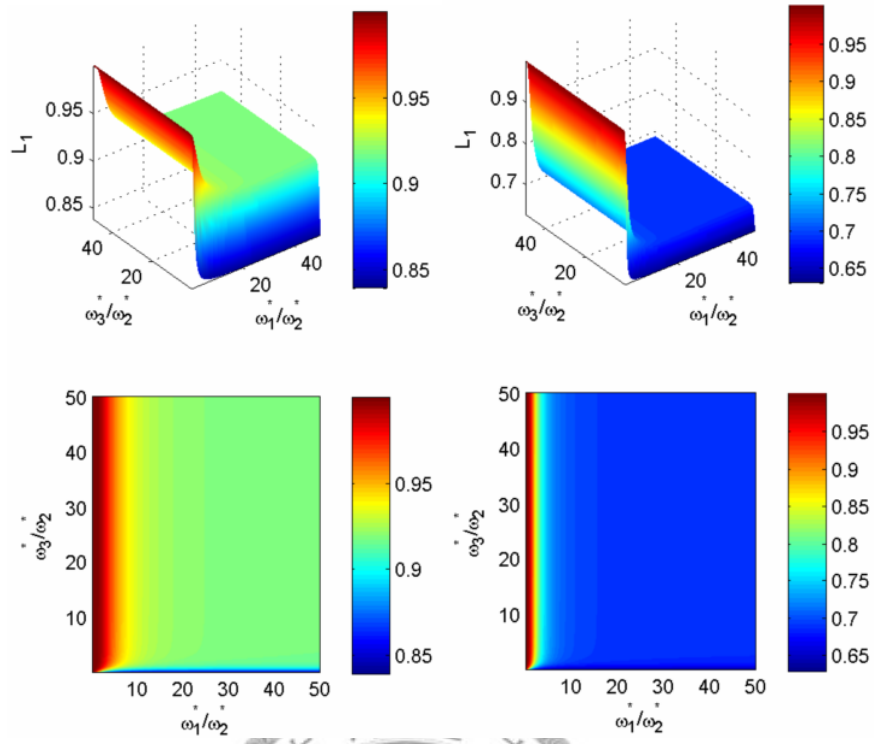
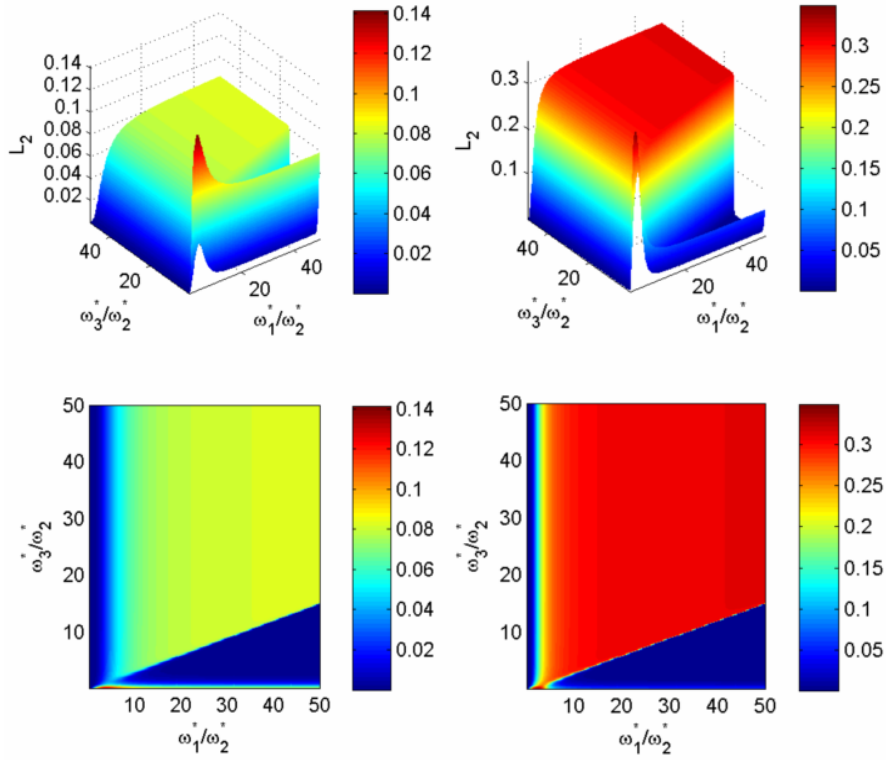


圖 2.1.1 簡化之三自由度結構



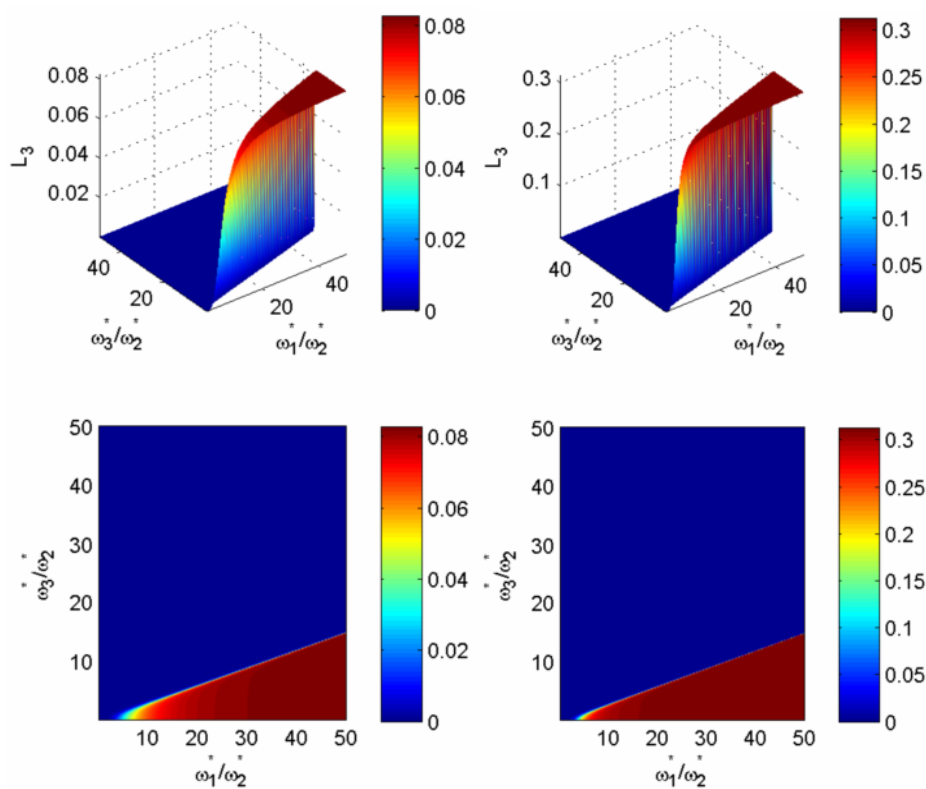
(a) $m_1/m_2 = 1$ (b) $m_1/m_2 = 5$

圖 2.2.1 第一模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$ (b) $m_1/m_2 = 5$

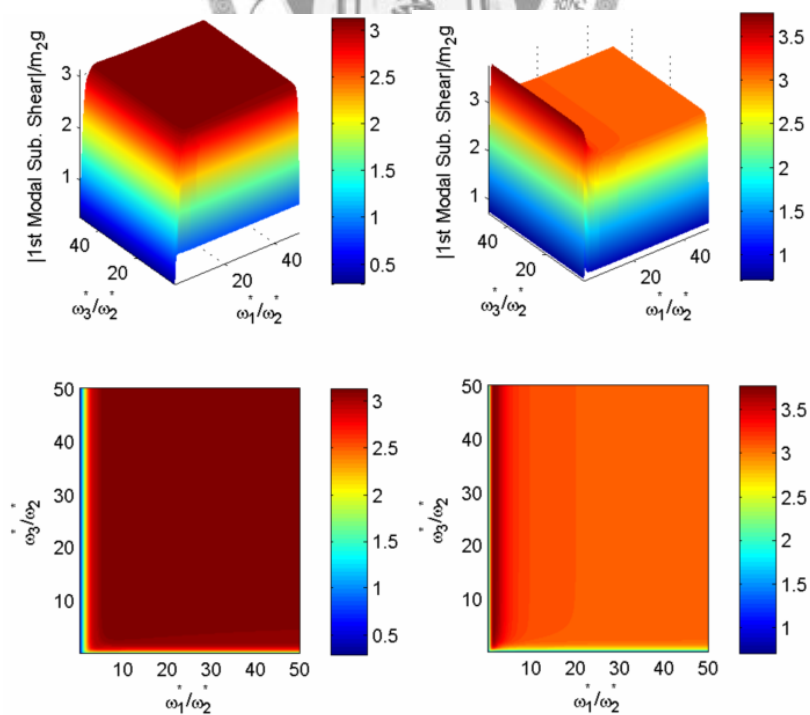
圖 2.2.2 第二模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

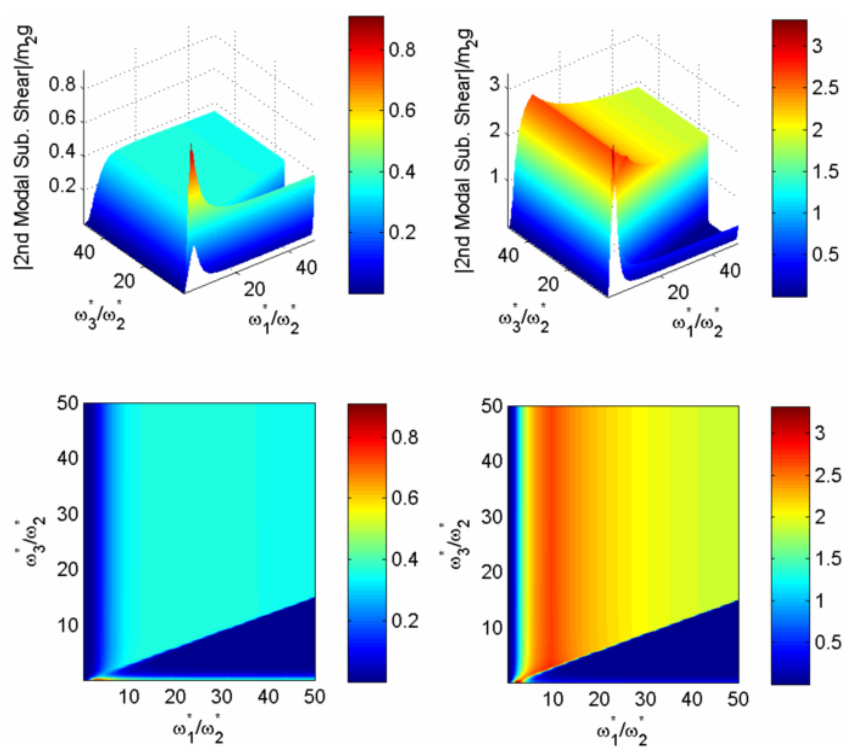
圖 2.2.3 第三模態質量參與因子($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

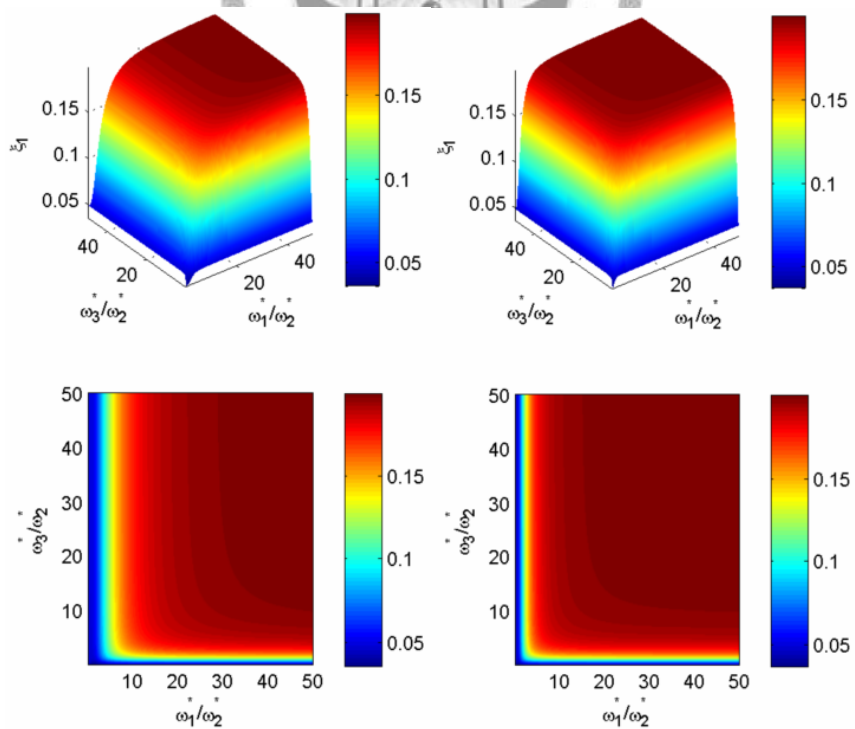
圖 2.2.4 第一模態下部結構樓層剪力比($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

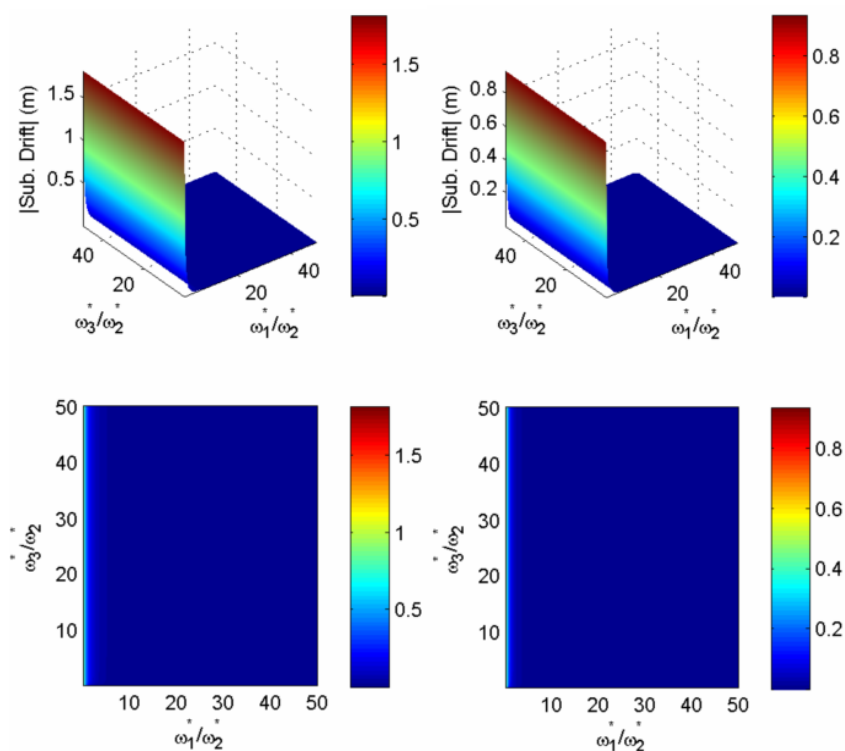
圖 2.2.5 第二模態下部結構樓層剪力比($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

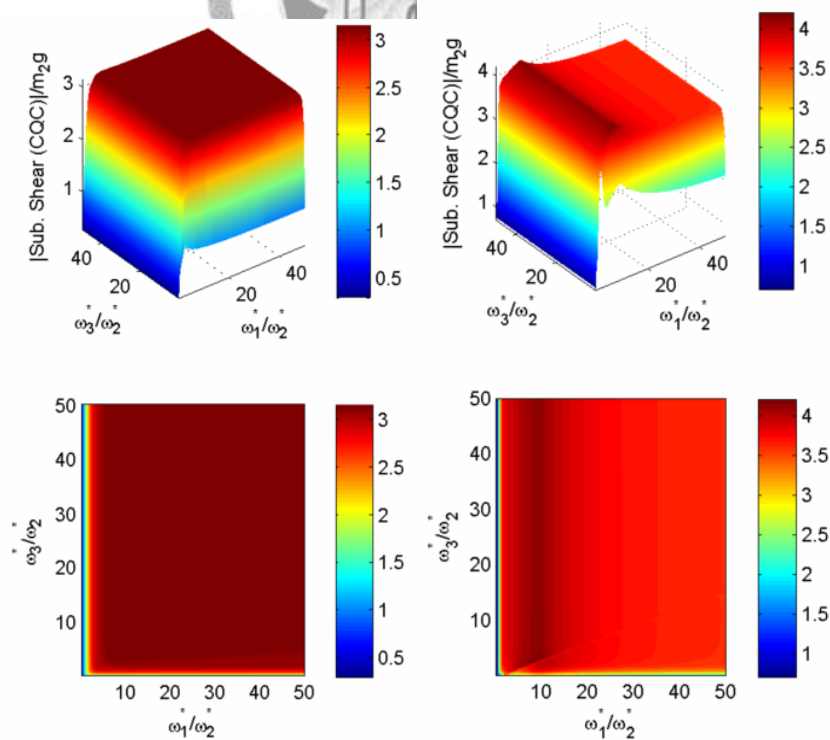
圖 2.2.6 第一模態阻尼比($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

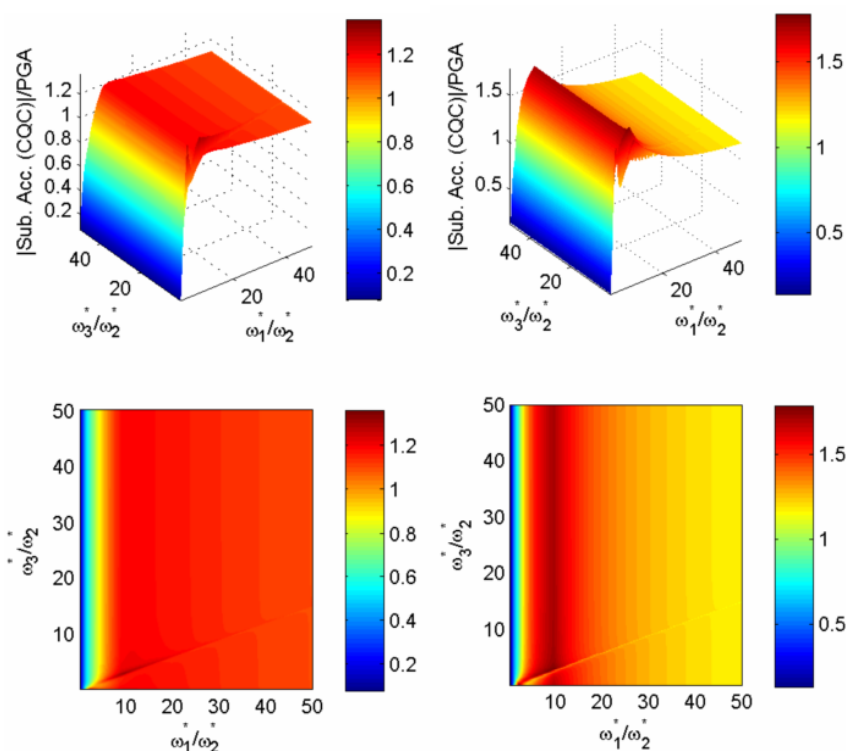
圖 2.2.7 下部結構最大變位($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

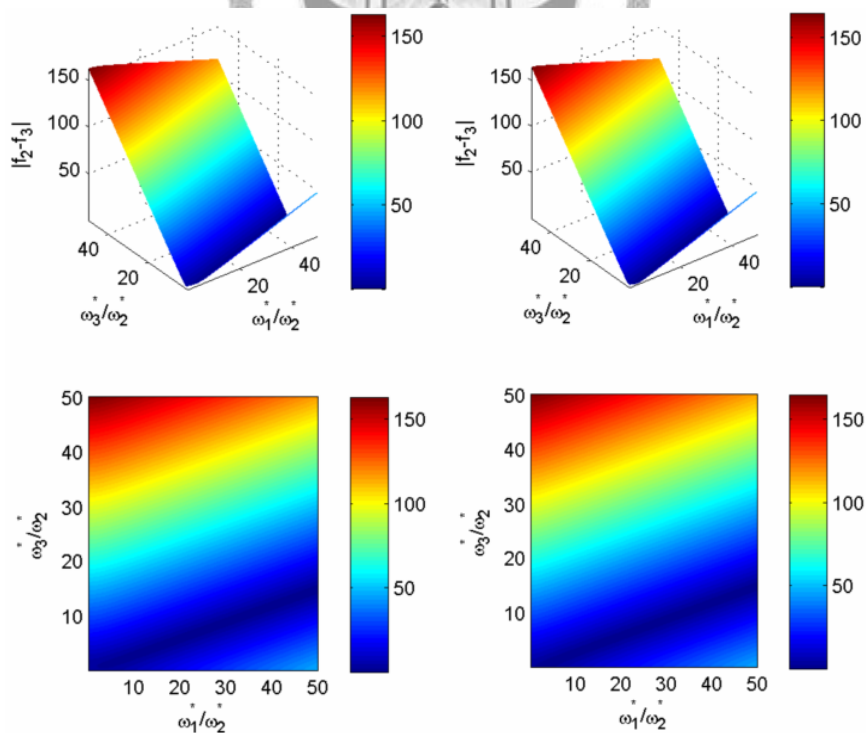
圖 2.2.8 下部結構最大樓層剪力比($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

圖 2.2.9 下部結構對地表最大加速度比值($m_3/m_1=10$)



(a) $m_1/m_2 = 1$

(b) $m_1/m_2 = 5$

圖 2.2.10 高模態頻率差($m_3/m_1=10$)

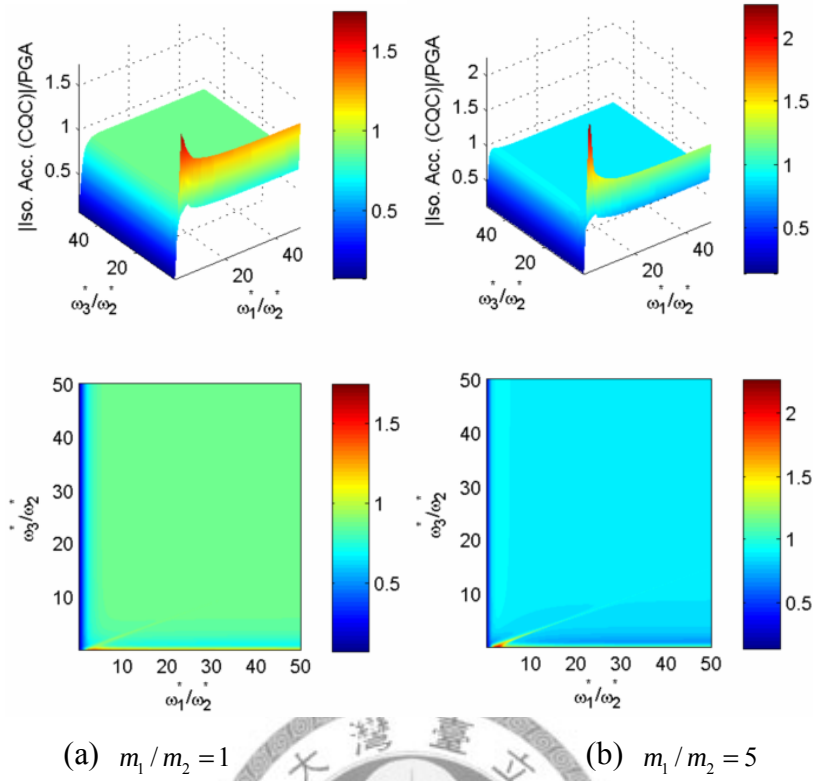


圖 2.2.11 隔震層上方樓板對地表最大加速度比值($m_3/m_1=10$)

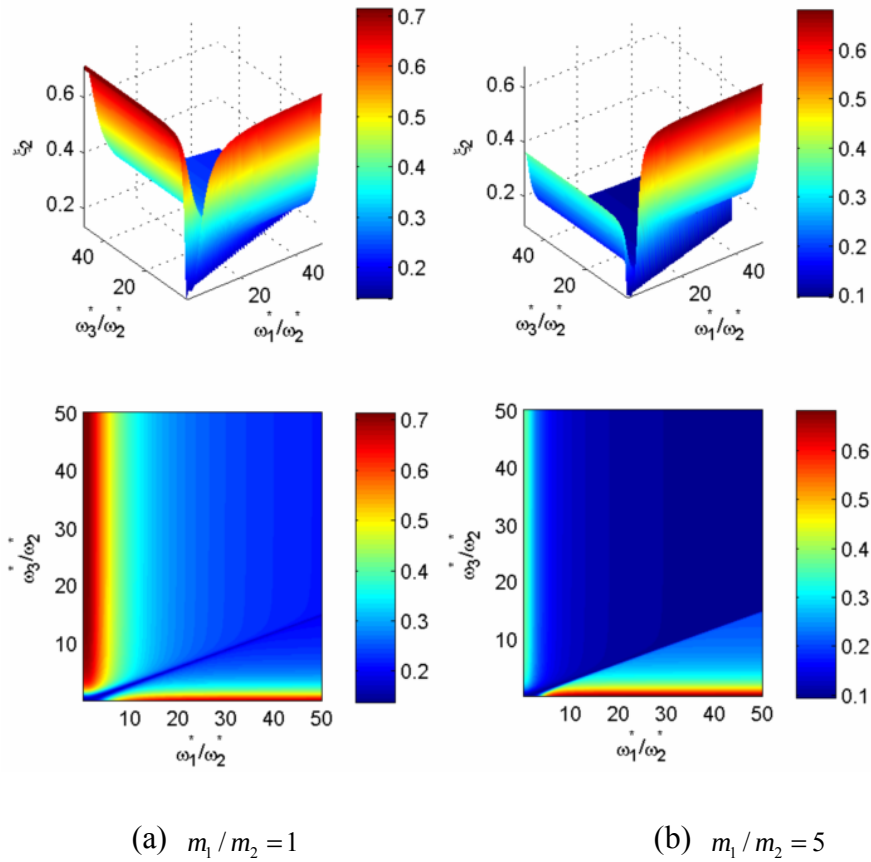


圖 2.2.12 第二模態阻尼比($m_3/m_1=10$)

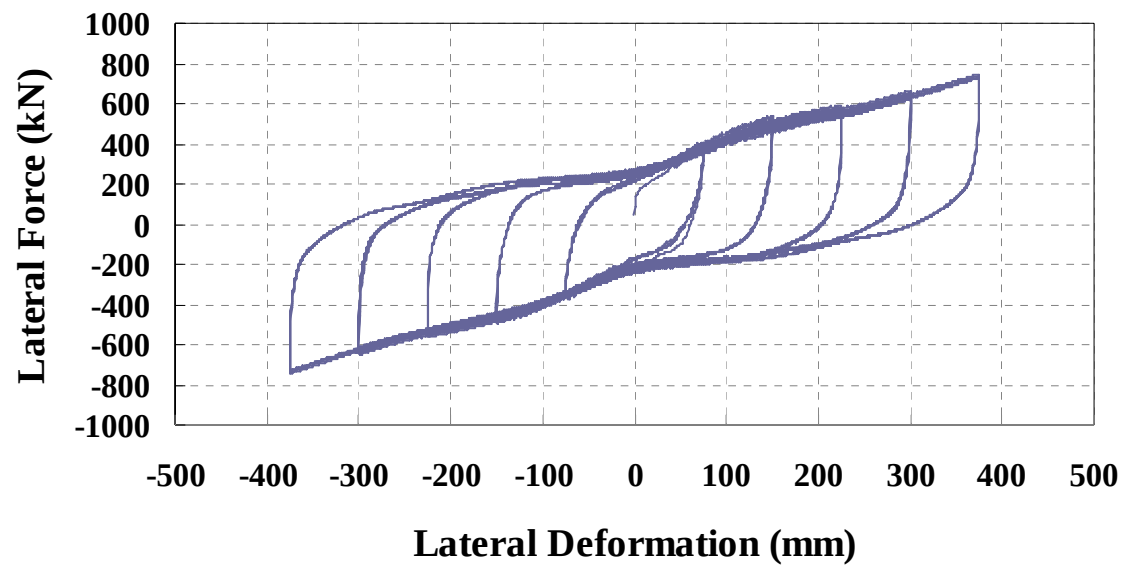


圖 2.3.1 LRB 實體測試之遲滯迴圈

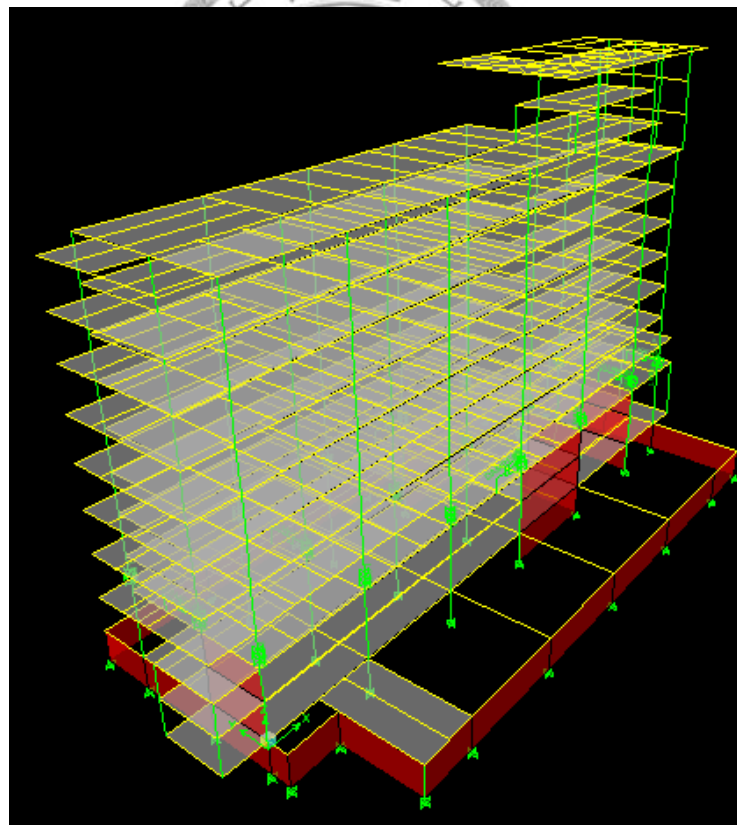


圖 2.3.2 台灣大學土木系研究大樓數值模型

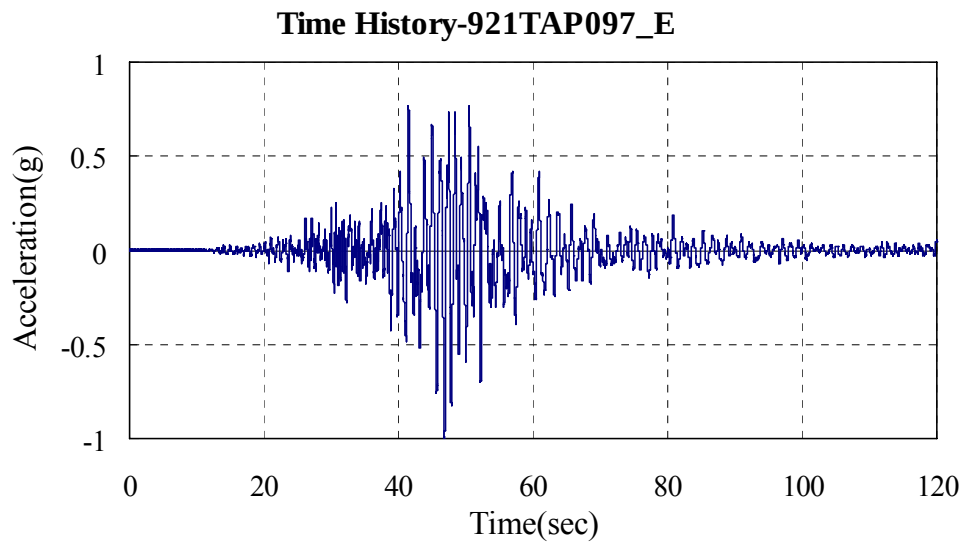


圖 2.3.3 TAP097 於 921 地震下之東西向地震加速度歷時

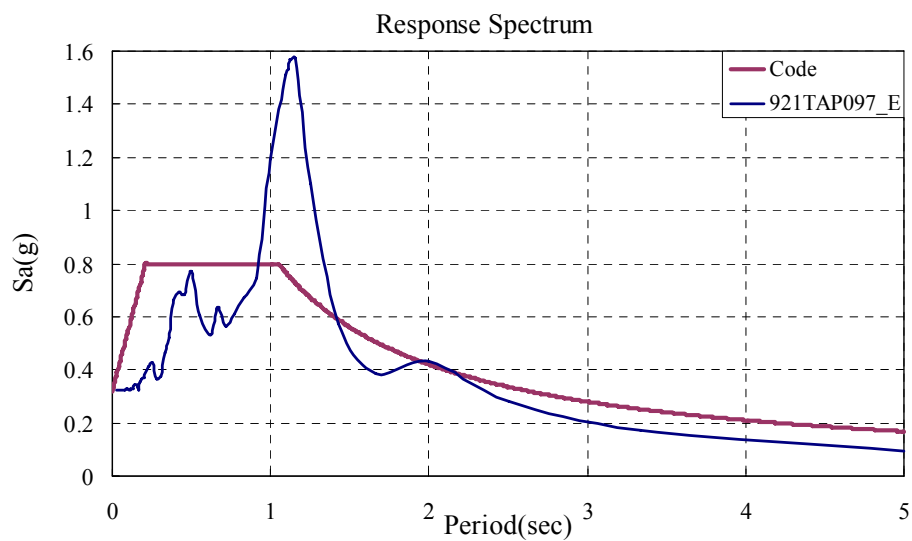
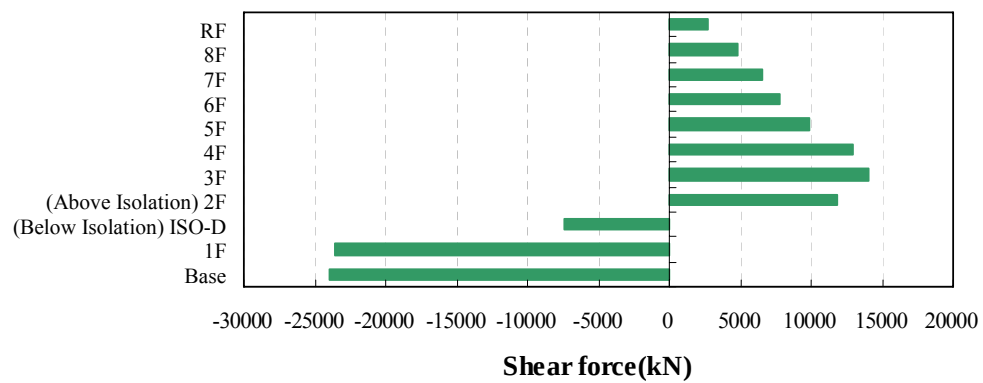
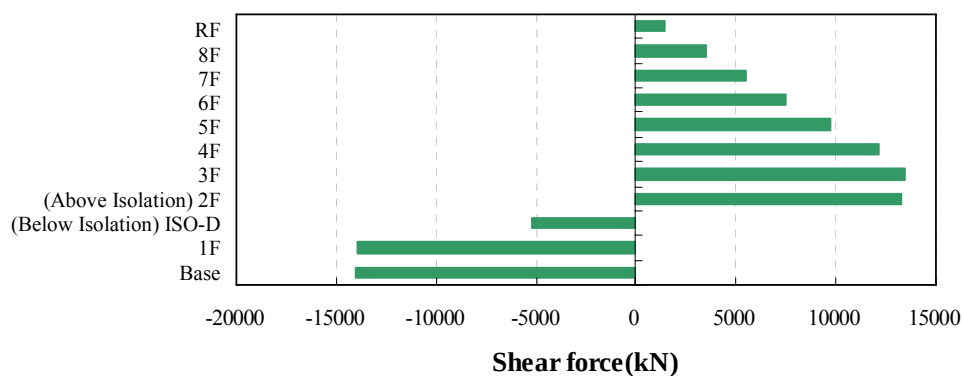


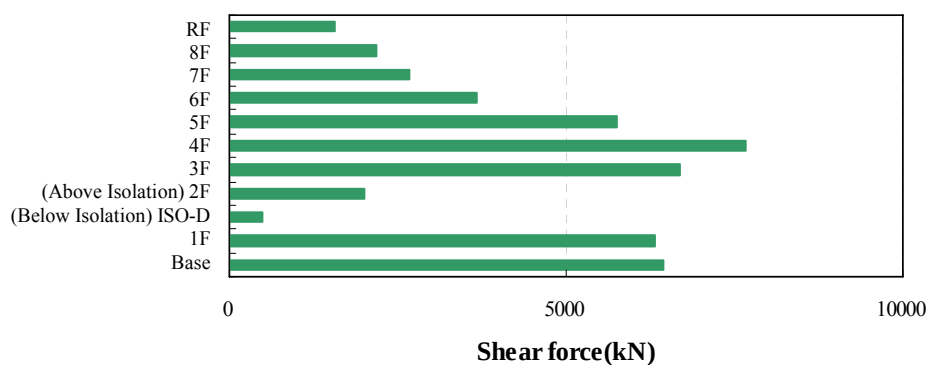
圖 2.3.4 TAP097 於 921 地震下之東西向地震加速度反應譜



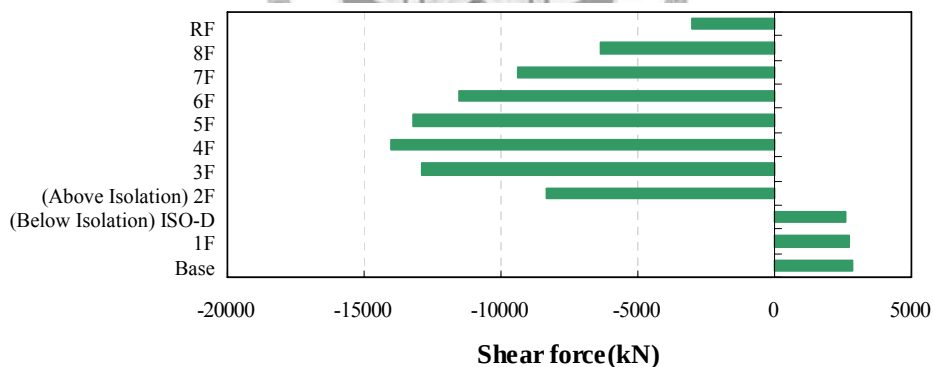
(a) 於最大基底剪力與最大下部結構剪力時之樓層剪力分布



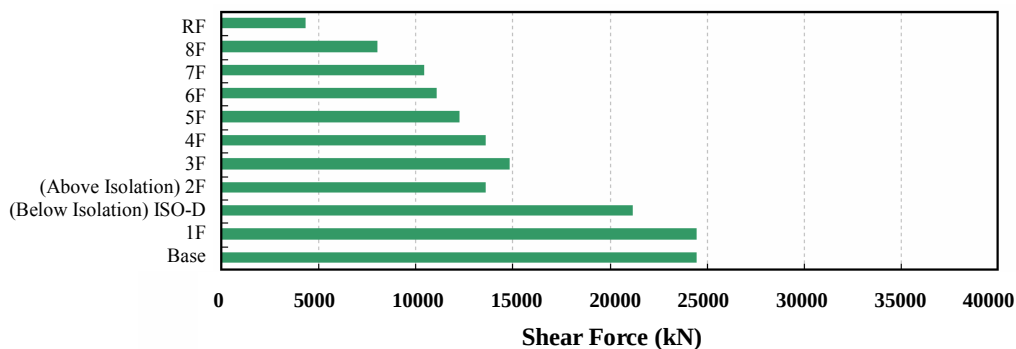
(b) 於最大頂層位移時之樓層剪力分布



(c) 於最大下部結構加速度時之樓層剪力分布



(d) 於最大基底加速度時之樓層剪力分布



(e) 樓層剪力最大值

圖 2.3.5 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下於不同時間點之樓層剪力分布

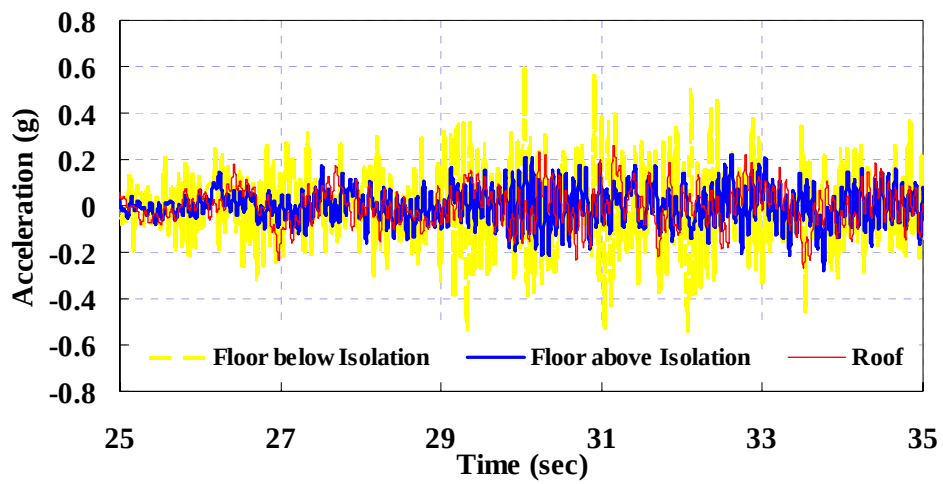


圖 2.3.6 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下之絕對加速度歷時反應

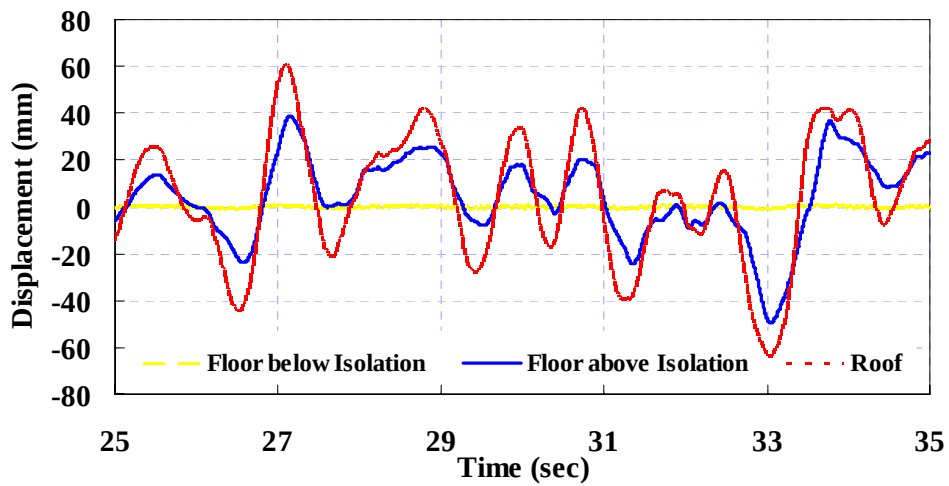


圖 2.3.7 921 地震測站 TAP097 東西向地震力作用下之位移歷時反應

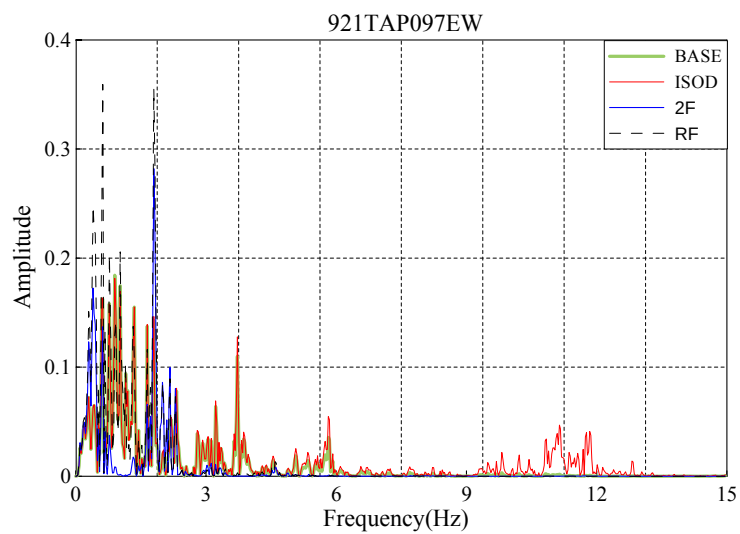


圖 2.3.8 土木系研究大樓 921 地震測站 TAP097 東西向地震力 320gal 之傅立葉轉換

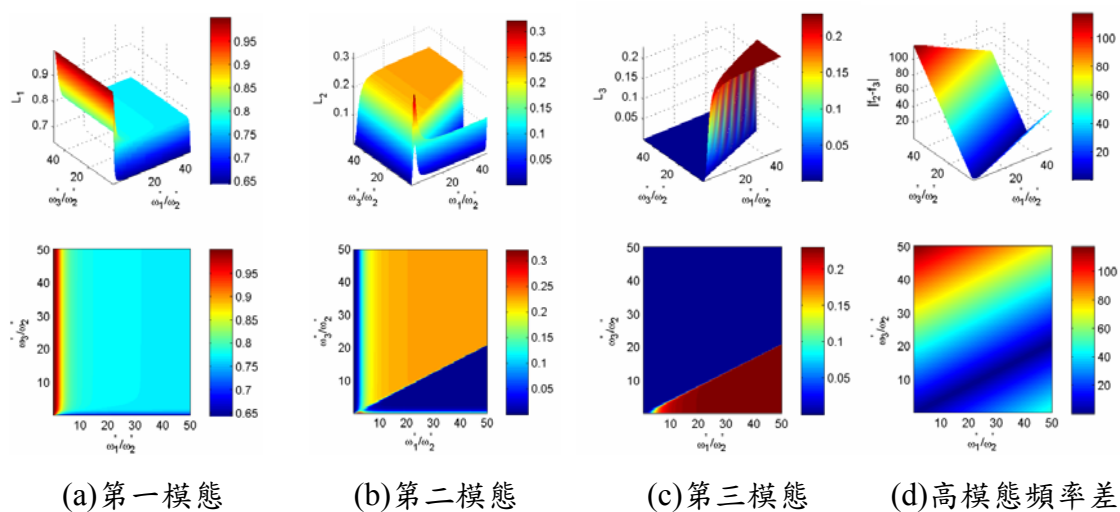


圖 2.3.9 前三模態之模態質量參與因子與高模態頻率差

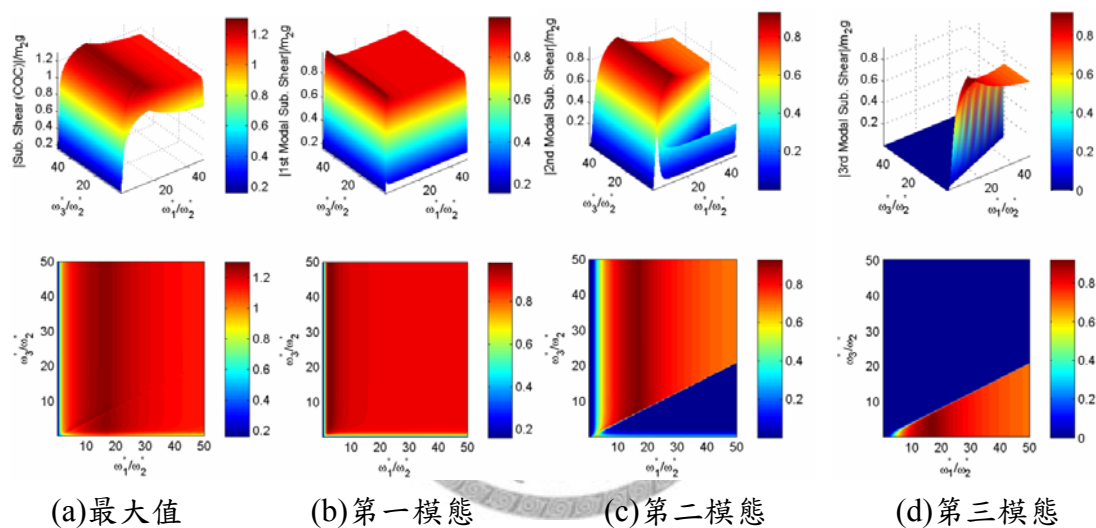


圖 2.3.10 最大與前三模態下部結構樓層剪力比

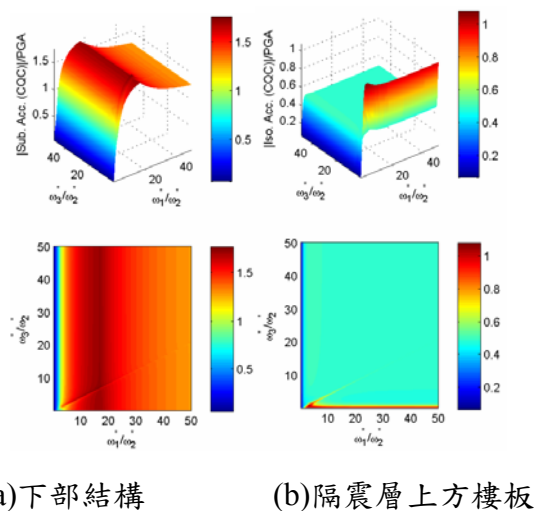


圖 2.3.11 下部結構與隔震層上方樓板對地表最大加速度比值



照片 2.3.1 台灣大學興建中之土木系研究大樓



照片 2.3.2 LRB 於設計位移 125%之變形

第三章 中間樓層隔震縮尺結構振動台試驗

為探討有無受到模態耦合效應影響之中間層隔震結構反應之差異，並與理論分析結果相驗證，於國家地震研究中心進行一系列縮尺振動台試驗。本章內容主要介紹中間層隔震縮尺結構振動台試驗，包括國家地震研究中心之三軸向地震模擬振動台簡介，三層樓中間層隔震縮尺結構試體設計規劃、LRB 設計檢核程序與元件測試結果，以及試體之量測機制。

3.1 三軸向地震模擬振動台

國家地震研究中心(National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE)地震模擬實驗室之地震模擬振動台如圖 3.1.1，總共有六個自由度以模擬三軸向之地震，皆能在地震模擬實驗室模擬重現目前發生於世界上之主要地震。地震模擬振動台之平面尺寸為 5 公尺乘 5 公尺，質量為 27 公噸，超過試體最大質量 50 公噸的一半，可減少振動台和試體之間的互制效應。振動台為一矩形結構體，充分利用有限之質量來提高其彎矩及扭轉勁度。振動台由油壓致動器驅動，每一軸向各有四支致動器，三軸向共十二支致動器。振動台與其上試體等之重力係由四支垂直靜力支承所承受，垂直靜力支承利用壓縮空氣的方法提供承載力，每支承載力為 21 公噸，4 支共可承載 84 公噸，調整氣缸內之空氣壓力來抵消總運動質量之重力，如此一來垂直致動器僅需提供動態力量即可驅動振動台。油壓泵提供油壓動力以推動致動器，兩部電動油壓泵及三部柴油油壓泵總共能提供流量 1,325gpm，而液壓油的工作壓力為 210kg/cm^2 。油壓泵提供系統所需之平均流量，而蓄壓器則提供尖峰流量所需之差異量。致動器驅動振動台時所需之反力由反力質塊提供，反力質塊尺寸為 16 公尺(長) $\times$ 16 公尺(寬) $\times$ 7.6 公尺(深)，質量約 4,000 公噸。為了要進一步改善工作環境與實驗環境之品質，以隔震系統將反力質塊與固定基礎分隔開，此時反力質塊即成為浮動基礎，隔震系統係由 96 組空氣彈簧及 80 組阻尼器所組成。

3.2 三層樓縮尺中間層隔震結構試體

試驗結構設計為縮尺比例 1/4 之單跨三層樓鋼構架，共規劃兩組鋼構架，其上部結構柱長皆為 2.5 公尺，第一組鋼構架下部結構柱長 0.8 公尺，第二組鋼構架下部結構柱長 2 公尺，結構各樓層平面尺寸皆為 3 公尺(長)乘 2 公尺(寬)，圖 3.2.1 與圖 3.2.2 分別為第一組與第二組鋼構架設計圖。整體構架包括剛性樓版組、鋼柱與 LRB，鋼柱分為上部結構柱長 2.5 公尺、下部結構柱長 0.8 公尺與 2 公尺三種尺寸，設計如圖 3.2.3 至 圖 3.2.5，其中上部結構柱上兩處焊有轉接板可另外接合梁構件與剛性樓版，以供後續研究多自由度時使用，其尺寸如圖 3.2.6，上部結構柱轉接板尺寸如圖 3.2.7，下部結構柱分別與隔震層以及基底相接，其轉接板尺寸如圖 3.2.8 與圖 3.2.9；剛性樓版組由兩部分焊接而成，分別為剛性樓板與(圖 3.2.10)上覆鋼板(圖 3.2.11)，剛性樓板由梁組成，梁與鋼柱尺寸皆採用 H150×150×7×10 型鋼，梁柱接頭尺寸如圖 3.2.12，其轉接板尺寸如圖 3.2.13。鋼構架材料為 A36，其楊氏係數 $E=214100000\text{kN/m}^2$ 、降伏強度 $F_y=254881\text{kN}$ 。

試驗總共規劃四組試體，隔震層上方樓板質量定為 $3\text{kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，質量塊一組為 0.25 噸，配合剛性樓板組原有重量 2.5 公噸，則需再配置兩組質量塊，第一二組試體使用第一組鋼構架，第三四組試體使用第二組鋼構架，改變各組上下部結構質量配置，詳細四組試體設計參數以及探討方向分別說明如下：

(1)第一組試體

使用第一組鋼構架，參數設定參照土木新系館： $m_1/m_2=1.7$ ， $m_3/m_1=4.7$ ， $\omega_1^*/\omega_2^*=37.9$ 與 $\omega_3^*/\omega_2^*=4.3$ ，故設計得到上部結構質量為 $14.1\text{kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，需於剛性樓板下加裝一片鋼板並配置 42 組質量塊，下部結構質量則為 $5\text{kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，質量塊需配置 10 組，第一組試體於振動台上之試驗構架如照片 3.2.1，期能透過縮尺試驗以探討土木新系館於此參數下之結構特性。

(2)第二組試體

使用第一組鋼構架，參數設定如下： $m_1/m_2 = 1.7$ ， $m_3/m_1 = 4.7$ ， $\omega_1^*/\omega_2^* = 37.9$ 與 $\omega_3^*/\omega_2^* = 4.3$ ，質量配置方面，上部結構質量為 $9\text{ kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，共配置 21 組質量塊，其中 7 組質量塊採偏振動台東側配置，下部結構質量 $5\text{ kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，共配置 10 組質量塊，第二組試體於振動台上之試驗構架如照片 3.2.2，藉由上部結構質量採偏心配置，以探討中間層隔震之扭轉效應。

(3)第三組試體

使用第二組鋼構架，參數設定如下： $m_1/m_2 = 1.7$ ， $m_3/m_1 = 4.7$ ， $\omega_1^*/\omega_2^* = 10.3$ 與 $\omega_3^*/\omega_2^* = 4.3$ ，質量塊配置數量及方式與第一組試體相同，第三組試體於振動台上之試驗構架如照片 3.2.3，欲探討中間層隔震之模態耦合效應，與對照第一組試體之試驗結果以了解相關動力特性差異。

(4)第四組試體

使用第二組鋼構架，參數設定如下： $m_1/m_2 = 1.5$ ， $m_3/m_1 = 2.4$ ， $\omega_1^*/\omega_2^* = 11$ 與 $\omega_3^*/\omega_2^* = 6$ ，上部結構質量為 $7.2\text{ kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，共配置 14 組質量塊，下部結構質量為 $4.5\text{ kN}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$ ，共配置 8 組質量塊，第四組試體於振動台上之試驗構架如照片 3.2.4，其目的與第三組試體相同，欲探討中間層隔震之模態耦合效應，並與其試驗結果做一比較，期能更為了解中間層隔震結構受到模態耦合效應影響下的動力行為。

試驗長度縮尺比例為 $1/4$ ，根據因次分析理論，縮尺模型與原始結構之時間比例關係為 $1/2$ ，故振動台模擬試驗之加速度歷時皆須調整時間軸以滿足此項縮尺特性。

依據我國最新建築物耐震設計規範及解說對震區劃分之訂定，試驗採台北三

區作為設計工址，在此為對應研究實例之分析結果，以最大考量地震需求為設計依據，圖 3.2.14 為其工址最大考量水平加速度反應譜，而縮尺試驗用之工址最大考量水平加速度反應譜列於圖 3.2.15。

振動台縮尺試驗採雙軸向地震力輸入，本文將主要探討結構長向反應，並以短向與雙向試驗結果作為輔佐以更加了解結構特性，所採用之地震歷時為 331TAP097、921TAP097、921NCREE、614NCREE 四組真實地震紀錄以及兩組與設計水平加速度反應譜相符之人造地震歷時 331TAP097 Code Compatible、921NCREE Code Compatible，圖 3.2.16 至圖 3.2.21 為六組加速度歷時圖，其相對應之加速度與位移反應譜分別列於圖 3.2.22 至圖 3.2.27 及圖 3.2.28 至圖 3.2.33。

在每組試體進行地震模擬試驗前，為識別試體構架之結構特性，必須先進行一次白訊試驗，以隨機製造一頻率內涵包含 0 到 50Hz 之白訊(White Noise)當作地震輸入力，獲取構架各樓層輸出反應，透過轉換函數得到各樓層對基底於頻率域之振幅比值，從中可得到構架之各模態頻率、振態與阻尼比等資訊。除此之外，於每組試體改變試驗方向時也會進行一次白訊試驗以確認 LRB 回復原狀。

3.3 鉛心橡膠支承墊

試驗之三自由度縮尺結構使用的隔震支承系統採鉛心橡膠支承墊(LRB，Lead Rubber Bearing，以下介紹 LRB 的基本構造與力學特性、力學行為參數與細部尺寸之設計流程以及元件測試結果。

3.3.1 基本構造與力學行為

LRB 為目前隔震建築物最廣為應用之隔震支承系統，為一種橡膠式隔震元件，基本構造如圖 3.3.1，由低阻尼橡膠隔震元件改良而成，以一層鋼板一層橡膠膠結而成，其核心灌入鉛心柱，上下轉接版用以固定支承，其中橡膠具有較低

之水平勁度以延長上部結構週期有效大幅降低地震能量，鋼板提高隔震元件之垂直勁度以支撐上部結構垂直載重並避免橡膠過度受壓膨脹，鉛本身具有高韌性，但無圍束情況下不易吸收地震能量，若讓其受到周圍橡膠鋼板的固定，則比較容易進入剪力變形以發揮吸收能量的功能，提高系統阻尼比，且鉛心柱於消能後會再結晶，重複變形也能安定。

LRB 之力學特性常以一雙線性遲滯迴圈模擬，如圖 3.3.2 所示，相關參數說明如下：

D ：LRB 之設計位移

D_y ：LRB 於鉛心降伏時之位移

Q_d ：LRB 之特性強度

F_y ：LRB 之於鉛心降伏時之力量

K_{eff} ：LRB 之有效勁度

K_u ：LRB 之彈性水平勁度

K_d ：LRB 之非彈性水平勁度



3.3.2 設計與檢核程序

首先設計 LRB 之力學特性參數，步驟如下：

步驟 1. 決定位於隔震系統上方結構總重量，並計算每個隔震支承墊所承受之

上部重量 W

步驟 2. 決定隔震結構之設計週期 T_e

步驟 3. 決定 LRB 貢獻之阻尼比 ξ_b

步驟 4. 決定 5% 阻尼比之加速度反應譜係數 S_{aD}

步驟 5. 決定等效阻尼比 ($\xi_e = \xi_0 + \xi_b$) 之修正係數 B

步驟 6. 考慮阻尼比修正係數之加速度反應譜係數 $S_a = \frac{S_{aD}}{B}$

步驟 7. 計算 LRB 之設計位移 $D = \frac{S_a}{\omega^2} g = \frac{S_a T_e^2}{4\pi^2} g$

步驟 8. 依 $K_{eff} = \frac{4\pi^2}{T_e^2} \frac{W}{g}$ 計算 LRB 之有效勁度 K_{eff}

步驟 9. 決定 LRB 之特性強度 Q_d

步驟 10. 假設 LRB 降伏後勁度與彈性勁度之比值 α_b

步驟 11. 依 $D_y = D - \frac{2\pi K_{eff} D^2 \xi_b}{4Q_d}$ 計算 LRB 於鉛心降伏時之位移 D_y

步驟 12. 依 $K_d = \frac{K_{eff} D - Q_d}{D}$ 計算 LRB 之非彈性水平勁度 K_d

步驟 13. 依 $K_u = \frac{K_d}{\alpha_b}$ 計算 LRB 之彈性水平勁度 K_u

步驟 14. 依 $F_y = \frac{Q_d}{1 - \alpha_b}$ 計算 LRB 之降伏力 F_y

步驟 15. 依 $D_y = \frac{F_y}{K_u}$ 計算 LRB 於鉛心降伏時之位移 D_y ，若與步驟 11 所得之

D_y 不同，則重新假設步驟 10 之 α_b 反覆迭代至 D_y 收斂

步驟 16. 依 $\xi_b = \frac{4Q_d(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2}$ 計算 LRB 貢獻之阻尼比 ξ_b ，與步驟 3 決定之 LRB

貢獻阻尼比相同即設計完成

LRB 之相關力學特性參數設計完成後，需進一步設計 LRB 之細部尺寸並進行穩定度檢核，步驟如下：

步驟 1. 決定支承墊之設計應變 $\gamma_{\max}$ 、橡膠硬度，可得到相對應之楊氏係數 E 、剪力模數 G 以及修正因子 κ

步驟 2. 由 LRB 設計位移與設計應變可求得橡膠層墊總厚度 $T_r = \frac{D_d}{\gamma_{\max}}$

步驟 3. 決定鉛心降伏應力 f_{py} ，由 $A_p = \frac{Q_d}{f_{py}}$ 計算鉛心面積 A_p 與直徑 d_p

步驟 4. 決定橡膠層墊的斷面面積 A 與尺寸

(a) 由橡膠層墊在靜載重 P_{DL} 下之容許壓應力 σ_c 計算橡膠層墊之有效受壓面積 A_{reo} ，公式如下：

$$\sigma_c = \frac{P_{DL+LL}}{A_{reo}} \leq 80 \text{ kg/cm}^2$$

若考慮水平變位效應，橡膠層墊有效受壓面積 A_{re} ，估算公式如下：

$$\text{採用圓形層墊之情況下：} \beta = 2\cos^{-1}\left(\frac{D}{d}\right), A_{re} = \frac{d^2}{4}(\beta - \sin\beta)$$

兩者取大值作為有效受壓面積 $A_{r0} = \max(A_{reo}, A_{re})$

(b) 不允許橡膠層發生 rocking 之條件下，選擇一形狀因子 S ，公式如下：

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{\frac{E_c A}{h}}{\frac{GA}{h}} = \frac{E_c}{G} = \frac{E(1+2KS^2)}{G} \geq 400$$

其中， E_c 為橡膠層墊之壓力模數， h 為橡膠支承墊總高度

(c) 由橡膠層墊垂直設計載重 P_{DL+LL} 計算橡膠層墊所需最小有效受壓面積 A_{r1} ，公式如下：

$$\gamma_c|_{DL+LL} = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c A_{r1}} \leq \frac{EB}{3}$$

其中，EB 為橡膠之拉斷應變

(d) 以下列公式求取不含鉛心之橡膠材料彈性勁度 K_r

$$K_d = K_r \left(1 + 12 \frac{A_p}{A_{r0}}\right)$$

(e) 由橡膠層墊所受剪力可求取橡膠層墊之最小剪力斷面面積 A_{r2} ，公式

$$\text{如下： } A_{r2} = \frac{K_r T_r}{G}$$

(f) 取 A_{r0} ， A_{r1} 與 A_{r2} 三者中之最大值作為橡膠層墊的設計斷面面積 A 。

(g) 選擇適當之橡膠層墊斷面尺寸以符合步驟 f 之設計斷面面積

步驟 5. 求取單層橡膠厚度 t_i 與橡膠層數 N

採用圓形層墊之情況下： $t_i = \frac{d}{4S}$ ，再由 $N = \frac{T_r}{t_i}$ 決定所需之橡膠層數

步驟 6. 以 $t_s \geq \frac{2(t_i + t_{i+1})P_{DL+LL}}{A_{re} F_S} \geq 2\text{mm}$ 設計鋼板厚度 t_s ，其中 $F_S = 0.6F_y$ ， F_y

為鋼之降伏應力。

步驟 7. 檢核 LRB 之剪應變與穩定度

(a) 受垂直軸壓 P_{DL+LL} 時產生之剪力應變 $\gamma_c = 6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c A_{re}} \leq \frac{EB}{3}$

(b) 防止支承傾覆情況發生，設計位移 D 需滿足下列公式：

$$D \leq \delta_{\text{roll-out}} = \frac{P_{DL+LL} L - Q_d h}{P_{DL+LL} + K_d h}$$

(c) 穩定度要求

為防止支承墊發生失穩現象，其平均壓應力需符合下列公式：

$$\sigma_c = \frac{P}{A} < \sigma_{cr} = \frac{GSd}{2.5T_r} \text{ (圓形層墊)}$$

(d) 鉛心尺寸需滿足 $1.25 \leq \frac{H_p}{d_p} \leq 5.0$ ，其中 d_p 為鉛心直徑， H_p 為鉛心有

效高度亦可視為橡膠層總厚度。

3.3.3 結構元件測試

依 3.3.2 之設計流程設計本研究縮尺試驗所需之 LRB，天然橡膠硬度採 50 IRHD，設計應變取 80%，設計位移與設計週期分別為 6cm 與 1sec，整體結構阻尼比為 20%，其他細部設計尺寸如表 3.3.1 所示。將 LRB 裝設於試驗構架上進行振動台縮尺試驗前，必須先進行結構元件測試，獲知其真實力學行為，提供結構分析時所需之資訊，並檢核有效勁度是否合乎規範中與設計值誤差不得大於 15%之規定。

結構隔震元件測試構架如圖 3.3.3 及照片 3.3.1，外部水平油壓致動器施力於隔震元件主軸方向，兩支垂直油壓致動器分別施加軸壓 42.5kN 於隔震元件，測力計(Load Cell)裝設於隔震元件下方以量測元件之軸力與剪力，位移計則裝置於隔震元件與測力計相接處量測元件相對位移，如照片 3.3.2。測試時採用控制位移 5cm，由外部水平致動器分別進行在 0.1Hz，0.5Hz，以及 1Hz 下之正弦函數位移，測試時以兩個 LRB 為一組，分別安裝於測試構架之東西側，總共測試四組，擇其測試結果較為良好之四個 LRB，安裝於振動台試驗構架上進行試驗並作分析比較。

圖 3.3.4 與圖 3.3.5 為第一組東西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈比較圖，圖 3.3.6 與圖 3.3.7 為第二組東西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈比較圖，圖 3.3.8 為東側二個 LRB 於 Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈比較圖，圖 3.3.9 為西側二個 LRB 於 Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈比較圖，圖 3.3.10 為四個 LRB 於 Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈比較圖，由四個 LRB 測試結果所得到之各項力學性

質參數如表 3.3.2 所示。若以原設計值進行檢核，有效勁度與其設計值誤差為 -2.3%，在規範規定範圍內，而在能量消散面積與有效阻尼部分，與其設計值比較也略小，可能對於實際 LRB 消能情況產生些許影響，而從遲滯迴圈圖也可發現在中段部分皆發生束縮的現象，原因可能在於當初設計時為配合試體整體結構設計，鉛心直徑有所限制，造成 LRB 在製作上有一定之困難度，且小尺寸支承墊在精度上也不易掌控。

3.4 量測機制

實驗使用之量測儀器包括位移計、加速度計、測力計以及應變計，總共裝設 92 個頻道數，如表 3.3.3 所示，以下分別說明四種感測器配置位置、數量與量測資訊。

(1) 位移計

使用 Temposonics II Transducer(照片 3.4.1)以磁致共振原理進行量測，裝設位置如圖 3.4.1，於每個樓板同一方向同一柱線裝設 2 個，雙向共 4 個，三個樓層共 12 個頻道，位移計量測訊號為絕對位移，所以必須先扣除掉振動台之位移量方可得到各樓層之相對地表位移。裝置於樓板兩側對應於同一柱線的位移計，透過迴歸的方式可得到質心的反應，也可藉由比較兩者之位移反應，得知樓板之扭轉反應。

(2) 加速度計

如照片 3.4.2，配置如圖 3.4.2，於振動台上裝設三軸向加速度計，紀錄輸入結構之地震力，藉此與其他樓層做相應比較。下部結構樓板與隔震上方樓板皆裝設 3 個長向水平與 3 個短向水平加速度計，由於下部結構勁度較大，在垂直向搖擺放大的效應不明顯，故在此不考慮裝設垂直向加速度計，上部結構樓板裝設 3 組三軸向加速度計，探討結構扭轉與搖擺放大效應，總共紀錄 24 個頻道。質心加速度反應可利用其中樓板兩側對應於同一柱線之加速度計訊號回歸求出。裝設位置方

面，長向加速度計距離樓板邊緣 20 公分，短向加速度計距離樓板邊緣 10 公分。

(3) 測力計(Load Cell)

如照片 3.4.3，其軸向承載最大力量 20 公噸，水平向承載最大剪力 10 公噸。配置如圖 3.4.3，8 個測力計分別裝設於上下部結構四根柱之柱底，一個測力計可量測軸力與長短向水平剪力共 3 個頻道，共紀錄 24 個頻道，量測上下部結構柱所承受之垂直軸力與雙向水平剪力。

(4) 應變計

如照片 3.4.4，由於振動台頻道數之限制，只裝置於上部結構四根柱上共 32 個應變計，配置如圖 3.4.4，同一根柱上距離柱頂跟柱底 15cm 處各黏貼 4 個應變計，分別位於 H 型鋼之上下翼板兩側，再經由回歸得到各個方向之應變值。

在剪力計算方面，可利用柱底與柱頂量測到之應變值，計算上下斷面之彎矩，加總除以相對高度，便可得到上部結構柱所受剪力；各樓層量測之加速度訊號與其質量相乘，可得到各樓層之慣性力，欲得某一樓層之樓層剪力，則將其上方所有樓層慣性力加總即得，而上下部結構柱底皆有裝設 Load Cell 以量測其剪力，在經由數據分析比對後，各感測計所量測計算之剪力反應滿足力平衡的觀念。

表 3.3.1 試驗之 LRB 設計值

力學性質	彈性勁度 K_u	kN/mm	1.286
	降伏強度 F_y	kN	3.883
	後降伏勁度比 α		0.091
	特性強度 Q_d	kN	3.53
	等效勁度 K_{eff}	kN/mm	0.176
	能量消散面積 EDC	kN-mm	800
形狀尺寸	橡膠層直徑 d_r	mm	150
	鉛心直徑 d_p	mm	23
	橡膠層厚度 t_i	mm	3
	橡膠總數	枚	25
	橡膠總厚度 T_r	mm	75
	上封鋼版厚度	mm	25
	下封鋼版厚度	mm	20
	支承墊總高度 h	mm	103

表 3.3.2 結構元件測試結果

No.	Q_d (kN)	K_1 (kN/mm)	K_2 (kN/mm)	K_{eff} (kN/mm)	EDC(kN-mm)	β_b
LRB1	2.840	1.725	0.136	0.184	661.363	0.159
LRB2	2.919	1.794	0.115	0.163	680.338	0.184
LRB3	2.691	1.738	0.132	0.177	627.879	0.157
LRB4	2.764	1.552	0.120	0.166	642.059	0.171
平均值	2.804	1.702	0.126	0.172	652.910	0.168

表 3.3.3 感測器種類與量測資訊

No.	感測器	量測資訊	代號	頻道
1	位移計 (Tempsonics II Transducer)	絕對位移	D	12
2	加速度計	絕對加速度	A	24
3	測力計 (Load Cell)	軸力與剪力	L	24
4	應變計	軸向應變	S	32
總計				92

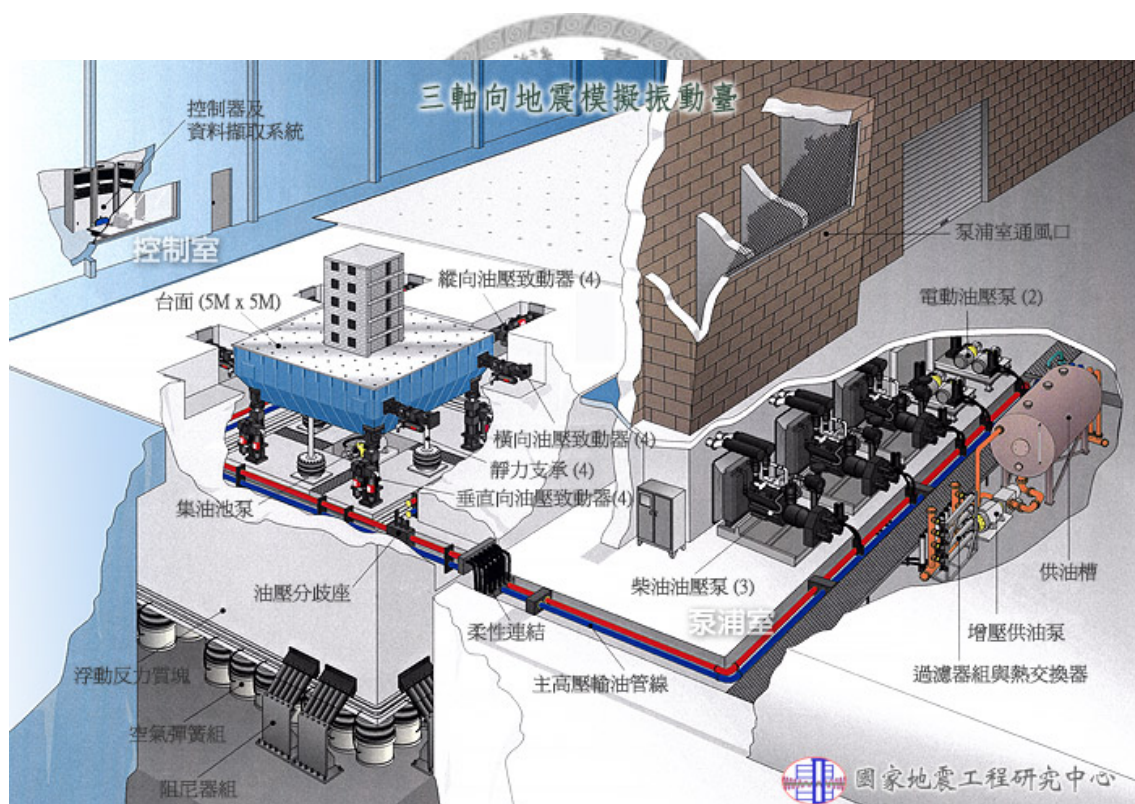


圖 3.1.1 國家地震研究中心地震模擬實驗室之地震模擬振動台

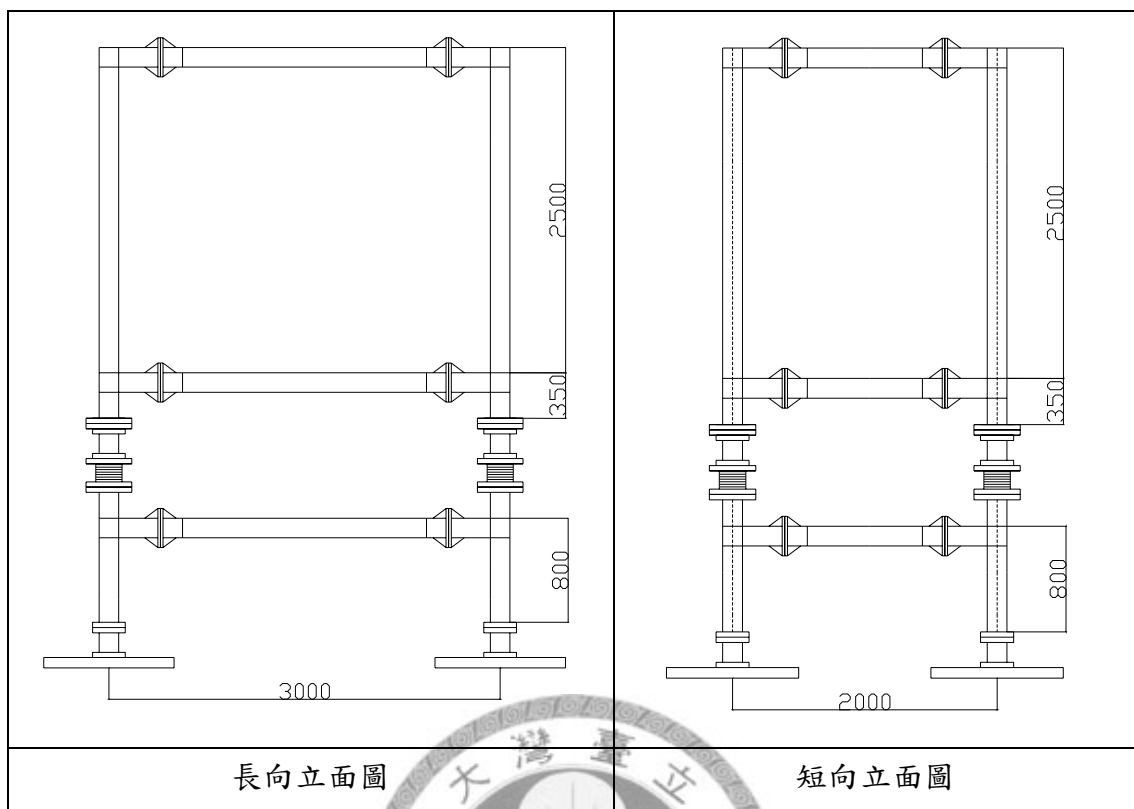


圖 3.2.1 第一組實驗鋼構架設計圖(下部結構柱長 80 公分)

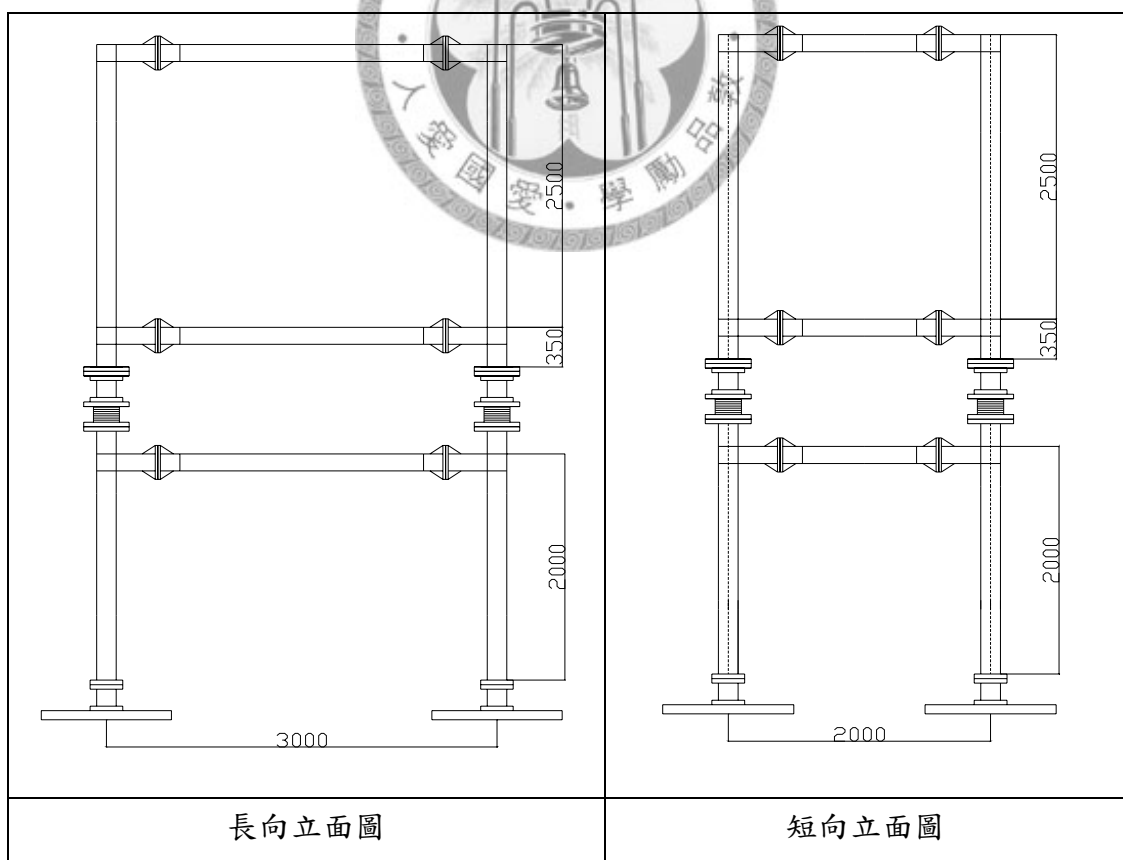


圖 3.2.2 第二組實驗鋼構架設計圖(下部結構柱長 200 公分)

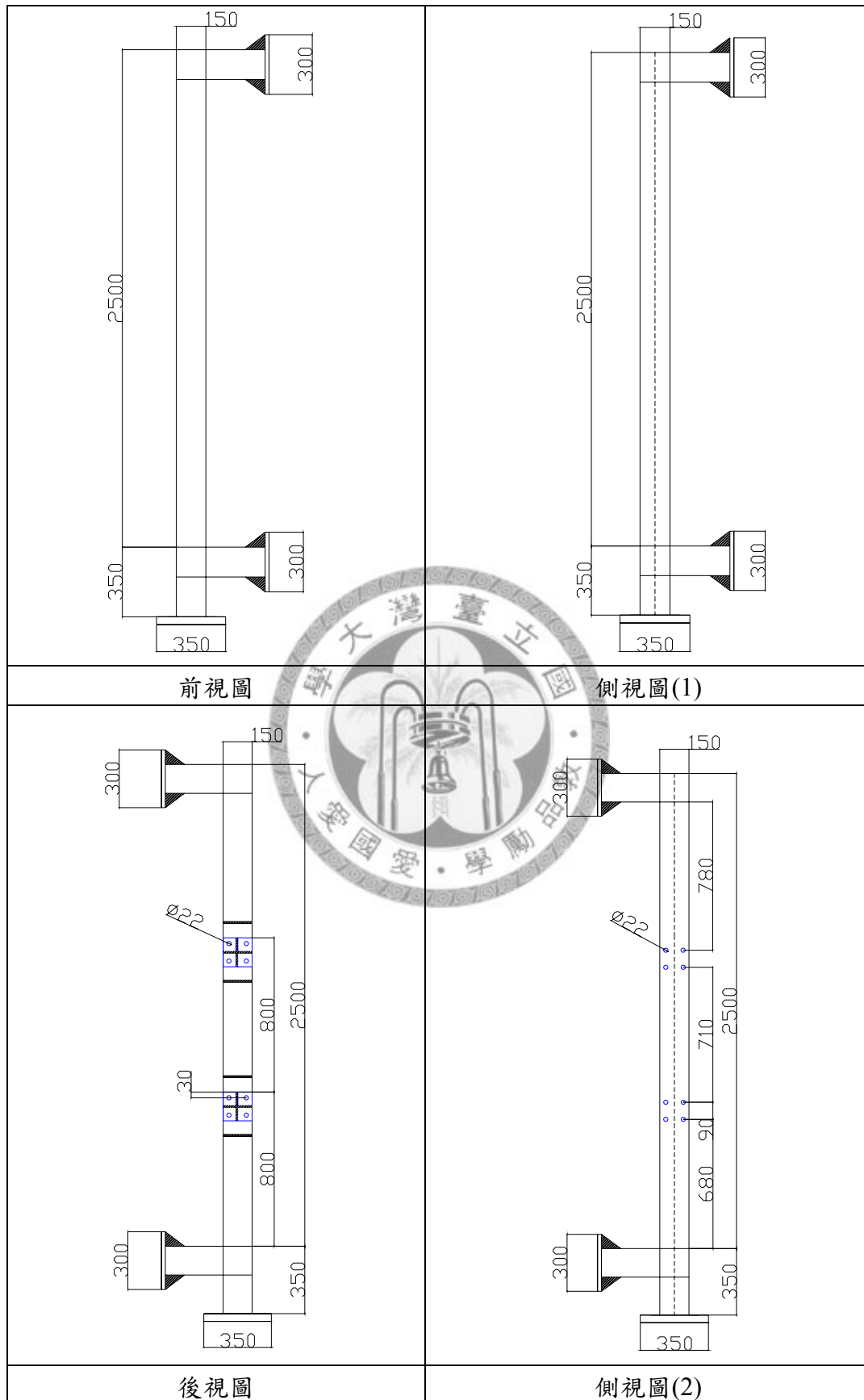


圖 3.2.3 上部結構柱長 2.5 公尺(柱: H150×150×7×10)

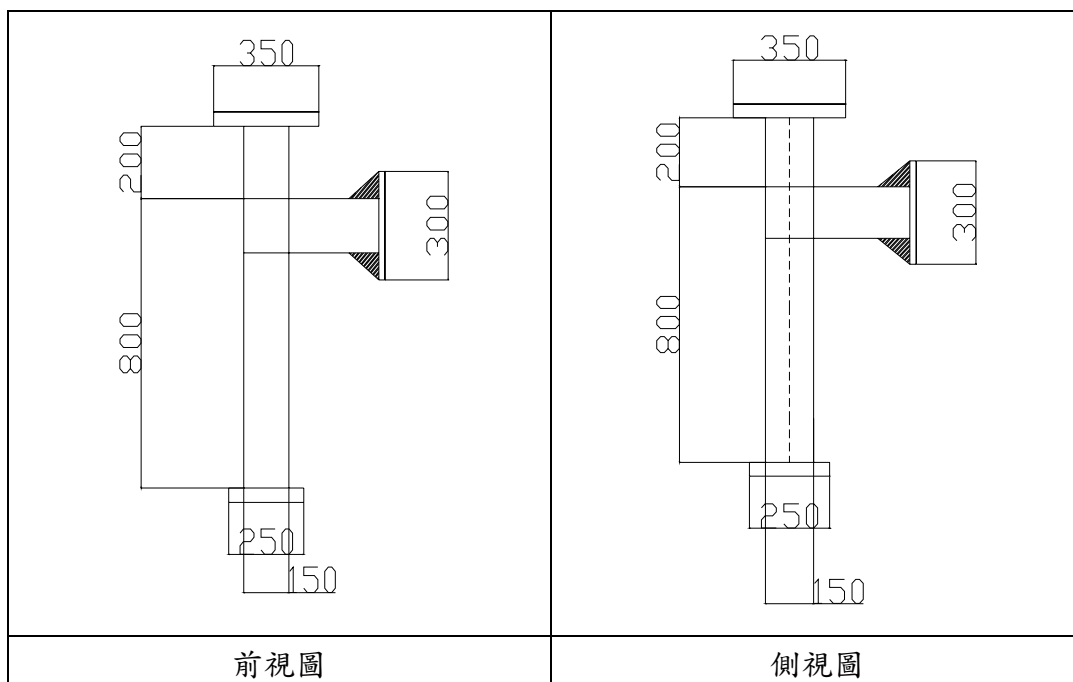


圖 3.2.4 下部結構柱長 0.8 公尺(柱:H150×150×7×10)

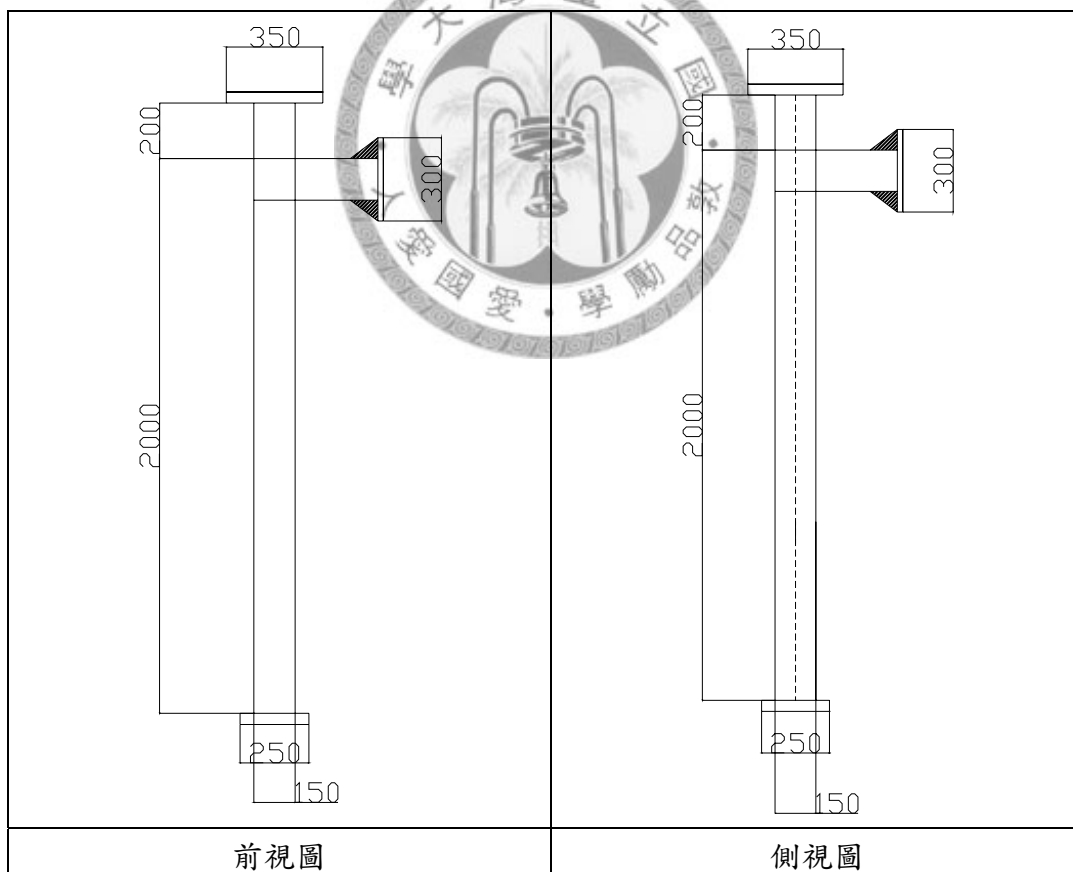


圖 3.2.5 下部結構柱長 2 公尺(柱: H150×150×7×10)

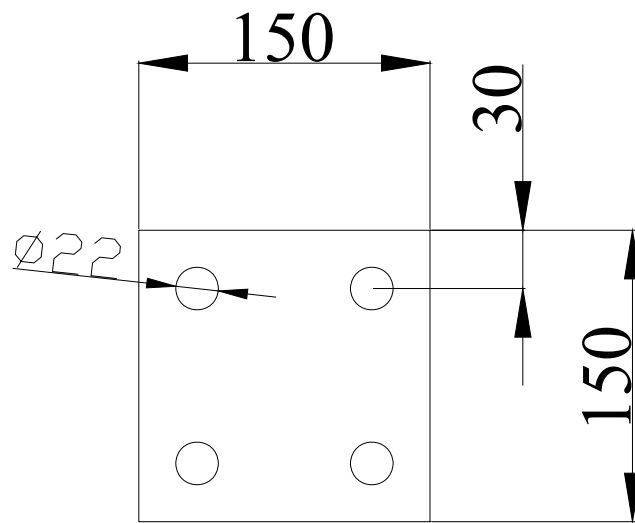


圖 3.2.6 連接板尺寸(厚度:20 公厘)

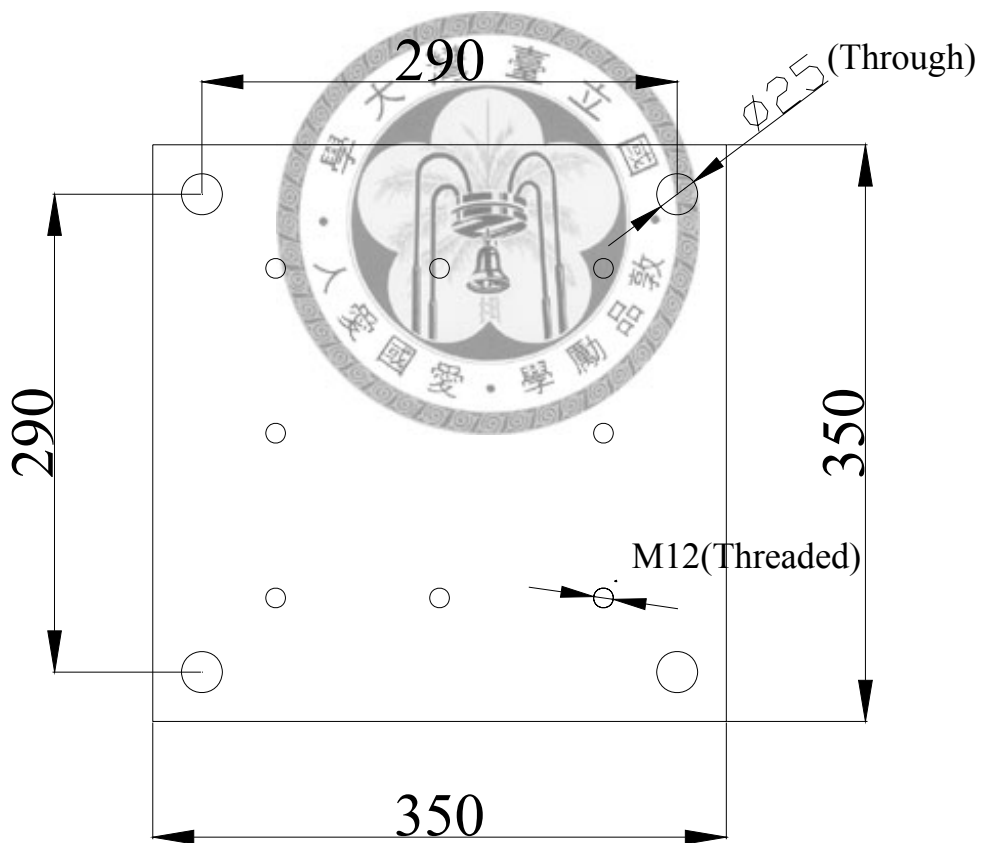


圖 3.2.7 上部結構柱接頭尺寸(厚度:25 公厘)

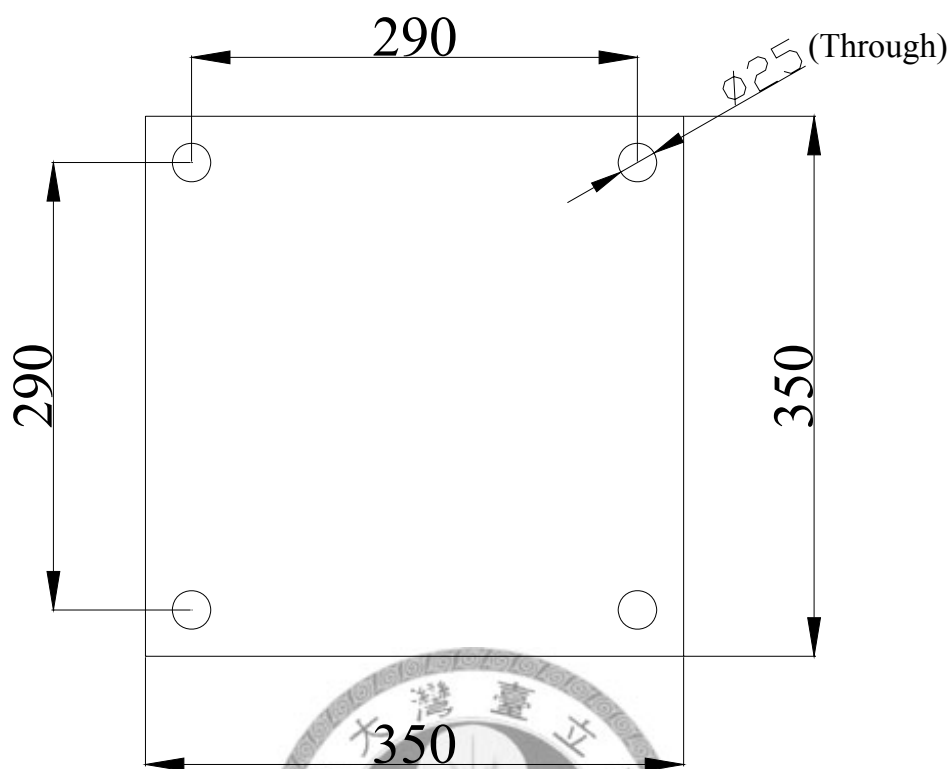


圖 3.2.8 下部結構柱與隔震層相接之接頭尺寸(厚度:25 公厘)-

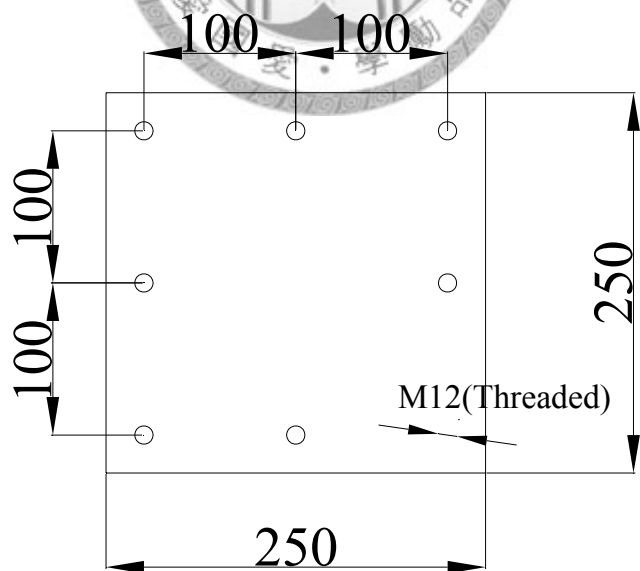


圖 3.2.9 下部結構柱與基底相接之接頭尺寸(厚度:20 公厘)

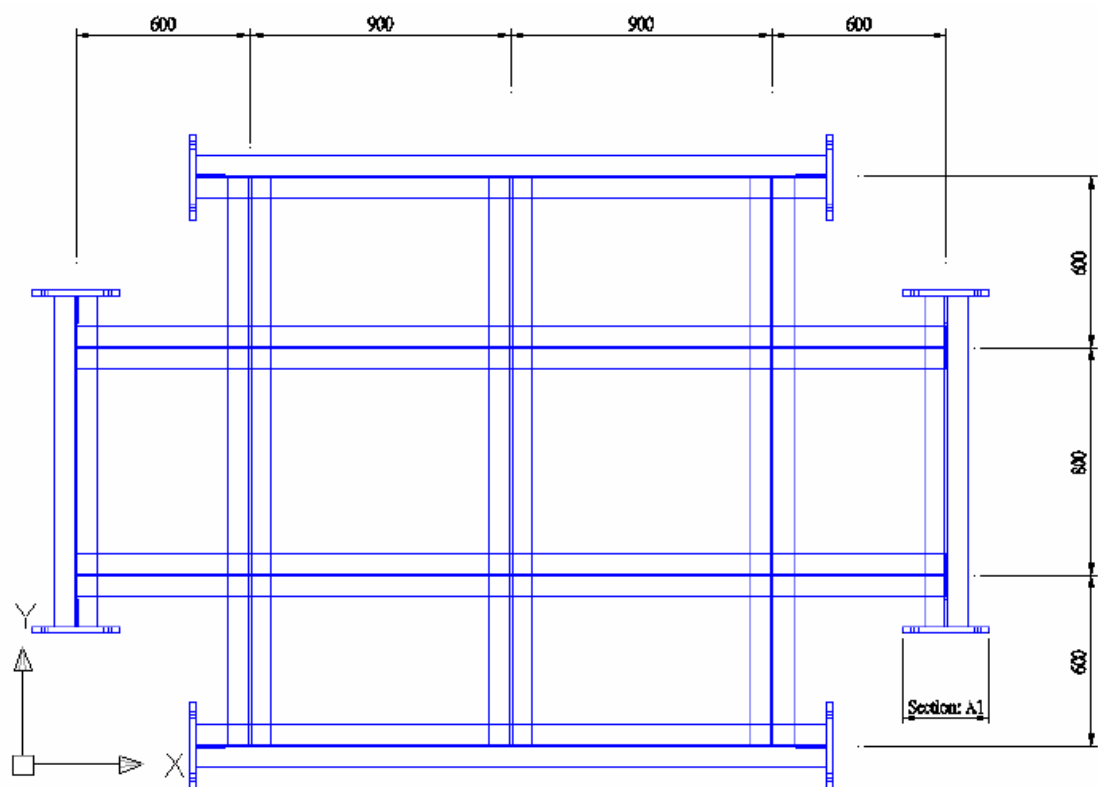


圖 3.2.10 剛性樓板

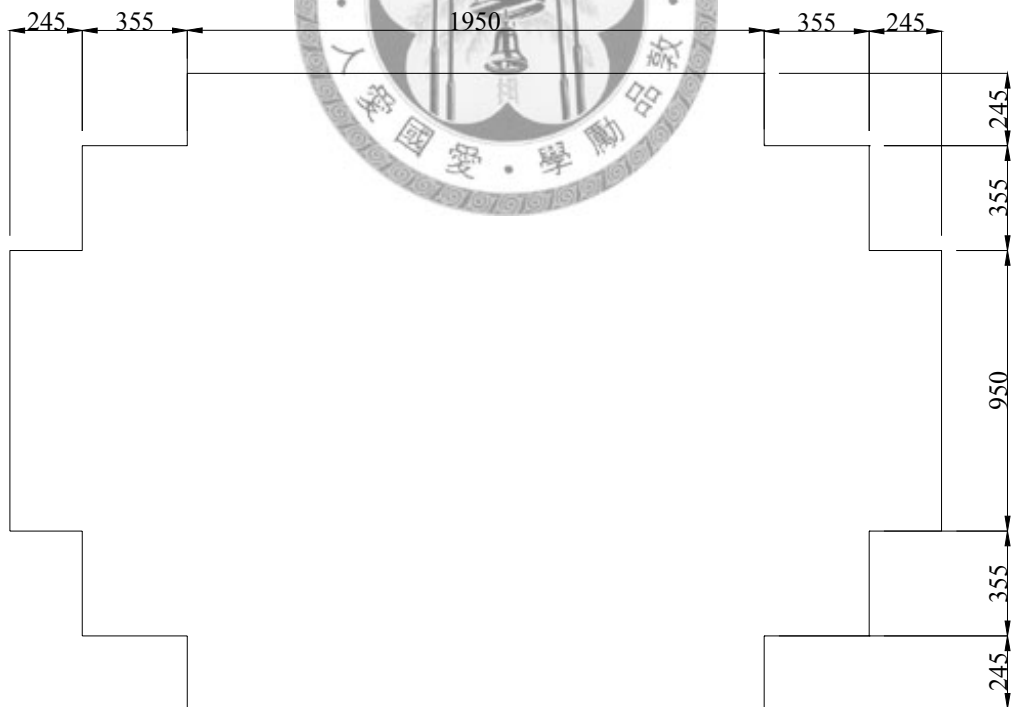
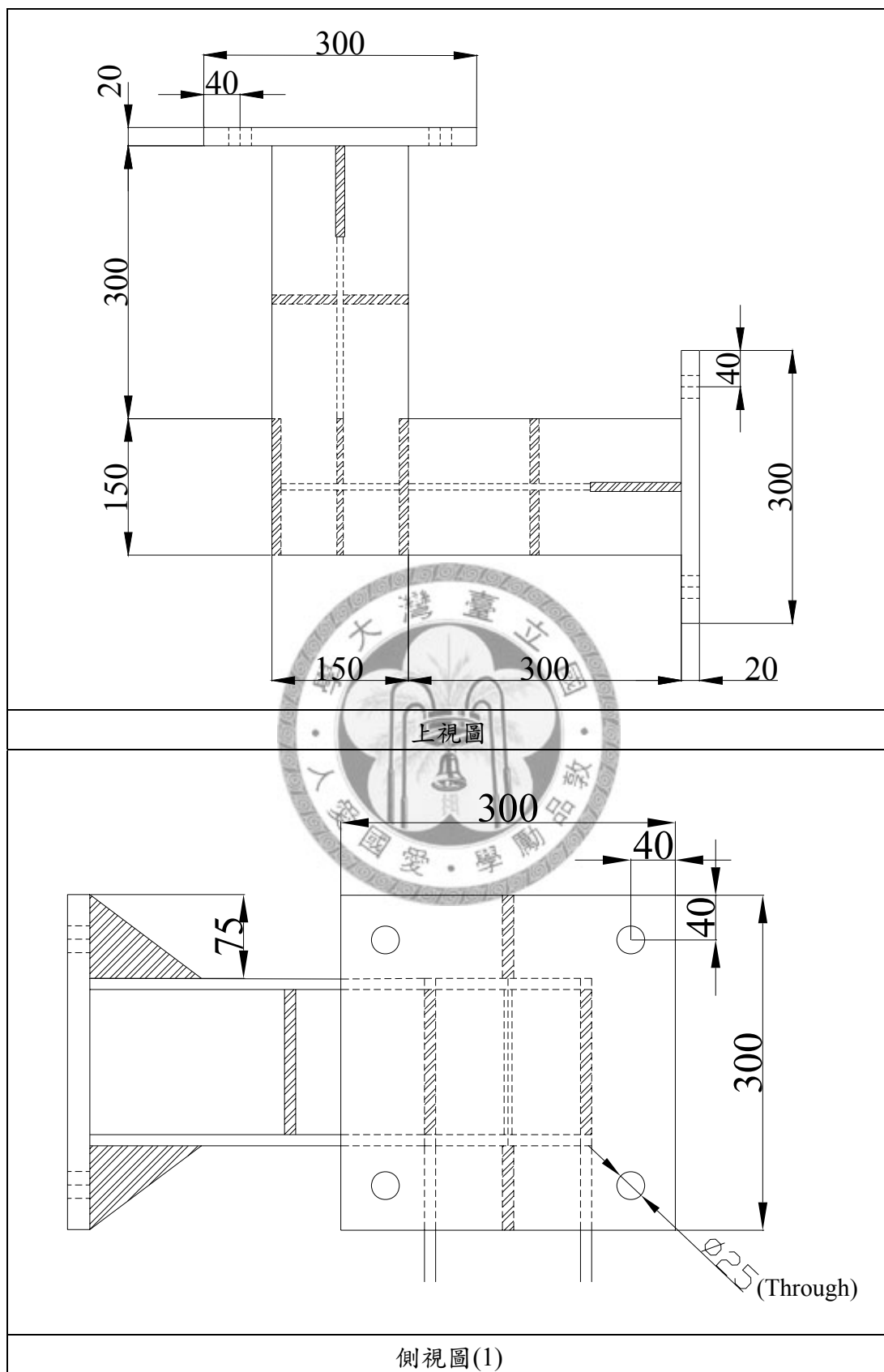


圖 3.2.11 上覆鋼板



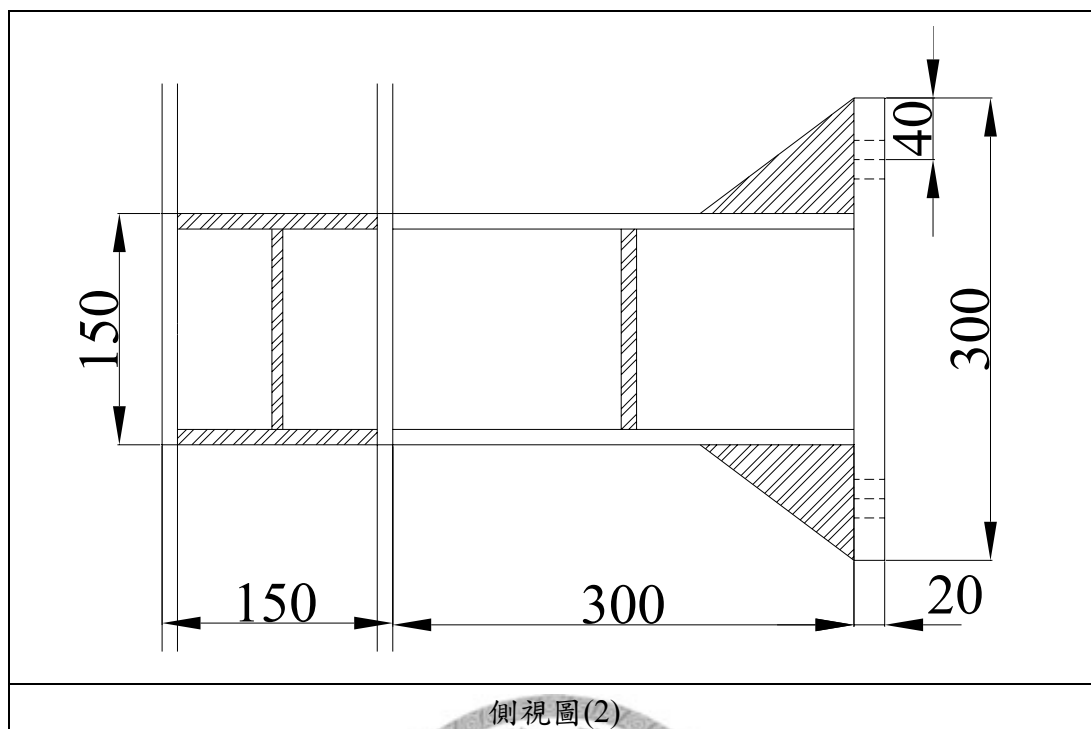


圖 3.2.12 梁柱接頭尺寸 (梁/柱尺寸: H150x150x7x10)

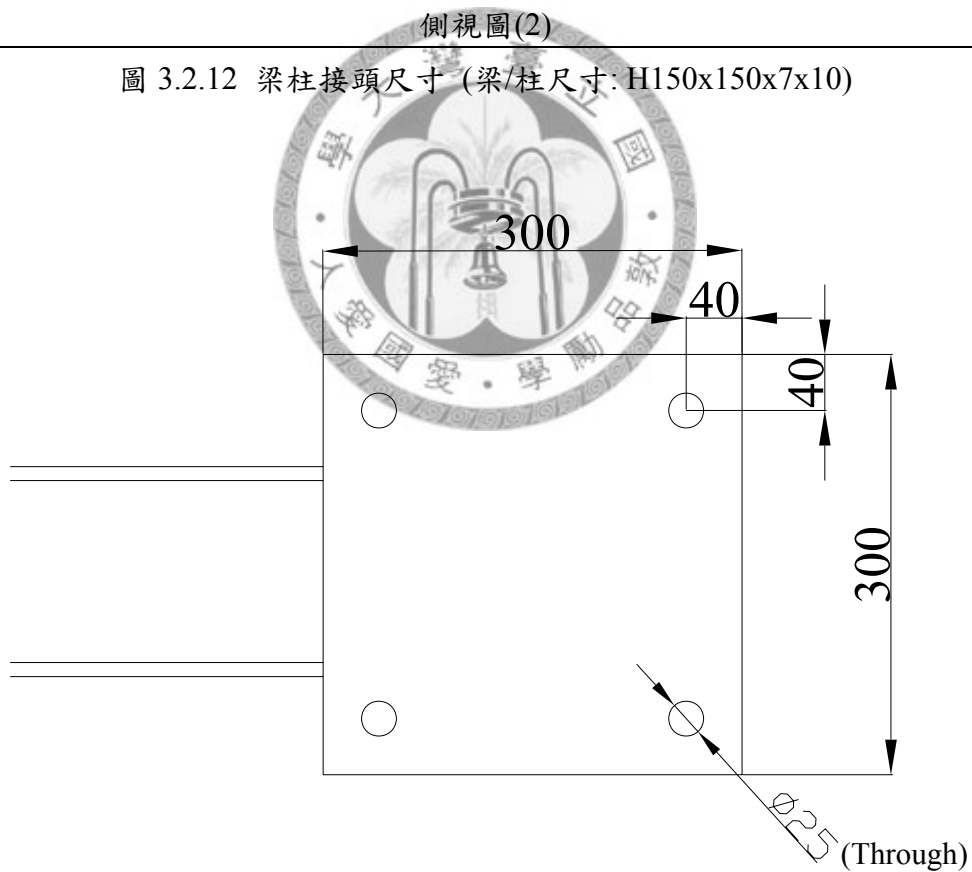


圖 3.2.13 轉接板尺寸 (厚度: 20 公厘)

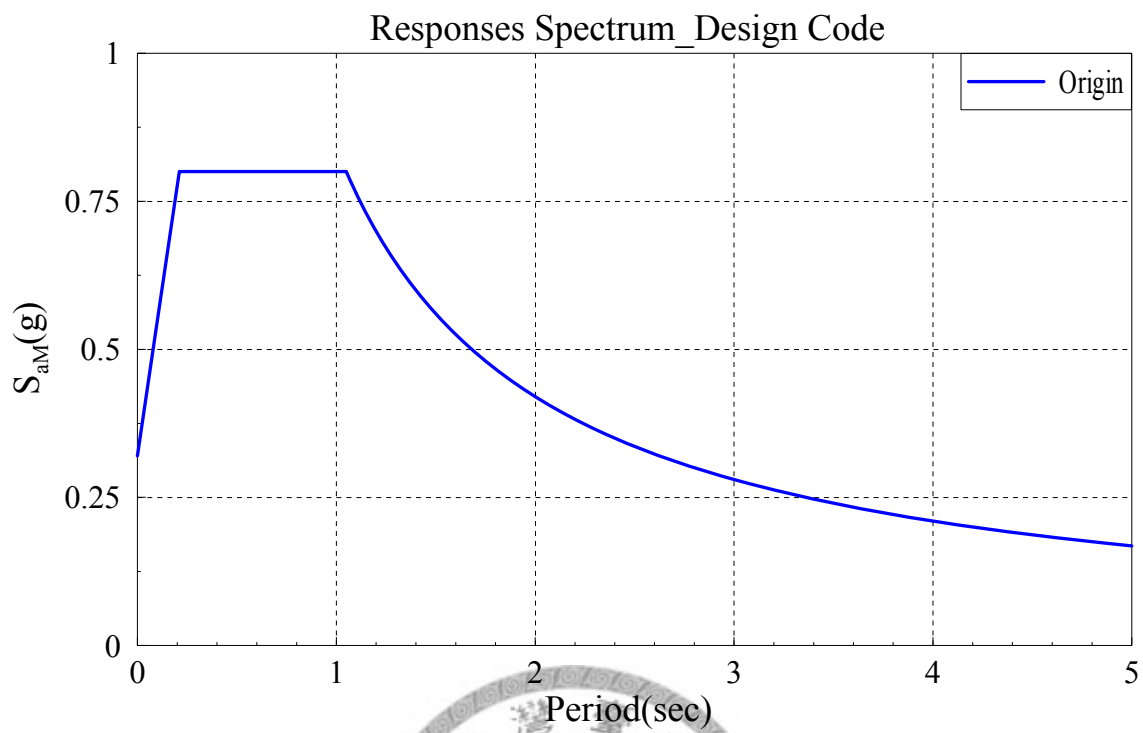


圖 3.2.14 現行建築物耐震設計規範台北三區最大考量水平加速度反應譜

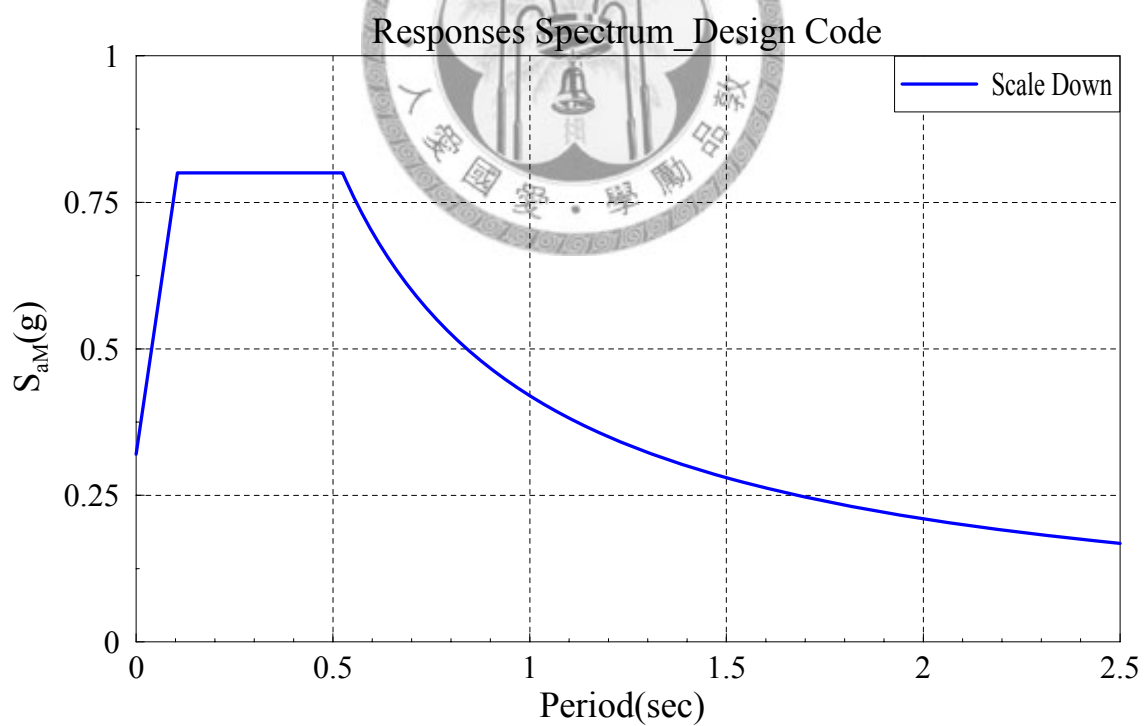


圖 3.2.15 縮尺最大考量水平加速度反應譜

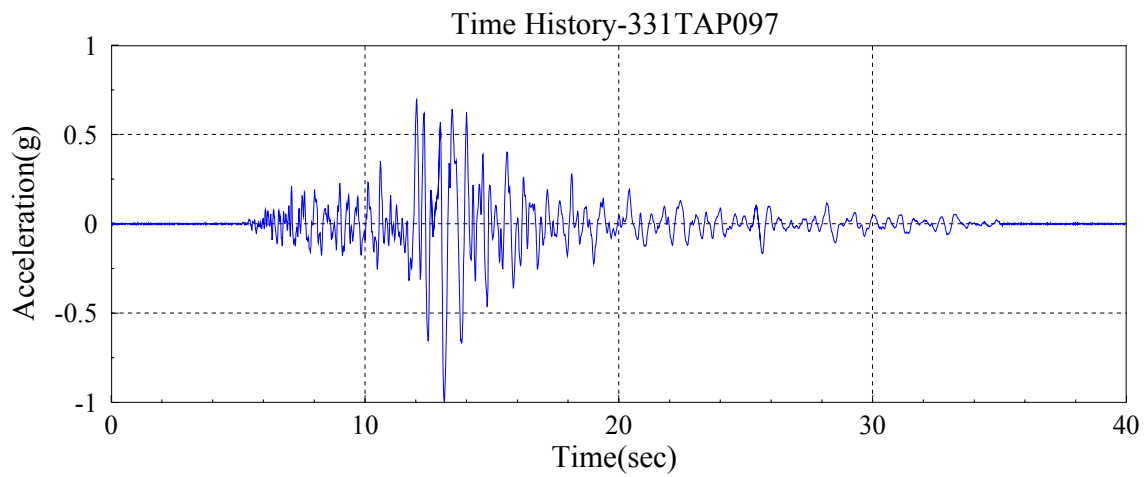


圖 3.2.16 331TAP097 正規化加速度歷時

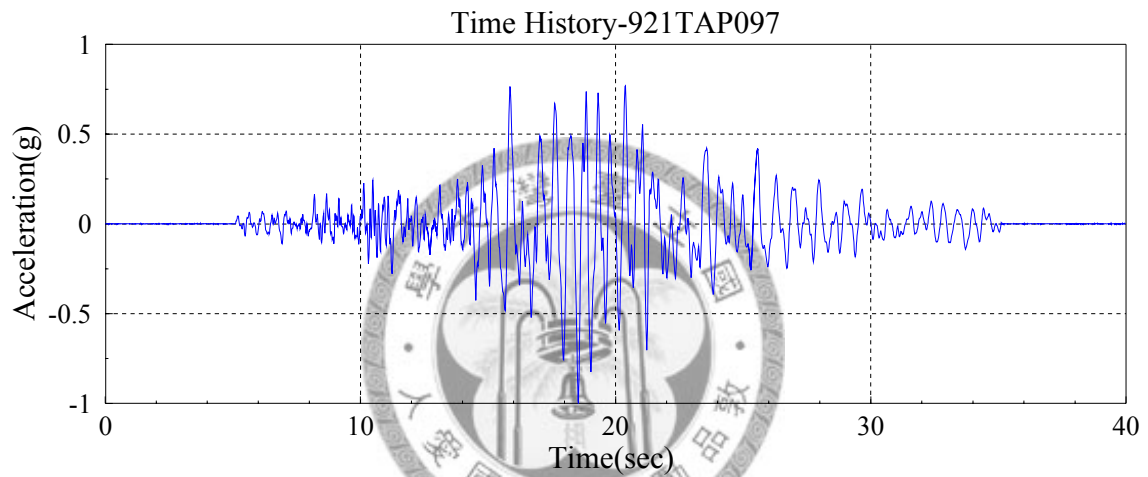


圖 3.2.17 921TAP097 正規化加速度歷時

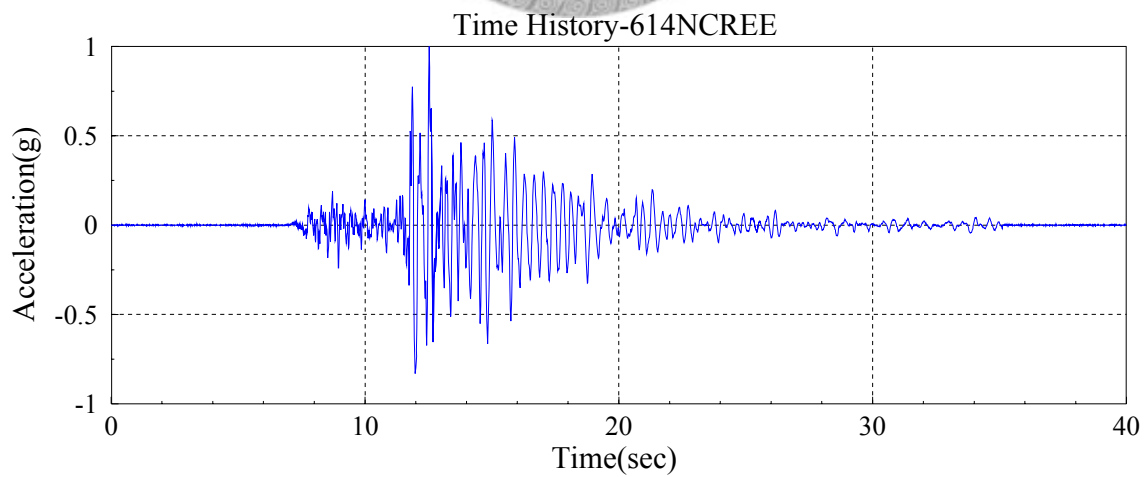


圖 3.2.18 614NCREE 正規化加速度歷時

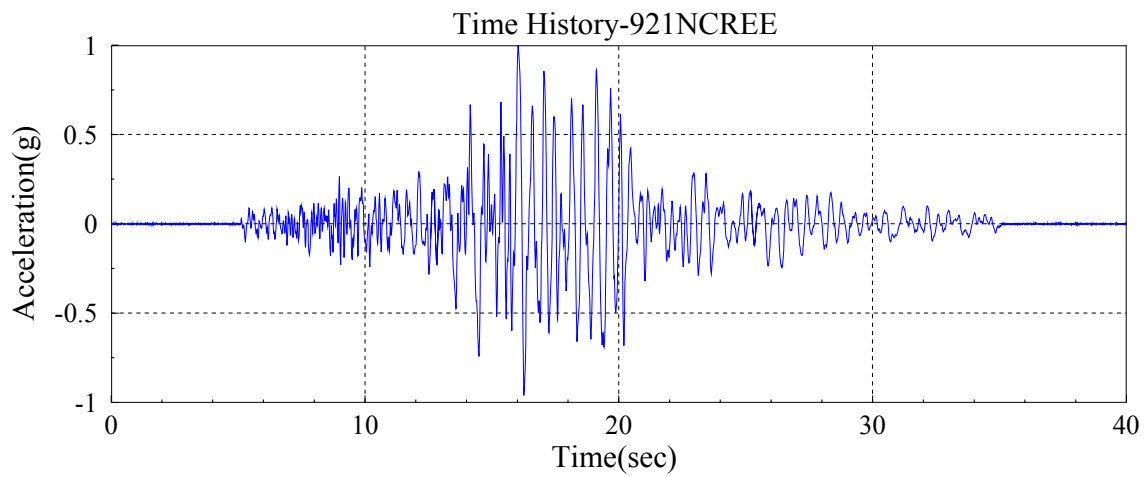


圖 3.2.19 921NCREE 正規化加速度歷時

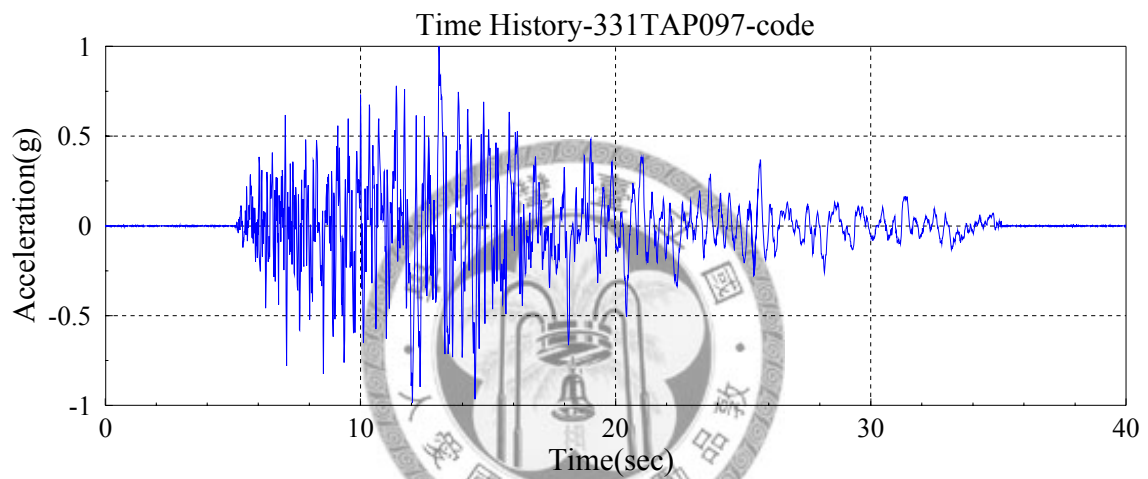


圖 3.2.20 331TAP097 Code Compatible 正規化加速度歷時

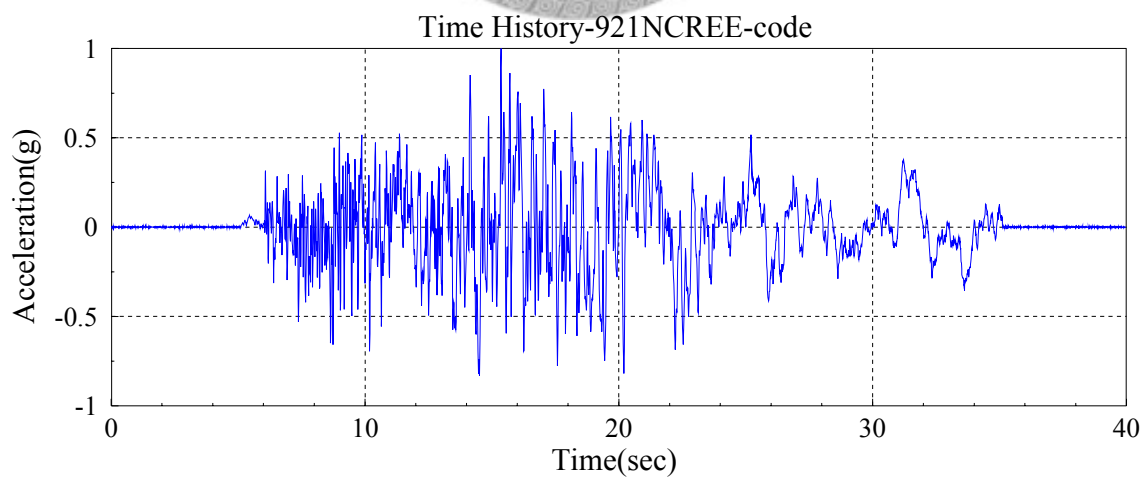


圖 3.2.21 921NCREE Code Compatible 正規化加速度歷時

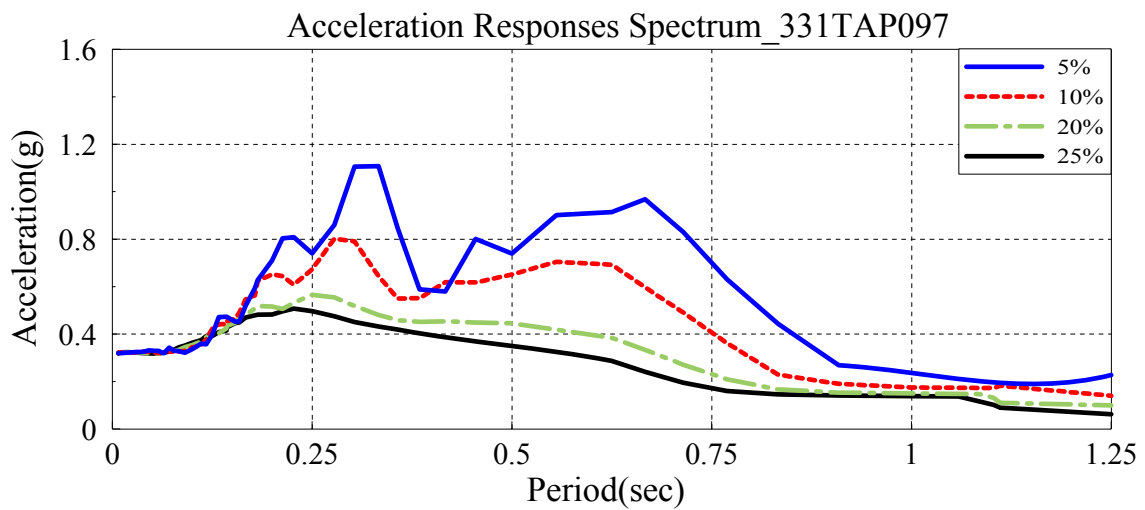


圖 3.2.22 331TAP097 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

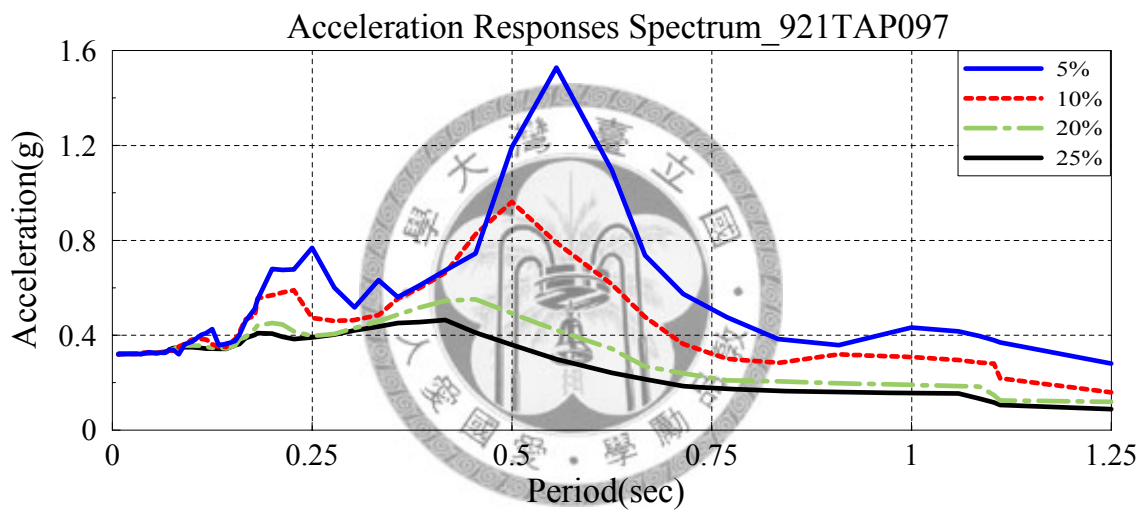


圖 3.2.23 921TAP097 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

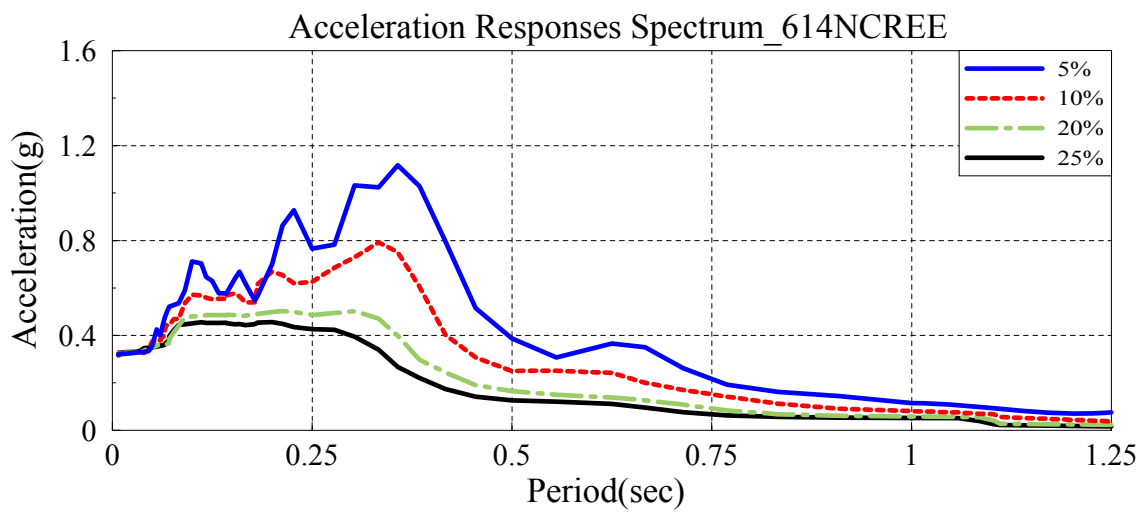


圖 3.2.24 614NCREE 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

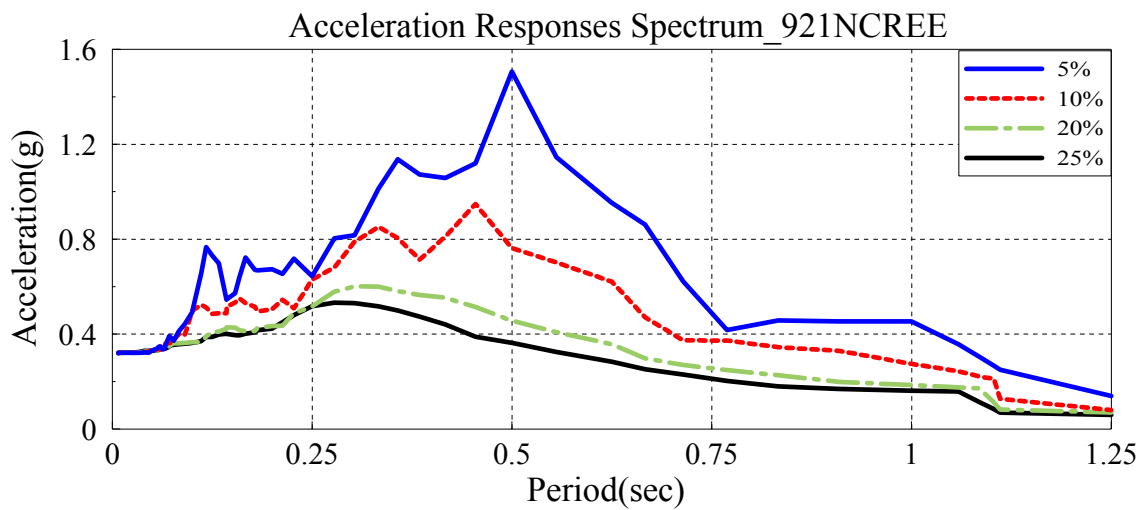


圖 3.2.25 921NCREE 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

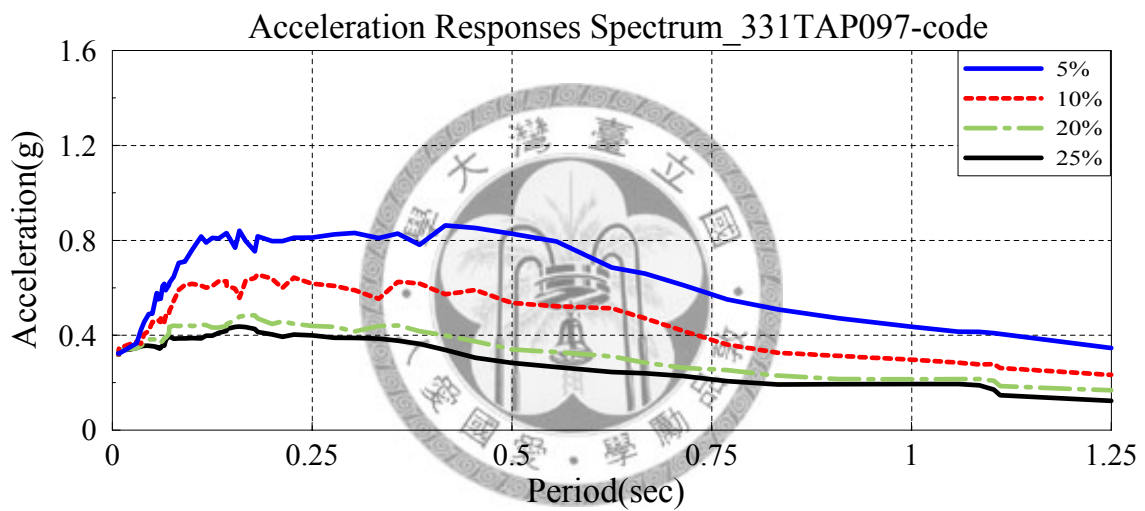


圖 3.2.26 331TAP097 Code Compatible 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

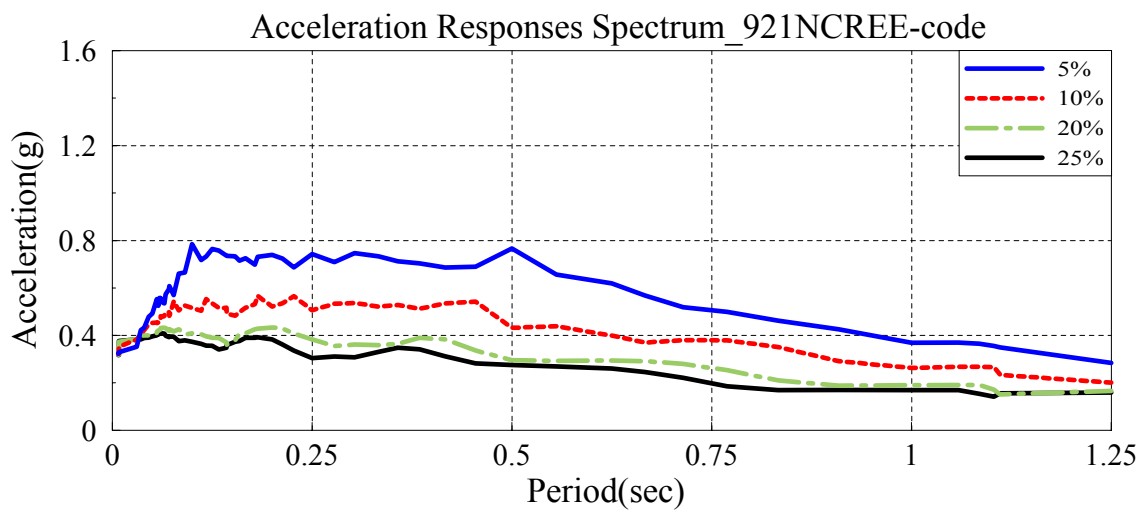


圖 3.2.27 921NCREE Code Compatible 加速度歷時之加速度反應譜(PGA=0.32g)

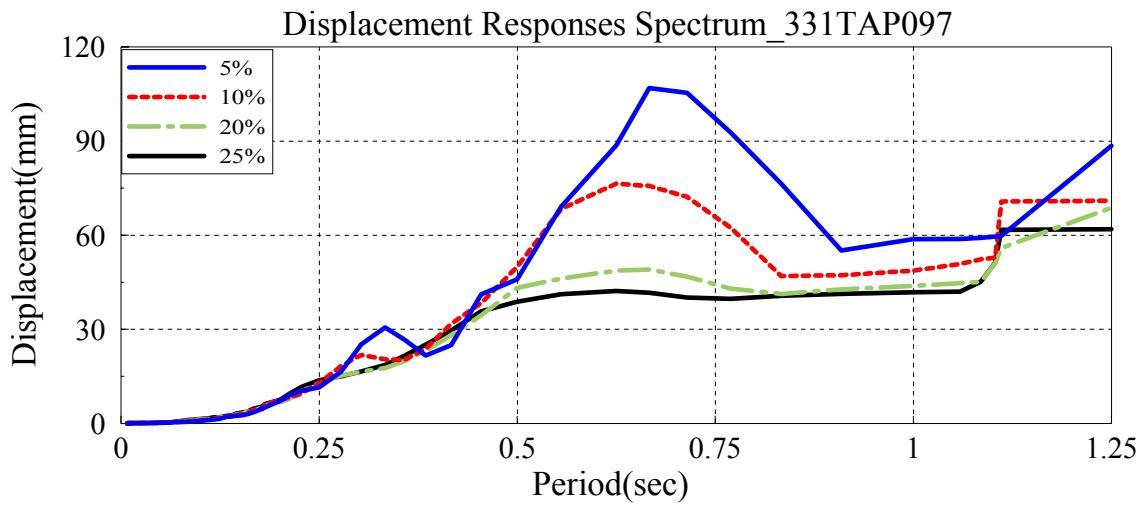


圖 3.2.28 331TAP097 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)

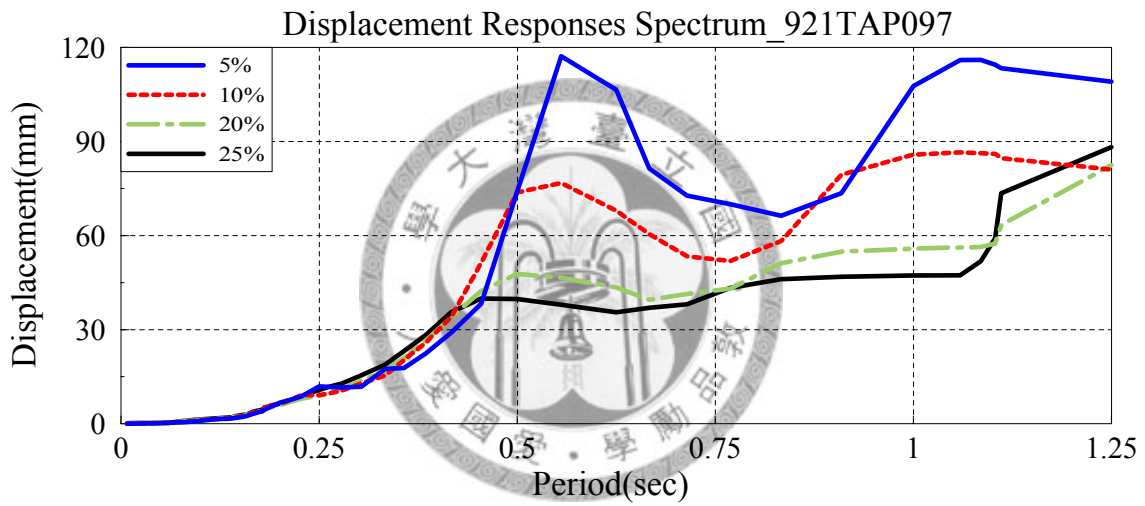


圖 3.2.29 921TAP097 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)

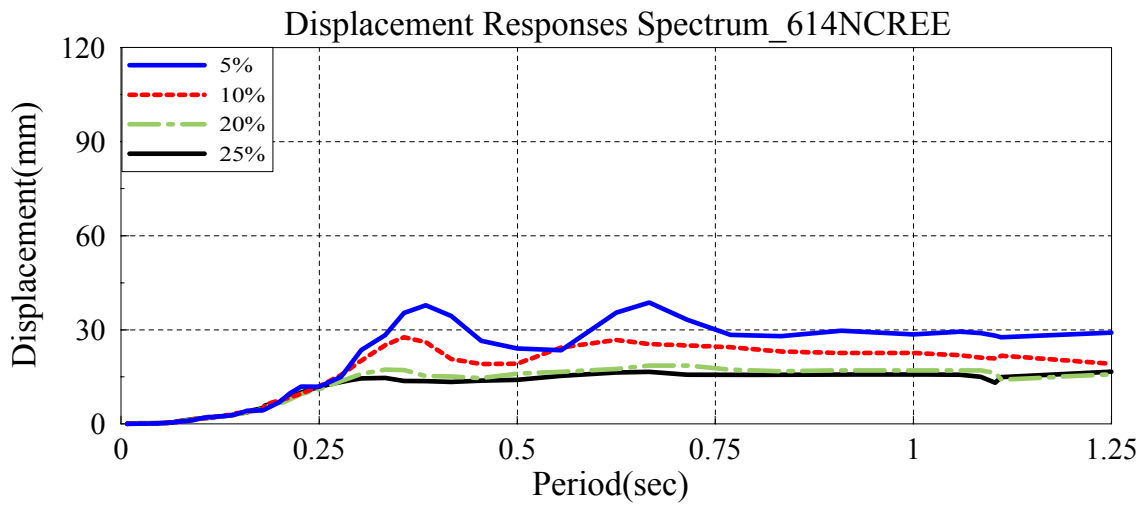


圖 3.2.30 614NCREE 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)

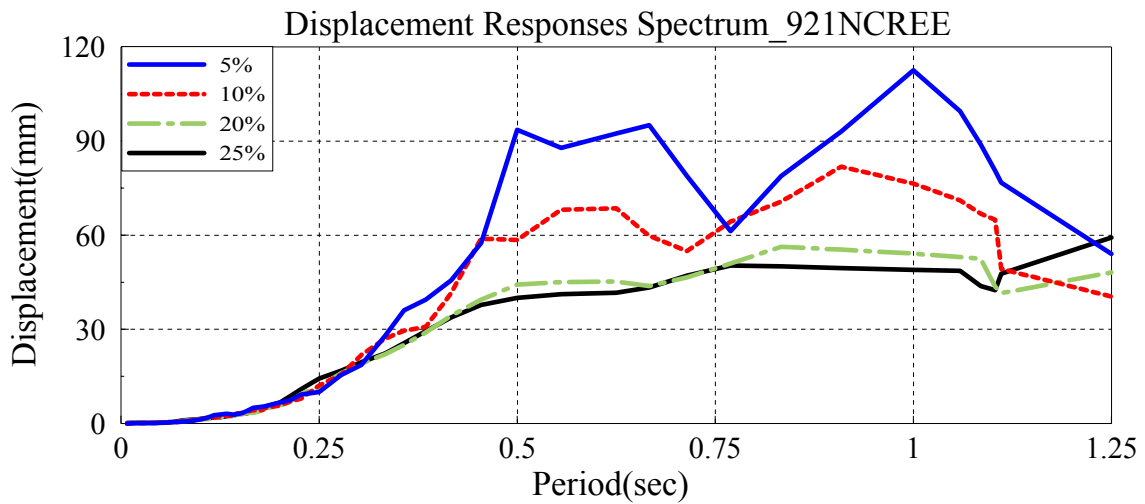


圖 3.2.31 921NCREE 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)

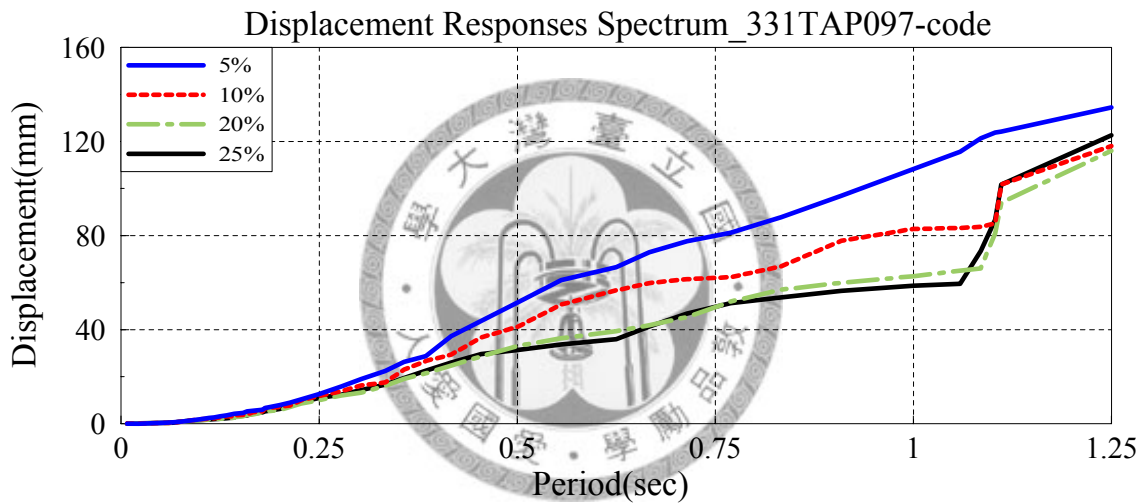


圖 3.2.32 331TAP097 Code Compatible 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)

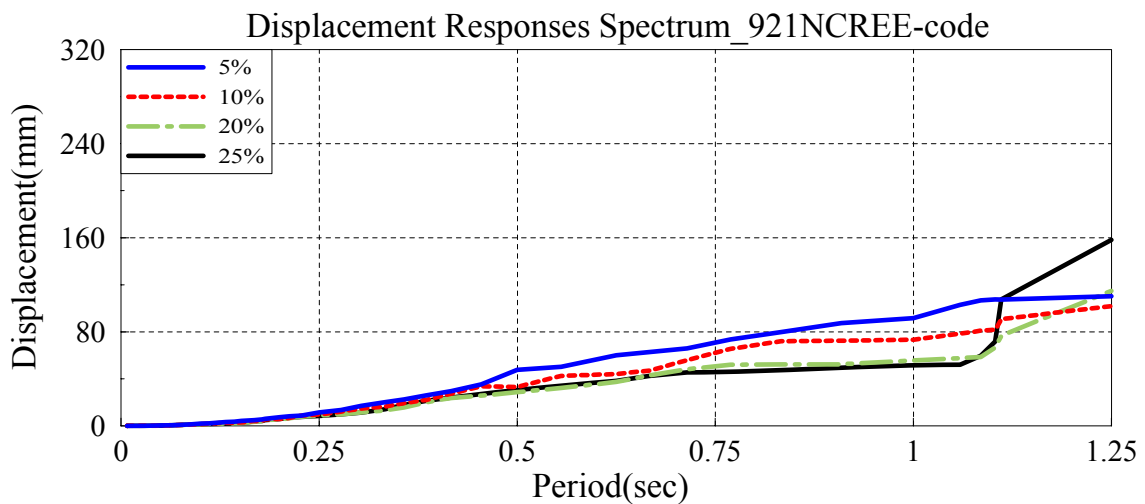
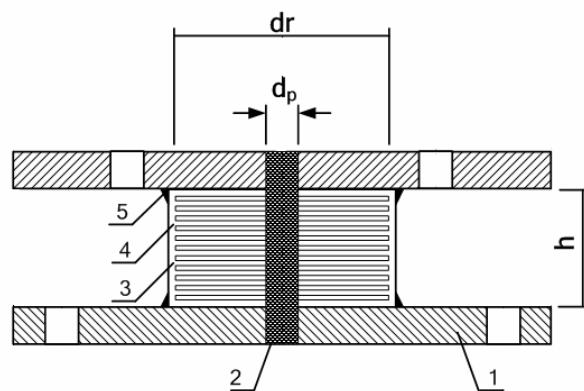


圖 3.2.33 921NCREE Code Compatible 加速度歷時之位移反應譜(PGA=0.32g)



LRB

1. 聯結板
2. 鉛心
3. 積層鋼板
4. 橡膠層
5. 外包膠

圖 3.3.1 LRB 基本構造

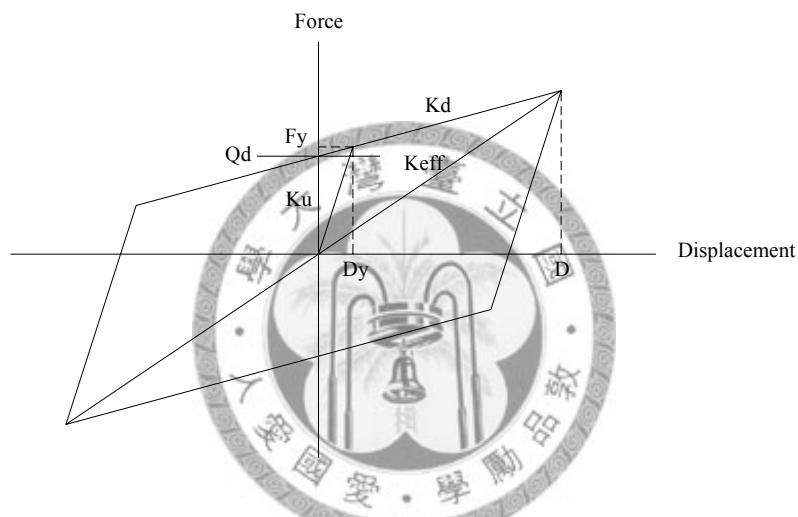


圖 3.3.2 LRB 雙線性遲滯迴圈表示圖

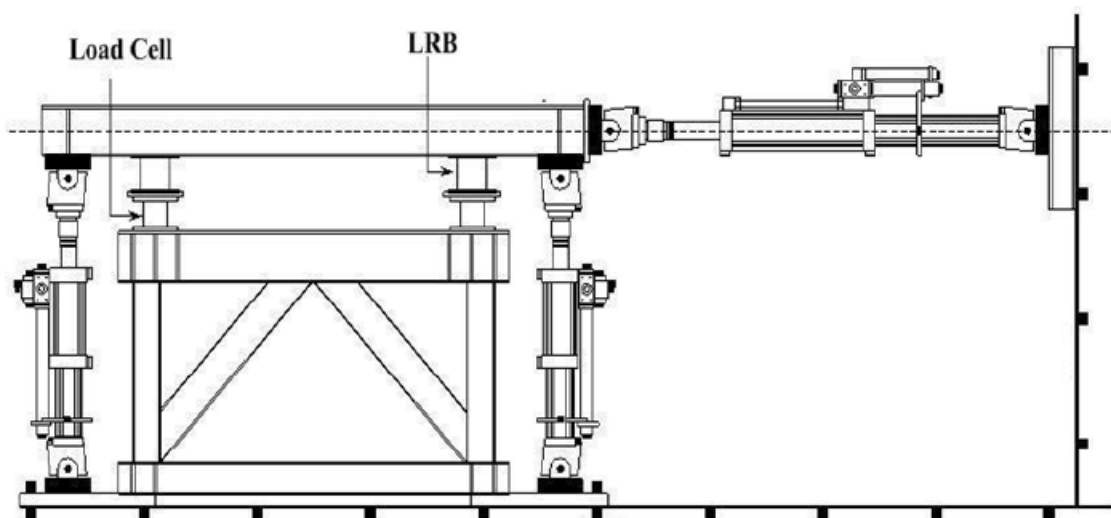


圖 3.3.3 結構元件測試裝置

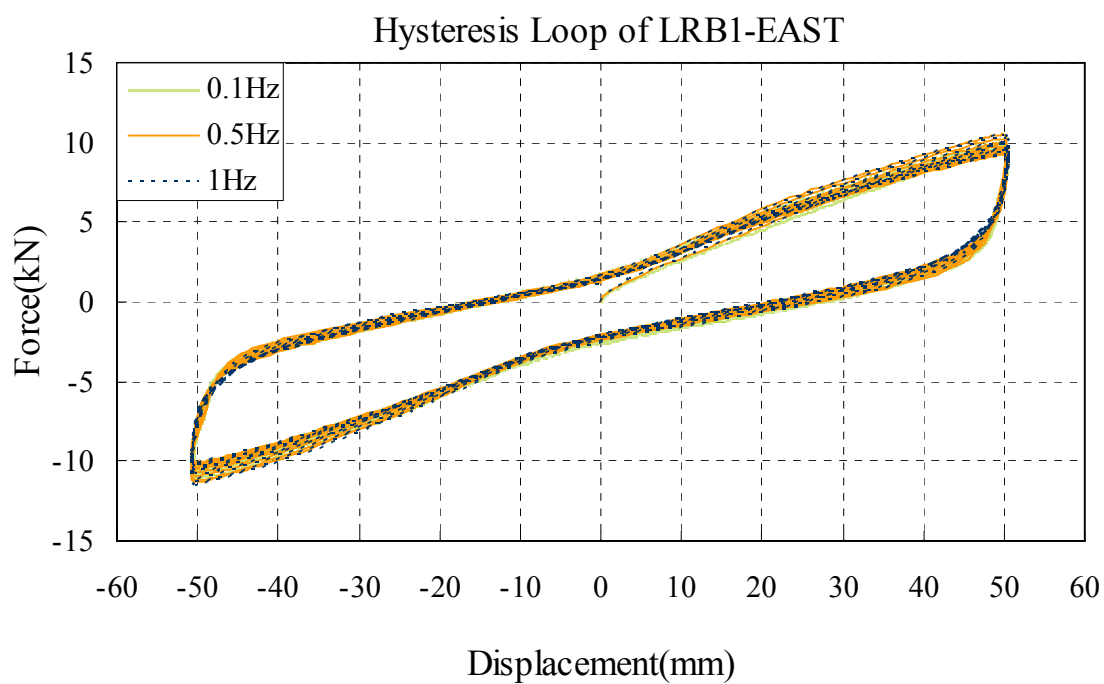


圖 3.3.4 第一組東側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈

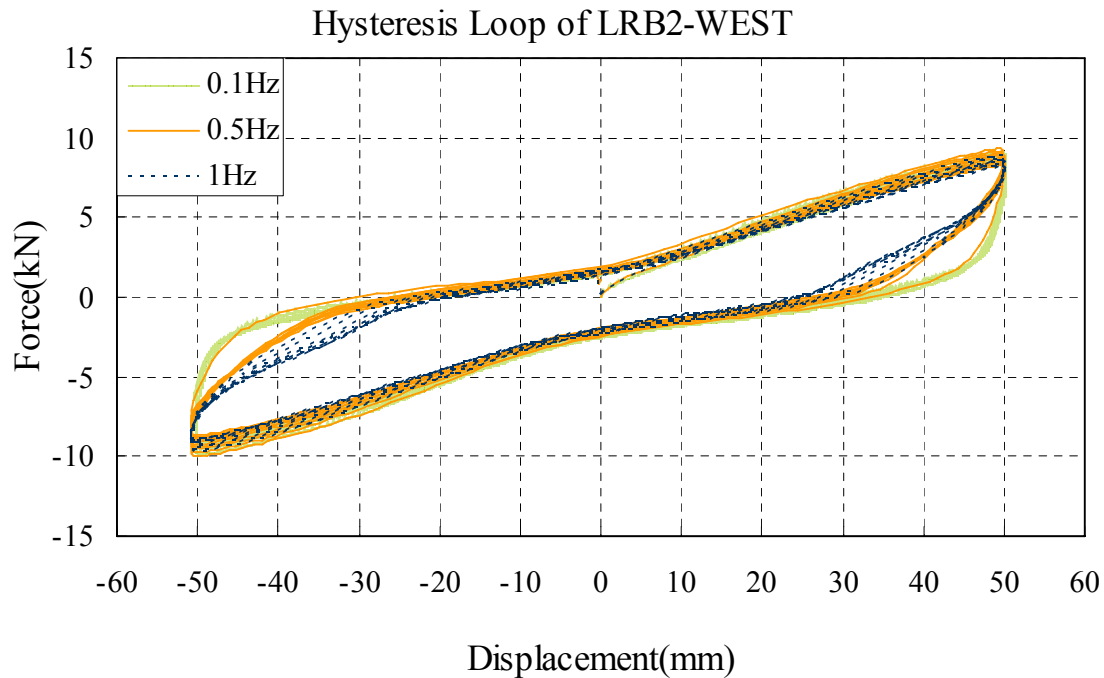


圖 3.3.5 第一組西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈

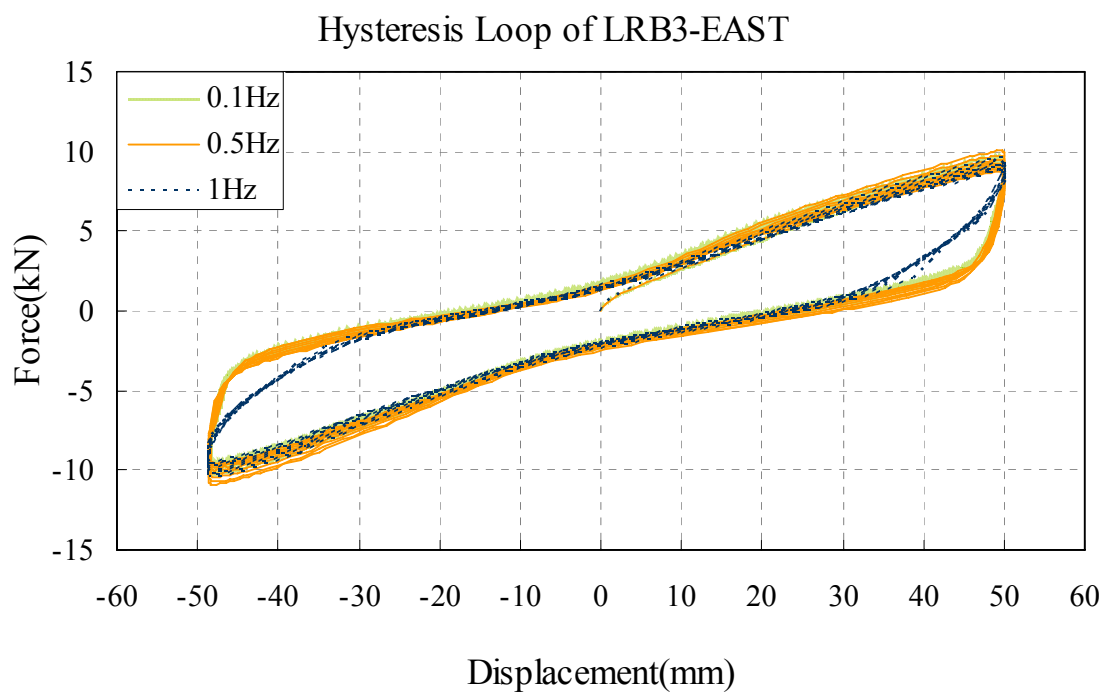


圖 3.3.6 第二組東側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈

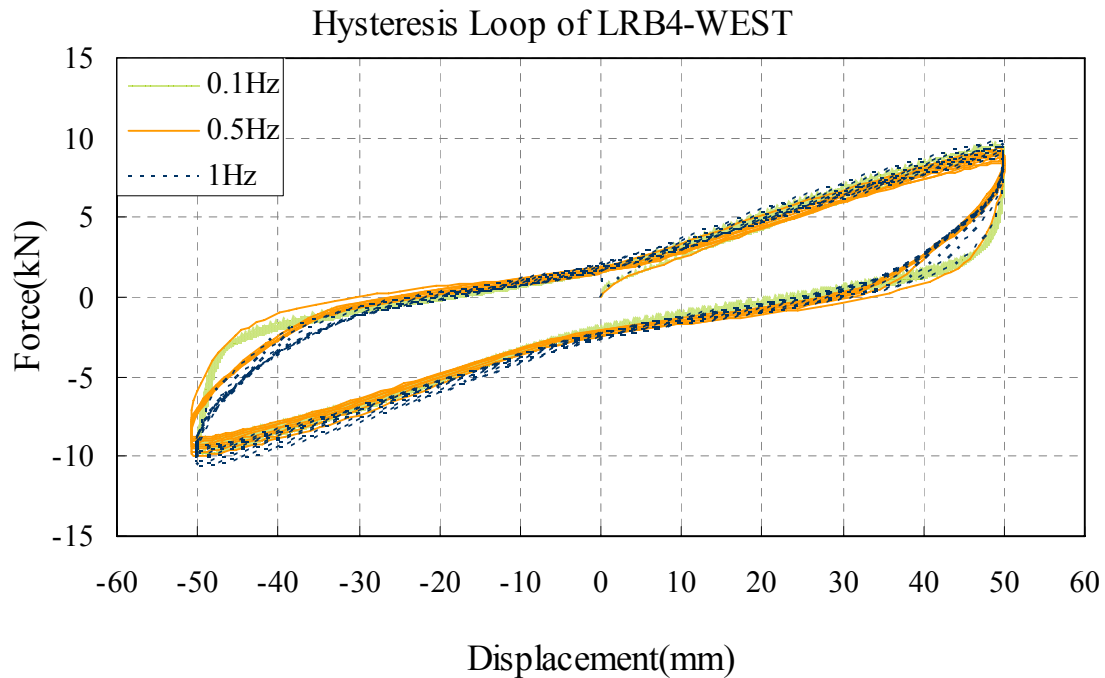


圖 3.3.7 第二組西側 LRB 於 Sine Wave 不同頻率下之遲滯迴圈

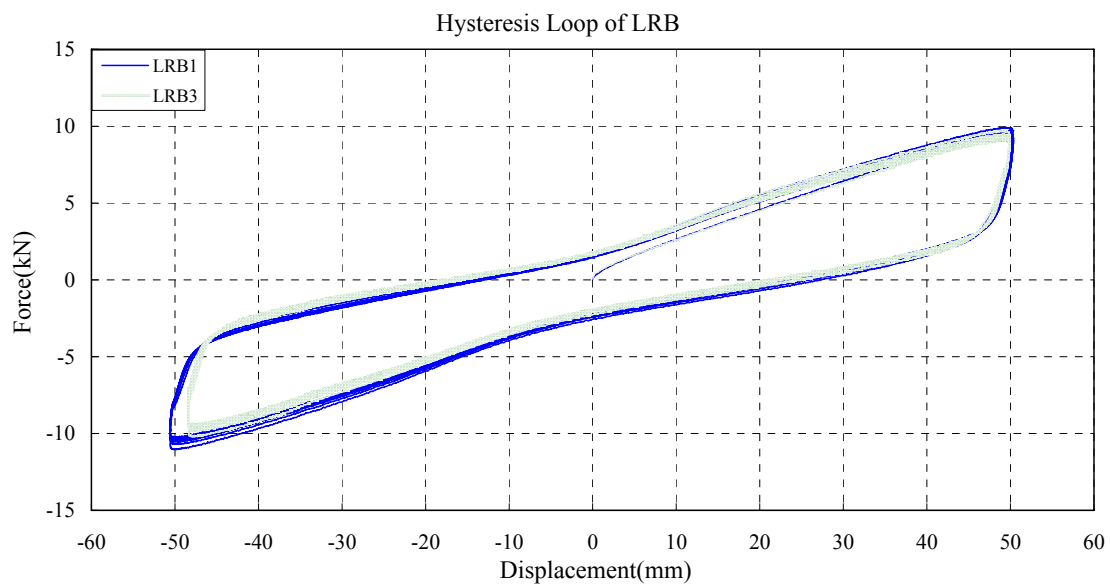


圖 3.3.8 東側 LRB Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈

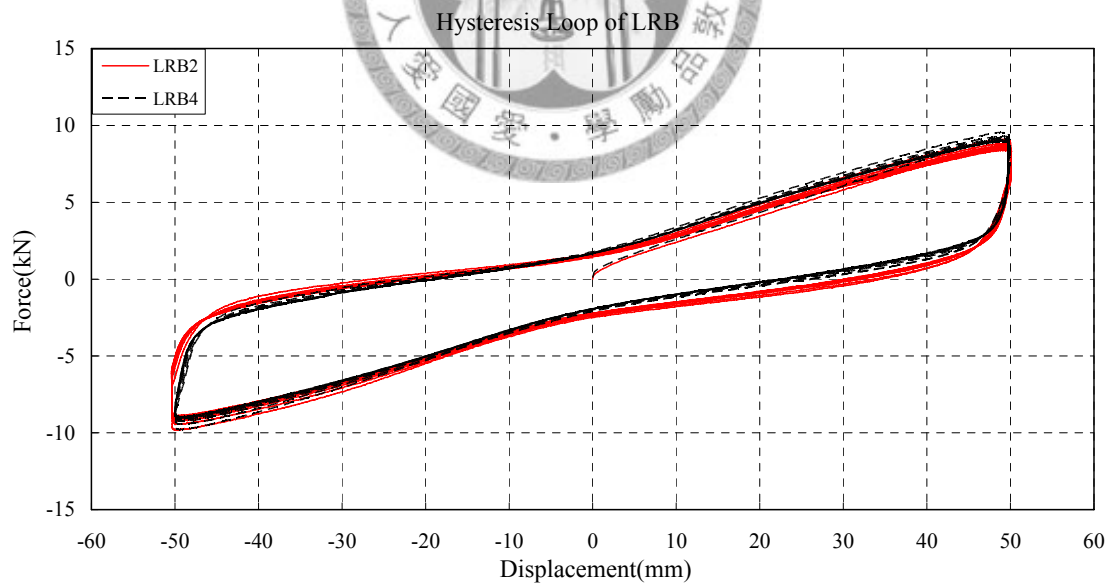


圖 3.3.9 西側 LRB Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈

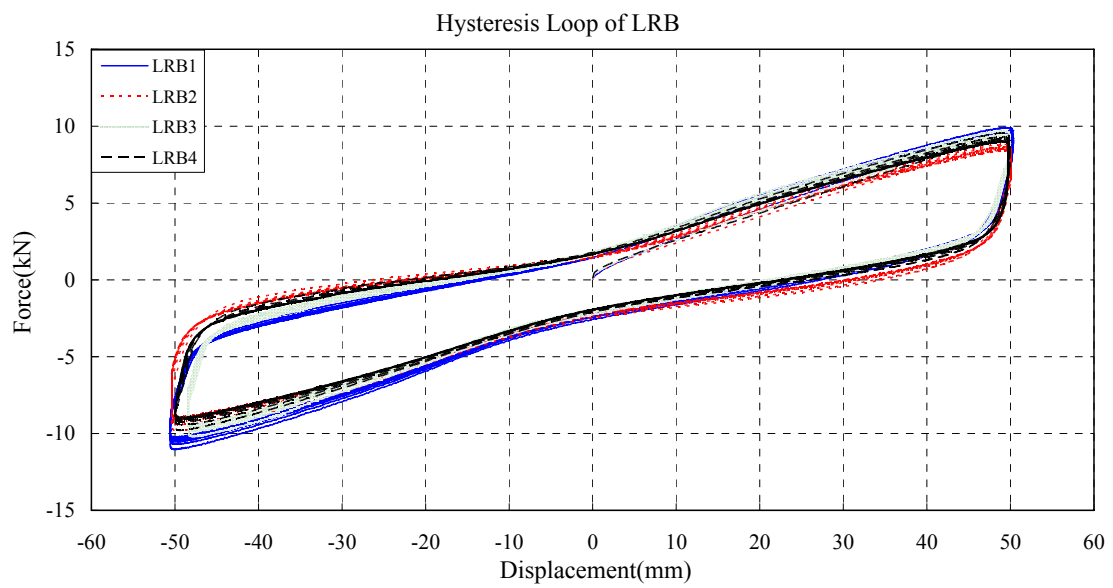


圖 3.3.10 四個 LRB 於 Sine Wave 0.1Hz 之遲滯迴圈

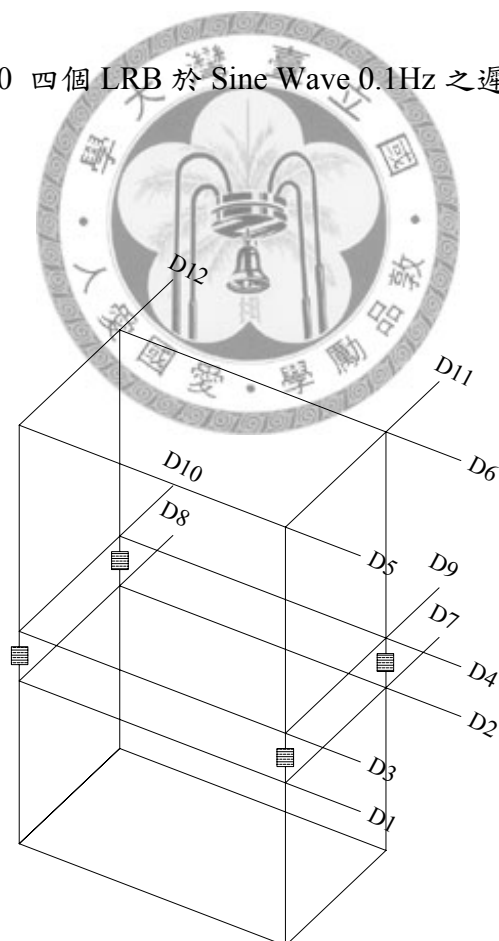


圖 3.4.1 位移計配置圖

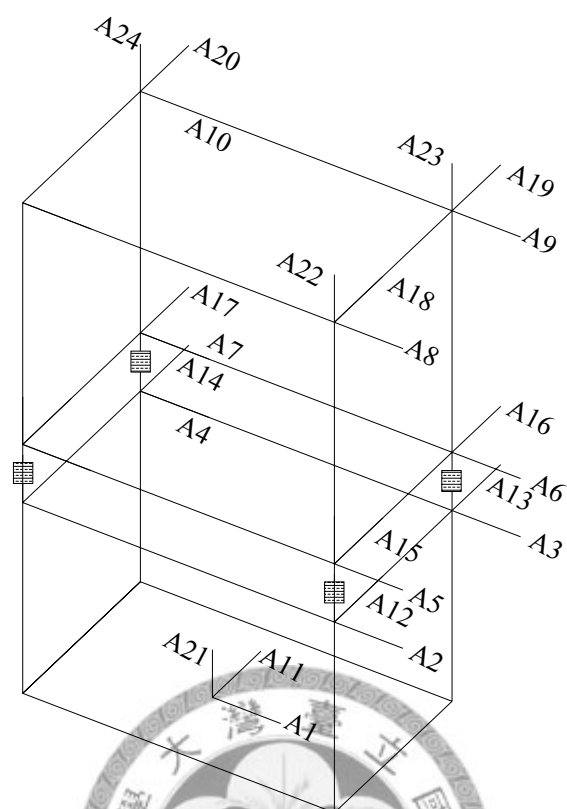


圖 3.4.2 加速規配置圖

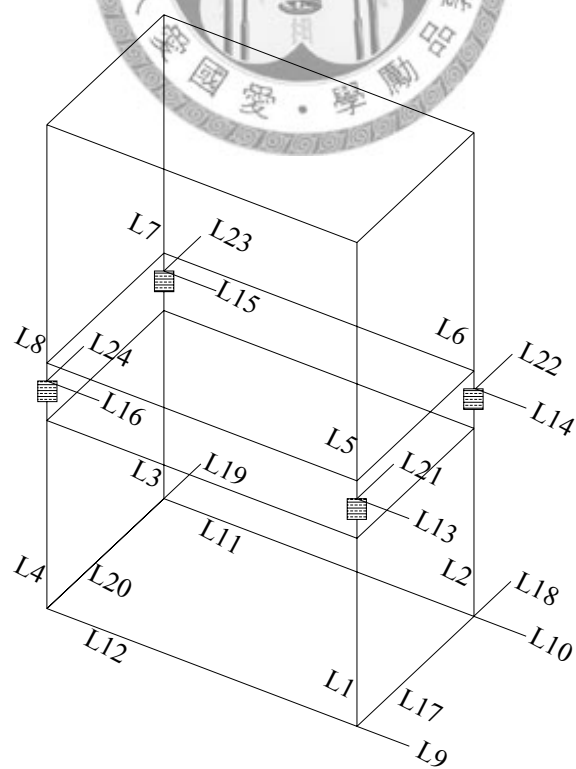


圖 3.4.3 測力計配置圖

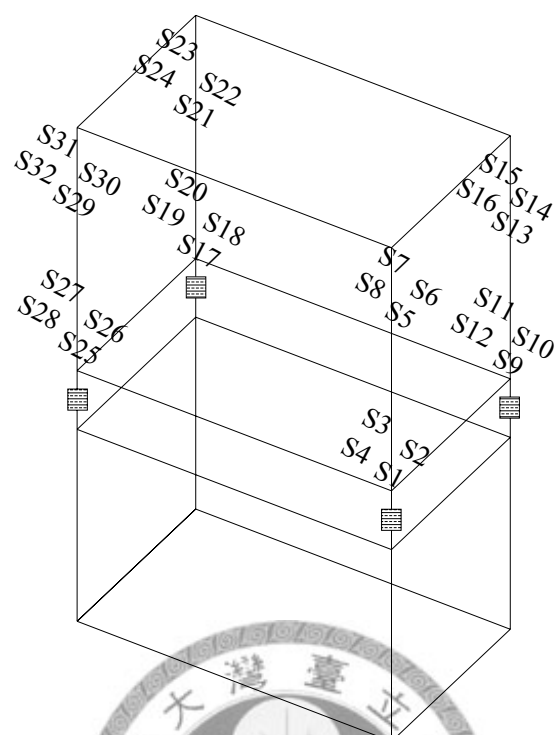


圖 3.4.4 應變計配置圖





照片 3.2.1 第一組試體組裝配置



照片 3.2.2 第二組試體組裝配置



照片 3.2.3 第三組試體組裝配置



照片 3.2.4 第四組試體組裝配置



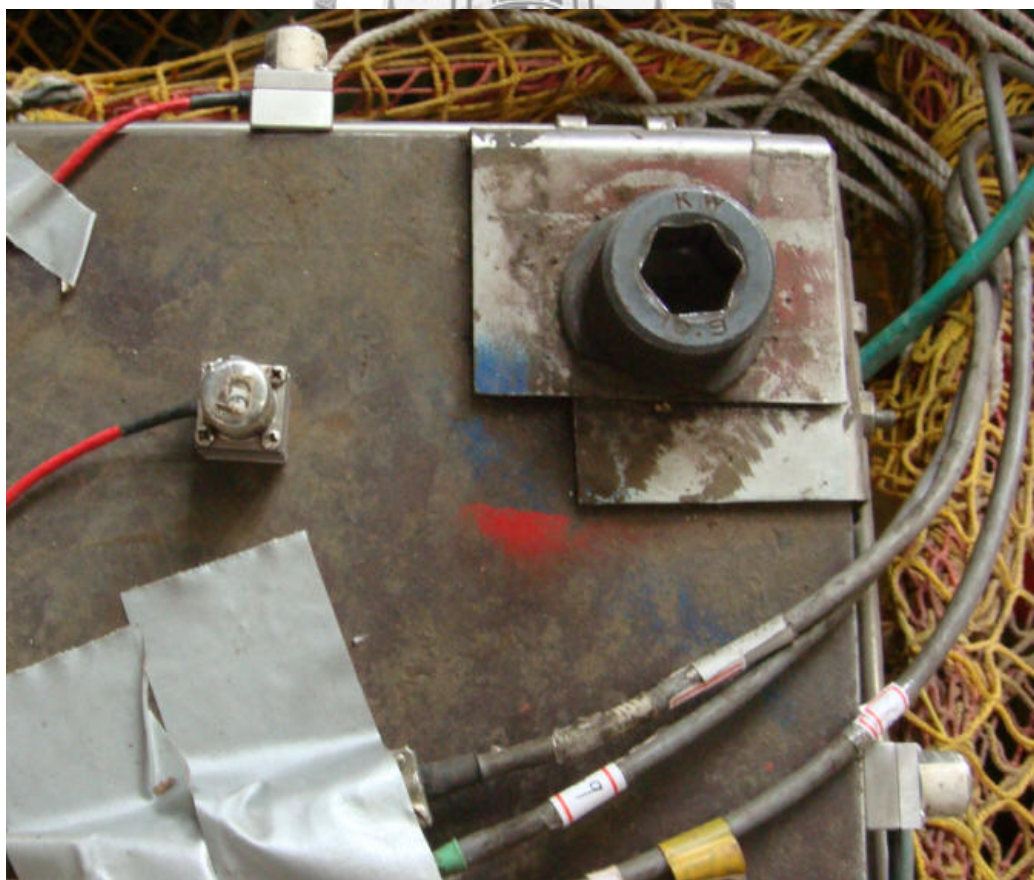
照片 3.3.1 元件測試裝置



照片 3.3.2 元件測試感測器裝置



照片 3.3.3 位移計



照片 3.3.4 加速度計



照片 3.3.5 測力計(Load Cell)



照片 3.3.6 應變計

第四章 試驗結果

此章節為中間樓層隔震縮尺振動台試驗結果，探討結構長向反應，第二組試體進行短向與雙向地震試驗，在此僅比較結構基本特性，探討四個地震歷時 331TAP097、921TAP097、921NCREE 以及 331TAP097 Code Compatible 為 320gal 之試驗分析結果，內容包括結構基本特性、結構歷時反應、LRB 受力與位移遲滯行為以及模態耦合效應。

4.1 結構基本特性

圖 4.1.1 至圖 4.1.8 分別為四組試體長向識別之振態以及白訊試驗之系統轉換函數，表 4.1.1 與表 4.1.3 分別為四組試體長向識別前三模態週期、模態質量參與因子與阻尼比，比較圖表結果，四組試體結構反應主要由第一模態控制，其振態由隔震層上方樓板反應主控，第一模態質量參與因子占 80% 的比例。第一、二組試體第三模態之模態質量參與因子次高，第三、四組試體則是第二模態之模態質量參與因子次高。

由第一、二組試體之轉換函數得知上部結構對基底最大反應在第二模態頻含區，下部結構對基底最大反應在第三模態頻含區，顯示上部結構與下部結構共振頻含區相異，第一、二組試體第二模態之振態由上部結構反應主控，第三模態之振態由下部結構反應主控，代表主控二、三模態之樓板反應共振頻含區不同，故第一、二組試體第二、三模態非模態耦合效應；探討第三、四組試體之振態，第二模態之振態由下部結構反應主控，第三模態之振態由上部結構反應主控，對照轉換函數，其主控第二、三模態之上下部結構反應最大值皆在第二模態頻含區，故第三、四組試體第二、三模態為模態耦合效應，第二模態之振態在隔震層上方樓板與上部結構呈現線性關係，不是一般認知中上部結構呈現剛體行為，且第二模態質量參與因子值不低，對隔震層隔震效益之影響不可忽略。

4.2 歷時反應

各小節分析結果包括三組試體於四個地震歷時之反應，並綜合討論三組試驗結果。反應歷時圖將以 331TAP097、921TAP097、921NCREE 與 331TAP097 Code Compatible 之順序依序排列。

4.2.1 位移歷時反應

(2) 第一組試體

圖 4.2.1 至圖 4.2.8 分別為四個歷時之樓層相對地表位移與層間位移反應，主要位移反應在隔震層上方樓板，由於此試體使用第一組鋼構架，其下部結構勁度大，下部結構位移相對控制得較小，上部結構位移反應較隔震層上方樓板反應小，比較第一模態之振態，上部結構反應不大，類似剛體行為，其結果近似。

(3) 第三組試體

圖 4.2.9 至圖 4.2.16 分別為四個歷時之樓層相對地表位移與層間位移反應，主要位移反應仍在隔震層上方樓板，不同的是，第三組試體使用第二組鋼構架，其下部結構勁度小，位移反應會較大，上部結構位移則與第一組差異不大，結果呼應第一模態之振態，惟各樓層相對地表位移反應之波形較第一組試體複雜，有較高模態反應參與。

(4) 第四組試體

圖 4.2.17 至圖 4.2.24 分別為四個歷時下之樓層相對地表位移與層間位移反應，主要位移反應仍是在隔震層上方樓板，由於第四組試體與第三組試體採用同一組鋼構架，兩組試體下部結構與上部結構位移反應差異不大，呼應第一模態之振態結果，各樓層相對地表位移反應圖波形也

較為複雜，而第四組質量配置較第三組少，隔震層上方樓板與上部結構位移反應之波長較短，顯示其周期較小，與識別周期結果相同。

(5) 綜合討論

比較前面三組試體，主要位移反應在隔震層上方樓板，與基礎隔震行為相同，此外，第三組與第四組試體位移反應圖波形比較複雜，其原因可能是高模態影響，表 4.2.1 為三組試體隔震層最大位移值比較，第三組試體反應較大，三組試體位移反應中周期延長的現象皆不明顯。

4.2.2 加速度歷時反應

(1) 第一組試體



圖 4.2.25 至圖 4.2.28 分別為四個歷時之樓層加速度反應，表 4.2.2 為第一組試體各樓層對地表最大加速度比值，其中 BASE、SUB、ISO 與 SUP 分別代表地表、下部結構、隔震層上方樓板與上部結構，下部結構對地表最大加速度比值略有放大；隔震層上方樓板加速度明顯下降許多，低於地表加速度，顯示隔震效果良好，波形仍有高模態貢獻；上部結構加速度小於地表加速度，但低於隔震層上方樓板加速度，此現象與一般頂樓加速度具放大效應相異，且上部結構頻率不大，可能原因是真實結構隔震層上方多層樓簡化成上部結構單自由度系統，導致上部結構質量加載太多，無法有效模擬真實結構物多自由度頂層反應。另外，三個樓板加速度反應之波形皆較地表加速度複雜，有高模態反應參與，但上部結構相較於其他樓層高模態反應較低，有濾掉高模態反應之現象。比較下部結構與隔震層上方樓板加速度主要波形發現波長變長，明顯有周期延長的現象。

(2) 第三組試體

圖 4.2.29 至圖 4.2.32 分別為四組歷時下之樓層加速度反應，表 4.2.3 為第三組試體樓層對地表最大加速度比值，下部結構相對於地表放大兩倍以上，應是下部結構頻率較小造成此現象；隔震層之上方樓板加速度相較於下部結構則明顯下降許多，但仍大於地表加速度；上部結構加速度明顯小於隔震層上方樓板加速度，第三組試體上部結構配重同第一組試體，其配重可能過大連帶影響上部結構反應。三個樓板加速度反應皆有高模態參與，樓層愈高，高模態反應愈不明顯。

(3) 第四組試體

圖 4.2.33 至圖 4.2.36 分別為四組歷時下之樓層加速度反應，表 4.2.3 為第四組試體樓層對地表最大加速度比值，在各樓板的加速度反應與第三組試體近似，下部結構加速度放大效應明顯，隔震層上方樓板加速度較下部結構低但仍大於地表加速度，上部結構加速度一樣偏低，而下部結構與隔震層上方樓板加速度反應有相當比例之高模態參與。

(4) 綜合討論

從三組試體結果發現，第三、第四組試體之下部結構加速度明顯大於第一組試體，其原因可能是第三、第四組試體下部結構柱較長，其頻率小，導致加速度放大效應明顯，而在三組樓層加速度反應中，都有高模態之貢獻，三四組下部結構加速度相較於第一組尤其明顯，隔震層上方樓板與上部結構加速度反應則差異不大，三組試體高模態參與隨著樓層愈高比例愈小。藉由隔震層上方樓板與下部結構加速度之比值，探討隔震結構之隔震效益，愈小愈能隔震效果愈好，三組試體之比值皆近似 0.6。

隔震之基本概念是經由隔震系統延長結構周期以降低結構加速度反應，預期隔震層上方結構加速度低於基底加速度，若隔震層上方結構受到

比基底地震輸入力還大的能量，即可能失去當初隔震設計的目的。

4.2.3 樓層剪力

在此節分析結果圖中，不同時間點下之樓層剪力分布，分別取各樓層最大值，以及最大下部結構剪力、最大基底加速度、最大下部結構加速度與最大上部結構位移時的剪力分布情形。

(1) 第一組試體

圖 4.2.37 至圖 4.2.44 分別為四組歷時下之樓層剪力反應以及不同時間點下之樓層剪力分布，下部結構樓層剪力反應參與較多高模態，隔震層上方樓板與上部結構樓層剪力反應之高模態參與不明顯，而不同時間點下之樓層剪力分布得知各樓層最大值不會出現於同一時間點，隔震層上方樓板之樓層剪力與下部結構剪力在某些時間點下呈現出相位差之現象。

(2) 第三組試體

圖 4.2.45 至圖 4.2.52 分別為四組歷時下之樓層剪力反應以及不同時間點下之樓層剪力分布，各樓層剪力比第一組試體之樓層剪力反應大，在高模態反應參與方面，下部結構最為明顯，隨著樓層愈高，參與愈不明顯，不同時間點下之樓層剪力分布，得知各樓層最大值非同一時間點，隔震層上方樓層剪力與下部結構剪力仍呈現相位差之現象。

(3) 第四組試體

圖 4.2.53 至圖 4.2.60 分別為四組歷時下之樓層剪力反應以及不同時間點下之樓層剪力分布，各樓層剪力大於第一、三組試體樓層剪力反應，高模態反應參與方面，此組試體上下部結構樓層剪力反應高模態貢獻量與第三組試體近似，隔震層上方樓板之樓層剪力，高模態貢獻量最小。不同時

間點下之樓層剪力分布除剪力值較大外，各樓層最大值也非同一時間點，隔震層上方樓層與下部結構之剪力也是呈現相位差之現象。

(6) 綜合討論

樓層剪力方面，第四組試體明顯大於第一、三組試體，第三組試體大於第一組試體，高模態反應參與方面，第三、四組試體上下部結構大於第一組試體，表 4.2.5 為下部結構樓層剪力值檢核， V_s 為隔震層上方樓板之樓層剪力值， V_b 為下部結構樓層剪力值，表中數值由各樓層最大剪力值計算得到，依據我國隔震規範規定，隔震層下方基底剪力設計值為隔震層上方剪力設計值 1.25 倍，而第一、三組試體下部結構樓層剪力值大於隔震層上方樓層剪力值之 1.25 倍，可見國內耐震設計規範對於隔震層上下結構剪力之設計仍有深入探討之空間。

4.2.4 遲滯迴圈

(1) 第一組試體

圖 4.2.61 至圖 4.2.64 分別為四組歷時下 LRB 之遲滯迴圈圖，因為地震特性造成剪力位移量大小不同，而四組 LRB 遲滯迴圈於中段有束縮情況發生，與元件測試結果相同。

(2) 第三組試體

圖 4.2.65 至圖 4.2.68 分別為四組歷時下 LRB 之遲滯迴圈圖，第三組質量配置與第一組相同，故結果不致有太大之差異。

(3) 第四組試體

圖 4.2.69 至圖 4.2.72 分別為四組歷時下 LRB 之遲滯迴圈圖，此組迴圈相較於第一、三組之剪力、位移、面積以及等效勁度大，而束縮情況更

為明顯，由於第四組試體質量配置較少，與 LRB 當初上部結構設計總重有差異，易造成其力學行為不同。

(4)綜合討論

由三組試體遲滯迴圈圖得知隔震層上方總重改變對 LRB 力學行為之影響，進行隔震設計時，有效估算隔震層上方總重有助於隔震系統發揮隔震效果。

4.3 模態耦合效應

此節將就上述三組試體試驗結果與試體參數進行等效線性反應譜分析之結果，作一相互對照驗證，如圖 4.3.1 至圖 4.3.4 與表 4.3.1 至表 4.3.3 所示，並探討模態耦合效應。

於結構特性中得知，第三、四組之二、三模態有模態耦合效應；在結構反應方面，探討模態耦合效應中較為明顯之下部結構最大樓層剪力比、下部結構對地表最大加速度比值與隔震層上方樓板對地表最大加速度比值，如圖 4.3.2 與圖 4.3.4 所示。試驗結果得到三組試體下部結構樓層剪力相對隔震層上方樓板之樓層剪力之平均比值分別為 1.38、1.51 與 1.02，與等效線性分析結果相近。表 4.3.1 至表 4.3.3 為三組試體試驗結果與等效線性分析比較，第三、四組試體試驗結果在下部結構對地表最大加速度比值方面，與等效線性分析值差異較大，其餘分析結果近似。綜合以上結果，等效線性分析結果與試驗結果大致相近。而三組試體各項反應皆有高模態反應參與，惟各組試體各模態所占比例不同，此結果也顯示高模態反應參與比例與模態耦合效應非絕對相關，如第一組試體非模態耦合效應，但高模態仍占有 0.2 較高之參與比例，故設計中間樓層隔震結構時，高模態反應仍需加以審慎考慮。

表 4.1.1 四組試體長向前三模態週期

	第一模態	第二模態	第三模態
第一組試體	0.98	0.14	0.08
第二組試體	0.73	0.13	0.08
第三組試體	1.15	0.21	0.14
第四組試體	0.87	0.19	0.13

表 4.1.2 四組試體長向前三模態之模態質量參與因子

	第一模態	第二模態	第三模態
第一組試體	0.775	0.040	0.185
第二組試體	0.714	0.048	0.237
第三組試體	0.817	0.183	0.0001
第四組試體	0.772	0.227	0.0001

表 4.1.3 四組試體長向前三模態之阻尼比(%)

	第一模態	第二模態	第三模態
第一組試體	9.84	0.60	1.16
第二組試體	6.64	1.83	1.70
第三組試體	6.56	1.66	0.57
第四組試體	6.89	1.66	0.38

表 4.2.1 隔震層相對位移最大值(單位：mm)

	第一組試體	第三組試體	第四組試體
331TAP097	33.6	39.90	40.70
921TAP097	55.60	61.60	48.20
921NCREE	48.20	35.80	48.40
331TAP097-code	57.10	79.10	57.30
平均值	48.63	54.1	48.65

表 4.2.2 第一組試體各樓層對地表最大加速度比值

	SUB/BASE	ISO/BASE	SUP/BASE
331TAP097	1.03	0.68	0.37
921TAP097	1.10	0.90	0.60
921NCREE	1.31	0.64	0.43
331TAP097-code	2.23	1.25	0.58
平均值	1.41	0.87	0.50

表 4.2.3 第三組試體各樓層對地表最大加速度比值

	SUB/BASE	ISO/BASE	SUP/BASE
331TAP097	2.10	1.50	0.67
921TAP097	2.28	1.39	0.60
921NCREE	2.40	1.05	0.39
331TAP097-code	2.17	1.74	0.76
平均值	2.24	1.42	0.61

表 4.2.4 第四組試體各樓層對地表最大加速度比值

	SUB/BASE	ISO/BASE	SUP/BASE
331TAP097	1.76	1.39	0.77
921TAP097	2.89	1.18	0.77
921NCREE	2.10	1.24	0.84
331TAP097-code	1.98	1.68	0.97
平均值	2.18	1.37	0.84

表 4.2.5 下部結構樓層剪力檢核(單位：kN)

	第一組試體		第三組試體		第四組試體	
	Vs/0.8	Vb	Vs/0.8	Vb	Vs/0.8	Vb
331TAP097	27.88	33.8	34.37	42.08	62.26	45.837
921TAP097	44.25	43.05	46.31	51.73	64.32	62.83
921NCREE	38.64	35.93	29.62	36.27	69.85	53.67
331TAP097-code	44.06	52.41	57.50	72.25	90.9	72.92
平均值	38.71	41.30	41.95	50.58	71.83	58.81

表 4.3.1 第一組試體試驗與等效線性分析結果

	試驗			等效線性分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	0.98	0.14	0.08	1.02	0.1	0.03
模態質量參與因子	0.77	0.04	0.18	0.77	0.0	0.23
LRB 最大變位(mm)	48.6			69		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	1.41		0.87	1.2		0.84

表 4.3.2 第三組試體試驗與等效線性分析結果

	試驗			等效線性分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	1.15	0.21	0.14	1.04	0.1	0.1
模態質量參與因子	0.82	0.18	0	0.78	0.13	0.09
LRB 最大變位(mm)	54.1			69		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	2.24		1.42	1.53		1

表 4.3.3 第四組試體試驗與等效線性分析結果

	試驗			等效線性分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	0.87	0.19	0.13	1.02	0.09	0.089
模態質量參與因子	0.77	0.23	0	0.70	0.20	0.1
LRB 最大變位(mm)	48.7			71.4		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	2.18		1.37	1.68		0.92

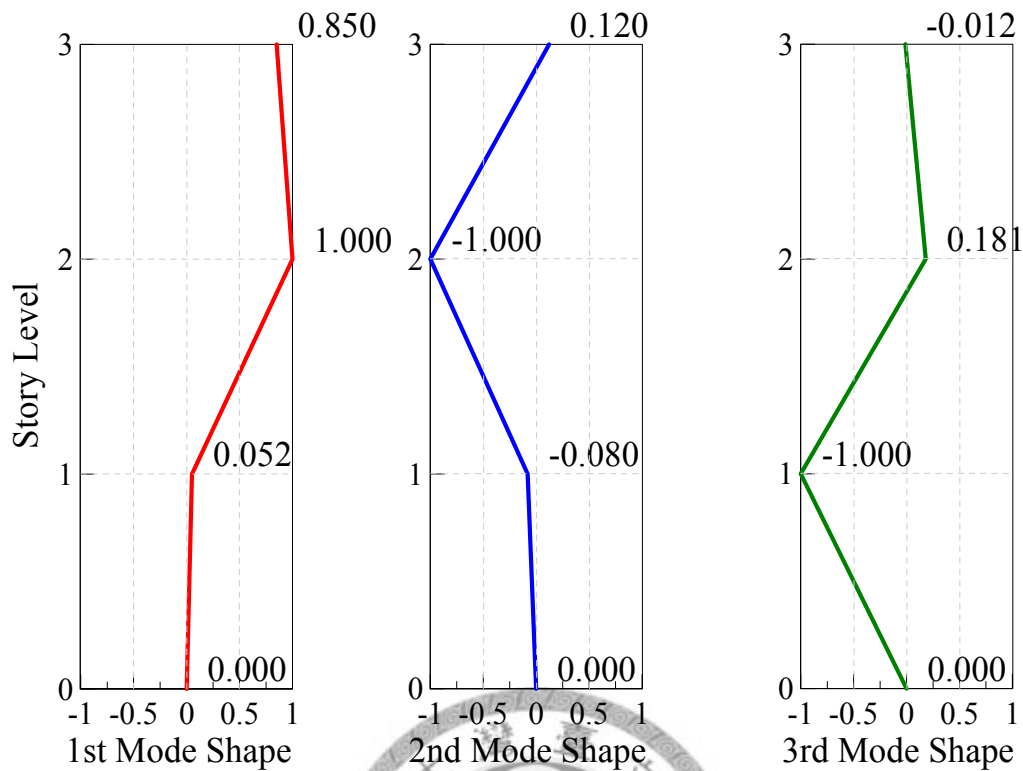


圖 4.1.1 第一組試體之振態

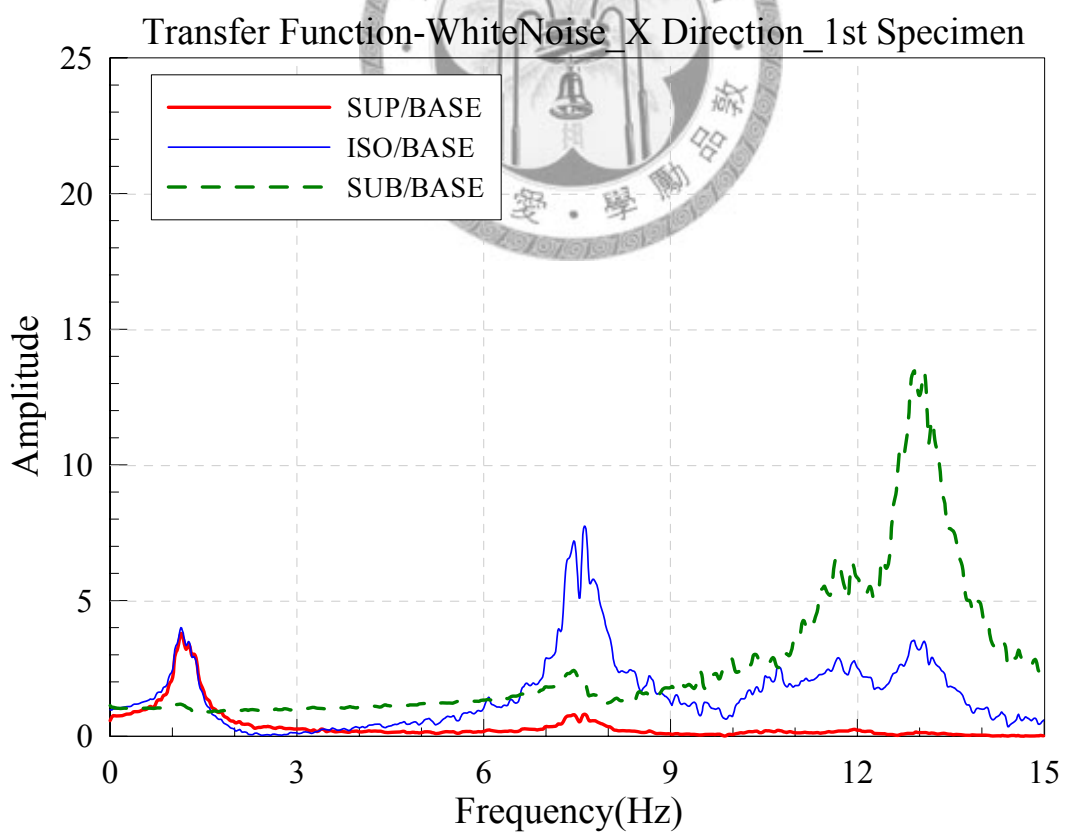


圖 4.1.2 第一組試體於白訊試驗下之系統轉換函數

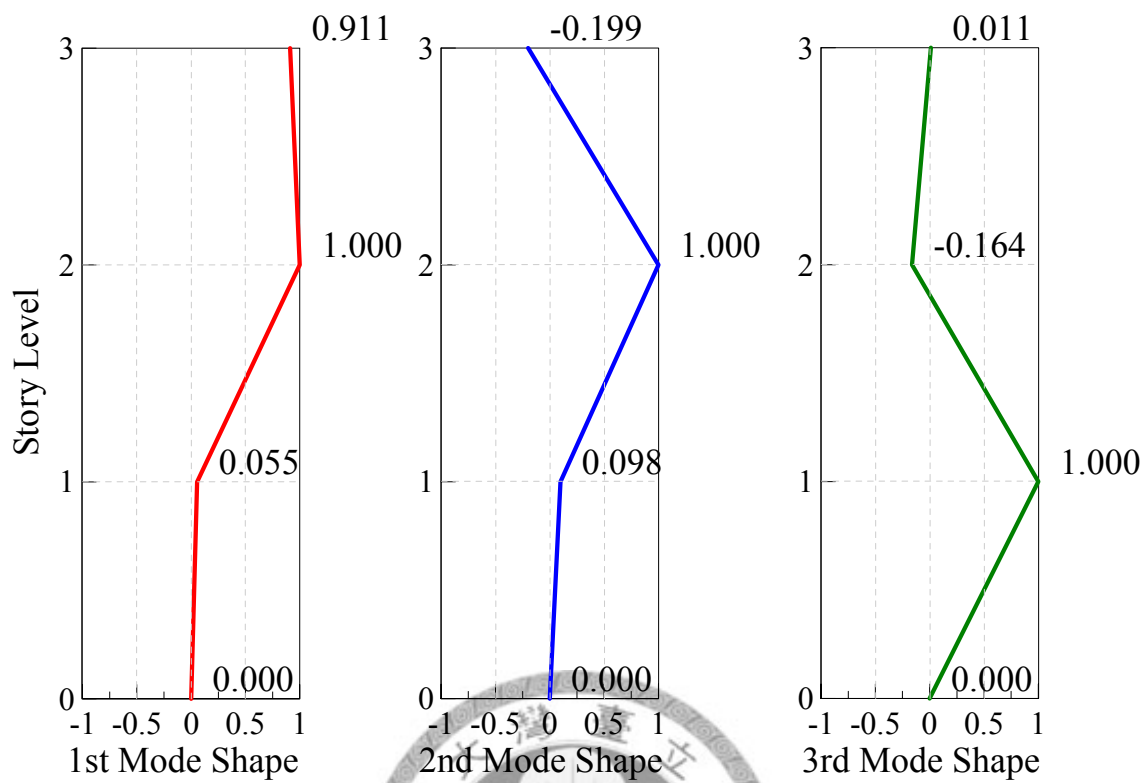


圖 4.1.3 第二組試體之振態

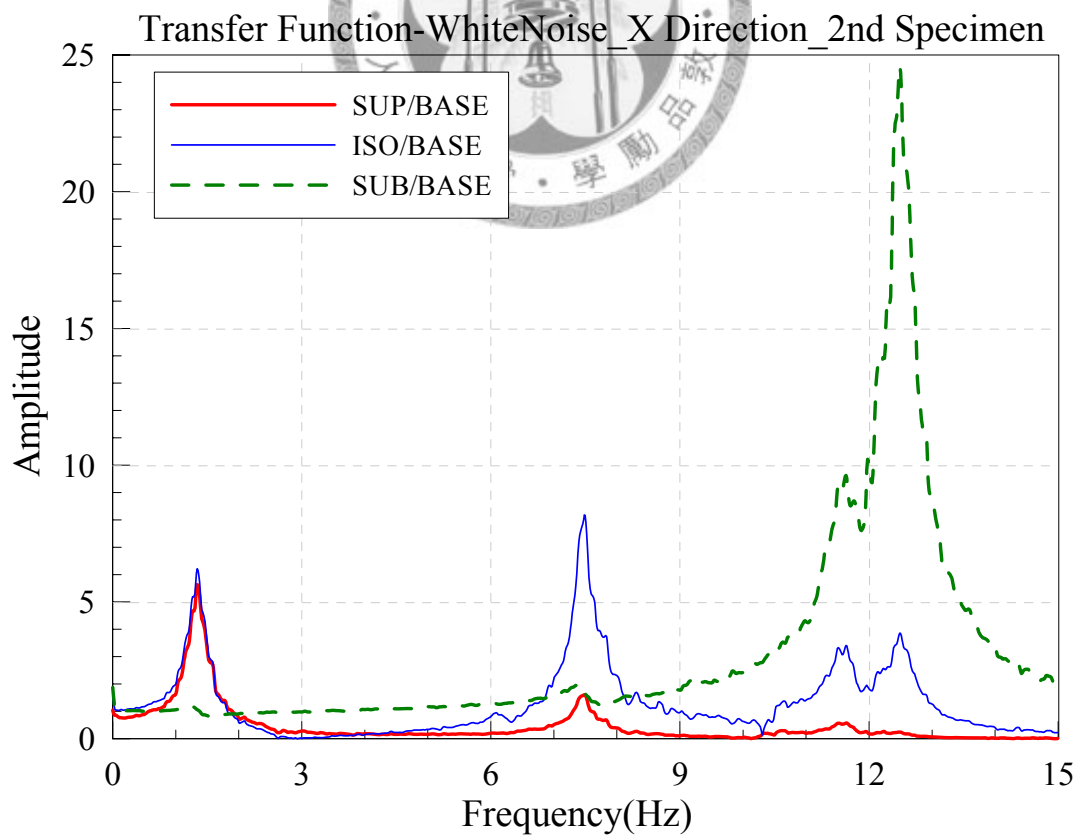


圖 4.1.4 第二組試體於白訊試驗下之系統轉換函數

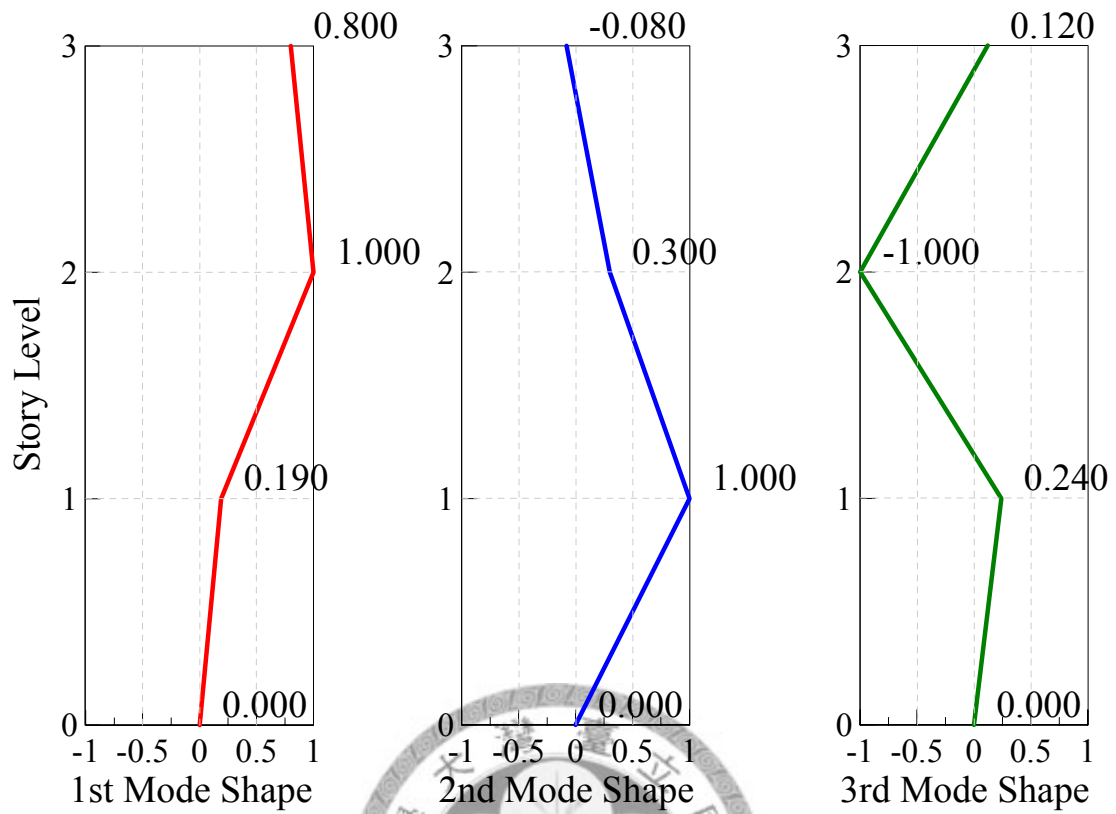


圖 4.1.5 第三組試體之振態

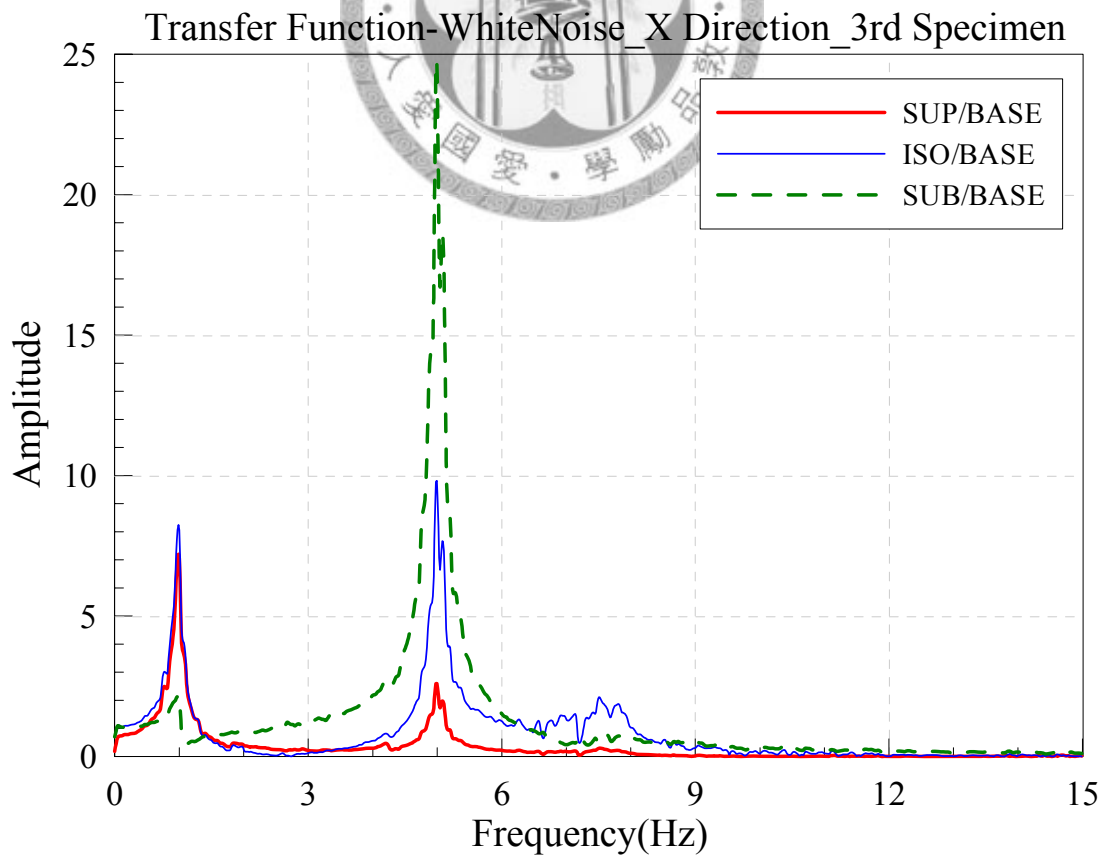


圖 4.1.6 第三組試體於白訊試驗之系統轉換函數

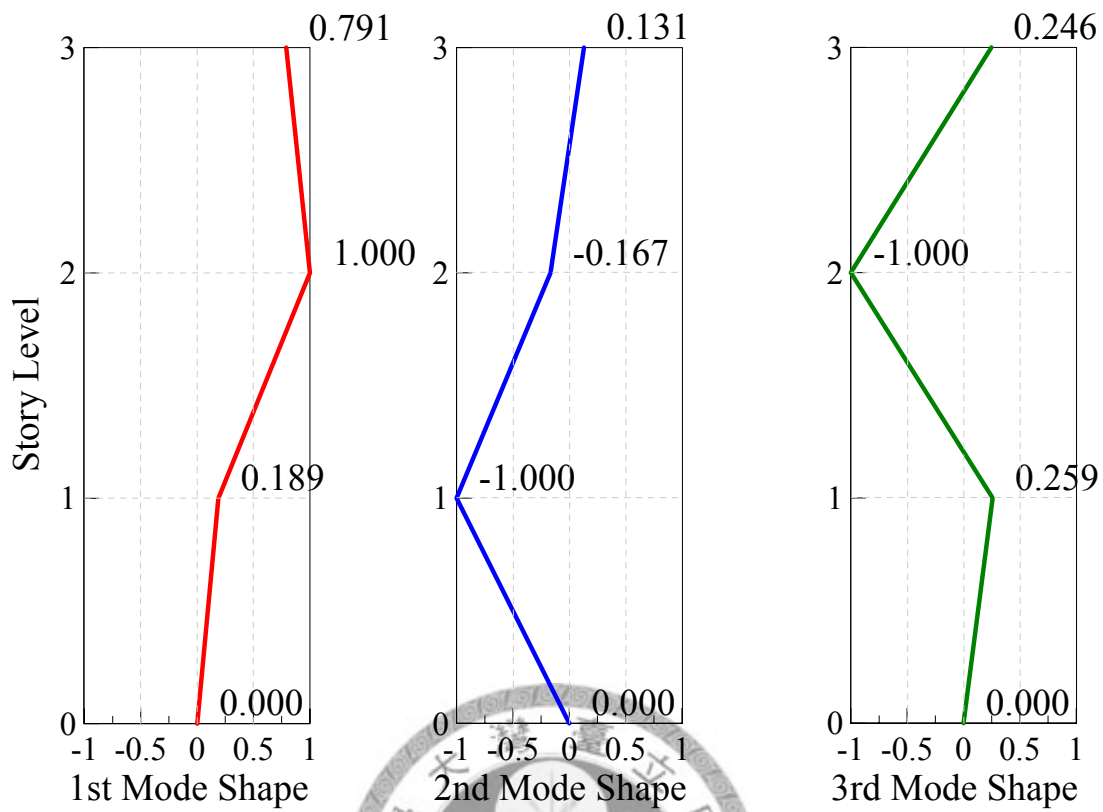


圖 4.1.7 第四組試體之振態

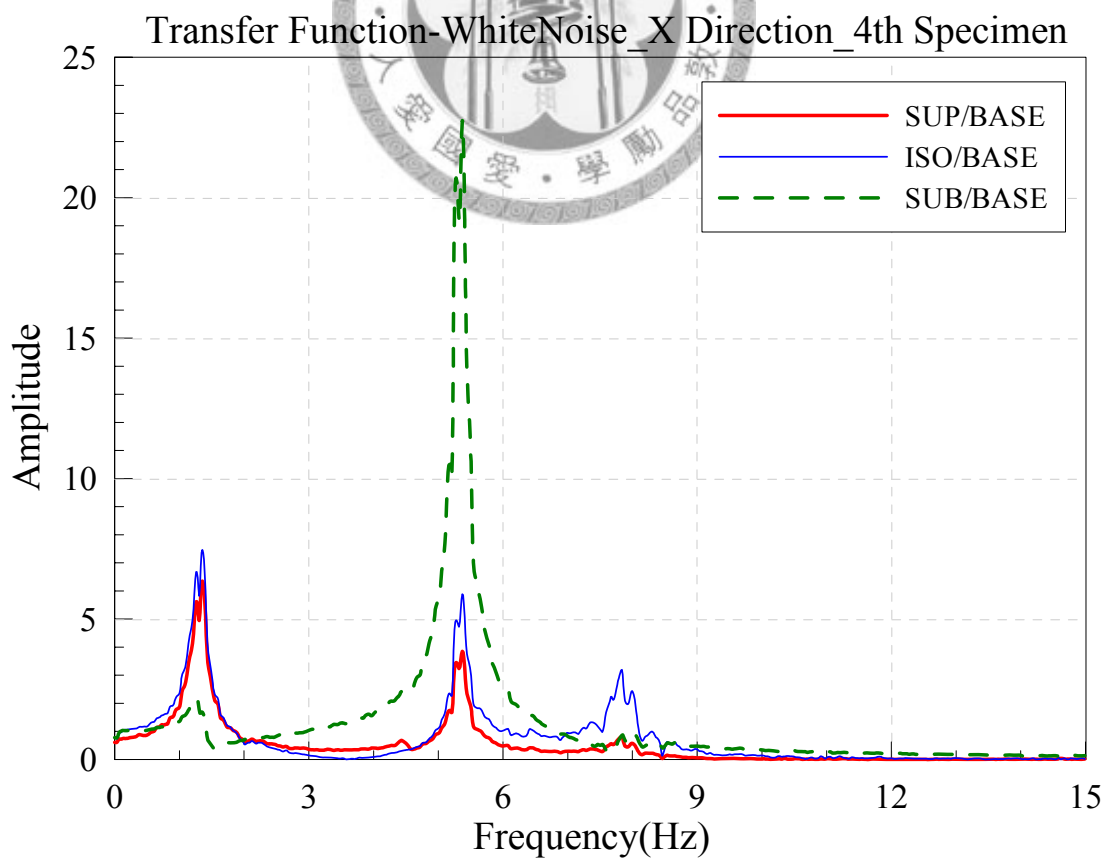


圖 4.1.8 第四組試體於白訊試驗下之系統轉換函數

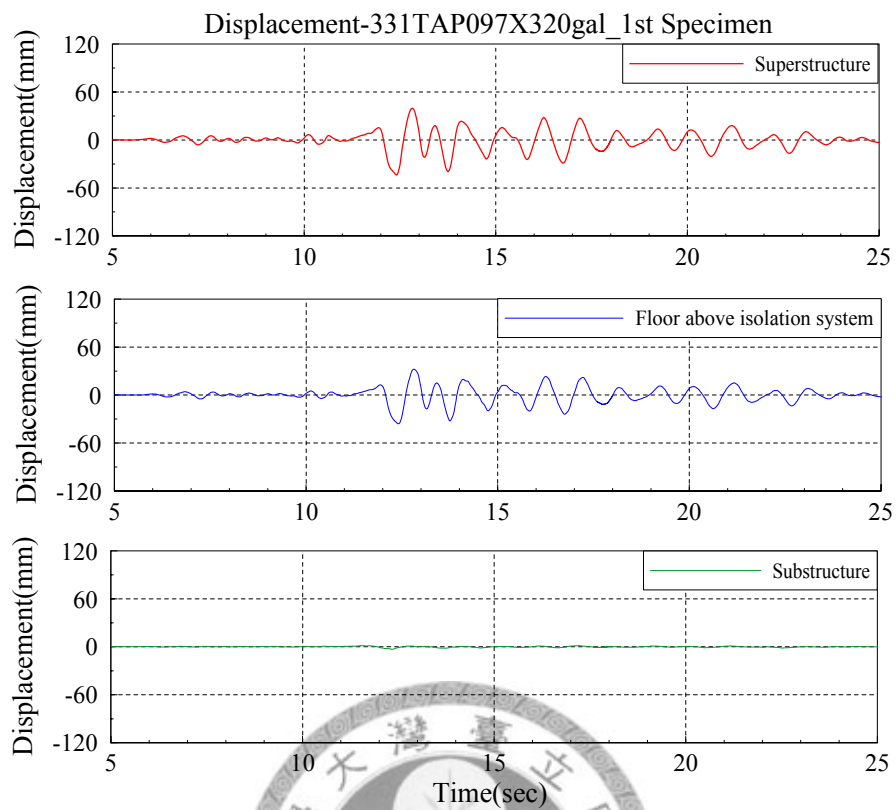


圖 4.2.1 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層位移反應

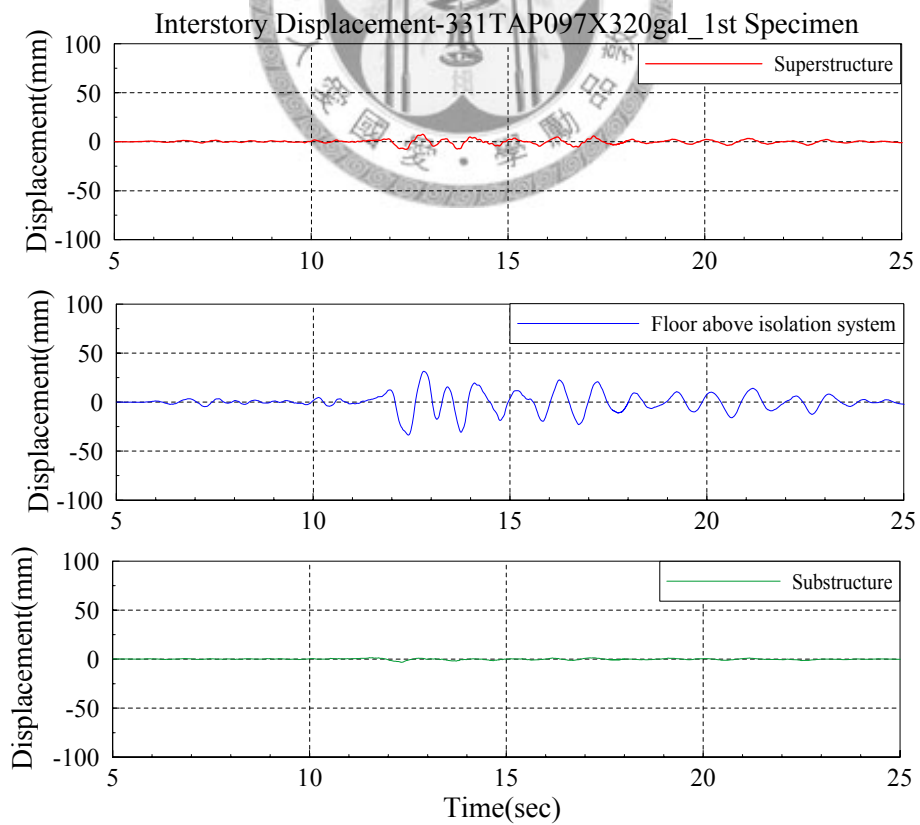


圖 4.2.2 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應

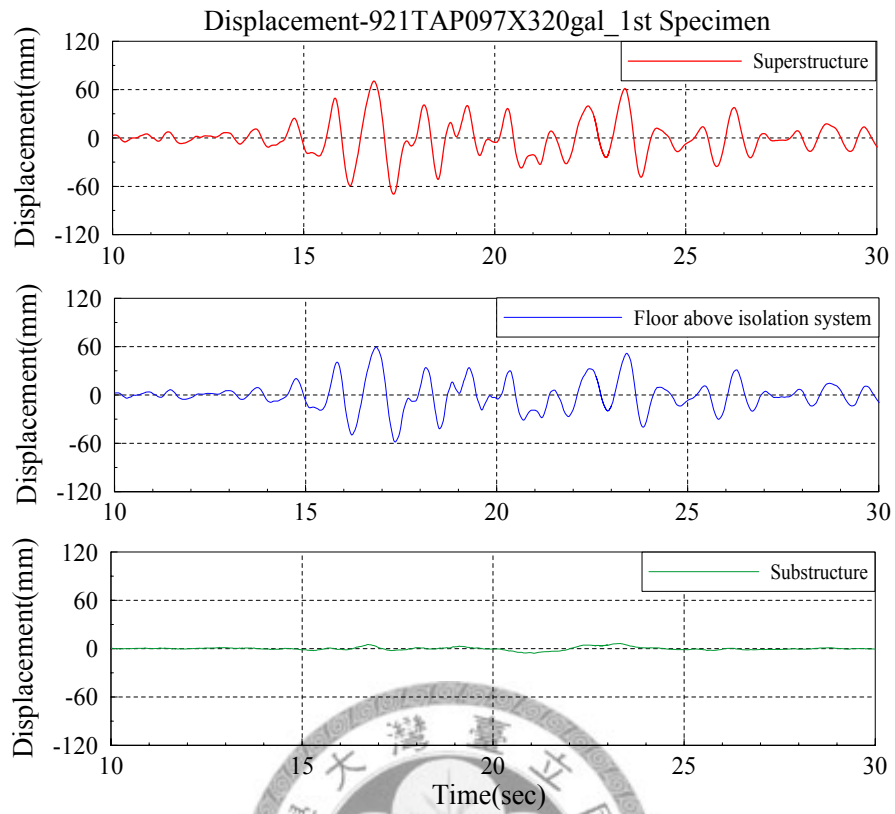


圖 4.2.3 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層位移反應

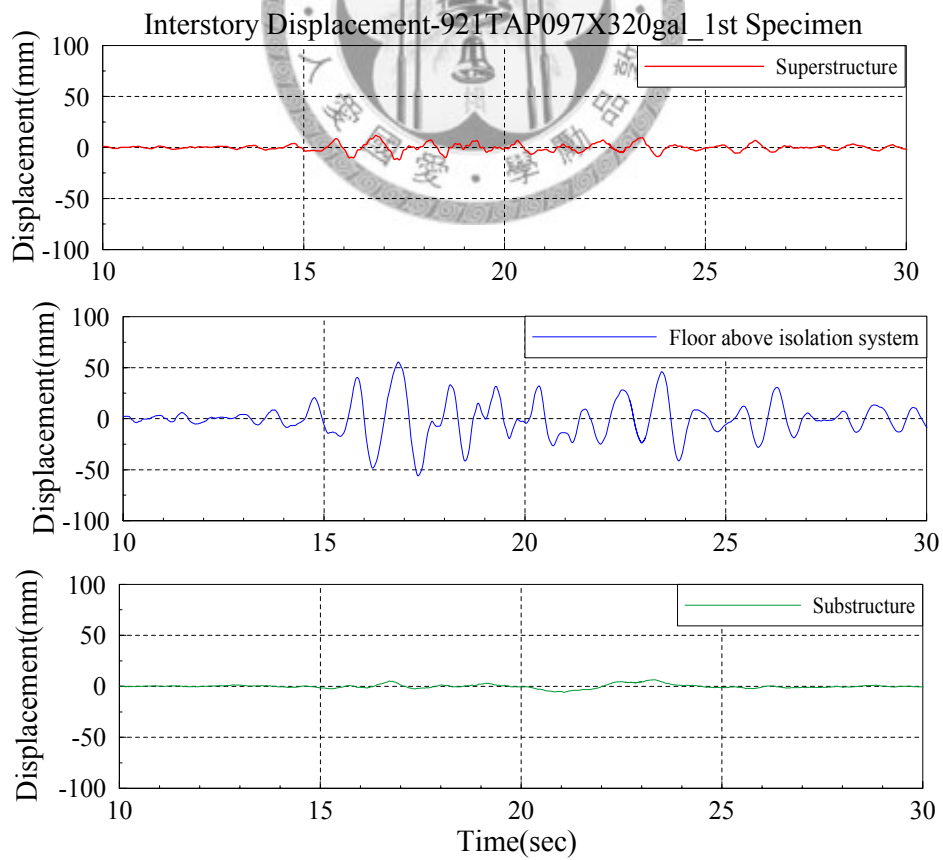


圖 4.2.4 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應

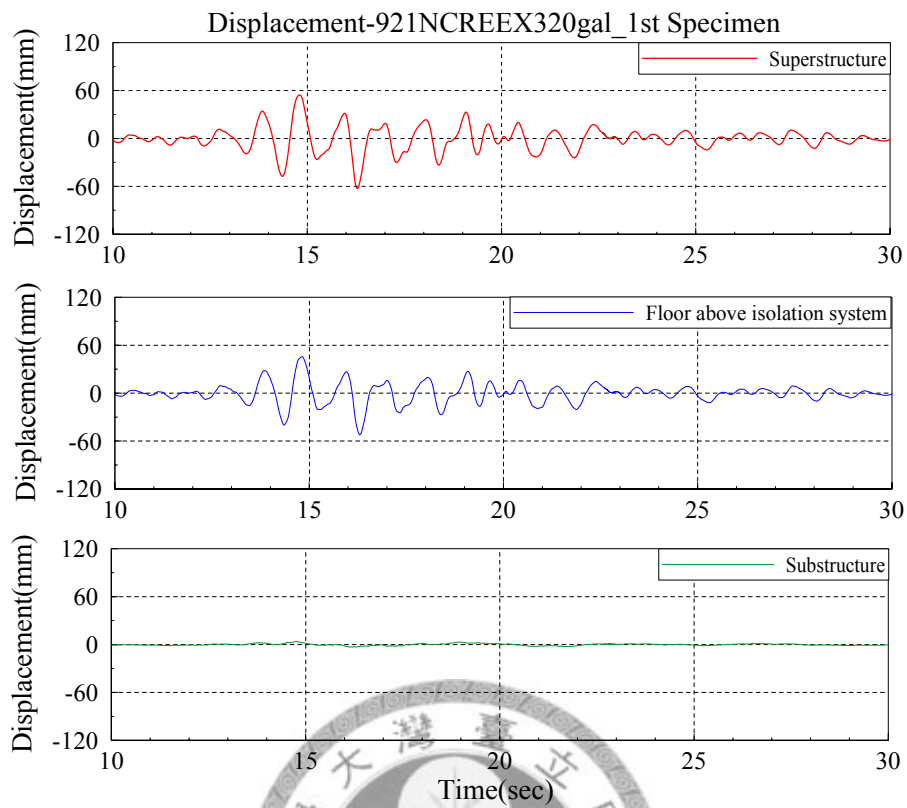


圖 4.2.5 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應

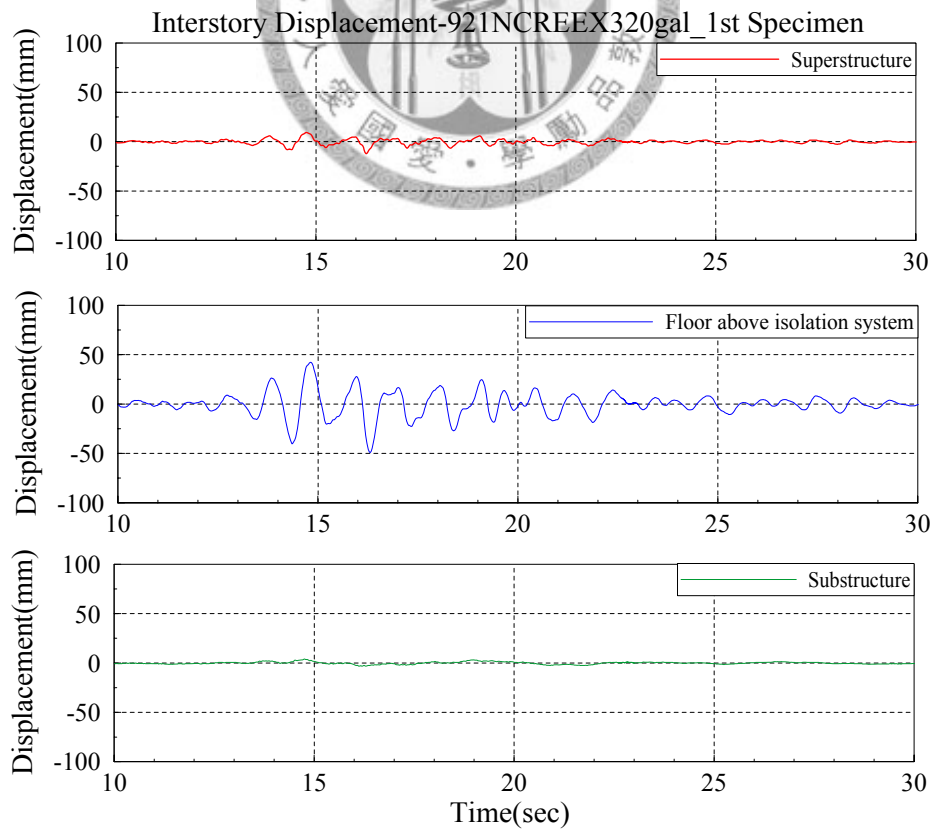


圖 4.2.6 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應

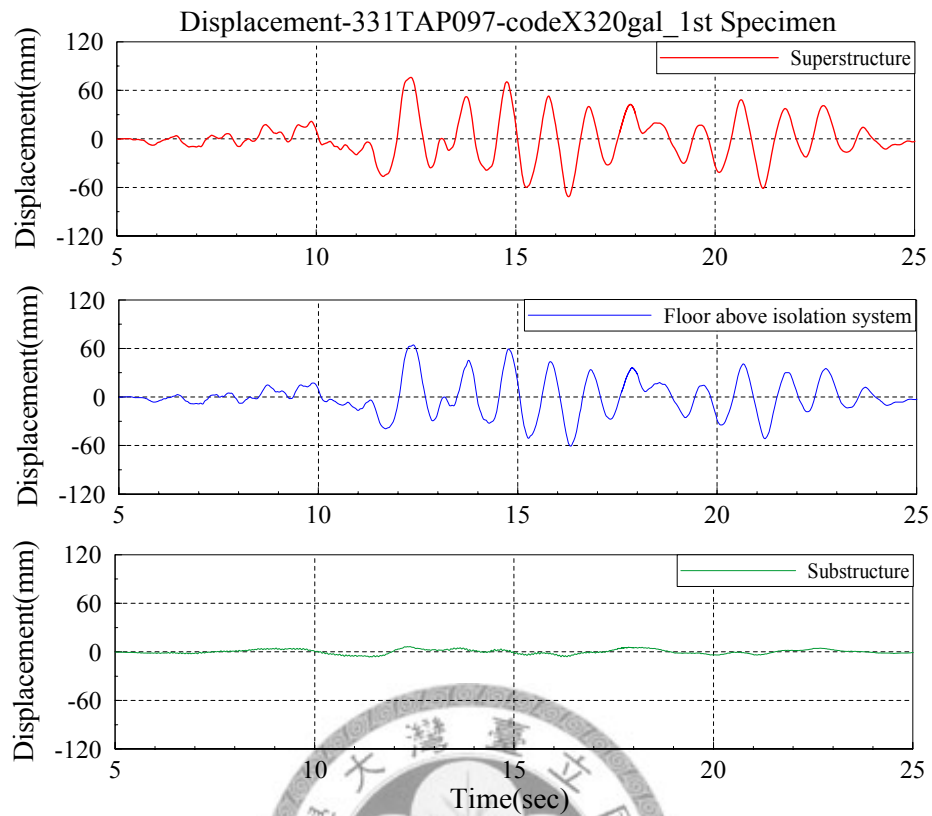


圖 4.2.7 第一組試體於 331TAP097-code X320gal 下各樓層位移反應

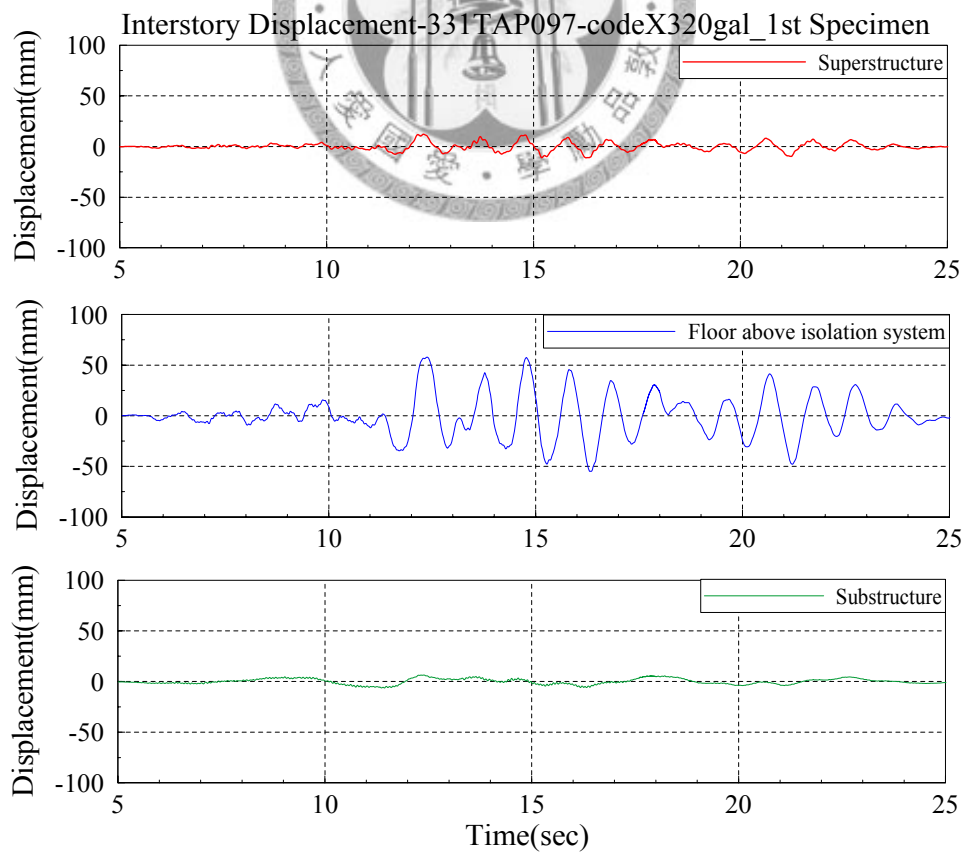


圖 4.2.8 第一組試體於 331TAP097-code X320gal 下各樓層層間位移反應

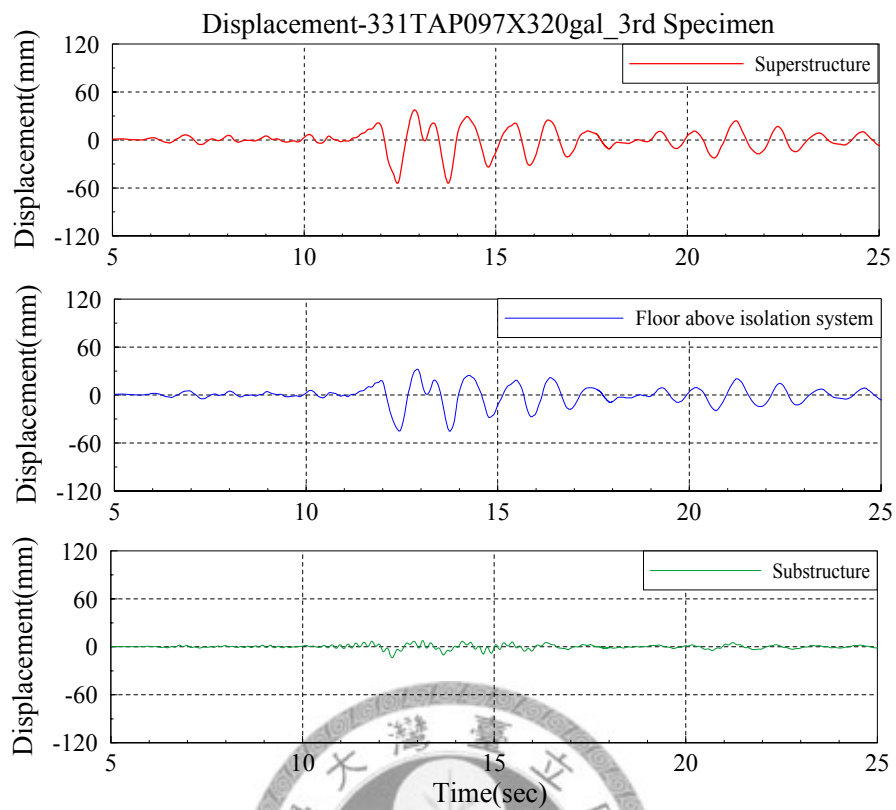


圖 4.2.9 第三組試體於 331TAP097 X320gal 下各樓層位移反應

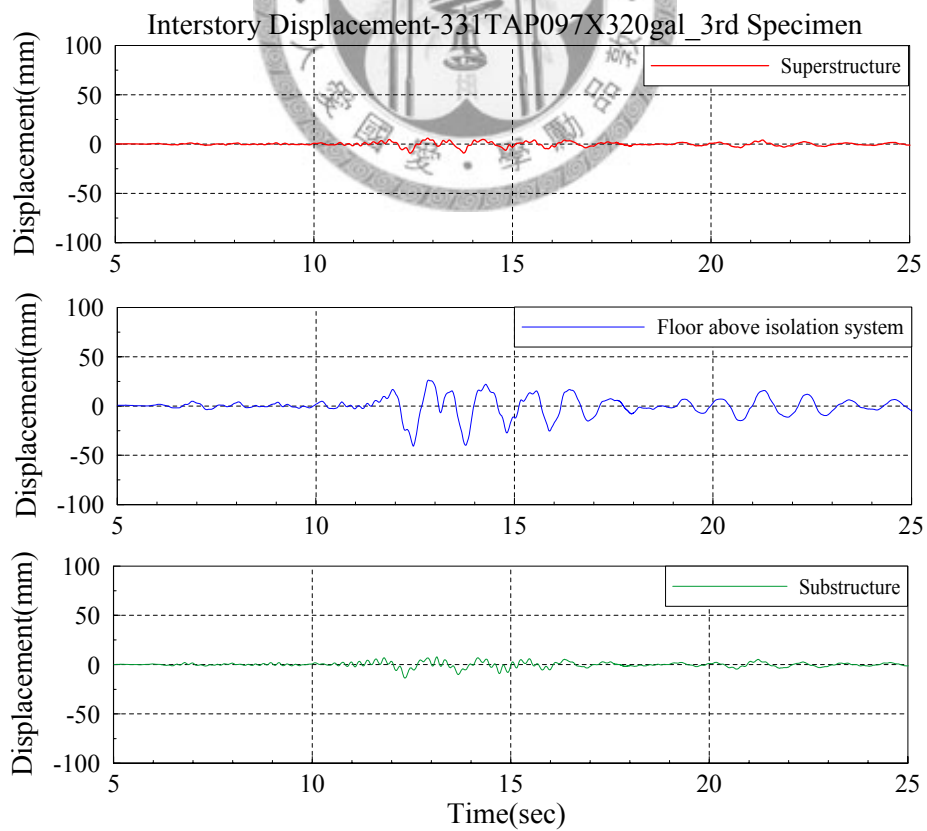


圖 4.2.10 第三組試體於 331TAP097 X320gal 下各樓層層間位移反應

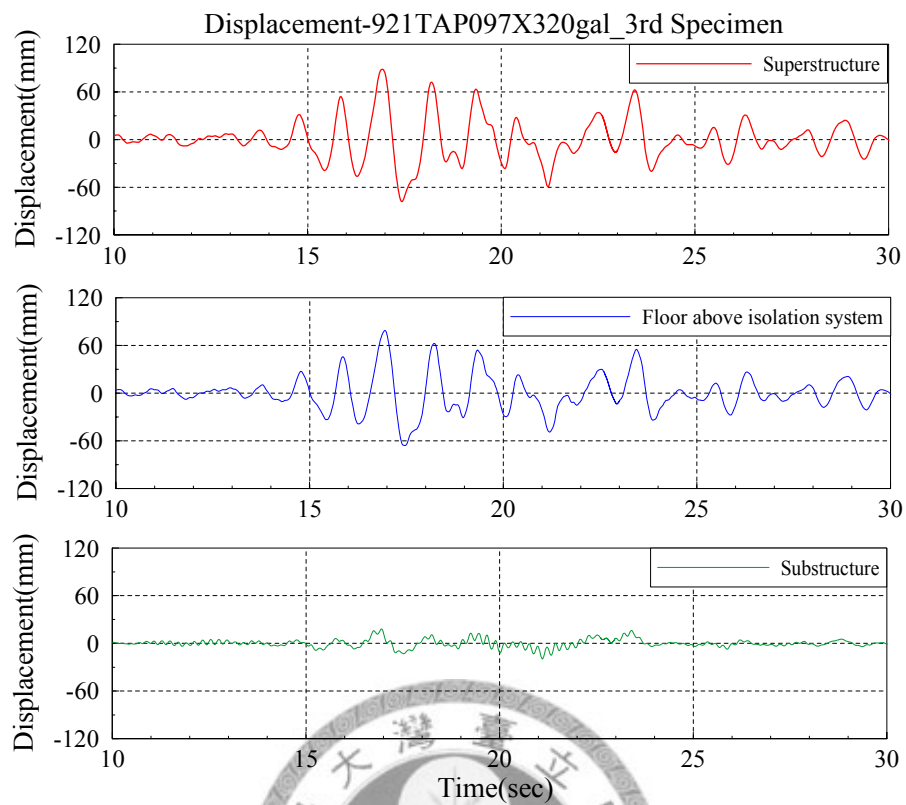


圖 4.2.11 第三組試體於 921TAP097 X320gal 下各樓層位移反應

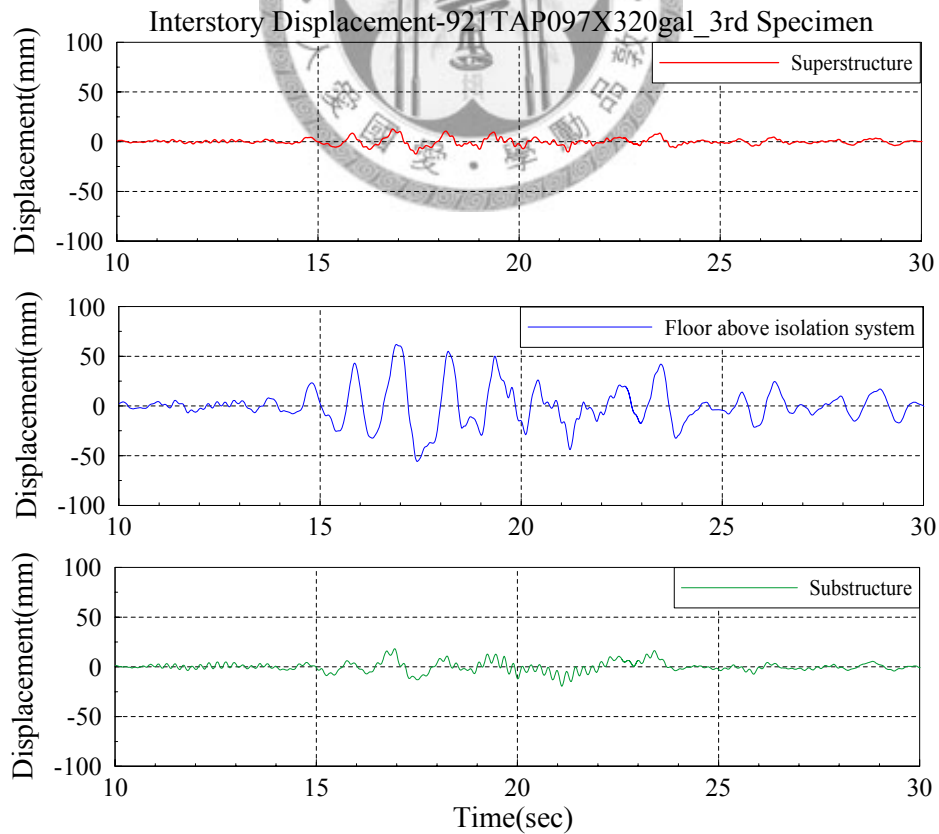


圖 4.2.12 第三組試體於 921TAP097 X320gal 下各樓層層間位移反應

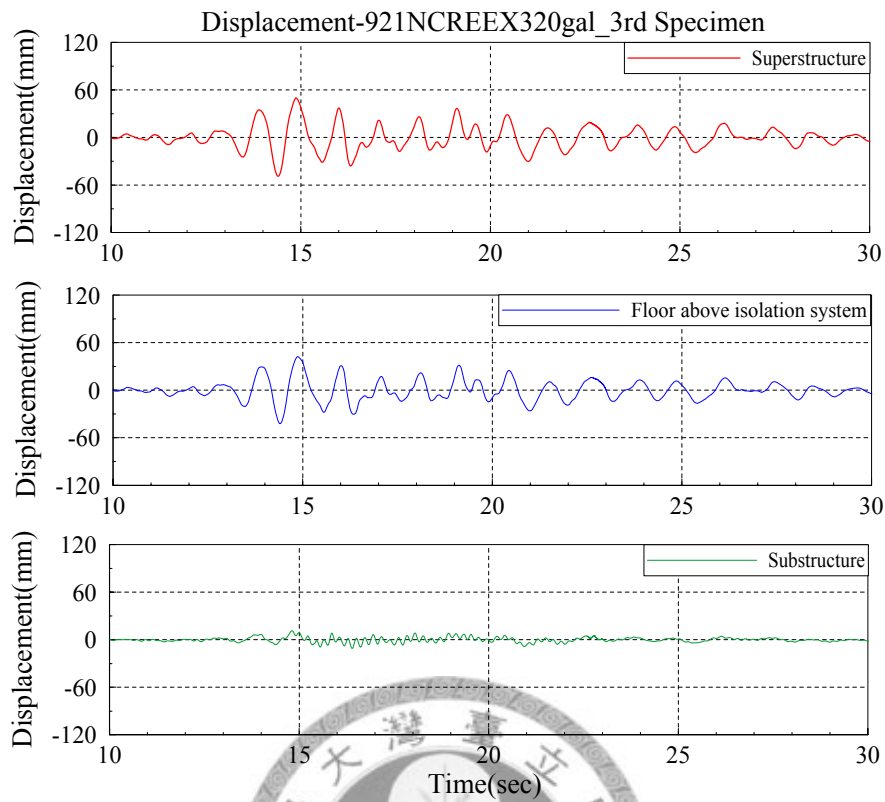


圖 4.2.13 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應

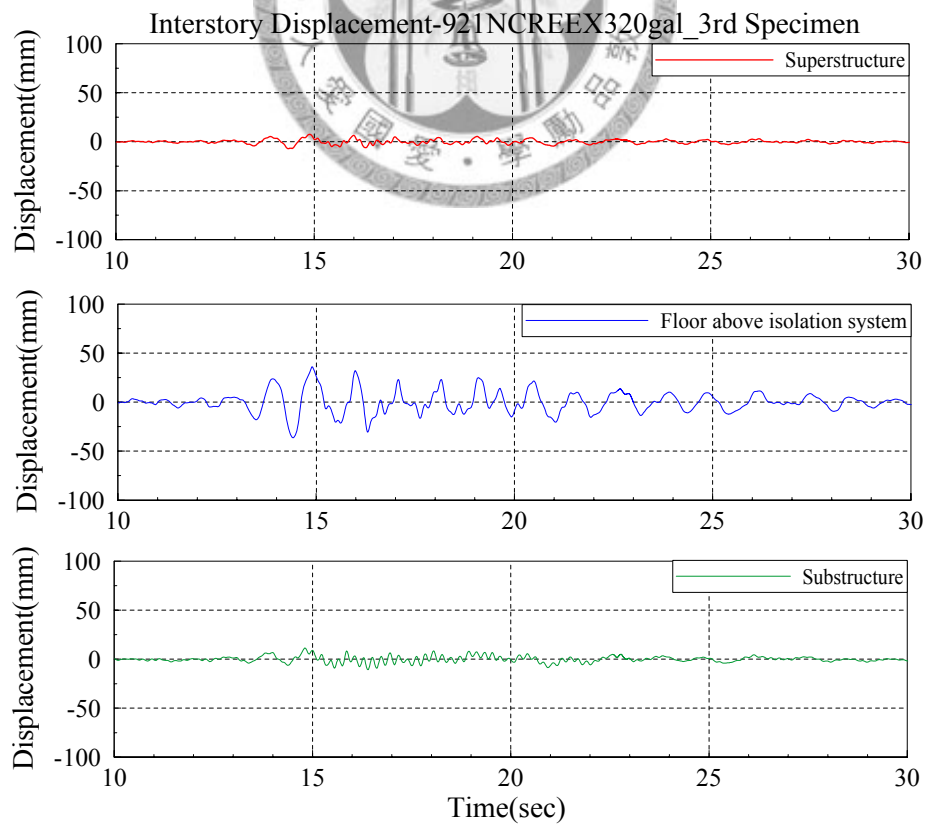


圖 4.2.14 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應

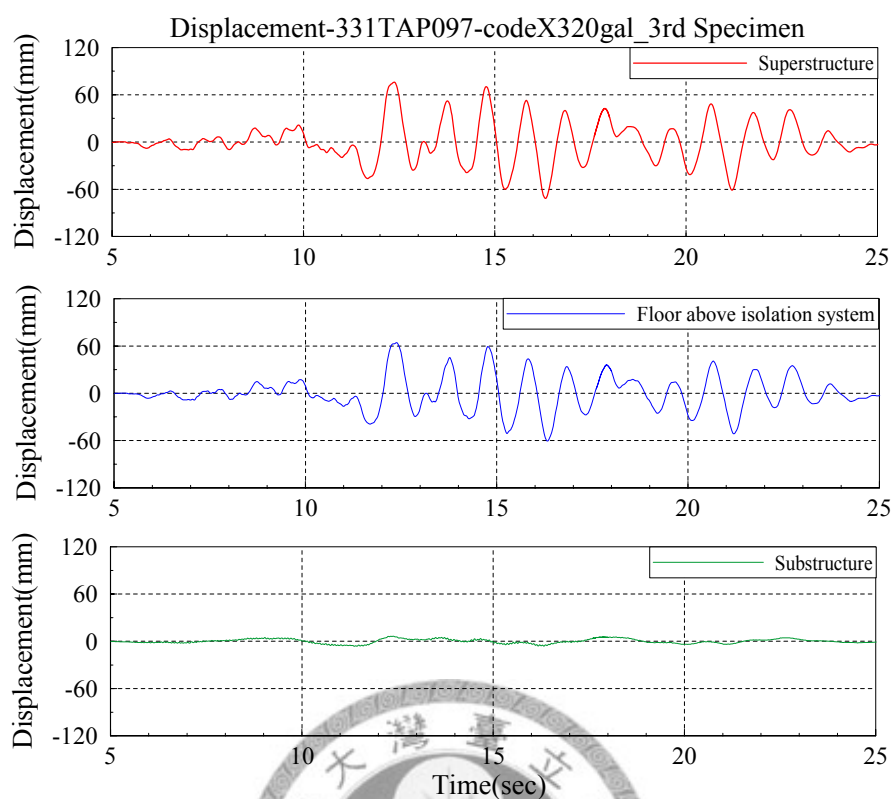


圖 4.2.15 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層位移反應

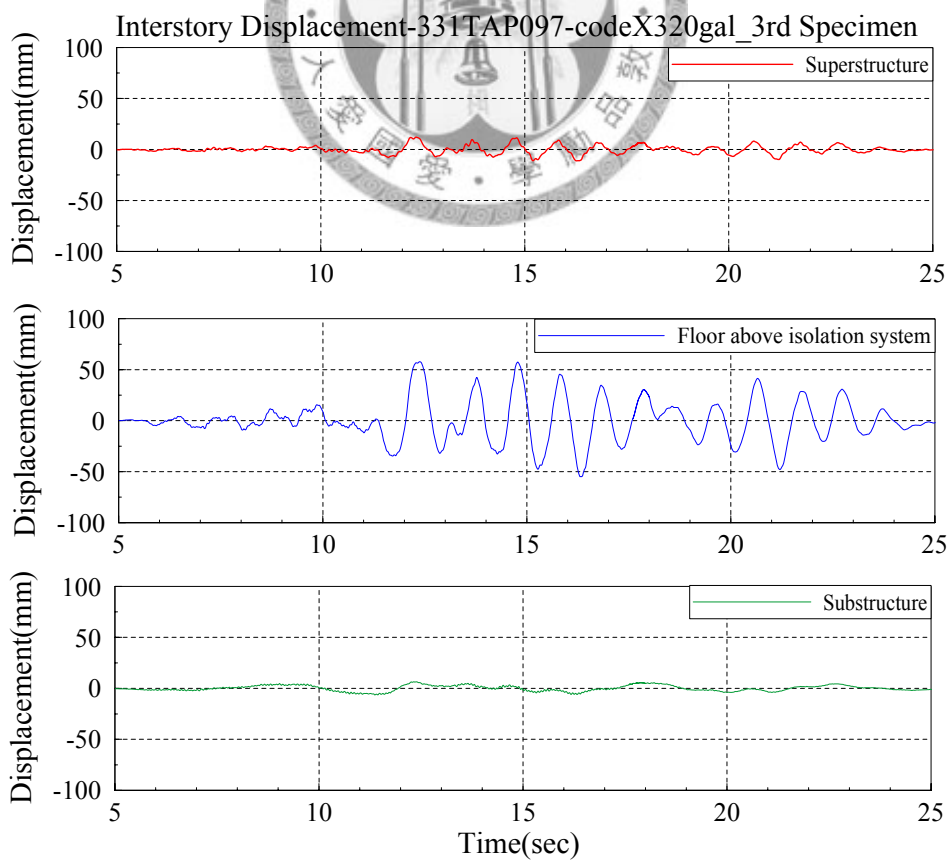


圖 4.2.16 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層層間位移反應

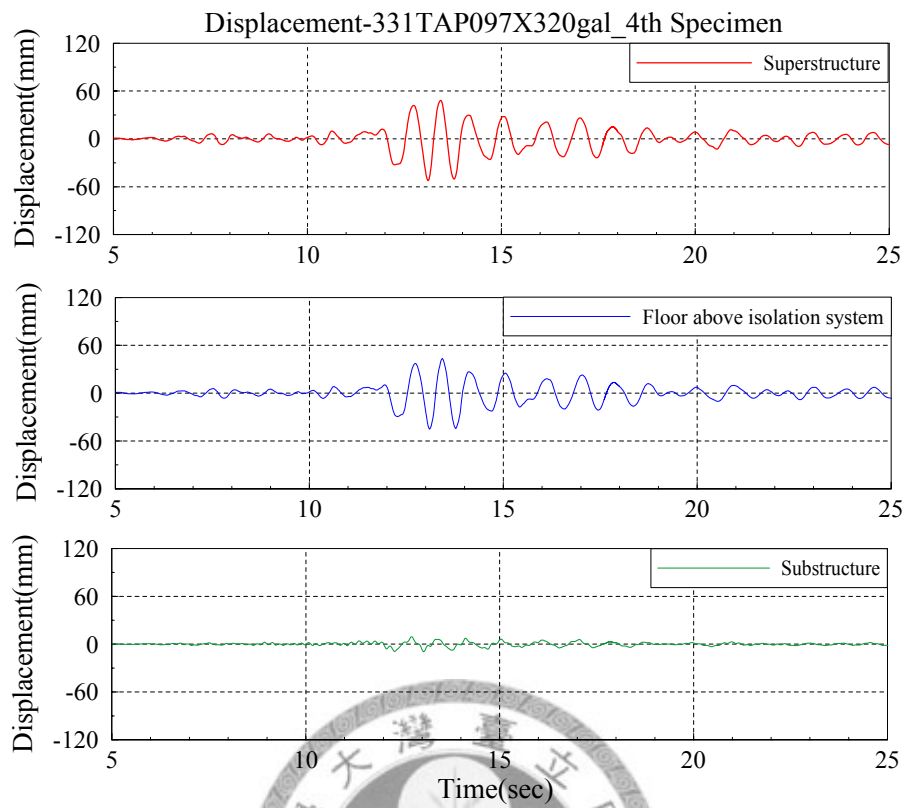


圖 4.2.17 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層位移反應

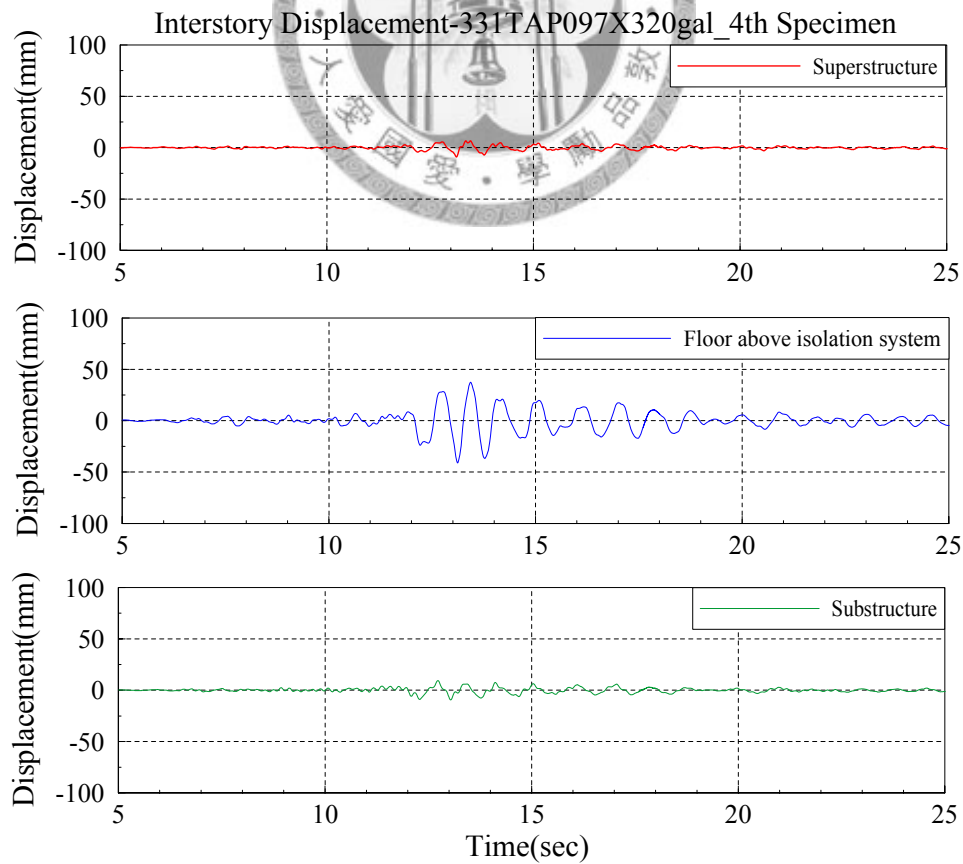


圖 4.2.18 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應

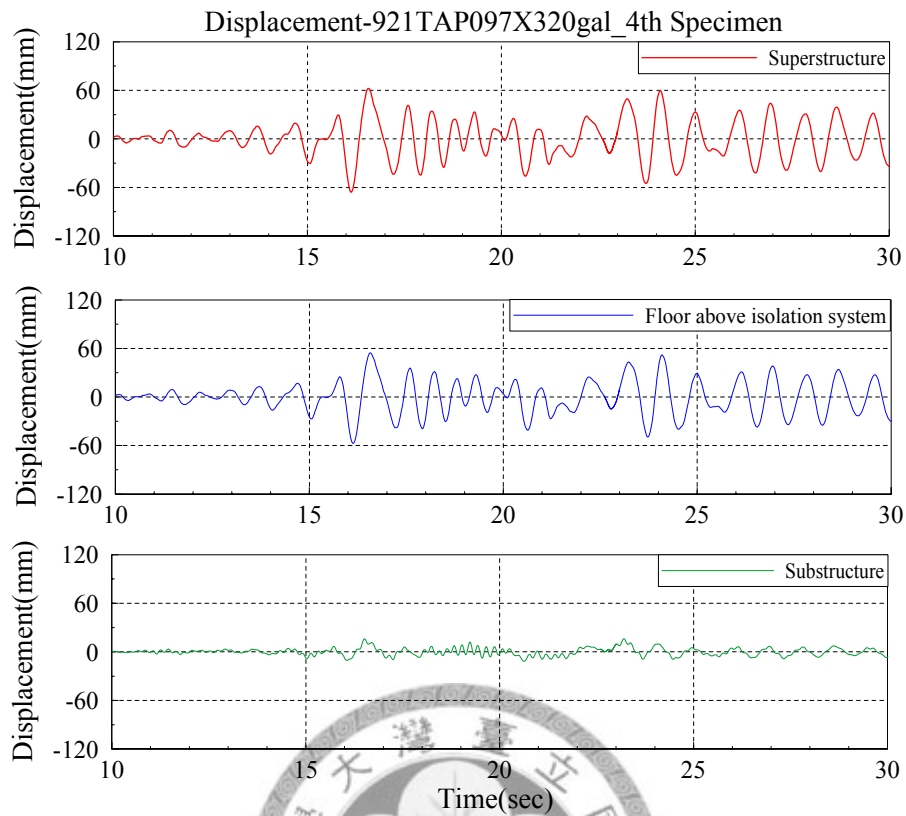


圖 4.2.19 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層位移反應

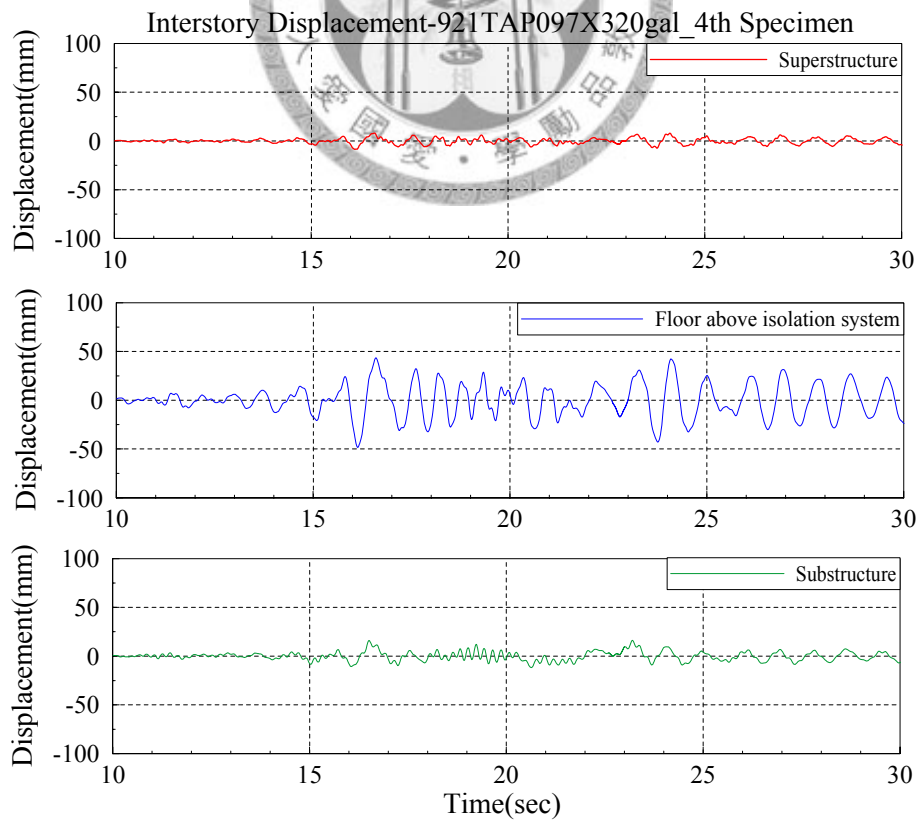


圖 4.2.20 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層層間位移反應

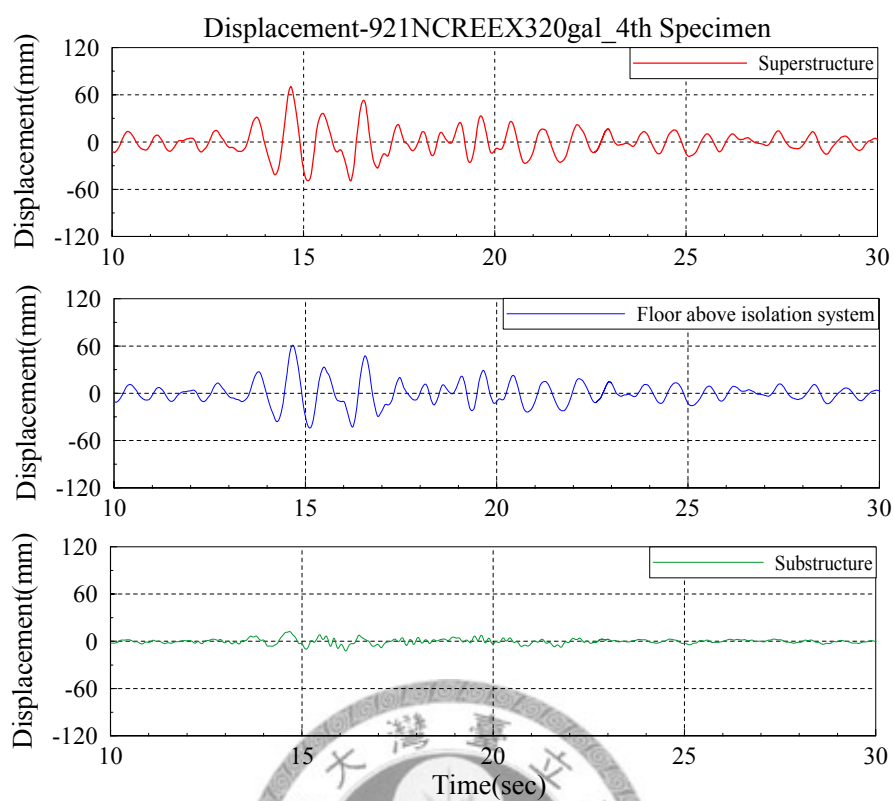


圖 4.2.21 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層位移反應

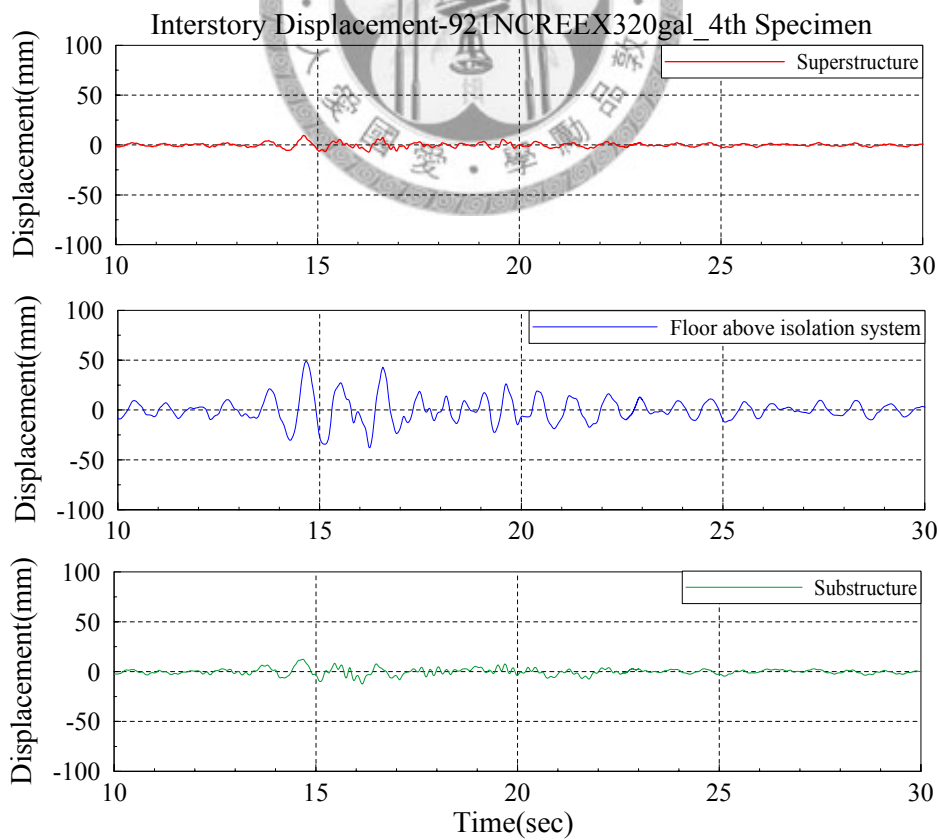


圖 4.2.22 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層層間位移反應

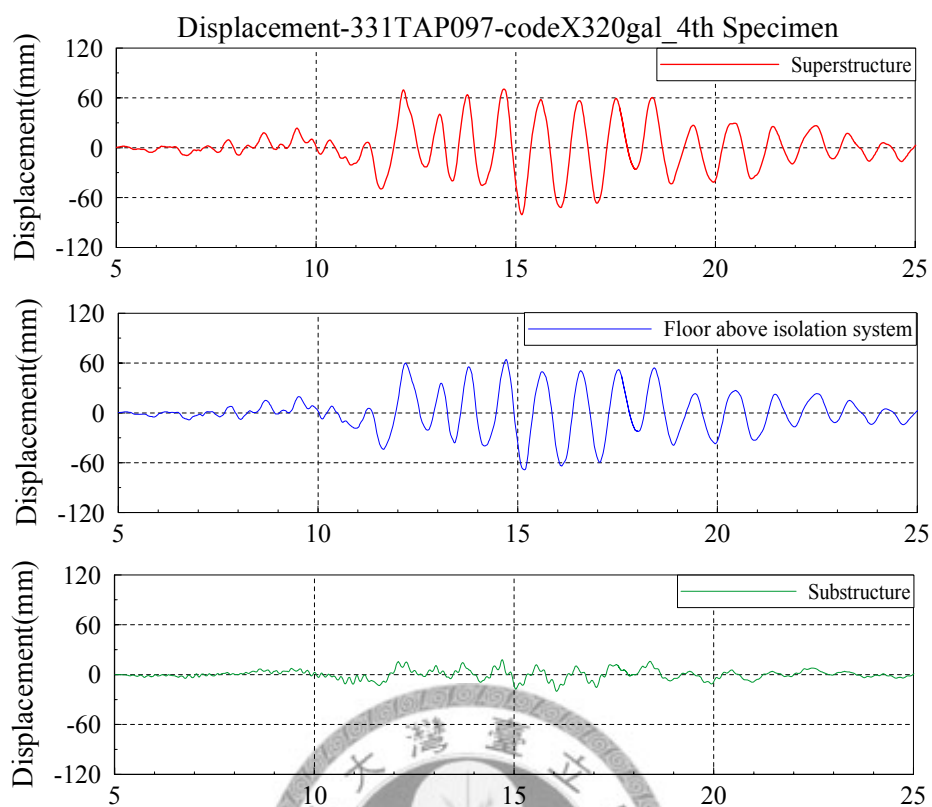


圖 4.2.23 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層位移反應

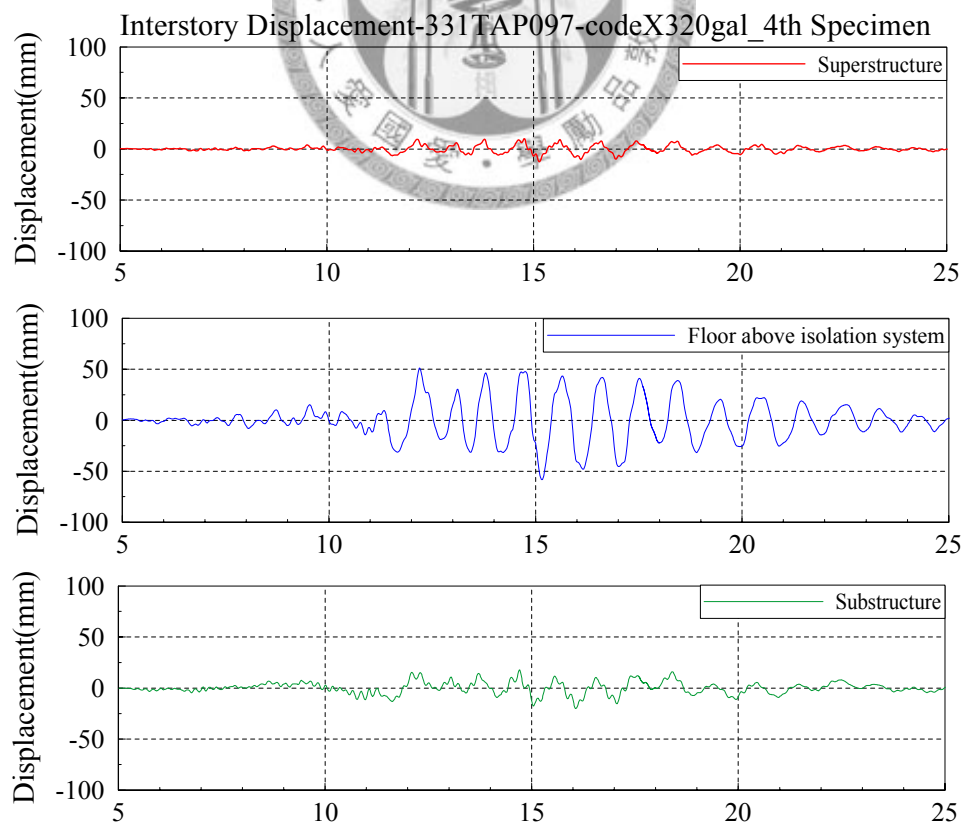


圖 4.2.24 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層層間位移反應

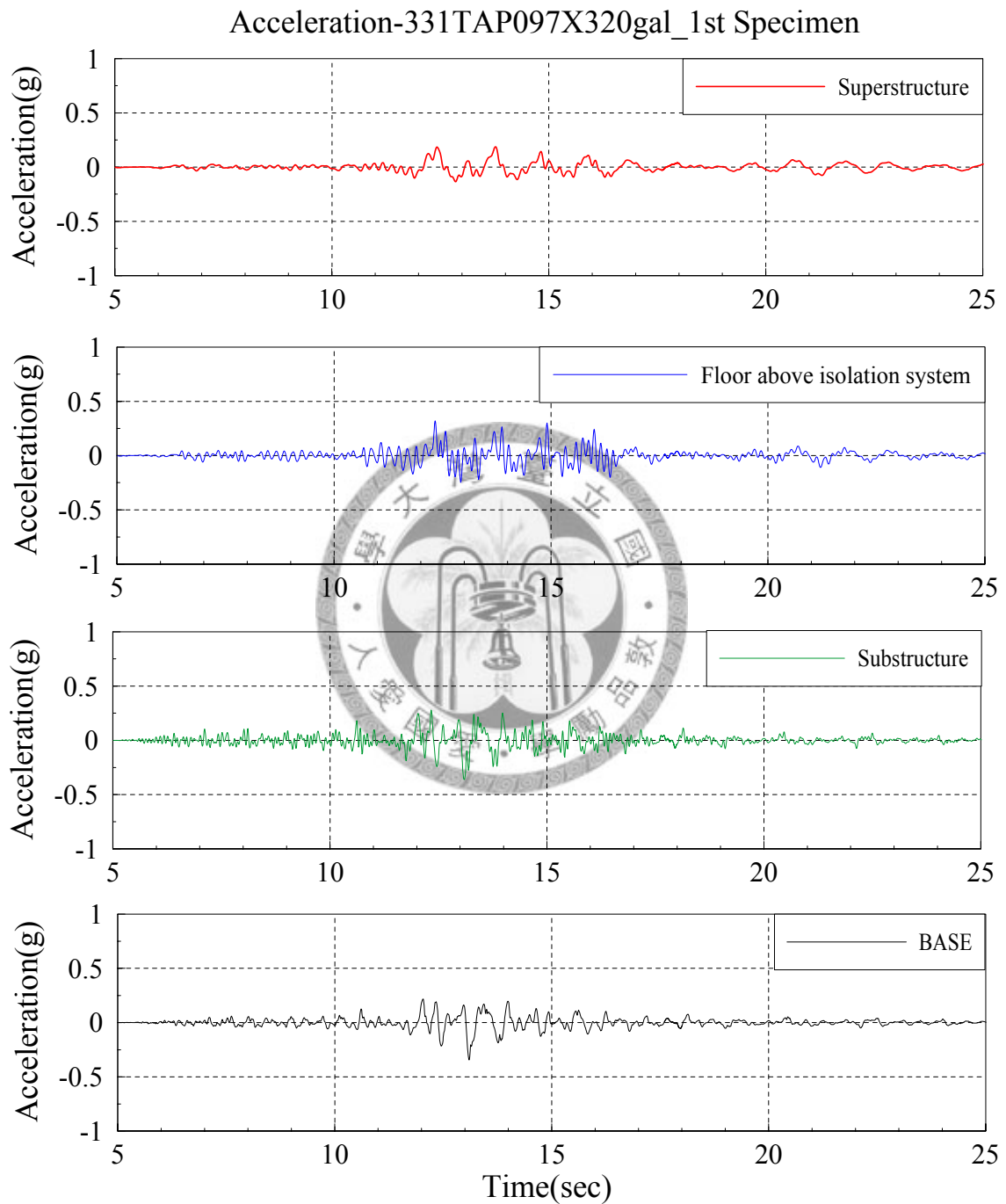


圖 4.2.25 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

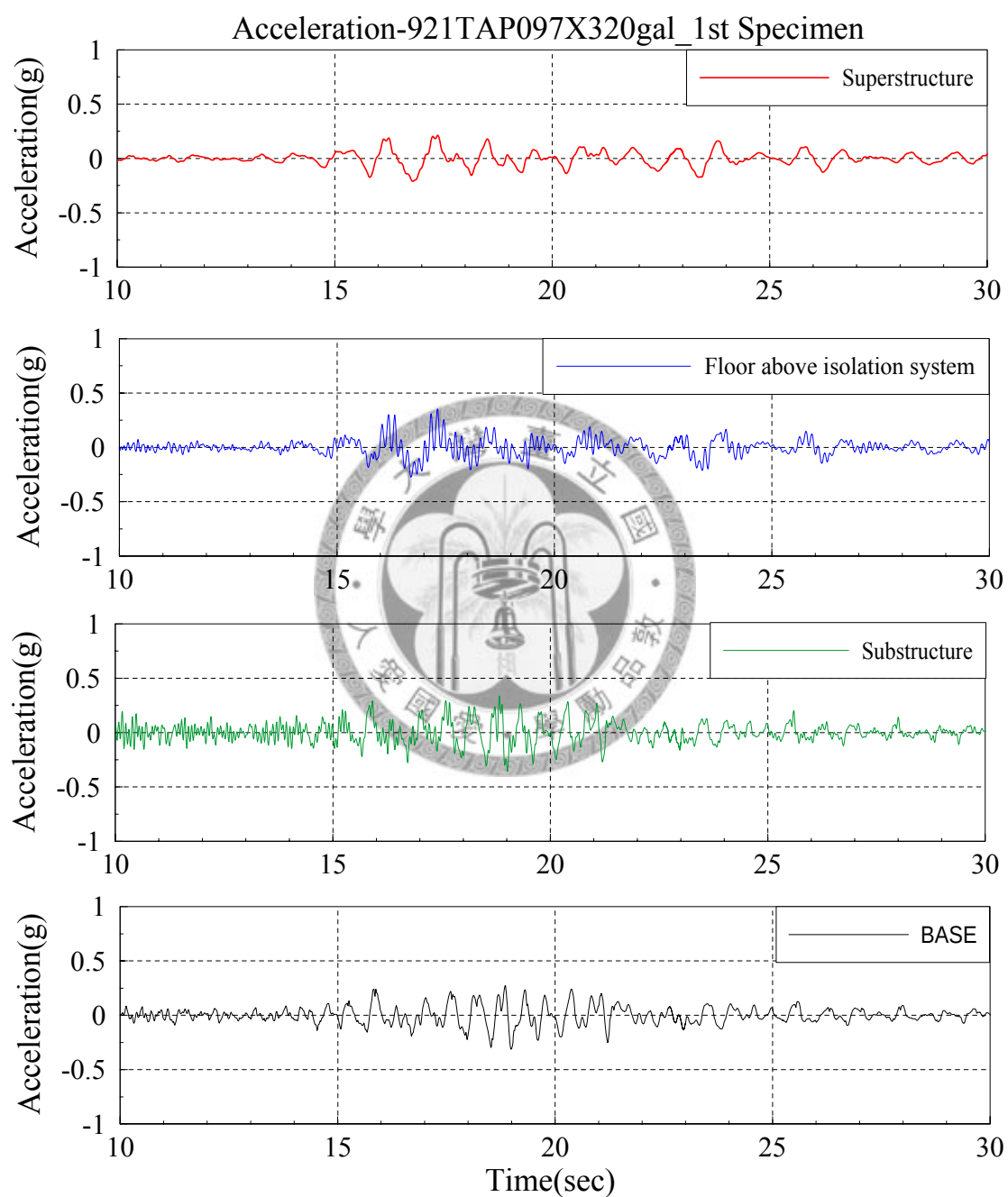


圖 4.2.26 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

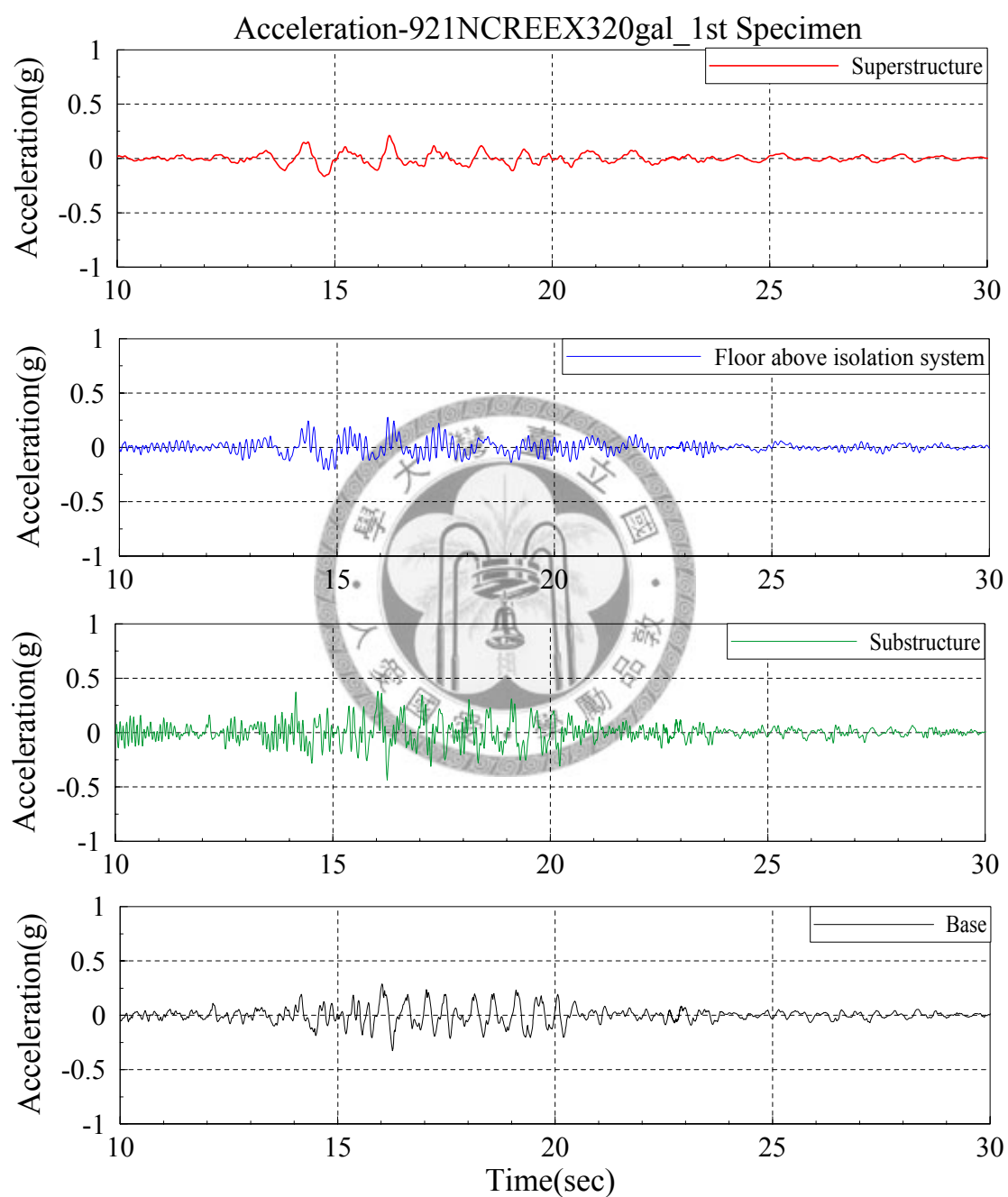


圖 4.2.27 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應

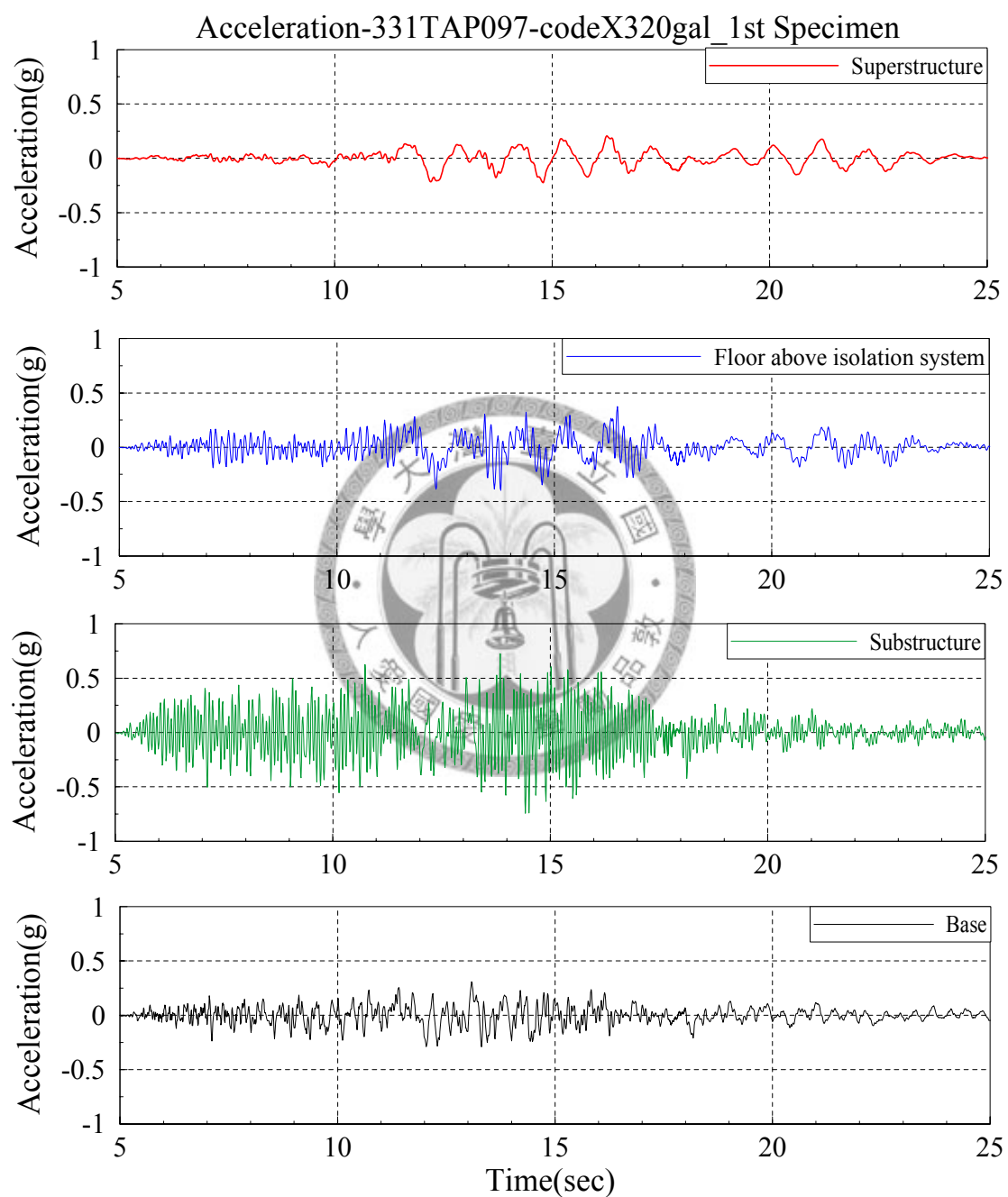


圖 4.2.28 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應

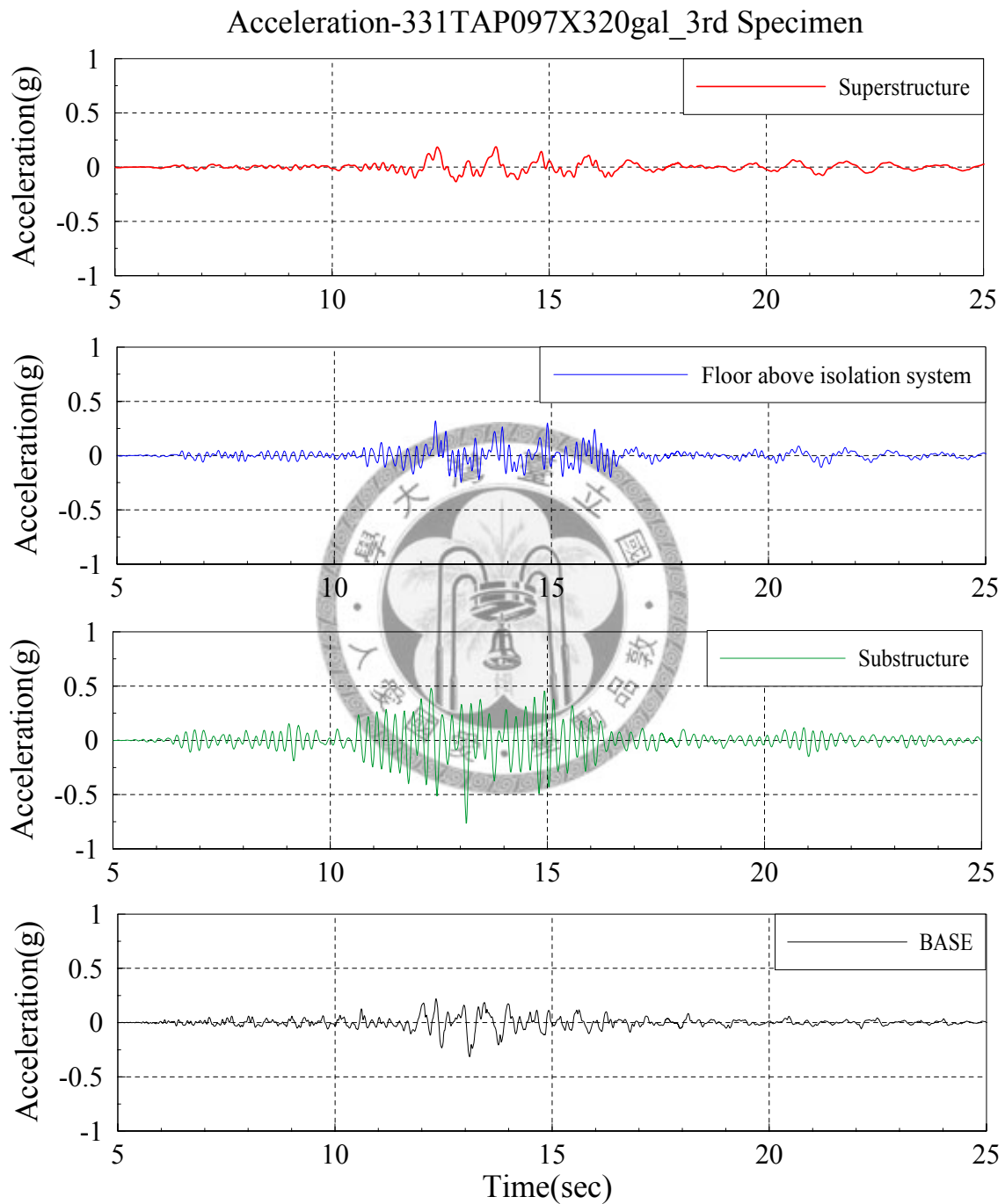


圖 4.2.29 第三組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

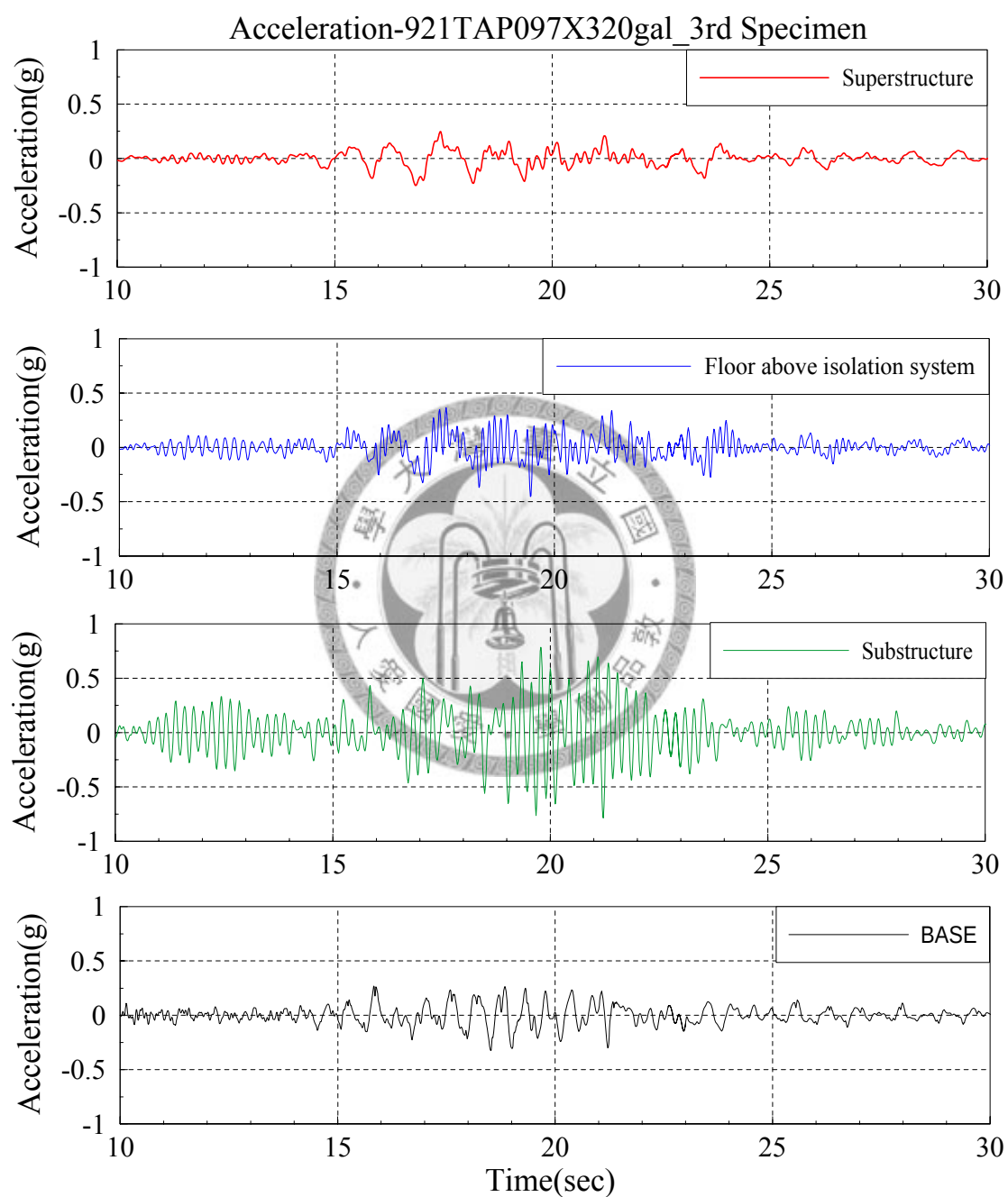


圖 4.2.30 第三組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

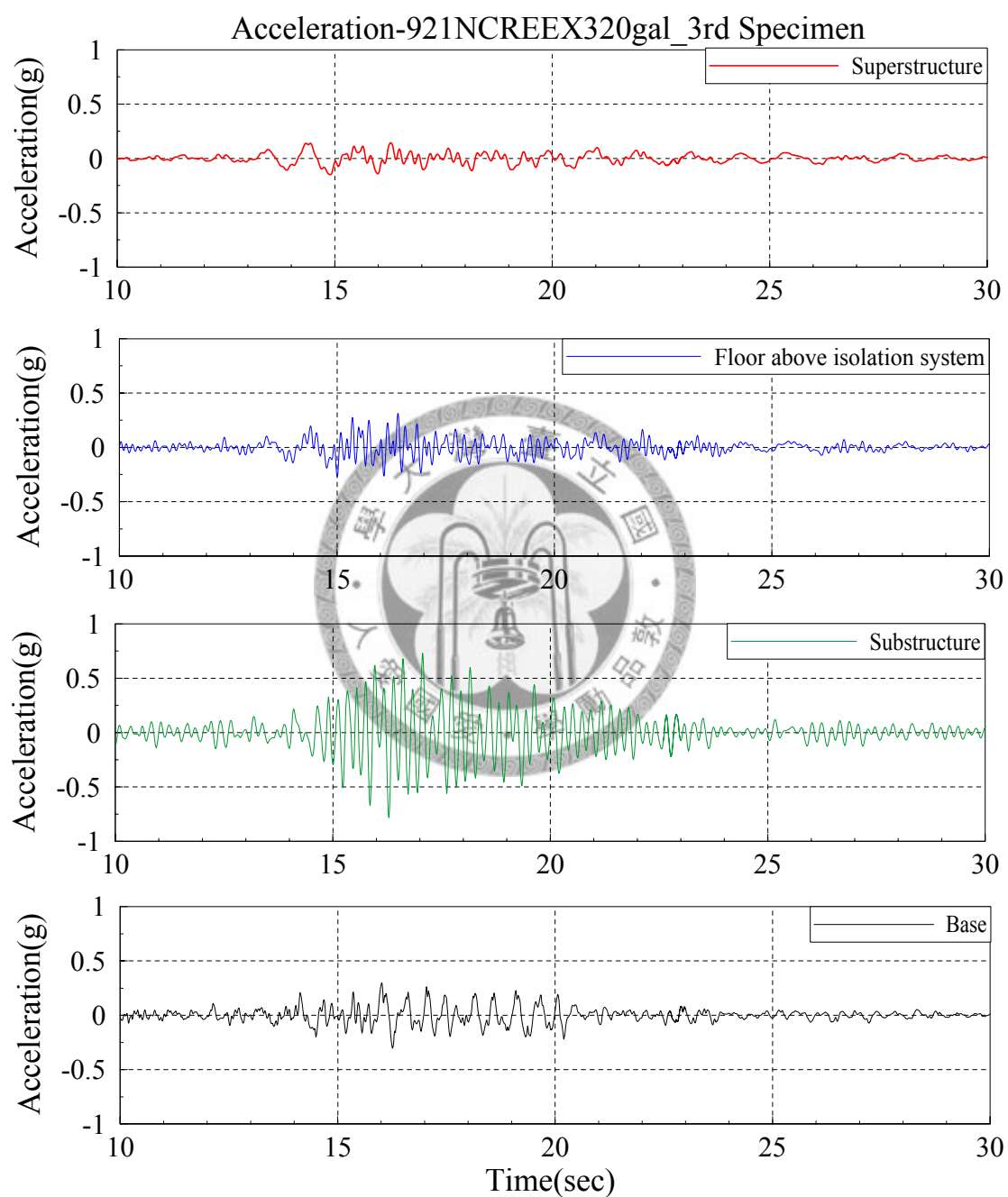


圖 4.2.31 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應

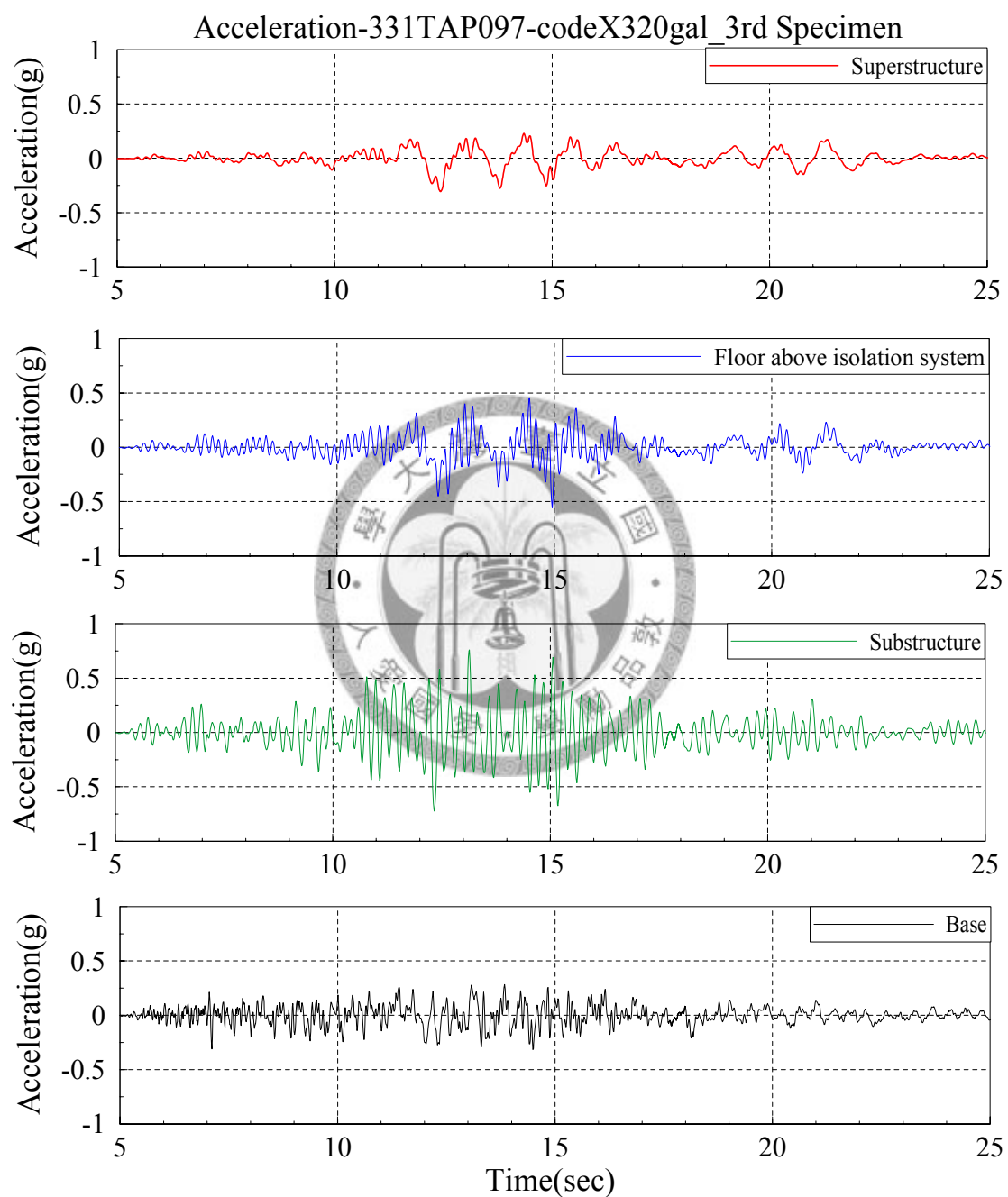


圖 4.2.32 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應

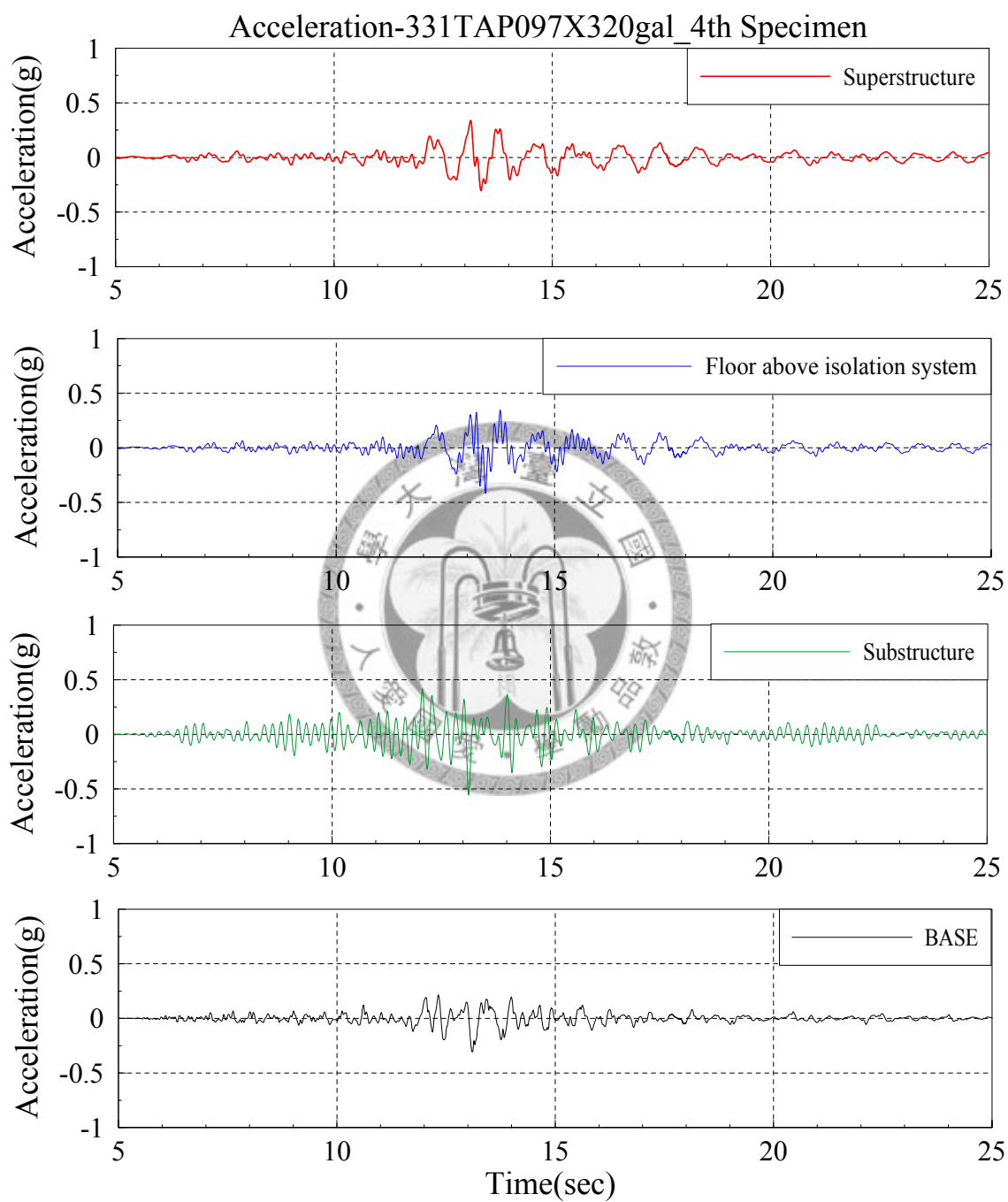


圖 4.2.33 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

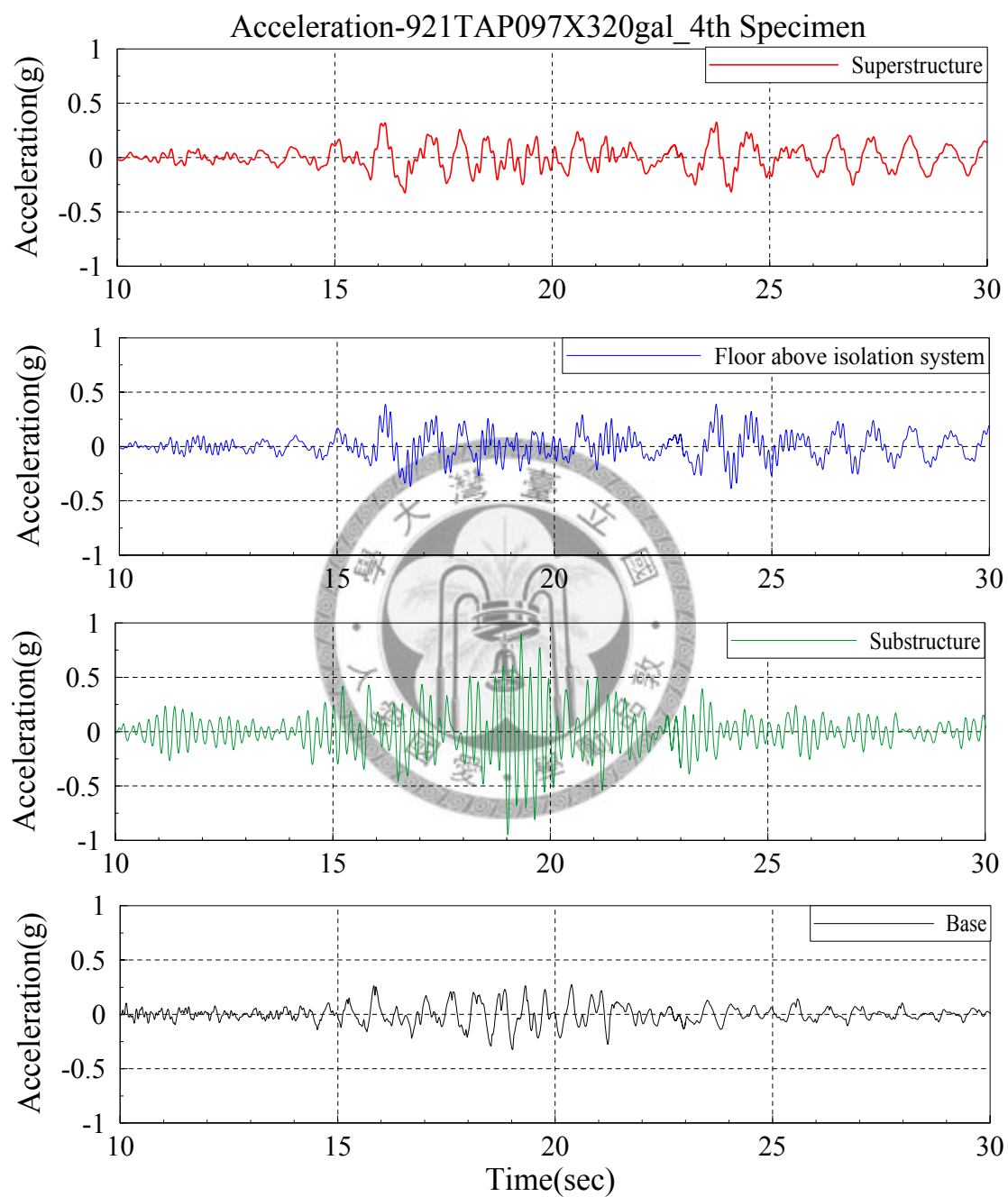


圖 4.2.34 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層加速度反應

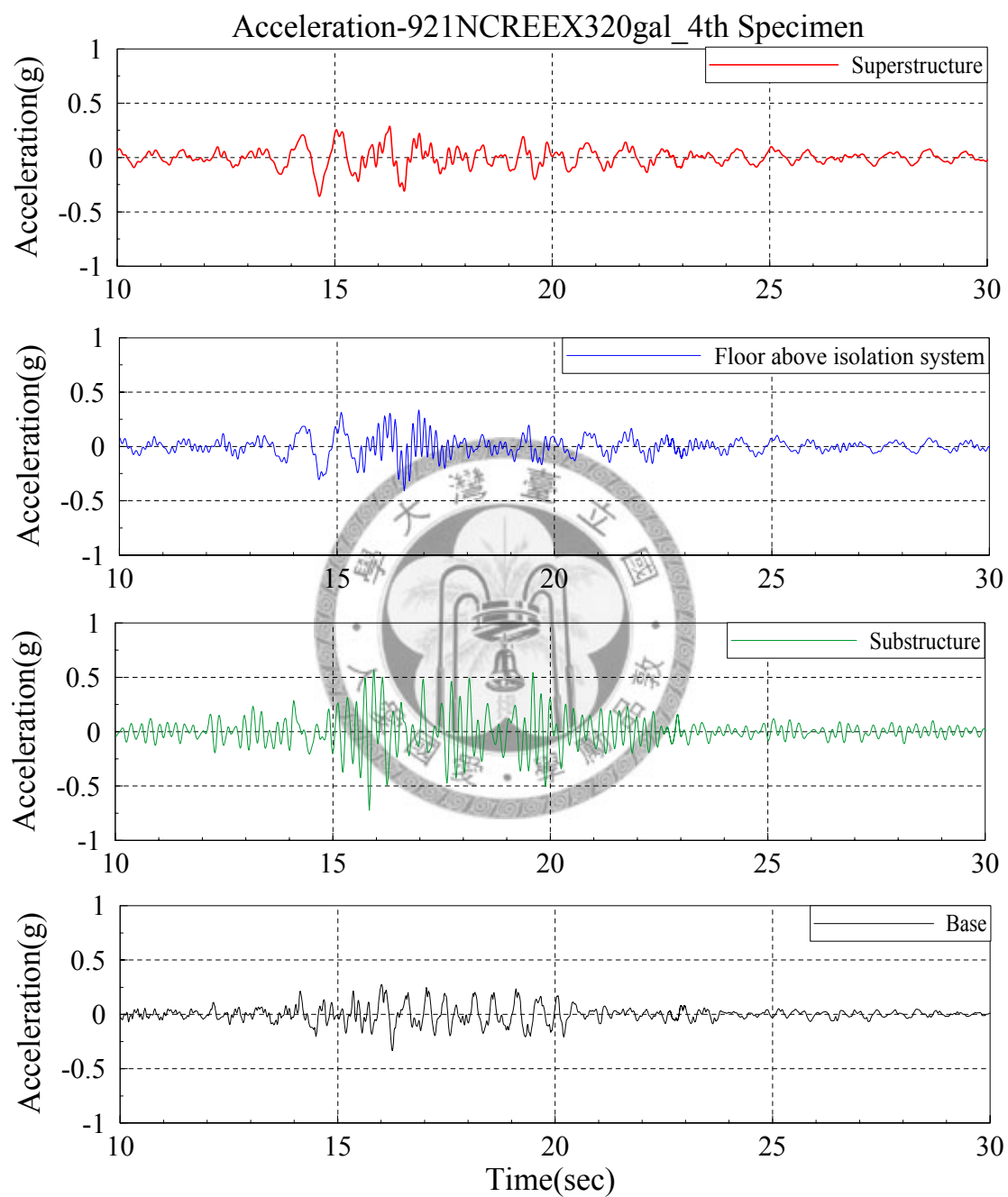


圖 4.2.35 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層加速度反應

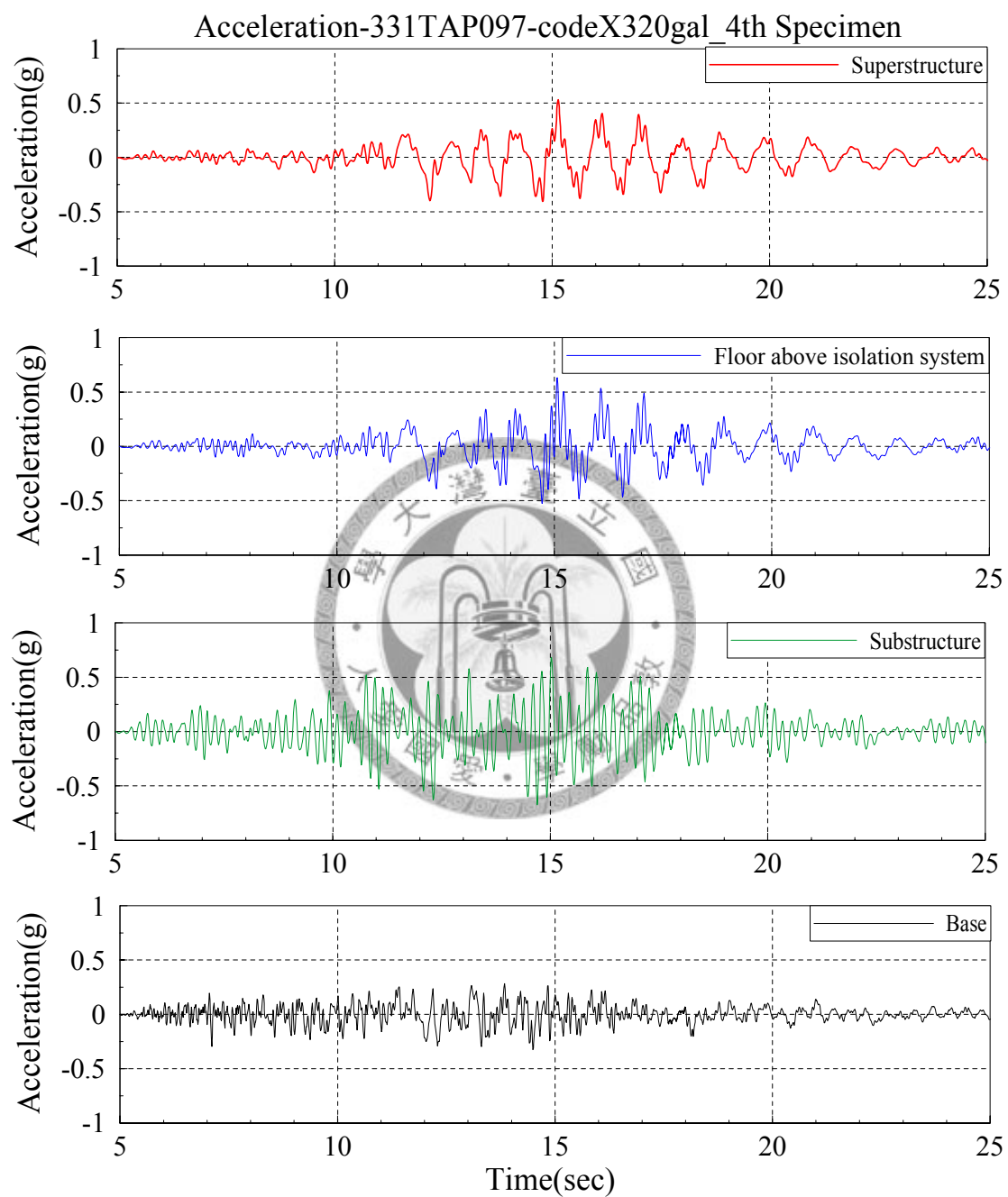


圖 4.2.36 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層加速度反應

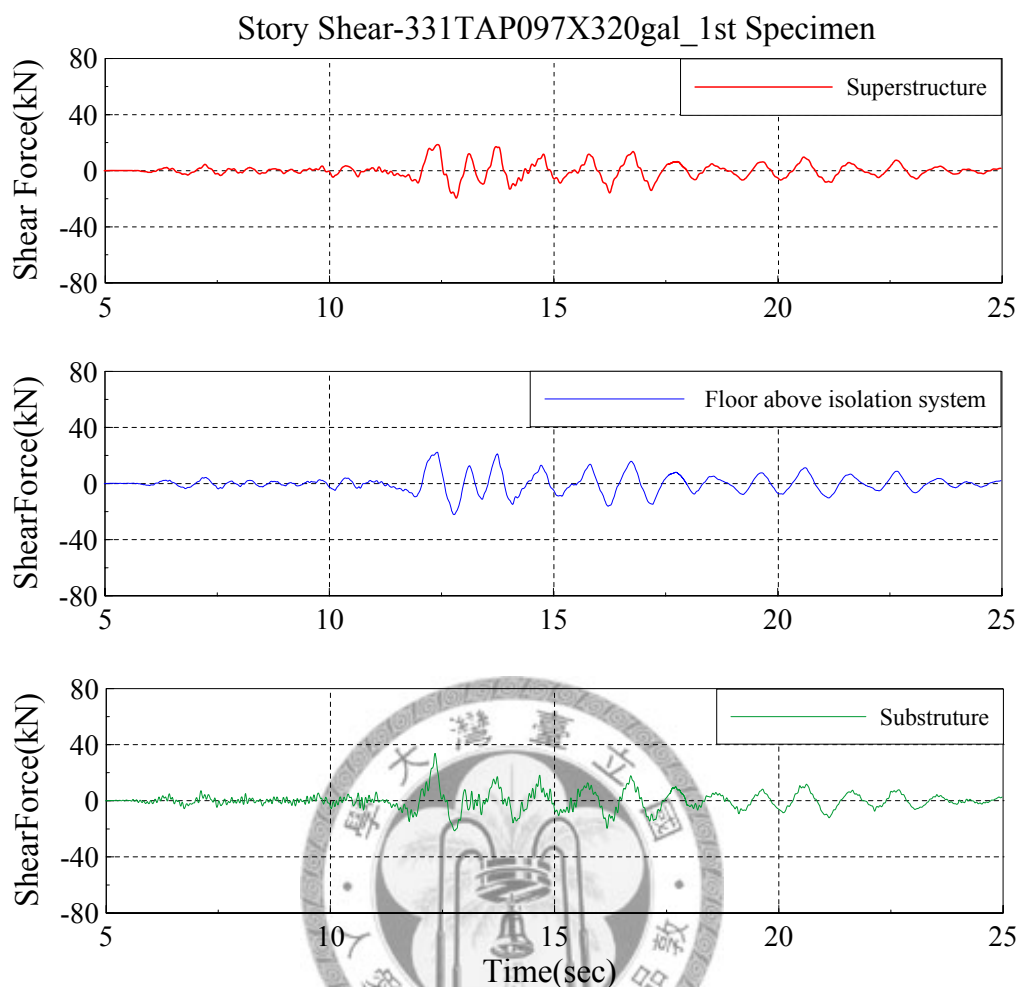


圖 4.2.37 第一組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

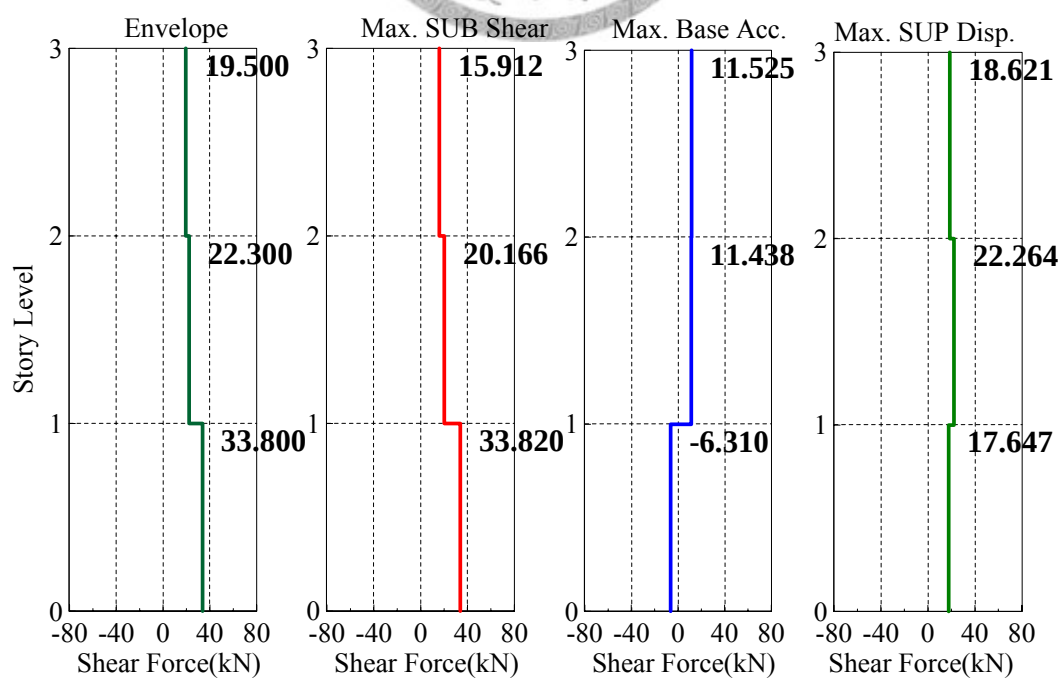


圖 4.2.38 第一組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

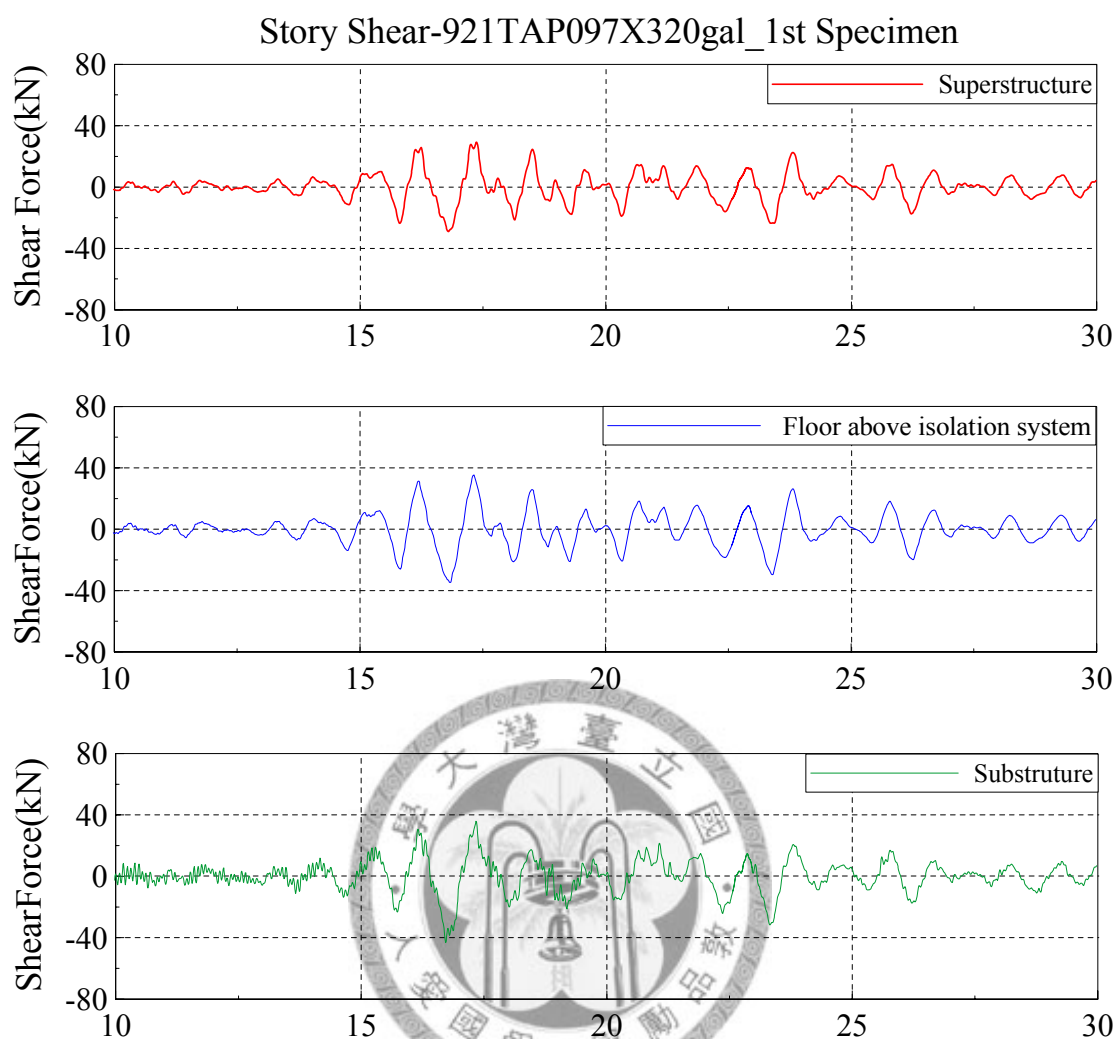


圖 4.2.39 第一組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

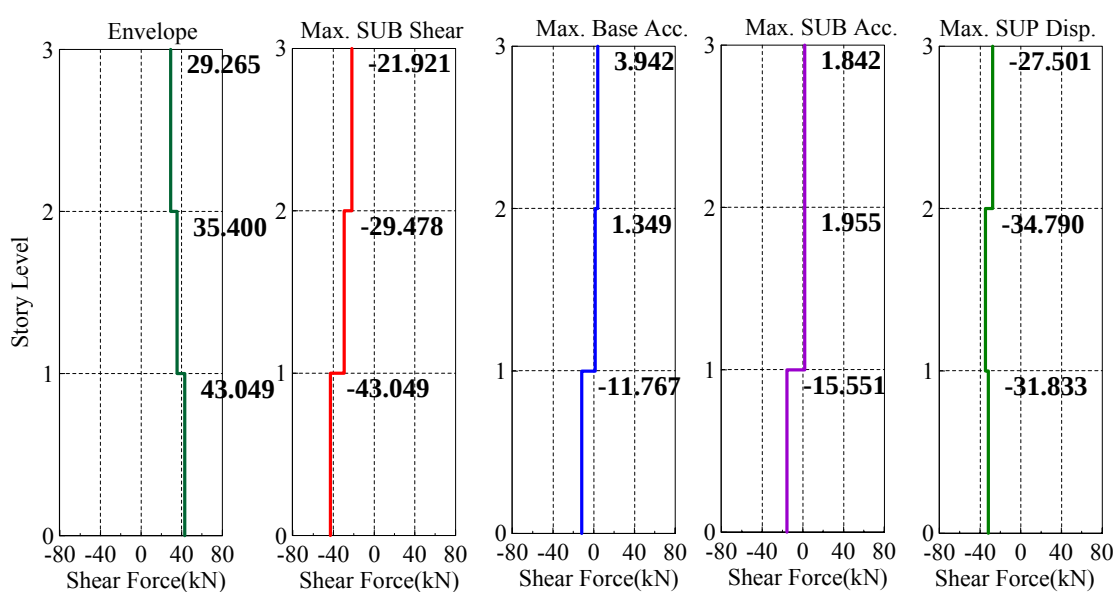


圖 4.2.40 第一組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

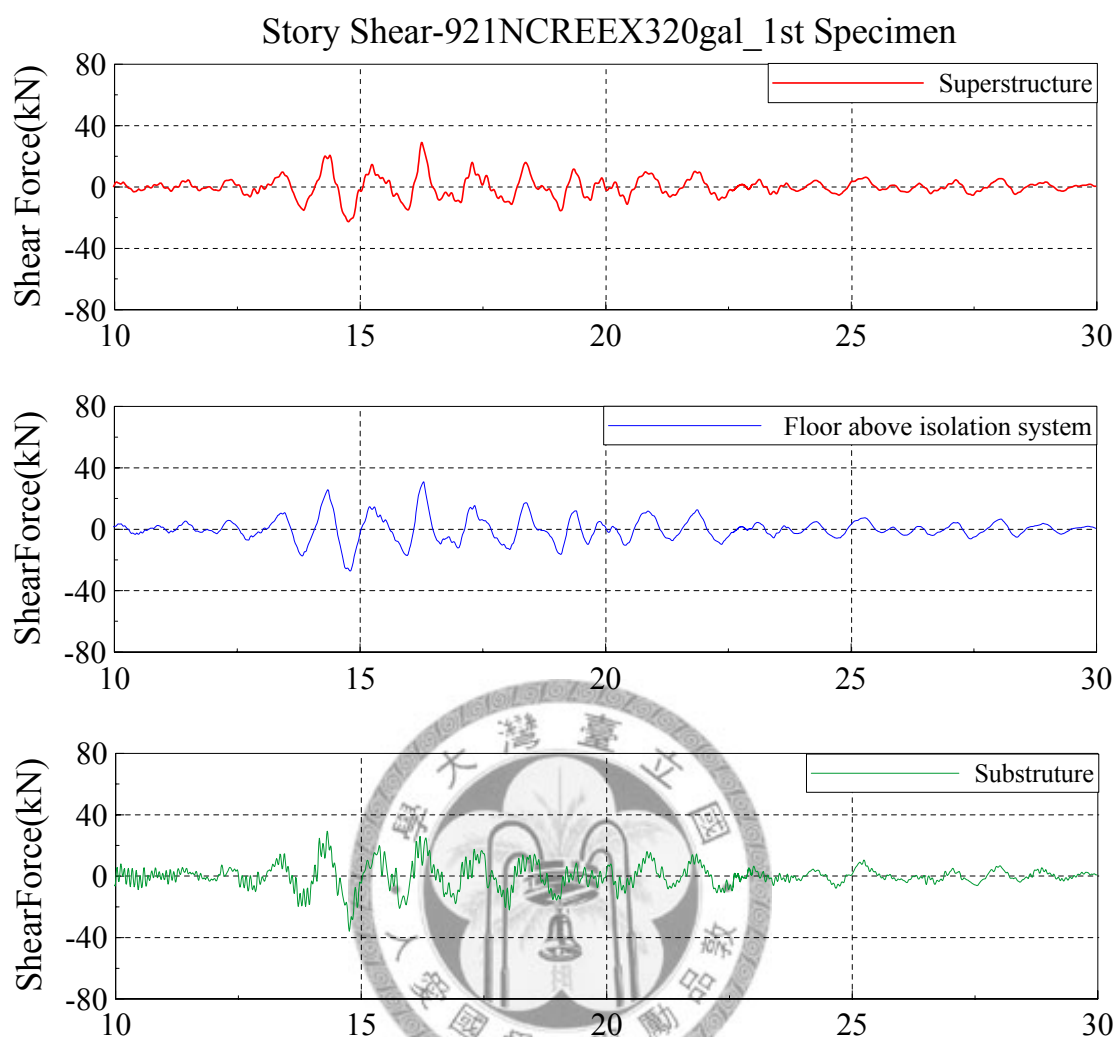


圖 4.2.41 第一組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應

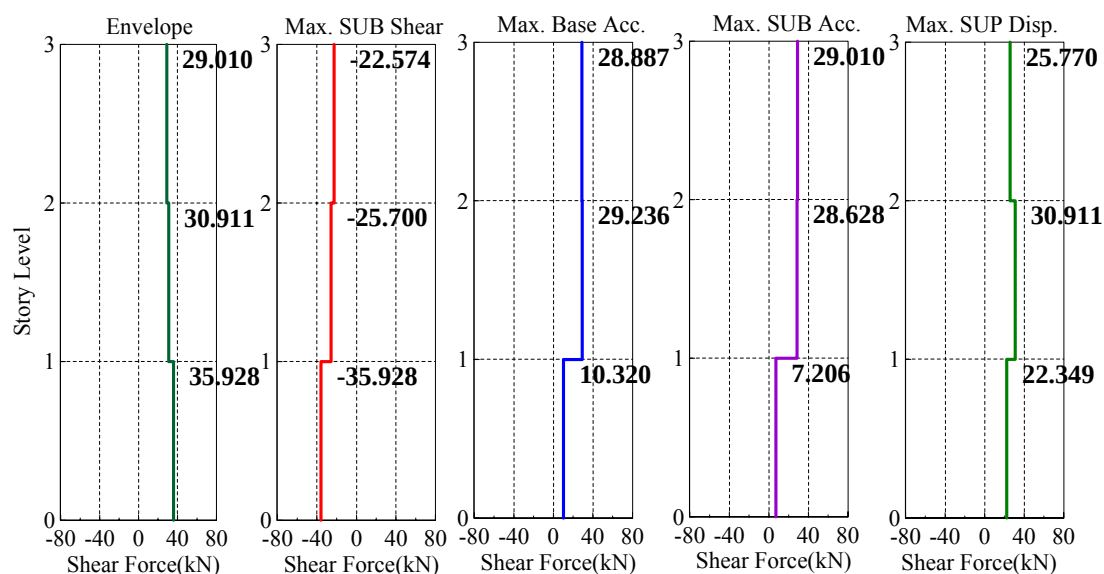


圖 4.2.42 第一組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

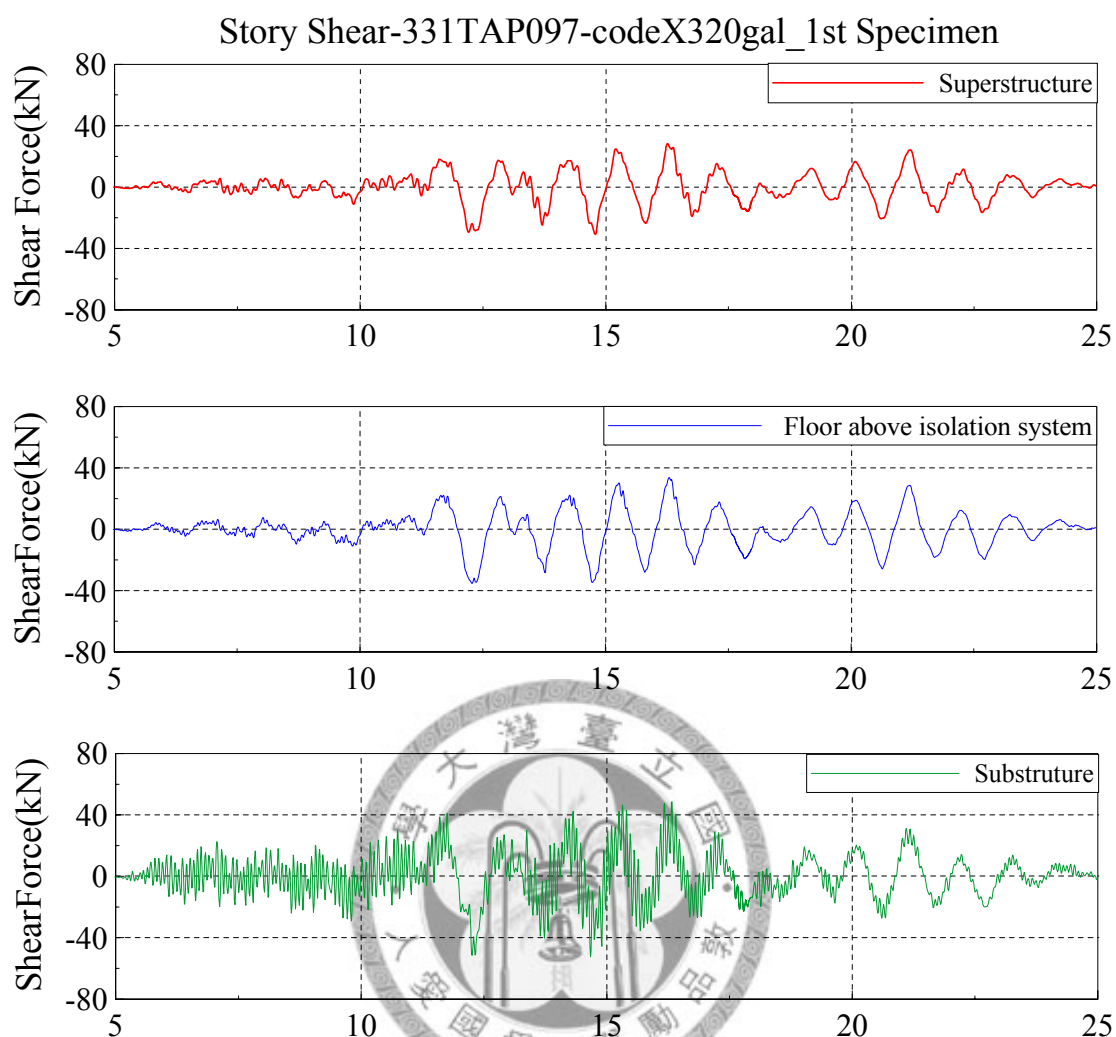


圖 4.2.43 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應

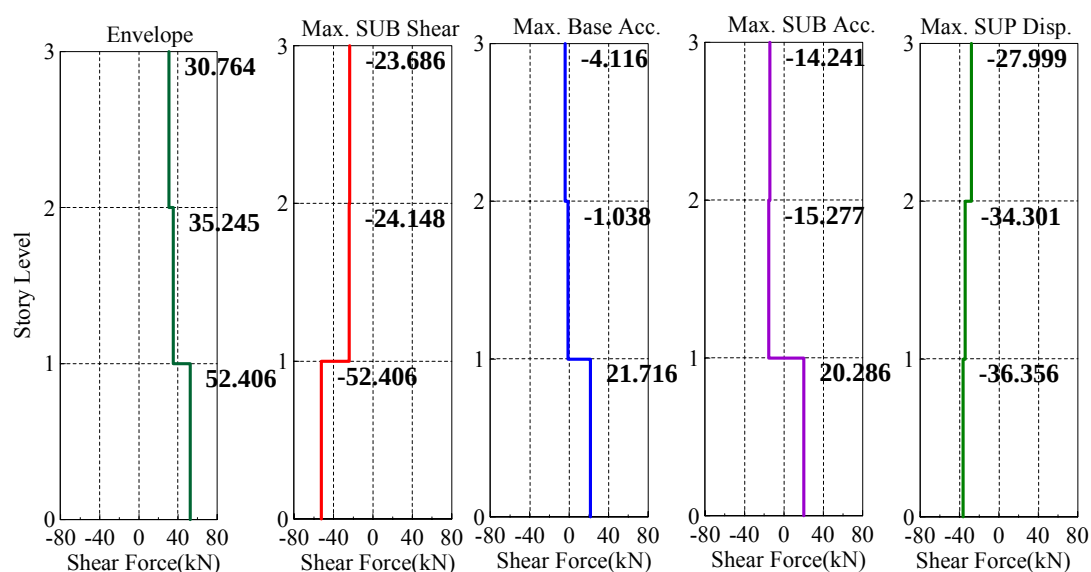


圖 4.2.44 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

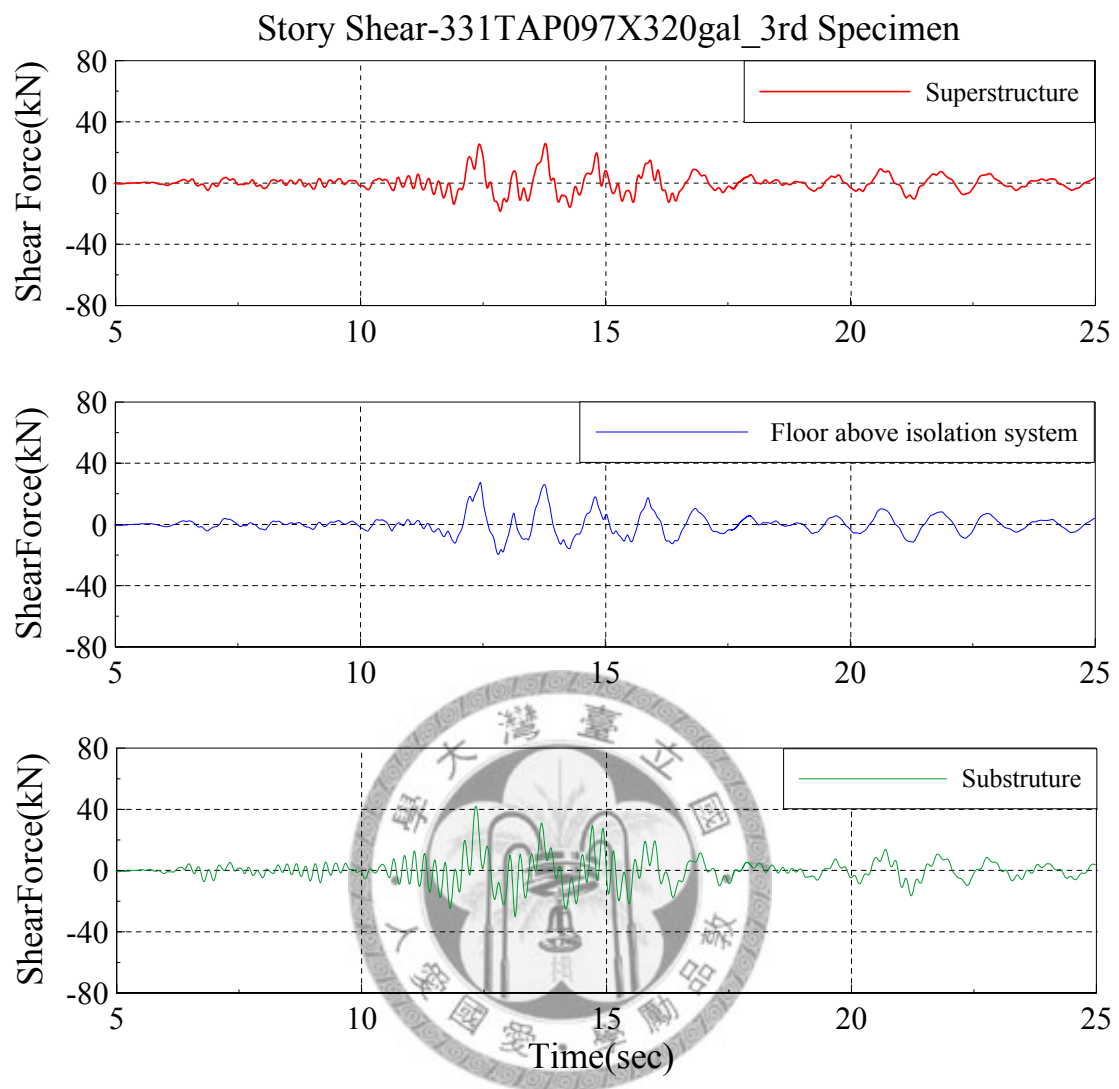


圖 4.2.45 第三組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

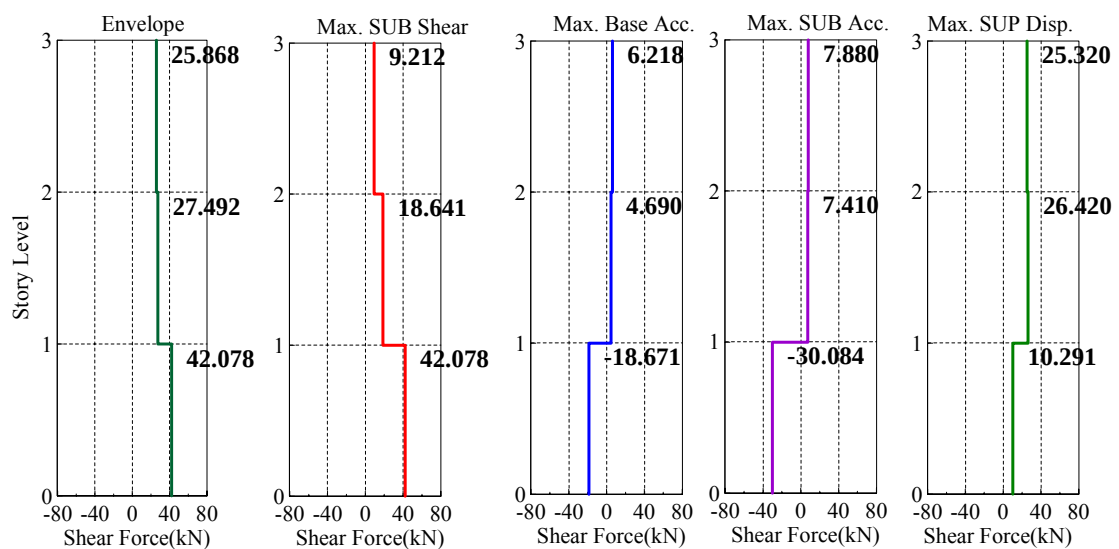


圖 4.2.46 第三組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

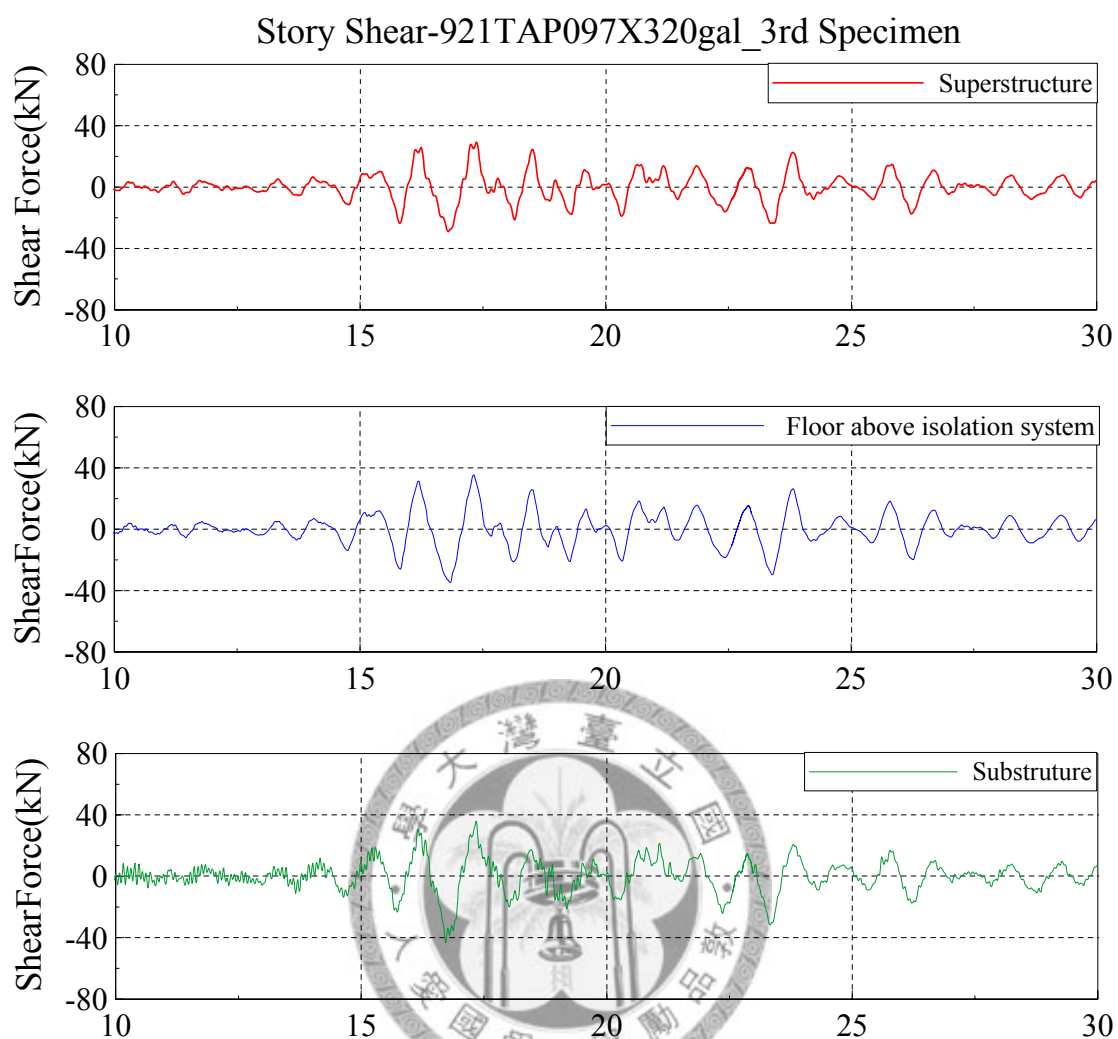


圖 4.2.47 第三組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

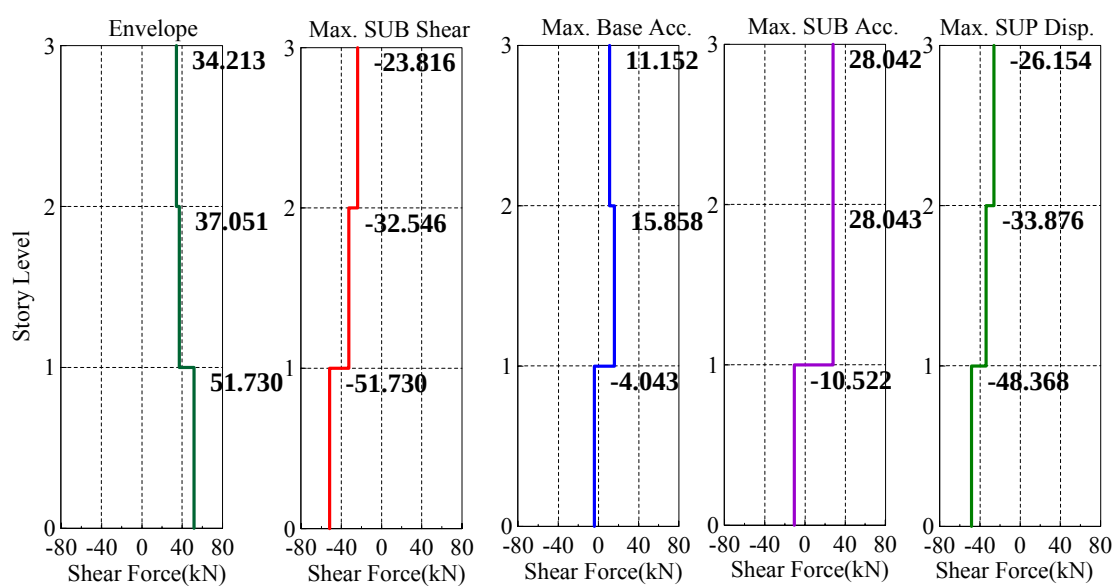


圖 4.2.48 第三組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

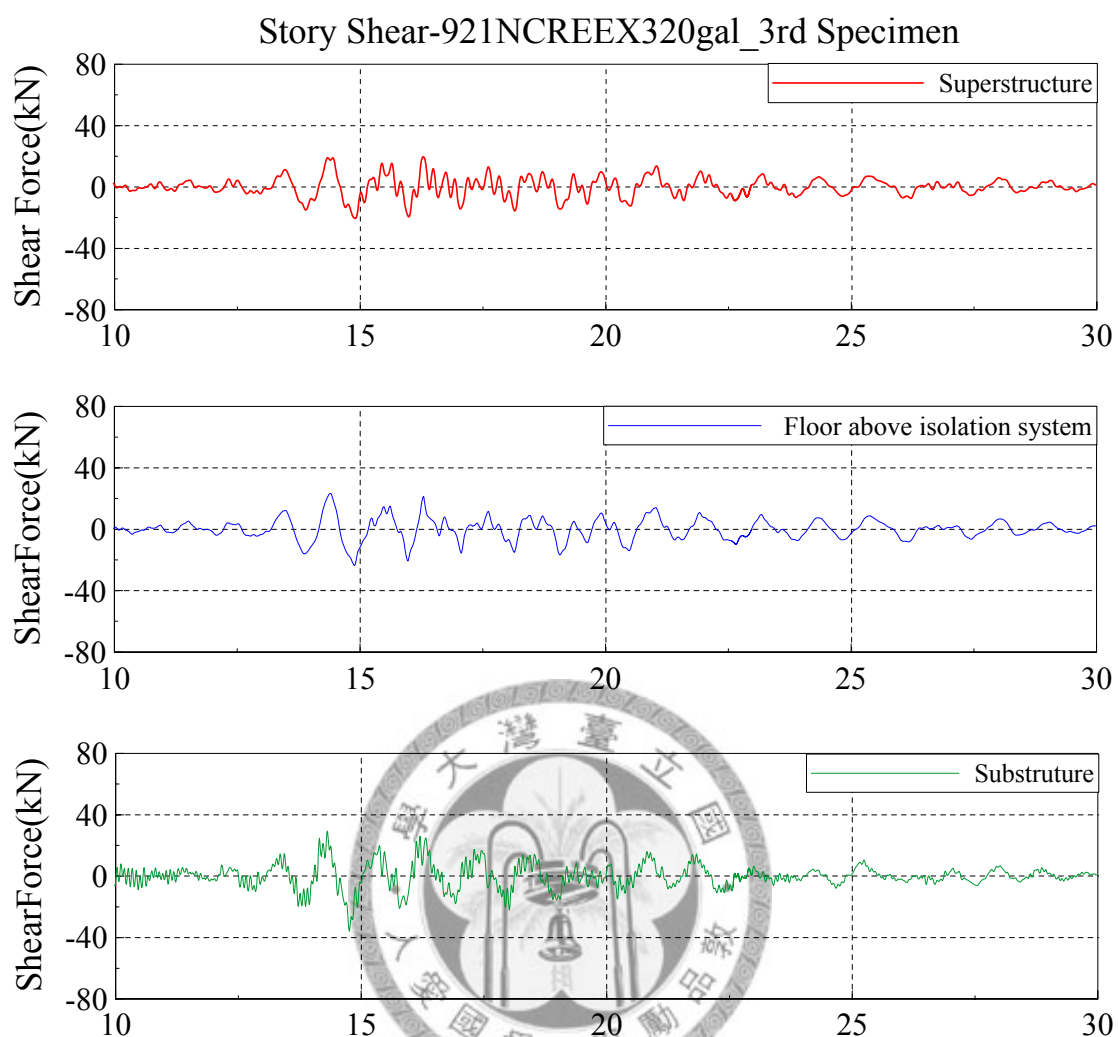


圖 4.2.49 第三組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應

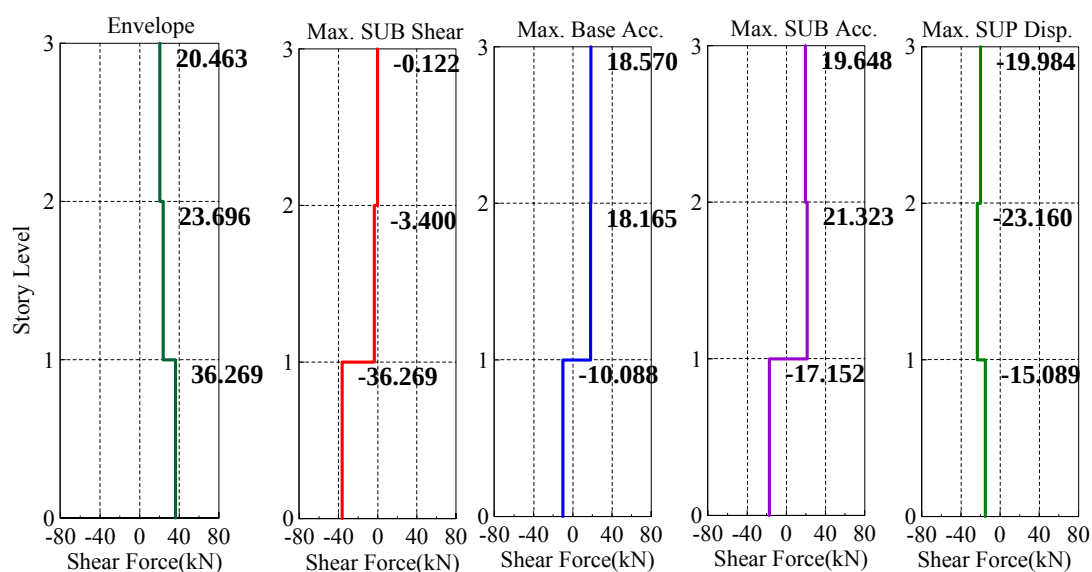


圖 4.2.50 第三組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

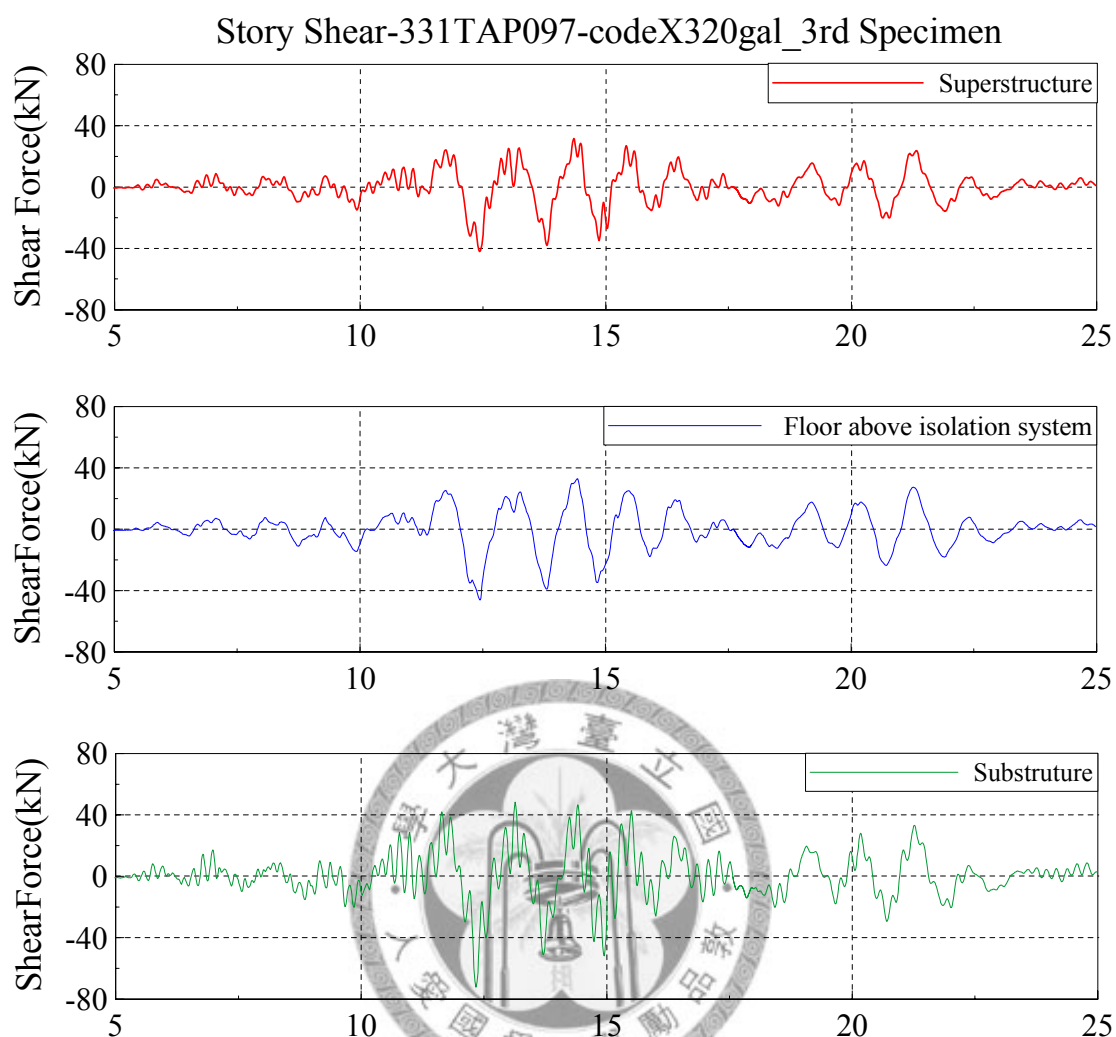


圖 4.2.51 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應

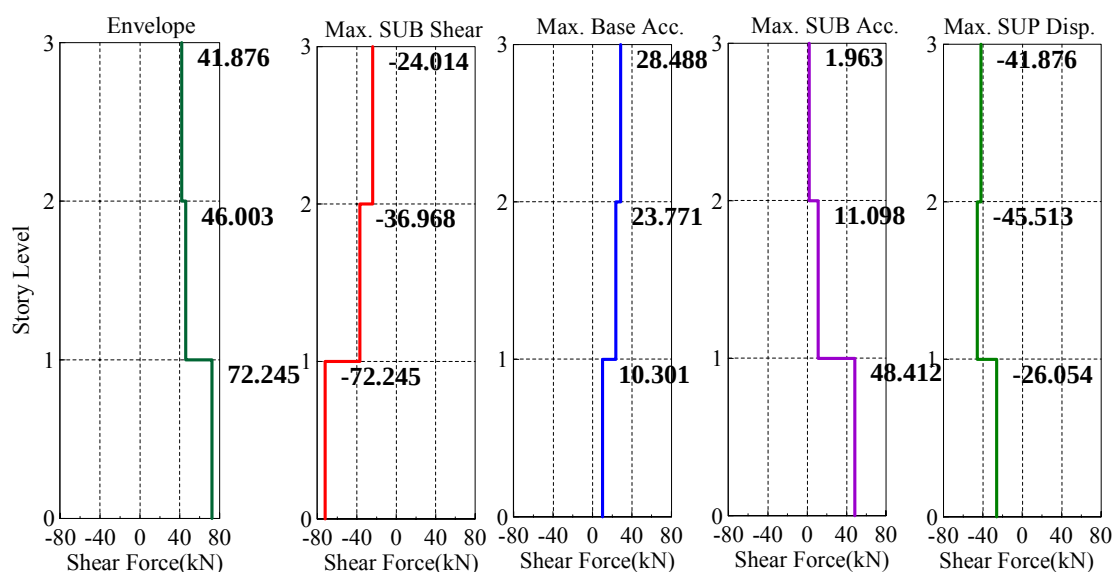


圖 4.2.52 第三組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

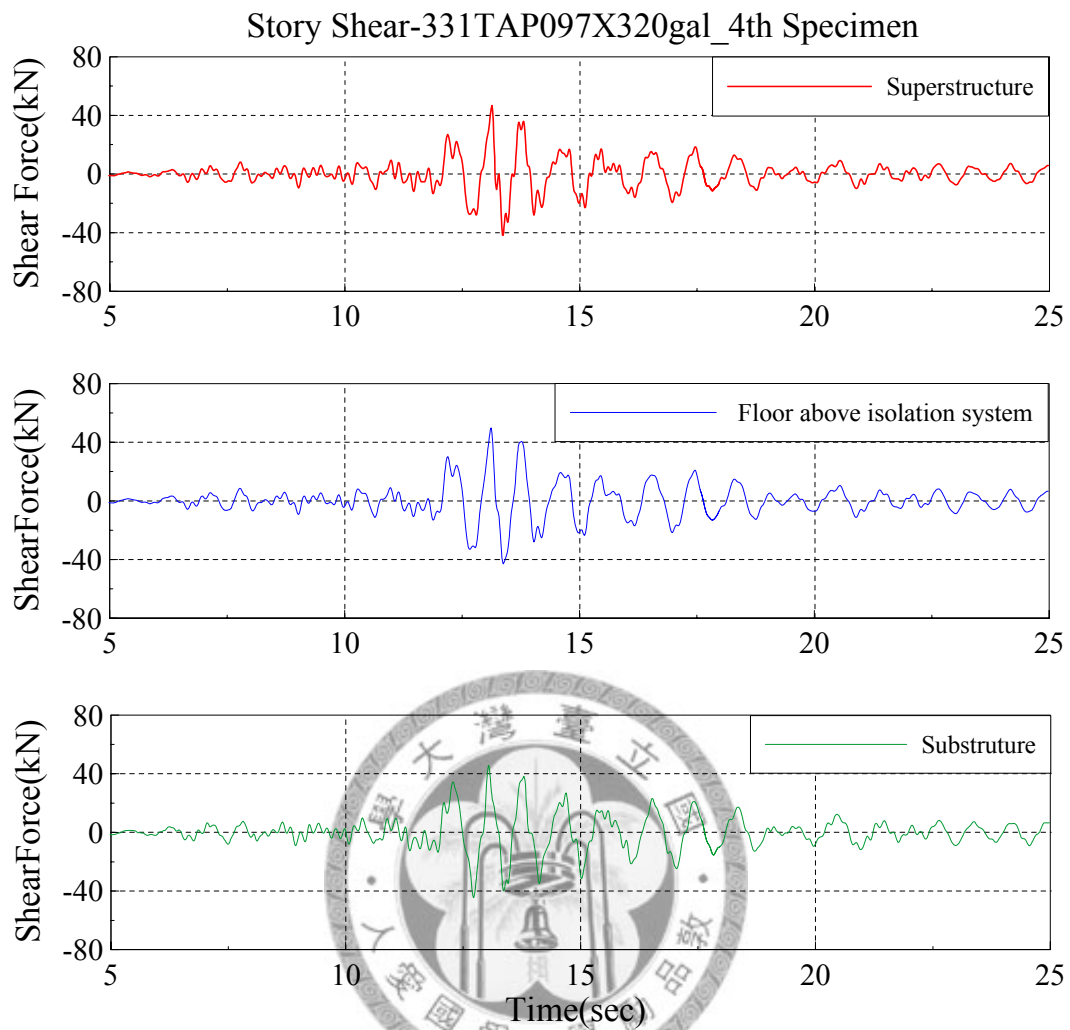


圖 4.2.53 第四組試體於 331TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

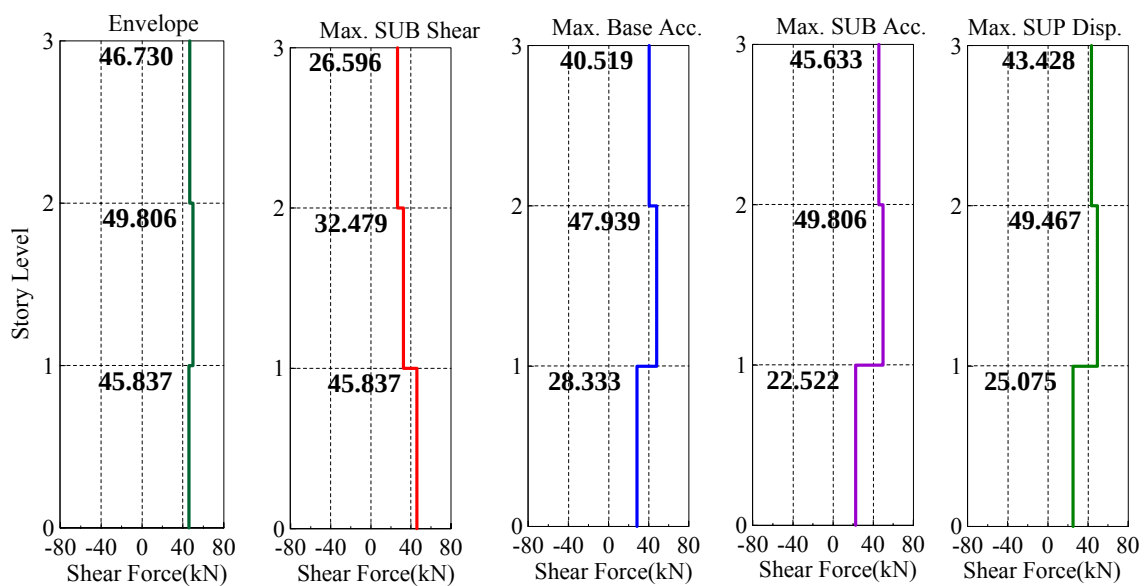


圖 4.2.54 第四組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

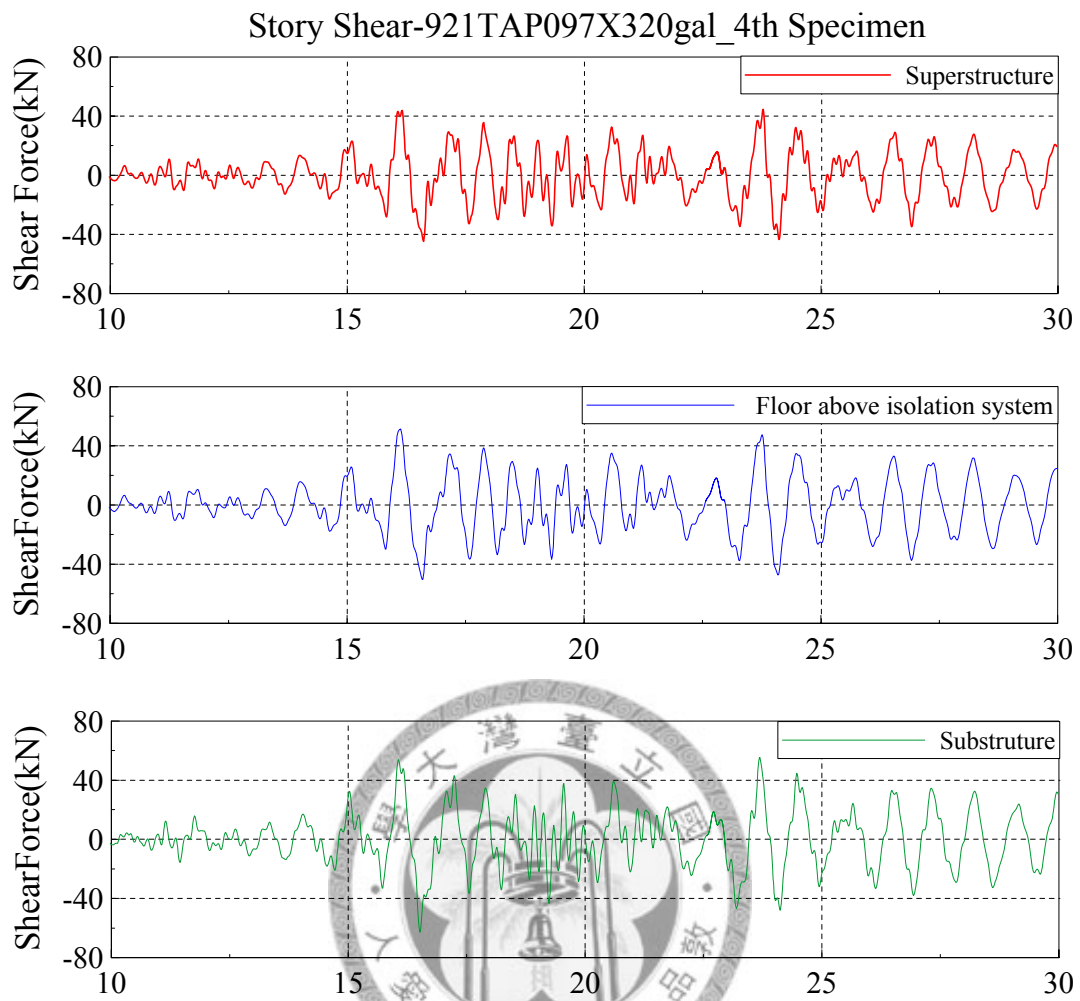


圖 4.2.55 第四組試體於 921TAP097X320gal 下各樓層剪力反應

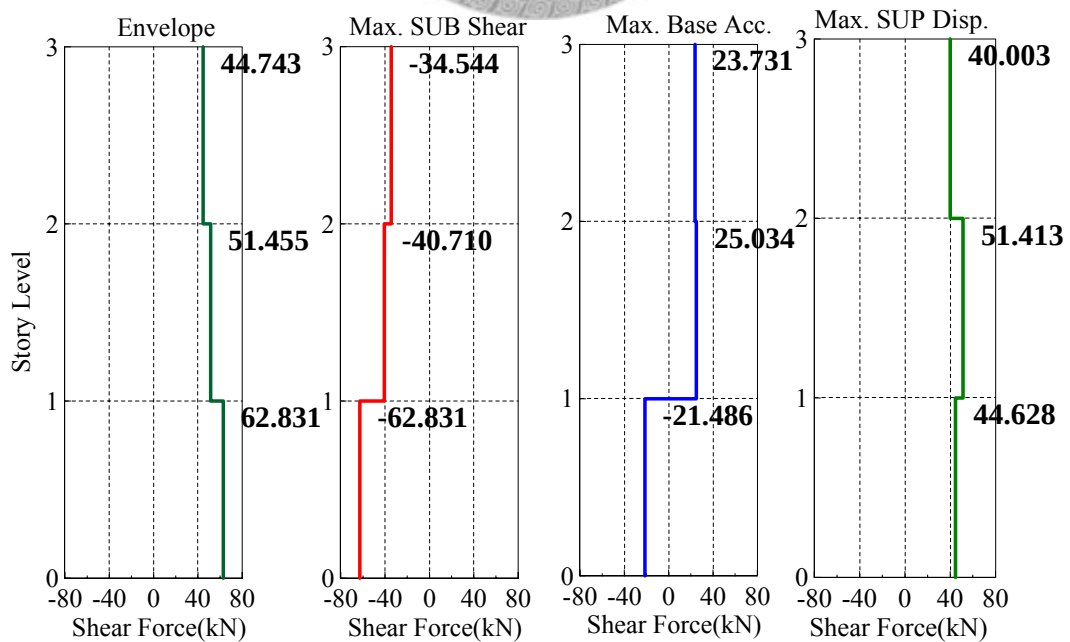


圖 4.2.56 第四組試體於 921TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

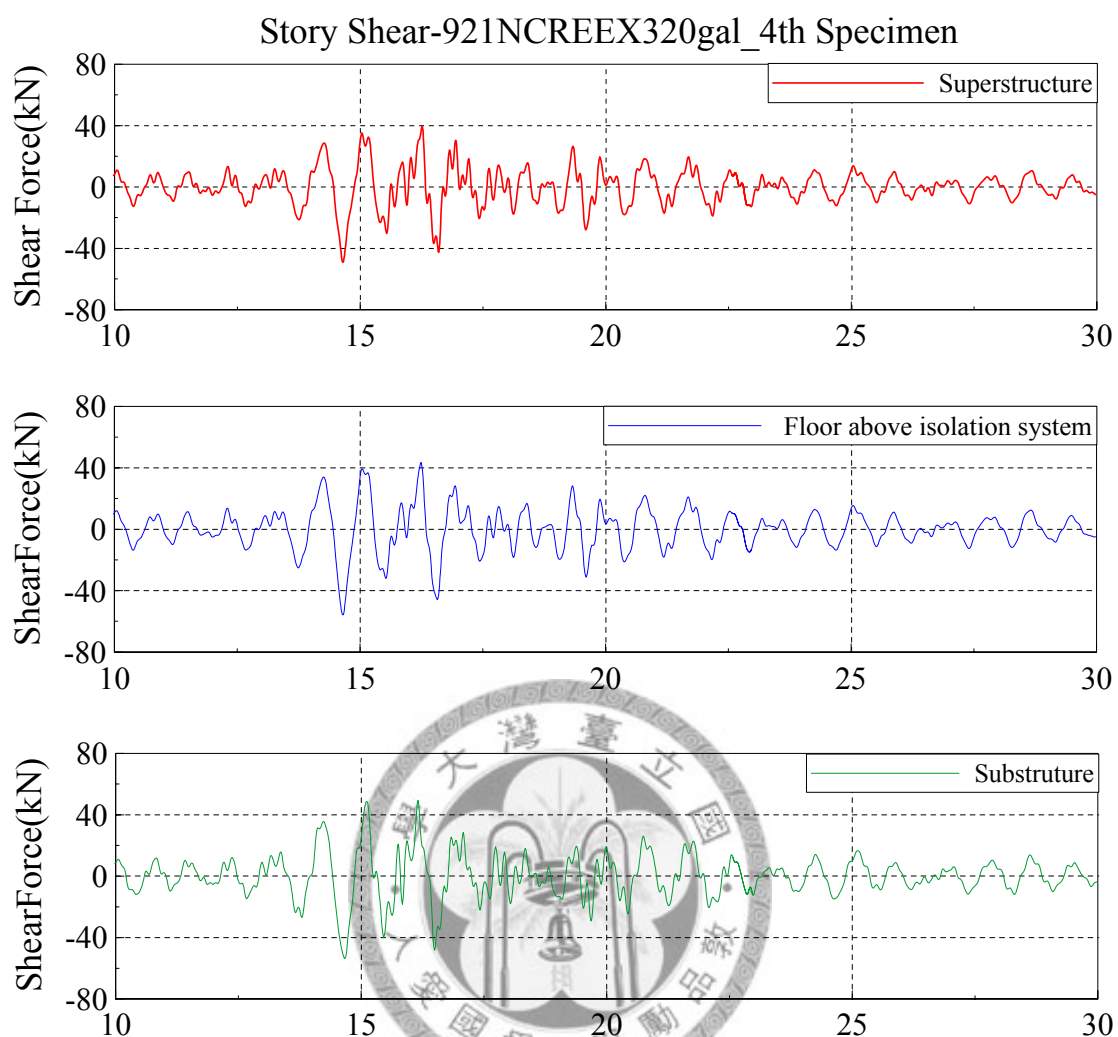


圖 4.2.57 第四組試體於 921NCREEX320gal 下各樓層剪力反應

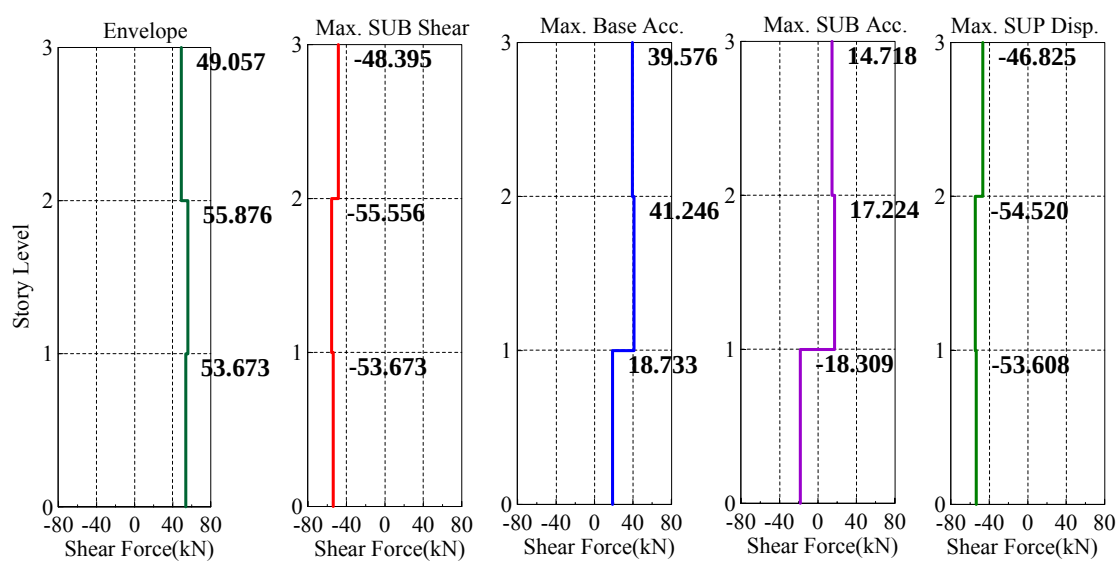


圖 4.2.58 第四組試體於 921NCREEX320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

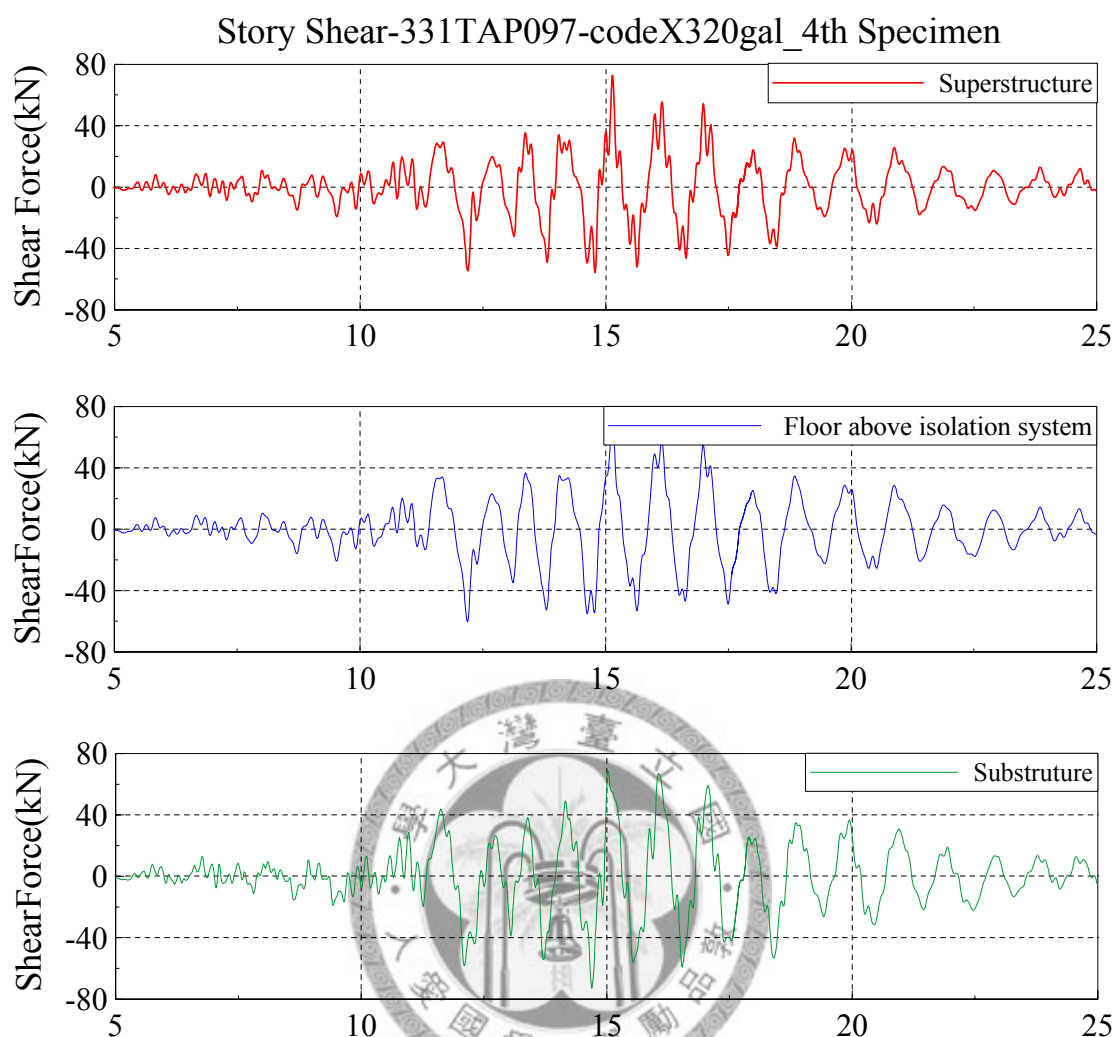


圖 4.2.59 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下各樓層剪力反應

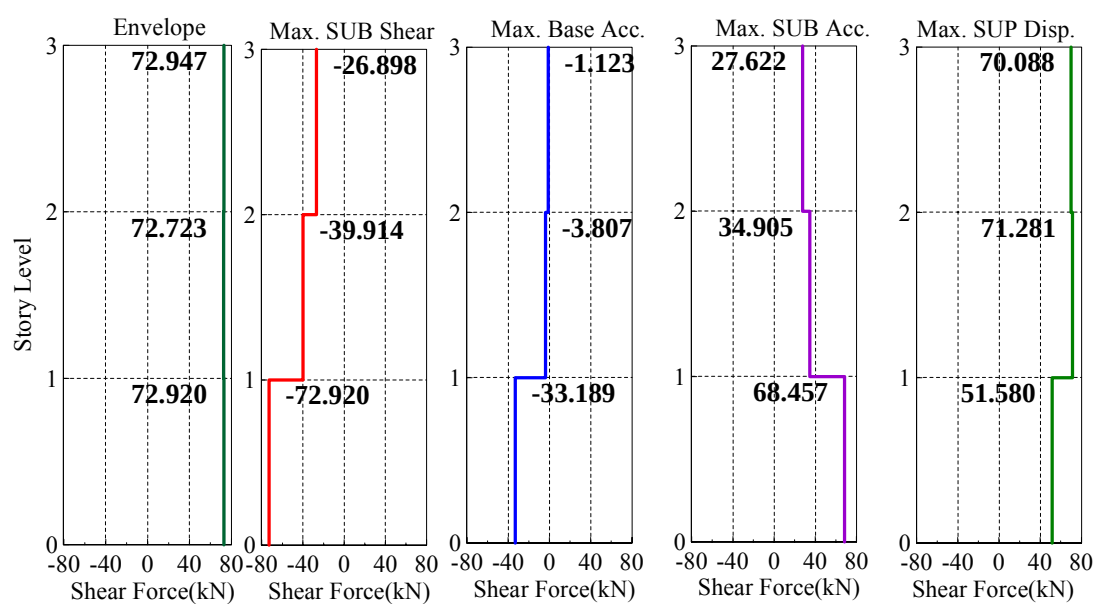


圖 4.2.60 第四組試體於 331TAP097X320gal 下不同時間點之樓層剪力分布

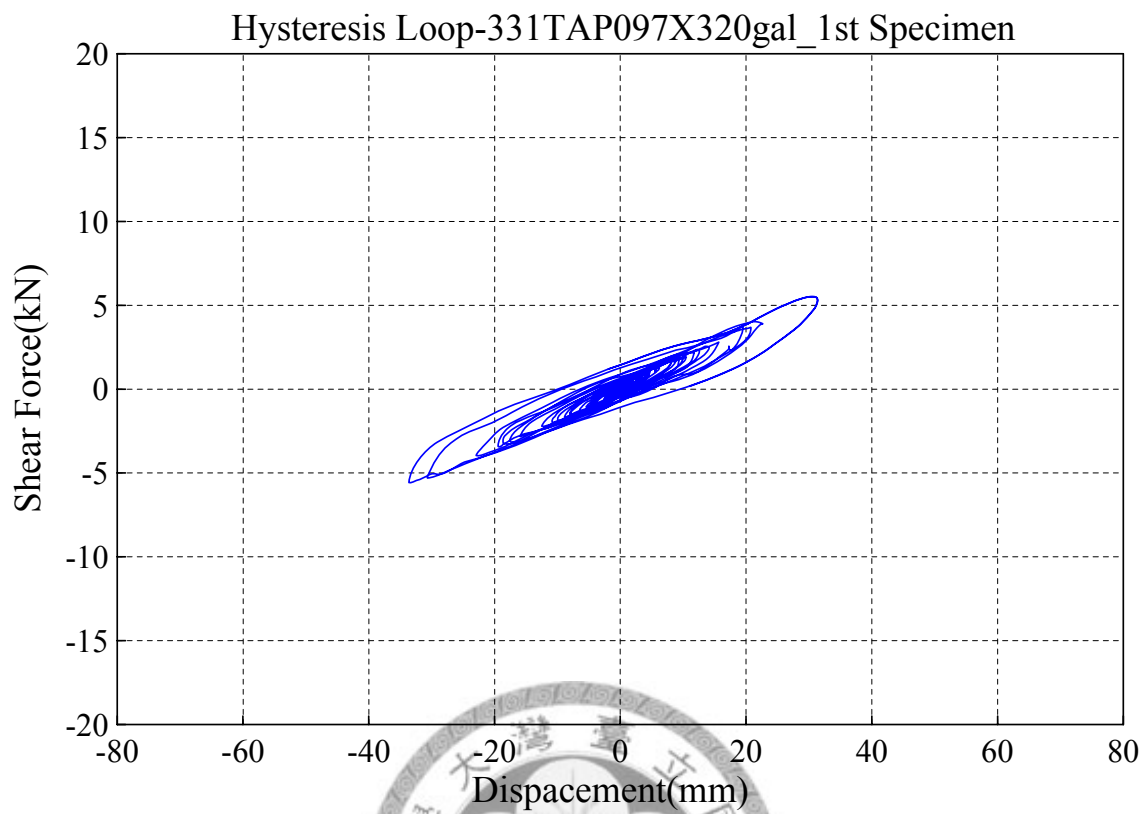


圖 4.2.61 第一組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

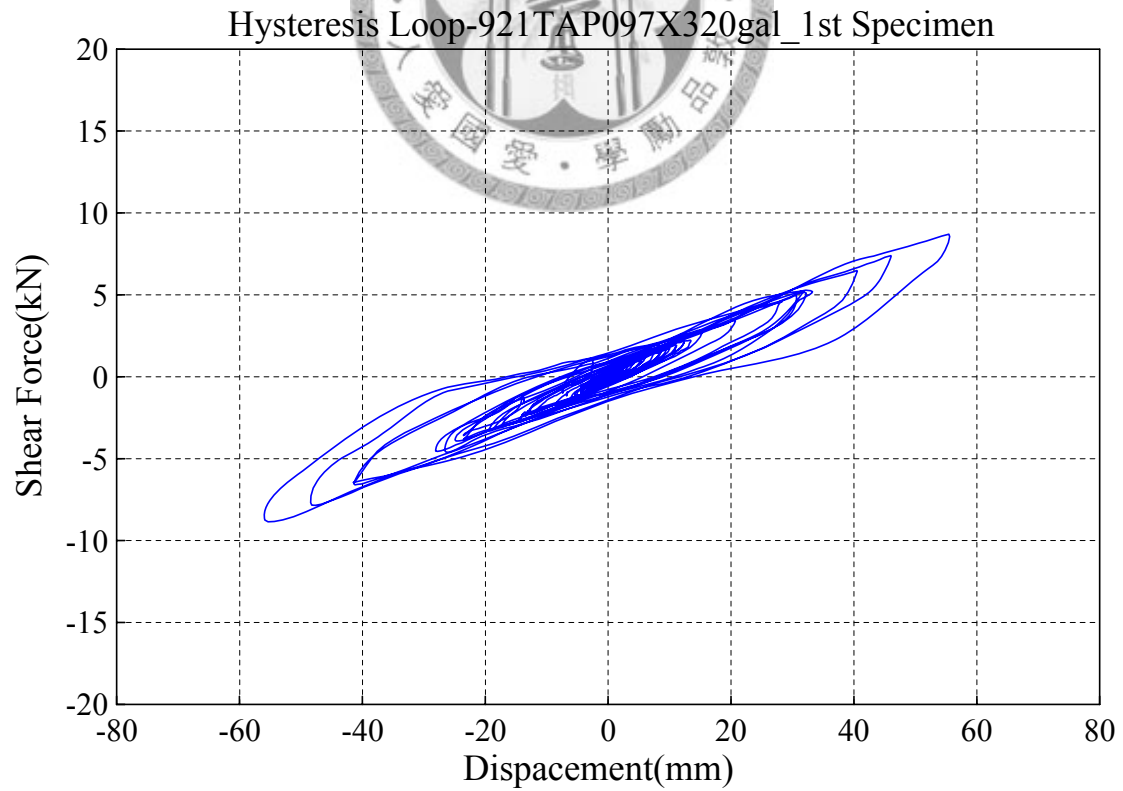


圖 4.2.62 第一組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

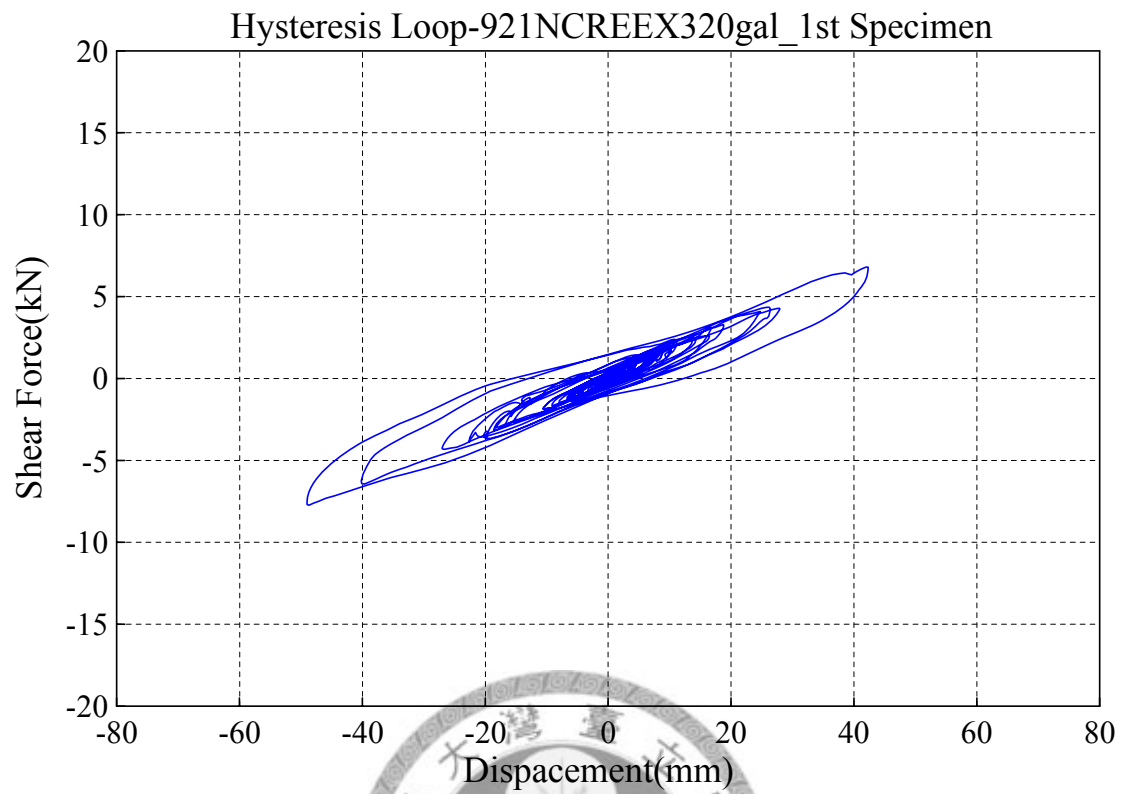


圖 4.2.63 第一組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈

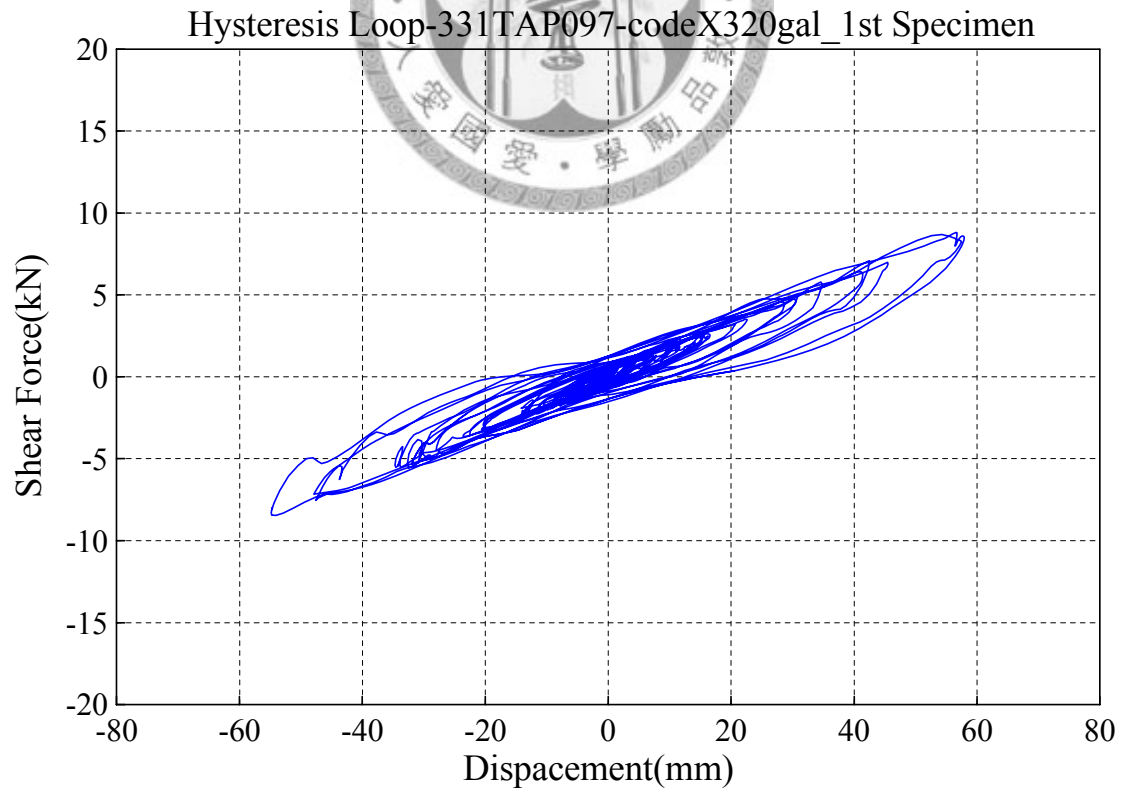


圖 4.2.64 第一組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈

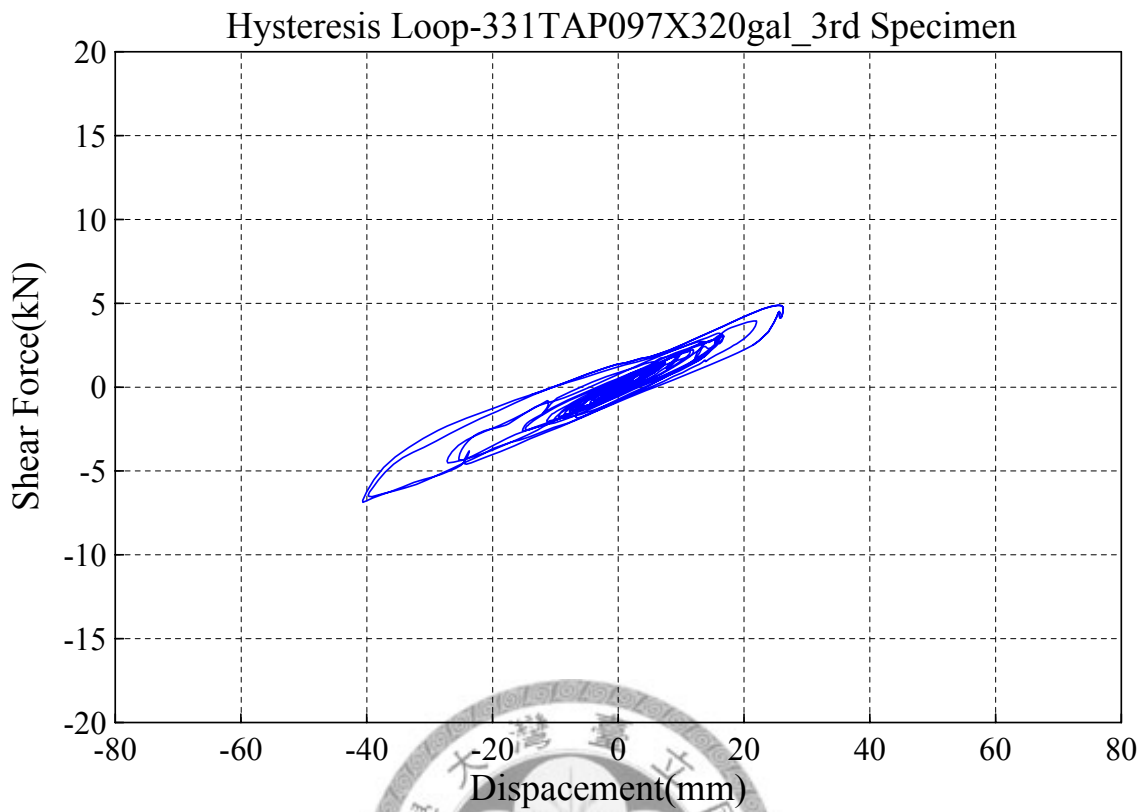


圖 4.2.65 第三組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

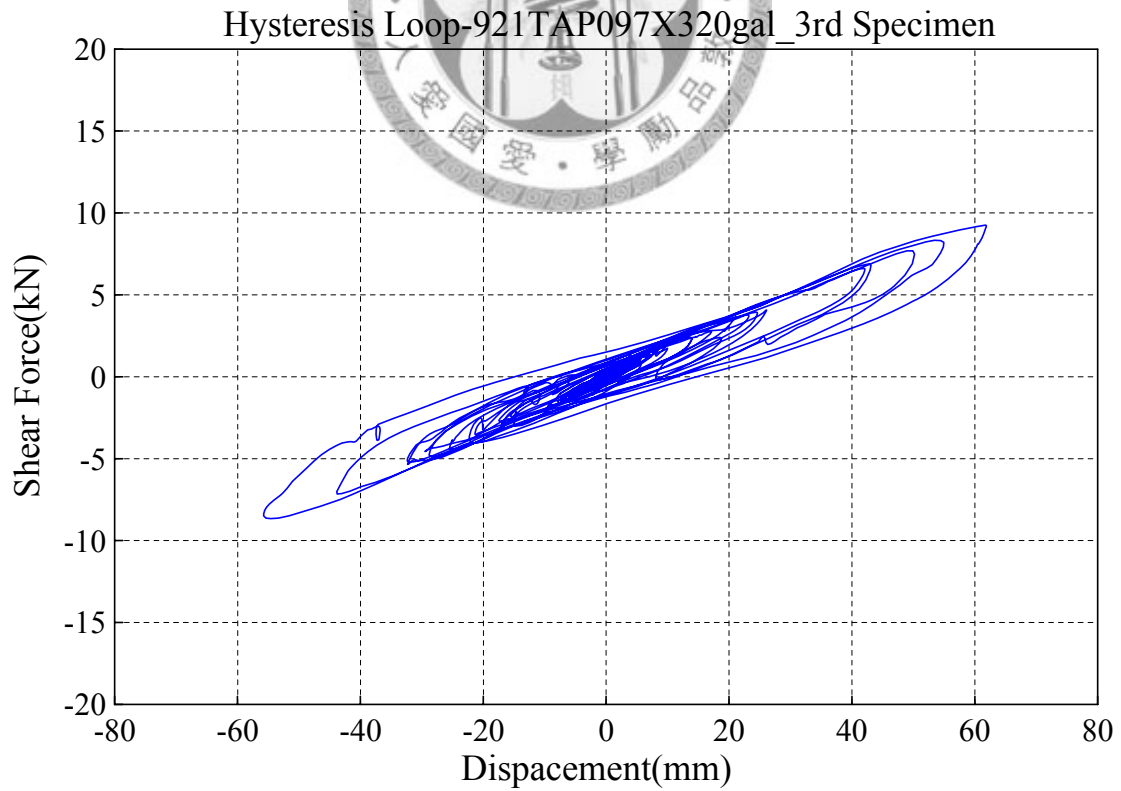


圖 4.2.66 第三組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

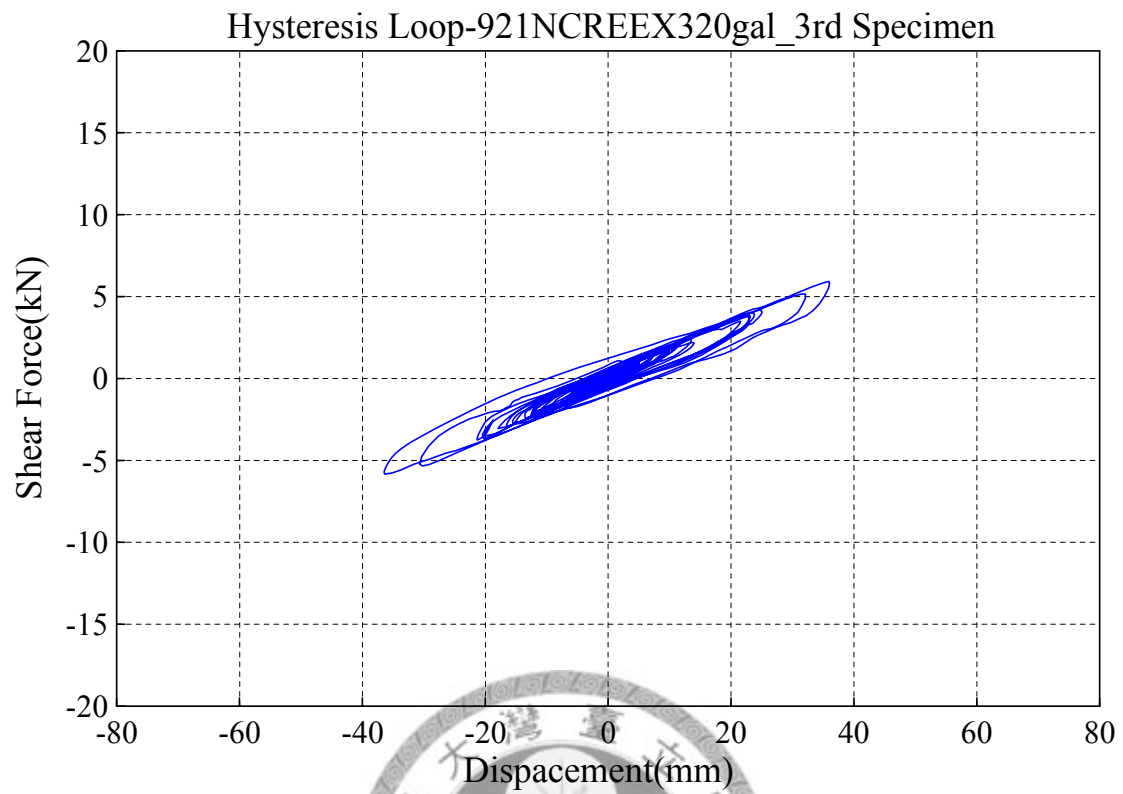


圖 4.2.67 第三組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈

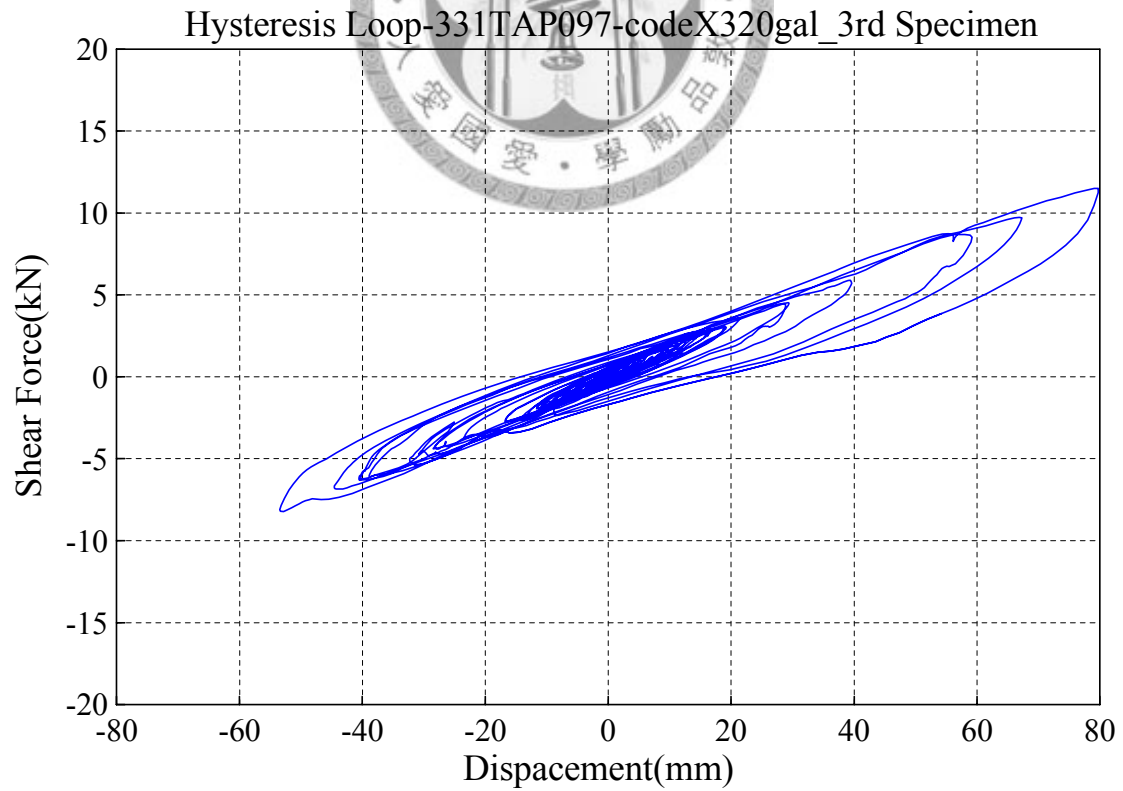


圖 4.2.68 第三組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈

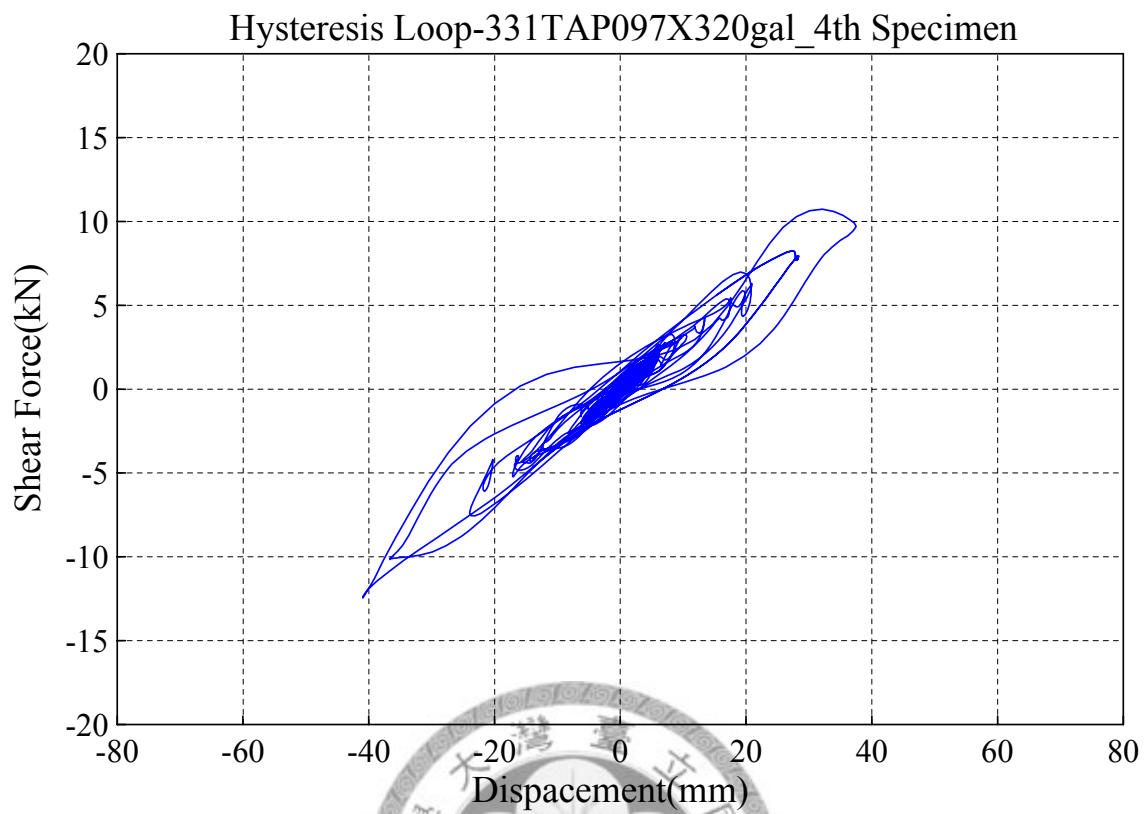


圖 4.2.69 第四組試體於 331TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

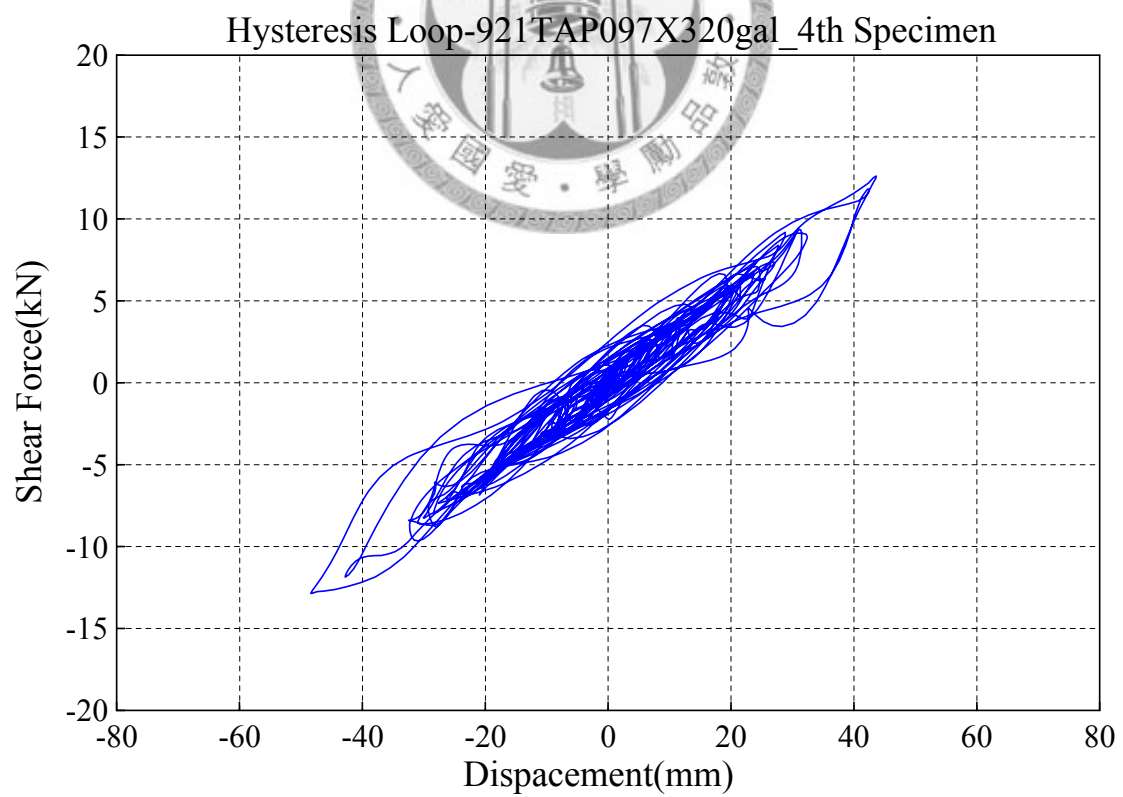


圖 4.2.70 第四組試體於 921TAP097X320gal 下之遲滯迴圈

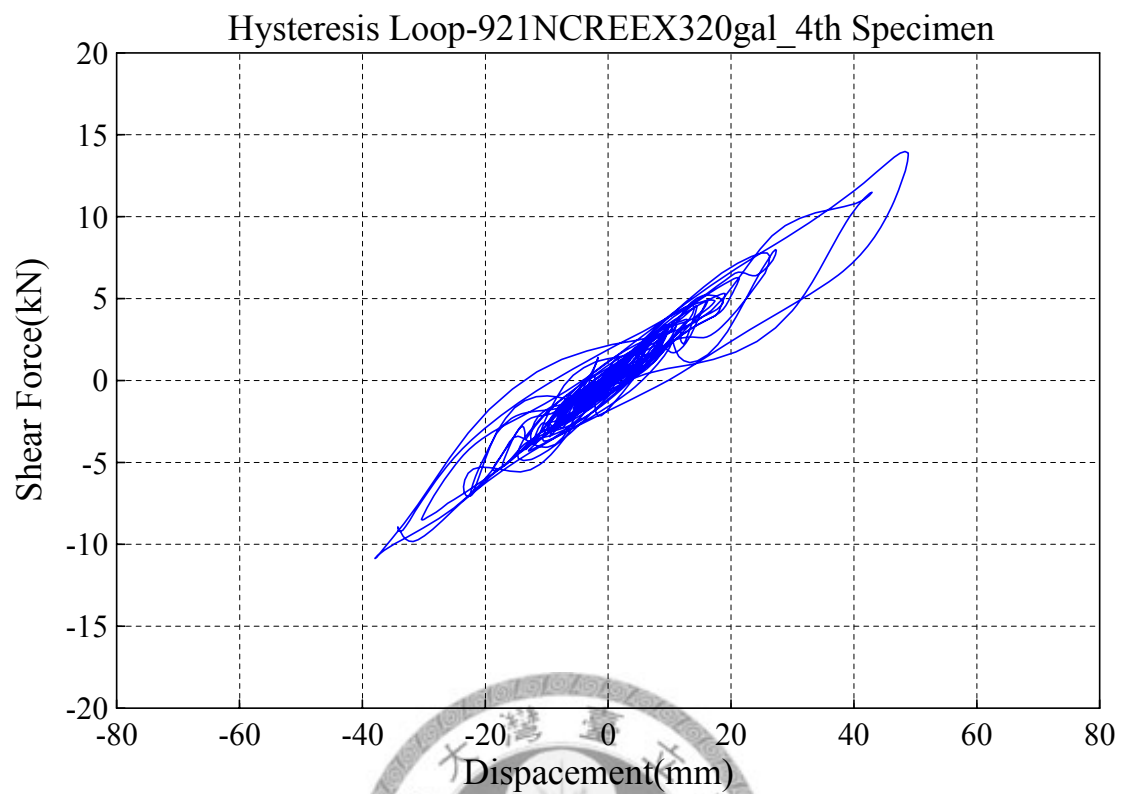


圖 4.2.71 第四組試體於 921NCREEX320gal 下之遲滯迴圈

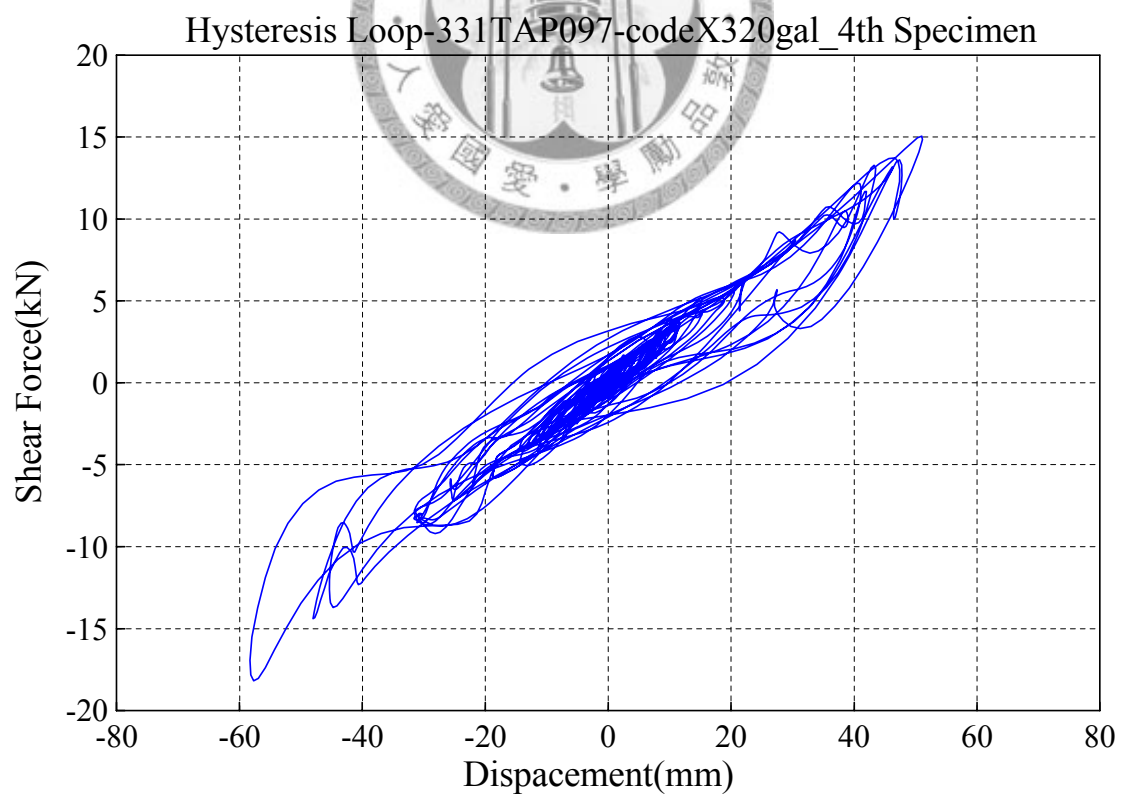


圖 4.2.72 第四組試體於 331TAP097-codeX320gal 下之遲滯迴圈

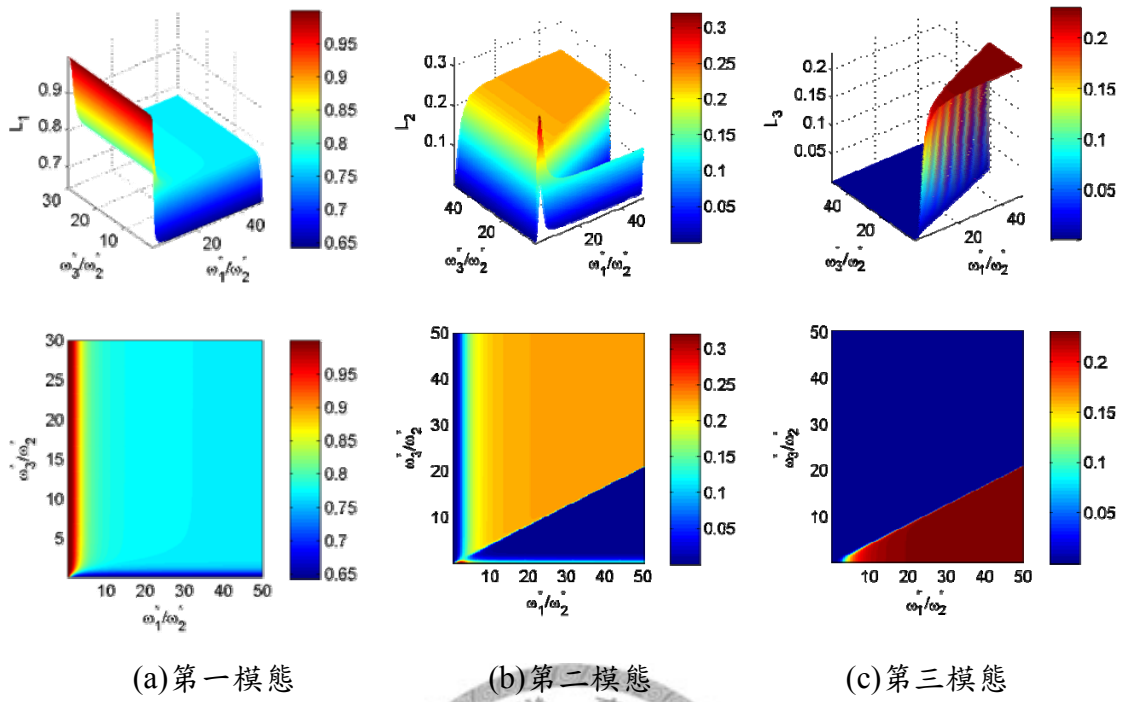


圖 4.3.1 第一組與第三組試體各模態之模態質量參與因子($m_1/m_2=1.7$, $m_3/m_1=4.7$)

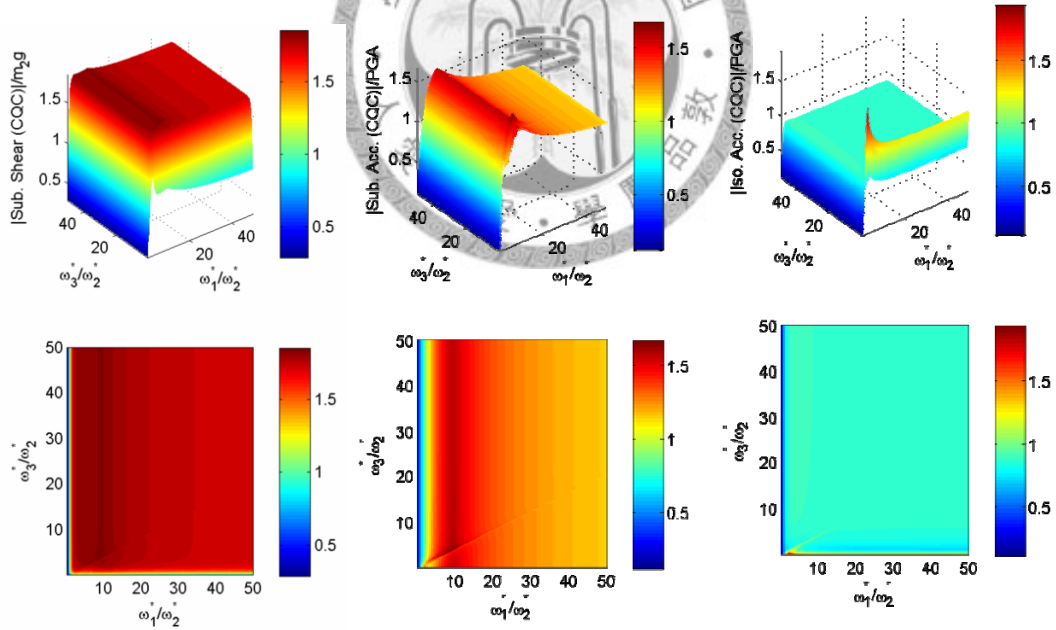


圖 4.3.2 第一組與第三組試體結構反應($m_1/m_2=1.7$, $m_3/m_1=4.7$)

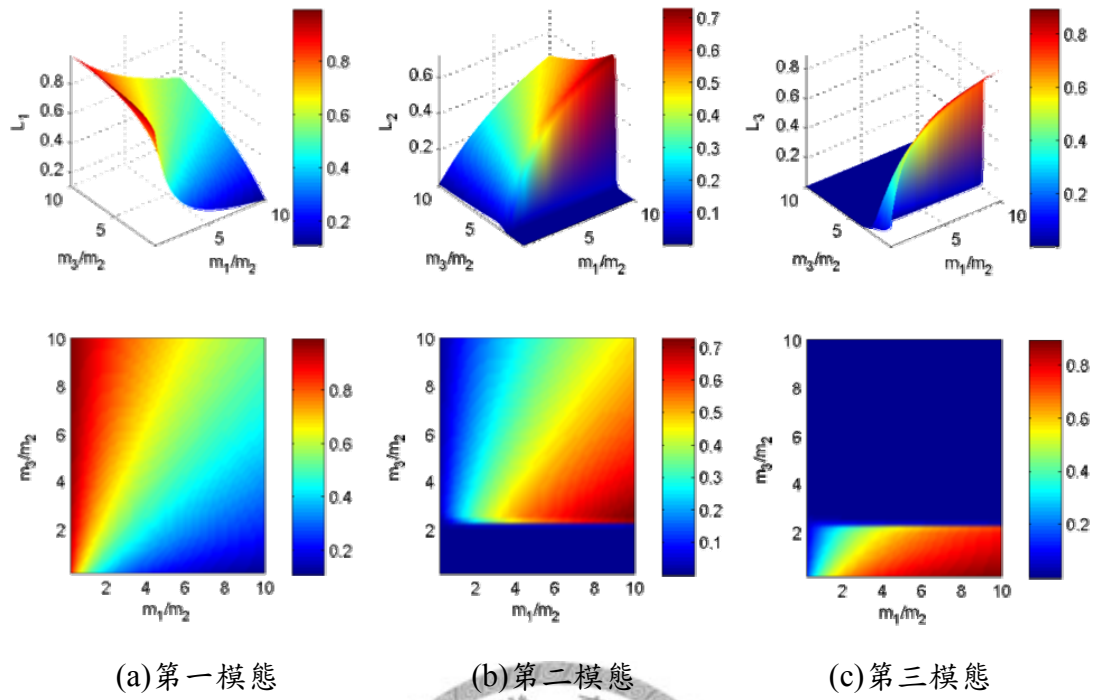


圖 4.3.3 第四組試體各模態之模態質量參與因子($\omega_1^*/\omega_2^*=11$, $\omega_3^*/\omega_2^*=6$)

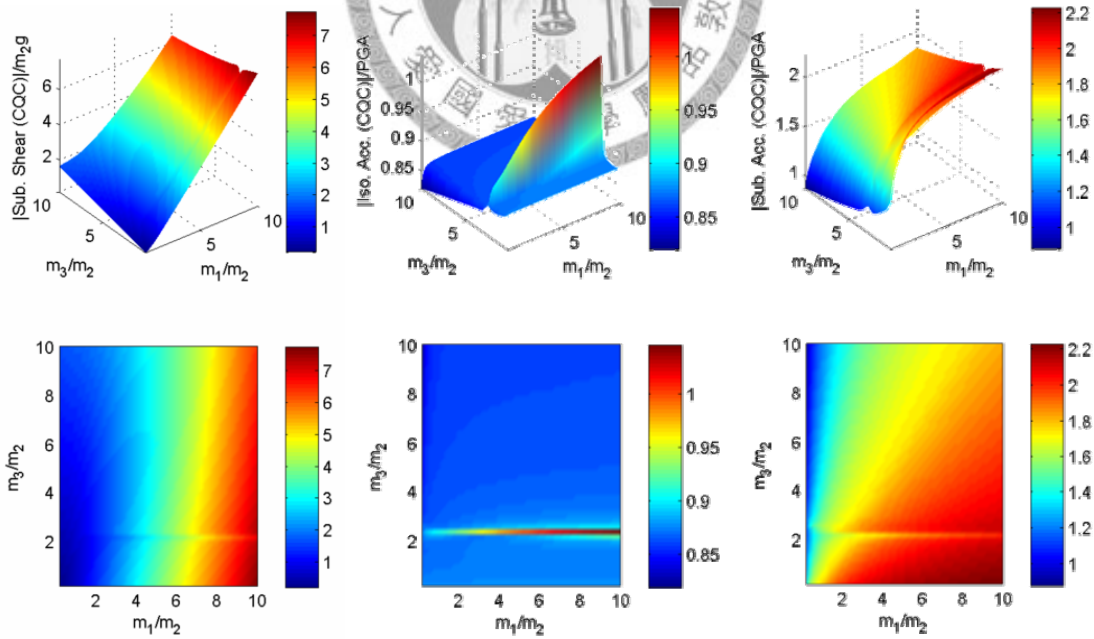


圖 4.3.4 第四組試體結構反應($\omega_1^*/\omega_2^*=11$, $\omega_3^*/\omega_2^*=6$)

第五章 數值模擬

本章以工程實務上經常使用之 SAP 與 MIDAS 兩種商業分析軟體，建立中間層隔震縮尺振動台結構模型，並輸入鉛心橡膠支承之彈性勁度、降伏強度與降伏後勁度比以模擬其力學行為，輸出反應包含結構模型之位移、加速度歷時反應與鉛心橡膠支承之受力與位移遲滯迴圈，同時與振動台試驗結果進行比較。

5.1 數值模擬模型

圖 5.1.1 與圖 5.1.2 分別為 SAP 與 MIDAS 兩種商業分析軟體建立之結構數值模擬模型，斷面尺寸與材料特性之設定與試驗構架相同(見章節 3.2)，在質量配置方法上，SAP 是以平均載重均勻施載於剛性樓板上，MIDAS 則是將施載於剛性樓板上之平均載重計算分配至梁上。

在 LRB 之模擬方面，程式需輸入兩個水平向與一個垂直向力學參數，水平向給定彈性勁度、降伏強度與降伏後勁度比之 LRB 雙線性力學參數，而垂直向僅需給定一垂直彈性勁度，其通常可估計為 300 倍之水平等效勁度。在參數給定值方面，原先欲使用結構元件測試結果值，但經分析後發現其模擬結果與振動台試驗結果有相當大之差異，在檢討振動台試驗之鉛心橡膠支承受力與位移遲滯迴圈後，決定取四組歷時 X 向 320gal 試驗結果之遲滯迴圈作為估算 LRB 相關力學參數，以迴歸後之平均值輸入分析軟體中進行模擬，如表 5.1.1 所示，其中第一組與第三組試體之 LRB 遲滯行為相近，因此使用參數一，第四組試體之 LRB 力學參數則使用參數二。

5.2 模擬分析結果

在模態分析方面，SAP 與 MIDAS 以等效勁度模擬得到前三模態週期與模態質量參與因子(如表 5.2.1 與表 5.2.2)，可得知兩種商業分析軟體所得到之分析結果

相近，而與試驗結果識別之結果比較，如表 5.2.3 至 5.2.5 所示，第一組試體第一模態週期與模態質量參與因子最為相近，惟第三模態週期在分析軟體模擬結果上有較大之差異，而第三組與第四組試體模擬結果與試驗結果比較，第二模態與三模態之週期與模態質量參與因子皆有落差。

圖 5.2.1 至圖 5.2.4、圖 5.2.17 至圖 5.2.20 與圖 5.2.33 至圖 5.2.36 分別為第一組試體 LRB 參數以元件測試值模擬之位移、加速度歷時反應與 LRB 之遲滯迴圈比較，在主振段之模擬趨勢上皆有落差，雖然下部結構加速度模擬較為準確，但是隔震層上方樓板與上部結構模擬則有較大之誤差，在位移反應上亦存在誤差，且 LRB 之遲滯迴圈與試驗結果相差甚大，故以下將採用其在振動台試驗結果之平均參數值進行模擬。

圖 5.2.5 至圖 5.2.8、圖 5.2.21 至圖 5.2.24 與圖 5.2.37 至圖 5.2.40 分別為第一組試體 LRB 參數以試驗平均值模擬之位移、加速度歷時反應與 LRB 之遲滯迴圈比較，可發現模擬結果與振動台試驗結果較為相近，在振幅與相位上也較為吻合，此外在加速度部分，上部結構模擬結果振幅差異不大，但部份區段有相位差，隔震層上方樓板模擬結果，相位大致吻合，振幅偏大，下部結構反應模擬結果相當準確，惟在 331TAP097 Code Compatible 歷時下之分析誤差較大，位移相位模擬良好，惟振幅有差距。

圖 5.2.9 至圖 5.2.12、圖 5.2.25 至圖 5.2.28 與圖 5.2.41 至圖 5.2.44 分別為第三組試體 LRB 參數以試驗平均值模擬之位移、加速度歷時反應與 LRB 之遲滯迴圈比較，上部結構加速度模擬結果振幅差異不大，相位差則較第一組明顯，而隔震層上方樓板與下部結構加速度反應趨勢皆無法準確預測，位移模擬與第一組近似，振幅模擬情況有差異。

圖 5.2.13 至圖 5.2.16、圖 5.2.29 至圖 5.2.32 與圖 5.2.45 至圖 5.2.48 分別為第四組試體 LRB 參數以試驗平均值模擬之位移、加速度歷時反應與 LRB 之遲滯迴圈

比較，加速度模擬情況與第三組類似，上部結構仍呈現相位差現象，下部結構加速度反應趨勢一樣無法準確預測，惟隔震層上方樓板相位模擬較為相近，位移反應於振幅與相位的模擬上皆無法吻合。

比較各組試驗與非線性歷時分析結果，如表 5.2.3 至表 5.2.5 所示，第一組試體模擬結果相近，第三組與第四組試體除高模態週期與模態質量參與因子外，下部結構對地表最大加速度比值亦相差較大，無法有效模擬試驗結果。

從以上結果，為進一步探討下部結構加速度反應模擬情況之差異性，各組試體取兩組地震歷時下之輸入振動台歷時與下部結構加速度反應進行傅立葉轉換，以進行比較，如圖 5.2.49 至圖 5.2.54 所示，可發現在下部結構加速度反應中明顯存在高模態的反應，若高模態反應愈大，則分析軟體模擬結果愈差。



表 5.1.1 LRB 模擬參數

	K1(kN/mm)	K2(kN/mm)	Keff(kN/mm)	Fy(kN)	α
參數一	1.284	0.168	0.196	1.982	0.131
參數二	1.300	0.200	0.234	2.438	0.154

表 5.2.1 SAP 模態分析結果

	第一組試體			第三組試體			第四組試體		
模態	1	2	3	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	1.1	0.144	0.043	1.112	0.146	0.125	0.706	0.134	0.114
模態質量參與因子	0.77	0.002	0.23	0.79	0.03	0.18	0.74	0.08	0.19

表 5.2.2 MIDAS 模態分析結果

	第一組試體			第三組試體			第四組試體		
模態	1	2	3	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	1.1	0.144	0.043	1.13	0.146	0.123	0.74	0.134	0.116
模態質量參與因子	0.77	0.002	0.23	0.79	0.03	0.18	0.73	0.06	0.2

表 5.2.3 第一組試體試驗與非線性歷時分析結果

	試驗			非線性歷時分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	0.98	0.14	0.08	1.1	0.144	0.043
模態質量參與因子	0.77	0.04	0.18	0.77	0.002	0.23
LRB 最大變位(mm)	45.8			39.27		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	1.15		0.74	1.03		0.98

表 5.2.4 第三組試體試驗與非線性歷時分析結果

	試驗			非線性歷時分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	1.15	0.21	0.14	1.11	0.15	0.13
模態質量參與因子	0.82	0.18	0	0.79	0.03	0.18
LRB 最大變位(mm)	45.8			39.62		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	2.26		1.31	1.44		1.22

表 5.2.5 第四組試體試驗與非線性歷時分析結果

	試驗			非線性歷時分析		
模態	1	2	3	1	2	3
週期(sec)	0.87	0.19	0.13	0.71	0.13	0.11
模態質量參與因子	0.77	0.23	0	0.74	0.08	0.19
LRB 最大變位(mm)	48.7			42.9		
	SUB/BASE		ISO/BASE	SUB/BASE		ISO/BASE
最大加速度比值	2.18		1.37	1.69		1.82



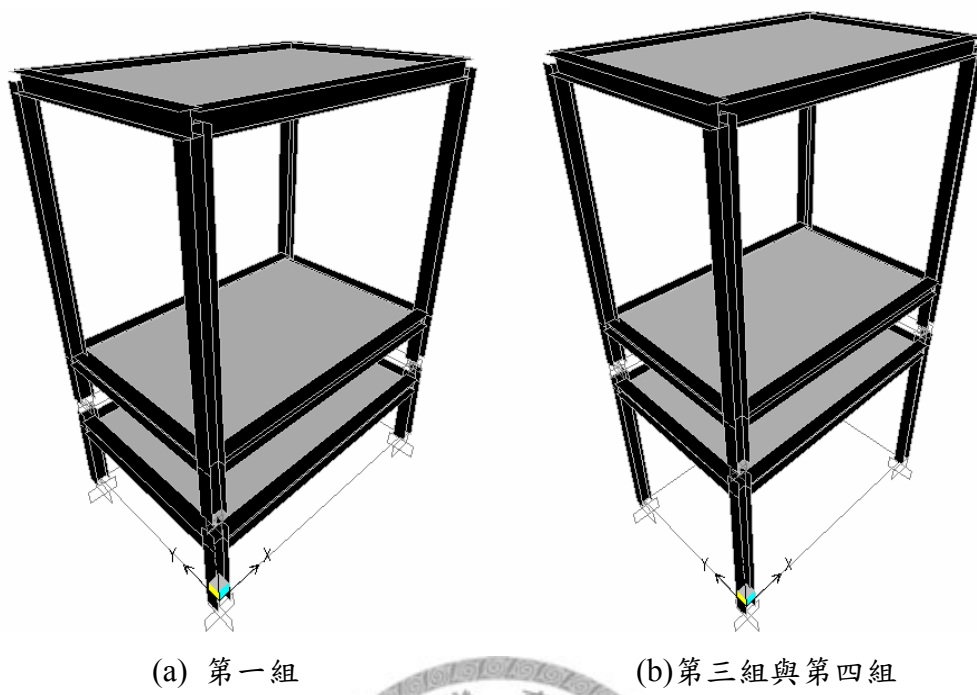


圖 5.1.1 SAP 數值模擬模型

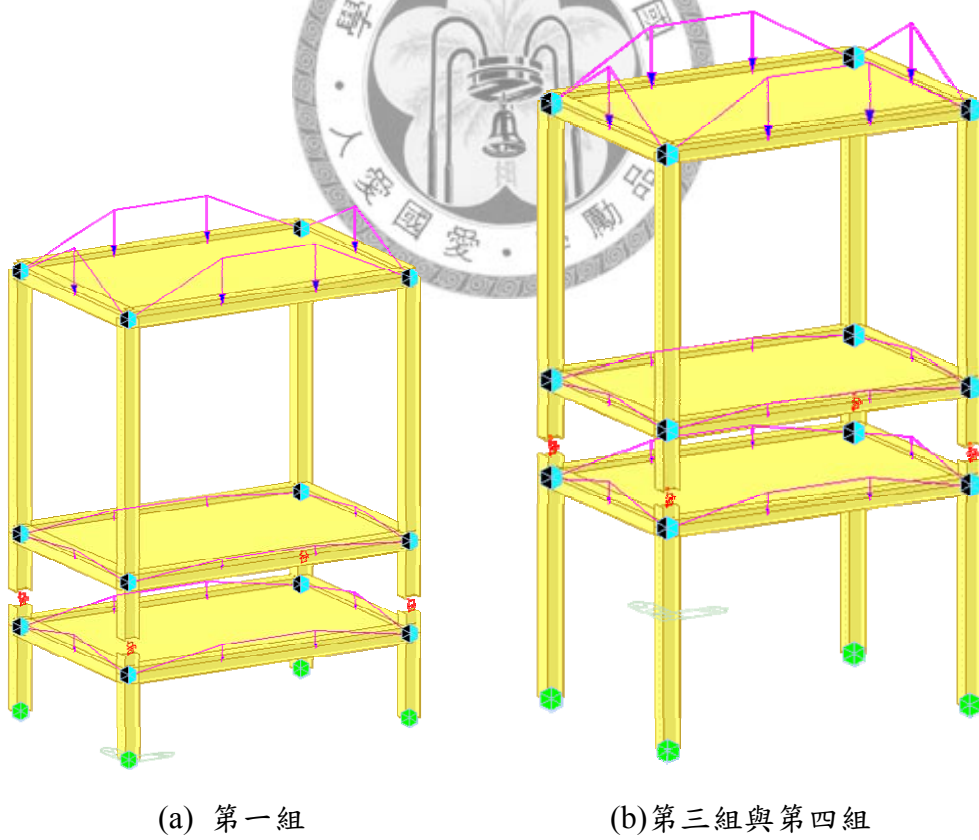


圖 5.1.2 MIDAS 數值模擬模型

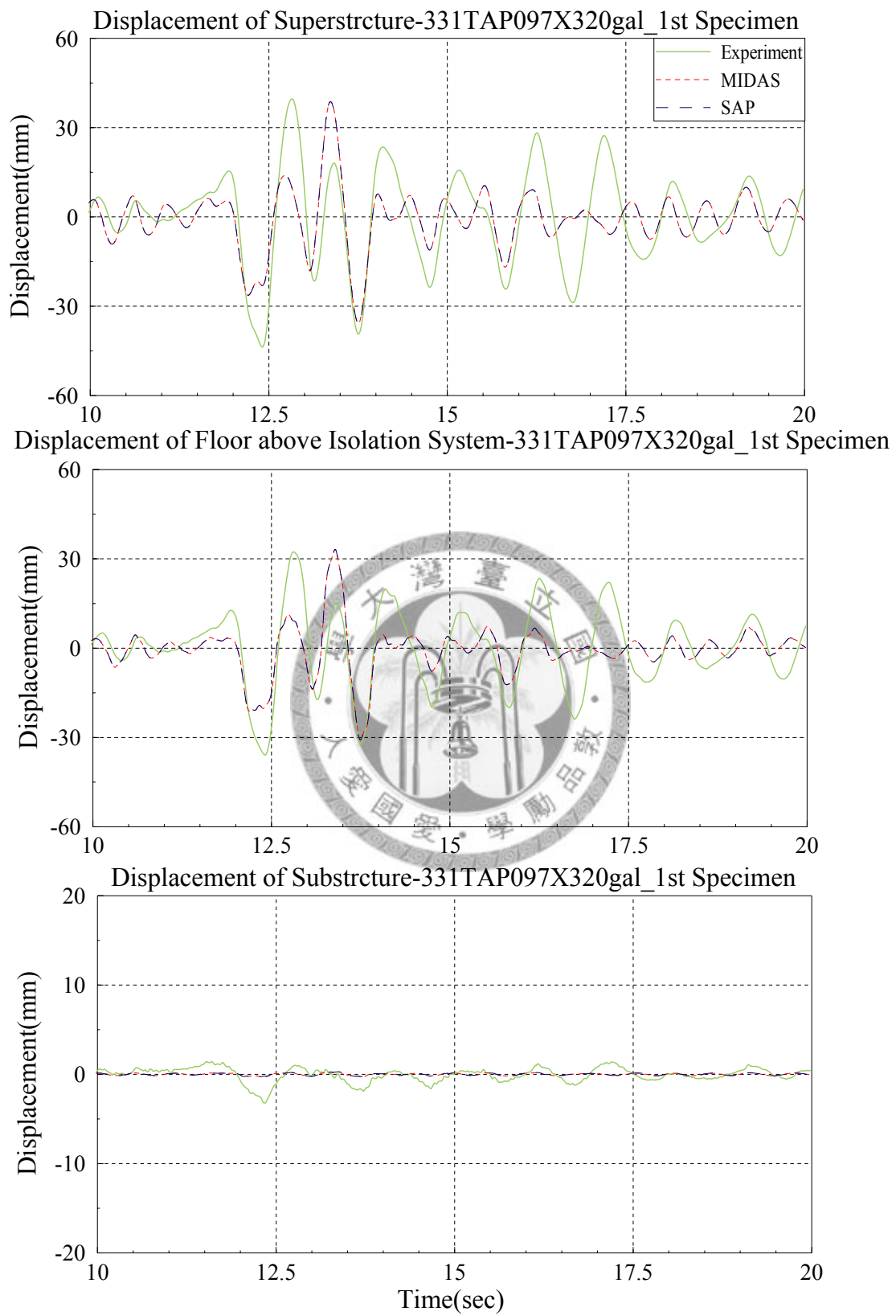


圖 5.2.1 第一組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)

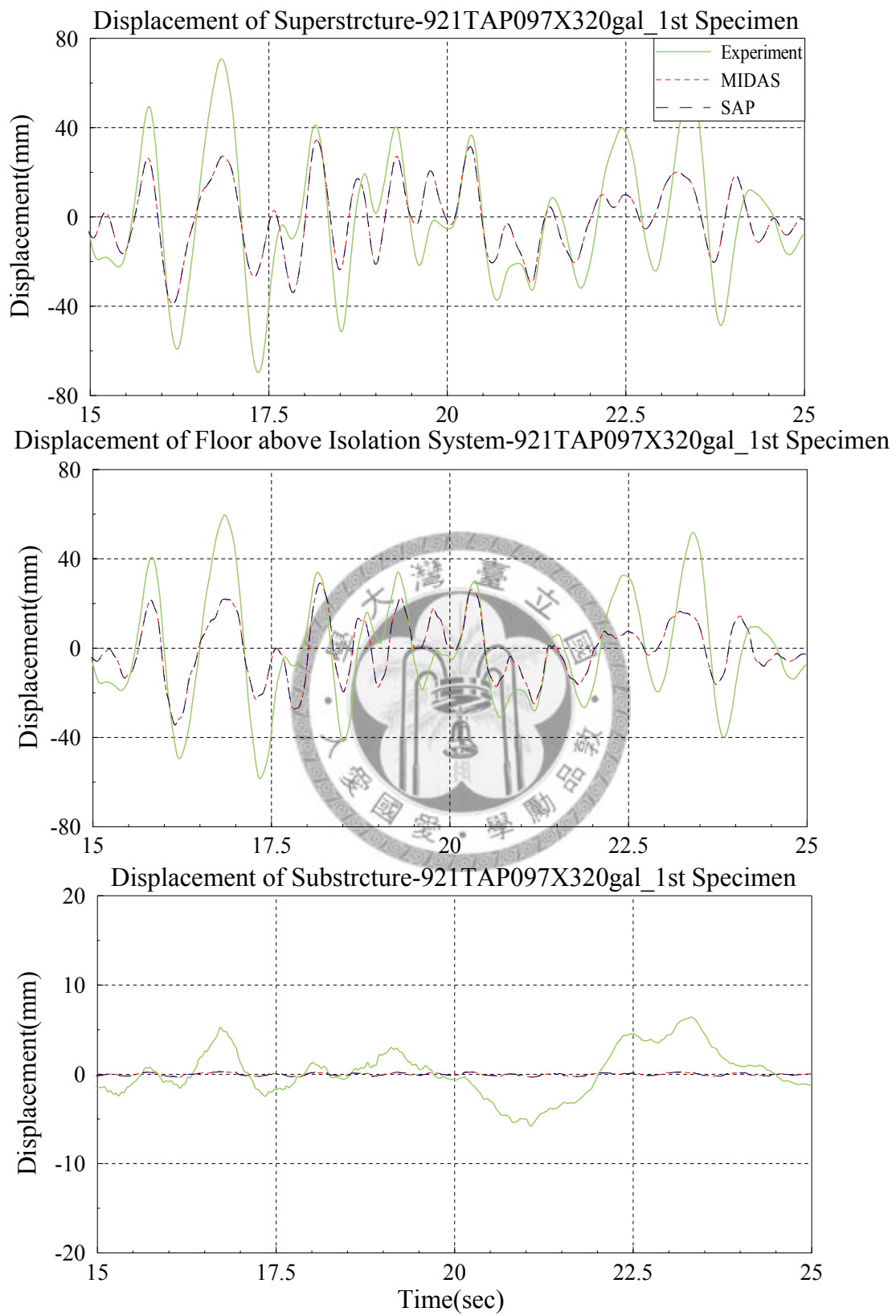


圖 5.2.2 第一組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)

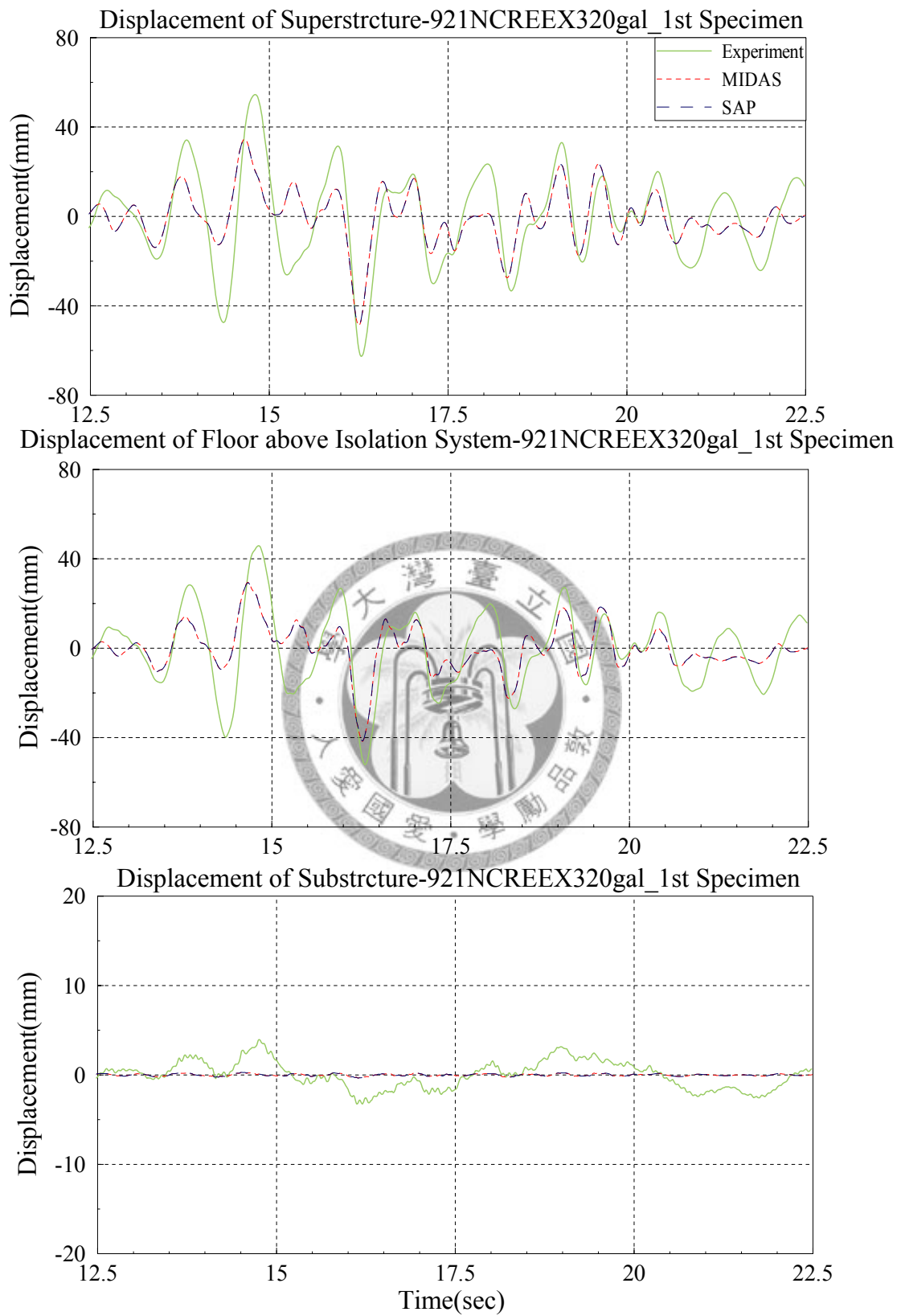


圖 5.2.3 第一組試體 921NCREEX320gal 歷時模擬(LRB 參數取元件測試值)

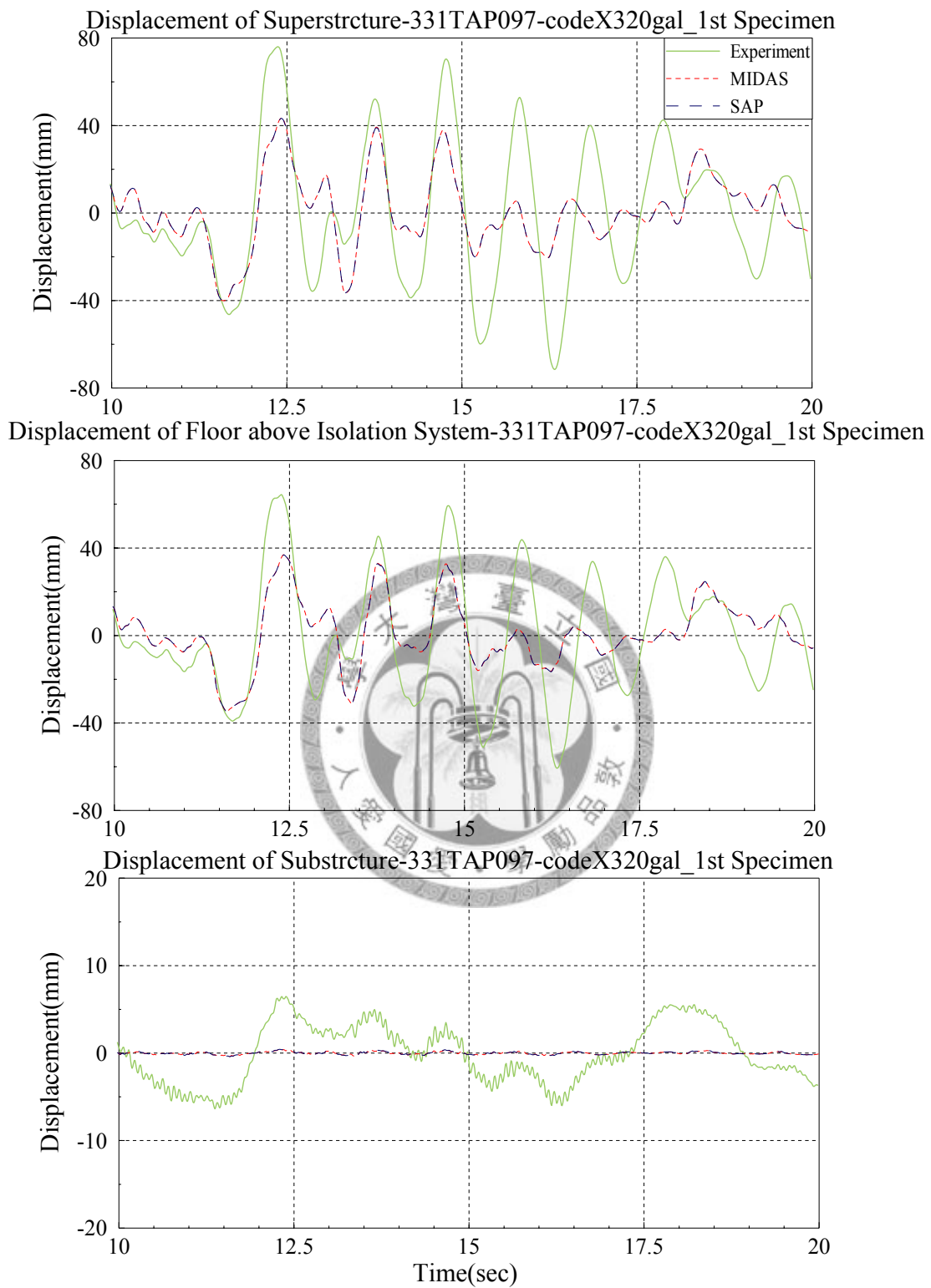


圖 5.2.4 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取元件測試值)

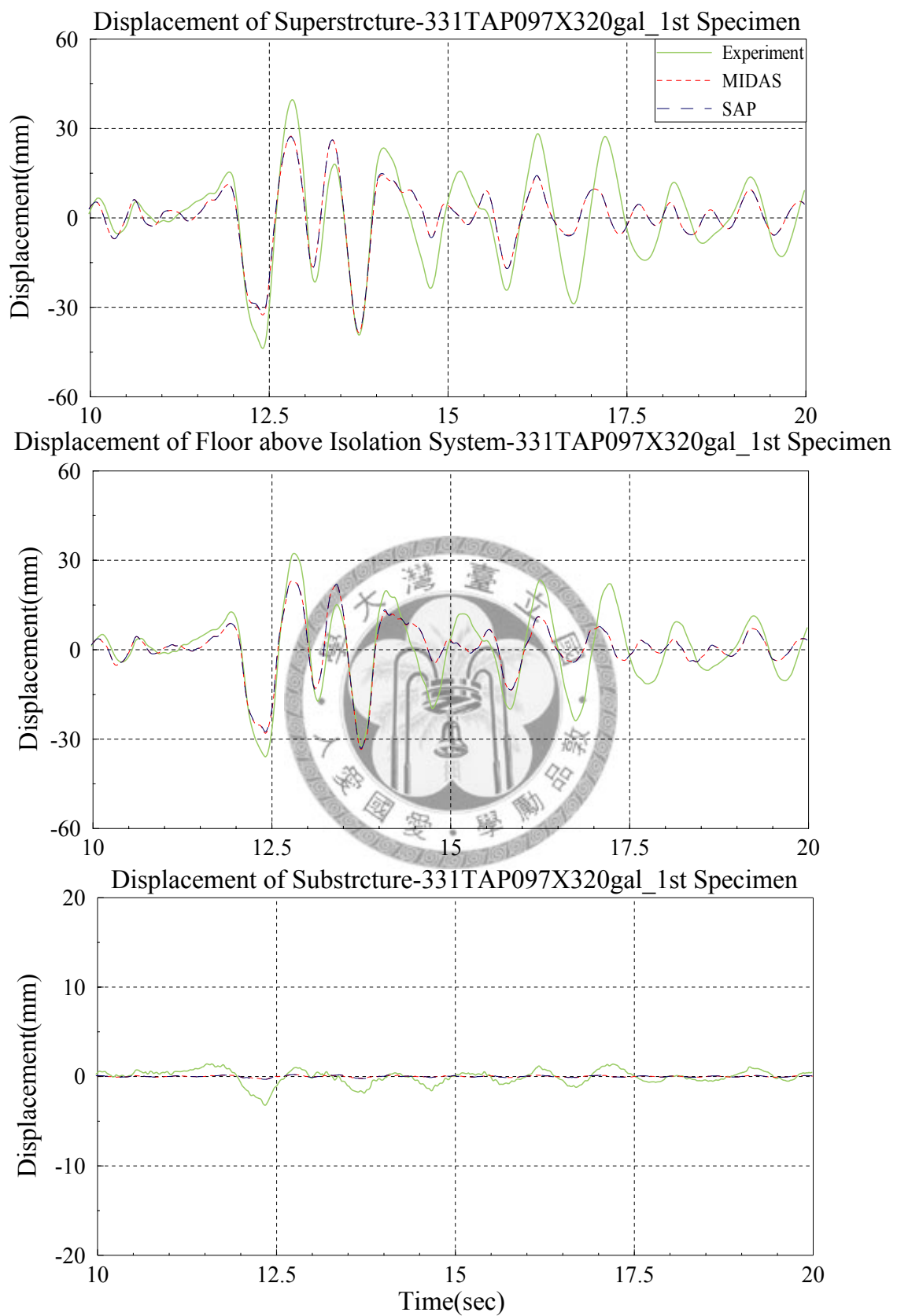


圖 5.2.5 第一組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

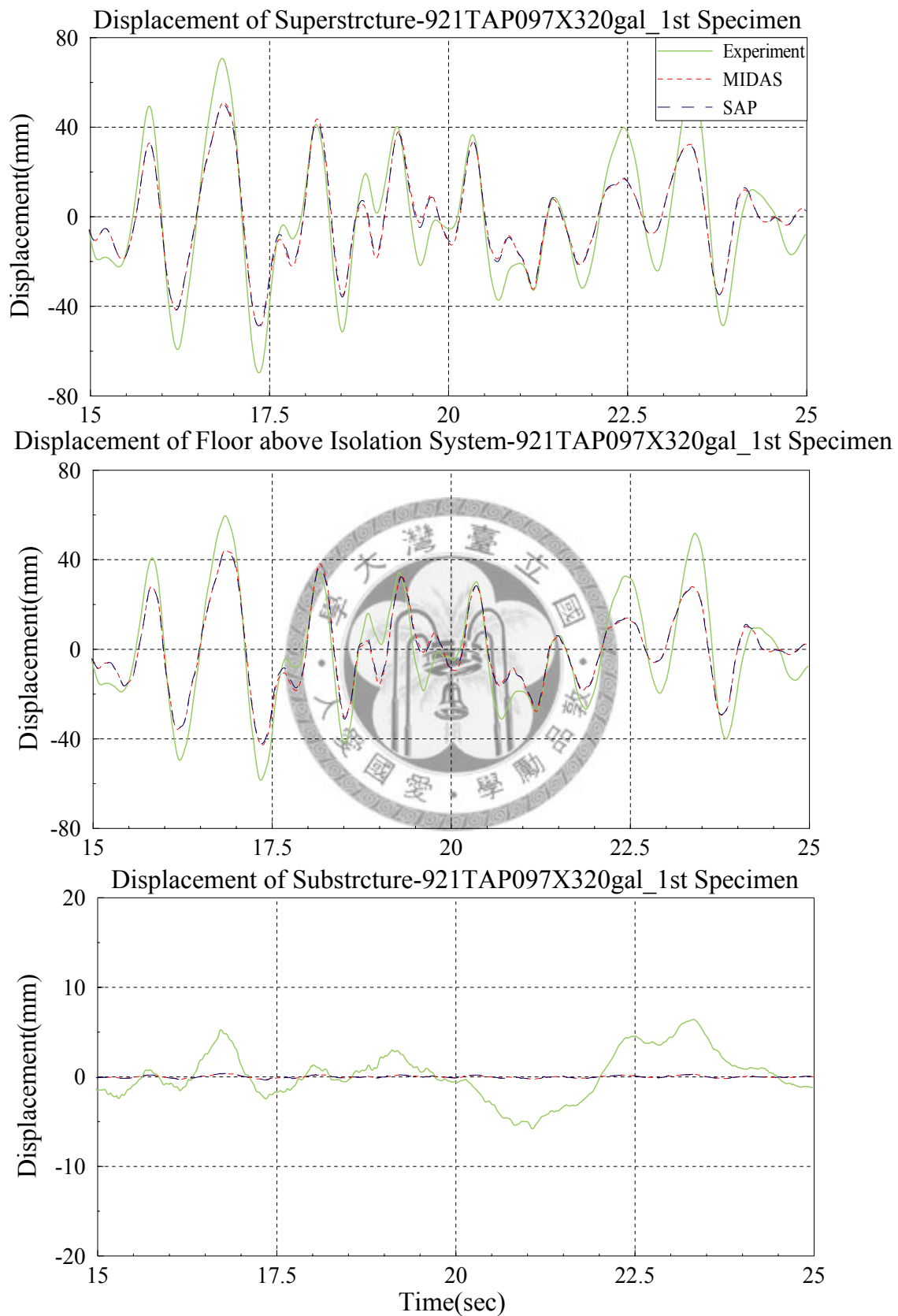


圖 5.2.6 第一組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

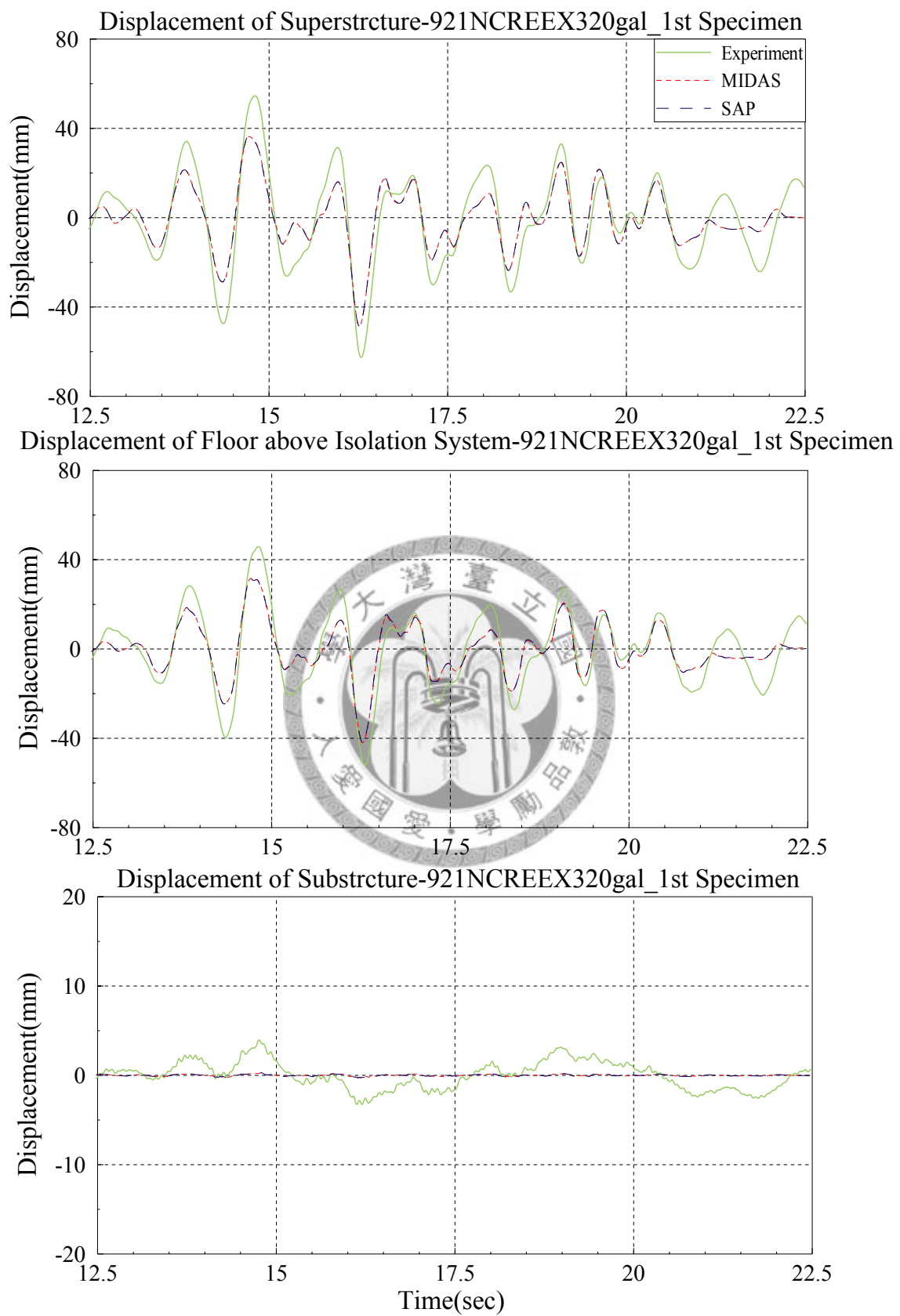


圖 5.2.7 第一組試體 921NCREEX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

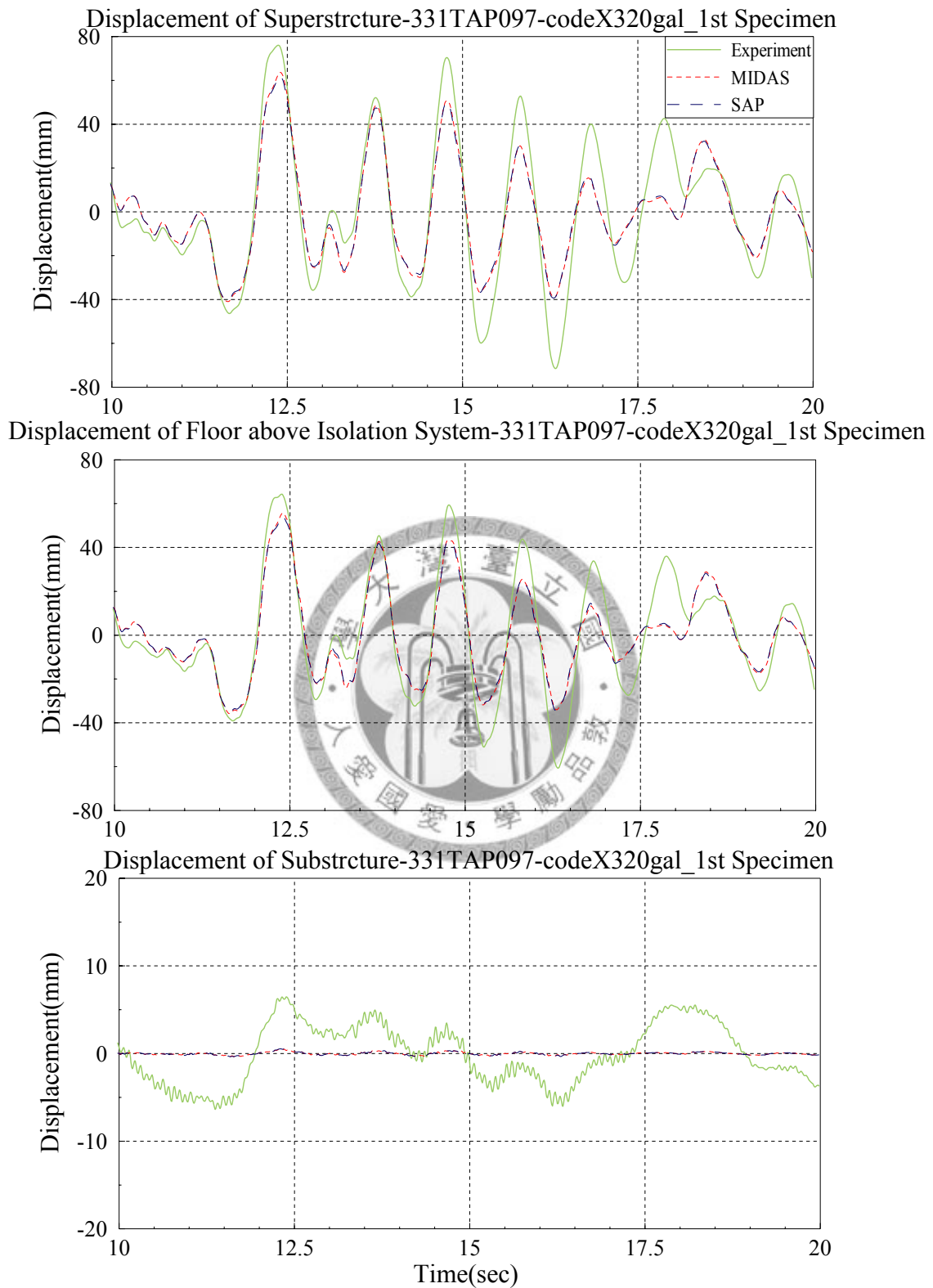


圖 5.2.8 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

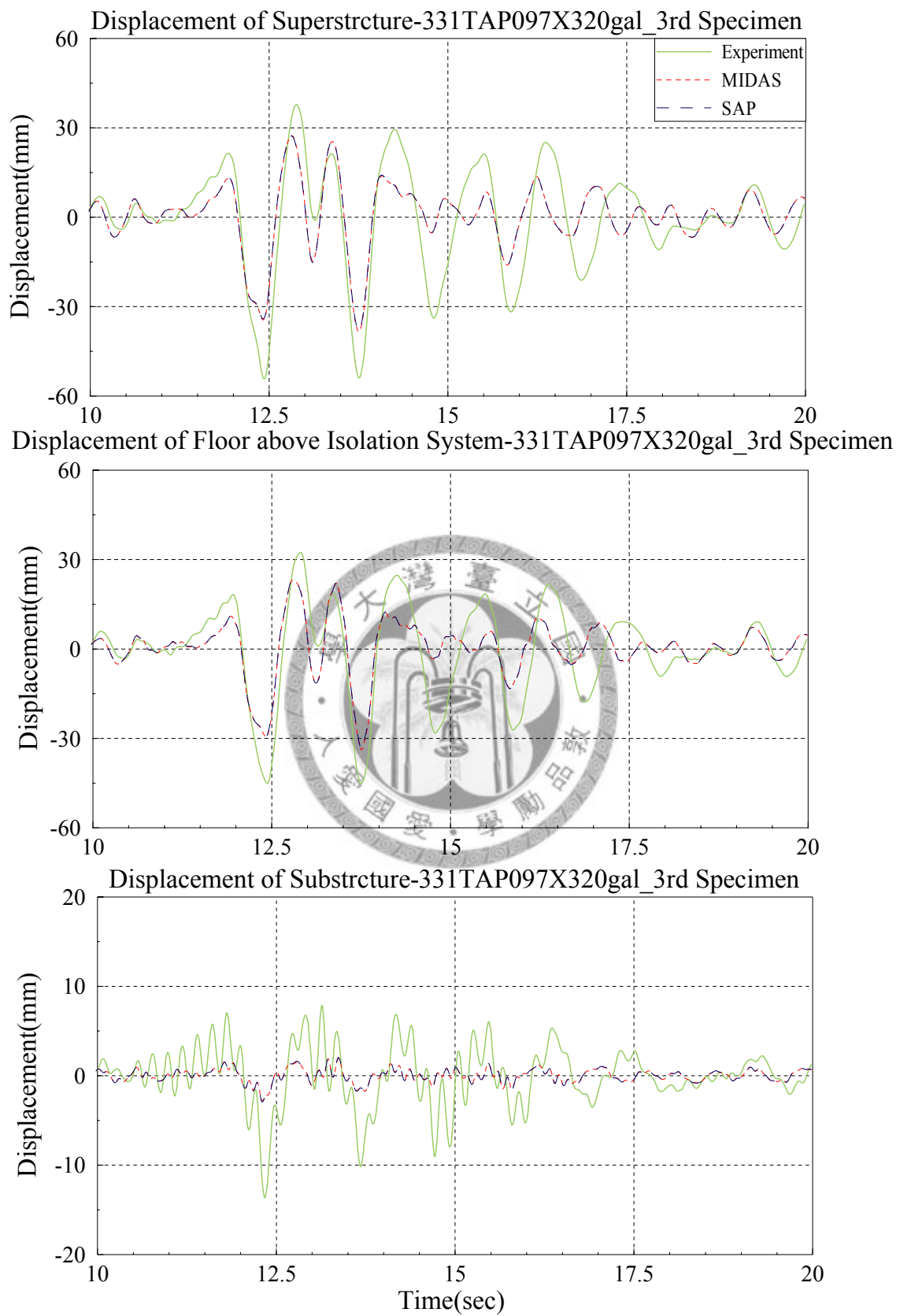


圖 5.2.9 第三組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

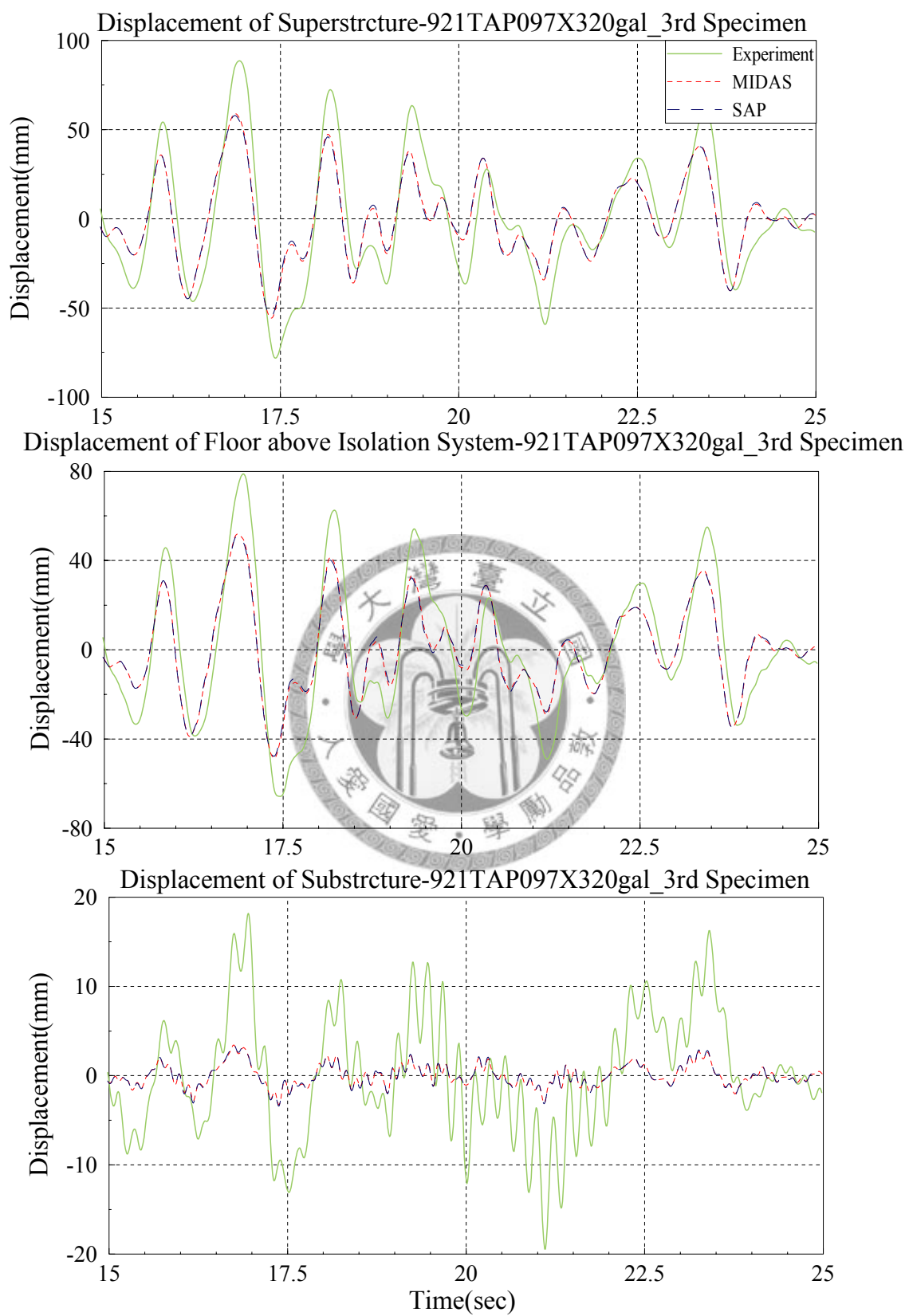


圖 5.2.10 第三組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

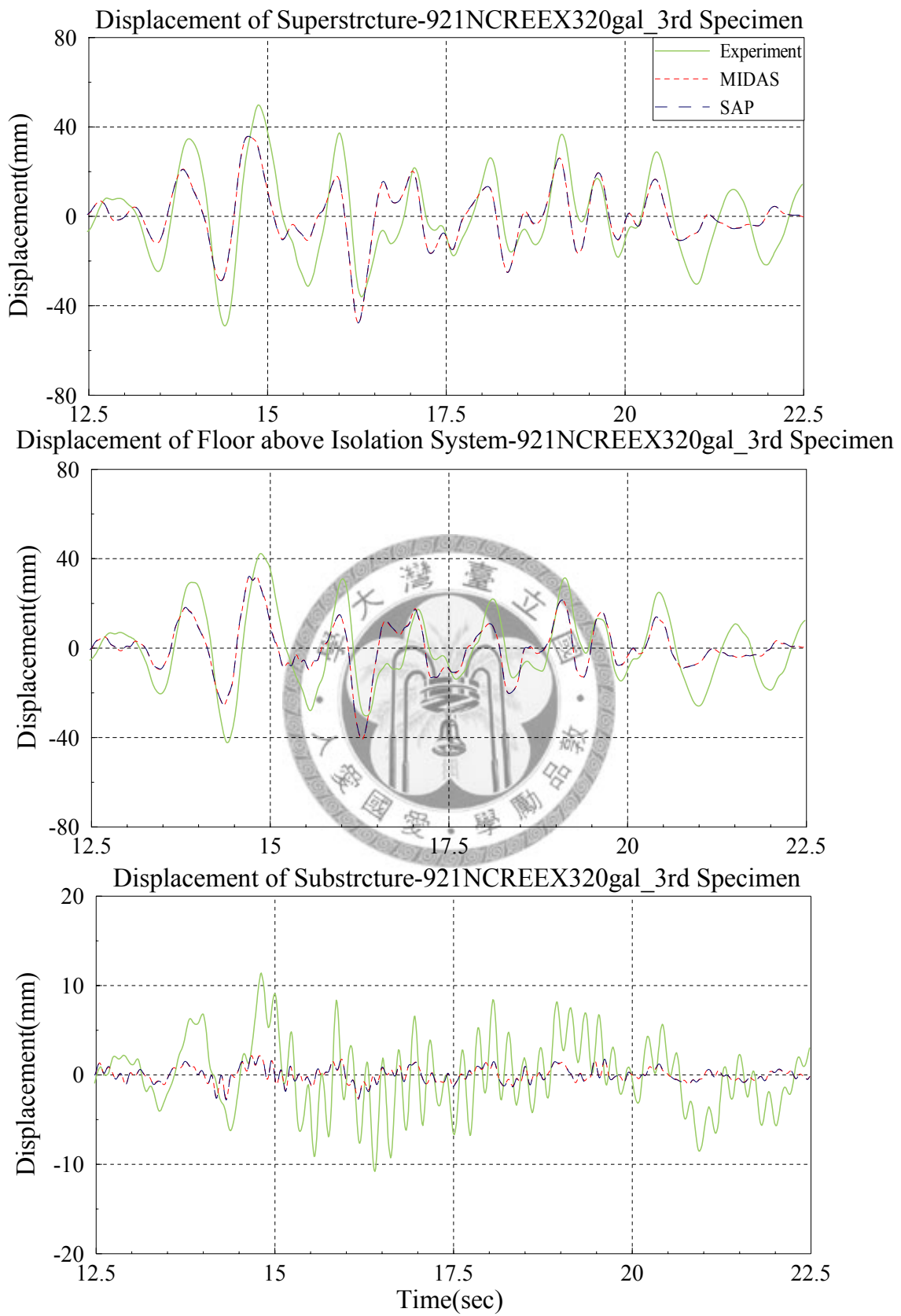


圖 5.2.11 第三組試體 921NCREEX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

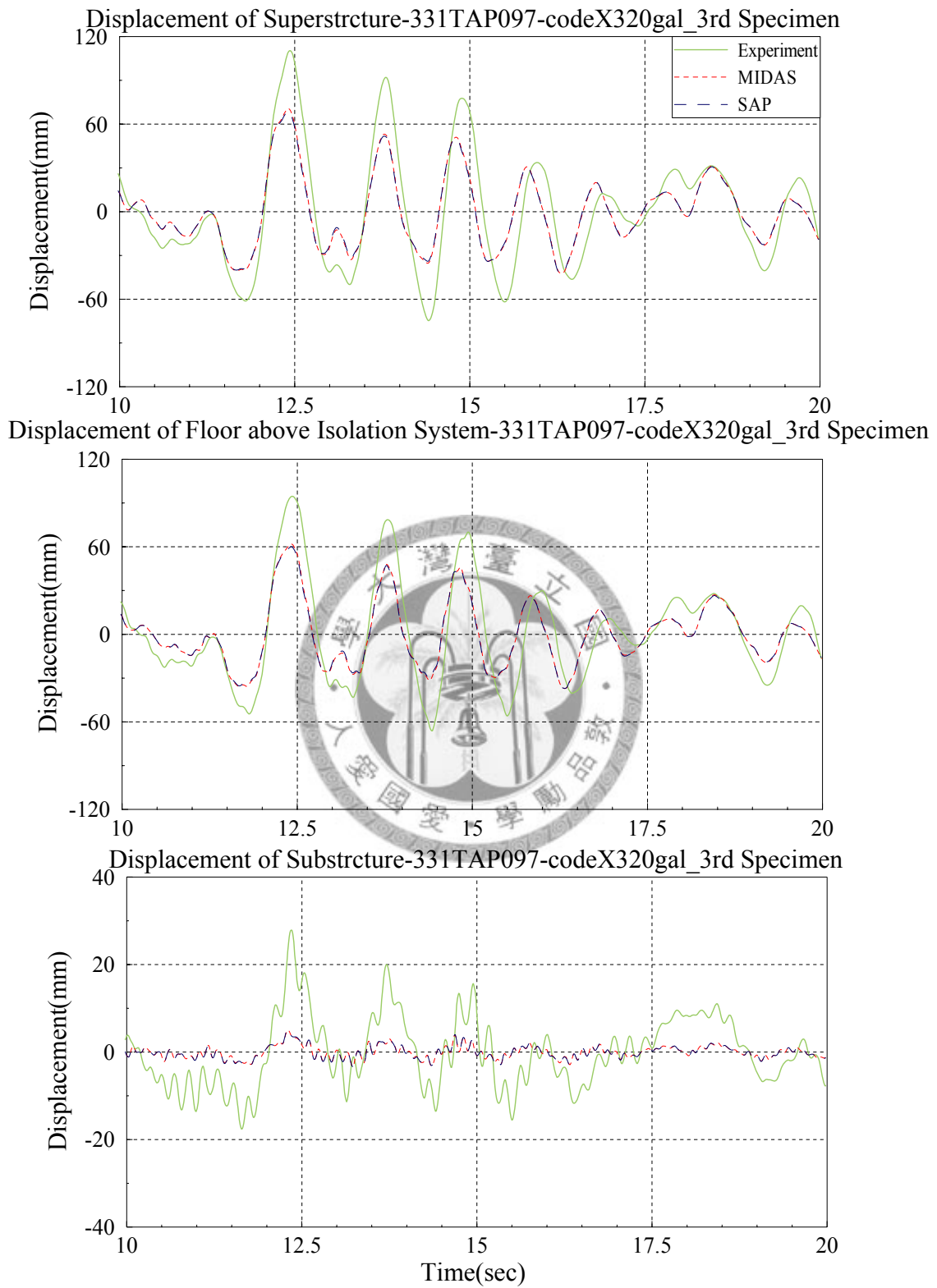


圖 5.2.12 第三組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

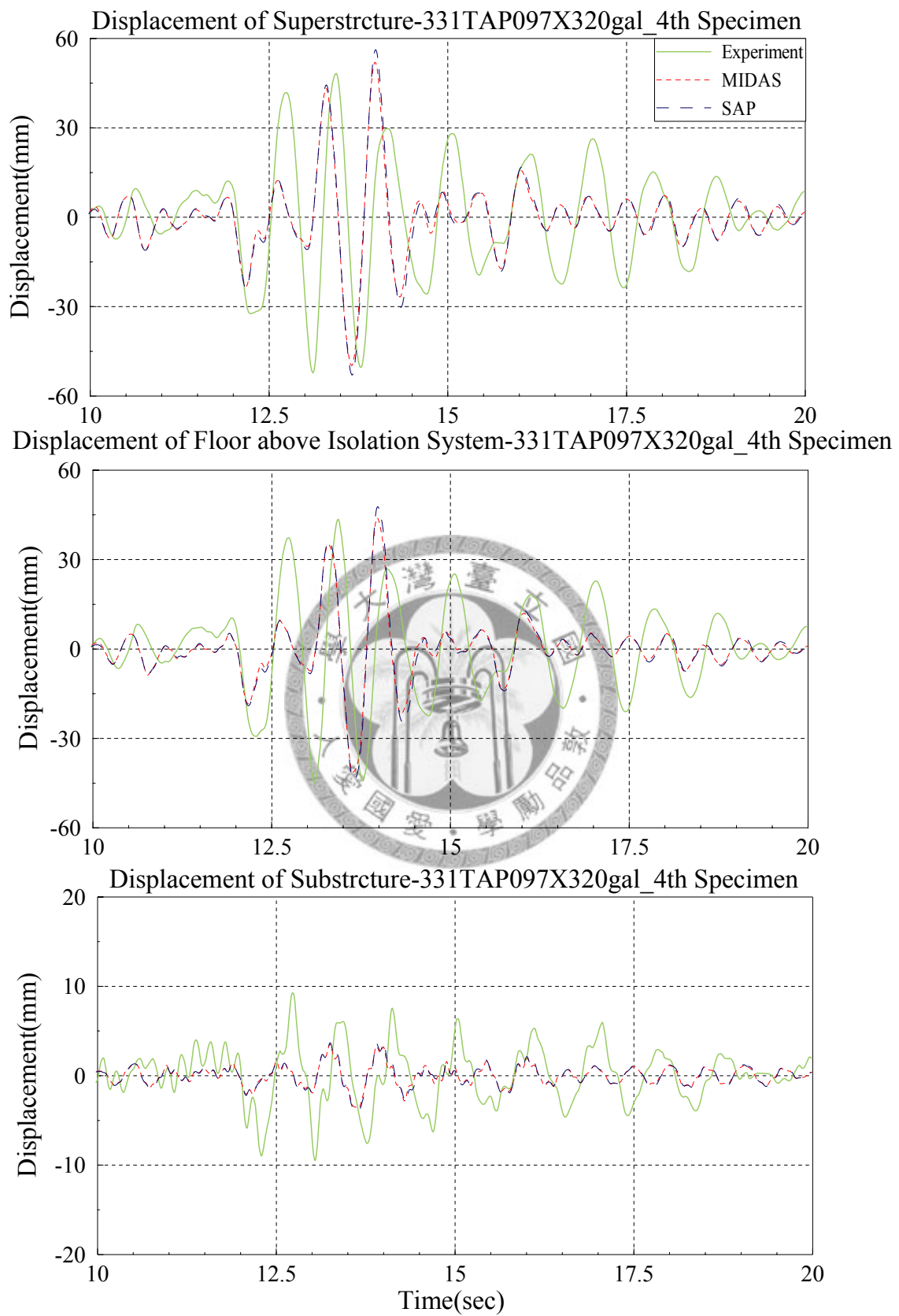


圖 5.2.13 第四組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

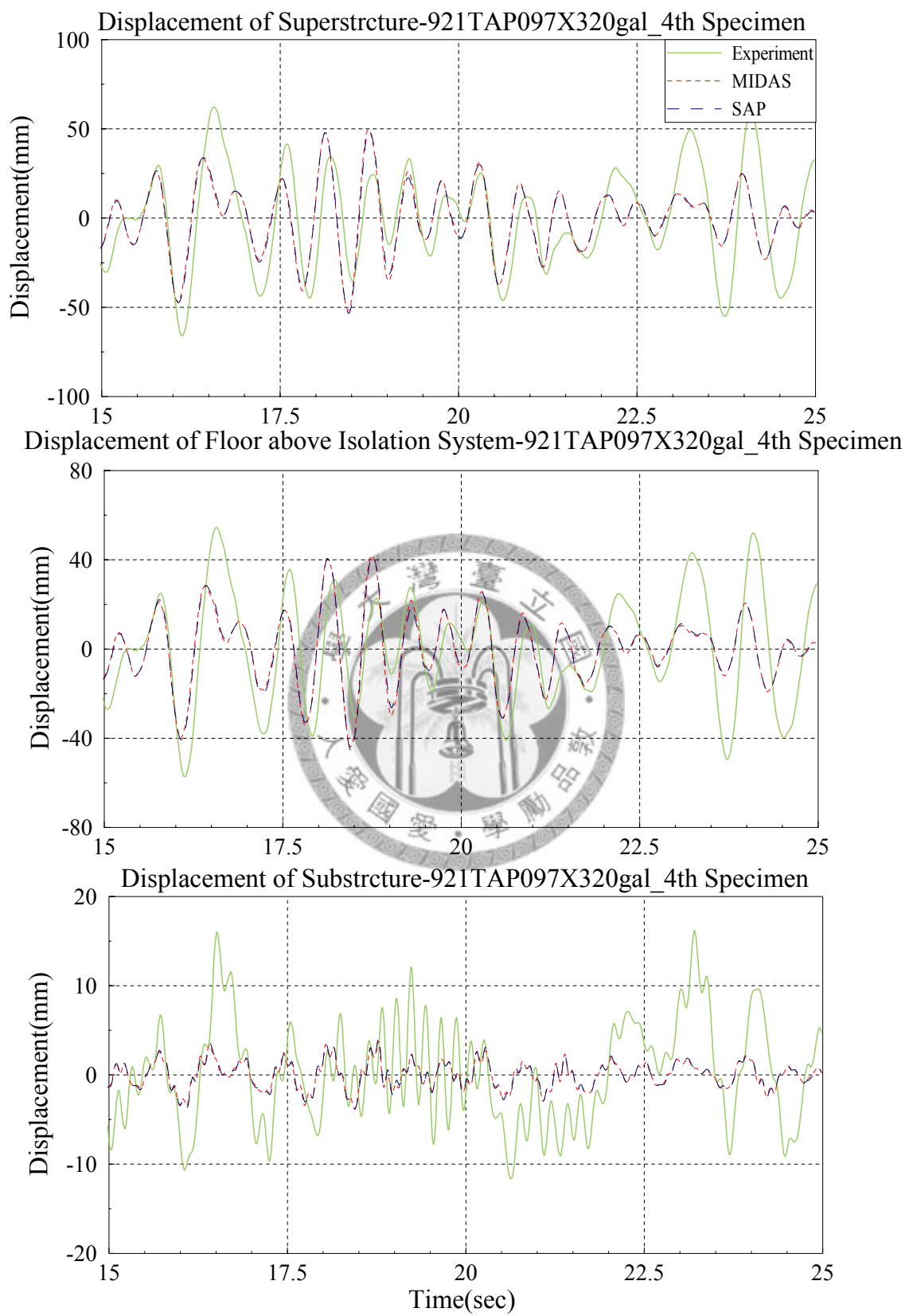


圖 5.2.14 第四組試體 921TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

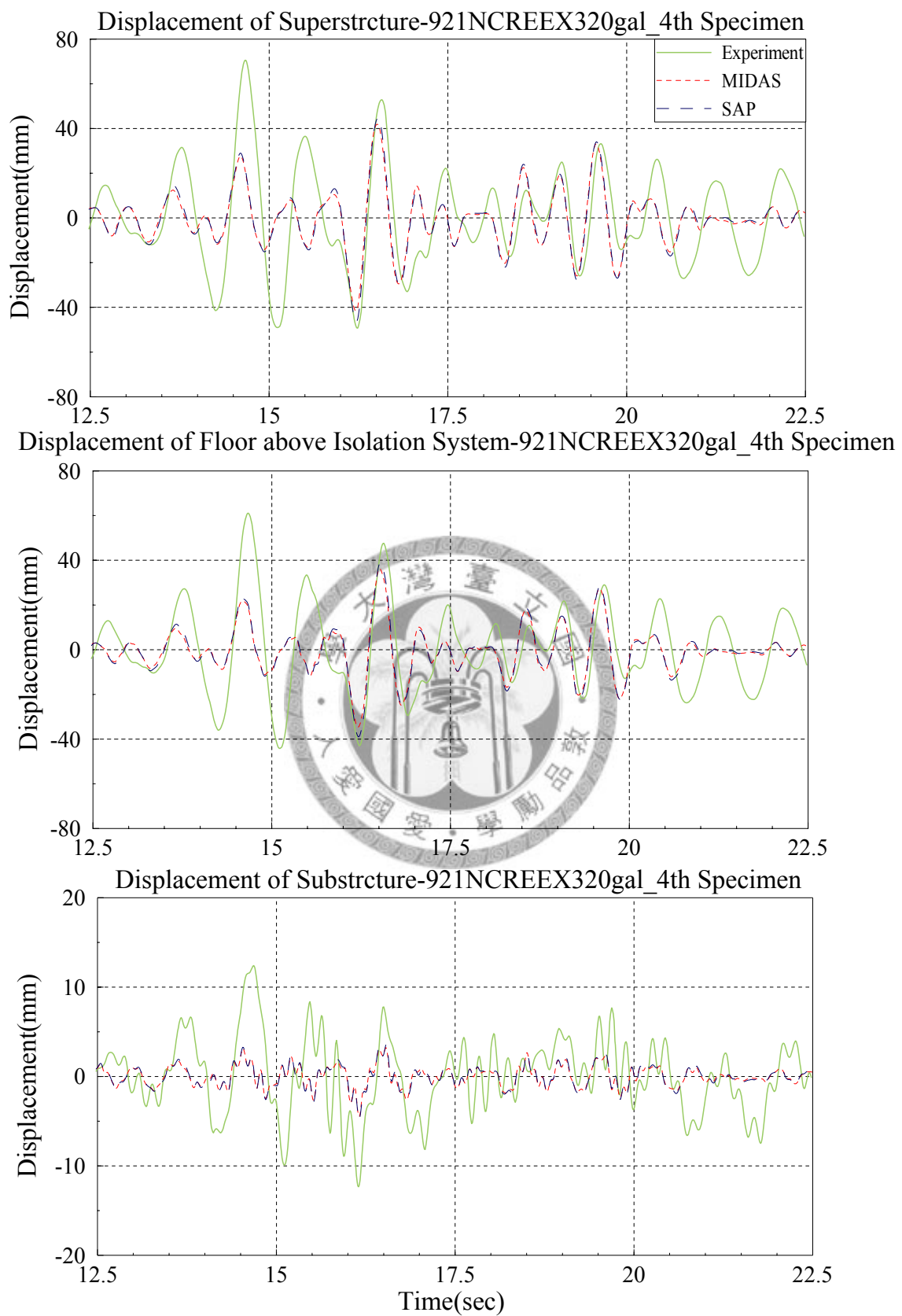


圖 5.2.15 第四組試體 331TAP097X320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

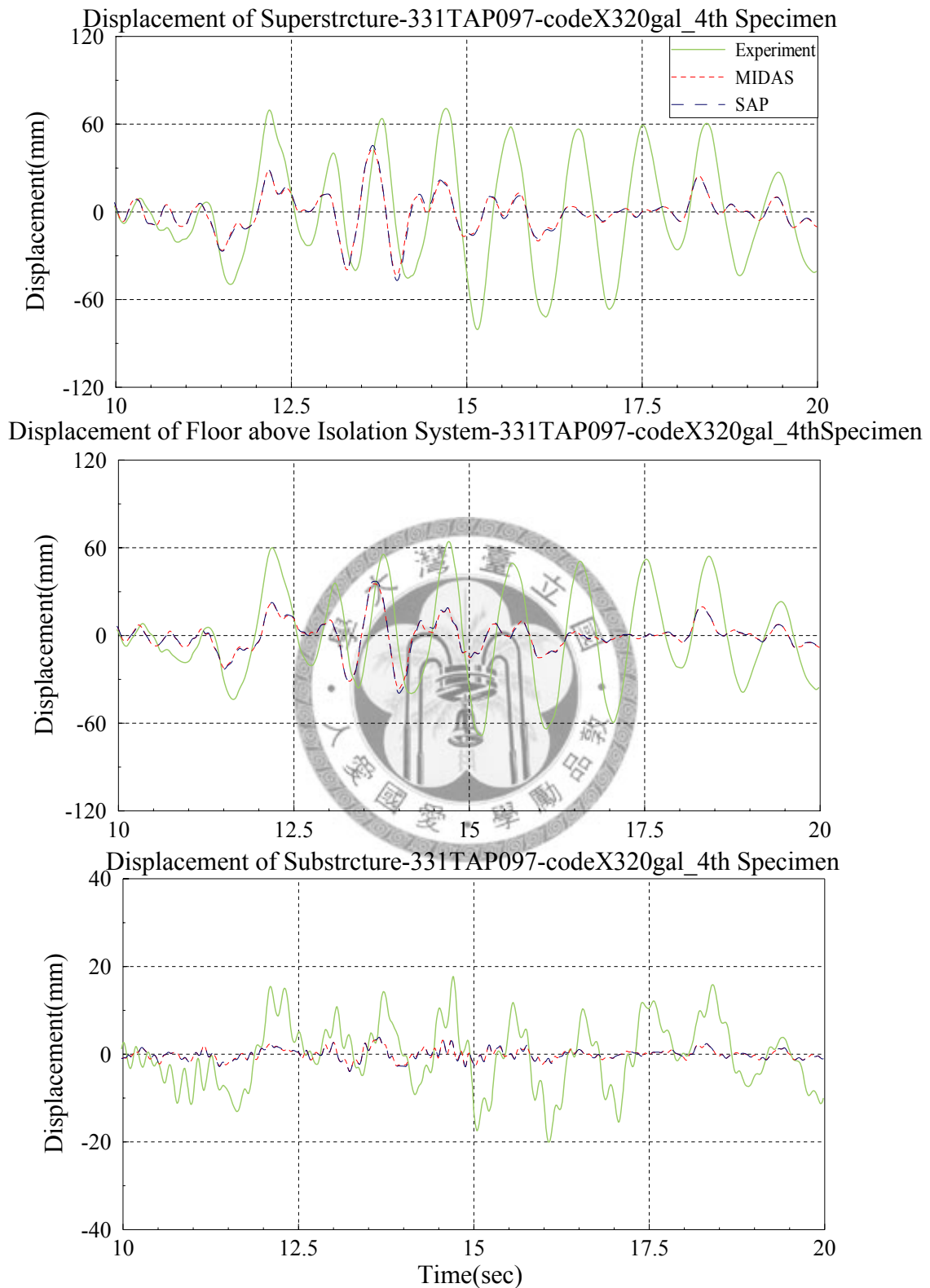


圖 5.2.16 第四組試體 331TAP097-codeX320gal 位移歷時(LRB 參數取試驗值)

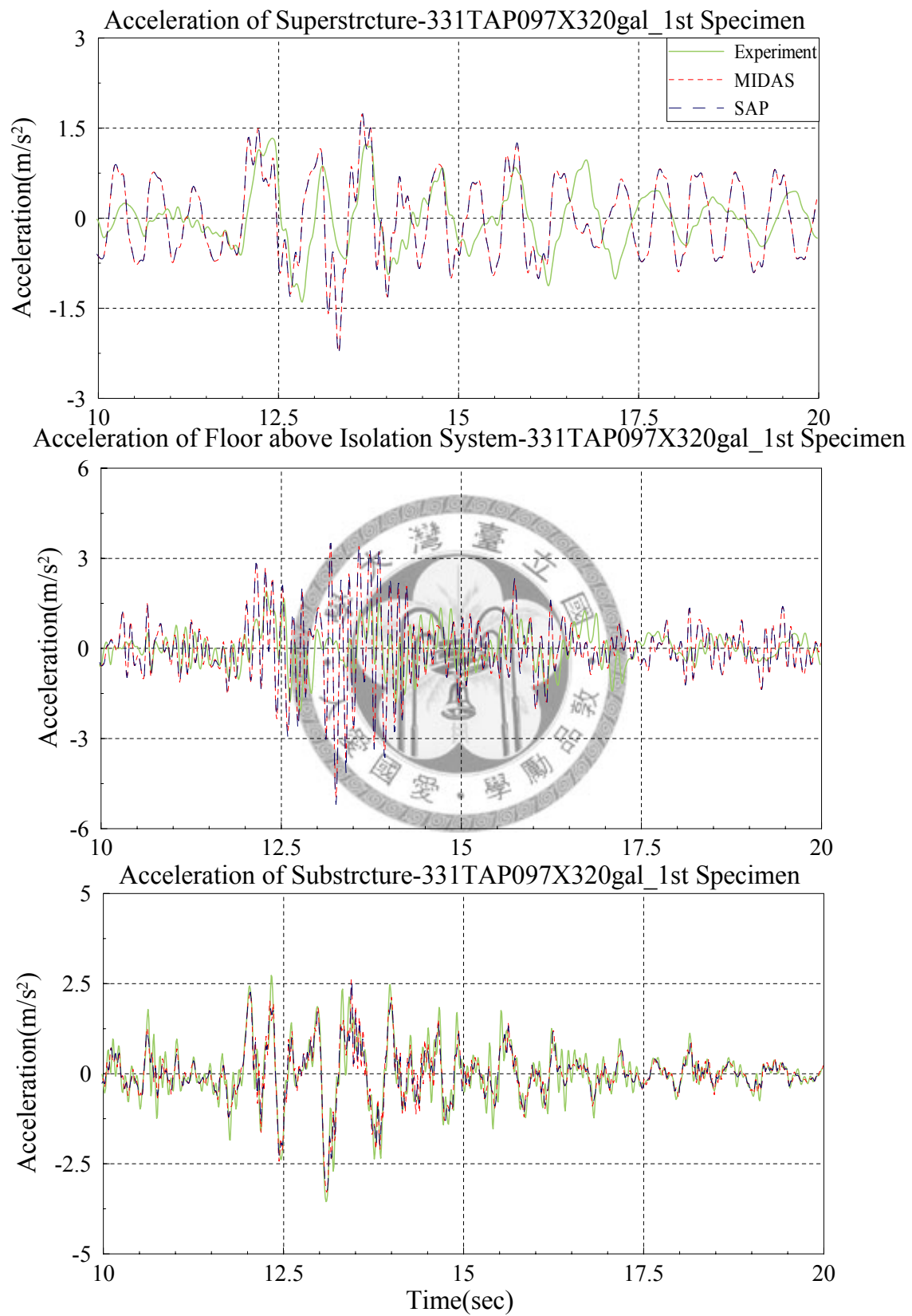


圖 5.2.17 第一組試體 331TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)

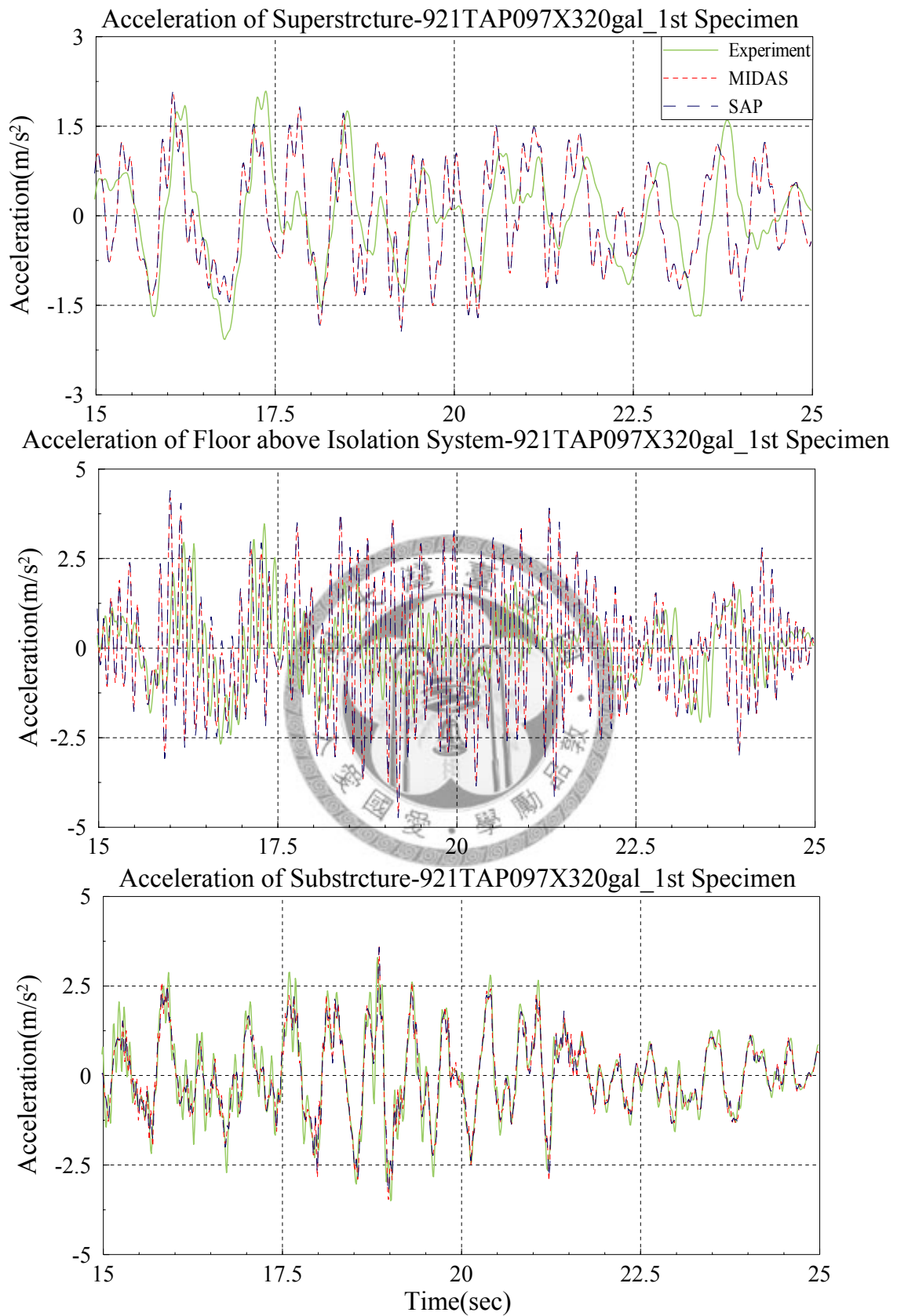


圖 5.2.18 第一組試體 921TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)

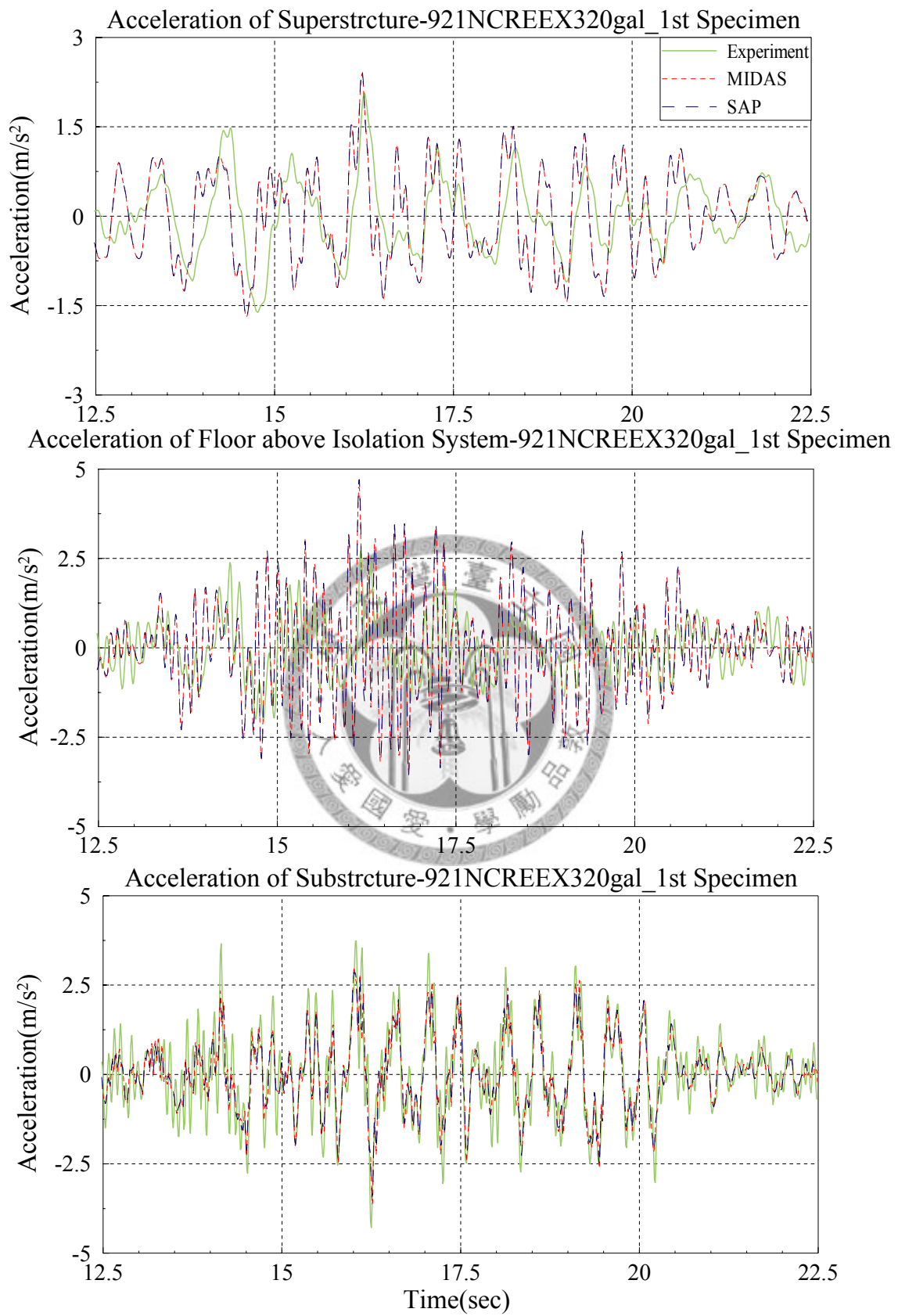


圖 5.2.19 第一組試體 921NCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)

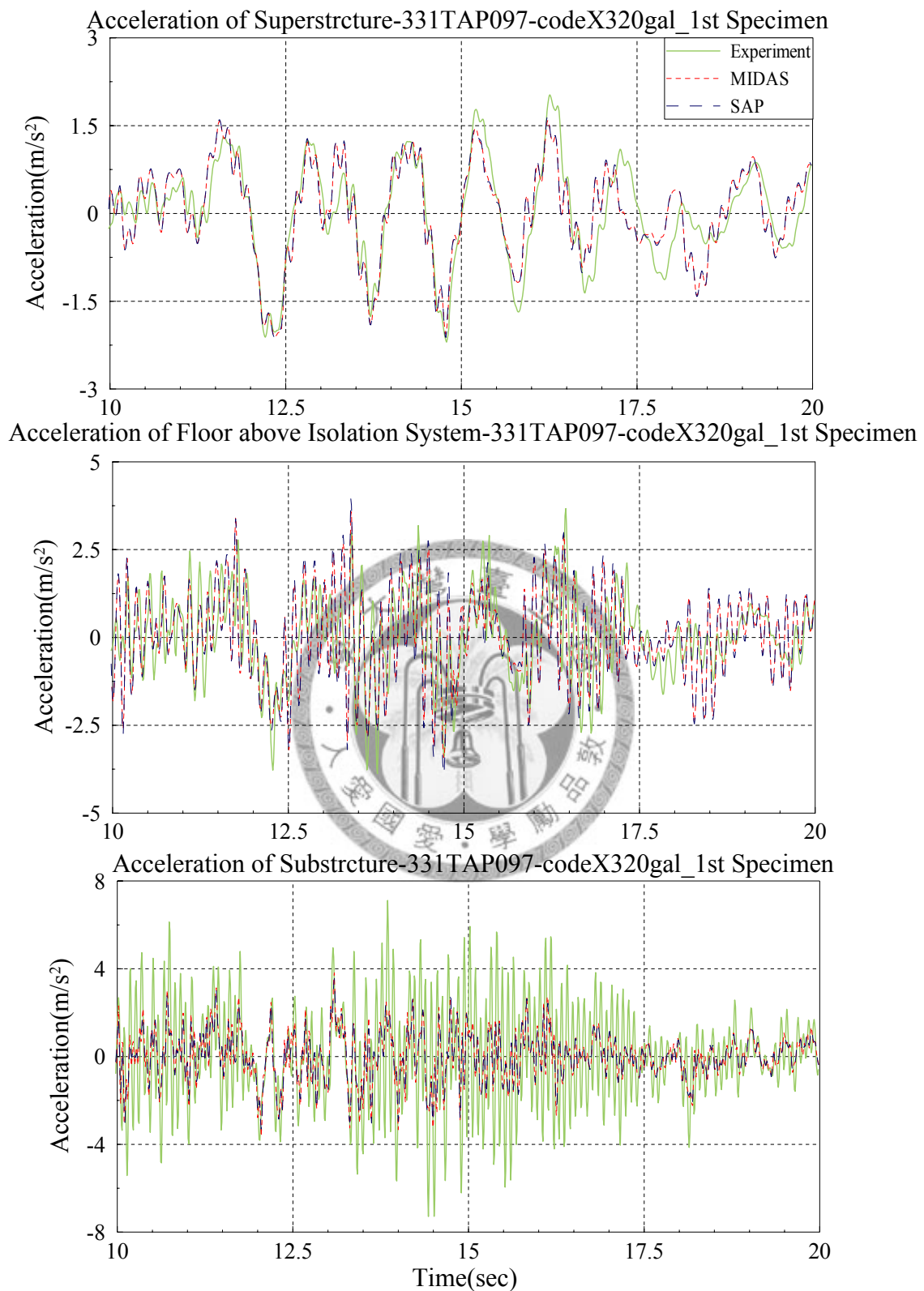


圖 5.2.20 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取元件測試值)

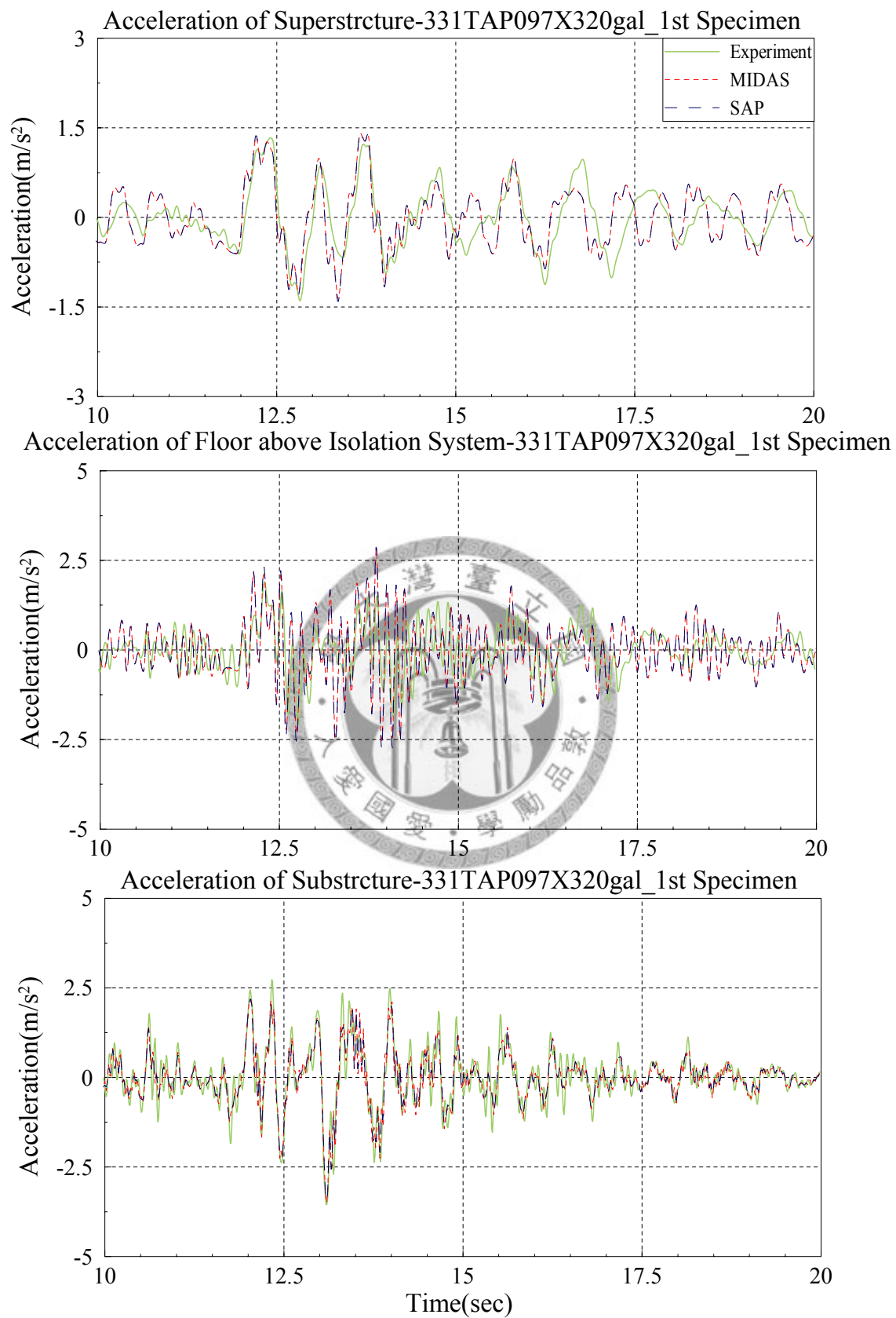


圖 5.2.21 第一組試體 331TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

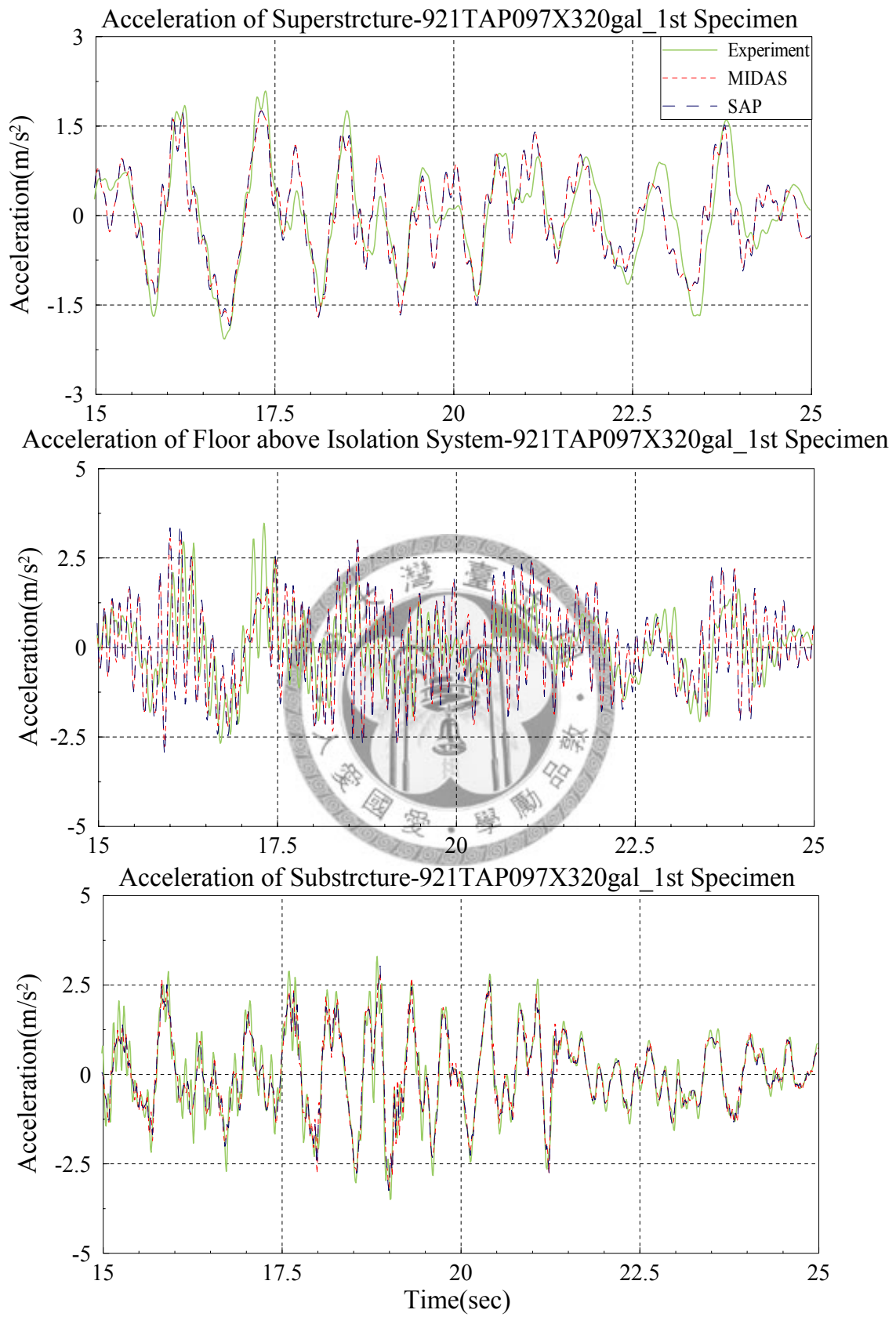


圖 5.2.22 第一組試體 921TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

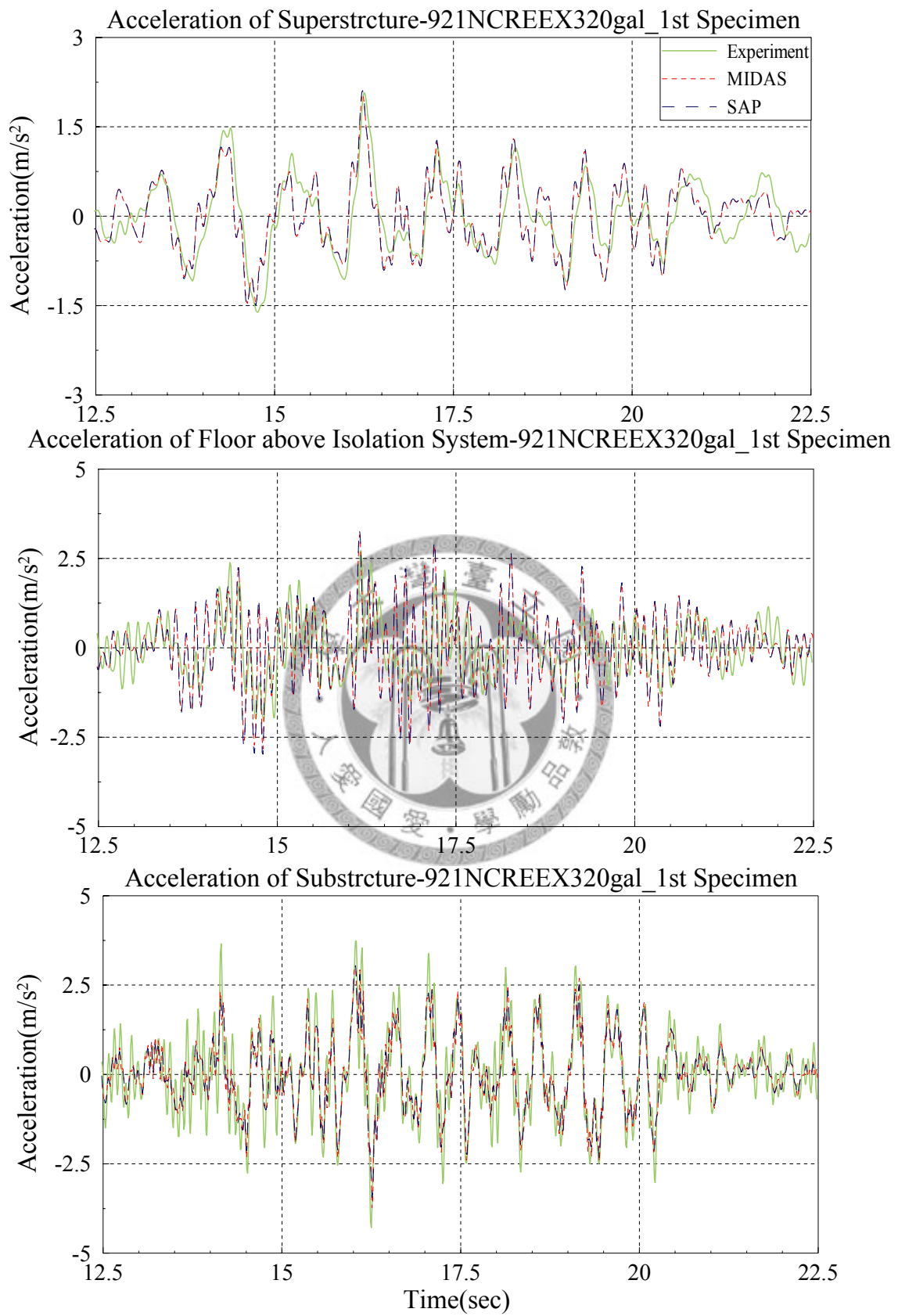


圖 5.2.23 第一組試體 921NCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

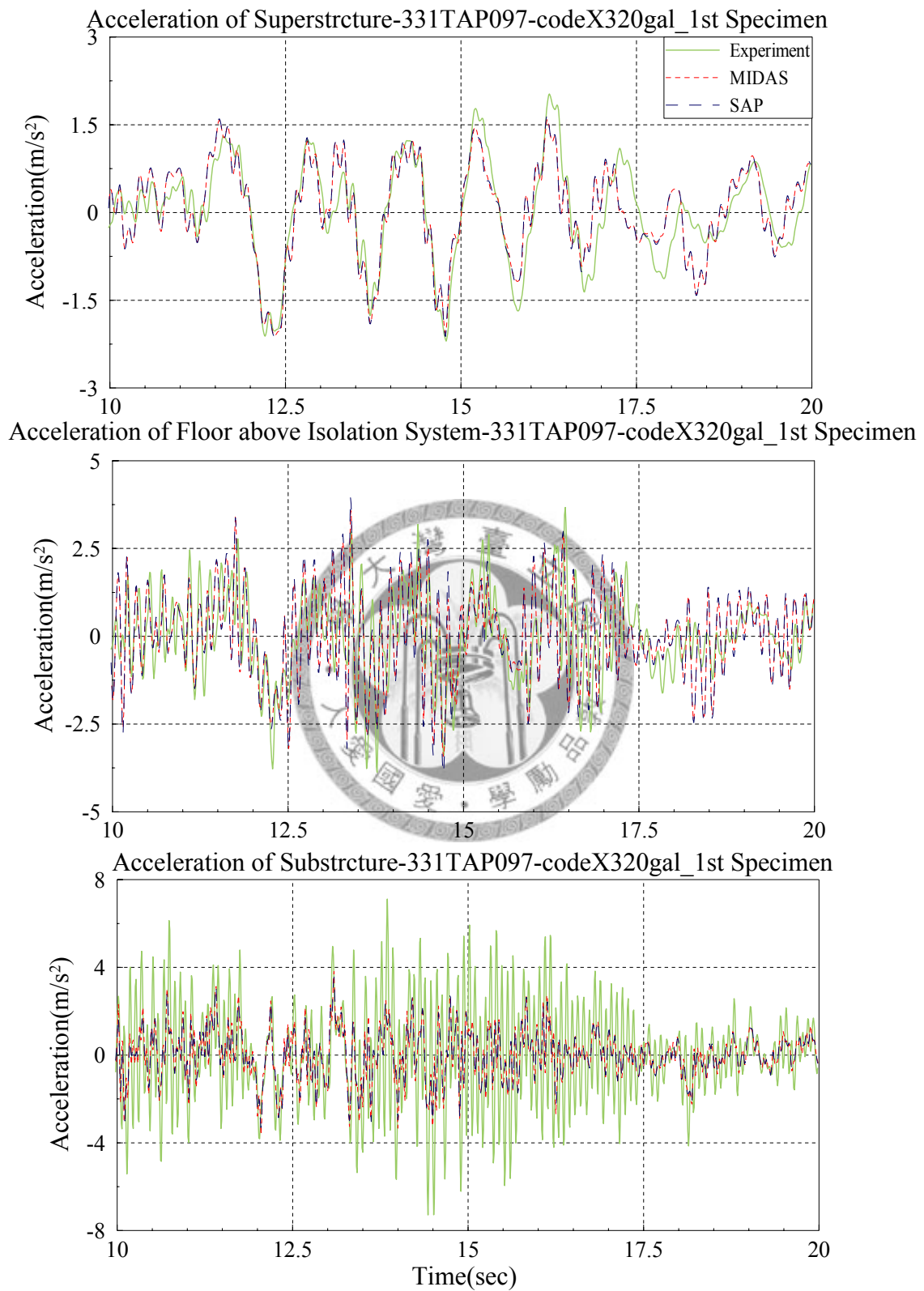


圖 5.2.24 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

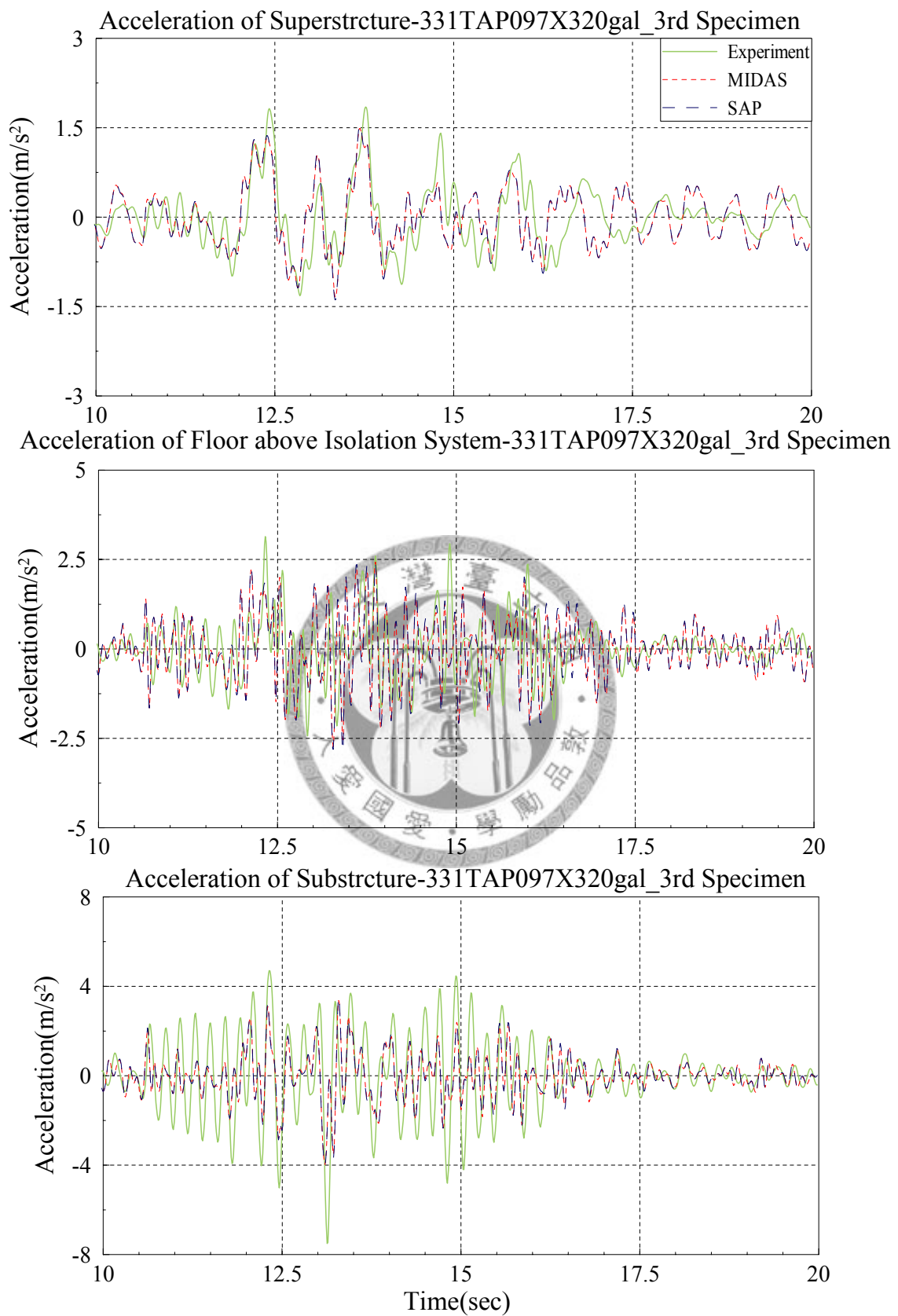


圖 5.2.25 第三組試體 331TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

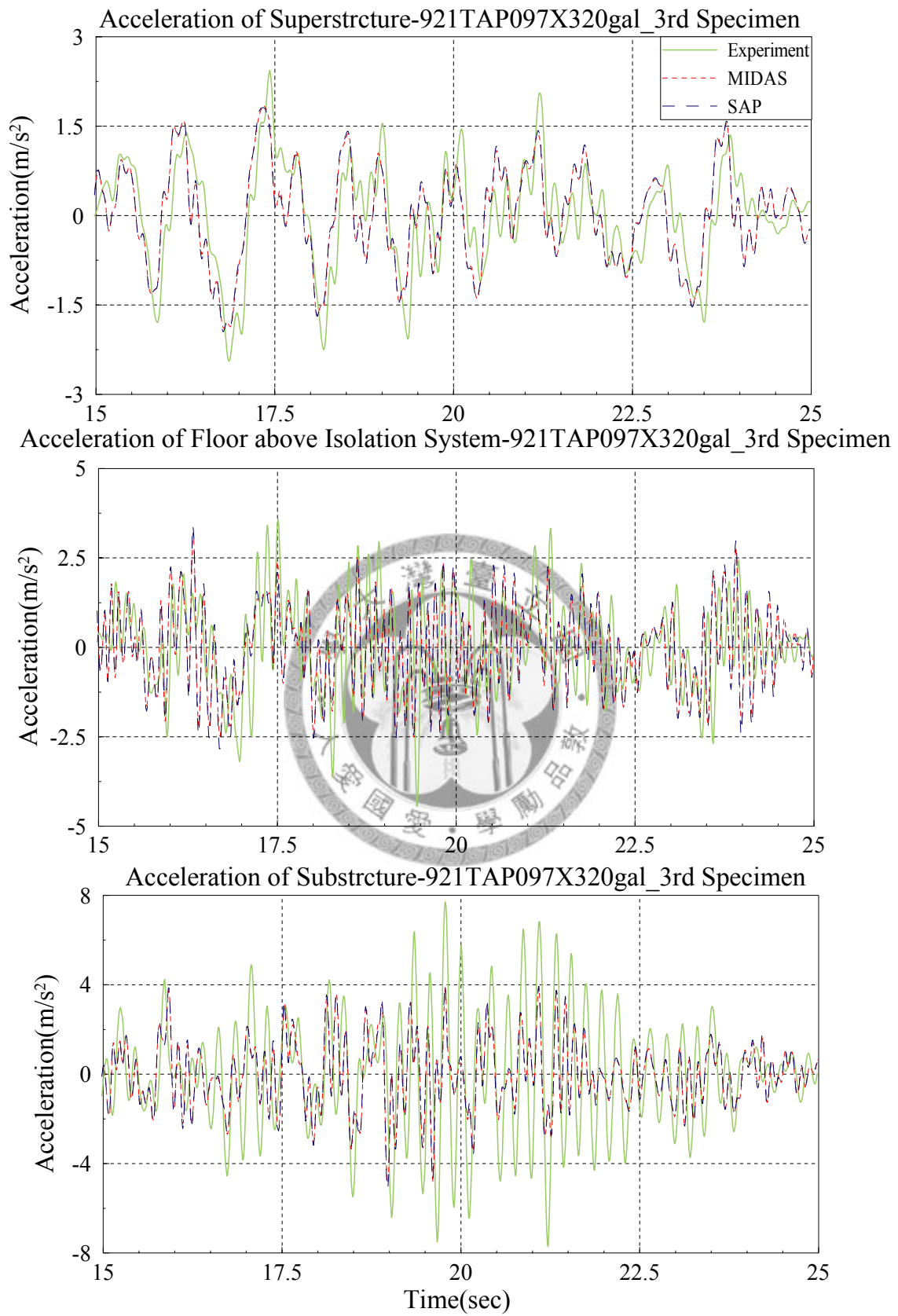


圖 5.2.26 第三組試體 921TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

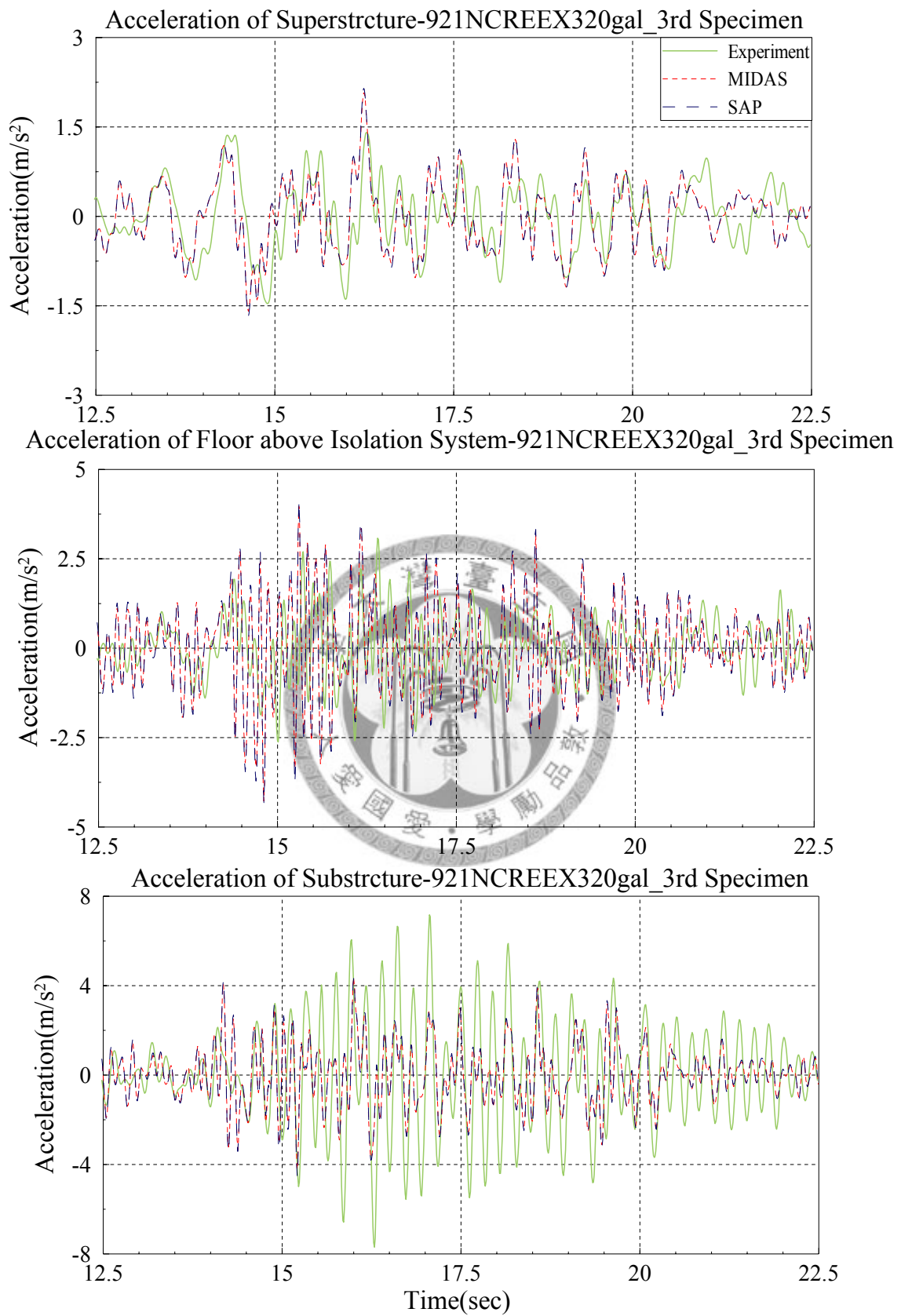


圖 5.2.27 第三組試體 921NCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

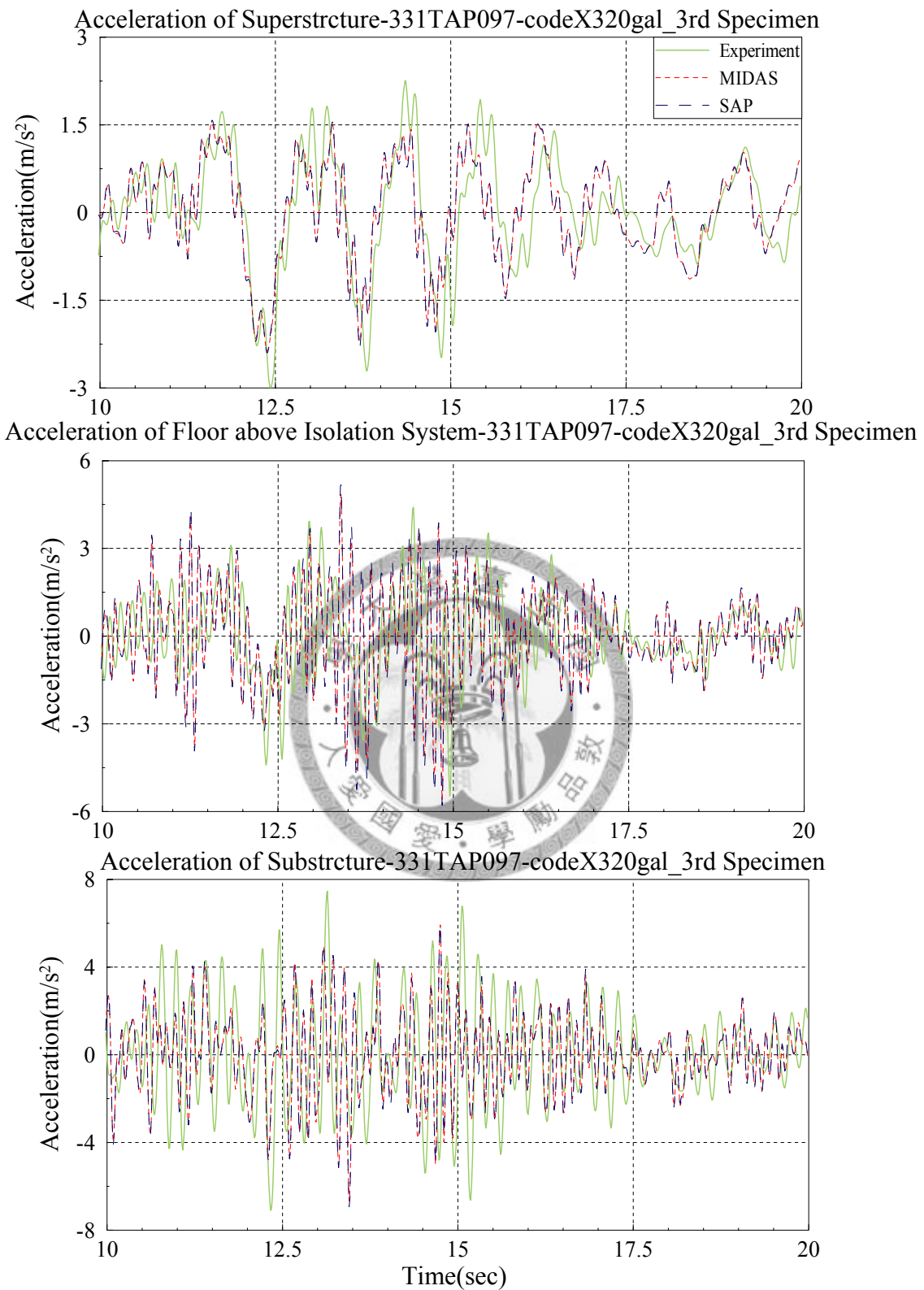


圖 5.2.28 第三組試體 331TAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

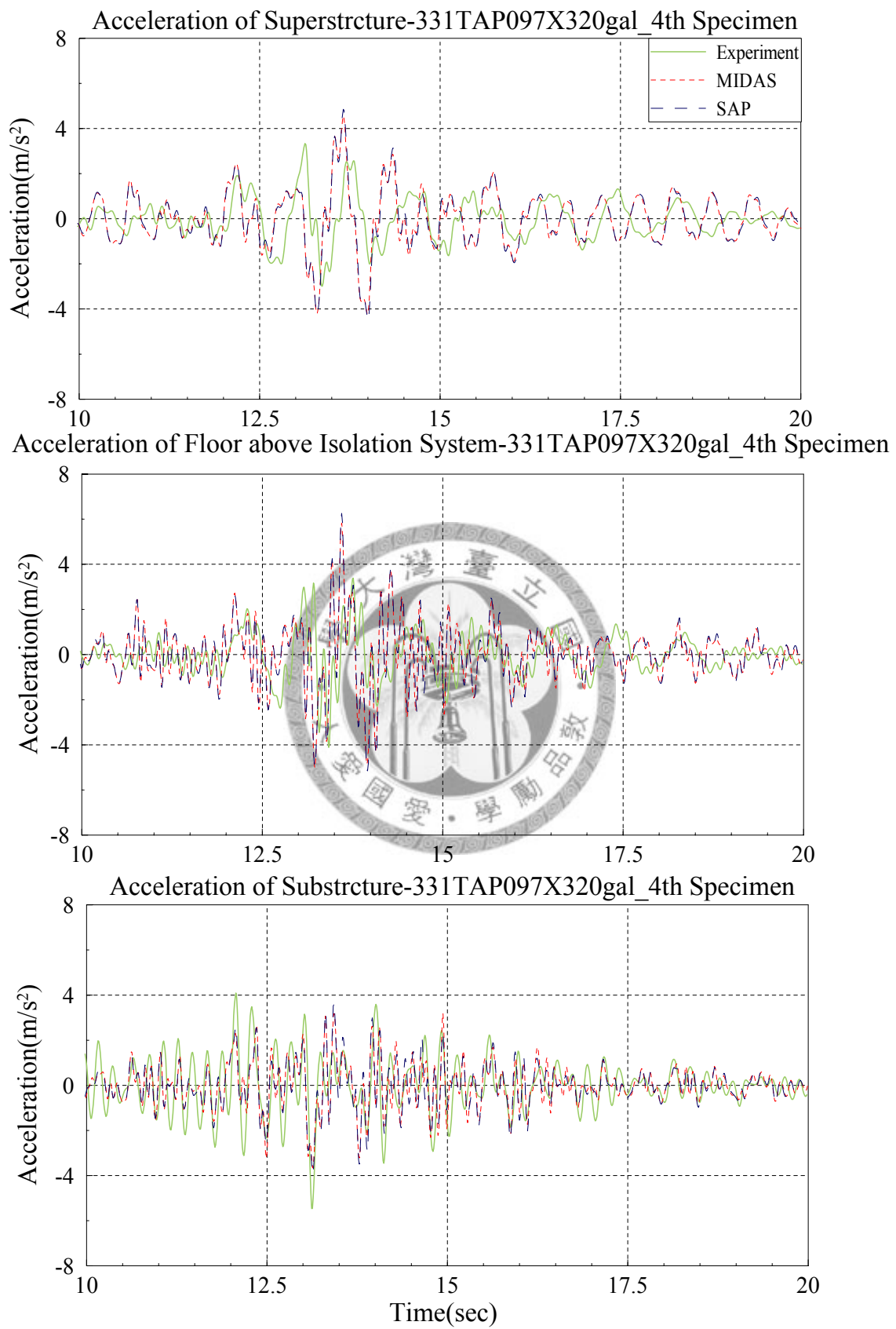


圖 5.2.29 第四組試體 331TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

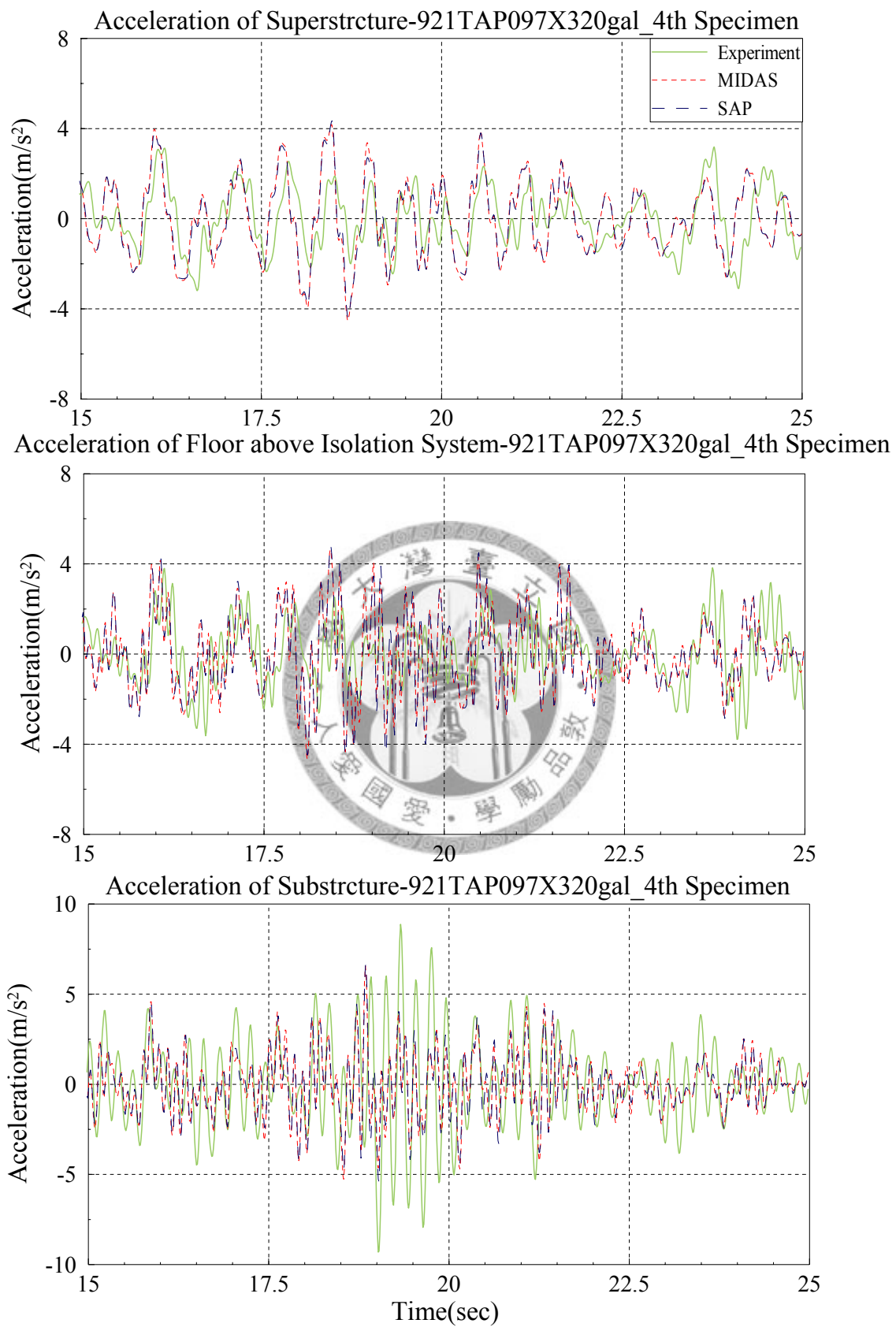


圖 5.2.30 第一組試體 921TAP097X320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

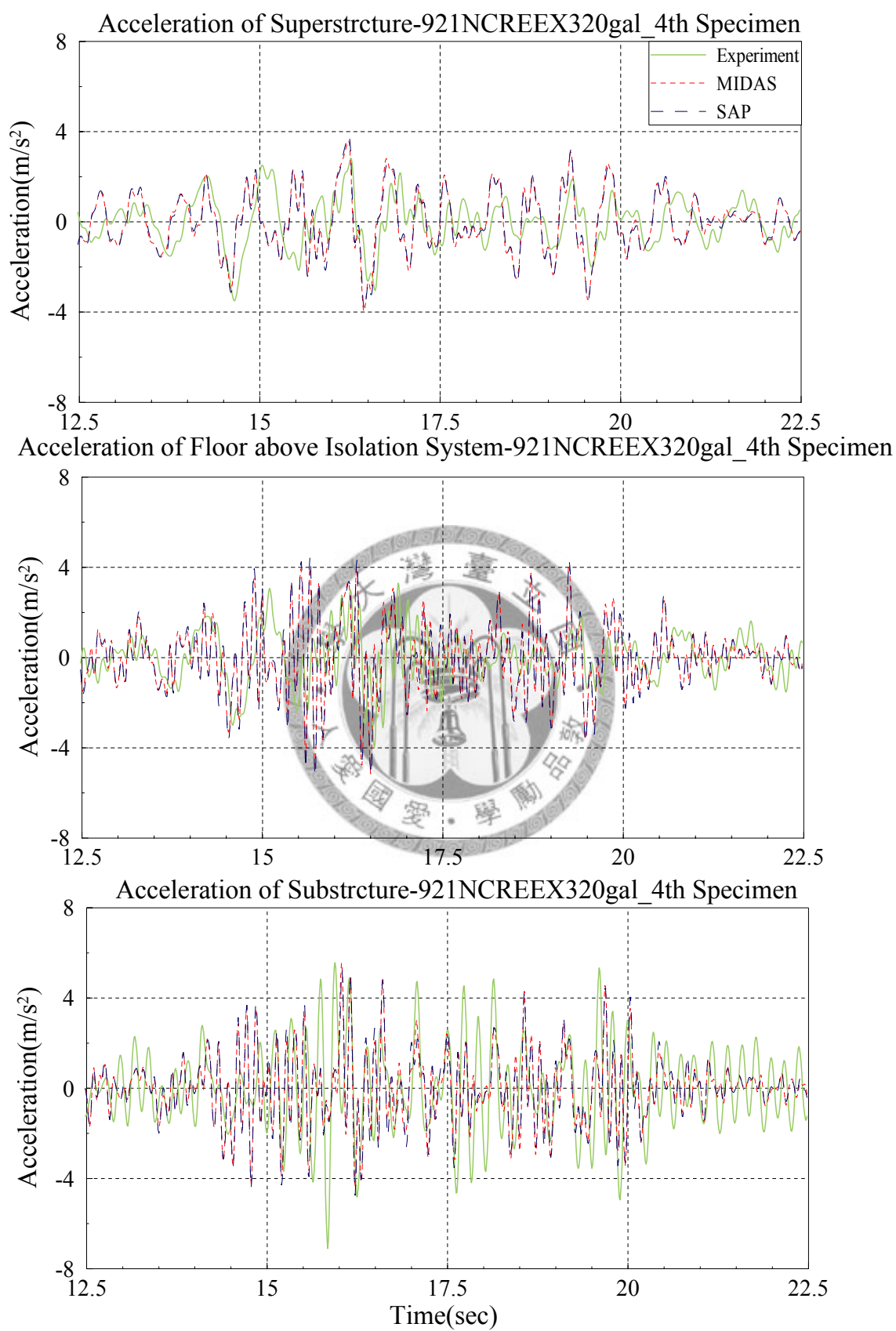


圖 5.2.31 第四組試體 921NCREEX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

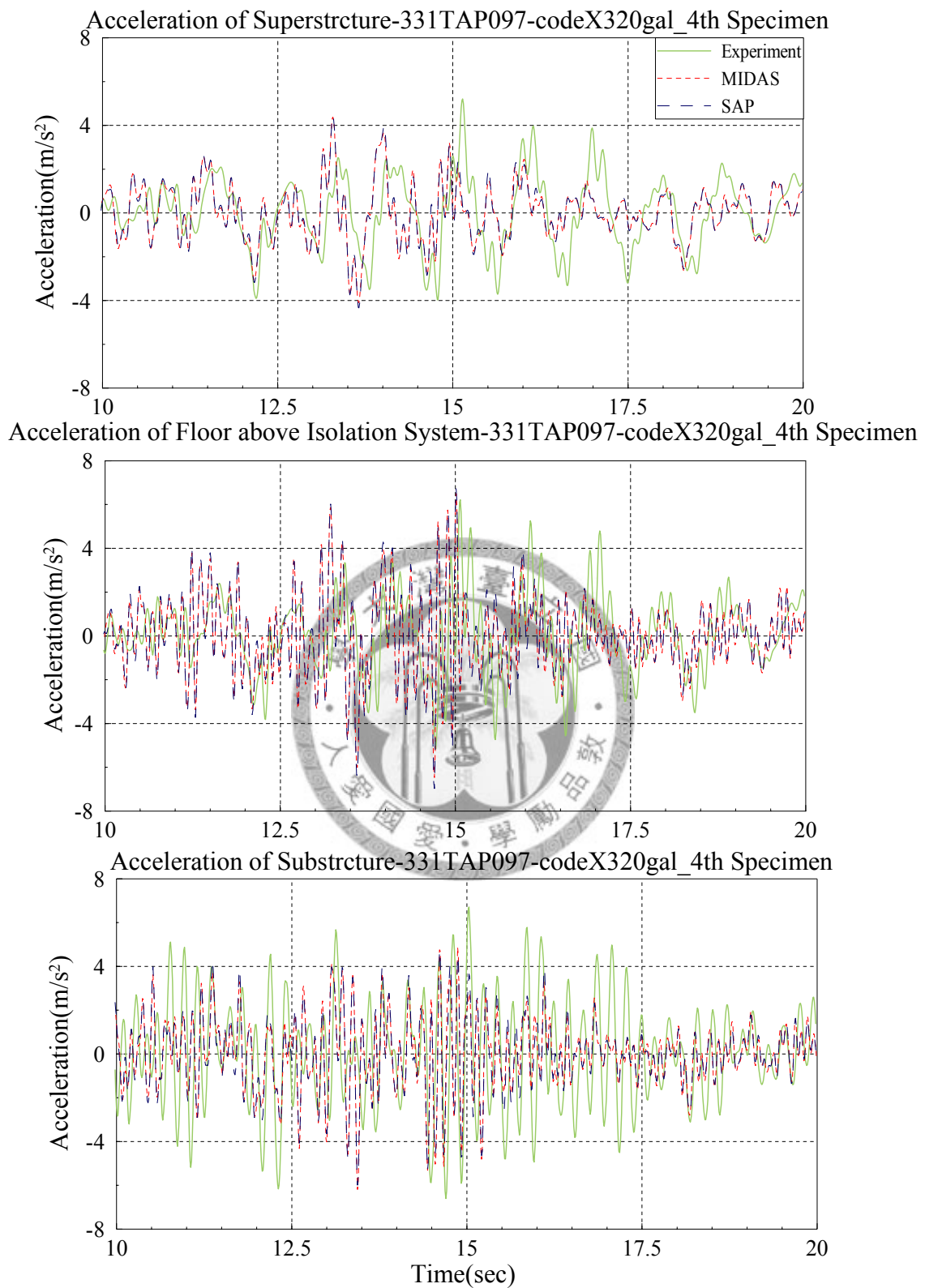


圖 5.2.32 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 加速度歷時(LRB 參數取試驗值)

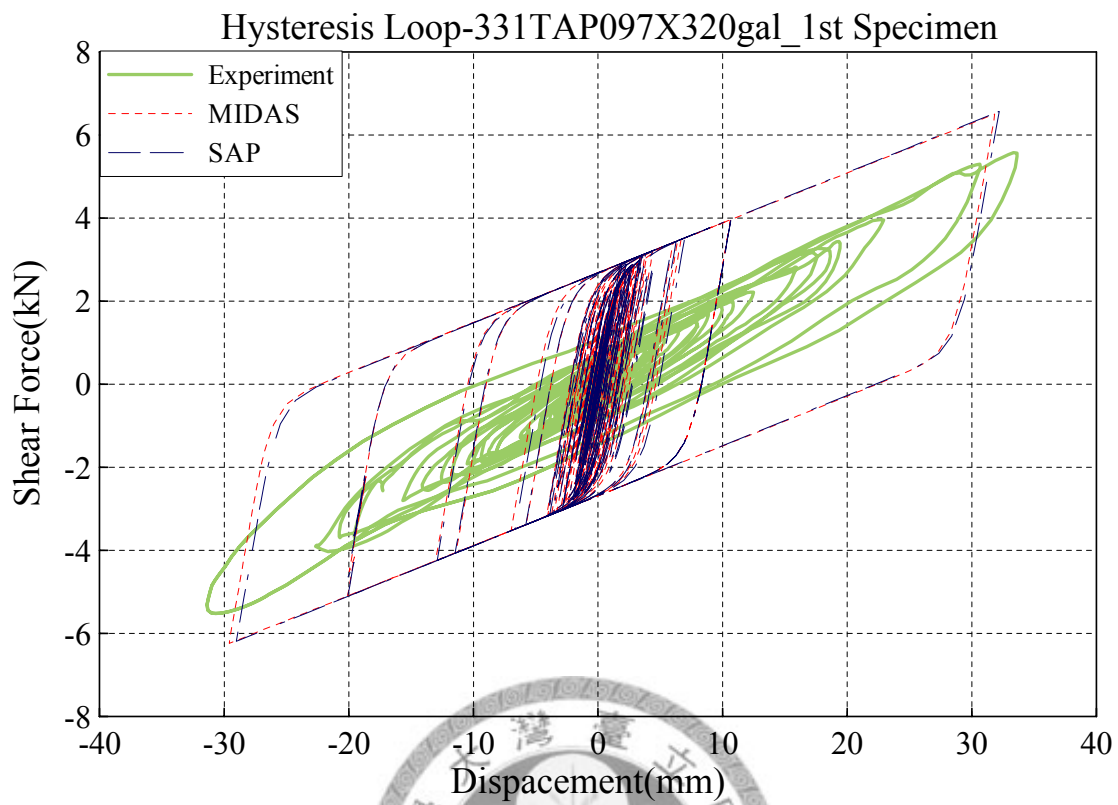


圖 5.2.33 第一組試體 331TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)

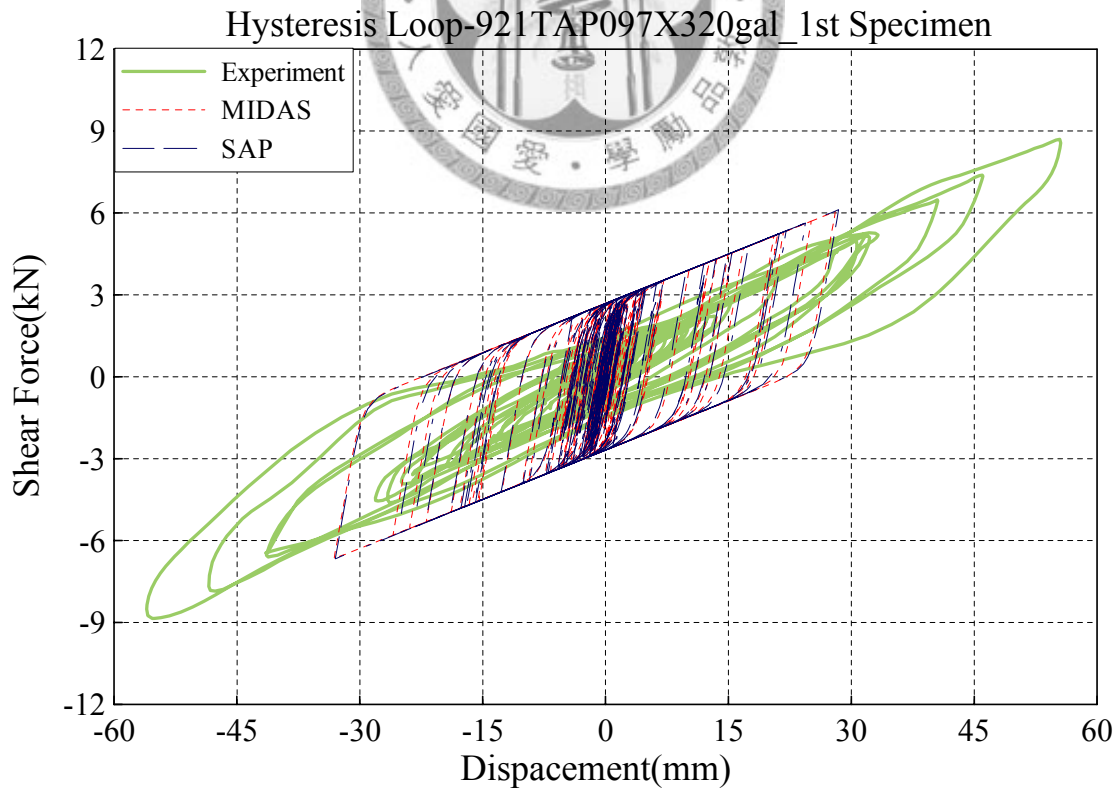


圖 5.2.34 第一組試體 921TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)

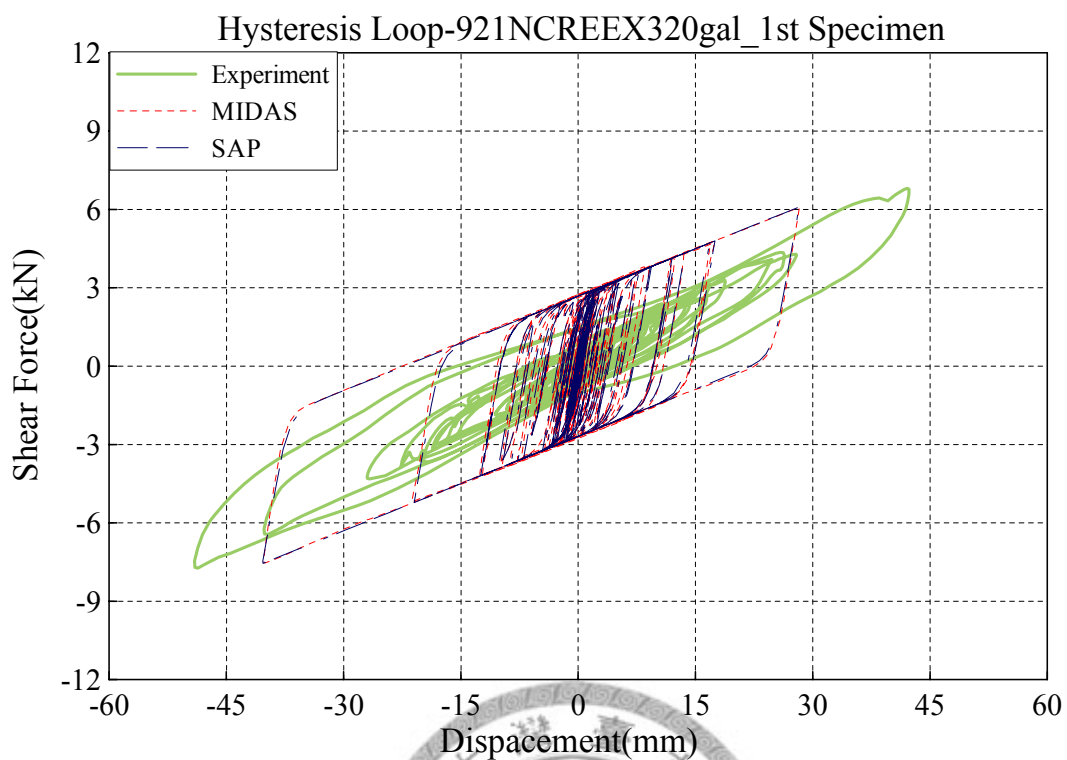


圖 5.2.35 第一組試體 921NCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)

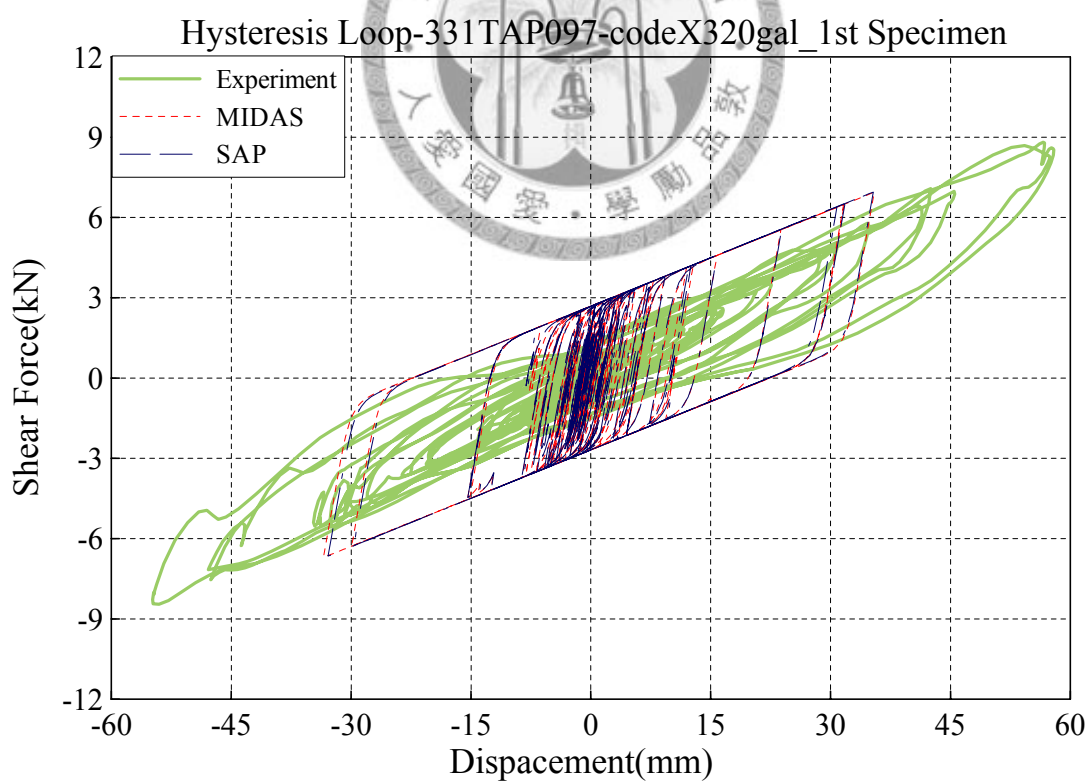


圖 5.2.36 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取元件測試值)

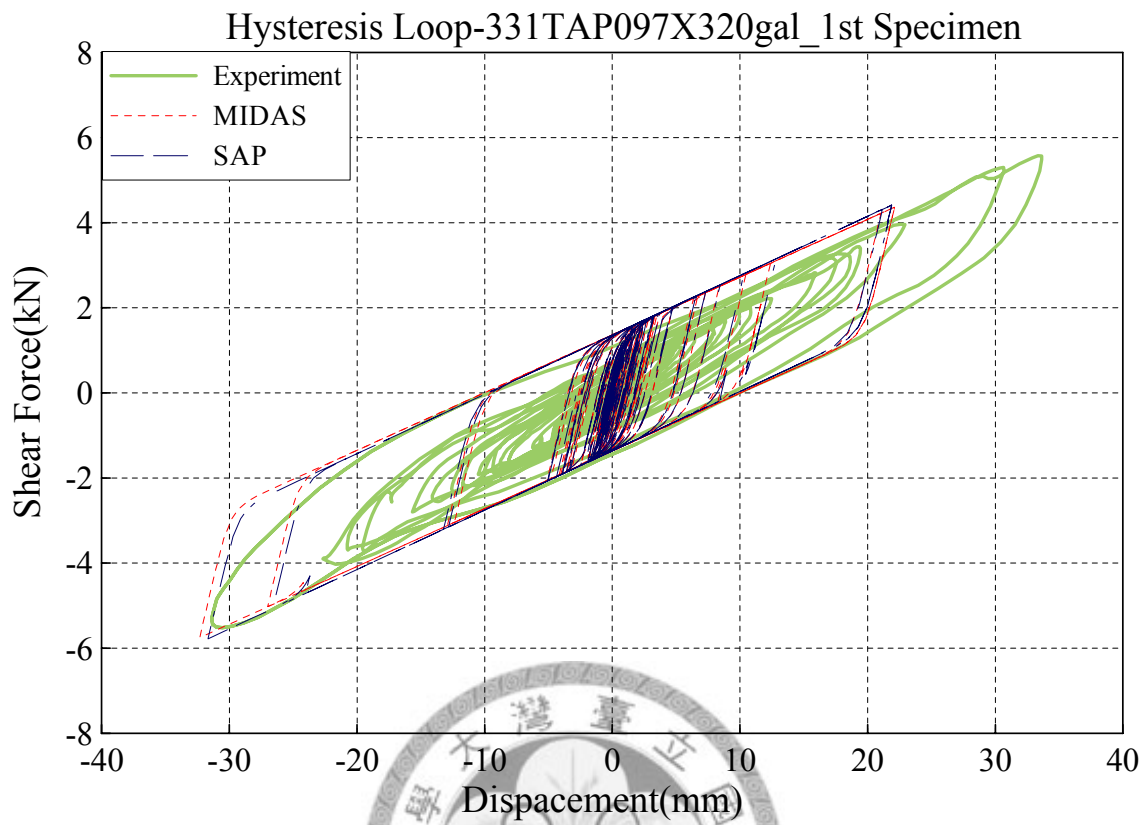


圖 5.2.37 第一組試體 331TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

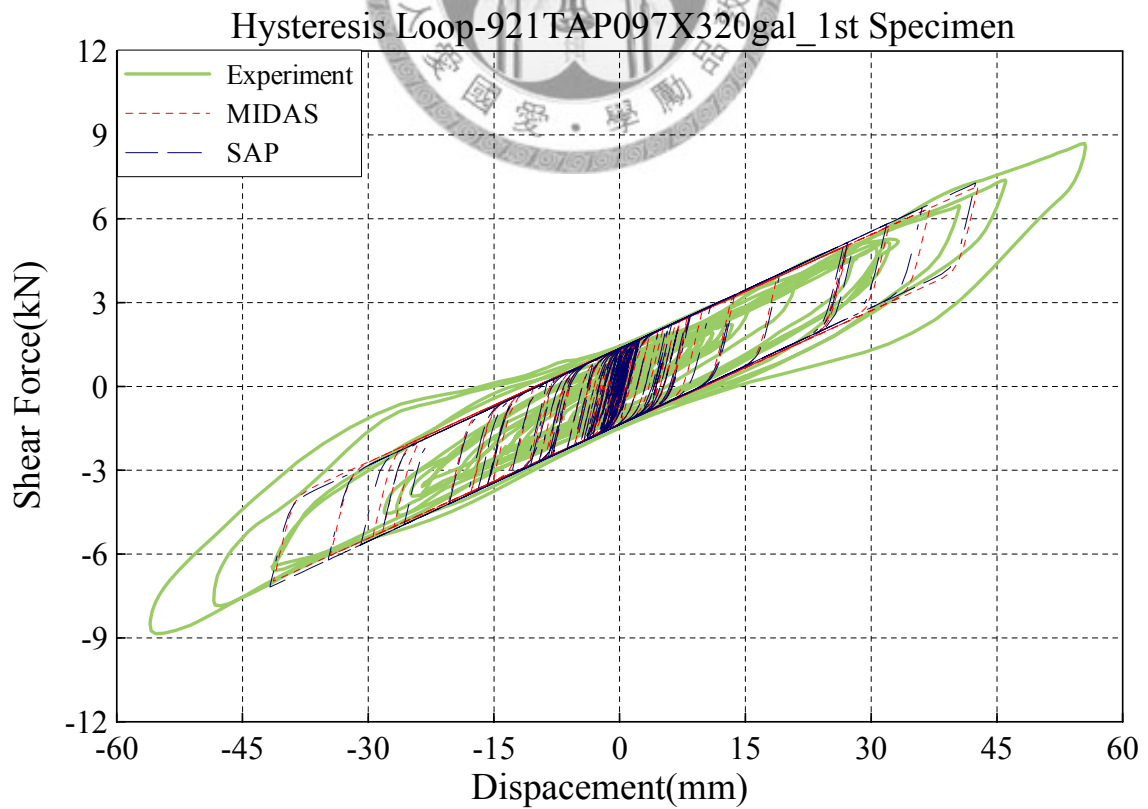


圖 5.2.38 第一組試體 921TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

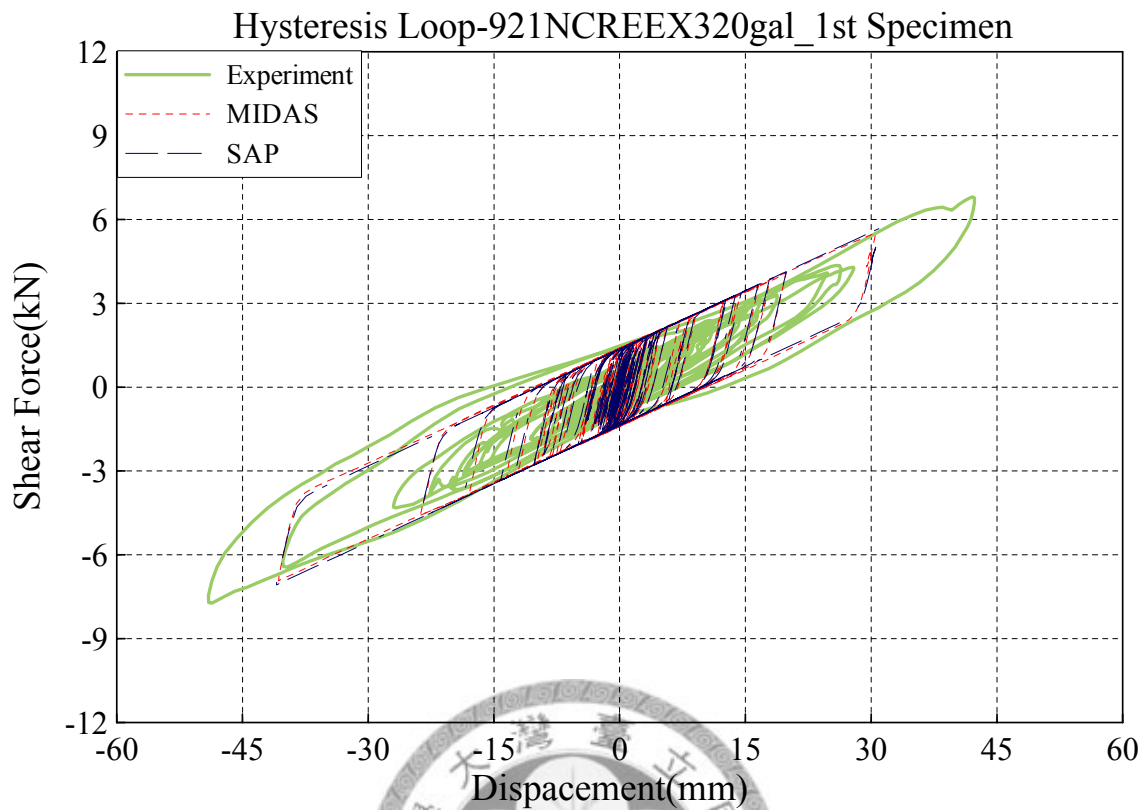


圖 5.2.39 第一組試體 921NCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

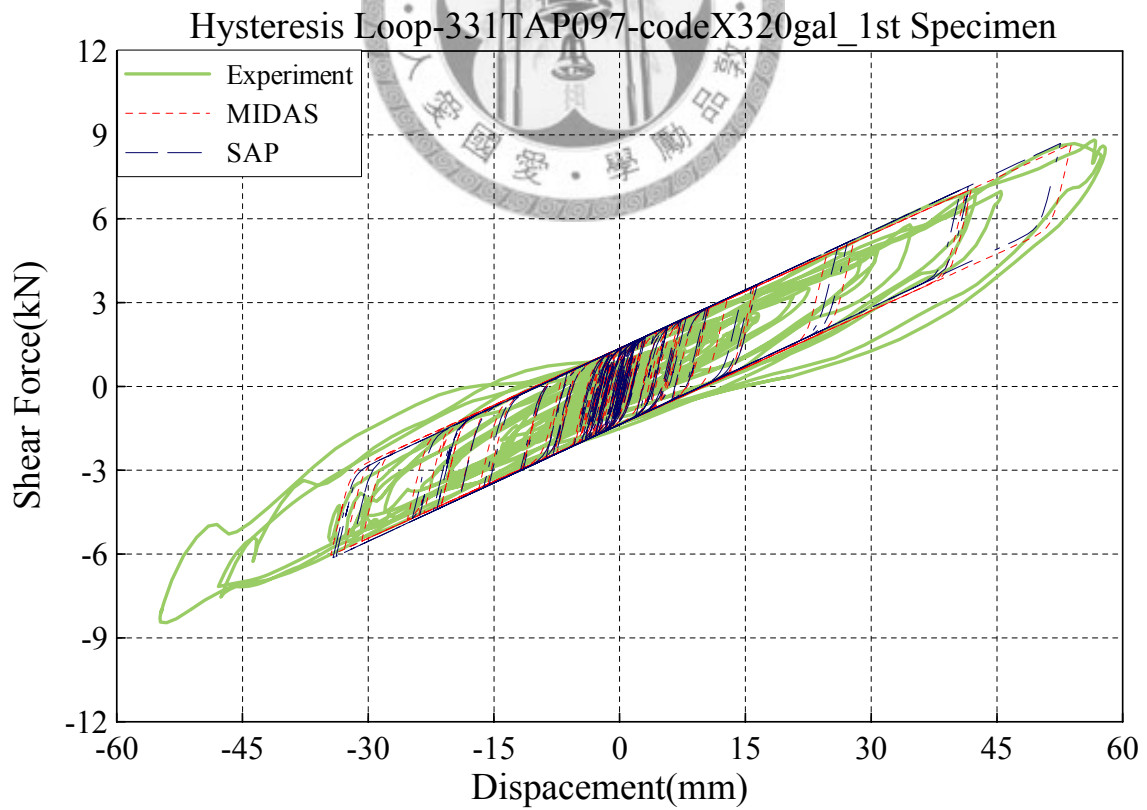


圖 5.2.40 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

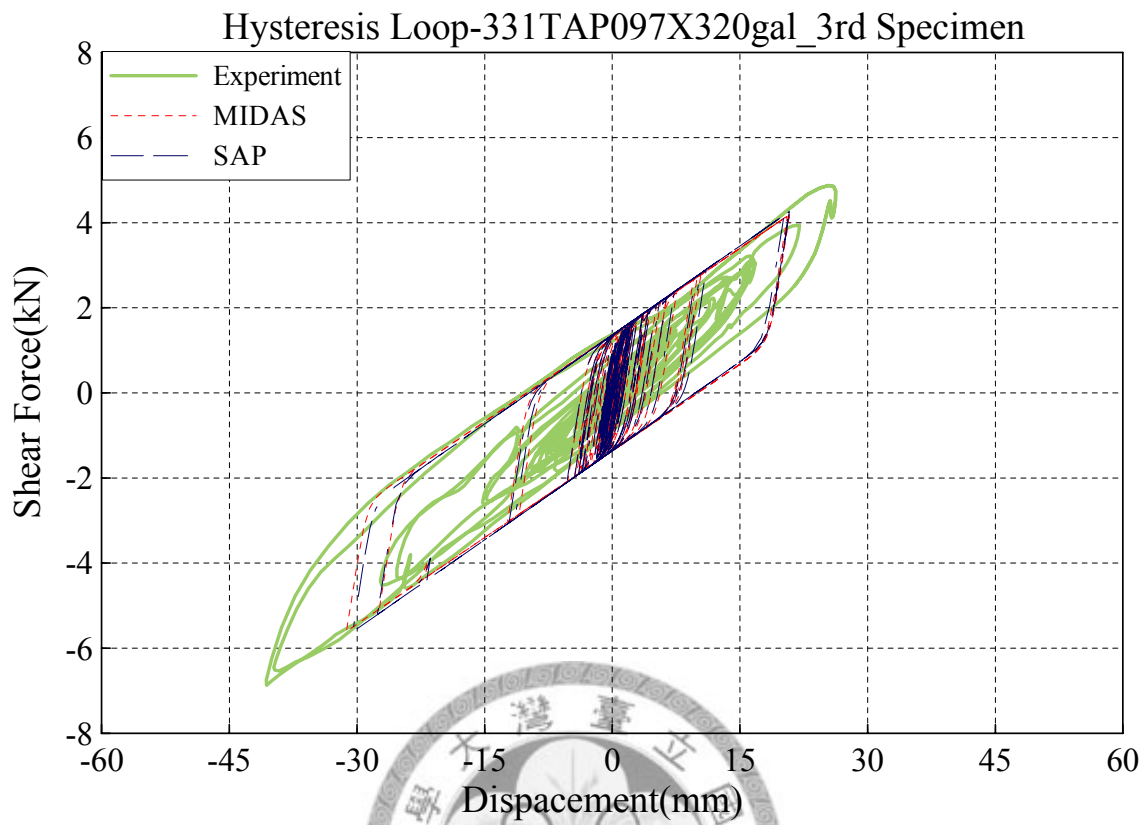


圖 5.2.41 第三組試體 331TAP097X320gal 遲滯迴圈 (LRB 參數取試驗值)

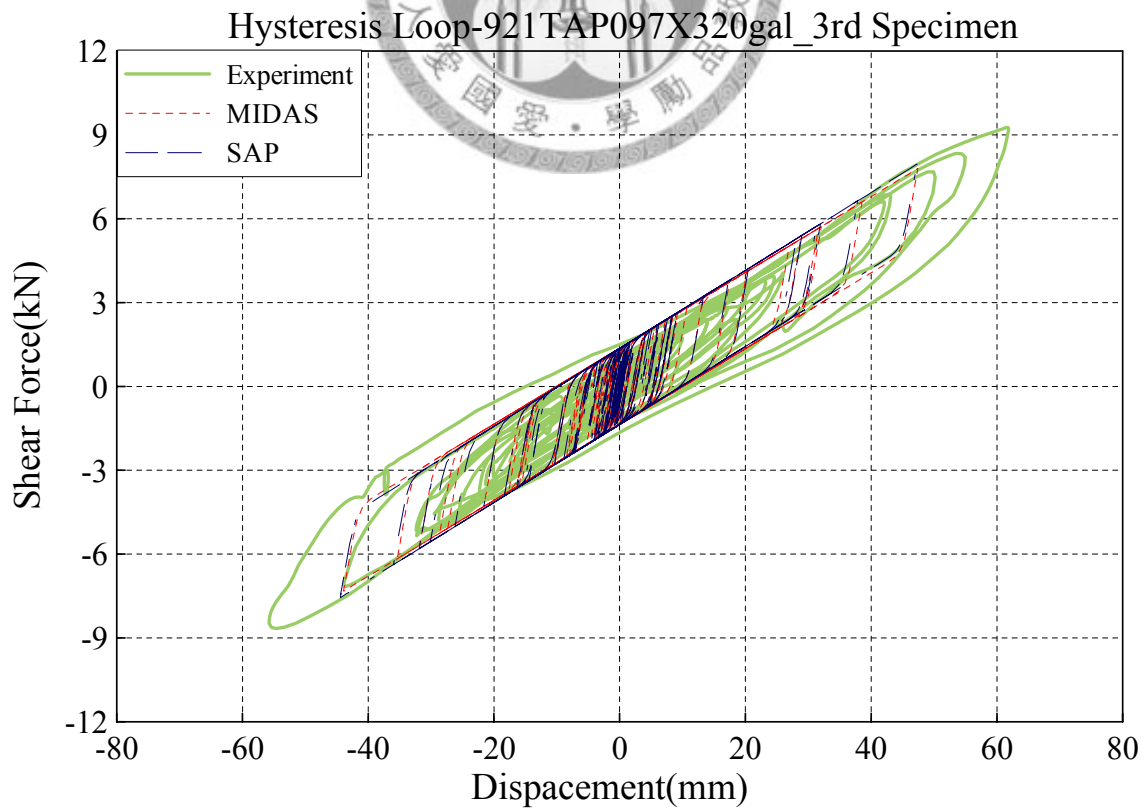


圖 5.2.42 第三組試體 921TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

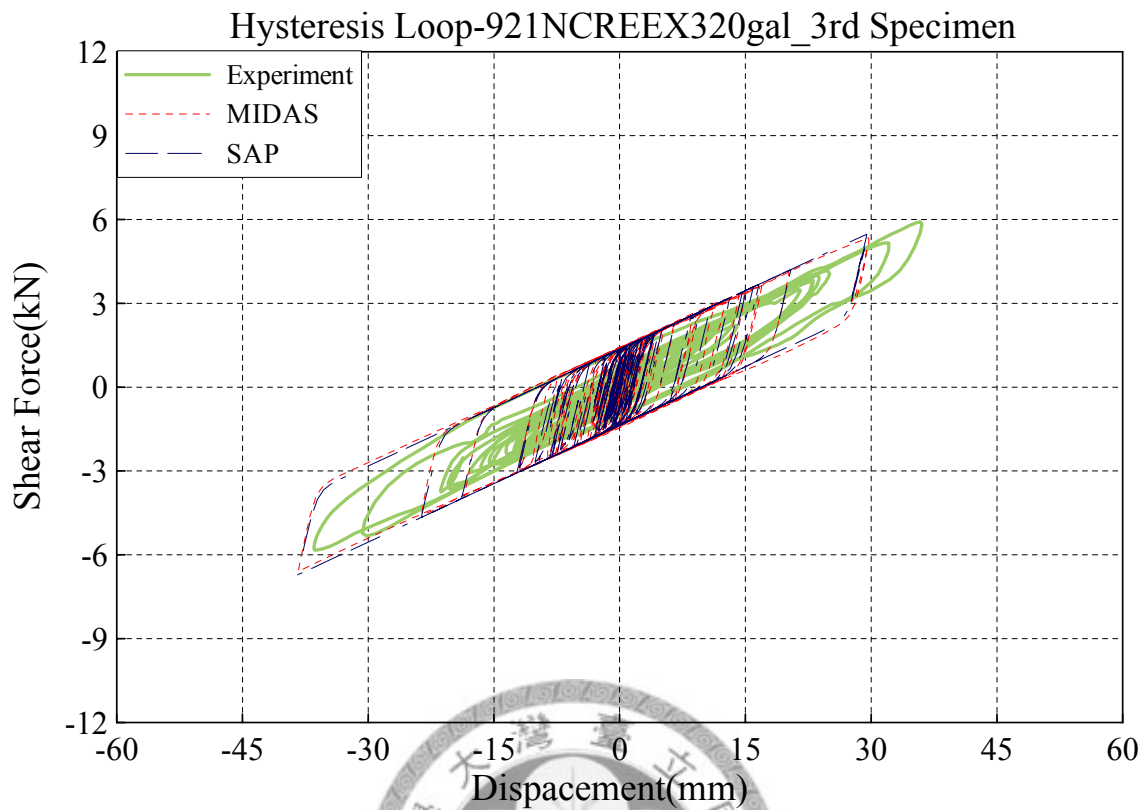


圖 5.2.43 第三組試體 921NCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

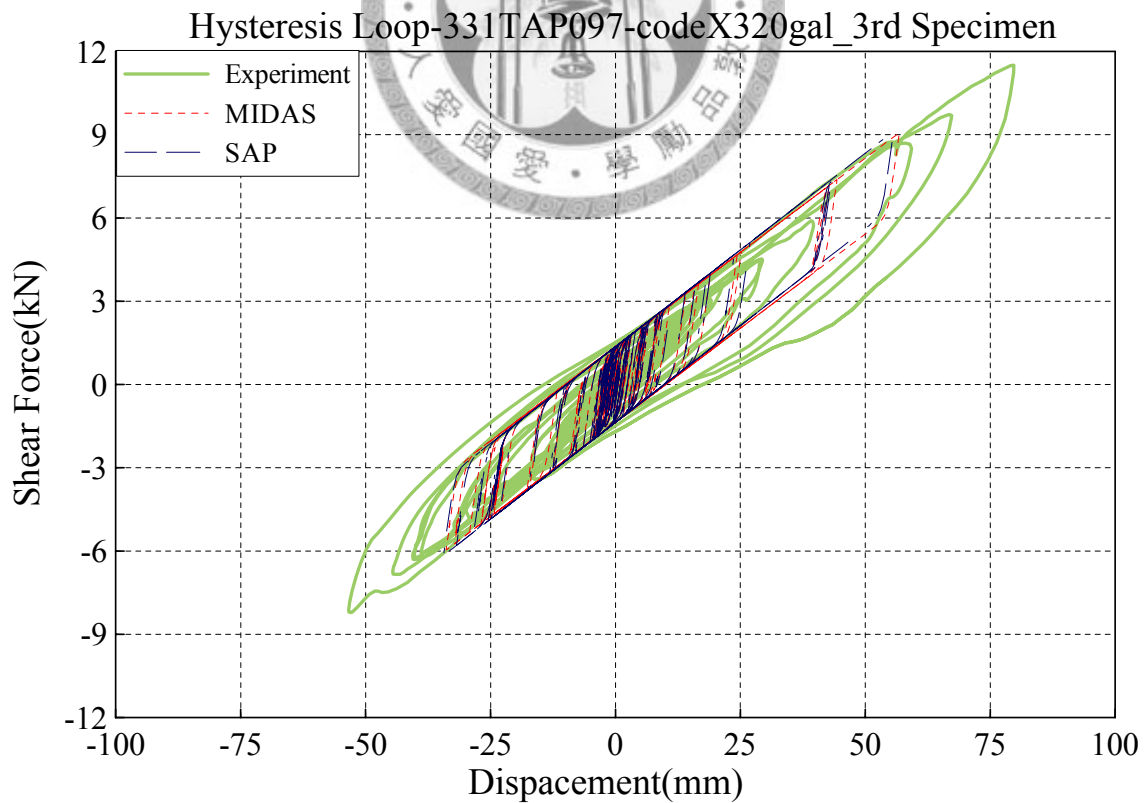


圖 5.2.44 第三組試體 331TAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

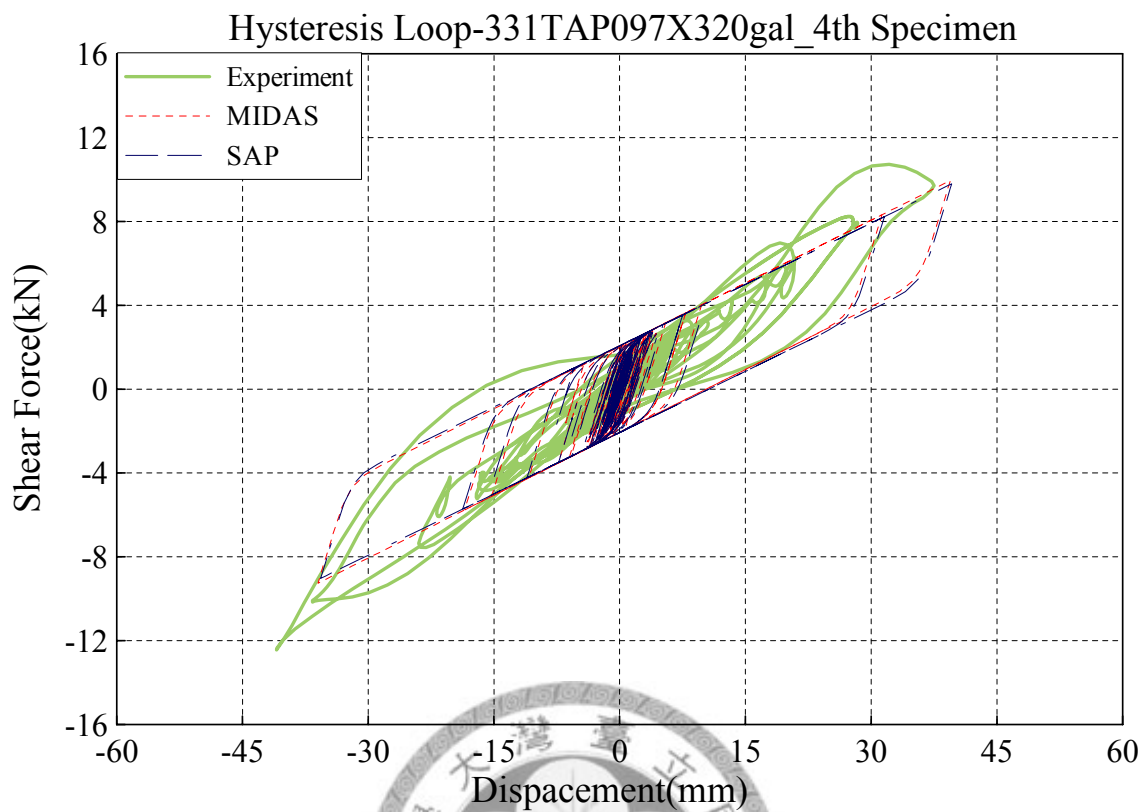


圖 5.2.45 第四組試體 331TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

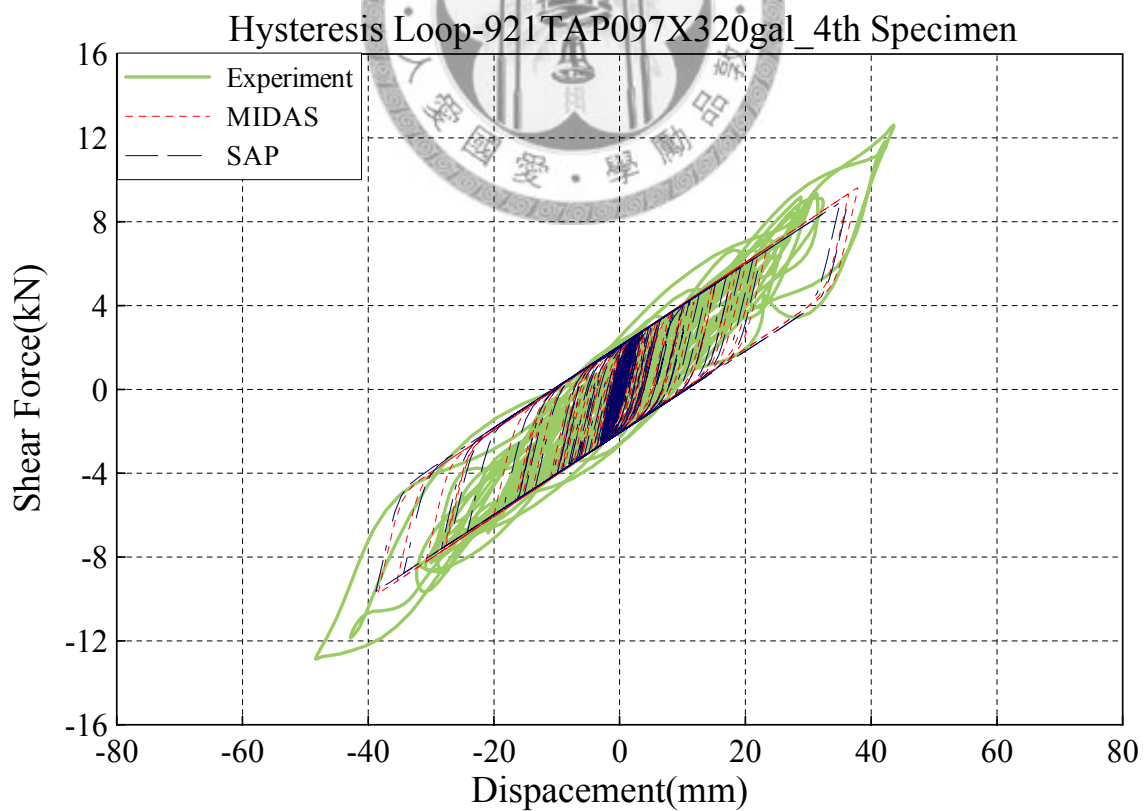


圖 5.2.46 第四組試體 921TAP097X320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

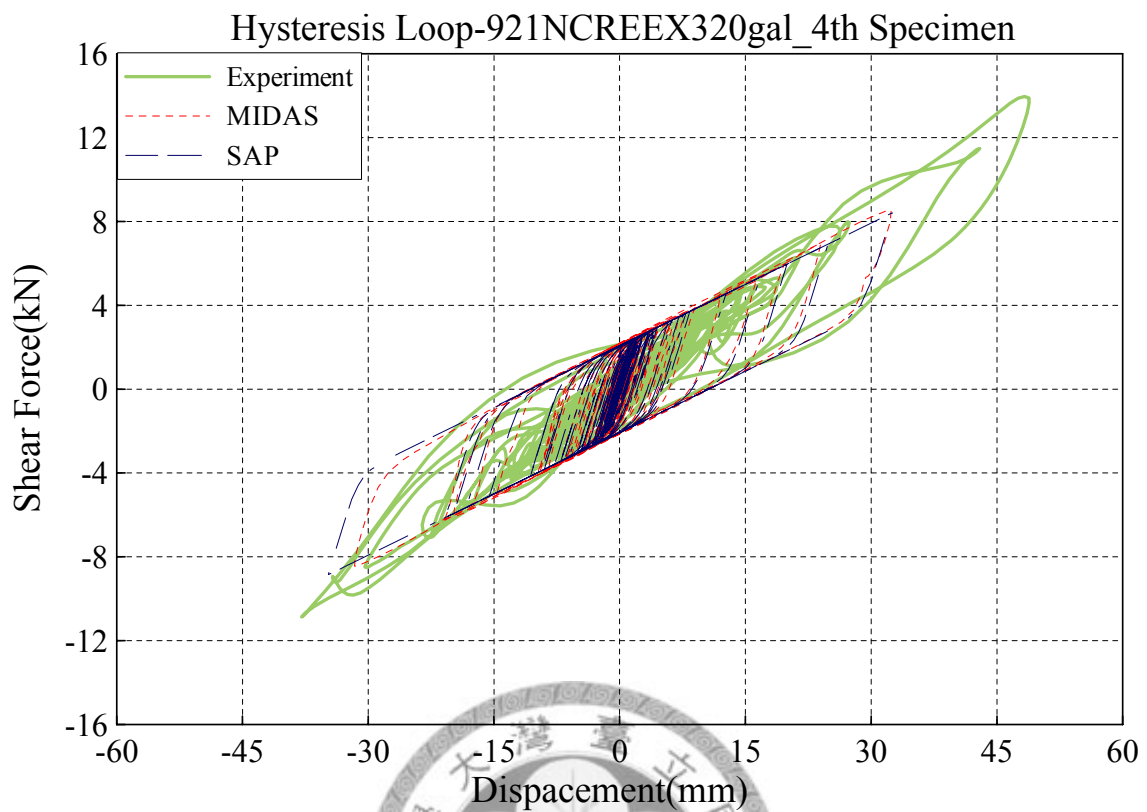


圖 5.2.47 第四組試體 921NCREEX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

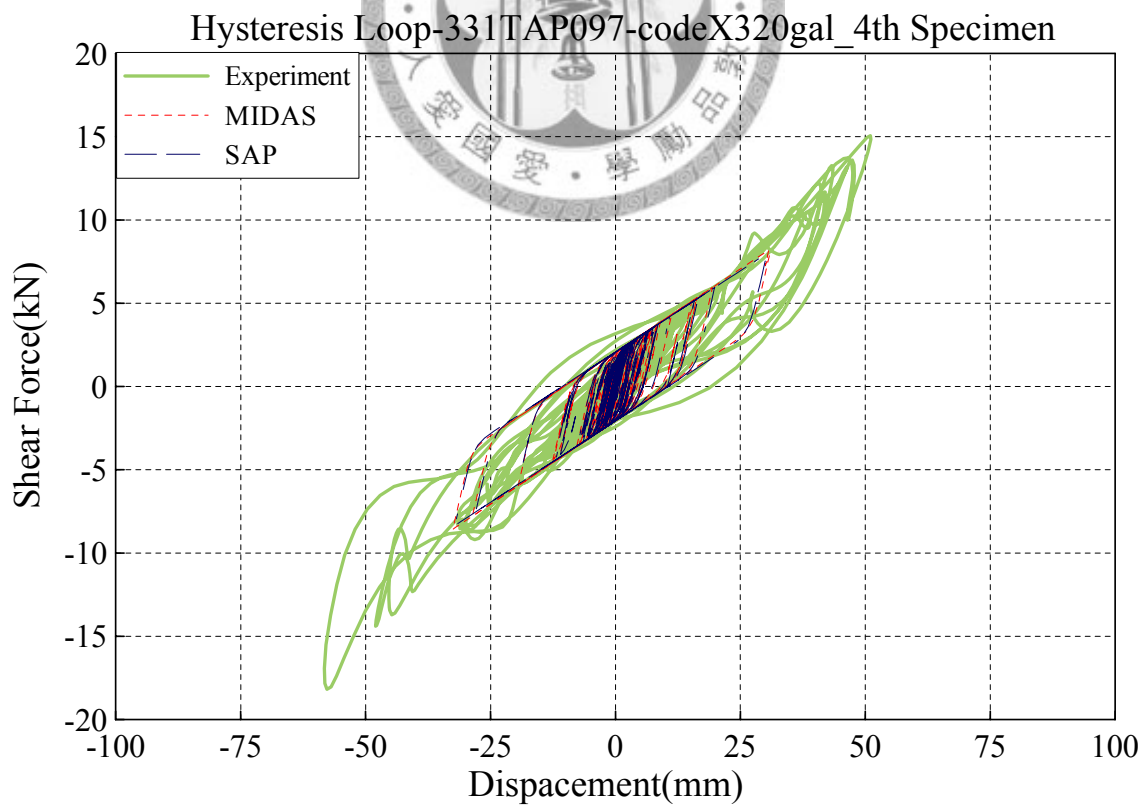


圖 5.2.48 第四組試體 331TAP097-codeX320gal 遲滯迴圈(LRB 參數取試驗值)

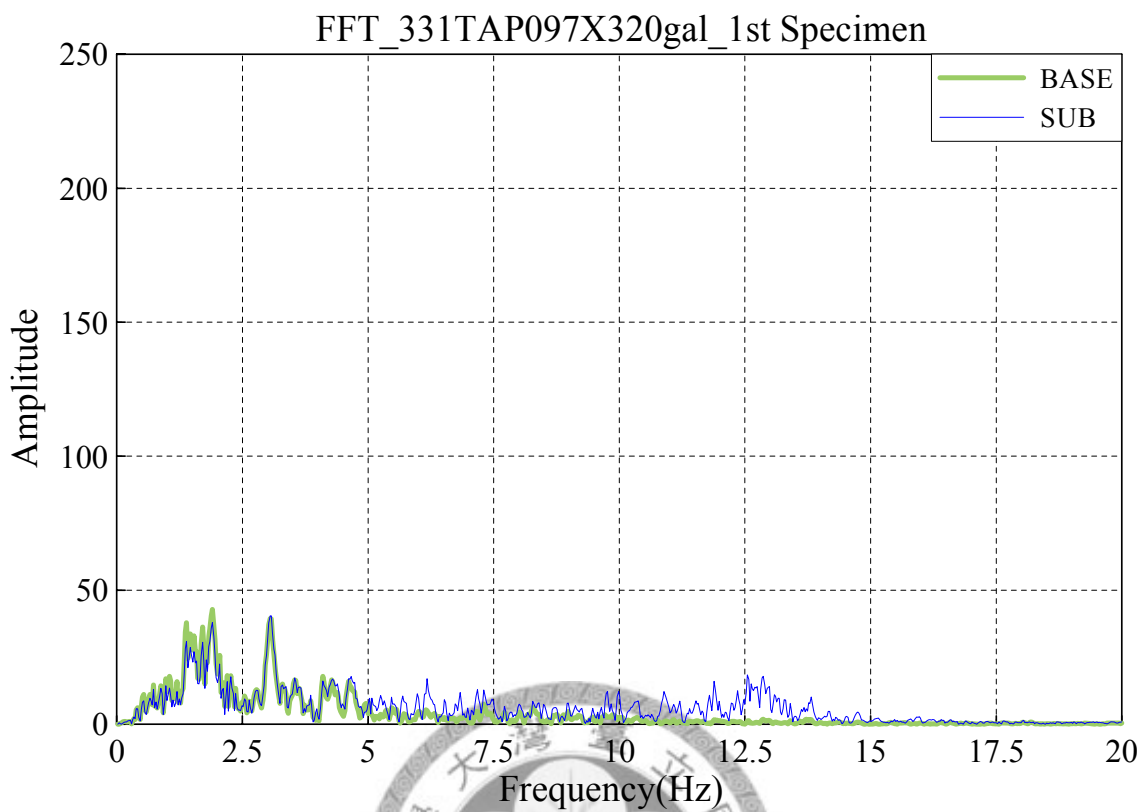


圖 5.2.49 第一組試體 331TAP097X320gal 傅立葉轉換

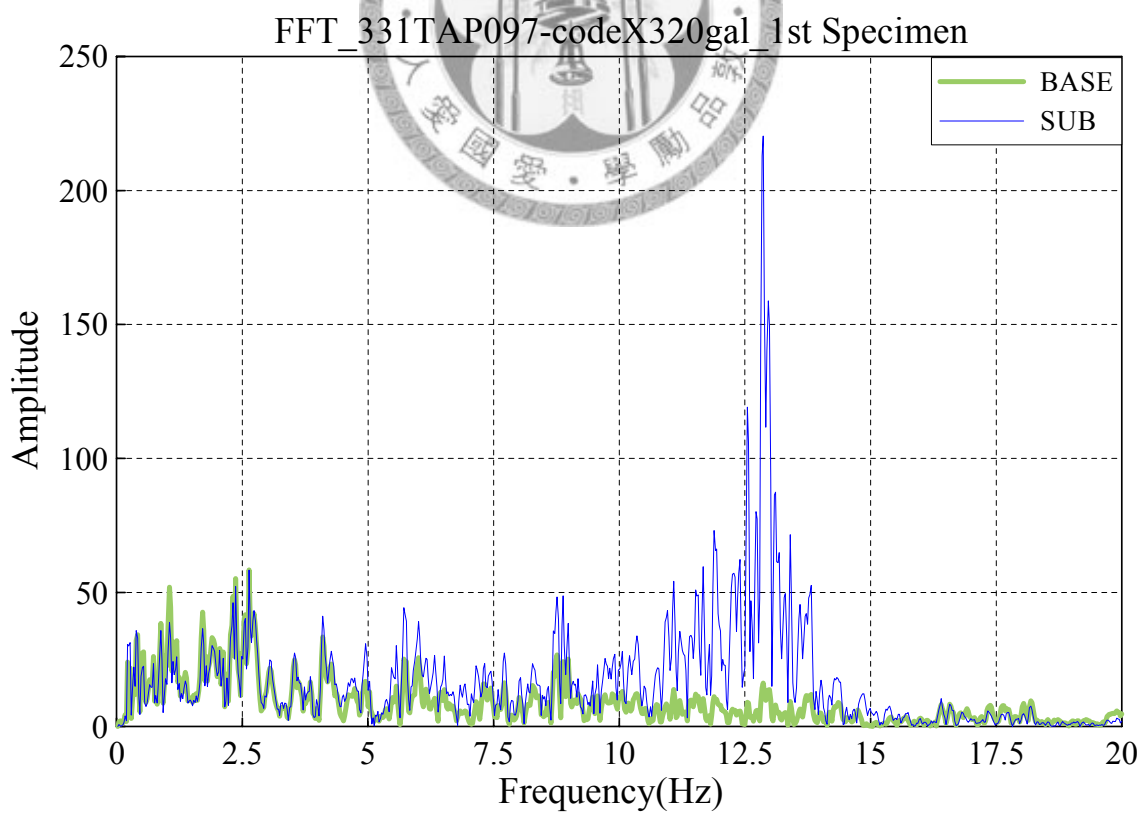


圖 5.2.50 第一組試體 331TAP097-codeX320gal 傅立葉轉換

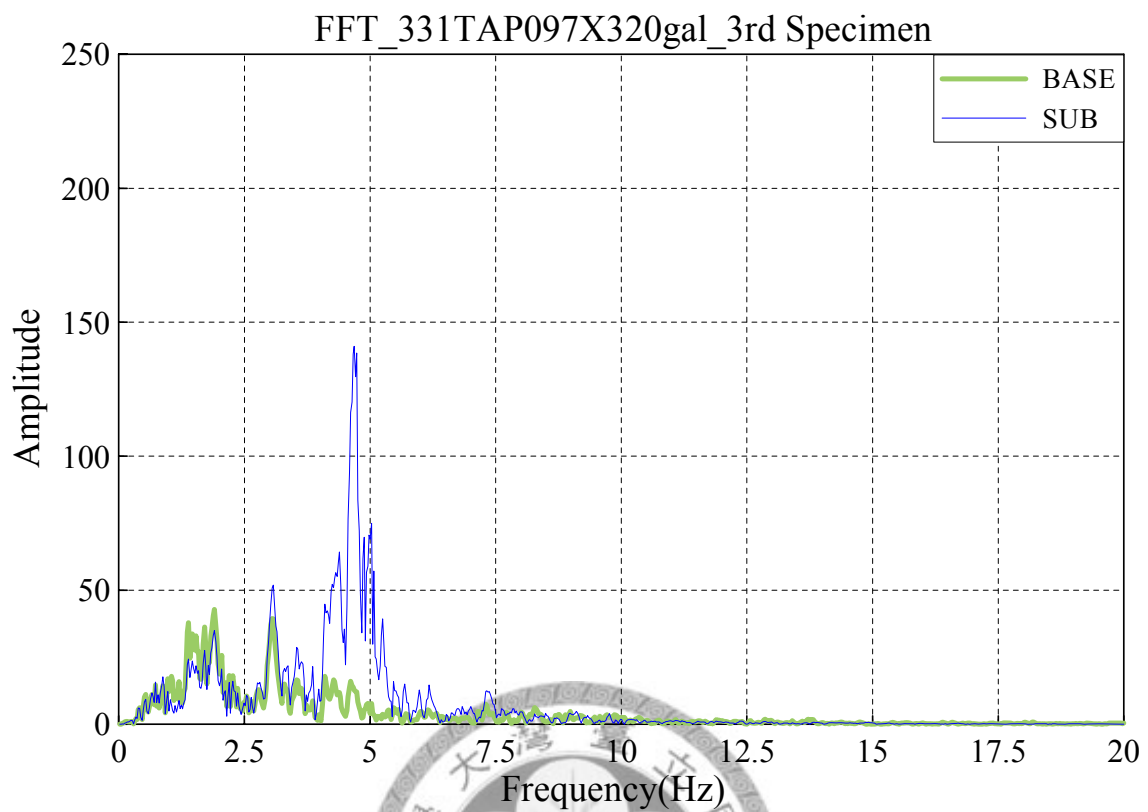


圖 5.2.51 第三組試體 331TAP097X320gal 傅立葉轉換

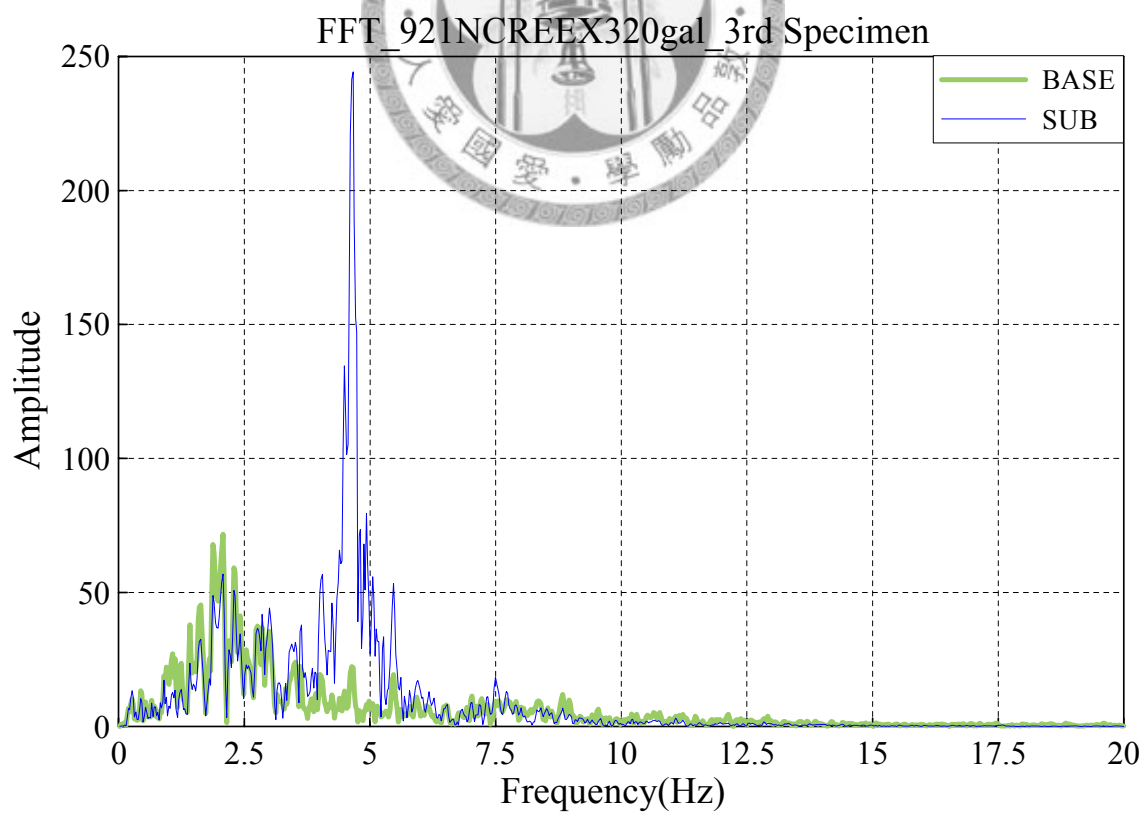


圖 5.2.52 第三組試體 331TAP097X320gal 傅立葉轉換

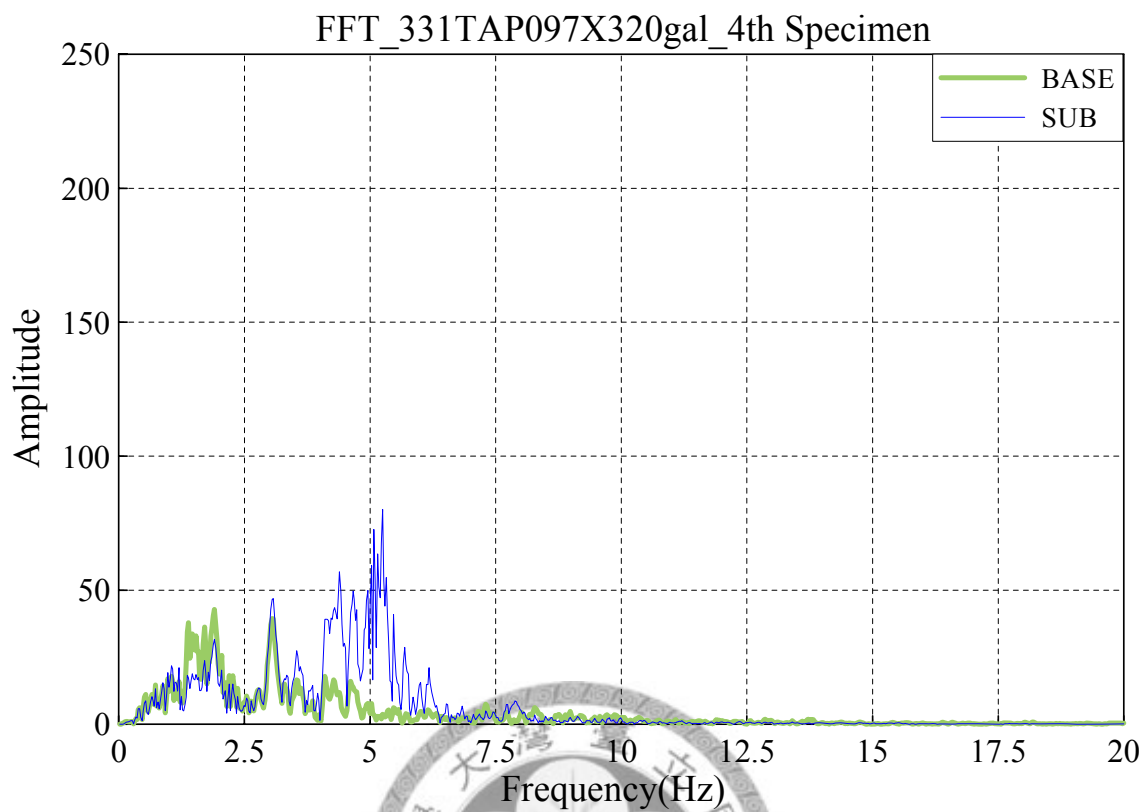


圖 5.2.53 第四組試體 331TAP097X320gal 傅立葉轉換

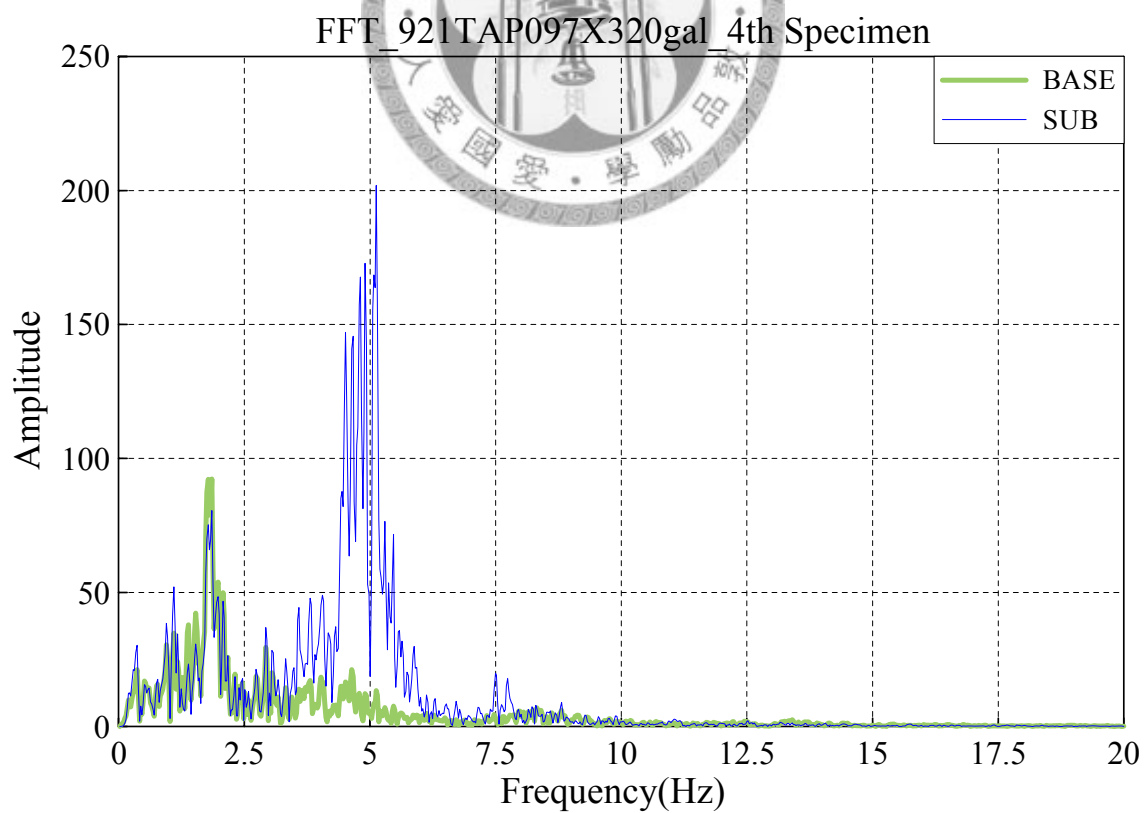


圖 5.2.54 第四組試體 921TAP097X320gal 傅立葉轉換

第六章 結論與未來展望

本文主要研究模態耦合效應對中間層隔震結構的影響，由中間層隔震結構簡化之三自由度結構，改變上下部結構對隔震層上方樓板之質量比與頻率比進行反應譜分析，以興建中的台大土木研究大樓為中間層隔震結構之實例做分析研究，並進行中間層隔震結構縮尺振動台試驗，驗證模態耦合效應並探討結構動態特性，綜合以上五章內容，提出幾點結論如下：

1. 實例分析與實驗結果顯示，中間層隔震結構相對於一般基礎隔震結構第一模態質量參與因子較小，高模態貢獻量變大，應考慮高模態特性進行中間層隔震結構設計。
2. 由參數分析與實驗結果觀察，台大土木研究大樓與第一、二組縮尺試驗結構之高模態貢獻量較高，但識別結果並無模態耦合效應，得知中間層隔震結構高模態參與比例與模態耦合效應無絕對相關，需各別探討。
3. 由實驗結果得知，縮尺試驗下部結構剪力放大，其值多高於隔震層上方樓板剪力 1.25 倍，顯示設計規範規定值不盡保守，待進一步研究。
4. 實驗結果發現，模態耦合效應容易造成下部結構加速度放大使隔震層較無法降低結構反應，大於基底加速度值，此現象與隔震設計理念不符，無法達到預期之隔震效果。
5. 在第五章數值模擬分析中，三四組試體高模態週期與模態質量參與因子皆無法有效模擬，從下部結構加速度反應與頻率域分析結果得知，當高模態參與反應愈大時，可能會造成模擬結果不準確。

試驗結果之上部結構加速度反應皆小於隔震層上方樓板反應，此原因可能為設計中間層隔震縮尺震動台試驗時，將真實結構隔震層上部多自由度樓層簡化成單自由度，承載重量過大導致無法有效模擬真實結構物多自由度頂

層反應。故建議未來可於上部結構增加樓層數，進一步實驗以了解中間層隔震建築之動態行為。



參考文獻

1. 陶其駿，厲妮妮，隔震建築應用與使用管理通俗化手冊之研擬，內政部建築研究所研究報告，2006。
2. 建築物隔震設計規範，內政部，民國 91 年 4 月。
3. 建築物耐震設計規範及解說，內政部，民國 94 年 7 月。
4. Tadaki Koh and Masahito Kobayashi, "Vibratory Characteristics and Earthquake Response of Mid-Story Isolated Buildings," Memoirs of the Institute of Sciences and Technology, Meiji University, Vol. 39(12), pp 97-114, 2000.
5. Tadaki Koh and Masahito Kobayashi, "Analytical Study of Modal Coupling Effect on Mid-story Isolation System by Eigen Value Analysis and Random Vibration Analysis," Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan (Hokkaido), pp 21167-21168, 2004.
6. 陳攻君，中間層隔震與速度型阻尼器配合隔震建築物之地震靜動力分析，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，蔡益超教授指導，民國九十三年六月。
7. 蔡宜真，中間層隔震縮尺建築物振動台試驗研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，張國鎮教授指導，民國九十六年一月。
8. 江春琴，中間樓層隔震建築之耐震行為研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，張國鎮教授指導，民國九十六年六月。
9. ANIL K. CHOPRA, "Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering", second edition, Prentice Hall, 2001.
10. 吳思誼，新式滾動隔震支承應用於縮尺橋樑振動台試驗研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，張國鎮教授指導，民國九十四年六月。
11. 蔡益超、詹添全，建築物隔震設計與施工，民國九十四年。
12. 張國鎮、黃震興、蘇晴茂、李森枏，結構消能減震控制及隔震設計，全華科技圖書，民國九十三年。

13. Farzad Naeim and James M. Kelly , ”Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice” ,John wiley & Sons , 1999 , New Work.
- 14.Keiji Ogura, et al., “ Seismic Response of Mid-Story Isolated Buildings ”, 1999.
- 15.Masahito Kobayashi, et al., “Prediction Method of Earthquake Responses on Mid-Story Isolated System Considering Modal Coupling Effect ”, 2003.
- 16.Katsuhide Murakami, et al., “Prediction for Seismic Responses of Two-Mass Model with Mid-story Isolation System ”, 2002.
- 17.Masahito Kobayashi and Tadaki Koh, “ Earthquake Response Prediction and Seismic Performance of Mid-Story Isolated System ”, 2002.
- 18.Li Xiang-Zhen, et al., “ Simplified Analysis on Calculation Model of Interlayer Seismic Isolation ”, 2002.
- 19.Xu Zhong-Gen and Zhou Fu-Lin, “ Discussion on Mid-Story Isolation of Building ”, 2004.
- 20.Roberto Villaverde, “A Seismic Roof Isolation System: Feasibility Study with 13-Story Building” , Journal of Structural Engineering,2002.

