

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180013
參展科別 地球與環境科學
作品名稱 高鐵行經嘉南地區之高鐵低頻震動波
得獎獎項 大會獎 三等獎

就讀學校 高雄市立新莊高級中學
 高雄市立高雄女子高級中學
指導教師 陳卉瑄、林佳賢
作者姓名 陳彥彰、張郡、江家穎

關鍵詞 土壤液化、地層下陷、低頻波

作者簡介



我是陳彥彰，目前就讀高雄市立新莊高中二年級。我一直很喜歡研究自然科學，在這次的研究過程學習到很多相關知識，也增進了解決問題的能力。感謝師長們不遺餘力的幫助，我們才能順利完成研究。

我是江家穎，目前就讀高雄女中三年級。我從國中開始就對地球科學很有興趣，很榮幸能參與這次國際科展，希望能藉此機會拓展視野，跟更多喜歡地球科學的人交流。

我是張郡，目前就讀高雄市立新莊高級中學，我從小就對自然科學這個領域有興趣，尤其是地球科學的部分，在因緣際會下遇到我們老師，且提供我們這個機會參加這一類的許多活動，希望能藉由這次的活動，跟其他一樣對科學，不一定是自然科學，有興趣的人一起做交流，增長知識。

摘要

當高鐵行經地層下陷明顯區域、或土壤液化中高潛勢的沖積層時，行車的車身震動會更劇烈嗎？本研究基於這樣的動機，經由測量高鐵沿線不同區段的震動訊號，了解各段的震動特徵。

本次研究使用微機電加速計（MEMS sensor）來量測高鐵行經左營至台北路線上車廂內之震動，並利用 QCN Live 軟體分析波形，分析行經各站間之頻率與振幅特徵，結果發現，行經台南到嘉義、嘉義至雲林、雲林至彰化三段路線的震動，在濾波 0.5-4.0 Hz 之平均振幅大於其他非地層下陷與土壤液化地段，同時我們也發現低頻振動的最大振幅在列車行經土壤液化區時有顯著的增加。

Abstract

As High-Speed Rail drives through areas with major land subsidence or high liquefaction of alluvial soils, will the vibration of the cabins move drastically? The research is performed with this quest in mind. This study aims to understand the characteristics of the vibration during each interval by measuring vibration signals in different sections.

MEMS sensor has been utilized in this research to measure the vibration in the cabins between Zuoying and Taipei. Subsequently, QCN Live software was used to analyze waveform to acquire frequency and patterns of vibration amplitude. The results showed that vibrations, with wave 0.5-4.0 Hz on average, in Tainan-Chiayi, Chiayi-Yunlin, and Yunlin-Changhua intervals are stronger than those in other intervals without land subsidence and soil liquefaction. In addition, the maximum amplitude of low frequency vibrations increases obviously as the HSR train travels through soil liquefaction areas has discovered.

壹、 研究動機

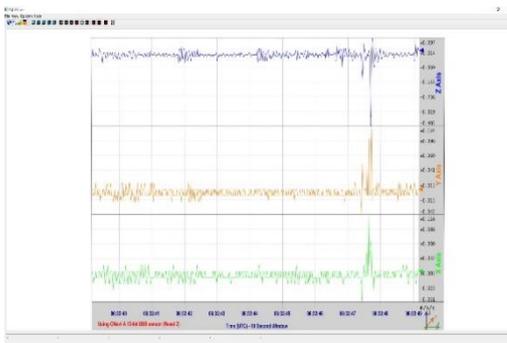
台灣西部位處沖積層區，震後土壤液化的災情時有所聞，而雲彰沿海地區超抽地下水造成地層下陷最嚴重累積下陷量 120 cm（2001-2019 雲林高鐵行經區域）。當地底下有沉陷差異，或行經較鬆軟、有土壤液化潛勢的沖積層時，行車的車身震動會更劇烈嗎？基於此動機，本研究企圖經由測量高鐵沿線不同區段的震動訊號，了解車體震動特徵與行經路線上的淺部地質特性之相關性。

貳、 研究目的

- 一、探討高鐵行經土壤液化高潛示區震動表現。
- 二、探討高鐵行經地層下陷區震動表現。

參、 研究設備及器材

- 一、QCN Live 軟體（圖一）、Seisgram2k 軟體（圖二）、Excel 軟體



圖一



圖二

- 二、GPS 軌跡紀錄器（圖三）



圖三

三、微機電加速計(O-Navi A 12-bit) (圖四)、筆電(Microsoft Surface book 2)(圖五)

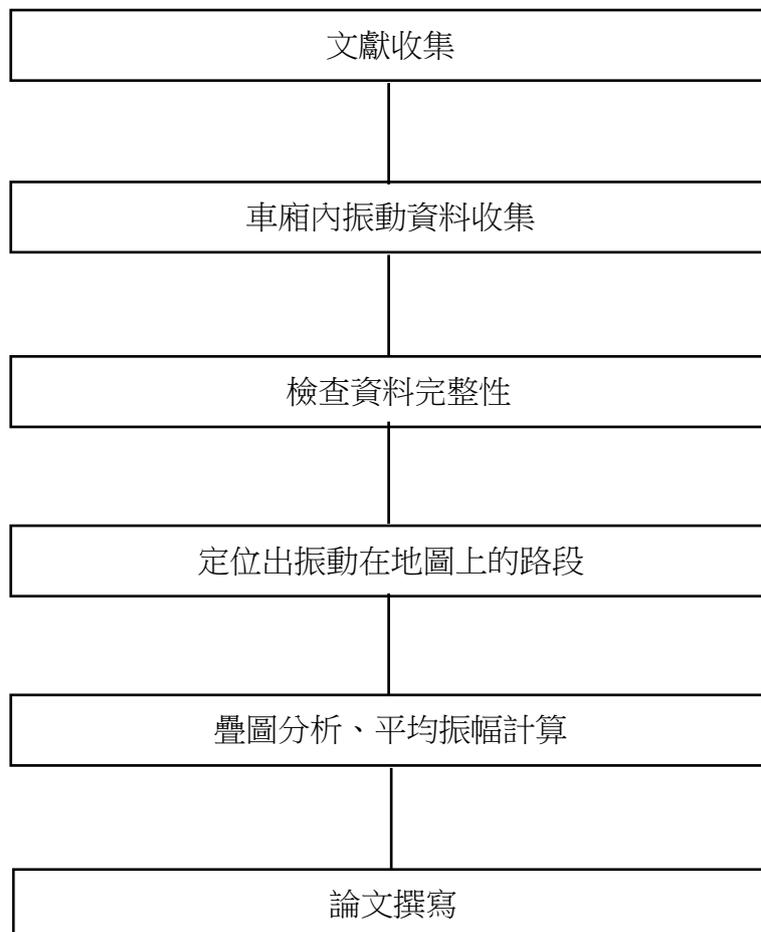


圖四



圖五

肆、 研究過程及進行步驟



伍、文獻探討

地震發生時常伴隨土壤液化，砂質土壤失去承載建築物重量的力量，造成建築物下陷或傾斜 (劉雲昊等，2017)。因此可得知高鐵的通過會產生震動，可藉由共振狀況推測土壤液化概況。高鐵行經雲林地區位於濁水溪沖積扇之南部，由於其土質疏鬆且壓縮性大，極易受環境或人為擾動而產生地層下陷 (王天南，2006)。高鐵行經雲林地區因該區累積地層下陷總量在七年(2004-2011)內已達超過 50 公分(高鐵局和水利署監控資料，2011)，被質疑影響高鐵的行車安全，該局對地層下陷問題一直持續地監控，然而高鐵通過不同區域產生的振動，並無公開資料可得。在氣候天氣災害網提到臺灣西部平原，地層組成以黏土層及粉土層為主要為第四紀沖積層，地層結構軟弱，經常有大面積的地層下陷現象存在。

表 1-1 濁水溪沖積平原地層名稱 (楊萬全，1989)

地質年代		地層	濁水溪北岸	濁水溪南岸
全新世或 完新世 Holocene	新 (上)	沖積層 Alluvium	沖積層	沖積層
更新 Pleistocene	舊 (下)	洪積層 Diluvium	臺地堆積層 Terrace deposits	臺地堆積層
			紅土臺地堆積層 Lateritic terrace deposits	紅土臺地堆積層
			頭嵙山層火炎山相 Toukoshan formation	六雙層 Liushuang formation
			頭嵙山層香山相 Toukoshan formation	二重溪層 Erchunggchi formation

受高鐵工程施工需要，需進行地質鑽探，因此具備各種不同深度之地質鑽探成果資料，提供此一地區不同深度的地質狀況，可在地質調查所網站查詢。

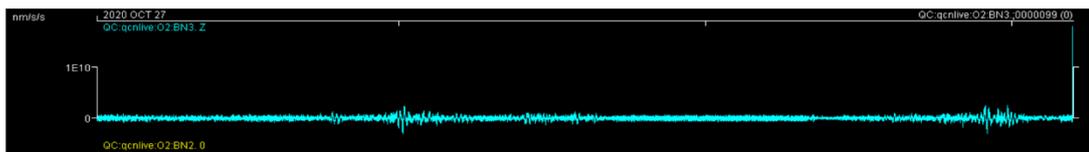
陸、 研究過程與結果

一、交通工具震動波形圖（不同交通工具的震動）

首先我們分析五種交通工具震動波形，發現高鐵相較其他交通工具，路程較長，行駛速度較為穩定，如下圖六～十所示。由於 X 軸與 Y 軸的震動會受高鐵加速或轉彎影響，以下針對 Z 軸的紀錄進行討論。

1. 公車震動紀錄：

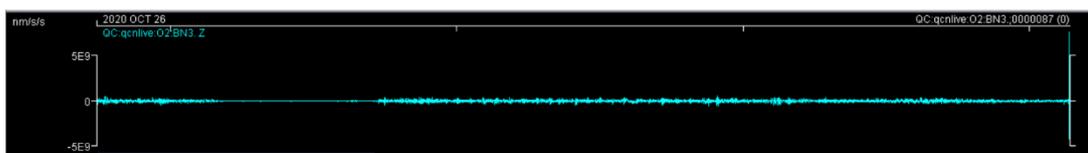
公車會受路面崎嶇影響，且市區常有紅綠燈，常有啟動與減速造成的較大振幅。



圖六：公車行駛中之加速度紀錄（總長十分鐘）。此路段為重愛路站至榮民總醫院站。

2. 輕軌震動紀錄：

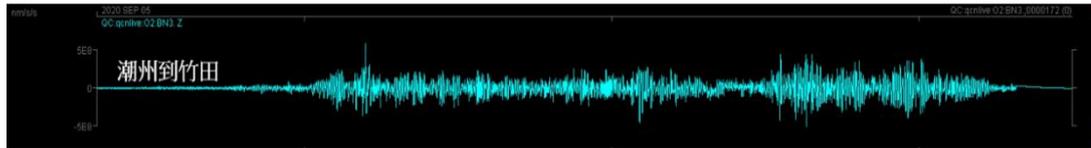
輕軌的路程較短，行駛速度較不穩定且受紅綠燈影響。



圖七：輕軌行駛中之加速度紀錄（總長十分鐘）。此路段為前鎮之星至籬仔站。

3. 火車震動紀錄：

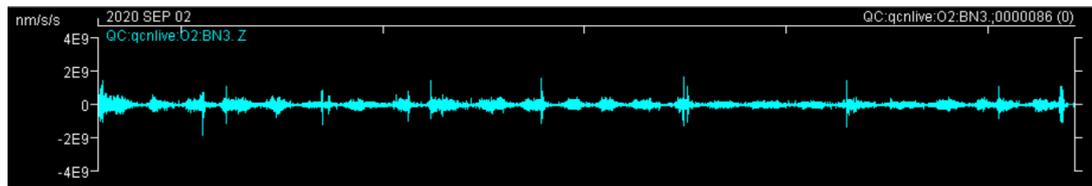
火車與輕軌路程較高鐵短，且受到行車調度影響，行駛速度較不穩定。



圖八：火車行駛中之加速度紀錄（總長十分鐘）。此路段為潮州站到竹田站。

4. 捷運紅線震動紀錄：

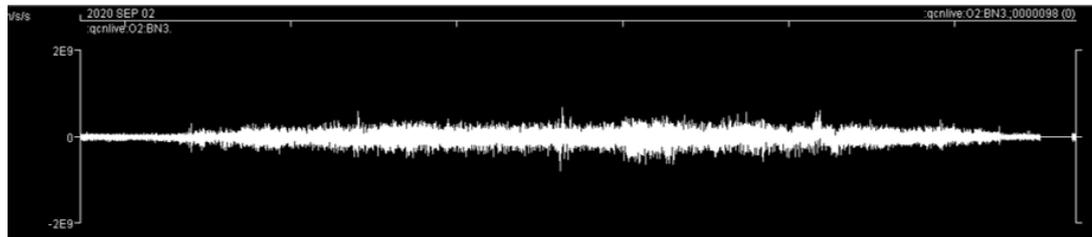
捷運的路程較高鐵短，行駛速度較不穩定，且震動數據大多處在加速與減速間。



圖九：捷運行駛中之加速度紀錄（總長五十分鐘）。此路段為南岡山站到小港站。

5. 高鐵震動紀錄：

高鐵的站距較長，站與站間的振動訊號較穩定，加、減速漸進，並未造成異常高的振幅。



圖十：高鐵行使中之加速度紀錄（總長十分鐘）。此路段為雲林站至嘉義站。

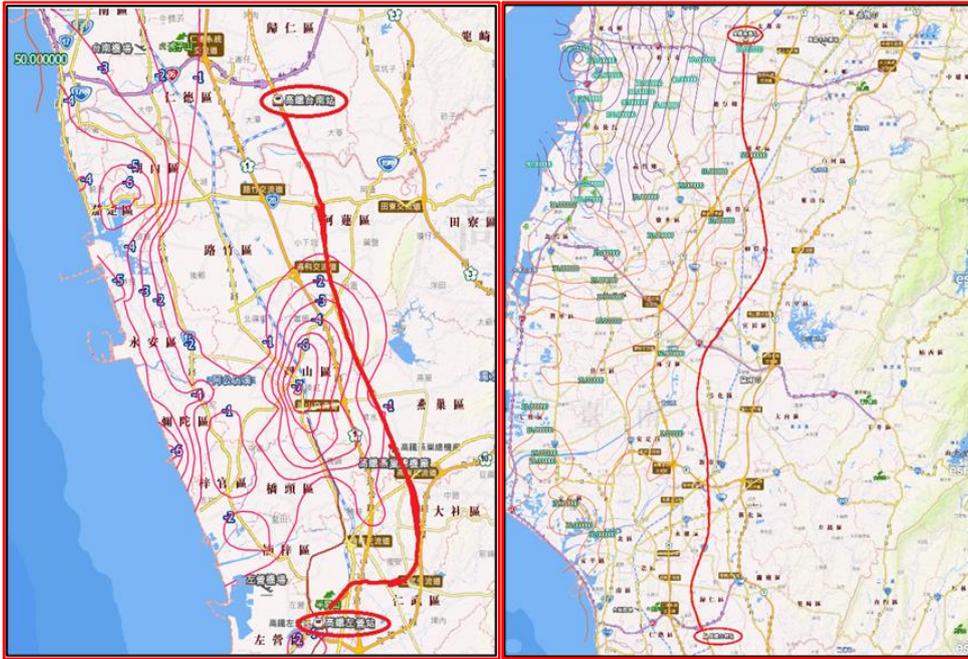
由圖六到圖十中我們發現高鐵站到站之間路徑較長，行車速率較穩定，啟動和停止並未製造異常的震動，而是漸進式衰減，因此本研究選定高鐵為此次研究標的。

一、高鐵行經地層下陷區累積下層量等值圖（2001-2019年）

利用水利處(2020年)發布的全台地層下陷分佈圖，我們將高鐵行進路線與之疊圖，欲探討哪個路段行經地層下陷較明顯的區域。如下圖：

（一）地層下陷等值圖

1. 由高雄新左營站到台南站、台南站到嘉義站



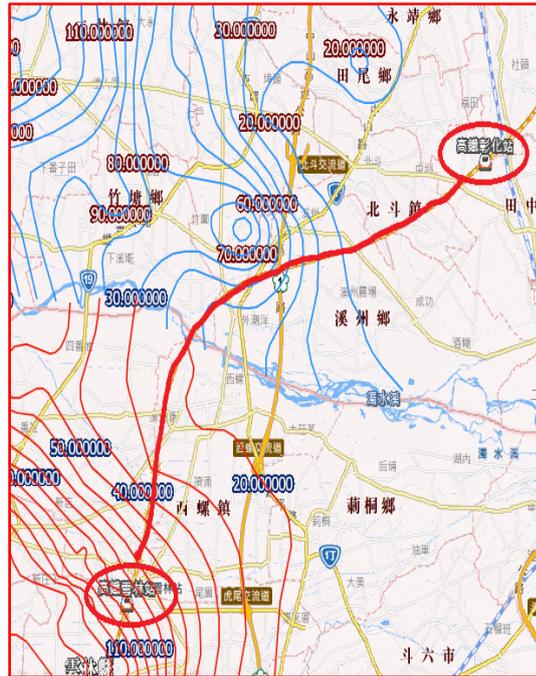
圖十一：新左營站到台南站

圖十二：台南站到嘉義站

2. 由嘉義站到雲林站、雲林站到彰化站

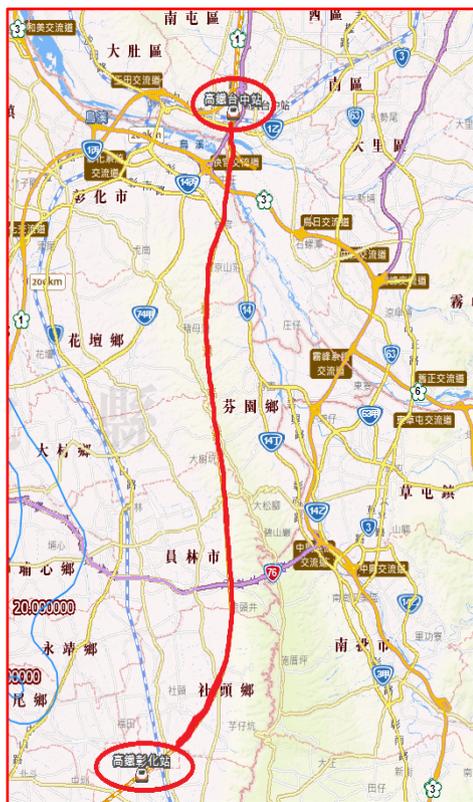


圖十三：嘉義站到雲林站



圖十四：雲林站到彰化站

3. 由彰化站到台中站、台中站到苗栗站



圖十五：彰化站到台中站

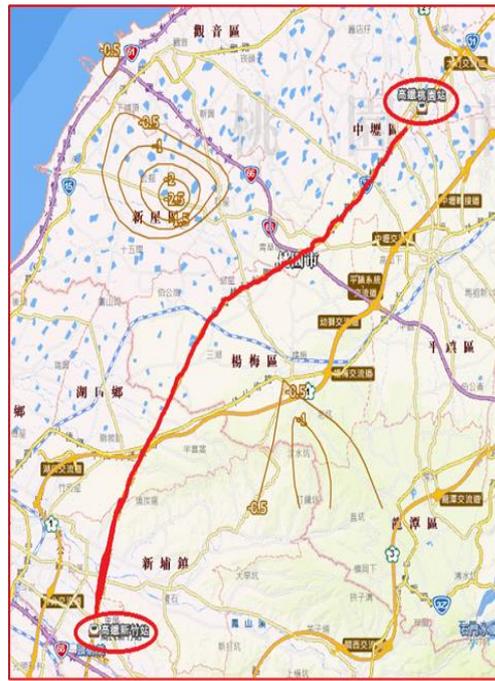


圖十六：台中站到苗栗站

4. 由苗栗站到新竹站、新竹站到桃園站

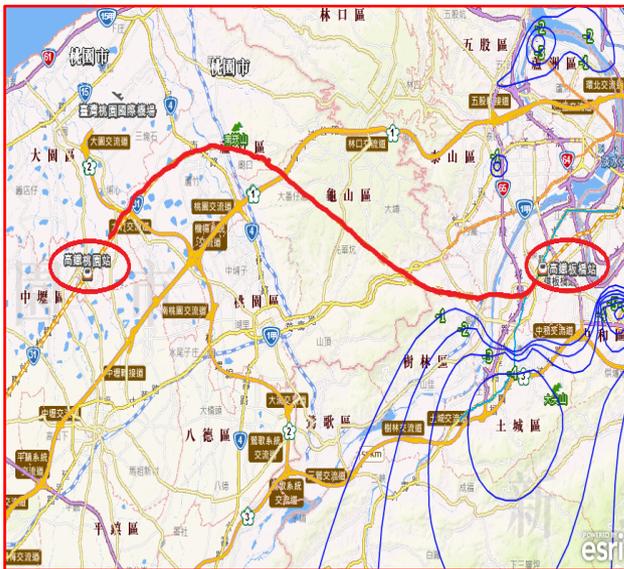


圖十七：苗栗站到新竹站

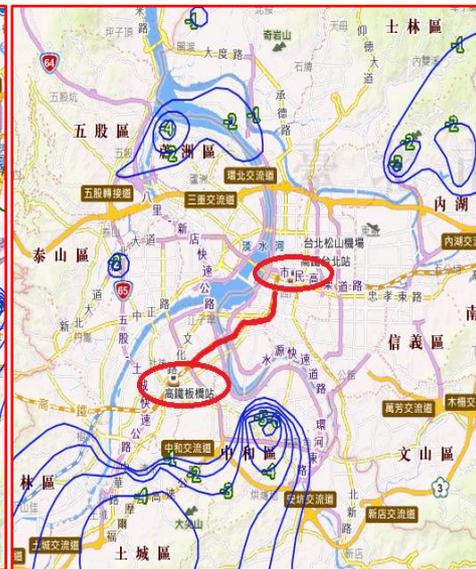


圖十八：新竹站到桃園站

5. 由桃園站到板橋站、板橋站到台北站



圖十九：桃園站到板橋站



圖二十：板橋站到台北站

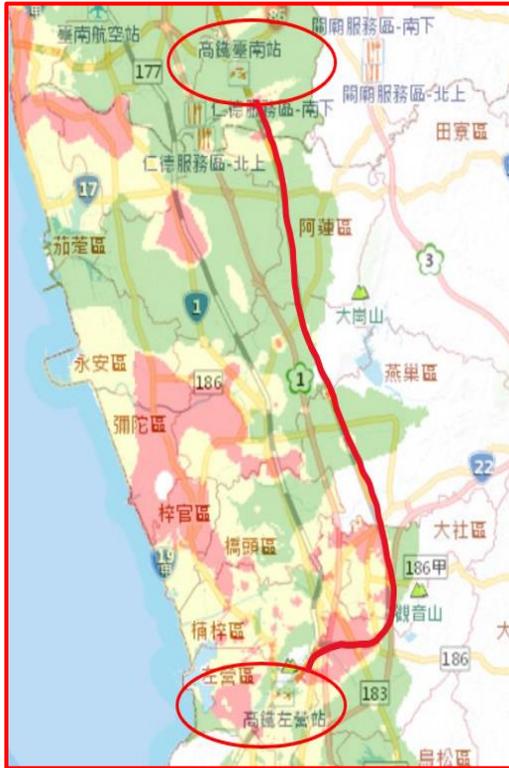
圖十九到圖二十是水利地理資訊平台中的各地區累積下層量等值圖。從圖中可發現下陷量最多的依序為嘉義站到雲林站、雲林站到彰化站、台南站到嘉義站。

二、高鐵行經土壤液化高潛勢區域

利用中央地質調查所（2020 年）所公布的土壤液化潛勢分佈圖，我們將高鐵路線與之疊圖如下：

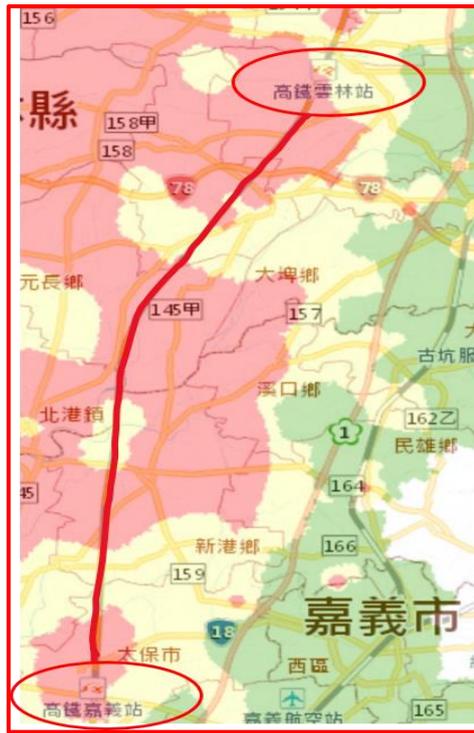
（一）土壤液化高潛勢區域圖（高潛勢以紅色標記）

1. 高雄新左營站到台南站、台南站到嘉義站



圖二十一：新左營站到台南站 圖二十二：台南站到嘉義站

2. 嘉義站到雲林站、雲林站到彰化站



圖二十三：嘉義站到雲林站



圖二十四：雲林站到彰化站

3. 由彰化站到台中站、台中站到苗栗站



圖二十五：彰化站到台中站



圖二十六：台中站到苗栗站

4. 由苗栗站到新竹站、新竹站到桃園站



圖二十七：苗栗站到新竹站



圖二十八：新竹站到桃園站

5. 由桃園站到板橋站、板橋站到台北站



圖二十九：桃園站到板橋站



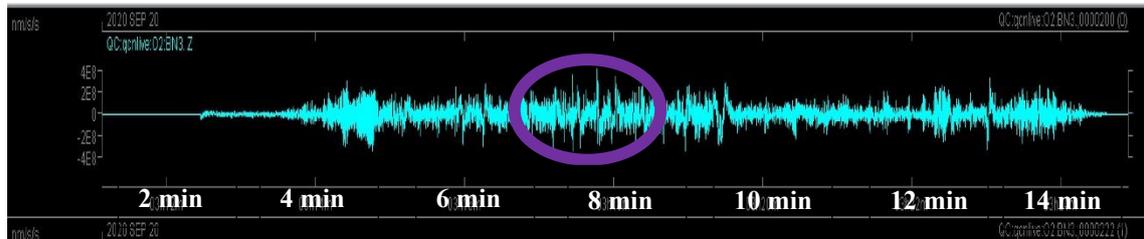
圖三十：板橋站到台北站

我們可發現高鐵行經高潛勢區路段多為嘉義站到雲林站、台南站到嘉義站、雲林站到彰化站。與地層下陷嚴重的三個區段相同。

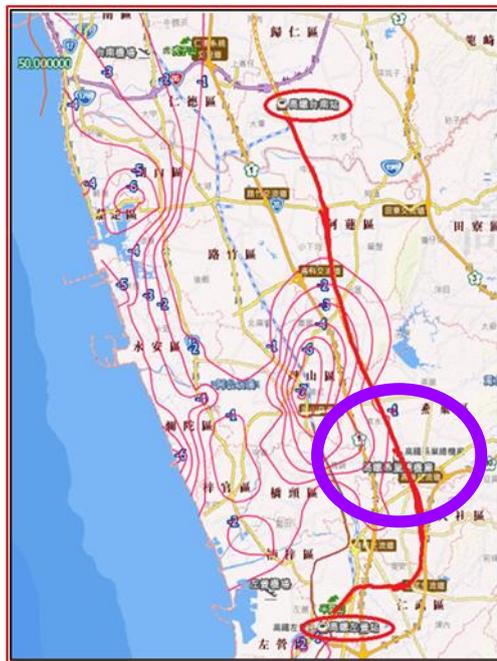
三、高鐵震動紀錄（高鐵行經各地區的震動）

（一）由高雄左營站到台南站

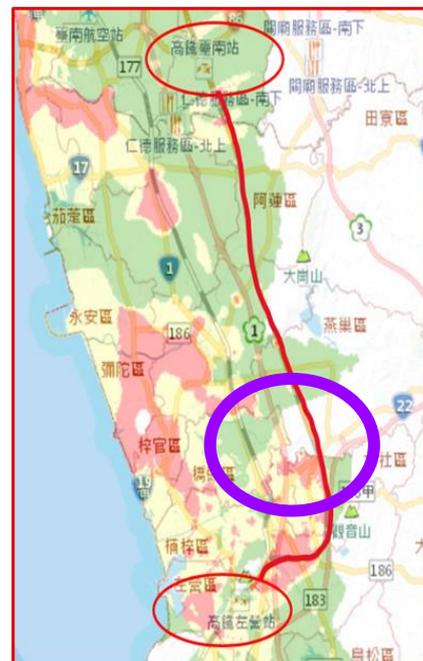
由圖三十一高雄左營站到台南站測得的震動資料中，可發現此路線震動幅度較小，最大振幅為 32.8cm/s^2 。（如圖中紫色圈所示）。



圖三十一：此為高鐵經過高雄左營站（圖左）到台南站的震動資料



圖三十二：新左營站到台南站地層下陷等值圖

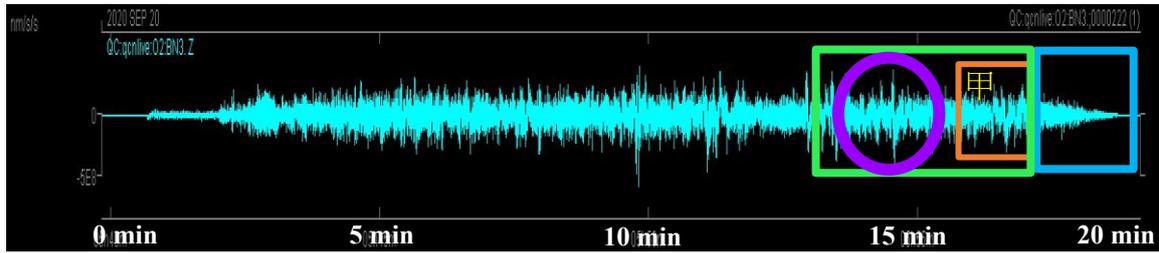


圖三十三：新左營站到台南站土壤液化高潛勢區域圖

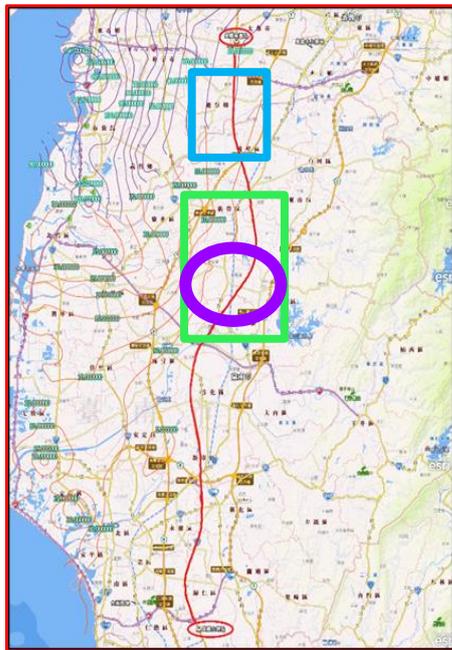
（二）由台南站到嘉義站

由台南站到嘉義站測得的震動中，紫框處最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 1.7 倍。綠框累積最大下陷量約 50 cm。藍框地段累積最大下陷量約 10 cm。

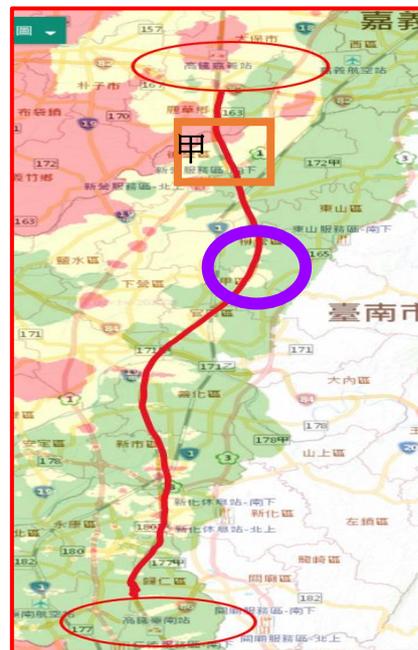
甲：最大振幅約 57.3 cm/s^2 ，平均振幅約 10.7 cm/s^2 ，甲地段高鐵行經時已開始降速，但振幅並沒有減少，是值得注意的地段。



圖三十四：台南站（圖左）到嘉義站，藍框與綠框為地層下陷地段，橘框為土壤液化高潛勢段。



圖三十五：台南站到嘉義站地層下陷等值圖

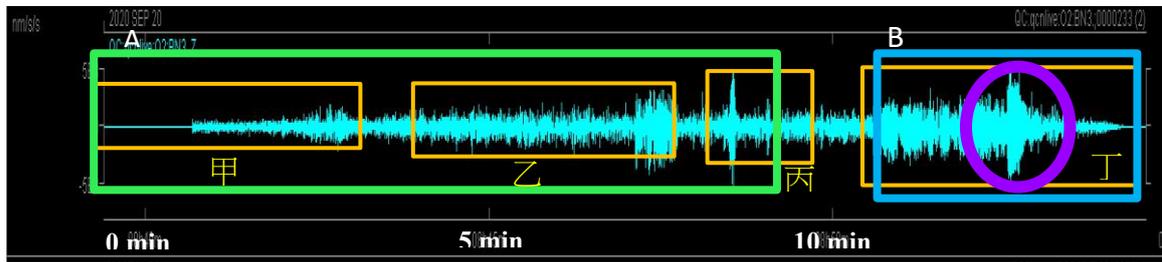


圖三十六：台南站到嘉義站土壤液化高潛勢區域圖

(三) 由嘉義站到雲林站

由嘉義站到雲林站測得的震動中，紫框處最大振幅約為圖三十一

(由高雄站到台南站) 中的 2.0 倍。綠框地段累積最大下陷量約 150 cm，藍框地段最大下陷量約 30 cm，此區域土壤液化區與地層下陷大致重疊。



圖三十七：嘉義站 (圖左)到雲林站，藍框與綠框為地層下陷地段、其中橘框為土壤液化高潛勢段。

此區域發生四個振幅較大的區段，分別是甲、乙、丙、丁。

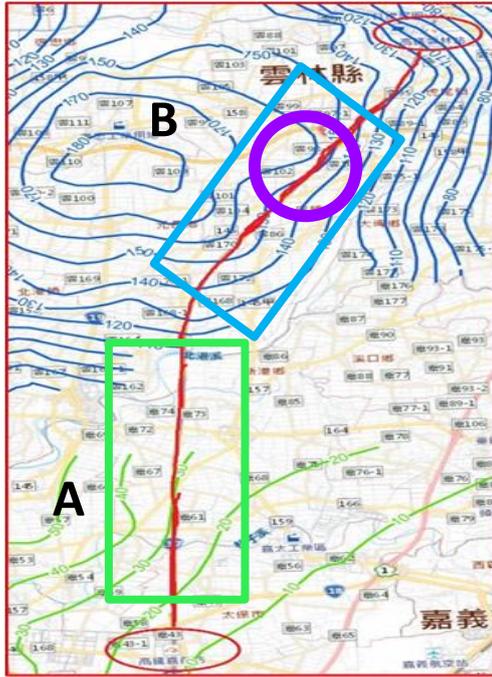
甲：最大振幅約 20.8 cm/s^2 ，平均振幅約 1.99 cm/s^2 。

乙：最大振幅約 40.3 cm/s^2 ，平均振幅約 5.08 cm/s^2 。

丙：最大振幅約 51.3 cm/s^2 ，平均振幅約 5.28 cm/s^2 。

丁：最大振幅約 52.4 cm/s^2 ，平均振幅約 7.69 cm/s^2 。

A 地段高鐵的行進方向大致在同一下陷區間，B 地段則跨越不同下陷區間，因此 B 地段的振幅大於 A 地段的振幅，且 A 地段中振幅稍大的區域也是因為行經過程跨越不同下陷區間，因此振幅增大。



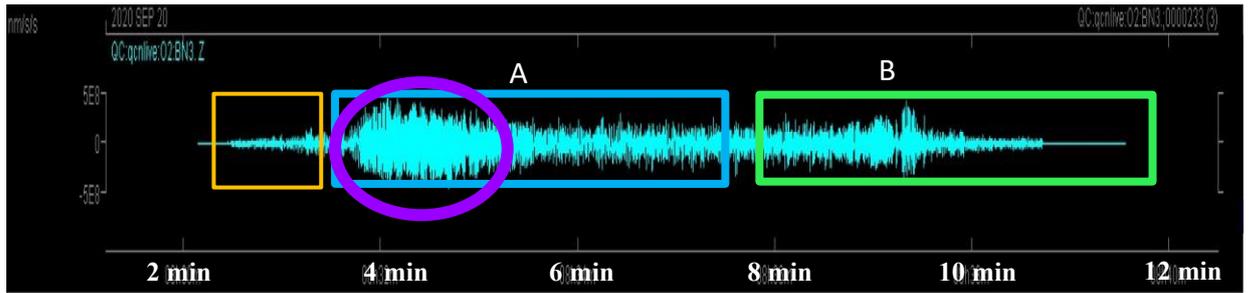
圖三十八：嘉義站到雲林站地層
下陷等值圖



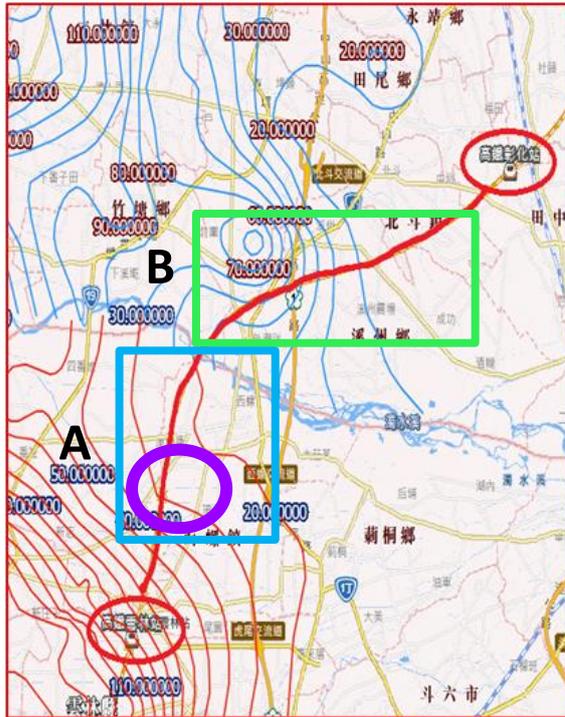
圖三十九：嘉義站到雲林站
土壤液化高潛勢區域圖

(四) 由雲林站到彰化站

由雲林站到彰化站測得的震動中紫框處其最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的還要來的大約 1.8 倍。綠框累積最大下陷量約 60 cm。藍框累積最大下陷量約 40 cm。



圖四十：雲林站（圖左）到彰化站，藍框與綠框為地層下陷地段、橘框為土壤液化高潛勢段。



圖四十一：雲林站到彰化站地層

下陷等值圖



圖四十二：雲林站到彰化站

土壤液化高潛勢區域圖

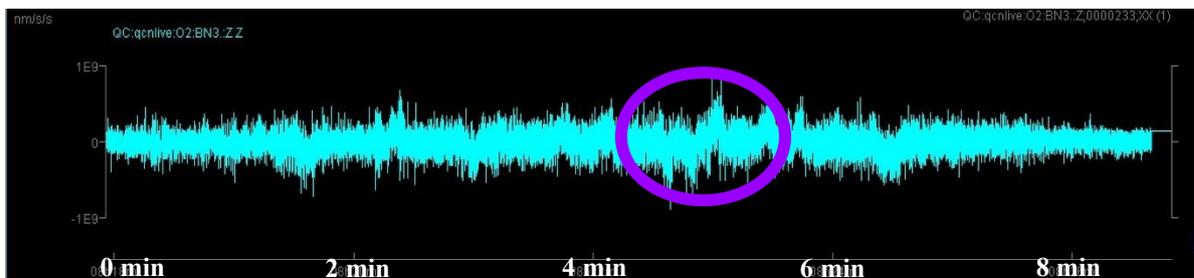
A：最大振幅約 46.6 cm/s^2 ，平均振幅約 11.5 cm/s^2 。

B：最大振幅約 42.7 cm/s^2 ，平均振幅約 5.5 cm/s^2 。

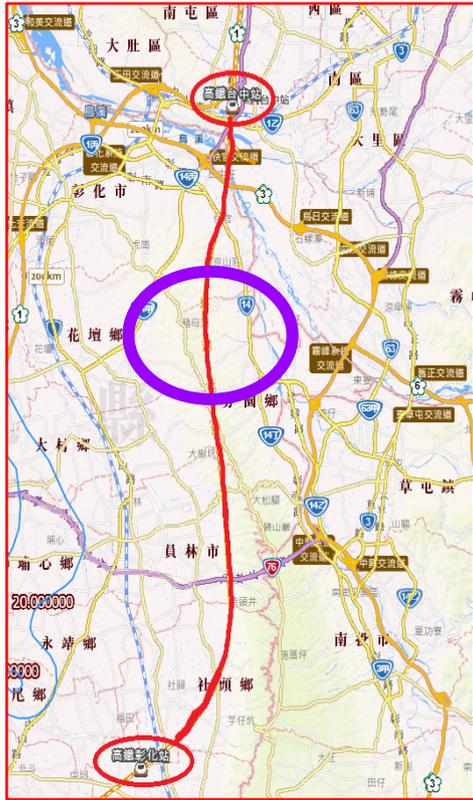
A 地段地層下陷較 B 地段嚴重，因此最大振幅相差約 3.9 cm/s^2 。

(五) 由彰化站到台中站

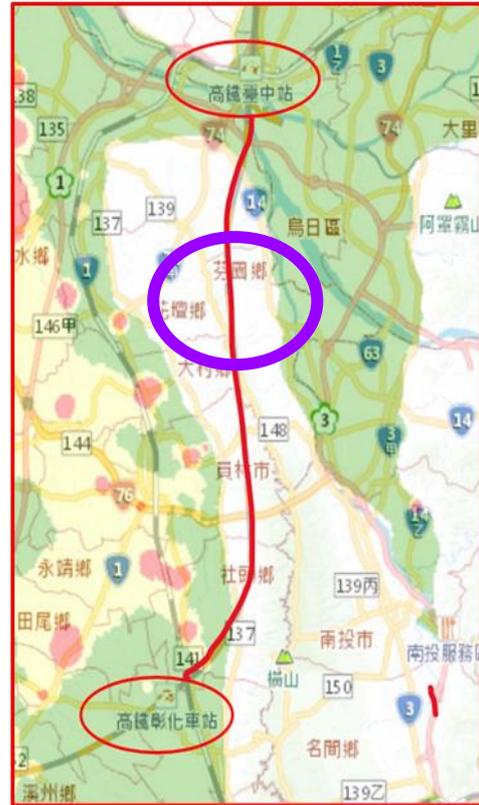
由彰化站到台中站測得的振動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖十三（由高雄站到台南站）中的 0.7 倍。



圖四十三：此為高鐵經過彰化站 (圖左)到台中站的震動資料



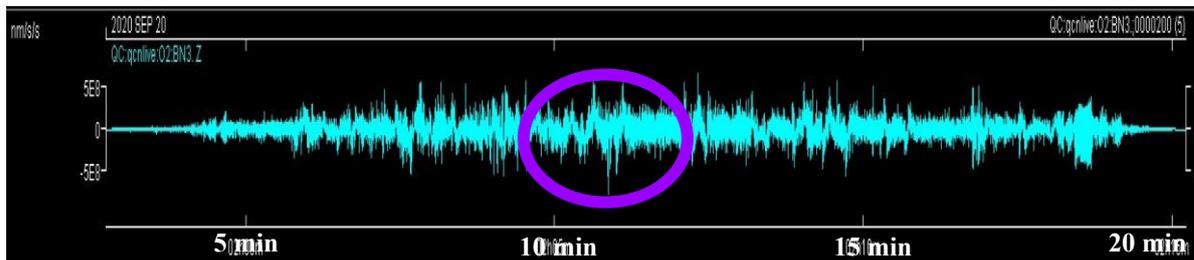
圖四十四：彰化站到台中站地層下陷等值圖



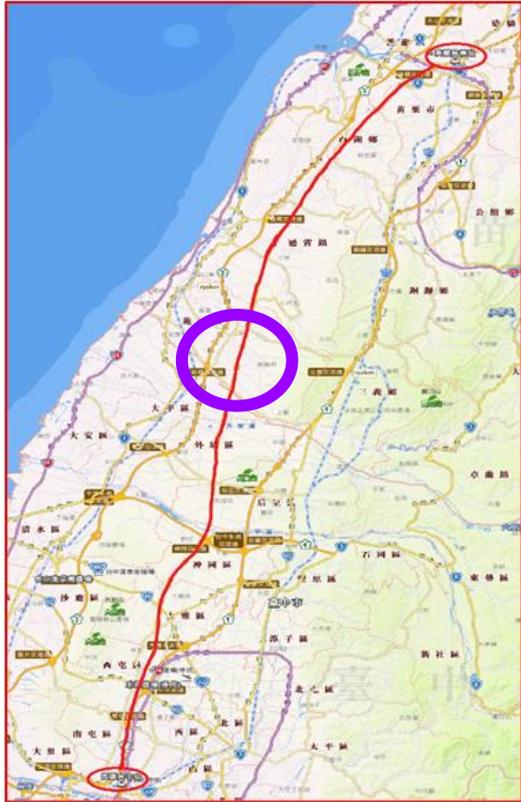
圖四十五：彰化站到台中站土壤液化高潛勢區域圖

(六) 由台中站到苗栗站

由台中站到苗栗站測得的震動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 0.8 倍。



圖四十六：此為高鐵經過台中站 (圖左)到苗栗站的震動資料



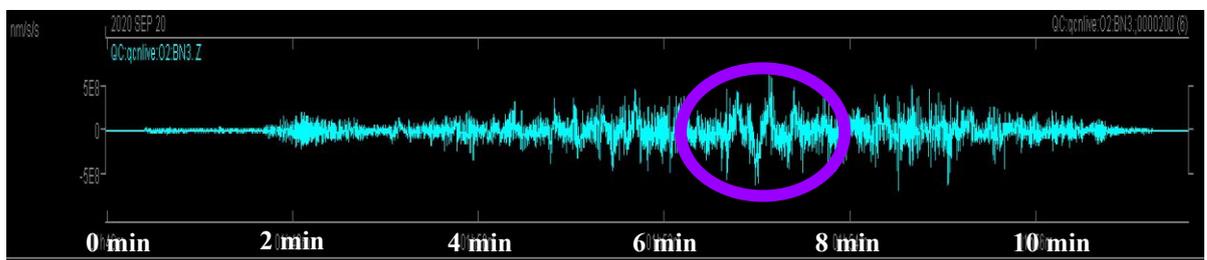
圖四十七：台中站到苗栗站地層下陷等值圖



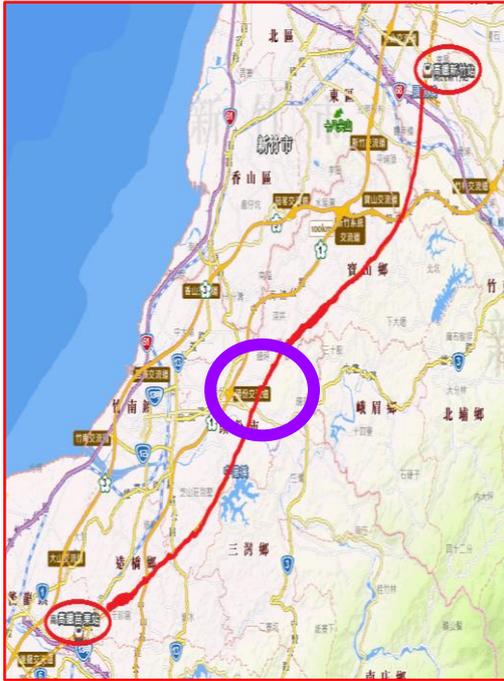
圖四十八：台中站到苗栗站土壤液化高潛勢區域圖

(七) 由苗栗站到新竹站

由苗栗站到新竹站測得的震動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 0.9 倍。



圖四十九：此為高鐵經過苗栗站 (圖左) 新竹站到的震動資料



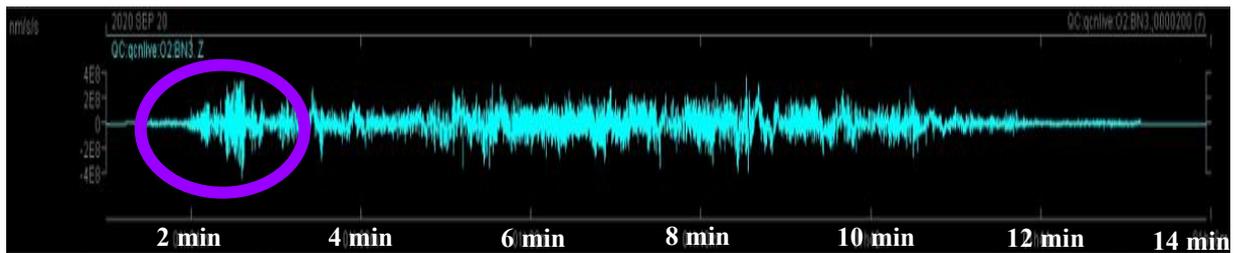
圖五十：苗栗站到新竹站站地層
下陷等值圖



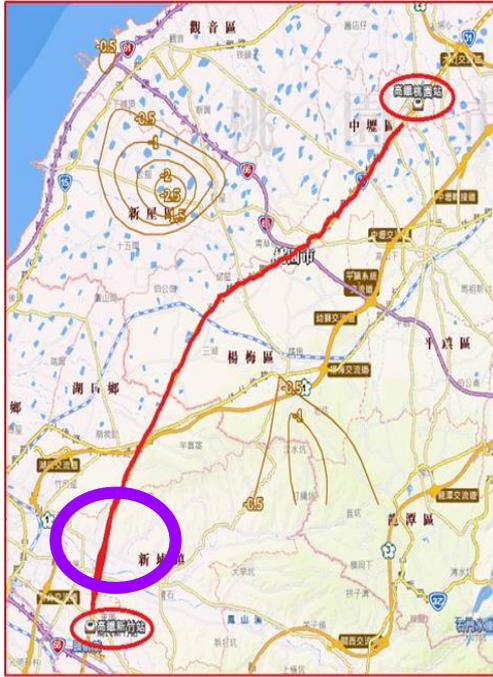
圖五十一：苗栗站到新竹站
土壤液化高潛勢區域圖

(八) 由新竹站到桃園站

由新竹站到桃園站測得的震動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 1.1 倍。



圖五十二：此為高鐵經過新竹站（圖左）桃園站到的震動資料



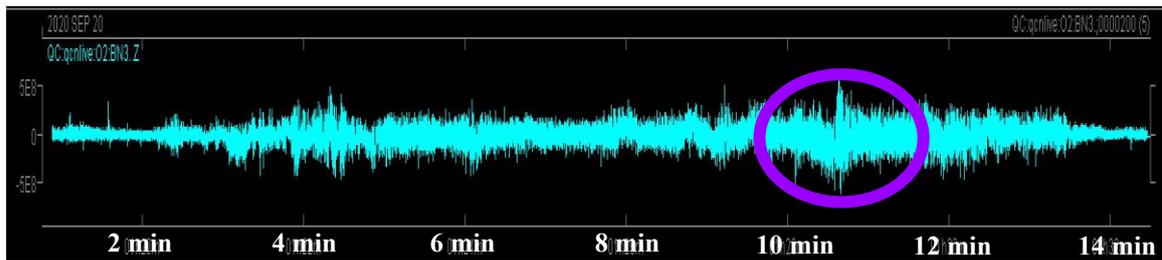
圖五十三：新竹站到桃園站站地層
下陷等值圖



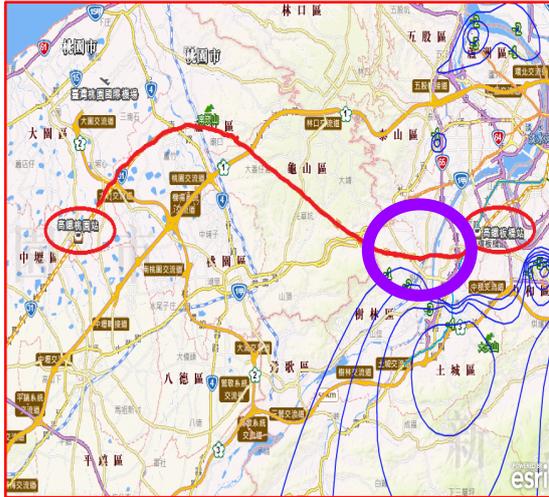
圖五十四：新竹站到桃園站
土壤液化高潛勢區域圖

(九) 由桃園站到板橋站

由桃園站到板橋站測得的震動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 0.9 倍。



圖五十五：此為高鐵經過桃園站（圖左）到板橋站的震動資料



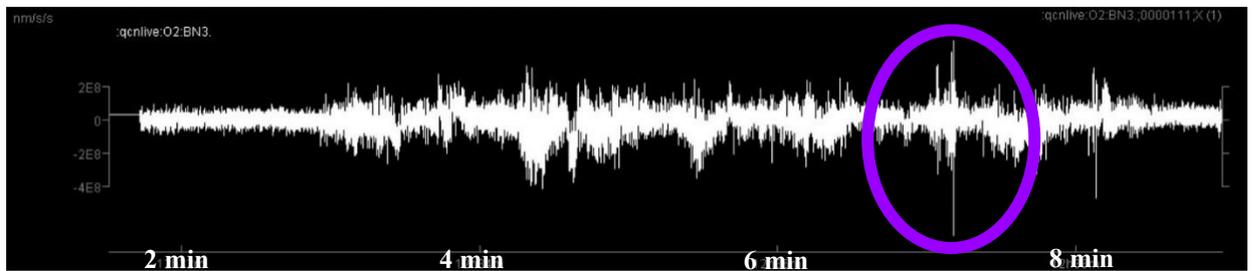
圖五十六：桃園站到板橋站地層
下陷等值圖



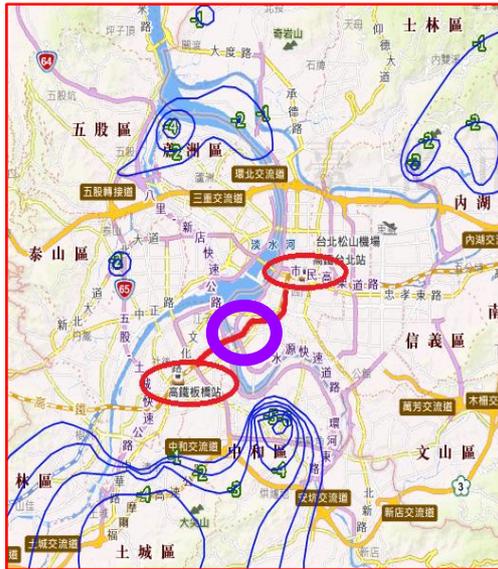
圖五十七：桃園站到板橋站
土壤液化高潛勢區域圖

(十) 由板橋站到台北站

由板橋站到台北站測得的震動中，我們發現到紫圈區域中的最大振幅約為圖三十一（由高雄站到台南站）中的 0.7 倍。



圖五十八：此為高鐵經過板橋站（圖左）到台北站的震動資料



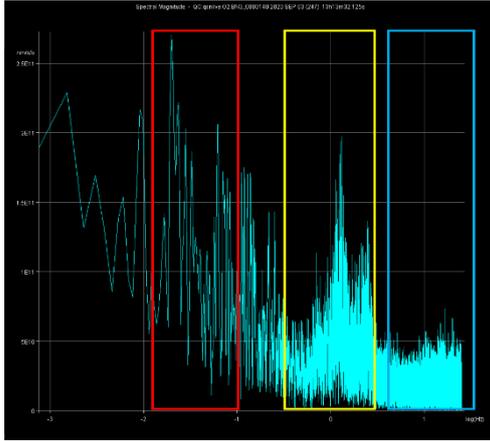
圖五十九：板橋站到台北站站地層
下陷等值圖



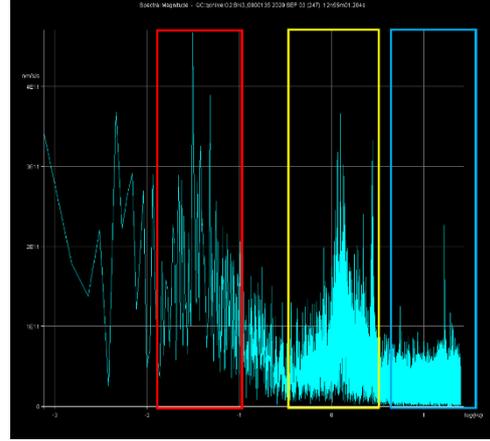
圖六十：板橋站到台北站
土壤液化高潛勢區域圖

四、 高鐵行經路段之震動頻譜圖

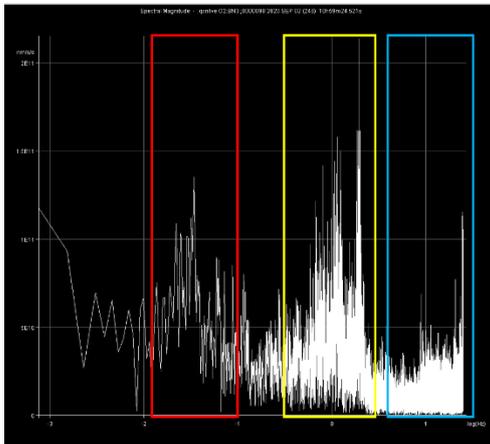
根據圖三十一到圖五十八發現台南站到嘉義站（圖三十四）、雲林站到嘉義站（圖三十七）、彰化站到雲林站（圖四十）具有最大的之原始震動振幅最大。為了解振幅大小與頻率之間的關係，我們進一步利用頻譜圖呈現振幅與頻率的關係。在不同路段，頻譜圖呈現幾個主頻分佈，由圖四十二至圖五十二中分別為（一） $0.016\sim 0.316\text{ Hz}$ （圖四十二至圖五十二中的紅框）（二） $0.5\sim 4.0\text{ Hz}$ （圖四十二至圖五十二中的黃框）（三） $8\sim 20\text{ Hz}$ （圖四十二至圖五十二中的藍框），然而微機電加速器對小於 0.1 Hz 和大於 10 Hz 並不敏感，本次 $0.016\sim 0.316\text{ Hz}$ 與 $8\sim 20\text{ Hz}$ 可能有部分來自於儀器本身的自我噪音(self-noise)，而非真實震動訊號。此次三個主頻的中的 $0.5\sim 4.0\text{ Hz}$ 洽落在此微機電加速器的最佳偵測範圍，故我們將對此波段進行帶通濾波(band-pass filter)，進行後續分析。



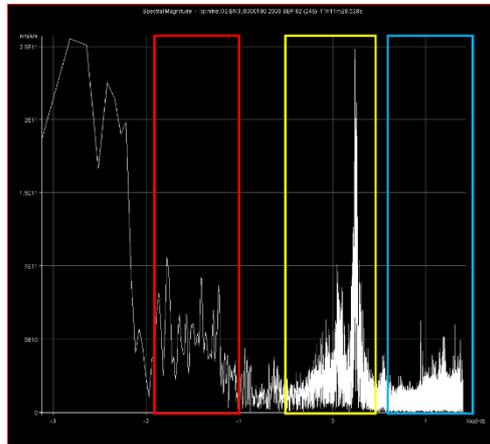
圖六十一：此為高雄到台南的頻譜圖



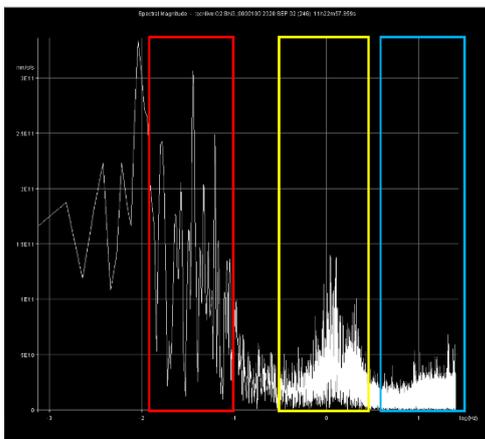
圖六十二：此為台南到嘉義的頻譜圖



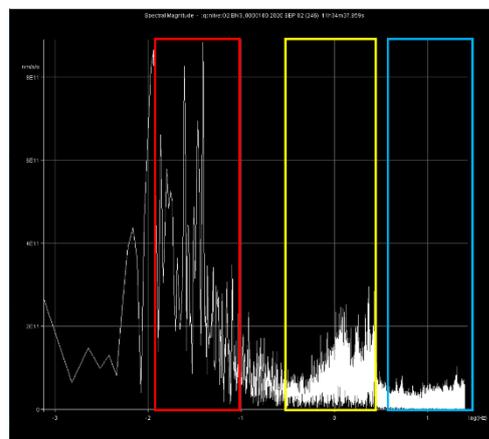
圖六十三：此為嘉義到雲林的頻譜圖



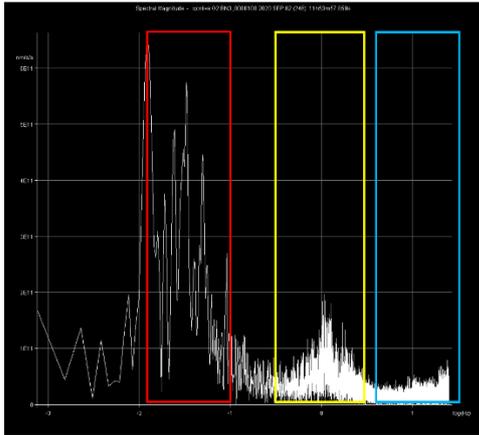
圖六十四：此為雲林到彰化的頻譜圖



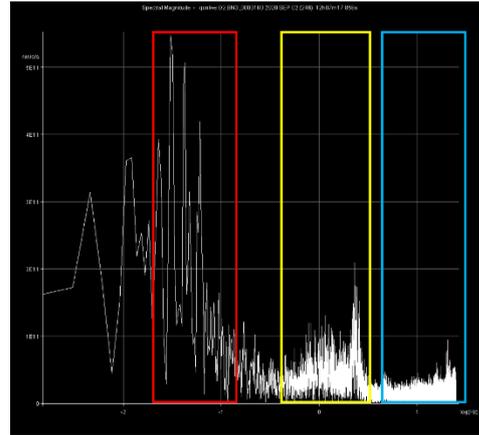
圖六十五：此為彰化到台中的頻譜圖



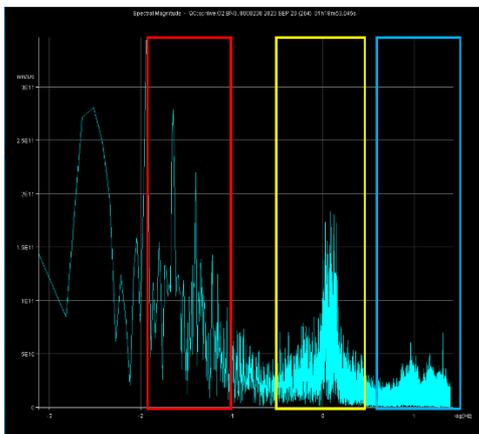
圖六十六：此為台中到苗栗的頻譜圖



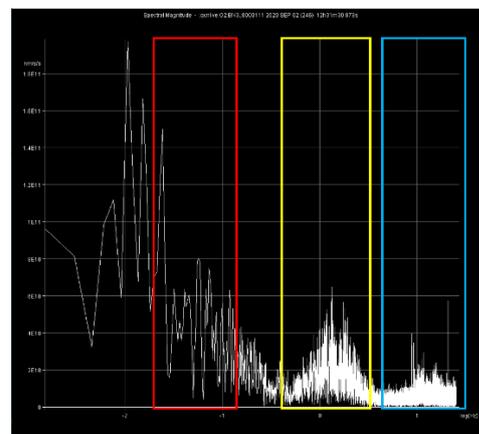
圖六十七：此為苗栗到新竹的頻譜圖



圖六十八：此為新竹到桃園的頻譜圖



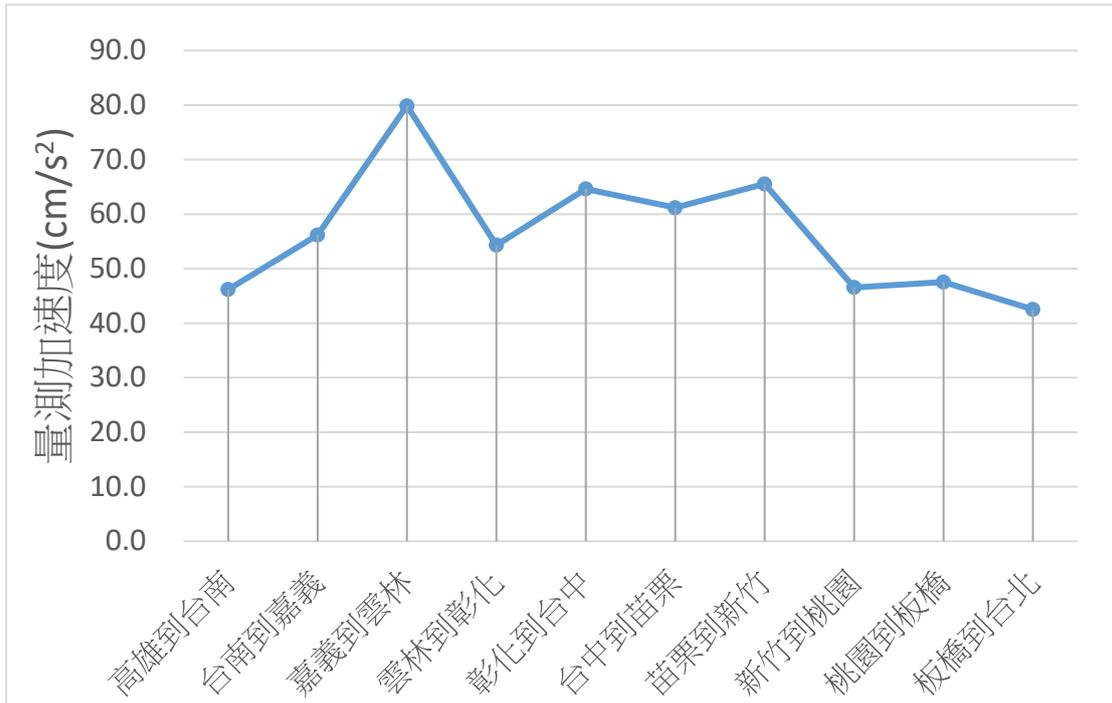
圖六十九：此為桃園到板橋的頻譜圖



圖七十：此為板橋到台北的頻譜圖

五、高鐵行經路線上帶通濾波之振幅比較

利用 0.5-4 Hz 帶通濾波，行經各路段的波形平均振幅如下圖所示。我們發現雲林到嘉義具有最大的量測加速度，正是經過最多土壤液化高潛勢區的路段。



圖七十一：此為高鐵行經高雄左營站（圖左）至台北站之 0.5-4 Hz 資料折線圖

黃瑋程、鄭濬承(2018 年臺灣國際科學展覽會)指出，台灣西南平原表面波現象反映了土壤液化共振效應，他們利用美濃、甲仙、霧台三個規模六地震的資料，在西部平原地區觀察到表面波的頻散特性，經過較厚的沖積層區域，表面波主頻範圍約落在 0.2-0.8Hz 間，他們推測這個頻段與沖積層厚度有關。本研究則利用高鐵的震動，反應了不同地點的震波特性，在土壤液化區範圍大的嘉義-雲林區域，較大的 0.5-4 Hz 振幅亦可能反應了沖積層的共振效應。

柒、結論與應用

(一) 高鐵震動與土壤液化之影響

高鐵震動與土壤液化之影響，根據上述資料中，發現三個區段：台南到嘉義、嘉義到雲林、雲林到彰化在未濾波時，有振幅較大的趨勢；同時利用頻譜圖的比較，我們發現各路段在 0.5-4 Hz 較其他頻率的波大約兩倍，所以我們針對 0.5-4 Hz 進行深入探討。在帶通濾波 0.5-4 Hz 後，最高振幅發生在嘉義-雲林此路段，正為行經土壤液化高潛勢區(或地層下陷)最大面積之路段。已知土壤液化是疏鬆砂土在高地下水位狀況，遇到夠大的地震搖晃，導致土壤顆粒喪失支撐力，呈現像水一樣流動狀態。我們可以推論鬆軟的沖積層，其高地下水位容易產生土壤液化，在土壤液化高潛勢區或低層下陷區，可能有助於放大 0.5-4 Hz 的震動。

(二) 高鐵振動與地層下陷之影響

高鐵振動與地層下陷之影響，根據上述資料中，發現三個區段：台南到嘉義、嘉義到雲林、雲林到彰化在未濾波時，有最大振幅較大的趨勢；同時在經過帶通濾波後，也發現 0.5-4 Hz 在這三段中的最大振幅較其他頻率的波還要來得大約兩倍，所以我們針對 0.5-4 Hz 進行深入探討，由水利地理資訊平台中可見高雄市左營站到台南站中最大累積下沉量 3 cm (2001-2019 年)、台南站到嘉義站最大下沉量為 50 cm、嘉義站到雲林站最大累積下沉量為 150 cm、雲林站到彰化站最大下沉量為 60 cm、彰化站到台中站最大下沉量為 0 cm、台中站到新竹站最大下沉量為 0 cm、新竹站到桃園站最大下沉量為 0 cm、桃園站到板橋站最大下沉量為 0 cm、板橋站到台北站最大下沉量為 0.1 cm。0.5-4 Hz 最明顯出現在台南到嘉義、嘉義到雲林、雲林到彰化，恰為下陷量最多的三個區域。

我們所討論的 0.5-4 Hz 容易與較大的結構具有較長週期的共振，因為一般地震的重要週期大多在 0.1 秒至 1 秒之間，也就是 10Hz 到 1Hz 間，而一般傳統建築的基本振動週期也大都在此範圍內，因此會有較大的振動。

(三) 高鐵所產生振動

高鐵高架的自然振動頻率皆落在我們所測定的 0.5-4 Hz，高鐵所產生 0.5Hz~4Hz 振動在本次的實驗結果較為顯著，所以高鐵所產生的 0.5Hz~4Hz，容易與高鐵結構物產生共振，再加上此區域為土壤液化高潛勢區，所以使 0.5Hz~4Hz 較其他區域來的顯著。長期的低頻振動會使螺絲容易鬆動(陳志明，行政院國家科學委員會專題研究計畫。縮緊式精密固鎖螺帽在靜態及動態下防鬆脫特性量測之研究)，進而影響高鐵建築物安全，結構物之振動來源可能由結構內部或外部的振源所引起。例如：機械設備運轉、人員活動、風或地震、海浪、交通工具及工程施工等均會產生振動或撼動，並經由支撐結構或基礎而傳至接受者。振動與撼動如果未妥善處理，由振源傳遞至結構物的能量，也會對結構物產生破壞(陳正平，2014)。應該對這三個區段建築結構進行更完善的安全檢查。

捌、未來展望與心得

- (一) 過去科展研究多以振動來推估下沉量為主題，本研究主要針對高鐵結構物在土壤液化高潛勢區，地層下陷振動低頻振幅表現對整體結構物之影響。
- (二) 討論水平方向的振動與高鐵結構物間的關係。
- (三) 利用水平方向紀錄，探討其震動型態在不同路段是否和垂直方向紀錄（本究使用）所得之特徵一致。
- (四) 未來將探討近地表低速構造與地層下陷和土壤液化潛勢之明確關係，若有機會亦將利用數值模擬釐清高鐵震動與近地表低速構造的關係。

玖、參考資料及文獻

1. Akhris Sufri Hilm, Muhammad Hamzah Fansuri, Rini Kusumawardani, Tigo Mindiastiwi, Untoro Nugroho, Woro Yuniarti(2018). The impact of vehicle load inducing vibrations on the subgrade soil particle acceleration. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(6), 1440 – 1450.
2. Cheng C. M., Cui Peng, Lu Xiaobing, Tan Qingming, Yu Shanbing (2004). Liquefaction and displacement of saturated sand under vertical vibration loading. *Acta Mechanica Sinica*, 20(1), 96-105.
3. C. Clément, E. Aharonov, M. Stojanova, & R. Toussaint (2018). Sinking during earthquakes: Critical acceleration criteria control drained soil liquefaction. *Physical Review*, 97(2), 022905(18). DOI:10.1103/PhysRevE.97.022905
4. Chunfa Zhao, Wanming Zhai, Xu Zhang (2016). Dynamic Behavior Analysis of High-Speed Railway Ballast under Moving Vehicle Loads Using Discrete Element Method. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 04016157(14). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000871
5. H. El Ganainy, &M.H. El Naggar (2009). Efficient 3D nonlinear Winkler model for shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1236–1248. DOI: 10.1016/j.soildyn.2009.02.002
6. Web log post Encyclopaedia Britannica, Inc.(2020, 29 January). Soil liquefaction. Retrieved from: <https://www.britannica.com/science/soil-liquefaction>
7. 王天南(2006)。台灣高速鐵路雲林土庫段地盤下陷之機制探討。國立雲林科技大學營建工程系碩士班，雲林縣。
8. 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。
9. 張子修(2004)。彰化地區高鐵工程沿線土壤液化潛能評估及對高鐵土建結構基礎影響研究。朝陽科技大學營建工程系，台中市。
10. 張清泉(2003)。高鐵行車振動在軟弱土層之行為研究。國立成功大學土木工程研究所，台南市。
11. 楊萬全(1989)。濁水溪平原的水文地質研究。台灣師大地理學系，台北市。
12. 陳正平(2014年12月6號)。淺談結構物之振動。技師報，檢自 <http://www.twce.org.tw/modules/freecontent/include.php?fname=twce/paper/939/7-1.htm>
13. 劉鈞皓(2003)。橋梁支撐電阻尼對高鐵行車震動之影響分析。國立成功大學土木工程研究所，台南市。
14. 吳承儒、楊芸甄、洪暉詞(2011)。危機自陷—臺灣高鐵差異沉陷的新測量方法。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會。
15. 陳志明、管益揚、李晃瑋。縮緊式精密固鎖螺帽在靜態及動態下防鬆脫特性

量測之研究---研究成果報告(精簡版)。行政院國家科學委員會專題研究計畫
成果報告(計畫編號: NSC 98-2622-E-167-004-CC3)。

16. 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。
17. 劉雲昊、顏豪佑、馬翊豪(2017)。震不倒的六家!?. 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會。
18. 廖慶隆、黃俊鴻、洪振發、楊國良。地震與地盤沉陷對軌道車輛行車行為之影響與改善對策--總計畫暨子計畫: 沉陷與震後軌道不完整性之快速檢測與安全評估(I)。行政院國家科學委員會專題研究計畫期末報告(計畫編號: NSC 101-2625-M-034-004-)。
19. 賈超、趙建宇、徐幫樹、岳長城、李樹忱(2008)。清水隧道圍岩軟土振動液化研究。山東大學學報(工學版)。38(1)，1-5。
20. 向御禎、柳欣妤、黃歆雅、鄭宇婕、呂鎮銘、沈育令(2016)。天搖地動--地震強度與土壤液化。中華民國第 56 屆中小學科學展覽會。

【評語】 180013

本研究使用微機電加速計(O-Navi)來量測高鐵行經左營至台北路線上車廂內之震動，並利用 QCNLive 軟體分析波形分析行經各站間之頻率與振幅特徵，結果發現行經台南到嘉義、雲林至嘉義、彰化至雲林三段路線的震動，在濾波 0.1-5.0Hz 之平均振幅大於其他非地層下陷與土壤液化地段，也發現低頻振動的最大震幅在列車行經土壤液化區時有顯著的增加。研究議題明確，對高鐵行經土壤液化高顯示區震動表現與高鐵行經地層下陷區震動表現都有明確之分析結果。此議題已有多人討論，創新性較低，可增加物理機制與震動訊號深入之時頻分析，以提升作品之創見。