

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第三名

051909

千尋水上列車-分析地下水訊號

學校名稱：高雄市立新莊高級中學

作者： 高二 陳彥彰 高二 林威廷 高三 江家穎	指導老師： 林佳賢
---	------------------

關鍵詞：地下水、高鐵

摘要

本研究利用微機電感測器，在阿蓮、仁德、新化、善化、太康、新東、鹿草、永定、土庫、溪洲十個地下水位站，收集台灣高鐵行經時的振動特徵。我們發現不同位址的地表震動紀錄，顯現豐水和枯水期有最大振幅和主頻的差異。豐水期的主要振動頻率較低頻而振幅較小，由於主頻和天然地震的表面波頻率相仿，可能指示高鐵振動在在地表的鬆軟土層的共振效應。我們並發現，各站的震動特徵和地下水位資料相關：與當地下水位在乾溼兩季落差較明顯時，主頻的高低落差也較明顯；而地下水位離地面較接近，產生的主頻較其他地方來得低頻。阿蓮至善化地區較無地層下陷情形，故高鐵在豐、枯水期的振動變化較能直接反映地下水位之改變。本研究提出連續的背景震動源（高鐵行經的振動）能讓我們釐清地下水位與地面振動的關係，以及季節性變化凸顯出的振動特徵差異。為研究地下水位與高鐵振動型態之相關性，未來可以無地層下陷或地層下陷不明顯區域為研究目標，如阿蓮、仁德、新化、善化地區，以作更深入的相關性分析。

壹、研究動機

2021 年初台灣本島發生近 56 年來大規模乾旱事件，導致各地區進入不同程度的減壓供水、限水、停耕、歇業等情況，也導致台灣西半部地下水位下降。政府相關單位也在積極開闢地下水源。這次近 56 年來的大規模乾旱現象，造成地下水位達到低點，因此我們希望趁這次乾旱時期的產生的振動，建立起尋找地下水位的基準值。

在過去相關高鐵研究中危機自陷—臺灣高鐵差異沉陷的新測量方法(吳承儒、楊芸甄、洪暉詞，2012)等科展研究中並沒有探討地下水位與車體振動特徵之相關性，故我們希望藉高鐵此一穩定震源研究地下水位高度與振動的關係，期望利用人工振動快速且大規模尋找地下水，以及探討地下水在乾濕兩季會產生甚麼不同的訊號。

貳、研究目的

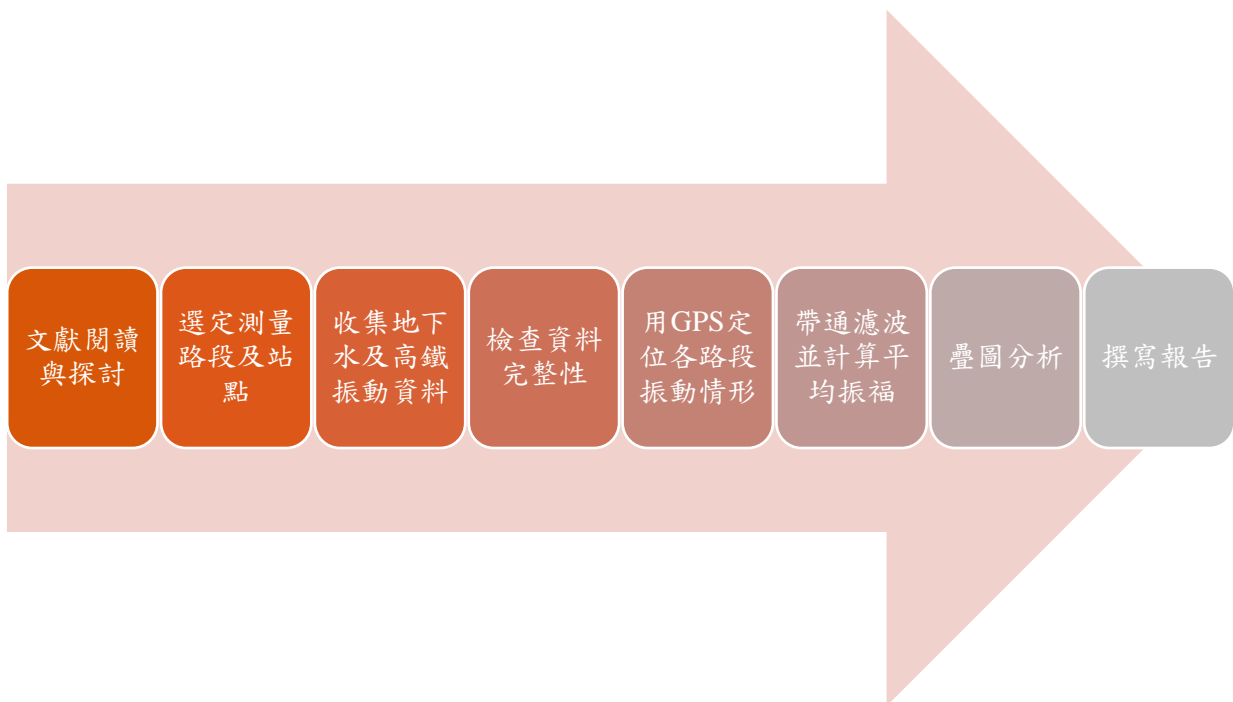
本研究希望藉 QCN Live 軟體記錄高鐵振動情形，探討台灣西南部豐枯水期時地下水位變化與振動頻譜變化之關係，並找出各地豐枯水期之主要振動頻率，收集之振動資料經帶通濾波後進行分析，建立頻率、最大振幅及平均振幅之配適模型。上述研究目的以列點方式歸納如下：

- 一、探討台灣西南部地下水與振動頻譜變化之關係。
- 二、探討豐水期的高鐵主要振動頻率。
- 三、探討枯水期的高鐵主要振動頻率。
- 四、建立頻率、最大振幅及平均振幅之模型

參、研究設備及器材

- 一、Quake Catcher Network Live 軟體：紀錄震動
- 二、original pro 軟體：統計、信號處理、曲線擬合以及峰值分析
- 三、Excel 2019 軟體：整理分析數據、製作圖表
- 四、GPS tracks 定位軟體(手機應用程式)：輔助 GPS 軌跡紀錄器
- 五、GPS 軌跡紀錄器：紀錄時間及定位行經路線
- 六、微機電加速計(O-Navi A 12-bit)：測量三軸運動情況
- 七、筆電(Macbook pro)
- 八、SPSS Statistics 26.0 軟體：利用此軟體進行迴歸分析
- 九、SeisGram2K 軟體：檢視與分析振動波形

肆、研究過程或方法



伍、研究結果

一、2009~2021 年地下水位月平均

表一到表五分別是由高雄、台南、嘉義、雲林、彰化中選一個地下水位測站作為代表去做 2009~2021 年地地下水位平均並且以基隆的台灣水準原點 18.6 年的平均海平面當作基準。由表一（阿蓮、新化、鹿草、溪州、土庫）七月到十一月（豐水期）地下水位高於十二月到六月（枯水期）地下水位月平均。

表一 地下水位各測站地下水位月平均

月份	月平均（單位：m）				
	阿蓮	新化	鹿草	土庫	溪州
一	15.12	6.54	-8.2	26.6	35.62
二	14.86	6.34	-9.14	26.28	35.15
三	14.63	6.39	-8.57	26.23	34.77
四	14.48	6.4	-7.84	26.15	34.5
五	14.55	6.43	-8.49	26.15	34.64
六	15.06	6.54	-8.36	26.57	35.89
七	15.68	6.68	-7.82	26.89	36.58
八	16.54	6.63	-7.01	27.14	37.48
九	17.22	6.78	-6.29	27.34	37.61
十	16.53	6.76	-5.97	27.12	37.1
十一	15.89	6.67	-6.14	26.98	36.54
十二	15.45	6.63	-5.87	26.79	36.09

二、不同地點之高鐵振動紀錄

本研究利用微機電加速器結合 QCN Live 軟體紀錄高鐵車廂振動，同時利用 GPS tracks 軟體紀錄高鐵軌跡，已得知振動紀錄對應的行駛路段（如下圖灰色區域表現）。本次研究針對 2020 年 9 月以及 2021 年 3 月高鐵資料，由水利地理資訊服務平台提供的地下水位測站找出距離高鐵鐵路方圓兩公里的十個測站（阿蓮、仁德、新化、善化、太康、新東、鹿草、永定、土庫、溪洲），並利用 GPS 定位出列車在特定時段經過區段，再擷取上述區段振動資料，由高

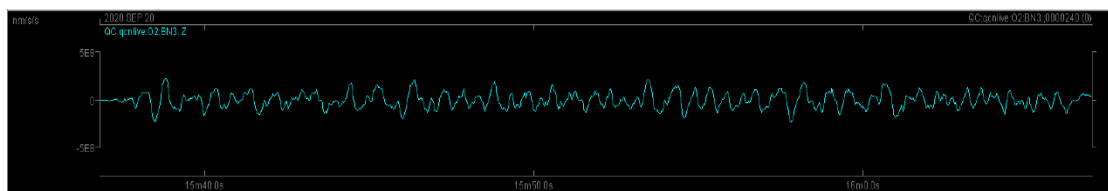
鐵行經嘉南地區之高鐵低頻振動波之特徵指出，此微機電加速器在 0.016~0.316 Hz 與 8~20 Hz 可能有部分來自於儀器本身的自我噪音(self-noise)，而非真實震振動訊號。此研究也指出 0.5~4.0Hz 恰落在此微機電加速器的最佳偵測範圍。故本研究針對此波段進行帶通濾波(band-pass filter)後進行後續分析，得出十個地點在豐水期與枯水期的主要頻率（如下圖的頻譜圖顯示，黃色圈處為頻譜圖中的主頻，白圈處為頻譜圖中的次頻）。

1. 阿蓮地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

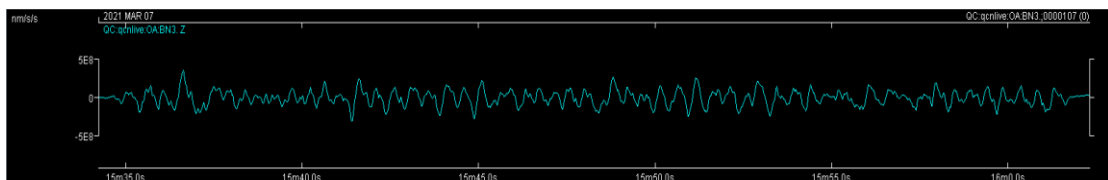
圖一中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為阿蓮地下水位站。阿蓮地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖二（9 月）及圖三（3 月）。阿蓮路段振動頻譜圖見圖四（9 月）及圖五（3 月）。



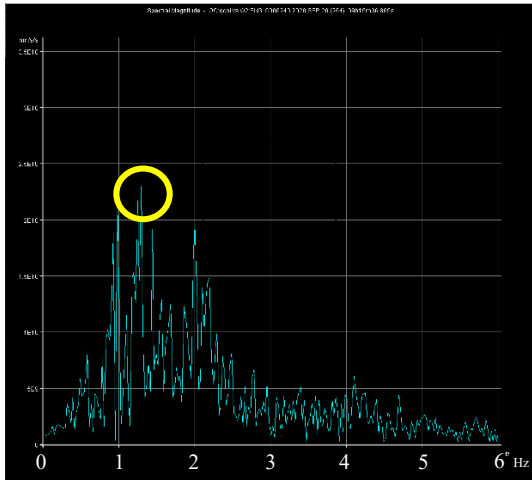
圖一 阿蓮地段地圖



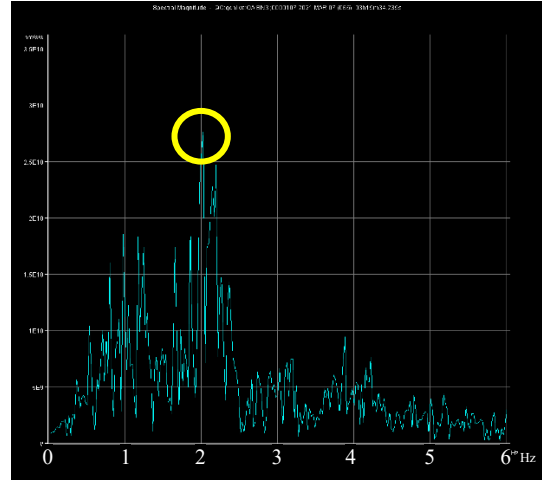
圖二 阿蓮振動紀錄（9 月）



圖三 阿蓮振動紀錄（3 月）



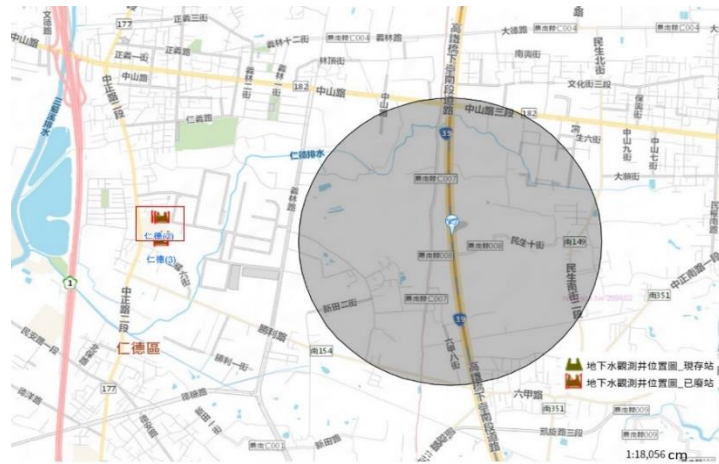
圖四 近阿蓮測站頻譜圖 (9月)
主頻(黃圈)1.29Hz



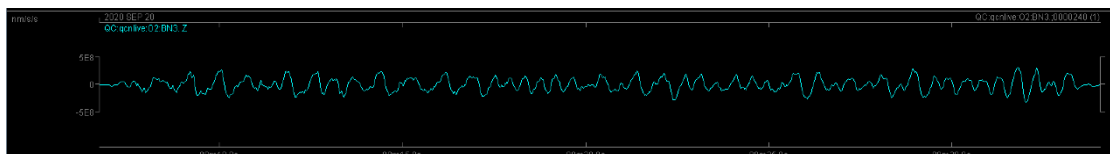
圖五 近阿蓮測站頻譜圖 (3月)
主頻(黃圈)2.02Hz

2. 仁德地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

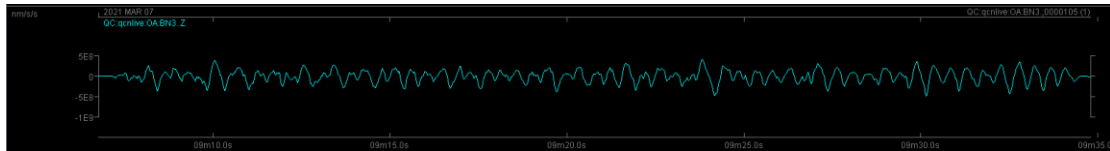
圖六中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為仁德地下水位站。仁德地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖七 (9月) 及圖八 (3月)。仁德路段振動頻譜圖見圖九 (9月) 及圖十 (3月)。



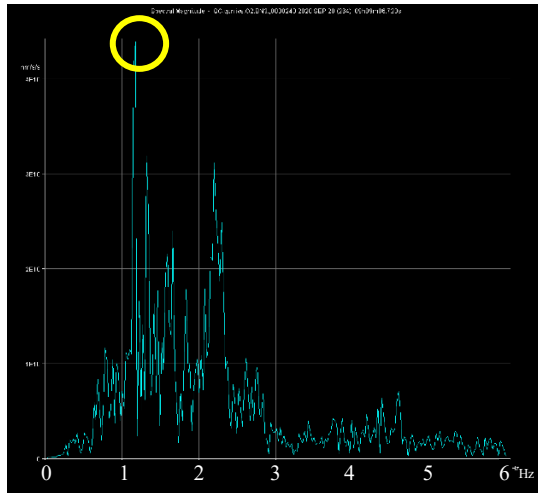
圖六 仁德地段地圖



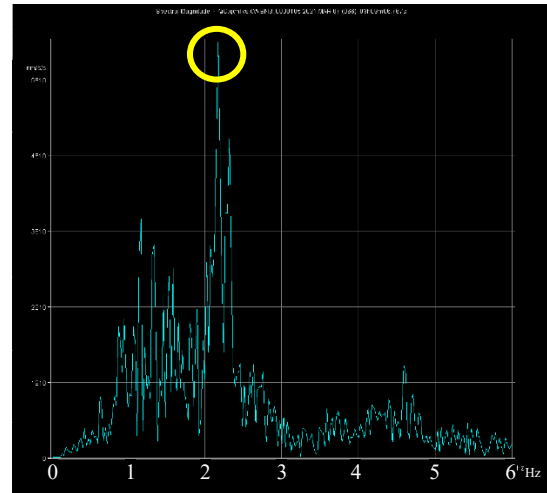
圖七 仁德振動紀錄 (9月)



圖八 仁德振動紀錄（3月）



圖九 近仁德測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)2.17Hz



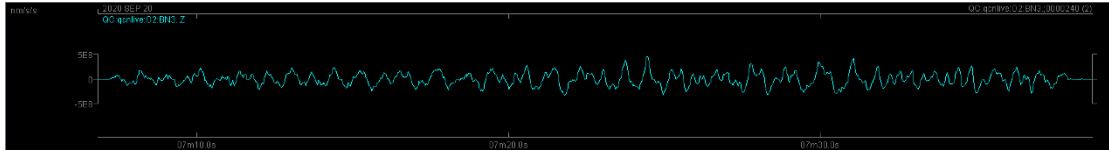
圖十 近仁德測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)1.17Hz

3. 新化地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

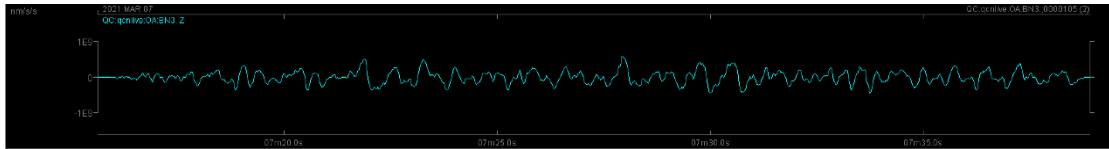
圖十一中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為新化地下水位站。新化地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖十二（9月）及圖十三（3月）。新化路段振動頻譜圖見圖十四（9月）及圖十五（3月）。



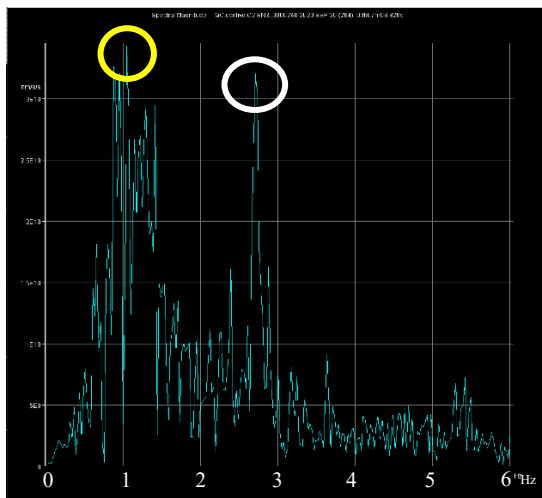
圖十一 新化地段地圖



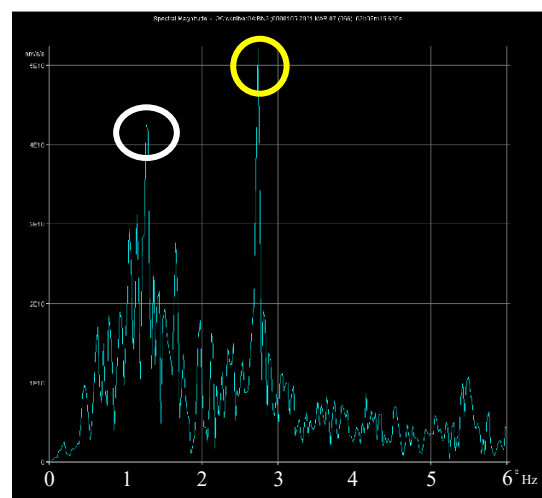
圖十二 新化振動紀錄（9月）



圖十三 新化振動紀錄（3月）



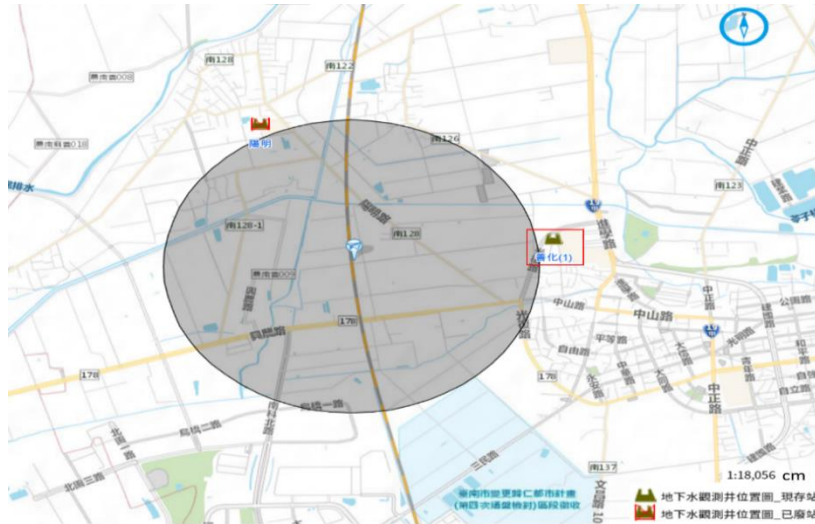
圖十四 近新化測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.28Hz、次頻(白圈)2.80Hz



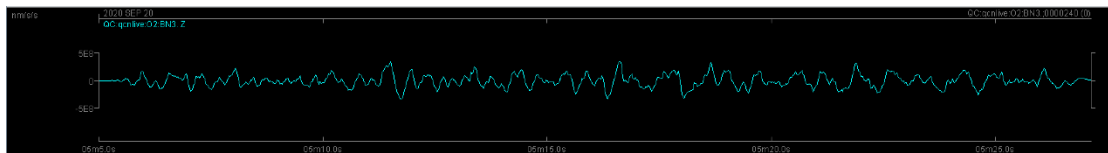
圖十五 近新化測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)2.74Hz、次頻(白圈)2.85Hz

4. 善化地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

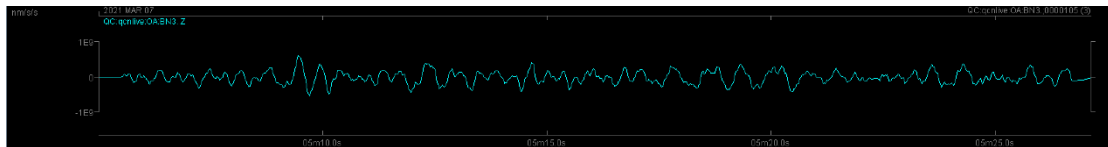
圖十六中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為善化地下水位站。善化地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖十七（9月）及圖十八（3月）。新化路段振動頻譜圖見圖十九（9月）及圖二十（3月）。



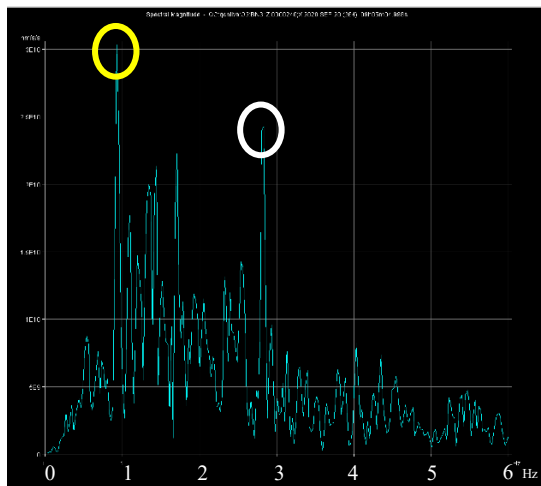
圖十六 善化地段地圖



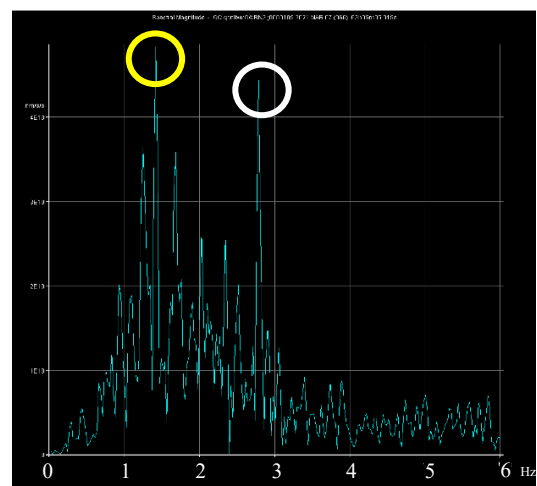
圖十七 善化振動紀錄 (9月)



圖十八 善化振動紀錄 (3月)



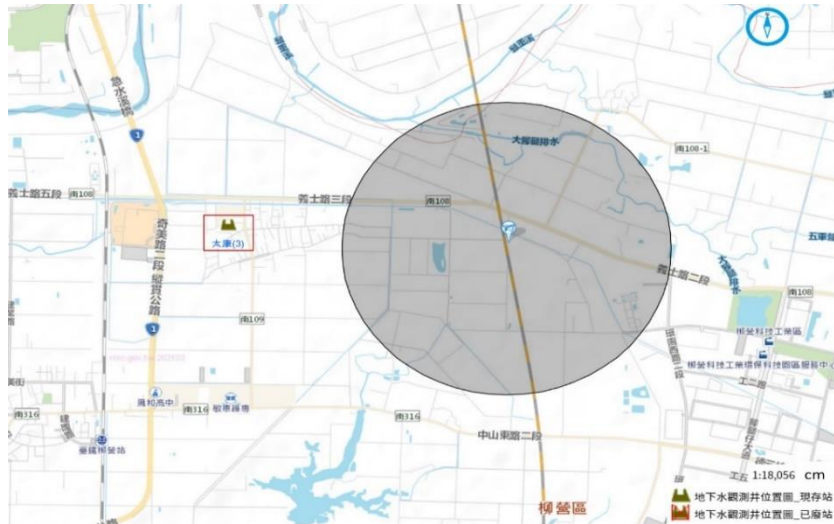
圖十九 近善化測站頻譜圖 (9月)
主頻(黃圈)0.98Hz、次頻(白圈)2.72Hz



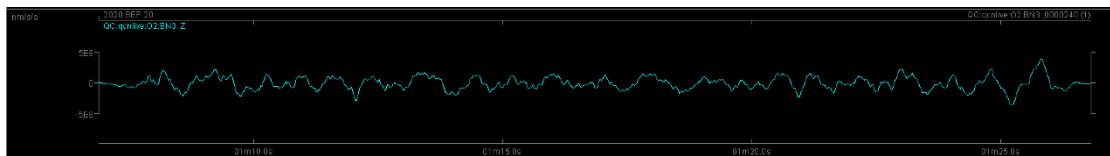
圖二十 近善化測站頻譜圖 (3月)
主頻(黃圈)1.42Hz、次頻(白圈)2.75Hz

5. 太康地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

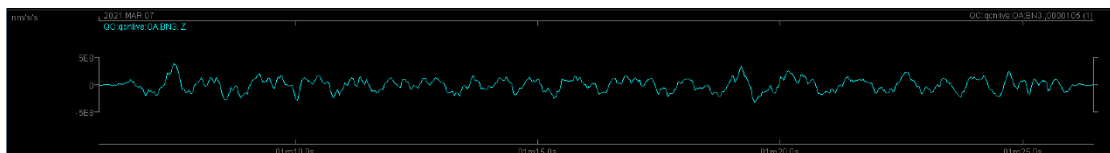
圖二十一中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為太康地下水位站。太康地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖二十二（9 月）及圖二十三（3 月）。太康路段振動頻譜圖見圖二十四（9 月）及圖二十五（3 月）。



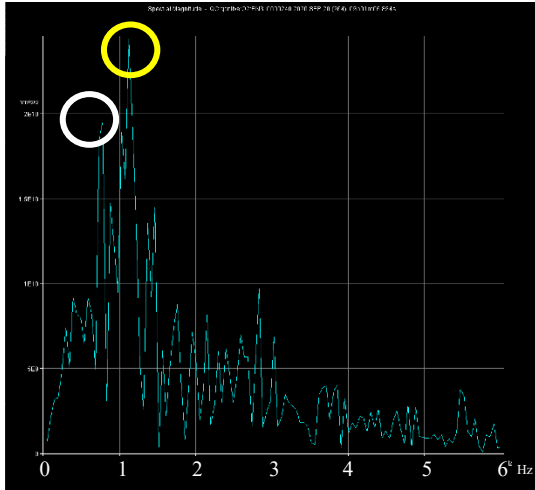
圖二十一 太康地段地圖



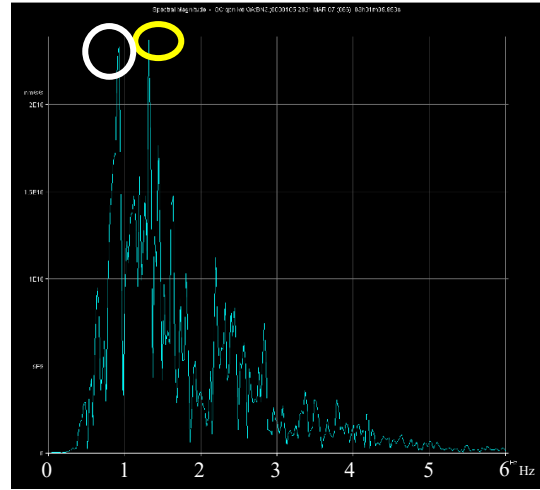
圖二十二 太康振動紀錄（9 月）



圖二十三 太康振動紀錄（3 月）



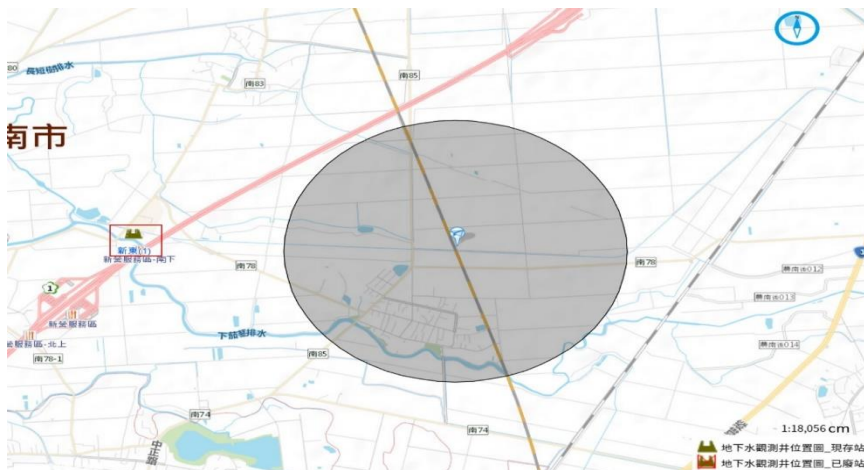
圖二十四 近太康測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.12Hz、次頻(白圈)0.92Hz



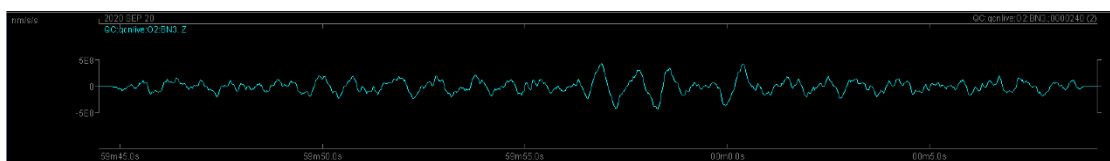
圖二十五 近太康測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)1.32Hz、次頻(白圈)0.95Hz

6. 新東地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

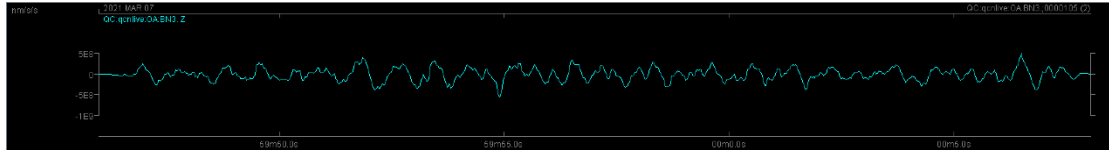
圖二十六中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為新東地下水位站。新東地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖二十七（9月）及圖二十八（3月）。新東路段振動頻譜圖見圖二十九（9月）及圖三十（3月）。



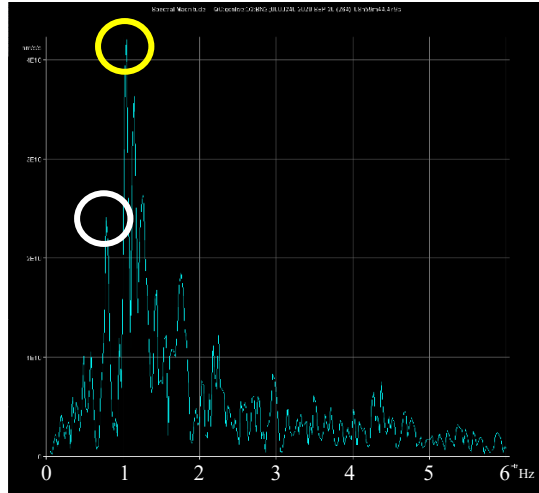
圖二十六 新東地段地圖



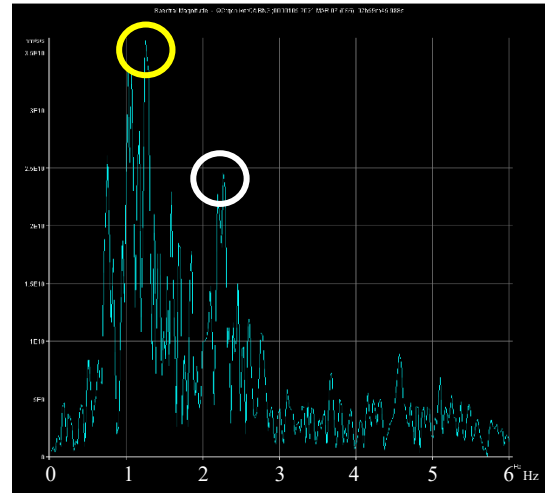
圖二十七 新東振動紀錄（9月）



圖二十八 新東振動紀錄（3月）



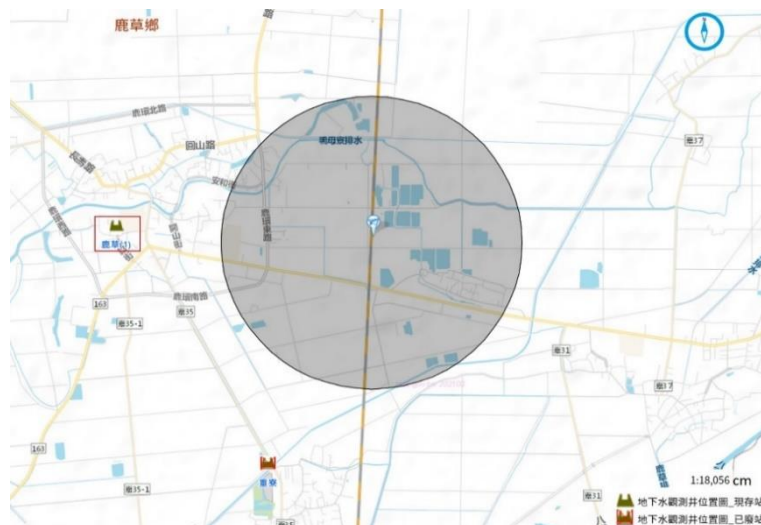
圖二十九 近新東測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.05Hz、次頻(白圈)0.87Hz



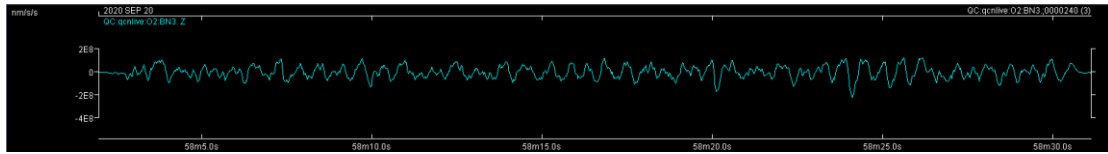
圖三十 近新東測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)1.24Hz、次頻(白圈)2.3Hz

7. 鹿草地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

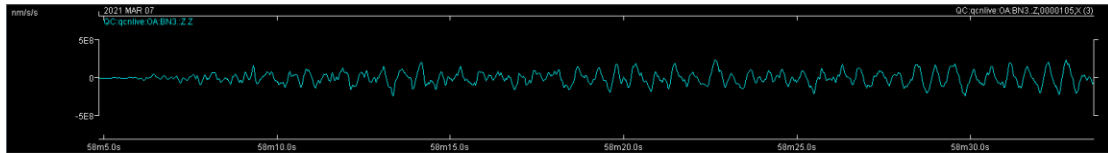
圖三十一中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為鹿草地下水位站。鹿草地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖三十二（9月）及圖三十三（3月）。鹿草路段振動頻譜圖見圖三十四（9月）及圖三十五（3月）。



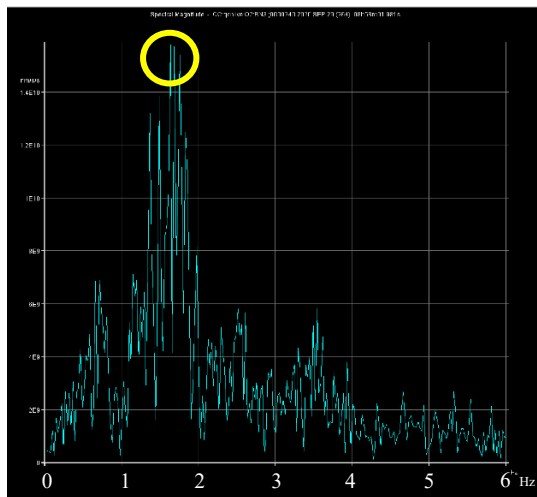
圖三十一 鹿草地段地圖



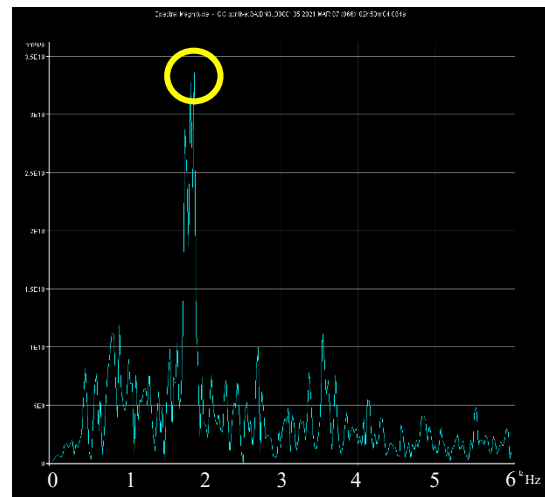
圖三十二 鹿草振動紀錄（9月）



圖三十三 鹿草振動紀錄（3月）



圖三十四 近鹿草測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.64Hz



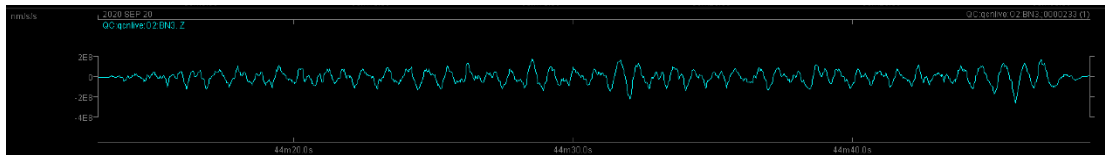
圖三十五 近鹿草測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)1.86Hz

8. 土庫地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

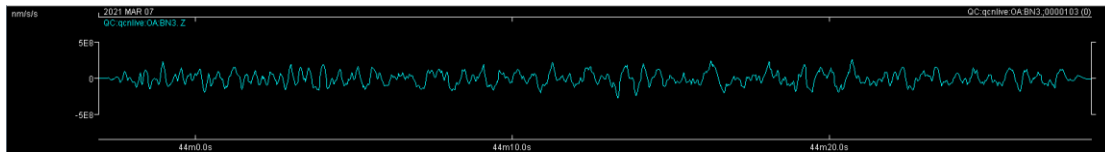
圖三十六中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為土庫地下水位站。土庫地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖三十七（9月）及圖三十八（3月）。土庫路段振動頻譜圖見圖三十九（9月）及圖四十（3月）。



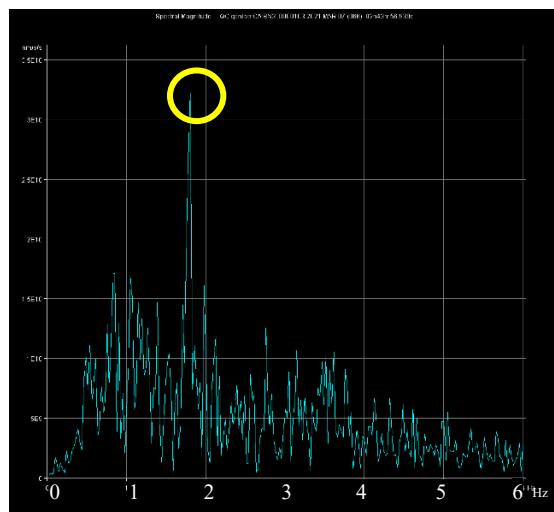
圖三十六 土庫地段地圖



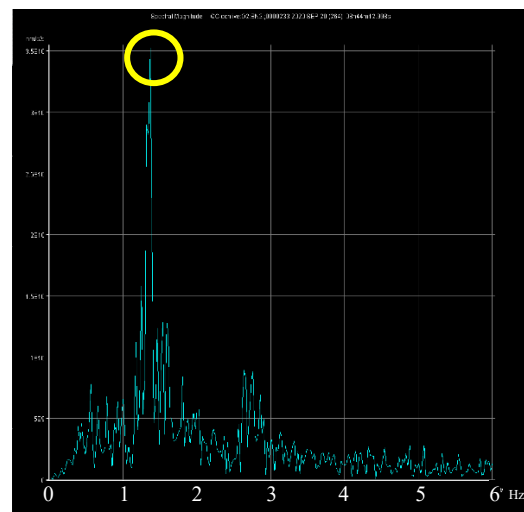
圖三十七 土庫振動紀錄 (9月)



圖三十八 土庫振動紀錄 (3月)



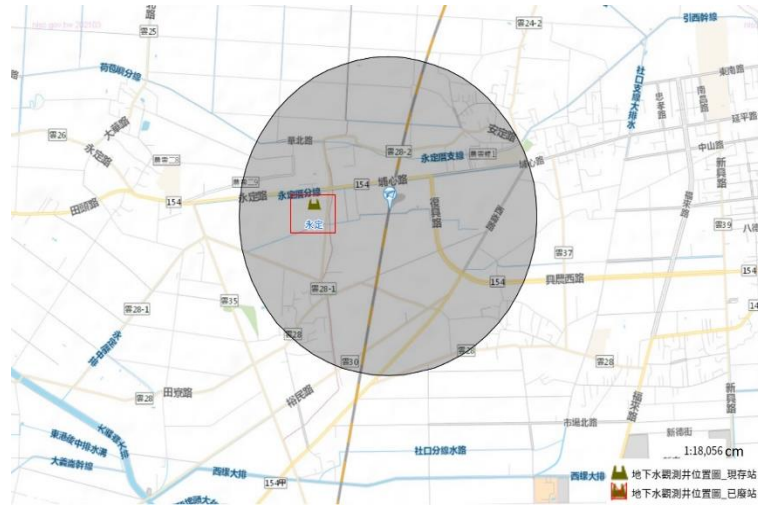
圖三十九 近土庫測站頻譜圖 (9月)
主頻(黃圈)2.02Hz



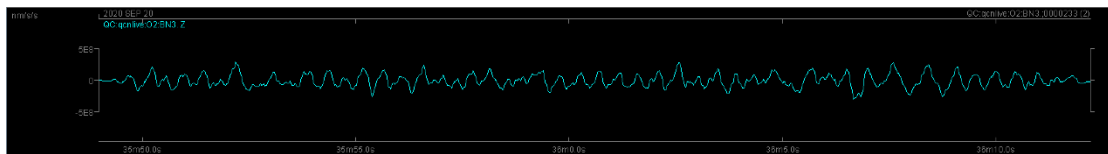
圖四十 近土庫測站頻譜圖 (3月)
主頻(黃圈)2.19Hz

9. 永定地下水位站與高鐵振動資料

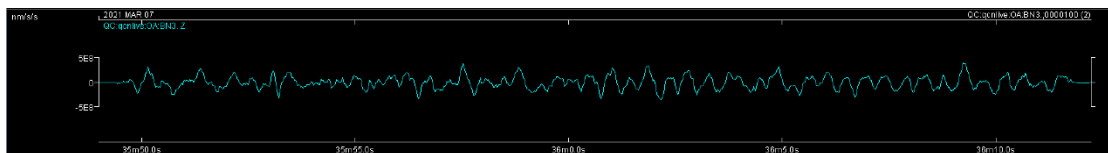
圖四十一中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為永定地下水位站。永定地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖四十二（9 月）及圖四十三（3 月）。永定路段振動頻譜圖見圖四十四（9 月）及圖四十五（3 月）。



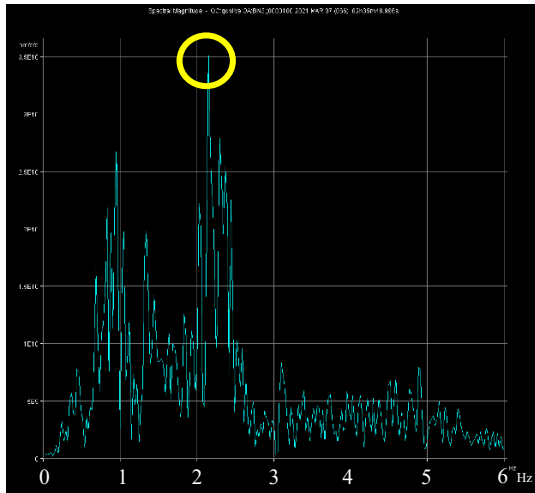
圖四十一 永定地段地圖



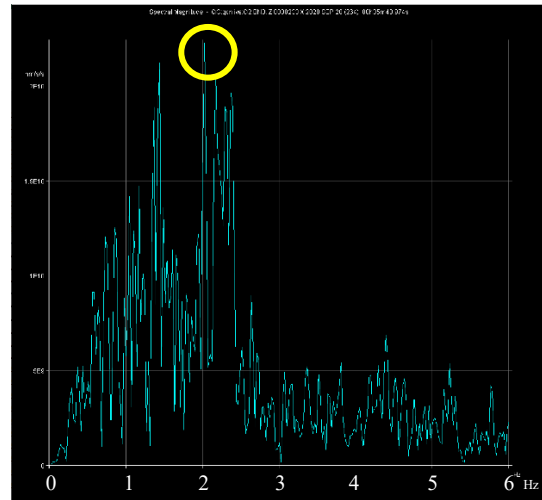
圖四十二 永定振動紀錄（9 月）



圖四十三 永定秒振動紀錄（3 月）



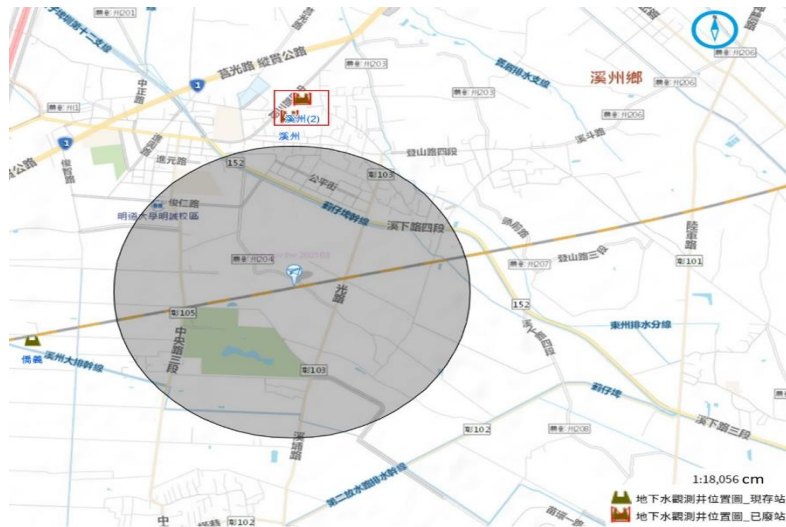
圖四十四 近永定測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.37Hz



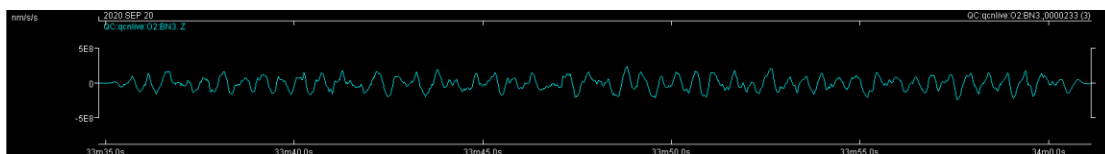
圖四十五 近永定測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)1.81Hz

10. 溪州地下水位站與鄰近之高鐵振動紀錄

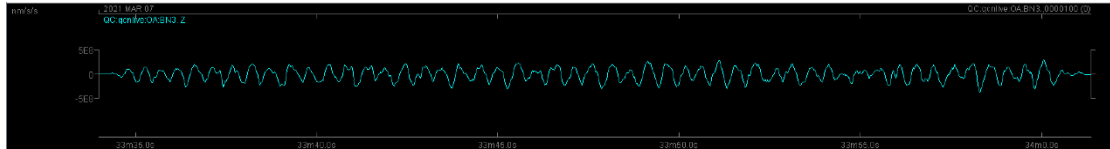
圖四十六中灰色圈處為為本次研究區段，紅框為溪州地下水位站。溪州地下水位站附近的高鐵路段 30 秒振動紀錄為圖四十七（9月）及圖四十八（3月）。溪州路段振動頻譜圖見圖四十九（9月）及圖五十（3月）。



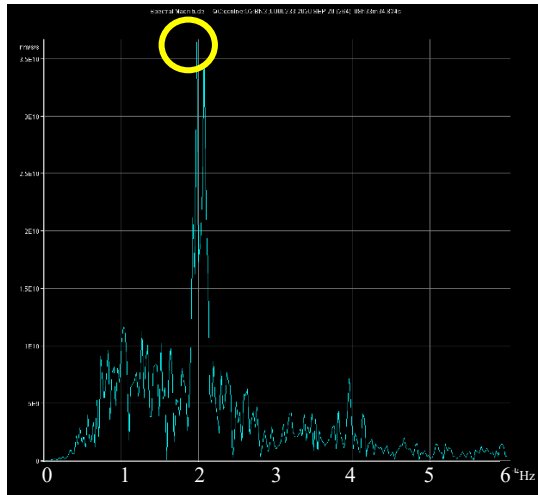
圖四十六 溪州地段地圖



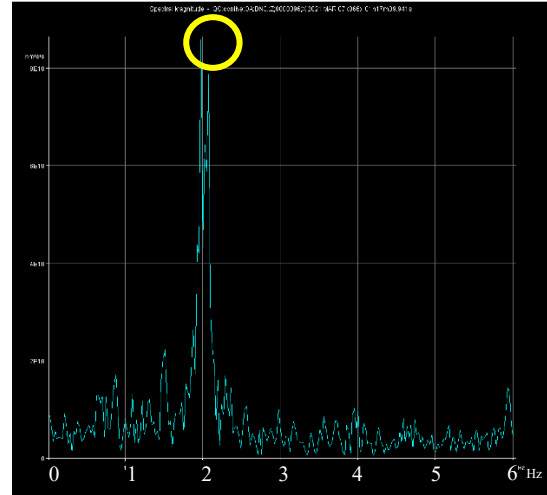
圖四十七 溪州振動紀錄（9月）



圖四十八 溪州振動紀錄（3月）



圖四十九 近溪州測站頻譜圖（9月）
主頻(黃圈)1.97Hz



圖五十 近溪州測站頻譜圖（3月）
主頻(黃圈)2.15Hz

三、高鐵振動特徵之空間變化

過去研究顯示，行車速度、軌道與道床特性、地層結構等有關(王永明等，2010)，本研究利用同一型列車、同樣行進狀態(等速進行中)進行振動量測，期能反映地震波傳遞過程中的介質特性。

本研究所選之十個地下水位站與其空間分佈由圖五十一中黑點表示，而鄰近的高鐵路線與振動量測區間則如圖五十一的紅色區間顯示。振動的特徵若由最大振幅與主頻定義，則不同量測點的特徵彙整在表二至表四。在表二中，我們發現各站皆呈現一致的特徵 - 枯水期的主頻皆比豐水期大，表三、表四則呈現枯水期的最大和平均振幅皆比豐水期大。而豐水期時在新化站的振動振幅最大，鹿草站最小，而主頻則以土庫站最高(2.02Hz)、阿蓮站最低(0.68Hz)；我們發現枯水期時在善化站的振動振幅最大，土庫站最小，而主頻則以新化站最高

(2.74Hz)、新東站最低(1.24Hz)。為理解不同站的地下水位資訊與振動振幅和主頻的關係，我們進一步分析各站的地下水紀錄。



圖五十一 地下水位測站與高鐵路線分布圖

表二 地下水位測站主頻

地區	2020年9月(豐水期)	2021年3月(枯水期)
阿蓮	1.29 Hz	2.02 Hz
仁德	1.17 Hz	2.17 Hz
新化	1.28 Hz	2.74 Hz
善化	0.93 Hz	1.42 Hz
太康	1.12 Hz	1.31 Hz
新東	1.05 Hz	1.24 Hz
鹿草	1.64 Hz	1.86 Hz
土庫	2.02 Hz	2.19 Hz
永定	1.37 Hz	1.81 Hz
溪州	1.97 Hz	2.15 Hz

表三 地下水位測站最大振幅

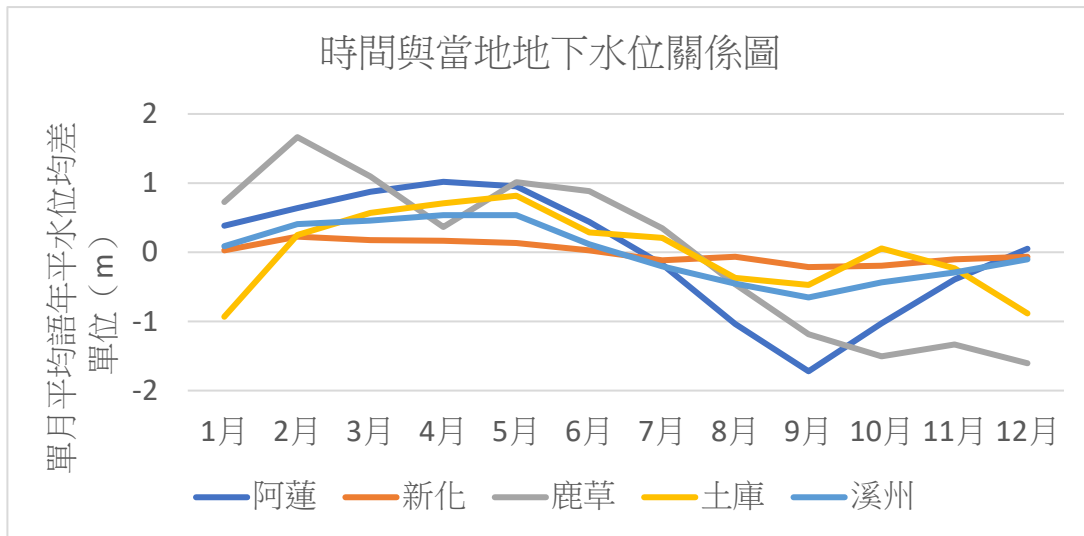
地區	2020年9月(豐水期)	2021年3月(枯水期)
阿蓮	23.8 cm/s ²	36.0 cm/s ²
仁德	32.4 cm/s ²	47.4 cm/s ²
新化	46.3 cm/s ²	57.0 cm/s ²
善化	35.1 cm/s ²	61.3 cm/s ²
太康	39.4 cm/s ²	36.9 cm/s ²
新東	43.9 cm/s ²	39.5 cm/s ²
鹿草	22.1 cm/s ²	54.6 cm/s ²
土庫	25.6 cm/s ²	22.1 cm/s ²
永定	29.6 cm/s ²	26.6 cm/s ²
溪州	25.0 cm/s ²	39.5 cm/s ²

表四 地下水位測站平均振幅

地區	2020年9月(豐水期)	2021年3月(枯水期)
阿蓮	6.4 cm/s ²	8.8 cm/s ²
仁德	9.3 cm/s ²	11.5 cm/s ²
新化	10.0 cm/s ²	12.9 cm/s ²
善化	8.7 cm/s ²	13.3 cm/s ²
太康	8.0 cm/s ²	10.6 cm/s ²
新東	8.8 cm/s ²	9.2 cm/s ²
鹿草	4.2 cm/s ²	11.7 cm/s ²
土庫	4.7 cm/s ²	5.6 cm/s ²
永定	6.8 cm/s ²	7.8 cm/s ²
溪州	7.2 cm/s ²	9.9 cm/s ²

四、各站之地下水位季節性特徵

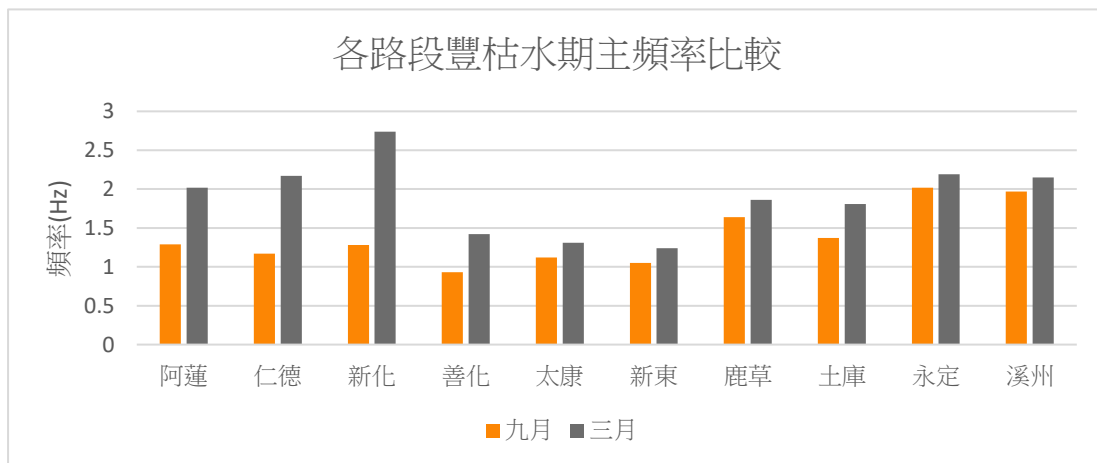
本研究取了阿蓮、新化、溪州、鹿草、土庫測站 2009~2021 的地下水位資料，其中地下水位是以基隆的臺灣水準原點 18.6 年的平均海平面當基準。計算出各地的月平均水位及年平均水位，然後與當地地下水位相減可得以下折線圖(如圖五十二)。由圖五十二得知二到六月地下水位低於該測站年平均，與枯水期有部份重疊，七月到一月地下水位大多高於該地的年平均(豐水期)。



圖五十二 時間與當地地下水位關係圖

五、豐枯水期最大振幅與主要頻率比較

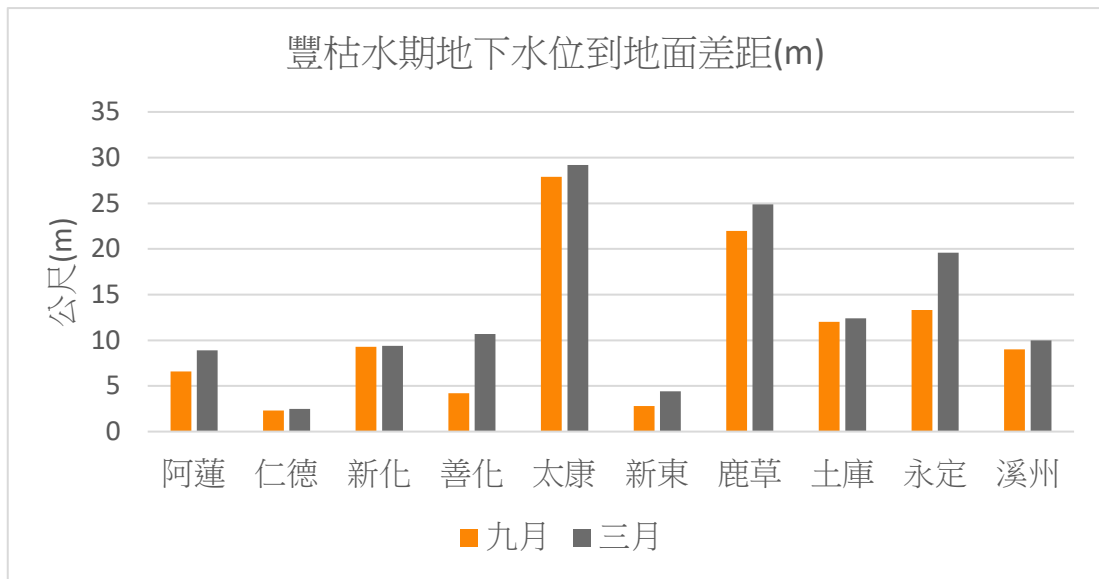
不同地下水站的豐水、枯水期對應之主頻如圖五十三顯示，我們發現高鐵在豐水期（9月）行經上述十個地區（阿蓮、仁德、新化、善化、太康、新東、鹿草、永定、土庫、溪洲）時的振動主頻較枯水期高。特別在阿蓮大約 1.57 倍、仁德大約 1.85 倍、新化大約 2.14 倍、善化大約 1.53 倍、太康大約 1.17 倍、新東大約 1.18 倍、鹿草大約 1.13 倍、土庫大約 1.08 倍、永定大約 1.32 倍、溪州大約 1.09 倍。阿蓮、仁德、新化、善化的豐枯水期主頻差異較為明顯，太康、新東、鹿草、永定、土庫、溪洲差異較小。不同測站的地下水位如表五所示，在阿蓮、仁德、新化、善化的地下水位離地面較接近，對應更低的主頻(見圖五十四)。



圖五十三 豐枯水期主頻測站長條圖

表五 豐枯水測站水位差

地區	地下水位測站高程 (m)	九月份地下水位 (m)	三月份地下水位 (m)	豐枯水期水位差 (m)
阿蓮	23.6	17.0	14.7	2.3
仁德	9.0	6.7	6.5	0.2
新化	14.3	5.0	4.9	0.1
善化	13.5	9.3	2.8	6.5
太康	15.2	-12.7	-14	1.3
新東	13.8	11.0	9.4	1.6
鹿草	13.57	-8.4	-11.3	2.9
土庫	17.2	3.9	-2.4	6.3
永定	24.0	12.0	11.6	0.4
溪州	34.0	25.0	24.0	1.0



圖五十四 豐枯水期地下水位到地面差距長條圖

陸、討論與迴歸分析

利用地表的振動量測和各站的地下水資訊，觀測資料顯示振動的頻率和振幅，受到枯水、豐水期的影響。為了理解這樣的關係，我們進一步整合各站的資料，期採取複迴歸模型做驗證。本研究採用平均絕對值誤差百分比(mean absolute percentage error, MAPE)作為預測優劣的指標，其計算方式如下：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y(i) - \hat{y}(i)}{y(i)} \right| \times 100\%$$

其中 n 為樣本數

y(i)為第 i 項的實際值

$\hat{y}(i)$ 為第 i 項的估計值

MAPE 值越接近 0 代表預測效果越佳。本研究根據 Lewis (1982)所提

MAPE 之標準判定模型預測之優劣。判定標準如表六所示。

表六 MAPE 之標準判定

MAPE(%)	說明
<10	高準確的預測
10-20	優良的預測
20-50	合理的預測
>50	不準確的預測

1. 頻率

本研究以頻率為依變數，水期、地區、水位為自變數，考慮以下複迴歸模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \cdots + \beta_{10} x_{10} + \beta_{11} x_{11} + \varepsilon$$

其中 y 為振動頻率

x_1, x_2, \dots, x_{10} 為指標變數，定義為：

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{若豐水期} \\ 0, & \text{若枯水期} \end{cases} \quad x_2 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為阿蓮} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_3 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為仁德} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_4 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為新化} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_5 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為善化} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_6 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為太康} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_7 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為新東} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_8 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為鹿草} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_9 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為土庫} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_{10} = \begin{cases} 1, & \text{若地區為永定} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

x_{11} 為水位。

本研究採用統計軟體 SPSS 26.0 進行複迴歸模型的配適，模型參數 β 估計值計算方式採最小平方法，得配適之複迴歸模型如下：

$$\hat{y} = 2.56 - 0.543x_1 - 0.447x_2 - 0.561x_3 - 0.054x_4 - 0.934x_5 - 0.387x_6 - 1.057x_7 + 0.025x_8 + 0.306x_9 - 0.405x_{10} - 0.024x_{11}$$

而判定係數 $R^2=0.813$ 接近 1，顯示模型與資料之配適度良好。本研究進一步以配適之模型預測頻率如下表：

表七 頻率模型真實與預測值比較

真實頻率(Hz)	預測頻率(Hz)	相對誤差百分比
2.02	1.90	6%
1.29	1.41	9%
2.17	1.94	11%
1.17	1.40	20%
2.74	2.28	17%
1.28	1.74	36%
1.42	1.37	4%
0.93	0.98	6%
1.31	1.47	12%

真實頻率(Hz)	預測頻率(Hz)	相對誤差百分比
1.12	0.96	14%
1.24	1.40	13%
1.05	0.89	15%
1.86	1.99	7%
1.64	1.51	8%
2.19	2.39	9%
2.02	1.82	10%
1.81	1.86	3%
1.37	1.32	3%
2.15	2.32	8%
1.97	1.80	9%

由上表得 MAPE 為 11%，表示此本研究所建立之頻率預測模型為“優良”的預測。

2. 平均振幅

本研究以平均振幅為依變數，水期、地區、水位為自變數，考慮以下複迴歸模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \cdots + \beta_{10}x_{10} + \beta_{11}x_{11} + \varepsilon$$

其中 y 為平均振幅

x_1, x_2, \dots, x_{10} 為指標變數，定義為：

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{若豐水期} \\ 0, & \text{若枯水期} \end{cases} \quad x_2 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為阿蓮} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_3 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為仁德} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_4 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為新化} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_5 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為善化} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_6 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為太康} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_7 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為新東} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_8 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為鹿草} \\ 0, & \text{否則} \end{cases} \quad x_9 = \begin{cases} 1, & \text{若地區為土庫} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

$$x_{10} = \begin{cases} 1, & \text{若地區為永定} \\ 0, & \text{否則} \end{cases}$$

x_{11} 為水位。

本研究採用統計軟體 SPSS 26.0 進行複迴歸模型的配適，模型參數 β 估計值計算方式採最小平方法，得配適之複迴歸模型如下：

$$\hat{y} = 4.207 - 1.905x_1 + 0.016x_2 + 5.815x_3 + 2.965x_4 + 3.629x_5 - 9.885x_6 + 3.734x_7 - 8.358x_8 - 9.404x_9 - 2.762x_{10} + 0.557x_{11}$$

而判定係數 $R^2=0.897$ 接近 1，顯示模型與資料之配適度良好。本研究進一步以配適之模型預測頻率如下表：

表八 平均振幅模型真實與預測值比較

真實平均振福(cm/s ²)	預測平均振福(cm/s ²)	相對誤差百分比
8.8	9.18	4%
6.37	5.99	6%
11.54	11.41	1%
9.27	9.40	1%
12.88	12.41	4%
9.97	10.45	5%
13.33	13.80	4%
8.74	8.27	5%
10.59	10.59	0%
7.95	7.96	0%
9.22	10.39	13%
8.77	7.60	13%
11.67	9.70	17%
4.21	6.18	47%
5.64	5.72	1%
4.73	4.65	2%
7.78	8.35	7%
6.8	6.22	8%
9.88	9.78	1%

由上表得 MAPE 為 7%，表示此本研究所建立之平均振幅預測模型為“高準確”的預測。

3.最大振幅

本研究以最大振幅為依變數，水期、地區、水位為自變數，考慮以下複迴歸模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \cdots + \beta_{10}x_{10} + \beta_{11}x_{11} + \varepsilon$$

其中 y 為最大振幅

x_1, x_2, \dots, x_{10} 為指標變數，定義為：

$$x_1 = \begin{cases} 1, \text{若豐水期} \\ 0, \text{若枯水期} \end{cases} \quad x_2 = \begin{cases} 1, \text{若地區為阿蓮} \\ 0, \text{否則} \end{cases} \quad x_3 = \begin{cases} 1, \text{若地區為仁德} \\ 0, \text{否則} \end{cases}$$

$$x_4 = \begin{cases} 1, \text{若地區為新化} \\ 0, \text{否則} \end{cases} \quad x_5 = \begin{cases} 1, \text{若地區為善化} \\ 0, \text{否則} \end{cases} \quad x_6 = \begin{cases} 1, \text{若地區為太康} \\ 0, \text{否則} \end{cases}$$

$$x_7 = \begin{cases} 1, \text{若地區為新東} \\ 0, \text{否則} \end{cases} \quad x_8 = \begin{cases} 1, \text{若地區為鹿草} \\ 0, \text{否則} \end{cases} \quad x_9 = \begin{cases} 1, \text{若地區為土庫} \\ 0, \text{否則} \end{cases}$$

$$x_{10} = \begin{cases} 1, \text{若地區為永定} \\ 0, \text{否則} \end{cases}$$

x_{11} 為水位。

本研究採用統計軟體 SPSS 26.0 進行複迴歸模型的配適，模型參數 β 估計值計算方式採最小平方法，得配適之複迴歸模型如下：

$$\hat{y} = -2.214 - 4.081x_1 + 4.444x_2 + 34.912x_3 + 20.006x_4 + 23.825x_5 \\ - 67.223x_6 + 32.133x_7 - 47.332x_8 - 49.992x_9 - 14.456x_{10} \\ + 3.839x_{11}$$

而判定係數 $R^2=0.825$ 接近 1，顯示模型與資料之配適度良好。本研究進一步以配適之模型預測頻率如下表：

表九 最大振幅模型真實與預測值比較

真實最大振幅(cm/s ²)	預測最大振幅(cm/s ²)	相對誤差百分比
36.04	36.40	1%
23.85	23.49	2%
47.36	42.30	11%
32.38	37.45	16%
57.02	53.88	5%
46.28	49.42	7%
61.28	62.69	2%
35.07	33.66	4%
36.86	42.67	16%
39.41	33.60	15%
39.49	46.81	19%
43.91	36.59	17%
54.59	45.94	16%
22.07	30.72	39%
22.15	23.04	4%
25.62	24.72	3%
26.61	30.94	16%
29.64	25.32	15%
39.46	36.18	8%

由上表得 MAPE 為 11%，表示此本研究所建立之最大振幅預測模型為“優良”的預測。

這三個複迴歸模型，串連了頻率、最大振幅、平均振幅在枯水、豐水的差異表現。這三個回歸模型的 R^2 皆大於 0.8，且頻率及最大振幅 MAPE 皆介於 11%-20%間 - 屬於“優良”模型，平均振幅模型中的 MAPE 為 7%屬於“高準確”模型，我們可以推估頻率、最大振幅、平均振幅接與地區、豐枯水期、地下水水位有線性關係。

柒、結論

一、地下水位與共振效應

台灣西南平原表面波現象探討 (黃瑋程、鄭濬承, 2018)及高鐵行經嘉南地區之高鐵低頻振動波研究中皆指出：在台灣西部沖積平原區，不管是天然地震或是背景環境振動，地動紀錄中存在的 0.5-4 Hz 主頻可能反應了沖積層的共振效應。本研究進一步分析十個位址的地下水位和地表振動的振幅和主頻，發現枯水期的主要振動頻率較高頻而振幅亦較高，顯示地下水位的季節性變化，能影響著共振頻率的表現。

二、各地區地下水位變化程度與振動頻率變化之關係

在阿蓮、仁德、新化、善化幾個測站，其地下水位離地面較接近，產生的主頻較低頻。根據測量結果發現，阿蓮、善化、鹿草、土庫地區在枯水期水位下降更為顯著，分別為 2.3m、6m、3m、6m，這可能對應著振動紀錄的較大之主頻差異。在這些測站，豐水期被發現訊號較具低頻能量，可能因為高頻能量在含水量更多的區域，更容易衰減。而其他地方的地下水位落差在 0.1~2m 導致豐枯水期的主頻差異不大。

三、豐枯水期振動頻率比較

地層微動頻率與地下水位之關聯性分析(馮正一、王上維, 2013)顯示地層微震的頻率應該有季節性變化，且地下水位與寬頻地震站所分析之地層微震頻率大致上成反向關係，當地下水位上升時，地層微震頻率是較低頻的，水位下降時，頻率則為較高頻。地震的震源深度、震央位置及規模皆無法控制，我們本次研究以高鐵為人工震源，好處為可快速且大規模研究台灣西半部地區的振動資料，高鐵的高速行進過程中造成地表振動可視作一穩定的人工震源，藉由高鐵在行經各路段產生的振動訊號，研究乾、枯水期地下水位變動與高鐵之振動有關，發現豐水期的主頻較為低頻。

四、複迴歸模型

由上三個複迴歸模型（頻率、最大振幅、平均振幅）三模型的 R^2 皆大於 0.8 且頻率及最大振幅 MAPE 皆介於 11%-20% 間屬於“優良”模型，平均振幅模型中的 MAPE 為 7% 屬於“高準確”模型，我們可以推估頻率、最大振幅、平均振幅接與地區、豐枯水期、地下水位有線性關係，未來我們希望可以透過逆回歸到方式來透過人工震源，監測的頻率來推估阿蓮、仁德、新化、善化、太康、新東、鹿草、永定、土庫、溪洲地下水位測站地下水位。

捌、心得與未來展望

這次科展我們遇到許多困境，比如收集地下水即時相關資料、如何將多種數據彙整，GPS 軌跡資料、地圖的疊圖。遇到不會處理的數據時，我們還申請台灣各大學旁聽相關課程。

未來我們希望可以利用其他兩軸數據，來監測高鐵地下構造，也希望在高鐵橋墩設置感應器，進行長時間的數據收集，以便後續利用時間序列模型完善。並嘗試利用振動情形反推地下水面位置及斷層位置。

玖、參考資料及其他

1. 吳承儒(2014)。軌道下陷與車輛振動頻率偏移之探討。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會。
2. 馮正一、王上維(2013)。地層微動頻率與地下水位之關聯性分析。社團法人中華水土保持學會 102 年度年會。
3. 黃瑋程、鄭濬承，(2018)。台灣西南平原表面波現象探討。2018 年臺灣國際科學展覽會。
4. 經濟部水利署。<https://www.wra.gov.tw/>
5. 水利地理資訊服務平台 <https://gic.wra.gov.tw/gis/>
6. Lewis, E.B., Control of body segment differentiation in *Drosophila* by the bithorax gene complex. *Prog Clin Biol Res*, 1982. 85 Pt A : p. 269-88.

【評語】 051909

利用置放在高鐵上的微機電感測器記錄分析高鐵經過地點的振動頻率變化去推估當地地下水位之高低變化，其實作探究精神，結果相當良好，值得進一步去分析其應用性。

研究設計與分析新穎，兼具學術性和應用性，但缺乏頻率與水位關係的說明。分析的地下水位，建議與實際量測地下水位比較。圖五十四之原始數據來源，沒有列在參考文獻中。根據圖五十三豐枯期主頻差異最大的測站是新化，根據表五新化站的地下水位豐枯期差異是最小的只有 0.1m，為什麼主頻差異無法反應地下水位差異？

作品簡報



千尋水上列車-分析地下水訊號

組別：高級中等學校組
科別：地球與行星科學

■ 研究動機 ■ ■

2021年初台灣本島發生近56年來大規模乾旱事件，導致各地區進入不同程度的減壓供水、限水、停耕、歇業等情況，也導致台灣西半部地下水位下降。



這次近56年來的大規模乾旱現象，造成地下水位達到低點，因此我們希望趁這次乾旱時期高鐵車體的振動，建立起尋找地下水位的基準值。

希望藉高鐵此一穩定震源研究地下水位高度與振動的關係，期望利用人工震源快速且大規模尋找地下水，以及探討地下水在乾濕兩季會產生甚麼不同的振動訊號。

■ 研究目的 ■ ■

- 一、探討台灣西南部地下水與振動頻譜變化之關係。
- 二、探討豐水期的高鐵主要振動頻率。
- 三、探討枯水期的高鐵主要振動頻率。
- 四、分別建立頻率、最大振幅、平均振幅之迴歸預測模型。

■ 研究設備及器材 ■ ■



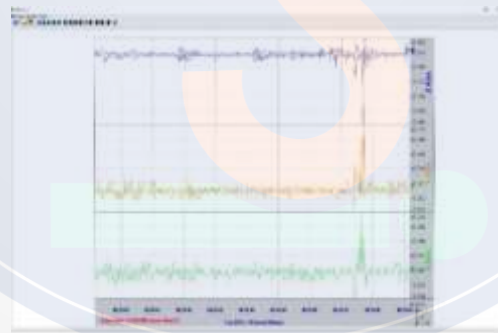
GPS軌跡紀錄器



微機電加速計
(O-Navi A 12-bit)



SeisGram2K 軟體



Quake Catcher
Network Live軟體



original pro軟體



SPSS Statistics 26.0
軟體

■ 研究過程或方法 ■■■

文獻閱讀
與探討

選定測量
路段及站
點

收集地下
水及高鐵
振動資料

用GPS定
位各路段
振動情形

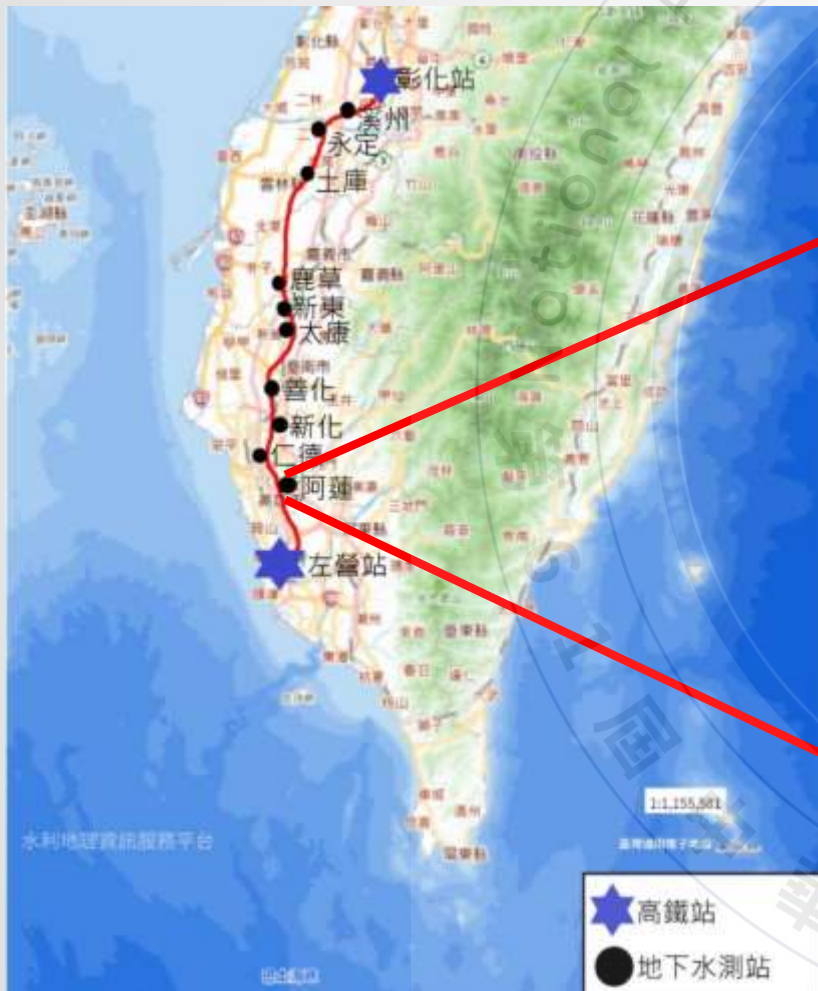
帶通濾波
並計算平
均振幅

疊圖分析

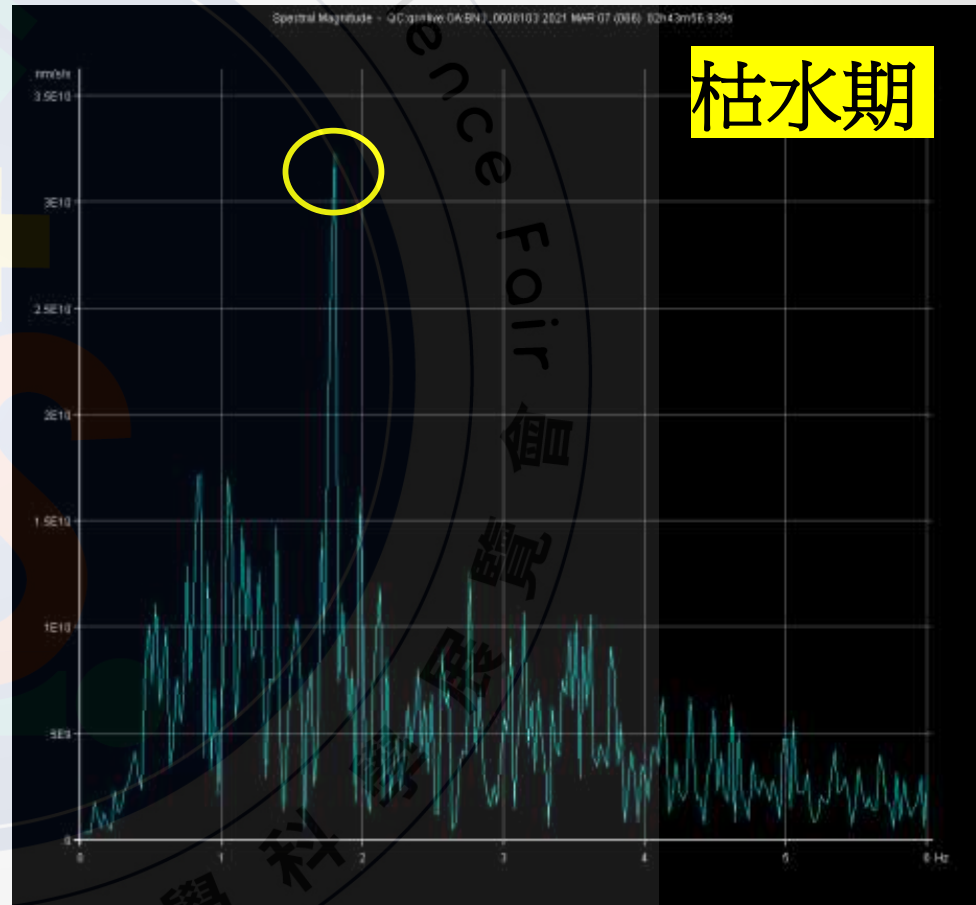
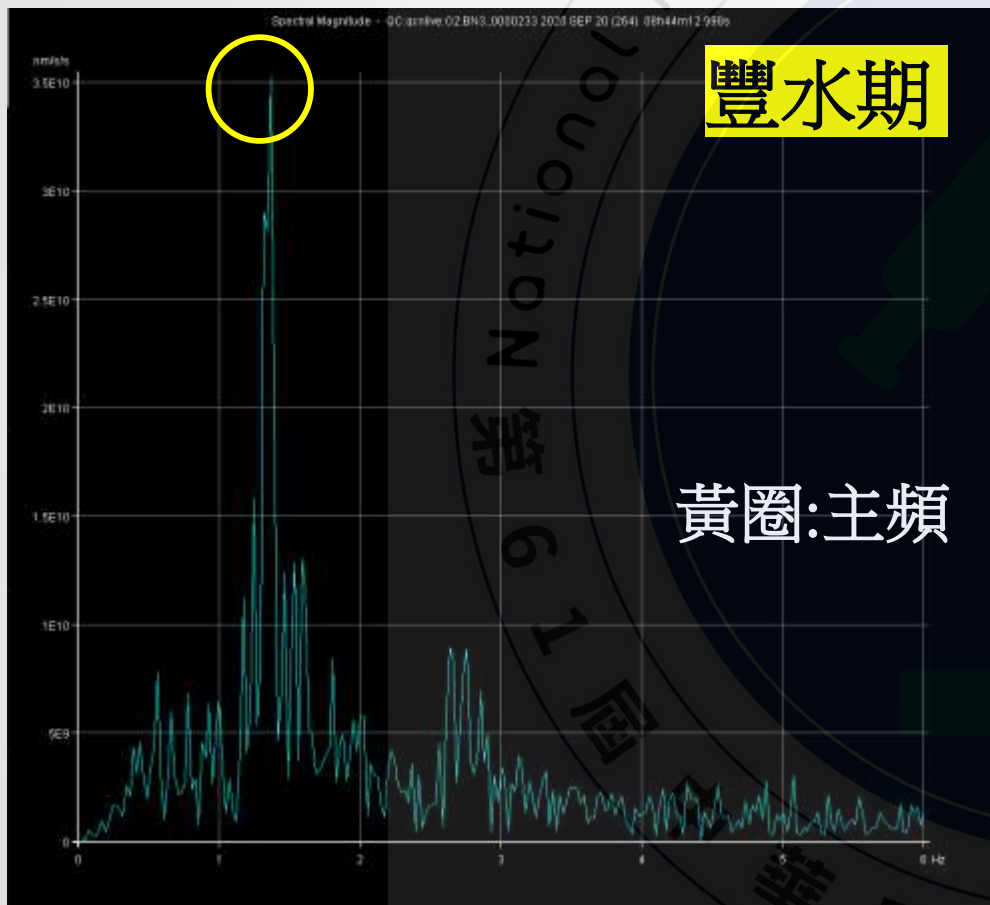
迴歸分析

撰寫報告

研究結果

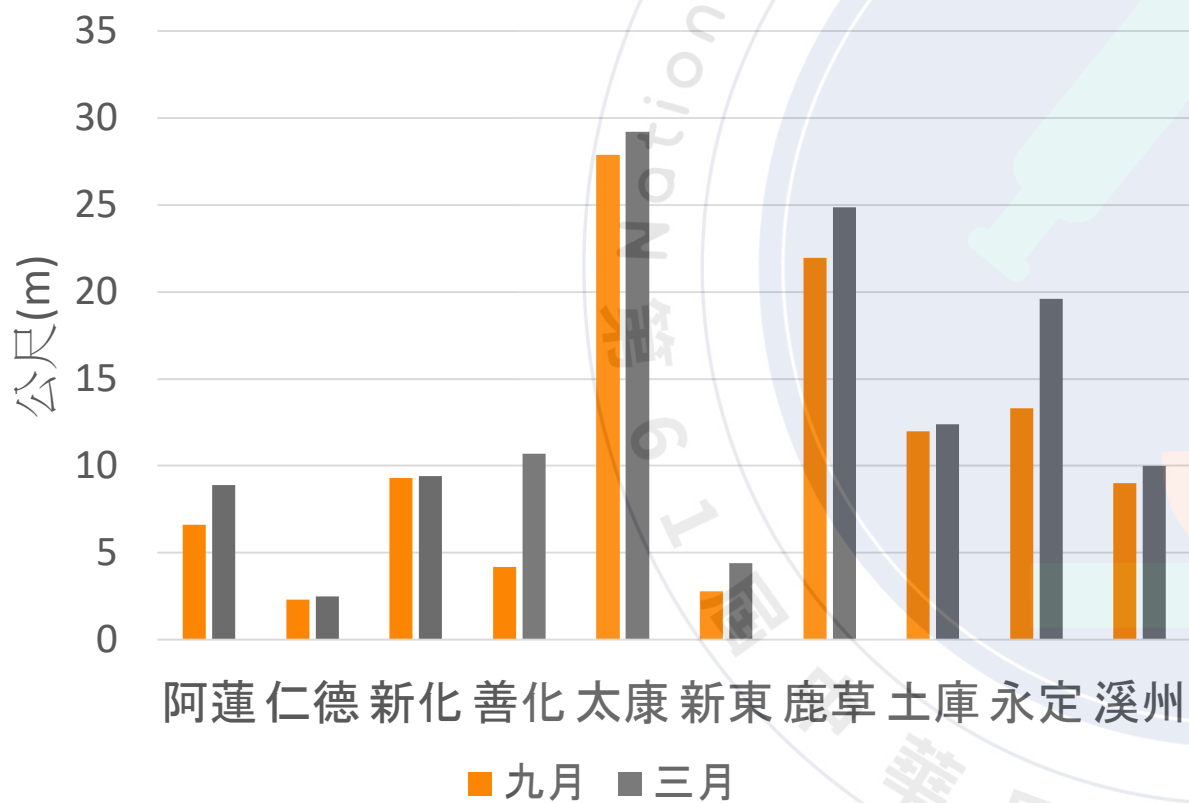


研究結果 豐水期vs 枯水期

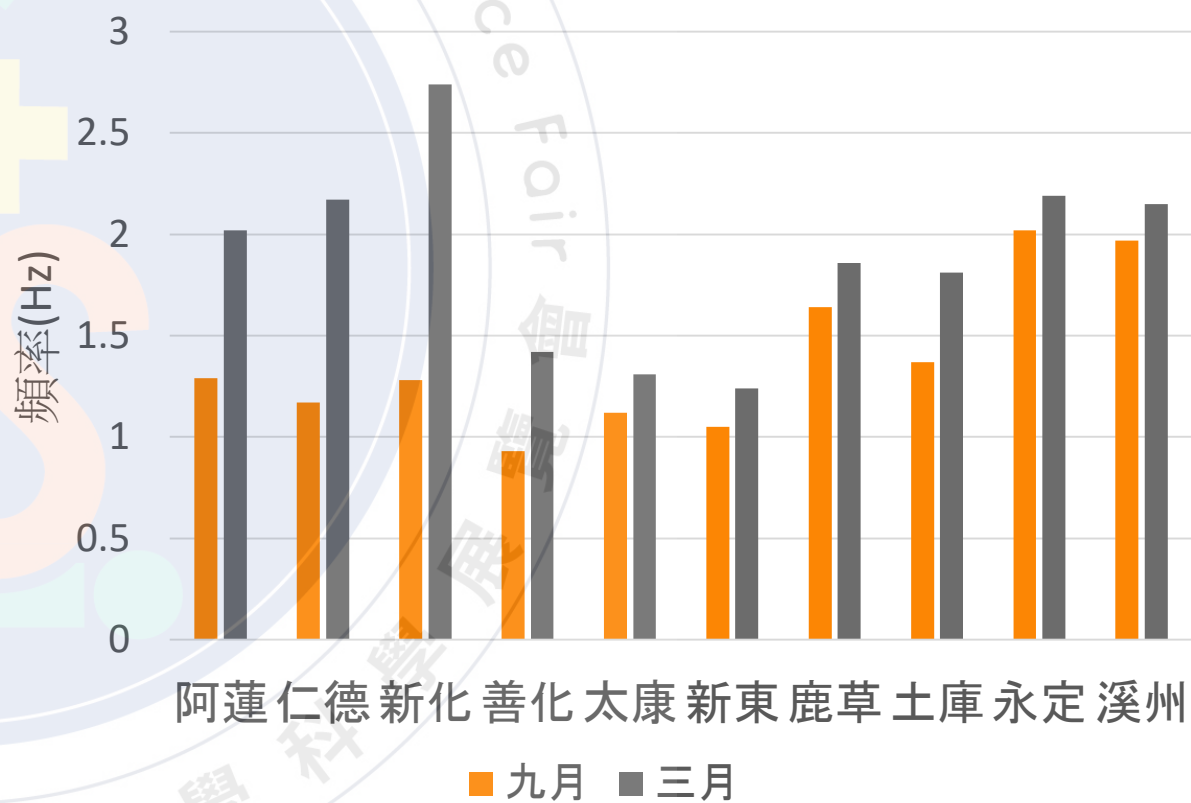


研究結果 地下水位與振動主頻

豐枯水期地下水位到地面差距(m)



各路段豐枯水期主頻率比較



研究結果

地區	2020年9月 (豐水期) (Hz)	2021年3月 (枯水期) (Hz)	豐水期最 大振幅 (cm/s ²)	枯水期最 大振幅 (cm/s ²)	豐水期平 均振幅 (cm/s ²)	枯水期平 均振幅 (cm/s ²)
阿蓮	1.29	2.02	23.8	36.0	6.4	8.8
仁德	1.17	2.17	32.4	47.4	9.3	11.5
新化	1.28	2.74	46.3	57.0	10.0	12.9
善化	0.93	1.42	35.1	61.3	8.7	13.3
太康	1.12	1.31	39.4	36.9	8.0	10.6
新東	1.05	1.24	43.9	39.5	8.8	9.2
鹿草	1.64	1.86	22.1	54.6	4.2	11.7
土庫	2.02	2.19	25.6	22.1	4.7	5.6
永定	1.37	1.81	29.6	26.6	6.8	7.8
溪州	1.97	2.15	25.0	39.5	7.2	9.9

小結

平均振幅在枯水期較大，因此本研究認為振幅的整體表現與地下土壤含水程度有關，經過有水的介質時，振幅更易衰減。

枯水期的主要振動頻率較高頻而振幅亦較大。地下水位的季節性變化，能影響著共振頻率的表現，且可能與附近建築物產生不同樓層共振。

■ 迴歸分析 ■■

本研究分別以頻率、平均振幅及最大振幅為依變數，水期、地區、水位為自變數，考慮以下複迴歸模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_{10} x_{10} + \beta_{11} x_{11} + \varepsilon$$

頻率模型

$$R^2 = 0.813$$

$$\text{MAPE} = 11\%$$

平均振幅模型

$$R^2 = 0.897$$

$$\text{MAPE} = 7\%$$

最大振幅模型

$$R^2 = 0.825$$

$$\text{MAPE} = 11\%$$

■ 結論 ■ ■

一、地下水位與共振效應

本研究發現枯水期的主要振動頻率較高頻而振幅亦較大，顯示地下水位的季節性變化，影響共振頻率的表現。

二、各地區地下水位變化程度與振動頻率變化之關係

根據測量結果發現，阿蓮、善化、鹿草、土庫地區在枯水期水位下降更為顯著，對應較大之主頻差異。

三、豐枯水期振動頻率比較

本次研究發現豐水期的主頻較為低頻，最大振幅及平均振幅較小。

四、複迴歸模型

頻率、最大振幅與平均振幅三者迴歸模型的 R^2 皆大於0.8 且屬於“優良”預測模型。

■ 心得與未來展望 ■ ■ ■

• 我們遇到的困境

1. 收集地下水即時相關資料。
2. 彙整多種數據。
3. GPS軌跡資料。
4. 地圖的疊圖。

→ 解決方法

1. 自行研讀或旁聽大學相關課程。
2. 商請大學教授個別指導。

• 未來展望

1. 利用其他兩軸數據，來監測高鐵附近地層構造。
2. 在高鐵橋墩設置感應器，進行長時間的數據收集，以便後續建立時間序列模型。
3. 逆迴歸反推各測站之地下水位。
4. 探討高鐵振動資料與斷層位置之相關性。