

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis



建築結構健康監控系統配置之研究-以鋼構廠房為例

Research on the establishment suggestion of Structure Health
Monitoring System - Taking Steel Construction for example

林高禾

Kao-Ho Lin

指導教授:曾惠斌 博士

Advisor : Hui-Ping Tserng Ph.D.

共同指導教授:林之謙 博士

Co-Advisor : Jacob J. Lin Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July 2024

摘要

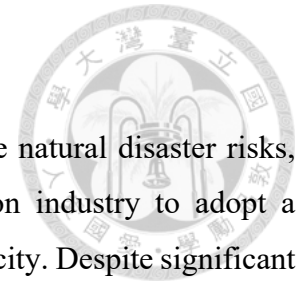


臺灣因其特殊地理條件下，面臨多種自然災害風險，如颱風和地震等，這使得營建工程產業必須具備居安思危的觀念，並制定相應的風險管理策略，以實現韌性城市的願景。雖然近年來臺灣在災後搶救和建築修復技術方面取得了顯著進展，但仍難以完全保障生命和財產安全。對此，結構監測儀器和辨識方法的研究逐漸增加，但目前的研究多集中於數值模型模擬及實驗室試驗，尚未針對具體建築專案提出經濟實用且可靠的監控系統規劃。

本研究以某國營事業機構的重要發電設施廠房為案例，針對自然災害外部衝擊，透過建築結構制定歷程，運用 TEKLA 及 ETABS 結構分析軟體，著重探討結構系統抵禦外力機制，辨識系統載重控制因子，模擬結構構件破壞順序，從而定義重點監控構件標準。期能大幅降低系統點位佈設比率，並結合業界監測新知技術，提出最佳化結構健康監控系統 (Structure Health Monitoring, SHM) 配置方案。另經由歷史數據進行動力分析歷時模擬驗證，取得具相當可靠度的辨識成果。透過主動結構安全數據蒐測，在遭受外部衝擊時，能提供關鍵數據支援緊急應變和修復評估，避免城市機能系統鏈中斷，影響基礎設施品質恢復時程。同時，透過與中央監控軟硬體整合，將數據自動化導入物管單位系統，作為日後評估建物整建維護計畫的參考依據，從而達到延長建築物生命週期的目標。

關鍵字：結構健康監控、系統識別、風險管理、韌性城市

Abstract



Due to its unique geographical conditions, Taiwan faces multiple natural disaster risks, such as typhoons and earthquakes. This necessitates the construction industry to adopt a proactive risk management approach to achieve the vision of a resilient city. Despite significant advancements in disaster recovery and building restoration technologies in recent years, ensuring complete safety of lives and property remains challenging. Consequently, research on structural monitoring instruments and identification methods has been increasing. However, current studies mainly focus on numerical model simulations and laboratory tests, and have yet to propose economical, practical, and reliable monitoring system plans for specific building projects.

This study takes a power generation facility of a state-owned enterprise as a case example. In response to external impacts from natural disasters, it formulates a structural process using TEKLA and ETABS structural analysis software, focusing on exploring the mechanism of the structural system's resistance to external forces, identifying system load control factors, and simulating the sequence of structural component failures. This aims to define standards for key monitoring components, significantly reducing the system's point layout ratio. By integrating the latest monitoring technologies from the industry, the study establishment suggestion of an optimized Structure Health Monitoring (SHM) system plan. Furthermore, through dynamic analysis and time-history simulation verification using historical data, the study achieves identification results with considerable reliability. By actively collecting structural safety data during external impacts, the system can provide critical data to support emergency response and repair assessments, preventing disruptions in urban functional systems and affecting infrastructure quality recovery timelines. Additionally, through integration with central monitoring hardware and software, the data can be automatically incorporated into property management systems, serving as a reference for future building maintenance and renovation plans, thereby achieving the goal of extending the building's lifecycle.

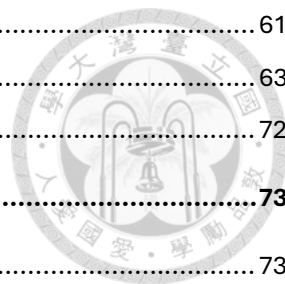
Key Words: Structure Health Monitoring, System identification, Risk management,
Urban resilience

目次



第一章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	2
1.4 研究問題.....	3
1.5 範圍限制.....	4
1.6 論文架構.....	4
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 結構健康監控.....	6
2.2 結構系統辨識.....	7
2.3 建築監測儀器.....	9
2.4 小結.....	11
第三章 研究方法.....	12
3.1 建築結構傳力路徑.....	13
3.2 集力構件定義標準.....	14
3.3 監控系統規劃流程.....	16
3.4 小結.....	18
第四章 研究案例.....	19
4.1 研究案例簡介.....	19
4.2 研究案例規劃.....	22
4.3 結構系統分析.....	27
4.3.1 靜載重.....	29
4.3.2 活載重.....	32
4.3.3 風載重.....	36
4.3.4 地震載重	39
4.3.5 載重控制因子	42
4.4 結構分析成果.....	45
4.5 小結.....	58
第五章 驗證模擬.....	60
5.1 非線性地震力歷時分析.....	60

5.2 歷史地震力輸入與調整.....	61
5.3 歷時載重驗證模擬成果.....	63
5.4 小結.....	72
第六章 結論建議.....	73
6.1 結論.....	73
6.2 建議.....	76
參考文獻.....	77



表次



表 2.1 參考文獻對應損壞狀態之門檻值 (許嘉雯, 2022)	8
表 2.2 文獻回顧強震儀規格表	10
表 2.3 文獻回顧快篩標準表	10
表 3.1 臺灣主要結構用鋼材基本性質 (中華民國鋼結構協會, 2022)	14
表 3.2 應變計讀數判別標準	18
表 3.3 層間位移法管理標準	18
表 4.1 統包需求建議書之各空間需求概估表	22
表 4.2 案例工地鋼骨架構數量統計表 (圓方結構, 2024)	27
表 4.3 各材料單位重量分析表	29
表 4.4 2FL 靜載重核算表	29
表 4.5 3FL 靜載重核算表	30
表 4.6 3MFL 靜載重核算表	30
表 4.7 4FL 靜載重核算表	30
表 4.8 5FL 靜載重核算表	31
表 4.9 6FL 靜載重核算表	31
表 4.10 R1FL 靜載重核算表	31
表 4.11 PRFL 靜載重核算表	32
表 4.12 樓層單位重統計表	32
表 4.13 風力計算基本參數表	36
表 4.14 X 向風力計算($G_{cpi} = 0.375$)	37
表 4.15 X 向風力計算($G_{cpi} = -0.375$)	37
表 4.16 X 向橫向風及扭轉風向力計算	37
表 4.17 Y 向風力計算($G_{cpi} = 0.375$)	38
表 4.18 Y 向風力計算($G_{cpi} = -0.375$)	38
表 4.19 Y 向橫向風及扭轉風向力計算	38
表 4.20 地震力基本載重符號與定義	39
表 4.21 靜力分析載重組合係數(內政部, 2010)	40

表 4.22 動力分析載重組合係數(內政部, 2010)	40
表 4.23 實際地震力質量計算表	41
表 4.24 LRFD 設計規範載重組合係數(內政部, 2010)	42
表 4.25 X 向地震力與 1.6 風剪力比較表	42
表 4.26 Y 向地震力與 1.6 風剪力比較表	43
表 4.27 地震力與扭轉風力比較表	43
表 4.28 A Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	50
表 4.29 B Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	50
表 4.30 C Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	51
表 4.31 D Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	51
表 4.32 E Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	52
表 4.33 F Line 主柱構件組合載重 Ratio 值	52
表 4.34 BRB 斜撐構件組合載重 Ratio 值	53
表 4.35 2FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	54
表 4.36 2FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	54
表 4.37 3FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	54
表 4.38 3FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	55
表 4.39 3MFL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	55
表 4.40 3MFL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	55
表 4.41 4FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	55
表 4.42 4FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	56
表 4.43 5FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	56
表 4.44 5FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	56
表 4.45 6FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	56
表 4.46 6FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	57
表 4.47 RFL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	57
表 4.48 RFL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值	57
表 4.49 三軸向應變計最佳化配置方案	58
表 5.1 動力歷時分析載重組合係數 (內政部, 2024)	63

表 5.2 A Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	64
表 5.3 B Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	64
表 5.4 C Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	65
表 5.5 D Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	65
表 5.6 E Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	66
表 5.7 F Line 主柱構件歷時載重驗證成果.....	66
表 5.8 BRB 斜撐構件歷時載重驗證成果.....	67
表 5.9 D Line 主梁構件歷時載重驗證成果表.....	68
表 5.10 2FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	68
表 5.11 2FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	68
表 5.12 3FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	69
表 5.13 3FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	69
表 5.14 3MFL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	69
表 5.15 3MFL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	69
表 5.16 4FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	70
表 5.17 4FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	70
表 5.18 5FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	70
表 5.19 5FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	70
表 5.20 6FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	71
表 5.21 6FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	71
表 5.22 RFL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	71
表 5.23 RFL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果.....	71
表 5.24 驗證模擬成果總表.....	72
表 6.1 三軸向應變計讀數判別標準.....	73
表 6.2 pALERT 強震儀層間變位角管理標準.....	73
表 6.3 第一階段 TEKLA 評估成果.....	74
表 6.4 第二階段 ETABS 評估成果.....	74
表 6.5 非線性地震力歷時分析驗證模擬成果.....	75

圖次



圖 3.1 研究流程圖	12
圖 3.2 永久變形容量影響示意圖 (本研究彙整)	15
圖 3.3 結構用鋼材應力應變曲線示意圖	15
圖 4.1 研究案例基地正射影像圖(桃園市政府, 2020)	19
圖 4.2 案例基地鑽孔編號(深度)示意圖 (泛亞工程, 2023)	20
圖 4.3 地層剖面示意圖 (泛亞工程, 2023)	21
圖 4.4 概念設計模擬透視圖 (泛亞工程, 2022)	23
圖 4.5 基本設計報告書 1FL 空間規劃圖 (陳文彥建築師事務所, 2022)	24
圖 4.6 基本設計階段 ETABS 二元系統模型圖 (陳文彥建築師事務所, 2022)	25
圖 4.7 挫屈束制支撐構造示意圖 (魏志毓, 2006)	26
圖 4.8 鋼骨架構 TEKLA 模型	27
圖 4.9 細部設計階段 ETABS 二元系統模型 (圓方結構, 2024)	28
圖 4.10 1FL 活載重 Loading Map	33
圖 4.11 2FL 活載重 Loading Map	33
圖 4.12 3FL 活載重 Loading Map	34
圖 4.13 4FL 活載重 Loading Map	34
圖 4.14 5FL 活載重 Loading Map	35
圖 4.15 6FL 活載重 Loading Map	35
圖 4.16 X 向地震力與 1.6 風剪力比較圖	43
圖 4.17 Y 向地震力與 1.6 風剪力比較圖	44
圖 4.18 X 向地震力與 1.6 倍扭轉風力比較圖	44
圖 4.19 Y 向地震力與 1.6 倍扭轉風力比較圖	45
圖 4.20 2FL 組合載重分析成果	46
圖 4.21 3 FL 組合載重分析成果	46
圖 4.22 3M FL 組合載重分析成果	47
圖 4.23 4 FL 組合載重分析成果	47
圖 4.24 6FL 組合載重分析成果	48

圖 4.25 5 FL 組合載重分析成果	48
圖 4.27 柱位編號示意圖	49
圖 4.26 R1FL 組合載重分析成果.....	49
圖 4.28 BRB 斜撐與主樑柱接合詳圖	53
圖 4.29 強震於安裝位置示意圖	58
圖 5.1 中央氣象署地震觀測網的測站分布圖 (中央氣象署, 2018).....	60
圖 5.2 擇定測站與案例建築相對位置圖	61
圖 5.3 動力分析相符反應譜	62
圖 5.4 測站歷史數據轉換圖	62

第一章 緒論



1.1 研究背景

臺灣地處環太平洋地震帶上，位於「菲律賓海板塊、歐亞大陸板塊、太平洋板塊」三大板塊的交匯處，地震活動頻繁，屬全球少數幾個地震頻率極高的地區之一。而臺灣又位於西太平洋颱風生成的主要路徑上，每年夏、秋季節，受到太平洋高壓和西風帶的影響，都會受到多次颱風侵襲，產生強風、暴雨等多種災害（交通部中央氣象局, 2024b）。

因其特殊地理條件，臺灣的營建工程產業在考量建築全生命週期中的地震和颱風等高風險自然災害時，顯得格外重要。回顧近年來的地震災害事件，如：1999 年 921 集集大地震，造成 51,711 棟建物倒塌；於 2002 年 331 花蓮地震，於強震搖晃下，致使興建中的臺北 101 塔吊吊臂斷裂震落，造成 25 位人員傷亡；於 2010 年高雄甲仙地震，茲因台灣電力股份有限公司重要發電廠房受損，致使南臺灣逾 54 萬戶停電（交通部中央氣象局, 2024a）。這些事件促使臺灣積極強化建築耐震性能發展，並不斷更新耐震規範，引入新的地震工程理論和技術，以提高建築物的抗震能力，因應不斷變化的地震風險和建築技術需求。

歷經臺灣 25 年耐震革新，新建建物耐震能力大幅增加，於 2024 年 403 花蓮地震，儘管有 84 棟建物損壞，惟其中多數建物曾於 921 地震災害，經專業技師公會依內政部「災害後危險建築物緊急評估辦法」（內政部國土管理署, 2019），評定為黃色危險標誌（評估有危險之虞建物，惟尚未達限制使用程度），經檢修補強後，仍無法抵禦本次地震災害，造成嚴重財產損失。

近十年來，臺灣災後搶救動員能力和建築修復補強技術逐步增強，產、官、學各界也共同積極研擬建築耐震技術和修訂法令設計規範。儘管如此，這些努力仍無法完全保障生命和財產。經過文獻回顧，近期科學界亦逐步專注於「結構監測儀器」和「結構辨識方法」，但目前尚未提出經濟實用且具有相當可靠度的監測系統，以供推廣使用。

本研究認同積極預防災害發生的重要性，主張在建築物中設置科學化的安全監測系統。透過主動監測數據收集，實現對建築物的全面監控和管理，不僅能夠即時發現結構系統存在的潛在問題，達到災害預防的目的；平時亦能夠提供重要的數據支持，用於建築物的定期檢測和維護，進一步延長其使用壽命，降低事故風險。這也是推動後續第 1.2 節研究動機的重要驅動力。

1.2 研究動機

鑑於自然災害為臺灣無可避免的風險，特別是地震風險，與其他自然災害（如：颱風、豪雨...等）相比，其不可預測性更加顯著。迄今為止，科學技術尚無法精準預測地震發生時間與災害規模，這使得我們更加需要居安思危，制定相應的災害管理策略。臺灣傳統災害管理的四個主軸，主要以「災害減災、防災整備、緊急應變和災後復原」等四個面向進行探討 (Bruneau et al., 2003); 惟完善的韌性評估機制仍需有具體資料數據及科學研究成果，始能研擬完整的防災規劃，達到韌性城市的願景。

以建築工程觀點出發，建築完整生命週期包含規劃、設計、施工及運營等 4 階段，其中運營階段時程約佔全週期 90% 以上。然而，目前法令規範所規定的必要安全監測時程僅局限於施工階段，主要是針對施工過程中對鄰近房屋的保護。對於運營階段的建物，卻缺乏相應的法規著墨，這對於長期存在的建築物安全管理帶來了不小的挑戰。

經文獻探討了解其窒礙難行因素，因建築物結構屬高度靜不定韌性系統，其抵禦外力的機制極為複雜。所謂靜不定結構，意即某一構材損毀（如挫曲或塑鉸），系統不會立即產生局部不穩定現象，而是會將力量轉移至鄰近的構材，以消能抵抗能力。然而，全面識別各建築構件所承受的載重、力量傳導路徑以及應力集中處，仍然是結構系統識別領域中的一大挑戰。現有的科學研究成果，仍無法完全解開這個複雜難解的謎。

為因應臺灣眾多高齡建築物所帶來的安全挑戰，本研究嘗試突破先前研究，僅限於簡化數值模擬及實驗室測試等限制。運用實際建築廠房案例，自建築生命週期起點出發，逐步探討結構系統的規劃和設計來由，以檢討如何精進突破建築物結構系統識別的瓶頸。透過此方法，規劃專屬於該廠房建物的安全監控系統，並主動進行建物結構數據蒐測。

本研究動機在於辨識結構系統抵禦外力的機制，提前預防單一構件韌性容量耗盡等潛在安全隱患，並採取主動防護措施，以確保延長建築物使用年限；為達到此願景，本研究選擇某國營事業機構的重要發電設施廠房作為案例，深度探討第 1.3 節研究目的及設定第 1.4 節研究問題。

1.3 研究目的

由於大量佈設相關儀器設備成本過高，致使現今結構監控系統仍難以落實主因之一。對此，本研究的主要目的是突破參考文獻的限制，不再僅侷限於實驗室簡易架構模擬。本研究將運用實際建築案例，進行結構系統識別，剖析應力集中構件（集力構件），提出最經濟的監測儀器配置建議。同時，將運用災害控制因子之歷史數據進行驗證，確保

所提出的配置能夠提供相當可靠度的結果。具體而言，本研究的目的包括以下幾點：

1. 透過建築結構制定歷程，探討設計階段各利害關係者直接與間接影響，如何於各需求被滿足的前提下，擇定最經濟且有效的結構系統架構，所需面臨之關鍵課題。
2. 如何於設計階段，透過「調整構件型式」及「加設二元系統」等方式，以控制結構系統抵禦外力機制；進而辨識模擬結構構件破壞順序，從而選擇重點監控構件。
3. 如何運用結構系統識別及建築監測儀器的研究成果，針對系統載重控制因子，自動化紀錄結構數據，並將其整合到中央監控系統，以利日後結合物業管理的應用。
4. 如何針對災害控制因子，引用歷史數據進行數值模擬驗證，確保本研究提出的結構健康監控系統具有足夠可靠的辨識成果，從而實現本研究的目標。

1.4 研究問題

檢討臺灣政府對建築物安全監測的相關法令規範，包括「建築法第 69 條」、「建築技術規則，建築構造編，第 127-1 條」以及「建築物基礎構造設計規範，第八章，基礎開挖」等。另外，社團法人團體「中華民國大地工程學會」也制定了「建築物基礎開挖安全監測準則」。然而，目前這些法規多數僅針對施工階段的建築物進行規範要求，對於營運階段的建築物則鮮少有相應研究。有鑑於此，本研究擬從以下幾個問題進行研析：

研究問題一：架構最佳化歷程

以研究案例統包工程為例，如何在符合利害關係者需求及法令規範檢討的前提下，擇定最經濟且有效的結構系統架構，從而避免過度超額設計，以及經濟上的浪費和損失。

研究問題二：系統辨識檢討

針對研究案例進行結構系統辨識，如何掌握結構系統抵禦外力機制及構件破壞順序；並從結構分析成果定義集力構件，以利進行後續結構健康監控。

研究問題三：載重控制因子

如何透過監測儀器有效地獲取重要結構數據，並記錄於物管中央監控系統中，用以作為未來結構補強規畫性檢討的重要依據，以提高建築物的整體安全性。

研究問題四：驗證模擬成果

如何針對載重控制因子，引用歷史數據，設計數值模擬驗證方法，確保在考量經濟因素的前提下，所建議的結構健康監控配置方案，仍具有一定可靠度辨識成果。

1.5 範圍限制

考量到建物結構健康監控系統建置的費用高昂且需要長時間進行數據收集、彙整以及專家研析，始能判讀數據呈現之物理意義；因此，在法令規範尚未完備且政府尚未提供鼓勵措施的情況下，將其普及至一般私有住宅相對困難。

鑒於此，於第 1.2 節研究動機中提出，為實現韌性城市規劃的願景，應優先考慮關鍵民生系統的基礎建設，如：醫療系統（醫療機構）、電力系統（發電廠）、公務系統（行政大樓）、救災系統（警消單位）...等，避免災後系統鏈中斷，維護城市整體機能的恢復力，從而減少經濟損失和社會動盪的影響。(Mileti & Noji, 1999)

本研究範圍，係以某國營事業機構的重要發電設施廠房為案例，該廠房主要用途為運轉大型機具設備。該廠房的地上主體結構系統，採用鋼骨造特殊抗彎矩構架及挫曲束制斜撐（Buckling-Restrained Brace，BRB）所構成之二元系統。本研究將於此範疇下，透過適用法令規範及設計準則，進行設計流程的深入研析，確定控制系統關鍵因子，以便進一步設置安全監測系統。

在研究限制方面，由於本研究採用實際案例作為標的，因此將不討論其他構造物（如鋼筋混凝土造）適用之設計規範及實證方法。另外，本研究主要著重於天然災害風險因子的分析，其中地震致災機制係透過地盤錯動，引致建物地上結構體產生相對位移，導致建築構件額外力量而造成破壞；而颱風致災機制係因熱帶氣旋帶來強烈陣風及豪雨，兩者災害因素均與下部主體結構無關，因此本研究僅針對上部結構物進行討論。

1.6 論文架構

於確認研究動機、問題、目的及限制後，將進行文獻蒐集及研析。透過實際案例建立研究模型，進行模擬驗證分析，彙整歸納結論與建議。有關本研究章節架構及研究流程，詳述如下：

第一章 緒論

於本研究首要章節，將闡述研究的背景、動機、目的，並界定研究範圍和限制。透過此章節，明確呈現出研究的重要性、必要性，以及具體的研究目標與方向。

第二章 文獻回顧

本章旨在透過系統性的文獻資料收集，深入瞭解學界對結構系統識別及監控技術的理論基礎和研究成果。同時，綜合專家學者的觀點和業界最新科技動態，以加深對本研究領域的理解。透過文獻回顧，確定本研究的方向和內容與現有研究成果的差異，同時關注專業儀器設備廠商的技術發展，探索未來結構安全監控系統可能的發展方向，以提升其效能和可靠性。

第三章 研究方法

本章旨在針對第 1.3 節研究目的與第 1.4 節研究問題，設計出研究的流程和方法。透過本章節研析，以利理解本研究所要解決的問題，並確立鋼構廠房建築物結構監控的標準和重要點位的選擇方法。這將助於第四章實際案例的結構系統識別分析及監控系統規劃。

第四章 研究案例

本章將詳細說明研究案例的擇定緣由、地質條件、建築規劃及結構系統等基本性質，透過結構分析軟體，納入臺灣法令規範及設計指引，模擬不同外力加載模式（如：地震、颱風等），檢討控制結構系統關鍵要因，辨識結構系統集力構件，定義識別判斷基準，規劃案例架構的重點監控點位。

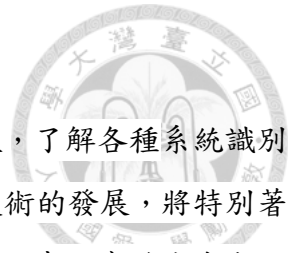
第五章 驗證模擬

本章將挑選鄰近案例工址測站，運用交通部中央氣象署測站歷史數據資料，針對災害控制因子設計相應的實證方案，以驗證第四章所提出的監控系統及重要觀測點位的辨識準確性。

第六章 結論建議

最後一章將對整個研究進行總結，彙整主要發現及結果，並提出對未來研究方向與建議，以期進一步深化本研究領域的研究內涵與應用價值。

第二章 文獻回顧



本章節文獻回顧主要分為兩大部分，其一為結構系統識別文獻，了解各種系統識別方法以及其在實際應用中的研究成果和局限性。其二為監測儀器技術的發展，將特別著重於適合應用於建築結構的監測儀器技術。透過文獻回顧探討，確認本研究的方向和內容與現有研究成果的差異性，同時關注專業儀器設備廠商的科技技術發展，以探索未來結構安全監控系統可能的發展方向，以提升其效能和可靠性。

2.1 結構健康監控

結構健康監控 (Structure Health Monitoring, SHM) 技術起源於 1980 年代，隨著機械工業和航太工業的迅速發展，科學界逐漸重視機械系統的結構損傷診斷技術。早期的結構損傷檢測概念主要分為兩大類：其一為破壞性檢測，透過材料取樣，進行試驗和檢測，以了解結構損傷程度；其二為非破壞性檢測，透過於系統上，安裝感測儀器，透過外部力量等特徵數據探測，來推估結構內部力量變化，據了解整體系統健康狀況。

SHM 技術的實際應用首先在航太工程 (Aerospace Engineering) 中被提出。隨著資訊時代進步和科技技術的蓬勃發展，各種先進感測儀器設備迅猛發展，使得結構健康診斷系統在航太、機械和土木工程領域取得了顯著進步。(國家地震工程研究中心, 2010)

結構健康診斷是近年來許多學者研究的重點，目的是透過比較結構目前的狀態與未受損狀態或基線狀態 (Baseline State)，來判斷結構在外力作用後是否受損，進而確定損壞的位置和程度 (許嘉雯, 2022)。廣義的結構健康診斷技術包括以下四個階段：結構運行評估 (Operational evaluation of the structure)、數據獲取過濾 (Data acquisition and cleansing)、特徵數據提取 (Feature extraction and information condensation) 以及統計模型開發 (Statistical model development)。

其中，「結構運行評估」包括識別結構的損傷類型及其可能發生的位置，涉及詳細結構分析和診斷技術，以辨識結構系統在抵禦外部載重下的應力傳導路徑。這部分將在第 2.2 節進行深入探討，並列舉已實施應用案例。另「數據獲取過濾」需要依靠先進的監測儀器技術，包括各種感測器來收集結構運行數據。為達到數據過濾的目的，需開發適當的系統運行環境和監測限制，設計合適的數據處理算法，並建立可靠的數據管理系統，以確保數據的準確性和一致性。這部分的研究內容將在第 2.3 節進行探討，分析不同技術手段的優缺點及其實際應用效果。

2.2 結構系統辨識

考量到建築物結構屬於高度靜不定韌性系統，其抵禦外力的機制極為複雜。靜不定結構指的是當某一構件損毀（如挫曲或塑鉸）時，系統不會立即產生不穩定現象，而是會將力量轉移至鄰近的構件，以消能抵抗。然而，全面識別各建築構件所承受的載重、力量傳導路徑以及應力集中處，仍然是結構系統識別領域中的一大挑戰，也是本研究首要探討現今研究成果的關鍵課題。

現行研究的系統識別成果可簡要分為力量辨識、變位辨識和勁度辨識三大類：第一類是力量辨識，主要檢核建物構件所受力量是否超越設計階段所假設的「設計地震力」與「最大考量地震力」，判斷是否已超出設計者的考量，進而導致結構損壞。

第二類是變位檢核，其主要原理是透過強震儀收集加速度數據，經過零均值化處理和兩次積分得到擬位移結果，並利用濾波處理，計算各樓層的最大層間變位角（余以諾, 2020）。這類方法主要檢核結構層間變位比值，根據建築結構系統、建築材料、樓層高度、耐震設計等級等特性，客製化設定該建築損傷級別的門檻值。在地震發生時，各樓層的加速度紀錄經過適當的積分與濾波分析，得到各樓層的最大層間變位角（Drift Ratio）。

先前研究提出的層間位移法是透過應用層間變位角，根據建築結構系統、建築材料、樓層高度和耐震設計等級等特性，客製化設定建築損傷級別的門檻值。在地震發生時，透過對加速度紀錄進行零均值化處理，使用梯形積分兩次得到位移訊號，並透過帶通濾波器進行處理，求得各樓層的相對位移量。上下兩樓層的相對位移量相減，即為相對層間位移，再乘上振幅放大系數，以減少因濾波器造成的誤差值，從而得到估算的層間位移值。

變位檢核方法已經應用於結構健康監測系統中，並有在臺北市內湖區公共住宅的真實案例。該計畫共安裝了 11 個強震儀，並將啟動紀錄標準設定為震度 1 級。在獲取地震紀錄數據後，這些數據被導入快篩診斷系統。該快篩系統基於局部變位角，結合 Hazus 損失估算方法學（Hazus Loss Estimation Methodology）所定義的層間變位角門檻值，來判定輕度損壞、中度損壞、嚴重損壞和完全損壞等四種損壞狀態，如表 2.1 所示（許嘉雯, 2022）。

表 2.1 參考文獻對應損壞狀態之門檻值 (許嘉雯, 2022)

Damage Index Threshold				
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
DM	0.10	0.25	0.50	0.80
SDI	0.25	0.40	0.70	0.90

第三類檢核是勁度檢核，其原理是透過測量頂樓及地表的加速度反應，運用工程學理概念，將「層間力平衡方程式」透過積分推導，識別結構系統在地震作用前後的振動週期及勁度變化，進而推斷結構損壞情況 (楊晏瑜, 2023)。結構損壞會導致其勁度降低，檢核振動週期是否有下降的趨勢即可掌握結構是否受損 (劉醇宇, 2003; 羅俊雄, 2014)。如果週期有些微變化則屬中度警戒，明顯差異則屬高度警戒。除了結構損壞，其他環境因素也可能影響振動週期觀察，因此該檢核需仰賴長期監測資料的分析比對，不同結構需依據長期資料分析結果做最適切的設定。

黃雅霏(2017)透過實際量測資料，利用基本數學積分器與層間力平衡方程式推導，識別結構系統在地震前後的勁度變化。該研究方法分為全量測與部分量測兩種方式，全量測可判別損壞層次及程度，部分量測只需測量頂樓及地表反應，即可初步計算出損壞指標，說明損壞程度。該研究發展簡易快速方法，只需測量部分樓層的加速度反應及地表反應，依層間力平衡方程式識別整體擬勁度，觀察擬勁度之變化並計算整體損壞指標。在真實八層樓結構中雖低估損壞結果，但仍可作為初步判斷損壞的指標。

曾昭俊(2001)於九二一集集大地震後，中興大學土木環工大樓的水平向基本振動週期由地震前的 0.33 秒延長至 0.5 秒，這表明大地震造成建築物損傷後勁度變小，振動週期變長。因此，檢查振動週期是否下降可指示結構是否受損，透過建築物各樓層設置感應器，記錄振動歷時後，透過快速傅里葉轉換 (FFT) 識別建築物的週期與振態。其中，微小變化表示中度警戒，明顯差異則屬高度警戒。然而，除了結構損壞外，其他環境因素也可影響觀察到的振動週期。因此，這項檢核需倚賴長期監測資料的分析比對。不同結構需根據長期資料分析的結果做出最適切的設定。

2.3 建築監測儀器

強震即時警報系統在地震防災中扮演著重要的角色，國家災害防救科技中心在 2012 年的報告中明確指出了其重要性。儘管科技仍難以準確預測地震，但這個系統能夠在地震發生時提供數秒至數十秒的預警時間，這對於減少地震所帶來的損失具有關鍵意義。該系統採用了中央氣象局提出的觸發機制，利用 STA (短期平均值) 和 SILTA (長期平均值) 的比值來判定地震事件。當 STA 與 SILTA 之比值超過特定門檻值，且同一時間內有超過 5 個測站觸發，即可確認地震事件的發生。

林裕家(2007)研究指出，在評估全域性和局部性結構損害，探討兩種不同的損害檢測方法，提出的傷害評估方法主要分為三個步驟：首先，利用量測資料識別狀態空間的結構系統矩陣，轉換出動態的物理參數；其次，使用 DLV 方法進行全域性損害檢測；最後，利用模態振形曲率的變化量和定義的傷害指數評估局部性結構損害。實驗及數值模擬的結果證實了這些方法的有效性 (林裕家, 2007)。

林子軒(2011)提出了一個整合式無線感測網路結構健康監測系統，應用於建築與土木結構。該系統由多種無線節點組成，包括感測結點、簇首節點、傳送節點和基地台。其軟體架構能夠進行可靠的資料感測、傳輸、儲存、視覺化及分析等工作。此外，系統還整合了能源擷取系統以改善能源消耗。這種整合式監測系統的應用為結構健康監測提供了一個新的途徑 (林子軒, 2011)。

楊晏瑜(2023) 提出了一個最佳化感測器配置方法，以減少成本和時間，同時提高結構物健康檢測的精確度。結合了隨機子空間識別法、三次樣條內插法、K-means 演算法和基因演算法等方法，判斷加速度感測器的最佳樓層位置。該方法經數值模擬和現地實驗驗證，證明了其可行性和效益。最終，提出的最佳化配置方法可大幅減少感測器數量，並獲得更準確的結構物模態頻率，可作為日後結構物損壞情況的重要參考依據 (楊晏瑜, 2023)。

根據第 2.2 節，第一類力量檢核結構系統識別特徵值成果，對於鋼骨構造系統，透過構件表面安裝具自動化數據監測功能的三軸向應變計，依據力學原理進行測量。單軸向應變計可以測得已知應變方向的應變量；雙軸向應變計可用來測量 X 軸及 Y 軸兩方向的應變，從而計算材料的波松比 (Poisson ratio)；三軸向應變計可以透過應變莫爾圓 (Mohr's circle) 轉換來計算主應變，進而得知構件所受的應力大小。

根據第 2.2 節，第二類變位檢核及第三類勁度檢核結構系統識別特徵值成果，主要基於「加速度數據」的延伸應用。參考專業儀器設備廠商的科技技術發展，目前針對地震感測所開發的儀器設備日新月異。根據先前研究，在臺北市內湖區某處地下四層、地上十四層的鋼筋混凝土公共住宅的實際監測案例中，安裝了 11 個強震儀。相關儀器規格如表 2.2 所示，在獲取地震紀錄數據後，以頂樓及 10 樓之層間變位角為例，定義快篩標準如表 2.3 所示，導入快篩診斷系統進行系統識別和損壞評估。（許嘉雯, 2022）

表 2.2 文獻回顧強震儀規格表

強震儀規格表	
型號	Palert+
規格	三軸向微機電加速度計。 可內建或外接第四垂直軸速度計。
量測範圍	$\pm 2G$
動態範圍	100 dB
解析度	4 通道 24 位元
地震事件紀錄時間	200 秒（可設定）
記憶容量	16GB（可擴充 64GB）
內建時鐘精度 （RTC）	± 60 秒/年

表 2.3 文獻回顧快篩標準表

層間變位角 θ (Drift Ratio)	損壞程度
$\theta_{RF-10F} < 0.0025$	無損壞
$0.0025 < \theta_{RF-10F} < 0.005$	輕度損壞
$0.0050 < \theta_{RF-10F} < 0.015$	中度損壞
$0.0150 < \theta_{RF-10F} < 0.040$	嚴重損壞
$0.0400 < \theta_{RF-10F}$	完全損壞

2.4 小結

透過上開文獻回顧，過去研究針對結構受震反應，主要透過建立數值分析模型模擬或縮尺振動台試驗進行評估，但欠缺真實案例，致使技術無法推進。本研究建議，採用第一類力量檢核結構系統識別特徵值成果，於重點監測構件上加裝「三軸向應變計」，利用自動化量測技術了解鋼骨構件的應力分佈。量測真實力量可掌握結構的平時傳力路徑，比對應力是否符合模擬的抵抗機制，並作為設計流程和構件選配的參考。此外，地震時的消能反應與耐震機制也應納入研究，提供未來設計和選材的依據

針對第二類變位檢核及第三類勁度檢核結構系統識別特徵值中「加速度數據」的延伸應用，本研究建議採用與文獻回顧中相同的「pALERT 強震儀」。此儀器不僅可與先前研究的不同構造系統建物進行比對，還能建立累積的建築數據庫，為結構補強規劃提供檢討依據，從而提高建築物的整體安全性。本研究納入研究案例建築結構系統特性，並針對目前結構識別成果，引用現行技術和監測儀器進行特徵值數據蒐測。未來，本研究建議之結構健康監控系統能使專業技師更準確地評估建築物在地震中的表現，為未來的設計和補強工作提供堅實的數據支持。

第三章 研究方法

本章主要目的是針對第 1.3 節所設定的研究目的，設計出相應的研究流程，如圖 3.1 所示；並闡述如何在該流程中找到解答研究問題的方法。透過這章節的分析，以利更深入地理解本研究所要解決的問題，同時確立鋼構廠房建築物結構監控的標準和重要點位的選擇方法。這將助於第四章的實際案例提供結構系統識別分析和監控系統規劃所需的基礎。

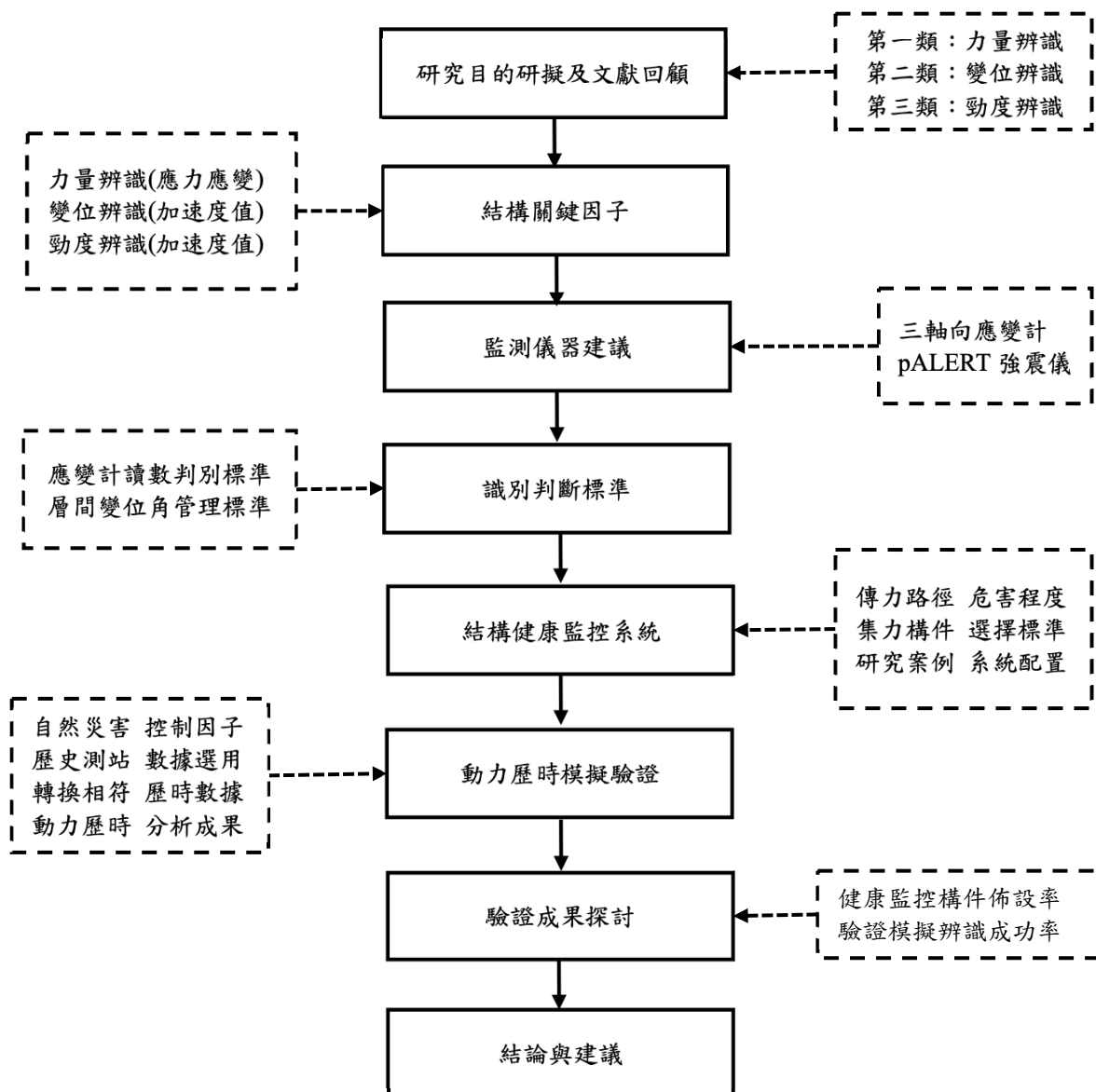


圖 3.1 研究流程圖

3.1 建築結構傳力路徑

結構系統載重應力路徑概念是指建築物內部空間的負載會加載到樓板(Plate or Desk)上。當樓版跨距較大、單點集中力量或較大均佈載重時，輔以小梁(Joist)構件加強勁度，以滿足結構設計的性能和使用要求。透過小梁將負載導向主樑(Girder)，再由主樑向下傳載至主柱(Column)，最終負載從樓板引導至基礎(foundation)，並將其在地盤中消散。然根據 1.2 節提及的現有挑戰，建築物結構屬高度靜不定韌性系統，當單一構件產生塑性鉸點(Plastic Hinge)時，力量會轉由相鄰構件承載抵抗，這種力量再分配的機制極其複雜，仍然是結構辨識領域中的一大挑戰。

1999 年前，臺灣的傳統設計理念主要著重於建築物的剛性和勁度，以抵禦外部衝擊為主。然而，自從同年 921 大地震發生後，倒塌建築物的案例被用來探討建築物的耐震性能和韌性設計。經過反思，歸納出建築結構構件產生塑性鉸點所引致的災損危害。例如，倘若小梁構件產生塑性鉸點，可能會影響該單元樓板系統；而若大梁構件產生塑性鉸點，可能會對鄰近跨距結構造成危害；假若，柱構件產生塑性鉸點，除導致鄰近立面系統產生額外應力等連鎖效應外，進而導致結構系統失效，甚至造成大樓倒塌，帶來嚴重的人員傷亡和財產損失。

基於上述基礎，透過歷次地震災害經驗教訓，新型耐震設計的主流，著重強調韌性設計理念，建築物結構系統應能在 30 年回歸期之中小度地震中保持彈性限度範圍，不產生塑性鉸點損壞；而在 475 年回歸期之設計地震力，允許部分建築結構構件產生塑性鉸點，以消耗地震能量，但仍需保持於可修復。在 2500 年回歸期之最大考量地震，建築結構系統不應崩塌，以確保人員有足夠的時間進行逃生。這些原則已成為新型耐震設計的主流。

在考慮最大地震力情況下，建築物的主體結構系統應符合「強柱弱梁」的概念。換言之，主體結構構件的破壞關鍵在於「主梁 (Girder) 」和「主柱 (Column) 」，其中，大梁的塑性鉸點應優先於主柱產生，而後者則優先於梁柱接頭。

為利實現第 1.3 節所述研究目的，本研究擬規劃最經濟化的結構健康系統配置。在針對研究案例上部鋼骨構造結構系統時，第一階段將對主體結構系統的構件類別進行篩選。具體而言，將樓板及小梁等對系統架構危害度較低的構件剔除，以經濟性考量而不予監測。隨後，將針對「主梁 (Girder) 」、「主柱 (Column) 」及二元系統中的「挫曲束制斜撐 (BRB) 」等主體耐震韌性構件，進行第二階段的定義和詳細分析。

3.2 集力構件定義標準

參考臺灣市場上，鋼骨構造所使用的建築用鋼材分為不同的鋼種系統：包括早期的 ASTM 美國標準下的 A36、A572 結構鋼材、近期 CNS 13812 臺灣標準下的 SN490 耐震鋼材，以及用於超高層建築特殊規範的 SM570 高強度耐震結構用鋼。為了滿足新型耐震設計的韌性要求，選用建築鋼材時，降伏比 (Yield Ratio, YR) 是一個重要的指標。這裡的 YR 指的是實際測得的鋼材降伏強度 (F_y) 與抗拉強度 (F_u) 之比值。根據「鋼結構極限設計法規範」第 13.2 章節內政部 (2010) 規定，耐震鋼材降伏比應小於 80%，臺灣主要結構鋼材之基本性質，如表 3.1 所示。這個值越低，表示鋼材於降伏到破斷的過程中能夠吸收的能量越大，因此韌性越好。

表 3.1 臺灣主要結構用鋼材基本性質 (中華民國鋼結構協會, 2022)

鋼材種類	A36	A572	SN490	SM570
參考標準	ASTM A36-08	ASTM A572-07	CNS 13812	CNS 13812
降伏強度 F_y (t/m ²)	2.5	3.5	3.5	4.3
抗拉強度 F_u (t/m ²)	4.1	4.6	4.6	5.8
降伏比 YR	60.98%	76.09%	76.09%	74.14%
韌性鋼材選用	x	x	v	v
備註	早期結構使用，根據近期研究顯示其強度及變異性過高，無法滿足現今耐震規範之韌性要求。		臺灣 CNS 規範耐震鋼材。	臺北 101 大樓主體結構用鋼，適用超高樓層大樓之特殊規範。

根據鋼骨基本材料性質，材料韌性定義為應力-應變曲線下，透過積分求得的涵蓋面積，意即材料自受力起，直至斷裂時，所能吸收機械能(或動能)的能力；透過對歷史數據和文獻回顧中多次拉伸試驗成果的綜合分析，可以回歸出鋼材的應力-應變曲線示意圖 (Stress-Strain Diagram)，如圖 3.3 所示。在這個曲線圖中，當鋼材處於極限強度(F_u) 的 70% 以下時，通常仍處於線彈性階段，遵循虎克定律 (Hooke's law)。然而，一旦超過降伏強度(F_y)，鋼材就會進入塑性階段。在塑性階段，即使後續加載的力量被卸除，材料仍會產生永久變形(Permanent Set)和殘留應力(Residual Stresses)，此部分會佔據應力-應變曲線面積，如圖 3.2 紅色區域範圍，影響材料韌性，降低後續材料所能提供的總消能能量，如圖 3.2 藍色區域範圍。

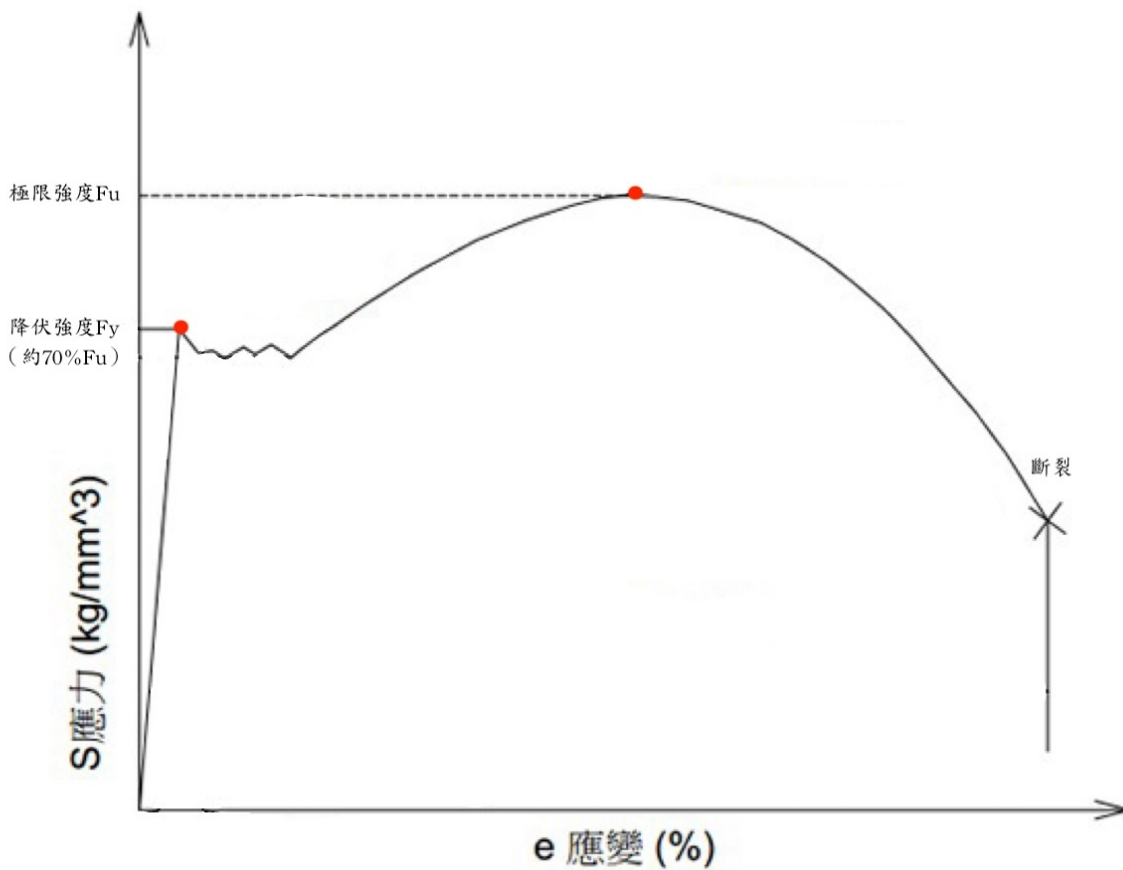


圖 3.3 結構用鋼材應力應變曲線示意圖

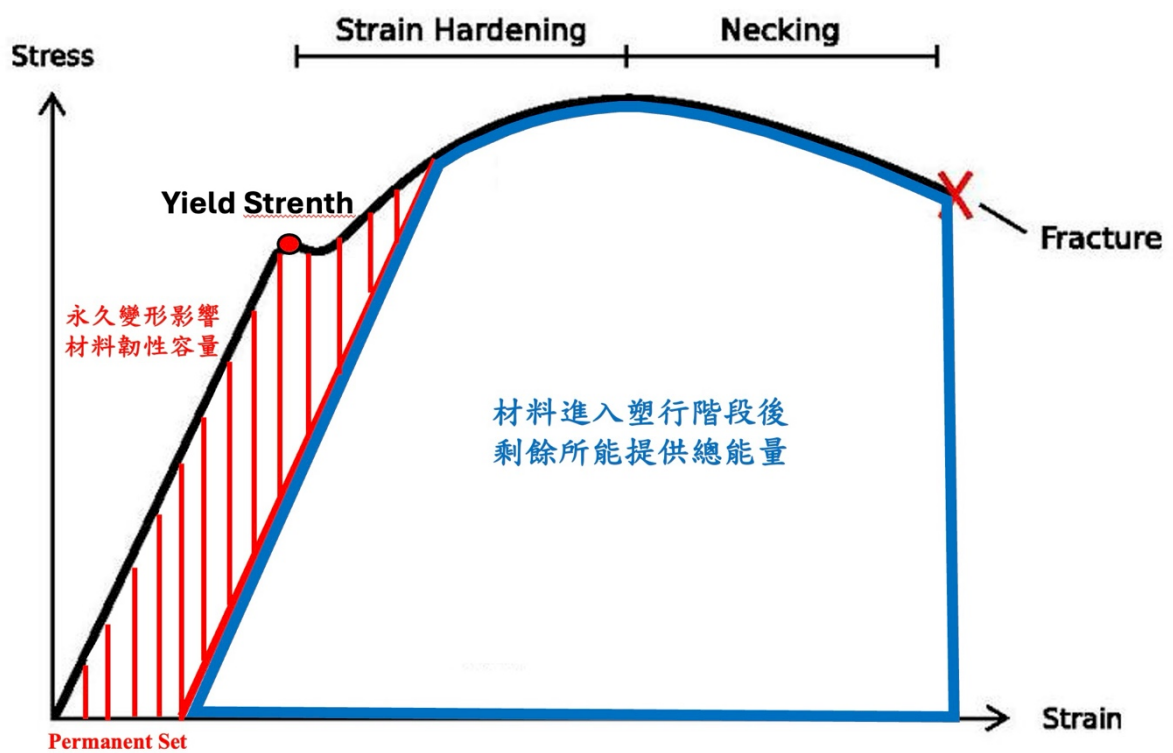


圖 3.2 永久變形容量影響示意圖 (本研究彙整)

將根據上述鋼材的基本特性及設計規範對韌性的考量，本研究彙整下列兩項要點：

- (一) 根據「鋼結構極限設計法規範」規定，耐震鋼材降伏比 YR 應小於 80%。
- (二) 根據「鋼材料應力應變回歸曲線」，於極限應力 70%以下時，材料遵循虎克定律，保持線彈性階段。

在第 3.1 節，針對研究案例上部鋼骨構造結構系統完成第一階段篩選後，本研究進入第二階段。根據先前提出的兩項要點，建議於鋼骨構件的實際應力與容許應力的比值超過 75%時，應將其視為主體架構系統的集力構件。這些構件為此鋼骨韌性架構下，設定為優先承載外力之構件，因此容易承受較高的應力。由於它們在結構系統起到關鍵的支撐和穩定作用，所以在安全監控系統中被視為重要的監測點位。因此，需要對這些構件實施加強的觀測和重點監控，以及定期的檢測和評估，以確保結構的穩定性和安全性。這些監測和控制的實施將有助於及早發現構件的變形或損壞情況，並及時採取相應的修復和加固措施，從而延長建築物使用壽命，以及提高結構的整體安全性和可靠性。

3.3 監控系統規劃流程

本研究深入剖析統包工程中建築結構的生命歷程，透過第四章 研究案例來理解並解決相關問題。研究在確立鋼構廠房建築架構後，利用 ETABS 結構分析軟體分析結構性能和行為，並根據分析結果確定案例結構系統中的集力構件及重要監測點位，從而制定針對性的安全監控系統方案，為專案的後續執行提供支持。

以統包工程為例，建築結構設計的流程可以分為四個階段：概念設計、方案設計、基本設計和細部設計。在概念設計階段，建築師會根據各利害關係者的需求，設定建築物的規模和整體量體，確定基本形態和外觀特徵。方案設計階段則定義各室內空間的用途和功能分佈，確立各功能區域的相對位置和連接關係。在基本設計階段，設計師根據基地條件和建築使用要求，參考耐震、減震及隔震設計理念，提出最經濟且有效的結構系統架構，包括主要耐震結構型式及搭配隔震、減震的二元系統設計草案，確保建築物在日常使用和極端情況下的承載能力及安全性。細部設計階段則深入細化結構各個構件的尺寸、斷面和材料選擇，考慮所有外部載重來源，詳細檢討設計規範的回歸週期及載重組合，並透過工程學理分析和調整構件型式，例如採用切削式梁-柱接頭以控制塑性鉸構件位置，達到消散地震能量的效果，並在部分架構中加設位移型阻尼器，進一步控制建築物抵抗外力的模式。這些階段的討論，包括建築師、結構技師和各利害關係者的參與，確保滿足各利害關係者的需求，選擇最佳化的系統架構，避免過度設計和經濟浪費。

最終，結構設計單位可透過工程學理分析、專家建議和專業技師判斷等方式，調整構件型式，例如採用切削式梁-柱接頭以控制塑性鉸構件位置，達到消散地震能量的效果，同時透過在部分架構中加設位移型阻尼器，進一步控制建築物抵抗外力的模式，加強系統辨識抵禦地震的模式以及構件破壞機制。

根據文獻回顧，現行研究的結構辨識成果可分為力量辨識、變位辨識和勁度辨識三大類。力量辨識主要檢核建物構件所受力量是否超越設計地震力與最大考量地震力，進而導致結構損壞。針對力量分析，本研究建議在重點監測構件上加裝三軸向應變計，透過自動化量測技術了解鋼結構的應力分佈狀況，持續數據收集可比對應力是否符合模擬的抵抗機制運行，並作為日後設計流程技術參考及構件選配的依據。變位檢核主要原理是透過強震儀收集加速度數據，經過零均值化處理和兩次積分產出擬位移結果，再利用濾波處理，計算各樓層的最大層間變位角。勁度檢核則是透過測量頂樓及地表的加速度反應，運用工程學理概念，將層間力平衡方程式透過積分推導，識別結構系統在地震作用前後的振動週期及勁度變化，進而推斷結構損壞情況。這兩類檢核主要基於加速度數據的延伸應用，因此本研究建議在各樓層安裝與文獻回顧相同的強震儀。這不僅可以與先前研究之不同構造系統建物進行比對，透過長時間累積的數據庫研析，亦可作為未來結構補強規劃的檢討依據，從而提高建築物的整體安全性。

本研究建議在上述探討的基礎上，加裝三軸向應變計和強震儀。根據專業儀器廠商的型錄，這兩種儀器皆有自動監測系統，可將結構訊號透過有線或無線方式傳輸到指定平台呈現，這有助於收集和記錄結構數據，並將其整合到中央監控系統中，以利日後結合物業管理的應用。

最後，鑒於天然災害的特殊性，並不會有兩次相同的災害數據，本研究建議運用中央氣象局的歷史數據資料，針對建築物的災害控制因子進行針對性的數值模擬。倘若結構系統災害控制因子為地震力，本研究建議使用非線性歷時分析(Nonlinear Time-History Analysis) 或側推分析法 (Pushover Analysis) 進行模擬；而若災害控制因子為風力，建議採用數值模擬 (Numerical Experiment) 或等比例縮小的風洞實驗(Wind Tunnel experiment)進行驗證。這樣的方法確保在經濟考量下，所建議的結構健康監控配置方案，仍具有一定可靠度的辨識成果，並能在災害發生時有效發揮通知預警的功能。

3.4 小結

總結本章節內容，本研究透過文獻回顧與探討，對建立結構健康監控系統的流程架構進行了深入分析，並提出具體結構監控儀器安裝建議。針對力量檢核的結構辨識模式，其關鍵因子為構件應力，本研究建議在重點監測構件上加裝「三軸向應變計」，透過莫爾圓應力應變轉換來獲得構件應力數據。考慮到臺灣設計規範不允許桿件進入塑性階段，因此規定以降伏強度 (F_y ，約為極限強度 F_u 的 70%) 作為材料容許強度 F_a 進行設計。保持所有係數因子不變情況下，依據工程力學推導，以極限強度 F_u 作為上限管理值。其實測 Ratio 數值(f_a/F_a)應放大 1.4 倍(即 $1.0 / 0.7 \cong 1.428$)，如表 3.2 所示。

表 3.2 應變計讀數判別標準

	鋼骨構件 Ratio 值	構件應變階段	構件應力狀態
管理值	$75\% < \text{Ratio} < 100\%$	彈性狀態 (Elastic Region)	遵循虎克定律，惟構件屬架構集力構件，應巡查檢視是否產生細微損傷。
警戒值	$100\% < \text{Ratio} < 140\%$	塑性狀態 (Plastic Region)	構件產生永久變形，應進行修繕補強，使構件恢復原應具備韌性容量。
行動值	$140\% < \text{Ratio}$	緊縮狀態 (Necking)	韌性容量將用盡，可能脆性破壞(Fracture)，需立即疏散人員。

針對變位檢核的結構辨識模式，本研究以先前研究成果的層間位移法為例，其關鍵因子為「層間加速度」，本研究建議在各樓層「結構質心(設計地震力輸入中心)」附近安裝「pALERT 強震儀」，另根據建築物基礎構造設計規範 (內政部, 2023)所訂定之角變量對應建築物損壞程度之標準進行管控，其管理標準如表 3.3 所示。

表 3.3 層間位移法管理標準

	層間變位角 θ (Drift Ratio)	損壞程度	層間構件狀態
管理值	$0.0020(1/500) < \theta < 0.0033(1/300)$	輕度損壞	隔間牆發生裂縫
警戒值	$0.0033(1/300) < \theta < 0.0067(1/150)$	中度損壞	剛性建築物明顯傾斜
行動值	$0.0067(1/150) < \theta$	嚴重損壞	結構性損壞

期許未來於其他建築專案，也可以透過這一研析過程，佈設經濟且有效的結構健康監控系統。透過不斷的實踐和改進，提升建築結構監控系統的效能和可靠性，不僅保障建築物的安全，更能達到延長其使用年限長遠目標。

第四章 研究案例

根據第 1.5 節範圍限制的討論，結構安全監測系統技術尚未普及，且建置所需費用高昂且耗時，因而在法令尚未完備且政府未提供鼓勵措施的情況下，將其普及至一般私有住宅相對困難。這一觀點也在實現韌性城市規劃的動機中有所提及，認為應優先考慮基礎建設。本研究擬依據「建築物耐震設計規範」第 2.8 節 (內政部, 2024)所列之第一類建築物，其分類標準係於地震發生後，必須維持功能以救濟大眾的重要建築物，進行適當的案例選擇。

4.1 研究案例簡介

本研究選擇某國營事業機構的重要發電設施廠房作為案例，其專案規劃係為因應臺灣地區普遍高能耗需求的現況，既有發電設施及相關產線能量不敷使用；以及配合政府能源政策，延長使用發電機組氣渦輪機生命週期，遂而規劃興建之工業廠房，該廠房位於桃園市林口工業區，基地面積約 99,000 平方公尺，都市計畫用途屬「工三工業區」，土地使用分區為乙種工業區，基地正射影像如圖 4.1。



圖 4.1 研究案例基地正射影像圖 (桃園市政府, 2020)

案例基地位於林口台地，根據「經濟部地質調查及礦業管理中心」的文獻記載，該區地質主要由礫砂泥互層的海相沉積物組成。這些地層形成於早期與鄰近的新莊斷層（逆斷層）接觸後，經過多年的造山運動，使得原本的逆衝斷層轉變為張裂環境的山腳斷層（經濟部, 2024）。

在設計階段前的地質調查過程中，按照基地面積，按照設計規範指引進行 7 處 SPT-N 鑽孔貫入試驗（GL-20.0m），如圖 4.2 所示。透過這些試驗，獲得了基地土壤樣本，並在實驗室中詳細記錄了各地層深度的基本參數，包括「土壤分類、粒徑大小、單位重量、含水量 W 、孔隙比 e 、內凝聚力 c 」等。同時，也進行了一系列相關的「物理性試驗、剪力強度試驗、三軸試驗、載重試驗」，以取得「壓縮指數 C_c 、膨脹指數 C_s 、無圍壓壓縮強度 q_u 、地層剪力波速 V_{s30} 」等資料，據以判斷地盤的分類。以上資料將作為後續地震力設計的重要參考依據。

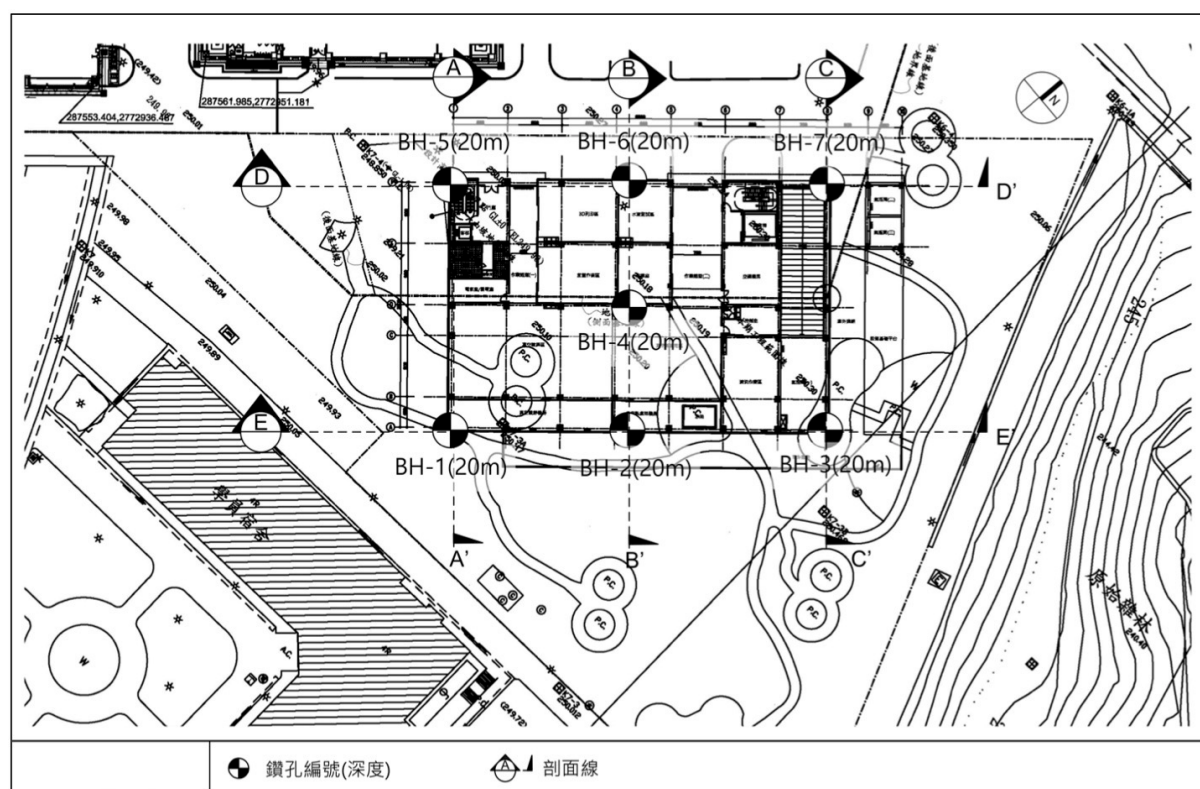


圖 4.2 案例基地鑽孔編號(深度)示意圖 (泛亞工程, 2023)

根據鑽探調查與試驗結果顯示，基地地層可大致分為兩個主要層次，如圖 4.3 所示：

(一) 第一層次：地表 GL.0m 至平均深度 GL.-12.3m 間為「粉土質黏土(CH)」，標準貫入試驗 N 平均值為 15。根據耐震規範第 11.1.3 節規定 (內政部, 2024) 土壤液化潛能評估標準，因基地現地無酥鬆沙土及高常時地下水位，故此地層無沙湧、上舉、隆起及土壤液化發生的疑慮。

(二) 第二層次：基地 12.3m 以下則為「礫石層(G)」，標準貫入試驗 N 值皆大於 50，表明其承载力良好。此外，經測試其地層剪力波速 V_{s30} 平均值為 273 m/s，根據耐震設計規範，屬於「第一類地盤 (堅實地盤)」。(泛亞工程, 2023)

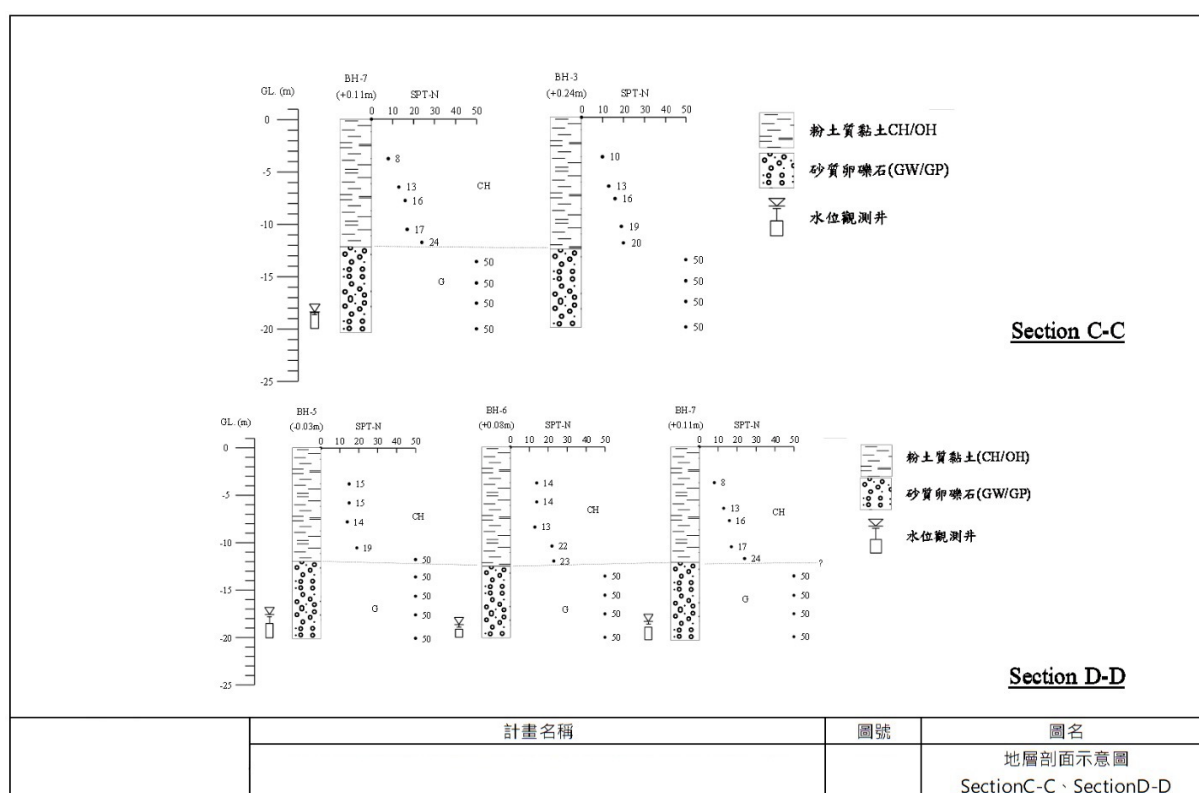


圖 4.3 地層剖面示意圖 (泛亞工程, 2023)

4.2 研究案例規劃

同本研究第 4.1 節所述，本案例發電設施廠房統包工程，是該工業區第三條發電機組生產線的建設項目。此建設項目是由事業機構擔任起造人，與日後使用單位進行訪談，盤點廠房機組設備等直接需求，包括各種發電設備的規格、功率、尺寸、特性；以及其對應之間接需求，如機具車輛行駛、停車服務容量、操作人員作業和室內辦公空間等空間使用需求。

於採購發包階段，事業機構編製了統包需求建議書，說明廠房設備的基本需求和相關配套設施的要求，並概估廠房建築規模量體，經過本研究節錄和隱蔽部分資訊後，彙整成表 4.1 所示；此建議書係供領標之統包團隊參考，以便能對此項專案有初步的了解。隨後，按照政府採購法的規定，進行公告、招標、評選和決標等行政程序。整體過程依循最有利標評選辦法。統包團隊提出服務建議書，其中包括設計單位所提「概念設計 (Conceptual Design) 及結構基本架構」，如圖，以及施工單位提出的工期建議及成本估算，透過評選委員提問及統包團隊答詢，確保最終得標的統包團隊能夠充分理解項目需求，並具備相應的專業能力和人力資源，從而能夠順利完成本專案的建設工作。

表 4.1 統包需求建議書之各空間需求概估表

專案名稱	樓層分區	空間類別	概估面積	需求說明
國營事業機構 發電設施廠房	屋突	各類機房	467	各層空間需求等 詳細資訊，另詳 使用需求表及空 間示意圖。
	地上四層	焊修作業區	1,728	
	地上三層	NDT 作業區	1,728	
	地上二層	噴銲作業區	1,728	
	夾層	產線管理及資料處理 作業區	1,028	
	地上一層	辦公空間、服務空 間、真空作業區及機 房	2,025	
	地下一層	停車場、各類機房、	1,980	
	地下二層	雙車道及汽車坡道	1,980	
合計：			12,664	m2



圖 4.4 概念設計模擬透視圖 (泛亞工程, 2022)

於規劃階段，統包團隊將根據服務建議書中提出的概念設計，詳加檢討契約規定細節項目，並進一步深化圖面，特別是各層室內空間別配置，以提出更具體的「方案設計 (Schematic Design)」。同時，設計單位將再次與日後使用單位(參建單位)進行訪談，以確認參建需求是否均已納入規劃，從而正式進入基本設計及細部設計階段，本研究節錄地上一層方案設計成果作為範例，如圖 4.5。

從結構設計單位角度出發，在此階段，將著重確認每個空間別的使用用途。這將決定後續結構系統的靜載重和活載重的配置，進而影響後續結構系統的生成。整個規劃檢討過程需要事業機構、參建單位、建築師事務所、結構工程顧問及施工廠商等各專案利害關係人密切合作，以確保最終基本/細部設計方案全面性、結構安全性、期程妥適性及經費合理性。



圖 4.5 基本設計報告書 1FL 空間規劃圖 (陳文彥建築師事務所, 2022)

本案例建築結構量體為地下 2 層、地上 6 層之工業廠房，主要用途係提供大型機組設備運轉。因此，在進行建築規劃時，首要考量關鍵因素為「柱位少、樓挑高、跨距長」。考慮到這些因素，鋼骨構造 (Steel Construction, SC) 被視為最合適的選擇。鋼材具有強度高、韌性強、自重輕的特點，其材料性質均勻、力學性能平均，於抵抗拉力及剪力部分，均能有優益表現，適合支撐長跨距的結構。同時，透過鋼骨構材強度高特性，可以透過較小的構件尺寸實現結構的支撐，滿足廠房設計的基本需求。

相較於鋼筋混凝土構造物，鋼骨架構有其缺點。首先，鋼骨結構具有較大的柔軟性，其基本振動週期 T 相對較長。在受到地震擾動或颱風吹襲等天然災害時，這種柔軟性可能導致構造物的震動幅度增加，層間變位明顯增加，進而影響使用需求。其次，受鋼材料較軟的影響，當鋼構件處於受壓狀態時，需要特別注意桿件的細長比以及無支撐長度。如果這些條件未得到妥善考慮，可能導致桿件發生彎曲變形，進而形成不穩定的挫曲 (Buckling) 失效。因此，結構設計者在鋼骨結構設計中，需要特別加強對這些問題的考慮和處理。

為了克服鋼骨構架材料較軟的問題，根據結構設計單位的經驗反饋，透過於鋼骨構架安裝阻尼器（被動式消能元件）增強勁度的方案，可以同時有效提高結構抗震性能，為加強架構勁度是最經濟有效的方法之一。然而，這種解決方案可能會在加裝阻尼器的空間帶來一些限制，影響其原本的空間功能。因此，在設置阻尼器之前，必須與事業單位及相關利害關係人進行深入討論，確保業方對這個方案有足夠的理解和支持。

在建築師、結構技師等設計團隊與事業單位及各利害關係者解釋方案必要性及影響後，透過多次方案調整及會議討論，確保各利害關係者提出的統包需求均被滿足的前提下，調整建築立面方案，於四個外牆立向上，各選定一跨度空間，設置阻尼器。這些阻尼器與鋼骨造特殊抗彎矩構架共同組成二元系統，作為本案主要結構系統架構，如圖 4.6 所示。

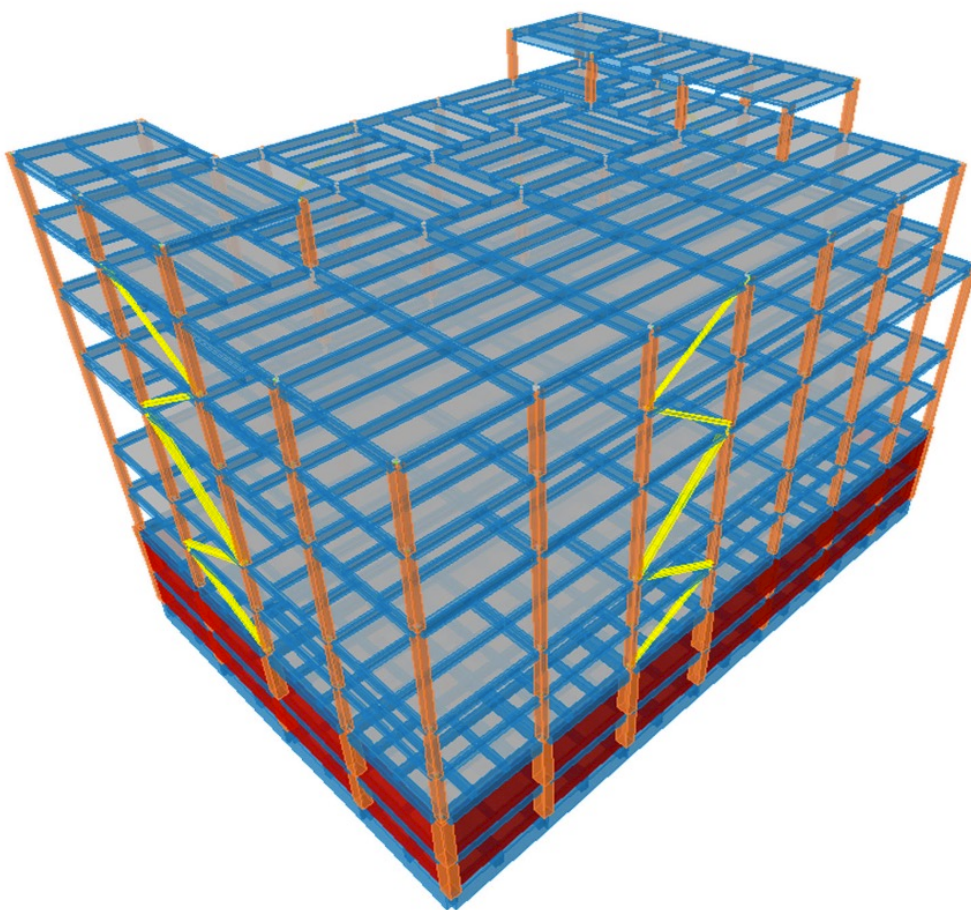


圖 4.6 基本設計階段 ETABS 二元系統模型圖 (陳文彥建築師事務所, 2022)

阻尼器（被動式消能元件）依照消能形式，分為「位移型阻尼器」與「速度型阻尼器」。位移型阻尼器透過鋼板、斜撐及剪力牆等剪切形變來實現消能效果；而速度型阻尼器則是利用簡諧運動中位移與速度變化之間的相位差，短運動週期來實現消能效果。兩者擁有不同的消能機制和運作時機。

本案例為了克服結構軟的特性，採用了位移型阻尼器來增加結構勁度。具體而言，本案例選擇國家地震工程研究中心(國震中心)及國立臺灣大學共同開發的「挫屈束制斜撐（Buckling-restrained brace, DC-BRB）」，搭配開發協作之 BOD 雲端設計軟體(Brace on Demand, BOD)。透過 BOD 軟體，可以快速選擇適合架構的斜撐種類，避免設計者反覆調整勁度，減少試誤過程。

BRB 的基本結構採用了鋼斜撐作為核心單元，而鋼套管則充當外部束制單元，兩者之間以混凝土灌注的方式加強側向束制效果。這種結構設計使得 BRB 可以充分發揮各自材料的特點和優勢。當地震災害來臨時，BRB 能夠有效地承受拉力和壓力，並且吸收地震能量，從而有效地減緩建築受震反應。（魏志毓, 2006）

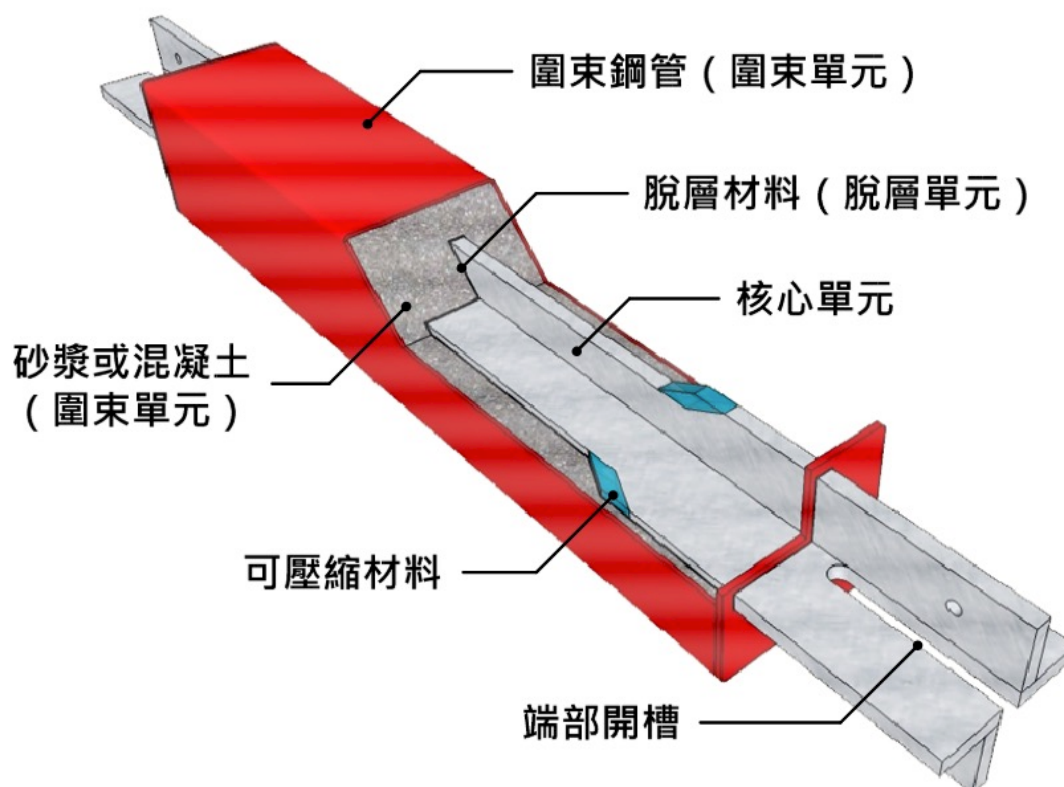


圖 4.7 挫屈束制支撐構造示意圖（魏志毓, 2006）

4.3 結構系統分析

研究案例採用鋼骨構造作為特殊抗彎矩構架。為了精確地計算主柱、主梁、小梁等各構件的數量及接合型式，以及鋼骨的總使用重量，研究案例進一步使用 TEKLA 鋼構設計系統與工程資料管理軟體進行詳細建模，如圖 4.8 所示。這一過程將確保所有構件的精度和準確性，並有助於將鋼構資訊模型無縫轉移到鋼構廠，以有效提升構件生產效率，減少材料浪費。

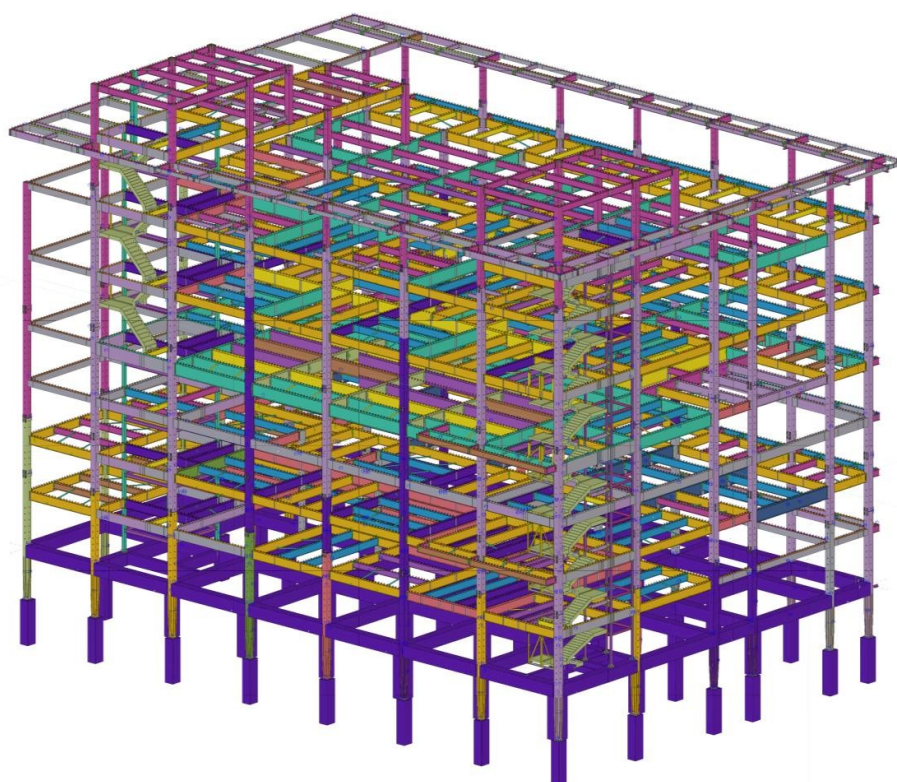


圖 4.8 鋼骨架構 TEKLA 模型

透過上述建模精密核算，彙整本案例工地的鋼骨構造系統，確認其由 1328 件主要構件組成，詳見表 4.2，經核算後的總鋼構生產量體約為 1926.5 噸。

表 4.2 案例工地鋼骨架構數量統計表 (圓方結構, 2024)

構件名稱	構件數量	構件重量	備註
主柱構件(Colimn)	246	665.5	BOX/BH 鋼柱(SN490YB)
主梁構件(Girder)	418	874.3	BH 鋼梁 (SN490YB)
小梁構件(Joist)	640		
BRB 斜撐	24	42.5	
零星組零件	-	344.2	側撐、續接器及雜項鋼件等
總計	1,328	1926.5	

臺灣的結構設計者常使用眾多分析軟體程式，如 SAP2000、ETABS、Midas、Tekla 等等。每個應用程式都有其獨特特色和擅長領域。研究案例選用了 ETABS 結構分析軟體。這個軟體不僅能夠分析一般的高層結構物，還可以模擬鋼結構、彈簧、阻尼、斜版等特殊構件。尤其適用於本案地上結構物是鋼骨構造的情況。透過建立 3D 分析模型，可以進行後續案例的靜力分析、動力分析以及第四章所述的驗證模擬。

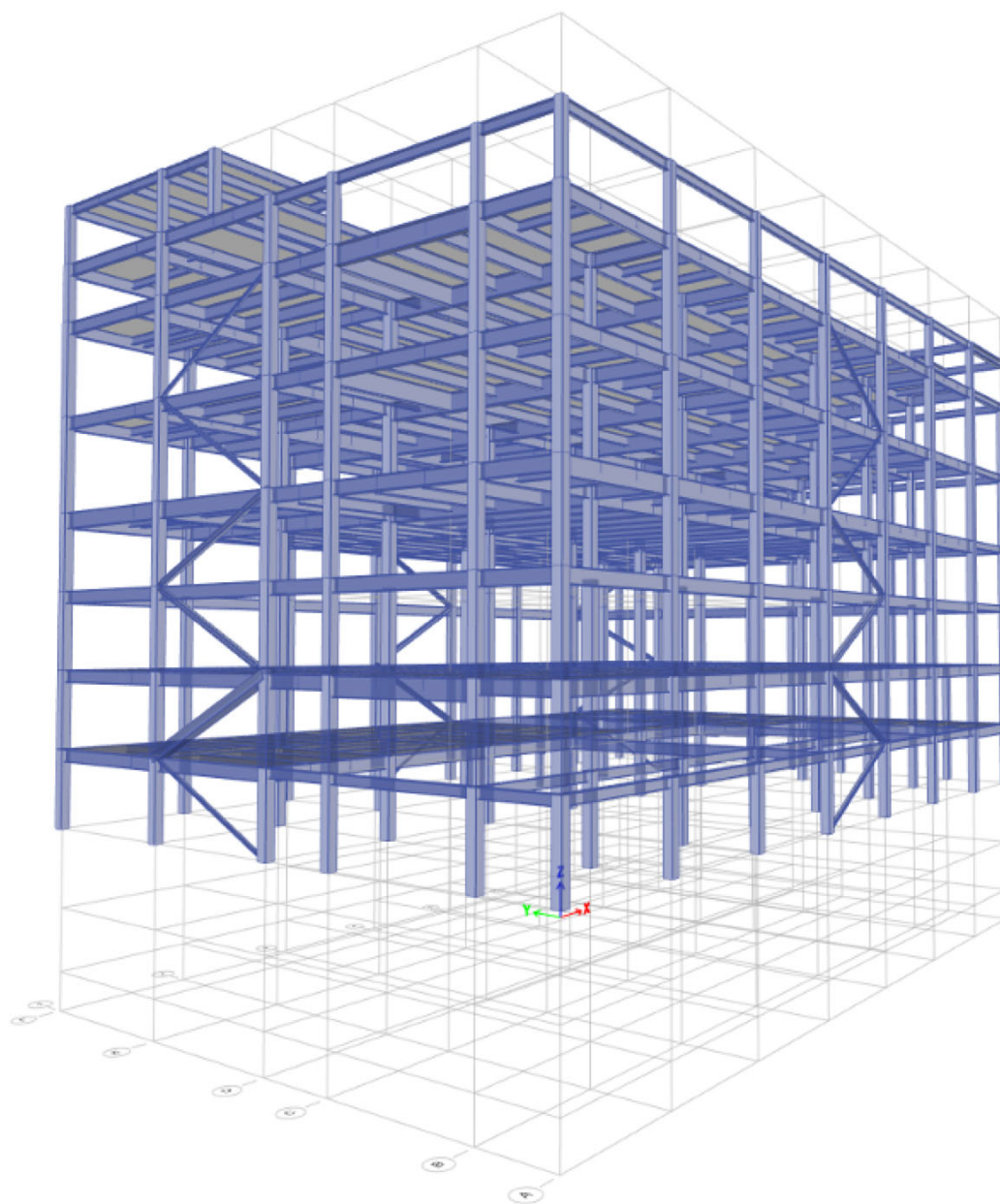


圖 4.9 細部設計階段 ETABS 二元系統模型 (圓方結構, 2024)

4.3.1 靜載重

本研究結構模型針對靜載重(Dead Load)部分，採用精準重量核算方式，依實際配置之柱、梁、版、牆等結構元素數量，乘以其個別材料單位重量（如表 4.3 所示），進行各平面樓層靜載重量核算(如表 4.4～表 4.11 所示)，確保後續分析成果的準確性。

表 4.3 各材料單位重量分析表

材料	單位重	
鋼筋混凝土	2,400	kg / m ³
鋼骨	7,850	kg / m ³
天花版	20	kg / m ²
水泥沙漿粉刷(假設 1cm)	20	kg / m ²
地坪鋪面	80	kg / m ²
輕質灌漿牆	100	kg / m ²
防水隔熱層及洩水坡度	200	kg / m ²

表 4.4 2FL 靜載重核算表

2FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 1074$	644.40	t	0.6	t/m ²	
二、	外牆：						
	20 cm 外牆	$= 0.1 \times 0.2 \times 8.25 \times (4.5 - 0.01 \times 70)$	0.63	t	0.00	t/m ²	
	25 cm 外牆	$= 2.4 \times 0.25 \times 31.85 \times (4.5 - 0.01 \times 70)$	72.62	t	0.07	t/m ²	
	帷幕外牆	$= 4.5 \times 113.38 \times 0.1$	51.02	t	0.05	t/m ²	
三、	內牆：						
	15cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 21.99 \times (4.5 - 0.01 \times 70)$	30.08	t	0.02	t/m ²	
	20cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.2 \times 34.61 \times (4.5 - 0.01 \times 70)$	63.13	t	0.06	t/m ²	
	25cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.25 \times 43.13 \times (4.5 - 0.01 \times 70)$	98.34	t	0.09	t/m ²	
	輕質灌漿牆	$= 295.15 \times 0.1 \times (4.5 - 0.01 \times 20)$	126.91	t	0.12	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	167.47	t	0.16	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	95.70	t	0.09	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
	2FL 樓地板面積：	$= 1,074 \text{ m}^2$	1350.30	t	1.26	t/m ²	

表 4.5 3FL 靜載重核算表

3FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 2074$	1,244.40	t	0.60	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 9 \times 98.15 \times 0.1$	88.34	t	0.04	t/m ²	
三、	內牆：						
	15cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 21.11 \times (9 - 0.01 \times 90)$	61.56	t	0.03	t/m ²	
	20cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.2 \times 31.77 \times (9 - 0.01 \times 90)$	123.52	t	0.06	t/m ²	
	輕質灌漿牆	$= 142.83 \times 0.18 \times (9 - 0.01 \times 20)$	226.24	t	0.11	t/m ²	
	女兒牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 65.98 \times 1.2$	28.50	t	0.01	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	159.64	t	0.08	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	142.64	t	0.07	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
3FL 樓地板面積：		= 2,074 m ²	2,047.84	t	1.00	t/m ²	

表 4.6 3MFL 靜載重核算表

3MFL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 9 \times 98.15 \times 0.1$	88.34	t	0.04	t/m ²	
三、	內牆：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	150.43	t	0.07	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	34.61	t	0.02	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
3MFL 樓地板面積：		= 2,074 m ²	237.38	t	0.13	t/m ²	

表 4.7 4FL 靜載重核算表

4FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 1834$	1,100.40	t	0.60	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 5.5 \times 98.9 \times 0.1$	54.40	t	0.03	t/m ²	
三、	內牆：						
	20cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.2 \times 71.05 \times (5.5 - 0.01 \times 70)$	163.70	T	0.09	t/m ²	
	30cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.3 \times 2.72 \times (5.5 - 0.01 \times 70)$	9.40	t	0.01	t/m ²	
	輕質灌漿牆	$= 183.11 \times 0.18 \times (5.5 - 0.01 \times 15)$	176.33	t	0.10	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	165.09	t	0.09	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	237.96	t	0.13	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
4FL 樓地板面積：		= 1,834 m ²	1,907.28	t	1.04	t/m ²	

表 4.8 5FL 靜載重核算表

5FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 1834$	1,100.40	t	0.60	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 5.5 \times 98.06 \times 0.1$	53.93	t	0.03	t/m ²	
三、	內牆：						
	15cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 20.38 \times (5.5 - 0.01 \times 70)$	35.22	t	0.02	t/m ²	
	20cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.2 \times 31.78 \times (5.5 - 0.01 \times 70)$	73.22	t	0.04	t/m ²	
	輕質灌漿牆	$= 286.75 \times 0.18 \times (5.5 - 0.01 \times 20)$	273.56	t	0.15	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	180.92	t	0.10	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	144.48	t	0.08	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
5FL 樓地板面積：		= 1,834 m ²	1,861.73	t	1.02	t/m ²	

表 4.9 6FL 靜載重核算表

6FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 1816$	1,089.60	t	0.60	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 3.4 \times 94.43 \times 0.1$	32.11	t	0.02	t/m ²	
三、	內牆：						
	15cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 21.36 \times (3.4 - 0.01 \times 50)$	22.30	t	0.01	t/m ²	
	20cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.2 \times 86.28 \times (3.4 - 0.01 \times 50)$	120.10	t	0.07	t/m ²	
	輕質灌漿牆	$= 55.59 \times 0.18 \times (3.4 - 0.01 \times 20)$	32.02	t	0.02	t/m ²	
	女兒牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 109.33 \times 1.2$	47.23	t	0.03	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	103.63	t	0.06	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	139.71	t	0.08	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
5FL 樓地板面積：		= 1,816 m ²	1,586.70	t	0.87	t/m ²	

表 4.10 R1FL 靜載重核算表

R1FL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.2 + 0.12) \times 435$	261.00	t	0.60	t/m ²	
二、	外牆：						
	帷幕外牆	$= 3.4 \times 95.53 \times 0.1$	32.48	t	0.07	t/m ²	
三、	內牆：						
	15cm RC 內牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 25.75 \times (3.4 - 0.01 \times 50)$	26.88	t	0.06	t/m ²	
	女兒牆	$= 2.4 \times 0.15 \times 54.3 \times 1.2$	23.46	t	0.05	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	18.33	t	0.04	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	48.72	t	0.11	t/m ²	
六、	其他：						
	水箱		104.50	t	0.24	t/m ²	
R1FL 樓地板面積：		= 1,816 m ²	515.37	t	1.18	t/m ²	

表 4.11 PRFL 靜載重核算表

PRFL 靜載重核算表							
項次	項目	計算式	重量		單位重		備註
一、	樓板：						
	20 cm 樓板	$= (2.4 \times 0.15 + 0.12) \times 250$	120.00	t	0.48	t/m ²	
二、	外牆：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
三、	內牆：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
四、	柱：	From ETABS	5.07	t	0.02	t/m ²	
五、	梁：	From ETABS	12.52	t	0.05	t/m ²	
六、	其他：	None	0.00	t	0.00	t/m ²	
PRFL 樓地板面積：		= 250 m ²	137.59	t	0.55	t/m ²	

本小節運用精確的重量核算方式，對結構物構件和永久附加物的重量進行計算。透過將計算得到的各層實際結構體載重(如表 4.12)，輸入到 ETABS 模型，使成果能更準確地模擬結構的行為和性能。

表 4.12 樓層單位重統計表

樓層	樓高	面積	靜載重	樓層單位重
	(m)	(m ²)	(t)	(t/m ²)
PR FL	-	250	137.59	0.55
R1 FL	3.4	435	515.37	1.18
6 FL	5.8	1816	1,586.70	0.87
5 FL	5.7	1834	1,861.73	1.02
4 FL	5.7	1834	1,907.28	1.04
3M FL	4.5	2074	237.38	0.13
3 FL	4.5	2074	2,047.84	1.00
2 FL	4.5	1074	1,350.30	1.26
1 FL	4.5	1975	3,563.69	1.80
B1 FL	4.8	2060	2,474.17	1.20
B2 FL	3.8	2050	7,590.95	3.70
總結構靜載重：			23,135.41	(t)

4.3.2 活載重

本研究結構模型針對活載重(Live Load)部分，根據「建築技術規則建築構造編」第 17 條的規定，依據樓地板的不同用途，必須與參建單位確認建築物室內空間的具體需求，例如大型設備、辦公空間以及作業通道等功能，以模擬構造所需承受的活載重(如圖 4.10 ~ 圖 4.15)。此部分亦為廠房結構與一般住宅結構的差異之處，廠房單位面積樓板所承受的活載重相對較大，對於第 4.3.3 節地震力檢討的計算上有較大的不同，其相異之處將於該節深入探討。

1FL 空間規劃及活載重Loading Map
(1)樓地板面積：1975m² (2)樓層高度：4.5M

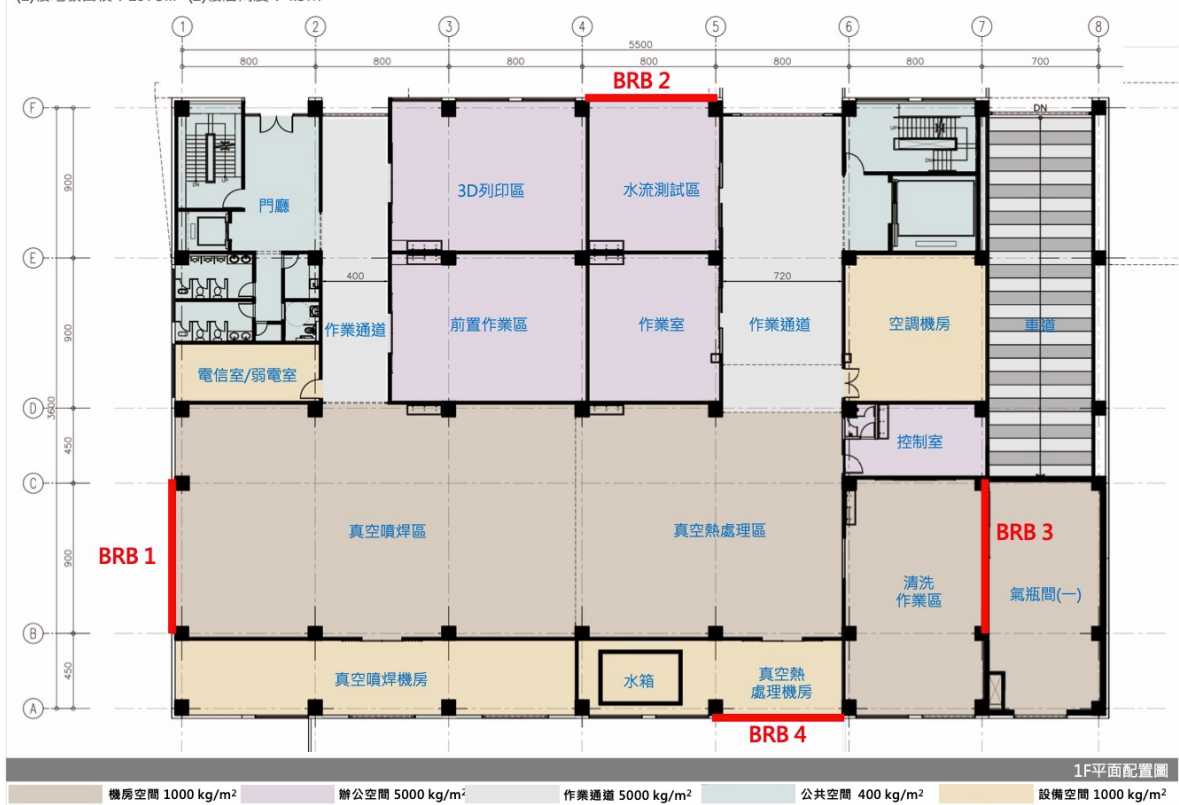


圖 4.10 1FL 活載重 Loading Map

2FL 空間規劃及活載重Loading Map
(1)樓地板面積：1074m² (2)樓層高度：4.5M

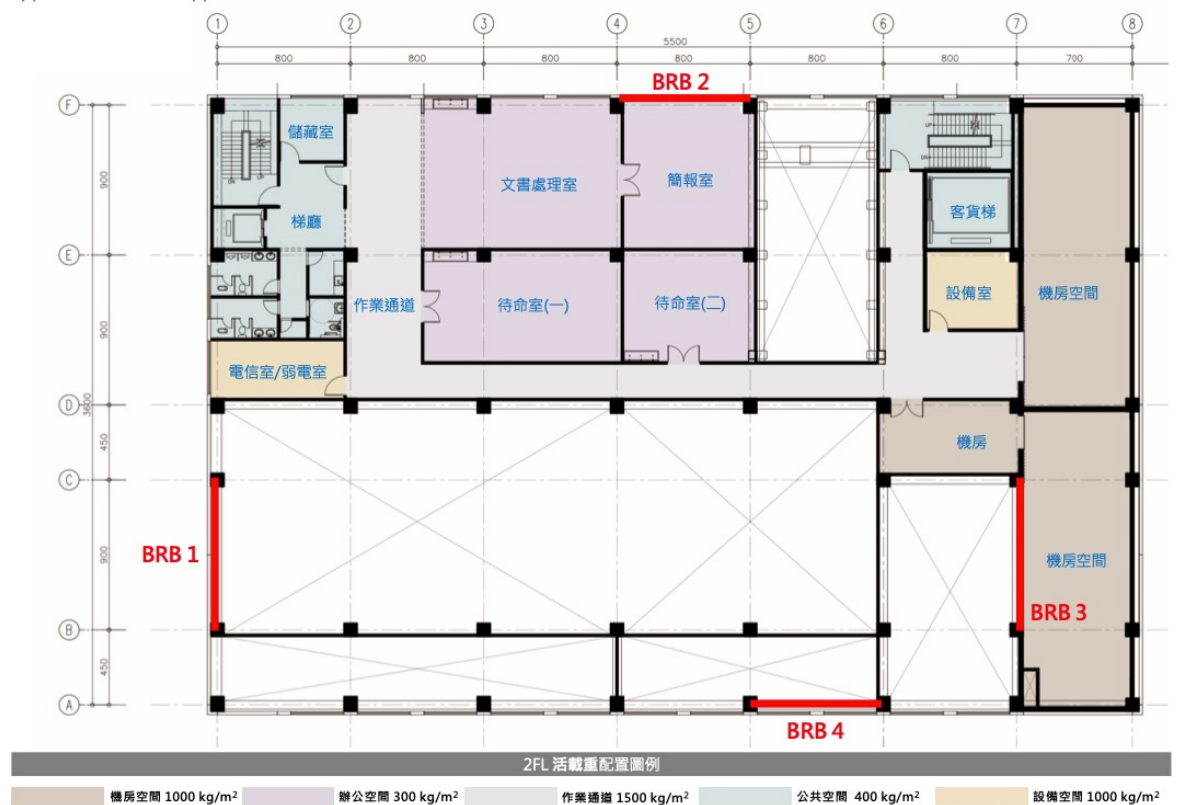


圖 4.11 2FL 活載重 Loading Map

3FL 空間規劃及活載重Loading Map

(1)樓地板面積：2074m² (2)樓層高度：4.5M

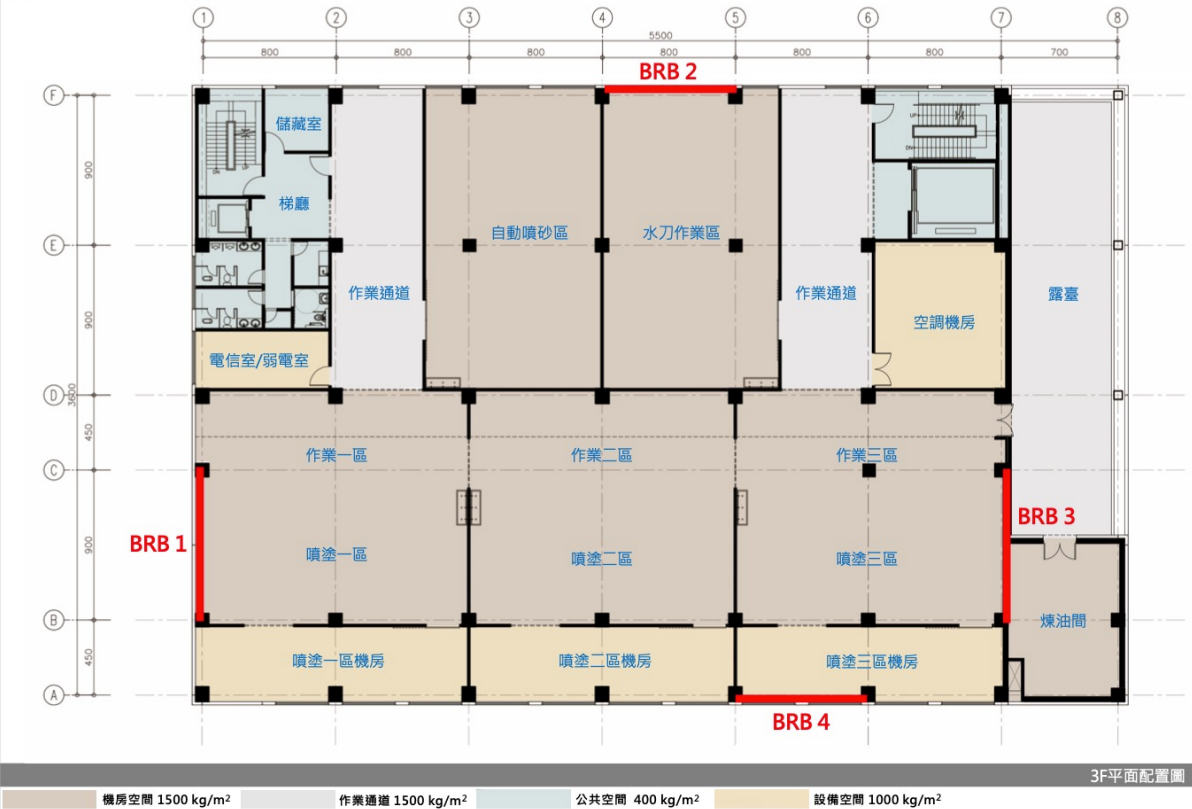


圖 4.12 3FL 活載重 Loading Map

4FL 空間規劃及活載重Loading Map

(1)樓地板面積：1834m² (2)樓層高度：5.7M

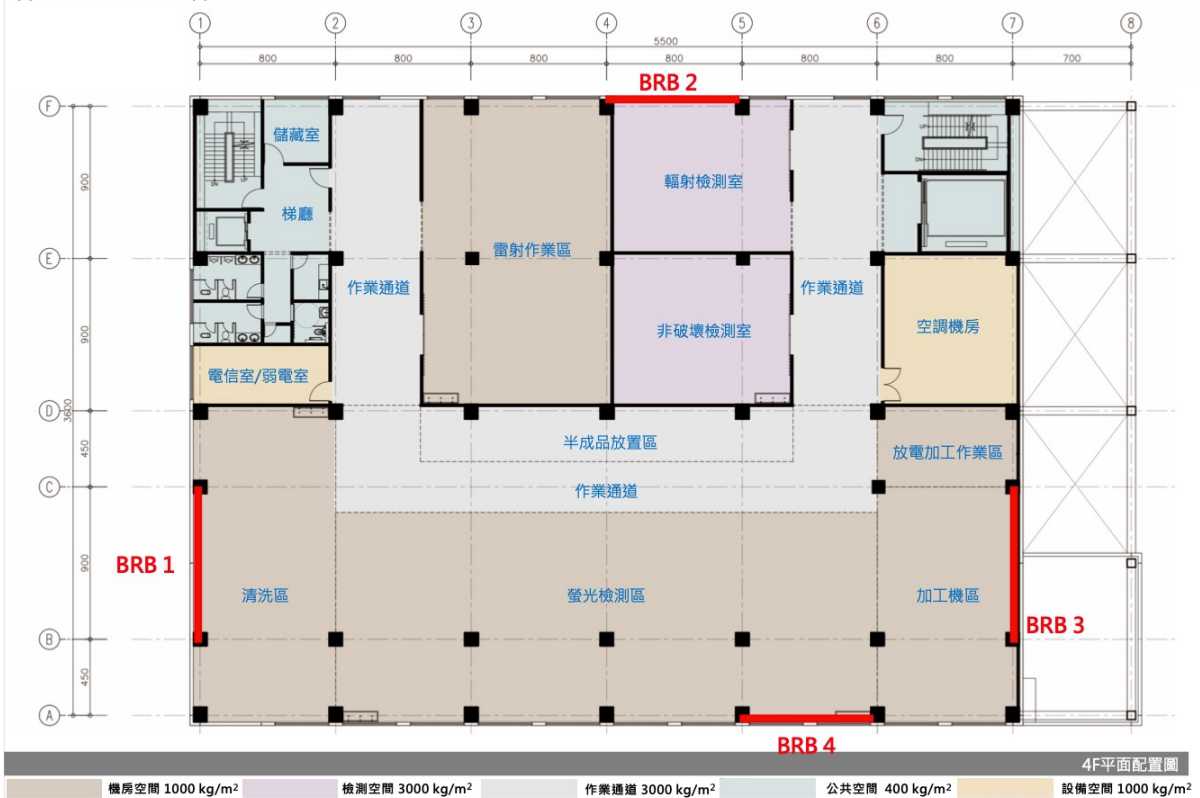


圖 4.13 4FL 活載重 Loading Map

5FL 空間規劃及活載重Loading Map

(1)樓地板面積：1834m² (2)樓層高度：5.7M



圖 4.14 5FL 活載重 Loading Map

6FL 空間規劃及活載重Loading Map

(1)樓地板面積：1816m² (2)樓層高度：5.8M

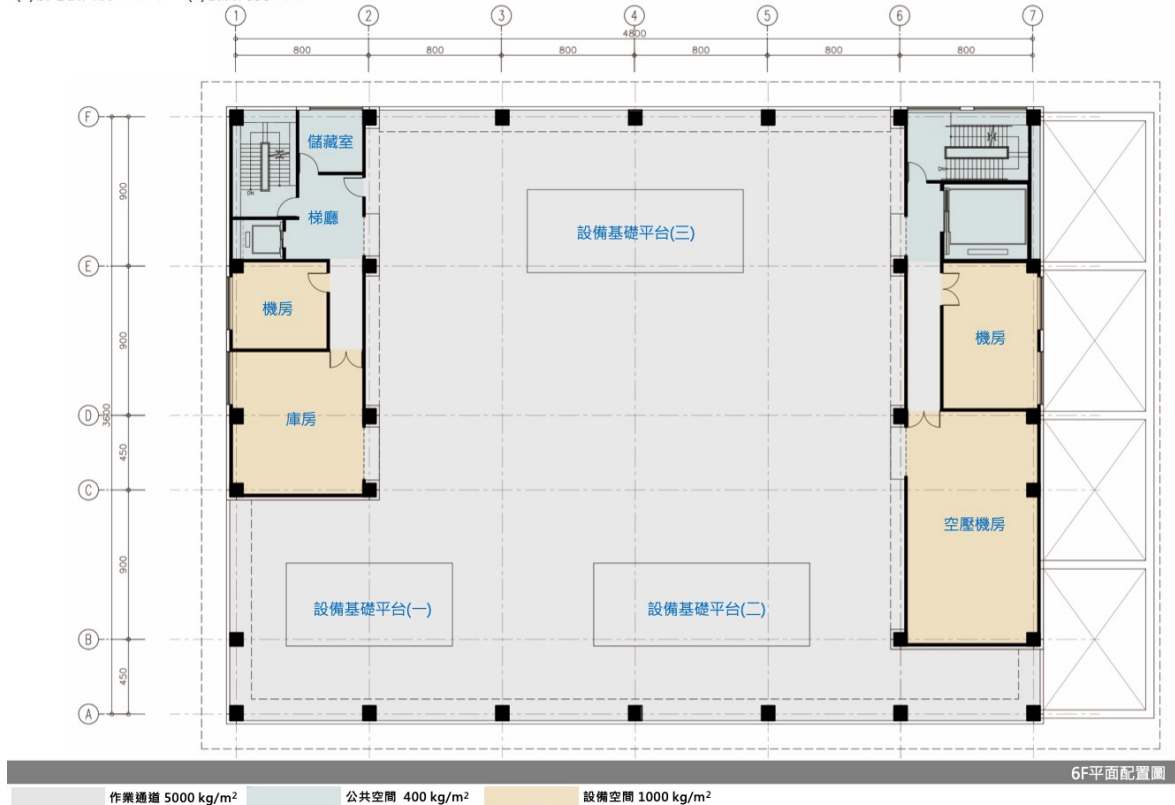


圖 4.15 6FL 活載重 Loading Map

4.3.3 風載重

本研究結構模型針對風力(W)結構模型，依據「建築物耐風設計規範及解說」(內政部, 2015)進行檢討。根據研究案例位址，基地位於桃園市龜山區，基本設計風速 $V_{10}(C)$ = 37.5 m/sec，地況種類屬於 Type B，即大都市市郊或小市鎮。根據第 2.5 節的規定，針對第一類建築物，在風災發生後必須維持功能，以救濟大眾的重要建築物，所設定的用途係數(I)為=1.1。建築物類型屬於封閉式建築，抗風阻尼比設定為 0.01。設計風力計算基本參數設定如表 4.13 所示。

表 4.13 風力計算基本參數表

研究案例：某國營事業機構 發電設施廠房		
1.風力區及基本設計風速		
風力區：	桃園市龜山區	
基本設計風速 $V_{10}(C)$ =	37.5	m/sec
2.用途係數 I		
I =	1.1	第一類建築物
3.地況種類及相關常數		
地況種類：	B	大都市市郊或小市鎮
常數 α	0.25	
梯度高度 Z_g =	400	m
4.建築物基本資料		
建築物類型：	封閉式建築物	
建築物平行於風向之自振週期 T_n =	1.352	sec
順風向基本自然頻率 f_n =	0.740	hz
建築物橫向之自振週期 T_a =	1.424	sec
橫向基本自然頻率 f_a =	0.702	hz
建築物扭轉自振週期 T_t =	0.986	sec
扭轉自然頻率 f_t =	1.014	hz
建築結構物阻尼比 β =	0.01	
建築物平均屋頂高度 h =	29.3	m
垂直於風向之建築物寬度 B =	36.0	m
平行於風向之建築物長度 L =	55.0	m
屋頂女兒牆頂端之高度 h_p =	30.8	m
欲設計迎風面牆所在之高度 z =	29.3	m
設計風速 V_{10} =	27.33	m/sec
設計風速 V_h =	35.75	m/sec

表 4.14 X 向風力計算($G_{cpi} = 0.375$)

樓層	層高	樓層高	受風面寬	風速壓			迎風風壓	背風風壓	設計風壓	順向風力
		z	B	q(z)	q(h)	q _i	p ₁	p ₂	Σp	W _{DZ}
(FL)	(m)	(m)	(m)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(t)
PR FL	3.4	36.1	13.5	85.08	76.65	76.65	99.95	-85.91	185.85	8.53
R FL	3.4	32.7	31.5	80.97	76.65	76.65	93.74	-85.91	179.64	19.24
6 FL	5.5	29.3	36.0	76.65	76.65	76.65	87.19	-85.91	173.10	46.58
5 FL	5.5	23.8	36.0	69.08	76.65	76.65	75.75	-85.91	161.66	32.01
4 FL	9.0	18.3	36.0	60.58	76.65	76.65	62.88	-85.91	148.79	48.21
3 FL	4.5	9.3	36.0	43.18	76.65	76.65	36.57	-85.91	122.48	19.84
2 FL	4.5	4.8	36.0	31.66	76.65	76.65	19.15	-85.91	105.06	17.02

表 4.15 X 向風力計算($G_{cpi} = -0.375$)

樓層	層高	樓層高	受風面寬	風速壓			迎風風壓	背風風壓	設計風壓	順向風力
		z	B	q(z)	q(h)	q _i	p ₁	p ₂	Σp	W _{DZ}
(FL)	(m)	(m)	(m)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(t)
PR FL	3.4	36.1	13.5	85.08	76.65	76.65	157.43	-28.42	185.85	8.53
R FL	3.4	32.7	31.5	80.97	76.65	76.65	151.22	-28.42	179.64	19.24
6 FL	5.5	29.3	36.0	76.65	76.65	76.65	144.68	-28.42	173.10	46.58
5 FL	5.5	23.8	36.0	69.08	76.65	76.65	133.23	-28.42	161.66	32.01
4 FL	9.0	18.3	36.0	60.58	76.65	76.65	120.37	-28.42	148.79	48.21
3 FL	4.5	9.3	36.0	43.18	76.65	76.65	94.06	-28.42	122.48	19.84
2 FL	4.5	4.8	36.0	31.66	76.65	76.65	76.64	-28.42	105.06	17.02

表 4.16 X 向橫向風及扭轉風向力計算

樓層	層高	樓層高	受風面寬		風速壓		橫風向風力	扭轉風向力
		z	B	z/h	q(h)	q(h)* z/h	W _{Lz}	W _{Tz}
(FL)	(m)	(m)	(m)		(kg/m ²)	(kg/m ²)	(T-m)	(T-m)
PR FL	3.4	36.1	13.5	1.232	76.65	94.44	10.82	33.94
R FL	3.4	32.7	31.5	1.116	76.65	85.54	22.87	167.38
6 FL	5.5	29.3	36.0	1.000	76.65	76.65	37.89	316.87
5 FL	5.5	23.8	36.0	0.812	76.65	62.26	30.77	257.39
4 FL	9.0	18.3	36.0	0.625	76.65	47.87	38.72	323.85
3 FL	4.5	9.3	36.0	0.317	76.65	24.33	9.84	82.29
2 FL	4.5	4.8	36.0	0.164	76.65	12.56	5.08	42.47

表 4.17 Y 向風力計算($G_{cpi} = 0.375$)

樓層	層高	樓層高	受風面寬	風速壓			迎風風壓	背風風壓	設計風壓	順向風力
		z	B	q(z)	q(h)	q _i	p ₁	p ₂	Σp	W _{DZ}
(FL)	(m)	(m)	(m)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(t)
PR FL	3.4	36.1	8.00	85.08	76.65	76.65	96.24	-99.12	195.35	5.31
R FL	3.4	32.7	8.00	80.97	76.65	76.65	90.21	-99.12	189.32	5.15
6 FL	5.5	29.3	55.0	76.65	76.65	76.65	83.85	-99.12	182.97	74.15
5 FL	5.5	23.8	55.0	69.08	76.65	76.65	72.74	-99.12	171.85	51.99
4 FL	9.0	18.3	55.0	60.58	76.65	76.65	60.24	-99.12	159.36	78.88
3 FL	4.5	9.3	55.0	43.18	76.65	76.65	34.69	-99.12	133.81	33.12
2 FL	4.5	4.8	55.0	31.66	76.65	76.65	17.77	-99.12	116.89	28.93

表 4.18 Y 向風力計算($G_{cpi} = -0.375$)

樓層	層高	樓層高	受風面寬	風速壓			迎風風壓	背風風壓	設計風壓	順向風力
		z	B	q(z)	q(h)	q _i	p ₁	p ₂	Σp	W _{DZ}
(FL)	(m)	(m)	(m)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(t)
PR FL	3.4	36.1	8.00	85.08	76.65	76.65	153.72	-41.63	195.35	5.31
R FL	3.4	32.7	8.00	80.97	76.65	76.65	147.69	-41.63	189.32	5.15
6 FL	5.5	29.3	55.0	76.65	76.65	76.65	141.34	-41.63	182.97	74.15
5 FL	5.5	23.8	55.0	69.08	76.65	76.65	130.22	-41.63	171.85	51.99
4 FL	9.0	18.3	55.0	60.58	76.65	76.65	117.73	-41.63	159.36	78.88
3 FL	4.5	9.3	55.0	43.18	76.65	76.65	92.18	-41.63	133.81	33.12
2 FL	4.5	4.8	55.0	31.66	76.65	76.65	75.26	-41.63	116.89	28.93

表 4.19 Y 向橫向風及扭轉風向力計算

樓層	層高	樓層高	受風面寬		風速壓		橫風向風力	扭轉向風力
		z	B	z/h	q(h)	q(h)* z/h	W _{Lz}	W _{Tz}
(FL)	(m)	(m)	(m)		(kg/m ²)	(kg/m ²)	(T-m)	(T-m)
PR FL	3.4	36.1	8.00	1.232	76.65	94.44	3.52	5.04
R FL	3.4	32.7	8.00	1.116	76.65	85.54	3.19	4.56
6 FL	5.5	29.3	55.0	1.000	76.65	76.65	31.79	312.57
5 FL	5.5	23.8	55.0	0.812	76.65	62.26	25.82	253.90
4 FL	9.0	18.3	55.0	0.625	76.65	47.87	32.49	319.45
3 FL	4.5	9.3	55.0	0.317	76.65	24.33	8.25	81.17
2 FL	4.5	4.8	55.0	0.164	76.65	12.56	4.26	41.9

4.3.4 地震載重

本研究結構模型針對地震力(EQ)部分，依據「建築物耐震設計規範」(內政部, 2024)進行檢討。根據規範第 2.8 節的規定，針對第一類建築物，在地震發生後必須維持功能，以救濟大眾的重要建築物，所設定的用途係數為 $I=1.5$ 。

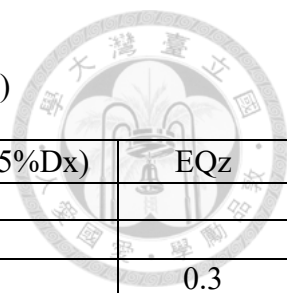
本案例座落於桃園市龜山區，附近無相關近斷層效應，經納入工址位置地盤參數後，模型採用「靜力分析」及「動力反應譜分析」，將地震加載分為 0 度和 90 度正反向；同時，根據規範第 2.14 節規定，檢討了質量分佈的不確定性因素，在每層計算了 X、Y 兩向的質心點，並考慮了與地震力垂直向的尺度百分之五的偏移，以研判質心偏移可能引起的意外扭舉情況。相關基本載重符號的定義如表 4.20 所示。

表 4.20 地震力基本載重符號與定義

項次	載重符號	載重定義
1	DL	靜載重
2	LL	活載重
3	SPEC x	X 方向反應譜分析動態地震力
		地震方向 0 度 + (質心 +5%Dy)
		地震方向 0 度 + (質心 -5%Dy)
4	SPEC y	Y 方向反應譜分析動態地震力
		地震方向 90 度 + (質心 +5%Dx)
		地震方向 90 度 + (質心 -5%Dx)
5	EQx	X 方向靜態地震力
		地震方向 0 度 + (質心 +5%Dy)
		地震方向 0 度 + (質心 -5%Dy)
6	EQy	Y 方向靜態地震力
		地震方向 90 度 + (質心 +5%DX)
		地震方向 90 度 + (質心 -5%DX)
7	EQz	Z 方向垂直地震力 ($K_z \times DL$)

根據「建築物耐震設計規範」的原則和設計經驗反饋，一般情況下，採用「第 2 章靜力分析所得之組合載重總橫力(表 4.21)」會比「第 3 章動力分析振態疊加所得之組合載重總橫力(表 4.22)」大。但由於未考慮到動態震態效益，實際震動模式可能與結構實際反應行為有所差異。因此，為了盡可能準確地模擬實際震動模態的幾何形狀以及土壤與基礎結構的相互作用，通常會進行分析並獲得兩組結果。然後，根據規範 3.3 節的總橫力調整規定，對這兩組結果進行調整，以確定最終的水平設計總橫力，以應對地震力。

表 4.21 靜力分析載重組合係數 (內政部, 2010)



組合項次	靜載重(DL)	活載重(LL)	EQx ($\pm 5\% D_y$)	EQy ($\pm 5\% D_x$)	EQz
1	1.4				
2	1.2	1.6			
3	1.2	1.0	1.0		0.3
4	1.2	1.0		1.0	0.3
5	1.2	1.0	1.0		-0.3
6	1.2	1.0		1.0	-0.3
7	1.2	1.0	0.3		1.0
8	1.2	1.0		0.3	1.0
9	1.2	1.0	0.3		-1.0
10	1.2	1.0		0.3	-1.0
11	0.9		1.0		0.3
12	0.9			1.0	0.3
13	0.9		1.0		-0.3
14	0.9			1.0	-0.3
15	0.9		0.3		1.0
16	0.9			0.3	1.0
17	0.9		0.3		-1.0
18	0.9			0.3	-1.0

表 4.22 動力分析載重組合係數 (內政部, 2010)

組合項次	靜載重(DL)	活載重(LL)	SPECx ($\pm 5\% D_y$)	SPECy ($\pm 5\% D_x$)	EQz
1	1.4				
2	1.2	1.6			
3	1.2	1.0	1.0		0.3
4	1.2	1.0		1.0	0.3
5	1.2	1.0	1.0		-0.3
6	1.2	1.0		1.0	-0.3
7	1.2	1.0	0.3		1.0
8	1.2	1.0		0.3	1.0
9	1.2	1.0	0.3		-1.0
10	1.2	1.0		0.3	-1.0
11	0.9		1.0		0.3
12	0.9			1.0	0.3
13	0.9		1.0		-0.3
14	0.9			1.0	-0.3
15	0.9		0.3		1.0
16	0.9			0.3	1.0
17	0.9		0.3		-1.0
18	0.9			0.3	-1.0

同第 4.3.2 節所述，廠房結構與一般住宅結構的不同之處在於，廠房的建築用途多為運轉大型機械設備，因此活載重量相對較大。根據「建築物耐震設計規範」(內政部, 2024)第 2.2 節的內容，若單位面積的活載重超過 500kg/m²，則應將其 25% 的活載重質量納入地震力所考量的建築物地震力質量(即靜載重+25%活載重)。本案例中實際的地震力質量為 26513 公噸，詳細計算式請見表 4.23。

表 4.23 實際地震力質量計算表

樓層	樓高 (m)	面積 (m ²)	靜載重 (t)	25%活載重 (t)	地震力質量 (t)	樓層單位重 (t/m ²)
PR FL	-	250	137.59	0.00	137.59	0.55
R1 FL	3.4	435	515.37	24.00	539.37	1.18
6 FL	5.8	1816	1,586.70	456.30	2,043.00	0.87
5 FL	5.7	1834	1,861.73	603.30	2,465.03	1.02
4 FL	5.7	1834	1,907.28	1,152.30	3,059.58	1.04
3M FL	4.5	2074	237.38	0.00	237.38	0.13
3 FL	4.5	2074	2,047.84	682.33	2,730.17	1.00
2 FL	4.5	1074	1,350.30	321.90	1,672.20	1.26
1 FL	4.5	1975	3,563.69	0.00	3,563.69	1.80
B1 FL	4.8	2060	2,474.17	0.00	2,474.17	1.20
B2 FL	3.8	2050	7,590.95	0.00	7,590.95	3.70
總地震力質量：					26513.13	(t)

4.3.5 載重控制因子

根據「鋼結構極限設計法規範及解說」第 2.2 節 (內政部, 2010) 中的規定, 考慮載重的不確定性、結構的安全性要求以及其他因素, 制定相應的係數化載重規定。這些係數將會乘上載重, 納入不同臨界狀況載重組合, 以確保結構在各種負載情況下的安全性和穩定性, 並符合相關的設計規範和標準, 如表 4.24。

表 4.24 LRFD 設計規範載重組合係數 (內政部, 2010)

組合項次	靜載重(DL)	活載重(LL)	風力(W)	地震力(EQ)
1	1.4			
2	1.2	1.6		
3	1.2	0.5	± 1.6	
4	1.2	0.5		± 1
5	0.9			± 1
6	0.9		± 1.6	

透過表 4.24 顯示, LRFD 規範載重組合係數的設定, 其控制變因主要是地震力 (EQ) 與 1.6 倍風力 (W) 之間的比較。透過本研究第 4.3.3 節及第 4.3.4 節研析, 進一步比較成果, 本案例 X、Y 及 Z 等三軸結構之地震力皆遠大於 1.6 倍風力, 詳表 4.25 及圖 4.16 至圖 4.19 所示, 結構系統主要受到地震力載重的控制。

表 4.25 X 向地震力與 1.6 風剪力比較表

樓層	X 向		
	地震力(t)	1.6 倍順風力(t)	1.6 倍橫風力(t)
PR FL	0.00	0.00	0.00
R1 FL	22.09	13.71	17.31
6 FL	97.45	44.63	53.91
5FL	321.35	119.40	114.52
4FL	539.27	170.84	163.76
3FL	753.51	248.31	225.71
2FL	867.96	280.20	241.45
1FL	894.01	307.55	249.58

表 4.26 Y 向地震力與 1.6 風剪力比較表

樓層	Y 向		
	地震力	1.6 倍順風力	1.6 倍橫風力
PR FL	0.00	0.00	0.00
R1 FL	21.88	8.52	5.63
6 FL	96.55	16.78	10.74
5FL	318.37	135.64	61.60
4FL	534.28	219.03	102.91
3FL	746.54	345.55	154.88
2FL	859.93	398.67	168.09
1FL	885.74	445.08	174.91

表 4.27 地震力與扭轉風力比較表

樓層	X 向		Y 向	
	地震力	1.6 倍扭轉風力	地震力	1.6 倍扭轉風力
PR FL	0.00	0.00	0.00	0.00
R1 FL	675.12	54.30	533.92	8.06
6 FL	2628.37	322.11	2125.44	15.36
5FL	7040.96	829.10	8094.49	515.47
4FL	11307.14	1240.92	13851.00	921.70
3FL	15358.46	1759.08	19357.97	1432.83
2FL	17595.38	1890.75	22675.93	1562.70
1FL	18224.36	1958.70	23471.65	1629.74

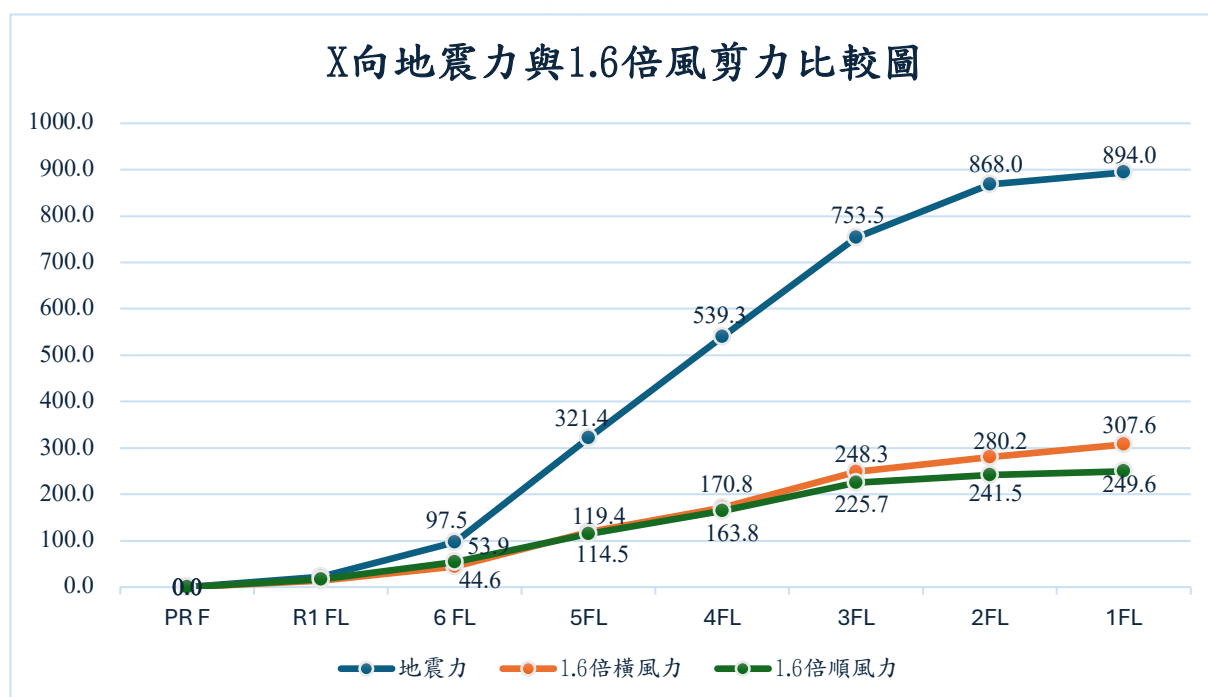


圖 4.16 X 向地震力與 1.6 風剪力比較圖

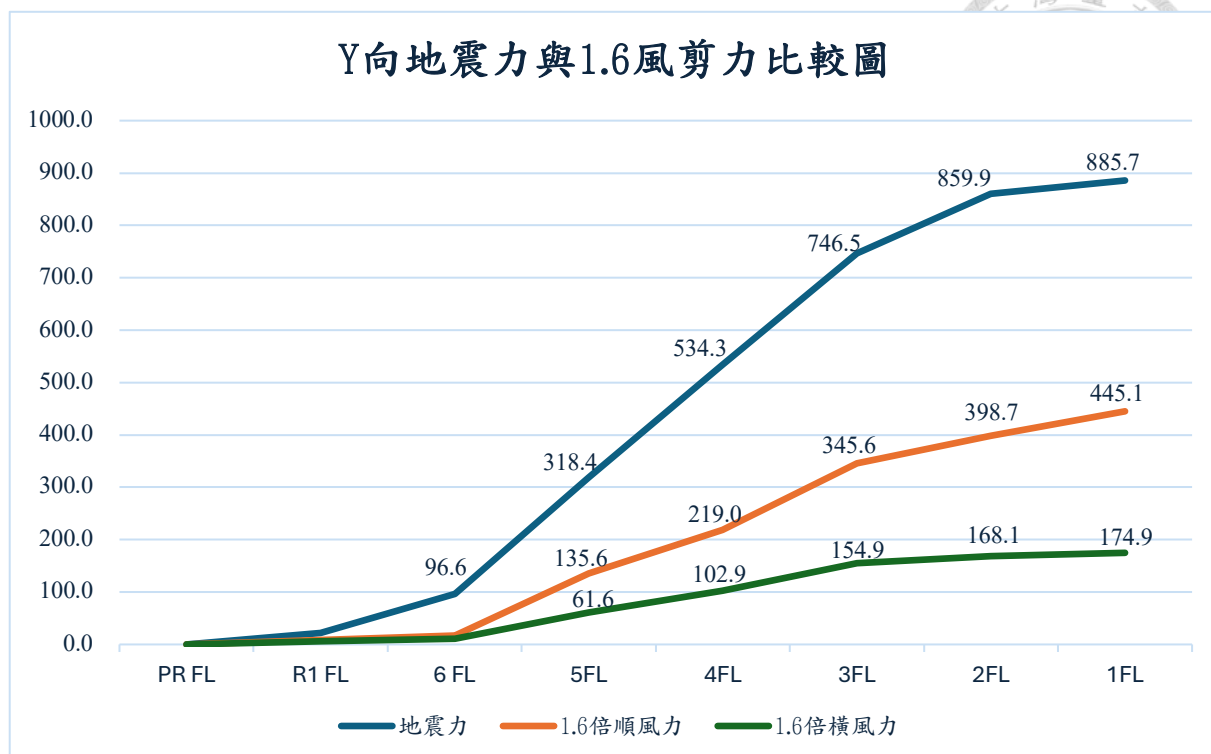


圖 4.17 Y 向地震力與 1.6 風剪力比較圖

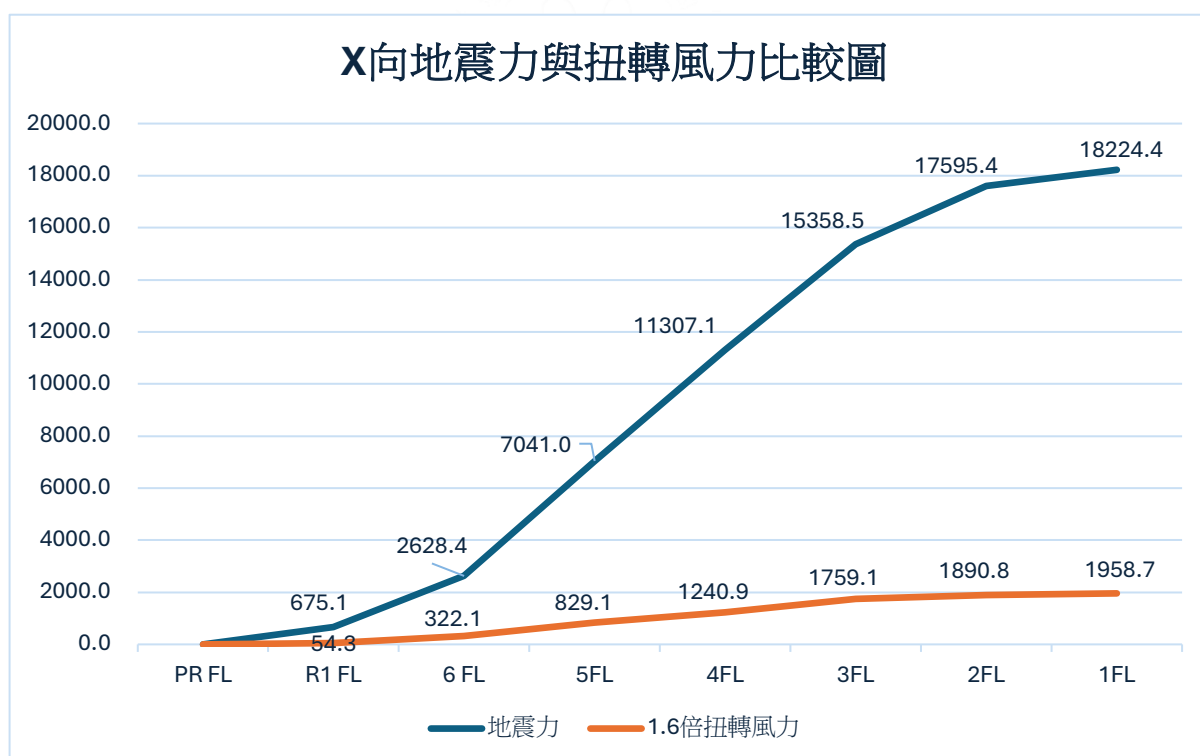


圖 4.18 X 向地震力與 1.6 倍扭轉風力比較圖

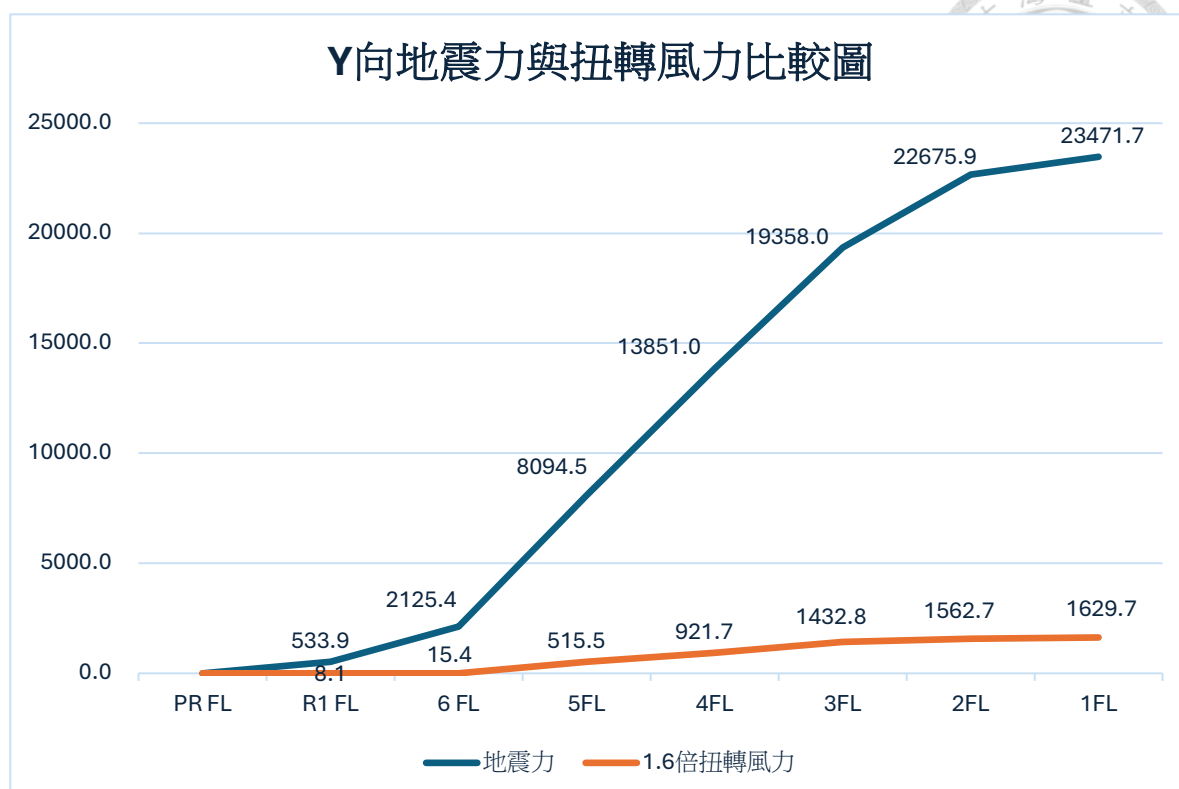


圖 4.19 Y 向地震力與 1.6 倍扭轉風力比較圖

更進一步深入檢討，本案例即為典型工業廠房結構的分析成果。由於廠房的樓高通常不超過 50 公尺，非屬於超高層結構物，受風力影響的層面相對較低。另外，由於廠房建築物主要用途為運轉大型設備，因此具有較大的靜載重和活載重量，且地震力的設計水平橫力與建築物的自重有密切關係，相對於同規模的建築物而言，廠房結構受到地震力的影響更為顯著，通常成為結構設計中的主要控制因素。

4.4 結構分析成果

透過第 4.3 節的分析，針對本案例建物結構，將各種可能的力量加載情況納入考量，並以建築設計使用年限(50 年)為基礎，綜合考慮建物廠址所受風力(W)和地震力(EQ)的危害超越機率(Probability of Exceedance)，定義建築物可能遭遇的各回歸週期下的外部力量，並進一步，對建築物的韌性行為進行檢討和分析。最後，根據 LRFD 設計規範，將組合載重納入模型分析；相關成果按樓層顯示如下：

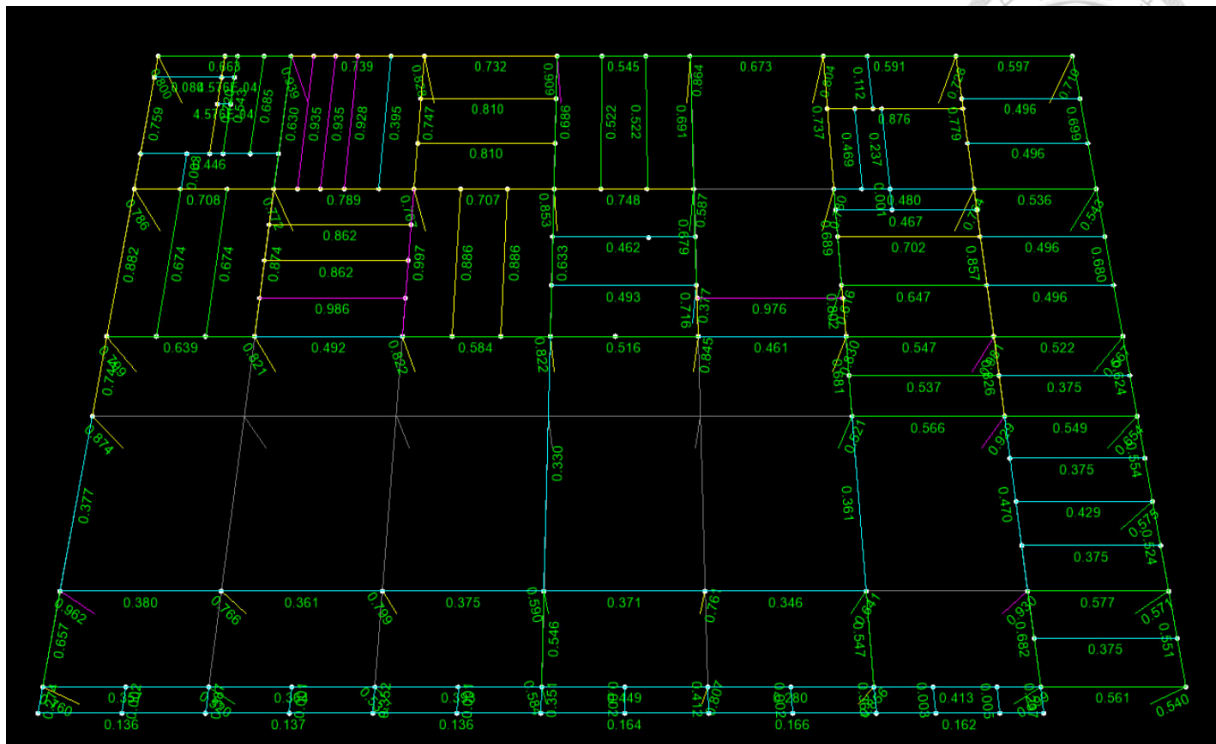


圖 4.20 2FL 組合載重分析成果

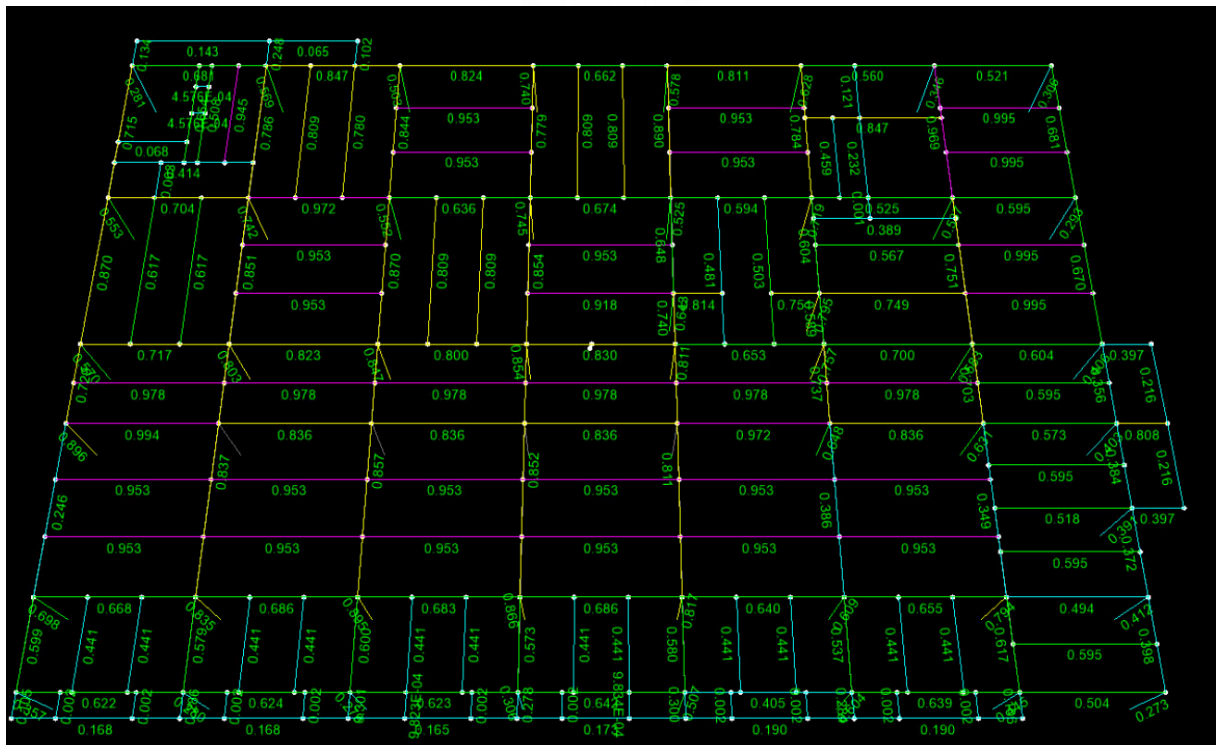


圖 4.21 3FL 組合載重分析成果

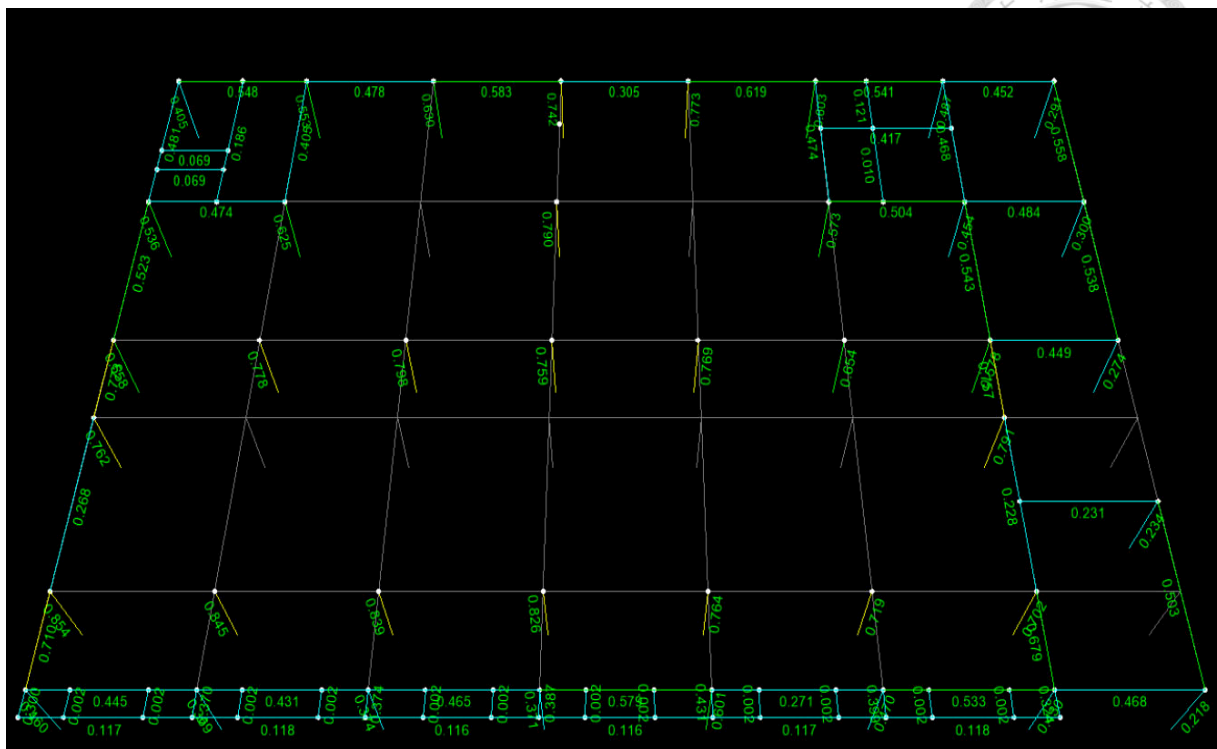


圖 4.22 3M FL 組合載重分析成果

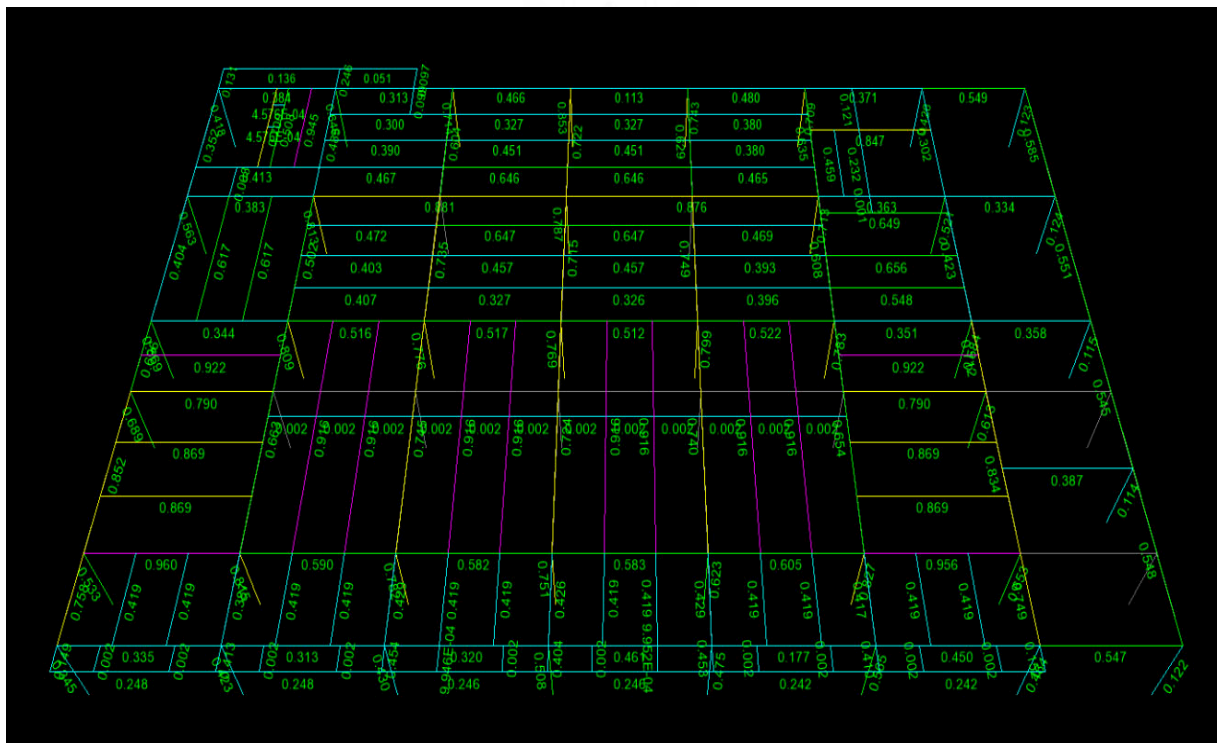


圖 4.23 4 FL 組合載重分析成果

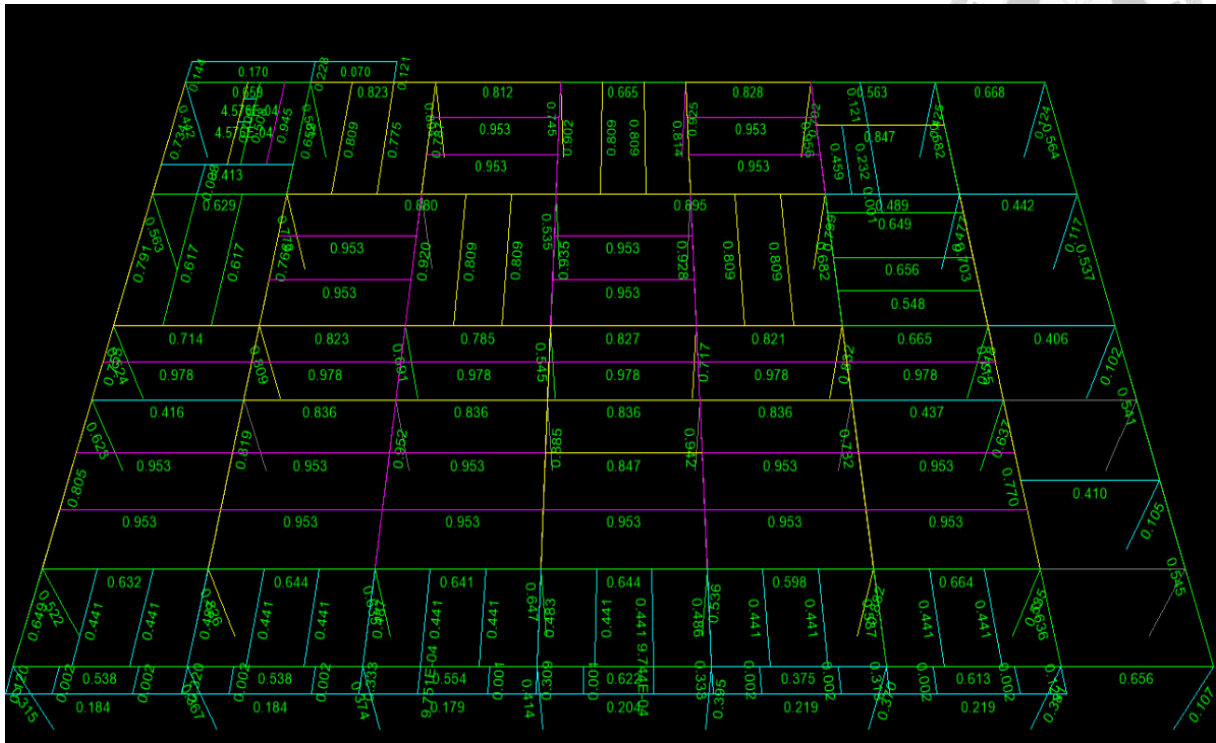


圖 4.25 5 FL 組合載重分析成果

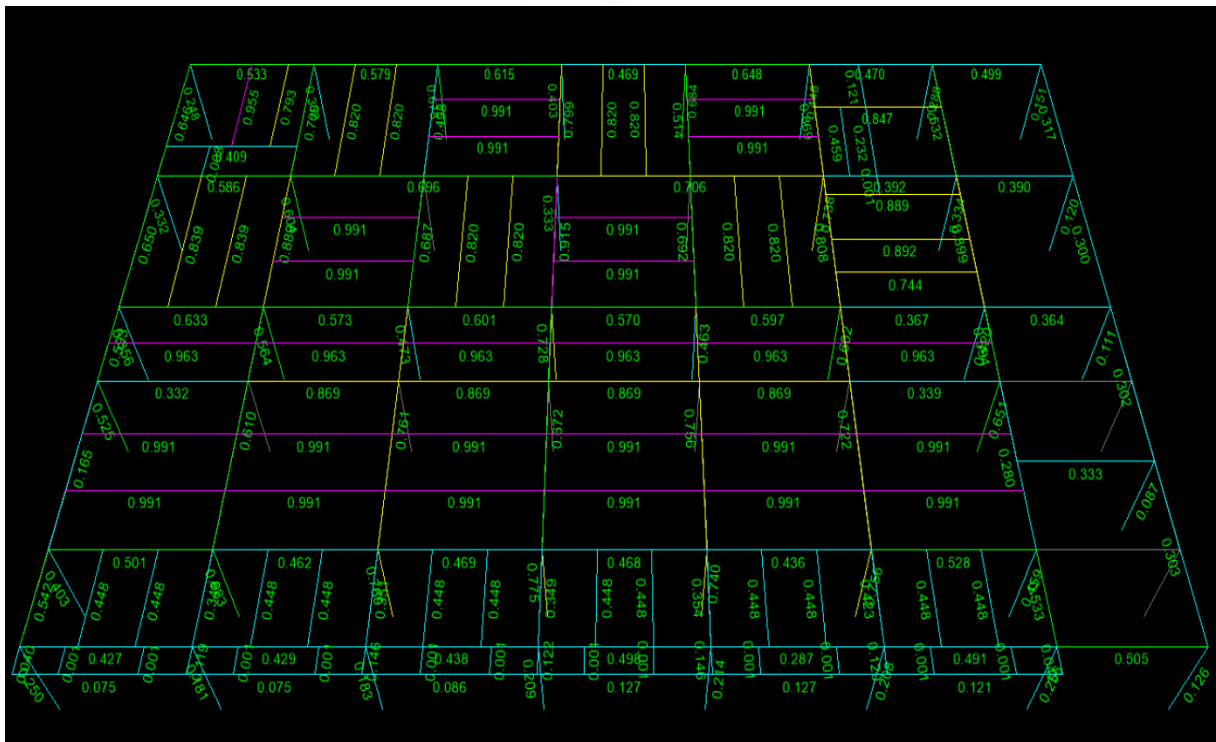


圖 4.24 6FL 組合載重分析成果

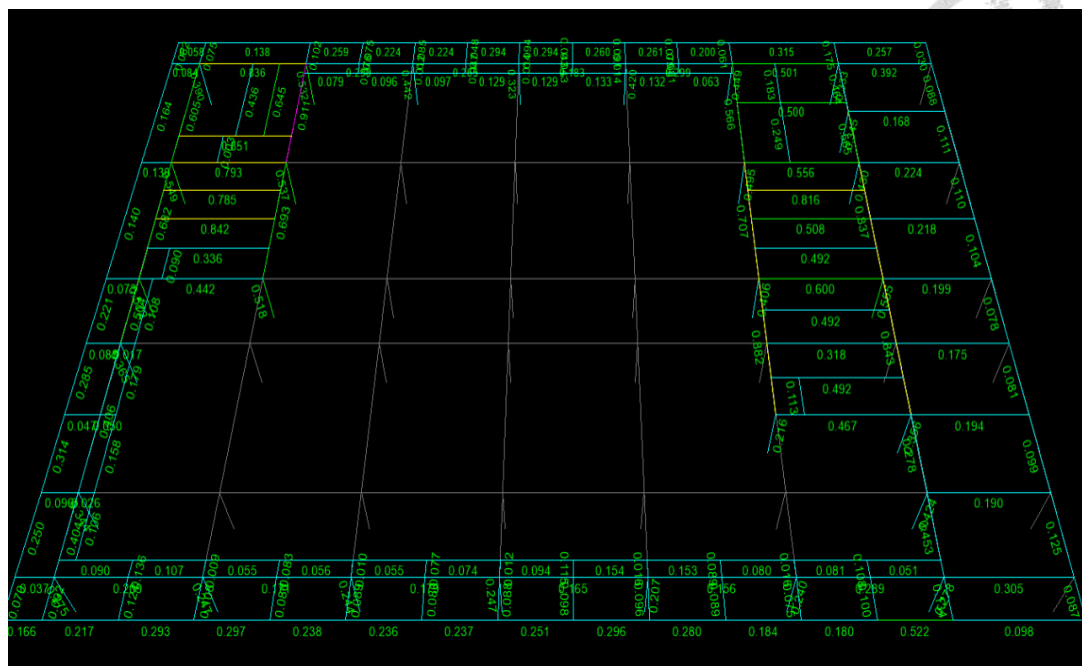


圖 4.27 R1FL 組合載重分析成果

根據第 4.6 節 ETABS 結構軟體的分析成果，轉換為表格方式呈現，並將系統架構集力構件位置以紅色字體標註，並運用第 3.5 節的結論，在這些重要監測構件上加裝「三軸向應變計」。在分析「主柱構件 (Column)」時，主要考量其提供系統架構垂直向 (Z 向) 的勁度，故其分析成果將從 A Line 至 FLine，其中位置 A1 即表示該柱位位於 A Line 及 1 Line 的交叉點上，另柱位編號參考圖 4.26 所示，以垂直向立面進行呈現。其中主柱構件分析成果如表 4.28 至表 4.33 所示。

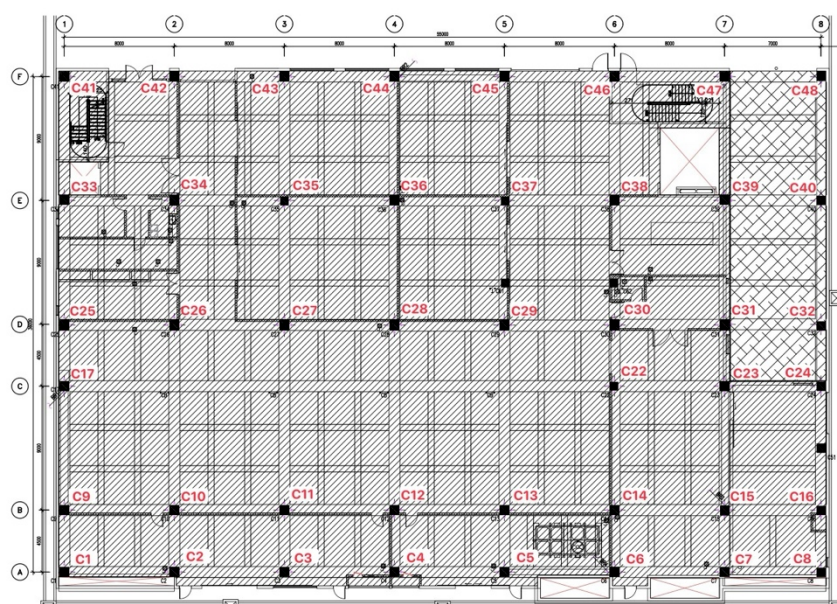


圖 4.26 柱位編號示意圖

表 4.28 A Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
樓層\位置	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
6 FL	0.275	0.247	0.244	0.247	0.207	0.240	0.278	
5 FL	0.250	0.381	0.183	0.209	0.214	0.208	0.266	0.126
4 FL	0.315	0.367	0.374	0.414	0.395	0.370	0.381	0.107
3MFL	0.345	0.423	0.430	0.508	0.475	0.565	0.454	0.122
3 FL	0.460	0.369	0.374	0.371	0.601	0.470	0.430	0.218
2 FL	0.257	0.280	0.270	0.306	0.507	0.604	0.445	0.203
1 FL	0.760	0.520	0.530	0.584	0.807	0.866	0.699	0.540

表 4.29 B Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
樓層\位置	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
6 FL	0.344						0.424	
5 FL	0.403	0.683	0.760	0.775	0.740	0.756	0.459	
4 FL	0.522	0.826	0.635	0.647	0.536	0.882	0.585	
3/3M FL	0.854	0.845	0.839	0.826	0.764	0.827	0.702	
2 FL	0.874	0.835	0.895	0.866	0.817	0.609	0.794	0.412
1 FL	0.962	0.766	0.799	0.590	0.761	0.641	0.930	0.571

表 4.30 C Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24
樓層\位置	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
6 FL	0.365							
5 FL	0.525						0.651	
4 FL	0.623						0.791	
3/3M FL	0.762						0.637	
2 FL	0.896					0.648	0.631	0.403
1 FL	0.874					0.521	0.929	0.654

表 4.31 D Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C25	C26	C27	C28	C29	C30	C31	C32
樓層\位置	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
6 FL	0.510	0.518				0.406	0.555	
5 FL	0.356	0.564	0.473	0.728	0.463	0.602	0.430	0.111
4 FL	0.524	0.809	0.691	0.545	0.717	0.832	0.518	0.102
3/3M FL	0.669	0.809	0.798	0.769	0.799	0.783	0.584	0.274
2 FL	0.570	0.803	0.847	0.854	0.811	0.757	0.583	0.406
1 FL	0.799	0.821	0.822	0.822	0.845	0.830	0.981	0.567

表 4.32 E Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C33	C34	C35	C36	C37	C38	C39	C40
樓層\位置	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
6 FL	0.549	0.537				0.495	0.430	
5 FL	0.332	0.604		0.333		0.738	0.334	0.120
4 FL	0.563	0.773		0.535		0.799	0.477	0.117
3/3M FL	0.563	0.813		0.790		0.713	0.521	0.300
2 FL	0.553	0.742	0.552	0.745	0.525	0.719	0.587	0.293
1 FL	0.786	0.772	0.767	0.853	0.587	0.780	0.764	0.543

表 4.33 F Line 主柱構件組合載重 Ratio 值

柱位編號	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48
樓層\位置	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
6 FL	0.390	0.532	0.442	0.323	0.420	0.449	0.333	
5 FL	0.248	0.306	0.678	0.403	0.684	0.448	0.288	0.151
4 FL	0.442	0.561	0.894	0.745	0.925	0.702	0.425	0.124
3MFL	0.418	0.646	0.714	0.853	0.743	0.709	0.426	0.123
3 FL	0.405	0.553	0.630	0.742	0.773	0.603	0.487	0.291
2 FL	0.281	0.569	0.503	0.740	0.578	0.628	0.346	0.306
1 FL	0.800	0.939	0.828	0.909	0.864	0.804	0.728	0.710

在分析「挫曲束制斜撐 (BRB) 」時，考慮到斜撐在跨度立面上的配置型式，以加強鋼骨構材較軟的弱面，其與主柱構件連結方式如圖 4.28 所示，故其分析成果將以垂直向立面進行呈現，BRB 斜撐構件分析成果如表 4.26 所示。

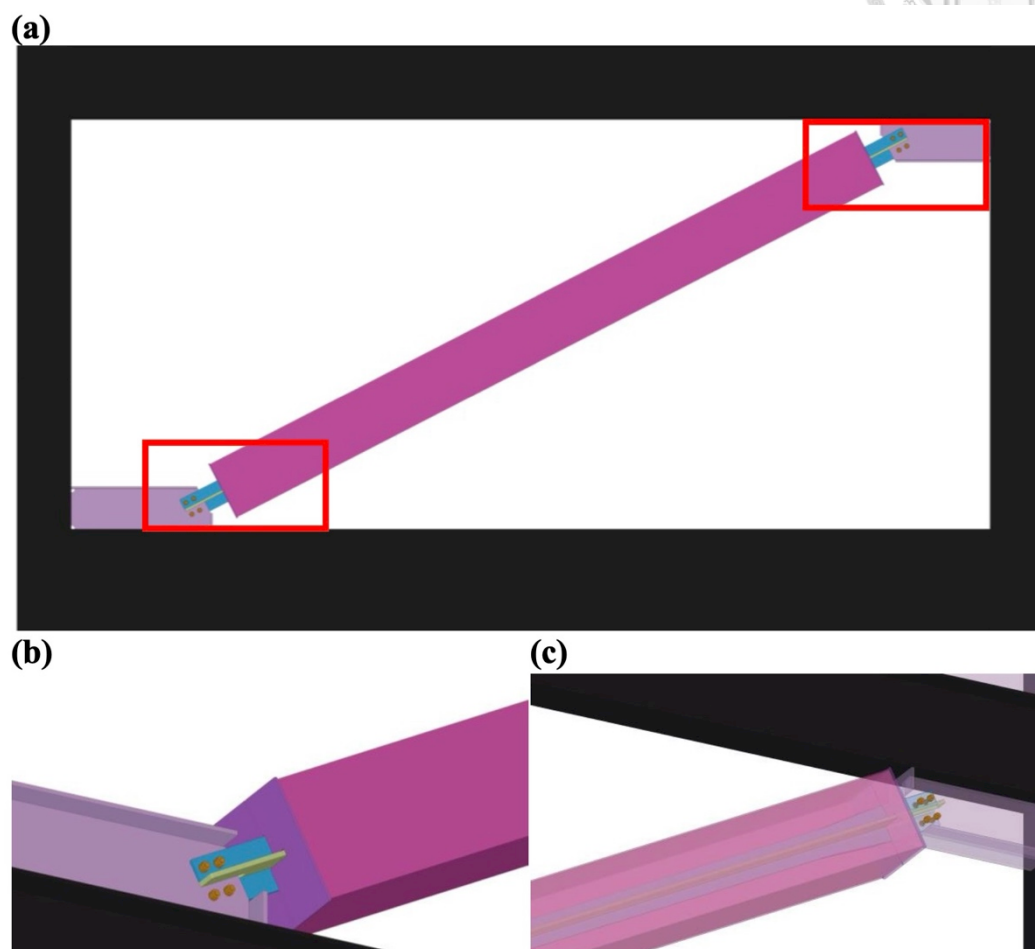


圖 4.28 BRB 斜撐與主樑柱接合詳圖
(a)BRB 斜撐、(b)斜撐下部接合詳圖、(c)斜撐上部接合詳圖
(圓方結構, 2024)

表 4.34 BRB 斜撐構件組合載重 Ratio 值

BRB 編號	BRB 1	BRB 2	BRB 3	BRB 4
樓層/位置	Line 1	Line F	Line 7	Line A
5FL	0.877	0.867	0.835	0.798
4FL	0.919	0.915	0.912	0.870
3MFL	0.968	0.906	0.963	0.959
3FL	0.987	0.965	0.984	0.984
2FL	0.986	0.998	0.945	0.963
1FL	0.999	0.937	0.871	0.961

在分析「主梁構件 (Girder)」時，考慮主要受力機制是提供各層樓版勁度，將樓版單元所受載重力量傳到至鄰近跨度的主柱構件，因此，故其分析成果將分成 X 方向(自 A Line 至 F Line)，以及 Y 方向 (自 1 Line 至 8 Line)，以水平向平面進行呈現，如表 4.35 至表 4.48 所示。

表 4.35 2FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.668	0.739	0.732	0.545	0.673	0.591	0.597	
E	0.708	0.789	0.707	0.748		0.480	0.536	
D	0.639	0.492	0.584	0.516	0.461	0.547	0.522	
C						0.566	0.549	
B	0.380	0.361	0.375	0.371	0.346		0.577	
A	0.357	0.352	0.393	0.449	0.280	0.413	0.561	

表 4.36 2FLY 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.657	0.377	0.744	0.882	0.759	
2				0.874	0.630	
3				0.997	0.747	
4	0.546	0.330		0.633	0.686	
5				0.716	0.691	
6	0.547	0.361	0.681	0.686	0.737	
7	0.682	0.470	0.826	0.857	0.779	
8	0.551	0.554	0.624	0.680	0.699	

表 4.37 3FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.681	0.847	0.824	0.662	0.811	0.560	0.521	
E	0.704	0.972	0.636	0.674	0.594	0.525	0.595	
D	0.717	0.823	0.800	0.830	0.653	0.700	0.604	
C	0.994	0.836			0.972	0.836	0.573	
B	0.668	0.686	0.683	0.686	0.640	0.655	0.494	
A	0.622	0.624	0.623	0.642	0.405	0.639	0.504	



表 4.38 3FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.599	0.246	0.729	0.870	0.715	
2	0.579	0.837		0.851	0.786	
3	0.600	0.857		0.870	0.844	
4	0.573	0.852		0.854	0.779	
5	0.580	0.811		0.740	0.860	
6	0.537	0.386	0.737	0.604	0.784	
7	0.617	0.349	0.703	0.751	0.696	
8	0.398	0.384	0.356	0.670	0.681	

表 4.39 3MFL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.548	0.478	0.583	0.305	0.619	0.541	0.452	
E						0.504	0.484	
D							0.449	
C								
B								
A	0.445	0.431	0.465	0.575	0.271	0.533	0.468	

表 4.40 3MFL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.710	0.268	0.775	0.523	0.481	
2					0.405	
3						
4						
5						
6						
7	0.679	0.228	0.757	0.543	0.468	
8		0.503		0.538	0.558	

表 4.41 4FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.384	0.313	0.466	0.113	0.480	0.371	0.549	
E	0.383	0.881		0.876		0.363	0.334	
D	0.344	0.516	0.517	0.512	0.522	0.351	0.358	
C	0.790					0.790		
B	0.960	0.590	0.582	0.583	0.605	0.956		
A	0.335	0.313	0.320	0.461	0.177	0.450	0.547	

表 4.42 4FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.758	0.852	0.696	0.404	0.352	
2	0.384	0.663		0.502	0.483	
3	0.428	0.745		0.735	0.604	
4	0.426	0.724		0.715	0.722	
5	0.426	0.740		0.749	0.629	
6	0.417	0.654		0.608	0.635	
7	0.749	0.834	0.712	0.423	0.302	
8	0.548		0.545	0.551	0.585	

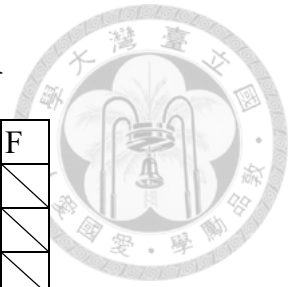


表 4.43 5FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.659	0.823	0.812	0.665	0.828	0.563	0.668	
E	0.629	0.880		0.895		0.489	0.442	
D	0.714	0.823	0.785	0.827	0.821	0.665	0.406	
C	0.416	0.836				0.437		
B	0.632	0.644	0.641	0.644	0.598	0.664		
A	0.538	0.538	0.554	0.622	0.375	0.613	0.656	

表 4.44 5FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.649	0.805	0.755	0.791	0.734	
2	0.487	0.819		0.766	0.659	
3	0.487	0.952		0.920	0.787	
4	0.483	0.885		0.935	0.902	
5	0.536	0.942		0.928	0.814	
6	0.587	0.732		0.799	0.956	
7	0.636	0.770		0.715	0.703	
8	0.545		0.541	0.537	0.564	

表 4.45 6FL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.533	0.579	0.615	0.469	0.648	0.470	0.499	
E	0.586	0.696		0.706		0.392	0.390	
D	0.633	0.573	0.601	0.570	0.597	0.367	0.364	
C	0.332	0.869				0.339		
B	0.501	0.462	0.469	0.468	0.436	0.528		
A	0.427	0.429	0.438	0.498	0.287	0.491	0.505	

表 4.46 6FL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.542	0.165	0.593	0.650	0.646	
2	0.346	0.610		0.889	0.760	
3	0.351	0.761		0.687	0.498	
4	0.349	0.372		0.951	0.799	
5	0.354	0.756		0.692	0.514	
6	0.423	0.722		0.808	0.869	
7	0.533	0.280		0.899	0.532	
8	0.303		0.302	0.300	0.317	

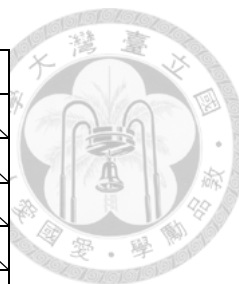


表 4.47 RFL X 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.836	0.298	0.265	0.183	0.299	0.501	0.392	
E	0.793					0.556	0.224	
D	0.442					0.600	0.199	
C						0.318	0.175	
B							0.109	
A	0.209	0.170	0.179	0.165	0.156	0.289	0.305	

表 4.48 RFL Y 方向主梁構件組合載重 Ratio 值

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.404	0.406	0.504	0.682	0.605	
2				0.693	0.911	
3						
4						
5						
6		0.882		0.707	0.566	
7	0.453	0.278	0.843	0.837	0.345	
8	0.125		0.078	0.110	0.111	

4.5 小結

本研究案例的鋼骨特殊抗彎矩構架，總共包含 1328 件桿件。參照第 4.4 節內容，本研究建議在案例廠房的 153 處集力構件上設置「三軸向應變計」作為重要監測點位。經過詳細檢討和分析，本研究建議最佳化的結構監控系統配置方案。這些監控點的佈設率達到 11.52%，如表 4.49 所示。此配置顯著降低結構健康監控系統(SHM)的設置成本效益，增加事業機構採納和建制此系統的意願。

表 4.49 三軸向應變計最佳化配置方案

構件名稱	構件數量	監控構件	佈設率	備註
主柱構件 (Column)	246	44	17.89%	
主梁構件 (Girder)	418	85	20.33%	
小梁構件 (Joist)	640	0	0.00%	根據第 3.1 節研析內容，非屬規範主要控制韌性構件。
BRB 斜撐	24	24	100.00%	
總計	1,328	153	11.52%	

此外，經本研究檢討，考量到廠房運轉維護過程中的作業通道暢通性及機組運作的工作性，建議在 1~2 Line/E~F Line 跨距的儲藏室空間內設置「pALERT 強震儀」，如圖 4.29 所示。此空間相對不影響整體廠房維運，適合作為設備的安裝位置。設置空間將從地上 1 樓至屋頂，共計設置 8 組強震儀，以納入變位檢討及進度檢討結構辨識模組，進一步提升整體結構的安全監控能力。



圖 4.29 強震於安裝位置示意圖

本研究建議在研究案例，重要發電設施廠房中建置結構健康監控系統，以在強震時即時反映結構健康狀況，提供關鍵數據支援應急處理和修復評估，避免城市機能系統中斷，影響城市韌性機制的恢復速度。本研究強調預防災害的重要性，透過主動監測數據收集，實現全面監控和管理，即時發現潛在問題，達到災害預防的目的。此外，這些數據有助於定期檢測和維護，延長建築使用壽命，降低事故風險。

第五章 驗證模擬

根據第 4.3.5 節的研究案例分析成果，由於案例廠房結構僅地上 6 層，非屬於高層結構物，受風力影響的層面相對較低。另外，由於廠房建築物主要用途為運轉大型設備，因此具有較大的靜載重和活載重量，且地震力的設計水平橫力與建築物的自重有密切關係，故廠房結構受到地震力的影響更為顯著，為本案結構設計的主要災害控制因子。透過第 4.3.5 研析成果，因為本案例災害控制因子為地震力，本研究建議使用非線性歷時分析 (Nonlinear Time-History Analysis)，引用中央氣象局的歷史數據資料，針對性得進行數值模擬，以確保在考量經濟因素的前提下，所選擇的重要監測點位仍具有一定的可靠度。

5.1 非線性地震力歷時分析

根據「建築物耐震設計規範」第 3.6 節 (內政部, 2024)規定，為模擬研究案例在強地動狀態下的反應，確切反應出構材的真實非線性行為及破壞機制，應根據案例工址的座落位置、土層性質及斷層距離，選擇符合這些條件的地震紀錄進行模擬驗證。這些地震紀錄應從中央氣象局地震測報中心公告的地震觀測站數據中挑選，以確保模擬的準確性和可靠性。

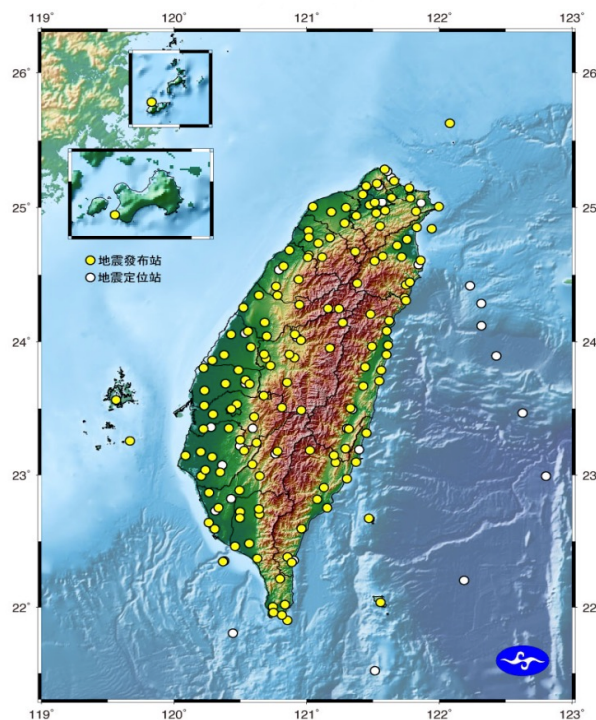


圖 5.1 中央氣象署地震觀測網的測站分布圖 (中央氣象署, 2018)

5.2 歷史地震力輸入與調整

本案例工址位於桃園市龜山區。根據工址特性，參考鄰近測站的設計反應譜相符地震歷史數據，包括清溪國小測站（TH007）、大坑國小測站（TH014）及林口國小測站（TH052），如圖 5.2 所示。地震力的選擇部分，根據第 1.1 節研究背景中提到的致災嚴重地震災害，選擇 1999 年 921 集集地震及 2002 年 331 花蓮地震，作為後續歷時分析的主要參數。



圖 5.2 擇定測站與案例建築相對位置圖

根據「建築物耐震設計規範」第 3.6 節規定，應調整觀測站歷史數據，如圖 5.4 所示，使案例工址第一模態基本震動週期($T_x=1.24\text{ s}$, $T_y=1.26\text{ s}$) 之 0.2 倍至 1.5 倍範圍間，意即相符反應譜週期 0.25 秒($0.2T_x$)至 1.9 秒($1.5T_y$)間，任一點譜加速度值大於設計譜加速度值之 90%，調整後設計普加速度皆符合耐震設計規範第 3.6 章節要求，如圖 5.3 所示。

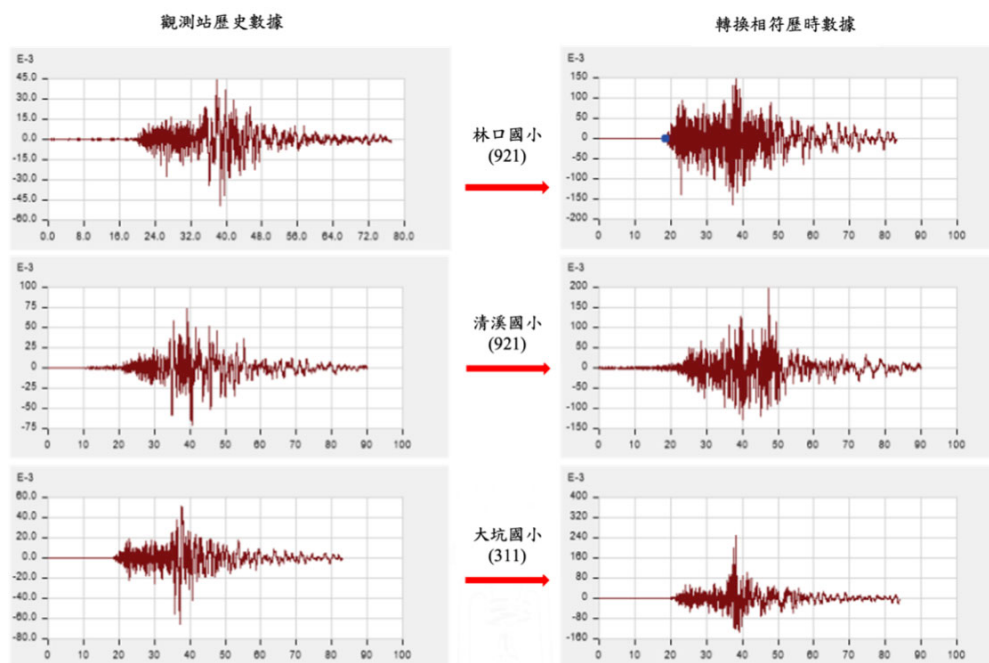


圖 5.4 測站歷史數據轉換圖

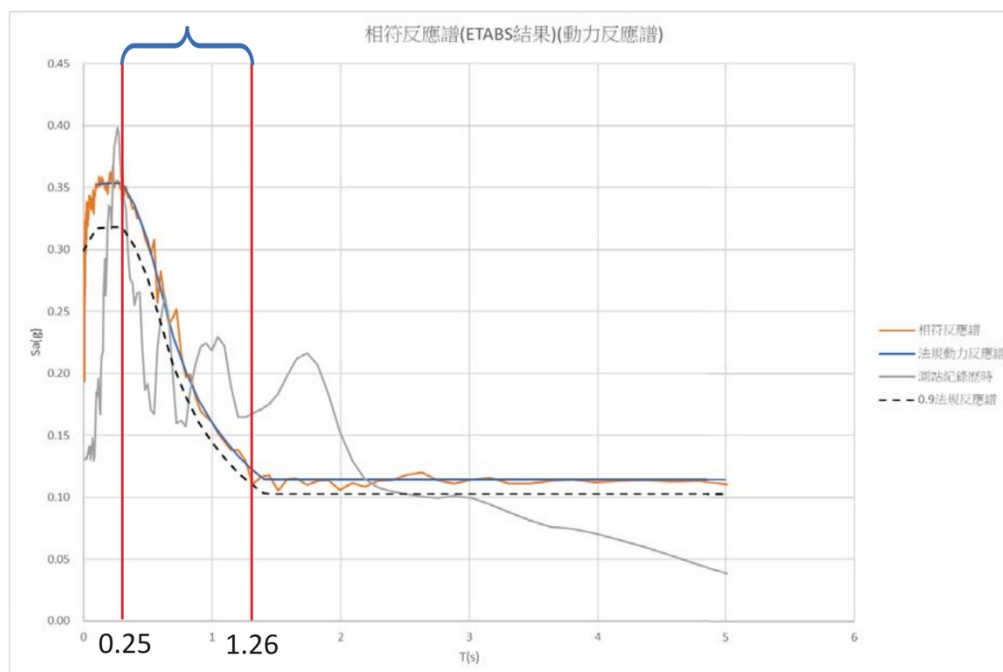


圖 5.3 動力分析相符反應譜

5.3 歷時載重驗證模擬成果

根據第 5.2 節的相符反應譜調整成果，引用中央氣象局的歷史地震資料，將歷時地震力 (TH) 依據設計規範的動力組合載重規定，如表 5.1 所示，輸入至 ETABS 結構分析軟體，產出鋼骨構件的 Ratio 值 (f_a/F_a)。考量到天然災害的特殊性，由於不會有兩次完全相同的災害數據，僅對單一歷史地震數據進行比較意義有限，因此本研究取三組歷史地震力的平均值，並與本研究建議的結構監控配置成果進行比對。並將成果轉換為表格型式呈現，以利與第 4.4 節成果進行比對，其表格黃底欄位為本研究建議的重點監控構件，紅色字體為歷史地震數據驗證成果。

表 5.1 動力歷時分析載重組合係數 (內政部, 2024)

組合項次	靜載重(DL)	活載重(LL)	歷時載重(THx)	歷時載重(Thy)	EQz
1	1.2	1.0	±1.0		±0.3
2	1.2	1.0	±0.3		±1.0
3	1.2	1.0		±1.0	±0.3
4	1.2	1.0		±0.3	±1.0
5	0.9	±1.0	±1.0		±0.3
6	0.9	±0.3	±0.3		±1.0
7	0.9	±1.0		±1.0	±0.3
8	0.9	±0.3		±0.3	±1.0

在分析主柱構件 (Column) 時，考慮到其主要提供系統架構在垂直方向 (Z 向) 的勁度，故分析成果從 A Line 至 F Line，其中位置 A1 即表示該柱位位於 A Line 及 1 Line 的交叉點上，另柱位編號參考圖 4.27 所示，以垂直方向的立面圖進行呈現。主柱構件的分析成果如表 5.2 至表 5.7 所示。

表 5.2 A Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	樓層\位置	A1		A2		A3		A4		A5		A6		A7		A8	
林口 921	6 FL	0.142	0.144	0.152	0.145	0.164	0.142	0.157	0.135	0.157	0.134	0.157	0.128	0.180	0.179		
清溪 921		0.118		0.120		0.117		0.115		0.119		0.114		0.157			
大坑 331		0.171		0.163		0.146		0.133		0.125		0.114		0.200			
林口 921	5 FL	0.165	0.192	0.215	0.194	0.242	0.221	0.259	0.233	0.239	0.221	0.259	0.228	0.280	0.241	0.135	0.113
清溪 921		0.190		0.167		0.191		0.199		0.199		0.192		0.205		0.097	
大坑 331		0.222		0.201		0.229		0.242		0.226		0.233		0.239		0.107	
林口 921	4 FL	0.213	0.232	0.331	0.305	0.367	0.341	0.358	0.329	0.378	0.338	0.354	0.327	0.314	0.273	0.105	0.093
清溪 921		0.227		0.268		0.302		0.286		0.286		0.282		0.244		0.083	
大坑 331		0.257		0.316		0.355		0.344		0.350		0.345		0.261		0.090	
林口 921	3M FL	0.290	0.300	0.365	0.357	0.411	0.401	0.516	0.490	0.443	0.422	0.428	0.415	0.292	0.307	0.110	0.108
清溪 921		0.293		0.355		0.399		0.437		0.419		0.412		0.298		0.107	
大坑 331		0.318		0.350		0.392		0.516		0.404		0.405		0.332		0.106	
林口 921	3 FL	0.336	0.371	0.326	0.323	0.337	0.332	0.467	0.469	0.548	0.536	0.332	0.334	0.308	0.333	0.154	0.147
清溪 921		0.383		0.315		0.322		0.446		0.492		0.315		0.319		0.133	
大坑 331		0.393		0.327		0.338		0.493		0.567		0.354		0.373		0.154	
林口 921	2 FL	0.194	0.197	0.215	0.218	0.226	0.227	0.502	0.499	0.452	0.432	0.225	0.243	0.298	0.338	0.339	0.380
清溪 921		0.190		0.215		0.228		0.488		0.391		0.257		0.386		0.435	
大坑 331		0.207		0.225		0.226		0.506		0.454		0.247		0.329		0.367	
林口 921	6 FL	0.384	0.444	0.394	0.398	0.410	0.424	0.725	0.749	0.662	0.687	0.454	0.479	0.458	0.544	0.358	0.432
清溪 921		0.506		0.405		0.435		0.756		0.676		0.491		0.628		0.489	
大坑 331		0.442		0.394		0.427		0.765		0.724		0.492		0.545		0.448	

表 5.3 B Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C9		C10		C11		C12		C13		C14		C15		C16	
	樓層\位置	B1		B2		B3		B4		B5		B6		B7		B8	
林口 921	6 FL	0.190	0.193											0.273	0.274		
清溪 921		0.198												0.275			
大坑 331		0.191												0.273			
林口 921	5 FL	0.442	0.434	0.872	0.871	0.962	0.962	0.995	0.995	0.948	0.948	0.899	0.899	0.493	0.484		
清溪 921		0.418		0.870		0.962		0.994		0.948		0.900		0.466			
大坑 331		0.443		0.871		0.962		0.995		0.948		0.899		0.493			
林口 921	4 FL	0.603	0.604	0.950	0.950	0.720	0.720	0.744	0.744	0.516	0.516	0.995	0.995	0.736	0.737		
清溪 921		0.604		0.950		0.720		0.744		0.516		0.996		0.737			
大坑 331		0.604		0.950		0.720		0.744		0.516		0.995		0.737			
林口 921	3M FL	0.639	0.631	0.955	0.955	0.934	0.934	0.910	0.910	0.858	0.857	0.948	0.948	0.726	0.699		
清溪 921		0.615		0.955		0.934		0.910		0.857		0.948		0.657			
大坑 331		0.639		0.955		0.934		0.910		0.957		0.948		0.714			
林口 921	3 FL	0.474	0.474	0.883	0.883	0.966	0.966	0.964	0.964	0.890	0.890	0.689	0.689	0.714	0.711	0.613	19.000
清溪 921		0.474		0.883		0.966		0.964		0.890		0.689		0.706		0.620	
大坑 331		0.474		0.883		0.966		0.964		0.890		0.689		0.714		0.613	
林口 921	2 FL	0.437	0.475	0.739	0.739	0.796	0.796	0.592	0.605	0.737	0.737	0.568	0.587	0.625	0.647	0.472	0.487
清溪 921		0.550		0.739		0.796		0.630		0.737		0.625		0.691		0.516	
大坑 331		0.437		0.739		0.796		0.592		0.737		0.568		0.625		0.472	

表 5.4 C Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C17		C18		C19		C20		C21		C22		C23		C24	
	樓層\位置	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
林口 921	6 FL	0.354	0.354														
清溪 921		0.359															
大坑 331		0.349															
林口 921	5 FL	0.610	0.577											0.565	0.538		
清溪 921		0.565												0.541			
大坑 331		0.555												0.507			
林口 921	4 FL	0.766	0.766											0.804	0.804		
清溪 921		0.766												0.804			
大坑 331		0.767												0.804			
林口 921	3M FL	0.748	0.750											0.676	0.676		
清溪 921		0.750												0.676			
大坑 331		0.751												0.677			
林口 921	3 FL	0.563	0.563									0.612	0.658	0.522	0.556	0.474	0.515
清溪 921		0.563										0.72		0.613		0.583	
大坑 331		0.563										0.641		0.533		0.487	
林口 921	2 FL	0.616	0.664									0.392	0.426	0.603	0.656	0.409	0.474
清溪 921		0.738										0.471		0.707		0.525	
大坑 331		0.637										0.416		0.659		0.487	

表 5.5 D Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C25		C26		C27		C28		C29		C30		C31		C32	
	樓層\位置	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8	
林口 921	6 FL	0.419	0.443	0.424	0.434							0.286	0.291	0.466	0.420		
清溪 921		0.452		0.438								0.281		0.397			
大坑 331		0.459		0.441								0.307		0.397			
林口 921	5 FL	0.328	0.309	0.682	0.682	0.500	0.486	0.864	0.864	0.474	0.462	0.607	0.607	0.387	0.367	0.108	0.093
清溪 921		0.298		0.682		0.490		0.864		0.470		0.608		0.357		0.076	
大坑 331		0.302		0.683		0.467		0.865		0.443		0.606		0.357		0.094	
林口 921	4 FL	0.336	0.335	0.889	0.889	0.727	0.727	0.611	0.611	0.801	0.801	0.971	0.971	0.429	0.402	0.096	0.083
清溪 921		0.342		0.889		0.727		0.611		0.801		0.971		0.387		0.073	
大坑 331		0.326		0.889		0.727		0.611		0.801		0.971		0.391		0.081	
林口 921	3M FL	0.560	0.602	0.861	0.861	0.821	0.821	0.807	0.807	0.833	0.833	0.895	0.895	0.403	0.420	0.180	0.180
清溪 921		0.634		0.861		0.821		0.807		0.833		0.895		0.445		0.179	
大坑 331		0.612		0.861		0.821		0.808		0.833		0.895		0.412		0.180	
林口 921	3 FL	0.729	0.764	0.889	0.888	0.915	0.915	0.906	0.906	0.884	0.884	0.951	0.952	0.781	0.780	0.503	0.518
清溪 921		0.814		0.889		0.915		0.906		0.884		0.951		0.781		0.555	
大坑 331		0.750		0.887		0.915		0.905		0.885		0.953		0.779		0.496	
林口 921	2 FL	0.815	0.889	0.738	0.738	0.776	0.776	0.740	0.740	0.826	0.826	0.896	0.896	0.765	0.800	0.426	0.461
清溪 921		0.996		0.738		0.776		0.740		0.826		0.896		0.832		0.480	
大坑 331		0.856		0.738		0.775		0.741		0.827		0.896		0.803		0.477	

表 5.6 E Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C33		C34		C35		C36		C37		C38		C39		C40	
	樓層\位置	E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7		E8	
林口 921	6 FL	0.580		0.585								0.410		0.431			
清溪 921		0.587	0.582	0.556	0.579							0.323	0.352	0.327	0.362		
大坑 331		0.580		0.595								0.322		0.327			
林口 921	5 FL	0.323		0.801				0.480				0.880		0.380		0.107	
清溪 921		0.323	0.325	0.803	0.802			0.321	0.387			0.867	0.876	0.380	0.380	0.074	0.087
大坑 331		0.328		0.801				0.359				0.882		0.380		0.079	
林口 921	4 FL	0.530		0.986				0.637				0.992		0.430		0.085	
清溪 921		0.530	0.539	0.987	0.986			0.633	0.635			0.932	0.972	0.433	0.417	0.064	0.074
大坑 331		0.557		0.985				0.635				0.993		0.389		0.073	
林口 921	3M FL	0.777		0.910				0.797				0.885		0.539		0.162	
清溪 921		0.778	0.788	0.910	0.910			0.796	0.797			0.880	0.883	0.563	0.578	0.152	0.165
大坑 331		0.809		0.910				0.797				0.885		0.633		0.182	
林口 921	3 FL	0.753		0.767		0.412		0.768		0.483		0.967		0.669		0.322	
清溪 921		0.795	0.760	0.769	0.768	0.408	0.411	0.767	0.767	0.561	0.511	0.967	0.967	0.781	0.739	0.384	0.362
大坑 331		0.733		0.768		0.412		0.767		0.488		0.968		0.766		0.379	
林口 921	2 FL	0.717		0.752		0.591		0.794		0.650		0.986		0.718		0.390	
清溪 921		0.870	0.784	0.882	0.795	0.715	0.634	0.795	0.794	0.705	0.668	0.986	0.986	0.849	0.790	0.492	0.449
大坑 331		0.764		0.752		0.595		0.794		0.650		0.986		0.803		0.464	

表 5.7 F Line 主柱構件歷時載重驗證成果

地震別	柱位編號	C41		C42		C43		C44		C45		C46		C47		C48	
	樓層\位置	F1		F2		F3		F4		F5		F6		F7		F8	
林口 921	6 FL	0.360		0.549		0.349		0.194		0.316		0.353		0.351			
清溪 921		0.361	0.357	0.540	0.536	0.295	0.316	0.181	0.193	0.279	0.291	0.353	0.353	0.284	0.306		
大坑 331		0.351		0.519		0.303		0.205		0.279		0.354		0.284			
林口 921	5 FL	0.229		0.314		0.854		0.434		0.824		0.590		0.291		0.138	
清溪 921		0.229	0.231	0.314	0.306	0.855	0.854	0.433	0.434	0.825	0.824	0.589	0.590	0.243	0.262	0.095	0.115
大坑 331		0.234		0.289		0.854		0.434		0.824		0.590		0.252		0.112	
林口 921	4 FL	0.375		0.622		0.977		0.860		0.983		0.766		0.432		0.103	
清溪 921		0.376	0.369	0.557	0.584	0.978	0.977	0.859	0.860	0.983	0.983	0.765	0.766	0.357	0.396	0.072	0.087
大坑 331		0.357		0.572		0.977		0.860		0.983		0.766		0.399		0.087	
林口 921	3M FL	0.376		0.605		0.824		0.823		0.852		0.736		0.329		0.101	
清溪 921		0.416	0.391	0.575	0.591	0.824	0.824	0.791	0.802	0.853	0.852	0.737	0.736	0.623	0.441	0.091	0.099
大坑 331		0.382		0.593		0.824		0.791		0.852		0.736		0.371		0.106	
林口 921	3 FL	0.469		0.607		0.713		0.771		0.775		0.729		0.632		0.211	
清溪 921		0.499	0.482	0.557	0.572	0.713	0.713	0.712	0.731	0.755	0.761	0.728	0.729	0.695	0.638	0.186	0.204
大坑 331		0.478		0.551		0.713		0.710		0.754		0.729		0.588		0.216	
林口 921	2 FL	0.409		0.708		0.553		0.839		0.552		0.897		0.632		0.329	
清溪 921		0.461	0.431	0.708	0.708	0.553	0.553	0.838	0.794	0.545	0.545	0.897	0.897	0.695	0.650	0.367	0.343
大坑 331		0.422		0.708		0.553		0.704		0.537		0.897		0.623		0.334	
林口 921	6 FL	0.600		0.828		0.672		0.752		0.672		0.739		0.766		0.486	
清溪 921		0.760	0.657	0.936	0.864	0.788	0.717	0.789	0.748	0.721	0.699	0.793	0.757	0.860	0.805	0.552	0.530
大坑 331		0.611		0.828		0.690		0.702		0.705		0.739		0.788		0.553	

同樣的，對於「挫曲束制斜撐（BRB）」分析，考慮其設置的初衷以及與前述第 4.4 研究成果對比的便利性，其分析成果將以垂直向立面進行呈現，BRB 斜撐構件分析成果如表 5.8 所示。

表 5.8 BRB 斜撐構件歷時載重驗證成果

地震別	斜撐編號	BRB 1		BRB 2		BRB 3		BRB 4	
	樓層\Line	Line 1		Line F		Line 7		Line A	
林口 921	5 FL	0.782	0.817	0.852	0.846	0.816	0.844	0.910	0.771
清溪 921		0.839		0.901		0.921		0.660	
大坑 331		0.830		0.785		0.796		0.742	
林口 921	4 FL	0.821	0.881	0.936	0.861	0.875	0.875	0.870	0.849
清溪 921		0.914		0.832		0.857		0.765	
大坑 331		0.908		0.815		0.894		0.912	
林口 921	3M FL	0.870	0.906	0.887	0.881	0.926	0.927	0.876	0.870
清溪 921		0.927		0.896		0.929		0.845	
大坑 331		0.922		0.859		0.926		0.889	
林口 921	3 FL	0.847	0.859	0.923	0.891	0.877	0.903	0.939	0.919
清溪 921		0.854		0.895		0.905		0.915	
大坑 331		0.877		0.855		0.927		0.904	
林口 921	2 FL	0.311	0.373	0.916	0.924	0.922	0.923	0.935	0.899
清溪 921		0.414		0.926		0.921		0.870	
大坑 331		0.393		0.930		0.927		0.892	
林口 921	1 FL	0.928	0.879	0.795	0.790	0.939	0.896	0.862	0.874
清溪 921		0.858		0.835		0.901		0.893	
大坑 331		0.850		0.741		0.848		0.867	

最後，對於「主梁構件（Girder）」的地震力歷時分析，以 DLine 為例，以剖面呈現三組地震力平均成果如表 5.9 所示；惟考慮其主要受力機制是提供各層樓板的勁度，將樓板單元所受載重傳遞至鄰近跨度的主柱構件。同時，為了方便與前述第 4.8 節的研究成果進行比較，本研究節錄其歷時分析結果，轉換為樓層平面方式呈現，並分為 X 方向（從 ALine 至 FLine）和 Y 方向（從 1Line 至 8Line），詳見表 5.10 至表 5.23 所示。

表 5.9 D Line 主梁構件歷時載重驗證成果表

地震別	樓層/Line	D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7	
林口 921	RFL	0.408	0.394	RF FL D Line/ 2~5 Line 無梁構件								0.722	0.722	0.088	0.087
清溪 921		0.356										0.722		0.087	
大坑 331		0.418										0.722		0.087	
林口 921	6 FL	0.544	0.541	0.570	0.570	0.608	0.608	0.563	0.563	0.652	0.652	0.701	0.701	0.286	0.243
清溪 921		0.540		0.570		0.608		0.563		0.652		0.701		0.205	
大坑 331		0.539		0.570		0.609		0.563		0.652		0.702		0.237	
林口 921	5 FL	0.716	0.716	0.809	0.809	0.799	0.799	0.813	0.813	0.820	0.820	0.675	0.664	0.325	0.278
清溪 921		0.716		0.809		0.799		0.813		0.820		0.659		0.231	
大坑 331		0.716		0.809		0.799		0.813		0.820		0.659		0.278	
林口 921	4 FL	0.437	0.424	0.641	0.641	0.633	0.633	0.634	0.634	0.653	0.653	0.440	0.414	0.267	0.246
清溪 921		0.418		0.641		0.633		0.634		0.653		0.402		0.235	
大坑 331		0.418		0.641		0.633		0.634		0.653		0.399		0.236	
林口 921	3M FL	3M FL D Line 無梁構件												0.342	0.344
清溪 921														0.340	
大坑 331														0.349	
林口 921	3 FL	0.678	0.671	0.812	0.812	0.776	0.777	0.810	0.810	0.779	0.778	0.658	0.647	0.453	0.445
清溪 921		0.668		0.812		0.776		0.810		0.779		0.649		0.445	
大坑 331		0.667		0.812		0.778		0.810		0.777		0.634		0.436	
林口 921	2 FL	0.586	0.586	0.606	0.606	0.650	0.650	0.817	0.817	0.604	0.604	0.728	0.728	0.430	0.421
清溪 921		0.583		0.606		0.650		0.817		0.604		0.728		0.427	
大坑 331		0.588		0.606		0.649		0.818		0.604		0.728		0.406	

表 5.10 2FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.607	0.938	0.484	0.504	0.405	0.905	0.411	
E	0.710	0.849	0.776	0.616		0.859	0.420	
D	0.568	0.606	0.650	0.817	0.604	0.728	0.421	
C						0.428	0.431	
B	0.284	0.271	0.278	0.276	0.300	x	0.451	
A	0.285	0.284	0.314	0.304	0.355	0.309	0.389	

表 5.11 2FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.280	0.674	0.405	0.531	0.833	
2				0.762	0.768	
3				0.847	0.588	
4	0.424	0.311		0.729	0.593	
5				0.699	0.492	
6	0.416	0.307	0.440	0.846	0.696	
7	0.459	0.454	0.524	0.686	0.820	
8	0.444	0.479	0.438	0.547	0.571	

表 5.12 3FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.624	0.938	0.484	0.504	0.405	0.905	0.411	
E	0.642	0.740	0.747	0.776	0.736	0.818	0.585	
D	0.671	0.812	0.777	0.810	0.778	0.647	0.445	
C	0.624	0.739			0.666	0.817	0.380	
B	0.549	0.555	0.554	0.551	0.553	0.542	0.513	
A	0.549	0.544	0.571	0.447	0.547	0.524	0.429	

表 5.13 3FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.326	0.312	0.447	0.575	0.921	
2	0.522	0.859		0.864	0.741	
3	0.570	0.909		0.750	0.641	
4	0.515	0.894		0.809	0.609	
5	0.568	0.852		0.735	0.640	
6	0.428	0.484	0.718	0.614	0.797	
7	0.459	0.454	0.524	0.686	0.820	
8	0.399	0.520	0.376	0.669	0.683	

表 5.14 3MFL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.361	0.344	0.407	0.269	0.423	0.370	0.276	
E						0.322	0.364	
D							0.344	
C								
B								
A	0.353	0.325	0.384	0.266	0.398	0.329	0.264	

表 5.15 3MFL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.401	0.278	0.555	0.251	0.418	
2						
3						
4						
5						
6						
7	0.423	0.283	0.433	0.390	0.305	
8	0.200			0.145	0.150	

表 5.16 4FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.378	0.340	0.419	0.253	0.426	0.407	0.244	
E	0.486	0.990		0.994		0.578	0.276	
D	0.424	0.641	0.633	0.634	0.653	0.414	0.246	
C	0.786					0.782		
B	0.677	0.731	0.715	0.721	0.748	0.709		
A	0.388	0.375	0.442	0.282	0.459	0.389	0.238	

表 5.17 4FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.467	0.716	0.661	0.273	0.478	
2	0.434	0.757		0.591	0.593	
3	0.570	0.909		0.771	0.628	
4	0.447	0.929		0.788	0.799	
5	0.451	0.922		0.781	0.633	
6	0.433	0.745		0.629	0.717	
7	0.434	0.717	0.502	0.453	0.247	
8	0.194		0.157	0.107	0.140	

表 5.18 5FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.557	0.688	0.605	0.680	0.587	0.895	0.274	
E	0.672	0.805		0.843		0.805	0.309	
D	0.716	0.809	0.799	0.813	0.820	0.664	0.278	
C	0.452	0.739				0.466		
B	0.600	0.568	0.529	0.532	0.546	0.578		
A	0.464	0.465	0.518	0.374	0.518	0.457	0.244	

表 5.19 5FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.388	0.575	0.593	0.535	0.751	
2	0.422	0.757		0.591	0.593	
3	0.406	0.872		0.895	0.927	
4	0.407	0.902		0.795	0.727	
5	0.416	0.878		0.759	0.912	
6	0.416	0.745		0.629	0.717	
7	0.374	0.561		0.632	0.319	
8	0.203		0.144	0.084	0.145	

表 5.20 6FL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.473	0.508	0.453	0.469	0.455	0.860	0.291	
E	0.620	0.897		0.873		0.808	0.320	
D	0.541	0.570	0.608	0.563	0.652	0.701	0.243	
C	0.371	0.746				0.409		
B	0.434	0.408	0.406	0.416	0.411	0.420		
A	0.329	0.320	0.378	0.250	0.380	0.318	0.268	

表 5.21 6FL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.294	0.298	0.482	0.315	0.620	
2	0.364	0.794		0.856	0.946	
3	0.570	0.909		0.750	0.641	
4	0.352	0.843		0.918	0.764	
5	0.357	0.930		0.849	0.611	
6	0.372	0.789		0.816	0.703	
7	0.297	0.334	0.321	0.520	0.191	
8	0.195		0.124	0.076	0.145	

表 5.22 RFL X 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	1	2	3	4	5	6	7	8
F	0.753	0.031	0.032	0.032	0.031	0.403	0.045	
E	0.440					0.777	0.089	
D	0.394					0.722	0.087	
C						0.634	0.157	
B							0.047	
A	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.063	

表 5.23 RFL Y 方向主梁構件歷時載重驗證成果

Line	A	B	C	D	E	F
1	0.005	0.048	0.542	0.890	0.874	
2				0.878	0.865	
3						
4						
5						
6		0.875		0.768	0.338	
7	0.247	0.265	0.300	0.801	0.629	
8	0.029		0.019	0.049	0.074	

5.4 小結

總整第四章監控系統規劃研析成果，以及第五章表 5.2 至表 5.23 驗證成果，本研究將辨識成果分為兩類：

- (一) 重點監控構件：定義為驗證成果 Ratio 值大於 0.75 者，表中以黃底紅字標示。
- (二) 非重點監控構件：定義為驗證成果 Ratio 值小於 0.75 者，表中以白底黑字標示。

若構件分類符合上述條件，即屬於辨識成功。相反地，若重點監控構件的驗證成果 Ratio 值小於 0.75（黃底黑字），或非重點監控構件的驗證成果表 Ratio 值大於 0.75（白底紅字），則定義為辨識失敗。相關主柱、主梁及 BRB 斜撐構件的辨識成果彙整如表所示。

表 5.24 驗證模擬成果總表

主柱構件			
主柱監控數	44	柱識別成功	196
總柱構件數	246	柱識別失敗	50
主柱佈設率	17.9%	主柱辨識率	79.7%
主梁構件			
主梁監控數	85	梁識別成功	341
主梁構件數	418	梁識別失敗	74
主梁佈設率	20.3%	主梁辨識率	81.6%
BRB 斜撐			
BRB 監控數	24	BRB 識別成功	23
總 BRB 構件數	24	BRB 識別失敗	1
BRB 佈設率	100.0%	BRB 辨識率	95.8%
總驗證成果			
重點監控點位	153	識別成功	560
總架構構件數	1,328	識別失敗	125
總佈設率	11.52%	總辨識成果	81.4%

針對本研究案例，提出了一個結構健康監控系統（SHM）的建議。此建議系統經過設計階段的生命週期檢討，引用文獻結構辨識領域的研究成果。經過詳細檢討和分析後，建議設置 153 處重點監控構件，佔總構件數量的 11.52%，顯著降低了結構健康監控系統的設置成本。此外，利用歷史地震數據進行了動力分析歷時模擬驗證，結果顯示所選擇的重點監控構件具有 81.4% 的辨識成果，驗證在確保在考量經濟因素的前提下，所選擇的重點監測點位仍然具有相當程度的可靠度，達成了本研究的目的與動機。

第六章 結論建議



6.1 結論

本研究突破了過往僅限於簡化數值模擬和實驗室試驗的研究限制，透過某國營事業機構的重要發電設施廠房作為研究案例，提出了一個完整的結構健康監控系統(SHM)的規劃流程。本流程係參考現今結構辨識領域的研究成果，採用第一類力量檢核結構系統識別成果，其特徵數值為「應變值」，建議採用「三軸向應變計」對系統集力構件進行佈設；另第二類變位檢核及第三類勁度檢核結構系統識別特徵值成果，其特徵數值為「加速度值」，建議結合業界專業儀器設備廠商的監測技術，採用「pALERT 強震儀」等儀器進行建築數據蒐測。

於工程理學分析的基礎上，參考先前研究成果及建築物基礎構造設計規範，本研究針對「三軸向應變計」及「pALERT 強震儀」定義管理值、警戒值及行動值等監測管理標準，如表 6.1 及表 6.2 所示。

表 6.1 三軸向應變計讀數判別標準

	鋼骨構件 Ratio 值	構件應變階段	構件應力狀態
管理值	$75\% < \text{Ratio} < 100\%$	彈性狀態 (Elastic Region)	遵循虎克定律，惟構件屬架構集力構件，應巡查檢視是否產生細微損傷。
警戒值	$100\% < \text{Ratio} < 140\%$	塑性狀態 (Plastic Region)	構件產生永久變形，應進行修繕補強，使構件恢復原應具備韌性容量。
行動值	$140\% < \text{Ratio}$	緊縮狀態 (Necking)	韌性容量將用盡，可能脆性破壞(Fracture)，需立即疏散人員。

表 6.2 pALERT 強震儀層間變位角管理標準

	層間變位角 θ (Drift Ratio)	損壞程度	層間構件狀態
管理值	$0.0020(1/500) < \theta < 0.0033(1/300)$	輕度損壞	隔間牆發生裂縫
警戒值	$0.0033(1/300) < \theta < 0.0067(1/150)$	中度損壞	剛性建築物明顯傾斜
行動值	$0.0067(1/150) < \theta$	嚴重損壞	結構性損壞

本研究針對最佳化結構健康監控配置方法，建議兩階段評估流程。

- (一) 第一階段，依結構系統傳力路徑、構件破壞危害程度及耐震規範韌性考量精神，將對主體結構系統的構件類別進行剖析，依承載機制用工程理學定義篩選，著重考量主體架構主柱 (Column)、主梁 (Girder) 及二元系統等主體耐震韌性構件，進行第二階段的定義和詳細分析。
- (二) 於第二階段，透過鋼骨構材基本性質，於極限應力 70%以下時，材料遵循虎克定律，保持線彈性階段，以及設計規範韌性要求，耐震鋼材降伏比 YR 應小於 80%進行檢討，本研究定義鋼骨構件的實際應力與容許應力的比值超過 75%時，應將其視為主體架構系統的集力構件。

於研究案例中，透過 TEKLA 軟體建立模型，模擬核算各桿件數量及尺寸，經檢討研究案例鋼骨結構系統係由 1,328 構件組成，進行第一階段評估後，其中有 688 構件為耐震韌性構件 (第一階段篩選率為 51.81%)，如表 6.3 所示；另透過 ETABS 結構軟體，考慮各種外部載重，確認廠房結構系統主要災害控制因子為地震力。另按結構分析成果，將透過第一階段評估後桿件，進行第二階段評估，確認 153 處構件為系統集力構材，應作為重點監控構件 (第二階段佈設率為 22.23%)，如表 6.4 所示。綜合檢討，透過對研究案例上部結構系統(總桿件 1,328 桿件)進行兩階段評估，最終擇定 153 處集力構材，安裝「三軸向應變計」，整體佈設率為 11.52%，大幅降低結構健康監控系統設置成本。

表 6.3 第一階段 TEKLA 評估成果

構件名稱	構件數量	檢討數量	篩選成果
主柱構件(Colmn)	246	246	耐震韌性構件
主梁構件(Girder)	418	418	耐震韌性構件
小梁構件(Joist)	640	-	非主要耐震構件
BRB 斜撐	24	24	減震韌性構件
零星組合件	-	-	非主要耐震構件
總計	1,328	688	
篩選率		51.81%	第一階段篩選率

表 6.4 第二階段 ETABS 評估成果

構件名稱	構件數量	監控構件	佈設率	備註
主柱構(Colmn)	246	44	17.89%	
主梁構件(Girder)	418	85	20.33%	
BRB 斜撐	24	24	100.00%	
總計	688	153	22.23%	第二階段佈設率

此外，建議於研究案例地上 1 樓至屋頂之間，不影響廠房運營架構立面的儲藏室空間，共設置 8 組「pALERT 強震儀」；本研究透過實際案例研析，依據提出的研究規劃流程，建議了最佳化的結構監控系統配置方案，顯著降低結構健康監控系統的設置成本，大幅提升方案實施可行性。

為利驗證本研究所建議的結構健康監控系統的可靠性，利用中央氣象局歷史地震數據，進行「非線性地震力歷時分析」模擬。結果顯示，所選擇重點監控構件的辨識成果達到 81.4%，如表 6.5 所示，驗證於考慮經濟因素的前提下，所選擇的重點監控點位仍然具有相當程度的可靠性，實現了本研究的目的。

表 6.5 非線性地震力歷時分析驗證模擬成果

主柱構件			
主柱監控數	44	柱識別成功	196
總柱構件數	246	柱識別失敗	50
主柱佈設率	17.9%	主柱識別率	79.7%
主梁構件			
主梁監控數	85	梁識別成功	341
主梁構件數	418	梁識別失敗	74
主梁佈設率	20.3%	主梁識別率	81.6%
BRB 斜撐			
BRB 監控數	24	BRB 識別成功	23
總 BRB 構件數	24	BRB 識別失敗	1
BRB 佈設率	100.0%	BRB 識別率	95.8%
總驗證成果			
重點監控點位	153	識別成功	560
總架構構件數	1,328	識別失敗	125
總佈設成果	11.52%	總識別成果	81.4%

綜上所述，本研究提出的結構健康監控系統(SHM)的規劃流程，透過精確選定應力集中桿件和佈置監控儀器，針對實際鋼構廠房研究案例，以最經濟的佈點選擇，提出切實可行且具成本效益的最佳化配置方案。透過歷史數據的驗證，證實該配置方案的可靠性，這也是本研究主要貢獻。本研究結論對未來類似鋼骨構造的結構健康監控系統設計和實施具有重要參考價值。除此之外，透過相同的研析流程和技術選擇，還可應用推廣於其他構造物和不同使用用途的建築物，將結構安全理念融入建築數位轉型的核心價值，推動國內營建產業跨域創新技術升級，從而更全面地實現建築數位轉型的理想願景。

6.2 建議

現行內政部建築研究所推廣的建築產業 3.0 概念包含了物聯網、綠建築和智慧建築等內容，但其中智慧建築評估指標尚未包括結構健康數據的概念。未來，將重點放在跨域整合數位轉型上，推動「建築 4.0 跨域創新整合發展計畫（草案）」¹。草案計畫中強調「建築數據庫」重要性，但實現這一目標需要先行收集建築數據，並將其自動化導入物管系統，從而建立建築大數據庫(Big Data)。只有這樣，才能利用人工智慧(Artificial Intelligence, AI) 演算技術，實現建築轉型的目標。

本研究以地下二層、地上六層的鋼骨構造廠房作為實際案例，進行規劃建議及模擬驗證，然而，此研究案例仍存在一定局限性。針對研究後續建議，本研究提出以下幾點建議，供日後參考：

1. 研究案例針對由鋼骨構造及減震斜撐共同組成的二元結構系統進行了詳細分析。後續研究可參考本文的研究流程和技術選擇，並應用於其他構造物和不同用途的建築物，以提升結構健康監測系統的適用性。
2. 結構健康監控目前仍處於起步階段，業界的設備廠商仍在不斷創新和研發合適的監測儀器，以加強雜訊辨識及濾波處理程序，從而提升測得建築數據，在監控系統中的適用性。
3. 現行結構辨識領域，應用於建築安全診斷評估部分，仍有許多挑戰，例如時域和頻率域信號的分解、經驗法模態解析及建築物自然頻率演算方法等，這些方面仍有進步空間。未來若有更進一步的研究成果，將有助於提高結構健康監控系統模型的準確性。
4. 研究案例的工程進度目前處於地下結構體階段，若能在未來對結構系統進行實際數據收集，將為研究提供更多依據。進一步的研究可檢討實際結構系統的應力傳遞路徑及抵抗外部載荷的機制，並最佳化結構健康監控系統的點位配置。

在這環境劇變時代，各種極端氣候席捲全球。唯有透過感測器和物聯網設備持續收集數據，並標準化建築數據協定，保持信息的一致性和可操作性，才能應對這些挑戰。本研究認為需建立建築大數據資料庫，結合人工智慧演算技術和統一計算架構(Compute Unified Device Architecture, CUDA)，整合結構健康監控系統，從而建立數位孿生(Digital Twin)結構系統模型。透過虛擬模型反映真實物理世界的情況，始能有效掌控自然災害風險，實現防範於未然的願景。

參考文獻



中央氣象署(2018)，中央氣象署地震觀測站。

中華民國鋼結構協會(2022)，鋼結構品質管制作業標準（第四版）。

<https://www.tiscnet.org.tw/011>

內政部(2010)，鋼結構極限設計法規範及解說。<https://reurl.cc/YE9znx>

內政部(2015)，建築物耐風設計規範及解說。<https://reurl.cc/ez6Y7L>

內政部(2023)，建築技術規則建築構造編。<https://reurl.cc/dn7Rj8>

內政部(2024)，建築物耐震設計規範及解說。<https://reurl.cc/Djd5Ld>

內政部(2019)，災害後危險建築物緊急評估辦法。<https://reurl.cc/nNEg8e>

交通部中央氣象局(2024a)，1900年後災害性地震列表。

<https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/page/disaster/5>

交通部中央氣象局(2024b)，臺灣地區地震活動特性探討。

<https://reurl.cc/yLQV9q>

余以諾(2020)，應用層間變位角於結構損傷指標，三聯技術。

吳佳欣(2021)，應用壓電感測器於RC構件在動態載重下之受力推估與損傷

診斷研究，碩士論文，國立臺灣科技大學，臺北市。

林子軒(2011)，整合式無線感測網路之結構健康監測系統於建築與土木結構

之研發，博士論文，國立交通大學，新竹市。

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，碩士論

文，國立臺灣大學，臺北市。

泛亞建設股份有限工程(2022)，「研究案例發電設施廠房」服務建議書。

泛亞建設股份有限工程(2023)，「研究案例發電設施廠房」地質調查報告。

桃園市政府(2020)，都市計畫地理資訊服務網。

<https://urplanning.tycg.gov.tw/upgis/>

許嘉雯(2022)，建築物之結構系統識別與結構健康監測，碩士論文，朝陽科技大學，臺中市。

問世賢(2018)，應用小波分析與功率譜密度法於結構健康監測之研究，國立交通大學，新竹市。

陳文彥建築師事務所(2022)，「研究案例發電設施廠房」基本設計報告書。

圓方結構工程顧問有限公司(2024)，「研究案例發電設施廠房」結構計算書。

楊晏瑜(2023)，建築物微振量測之最佳感測器配置，博士論文，國立臺灣大學，臺北市。

國家地震工程研究中心(2010)，機動式健康診斷系統之可行性研究。

經濟部(2024)，地質資料整合平台。<https://reurl.cc/vamEM1>

劉醇宇(2003)，微振量測於建立建築物基本周期經驗公式及進行耐震評估之應用，博士論文，國立臺灣大學，臺北市。

魏志毓(2006)，挫屈束制支撐局部挫屈與構架耐震效益分析研究，碩士論文，國立臺灣大學，臺北市。

羅俊雄(2014)，結構物強震監測紀錄應用於結構物耐震評估之研究。

Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W., & Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA*, 19. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>

Mileti, D., & Noji, E. (1999). *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. <https://doi.org/10.17226/5782>