

國立臺灣大學工學院土木工程學系

博士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation



應用無線感測儀器與微振試驗

評估橋梁基礎淘刷之研究

Research on Application of Wireless Sensing Instruments and

Ambient Vibration Test to Evaluate Bridge Foundation Scour

陳弘毅

Hung-Yi Chen

指導教授：曾惠斌 博士

Advisor : Hui-Ping Tserng, Ph.D.

中華民國 113 年 8 月

August 2024



誌謝

終於盼到寫誌謝這一天的到來，度過六載無數個晨昏，其中有太多不足為外人道的甘苦。

能夠有今天，首先要感謝的是恩師曾惠斌老師，曾老師充分讓我有自由揮灑的空間，並在關鍵時刻提供最大的幫助。其次，要感謝的是幫我寫入學推薦信的田堯彰老師及徐景文學長，多虧了您們的引薦，才讓我有機會展開後續的研究生涯。另外要感謝老東家臺北市政府工務局新建工程處，除了給了我在職進修的機會，讓我有充裕的時間修課，並提供研究所需的橋梁資訊，成為研究主體的一部分。此外，也要感謝郭斯傑老師在研究初期的指導及陳榮興學長於入學之初的協助，還有卓逸程學長提供無人能比的臺大博士班學習經驗諮詢及林正偉學長的 SAP2000 教學。

還要感謝璧汝學妹在研究初期對我的啟發與協助、人豪學弟提供寶貴的橋梁圖資及相關資訊、靜韋學妹告知學習橋梁建模的機會及學位口試時在現場提供後勤支援的倫旺學弟。沒有您們的協助，我的研究道路肯定會崎嶇難行。

最要感謝的是全力支持及鼓勵我的家人，父親您多年前的一句話，鼓舞並成為我追求博士學位初衷，內人宜靜在多個下班後趕去學校上課的夜晚，辛苦地為我準備晚餐，這些都是我在這條艱辛道路上最大的動力。定亞，想穿博士服不是沒有機會唷，加油吧！

最後，感謝所有曾經幫助我的人，也要將這份榮耀獻給在天國的母親。

陳弘毅 謹誌

2024/8/2 凌晨于臺北

摘要



隨著氣候變遷的加劇，極端氣候對基礎設施的破壞亦愈行嚴重。其中，橋梁基礎的淘刷攸關橋梁安全甚鉅，但頻繁發生的特大暴雨對橋梁基礎造成沖刷，嚴重影響橋梁安全。與傳統的有線或水下測量儀器不同，透過量測橋梁上部結構的動力參數，可以反映橋墩基礎與土壤互制系統的特性，間接推估橋梁基礎淘刷的嚴重程度，同時也可避免儀器於颱風季節遭受損壞。惟測量所得之動力參數可能受到不明來源的外在環境干擾，而以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transformation，FFT)處理所得之加速度數據後，有錯誤識別橋梁自然頻率的風險。因此本研究嘗試以短時傅立葉轉換 (short-time Fourier transform，STFT) 延伸發展出的方法去除測量所得加速度數據中之干擾因素，以更正確且穩定地識別橋梁的自然頻率。

本研究採用無線感測儀器、MMF KB12VD 加速度計進行微振量測試驗，後續則使用 Arduino Uno 介面控制版、Xbee 無線傳輸模組等開源軟體(Open Source)，進行資料蒐集與傳輸，再以 MATLAB 作為資料處理及示波器，將測得之加速度值進行數位濾波並嘗試以「短時傅立葉轉換沿時間軸加總法」(STFTCATS)，取代快速傅立葉轉換(FFT)識別橋梁的自然頻率。本研究選取了臺北市基隆河上的成美長壽橋、南湖大橋及景美溪上的萬壽橋所量測到的微振訊號加以分析，確認「短時傅立葉轉換沿時間軸加總法」(STFTCATS)相對於快速傅立葉轉換(FFT)較能識別橋梁自然頻率，且較為穩定。

本研究另選取了基隆河上的南湖大橋以有限元素法 SAP2000 軟體建立模型，並以土壤彈簧模擬土壤與基礎間的互制行為，藉著逐層解除基礎土壤彈簧的束制，獲得橋梁自然頻率與基礎淘刷深度關係圖。結果顯示，橋梁之自然頻率確隨淘刷之深度而降低。經由適當地設定邊界條件，模擬與現場實測之自然頻率差異約為 +0.19%，模擬與現場實測之淘刷深度差異約為 +5.50%。顯示所獲得之自然頻率-淘刷深度關係圖應具實用性。

本研究所提供之基礎淘刷評估適用於災害發生之前後，用以與基礎不受淘刷時之自然頻率做一比較以作為預警或災後復舊之參考。另宜配合基樁耐洪能力分析和極限承載能力之評估，以訂定適當之頻率警戒值。



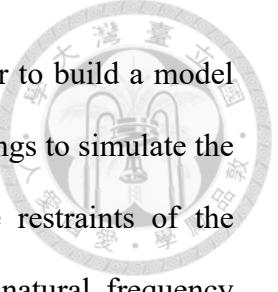
關鍵字：無線感測儀器、微振試驗、短時傅立葉轉換、基礎淘刷、有限元素分析

Abstract



As climate change becomes more severe, so infrastructure is being damaged more by extreme weather. In particular, extreme rainstorms are occurring more often and are scouring the foundations of bridges, seriously affecting their safety. Unlike traditional wired or underwater measuring instruments, measuring the dynamic parameters of the bridge superstructure can reflect the characteristics of the soil-foundation interaction and indirectly estimate the scour of bridge foundation and so avoid the device being destroyed during typhoon season. However, the measured dynamic parameters may be affected by external environmental interference from unknown sources, and there is a risk of misidentifying the natural frequency of the bridge after processing the acceleration data obtained with Fast Fourier Transformation (FFT). Therefore, this study attempts to use a method developed by the short-time Fourier transform (STFT) to remove interference factors in the measured acceleration data to more accurately and stably identify the natural frequency of the bridge.

In the study, a wireless sensing instrument was used to measure bridge ambient vibration, it uses an accelerometer and an open-source Arduino Uno microcontroller board and XBee wireless transmission module for data collection and transmission, with MATLAB used for the subsequent data processing, including digital filtering and identifying the natural frequency of the bridge using the short-time Fourier transform cumulate along time sequence (STFTCATS) method to replace the Fast Fourier Transform (FFT). This study selected the ambient vibration tests by the Chengmei Changshou Bridge on the Keelung River and the Wanshou Bridge on the Jingmei River in Taipei City for analysis, and confirmed that STFTCATS is better than FFT in identifying the natural frequency of bridges and is more stable.



This study also selected the Nanhу Bridge on the Keelung River to build a model using the finite element method SAP2000 software, and used soil springs to simulate the interaction between the soil and the foundation. By releasing the restraints of the foundation soil springs layer by layer, the simulated scour depth–natural frequency relationship was obtained. The results show that the natural frequency of the bridge does decrease with the scour depth. By appropriately setting the boundary conditions, the difference in natural frequency between simulation and field measurement is approximately +0.19%, and the difference in scour depth between simulation and field measurement is approximately +5.50%. Displaying the simulated scour depth–natural frequency relationship should be practical.

The scour assessment provided by this study is applicable before and after a disaster, and can be compared with the natural frequency when the foundation is not scoured as a reference for early warning or post-disaster recovery. In addition, it should be combined with flood-resisting capacity analysis and the assessment of ultimate bearing capacity of foundation piles to determine appropriate frequency warning standard.

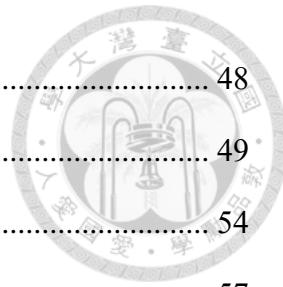
Key words: wireless sensing, ambient vibration test, short-time Fourier transform, bridge scouring, finite element analysis

目次



感謝	i
摘要	ii
Abstract	iv
目次	vi
圖次	x
表次	xiii
第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 研究的範圍及限制	4
1.4 論文架構	5
1.5 研究架構	6
第 2 章 文獻回顧	8
2.1 淘刷	8
2.1.1 淘刷種類	8
2.1.2 監測技術	10
2.2 橋梁振動量測方法	15
2.2.1 結構的自然頻率	15
2.2.2 橋梁結構的動力試驗	16
2.2.3 淘刷深度和橋梁自然頻率的關係	18
2.3 振動訊號分析方法	19
2.3.1 時域分析	19
2.3.2 頻譜分析	19

2.3.3 時頻分析	20
2.3.4 數位濾波器	22
2.4 無線感測網路	23
2.5 自製無線感測儀器之便利性及經濟性優勢	25
2.5.1 有線及無線網路之比較	26
2.5.2 現場人員測量所需費用	26
2.6 與先前研究之比較	27
第3章 研究方法	28
3.1 整體研究架構與概念	28
3.2 訊號處理方法	29
3.2.1 線性穩態及依時變異訊號之識別差異	29
3.2.2 微振量測依時變異訊號之處理概念	32
3.3 識別橋梁自然頻率的步驟	34
第4章 案例研究與驗證	36
4.1 本研究使用之無線感測儀器	36
4.1.1 感測器	37
4.1.2 介面控制版	38
4.1.3 無線傳輸模組	41
4.1.4 電源供應	42
4.2 儀器訊號傳輸	43
4.2.1 感測節點	43
4.2.2 網路協調器	44
4.2.3 電腦端處理	45
4.3 儀器性能介紹	46
4.4 測量方向及點位	48



4.5 STFTCATS 法之現地量測驗證	48
4.5.1 與先前研究萬壽橋比較	49
4.5.2 成美長壽橋現地量測	54
4.5.3 南湖大橋現地量測	57
4.6 小結	60
第 5 章 數值模擬驗證	61
5.1 有限元素軟體	61
5.2 建模步驟	62
5.2.1 橋梁之竣工圖及相關資料之取得	62
5.2.2 建模單元之界定	63
5.2.3 橋梁各部尺寸、材料及淘刷基準高程設定	64
5.2.4 橋墩柱之建模	66
5.2.5 梁之建模	68
5.2.6 橋面板之建模	70
5.2.7 椽帽之建模	73
5.2.8 基樁之建模	74
5.2.9 土壤結構互制之建模	75
5.2.10 模型模擬結果	85
5.2.11 獲取橋梁自然頻率與淘刷深度之關係圖	88
5.3 模擬結果與現地量測資料之分析	89
5.3.1 河床現地高程之取得	90
5.3.2 現場頻率及淘刷深度實測值與模擬值之比較	92
5.4 小結	93
第 6 章 結論與建議	95
6.1 結論	95

6.2 建議	96
參考文獻	98
附錄	106



圖次



圖 1-1 歷年橋梁基礎淘刷災害	1
圖 1-2 本研究流程圖	7
圖 2-1 橋墩淘刷機制示意圖	9
圖 2-2 橋梁沖刷監控方法-以參考目標監控	11
圖 2-3 橋梁沖刷監控方法-土水介面	12
圖 2-4 橋梁沖刷監控方法-反向監控	13
圖 2-5 濾波器的運算原理	23
圖 2-6 感測節點的組成	25
圖 3-1 整體研究概念架構圖	29
圖 3-2 A 波：頻率為 20Hz 及 60Hz 之 sine 波合成波	30
圖 3-3 B 波：分為 4 時段分別為 0、20Hz、60Hz、0 之 sine 波	30
圖 3-4 將 A 波以 FFT 轉換後之頻譜圖	31
圖 3-5 將 B 波以 FFT 轉換後之頻譜圖	31
圖 3-6 將 B 波以 STFT 轉換後之頻譜圖	32
圖 3-7 時序訊號資料以 FFT 處理後之頻譜圖	33
圖 3-8 時序訊號資料以 STFT 處理後之訊號強度-時間-頻率三者之關係圖	33
圖 3-9 時序訊號資料以 STFT 處理後之等值線圖(contour)	34
圖 3-10 將訊號強度-時間-頻率之關係圖以 STFTCATS 法處理後識別之頻率值 ..	34
圖 3-11 無法識別頻率峰值之範例	35
圖 4-1 無線感測儀器於橋梁上實測之配置	37
圖 4-2 MMF KB12VD 外觀	38
圖 4-3 Arduino Uno 腳位圖	39

圖 4-4 類比數位轉換器 Ads-1115	40
圖 4-5 M28 sensor supply module	42
圖 4-6 感測節點之電源及訊號流向	43
圖 4-7 無線感測儀器訊號傳輸流程圖	43
圖 4-8 感測節點(End Device)的訊號傳輸	44
圖 4-9 網路協調器(Coordinator)的訊號傳輸	44
圖 4-10 電腦端的訊號處理流程	46
圖 4-11 萬壽橋測量儀器置放點位	49
圖 4-12 萬壽橋微振試驗以 STFTCATS(左)及 FFT(右)法識別自然頻率之比較 ...	53
圖 4-13 成美長壽橋橋墩位置圖	54
圖 4-14 成美長壽橋河道斷面圖	55
圖 4-15 成美長壽橋測量點位平面圖及現場儀器放置點位	55
圖 4-16 成美長壽橋測量點位立面圖	56
圖 4-17 成美長壽橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值比較	56
圖 4-18 南湖大橋現況照片(2024.03)	57
圖 4-19 南湖大橋量測儀器放置點位	58
圖 4-20 南湖大橋量測儀器現場配置圖	58
圖 4-21 南湖大橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值比較	59
圖 5-1 南湖大橋各階段竣工圖	62
圖 5-2 南湖大橋橋墩、主深槽區及建模單元圖	64
圖 5-3 淘刷深度為 0 之高程設定	66
圖 5-4 橋墩鋼板包覆耐震補強	67
圖 5-5 鋼板包覆耐震補強橋墩柱之複合斷面設定	68
圖 5-6 南湖大橋 P5、P6 橋墩帽梁竣工圖	68
圖 5-7 南湖大橋上部結構及大梁斷面圖	69

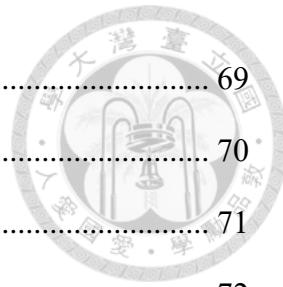


圖 5-8 南湖大橋大梁於 SAP2000 尺寸設定	69
圖 5-9 南湖大橋隔梁於 SAP2000 尺寸設定	70
圖 5-10 橋面板等值斜撐推導圖	71
圖 5-11 南湖大橋橋面板以等值斜撐模擬圖	72
圖 5-12 南湖大橋橋墩現況(2024.03)	73
圖 5-13 南湖大橋樁帽尺寸圖	74
圖 5-14 原橋梁(左)及拓寬部分(右)基樁配置平面圖	74
圖 5-15 基礎基樁之分析模式	76
圖 5-16 基礎之有效寬度 Be	77
圖 5-17 南湖大橋 P5、P6 橋墩地質鑽探圖	78
圖 5-18 P5(左)、P6(右)橋墩基礎土壤彈簧設定圖	84
圖 5-19 南湖大橋建模模型	85
圖 5-20 SAP2000 模擬南湖大橋之第 1 至第 6 模態圖	87
圖 5-21 南湖大橋模擬之自然頻率-淘刷深度關係圖	89
圖 5-22 南湖大橋河床高程量測測線示意圖	90
圖 5-23 中央氣象署 2021、2022 逐日雨量資料	91
圖 5-24 經濟部水利署 2021、2022 每日平均水位	92
圖 5-25 實測資料值標繪於模擬之自然頻率-淘刷深度關係圖	92

表次



表 2-1 淘刷監測技術比較表	14
表 2-2 河床斷面高程測量方法彙整表	15
表 2-3 有線及無線網路之比較	26
表 4-1 MMF KB12VD 規格表	38
表 4-2 Arduino UNO 硬體規格	40
表 4-3 類比數位轉換器 Ads-1115 規格	41
表 4-4 XBee 規格比較表	42
表 4-5 本研究使用之無線感測儀器性能彙整表	46
表 4-6 萬壽橋量測資料以 STFTCATS 及 FFT 法識別自然頻率之比較	53
表 4-7 成美長壽橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值	56
表 4-8 南湖大橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值	59
表 5-1 南湖大橋基本資料表	63
表 5-2 南湖大橋各階段使用材料強度	65
表 5-3 南湖大橋各主要構件尺寸	65
表 5-4 南湖大橋橋面板等值斜撐計算表	72
表 5-5 南湖大橋 P5 橋墩地質鑽探資料	79
表 5-6 南湖大橋 P5、P6 等 4 橋墩樁帽高程	79
表 5-7 南湖大橋 P5 橋墩基樁前方地盤之水平地盤反力係數 kH	81
表 5-8 南湖大橋 P6 橋墩基樁前方地盤之水平地盤反力係數 kH	82
表 5-9 P5 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (長邊).....	82
表 5-10 P5 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (短邊)....	82
表 5-11 P6 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (長邊)..	83

表 5-12 P6 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (短邊)..	83
表 5-13 P5 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (長邊).....	83
表 5-14 P5 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (短邊).....	83
表 5-15 P6 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (長邊).....	83
表 5-16 P6 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 kHF (短邊).....	84
表 5-17 南湖大橋各模態質量參與比率.....	86
表 5-18 Y 方向(水流方向)淘刷深度與模態階數及質量參與比率之關係	89
表 5-19 南湖大橋河床高程.....	91
表 5-20 實測頻率值及淘刷深度值與模擬值之比較	93



第1章 緒論

1.1 研究背景與動機

根據美國相關研究顯示，淘刷(scour)為造成橋梁損壞的主要原因[1]，在過去數十年間，超過 600 餘座的橋梁因為淘刷而損壞[2]。根據 Wardhana 和 Hadipriono 兩位學者的研究，在西元 1989 和 2000 年間損壞的 500 多座橋梁中，有半數以上係導因於洪水等水利方面的因素所引發之淘刷所致[3]。另外，根據 Lagasse 等人研究亦指出，約有 60%橋梁損壞是因為淘刷所造成[4]。而近年來由於極端氣候造成劇烈降雨發生機率大增，加以臺灣地區特殊的地形造成河流多為坡陡流急的狀況，導致多起重大橋梁災害發生的情形，造成人民生命財產的損失，而其多與跨河橋梁座落於河床的基礎遭受淘刷有關，例如，2000 年碧利斯颱風，造成高屏大橋 22 位用路人墜橋受傷、2008 年辛樂克颱風，造成后豐大橋 2 人死亡 4 人失蹤、2009 年莫拉克颱風，造成雙園大橋 16 座橋墩被沖垮，橋面斷落 460 公尺，造成車輛墜河，民眾傷亡失蹤，如圖 1-1 所示。由此可知，淘刷對於橋梁安全有著重大的危害，控制並了解橋梁淘刷的狀況亦愈形重要，若能在災害發生之前，事先了解橋梁基礎可能之淘刷狀況，進而加以評估其承載能力是否不足，並據以對橋梁基礎加以補強修復，則可防範災害於未然。



圖 1-1 歷年橋梁基礎淘刷災害

(資料來源：屏東小鎮資訊、三立新聞、蘋果日報)

評估橋梁淘刷的方法甚多，例如經驗公式法(empirical formula) [5]是以橋梁建



造方法、淘刷模式及橋梁所在之現地狀況等因素加以評估，其他尚有數值模擬[6]、實驗室模型[7]等評估方法。近期尚有考慮能量損失之數值模擬方法[8]、運用人工智慧[9]及混合的機器學習[10]等方法。然而，部分方法由於尺度效應(scale effect)、河床質地等因素及對於流況過度簡化造成結果不盡理想[11]。另外，在淘刷監測部分，由於橋梁基礎多位於地表之下甚難直接觀察，即使橋梁基礎因淘刷而裸露的情形，在低水位時可以肉眼觀察，但在洪水來襲等高水位的情況下，實難以察覺其裸露狀態。若直接將儀器置於橋墩基礎，則因洪澇時期土石伴隨洪水沖刷，恐將導致設備損毀或被沖走，維護極其不易。監測方法可概略區分為以參考目標監測，例如磁性滑環(magnetic sliding collar)、智慧石(smart rock)等，以及監測土壤-水介面(soil-water interface)的聲納、布拉格光纖光柵(fiber Bragg grating, FBG)感測器等[11]。近年來，利用偵測橋梁振動以評估橋梁基礎淘刷程度的方法亦逐漸發展起來。上述之偵測方法及儀器，需要昂貴的水下建置費用，亦有其特殊的使用限制，因此近年來在橋梁上部結構監測橋梁振動之非波壞性技術亦愈形普及[12]，其應用方式係根據橋梁在淘刷前後振動特徵值(characteristics)的變化，亦即從振動反應譜(response spectrum)中所識別出的振動特徵值，用以評估橋梁基礎的淘刷程度。而獲得結構動力行為及振動特徵值的方法包含微振試驗(ambient vibration test)、自由振動試驗(free vibration test)、強迫振動試驗(forced vibration test)、真實地震反應量測(real earthquake response measurement)及車載振動試驗(vehicle test)等。其中微振訊號(ambient vibration signal)是由地表附近所有天然或人為所產生的振動疊加而成，其不但隨處可得而且涵蓋不同範圍之頻率。微振訊號由地表經由橋梁基礎、橋墩傳至橋梁的上部結構，因此土壤和基樁互制關係可以顯現出來，並用以判斷橋梁基礎的裸露程度[13]。微振試驗之優點在於其不須對結構施加任何外力，而是利用橋梁附近振源產生的微振所造成橋梁之位移或加速度，加以分析而獲得橋梁的振動頻率。因其不須外加振源亦無不會影響橋梁之使用，故特別適用於使用中的橋梁。在過去多有使用微振量測之研究，例如 R. Brincker[14]等人使用頻域分解法(Frequency

Domain Decomposition, FDD)識別模態參數(model parameter), Mustafa Gul [15]等人則提出了在沒有輸入資料下利用微振資料進行系統識別及結構狀況評估的方法。此外，多項研究亦指出，利用微振試驗所獲得的資訊可用以評估橋梁基礎的淘刷程度，例如柯永彥[16]等人在基礎裸露的橋梁上進行了微振試驗，並以橋梁振動單元模型研討橋梁上部結構振動及基礎裸露的關係。

過去橋梁監測係以有線系統(wired system)為主，而商用設備通常所費不貲，對於大型橋梁尤甚。隨著科技的進步，無線感測網路(wireless sensor network, WSN)、物聯網(Internet of Things, IoT)等已經快速發展起來。近年來，許多研究已將無線感測網路應用於微振試驗上，並提出橋梁監測的方法，例如 Kim[17]等人在美國加州金門大橋上安裝 64 個感測節點進行微振試驗，用以評估橋梁整體安全性。M.J. Chae [18]等人則在韓國永宗大橋(Yongjong Grand Bridge, South Korea)上將五種型式的 45 個感應器更換為無線感測系統，以有效節省感測器配置及日後維護之費用。

綜上所述，如何發展出一套維護相對簡易、價格相對低廉之儀器，配合適當的監測方法，以評估橋梁基礎的淘刷深度，並作為後續橋梁整體安全評估之參考，以期防範災害於未然，實為一項值得深入研究的議題。

1.2 研究目的

本研究採用自製之無線感測儀器進行微振量測試驗，後續進行量測資料之蒐集與傳輸，並嘗試以時頻分析(time frequency analysis)取代頻譜分析(spectrum analysis)識別橋梁的自然頻率。再以臺北市境內數座橋梁之實測數據及南湖大橋之數值模型作為驗證。其欲達到之目的說明如下：

1. 鑑於測量所得之振動參數可能受到不明來源的外在環境干擾，而以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transformation, FFT)處理所得之加速度數據後，有錯誤識別橋梁自然頻率的風險。因此本研究嘗試以短時傅立葉轉換(short-time Fourier transform, STFT)延伸發展出的方法去除測量所得加



速度數據中之干擾因素，以更正確且穩定地識別橋梁的自然頻率。並建立一套減少外界雜訊干擾之識別及分析橋梁自然頻率的程序。

2. 於不同結構形式及交通量下，皆可藉自製無線感測儀器進行微振量測識別橋梁的自然頻率，並進而評估橋梁淘刷深度，以確認其具有便利性及經濟性上的優勢。

1.3 研究的範圍及限制

囿於研究時間及人力等限制，及臺北市橋梁位處河川流域特性等因素，相關研究範圍及限制說明如下：

1. 考量國內老舊橋梁多以混凝土橋為主，該類橋梁跨距較短、落墩較多，受淘刷影響導致危害之風險較大，故本研究以混凝土橋為研究之對象，研究區域以臺北市境內之橋梁為主。
2. 本研究所考量之背景係為常態狀態下橋梁基礎淘刷導致自然頻率變化之情形，特殊事件如地震等突發外力造成橋梁基礎勁度的損失所導致的自然頻率變化，非本研究的範圍。
3. 以有限元素法模擬橋梁結構之竣工圖資訊，因年代久遠或有散佚、或難以辨識，另土壤彈簧常數等參數主要依據國內相關規範之估算而來，故模擬所得之結果非精確值。而有限元素法各參數設定方式各異，故模擬所獲得自然頻率-淘刷深度關係曲線並非唯一。
4. 本研究實測之橋梁頻率值與相對之淘刷深度量測日期並非同一日，雖經檢視相關水位及淘刷深度在該段期間變化不大，但仍然可能存在誤差。
5. 本研究選擇數值模擬及現地實測的橋梁，因長年基礎淘刷深度變化不大，致可供校正的數據點較少，且為鋼鈑包覆補強後之橋梁，屬非典型的跨河橋梁，應用上有其限制。
6. 本研究藉由量測橋梁自然頻率，進而評估基礎淘刷深度，提供作為災前或災後

橋梁整體安全評估之參考參數，尚無法據以立即判斷橋梁之危險程度。



1.4 論文架構

本研究之論文架構依各章內容概述如下：

第1章 緒論

說明研究背景與動機、研究目的、研究的範圍及限制、研究架構與流程等。

第2章 文獻回顧

本章共分為四大部分，第一部分說明淘刷的定義，並介紹淘刷的種類及監測技術；第二部分介紹橋梁振動量測方法，包含結構自然頻率的定義、橋梁結構動力試驗的種類及回顧淘刷深度和橋梁自然頻率關係之相關文獻；第三部分說明振動訊號的分析方法；第四部分則說明無線感測網路之組成及功能等；第五部分說明自製無線感測儀器之便利性及經濟性優勢；最後再說明與先前研究之比較。

第3章 研究方法

本章包含三大部分，說明本研究所採用的研究方法。依序說明整體研究架構與概念、訊號處理方法及識別橋梁自然頻率的步驟。

第4章 案例研究與驗證

本章包含四大部分，第一部分說明本研究使用之無線感測儀器及其組成等；第二部分說明儀器訊號如何傳輸及訊號傳輸到電腦端後識別自然頻率的方法；第三部分則說明儀器性能，包含傳輸距離、電池壽命及儀器可靠度驗證等。本章主要係針對本研究所提出之自然頻率識別方法以現地實測方式加以驗證，包含對先前研究橋梁之比較及兩座橋梁之現地量測。

第5章 數值模擬驗證

本章介紹本研究所採用之有限元素軟體，並逐步說明橋梁建模之步驟，最後將模擬結果與現地量測資料分析比較。



第6章 結論與建議

本章彙整本研究之結論與成果，並對研究本身後續可再精進部分作一建議。

1.5 研究架構

本研究首先闡述研究的背景與動機，概略敘述橋梁淘刷之重要性，並說明當前評估橋梁淘刷的方法，及透過無線感測儀器採用非直接性測量微振量測試驗之原因，隨後擬定研究目的，並說明研究的範圍及限制。

此外，對於研究所涉及之原理及儀器透過文獻加以回顧，後續研究主要則分為兩大途徑，其一係為發展現地測量自然頻率測量所使用之訊號處理方法，包含濾波器、短時傅立葉轉換沿時間軸加總法等，並確認其較傳統使用之快速傅立葉轉換法穩定且易於辨識自然頻率，另配合現地淘刷深度之取得，獲得一組實測之自然頻率及對應之淘刷深度值。另一方面，建立選取橋梁之數值模擬加以驗證，透過分層解除基礎土壤束制模擬淘刷情形，獲得各淘刷深度對應之自然頻率值，並獲致兩者之關係圖，再比較其與現地量測值之結果，視情況對數值模擬之邊界條件做必要之修正，最後再對結果予以討論並做出結論與建議，如圖 1-2 所示。另整體細部研究架構與概念，則詳述於第 3 章，如圖 3-1 所示。

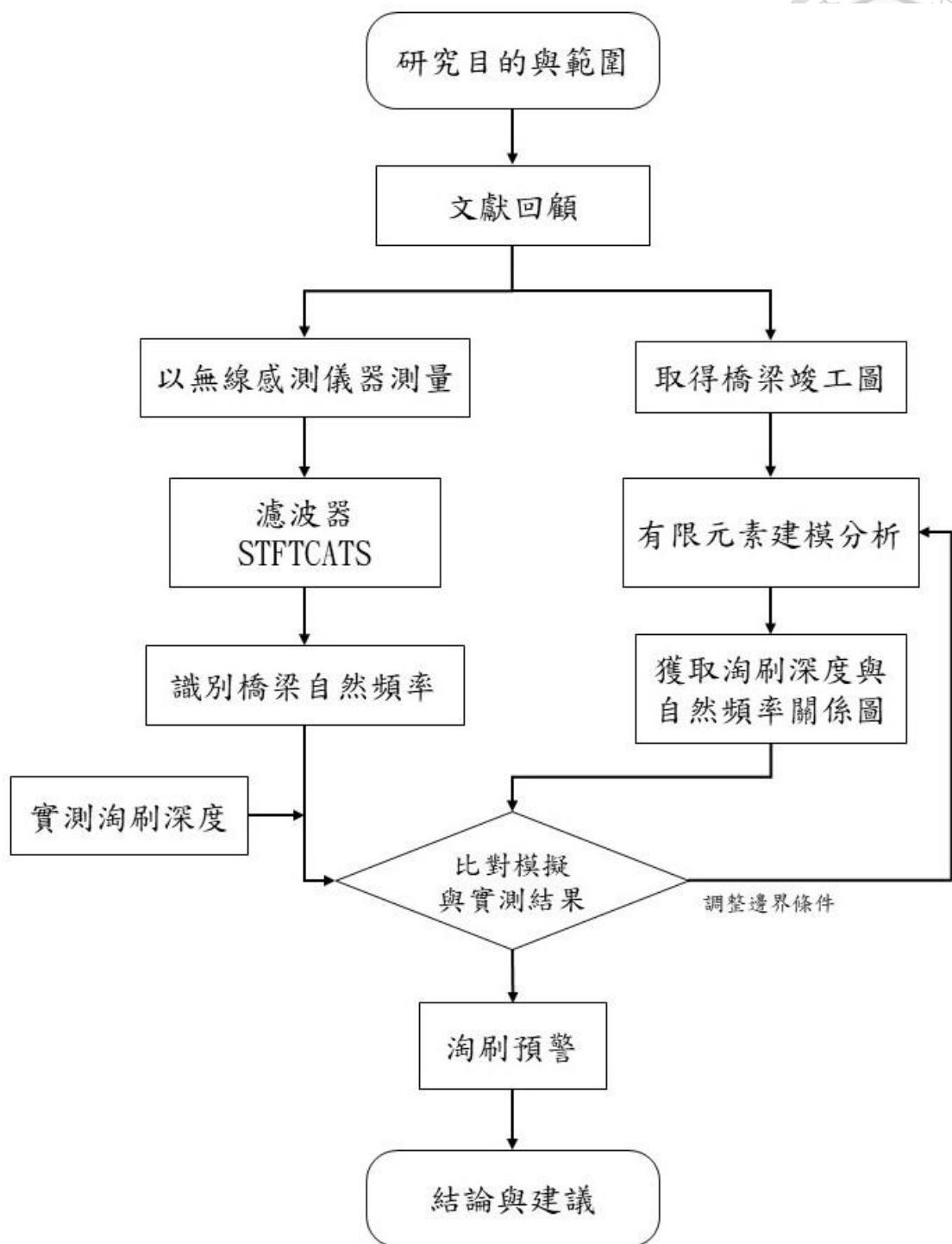


圖 1-2 本研究流程圖



第2章 文獻回顧

2.1 淘刷

淘刷(scour)是流水侵蝕作用的結果，從河床和河岸以及橋墩和橋台周圍挖掘並帶走土石等材料[19]。而橋墩基礎淘刷的主要成因為當水流通過可移動的河床表面時，與河床面顆粒之間產生的作用力，導致河床面上的泥沙產生臨界運動並開始脫離。在自然河流的作用下，可能會達到一暫時平衡的狀態，但隨著流量的增減，河床將因此而沖刷或淤積。當水流遇到橋墩等結構物時，由於通水面積減少、流速增大，橋墩周圍的水流場也隨之改變，導致橋墩附近的水流紊亂度增加，原本平衡狀態下的河床開始發生改變，形成一個新的河床型態，而這種新的型態與原始河床之差異即為橋墩淘刷[20]。

2.1.1 淘刷種類

綜合 Raudkivi(1986) [21]，Melville & Coleman(2000) [1]及林呈(2012) [22]之研究，針對橋台附近的沖刷情況做探討，橋墩的沖刷現象大致可以分為三個部分，如圖 2-1 所示：

1. 一般淘刷(General scour)

不論有無橋墩或水中結構物之設置，水流對河床造成河段之高程下降的情形，可分為短期或長期的沖刷。短期之一般沖刷為在單一、或連續數個緊接的洪水沖刷下，所形成的河床下降，此一類型之沖刷成因包括：河川砂石的開採、水流之聚合與河道淨寬的不足、瓣狀河道中之深槽移動、及底床型式之遷移。長期之一般沖刷為具相當長之時間尺度，其成因亦與河川取水工或堰壩之設立造成輸砂來源的減少及下游側的放水沖刷、長期高流速的自然侵蝕、河川砂石開採、或橋基保護工之不當設置、截彎取直



導致河床坡度的增加、河川地上進行墾植或動物之放牧豢養、郊野都市化後之逕流增加…等因素息息相關。

2. 束縮淘刷(contraction scour)

一般係指橋梁的引道與橋台延伸進入河川之行水區域內以致佔據部分之河寬，或由於橋基、橋墩之設置形成阻水效應，造成水流之通水斷面積減小，且通過橋址處之流速增加，進而對河床所衍生之沖刷現象。另由於已施作保護工之區域是為抵抗洪流沖刷之強勢面，而未合攏(或缺口)段則為抵禦沖刷之弱勢面，且為宣洩大量洪流的必經通道，此一情形近似橋梁之引道大幅延伸佔據河寬般，因而亦具有束縮沖刷的效應存在。

3. 局部淘刷(Local scour)

由於橋墩或水中結構物的存在對水流產生局部阻礙或干擾的現象，並進而造成局部河床之沖刷侵蝕與高程下降的情形。若就橋基或橋台的局部沖刷來說，則專指橋基或橋台對水流的干涉作用，而在墩台周邊形成強烈下降流、馬蹄型渦流、迴流區、尾跡渦流、及局部沖刷坑的現象。

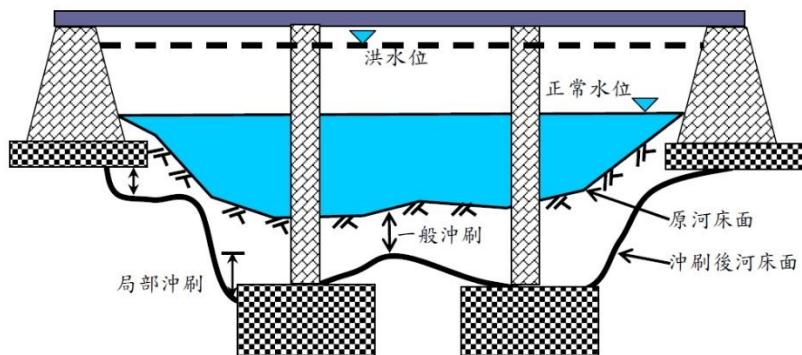


圖 2-1 橋墩淘刷機制示意圖

(資料來源：[1, 23])



2.1.2 監測技術

潛水員目視檢查為傳統上使用基本儀器測量沖刷深度的唯一方法，惟此方法有三個主要缺點，即洪水期間無法進行檢查、最大淘刷深度往往會因為淘刷孔在洪水發生後被沉積物填滿而可能無法準確記錄，以及所取得的為離散的數據，致淘刷趨勢無法推導出平衡狀態時的淘刷深度等。近來相關研究提出了更有效的替代方案來監測淘刷狀況，可分為以下三類，如圖 2-2 所示。綜整其優缺點，如表 2-1 所示：

1. 透過參考目標進行監測

監測淘刷深度的直接方法是直接測量沉泥的變化。然而，顆粒物很難被定位和監測，尤其是在水下。因此，參考目標埋在河床周圍，記錄最大沖刷深度，並隨後根據各種原理進行檢測。

i. 磁性滑環(Magnetic sliding collar, MSC)

當淘刷孔發生時，滑環會向下滑動，並可利用附在滑環上磁鐵產生的磁場來追蹤滑環的位置，河床深度就可從磁性感測器所提供之資訊讀取。

ii. 浮出設備(Float-out devices)

此類設備當作無線電發射器參考目標而被埋在河床預定深度裡，當淘刷深度達到該深度時，該設備就會浮到河面，進而得知河床的深度。

iii. 智慧石(Smart rocks)

智慧石是嵌入感測器的天然岩石或人造混凝土石頭，可以發送本身的深度、位置和運動等數據。此類設備比磁性滑環更智慧化、更自動化、監控範圍也更廣，可在橋墩附近同時佈設許多智慧石。

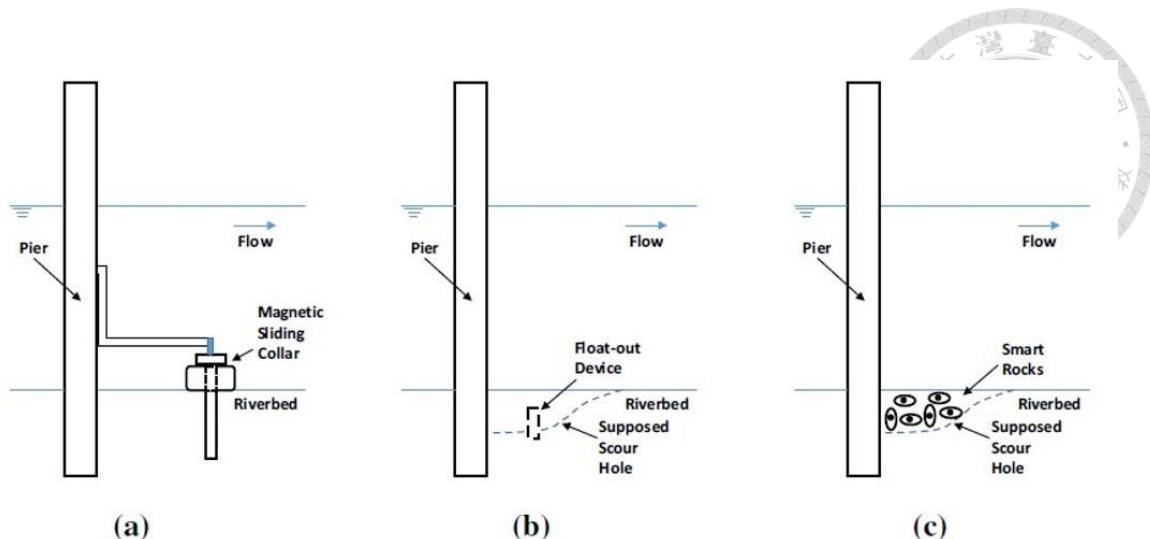


圖 2-2 橋梁沖刷監控方法-以參考目標監控

(資料來源：[11])

2. 以土水介面進行監測

透過監測水和沈積物之間的介面可以檢測特定位置的沖刷深度，如圖 2-3 所示。

i. 聲納 (sonar)

聲納儀器系統之原理係檢測兩種介質之差異，該系統由兩個感測器組成，即發射器和接收器。從發射器發出的聲波脈衝反射後被接收器接收。訊號從發射器傳播到接收器所需的時間和在水中的傳播速度可用於計算從發射器到河床的距離。

ii. 布拉格光纖光柵感測器(Fiber Bragg grating, FBG)

該設備暴露在水中，受到水流的水壓力所產生之彎矩而變形。這些感測器被固定在嵌入河床的桿子上，可以從數據中得出沖刷深度，從而獲得河床高程。

iii. 時域反射量測法(time domain reflectometry, TDR)

此法通常作為土壤特性的測量[24]，同樣是藉由通過不同介質有不同

傳播速度來檢測土壤-水界面的概念。在實驗室和現場使用 TDR 探頭測量淘刷的可行性的研究已經在進行中[25]。

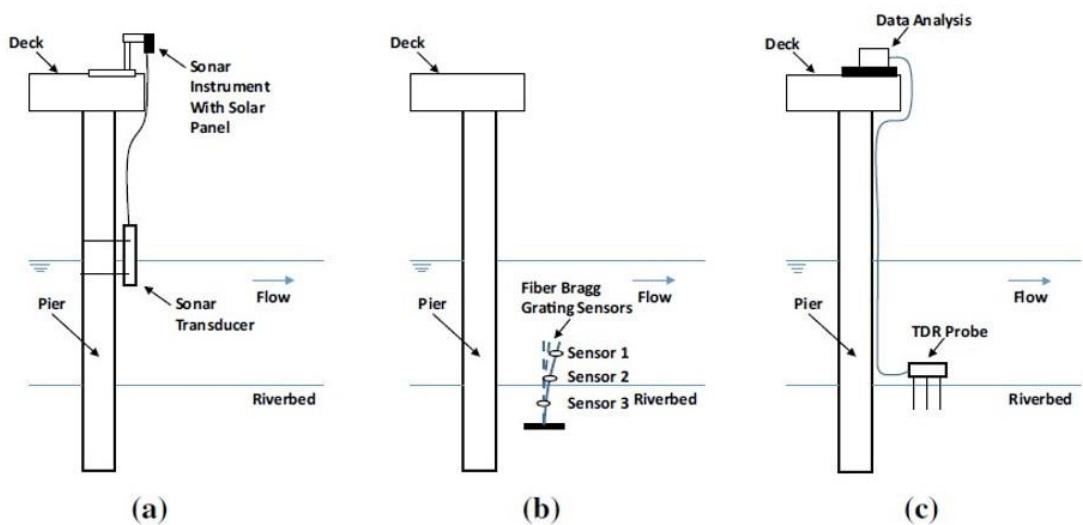


圖 2-3 橋梁沖刷監控方法-土水介面

(資料來源：[11])

3. 反向分析監測法(inversion analyses)

反向分析係根據淘刷的結果(即結構動力響應和變形等行為的變化)來監測淘刷。利用橋墩在淘刷前後表現行為不同的概念，引入傾斜感測器等儀器來測量橋梁淘刷的運動。另一種反向分析方法利用識別淘刷過程中上部結構模態參數的變化，從模態分析得出的土壤-結構系統的動態行為以應用於監測橋梁淘刷，上述概念如圖 2-4 所示。對於使用中橋梁的模態參數與局部淘刷深度之間的關係，已進行了相關研究分析[16, 26, 27]。

Reverse Monitoring

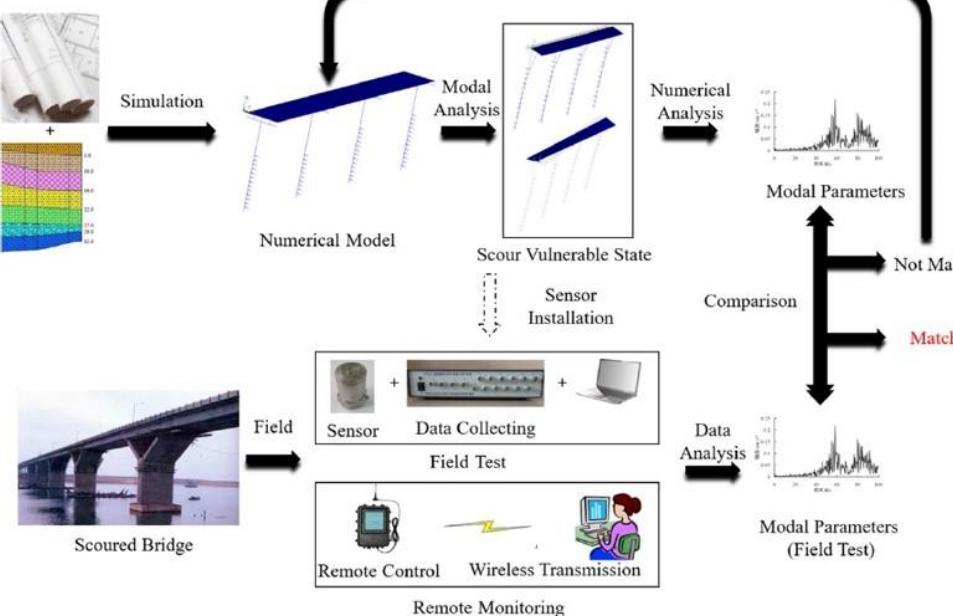


圖 2-4 橋梁沖刷監控方法-反向監控

(資料來源：[11])

表 2-1 淘刷監測技術比較表

類別	儀器	優點	缺點	經濟性
透過參考目標進行監測	磁性滑環 (Magnetic sliding collar)	安裝及操作簡單；可用於洪水來襲	無法連續監控；只能應用於限定區域	佳
	浮出設備 (Float-out device)	安裝及操作簡單；內建	只有沖刷超過極限值時會提供訊息；只能應用於限定區域	極佳
	智慧石 (Smart rock)	安裝及操作簡單；成本效率高；監控範圍較大	監控回淤過程有所限制	極佳
以土水介面進行監測	聲納(sonar)	安裝簡單；可監控回淤過程；資料收集精確	在流水中易受損；分析及判讀易受影響而不同	佳
	布拉格光纖光柵感測器 (Fiber Bragg grating sensor)	可連續監控	耗時；人員須經特殊訓練；易損壞	差
	時域反射量測法 (TDR)	安裝簡單；可監控回淤過程；即時監控	每個感測器的監控範圍有限；需挖掘	佳
反向分析監測法	傾斜感測器 (Tilt sensor)	易於分析及判讀	易受交通量、氣溫、風力及水利因素影響	極佳
	模型參數 (Modal parameter)	環保；易於操作	人員須經特殊訓練；易受交通量、氣溫、風力及水利因素影響	極佳

(資料來源：[11]及本研究整理)

另依據臺北市政府工務局新建工程處進行之例行跨河橋防汛期檢測及檢查通

報，實務上河床斷面高程測量採用的方法有經緯儀定位與直接水中量測、透地雷達 (GPR)、聲納探測法及三維雷射掃描等，整理比較如表 2-2 所示。

表 2-2 河床斷面高程測量方法彙整表

測量方法	原理說明
經緯儀定位與直接水中量測	高灘地以經緯儀定位測高程，深槽區則以乘船放置鉛錘測水深
透地雷達 (GPR)	藉發射高頻電磁波反射介質差異，由螢幕顯現之影像判釋河道沖刷與深度
聲納探測法	與透地雷達原理相似，為發射聲納波以接收反射訊號判釋河道斷面與沖刷，並且需扣除河床表面沈泥層厚度，以求得具穩定承載作用之堅實河床高程
三維雷射掃描法	使用可見光影像達成重建的方法

2.2 橋梁振動量測方法

2.2.1 結構的自然頻率

結構於單位時間內的往復次數稱為該結構的自然頻率，而結構物的自然頻率可由下列方程式進行推導[28]：

一般結構方程式可由表示

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = F(t) \quad (2-1)$$

其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 為結構質量矩陣、結構阻尼矩陣、勁度矩陣， $[u]$ 、 $[\dot{u}]$ 、 $[\ddot{u}]$ 分別為節點位移向量、節點速度向量與節點加速度向量，而 $F(t)$ 為外力， $[M][\ddot{u}]$ 為慣性力， $[C][\dot{u}]$ 為阻尼力， $[K][u]$ 為回復力。由於採用微振量測試驗，因此可以忽略外力與阻尼力，故結構體視為自由振動且無阻尼，(2-1)可簡化為(2-2)：

$$[M][\ddot{u}] + [K][u] = 0$$

(2-2)

對於線性系統而言，自由振動是一種簡諧形式，如(2-3)。

$$[u] = [\Phi_i] \cos \omega_i t$$

(2-3)

其中 Φ_i 表示在第 i 模態(modal shapes)下的振形特徵向量， ω_i 為第 i 模態時的自然頻率， t 為時間。將 $[u]$ 二次微分得(2-4)。

$$[\ddot{u}] = -\omega_i^2 [\Phi_i] \cos \omega_i t$$

將(2-3)與(2-4)，代入(2-2)得(2-5)。

$$([K] - \omega_i^2 [M]) [\Phi_i] = 0$$

(2-5)整理後可得(2-6)。

$$\omega_i \propto \sqrt{\frac{[K]}{[M]}}$$

此 ω 為結構之自然頻率，單位為每秒徑度(rad/sec)，再除以 2π 即為每秒次數(Hz)。

由此可知在微振量測試驗下，結構之自然頻率與勁度和質量相關。

一個多自由度的結構，自由振動時會依其結構參數產生固定的振動模態，各以固定的自然頻率振動。模態分析即是對每個模態進行研究以期瞭解整個結構系統的動態行為。一般來說，低模態所對應到的自然頻率值較低，低模態對於結構物的影響比高模態對結構物的影響大，即低模態的參與比重較高，在量測結構物時，低頻率之自然頻率比高頻率的自然頻率有更高的參考性。因此，進行模態分析時只需要針對較低自然頻率之振動模態進行響應分析，就足以將整個系統的動態行為描述清楚[29]。

2.2.2 橋梁結構的動力試驗

橋梁的動力試驗有助於了解橋梁的結構特徵值(characteristics)，現今已發展出許多方法以獲得既有橋梁的動力行為及參數。在 O.S.Salawu [30] 等人的研究中，對於橋梁動力試驗做了完整的比較，主要係將橋梁的動力試驗區分為微振試驗

(ambient vibration test)和強迫振動試驗(forced vibration test)兩大部分，並指出微振試驗毋須任何外力激振設備，相對於其他試驗方法更易於執行。因此，一般公路橋梁常使用下列試驗方法以獲得其動力行為及特徵值，即自由振動試驗(free vibration test)、強迫振動試驗(forced vibration test)、真實地震反應量測(real earthquake response measurement)、車載振動試驗(vehicle test)及微振試驗(ambient vibration test)等。各種動力試驗方法簡述如下：

1. 自由振動試驗

自由振動試驗是選擇適當的受力位置，給予結構物初始位移，使之自由振動，並測量振動直到位移穩定，另可根據不同的受力位置分析結構的動力參數。

2. 強迫振動試驗

強迫振動試驗是用振動器對橋梁進行的試驗。透過調節其振動力和頻率，使結構產生共振，用以測量車行方向、水流方向、垂直方向之頻率、振動模態和阻尼。

3. 真實地震反應量測

該法係以結構在真實地震下的響應，用以評估結構的動力參數。但目前尚無法預測地震發生的時間，故欲以該法取得相關動力參數值並不容易。

4. 車載振動試驗

該法係利用車輛重量在不同車道上以不等速或靜態的方式擾動橋梁，即動態及靜態車載振動試驗。透過試驗可以獲得橋梁的動、靜特徵值。

5. 微振試驗

此法係於被試驗之目標物上裝置加速度器或速度器等儀器，並以環境擾動，例如水流、風及車流等為振源。因為該振源相當微小，振幅僅約 $10^{-5} \sim 10^{-3} g$ ，因此容易受到雜訊的干擾，而微振試驗需要使用高解析度的測量儀器來記錄訊號，並採用適當的濾波、分析方法，才能獲得被試驗目標物



之動力參數。由於微振試驗在測量過程中不需要任何激振設備，因此不會影響結構的使用性。因此，本研究採用微振試驗用以獲取橋梁的動力特徵值。其識別結構物的動力特性優點有下 [31] [32]：

- i. 紀錄資料長度擷取可長可短，擷取長度越長及多次的頻譜平均可增進其精確度(Resolution)。
- ii. 建築物在微振之小振幅情形下，比其在地震狀況下更線性化，而且假設激振力為平穩過程，在單一量測記錄中表現為線性彈性行為，則只根據輸出反應記錄所求得之結構動力參數並不會因為時間不同而改變。
- iii. 分析過程中，只需對輸出信號作分析而毋須探討輸入信號，因此可節省相當多的人力與物力。
- iv. 試驗過程中，不需要任何激震設備，因此並不影響建築物使用者之舒適感，特別適合於已建築完成或使用中之建築物。

2.2.3 淘刷深度和橋梁自然頻率的關係

近年來，關於橋墩基礎淘刷深度和橋梁自然頻率關係的研究頗多，得出的結論皆為橋梁之自然頻率會隨著淘刷深度的加深而降低[16] [26] [27] [33]。橋梁上部結構的振動特性可用以評估橋墩基礎的裸露狀況。以車行方向和水流方向的振動特徵相比，後者更能有效反映地基裸露狀況，另依 SAP2000 建立的模型分析與現地所測得的頻率特性具有一致的趨勢。

綜上，橋梁基礎的淘刷確可造成橋梁自然頻率之下降，惟因尚有其他因素，例如橋梁結構裂縫及侵蝕等亦可能造成整體結構勁度之下降，進而導致橋梁自然頻率的下降。橋梁淘刷通常導因於洪水等事件，而結構裂縫及侵蝕等對自然頻率之影響較微小且通常是漸進的，因此橋梁淘刷對自然頻率的影響與其比較相對而言較為顯著。另外，在監測到橋梁自然頻率急遽變化時可進行人為的安全檢查，對於橋

梁的維護管理也所助益[34]。



2.3 振動訊號分析方法

對於結構的實測振動響應(vibration response)，已經發展出相當成熟的分析方法，如時域分析(time domain analysis)、頻譜分析(spectrum analysis)、時頻分析(time frequency analysis)等，目的是了解振動訊號的特徵，識別結構系統的動力參數。相關方法茲說明如下[35]：

2.3.1 時域分析

隨機遞減法(random decrement technique)是振動訊號常用的時域分析方法。例如，Asmussen [36]等人利用結構受微振激振後的響應，並採用隨機遞減法來辨識系統。其原理係假設外部振動源是平均為零的穩態高斯白噪(steady-state Gaussian white noise)。透過取得不同時段訊號的平均值，就可以精確地得到系統在初始條件下的自由振動反應，並且可以用自由振動理論來辨識系統。此外，自迴歸模型(auto-regressive model)或稱 AR 模型也是時域系統辨識的常用技術。例如，Huang [37]使用微振量測並透過自迴歸模型來識別結構系統。

2.3.2 頻譜分析

由於振動響應的頻率特性往往很難直接從振動歷時資料來判斷，如果透過頻譜分析將時域的歷時訊號轉換到頻域，則可以從頻譜的分佈中有效地顯示頻率特性。快速傅立葉轉換(fast Fourier transform，FFT)是一種在各領域廣泛使用的頻譜分析方法。對於無限範圍實數或複數 $x(t)$ 的傅立葉轉換定義為：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-7)$$

若將時間限制在有限範圍，例如在 $(0, T)$ 的範圍內，則有限範圍的傅立葉轉換定義



為：

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2-8)$$

假設該 $x(t)$ 在 N 個等距點取樣，間隔距離為 Δt ，其中選擇 Δt 以產生足夠高的奈奎斯特頻率(Nyquist frequency)。採樣時間為 $t_n = n\Delta t$ ，此處從 $n = 0$ 開始比較方便，令

$$x_n = x(n\Delta t) \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2-9)$$

則對任意 f 其對公式(2-8)的離散形式即為

$$X(f, T) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi f n \Delta t} \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2-10)$$

這種離散化的過程使其適合程式化，並且可以使用電腦對有限的取樣點進行運算。其方式係透過加入一些零值數據(zero-valued data)，使得取樣點的數量為 2 的冪次方，以及利用矩陣特性來減少運算時間，可以經濟且快速地執行所需數量的運算。

利用分析所獲得的傅立葉頻譜，可以顯示振動訊號的頻率特性，並且可以評估被測結構系統的特性。例如，最大峰值的頻率可用於確定顯著頻率，其通常代表結構系統的自然頻率。根據自然頻率對應的不同位置的振幅和相位差可以得到振動模態，並且可以根據峰值頻寬來估計系統阻尼的大小。

2.3.3 時頻分析

由於 FFT 得到的頻譜代表了被分析資料的整體頻率和特徵，因此較適合振動響應(vibration response)呈線性且響應訊號具有週期性和穩定(steady)的情況。但當振動響應為瞬態、非週期、非穩態時，即無法表現出頻率特性隨時間的變化。因此，需要進行時頻分析，以獲得振動響應的時頻分佈，同時觀察訊號在時域和頻域的特性。茲將常見的幾種時頻分析方法說明如下：

1. 短時傅立葉轉換 (short-time Fourier transform, STFT)

為常用的時頻分析方法，主要概念是將原始完整時段的訊號分成為許多



連續相等的較短時段訊號，並假設每個較短時段中的訊號是穩定的。隨之進行 FFT 即可得到每個時段的傅立葉頻譜，整體時段的頻譜圖也隨之獲得。在連續時間的情況下，將函數乘以僅在一段時間內非零的窗函數，而後執行一維傅立葉轉換。然後沿時間軸移動該窗函數，並將所得的一系列傅立葉轉換結果以二維表示。連續 STFT 可以寫為[38]：

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau) x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2-11)$$

其中 $w(t)$ 是窗函數， $x(t)$ 是要轉換的訊號。 $X(t, f)$ 是 $w(t - \tau) x(\tau)$ 的傅立葉轉換。隨著 t 的變化，視窗函數將在時間軸上移動，只留下被視窗函數截取的部分用於訊號的最終傅立葉轉換。得到的結果是一個複數，代表訊號隨時間和頻率變化的振幅和相位。

在離散時間的情況下，資料會被切割成若干段，每段通常會相互重疊，以避免切割方法帶來的邊界誤差。將各段各自傅立葉轉換後的複數結果再相加，即可得到各點時間和頻率的振幅和相位，可寫為：

$$X(f, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) [w(n - m) e^{-j2\pi f n}] \quad (2-12)$$

其中 $w(n)$ 是窗函數， $x(n)$ 是要轉換的訊號。此方法有助於評估顯著振動頻率隨時間的變化趨勢，從而避免因特殊事件或特定振動源而影響結構振動特性的識別。惟短時傅立葉轉換的窗函數是固定的，窗函數較寬時，頻率的解析度較高，但時間的解析度較低，相反地，窗函數較窄時，時間的解析度較低，但時間的解析度較高，此即著名的測不準原理(uncertainty principle)。

2. 小波轉換 (wavelet transform, WT)

為了解決短時傅立葉轉換對於非穩態訊號及突然變化訊號無法以適當的窗函數來因應不同時段的問題，小波轉換便應運而生，其為窗函數寬度可以變化的時頻分析，透過時間窗(time window)及頻率窗(frequency window)

的改變，能在時間軸及頻率軸上表達局部特徵，因此適合用於觀察一正常訊號中的反常結果。

3. 希爾伯特-黃轉換 (Hilbert-Huang Transform, HHT)

此法亦為近年來應用愈來愈廣泛的時頻分析方法[39]，其利用經驗模態分解 (empirical mode decomposition, EMD) 將原始振動訊號展開為多個內在模態函數 (intrinsic mode function, IMF)，代表具有簡單型式的振動模態，然後利用希爾伯特頻譜分析 (Hilbert Spectral Analysis, HSA) 即可獲得模態函數的振動訊號中每個內在模態函數之振幅與頻率隨時間變化的狀況。此法跳脫傅立葉轉換架構，因此能有效反映訊號內部特徵，達到去除雜訊並保有訊號的非線性及非穩定特徵。

2.3.4 數位濾波器

使用濾波器之目的在於保留吾人所感興趣的某一特定頻率，或濾掉某些高頻雜訊 (reshape frequency component)，其方法係對頻率成分做調整而非直接對時間域做調整，依欲保留下來的頻率成分可分為高通濾波器 (highpass filtering)、低通濾波器 (lowpass filtering) 及帶通濾波器 (bandpass filtering) 等。其效果可去除低頻的飄移 (drift) 成分和機器或環境的高頻雜訊 (noise)。其原理係利用傅立葉轉換卷積 (convolution) 和時間移位 (time shifting) 的特性，其意義是在時間域上的卷積 $h(n)*x(n)$ 當轉換到頻域上則只是單純相乘的現象。故在頻域下設計一濾波器轉換函數 (digital transfer function) $H(z)$ ，再使用傅立葉逆轉換回時間域 $h(n)$ ，原時間序列 (time sequence) 對其卷積即可達到濾波的效果，如圖 2-5 所示 [40]。

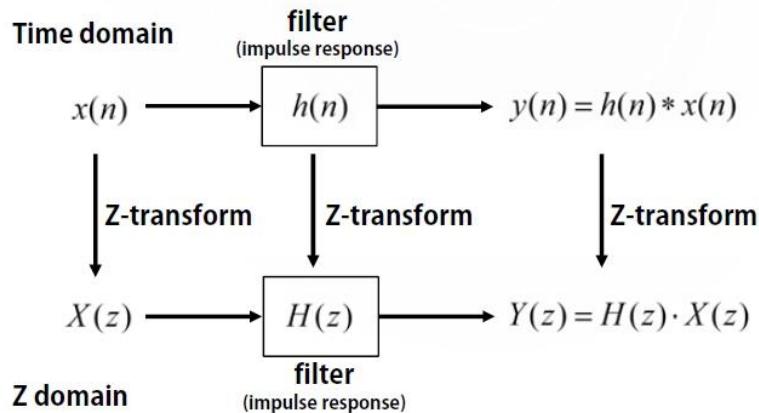


圖 2-5 濾波器的運算原理

(資料來源：[40])

有限脈衝響應濾波器(finite impulse response filters, FIR filters)為數位濾波器的一種，此濾波器對於脈波輸入訊號的響應最終趨向於 0，因此相對於無限脈衝響應濾波器(Infinite impulse response filter, IIR filter)而言，有限脈衝響應濾波器對脈波輸入訊號的響應為有限，故以此得名；而無限脈衝響應濾波器中存在反饋迴路(internal feedback)，因此對於脈波輸入訊號的響應為無限延續[41]。有限脈衝響應濾波器雖有需要較高階數才能滿足濾波條件及計算效率較低的缺點，惟考量本研究數據資料量相對較小，且有限脈衝響應濾波器相對於無限脈衝響應濾波器較為穩定，故採用有限脈衝響應濾波器處理數據。

2.4 無線感測網路

無線感測器網路(wireless sensor network, WSN)是由許多在空間中分布的自動裝置組成的一種無線通訊電腦網路，這些裝置使用感測器協同運作地監視不同位置的物理或環境狀況（例如溫度、聲音、振動、壓力、運動或污染物）。無線感測器網路的發展最初起源於戰場監測等軍事應用。而現今無線感測器網路被應用於很多民用領域，如環境與生態監測、健康監護、家居自動化以及交通控制等[42]。無線感測器網路是由許多感測節點(Sensor Node)所組成，透過感測節點的佈設可以

建構一個監測網路，並以特定頻道的無線電波傳遞資料取代過去有線傳輸時可能遭遇管線佈設困難的問題[43]。

無線感測網路由許多元件組成，大致可分成三個節點，感測節點(End Device)、路由器(Router)及網路協調器(Coordinator)，而至少需要一個網路協調器及一個感測節點組合，才能使無線網路正常運作[44] [45]。

1. 感測節點(End Device)：亦稱為終端設備，主要用來接收環境數據並傳輸，因此可依照不同需求選定不同的感應器，通常在該節點會將類比訊號轉換為數位訊號，再以封包型式進行無線網路傳輸。
2. 路由器(Router)：功能與網路中的路由器相似，當傳輸距離較遠，感測節點無法直接將封包傳給協調器時，路由器便可當作中繼點增加傳輸距離，其中可架設多個中繼點，所形成的網路架構稱之為多跳式網路架構(multi-hop)。
3. 網路協調器(Coordinator)：為整體無線網路的中樞，類似於主機伺服器，負責維持整體架構和建立網路，與感測節點相比，需要較多的記憶體運算，判別何處的節點訊號較強，並且找出最短的傳輸路徑，通常 Coordinator 會接上個人電腦幫助接收及計算資料。

感測節點通常包含四部分，包含感測單元(sensing unit)、處理單元(processing unit)、傳輸單元(Transceiver unit)及電源供應單元(power unit)，如圖 2-6 所示，並分述如下：

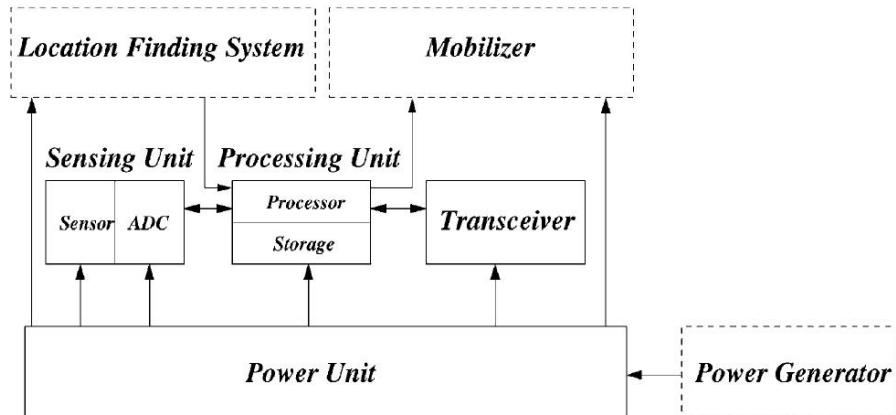


圖 2-6 感測節點的組成

(資料來源：[46])

1. 感測單元(Sensing Unit)：通常由感測器(sensors)和類比數位轉換器(Analog to Digital Converter，ADC)兩個子單元組成，感測器將測量到的現象，諸如加速度、溫度等由類比數位轉換器換為數字再傳送至處理單元。
2. 處理單元(Processing Unit)：此單元一般是具有小的儲存資料單元(storage unit)，其功能在於管理所有感測器節點間的動作以達成指定之感測任務。
3. 傳輸單元(Transceiver Unit)：傳輸單元係將感測點與整個網絡連結，即感測器之間的連結，或是將所測得的資料傳送至無線資料蒐集器。
4. 電源供應單元(Power Unit)：主要係供應感測節點所需的電力，為相當重要的單元，可使用太陽能電池等能源採集電源(energy scavenging)或依應用條件採用適當的電源。

2.5 自製無線感測儀器之便利性及經濟性優勢

本研究係藉由自製無線感測儀器進行微振量測識別橋梁的自然頻率，並進而評估橋梁淘刷深度，其相對於一般有線感測儀器與現場人員測量具有便利性與經濟性上的優勢。



2.5.1 有線及無線網路之比較

一般而言，有線感測網路通常較適用於長期結構安全監測，但其高昂之建置費用和維護成本為較大的挑戰，而無線感測網具靈活性和易擴展性，且建置維護成本相對較低，特別適用於特定時間點及位置對橋梁安全之監測。有線及無線感測網路運用於橋梁安全監測比較如表 2-3 所示。

表 2-3 有線及無線網路之比較

項目	有線網路	無線網路
所需費用	非常高	較低
布建時間	非常長，通常需數日	較短，約半小時
壽命	較長，因設備硬體而異	較短，通常受限於節點電池壽命
感測節點數	較少，因受限於安裝之困難度	較多，因安裝較為容易
連線頻寬	較寬	較窄
資料傳輸率	較高	較低
感測節點同步性	較高	因無線連結方式而異

(資料來源：[47]及本研究整理)

2.5.2 現場人員測量所需費用

經洽詢臺北市境內橋梁之維護管理機關臺北市政府工務局新建工程處，跨河橋梁為免因無法進行目視檢測評估來判定水下構件之情況、完整性及安全性，故採水下檢測項目或測繪橋梁之上下游河床橫斷面來協助判斷。所需之儀器機具及內業軟體費用概估說明如下：

1. 儀器機具

衛星接收儀 3 台 CHCNAV i90 共 75 萬(新臺幣，下同)

全測站儀 1 台 Trimble S9 共 100 萬



光達掃描儀 Trimble TX8 Advance Extended 共 150 萬

單音束測量船+動力橡皮艇 共 95 萬

2. 內業軟體

Trimble Business Center 30 萬

Trimble Realwork 100 萬

綜上，即便扣除相關儀器設備及軟體折舊，若加上人力動員及保險等費用，及人員作業安全等無形成本，現場之水上水下測量仍需一筆龐大之成本費用。而本研究係藉由自製無線感測儀器進行微振量測識別橋梁的自然頻率，並進而評估橋梁淘刷深度，該測量工作係於橋面板上進行，所需人力甚少且相對較為安全，另自製無線感測儀器硬體所需費用相對於上述專業儀器實屬細微，故實具有便利性與經濟性上的優勢。

2.6 與先前研究之比較

本研究係採用無線感測儀器、加速度計進行微振量測試驗，後續則使用 Arduino Uno 介面控制版、Xbee 無線傳輸模組等開源軟體(Open Source)，進行資料蒐集與傳輸，再以 MATLAB 作為資料處理及示波器，將測得之加速度值進行數位濾波後識別橋梁的自然頻率。該無線感測儀器屬非直接設置方式，相對於一般現場檢測方式或一般商用儀器有其便利性及經濟性上之優勢。另先前的研究[48] [49] [50] [51]係以快速傅立葉轉換(FFT)作為識別橋梁自然頻率的方法，惟量測過程中的特殊事件(例如鄰近施工的干擾)或特定振源(例如僅能激發上部結構局部模態之車輛，或車輛本身之機械特性過於顯著)等[35]皆有可能造成對橋梁振動特性識別之影響，並可能造成錯誤識別的風險，故本研究嘗試提出對於測得數據改良之處理方法，以期在識別橋梁自然頻率之精確性及穩定性上有所精進，並用以作為後續相關應用之依據參考。



第3章 研究方法

3.1 整體研究架構與概念

本研究係採用無線感測儀器、加速度計進行微振量測試驗，鑑於測量所得之振動參數可能受到不明來源的外在環境干擾，而以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transformation, FFT)處理所得之加速度數據後，有錯誤識別橋梁自然頻率的風險。因此本研究嘗試以短時傅立葉轉換 (short-time Fourier transform, STFT) 延伸發展出的方法去除測量所得加速度數據中之干擾因素，以更正確且穩定地識別橋梁的自然頻率。其方式係先以感測器量取橋梁微振參數，透過數位類比轉換器將類比訊號轉為數位訊號，再以介面控制版將訊號封包後，經無線傳輸模組傳輸至網路協調器，其上的無線傳輸模組接收訊號後，再傳輸到電腦端，藉由濾波器擷取適當頻帶、短時傅立葉轉換識別自然頻率值，再剔除離群值獲得橋梁之自然頻率。另外，藉由獲得測量相關振動訊號當下淘刷深度之實測數據，可以獲致一組橋梁自然頻率和對應之淘刷深度實測值。

此外，透過被測量橋梁竣工圖之取得，可以得知橋梁各部尺寸及材料參數，並進行有限元素法之建模。其方式係建立柱、梁、橋面板及樁之模型，再透過橋墩處之地質鑽探資料以取得標準貫入試驗 N 值，以便估算等值彈簧常數，最後再定義邊界條件，並加載 Mass Source，經由逐層解除土壤彈簧束制並以有限元素法模擬，取得各淘刷深度所對應之橋梁自然頻率值及其關係圖。再將前述的實測資料值與之比較並視結果修正邊界條件，以供後續之應用。

以上說明如圖 3-1 所示，詳細步驟將於後續章節說明。

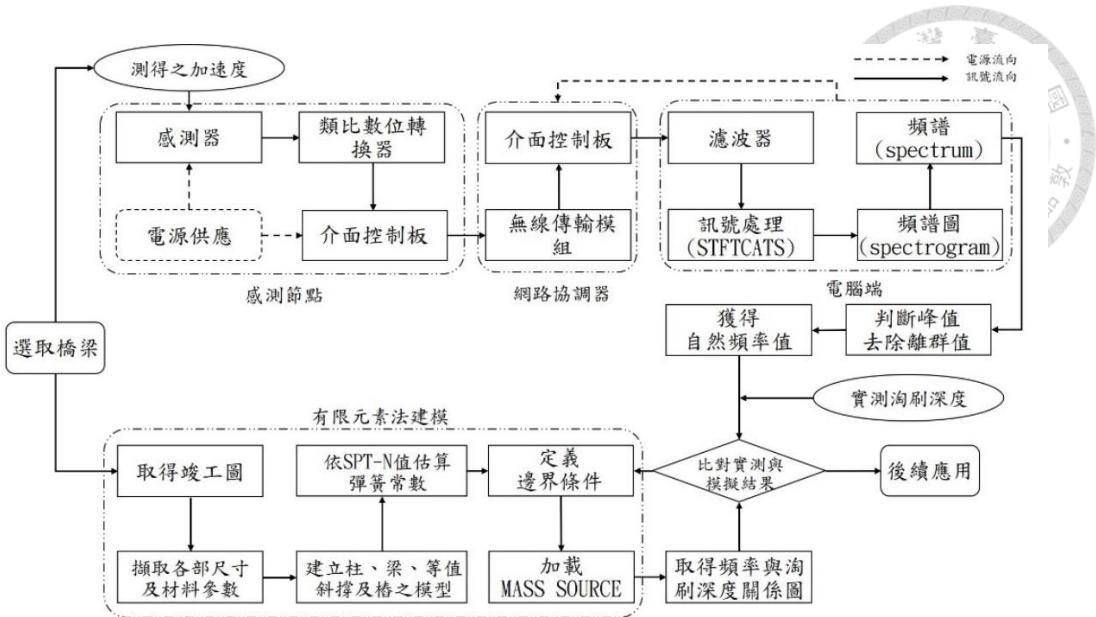


圖 3-1 整體研究概念架構圖

3.2 訊號處理方法

振動訊號分析如同 2.3 節所述有多種不同的方法，以往多以快速傅立葉轉換(FFT)以頻域的角度判別振動訊號的頻率，其立論基礎係因結構物在小振幅情形下量測更為線性化，並假設激振力為平穩過程(Stationary Process)，使結果更貼近線性彈性行為。惟在真實的情況下，橋梁在各種外在振源，包含風、水流、車行振動等，很難確保激振力是完全平穩過程，而不隨時間變動。事實上，頻率成分是隨時間變動的狀況，此時採用時頻分析之方式就可區別訊號頻率隨時間變化之情形。其概念說明如下：

3.2.1 線性穩態及依時變異訊號之識別差異

若以 MATLAB 軟體生成兩個頻率分別為 20Hz 及 60Hz 的 sine 波並合成疊加為 A 波，其波形如圖 3-2 所示：

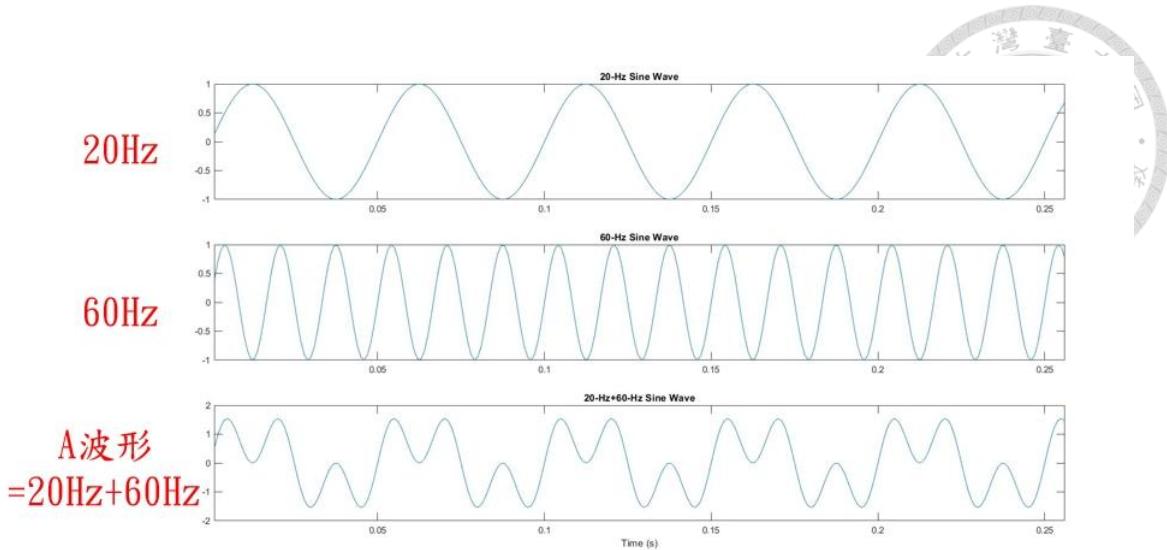


圖 3-2 A 波：頻率為 20Hz 及 60Hz 之 sine 波合成波

另以 MATLAB 軟體生成 B 波，而將其時間分為 4 段的訊號，在最前及最後 1/4 時段之頻率為 0Hz、1/4~2/4 時段為 20Hz 的 sine 波及 2/4~3/4 時段為 60Hz 的 sine 波，如圖 3-3 所示：

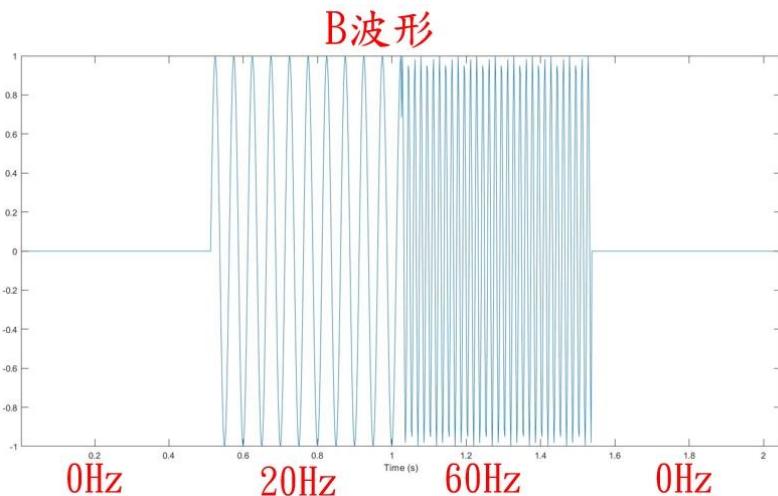


圖 3-3 B 波：分為 4 時段分別為 0、20Hz、60Hz、0 之 sine 波

此時若將上述之 A 波及 B 波分別以快速傅立葉轉換(FFT)從頻域識別其頻率則分別得出以相同的結果，如圖 3-4 及圖 3-5 所示：

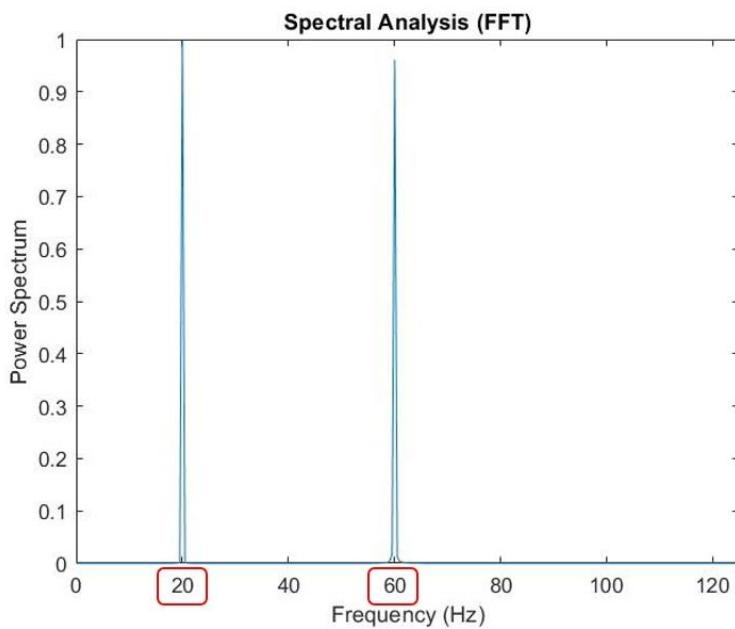
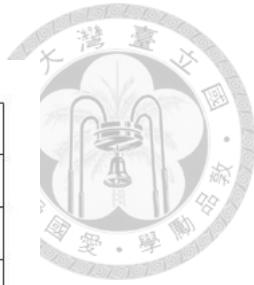


圖 3-4 將 A 波以 FFT 轉換後之頻譜圖

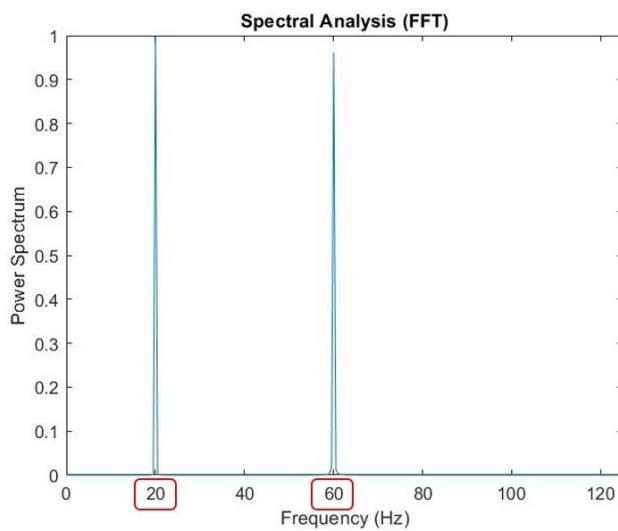


圖 3-5 將 B 波以 FFT 轉換後之頻譜圖

顯然，若以快速傅立葉轉換(FFT)從頻域識別頻率方式檢視 A、B 兩波，則僅能識別其具有 20Hz 及 60Hz 之頻率成分，而無法識別其訊號發生時段的關係。此時若將 B 波以短時傅立葉轉換(STFT)以時頻分析的方法處理，則可清楚辨識 B 波除了有 20Hz 及 60Hz 兩主要之頻率成分外，尚可辨識其發生之時段分別處於 1/4~2/4 時段及 2/4~3/4 時段，如圖 3-6 所示：

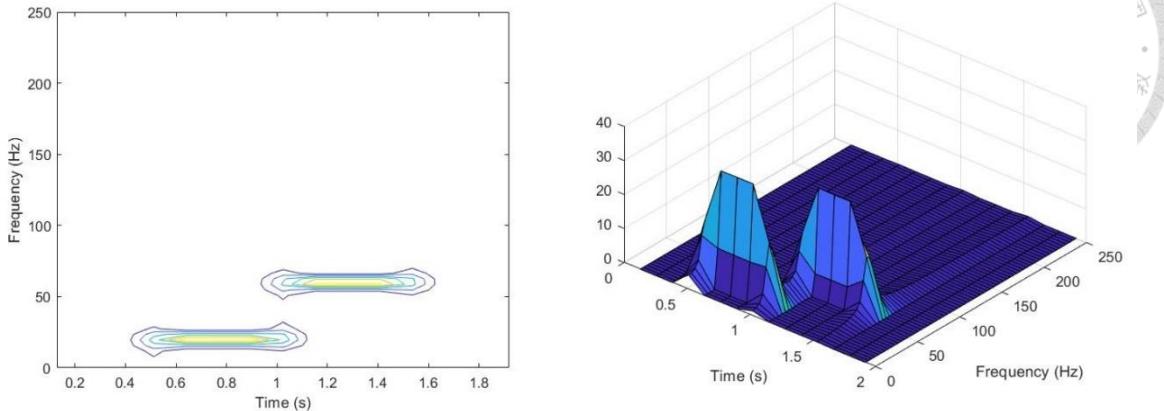


圖 3-6 將 B 波以 STFT 轉換後之頻譜圖

如 2.3.3 節所述，其原因係因 A 波形為線性穩態(stationary)之訊號，故可用 FFT 等頻域分析法，若訊號具依時變異(non-stationary)性，則宜使用時頻分析法，例如短時傅立葉轉換(STFT)、小波轉換(Wavelet Transform)、希爾伯特黃轉換(Hilbert-Huang-Transform)等方法。考量評估橋梁基礎淘刷深度所需者係以土壤與基礎互制關係變化所導致之自然頻率變化，其方式僅需擷取橋梁之主頻率而非關注所有頻率成分的變化情形，且短時傅立葉轉換之原理簡單易懂，故本研究將以時頻分析方法中的短時傅立葉轉換為基礎，並經處理後作為時間序列訊號處理之方法。

3.2.2 微振量測依時變異訊號之處理概念

考量微振訊號與其他突發性之干擾訊號相比相對穩定且持久，其在測量時間序列上的訊號分布亦應較為均布且完整，因此將上述訊號強度-時間-頻率關係圖中的整個時間序列中各頻率的訊號強度值進行加總比較。其最大值對應的頻率即被視為橋梁的自然頻率。我們將此方法稱為「短時傅立葉轉換沿時間軸加總法」(Short-Time Fourier Transform Cumulate Along Time Sequence，STFTCANTS)，此過程亦可經由撰寫 MATLAB 的函式加以實現。以先前研究[50] 於 2020 年 2 月 21 日 16 時 58 分對臺北市景美溪流域萬壽橋的測量為例，若將時序訊號資料以 FFT 處理，可以發現其所得頻譜之峰值辨識並不容易，如圖 3-7 所示。

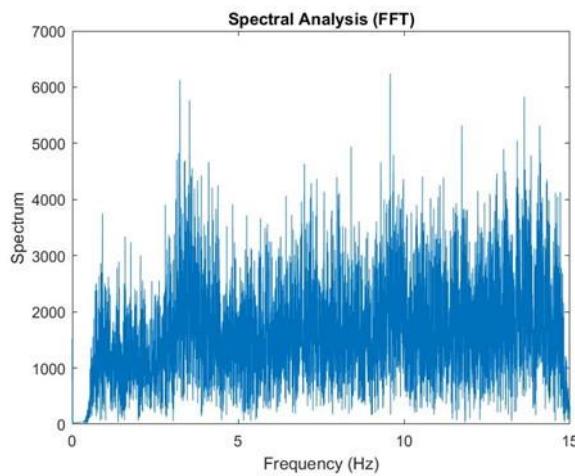


圖 3-7 時序訊號資料以 FFT 處理後之頻譜圖

然而，若改為 STFT 處理後，則可以得到訊號強度-時間-頻率三者之關係圖，如圖 3-8 所示，若以等值線圖(contour)表示，則如圖 3-9 所示，從這些圖可以觀察到某些突發性之干擾訊號發生在某些特定的時間點。再將上述關係圖應用 STFTCATS 法處理後，就可辨識出橋梁的自然頻率為 3.42Hz，如圖 3-10 所示。

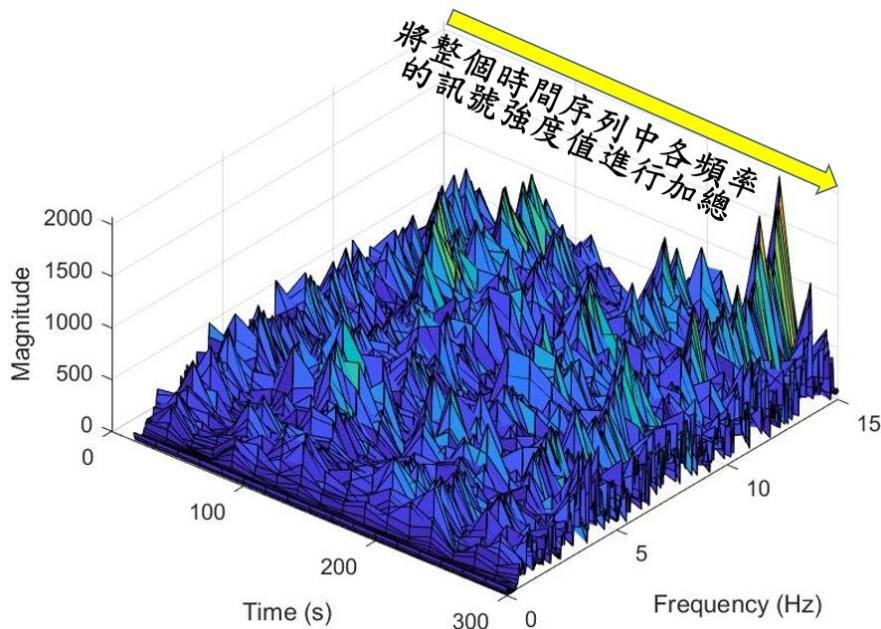


圖 3-8 時序訊號資料以 STFT 處理後之訊號強度-時間-頻率三者之關係圖

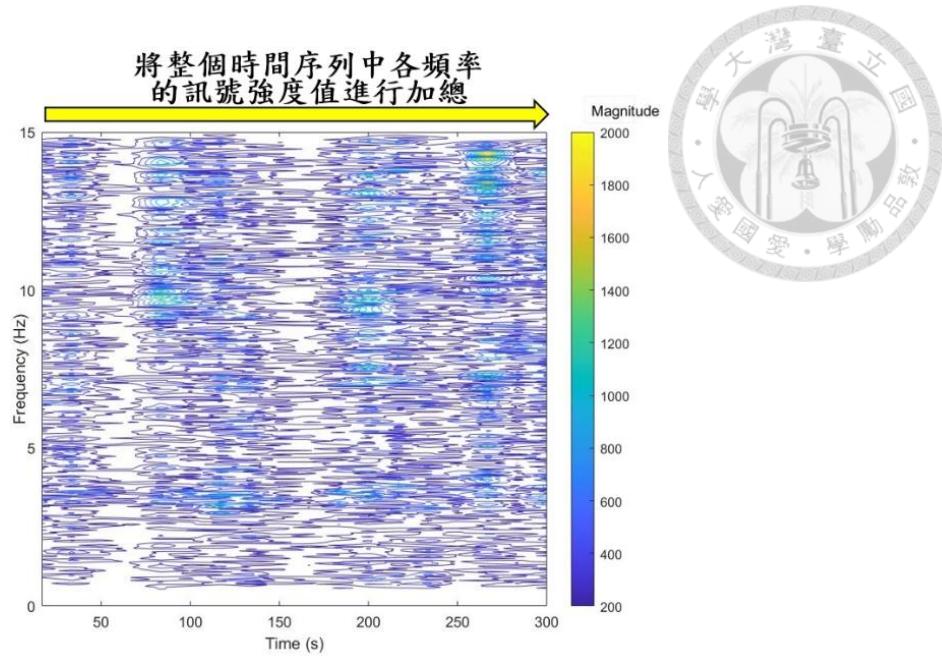


圖 3-9 時序訊號資料以 STFT 處理後之等值線圖(contour)

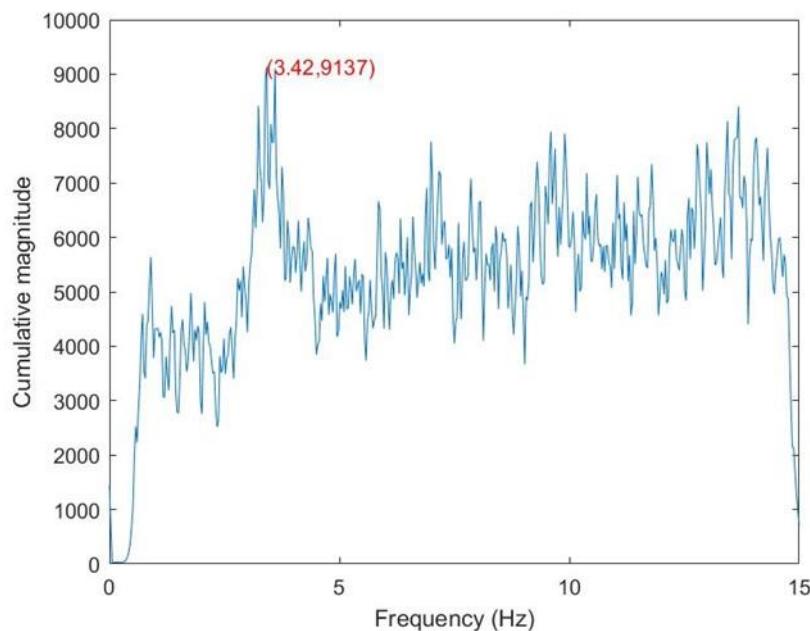


圖 3-10 將訊號強度-時間-頻率之關係圖以 STFTCATS 法處理後識別之頻率值

3.3 識別橋梁自然頻率的步驟

雖然所量測的訊號經過數位濾波器先篩選所需擷取之頻率範圍，惟因現場量

測環境複雜，可能有不確定之干擾源，故仍須對於依 3.2.2 節每次測量數據經 STFTCATS 法獲致頻譜(spectrum)後，依以下步驟加以確認自然頻率：

1. 確定頻譜是否可識別，即是否有明顯頻率峰值，若該筆資料無明顯峰值即不列入統計，範例如圖 3-11 所示。
2. 再將列入統計之各頻率值計算平均值及標準差，若超過平均值加減兩倍標準差範圍之資料則視為離群值而刪除，再將剩餘之各頻率值計算平均值，以獲得最終之橋梁自然頻率值。

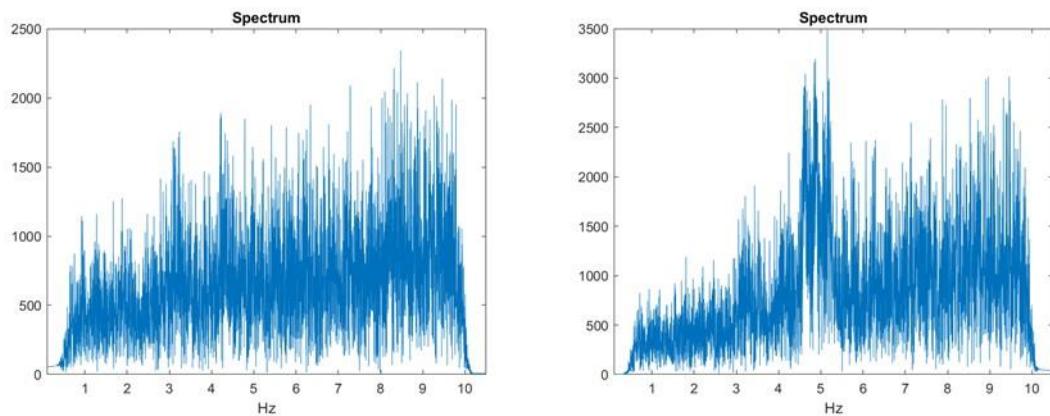


圖 3-11 無法識別頻率峰值之範例



第4章 案例研究與驗證

本章旨在現地橋梁上實際操作前章所述概念並驗證其結果。首先，說明進行現場量測實際使用儀器之細節，並與先前研究[50]之萬壽橋以 FFT 處理數據所識別的自然頻率結果比較，以確定 STFTCATS 確實對於自然頻率有較佳的辨識度，另再擇兩座混凝土橋進行現地量測，如同 1.3 節所述，考量國內老舊橋梁多以混凝土橋梁居多，該類橋梁跨距較短、落墩較多，受淘刷影響導致危害之風險較大，故本研究以混凝土橋梁為研究之對象。選擇之橋梁為臺北市境內橫跨基隆河之成美長壽橋及南湖大橋，成美長壽橋為一人行橋，除自行車外並無其他車輛，選擇此橋的原因係考慮在不同的外界干擾的情況及結構形式條件下，再次比較 FFT 和 STFTCATS 兩種方式識別橋梁自然頻率的差異，另再選擇一結構形式較為複雜的南湖大橋，以完整的步驟識別其自然頻率，並在後續章節以有限元素法建模模擬其振動行為，最後獲得頻率與橋梁基礎淘刷深度關係圖，以作為後續橋梁維護管理之應用。

4.1 本研究使用之無線感測儀器

本研究所使用之無線感測儀器，係沿襲先前研究的成果，林宥任(2014)[52]使用電路板與 supernode 傳輸模組組成無線感測節點，並使用 IAR for MSP430 軟體將韌體燒錄於 supernode 後，使得節點具收集數據、建立及控制網路等能力，惟此階段儀器有更新困難與專利等問題。侯瑞瑜(2017) [48]則利用有大量開放原始碼(Open Source)特性的 Arduino 版作為電路板，並整合 Digi 公司所開發之 XBee 傳輸模組，再加上類比數位轉換器、升壓模組等整合為無線感測節點，此階段已有本研究使用儀器之雛型。羅瑞邦(2018) [49]同樣以 Arduino 電路板做為開發基礎，降低儀器受專利與更新困難之限制，並對儀器進行驗證與校正，使無線感測儀器具備



更完整的功能與量測數值的正確性。李璧汝(2020) [50]對此套無線感測進行修復，確認其於橋梁上最適測量之位置。林東儒(2021)[51]則改善在特定狀況下儀器之干擾現象，並建立儀器之最佳使用流程。

感測節點組成部分主要分為無線傳輸模組、介面控制板、加速度計、電源供應等。整體儀器於橋梁上配置如圖 4-1 所示，感測儀器係採用鐵盒內之 MMF KB12VD 加速度計，萬用盒內則置有介面控制板、無線傳輸組件及供電設備，再傳輸至電腦側的收發單元並連接到電腦。各部分敘述如下：

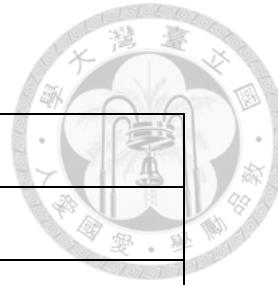


圖 4-1 無線感測儀器於橋梁上實測之配置

4.1.1 感測器

本研究採用之感測器為高階、高靈敏度的通用加速度計 MMF KB12VD，係屬於單軸類比加速度計，其重要參數如表 4-1、外觀如圖 4-2 所示。

表 4-1 MMF KB12VD 規格表



Output	IEPE
Sensitivity	10 000 mV/g
Measuring range	6 m/s ²
Lower frequency limit (3 dB)	0,08 Hz
Upper frequency limit (3 dB)	0,26 kHz
Connection	UNF 10-32, radial
Mounting	M5 female thread, M10 stud bolt
Working temperature range	-20 .. 80 °C

(資料來源: <https://mmf.de/en/produkt/kb12vd/> , 2024)



圖 4-2 MMF KB12VD 外觀

(資料來源: <https://mmf.de/en/produkt/kb12vd/> , 2024)

4.1.2 介面控制版

本研究採用義大利團隊開發的 Arduino 作為介面控制版，其係為為開源軟體 (Open Source)，提供了大量的配套軟體、電路腳位圖、電路設計圖，並擁有完整的資料庫，其具有易於開發、修改、操作方便的優點。介面控制版採用的型號是常

見的 Arduino UNO，其腳位圖如圖 4-3 所示。Arduino UNO 具有 ATMEGA328P 和 ATMEGA16U2 兩個微控制器，其中 ATMEGA328P 為其控制核心，類似於電腦 CPU 的作用，ATMEGA16U2 之功能係將程式燒錄到 ATMEGA328P 中，Arduino UNO 之規格如表 4-2 所示。Arduino UNO 內建 10 位元之解析度，可將電壓訊號切分成 2 的 10 次方，即 1024 等份。此解析度可能不足以滿足微振試驗的要求。因此，本研究增加了一個 Ads-1115 16bit 類比數位轉換器(ADC)，如圖 4-4 所示，其部分重要參數如表 4-3 所示。Ads-1115 將輸入的類比電壓訊號分成 2 的 16 次方，即 65536 等份，以提高訊號的解析度。

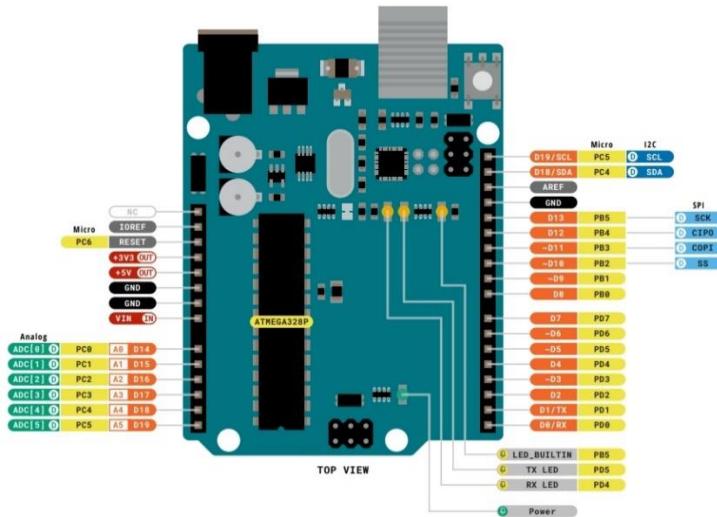


圖 4-3 Arduino Uno 腳位圖

(資料來源: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us> , 2024)

表 4-2 Arduino UNO 硬體規格



Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

(資料來源: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us> , 2024)

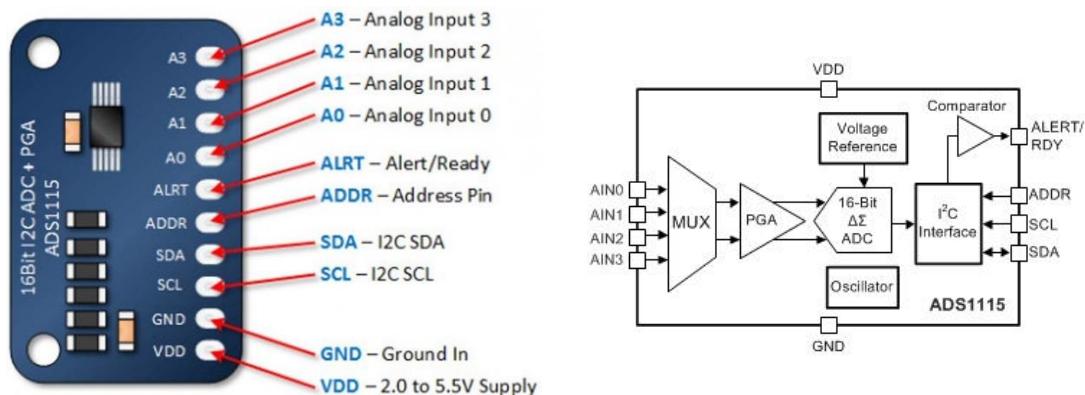
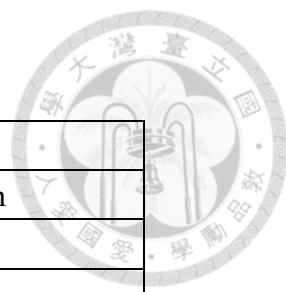


圖 4-4 類比數位轉換器 Ads-1115

(資料來源: <https://www.ti.com/product/zh-tw/ADS1115> , 2024)

表 4-3 類比數位轉換器 Ads-1115 規格



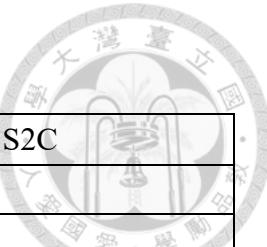
ADC	Ads-1115
Package	2 mm × 1.5 mm × 0.4 mm
Supply Range	2.0 V to 5.5 V
Current Consumption	150 μ A (Continuous-Conversion Mode)
Programmable Data Rate	8 SPS to 860 SPS
Operating Temperature Range	−40°C to +125°C

(資料來源：<https://www.ti.com/product/zh-tw/ADS1115>，2024)

4.1.3 無線傳輸模組

本研究使用的無線傳輸模組是 Digi 公司開發的 XBee 系列產品，其通訊協定是 ZigBee (IEEE.802.15.4)。 XBee 傳輸模組可分為 Series 1 和 Series 2 兩個版本，兩者的主要區別為 Series 1 只能一對一傳輸數據，而 Series 2 可以一對多或多對一方式傳輸數據。為了考量未來建立一對多的無線感測器網路結構，本研究使用的儀器採用 XBee Series 2 的傳輸模組，該系列模組包含有 S2C、S2、S2B、PRO S2C 等多種型號，其中最基本的版本是 S2，其他版本皆屬升級版本，其天線數量較多或傳輸距離較長，但相對耗電量較大。因此，本研究中感測單元(end device)側採用 S2C 模組，而協調器(coordinator)側選用 S2 模組。這樣的組合不會造成 XBee 傳輸的週期性休眠延遲，傳輸效果相對較好，XBee 規格如表 4-4 所示[49]。

表 4-4 XBee 規格比較表



XBee 型號	XBee S2	XBee S2C
工作電壓	2.8~3.4 V	
腳位	20 個針腳 (含 9 個數位 I/O 及 5 個類比暨數位輸入腳)	
針腳間距	2.0mm	
室內傳輸距離	30 公尺	90 公尺
室外傳送距離 (無遮蔽物)	100 公尺	1200 公尺
無線工作頻率	2.4GHz	
無線傳輸資料速率	250Kbps (Kilobits per second)	

(資料來源：<https://www.digi.com/lp/xbee>，2024)

4.1.4 電源供應

本研究所儀器所使用的電源採用四顆 AAA 電池，安裝在有開關的電池盒內，提供總電壓為 $1.5 \times 4 = 6V$ 的直流電源。惟 MMF KB12VD 需要額外的 IEPE 規格供電模組 M28 sensor supply module，如圖 4-5 所示，將其與電池盒串聯，即可將電力傳輸至 MMF KB12VD，其餘設備所需的電源則可由 Arduino Uno 供應，感測節點之電源流向及訊號流向如圖 4-6 所示。



圖 4-5 M28 sensor supply module

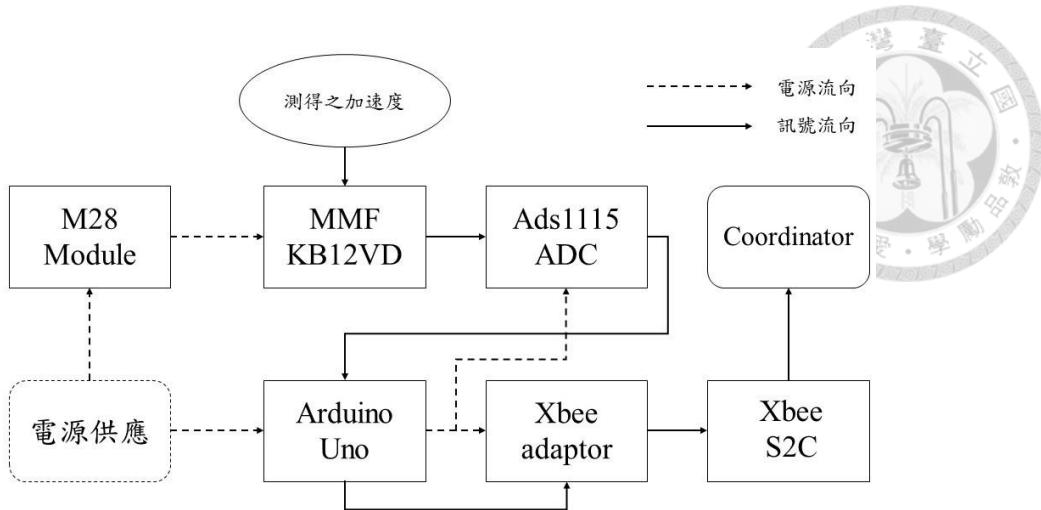


圖 4-6 感測節點之電源及訊號流向

4.2 儀器訊號傳輸

無線感測儀器的訊號傳輸至電腦端之完整處理流程如圖 4-7 所示。首先，感測節點中的加速度計讀取外部加速度。訊號經過簡單處理後傳送至協調器，再傳輸至電腦分析訊號，最後獲得頻譜。詳細內容如以下說明：

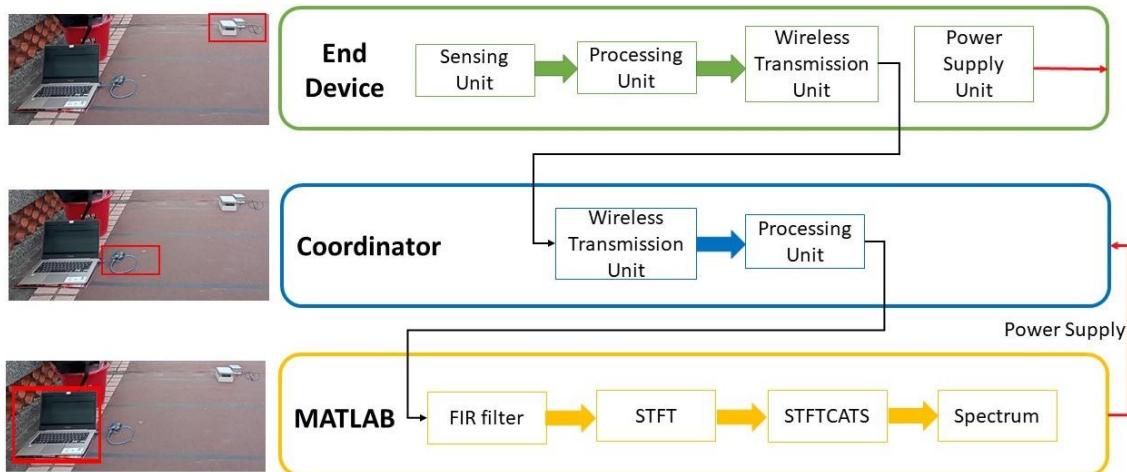


圖 4-7 無線感測儀器訊號傳輸流程圖

4.2.1 感測節點

感測節點(End Device)的訊號傳輸過程如圖 4-8 所示。在本研究中，MMF KB12VD 加速度計係測量結構產生的微小振動。經過 MMF KB12VD 測量加速度



後，輸出電壓為 $\pm 6V @ \pm 0.6g$ ，然後將訊號-2V~+2V 範圍設定為 16bit 等份，即 2 的 16 次方 65536 等份，輸出值則落在-32768~+32767 範圍內，因此依此條件設定下的理論解析度為 $0.4g/65536 = 6.1 \times 10^{-6} g$ 。

由於後續資料傳送的封包為正整數數據，因此 Arduino Uno 將接收的數位訊號-32768~+32767 平移為 0~+65535，再經運算分為萬位、千位百位、十位個位等三組數字，再以 API mode 透過 XBee 模組傳送至網路協調器(Coordinator)。



圖 4-8 感測節點(End Device)的訊號傳輸

4.2.2 網路協調器

網路協調器(Coordinator)的訊號傳輸流程如圖 4-9 所示，網路協調器中的 XBee S2 收到來自感測節點中的 XBee S2C 發送的 API Package 後，由 Arduino Uno 將 API Package 中儲存的三個資料值進行反運算，將資料還原為 0~+65535，然後再傳輸到電腦中的 MATLAB 軟體進行進一步的分析運算。



圖 4-9 網路協調器(Coordinator)的訊號傳輸



4.2.3 電腦端處理

由於 Arduino Uno 不具備儲存資料的功能，因此需要使用其他軟體來儲存 Arduino Uno 輸出的資料。MATLAB (Matrix Laboratory，矩陣實驗室)是由美國 The MathWorks 公司出品的商業數學軟體，其為一種用於演算法開發、資料視覺化、資料分析以及數值計算的進階技術計算語言和互動式環境軟體。除矩陣運算、繪製函數/資料圖像等常用功能外，MATLAB 還可用來建立使用者介面，以及呼叫其它語言（包括 C、C++、Java、Python、FORTRAN）編寫的程式[53]。本研究係採用 MATLAB 儲存並處理數據，利用 MATLAB 內建的函式處理後就可以得到頻譜圖。資料儲存到 MATLAB 後，首先對輸入資料進行濾波處理(filtering)，使用濾波器(filter)可以將頻率限制在特定範圍內，校正能量累積引起的訊號漂移(drift)，並消除環境中的雜訊(noise)。

如同 2.3.4 節所述，考量本研究數據資料量相對較小，且有限脈衝響應濾波器(FIR)相對於無限脈衝響應濾波器(IIR)較為穩定，故採用有限脈衝響應濾波器處理數據。而 MATLAB 濾波器設計函式分為三階段和二階段設計，其流程的差異在於三階段事先須找到決定濾波器階數(order)與截斷頻率(cutoff frequency)的最佳值，再進行二階段(產生轉換函數之係數序列)和三階段(將濾波器套用到訊號上)等步驟。二階段則直接指定濾波器階數(order)與截斷頻率(cutoff frequency)再進行後面兩步驟[40]。本研究採用二階段之 band pass 有限脈衝濾波器模式，將 low-cutoff frequency 設定為 0.5Hz，過濾環境中例如風等所產生之低頻成分，並將 high-cutoff frequency 設定為 14.9Hz，以限定適當的頻帶。權衡濾波效果及所需之運算時間，參考先前的研究將濾波階數 forder 設定為 180[49]，以滿足本研究所需。

時序資料在 MATLAB 中經濾波處理後，再利用內建函式進行短時傅立葉轉換(STFT)。如 2.3.3 節所述，其原理係將原始完整時段的訊號分成為許多連續相等的較短時段訊號，並假設每個較短時段中的訊號是穩定的。隨之進行快速傅立葉轉

換(FFT)，轉換後為一複數形式數字，將其實部與虛部平方開根號即得其強度，隨即可得到每個時段的傅立葉頻譜，整體時段的頻譜圖也隨之獲得，由此也可獲致訊號強度-時間-頻率三者之間的三維關係圖。本研究使用 MATLAB 中的 SPECTROGRAM 函式，相關參數為每段視窗大小(NFFT)設定為 1000，重疊點數(NOVERLAP)設定為 50%，視窗類型(WINDOW)選擇 hamming，取樣頻率(Fs)設為 30Hz，整體電腦端處理流程如圖 4-10 所示。

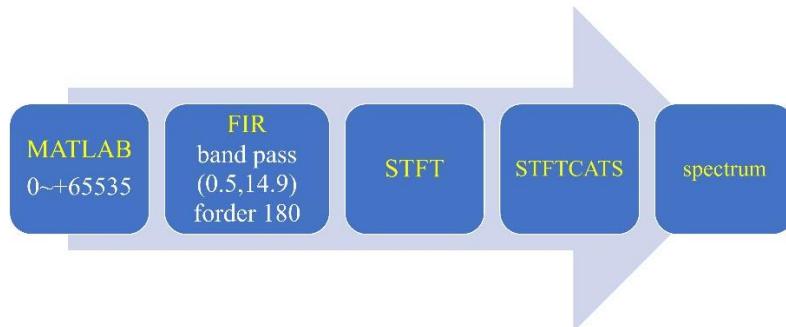


圖 4-10 電腦端的訊號處理流程

4.3 儀器性能介紹

本研究所使用之無線感測儀器性能彙整如表 4-5，並分別說明如下：

表 4-5 本研究使用之無線感測儀器性能彙整表

感測器種類	MMF KB12VD 加速度計(單軸)
理論解析度	$6.1 \times 10^{-6}g$
取樣頻率	30Hz
單次量測所需時間	約 5 分 30 秒(以取樣 10000 筆資料計算)
電池壽命	約 5 小時
傳輸距離	100 公尺(XBee S2)
與商用儀器比較	波形相似
於振動台上測試	頻率誤差約為 5%



在儀器測量之頻率範圍部分，微振試驗除了需要有高精度的加速度計或速度計等感測儀器外，還需要注意蒐集之資料量和取樣頻率(sampling rate)。Arduino Uno 的數位針腳的取樣頻率為 200Hz，由於 Arduino Uno 無法暫時儲存數據，Xbee 模組必須一次完成數據傳輸，此原因導致 Xbee 模組的數據傳輸限制了取樣頻率。透過實際測量發現，每筆加速度數據大約需要耗時 33 毫秒。因此，本研究中採樣間隔設定為 33 毫秒，即採樣頻率約為 30 Hz。根據 Nyquist–Shannon sampling theorem，當取樣頻率為 30Hz 時，理論上可測量的最大頻率為 15Hz。

單次測量時間部分，根據先前的研究經驗[48]，取樣資料量以 10000 筆以上，在系統的運算上較為適當，因此，為了使 STFTCATS 的資料量適合運算，本研究的樣本數為 10000 個，即每張頻譜圖需要 10000 次加速度資料分析和轉換。當儀器採樣率為 30Hz 時，測量 10000 個加速度資料大約需要 5 分 30 秒。

在電池壽命方面，在本研究的設備配置下，電池電力可供感測節點連續量測約 5 小時左右，而一般商用儀器約可量測 1.5 小時。微振試驗所需量測的時間通常較短，並不會進行長時間的量測，因此本研究使用的儀器應該足堪使用。

有關傳輸距離方面，無線傳輸模組在 4.1.3 節已有詳細敘述，XBee S2 和 XBee S2C 在室外的理論傳輸距離分別為 100 公尺和 1200 公尺，因此本研究中使用的無線傳輸模組理論上可以傳輸 100 公尺。在本研究中使用無線感測設備時，XBee S2 和 XBee S2C 之間的距離不超過 15 公尺，因此應不會出現封包遺失的情況。

在儀器可靠度驗證部分，為了評估本研究使用之無線感測儀器對結構振動頻率的測量能力，先前的研究[49]將儀器以石膏固定在木板上，然後再將此木板固定在振動台上，以便進行測試。振動台可設定振動之振幅和頻率，將振幅設定為 0.5 公分，並以正弦波形式輸出。考慮到振動台單次振動時間最長僅能設定為 70 秒，因此單次實驗取樣數為 1000 次。結果顯示，大部分誤差皆在 5% 以內，並且在不同頻率下 3 次的測量結果大致相同，且不同頻率的誤差結果甚至具有相關性，因

此推測此誤差可能源於振動台本身，或由於振動台單次振動時間的限制導致取樣數據不足所產生的系統性誤差。

由於無法使用振動台確認無線感測儀器在真實微振試驗下測量加速度的準確性，因此在臺大土木研究大樓進行了使用商用儀器和本研究所用無線感測儀器的測試和比較。採用的商用儀器是 TOKYO SOKUSHIN CO., LTD. 的 Recorder of All in One Sensor CV-374V，其配備了三軸速度計，測量範圍為 $\pm 0.02\text{ m/s}$ ，解析度為 $0.25\text{ }\mu\text{m/s}$ ，取樣頻率為 200Hz 。單次測量最長可達 300 秒，最高可支援 32GB CF 記憶卡或連接電腦，為一種有線測量儀器。

測試結果顯示，MMF KB12VD 的測量波形與商用儀器相似，並且在短軸上兩者測得之頻率差距甚微，表示本研究所採用之儀器具有一定的精度。然而，在長軸方向上仍存在一定差距，推測可能是由於儀器軸向定位的差異，或是建築物在兩軸振動模式不夠顯著所導致的誤差。

4.4 測量方向及點位

一般橋梁之現地量測包含水流方向、車流方向及垂直方向等，惟根據眾多文獻指出，橋梁上部結構之振動特性，特別是水流方向反應之頻率較能反映橋梁系統邊界條件之變化，可作為基礎裸露狀況評估之重要參考指標[54] [55] [56]。另依據先前研究[50] [57]指出，儀器放置的位置則以橋面板下游側為最佳點位，故本研究之現地量測均以水流方向為量測微振訊號之方向，另量測點位若是單柱橋墩則在橋墩正上方橋面板中央，多橋墩橋梁則在下游側橋墩正上方之橋面板上測量。

4.5 STFTCATS 法之現地量測驗證

為比較 FFT 和 STFTCATS 兩種識別橋梁自然頻率方式比較之驗證，於 3 柱的萬壽橋、單柱成美長壽橋人行橋及拓寬後為 5 柱的南湖大橋等三座橋梁橋面板橋柱正上方以自製無線感測儀器進行水流方向之微振量測試驗，並比較兩方法識別



而得之自然頻率標準差及變異係數等，說明如下：

4.5.1 與先前研究萬壽橋比較

先前的研究[50]曾在2020年2月於臺北市跨越景美溪的萬壽橋進行微振試驗，儀器係設置於下游側之橋面板上，以測量水流方向之振動訊號，位置如圖 4-11 所示。

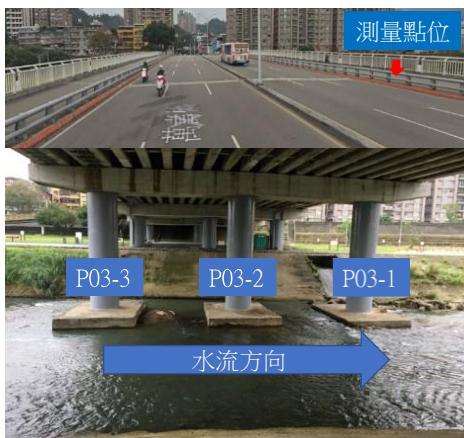


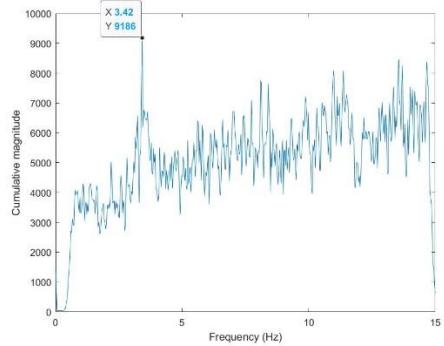
圖 4-11 萬壽橋測量儀器置放點位

(資料來源：[50])

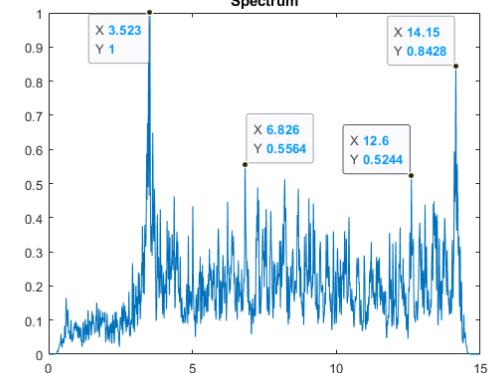
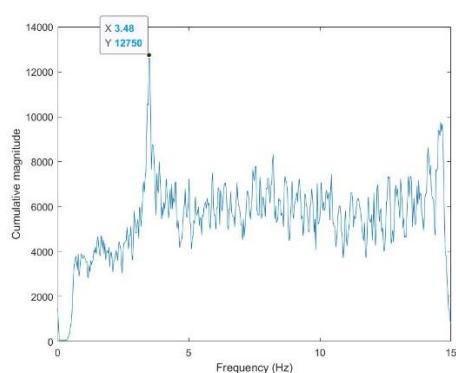
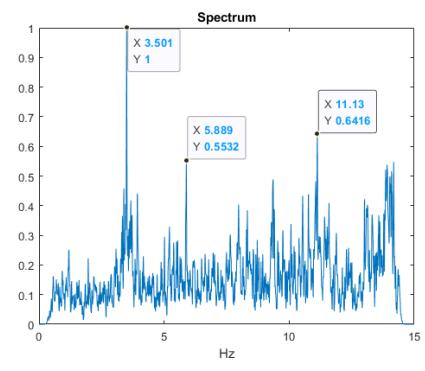
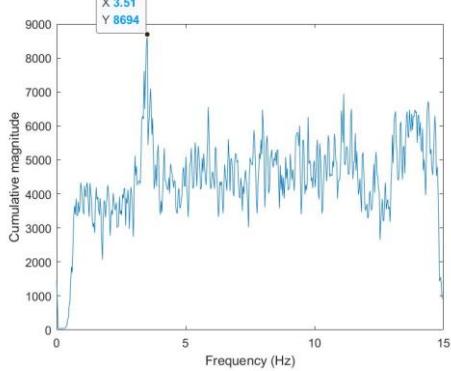
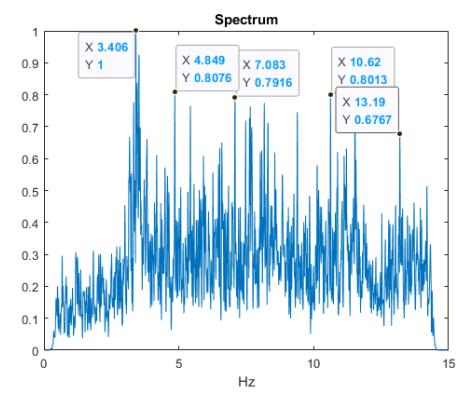
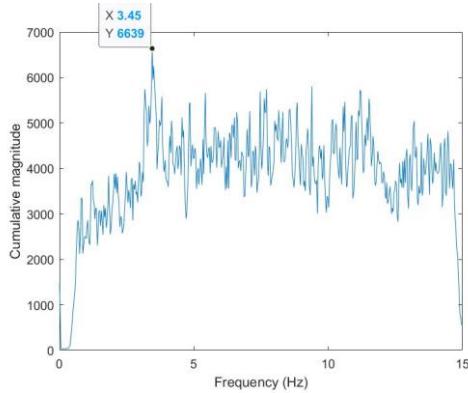
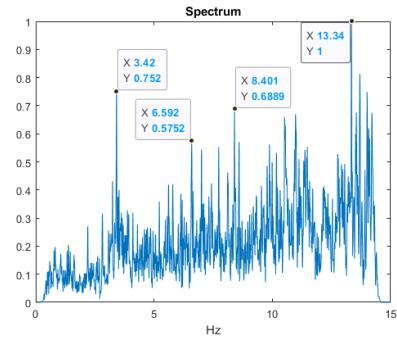
當時測量次數共計 13 次，之後並以 FFT 法識別橋梁的自然頻率。若將該 13 次之微振訊號資料改以 STFTCATS 法加以識別，比較後發現 STFTCATS 法所獲得之頻譜圖較易有明顯的峰值，可直觀地加以識別自然頻率，兩種識別方法之比較如圖 4-12 所示。

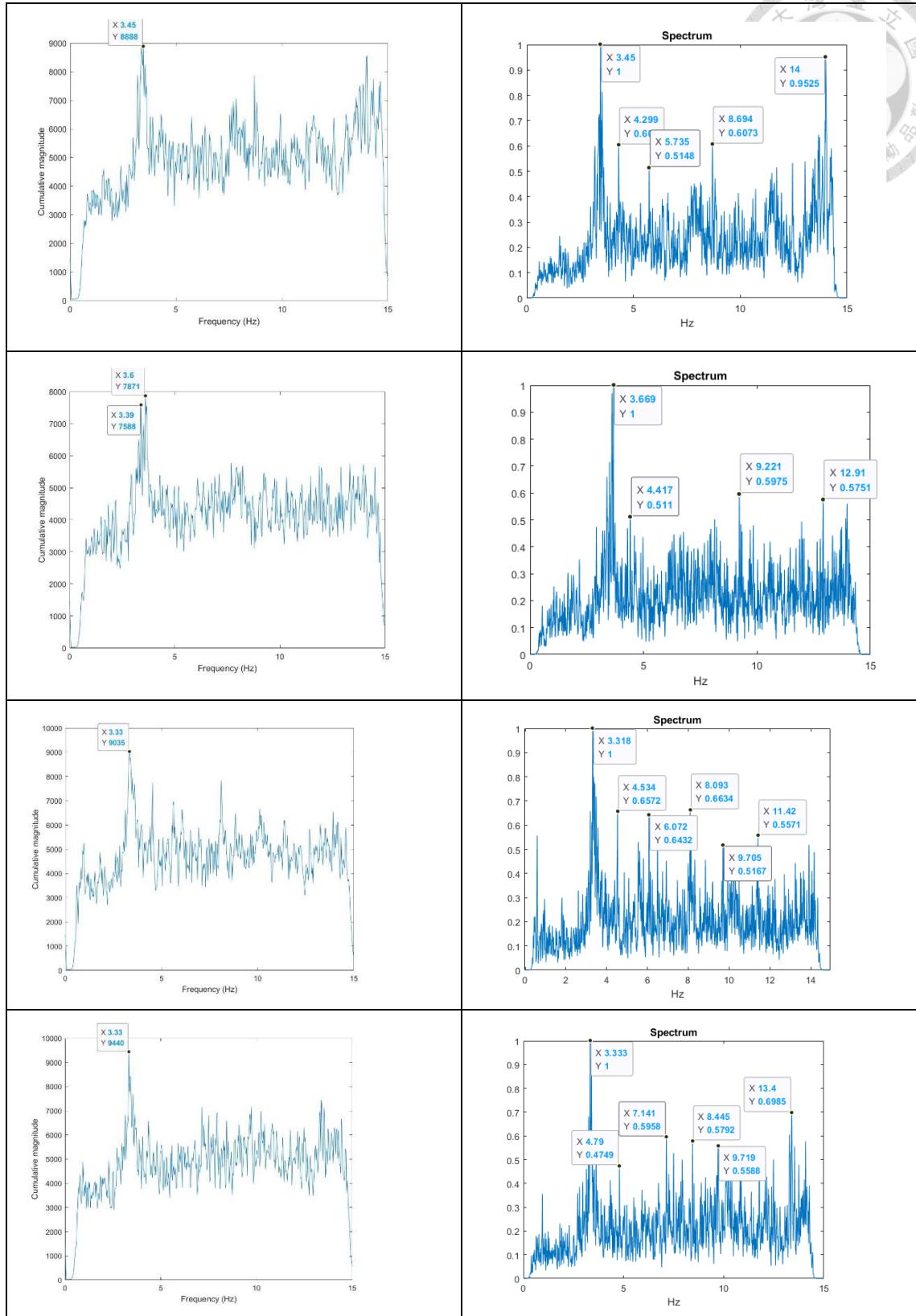


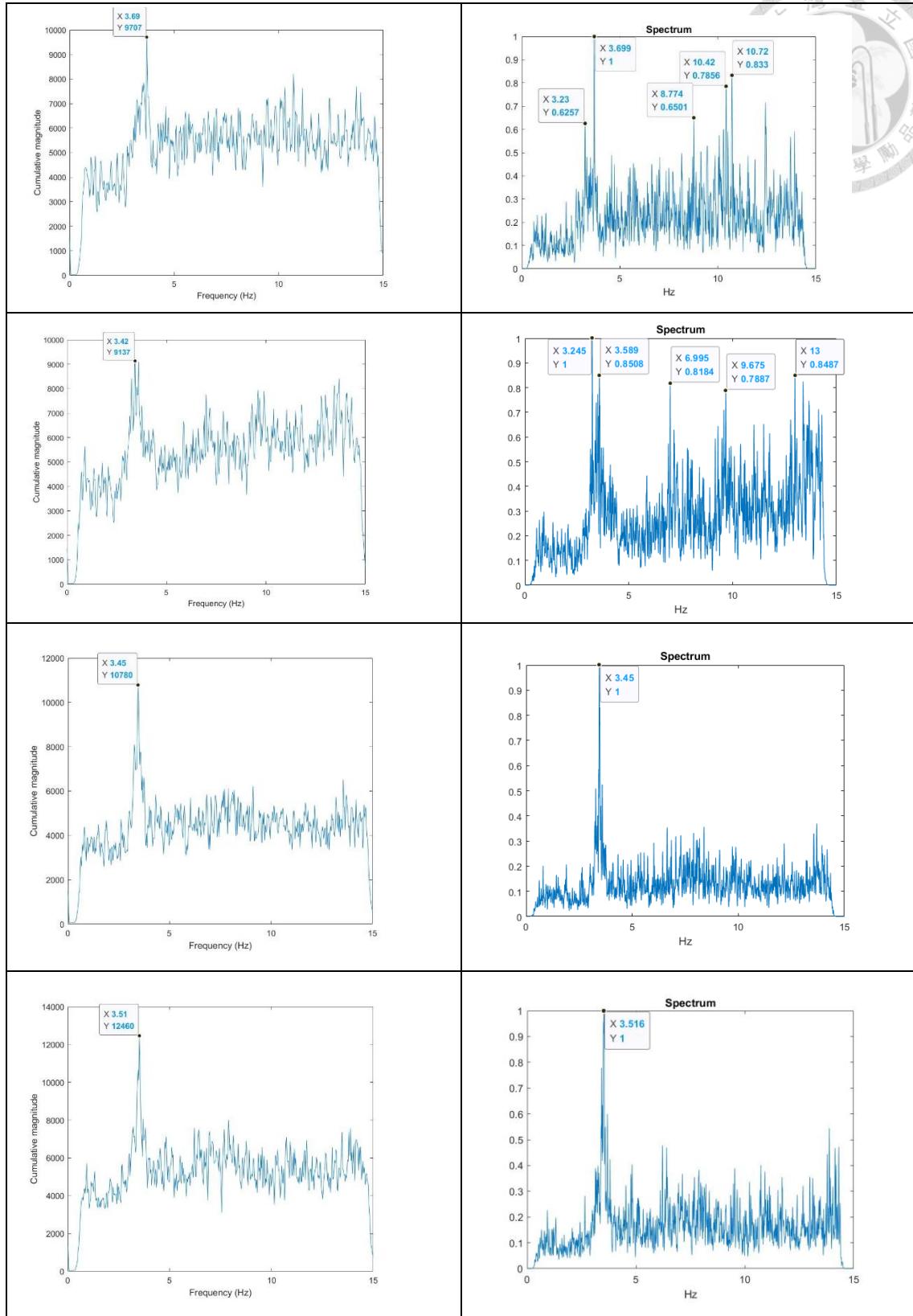
以 STFTCATS 法識別頻譜圖



以 FFT 法識別頻譜圖







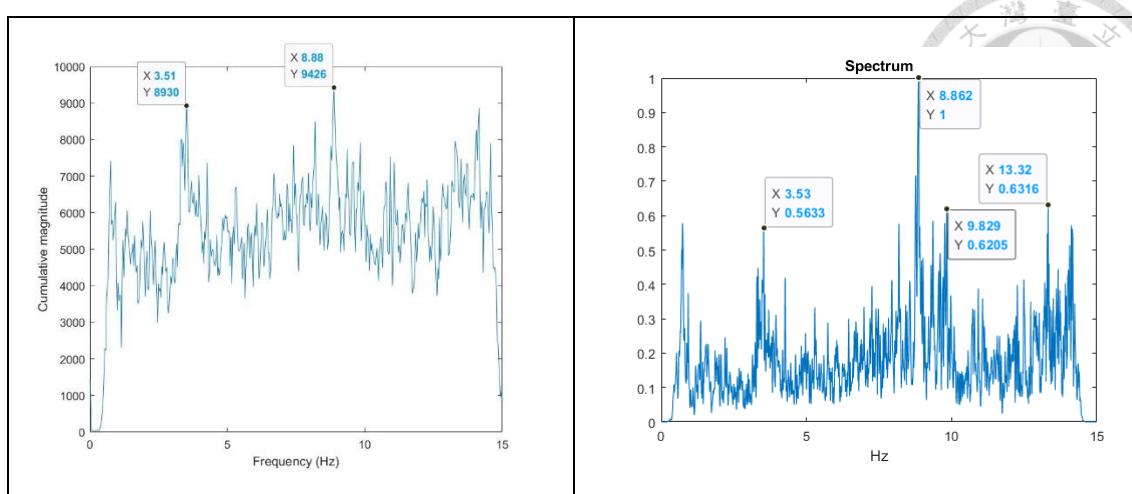


圖 4-12 萬壽橋微振試驗以 STFTCATS(左)及 FFT(右)法識別自然頻率之比較

另將上述 13 次測量數據，依 STFTCATS 及 FFT 兩種方法以 3.3 節步驟處理整理後之結果如表 4-6 所示，並可發現 STFTCATS 法較 FFT 法有下列優點：

1. 對於頻譜圖的辨識度較高：STFTCATS 法可輕易辨識頻譜圖之峰值，而以 FFT 法辨識時常有眾多峰值併列，而有識別困難之情形。
2. 各次量測所識別之峰值變異性較小：13 次的測量結果以 STFTCATS 法識別的自然頻率標準差為 1.445，而以 FFT 法識別之標準差為 2.894，STFTCATS 法識別之結果僅為 FFT 法之 49.93%。另以 STFTCATS 法識別的自然頻率變異係數(coefficient of variation, CV)為 0.372，而以 FFT 法識別之變異係數為 0.624，STFTCATS 法識別之結果僅為 FFT 法之 59.62%。
3. 較為接近模擬之橋梁自然頻率值：依據先前研究[50]對萬壽橋以 SAP2000 建模獲得之頻率與橋梁基礎淘刷深度關係圖顯示，測量當時的橋梁自然頻率值為 3.4519Hz，而以 STFTCATS 法識別之自然頻率值為 3.47Hz，誤差約為 0.52%，較以 FFT 法識別之 4.639Hz 誤差為 34.39%，更為接近橋梁自然頻率值。

表 4-6 萬壽橋量測資料以 STFTCATS 及 FFT 法識別自然頻率之比較

測量地點：臺北市萬壽橋下游側橋面板													測量日期：2020/2/21					
次別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	原平均值 (Hz)	標準差 (Hz)	變異係數	剔除離群值後之平均值(Hz)	
測量時間	15:57	16:03	16:10	16:16	16:23	16:30	16:39	16:46	16:52	16:58	17:04	17:10	17:17					
FFT	有效值(Hz)	13.34	3.406	3.501	3.523	3.45	3.669	3.318	3.333	3.699	3.245	3.45	3.516	8.862	4.639	2.894	0.624	4.639
	剔除離群值																	
STFTCATS	有效值(Hz)	3.42	3.45	3.51	3.48	3.45	3.6	3.33	3.33	3.69	3.42	3.45	3.51		3.886	1.445	0.372	3.47
	剔除離群值														8.88			



4.5.2 成美長壽橋現地量測

成美長壽橋位於臺北市南港區松河街至內湖區潭美街跨越基隆河，於1987年2月竣工，迄今已37年，長度約168.3m、最大淨寬3.2m，橋孔數為6孔，為一單柱混凝土行人專用橋，並無車輛行駛。上部結構為預力混凝土箱型梁及鋼構I型梁，下部結構為鋼筋混凝土單柱式橋墩。行水區域為P1(南港端)至P6(內湖端)間，P2至P5間則為主深槽區，P1至P2間為南港端高灘地，P5至P6間則為內湖端高灘地，如圖 4-13 所示。由該橋主管機關臺北市政府工務局新建工程處之橋檢資料[20]可知河道橫斷面圖之最低點如圖 4-14 所示。

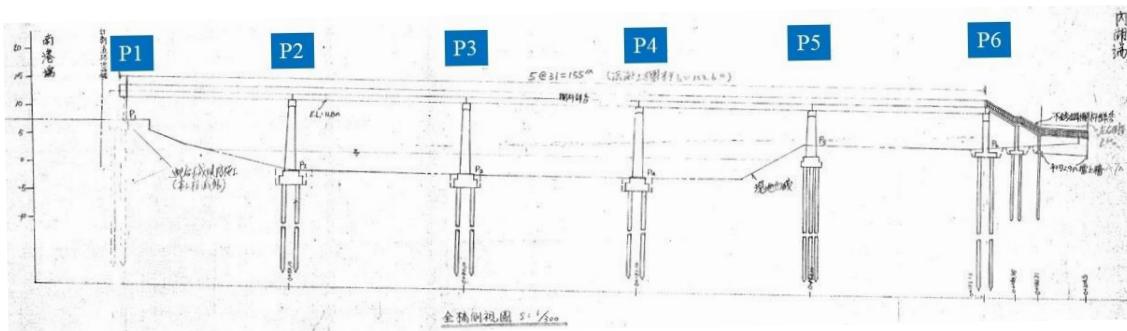


圖 4-13 成美長壽橋橋墩位置圖

(資料來源：[20])

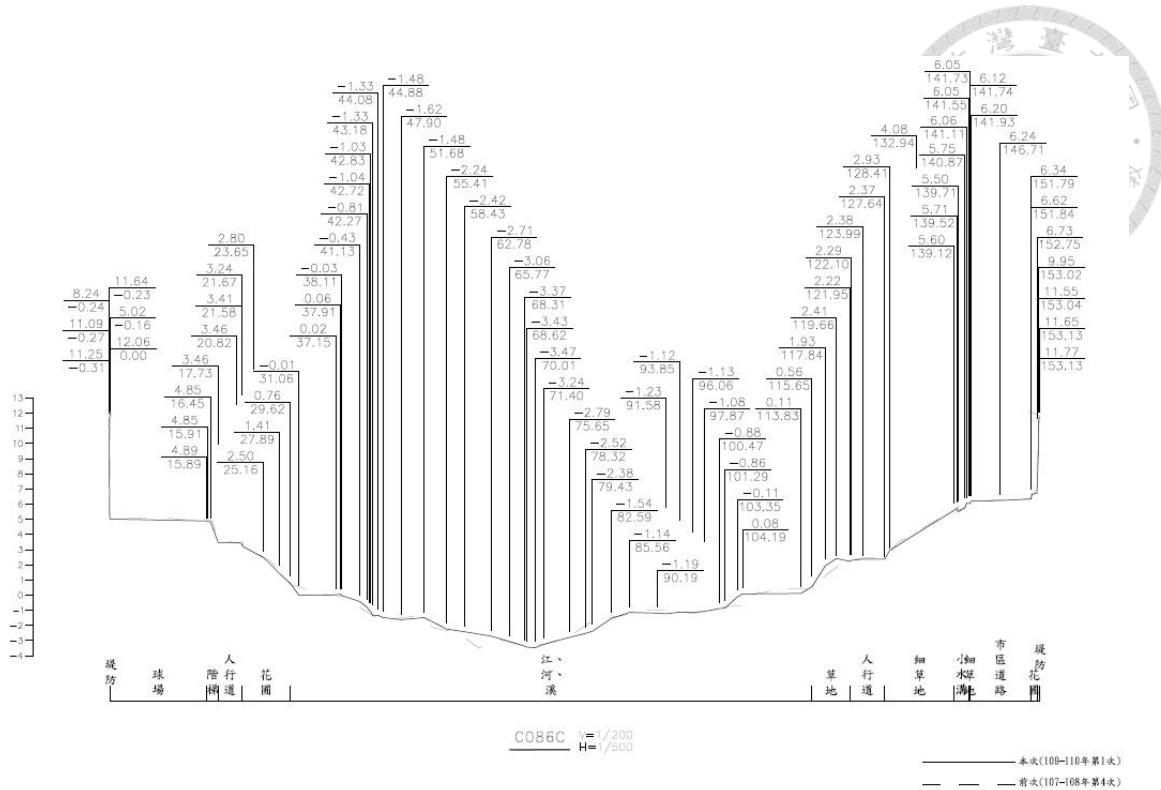


圖 4-14 成美長壽橋河道斷面圖

(資料來源：[20]）

依 4.1 節之原則所述，將儀器配置於河床高程相對較低之 P3 橋柱正上方橋面版上，並量測水流方向的訊號，如圖 4-15 及圖 4-16 藍色星號標示位置。

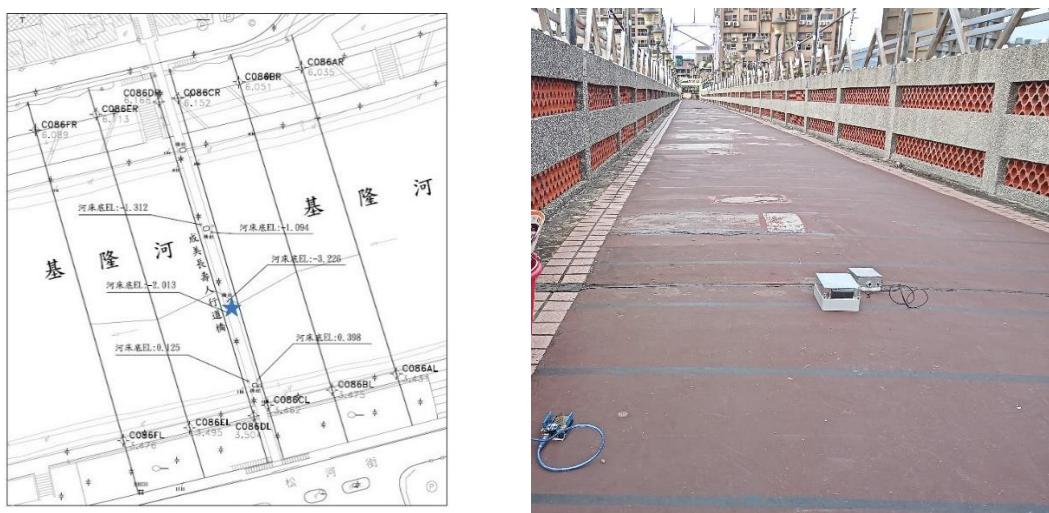


圖 4-15 成美長壽橋測量點位平面圖及現場儀器放置點位

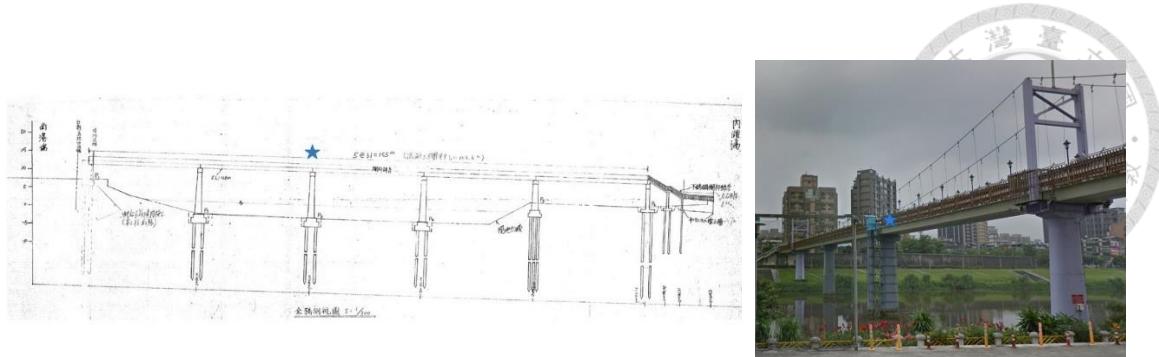


圖 4-16 成美長壽橋測量點位立面圖

本次量測共測得 10 筆數據，經過 4.2 節各步驟所獲得的結果與快速傅立葉(FFT)所識別之頻率做比較，如表 4-7 及圖 4-17 所示。由 STFTCATS 法所識別的 10 組頻率，其平均值、標準差及變異係數分別為 1.629、0.014 及 0.0084，其中標準差僅為 FFT 所獲致數據之 28%，變異係數僅為 FFT 所獲致數據之 27.27%。

表 4-7 成美長壽橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值

儀器位置及量測方向	橋面板中央-水流向										平均值	標準差	變異係數
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
FFT	1.63	1.5	1.57	1.65	1.656	1.644	1.67	1.626	1.62	1.668	1.623	0.050	0.0308
STFTCATS	1.62	1.65	1.65	1.62	1.65	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.629	0.014	0.0084

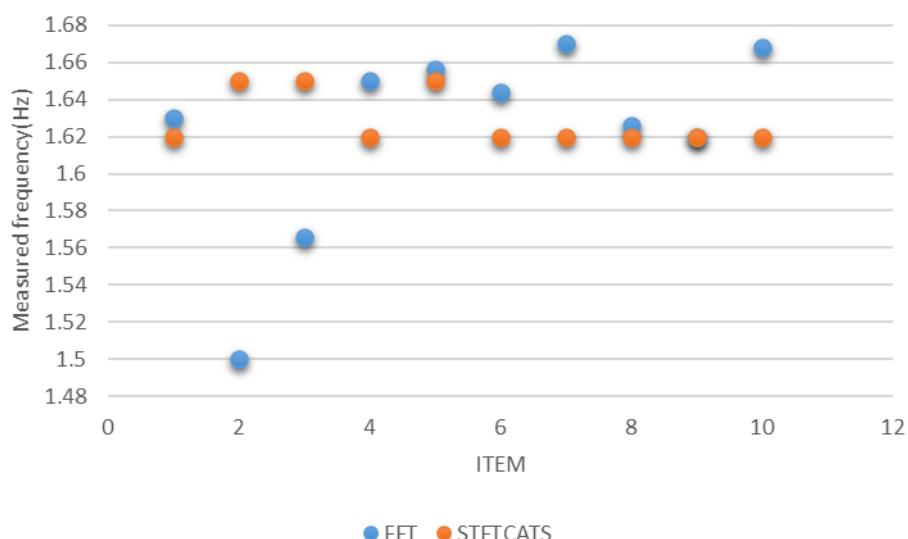


圖 4-17 成美長壽橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值比較



4.5.3 南湖大橋現地量測

依據臺北市工務局新建工程處的資料[20]，南湖大橋銜接臺北市內湖區與南港區並跨越基隆河，係於 1976 年竣工，迄今已約 48 年，主橋長度約 344m，最大淨寬 27.55m，橋孔數為 11 孔。主橋上部為預力混凝土 I 型梁、下部為鋼筋混凝土多柱式橋墩及橋台。該橋行水區域為主橋 P3 至 P9 間（南港端堤防於 P3 至 P4 間、內湖端堤防於 P8 至 P9 間），P4 至 P7 間則為主深槽區，南港端高灘地位於 P4 至 P5 間，內湖端高灘地位於 P6 至 P8 間。該橋於 1976 年竣工後，並於 2000 年拓寬為雙向 6 車道的路型，最後再於 2016 年辦理耐震補強，現況照片如圖 4-18 所示。

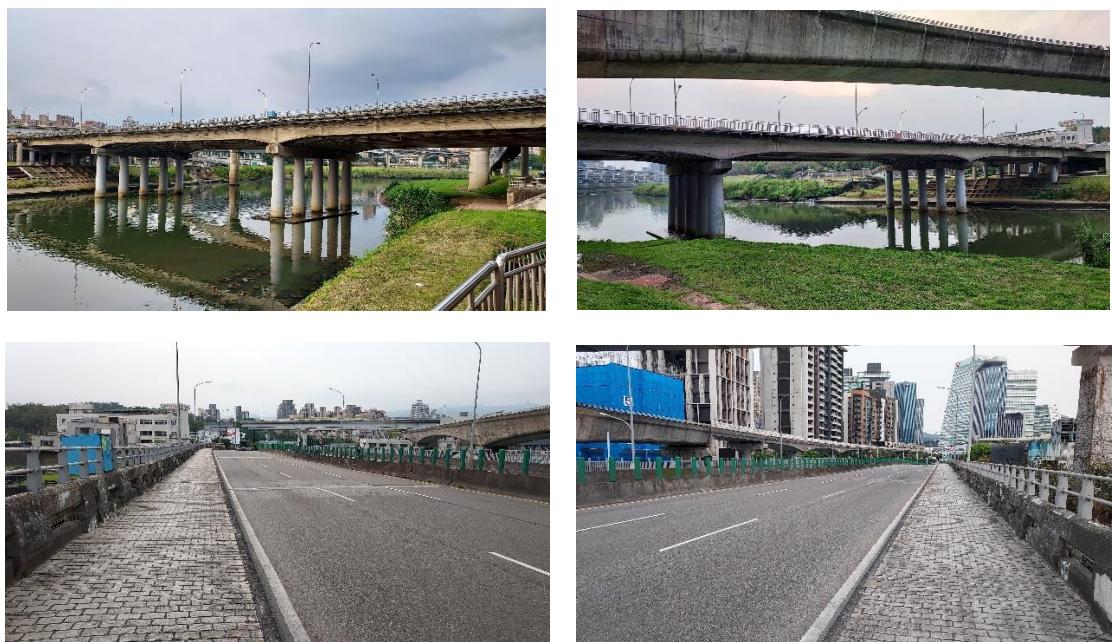


圖 4-18 南湖大橋現況照片(2024.03)

現場量測的位置如同 4.1 節所述，儀器係置於 P5 橋墩正上方靠近下游側之橋面板上，並量測水流方向的微振訊號。為使儀器確實量測到橋梁的振動，加速度器底部並使用石膏使之與橋面板固定，儀器放置位置如圖 4-19 藍色星號所示，現場配置如圖 4-20 所示。

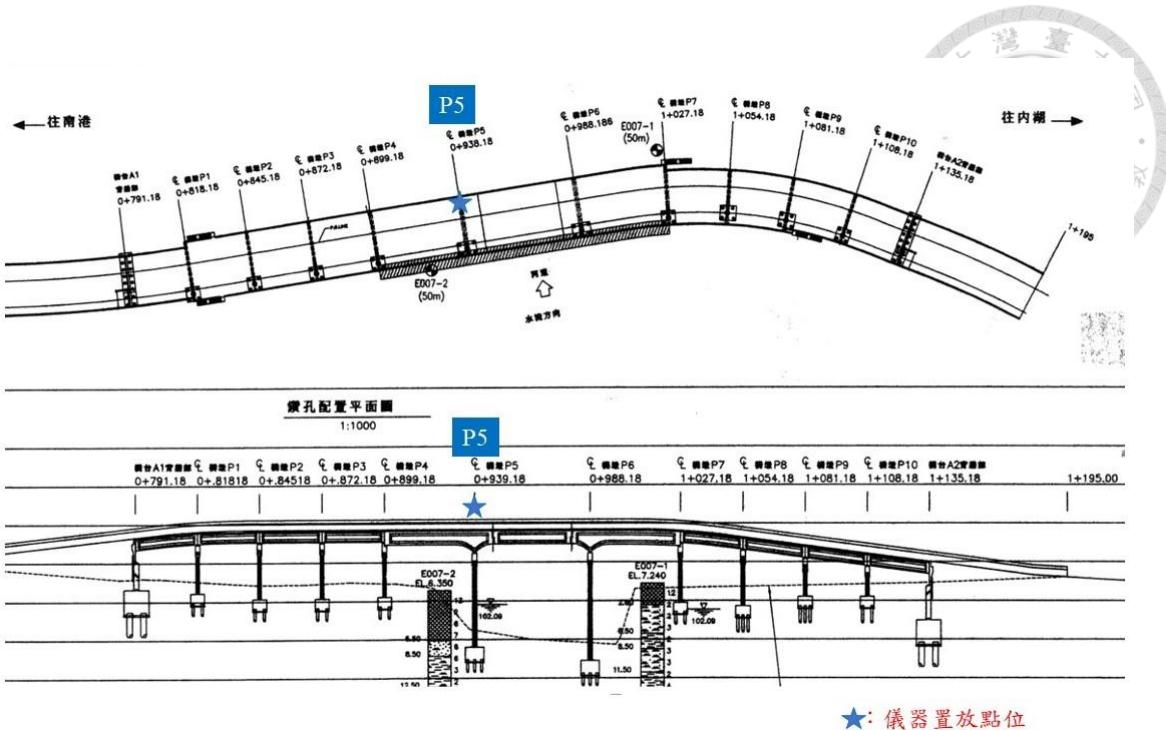


圖 4-19 南湖大橋量測儀器放置點位



圖 4-20 南湖大橋量測儀器現場配置圖

量測時間係於 2022 年 1 月 16 日下午，共測得 10 筆數據，經過 3.3 節各步驟所獲得的結果與快速傅立葉(FFT)所識別之頻率做比較，如表 4-8 及圖 4-21 所示，STFTCATS 法所獲致之標準差為 0.292，而 FFT 法所獲得之標準差為 3.955，STFTCATS 法僅為 FFT 法之 7.38%，STFTCATS 法所獲致之變異係數為 0.1305，而 FFT 法所獲得之變異係數為 0.8796，STFTCATS 法僅為 FFT 法之 14.84%。由 STFTCATS 法所識別的 10 組頻率，經 3.3 節的步驟，判別第 3 組量測數據大於 10



組量測平均值加上兩倍標準差，故認定該值為離群值並予剔除，並據以計算自然頻率平均值。

此外於量測 10 組資料期間，也一併紀錄重車(多為大型公車)經過的時間，共計 25 車次，惟於自然頻率之識別上並無造成異狀，由此可知，其若非僅能激發上部結構局部模態之車輛，或車輛本身之機械特性過於顯著，則可視為一般橋梁振動之激振力，並不影響橋梁振動自然頻率之識別結果。

表 4-8 南湖大橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值

測量地點：臺北市南湖大橋下游側橋面板											測量日期：2022/1/16				
次別		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 (Hz)	標準差 (Hz)	變異係數	剔除離群值後之平均值(Hz)
FFT	有效值(Hz)	2.21	2.13	3.08	3.16	2.05	2.18	2.63	3.14	10.41		4.50	3.955	0.8796	3.44
	剔除離群值										13.99				
STFTCATS	有效值(Hz)	2.19	2.19		2.04	2.04	2.19	2.07	2.19	2.19	2.16	2.24	0.292	0.1305	2.14
	剔除離群值			3.09											

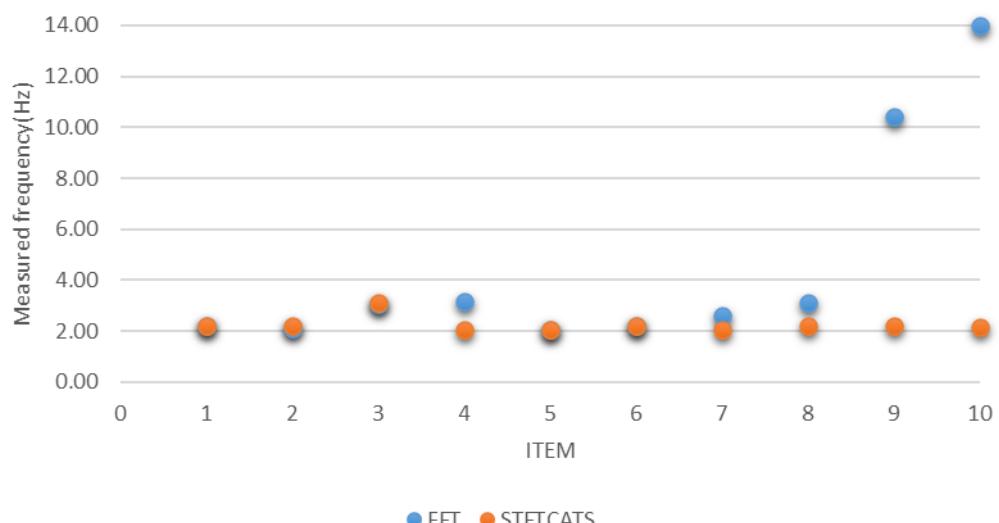


圖 4-21 南湖大橋以 FFT 及 STFTCATS 法所識別之頻率值比較

微振量測的原理係以像是水流、車流、風等為環境振源，其所引致之振動持續較長時間，相對於某個干擾源於某特定時間點所引致之單一頻率，若將測量時間內所有之頻率對應之強度值加總，環境微振所引起頻率加總應較大，因此將頻率強度

沿測量時間加總之最大值作為橋梁之自然頻率，經過萬壽橋、成美長壽橋及南湖大橋所測得數據的驗證，於自然頻率識別上，STFTCATS 法確實較 FFT 法直觀且穩定。本研究以無線感測儀器於橋梁橋面板量測自然頻率值之時機，係為平時災前預警或災後評估橋墩基礎淘刷深度，故其非長時間固定設置於橋梁上量測，故在量測次數有限制之情況下，為避免誤判之機會，量測之穩定性即相對重要。在後續章節將以有限元素法模擬橋梁振動，並得出橋梁自然頻率與淘刷深度之關係，進而探討實測和模擬之橋梁自然頻率間的差異。

4.6 小結

本章旨在對第 3 章所提之整體研究架構與概念，說明具體的實現方法與驗證。首先，說明本研究使用之無線感測儀器的組成，再說明儀器訊號傳輸方式及各部性能。另在案例研究部分，於 3 柱的萬壽橋、單柱成美長壽橋人行橋及拓寬後為 5 柱的南湖大橋等三座橋梁橋面板橋柱正上方以自製無線感測儀器進行水流方向之微振量測試驗，作為比較 FFT 和 STFTCATS 兩種識別橋梁自然頻率方式比較之驗證，結果顯示於不同結構形式及交通量下，皆可藉自製無線感測儀器進行微振量測識別橋梁的自然頻率，且以 FFT 及 STFTCATS 方法識別橋梁自然頻率時，STFTCATS 的識別度較高，並且可以獲致較為穩定的識別結果，與微振訊號之理論較為吻合。

此外，由於 STFTCATS 法所識別橋梁自然頻率之標準差及變異係數皆較 FFT 法所識別者為小，亦造成後者之離群值較少，致 FFT 法識別之整體自然頻率平均值也較不準確之現象。



第5章 數值模擬驗證

本研究的重要目的之一是獲得橋梁基礎淘刷深度和橋梁振動自然頻率之間的關係，以作為後續橋梁維護管理之應用。而若橋梁所在現場有足夠數量的歷史淘刷深度及該淘刷發生當時自然頻率之量測資料，則可利用迴歸分析等方法，獲得前述兩者之間的關係。但當現場存在的歷史淘刷資料數量不足，或僅局限於某個深度的範圍，則以數值分析方法獲得淘刷深度和自然頻率的關係就有其必要。本研究採用有限元素軟體，對於前述章節中的南湖大橋進行數值模擬分析，以獲得基礎淘刷深度和橋梁振動自然頻率之間的關係，再以現場實測之自然頻率及淘刷深度加以驗證，以作為後續橋梁維護管理之參考。

5.1 有限元素軟體

目前市面上有許多有限元素分析軟體，如 ABAQUS、ANSYS、LS-DYNA、MSC Nastran、ETABS 及 SAP2000 等，每個軟體都有其獨特的特色和應用領域，例如 ABAQUS 廣泛應用於工程和科學領域，具有強大的非線性分析功能，可以處理複雜的材料模型、接觸問題和大變形情況。ANSYS 則具有廣泛的模擬能力，包括結構、流體、熱、電磁等多物理場耦合分析等。本研究係採用 SAP2000 作為模擬工具，其為一款用於結構分析和設計的有限元素軟體，由 Computers and Structures, Inc. 開發，具有直觀的用戶界面和強大的分析功能，廣泛應用於土木工程和結構工程領域。本研究係欲獲得橋梁振動時的特徵值，採用 SAP2000 v.16 作為有限元素法建模的工具。

5.2 建模步驟



5.2.1 橋梁之竣工圖及相關資料之取得

有限元素軟體建模時首先必須取得原橋梁之竣工圖，由於本研究實測之南湖大橋始建於 1975 年而竣工於 1976 年，年代久遠迄今已近半世紀，蒐集相關竣工圖資極其不易，且該橋歷經 2000 年橋梁拓寬及 2016 年辦理耐震補強，結構型式亦已有所改變。本研究承蒙該橋梁之主管機關臺北市政府工務局新建工程處提供此三階段之竣工圖，如圖 5-1 所示，以期建模結果與現場實際狀況更為吻合。

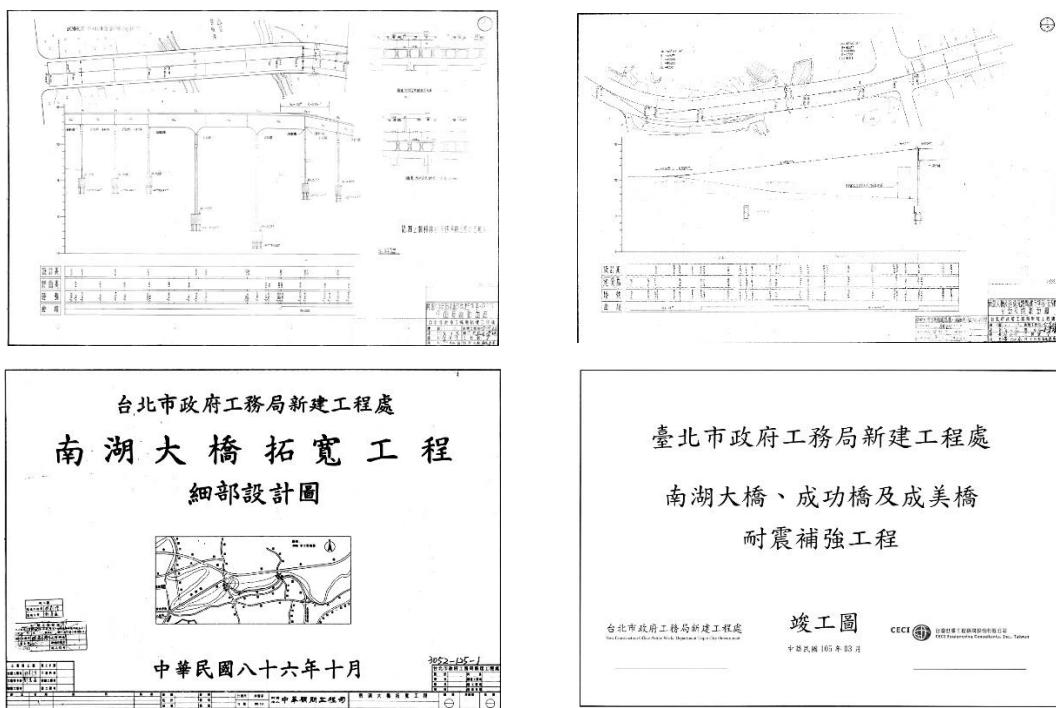


圖 5-1 南湖大橋各階段竣工圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

另依據臺北市政府工務局新建工程處 109-110 年度橋涵安全檢測工作報告[20]可得知南湖大橋之基本資料及橋梁附近河床高程等重要資訊，如表 5-1 所示，將於後續章節加以應用、驗證。

表 5-1 南湖大橋基本資料表



管理資料					
橋梁名稱	南湖大橋		使用狀態	正常使用	
橋梁編號	E007	類別	(E)跨河橋	標別	東區
設施種類	橋梁	交流/匝道	否	匝道編號	
管理單位	新建工程處	行政區	南港區		
道路等級	市區道路	路線	康寧路三段至南港三重路		
跨越物體	基隆河	參考地標	南港經貿園區		
橋頭里程	無 K+無 M	橋尾里程	無 K+無 M	改造長度	5.0KM
開工日期	1975/4/25	竣工年月	65 年 5 月	檢測週期	24(月/次)
接管日期	1977/8/30	保固日期	1981/5/15	拆除日期	
造價	16075415	合約編號	(90/03/08 更新資料拓寬)		
設計單位	新建工程處	監造單位	不詳	施工單位	元順營造廠
年平均日交通量	48860	竣工圖保存地點	新建工程處		
警急應變防災道路	否	維生管線	無	附掛管線	不詳
河川資料					
河川名稱	基隆河	上游 500M 構造物	台北捷運內湖線	下游 500M 構造物	無
上游最近水位站	南湖抽水站	計畫洪水位	10.3M	計畫河寬	150M
計畫堤頂高程	12.94EL	設計河床高程	無此資料 EL	設計橋梁出水高	1.5EL
幾何資料					
橋梁總長	344M	A1 進橋版長度	不詳 M	A2 進橋版長度	不詳 M
最大淨寬	27.55M	最小淨寬	21.5M	橋版投影面積	9335M ²
總車道數	6	總橋孔數	11	最大跨距	50M
最高橋墩高度	10.76M	最低橋上淨高	13M	最低橋下淨高	2.6M
跨距分配	4@27m+39m+50m+39m+4@27m				
橋頭 GPS 經度	121.61315233	橋頭 GPS 緯度	25.06196645		
橋尾 GPS 經度	121.61106706	橋尾 GPS 緯度	25.0643329		

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

5.2.2 建模單元之界定

如 4.5.3 節所述南湖大橋之橋孔數為 11 孔，主橋上部為預力混凝土 I 型梁，下部為鋼筋混凝土多柱式橋墩，橋台行水區域為主橋 P3 至 P9 間（南港端堤防於



P3 至 P4 間、內湖端堤防於 P8 至 P9 間)，P4 至 P7 間則為主深槽區。因主深槽區位於 P5 與 P6 橋墩之間，而儀器所設置位置如 4.5.3 節所述，係位於 P5 橋墩正上方靠近下游側的橋面版上，故建模單元包含 P5 至 P6 橋墩間的結構範圍，其關係如圖 5-2 所示。

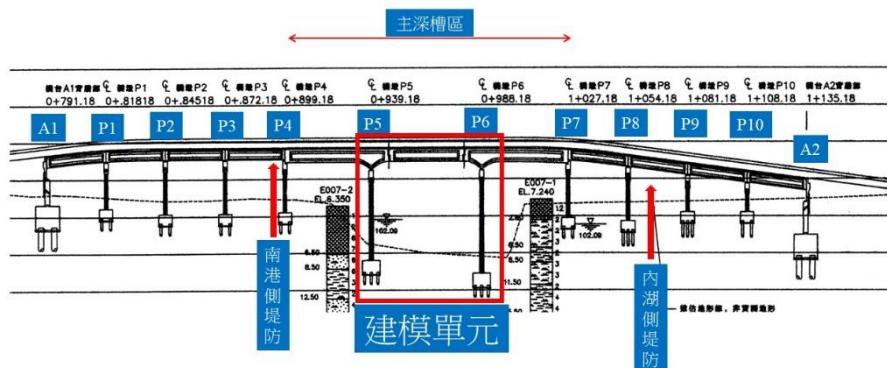


圖 5-2 南湖大橋橋墩、主深槽區及建模單元圖

5.2.3 橋梁各部尺寸、材料及淘刷基準高程設定

如 4.5.3 節所述，由於南湖大橋於 1976 年竣工後，歷經 2000 年拓寬，及 2016 年的耐震補強，各階段使用之材料不盡相同，故將較為大宗之材料包含混凝土、鋼筋等整理如表 5-2 所示，另各主要構件尺寸如表 5-3 所示。混凝土之彈性模數依據中華民國內政部之混凝土結構設計規範(110 年版) 1.9.1 節，在常重混凝土的情況下，定為 $E_c = 15000\sqrt{f'_c}$ (kgf/cm²)。鋼筋之彈性模數依 1.9.2 節以 $E_s = 2.04 \times 10^6$ (kgf/cm²) 定之。

表 5-2 南湖大橋各階段使用材料強度

	構件名稱	原橋梁部分	拓寬部分
混凝土	預力梁	$f'_c = 350\text{kgf/cm}^2$	$f'_c = 350\text{kgf/cm}^2$
	橋墩、帽梁	$f'_c = 210\text{kgf/cm}^2$	$f'_c = 280\text{kgf/cm}^2$
	橋台	$f'_c = 210\text{kgf/cm}^2$	$f'_c = 240\text{kgf/cm}^2$
	基礎	$f'_c = 210\text{kgf/cm}^2$	$f'_c = 280\text{kgf/cm}^2$
	基樁	$f'_c = 210\text{kgf/cm}^2$	$f'_c = 210\text{kgf/cm}^2$
鋼筋	SD28	$f_y^{\square} = 2800\text{kgf/cm}^2$	$f_y^{\square} = 2800\text{kgf/cm}^2$
	SD42	$f_y^{\square} = 2800\text{kgf/cm}^2$	$f_y^{\square} = 4200\text{kgf/cm}^2$

表 5-3 南湖大橋各主要構件尺寸

構件名稱		原橋梁部分	拓寬部分
預力梁		長度：50m	長度：50m
橋墩	P5	高度：9.1m 直徑：2m	高度：10.24m 直徑：2m
	P6	高度：11.4m 直徑：2m	高度：12.01m 直徑：2m
隔梁		斷面 22*103cm	斷面 22*103cm
帽梁		1970*226*150cm	620*137*200cm
樁帽		1920*800*160cm	600*800*190cm
基樁	P5	120cm*23m*21	120cm*35m*6
	P6	120cm*21m*21	120cm*35m*6

另依據竣工圖所示，原橋梁部分 P5 之樁帽頂高程為 E.L.=0.515m，後續分析將以此高程作為未淘刷之河床高程基準點，即淘刷深度為 0 之高程，如圖 5-3 所示。

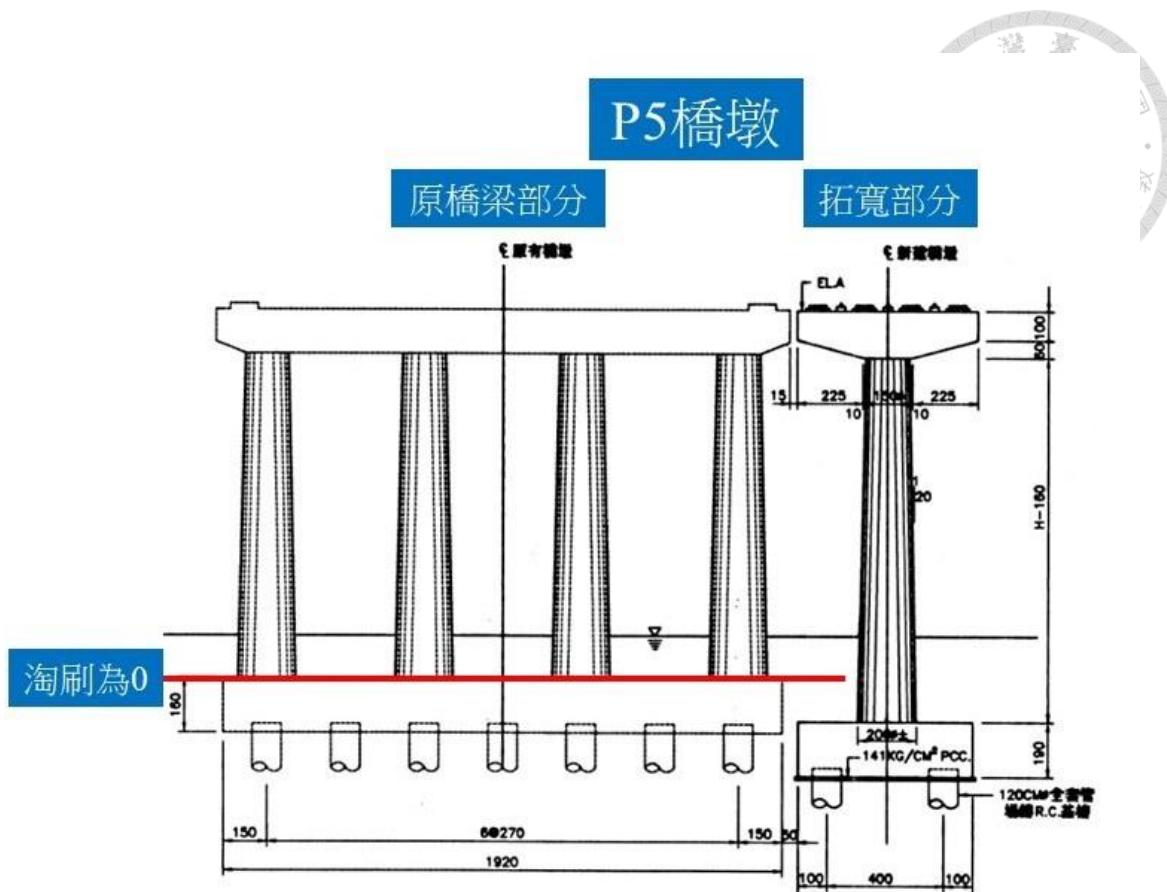


圖 5-3 淘刷深度為 0 之高程設定

5.2.4 橋墩柱之建模

南湖大橋建模單元內共包含 P5、P6 兩橋墩，原橋梁部分各有 4 柱，拓寬部分有 1 單柱，其尺寸如表 5-3 所示。該橋梁曾於 2016 年辦理耐震補強，橋墩的補強方式係以 12mm 的 ASTM-A36 鋼板加以包覆，鋼板和原橋墩之間的間隙再以 50mm 的無收縮水泥砂漿灌漿充填，如圖 5-4 所示。此混凝土與鋼板之複合斷面尚無法以 SAP2000 加以模擬，僅能將之轉換為等值單一材質斷面加以處理。

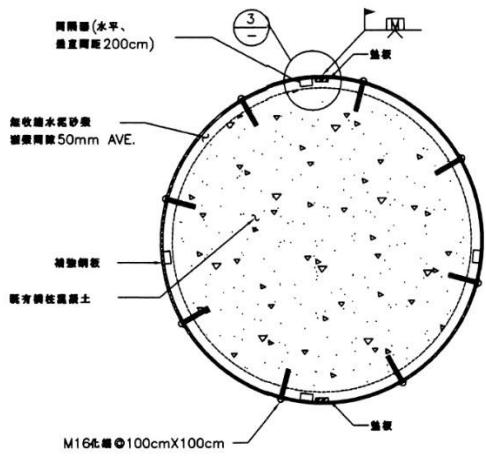


圖 5-4 橋墩鋼板包覆耐震補強

參考邱耀正等人於 2008 年對於老舊 RC 結構建物進行耐震補強的案例[58]，其補強方式亦為在柱梁構架上包覆鋼板，惟其使用之模擬軟體為 ETABS。如同 SAP2000 於模擬橋墩補強時所遭遇之問題，ETABS 分析程式的輸入設計也無法模擬鋼板包覆 RC 柱之複合斷面，而其採取的方法係將鋼板之抗彎和抗剪能力，分別以等效主筋及箍筋模擬。考量複合斷面轉換後之轉換斷面形狀亦難以模擬，故其具體處理方式係採原有斷面之尺寸，而更改其彈性模數(Modulus of Elasticity)，以此方式模擬 RC 柱以鋼板補強後所增加的勁度，即受補強柱之彈性模數值以一般結構用鋼之彈性模數 $E_s = 2.04 \times 10^6$ (kgf/cm²) 代之。考量該研究之分析方法對於模擬建築物的強度與耐震行為有頗佳的可靠度，且 ETABS 和 SAP2000 兩模擬軟體同為美國 CSI(Computers and Structures, Inc.) 公司之產品，故本研究擬比照該方式處理混凝土與鋼板之複合斷面尚無法模擬的問題，該設定如圖 5-5 所示。

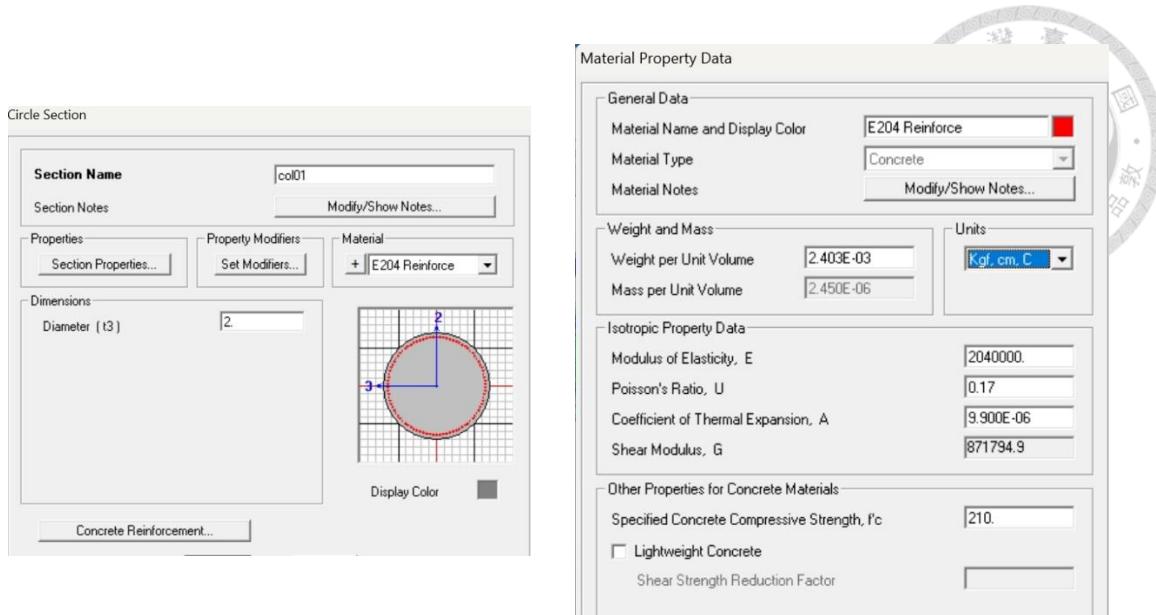


圖 5-5 鋼板包覆耐震補強橋墩柱之複合斷面設定

5.2.5 梁之建模

南湖大橋的梁可分為帽梁、大梁、隔梁等部分，分述如下：

1. 帽梁

帽梁斷面尺寸略有變化，惟大致維持均一斷面，故將原橋梁和拓寬部分之 P5、P6 帽梁各近似為 1970*226*150cm 及 620*137*200cm，如圖 5-6 所示。帽梁與橋墩柱在有限元素模型中不連續，因此將帽梁與橋墩柱接點皆以”EQUAL”之 constraint 束制設定，使其有連接的效果。

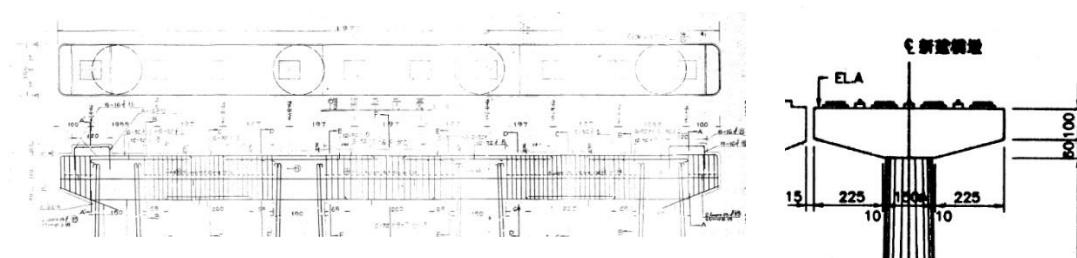


圖 5-6 南湖大橋 P5、P6 橋墩帽梁竣工圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

2. 大梁

南湖大橋之大梁型式為 I 型預力梁，原橋梁部分有 10 根梁，大梁間距除

外側為 195.5 公分外，其餘為 197 公分。拓寬部分有 4 根梁，間距為 160 公分，共計 14 根梁，上部結構及大梁斷面尺寸詳如圖 5-7 所示，大梁於 SAP2000 尺寸設定如圖 5-8 所示。有關大梁與帽梁的束制設定，因 P5、P6 橋墩間之大梁於兩端為固定端，近似鉸支承狀態，故於大梁兩側釋放彎矩之束制，即不傳遞彎矩力量，扭矩則擇一端釋放，以求該大梁整體結構之穩定。

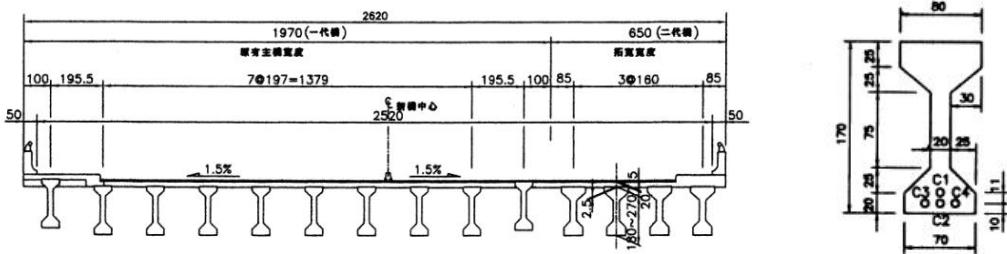


圖 5-7 南湖大橋上部結構及大梁斷面圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

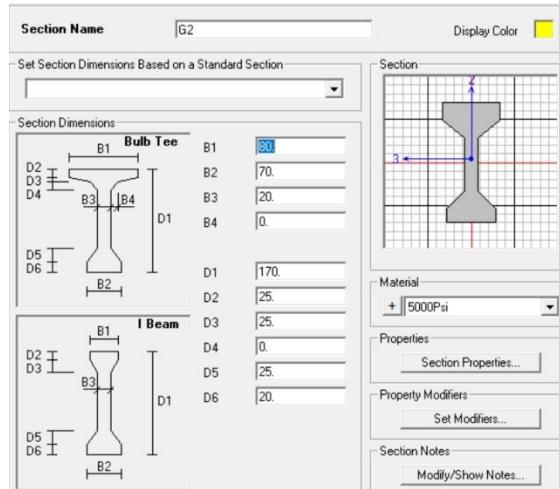


圖 5-8 南湖大橋大梁於 SAP2000 尺寸設定

3. 隔梁

南湖大橋於 P5 和 P6 間共有 6 根隔梁，最外側兩根距離橋墩為 800 公分，其餘隔梁間距為 680 公分，其斷面為 103*22 公分，於 SAP2000 中建置如

圖 5-9 所示。

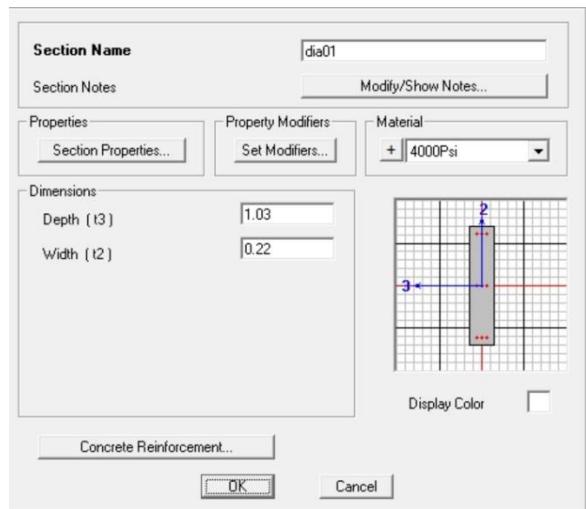


圖 5-9 南湖大橋隔梁於 SAP2000 尺寸設定

5.2.6 橋面板之建模

考量若將橋面板以 SAP2000 的 Area Section 元素加以模擬，則可能導致模型在該處的勁度過大、耗能過多變形過小，而無法模擬橋梁的動力行為。故本研究以 Frame Section 元素建構等值斜撐之二力桿件，以模擬橋面板之動力行為。由橋面板轉換為等值斜撐之推導說明如下：

將橋面板分割為大梁與隔梁所切分出來的數個板塊，單一板塊如圖 5-10 所示，其中， λ 為隔梁間距、 h 為大梁間距、 τ 為剪應力、 γ 為剪應變、 H 為剪力、 G 為橋面板的剪力模數 (shear modulus)、 E 為彈性模數(elastic modulus)、 D 為斜撐軸力、 d 為斜撐之長度、 t_w 為橋面板厚度、 ν 為泊松比(Poisson's ratio)。

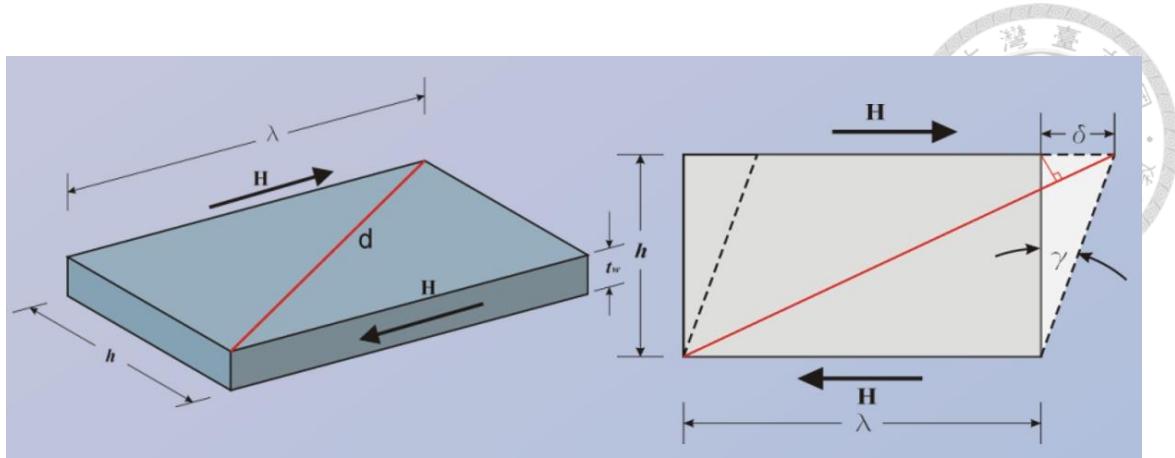


圖 5-10 橋面板等值斜撐推導圖

(資料來源：台灣世曦工程顧問股份有限公司，2024)

由上圖可知

$$\delta = \gamma h = \tau h / G \quad (5-1)$$

另將

$$H = \tau t_w \lambda \quad (5-2)$$

代入(5-1)後，可得到

$$\delta = H h / G t_w \lambda \quad (5-3)$$

又因

$$D = H d / \lambda \quad (5-4)$$

由(5-4)可得到

$$\delta' = (H / E A_g) \times (d / \lambda)^2 d \quad (5-5)$$

又因變形量相等，即

$$\delta = \delta' \quad (5-6)$$

可得到等值斜撐斷面積

$$A_g = G / E \times (d^3 / h \lambda) t_w \quad (5-7)$$

另剪力模數與彈性模數之關係採用

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5-8)$$



以此推導而得之公式，將南湖大橋之大梁間距、隔梁間距、橋面板厚度等資訊代入可獲得等值斜撐之斷面積，如表 5-4 所示，於 SAP2000 建構等值斜撐如圖 5-11 所示。

表 5-4 南湖大橋橋面板等值斜撐計算表

混凝土抗壓強度 (kgf/cm ²)	大梁間距 (cm)	隔梁間距 (cm)	板厚 (cm)	彈性模數 (kgf/cm ²)	剪力模數 (kgf/cm ²)	斜撐長度 (cm)	等值面積 (m ²)	所在位置
210	197	680	20	217371	92893	707.96	2.2640	原橋中間
210	197	800	20	217371	92893	823.90	3.0330	原橋兩側
350	160	680	20	280624	119925	698.57	2.6780	拓寬部分中間
350	160	800	20	280624	119925	815.84	3.6260	拓寬部分兩側
350	185	680	20	280624	119925	704.72	2.3778	新舊銜接處中間
350	185	800	20	280624	119925	821.11	3.1971	新舊銜接處兩側

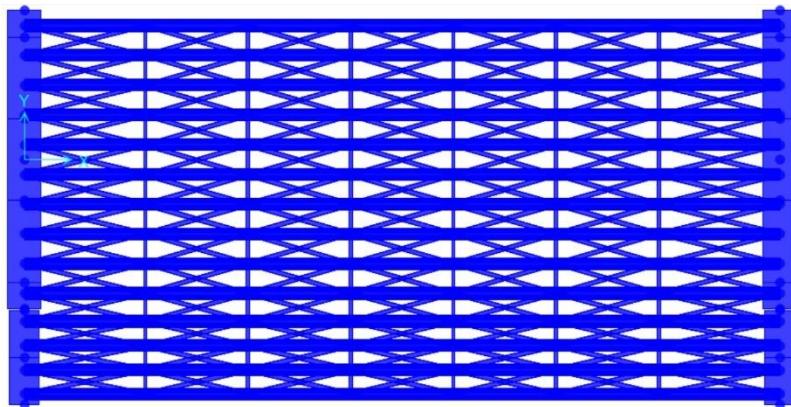


圖 5-11 南湖大橋橋面板以等值斜撐模擬圖

由於等值斜撐主要係模擬橋面板之勁度，橋面板的質量仍需另予考量。因此將橋面板所造成之載重以均布之方式作用於 14 根大梁之上，最後再以設定 Mass Source 之方式將該部分的質量計入分析單元內。本研究混凝土及瀝青混凝土之單位重均設為 $2.3(t/m^3)$ ，另由南湖大橋之竣工圖可知橋面板厚 20 公分，其上之瀝青混凝土厚 5 公分，P5、P6 橋墩之間之橋面板長 50 公尺、寬 26.2 公尺，可計算



每根大梁之均布載重如下：

$$\begin{aligned}\text{橋面版重量} &= \text{單位重} \times \text{板厚度} \times \text{版寬度} \times \text{版長度} \\ &= 2.3 \times (0.2 + 0.05) \times 26.2 \times 50 = 753.25 \text{ tf}\end{aligned}$$

$$\text{每根大梁之均布載重} = 753.25 \div 14 \div 50 = 1.076 \text{ tf/m}^2$$

另考量部分橋梁設施，如護欄、中央分隔島、路燈、附掛管線等...，並未納入建模，估算結果為 0.225 tf/m^2 ，將比照上述橋面版質量計入系統之方式辦理。

5.2.7 椽帽之建模

南湖大橋的樁帽仍由原橋梁及拓寬部分所組成，現況如圖 5-12 所示，另由竣工圖可知，在原橋梁部分 P5、P6 橋墩之樁帽長、寬、高皆為 1920 公分、800 公分及 160 公分。拓寬部分 P5、P6 橋墩之樁帽長、寬、高則為 600 公分、800 公分、190 公分，如圖 5-13 所示。樁帽與橋墩柱及基樁在有限元素模型中不連續，因此將三者在 SAP2000 中皆以”EQUAL”之 constraint 束制設定，使其有連接的效果。



圖 5-12 南湖大橋橋墩現況(2024.03)

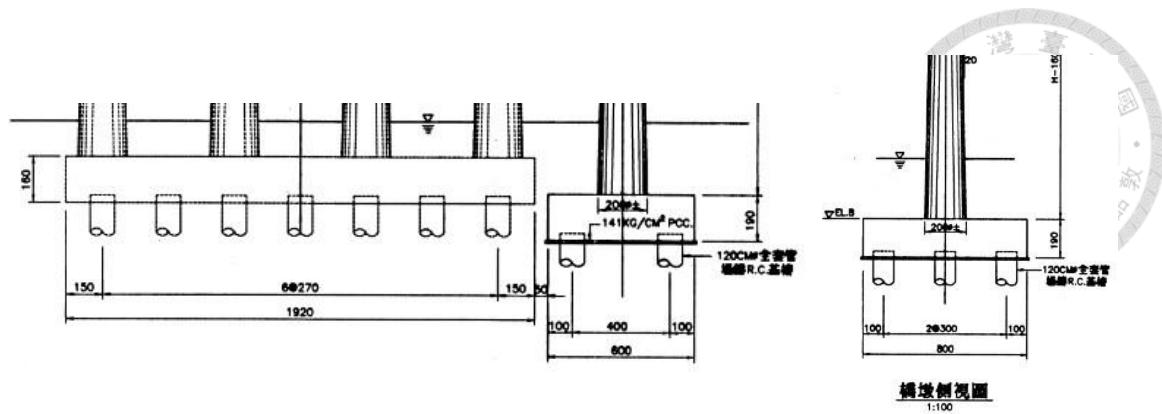


圖 5-13 南湖大橋樁帽尺寸圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

5.2.8 基樁之建模

南湖大橋的基樁不論原橋梁或拓寬部分皆以群樁方式設置，原橋梁在 P5 橋墩部分是直徑 120 公分之全套管場鑄 R.C. 基樁，長度 23 公尺，數量共 21 支，並以 7×3 之方式排列。原橋梁在 P6 橋墩部分除了長度為 21 公尺外，其餘與 P5 相同。拓寬部分 P5 及 P6 橋墩亦為直徑 120 公分之全套管場鑄 R.C. 基樁，長度 35 公尺，數量共 6 支，並以 2×3 之方式排列，如圖 5-14 所示。

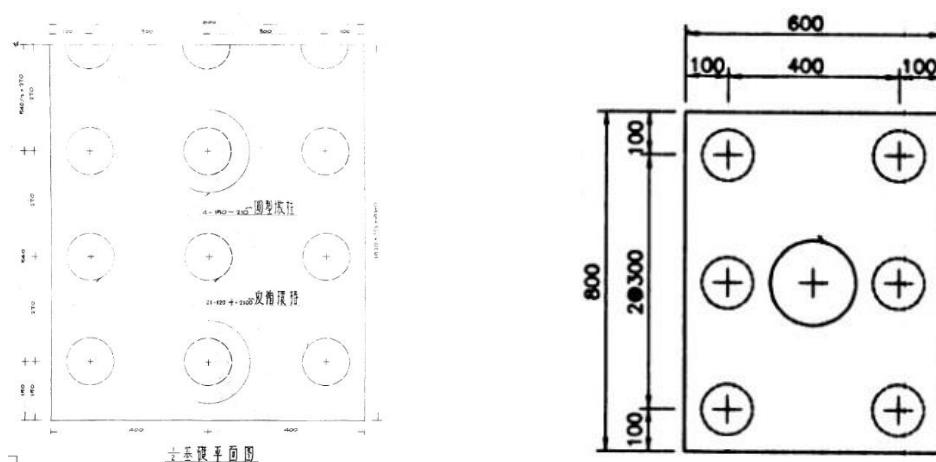


圖 5-14 原橋梁(左)及拓寬部分(右)基樁配置平面圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)



5.2.9 土壤結構互制之建模

由於本研究係以基礎及基樁與土壤之互制行為模擬其淘刷情形，因此對土壤與結構體的互制特徵值問題益形重要。然而，此類型問題分析通常非常複雜，因為土壤、橋梁基礎結構、上部結構的結構振態相互混合，因此以適當的有限元素方法分析是需要的[43]。

曾惠斌等人[43]曾經提出兩種有限元素分析法，即以 3D 連續型有限元素模型模擬土壤與橋梁結構，即 Complicated finite element model 及以簡化土壤與橋梁結構體的互制行為分析：樁帽以 plate 元素、樁基礎以 beam 元素、土壤以 spring 元素各自取代原本的連續性的元素的 Simple soil spring model。Complicated finite element model 方法雖可得到精確的結果，然而此法造成有限元素網格(mesh)變得巨大而困難處理。Simple soil spring model 方法則將樁帽、樁基礎及土壤分別使用 plate、beam 及 spring 元素來模擬，使得有限元素的分析可以更容易實行。為了比較兩種方法獲致結果的差異，曾惠斌等人將兩種方法以兩種型式的橋梁及 9 種沖刷深度加以比較，結果顯示了兩種方法所得到的成果是相似的，顯示無論使用上述兩種方法計算自然頻率皆為可行。本研究基於此研究結果，採用簡易土壤彈簧模型以模擬土壤及基礎間之互制關係。而土壤彈簧模型之建立需要土壤彈簧常數加以模擬，該常數係由各類經驗公式所獲得，本研究參考中華民國公路橋梁耐震設計規範解說(交技(108)字第 1085000530 號)C4.4 節之地盤反力係數經驗公式，作為土壤彈簧常數計算之依據，其結構分析模式如圖 5-15 所示。

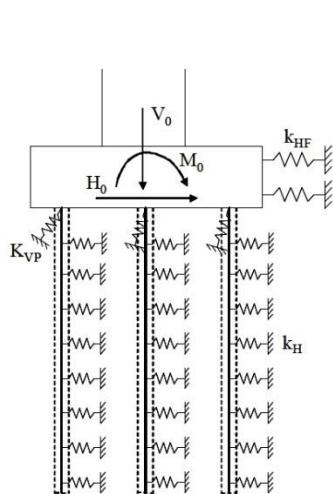


圖 5-15 基礎基樁之分析模式

(資料來源：[59])

1. 基樁前方地盤之水平地盤反力係數 k_H (kgf/cm³)：

$$k_H = 0.34(\alpha E_0)^{1.1} \times D^{-0.31}(EI)^{-0.103} \quad (5-9)$$

利用標準貫入試驗 N 值推估變形模數：

$$E_0 = 28N \quad (5-10)$$

其中， D 為樁徑(cm)， EI 為基樁撓曲勁度(kgf/cm²)， E_0 為變形模數(kgf/cm²)， α 為地震時地盤反力係數推估用係數，另依據中華民國建築物基礎構造設計規範(內政部 90.10.02 台內營字第 9085629 號函訂定、112.06.20 台內營字第 1120807974 號令修正發布)中第六章中有關沉箱基礎述及在平時狀態下地盤反力係數推估用係數 $\alpha=1$ ，因本研究係屬平時之微振量測試驗，故予以參照沿用，即以 $\alpha=1$ 計算。

2. 樁帽基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (kgf/cm³)：

$$k_{HF} = k_{H0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-3/4} \quad (5-11)$$

$$k_{H0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 \quad (5-12)$$

$$B_H = B_e (\leq \sqrt{B_e \times L_e}) \quad (5-13)$$

其中， k_{H0} 為水平地盤反力係數基準值(kgf/cm³)， B_H (cm)為與水平側向載



重方向正交之等值基礎寬度, B_e (cm)為基礎有效正面寬, 如圖 5-16 所示。

L_e (cm)為基礎之有效埋置深度。

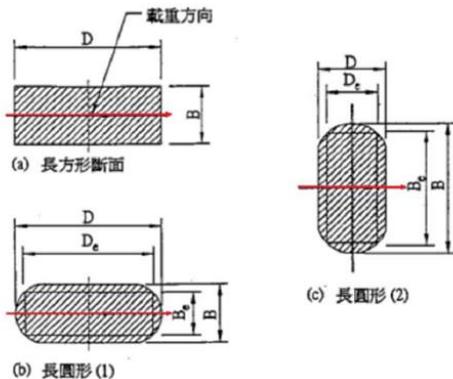


圖 5-16 基礎之有效寬度 B_e

(資料來源：[59])

另因樁體底部為了整體結構穩定已設定為 Pined Restraints 模擬，即以鉸接型式與大地接觸，因此不考慮基樁軸向單樁樁頭等值彈簧常數 k_{VP} ，而依據中華民國建築物基礎構造設計規範（內政部 90.10.02 台內營字第 9085629 號函訂定、112.06.20 台內營字第 1120807974 號令修正發布）中第六章中有關沉箱基礎樁體垂直地盤摩擦力係數 k_{SVB} (kgf/cm³)，考慮樁體垂直摩擦彈簧常數，並以基樁前方地盤之水平地盤反力係數 k_H 之 0.3 倍計算。即

3. 樁體垂直地盤摩擦力係數 k_{SVB} (kgf/cm³)：

$$k_{SVB} = 0.3k_H \quad (5-14)$$

為了求得土壤彈簧常數，必須藉由地質鑽探相關資料，以取得標準貫入試驗 N 值，該部分依據南湖大橋竣工圖內之鑽探資料據以獲得，如圖 5-17 所示。

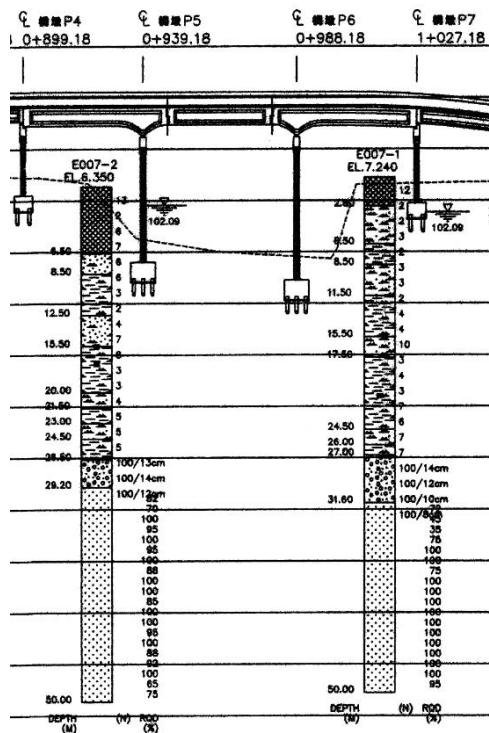


圖 5-17 南湖大橋 P5、P6 橋墩地質鑽探圖

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

以 P5 橋墩為例，依據竣工圖將橋墩附近的地質鑽探整理如表 5-5 所示，並獲致各高程土壤之 N 值。

表 5-5 南湖大橋 P5 橋墩地質鑽探資料

鑽探高程 E.L.(m)	G.L.(m)	土層厚度(m)	N 值	土壤分類
6.35~0.15	0-6.5	6.5	7	填方
-0.15~-2.15	6.5~8.5	2	6	粉土質細砂
-2.15~-6.15	8.5~12.5	4	5	粉土質黏土
-6.15~-9.15	12.5~15.5	3	6	粉土質細砂
-9.15~-13.65	15.5~20.0	4.5	5	粉土質黏土
-13.65~-15.15	20.0~21.5	1.5	4	砂質粉土
-15.15~-16.65	21.5~23.0	1.5	5	粉土
-16.65~-18.15	23.0~24.5	1.5	5	砂質粉土
-18.15~-20.15	24.5~26.5	2	5	粉土
-20.15~-22.85	26.5~29.2	2.7	100	砂質礫
-22.85~-43.65	29.2~50	20.8	100	砂岩

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

南湖大橋原橋梁及拓寬部分在 P5、P6 共有 4 個橋墩基礎，其高程不盡相同，如表 5-6 所示。如 5.2.3 節所述本研究係將淘刷深度為 0 之河床高程設於 P5 樁帽頂部，即 E.L.=0.515m 之處，如圖 5-3 所示。

表 5-6 南湖大橋 P5、P6 等 4 橋墩樁帽高程

		原橋梁部分	拓寬部分
P5	樁帽頂 E.L.(m)	0.515	-1
	樁帽底 E.L.(m)	-1.085	-2.9
P6	樁帽頂 E.L.(m)	-1.767	-2.77
	樁帽底 E.L.(m)	-3.367	-4.67

由於原橋梁及拓寬部分之混凝土強度皆為 210kgf/cm^2 ，基樁直徑皆為 120cm，如表 5-2、表 5-3 所示，可得彈性模數約為 $217370.6512 \text{ kgf/cm}^2$ ，P5 橋墩基樁在淘刷 0~12 公尺以每公尺土層設置土壤彈簧，12 公尺以上以每 2 公尺土層設置土壤彈簧。P6 橋墩基樁則以每 2 公尺及每 3 公尺土層設土壤彈簧，等值面積則以樁徑乘以土層厚度之 80% 計之。再由(5-9)式可得 P5 即 P6 橋墩之基樁前方地盤之水平地盤反力係數 $k_H(\text{kgf/cm}^3)$ ，如表 5-7 及表 5-8 所示。

表 5-7 南湖大橋 P5 橋墩基樁前方地盤之水平地盤反力係數 k_H

淘刷深度 (cm)	彈簧位置 (cm)	等值面積 (cm ²)	N 值	k_H (kgf/cm ³)	彈簧常數 (kgf/cm ²)
160-200	180	3840	6	1.1568	4442.0138
200-300	250	9600	5	0.9466	9087.0002
300-400	350	9600	3	0.5397	5180.6817
400-500	450	9600	3	0.5397	5180.6817
500-600	550	9600	3	0.5397	5180.6817
600-700	650	9600	4	0.7405	7109.1802
700-800	750	9600	6	1.1568	11105.0344
800-900	850	9600	6	1.1568	11105.0344
900-1000	950	9600	6	1.1568	11105.0344
1000-1100	1050	9600	5	0.9466	9087.0002
1100-1200	1150	9600	5	0.9466	9087.0002
1200-1400	1300	19200	5	0.9466	18174.0004
1400-1600	1500	19200	4	0.7405	14218.3604
1600-1800	1700	19200	5	0.9466	18174.0004
1800-2000	1900	19200	5	0.9466	18174.0004
2000-2200	2100	19200	29	6.5452	125667.0225
2200-2460	2330	24960	100	25.5436	637568.5411
2460-3841.5	3099.25	132624	100	25.5436	3387695.9212

表 5-8 南湖大橋 P6 橋墩基樁前方地盤之水平地盤反力係數 k_H

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	等值面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
0~228.2	114.1	37242	3	0.5397	20097.9367
388.2-588.2	488.2	19200	3	0.5397	10361.3634
588.2-788.2	688.2	19200	4	0.7405	14218.3604
788.2-988.2	888.2	19200	7	1.3705	26314.2727
988.2-1188.2	1088.2	19200	7	1.3705	26314.2727
1188.2-1488.2	1338.2	28800	5	0.9466	27261.0005
1488.2-1788.2	1638.2	28800	5	0.9466	27261.0005
1788.2-2088.2	1938.2	28800	7	1.3705	39471.4091
2088.2-2488.2	2288.2	38400	100	25.5436	980874.6786

南湖大橋之樁帽為長方形，P5、P6 橋墩原橋梁部分長方形長邊 $B = 1920\text{cm}$ ， $B_e = 1920\text{cm}$ ， $L_e = 160\text{cm}$ ，故 $B_H \cong 554\text{cm}$ ，短邊以相同之方法計算。由(5-11)式可得 P5、P6(原橋梁部分)基礎板前方地盤之長、短兩邊水平地盤反力係數 k_{HF} ，土壤彈簧則設定於樁帽厚度之中央，計算結果如表 5-9~表 5-12 所示。

表 5-9 P5 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (長邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
0-160	80	307200	3	0.6284	193048.8528

表 5-10 P5 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (短邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
0-160	80	128000	3	0.8726	111695.3772

表 5-11 P6 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (長邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
228.2-388.2	308.2	307200	3	0.3142	96524.4264

表 5-12 P6 橋墩(原橋梁部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (短邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
228.2-388.2	308.2	128000	3	0.4363	55847.6886

另外，南湖大橋拓寬部分之樁帽亦為長方形，P5、P6 橋墩原橋梁部分長方形長邊 $B = 800\text{cm}$ ， $B_e = 800\text{cm}$ ， $L_e = 190\text{cm}$ ，故 $B_H \cong 390\text{cm}$ ，短邊以相同之方法計算。由(5-11)式可得 P5、P6(拓寬部分)基礎板前方地盤之長、短兩邊水平地盤反力係數 k_{HF} ，土壤彈簧一樣設定於樁帽厚度之中央，計算結果如表 5-13~表 5-16 所示。

表 5-13 P5 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (長邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
151.5-341.5	246.5	152000	3	0.6818	103633.452

表 5-14 P5 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (短邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
151.5-341.5	246.5	114000	3	0.7595	86579.1373

表 5-15 P6 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (長邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
328.5~518.5	423.5	152000	3	0.4091	62180.0712

表 5-16 P6 橋墩(拓寬部分)基礎板前方地盤之水平地盤反力係數 k_{HF} (短邊)

淘刷深度(cm)	彈簧位置(cm)	面積(cm ²)	N 值	$k_H(\text{kgf}/\text{cm}^3)$	彈簧常數(kgf/cm ²)
328.5~518.5	423.5	114000	3	0.4557	51947.4824

將所有土層之土壤彈簧設定於其作用點，並將土壤常數值依上述計算之結果設定之並加上作用方向，如圖 5-18 所示。

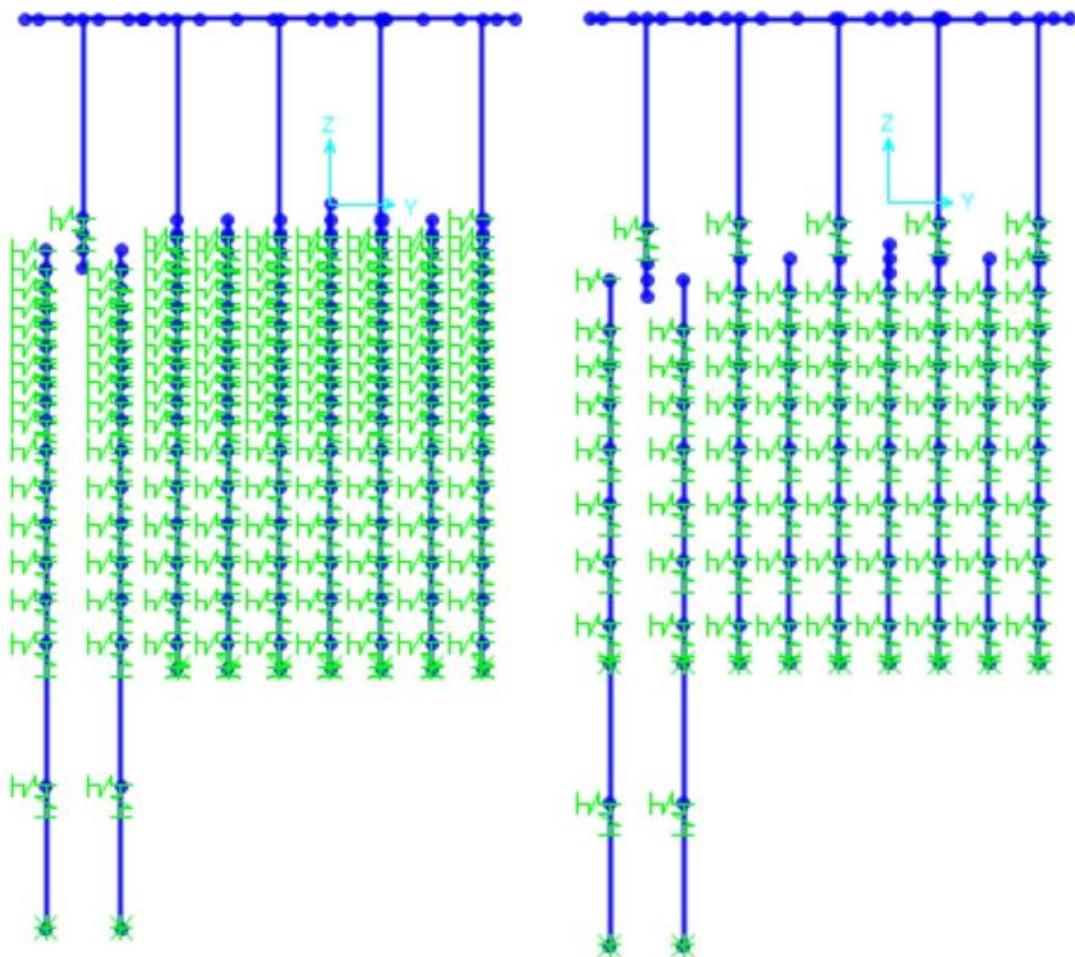


圖 5-18 P5(左)、P6(右)橋墩基礎土壤彈簧設定圖



5.2.10 模型模擬結果

依前述各節將橋梁各部構件之模型建立完成，如圖 5-19 所示，即以 Mass Source 設定欲在模型分析中所考慮之質量來源，除分析單元內之材料自重外，另也依據 5.2.6 節所述之原則，將被等值斜撐替代之橋面板及未建模之部分橋梁附屬設施之質量一併以均布載重之方式納入 Mass Source 考量。

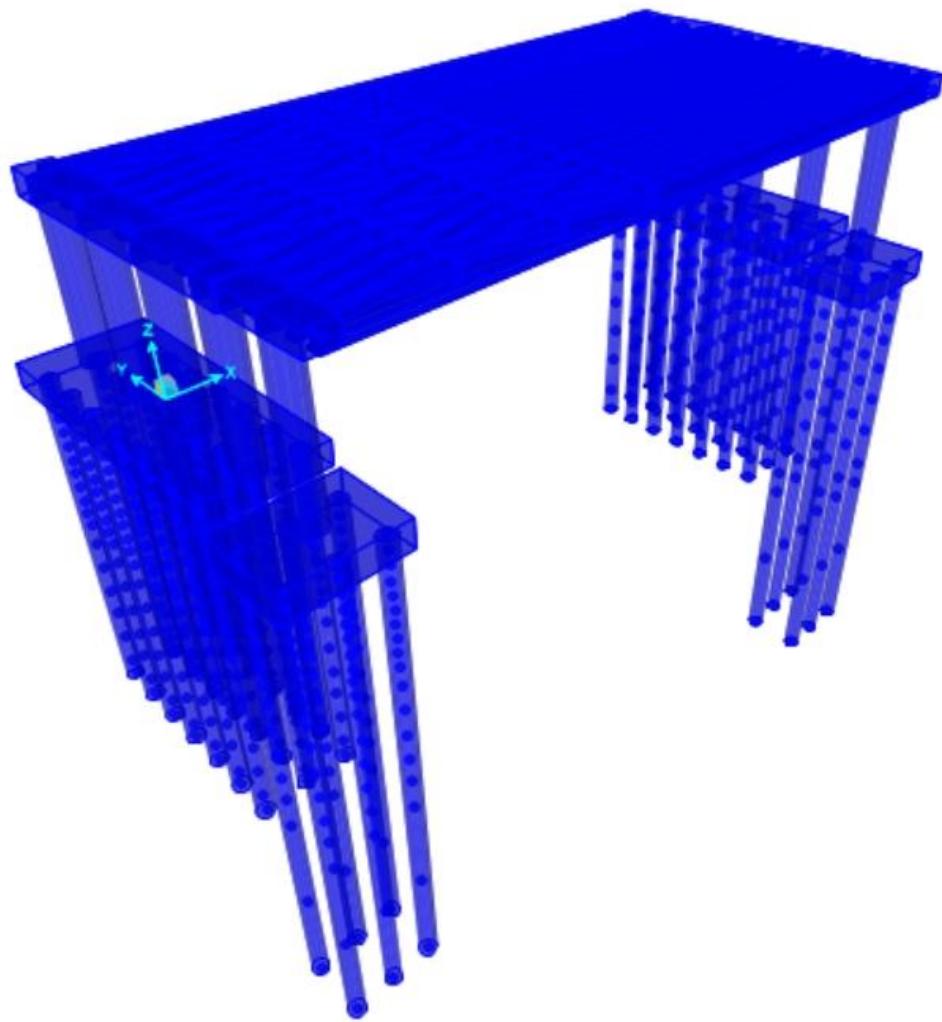


圖 5-19 南湖大橋建模模型

由於土壤、基礎、以及上部結構的振態相互混合，求取上部結構各方向的第一自然震動頻率常顯困難，本研究參考曾惠斌等人[43]的作法，以土表上有效質量作為確定上部結構的主要自然震動頻率之方法，即有效質量比率即可作為在振動狀態下某個模式(mode)的重要性，若該值足夠大，該模式即可被歸類為該方向主要的

主要振態。以尚未產生淘刷，即河床高程位於 P5 橋墩樁帽頂之狀態為例，經 SAP2000 分析後可得模態各質量參與比率(Modal Participating Mass Ratios)，如表 5-17 所示，其所對應的振態振形如圖 5-20 所示。可以觀察到模態 1 大致呈現橋墩柱不動、橋面板上下振動，模態 2 大致呈現橋墩柱不動、橋面板左右上下反向振動，模態 3 大致呈現橋墩柱不動、橋面板左右上下同向振動，模態 4 大致呈現橋墩柱不動、橋面板上下波浪振動，模態 5 大致呈現橋墩柱不動、橋面板前後上下振動，模態 6 大致呈現橋墩柱在 Y 方向擺動，但橋面板不動的狀態。

表 5-17 南湖大橋各模態質量參與比率

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789296	0	1.28E-11	0.36707	0	1.28E-11	0.36707
MODAL	Mode	2	1.627222	0	4.51E-10	0.00921	0	4.64E-10	0.37628
MODAL	Mode	3	1.00409	2.77E-19	5.49E-11	0.00035	2.77E-19	5.19E-10	0.37662
MODAL	Mode	4	0.488435	5.62E-17	3.43E-08	1.27E-07	5.65E-17	3.49E-08	0.37663
MODAL	Mode	5	0.465029	6.76E-19	2.37E-08	3.23E-09	5.72E-17	5.86E-08	0.37663
MODAL	Mode	6	0.450177	6.67E-18	0.82783	9.98E-14	6.38E-17	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	7	0.443855	1.69E-18	7.26E-07	1.68E-09	6.55E-17	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	8	0.427056	0.83559	1.45E-19	4.1E-20	0.83559	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	9	0.396579	6.01E-17	9.29E-10	7.11E-08	0.83559	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	10	0.314767	8.34E-16	2.64E-09	2.06E-10	0.83559	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	11	0.271089	3.87E-16	6.26E-11	1.35E-06	0.83559	0.82783	0.37663
MODAL	Mode	12	0.225387	3.92E-15	8.06E-11	4.52E-05	0.83559	0.82783	0.37667

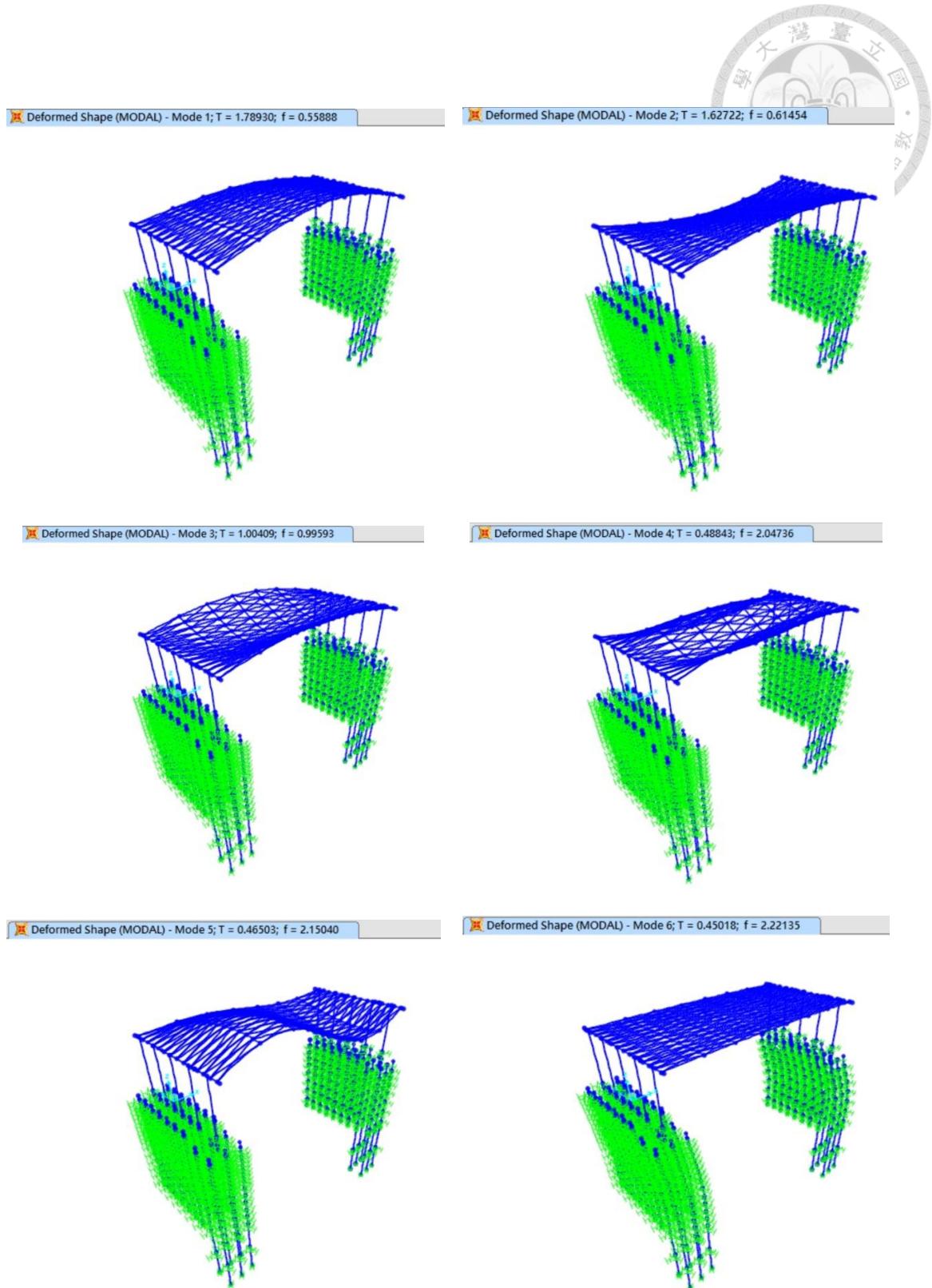


圖 5-20 SAP2000 模擬南湖大橋之第 1 至第 6 模態圖

由表 5-17 可知，第 6 模態在 Y 方向，即水流方向的質量參與比率達 82.783%，如



同 2.2.3 節所述，水流方向的振動特徵更能有效反映橋梁上部結構的振動特性，可用以評估橋墩基礎的裸露狀況。因此該模態之振動週期 0.450177 秒，換算成頻率為 $1/0.450177$ 即 2.22135Hz ，該數值即為振動單元於水流方向之自然頻率。另亦可由表 5-17 發現，前 12 個模態中之累積質量參與比率至第 6 模態後已不再變化，且累積質量參與比率主要亦由第 6 模態所貢獻，由此可知該模態足以代表該方向之主要振態。同理亦可由此表判斷，X 方向即車行方向之主要振態為第 8 模態，Z 方向即垂直地表方向，因前 12 個模態之累積質量參與比率僅達 37.667% ，因此前 12 個模態都尚不足以代表 Z 方向之振態。

5.2.11 獲取橋梁自然頻率與淘刷深度之關係圖

如 5.2.3 節所述，本研究所設定之未淘刷河床高程係位在原橋梁 P5 橋墩樁帽頂部，即 $E.L.=0.515\text{m}$ 之處，在橋梁各部建模完成後，即以此高程向下逐層解除土壤彈簧對基礎之束制，以模擬基礎淘刷之情形。於淘刷較易發生的 $0\sim 12$ 公尺範圍，以每 1 公尺的深度向下逐層解除。另於 $12\sim 20$ 公尺之範圍，則以每 2 公尺的深度向下逐層解除。每次皆於原橋梁及拓寬部分的 P5、P6 橋墩等 4 座基礎同時解除土壤彈簧束制，P6 橋墩部分則依逐層解除之深度計算折減之彈簧常數。再依據 5.2.10 節的方式，獲取每個淘刷深度所對應之橋梁振動自然頻率，並得到其兩者之間的關係圖，如圖 5-21 所示。

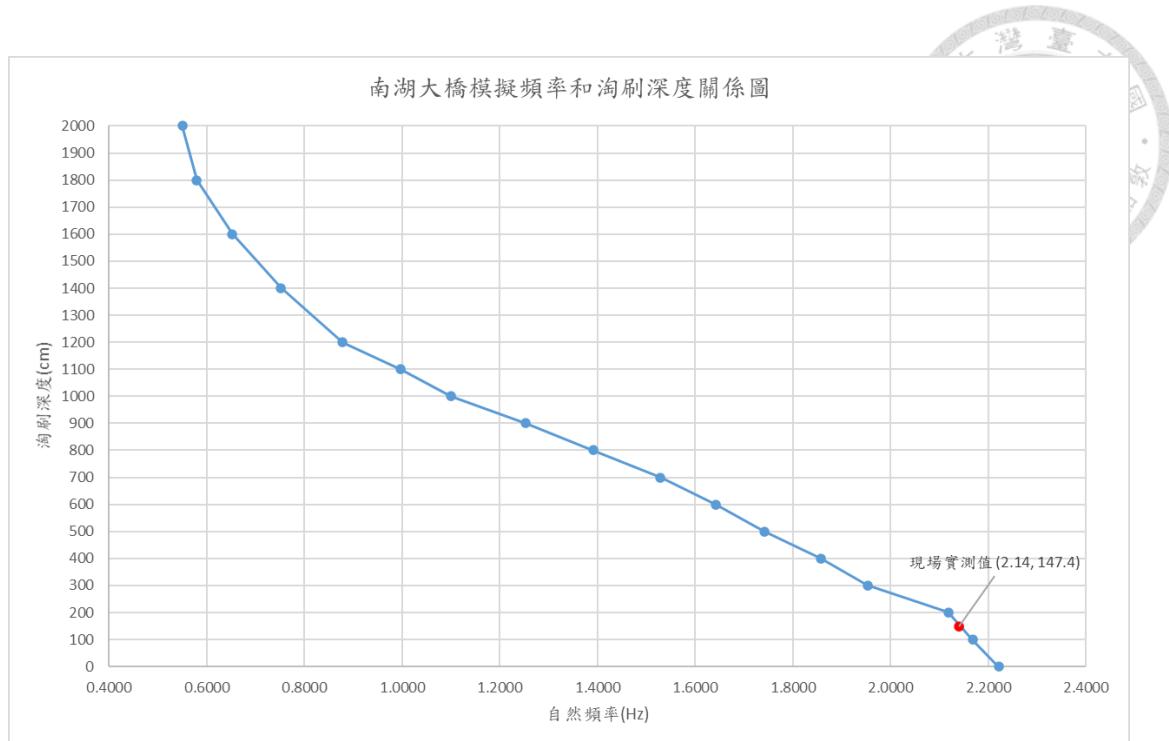


圖 5-21 南湖大橋模擬之自然頻率-淘刷深度關係圖

另比較各淘刷深度在 Y 方向，即水流方向之代表質量參與比率和所屬模態可發現，隨著淘刷深度增加，其質量參與比率逐漸增加，也成為主要之振動模態，如表 5-18 所示，推論係因水流方向的勁度在樁體土壤束制消失後下降較多，故成為主要之振動模態，質量參與比率也較高。

表 5-18 Y 方向(水流方向)淘刷深度與模態階數及質量參與比率之關係

淘刷深度 (m)	0	2	5	8	10	12	14	16	18	20
模態階數	6	5	4	4	4	3	3	3	2	1
質量參與比率(%)	82.8	82.9	83	84	86	87	88	89	89	90

5.3 模擬結果與現地量測資料之分析

本研究使用 0 節所介紹之無線感測儀器，並依據錯誤！找不到參照來源。之儀器設置位置及量測資料處理步驟，取得橋梁振動之自然頻率，繼而以本章之有限元



素建立模型的方式獲得橋梁自然頻率與基礎淘刷深度之關係，本節即依現場量測之淘刷深度及自然頻率與圖 5-21 作一比較，探討其誤差並確認其可應用性。

5.3.1 河床現地高程之取得

本研究用以驗證之南湖大橋現地河床高程，係採用該橋梁之主管機關臺北市政府工務局新建工程處例行之「跨河橋防汎期檢測及檢查通報」所測得之資料。其量測內容係為各橋墩上下游面河床高程水中測量及橋體兩側向上下游面各延伸 50 公尺範圍河道河床斷面及常水位河槽斷面測量，如圖 5-22 所示。

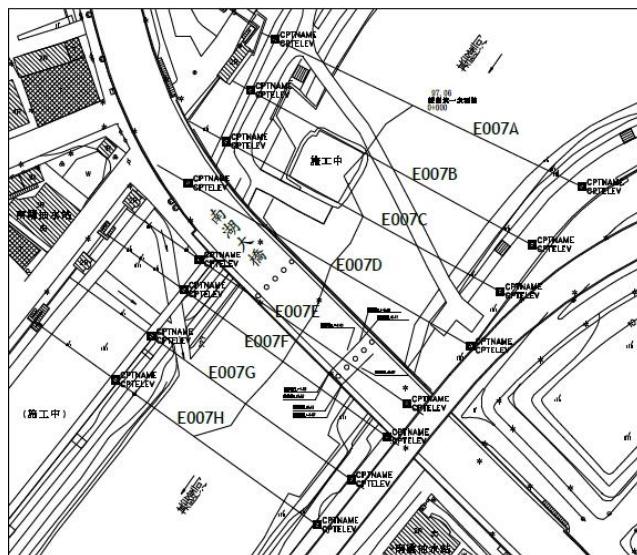


圖 5-22 南湖大橋河床高程量測測線示意圖

(資料來源：[20])

測量方式係採用聲納探測方法對橋址上、下游側河床斷面進行探測，藉由聲納反射訊號接收，測量河床與橋基相關位置，並配合現場量測方法協助確認河床高程，精度需小於等於 10 公分，測量成果如表 5-19 所示。本研究所建模的單元涉及 P5、P6 兩橋墩，故將其上下游共 4 個高程予以平均，得其平均高程為 E.L.= -0.959m，若依 5.2.3 節所設定之淘刷原點，則淘刷深度為 $0.515+0.959=1.474m$ ，將據以進行後續之分析。

表 5-19 南湖大橋河床高程

橋墩編號	橋墩基礎 頂部高程 (E. L.)	基礎深度 (公尺)	橋墩基礎 底部高程 (E. L.)	上游河床 高程(E. L.)	下游河床 高程(E. L.)
P001	6.07	30	-23.93	6.25	6.69
P002	5.33	30	-24.67	6.36	6.56
P003	5.33	30	-24.67	6.53	6.21
P004	5.52	30	-24.48	6.89	6.65
P005	-1	35	-36	-0.746	-1.13
P006	-2.77	35	-37.77	-0.81	-1.15
P007	4.73	30	-25.27	7.06	7.24
P008	4.29	30	-25.71	7.41	7.36
P009	6.5	30	-23.5	7.32	7.46
P010	6.5	30	-23.5	7.33	7.62

(資料來源：臺北市政府工務局新建工程處，2024)

該次河床高程測量時間為 2021 年 12 月 5 日，而本研究現場測量橋梁自然頻率的時間為 2022 年 1 月 16 日，經查交通部中央氣象署該段期間之臺北測站逐日雨量資料皆為無雨或少量降雨，如圖 5-23 所示。且查詢經濟部水利署每日平均水位亦無異常波動如圖 5-24 所示，故推論在該段時間內河床高程並無顯著變動，因此即以表 5-19 內之河床水位高程進行後續之分析。

2021年臺北氣象站逐日雨量資料		2022年臺北氣象站逐日雨量資料						
		一月	十二月	一月	二月	三月	四月	五月
1	-	-	T	1	T	11.0	-	6.0
2	-	-	T	2	T	3.0	-	23.0
3	-	-		3	-	29.0	-	T
4	4.0	-		4	T	3.5	-	1.0
5	0.5	T		5	0.5	0.5	-	T
6	1.5	18.0		6	8.0	T	T	T
7	6.5	1.5		7	5.0	6.5	21.5	-
8	4.0	-		8	T	0.5	-	T
9	-	-		9	T	11.0	-	T
				10	T	0.5	-	4.5
				11	6.0	-	-	13.0
				12	T	T	-	40.0
				13	0.5	14.0	-	4.5
				14	-	38.5	57.0	27.0
				15	T	0.5	-	15.0
				16	T	0.5	-	43.5

圖 5-23 中央氣象署 2021、2022 逐日雨量資料

民國 110 年日平均水位 (公尺)

DAILY MEAN LEVEL IN 2021 (M)

民國 111 年日平均水位 (公尺)

DAILY MEAN LEVEL IN 2022 (M)

經濟部水利署 Sponsoring Agency WRA, MOEA													
流域名稱 Basin			河流名稱 Tributary		測站名稱 Station		流域面積Km ² Drainage Area						
淡水河 Danshui River			基隆河 Keelung River		五堵 WU-TU		204.41						
三月 Mar.	四月 Apr.	五月 May	六月 June	七月 July	八月 Aug.	九月 Sept.	十月 Oct.	十一月 Nov.	十二月 Dec.				
4.14	4.02	4.37	5.66	3.98	4.60	3.95	3.96	4.34	4.52				
4.76	4.00	4.24	4.95	3.96	4.26	3.94	3.95	4.27	4.38				
5.06	3.98	4.15	4.96	3.97	4.64	3.95	3.94	4.22	4.28				
4.58	4.02	4.11	5.98	3.96	4.88	3.94	3.93	4.18	4.21				
4.38	3.99	4.21	6.77	3.95	4.46	3.95	3.94	4.14	4.21				
4.47	3.97	4.10	6.08	3.96	4.34	3.94	4.12	4.10	4.76				
5.14	3.96	4.04	5.20	3.96	5.55	3.93	4.12	4.06	6.05				
5.73	4.05	4.02	4.75	3.95	5.64	3.93	3.98	5.35	4.93				
5.13	4.39	3.99	4.51	3.95	4.92	3.94	3.95	5.07	4.57				
4.86	4.53	3.97	4.34	3.96	4.78	3.94	3.95	4.57	4.40				
4.67	4.48	3.97	4.23	3.96	4.56	3.94	4.79	4.36	4.59				

流域編號 Basin No.		測站編號 Station No.		流域名稱 Basin		河流名稱 Tributary		測站名稱 Station					
1140 030		H058 0650		淡水河 Danshui River		基隆河 Keelung River		五堵 WU-TU					
Month	月	一月 Jan.	二月 Feb.	三月 Mar.	四月 Apr.	五月 May	六月 June	七月 July	八月 Aug.	九月 Sept.	十月 Oct.	十一月 Nov.	十二月 Dec.
Day	日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		4.41	4.59	4.37	4.82	4.20	5.51	4.01	3.98	3.97			
2		4.31	5.52	4.30	4.37	4.11	4.74	4.09	4.14	4.25			
3		4.35	6.74	4.28	6.27	4.83	5.20	4.12	4.00	5.10			
4		4.34	6.95	4.20	5.08	4.77	5.41	4.13	3.97	5.52			
5		4.49	6.24	4.16	4.56	4.87	4.90	4.40	3.96	5.57			
6		4.50	5.41	4.14	4.32	4.87	4.63	4.58	3.98	5.89			
7		4.51	5.65	4.50	4.29	4.30	5.00	4.24	3.97	4.86			
8		4.87	4.77	5.09	4.11	4.30	5.59	4.10	3.96	4.47			
9		4.57	4.80	4.58	4.05	4.19	5.69	4.08	3.95	4.31			
10		4.49	4.82	4.39	3.98	4.23	5.00	4.05	3.95	4.21			
11		4.86	4.81	4.18	3.95	4.81	4.72	4.02	3.95	4.46			
12		4.78	4.70	4.01	3.93	4.89	4.49	3.95	3.91	4.29			
13		4.54	4.79	3.92	4.64	4.64	4.00	3.95	3.95	4.29			
14		4.39	6.12	3.93	4.21	5.64	4.61	4.00	3.95	5.18			
15		4.31	5.42	3.92	4.32	5.22	4.46	4.00	3.95	4.94			
16		4.23	5.18	3.91	4.64	5.71	4.51	3.99	3.94	4.56			
17		4.56	6.58	3.91	4.28	5.36	4.42	4.01	3.95	4.38			

圖 5-24 經濟部水利署 2021、2022 每日平均水位

5.3.2 現場頻率及淘刷深度實測值與模擬值之比較

依 4.5.3 節現場量測所識別之橋梁自然頻率如表 4-8 所示，為 2.14Hz，其所對應之淘刷深度如前所述為 1.474m，將實測值標示於模擬所得之自然頻率-淘刷深度關係圖中，如圖 5-25 所示。

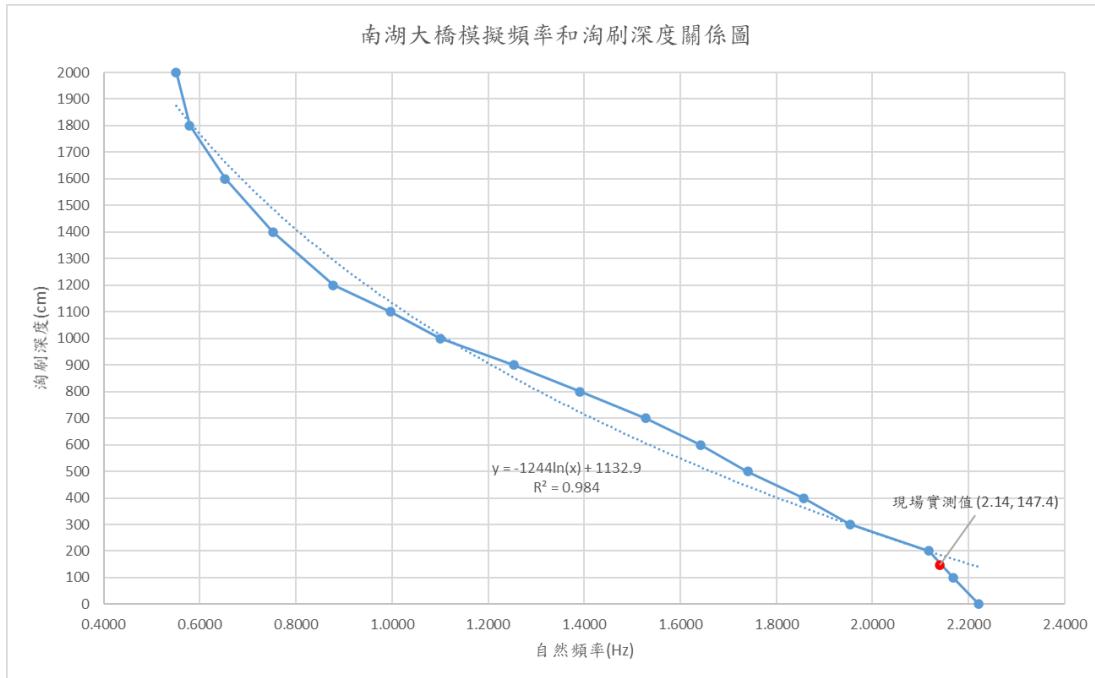


圖 5-25 實測資料值標繪於模擬之自然頻率-淘刷深度關係圖

由該圖可知，現場實測之頻率及淘刷深度值已大致落於關係圖之曲線上，將現場頻

率實測值 2.14Hz 內插於自然頻率-淘刷深度關係圖，可得淘刷深度值為 155.5 公分，與現場淘刷深度實測值差異為 +8.1 公分，差異百分比為 +5.50%。續將現場淘刷深度實測值 147.7 公分內插於自然頻率-淘刷深度關係圖，可得頻率值為 2.1441Hz，與現場頻率實測值差異為 +0.0041Hz，差異百分比為 +0.19%，如表 5-20 所示。

表 5-20 實測頻率值及淘刷深度值與模擬值之比較

現場實測值		模擬值		差異	
				數值	百分比
頻率(Hz)	2.14	對應實測 淘刷深度之 頻率值	2.1441	+0.0041	+0.19%
淘刷深度 (cm)	147.4	對應實測 頻率之 淘刷深度值	155.5	+8.1	+5.50%

5.4 小結

本章藉由取得南湖大橋之竣工圖資料，依序建立橋梁各部之數值模擬，並逐層解除基礎之土壤彈簧束制，以模擬基礎土壤淘刷之情形，從而獲得橋梁振動自然頻率和基礎淘刷深度之間的關係圖，再透過第 4 章所量測並識別之自然頻率及橋梁基礎實際淘刷深度，驗證該關係圖之可應用性。經過適當地修正邊界條件，發現現場實測之頻率及淘刷深度值已大致落於關係圖之曲線上，可得模擬淘刷深度值與現場淘刷深度實測值差異為 +8.1 公分，差異百分比為 +5.50%。另模擬頻率值與現場頻率實測值差異為 +0.0041Hz，差異百分比為 +0.19%，顯示所獲得之橋梁振動自然頻率和基礎淘刷深度之間的關係圖應具實用性。

另橋梁基礎淘刷深度並非決定橋梁安全之唯一因素，仍宜配合整體河川水文資料、橋梁結構型式進行基樁耐洪分析和極限承載能力以進行整體評估[60]，俾確

認橋梁之安全性。



第6章 結論與建議



6.1 結論

橋梁聯繫著文明，並在人類文明法展史上扮演重要的角色。本研究嘗試結合開源軟體，諸如 Arduino Uno 介面控制版、Xbee 無線傳輸模組、MMF KB12VD 加速度器等，以組成無線感測儀器，其不同於一般有線感測儀器需要龐大的建置維護成本，或商業儀器的昂貴費用，具有易修改及發展之優點。在儀器量取數據之後，首先以數位濾波器擷取適當的頻帶，再以 STFTCATS 法識別因時變異的訊號，最後依去除離群值的步驟決定橋梁之自然頻率。此部分選取了臺北市基隆河上的成美長壽橋及景美溪上的萬壽橋所量測到的微振訊號加以分析驗證，以確認 STFTCATS 法之適用性，另外選取了基隆河上的南湖大橋以有限元素法 SAP2000 軟體建立模型，並以土壤彈簧模型模擬土壤與基礎間的互制行為，藉著逐層解除基礎土壤彈簧的束制，獲得橋梁自然頻率與基礎淘刷深度關係圖，以驗證橋梁自然頻率評估橋梁基礎淘刷之可行性。本研究獲致結論如下：

1. 於橋梁橋面板橋柱正上方以自製無線感測儀器進行水流方向之微振量測試驗，分別以 FFT 及 STFTCATS 方法識別橋梁自然頻率時，STFTCATS 的識別度較高，並且可以獲致較為穩定的識別結果，與微振訊號之理論較為吻合。而在實務上量測次數有限制之情況下，量測結果識別之穩定性即相對重要。
2. 建立一套減少外界雜訊干擾之識別及分析橋梁自然頻率的程序。即先判斷每次依 STFTCATS 法獲得之頻譜是否有明顯峰值，若有則記錄其頻率值並刪除兩倍標準差以外之離群值，剩餘的各頻率值再予平均獲致於該測量位置最終之橋梁自然頻率值。
3. 以 STFTCATS 法之原理應可過濾大部分之干擾頻率，惟若干擾強度過大，

則可以橋梁自然頻率值為眾數之概念，以離群值排除之，以確保識別橋梁自然頻率之正確性。

4. 本研究所實測的單柱成美長壽橋、原每墩四柱經拓寬後成為五柱的南湖大橋，及先前研究所測得每墩三柱之萬壽橋，於不同結構形式及交通量下，皆可藉自製無線感測儀器進行微振量測識別橋梁的自然頻率。故推測未來以無線感測儀器透過微振量測識別自然頻率後，作為評估橋梁基礎淘刷程度之作法應有其可行性。
5. 隨著淘刷深度增加，Y方向(水流方向)之質量參與比率逐漸增加，也成為主要之振動模態。
6. 由有限元素法之 SAP2000 軟體模擬南湖大橋之結果顯示，橋梁之自然頻率確隨淘刷深度之增加而降低。經由適當地設定邊界條件，模擬與現場實測之自然頻率差異約為+0.19%，模擬與現場實測之淘刷深度差異約為+5.50%。顯示所獲得之自然頻率-淘刷深度關係圖應具實用性。

6.2 建議

本研究嘗試以自製無線感測儀器，搭配開源軟體達到減省傳統有線感測設備之建置及維護成本，惟於相關設備方面發展日新月異，諸如微振量測資料之取樣及傳輸等，有相當大的進步空間。目前仍以定期或災害前後定點量測之概念，對於橋梁之自然頻率予以檢核，以收平時或災前預警、災後復舊之參考，未來在改善電源供應及訊號傳輸等問題後，可進一步發展定點、長期之自動化訊號量測，以提供橋梁主管機關之維護管理參考。

本研究另以橋梁主管機關所提供之竣工圖建置數值模型，以了解淘刷深度與橋梁自然頻率之關係，惟因探討橋梁基礎淘刷之橋梁，多為完工年代久遠者，相關竣工圖資或有散佚、或難以辨識，致使建模工作徒增難度。故建議於橋梁竣工之初，即以竣工圖資建模，除可與日後量測之資料做一比對，以收維護管理預警之效，亦



可區分造成橋梁自然頻率下降之確實原因。

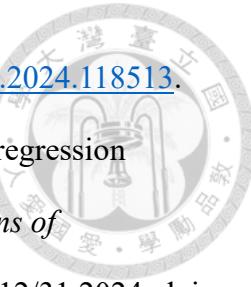
本研究所選用之現場量測橋梁，根據歷史資料，其河床高程多屬相對穩定且變化不大之區段，對於橋梁自然頻率與淘刷深度之關係較難驗證，建議未來可選擇河床高程變化較大之流域橋梁為研究標的，以收驗證之效。

本研究所提供之基礎淘刷評估適用於災害發生之前後，用以與基礎不受淘刷時之自然頻率做一比較以作為預警或災後復舊之參考。惟橋梁基礎淘刷深度並非決定橋梁安全之唯一因素，仍宜配合整體河川水文資料、橋梁結構型式進行基樁耐洪分析和極限承載能力之整體評估，以確定橋梁結構之安全極限，配合適當之安全係數，訂定適當之頻率警戒值，以作為橋梁維護管理之參考依據。

參考文獻



- [1] B. W. Melville and S. E. Coleman, *Bridge scour*. Water Resources Publication, 2000.
- [2] A. Shirole and R. Holt, "Planning for a comprehensive bridge safety assurance program," *Transportation Research Record*, vol. 1290, no. 3950, pp. 290-005, 1991.
- [3] K. Wardhana and F. C. Hadipriono, "Analysis of recent bridge failures in the United States," *Journal of performance of constructed facilities*, vol. 17, no. 3, pp. 144-150, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144).
- [4] P. Lagasse, P. Clopper, L. Zevenbergen, and L. Girard, "Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour," 0309099099, 2007.
- [5] B. W. Melville and A. J. Sutherland, "Design Method for Local Scour at Bridge Piers," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 114, no. 10, pp. 1210-1226, 1988, doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210).
- [6] M. Dixen, B. M. Sumer, and J. Fredsøe, "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a half-buried sphere," *Coastal Engineering*, vol. 73, pp. 84-105, 2013/03/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.10.006>.
- [7] B. Ataie-Ashtiani, Z. Baratian-Ghorghi, and A. A. Beheshti, "Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour of Compound Piers," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 136, no. 6, pp. 343-351, 2010, doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2010)136:6(343).
- [8] J. Guo, B. Weng, and J. Wu, "Investigation of the energy loss in cylindrical bridge piers scour depth prediction on sand-bed," *Ocean Engineering*, vol. 309, p.



- [9] J.-S. Chou and A. Molla, "Arctic tern-optimized weighted feature regression system for predicting bridge scour depth," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 18, no. 1, p. 2364745, 2024/12/31 2024, doi: 10.1080/19942060.2024.2364745.
- [10] N. Eini, S. M. Bateni, C. Jun, E. Heggy, and S. S. Band, "Estimation and interpretation of equilibrium scour depth around circular bridge piers by using optimized XGBoost and SHAP," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 17, no. 1, p. 2244558, 2023/12/31 2023, doi: 10.1080/19942060.2023.2244558.
- [11] C. Wang, X. Yu, and F. Liang, "A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures," *Natural hazards (Dordrecht)*, vol. 87, no. 3, pp. 1881-1906, 2017, doi: 10.1007/s11069-017-2842-2.
- [12] L. J. Prendergast, D. Hester, K. Gavin, and J. J. O'Sullivan, "An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 25, pp. 6685-6702, 2013/12/09/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.08.020>.
- [13] 邱永芳、謝明志、柯正龍、林雅雯、王仲宇、連惠邦、楊明德、李維峰、陳銘鴻、胡志昕、劉興昌、洪紹勛、張為光、柯永彥, and 鄭. 梅. 黃. 蔡. 羅冠顯, "跨河橋梁橋基沖刷檢測作業規範(草案)," 2011. 交通部運輸研究所.
- [14] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," in *Proc. of the 18* International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas*, 2000.
- [15] M. Gul and F. N. Catbas, "Ambient Vibration Data Analysis for Structural Identification and Global Condition Assessment," *Journal of Engineering*

Mechanics, vol. 134, no. 8, pp. 650-662, 2008, doi: doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(650).

- [16] Y.-Y. Ko, W. F. Lee, W. Chang, H. Mei, and C. Chen, "Scour evaluation of bridge foundations using vibration measurement," in *Scour and Erosion*, 2010, pp. 884-893.
- [17] S. Kim *et al.*, "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," in *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, 2007, pp. 254-263, doi: 10.1145/1236360.1236395.
- [18] M. Chae, H. Yoo, J. Kim, and M. Cho, "Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring," *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 237-252, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.008.
- [19] L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, and P. E. Clopper, "Evaluating Scour at Bridges: Fifth Edition," (in English), Tech Report 2012. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42053>.
- [20] 臺北市政府工務局新建工程處, 跨河橋防汛期檢測及檢查通報第一次成果報告. 2020.
- [21] A. J. Raudkivi, "Functional trends of scour at bridge piers," *Journal of hydraulic engineering*, vol. 112, no. 1, pp. 1-13, 1986.
- [22] 林呈, 本省西部重要河川橋梁基礎災害分析與橋基保護工資料庫系統之建立. 1998, pp. 1-505. 交通部運輸研究所.
- [23] 邱永芳、謝明志、賴瑞應、林雅雯、林三賢, 張嘉賢、廖振程、林炤圭、楊國城、黃進國, 羅冠顯、汪書瑜、袁瑜鎂、許師瑜、尤俊傑, and 唐韻淳、戴可茵, 跨河橋梁安全評估之研究. 交通部運輸研究所, 2011.
- [24] X. Yu, P. Asheesh, N. Zhang, B. Thapa, and S. Tjuatja, "Thermo-TDR probe for measurement of soil moisture, density, and thermal properties," in *Geo-Congress*

2014: *Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, 2014, pp. 2804-2813.

[25] X. Yu and L. J. Zabilansky, "Time Domain Reflectometry for Automatic Bridge

Scour Monitoring," in *Site and Geomaterial Characterization*, 2006, pp. 152-159.

[26] M. Samizo, S. Watanabe, A. Fuchiwaki, and T. Sugiyama, "Evaluation of the

Structural Integrity of Bridge Pier Foundations Using Microtremors in Flood

Conditions," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 48, no. 3, pp. 153-157, 2007, doi:

10.2219/rtricqr.48.153.

[27] S. H. Ju, "Determination of scoured bridge natural frequencies with soil-structure

interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 55, pp. 247-254,

2013/12/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.015>.

[28] 鍾立來. "國立臺灣大學土木工程學系結構耐震設計導論(一)." <https://ocw.aca.ntu.edu.tw/ntu-ocw/ocw/cou/105S106> (accessed Feb.24, 2024).

[29] 吳政忠. "模態分析." 國家教育研究院.

<https://terms.naer.edu.tw/detail/79868b1d68d6a96a927e115c658870e9/> (accessed May 14, 2024).

[30] O. S. Salawu and C. Williams, "Review of full-scale dynamic testing of bridge

structures," *Engineering structures*, vol. 17, no. 2, pp. 113-121, 1995.

[31] 楊永斌, 高健章, and 呂良正, "模板支撐架縮小模型之自然頻率量測及理論分

析 (Measurement and Analysis of the Natural Frequencies of Small Scale Models

of Formwork Supporting Frames)," *勞工安全衛生研究季刊*, vol. 3, 1995.

[32] 葉祥海、呂良正、楊永斌、黃仲偉、劉醇宇、周俊杰、李肇豪, "以微振量測

探討鋼筋混凝土建築物之基本振動周期," 2000. 內政部建築研究所報告.

[33] T. Bao and Z. Liu, "Bridge scour characteristic curve for natural frequency-based

bridge scour monitoring using simulation-based optimization," *Structural Control*

and Health Monitoring, vol. 28, no. 8, p. e2773, 2021, doi:

<https://doi.org/10.1002/stc.2773>.



- [34] L. J. Prendergast, K. Gavin, and D. Hester, "Isolating the location of scour-induced stiffness loss in bridges using local modal behaviour," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 7, no. 4, pp. 483-503, 2017.
- [35] 柯永彥、張為光、陳家漢, "結構基礎損傷評估技術發展(II)," 2011. 國家地震工程研究中心技術報告.
- [36] J. Asmussen, S. Ibrahim, and R. Brincker, "Random decrement: Identification of structures subjected to ambient excitation," 1997.
- [37] C.-S. Huang, "Structural identification from ambient vibration measurement using the multivariate AR model," *Journal of sound and vibration*, vol. 241, no. 3, pp. 337-359, 2001.
- [38] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, 2011.
- [39] N. E. Huang *et al.*, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 454, no. 1971, pp. 903-995, 1998.
- [40] 盧家鋒, "醫學訊號分析原理與 MATLAB 程式應用實作," 2013. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=JxYGcmxviz8&list=PLx_IWc-RN82uKOdaffF4v4U5R_u4qmYaiu&index=1.
- [41] 維基百科. "有限脈衝響應." <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%89%E9%99%90%E5%86%B2%E6%BF%80%E5%93%8D%E5%BA%94> (accessed Feb. 27, 2024).
- [42] 維基百科. "無線感測網路." <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%84%A1%E7%B7%9A%E6%84%9F%E6%B8%AC%E7%B6%B2%E8>

[%B7%AF](#) (accessed Feb. 24, 2024).



- [43] 曾惠斌、韓仁毓、林致廷、朱聖浩、馮重偉, "極端氣候下複合性災害防治之研究--整合 GPS 及通訊光電技術於橋梁防災監測平台研發計畫," 2013.
- [44] 陳憲廷, "無線感測網路系統於即時結構安全監測系統之研發 / The development of wireless sensor network system in structure health monitoring / Hsien-Ting Chen," 碩士論文--國立臺灣大學電子工程學研究所, 2010.
- [45] 黃任篷, "無線感測器網路應用於結構健康監測之系統開發 / Development of wireless sensor network for structural health monitoring / Jen-Peng Huang," 碩士論文--國立臺灣大學土木工程學研究所, 2010.
- [46] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002/03/15/2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4).
- [47] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata, "Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1403-1423, 2017.
- [48] 侯瑞瑜, "無線感測技術應用於橋梁淘刷檢測之開發與實測 /Development and implementation of wireless sensor network for detecting the exposure of a bridge pile foundation / Ruei-Yu Hou," 碩士論文--國立臺灣大學土木工程學研究所, 2017.
- [49] 羅瑞邦, "利用無線感測系統建立橋梁淘刷監控之研究 /Research on establishing scouring monitoring system of bridge management by using wireless sensor network / Jui-Pang Lo," 國立臺灣大學土木工程學研究所, 2018.
- [50] 李璧汝, "以無線感測儀器監測橋梁淘刷之研究 : 寶橋及萬壽橋為例 / Research on monitoring the scouring of bridges by using wireless sensors : Bao

bridge and Wanshou bridge for example / Pi-Ru Lee," 國立臺灣大學土木工程學研究所, 2020.

[51] 林東儒, "無線監測橋梁淘刷系統之量測流程及數據分析初步研究 / Preliminary study on measurement quantification and data analysis of wireless monitoring in bridge scouring depth system / Dong-Ru Lin," 國立臺灣大學土木工程學研究所, 2021.

[52] 林宥任, "無線監測應用於橋梁管理之開發與實測 = Development and implementation of wireless sensor network for bridge management / You-Ren Lin," 碩士論文--國立臺灣大學土木工程學研究所, 2014.

[53] 維基百科. "MATLAB." <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/MATLAB#%E4%B8%BB%E8%A6%81%E5%8A%9F%E8%83%BD> (accessed Mar. 1, 2024).

[54] 柯. 張. 陳正興, "結構基礎損傷評估技術發展(I)," 2010. 國家地震工程研究中心技術報告.

[55] 厲開紋, "運用現地監測與結構模擬評估橋梁基礎之沖刷程度與健康狀態 = Assessing the scouring depth and health condition of bridge foundation through the field monitoring and associated structural modelling / 厲開紋(Kai-Wen Li)撰," Assessing the scouring depth and health condition of bridge foundation through the field monitoring and associated structural modelling., 碩士論文--國立臺灣大學土木工程學研究所, 2012.

[56] T. Bao, R. A. Swartz, S. Vitton, Y. Sun, C. Zhang, and Z. Liu, "Critical insights for advanced bridge scour detection using the natural frequency," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 386, pp. 116-133, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.06.039>.

[57] 曾惠斌, 陳弘毅, 李璧汝, and 陳靜韋, "以無線感測儀器監測自然頻率之研究-

寶橋及萬壽橋為例," 中國土木水利工程學刊, vol. 33, no. 7, pp. 517-527, 2021.

[58] 邱耀正、劉玉文、黃錦旗、蕭輔沛、邱一哲、邱聰智、黃世建, "校舍建築構架式鋼板補強現地試驗分析," 2008.

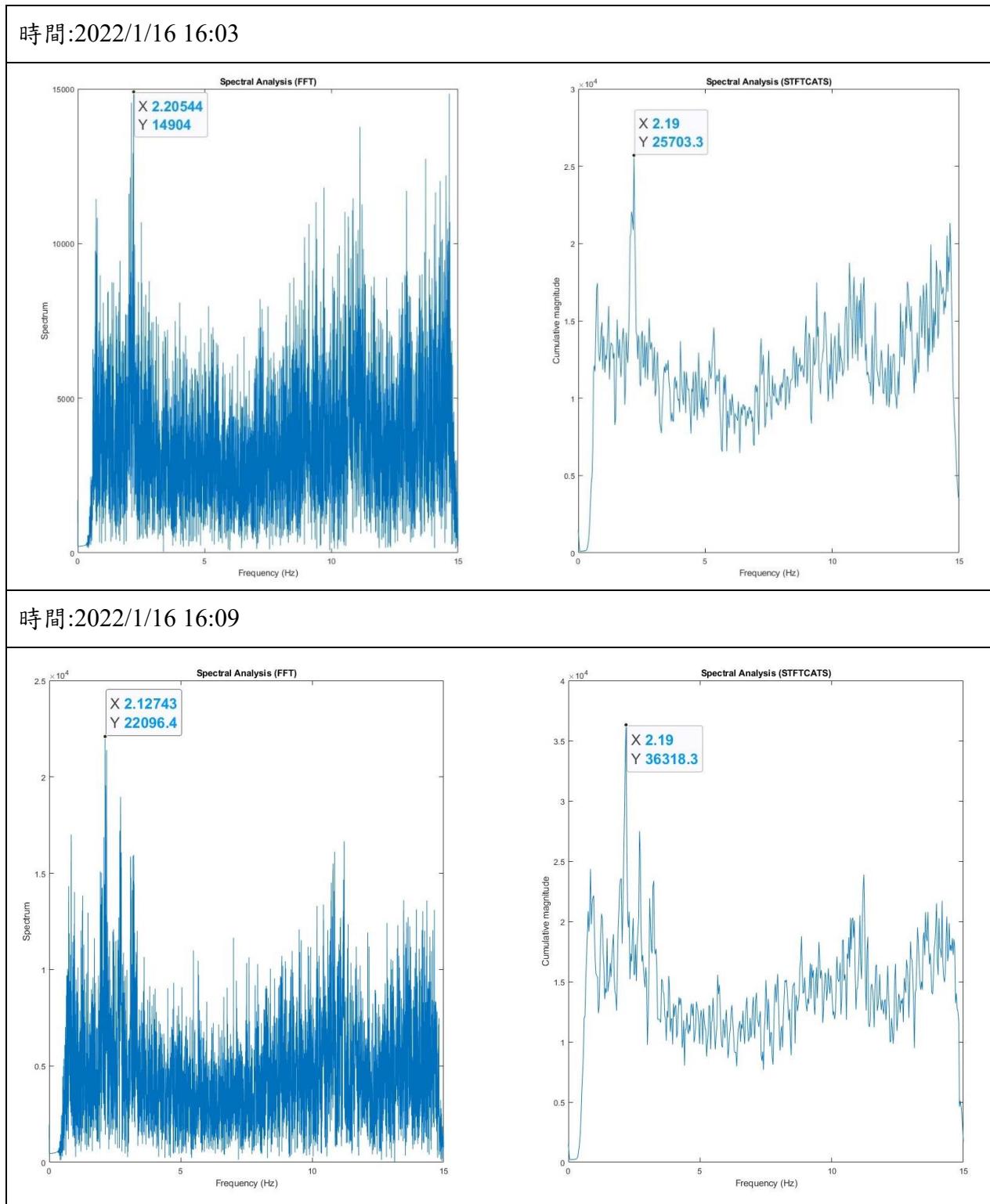
[59] 交通部, 公路橋梁耐震設計規範. 中華民國政府出版品, 2018.

[60] 鄭明淵, 廖國偉, 吳育偉, 林雅雯, and 郭佑綱, "橋梁振動頻率量測方法與安全評估模式之研發," 港灣季刊, no. 106, pp. 42-62, 2017.

附錄

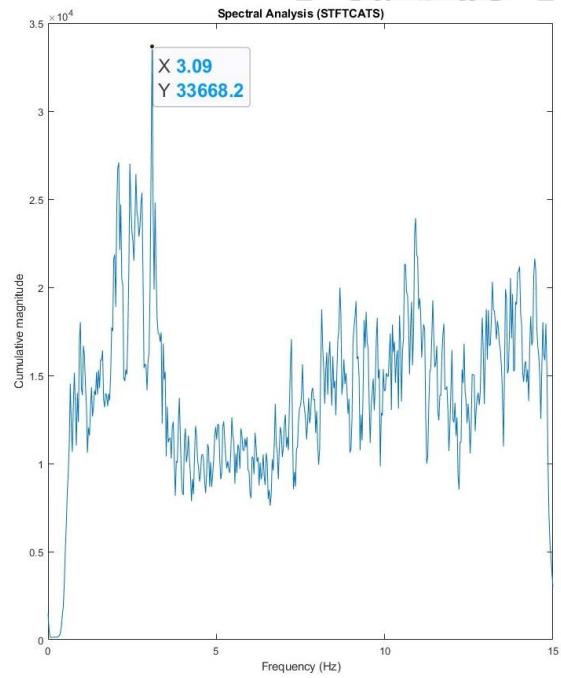
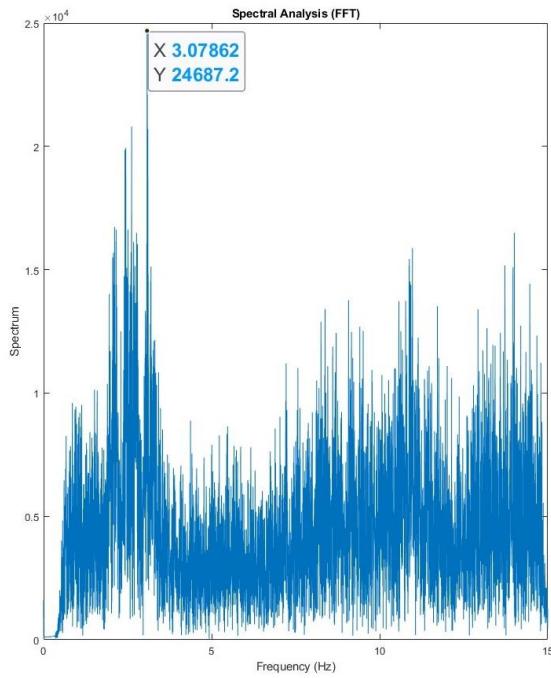


1. 南湖大橋實測自然頻率識別

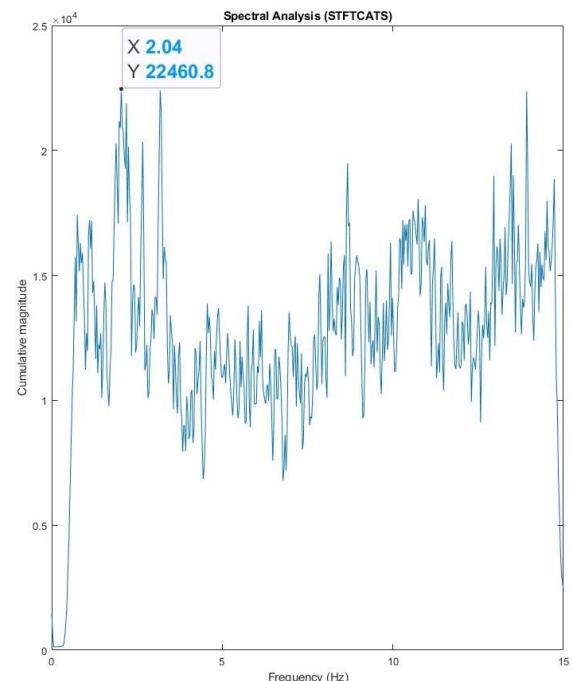
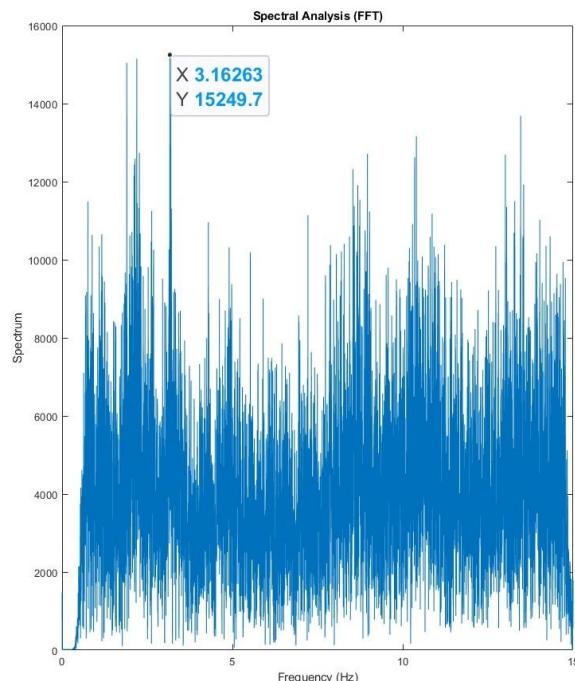




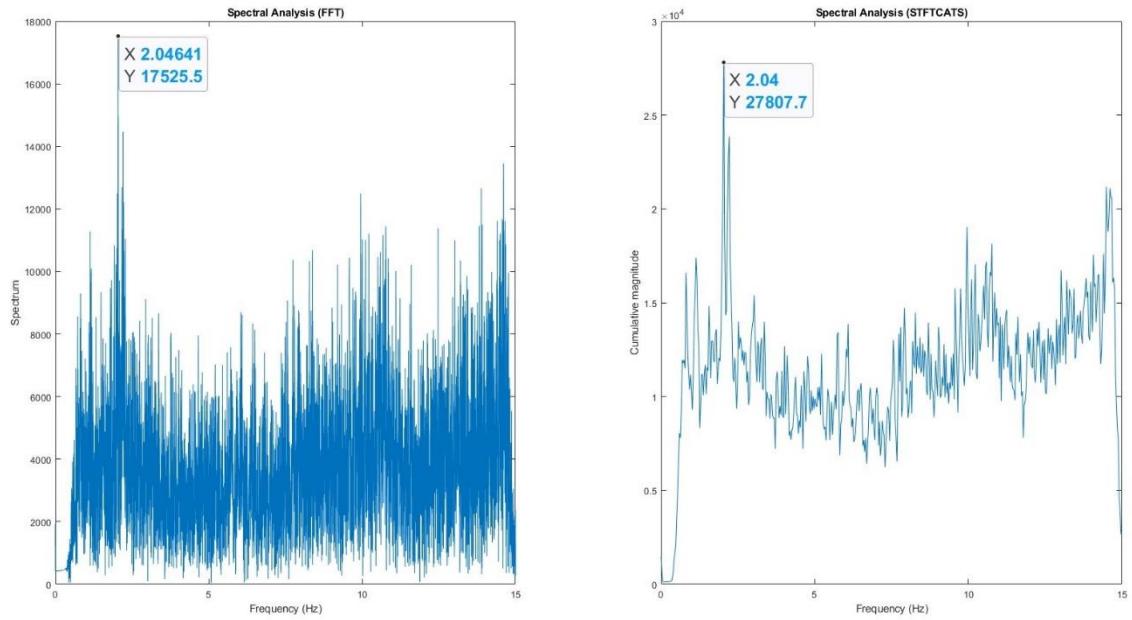
時間:2022/1/16 16:25



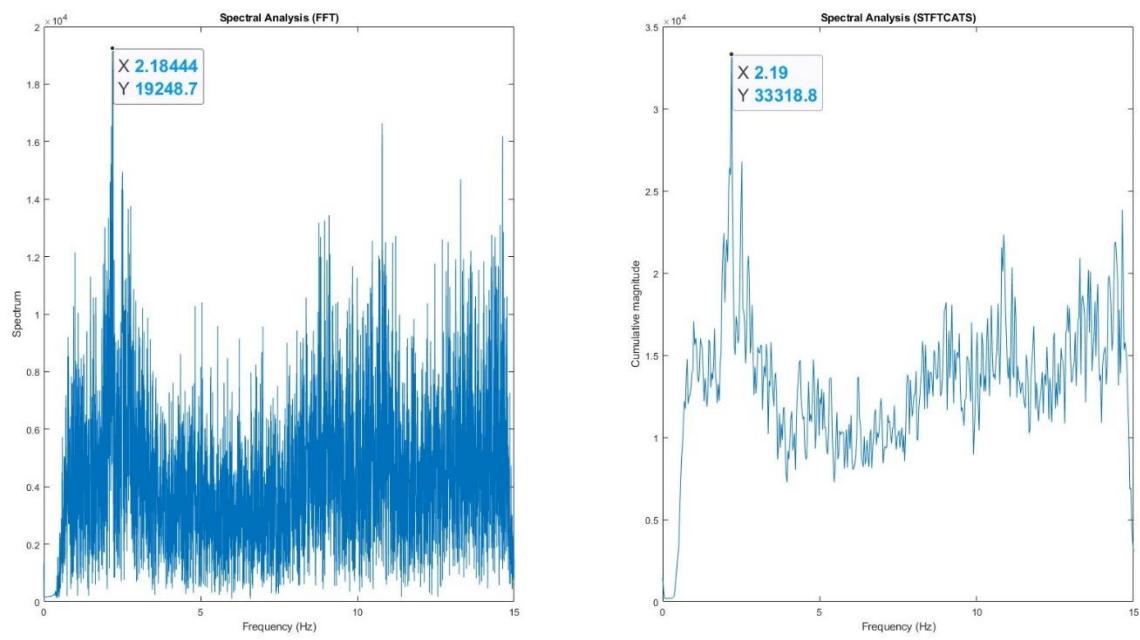
時間:2022/1/16 16:32



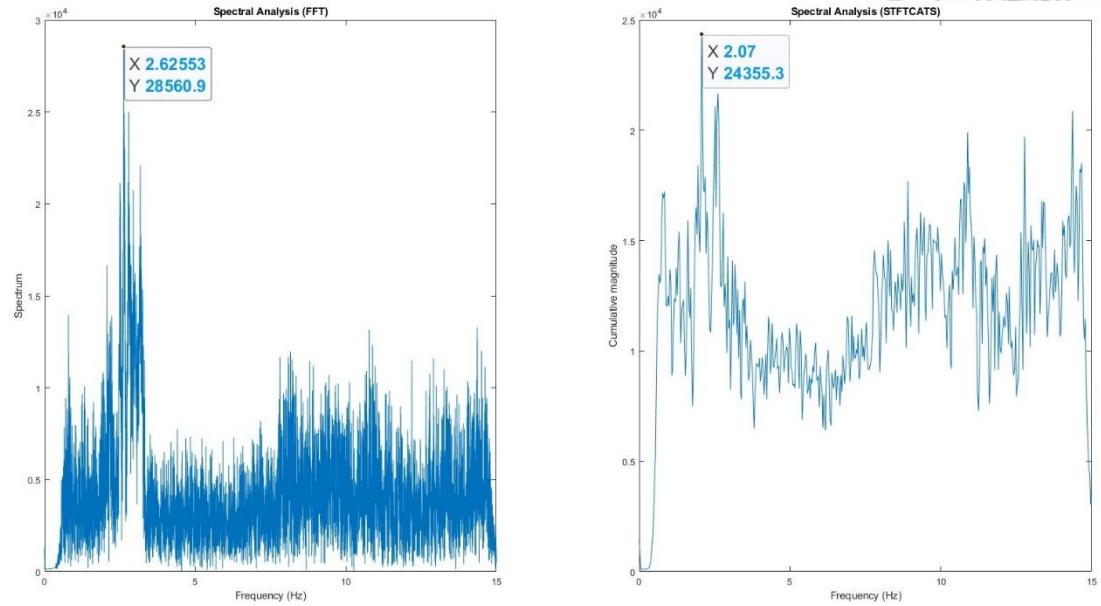
時間:2022/1/16 16:38



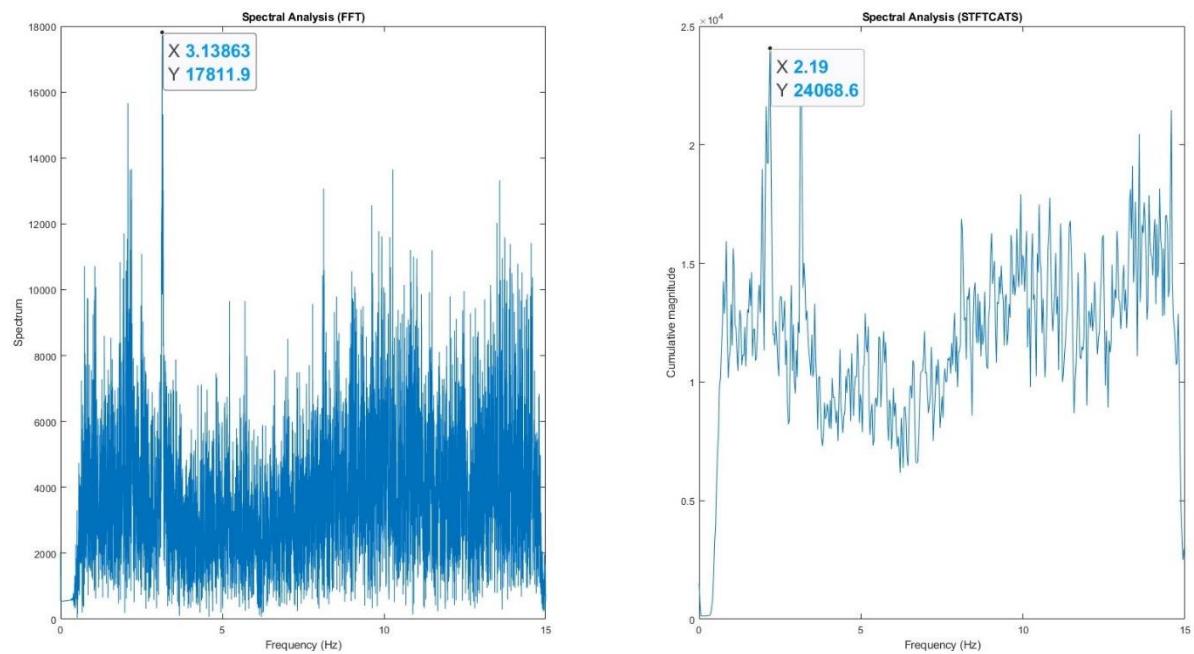
時間:2022/1/16 16:44



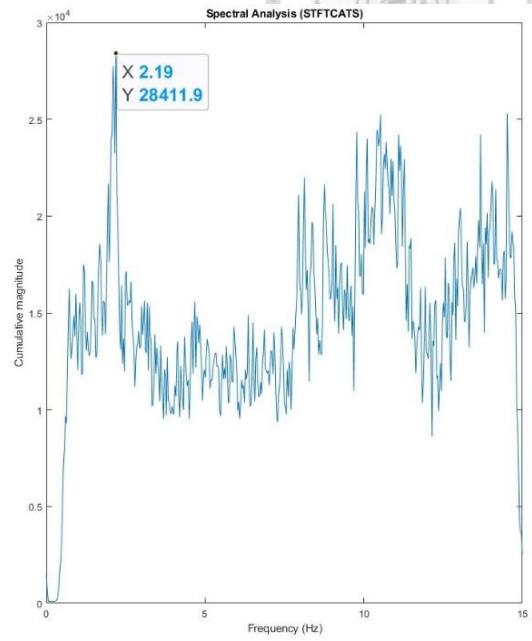
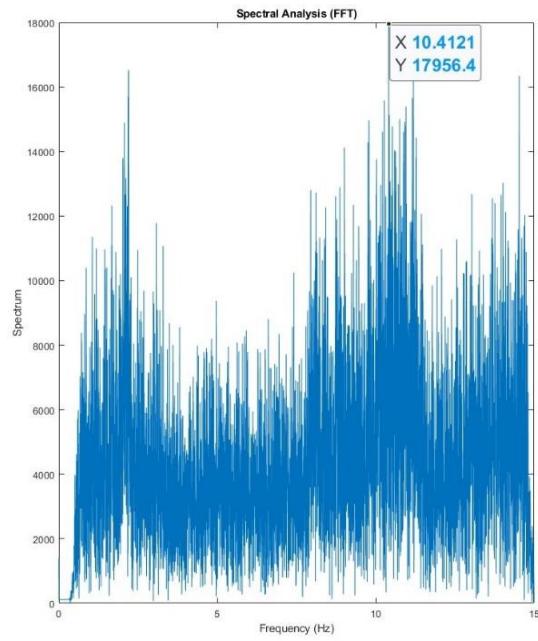
時間:2022/1/16 16:50



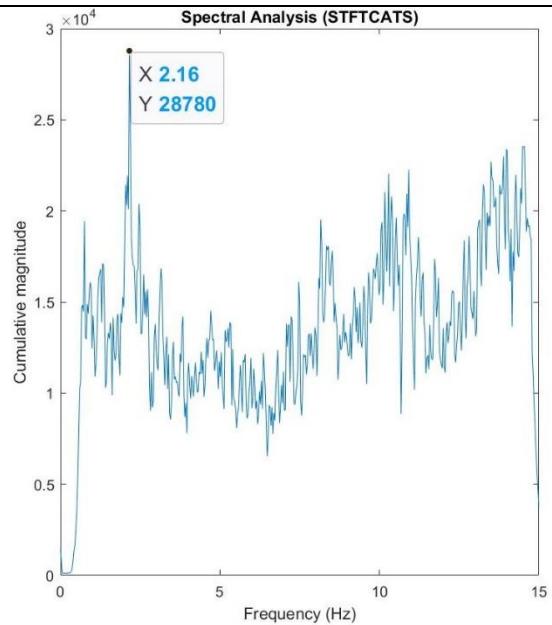
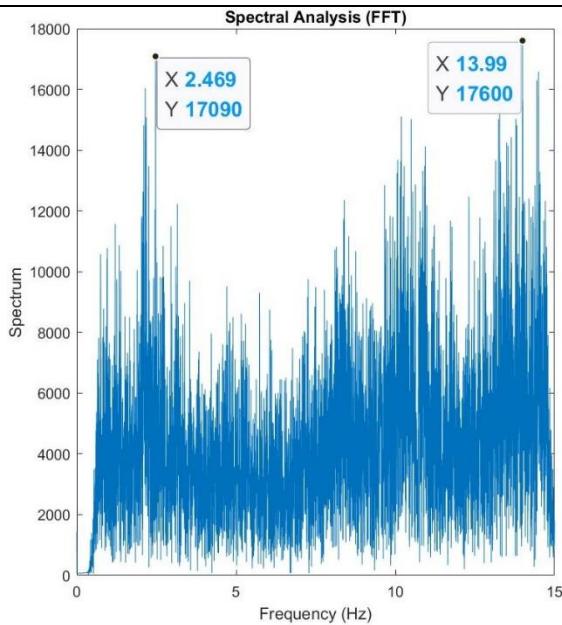
時間:2022/1/16 16:56



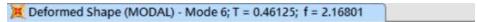
時間:2022/1/16 17:02



時間:2022/1/16 17:08



2. 南湖大橋 Sap2000 數值模擬各淘刷深度自然頻率及質量參與比率

淘刷 1m																		
																		
																		
淘刷 2m																		
TABLE: Modal Participating Mass Ratios																		
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ			
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789298	0	1.468E-11	0.36707	0	1.468E-11	0.36707	0.00391	0.000003066	1.09E-14	0.00391	0.000003066	1.09E-14			
MODAL	Mode	2	1.627222	0	5.195E-10	0.00921	0	5.342E-10	0.37628	0.11957	1.06E-07	3.787E-13	0.12348	0.000003173	3.896E-13			
MODAL	Mode	3	1.00409	1.088E-20	6.429E-11	0.00035	1.105E-20	5.984E-10	0.37663	0.00004238	0.000001075	4.165E-14	0.12352	0.000004248	4.312E-13			
MODAL	Mode	4	0.488435	3.823E-17	7.59E-08	1.268E-07	3.824E-17	7.65E-08	0.37663	0.00007048	0.000000221	1.221E-11	0.12359	0.000004469	1.264E-11			
MODAL	Mode	5	0.465029	1.98E-19	4.086E-07	3.229E-09	3.844E-17	4.851E-07	0.37663	5.258E-07	0.11589	4.885E-11	0.12359	0.11589	6.148E-11			
MODAL	Mode	6	0.461253	2.891E-19	0.82842	1.31E-13	3.873E-17	0.82842	0.37663	0.14908	7.518E-08	0.00009404	0.27267	0.11589	0.00009404			
MODAL	Mode	7	0.443855	7.244E-18	1.069E-07	1.676E-09	4.597E-17	0.82842	0.37663	0.00000153	0.00836	9.174E-12	0.27267	0.12426	0.00009404			
MODAL	Mode	8	0.442639	0.83548	3.72E-20	1.384E-19	0.83548	0.82842	0.37663	6.288E-20	0.05593	0.00008917	0.27267	0.1802	0.00018			
MODAL	Mode	9	0.396579	5.247E-18	7.092E-10	7.106E-08	0.83548	0.82842	0.37663	4.238E-11	0.00394	2.566E-14	0.27267	0.18414	0.00018			
MODAL	Mode	10	0.314767	6.517E-17	2.498E-09	2.056E-10	0.83548	0.82842	0.37663	0.0000182	2.991E-13	0.27268	0.18416	0.00018				
MODAL	Mode	11	0.271089	1.813E-16	6.119E-11	0.000001348	0.83548	0.82842	0.37663	1.153E-09	0.000001665	3.594E-14	0.27268	0.18416	0.00018			
MODAL	Mode	12	0.225387	2.947E-16	7.916E-11	0.00004526	0.83548	0.82842	0.37667	0.00000024	0.00007772	2.329E-13	0.27268	0.18424	0.00018			
淘刷 2m																		
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ			
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789304	0	2.143E-11	0.36707	0	2.143E-11	0.36707	0.0039	0.00000305	1.465E-14	0.0039	0.00000305	1.465E-14			
MODAL	Mode	2	1.627227	1.894E-20	6.295E-10	0.00921	1.999E-20	6.509E-10	0.37628	0.11931	1.074E-07	4.225E-13	0.12321	0.000003157	4.372E-13			
MODAL	Mode	3	1.004093	8.18E-19	5.347E-11	0.00035	8.38E-19	7.044E-10	0.37663	0.0000423	0.000001065	2.907E-14	0.12325	0.000004222	4.662E-13			
MODAL	Mode	4	0.488436	7.517E-14	2.603E-07	1.257E-07	7.517E-14	2.611E-07	0.37663	0.00007202	2.026E-07	3.583E-11	0.12333	0.000004425	3.63E-11			
MODAL	Mode	5	0.472251	0.000001576	0.82889	1.809E-12	0.000001576	0.82889	0.37663	0.14833	6.752E-08	0.00009365	0.27166	0.000004492	0.00009365			
MODAL	Mode	6	0.465031	1.222E-12	6.624E-08	3.605E-09	0.000001576	0.82889	0.37663	1.175E-07	0.11542	6.754E-12	0.27166	0.11543	0.00009365			
MODAL	Mode	7	0.461575	0.83535	0.000001582	3.244E-18	0.83535	0.82889	0.37663	2.678E-07	0.05574	0.00008878	0.27166	0.17117	0.00018			
MODAL	Mode	8	0.443855	2.537E-14	3.364E-08	1.36E-09	0.83535	0.82889	0.37663	0.000001674	0.00834	2.405E-12	0.27166	0.1795	0.00018			
MODAL	Mode	9	0.396583	1.012E-16	1.225E-09	6.806E-08	0.83535	0.82889	0.37663	5.107E-11	0.00392	1.858E-14	0.27166	0.18343	0.00018			
MODAL	Mode	10	0.31477	1.849E-16	1.953E-09	3.516E-11	0.83535	0.82889	0.37663	0.000003658	0.00001812	1.974E-13	0.27167	0.18344	0.00018			
MODAL	Mode	11	0.271089	9.187E-17	4.564E-11	0.00000134	0.83535	0.82889	0.37663	1.017E-09	0.000001661	1.53E-14	0.27167	0.18345	0.00018			
MODAL	Mode	12	0.225388	9.444E-17	1.179E-10	0.00004495	0.83535	0.82889	0.37668	2.272E-07	0.00007749	8.433E-14	0.27167	0.18352	0.00018			

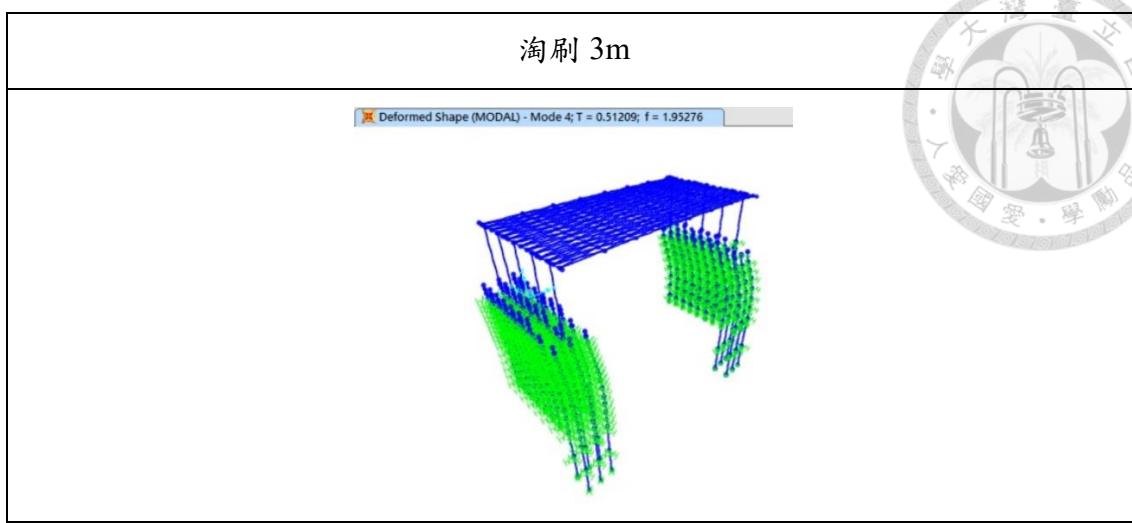


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789312	0	2.284E-11	0.36709	0	2.284E-11	0.36709	0.00391	0.000003065	1.274E-14	0.00391	0.000003065	1.274E-14
MODAL	Mode	2	1.627222	0	8.143E-10	0.00921	0	8.371E-10	0.3763	0.11957	1.067E-07	4.446E-13	0.12348	0.000003172	4.574E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	6.975E-20	1.1E-10	0.00035	6.976E-20	9.472E-10	0.37664	0.00004239	0.000001075	4.808E-14	0.1235	0.000004246	5.054E-13
MODAL	Mode	4	0.512095	7.596E-20	0.83081	3.56E-15	1.457E-19	0.83081	0.37664	0.14687	1.288E-10	0.00008543	0.27039	0.000004246	0.00008543
MODAL	Mode	5	0.5055219	0.83558	4.953E-19	2.6E-19	0.83558	0.83081	0.37664	2.149E-18	0.05586	0.0000905	0.27039	0.05586	0.00018
MODAL	Mode	6	0.488435	0	1.361E-07	1.269E-07	0.83558	0.83081	0.37664	0.00006599	2.209E-07	1.03E-11	0.27045	0.05586	0.00018
MODAL	Mode	7	0.4650202	3.937E-19	3.563E-09	3.231E-09	0.83558	0.83081	0.37664	1.839E-07	0.11589	1.77E-13	0.27045	0.17175	0.00018
MODAL	Mode	8	0.443855	1.766E-18	9.396E-09	1.676E-09	0.83558	0.83081	0.37664	0.000001782	0.00836	2.672E-13	0.27046	0.18011	0.00018
MODAL	Mode	9	0.396579	4.045E-18	2.993E-10	7.111E-08	0.83558	0.83081	0.37664	1.114E-10	0.00394	3.761E-16	0.27046	0.18405	0.00018
MODAL	Mode	10	0.314767	1.228E-17	1.835E-09	2.045E-10	0.83558	0.83081	0.37664	0.000003692	0.0000182	3.225E-13	0.27046	0.18407	0.00018
MODAL	Mode	11	0.271089	1.525E-16	5.051E-11	0.000001352	0.83558	0.83081	0.37665	1.173E-09	0.000001665	3.822E-14	0.27046	0.18407	0.00018
MODAL	Mode	12	0.225387	8.733E-16	7.127E-11	0.000004548	0.83558	0.83081	0.37669	2.396E-07	0.00007771	1.821E-13	0.27046	0.18415	0.00018

淘刷 4m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.53856; f = 1.85680

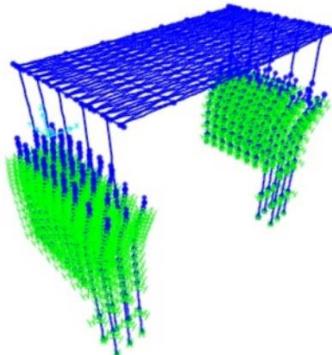


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ	
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	
MODAL	Mode	1	1.789317	0	2.754E-11	0.3671	0	2.754E-11	0.3671	0.00391	0.000003064	1.345E-14	0.00391	0.000003064	1.345E-14	
MODAL	Mode	2	1.627223	0	9.864E-10	0.00921	0	1.014E-09	0.3763	0.11957	1.067E-07	4.703E-13	0.12348	0.000003171	4.838E-13	
MODAL	Mode	3	1.00409	6.938E-20	1.405E-10	0.00035	6.939E-20	1.154E-09	0.37665	0.0000424	0.000001075	5.232E-14	0.12352	0.000004246	5.361E-13	
MODAL	Mode	4	0.53856	1.903E-20	0.83195	2.112E-14	8.842E-20	0.83195	0.37665	0.14576	4.306E-11	0.00007635	0.26928	0.000004246	0.00007635	
MODAL	Mode	5	0.527862	0.83597	2.036E-19	1.245E-19	0.83597	0.83195	0.37665	0.00006726	2.209E-07	1.505E-12	0.26935	0.05574	0.00017	
MODAL	Mode	6	0.488435	0	3.411E-08	1.269E-07	0.83597	0.83195	0.37665	0.000006726	0.00000191	0.11589	3.989E-14	0.26935	0.17163	0.00017
MODAL	Mode	7	0.4650202	4.023E-19	1.641E-09	3.232E-09	0.83597	0.83195	0.37665	0.000000191	0.00836	5.453E-14	0.26935	0.17999	0.00017	
MODAL	Mode	8	0.443855	1.831E-18	5.477E-09	1.677E-09	0.83597	0.83195	0.37665	0.000001809	0.00836	5.453E-14	0.26935	0.18393	0.00017	
MODAL	Mode	9	0.396579	4.068E-18	2.22E-10	7.114E-08	0.83597	0.83195	0.37665	1.346E-10	0.00394	2.777E-16	0.26935	0.18395	0.00017	
MODAL	Mode	10	0.314767	1.297E-17	1.593E-09	2.046E-10	0.83597	0.83195	0.37665	0.000003697	0.0000182	4.104E-13	0.26935	0.18395	0.00017	
MODAL	Mode	11	0.271089	1.517E-16	4.569E-11	0.000001352	0.83597	0.83195	0.37665	1.183E-09	0.000001665	4.317E-14	0.26935	0.18395	0.00017	
MODAL	Mode	12	0.225387	8.422E-16	6.651E-11	0.00004556	0.83597	0.83195	0.3767	2.394E-07	0.00007771	1.961E-13	0.26935	0.18403	0.00017	

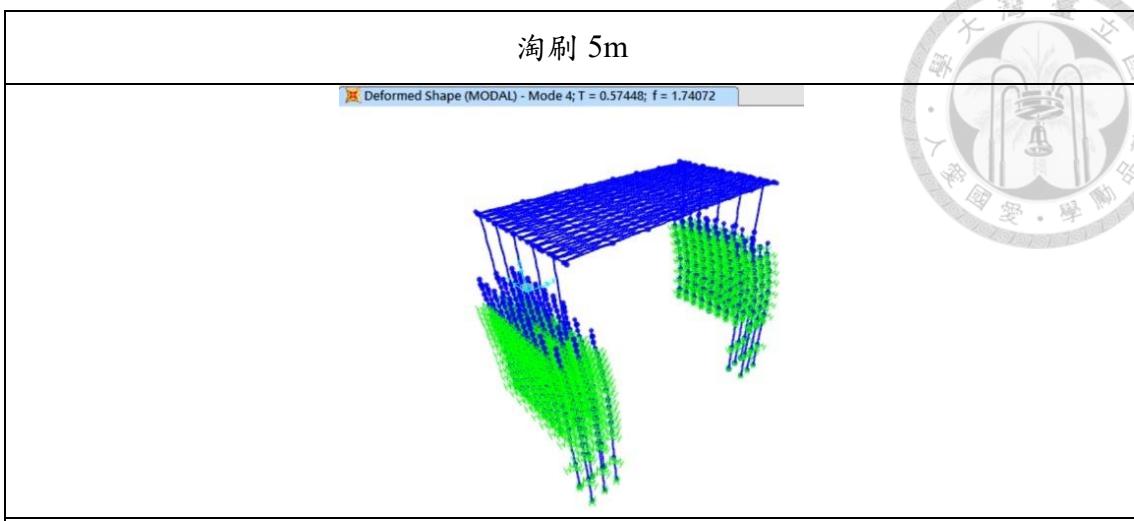


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789326	0	3.389E-11	0.37	0	3.389E-11	0.37	0.003905	0.00003064	1.434E-14	0.003905	0.00003064	1.434E-14
MODAL	Mode	2	1.627223	0	1.222E-09	0.009205	0	1.256E-09	0.38	0.12	1.066E-07	5.03E-13	0.12	0.0000317	5.174E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	6.913E-20	1.887E-10	0.0003475	6.914E-20	1.445E-09	0.38	0.00004241	0.00001074	5.828E-14	0.12	0.00004245	5.757E-13
MODAL	Mode	4	0.574475	0	0.83	3.772E-14	7.199E-20	0.83	0.38	0.14	1.649E-11	0.00005595	0.27	0.00004245	0.0000595
MODAL	Mode	5	0.56394	0.84	5.375E-20	3.774E-20	0.84	0.83	0.38	2.504E-19	0.05547	0.00009436	0.27	0.05548	0.0001603
MODAL	Mode	6	0.488435	0	1.298E-08	0.000000127	0.84	0.83	0.38	0.00006775	2.209E-07	2.039E-13	0.27	0.05548	0.0001603
MODAL	Mode	7	0.465029	4.149E-19	8.295E-10	3.233E-09	0.84	0.83	0.38	1.954E-07	0.12	3.742E-15	0.27	0.17	0.0001603
MODAL	Mode	8	0.443855	1.912E-18	3.221E-09	1.678E-09	0.84	0.83	0.38	0.000001829	0.008363	1.582E-16	0.27	0.18	0.0001603
MODAL	Mode	9	0.396579	4.138E-18	1.578E-10	7.118E-08	0.84	0.83	0.38	1.595E-10	0.003938	2.893E-15	0.27	0.18	0.0001603
MODAL	Mode	10	0.314767	1.398E-17	3.151E-09	2.048E-10	0.84	0.83	0.38	0.000003704	0.0000182	5.449E-13	0.27	0.18	0.0001603
MODAL	Mode	11	0.271089	1.511E-16	3.945E-11	0.000001354	0.84	0.83	0.38	1.197E-09	0.000001665	5.114E-14	0.27	0.18	0.0001603
MODAL	Mode	12	0.225387	8.061E-16	5.952E-11	0.0000457	0.84	0.83	0.38	0.00000239	0.0000777	2.205E-13	0.27	0.18	0.0001603

淘刷 6m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.60913; f = 1.64170

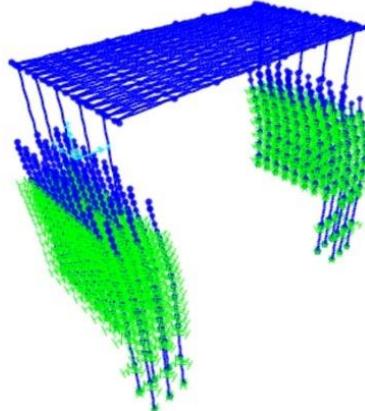
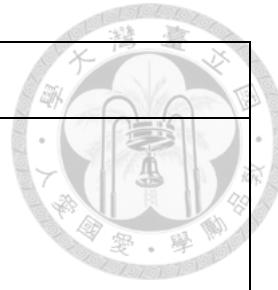


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789335	0	4.031E-11	0.37	0	4.031E-11	0.37	0.003905	0.00003063	1.496E-14	0.003905	0.00003063	1.496E-14
MODAL	Mode	2	1.627223	0	1.464E-09	0.009204	0	1.504E-09	0.38	0.12	1.066E-07	5.258E-13	0.12	0.00003169	5.407E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	6.977E-20	2.473E-10	0.0003475	6.978E-20	1.752E-09	0.38	0.00004242	0.00001074	6.313E-14	0.12	0.00004244	6.039E-13
MODAL	Mode	4	0.609126	0	0.84	5.446E-14	7.016E-20	0.84	0.38	0.14	8.637E-12	0.00005342	0.27	0.00004244	0.00005342
MODAL	Mode	5	0.599212	0.84	1.585E-20	1.329E-20	0.84	0.84	0.38	7.625E-20	0.05512	0.00009686	0.27	0.05512	0.0001503
MODAL	Mode	6	0.488435	0	7.181E-09	0.000000127	0.84	0.84	0.38	0.00006796	0.00000221	7.326E-15	0.27	0.05513	0.0001503
MODAL	Mode	7	0.465029	4.248E-19	5.203E-10	3.235E-09	0.84	0.84	0.38	1.976E-07	0.12	5.319E-16	0.27	0.17	0.0001503
MODAL	Mode	8	0.443855	1.97E-18	2.186E-09	1.678E-09	0.84	0.84	0.38	0.00000184	0.008363	2.099E-14	0.27	0.18	0.0001503
MODAL	Mode	9	0.396579	4.221E-18	1.199E-10	7.122E-08	0.84	0.84	0.38	1.784E-10	0.003938	7.682E-15	0.27	0.18	0.0001503
MODAL	Mode	10	0.314767	1.481E-17	1.107E-09	2.05E-10	0.84	0.84	0.38	0.00000371	0.0000182	7.299E-13	0.27	0.18	0.0001503
MODAL	Mode	11	0.271089	1.499E-16	3.436E-11	0.000001356	0.84	0.84	0.38	1.209E-09	0.000001664	6.285E-14	0.27	0.18	0.0001503
MODAL	Mode	12	0.225387	7.736E-16	5.34E-11	0.00004584	0.84	0.84	0.38	2.387E-07	0.0000777	2.596E-13	0.27	0.18	0.0001503



淘刷 7m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.65431; f = 1.52833

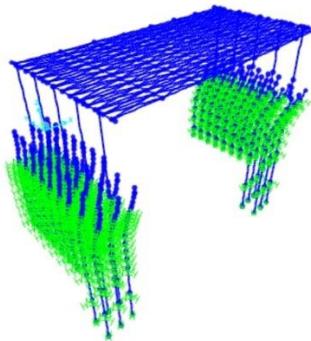


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789348	0	4.829E-11	0.37	0	4.829E-11	0.37	0.003904	0.00003062	1.587E-14	0.003904	0.00003062	1.587E-14
MODAL	Mode	2	1.627223	0	1.772E-09	0.009203	0	1.82E-09	0.38	0.12	1.065E-07	5.595E-13	0.12	0.00003168	5.754E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	7.321E-20	3.436E-10	0.0003476	7.322E-20	2.164E-09	0.38	0.00004244	0.00001074	7.105E-14	0.12	0.00004243	6.464E-13
MODAL	Mode	4	0.65431	0	0.84	8.386E-14	7.322E-20	0.84	0.38	0.14	4.528E-12	0.00004304	0.26	0.00004243	0.00004304
MODAL	Mode	5	0.645294	0.84	0	0	0.84	0.84	0.38	1.791E-20	0.0544	0.0001005	0.26	0.0544	0.0001436
MODAL	Mode	6	0.488435	0	4.062E-09	1.271E-07	0.84	0.84	0.38	0.00006811	0.00000221	3.078E-14	0.26	0.0544	0.0001436
MODAL	Mode	7	0.465029	4.318E-19	3.218E-10	3.237E-09	0.84	0.84	0.38	1.995E-07	0.12	8.257E-15	0.26	0.17	0.0001436
MODAL	Mode	8	0.443855	2.001E-18	1.438E-09	1.68E-09	0.84	0.84	0.38	0.000001851	0.008363	7.977E-14	0.26	0.18	0.0001436
MODAL	Mode	9	0.396579	4.333E-18	8.683E-11	7.128E-08	0.84	0.84	0.38	1.994E-10	0.003938	1.477E-14	0.26	0.18	0.0001436
MODAL	Mode	10	0.314767	1.533E-17	8.854E-10	2.053E-10	0.84	0.84	0.38	0.000003717	0.0000182	9.777E-13	0.26	0.18	0.0001436
MODAL	Mode	11	0.271089	1.492E-16	2.851E-11	0.000001359	0.84	0.84	0.38	1.227E-09	0.000001664	7.943E-14	0.26	0.18	0.0001436
MODAL	Mode	12	0.225387	7.757E-16	4.588E-11	0.00004605	0.84	0.84	0.38	2.382E-07	0.0000777	3.196E-13	0.26	0.18	0.0001436

淘刷 8m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.71889; f = 1.39104

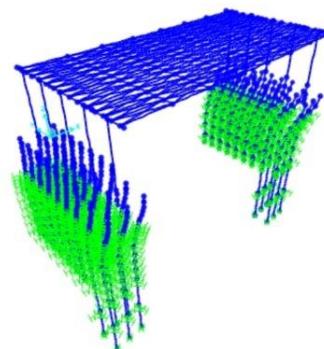


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789364	0	6.15E-11	0.37	0	6.15E-11	0.37	0.003903	0.0000306	1.614E-14	0.003903	0.0000306	1.614E-14
MODAL	Mode	2	1.627224	0	2.295E-09	0.009202	0	2.357E-09	0.38	0.12	1.064E-07	5.692E-13	0.12	0.00003166	5.853E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	8.756E-20	5.726E-10	0.0003476	8.758E-20	2.93E-09	0.38	0.00004246	0.00001074	7.516E-14	0.12	0.00004241	6.605E-13
MODAL	Mode	4	0.718889	0	0.84	1.656E-13	8.759E-20	0.84	0.38	0.14	2.326E-12	0.00002113	0.26	0.00004241	0.00002113
MODAL	Mode	5	0.710942	0.84	0	0	0.84	0.84	0.38	0	0.05327	0.0001056	0.26	0.05327	0.0001267
MODAL	Mode	6	0.488435	0	2.275E-09	1.272E-07	0.84	0.84	0.38	0.00006822	0.00000221	2.44E-13	0.26	0.05327	0.0001267
MODAL	Mode	7	0.465029	4.317E-19	1.932E-10	3.239E-09	0.84	0.84	0.38	2.012E-07	0.12	3.42E-14	0.26	0.17	0.0001267
MODAL	Mode	8	0.443855	1.953E-18	9.083E-10	1.681E-09	0.84	0.84	0.38	0.000001861	0.008363	2.424E-13	0.26	0.18	0.0001267
MODAL	Mode	9	0.396579	4.378E-18	5.984E-11	7.137E-08	0.84	0.84	0.38	2.219E-10	0.003938	3.388E-14	0.26	0.18	0.0001267
MODAL	Mode	10	0.314767	1.302E-17	6.745E-10	2.057E-10	0.84	0.84	0.38	0.000003725	0.0000182	1.631E-12	0.26	0.18	0.0001267
MODAL	Mode	11	0.271089	1.494E-16	2.264E-11	0.000001363	0.84	0.84	0.38	1.249E-09	0.000001664	1.258E-13	0.26	0.18	0.0001267
MODAL	Mode	12	0.225387	9.406E-16	3.807E-11	0.00004632	0.84	0.84	0.38	2.375E-07	0.00007769	4.971E-13	0.26	0.18	0.0001267

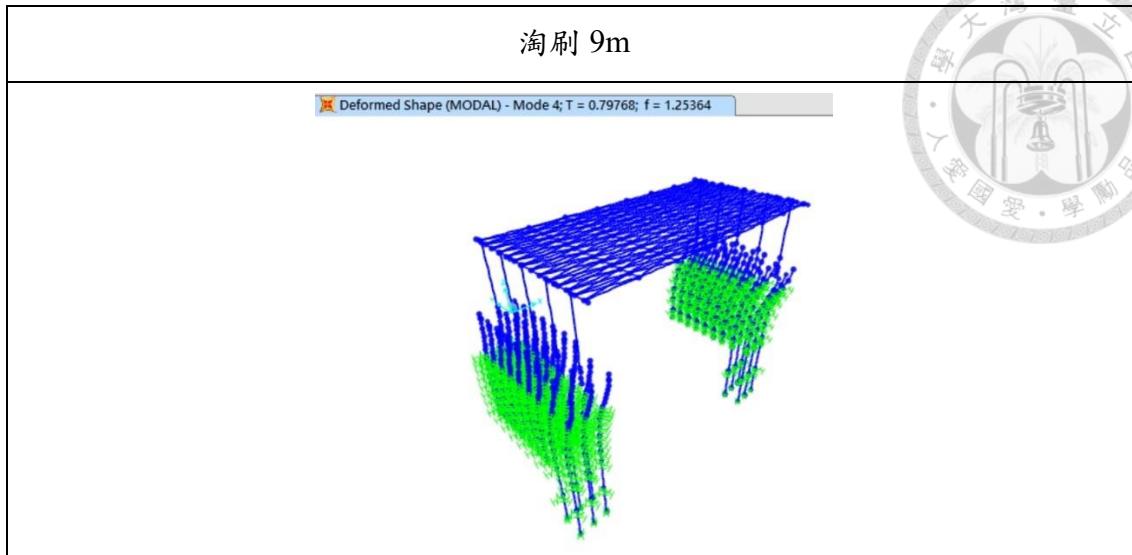


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789384	0	7.959E-11	0.37	0	7.959E-11	0.37	0.003902	0.000003059	1.763E-14	0.003902	0.000003059	1.763E-14
MODAL	Mode	2	1.627224	0	3.045E-09	0.0092	0	3.125E-09	0.38	0.12	1.064E-07	6.249E-13	0.12	0.000003165	6.425E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	1.223E-19	1.185E-09	0.0003477	1.223E-19	4.31E-09	0.38	0.00004252	0.000001074	9.768E-14	0.12	0.000004239	7.402E-13
MODAL	Mode	4	0.799769	1.171E-17	0.85	4.254E-13	1.183E-17	0.85	0.38	0.13	1.301E-12	0.0000151	0.26	0.000004239	0.0000151
MODAL	Mode	5	0.790763	0.85	6.455E-19	2.567E-18	0.85	0.85	0.38	1.417E-18	0.05162	0.0001117	0.26	0.05163	0.0001268
MODAL	Mode	6	0.488435	1.193E-20	1.337E-09	1.273E-07	0.85	0.85	0.38	0.00006831	0.00000221	4.158E-13	0.26	0.05163	0.0001268
MODAL	Mode	7	0.465029	5.639E-19	1.191E-10	3.243E-09	0.85	0.85	0.38	2.024E-07	0.12	5.39E-14	0.26	0.17	0.0001268
MODAL	Mode	8	0.443855	2.815E-18	5.805E-10	1.683E-09	0.85	0.85	0.38	0.000001869	0.008363	3.622E-13	0.26	0.18	0.0001268
MODAL	Mode	9	0.396579	7.502E-18	4.087E-11	7.147E-08	0.85	0.85	0.38	2.435E-10	0.003938	4.747E-14	0.26	0.18	0.0001268
MODAL	Mode	10	0.314767	2.383E-18	5.028E-10	2.062E-10	0.85	0.85	0.38	0.000003734	0.0000182	2.116E-12	0.26	0.18	0.0001268
MODAL	Mode	11	0.271089	1.176E-16	1.763E-11	0.000001367	0.85	0.85	0.38	1.274E-09	0.000001664	1.605E-13	0.26	0.18	0.0001268
MODAL	Mode	12	0.225387	5.307E-16	3.118E-11	0.00004665	0.85	0.85	0.38	2.357E-07	0.00007768	5.976E-13	0.26	0.18	0.0001268

TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789404	0	1.167E-10	0.37	0	1.167E-10	0.37	0.003901	0.000003057	2.051E-14	0.003901	0.000003057	2.051E-14
MODAL	Mode	2	1.627225	0	4.671E-09	0.009199	0	4.788E-09	0.38	0.12	1.063E-07	7.361E-13	0.12	0.000003164	7.567E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	2.076E-19	6.262E-09	0.0003477	2.076E-19	1.105E-08	0.38	0.00004274	0.000001074	2.216E-13	0.12	0.000004238	9.783E-13
MODAL	Mode	4	0.903109	2.414E-18	0.86	2.796E-12	2.622E-18	0.86	0.38	0.13	7.907E-13	0.00001132	0.25	0.000004238	0.00001132
MODAL	Mode	5	0.903351	0.86	1.349E-19	3.451E-19	0.86	0.86	0.38	3.844E-19	0.04977	0.0001187	0.25	0.04978	0.00013
MODAL	Mode	6	0.488435	9.378E-20	7.869E-10	1.274E-07	0.86	0.86	0.38	0.00006837	0.000000221	6.055E-13	0.25	0.04978	0.00013
MODAL	Mode	7	0.465029	4.551E-19	7.271E-11	3.246E-09	0.86	0.86	0.38	2.035E-07	0.12	7.612E-14	0.25	0.17	0.00013
MODAL	Mode	8	0.443855	2.011E-18	3.654E-10	1.685E-09	0.86	0.86	0.38	0.000001876	0.008363	5.001E-13	0.25	0.17	0.00013
MODAL	Mode	9	0.396579	1.271E-17	2.726E-11	7.157E-08	0.86	0.86	0.38	2.641E-10	0.003938	6.482E-14	0.25	0.18	0.00013
MODAL	Mode	10	0.314767	1.141E-17	3.652E-10	2.068E-10	0.86	0.86	0.38	0.000003743	0.0000182	2.746E-12	0.25	0.18	0.00013
MODAL	Mode	11	0.271089	3.013E-16	1.345E-11	0.000001372	0.86	0.86	0.38	1.301E-09	0.000001664	2.23E-13	0.25	0.18	0.00013
MODAL	Mode	12	0.225387	3.292E-15	2.521E-11	0.00004699	0.86	0.86	0.38	2.357E-07	0.00007768	9.219E-13	0.25	0.18	0.00013

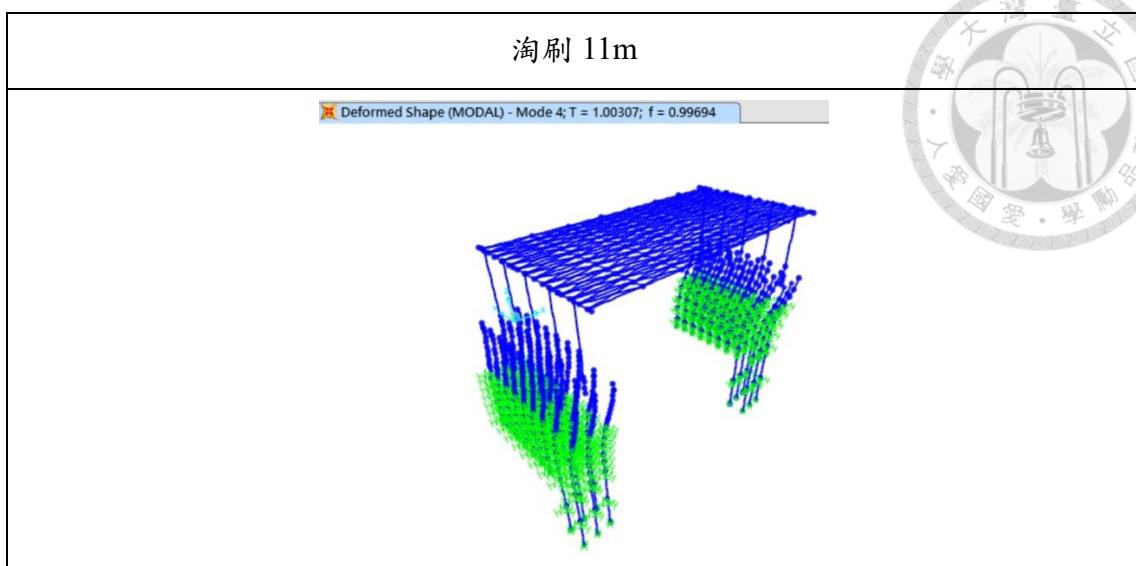


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789421	0	1.589E-10	0.37	0	1.589E-10	0.37	0.0039	0.00003057	2.4E-14	0.0039	0.00003057	2.4E-14
MODAL	Mode	2	1.627225	0	6.693E-09	0.009197	0	6.852E-09	0.38	0.12	1.063E-07	8.811E-13	0.12	0.00003163	9.05E-13
MODAL	Mode	3	1.00409	3.755E-19	0.00005754	0.0003477	3.756E-19	0.00005755	0.38	0.00008747	0.00001074	8.457E-10	0.12	0.000004237	8.465E-10
MODAL	Mode	4	1.003069	9.071E-19	0.86	2.331E-08	1.283E-18	0.86	0.38	0.12	8.309E-11	0.0000125	0.24	0.000004237	0.000125
MODAL	Mode	5	0.998064	0.86	4.887E-20	8.014E-20	0.86	0.86	0.38	1.779E-19	0.04799	0.0001248	0.24	0.04799	0.0001373
MODAL	Mode	6	0.488435	5.112E-19	5.504E-10	1.275E-07	0.86	0.86	0.38	0.00006841	0.00000221	6.766E-13	0.24	0.04799	0.0001373
MODAL	Mode	7	0.465029	3.256E-19	5.188E-11	3.249E-09	0.86	0.86	0.38	2.041E-07	0.12	8.494E-14	0.24	0.16	0.0001373
MODAL	Mode	8	0.443855	1.062E-18	2.651E-10	1.696E-09	0.86	0.86	0.38	0.0000188	0.008363	5.556E-13	0.24	0.17	0.0001373
MODAL	Mode	9	0.396579	2.809E-17	2.045E-11	7.165E-08	0.86	0.86	0.38	2.789E-10	0.003938	7.288E-14	0.24	0.18	0.0001373
MODAL	Mode	10	0.314767	2.033E-16	2.906E-10	2.073E-10	0.86	0.86	0.38	0.0000375	0.0000182	3.002E-12	0.24	0.18	0.0001373
MODAL	Mode	11	0.271089	9.756E-16	1.117E-11	0.000001376	0.86	0.86	0.38	1.326E-09	0.000001664	2.866E-13	0.24	0.18	0.0001373
MODAL	Mode	12	0.225387	1.344E-14	2.193E-11	0.00004729	0.86	0.86	0.38	2.348E-07	0.00007767	1.404E-12	0.24	0.18	0.0001373

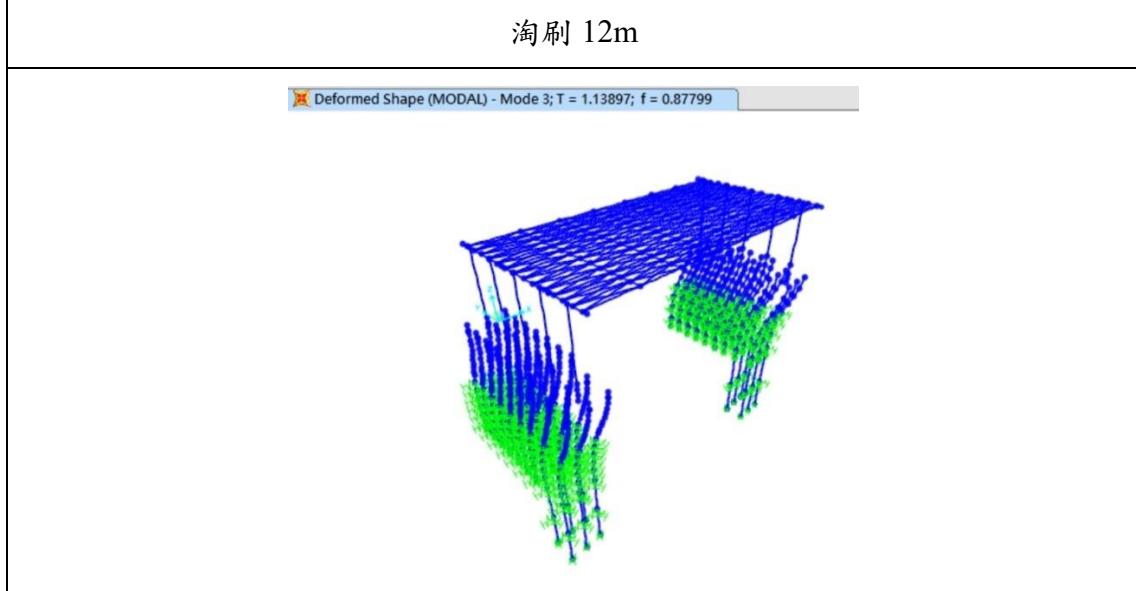


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789438	0	2.624E-10	0.37	0	2.624E-10	0.37	0.0039	0.00003056	3.379E-14	0.0039	0.00003056	3.379E-14
MODAL	Mode	2	1.627226	0	1.23E-08	0.009196	0	1.256E-08	0.38	0.12	1.062E-07	1.329E-12	0.12	0.00003163	1.363E-12
MODAL	Mode	3	1.13897	2.225E-19	0.87	7.599E-14	2.227E-19	0.87	0.38	0.12	1.986E-13	0.00001896	0.24	0.00003163	0.00001896
MODAL	Mode	4	1.134855	0.87	1.169E-20	1.218E-20	0.87	0.87	0.38	5.578E-20	0.04602	0.0001318	0.24	0.04602	0.0001507
MODAL	Mode	5	1.00409	8.303E-19	3.616E-09	0.0003478	0.87	0.87	0.38	0.00004206	0.00001074	8.339E-15	0.24	0.04602	0.0001507
MODAL	Mode	6	0.488435	2.106E-18	3.717E-10	1.276E-07	0.87	0.87	0.38	0.00006845	0.00000221	7.058E-13	0.24	0.04602	0.0001507
MODAL	Mode	7	0.465029	2.826E-19	3.571E-11	3.251E-09	0.87	0.87	0.38	2.048E-07	0.12	8.935E-14	0.24	0.16	0.0001507
MODAL	Mode	8	0.443855	3.437E-19	1.856E-10	1.688E-09	0.87	0.87	0.38	0.000001884	0.008363	5.84E-13	0.24	0.17	0.0001507
MODAL	Mode	9	0.396579	6.794E-17	1.48E-11	7.174E-08	0.87	0.87	0.38	2.942E-10	0.003938	7.762E-14	0.24	0.17	0.0001507
MODAL	Mode	10	0.314767	1.351E-15	2.245E-10	2.08E-10	0.87	0.87	0.38	0.00003758	0.0000182	3.09E-12	0.24	0.17	0.0001507
MODAL	Mode	11	0.271089	3.386E-15	9.153E-12	0.00000138	0.87	0.87	0.38	1.355E-09	0.000001664	3.916E-13	0.24	0.17	0.0001507
MODAL	Mode	12	0.225387	2.603E-15	1.912E-11	0.00004758	0.87	0.87	0.38	2.338E-07	0.00007767	1.263E-12	0.24	0.17	0.0001507



淘刷 14m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 1.33000; f = 0.75188

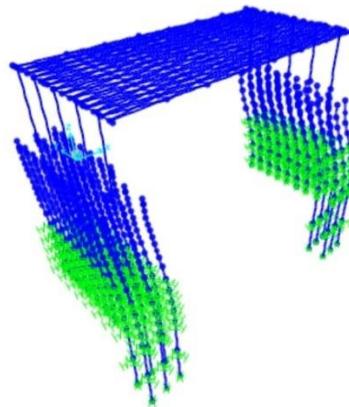


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789463	0	5.859E-10	0.37	0	5.859E-10	0.37	0.003899	0.000003054	3.773E-14	0.003899	0.000003054	3.773E-14
MODAL	Mode	2	1.627227	0	3.676E-08	0.009194	0	3.735E-08	0.38	0.12	1.061E-07	1.631E-12	0.12	0.00000316	1.668E-12
MODAL	Mode	3	1.33	6.797E-20	0.88	1.217E-11	6.878E-20	0.88	0.38	0.11	1.404E-13	0.000006642	0.23	0.00000316	0.000006642
MODAL	Mode	4	1.326803	0.88	0	0	0.88	0.88	0.38	2.728E-20	0.04283	0.0001425	0.23	0.04283	0.0001491
MODAL	Mode	5	1.00409	5.803E-18	6.673E-10	0.00003479	0.88	0.88	0.38	0.00004223	0.000001074	2.341E-14	0.23	0.04283	0.0001491
MODAL	Mode	6	0.488435	1.839E-17	2.394E-10	1.277E-07	0.88	0.88	0.38	0.00006849	0.000000221	1.163E-12	0.23	0.04283	0.0001491
MODAL	Mode	7	0.465029	5.519E-18	2.348E-11	3.255E-09	0.88	0.88	0.38	2.055E-07	0.12	1.512E-15	0.23	0.16	0.0001491
MODAL	Mode	8	0.443855	5.555E-18	1.242E-10	1.69E-09	0.88	0.88	0.38	0.00000189	0.008363	9.642E-13	0.23	0.17	0.0001491
MODAL	Mode	9	0.396579	2.516E-16	1.021E-11	7.185E-08	0.88	0.88	0.38	3.142E-10	0.003938	1.328E-13	0.23	0.17	0.0001491
MODAL	Mode	10	0.314767	5.337E-16	1.719E-10	2.094E-10	0.88	0.88	0.38	0.000003769	0.0000182	5.77E-12	0.23	0.17	0.0001491
MODAL	Mode	11	0.271089	6.84E-16	7.585E-12	0.000001386	0.88	0.88	0.38	1.402E-09	0.000001664	4.881E-13	0.23	0.17	0.0001491
MODAL	Mode	12	0.225387	4.925E-15	1.813E-11	0.00004802	0.88	0.88	0.38	2.318E-07	0.00007766	1.712E-12	0.23	0.17	0.0001491

淘刷 16m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 1.53207; f = 0.65271

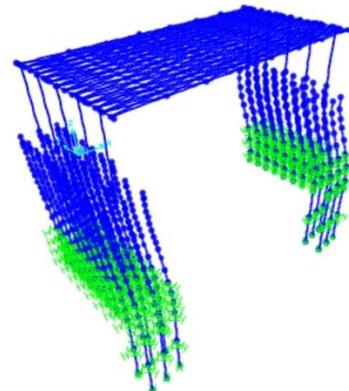


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789483	0	2.084E-09	0.37	0	2.084E-09	0.37	0.003899	0.000003053	7.908E-14	0.003899	0.000003053	7.908E-14
MODAL	Mode	2	1.627227	0	3.983E-07	0.009192	0	4.004E-07	0.38	0.12	1.061E-07	8.081E-12	0.12	0.000003159	8.16E-12
MODAL	Mode	3	1.532075	1.766E-20	0.89	1.196E-09	1.991E-20	0.89	0.38	0.1	1.778E-13	0.000009539	0.22	0.000003159	0.000009539
MODAL	Mode	4	1.529631	0.89	0	0	0.89	0.89	0.38	0	0.04023	0.0001514	0.22	0.04024	0.0001609
MODAL	Mode	5	1.00409	1.183E-20	2.758E-10	0.00003479	0.89	0.89	0.38	0.00004228	0.000001074	3.306E-14	0.22	0.04024	0.0001609
MODAL	Mode	6	0.488435	7.02E-17	1.705E-10	1.278E-07	0.89	0.89	0.38	0.00006853	0.000000221	1.302E-12	0.22	0.04024	0.0001609
MODAL	Mode	7	0.465029	7.071E-17	1.703E-11	3.259E-09	0.89	0.89	0.38	2.061E-07	0.12	1.761E-13	0.22	0.16	0.0001609
MODAL	Mode	8	0.443855	8.362E-17	9.118E-11	1.692E-09	0.89	0.89	0.38	0.000001894	0.008363	1.069E-12	0.22	0.16	0.0001609
MODAL	Mode	9	0.396579	6.802E-18	7.845E-12	7.199E-08	0.89	0.89	0.38	3.338E-10	0.003938	1.481E-13	0.22	0.17	0.0001609
MODAL	Mode	10	0.314767	7.346E-15	1.406E-10	2.11E-10	0.89	0.89	0.38	0.000003779	0.0000182	6.524E-12	0.22	0.17	0.0001609
MODAL	Mode	11	0.271089	2.125E-14	7.566E-12	0.000001391	0.89	0.89	0.38	1.467E-09	0.000001664	8.397E-13	0.22	0.17	0.0001609
MODAL	Mode	12	0.225387	3.046E-15	1.844E-11	0.00004839	0.89	0.89	0.38	2.298E-07	0.00007766	1.842E-12	0.22	0.17	0.0001609

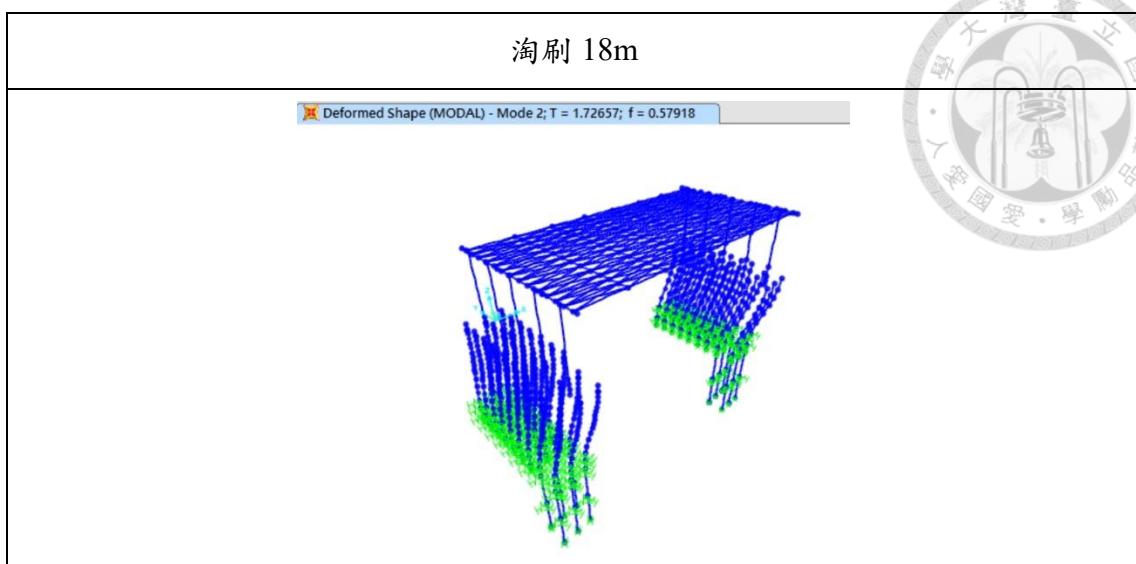


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.789504	0	3.793E-08	0.37	0	3.793E-08	0.37	0.003904	0.00003051	7.935E-13	0.003904	0.00003051	7.935E-13
MODAL	Mode	2	1.726567	0	0.89	3.566E-08	1.523E-20	0.89	0.37	0.009487	1.119E-13	0.00001353	0.09677	0.00003051	0.00011353
MODAL	Mode	3	1.724694	0.89	0	0	0.89	0.89	0.37	0	0.03789	0.0001596	0.09677	0.03789	0.0001731
MODAL	Mode	4	1.627228	0	0.000000396	0.009191	0.89	0.89	0.38	0.12	0.00000106	2.765E-12	0.22	0.03789	0.0001731
MODAL	Mode	5	1.00409	4.098E-20	1.57E-10	0.000348	0.89	0.89	0.38	0.00004231	0.00001074	3.697E-14	0.22	0.03789	0.0001731
MODAL	Mode	6	0.488435	6.981E-19	1.323E-10	0.000000128	0.89	0.89	0.38	0.00006855	0.00000221	1.521E-12	0.22	0.03789	0.0001731
MODAL	Mode	7	0.465029	5.661E-16	1.346E-11	3.262E-09	0.89	0.89	0.38	2.066E-07	0.12	2.006E-13	0.22	0.15	0.0001731
MODAL	Mode	8	0.443855	1.235E-18	7.247E-11	1.694E-09	0.89	0.89	0.38	0.00001897	0.008363	1.182E-12	0.22	0.16	0.0001731
MODAL	Mode	9	0.396579	1.491E-17	6.376E-12	7.211E-08	0.89	0.89	0.38	3.484E-10	0.003938	1.618E-13	0.22	0.17	0.0001731
MODAL	Mode	10	0.314767	2.687E-16	1.268E-10	2.101E-10	0.89	0.89	0.38	0.0000379	0.0000182	9.104E-12	0.22	0.17	0.0001731
MODAL	Mode	11	0.271089	6.723E-16	6.854E-12	0.000001397	0.89	0.89	0.38	1.508E-09	0.00001664	9.498E-13	0.22	0.17	0.0001731
MODAL	Mode	12	0.225387	7.701E-15	2.08E-11	0.00004878	0.89	0.89	0.38	2.274E-07	0.00007765	3.265E-12	0.22	0.17	0.0001731

淘刷 20m

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 1.81713; f = 0.55032

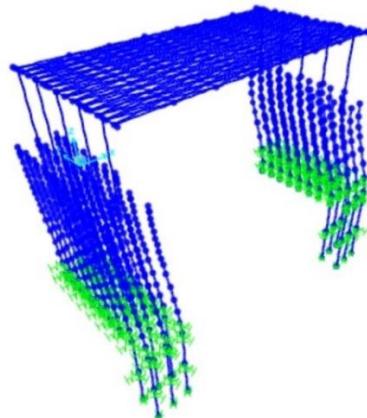


TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	1.817131	0	0.9	6.472E-08	0	0.9	6.472E-08	0.09183	8.85E-13	0.00001542	0.09183	8.85E-13	0.00001542
MODAL	Mode	2	1.81548	0.9	0	0	0.9	0.9	6.472E-08	0	0.03671	0.0001638	0.09183	0.03671	0.0001792
MODAL	Mode	3	1.789526	2.154E-20	2.033E-07	0.37	0.9	0.9	0.37	0.003876	0.0000305	3.01E-12	0.09571	0.03671	0.0001792
MODAL	Mode	4	1.627228	1.157E-20	1.116E-07	0.009189	0.9	0.9	0.38	0.12	1.059E-07	3.565E-13	0.22	0.03671	0.0001792
MODAL	Mode	5	1.00409	7.542E-20	1.269E-10	0.000348	0.9	0.9	0.38	0.00004232	0.00001074	3.84E-14	0.22	0.03671	0.0001792
MODAL	Mode	6	0.488435	5.954E-18	1.196E-10	1.281E-07	0.9	0.9	0.38	0.00006856	0.00000221	1.555E-12	0.22	0.03671	0.0001792
MODAL	Mode	7	0.465029	2.088E-17	1.218E-11	3.266E-09	0.9	0.9	0.38	2.068E-07	0.12	1.944E-13	0.22	0.15	0.0001792
MODAL	Mode	8	0.443855	1.072E-18	6.654E-11	1.696E-09	0.9	0.9	0.38	0.00001897	0.008363	1.212E-12	0.22	0.16	0.0001792
MODAL	Mode	9	0.396579	1.546E-19	5.84E-12	7.221E-08	0.9	0.9	0.38	3.553E-10	0.003938	1.771E-13	0.22	0.16	0.0001792
MODAL	Mode	10	0.314767	3.34E-15	1.244E-10	2.095E-10	0.9	0.9	0.38	0.00003796	0.0000182	1.023E-11	0.22	0.16	0.0001792
MODAL	Mode	11	0.271089	2.487E-14	8.445E-12	0.000001401	0.9	0.9	0.38	1.586E-09	0.00001664	1.454E-12	0.22	0.16	0.0001792
MODAL	Mode	12	0.225387	2.693E-18	2.282E-11	0.00004919	0.9	0.9	0.38	2.259E-07	0.00007765	8.661E-12	0.22	0.17	0.0001792