

計畫編號：108 保發-10.1-保-01-06-001(11)

**以 NB-IoT 與免控制點位移量測技術進行
水土保持設施之安全檢測與評估(2/2)
Safety Evaluation of Soil and Water
Infrastructures using NB-IoT and
Reference-Free Displacement Technology
(2/2)
(成果報告書)**

執行單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系

執行期間：中華民國 108 年 02 月 20 至中華民國 108 年 12 月
31 日

計畫主持人：廖國偉 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 108 年 11 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

以 NB-IoT 與免控制點位移量測技術進行水土保持設施之安全檢測與評估(2/2)

摘要

為達到減少災害的發生或降低災害的規模，於水土保持工程設施完成後，應確實執行維護管理，確保設施的安全性與功能性，例如【水保局 96 年度之治山防災工程維護機制計畫案】對治山防洪構造物提出巡查表單，目的在於平時即可掌握水保設施的安全性與功能性。為減少人力，以 NB-IoT 結合本團隊去年所開發的位移重建技術，為一個潛在的維護管理方法。本計畫選定烏來忠治的防砂壩分析目標，2015 的蘇迪勒颱風重創烏來與新店部分山區，尤其忠治里發生嚴重的岩屑崩滑，造成台北市水源濁度達到歷史新高，新店溪水濁度最高曾至 3 萬 9300 度，家戶用水濁黃，根據觀察與監測資料顯示，其地滑現象(尤其是右岸忠治二號橋下游處)於蘇迪勒颱風之後有持續微量發生的跡象，目前除了持續監測外，工程上的解決方案為設置水平向排水設施與防砂壩，尤其是裂縫發生下游隘口處設置一高度超過 20 公尺的高壩，期望可以減緩或避免進一步崩塌地發生，本計畫將於上述樣設施設相關儀器(如加速度或速度計)並取得忠治地區原監測儀器(如傾斜管)相關資料，進行進一步的分析與研究。

關鍵詞：位移重建、大型防砂設施、NB-IoT

Safety Evaluation of Soil and Water Infrastructures using NB-IoT and Reference-Free Displacement Technology (2/2)

Abstract

To reduce the occurrence of disasters or reduce the scale of disasters, the maintenance management should be carried out to ensure the safety and functionality of the engineering facilities. For example, a preliminary investigation form was proposed for the prevention and control for the safety and functionality of water conservation facilities. To reduce manpower, NB-IoT combines the displacement reconstruction technology developed last year as a potential maintenance management method. This project selected Wulai Zhongzhi's check dam as the analysis target. The 2015 Sudir typhoon hit Zhongzhili area, resulting in occurrences of debris and landslide, and a high turbidity in Taipei's water source. According to observations and monitoring data, the landslide phenomenon (especially at the lower reaches of the Zhizhi No. 2 Bridge on the right bank) showed signs of persistent micro-generation after the typhoon Sudier. A series of check dams were designed to slow down or avoid further collapse. The plan will set up relevant instruments (such as acceleration or speedometer) in the above-mentioned facility (i.e., the dam with a height of more than 10 meters) and obtain relevant information of the previous monitoring data for further analysis and research.

Keywords: Displacement reconstruction, Check dam, NB-IoT

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 緒論	1
第一節 問題與計畫目標	2
第二節 實施方法與步驟	4
第 2 章 工作執行方法與步驟	7
第一節 工作執行方法	7
第二節 防砂壩歷史監測資料之收集	7
第三節 防砂壩頂位移之重建	14
第四節 智慧感測器之開發與現場監測	41
第五節 基於位移重建之防砂壩系統識別分析(容量分析).....	49
第六節 基於位移重建之防砂壩機器學習分析(需求分析).....	78
第七節 防砂壩之安全分析	89
第 3 章 工作進度與交付項目	99
第一節 計畫甘特圖	99
第二節 計畫交付項目	99
第 4 章 結論與討論	101
參考文獻.....	104
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	106
附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	109

表次

表 1-1 計畫重要檢核點管制表.....	5
表 2-1 預計收集之資料(青山工程顧問公司提供).....	12
表 2-2 各自由度之參數內容.....	16
表 2-3 各自由度之參數內容.....	17
表 2-4 不同測試與對照組之相關性.....	18
表 2-5 各次試驗之相關數據.....	22
表 2-6 試驗設計	31
表 2-7 原始橋梁振動模態訊息.....	31
表 2-8 加勁橋梁振動模態訊息.....	32
表 2-9 原始與加勁橋梁之阻尼.....	32
表 2-10 不同條件下之第一振態頻率.....	33
表 2-11 不同條件下之第二振態頻率.....	34
表 2-12 不同條件下之第三振態頻率.....	35
表 2-13 中間跨度之加速度統計數值(H1).....	36
表 2-14 中間跨度之加速度統計數值(H2).....	37
表 2-15 中間跨度靜態位移統計數值.....	38
表 2-16 中間跨度動態位移統計數值(H1).....	39
表 2-17 中間跨度動態位移統計數值(H2).....	40
表 2-18 ADXL 355 之規格一	43
表 2-19 ADXL 355 之規格二	43
表 2-20 數值模型中的隨機變數統計特性.....	56
表 2-21 各種噪聲比下精確和預測頻率的比較.....	57
表 2-22 各種噪聲比下精確和預測阻尼的比較.....	57
表 2-23 第一個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比.....	63

表 2-24 第二個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比.....	63
表 2-25 第三個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比.....	63
表 2-26 ABAQUS 建模的剖面尺寸和土壤性質假設.....	74
表 2-27 本計畫所考慮之參數.....	84
表 2-28 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=35 TF).....	84
表 2-29 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=38 TF).....	85
表 2-30 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=41 TF).....	85
表 2-31 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=44 TF).....	86
表 2-32 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=44 TF).....	95
表 3-1 本計畫之甘特圖	99
表 3-2 工作項目與經費	99

圖次

圖 1-1 本計畫分析標的之水保設施(烏來忠治防砂壩).....	4
圖 1-2 本計畫之分析流程與架構示意圖	5
圖 2-1 本計畫之分析標的物之位置圖	10
圖 2-2 本計畫之分析標的物(5 號壩)之詳細位置圖	11
圖 2-3 南勢溪潛勢溪流兩岸潛在滑動區圖	12
圖 2-4 使用於對照組之地震紀錄 (EL CENTRO)	18
圖 2-5 N1-1 與對照組之比較	19
圖 2-6 N3-3 與對照組之比較	20
圖 2-7 第一個試驗地表加速度與位移歷時(EQ1)	21
圖 2-8 第二個試驗地表加速度與位移歷時(EQ2)	21
圖 2-9 第三個試驗地表加速度與位移歷時(EQ3)	21
圖 2-10 第四個試驗地表加速度與位移歷時(EQ4)	22
圖 2-11 試驗之設定	22
圖 2-12 京都大學縮尺橋梁模型	23
圖 2-13 試驗設計示意圖	25
圖 2-14 LV1 前段之 FFT	26
圖 2-15 LV1 後段之 FFT	26
圖 2-16 HV1 前段之 FFT	27
圖 2-17 HV1 後段之 FFT	27
圖 2-18 LV2 前段之 FFT	28
圖 2-19 LV2 後段之 FFT	28
圖 2-20 HV2 前段之 FFT	29
圖 2-21 HV2 後段之 FFT	29
圖 2-22 試驗用車	30

圖 2-23 橋梁加勁圖	30
圖 2-24 本計畫於烏來忠治 5 號壩所設置之智慧感測元 件.....	42
圖 2-25 本計畫之 NB-IoT 架構如圖所示	42
圖 2-26 ADXL355.....	44
圖 2-27 NB-IoT 感應器裝置示意圖	49
圖 2-28 由加速度轉換之傾斜角	49
圖 2-29 烏來忠治高壩量測設定.....	51
圖 2-30 6 個自由度之數值範例.....	56
圖 2-31 絕對加速度的歷時響應(精確值與 $NR=1$).....	58
圖 2-32 絕對加速度的歷時響應(精確值與 $NR=1.4$).....	58
圖 2-33 絕對加速度的歷時響應(精確值與 $NR=2.1$).....	59
圖 2-34 絕對加速度的歷時響應(精確值與 $NR=3.0$).....	59
圖 2-35 精確(藍)與預測(紅)模態之比較($NR=1.0$).....	60
圖 2-36 精確(藍)與預測(紅)模態之比較($NR=1.4$).....	60
圖 2-37 精確(藍)與預測(紅)模態之比較($NR=2.1$).....	61
圖 2-38 精確(藍)與預測(紅)模態之比較($NR=3.0$).....	61
圖 2-39 第一個時段之加速度歷時.....	62
圖 2-40 第二個時段之加速度歷時.....	63
圖 2-41 第三個時段之加速度歷時.....	63
圖 2-42 5 號壩之示意圖.....	64
圖 2-43 穩定分析的 4 種情況.....	68
圖 2-44 5 號壩的尺寸示意圖.....	74
圖 2-45 5 號壩的有限元素模型.....	75
圖 2-46 邊界條件設定.....	76

圖 2-47 被動土壓力分布圖	76
圖 2-48 主動土壓力分布圖	77
圖 2-49 支持向量機資料分類	79
圖 2-50 SVM 之區隔線	79
圖 2-51 最佳區隔超平面	80
圖 2-52 超平面之最大間距	81
圖 2-53 有限元素模型之自由振動歷時反應	83
圖 2-54 有限元素模型之 FFT	84
圖 2-55 有限元素模型與考慮的外力	87
圖 2-56 水深 12M, $PGA = 0$ 和上浮力 = 40TF 時的水平位 移分佈	87
圖 2-57 在 35TF 上浮壓力下、各種水深和 PGA 的水平 位移	88
圖 2-58 在 44TF 上浮壓力下、各種水深和 PGA 的水平 位移	88
圖 2-59 35TF 上浮力下各種水深的 LSSVM 函數	89
圖 2-60 忠治二號橋下游右岸 S3 邊坡	90
圖 2-61 DSM 在 S3 邊坡的剖面圖	91
圖 2-62 S3 邊坡	92
圖 2-63 應用 SCOOPS3D 之安全係數分布圖	93
圖 2-64 通過傾斜管觀測站(SB-6)的剖面圖及優選滑動 面的幾何型態	94
圖 2-65 傾斜管 SB-6	95
圖 2-66 暴雨且沒有發生溪床沖刷下邊坡之安全係數	96
圖 2-67 暴雨且發生溪床沖刷 1 M 下邊坡之安全係數	97

圖 2-68 暴雨且發生溪床冲刷 2 M 下邊坡之安全係數.....	98
------------------------------------	----

第1章 緒論

本計畫為去年創新研究計畫之延續計畫，去年的工作重點有 3 個：智慧感應器之開發、免控制點位移演算法之開發與 NB-IoT 網路系統建置。上述技術均順利完成，雖然 NB-IoT 的技術(如覆蓋率與穩定度)仍有待提升，惟若相關演算法與驗證工作可以提前探討與建立，則以 NB-IoT 為基礎的監檢測技術具有相當的潛力，因此，基於去年的成果，今年將更深入地研究免控制點位移演算法之於水保設施安全評估的可能應用技術。位移量經常作為評量基礎設施的安全指標。因為 MEMS 的成功，加速度計(規)相對於速度計或位移計在分辨率(resolution)、價格上與便利性上最具吸引力。為取得可信的位移值，去年度的計畫利用加速度計取得加速度值、將其轉換為位移並利用 NB-IoT 將訊號傳回遠端的伺服器。為驗證上述三個階段的開發皆順利完成，前期計畫設計了三種試驗驗證其結果。室內縮尺寸試驗驗證加速度計取得之加速度值無誤、數值分析確認重建位移可行與室外試驗確實可將訊號傳回實驗室中的電腦。其中，加速度計的開發技術包含軟硬體(如 Arduino 開發環境與傅立葉轉換)相對成熟，然而位移重建與 NB-IoT 無線傳輸相對上，為較新的技術。藉由加速度重建位移最關鍵的因素之一為須將低頻雜訊濾除，目前濾波器(filter)的技術雖相當成熟，然而，若所欲濾除的頻率範圍與所關注的基礎設施之頻率範圍重疊時，則傳統上的濾波器並無法完成。因此，本計畫由韓國學者(Lee et al. 2010)所提的方法出發，考慮不同取樣頻率、不同取樣時窗與不同設施的振動頻率等各項因子下，利用最佳化搜尋重建過程中的各項參數值，並提出重建過程中所需的公式以減低日後運用時的

計算量與複雜度。此外，前期計畫為利用室內主機建立服務端，使用 AT command 建立 UDP 無線通訊協定並將所開發的智慧感測器模組設置於室外，順利回傳加速度值，然而，試驗結果顯示，NB-IoT 的訊號受到模組放置的地點的影響，訊號強度有所的差異。根據上述，本團隊去年度所開發的水保設施的初步安全評估關鍵技術包含智慧感應器、位移重建與 NB-IoT 環境的開發。計畫進行中針對加速度計、Arduino 板與 NB-IoT 硬體進行測試，試驗結果可以正確地量取加速度值並且能藉由 NB-IoT 硬體藉由無線通訊協定將資料從戶外回傳室內主機伺服器，可有效減少人力與時間成本。根據已建立的技術，可順利量測加速度值並成功地重建位移。本計畫嘗試使用多種演算法進行位移重建，其中，梯形積分法因未考慮基線修正效應，不適用於位移重建；具時窗且時窗相互覆蓋的演算法結果比較理想，但最佳化結果的優劣受到時窗的數量與震動源、及水保設施的型態的影響，依目前試驗結果，提出位移重建技術的對應公式，提升後續開發使用上的便利性。今年度將基於前續研究基礎，針對以下問題擬定計畫目標與進行步驟，說明如下。

第一節 問題與計畫目標

基於去年所開發的位移重建技術，探討應用於防砂壩安全評估的可行性。亦即、利用監測技術評估防砂壩之安全性，為與實務結合，選定烏來忠治的防砂壩，尤其是最後隘口處的高壩(如圖 1-1)，作為本計畫分析的標地物，詳細背景說明如下。為達到減少災害的發生或降低災害的規模，於水土保持工程設施完成後，應確實執行維護管理，確保設施的安全性與功能性，例如【水保局 96 年度之治山防災工程維護機制計畫案】對治山防洪構造物提出巡查表單，目的在於平

時即可掌握水保設施的安全性與功能性。通常，巡查表單屬於初步的評估，除了評估結果須達到一定的準確性外，必須在短時間內完成。例如，【水保局 101 年度的水土保持設施耐久性分析與延壽策略研擬計畫案】中，為提供安全評估與修復補強方式的依據，提出水保設施現地檢測的 DER 評分標準。上述 DER 評分標準，大多可藉由目視檢測完成，客觀性略嫌不足。為避免人為的誤差，本計畫擬以去年所開發的位移重建技術，提供初步的評估，不失為一個理想的維護管理策略。如前述，本計畫選定烏來忠治的防砂壩最為分析目標，說明如下。2015 的蘇迪勒颱風重創烏來與新店部分山區，尤其忠治里發生嚴重的岩屑崩滑，造成台北市水源濁度達到歷史新高，新店溪水濁度最高曾至 3 萬 9300 度，家戶用水濁黃，烏來忠治的災後重建工程目前依照規劃進度循序進行並亦接近尾聲，根據觀察與監測資料顯示，其地滑現象(尤其是右岸忠治二號橋下游處)於蘇迪勒颱風之後有持續微量發生的跡象，目前除了持續監測外，工程上的解決方案為設置水平向排水設施與防砂壩，尤其是裂縫發生下游隘口處設置一高度超過 20 公尺的高壩，期望可以減緩或避免進一步崩塌地發生，此高壩的安全性與重要性不可言喻，故選定為本計畫的標的設施。本計畫的目標為評估 NB-IoT 與免控制點位移量測技術於防砂壩安全評估的可行性分析，分析結果可作為初步安全評估之依據，提供主管單位人員維護管理或補強時之參考。



圖 1-1 本計畫分析標的之水保設施(烏來忠治防砂壩)

第二節 實施方法與步驟

本計畫的工作項目，如下所列：

- 1.防砂壩歷史監測資料之收集
- 2.防砂壩頂位移之重建
- 3.基於位移重建之防砂壩系統識別分析(容量分析)
- 4.基於位移重建之防砂壩機器學習分析(需求分析)
- 5.防砂壩之安全分析

上述工作項目之內容將於第二章詳細說明，本計畫之分析流程與架構如圖 1-2 所示，本計畫之重要檢核點如表 1-1 所示。

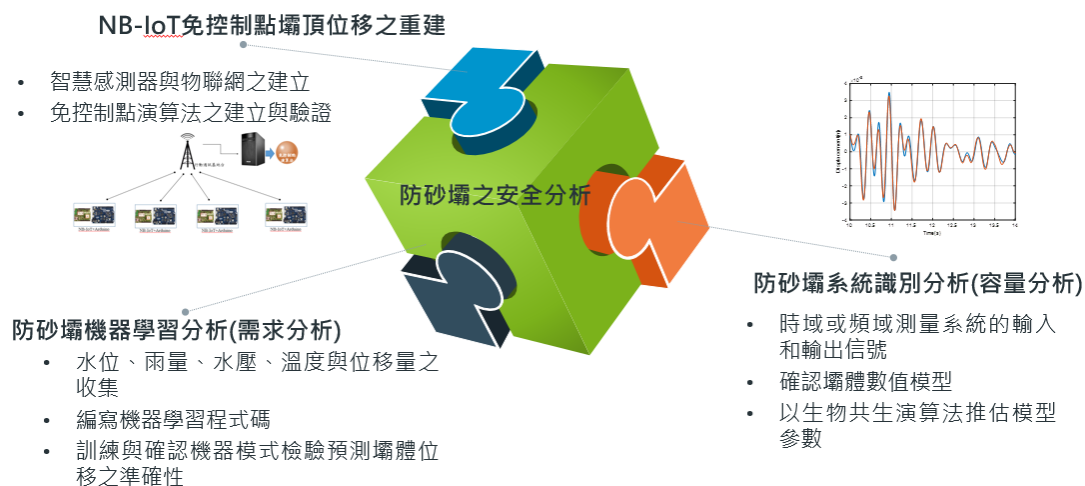


圖 1-2 本計畫之分析流程與架構示意圖

表 1-1 計畫重要檢核點管制表

檢核點	預計完成日期	工作項目	數量	備註
M1	5 月 15 日	防砂壩歷史監測資料之收集	一式	水位、雨量、水壓、溫度與位移量之收集
M2	5 月 31 日	防砂壩頂位移之重建	一式	位移重建運算模式之確認、模式參數之最佳化
M3	7 月 31 日	基於位移重建之防砂壩系統識別分析(容量分析)	一式	時域或頻域測量系統的輸入和輸出信號、建立壩體數值模型、生物共生演算法推估模型參數
M4	9 月 30 日	基於位移	一式	訓練與確認機器模式

檢核點	預計完成 日期	工作項目	數量	備註
		重建之防 砂壩機器 學習分析 (需求分 析)		檢驗預測壩體位移之 準確性
M5	11 月 30 日	防砂壩等 效位移之 安全分析	一式	各極限狀態等效位移 之計算、系統安全係數 或可靠度指標之計算

資料來源：本計畫

第2章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本計畫執行過程中將以現地量取的資料如加速度計或速度計所取的訊號、水位計取得之水位、竣工圖與鑽探所得之土壤參數等，作為各項分析如系統識別、防砂壩穩定分析、有限元素分析與機器學習等的基礎，最後並提出防砂壩的初步安全評估流程。

第二節 防砂壩歷史監測資料之收集

圖 2-1 與圖 2-2 所示為本計畫預計分析標的物之粗略與詳細的位置圖。藉由青山工程顧問公司所提供之忠治監測的資料，於計畫執行過程中可以了解忠治防砂壩的環境與歷史變化，如下所述。首先，參考陳昭維 (2017)的成果報告書與期末修正報告 (2018)在烏來忠治區域做的監測記錄並整理成的報告，表 2-1 為兩份報告整理出的監測內容，詳細說明如下：

(一)遙控影像 UAV

2015 年 9 月 2 日起開始使用 UAV 調查整體大壩並進行數值模型建立，發現 2015 年崩塌過後，範圍持續擴大，表示此區域的邊坡尚未穩定，因此後續進行現地資料的監測。

(二)傾斜管

編號 SB 孔位與 BW 孔位皆為手動監測，每個月記錄一次，SB 的部分當初如有颱風豪雨或者 4 級以上地震會即時補測，兩種編號皆有紀錄滑動變位量與滑動深度，唯獨 BW 編號還有記錄地下水位變化。

(三)無線地表伸縮計

屬於連續性的自動記錄儀器，每五分鐘回傳一筆資料，可幫

助了解地表變位速率，作為穩定性研判參考，蒐集期間為 2018 年 6 月 11 日至 11 月 2 日。

(四)地盤傾斜計

屬於連續性的自動記錄儀器，每五分鐘回傳一筆資料，共三台，可幫助了解地表變位速率、掌握傾斜量變化，資料蒐集期間為 2018 年 6 月 14 日至 11 月 2 日。目前監測傾斜量不大，後續仍持續監測，以掌握邊坡活動情形。

(五)孔內伸縮計

以自動化即時方式取得地中連續變位資料，每五分鐘回傳一筆資料，監測資料蒐集期間為 2018 年 6 月 11 日至 2018 年 11 月 2 日。歷經瑪莉亞颱風侵襲後，孔內伸縮計略具變化趨勢，目前監測時程尚短，滑動量不大，後續仍持續監測，掌握邊坡活動性。

(六)雨量計

以自動化即時方式取得連續雨量資料，每五分鐘回傳一筆資料，可幫助瞭解天氣變化。

(七)水位觀測井(手動)

為手動監測，每個月記錄一次，調查地下水位變化。

(八)水位觀測井(自動水壓計)

以自動化即時方式取得地下水位資料，每小時記錄一筆資料在現場，每個月做手動水位觀測時順勢收資料，一個月收一次資料。

(九)水位觀測井(自動傳輸水壓計)

以自動化即時方式取得地下水位資料，每 5 分鐘記錄一筆資料並回傳。

(十)地下水檢層

判斷地下水脈位置及流動速率，比電阻變化大代表有明顯地下水流動，其中 SB-2 地表下 4.5~7m 略有地下水流動現象，SB-4 地表下 15~18m 及 38.5~39m 略有地下水流動現象，18-1W 地表下 8~11m 略有地下水流動現象，18-3BW 地表下 33~50m 有明顯地下水流動現象，18-4W 地表下 8.5m 地下水無明顯流動現象。

(十一)地下水流向流速計(GFD-3A)

施測日期為 2018 年 11 月 8 日至 11 月 9 日進行孔內流速流向量測作業，施測深度則依地下水檢層之成果選取較具地下水流動趨勢之區段進行，大部分的流向為西南或西北。

(十二)鑽孔探測資料

可得出地質與岩心的種類。河溪兩岸邊坡的地質探測得到大概為海拔 100m 以下，大多還是灰黑色硬頁岩，而海拔 100m 以上多為暫積材料，是黃灰色棕灰色黏土夾灰黑色棕灰色岩塊，推測是更上坡土砂崩落而留存的。

(十三)地電阻

地層組成材料及膠結等狀況不同，表現出不同的導電特性，可藉由儀器測量及分析技術瞭解地層的電阻率，快速獲得該測線區內的地層資訊，常配合地下水檢層來了解地下水位置。四條地電阻線中，V2 區域會是地下水較高的地方。

(十四)高壩竣工圖

從高壩竣工圖可以了解高壩整體結構以及建材。

(十五)岩石單軸抗壓試驗

求得岩芯材料之單軸壓縮強度，包含單位重、含水量、壓縮強度、直徑應變。

(十六)弱面直接剪力

可得到土壤強度參數 c 、 φ 值。

(十七)超音波孔攝影

判釋之區域邊坡之不連續面與邊坡之空間幾何關係，進行可能破壞型態分析。

歸納調查的結果可知，南勢溪的 S3、S3-1、S3-2 坡面(如圖 2-3)是崩塌潛勢最高的，因為 UAV 輸出的 DSM 判釋出，南勢溪發生土石流下切 S3 群的邊坡以後，坡趾有沖刷現象所以 S3 才相當不穩定。此外，S3-2 的邊坡中，SB-6 的傾斜管是所有傾斜管中變位最大的，故需要多關注 S3-2 的邊坡並進行補強以增加邊坡穩定度。其中，一般認為地下水位越高，有效應力越低，邊坡穩定性會降低，但以 SB-6 的傾斜管與鄰近的地下水位點 18-5W 比較之下，彼此的相關性並沒有相當高。

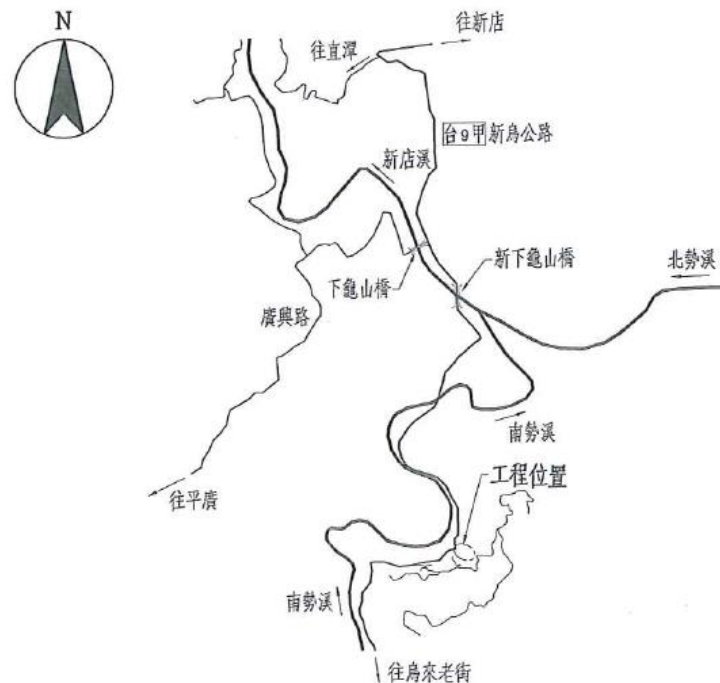


圖 2-1 本計畫之分析標的物之位置圖

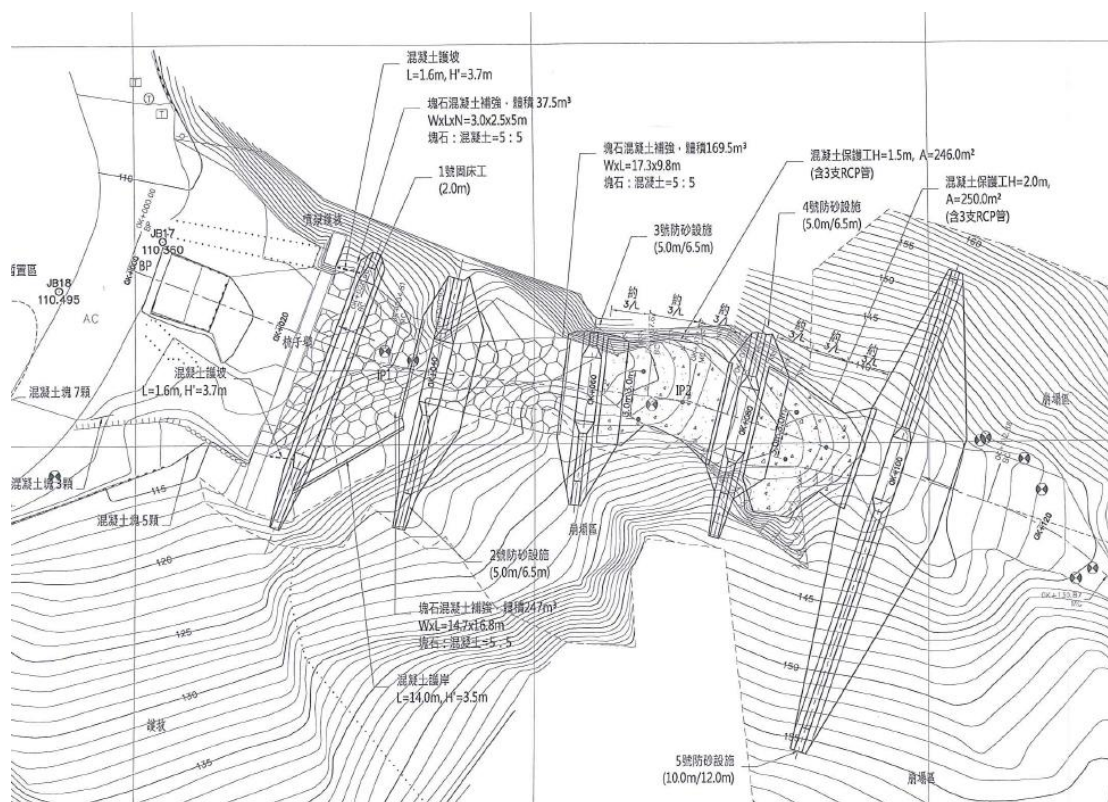


圖 2-2 本計畫之分析標的物(5 號壩)之詳細位置圖

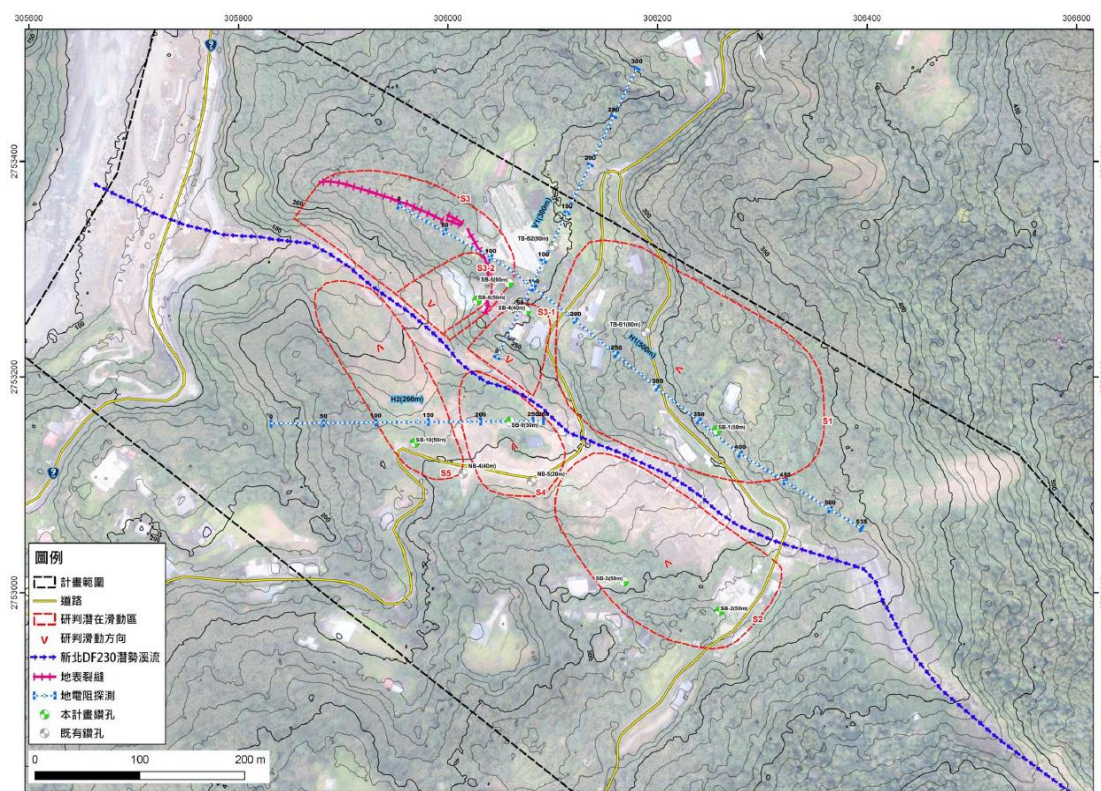


圖 2-3 南勢溪潛勢溪流兩岸潛在滑動區圖

表 2-1 預計收集之資料(青山工程顧問公司提供)

儀器	站名	可得參數	裝設、試驗日期
遙控影像 UAV	全部災區	DSM 產製數值 地形	2015 年 9 月起半 年飛一次
傾斜管	SB-1~SB-10(沒 有 SB-7、 SB-8)、 18-2BW、 18-3BW	滑動變位量、滑 動深度、地下水 位變化	編號 SB：2017 年 4~7 月 編號 BW： 2018/4/26
無線地表伸 縮計	U-1	滑動變位量(主 要調查裂縫)	2018/6/11
地盤傾斜計	EL-1~EL-3	地表變位速 率、掌握傾斜量 變化	2018/6/14
孔內伸縮計	18-6E	滑動變位量、地 中連續變位	2018/6/11
雨量計	R-1	降雨量	2017/5/22
水位觀測井 (手動)	SB3、SB10	即時掌握暴雨 期間地下水位 連續升降情況	2017
水位觀測井 (自動水壓計)	SB1、SB2、 SB5、SB6、 SB9、18-2BW、	即時掌握暴雨 期間地下水位 連續升降情況	2017~2018

	18-4W		
水位觀測井 (自動傳輸水壓計)	18-1W、 18-3BW、18-5W	即時掌握暴雨 期間地下水位 連續升降情況	2017~2018
地下水檢層	SB-2、SB-4、 18-1W、 18-3BW、18-4W	地下水位置與 流向=>比電阻	2017(SB)~2018(BW)
地下水流向 流速計 (GFD-3A)	18-1W、18-3BW	地下水流向	2018/11/8-9
鑽孔探測資料	TB-B1~TB-B2 、18-1W、 18-2BW、 18-3BW、 18-4W、 18-5W、18-6E、 NB-1~NB-8、 RB-1~RB-6	堆積層深度 (m)、岩層深度 (m)、剪裂帶深度(m)、岩層地質	
地電阻	V1、V2、H1、 H2	地層分布、斷層 位置、地層含水 層或岩性	2017
高壩竣工圖	高壩結構體	高壩結構與建 構材料	
岩石單軸抗	SB-3、SB-9	單位重、含水	

壓試驗		量、壓縮強度、 直徑應變	
弱面直接剪力	SB-3、SB-9、 SB-10	c、phi	
超音波孔攝影	SB-2	邊坡破壞型態 分析、記錄深度、 傾角、方位及收錄孔壁 反射訊號、地層層面、 孔隙節理之走向與傾角	2017/4/18

第三節 防砂壩頂位移之重建

由加速度值重建位移可藉由數位濾波器完成，例如無限脈衝響應濾波器（infinite impulse response filters, IIR 濾波器）或有限脈衝響應濾波器（finite impulse response filters, FIR 過濾器），上述數位濾波器若應用於以低頻為主的水保設施的位移重建過程中存有缺點，例如 IIR 濾波器通常需要位移的初始條件，而這項資訊在現地量測過程中通常並不存在；而 FIR 濾波器無法免除低頻雜訊。本計畫於前一年度之研究中，將位移重建視為一個邊界值問題且無須任何的初始條件，於給定的時間範圍內，藉由最小化量測加速度與位移兩次微分值，重建所需的位移。Park 等人(2013)與 Moreu(2016)均利用 Lee(2010)等人所提的方法進行位移重建，不過，先前研究的量測對象多為實驗室內的縮尺寸的結構設施，目前尚未有足夠的研究顯示此項技術可運用於

戶外實尺寸的水保設施。本年度計畫將基於去年所開發的位移重建技術，選定烏來忠治崩塌區下游處之高壩作為試驗的標的物，進一步驗證先前提出的方式於現地是否亦可順利取的正確的位移。重建位移過程中所需的參數如有限差分或其他方式的選擇與正則化的參數，可使用去年本計畫之成果或根據現況所取的之資料另求取最佳值。執行時，預計採用本計畫所開發的 NB-IoT 智慧感測器以及高分辨率的速度計(東京測振生產)同時進行試驗與所重建位移，使用東京測振的儀器可確保取得精確的位移重建數值以提供下列的容量與位移分析。

進一步探討 Lee et al. (2010)的方法，可知位移(u)的兩次微分並不存在於實際的量測值中，因此位移(u)為最佳化中代求的設計變數。例如可以使用中央有限差分(central finite difference)計算「假設的加速度值」並使之與現地量測的加速度差值最小，然而，因為中央有限差分需要前一個時間點與後一個時間點的資訊方能完成計算，因此，上述最佳化問題並非一個定義完整的方程式(ill-posed problem)，不具唯一解。為避免過度擬合(overfitting)既有資料的訊息，可以正則化(regularization)處理。例如使用 Tikhonov 正則化(脊迴歸，ridge regression)。以上的解釋利用式子可寫為：

$$\underset{u}{\text{Min}} \Pi_E(u) = 0.5 \int_{T_1}^{T_2} (a(u(t)) - \bar{a})^2 dt + \frac{\lambda^2}{2} \|u\| \quad (1)$$

其中：

λ ：正則化參數

T_2 、 T_1 ：分別為時間視窗的第一與最後的時間點

$a(u(t))$ ：假設的加速度值

$\bar{a}$ ：現地量測加速度

可展開成：

$$\begin{aligned} \Pi_E(u) &\approx 0.5(0.5(a_1 - \bar{a}_1)^2 + (a_2 - \bar{a}_2)^2 + \dots + (a_{2k} - \bar{a}_{2k})^2 + 0.5(a_{2k+1} - \bar{a}_{2k+1})^2) \Delta t \\ &+ \frac{\lambda^2}{2} \|u\|^2 = 0.5 \|L_a(a - \bar{a})\|_2^2 \Delta t + \frac{\lambda^2}{2} \|u\|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中：

L_a ：矩陣，階乘為 $1 \times 2k+1$ ，除了頭尾為 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，其餘皆為 1； $\|u\|$ 說明如下。所重建的位移必須符合基本的力學定律，例如需要滿足靜力平衡，因此，最終的最佳化公式為

$$\underset{u}{\text{Min}} \Pi_E(u) = 0.5 \|L_a(a - \bar{a})\|_2^2 \Delta t + 0.5 \lambda^2 \|u\|_2^2 \quad (3)$$

其中， λ 為最佳化參數，例如本計畫與 Lee et al. (2010) 均曾以不同方式求取相關的公式。一般而言， λ 為視窗大小、取樣頻率與受測物頻率的函數。

如前述，本計畫訊號的取得有兩種方式：MEMS 加速度計或速度計。其中，加速度計的其中一個挑戰為所取得的訊號是否不受雜訊影響，經過初步判斷(如加速度的解析度分析)，若地表加速度大於 10^{-2} 或 $10^{-3}g$ 時，擬採用的 ADXL355 加速度計應可順利取得數據，以下則針對當加速度未達上述條件時，本團隊所進行的初步分析。

kalman filter 為經常使用的過濾器之一，以下為目前本團隊的測試內容與結果。首先，我們假設受測物具有 6 個自由度，其每個自由度的參數如表 2-2 所示。

表 2-2 各自由度之參數內容

DOF	1	2	3	4	5	6
質量 (kg)	5897	5897	5897	5897	5897	5897
勁度 (kN/m)	33732	33732	29093	28621	24954	19059
阻尼比	0.02					

除了對照組外，共測試 6 種不同的狀況，以上 7 組的內容，如所表 2-3 示。其中，對照組使用真實的地震紀錄做為系統的輸入，其餘 6 組則假設其輸入之加速度為 0。上述設計的目的在於根據本團隊先前的分析，kalman filter 若在已知輸入的條件下，可以有很好濾除雜訊的結果，然而，未來若應用於水保設施上時，輸入應為未知，在此情形下，先前的研究者一般均假設受測物成等加速度運動狀態，本次測試則假設其加速度值為 0。表 2-3 同時顯示本次測試的兩個目標：受測物參數性質與雜訊程度的靈敏度分析。其中，對照組的地震紀錄如圖 2-4 所示。其中，N1、N2 與 N3 分別表示 3 種不同的雜訊，在時間域下，其雜訊震幅高於正確解(對照組)8、12 與 16 倍。表 2-4 所示為不同測試組別與對照組之相關性，由該表可知，如預期地，當雜訊強度越高、對受測物系統所知越少，其相關性越低。圖 2-5 與圖 2-6 所示為相對性最佳與最差的兩組(N1-1 與 N3-3)與對照組關於加速度、位移與主頻之比較，由圖可知，N1-1 的條件下，Kalman 濾波器關於加速度、位移與主頻的結果尚稱理想，而 N3-3 的條件下則相對地，相差較多。

表 2-3 各自由度之參數內容

Case 0 對照組	Exact Solution (No noise and estimated system using 表 2-2 property), with input of earthquake record
Case N1-1	Incorporate noise1 and estimated system using 0 cov, without input, using zero acceleration
Case N1-2	Incorporate noise1 and estimated system using 0.1 cov, without input using zero acceleration
Case N1-3	Incorporate noise1 and estimated system using 0.3 cov, without input, using zero acceleration
Case N2-1	Incorporate noise2 and estimated system using 0 cov, without input using zero acceleration

Case N2-2	Incorporate noise2 and estimated system using 0.1 cov, without input, using zero acceleration
Case N2-3	Incorporate noise2 and estimated system using 0.3 cov, without input, using zero acceleration
Case N3-1	Incorporate noise3 and estimated system using 0 cov, without input, using zero acceleration
Case N3-2	Incorporate noise3 and estimated system using 0.1 cov, without input, using zero acceleration
Case N3-3	Incorporate noise3 and estimated system using 0.3 cov, without input, using zero acceleration

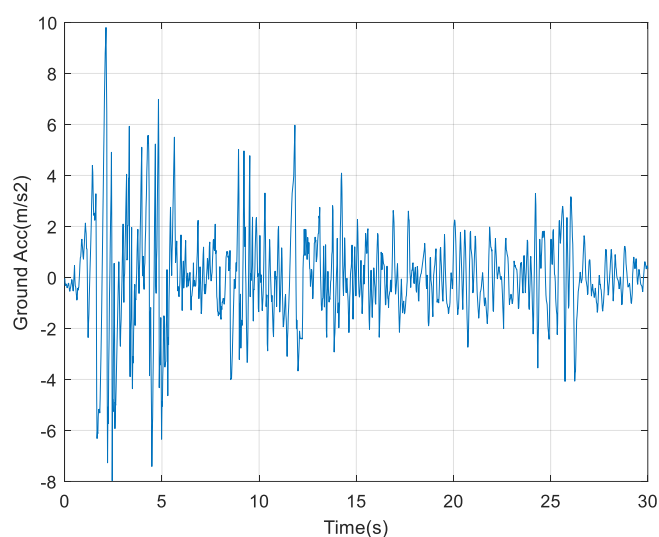


圖 2-4 使用於對照組之地震紀錄 (El Centro)

表 2-4 不同測試與對照組之相關性

Case	Top Acc R^2 (m/s ²)	Top Disp R^2 (m)
Case N1-1	0.53	0.58
Case N1-2	0.37	0.42
Case N1-3	-0.05	-0.08
Case N2-1	0.50	0.57
Case N2-2	0.23	0.25
Case N2-3	0.03	-0.03
Case N3-1	0.40	0.50

Case N3-2	0.36	0.47
Case N3-3	0.08	0.13

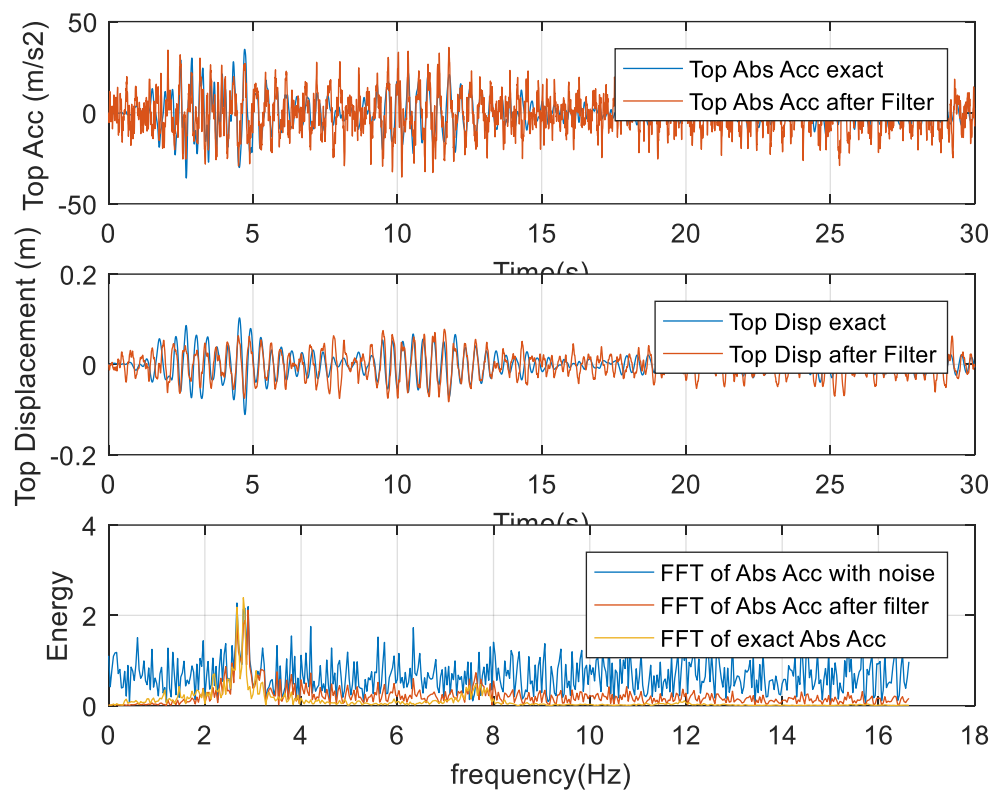


圖 2-5 N1-1 與對照組之比較

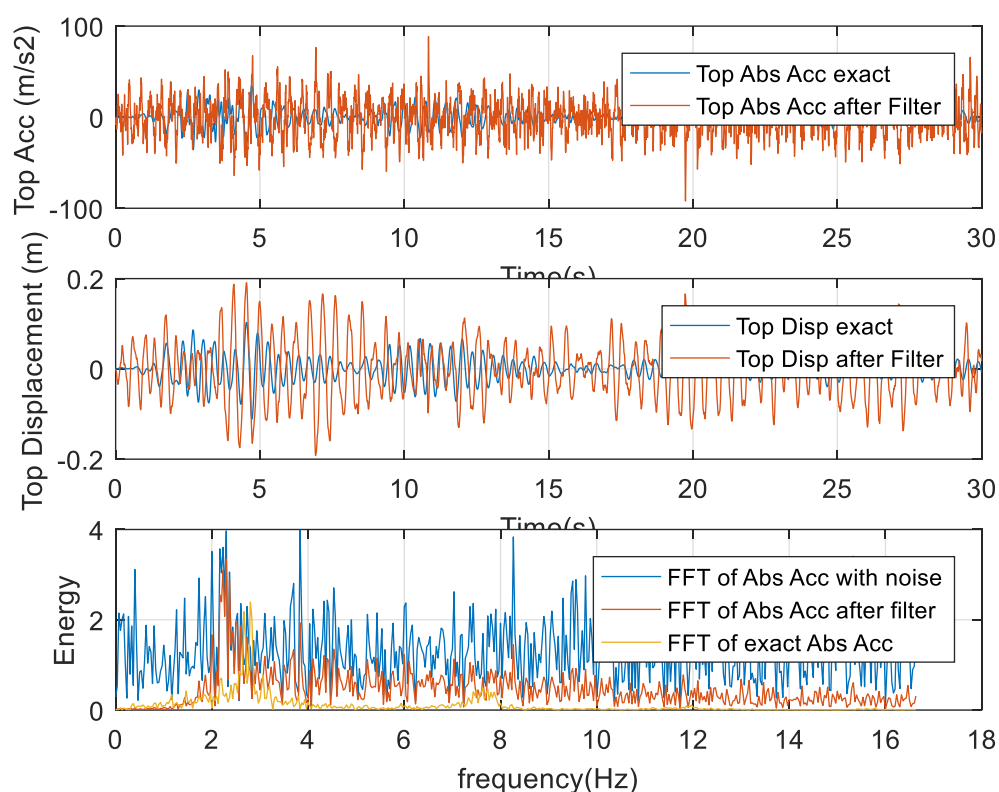


圖 2-6 N3-3 與對照組之比較

以上所述為數值分析的部分，針對本團隊所提出的位移重建演算法，雖然去年亦曾進行相關的測試，為求更精確的驗證，今年本研究再隨後將進行兩項實驗，第一個實驗將在國家地震中心(NCREE)進行，第二個實驗將在日本京都大學進行。其中，國震試驗的部分將於8月中旬至8月底前完成，試驗的規畫已完成，說明如下。

本研究的主要目的是使用 MEMS（微機電系統）加速度計測量小規模結構的加速度，並使用位移重建算法將來自 MEMS 加速度計的測量加速度轉換為位移數據。所重建的位移，將與從 LVDT（線性可變位移變壓器）或 NCREE 中的其他可用裝置獲得的位移進行比較。LVDT 計劃安裝在小型結構的第二與第三個樓層上。小規模結構將由四個選定的地面運動（EQ1，EQ2，EQ3 和 EQ4）進行震動。四個選定的地面運動如圖 2-7 至圖 2-10 所示，選擇的地面運動考慮了

振動台最大滑動位移的問題。也就是說，地面運動位移不會超過 30 厘米。為了避免低頻噪聲的干擾，本計畫提出的重建位移法，此法將藉由試驗驗證該算法的準確性。

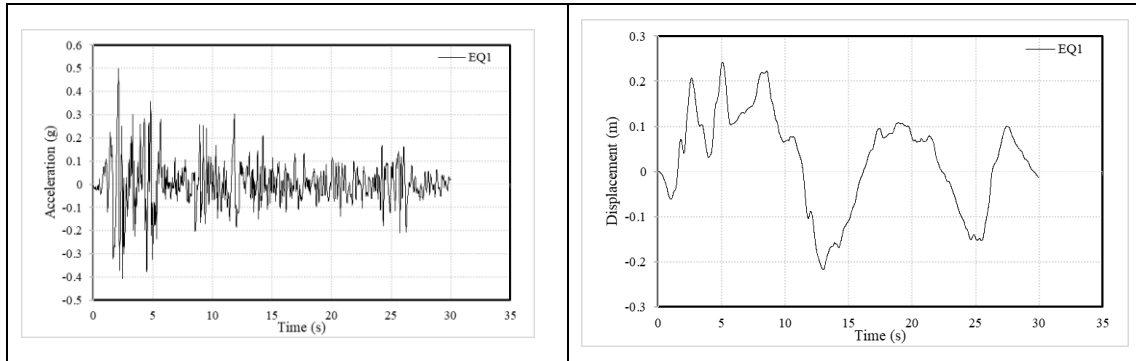


圖 2-7 第一個試驗地表加速度與位移歷時(EQ1)

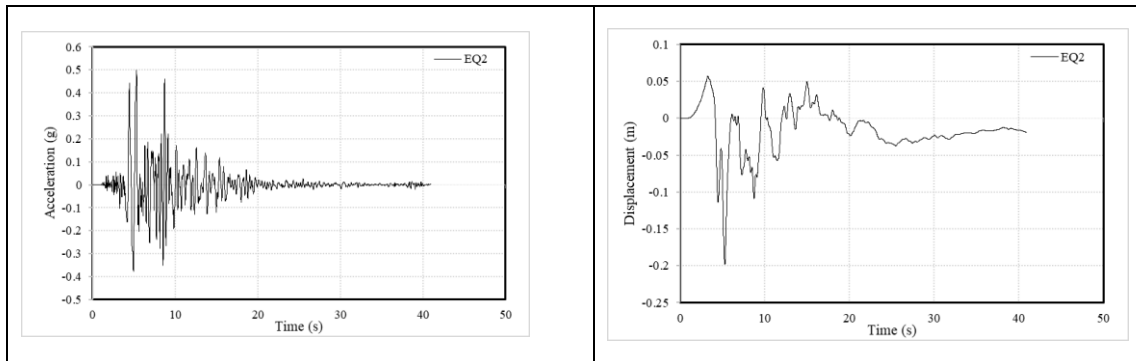


圖 2-8 第二個試驗地表加速度與位移歷時(EQ2)

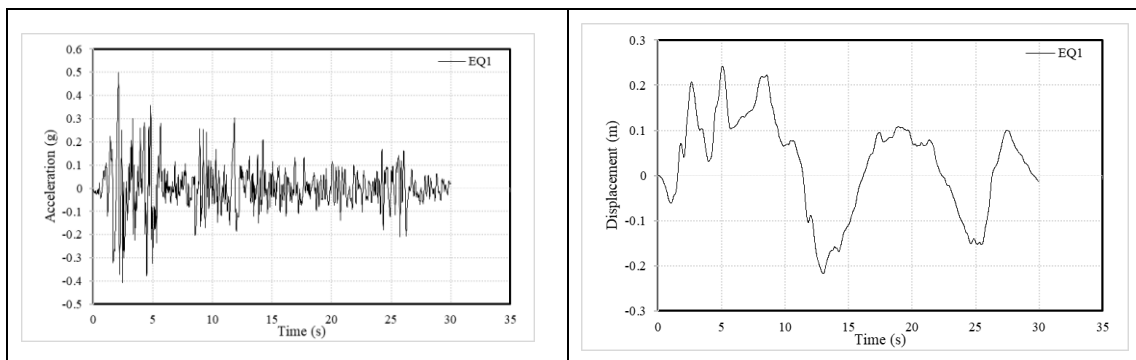


圖 2-9 第三個試驗地表加速度與位移歷時(EQ3)

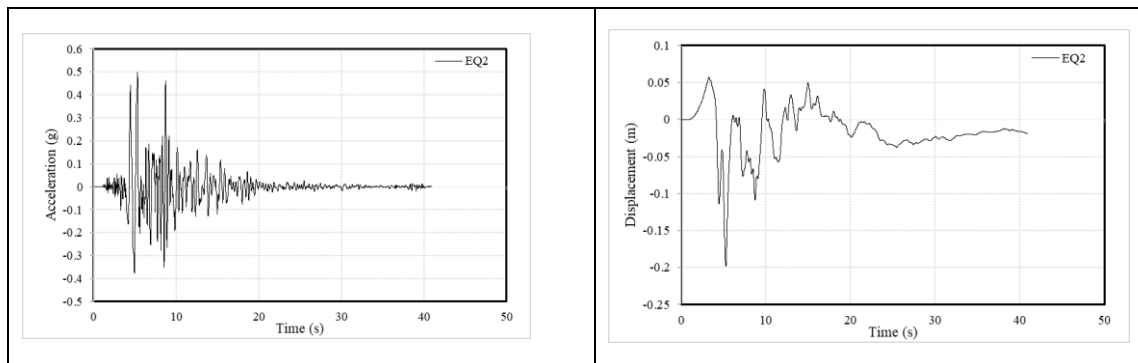


圖 2-10 第四個試驗地表加速度與位移歷時(EQ4)

圖 2-11 顯示了小規模結構的實驗佈局，兩個 MEMS 加速度計將安裝在小型結構的第二層和頂層。表 2-5 列出了每個地面運動的地面運動和測試時間。

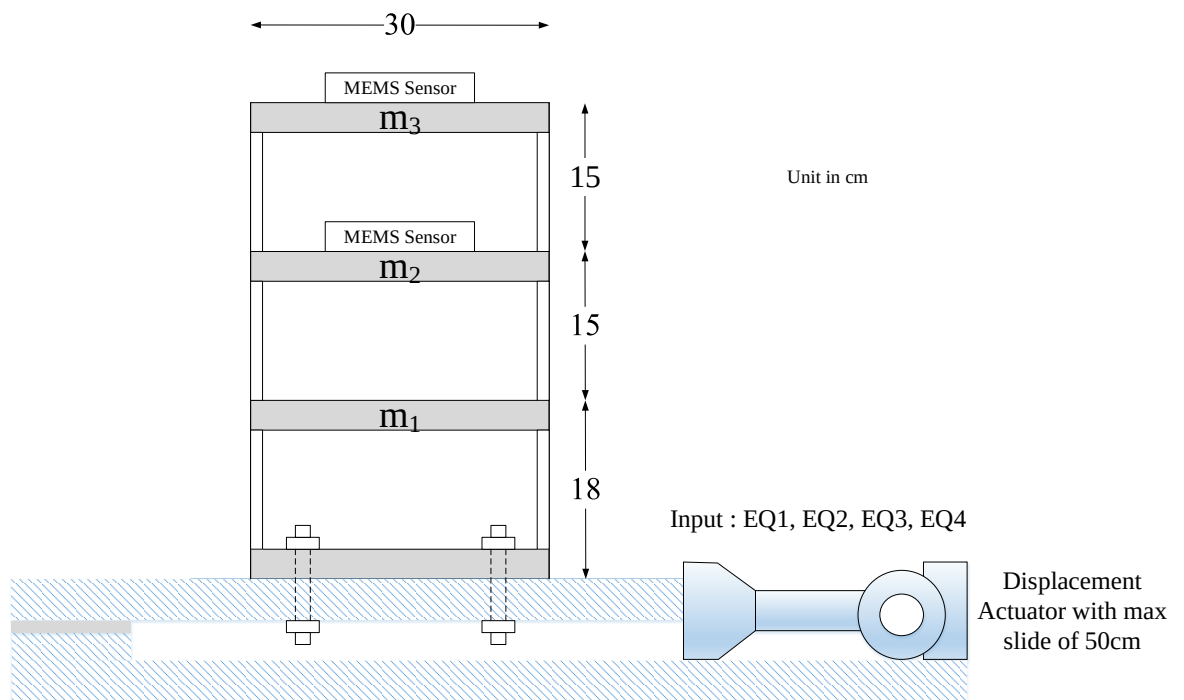


圖 2-11 試驗之設定

表 2-5 各次試驗之相關數據

o.				
	Input	Duration (s)	Data freq. (Hz)	Perform (times)
	White	240	200/125	3

Noise			
EQ1	30	200/125	6
EQ2	40.94	200/125	6
EQ3	70.09	200/125	6
EQ4	40.96	200/125	6

實驗的步驟如下：

步驟 1. 將建立小規模模型，如圖 2-11 所示。

步驟 2. 將 NCREE 中的 LVDT 或其他可用的位移測量裝置安排在結構的頂部和第二層。

步驟 3. MEMS 加速度計將佈置在結構的頂部和第二層。

步驟 4. 使用噪聲信號啟動振動台，所有傳感器（包括 LVDT 和 MEMS）將記錄測試數據。

步驟 5. 使用表 2-5 中列出的每個地面運動重複步驟 4，直到測試完所有地面運動。

步驟 6. 重複步驟 4 和 5，直到達到預定數量的實驗次數。

由上可知，NCREE 的試驗主要是針對房屋建築，京都大學的部分將針對橋梁、最後再將試驗驗證的成果應用於現地烏來忠治高壩。圖 2-12 所示為京都大學縮尺橋梁模型之照片。



圖 2-12 京都大學縮尺橋梁模型

圖 2-13 顯示了實驗計劃的詳細資訊，包含測試變量和實驗次數。加速度計與線性可變位移傳感器（LVDT）一起放置在橋梁跨度的四分之一，一半和三分之一處，以驗證重建位移演算法的準確性。測試兩個不同的大梁：分別為完整的和加勁的大梁。加強(勁)區域在大梁的四分之一到中跨之間。使用各種車速和質量來檢查重建位移的靈敏度。表 2-6 顯示了每種方案的符號，這些符號清楚地描述了所考慮的變量的值。在表 2-6 中，第一個字母是 L（輕）或 H（重），表示車輛的重量。第二個符號是告知車輛類型為 V1 或 V2，其中 V1 代表拖拉機，V2 代表拖車。在這項研究中，輕型拖拉機（LV1）為帶有四個齒輪的小車，質量為 18.70 千克。表 2-6 中列出了每種情況的條件，每種情況將重複執行 10 次試驗。

圖 2-14 和圖 2-15 顯示了 LV1 前後部分的頻率，其中基本振動頻率約為 3.36Hz。而重型拖拉機（HV1）的模型是在 LV1 上方增加質量，從而使總質量達到 28.50kg。圖 2-16 和圖 2-17 分別顯示了前部和後部的(HV1)基本振動頻率，前部和後部的(HV1)主導頻率均為 2.74 Hz。對掛車（V2）在 V1 推車後面安裝了附加推車，附加推車具有兩種不同的質量，其中輕型和重型拖車分別為 11.70 kg 和 18.8 kg。對於 LV2，前部推車使用 LV1，後部推車使用重量為 11.70 千克的附加輕型推車。反之亦然，將 HV1 附加 18.8 kg 的重型推車附加到 HV2 型號上。圖 2-18 和圖 2-19 分別顯示了前部和後部輕型拖車的頻率。輕型拖車的前部和後部都具有大約 15 Hz 的主導頻率。對於重型拖車，前部和後部的主頻移至 12 Hz 左右，分別如圖 2-20 和圖 2-21 所示。圖 2-22 顯示此次試驗所使用的推車。

另一個要考慮的因素是橋的狀態。為了檢查不同橋梁對重建位移

的影響，試驗過程中，改變了橋梁特性。如圖 2-23 所示，通過增加橋的第一和第二個四分之一之間的剛度，可以改變被測試橋的結構特性。透過在梁的兩側連接加強筋，可以提高梁的剛度，如圖 2-23 所示。在這種情況下，原始的橋梁將用 B0 表示，而剛性橋梁將用 B1 表示。

試驗預計研究的最後一個變量是車速對重建位移的影響。這項研究中納入了三種不同的速度，分別表示為 S1，S2 和 S3，分別代表 0.4、0.8 和 1.2 m/s 的速度。即，除了用於估計橋梁和車輛的固有頻率的預運行之外，實驗的總數為 240。

在進行實驗之前，使用自由振動來測量完整和加勁橋梁的橋梁模態頻率。對於每個橋梁，將執行 5 次自由振動。表 2-7 和表 2-8 列出了完整和加勁的橋梁的前三個模式的模態頻率統計數據。如預期，加勁後，橋梁的基本振動頻率會稍高一些。此外，基於自由振動數據，使用對數遞減法計算阻尼比，結果如表 2-9 所示。

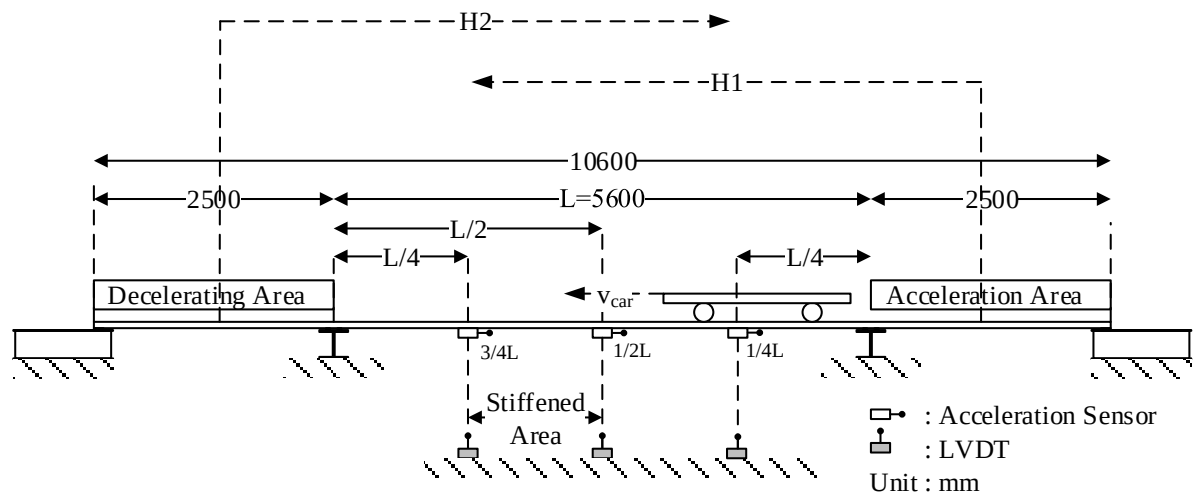


圖 2-13 試驗設計示意圖

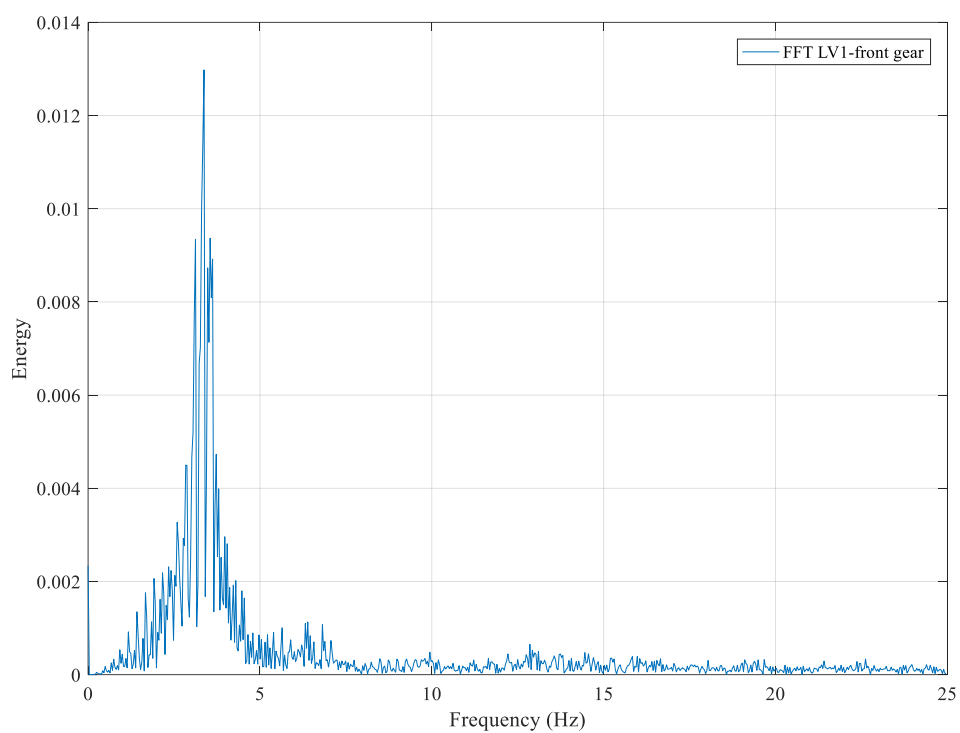


圖 2-12 LV1 前段之 FFT

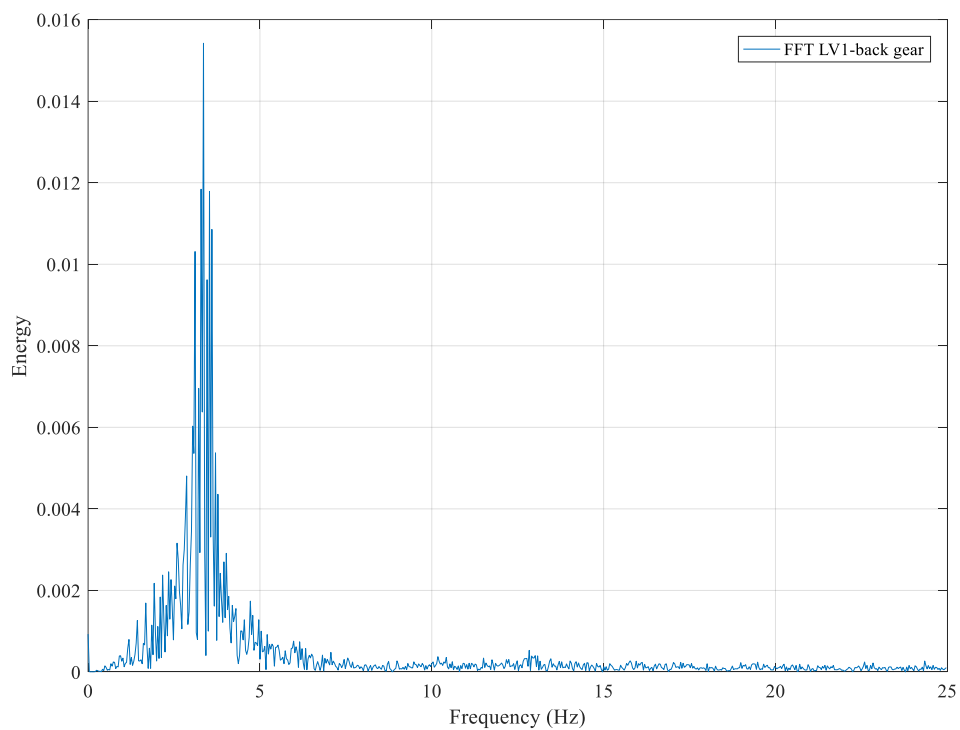


圖 2-13 LV1 後段之 FFT

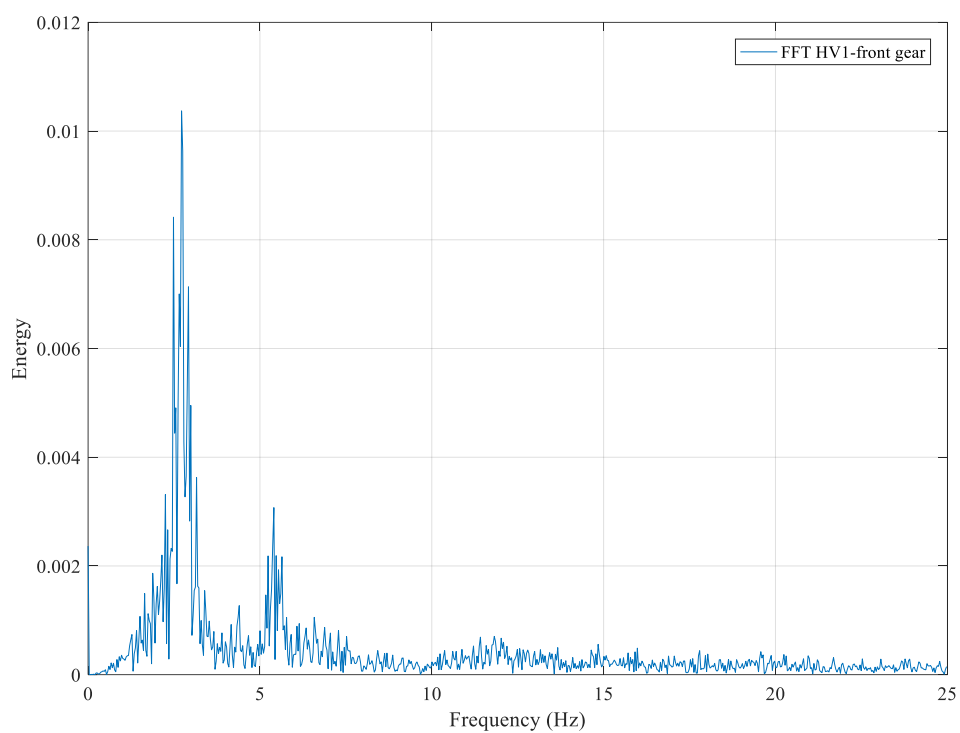


圖 2-14 HV1 前段之 FFT

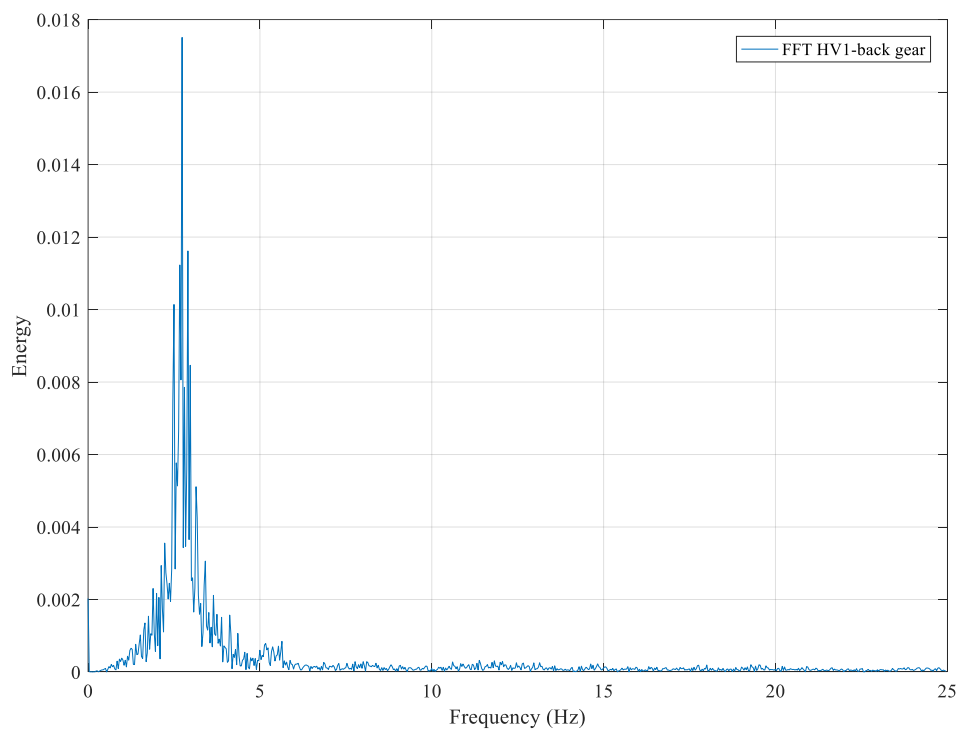


圖 2-15 HV1 後段之 FFT

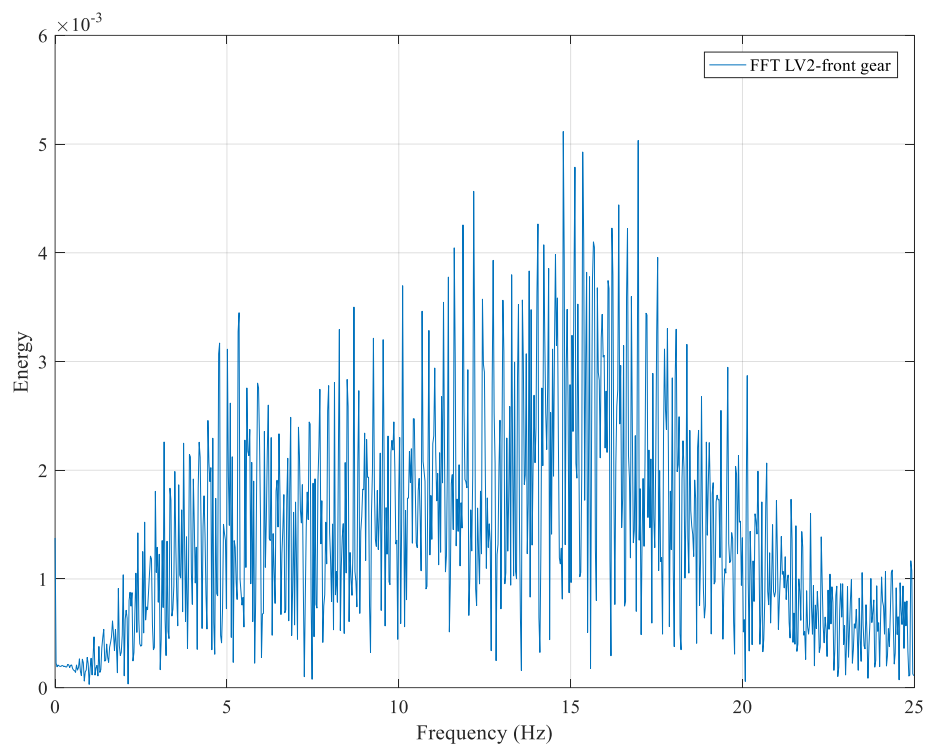


圖 2-16 LV2 前段之 FFT

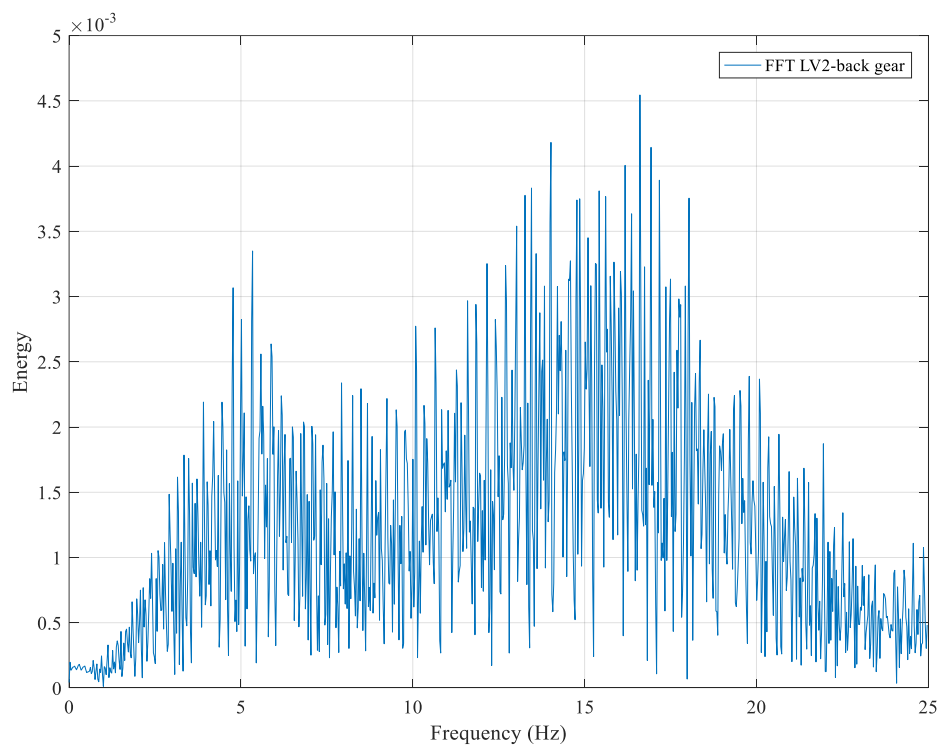


圖 2-17 LV2 後段之 FFT

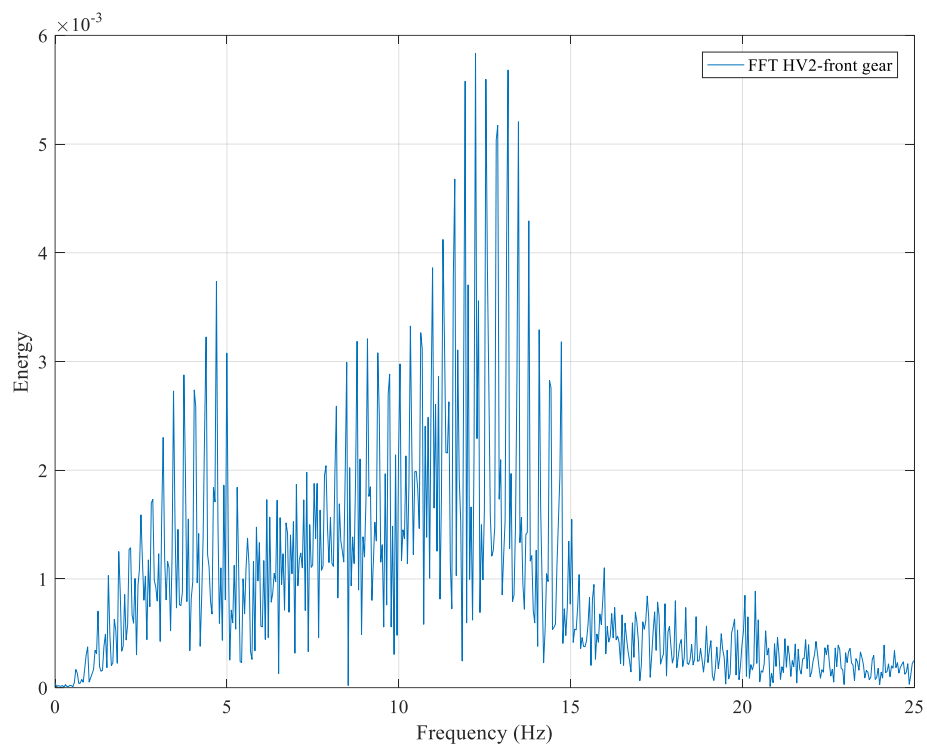


圖 2-18 HV2 前段之 FFT

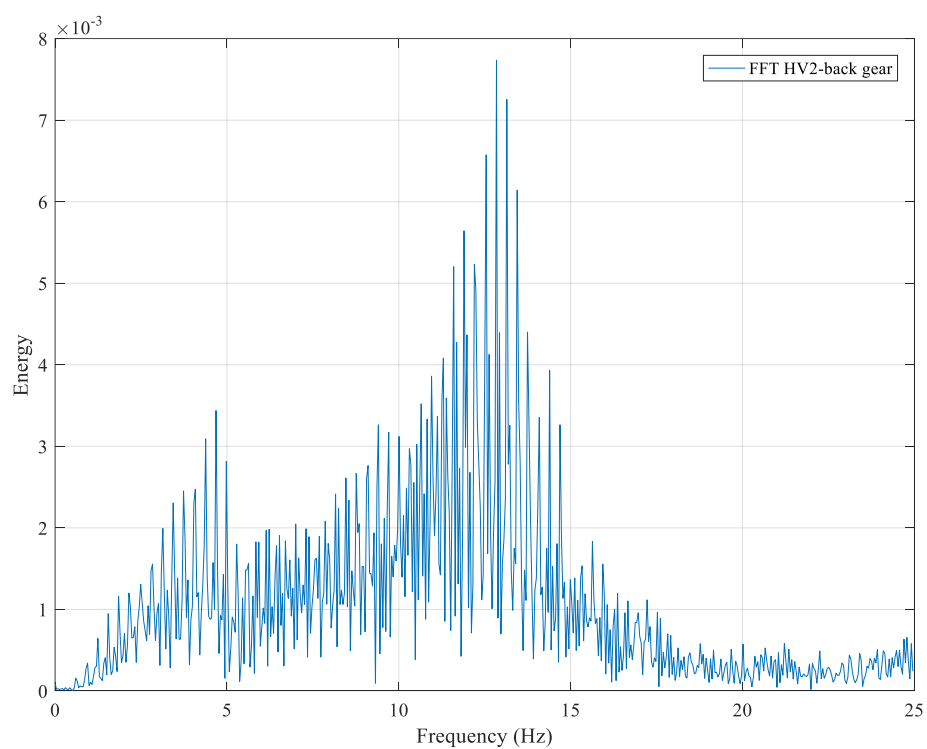


圖 2-19 HV2 後段之 FFT

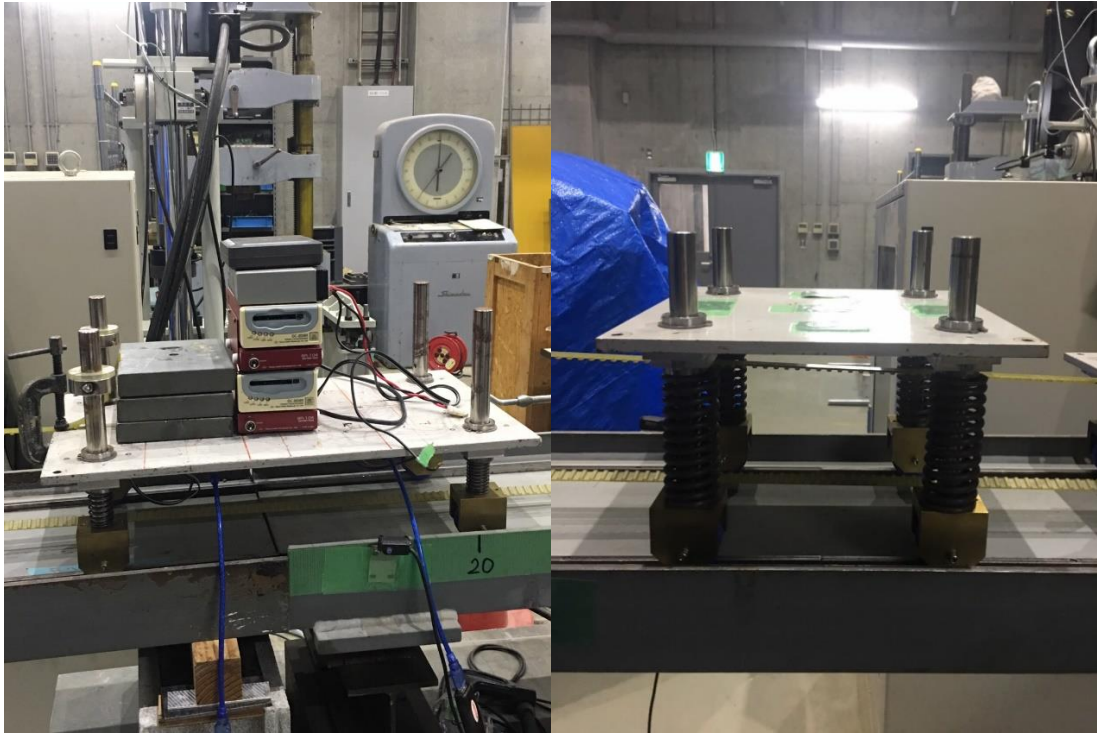


圖 2-20 試驗用車

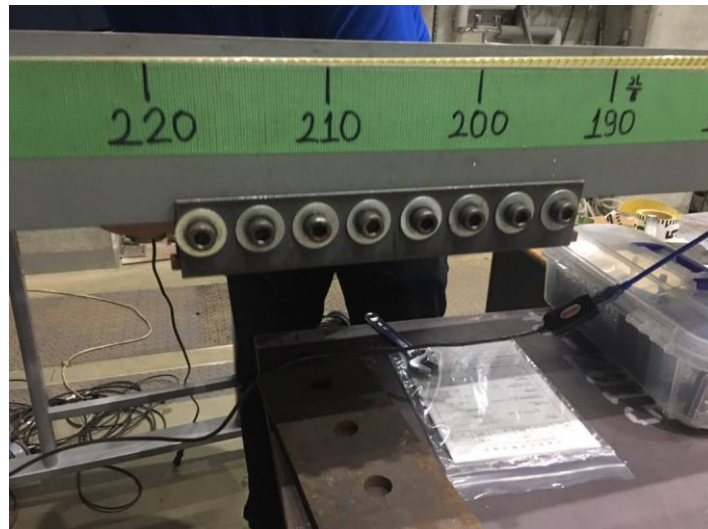


圖 2-21 橋梁加勁圖

表 2-6 試驗設計

No	Scenario Name	Vehicle	Bridge Type	Vehicle Mass	Vehicle Speed (m/s)
1	LV1B0S1	Tractor	Original	Light	0.4
2	LV1B0S2	Tractor	Original	Light	0.8
3	LV1B0S3	Tractor	Original	Light	1.2
4	HV1B0S1	Tractor	Original	Heavy	0.4
5	HV1B0S2	Tractor	Original	Heavy	0.8
6	HV1B0S3	Tractor	Original	Heavy	1.2
7	LV1B1S1	Tractor	Stiffened	Light	0.4
8	LV1B1S2	Tractor	Stiffened	Light	0.8
9	LV1B1S3	Tractor	Stiffened	Light	1.2
10	HV1B1S1	Tractor	Stiffened	Heavy	0.4
11	HV1B1S2	Tractor	Stiffened	Heavy	0.8
12	HV1B1S3	Tractor	Stiffened	Heavy	1.2
13	LV2B0S1	Trailer	Original	Light	0.4
14	LV2B0S2	Trailer	Original	Light	0.8
15	LV2B0S3	Trailer	Original	Light	1.2
16	HV2B0S1	Trailer	Original	Heavy	0.4
17	HV2B0S2	Trailer	Original	Heavy	0.8
18	HV2B0S3	Trailer	Original	Heavy	1.2
19	LV2B1S1	Trailer	Stiffened	Light	0.4
20	LV2B1S2	Trailer	Stiffened	Light	0.8
21	LV2B1S3	Trailer	Stiffened	Light	1.2
22	HV2B1S1	Trailer	Stiffened	Heavy	0.4
23	HV2B1S2	Trailer	Stiffened	Heavy	0.8
24	HV2B1S3	Trailer	Stiffened	Heavy	1.2

表 2-7 原始橋梁振動模態訊息

Original Bridge				
Mode	Frequency Mode Statistical Properties (Hz)			
	Max	Min	Mean	c.o.v
1	3.733	3.733	3.733	0.000
2	15.067	14.933	14.987	0.005
3	32.000	29.600	30.800	0.037

表 2-8 加勁橋梁振動模態訊息

Stiffened Bridge				
Mode	Frequency Mode Statistical Properties (Hz)			
	Max	Min	Mean	c.o.v
1	3.867	3.867	3.867	0.000
2	14.533	14.533	14.533	0.000
3	31.867	30.667	31.493	0.015

表 2-9 原始與加勁橋梁之阻尼

Bridge	First Mode Damping Ratio Statistical Properties			
	Max	Min	Mean	c.o.v
Original	0.025	0.019	0.023	0.114
Stiffened	0.018	0.016	0.017	0.047

對於每種情況，表 2-10、表 2-11 和表 2-12 中列出的快速傅立葉變換（FFT）計算前三種振態的頻率。可以看出，提高車速顯然會降低頻率。表 2-10，表 2-11 和表 2-12 中顯示的統計數據是使用 10 個測試結果計算得出，並提取最大值，最小值，均值和 c.o.v（方差係數）並列在相應的表中。表 2-13 和表 2-14 分別顯示了在橋中間跨度上測得的 H1 和 H2 加速度的統計數據。根據這兩個表，發現正值（重力方向）和負值（與重力相反）是可分辨的，這表明 10 個不同運行之間的結果對於 H1 和 H2 方向是一致的。位移可以分為兩種：靜態位移和動態位移。靜態位移是通過濾除頻率大於 1Hz 的數據而獲得的，並將所得數據歸為動態位移數據。

表 2-15 顯示了橋梁中間跨度的靜態位移數據。對於動態位移，它進一步分為與加速度數據相同的兩類（即，正方向和負方向），表 2-16 和表 2-17 顯示了中間跨度的動態位移數據。根據計算的位移，靜態位移可以清楚地、一致地區分 B0 和 B1 的差異。

表 2-10 不同條件下之第一振態頻率

Scenario	Frequency Mode 1 Statistical Properties (Hz)			
	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	4.044	3.939	4.018	0.007
LV1B0S2	4.148	3.715	4.018	0.031
LV1B0S3	3.923	3.358	3.866	0.046
HV1B0S1	4.055	3.915	4.002	0.013
HV1B0S2	4.134	3.830	4.012	0.039
HV1B0S3	3.904	3.904	3.904	0.000
LV1B1S1	4.114	4.044	4.059	0.006
LV1B1S2	4.019	3.841	3.966	0.017
LV1B1S3	3.913	3.913	3.913	0.000
HV1B1S1	4.074	3.899	3.995	0.019
HV1B1S2	3.981	3.829	3.889	0.020
HV1B1S3	3.907	3.907	3.907	0.000
LV2B0S1	4.027	3.973	4.002	0.004
LV2B0S2	3.978	3.822	3.900	0.021
LV2B0S3	3.927	3.293	3.580	0.073
HV2B0S1	4.069	3.997	4.020	0.008
HV2B0S2	3.964	3.809	3.871	0.021
HV2B0S3	3.894	3.622	3.821	0.031
LV2B1S1	4.057	4.003	4.035	0.005
LV2B1S2	3.994	3.864	3.970	0.010
LV2B1S3	3.931	3.840	3.883	0.010
HV2B1S1	4.086	3.908	3.979	0.011
HV2B1S2	3.956	3.801	3.816	0.013
HV2B1S3	3.925	3.623	3.847	0.029

表 2-11 不同條件下之第二振態頻率

Scenario	Frequency Mode 2 Statistical Properties (Hz)			
	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	14.507	14.454	14.487	0.001
LV1B0S2	14.531	14.531	14.531	0.000
LV1B0S3	14.383	14.205	14.333	0.004
HV1B0S1	14.594	14.367	14.412	0.005
HV1B0S2	14.507	14.329	14.448	0.003
HV1B0S3	14.461	14.284	14.343	0.005
LV1B1S1	14.539	14.487	14.517	0.001
LV1B1S2	14.526	14.526	14.526	0.000
LV1B1S3	15.001	14.409	14.578	0.012
HV1B1S1	14.600	14.531	14.572	0.002
HV1B1S2	14.503	14.503	14.503	0.000
HV1B1S3	14.918	14.355	14.586	0.013
LV2B0S1	14.194	13.833	13.977	0.013
LV2B0S2	14.403	13.727	13.878	0.020
LV2B0S3	13.837	13.776	13.801	0.002
HV2B0S1	14.519	13.694	14.200	0.016
HV2B0S2	14.354	13.732	14.282	0.014
HV2B0S3	14.519	13.945	14.304	0.012
LV2B1S1	14.497	13.812	13.969	0.020
LV2B1S2	14.393	13.797	14.334	0.013
LV2B1S3	13.910	13.759	13.874	0.005
HV2B1S1	15.684	14.239	14.581	0.029
HV2B1S2	14.609	14.376	14.482	0.006
HV2B1S3	14.583	14.130	14.426	0.010

表 2-12 不同條件下之第三振態頻率

Scenario	Frequency Mode 3 Statistical Properties (Hz)			
	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	31.475	31.423	31.435	0.001
LV1B0S2	31.582	31.531	31.571	0.001
LV1B0S3	31.679	31.471	31.513	0.003
HV1B0S1	31.897	31.286	31.724	0.006
HV1B0S2	31.930	31.473	31.709	0.006
HV1B0S3	31.524	31.524	31.524	0.000
LV1B1S1	31.663	31.382	31.508	0.002
LV1B1S2	31.620	31.493	31.592	0.001
LV1B1S3	31.604	31.545	31.551	0.001
HV1B1S1	31.911	31.352	31.602	0.005
HV1B1S2	31.897	31.491	31.803	0.004
HV1B1S3	31.552	31.552	31.552	0.000
LV2B0S1	31.964	30.357	31.677	0.015
LV2B0S2	32.159	31.093	31.637	0.011
LV2B0S3	31.934	31.208	31.411	0.009
HV2B0S1	31.995	31.421	31.791	0.005
HV2B0S2	32.129	31.196	31.701	0.007
HV2B0S3	31.935	31.391	31.588	0.007
LV2B1S1	32.095	31.266	31.718	0.010
LV2B1S2	31.872	31.535	31.802	0.004
LV2B1S3	31.842	31.267	31.473	0.006
HV2B1S1	31.689	31.314	31.410	0.004
HV2B1S2	32.114	31.261	31.651	0.008
HV2B1S3	32.035	31.401	31.600	0.008

表 2-13 中間跨度之加速度統計數值(H1)

Scenario	H1 Acceleration Statistical Properties on 1/2L Segment (m/s ²)							
	Positive Direction				Negative Direction			
	Max	Min	Mean	c.o.v	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	0.182	0.126	0.157	0.116	-0.133	-0.178	-0.154	0.105
LV1B0S2	0.521	0.269	0.363	0.201	-0.248	-0.454	-0.290	0.205
LV1B0S3	0.657	0.514	0.568	0.073	-0.341	-0.429	-0.371	0.072
HV1B0S1	0.251	0.149	0.191	0.167	-0.138	-0.190	-0.167	0.110
HV1B0S2	0.413	0.250	0.367	0.163	-0.260	-0.331	-0.300	0.075
HV1B0S3	0.514	0.386	0.440	0.109	-0.332	-0.488	-0.388	0.117
LV1B1S1	0.180	0.131	0.153	0.105	-0.125	-0.193	-0.150	0.128
LV1B1S2	0.415	0.278	0.331	0.150	-0.250	-0.329	-0.293	0.089
LV1B1S3	0.640	0.409	0.559	0.144	-0.349	-0.423	-0.382	0.059
HV1B1S1	0.188	0.129	0.169	0.107	-0.129	-0.192	-0.163	0.130
HV1B1S2	0.338	0.241	0.293	0.108	-0.261	-0.345	-0.289	0.097
HV1B1S3	0.540	0.391	0.453	0.101	-0.336	-0.455	-0.390	0.095
LV2B0S1	0.688	0.393	0.452	0.190	-0.333	-0.570	-0.426	0.152
LV2B0S2	0.636	0.425	0.526	0.119	-0.413	-0.623	-0.510	0.121
LV2B0S3	0.813	0.603	0.703	0.098	-0.499	-0.686	-0.589	0.101
HV2B0S1	0.705	0.457	0.541	0.163	-0.442	-0.675	-0.501	0.144
HV2B0S2	0.732	0.435	0.572	0.179	-0.448	-0.747	-0.589	0.170
HV2B0S3	0.822	0.493	0.664	0.126	-0.590	-0.822	-0.703	0.105
LV2B1S1	0.435	0.226	0.305	0.199	-0.235	-0.368	-0.283	0.150
LV2B1S2	0.529	0.362	0.443	0.126	-0.396	-0.533	-0.462	0.098
LV2B1S3	0.798	0.542	0.665	0.108	-0.435	-0.587	-0.521	0.079
HV2B1S1	0.513	0.300	0.413	0.156	-0.297	-0.451	-0.373	0.132
HV2B1S2	0.514	0.402	0.460	0.097	-0.465	-0.650	-0.545	0.101
HV2B1S3	0.949	0.506	0.756	0.191	-0.661	-0.884	-0.753	0.110

表 2-14 中間跨度之加速度統計數值(H2)

Scenario	H2 Acceleration Statistical Properties on 1/2L Segment (m/s ²)							
	Positive Direction				Negative Direction			
	Max	Min	Mean	c.o.v	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	0.583	0.323	0.435	0.174	-0.133	-0.454	-0.332	0.203
LV1B0S2	1.262	0.317	0.469	0.600	-0.248	-0.781	-0.473	0.232
LV1B0S3	0.897	0.699	0.804	0.095	-0.341	-0.962	-0.860	0.078
HV1B0S1	0.325	0.206	0.275	0.163	-0.138	-0.314	-0.259	0.165
HV1B0S2	0.888	0.289	0.541	0.341	-0.260	-0.917	-0.564	0.304
HV1B0S3	0.912	0.555	0.691	0.147	-0.332	-0.965	-0.786	0.130
LV1B1S1	0.773	0.291	0.451	0.331	-0.125	-0.574	-0.357	0.312
LV1B1S2	0.903	0.354	0.482	0.345	-0.250	-0.620	-0.519	0.134
LV1B1S3	0.976	0.799	0.856	0.066	-0.349	-0.953	-0.844	0.074
HV1B1S1	0.426	0.239	0.302	0.184	-0.129	-0.383	-0.307	0.186
HV1B1S2	0.607	0.346	0.487	0.178	-0.261	-0.655	-0.485	0.251
HV1B1S3	0.808	0.582	0.684	0.105	-0.336	-0.879	-0.769	0.064
LV2B0S1	0.679	0.423	0.501	0.149	-0.333	-0.738	-0.528	0.155
LV2B0S2	0.803	0.452	0.585	0.188	-0.413	-0.961	-0.736	0.152
LV2B0S3	1.165	0.775	1.019	0.135	-0.499	-1.257	-1.067	0.096
HV2B0S1	0.606	0.367	0.441	0.157	-0.442	-0.586	-0.480	0.123
HV2B0S2	0.713	0.578	0.645	0.085	-0.448	-0.788	-0.650	0.163
HV2B0S3	1.094	0.571	0.859	0.172	-0.590	-1.043	-0.891	0.123
LV2B1S1	0.556	0.353	0.425	0.143	-0.235	-0.467	-0.378	0.144
LV2B1S2	0.709	0.433	0.580	0.159	-0.396	-0.885	-0.712	0.171
LV2B1S3	1.184	0.847	1.033	0.096	-0.435	-1.247	-1.054	0.090
HV2B1S1	0.649	0.338	0.483	0.201	-0.297	-0.655	-0.540	0.145
HV2B1S2	0.622	0.435	0.524	0.112	-0.465	-0.713	-0.535	0.148
HV2B1S3	1.095	0.675	0.956	0.142	-0.661	-1.065	-0.954	0.093

表 2-15 中間跨度靜態位移統計數值

Scenario	Static Displacement Statistical Properties on 1/2L Segment (mm)					
	H1			H2		
	Max	Mean	c.o.v	Max	Mean	c.o.v
LV1B0S1	2.189	2.185	0.001	2.205	2.202	0.001
LV1B0S2	2.177	2.175	0.001	2.217	2.193	0.004
LV1B0S3	2.187	2.184	0.001	2.207	2.202	0.001
HV1B0S1	3.391	3.388	0.001	3.413	3.405	0.001
HV1B0S2	3.381	3.377	0.001	3.414	3.404	0.002
HV1B0S3	3.409	3.400	0.002	3.438	3.420	0.003
LV1B1S1	2.139	2.135	0.002	2.176	2.154	0.004
LV1B1S2	2.117	2.115	0.001	2.142	2.134	0.002
LV1B1S3	2.130	2.128	0.001	2.156	2.152	0.001
HV1B1S1	3.292	3.288	0.001	3.317	3.308	0.002
HV1B1S2	3.275	3.272	0.001	3.299	3.295	0.001
HV1B1S3	3.293	3.289	0.001	3.322	3.315	0.001
LV2B0S1	3.923	3.919	0.001	3.961	3.951	0.002
LV2B0S2	3.909	3.906	0.001	3.938	3.934	0.001
LV2B0S3	3.925	3.919	0.001	3.951	3.948	0.001
HV2B0S1	6.009	6.003	0.001	6.027	6.022	0.001
HV2B0S2	6.011	6.003	0.001	6.032	6.028	0.001
HV2B0S3	6.018	6.005	0.001	6.026	6.023	0.000
LV2B1S1	3.772	3.768	0.001	3.788	3.784	0.001
LV2B1S2	3.759	3.756	0.001	3.781	3.775	0.001
LV2B1S3	3.775	3.767	0.001	3.796	3.794	0.001
HV2B1S1	5.794	5.788	0.001	5.821	5.809	0.001
HV2B1S2	5.793	5.786	0.001	5.813	5.806	0.001
HV2B1S3	5.799	5.788	0.001	5.824	5.809	0.001

表 2-16 中間跨度動態位移統計數值(H1)

Scenario	H1 Dynamic Displacement Statistical Properties on 1/2L Segment (mm)							
	Positive Direction				Negative Direction			
	Max	Min	Mean	c.o.v	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	0.178	0.083	0.130	0.231	-0.086	-0.173	-0.130	0.227
LV1B0S2	0.126	0.083	0.105	0.145	-0.081	-0.132	-0.108	0.172
LV1B0S3	0.307	0.214	0.264	0.108	-0.221	-0.312	-0.260	0.110
HV1B0S1	0.191	0.101	0.140	0.218	-0.099	-0.185	-0.139	0.192
HV1B0S2	0.165	0.135	0.148	0.065	-0.130	-0.181	-0.156	0.111
HV1B0S3	0.244	0.182	0.218	0.079	-0.181	-0.231	-0.205	0.080
LV1B1S1	0.153	0.062	0.097	0.278	-0.061	-0.148	-0.097	0.281
LV1B1S2	0.124	0.088	0.100	0.108	-0.086	-0.127	-0.100	0.115
LV1B1S3	0.298	0.215	0.255	0.116	-0.207	-0.288	-0.254	0.135
HV1B1S1	0.199	0.101	0.140	0.224	-0.092	-0.196	-0.136	0.234
HV1B1S2	0.174	0.144	0.155	0.059	-0.136	-0.194	-0.158	0.133
HV1B1S3	0.225	0.172	0.199	0.068	-0.169	-0.221	-0.187	0.088
LV2B0S1	0.141	0.070	0.102	0.208	-0.071	-0.130	-0.094	0.224
LV2B0S2	0.118	0.091	0.098	0.092	-0.086	-0.111	-0.096	0.085
LV2B0S3	0.262	0.199	0.225	0.075	-0.203	-0.262	-0.224	0.090
HV2B0S1	0.250	0.143	0.169	0.218	-0.130	-0.222	-0.146	0.191
HV2B0S2	0.268	0.198	0.232	0.080	-0.198	-0.255	-0.224	0.069
HV2B0S3	0.241	0.173	0.213	0.096	-0.187	-0.248	-0.211	0.087
LV2B1S1	0.130	0.090	0.109	0.136	-0.086	-0.138	-0.108	0.162
LV2B1S2	0.120	0.103	0.113	0.042	-0.101	-0.118	-0.112	0.045
LV2B1S3	0.285	0.210	0.246	0.110	-0.225	-0.281	-0.254	0.079
HV2B1S1	0.210	0.139	0.158	0.152	-0.122	-0.191	-0.139	0.164
HV2B1S2	0.240	0.162	0.211	0.111	-0.167	-0.232	-0.201	0.098
HV2B1S3	0.241	0.178	0.207	0.094	-0.182	-0.241	-0.208	0.077

表 2-17 中間跨度動態位移統計數值(H2)

Scenario	H2 Dynamic Displacement Statistical Properties on 1/4L Segment (mm)							
	Positive Direction				Negative Direction			
	Max	Min	Mean	c.o.v	Max	Min	Mean	c.o.v
LV1B0S1	0.168	0.106	0.127	0.147	-0.103	-0.152	-0.123	0.121
LV1B0S2	0.201	0.102	0.125	0.238	-0.096	-0.219	-0.127	0.284
LV1B0S3	0.343	0.279	0.302	0.068	-0.269	-0.351	-0.299	0.076
HV1B0S1	0.203	0.122	0.153	0.210	-0.113	-0.187	-0.140	0.207
HV1B0S2	0.161	0.115	0.140	0.119	-0.120	-0.173	-0.141	0.128
HV1B0S3	0.307	0.202	0.260	0.136	-0.218	-0.314	-0.263	0.115
LV1B1S1	0.229	0.087	0.129	0.334	-0.083	-0.224	-0.133	0.303
LV1B1S2	0.145	0.096	0.116	0.152	-0.094	-0.134	-0.114	0.102
LV1B1S3	0.354	0.264	0.305	0.085	-0.255	-0.325	-0.294	0.080
HV1B1S1	0.173	0.092	0.142	0.167	-0.098	-0.165	-0.131	0.140
HV1B1S2	0.147	0.132	0.138	0.043	-0.118	-0.150	-0.131	0.069
HV1B1S3	0.296	0.217	0.261	0.098	-0.196	-0.280	-0.253	0.103
LV2B0S1	0.187	0.089	0.122	0.270	-0.076	-0.182	-0.118	0.304
LV2B0S2	0.130	0.111	0.123	0.045	-0.103	-0.130	-0.114	0.074
LV2B0S3	0.369	0.226	0.293	0.127	-0.244	-0.364	-0.292	0.114
HV2B0S1	0.207	0.140	0.171	0.117	-0.132	-0.203	-0.167	0.121
HV2B0S2	0.269	0.245	0.257	0.026	-0.253	-0.275	-0.265	0.027
HV2B0S3	0.254	0.176	0.212	0.133	-0.167	-0.267	-0.212	0.154
LV2B1S1	0.195	0.092	0.111	0.274	-0.091	-0.202	-0.113	0.288
LV2B1S2	0.143	0.113	0.127	0.074	-0.109	-0.141	-0.123	0.072
LV2B1S3	0.354	0.289	0.322	0.060	-0.280	-0.360	-0.320	0.082
HV2B1S1	0.208	0.148	0.168	0.102	-0.141	-0.182	-0.158	0.074
HV2B1S2	0.279	0.182	0.231	0.103	-0.186	-0.265	-0.239	0.087
HV2B1S3	0.329	0.188	0.254	0.192	-0.186	-0.375	-0.286	0.242

第四節 智慧感測器之開發與現場監測

本計畫已完成智慧感測器之開發，並佈設於現場(如圖 2-22 所示)以進行資料收集與後續分析。

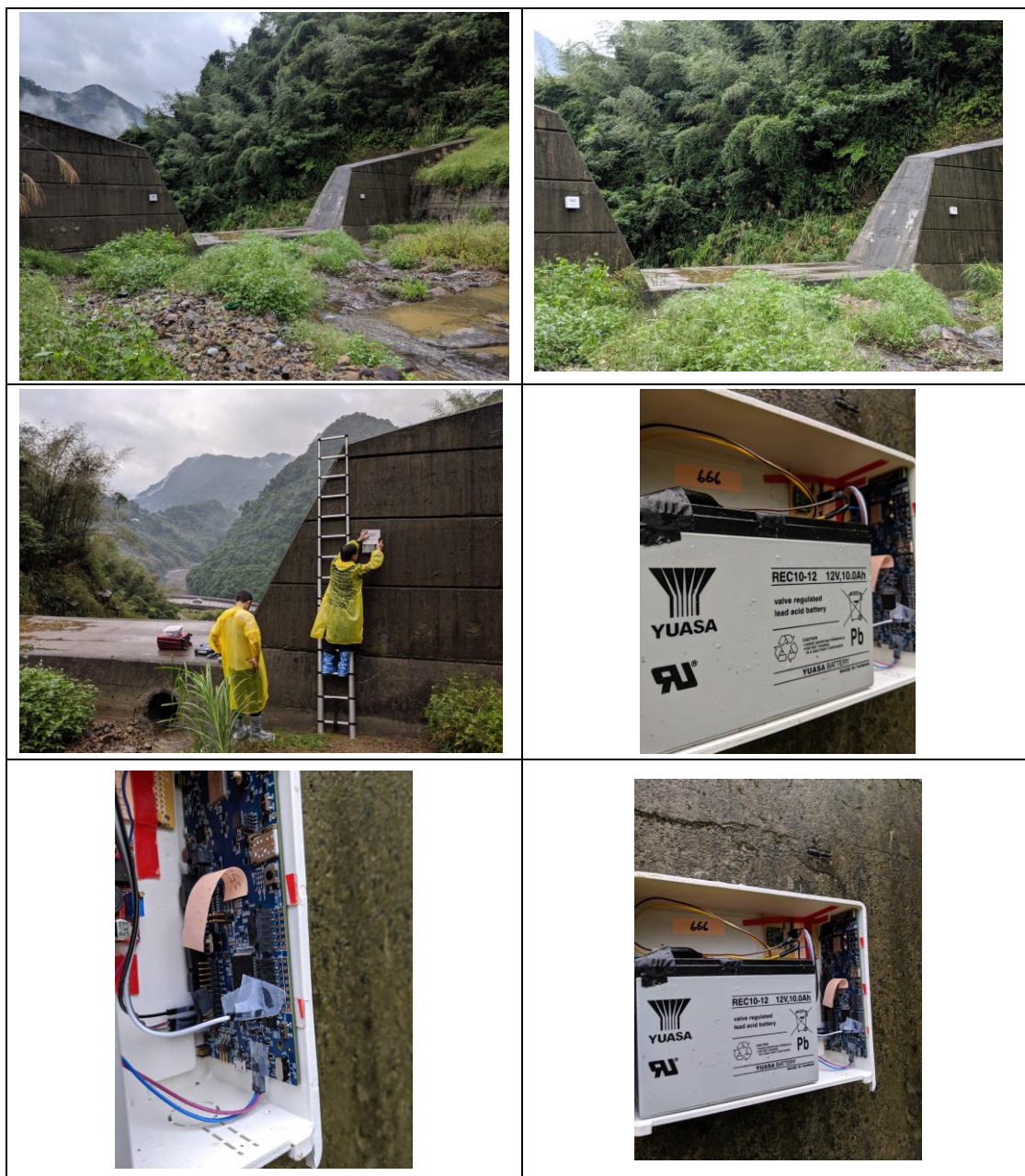




圖 2-22 本計畫於烏來忠治 5 號壩所設置之智慧感測元件

本計畫所建立的智慧感測器開發與 NB-IoT 架構如圖 2-23 所示，由 MCU 搜集 ADXL355 的 G 值資料，透過 NB-IoT 模組，傳送給遠端的 Server，Server 再將資料儲存至 Database。其中，加速度計係利用 ADXL355 實現，MCU 為 nRF9160，使用 BSD Socket 來撰寫網路通訊程式，並以 MySQL 建立資料庫(DB)。

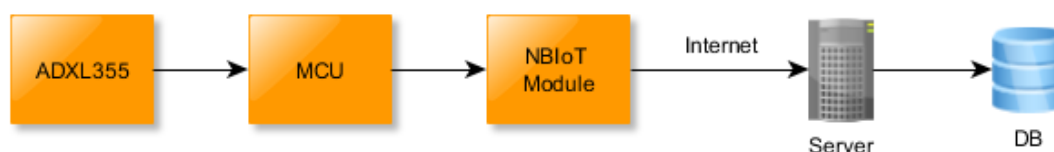


圖 2-23 本計畫之 NB-IoT 架構如圖所示

亞德諾半導體(ADI)2016 推出 ADXL354 和 ADXL355 三軸微機電(MEMS)加速度計，冀望以極低雜訊進行高解析度振動測量，同時希望達到低功耗，減低電池負擔，延長產品壽命，並藉由低雜訊的性能表現，使得其應用結構安全監控(SHM)的可行性增加。ADXL354 和 ADXL355 加速度計的穩定性提供不同環境條件下如溫度重複操作的可行性。對於在防砂壩的長期觀測，ADXL354 和 ADXL355 是否能在惡劣環境中，提供良好加速度與傾斜誤差，為此次計畫的觀察項目之一。ADXL355(本計畫選用，約 1500~2000 新台幣)的詳細規格如表 2-18、表 2-19 與照片(圖 2-24)如下所示。

表 2-18 ADXL 355 之規格一

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Output Full Scale Range (FSR)	User selectable		±2.048 ±4.096 ±8.192		<i>g</i> <i>g</i> <i>g</i>
Nonlinearity	±2 <i>g</i>		0.1		% FS
Cross Axis Sensitivity			1		%
SENSITIVITY	Each axis				
X-Axis, Y-Axis, and Z-Axis Sensitivity	±2 <i>g</i>	235,520	256,000	276,480	LSB/ <i>g</i>
	±4 <i>g</i>	117,760	128,000	138,240	LSB/ <i>g</i>
	±8 <i>g</i>	58,880	64,000	69,120	LSB/ <i>g</i>
X-Axis, Y-Axis, and Z-Axis Scale Factor	±2 <i>g</i>		3.9		μ <i>g</i> /LSB
	±4 <i>g</i>		7.8		μ <i>g</i> /LSB
	±8 <i>g</i>		15.6		μ <i>g</i> /LSB
Sensitivity Change due to Temperature	−40°C to +125°C		±0.01		%/°C
0 <i>g</i> OFFSET	Each axis, ±2 <i>g</i>				
X-Axis, Y-Axis, and Z-Axis 0 <i>g</i> Output		−75	±25	+75	<i>mg</i>
0 <i>g</i> Offset vs. Temperature (X-Axis, Y-Axis, and Z-Axis) ¹	−40°C to +125°C	−0.15	±0.02	+0.15	<i>mg</i> /°C
Repeatability ²	X-axis and y-axis		±3.5		<i>mg</i>
	Z-axis		±9		<i>mg</i>
Vibration Rectification ³	±2 <i>g</i> range, in a 1 <i>g</i> orientation, offset due to 2.5 <i>g</i> rms vibration		<0.4		<i>g</i>
NOISE DENSITY	±2 <i>g</i>				
X-Axis, Y-Axis, and Z-Axis			25		μ <i>g</i> /√Hz
Velocity Random Walk	X-axis and y-axis		9		μ <i>m</i> /sec/√Hr
	Z-axis		13		μ <i>m</i> /sec/√Hr
OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH					
Low-Pass Filter Passband Frequency	User programmable, Register 0x28	1		1000	Hz
High-Pass Filter Passband Frequency When Enabled (Disabled by Default)	User programmable, Register 0x28 for 4 kHz ODR	0.0095		10	Hz

表 2-19 ADXL 355 之規格二

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
SELF TEST					
Output Change					
X-Axis			0.3		<i>g</i>
Y-Axis			0.3		<i>g</i>
Z-Axis			1.5		<i>g</i>
POWER SUPPLY					
Voltage Range					
V _{SUPPLY} Operating ⁴		2.25	2.5	3.6	V
V _{DDIO}		V _{1PB0DIG}	2.5	3.6	V
V _{1PBANA} and V _{1PB0DIG} with Internal LDO Bypassed	V _{SUPPLY} = 0 V	1.62	1.8	1.98	V
Current					
Measurement Mode					
V _{SUPPLY} (LDO Enabled)			200		μA
V _{1PBANA} (LDO Disabled)			160		μA
V _{1PB0DIG} (LDO Disabled)			35.5		μA
Standby Mode					
V _{SUPPLY} (LDO Enabled)			21		μA
V _{1PBANA} (LDO Disabled)			7		μA
V _{1PB0DIG} (LDO Disabled)			10		μA
Turn On Time ⁵	2 <i>g</i> range		<10		ms
	Power-off to standby		<10		ms
TEMPERATURE SENSOR					
Output at 25°C			1852		LSB
Scale Factor			−9.05		LSB/°C
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		−40		+125	°C

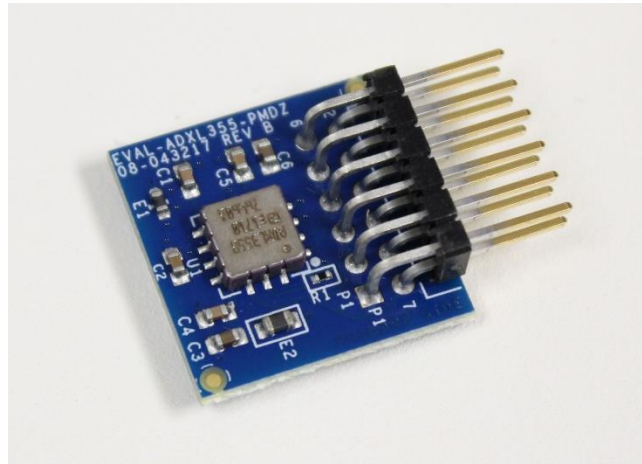


圖 2-24 ADXL355

本計畫 ADXL355 參數設定如下：

通訊介面: I2C

通訊位址: 0x1D

設定 FILTER 暫存器, 位址: 0x28, 值: 0x05

表示取樣頻率為 125Hz

啟動量測功能, 位址: 0x2D, 值: 0x00

本計畫讀取 G 值的流程如下：

1. 檢查是否已產生資料？
2. 讀取位址: 0x05, 若值 ≥ 3 ，則可讀取資料。

3. 開始讀取 G 值

讀取位址: 0x11，每次讀取 3 個位元組，連續讀取 3 次，將依序得到 Z 軸, Y 軸 與 X 軸的 G 值資料。

本計畫之 MCU 與 NB-IoT 通訊係藉由 nRF9160(約 2000 新台幣)實現。其中，SDK 是使用 nRF Connect SDK 而使用 BSD Socket 來撰寫網路通訊程式。Nordic Semiconductor nRF9160 開發套件(DK)是單板硬件開發平台，為基於 nRF9160-SiP（系統級封裝）的應用軟體評

估和開發提供了所有必要的工具。它支持 LTE 標準，M1 和 NB-IoT，並且在全球範圍內相容。開發套件包括 LTE 天線，可支持 690-960MHz 和 1710-2200MHz 的頻段。它具有內置 GPS 與 nRF9160 專用 GPS 天線，可以與 Bluetooth 5，Bluetooth Mesh 和 IEEE 802.15.4 協議（例如 Thread 或 Zigbee®）一起使用 2.4GHz 天線。nRF52840 SoC（晶片上系統）集成為板控制器，可用於例如構建 Bluetooth® Low Energy 網關。開發人員可以通過插頭連接器取得所有 I/O 引腳和模塊接口，包括 Arduino UNO Rev3 接口。目前通行的 SEGGER J-Link OB 可用於除錯和編輯程式。DK 同時具有 4FF SIM 卡插槽和 MFF2 SIM 卡腳位。來自 iBasis 的內建 SIM 卡具有 LTE-M 的 10MB 數據，有助於啟動開發。此外，nRF9160-DK 具有四個 LED，兩個按鈕和兩個開關，開發者可以對其進行編程。此外，Nordic 還提供相容的開發工具，包括 nRF Connect SDK（軟件開發套件）。這個可擴展的框架允許在高度受限的情況下開發非常小的應用程序，並可以為高級應用程序編寫功能強大且功能豐富的軟件。nRF Connect for Cloud 是基於雲的 IoT 平台，用於開發，測試和評估移動物聯網(cellular IoT)和低功耗藍牙設備。LTE 鏈接監控器使用 AT 命令來監控調製解調器/鏈接狀態和有關網絡的信息。

在資料編碼方面，為因應計畫需求，本計畫擬定傳送的資料量為每 25 分鐘傳送 4096 筆原始 G 值資料，因此原始資料量為 $20\text{bit} \times 3 \text{ 軸} \times 4096 \text{ 筆} / 8 = 30720 \text{ Bytes}$ 。因為 NB-IoT 有資料傳輸量額度的問題（目前跟遠傳租用的價格為約 60 元/月），因此本計畫採用差值編碼法克服此項問題：因為當 G-Sensor 晃動不大時，G 值變化也不會太大，因此增加 2 個 bit 來記錄差值的記錄位元數，如 00: 8bits；01:12bits；

10: 16bits；11:20bits。本計畫實測結果壓縮率達 50%以上。

欲藉由無線通訊方式回傳資料我們將會使用網路傳輸協定的技術來執行此計畫。網路傳輸的協定現今有不少的技術，大體上以 DoD 模型將分成四項，以下內容參考李忠憲 (2003)的文章：

1.鏈結層：鏈結層的機制通常由網路卡的驅動程式來提供，鏈結層可識別數據來源與傳輸目的地，並負責依照適當的通訊協定來分割、組合訊框（frame），以便有效的管理資料傳輸的進行。

2.網路層：主要功能是建立主機對主機的連線，是以 IP 來識別傳輸來源與傳輸目的地，讓封包（packet）能在不同的網路之間透過路由來進行傳遞。

3.傳送層：傳送層的主要功能是確保電腦資料正確的傳送到目的地，提供端到端的通訊服務。

4.應用層：主要是提供一些網路應用程式所需的通訊協定，客戶端必須傳送要求或命令給伺服器端，伺服器端則必須傳送回應或運算結果給客戶端，兩端要能溝通必須有事先定義好的通訊協定，來解讀雙方所送出的訊息。

以上的四種網路通訊協定，其中我們是要將 NB-IoT 模組的資料傳回主機，所以第 3 種的傳送層網路協定方式是我們本計畫可使用的方式。而網路協定方式的傳送層最具代表性的協定技術就是 TCP(Transmission Control Protocol)、UDP(User Datagram Protocol)兩種。雖然 UDP 雖然資料傳輸量大，也比較迅速，但是因為 TCP 的握手程序，所以資料傳輸的可靠與穩定性就提升，並且如果在資料無法送至接收端，也會有所回應，可以確認資料是否真的收到。因為可靠度與穩定度，且沒有相當要求資料的傳輸速度，以及沒有相當大的資

料量要傳送，所以我們將使用 TCP 的無線協定的方式架設通訊協定，可透過序列確認以及封包重送機制，提供了可靠性和連接導向的服務。吳建德 (2010)的研究提到 TCP 也為目前最常使用的通訊協定，而 TCP 提供的功能包括區段分割、連接導向的服務、可靠性的服務、應用程式間的流量控制和壅塞控制服務。

TCP 的通訊協定架設有兩個很重要的機制就是客戶端(Client)與服務端(Server)，客戶端會將資料傳送至服務端讓服務端接收資料，服務端就是我們希望回傳的目的地的主機，客戶端就是將資料傳出去的模組。而服務端的主機要是穩定且固定的網路位址(IP)，如果是連 Wi-Fi 的話將會使連到的 IP 不固定，傳送資料會有所困難，所以要用主機連接有線網路。本次計畫伺服器(Server)通訊方面，採用 TCP 為通訊介面、Server IP: 13.67.95.104, Port: 3366

通訊格式如下



其中 Header 為量測的資訊、Encode Map 為每筆資料的 2bit 對映表、Encode Data 為差值編碼的資料。

MySQL 是一個關係型資料庫管理系統，由瑞典 MySQL AB 公司開發，目前屬於 Oracle 旗下產品。MySQL 是最流行的關係型資料庫管理系統之一，在 WEB 應用方面，MySQL 是最好的 RDBMS (Relational Database Management System，關係資料庫管理系統) 應用軟體。MySQL 是一種關係資料庫管理系統，關係資料庫將資料儲存在不同的表中，而不是將所有資料放在一個大倉庫內，這樣就增加了速度並提高了靈活性。MySQL 所使用的 SQL 語言是用於訪問資料庫的最常用標準化語言。MySQL 軟體採用了雙授權政策，分為社群版和

商業版，由於其體積小、速度快、總體擁有成本低，尤其是開放原始碼這一特點，一般中小型網站的開發都選擇 MySQL 作為網站資料庫。由於其社群版的效能卓越，MySQL 可搭配 PHP 和 Apache 可組成良好的開發環境。本計畫以 MySQL 建立資料庫，資料表的內容如下：

ID: Index

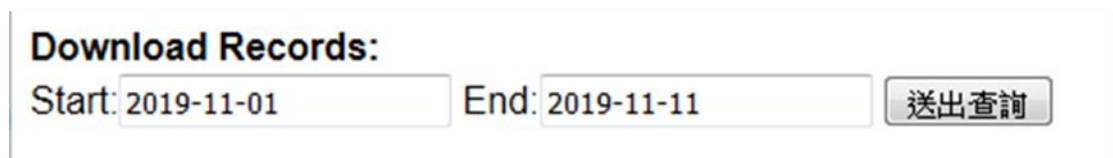
TIME: DATETIME

IMEI: CHAR(16)

DATA: BLOB

伺服器下載(URL: <http://13.67.95.104:3366/getrec.php>)設計如下：

下載介面顯示 IMEI 的清單，點選後顯示回報的狀態，在最上方可輸入日期範圍下載資料。例如若欲下載 11 月 1 日~11 月 10 日間的資料，可操作如下。



Download Records:

Start: 2019-11-01 End: 2019-11-11

在現場監控中(示意圖如圖 2-25)，配備有 IOT（物聯網）技術的加速度計安裝在大壩結構體上。這些設備可以發送加速度訊息，由於感應器可以感測重力的存在，因此可以根據加速度訊息將其轉換為壩體結構的傾斜角度訊息，從加速度到傾斜角的轉換是通過執行以下公式來完成的，所計算出的傾斜角是引起沿水流方向位移的傾斜角，圖 2-26 顯示了兩個感應器從 11 月 4 日到 10 日所量測到的傾斜角度。

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{acc}{g}\right)$$

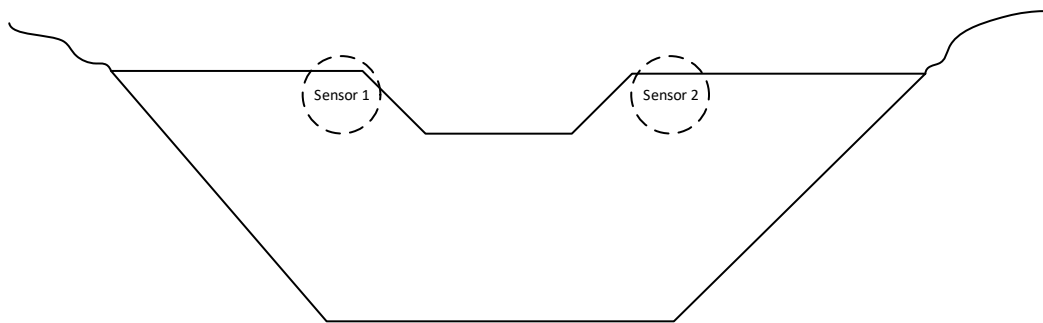


圖 2-25 NB-IoT 感應器裝置示意圖

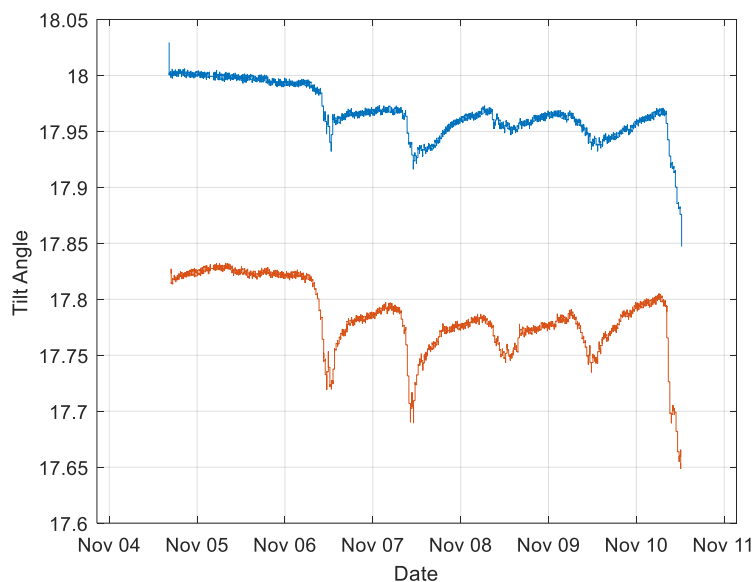


圖 2-26 由加速度轉換之傾斜角

第五節 基於位移重建之防砂壩系統識別分析(容量分析)

此工作項目可再細分為系統識別、壩體的穩定分析(傾倒、滑動與內部應力之安全檢討)、有限元素建模與分析與最佳化演算(如 SOS)等，以下分別說明。

(一) 系統識別分析

系統識別為利用壩體的輸入和輸出信號的測量來建立壩體動態系統的數學模型的方法。系統識別過程中需要在時域或頻域測量系統

的輸入和輸出信號、確認壩體數值模型、以及以估計方法來推估數值模型中需調整參數值，最後並評估所建立的數值模型是否滿足計畫的應用需求。基於上述，本計畫系統識別所需的輸入為微震訊號(ambient vibration)或藉由儀器輸入訊號；所需的輸出訊號為 NB-IoT 智慧感測器或高分辨率的速度計(東京測振生產)所重建位移；高壩實務設計上並未考慮其塑性容量，故以彈線性模型模擬；估計參數的方法採用生物共生演算法(Stochastic Optimization of Stimuli, SOS)。本計畫系統識別的目的為取得壩體的模態形狀、所對應的頻率、壩體的阻尼比，勁度和質量。識別時所需的數據量測(輸出)通常是以一振動單元為量測目標，因此，本計畫將於目標壩體上佈置數個感應器(如加速度計或速度計)，量測壩體現地的震動資料，藉由量測的加速度資料，重建位移並取得的自由振動反應(Free Vibration)。

公共設施如大型防砂設施、橋梁或大壩結構等重要結構，定期監測可提供設施安全的重要指標。因此，近來各學者已引入各種技術來識別動態結構行為如模態形狀，阻尼比和頻率。大多數方法用於測量系統的感應輸入和結構的響應。通過輸入和輸出信息，設施系統的數學模式得以建立，並作為描述設施動態特性的模型。設施的頻率(振動週期)將成為健康狀況的主要指標，頻率值的變化將表明設施勁度的惡化，是一個很重要的指標。Kim 等人(2012)利用自回歸滑動平均 (ARMA) 開發了一種損傷檢測模型，用於識別橋梁的模態參數。Michael Fraser 等人(2010)開發了一種傳感器網絡，利用子空間識別技術監測橋梁結構的頻率。Loh 等人(1996)利用自回歸模型 (AR) 識別了 Fetsui 大壩結構的固有頻率和阻尼比，其結論為環境振動系統識別可以給出相當準確的頻率測量結果。Huang 等人(1999)使用

Ibrahim 時域技術進行系統識別，在這種方法中，橋梁設置為卡車在橋上引起的自由振動。該報告嘗試使用隨機子空間識別(Stochastic Subspace Identification, SSI)來識別設施系統之質量、阻尼與勁度。在上述研究人員研發的各種系統識別技術中，SSI 提供了簡單的程序，整個程序只需要輸出環境振動測量數據。在本報告中，由於壩體結構之地表面不易取得輸入訊號，因此量測時，僅在壩體頂部測量環境振動，如圖 2-27 所示。在對壩體結構進行測量之前，以下先藉由一個數值範例，此範例假設壩體為一個六個自由度(DOF)的系統，其目的在於測試 SSI 在預測不同噪聲強度下系統動態特性方面是否具有優越性。系統識別部分將由三個部分組成，第一部分是將用於系統識別的實驗和方法的介紹。第二部分將提供有關 SSI 的更多細節。第三部分分別描述了數值例子和真實的壩體結構分析的情況。



圖 2-27 烏來忠治高壩量測設定

1. 系統識別的實驗和方法的介紹

在工程中，可以使用運動方程來表示由外部載荷激發的結構反

應，可以以矩陣形式寫入，如等式(4)所示。

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -ML\ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

其中 M ， C 和 K 是結構系統的質量，阻尼和勁度矩陣； L 矩陣是用於確定乾擾位置的影響向量； $u(t)$ 和 $\ddot{u}_g(t)$ 為結構的相對位移與地面運動。藉由定義狀態 $x = [u(t)^T \dot{u}(t)^T]^T$ ，式(4)中的運動方程可以轉換為式(5)中的狀態空間模型。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + BF(t) \\ y(t) &= Cx(t) + DF(t) \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中， A 和 B 矩陣分別是系統矩陣和外力位置矩陣。而輸出矩陣 y 包含相對位移，相對速度和絕對加速度。矩陣 A ， B ， C 和 D 在定義於式(6)和(7)中，其中 E 是外部負載矩陣的位置， $F(t)$ 是外部負載。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (7)$$

結構分析的目的是找到在式(5)中找到 x 。但在系統識別中，已知參數是 y 和 x ，或已知參數僅為 y 。系統識別中的問題是找到 A ， B ， C 和 D 。

系統識別中最經典的方法是從測量數據中識別系統的輸入和輸出，然後通過求解最小二乘問題得到狀態空間模型。透過這種方法，可以獲得 A ， B ， C 和 D 的系統矩陣，但該矩陣內的值並不存在物理意義，亦即所獲得的 A ， B ， C 和 D 的系統矩陣並不具式(6)與(7)之形

式(Gu and Ding, 2013)。

然而，最小二乘法不足以預測系統響應，因為測量的信號總是包含雜訊。為了處理雜訊，許多學者已經提出了各種方法，雖然如此，大多數方法，如卡爾曼濾波器(Kalman filter)和 H-infinity 濾波器方法需要良好的建模和良好的初始條件，多數方法都將系統識別視為黑盒而不具有物理意義(Sage and Melsa, 1971)。

另一類方法被稱為頻域分解(Zhang and Anderson, 2000)，近來十分廣泛，因為僅需要輸出環境振動作為該方法的輸入。該方法的概念是通過構造所測量的結構的環境輸出的 PSD(功率譜密度)，然後使用 SVD(單值分解)將 PSD 信號分成幾個信號。每個分解的 PSD 信號將被選擇其峰值以表示其固有頻率，並且阻尼比也可以從分解的信號中預測。該方法的最終結果是每種結構模式的自然頻率和阻尼比。

一些研究人員避免了複雜的公式推導，結合最佳化演算法於系統辨識理論(Xue 等人, 2009)，與其他方法不同，該方法可以給出具有物理意義的系統結果。最佳化的目標為最小化測量輸出和分析模型的預測輸出之間的誤差。在這種情況下，結構的質量，阻尼和勁度將作為最佳化的變數。但是，最佳化的方法仍然需要系統的輸入和輸出。

2. 隨機子空間識別 (Stochastic Subspace Identification)

由於輸入未知，Van Overschee 等人(1996)制定了僅輸出狀態空間模型，如公式(8)和(9)所示。

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + v_1(t) \\ y(t) &= Dx(t) + v_2(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$Hankel = \frac{Y_{past}}{Y_{future}} = \begin{pmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{i-2} & y_{i-1} & \cdots & y_{i+j-3} \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中 v_1 和 v_2 分別是傳感器測量的干擾和噪聲。一旦確定了系統矩陣 A ，就可以獲得結構的模態性質。為確定 A 矩陣，Van Overschee 等人(1996)提出的幾個程序如本章所述。第一步是構建一個由過去和未來輸出組成的 Hankel 矩陣，如公式(9)所示。

下一步是確定投影矩陣。基於過去矩陣而建立的未來投影可以表示為公式(10)中的矩陣。該 O 矩陣被稱為卡爾曼狀態，可以以公式(11)的形式表示。使用 SVD(奇異值分解)， O 矩陣可以被分解為若干個如公式(12)中所示的矩陣。使用公式(12)中的分解矩陣，可以獲得結構和觀察矩陣 D 的系統矩陣，如公式(13)所示。

$$O = Y_f Y_p^T (Y_p Y_p^T)^{-1} Y_p \quad (10)$$

$$O = \Gamma X_0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} O &= USV^T \\ \Gamma &= US^{0.5} \\ X_0 &= S^{0.5}V^T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{A} &= \Gamma^{-1}\Gamma \\ \hat{C} &= \Gamma \end{aligned} \quad (13)$$

一旦獲得預測系統矩陣，就可以使用公式(14)中給出的公式計算壩體結構的頻率和阻尼比，其中輸入來自矩陣 A 的特徵值，亦可以

使用公式(15)計算每個模態的形狀，模態的計算係使用 C 矩陣乘以每個模態的矩陣 A(T)的特徵向量。

$$\begin{aligned}\omega_i &= |\ln(\lambda_i) / \Delta t| \\ \zeta_i &= -\cos\{\angle[\ln(\lambda_i)]\}\end{aligned}\quad (14)$$

$$shapen_i = C * T_i \quad (15)$$

在將上述演算法應用到烏來忠治的大型防砂壩之前，演算法的性

能首先以 6-DOF 結構來檢驗，如圖 2-28 所示。假設傳感器附著在每個結構的樓層以測量來自的

結構的絕對加速度響應。整個結構參數列於

表 2-20 中，阻尼矩陣採用萊力阻尼矩陣(Rayleigh damping matrix)(2012)，結構的數學模型遵循公式(4)-(7)中所示的狀態空間公式。隨機地面加速度歷時其平均值為零且其標準偏差為 1.1572，結構的輸出響應將加上不同強度的白噪聲。輸出響應噪聲的強度將由 6 樓之前和之後的平均絕對值之比表示，在本報告中將其稱為噪聲比 (NR)。

表 2-21 顯示了每種模態的預測頻率和精確頻率，而表 2-22 顯示了每種模態的預測阻尼比和精確阻尼比。從表 2-21 可以看出，即使噪聲比增加到 3.0，SSI 仍然對前三種模態有良好的效果。對於阻尼比，在 NR 小於 2.1 的條件下，前三種模態仍然具有相對低的誤差。

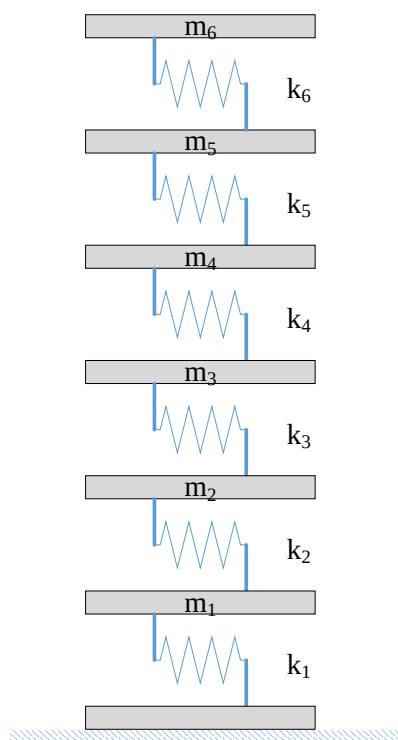


圖 2-28 6 個自由度之數值範例

表 2-20 數值模型中的隨機變數統計特性

隨機變數	平均值	單位
$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$	5897	kg
k_1, k_2	33732	kN/m
k_3	29093	kN/m
k_4	28621	kN/m
k_5	24954	kN/m
k_6	19059	kN/m
ζ	5	%

表 2-21 各種噪聲比下精確和預測頻率的比較

模態	預測頻率 (Hz, 括弧數值表示為誤差百分比)				
	精確頻率 (Hz)	NR = 1.0	NR = 1.4	NR = 2.1	NR = 3.0
1	2.77	2.77 (0.0)	2.8 (1.1)	2.77 (0.0)	2.79 (0.7)
2	7.62	7.63 (0.1)	7.67 (0.7)	7.69 (0.9)	7.57 (0.7)
3	11.95	11.99 (0.3)	11.93 (0.2)	11.99 (0.3)	11.96 (0.1)
4	15.81	15.77 (0.3)	15.98 (1.1)	14.51 (8.2)	11.99 (24.2)
5	19.26	19.07 (1.0)	20.39 (5.9)	16.19 (15.9)	16.99 (11.8)
6	21.89	21.55 (1.6)	58.89 (169.0)	21.13 (3.5)	29.55 (35.0)

表 2-22 各種噪聲比下精確和預測阻尼的比較

模態	預測頻率 (% , 括弧數值表示為誤差百分比)				
	精確阻尼 (%)	NR = 1.0	NR = 1.4	NR = 2.1	NR = 3.0
1	5	4.57 (8.6)	5.76 (15.2)	4.64 (7.2)	8.6 (72.0)
2	4.06	3.54 (12.8)	4.28 (5.4)	3.88 (4.4)	4.49 (10.6)
3	5	4.41 (11.8)	4.76 (4.8)	4.68 (6.4)	6.28 (25.6)
4	6.08	5.67 (6.7)	5.62 (7.6)	12.81 (110.7)	18.36 (202.0)
5	7.12	9.01 (26.5)	8.1 (13.8)	8.67 (21.8)	13.21 (85.5)
6	7.95	7.85 (1.3)	0.51 (93.6)	11.21 (41.0)	21.74 (173.5)

圖 2-29 至圖 2-32 顯示了精確響應與各種噪聲響應之間響應關係，圖中所示包含了第 4、5 和頂層樓的絕對加速度的歷時響應。圖 2-33 至圖 2-36 示出了針對各種噪聲比的結構的模態形狀(正規畫至 1)。在模態形狀預測中，隨著噪聲增加，較高模態的模態形狀預測精度降低。然而，即使 NR = 3.0，第一和第二模態形狀仍然具有相當好的精度。由本節的測試結果顯示，對於噪聲比低於 3.0 的噪聲，預測前三種模式（包括頻率，阻尼比和模態形狀）的精度仍處於可接受的誤差範圍。

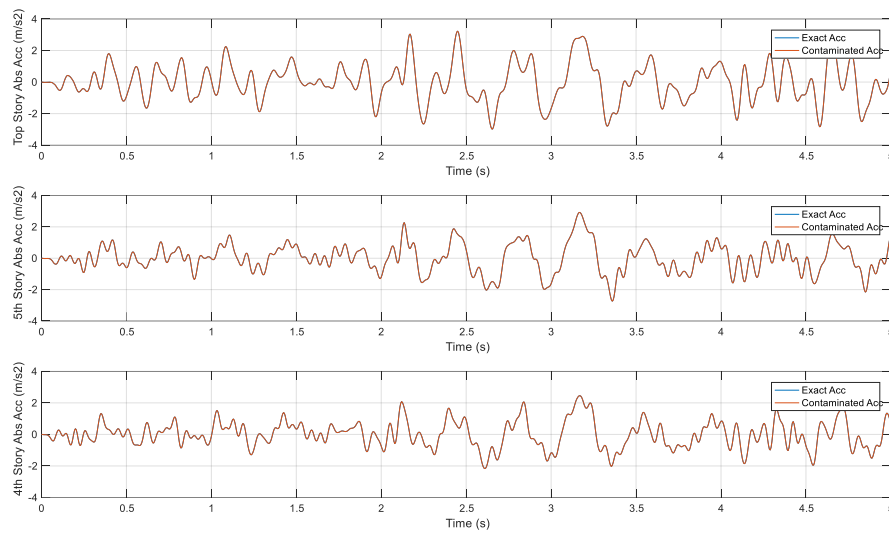


圖 2-29 絕對加速度的歷時響應(精確值與 NR=1)

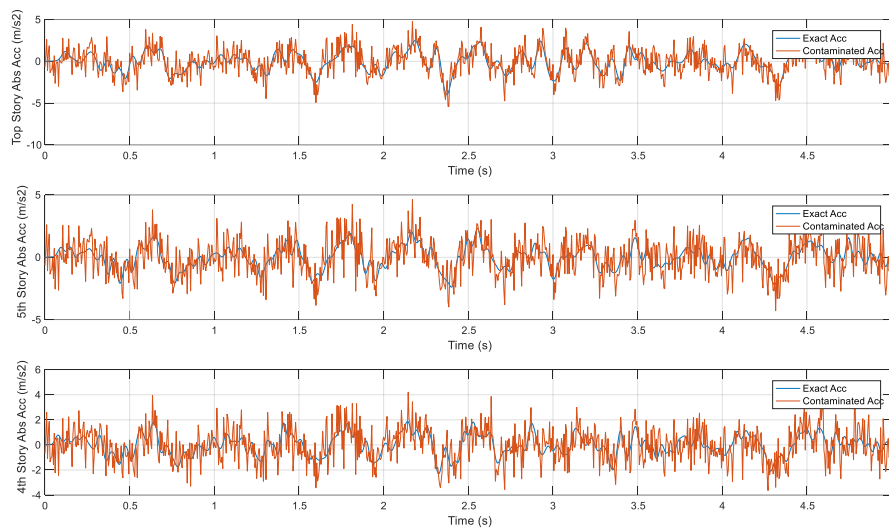


圖 2-30 絕對加速度的歷時響應(精確值與 NR=1.4)

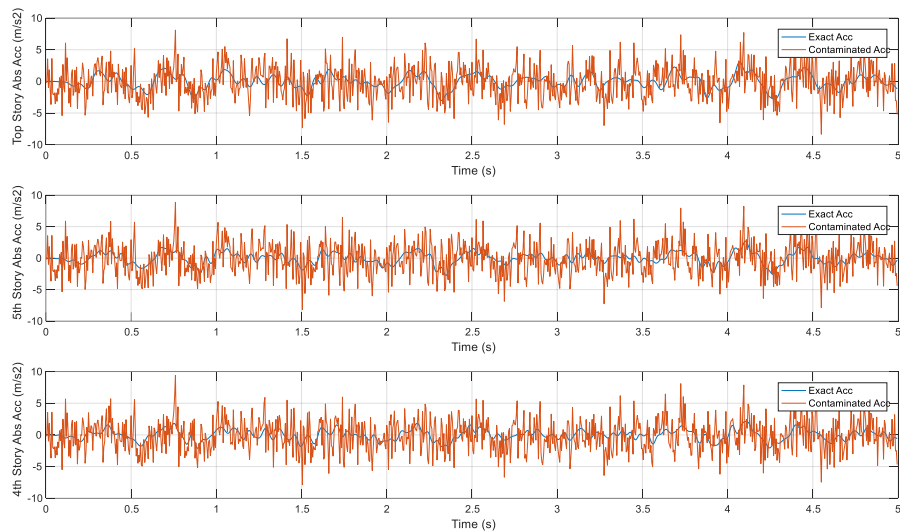


圖 2-31 絕對加速度的歷時響應(精確值與 NR=2.1)

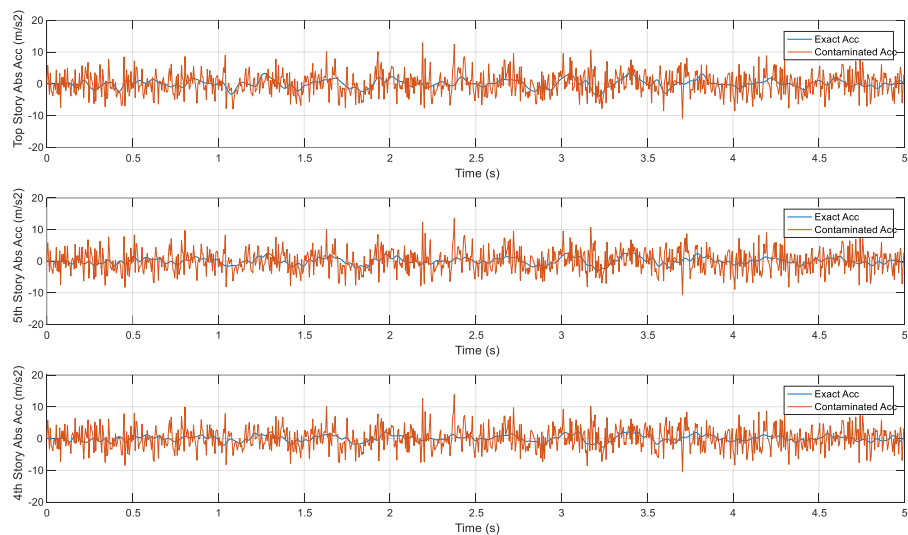


圖 2-32 絕對加速度的歷時響應(精確值與 NR=3.0)

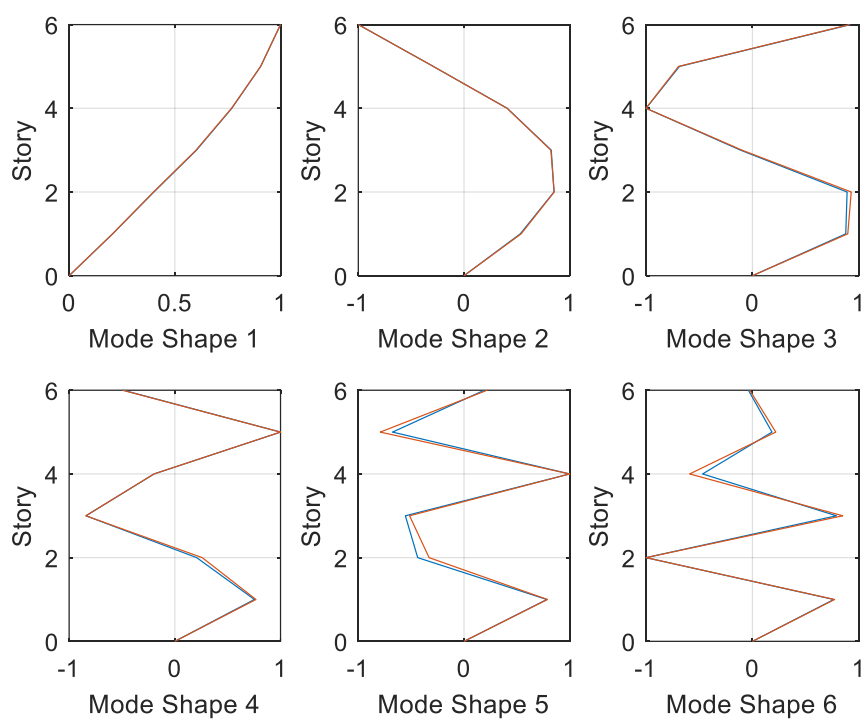


圖 2-33 精確(藍)與預測(紅)模態之比較(NR=1.0)

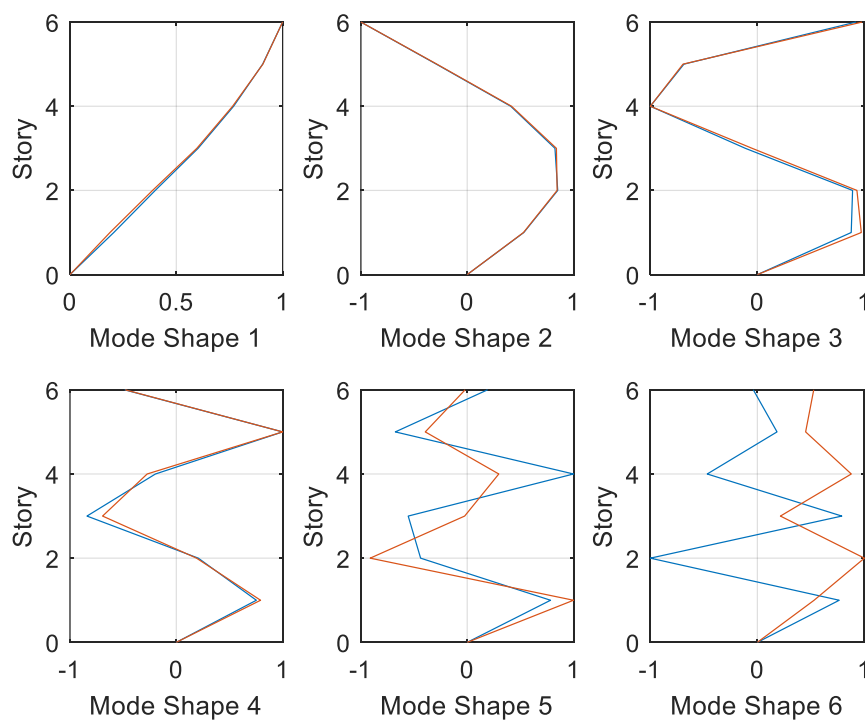


圖 2-34 精確(藍)與預測(紅)模態之比較(NR=1.4)

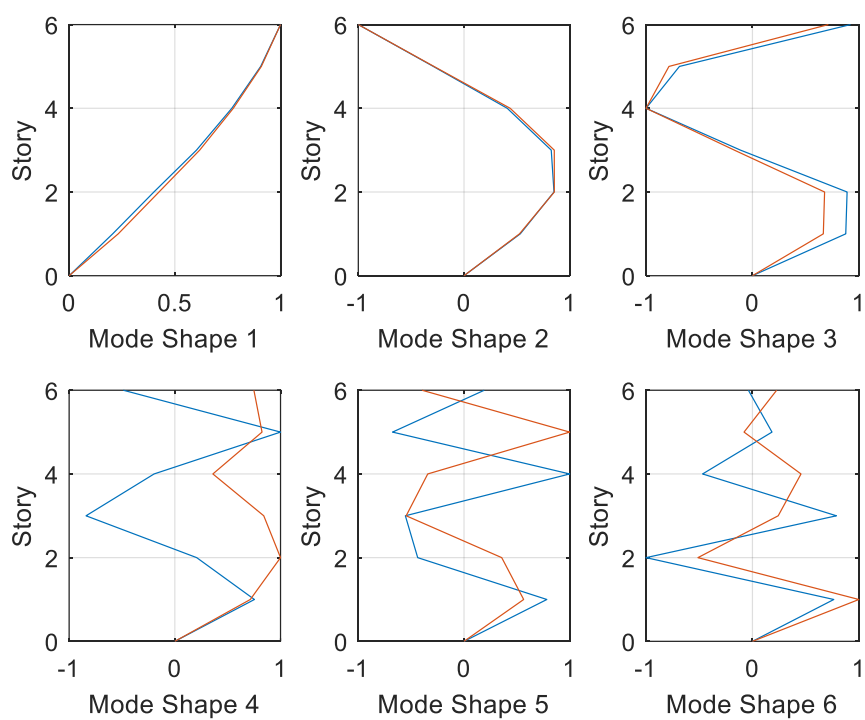


圖 2-35 精確(藍)與預測(紅)模態之比較(NR=2.1)

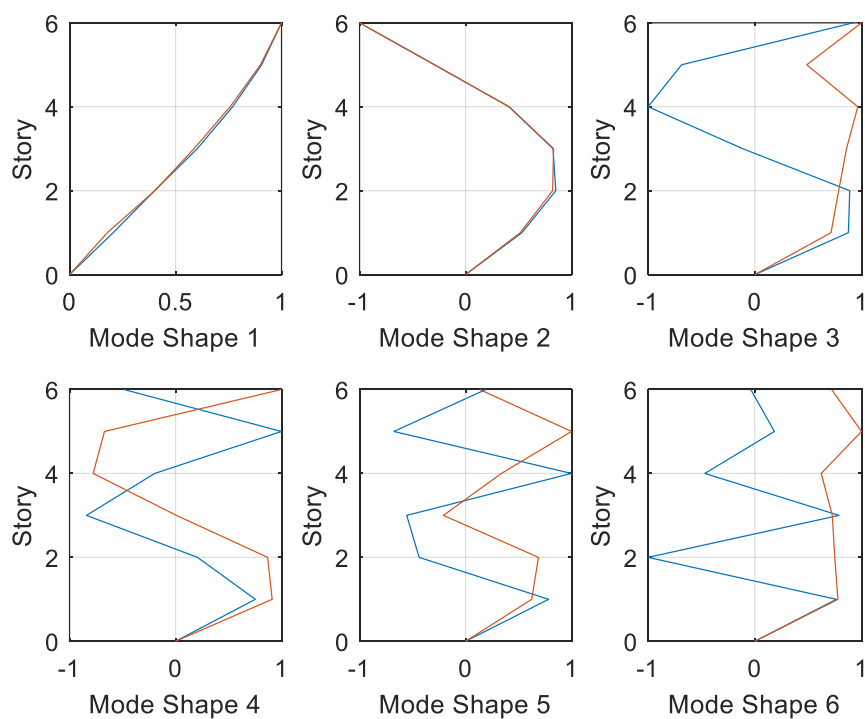


圖 2-36 精確(藍)與預測(紅)模態之比較(NR=3.0)

3. SSI 應用於烏來忠治高壩之分析結果

根據以上所建立的演算法則，應用於烏來忠治的高壩。試驗時，速度傳感器(感測器)係安裝在壩體結構的頂部。因為僅安裝一個傳感器，因此根據所建立的演算法，將無法產生模態的形狀，因此，以下分析將使用 SSI 預測壩體的頻率和阻尼比。因為 MATLAB 於 SSI 過程運算中，資料的儲存是有受限的，因此系統識別時分析時，數據的長度為 500s。來自傳感器的測量數據被分為三個部分，分別為 250-750s，750-1250s 和 1250-1750s。以下將針對將對這三個部分執行 SSI，並將比較結果。

圖 2-37 和表 2-23 所示為第一段 SSI 的結果，在給定的 500s 資料下進行 SSI 算法，其結果為壩體的的第一振態為 12.27Hz，壩體的阻尼比為 10.50%。圖 2-38 和表 2-24 顯示了第二段數據的結果，而圖 2-39 和表 2-25 則為第三段數據的結果。根據以上分析的結果，所有三個時段都具有從 12.14 到 12.27 的第一振態頻率的預測，它們彼此非常接近，阻尼比範圍則從 9.89%到 12.59%。

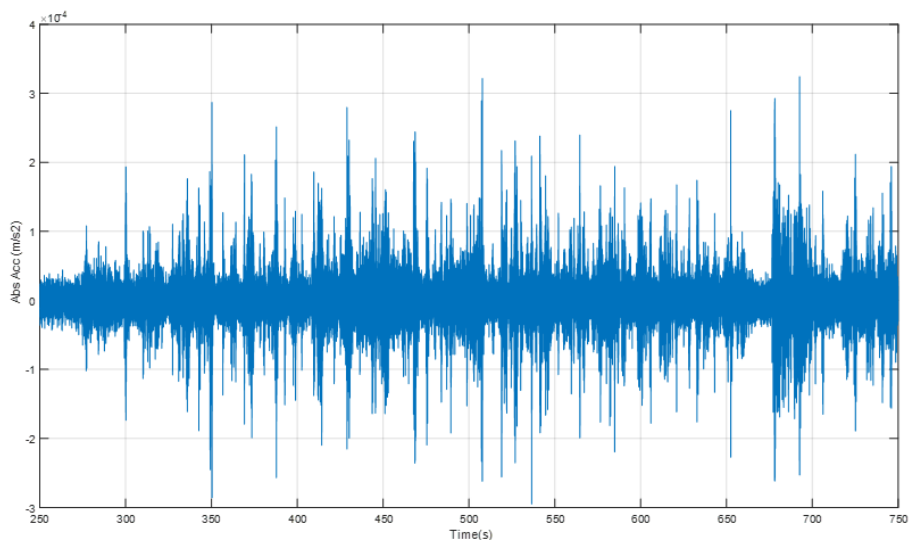


圖 2-37 第一個時段之加速度歷時

表 2-23 第一個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比

第一振態頻率 (Hz)	12.27
阻尼比 (%)	10.50

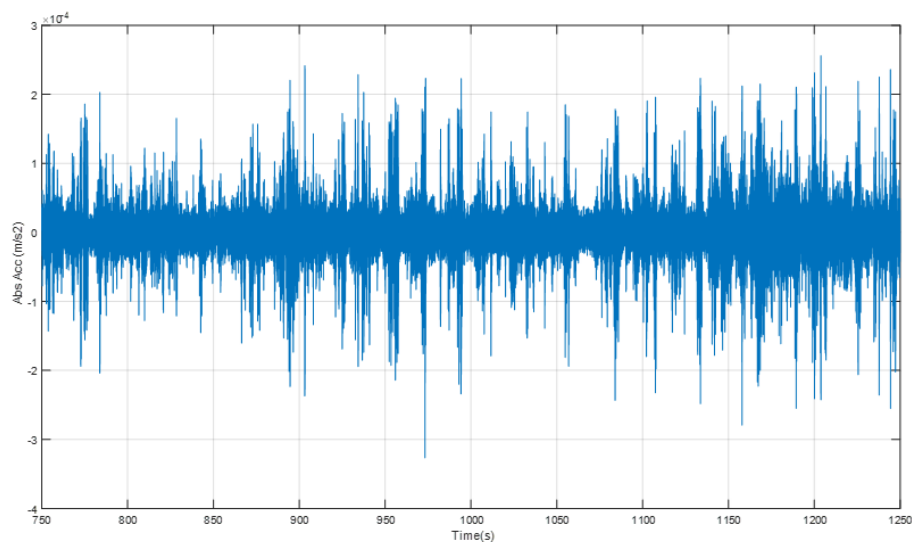


圖 2-38 第二個時段之加速度歷時

表 2-24 第二個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比

第一振態頻率 (Hz)	12.24
阻尼比 (%)	9.89

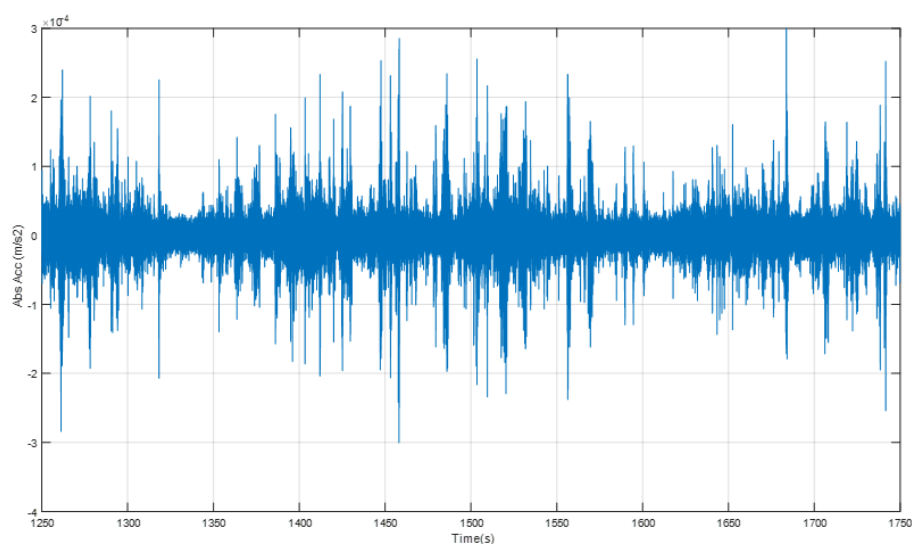


圖 2-39 第三個時段之加速度歷時

表 2-25 第三個時段資料之壩體第一振態頻率與阻尼比

第一振態頻率 (Hz)	12.14
阻尼比 (%)	12.59

SSI 提供簡單的程序，分析時僅需要輸出環境振動即可預測壩體的頻率和阻尼比。在高噪聲比條件下，該方法仍然可以給出相當準確的第一至第三模態的基本振動頻率，阻尼比和模態形狀。從 SSI 程序可以看出，壩體結構的基頻(在水流方向)為 12.14Hz(平均值)，阻尼比約為 11%。

(二) 壩體的穩定分析

在評估位移是否適合作為安全指標之前，首先應對既有的壩體安全分析流程進行了解。本計畫團隊目前已與烏來忠治防砂壩的設計公司(豐華)聯繫並取的壩體的穩定分析相關資料，整理如下(以下以 5 號防砂設施，即前文提及之高壩為例)。

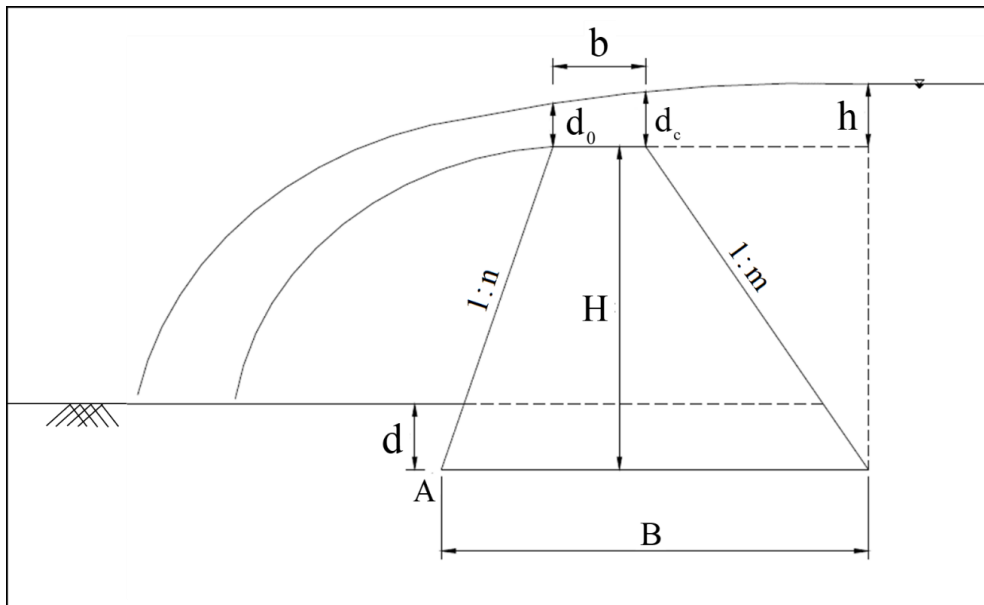


圖 2-40 5 號壩之示意圖

a. 基本數據

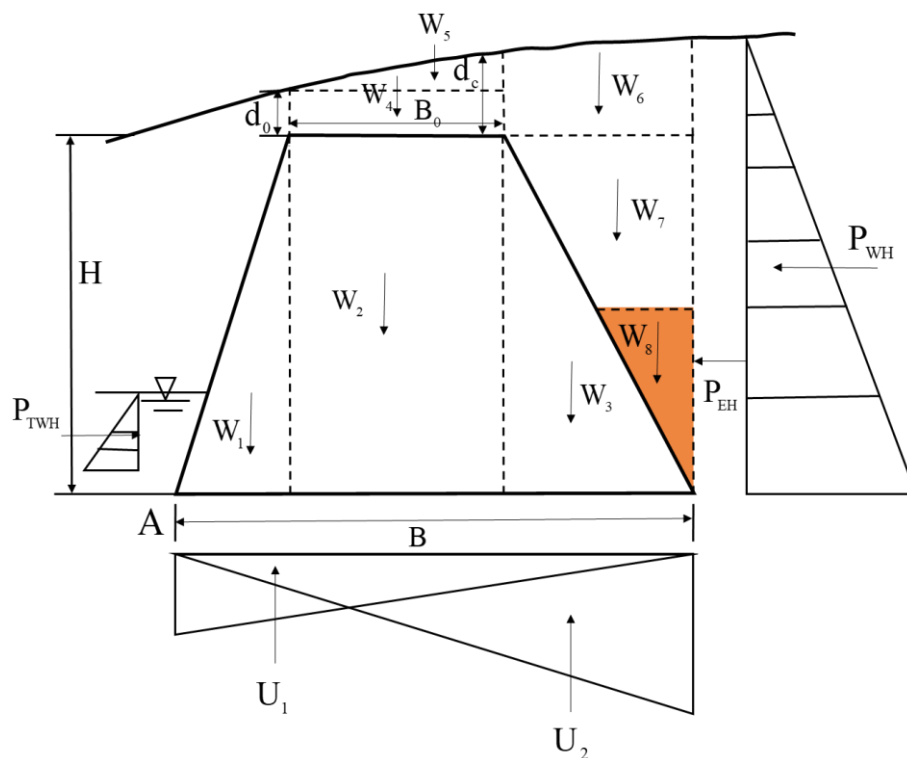
1.淨水之單位重	1.00 $\frac{t}{m^3}$
2.濁水之單位重	1.10 $\frac{t}{m^3}$

3.混凝土單位重	2.30 t/m^3
4.乾砂單位重	1.69 t/m^3
5.孔隙率	35.00 %
6.乾砂在水中單位重	1.04 t/m^3
7.砂礫飽和水分時單位重	2.04 t/m^3
8.塊石混凝土單位重	2.30 t/m^3
9.塊石:混凝土	0:1
10.浮力係數	0.45
11.壩基摩擦係數	0.65
12.淤積砂礫內摩擦角	30.00 度
13.水平地震加速度	0.115 g
14.混凝土容許抗壓強度	210.00 kg/cm^2
15.基礎容許支承力	50.00 t/m^2
16.浮力係數	0.45
17.淤砂坡度	7.41%
b.壩體設計條件	
1.壩體全高 H	12.00 m
2.壩頂寬度 b	2.50 m
3.壩底寬度 B	12.70 m
4 基礎埋置深度 d	2.00 m
5.壩體上游坡面 V:H=1:m	m=0.55
6.壩體下游坡面 V:H=1:n	n=0.3

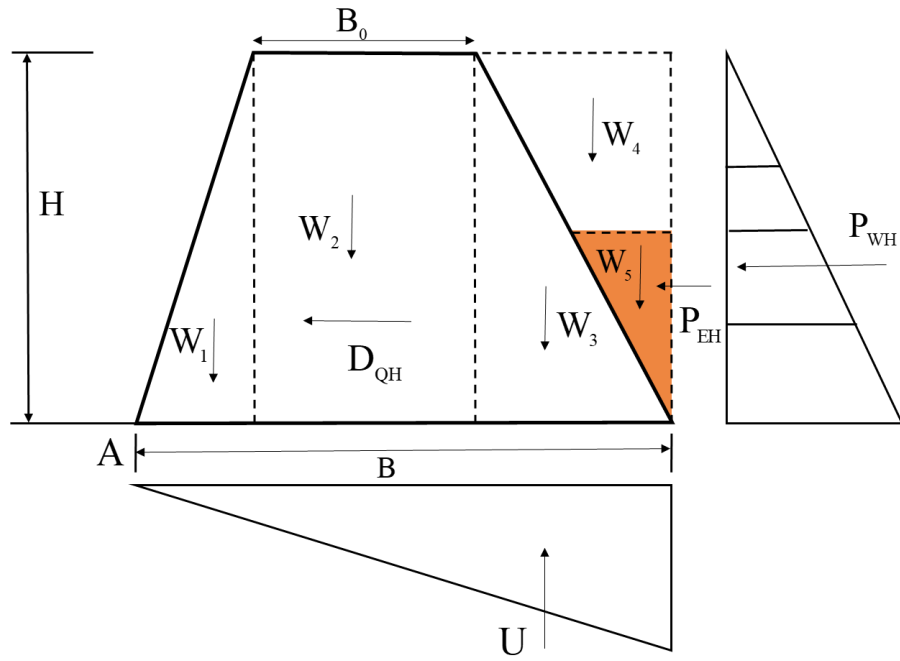
c. 溢流口設計條件

- | | |
|-----------------|-----------|
| 1. 設計流量 Q_d | 57.81 cms |
| 2. 溢流口底寬 B_0 | 8.00 m |
| 3. 溢流水深 h | 2.38 m |
| 4. 溢流臨界水深 d_c | 1.69 m |
| 5. 溢流出口水深 d_0 | 1.21 m |
| 6. 集水區面積 | 51.70 m |
| 7. 邊坡比 = 1V: | 0.5 |

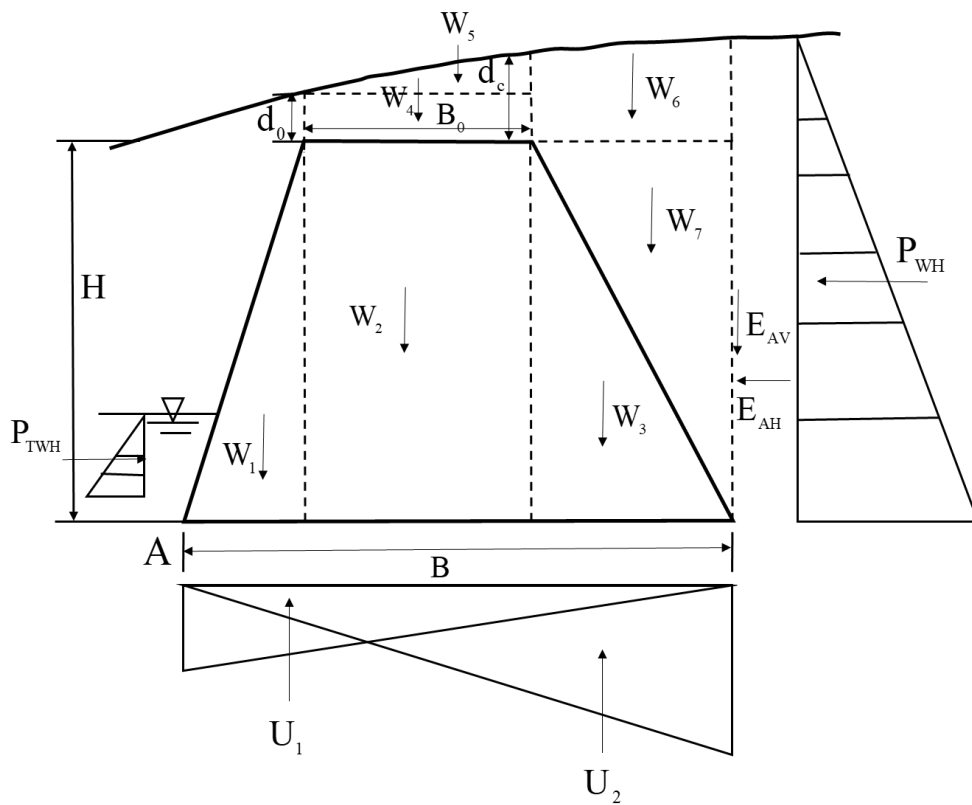
以下分別探討壩體在 4 種情況下的穩定分析，4 種情況如：



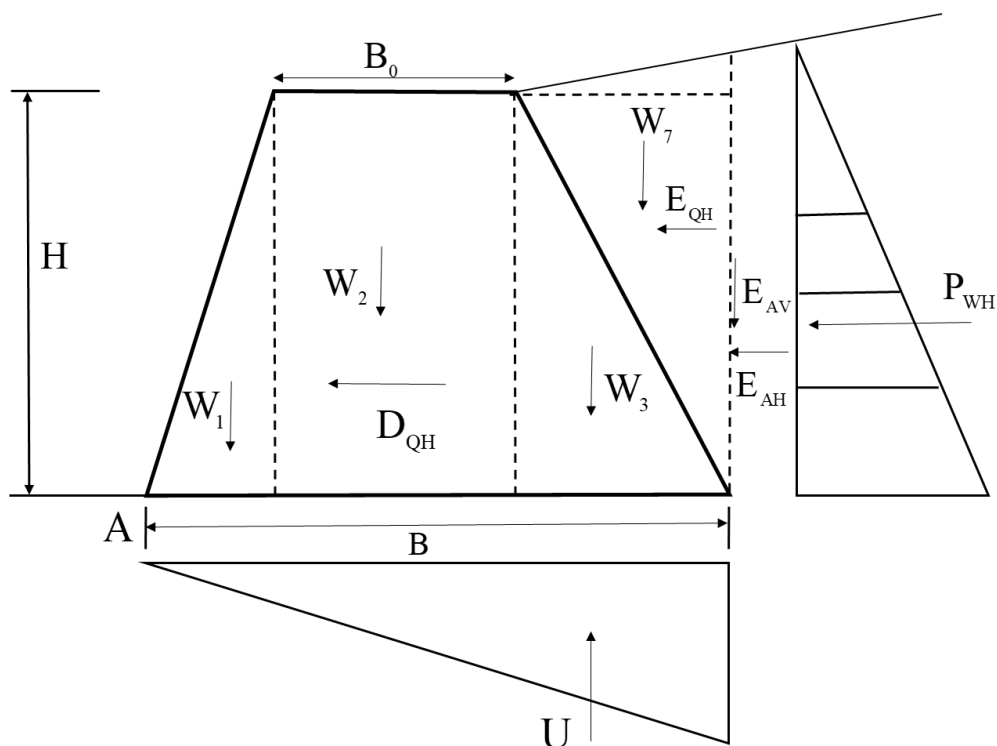
Case 1：未淤滿發生最大流量時



Case 2：未淤滿、普通流量、發生地震之情形



Case 3：已淤滿發生最大流量時



Case 4：已淤滿、普通流量、發生地震之情形

圖 2-41 穩定分析的 4 種情況

穩定分析的內容包括檢算壩體傾覆、壩體滑動、壩底垂直應力，上述 4 種狀況的計算過程如下所述。

Case 1：未淤滿發生最大流量時

作用力			力臂	力矩(對 A 點)	
力	垂直力	水平力		正	負
W_1	49.68		2.40	119.23	
W_2	69.00		4.85	334.65	
W_3	91.08		8.30	755.96	
W_4	3.33		4.85	16.15	
W_5	0.66		5.27	3.48	
W_6	14.77		9.40	138.84	
W_7	43.56		10.50	457.38	
W_8	10.30		11.60	119.48	

P_{TWH}		-4.79	2.98	14.27	
P_{WH}		110.62	4.00		442.48
P_{EH}		6.24	4.00		24.96
U_1	-14.14		4.23		59.81
U_2	-41.09		8.47		348.03
合計	227.15	112.07		1959.44	875.28

(1) 壩體傾覆檢算

設合力作用點至壩址 A 點之距離為 X

$X = 4.77 \text{ m}$ 判別 $(2/3)B > X > (1/3)B$ **OK**

傾覆安全係數 $FS = 2.24$

(2) 壩體滑動檢算

壩底之摩擦阻力 $F = 147.65$

滑動安全係數 $FS = 1.32$ 滑動安全係數大於 1.1 **OK**

(3) 壩底垂直應力檢算

偏心距 $e = 1.58$

設壩趾處之垂直應力為 P_1 、壩跟(踵)處之垂直應力為 P_2 ，則

$P_1 = 31.24 \text{ t/m}^2$ 小於基礎容許支承力 **OK**

$P_2 = 4.53 \text{ t/m}^2$ 小於基礎容許支承力 **OK**

Case 2：未淤滿、普通流量、發生地震之情形

作用力	力臂	力矩(對 A 點)
-----	----	-----------

力	垂直力	水平力		正	負
W_1	49.68		2.40	119.23	
W_2	69.00		4.85	334.65	
W_3	91.08		8.30	755.96	
W_4	39.60		10.50	415.80	
W_5	10.30		11.60	119.48	
P_{WH}		72.00	4.00		288.00
P_{EH}		6.24	4.00		24.96
U	-34.29		8.47		290.44
D_{QH}		24.12	4.66		112.40
合計	225.37	102.36		1745.12	715.80

(1) 壩體傾覆檢算

設合力作用點至壩址 A 點之距離為 X

$$X = 4.57 \text{ m} \quad \text{判別 } (2/3)B > X > (1/3)B \quad \text{OK}$$

$$\text{傾覆安全係數 } FS = 2.44$$

(2) 壩體滑動檢算

$$\text{壩底之摩擦阻力 } F = 146.49$$

$$\text{滑動安全係數 } FS = 1.43 \quad \text{滑動安全係數大於 } 1.1 \quad \text{OK}$$

(3) 壩底垂直應力檢算

$$\text{偏心距 } e = 1.78$$

設壩趾處之垂直應力為 P_1 、壩跟(踵)處之垂直應力為 P_2 ，則

$$P_1 = 32.67 \text{ t/m}^2 \quad \text{小於基礎容許支承力} \quad \text{OK}$$

$$P_2 = 2.82 \text{ t/m}^2 \text{ 小於基礎容許支承力 } \text{OK}$$

Case 3：已淤滿發生最大流量時($K_A = 0.342, E_A = 29.40$)

作用力			力臂	力矩(對 A 點)	
力	垂直力	水平力		正	負
W_1	49.68		2.40	119.23	
W_2	69.00		4.85	334.65	
W_3	91.08		8.30	755.96	
W_4	3.33		4.85	16.15	
W_5	0.66		5.27	3.48	
W_6	14.77		9.40	138.84	
W_7	86.56		10.50	908.88	
E_{AV}	3.79		12.70	48.13	
E_{AH}		29.15	4.29		125.05
P_{TWH}		-4.79	2.98	14.27	
P_{WH}		124.60	4.00		498.40
U_1	-14.14		4.23		59.81
U_2	-43.54		8.47		368.78
合計	261.19	148.96		2339.59	1052.04

(1) 壩體傾覆檢算

設合力作用點至壩址 A 點之距離為 X

$$X = 4.93 \text{ m} \quad \text{判別 } (2/3)B > X > (1/3)B \quad \text{OK}$$

$$\text{傾覆安全係數 } FS = 2.22$$

(2) 壩體滑動檢算

壩底之摩擦阻力 $F = 169.77$

滑動安全係數 $FS = 1.14$ 滑動安全係數大於 1.1 **OK**

(3)壩底垂直應力檢算

偏心距 $e = 1.42$

設壩趾處之垂直應力為 P_1 、壩跟(踵)處之垂直應力為 P_2 ，則

$P_1 = 34.36 \text{ t/m}^2$ 小於基礎容許支承力 **OK**

$P_2 = 6.77 \text{ t/m}^2$ 小於基礎容許支承力 **OK**

Case 4：已淤滿、普通流量、發生地震之情形($n = 0.592$,

$P_{EH} = 29.85$)

作用力			力臂	力矩(對 A 點)	
力	垂直力	水平力		正	負
W_1	49.68		2.40	119.23	
W_2	69.00		4.85	334.65	
W_3	91.08		8.30	755.96	
W_7	86.56		10.50	908.88	
P_{WH}		82.67	4.00		330.68
E_{AV}	3.79		12.70	48.13	

E_{AH}		29.15	4.29		125.05
E_{QH}		0.70	4.29		3.00
D_{QH}		24.12	4.66		112.40
U	-34.29		8.47		290.44
合計	265.82	136.64		2166.85	861.57

(1) 壩體傾覆檢算

設合力作用點至壩址 A 點之距離為 X

$$X = 4.91 \text{ m} \quad \text{判別 } (2/3)B > X > (1/3)B \quad \text{OK}$$

$$\text{傾覆安全係數 } FS = 2.52$$

(2) 壩體滑動檢算

$$\text{壩底之摩擦阻力 } F = 172.78$$

$$\text{滑動安全係數 } FS = 1.26 \quad \text{滑動安全係數大於 } 1.1 \quad \text{OK}$$

(3) 壩底垂直應力檢算

$$\text{偏心距 } e = 1.44$$

設壩趾處之垂直應力為 P_1 、壩跟(踵)處之垂直應力為 P_2 ，則

$$P_1 = 35.17 \text{ t/m}^2 \quad \text{小於基礎容許支承力} \quad \text{OK}$$

$$P_2 = 6.69 \text{ t/m}^2 \quad \text{小於基礎容許支承力} \quad \text{OK}$$

(三) 有限元素建模與分析與與搜尋最佳系統參數

本計畫將基於竣工圖與其他資料建立有限元素分析模式進行進一步的分析，並與系統分析的過程中，利用最佳化演算推求系統參數，目前評估將利用較新的啟發式演算法如生物共生演算法 (Symbiotic Organisms Search, SOS) 推算所需參數，說明如下。

本研究對烏來水壩進行了監測與分析，基本上，分析係藉由在大壩上安裝感應器所取得之資料而實現，為了全面了解忠治 5 號壩的安全程度，本計畫使用 ABAQUS 軟件建立 FEM (有限元素模型) 進行分析。圖 2-42 顯示了 5 號壩的尺寸示意圖，表 2-26 列出了 ABAQUS 建模的剖面尺寸和土壤性質假設。

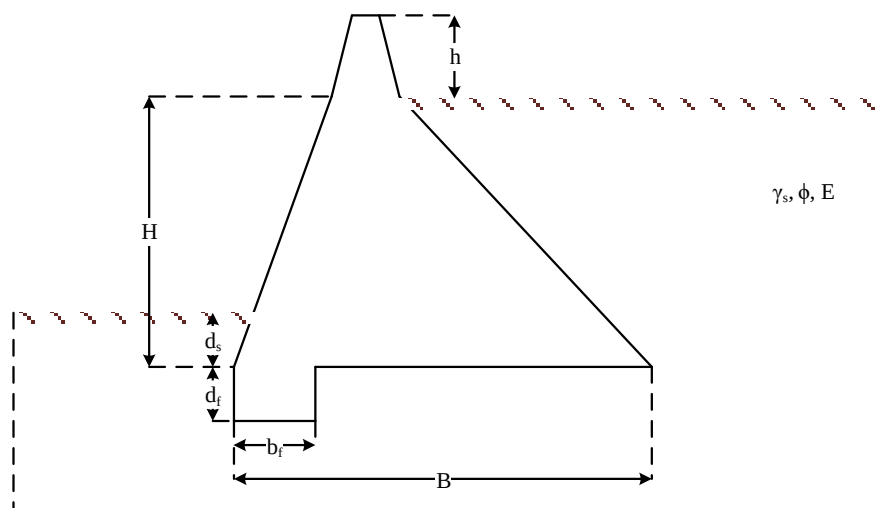


圖 2-42 5 號壩的尺寸示意圖

表 2-26 ABAQUS 建模的剖面尺寸和土壤性質假設

Dam dimension			
Description	Symbol	Value	Unit
Dam Total Width	B	12.7	m
Soil Height on Active Soil Side	H	10	m
Soil Height on Passive Soil Side	d_s	2	m
Foundation Depth	d_f	2	m
Foundation Width	b_f	3	m

Dam Additional Height above Active Soil Side	h	2.5	m
Soil Property			
Description	Symbol	Value	Unit
Friction Angle	ϕ	30	degree
Soil Density	γ	2000	kg/m ³
Soil Elastic Modulus	E	30	MPa

壩體結構使用二維殼單元建模，而網格單元則使用平面應變四邊形簡化積分(CPE4R)，有限元素模型如圖 2-43 所示；模型的邊界條件如圖 2-44 所示，其中，土壤的兩個垂直側面都可以垂直移動，但不能水平移動。對於主動和被動土壤，允許土壤水平移動但不能垂直移動，以消除土壤引起的床層土壤沉陷。大壩結構下面的床層土壤只能由大壩結構本身沉陷，並假定水位高程與土壤高程相同，水壓方向設定為垂直於大壩的表面。圖 2-45 和圖 2-46 分別顯示了土壤的被動壓力和主動壓力，在土壤壓力、邊界條件和水壓力下，大壩結構傾斜了 0.149 度。

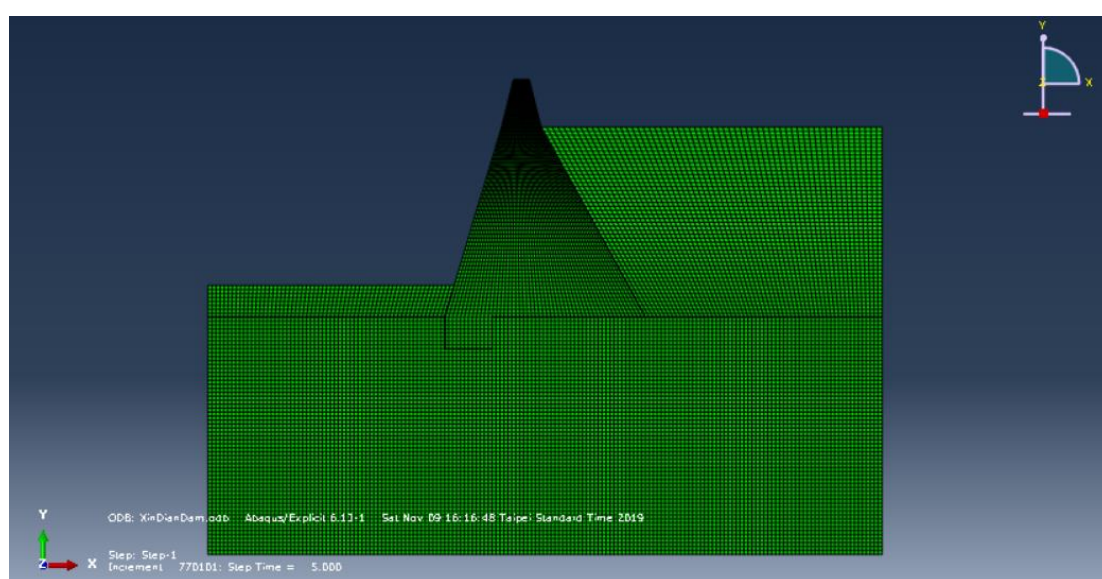


圖 2-43 5 號壩的有限元素模型

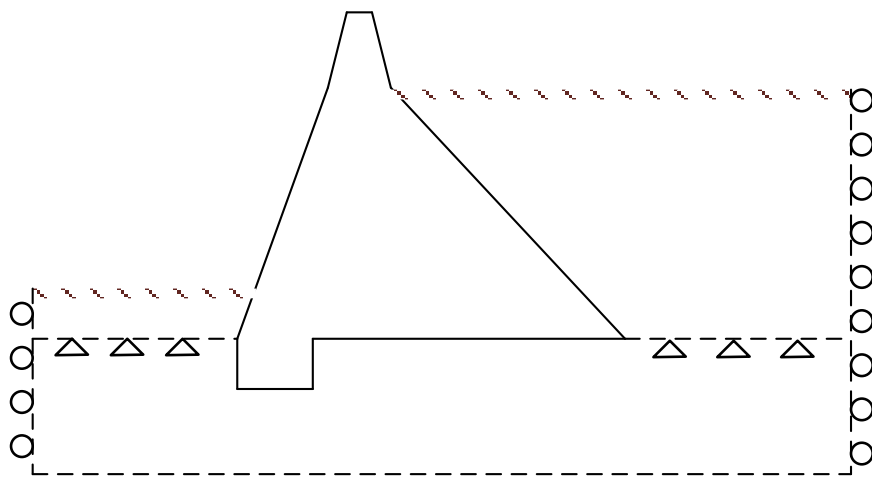


圖 2-44 邊界條件設定

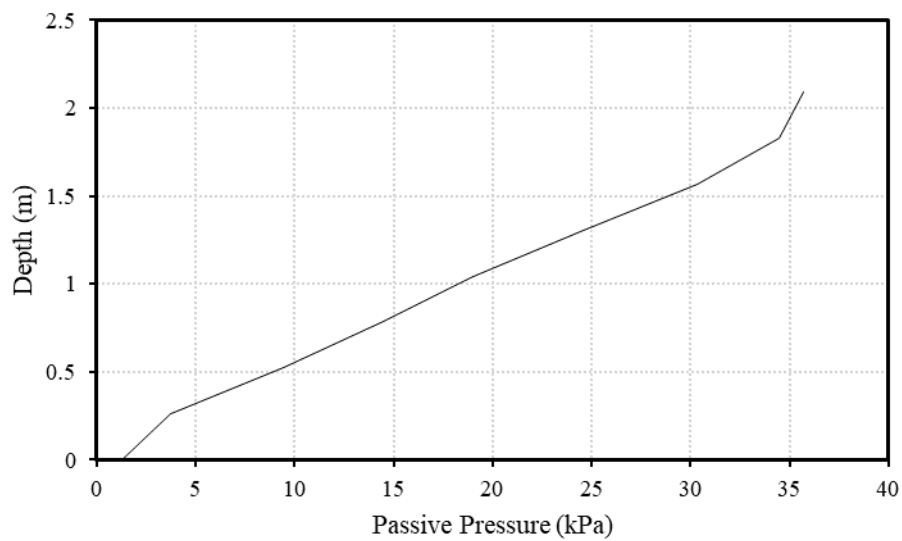


圖 2-45 被動土壓力分布圖

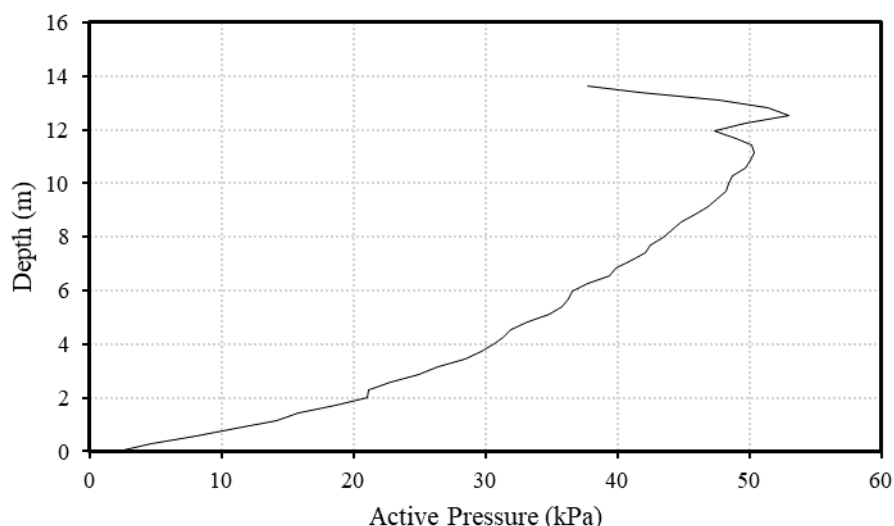


圖 2-46 主動土壓力分布圖

啟發式演算法約可視為基於直觀或經驗所衍伸而建構的演算法，一般而言，其計算成本必須在可接受的範圍且演算法必須針對最佳化問題提出一個合理的可行解。目前常用的啟發式演算法計有：基因演算法(GA)、質群演算法(PSO)、差異進化演算法(DE)、螞蟻演算法(ACO)、和聲演算法(HS)、人工蜂群演算法(ABC)、蜂群演算法(BA)、螢火蟲演算法(FA)等(邱雅萍，2017)。上述演算法為盡量求取全域最佳解，一般均應用隨機方法跳脫局部搜尋空間，因此，執行的結果通常具有不確定性。雖然上述方法具有共通性，例如在搜尋的過程中，均存有「鄰域搜索」的機制，且如同梯度法，一般均為疊代的過程，因此，需要設定起始點。各演算的差異一般在於起始點後的搜尋策略有所不同，可能是簡單局部搜尋，也可能是較繁複的邏輯。不過，各演算法的目標都是盡量有效地搜尋整個可行解的空間，且並不針對特定的最佳化問題。

生物共生演算法(SOS)為台灣科技大學鄭明淵博士近年所發展的一種新式最佳化演算法；SOS通過模擬生物生存在生態系統中與其他

生物共生的策略，用以模擬數值最佳化搜尋的過程。SOS演算法模擬兩生物體(包含不相似生物體之間吞噬行為)在自然界中出現的互動行為。不同的物種生體之間的關係。所謂的共生關係指兩種生物體互相依賴於對方的生存，或兩種生物體選擇同居在一個的環境，但彼此之間不發生互惠互利的關係，常見的共生關係有互利共生，片利共生和寄生。如前述，SOS與一般的啟發式演算法類似，將在可搜尋空間中，不斷地迭代搜尋，以求得全域最佳解為目標。與PSO不同處在於，每次迭代中的每一的粒子點，SOS均會更新下一個粒子點的候選解，PSO更新則以世代為區隔。SOS計有互利共生、片利共生與寄生等三個階段。

第六節 基於位移重建之防砂壩機器學習分析(需求分析)

壩體的位移不僅受壩體質量與勁度的影響，溫度、壩體老化和淤砂量等環境條件亦對位移有所影響。由於壩體的複雜性，研究人員如Kang 等(2017)建議以機器學習模型計算不同時間之位移需求。SVM是一種基於歷史數據分析和識別數據模式的方法。從歷史數據模式可以預測當前和未來趨勢。本計畫預計基於時間資料的記錄如溫度、淤砂量與材料性質建立 SVM 或 LSSVM 預測模型。所建立的支持向量機(SVM/LSSVM)可用於預測壩體的位移，其中，溫度，老化和淤砂量等環境因素均為所建模型的影響因子。因此，所建立的 SVM 除了可預測當前位移需求外，在資料足夠的條件下，亦可預測壩體的未來位移以及老化趨勢。支持向量機主要的觀念係將原本低維度的問題轉換至另一個高維度的超平面(Hyper-plane)以利分類的進行，藉此轉換將有利於處理原本線性不可分的情形。SVM 的運算過程為利用現有的資料進行訓練，並由這些資料中，選出部分的資料(支持向量)用以

代表全部的資料，並包裝為一運算模式，以運算後續資料之分類。

SVM 概念是在原 R^2 空間裡，若無法簡單的用"線性"直線將兩種類別的資料分開(如圖 2-47)，則試圖轉換到高維度的 R^3 空間裡進行線性區隔(如圖 2-47)。 R^2 的資料點(通常是向量)將透過一個核函數(kernel function)映射到 R^3 空間，然後在高維度空間裡找出一個超平面(Hyper plane)將資料點分離，最後再轉回原空間，完成分類。

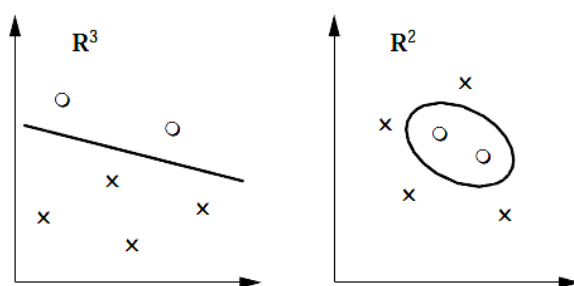


圖 2-47 支持向量機資料分類

然而，在高維度空間中能夠順利的將兩筆不同的資料分開有無限多條直線(圖 2-48)，因此哪一條直線具有最佳的分離空間則形成最佳化的問題。

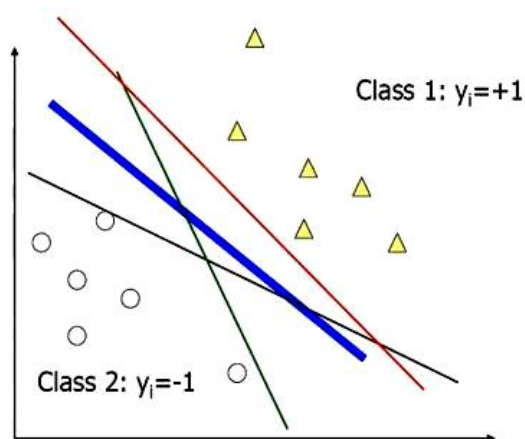


圖 2-48 SVM 之區隔線

由圖 2-49(左)可得知，在高維度空間中將會有一個最佳的超平面

來區隔兩類資料，因此分類問題至此轉換為最大間隔問題。

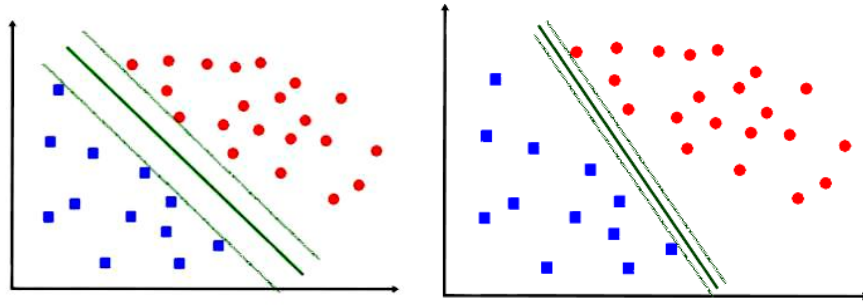


圖 2-49 最佳區隔超平面

假設分類問題中包含 m 個訓練樣本點，每個樣本點具有 n 個維度之向量集合，則：

$$\Omega = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\} \in X^m \times Y^m, x_i \in X = R^n, y_i \in Y = \{1, -1\}, i = 1, \dots, m \quad (16)$$

根據上述可知，對任一樣本點均滿足以下之方程式

$$\langle w, x \rangle + b \geq 1 \text{ if } y_i = 1 \quad (17)$$

及

$$\langle w, x \rangle + b \leq -1 \text{ if } y_i = -1 \quad (18)$$

其中：

w : 為超平面之法向量

x : 為原始資料向量

b : 為超平面與高維度空間的截距

以上兩式亦可合併為

$$\langle w, x \rangle + b \geq 1 \quad 1 \leq i \leq m \quad (19)$$

因此，可求得樣本間の間隔等於 $\frac{2}{\|w\|}$ ，此式可由幾何或代數推導

而得。所以尋求具有最大間隔之超平面(圖 2-50)，將等同於尋求具有

最小 $\frac{\|w\|}{2}$ (或 $\frac{\|w\|^2}{2}$) 之超平面。

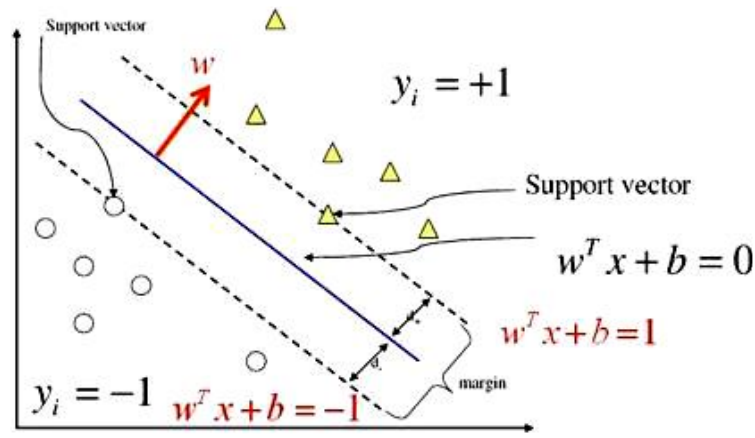


圖 2-50 超平面之最大間距

因此，尋求最佳分離超平面的問題將被轉化為具有約束條件的二次規劃求解問題(Constrained Quadratic Programming)，如下所示：

$$\min f(w, b) = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad \text{s.t. } y_i (w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (20)$$

至此，支持向量機剩下的求解可利用既有的數學演算法求出，然而以上係假設樣本群在超平面係為線性可分的，若非，則上述方法將無法求出分離樣本之超平面。解決此類問題，一般導入軟化間隔(soft margin)與鬆弛變量(slack)的觀念，簡單的說，即是容許部分的樣本(資料)被分類錯誤，其數學表示式如下：

$$\begin{aligned} \min f(w, b) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + \gamma \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \\ \text{s.t. } y_i (w \cdot \Phi(x_i) + b) &= 1 - \xi_i \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (21)$$

其中：

Φ :核函數(kernel function)

由於 SVM 的限制式為不等式，在解決最佳化的問題上一般以二次規劃(Quadratic Programming, QP)解決上述的最佳化問題，計算方面

較為複雜。而在 2001 年時，Suykens 等人為了解決上述的問題，對 SVM 導入最小平方失函數(Least Squares Loss Function)的概念：

$$\begin{aligned} \min Q(w) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \\ \text{s.t. } y(w \times \Phi(x_i) + b) &= 1 - \xi_i \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (22)$$

其中 γ 為調整間距最大化與錯誤最小化的參數，又稱為規則化參數(regularization parameter)，此參數的變化及代表 LSSVM 模型對於錯誤的敏感度，而 ξ 為錯誤變數，其總合越大則會須對資料做越大的調整才能使所有資料合乎資料分離的情況，因此通常錯誤變數越小越好。因此 LSSVM 的最佳解並不同於 SVM 一般為稀疏解，可運用 Lagrange method 來最佳化問題進而趨近到最佳解，其式如下：

$$L(x, w, b) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n a_i (w \times \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i) \quad (23)$$

對 L 函數一次偏微分可得下式：

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n a_i \times \Phi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n a_i = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow a_i = \xi_i y \\ \frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \rightarrow w \times \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \end{cases} \quad (17)$$

因此，原本的最佳化問題被轉換為解線性方程式組的問題，進而降低了計算複雜度，LSSVM 與 SVM 不同處為 LSSVM 將所有的資料點均當成支持向量(Support Vector)，而 SVM 則是藉由部分的資料點作為支持向量。

因為觀測期間並無重大降雨事件，資料量不足，本計畫擬以所建的有限元素軟體進行模擬。首先，所建立的模型需要校正。從現地實

驗(以感測器安裝在壩體上以測量模態頻率)。根據測量，5 號壩的基本週期約為 12Hz。為了匹配現場測量，進行了幾個假設，如由於所分析壩是重力壩型，其中壩的勁度遠高於周圍土壤的勁度，因此假定壩體為剛性，且基本週期的主要是受到壩結構下方基礎的影響。基於所做的假設，對有限元素模型中的土壤性質進行校正，以使 FEM 的基本週期與現場測量相同(如圖 2-51 與圖 2-52 所示)。

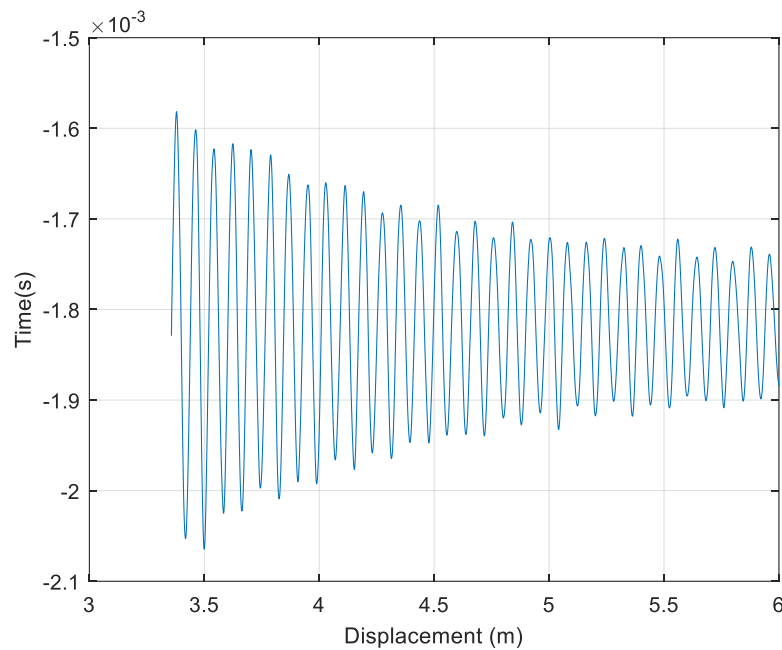


圖 2-51 有限元素模型之自由振動歷時反應

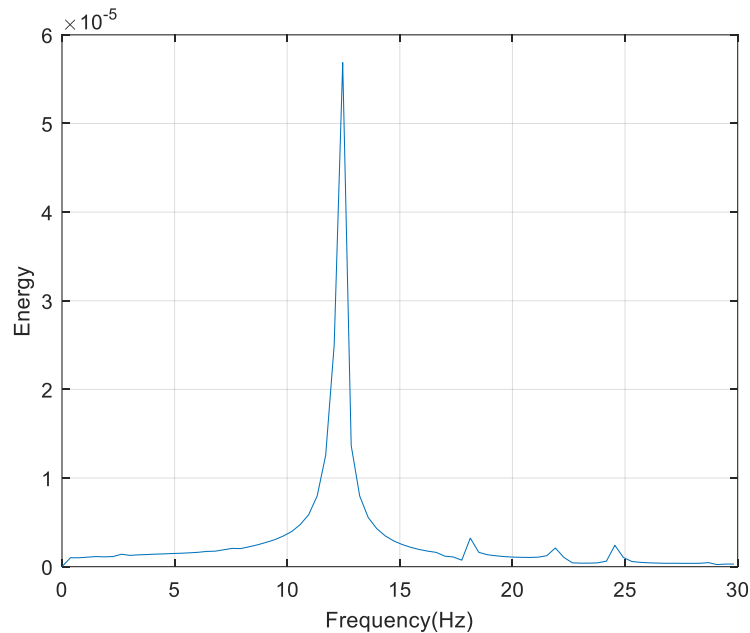


圖 2-52 有限元素模型之 FFT

為了壩體需求有更多的了解，使用各種外部荷載條件下進行有限元素。在此分析中，考慮了三種外部載荷：水深，隆起壓力和地震 PGA(峰值地面加速度)，表 2-27 列出考慮參數的範圍，每個外力如圖 2-53 所示。總共進行了 320 次的分析，並記錄了每種情況下壩結構的水平位移，表 2-28 至表 2-31 列出了每種情況下記錄的尖端位移。

表 2-27 本計畫所考慮之參數

Variable	Min	Max	Increment
Water Depth (m)	2.50	12.00	0.50
Uplift Pressure (tf)	35.00	44.00	3.00
PGA (g)	0.00	0.30	0.10

表 2-28 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=35 tf)

Up Lift Pressure = 35 tf
Dam Tip Horizontal Displacement (mm)

Depth	PGA (g)			
	0.00	0.10	0.20	0.30
12.00	1.47	1.84	2.26	2.71
11.00	1.35	1.71	2.13	2.59
10.00	1.24	1.60	2.02	2.48
9.00	1.15	1.50	1.93	2.38
8.00	1.08	1.43	1.85	2.32
7.00	1.01	1.37	1.79	2.25
6.00	0.97	1.33	1.74	2.21
5.00	0.93	1.29	1.71	2.17
4.00	0.90	1.27	1.68	2.14
3.00	0.88	1.25	1.66	2.12

表 2-29 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=38 tf)

Up Lift Pressure = 38 tf				
Dam Tip Horizontal Displacement (mm)				
Depth	PGA (g)			
	0.00	0.10	0.20	0.30
12.00	1.48	1.85	2.27	2.72
11.00	1.35	1.72	2.13	2.60
10.00	1.25	1.60	2.02	2.49
9.00	1.16	1.51	1.94	2.39
8.00	1.08	1.44	1.86	2.31
7.00	1.02	1.39	1.80	2.25
6.00	0.97	1.34	1.75	2.22
5.00	0.94	1.30	1.71	2.17
4.00	0.91	1.27	1.68	2.15
3.00	0.89	1.25	1.66	2.12

表 2-30 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=41 tf)

Up Lift Pressure = 41 tf				
Dam Tip Horizontal Displacement				

(mm)				
Depth	PGA (g)			
	0.00	0.10	0.20	0.30
12.00	1.49	1.86	2.28	2.73
11.00	1.36	1.73	2.14	2.62
10.00	1.25	1.61	2.03	2.49
9.00	1.16	1.53	1.94	2.40
8.00	1.09	1.45	1.87	2.33
7.00	1.03	1.39	1.81	2.26
6.00	0.98	1.35	1.76	2.22
5.00	0.94	1.31	1.72	2.18
4.00	0.91	1.28	1.69	2.15
3.00	0.89	1.26	1.67	2.13

表 2-31 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=44 tf)

Up Lift Pressure = 44 tf				
Dam Tip Horizontal Displacement (mm)				
Depth	PGA (g)			
	0.00	0.10	0.20	0.30
12.00	1.49	1.87	2.28	2.74
11.00	1.37	1.74	2.15	2.61
10.00	1.26	1.63	2.04	2.50
9.00	1.17	1.53	1.95	2.41
8.00	1.10	1.46	1.87	2.33
7.00	1.04	1.40	1.81	2.27
6.00	0.99	1.35	1.76	2.23
5.00	0.95	1.32	1.73	2.19
4.00	0.92	1.29	1.70	2.16
3.00	0.90	1.27	1.68	2.14

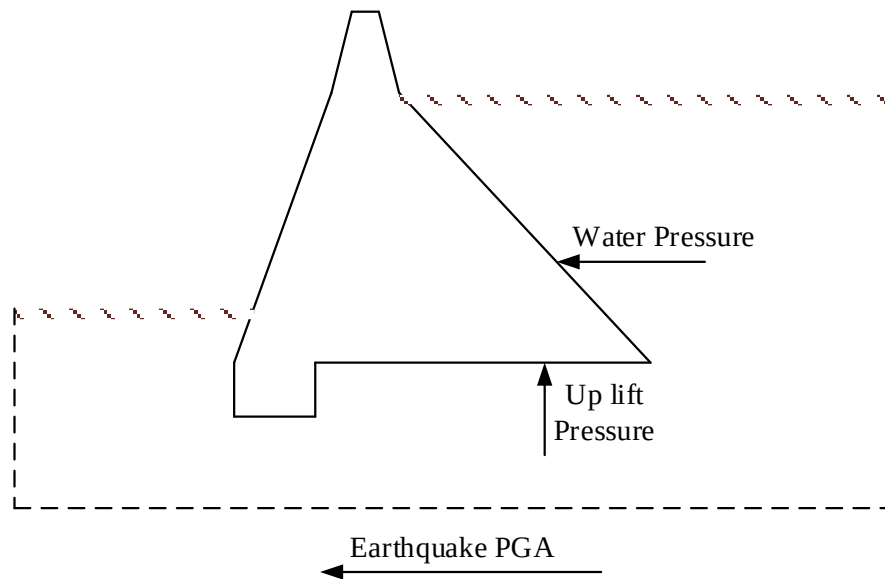


圖 2-53 有限元素模型與考慮的外力

圖 2-54 為其中一個 FEM 案例，圖 2-55 和圖 2-56 分別顯示了在 35tf 和上浮壓力下，各種水深和 PGA 的壩體水平位移圖。如圖所示，上浮壓力對水平位移沒有顯著影響。圖 2-57 顯示了使用 320 個 FEM 案例所建立的 LSSVM 函數圖。

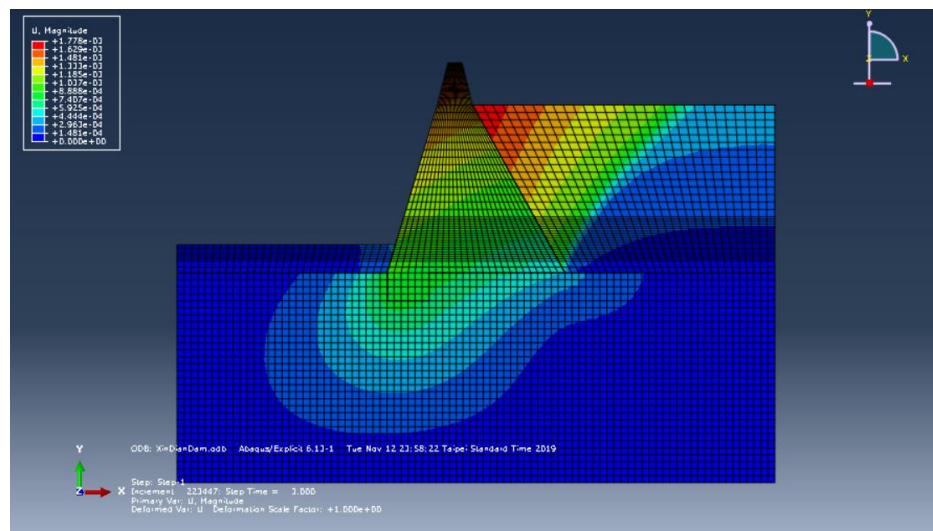


圖 2-54 水深 12m，PGA = 0 和上浮力 = 40tf 時的水平位移分佈

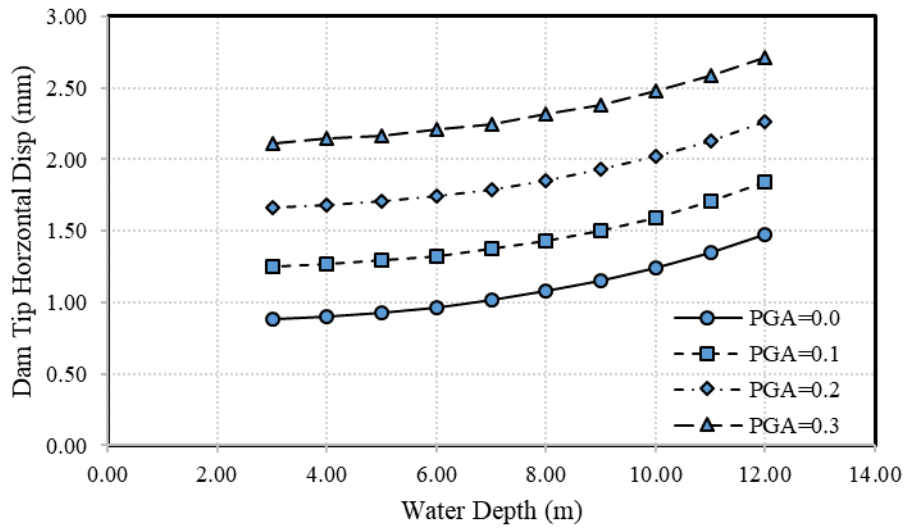


圖 2-55 在 35tf 上浮壓力下、各種水深和 PGA 的水平位移

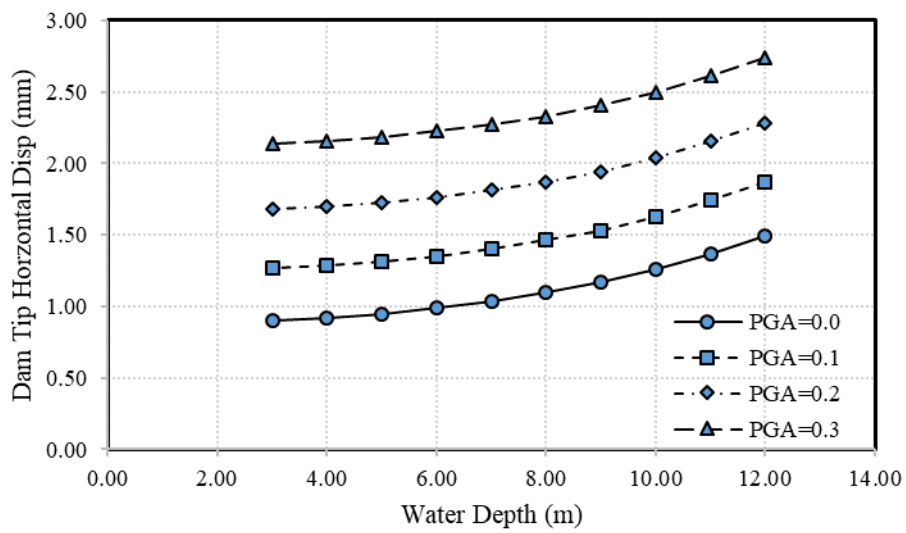


圖 2-56 在 44tf 上浮壓力下、各種水深和 PGA 的水平位移

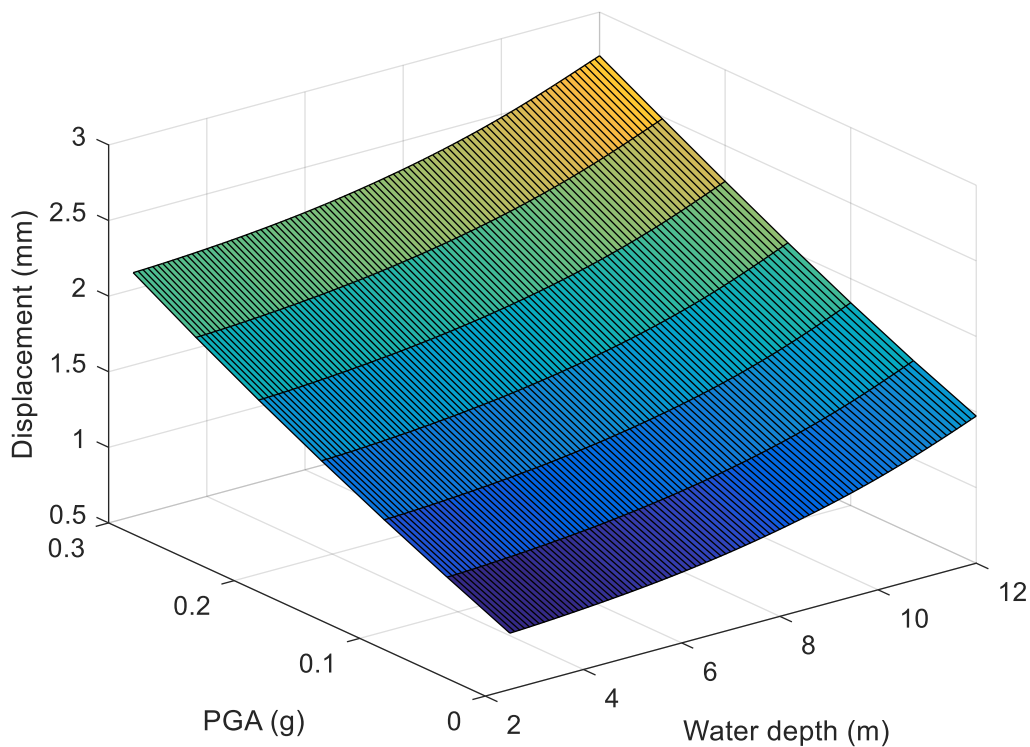


圖 2-57 35tf 上浮力下各種水深的 LSSVM 函數

第七節 防砂壩之安全分析

本計畫將針對傾倒、滑動與內部應力三個極限狀態分別求出等效的壩體位移量，並將壩體的安全分析視為串聯的系統分析，亦即，上述任一極限狀態的失效均視為系統的失效，如此可以求得一個整體的等效位移量，並根據上述容量與需求分析所得，計算忠治高壩之安全係數或其背後所代表的可靠度指標。本計畫基於前一年度所重建的位移進一步探討水保設施的變位的情形，以評估其設施的安全程度，具體而言，以防砂壩內部應力為例，假設壩體底部為應力最大發生處(且為撓曲應力控制)，則可依據壩體斷面、高度、彈性模數與降伏彎矩反推可容許位移值並作為壩體是否安全的門檻值；傾倒、滑動亦可藉由類似的分析反推等效位移。除了傾倒、滑動與內部應力三個極限狀

態之外，沖刷與局部磨損亦為防砂壩重要的破壞型態，而且，沖刷與局部磨損在目視檢測時，可能無法成功檢出，亦即某些壩體可能已經有部分毀損但無法藉由目視檢出，可視為隱形的損壞(invisible damage)，這類損害雖隱形但會影響設施的振動頻率，因此獲可藉由振動頻率的變化量得知此一狀態。本計畫將藉由重建位移與其後分析探討所觀測的壩體是否有所損毀。

由於河岸邊坡的穩定性會影響防砂壩的安全性，而防砂壩的存在也會減緩溪床的坡降，進而保護河岸邊坡的坡腳以及提供護岸支撐力，河岸邊坡和防砂壩的穩定性互相影響，因此本小節進行忠治二號橋(如圖 2-58)下游右岸邊坡之崩塌潛勢分析。



圖 2-58 忠治二號橋下游右岸 S3 邊坡

研究團隊以無人飛行載具(UAV)進行現地數值地表模型(Digital Surface Model)的建置，進行忠治二橋下游右岸邊坡的崩塌潛勢分析，然而邊坡植生茂密，圖 2-59 為 DSM 在 S3 邊坡的剖面圖，可看出 DSM 的地表線不光滑，明顯受到植被影響而有誤差，進而影響分析結果的準確度，因此，本團隊向內政部申請 2015 年高精度數值地形模型以利進行後續分析。

2015 年 8 月蘇迪勒颱風造成忠治二號橋下游右岸邊坡發生大規模崩塌，同時發生土石流，縱向刷深河道約 5 公尺(由圖 2-60 的 S3 邊坡河道處可明顯看出)。為了進行後續分析，以下分析皆以 2015 年高精度數值地形模型為主，並利用本團隊 2019 年 5 月進行航拍作業建置的 DSM 修正河道高程。

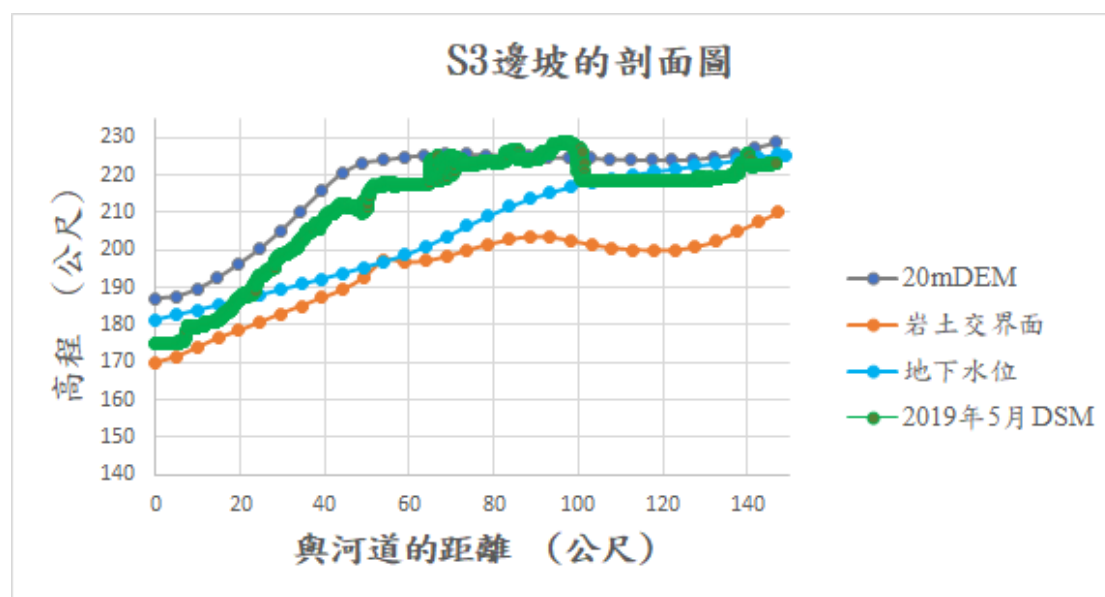


圖 2-59 DSM 在 S3 邊坡的剖面圖

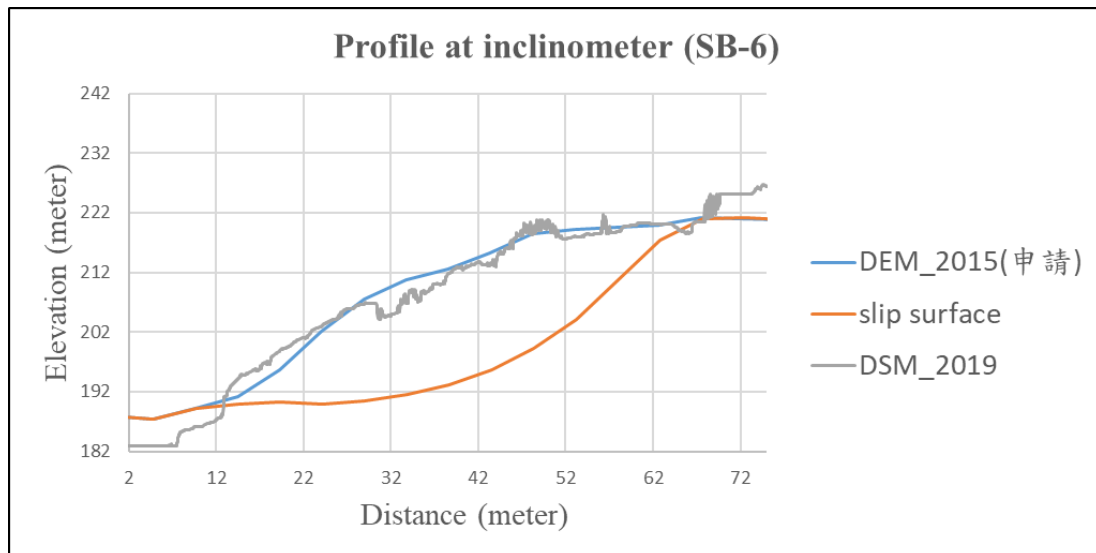


圖 2-60 S3 邊坡

以下分析步驟為先應用三維邊坡穩定分析軟體 Scoops3D 進行崩塌潛勢分析，搜尋 S3 邊坡所有的潛在滑動面，並計算各別潛在滑動面的安全係數(如圖 2-61)，再依據現地監測資料或地表特徵(如坡頂裂縫)優選一個最接近現況的高潛勢滑動面(如圖 2-60)。後續再應用 SLOPE/W 分析坡腳沖刷及地下水位變動對於該滑動面的影響。

Scoops3D 為 USGS 在 2015 年公佈的三維邊坡穩定分析軟體，此軟體考慮數值地形模型、地質材料分布以及地下水分布，主要特色為地質材料分布和地下水分布可以建立三維資料進行分析，若具備足夠的現地監測調查資料，相較於二維分析軟體更有助於分析整體地形的穩定性。

先以 Scoops3D 分析 S3 邊坡的崩塌潛勢圖，判釋崩塌潛勢高的區域，以及發生崩塌可能危害的防砂壩，圖 2-61 為應用 Scoops3D 之安全係數分布圖，紅橘色區域為安全係數低的地區，即崩塌潛勢高的區域，而圖 2-63 為傾斜管觀測站 SB-6 的監測資料，顯示地表到深度 18m 發生明顯位移，推估滑動面深度大約在地表下 18m 發生明顯位移，推估滑動面深度大約在地表下 18m 處，Scoops3D 分析的崩塌潛勢分布

圖和現地傾斜管觀測站的資料相符(圖 2-62)。安全係數分布圖是由多個滑動面的安全係數所組合成，考量到現地的滑動面不會隨著誘導因子(如地下水位)變動而改變深度、位置或幾何大小，依據傾斜管觀測站的監測資料(SB-6)顯示在地表下深度 18 米到地表發生明顯位移，可推估滑動面通過傾斜管觀測站(SB-6)地表下深度 18 米的位置，且在 S3 邊坡的坡頂可判釋坡頂裂縫的位置，亦可推測滑動面通過地表裂縫的位置。再應用粒子群優化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)優選一個最接近現況的高潛勢滑動面(圖 2-62)。

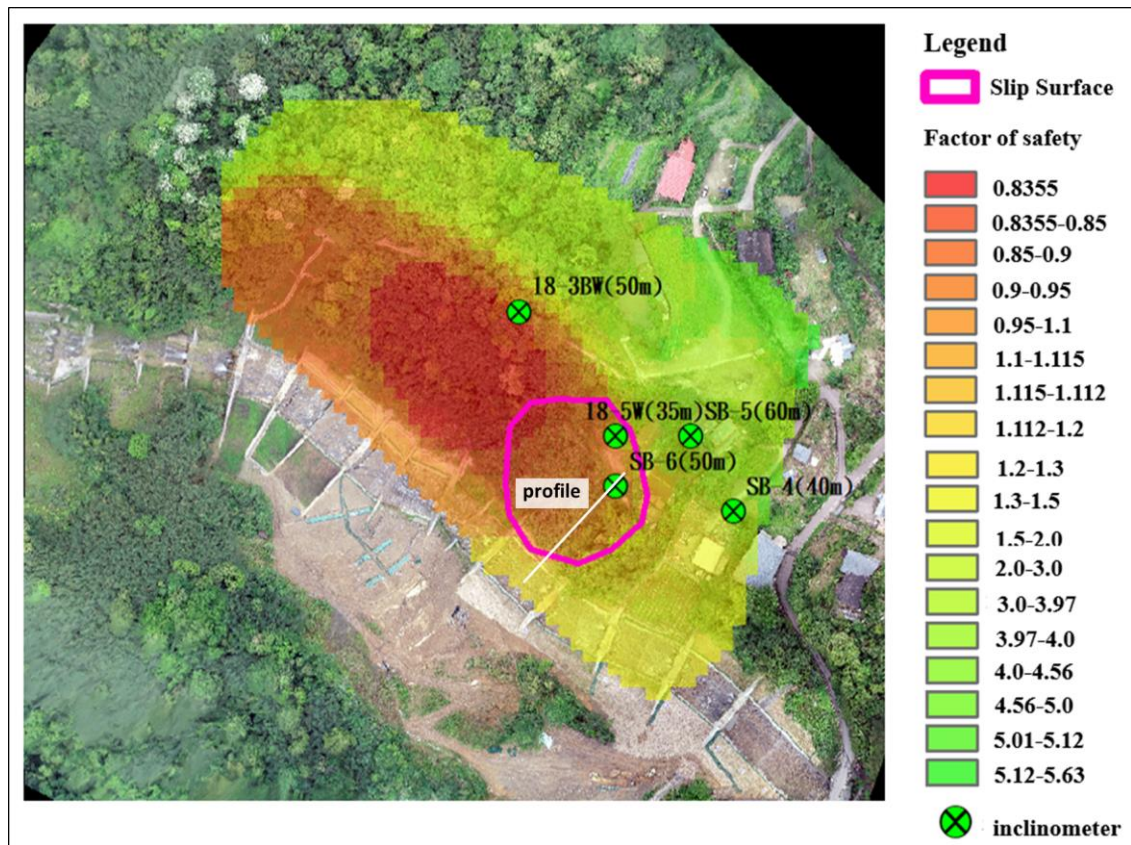


圖 2-61 應用 Scoops3D 之安全係數分布圖

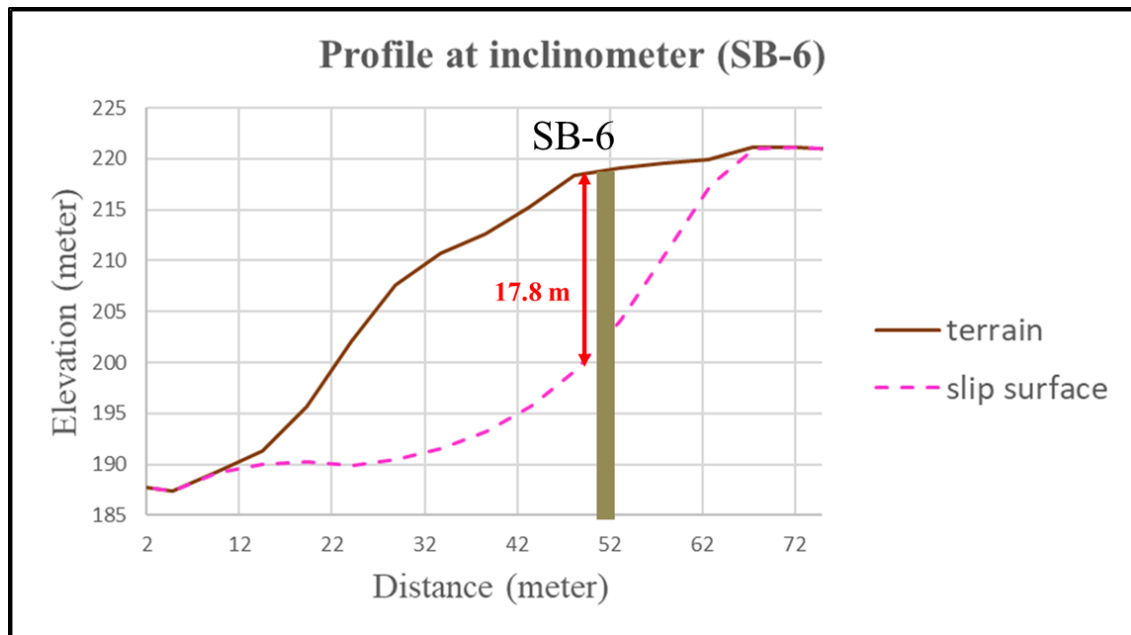


圖 2-62 通過傾斜管觀測站(SB-6)的剖面圖及優選滑動面的幾何型態

粒子群優化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)為多個粒子初始值的計算，並分別在解空間進行搜尋，同時儲存各個粒子搜尋到的區域最佳解以及持續更新全域最佳解，各個粒子持續在解空間裡搜尋直到符合停止搜尋原則(最大演算次數或搜尋精度)。圖 2-61 的 Slip Surface 為 Scoops3D 配合 PSO 優選之滑動面，圖 2-62 為該滑動面在傾斜管觀測站(SB-6)的剖面圖，而表 2-32 為該滑動面的相關資訊。根據以上分析的結果，接著以 SLOPE/W 分析坡腳淘刷及地下水位變動對於該滑動面之影響。SLOPE/W 為二維邊坡穩定分析軟體，需要取一剖面進行分析，而剖面位置通過傾斜管觀測站 (SB-6)(如圖 2-61 的 profile)。

粒子群優化演算法(PSO)	
變數	搜索球體的中心位置、搜索球體的半徑大小、水平搜尋精度和垂直搜尋精度(Scoops3D 的搜尋參數)
優化目標	(1) 滑動面在傾斜管觀測站(SB-6)的位置，滑動深度最

	接近 18m
	(2) 滑動面通過最接近地表裂縫的位置

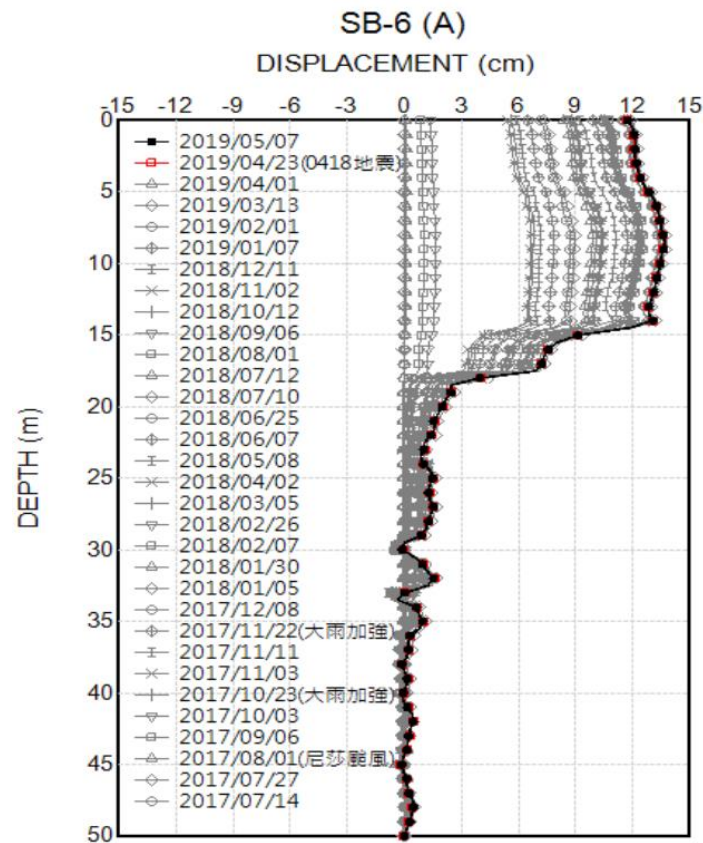


表 2-32 不同 PGA 下之壩位移 (上浮力=44 tf)

xcen_m	ycen_m	cen_m	radius_m	angle	volume_ m ³	area_ m ²
305992.2354	2753266.804	229.87	45.4982	202.7604	3.27E+04	2.69E+03

以下分析皆未考慮現地的整治措施 (整治措施包含防砂壩、護岸和自由梁框法)，分為三種情境，第一種情境為暴雨時，地下水位升高(地下水位達到最高紀錄值)但沒有發生坡腳淘刷下，分析該滑動面上滑動塊體的安全係數；第二種情境為暴雨時(地下水位達到最高紀

錄值)且發生坡腳淘刷，分析該滑動面上滑動塊體的安全係數；第三種情境為暴雨時，地下水位升高(最高紀錄值高 2m 的地下水位)但沒有發生坡腳淘刷下，分析該滑動面上滑動塊體的安全係數。以下分別說明上述三種情境之分析結果。

第一種情境為暴雨時，地下水位升高(地下水位達到最高紀錄值)但沒有發生溪床沖刷下，分析該滑動面上滑動塊體的安全係數，如圖 2-64 所示。

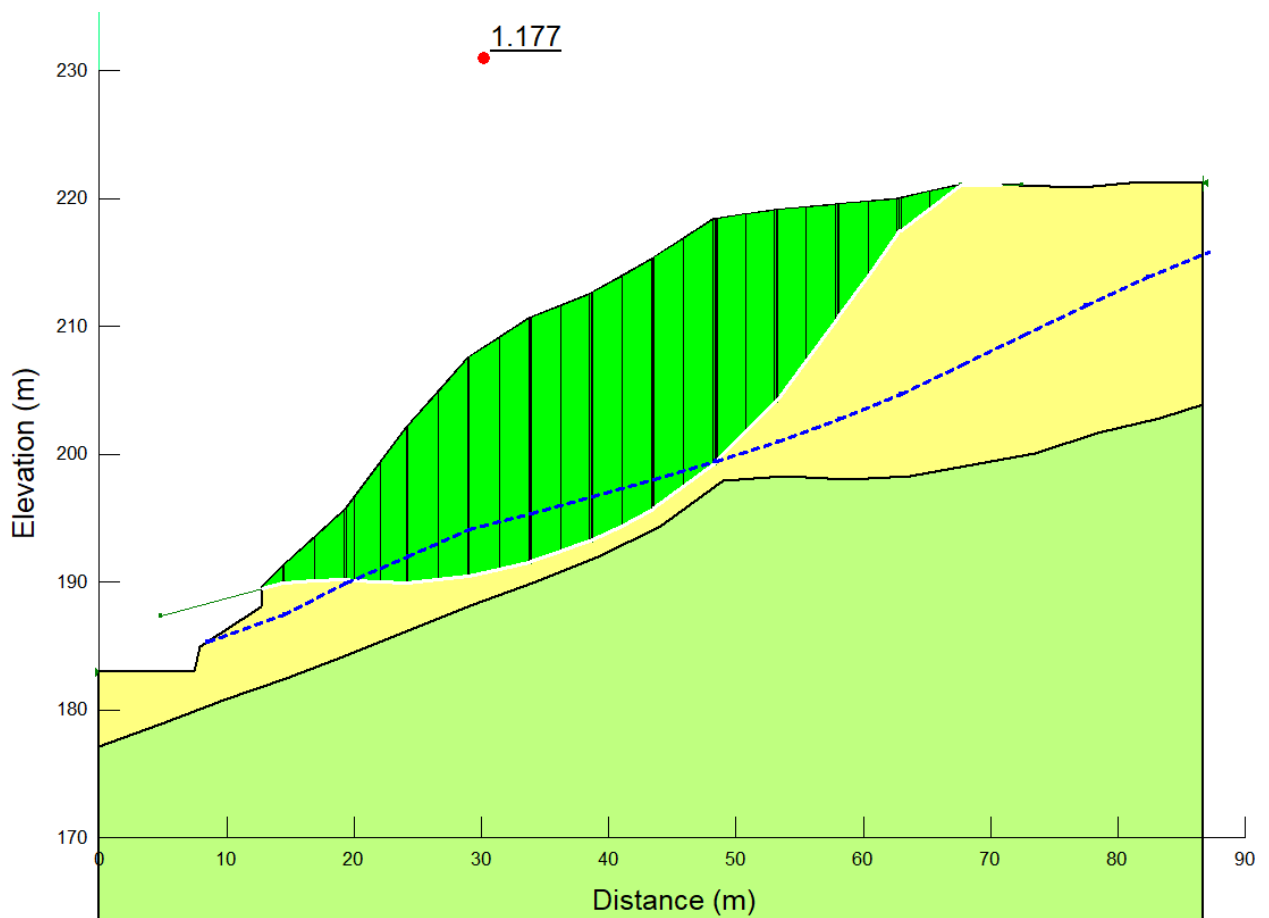


圖 2-64 暴雨時但沒有發生坡腳淘刷下該滑動塊體之安全係數

第二種情境為暴雨時(地下水位達到最高紀錄值)且發生溪流淘刷坡腳，分析該滑動面上滑動塊體的安全係數，如圖 2-65 所示。

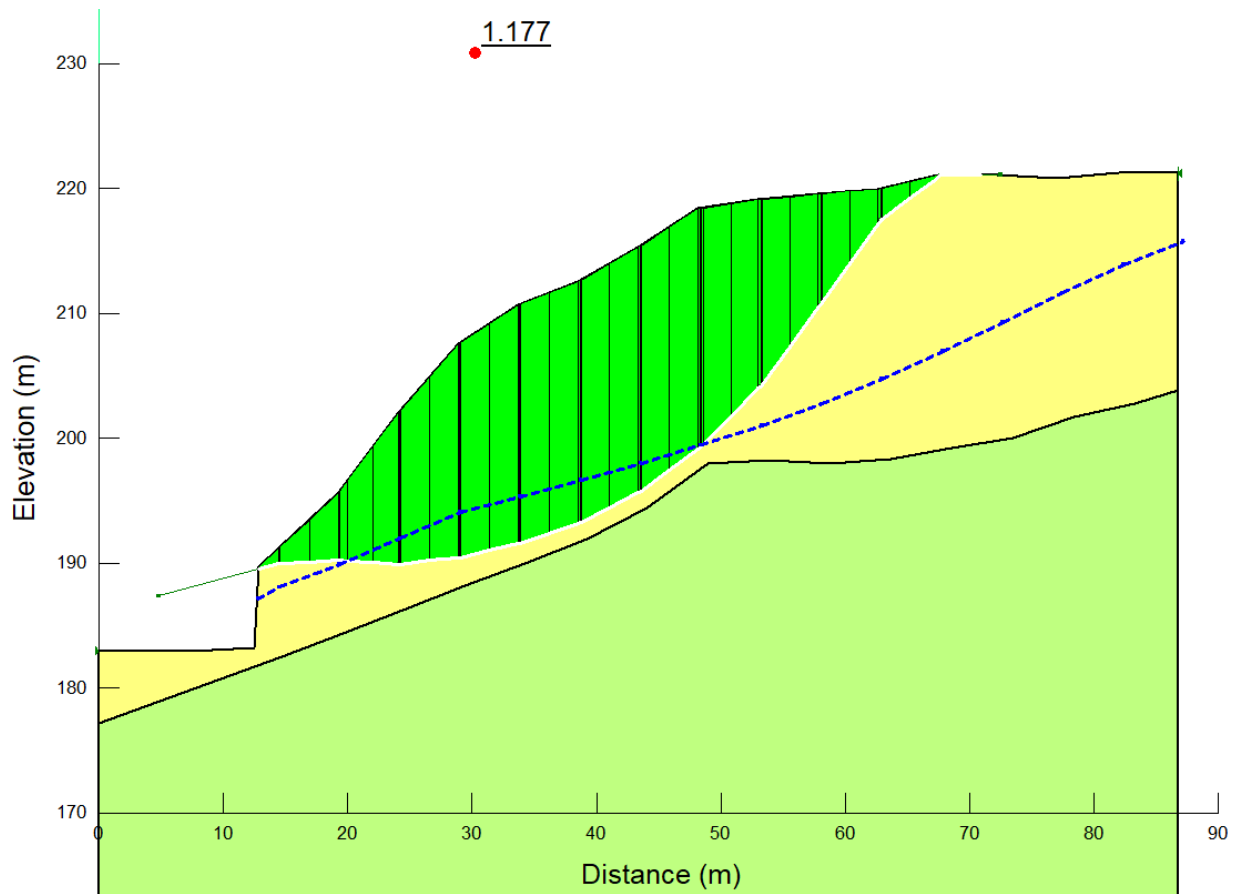


圖 2-65 暴雨且發生溪床沖刷 1 m 下邊坡之安全係數

第三種情境為暴雨時，地下水位升高(最高紀錄值高 2m 的地下水位)但沒有發生溪流淘刷 2m 下，分析該滑動面的安全係數，如圖 2-66 所示。

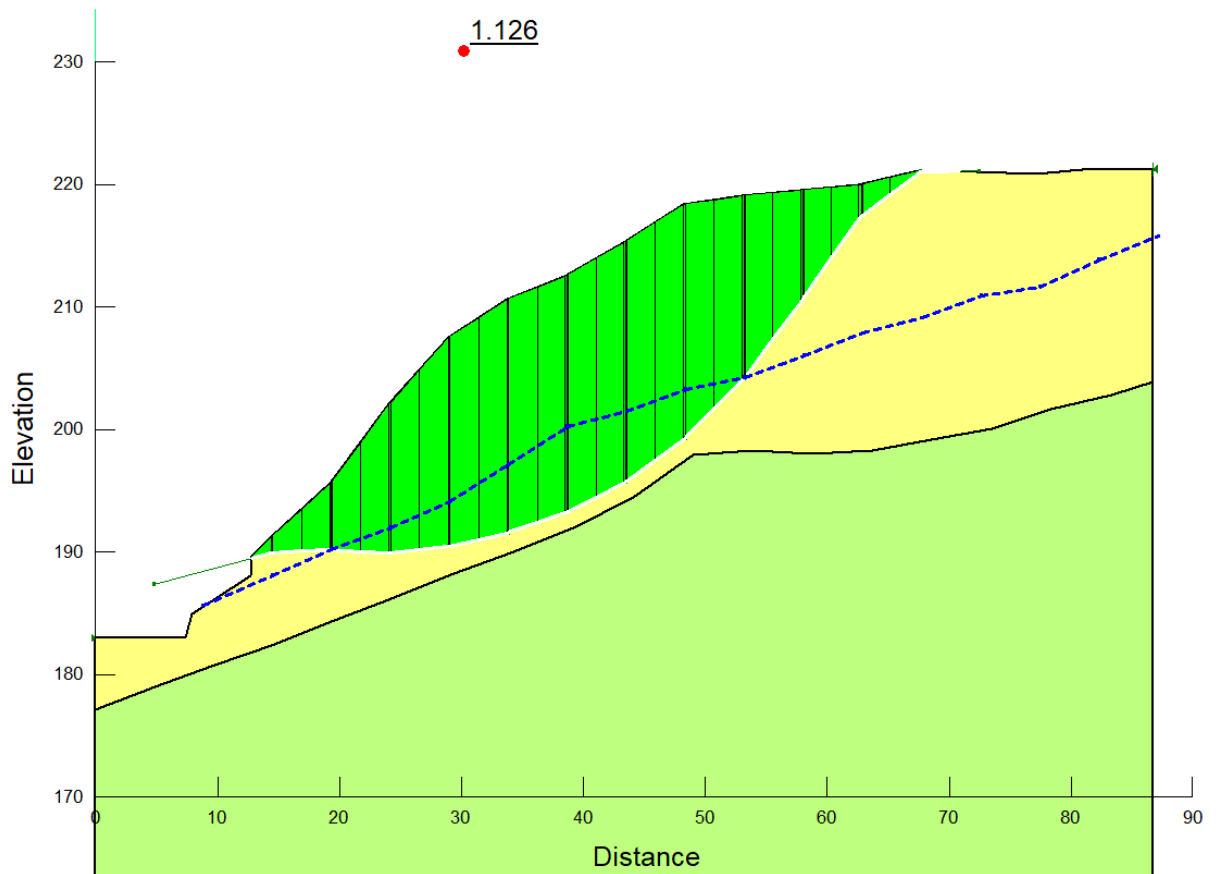


圖 2-66 暴雨且發生溪床沖刷 2 m 下邊坡之安全係數

分析的剖面由於滑動面沒有通過坡腳，所以坡腳淘刷對於滑動塊體的安全係數沒有影響(圖 2-65)，若是取另一個剖面，滑動面通過坡腳，而坡腳淘刷則會影響滑動塊體的安全係數;地下水位變動對於滑動塊體的安全係數有明顯的下降(圖 2-65)

當滑動塊體崩落有很大的機率會撞擊護岸或防砂壩體，造成結構設施損壞。後續可再分析該滑動面上的滑動塊體崩塌後，對於鄰近防砂壩體安全性的影響，以及是否可接收到滑動塊體崩落過程中的振動訊號。

第3章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫之甘特圖如表 3-1 所示，目前進度皆符合規畫，將持續完成待辦事項。

表 3-1 本計畫之甘特圖

	二 月	三 月	四 月	五 月	六 月	七 月	八 月	九 月	十 月	十 一 月
防砂壩歷史監測資料之收集										
防砂壩頂位移之重建										
系統識別分析										
壩體的穩定分析										
有限元素建模										
搜尋最佳系統參數(SOS)										
防砂壩機器學習分析(需求分析)										
防砂壩等效位移之安全分析										

第二節 計畫交付項目

本計畫重要交付工作項目與經費如表 3-2 所示。

表 3-2 工作項目與經費

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施 地點
	單 位	108/02~ 108/12	累計 成果	本年度預定 目標	水保局 經費	其 他	

						經 費	
防砂壩歷史監測 資料之收集	式	1	0%	100%	60	0	台大、 青山、 豐華
防砂壩頂位移之 重建	式	1	75%	100%	60	0	台大、 青山、 新店
基於位移重建之防 砂壩系統識別分析 (容量分析)	式	1	0%	100%	250	0	台大
基於位移重建之防 砂壩機器學習分析 (需求分析)	式	1	0%	100%	150	0	台大
防砂壩等效位移之 安全分析	式	1	0%	100%	93	0	台大

第4章 結論與討論

本計畫之目標為利用位移重建技術，探討應用於防砂壩安全評估的可行性。亦即、利用監測技術評估防砂壩之安全性，為與實務結合，選定烏來忠治的防砂壩，尤其是最後隘口處的高壩(如圖 1-1)，作為本計畫分析的標地物；2015 的蘇迪勒颱風重創烏來與新店部分山區，尤其忠治里發生嚴重的岩屑崩滑，造成台北市水源濁度達到歷史新高，新店溪水濁度最高曾至 3 萬 9300 度，家戶用水濁黃，烏來忠治的災後重建工程目前依照規劃進度循序進行並亦接近尾聲，根據觀察與監測資料顯示，其地滑現象(尤其是右岸忠治二號橋下游處)於蘇迪勒颱風之後有持續微量發生的跡象，目前除了持續監測外，工程上的解決方案為設置水平向排水設施與防砂壩，尤其是裂縫發生下游隘口處設置一高度超過 20 公尺的高壩，期望可以減緩或避免進一步崩塌地發生，此高壩的安全性與重要性不可言喻，故選定為本計畫的標的設施。本計畫的目標為評估 NB-IoT 與免控制點位移量測技術於防砂壩安全評估的可行性分析，分析結果可作為初步安全評估之依據，提供主管單位人員維護管理或補強時之參考。

本計畫執行過程中將以現地量取的資料如加速度計或速度計所取的訊號、水位計取得之水位、竣工圖與鑽探所得之土壤參數等，作為各項分析如系統識別、防砂壩穩定分析、有限元素分析與機器學習

等的基礎，最後並提出防砂壩的初步安全評估流程。其中，現地量取的資料如如水位計取得之水位、竣工圖與鑽探所得之土壤參數等已於第 2 章第 2 節所述。位移重建部分，本研究的主要目的是使用 MEMS（微機電系統）加速度計測量小規模結構的加速度，並使用位移重建算法將來自 MEMS 加速度計的測量加速度轉換為位移數據，除以數值分析驗證準確性外，另於 NCREE 以及日本京都大學進行試驗，數值與試驗結果均符合預期，詳細內容可參考於第 2 章第 3 節。

因應計畫之執行，本計畫所建立的智慧感測器開發與 NB-IoT 架構係由 MCU 搜集 ADXL355 的 G 值資料，透過 NB-IoT 模組，傳送給遠端的 Server，Server 再將資料儲存至 Database。其中，加速度計係利用 ADXL355 實現，MCU 為 nRF9160，使用 BSD Socket 來撰寫網路通訊程式，並以 MySQL 建立資料庫(DB)，智慧感測器開發與 NB-IoT 架構均已開發完成裝置於現場進行資料蒐集(第 2 章第 4 節)。根據以系統識別演算法則，應用於烏來忠治的高壩之結果為壩體的的第一振態之振動頻率為 12.27Hz，壩體的阻尼比範圍則從 9.89%到 12.59%(第 2 章第 5 節)。

由於壩體的複雜性，本計畫以機器學習模型計算不同時間之位移需求。因為觀測期間並無重大降雨事件，資料量不足，本計畫以所建的有限元素軟體進行模擬。所建立的模型匹配現場測量的結果，亦即

FEM 的基本週期與現場測量相同，根據所得 FEM 的分析，並以 LSSVM 之機器訓練成果(第 2 章第 5 節)。此外，由於河岸邊坡的穩定性會影響防砂壩的安全性，而防砂壩的存在也會減緩溪床的坡降，進而保護河岸邊坡的坡腳以及提供護岸支撐力，河岸邊坡和防砂壩的穩定性互相影響，因此，本計畫亦針對下游右岸邊坡進行崩塌潛勢分析。根據上述，本計畫之目標與對應之工作項目均已完成，惟仍有改善空間。例如，理想上，機器學習的資料應利用現場量測的數字，而非 FEM 模擬的結果，但因資料有限，故分析時以數值模擬作為權衡之計。

參考文獻

1. 邱雅萍，碩士論文，自動調適生物共生演算法在工程上之應用-以鋼筋裁切為例，國立台灣科技大學，2017。
2. 豐華工程顧問股份有限公司，新北 DF230 潛勢溪流治理工程。
3. 陳昭維，台 9 甲 10.2K 大崩塌安全評估及後續整體調查規劃，行政院農業委員會水土保持局臺北分局成果報告書，SWCB-106-236，2017。
4. 陳昭維，台 9 甲 10.2K 大崩塌安全評估及後續整體調查規劃，行政院農業委員會水土保持局臺北分局期末報告書，SWCB-106-236，2018。
5. Ya Gu; Rui Ding, A least squares identification algorithm for a state space model with multi-state delays. Applied Mathematics Letters, Vol: 26, Issue: 7, Page: 748-753, 2013.
6. Andrew P. Sage, James L. Melsa, 2 Classical Methods of System Identification. Mathematics in Science and Engineering, Vol 80, Page: 5-37, 1971.
7. Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P, Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. In IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000.
8. Songtao Xue, Hesheng Tang & Jin Zhou, Identification of Structural

- Systems Using Particle Swarm Optimization, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 8:2, 517-524, 2009.
9. Kim CW, Kawatani M, Hao J. Modal parameter identification of short span bridges under a moving vehicle by means of multivariate AR model. Structure and Infrastructure Engineering. 2012;8:459-72.
 10. Fraser M, Elgamal A, He X, Conte JP. Sensor Network for Structural Health Monitoring of a Highway Bridge. Journal of Computing in Civil Engineering. 2010;24:11-24.
 11. Loh C-H, Wu T-S. Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1996;15:465-83.
 12. Huang CS, Yang YB, Lu LY, Chen CH. Dynamic testing and system identification of a multi-span highway bridge. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1999;28:857-78.
 13. Van Overschee, P., and De Moor, B. Subspace identification for linear systems, Kluwer Academic, AA Dordrecht, The Netherlands. 1996

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	目研究案所指位移為何？	本計畫所重建的位移為壩體受外力震動下之的位移
二	加速度計的檢測所轉出的數據是否可親民與大眾化？	未來如配合警戒值或行動值的訂定，可增加研究的應用性
三	位移是否有容許範圍值以及容許誤差，是否可接受？	目前測試結果誤差皆在容許範圍，未來將視誤差的分布狀況，可以異常值的方式訂定容許範圍
四	位移量對壩體安全如何評估，如何訂出警戒值？不同條件的影響因子如何影響位移？	1.力學為基礎：藉由建立位移與結構體滑動、傾倒之關係，連結穩定分析，可以訂定警戒值。 2.統計為基礎：藉由異常值分析建立警戒值。
五	壩體安全分析需考慮動壓力，會比較準確	謝謝委員意見，若水位資訊，動水壓將納入考慮。考慮時，動水壓之

項次	審查意見	回覆辦理情形
		計算將以目前規範訂的內容為主。
六	N1-1 結果好，是用 R^2 去定義或者其他分析嗎？	目前採用 R^2 來定義相關程度，之後可用其他方法來分析誤差程度。
七	分析流程、架構，須補防砂壩的歷史資料收集與監測背景	未來將持續收集歷史資料與背景補足樣區的資訊。
八	是否可藉由振動頻率變化量觀察沖刷現象？	沖刷後理論上振動頻率將下降，但現地量測常有許多雜訊，不易觀察到明顯的頻率變化。
九	是否考慮老舊壩體評估，來比較新壩體？	謝謝委員意見，未來將視計畫需求，增加老舊壩體之試驗。
十	使用便宜感測器得到的數字，建議配合位移計比較。所選樣區是否可以量到預期的數據？因樣區不會有巨	謝謝委員意見，將會配合較精密的儀器進行驗證，目前已規劃於台灣國家地震中心與日本京都大學進行試驗與驗證。所選定的樣區被訂定

項次	審查意見	回覆辦理情形
	石，也不太會有基腳掏空的情形發生。	為土石流潛勢溪流，應仍有土石流發生的機會。
十一	裂縫問題，頻率下降趨勢有一定難度。	同意委員所述，目前所提建議不易觀察到裂縫問題與頻率下降之現象。

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	建議於內文中說明 sensor 製作的成本，以利後續實務應用參考	已於 2.4 節補充說明。
二	安全檢測與評估，認知上應有門檻值或檢測標準，建議說明其應用方式。	門檻值或檢測標準可依力學為基礎(藉由建立位移與結構體滑動、傾倒之關係，連結穩定分析等訂定) 或以統計為基礎例如藉由異常值分析建立。門檻值可能會受到不同地點、結構形式而有不同，應根據個別構造物的調查結果制定。本次分析的結果詳見第 2 章內容。
三	現地裝置之接收資料是否有現地監測資料做比對?其結果如何?請說明。	本團隊於安裝 NB-IoT 感測器時，同時另以東京測振 CV-374AV 三軸振動量測儀進行檢測，兩者檢測結果一致，並運用於系統識別，詳見 2.5 節所述。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	由加速度積分為位移量，在實務應用上，是否有安裝位置之建議，或是位移警示量之參考原則?請說明。	1. 安裝位置建議設置於壩翼兩側，以防止流水沖刷。因為壩體勁度很高，目前設置於兩側的數據相當。 2.請參照第 2 個意見之回覆。
五	建議後續針對應用面及使用時機(對象、方法等)予以擴充及延伸。	後續建議除裝設於單一防砂設施外，應亦可考慮於裝設於單一流域中的重要防砂設施並進行長時間的監測，例如本計畫成果已應用於水保局 107 年度防砂設施安全感測與分析應用之計畫案中之防砂設施。
六	由加速度反推位移部分，是否需定期校正?建議週期為何?請說明。	所重建位移均為相對於儀器最初設置的位移，應無校正的需求。
七	此研究利用加速度推估位移之方法，是否適用於高頻結構物?請說明。	高低頻結構物均適用。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	此研究係以防砂壩之應用為主，未來是否會運用在擋土牆上?請說明。	本計畫部分成果已應用於水保局107 年度防砂設施安全感測與分析應用之計畫案中之防砂設施，擋土牆依據目前評估，應亦可適用。