

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

狀態空間 DLV 法在扭轉耦合結構之

地震損傷探測試驗研究

**An Experimental Study of State-Space DLV Method in  
Seismic Damage Detection of Torsionally Coupled Structures**

研究生：吳柏霖

指導教授：王彥博 教授

中華民國一〇〇年七月

狀態空間 DLV 法在扭轉耦合結構之地震損傷探測試驗研究

**An Experimental Study of State-Space DLV Method in  
Seismic Damage Detection of Torsionally Coupled Structures**

研 究 生：吳柏霖

**Student : Po Lin Wu**

指 導 教 授：王彥博

**Advisor : Dr. Yen-Po Wang**

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 學 系 碩 士 班

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 〇 〇 年 七 月

# 狀態空間 DLV 法在扭轉耦合結構之地震損傷探測試驗研究

研究生：吳柏霖

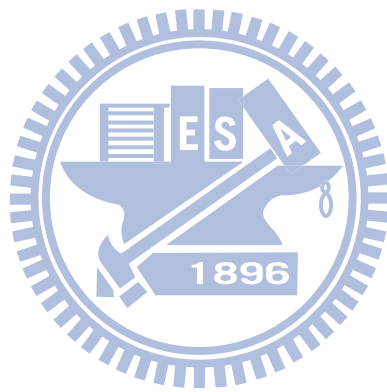
指導教授：王彥博 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

本研究以 DLV 損傷探測法結合 SRIM 系統識別分析，針對扭轉耦合結構進行一系列數值模擬與振動台試驗。數值模擬結果顯示，不論結構為單一或複數樓層受損，均可準確定位出破壞樓層。在振動台試驗方面，分別考慮以位形空間 DLV 法與狀態空間 DLV 法進行結構損傷探測分析。結果顯示位形空間 DLV 法之偵測能力不佳，狀態空間 DLV 法則有較高之成功率，初具實際應用之潛力，惟仍有部分案例未能準確定位，應與試驗之地震強度較低( $PGA=0.05g$ )有關。由於監測訊號中含有雜訊，當擾動訊號較弱時，噪訊比相對較高，系統識別誤差因而增大。此外，當破壞定位向量經由柔度差異矩陣之奇異值分解得到後，需加載於健康結構上進行應力分析。本研究目前採用之 ETABS 模型與真實結構間仍有落差，故導致額外誤差。建議未來應由系統識別參數進行應力分析，進一步提升實務應用之可行性。

關鍵字：扭轉耦合結構、系統識別、結構損傷探測、柔度矩陣、損傷定位向量



# **An Experimental Study of State-Space DLV method in Seismic Damage Detection of Torsionally Coupled Structures**

Student : Po-Lin Wu

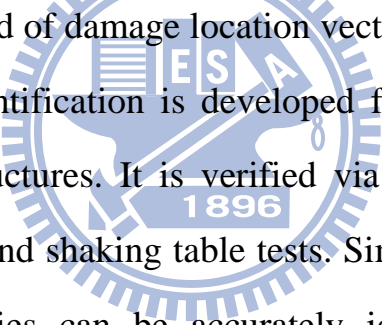
Advisor : Dr. Yen-Po Wang

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**



In this study, method of damage location vector (DLV) in conjunction with SRIM system identification is developed for damage detection of torsionally coupled structures. It is verified via a series of a series of numerical simulations and shaking table tests. Simulation results indicate that the damaged stories can be accurately identified, regardless of single or multiple damages. The experimental data have been analyzed using both the configuration-space DLV and state-space DLV methods for damage detection. Results show that the configuration-space DLV method fails to identify the damage in most cases while the state-space DLV method proves more successful, indicating its potential in practical application. Nevertheless, there were still a few cases not accurately identified. It is partly attributed to the low earthquake intensity (PGA=0.05g) considered in the tests as the noise-to-signal ratio becomes higher for weak signals, thus introducing errors in the system

identification as a consequence. Moreover, the damage locating vectors obtained from singular value decomposition of the flexibility differential matrix are to be applied on the intact structure for further stress analysis, and discrepancy between the ETABS model and test structure considered in this study leads to additional errors. In order to be practically more feasible, it is suggested to further explore new methodologies for stress analysis using parameters directly from system identification.

Keywords : torsionally coupled structures, system identification, structural damage detection, flexibility matrix, damage locating vectors



## 誌謝

感謝吾師 王彥博教授的悉心指導。在論文寫作期間，吾師費心的指正與修改，方使本論文得以順利完成。在研究所兩年的期間，讓學生體會到吾師嚴謹的治學態度、對學術研究鍥而不捨的精神與求知的熱忱，實為學生學習的典範。對於吾師的諄諄教誨，在此致上最誠摯的謝意。

論文口試期間，承蒙國立高雄第一科技大學 盧煉元教授、中華大學 張奇偉教授、國立交通大學 趙文成教授撥冗指正，並提供寶貴意見，使本論文之內容更加詳實完備，亦在此表達最誠摯的謝意。

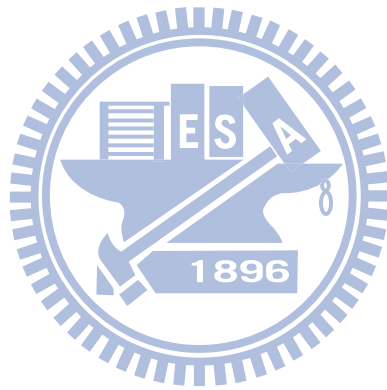
在交大的研究生涯中，感謝李建良博士、張簡嘉賞博士及陳逸軒博士在研究及實驗上的指導；畢業學長羿廷、顥勳、勵元、力邨及學長志儒在研究所生活上的經驗分享；學弟黃罡、學妹怡廷、同窗柏翰及越南生 Tuyen 的支援與協助。有同門師兄弟妹們的鼎力相助，使我平穩得走過崎嶇的研究之路。

在這兩年中，很開心遇到連峰及智洋兩位同窗夥伴。在學業上一一起奮鬥打拼，在生活上一同談天說地、分享喜悅，一切的點點滴滴，畢生難忘。也很高興能與大學同窗家宇、宗輝、明儒、同學承哲、沐崧及學弟懷國奔馳於球場上，延續著我對籃球的熱情。此外，和宣好、維莘、鈞誠、江祥等大夥遊遍臺灣、嚐遍美食的日子，為我單調的研究生生活，增添幾分色彩。感謝你們陪伴我度過了研究所的求學生涯。

最後，衷心的感激我的家人，你們的支持、鼓勵、關懷與無怨無悔的奉獻，讓我得以順利取得碩士學位。謹以本文獻給所有關心我的

朋友們，謝謝你們。

謹誌於交通大學工程二館 2011 年 7 月



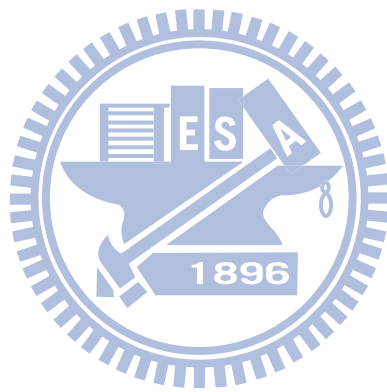


# 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	III
誌謝.....	V
目錄.....	VII
表目錄.....	XI
圖目錄.....	XVII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 論文架構.....	5
第二章 SRIM 系統識別分析理論.....	7
2.1 前言.....	7
2.2 SRIM 系統識別理論回顧.....	8
2.2.1 萃取 A 和 C 矩陣.....	12
2.2.2 萃取 B 和 D 矩陣.....	16
2.2.3 萃取系統模態參數.....	19
2.3 扭轉耦合結構之座標系統轉換.....	21
2.4 SRIM 與 ARX 系統識別分析之比較.....	22
第三章 DLV 結構損傷探測理論.....	43
3.1 前言.....	43
3.2 DLV 損傷探測理論之回顧.....	43
3.3 結構柔度矩陣之建立.....	47
第四章 扭轉耦合結構之 DLV 損傷探測數值驗證.....	49
4.1 前言.....	49

4.2	三層樓扭轉耦合結構之損傷探測分析 .....	50
4.3	五層樓扭轉耦合結構之損傷探測分析—特徵分析 .....	54
4.3.1	弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 .....	54
4.3.1.1	單一樓層受損 .....	55
4.3.1.2	複數樓層受損 .....	57
4.3.2	弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐 .....	59
4.3.2.1	單一樓層受損 .....	59
4.3.2.2	複數樓層受損 .....	64
4.4	基於地震反應之扭轉耦合結構損傷探測分析 .....	69
4.4.1	地震於 $x$ 向輸入 .....	70
4.4.1.1	單一樓層受損 .....	70
4.4.1.2	複數樓層受損 .....	73
4.4.2	地震於 $y$ 向輸入 .....	75
4.4.2.1	單一樓層受損 .....	75
4.4.2.2	複數樓層受損 .....	77
4.5	小結 .....	79
第五章	扭轉耦合結構之振動台試驗與損傷探測 .....	141
5.1	前言 .....	141
5.2	試驗設備與規劃 .....	141
5.2.1	試驗設備 .....	141
5.2.2	試驗規劃 .....	143
5.3	振動台試驗結果與分析 .....	145
5.3.1	弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 .....	145
5.3.1.1	單一樓層受損 .....	145
5.3.1.2	複數樓層受損 .....	151

5.3.2 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐.....	156
5.3.2.1 單一樓層受損.....	157
5.3.2.2 複數樓層受損.....	162
5.4 狀態空間 DLV 損傷探測法之應用.....	165
5.4.1 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐.....	166
5.4.1.1 單一樓層受損.....	166
5.4.1.2 複數樓層受損.....	171
5.4.2 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐.....	176
5.4.2.1 單一樓層受損.....	176
5.4.2.2 複數樓層受損.....	180
5.5 小結.....	182
第六章 結論與建議.....	291
參考文獻.....	295
附錄 A ARX 系統識別分析理論.....	299
A.1 離散時間系統的輸入-輸出模型.....	299
A.2 含雜訊之系統模型與預測誤差.....	300
A.3 遞迴預測誤差法.....	302
附錄 B 狀態空間 DLV 損傷探測分析理論.....	305
B.1 狀態空間 DLV 法之理論回顧.....	305
B.2 結合 SRIM 系統識別之狀態空間 DLV 法.....	314



## 表目錄

表 2.1 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(特徵分析).....	29
表 2.2 三層樓扭轉耦合結構之系統參數( $x$ 向輸入；ARX 系統識別)	30
表 2.3 三層樓扭轉耦合結構之系統參數( $y$ 向輸入；ARX 系統識別)	31
表 2.4 三層樓扭轉耦合結構之系統參數( $x$ 向輸入；SRIM 系統識別) .....	32
表 2.5 三層樓扭轉耦合結構之系統參數( $y$ 向輸入；SRIM 系統識別) .....	33
表 2.6 ARX 與 SRIM 識別之模態正交性比較 .....	34
表 4.1 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單 一樓層破壞；特徵分析).....	81
表 4.2 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複 數樓層破壞；特徵分析).....	81
表 4.3 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移 除受損層單邊斜撐；單一樓層破壞；特徵分析).....	82
表 4.4 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移 除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；特徵分析).....	82
表 4.5 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移 除受損層單邊斜撐；複數樓層破壞；特徵分析).....	83
表 4.6 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移 除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；特徵分析).....	83
表 4.7 健康結構系統參數(input 於 $x$ 向；SRIM 識別).....	84
表 4.8 一樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向；SRIM 識別).....	85
表 4.9 二樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向；SRIM 識別).....	86
表 4.10 三樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向；SRIM 識別).....	87

表 4.11 四樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別).....	88
表 4.12 五樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別).....	89
表 4.13 DLV 分析之各樓層應力指標(單一樓層破壞 ; input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別) .....	90
表 4.14 一樓及三樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別)...	91
表 4.15 二樓及四樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別)...	92
表 4.16 三樓及五樓受損結構系統參數(input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別)...	93
表 4.17 DLV 分析之各樓層應力指標(複數樓層破壞 ; input 於 $x$ 向 ; SRIM 識別) .....	94
表 4.18 健康結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	95
表 4.19 一樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	96
表 4.20 二樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	97
表 4.21 三樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	98
表 4.22 四樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	99
表 4.23 五樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).....	100
表 4.24 DLV 分析之各樓層應力指標(單一樓層破壞 ; input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別) .....	101
表 4.25 一樓及三樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).	102
表 4.26 二樓及四樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).	103
表 4.27 三樓及五樓受損結構系統參數(input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別).	104
表 4.28 DLV 分析之各樓層應力指標(複數樓層破壞 ; input 於 $y$ 向 ; SRIM 識別) .....	105
表 5.1 鋼結構房屋模型結構系統參數 .....	185
表 5.2 健康結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; SRIM 系統識別) .....	186

表 5.3 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別) .....	187
表 5.4 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波).....	188
表 5.5 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別).....	189
表 5.6 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波).....	190
表 5.7 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別) .....	191
表 5.8 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波).....	192
表 5.9 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別) .....	193
表 5.10 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波) .....	194
表 5.11 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別).....	195
表 5.12 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波).....	196
表 5.13 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別).....	197
表 5.14 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波) .....	198
表 5.15 健康結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；SRIM 系統	

識別).....	199
表 5.16 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別).....	200
表 5.17 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波) .....	201
表 5.18 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別).....	202
表 5.19 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波) .....	203
表 5.20 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別).....	204
表 5.21 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波).....	205
表 5.22 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別).....	206
表 5.23 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波) .....	207
表 5.24 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別).....	208
表 5.25 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波) .....	209

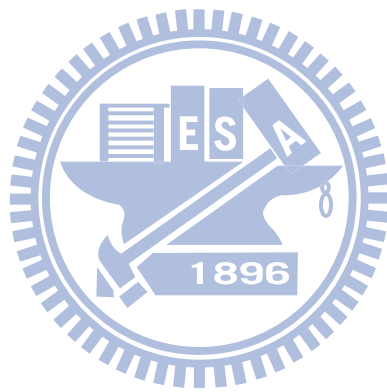


表 5.26 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐； Kobe 地震波；SRIM 系統識別).....	210
表 5.27 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配 置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波).....	211
表 5.28 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波) .....	212
表 5.29 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波).....	212
表 5.30 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波) .....	213
表 5.31 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波) .....	213
表 5.32 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波).....	214
表 5.33 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸單邊強軸雙邊配 置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波) .....	214
表 5.34 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配 置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波) .....	215
表 5.35 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配 置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波).....	215
表 5.36 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配 置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波) .....	216
表 5.37 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配 置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波) .....	216
表 5.38 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配	

置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波).....217

表 5.39 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標 (弱軸雙邊強軸單邊配

置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波) .....217



## 圖目錄

圖 2.1 奇異值分解之幾何概念 .....	35
圖 2.2 各樓層加速規安裝示意圖 .....	35
圖 2.3 三層樓扭轉耦合鋼構架之 ETABS 模型 .....	36
圖 2.4 El Centro 地震加速度歷時(PGA=0.1g).....	36
圖 2.5 三層樓結構各樓層角隅加速度歷時(x 向輸入).....	37
圖 2.6 三層樓結構各樓層角隅加速度歷時(y 向輸入).....	37
圖 2.7 三層樓結構各樓層質心加速度歷時(x 向輸入).....	38
圖 2.8 三層樓結構各樓層質心加速度歷時(y 向輸入).....	38
圖 2.9 三層樓結構之 x 向加速度傳遞函數與相位角(x 向輸入).....	39
圖 2.10 三層樓結構之 y 向加速度傳遞函數與相位角(x 向輸入).....	39
圖 2.11 三層樓結構之旋轉向加速度傳遞函數與相位角 (x 向輸入)..	40
圖 2.12 三層樓結構之 x 向加速度傳遞函數與相位角(y 向輸入).....	40
圖 2.13 三層樓結構之 y 向加速度傳遞函數與相位角(y 向輸入).....	41
圖 2.14 三層樓結構之旋轉向加速度傳遞函數與相位角 (y 向輸入)..	41
圖 2.15 系統識別分析與特徵分析之頻率比較 .....	42
圖 4.1 DLV 結構破壞診斷之數值分析流程圖 .....	106
圖 4.2 三層樓之扭轉耦合結構 .....	107
圖 4.3 弱軸(x)單邊強軸(y)雙邊配置斜撐之平面斜撐配置 (移除弱軸斜撐) .....	107
圖 4.4 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 .....	108
圖 4.5 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (x 向之 $WSI_j$ ) .....	109
圖 4.6 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (x 向之 $WSI_j$ ) .....	110

圖 4.7 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 .....	111
圖 4.8 弱軸(x)雙邊強軸(y)單邊配置斜撐之平面斜撐配置 (移除弱軸單邊斜撐) .....	112
圖 4.9 弱軸(x)雙邊強軸(y)單邊配置斜撐之平面斜撐配置 (移除弱軸雙邊斜撐) .....	112
圖 4.10 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸單邊斜撐；旋轉向之 $WSI_j$ ).....	113
圖 4.11 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸雙邊斜撐； $x$ 向之 $WSI_j$ ).....	114
圖 4.12 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸雙邊斜撐；旋轉向之 $WSI_j$ ).....	115
圖 4.13 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸單邊斜撐；旋轉向之 $WSI_j$ ).....	116
圖 4.14 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸雙邊斜撐； $x$ 向之 $WSI_j$ ).....	117
圖 4.15 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (移除弱軸雙邊斜撐；旋轉向之 $WSI_j$ ).....	118
圖 4.16 健康結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	119
圖 4.17 一樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	120
圖 4.18 二樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	121
圖 4.19 三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	122
圖 4.20 四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	123
圖 4.21 五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 ( $x$ 向輸入).....	124
圖 4.22 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (經由 $x$ 向地震反應識別； $x$ 向之 $WSI_j$ ).....	125

圖 4.23 一樓及三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (x 向輸入)	126
圖 4.24 二樓及四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (x 向輸入)	127
圖 4.25 三樓及五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (x 向輸入)	128
圖 4.26 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (經由 x 向地震反應識別; x 向之 $WSI_j$ )	129
圖 4.27 健康結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	130
圖 4.28 一樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	131
圖 4.29 二樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	132
圖 4.30 三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	133
圖 4.31 四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	134
圖 4.32 五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	135
圖 4.33 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (經由 y 向地震反應識別; x 向之 $WSI_j$ )	136
圖 4.34 一樓及三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	137
圖 4.35 二樓及四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	138
圖 4.36 三樓及五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時 (y 向輸入)	139
圖 4.37 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果 (經由 y 向地震反應識別; x 向之 $WSI_j$ )	140
圖 5.1 振動台試驗分析流程	218
圖 5.2 地震模擬振動台	219
圖 5.3 振動台油壓致動器	219
圖 5.4 MTS 407 控制器	220
圖 5.5 IMC $\mu$ -MUCIS 資料擷取系統	220
圖 5.6 1:2 縮尺五層樓鋼構結構立面圖	221
圖 5.7 1:2 縮尺五層樓鋼構結構上視圖	221

圖 5.8 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (健康結構)	222
圖 5.9 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.1g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 健康結構)	223
圖 5.10 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.1g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 健康結構)	224
圖 5.11 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.1g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 健康結構)	225
圖 5.12 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (單一樓層受損 ; 移除一樓弱軸斜撐)	226
圖 5.13 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (複數樓層受損 ; 移除一樓及三樓弱軸斜撐)	226
圖 5.14 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 一樓受損結構)	227
圖 5.15 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 二樓受損結構)	228
圖 5.16 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 三樓受損結構)	229
圖 5.17 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 四樓受損結構)	230
圖 5.18 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 五樓受損結構)	231
圖 5.19 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 單一樓層受損 ; El Centro)	232
圖 5.20 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.05g) (弱軸單	

邊強軸雙邊配置斜撐；一樓受損結構).....	233
圖 5.21 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓受損結構).....	234
圖 5.22 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓受損結構).....	235
圖 5.23 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；四樓受損結構).....	236
圖 5.24 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；五樓受損結構).....	237
圖 5.25 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe).....	238
圖 5.26 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓受損結構).....	239
圖 5.27 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓受損結構).....	240
圖 5.28 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓受損結構).....	241
圖 5.29 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；四樓受損結構).....	242
圖 5.30 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；五樓受損結構).....	243
圖 5.31 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe).....	244
圖 5.32 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro;PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構).....	245

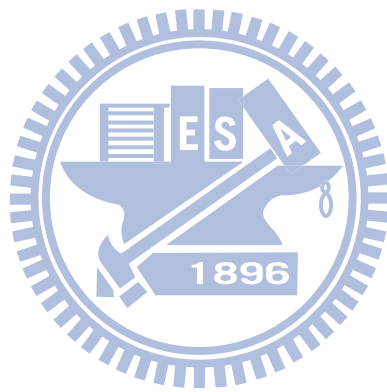
圖 5.33 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 二樓及四樓受損結構).....	246
圖 5.34 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 三樓及五樓受損結構).....	247
圖 5.35 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 複數樓層受損 ; El Centro) .....	248
圖 5.36 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 一樓及三樓受損結構).....	249
圖 5.37 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 二樓及四樓受損結構).....	250
圖 5.38 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 三樓及五樓受損結構).....	251
圖 5.39 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 複數樓層受損 ; Hachinohe).....	252
圖 5.40 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 一樓及三樓受損結構).....	253
圖 5.41 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 二樓及四樓受損結構).....	254
圖 5.42 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.05g) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 三樓及五樓受損結構).....	255
圖 5.43 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐 ; 複數樓層受損 ; Kobe) .....	256
圖 5.44 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (健康結構).....	257
圖 5.45 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊	



強軸單邊配置斜撐；健康結構).....	258
圖 5.46 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；健康結構).....	259
圖 5.47 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；健康結構).....	260
圖 5.48 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (單一樓層受損；移除一樓弱軸雙邊斜撐).....	261
圖 5.49 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構 (複數樓層受損；移除一樓及三樓弱軸雙邊斜撐).....	261
圖 5.50 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構).....	262
圖 5.51 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構).....	263
圖 5.52 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構).....	264
圖 5.53 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro) .....	265
圖 5.54 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構).....	266
圖 5.55 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構).....	267
圖 5.56 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe；PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構).....	268
圖 5.57 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe).....	269

圖 5.58 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構).....	270
圖 5.59 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構).....	271
圖 5.60 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構).....	272
圖 5.61 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe) .....	273
圖 5.62 各樓層質心加速度歷時反應 (El Centro ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構).....	274
圖 5.63 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro) .....	275
圖 5.64 各樓層質心加速度歷時反應 (Hachinohe ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構).....	276
圖 5.65 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe).....	277
圖 5.66 各樓層質心加速度歷時反應 (Kobe ; PGA=0.1g) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構).....	278
圖 5.67 位形空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe) .....	279
圖 5.68 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro) .....	280
圖 5.69 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe).....	281
圖 5.70 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向或旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸	

雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe) .....	282
圖 5.71 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸 雙邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro) .....	283
圖 5.72 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸 雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe).....	284
圖 5.73 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸單邊強軸 雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe) .....	285
圖 5.74 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro) .....	286
圖 5.75 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe).....	287
圖 5.76 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe) .....	288
圖 5.77 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro) .....	289
圖 5.78 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe).....	289
圖 5.79 狀態空間 DLV 分析結果( $x$ 向及旋轉向之 $WSI_j$ ) (弱軸雙邊強軸 單邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe) .....	290



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

臺灣位於環太平洋地震帶上，由於受到歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的擠壓，每年地震的發生數以百計，因地震頻繁，建築物的震害風險亦相對較高。在經歷地震後，如何快速有效且準確診斷結構可能的破壞位置及受損程度，並適時於破壞處給予適當的加勁補強，以抵禦下一次地震的侵襲，乃現代土木結構工程上的熱門研究課題之一。

結構損傷探測的觀念及其技術發展，起源於 1960 年代軍事及航太工業上的需求。最初是針對機械設備的故障進行診斷，後來逐漸發展並廣泛應用於其他領域。結構損傷探測的方法，多由力學及動力分析理論發展而來，其宗旨乃在不破壞材料及構件的前提下，對破壞位置及損傷程度進行有效的識別。結構損傷探測的判斷依據，乃由其力學或動力特性，以及位移等異常變化做為參考依據。

常見的非破壞檢測方法多以聲、光、電、磁學等原理激發結構反應來擷取資訊進行損傷評估，適用於探討已知破壞材料及構件的破壞程度及殘餘強度。近年來以動態測試法為基礎進行結構損傷探測之研究廣受注目。動態測試法乃是藉由激發結構產生振動，利用模態分析為基礎，由結構系統的模態參數(頻率、阻尼比、模態向量...等)及物理參數(勁度、柔度...等)之變化找出可能的破壞位置。

隨著科技發展的日新月異，資料擷取技術及分析方法日益成熟，結構損傷探測的發展也逐漸受到重視。藉由動態測試、反應監測、系統識別及損傷探測等技術為基礎，建立一套完善的結構健康監測系統已可能實現。在動態測試方面，可考慮以人為敲擊或藉由大自然的風與地震等擾動激發結構之動態行為，作為後續系統識別之資料來源。在反應監測方面，利用感應計(sensor)量測結構物因振動而產生的物理訊號(位移、速度及加速度)，作為損傷探測分析之依據。在系統識別方面，則宜選擇可直接利用量測訊號之數據，具有不需要再經數值加工(積分或微分)的強健方法。在損傷探測方面，宜採用對結構的損傷有高度敏感性的方法。因此，本研究之結構健康監測系統將採用地震反應偵測資料，選擇不需要參考點之加速度作為結構振動反應之偵測物理量，並利用 SRIM 方法識別結構之系統參數，配合對高階模態較不敏感的柔度矩陣為基礎之 DLV 法進行損傷探測，以期發展出一套實際可行的結構損傷探測技術。

許多建築結構受限於基地現況或基於功能的考量，因而產生結構之不對稱性。不對稱結構會產生明顯的扭轉振態，所以在進行系統識別及損傷探測時，針對平面結構(Plane Frame)所發展的方法未必適用，因此必須加以修正。本研究將針對一座單跨五層樓鋼結構模型，其中之三面框架各樓層皆以斜撐加勁，以形成平面不對稱之扭轉耦合結構配置。並藉由拆除部分斜撐以模擬樓層之損傷狀況，進行結構損傷探測分析及振動台試驗。

## 1.2 文獻回顧

以動力測試方法進行結構損傷探測是近年來廣為研究的課題。例如，D.J Ewins【1】根據結構動力學的基本觀念及理論，發展動態試驗及系統識別等技術，並定義多項指標，將動態試驗識別分析所得之模態參數具體轉換為工程分析的參考依據。Salawu【2】則藉由動態監測反應萃取系統頻率，並由其變化來判斷結構系統是否受損。

利用自然頻率(natural frequency)和模態(mode shape)定義損傷指標進行破壞診斷的研究包括 Chen 和 Garba【3】等人由桁架的勁度折減進行損傷探測分析。根據該研究之範例，考慮結構之前三模態即可準確計算出勁度之折減量，而結構損傷所造成的頻率變化以第一模態影響最大。此外 Lee 和 Shin【4-5】提出以梁的自然頻率與模態，以及損傷後的傳遞函數進行損傷探測分析。該研究也利用數值模擬分析及試驗證明其可行性。

Hoyos 和 Aktan【6】提出以結構自然頻率及模態建立模態柔度(modal flexibilities)奠定以柔度矩陣作為結構損傷探測之基礎。Toksoy 和 Aktan【7】以模態柔度進行橋梁結構的破壞診斷。Pandey 和 Biswas【8-9】利用結構破壞前與破壞後的柔度矩陣變化，成功的應用在 I 型梁與平面桁架之損傷探測。相較於自然頻率及模態，Zhao 和 DeWolf【10】針對彈簧質塊系統進行損傷探測的靈敏度分析，發現模態柔度比起自然頻率及模態，在損傷探測上更為敏感，也較適合作為損

壞評估指標。

Bernal【11】於2002年提出以結構柔度矩陣之變化為基礎的破壞定位向量法(Method of Damage Locating Vectors；簡稱DLV法)，依其訂定的標準作為損傷探測判斷之依據。該研究以平面桁架結構進行分析，探討多重位置破壞及破壞程度的損傷探測，結果顯示DLV法可準確的判斷其破壞位置。Gao等人【12-13】成功的將DLV法應用於平面桁架及立體桁架結構之損傷探測上。Duan等人【14】分別針對多自由度彈簧質塊系統及平面桁架結構以DLV損傷探測法進行破壞診斷分析，並探討模態數之多寡對識別分析結果的影響。該研究指出，當結構系統有兩處破壞時，考慮前二、三模態即可正確偵測出破壞位置。

國內在結構損傷探測的研究也有些具體成果。柯宏明【15】以ARX模式、振態疊加原理及非線性迴歸分析，推定各振態頻率、阻尼比及有效參數，並輔以三種損壞評估指標 $\delta_M$ (Maximum Softening)、MAC(Modal Assurance Criterion)及COMAC(Coordinate Modal Assurance Criterion)來判斷破壞位置及程度。其研究指出強動階段的基本振動週期為判斷結構破壞程度的可靠指標。劉正偉【16】利用結構振動特性及Graffi線彈性動力互易定理的觀念，結合頻率反應函數(Frequency Response Function；FRF)，識別敲擊激振所得之訊號，由其頻率及模態參數，進行梁的損傷探測分析。其分析結果顯示，模態振形曲率變化指標(Method of Modal Curvature；MMC)及模態尺度因子(Modal Scale Factor；MSF)可作為損壞程度的



判斷依據。楊淳皓【17】藉由動態參數識別結構之模態參數，進行建築結構層間損壞評估，並由動力方程式建立扭轉耦合結構層間損壞指標 SDITC(Storey Damage Index of Torsionally-Coupled)與近似指標 ASDI(Approximate Storey Damage Index of Torsionally-Coupled)，依此二指標判別樓層損壞的程度及利用剛心位置的變化判斷損傷之桿件位置。林裕家【18】以 DLV 損傷識別法進行全域性損害檢測，並配合模態曲率變化量評估局部性損害，藉由數值模擬分析及試驗驗證 DLV 法可準確診斷出框架結構之破壞位置。涂哲維【19】將 DLV 法應用於抗彎構架系統之損傷探測上，由一系列的數值模擬分析及振動台試驗驗證此方法在抗彎構架系統之可行性。陳逸軒【20】利用 DLV 損傷探測法結合推測-適應過濾法與模態向量間之正交特性，提供觀測不足的問題解決方法，並透過數值範例及振動台試驗驗證其實際應用的可行性。

本文接續 DLV 損傷探測法的研究，將其擴展應用至扭轉耦合結構之損傷探測上，考慮單一樓層破壞及多重樓層破壞的情況，進行數值模擬分析及振動台試驗驗證，作為後續實際應用之基礎。

### 1.3 論文架構

本論文共分六章，各章內容分別如下所述：第一章為緒論，介紹研究動機與目的、文獻回顧及論文架構。第二章為 SRIM 系統識別分析，介紹其理論推導，並以範例比較此法與 ARX 模式之優劣。第三章為 DLV 損傷探測法，介紹其理論推

導，以及由結構模態參數建構系統柔度矩陣的方法。第四章以數值模擬分析驗證 DLV 損傷探測法應用於扭轉耦合結構之可行性。建立一座單跨五層樓三維鋼結構模型，其中三面框架各樓層皆以斜撐加勁造成平面不對稱性，並以拆除斜撐模擬樓層之破壞情況，針對單一樓層及雙層樓層破壞的狀況進行探討。並以地震加速度反應資料識別結構參數及進行破壞診斷，以示範 DLV 損傷探測法於扭轉耦合結構之應用。此外，本文亦探討針對僅以單一方向輸入地震波之識別分析結果進行損傷探測分析的影響。第五章以振動台試驗驗證 DLV 損傷探測法於扭轉耦合結構實際應用的可行性。考慮結構於單一樓層或雙層樓層破壞之情況，並以若干不同地震波做為輸入擾動進行識別及破壞診斷分析。第六章為結論與建議。



## 第二章 SRIM 系統識別分析理論

### 2.1 前言

欲掌握建築結構之動力特性，必須求得結構之模態參數(自然頻率、阻尼比、振態)或物理參數(質量、阻尼、勁度矩陣)。然而真實結構十分複雜且自由度極多，欲直接求得實際結構之質量、阻尼及勁度矩陣實屬不易。系統識別技術的目的，即在藉由實際量測到的結構動態反應訊號以及大自然的風力、地震或人為敲擊等輸入擾動，依據結構動力學所發展之理論，推算結構系統之動力參數，作為數值模擬分析之依據或其他應用。

Juang【21】於 1997 年提出信息矩陣之系統辨識理論(system realization using information matrix；簡稱 SRIM)。此一方法利用資料之相關性(data correlation)，於輸出與輸入資料之狀態空間系統架構下，由可觀測矩陣(observability matrix)與 Toeplitz 矩陣決定結構系統之狀態空間矩陣(A、B、C 與 D)，進而推算系統之模態參數，並用於後續之結構損傷探測分析。

本章將回顧 SRIM 系統識別法之理論推導，說明求取系統矩陣與狀態空間影響矩陣之方法，及萃取結構頻率、阻尼比與振態等模態參數。此外，並以一數值範例針對 SRIM 法與 ARX 模式兩種系統識別方法進行比較。

## 2.2 SRIM 系統識別理論回顧

考慮結構系統受外力擾動下， $n$  個自由度之位形空間運動方程式，以二階常微分系統方程式表示為：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{E}\mathbf{u}(t) \quad (2.1)$$

其中， $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{\Xi}$  及  $\mathbf{K}$  分別為  $R^{n \times n}$  之質量、阻尼及勁度矩陣； $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  與  $\mathbf{x}(t)$  分別為  $R^{n \times 1}$  之結構位移、速度與加速度向量； $\mathbf{u}(t) \in R^{r \times 1}$  為外力向量， $r$  為輸入外力之數量； $\mathbf{E} \in R^{n \times r}$  為外力配置矩陣，其矩陣元素取決於外力之型式與分佈。

式(2.1)可改寫為狀態空間方程式如下：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (2.2)$$

若定義狀態向量

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

則式(2.2)可改寫成：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (2.4)$$

其中，

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Xi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$\mathbf{z}(t) \in R^{2n \times 1}$  為連續時間之狀態向量； $\mathbf{A}_c \in R^{2n \times 2n}$  為連續時間之系統矩陣； $\mathbf{B}_c \in R^{2n \times r}$  為連續時間之輸入影響矩陣。

若系統之動態反應可由  $m$  組感應器量測而得（如位移計、速度計、加速規等），則輸出向量  $\mathbf{y}(t)$  可表示如下：

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_D \mathbf{x}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}_A \ddot{\mathbf{x}}(t) \quad (2.6)$$

其中， $\mathbf{C}_D$ 、 $\mathbf{C}_V$  與  $\mathbf{C}_A$  分別為  $R^{m \times n}$  之位移、速度與加速度輸出影響矩陣。由式(2.1)求解  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  並代入式(2.6)可得：

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_D - \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & \mathbf{C}_V - \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{\Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{E} \mathbf{u}(t) \quad (2.7)$$

或

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{z}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \quad (2.8)$$

其中，

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_D - \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & \mathbf{C}_V - \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{\Xi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{C}_A \mathbf{M}^{-1} \mathbf{E} \quad (2.9)$$

$\mathbf{y}(t) \in R^{m \times 1}$  為輸出向量； $\mathbf{C} \in R^{m \times 2n}$  為狀態輸出影響矩陣； $\mathbf{D} \in R^{m \times r}$  為直接傳輸矩陣。

由於量測資料為離散之型式，故須將連續時間之狀態空間方程式推展為離散時間之型式。令  $k = k\Delta t$ （ $\Delta t$  為取樣週期），其離散時間之狀態空間方程式可表示成：

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{z}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) \quad (2.10)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{Cz}(k) + \mathbf{Du}(k) \quad (2.11)$$

其中， $\mathbf{z}(k) \in R^{2n \times 1}$  為離散時間之狀態向量； $\mathbf{u}(k) \in R^{r \times 1}$  為外力輸入向量； $\mathbf{y}(k) \in R^{m \times 1}$  為感應器輸出向量； $\mathbf{A} \in R^{2n \times 2n}$  為離散時間之系統矩陣； $\mathbf{B} \in R^{2n \times r}$  為離散時間之輸入影響矩陣。若取樣頻率高於最大等效阻尼自然頻率之兩倍，則連續時間系統與離散時間系統式，兩者可相互轉換：

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c \Delta t}, \quad \mathbf{A}_c = \frac{\ln(\mathbf{A})}{\Delta t} \quad (2.12a)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}_c^{-1}(\mathbf{A} - \mathbf{I})\mathbf{B}_c, \quad \mathbf{B}_c = (\mathbf{A} - \mathbf{I})^{-1}\mathbf{A}_c\mathbf{B} \quad (2.12b)$$

將式(2.10)疊代  $p$  次至式(2.11)，以矩陣型式表示成：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) \\ \mathbf{y}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix} \mathbf{z}(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{D} & & & & \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & & & \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{D} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-3}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-4}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{u}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) \end{bmatrix} \quad (2.13a)$$

或

$$\mathbf{y}_p(k) = \mathbf{O}_p \mathbf{z}(k) + \mathbf{T}_p \mathbf{u}_p(k) \quad (2.13b)$$

其中，

$$\mathbf{y}_p(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) \\ \mathbf{y}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) \end{bmatrix} \in R^{mp \times 1}, \quad \mathbf{u}_p(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{u}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) \end{bmatrix} \in R^{rp \times 1} \quad (2.14a)$$

$$\mathbf{O}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & & & & \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & & & \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{D} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-3}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-4}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (2.14b)$$

$\mathbf{O}_p \in R^{mp \times 2n}$  為可觀測性矩陣 (observability matrix) ;  
 $\mathbf{T}_p \in R^{mp \times rp}$  為 Toeplitz 矩陣, 由馬可夫參數組成;  $p$  為整數, 其  
 最小值與  $\mathbf{A}$  矩陣之維度有關, 將於 2.2.1 小節 (計算  $\mathbf{A}$  矩陣)  
 中作說明。

觀察  $\mathbf{O}_p$  矩陣, 可知求取模態參數所需之  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣即  
 隱含於其中, 此乃萃取  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣之關鍵。以  $k+1$  為起點,  
 將式(2.10)疊代  $p$  次至式(2.11), 重複至  $k+N-1$  為起點 (共  $N$   
 次), 可得式(2.13b)合併後之擴大型式:

$$\mathbf{Y}_p(k) = \mathbf{O}_p \mathbf{Z}(k) + \mathbf{T}_p \mathbf{U}_p(k) \quad (2.15)$$

其中,

$$\mathbf{Y}_p(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_p(k) & \mathbf{y}_p(k+1) & \dots & \mathbf{y}_p(k+N-1) \\ \mathbf{y}(k) & \mathbf{y}(k+1) & \dots & \mathbf{y}(k+N-1) \\ \mathbf{y}(k+1) & \mathbf{y}(k+2) & \dots & \mathbf{y}(k+N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) & \mathbf{y}(k+p) & \dots & \mathbf{y}(k+p+N-2) \end{bmatrix} \in R^{mp \times N}$$

$$\mathbf{U}_p(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_p(k) & \mathbf{u}_p(k+1) & \cdots & \mathbf{u}_p(k+N-1) \\ \mathbf{u}(k) & \mathbf{u}(k+1) & \cdots & \mathbf{u}(k+N-1) \\ \mathbf{u}(k+1) & \mathbf{u}(k+2) & \cdots & \mathbf{u}(k+N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) & \mathbf{u}(k+p) & \cdots & \mathbf{u}(k+p+N-2) \end{bmatrix} \in R^{rp \times N}$$

$$\mathbf{Z}(k) = [\mathbf{z}(k) \quad \mathbf{z}(k+1) \quad \cdots \quad \mathbf{z}(k+N-1)] \in R^{2n \times N} \quad (2.16)$$

$N$  為資料長度減  $p$ 。

由於  $\mathbf{Y}_p(k)$  與  $\mathbf{U}_p(k)$  皆由已知的輸出與輸入量測資料組成，可藉由兩者之相關性可求得  $\mathbf{O}_p$  矩陣，其自相關（autocorrelation）與互相關（cross-correlation）矩陣定義如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{yy} &= (1/N) \mathbf{Y}_p(k) \mathbf{Y}_p^T(k) & \mathbf{R}_{yu} &= (1/N) \mathbf{Y}_p(k) \mathbf{U}_p^T(k) \\ \mathbf{R}_{uu} &= (1/N) \mathbf{U}_p(k) \mathbf{U}_p^T(k) & \mathbf{R}_{yz} &= (1/N) \mathbf{Y}_p(k) \mathbf{Z}^T(k) \\ \mathbf{R}_{zz} &= (1/N) \mathbf{Z}(k) \mathbf{Z}^T(k) & \mathbf{R}_{zu} &= (1/N) \mathbf{Z}(k) \mathbf{U}_p^T(k) \end{aligned} \quad (2.17)$$

其中，對稱矩陣  $\mathbf{R}_{yy} \in R^{mp \times mp}$ 、 $\mathbf{R}_{uu} \in R^{rp \times rp}$  與  $\mathbf{R}_{zz} \in R^{2n \times 2n}$  分別為輸出觀測矩陣  $\mathbf{Y}_p(k)$ 、輸入矩陣  $\mathbf{U}_p(k)$  及未知狀態矩陣  $\mathbf{Z}(k)$  的自相關矩陣；矩陣  $\mathbf{R}_{yu} \in R^{mp \times rp}$ 、 $\mathbf{R}_{yz} \in R^{mp \times 2n}$  與  $\mathbf{R}_{zu} \in R^{2n \times rp}$  分別為輸出觀測矩陣  $\mathbf{Y}_p(k)$  對於輸入矩陣  $\mathbf{U}_p(k)$ 、輸出觀測矩陣  $\mathbf{Y}_p(k)$  對於未知狀態矩陣  $\mathbf{Z}(k)$  矩陣及未知狀態矩陣  $\mathbf{Z}(k)$  矩陣對於輸入矩陣  $\mathbf{U}_p(k)$  矩陣的互相關矩陣。

### 2.2.1 萃取 A 和 C 矩陣

由式(2.15)左右兩邊乘上  $(1/N) \mathbf{U}_p^T(k)$  可得：



$$\mathbf{R}_{yu} = \mathbf{O}_p \mathbf{R}_{zu} + \mathbf{T}_p \mathbf{R}_{uu} \quad (2.18)$$

若  $\mathbf{R}_{uu}^{-1}$  為非奇異矩陣，則由式(2.18)可得：

$$\mathbf{T}_p = [\mathbf{R}_{yu} - \mathbf{O}_p \mathbf{R}_{zu}] \mathbf{R}_{uu}^{-1} \quad (2.19)$$

同樣地，於式(2.15)左右兩邊乘上  $(1/N)\mathbf{Y}_p^T(k)$  可得：

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{O}_p \mathbf{R}_{yz}^T + \mathbf{T}_p \mathbf{R}_{yu}^T \quad (2.20)$$

又於式(2.15)左右兩邊乘上  $(1/N)\mathbf{Z}^T(k)$  可得：

$$\mathbf{R}_{yz} = \mathbf{O}_p \mathbf{R}_{zz} + \mathbf{T}_p \mathbf{R}_{zu}^T \quad (2.21)$$

再將式(2.19)之  $\mathbf{T}_p$  代入式(2.20)與式(2.21)移項整理後可得：

$$\mathbf{R}_{yy} - \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{yu}^T = \mathbf{O}_p (\mathbf{R}_{zz} - \mathbf{R}_{zu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{zu}^T) \mathbf{O}_p^T \quad (2.22)$$

茲定義  $\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{R}_{yy} - \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{yu}^T$ ， $\tilde{\mathbf{R}}_{zz} = \mathbf{R}_{zz} - \mathbf{R}_{zu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \mathbf{R}_{zu}^T$

則式(2.22)可簡化為：

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{O}_p \tilde{\mathbf{R}}_{zz} \mathbf{O}_p^T \quad (2.23)$$

對  $\mathbf{R}_{hh} \in R^{mp \times mp}$  作奇異值分解 (singular value decomposition；簡稱 SVD)：

$$\mathbf{R}_{hh} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = [\mathbf{U}_n \quad \mathbf{U}_0] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_n \quad \mathbf{V}_0]^T = \mathbf{U}_n \mathbf{S}_n \mathbf{V}_n^T \quad (2.24)$$

其中， $\mathbf{U}_n \in R^{mp \times 2n}$  為  $\mathbf{R}_{hh} \mathbf{R}_{hh}^T$  之非零特徵值所對應之單位特徵向量； $\mathbf{U}_0 \in R^{mp \times n_0}$  為  $\mathbf{R}_{hh} \mathbf{R}_{hh}^T$  之奇異值所對應之單位特徵向量，

$n_0 = mp - 2n$  ;  $\mathbf{S}_n \in R^{2n \times 2n}$  為  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之非零特徵值所組成之對角矩陣 ;  $\mathbf{S}_0 \in R^{n_0 \times n_0}$  為  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之奇異值所組成之對角矩陣 ;  $\mathbf{V}_n \in R^{mp \times 2n}$  為  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之非零特徵值所對應之單位特徵向量 ;  $\mathbf{V}_0 \in R^{mp \times n_0}$  為  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之奇異值所對應之單位特徵向量。

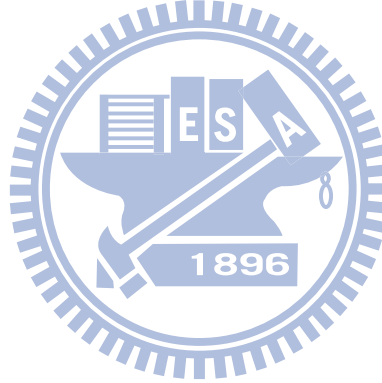
SVD 分解的主要幾何概念如圖 2.1 所示，其中矩陣  $\mathbf{U}$  及  $\mathbf{V}$  分別為  $\mathbf{R}_{hh} \mathbf{R}_{hh}^T$  與  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之特徵向量所組成之座標轉換矩陣，且  $\mathbf{U}$  及  $\mathbf{V}$  皆為正交矩陣；而矩陣  $\mathbf{S}$  為  $\mathbf{R}_{hh} \mathbf{R}_{hh}^T$  或  $\mathbf{R}_{hh}^T \mathbf{R}_{hh}$  之奇異值所組成之對角矩陣。

比較式(2.23)與式(2.24)可知：

$$\mathbf{O}_p = \mathbf{U}_n \quad (2.25a)$$

以及

$$\tilde{\mathbf{R}}_{zz} = \mathbf{S}_n \quad (2.25b)$$



換言之，可觀測性矩陣  $\mathbf{O}_p$  可由  $\mathbf{R}_{hh}$  矩陣之奇異值分解 (SVD) 求得，此為求取  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣之關鍵。以下將進一步說明如何由  $\mathbf{O}_p$  矩陣求取  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣：

$$\mathbf{O}_p(m+1: pm, :) = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \mathbf{CA}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{O}_p(1: (p-1)m, :) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

其中， $\mathbf{O}_p(m+1: pm, :)$  代表第  $m+1$  至  $pm$  列和所有行向量所組成之矩陣； $\mathbf{O}_p(1: (p-1)m, :)$  代表第 1 至  $(p-1) \times m$  列和所有行向量所組成之矩陣。

將式(2.26)改寫成：

$$\mathbf{O}_p(m+1:pm,:) = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \mathbf{CA}^3 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-2} \end{bmatrix} \mathbf{A} = \mathbf{O}_p(1:(p-1)m,:) \mathbf{A} \quad (2.27)$$

由式(2.27)即可求得  $\mathbf{A}$  矩陣：

$$\mathbf{A} = \mathbf{O}_p^*(1:(p-1)m,:) \mathbf{O}_p(m+1:pm,:) \quad (2.28)$$

其中，

$$\mathbf{O}_p^* = [\mathbf{O}_p(1:(p-1)m,:)]^T \mathbf{O}_p(1:(p-1)m,:) \mathbf{O}_p(1:(p-1)m,:) \in R^{2n \times (p-1)m}$$

為  $\mathbf{O}_p$  的擬逆 (pseudoinverse) 矩陣，而整數  $p$  之最小值，則需滿足  $\mathbf{O}_p(1:(p-1)m,:)$  的秩 (rank) 等於或大於  $2n$ ：

$$(p-1)m \geq 2n \quad (2.29a)$$

或

$$p \geq \frac{2n}{m} + 1 \quad (2.29b)$$

觀察  $\mathbf{O}_p$  矩陣可知，其前  $m$  列即為  $\mathbf{C}$  矩陣：

$$\mathbf{C} = \mathbf{O}_p(1:m,:) \quad (2.30)$$

上述過程說明，可由已知的輸出資料組成之  $\mathbf{Y}_p(k)$  矩陣與輸入資料組成之  $\mathbf{U}_p(k)$  矩陣二者的相關性，經 SVD 分解後求得  $\mathbf{O}_p$

矩陣，進而萃取出系統未知的  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣。

## 2.2.2 萃取 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{D}$ 矩陣

觀察式(2.14b)之  $\mathbf{T}_p$  矩陣，可知  $\mathbf{B}$  與  $\mathbf{D}$  矩陣即隱含於其中。於式(2.18)前乘  $\mathbf{U}_0^T$  可得：

$$\mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} = \mathbf{U}_0^T \mathbf{O}_p \mathbf{R}_{zu} + \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p \mathbf{R}_{uu} \quad (2.31)$$

由於  $\mathbf{O}_p = \mathbf{U}_n$ ，且根據  $\mathbf{U}_0^T$  與  $\mathbf{U}_n$  之正交性可得：

$$\mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} = \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p \mathbf{R}_{uu} \quad (2.32)$$

將式(2.32)後乘  $\mathbf{R}_{uu}^{-1}$  可改寫成：

$$\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p = \mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1} \quad (2.33)$$

將未知之  $\mathbf{T}_p$  矩陣分成  $p$  個子矩陣：

$$\mathbf{T}_p = [\mathbf{T}_p(:,1:r) \quad \mathbf{T}_p(:,r+1:2r) \quad \cdots \quad \mathbf{T}_p(:,(p-1)r+1:pr)] \quad (2.34)$$

其中，由式(2.14b)與式(2.25a)可推得：

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_p(:, 1:r) &= \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{U}_n[1:(p-1)m, :] \mathbf{B} \end{bmatrix} \\
\mathbf{T}_p(:, r+1:2r) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{m \times r} \\ \mathbf{D} \\ \mathbf{U}_n[1:(p-2)m, :] \mathbf{B} \end{bmatrix} \\
\mathbf{T}_p(:, 2r+1:3r) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2m \times r} \\ \mathbf{D} \\ \mathbf{U}_n[1:(p-3)m, :] \mathbf{B} \end{bmatrix} \\
&\vdots \\
\mathbf{T}_p[:, (p-1)r+1:pr] &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(p-1)m \times r} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

再將式(2.35)前乘  $\mathbf{U}_0^T$  改寫成：

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, 1:r) &= \mathbf{U}_0^T(:, 1:m) \mathbf{D} + \mathbf{U}_0^T(:, m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-1)m, :] \mathbf{B} \\
\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, r+1:2r) &= \mathbf{U}_0^T(:, m+1:2m) \mathbf{D} + \mathbf{U}_0^T(:, 2m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-2)m, :] \mathbf{B} \\
\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, 2r+1:3r) &= \mathbf{U}_0^T(:, 2m+1:3m) \mathbf{D} + \mathbf{U}_0^T(:, 3m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-3)m, :] \mathbf{B} \\
&\vdots \\
\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p[:, (p-1)r+1:pr] &= \mathbf{U}_0^T[:, (p-1)m+1:pm] \mathbf{D}
\end{aligned} \tag{2.36a}$$

或

$$\mathbf{U}_{0T} = \mathbf{U}_{0n} \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \tag{2.36b}$$

其中，

$$\mathbf{U}_{0T} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, 1:r) \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, r+1:2r) \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p(:, 2r+1:3r) \\ \vdots \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p[:, (p-1)r+1:pr] \end{bmatrix} \quad (2.37a)$$

$$\mathbf{U}_{0n} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0^T(:, 1:m) & \mathbf{U}_0^T(:, m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-1)m, :] \\ \mathbf{U}_0^T(:, m+1:2m) & \mathbf{U}_0^T(:, 2m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-2)m, :] \\ \mathbf{U}_0^T(:, 2m+1:3m) & \mathbf{U}_0^T(:, 3m+1:pm) \mathbf{U}_n[1:(p-3)m, :] \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{U}_0^T[:, (p-1)m+1:pm] & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.37b)$$

由於  $\mathbf{T}_p$  為未知矩陣，因此式(2.37a)中之  $\mathbf{U}_0^T \mathbf{T}_p$  亦未知矩陣。茲根據式(2.33)將其改寫為

$$\mathbf{U}_{0T} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1}(:, 1:r) \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1}(:, r+1:2r) \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1}(:, 2r+1:3r) \\ \vdots \\ \mathbf{U}_0^T \mathbf{R}_{yu} \mathbf{R}_{uu}^{-1}[:, (p-1)r+1:pr] \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

則，由式(2.36b)即可求得  $\mathbf{B}$  與  $\mathbf{D}$  矩陣，亦即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{0n}^* \mathbf{U}_{0T} \quad (2.39)$$

其中之前  $m$  列即為矩陣  $\mathbf{D} \in R^{m \times r}$ ；最後  $2n$  列即為矩陣  $\mathbf{B} \in R^{2n \times r}$ ； $\mathbf{U}_{0n}^* = (\mathbf{U}_{0n}^T \mathbf{U}_{0n})^{-1} \mathbf{U}_{0n}^T \in R^{(m+2n) \times pn_0}$  為  $\mathbf{U}_{0n}$  之擬逆 (pseudoinverse) 矩陣。

### 2.2.3 萃取系統模態參數

由於模態參數即隱含於  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣中，因此吾人只需針對兩者計算，便可求得系統等效之自然頻率、阻尼比與模態等參數。首先，對  $\mathbf{A}$  矩陣進行特徵分析可得：

$$\mathbf{A}\Psi = \Psi\Lambda \quad (2.40)$$

其中，

$$\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{2n}], \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_{2n} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

兩者均為共軛複數的形式， $\Psi \in R^{2n \times 2n}$  為特徵向量組成之矩陣； $\Lambda \in R^{2n \times 2n}$  為特徵值所組成之對角矩陣。特徵向量  $\Psi$  為系統之模態向量矩陣，可經由  $\mathbf{C}$  矩陣將其轉換至輸出座標上，即可求得降階系統之模態向量矩陣：

$$\Phi = \mathbf{C}\Psi \quad (2.42)$$

$\Phi \in R^{m \times 2n}$ 。而系統之等效自然頻率與阻尼比，可由  $\Lambda_c$  的實部與虛部求得，將  $\Lambda$  轉換為  $\Lambda_c$  如下：

$$\Lambda_c = \frac{\ln(\Lambda)}{\Delta t}, \quad \Lambda_c = \text{diag}(\lambda_{c,1}, \lambda_{c,2}, \dots, \lambda_{c,2n}) \quad (2.43)$$

其中，

$$\lambda_{c,i} = \alpha_i \pm j\beta_i = -\xi_i \omega_i \pm j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (2.44)$$

$\omega_i$  為系統第  $i$  模態之自然頻率； $\xi_i$  為系統第  $i$  模態之阻尼比。  
由式(2.44)可進一步解得  $\omega_i$  與  $\xi_i$ ：

$$\omega_i = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \quad (2.45a)$$

$$\xi_i = -\frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \quad (2.45b)$$

由於特徵值  $\Lambda$  與特徵向量  $\Psi$  均為共軛複數的形式，因此所求得之等效自然頻率、阻尼比與模態數量均為系統自由度的兩倍，且以兩兩共軛成對出現，實際上求得之模態參數仍與自由度數量相同。

吾人可將上述分析流程整理如下：

1. 定義欲分析系統之輸入  $\mathbf{u}(k)$  及輸出  $\mathbf{y}(k)$  資料。
2. 由式(2.29b)設定疊代次數  $(p)$ ，根據經驗建議取其最小值的兩倍。
3. 由式(2.19)、式(2.20)及式(2.21)，求得  $\mathbf{R}_{hh}$ 。
4. 對  $\mathbf{R}_{hh}$  作奇異值分解，求得  $\mathbf{O}_p$ ，繼而求出  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣。
5. 由式(2.37b)及式(2.38)，求得  $\mathbf{B}$  與  $\mathbf{D}$  矩陣。
6. 由系統識別所得之  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}$  矩陣，根據式(2.42)及式(2.45)萃取出系統等效之自然頻率、阻尼比與模態。




## 2.3 扭轉耦合結構之座標系統轉換

由於各樓層之感應器未必安裝於質心上，故需經由座標轉換將各感應器之直接量測訊號轉換成質心之動態反應，作為系統識別之基礎。各層樓至少需安裝 3 組感應器，方可建立扭轉耦合結構質心水平向( $x, y$ )與扭轉向( $\theta$ )之訊號，如圖 2.2 所示。假設第  $i$  樓層測點之訊號為  $\mathbf{S}_i$ ，轉換矩陣為  $\mathbf{T}_i$ ，質心訊號為  $\mathbf{S}_{CM,i}$ ，則其線性轉換關係為：

$$\mathbf{S}_{CM,i} = \mathbf{T}_i \mathbf{S}_i \quad (2.46)$$

其中，

$$\mathbf{S}_{CM,i} = \begin{Bmatrix} \mathbf{S}_{x_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{y_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{\theta_{CM},i} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{S}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{S}_{x_{1,i}} \\ \mathbf{S}_{x_{2,i}} \\ \mathbf{S}_{y_{1,i}} \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$


$\mathbf{S}_{x_{CM},i}$ 、 $\mathbf{S}_{y_{CM},i}$  與  $\mathbf{S}_{\theta_{CM},i}$  分別為第  $i$  樓層之質心  $x$ 、 $y$  與扭轉向訊號；  
 $\mathbf{S}_{x_{1,i}}$ 、 $\mathbf{S}_{x_{2,i}}$  與  $\mathbf{S}_{y_{1,i}}$  分別為第  $i$  樓層測點  $x_{1,i}$ 、 $x_{2,i}$  與  $y_{1,i}$  向之訊號。

第  $i$  樓層測點訊號與質心訊號之相對關係如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{x_{1,i}} &= \mathbf{S}_{x_{CM},i} - l_{y_{1,i}} \mathbf{S}_{\theta_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{x_{2,i}} &= \mathbf{S}_{x_{CM},i} + l_{y_{2,i}} \mathbf{S}_{\theta_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{y_{1,i}} &= \mathbf{S}_{y_{CM},i} - l_{x_{1,i}} \mathbf{S}_{\theta_{CM},i} \end{aligned} \quad (2.48a)$$

或

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_{y_1,i} \\ 1 & 0 & l_{y_2,i} \\ 0 & 1 & -l_{x_1,i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{S}_{x_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{y_{CM},i} \\ \mathbf{S}_{\theta_{CM},i} \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{S}_{CM,i} \quad (2.48b)$$

其中， $l_{y_1,i}$  為第  $i$  樓層測點  $x_{1,i}$  與質心  $CM,i$  之垂直距離； $l_{y_2,i}$  為第  $i$  樓層測點  $x_{2,i}$  與質心  $CM,i$  之垂直距離； $l_{x_1,i}$  為第  $i$  樓層測點  $y_{1,i}$  與質心  $CM,i$  之水平距離。

由式(2.48b)可推得  $\mathbf{T}_i^{-1}$  之逆矩陣  $\mathbf{T}_i$  為：

$$\mathbf{T}_i = \frac{1}{l_{y,i}} \begin{bmatrix} l_{y_2,i} & l_{y_1,i} & 0 \\ -l_{x_1,i} & l_{x_1,i} & l_{y,i} \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

其中， $l_{y,i} = l_{y_1,i} + l_{y_2,i}$ 。

將式(2.49)代入式(2.46)便可得，第  $i$  樓層質心訊號為：

$$\mathbf{S}_{CM,i} = \frac{1}{l_{y,i}} \begin{bmatrix} l_{y_2,i} & l_{y_1,i} & 0 \\ -l_{x_1,i} & l_{x_1,i} & l_{y,i} \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{S}_i \quad (2.50)$$

由上式即可將直接量測之測點訊號，轉換成對應樓層之質心輸出訊號，作為系統識別分析之依據。

## 2.4 SRIM 與 ARX 系統識別分析之比較

本節將以 ETABS 軟體建立一座單跨之三層樓三維結構模型，其中三面各樓裝置斜撐，以構成平面不對稱的扭轉耦

合結構(圖 2.3)。輸入地震波擾動進行動態反應分析，擷取各樓層角隅處之加速度歷時反應，並利用 2.3 節推導的座標轉換推算各樓層之質心加速度反應，作為系統識別分析之依據。

本文分別以 SRIM 及 ARX 兩種方法進行單一輸入-多重輸出(SIMO)條件下之系統識別分析，並比較其結構參數與特徵分析結果。本文後續之研究將以其誤差較小者作為結構系統識別之工具。ARX 系統識別理論之推導詳附錄 A。

該三層樓扭轉耦合結構之 ETABS 模型設定為空間結構之型式，考慮 UX、UY、UZ、RX、RY 及 RZ 等自由度，結構之阻尼比為 2%，以特徵分析結果(表 2.1)作為兩種系統識別方法精度之比較基準。

茲以 PGA=0.1g 之 El Centro 地震波(圖 2.4)分別於結構之  $x$  向與  $y$  向輸入進行分析。各樓層角隅處之絕對加速度反應分別如圖 2.5 及圖 2.6 所示，經由座標系統轉換而得各樓層之質心絕對加速度則分別如圖 2.7 及圖 2.8 所示。茲分別以 ARX 及 SRIM 法針對前述之加速度歷時反應資料進行系統識別分析。

經由地震反應識別所得之模態參數與特徵分析所得者仍有差異，茲定義第  $k$  模態向量之誤差函數  $E_k$  如下：

$$E_k = \left( \frac{\|\phi_k^{ID} - \phi_k^E\|}{\|\phi_k^E\|} \right) = \left( \frac{\sum_{j=1}^9 (\phi_{k,j}^{ID} - \phi_{k,j}^E)^2}{\sum_{j=1}^9 (\phi_{k,j}^E)^2} \right)^{\frac{1}{2}} ; k=1, \dots, 9 \quad (2.51)$$

其中， $\phi_k^{ID}$  與  $\phi_{k,j}^{ID}$  分別為系統識別所得之第  $k$  個模態向量及其第  $j$  個模態分量； $\phi_k^E$  與  $\phi_{k,j}^E$  分別為特徵分析所得之第  $k$  個模態向量及其第  $j$  個模態分量元素。

## A.ARX 識別分析

以 ARX 模式識別所得之加速度傳遞函數與對應之相位角分別如圖 2.9~2.14 所示。其結構動力參數歸納於表 2.2 及表 2.3。以下將分別針對  $x$  向輸入與  $y$  向輸入之分析結果作探討。

- $x$  向輸入(表 2.2)：

識別分析所得之頻率精準度至小數以下四位的為第一、第二及第四振態，精準度至小數以下三位的為第三及第七振態，精準度至小數以下二位的為第五及第八振態，其餘振態之頻率精準度僅至個位數或小數以下一位。

阻尼比方面，第一至第四振態皆為 2%，第五振態為 2.01%，第六振態為 1.99%，第七振態為 2.05%，第八及第九振態為 1.97%。除第七振態與設定之阻尼比 2% 誤差略大外(百分之五)，其餘振態皆與設定值誤差在百分之一以內。

模態向量的誤差方面， $x$  向的第一振態(Mode 1)最為精準( $E_1=6\times 10^{-5}$ )，旋轉向的第一振態(Mode 3)精準度次之( $E_3=2\times 10^{-2}$ )，其餘振態的誤差皆超過 2%。

- $y$  向輸入(表 2.3)：

識別分析所得之頻率精準度至小數以下四位的為第一、第三、第四、第五及第八振態，精準度至小數以下三位的為

第二及第六振態，其餘振態之頻率精準度至小數以下一位或小數以下二位。

阻尼比方面，第一至第四、第六及第七振態皆為 2%，第五、第八及第九振態為 2.01%。各振態之阻尼比皆與設定值相近。

模態向量的誤差方面，僅  $y$  向的第一振態(Mode 2)較為精準( $E_2=4\times 10^{-4}$ )，其餘振態的誤差皆超過 20。

## B.SRIM 識別分析

以 SRIM 法識別所得之結構動力參數歸納於表 2.4 及表 2.5。以下將分  $x$  向輸入與  $y$  向輸入之分析結果作探討。

### ● $x$ 向輸入(表 2.4)：

識別分析所得之頻率精準度至小數以下四位的僅有第二振態，精準度至小數以下三位的為第一及第三振態，精準度至小數以下二位的為第四至第六及第九振態，其餘振態之頻率精準度僅至個位數。本例第八振態未被識別出來。

阻尼比方面，第一至第五振態皆為 2%，第六振態為 2.02%，第七及第九振態為 1.98%，各振態皆與設定值相近。

模態向量的誤差方面， $x$  向的第一振態(Mode 1)最為精準( $E_1=3\times 10^{-9}$ )，旋轉向的第一振態(Mode 3)精準度次之( $E_3=5\times 10^{-7}$ )， $x$  向的第二(Mode 4)、第三(Mode 5)及  $y$  向的第一振態(Mode 2)亦然( $E_4=5\times 10^{-5}$ 、 $E_5=5\times 10^{-3}$  及  $E_2=4\times 10^{-3}$ )，其餘振態的誤差皆超過 6%。整體而言，其精確度均較 ARX 識別結果為佳。

●  $y$  向輸入(表 2.5)：

識別分析所得之頻率精準度至小數以下三位的僅有第一振態，精準度至小數以下二位的僅有第二振態，精準度至小數以下一位的僅有第四振態，其餘振態之頻率精準度僅至個位數。本例第九振態未被識別出來。

阻尼比方面，第一振態為 2%，第二振態為 2.02%，第三振態為 1.98%，第四振態為 1.97%，與設定值相近。其餘振態之阻尼比介於 1.69%(Mode 7)至 2.15%(Mode 5)。

模態向量的誤差方面， $y$  向的第一振態(Mode 2)最為精準( $E_1=3\times 10^{-6}$ )， $x$  向的第一振態(Mode 1)及旋轉向的第一振態(Mode 3)精準度次之( $E_1=6\times 10^{-2}$  及  $E_3=4\times 10^{-2}$ )，其餘振態的誤差皆超過 5%。整體而言，其精確度均較 ARX 識別結果為佳。

圖 2.15 為上述四個案例分析所求得頻率與特徵分析所得頻率之比較。紅色格線代表特徵分析之頻率。其結果顯示，不論在  $x$  向輸入或  $y$  向輸入以 ARX 系統識別分析求得之頻率皆落於紅線上，而 SRIM 系統識別分析在  $x$  向輸入或  $y$  向輸入皆會有一模態之頻率識別不準確而落在紅線外。

接著再進一步由識別所得之模態向量進行正交性的比較。在理想的情況下，結構系統的正交性應滿足：

$$\Phi_i^T M \Phi_j = 0, \quad i \neq j \quad (2.52)$$

其中，下標  $i$  代表第  $i$  模態；下標  $j$  代表第  $j$  模態。

茲定義：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Phi_i^T M \Phi_j}{\sqrt{\Phi_i^T M \Phi_i} \sqrt{\Phi_j^T M \Phi_j}} \quad (2.53)$$

並定義整體振態正交性誤差為：

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij}^2} \quad (2.54)$$

其中， $n = C_2^{N_0}$ ， $N_0$ 為系統之模態數。本例之結構系統共九個模態，故  $N_0 = 9$ ， $n = C_2^9 = 36$ 。

利用式(2.53)進行正交性分析的結果歸納於表 2.6。x 向輸入時，ARX 系統識別求得之模態向量僅有 3 組之正交性介於  $\pm 0.01$  之間，而 SRIM 系統識別求得之模態向量有 28 組之正交性介於  $\pm 0.01$  之間。y 向輸入時，ARX 系統識別求得之模態向量僅有 4 組之正交性介於  $\pm 0.01$  之間，而 SRIM 系統識別求得之模態向量有 15 組之正交性介於  $\pm 0.01$  之間。x 向輸入時，ARX 系統識別分析之整體振態正交性誤差為 0.3090，SRIM 系統識別分析之整體振態正交性誤差為 0.0629。y 向輸入時，ARX 系統識別分析之整體振態正交性誤差為 0.4139，SRIM 系統識別分析之整體振態正交性誤差為 0.2096。仍以 SRIM 之識別結果為佳。

經由上述案例針對兩種識別技術在頻率、阻尼比、模態向量及振態正交性等分析結果比較顯示：頻率及阻尼比的識別結果以 ARX 系統識別較佳，模態向量及振態正交性方面，則以 SRIM 系統識別較為精準。由於後續結構損傷探測分析

係基於模態向量建立結構柔度矩陣。因此，本文後續將採用 SRIM 法由震測反應識別結構參數。





表 2.1 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(特徵分析)

Modal Parameters											
Mode		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Frequency (Hz)		7.0665	13.9681	19.6085	22.0238	35.5053	41.7137	54.8064	66.5857	82.8068	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	R	Y	R	
Mode shapes	3F	X	-1	0.0211	-0.3070	0.8387	0.4319	-0.0002	0.3457	-0.0059	0.1929
		Y	0.0357	1	-0.0747	-0.0305	0.0138	0.7831	0.0096	-0.4435	0.0114
		R	0.4004	-0.0786	-1	-0.1834	-0.1876	-0.0068	0.8291	0.0041	0.4875
	2F	X	-0.7247	-0.0115	-0.3862	-0.4525	-1	0.0235	-0.1783	0.0008	-0.4098
		Y	0.0211	0.7476	-0.0693	-0.0076	0.0021	-0.4678	-0.0019	1	-0.0286
		R	0.2932	-0.0560	-0.7471	0.3026	0.3837	0.0079	-0.3724	-0.0251	-1
	1F	X	-0.3782	-0.0299	-0.3258	-1	0.8048	-0.0084	-0.4150	0.0073	0.3073
		Y	0.0094	0.4006	-0.0455	0.0012	-0.0285	-1	-0.0421	-0.7971	0.0286
		R	0.1548	-0.0278	-0.3907	0.4705	-0.2962	0.0381	-1	0.0333	0.7488

表 2.2 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(x 向輸入；ARX 系統識別)

Modal Parameters											
Mode		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Frequency (Hz)		7.0665	13.9681	19.6086	22.0238	35.5040	41.7266	54.8061	66.5816	82.9310	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	1.99	2.05	1.97	1.97	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	R	Y	R	
Mode shapes	3F	X	-1	0.4190	-0.3097	-0.8120	0.4311	-0.3128	0.3512	-0.3760	0.1975
		Y	0.0358	0.2968	-0.0752	-0.0361	0.0136	-0.2349	0.0139	-0.0605	0.0261
		R	0.4005	-1	-1	-0.3345	0.2346	-0.5081	0.8459	-0.8902	0.5014
	2F	X	-0.7248	-0.1916	-0.3953	-0.4763	-1	0.3285	-0.1800	0.3917	-0.3817
		Y	0.0211	0.2205	-0.0692	-0.0190	0.0100	0.1740	-0.0019	0.1401	-0.0257
		R	0.2935	-0.6767	-0.7394	0.3122	0.3819	-0.2003	-0.3805	0.9968	-0.9746
	1F	X	-0.3779	-0.7470	-0.3674	-1	0.7786	-0.9981	-0.4150	1	0.6366
		Y	0.0094	0.1177	-0.0452	-0.0117	-0.0319	0.3602	-0.0424	-0.1042	0.0317
		R	0.1558	-0.2976	-0.3820	0.4471	-0.3317	1	-1	0.9149	1
$E_k$		6E-05	2E+03	2E-02	1E+02	2E+01	3E+06	2E-01	3E+05	3E+00	

表 2.3 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(y 向輸入；ARX 系統識別)

Modal Parameters											
Mode		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Frequency (Hz)		7.0665	13.9680	19.6085	22.0238	35.5053	41.7134	54.8010	66.5857	82.8261	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.01	2.01	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	R	Y	R	
Mode shapes	3F	X	-0.5977	0.0212	-0.3060	-0.2746	0.0533	0.0008	0.1946	-0.0071	0.0785
		Y	1	1	-0.7378	-1	-0.9803	0.7782	0.7254	-0.4457	0.1088
		R	0.2395	-0.0784	-1	-0.2442	-0.0354	-0.0081	0.4667	-0.0100	0.1981
	2F	X	-0.4331	-0.0117	-0.3893	-0.1878	-0.1244	0.0232	-0.0999	0.0037	-0.1660
		Y	0.9328	0.7478	-0.4003	-0.4355	0.2420	-0.4672	-1	1	-0.4839
		R	0.1755	-0.0559	-0.7441	-0.1785	0.0488	0.0078	-0.2108	-0.0265	-0.4049
	1F	X	-0.2259	-0.0300	-0.3345	-0.3399	0.0979	-0.0087	-0.2381	0.0078	0.1284
		Y	0.8373	0.4006	-0.0707	0.2406	1	-1	-0.4423	-0.8007	1
		R	0.0928	-0.0277	-0.3869	0.1604	-0.0413	0.0376	-0.5634	0.0326	0.3051
$E_k$		1E+04	4E-04	1E+02	4E+04	2E+04	3E+01	3E+05	2E+01	1E+03	

表 2.4 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(x 向輸入；SRIM 系統識別)

Modal Parameters										
Mode		1	2	3	4	5	6	7	9	
Frequency (Hz)		7.0666	13.9681	19.6087	22.0242	35.5095	41.7142	54.7907	82.8092	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.02	1.98	1.98	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	R	R	
Mode shapes	3F	X	-1	0.0203	-0.3071	0.8387	0.4317	-0.0014	0.3458	0.1925
		Y	0.0357	1	-0.0747	-0.0305	0.0139	0.7891	0.0085	0.0177
		R	0.4004	-0.0787	-1	-0.1833	-0.1874	-0.0128	0.8298	0.4910
	2F	X	-0.7247	-0.0121	-0.3862	-0.4525	-1	0.0153	-0.1785	-0.4119
		Y	0.0211	0.7477	-0.0693	-0.0075	0.0020	-0.4738	0.0007	-0.0418
		R	0.2932	-0.0562	-0.7472	0.3027	0.3842	0.0220	-0.3726	-1
	1F	X	-0.3782	-0.0302	-0.3256	-1	0.8057	0.0139	-0.4158	0.3088
		Y	0.0094	0.4006	-0.0455	0.0012	-0.0283	-1	-0.0443	0.0390
		R	0.1548	-0.0280	-0.3908	0.4705	-0.2960	0.0439	-1	0.7530
$E_k$		3E-09	4E-03	5E-07	5E-05	5E-03	6E+01	2E+00	6E-01	

\*本例第 8 振態並未被識別出來

表 2.5 三層樓扭轉耦合結構之系統參數(y 向輸入；SRIM 系統識別)

Modal Parameters										
Mode		1	2	3	4	5	6	7	8	
Frequency (Hz)		7.0663	13.9690	19.5999	22.0100	35.4752	41.6196	54.9245	66.4540	
Damping Ratio (%)		2.00	2.02	1.98	1.97	2.15	1.93	1.69	2.04	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	R	Y	
Mode shapes	3F	X	-1	0.0212	-0.3065	0.8492	0.4443	-0.0003	0.3407	-0.0051
		Y	0.0394	1	-0.0869	-0.0857	-0.4180	0.7799	-0.5048	-0.4646
		R	0.3998	-0.0786	-1	-0.1682	-0.1712	-0.0063	0.8365	0.0067
	2F	X	-0.7249	-0.0115	-0.3866	-0.4487	-1	0.0237	-0.1711	0.0017
		Y	0.0239	0.7475	-0.0768	-0.0483	-0.3090	-0.4680	0.2890	1
		R	0.2929	-0.0560	-0.7460	0.3237	0.4140	0.0080	-0.3513	-0.0288
	1F	X	-0.3785	-0.0299	-0.3264	-1	0.8288	-0.0082	-0.4047	0.0094
		Y	0.0111	0.4005	-0.0478	-0.0357	-0.6618	-1	0.3574	-0.7667
		R	0.1546	-0.0278	-0.3903	0.4800	-0.2719	0.0383	-1	0.0366
$E_k$		6E-02	3E-06	4E-02	1E+03	2E+04	5E-01	3E+04	2E+00	

\*本例第 9 振態並未被識別出來

表 2.6 ARX 與 SRIM 識別之模態正交性比較

	ARX(X)	SRIM(X)	ARX(Y)	SRIM(Y)
$\phi_1^T M \phi_2$	-0.2857	0.0007	0.8413	0.0036
$\phi_1^T M \phi_3$	0.0139	1E-05	-0.3799	0.0002
$\phi_1^T M \phi_4$	-0.0086	3E-05	-0.5547	-0.0010
$\phi_1^T M \phi_5$	0.0854	0.0001	0.0476	-0.0136
$\phi_1^T M \phi_6$	0.1491	0.0009	-0.2212	-0.0001
$\phi_1^T M \phi_7$	-0.0005	0.0003	-0.2178	-0.0013
$\phi_1^T M \phi_8$	-0.0681	-0.1919	-0.0710	-0.0013
$\phi_1^T M \phi_9$	-0.0393	0.0016	0.2167	0.0090
$\phi_2^T M \phi_3$	0.7958	0.0004	-0.4125	-0.0097
$\phi_2^T M \phi_4$	0.4670	-0.0002	-0.7075	-0.0512
$\phi_2^T M \phi_5$	-0.2694	3E-05	-0.1940	-0.4111
$\phi_2^T M \phi_6$	0.3422	3E-05	-0.0024	-0.0018
$\phi_2^T M \phi_7$	0.1026	0.0001	-0.1101	-0.0560
$\phi_2^T M \phi_8$	-0.3478	0.0027	-0.0012	-0.0047
$\phi_2^T M \phi_9$	-0.1604	-0.0001	0.0874	-0.0283
$\phi_3^T M \phi_4$	0.1002	-0.0002	0.6202	-0.0130
$\phi_3^T M \phi_5$	-0.1968	-0.0004	0.2281	0.0116
$\phi_3^T M \phi_6$	0.2342	-0.0059	-0.1402	-0.0020
$\phi_3^T M \phi_7$	-0.0027	-0.0001	-0.0316	-0.0117
$\phi_3^T M \phi_8$	-0.2355	0.2196	-0.0052	-0.0013
$\phi_3^T M \phi_9$	-0.1136	-0.0023	0.0198	-0.0326
$\phi_4^T M \phi_5$	-0.0360	-0.0004	0.6068	0.0324
$\phi_4^T M \phi_6$	0.4680	-0.0055	-0.4660	0.0074
$\phi_4^T M \phi_7$	-0.0483	0.0003	-0.2003	0.0001
$\phi_4^T M \phi_8$	-0.1368	-0.0716	-0.1139	0.0054
$\phi_4^T M \phi_9$	-0.1210	0.0002	0.2763	-0.0150
$\phi_5^T M \phi_6$	-0.7439	0.0157	-0.9711	0.2010
$\phi_5^T M \phi_7$	0.1831	-0.0006	-0.6225	-0.0538
$\phi_5^T M \phi_8$	0.0379	-0.0001	-0.0751	0.1613
$\phi_5^T M \phi_9$	0.1301	0.0004	0.4323	0.2177
$\phi_6^T M \phi_7$	-0.4722	-0.0123	0.6833	-0.4206
$\phi_6^T M \phi_8$	0.1358	-0.0335	0.0026	-0.0250
$\phi_6^T M \phi_9$	0.0730	-0.0011	-0.4067	0.9777
$\phi_7^T M \phi_8$	-0.9039	0.2242	-0.4644	0.0962
$\phi_7^T M \phi_9$	-0.1518	-0.0010	0.0577	-0.3585
$\phi_8^T M \phi_9$	-0.0242	0.0244	-0.7637	0.1242
$\varepsilon$	0.3090	0.0629	0.4139	0.2096

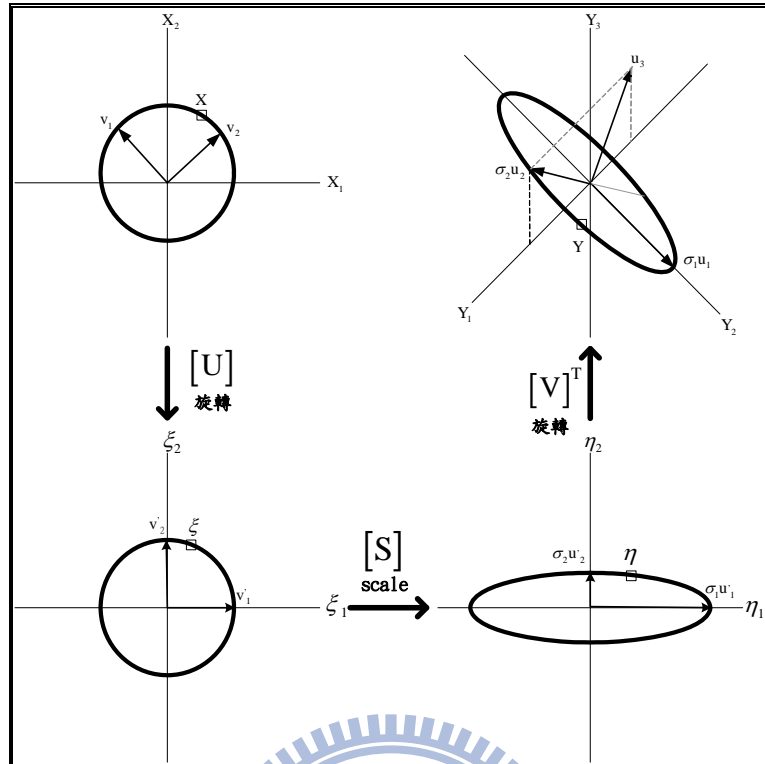


圖 2.1 奇異值分解之幾何概念

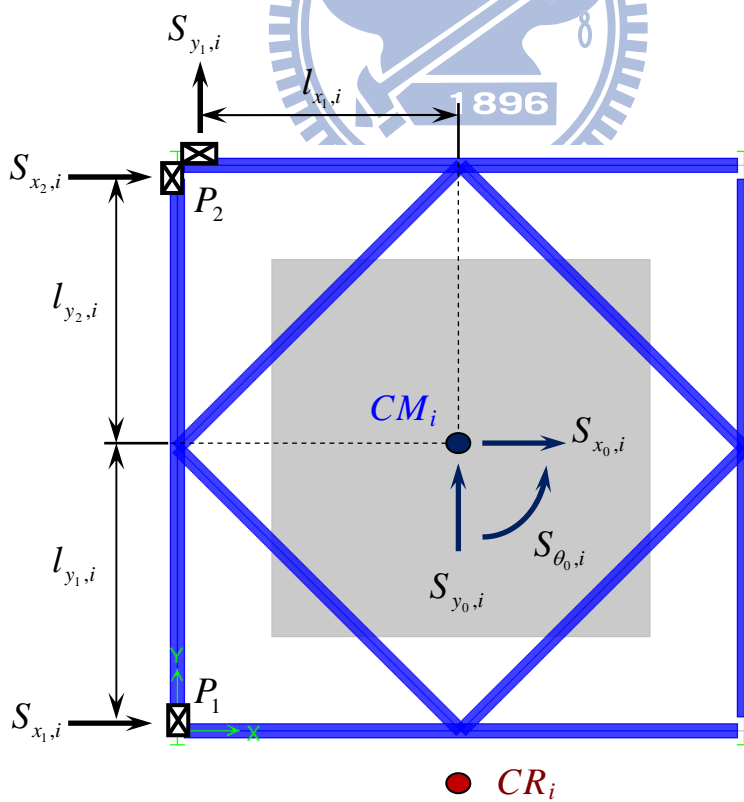


圖 2.2 各樓層加速規安裝示意圖

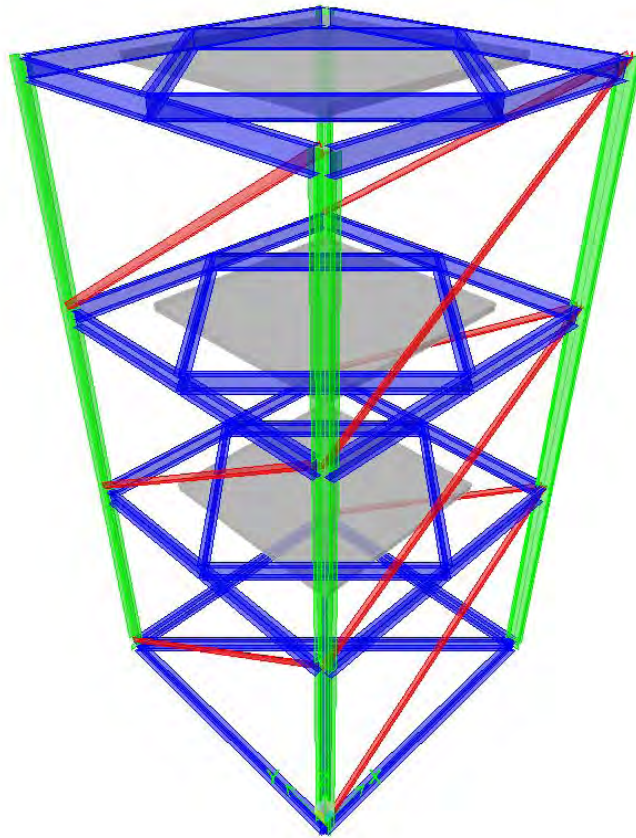


圖 2.3 三層樓扭轉耦合鋼構架之 ETABS 模型

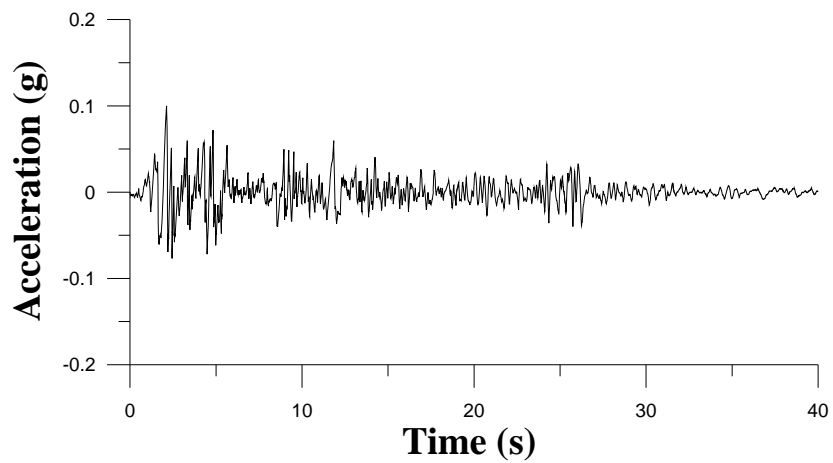


圖 2.4 El Centro 地震加速度歷時(PGA=0.1g)



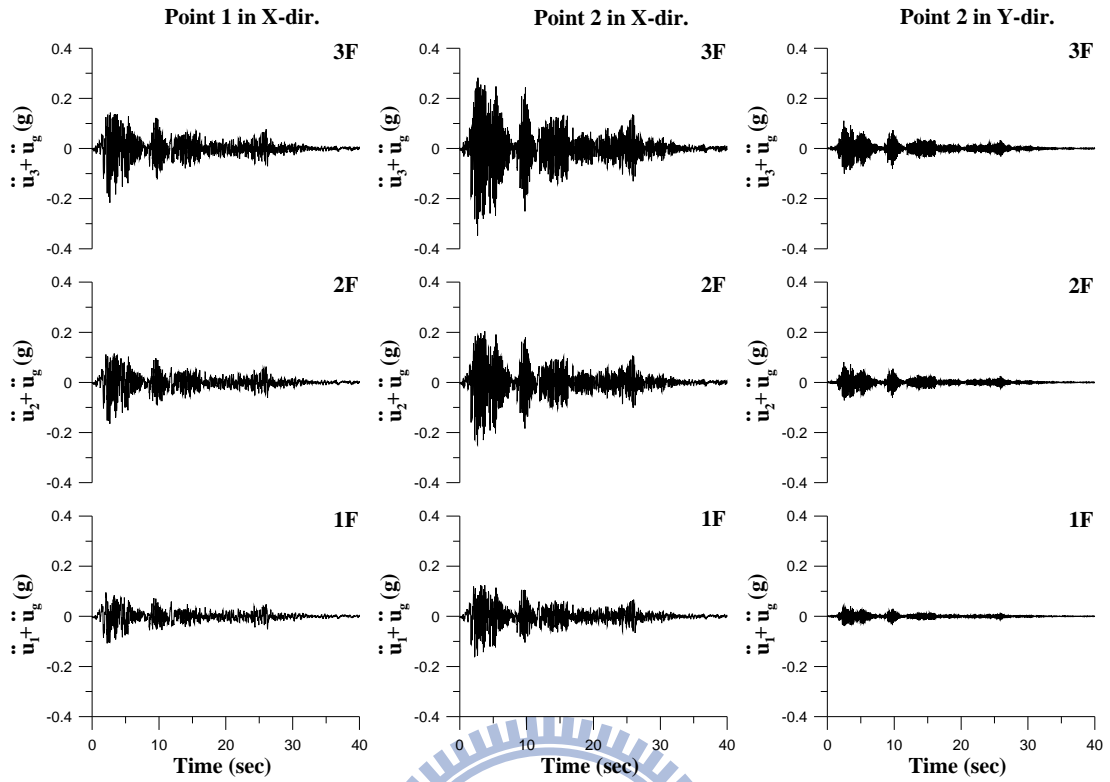


圖 2.5 三層樓結構各樓層角隅加速度歷時(x 向輸入)

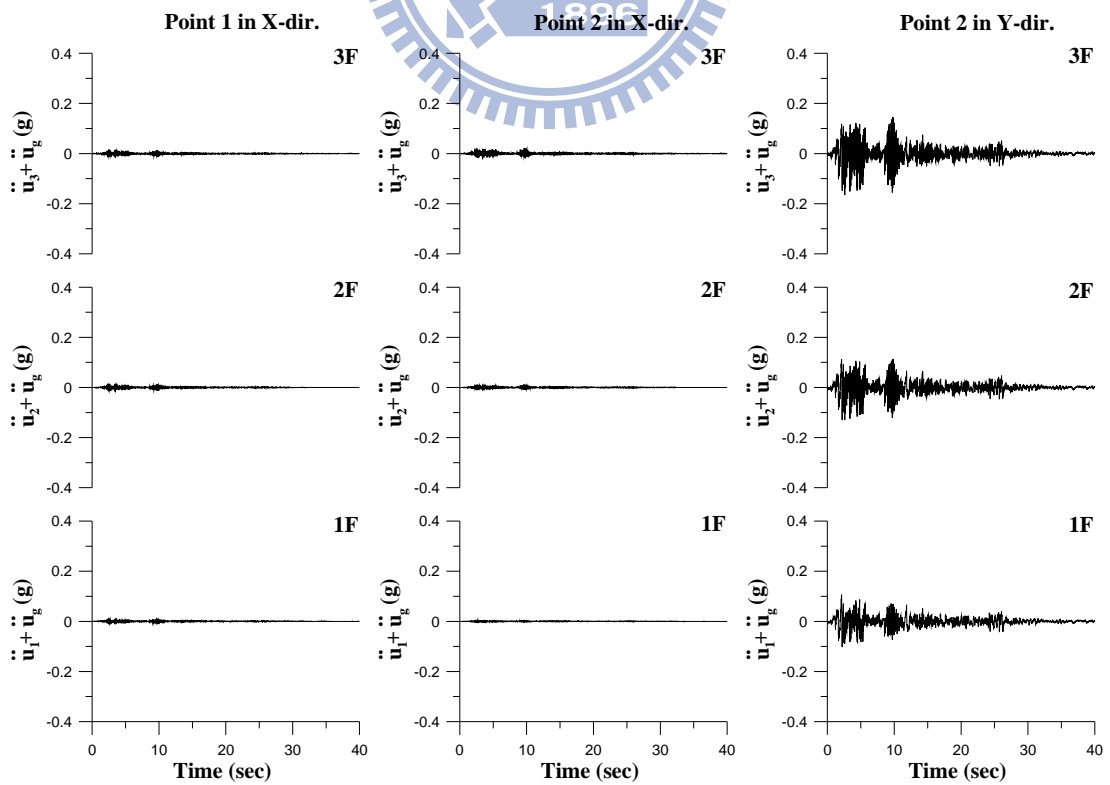


圖 2.6 三層樓結構各樓層角隅加速度歷時(y 向輸入)

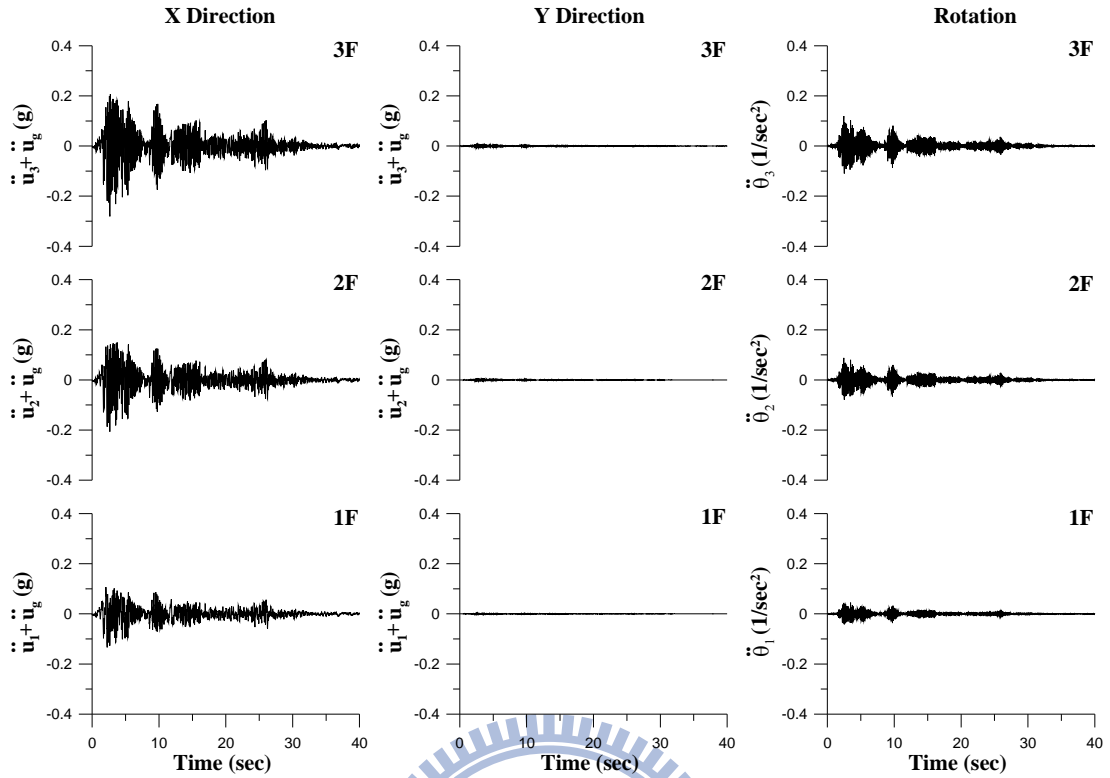


圖 2.7 三層樓結構各樓層質心加速度歷時(x 向輸入)

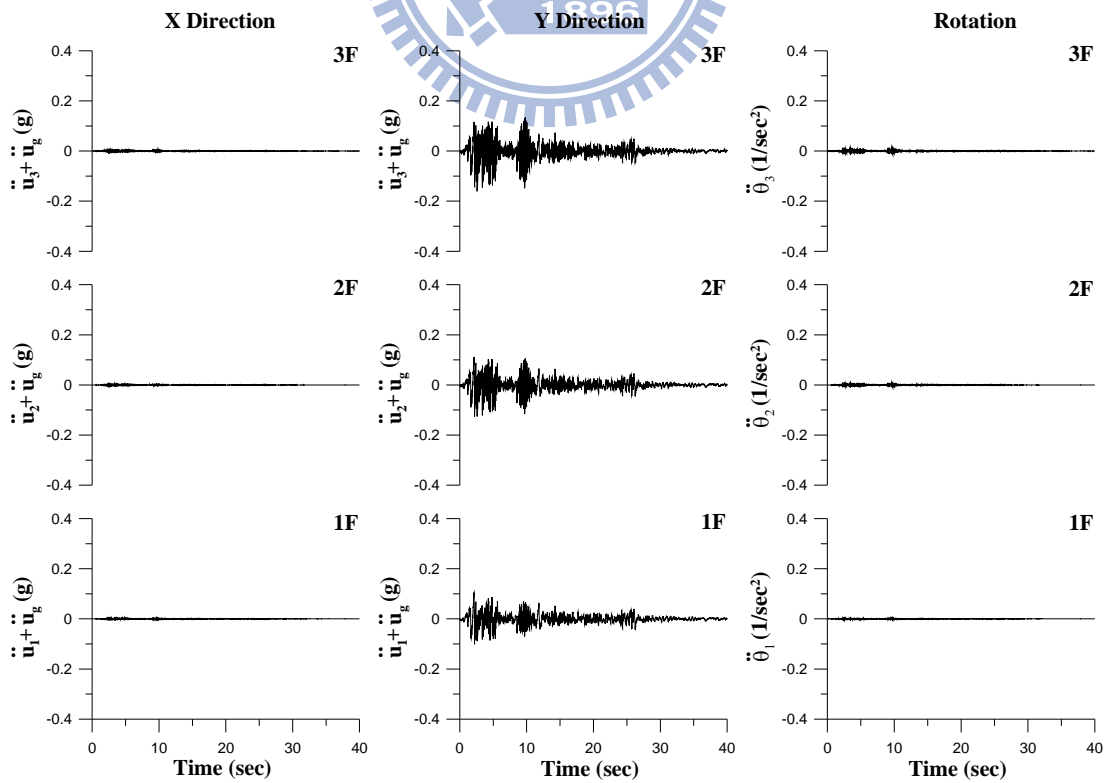


圖 2.8 三層樓結構各樓層質心加速度歷時(y 向輸入)

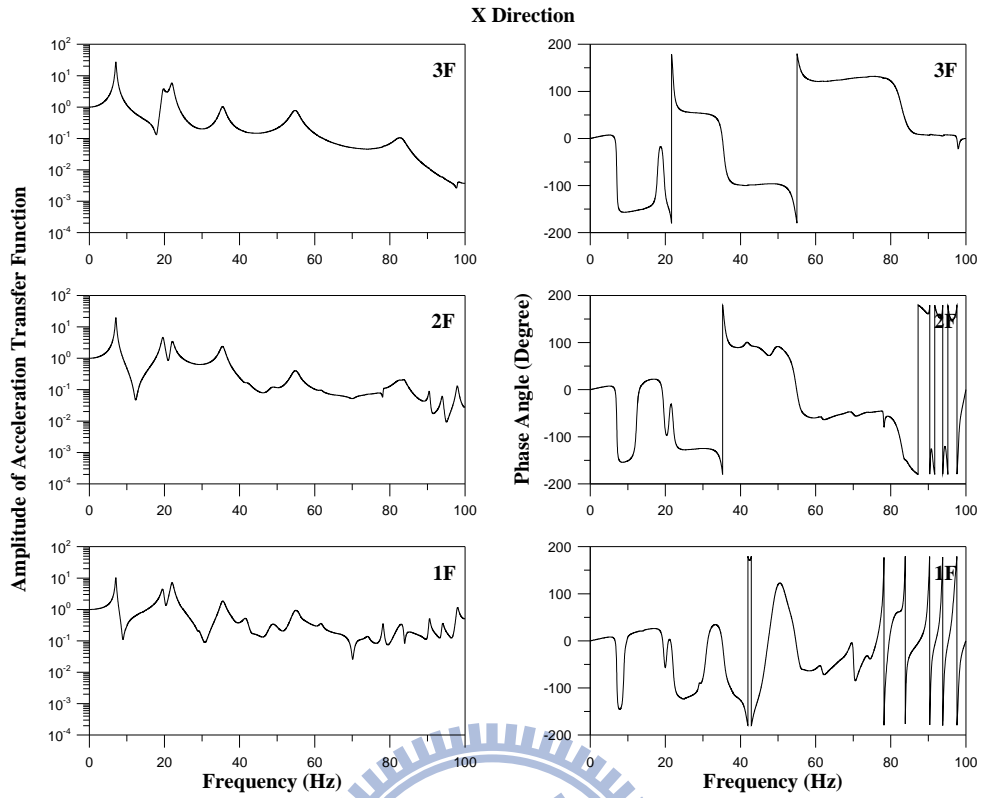


圖 2.9 三層樓結構之  $x$  向加速度傳遞函數與相位角( $x$  向輸入)

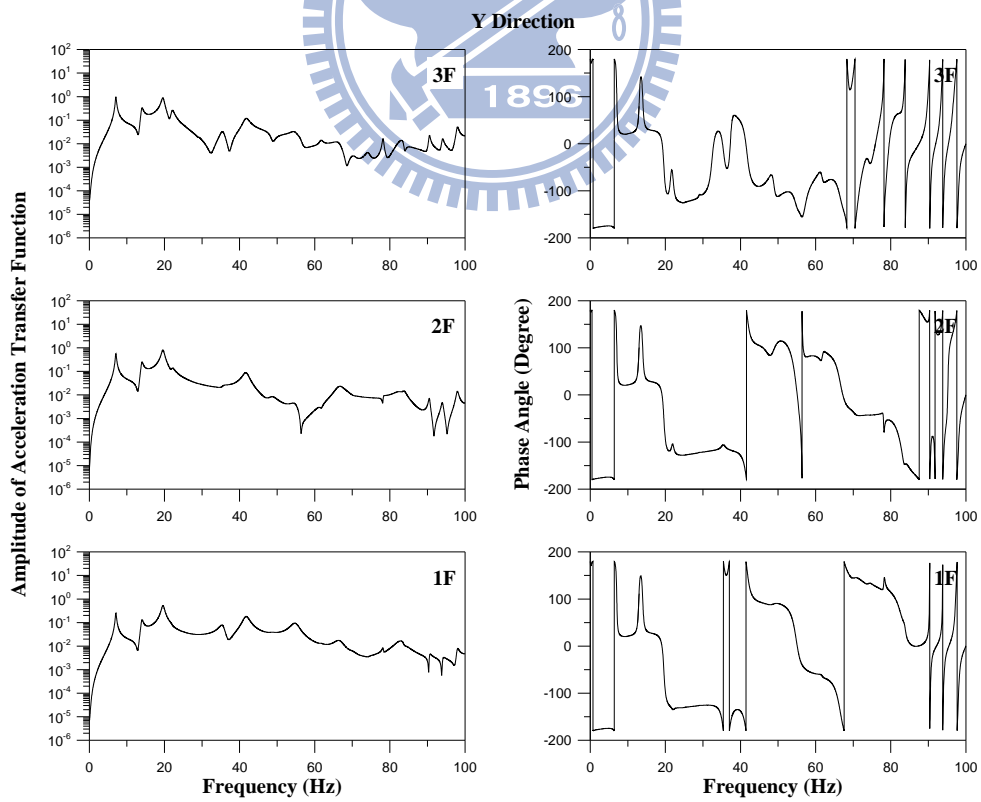


圖 2.10 三層樓結構之  $y$  向加速度傳遞函數與相位角( $x$  向輸入)

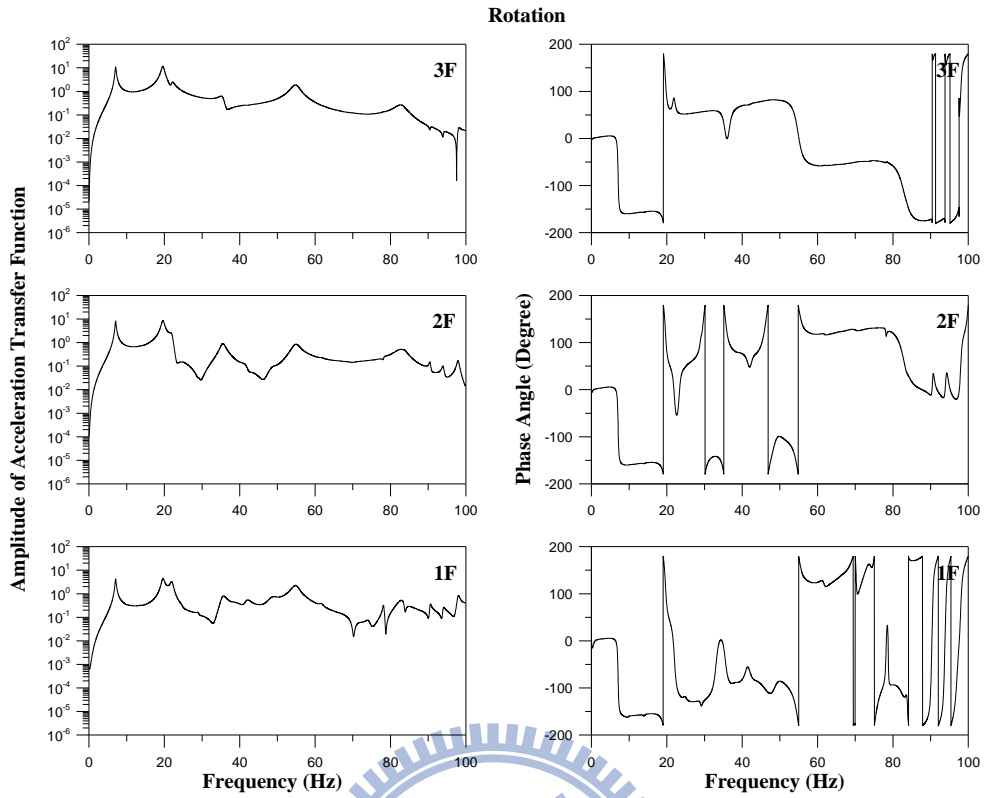


圖 2.11 三層樓結構之旋轉向加速度傳遞函數與相位角  
( $x$  向輸入)

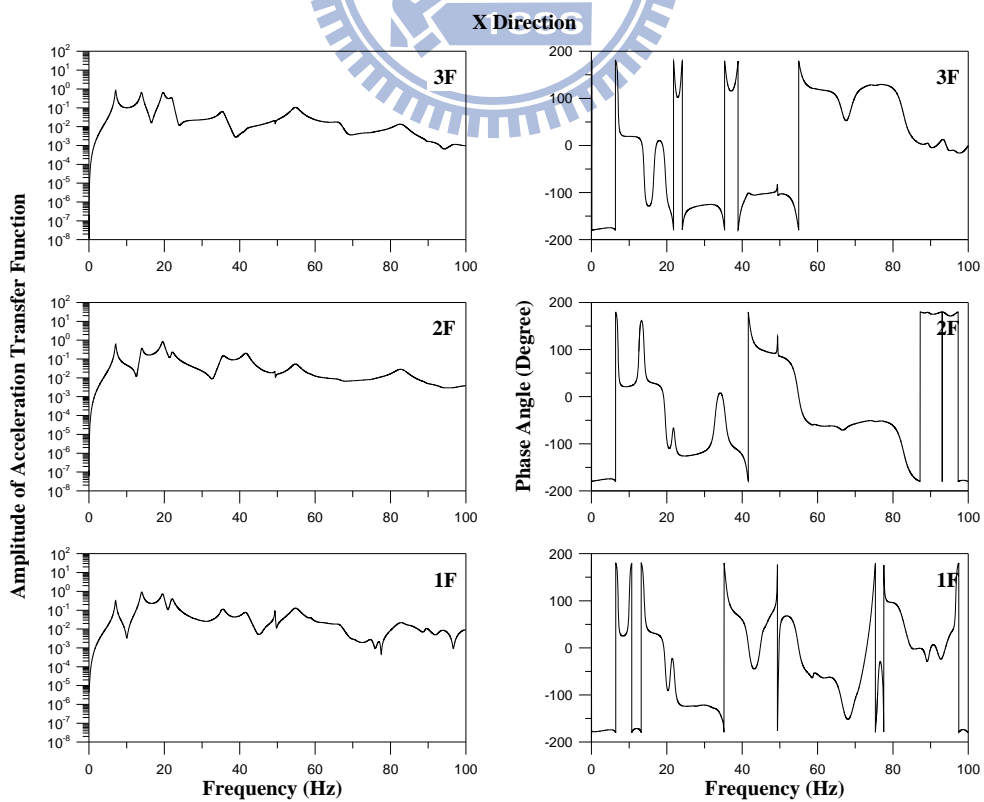


圖 2.12 三層樓結構之  $x$  向加速度傳遞函數與相位角 ( $y$  向輸入)

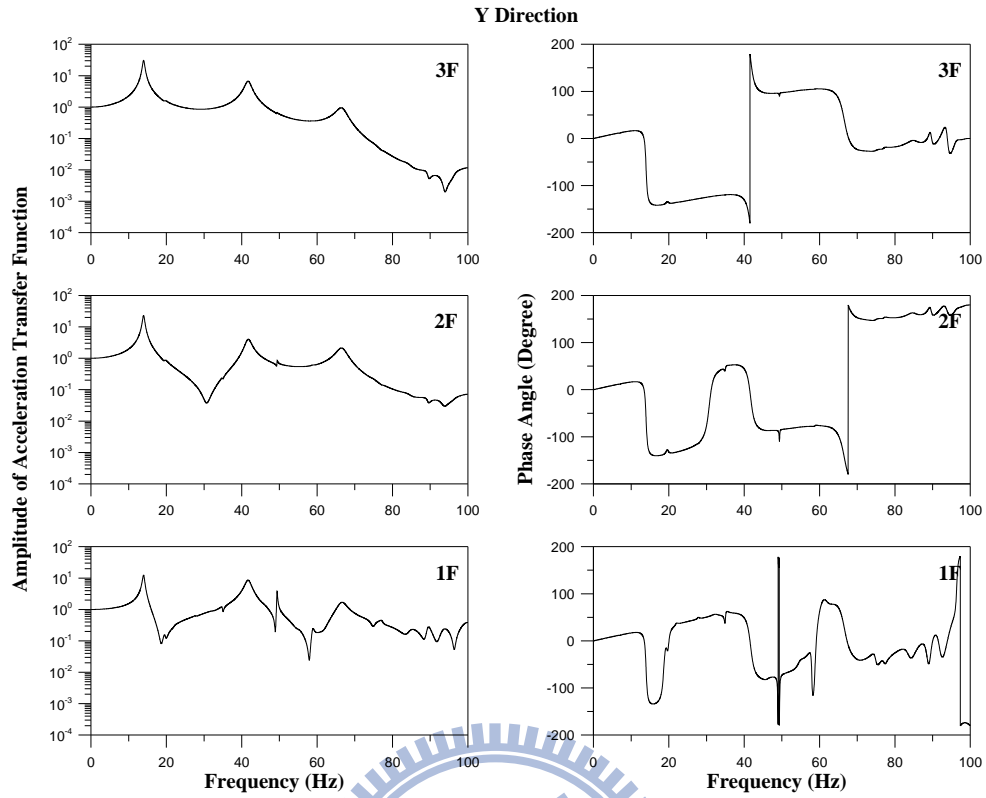


圖 2.13 三層樓結構之 y 向加速度傳遞函數與相位角 (y 向輸入)

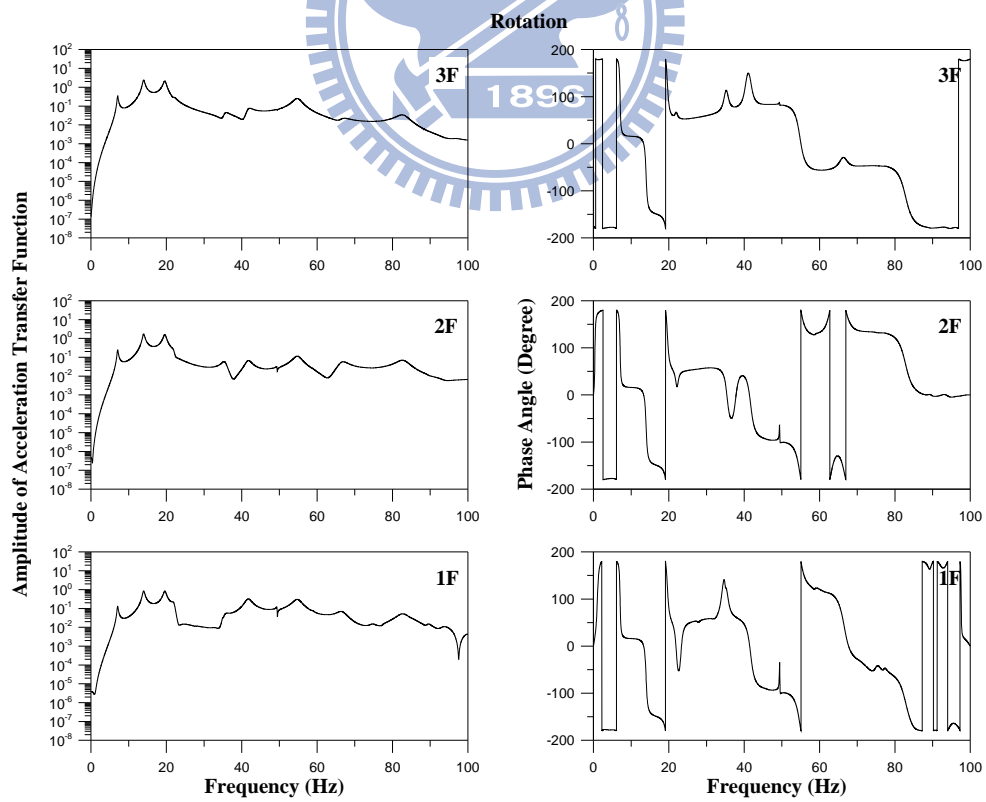


圖 2.14 三層樓結構之旋轉向加速度傳遞函數與相位角  
(y 向輸入)

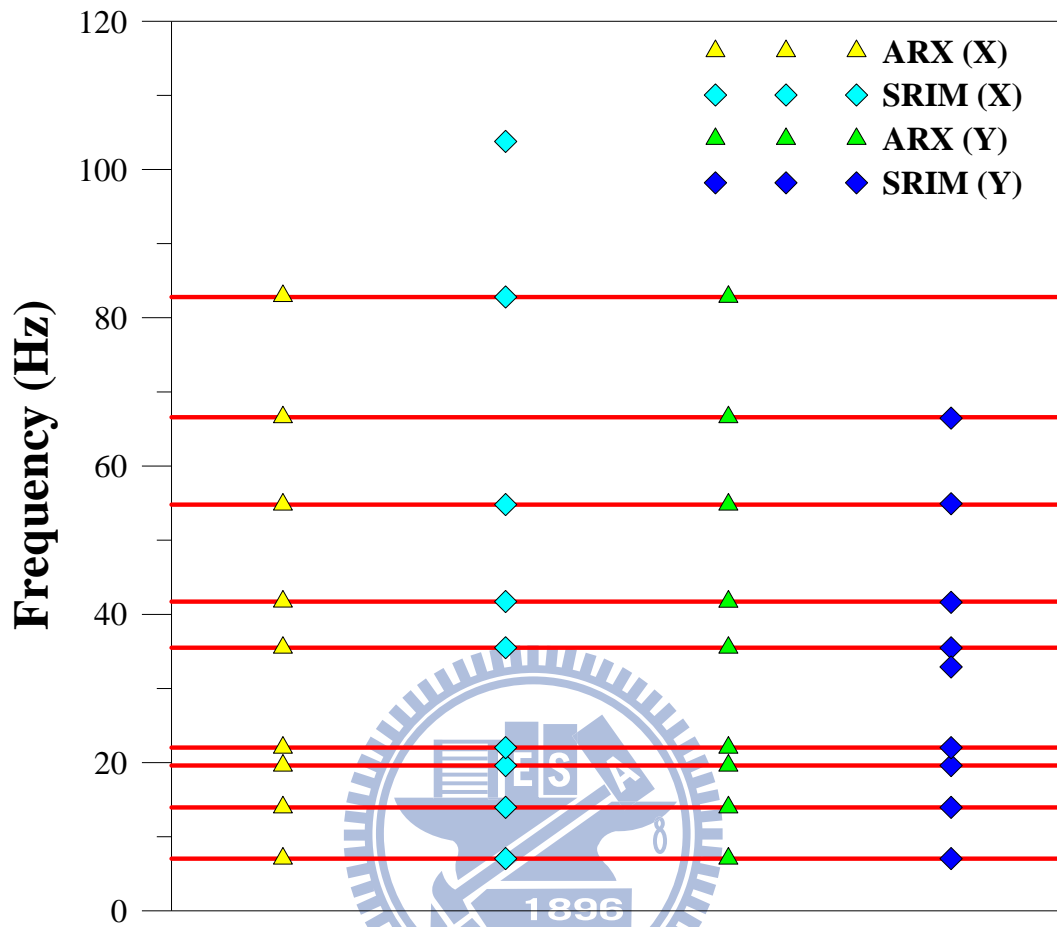


圖 2.15 系統識別分析與特徵分析之頻率比較

## 第三章 DLV 結構損傷探測理論

### 3.1 前言

Bernal 於 2002 年所提出的破壞定位向量法(Method of Damage Locating Vectors, 簡稱 DLV 法), 是以結構柔度變化矩陣為基礎的損傷探測法。此方法的概念乃在於識別結構在某些特定形式的荷載向量作用下, 應力或內力為零的桿件, 凡滿足此一條件的特定荷載向量, 即稱為破壞定位向量, 可藉由健康結構與受損結構柔度矩陣之變化, 將其差異作奇異值分解(singular value decomposition, 簡稱 SVD)而得。DLV 在數學上乃對應於柔度變化矩陣之零空間(null space)的一組向量基底(basis), 並以此特徵向量作為荷載, 施加於健康結構, 再由其應力或內力的分析結果萃取出最可能的破壞構件, 作為結構損傷探測之依據。

以 DLV 為基礎的結構損傷探測法, 並非完全與結構之數值模型無關, 因計算結構桿件之應力或內力仍須以結構模型為依據。惟其計算結果受到結構數值模型誤差的影響很小, 因此辨識率極高, 且可用於偵測多重位置受損的結構系統, 也可僅考慮局部之模態來計算。

本章將介紹 DLV 損傷探測法的原理, 以及由結構的模態參數建立系統柔度矩陣的方法。

### 3.2 DLV 損傷探測理論之回顧

考慮一  $n$  維線彈性結構系統, 其健康狀態之柔度矩陣為

$\mathbf{F}_h$ ，受損狀態之柔度矩陣為  $\mathbf{F}_d$ 。假設存在某荷載向量，將其分別作用於健康與受損之結構系統時，會使結構系統產生相同的變位。將滿足上述條件的荷載向量記為  $\mathbf{L}$ ，則可建立下列關係式：

$$\mathbf{F}_d \mathbf{L} = \mathbf{F}_h \mathbf{L} \quad (3.1)$$

式(3.1)可進一步改寫成：

$$(\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_h) \mathbf{L} = \mathbf{D}_F \mathbf{L} = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

式(3.2)中的  $\mathbf{D}_F = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_h$  為健康結構與受損結構之柔度矩陣的變化量。在數學上，滿足式(3.2)者有三種情況：(1)  $\mathbf{D}_F = \mathbf{0}$ ，表示結構系統柔度矩陣未產生任何變化，即結構系統無破壞發生，因此不具討論意義；(2)  $\mathbf{L} = \mathbf{0}$ ，表示結構系統無荷載向量的存在，因此結構系統也無變位產生，亦無須討論；(3)  $\text{rank}(\mathbf{D}_F) = r < n$ ，表示  $\mathbf{D}_F$  秩缺(rank deficient)，矩陣  $\mathbf{L}$  為對應於零空間(null space)之基底(basis)的情況。凡滿足情況(3)的荷載向量  $\mathbf{L}$ ，即稱為破壞定位向量(DLV)。

DLV 可由柔度矩陣之變化量  $\mathbf{D}_F$  做奇異值分解而得，即：

$$\mathbf{D}_F = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_0] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0 \end{bmatrix} [\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_0]^T \quad (3.3)$$

其中， $\mathbf{U}_1$  為  $\mathbf{D}_F \mathbf{D}_F^T$  之非零特徵值所對應的單位特徵向量； $\mathbf{U}_0$  為  $\mathbf{D}_F \mathbf{D}_F^T$  之零特徵值所對應的單位特徵向量； $\mathbf{S}_1$  為  $\mathbf{D}_F^T \mathbf{D}_F$  之非零奇異值所組成的對角矩陣； $\mathbf{S}_0$  為  $\mathbf{D}_F^T \mathbf{D}_F$  之理想零奇異值所



組成的對角矩陣； $\mathbf{V}_1$  為  $\mathbf{D}_F^T \mathbf{D}_F$  之非零特徵值所對應的單位特徵向量； $\mathbf{V}_0$  為  $\mathbf{D}_F^T \mathbf{D}_F$  之零特徵值所對應的單位特徵向量。

於式(3.3)後乘上  $(\mathbf{V}^T)^{-1}$  可改寫成：

$$\mathbf{D}_F (\mathbf{V}^T)^{-1} = \mathbf{U}\mathbf{S} = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_0] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

由於矩陣  $\mathbf{V}$  為正交矩陣，因此  $\mathbf{V}^T = \mathbf{V}^{-1}$ ，所以式(3.4)亦可表示成：

$$\mathbf{D}_F \mathbf{V} = [\mathbf{D}_F \mathbf{V}_1 \quad \mathbf{D}_F \mathbf{V}_0] = [\mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \quad \mathbf{U}_0 \mathbf{S}_0] = [\mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \quad \mathbf{0}] \quad (3.5)$$

比較式(3.5)與式(3.2)可知，破壞定位向量  $\mathbf{L}$  可由柔度變化矩陣  $\mathbf{D}_F$  之奇異值分解得到。

在現實中，數值計算所造成之誤差或訊號量測受雜訊影響而產生的誤差，皆會使得  $\mathbf{S}_0$  無法完全為零。為了由奇異值分解後的矩陣  $\mathbf{S}$  有效的區分出零空間(null space)大小，以及辨識出結構系統可能受損的桿件，Bernal【14】提出一指標係數  $svn_i$  (singular value normalize) 作為零空間選擇之門檻依據。 $svn_i$  之定義如下：

$$svn_i = \sqrt{\frac{s_i \|\mathbf{V}_i\|_\infty^2}{s_q \|\mathbf{V}_q\|_\infty^2}} \quad i=1, \dots, n \quad (3.6)$$

其中， $s_i$  為柔度變化矩陣  $\mathbf{D}_F$  之第  $i$  個奇異值； $\|\mathbf{V}_i\|_\infty^2$  為  $s_i$  所對應特徵向量  $\mathbf{V}_i$  之 infinity norm，即向量  $\mathbf{V}_i$  分量之絕對值最大

者； $s_q \|\mathbf{V}_q\|_\infty^2 = \max(s_i \|\mathbf{V}_i\|_\infty^2)$  為所有  $s_i \|\mathbf{V}_i\|_\infty^2 (i=1, \dots, n)$  中最大者。Bernal 建議，凡滿足  $svn_i \leq 0.20$  者，其特徵向量  $\mathbf{V}_i$  即是為零空間，據以挑選出結構系統之破壞定位向量  $\mathbf{L}_i$ 。

此外，Bernal 並定義結構系統於第  $i$  個破壞定位向量  $\mathbf{L}_i$  荷載作用下之正規化應力指標  $nsi_{ij}$  (normalized stress index) 如下：

$$nsi_{ij} = \left| \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ij}|_{\max}} \right| \quad j=1, \dots, n, \quad \forall i \quad (3.7)$$

其中， $\sigma_{ij}$  為對應於第  $i$  個 DLV 荷載向量作用下第  $j$  根桿件的應力或內力。當結構為桁架系統時， $\sigma_{ij}$  可為桿件之軸力；若結構為抗彎構架系統時， $\sigma_{ij}$  可以是柱剪力。

透過  $i$  組 DLV 的加載於健康結構並求得  $nsi_{ij}$  指標後，即可經由 Bernal 定義的加權應力指標  $WSI_j$  (weighted stress index) 作為結構損傷探測之依據如下：

$$WSI_j = \frac{\sum_{i=1}^{nDLV} \overline{nsi_{ij}}}{nDLV} \quad (3.8)$$

其中， $\overline{svn_i} = \max(svn_i, 0.015)$ ； $nDLV$  代表結構系統進行 DLV 分析之總桿件元素數目。根據計算出對應於各桿件之加權應力指標  $WSI_j$ ，由各桿件之指標中相對數值尺度 (order) 較小者，即判斷為結構系統可能受損的樓層或桿件。

### 3.3 結構柔度矩陣之建立

由於結構系統的高階模態難以識別，因而增加了結構損傷探測工作的困難度。幸而柔度矩陣對於結構系統的高階模態較不敏感，基於此特性，在系統識別時僅使用少量的低頻模態仍可建構等效的結構柔度矩陣。

考慮一  $n$  維線性結構動力系統如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (3.9)$$

其中， $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  與  $\mathbf{K}$  分別為  $n \times n$  之系統質量、阻尼與勁度矩陣； $\mathbf{x}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}(t)$  與  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  分別為  $n \times 1$  之系統位移、速度與加速度向量； $\mathbf{P}(t)$  為  $n \times 1$  之系統外力向量。若將結構系統由時間域轉換至模態域，可得系統模態質量  $\bar{\mathbf{M}}$  與模態勁度  $\bar{\mathbf{K}}$  如下：

$$\bar{\mathbf{M}} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi \quad (3.10a)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \Phi^T \mathbf{K} \Phi \quad (3.10b)$$

其中， $\Phi_{n \times n} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$  為由結構系統模態向量  $\phi_i$  所組成之模態矩陣。系統模態質量矩陣  $\bar{\mathbf{M}}$  與模態勁度矩陣  $\bar{\mathbf{K}}$  之關係式如下：

$$\mathbf{\Omega} = \bar{\mathbf{M}}^{-1} \bar{\mathbf{K}} \quad (3.11)$$

其中， $\mathbf{\Omega}$  為由系統模態頻率平方 ( $\omega_j^2; j=1 \sim n$ ) 所組成之對角矩陣。由式(3.10)與式(3.11)之關係可推得：

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi = \Phi^T \mathbf{M} \Phi \mathbf{\Omega} \quad (3.12)$$

因此，結構系統勁度矩陣  $\mathbf{K}$  可被表示為：

$$\mathbf{K} = (\Phi^T)^{-1} \mathbf{w} \Omega \mathbf{w} \Phi^{-1} \quad (3.13)$$

其中， $\mathbf{w} = (\Phi^T \mathbf{M} \Phi)^{1/2}$ 。由式(3.13)顯示勁度矩陣  $\mathbf{K}$  與  $\Omega$  成正比，因此越高頻的振態，勁度之貢獻度越高。

結構系統之柔度矩陣  $\mathbf{F}$  與勁度矩陣  $\mathbf{K}$  互為反矩陣，故可由式(3.13)推得：

$$\mathbf{F} = \Phi \mathbf{w}^{-1} \Omega^{-1} \mathbf{w}^{-1} \Phi^T \quad (3.14)$$

由式(3.14)顯示柔度矩陣  $\mathbf{F}$  與  $\Omega$  成反比，因此越高頻的振態，柔度之貢獻度越低。利用式(3.14)可由結構系統之模態參數建立柔度矩陣。

若僅考慮前  $m$  個模態 ( $m < n$ )，則式(3.14)可改寫如下：

$$\mathbf{F}_{n \times n} = \Phi_{n \times m} \mathbf{w}_{m \times m}^{-1} \Omega_{m \times m}^{-1} \mathbf{w}_{m \times m}^{-1} \Phi_{n \times m}^T \quad (3.15)$$

其中， $\Phi_{n \times m} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]$  為結構系統前  $m$  個模態向量所組成之模態矩陣； $\mathbf{w}_{m \times m} = (\Phi_{n \times m}^T \mathbf{M} \Phi_{n \times m})^{1/2}$ 。因此，儘管只考慮前  $m$  個模態，結構柔度矩陣  $\mathbf{F}$  仍為一  $n \times n$  之矩陣。

## 第四章 扭轉耦合結構之 DLV 損傷探測數值驗證

### 4.1 前言

扭轉耦合結構行為是因建築物樓層質心(center of mass, C.M.)位置和剛心(center of rigidity, C.R.)位置不一致所導致。為驗證 DLV 損傷探測法應用於扭轉耦合結構的可行性，本章將分別以一座單跨三層樓扭轉耦合結構模型及一座單跨五層樓含斜撐的鋼構架模型(針對實驗室現有結構模型所建構)，進行破壞診斷之數值模擬分析。鋼構架之其中三面框架於每層樓皆以斜撐加勁，以構成不對稱之扭轉耦合結構。斜撐的配置方式，考慮於弱軸單邊及強軸雙邊各樓層配置斜撐，以及於弱軸雙邊及強軸單邊各樓層配置斜撐兩種情況。有關結構之損傷狀態，係以移除部份樓層之斜撐來模擬，考慮單一樓層受損及複數樓層受損等條件進行結構破壞診斷分析，其分析流程如圖 4.1 所示。

本章將循序由特徵分析及系統識別分析兩種途徑建構結構之柔度矩陣，以進行結構損傷探測分析。由特徵分析結果所建構的結構柔度矩陣可視為正確解(exact solution)，目的在驗證 DLV 損傷探測法於結構系統參數為理想已知的前提下應用於扭轉耦合結構的可行性。本文將先以單跨三層樓扭轉耦合結構進行分析，示範 DLV 損傷探測法於扭轉耦合結構之應用，作為後續五層樓結構損傷探測分析之基礎；系統識別分析將採用第二章所介紹的 SRIM 法，由地震擾動下之結構動態歷時反應資料識別其系統參數，進而建構出結構之柔度矩

陣，再進行結構損傷探測分析，以探討在擬真情況(realistic condition)下 DLV 損傷探測法之可行性。模擬分析時以結構之弱軸為  $x$  向，強軸為  $y$  向。當以地震反應資料進行系統識別時，係以單軸向( $x$  或  $y$  向)地震波為輸入擾動進行分析。

## 4.2 三層樓扭轉耦合結構之損傷探測分析

為示範 DLV 損傷探測法於扭轉耦合結構之應用，本節首先針對自由度為三維之三層樓扭轉耦合結構系統進行分析，其 ETABS 模型如圖 4.2 所示。此結構之 ETABS 模型設定為空間結構之型式，考慮 UX、UY、UZ、RX、RY 及 RZ 等自由度。結構破壞前、後之斜撐平面配置方式如圖 4.3 所示。健康結構的質量矩陣如下：

$$\mathbf{M}_h = \begin{bmatrix} 86.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 86.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 88.87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 89.82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 89.82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 95.71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 90.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 90.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 96.54 \end{bmatrix}$$

茲設定受損位置在一樓，移除一樓弱軸向之斜撐，該受損結構的質量矩陣如下：

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} 86.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 86.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 88.87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 89.82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 89.82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 95.71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 89.86 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 89.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 95.79 \end{bmatrix}$$

質量矩陣之對角元素之排列依序為三樓  $x$  向質量、三樓  $y$  向質量、三樓轉動慣量，由上而下，以此類推。

針對健康結構及受損結構進行特徵分析，得到其模態參數如下：

健康結構的特徵值矩陣( $\Omega_h$ )與模態矩陣( $\Phi_h$ )為：

$$\Omega_h = \begin{bmatrix} 49.94 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 195.11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 384.49 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 485.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1260.63 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1740.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3003.74 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4433.66 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6856.97 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_h = \begin{bmatrix} -8E-02 & 2E-03 & -2E-02 & 6E-02 & 3E-02 & -1E-05 & 2E-02 & -5E-04 & 1E-02 \\ 3E-03 & 8E-02 & -5E-03 & -2E-03 & 1E-03 & 6E-02 & 7E-04 & -3E-02 & 8E-04 \\ 3E-02 & -6E-03 & -7E-02 & -1E-02 & -1E-02 & -5E-04 & 6E-02 & 3E-04 & 3E-02 \\ -6E-02 & -9E-04 & -3E-02 & -3E-02 & -7E-02 & 2E-03 & -1E-02 & 7E-05 & -3E-02 \\ 2E-03 & 6E-02 & -5E-03 & -5E-04 & 2E-04 & -4E-02 & -1E-04 & 8E-02 & -2E-03 \\ 2E-02 & -5E-03 & -5E-02 & 2E-02 & 3E-02 & 6E-04 & -3E-02 & -2E-03 & -7E-02 \\ -3E-02 & -2E-03 & -2E-02 & -7E-02 & 6E-02 & -7E-04 & -3E-02 & 6E-04 & 2E-02 \\ 7E-04 & 3E-02 & -3E-03 & 8E-05 & -2E-03 & -8E-02 & -3E-03 & -6E-02 & 2E-03 \\ 1E-02 & -2E-03 & -3E-02 & 3E-02 & -2E-02 & 3E-03 & -7E-02 & 3E-03 & 5E-02 \end{bmatrix}$$

受損結構的特徵值矩陣( $\Omega_d$ )與模態矩陣( $\Phi_d$ )為：

$$\Omega_d = \begin{bmatrix} 3.90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 151.42 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 195.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 455.29 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1190.69 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1742.56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2534.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4439.39 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6632.82 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_d = \begin{bmatrix} -6E-02 & -4E-02 & 4E-04 & 6E-02 & -3E-02 & 1E-03 & -3E-02 & -2E-04 & -2E-02 \\ 6E-05 & 3E-03 & 8E-02 & 6E-04 & -9E-04 & -6E-02 & -3E-03 & -3E-02 & -7E-04 \\ 1E-03 & 7E-02 & -3E-03 & 3E-02 & 3E-02 & 2E-03 & -6E-02 & 8E-04 & -4E-02 \\ -6E-02 & 3E-04 & -3E-04 & -1E-02 & 8E-02 & -3E-03 & 1E-02 & -2E-04 & 3E-02 \\ 2E-05 & 2E-03 & 6E-02 & 2E-03 & 9E-04 & 4E-02 & 1E-03 & 8E-02 & 2E-03 \\ 7E-04 & 5E-02 & -2E-03 & 4E-02 & -2E-02 & -7E-05 & 1E-02 & -3E-03 & 7E-02 \\ -6E-02 & 4E-02 & -5E-05 & -5E-02 & -5E-02 & 2E-03 & 1E-02 & 4E-04 & -2E-02 \\ 2E-07 & 8E-04 & 3E-02 & 2E-03 & 3E-03 & 8E-02 & 5E-03 & -6E-02 & -2E-03 \\ 1E-04 & 2E-02 & -1E-03 & 4E-02 & 1E-02 & -5E-03 & 8E-02 & 2E-03 & -5E-02 \end{bmatrix}$$

根據第 3.3 節所推導的柔度矩陣公式(3.15)，可分別計算出健康結構及受損結構的柔度矩陣( $F_h$  及  $F_d$ )如下：

$$\mathbf{F}_h = \begin{bmatrix} 1\text{E-}04 & -3\text{E-}06 & -4\text{E-}05 & 8\text{E-}05 & -2\text{E-}06 & -3\text{E-}05 & 4\text{E-}05 & -7\text{E-}07 & -1\text{E-}05 \\ -3\text{E-}06 & 4\text{E-}05 & 8\text{E-}08 & -3\text{E-}06 & 2\text{E-}05 & 6\text{E-}08 & -2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 2\text{E-}08 \\ -4\text{E-}05 & 8\text{E-}08 & 3\text{E-}05 & -3\text{E-}05 & -5\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -1\text{E-}05 & -1\text{E-}08 & 1\text{E-}05 \\ 8\text{E-}05 & -3\text{E-}06 & -3\text{E-}05 & 7\text{E-}05 & -2\text{E-}06 & -2\text{E-}05 & 4\text{E-}05 & -7\text{E-}07 & -1\text{E-}05 \\ -2\text{E-}06 & 2\text{E-}05 & -5\text{E-}08 & -2\text{E-}06 & 2\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & -1\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & -2\text{E-}08 \\ -3\text{E-}05 & 6\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -2\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -1\text{E-}05 & -2\text{E-}09 & 1\text{E-}05 \\ 4\text{E-}05 & -2\text{E-}06 & -1\text{E-}05 & 4\text{E-}05 & -1\text{E-}06 & -1\text{E-}05 & 3\text{E-}05 & -7\text{E-}07 & -1\text{E-}05 \\ -7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & -1\text{E-}08 & -7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & -2\text{E-}09 & -7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & -5\text{E-}09 \\ -1\text{E-}05 & 2\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -1\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -1\text{E-}05 & -5\text{E-}09 & 1\text{E-}05 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_d = \begin{bmatrix} 1\text{E-}03 & -1\text{E-}06 & -3\text{E-}05 & 1\text{E-}03 & 8\text{E-}08 & -2\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 4\text{E-}08 & -3\text{E-}06 \\ -1\text{E-}06 & 4\text{E-}05 & 1\text{E-}07 & -7\text{E-}07 & 2\text{E-}05 & 7\text{E-}08 & 2\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & 4\text{E-}08 \\ -3\text{E-}05 & 1\text{E-}07 & 3\text{E-}05 & -2\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -9\text{E-}07 & -4\text{E-}08 & 1\text{E-}05 \\ 1\text{E-}03 & -7\text{E-}07 & -2\text{E-}05 & 1\text{E-}03 & 8\text{E-}08 & -1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 2\text{E-}08 & -2\text{E-}06 \\ 8\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 8\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 5\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & -9\text{E-}09 \\ -2\text{E-}05 & 7\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -1\text{E-}05 & -2\text{E-}08 & 2\text{E-}05 & -5\text{E-}07 & -4\text{E-}08 & 1\text{E-}05 \\ 9\text{E-}04 & 2\text{E-}07 & -9\text{E-}07 & 9\text{E-}04 & 5\text{E-}07 & -5\text{E-}07 & 9\text{E-}04 & 2\text{E-}08 & 1\text{E-}07 \\ 4\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -4\text{E-}08 & 2\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -4\text{E-}08 & 2\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -4\text{E-}08 \\ -3\text{E-}06 & 4\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -2\text{E-}06 & -9\text{E-}09 & 1\text{E-}05 & 1\text{E-}07 & -4\text{E-}08 & 1\text{E-}05 \end{bmatrix}$$

接著計算柔度變化矩陣( $\mathbf{D}_f$ )如下：

$$\mathbf{D}_f = \begin{bmatrix} 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 \\ 2\text{E-}06 & 3\text{E-}08 & 4\text{E-}08 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}08 & 9\text{E-}09 & 2\text{E-}06 & -9\text{E-}09 & 2\text{E-}08 \\ 1\text{E-}05 & 4\text{E-}08 & 1\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & 3\text{E-}08 & 9\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -3\text{E-}08 & 1\text{E-}07 \\ 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 \\ 2\text{E-}06 & 1\text{E-}08 & 3\text{E-}08 & 2\text{E-}06 & -1\text{E-}08 & 4\text{E-}09 & 2\text{E-}06 & -2\text{E-}08 & 9\text{E-}09 \\ 1\text{E-}05 & 9\text{E-}09 & 9\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & 4\text{E-}09 & 7\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -4\text{E-}08 & 8\text{E-}08 \\ 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 2\text{E-}06 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}04 & 7\text{E-}07 & 1\text{E-}05 \\ 7\text{E-}07 & -9\text{E-}09 & -3\text{E-}08 & 7\text{E-}07 & -2\text{E-}08 & -4\text{E-}08 & 7\text{E-}07 & -5\text{E-}09 & -3\text{E-}08 \\ 1\text{E-}05 & 2\text{E-}08 & 1\text{E-}07 & 1\text{E-}05 & 9\text{E-}09 & 8\text{E-}08 & 1\text{E-}05 & -3\text{E-}08 & 9\text{E-}08 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{D}_f$  經奇異值分解後展開如下：1896

$$\mathbf{D}_f = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$$

其中，

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} -0.5756 & 0.4157 & -0.3478 & -0.0754 & 0.3833 & 0.0354 & -0.4073 & -0.0768 & -0.2217 \\ -0.0014 & -0.0764 & -0.0747 & -0.5541 & -0.0472 & -0.6620 & 0.0298 & 0.4345 & -0.2267 \\ -0.0073 & -0.3369 & -0.2103 & -0.5495 & -0.1728 & 0.0318 & -0.1629 & -0.6795 & 0.1451 \\ -0.5780 & -0.0850 & -0.1892 & 0.3086 & -0.2207 & -0.3831 & 0.4945 & -0.1715 & 0.2412 \\ -0.0011 & -0.0903 & 0.0459 & -0.2906 & 0.7443 & 0.1539 & 0.5455 & -0.0104 & 0.1731 \\ -0.0069 & -0.5799 & -0.3562 & 0.2236 & 0.0725 & 0.1710 & 0.1166 & 0.0373 & -0.6612 \\ -0.5783 & -0.3127 & 0.5466 & -0.2286 & -0.1626 & 0.3462 & -0.0851 & 0.2505 & -0.0207 \\ -0.0005 & -0.3210 & 0.4424 & 0.3051 & 0.4140 & -0.4866 & -0.3566 & -0.2696 & -0.0121 \\ -0.0065 & -0.3941 & -0.4122 & 0.1013 & 0.1235 & 0.0560 & -0.3413 & 0.4209 & 0.5937 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2.7\text{E-}03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.2\text{E-}07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.9\text{E-}08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.3\text{E-}08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6\text{E-}08 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.8\text{E-}08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.2\text{E-}08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.4\text{E-}09 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.1\text{E-}09 \end{bmatrix}$$



$$V = \begin{bmatrix} -0.5756 & -0.4157 & -0.3478 & -0.0754 & -0.3833 & 0.0354 & 0.4073 & -0.0768 & 0.2217 \\ -0.0014 & 0.0764 & -0.0747 & -0.5541 & 0.0472 & -0.6620 & -0.0298 & 0.4345 & 0.2267 \\ -0.0073 & 0.3369 & -0.2103 & -0.5495 & 0.1728 & 0.0318 & 0.1629 & -0.6795 & -0.1451 \\ -0.5780 & 0.0850 & -0.1892 & 0.3086 & 0.2207 & -0.3831 & -0.4945 & -0.1715 & -0.2412 \\ -0.0011 & 0.0903 & 0.0459 & -0.2906 & -0.7443 & 0.1539 & -0.5455 & -0.0104 & -0.1731 \\ -0.0069 & 0.5799 & -0.3562 & 0.2236 & -0.0725 & 0.1710 & -0.1166 & 0.0373 & 0.6612 \\ -0.5783 & 0.3127 & 0.5466 & -0.2286 & 0.1626 & 0.3462 & 0.0851 & 0.2505 & 0.0207 \\ -0.0005 & 0.3210 & 0.4424 & 0.3051 & -0.4140 & -0.4866 & 0.3566 & -0.2696 & 0.0121 \\ -0.0065 & 0.3941 & -0.4122 & 0.1013 & -0.1235 & 0.0560 & 0.3413 & 0.4209 & -0.5937 \end{bmatrix}$$

由式(3.6)求出正規化指標係數  $svn_i$  如下：

$$\begin{bmatrix} svn_1 \\ svn_2 \\ svn_3 \\ svn_4 \\ svn_5 \\ svn_6 \\ svn_7 \\ svn_8 \\ svn_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 8.13E-05 \\ 2.28E-05 \\ 1.78E-05 \\ 1.60E-05 \\ 8.51E-06 \\ 3.92E-06 \\ 2.23E-06 \\ 1.03E-06 \end{bmatrix}$$

依據 Bernal 所提出之判斷標準，破壞定位向量(L)為 V 中對應於  $svn_i \leq 0.20$  之特徵向量，亦即：

$$L = \begin{bmatrix} 0.2217 & -0.0768 & 0.4073 & 0.0354 & -0.3833 & -0.0754 & -0.3478 & -0.4157 \\ 0.2267 & 0.4345 & -0.0298 & -0.6620 & 0.0472 & -0.5541 & -0.0747 & 0.0764 \\ -0.1451 & -0.6795 & 0.1629 & 0.0318 & 0.1728 & -0.5495 & -0.2103 & 0.3369 \\ -0.2412 & -0.1715 & -0.4945 & -0.3831 & 0.2207 & 0.3086 & -0.1892 & 0.0850 \\ -0.1731 & -0.0104 & -0.5455 & 0.1539 & -0.7443 & -0.2906 & 0.0459 & 0.0903 \\ 0.6612 & 0.0373 & -0.1166 & 0.1710 & -0.0725 & 0.2236 & -0.3562 & 0.5799 \\ 0.0207 & 0.2505 & 0.0851 & 0.3462 & 0.1626 & -0.2286 & 0.5466 & 0.3127 \\ 0.0121 & -0.2696 & 0.3566 & -0.4866 & -0.4140 & 0.3051 & 0.4424 & 0.3210 \\ -0.5937 & 0.4209 & 0.3413 & 0.0560 & -0.1235 & 0.1013 & -0.4122 & 0.3941 \end{bmatrix}$$

茲將上述破壞定位向量(L<sub>i</sub>)視為外力，各自獨立加載於健康結構之各樓層質心，得到在各 DLV(L<sub>i</sub>)荷載作用下，對應之結構各樓層(j)之層間剪力或扭矩( $\sigma_{ij}$ )如下：

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -0.2217 & 0.0768 & -0.4073 & -0.0354 & 0.3833 & 0.0754 & 0.3478 & 0.4157 \\ -0.2267 & -0.4345 & 0.0298 & 0.6620 & -0.0472 & 0.5541 & 0.0747 & -0.0764 \\ 0.1365 & 0.1674 & 0.2693 & 0.6679 & -0.5988 & 1.0314 & -0.0582 & -0.8241 \\ 0.0195 & 0.2483 & 0.0872 & 0.3477 & 0.1625 & -0.2332 & 0.5370 & 0.3307 \\ -0.0535 & -0.4242 & 0.5753 & 0.5081 & 0.6971 & 0.8447 & 0.0289 & -0.1666 \\ -0.5909 & -0.0298 & 0.4408 & -0.0370 & 0.4370 & 1.4046 & 0.0644 & -1.4100 \\ -0.0012 & -0.0022 & 0.0020 & 0.0014 & -0.0001 & -0.0046 & -0.0096 & 0.0181 \\ -0.0657 & -0.1546 & 0.2187 & 0.9948 & 1.1110 & 0.5396 & -0.4135 & -0.4877 \\ 0.0112 & 0.0673 & -0.1728 & 0.7370 & 1.1357 & 0.7715 & 0.5762 & -1.8152 \end{bmatrix}$$

根據式(3.7)分成 x 向、y 向及旋轉向計算正規化應力指標  $nsi_{ij}$

與式(3.8)求得加權應力指標  $WSI_j$  分別為：

$$nsi_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0.3093 & 1 & 0.1019 & 1 & 0.3233 & 0.6476 & 1 \\ 1 & 1 & 0.0518 & 0.6655 & 0.0425 & 0.6560 & 0.1807 & 0.1566 \\ 0.2309 & 1 & 0.6109 & 0.9063 & 0.5272 & 0.7343 & 0.1010 & 0.4540 \\ 0.0879 & 1 & 0.2140 & 1 & 0.4241 & 1 & 1 & 0.7955 \\ 0.2362 & 0.9762 & 1 & 0.5108 & 0.6274 & 1 & 0.0698 & 0.3417 \\ 1 & 0.1778 & 1 & 0.0502 & 0.3848 & 1 & 0.1119 & 0.7768 \\ 0.0056 & 0.0090 & 0.0049 & 0.0041 & 0.0002 & 0.0197 & 0.0179 & 0.0434 \\ 0.2898 & 0.3559 & 0.3801 & 1 & 1 & 0.6388 & 1 & 1 \\ 0.0189 & 0.4022 & 0.3921 & 1 & 1 & 0.5493 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$WSI_j = \frac{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.2309 \\ 0.0879 \\ 0.2362 \\ 1 \\ 0.0056 \\ 0.2898 \\ 0.0189 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.3093 \\ 1 \\ 1 \\ 0.9762 \\ 0.1778 \\ 0.0090 \\ 0.3559 \\ 0.4022 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.0518 \\ 0.6109 \\ 0.2140 \\ 1 \\ 1 \\ 0.0049 \\ 0.3801 \\ 0.3921 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1019 \\ 0.6655 \\ 0.9063 \\ 1 \\ 0.5108 \\ 0.0502 \\ 0.0041 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.0425 \\ 0.5272 \\ 0.4241 \\ 0.6274 \\ 0.3848 \\ 0.0002 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.3233 \\ 0.6560 \\ 0.7343 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0.0197 \\ 0.6388 \\ 0.5493 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.6476 \\ 0.1807 \\ 0.1010 \\ 1 \\ 0.0698 \\ 0.1119 \\ 0.0179 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.1566 \\ 0.4540 \\ 0.7955 \\ 0.3417 \\ 0.7768 \\ 0.0434 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}{8} = \begin{bmatrix} 44.85 \\ 31.28 \\ 38.04 \\ 46.01 \\ 39.68 \\ 37.51 \\ 0.87 \\ 47.20 \\ 44.69 \end{bmatrix}$$

上述結果顯示，一樓  $x$  向之  $WSI_j$  值相較於其他樓層之  $WSI_j$  值明顯偏低，故研判一樓為可能之受損樓層，此與本例設定的條件相符。

### 4.3 五層樓扭轉耦合結構之損傷探測分析—特徵分析

本節將針對一座五層樓扭轉耦合結構進行損傷探測分析。斜撐的配置方式，分別考慮於弱軸單邊及強軸雙邊配置斜撐，以及於弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐兩種情況。以移除部份樓層斜撐模擬結構受損，考慮包括單一樓層受損與複數樓層受損等條件進行結構破壞診斷分析。

#### 4.3.1 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐

本節針對弱軸單邊及強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構進行損傷探測分析，其 ETABS 結構模型如圖 4.4 所

示。此結構於 ETABS 程式設定為空間結構之型式，考慮 UX、UY、UZ、RX、RY 及 RZ 等自由度，以 ETABS 進行特徵分析，找出其模態參數，並利用式(3.15)分別建立健康結構與受損結構的柔度矩陣。結構的受損狀態係以移除弱軸向之斜撐模擬樓層之破壞。結構破壞前、後對應於受損樓層的斜撐平面配置方式如圖 4.3 所示。

#### 4.3.1.1 單一樓層受損

本節將針對弱軸單邊及強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構於單一樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.1 與圖 4.5。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.5(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.79，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 34.30(多一個數量級以上)，相差 43 倍以上。研判一樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.5(b)。二樓  $x$  向之指數為 1.35，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 36.81(多一個數量級)，相差 27 倍以上。研判二樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.5(c)。三樓  $x$  向之指數為 1.50，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 31.27(多一個數量級)，相差 20 倍以上。研判三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.5(d)。四樓  $x$  向之指數為 1.05，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 21.89(多一個數量級)，相差 20 倍以上。研判四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.5(e)。五樓  $x$  向之指數為 1.17，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 30.32(多一個數量級)，相差 25 倍以上。研判五樓為可能

之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸單邊強軸雙邊斜撐的結構配置下，在單一樓層破壞的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

#### 4.3.1.2 複數樓層受損

本節將針對弱軸單邊及強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構於複數樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

- CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。
- CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。
- CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。
- CASE4 破壞位置位於一樓、二樓及三樓處，以移除一樓、二樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。
- CASE5 破壞位置位於一樓、三樓及五樓處，以移除一樓、三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.2 與圖 4.6。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖

4.6(a)。一樓  $x$  向之指數為 1.92，三樓  $x$  向之指數為 2.67，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 31.73(多一個數量級)，相差 11 倍以上。研判一樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.6(b)。二樓  $x$  向之指數為 2.55，四樓  $x$  向之指數為 3.01，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 37.70(多一個數量級)，相差 12 倍以上。研判二樓及四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.6(c)。三樓  $x$  向之指數為 2.08，五樓  $x$  向之指數為 2.53，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 32.95(多一個數量級)，相差 13 倍以上。研判三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE4：一樓、二樓及三樓破壞(移除一樓、二樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.6(d)。一樓  $x$  向之指數為 1.80，二樓  $x$  向之指數為 1.94，三樓  $x$  向之指數為 3.02，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 38.06(多一個數量級)，相差 12 倍以上。研判一樓、二樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE5：一樓、三樓及五樓破壞(移除一樓、三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.6(e)。一樓  $x$  向之指數為 3.38，三樓  $x$  向之指數為 5.69，五樓  $x$  向之指數為 5.46，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 41.96(多一個數量級)，相差 7 倍以上。研判一樓、三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸單邊強軸雙邊斜撐的結構配置下，在複數樓層破壞的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

### 4.3.2 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐

本節針對弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構進行損傷探測分析，其 ETABS 結構模型如圖 4.7 所示。此結構於 ETABS 程式設定為空間結構之型式，考慮 UX、UY、UZ、RX、RY 及 RZ 等自由度，以 ETABS 進行特徵分析，找出其模態參數，並利用式(3.15)分別建立健康結構與受損結構的柔度矩陣。結構的受損狀態係以移除弱軸向之斜撐模擬樓層之破壞，考慮包括移除弱軸單邊斜撐與雙邊斜撐兩種情況。結構破壞前、後對應於受損樓層的斜撐平面配置方式分別如圖 4.8 與圖 4.9 所示。

#### 4.3.2.1 單一樓層受損

##### A. 移除弱軸單邊斜撐

本節將針對弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構於單一樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.3 與圖 4.10。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.10(a)。一樓旋轉向之指數為 7.06，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 30.81(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判一樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.10(b)。二樓旋轉向之指數為 5.45，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$



值均大於 32.40(多一個數量級)，相差 5 倍以上。研判二樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.10(c)。三樓旋轉向之指數為 4.85，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 26.24(多一個數量級)，相差 5 倍以上。研判三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.10(d)。四樓旋轉向之指數為 7.84，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 23.68(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.10(e)。五樓旋轉向之指數為 6.70，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 22.17(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸雙邊強軸單邊斜撐的結構配置下，在單一樓層破壞(移除弱軸向之單邊斜撐)的情況，均能以 DLV 損傷探測法偵測出破壞位置。

## B. 移除弱軸雙邊斜撐

本節將針對弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉

耦合結構於單一樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.4 與圖 4.11 及圖 4.12 以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.11(a)及圖 4.12(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.11，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 32.72(多一個數量級以上)，相差 297 倍以上。一樓旋轉向之指數為 6.68，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 35.24(多一個數量級)，相差 5 倍以上。研判一樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖

4.11(b)及圖 4.12(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.08，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 33.00(多一個數量級以上)，相差 412 倍以上。二樓旋轉向之指數為 7.78，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 28.52(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判二樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.11(c)及圖 4.12(c)。三樓  $x$  向之指數為 0.08，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 32.04(多一個數量級以上)，相差 400 倍以上。三樓旋轉向之指數為 4.36，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 30.81(多一個數量級)，相差 7 倍以上。研判三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.11(d)及圖 4.12(d)。四樓  $x$  向之指數為 0.07，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 28.02(多一個數量級以上)，相差 400 倍以上。四樓旋轉向之指數為 3.96，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 29.36(多一個數量級)，相差 7 倍以上。研判四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.11(e)及圖 4.12(e)。五樓  $x$  向之指數為 0.04，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.39(多一個數量級以上)，相差 634 倍以

上。五樓旋轉向之指數為 5.23，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 24.08(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸雙邊強軸單邊斜撐的結構配置下，在單一樓層破壞(移除弱軸向之雙邊斜撐)的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

#### 4.3.2.2 複數樓層受損

##### A. 移除弱軸單邊斜撐

本節將針對弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構於複數樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於一樓、二樓及三樓處，以移除一樓、二樓及三樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於一樓、三樓及五樓處，以移除一樓、三樓及五樓弱軸向之單邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.5 與圖 4.13。以下將

針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.13(a)。一樓旋轉向之指數為 12.84，三樓旋轉向之指數為 12.41，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 35.42(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判一樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2: 二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.13(b)。二樓旋轉向之指數為 5.84，四樓旋轉向之指數為 6.11，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 25.99(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判二樓及四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE3: 三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.13(c)。三樓旋轉向之指數為 8.41，五樓旋轉向之指數為 10.30，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 31.54(未明顯差一個數量級)，相差 3 倍以上。研判三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE4: 一樓、二樓及三樓破壞(移除一樓、二樓及三樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.13(d)。一樓旋轉向之指數為 10.57，二樓旋轉向之指數為

10.31，三樓旋轉向之指數為 11.58，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 40.13(同一數量級)，相差 3 倍以上。研判一樓、二樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE5：一樓、三樓及五樓破壞(移除一樓、三樓及五樓弱軸向之單邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.13(e)。一樓旋轉向之指數為 15.53，三樓旋轉向之指數為 13.77，五樓旋轉向之指數為 14.75，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 39.75(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判一樓、三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸雙邊強軸單邊斜撐的結構配置下，驗證 DLV 損傷探測法在複數樓層破壞(移除弱軸向之單邊斜撐)的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

## B. 移除弱軸雙邊斜撐

本節將針對弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構於複數樓層破壞的情況進行探討，考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處以移除二樓及四樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處以移除三樓及五樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於一樓、二樓及三樓處以移除一樓、二樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於一樓、三樓及五樓處以移除一樓、三樓及五樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.6 與圖 4.14 及圖 4.15。以下將針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.14(a)及圖 4.15(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.76，三樓  $x$  向之指數為 0.86，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 34.01(多一個數量級以上)，相差 39 倍以上。一樓旋轉向之指數為 12.28，三樓旋轉向之指數為 9.09，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 38.59(未明顯差一個數量級)，相差 3 倍以上。研判一樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2: 二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.14(b)及圖 4.15(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.21，四樓  $x$  向之指數為 0.41，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.00(多一個數量級以上)，相差 60 倍以上。二樓旋轉向之指數為 5.27，四樓旋轉向之指數為 7.89，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 30.42(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判二樓及四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE3: 三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.14(c)及圖 4.15(c)。三樓  $x$  向之指數為 0.36，五樓  $x$  向之指數為 0.61，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 28.99(多一個數量級以上)，相差 47 倍以上。三樓旋轉向之指數為 4.93，五樓旋轉向之指數為 7.42，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 34.30(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE4：一樓、二樓及三樓破壞(移除一樓、二樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.14(d)及圖 4.15(d)。一樓  $x$  向之指數為 0.56，二樓  $x$  向之指數為 0.76，三樓  $x$  向之指數為 0.46，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 37.38(多一個數量級以上)，相差 49 倍以上。一樓旋轉向之指數為 10.39，二樓旋轉向之指數為 11.88，三樓旋轉向之指數為 13.67，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 39.73(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判一樓、二樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE5：一樓、三樓及五樓破壞(移除一樓、三樓及五樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.14(e)及圖 4.15(e)。一樓  $x$  向之指數為 0.21，三樓  $x$  向之指數為 1.47，五樓  $x$  向之指數為 0.70，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 30.33(多一個數量級)，相差 20 倍以上。一樓旋轉向之指數為 8.86，三樓旋轉向之指數為 8.75，五樓旋轉向之指



數為 10.78，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 38.13(未明顯差一個數量級)，相差 3 倍以上。研判一樓、三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸雙邊強軸單邊斜撐的結構配置下，驗證 DLV 損傷探測法在複數樓層破壞(移除弱軸向之雙邊斜撐)的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

#### 4.4 基於地震反應之扭轉耦合結構損傷探測分析

4.3 節係由特徵分析找出結構之模態參數，配合已知之質量矩陣建立柔度矩陣，目的在探究理想條件(結構參數完全正確)下，DLV 損傷探測法應用於扭轉耦合結構之適用性。惟在真實條件下，結構損傷探測技術必須根據地震反應監測資料進行分析，因此必須進一步驗證系統識別之結構參數進行損傷探測分析之精確性。本節將以弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐的五層樓結構(圖 4.4)為對象，各樓層角隅處之加速度反應歷時作為輸出觀測訊號，並轉換為各樓層質心加速度，並以第二章介紹的 SRIM 法進行系統識別，再依所得之模態參數配合質量矩陣建構出柔度矩陣。後續之 DLV 損傷探測分析則與先前做法完全相同。

由於系統識別所得之結構模態與理想之特徵分析結果存在差異，精度太差時可能影響 DLV 損傷探測之結果。因此，必須排除精確度較差之振態資訊(通常為高頻振態)。本研究定義振態  $k$  之誤差( $E_k$ )及篩選標準如下：

$$E_k = \left( \frac{\|\phi_k^A - \phi_k^E\|}{\|\phi_k^E\|} \right) = \left( \frac{\sum_{j=1}^{15} (\phi_{k,j}^A - \phi_{k,j}^E)^2}{\sum_{j=1}^{15} (\phi_{k,j}^E)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 0.1 \quad (4.1)$$

其中， $\phi_k^{ID}$  與  $\phi_{k,j}^{ID}$  分別為系統識別所得之第  $k$  個模態向量及其第  $j$  個模態分量； $\phi_k^E$  與  $\phi_{k,j}^E$  分別為特徵分析所得之第  $k$  個模態向量及其第  $j$  個模態分量元素。

凡識別所得之模態參數與特徵分析之誤差滿足不等式 (4.1) 時，則用於建立柔度矩陣。

本節將以 El Centro 震波 (PGA=0.1g) 作為輸入擾動，分別由  $x$  向與  $y$  向獨立輸入震波進行分析，考慮之結構阻尼比為 2%。

#### 4.4.1 地震於 $x$ 向輸入

##### 4.4.1.1 單一樓層受損

本節針對五層樓扭轉耦合結構，由  $x$  向輸入震波，在單一樓層受損的情況下，進行系統識別與損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

健康結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.16 所示。表 4.7 之結果顯示，第 10、13 及 14 振態之模態誤差大於 0.1，因此建立柔度矩陣時將此三個振態資訊排除。DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.13 與圖 4.22。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

一樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.17 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.8 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1、2 及 4~9 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.22(a)。

一樓  $x$  向之指數為 0.78，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 26.11(多一個數量級以上)，相差 33 倍以上。研判一樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

二樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.18 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.9 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1~9、11 及 12 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.22(b)。

二樓  $x$  向之指數為 1.43，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於

26.95(多一個數量級)，相差 18 倍以上。研判二樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

三樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.19 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.10 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1~5 及 7~9 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.22(c)。

三樓  $x$  向之指數為 0.73，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 20.97(多一個數量級以上)，相差 28 倍以上。研判三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

四樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.20 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.11 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1~9、11~13 及 15 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.22(d)。

四樓  $x$  向之指數為 0.67，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 22.11(多一個數量級以上)，相差 33 倍以上。研判四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

五樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.21 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.12 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1~9 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法

計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.22(e)。

五樓  $x$  向之指數為 0.89，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 19.38(多一個數量級以上)，相差 21 倍以上。研判五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### 4.4.1.2 複數樓層受損

本節針對五層樓扭轉耦合結構，由  $x$  向輸入震波，在複數樓層受損的情況下，進行系統識別與損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.17 與圖 4.26。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

一樓及三樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.23 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.14 所示。依據式 (4.1) 之篩選標準，選擇第 1~3、5、7 及 8 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.26(a)。

一樓  $x$  向之指數為 1.98，三樓  $x$  向之指數為 1.66，其他

樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 31.03(多一個數量級)，相差 15 倍以上。研判一樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

二樓及四樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.24 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.15 所示。依據式 (4.1) 之篩選標準，選擇第 1~6、8、9 及 11 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.26(b)。

二樓  $x$  向之指數為 1.75，四樓  $x$  向之指數為 2.14，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.47(多一個數量級)，相差 11 倍以上。研判二樓及四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

三樓及五樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.25 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.16 所示。依據式 (4.1) 之篩選標準，選擇第 1~9 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.26(c)。

三樓  $x$  向之指數為 1.76，五樓  $x$  向之指數為 2.17，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 26.54(多一個數量級)，相差 12 倍以上。研判三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸單邊強軸雙邊斜撐的結構配置下，由  $x$

向輸入震波，利用 SRIM 系統識別之參數建立柔度矩陣，在單一樓層及複數樓層破壞的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

## 4.4.2 地震於 y 向輸入

### 4.4.2.1 單一樓層受損

本節針對五層樓扭轉耦合結構，由 y 向輸入震波，在單一樓層受損的情況下，進行系統識別與損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

健康結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.27 所示。根據表 4.18 之結果第 4、7、8、10、14 及 15 振態之模態誤差大於 0.1，因此建立柔度矩陣特將此六個振態資訊排除。DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.24 與圖 4.33。以下將針對各案例進行討論：

### CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

一樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.28 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.19 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 2 至 8 及 10 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.33(a)。

一樓  $x$  向之指數為 0.75，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 16.20(多一個數量級以上)，相差 21 倍以上。研判一樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

### CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

二樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.29 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.20 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1 至 12 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.33(b)。

二樓  $x$  向之指數為 2.23，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 16.16(多一個數量級)，相差 7 倍以上。研判二樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

三樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.30 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.21 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1 至 6、10 及 13 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.33(c)。

三樓  $x$  向之指數為 1.58，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 18.27(多一個數量級)，相差 11 倍以上。研判三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。



#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

四樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.31 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.22 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1 至 7 及 12 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.33(d)。

四樓  $x$  向之指數為 1.82，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 22.03(多一個數量級)，相差 12 倍以上。研判四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

五樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.32 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.23 所示。依據式(4.1)之篩選標準，選擇第 1 至 8 及 10 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.33(e)。

五樓  $x$  向之指數為 0.90，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 17.93(多一個數量級以上)，相差 19 倍以上。研判五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

### 4.4.2.2 複數樓層受損

本節針對五層樓扭轉耦合結構，由  $y$  向輸入震波，在複數樓層受損的情況下，進行系統識別與損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸

向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 4.28 與圖 4.37。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

一樓及三樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.34 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.25 所示。依據式 (4.1)之篩選標準，選擇第 2~5 及 7~12 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.37(a)。

一樓  $x$  向之指數為 4.22，三樓  $x$  向之指數為 2.67，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 12.35(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判一樓及三樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

二樓及四樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.35 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.26 所示。依據式 (4.1)之篩選標準，選擇第 1~4、6~10 及 12 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.37(b)。

二樓  $x$  向之指數為 1.18，四樓  $x$  向之指數為 1.58，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 20.61(多一個數量級)，相差 13 倍

以上。研判二樓及四樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

三樓及五樓破壞結構各樓層之質心加速度歷時反應如圖 4.36 所示，識別所得之結構系統參數如表 4.27 所示。依據式 (4.1) 之篩選標準，選擇第 1~7 及 9 模態之資訊建立柔度矩陣。依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 4.37(c)。

三樓  $x$  向之指數為 2.37，五樓  $x$  向之指數為 2.16，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.26(多一個數量級)，相差 10 倍以上。研判三樓及五樓為可能之受損樓層，與假設之破壞位置相符。

本系列有關弱軸單邊強軸雙邊斜撐的結構配置下，由  $y$  向輸入震波，利用 SRIM 系統識別之參數建立柔度矩陣，在單一樓層及複數樓層破壞的情況，均能以 DLV 損傷探測法有效偵測出破壞位置。

## 4.5 小結

依據 4.2 及 4.3 節針對扭轉耦合結構進行損傷探測分析結果顯示，由特徵分析求得之結構系統參數建立柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析，在單一樓層及複數樓層受損的情況下，均能準確偵測結構的受損位置。

依據 4.4 基於地震僅由單軸向( $x$  向或  $y$  向)做為輸入擾動時，利用 SRIM 法識別求得之結構系統參數建立柔度矩陣，

進行 DLV 損傷探測分析，在單一樓層及複數樓層受損的情況下，在均能準確偵測結構的受損位置。以此分析結果作為後續振動台試驗之基礎。

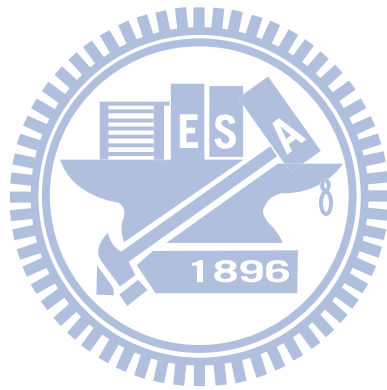


表 4.1 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	44.11	36.81	32.49	21.89	<b>*1.17</b>
	4F	42.19	44.53	31.27	<b>*1.05</b>	30.32
	3F	40.36	37.47	<b>*1.50</b>	29.40	42.09
	2F	34.30	<b>*1.35</b>	37.53	40.11	41.29
	1F	<b>*0.79</b>	37.52	41.77	52.09	52.36
$V_y$	5F	29.49	31.77	29.47	27.13	21.20
	4F	38.72	38.86	41.22	29.92	26.22
	3F	38.10	38.40	38.82	32.66	37.30
	2F	43.25	36.65	46.48	41.22	36.75
	1F	43.28	40.18	48.63	50.04	52.27
$T$	5F	33.43	33.42	24.35	29.30	22.62
	4F	41.09	37.47	34.59	28.61	30.54
	3F	35.57	38.74	31.36	36.26	41.14
	2F	38.76	32.89	39.85	48.19	42.49
	1F	38.29	37.31	48.51	49.03	37.78

\*偵測到之受損樓層

表 4.2 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F	1F&2F&3F	1F&3F&5F
$V_x$	5F	33.39	38.61	<b>*2.53</b>	38.06	<b>*5.46</b>
	4F	31.73	<b>*3.01</b>	32.95	54.60	57.46
	3F	<b>*2.67</b>	37.70	<b>*2.08</b>	<b>*3.02</b>	<b>*5.69</b>
	2F	43.19	<b>*2.55</b>	43.11	<b>*1.94</b>	41.96
	1F	<b>*1.92</b>	49.17	57.59	<b>*1.80</b>	<b>*3.38</b>
$V_y$	5F	20.39	22.88	26.07	26.35	30.49
	4F	37.70	37.24	31.24	38.11	37.02
	3F	37.56	38.18	32.05	39.24	35.53
	2F	33.60	32.52	39.23	45.14	49.97
	1F	47.29	46.67	55.68	46.55	47.54
$T$	5F	27.25	36.55	25.67	29.12	30.61
	4F	43.17	39.80	32.62	38.41	42.96
	3F	30.90	42.69	33.58	33.30	42.19
	2F	40.78	38.64	42.70	40.50	47.86
	1F	45.92	49.82	52.61	47.36	39.66

\*偵測到之受損樓層

表 4.3 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層單邊斜撐；單一樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	25.22	23.79	25.45	13.26	14.91
	4F	38.66	24.12	29.39	25.67	26.36
	3F	34.49	24.54	21.35	32.40	21.38
	2F	34.43	28.96	19.86	28.07	33.30
	1F	22.13	36.01	36.15	37.89	34.36
$V_y$	5F	27.74	34.36	29.88	25.61	26.36
	4F	31.04	30.95	27.10	18.18	26.09
	3F	32.31	21.47	19.07	29.04	30.73
	2F	30.57	22.16	26.76	33.13	30.58
	1F	34.69	35.34	37.24	37.35	37.90
$T$	5F	30.81	32.40	31.56	23.68	<b>*6.70</b>
	4F	38.55	34.04	29.43	<b>*7.84</b>	25.10
	3F	35.11	32.48	<b>*4.85</b>	32.46	22.17
	2F	33.00	<b>*5.45</b>	26.24	31.30	26.70
	1F	<b>*7.06</b>	34.40	26.87	37.47	45.42

\*偵測到之受損樓層

表 4.4 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	32.72	33.00	33.99	29.05	<b>*0.04</b>
	4F	39.46	36.46	39.44	<b>*0.07</b>	25.39
	3F	45.93	43.32	<b>*0.08</b>	28.02	36.87
	2F	35.73	<b>*0.08</b>	32.04	39.87	35.43
	1F	<b>*0.11</b>	47.57	46.65	52.87	53.80
$V_y$	5F	39.97	36.87	31.53	30.04	21.51
	4F	30.45	37.50	36.84	29.94	37.56
	3F	31.94	33.12	23.25	45.67	39.55
	2F	29.82	23.23	44.68	38.23	40.79
	1F	45.54	45.55	49.52	37.10	51.88
$T$	5F	35.24	28.52	34.04	30.90	<b>*5.23</b>
	4F	39.83	40.57	38.15	<b>*3.96</b>	24.08
	3F	39.34	38.55	<b>*4.36</b>	29.36	42.45
	2F	40.09	<b>*7.78</b>	30.81	40.35	37.99
	1F	<b>*6.68</b>	36.95	39.52	49.09	43.92

\*偵測到之受損樓層

表 4.5 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層單邊斜撐；複數樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F	1F&2F&3F	1F&3F&5F
$V_x$	5F	32.73	28.13	17.58	33.02	22.05
	4F	29.71	27.26	30.58	37.82	29.97
	3F	28.94	27.78	25.24	26.39	26.46
	2F	31.60	27.40	27.23	25.74	35.81
	1F	31.71	33.15	42.63	20.81	33.54
$V_y$	5F	29.36	30.34	18.44	25.41	20.39
	4F	34.67	27.28	26.04	30.83	27.93
	3F	21.05	30.46	27.50	36.64	38.23
	2F	34.90	38.81	29.13	39.61	39.81
	1F	47.94	39.64	37.75	40.58	44.38
$T$	5F	41.55	31.32	<b>*10.30</b>	40.13	<b>*14.75</b>
	4F	43.89	<b>*6.11</b>	31.54	40.32	40.46
	3F	<b>*12.41</b>	25.99	<b>*8.41</b>	<b>*11.58</b>	<b>*13.77</b>
	2F	35.42	<b>*5.84</b>	33.98	<b>*10.31</b>	39.75
	1F	<b>*12.84</b>	35.29	48.35	<b>*10.57</b>	<b>*15.53</b>

\*偵測到之受損樓層

表 4.6 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；特徵分析)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F	1F&2F&3F	1F&3F&5F
$V_x$	5F	43.75	41.44	<b>*0.61</b>	37.38	<b>*0.70</b>
	4F	39.15	<b>*0.41</b>	28.99	40.55	50.42
	3F	<b>*0.86</b>	25.00	<b>*0.36</b>	<b>*0.46</b>	<b>*1.47</b>
	2F	34.01	<b>*0.21</b>	32.26	<b>*0.76</b>	30.33
	1F	<b>*0.76</b>	48.17	54.46	<b>*0.56</b>	<b>*0.21</b>
$V_y$	5F	34.26	35.38	25.20	35.48	25.49
	4F	35.94	31.38	33.40	30.29	32.77
	3F	26.43	36.71	23.83	27.58	28.10
	2F	34.43	28.81	43.74	35.78	37.66
	1F	26.63	42.56	54.29	39.70	34.69
$T$	5F	40.42	30.42	<b>*7.42</b>	39.73	<b>*10.78</b>
	4F	38.59	<b>*7.89</b>	37.37	42.24	38.13
	3F	<b>*9.09</b>	38.56	<b>*4.93</b>	<b>*13.67</b>	<b>*8.75</b>
	2F	40.66	<b>*5.27</b>	34.30	<b>*11.88</b>	47.72
	1F	<b>*12.28</b>	45.14	50.64	<b>*10.39</b>	<b>*8.86</b>

\*偵測到之受損樓層

表 4.7 健康結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	
Frequency (Hz)		3.8743	7.8604	12.1831	13.2975	24.3385	25.3886	32.7933	35.0910	38.4303	45.8167	58.6777	61.3821	76.7942	89.0095	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.02	2.00	2.00	2.00	2.00	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	X	R	X	Y	R	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	0.0302	-0.2283	1	0.6787	-0.1000	0.5145	0.3933	-0.2711	0.0076	-0.3219	0.0271	0.2318	0.1177
		4F	0.8154	0.0048	-0.3324	0.1848	-0.5711	0.0958	-1	0.1360	0.7416	0.0136	0.2239	-0.0157	-0.4176	-0.3106
		3F	0.6034	-0.0184	-0.4094	-0.6179	-0.8203	0.1405	0.3097	-0.2883	-1	-0.0066	0.3819	-0.0332	0.1053	0.4039
		2F	0.3844	-0.0318	-0.3939	-0.9907	0.3167	-0.0460	0.7918	-0.4263	0.9151	-0.0178	-0.1047	0.0092	0.3368	-0.3611
		1F	0.1811	-0.0299	-0.2628	-0.7571	1	-0.1532	-0.9078	-0.3163	-0.5104	0.0026	-0.4141	0.0349	-0.3621	0.2001
	Y	5F	-0.0344	1	-0.0687	-0.0402	0.1461	0.8849	0.0018	-0.0003	0.0036	0.7099	0.0271	0.5136	0.0185	0.0009
		4F	-0.0245	0.8297	-0.0665	-0.0204	0.0348	0.1288	0.0023	0.0116	-0.0048	-0.5754	-0.0705	-1	-0.0508	-0.0039
		3F	-0.0166	0.6260	-0.0604	-0.0058	-0.1003	-0.6369	-0.0181	-0.0025	0.0066	-0.8281	0.0511	0.2877	0.0483	0.0109
		2F	-0.0096	0.4076	-0.0464	0.0003	-0.1768	-1	-0.0036	-0.0391	-0.0145	0.2847	0.0502	0.8249	-0.0140	-0.0134
		1F	-0.0041	0.1964	-0.0261	0.0004	-0.1384	-0.7647	0.0203	-0.0489	0.0087	1	-0.1133	-0.9119	-0.0201	0.0112
	R	5F	-0.3978	-0.0713	-1	-0.1537	-0.3040	0.0420	-0.1844	0.9508	0.0870	-0.0016	-0.7770	0.0445	0.5792	0.3049
		4F	-0.3270	-0.0579	-0.8400	0.1467	0.2089	-0.0309	0.4027	0.2642	-0.2883	0.0113	0.4984	-0.0125	-1	-0.7712
		3F	-0.2449	-0.0418	-0.6248	0.4299	0.3372	-0.0365	-0.1197	-0.5213	0.3946	0.0218	0.9114	-0.0670	0.2359	1
		2F	-0.1583	-0.0256	-0.3965	0.5314	-0.0973	0.0496	-0.3361	-1	-0.3203	-0.0117	-0.2156	-0.0117	0.8277	-0.8917
		1F	-0.0758	-0.0115	-0.1881	0.3776	-0.3750	0.0905	0.3191	-0.8278	0.2052	-0.0481	-1	0.1005	-0.8736	0.4957
$E_k$		2E-09	2E-07	2E-09	7E-07	8E-07	2E-04	2E-03	6E-03	3E-02	1E+02	3E-03	6E-02	5E+00	2E+00	



表 4.8 一樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters													
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	
Frequency (Hz)		1.4900	6.5332	7.8631	12.9337	21.8791	25.3887	30.2974	33.6285	38.3217	56.0945	75.5215	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.03	2.05	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	R	R	X	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	0.8640	-0.0091	-1	0.5756	0.0373	0.8579	-0.0967	0.3417	-0.3370	0.2295
		4F	0.9741	0.4172	0.0007	-0.3901	-0.5106	-0.0439	-0.7905	0.9493	-0.7774	0.1869	-0.4247
		3F	0.9439	-0.0804	0.0067	0.2394	-0.9397	-0.0751	-0.2531	-0.5778	1	0.4027	0.0764
		2F	0.9110	-0.5410	0.0057	0.6005	-0.0767	-0.0061	0.7321	-0.8459	-0.9761	-0.0493	0.3640
		1F	0.8769	-0.8797	-0.0049	0.5524	1	-0.0786	-0.5225	0.5732	0.4293	-0.2343	-0.2538
	Y	5F	-0.0029	-0.0453	-1	-0.0044	0.0474	-0.8840	0.0252	0.0081	-0.0053	-0.0291	0.0459
		4F	-0.0018	-0.0304	-0.8294	-0.0218	0.0030	-0.1300	0.0244	0.0107	0.0041	0.0154	-0.0613
		3F	-0.0010	-0.0201	-0.6257	-0.0321	-0.0530	0.6347	-0.0171	0.0078	-0.0081	0.0457	0.0686
		2F	-0.0004	-0.0115	-0.4075	-0.0297	-0.0863	1	-0.0446	-0.0347	0.0099	-0.0053	0.0255
		1F	0.0000	-0.0044	-0.1961	-0.0155	-0.0673	0.7622	-0.0237	-0.0514	-0.0118	-0.0709	-0.0718
	R	5F	-0.0474	-1	0.0352	-0.5064	-0.6679	-0.0292	0.4618	0.8861	0.0291	-0.7837	0.6025
		4F	-0.0381	-0.8051	0.0291	-0.6444	-0.0872	0.0038	0.6611	-0.0926	0.3277	0.4004	-1
		3F	-0.0274	-0.5761	0.0220	-0.7336	0.3023	0.0098	-0.1380	-0.2026	-0.4998	0.9501	0.1527
		2F	-0.0157	-0.3469	0.0142	-0.6735	0.1812	-0.0273	-1	-0.5233	0.1887	0.0350	0.8956
		1F	-0.0038	-0.1530	0.0071	-0.4232	-0.0878	-0.0489	-0.6312	-1	-0.2623	-1	-0.7603
$E_k$		3E-04	5E-07	4E-01	3E-05	1E-04	2E-02	2E-03	3E-02	5E-02	4E+04	4E+01	

表 4.9 二樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	
Frequency (Hz)		1.9193	7.3496	7.8632	13.2038	20.8248	25.3493	27.2363	34.8959	36.9325	45.8493	56.0467	61.4307	70.0045	86.6072	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.02	2.00	2.00	2.00	2.02	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	X	R	X	Y	R	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	-0.5501	0.0082	-1	-0.2802	0.0920	0.6212	-0.5816	-0.2459	0.0049	-0.1788	0.0079	-0.2709	-0.1464
		4F	0.9602	-0.1464	0.0018	-0.2754	0.0157	-0.1091	-0.9089	0.3580	0.8861	0.0131	0.0994	-0.0012	0.3494	0.3705
		3F	0.9133	0.2935	-0.0010	0.4502	0.1964	-0.0943	-0.6537	-0.0764	-1	-0.0130	0.2791	-0.0161	0.1026	-0.4010
		2F	0.8612	0.6735	0.0026	0.8184	0.1049	-0.1187	1	0.2777	0.3596	-0.0094	-0.2075	0.0094	-0.1932	0.1719
		1F	0.0490	-0.1981	-0.0371	0.5577	-1	0.0107	-0.1947	0.5327	-0.1916	-0.0062	-0.2023	0.0150	0.0798	-0.0106
	Y	5F	-0.0066	0.0260	1	0.0178	-0.0040	0.8792	-0.1440	-0.0064	-0.0077	0.7093	0.0069	0.5096	-0.0141	-0.0256
		4F	-0.0046	0.0160	0.8295	-0.0009	-0.0199	0.1291	-0.0199	-0.0127	-0.0016	-0.5749	-0.0316	-1	0.0384	0.0689
		3F	-0.0031	0.0106	0.6257	-0.0132	-0.0257	-0.6363	0.0875	0.0150	0.0161	-0.8423	0.0217	0.3142	-0.0132	-0.0974
		2F	-0.0017	0.0049	0.4074	-0.0124	-0.0199	-1	0.1389	0.0343	-0.0144	0.2971	0.0289	0.7824	-0.0430	0.0869
		1F	-0.0010	0.0037	0.1963	-0.0103	-0.0083	-0.7638	0.1164	0.0433	-0.0190	1	-0.0607	-0.8837	0.0317	-0.0459
	R	5F	-0.0740	1	-0.0232	-0.1550	-0.2190	-0.0904	-0.6098	-0.8218	0.3156	0.0028	-0.4595	0.0023	-0.6360	-0.3812
		4F	-0.0602	0.8108	-0.0190	-0.3796	-0.2363	0.0188	0.1734	-0.4482	-0.2933	0.0074	0.2391	0.0186	0.8114	0.9099
		3F	-0.0439	0.5875	-0.0138	-0.5708	-0.1639	0.0608	0.3159	0.6179	0.2359	0.0164	0.5357	-0.0240	0.3427	-1
		2F	-0.0260	0.3674	-0.0083	-0.5928	0.0308	0.0182	-0.1391	1	-0.3635	-0.0197	0.0842	-0.0369	-1	0.5836
		1F	-0.0174	0.1713	-0.0035	-0.3903	0.2192	0.0077	-0.0554	0.6085	-0.2804	-0.0367	-1	0.0874	0.6858	-0.1851
$E_k$		4E-09	5E-07	2E-05	1E-06	3E-08	2E-04	6E-07	4E-06	1E-04	6E-01	1E-05	4E-02	9E+00	2E+01	

表 4.10 三樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	
Frequency (Hz)		2.1643	7.5584	7.8661	13.0757	17.6221	25.3707	30.7081	33.5086	35.8443	45.8680	53.7509	62.9949	75.6027	83.1329	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.99	2.01	2.01	2.06	2.01	2.55	2.01	2.00	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	X	X	R	Y	R	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	-1	0.2103	0.0400	-0.6096	1	0.0296	0.1721	-0.6503	-0.0518	0.0424	-0.2936	0.0601	-0.1224	0.1968
		4F	-0.9537	-0.1098	-0.0068	-0.0167	-0.1186	-0.0215	-0.0817	1	-0.8101	0.0324	0.2213	-0.0212	0.2435	-0.3959
		3F	-0.8974	-0.4390	-0.0519	0.5631	-0.9469	-0.0064	-0.0679	-0.3798	0.8814	-0.0362	0.0609	-0.0186	-0.1259	0.2062
		2F	-0.1074	0.6633	0.0128	1	0.7086	-0.0185	-0.8428	-0.0941	-0.0898	-0.0434	0.1710	-0.0933	-0.2623	-0.0789
		1F	-0.0504	0.3337	-0.0076	0.7309	0.5168	0.0571	1	0.4407	0.5466	-0.0475	-0.3306	-0.1245	0.4005	0.1363
	Y	5F	0.0079	-0.1696	1	0.0575	0.0046	0.8803	-0.0387	0.0108	-0.0045	0.7147	-0.0244	0.3218	-0.0178	0.0121
		4F	0.0056	-0.1364	0.8303	0.0439	0.0344	0.1304	-0.0011	-0.0047	-0.0103	-0.5901	0.0051	-0.5785	0.0464	-0.0352
		3F	0.0036	-0.1001	0.6261	0.0317	0.0427	-0.6370	0.0270	0.0080	-0.0074	-0.8368	0.0505	0.1762	-0.0536	0.0402
		2F	0.0025	-0.0686	0.4075	0.0201	0.0389	-1	0.0274	0.0063	0.0491	0.2913	-0.0100	1	0.0307	-0.0259
		1F	0.0009	-0.0322	0.1964	0.0119	0.0231	-0.7668	0.0040	-0.0041	0.0474	1	-0.0507	-0.9212	0.0163	0.0134
	R	5F	0.0858	-1	-0.1441	0.5094	0.1614	-0.0191	0.0367	-0.0731	-1	0.0183	-0.7287	-0.0675	-0.3250	0.4819
		4F	0.0699	-0.8376	-0.1193	0.2345	0.4844	0.0106	0.0820	-0.5095	0.0526	0.0103	0.2928	0.0401	0.5537	-1
		3F	0.0507	-0.6469	-0.0896	-0.0569	0.6348	0.0238	0.0042	0.2922	0.2957	0.0189	1	0.0380	-0.0595	0.8019
		2F	0.0387	-0.4388	-0.0583	-0.2313	0.4062	0.0166	-0.1750	0.5881	0.9160	-0.0682	-0.4105	-0.1067	-0.8810	-0.5050
		1F	0.0186	-0.2244	-0.0284	-0.2047	0.1777	-0.0061	-0.7365	0.2581	0.5392	-0.0854	-0.5861	-0.1127	1	0.3624
$E_k$		1E-08	3E-08	3E-02	4E-08	5E-06	3E-01	7E-02	7E-03	8E-03	2E+03	3E-01	4E+05	5E-01	3E-01	

表 4.11 四樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	
Frequency (Hz)		2.5569	6.7755	7.8716	12.4553	20.7302	24.4517	25.3959	33.7697	37.0568	58.2261	61.4144	70.7494	72.2707	84.5713	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	X	Y	X	X	R	Y	R	Y	R	
Mode shapes	X	5F	1	-0.1702	-0.0076	0.2459	0.7816	-0.8342	0.0900	0.5561	-0.2973	0.2719	-0.0142	-0.2223	-0.0263	0.0208
		4F	0.9415	-0.3596	0.0230	-0.1705	-0.8395	0.8097	-0.0852	-0.5458	0.3015	-0.2629	0.0142	0.2166	0.0216	-0.0211
		3F	0.1908	1	-0.0286	-0.7718	1	0.7207	-0.1367	-0.1388	-0.5478	-0.2725	0.0183	0.0307	0.0038	0.1847
		2F	0.1194	0.7083	-0.0034	-0.8809	-0.2316	-0.3596	0.0421	0.5631	1	0.0863	-0.0067	-0.1297	-0.0115	-0.3944
		1F	0.0561	0.3612	0.0111	-0.6132	-0.7389	-1	0.1445	-1	-0.3856	0.4143	-0.0326	0.1650	0.0168	0.2821
	Y	5F	-0.0096	-0.1145	-1	-0.0856	-0.0538	-0.1472	-0.8839	0.0052	0.0054	-0.0274	-0.5088	-0.0050	-0.2694	0.0052
		4F	-0.0065	-0.0884	-0.8301	-0.0730	0.0072	-0.0369	-0.1288	0.0033	-0.0108	0.0614	1	-0.0137	0.7533	-0.0058
		3F	-0.0050	-0.0699	-0.6256	-0.0658	0.0550	0.0980	0.6368	-0.0203	-0.0023	-0.0415	-0.3058	0.0635	-1	0.0103
		2F	-0.0026	-0.0433	-0.4075	-0.0478	0.0752	0.1776	1	-0.0246	0.0080	-0.0332	-0.7955	-0.0857	0.9000	-0.0254
		1F	-0.0011	-0.0202	-0.1963	-0.0269	0.0553	0.1390	0.7652	-0.0046	0.0368	0.0875	0.8902	0.0616	-0.5199	0.0257
	R	5F	-0.1058	-0.7712	0.1115	-1	-0.3918	0.4277	-0.0381	0.4359	-0.3961	0.5669	-0.0051	-0.6836	-0.0578	0.1111
		4F	-0.0858	-0.6702	0.0939	-0.7270	0.2576	-0.2617	0.0264	0.4390	-0.2201	-0.2978	-0.0247	1	0.0868	-0.2801
		3F	-0.0698	-0.5378	0.0719	-0.4033	0.5766	-0.4353	0.0307	-0.3824	0.4302	-0.9431	0.0678	-0.3852	-0.0073	0.6786
		2F	-0.0447	-0.3788	0.0476	-0.1477	0.8955	-0.0144	-0.0522	-0.9454	0.1337	0.2364	0.0142	-0.2370	-0.0444	-1
		1F	-0.0214	-0.1948	0.0232	-0.0187	0.7660	0.2941	-0.0897	-0.1947	0.5845	1	-0.0937	0.4048	0.0461	0.6811
$E_k$		5E-09	1E-10	1E-02	1E-09	1E-04	1E-05	9E-03	1E-06	8E-04	1E-05	8E-02	4E-04	2E-01	2E-03	

表 4.12 五樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	
Frequency (Hz)		3.2917	6.0328	7.8745	12.2834	16.8190	25.3729	28.2025	34.2426	37.7296	45.9275	52.0482	61.5732	71.9678	87.5262	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.17	2.00	2.07	2.00	2.00	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	Y	X	X	X	Y	R	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	-0.9676	-0.0125	0.0506	0.0764	0.0013	-0.0096	0.0141	-0.0096	-0.0057	0.0005	0.0029	-0.0012	0.0006
		4F	0.3629	1	0.0277	-0.3426	-1	-0.0345	0.3665	-0.6528	0.5459	0.0115	0.0475	-0.0099	0.2402	-0.1530
		3F	0.2648	0.8192	0.0035	-0.5627	-0.0282	0.0179	-0.7393	0.2147	-1	-0.0073	-0.3657	0.0005	-0.2783	0.3832
		2F	0.1674	0.5658	-0.0149	-0.5981	0.7858	0.0017	-0.0440	1	0.8704	0.0325	0.2317	0.0045	-0.2362	-0.4077
		1F	0.0786	0.2841	-0.0207	-0.4094	0.8110	-0.0396	1	-0.3383	-0.7055	0.0086	0.3445	-0.0057	0.4226	0.2364
	Y	5F	-0.0138	-0.0685	1	-0.0725	0.0291	-0.8856	-0.0409	-0.0022	-0.0017	-0.7176	0.0061	0.5220	0.0077	0.0023
		4F	-0.0109	-0.0571	0.8293	-0.0745	0.0041	-0.1337	0.0034	-0.0069	0.0055	0.6217	-0.0129	-0.9977	0.0182	-0.0075
		3F	-0.0068	-0.0404	0.6259	-0.0627	-0.0201	0.6341	0.0425	-0.0058	0.0059	0.7509	-0.0047	0.2375	-0.0355	0.0246
		2F	-0.0039	-0.0251	0.4077	-0.0476	-0.0287	1	0.0419	0.0302	-0.0274	-0.2304	0.0064	0.9503	0.0202	-0.0334
		1F	-0.0016	-0.0114	0.1965	-0.0267	-0.0191	0.7667	0.0236	0.0549	-0.0077	-1	0.0309	-1	0.0276	0.0244
	R	5F	-0.1618	-0.5713	-0.0871	-1	0.1079	0.0304	-0.4718	-0.9848	0.2325	-0.0130	0.7855	0.0033	-0.3082	0.1096
		4F	-0.1377	-0.4903	-0.0728	-0.7851	-0.0738	-0.0028	-0.0372	0.0853	-0.0115	0.0107	-1	-0.0111	0.9766	-0.5214
		3F	-0.1024	-0.3977	-0.0551	-0.5244	-0.4109	-0.0470	0.5614	0.4776	0.2562	0.0179	-0.5183	0.0122	-0.7262	0.9726
		2F	-0.0659	-0.2750	-0.0355	-0.2870	-0.6366	-0.0556	0.3393	0.5398	-0.6820	0.0081	0.4760	-0.0210	-0.6012	-1
		1F	-0.0315	-0.1393	-0.0169	-0.1145	-0.5062	-0.0300	-0.1680	0.8589	-0.0556	0.0530	0.9014	0.0204	1	0.5853
$E_k$		7E-09	1E-09	3E-05	9E-10	2E-06	1E-03	1E-04	6E-03	1E-02	5E+02	1E+01	6E+06	5E+00	5E+01	

表 4.13 DLV 分析之各樓層應力指標(單一樓層破壞；input 於  $x$  向；SRIM 識別)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	32.25	28.36	24.65	23.32	<b>*0.89</b>
	4F	29.42	26.95	25.26	<b>*0.67</b>	19.38
	3F	36.27	33.01	<b>*0.73</b>	22.11	35.83
	2F	26.11	<b>*1.43</b>	27.29	26.15	23.86
	1F	<b>*0.78</b>	30.74	20.97	22.19	35.45
$V_y$	5F	34.35	18.86	22.86	20.11	24.57
	4F	30.40	29.49	22.28	17.58	28.18
	3F	24.11	34.72	27.68	27.35	30.40
	2F	27.92	28.95	29.25	25.19	21.85
	1F	33.05	35.14	24.19	22.03	29.61
$T$	5F	22.23	20.84	25.62	19.80	16.55
	4F	26.60	23.80	21.18	24.51	22.04
	3F	30.14	30.15	25.01	26.36	17.76
	2F	32.05	31.02	17.43	16.70	26.33
	1F	26.25	43.97	19.78	25.82	32.68

\*偵測到之受損樓層

表 4.14 一樓及三樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters													
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	
Frequency (Hz)		1.3334	4.1577	7.7868	7.8670	16.0294	25.3664	29.1840	31.4786	34.7553	52.3003	73.1568	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.02	2.01	2.00	
Primary Direction		X	X	R	Y	X	Y	X	R	X	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	-0.5032	-0.2866	-0.0153	-1	0.0006	0.3151	0.5988	-0.3004	-0.3173	0.1142
		4F	0.9829	-0.4350	0.0588	0.0040	0.0699	-0.0129	-0.2121	-0.4749	1	0.1856	-0.2144
		3F	0.9619	-0.3501	0.4185	0.0190	0.9621	-0.0151	-0.1192	-0.0969	-0.7331	0.0940	0.1142
		2F	0.6530	0.9587	-0.2386	-0.0032	0.0549	-0.0761	1	-0.4479	0.0068	0.1983	0.2724
		1F	0.6286	1	0.0530	-0.0051	-0.1264	-0.0753	-0.9840	0.4462	0.0067	-0.1886	-0.2669
	Y	5F	-0.0016	0.0037	0.0741	-1	0.0134	-0.8815	0.0689	-0.0166	0.0033	-0.0535	0.0317
		4F	-0.0010	0.0019	0.0572	-0.8294	-0.0071	-0.1274	0.0231	0.0110	0.0020	-0.0441	-0.0354
		3F	-0.0005	0.0007	0.0403	-0.6279	-0.0139	0.6381	-0.0402	0.0093	0.0155	0.0591	0.0569
		2F	-0.0003	0.0006	0.0296	-0.4076	-0.0147	1	-0.0733	-0.0090	-0.0316	-0.0270	0.0556
		1F	0.0000	0.0001	0.0126	-0.1975	-0.0052	0.7680	-0.0433	-0.0117	-0.0344	-0.0562	-0.0406
	R	5F	-0.0274	0.0993	1	0.0620	0.1636	0.0490	0.3921	0.3760	0.5458	-0.7273	0.3179
		4F	-0.0217	0.0748	0.8259	0.0514	-0.2245	0.0166	0.3205	0.4371	-0.2649	0.2185	-0.4906
		3F	-0.0148	0.0445	0.6206	0.0381	-0.5245	-0.0177	-0.0853	-0.1761	0.0280	1	-0.0630
		2F	-0.0106	0.0273	0.4053	0.0243	-0.5052	-0.0418	-0.4515	-0.7599	-0.2301	-0.1974	1
		1F	-0.0025	0.0099	0.1983	0.0120	-0.3028	-0.0098	0.0773	-1	-0.2765	-0.6098	-0.9188
$E_k$		4E-05	9E-07	7E-05	4E-01	2E-03	8E+02	6E-05	1E-02	2E+00	8E+00	1E+01	

表 4.15 二樓及四樓受損結構系統參數(input 於  $x$  向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	
Frequency (Hz)		1.7253	4.6470	7.8695	7.9274	18.4345	23.4303	25.3647	28.7138	35.0617	45.8997	55.5698	61.4764	68.6206	77.4742	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.04	2.00	2.00	2.00	2.00	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	X	Y	X	R	Y	R	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	-1	-0.6495	-0.0123	0.0937	0.3085	-0.9744	0.0395	-0.2636	0.7840	0.0168	-0.1559	0.0024	0.2875	0.0662
		4F	-0.9742	-0.5845	0.0257	-0.2042	-0.3302	0.9781	-0.0365	0.2352	-0.7824	-0.0153	0.1505	-0.0020	-0.2790	-0.0660
		3F	-0.6270	0.9662	-0.0167	0.1566	0.2472	0.0082	-0.0862	0.9853	0.5390	0.0066	0.1958	-0.0071	-0.1393	0.2005
		2F	-0.5916	1	0.0345	-0.1680	-0.1714	-0.0109	0.0877	-1	-0.5170	-0.0078	-0.1959	0.0065	0.1415	-0.2001
		1F	-0.0331	0.0428	-0.0728	0.2514	-1	-1	-0.0112	0.4585	-0.5219	0.0019	-0.2095	0.0148	-0.0643	0.0298
	Y	5F	0.0042	-0.0057	1	0.1407	-0.0262	0.0225	0.8786	0.0810	0.0133	0.7133	0.0126	0.5051	0.0224	0.0297
		4F	0.0029	-0.0054	0.8284	0.1236	-0.0149	-0.0233	0.1285	0.0193	0.0150	-0.5570	-0.0341	-1	-0.0384	-0.0598
		3F	0.0022	-0.0042	0.6254	0.0880	-0.0058	-0.0432	-0.6375	-0.0403	-0.0253	-0.8663	0.0160	0.3207	-0.0271	0.0769
		2F	0.0011	-0.0029	0.4069	0.0607	0.0001	-0.0367	-1	-0.0657	-0.0331	0.3126	0.0234	0.7686	0.0675	-0.0792
		1F	0.0007	-0.0016	0.1962	0.0275	0.0056	-0.0228	-0.7652	-0.0598	-0.0437	1	-0.0490	-0.8713	-0.0472	0.0445
	R	5F	0.0427	0.0387	0.1193	-1	-0.4101	0.3693	-0.0482	0.2200	0.8429	-0.0169	-0.3310	-0.0232	0.7832	0.3144
		4F	0.0345	0.0173	0.1000	-0.8388	-0.0891	-0.3837	0.0033	-0.0565	0.6315	0.0230	0.1245	0.0423	-1	-0.6446
		3F	0.0282	0.0064	0.0766	-0.6409	0.1736	-0.5672	0.0311	-0.1030	-0.7993	0.0135	0.5739	-0.0280	-0.0647	1
		2F	0.0167	-0.0064	0.0514	-0.4260	0.3980	-0.3926	0.0021	0.4875	-1	-0.0050	0.0394	-0.0377	0.6362	-0.9240
		1F	0.0116	-0.0118	0.0259	-0.2107	0.4123	-0.0238	0.0024	0.2299	-0.5985	-0.0169	-1	0.0856	-0.4893	0.4055
$E_k$		2E-08	5E-08	1E-04	3E-06	2E-03	4E-07	4E-01	1E-06	1E-05	5E+00	2E-03	1E+01	3E-01	4E+00	



表 4.16 三樓及五樓受損結構系統參數(input 於 x 向；SRIM 識別)

Modal Parameters															
Mode(k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15		
Frequency (Hz)	2.0758	5.3667	7.6210	7.8813	13.9653	23.6811	25.4049	30.9031	35.8708	45.8749	48.4053	71.7843	78.8608		
Damping Ratio (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.97	2.01	1.99		
Primary Direction	X	X	R	Y	X	X	Y	X	R	Y	R	R	R		
Mode shapes	X	5F	-1	1	0.0249	-0.0105	-0.0244	0.0408	-0.0029	-0.0037	0.0181	-0.0024	0.0009	-0.0014	-0.0010
		4F	-0.7458	-0.6419	-0.0125	0.0192	0.2436	-0.9872	0.0804	0.1895	-0.9018	-0.0201	-0.0439	0.2321	-0.1104
		3F	-0.7029	-0.6676	0.2977	-0.0328	-0.1433	1	-0.0808	-0.1736	0.9023	0.0201	0.0423	-0.2310	0.1108
		2F	-0.0824	-0.0781	-0.6993	0.0457	-1	-0.4998	0.0256	-0.7574	-0.0856	-0.0207	0.1804	-0.2177	-0.2176
		1F	-0.0389	-0.0420	-0.3562	0.0099	-0.7452	-0.2306	0.0724	1	0.5056	0.0214	-0.4910	0.3309	0.3276
	Y	5F	0.0058	0.0093	0.2193	1	-0.0486	0.1163	0.8843	-0.0298	-0.0047	-0.6913	-0.0523	0.0342	-0.0050
		4F	0.0046	0.0078	0.1850	0.8286	-0.0463	-0.0043	0.1332	-0.0008	-0.0120	0.5414	0.0413	-0.0831	0.0119
		3F	0.0028	0.0059	0.1343	0.6261	-0.0347	-0.1127	-0.6337	0.0254	-0.0086	0.8471	0.0504	-0.1090	-0.0233
		2F	0.0019	0.0039	0.0910	0.4071	-0.0238	-0.1549	-1	0.0233	0.0497	-0.2824	-0.0301	0.0908	-0.0215
		1F	0.0007	0.0017	0.0429	0.1963	-0.0139	-0.1113	-0.7671	0.0005	0.0497	-1	-0.0603	-0.0447	0.0249
	R	5F	0.0599	0.0275	1	-0.1811	-0.5638	0.4373	-0.0612	-0.0283	-1	0.0432	-1	-0.3093	-0.1244
		4F	0.0516	0.0266	0.8466	-0.1523	-0.3791	-0.0485	0.0032	-0.0244	0.1139	-0.0481	0.9588	1	-0.5461
		3F	0.0377	0.0326	0.6627	-0.1172	-0.1198	-0.8302	0.0946	0.1118	0.2708	-0.0677	0.9573	-0.7702	0.7962
		2F	0.0293	0.0298	0.4544	-0.0780	0.1044	-0.8292	0.0947	0.0065	0.8427	0.0592	-0.8205	-0.4213	-1
		1F	0.0143	0.0159	0.2338	-0.0388	0.1417	-0.5389	0.0487	-0.5838	0.4959	0.0855	-0.8529	0.7487	0.8797
$E_k$	6E-09	2E-07	2E-07	7E-04	4E-09	2E-04	8E-03	4E-02	1E-03	2E+02	3E-01	8E+00	2E+01		

表 4.17 DLV 分析之各樓層應力指標(複數樓層破壞；input 於  $x$  向；SRIM 識別)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	31.89	31.50	<b>*2.17</b>
	4F	31.03	<b>*2.14</b>	34.23
	3F	<b>*1.66</b>	25.47	<b>*1.76</b>
	2F	33.46	<b>*1.75</b>	26.54
	1F	<b>*1.98</b>	40.84	35.91
$V_y$	5F	29.36	28.28	26.47
	4F	32.59	27.82	25.84
	3F	30.92	34.46	22.73
	2F	31.98	38.54	26.67
	1F	22.15	34.50	39.22
$T$	5F	17.46	32.81	25.54
	4F	19.30	32.05	26.33
	3F	31.75	28.45	30.69
	2F	24.66	25.72	26.40
	1F	34.92	29.87	33.57

\*偵測到之受損樓層

表 4.18 健康結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	
Frequency (Hz)		3.8743	7.8604	12.1831	13.2975	24.3384	25.3886	32.8062	35.0908	45.8101	58.6758	61.3746	72.1785	76.7918	88.9958	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.04	
Primary Direction		X	Y	R	X	X	Y	X	R	Y	R	Y	Y	R	R	
Mode shapes	X	5F	1	0.0302	-0.2283	1	0.6787	-0.0994	0.5148	0.3937	0.0053	-0.3217	0.0246	-0.0039	0.2330	0.1179
		4F	0.8154	0.0048	-0.3324	0.1848	-0.5711	0.0954	-1	0.1353	0.0122	0.2226	-0.0146	0.0092	-0.4224	-0.3089
		3F	0.6034	-0.0184	-0.4094	-0.6179	-0.8203	0.1400	0.3097	-0.2871	-0.0061	0.3847	-0.0315	-0.0042	0.1141	0.3996
		2F	0.3844	-0.0318	-0.3939	-0.9909	0.3167	-0.0457	0.7757	-0.4278	-0.0169	-0.1071	0.0089	-0.0048	0.3286	-0.3579
		1F	0.1811	-0.0299	-0.2628	-0.7572	1	-0.1525	-0.8802	-0.3159	-0.0009	-0.4134	0.0330	0.0055	-0.3601	0.1966
	Y	5F	-0.0344	1	-0.0687	-0.0403	0.1453	0.8850	-0.0380	0.0012	0.7118	0.0266	0.5104	0.2655	0.0214	0.0142
		4F	-0.0245	0.8297	-0.0665	-0.0206	0.0346	0.1290	0.0057	0.0116	-0.5683	-0.0661	-1	-0.7409	-0.0426	0.0312
		3F	-0.0166	0.6260	-0.0604	-0.0059	-0.0996	-0.6372	0.0092	-0.0032	-0.8531	0.0493	0.3068	1	0.0426	0.0349
		2F	-0.0096	0.4076	-0.0465	0.0001	-0.1758	-1	0.0266	-0.0393	0.3020	0.0492	0.7886	-0.9079	-0.0059	-0.0427
		1F	-0.0041	0.1964	-0.0261	0.0003	-0.1376	-0.7650	0.0368	-0.0491	1	-0.1155	-0.8840	0.5227	-0.0339	-0.0462
	R	5F	-0.3978	-0.0713	-1	-0.1538	-0.3040	0.0418	-0.1868	0.9513	0.0002	-0.7769	0.0403	-0.0212	0.5808	0.3050
		4F	-0.3270	-0.0579	-0.8400	0.1466	0.2089	-0.0307	0.4013	0.2647	0.0103	0.4989	-0.0109	0.0442	-1	-0.7711
		3F	-0.2449	-0.0418	-0.6249	0.4298	0.3372	-0.0362	-0.1209	-0.5221	0.0198	0.9102	-0.0656	-0.0337	0.2326	1
		2F	-0.1583	-0.0256	-0.3965	0.5314	-0.0974	0.0496	-0.3287	-1	-0.0142	-0.2145	-0.0118	0.0059	0.8338	-0.8940
		1F	-0.0758	-0.0115	-0.1881	0.3776	-0.3750	0.0903	0.3095	-0.8284	-0.0511	-1	0.0968	0.0052	-0.8763	0.4977
$E_k$		9E-07	7E-10	2E-06	5E-01	2E-04	5E-07	6E+02	2E+01	1E-01	5E-03	2E-04	3E-02	7E-01	2E+01	

表 4.19 一樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Frequency (Hz)		1.4900	6.5332	7.8631	12.9337	21.8790	25.3881	30.2975	33.6286	38.3210	45.8391	56.0976	61.3929	72.1925	75.6507	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.06	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	R	R	X	Y	R	Y	Y	R	
Mode shapes	X	5F	1	0.8639	-0.0092	-1	0.5756	0.0378	0.8571	-0.0967	0.3408	0.0011	-0.3281	-0.0073	0.0043	0.2345
		4F	0.9742	0.4172	0.0005	-0.3901	-0.5107	-0.0437	-0.7896	0.9493	-0.7763	0.0123	0.1810	0.0001	-0.0099	-0.4175
		3F	0.9438	-0.0804	0.0066	0.2394	-0.9397	-0.0752	-0.2523	-0.5770	1	-0.0006	0.4057	0.0122	-0.0047	0.0966
		2F	0.9111	-0.5410	0.0056	0.6005	-0.0768	0.0064	0.7309	-0.8463	-0.9754	-0.0151	-0.0412	0.0018	0.0042	0.3120
		1F	0.8769	-0.8797	-0.0048	0.5524	1	0.0776	-0.5219	0.5732	0.4281	0.0024	-0.2310	-0.0069	-0.0031	-0.2137
	Y	5F	-0.0029	-0.0453	-1	-0.0044	0.0473	-0.8843	0.0255	0.0085	-0.0073	0.7118	-0.0066	-0.5089	-0.2653	0.0248
		4F	-0.0018	-0.0304	-0.8295	-0.0218	0.0029	-0.1301	0.0247	0.0103	0.0051	-0.5694	0.0017	1	0.7398	-0.0468
		3F	-0.0010	-0.0201	-0.6258	-0.0320	-0.0530	0.6363	-0.0180	0.0090	0.0087	-0.8521	0.0409	-0.3112	-1	0.0414
		2F	-0.0003	-0.0114	-0.4075	-0.0296	-0.0862	1	-0.0448	-0.0348	0.0081	0.3054	-0.0008	-0.7847	0.9104	-0.0070
		1F	0.0001	-0.0044	-0.1964	-0.0155	-0.0672	0.7647	-0.0244	-0.0522	-0.0122	1	-0.0648	0.8894	-0.5270	-0.0356
	R	5F	-0.0474	-1	0.0353	-0.5064	-0.6679	-0.0289	0.4616	0.8854	0.0296	-0.0099	-0.7790	0.0020	0.0223	0.5903
		4F	-0.0381	-0.8050	0.0293	-0.6444	-0.0873	0.0034	0.6600	-0.0937	0.3241	0.0114	0.3957	-0.0218	-0.0465	-1
		3F	-0.0275	-0.5761	0.0220	-0.7336	0.3023	0.0099	-0.1371	-0.2013	-0.4929	0.0297	0.9435	0.0186	-0.0364	0.2153
		2F	-0.0157	-0.3469	0.0144	-0.6735	0.1811	-0.0275	-1	-0.5242	0.1816	-0.0044	0.0307	0.0382	0.0087	0.7753
		1F	-0.0038	-0.1530	0.0070	-0.4232	-0.0878	-0.0484	-0.6300	-1	-0.2594	-0.0545	-1	-0.0462	-0.0047	-0.6709
$E_k$		1E+02	5E-06	8E-08	1E-05	8E-06	2E-06	1E-03	2E-03	5E+00	2E-02	6E+02	4E+00	2E+01	1E+01	

表 4.20 二樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Frequency (Hz)		1.9193	7.3496	7.8632	13.2038	20.8248	25.3493	27.2364	34.8959	36.9326	45.8482	56.0469	61.4301	70.0146	72.2361	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	X	R	X	Y	R	Y	R	Y	
Mode shapes	X	5F	1	-0.5501	0.0082	-1	-0.2802	0.0920	0.6212	-0.5815	-0.2458	0.0060	-0.1788	0.0084	-0.2782	-0.0025
		4F	0.9603	-0.1464	0.0018	-0.2754	0.0156	-0.1092	-0.9089	0.3581	0.8860	0.0133	0.0987	-0.0014	0.3649	0.0012
		3F	0.9133	0.2935	-0.0010	0.4502	0.1964	-0.0943	-0.6537	-0.0766	-1	-0.0115	0.2801	-0.0163	0.0942	0.0057
		2F	0.8612	0.6735	0.0026	0.8184	0.1049	-0.1187	1	0.2777	0.3595	-0.0077	-0.2079	0.0096	-0.1922	-0.0034
		1F	0.0490	-0.1981	-0.0371	0.5577	-1	0.0106	-0.1947	0.5326	-0.1916	-0.0039	-0.2024	0.0152	0.0816	0.0018
	Y	5F	-0.0066	0.0260	1	0.0178	-0.0040	0.8791	-0.1441	-0.0064	-0.0073	0.7107	0.0068	0.5089	-0.0113	-0.2646
		4F	-0.0046	0.0160	0.8294	-0.0008	-0.0199	0.1291	-0.0199	-0.0127	-0.0018	-0.5685	-0.0315	-1	0.0302	0.7386
		3F	-0.0031	0.0106	0.6257	-0.0131	-0.0257	-0.6363	0.0876	0.0150	0.0160	-0.8508	0.0219	0.3142	0.0090	-1
		2F	-0.0017	0.0049	0.4074	-0.0123	-0.0199	-1	0.1391	0.0343	-0.0145	0.3052	0.0283	0.7824	-0.0548	0.9152
		1F	-0.0010	0.0037	0.1963	-0.0103	-0.0083	-0.7640	0.1164	0.0433	-0.0191	1	-0.0609	-0.8838	0.0356	-0.5285
	R	5F	-0.0740	1	-0.0232	-0.1550	-0.2190	-0.0904	-0.6098	-0.8218	0.3161	0.0036	-0.4588	0.0029	-0.6527	0.0061
		4F	-0.0602	0.8108	-0.0190	-0.3796	-0.2363	0.0188	0.1734	-0.4478	-0.2944	0.0096	0.2372	0.0179	0.8450	-0.0237
		3F	-0.0439	0.5875	-0.0138	-0.5708	-0.1639	0.0607	0.3158	0.6174	0.2368	0.0177	0.5381	-0.0232	0.3225	0.0406
		2F	-0.0260	0.3674	-0.0083	-0.5928	0.0308	0.0182	-0.1391	1	-0.3641	-0.0209	0.0828	-0.0379	-1	-0.0332
		1F	-0.0174	0.1713	-0.0035	-0.3904	0.2192	0.0076	-0.0554	0.6083	-0.2803	-0.0368	-1	0.0875	0.6906	0.0238
$E_k$		1E-04	6E-05	1E-08	2E-03	2E-05	1E-07	6E-06	4E-05	2E-02	3E-04	1E-03	2E-02	1E-01	5E-01	

表 4.21 三樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Frequency (Hz)		2.1643	7.5584	7.8661	13.0759	17.6222	25.3714	30.7107	33.5094	35.8429	45.8261	53.7794	61.3972	72.2626	75.8744	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.05	
Primary Direction		X	R	Y	X	X	Y	X	X	R	Y	R	Y	Y	R	
Mode shapes	X	5F	-1	0.2103	0.0401	-0.6096	1	0.0282	0.1714	-0.6516	-0.0531	-0.0013	-0.2876	-0.0064	0.0057	0.1620
		4F	-0.9537	-0.1098	-0.0065	-0.0167	-0.1186	-0.0226	-0.0820	1	-0.8084	0.0201	0.2159	0.0017	-0.0127	-0.3215
		3F	-0.8974	-0.4390	-0.0511	0.5631	-0.9469	-0.0042	-0.0668	-0.3783	0.8808	-0.0192	0.0618	0.0046	0.0073	0.1665
		2F	-0.1074	0.6633	0.0114	1	0.7089	-0.0174	-0.8428	-0.0946	-0.0894	0.0015	0.1660	0.0000	0.0090	-0.2656
		1F	-0.0504	0.3337	-0.0082	0.7309	0.5170	0.0570	1	0.4423	0.5469	-0.0114	-0.3284	-0.0050	-0.0140	0.4014
	Y	5F	0.0078	-0.1699	1	0.0575	0.0047	0.8804	-0.0382	0.0178	-0.0083	0.7121	-0.0247	-0.5100	-0.2639	0.0478
		4F	0.0056	-0.1367	0.8299	0.0439	0.0343	0.1293	-0.0032	-0.0078	-0.0118	-0.5696	0.0266	1	0.7316	0.0819
		3F	0.0036	-0.1003	0.6263	0.0316	0.0425	-0.6356	0.0271	0.0122	-0.0063	-0.8528	0.0500	-0.3110	-1	-0.0643
		2F	0.0025	-0.0687	0.4073	0.0200	0.0385	-1	0.0287	0.0135	0.0515	0.2996	-0.0291	-0.7885	0.9130	-0.0485
		1F	0.0009	-0.0322	0.1964	0.0118	0.0228	-0.7663	0.0072	-0.0063	0.0487	1	-0.0726	0.8843	-0.5175	-0.0806
	R	5F	0.0858	-1	-0.1415	0.5094	0.1615	-0.0193	0.0352	-0.0759	-1	-0.0142	-0.7229	0.0023	0.0265	0.4180
		4F	0.0699	-0.8375	-0.1168	0.2345	0.4845	0.0107	0.0827	-0.5083	0.0527	0.0094	0.2840	-0.0211	-0.0518	-0.7467
		3F	0.0508	-0.6469	-0.0874	-0.0569	0.6348	0.0234	0.0036	0.2917	0.2954	0.0427	1	0.0200	0.0312	0.2032
		2F	0.0387	-0.4388	-0.0567	-0.2313	0.4062	0.0164	-0.1732	0.5920	0.9171	-0.0285	-0.4161	0.0148	0.0113	-0.8534
		1F	0.0187	-0.2243	-0.0275	-0.2047	0.1777	-0.0057	-0.7367	0.2573	0.5387	-0.0559	-0.5782	-0.0252	-0.0267	1
$E_k$		7E-04	2E-05	7E-08	6E-05	7E-04	2E-06	2E+00	3E+00	1E+00	9E-04	8E+00	2E+00	9E-02	1E+02	

表 4.22 四樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Frequency (Hz)		2.5569	6.7755	7.8716	12.4553	20.7302	24.4512	25.3947	33.7706	37.0549	45.8437	58.2356	61.4098	71.0138	72.2720	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.01	1.99	2.09	2.02	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	X	Y	X	X	Y	R	Y	R	Y	
Mode shapes	X	5F	1	-0.1702	-0.0075	0.2459	0.7814	-0.8343	0.0925	0.5571	-0.2974	0.0068	0.2759	-0.0145	-0.2164	-0.0305
		4F	0.9415	-0.3596	0.0228	-0.1704	-0.8394	0.8098	-0.0878	-0.5469	0.3015	-0.0068	-0.2669	0.0139	0.2104	0.0298
		3F	0.1908	1	-0.0280	-0.7718	1	0.7206	-0.1389	-0.1382	-0.5472	0.0121	-0.2787	0.0181	0.0211	0.0072
		2F	0.1194	0.7083	-0.0031	-0.8809	-0.2314	-0.3594	0.0434	0.5621	1	-0.0196	0.0933	-0.0044	-0.1197	-0.0269
		1F	0.0560	0.3612	0.0114	-0.6133	-0.7392	-1	0.1483	-1	-0.3866	0.0076	0.4150	-0.0334	0.1637	0.0309
	Y	5F	-0.0097	-0.1145	-1	-0.0857	-0.0544	-0.1481	-0.8838	0.0097	0.0110	0.7097	-0.0342	-0.5072	-0.0280	-0.2741
		4F	-0.0066	-0.0884	-0.8300	-0.0731	0.0073	-0.0368	-0.1287	0.0018	-0.0088	-0.5692	0.0770	1	-0.0273	0.7398
		3F	-0.0051	-0.0699	-0.6256	-0.0658	0.0557	0.0987	0.6369	-0.0212	-0.0062	-0.8543	-0.0510	-0.3024	0.0194	-1
		2F	-0.0026	-0.0433	-0.4076	-0.0479	0.0762	0.1787	1	-0.0242	-0.0066	0.3002	-0.0440	-0.7948	-0.0133	0.9023
		1F	-0.0011	-0.0202	-0.1964	-0.0270	0.0561	0.1398	0.7652	-0.0045	0.0350	1	0.1059	0.8849	0.0789	-0.4978
	R	5F	-0.1058	-0.7712	0.1110	-1	-0.3916	0.4278	-0.0393	0.4368	-0.3955	-0.0152	0.5752	-0.0050	-0.6799	-0.0864
		4F	-0.0858	-0.6702	0.0934	-0.7270	0.2578	-0.2617	0.0275	0.4395	-0.2195	0.0203	-0.3021	-0.0221	1	0.1177
		3F	-0.0698	-0.5378	0.0715	-0.4034	0.5764	-0.4355	0.0324	-0.3816	0.4278	0.0081	-0.9631	0.0682	-0.4215	-0.0327
		2F	-0.0447	-0.3788	0.0473	-0.1477	0.8957	-0.0142	-0.0519	-0.9489	0.1363	0.0015	0.2552	0.0159	-0.2257	-0.0762
		1F	-0.0214	-0.1948	0.0231	-0.0187	0.7657	0.2938	-0.0907	-0.1931	0.5817	-0.0365	1	-0.0973	0.3789	0.0769
$E_k$		1E-03	4E-07	3E-08	1E-05	1E-03	3E-04	1E-05	1E+00	8E+00	3E-01	3E-01	8E-02	2E+01	1E+01	

表 4.23 五樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	
Frequency (Hz)		3.2917	6.0328	7.8745	12.2834	16.8190	25.3728	28.2026	34.2428	37.7297	45.8361	52.0600	61.4139	72.2020	84.8555	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.00	2.00	3.52	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	Y	X	X	X	Y	R	Y	Y	R	
Mode shapes	X	5F	1	-0.9676	-0.0124	0.0506	0.0764	0.0013	-0.0096	0.0141	-0.0096	0.0003	-0.0007	0.0000	-0.0001	-0.0029
		4F	0.3629	1	0.0277	-0.3426	-1	-0.0345	0.3665	-0.6527	0.5461	-0.0193	0.0490	0.0004	0.0256	0.1679
		3F	0.2648	0.8192	0.0035	-0.5627	-0.0282	0.0176	-0.7393	0.2146	-1	0.0115	-0.3688	-0.0032	-0.0287	-0.3641
		2F	0.1674	0.5658	-0.0148	-0.5981	0.7858	0.0017	-0.0439	1	0.8693	0.0125	0.2349	0.0054	-0.0245	-0.4047
		1F	0.0786	0.2841	-0.0206	-0.4094	0.8111	-0.0390	1	-0.3385	-0.7041	-0.0019	0.3422	0.0022	0.0428	0.3084
	Y	5F	-0.0138	-0.0685	1	-0.0725	0.0291	-0.8855	-0.0410	-0.0020	-0.0026	-0.7122	0.0037	0.5109	0.2703	-0.0074
		4F	-0.0109	-0.0571	0.8292	-0.0745	0.0041	-0.1333	0.0034	-0.0072	0.0063	0.5656	-0.0153	-1	-0.7485	0.0734
		3F	-0.0068	-0.0404	0.6259	-0.0627	-0.0200	0.6335	0.0427	-0.0056	0.0054	0.8542	0.0060	0.3021	1	-0.0790
		2F	-0.0039	-0.0251	0.4077	-0.0476	-0.0286	1	0.0420	0.0300	-0.0272	-0.3000	0.0112	0.7920	-0.9063	0.0485
		1F	-0.0016	-0.0114	0.1965	-0.0267	-0.0190	0.7663	0.0237	0.0551	-0.0079	-1	0.0343	-0.8865	0.5226	-0.0461
	R	5F	-0.1618	-0.5713	-0.0870	-1	0.1080	0.0301	-0.4719	-0.9845	0.2320	-0.0108	0.7858	-0.0019	-0.0409	-0.1627
		4F	-0.1377	-0.4903	-0.0728	-0.7851	-0.0738	-0.0028	-0.0372	0.0849	-0.0100	0.0033	-1	0.0050	0.1268	0.6117
		3F	-0.1024	-0.3977	-0.0551	-0.5244	-0.4109	-0.0467	0.5615	0.4778	0.2550	-0.0197	-0.5225	0.0069	-0.0996	-0.9255
		2F	-0.0659	-0.2750	-0.0355	-0.2870	-0.6366	-0.0554	0.3395	0.5402	-0.6836	0.0070	0.4839	-0.0178	-0.0443	-1
		1F	-0.0315	-0.1393	-0.0169	-0.1145	-0.5061	-0.0301	-0.1683	0.8581	-0.0529	0.0419	0.8969	0.0234	0.0930	0.7460
$E_k$		4E-06	2E-08	3E-10	4E-08	4E-05	1E-05	4E-04	3E-03	2E-01	7E-03	2E+01	8E+02	3E+01	6E+02	



表 4.24 DLV 分析之各樓層應力指標(單一樓層破壞；input 於 y 向；SRIM 識別)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	18.22	20.63	18.27	27.59	<b>*0.90</b>
	4F	16.20	16.16	23.50	<b>*1.82</b>	17.93
	3F	23.45	23.50	<b>*1.58</b>	28.46	24.82
	2F	20.66	<b>*2.23</b>	19.06	22.03	27.75
	1F	<b>*0.75</b>	23.84	29.04	29.91	26.11
$V_y$	5F	16.13	12.75	15.92	22.14	13.25
	4F	19.04	18.19	19.09	20.62	16.02
	3F	13.37	15.35	19.23	31.51	17.19
	2F	14.91	25.42	32.27	28.39	23.37
	1F	22.68	27.87	32.12	35.22	25.50
$T$	5F	19.77	12.88	20.26	15.71	12.07
	4F	19.80	18.44	18.86	23.70	19.14
	3F	18.03	24.94	22.52	22.73	22.13
	2F	14.68	26.84	24.97	25.06	15.57
	1F	13.12	28.07	23.34	23.48	19.45

\*偵測到之受損樓層

表 4.25 一樓及三樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15		
Frequency (Hz)	1.3334	4.1577	7.7868	7.8670	16.0294	25.3666	29.1842	31.4783	34.7604	45.8588	52.3132	61.4242	72.2771	82.5722		
Damping Ratio (%)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.17		
Primary Direction	X	X	R	Y	X	Y	X	R	X	Y	R	Y	Y	R		
Mode shapes	X	5F	1	-0.5032	-0.2866	-0.0155	-1	0.0000	0.3149	0.5990	-0.2907	0.0083	-0.3041	0.0037	-0.0126	-0.2014
		4F	0.9829	-0.4350	0.0587	0.0030	0.0699	-0.0119	-0.2120	-0.4744	1	-0.0218	0.1995	0.0020	0.0262	0.3913
		3F	0.9620	-0.3501	0.4185	0.0181	0.9620	0.0148	-0.1193	-0.0970	-0.7367	0.0141	0.0943	-0.0056	-0.0141	-0.1999
		2F	0.6532	0.9587	-0.2386	-0.0021	0.0550	-0.0758	1	-0.4478	0.0057	-0.0068	0.1998	-0.0017	-0.0247	0.1493
		1F	0.6286	1	0.0531	-0.0049	-0.1264	0.0742	-0.9839	0.4461	0.0076	0.0066	-0.2007	0.0017	0.0246	-0.1529
	Y	5F	-0.0017	0.0037	0.0737	-1	0.0137	0.8791	0.0690	-0.0166	0.0126	-0.7110	-0.0360	0.5084	0.2618	0.0094
		4F	-0.0010	0.0020	0.0569	-0.8295	-0.0070	0.1272	0.0231	0.0112	0.0056	0.5704	0.0235	-1	-0.7340	0.0194
		3F	-0.0005	0.0007	0.0401	-0.6258	-0.0137	-0.6371	-0.0403	0.0097	0.0074	0.8509	0.0519	0.3147	1	-0.0179
		2F	-0.0004	0.0006	0.0294	-0.4072	-0.0148	-1	-0.0731	-0.0100	-0.0275	-0.3034	-0.0148	0.7848	-0.9133	-0.0136
		1F	0.0001	0.0001	0.0126	-0.1963	-0.0054	-0.7658	-0.0431	-0.0121	-0.0302	-1	-0.0529	-0.8872	0.5285	-0.0258
	R	5F	-0.0274	0.0993	1	0.0620	0.1636	-0.0488	0.3921	0.3762	0.5535	0.0302	-0.7446	-0.0097	-0.0456	-0.4621
		4F	-0.0217	0.0748	0.8259	0.0514	-0.2244	-0.0168	0.3205	0.4373	-0.2670	-0.0104	0.2454	0.0277	0.0810	1
		3F	-0.0148	0.0445	0.6207	0.0387	-0.5244	0.0169	-0.0852	-0.1763	0.0266	-0.0605	1	-0.0118	-0.0243	-0.9133
		2F	-0.0106	0.0273	0.4054	0.0253	-0.5052	0.0405	-0.4514	-0.7605	-0.2360	0.0167	-0.1975	-0.0298	-0.0709	0.7895
		1F	-0.0025	0.0098	0.1983	0.0124	-0.3028	0.0096	0.0774	-1	-0.2840	0.0610	-0.6059	0.0238	0.0805	-0.5469
$E_k$	4E+02	1E-03	1E-05	1E-08	1E-05	6E+01	3E-06	3E-04	2E-04	3E-05	5E-03	2E-03	3E-01	2E+01		

表 4.26 二樓及四樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Frequency (Hz)		1.7253	4.6470	7.8694	7.9274	18.4345	23.4302	25.3649	28.7141	35.0631	45.8699	55.5782	61.4777	68.6807	72.3144	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	1.99	1.99	2.01	1.99	
Primary Direction		X	X	Y	R	X	X	Y	X	R	Y	R	Y	R	Y	
Mode shapes	X	5F	-1	-0.6495	-0.0123	0.0937	0.3085	-0.9743	0.0382	-0.2636	0.7839	0.0074	-0.1557	0.0007	0.2912	0.0076
		4F	-0.9742	-0.5845	0.0258	-0.2042	-0.3302	0.9781	-0.0352	0.2352	-0.7822	-0.0073	0.1506	-0.0006	-0.2825	-0.0074
		3F	-0.6270	0.9663	-0.0167	0.1566	0.2472	0.0082	-0.0862	0.9853	0.5392	0.0074	0.1971	-0.0067	-0.1426	-0.0088
		2F	-0.5916	1	0.0345	-0.1679	-0.1714	-0.0109	0.0876	-1	-0.5173	-0.0074	-0.1973	0.0066	0.1439	0.0087
		1F	-0.0331	0.0428	-0.0729	0.2513	-1	-1	-0.0117	0.4586	-0.5216	0.0037	-0.2097	0.0158	-0.0639	-0.0029
	Y	5F	0.0041	-0.0056	1	0.1452	-0.0264	0.0222	0.8785	0.0831	0.0127	0.7102	0.0125	0.5070	0.0395	0.2625
		4F	0.0028	-0.0054	0.8284	0.1274	-0.0147	-0.0231	0.1277	0.0200	0.0163	-0.5695	-0.0307	-1	-0.0666	-0.7386
		3F	0.0022	-0.0041	0.6255	0.0909	-0.0054	-0.0429	-0.6362	-0.0415	-0.0240	-0.8528	0.0098	0.3094	-0.0446	1
		2F	0.0011	-0.0029	0.4068	0.0625	0.0007	-0.0365	-1	-0.0681	-0.0335	0.3027	0.0233	0.7882	0.1287	-0.9086
		1F	0.0007	-0.0015	0.1963	0.0284	0.0060	-0.0227	-0.7643	-0.0615	-0.0442	1	-0.0385	-0.8852	-0.0550	0.5223
	R	5F	0.0427	0.0387	0.1197	-1	-0.4101	0.3693	-0.0477	0.2199	0.8429	-0.0133	-0.3304	-0.0238	0.7896	0.0061
		4F	0.0345	0.0173	0.1004	-0.8388	-0.0892	-0.3838	0.0027	-0.0567	0.6311	0.0204	0.1233	0.0436	-1	0.0112
		3F	0.0282	0.0064	0.0769	-0.6409	0.1737	-0.5671	0.0305	-0.1028	-0.7988	0.0055	0.5775	-0.0289	-0.1119	-0.0589
		2F	0.0167	-0.0064	0.0516	-0.4260	0.3980	-0.3927	0.0013	0.4874	-1	-0.0058	0.0363	-0.0389	0.6705	0.0583
		1F	0.0116	-0.0118	0.0260	-0.2107	0.4123	-0.0237	0.0022	0.2301	-0.5981	-0.0165	-1	0.0887	-0.5044	-0.0366
$E_k$		5E-03	3E-03	4E-06	5E-03	2E+02	4E-04	4E-05	5E-03	1E-02	1E-03	2E-01	5E-03	5E+00	8E+01	

表 4.27 三樓及五樓受損結構系統參數(input 於 y 向；SRIM 識別)

Modal Parameters																
Mode(k)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	1	
Frequency (Hz)		2.0758	5.3667	7.6210	7.8813	13.9652	23.6805	25.4053	30.9047	35.8685	45.8568	48.4130	61.4505	72.2773	2.0758	
Damping Ratio (%)		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.09	1.99	2.01	2.00	
Primary Direction		X	X	R	Y	X	X	Y	X	R	Y	R	Y	Y	X	
Mode shapes	X	5F	-1	1	0.0249	-0.0106	-0.0244	0.0409	-0.0029	-0.0037	0.0181	0.0003	0.0011	0.0000	0.0002	-1
		4F	-0.7458	-0.6419	-0.0125	0.0193	0.2436	-0.9872	0.0802	0.1888	-0.9021	-0.0194	-0.0340	-0.0014	-0.0279	-0.7458
		3F	-0.7029	-0.6676	0.2977	-0.0330	-0.1433	1	-0.0806	-0.1727	0.9027	0.0194	0.0327	0.0014	0.0279	-0.7029
		2F	-0.0824	-0.0781	-0.6993	0.0460	-1	-0.4998	0.0252	-0.7577	-0.0860	-0.0027	0.1743	-0.0040	0.0293	-0.0824
		1F	-0.0389	-0.0420	-0.3562	0.0101	-0.7452	-0.2304	0.0718	1	0.5060	0.0150	-0.4831	0.0017	-0.0448	-0.0389
	Y	5F	0.0058	0.0093	0.2195	1	-0.0486	0.1167	0.8845	-0.0284	-0.0035	-0.7120	0.0208	-0.5100	-0.2707	0.0058
		4F	0.0046	0.0078	0.1851	0.8288	-0.0463	-0.0041	0.1329	-0.0020	-0.0129	0.5663	-0.0651	1	0.7395	0.0046
		3F	0.0028	0.0059	0.1344	0.6262	-0.0346	-0.1130	-0.6336	0.0242	-0.0101	0.8539	-0.0891	-0.3045	-1	0.0028
		2F	0.0019	0.0039	0.0911	0.4071	-0.0238	-0.1554	-1	0.0229	0.0491	-0.2972	0.0674	-0.7926	0.9109	0.0019
		1F	0.0007	0.0017	0.0429	0.1964	-0.0138	-0.1117	-0.7673	0.0036	0.0496	-1	0.1555	0.8823	-0.5138	0.0007
	R	5F	0.0599	0.0274	1	-0.1821	-0.5638	0.4373	-0.0614	-0.0286	-1	0.0152	-1	0.0066	0.0446	0.0599
		4F	0.0516	0.0266	0.8466	-0.1531	-0.3791	-0.0485	0.0030	-0.0251	0.1132	-0.0164	0.9818	-0.0158	-0.1372	0.0516
		3F	0.0377	0.0326	0.6627	-0.1178	-0.1198	-0.8303	0.0944	0.1121	0.2713	-0.0482	0.9199	-0.0038	0.1024	0.0377
		2F	0.0293	0.0298	0.4544	-0.0785	0.1044	-0.8293	0.0948	0.0066	0.8428	0.0346	-0.8108	0.0170	0.0477	0.0293
		1F	0.0143	0.0159	0.2338	-0.0390	0.1417	-0.5390	0.0489	-0.5838	0.4956	0.0615	-0.8324	-0.0129	-0.0962	0.0143
$E_k$		2E-04	6E-05	3E-06	2E-08	1E-05	5E-04	4E-06	4E+01	1E-01	7E-03	4E+01	1E+00	3E+01	2E-04	

表 4.28 DLV 分析之各樓層應力指標(複數樓層破壞；input 於 y 向；SRIM 識別)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	14.27	25.09	<b>*2.16</b>
	4F	12.35	<b>*1.58</b>	27.46
	3F	<b>*2.67</b>	29.84	<b>*2.37</b>
	2F	18.47	<b>*1.18</b>	26.21
	1F	<b>*4.22</b>	20.61	25.26
$V_y$	5F	13.95	18.46	21.77
	4F	17.79	19.28	29.10
	3F	10.56	16.79	25.42
	2F	17.33	23.70	26.17
	1F	13.92	28.18	29.12
$T$	5F	14.98	22.00	20.40
	4F	15.58	23.51	19.89
	3F	10.25	13.01	27.64
	2F	18.61	14.42	27.79
	1F	10.60	23.60	20.64

\*偵測到之受損樓層

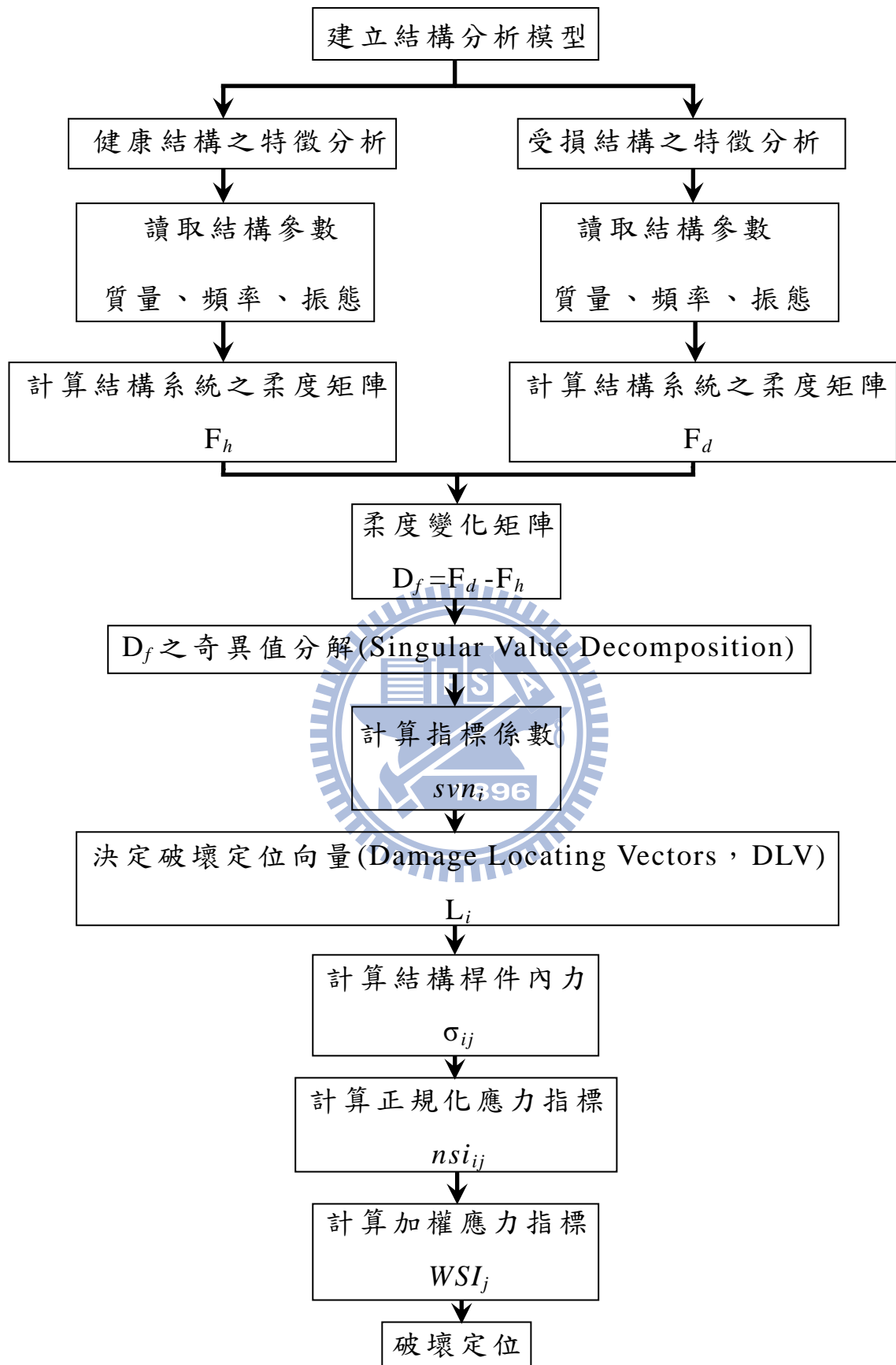


圖 4.1 DLV 結構破壞診斷之數值分析流程圖

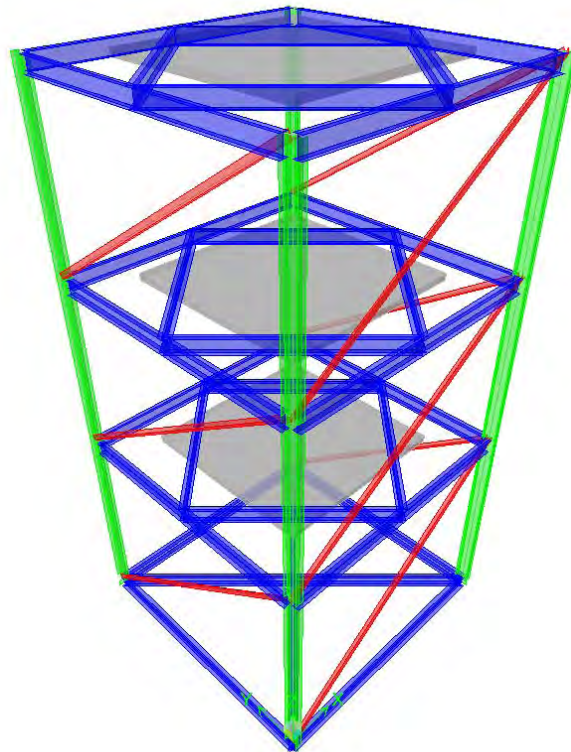


圖 4.2 三層樓之扭轉耦合結構

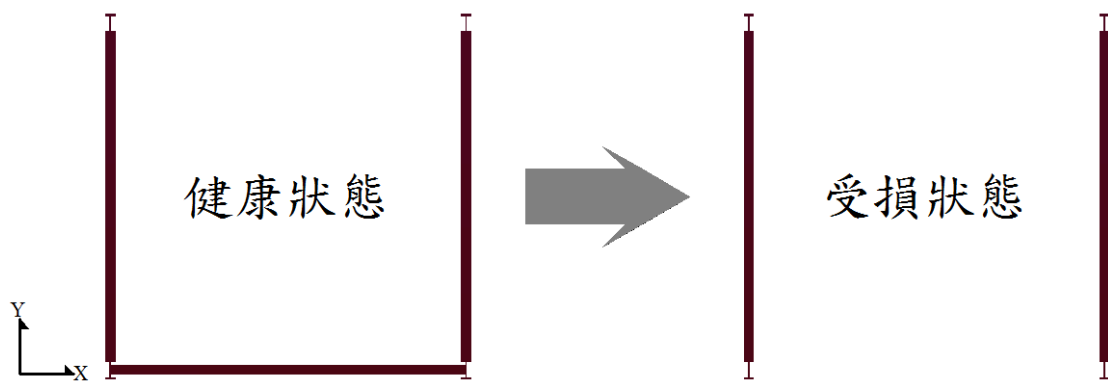


圖 4.3 弱軸(x)單邊強軸(y)雙邊配置斜撐之平面斜撐配置  
(移除弱軸斜撐)

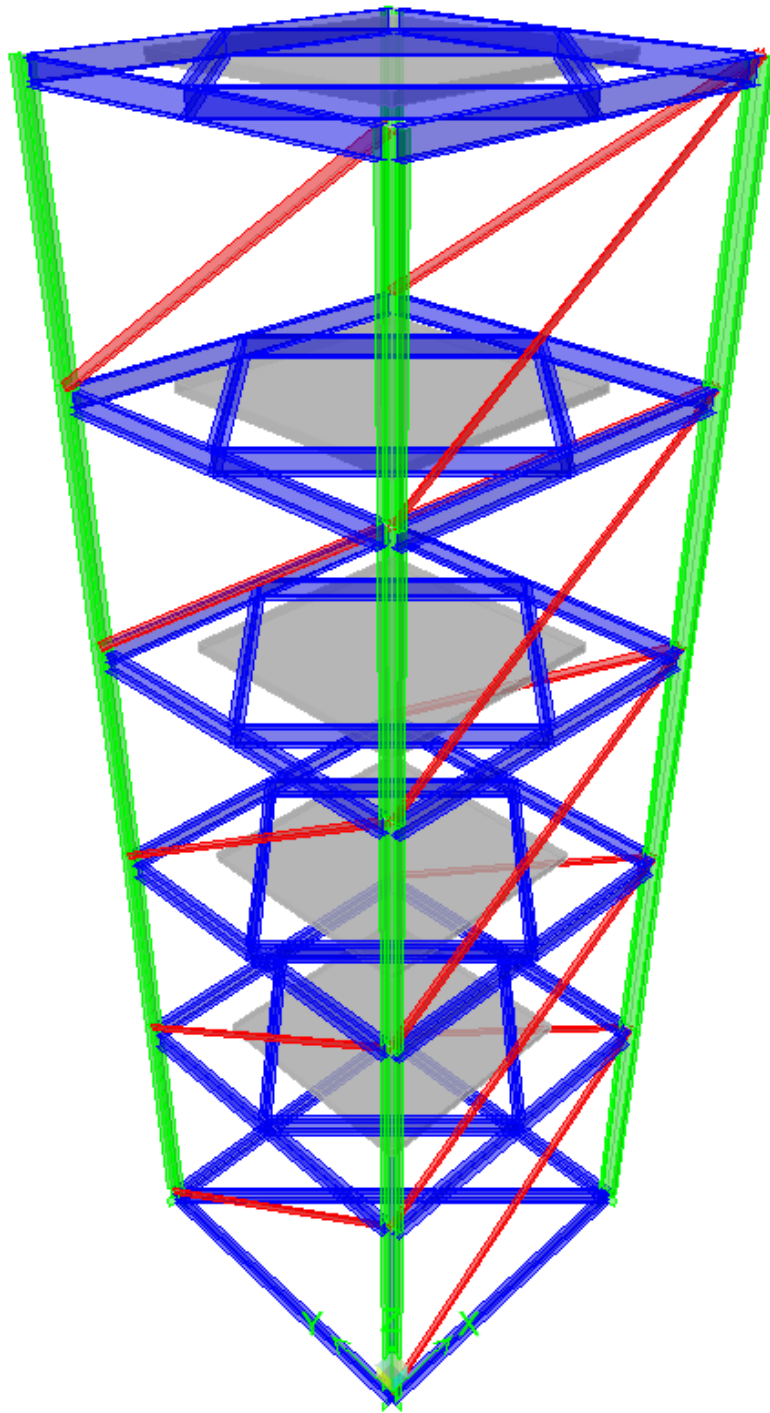


圖 4.4 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構



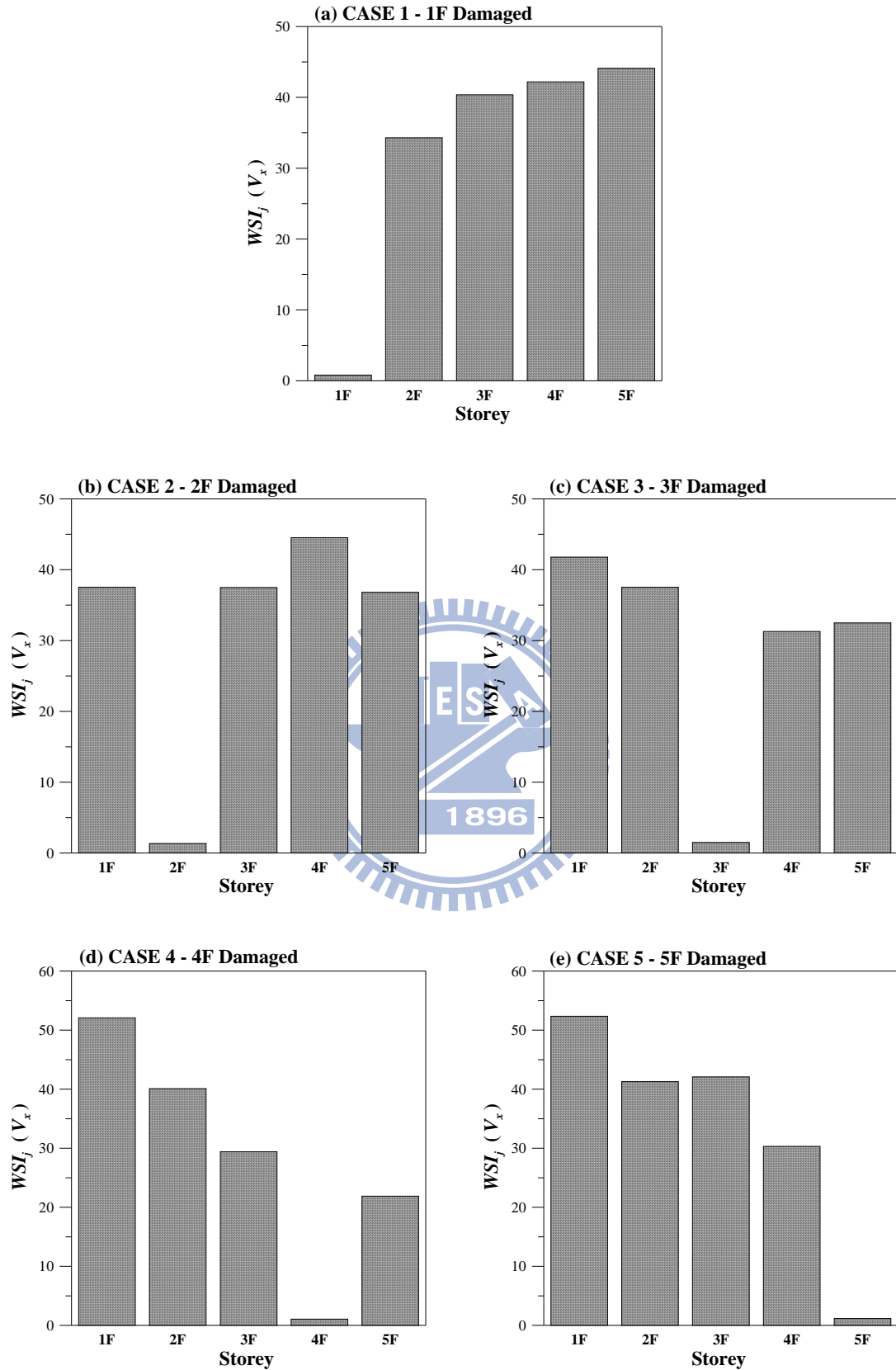


圖 4.5 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(x 向之  $WSI_j$ )

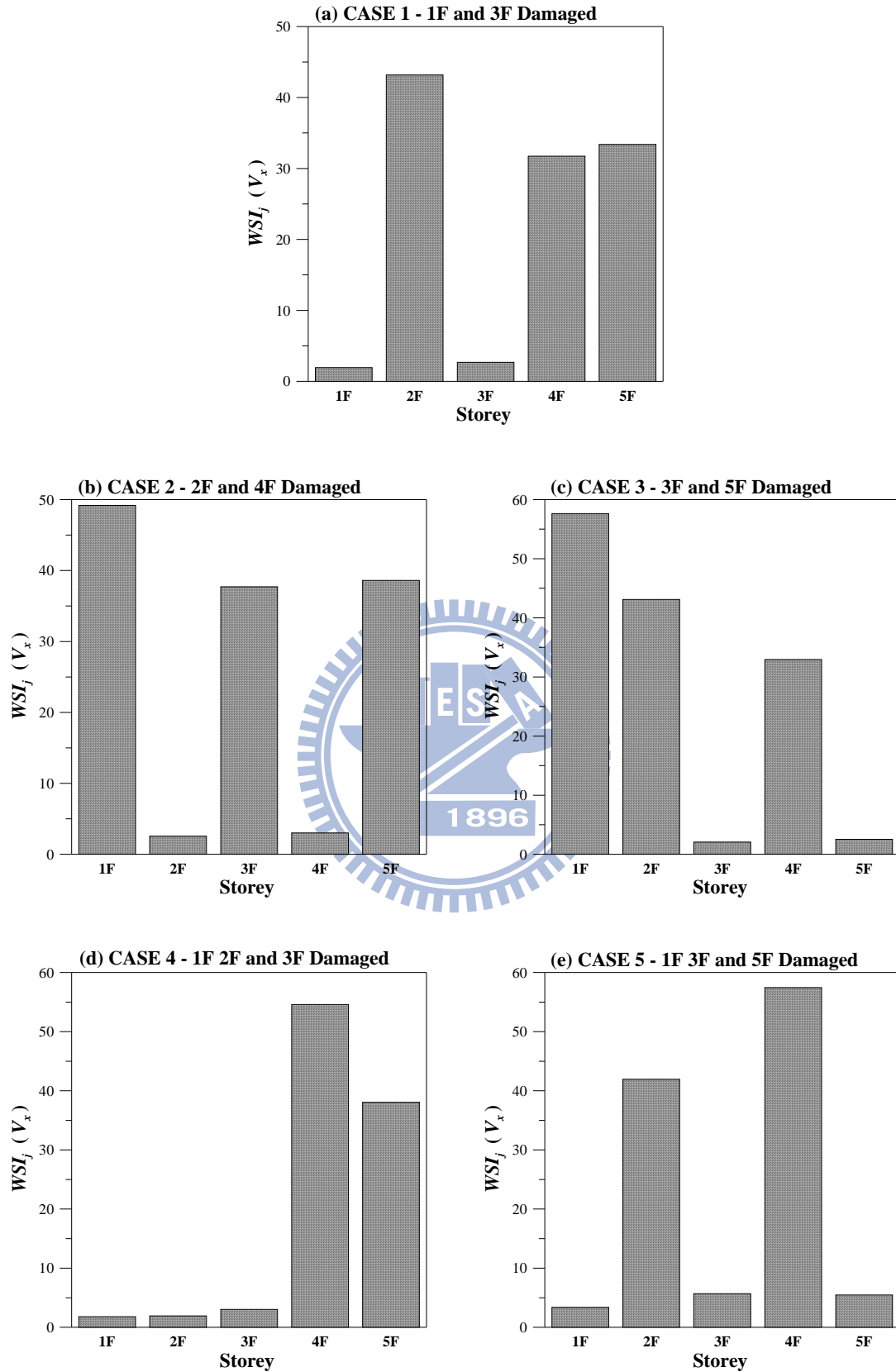


圖 4.6 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(x 向之  $WSI_j$ )

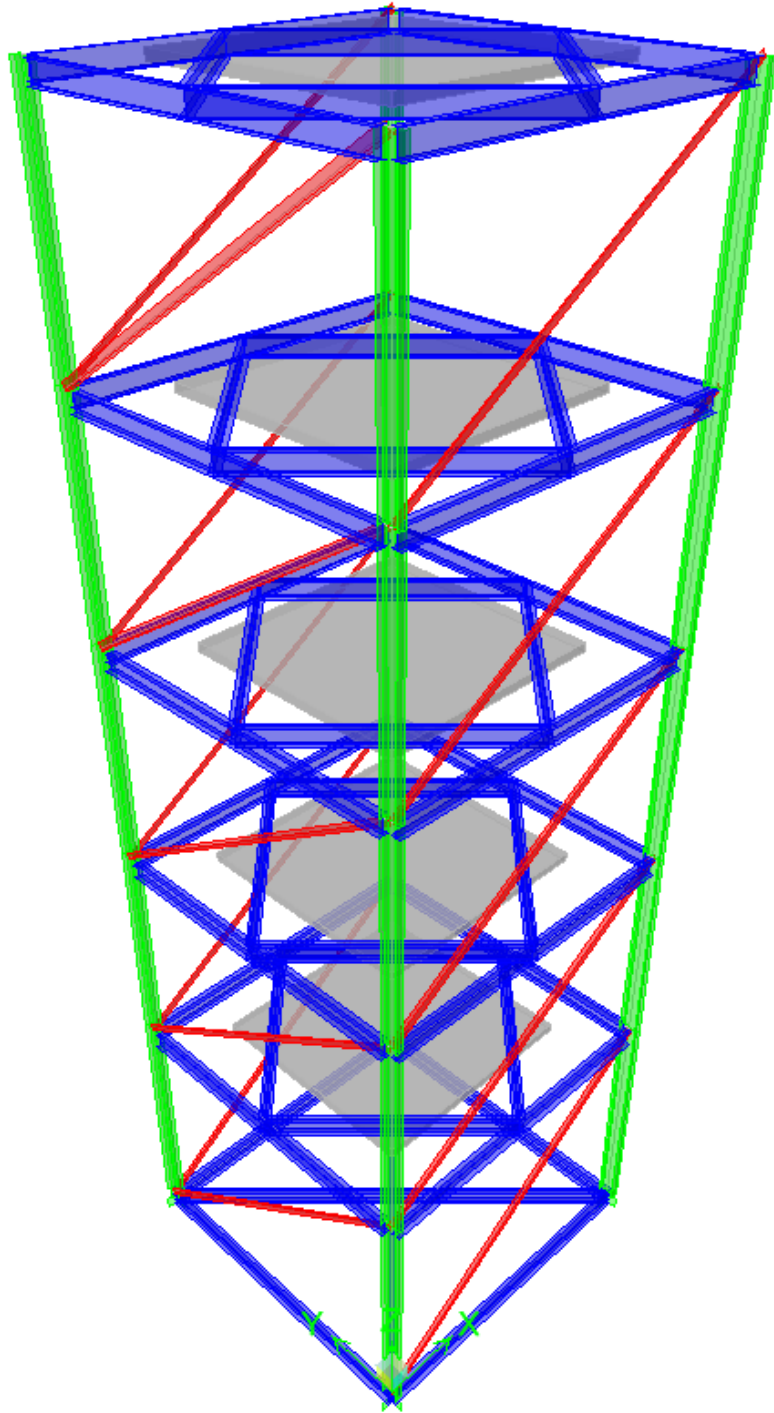


圖 4.7 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

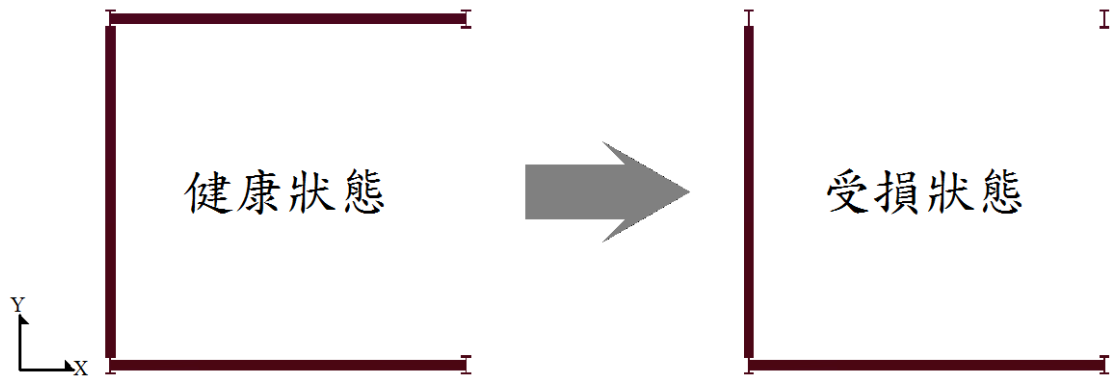


圖 4.8 弱軸(x)雙邊強軸(y)單邊配置斜撐之平面斜撐配置

(移除弱軸單邊斜撐)

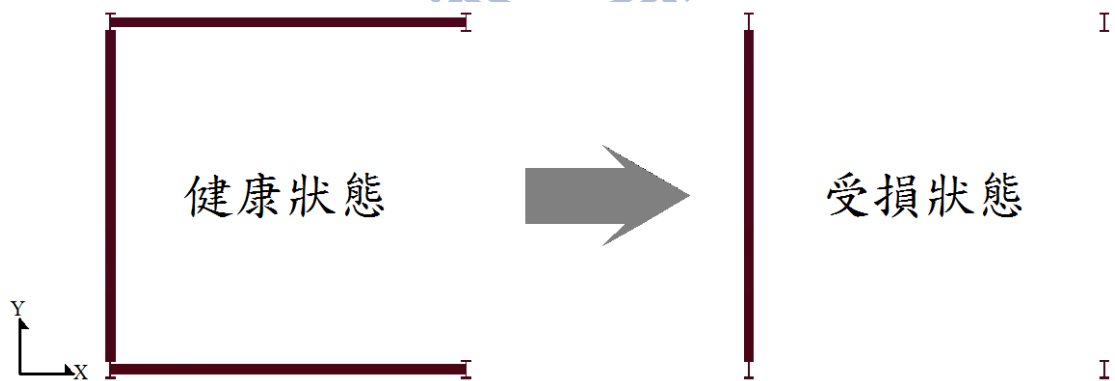


圖 4.9 弱軸(x)雙邊強軸(y)單邊配置斜撐之平面斜撐配置

(移除弱軸雙邊斜撐)

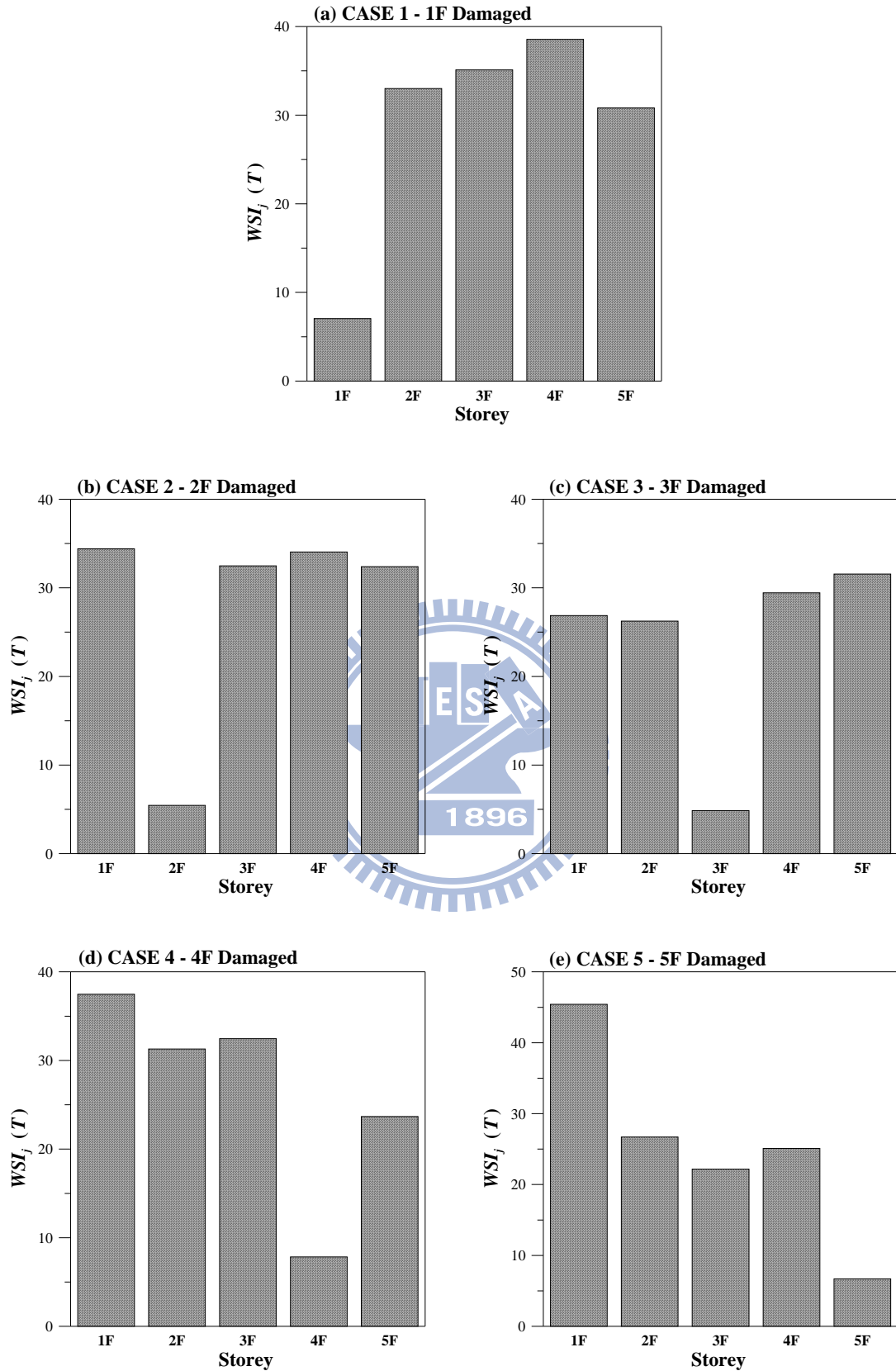


圖 4.10 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸單邊斜撐；旋轉向之  $WSI_j$ )

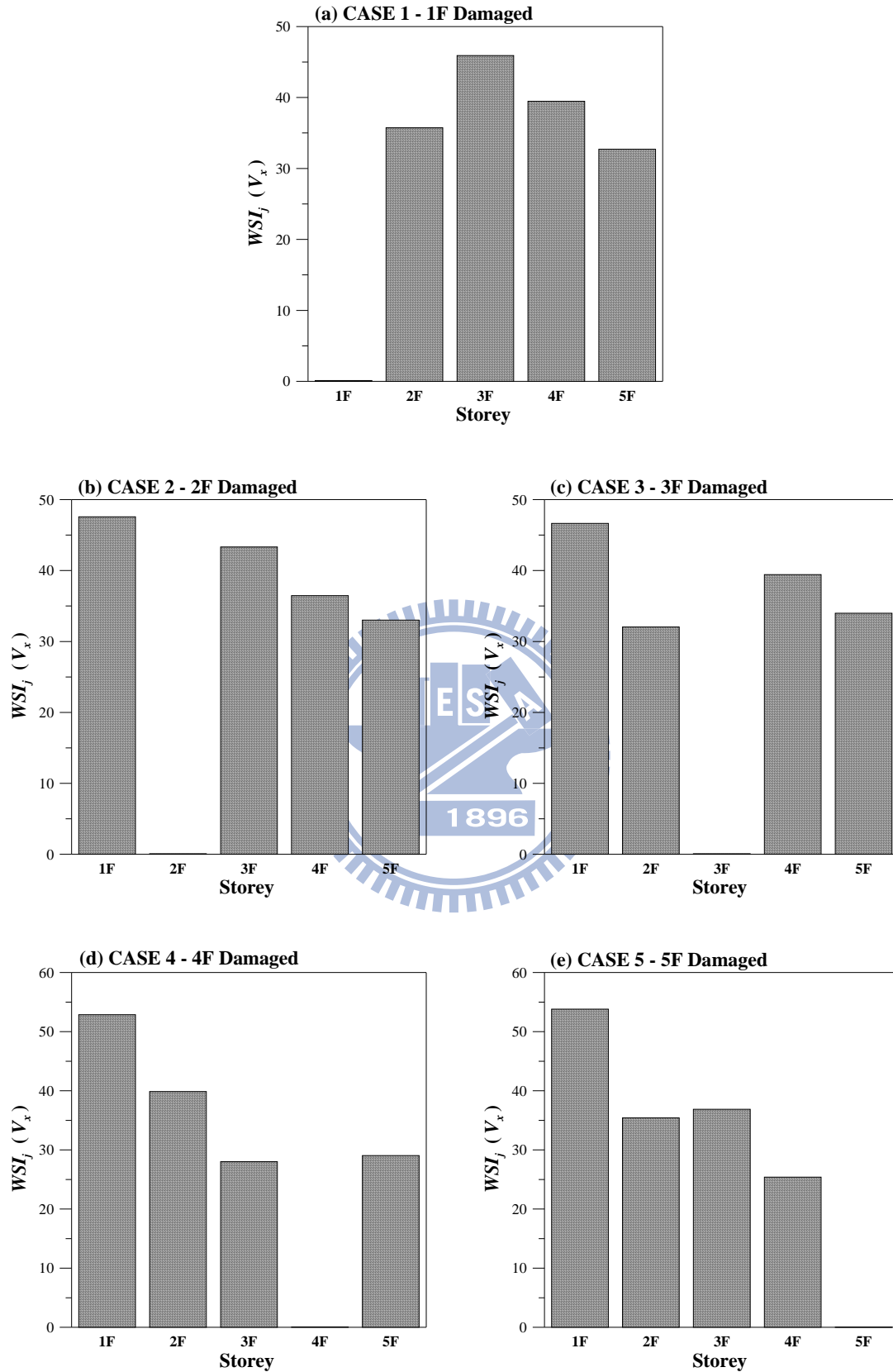


圖 4.11 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸雙邊斜撐； $x$  向之  $WSI_j$ )

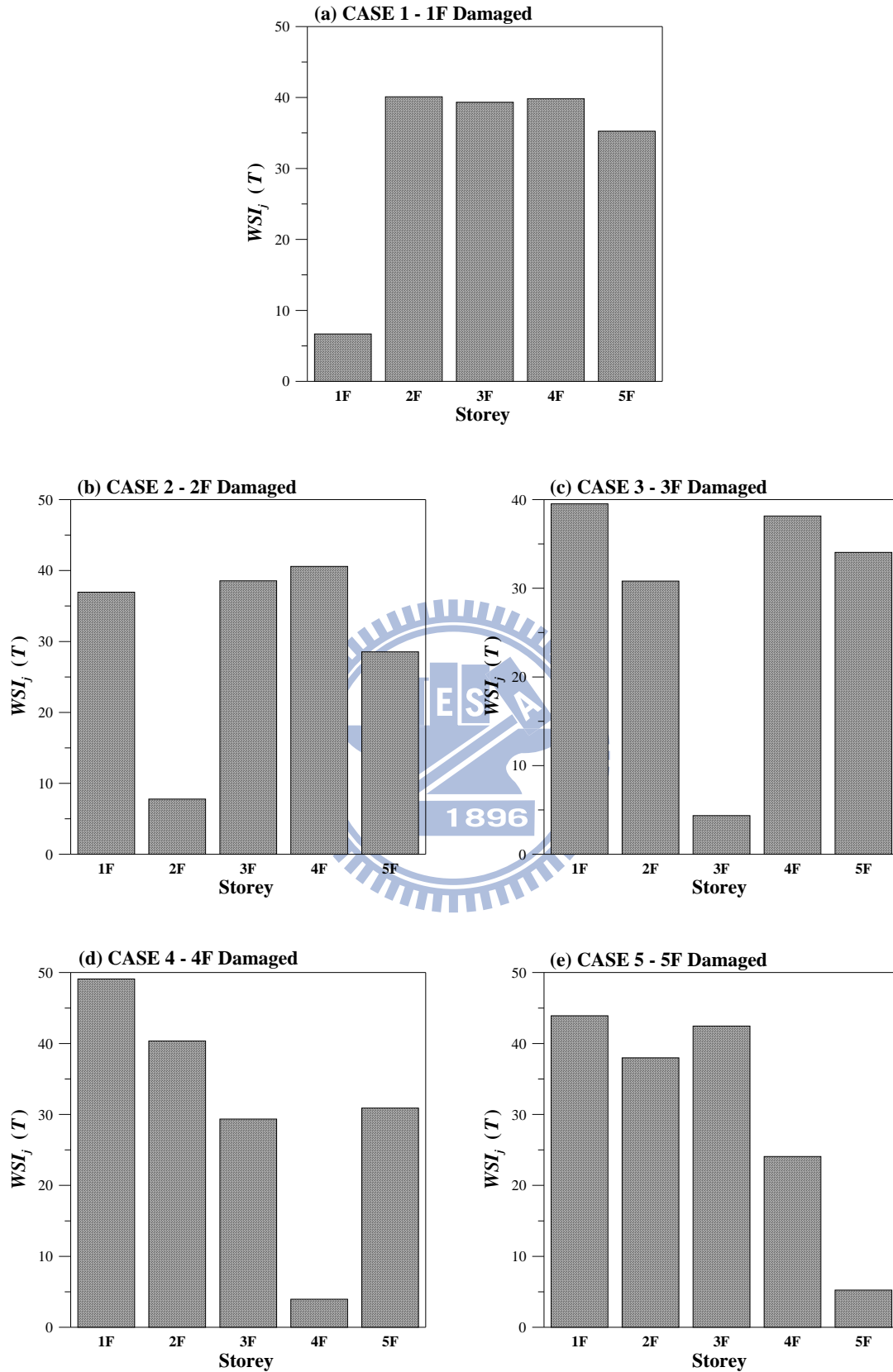


圖 4.12 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸雙邊斜撐；旋轉向之  $WSI_j$ )

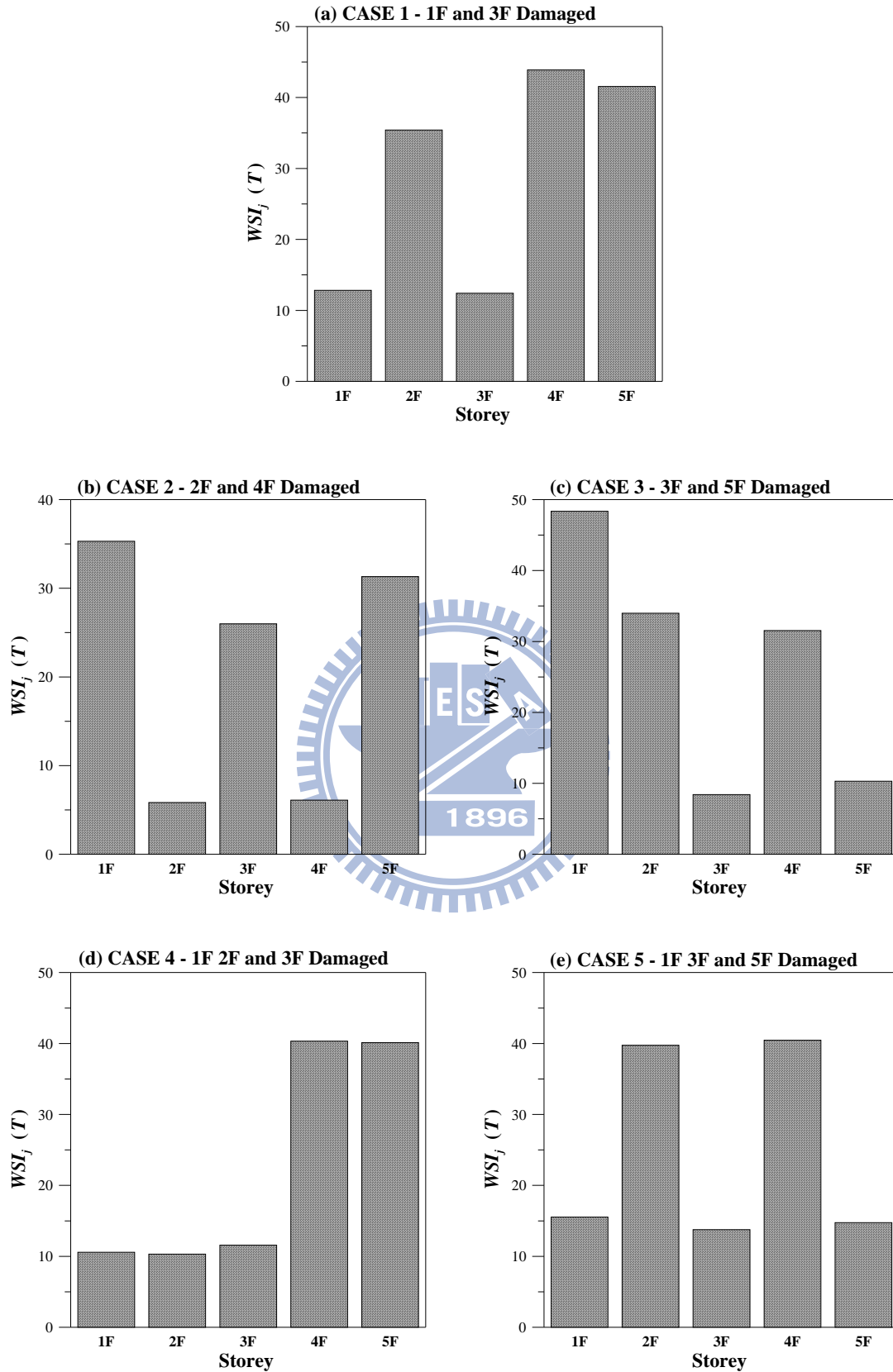


圖 4.13 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸單邊斜撐；旋轉向之  $WSI_j$ )



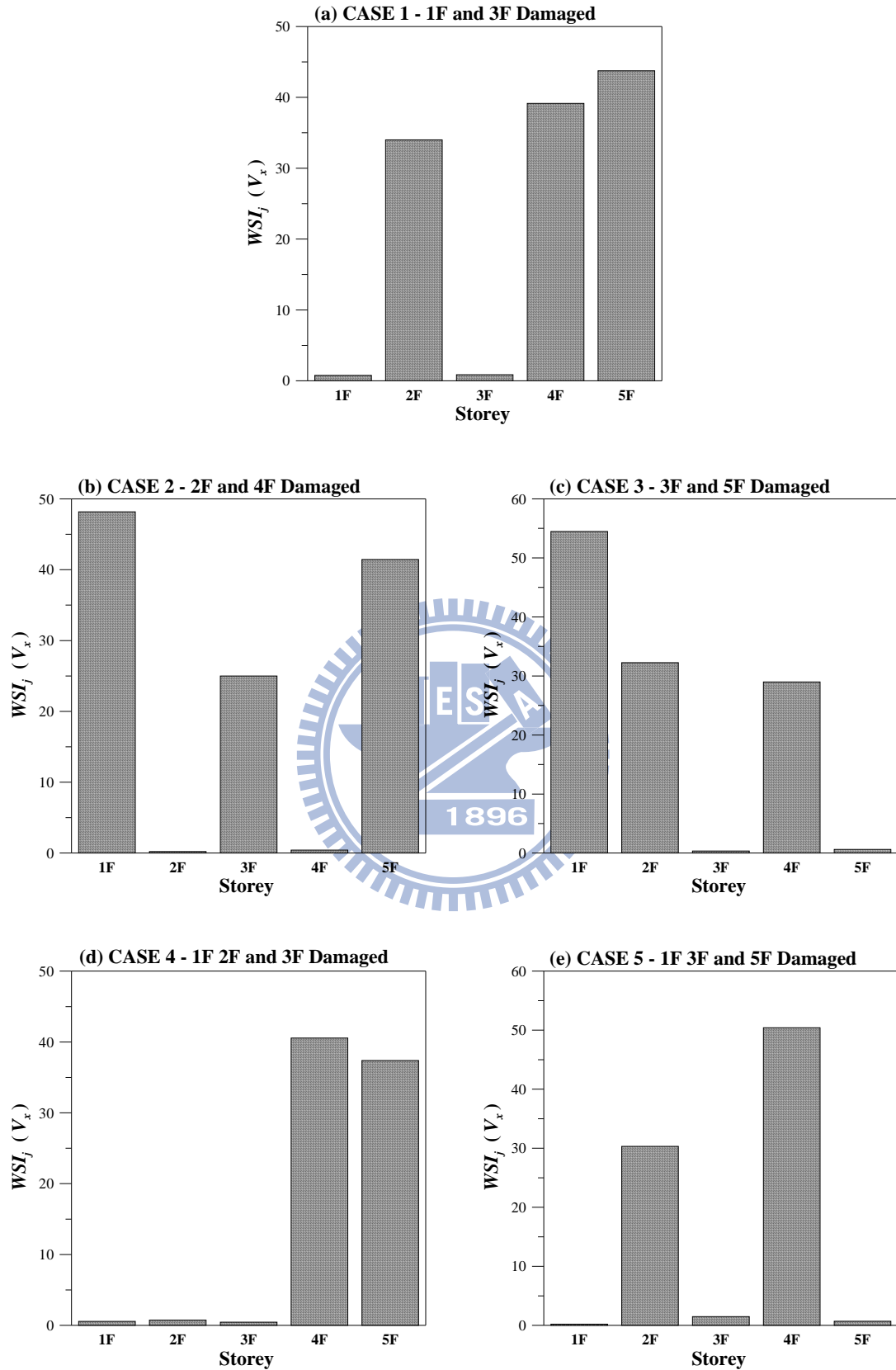


圖 4.14 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸雙邊斜撐； $x$  向之  $WSI_j$ )

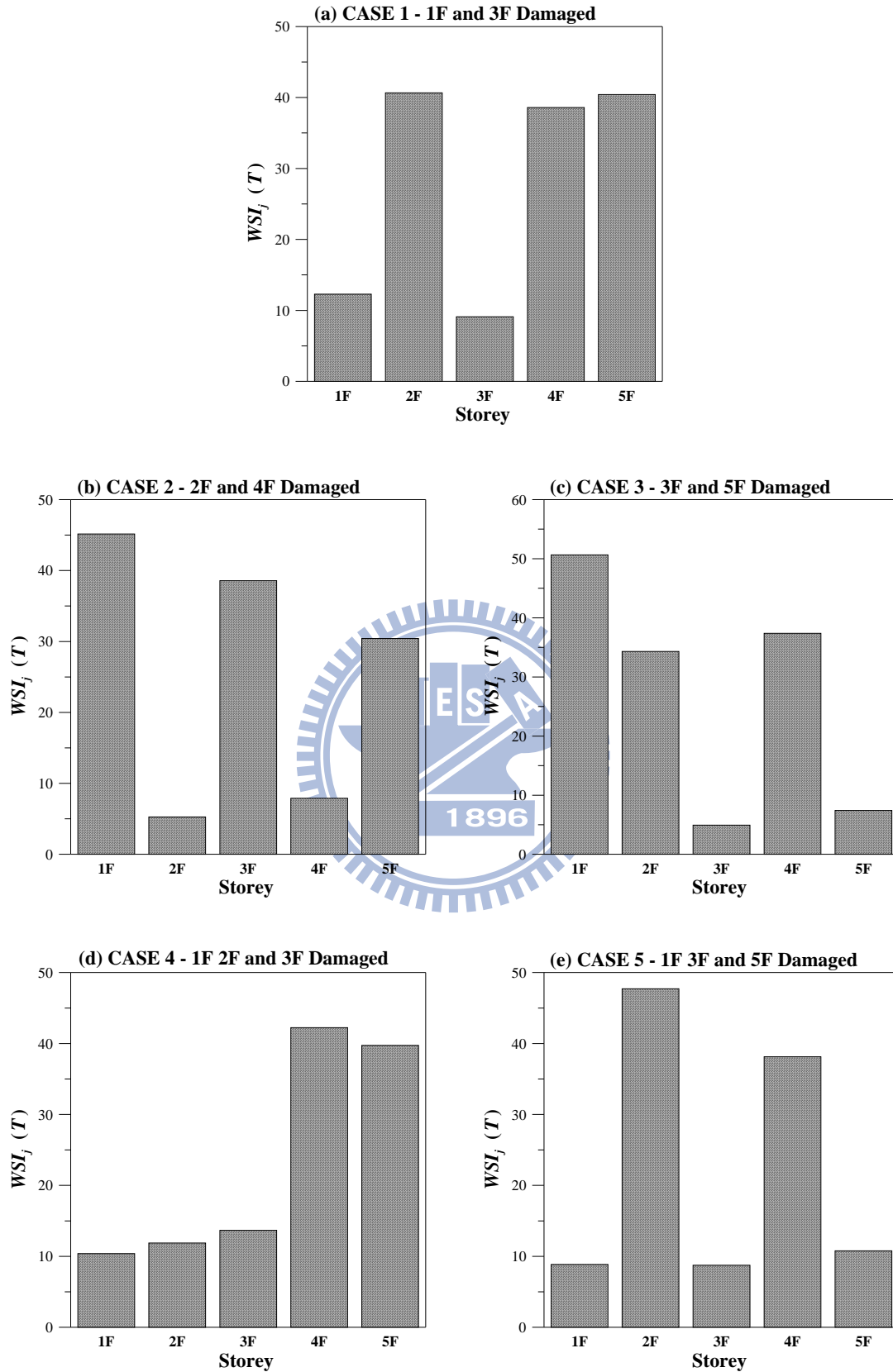


圖 4.15 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(移除弱軸雙邊斜撐；旋轉向之  $WSI_j$ )

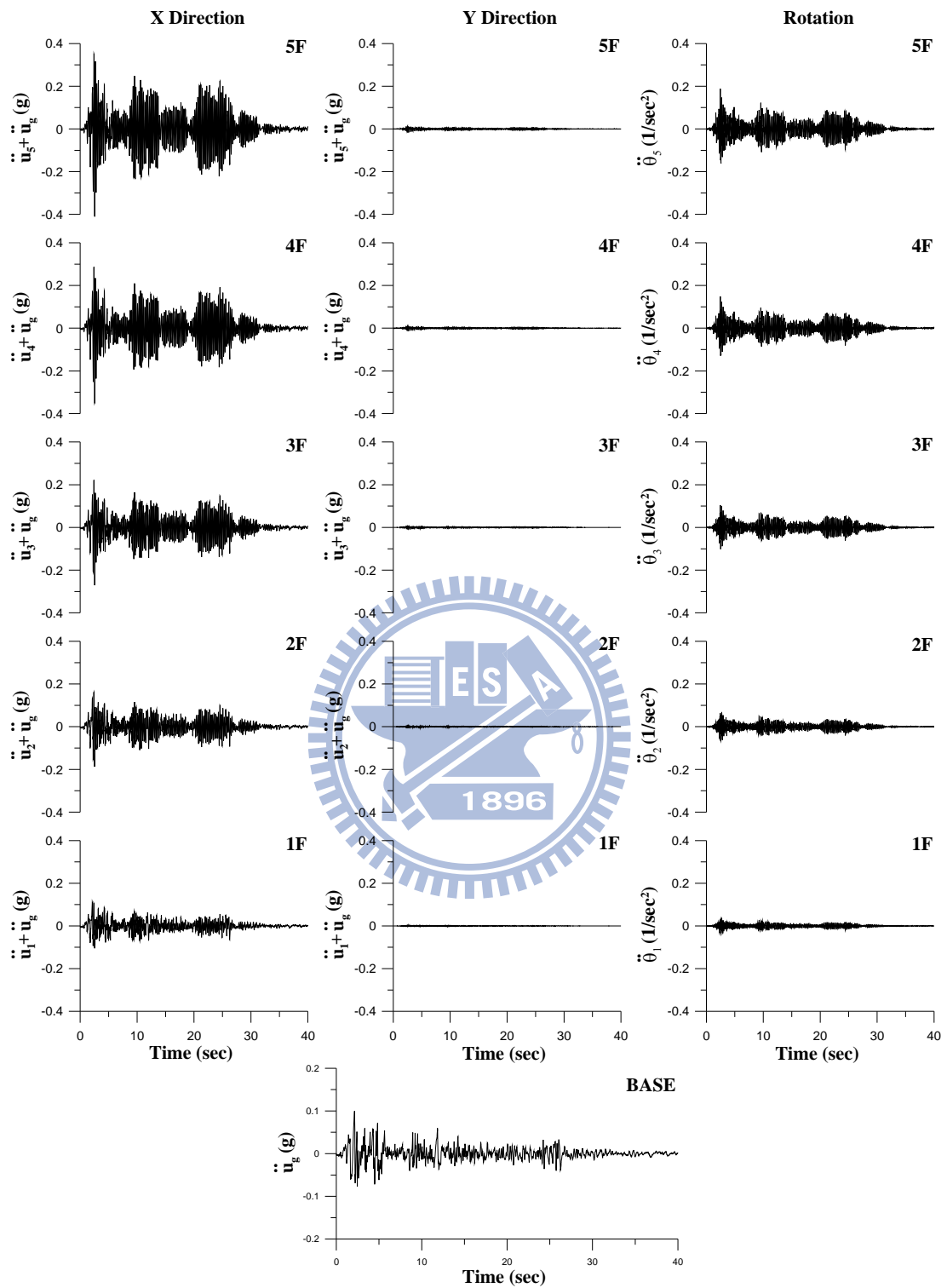


圖 4.16 健康結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

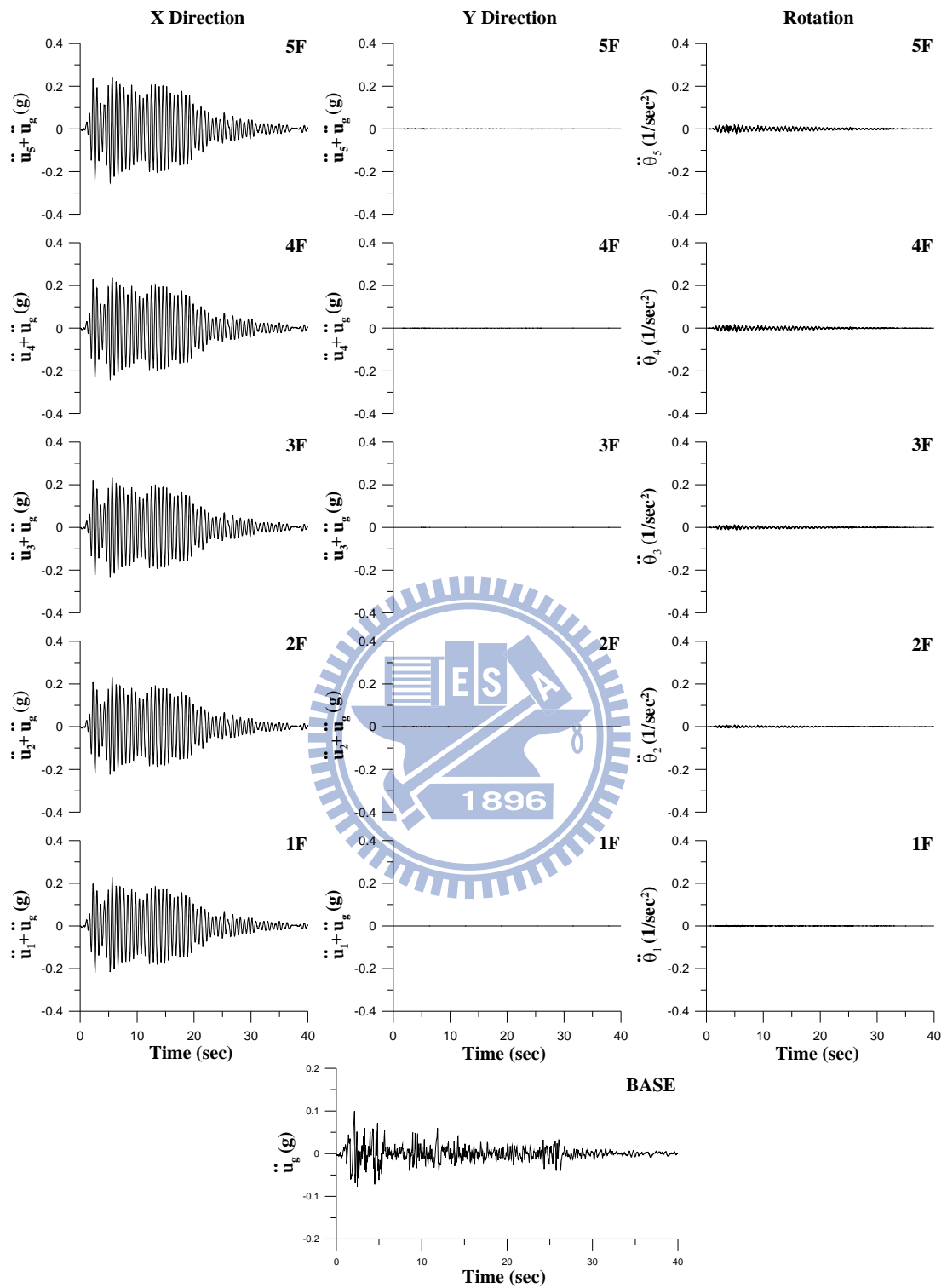


圖 4.17 一樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

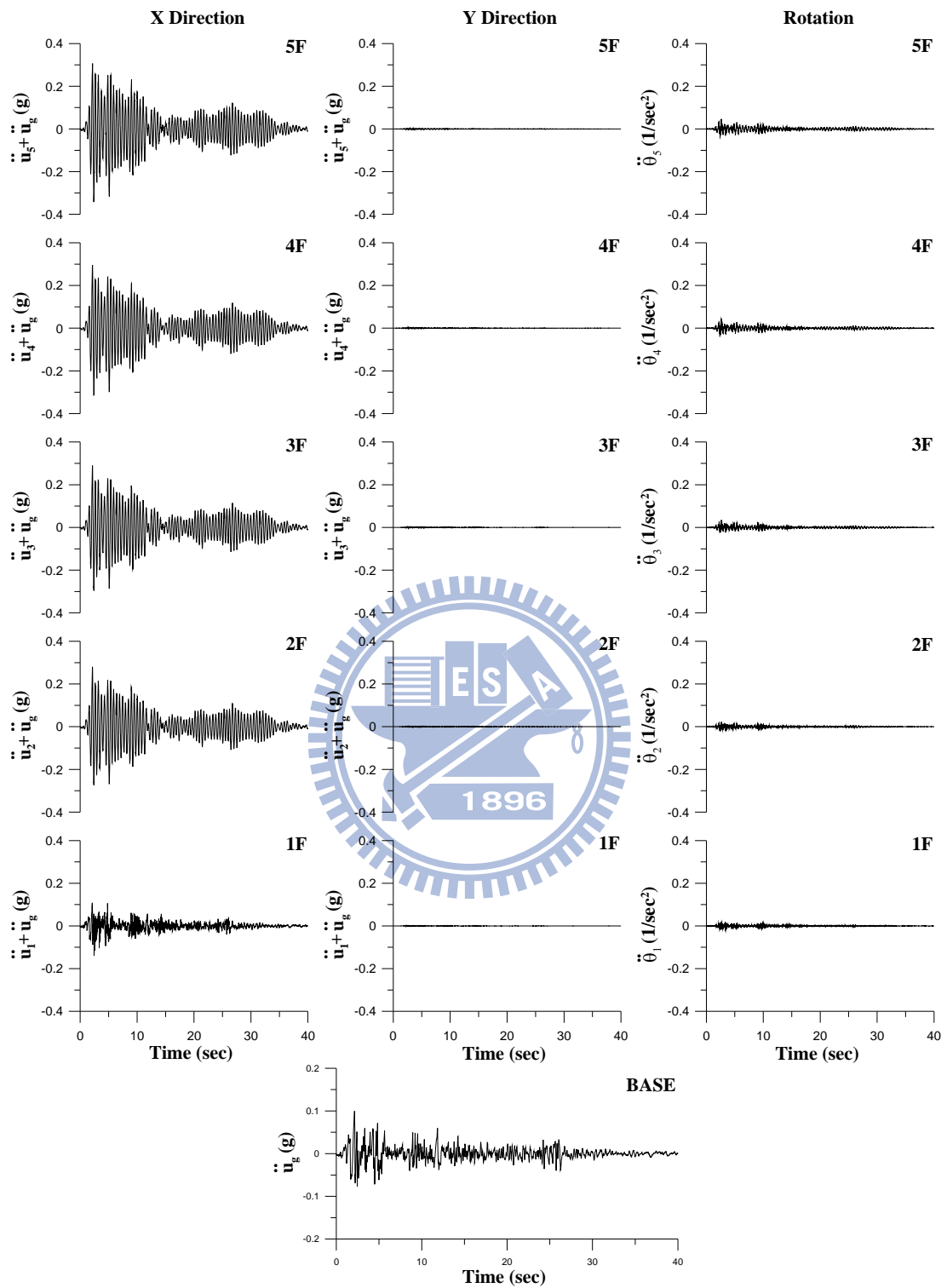


圖 4.18 二樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

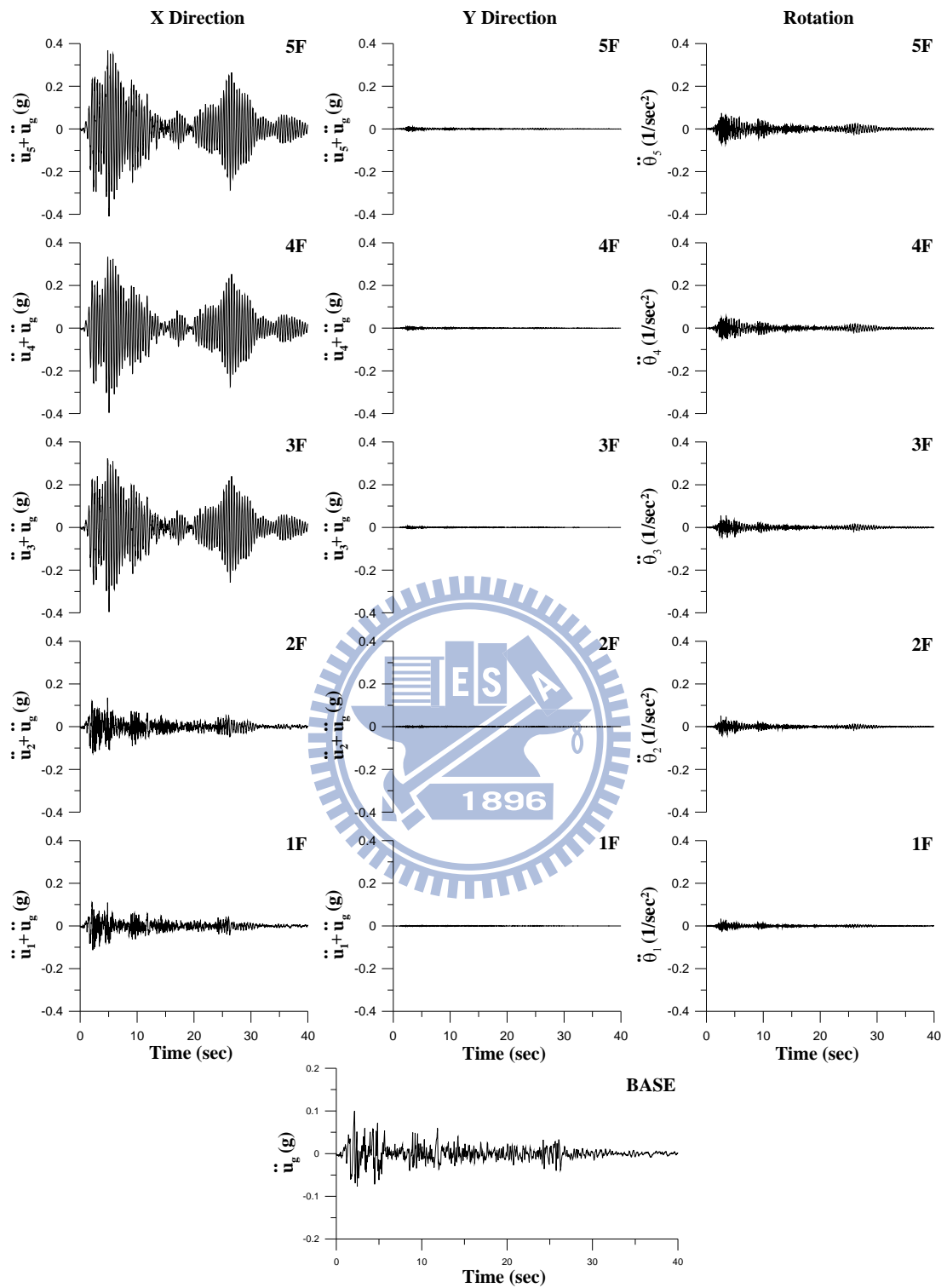


圖 4.19 三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

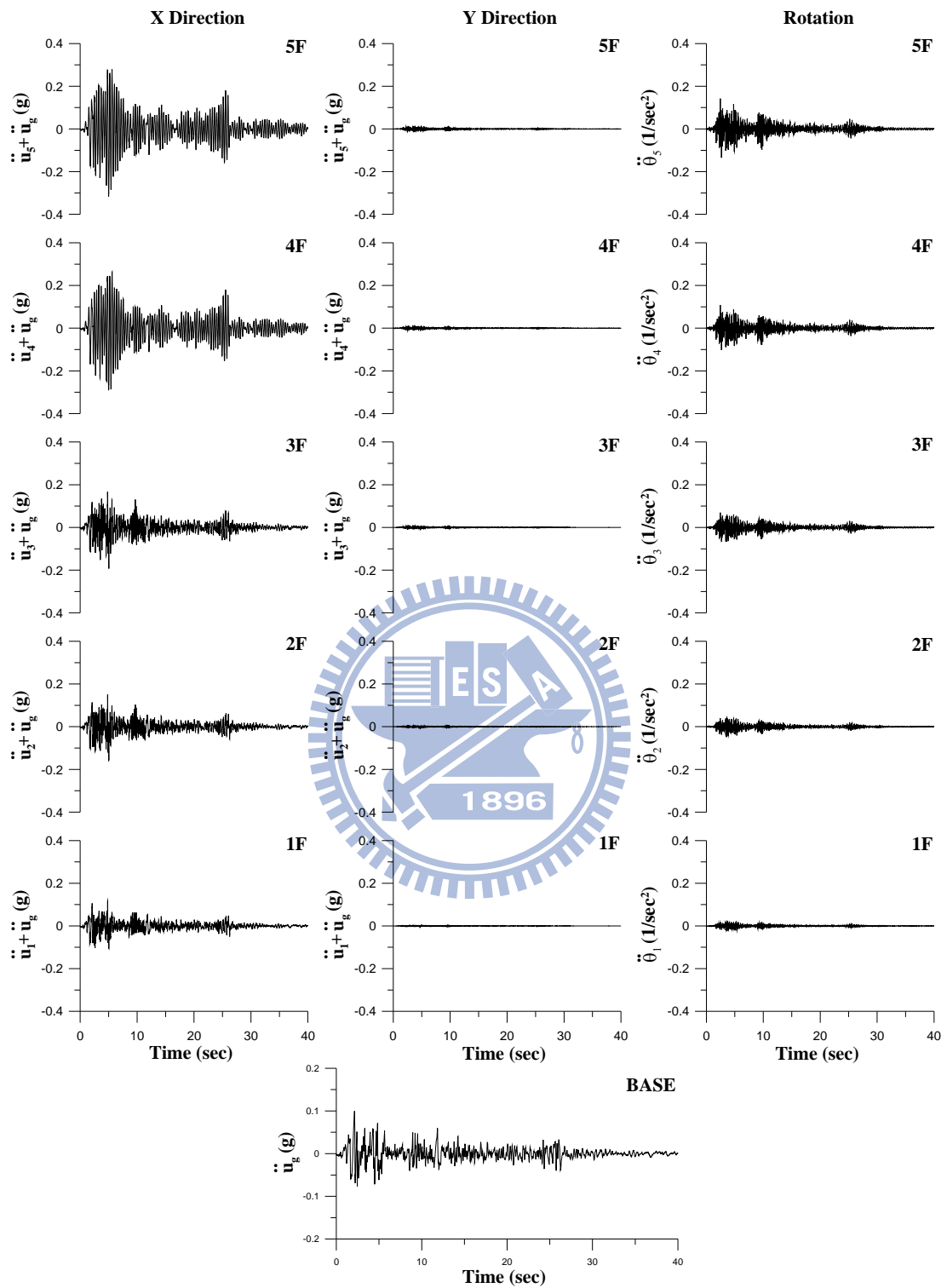


圖 4.20 四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

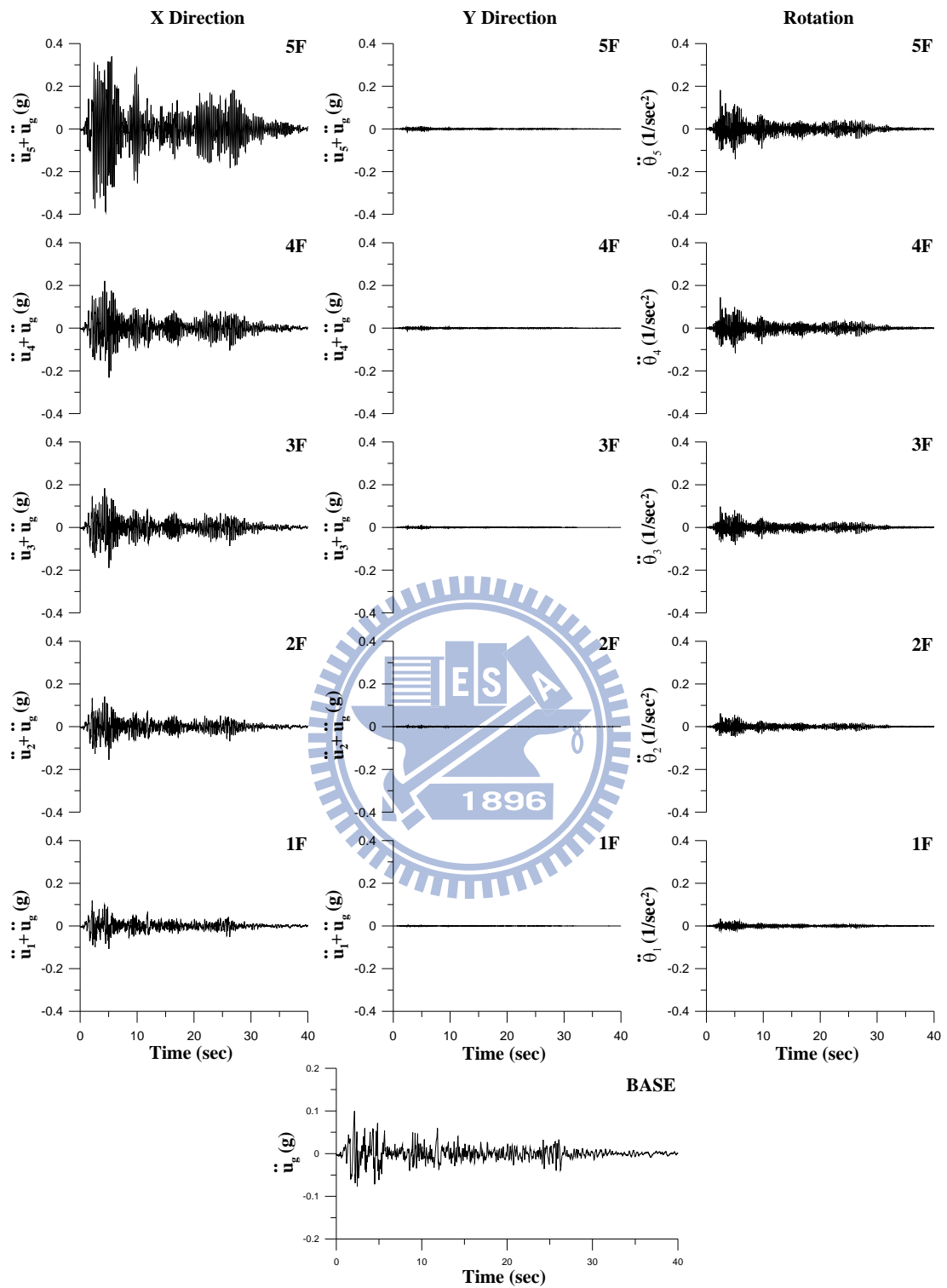


圖 4.21 五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)



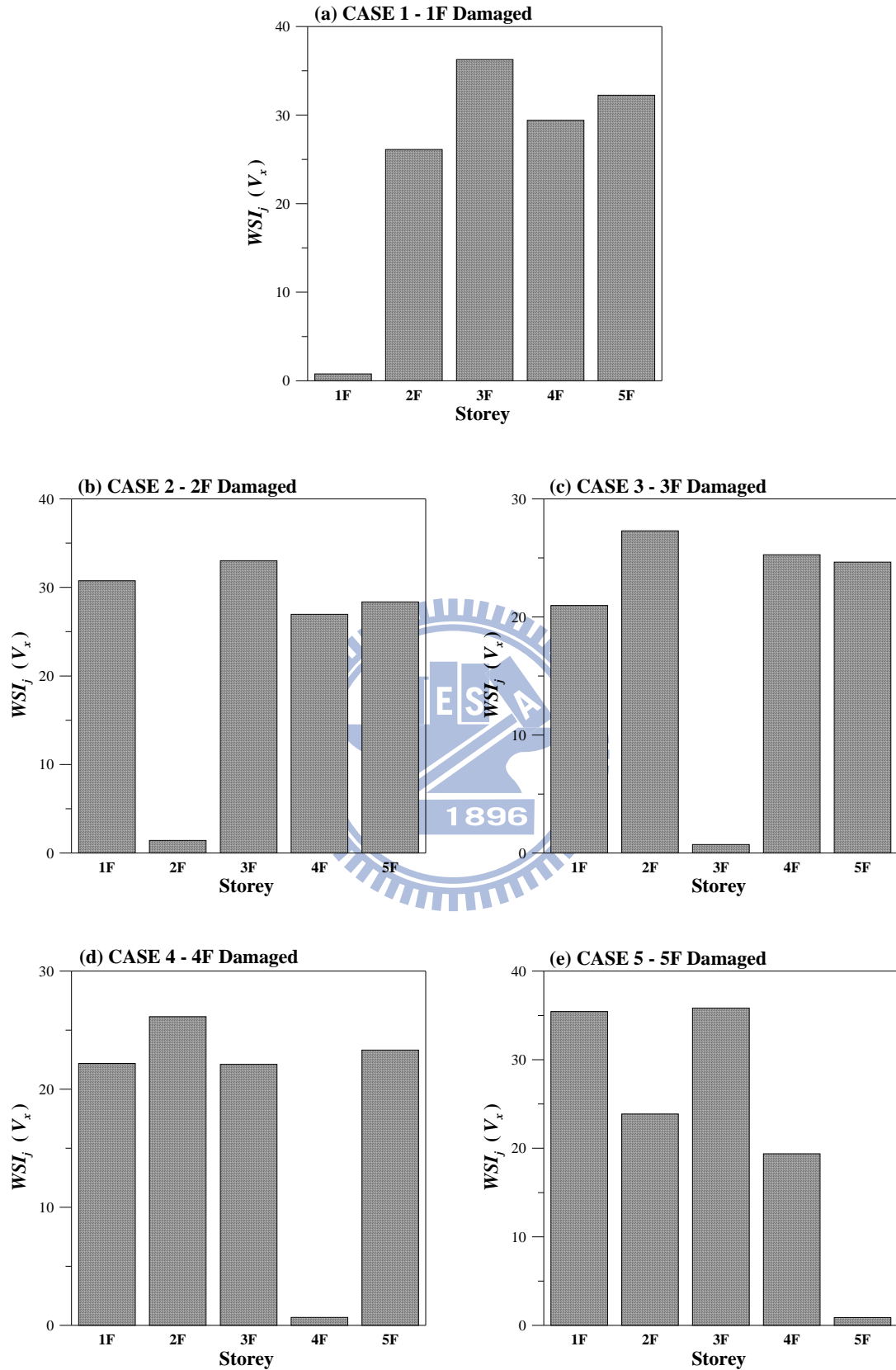


圖 4.22 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(經由  $x$  向地震反應識別； $x$  向之  $WSI_j$ )

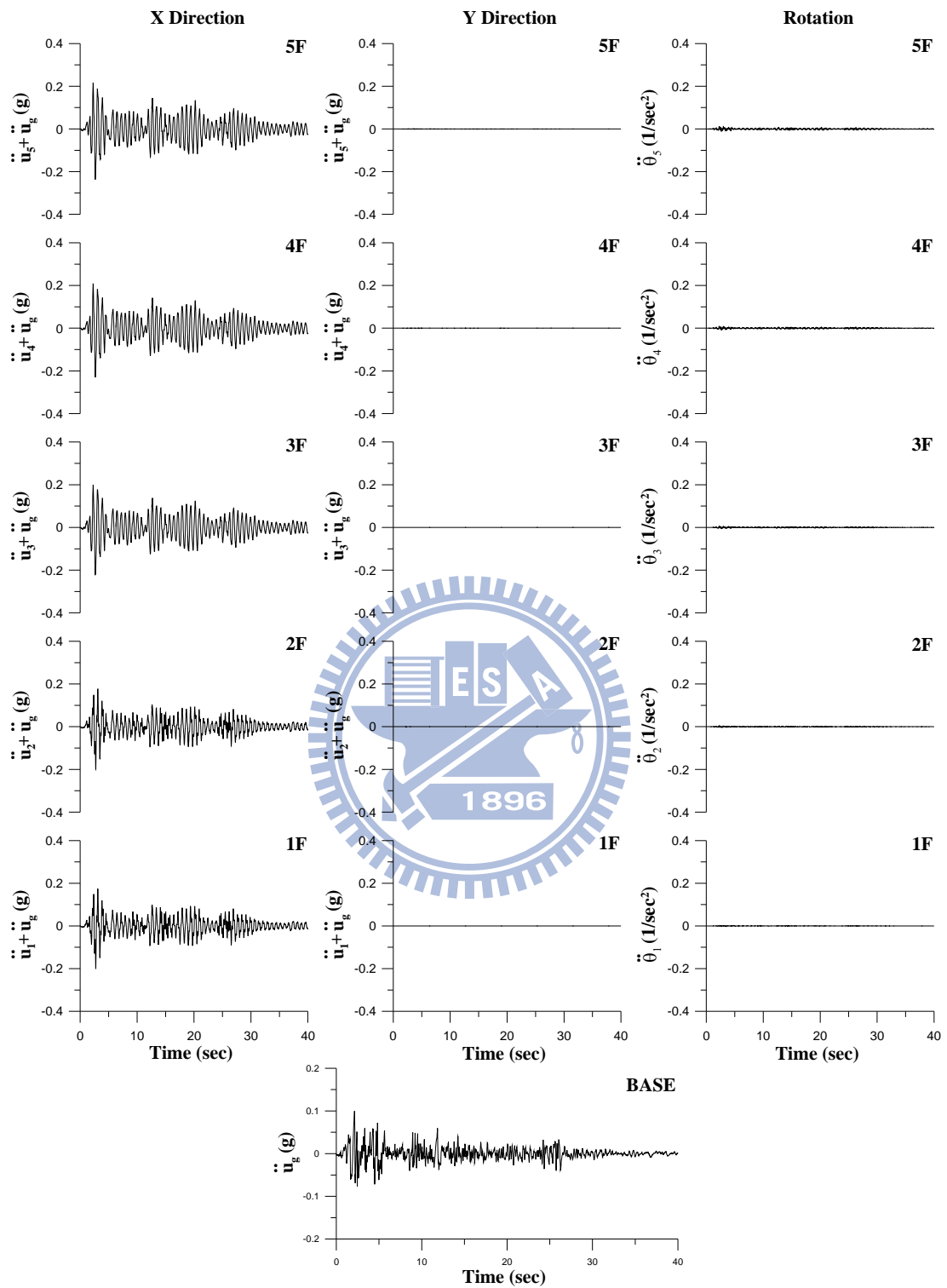


圖 4.23 一樓及三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

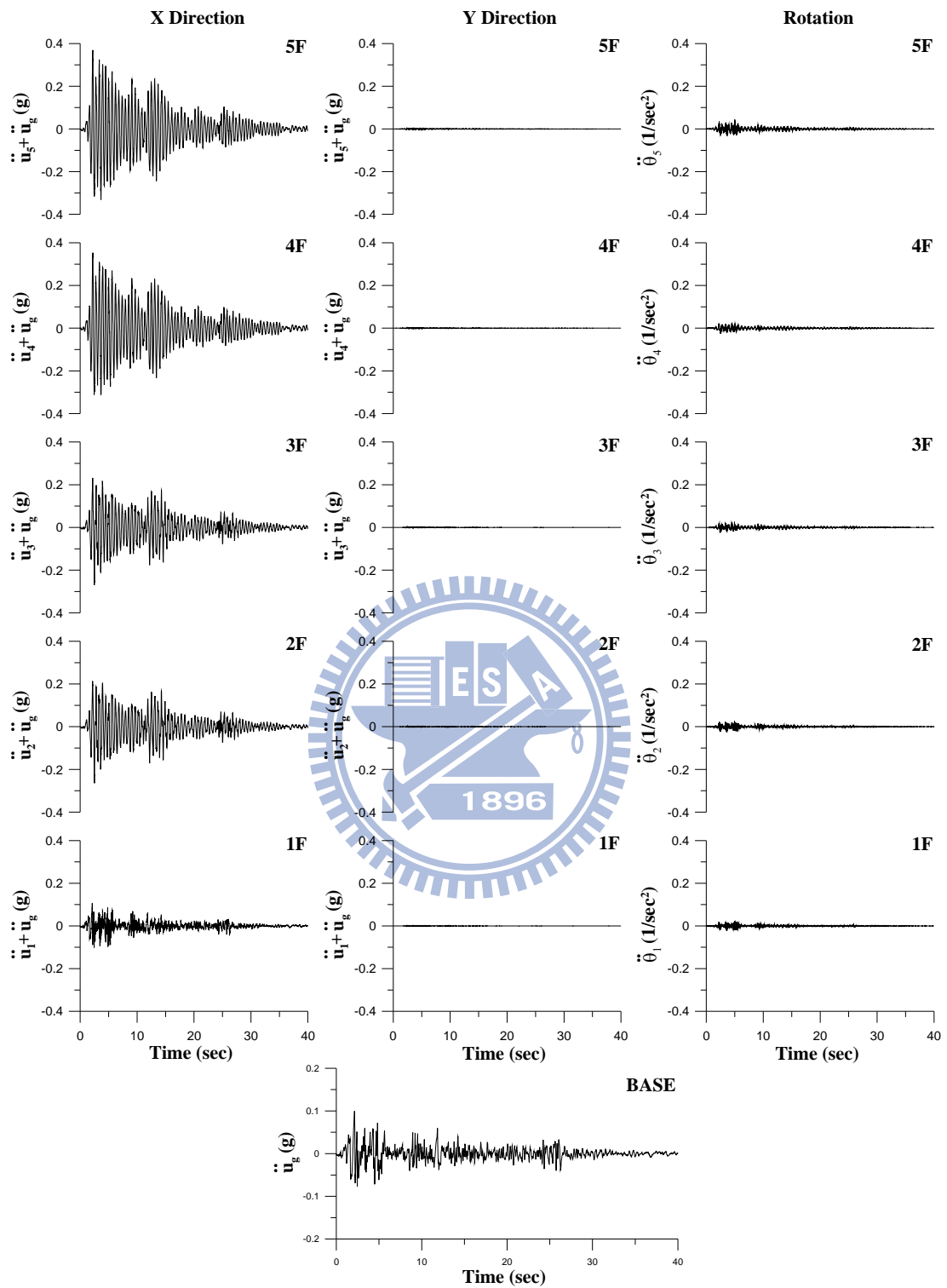


圖 4.24 二樓及四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

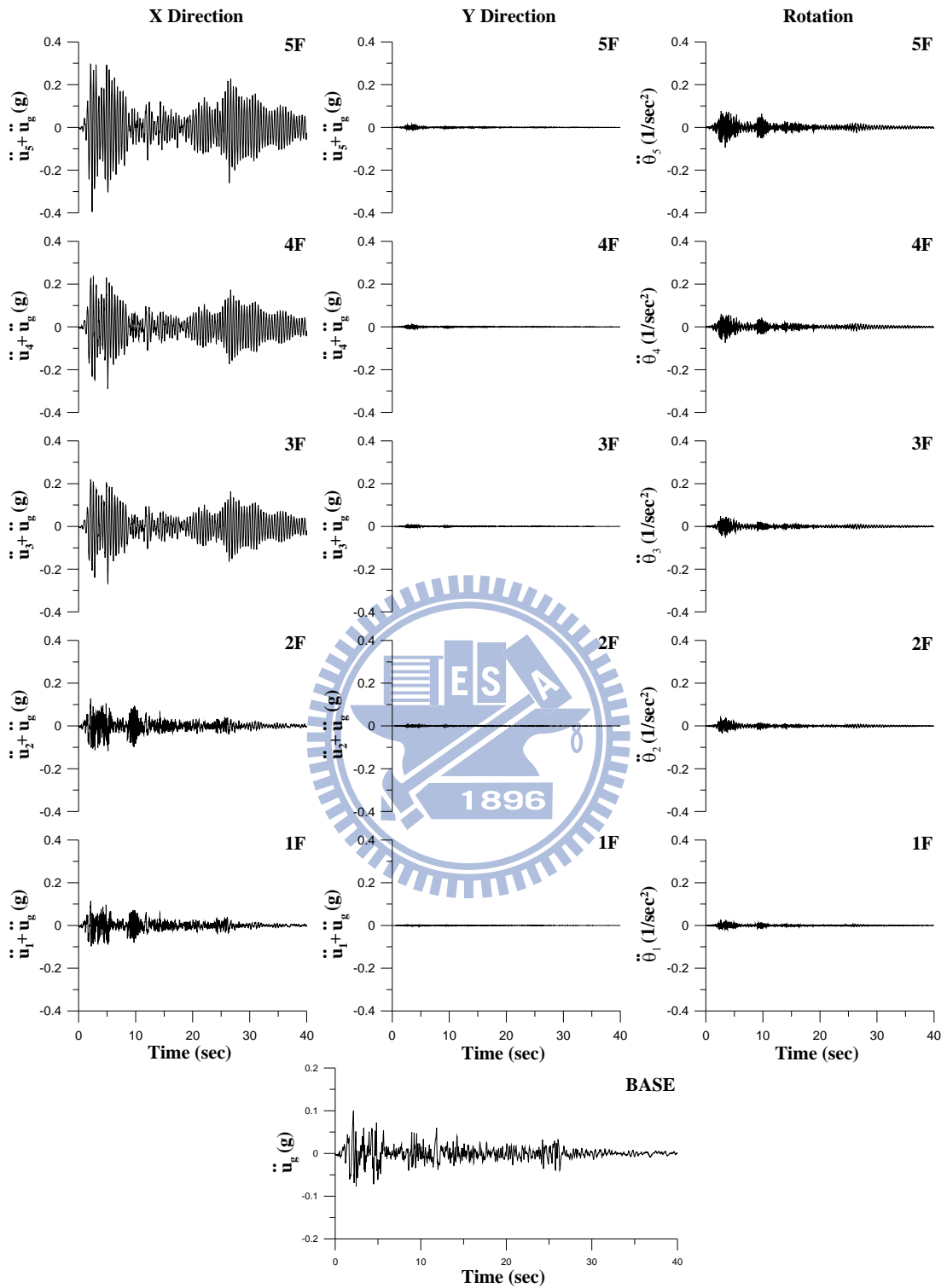


圖 4.25 三樓及五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(x 向輸入)

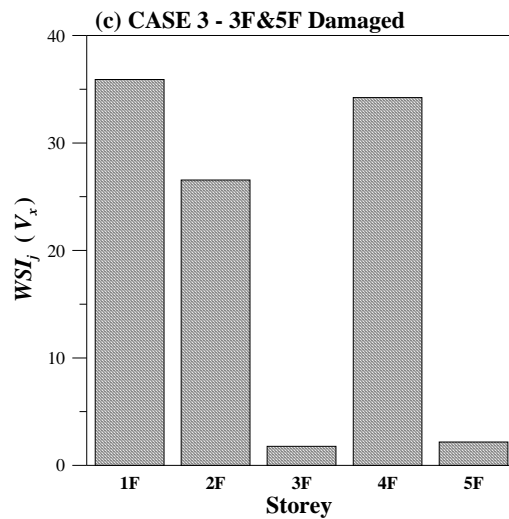
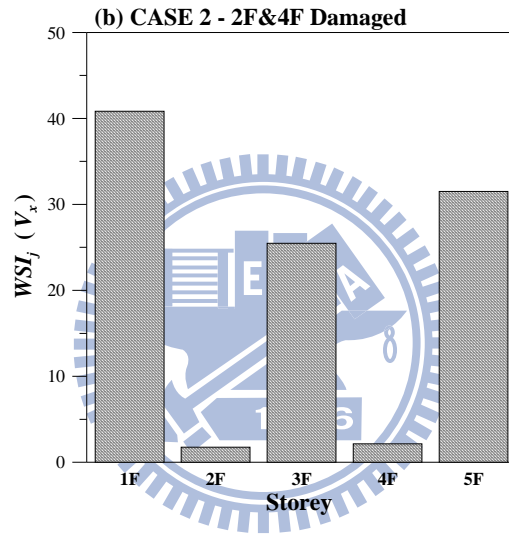
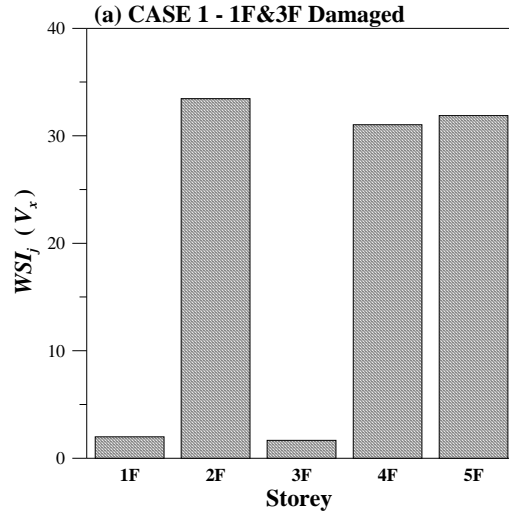


圖 4.26 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(經由  $x$  向地震反應識別； $x$  向之  $WSI_j$ )

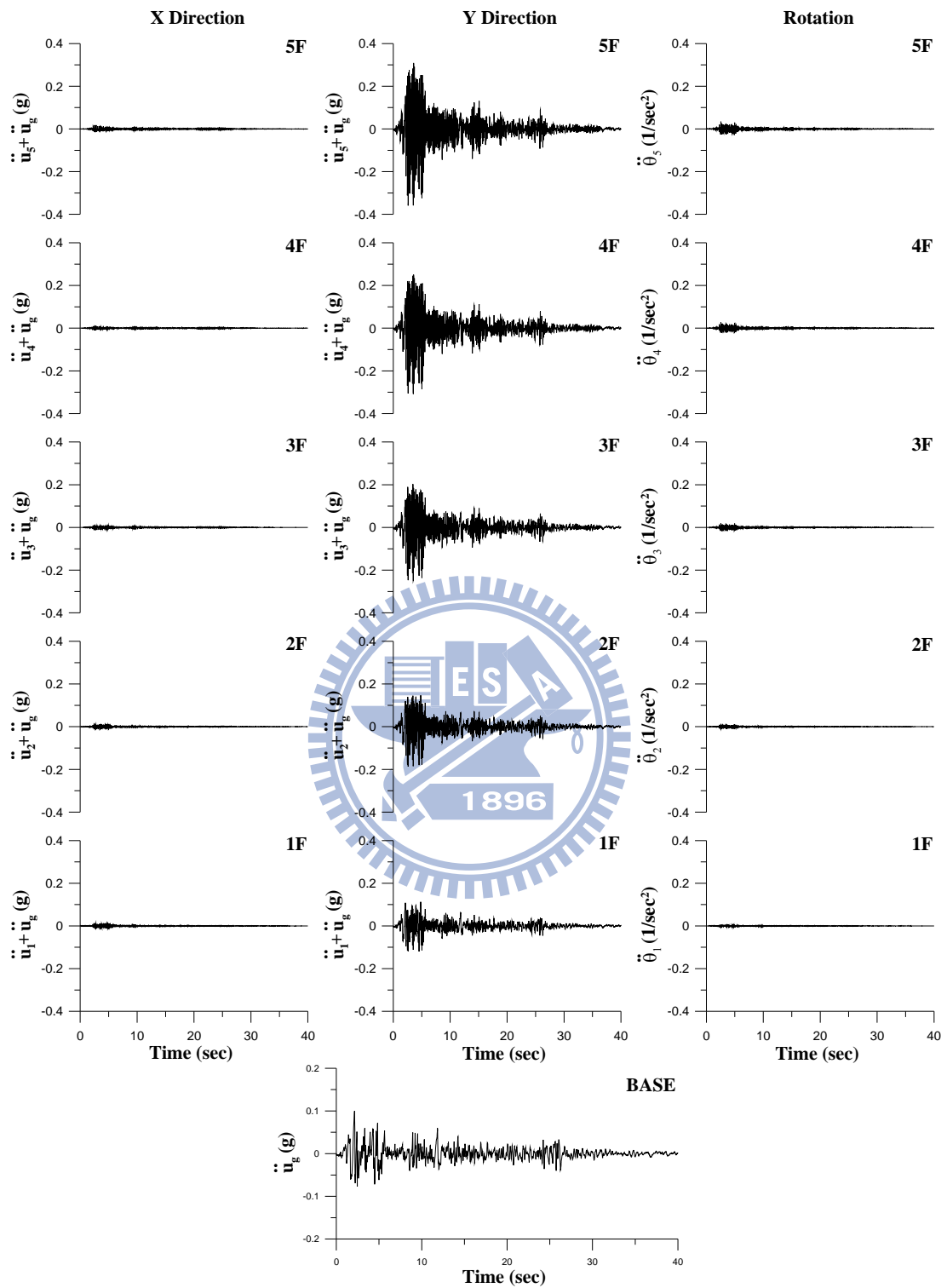


圖 4.27 健康結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

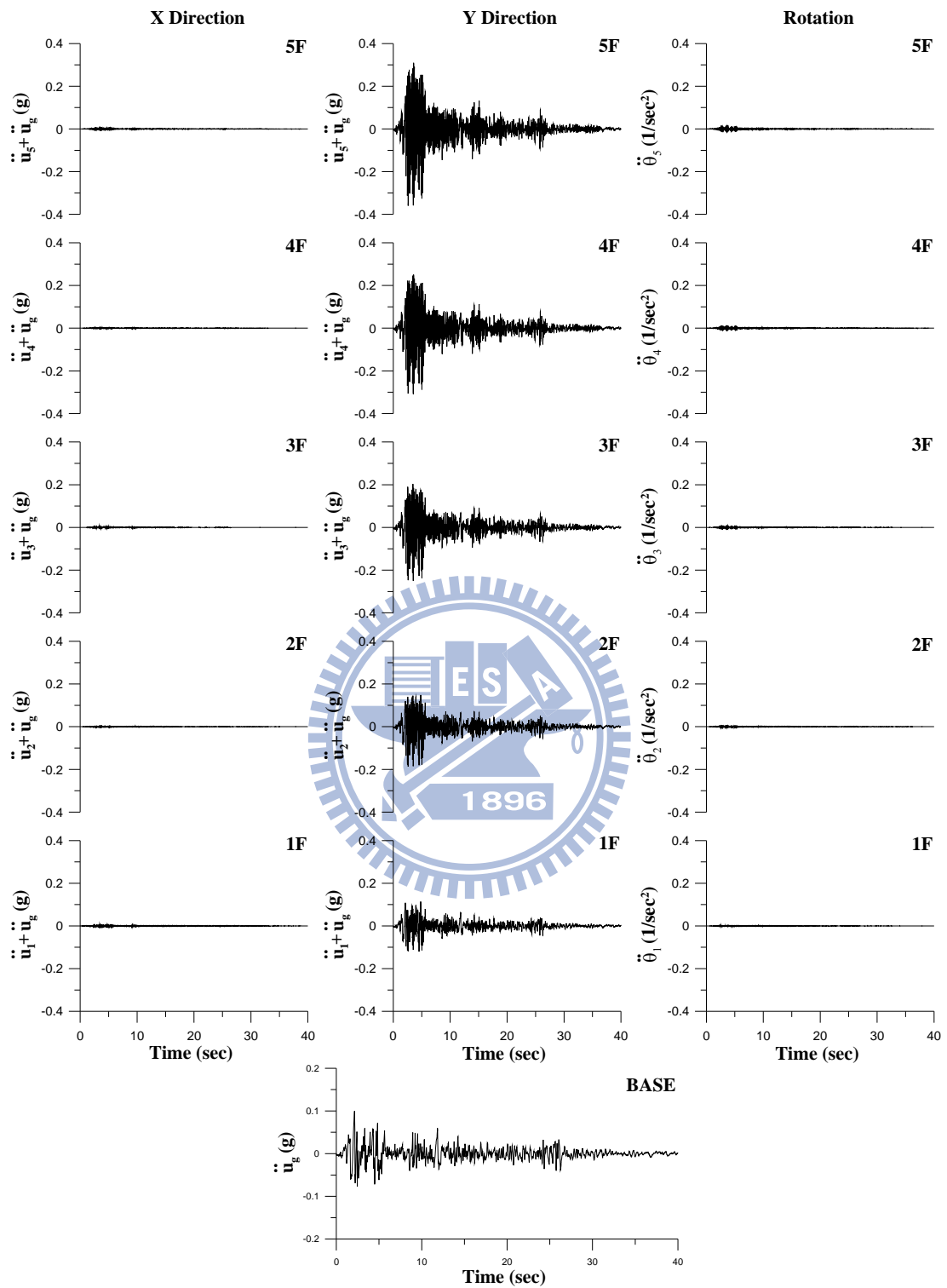


圖 4.28 一樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

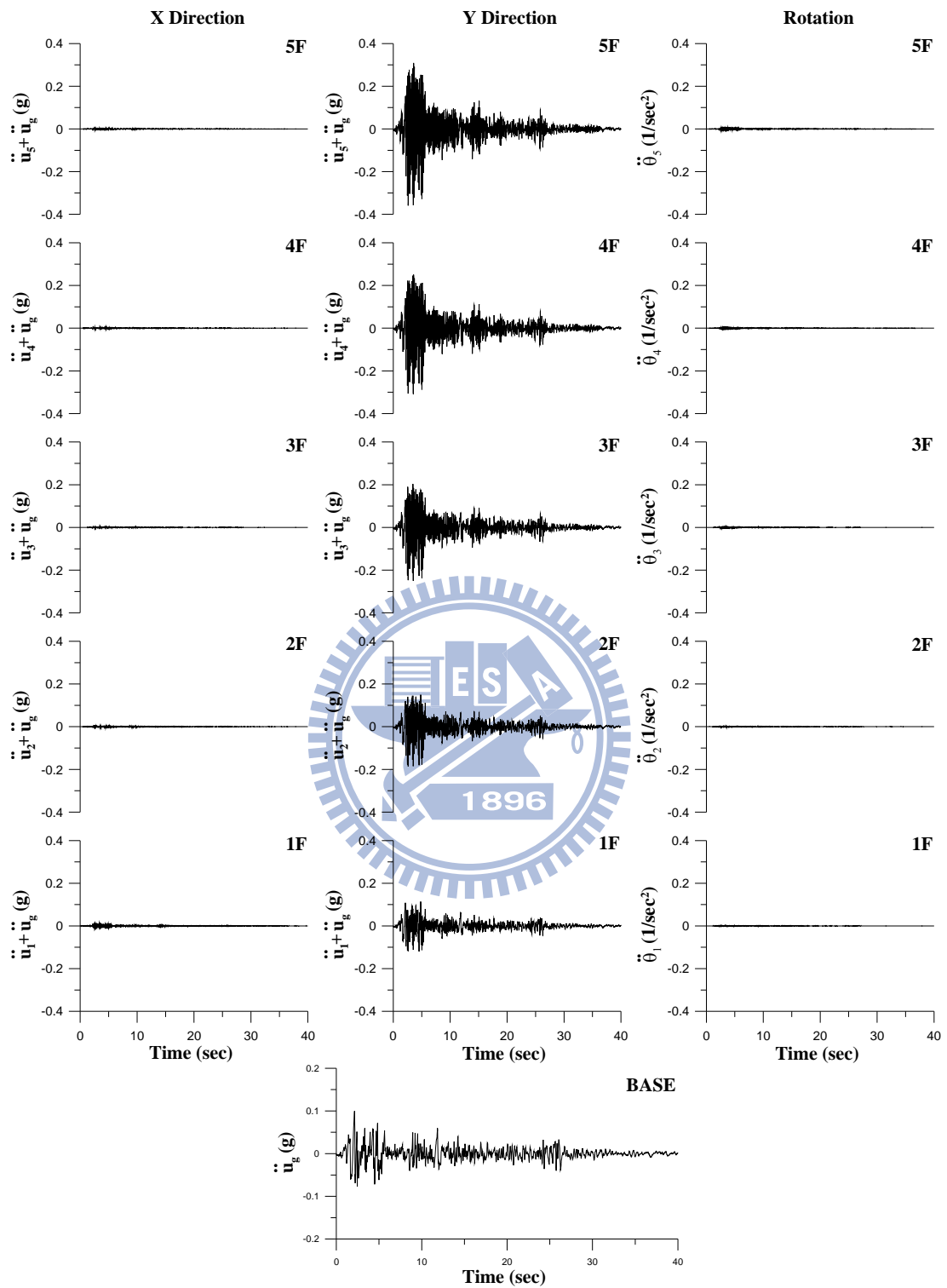


圖 4.29 二樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)



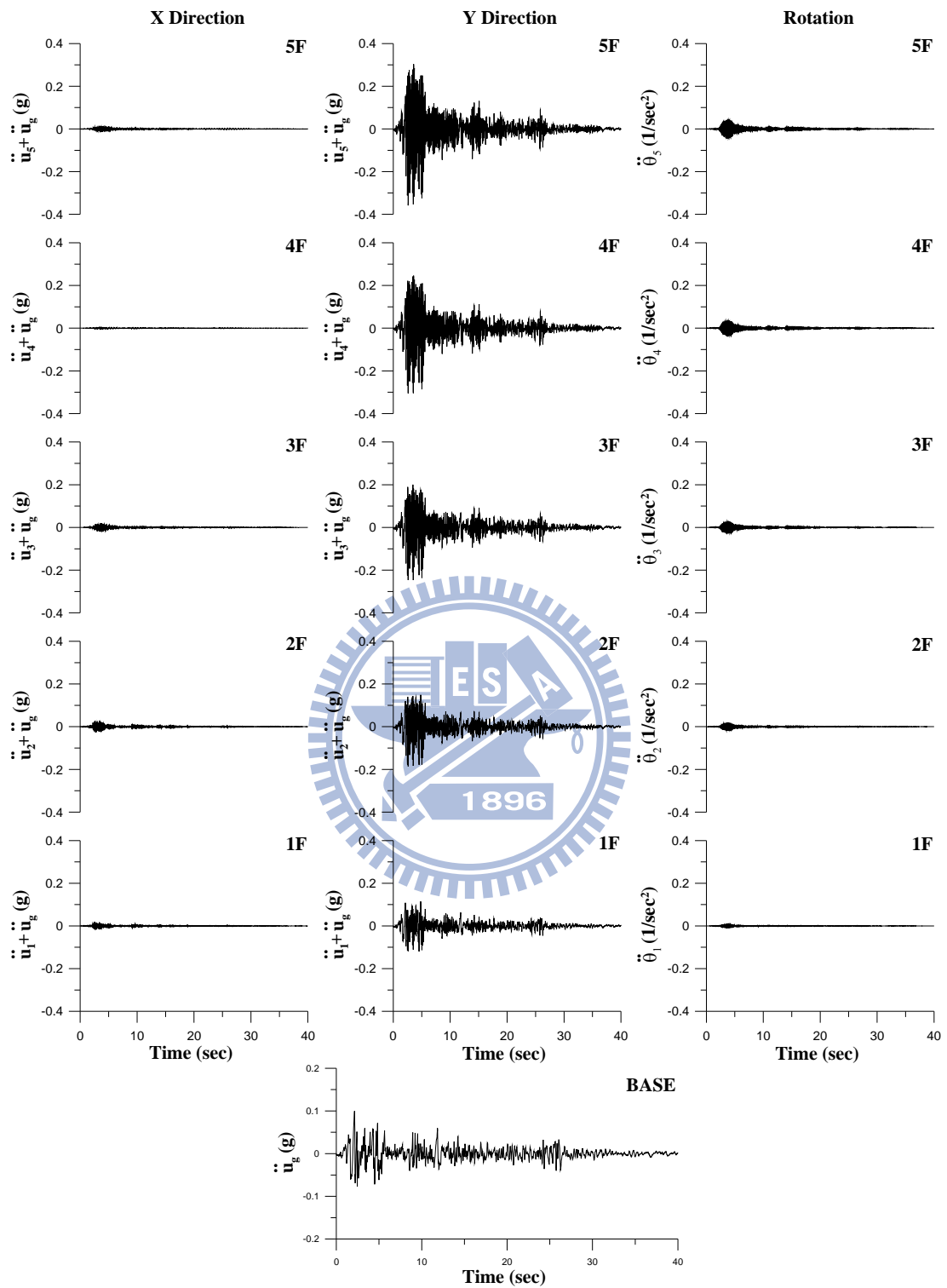


圖 4.30 三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時

(y 向輸入)

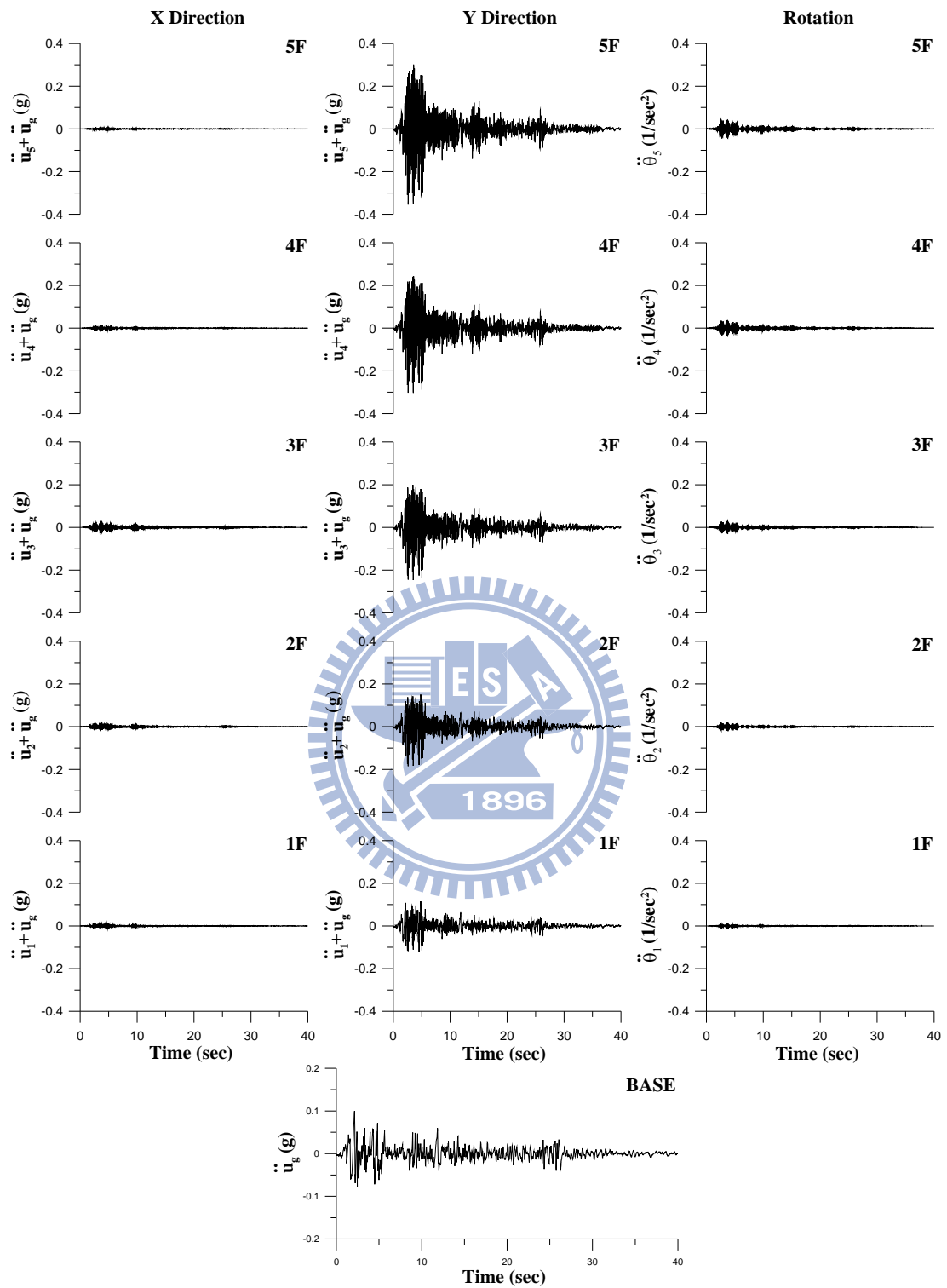


圖 4.31 四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時

(y 向輸入)

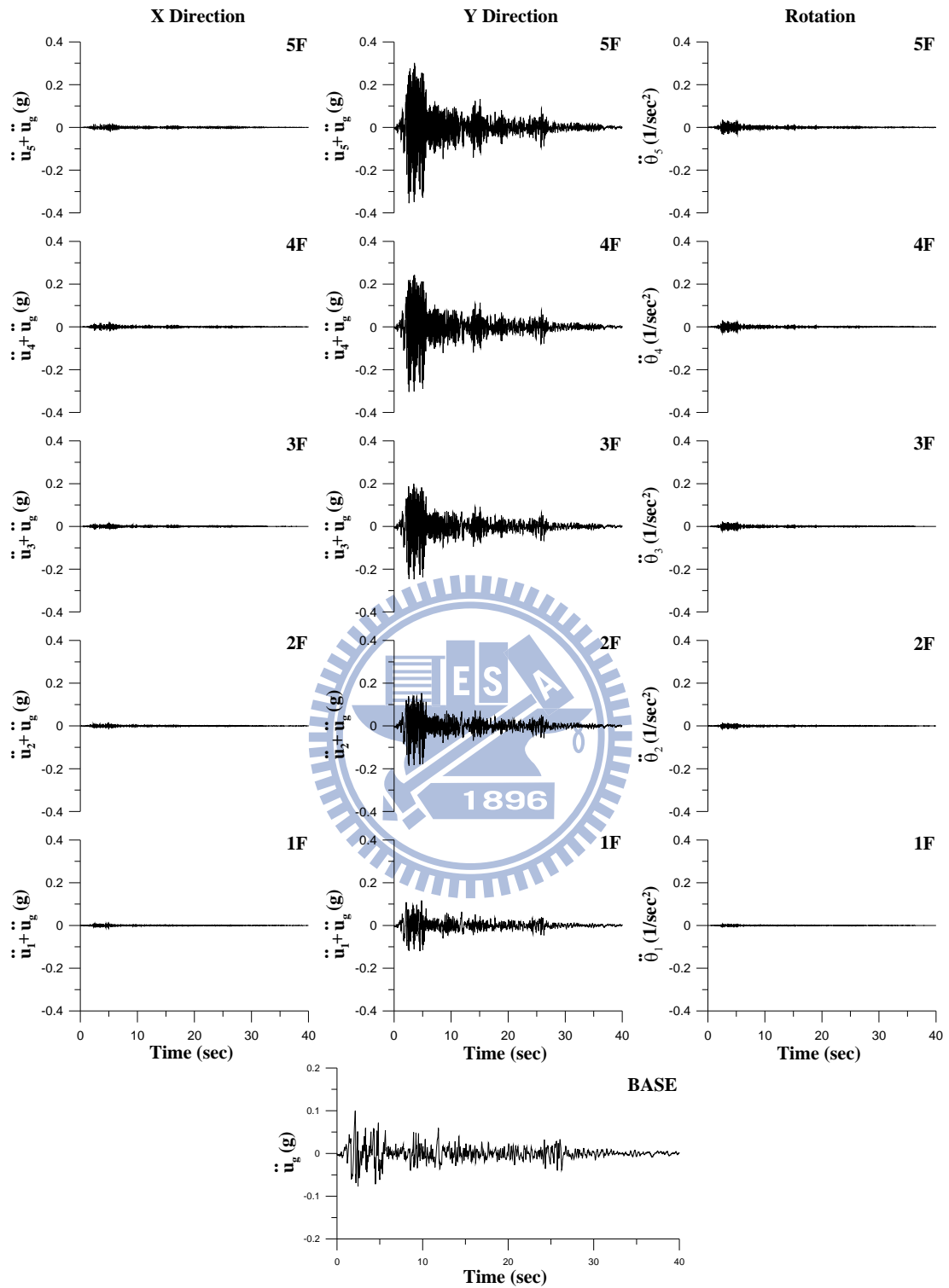


圖 4.32 五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

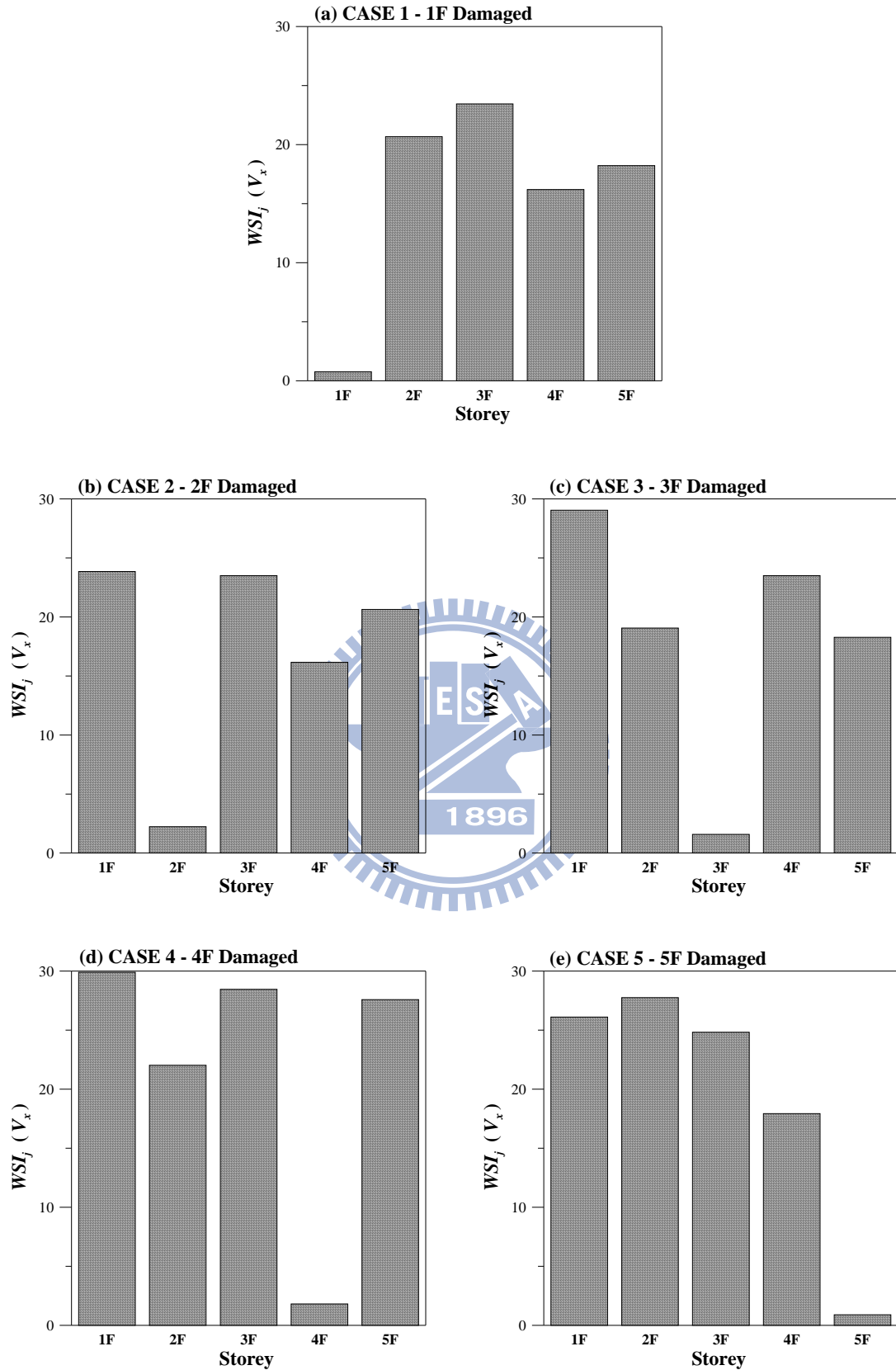


圖 4.33 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(經由  $y$  向地震反應識別； $x$  向之  $WSI_j$ )

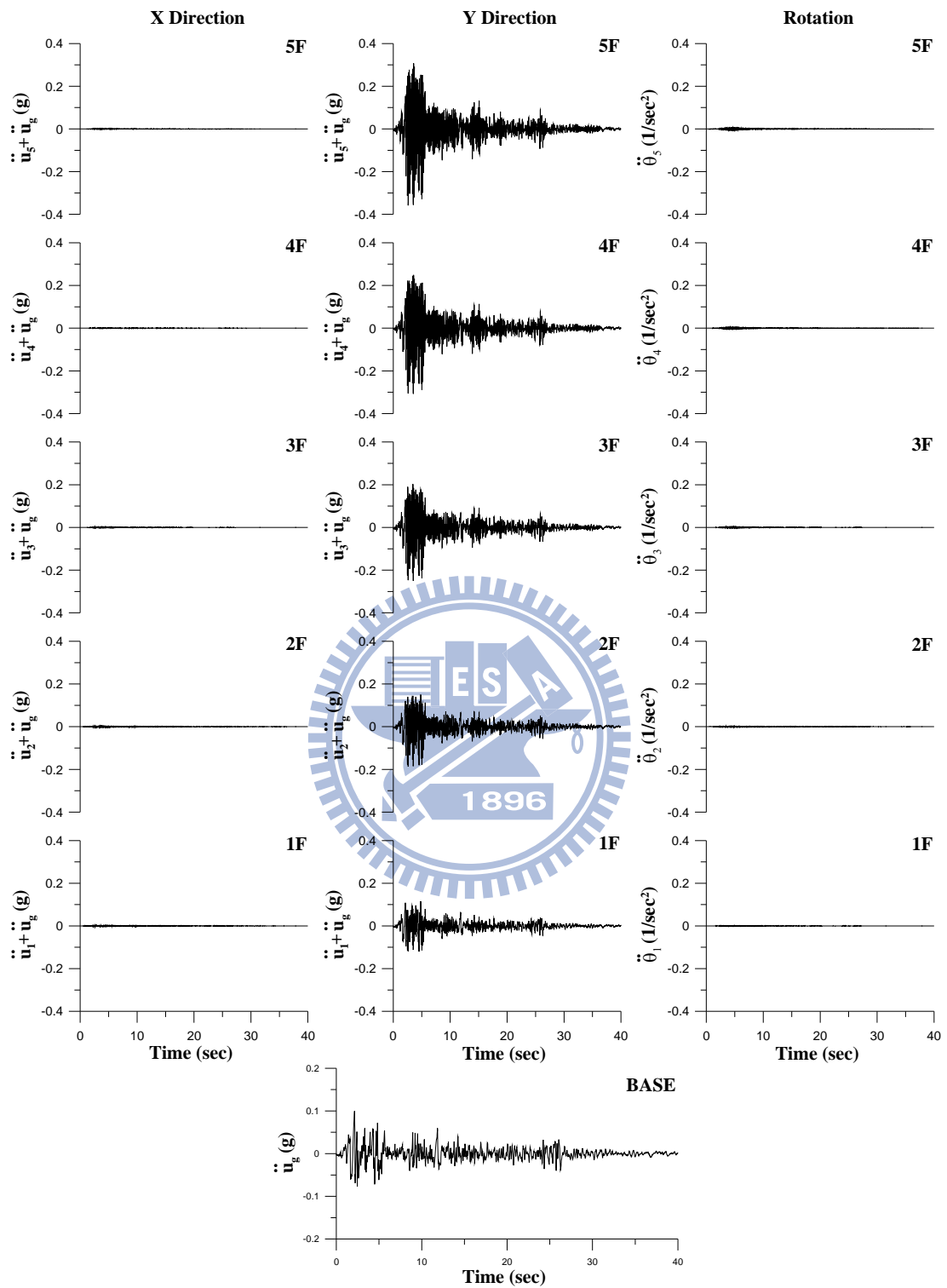


圖 4.34 一樓及三樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

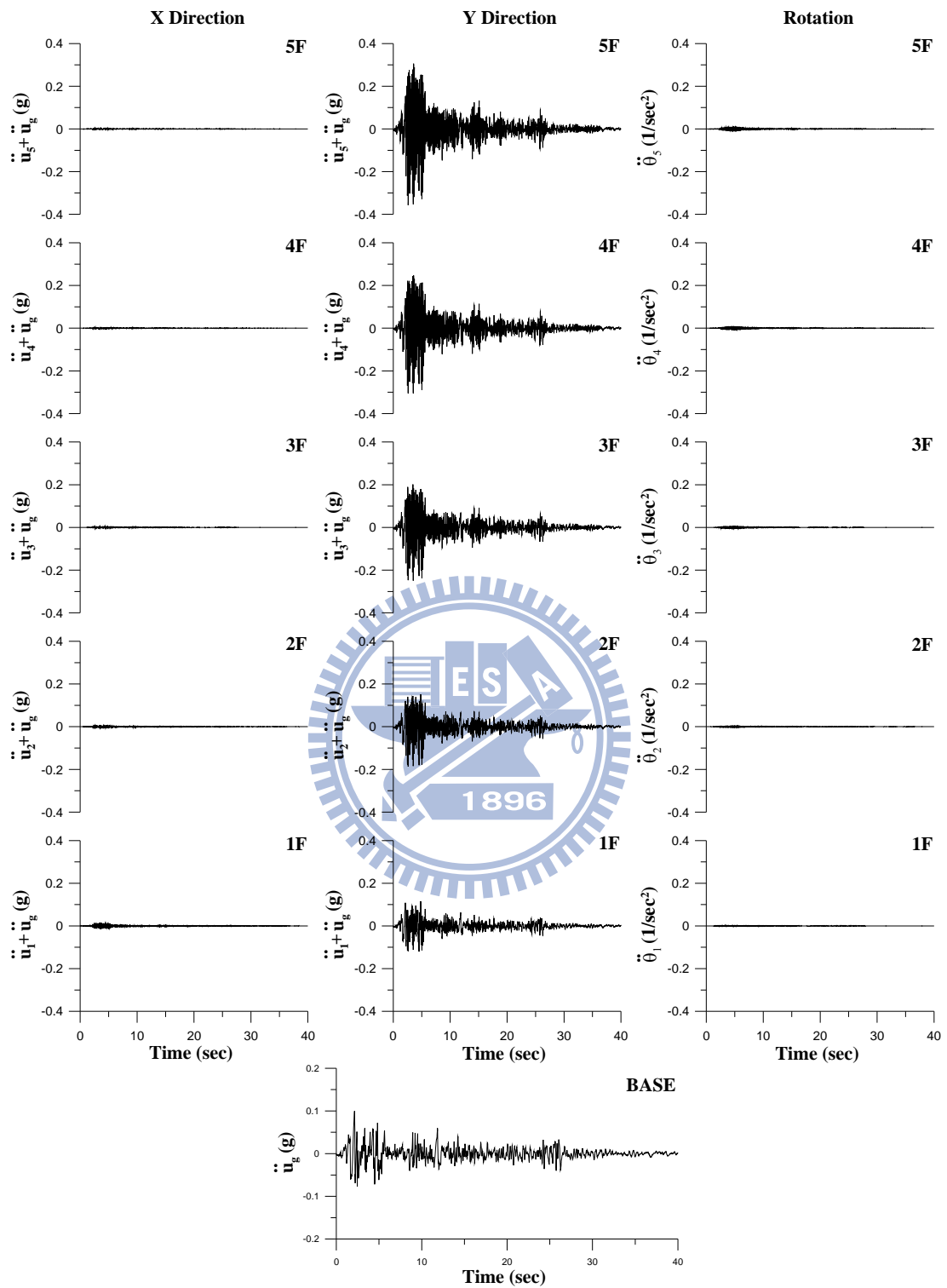


圖 4.35 二樓及四樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

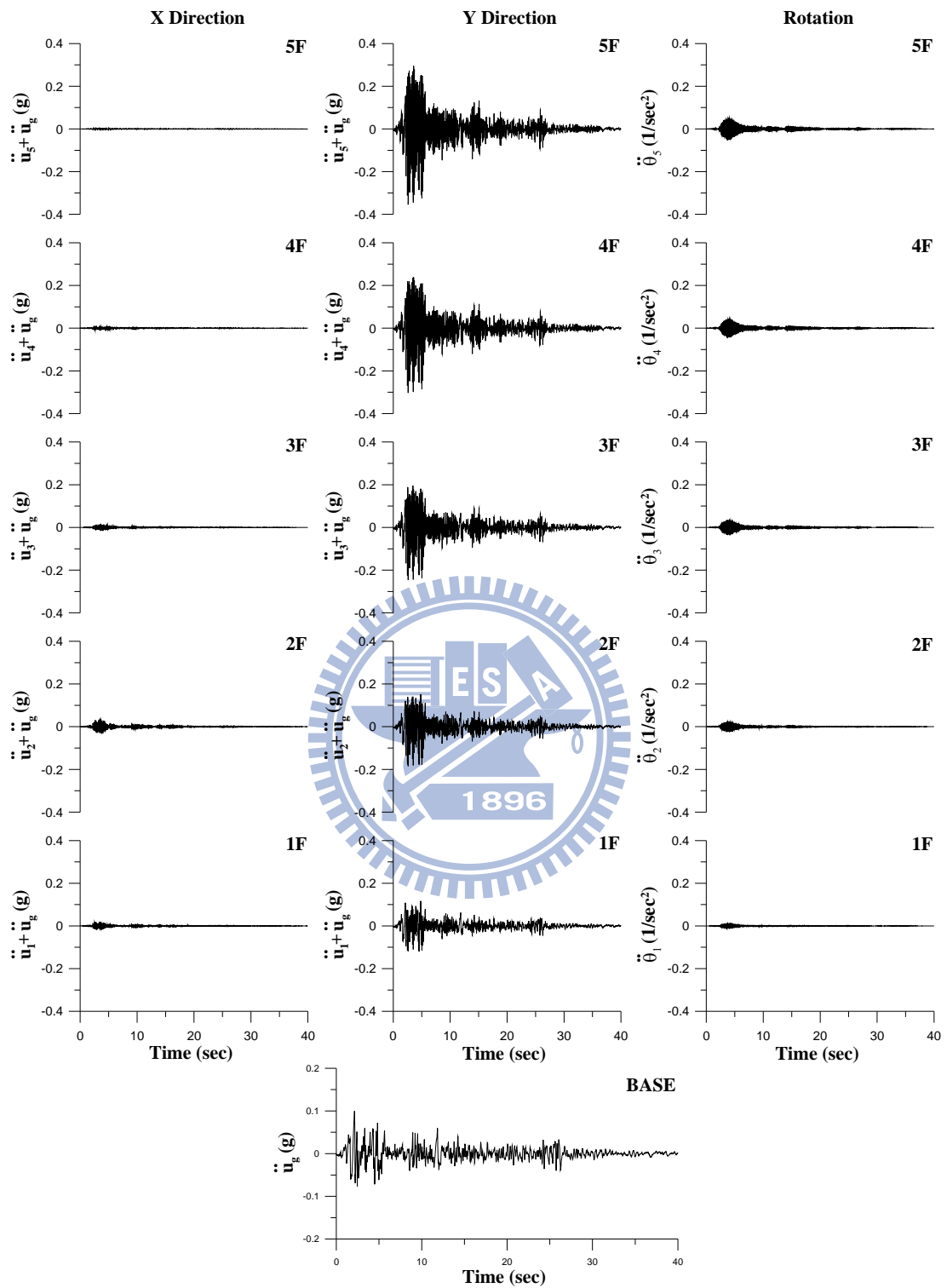


圖 4.36 三樓及五樓受損結構之各樓層質心加速度歷時  
(y 向輸入)

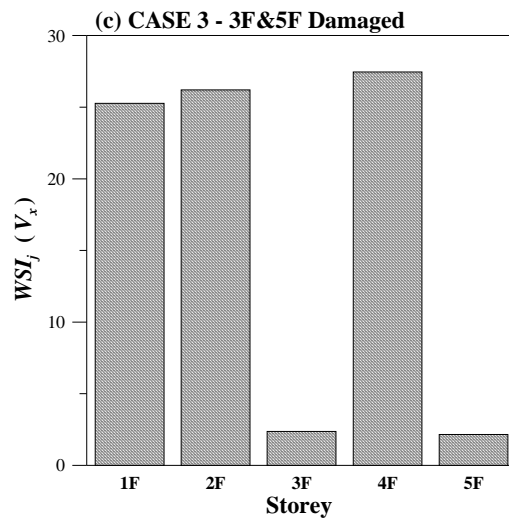
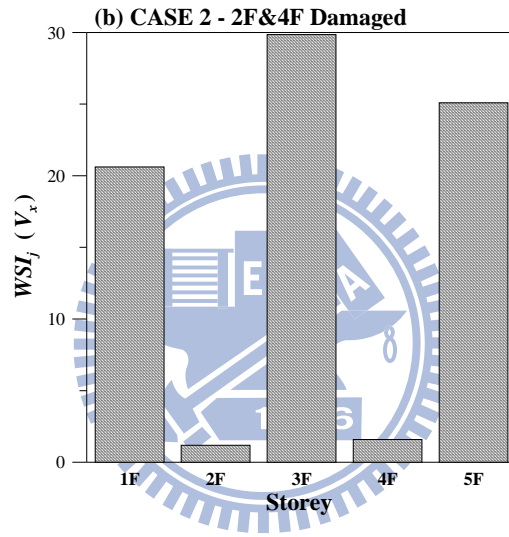
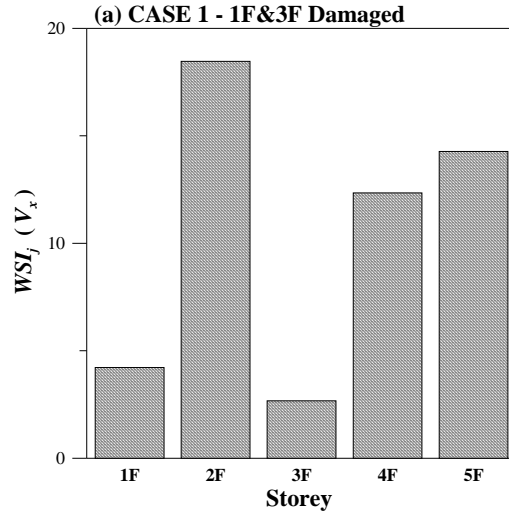


圖 4.37 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構之 DLV 分析結果

(經由  $y$  向地震反應識別； $x$  向之  $WSI_j$ )



## 第五章 扭轉耦合結構之振動台試驗與損傷探測

### 5.1 前言

為驗證 DLV 損傷探測法應用於真實扭轉耦合結構破壞偵測之可行性，本研究利用交通大學土木結構實驗室之單軸向地震模擬振動台，進行一系列扭轉耦合結構之損傷探測試驗分析。試驗對象為一座五層樓含斜撐之鋼構架，利用其中三面框架(結構弱軸單邊及強軸雙邊與弱軸雙邊及強軸單邊)配置斜撐，以構成扭轉耦合結構。結構的受損情況，以移除部分樓層斜撐代表破壞。考慮移除單一樓層斜撐及移除複數樓層斜撐兩種情況，以探討結構在單一破壞及多重破壞位置條件下之結構損傷探測分析。

本系列之研究係根據實測之結構破壞前、後地震反應，利用第二章所介紹之 SRIM 法識別出結構模態參數，進而計算結構柔度矩陣，再依第三章介紹之 DLV 損傷探測法進行破壞偵測，分析流程如圖 5.1 所示。當 DLV 法應用於三維扭轉耦合結構之損傷探測時，破壞定位向量須施加於健康結構進行應力分析。因此，本試驗結構在各種破壞狀態下求得之破壞定位向量，皆施加於對應之 ETABS 模型(圖 4.4 及圖 4.7)上，以進行後續之損傷定位。

### 5.2 試驗設備與規劃

#### 5.2.1 試驗設備

茲說明試驗所使用之相關儀器設備與配置如下：

## 1. 地震模擬振動台

交通大學地震模擬振動台之台面尺寸為 3m 見方，如圖 5.2 所示，振動台本體重為 5tf，而試體結構之最大容許重量可達 10tf。振動台係由一支油壓致動器(圖 5.3)來驅動，其將油壓動力轉化成機械動力，以驅動振動台及其承載之試體，其最大行程為  $\pm 12.5\text{cm}$ ，在滿載情況下最大加速度可達 1g。

## 2. 控制系統與資料擷取系統

控制系統為振動台之中樞所在，吾人使用 MTS407 控制器之位移控制模式操控振動台，如圖 5.4 所示。MTS407 控制器內含造波器，可提供矩形波、三角形波及正弦波等類比訊號以驅動致動器，並有一外在輸入(external input)管道可接受任意形式之隨機訊號，故得以輸入地震波以模擬地表運動。

資料擷取系統採用德國 IMC 公司之  $\mu$ -MUCIS 產品以供訊號處理之用，如圖 5.5 所示，其主要功能為輸出地震命令訊號至 MTS407 控制器以驅動振動台，同時記錄各感應計之振動訊號。資料擷取系統包含類比/數位(A/D)、數位/類比(D/A)以及數位輸入/輸出(Digital I/O)等功能，並提供 32 組單端式(Single-ended)接線法類比輸入頻道、8 組單端式接線法類比輸出頻道、32 組單端式接線法數位輸入/輸出頻道，其最大總取樣頻率(Sampling Rate)為 80kHz。

## 3. 鋼結構試驗模型

鋼結構系統模型為平面 2m 見方，樓高 6.7m，重約 6tf

之二分之一縮尺鋼骨房屋結構模型，如圖 5.6 所示，包括五層樓空構架、各樓層雙方向斜撐及模擬樓板質量之鋼板。該鋼構模型系統之參數如表 5.1 所示。本系列試驗中將以結構之弱向為測試方向，故架設結構時柱之弱軸方向係與振動台運動方向平行。

#### 4. 振動感應計

感應計之裝設以加速規(Accelerometer)為主，共安裝 16 組加速規，包括 Crossbow $\pm$ 4g 與 Crossbow $\pm$ 2g 兩種型式。加速規分別裝置於基座與各樓層東面、西面及南面構架大梁中央處(分別以 Sbase、SE1、SE2、SE3、SE4、SE5、SW1、SW2、SW3、SW4、SW5、SS1、SS2、SS3、SS4 及 SS5 表示)，其安裝位置如圖 5.7 所示。其中 SE1~SE5 及 SW1~SW5 為量測結構系統 x 向的加速度反應，SS1~SS5 為量測結構系統 y 向的加速度反應。

#### 5.2.2 試驗規劃

本系列針對五層樓鋼構架，分為弱軸單邊強軸雙邊及弱軸雙邊強軸單邊兩種形式配置斜撐形成扭轉耦合結構進行振動台試驗與損傷探測分析，其試驗規劃如下：

1. 以不同地震波輸入於健康結構與受損結構。考慮的地震波為 El Centro、Hachinohe 及 Kobe。考量受損結構較為軟弱，為避免發生嚴重損壞，輸入受損結構之 PGA 調整為 0.05g，輸入健康結構之 PGA 調整為 0.1g。

2. 以三面框架皆配置斜撐構成之扭轉耦合結構視為健康狀態，移除部分樓層弱軸向之斜撐結構代表受損狀態。
3. 考慮弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐結構的受損狀態分為單一樓層破壞與複數樓層破壞。單一樓層破壞的案例為一樓破壞、二樓破壞、三樓破壞、四樓破壞及五樓破壞。複數樓層破壞的案例為一樓及三樓破壞、二樓及四樓破壞與三樓及五樓破壞。
4. 考慮弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐結構的受損狀態分為單一樓層破壞與複數樓層破壞。單一樓層破壞的案例為一樓破壞、二樓破壞及三樓破壞。複數樓層破壞的案例為一樓及三樓破壞。

試驗步驟如下：

1. 輸入地震波於健康結構與受損結構，地震波包括 El Centro、Hachinohe 及 Kobe。
2. 擷取各樓層測點(含基礎座)加速度反應。
3. 以 SRIM 法進行結構系統識別。以基座量測之加速度訊號作為輸入資料，以各樓層測點之加速度訊號轉換至質心加速度訊號作為輸出資料，進行單一輸入-多重輸出系統識別。
4. 利用識別之模態參數建立柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。

## 5.3 振動台試驗結果與分析

### 5.3.1 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐

本節將利用五層樓鋼結構之各樓層弱軸單邊及強軸雙邊配置斜撐的扭轉耦合結構視為健康狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.1g$  輸入於結構系統，其五層樓扭轉耦合結構如圖 5.8 所示。不同地震波下，結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.9 至圖 5.11 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.2 所示。

結構的受損狀態係以移除部份樓層弱軸向之斜撐模擬，考慮單一樓層受損與複數樓層受損等條件進行結構破壞診斷分析。受損之五層樓扭轉耦合結構如圖 5.12 及圖 5.13 所示。

#### 5.3.1.1 單一樓層受損

本節將利用移除單一樓層之弱軸斜撐視為受損狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.05g$  輸入於結構系統，探討移除單一樓層斜撐情況下之損傷探測分析。

##### A. El Centro

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.14 至圖 5.18 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分

析。系統識別所得之模態參數如表 5.3 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.4 與圖 5.19。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.19(a)。一樓  $x$  向之指數為 4.88，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 26.38(多一個數量級)，相差 5 倍以上。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.19(b)。二樓  $x$  向之指數為 6.65，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均

大於 29.66(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判應於二樓發生破壞，與實際情況相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.19(c)。一樓  $x$  向之指數為 14.34，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 14.81(同一數量級)，相差僅 1.03 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處並不相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.19(d)。四樓旋轉向之指數為 9.69，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 24.48(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於四樓發生破壞，與實際情況相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.19(e)。五樓旋轉向之指數為 27.18，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 29.04(同一數量級)，相差僅 1.06 倍。研判應無破壞發生。此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

## B. Hachinohe

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.20 至圖 5.24 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.5 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.6 與圖 5.25。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.25(a)。一樓  $x$  向之指數為 8.59，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 26.75(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.25(b)。二樓  $x$  向之指數為 6.70，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 17.03(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於二樓發



生破壞，與實際情況相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.25(c)。四樓  $x$  向之指數為 14.42，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 21.92(同一數量級)，相差僅 1.52 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.25(d)。四樓旋轉向之指數為 17.60，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 26.01(同一數量級)，相差僅 1.47 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於四樓處不相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.25(e)。五樓旋轉向之指數為 14.34，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 22.32(同一數量級)，相差僅 1.55 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

### C. Kobe

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.26 至圖 5.30 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.7 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV

損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.8 與圖 5.31。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.31(a)。一樓  $x$  向之指數為 8.11，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 19.04(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.31(b)。二樓  $x$  向之指數為 9.18，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 24.36(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於二樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.31(c)。一樓  $x$  向之指數為 9.63，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.12(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.31(d)。四樓旋轉向之指數為 6.86，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 21.88(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判應於四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.31(e)。四樓旋轉向之指數為 25.40，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 26.46(同一數量級)，相差僅 1.04 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於單一樓層受損的情況，當結構於一樓或二樓受損時，可準確偵測出破壞位置。而結構於高樓層(三樓、四樓或五樓)受損時，則無法正確判別出破壞位置。

### 5.3.1.2 複數樓層受損

本節將利用移除複數樓層之弱軸斜撐視為受損狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.05g$

輸入於結構系統，探討移除複數樓層斜撐情況下之損傷探測分析。

### A. El Centro

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.32 至圖 5.34 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.9 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.10 與圖 5.35。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.35(a)。一樓  $x$  向之指數為 10.48，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 19.76(同一數量級)，相差僅 1.88 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.35(b)。二樓  $x$  向之指數為 8.97，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 21.67(多一個數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 11.89，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 19.23(同一數量級)，相差僅 1.61 倍。研判應於二樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於二樓及四樓處不相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.35(c)。三樓  $x$  向之指數為 23.50，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 27.80(同一數量級)，相差僅 1.18 倍。二樓旋轉向之指數為 24.68，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 25.46(同一數量級)，相差僅 1.03 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

## B. Hachinohe

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.36 至圖 5.38 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.11 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.12 與圖 5.39。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.39(a)。一樓  $x$  向之指數為 12.36，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.91(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.39(b)。二樓  $x$  向之指數為 10.47，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 21.16(同一數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 7.91，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 20.94(多一個數量級)，相差 2 倍以上。研判應於二樓及四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.39(c)。一樓  $x$  向之指數為 7.52，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 19.50(多一個數量級)，相差 2 倍以上。五樓旋轉向之指數為 16.38，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 21.02(同一數量

級)，相差僅 1.28 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

### C. Kobe

以  $PGA=0.05g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.40 至圖 5.42 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.13 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.14 與圖 5.43。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.43(a)。一樓  $x$  向之指數為 10.52，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 22.97(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.43(b)。一樓  $x$  向之指數為 9.58，二樓  $x$  向之指數為 11.67，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 31.08(未明顯差一個數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 19.71，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 30.03(同一數量級)，相差僅 1.52 倍。研判應於一樓及二樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於二樓及四樓處不相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.43(c)。一樓  $x$  向之指數為 15.88，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 31.59(同一數量級)，相差 1.98 倍以上。五樓旋轉向之指數為 15.61，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 21.63(同一數量級)，相差僅 1.38 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於複數樓層受損的情況，當結構於一樓或二樓有受損時，可準確偵測出破壞位置，但無法同時偵測結構於高樓層(三樓、四樓或五樓)有受損的狀態。

### 5.3.2 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐

本節將利用五層樓鋼結構之各樓層弱軸雙邊及強軸單邊配置斜撐的扭轉耦合結構視為健康狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.1g$  輸入於結構系統，



其五層樓扭轉耦合結構如圖 5.44 所示。不同地震波下，結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.45 至圖 5.47 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.15 所示。

結構的受損狀態係以移除部份樓層弱軸向之雙邊斜撐模擬，考慮單一樓層受損與複數樓層受損等條件進行結構破壞診斷分析。受損之五層樓扭轉耦合結構如圖 5.48 及圖 5.49 所示。

### 5.3.2.1 單一樓層受損

本節將利用移除單一樓層之弱軸雙邊斜撐視為受損狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.1g$  輸入於結構系統，探討移除單一樓層斜撐情況下之損傷探測分析。

#### A. El Centro

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.50 至圖 5.52 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.16 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.17 與圖 5.53。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.53(a)。一樓  $x$  向之指數為 18.94，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.30(同一數量級)，相差僅 1.33 倍。一樓旋轉向之指數為 13.55，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 25.40(同一數量級)，相差僅 1.87 倍。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.53(b)。一樓  $x$  向之指數為 19.97，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 27.41(同一數量級)，相差僅 1.37 倍。一樓旋轉向之指數為 21.85，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 24.97(同一數量級)，相差僅 1.14 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於二樓處並不相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.53(c)。二樓  $x$  向之指數為 25.26，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均

大於 25.42(同一數量級)，相差僅 1.00 倍。四樓旋轉向之指數為 25.39，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 26.96(同一數量級)，相差僅 1.06 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處並不相符。

## B. Hachinohe

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.54 至圖 5.56 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.18 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.19 與圖 5.57。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.57(a)。一樓  $x$  向之指數為 8.22，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均

大於 17.85(多一個數量級)，相差 2 倍以上。一樓旋轉向之指數為 21.87，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 26.79(同一數量級)，相差僅 1.22 倍。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

#### CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.57(b)。一樓  $x$  向之指數為 21.32，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 30.30(同一數量級)，相差僅 1.42 倍。三樓旋轉向之指數為 24.24，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 27.44(同一數量級)，相差僅 1.13 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於二樓處並不相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.57(c)。一樓  $x$  向之指數為 24.44，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 25.39(同一數量級)，相差僅 1.03 倍。二樓旋轉向之指數為 23.13，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 23.91(同一數量級)，相差僅 1.03 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

### C. Kobe

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.58 至圖 5.60 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.20 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.21 與圖 5.61。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.61(a)。一樓  $x$  向之指數為 13.39，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 33.77(同一數量級)，相差 2 倍以上。一樓旋轉向之指數為 17.45，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 24.67(同一數量級)，相差僅 1.41 倍。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.61(b)。一樓  $x$  向之指數為 28.21，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 28.74(同一數量級)，相差僅 1.01 倍。二樓旋轉向之指數為 27.18，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 28.89(同一數量級)，相差僅 1.06 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實

際破壞位置於二樓處不相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.61(c)。二樓  $x$  向之指數為 26.70，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 27.56(同一數量級)，相差僅 1.03 倍。二樓旋轉向之指數為 30.41，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 32.09(同一數量級)，相差僅 1.05 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於單一樓層受損的情況，當結構於一樓受損時，可準確偵測出破壞位置。而結構於二樓或三樓受損時，則無法正確判別出破壞位置。

### 5.3.2.2 複數樓層受損

本節將利用移除複數樓層之弱軸雙邊斜撐視為受損狀態，考慮 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震波，以  $PGA=0.1g$  輸入於結構系統，探討移除複數樓層斜撐情況下之損傷探測分析。

#### A. El Centro

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.62 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.22 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.23 與圖 5.63。以下將針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.63。一樓  $x$  向之指數為 12.86，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 22.68(同一數量級)，相差僅 1.76 倍。一樓旋轉向之指數為 16.10，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 20.57(同一數量級)，相差僅 1.27 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

## B. Hachinohe

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.64 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.24 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.25 與圖 5.65。以下將針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.65。一樓  $x$  向之指數為 5.78，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 22.69(多一個數量級)，相差 3 倍以上。一樓旋轉向之指數為 11.85，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 21.72(同一數量級)，相差僅 1.83 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

### C. Kobe

以  $PGA=0.1g$  之地震波輸入於受損結構系統。結構之各樓層質心加速度反應如圖 5.66 所示。以各樓層質心加速度反應為輸出，基座加速度反應為輸入進行系統識別分析。系統識別所得之模態參數如表 5.26 所示。

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.27 與圖 5.67。以下將針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖



5.67。一樓  $x$  向之指數為 13.14，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 29.03(同一數量級)，相差 2 倍以上。一樓旋轉向之指數為 23.82，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 27.74(同一數量級)，相差僅 1.16 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於複數樓層受損的情況，當結構於一樓有受損時，可準確偵測出破壞位置，但無法同時偵測結構於三樓有受損的狀態。

#### 5.4 狀態空間 DLV 損傷探測法之應用

利用模態參數為基礎建立柔度矩陣的 DLV 法，是在知道質量矩陣的前提下進行損傷探測分析。然而真實結構之質量矩陣無法確切掌握，使得質量矩陣的誤差可能造成試驗分析結果的不準確。

Bernal【22】於 2006 提出新的 DLV 法，在狀態空間系統建立柔度矩陣，仍以柔度矩陣之變化為基礎，發展出改良式的破壞定位向量法，簡稱狀態空間 DLV 法。此方法利用狀態系統之參數，可由第二章所介紹的 SRIM 系統識別求得，且毋須假設質量矩陣。有鑑於此，本節將利用此法針對試驗結果進行損傷探測分析。其理論之推導詳附錄 B。

本節考慮前節弱軸單邊強軸雙邊及弱軸雙邊強軸單邊兩種形式配置斜撐的扭轉耦合結構，分為單一樓層受損與複數樓層受損等條件，在不同地震波下，經識別求得之參數建立

柔度矩陣，以狀態空間 DLV 法進行損傷探測分析。

### 5.4.1 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐

#### 5.4.1.1 單一樓層受損

##### A. El Centro

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.28 與圖 5.68。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.68(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.43，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.89(多一個數量級)，相差 6 倍以上。研判應於一樓發

生破壞，與實際情況相符。

#### CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.68(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.75，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.11(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判應於二樓發生破壞，與實際情況相符。

#### CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.68(c)。五樓  $x$  向之指數為 2.89，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.33(同一數量級)，相差僅 1.15 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處並不相符。

#### CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.68(d)。四樓旋轉向之指數為 1.35，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.53(同一數量級)，相差僅 1.87 倍。研判應於四樓發生破壞，與實際情況相符。

#### CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.68(e)。五樓旋轉向之指數為 2.57，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.74(同一數量級)，相差僅 1.06 倍。研判應無破壞發生。此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

## B. Hachinohe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.29 與圖 5.69。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.69(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.81，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.75(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.69(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.73，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.00(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判應於二樓發

生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.69(c)。一樓  $x$  向之指數為 2.28，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.83(同一數量級)，相差僅 1.67 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.69(d)。四樓旋轉向之指數為 1.42，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.58(同一數量級)，相差僅 1.81 倍。研判應於四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.69(e)。四樓旋轉向之指數為 2.29，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.21(同一數量級)，相差僅 1.40 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

## C. Kobe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之五種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之斜撐模

擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE4 破壞位置位於四樓處，以移除四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE5 破壞位置位於五樓處，以移除五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.30 與圖 5.70。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.70(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.92，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.44(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.70(b)。二樓  $x$  向之指數為 1.07，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.80(同一數量級)，相差 3 倍以上。研判應於二樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.70(c)。二樓  $x$  向之指數為 3.38，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.67(同一數量級)，相差僅 1.08 倍。研判應無破壞發生，

此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

CASE4：四樓破壞(移除四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.70(d)。四樓旋轉向之指數為 2.10，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.65(同一數量級)，相差僅 1.26 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於四樓處不相符。

CASE5：五樓破壞(移除五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.70(e)。五樓旋轉向之指數為 2.54，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.08(同一數量級)，相差僅 1.21 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於五樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於單一樓層受損的情況，當結構於一樓或二樓受損時，可準確偵測出破壞位置。而結構於高樓層(三樓、四樓或五樓)受損時，則無法正確判別出破壞位置。

### 5.4.1.2 複數樓層受損

#### A. El Centro

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸

向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.31 與圖 5.71。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.71(a)。一樓  $x$  向之指數為 1.44，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.08(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓處生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.71(b)。二樓  $x$  向之指數為 1.40，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.49(同一數量級)，相差僅 1.77 倍。四樓旋轉向之指數為 0.86，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.61(多一個數量級)，相差 4 倍以上。研判應於二樓及四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.71(c)。一樓  $x$  向之指數為 2.23，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.62(同一數量級)，相差僅 1.17 倍。五樓旋轉向之指數為 0.87，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.71(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判應於五樓發生破壞，此一分析結果



與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

## B. Hachinohe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.32 與圖 5.72。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.72(a)。一樓  $x$  向之指數為 2.86，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 4.01(同一數量級)，相差僅 1.4 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.72(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.90，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.19(多一個數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 0.80，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.06(多一個數量

級)，相差 3 倍以上。研判應於二樓及四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.72(c)。一樓  $x$  向之指數為 1.48，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.90(同一數量級)，相差 2 倍以上。五樓旋轉向之指數為 2.71，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.00(同一數量級)，相差僅 1.10 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

### C. Kobe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓及四樓處，以移除二樓及四樓弱軸向之斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓及五樓處，以移除三樓及五樓弱軸向之斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.33 與圖 5.73。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖

5.73(a)。一樓  $x$  向之指數為 0.33，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.95(多一個數量級)，相差 8 倍以上。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

CASE2：二樓及四樓破壞(移除二樓及四樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.73(b)。二樓  $x$  向之指數為 0.59，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 1.72(多一個數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 0.72，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.16(多一個數量級)，相差 3 倍以上。研判應於二樓及四樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓及五樓破壞(移除三樓及五樓弱軸向之斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.73(c)。一樓  $x$  向之指數為 1.46，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.62(同一數量級)，相差 2 倍以上。四樓旋轉向之指數為 2.26，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.71(同一數量級)，相差僅 1.19 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於三樓及五樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於複數樓層受損的情況，當結構於二樓及四樓有受損之案例，可準確偵測出破壞位置，但於一樓及三樓與三樓及五樓有受損之兩個案例，無法準確偵測出破壞位置。

## 5.4.2 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐

### 5.4.2.1 單一樓層受損

#### A. El Centro

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.34 與圖 5.74。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.74(a)。一樓  $x$  向之指數為 1.55，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.70(同一數量級)，相差僅 1.74 倍。一樓旋轉向之指數為 1.74，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.75(同一數量級)，相差僅 1.58 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於一樓處並不相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖

5.74(b)。二樓  $x$  向之指數為 1.40，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.50(同一數量級)，相差僅 1.78 倍。三樓旋轉向之指數為 1.76，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.82(同一數量級)，相差僅 1.60 倍。研判應於二樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.74(c)。一樓  $x$  向之指數為 2.34，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.72(同一數量級)，相差僅 1.58 倍。四樓旋轉向之指數為 2.60，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.85(同一數量級)，相差僅 1.48 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處並不相符。

## B. Hachinohe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.35 與圖 5.75。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.75(a)。一樓  $x$  向之指數為 1.04，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 1.67(同一數量級)，相差僅 1.60 倍。一樓旋轉向之指數為 1.41，二樓旋轉向之指數為 1.01，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.35(同一數量級)，相差 2 倍以上。研判應於一樓及二樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓處並不相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.75(b)。一樓  $x$  向之指數為 2.80，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.12(同一數量級)，相差僅 1.11 倍。三樓旋轉向之指數為 1.72，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.39(同一數量級)，相差僅 1.38 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於二樓處並不相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.75(c)。五樓  $x$  向之指數為 2.75，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.06(同一數量級)，相差僅 1.11 倍。五樓旋轉向之指數為 2.34，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.77(同一數量級)，相差僅 1.61 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

## C. Kobe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之三種分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓處，以移除一樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE2 破壞位置位於二樓處，以移除二樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

CASE3 破壞位置位於三樓處，以移除三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.36 與圖 5.76。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.76(a)。一樓  $x$  向之指數為 1.37，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.60(同一數量級)，相差僅 1.89 倍。一樓旋轉向之指數為 2.01，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.00(同一數量級)，相差僅 1.49 倍。研判應於一樓發生破壞，與實際情況相符。

CASE2：二樓破壞(移除二樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.76(b)。一樓  $x$  向之指數為 2.66，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.80(同一數量級)，相差僅 1.05 倍。三樓旋轉向之指數為 2.90，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 3.87(同一數量級)，相差僅 1.33 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於二樓處不相符。

CASE3：三樓破壞(移除三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.76(c)。二樓  $x$  向之指數為 1.92，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.71(同一數量級)，相差 1.41 倍以上。二樓旋轉向之指數為 1.73，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.69(同一數量級)，相差僅 1.55 倍。研判應無破壞發生，此一分析結果與實際破壞位置於三樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於單一樓層受損的情況，當結構於一樓受損時，可準確偵測出破壞位置。而結構於二樓或三樓受損時，則無法正確判別出破壞位置。

#### 5.4.2.2 複數樓層受損

##### A. El Centro

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.37 與圖 5.77。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.77。一樓  $x$  向之指數為 1.07，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.01(同一數量級)，相差僅 1.87 倍。一樓旋轉向之指數為



2.04，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.45(同一數量級)，相差僅 1.20 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

## B. Hachinohe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.38 與圖 5.78。以下將針對各案例進行討論：

CASE1: 一樓及三樓破壞(移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.78。一樓  $x$  向之指數為 0.89，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 3.61(多一個數量級)，相差 4 倍以上。一樓旋轉向之指數為 2.35，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 2.58(同一數量級)，相差僅 1.09 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

## C. Kobe

利用識別所得之模態參數建立結構柔度矩陣，進行 DLV 損傷探測分析。考慮之分析案例如下：

CASE1 破壞位置位於一樓及三樓處，以移除一樓及三樓弱軸向之雙邊斜撐模擬。

DLV 損傷探測分析結果歸納於表 5.39 與圖 5.79。以下將針對各案例進行討論：

CASE1：一樓破壞(移除一樓弱軸向之雙邊斜撐)

依 DLV 法計算所得之各樓層加權應力指標歸納於圖 5.79。一樓  $x$  向之指數為 0.73，其他樓層  $x$  向之  $WSI_j$  值均大於 2.64(多一個數量級)，相差 3 倍以上。二樓旋轉向之指數為 1.50，其他樓層旋轉向之  $WSI_j$  值均大於 1.93(同一數量級)，相差僅 1.28 倍。研判應於一樓發生破壞，此一分析結果與實際破壞位置於一樓及三樓處不相符。

本系列在不同地震波下，在結構於複數樓層受損的情況，當結構於一樓有受損時，可準確偵測出破壞位置，但無法同時偵測結構於三樓有受損的狀態。

## 5.5 小結

扭轉耦合結構之振動台試驗與損傷探測分析結果顯示，若以位形空間之 DLV 法針對弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之扭轉耦合結構進行損傷探測分析時，當結構為單一樓層破壞的情況，在三種不同地震波之測試結果，都僅能在低樓層(1、2F)受損時偵測出破壞位置；當結構為複數樓層破壞的情況，都僅能偵測到位於低樓層(1、2F)之受損層，位於高樓層之受損層則無法正確識別出來。針對弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之扭轉耦合結構進行損傷探測分析時，當結構為單一樓層破壞的情況，在三種不同地震波之測試結果，都僅能在一樓受損時偵測出破壞位置；當結構為複數樓層破壞的情況，都僅

能偵測到位於一樓之受損層，位於二樓及三樓之受損層則無法正確識別出來。

若以狀態空間 DLV 法針對弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之扭轉耦合結構進行損傷探測分析，則損傷定位之成功率有顯著提升。在不同地震波下，單一樓層受損的情況，除三樓及五樓受損之案例未能成功定位之外，其餘三個案例均可成功找出受損樓層；複數樓層受損的情況，二樓及四樓受損之案例可正確識別出來，惟其餘兩案例仍未能成功。針對弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之扭轉耦合結構進行損傷探測分析時，在不同地震波下，不論單一樓層或複數樓層受損，其識別結果相較於位形空間 DLV 法，並無明顯改善。

整體而言，狀態空間 DLV 法要比位形空間 DLV 法精確，其主要原因為狀態空間 DLV 法建立柔度矩陣時不需提供質量矩陣(已隱含於系統矩陣之中)，避免了位形空間 DLV 法建立柔度矩陣時因假設質量矩陣而引進誤差。惟狀態空間 DLV 法在部分案例之評估結果仍未臻理想，應與試驗時採用之地震強度較低( $PGA=0.05g$ )有關。由於地震反應監測訊號中含有雜訊，當擾動訊號較弱時，噪訊比(Noise-to-Signal Ratio, NSR)相對較高，系統識別結果之誤差因而增大，進而影響損傷探測分析之準確度。後續應補充受損結構在  $PGA=0.1g$  之動態試驗結果，以提高系統識別分析之精確度。此外，當 DLV 經由柔度差異矩陣之奇異值分解得到後，需加載於健康結構上進行應力分析以計算出各項應力指標。目前由 ETABS 所建立之模型與真實結構模型仍有落差，因此也會導致額外之誤差

來源。



表 5.1 鋼結構房屋模型結構系統參數

長度(m)	2
寬度(m)	2
2~5 樓高度(m)	1.3
1 樓高度(m)	1.5
五樓質量(kg-sec <sup>2</sup> /m)	82.97
四樓質量(kg-sec <sup>2</sup> /m)	85.36
三樓質量(kg-sec <sup>2</sup> /m)	85.36
二樓質量(kg-sec <sup>2</sup> /m)	85.36
一樓質量(kg-sec <sup>2</sup> /m)	85.73
柱之斷面尺寸(mm)	100×50×5×7
大樑之斷面尺寸(mm)	100×50×5×7
小樑之斷面尺寸(mm)	100×50×5×7
柱之斷面積(m <sup>2</sup> )	0.0011
大樑之斷面積(m <sup>2</sup> )	0.0011
小樑之斷面積(m <sup>2</sup> )	0.0011

表 5.2 健康結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Healthy)														
Earthquake		El Centro				Hachinohe				Kobe				
Mode		1	2	3	5	1	2	3	5	1	2	3	5	
Frequency (Hz)		3.0765	5.0396	11.2340	21.1937	3.1524	5.0846	8.3594	21.1152	3.0053	4.9645	8.9954	18.7538	
Damping Ratio (%)		0.67	0.53	0.27	0.43	1.45	0.41	0.32	0.17	6.14	2.13	0.25	0.59	
Mode shapes	X	5F	1	0.0673	0.1733	0.3527	1	0.1006	0.2242	0.5220	1	-0.2655	0.2215	0.3965
		4F	0.8609	-0.0608	0.0623	-0.3572	0.8514	0.0758	0.0871	-0.4408	0.8559	-0.1144	0.1016	-0.2770
		3F	0.8046	-0.0739	-0.1978	-0.6951	0.7815	0.0326	-0.2282	-0.7633	0.7896	-0.0400	-0.2722	-0.7694
		2F	0.6133	0.0585	-0.4497	0.1882	0.5783	0.0339	-0.4995	0.4440	0.5936	0.0034	-0.5244	0.3897
		1F	0.3601	0.0601	-0.5489	1	0.3256	-0.0718	-0.3495	1	0.3377	0.1121	-0.4482	1
	Y	5F	-0.2593	1	0.3726	-0.2483	-0.2827	1	-0.3359	-0.3008	-0.2612	1	-0.2848	-0.2694
		4F	-0.1421	0.8770	0.2641	0.1863	-0.1633	0.7993	-0.1611	0.4161	-0.1500	0.7768	-0.1423	0.1399
		3F	-0.0419	0.6923	-0.1324	-0.1305	-0.0472	0.6233	-0.0192	0.1631	-0.0281	0.5838	0.0124	0.0488
		2F	0.0083	0.4129	-0.2071	-0.1449	0.0132	0.4778	0.0483	-0.1601	-0.0160	0.4016	0.0569	-0.0925
		1F	-0.0089	0.2762	0.0595	-0.1217	-0.0031	-0.2637	0.0555	-0.1573	0.0054	0.2673	-0.0349	-0.0718
	R	5F	-0.4953	0.0819	-1	-0.4072	-0.5423	-0.1064	-1	-0.4441	-0.5291	0.3622	-1	-0.6019
		4F	-0.3494	0.0884	-0.9354	0.3106	-0.3903	-0.0589	-0.7407	0.5556	-0.3800	0.2092	-0.7128	0.2467
		3F	-0.1700	0.0798	-0.9174	0.1885	-0.2030	-0.0433	-0.4295	0.2085	-0.1848	0.1475	-0.3840	0.2377
		2F	-0.0973	-0.0327	-0.6724	-0.2336	-0.1152	-0.0264	-0.2751	-0.3139	-0.1107	0.0962	-0.2546	-0.1906
		1F	-0.0667	0.0115	-0.2963	-0.3680	-0.0631	-0.0136	-0.1205	-0.4103	-0.0566	0.0798	-0.1284	-0.1955

表 5.3 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (El Centro)											
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged		4F Damaged		5F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.8869	7.2560	2.3444	8.9198	2.0898	9.6250	2.5898	9.9630	2.9053	
Damping Ratio (%)		0.82	0.05	0.46	0.03	3.52	0.16	1.87	0.44	2.70	
Mode shapes	X	5F	1	0.3241	1	-0.1691	-0.9879	0.3088	1	-0.4941	1
		4F	0.9336	0.0584	0.9110	0.1094	-0.9036	0.1592	0.8874	-0.3583	0.7574
		3F	0.8870	-0.0939	0.8643	0.2515	-1	-0.3870	0.7526	1	0.7789
		2F	0.8413	-0.4414	0.7685	0.5309	-0.5342	-0.3662	0.3819	-0.5514	0.4596
		1F	0.7483	-0.6960	0.1419	0.1895	-0.1346	0.1773	0.1899	-0.3592	0.2388
	Y	5F	-0.0762	-0.3735	-0.1286	0.2646	0.3861	-0.2211	-0.5132	-0.1972	-0.4067
		4F	-0.0192	-0.2136	-0.0581	0.1384	0.3157	0.1388	-0.4311	-0.2375	-0.2066
		3F	-0.0163	0.0328	-0.0193	0.0213	0.0213	0.0590	-0.0440	-0.1745	-0.0188
		2F	-0.0333	-0.0326	0.0234	-0.0585	0.0063	0.0727	-0.0139	-0.0592	-0.0192
		1F	0.0333	-0.0192	0.0040	-0.0522	-0.0030	-0.0323	0.0212	-0.1042	-0.0037
	R	5F	-0.1580	-1	-0.2567	1	0.4836	-1	-0.7045	-0.5540	-0.6382
		4F	-0.0904	-0.7215	-0.1657	0.7493	0.3954	-0.7545	-0.5868	-0.4458	-0.3932
		3F	-0.0542	-0.3365	-0.0832	0.4501	0.0634	-0.6352	-0.1306	-0.3858	-0.1429
		2F	-0.0118	-0.2293	-0.0225	0.3117	0.0282	-0.4557	-0.0773	-0.2420	-0.0919
		1F	0.0078	-0.1277	-0.0317	0.1474	0.0236	-0.2441	-0.0255	-0.1318	-0.0495

表 5.4 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	26.38	35.47	26.67	23.89	21.46
	4F	45.45	47.44	40.04	30.27	46.56
	3F	35.87	30.84	31.16	40.75	41.21
	2F	27.08	<b>*6.65</b>	14.81	28.06	24.45
	1F	<b>*4.88</b>	29.66	14.34	20.93	20.42
$V_y$	5F	41.08	26.48	28.01	24.14	28.55
	4F	31.53	33.55	24.64	31.86	27.73
	3F	29.70	25.67	25.90	27.39	27.29
	2F	32.53	25.16	20.87	29.02	32.93
	1F	41.83	34.04	34.24	26.78	34.64
$T$	5F	22.32	29.63	27.59	24.48	27.18
	4F	31.50	35.87	19.75	<b>*9.69</b>	44.84
	3F	32.04	18.96	20.73	28.63	29.04
	2F	31.73	27.73	25.81	28.70	39.08
	1F	28.02	33.75	34.87	31.47	43.50

\*偵測到之受損樓層



表 5.5 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Hachinohe)											
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged		4F Damaged		5F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.8491	7.2504	2.2963	8.8474	2.0898	9.6250	2.5545	7.7099	2.7359	
Damping Ratio (%)		0.91	0.01	0.14	0.09	3.52	0.16	5.89	0.56	8.94	
Mode shapes	X	5F	1	0.3070	1	-0.1720	-1	0.4819	1	0.6395	1
		4F	0.9334	0.0656	0.9144	0.1021	-0.9093	-0.2257	0.8775	0.4630	0.7760
		3F	0.8947	-0.1044	0.8744	0.2443	-0.9963	-0.8032	0.7406	1	0.8581
		2F	0.8467	-0.4526	0.7772	0.5241	-0.5262	-0.3905	0.3895	0.8720	0.4683
		1F	0.7436	-0.7055	0.1671	-0.1060	-0.1305	-0.0055	0.2074	0.6587	0.2388
	Y	5F	-0.0723	-0.3644	-0.1228	0.2806	0.3876	-0.1509	-0.5112	0.7333	-0.4186
		4F	-0.0211	-0.2054	-0.0570	0.1449	0.3284	-0.2166	-0.4107	0.7214	-0.2284
		3F	-0.0129	0.0238	-0.0082	-0.0167	0.0172	0.0453	-0.0145	-0.1486	-0.0313
		2F	-0.0289	0.0422	0.0241	0.0593	-0.0242	0.0412	0.0112	-0.0844	-0.0139
		1F	0.0350	-0.0491	-0.0005	-0.0093	0.0021	-0.0103	0.0190	-0.2077	0.0087
	R	5F	-0.1555	-1	-0.2466	1	0.4961	-1	-0.6951	0.6096	-0.6189
		4F	-0.0883	-0.7362	-0.1598	0.7469	0.4177	-0.7191	-0.5642	0.4526	-0.3922
		3F	-0.0484	-0.3625	-0.0722	0.4256	0.0662	-0.5789	-0.1145	-0.7810	-0.1347
		2F	-0.0130	-0.2369	-0.0245	0.3072	0.0365	-0.4265	-0.0722	-0.6810	-0.0871
		1F	0.0088	-0.1332	-0.0289	0.1388	0.0238	-0.2164	-0.0350	-0.3966	-0.0466

表 5.6 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	43.06	42.62	34.43	30.54	28.19
	4F	38.36	33.14	14.42	41.98	36.21
	3F	35.97	33.51	26.12	30.19	30.08
	2F	26.75	<b>*6.70</b>	32.73	20.54	22.26
	1F	<b>*8.59</b>	17.03	21.92	18.67	24.55
$V_y$	5F	25.22	29.30	23.52	25.54	33.52
	4F	23.86	21.85	26.29	25.91	26.05
	3F	28.01	30.48	21.72	19.39	31.61
	2F	25.87	25.37	22.95	21.34	19.17
	1F	42.70	48.67	30.45	34.85	36.98
$T$	5F	22.06	20.85	13.74	27.15	14.34
	4F	28.18	30.92	20.71	17.60	28.46
	3F	24.24	20.78	19.12	26.01	22.32
	2F	32.25	38.24	35.56	36.70	38.28
	1F	44.04	45.51	48.04	49.67	46.50

\*偵測到之受損樓層

表 5.7 單一樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Kobe)											
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged		4F Damaged		5F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.8602	7.2782	2.2060	7.6761	2.0280	9.5111	2.5651	8.8734	2.7553	
Damping Ratio (%)		0.30	0.19	4.29	0.87	7.23	0.15	6.95	0.25	8.54	
Mode shapes	X	5F	1	0.3040	1	-0.2008	-1	0.2899	1	-0.6384	1
		4F	0.9339	0.0620	0.9160	0.0984	-0.9158	-0.1485	0.8745	-0.3785	0.7688
		3F	0.8945	-0.0937	0.8707	0.2047	-0.9915	-0.3449	0.7449	1	0.8462
		2F	0.8453	-0.4568	0.7963	0.6042	-0.5381	-0.4616	0.3744	-0.2698	0.4466
		1F	0.7489	-0.7076	0.2408	0.6732	-0.0985	0.0778	0.1981	-0.2245	0.2217
	Y	5F	-0.0743	-0.3588	-0.1129	0.4184	0.3943	-0.2072	-0.5446	-0.1742	-0.4256
		4F	-0.0228	-0.2160	-0.0476	0.2437	0.3275	-0.2087	-0.4486	-0.2690	-0.2387
		3F	-0.0134	0.0230	-0.0160	0.0269	0.0151	0.0233	-0.0353	-0.0309	-0.0292
		2F	-0.0259	0.0317	0.0274	-0.0596	0.0139	-0.0549	-0.0111	-0.0493	-0.0086
		1F	0.0396	-0.0331	0.0077	0.0329	-0.0057	-0.0164	-0.0015	-0.0088	0.0081
	R	5F	-0.1580	-1	-0.2223	1	0.4872	-1	-0.7143	0.7179	-0.6350
		4F	-0.0914	-0.7422	-0.1408	0.7196	0.4018	-0.7676	-0.5823	0.4442	-0.4069
		3F	-0.0489	-0.3534	-0.0697	0.3277	0.0526	-0.5948	-0.1240	0.5378	-0.1408
		2F	-0.0109	-0.2342	-0.0269	0.2015	0.0296	-0.4542	-0.0724	0.3369	-0.0862
		1F	0.0110	-0.1279	-0.0227	0.1175	0.0241	-0.2224	-0.0434	0.1706	-0.0417

表 5.8 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	36.12	37.34	35.66	42.80	30.93
	4F	45.90	37.68	38.96	38.99	39.83
	3F	31.85	40.54	27.80	28.56	37.57
	2F	19.04	<b>*9.18</b>	25.12	27.80	30.76
	1F	<b>*8.11</b>	24.36	<b>9.63<sup>#</sup></b>	22.39	24.07
$V_y$	5F	27.40	29.62	32.00	27.39	33.29
	4F	29.04	19.02	30.43	35.55	41.81
	3F	29.37	27.20	31.56	35.27	28.81
	2F	30.80	32.73	30.32	32.00	28.93
	1F	34.68	33.27	28.77	30.97	34.69
$T$	5F	23.03	23.16	25.47	21.88	27.93
	4F	26.37	29.33	25.07	<b>*6.86</b>	25.40
	3F	26.19	20.44	26.92	33.21	26.46
	2F	29.34	47.16	36.55	32.87	29.02
	1F	36.39	47.45	33.67	42.85	47.82

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符

表 5.9 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (El Centro)										
Structure Status		1F&3F Damaged			2F&4F Damaged			3F&5F Damaged		
Mode		1	2	3	1	2	4	1	3	
Frequency (Hz)		1.6783	5.6396	9.3930	2.1812	6.5844	9.6018	1.7472	5.4119	
Damping Ratio (%)		1.32	0.25	0.06	0.05	0.03	0.00	3.82	0.54	
Mode shapes	X	5F	1	0.1362	-0.5674	-1	0.1786	-0.2527	-1	-0.1531
		4F	0.9354	0.2013	-0.2186	-0.9093	0.2707	-0.1147	-0.8914	0.4309
		3F	0.9923	-0.1818	0.5197	-0.8128	0.8317	0.0735	-0.9931	0.0375
		2F	0.7573	0.8427	0.1881	-0.6547	1	-0.2297	-0.6873	0.9782
		1F	0.6192	1	-0.2389	-0.1653	0.1528	-0.3581	-0.3115	0.5774
	Y	5F	-0.1809	0.6213	-0.1635	0.2860	0.8638	-0.1361	0.2330	0.9890
		4F	-0.1351	0.5873	-0.3419	0.1884	0.7477	-0.2082	0.1533	0.5615
		3F	-0.0206	0.0145	-0.1054	0.0186	0.0836	-0.0526	-0.0039	0.0316
		2F	0.0287	0.0398	-0.0163	-0.0074	0.0663	-0.0450	-0.0232	-0.0354
		1F	0.0291	0.0512	0.0310	0.0228	0.0257	-0.0251	-0.0090	0.0565
	R	5F	-0.2365	0.8150	1	0.3713	0.8157	-1	0.3072	1
		4F	-0.1739	0.7342	0.6505	0.2708	0.7137	-0.7872	0.2043	0.5600
		3F	-0.0297	0.1076	0.7746	0.0381	0.0120	0.7878	0.0277	0.0101
		2F	-0.0125	0.0916	0.5445	0.0136	-0.0588	-0.5666	0.0138	-0.0269
		1F	-0.0255	0.0745	0.3119	0.0265	-0.0329	0.3028	0.0110	0.0414

表 5.10 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	25.49	34.73	32.50
	4F	32.26	33.39	40.86
	3F	28.36	21.67	23.50
	2F	19.76	<b>*8.97</b>	32.59
	1F	<b>*10.48</b>	22.82	27.80
$V_y$	5F	25.60	26.34	26.42
	4F	25.68	24.94	34.38
	3F	16.49	22.12	30.42
	2F	24.43	24.32	32.60
	1F	28.69	34.12	34.33
$T$	5F	17.87	29.94	25.46
	4F	19.47	11.89	35.80
	3F	21.50	19.23	28.05
	2F	27.41	28.80	24.68
	1F	23.87	37.00	41.92

\*偵測到之受損樓層

表 5.11 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Hachinohe)										
Structure Status		1F&3F Damaged			2F&4F Damaged			3F&5F Damaged		
Mode		1	2	3	1	2	4	1	3	
Frequency (Hz)		1.5998	8.2211	9.4656	2.1440	6.6603	9.6051	1.8553	5.1484	
Damping Ratio (%)		3.35	1.68	0.74	0.28	0.69	0.09	6.12	1.43	
Mode shapes	X	5F	1	-0.1294	-0.5767	-1	0.1272	0.1762	-1	0.0580
		4F	0.9462	-0.0497	-0.1940	-0.9288	0.2280	0.0508	-0.8800	0.3839
		3F	0.9885	-0.3523	0.6125	-0.7828	1	-0.0659	-0.9832	0.0201
		2F	0.7508	0.4494	-0.0591	-0.6937	0.9904	-0.2984	-0.6674	0.9527
		1F	0.5579	1	-0.0812	-0.1639	0.1285	0.3588	-0.4484	0.9598
	Y	5F	-0.1841	0.0938	-0.0700	0.2066	0.8866	0.2790	0.2585	0.9184
		4F	-0.1385	-0.1164	-0.2614	0.1502	0.8369	0.1381	0.1717	0.5676
		3F	-0.0044	-0.0105	-0.0299	0.0176	-0.1504	0.0923	-0.0178	0.0220
		2F	0.0217	-0.0881	-0.0300	-0.0304	0.0378	0.0640	0.0246	0.0630
		1F	0.0252	0.0313	0.0189	-0.0015	0.0501	-0.0910	-0.0174	0.0770
	R	5F	-0.2425	0.8621	1	0.3255	0.8712	-1	0.3446	1
		4F	-0.1860	0.8057	0.6111	0.2502	0.7510	-0.8632	0.2308	0.6165
		3F	-0.0246	0.5844	0.6248	0.0586	-0.1014	-0.8208	0.0497	0.0488
		2F	-0.0195	-0.4032	0.4674	0.0153	-0.0703	-0.5142	0.0214	0.0815
		1F	0.0076	0.2394	0.2470	0.0284	-0.0292	-0.3742	-0.0038	0.0385

表 5.12 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	39.61	34.55	30.47
	4F	39.17	40.09	48.11
	3F	30.14	36.61	37.99
	2F	25.91	<b>*10.74</b>	19.50
	1F	<b>*12.36</b>	21.16	<b>7.52<sup>#</sup></b>
$V_y$	5F	21.79	31.44	22.05
	4F	21.82	32.45	28.27
	3F	25.48	21.54	27.19
	2F	20.14	22.02	25.33
	1F	38.58	37.69	35.21
$T$	5F	18.60	20.94	16.38
	4F	24.97	<b>*7.91</b>	26.42
	3F	24.73	28.93	21.02
	2F	34.58	35.33	34.61
	1F	50.07	39.58	51.01

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符



表 5.13 複數樓層受損結構系統參數(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Kobe)										
Structure Status		1F&3F Damaged			2F&4F Damaged			3F&5F Damaged		
Mode		1	2	3	1	2	4	1	3	
Frequency (Hz)		1.5464	5.8756	9.2966	1.9469	6.4771	9.3961	1.8028	4.1774	
Damping Ratio (%)		1.51	0.39	0.03	3.28	0.07	0.08	5.04	1.82	
Mode shapes	X	5F	1	0.1170	-0.5404	-1	0.1425	0.3354	-1	-0.2225
		4F	0.9433	0.2066	-0.2408	-0.9207	0.2391	0.1251	-0.8861	0.2786
		3F	0.9795	-0.2062	0.6139	-0.9092	0.8304	-0.1238	-0.9890	-0.1745
		2F	0.7474	0.8707	-0.1551	-0.5813	1	-0.1508	-0.6789	0.8635
		1F	0.5307	1	-0.2632	-0.0967	0.2208	0.4037	-0.4121	0.7518
	Y	5F	-0.1912	0.6730	-0.1651	0.3410	0.8384	0.1664	0.2430	0.8104
		4F	-0.1478	0.5945	-0.2930	0.2883	0.7526	0.2585	0.1590	0.5128
		3F	-0.0073	-0.0229	-0.0432	0.0159	-0.0127	0.0320	0.0107	-0.0169
		2F	0.0229	0.0119	0.0090	-0.0148	0.0526	0.0577	0.0224	-0.0511
		1F	0.0249	0.0358	0.0036	-0.0072	0.0200	0.0093	-0.0281	0.0577
	R	5F	-0.2415	0.8658	1	0.4321	0.8712	-1	0.3227	1
		4F	-0.1837	0.7458	0.6875	0.3521	0.7597	-0.7600	0.2199	0.6634
		3F	-0.0171	0.0853	0.7236	0.0459	-0.0411	-0.7590	0.0387	0.0929
		2F	-0.0204	0.1021	0.5328	0.0153	-0.0568	-0.5677	0.0172	0.0945
		1F	0.0122	0.0631	0.2876	0.0229	-0.0269	-0.2904	-0.0017	0.0636

表 5.14 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	23.91	32.05	42.45
	4F	36.42	47.23	43.48
	3F	36.42	31.08	38.02
	2F	22.97	<b>*11.67</b>	31.59
	1F	<b>*10.52</b>	<b>9.58<sup>#</sup></b>	<b>15.88<sup>#</sup></b>
$V_y$	5F	21.26	29.30	28.66
	4F	29.00	31.28	31.22
	3F	26.30	27.14	23.54
	2F	28.65	26.55	34.38
	1F	34.20	33.07	33.94
$T$	5F	20.87	31.30	15.61
	4F	26.99	19.71	21.63
	3F	24.86	30.03	24.12
	2F	32.69	41.81	34.36
	1F	36.88	38.58	36.23

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符

表 5.15 健康結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Healthy)														
Earthquake		El Centro				Hachinohe				Kobe				
Mode		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Frequency (Hz)		2.5367	3.7497	9.2320	13.8963	2.4601	3.7742	10.7824	13.7084	2.3297	3.8810	8.7018	13.4926	
Damping Ratio (%)		12.92	2.69	0.08	0.17	12.21	3.38	0.47	0.20	14.43	2.24	0.41	0.32	
Mode shapes	X	5F	-1	0.1364	-0.1947	-0.6791	-1	0.1660	0.1519	-0.5982	-1	0.1414	-0.1186	-0.6437
		4F	-0.9695	0.1022	-0.2101	-0.6178	-0.9691	0.1273	0.2835	-0.4643	-0.9632	0.1036	-0.0735	-0.5809
		3F	-0.8436	-0.0649	-0.0993	0.4629	-0.8611	0.0775	0.4671	0.1934	-0.8393	0.0446	-0.0737	-0.1060
		2F	-0.7513	-0.0812	-0.2682	-0.5427	-0.7858	0.0682	0.6483	-0.1397	-0.7664	-0.0204	-0.1328	-0.3187
		1F	-0.4824	-0.0245	0.2478	0.4792	-0.5950	-0.0282	-0.4146	0.5148	-0.5867	-0.0596	0.2034	0.4360
	Y	5F	0.1120	-1	-0.7089	0.3237	0.0852	-1	0.3981	0.2734	0.1095	-1	-0.4518	-0.2877
		4F	0.1043	-0.8533	-0.5120	-0.4346	0.0694	-0.7983	0.3349	-0.1918	0.0947	-0.8379	-0.3109	-0.3315
		3F	-0.0866	-0.7053	-0.1108	-0.6129	-0.0864	-0.6879	0.0906	-0.6515	-0.0846	-0.6910	-0.0907	-0.6860
		2F	-0.0889	-0.4689	-0.0823	-1	-0.0709	-0.4943	0.2394	-1	-0.0749	-0.4837	0.0855	-1
		1F	-0.3541	-0.3219	0.2147	-0.6653	-0.4307	-0.3132	0.2540	-0.6378	-0.4221	-0.2835	-0.2324	-0.4360
	R	5F	0.1818	-0.3552	1	-0.4192	0.1492	-0.3139	1	-0.2300	0.1675	-0.3027	1	-0.2079
		4F	0.1503	-0.3159	0.9670	-0.4155	0.1141	-0.2627	0.8671	-0.1914	0.1398	-0.2682	0.9441	-0.1647
		3F	-0.0821	-0.2970	0.9276	-0.3498	-0.0679	-0.2833	0.5220	-0.3142	-0.0707	-0.2379	0.8513	-0.2691
		2F	-0.0703	-0.2140	0.7988	-0.5371	-0.0722	-0.2047	0.5101	-0.4803	-0.0653	-0.1681	0.7887	-0.4527
		1F	-0.3394	-0.1527	0.5120	-0.4451	-0.4157	-0.1387	0.4194	-0.3156	-0.4044	-0.1167	0.5619	-0.3008

表 5.16 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (El Centro)							
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.7812	3.4489	2.1503	3.7019	2.3467	
Damping Ratio (%)		2.57	2.20	3.75	0.64	5.99	
Mode shapes	X	5F	-1	-0.0448	1	-0.0957	-0.9317
		4F	-0.9800	-0.0463	0.9527	-0.0990	-0.8974
		3F	-0.8680	-0.0170	0.8845	-0.0896	-1
		2F	-0.8185	0.1035	0.6497	-0.1941	-0.3649
		1F	-0.6654	0.1830	0.3956	-0.1714	-0.4774
	Y	5F	0.1464	1	-0.2802	-1	0.6145
		4F	0.1364	0.8671	-0.2472	-0.8758	0.5866
		3F	0.0665	0.7777	-0.0370	-0.8053	0.0963
		2F	0.0065	0.5750	-0.0159	-0.5030	0.0806
		1F	0.0255	0.3210	0.3338	-0.3629	-0.3268
	R	5F	0.1943	0.4708	-0.3473	-0.3954	0.6544
		4F	0.1759	0.4556	-0.2984	-0.3288	0.6183
		3F	0.0772	0.4604	-0.0465	-0.3888	0.1105
		2F	0.0137	0.3310	-0.0135	-0.2079	0.0786
		1F	0.0364	0.1863	0.3325	-0.1698	-0.3207

表 5.17 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	25.30	32.57	25.83
	4F	41.82	38.36	37.78
	3F	38.57	34.96	37.05
	2F	30.53	27.41	25.26
	1F	18.94	19.97	25.42
$V_y$	5F	30.30	16.01	16.41
	4F	36.55	23.58	15.73
	3F	34.24	24.24	35.79
	2F	26.54	31.43	29.73
	1F	38.71	31.97	29.55
$T$	5F	39.73	38.87	32.51
	4F	34.37	27.46	25.39
	3F	35.05	27.78	28.38
	2F	25.40	24.97	26.96
	1F	<b>*13.55</b>	21.85	30.17

\*偵測到之受損樓層

表 5.18 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Hachinohe)							
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.7597	3.4854	2.1605	3.6702	2.3439	
Damping Ratio (%)		2.73	2.04	2.90	0.70	5.64	
Mode shapes	X	5F	-1	-0.0351	1	0.0589	-0.9591
		4F	-0.9811	-0.0452	0.9528	0.0244	-0.9203
		3F	-0.8861	-0.0647	0.8278	-0.0153	-1
		2F	-0.8311	0.0890	0.6548	-0.1097	-0.3123
		1F	-0.7319	0.1821	0.4723	-0.1790	-0.6061
	Y	5F	0.1321	1	-0.2742	-1	0.6613
		4F	0.1230	0.8560	-0.2451	-0.8460	0.6225
		3F	0.0525	0.7779	-0.0418	-0.7491	0.0965
		2F	0.0093	0.5530	0.0171	-0.4951	0.0499
		1F	-0.0814	0.4268	0.4006	-0.3860	-0.4807
	R	5F	0.1826	0.4229	-0.3443	-0.3670	0.7103
		4F	0.1654	0.4009	-0.2960	-0.3274	0.6685
		3F	0.0704	0.4196	-0.0600	-0.3441	0.0963
		2F	0.0169	0.3180	-0.0163	-0.1975	0.0600
		1F	0.0524	0.2616	0.3952	-0.2021	-0.4905

表 5.19 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	30.67	31.76	25.39
	4F	36.47	37.99	30.79
	3F	36.49	30.30	38.13
	2F	17.85	33.38	34.98
	1F	<b>*8.22</b>	21.32	24.44
$V_y$	5F	20.03	24.54	11.48
	4F	28.80	33.32	25.89
	3F	28.47	31.17	30.19
	2F	20.01	34.11	35.55
	1F	35.96	25.77	33.81
$T$	5F	29.23	31.40	31.69
	4F	26.79	27.44	23.91
	3F	26.79	24.24	27.29
	2F	33.58	38.07	23.13
	1F	21.87	36.93	29.25

\*偵測到之受損樓層

表 5.20 單一樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Kobe)							
Structure Status		1F Damaged		2F Damaged		3F Damaged	
Mode		1	2	1	2	1	
Frequency (Hz)		1.7723	3.4260	2.0748	3.7958	2.3340	
Damping Ratio (%)		2.53	2.50	4.21	3.31	5.72	
Mode shapes	X	5F	-1	-0.0635	1	0.1167	-0.9404
		4F	-0.9803	-0.0452	0.9498	0.1183	-0.9099
		3F	-0.8741	-0.0138	0.9054	0.2349	-1
		2F	-0.8221	0.0922	0.6121	0.3274	-0.3316
		1F	-0.7357	0.2244	0.4893	-0.2214	-0.5788
	Y	5F	0.1432	1	-0.3023	-1	0.6312
		4F	0.1374	0.8719	-0.2860	-0.8838	0.6277
		3F	0.0639	0.7825	-0.0264	-0.8138	0.0991
		2F	0.0119	0.5593	0.0178	-0.4669	0.0497
		1F	-0.0774	0.3393	0.4391	-0.4028	-0.4736
	R	5F	0.1950	0.4739	-0.3745	-0.4020	0.6909
		4F	0.1752	0.4461	-0.3282	-0.4444	0.6670
		3F	0.0714	0.4541	-0.0389	-0.4799	0.1105
		2F	0.0172	0.3311	-0.0184	-0.2003	0.0720
		1F	0.0540	0.2125	0.4374	-0.2720	-0.4767



表 5.21 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	33.86	28.74	27.56
	4F	39.38	33.15	33.57
	3F	40.05	39.22	40.17
	2F	33.77	31.27	26.70
	1F	<b>*13.39</b>	28.21	30.51
$V_y$	5F	27.84	25.60	34.51
	4F	33.62	38.26	35.11
	3F	34.21	33.01	38.36
	2F	26.90	31.90	39.38
	1F	34.19	29.79	39.06
$T$	5F	42.74	28.89	33.56
	4F	37.34	28.99	32.09
	3F	32.92	32.56	34.37
	2F	24.67	27.18	30.41
	1F	17.45	37.76	43.98

\*偵測到之受損樓層

表 5.22 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；El Centro 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (El Centro)						
Structure Status		1F&3F Damaged				
Mode		1	2	3		
Frequency (Hz)		1.6508	3.4747	4.8796		
Damping Ratio (%)		2.02	1.72	1.55		
Mode shapes	X	5F	1	-0.1388	0.1915	
		4F	0.9787	-0.1188	0.2086	
		3F	0.9814	-0.0895	0.2194	
		2F	0.7255	-0.0534	1	
		1F	0.6725	-0.1271	0.2839	
	Y	5F	-0.2284	1	0.7798	
		4F	-0.2211	0.8802	0.7611	
		3F	-0.0246	0.8982	0.0315	
		2F	0.0030	0.5553	-0.0138	
		1F	0.0955	0.3968	-0.6338	
	R	5F	-0.2743	0.4411	0.8419	
		4F	-0.2531	0.4083	0.8215	
		3F	-0.0326	0.5232	0.0176	
		2F	0.0007	0.2929	-0.0468	
		1F	0.0737	0.2676	-0.6590	

表 5.23 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	31.69
	4F	32.53
	3F	39.36
	2F	22.68
	1F	12.86
$V_y$	5F	34.88
	4F	31.64
	3F	29.57
	2F	22.85
	1F	29.15
$T$	5F	35.59
	4F	20.57
	3F	32.18
	2F	22.64
	1F	16.10

表 5.24 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Hachinohe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Hachinohe)						
Structure Status		1F&3F Damaged				
Mode		1	2	3		
Frequency (Hz)		1.5839	3.4760	5.0240		
Damping Ratio (%)		3.87	0.28	1.28		
Mode shapes	X	5F	1	-0.1276	0.1884	
		4F	0.9783	-0.1156	0.2111	
		3F	0.9922	0.0341	0.1478	
		2F	0.7511	-0.1157	1	
		1F	0.7297	0.2397	0.3185	
	Y	5F	-0.1940	1	0.8422	
		4F	-0.1846	0.8592	0.8068	
		3F	-0.0155	0.8578	0.0173	
		2F	0.0164	0.5980	0.0508	
		1F	0.1928	0.4543	-0.7145	
	R	5F	-0.2413	0.3653	0.8586	
		4F	-0.2213	0.3412	0.8312	
		3F	-0.0189	0.4833	0.0141	
		2F	0.0083	0.3389	0.0528	
		1F	0.1768	0.2906	-0.7645	

表 5.25 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	34.99
	4F	37.65
	3F	31.14
	2F	22.69
	1F	<b>*5.78</b>
$V_y$	5F	20.37
	4F	27.98
	3F	27.61
	2F	28.53
	1F	31.62
$T$	5F	36.15
	4F	27.36
	3F	21.72
	2F	22.51
	1F	<b>*11.85</b>

\*偵測到之受損樓層

表 5.26 複數樓層受損結構系統參數(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；Kobe 地震波；SRIM 系統識別)

Modal Parameters (Kobe)					
Structure Status		1F&3F Damaged			
Mode		1	2	3	
Frequency (Hz)		1.6041	3.3962	4.9780	
Damping Ratio (%)		2.26	0.48	0.85	
Mode shapes	X	5F	1	0.2405	0.1706
		4F	0.9833	0.2334	0.2013
		3F	0.9944	0.1465	0.1608
		2F	0.7390	0.3127	1
		1F	0.7462	0.2442	0.3146
	Y	5F	-0.2110	1	0.7823
		4F	-0.2086	0.8943	0.7555
		3F	-0.0193	0.8808	-0.0234
		2F	0.0182	0.5981	-0.0297
		1F	0.1889	0.5269	-0.7197
	R	5F	-0.2528	0.4604	0.8865
		4F	-0.2374	0.4339	0.8505
		3F	-0.0255	0.5460	0.0435
		2F	0.0080	0.3529	-0.0532
		1F	0.1737	0.3883	-0.7521

表 5.27 位形空間 DLV 分析之各樓層應力指標

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；移除受損層雙邊斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	35.50
	4F	34.20
	3F	31.11
	2F	29.03
	1F	<b>*13.14</b>
$V_y$	5F	25.29
	4F	36.02
	3F	29.37
	2F	29.15
	1F	30.69
$T$	5F	34.10
	4F	31.66
	3F	28.79
	2F	27.74
	1F	23.82

\*偵測到之受損樓層

表 5.28 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	3.60	3.55	2.89	3.81	3.36
	4F	5.43	3.11	3.33	3.45	3.28
	3F	4.83	5.23	4.36	3.92	4.60
	2F	2.89	<b>*0.75</b>	4.64	3.93	4.04
	1F	<b>*0.43</b>	3.29	3.81	3.56	4.21
$V_y$	5F	1.69	3.28	3.44	2.03	2.76
	4F	3.96	2.10	4.71	3.61	3.51
	3F	3.18	3.82	3.00	4.87	4.84
	2F	4.94	4.08	3.18	5.21	3.46
	1F	4.19	5.70	4.48	4.49	3.75
$T$	5F	3.22	3.79	3.37	2.53	2.57
	4F	3.01	2.59	4.53	<b>*1.35</b>	2.74
	3F	2.32	2.65	4.62	3.77	3.92
	2F	4.36	3.36	2.98	4.27	4.27
	1F	5.44	4.92	4.24	5.96	4.01

\*偵測到之受損樓層

表 5.29 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	3.75	4.63	4.10	4.35	4.82
	4F	4.69	4.99	3.95	4.36	4.93
	3F	4.14	3.30	3.83	3.88	2.85
	2F	4.39	<b>*0.73</b>	4.08	2.47	2.87
	1F	<b>*0.81</b>	3.00	2.28	1.94	2.50
$V_y$	5F	2.44	3.22	2.68	3.79	2.64
	4F	3.34	3.59	2.67	4.09	4.11
	3F	5.24	4.32	4.19	3.21	4.73
	2F	4.59	4.58	3.80	4.40	4.78
	1F	6.40	5.93	5.57	5.74	4.01
$T$	5F	2.81	3.02	2.16	2.58	3.21
	4F	2.56	3.68	1.76	<b>*1.42</b>	2.29
	3F	3.90	3.03	1.87	3.04	3.37
	2F	4.55	3.64	4.58	3.39	5.19
	1F	5.31	4.14	5.39	6.10	4.43

\*偵測到之受損樓層



表 5.30 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey				
Stress	Storey	1F	2F	3F	4F	5F
$V_x$	5F	4.40	3.80	3.67	1.64	3.63
	4F	4.20	4.57	4.96	4.30	4.90
	3F	3.44	5.03	4.58	5.10	3.23
	2F	3.91	<b>*1.07</b>	3.38	2.78	2.60
	1F	<b>*0.92</b>	3.82	4.32	2.77	3.74
$V_y$	5F	2.16	2.86	3.39	2.75	2.39
	4F	2.95	2.63	4.15	2.98	3.16
	3F	5.59	2.82	3.16	3.29	2.87
	2F	4.45	3.11	4.52	3.94	4.80
	1F	5.52	5.39	4.91	5.70	4.90
$T$	5F	3.29	2.72	3.19	2.65	2.54
	4F	2.62	3.65	4.82	2.10	3.08
	3F	4.26	2.11	4.16	3.75	4.00
	2F	3.60	4.10	3.77	3.65	4.60
	1F	5.52	4.33	5.06	6.00	3.92

\*偵測到之受損樓層

表 5.31 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	3.08	4.57	4.52
	4F	4.21	3.04	3.05
	3F	4.20	4.75	4.35
	2F	3.49	<b>*1.40</b>	2.62
	1F	<b>*1.44</b>	2.49	2.23
$V_y$	5F	2.08	3.94	1.45
	4F	3.19	2.32	3.35
	3F	3.50	5.54	4.43
	2F	2.08	4.19	4.79
	1F	2.68	4.40	3.80
$T$	5F	2.48	4.10	<b>*0.87</b>
	4F	1.96	<b>*0.86</b>	3.25
	3F	2.58	3.75	2.71
	2F	2.62	3.61	3.57
	1F	3.45	4.46	3.37

\*偵測到之受損樓層

表 5.32 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	5.93	5.02	3.97
	4F	5.10	2.19	2.94
	3F	4.23	4.51	4.14
	2F	4.01	<b>*0.90</b>	2.90
	1F	2.86	3.66	<b>1.48<sup>#</sup></b>
$V_y$	5F	3.21	2.19	1.36
	4F	4.23	3.56	4.58
	3F	5.03	4.04	3.69
	2F	4.83	3.15	4.88
	1F	5.19	4.27	5.68
$T$	5F	3.16	3.52	2.71
	4F	3.85	<b>*0.80</b>	3.00
	3F	3.57	3.06	3.37
	2F	5.08	3.44	4.38
	1F	5.55	3.44	5.95

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符

表 5.33 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F&3F	2F&4F	3F&5F
$V_x$	5F	3.82	3.94	3.95
	4F	3.93	3.30	3.87
	3F	3.82	2.56	4.36
	2F	2.95	<b>*0.59</b>	3.62
	1F	<b>*0.33</b>	1.72	<b>1.46<sup>#</sup></b>
$V_y$	5F	2.72	1.72	2.88
	4F	3.22	1.96	3.52
	3F	3.64	2.19	3.72
	2F	4.84	4.20	4.38
	1F	3.49	5.07	5.41
$T$	5F	3.70	2.16	2.71
	4F	2.30	<b>*0.72</b>	2.26
	3F	2.99	3.35	3.88
	2F	2.75	3.62	5.10
	1F	3.08	4.62	5.99

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符

表 5.34 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	3.52	4.66	4.27
	4F	4.47	3.13	3.72
	3F	2.70	3.64	4.11
	2F	3.69	<b>*1.40</b>	3.73
	1F	1.55	2.50	2.34
$V_y$	5F	2.04	3.54	2.21
	4F	2.15	4.66	3.69
	3F	2.64	2.20	3.46
	2F	5.19	3.61	3.55
	1F	4.79	2.32	4.66
$T$	5F	4.20	2.82	3.85
	4F	4.33	4.40	2.60
	3F	3.97	1.76	4.48
	2F	2.75	3.14	4.70
	1F	1.74	5.46	4.67

\*偵測到之受損樓層

表 5.35 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	2.45	3.92	2.75
	4F	4.60	4.22	4.26
	3F	2.63	4.15	3.51
	2F	1.67	3.12	3.06
	1F	<b>*1.04</b>	2.80	3.17
$V_y$	5F	3.85	3.77	3.77
	4F	2.62	2.95	3.85
	3F	2.50	5.31	3.83
	2F	2.90	1.95	2.39
	1F	3.93	2.47	4.60
$T$	5F	3.98	3.49	2.34
	4F	4.53	2.39	4.35
	3F	3.35	1.72	3.77
	2F	<b>1.01<sup>#</sup></b>	3.27	3.86
	1F	<b>*1.41</b>	5.16	4.11

\*偵測到之受損樓層；<sup>#</sup>偵測到之受損樓層與實際情況不符

表 5.36 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey		
Stress	Storey	1F	2F	3F
$V_x$	5F	3.27	4.40	2.71
	4F	2.60	4.13	4.68
	3F	4.19	2.92	4.58
	2F	3.48	2.80	1.92
	1F	<b>*1.37</b>	2.66	3.08
$V_y$	5F	3.01	3.98	3.54
	4F	3.56	4.69	3.20
	3F	3.99	4.32	3.18
	2F	3.22	4.42	2.50
	1F	3.64	2.94	2.81
$T$	5F	4.59	4.15	3.54
	4F	4.48	3.87	3.16
	3F	4.39	2.90	2.69
	2F	3.00	4.56	1.73
	1F	2.01	5.03	4.73

\*偵測到之受損樓層

表 5.37 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層破壞；El Centro 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	3.70
	4F	5.18
	3F	2.40
	2F	2.01
	1F	<b>*1.07</b>
$V_y$	5F	2.76
	4F	1.92
	3F	3.13
	2F	2.57
	1F	3.09
$T$	5F	4.87
	4F	4.70
	3F	2.45
	2F	2.95
	1F	2.04

\*偵測到之受損樓層

表 5.38 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層破壞；Hachinohe 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	3.68
	4F	5.61
	3F	4.94
	2F	3.61
	1F	<b>*0.89</b>
$V_y$	5F	4.00
	4F	2.82
	3F	2.81
	2F	3.00
	1F	2.96
$T$	5F	5.75
	4F	4.57
	3F	3.48
	2F	2.58
	1F	2.35

\*偵測到之受損樓層

表 5.39 狀態空間 DLV 分析之各樓層應力指標  
(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層破壞；Kobe 地震波)

		Damaged Storey
Stress	Storey	1F&3F
$V_x$	5F	3.83
	4F	4.08
	3F	4.45
	2F	2.64
	1F	<b>*0.73</b>
$V_y$	5F	3.66
	4F	2.91
	3F	3.29
	2F	1.56
	1F	3.43
$T$	5F	4.44
	4F	2.53
	3F	3.23
	2F	1.50
	1F	1.93

\*偵測到之受損樓層

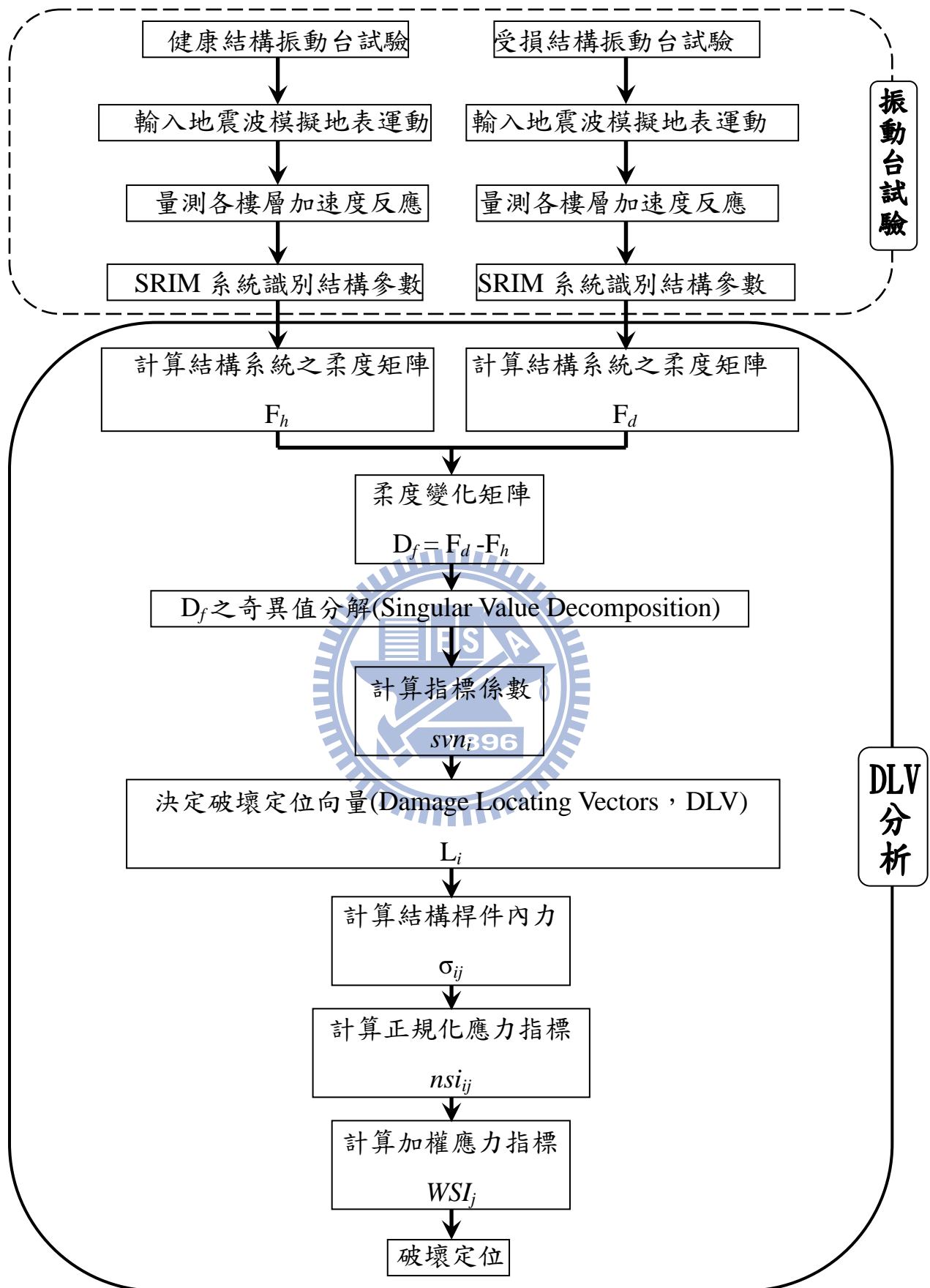


圖 5.1 振動台試驗分析流程



圖 5.2 地震模擬振動台



圖 5.3 振動台油壓致動器



圖 5.4 MTS 407 控制器



圖 5.5 IMC  $\mu$ -MUCIS 資料擷取系統



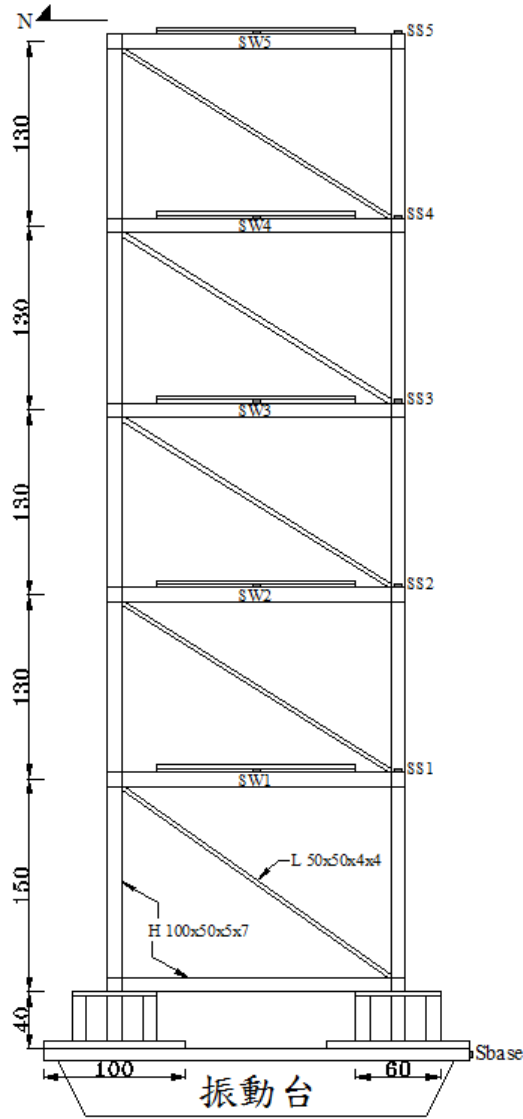


圖 5.6 1：2 縮尺五層樓鋼構結構立面圖

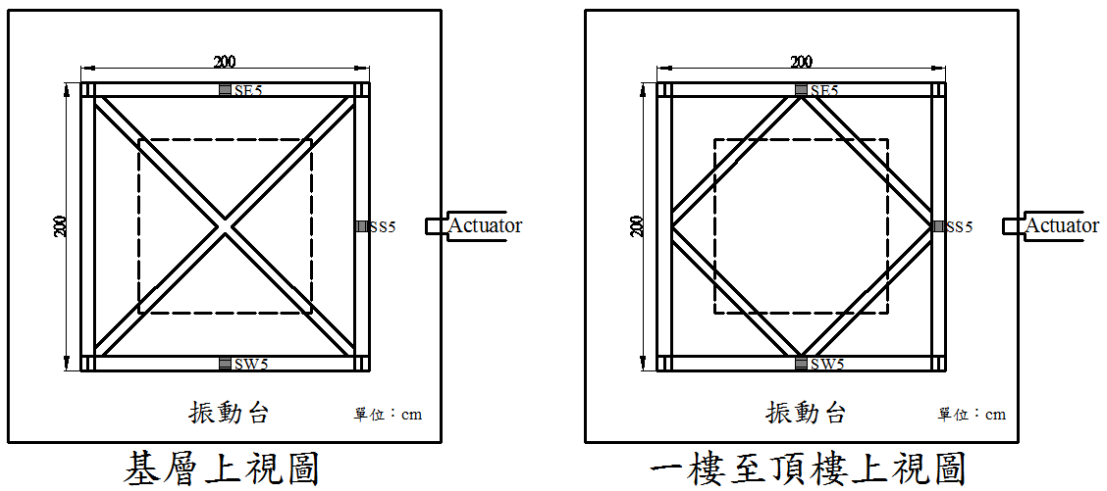


圖 5.7 1：2 縮尺五層樓鋼構結構上視圖



圖 5.8 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

(健康結構)

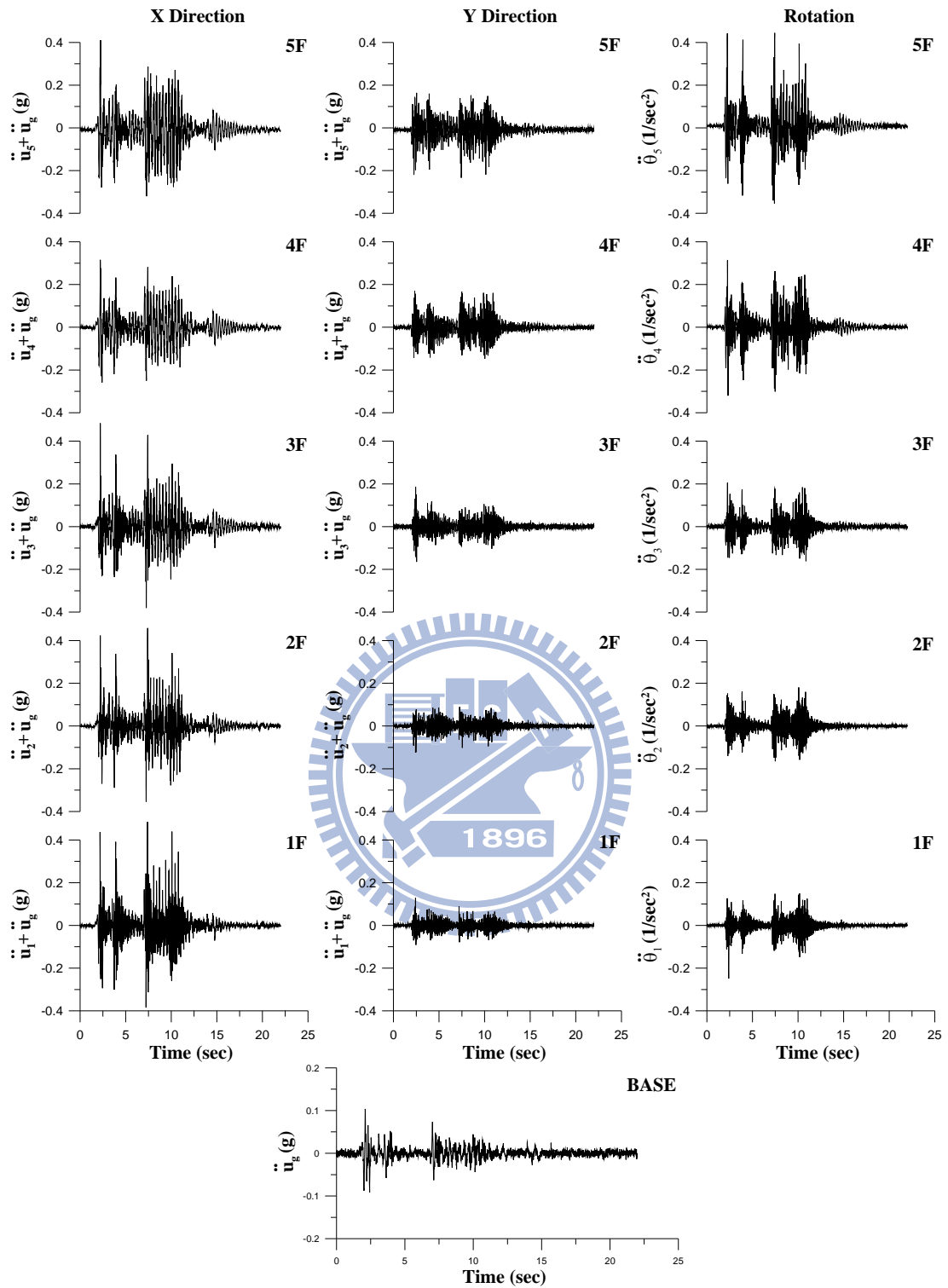


圖 5.9 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；健康結構)

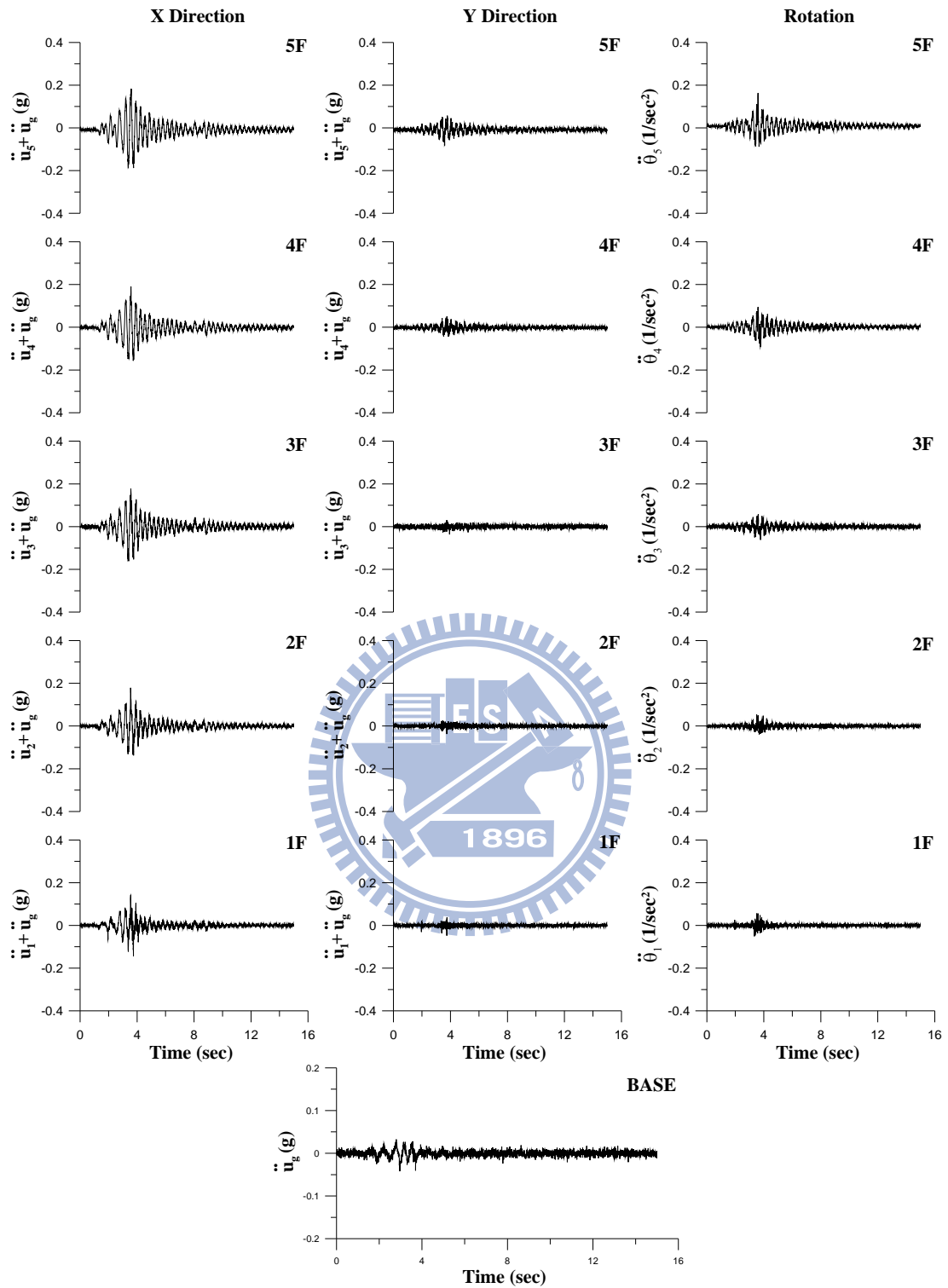


圖 5.10 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；健康結構)

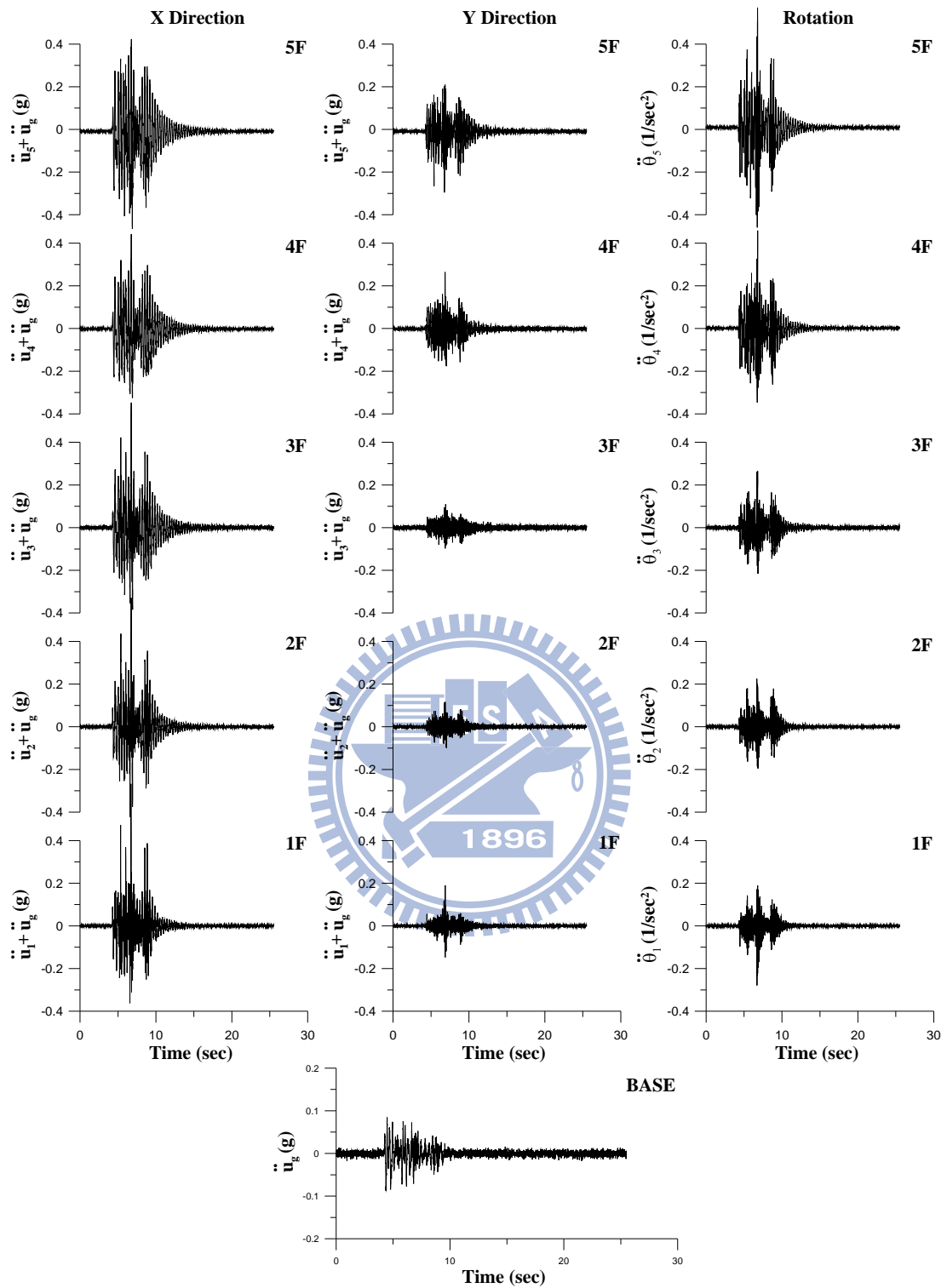


圖 5.11 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；健康結構)



圖 5.12 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

(單一樓層受損；移除一樓弱軸斜撐)



圖 5.13 弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

(複數樓層受損；移除一樓及三樓弱軸斜撐)

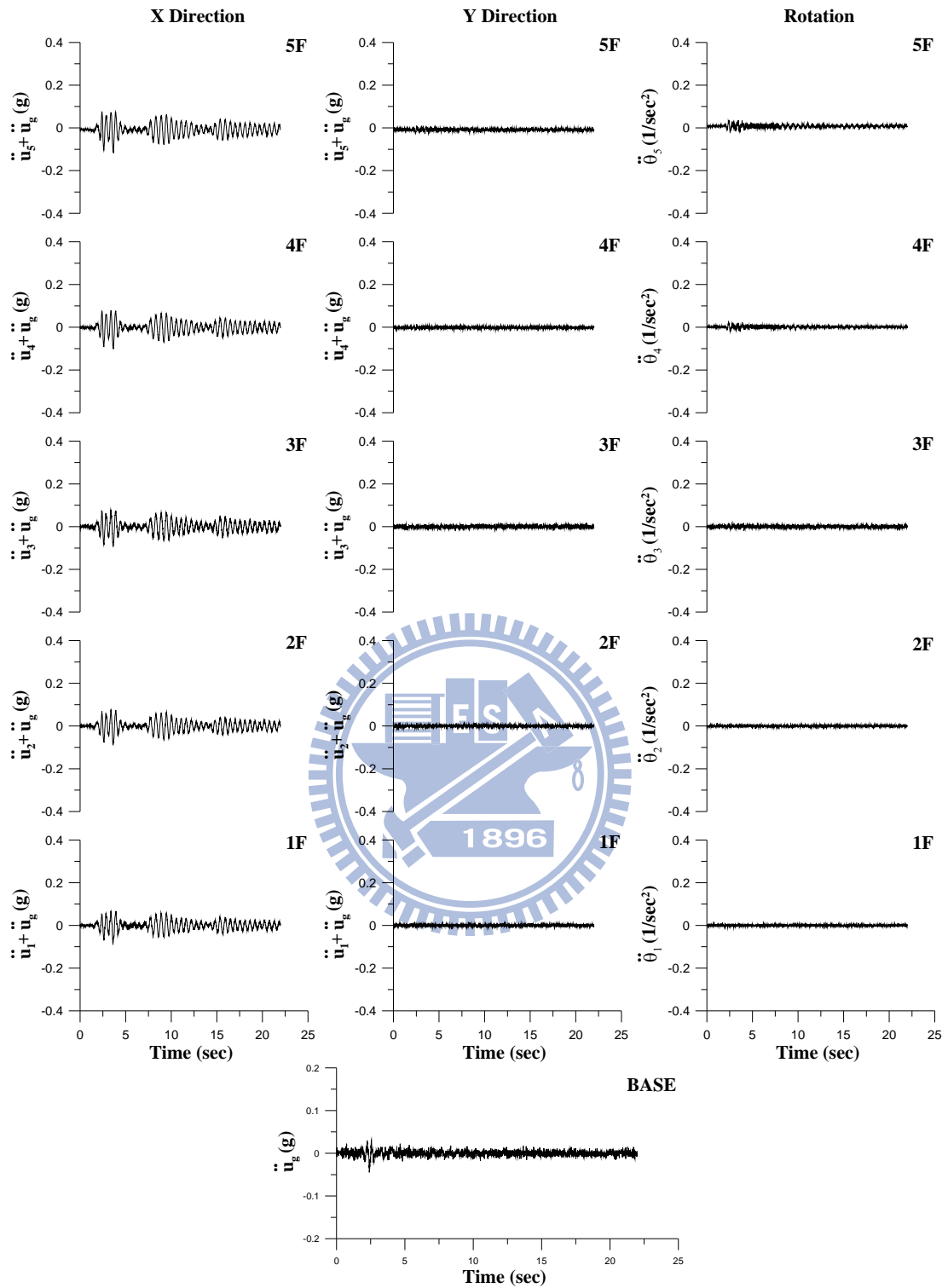


圖 5.14 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓受損結構)

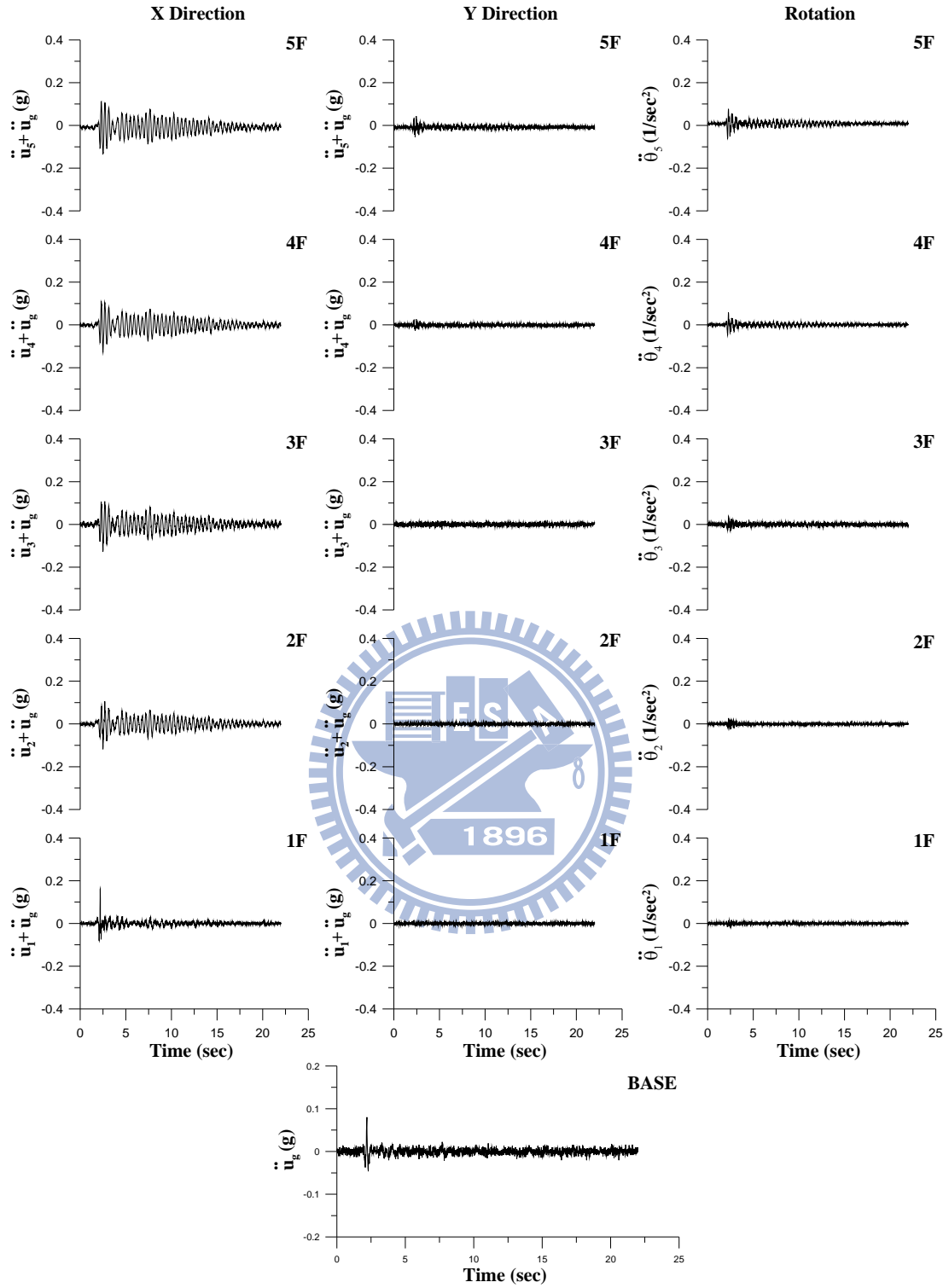


圖 5.15 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓受損結構)



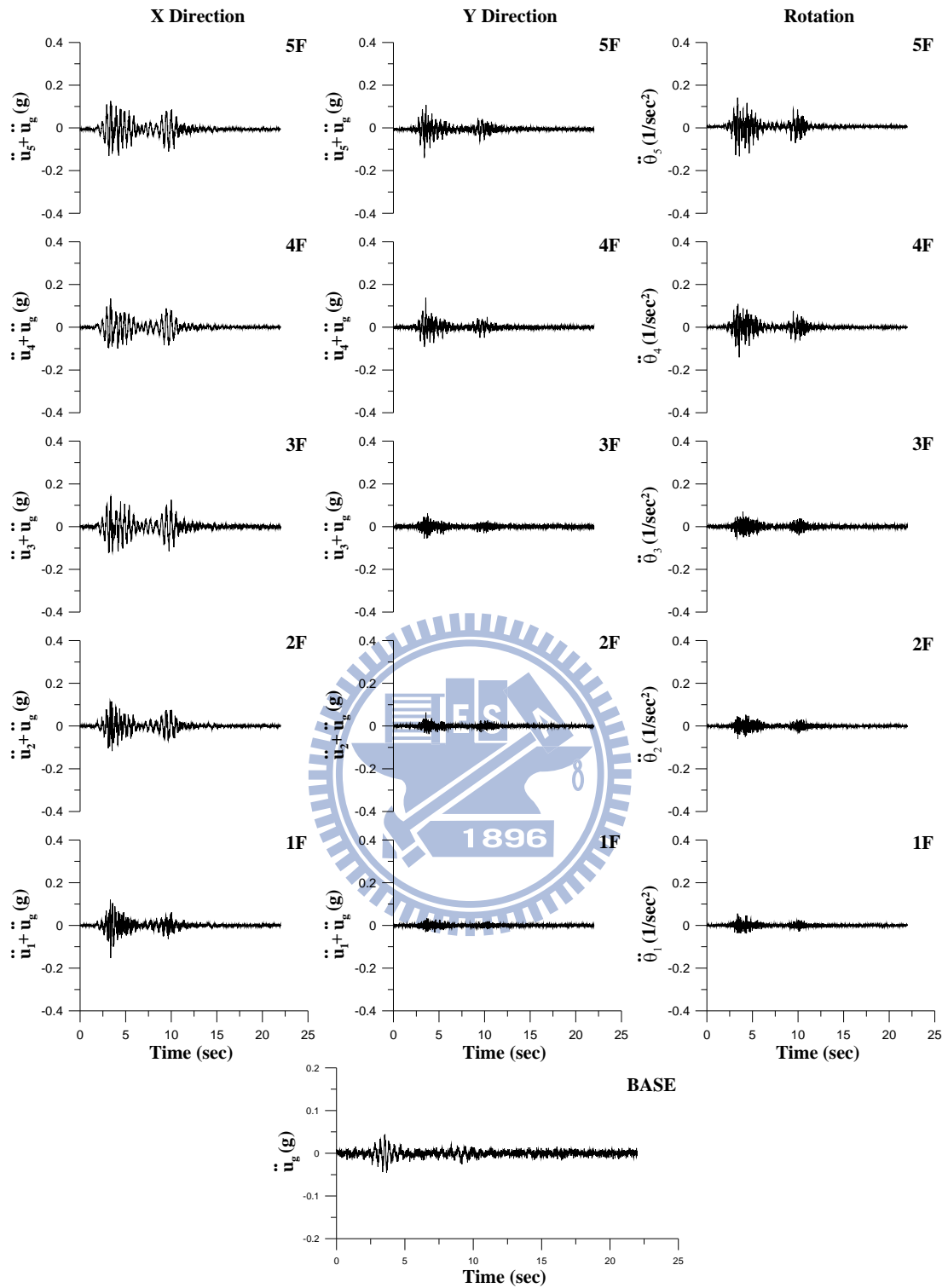


圖 5.16 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓受損結構)

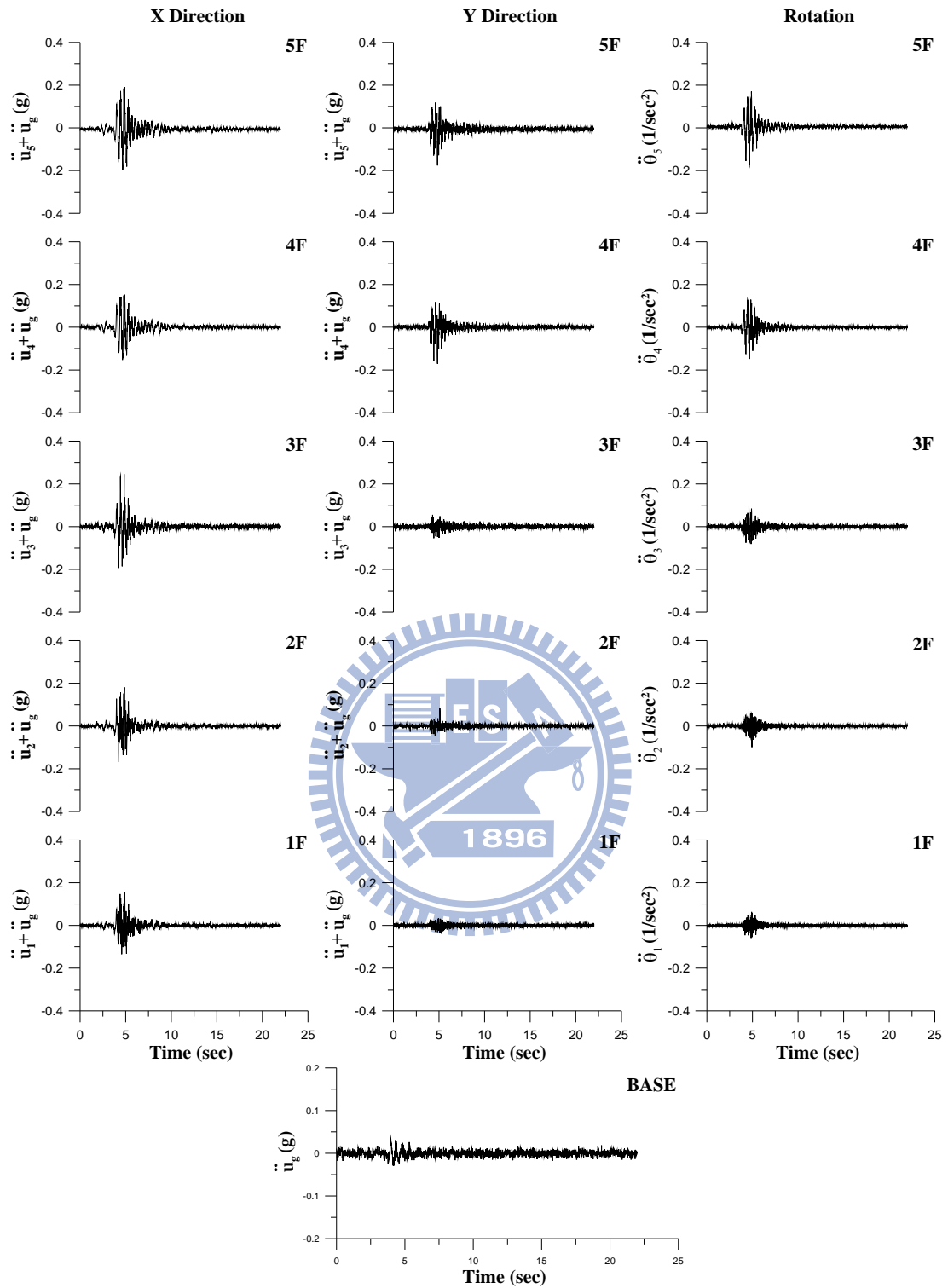


圖 5.17 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；四樓受損結構)

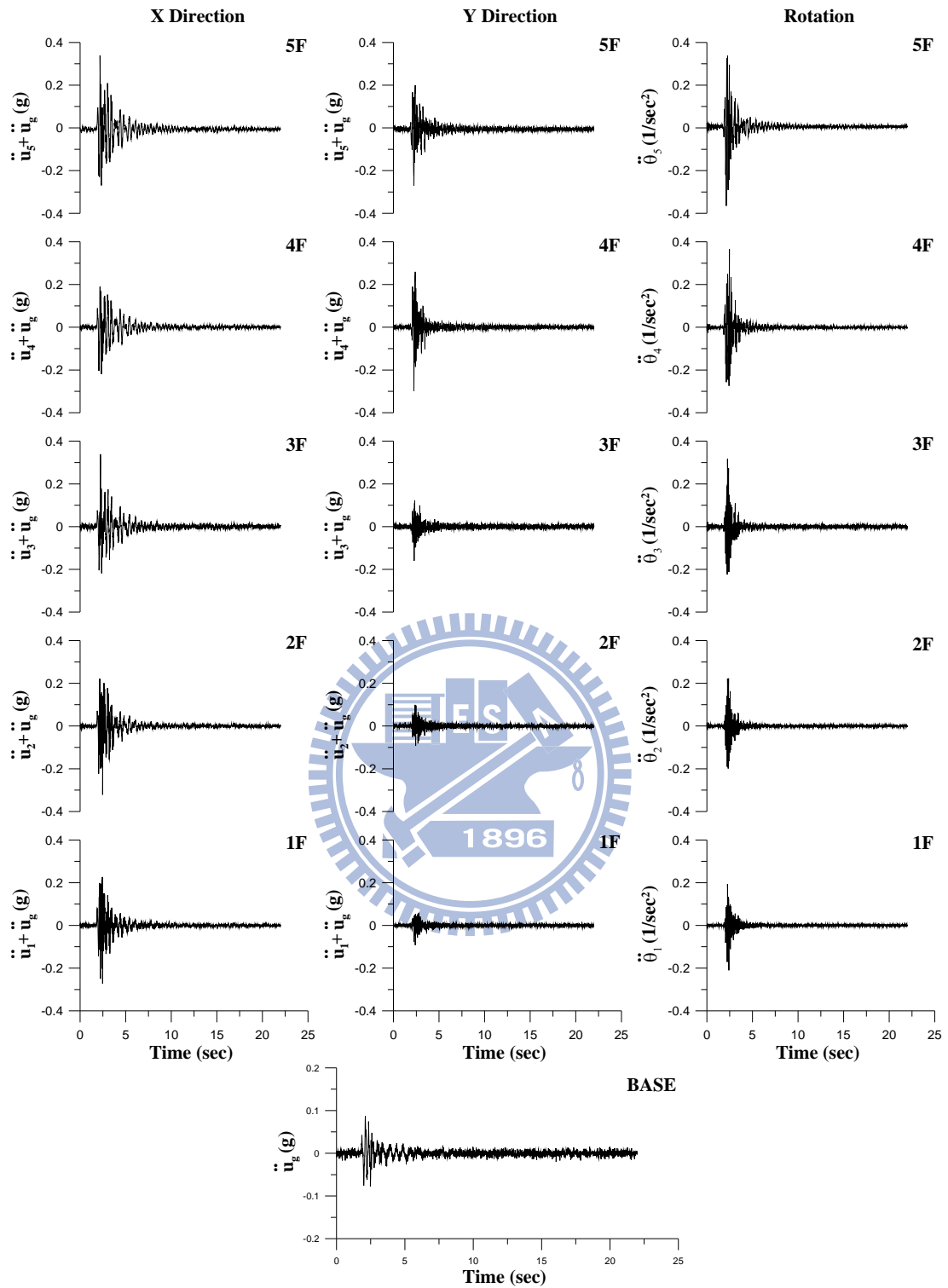


圖 5.18 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；五樓受損結構)

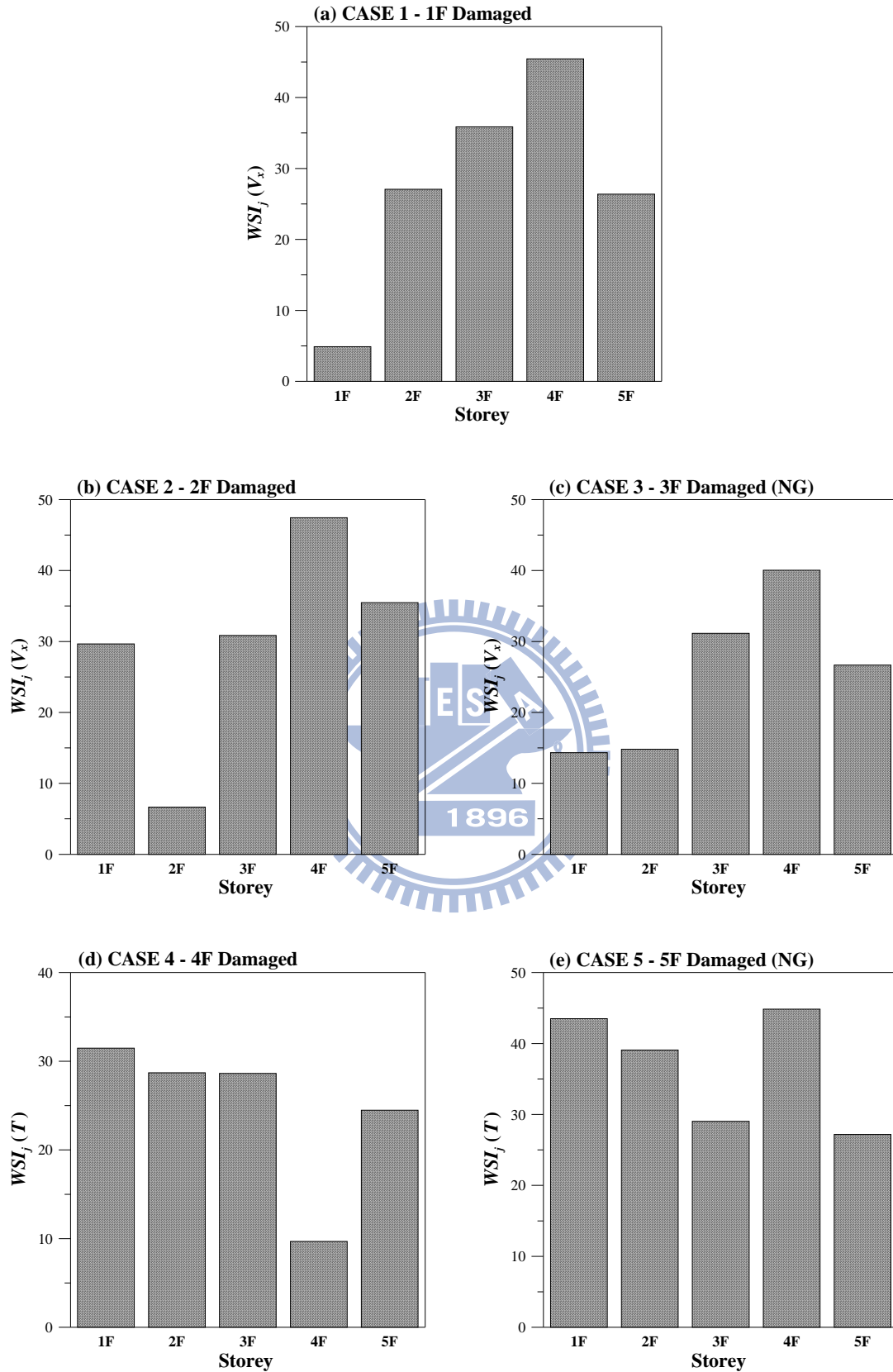


圖 5.19 位形空間 DLV 分析結果(x 向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro)

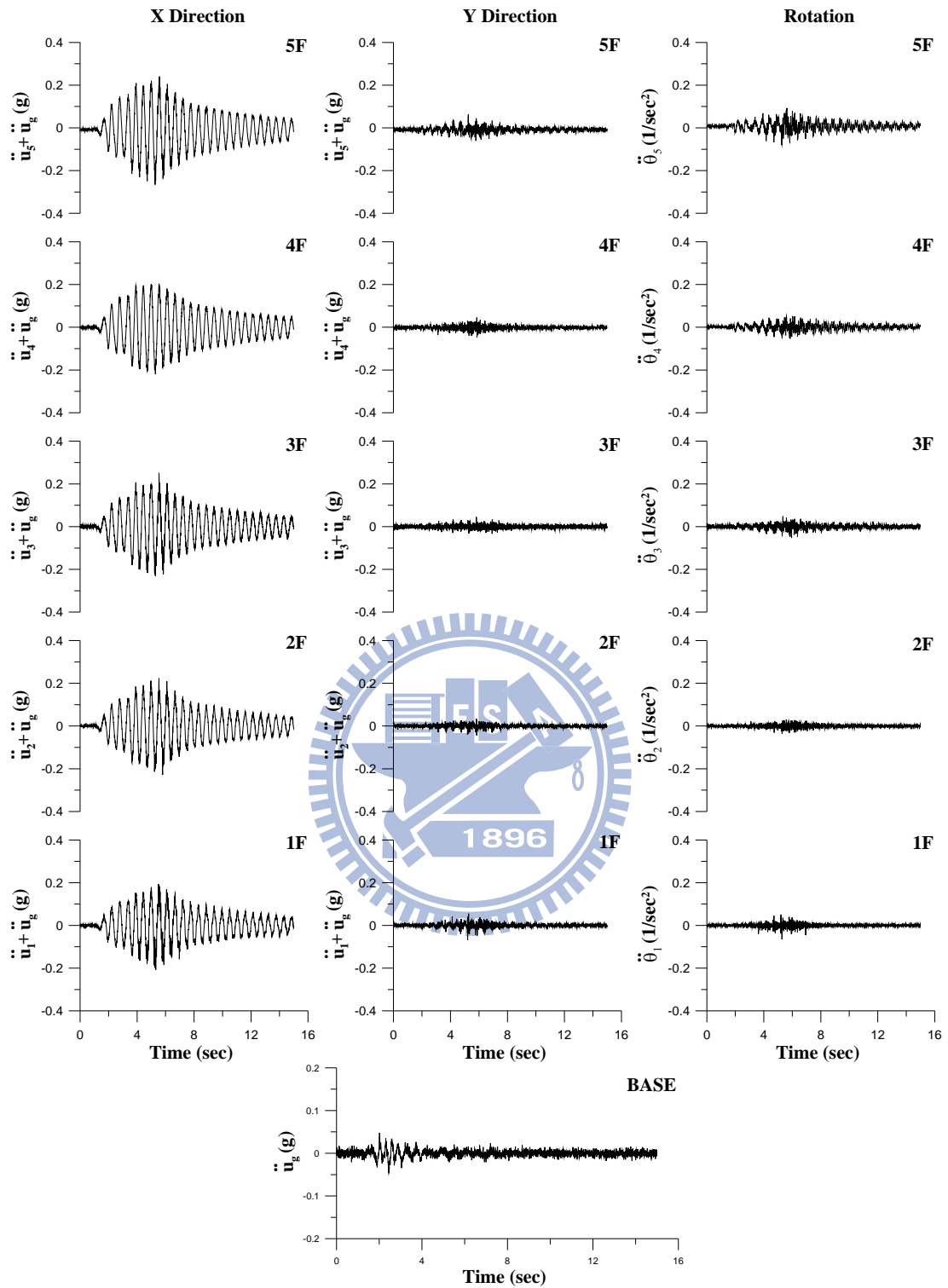


圖 5.20 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓受損結構)

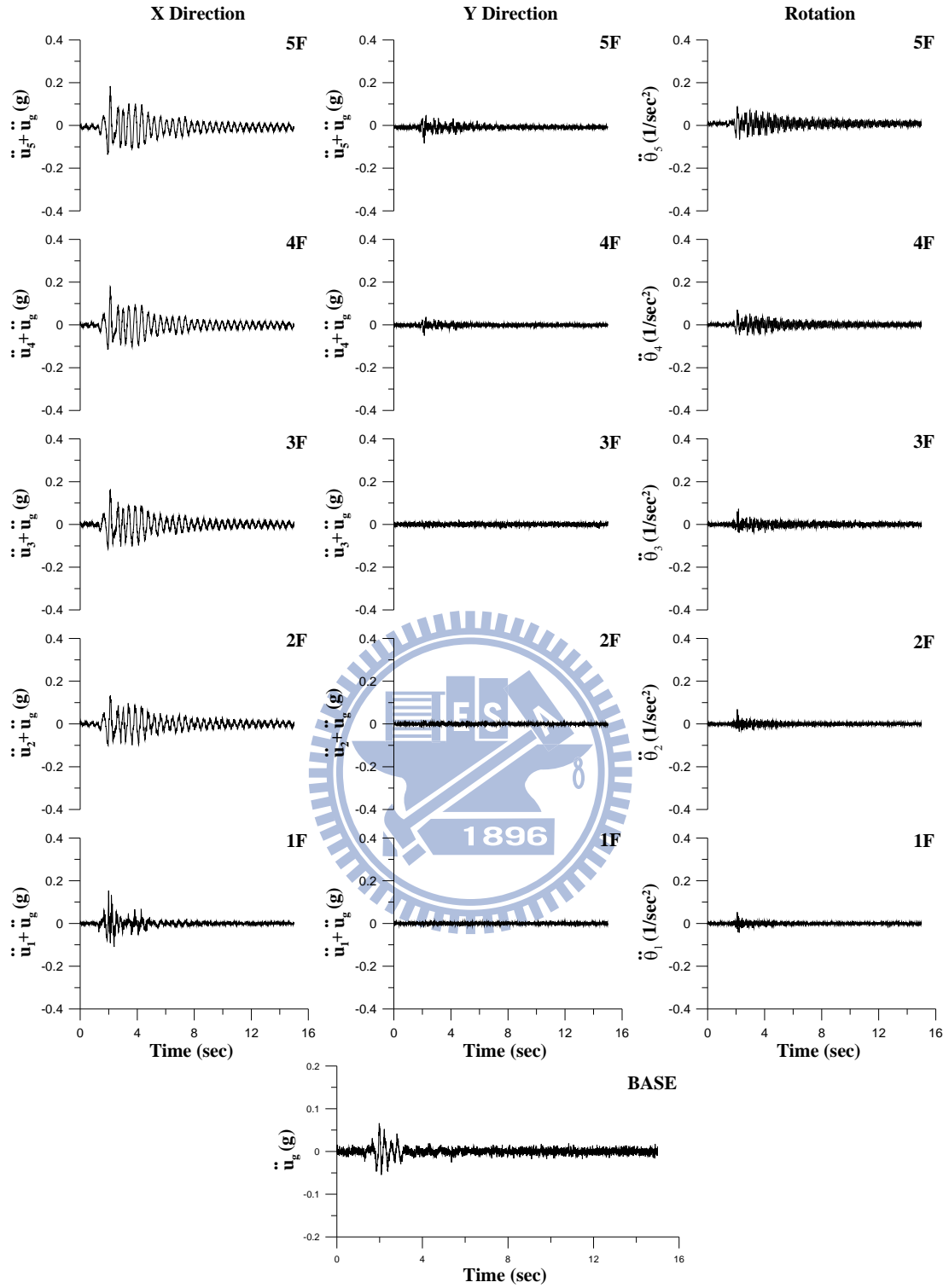


圖 5.21 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓受損結構)

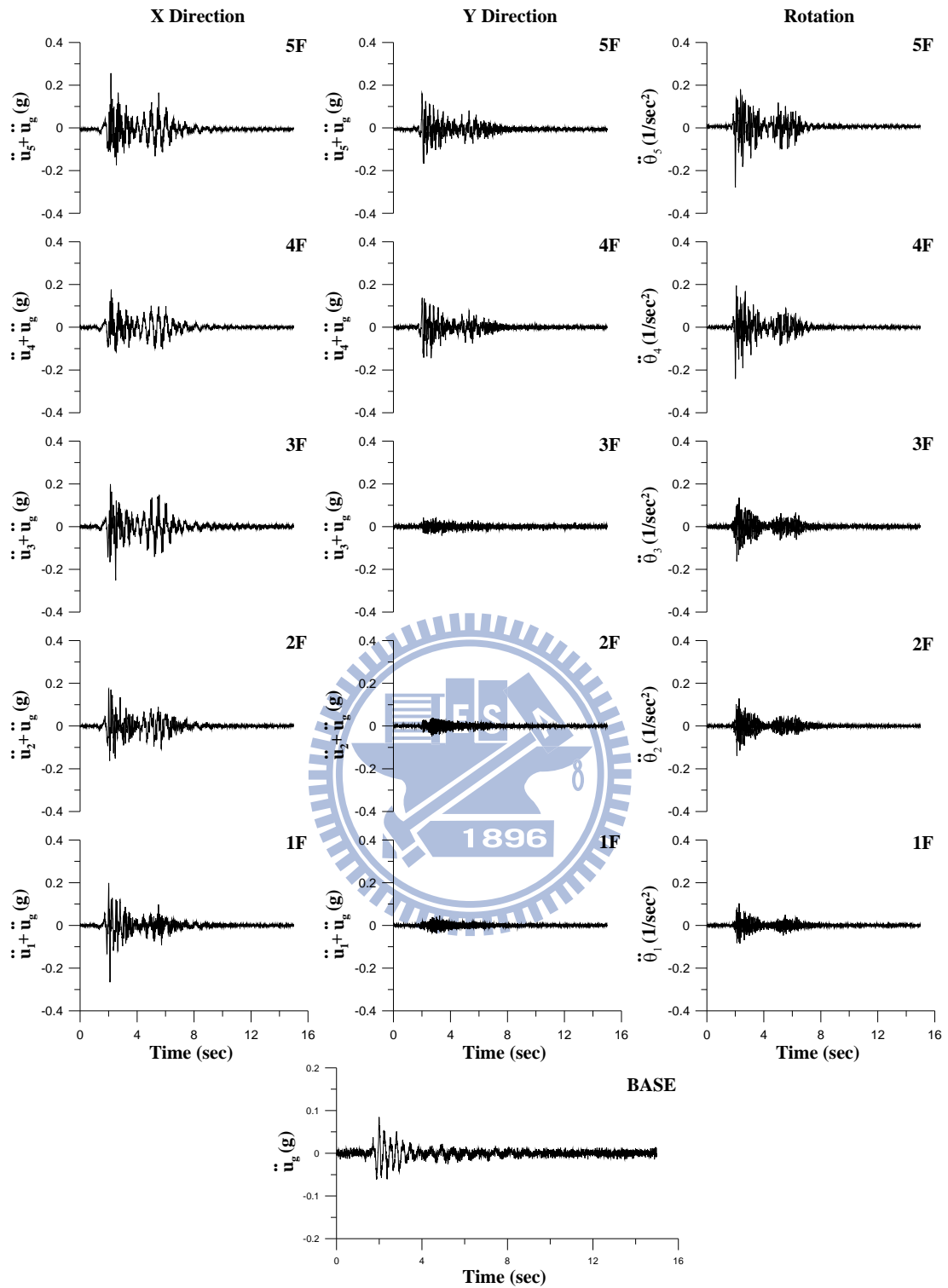


圖 5.22 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓受損結構)

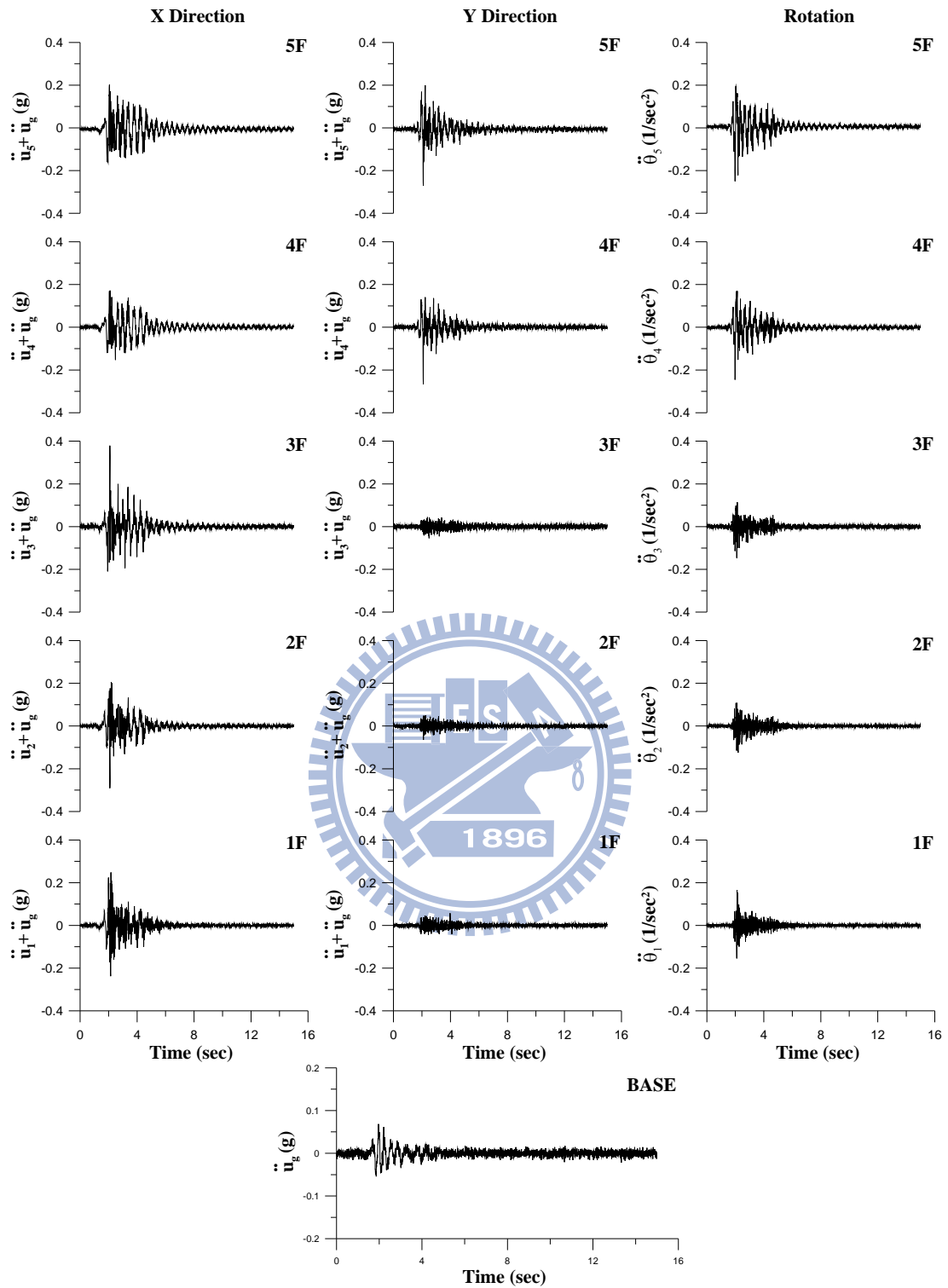


圖 5.23 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；四樓受損結構)



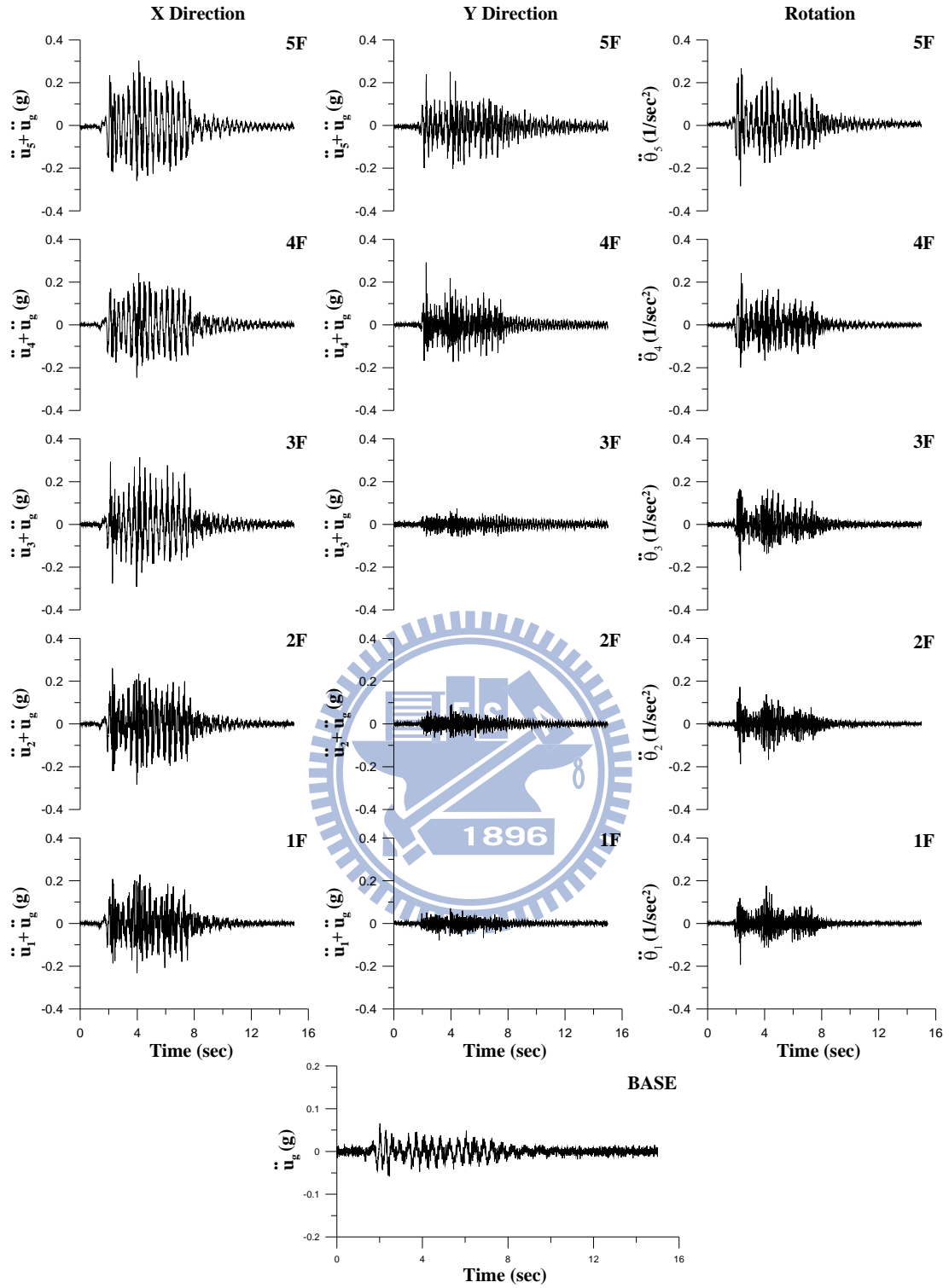


圖 5.24 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；五樓受損結構)

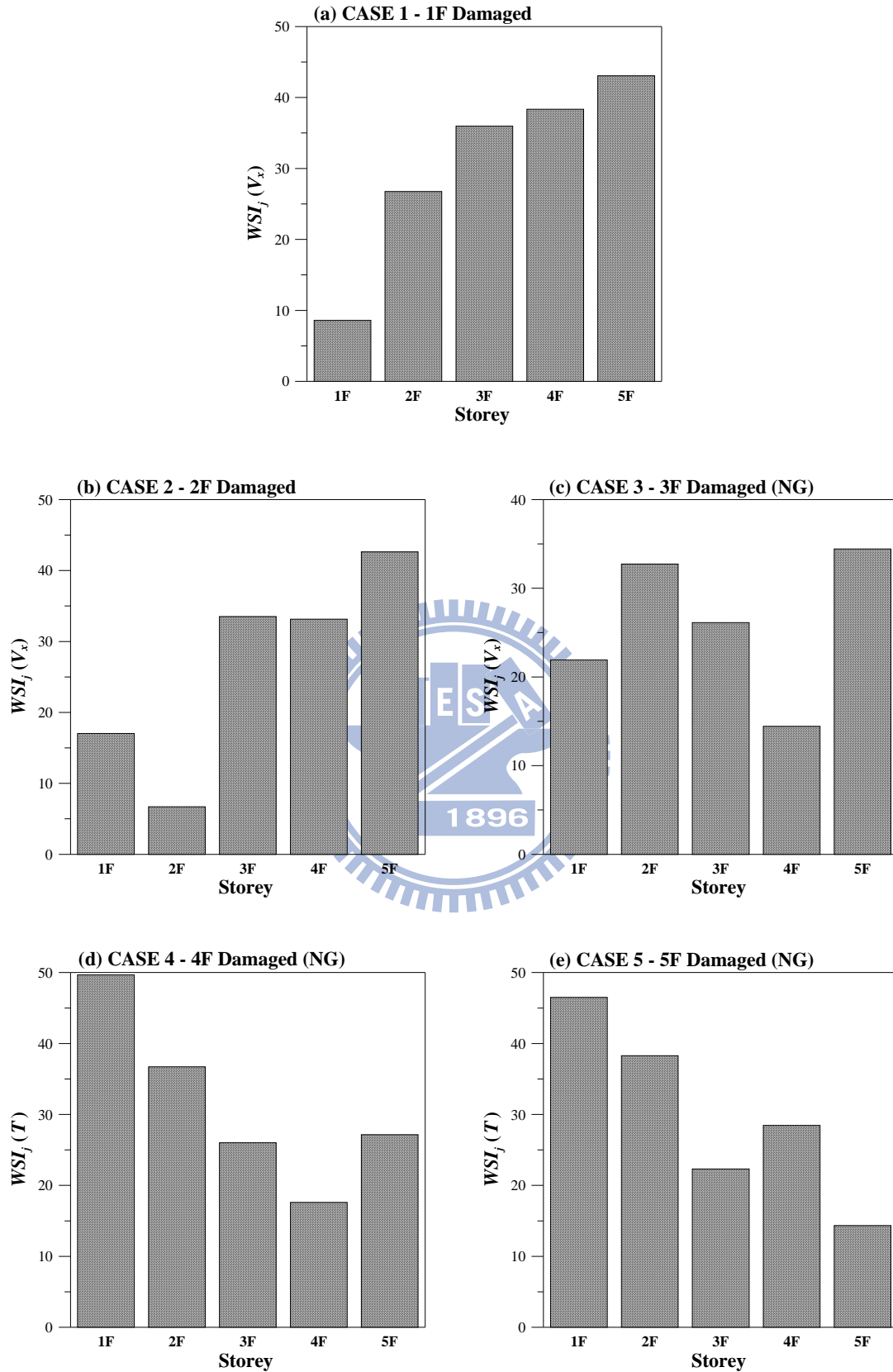


圖 5.25 位形空間 DLV 分析結果(x 向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe)

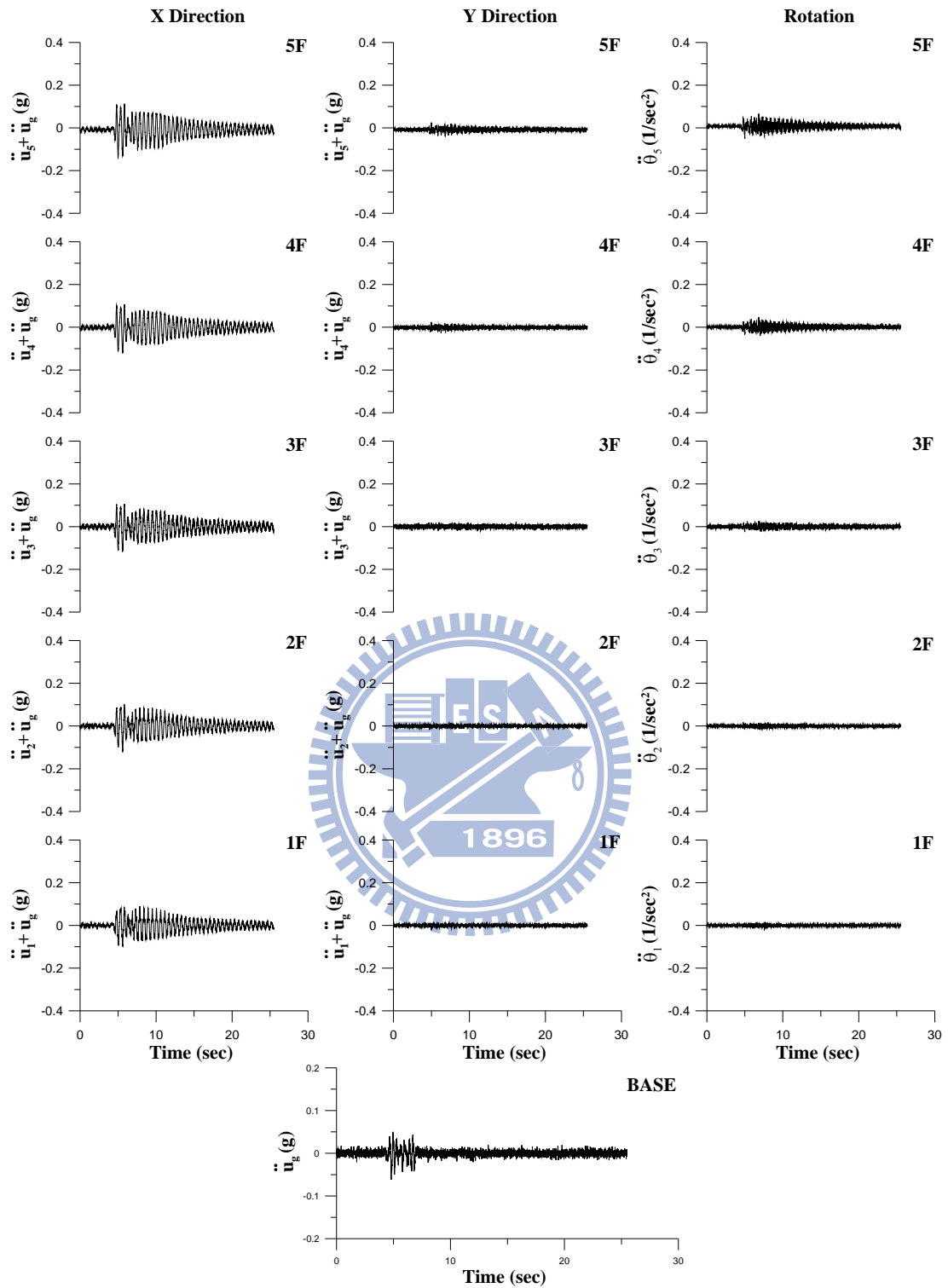


圖 5.26 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓受損結構)

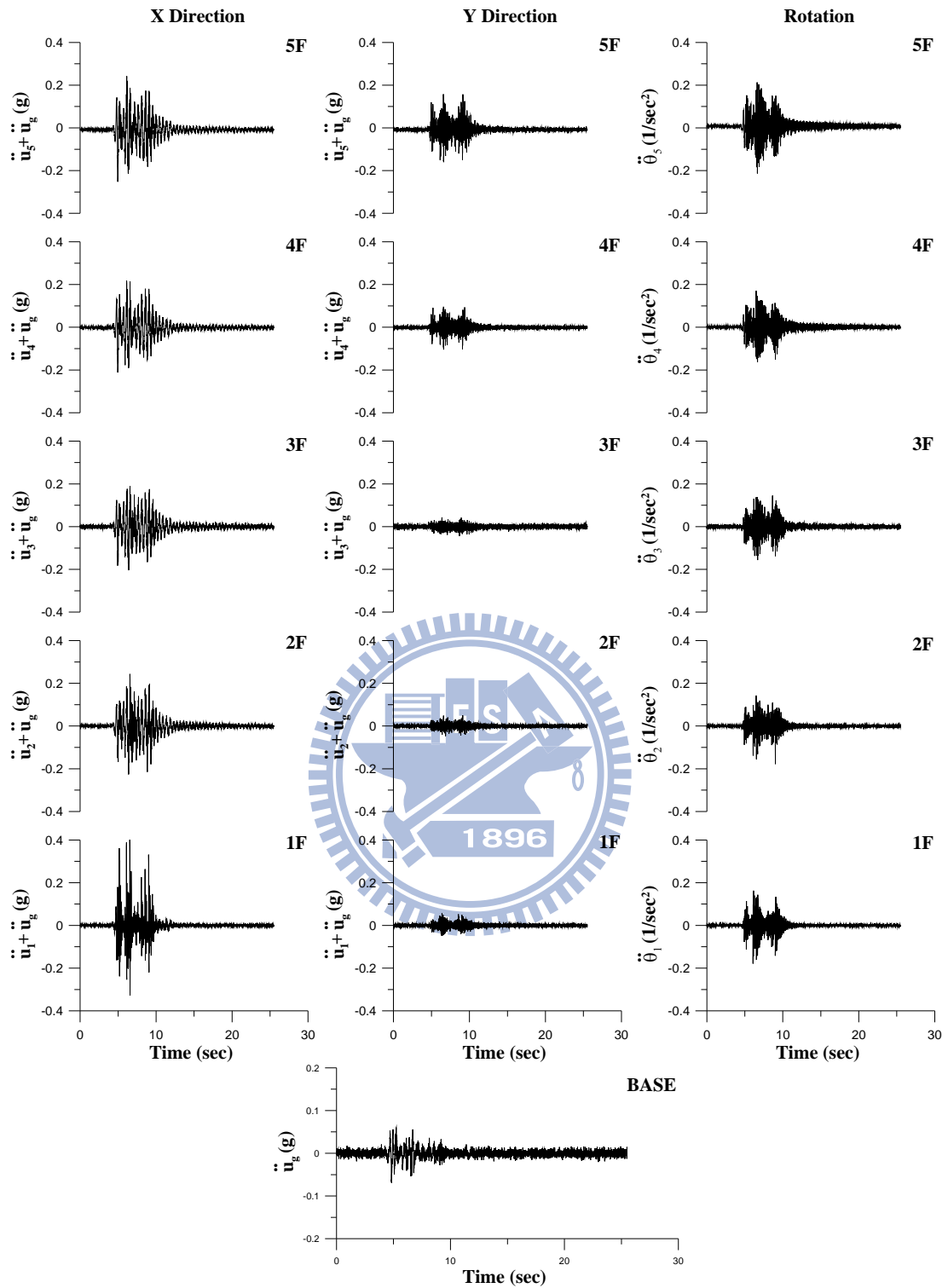


圖 5.27 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓受損結構)

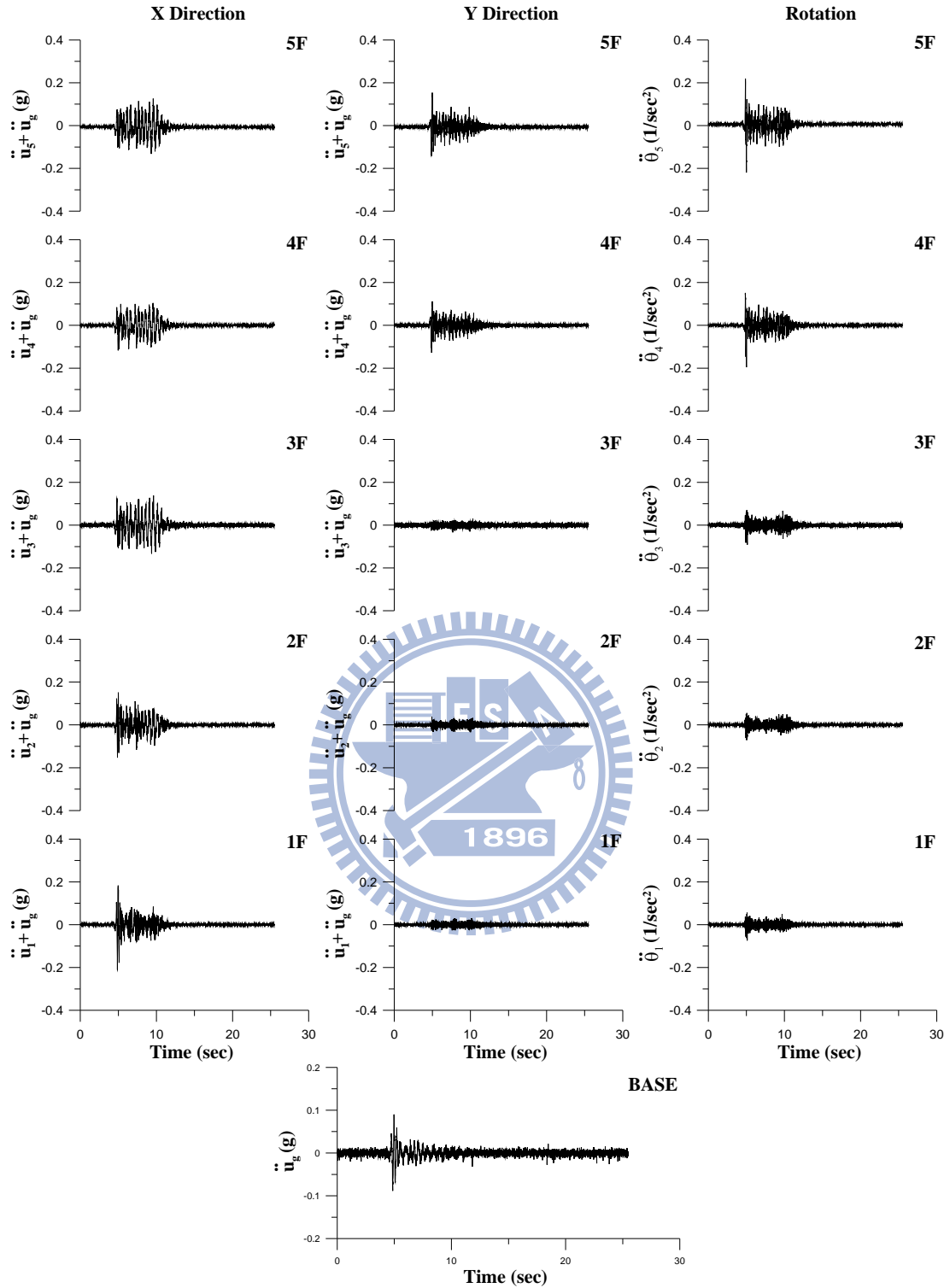


圖 5.28 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓受損結構)

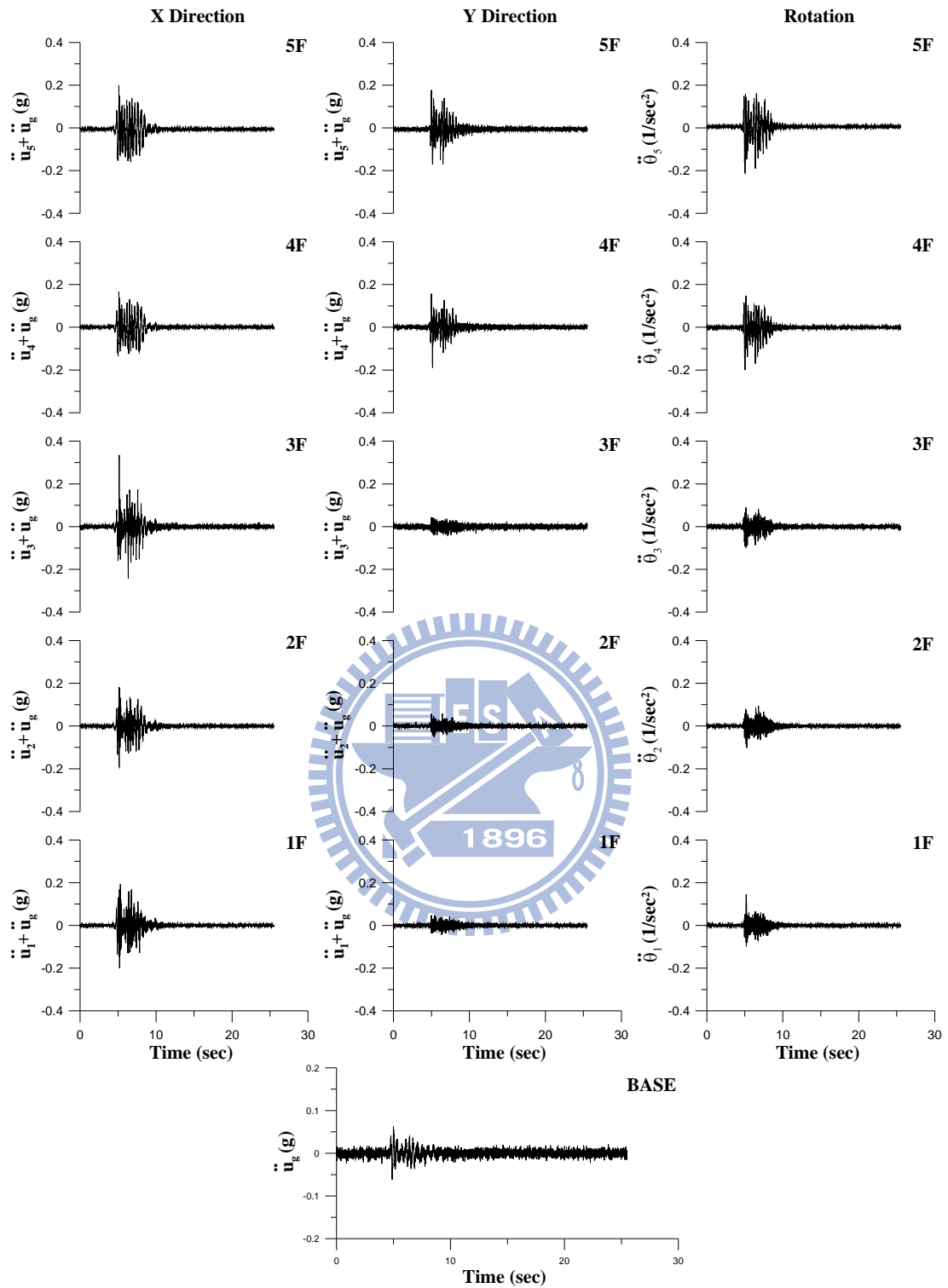


圖 5.29 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；四樓受損結構)

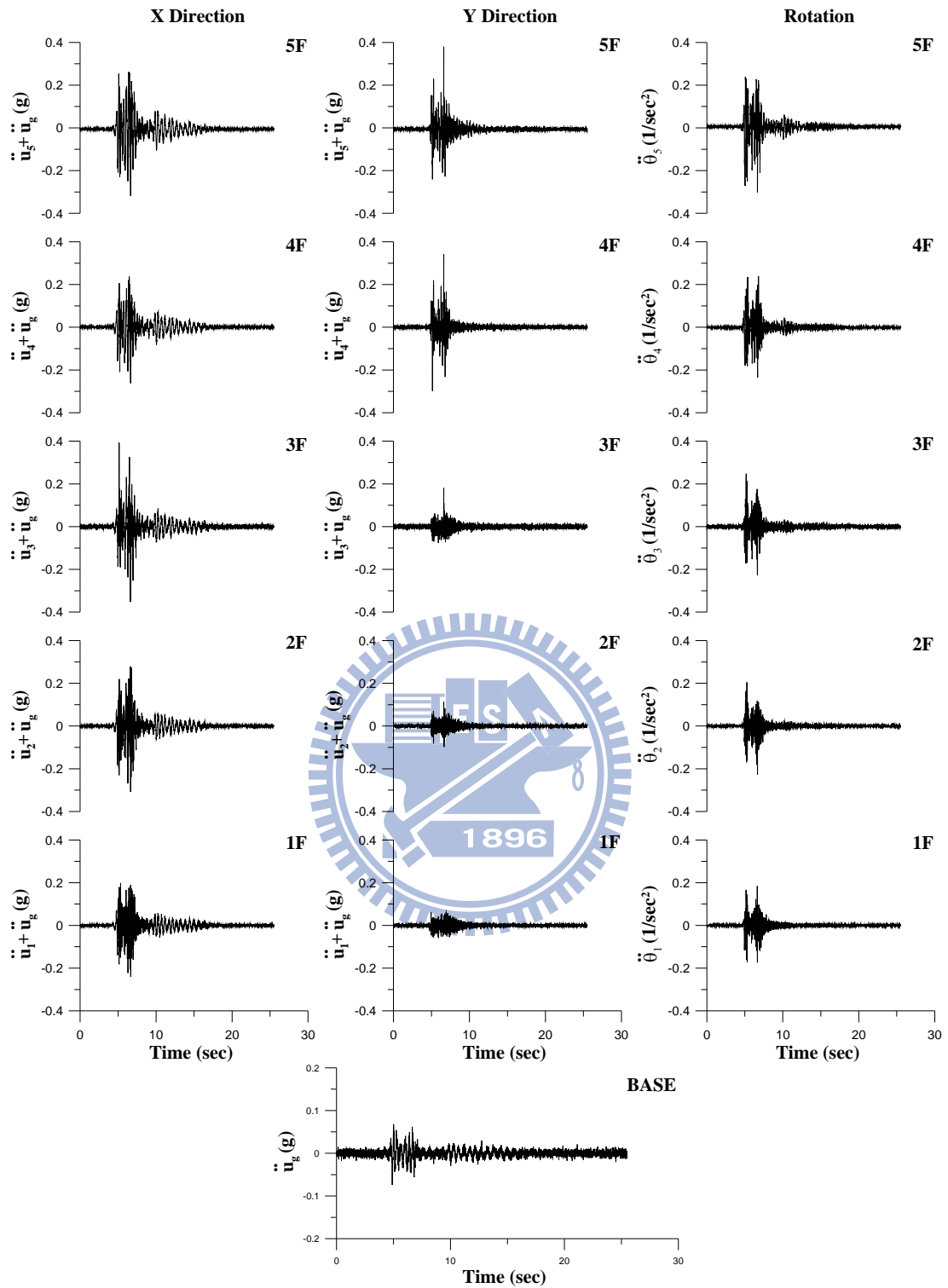


圖 5.30 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；五樓受損結構)

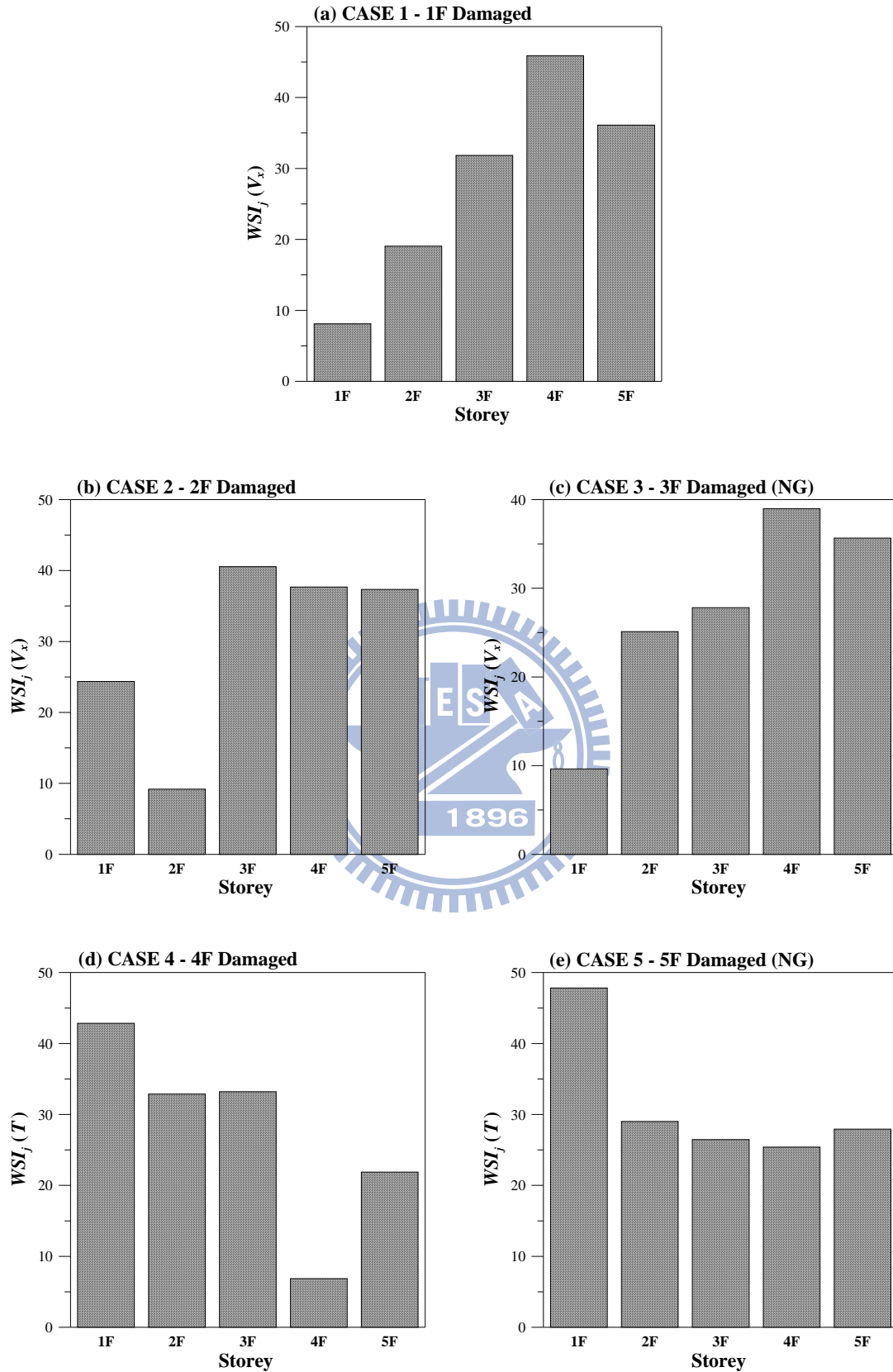


圖 5.31 位形空間 DLV 分析結果(x 向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe)



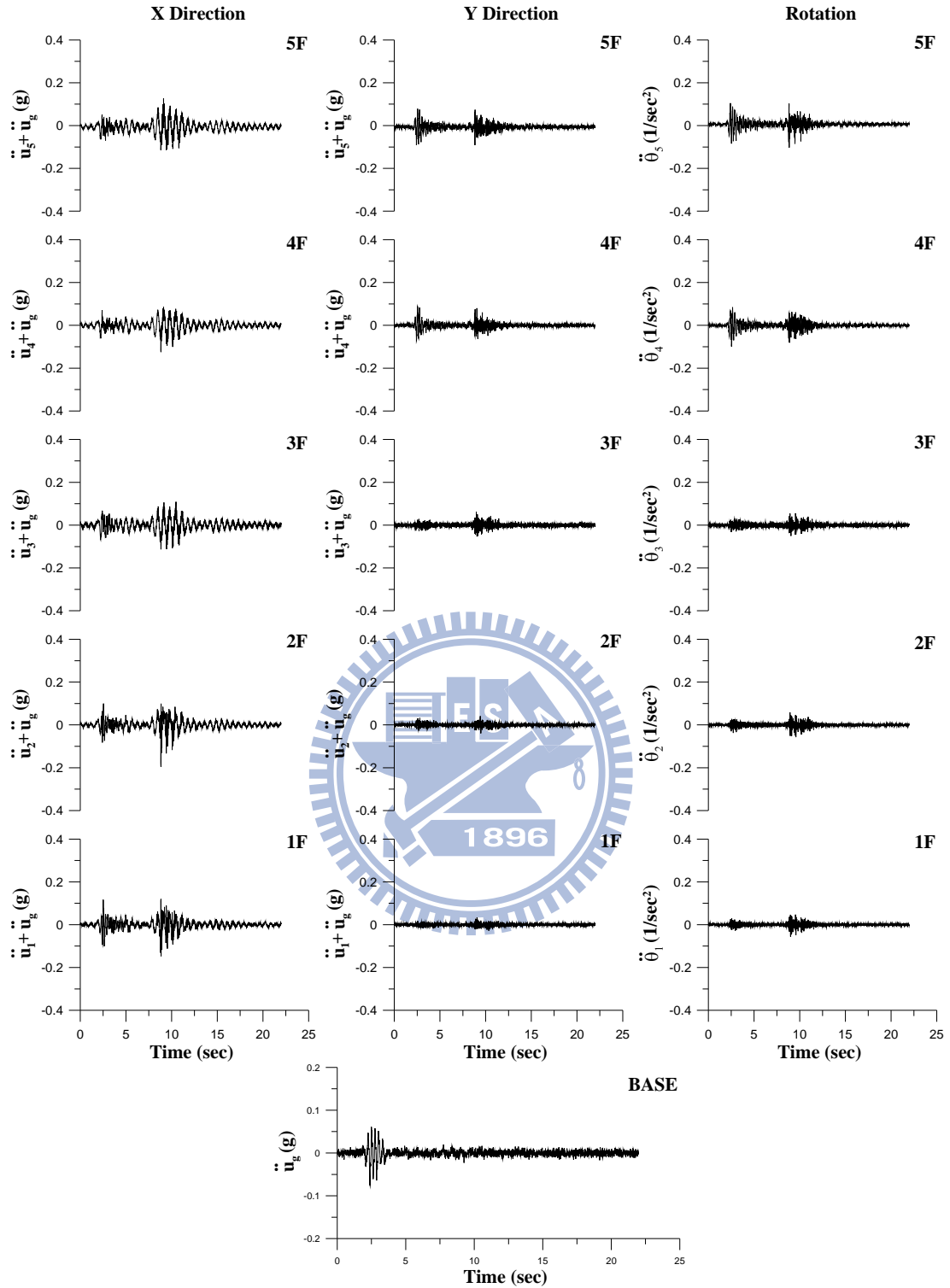


圖 5.32 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)

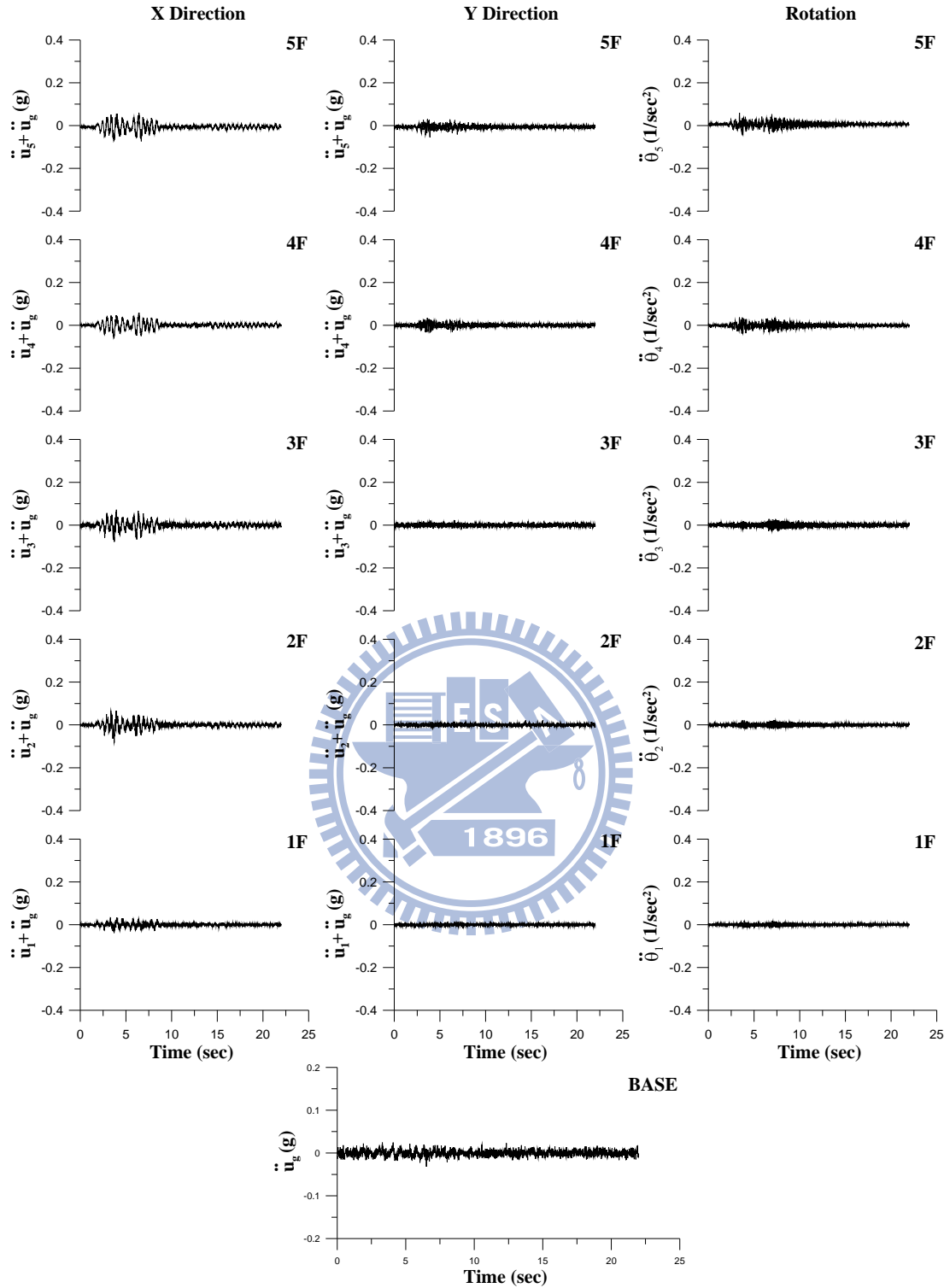


圖 5.33 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓及四樓受損結構)

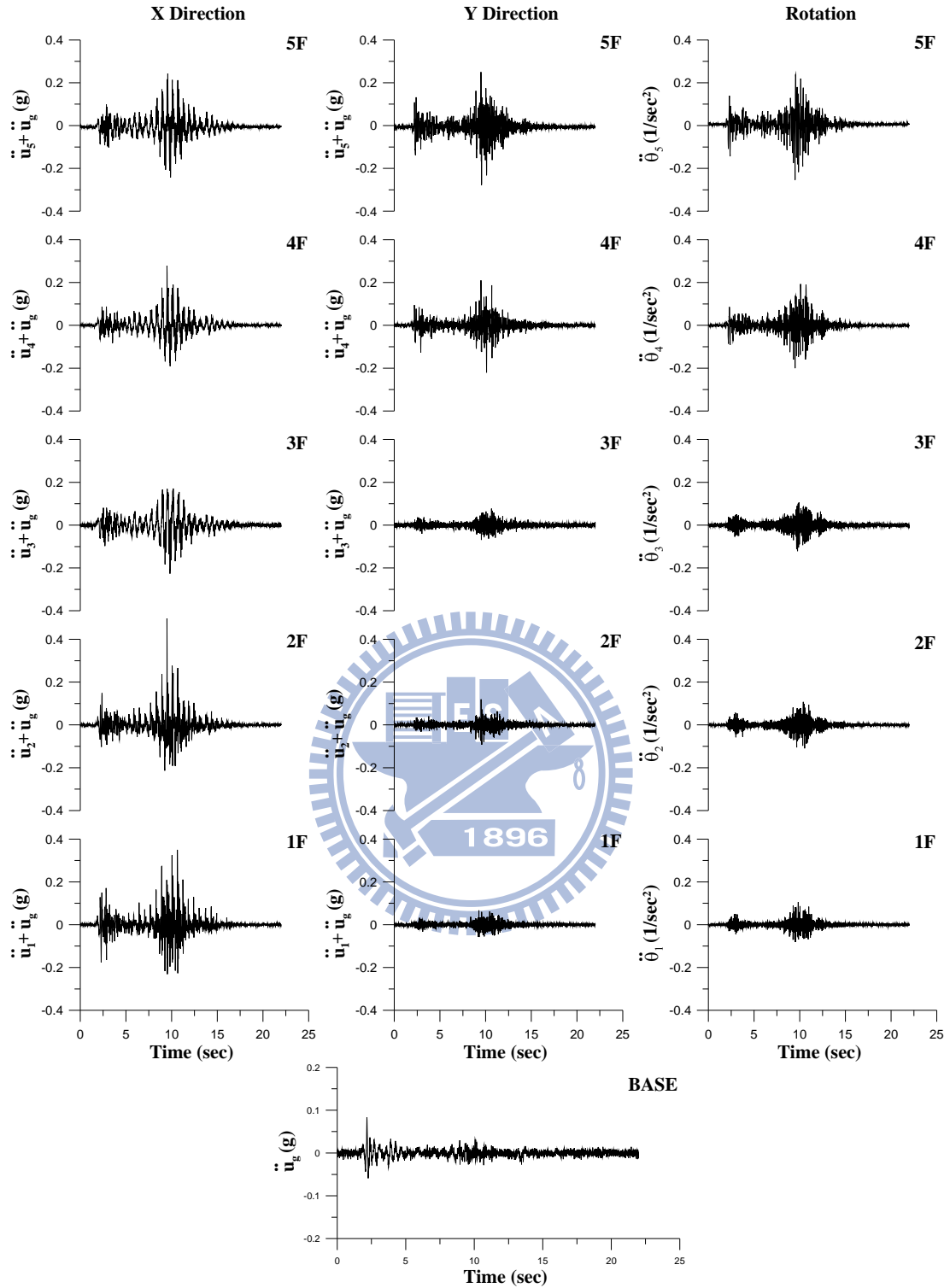


圖 5.34 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓及五樓受損結構)

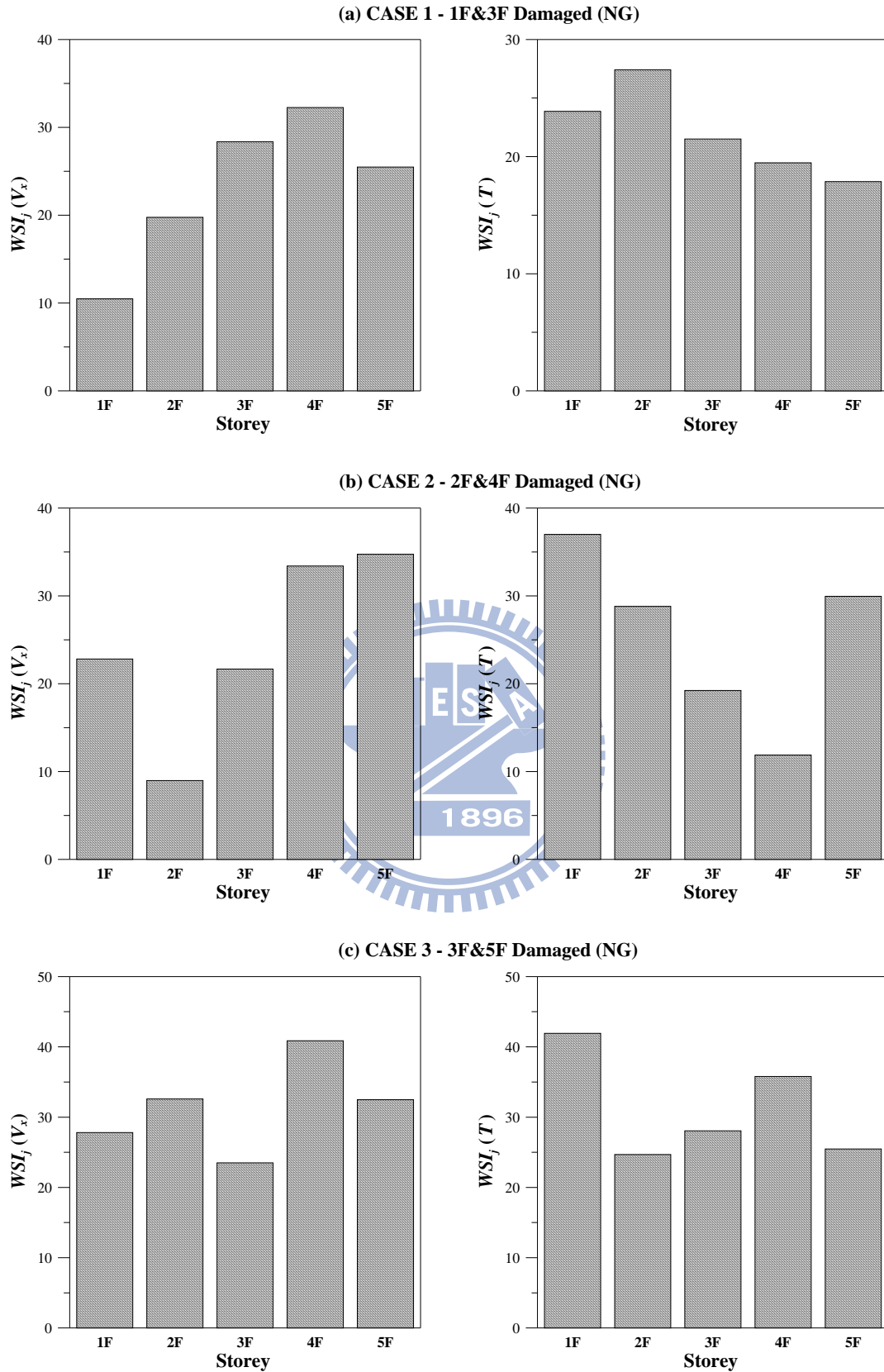


圖 5.35 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro)

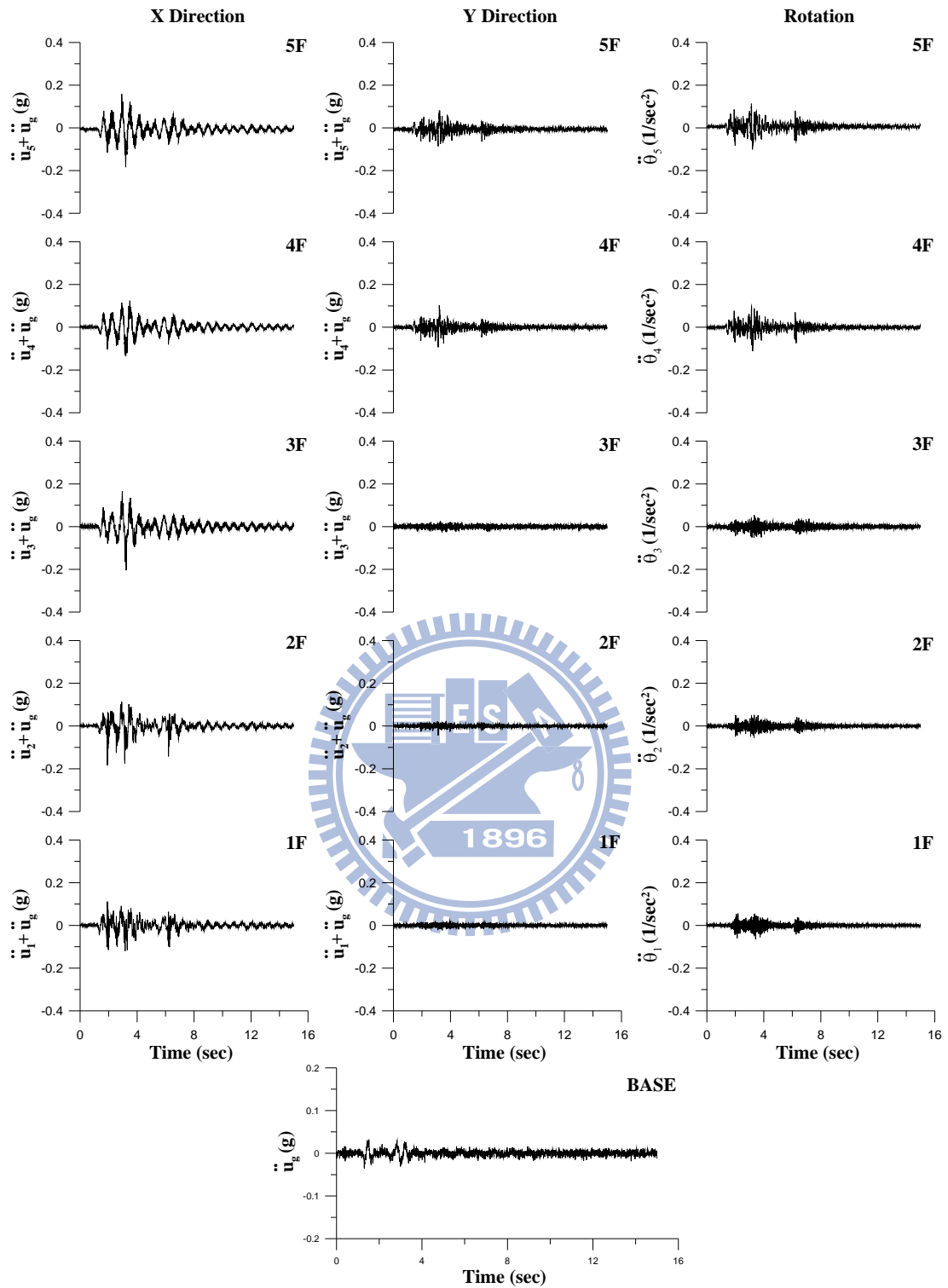


圖 5.36 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)

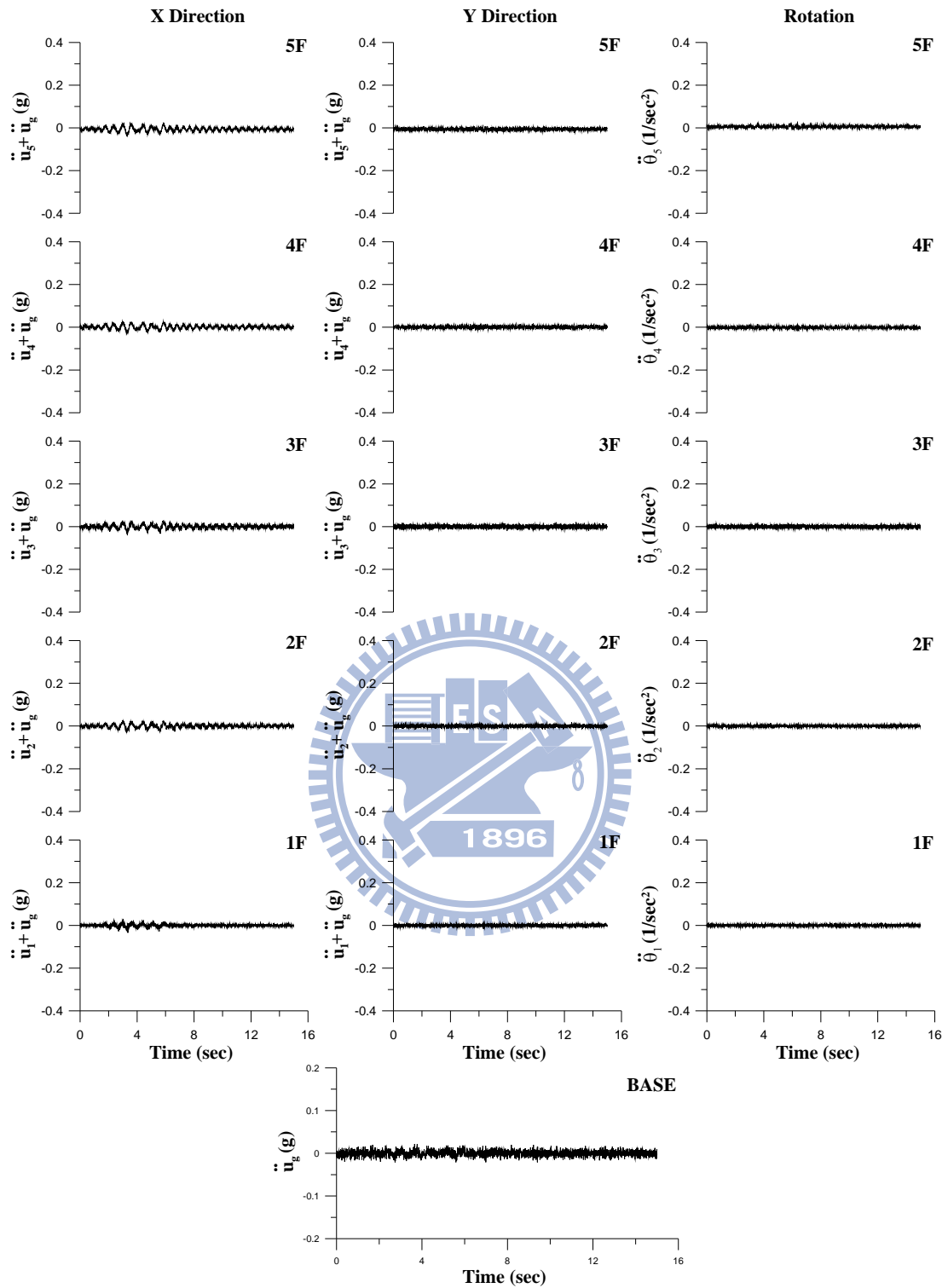


圖 5.37 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓及四樓受損結構)

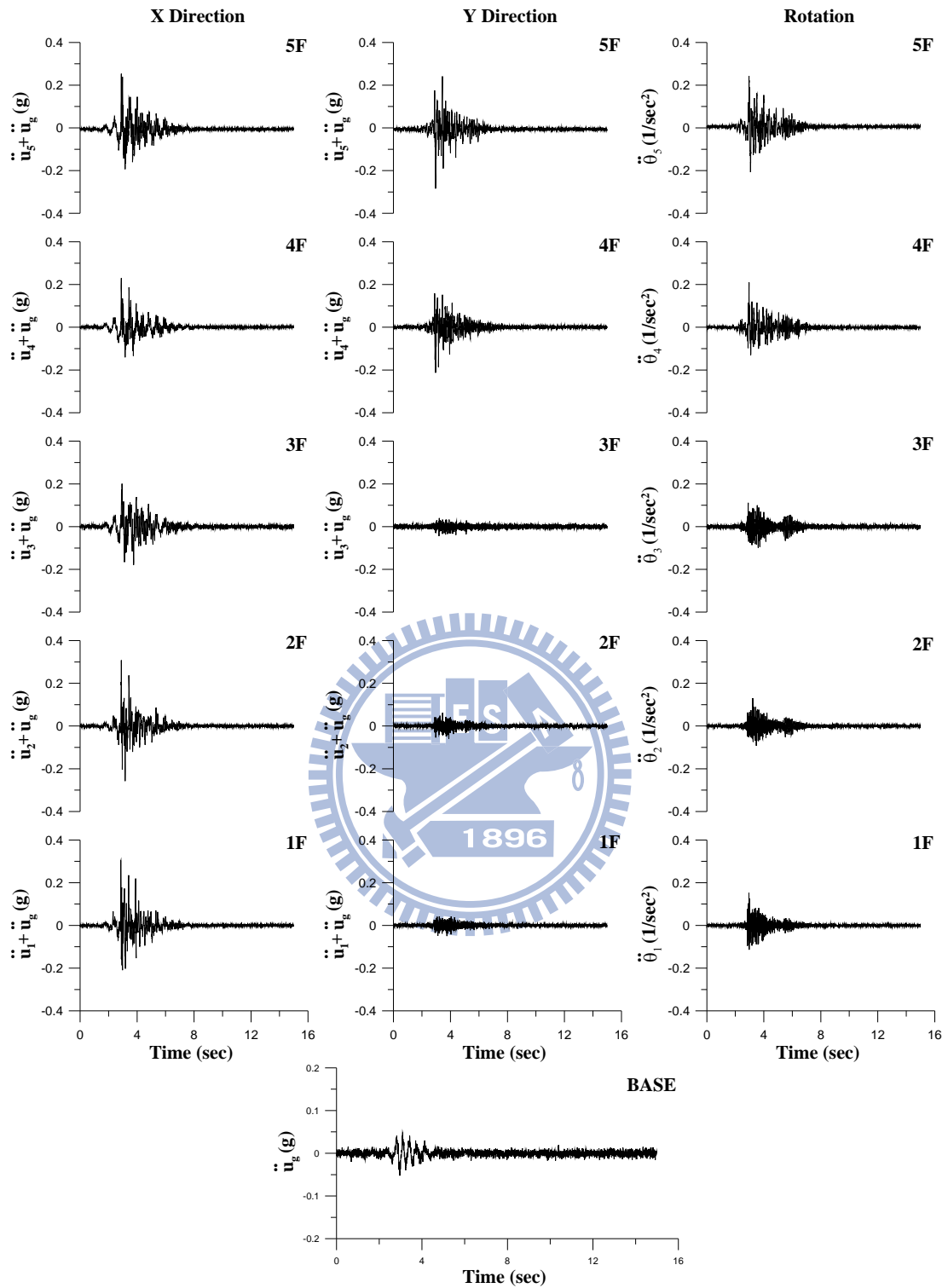


圖 5.38 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓及五樓受損結構)

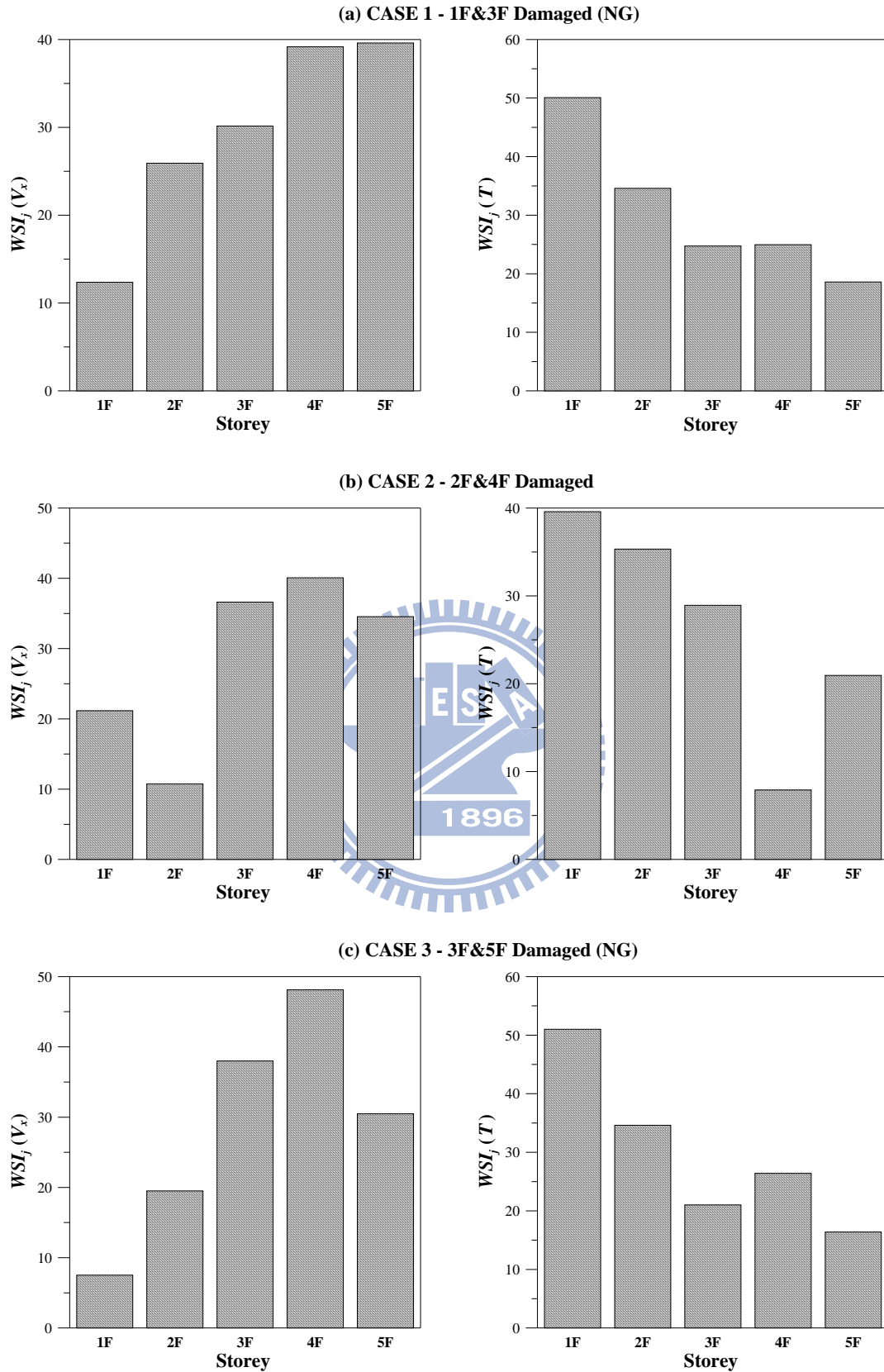


圖 5.39 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe)



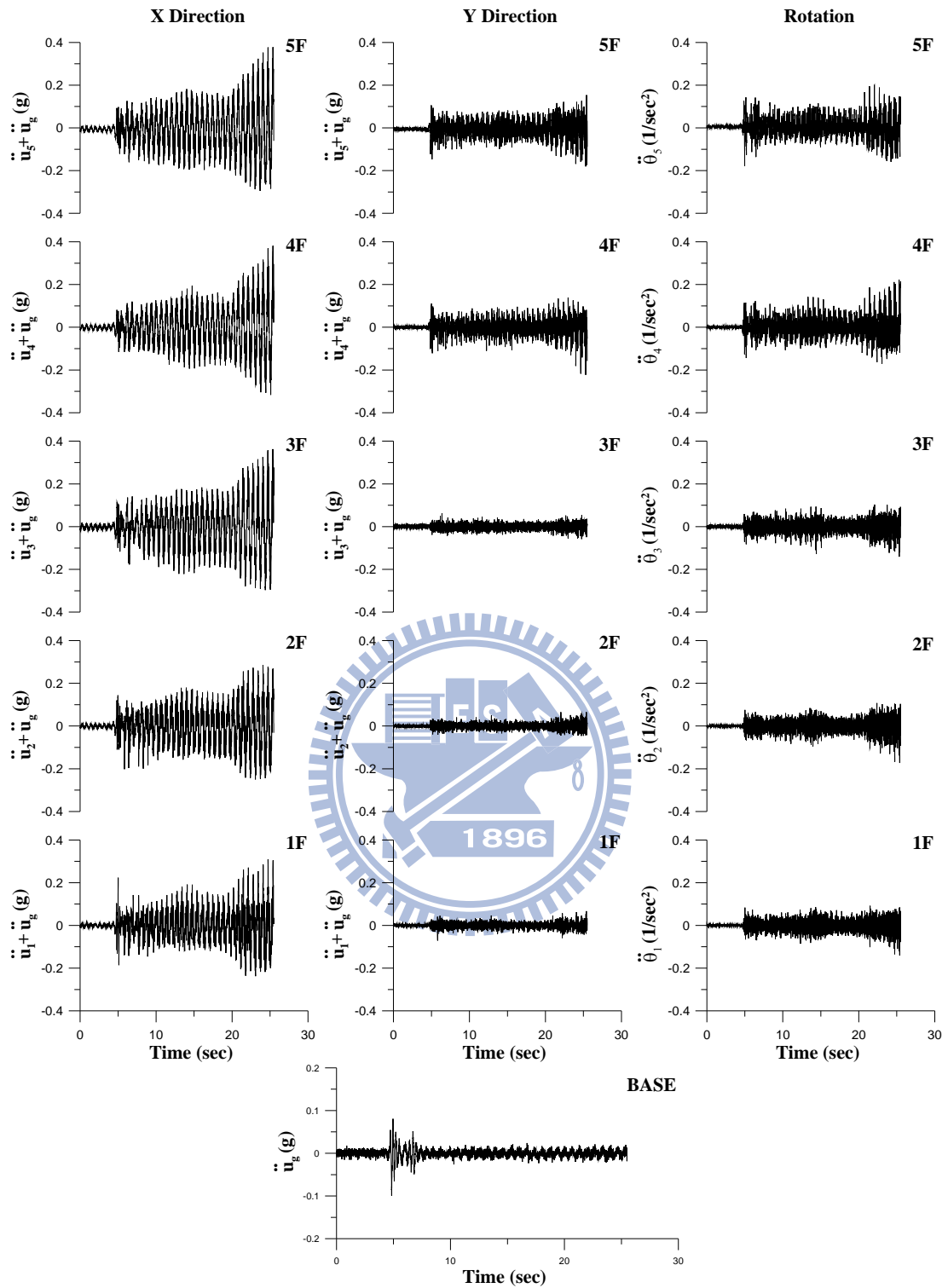


圖 5.40 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)

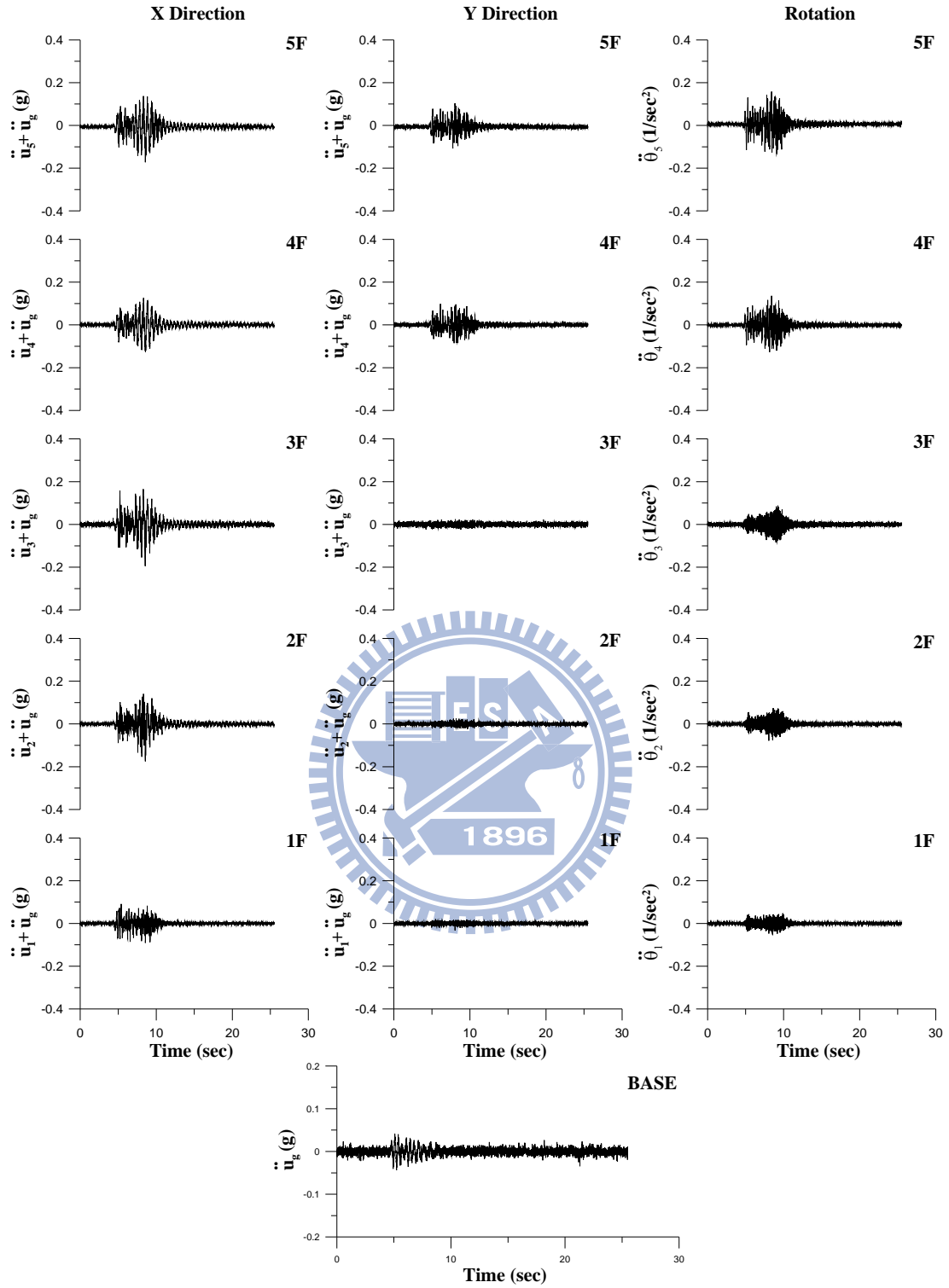


圖 5.41 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；二樓及四樓受損結構)

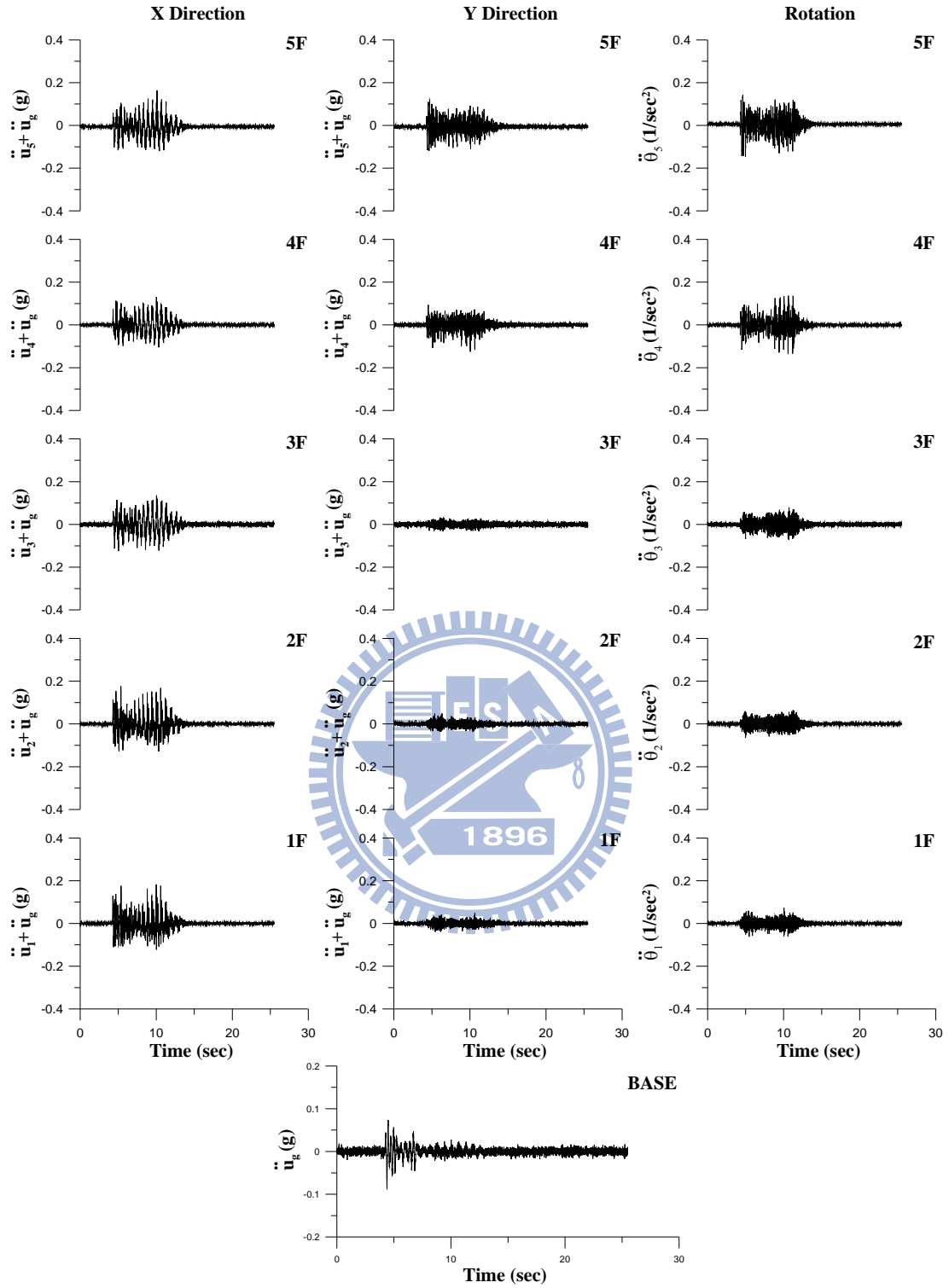


圖 5.42 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.05g)

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；三樓及五樓受損結構)

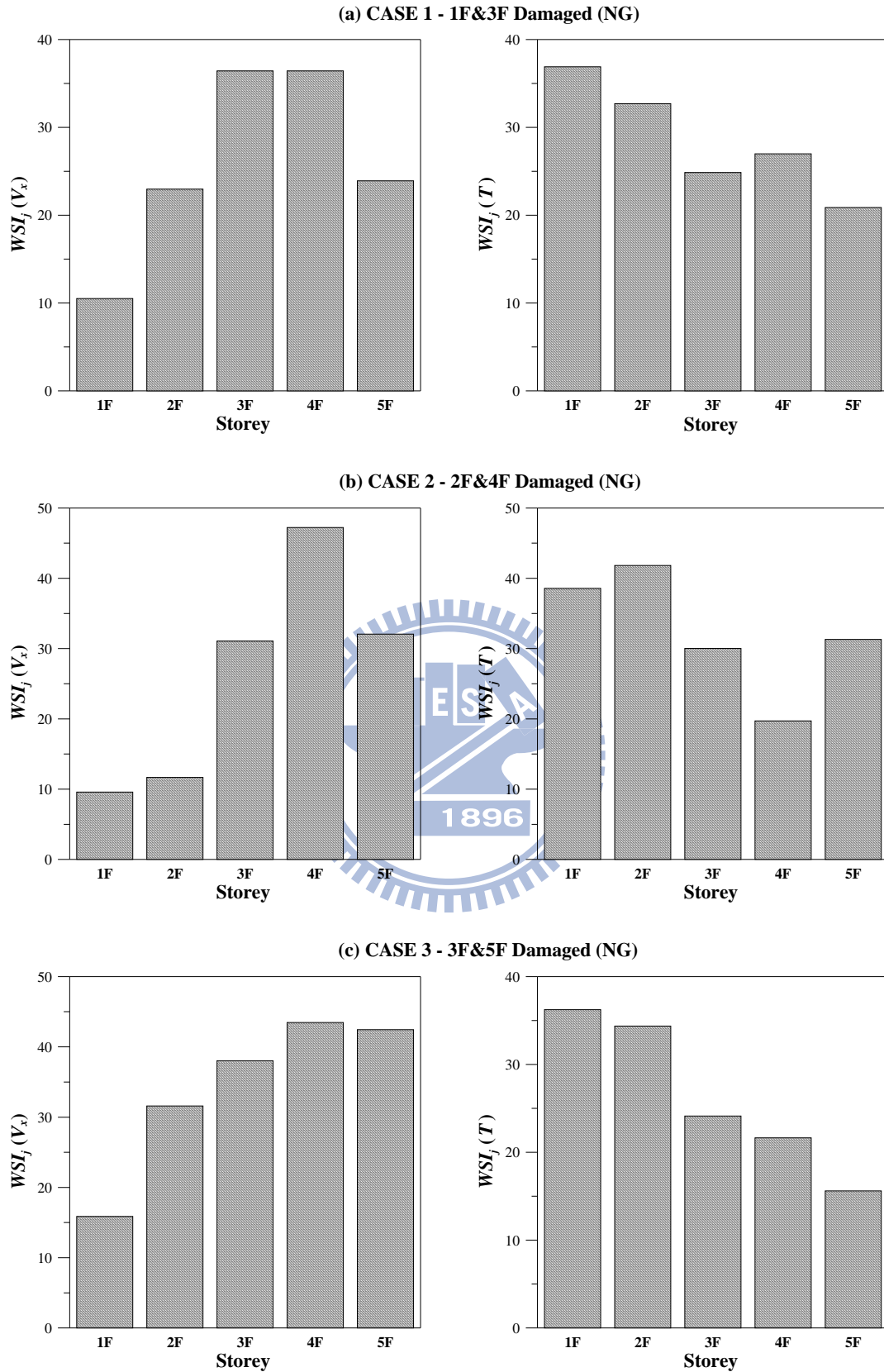


圖 5.43 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe)



圖 5.44 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構  
(健康結構)

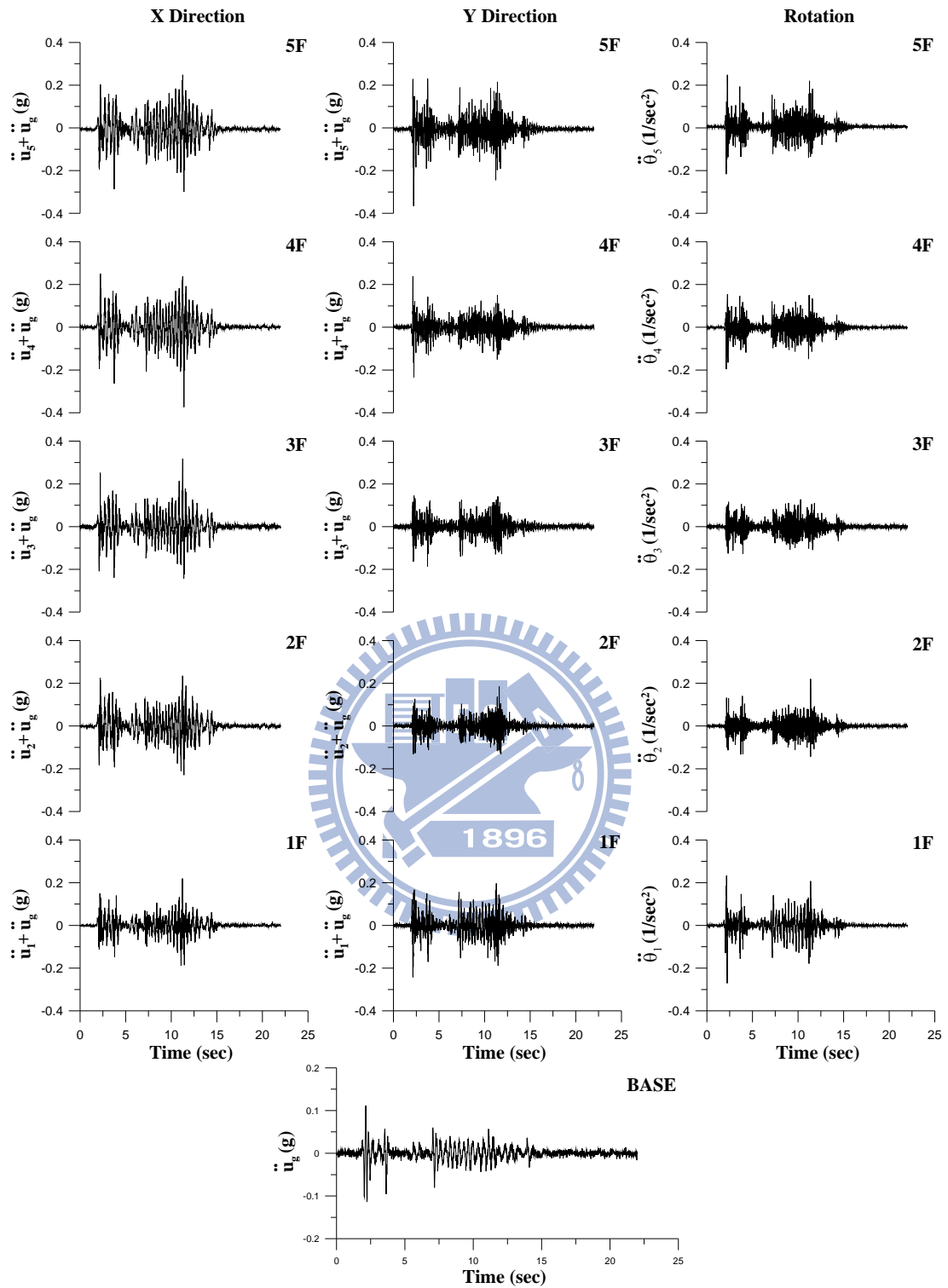


圖 5.45 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；健康結構)

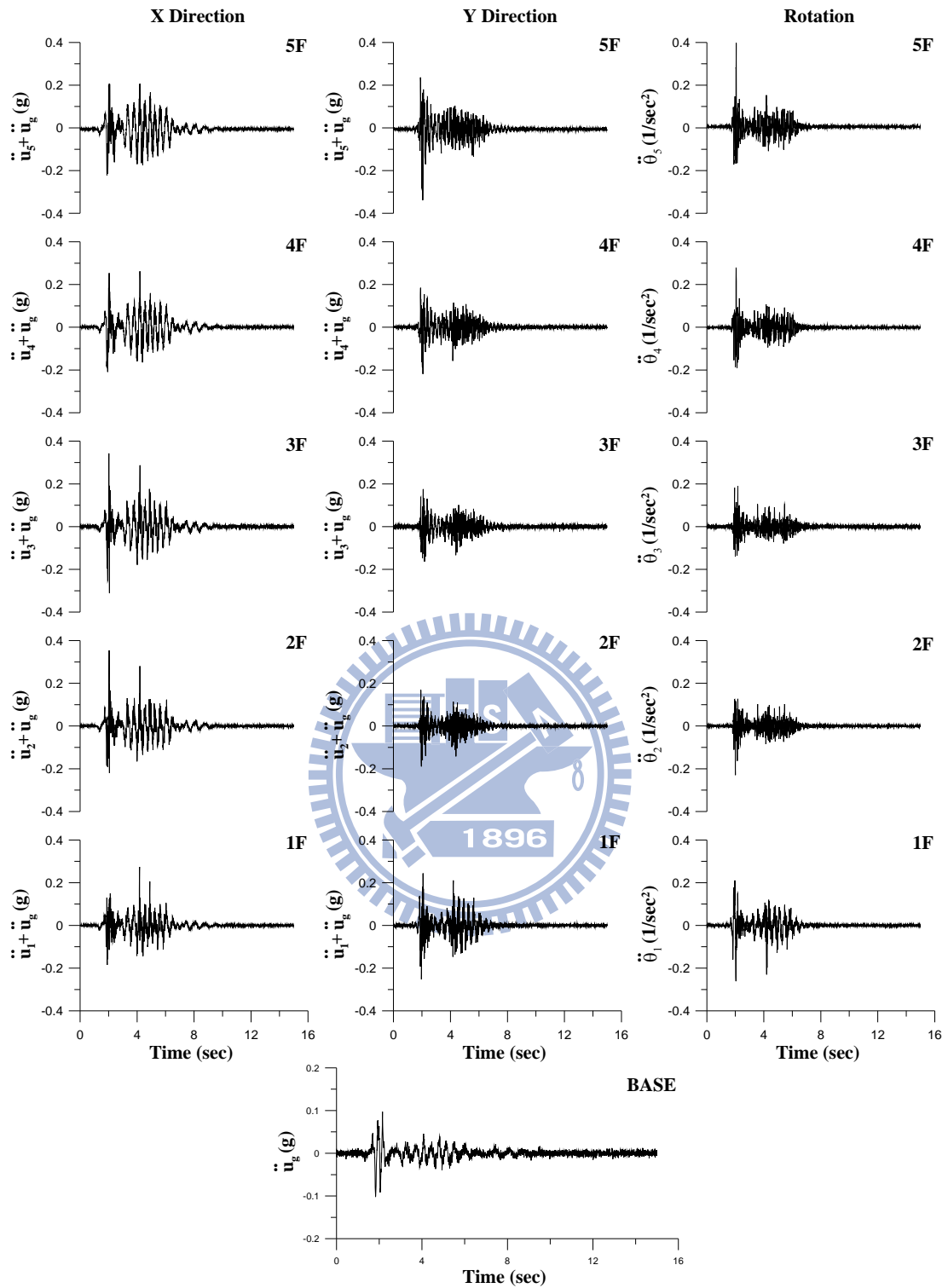


圖 5.46 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；健康結構)

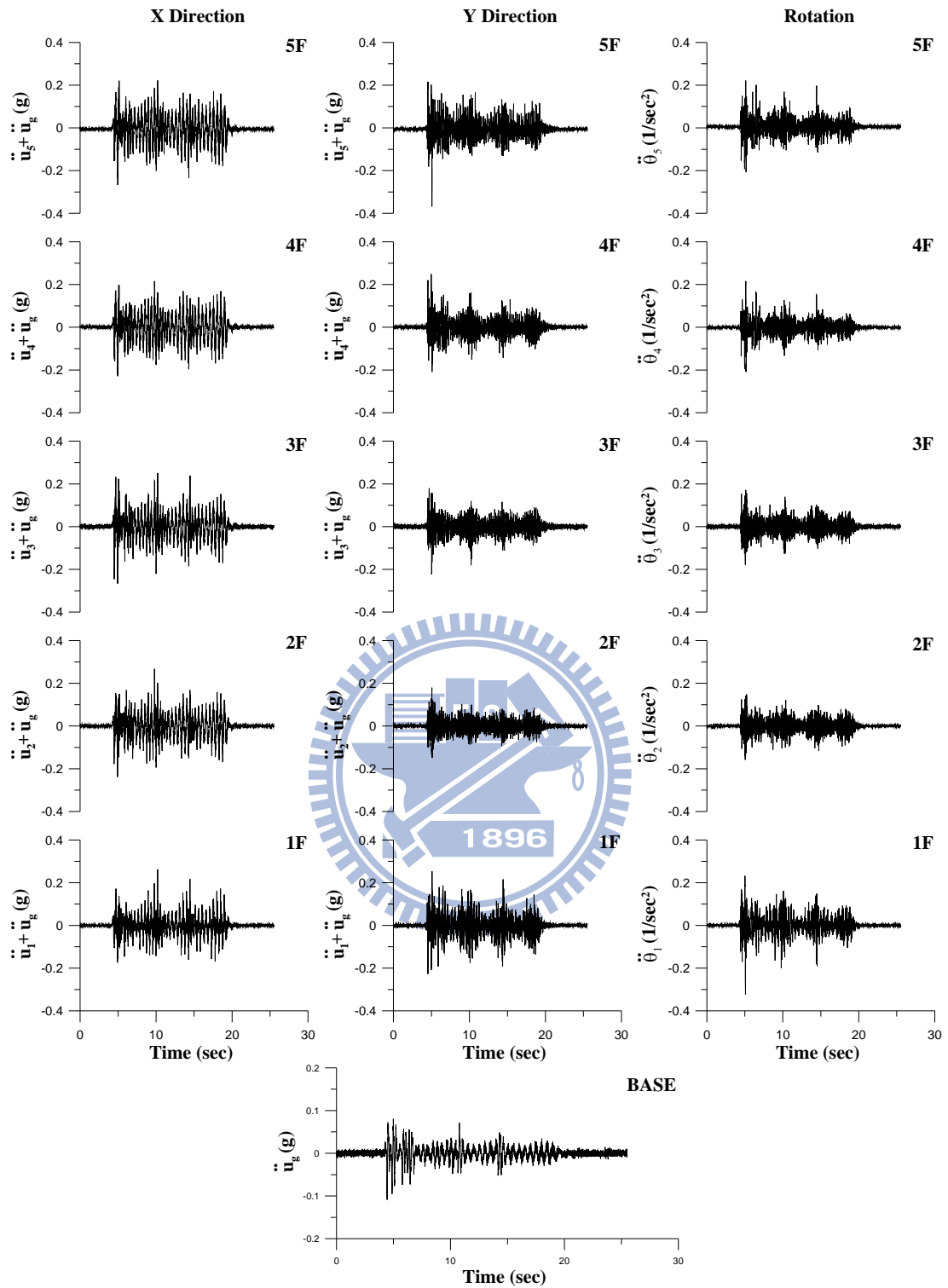


圖 5.47 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；健康結構)





圖 5.48 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

(單一樓層受損；移除一樓弱軸雙邊斜撐)



圖 5.49 弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐之五層樓扭轉耦合結構

(複數樓層受損；移除一樓及三樓弱軸雙邊斜撐)

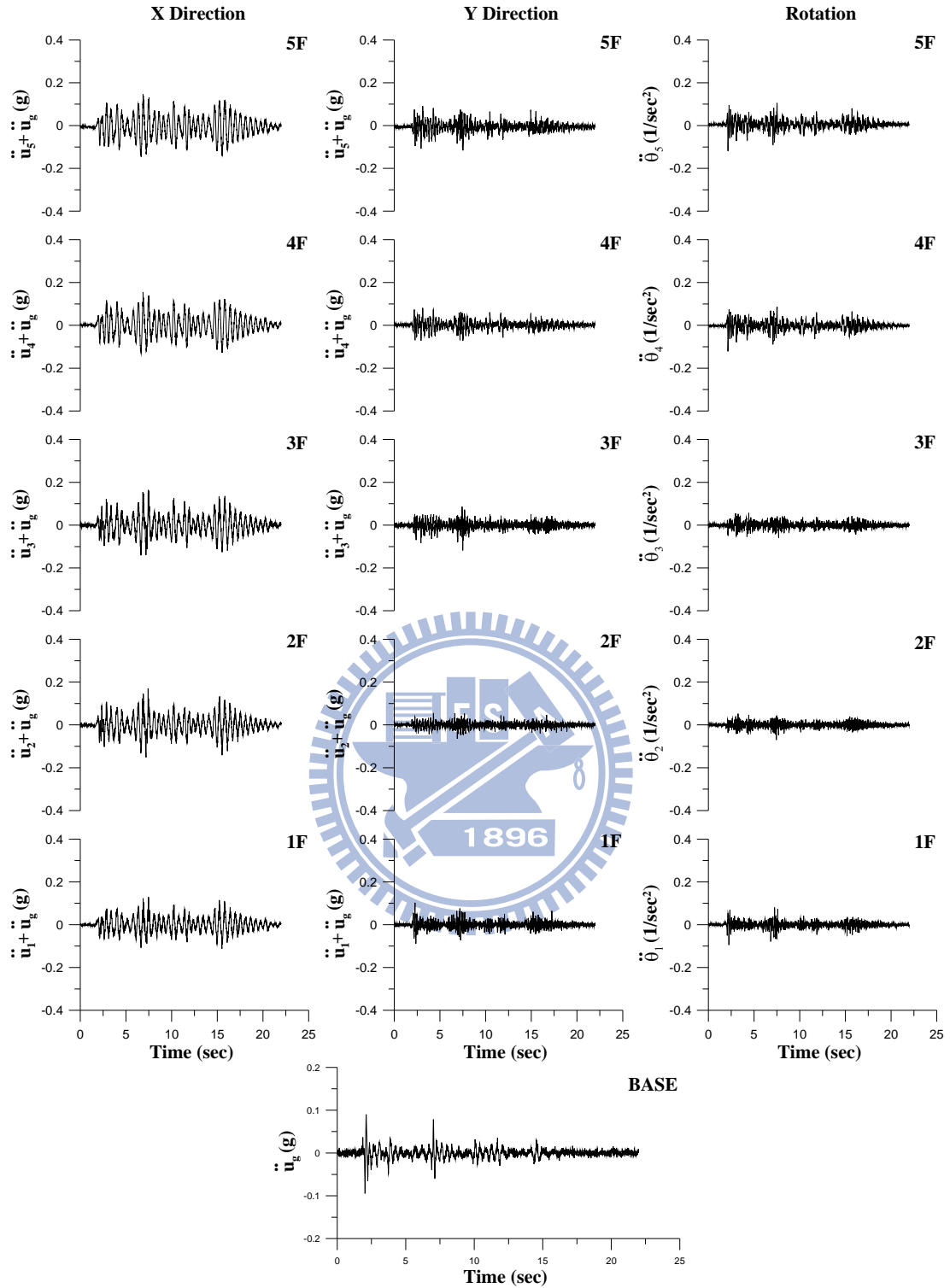


圖 5.50 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構)

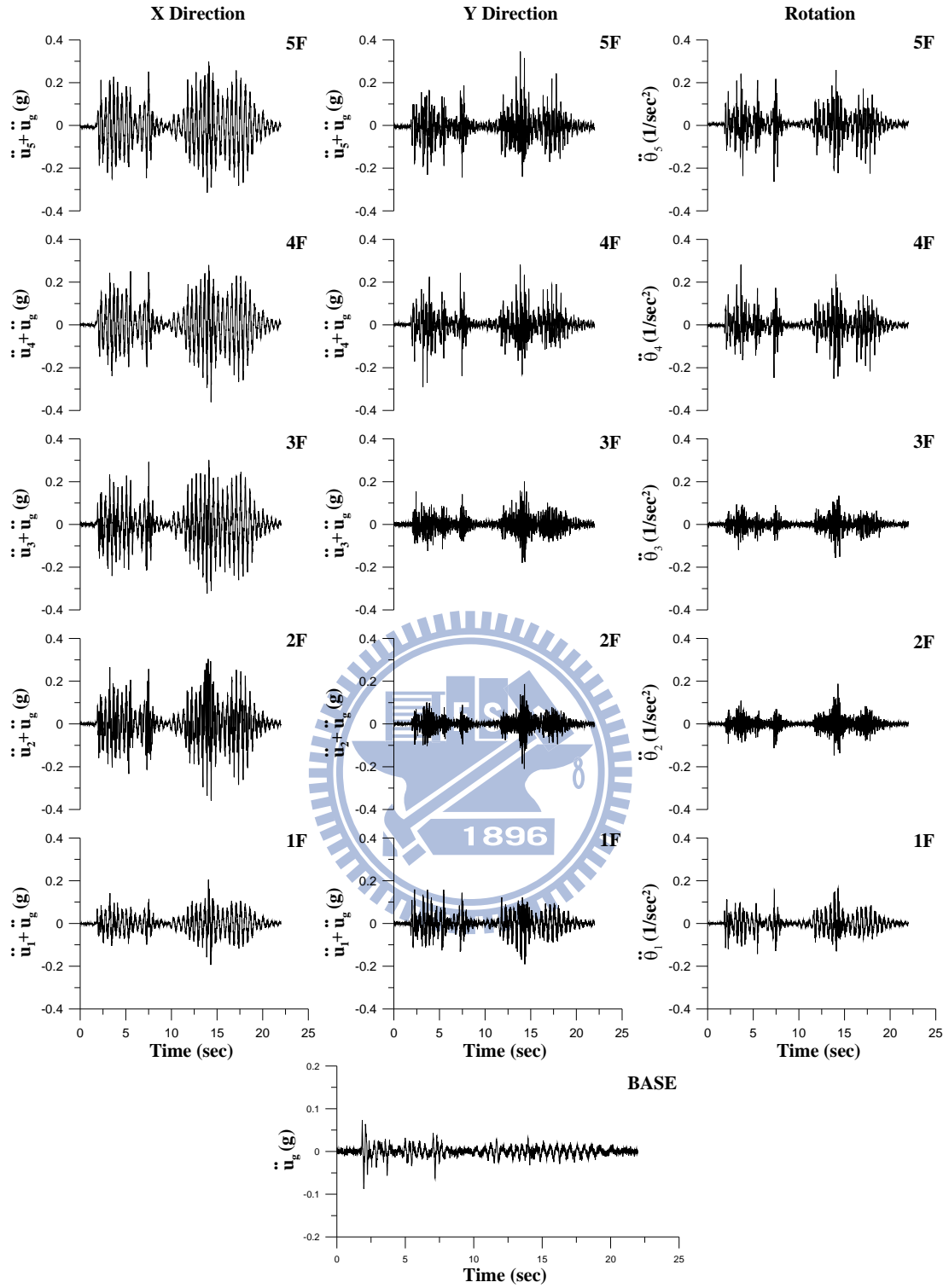


圖 5.51 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構)

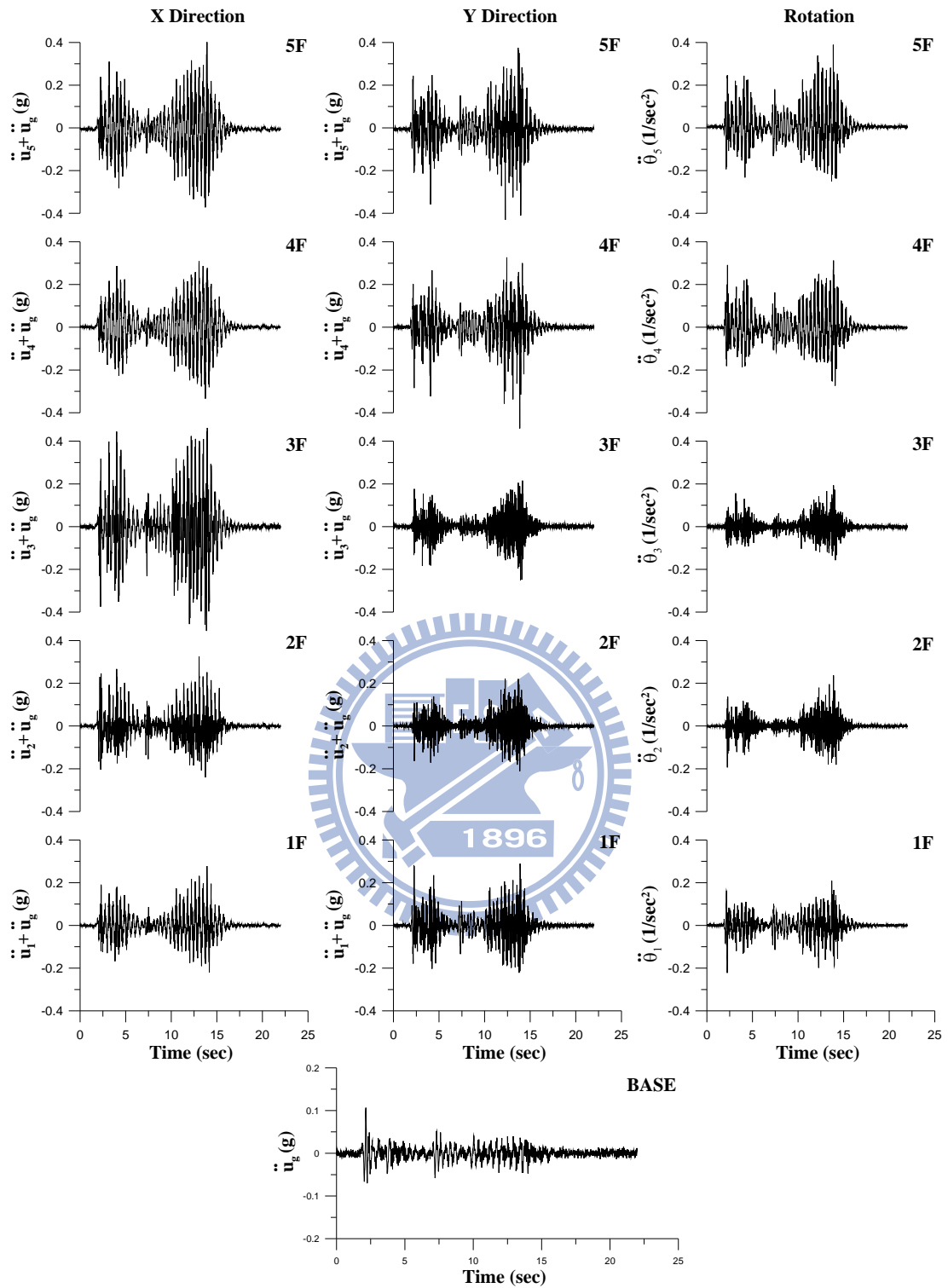


圖 5.52 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構)

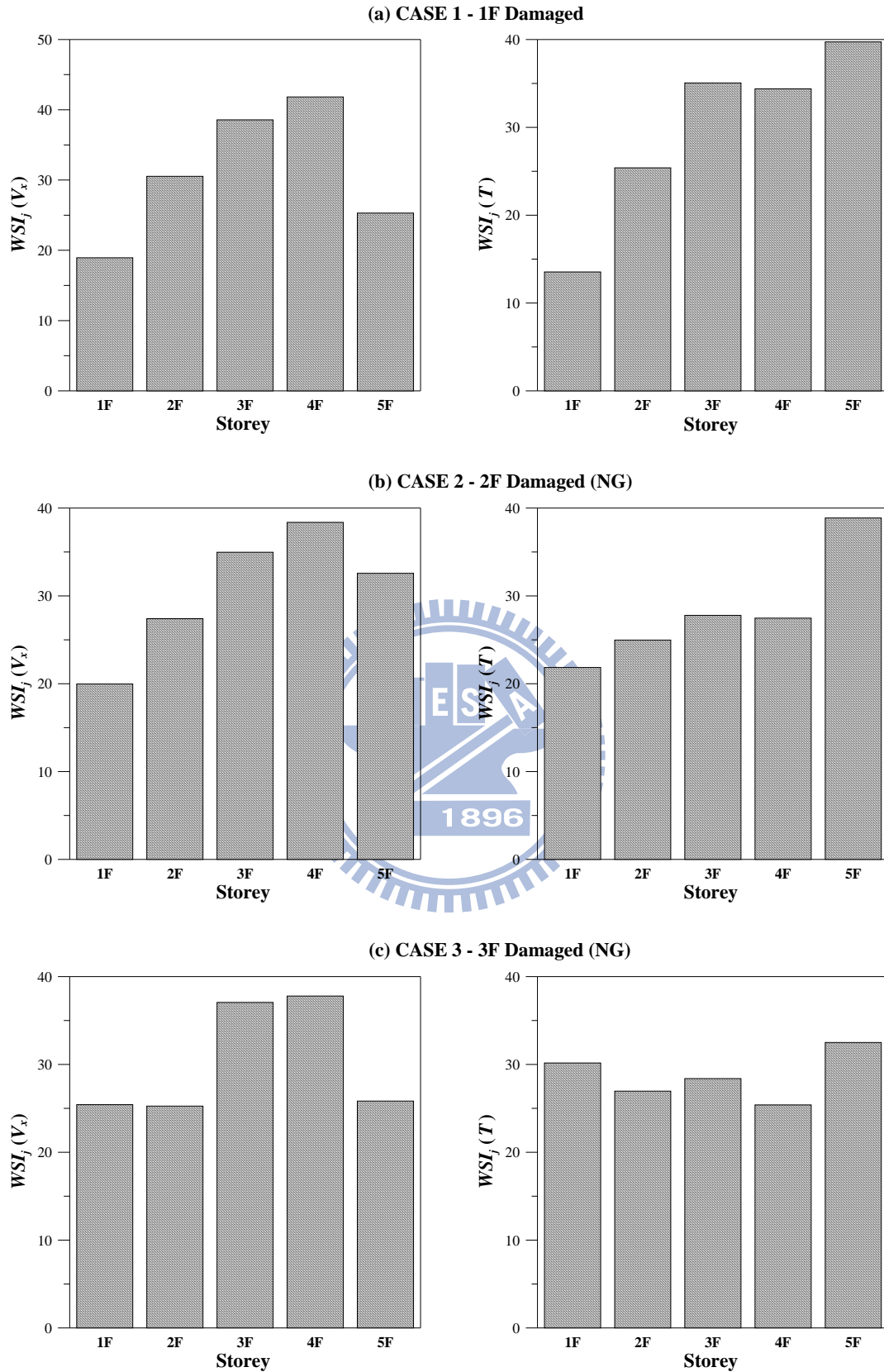


圖 5.53 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro)

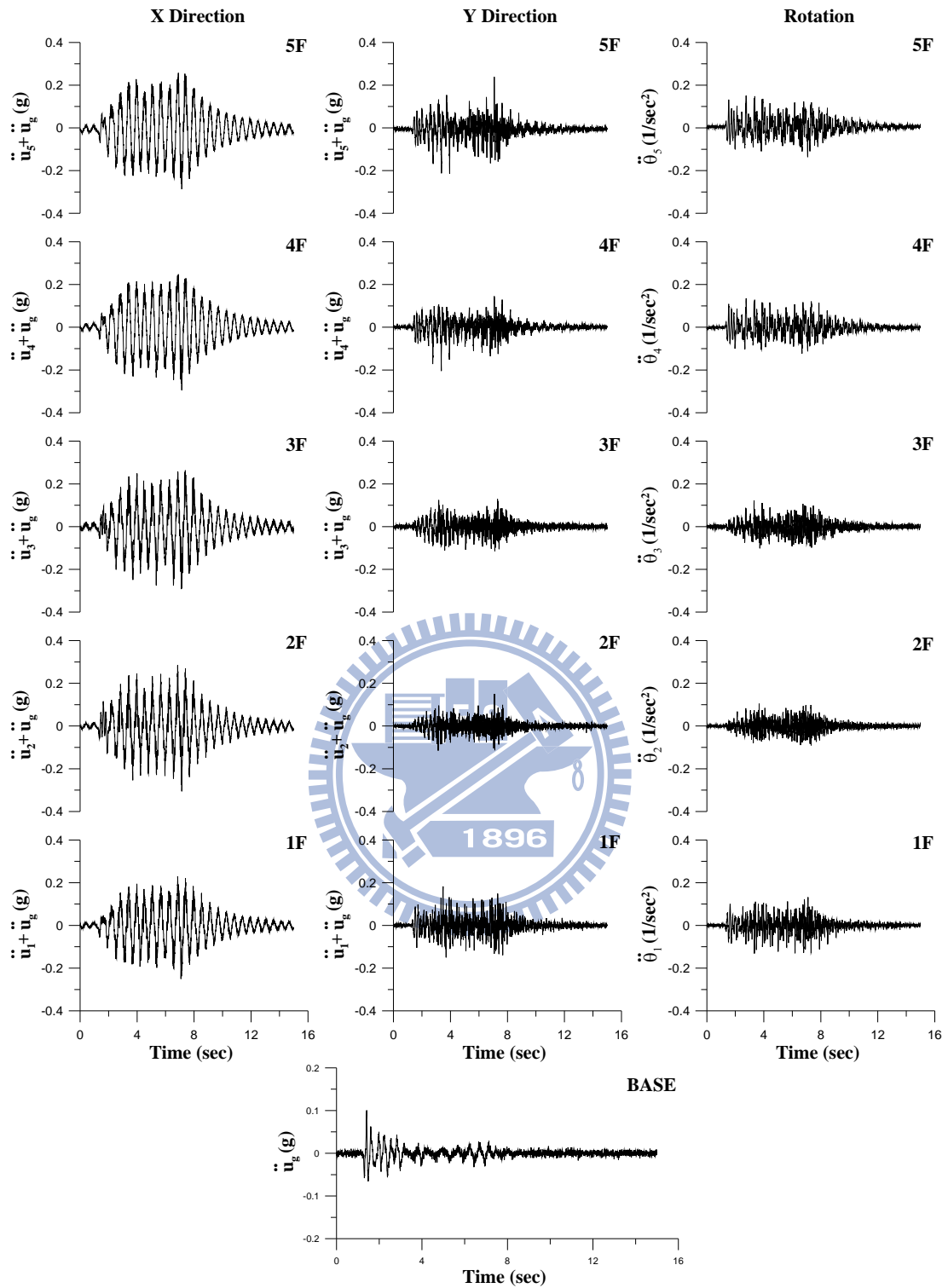


圖 5.54 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構)

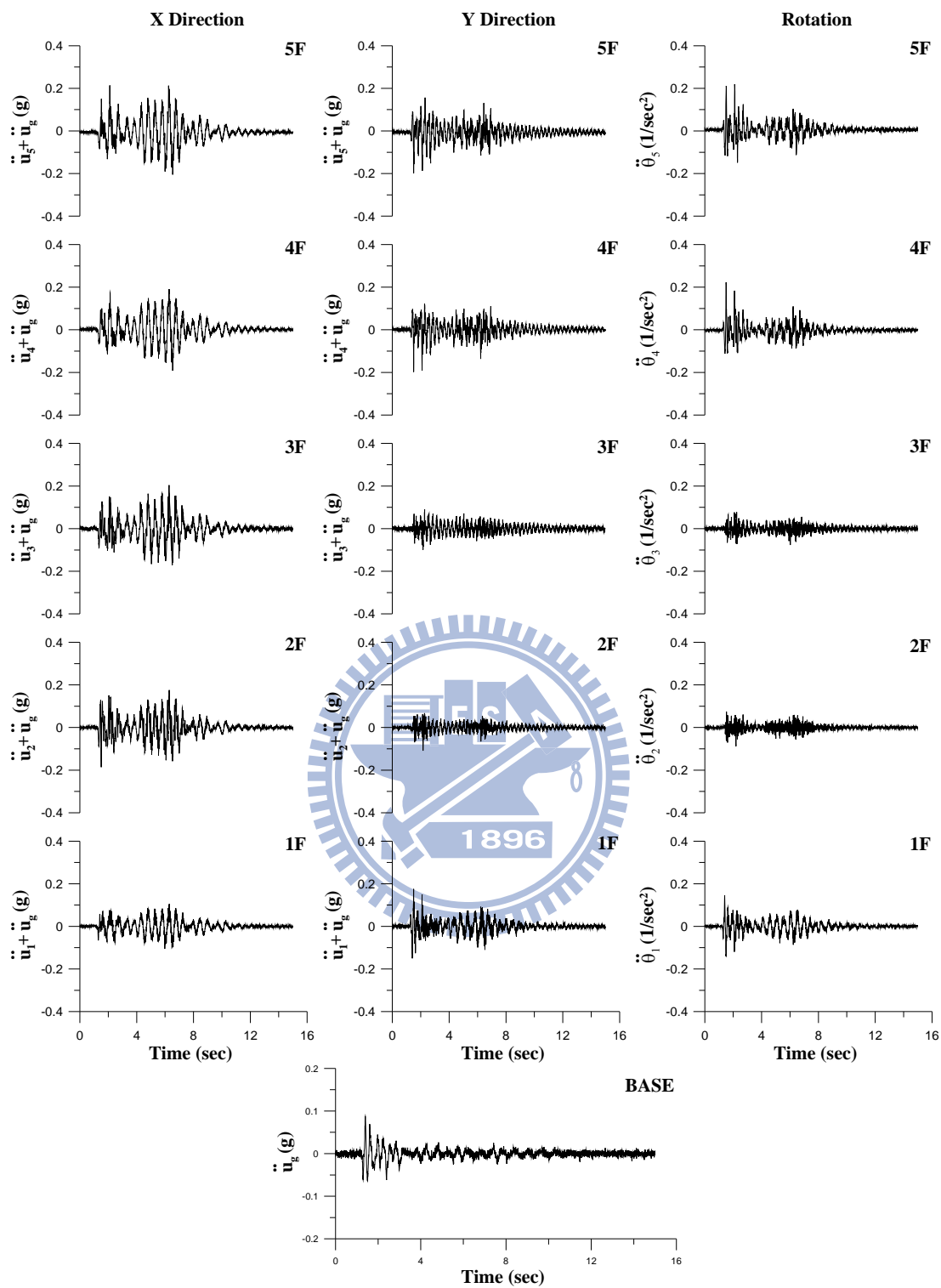


圖 5.55 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構)

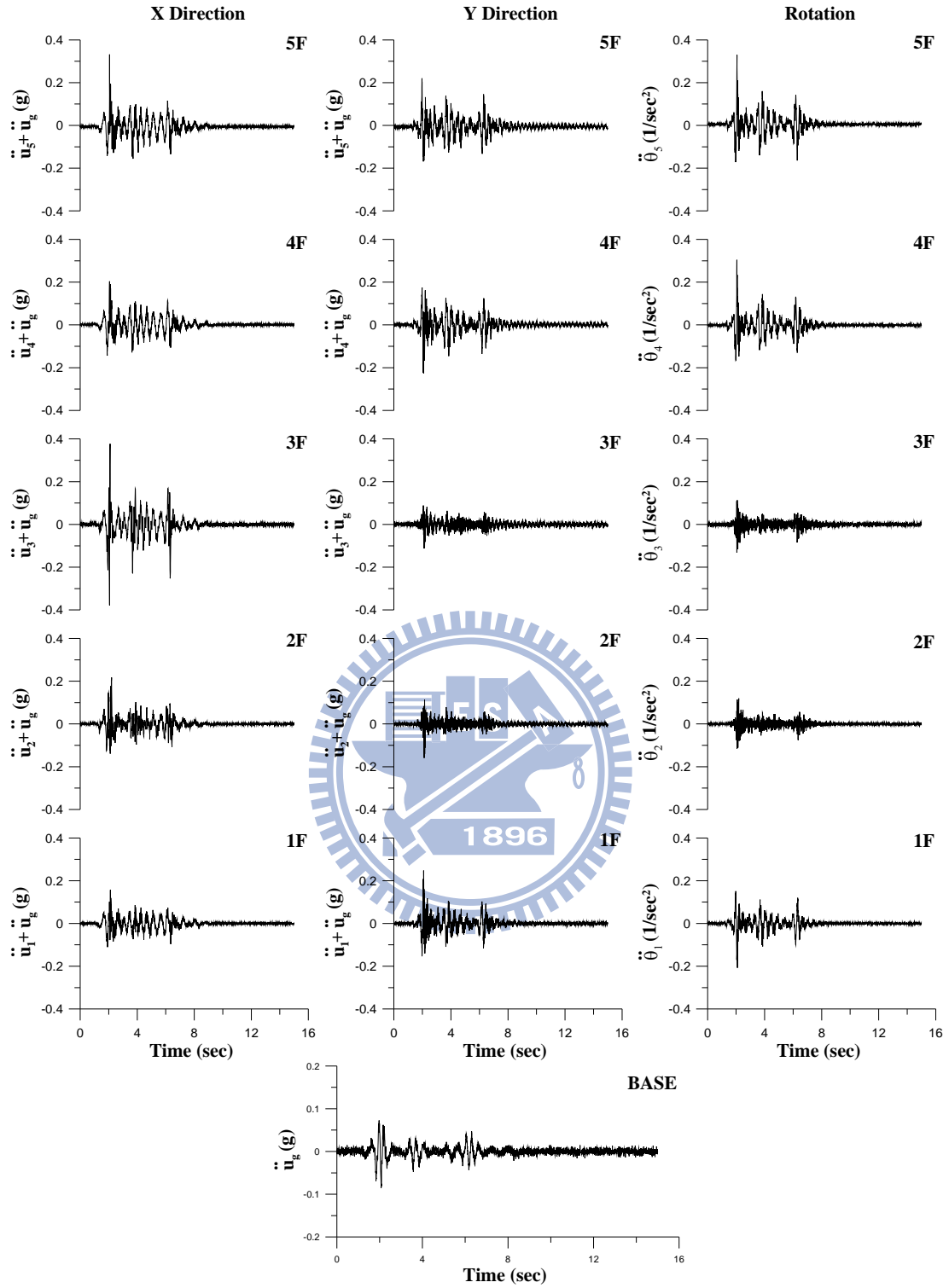


圖 5.56 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構)



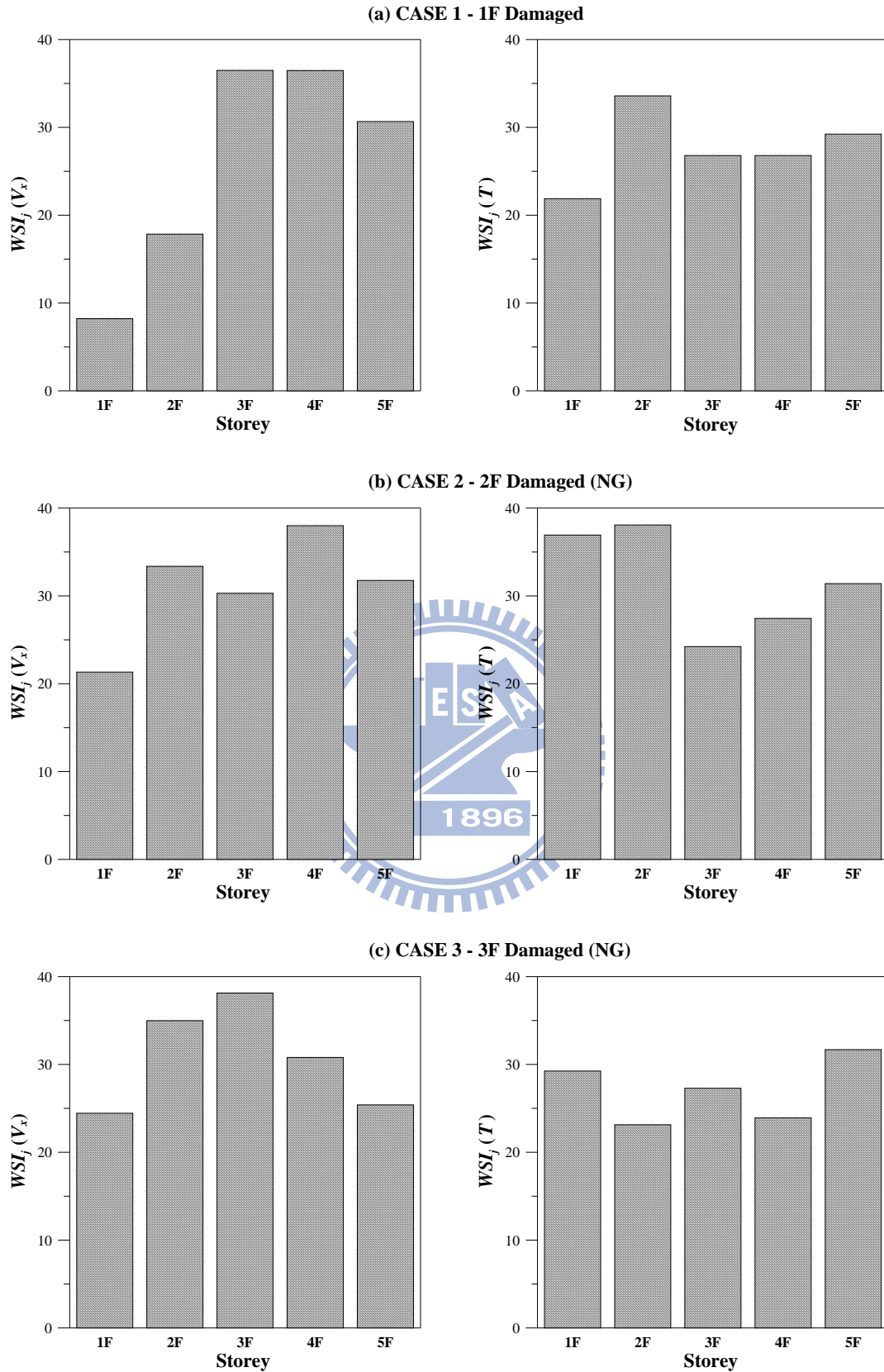


圖 5.57 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe)

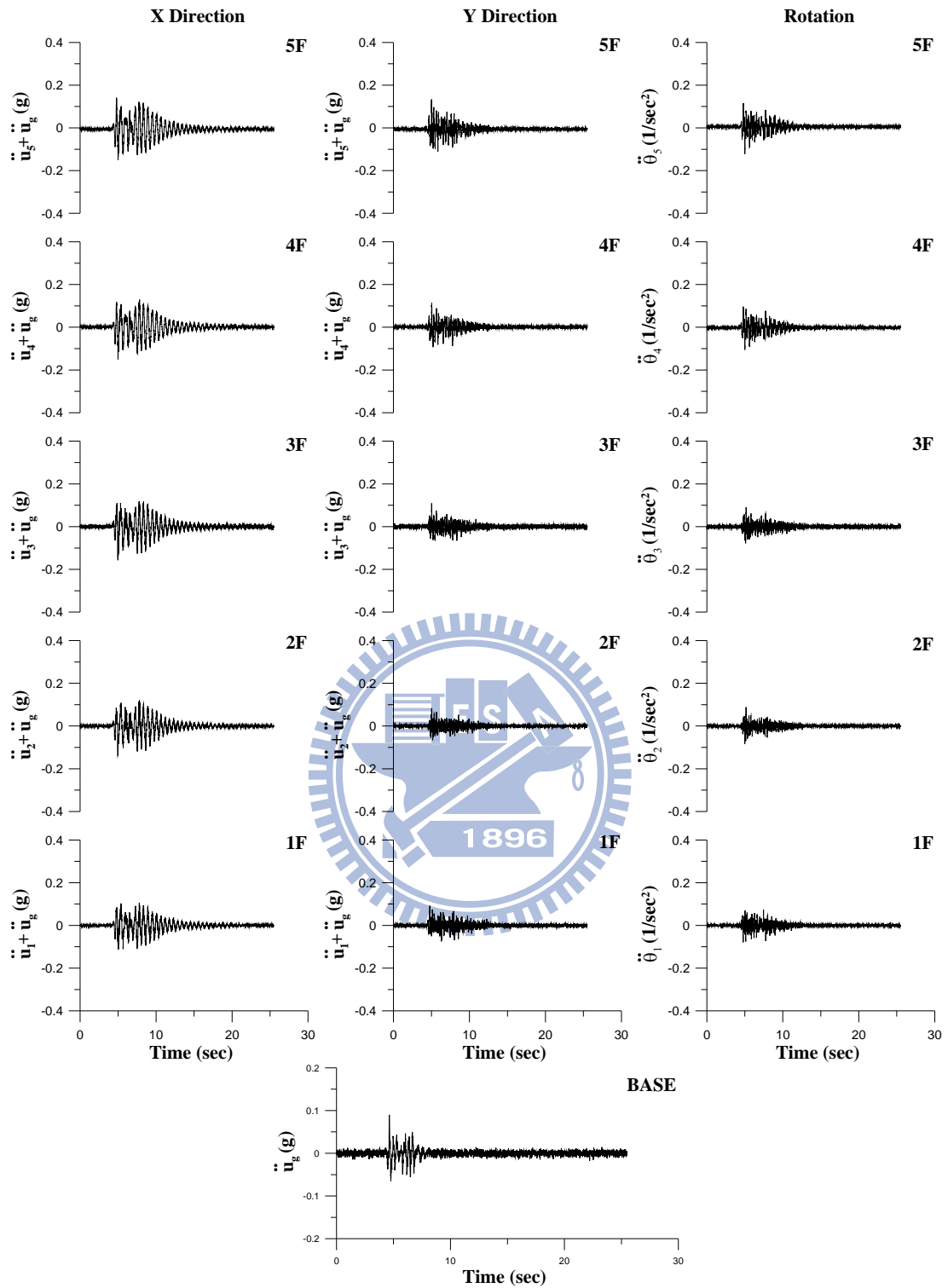


圖 5.58 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓受損結構)

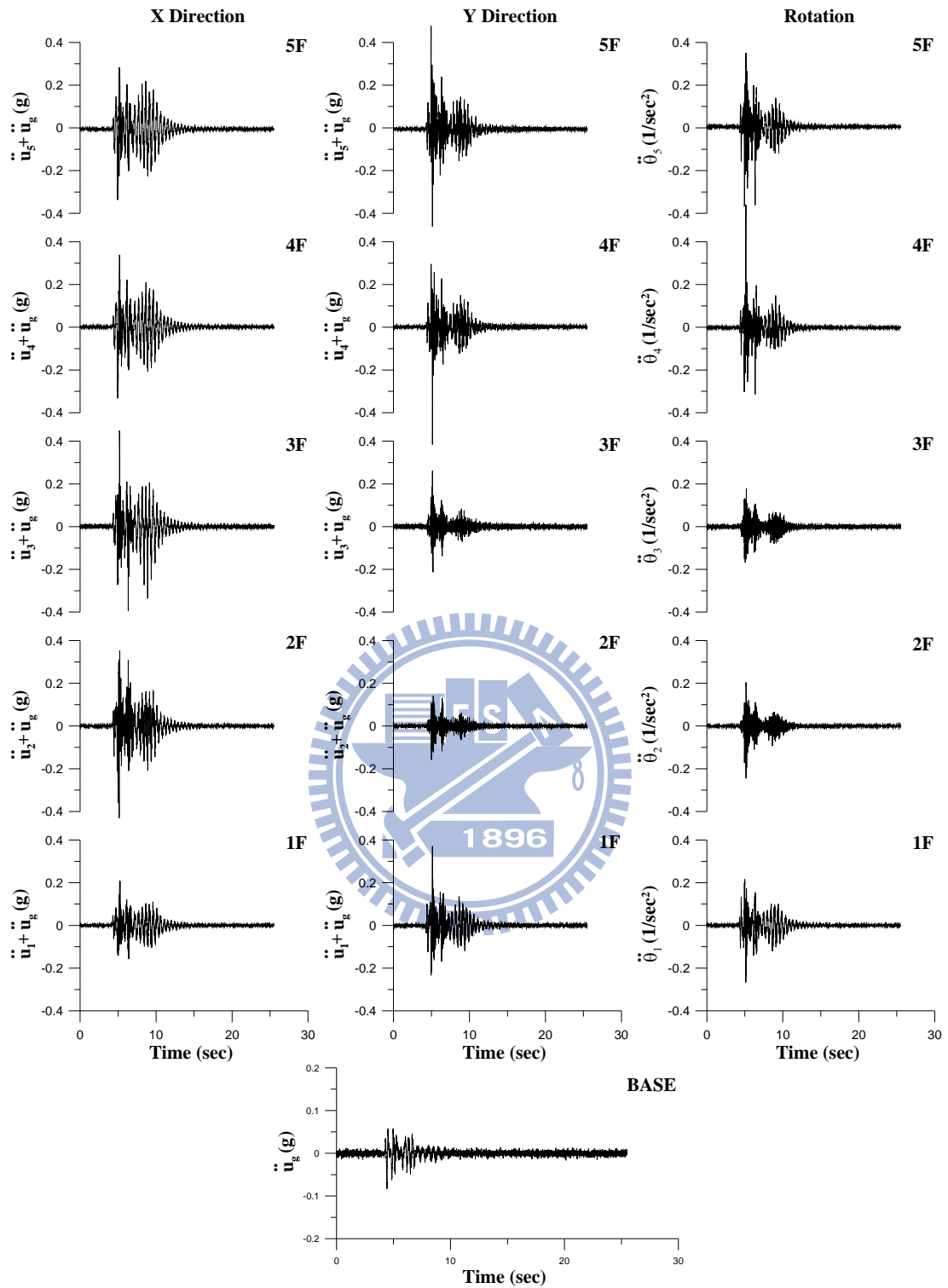


圖 5.59 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；二樓受損結構)

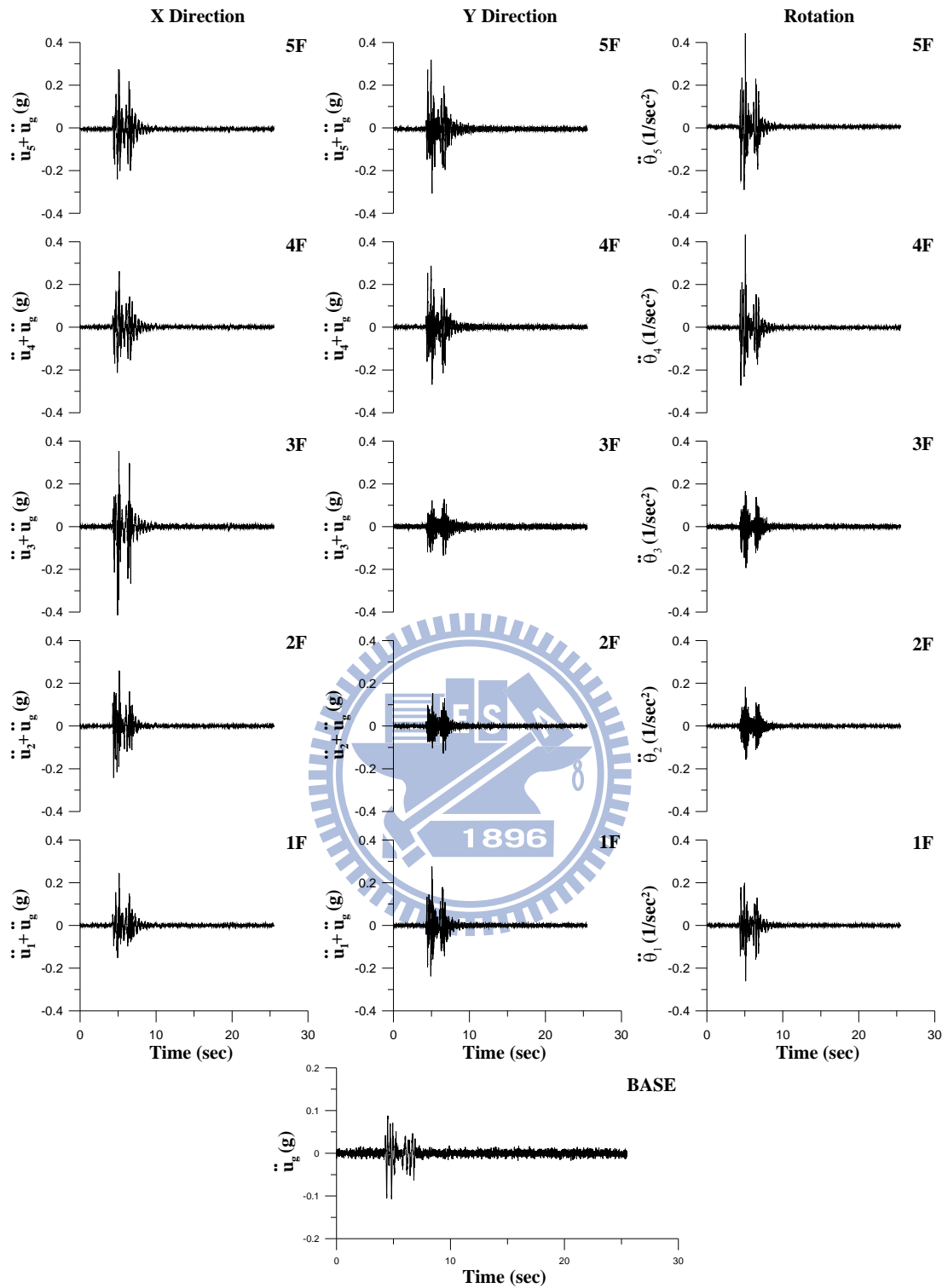


圖 5.60 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；三樓受損結構)

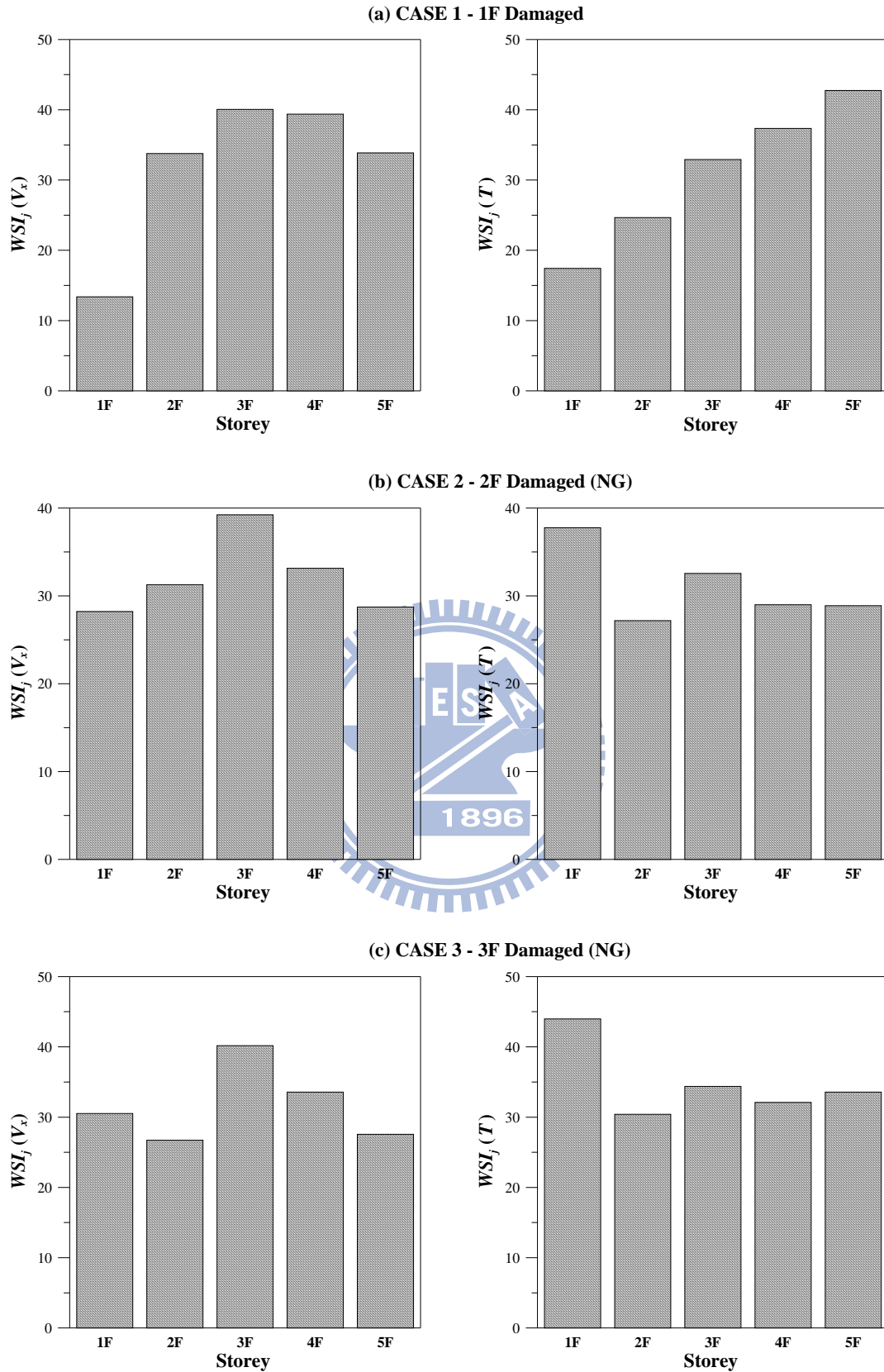


圖 5.61 位形空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe)

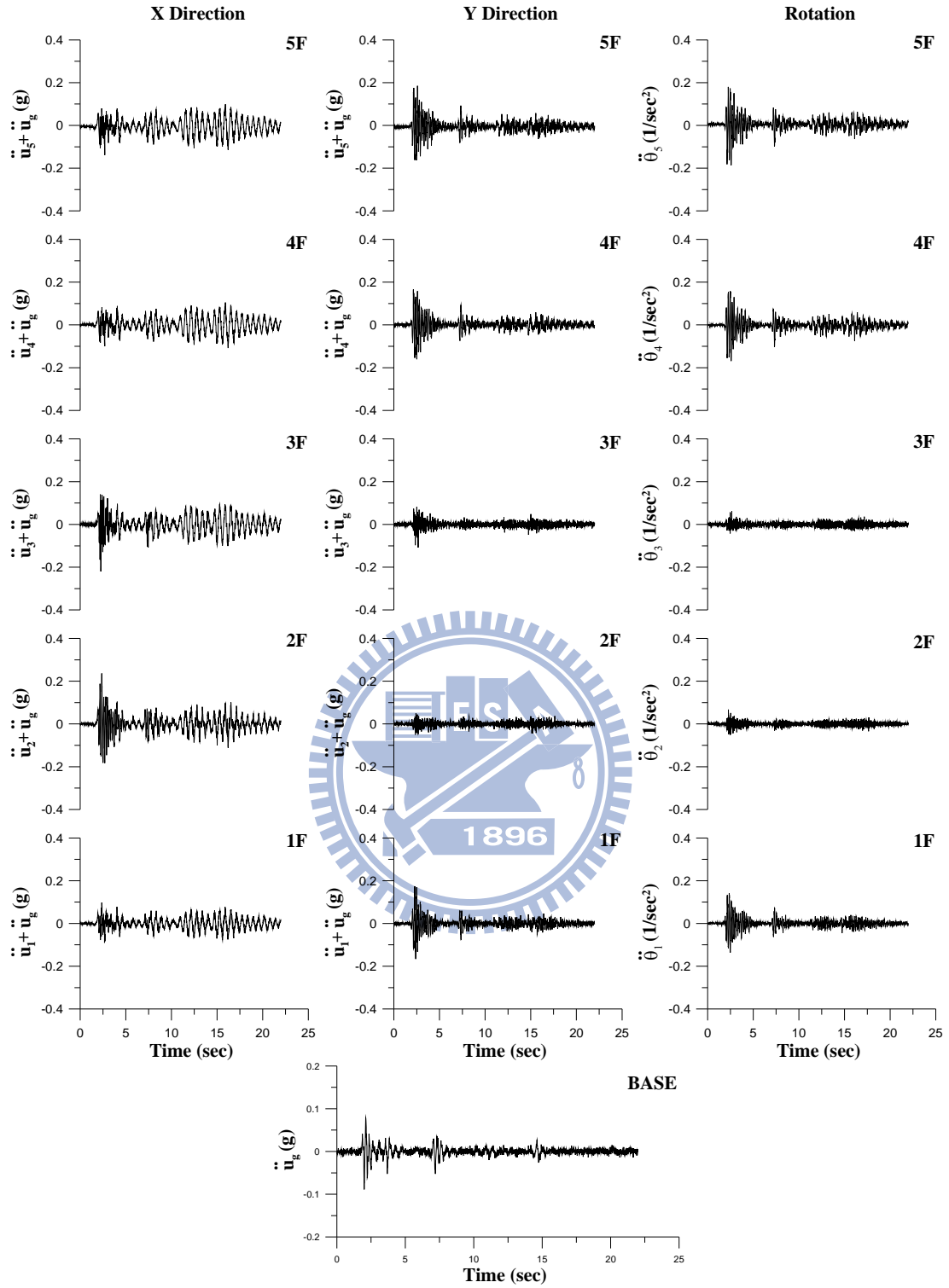


圖 5.62 各樓層質心加速度歷時反應

(El Centro ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)

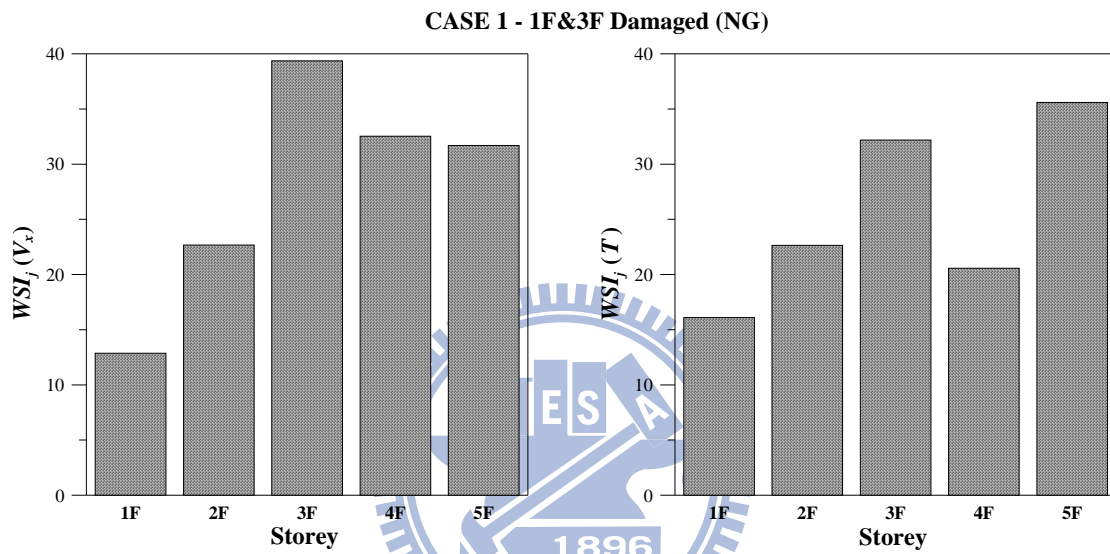


圖 5.63 位形空間 DLV 分析結果( $x$  向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro)

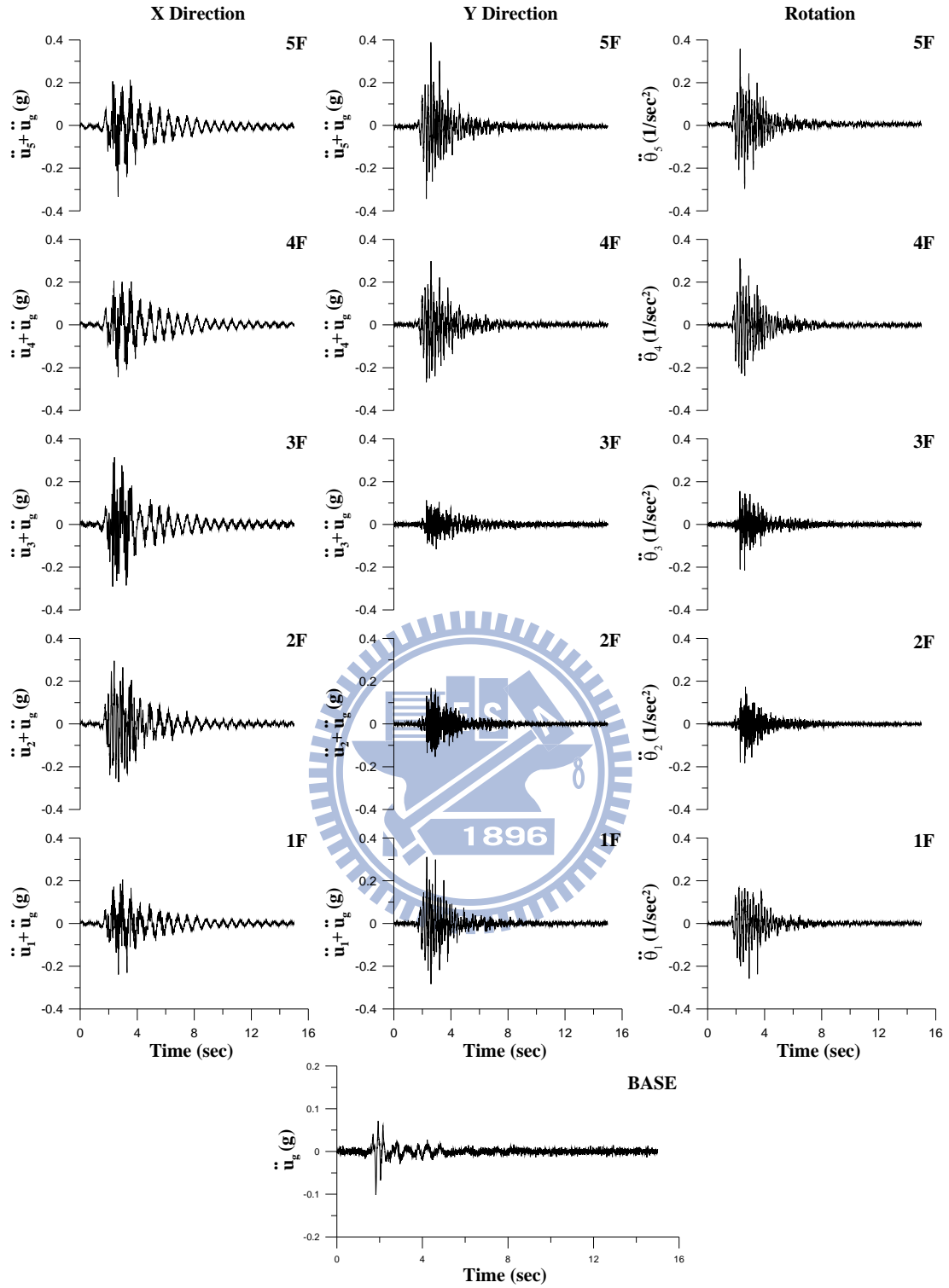


圖 5.64 各樓層質心加速度歷時反應

(Hachinohe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)



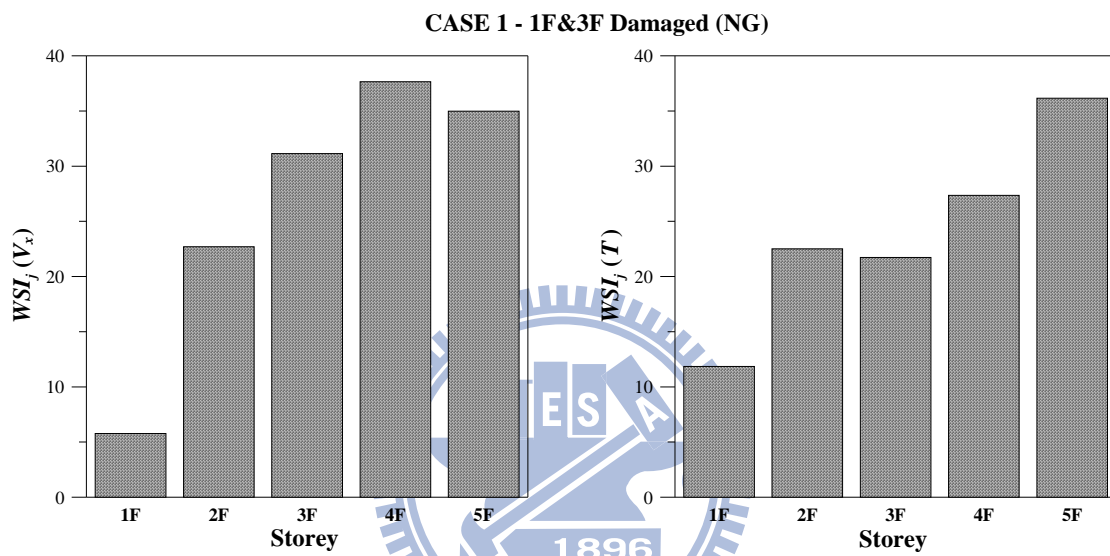


圖 5.65 位形空間 DLV 分析結果( $x$  向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe)

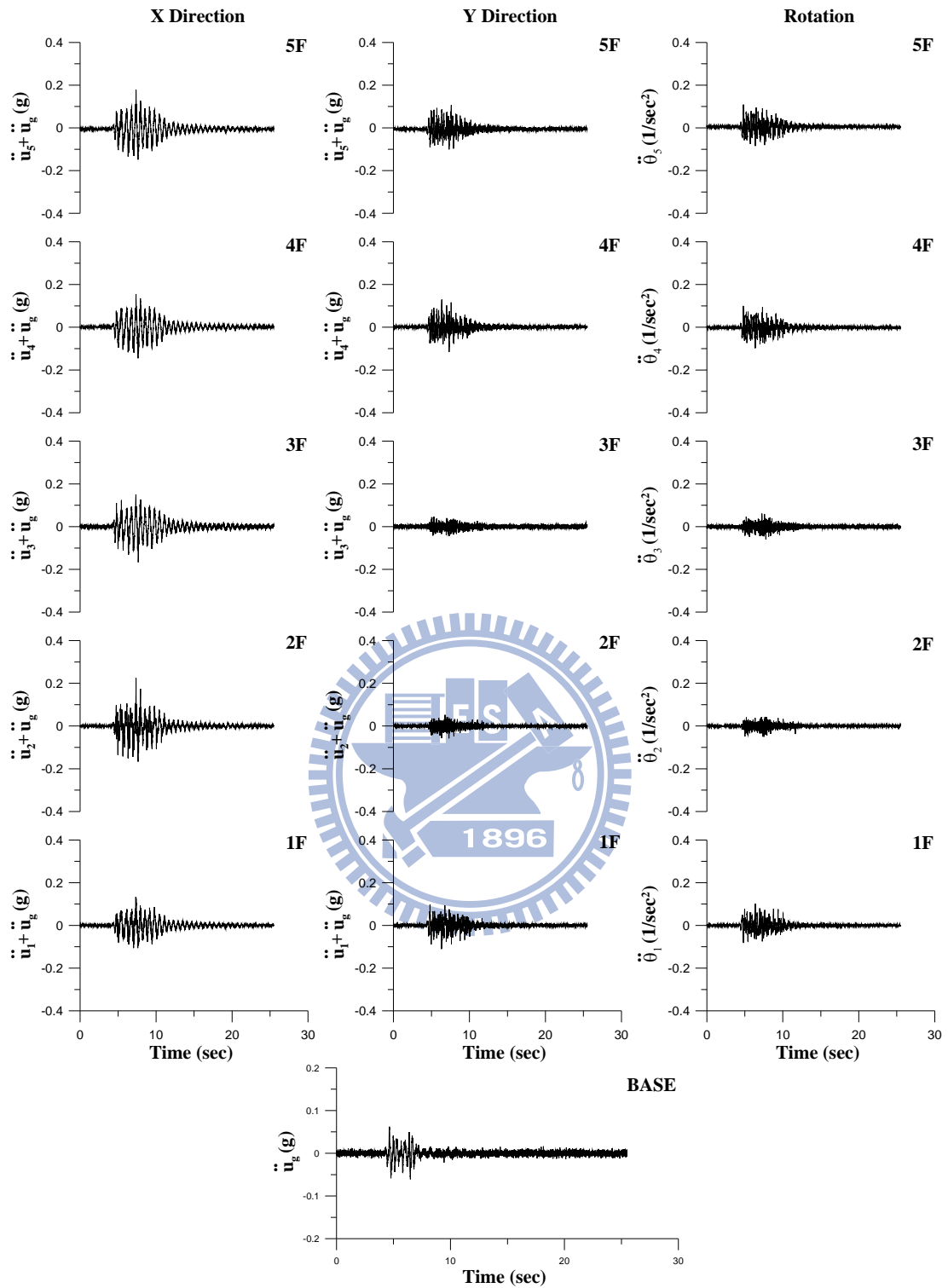


圖 5.66 各樓層質心加速度歷時反應

(Kobe ; PGA=0.1g)

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；一樓及三樓受損結構)

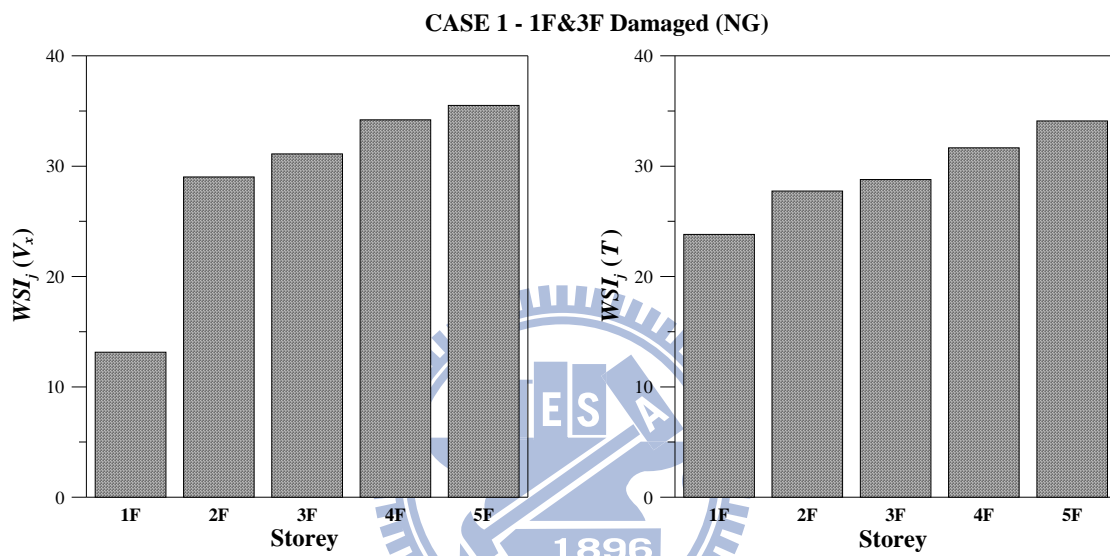


圖 5.67 位形空間 DLV 分析結果( $x$  向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe)

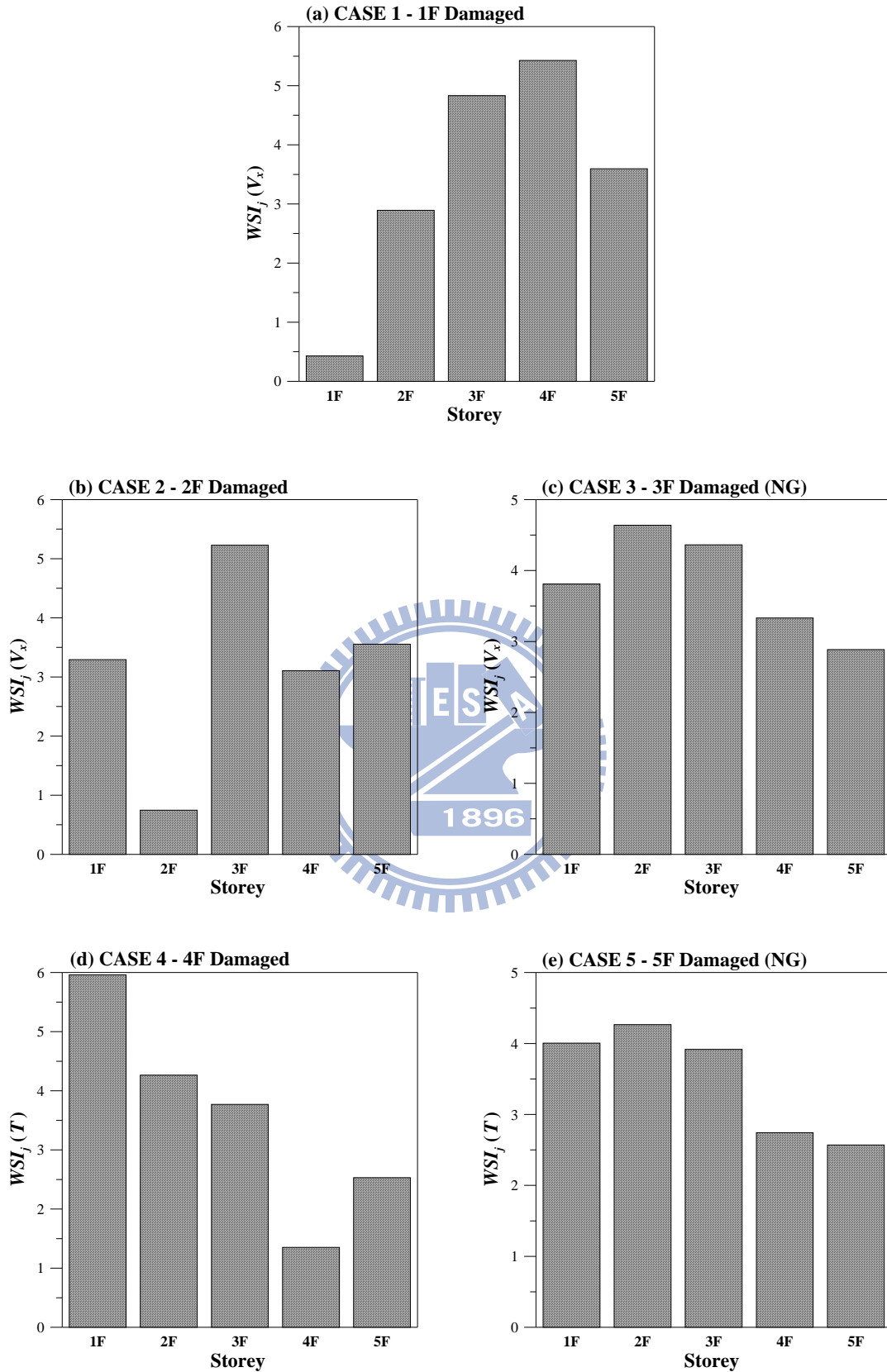


圖 5.68 狀態空間 DLV 分析結果( $x$  向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro)

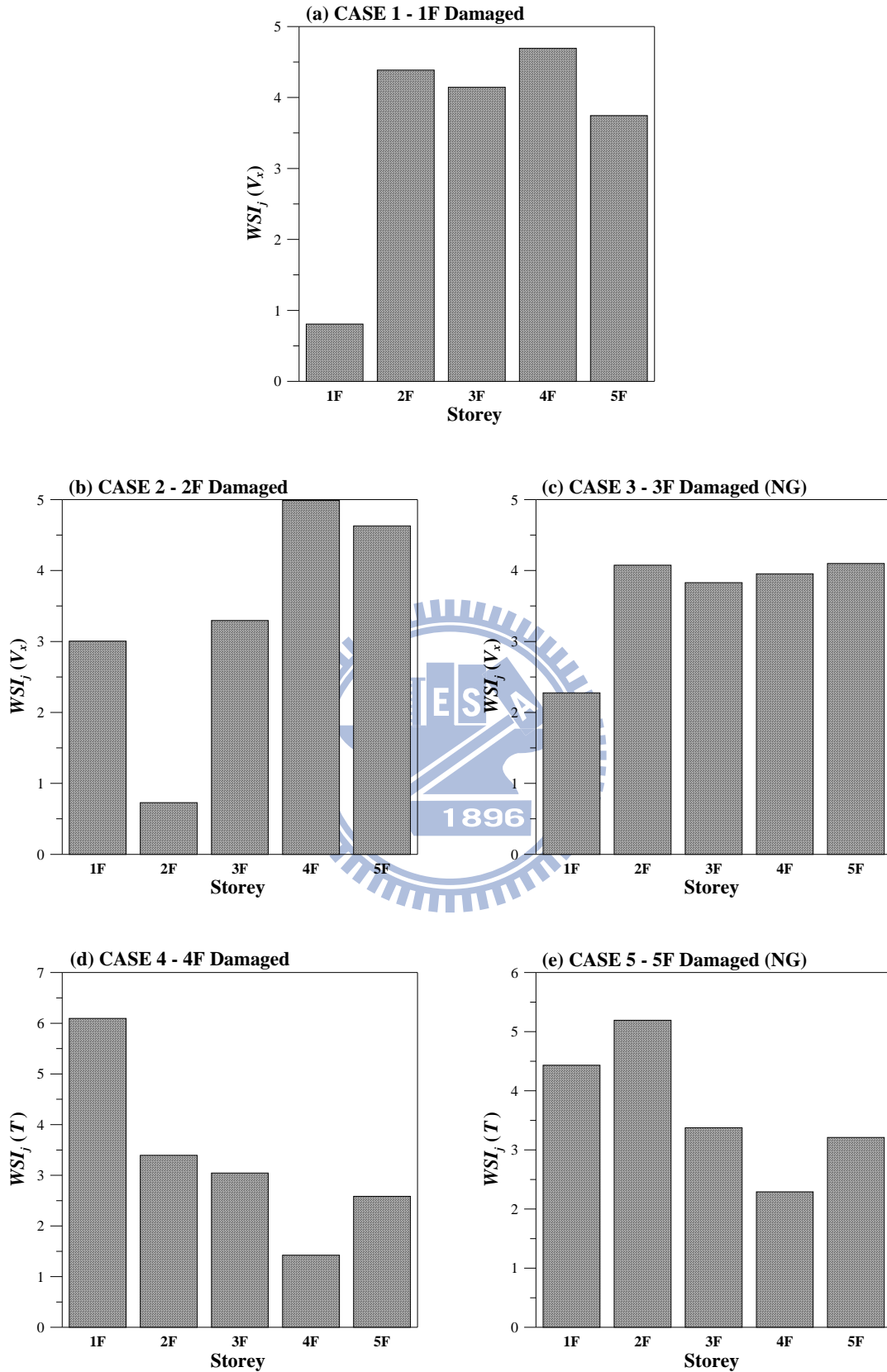


圖 5.69 狀態空間 DLV 分析結果(x 向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe)

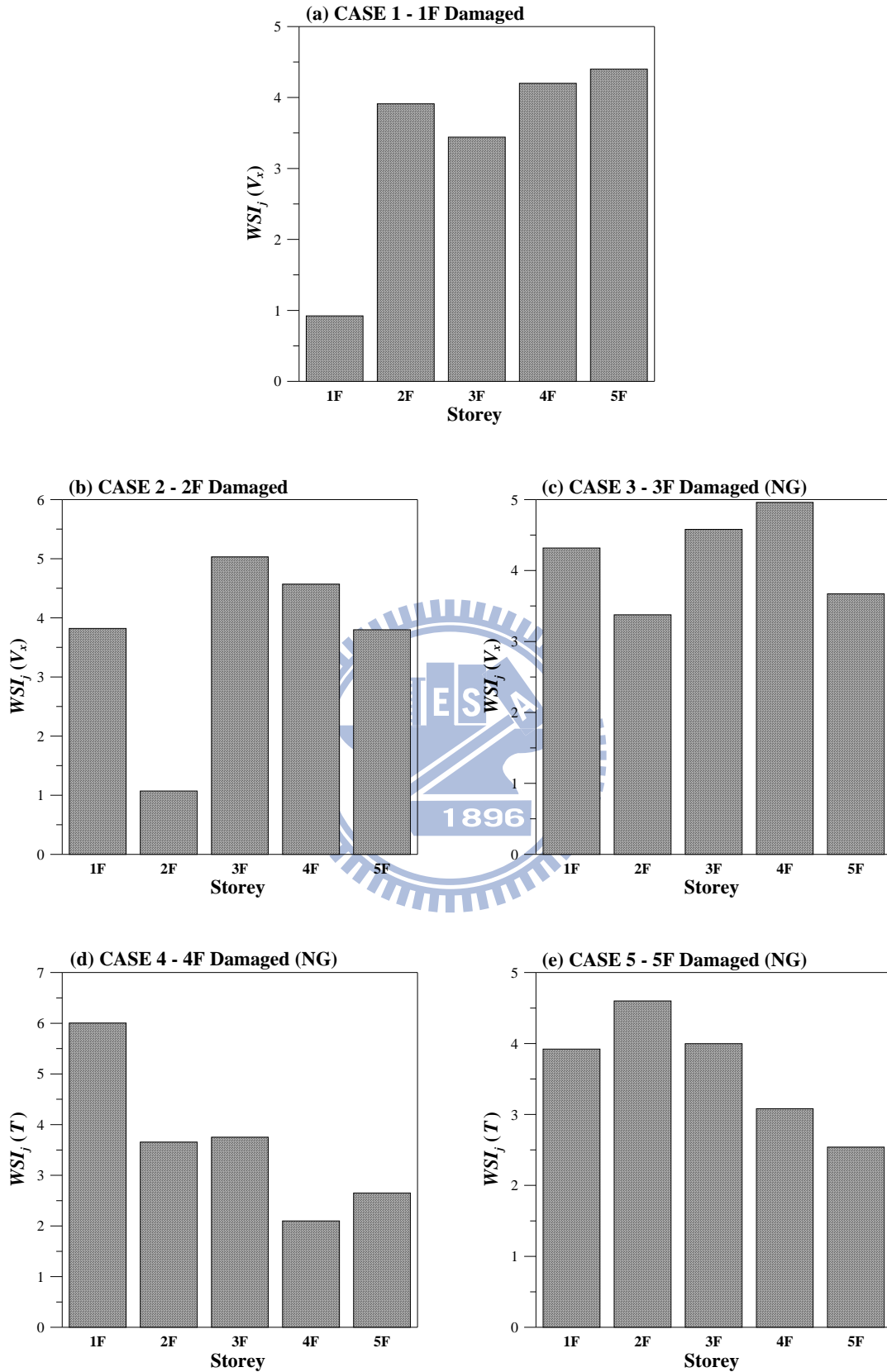


圖 5.70 狀態空間 DLV 分析結果(x 向或旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe)

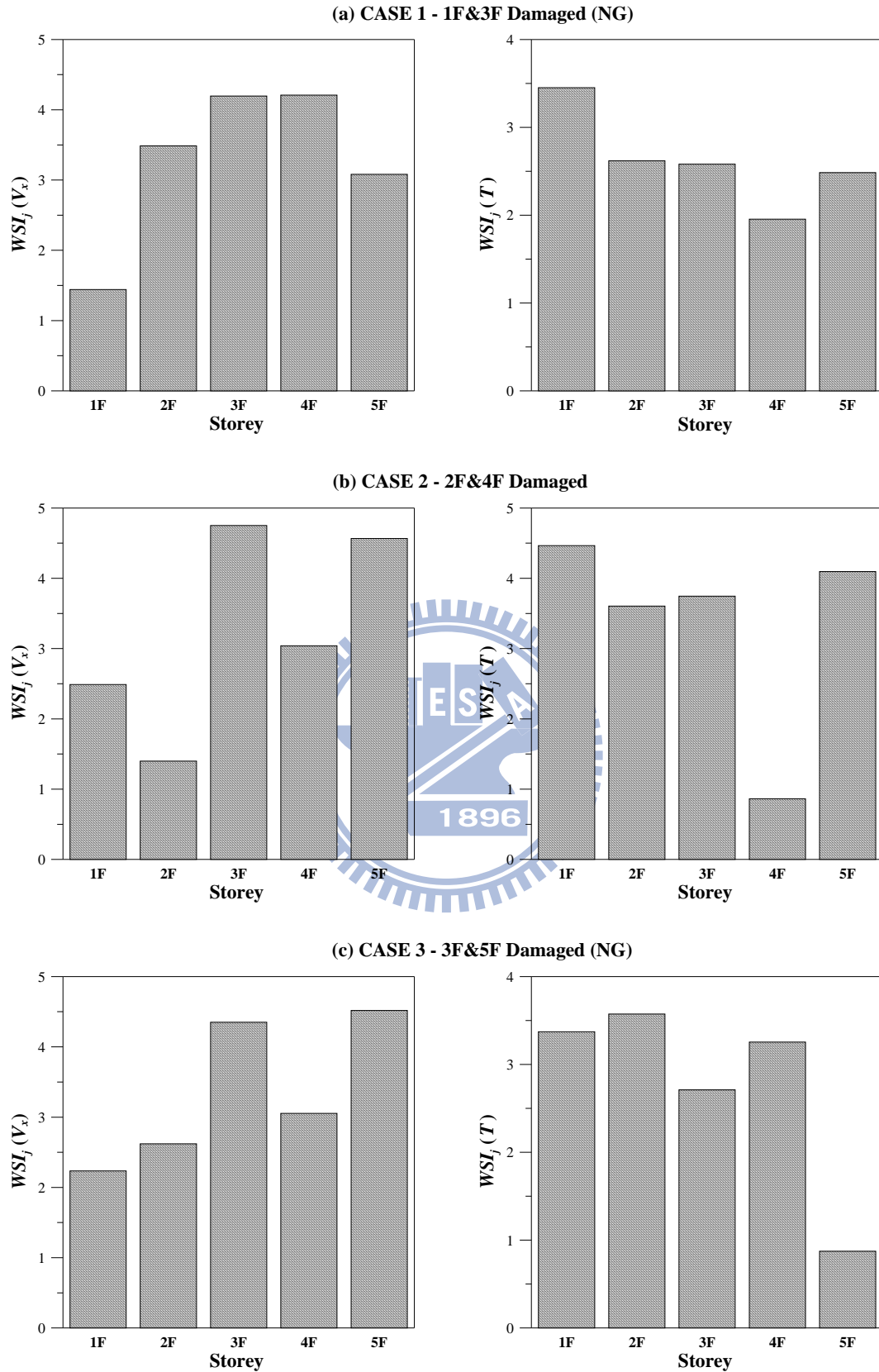


圖 5.71 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro)

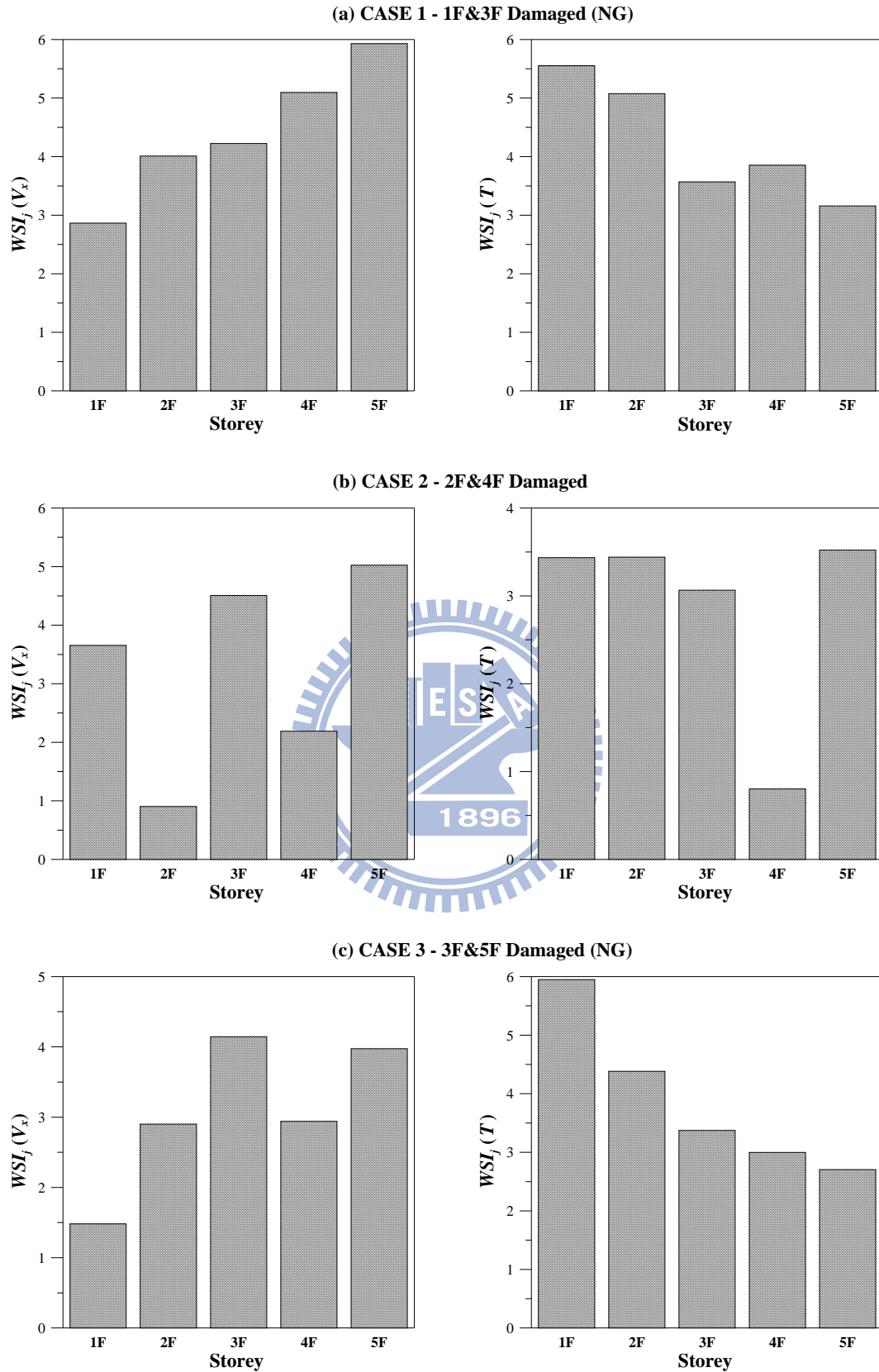


圖 5.72 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe)



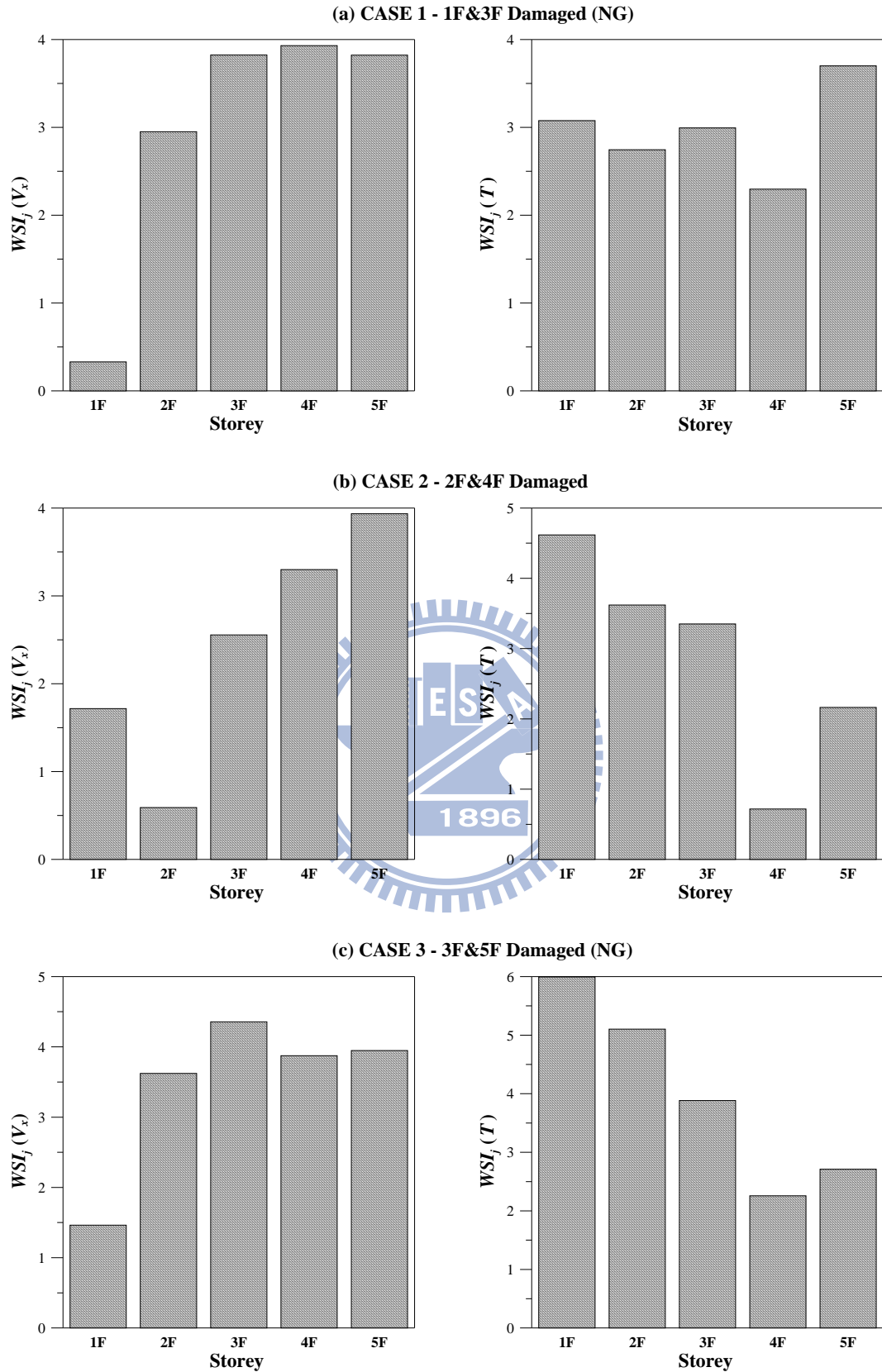


圖 5.73 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe)

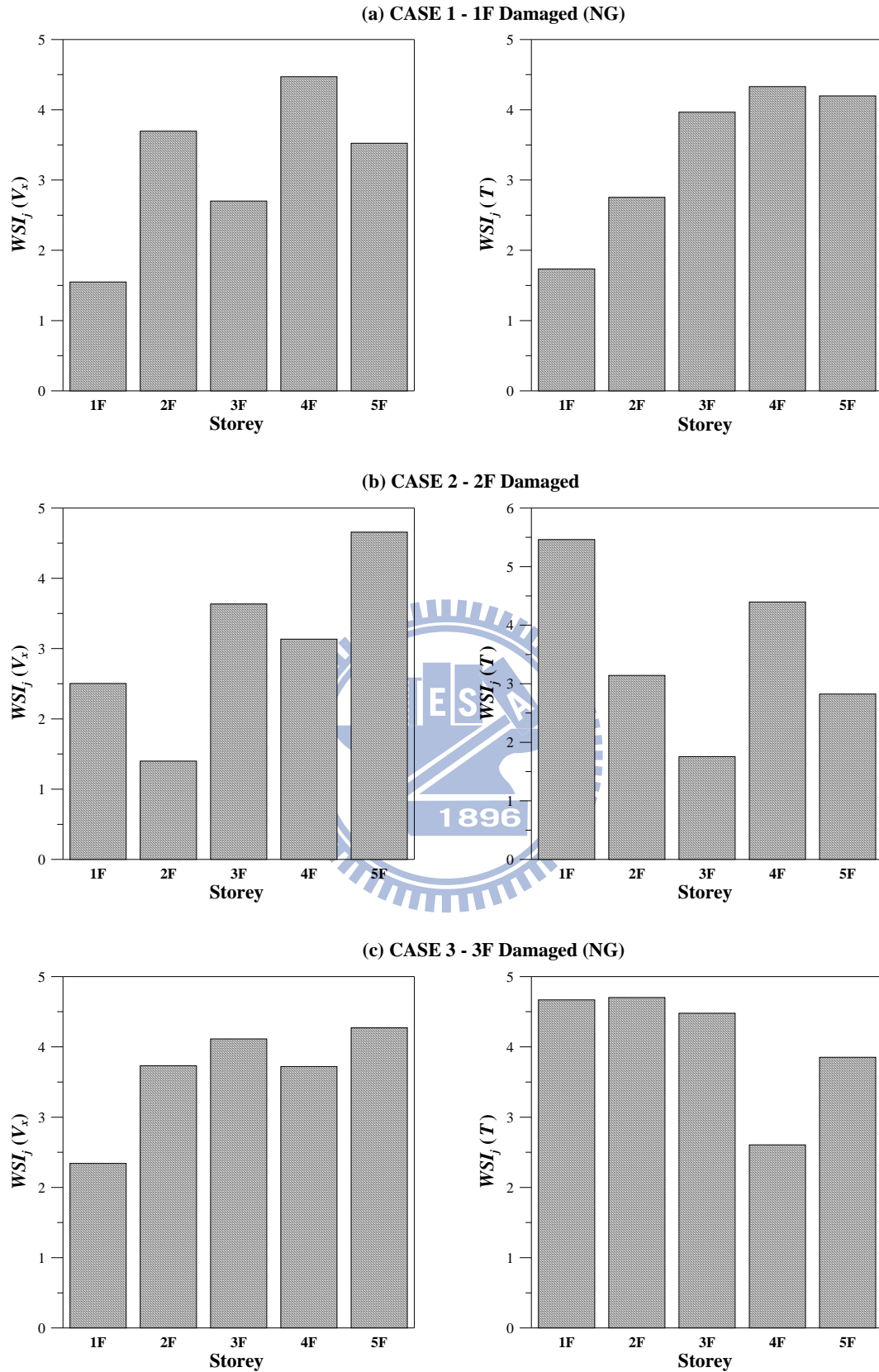


圖 5.74 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；El Centro)

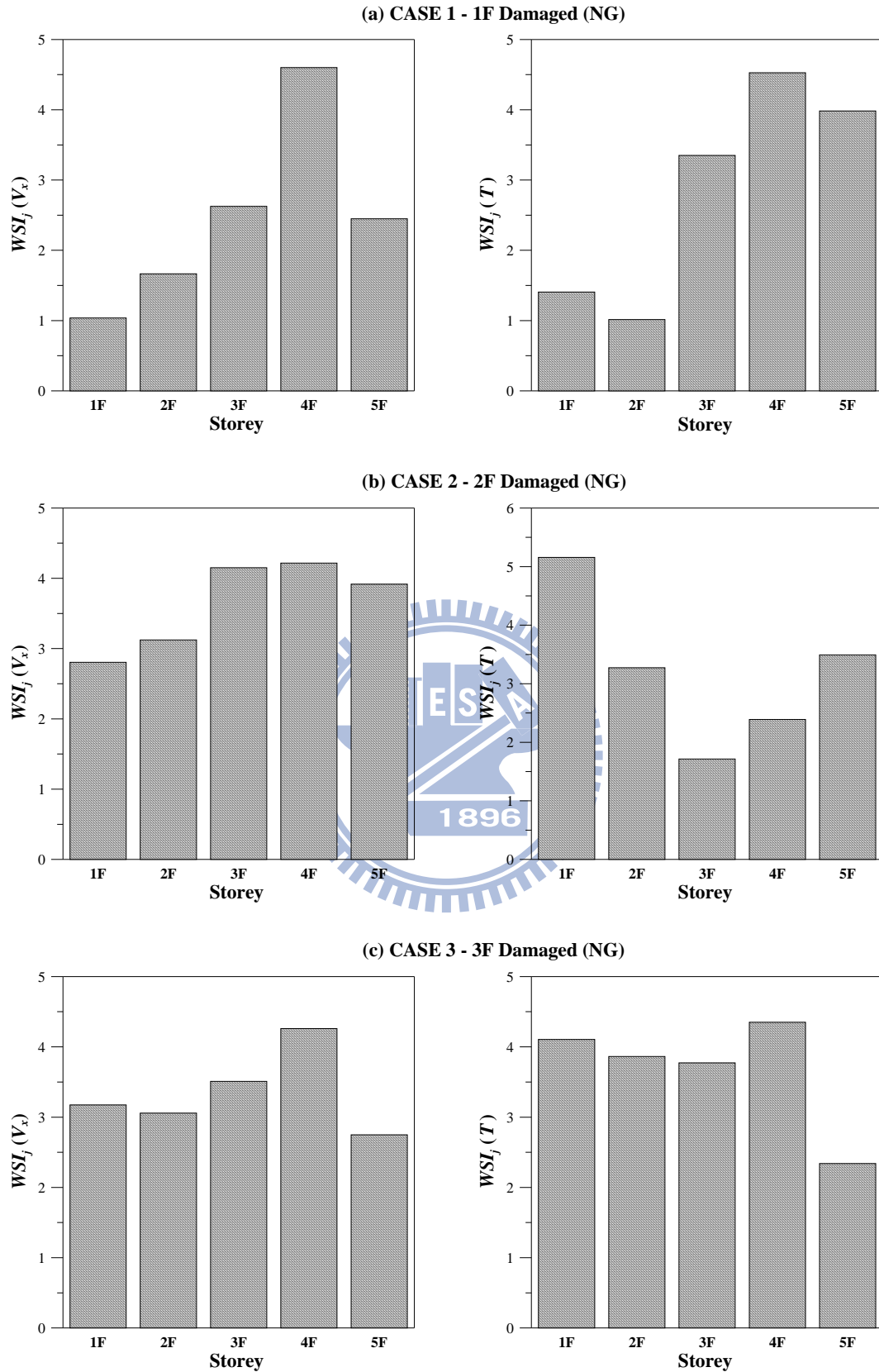


圖 5.75 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Hachinohe)

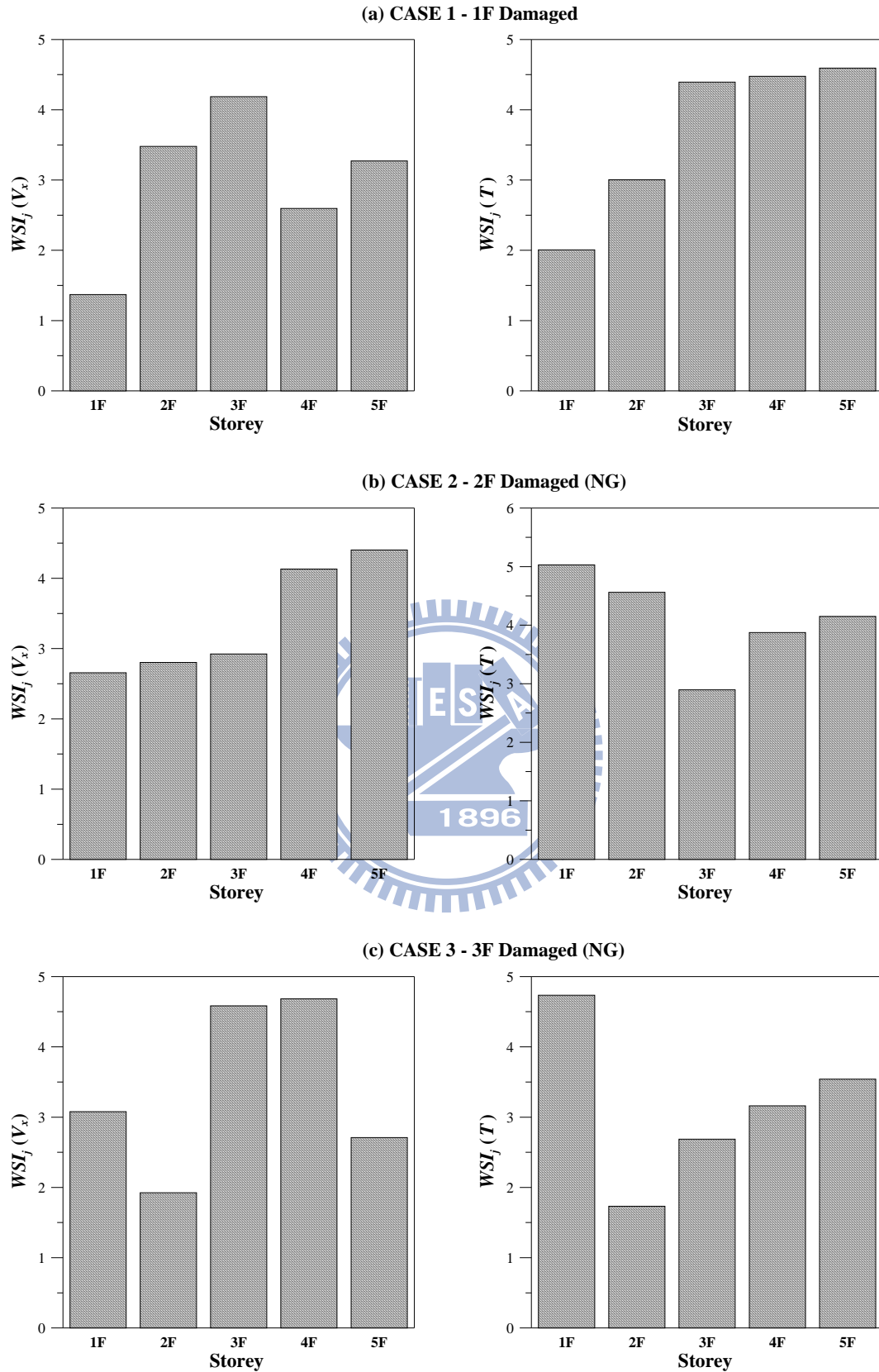


圖 5.76 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；單一樓層受損；Kobe)

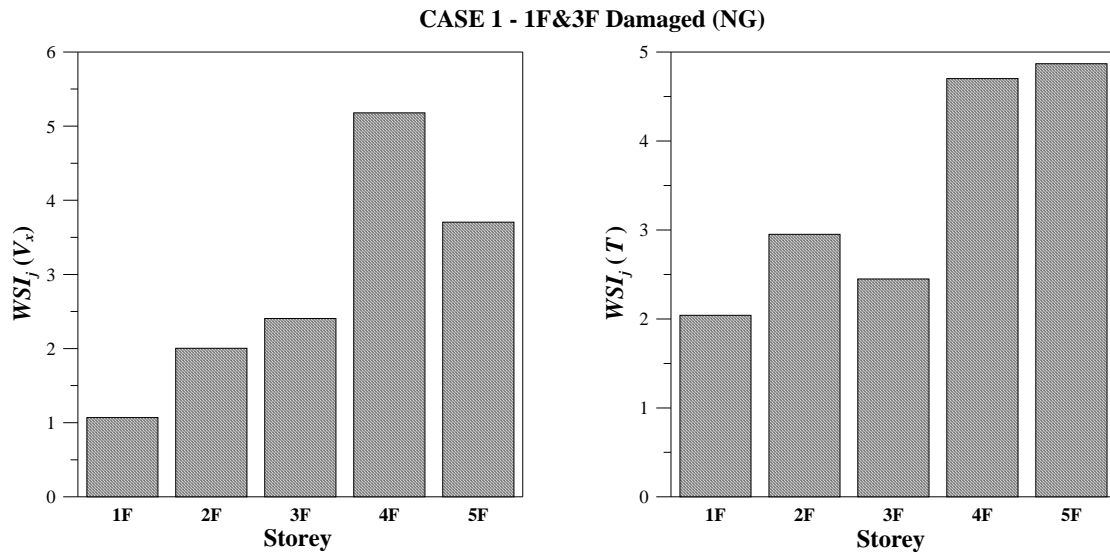


圖 5.77 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；El Centro)

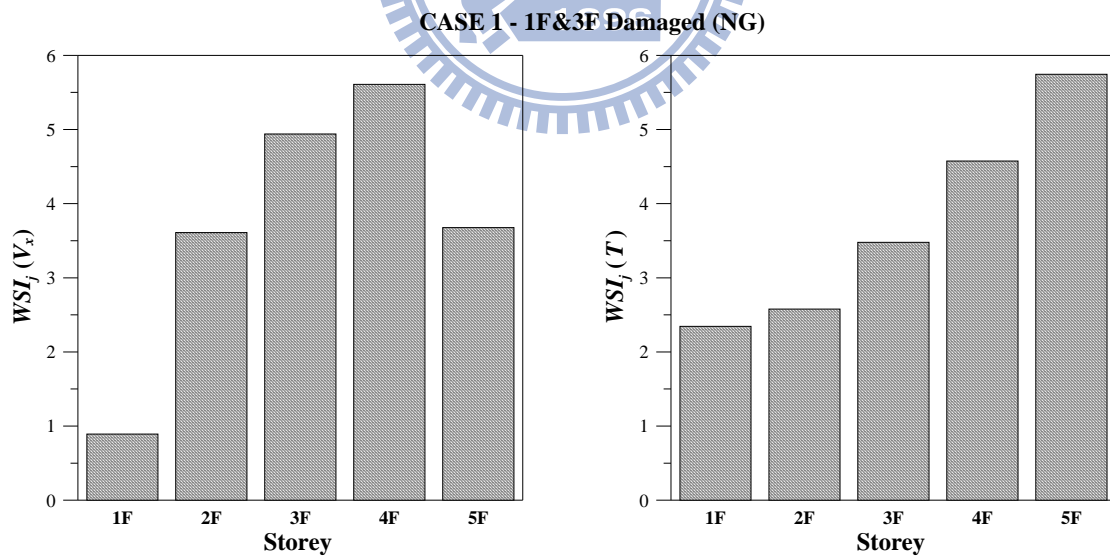


圖 5.78 狀態空間 DLV 分析結果(x 向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Hachinohe)

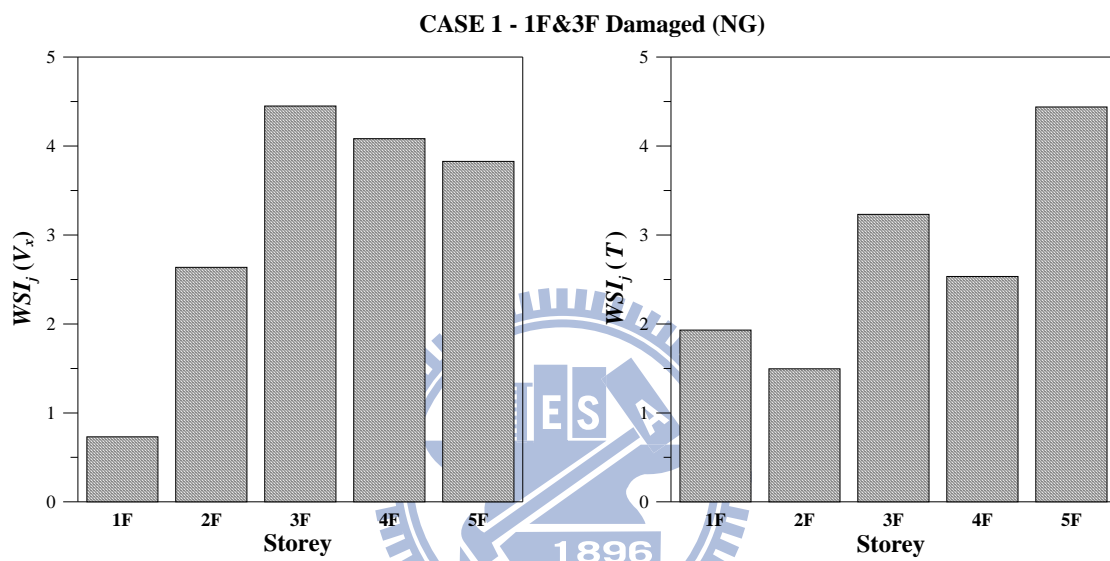


圖 5.79 狀態空間 DLV 分析結果( $x$  向及旋轉向之  $WSI_j$ )

(弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐；複數樓層受損；Kobe)

## 第六章 結論與建議

本研究利用 Bernal 提出的 DLV 損傷探測法結合 SRIM 系統識別分析，針對扭轉耦合結構進行一系列數值模擬與振動台試驗，驗證其實務應用之可行性。在系統識別方面，因 SRIM 法識別模態之正交性較 ARX 為佳，故本研究最終均採用 SRIM 法進行系統識別分析。在 DLV 損傷探測方面，針對不同方式配置斜撐之扭轉耦合結構，分別考慮特徵分析與系統識別兩種模式進行損傷探測分析。以特徵分析結果所建構的結構柔度矩陣可視為正確解(exact solution)，目的在驗證 DLV 損傷探測法於結構系統參數為理想已知的前提下應用於扭轉耦合結構之損傷探測的可行性。系統識別分析乃藉地震擾動下之結構動態歷時反應資料識別系統參數，進而建構出結構柔度矩陣以進行結構損傷探測分析。振動台試驗的目的在擬真條件(realistic conditions)下針對扭轉耦合結構進行損傷探測，以進一步驗證本文提出之結構損傷探測方法於實際應用之可行性。本文有關試驗數據之損傷探測分析分別考慮位形空間 DLV 法與狀態空間 DLV 法以進行比較。茲根據本文之分析與試驗結果，歸納結論與建議如下：

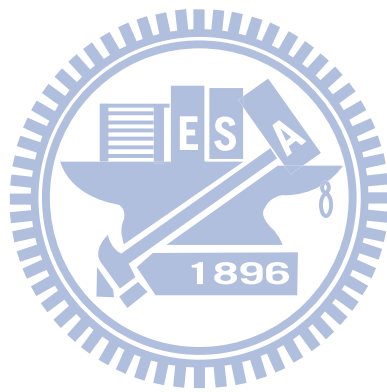
1. 數值分析結果顯示，針對弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐與弱軸雙邊強軸單邊配置斜撐兩種型式之扭轉耦合結構，以特徵分析結果建構柔度矩陣進行 DLV 損傷定位分析，無論是單一樓層受損或複數樓層受損的情況，均能準確偵測出破壞位置。

2. 數值分析結果顯示，針對弱軸單邊強軸雙邊配置斜撐之扭轉耦合結構，由單軸向(無論  $x$  或  $y$  向)輸入震波擾動，以系統識別求得結構系統參數建立之柔度矩陣進行 DLV 損傷探測分析，無論是單一樓層受損或複數樓層受損的情況，均能準確偵測出破壞位置。
3. 振動台試驗分析結果顯示，以位形空間 DLV 法進行損傷探測分析時，當結構為單一樓層破壞的情況，在三種不同地震波之測試結果都僅能在低樓層(1、2F)受損時偵測出破壞位置；當結構為複數樓層破壞的情況，都僅能偵測到位於低樓層(1、2F)之受損層，高樓層之受損層則無法正確識別出來。
4. 振動台試驗分析結果顯示，若以狀態空間 DLV 法進行損傷探測分析，則損傷定位之成功率有顯著提升。在單一樓層受損的情況，除三樓及五樓受損之案例未能成功定位之外，其餘三個案例均可成功找出受損樓層。複數樓層受損的情況，二樓及四樓受損之案例可正確識別出來，惟其餘兩案例仍未能成功。
5. 狀態空間 DLV 法比位形空間 DLV 法精確之主要原因為，狀態空間 DLV 法不需提供質量矩陣(已隱含於系統矩陣之中)，避免了位形空間 DLV 法建立柔度矩陣時因假設質量矩陣而引進誤差。
6. 狀態空間 DLV 法在部分案例之評估結果仍未臻理想，應與試驗時採用之地震強度較低( $PGA=0.05g$ )有關。由於地震反



應監測訊號中含有雜訊，當擾動訊號較弱時，噪訊比 (Noise-to-Signal Ratio, NSR) 相對較高，系統識別結果之誤差因而增大，進而影響損傷探測分析之準確度。此外，當 DLV 經由柔度差異矩陣之奇異值分解得到後，需加載於健康結構上進行應力分析以計算出各項應力指標。目前由 ETABS 所建立之模型與真實結構模型仍有落差，因此也是額外之誤差來源。

7. 建議後續應補充受損結構在  $PGA=0.1g$  之動態試驗結果，以提高系統識別分析之精確度，進一步改善損傷探測分析之準確度。
8. 建議在 DLV 找出來後，應發展直接由系統識別分析所得結構參數進行應力分析之後處理方法，避免因結構模型誤差而導致結構損傷探測分析之準確度。
9. 本研究於振動台試驗中所採用之結構模型係以移除受損樓層之斜撐來模擬結構之損傷狀態，因此損傷探測結果僅能偵測出受損樓層。建議未來試驗模型能以柱為受損構件，以進一步驗證狀態空間 DLV 法偵測個別受損桿件之能力。



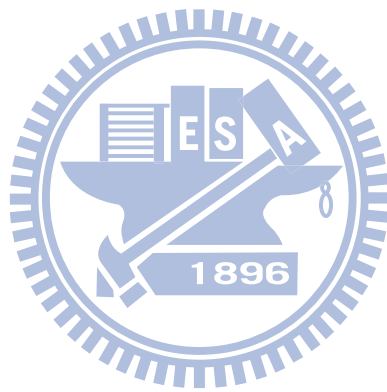
## 參考文獻

1. Ewins, D.J. (1984), "Modal Testing : Theory and Practice," John Wiley & Sons, London.
2. Salawu, O.S. (1997), "Detection of structural damage through changes in frequency : a review," *Engineering Structures*, Vol.19, No.9, pp.718-723.
3. Chen, J.C. and Garba, J.A. (1988), "On-orbit damage assessment for large space structures," *AIAA JOURNAL*, Vol.26, No.9, pp.1119-1126.
4. Lee, U. and Shin, J. (2002), "A frequency response function-based structural damage identification method," *Computers and Structures*, Vol.80, No.2, pp.117-132.
5. Lee, U. and Shin, J. (2002), "A frequency-domain method of structural damage identification formulated from the dynamic stiffness equation of motion," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.254, No.4, pp.615-634.
6. Hoyos, A. and Aktan, A.E. (1987), "Regional identification of engineered structures based on impact induced transient responses," *Res. Rep. No.87-1*, Louisiana State University.
7. Toksoy, T. and Aktan, A.E. (1994), "Bridge-condition assessment by modal flexibility," *Experimental Mechanics*, Vol.34, No.3, pp.271-278.

8. Pandey, A.K. and Biswas, M. (1994), "Damage detection in structures using changes in flexibility," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.169, No.1, pp.3-17.
9. Pandey, A.K. and Biswas, M. (1995), "Damage diagnosis of truss structures by estimation of flexibility change," *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol.10, No.2, pp.104-117.
10. Zhao, J. and DeWolf, J.T. (1999), "Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection," *Journal of Structural Engineering*, Vol.125, No.4, pp.410-416.
11. Bernal, D. (2002), "Load Vectors for Damage Localization," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.128, No.1, pp.7-14.
12. Gao, Y., Ruiz-Sandoval, and Spencer, B.F. (2002), "Flexibility-based damage localization employing ambient vibration," 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, Columbia University, New York.
13. Gao, Y., Spencer, B.F. and Bernal, D. (2007), "Experimental verification of the flexibility-based damage locating vector method," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.133, No.10, pp.1043-1049.
14. Duan, Z., Yan, G., Ou, J. and Spencer, B.F. (2005), "Damage localization in ambient vibration by constructing proportional

flexibility matrix,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol.284, No.1-2, pp.455-466.

- 15.柯宏明(2004),「建築物系統識別與損壞評估之研究」,國立成功大學土木工程學系,碩士論文。
- 16.劉正偉(2004),「樑構件系統之識別參數與損傷檢測之應用」,國立中央大學土木工程學系,碩士論文。
- 17.楊淳皓(2006),「扭轉耦合建築結構受震層間損壞指標」,國立中興大學土木工程學系,碩士論文。
- 18.林裕家(2007),「利用地震反應資料進行結構全域及局部性損害評估」,國立臺灣大學土木工程學系,碩士論文。
- 19.涂哲維(2008),「DLV法在結構破壞偵測之應用」,國立交通大學土木工程學系,碩士論文。
- 20.陳逸軒(2010),「結構系統識別與損傷探測之研究」,國立交通大學土木工程學系,博士論文。
- 21.Juang, J.N.(1997), “System Realization Using Information Matrix,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, pp. 492-500.
- 22.Bernal, D.(2006), “Flexibility-Based Damage Localization from Stochastic Realization Results,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 6, pp. 651-658.



## 附錄 A ARX 系統識別分析理論【20】

### A.1 離散時間系統的輸入-輸出模型

線性動力系統之等效離散時間模式，以單一輸入與單一輸出(SISO)的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y[k] + a_1 y[k-1] + \cdots + a_{n_a} y[k-n_a] = b_0 x[k] + b_1 x[k-1] + \cdots + b_{n_b} x[k-n_b] + e[k] \quad (\text{A.1})$$

其中， $y[\cdot]$ 與 $x[\cdot]$ 分別代表系統之輸出與輸入訊號； $a_i$ 與 $b_i$ 分別為輸出與輸入訊號之係數； $n_a$ 與 $n_b$ 分別為輸出與輸入訊號之維度。

針對式(A.1)進行 $z$ 轉換之運算，則可得到系統反應之頻率響應函數 $H(z)$ 如下所示：

$$H[z] = \frac{y[z]}{x[z]} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_{n_a} z^{-n_a}} = \frac{B[z]}{A[z]} \quad (\text{A.2})$$

其中， $y[z]$ 與 $x[z]$ 分別為 $y[k]$ 與 $x[k]$ 之 $z$ 轉換；而 $z = e^{j2\pi f \Delta t}$ 且 $f$ 與 $\Delta t$ 分別為系統之頻率與取樣間隔； $A[z]$ 與 $B[z]$ 分別為頻率響應函數之分母與分子多項式。

頻率響應函數 $H[z]$ 之分子多項式 $B[z]=0$ 之根稱為其零點(zeros)，其與系統之振態反應大小有關；頻率響應函數 $H[z]$ 之分母多項式 $A[z]=0$ 之根稱為其極點(poles)，其與系統第 $j$ 振態自然頻率 $f_j$ 及阻尼比 $\xi_j$ 之關係如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^2}} \quad (\text{A.4})$$

其中， $r_j = \sqrt{p_j \bar{p}_j}$ ，而  $p_j$  為分母多項式  $A[z]=0$  的第  $j$  個複數根，且  $\bar{p}_j$  為  $p_j$  之共軛複數； $\phi_j = \tan^{-1} \left[ \frac{I(p_j)}{R(p_j)} \right]$ ，其中  $I(p_j)$  與  $R(p_j)$  分別代表複數根  $p_j$  之實部與虛部； $T$  為取樣週期。

吾人只要識別出式(A.1)中之系統係數  $a_j$ 's,  $b_j$ 's，即可求得結構之自然頻率、阻尼比以及頻率響應函數。

## A.2 含雜訊之系統模型與預測誤差

理想的動力系統可由式(A.1)表示，但由於實際量測之訊號中多少會摻雜雜訊在內，因此，動力系統可修正如下：

$$A[q]y[k] = B[q]x[k] + C[q]e[k] \quad (\text{A.5})$$

其中， $e[k]$  代表雜訊，通常假設其為零均值(zero mean)之白雜訊(white noise)。多項式  $C[q]$  之定義為：

$$C[q] = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (\text{A.6})$$

其中， $c_j$  為雜訊之係數； $n_c$  為其維度。實際應用時，並不一定須要利用到每一多項式，可視情況予以簡化。例如

$$\text{ARX 模型：} A(q)y(k) = B(q)x(k) + e(k) \quad (\text{A.7})$$



$$\text{ARMAX 模型： } A(q)y(k) = B(q)x(k) + C(q)e(k) \quad (\text{A.8})$$

$$\text{ARMA 模型： } A(q)y(k) = C(q)e(k) \quad (\text{A.9})$$

單一輸入與單一輸出之 ARX 模型可根據式(A.1)重新表示成一誤差模型如下：

$$y[k] = \boldsymbol{\psi}^T[k]\boldsymbol{\theta}[k] + e[k] \quad (\text{A.10})$$

其中，

$$\boldsymbol{\psi}^T[k] = (-y[k-1], \dots, -y[k-n_a], x[k], \dots, x[k-n_b]) \quad (\text{A.11})$$

$$\boldsymbol{\theta}[k] = (a_1, \dots, a_{n_a}, b_0, \dots, b_{n_b})^T \quad (\text{A.12})$$

為了應用於多層樓結構單一輸入(地表加速度)與多重輸出(各樓層加速度)之情況，吾人遂進一步考慮單一輸入多重輸出(SIMO)之識別模式，則誤差模型可表示如下：

$$\mathbf{y}[k] = \boldsymbol{\psi}^T[k]\boldsymbol{\Theta}[k] + \mathbf{e}[k] \quad (\text{A.13})$$

其中，

$$\mathbf{y}[k] = (y_1[k], \dots, y_m[k])^T \quad (\text{A.14})$$

$$\boldsymbol{\Theta} = (a_1, \dots, a_{n_a}, b_{10}, \dots, b_{1n_b}, b_{20}, \dots, b_{2n_b}, \dots, b_{m0}, \dots, b_{mn_b})^T \quad (\text{A.15})$$

$$\boldsymbol{\psi}^T[k] = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1[k] & \mathbf{x}[k] & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{y}_2[k] & 0 & \mathbf{x}[k] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{y}_m[k] & 0 & 0 & \dots & \mathbf{x}[k] \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

$$\mathbf{y}_i[k] = (-y_i[k-1], \dots, -y_i[k-n_a]), \quad \forall i=1, \dots, m \quad (\text{A.17})$$

$$\mathbf{x}[k] = (x[k], \dots, x[k-n_b]) \quad (\text{A.18})$$

若對式(A.10)取期望值，並利用白雜訊之零均值之性質，可得：

$$\bar{\mathbf{y}}[k, \Theta] = \boldsymbol{\psi}^T[k] \Theta \quad (\text{A.19})$$

輸出訊號期望值  $\bar{\mathbf{y}}(k, \Theta)$  代表已知之系統參數  $\Theta$  下預測之輸出值。將其估測誤差定義為：

$$\boldsymbol{\varepsilon}[k, \Theta] = \mathbf{y}[k] - \bar{\mathbf{y}}[k, \Theta] \quad (\text{A.20})$$

若識別出來之系統參數  $\Theta$  完全正確，則  $\boldsymbol{\varepsilon}[k, \Theta] = \mathbf{e}[k]$ 。

### A.3 遞迴預測誤差法

今根據加權最小平方法之原理，定義系統之整體預測誤差為：

$$V(k, \Theta) = \frac{1}{2} \gamma(k) \sum_{s=1}^k \bar{\beta}(k, s) \boldsymbol{\varepsilon}^T(s, \Theta) \boldsymbol{\varepsilon}(s, \Theta) \quad (\text{A.21})$$

其中  $\beta(k, s)$  為加權因子， $\gamma(k)$  則為  $\bar{\beta}(k, s)$  之正規化因子 (normalization factor)，其定義為：

$$\gamma(k) \sum_{s=1}^k \bar{\beta}(k, s) = 1 \quad (\text{A.22})$$

若系統為非時變性時，可令加權因子為 1，此時即相當於最小平方法。對於時變性系統而言，加權因子可以追蹤系

統參數隨時間變化的特性，愈接近瞬時  $k$  的資料所給予的權重愈大。選擇指數視窗

$$\bar{\beta}(k,s) = \lambda(k)\bar{\beta}(k-1,s) \quad (\text{A.23})$$

其中，

$$\bar{\beta}(k,k) = 1 \quad (\text{A.24})$$

$$\lambda[k] = \lambda_0 \lambda[k-1] + 1 - \lambda_0 \quad (\text{A.25})$$

$\lambda$  稱為遺忘因子 (forgetting factor)，通常採用  $\lambda_0 = 0.99$ ， $\lambda[0] = 0.95$ 。為避免識別結果因雜訊影響而隨時間改變，我們將極小化的標準以期望值表示為：

$$E[V(k, \Theta)] = 0 \quad (\text{A.26})$$

或 (A.27) 可根據牛頓-瑞福森之迭代法 (Newton-Raphson method)，解出系統模型參數：

$$\Theta[k] = \Theta[k-1] - \alpha_i [V''[k, \Theta[k-1]]]^{-1} V'[k, \Theta[k-1]] \quad (\text{A.27})$$

上式中令  $\alpha_i = 1$ ，並經運算整理後可得到遞迴形式解

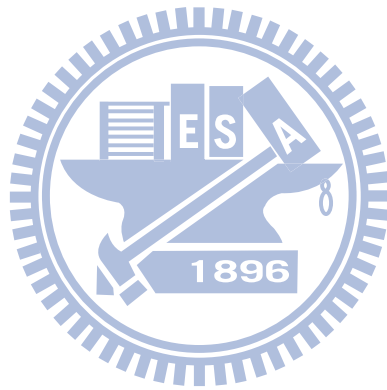
$$\Theta[k] = \Theta[k-1] + \mathbf{L}[k][\mathbf{y}[k] - \boldsymbol{\psi}^T[k]\Theta[k-1]] \quad (\text{A.28})$$

其中，

$$\mathbf{L}[k] = (\lambda[k]\mathbf{I} + \boldsymbol{\psi}^T[k]\mathbf{P}[k-1]\boldsymbol{\psi}[k])^{-1} \mathbf{P}[k-1]\boldsymbol{\psi}[k] \quad (\text{A.29})$$

$$\mathbf{P}[k] = \left( \lambda[k] \mathbf{I} + \boldsymbol{\psi}^T[k] \mathbf{P}[k-1] \boldsymbol{\psi}[k] \right)^{-1} \frac{\mathbf{P}[k-1]}{\lambda[k]} \quad (\text{A.30})$$

通常選擇初始條件  $\boldsymbol{\Theta}[0] = 0$  與  $\mathbf{P}[0] = K\mathbf{I}$ 。其中， $K$  通常為一很大之常數如  $10^8 \sim 10^{10}$  以加速其收斂速度。



## 附錄 B 狀態空間 DLV 損傷探測分析理論【22】

### B.1 狀態空間 DLV 法之理論回顧

考慮結構系統受外力擾動下， $n$  個自由度之位形空間運動方程式，以二階常微分系統方程式表示為：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{\Xi}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{E}\mathbf{u}(t) \quad (\text{B.1})$$

其中， $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{\Xi}$ 及 $\mathbf{K}$ 分別為 $R^{n \times n}$ 之質量、阻尼及勁度矩陣； $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 與 $\mathbf{x}(t)$ 分別為 $R^{n \times 1}$ 之結構位移、速度與加速度向量； $\mathbf{u}(t) \in R^{r \times 1}$ 為外力向量， $r$ 為輸入外力之數量； $\mathbf{E} \in R^{n \times r}$ 為外力配置矩陣，其矩陣元素取決於外力之型式與分佈。

式(B.1)可改寫為狀態空間方程式如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (\text{B.2})$$

若定義狀態向量

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

則式(B.2)可改寫成：

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (\text{B.4})$$

其中，

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (\text{B.5a})$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (\text{B.5b})$$

$\mathbf{z}(t) \in R^{2n \times 1}$  為連續時間之狀態向量； $\mathbf{A}_c \in R^{2n \times 2n}$  為連續時間系統矩陣； $\mathbf{B}_c \in R^{2n \times r}$  為連續時間輸入影響矩陣。

假設初始條件為零，且式(B.5b)中之 $\mathbf{E} \in R^{n \times n}$ 為單位矩陣及 $\mathbf{u}(t) \in R^{n \times 1}$ 的情況下，對式(B.4)作拉普拉斯轉換(Laplace transform)，則

$$s\mathbf{z}(s) = \mathbf{A}_c \mathbf{z}(s) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(s) \quad (\text{B.6a})$$

或

$$\mathbf{z}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_c)^{-1} \mathbf{B}_c \mathbf{u}(s) \quad (\text{B.6b})$$

考慮位移狀態的部分，即：

$$\mathbf{x}(s) = \mathbf{C}_0 \mathbf{z}(s) = \mathbf{C}_0 (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_c)^{-1} \mathbf{B}_c \mathbf{u}(s) \quad (\text{B.7})$$

其中， $\mathbf{C}_0 = [\mathbf{I} \ \mathbf{0}] \in R^{n \times 2n}$  為位移狀態輸出矩陣。當 $s=0$ 時(靜態)，即可求得結構之柔度矩陣( $\mathbf{F}$ )為：

$$\mathbf{F} = -\mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^{-1} \mathbf{B}_c \quad (\text{B.8})$$

先前文獻【11】中係由結構系統之質量矩陣、自然頻率及模態向量組成柔度矩陣如下：

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Phi} \mathbf{w}^{-1} \mathbf{\Omega}^{-1} \mathbf{w}^{-1} \mathbf{\Phi}^T \quad (\text{B.9})$$

其中， $\mathbf{\Phi}$  為模態向量所組成之模態矩陣； $\mathbf{w} = (\mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi})^{1/2}$ ； $\mathbf{\Omega}$  為自然頻率平方所組成之對角矩陣。相較之下，以系統之狀態空間參數組成之柔度矩陣式(B.8)不必估算系統之質量矩陣，有助於減少估算柔度矩陣之誤差，因此更具實務應用價值。

以  $\mathbf{C}_0$  前乘於式(B.4)可得速度狀態如下：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) + \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (\text{B.10})$$

將上式對時間  $(t)$  微分一次可得加速度狀態如下：

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_c \dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^2 \mathbf{z}(t) + \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) + \mathbf{C}_0 \mathbf{B}_c \dot{\mathbf{u}}(t) \quad (\text{B.11})$$

其中，由  $\mathbf{C}_0$  及式(B.5b)計算可得：

$$\mathbf{C}_0 \mathbf{B}_c = \mathbf{0} \quad (\text{B.12})$$

因此，式(B.10)與式(B.11)可分別再化簡為：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{z}(t) \quad (\text{B.13a})$$

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^2 \mathbf{z}(t) + \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \quad (\text{B.13b})$$

另一方面， $\dot{\mathbf{x}}(t)$  及  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  亦可分別表示為：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_1 \mathbf{z}(t) \quad (\text{B.14a})$$

及

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}_2 \mathbf{z}(t) + \tilde{\mathbf{D}} \mathbf{u}(t) \quad (\text{B.14b})$$

其中， $\mathbf{C}_1 = [\mathbf{0} \ \mathbf{I}] \in R^{n \times 2n}$  為速度狀態輸出矩陣； $\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^2$  為  $R^{n \times 2n}$  之加速度狀態輸出矩陣； $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c$  為  $R^{n \times r}$  之加速度直接傳輸矩陣。

對照式(B.13)與式(B.14)可推得：

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \quad (\text{B.15a})$$

或

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_c^{-1} \quad (\text{B.15b})$$

以及

$$\mathbf{C}_2 = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^2 = \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_c = [-\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \quad -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{E}] \quad (\text{B.16a})$$

或

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_c^{-2} \quad (\text{B.16b})$$

此外，

$$\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c = \mathbf{M}^{-1} \quad (\text{B.17})$$

將式(B.8)、式(B.12)與式(B.17)中之 $\mathbf{C}_0$ 分別以式(B.15b)或式(B.16b)代入可得：

$$\mathbf{F} = -\mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c^{-1} \mathbf{B}_c = -\mathbf{C}_1 \mathbf{A}_c^{-2} \mathbf{B}_c = -\mathbf{C}_2 \mathbf{A}_c^{-3} \mathbf{B}_c \quad (\text{B.18a})$$



$$\mathbf{C}_0 \mathbf{B}_c = \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_c^{-1} \mathbf{B}_c = \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_c^{-2} \mathbf{B}_c = \mathbf{0} \quad (\text{B.18b})$$

及

$$\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{C}_0 \mathbf{A}_c \mathbf{B}_c = \mathbf{C}_1 \mathbf{B}_c = \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_c^{-1} \mathbf{B}_c \quad (\text{B.18c})$$

或化簡為：

$$\mathbf{F} = -\mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{-(g+1)} \mathbf{B}_c \quad (\text{B.19a})$$

$$\mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{-g} \mathbf{B}_c = \mathbf{0} \quad (\text{B.19b})$$

及

$$\mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{1-g} \mathbf{B}_c = \tilde{\mathbf{D}} \quad (\text{B.19c})$$

其中， $\mathbf{C}_g \in R^{n \times 2n}$ ，可為 $\mathbf{C}_0$ 、 $\mathbf{C}_1$ 或 $\mathbf{C}_2$ ， $g$ 由量測輸出訊號之物理量而定， $g=0$ 對應於位移狀態， $g=1$ 對應於速度狀態， $g=2$ 對應於加速度狀態。

將式(3.19b)與式(3.19c)合併可得：

$$\mathbf{H} \mathbf{B}_c = \mathbf{J} \tilde{\mathbf{D}} \quad (\text{B.20a})$$

或

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{J} \tilde{\mathbf{D}} \quad (\text{B.20b})$$

其中，

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{-g} \\ \mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{1-g} \end{bmatrix} \in R^{2n \times 2n}, \quad g = 0, 1 \text{ or } 2 \quad (\text{B.21a})$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \in R^{2n \times n} \quad (\text{B.21b})$$

再將式(B.20b)代入式(B.19a)，可將結構之柔度矩陣改寫為：

$$\mathbf{F} = -\mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{-(g+1)} (\mathbf{H}^{-1} \mathbf{J} \tilde{\mathbf{D}}) = \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{D}} \quad (\text{B.22})$$

其中，

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{C}_g \mathbf{A}_c^{-(g+1)} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{J} \quad (\text{B.23})$$

根據式(B.22)計算結構物破壞前、後之柔度差異矩陣：

$$\mathbf{D}_F = \mathbf{F}^d - \mathbf{F}^i = \mathbf{Q}^d \tilde{\mathbf{D}}^d - \mathbf{Q}^i \tilde{\mathbf{D}}^i \quad (\text{B.24})$$

其中，上標  $i$ 、 $d$  分別表示未破壞(intact)與破壞(damaged)之結構狀態。

令  $\Delta \tilde{\mathbf{D}} = \tilde{\mathbf{D}}^d - \tilde{\mathbf{D}}^i$  代入式(B.24)可得：

$$\mathbf{D}_F = (\mathbf{Q}^d - \mathbf{Q}^i) \tilde{\mathbf{D}}^i + \mathbf{Q}_d \Delta \tilde{\mathbf{D}} = \Delta \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{D}}^i + \mathbf{Q}^d \Delta \tilde{\mathbf{D}} \quad (\text{B.25})$$

對  $\Delta \tilde{\mathbf{D}}$  作奇異值分解可得：

$$\Delta \tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{U}^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} \mathbf{S}^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} (\mathbf{V}^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}})^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{U}_0^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_n^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{V}_0^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.26})$$

將式(B.26)後乘  $(\mathbf{V}^{\Delta \tilde{\mathbf{D}}})^{-T}$  可改寫成：

$$\Delta\tilde{\mathbf{D}}(\mathbf{V}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}})^{-T} = \mathbf{U}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}\mathbf{S}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{U}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.27})$$

由於矩陣  $\mathbf{V}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}$  為正交矩陣，因此具有  $(\mathbf{V}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}})^{-T} = \mathbf{V}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}$  之特性，故式(B.27)亦可表示如下：

$$\Delta\mathbf{D}\mathbf{V}^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{D}\mathbf{V}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} & \Delta\mathbf{D}\mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}\mathbf{S}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{U}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}\mathbf{S}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}\mathbf{S}_n^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{B.28})$$

其中， $\Delta\mathbf{D}\mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} = \mathbf{0}$ 。將式(B.25)後乘  $\mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}}$  可消除等號右側的第二項，如下：

$$\mathbf{D}_F \mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} = \Delta\mathbf{Q}\tilde{\mathbf{D}}^i \mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}} \quad (\text{B.29})$$

再將式(B.29)後乘  $(\mathbf{V}_0^{\Delta\tilde{\mathbf{D}}})^{-1}$  可得：

$$\mathbf{D}_F = \Delta\mathbf{Q}\tilde{\mathbf{D}}^i \quad (\text{B.30})$$

另一方面，若結構系統受損前後之質量並無變化，可根據式(B.17)推得：

$$\Delta\tilde{\mathbf{D}} = \Delta(\mathbf{M}^{-1}) = \mathbf{0} \quad (\text{B.31})$$

因此，式(B.25)亦可改寫為：

$$\mathbf{D}_F = \Delta\mathbf{Q}\tilde{\mathbf{D}}^i \quad (\text{B.32})$$

與式(B.30)完全一致。

接著，對式(B.30)轉置後可得：

$$\mathbf{D}_F^T = (\tilde{\mathbf{D}}^i)^T \Delta \mathbf{Q}^T = \mathbf{D}_F \quad (\text{B.33})$$

其中，由於柔度矩陣為對稱，因此  $\mathbf{D}_F$  亦為對稱矩陣，故

$$\mathbf{D}_F^T = \mathbf{D}_F。$$

對  $\Delta \mathbf{Q}^T$  作奇異值分解可得：

$$\Delta \mathbf{Q}^T = \mathbf{U}^{\Delta \mathbf{Q}^T} \mathbf{S}^{\Delta \mathbf{Q}^T} (\mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T})^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{U}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.34})$$

其中， $\mathbf{U}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{n \times (n-c_0)}$  為  $\Delta \mathbf{Q}^T \Delta \mathbf{Q}$  之非零特徵值所對應之左側單位特徵向量，( $c_0$  為奇異值之數量)； $\mathbf{U}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{n \times c_0}$  為  $\Delta \mathbf{Q}^T \Delta \mathbf{Q}$  之奇異值所對應之左側單位特徵向量； $\mathbf{S}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{(n-c_0) \times (n-c_0)}$  為  $\Delta \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Q}^T$  之非零特徵值所組成之對角矩陣； $\mathbf{S}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{c_0 \times c_0}$  為  $\Delta \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Q}^T$  之奇異值所組成之對角矩陣； $\mathbf{V}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{n \times (n-c_0)}$  為  $\Delta \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Q}^T$  之非零特徵值所對應之右側單位特徵向量； $\mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \in R^{n \times c_0}$  為  $\Delta \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Q}^T$  之奇異值所對應之右側單位特徵向量。

將式(B.34)後乘  $(\mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T})^{-T}$  可改寫成：

$$\Delta \mathbf{Q}^T (\mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T})^{-T} = \mathbf{U}^{\Delta \mathbf{Q}^T} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{U}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} \quad (\text{B.35})$$

由於矩陣  $\mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T}$  為正交矩陣，因此具有  $(\mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T})^{-T} = \mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T}$  之特性，故式(B.35)亦可表示如下：

$$\Delta \mathbf{Q}^T \mathbf{V}^{\Delta \mathbf{Q}^T} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \Delta \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} \mathbf{S}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{U}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \mathbf{S}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} \mathbf{S}_n^{\Delta \mathbf{Q}^T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{B.36})$$

其中， $\Delta \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} = \mathbf{0}$ 。將式(B.33)後乘 $\mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T}$ 可得：

$$\mathbf{D}_F \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} = (\tilde{\mathbf{D}}^i)^T \Delta \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} \quad (\text{B.37a})$$

或

$$\mathbf{D}_F \mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T} = \mathbf{0} \quad (\text{B.37b})$$

$\mathbf{V}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T}$  即為破壞定位向量  $\mathbf{L}$ 。綜合以上所述，不論是於數學或物理意義上，均說明可由  $\Delta \mathbf{Q}^T$  作 SVD 分解萃取出破壞定位向量  $\mathbf{L}$ 。

實際上，因為數值計算及系統識別所產生之誤差，SVD 分解無法得到理想的奇異值 ( $\mathbf{S}_0^{\Delta \mathbf{Q}^T}$ )，因此 Bernal【22】定義一指標  $q$ ，作為篩選破壞定位向量  $\mathbf{L}_i$  的數目如下：

$$q = 0.5 \left[ \text{No. of } \gamma_i \leq 0.1, \gamma_i = \sqrt{\frac{s_i^{\Delta \mathbf{Q}^T}}{\max(s_i^{\Delta \mathbf{Q}^T})}} \right] \quad (\text{B.38})$$

取其整數值， $s_i^{\Delta \mathbf{Q}^T}$  為  $\Delta \mathbf{Q}^T$  第  $i$  個奇異值。此外，定義於第  $i$  組破壞定位向量  $\mathbf{L}_i$  作用下之正規化應力指標  $nsi_{j,i}$ ，如下：

$$nsi_{j,i} = \left| \frac{\sigma_{j,i}}{\sigma_{j,i \max}} \right| \quad (\text{B.39})$$

其中， $\sigma_{j,i}$  為對應於第  $i$  組破壞定位向量作用下之第  $j$  個元素的應力(或內力)。此外，並重新定義加權應力指標  $WSI_j$  的計算方式如下：

$$WSI_j = \sum_{i=1}^q nsi_{j,i} \quad (B.40)$$

Bernal 認為當  $WSI_j \leq 0.1(WSI_j)_{\max}$  時，則視該桿件或樓層 ( $j$ ) 為可能受損 (potentially damaged；簡稱 PD) 的元素，亦即：

$$PD = \left\{ \text{element } j \text{'s } \forall WSI_j \leq 0.1(WSI_j)_{\max} \right\} \quad (B.41)$$

## B.2 結合 SRIM 系統識別之狀態空間 DLV 法

以 SRIM 系統識別所得到的離散時間系統矩陣  $\bar{\mathbf{A}}$  與狀態輸出影響矩陣  $\bar{\mathbf{C}}_g$ ，未必全等於式 (2.10)、式 (2.11) 中之  $\mathbf{A}$  與  $\mathbf{C}_g$ 。惟  $\bar{\mathbf{A}}$  與  $\mathbf{A}$  為相似 (similarity) 之關係，其特徵值均相同且特徵向量亦為線性相關。此外，根據式 (2.12a)，可將  $\bar{\mathbf{A}}$  轉換為  $\bar{\mathbf{A}}_c$  如下：

$$\bar{\mathbf{A}}_c = \frac{\ln(\bar{\mathbf{A}})}{\Delta t} \quad (B.42)$$

茲將式 (B.23) 中之  $\mathbf{A}_c$  及  $\mathbf{C}_g$  分別以  $\bar{\mathbf{A}}_c$  及  $\bar{\mathbf{C}}_g$  取代而改寫成：

$$\bar{\mathbf{Q}} = -\bar{\mathbf{C}}_g \bar{\mathbf{A}}_c^{-(g+1)} \bar{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{J} \quad (B.43)$$

其中，

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_g \bar{\mathbf{A}}_c^{-g} \\ \bar{\mathbf{C}}_g \bar{\mathbf{A}}_c^{1-g} \end{bmatrix} \in R^{2n \times 2n}, \quad g = 0, 1 \text{ or } 2 \quad (\text{B.44a})$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \in R^{2n \times n} \quad (\text{B.44b})$$

由於真實情況下(如某些模態未被激發或雜訊過大)未必可精確識別出所有的模態向量，因此為避免不正確之模態資訊影響損傷探測分析結果，必須先將明顯不佳之模態剔除。若針對 $\bar{\mathbf{A}}$ 矩陣進行特徵分析可得：

$$\bar{\mathbf{A}} \bar{\Psi} = \bar{\Psi} \bar{\Lambda} \quad (\text{B.45a})$$

或

$$\bar{\mathbf{A}} = \bar{\Psi} \bar{\Lambda} \bar{\Psi}^{-1} \quad (\text{B.45b})$$

其中，

$$\bar{\Psi} = [\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2, \dots, \bar{\psi}_{2n}], \quad \bar{\Lambda} = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \bar{\lambda}_{2n} \end{bmatrix} \quad (\text{B.46})$$

兩者均為共軛複數的形式，特徵矩陣 $\bar{\Psi} \in R^{2n \times 2n}$ 係由特徵向量組成； $\bar{\Lambda} \in R^{2n \times 2n}$ 為特徵值所組成之對角矩陣。

若吾人僅考慮 $\bar{n}$  ( $\bar{n} < n$ )個有效模態(亦即對應之 $2\bar{n}$ 個特徵向量)，則式(B.45)可修正為：

$$\hat{\mathbf{A}}\hat{\Psi} = \hat{\Psi}\hat{\Lambda} \quad (\text{B.47a})$$

或

$$\hat{\mathbf{A}} = \hat{\Psi}\hat{\Lambda}\hat{\Psi}^* \quad (\text{B.47b})$$

其中， $\hat{\mathbf{A}} \in R^{2n \times 2n}$ ； $\hat{\Lambda} \in R^{2\bar{n} \times 2\bar{n}}$ ； $\hat{\Psi} = [\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2, \dots, \bar{\psi}_{2\bar{n}}] \in R^{2n \times 2\bar{n}}$  為  $\bar{\Psi}$  中之  $2\bar{n}$  個有效特徵向量組成之降階 (reduced-order) 模態向量矩陣； $\hat{\Psi}^* = \hat{\Psi}^T (\hat{\Psi}\hat{\Psi}^T)^{-1} \in R^{2\bar{n} \times 2n}$  為  $\hat{\Psi}$  之擬逆 (pseudo-inverse) 矩陣。

根據式 (2.12a)，將  $\hat{\mathbf{A}}$  轉換為  $\hat{\mathbf{A}}_c$  如下：

$$\hat{\mathbf{A}}_c = \frac{\ln(\hat{\mathbf{A}})}{\Delta t} \quad (\text{B.48})$$

接著以經過篩選後之  $\hat{\mathbf{A}}_c$  取代式 (B.43) 之  $\bar{\mathbf{A}}_c$  將其改寫成：

$$\hat{\mathbf{Q}} = -\bar{\mathbf{C}}_g \hat{\mathbf{A}}_c^{-(g+1)} \hat{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{J} \quad (\text{B.49})$$

其中，

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_g \hat{\mathbf{A}}_c^{-g} \\ \bar{\mathbf{C}}_g \hat{\mathbf{A}}_c^{1-g} \end{bmatrix} \in R^{2n \times 2n}, \quad g = 0, 1 \text{ or } 2 \quad (\text{B.50a})$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \in R^{2n \times n} \quad (\text{B.50b})$$

如此得到之  $\hat{\mathbf{Q}}$  內涵中已剔除不良之模態資訊，可避免損傷探測分析結果受到影響。