



臺中地區交通噪音與地層振動特性之探討

朝陽科技大學營建工程系副教授 / 伍勝民

朝陽科技大學營建工程系副教授 / 蔡佩勳

朝陽科技大學營建工程系副教授 / 賴俊仁

台灣世曦工程顧問股份有限公司捷運工程部工程師 / 李奕霆

台灣世曦工程顧問股份有限公司捷運工程部正工程師 / 張永漢

關鍵字：台中捷運、振動、噪音、傳遞動性、列車力密度

摘要

本文針對規劃中之臺中捷運藍線沿線進行背景振動與噪音、地層傳遞動性、以及已通車之捷運綠線進行列車力密度頻譜調查，求得臺中都會區三種（卵礫石、紅土礫石與砂質沉泥）主要地質材料之振動特性，提供將來臺中地區捷運列車營運之地傳振動與地傳噪音分析設計之參考。捷運藍線沿線10個測點之背景噪音與振動量測結果發現，其中8個測點之背景噪音量以及5個測點之背景振動量已經超出環保署所制定之管制標準；捷運藍線沿線人造振源之線源傳遞動性試驗結果發現3種地質材料之線源傳遞動性均有隨著距

離之增加而衰減的趨勢，線源傳遞動性最大值約20~40 dB，且產生最大的線源傳遞動性之頻率略有不同；捷運綠線列車所引發地表振動隨距離之衰減分析結果發現，以Bornitz模式求得之地層材料衰減係數 α 約為0.05，以Wiss模式求得之地層材料衰減係數 m 介於0.3~2.0之間。捷運綠線列車力密度頻譜分析結果發現，其平均列車力密度介於15~40 dB之間，最大值發生在12.5 Hz。

一、前言

近年來由於臺中都會區人口快速增加導致市區內交通壅塞日益嚴重，建構捷運系統



台灣世曦工程顧問股份有限公司於2019年取得「捷運藍線綜合規劃（含環境影響評估）暨捷運設備用地土地使用變更案」，並於2022年取得此捷運線之「基本設計」標，為進一步瞭解捷運藍線沿線之工程環境特性，於是偕同朝陽科技大學營建工程系針對規劃中捷運藍線沿線之代表性場址，以麥克風與加速度規進行背景噪音與振動之量測，並利用人造振源進行振動量測，求得臺中都會區三種主要地質材料之振動特性；以及量測營運中之捷運綠線列車之近源振動特性及其力密度頻譜，做為將來臺中捷運路網營運之地傳振動與地傳噪音分析之參考，其主要內容如下：

1. 背景振動與噪音調查 - 針對臺中捷運藍線之沿線各區段較具有代表性或敏感區域，如醫院、社區住宅、學校等選擇 10 個調查點，進行三個時段之三軸向地表振動與聲音源傳播噪音之量測，以求得此 10 個調查點的振動與噪音之背景值，有助於未來進行臺中捷運藍線「噪音與振動對本路線環境影響之分析評估及解決建議方案」之參考。
2. 地層傳遞動性調查 - 選定臺中捷運藍線三種主要地質材料（卵礫石層、紅土礫石層及砂質沉泥層）之代表性場址各 2 處共 6 處，進行人造振源之振動量測，求得各代表地質材料之線源傳遞動性（Line load Transfer Mobility, TM_{line} ），以提供臺中捷運各線列車地傳振動與地傳噪音分析之參考。

3. 列車力密度頻譜調查 - 選擇營運中之臺中捷運綠線 3 處場址（進出站段、轉彎段、直線段）進行列車經過時之地表振動量測，並選擇一條測線進行地層傳遞動性調查，依此決定臺中捷運綠線列車之近源振動特性及其力密度頻譜，以提供將來臺中捷運各線列車對周圍環境產生之振動預測分析之參考。

本文彙整上述計畫[2]之調查內容、位置、方法、以及分析結果，期能提供各界進行臺中都會區捷運列車行進所導致之地傳振動與地傳噪音分析之參考。

二、調查地點與方法

（一）調查地點

1. 捷運藍線沿線背景噪音與振動量測

本研究選定臺中捷運藍線沿線各區段較具代表性或敏感之社區或醫院、學校等10個調查點，進行上午、下午、夜間三個時段之噪音與三軸向振動量測，取得這10個地點的噪音與振動之背景資料，以提供台中捷運藍線地傳振動與噪音分析之參考。各測點之位置、座標與噪音管制區分類如表1所示，其所屬之行政區則如圖2所示。

2. 捷運藍線沿線主要地質材料線源傳遞動性量測

本研究針對規劃中之捷運藍線沿線可能

表 1 捷運藍線沿線背景噪音與振動量測點位概況

編號	測站名稱	噪音管制區分類	座標 (TWD97 二度分帶)
1	臺中火車站	第四類	218256.504,2670307.910
2	第二市場	第三類	217346.032,2670925.251
3	臺中市政府	第三類	214361.761,2673064.375
4	臺中轉運站	第二類	211617.607,2674957.376
5	澄清醫院	第二類	211034.377,2675315.832
6	臺中榮總	第二類	209809.745,2675390.001
7	正英路	第二類	207509.484,2678165.517
8	竹林國小	第二類	206061.125,2681535.604
9	沙鹿陸橋	第三類	205393.378,2681799.193
10	童綜合醫院	第二類	203587.414,2682491.053

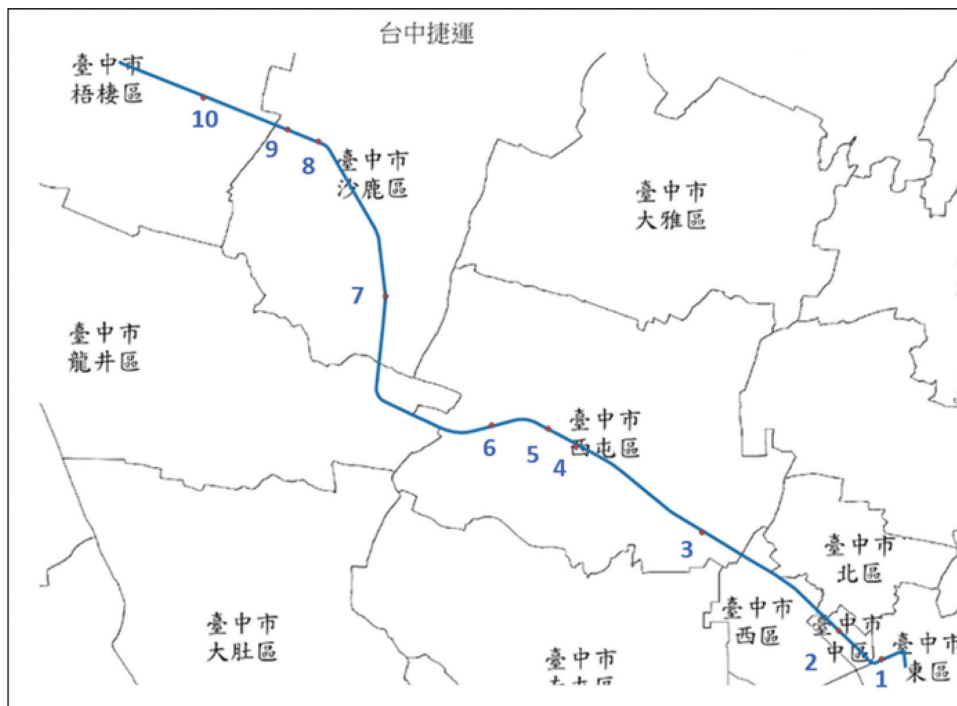


圖 2 捷運藍線沿線背景噪音與振動量測點位分布圖

遭遇的三種主要地質材料（卵礫石、紅土礫石、以及砂質沉泥）之代表性場址各2處，進行人造振源（衝擊錘敲擊）產生地面振動之

量測，以求得此三種地質材料之地層線源傳遞動性 TM_{line} ，提供台中捷運藍線列車地傳振動分析之參考。各測線之位置、座標與地層



種類如表2所示，其所屬之行政區則如圖3所示。

3. 捷運綠線列車近源振動特性及力密度頻譜量測

本研究針對已完工營運之台中捷運綠線選定3處測點及1條測線，量測列車通過時所

引發附近的地表振動，並調查該地點之地層傳遞動性與振動衰減，以分析綠線捷運列車之力密度頻譜，做為將來台中捷運路網營運之地傳振動與地傳噪音分析之參考。各測站之位置、座標與類別如表3所示，其所在位置則如圖4所示。

表 2 捷運藍線沿線主要地質材料線源傳遞動性量測點位概況

編號	測站名稱	地層種類	座標 (TWD97 二度分帶)
測線 1	中興街	卵礫石層	215855.753, 2672226.998
測線 2	市府停車場	卵礫石層	214212.587, 2673233.953
測線 3	1060 巷	紅土礫石層	210893.504, 2675402.359
測線 4	都會南街	紅土礫石層	207685.932, 2675829.948
測線 5	光華街	砂質沉泥層	204300.299, 2682248.768
測線 6	和平街	砂質沉泥層	203325.588, 2682645.739



圖 3 捷運藍線沿線主要地質材料地層傳遞動性量測測線分布圖

表 3 捷運綠線沿線列車近源振動特性及力密度頻譜量測點位概況

編號	測站名稱	測點類別	座標 (TWD97 二度分帶)
測點 1	大慶站	進、出站	214142.771, 2668209.503
測點 2	中山醫大	轉彎段	214258.411, 2668640.145
測點 3	大墩 11 街	直線段	214092.944, 2671548.223
測線 1	中山醫大	轉彎段	214264.279, 2668548.207



圖 4 捷運綠線列車近源振動特性及力密度頻譜量測點位分布圖

(二) 調查方法

本研究使用如圖5所示之設備進行各項現地量測，此系統主要由：高敏感度麥克風（量測音量）、低頻加速度規（量測振動量）、錄影機（記錄車流量）、擷取卡（將麥克風與加速度規之類比訊號轉換成數位訊號）、與筆記型電腦（記錄量測數據）等設備所組成，其量測步驟說明如後：

1. 背景噪音與振動量測

本研究參照行政院環境保護署2016年頒佈之「環境噪音量測方法」[3]與2021年發函各地方政府之「環境振動管理指引」[4]，進行捷運藍線沿線10個調查點之上、下午與夜間3個時段的背景噪音與背景振動量測。如圖6所示，首先於各測點選定約5公尺的範圍擺放安全警示圍欄；接著架設麥克風、加速度規、攝影機、擷取卡、以及筆記型電腦等儀

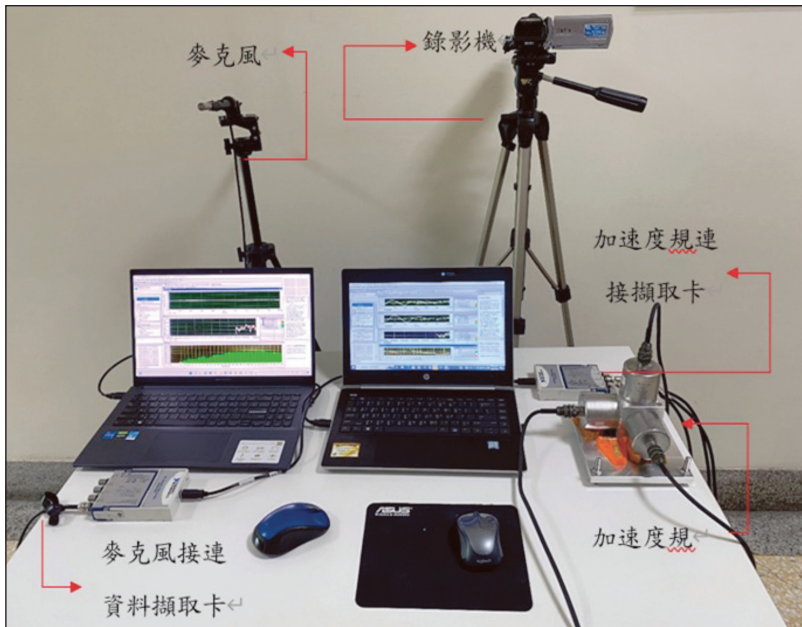


圖 5 本研究使用之現地量測系統照片



圖 6 背景噪音與振動現地量測照片

器；於確認各儀器均正常運作後，即啟動電腦軟體進行連續一小時（夜間為30分鐘）的噪音與振動量測。

除參照上述環保署建議之量測方法外，本研究更將各時段區分成10分鐘之區間，統計每一區間之平均與最大背景噪音量、產生

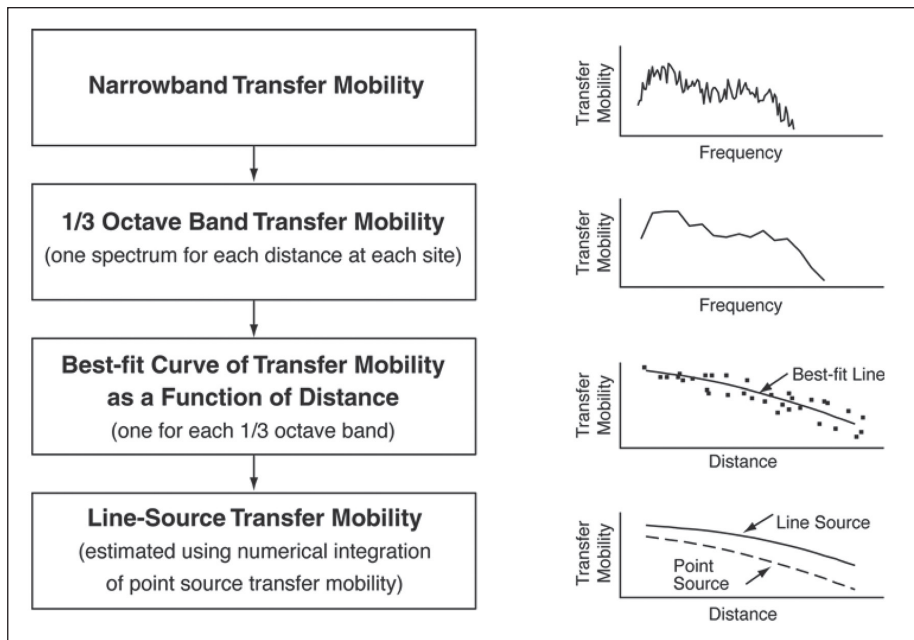


圖 7 地層傳遞動特性量測步驟 [5]

最大背景噪音之主要噪音源；三個軸向之平均背景振動量、最大Z軸振動量及其主要振動源；雙向（同向與逆向）之3種不同大小車輛（大車、小車及機車）之車流量，以進行背景噪音及振動量與車流量間之相關性分析。

2. 地層傳遞動特性量測

本研究參照美國聯邦運輸部（Federal Transit Administration, FTA）[5]建議之方法進行人造振源地層傳遞動性量測，其流程如圖7所示。茲說明如後：如圖8所示，首先選定垂直於捷運預定路線之測線，沿測線設定敲擊點並於距敲擊點數個不同之距離（本研究採用5、7.5、10、12.5、15、20、25與30 m）擺放三軸向加速度規（擺放位置會依



圖 8 線源傳遞動性試驗現地量測照片



現場環境限制因素進行調整)。每條測線進行30次敲擊，每次敲擊皆記錄歷時2秒之衝擊錘敲擊力與加速度規振動訊號。

進行分析時將加速度規記錄的加速度歷時訊號 $a(t)$ 做積分轉換成速度歷時訊號 $v(t)$ ，再將敲擊錘（力規）的施力歷時訊號 $P(t)$ 與速度歷時訊號 $v(t)$ 以快速傅立葉轉換，將時間域訊號轉換至頻率域求得其頻譜 $P(f)$ 與 $v(f)$ 。由衝擊力與速度頻譜計算其相干係數（coherence），相干係數反映此振動反應與衝擊力之相關性。所以，相干係數越高，量測的振動訊號與敲擊力關聯性越大，代表訊號受外部雜訊影響越少。每個測點會敲擊30次，取相干係數較大者做為後續點源傳遞動性分析之用。將不同距離之速度頻譜 $v(f)$ 除以參考速度 $v_0 (=2.54 \times 10^{-8} \text{ m/s})$ ，得到 $v(f)/v_0$ 。將敲擊力頻譜 $P(f)$ 除以參考衝擊力 $P_0 (=1\text{N})$ ，得 $P(f)/P_0$ 。將各頻率的速度頻譜值 $v(f)/v_0$ 與敲擊力頻譜 $P(f)/P_0$ 相除，取對數再乘以20，得到 $20\log(\frac{v/v_0}{P/P_0})$ 之窄帶（narrow band）點源傳遞動性（transfer mobility）頻譜。再以1/3八音階倍頻分析，將窄帶頻譜平滑化得到1/3八音階倍頻點源傳遞動性頻譜。再經由線性迴歸分析，求出所有中心頻率的點源傳遞動性與振源距離之迴歸直線的截距 b 與斜率 m ，以得到其他振源距離之點源傳遞動性估計值，再依此對列車長度進行Simpson數值積分，得到線源傳遞動性。即由迴歸所得之 m 與 b ，代入公式（1），計算軌道上的 (x, y_0) 的點源傳遞動性之平方 $TM_{point}^2(y_0, x)$

$$TM_{point}^2(y_0, x) = TM_{ref}^2 \times 10^{\frac{b+m \log \sqrt{(y_0^2+x^2)}}{10}} \quad (1)$$

其中， $TM_{ref} = 2.54 \times 10^{-8} \text{ m/s/N}$ ，再以公式（2）做積分得距軌道 y_0 的線源傳遞動性函數值， L 為列車長度

$$TM_{line}^2(y_0) = \int_{-L/2}^{L/2} TM_{point}^2(y_0, x) dx \quad (2)$$

最後利用公式（3）將以分貝來表示， TM_{line} 即為線源傳遞動性。

$$TM_{line}(dB) = 10 \log(TM_{line}^2) - 20 \log(TM_{ref}) \quad (3)$$

3. 列車近源振動特性及力密度頻譜量測

本研究參考倪勝火與朱聖浩（2002）[8]有關台北捷運木柵沿線振動量測及影響評估分析方法，針對台中捷運綠線列車通過時所引發鄰近的地表振動進行量測，並調查該地點之地層傳遞動性，以分析營運中之捷運綠線的列車力密度頻譜以及振動衰減特性，做為將來台中捷運路網營運之地傳振動與地傳噪音分析之參考，其分析流程如圖9所示，包含3個主要量測項目：1）以捷運綠線列車為振源量測墩柱下方3軸向地表之振動，進行近源振動特性分析；2）以捷運綠線列車為振源量測距軌道中心線7個不同距離之3軸向地表振動以進行地層振動衰減分析與列車經過所引發之振動頻譜；3）以衝擊錘為振源量測距軌道中心線7個不同距離之3軸向地表振動，結合第2項中列車經過所引發之振動頻譜分析

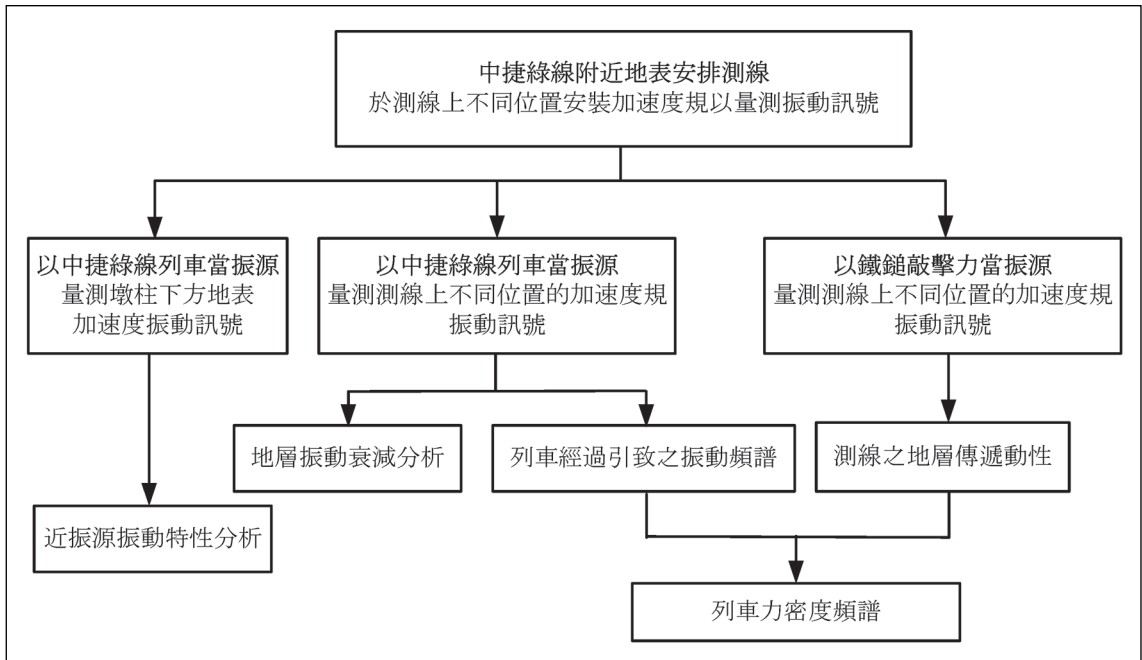


圖 9 列車近源振動特性及力密度頻譜之分析流程

捷運綠線列車之列車力密度頻譜。

近源振動特性量測除針對捷運列車在三種路段（進出車站、轉彎段、直線段）產生之振動進行分析外，亦利用連續小波轉換分析得到此振動訊號之時頻圖，由時頻圖上振動能量較高的部分判斷出列車車輪正好經過加速度規時的時間，由捷運列車最前輪與最後輪位置之時間差及列車長度來計算列車在通過量測點之車速。

地層振動衰減分析採用兩種模式：1) Bornitz (1931) [6]將打樁施工引致之振動透過土層傳遞之行為視為點振源，並假設產生

之地表振動主要以雷利波型式向四周傳遞，所提出之振波衰減經驗公式：

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\alpha(r_2-r_1)} \quad (4)$$

其中：

- A_1 ：為測點 1 到振源之振幅
- A_2 ：為測點 2 到振源之振幅
- r_1 ：為測點 1 到振源之距離
- r_2 ：為測點 2 到振源之距離
- α ：為材料阻尼係數

2) Wiss (1967) [7]就各種不同性質之土壤（包括黏土、乾砂、沖積土、濕砂所構成



之不同地盤)，以現場測試的方式研究振波在地盤中傳播及衰減之情形，忽略振波之波傳型式，僅考慮振波隨傳播距離不同而衰減的趨勢，所提出之地盤振波衰減經驗公式：

$$V = k D^{-m} \quad (5)$$

其中：

V：地表振動速度振幅

k：距振源一單位距離之振動速度振幅

D：距振源之距離

m：衰減係數

捷運綠線列車經過所引發之列車力分析則亦參考前述美國FTA之建議分析方法[5]，其計算公式如下：

$$L_F = L_V - TM_{line} \quad (6)$$

其中， L_F 為列車力密度， L_V 為列車產生之振動頻譜， TM_{line} 為線源傳遞動性。FTA提到當運輸軌道採高架方式而以墩柱來支持時，公式(6)的線源傳遞動性應改為點源傳遞動性 TM_{point} ，這是因為列車載重以墩柱傳遞至地面上，墩柱在地面視為只有一個施力點，故列車力密度 L_F 改用公式(7)來計算：

$$L_F = L_V - TM_{point} \quad (7)$$

三、調查結果

(一) 臺中捷運藍線沿線背景噪音與振動

1. 背景噪音

臺中捷運藍線沿線10個測點3個不同時段量測到之背景噪音量($L_{eq,1hr}$)整理於表4中。

表 4 捷運藍線沿線各測點背景噪音量測結果

測站	管制區分類	$L_{eq,1hr}$ [dB _A , ref: 20*10 ⁻⁶ Pa]				
		早上	下午	法規容許值	夜間	法規容許值
臺中火車站	第四類	68.0	68.3	75	64.5	65
第二市場	第三類	74.8	73.6	75	72.2	65
臺中市政府	第三類	76.9	75.5	75	75.7	65
臺中轉運站	第二類	75.0	73.5	70	71.4	60
澄清醫院	第二類	76.8	75.7	70	74.4	60
臺中榮總	第二類	74.2	74.9	70	73.9	60
正英站	第二類	70.5	70.9	70	71.2	60
竹林國小	第二類	72.4	70.6	70	68.0	60
沙鹿陸橋	第三類	74.5	75.0	75	75.9	65
童綜合醫院	第二類	71.8	71.0	70	69.4	60

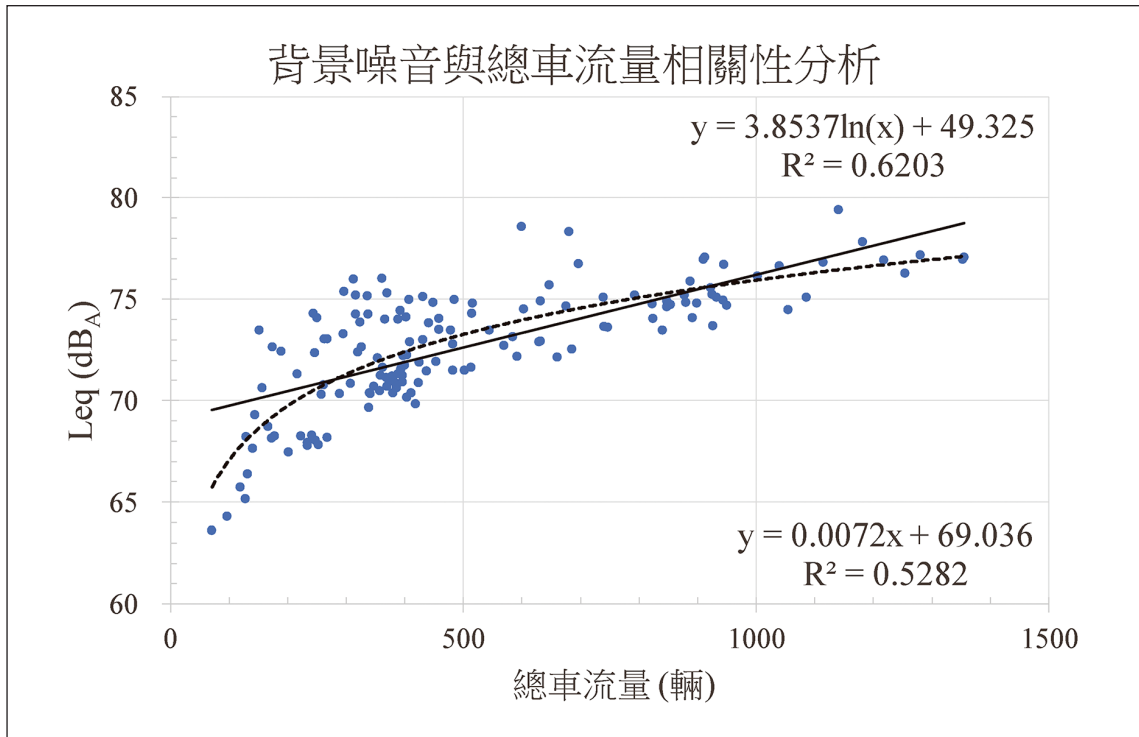


圖 10 捷運藍線沿線 10 個測點之背景噪音與車流量之相關性分析

由表4可以看出：調查之10個測點其平均背景噪音量日間介於68.0~76.9 dB_A ，夜間介於64.5~75.9 dB_A 。除了臺中火車站測點位於大智北路上車流量較少，以及第二市場與沙鹿陸橋測點之日間背景噪音量低於環保署之噪音管制法[9]之容許值外，其餘7個測點之背景噪音量不論是白天或夜間均已超過噪音管制法之容許值。

除了背景噪音之量測外，本研究亦利用攝影機統計3個時段每10分鐘區間經過各個測點之大型（大客車與大貨車）、小型（小客車與小貨車）與機車之車流量。綜合10個

測點3個時段不同區間內之背景噪音量與車流量數據將其彙整於圖10中，由此圖可以看出背景噪音量明顯隨車流量之增加而增加。若以直線迴歸其相關係數 R^2 為0.5282，若改採對數迴歸，則相關係數提高至0.6203。雖然單一測點背景噪音量與車流量間之線性迴歸相關係數因不同環境之影響有明顯的落差，有可能是因為單一測點數據量較小的影響。若將10個測點之所有數據納入考慮時，則可以看出背景噪音量與車流量間有明顯的線性關係。若將圖10中對數迴歸公式中之車流量（ x 值）以0代入，則可得在沒有車流之純背景噪音，約為49分貝，遠低於環保署規定之



表 5 捷運藍線沿線各測點背景振動量測結果

測站	管制區分類	$L_{V,RMS}$ [dB, ref: $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$]				
		早上	下午	法規建議值	夜間	法規建議值
台中火車站	第四類	50.0	53.2	60	48.1	57
第二市場	第三類	62.5	62.1	60	59.3	57
臺中市政府	第三類	61.6	61.1	60	59.6	57
臺中轉運站	第二類	54.5	50.5	55	52.0	52
澄清醫院	第二類	65.5	61.7	55	63.0	52
臺中榮總	第二類	55.6	55.3	55	52.0	52
正英站	第二類	64.1	55.1	55	54.2	52
竹林國小	第二類	57.9	57.4	55	52.0	52
沙鹿陸橋	第三類	52.5	53.3	60	56.7	57
童綜合醫院	第二類	51.5	50.7	55	46.3	52

夜間60分貝容許值。故若能以大眾運輸系統之捷運取代路面行駛之機動車輛，應可有效降低因車流產生之噪音，改善生活品質。

2. 背景振動

台中捷運藍線沿線10個測站以振動加速度基準之背景振動量測結果整理於表5中，由此表可以看出：各測點之總振動量白天介於50~66分貝，夜間則介於46~63分貝。其中澄清醫院測站之總振動量超出環保署之過渡期建議值[4]較多（約10分貝），第二市場、臺中市政府、台中榮總與竹林國小等4個測站總振動量略為超出建議值（約1~2分貝），其餘5個測站其總振動量則均在建議值之內。

綜合10個測點不同時段與區間內之背景振動量與車流量數據，將其彙整於圖11中。由此圖可以看出：背景振動量與車流量間

之關係零散，特別是在低流量（600輛/10分鐘）時，不論是使用那種迴歸方式兩者之間之相關係數明顯偏低（均低於0.1），此乃因各測點之周遭環境如地質條件、地下構造物（如排水溝、管道）等，都會影響到車輛產生震波之傳遞。由此可見，背景噪音量與車流量間之關係受測點周遭環境之影響較低；而背景振動量與車流量間之關係則很容易受測點周遭環境之影響。

（二）臺中捷運藍線沿線主要地質材料線源傳遞動性

本研究針對台中捷運藍線沿線三種主要地質材料（卵礫石、紅土礫石、以及砂質沉泥），各選擇2條測線進行以人造振源進行地層傳遞動性試驗，然後參照2-2節中美國FTA建議之方法計算線源傳遞動性，再將分析結

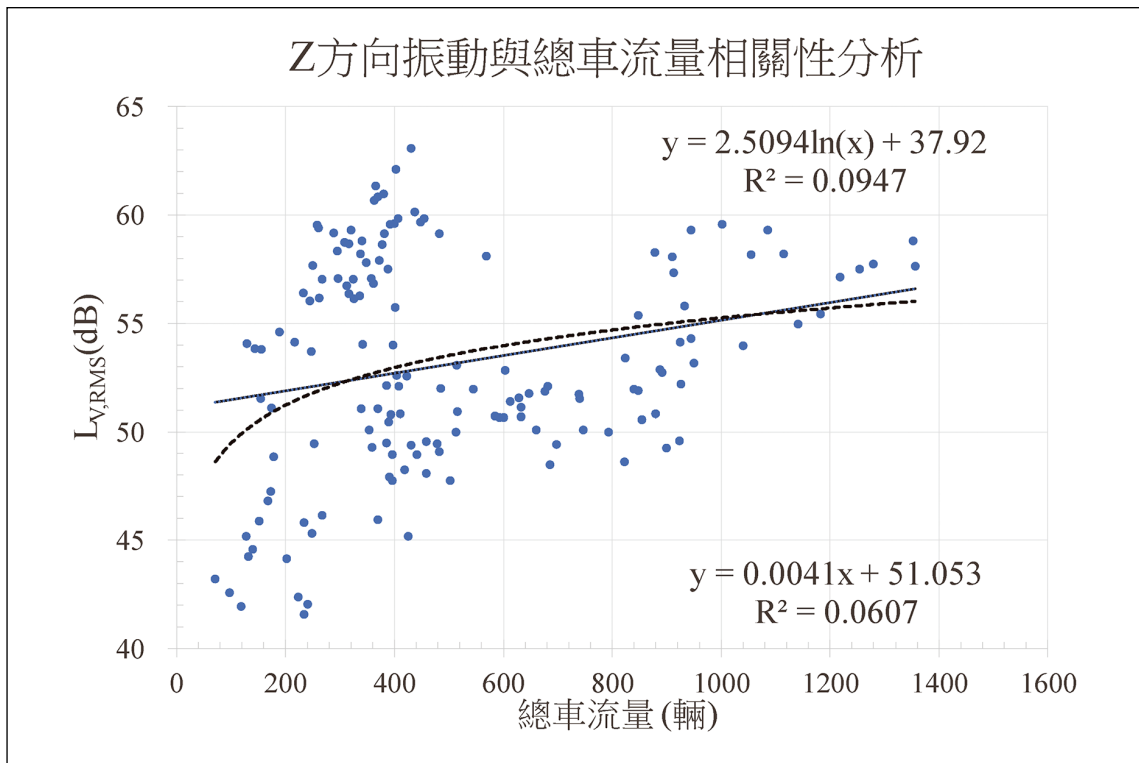


圖 11 捷運藍線沿線 10 個測點之背景振動與車流量之相關性分析

果以1/3八音階倍頻線源傳遞動性頻譜圖表示。由於衝擊錘敲擊地面主要的能量振動是Z軸（垂直地面）方向，所以本文僅呈現Z軸方向之傳遞動性分析結果。各測線距振源8個不同距離在Z軸方向之傳遞動性頻譜圖如圖12~圖17所示。從圖12~圖17之傳遞動性頻譜來看，對於同一振動頻率，距離振源最近之位置（5 m）的傳遞動性值最大，傳遞動性值隨著與振源距離之增加而衰減。由圖12與圖13可看出，測線一與測線二均位於卵礫石層上，其線型相似，在頻率為40~50 Hz時，線源傳遞動性有最大值，約25 dB，然後隨頻率

之增加而遞減。測線三、測線四則都位於紅土礫石層上，其線型亦相似，在頻率為80 Hz時，線源傳遞動性有最大值，約25~40 dB。測線五與測線六則位於砂質沉泥層，在頻率介於40~50 Hz時，線源傳遞動性有最大值，約20~25 dB，然後亦隨頻率之增加而遞減。

（三）臺中捷運綠線列車之近源振動特性及力密度頻譜

1. 列車近源振動特性

本節針對捷運綠線列車在三種路段（進

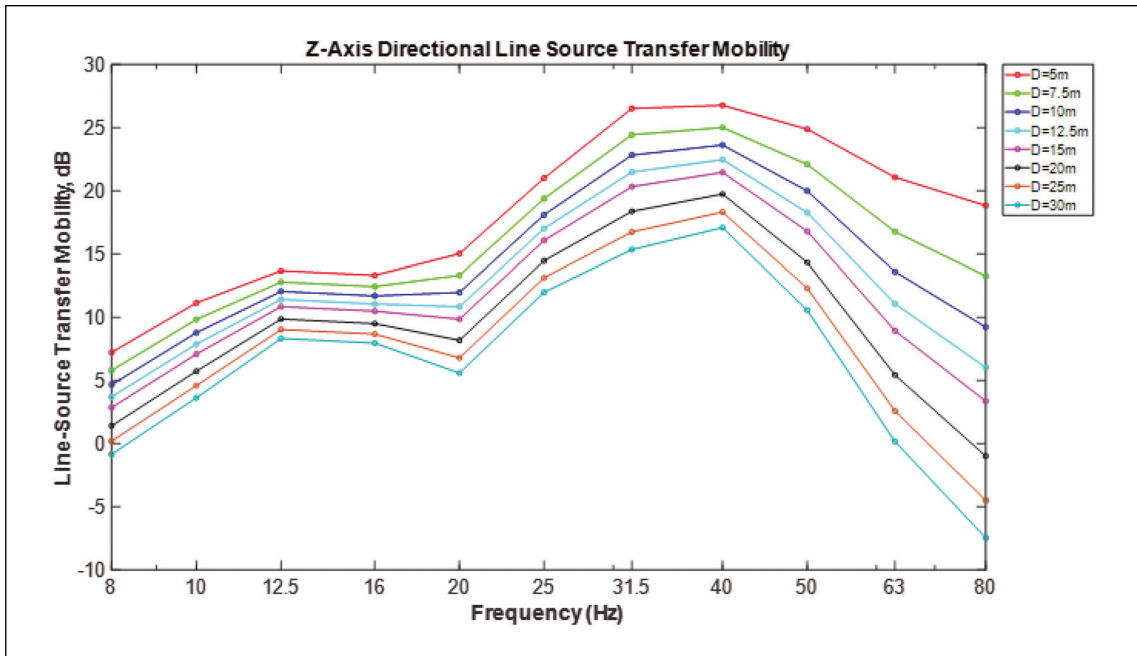


圖 12 測線一（中興街）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

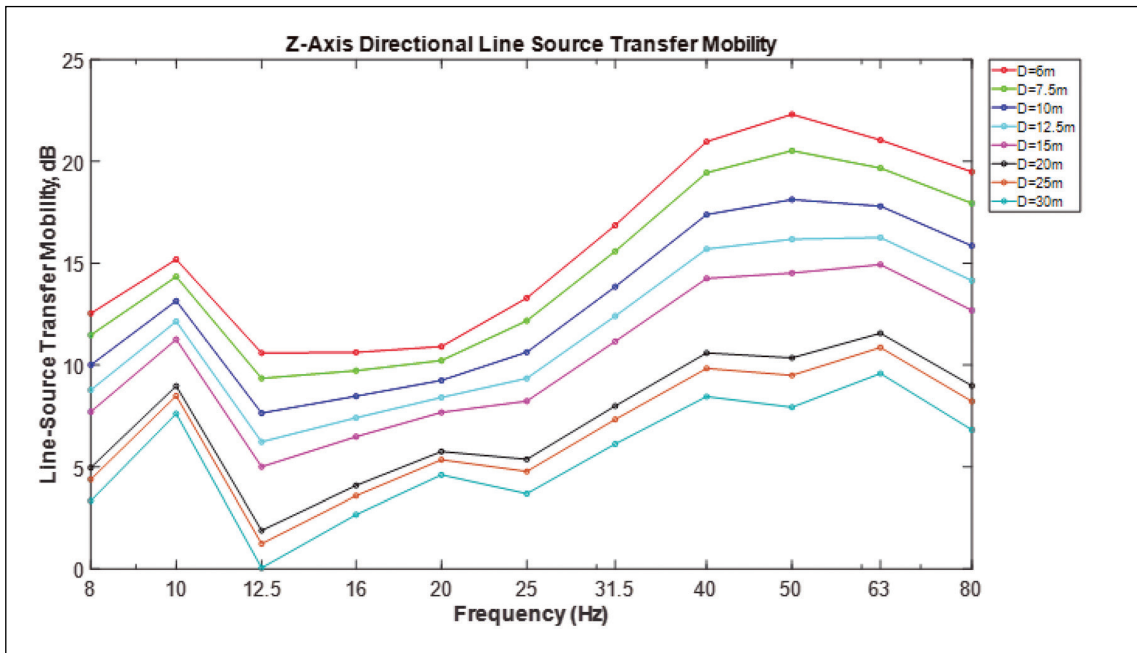


圖 13 測線二（市府停車場）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

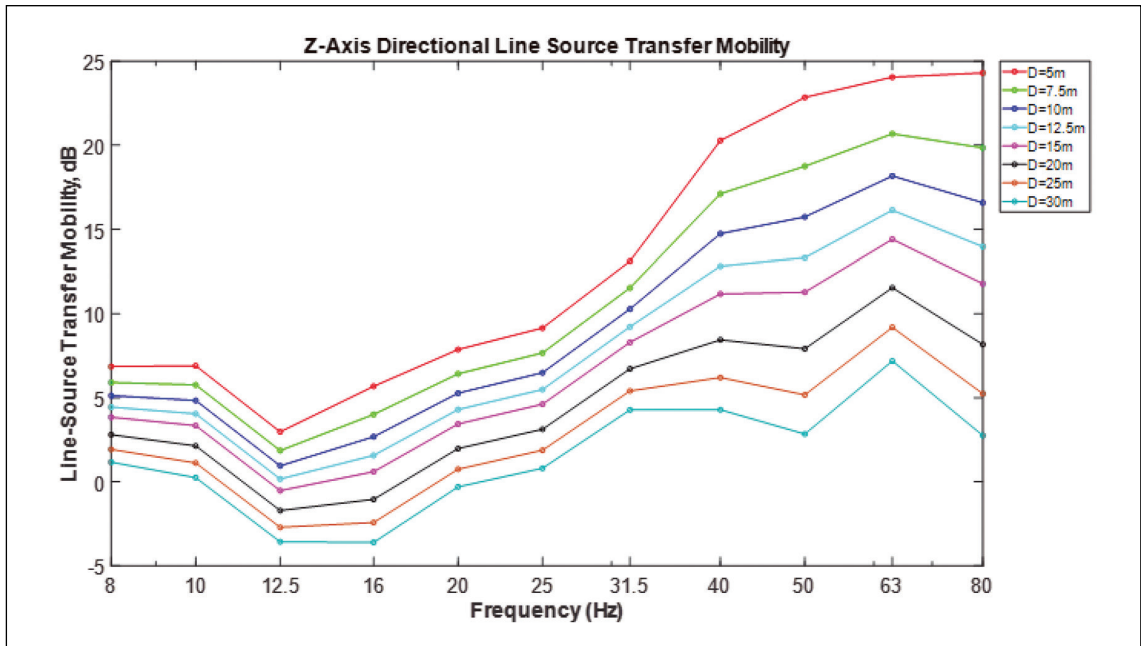


圖 14 測線三（1060巷）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

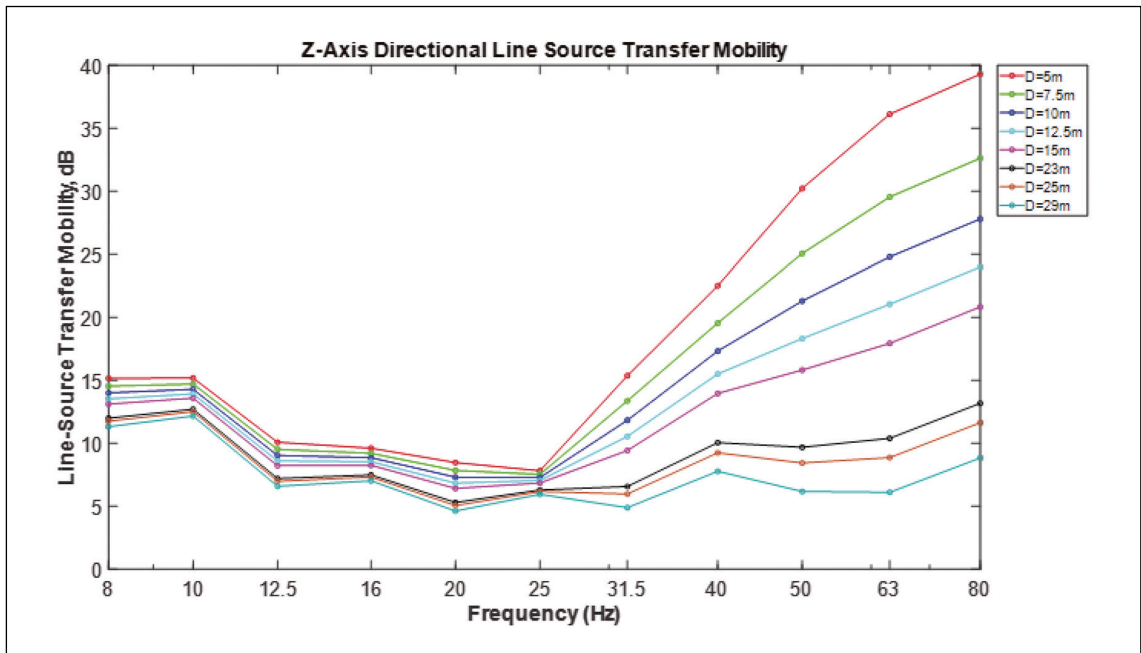


圖 15 測線四（都會南街）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

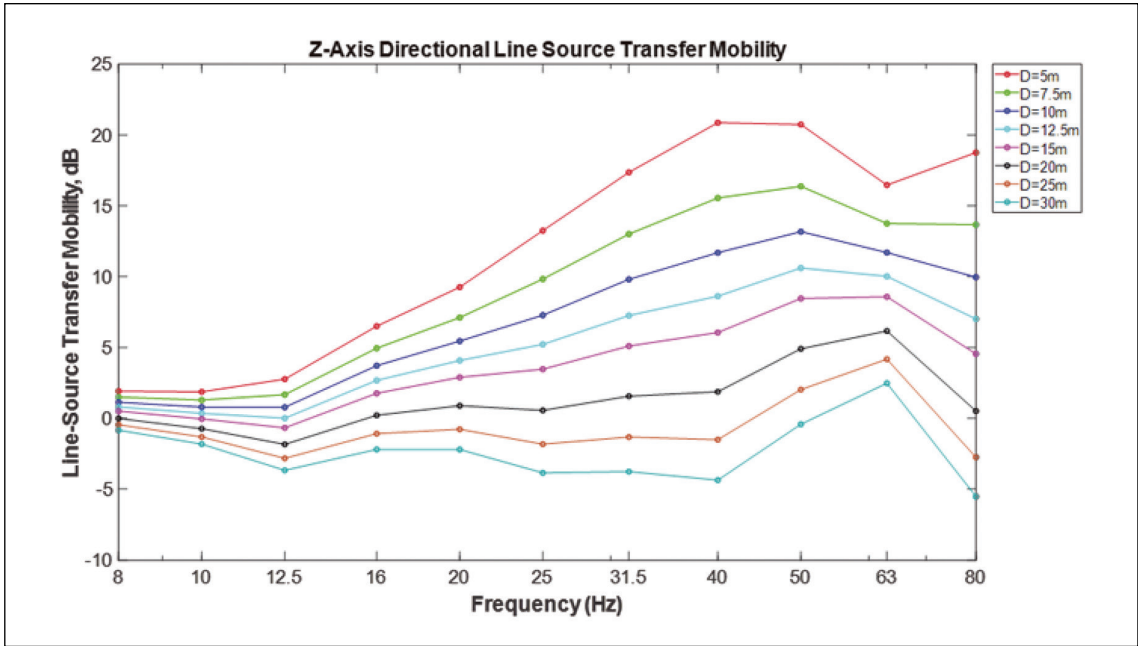


圖 16 測線五（光華街）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

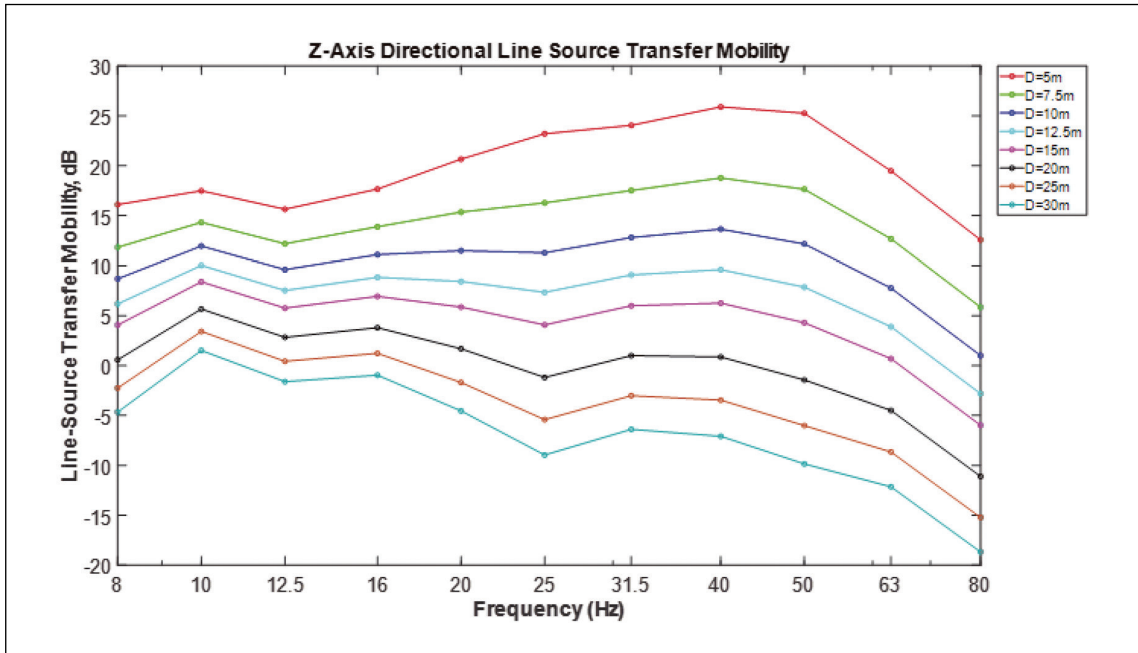


圖 17 測線六（和平街）在 Z 軸方向之線源傳遞動性頻譜圖

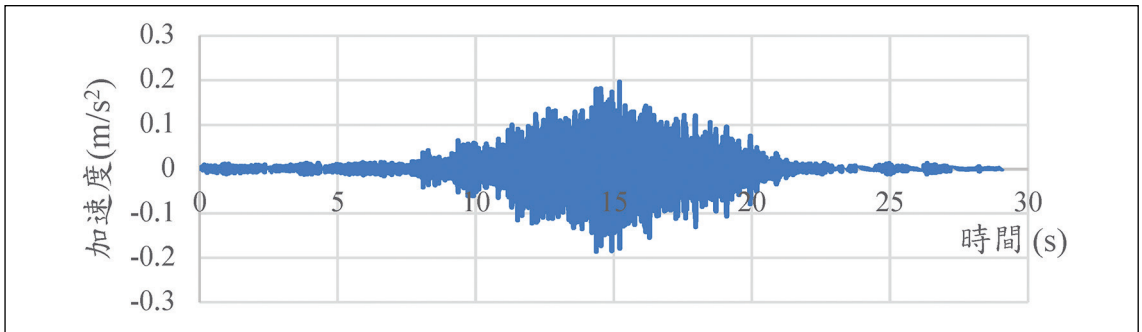


圖 18 捷運列車經過產生之鉛直 (Z) 方向地表加速度歷時

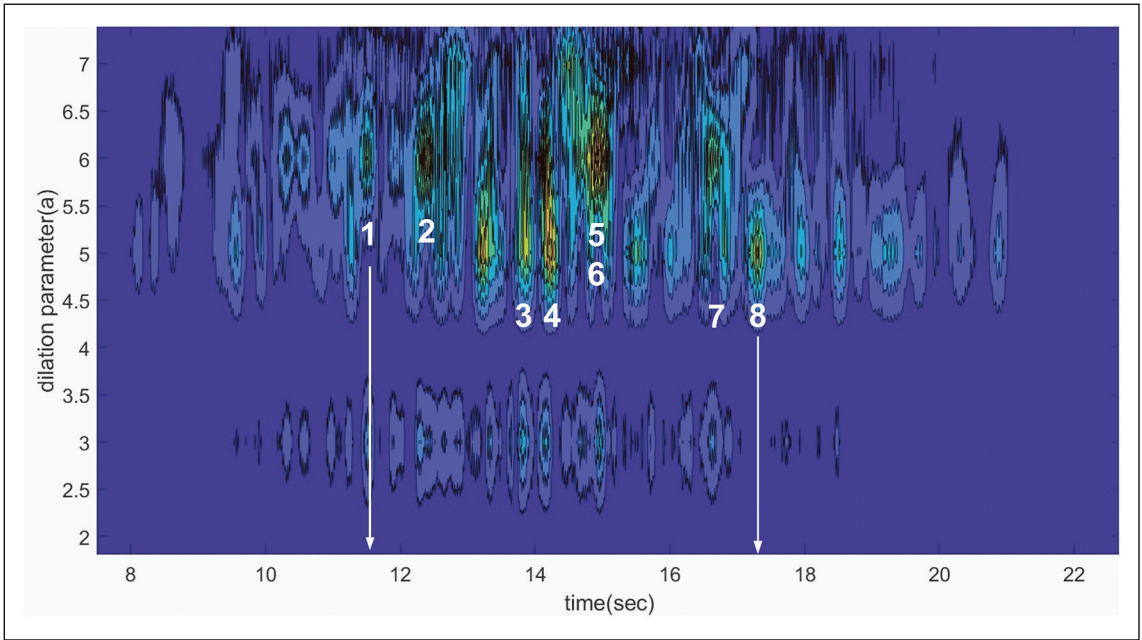


圖 19 連續小波轉換之時頻圖

出車站、轉彎段、直線段) 產生之振動進行分析與討論, 圖18為大慶捷運站南側約30 m 處(測點1)之加速度振動訊號, 經連續小波轉換分析可以得到此振動訊號之時頻圖, 如圖19所示。圖中之橫坐標為時間軸, 縱座標

為小波係數(與頻率相關), 圖上顏色代表振動能量之高低, 藍色部分能量較低, 黃色部分能量較高。由圖19可以看出, 能量較高的部分, 為列車車輪正好經過加速度規附近時所產生(圖上數字的位置), 此與台中捷

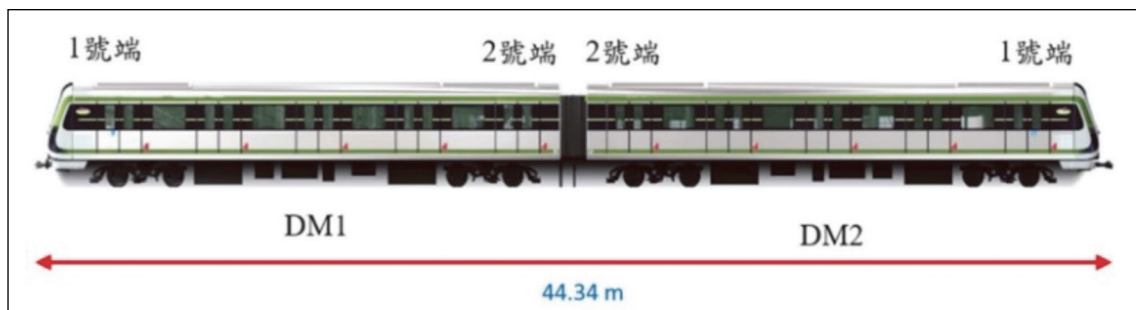


圖 20 台中捷運綠線列車車廂配置圖

表 6 列車通過測站時之車速統計分析

測點	測站	類別	車行方向	平均車速 (km/h)	標準偏差 (km/h)
1	大慶站	進出站	北上	27.3	0.63
			南下	28.1	1.30
2	中山醫大	轉彎段	北上	29.0	0.64
			南下	29.9	1.04
3	大墩 11 街	直線段	北上	60.9	0.42
			南下	60.9	0.42

運列車八組車輪（圖20）相對應。因此，可以由第一輪與第八輪位置之時間差及列車長度來計算列車在通過量測點之車速。列車在進出車站、轉彎段、直線段1小時內雙向各6班次之平均車速分析結果，如表6所示。

分析結果顯示：捷運綠線列車在進出車站之速度約為27.3~28.1公里/小時，在轉彎段之速度約為29.0~29.9公里/小時，在直線段之速度則約為60.9公里/小時。

站、轉彎段、直線段的墩柱下方振動之1/3八音階平均頻譜，黑線是將量測期間所量測的多個車次之振動頻譜值的平均結果。

由於列車進出車站的量測位置在大慶捷運站之南下方向約30 m的墩柱下方地表，所以南下車次為出站車班，北上車次為進站車班。由圖21可以看出，捷運綠線列車在進站或出站之平均頻譜近似，都在50 Hz有較大的振幅。

圖21~23分別為捷運綠線列車在進出車

圖22為綠線列車在轉彎段之振動速度頻

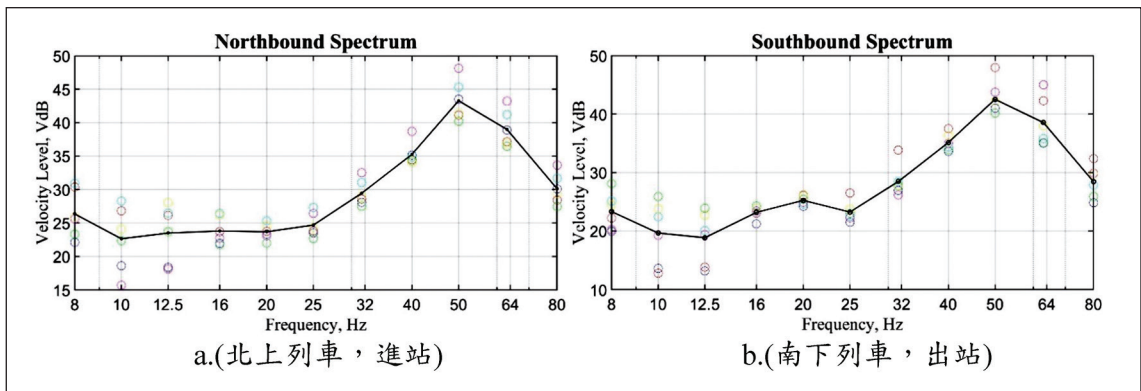


圖 21 捷運綠線列車在進出車站時之振動速度頻譜

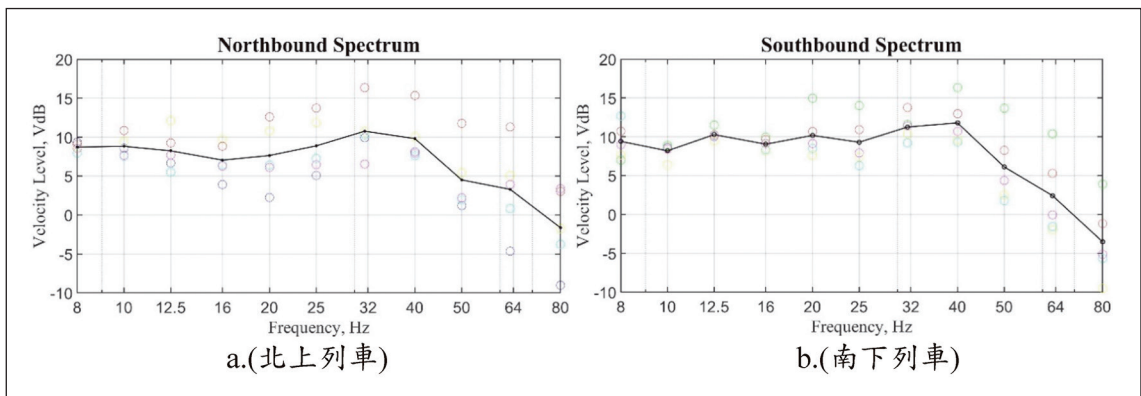


圖 22 捷運綠線列車在轉彎段之振動速度頻譜

譜，由此圖可以看出北上或南下列車在轉彎段墩柱下方地表振動之1/3八音階平均頻譜大致相同，當頻率小於40 Hz，其振幅差異不大，頻率超過40 Hz時振幅有下降趨勢。

圖23則為綠線列車在直線段之振動速度頻譜，由此圖可以看出北上或南下列車在直線段墩柱下方地表振動之1/3八音階平均頻譜亦很相似，都有較明顯的雙峰，在20與50Hz

處有較大的振幅。

2. 捷運綠線列車引發地表振動衰減分析

本研究參照2-2節中的Bornitz與Wiss之衰減模式對捷運綠線列車經過所引發地表振動之衰減分析，於中山醫大附近（測線1）量測距捷運中心線不同距離之振動訊號進行迴歸分析，以得到綠線列車振動振幅隨距離衰減之趨勢，並求取土層衰減係數，其結果整理

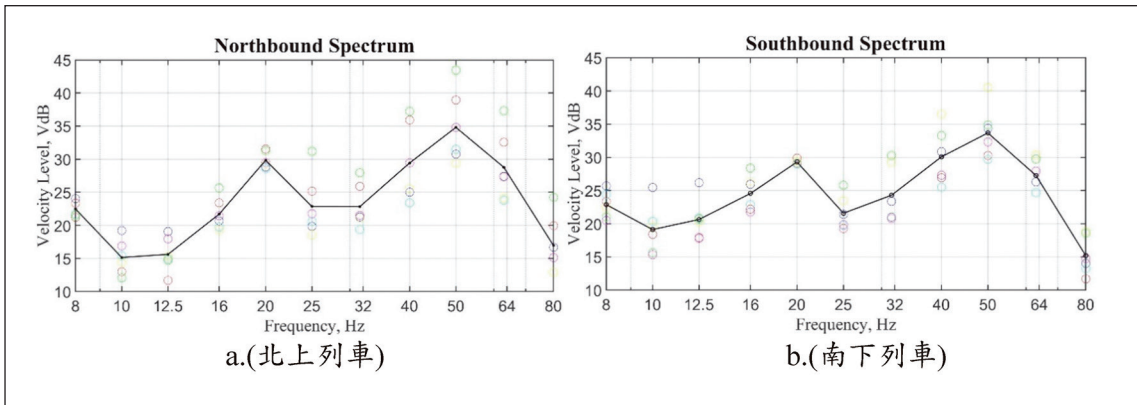


圖 23 捷運綠線列車在直線段之振動速度頻譜

於表7中。分析結果顯示：以Bornitz模式求得土層之材料衰減係數 α 約為0.05，較高的衰減係數 α 發生在頻率等於40 Hz。以Wiss模式分析得到土層之衰減係數 m 約0.3~2.0，較高

的衰減係數 m 發生在頻率等於40或100 Hz。當頻率小於31.5 Hz時，數據點較離散，可能是因為低頻振動需要較長距離才能有明顯衰減。由於Bornitz模式得到之材料衰減係數較

表 7 中山醫大附近測線在 1/3 八音階中心頻率之地層衰減係數

中心頻率 f_c (Hz)	Bornitz Model 衰減係數 α			Wiss Model 衰減係數 m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
8	0.047	0.046	0.046	0.931	0.523	0.665
10	0.047	0.047	0.045	0.979	0.508	0.577
12.5	0.046	0.046	0.042	0.750	0.656	0.291
16	0.047	0.046	0.043	1.111	0.774	0.304
20	0.048	0.046	0.043	1.305	0.797	0.308
25	0.048	0.048	0.045	1.467	1.238	0.609
31.5	0.050	0.048	0.049	1.528	1.339	0.990
40	0.053	0.052	0.052	2.074	1.707	1.449
50	0.053	0.052	0.049	1.891	1.785	0.964
63	0.048	0.048	0.046	1.281	1.390	0.712
80	0.050	0.052	0.049	1.746	1.558	1.163
100	0.051	0.050	0.054	1.903	1.556	1.887

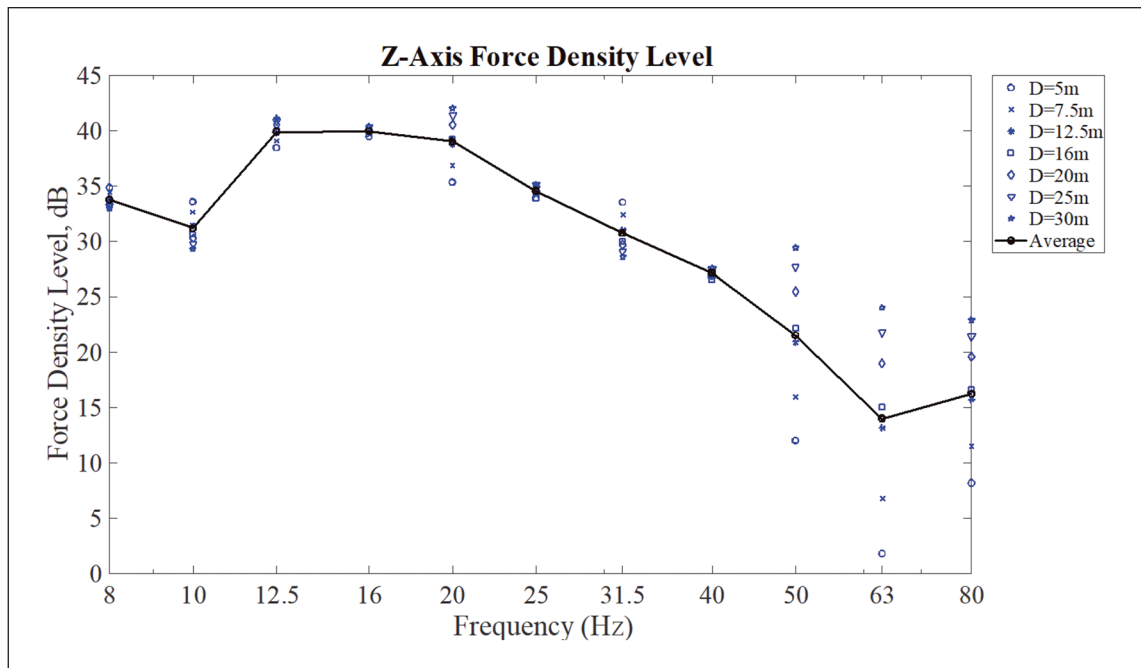


圖 24 中山醫大附近捷運綠線列車之 Z 軸方向列力密度頻譜

穩定，且線性迴歸時數據較集中於迴歸直線附近。因此，Bornitz 模式較適合用在台中捷運振動之衰減分析。

3. 列車力密度頻譜

參照美國 FTA 建議之方法，利用 2-2 節中公式 (7) 分析得到捷運綠線 Z 軸方向之列車力密度頻譜，如圖 24 所示。利用距捷運中心線不同距離之振動振幅皆可計算其列車力密度頻譜，本文取各距離平均值來代表捷運列車在此量測點之列車力密度，如圖 24 之粗黑線所示。從此圖可以看出捷運綠線之平均列車力密度介於 15 ~ 40 dB 之間，最大值發生在 12.5 Hz。

四、結論

本研究量測臺中捷運藍線沿線 10 個代表性測點之背景噪音與振動、以及此路線之三種主要地質材料之線源傳遞動性 (TM_{line})。此外，本研究亦分析已通車營運之臺中捷運綠線場址之地層振動衰減係數以及列車力密度頻譜，以提供臺中都會區捷運列車地傳振動與噪音分析之參考。綜合各量測結果可以獲致以下之結論：

1. 捷運藍線沿線背景噪音量測結果發現調查之 10 個測點其平均背景噪音量 ($L_{eq,1hr}$) 日間介於 68.0~76.9 dB_A ，夜間介於 64.5~75.9



dB_A。除了臺中火車站測點的3個時段、以及第二市場測點的日間時段之背景噪音量低於環保署制定之噪音管制法標準值外，其餘8個測點之平均背景噪音量均已超過噪音管制法的標準值。此外，與車流量相關性分析結果顯示：背景噪音量與車流量間有明顯的線性關係，若將對數迴歸公式中之車流量值以0代入，可得在沒有車流時之純背景噪音約為49~51分貝。

2. 捷運藍線沿線背景振動量測結果發現調查之10個測點其平均背景總振動量($L_{V,RMS}$)日間介於50.0~65.5 dB，夜間介於46.3~63.0 dB。其中澄清醫院測點之總振動量超出環保署之建議值較多(約10分貝)，第二市場、臺中市政府、臺中榮總與竹林國小等4個測點總振動量略為超出建議值(約1~2分貝)，其餘5個測點其總振動量則均在建議值之內。此外，與車流量相關性分析結果顯示：背景振動量與車流量間之關係則很容易受測點周遭環境之影響，單一測點背景振動量與車流量間有明顯的線性關係，綜合不同測點之量測數據則發現線性關係不佳。

3. 捷運藍線沿線人造振源之線源傳遞動性(TM_{line})試驗結果發現：3種地質材料之傳遞動性(Transfer mobility)均有隨著距離之增加而衰減的趨勢。卵礫石層之線振動量最大值約20~25 dB，發生頻率位在20~50 Hz之間；紅土礫石層之發生頻率則

為80 Hz；砂質沉泥層線振動量最大值則約25 dB，發生頻率則位在40~50 Hz。

4. 捷運綠線沿線之3個測點近振源振動試驗結果發現：列車在進出車站之速度約為27.3~28.1公里/小時，在轉彎段之速度約為29.0~29.9公里/小時，在直線段之速度則約為60.9公里/小時。此外，振動頻譜分析結果發現：進出車站處之最大垂直(Z軸)振動量發生在50 Hz，約為40~45 dB；轉彎段之最大垂直振動量發生在32~40 Hz，約為10 dB；直線段之最大垂直振動量則發生在20與50 Hz，分別為30與35 dB。因此列車於不同車速行駛時，皆有40或50Hz的尖峰頻率，此可能是捷運車輛或橋墩距離之影響。

5. 捷運綠線列車經過所引發地表振動之衰減分析果發現：以Bornitz模式求得之地層材料衰減係數約為0.05，較高的衰減係數發生在頻率等於40 Hz；以Wiss模式求得之地層衰減係數 m (含幾何阻尼與地層材料阻尼)約0.3~2.0，較高的衰減係數 m 發生在頻率等於40或100 Hz。由於Bornitz材料衰減係數較穩定，且線性迴歸時數據較集中於迴歸直線附近。因此，Bornitz模式較適合用在台中捷運振動之衰減分析中。

6. 捷運綠線列車力密度頻譜分析結果發現：捷運綠線平均列車力密度介於15~40 dB之間，最大值發生在12.5 Hz。



參考文獻

1. 臺中市政府 (2022), 「台中捷運 4 年推動 6 路線打造完善路網」, <https://www.taichung.gov.tw/2228185/post>。
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2022), 「臺中地區地層振動與噪音量測計畫」期末成果報告, 計畫編號: 11936。
3. 行政院環境保護署 (2016), 「環境噪音量測方法」, 公告日: 2016/11/2、實施日: 2017/03/15; 公告字號: 1050095238。
4. 行政院環境保護署 (2021), 「環境振動管理指引」, 2021/12/20 環署空字第 1101142559 號函。
5. Hanson, C. E., Towers, D. A., and Meister, L. D. (2006), "Transit Noise and Vibration Impact Assessment," Report No. FTA-VA-90-1003-06, Federal Transit Administration, pp.11-1~11-23.
6. Bornitz, G. (1931), "Über die Ausbreitung der von Groszkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die tiefe," Springer (Berlin).
7. Wiss, J. F. (1967), "Damage Effects of Pile-Driving Vibrations," Highway Research Records, Vol. 155, pp. 14-20.
8. 倪勝火與朱聖浩 (2002), 「台北捷運木柵 (內湖延伸) 線 145 標 - 沿線振動量測及影響評估分析」期末報告, 財團法人成大研究發展基金會, 臺南。
9. 行政院環境保護署 (2013), 「陸上運輸系統噪音量管制標準」, 2013/9/11 環署空字第 1020077145 號令。