

高架路伸縮縫衝擊噪音的量測與評估方式的探討

The Measurement and Evaluation of the Impulsive Noise Caused by the Expansion Joint of the Highway

林恆山¹

賴榮平²

摘 要

近年來，由於高架道路的大量興建，引起另一波交通噪音的問題，進而引發更多的抗爭。最主要的原因，出在車輛通過高架路伸縮縫所產生的衝擊噪音。斷斷續續的衝擊音響，對道路周邊居民生理與心理的危害，更甚於車輛所發出的連續噪音。

目前高架道路所採用的伸縮縫，不外乎模組伸縮縫、窄齒指鋸縫及寬齒指鋸縫等三種。由於構造不同，所發出的衝擊音的時間波形與頻率範圍有很大不同。本研究進行伸縮縫衝擊音的量測與評估，得到以下的結論：

- 一、經由評估方法的探討，確定 L_{max} 為伸縮縫衝擊音的最佳評估方式。
- 二、無論加權與否，模組伸縮縫的衝擊音評估值較窄齒指鋸縫高了 6 dB，較寬齒指鋸縫高了 13 dB；以模組伸縮縫對周邊居民的干擾最為嚴重。
- 三、寬齒指鋸縫的優點，在它道路表面的平整度佳、齒間縫隙小及較寬的齒面等，缺點則是伸縮量小。寬齒指鋸縫的優點若能應用在窄齒指鋸縫的改良上，對於高架道路衝擊音的降低將會有非常大的助益。
- 四、量測時發現，某些模組伸縮縫的聲音波形會出現異常的高頻訊號。推論此導因於施工瑕疵及使用後損壞的前兆，可驗證以做為政府部門在模組伸縮縫施工驗收或更新替換的依據。

關鍵字：伸縮縫、衝擊音

A b s t r a c t

Recently, the noise environment is getting worse due to the mass construction of the highway. The resident along the highway has to endure the impulsive noise by the expansion joint which is designed for the expansion of highway structure. The impulsive noise is completely different from the continuous traffic noise. Someone who is allergic to the impulsive noise is very easy to get nervous and is eventually harmful to the health. The protest against this kind of highway keeps increasing.

Currently, two types of expansion joint are utilized. One is the modular joint, and the other is the fingerplate joint. According to the width of the teeth, the fingerplate joint is also classified into "wide" and "narrow" types. When cars or trucks fast passing across the expansion joint, the annoying impulsive noise is stimulated.

¹ 林恆山，台電 電力修護處 振動研測課 課長，成功大學 建築學系 碩士

² 賴榮平，成功大學 建築學系 教授

Today, the protest is mostly against the modular joint. The design of the modular joint is different from the fingerplate and the loudness of the impulsive noise of the modular joint is also different. A method is utilized to analyze the characteristics of the impulse signals. It is found that the waveforms and frequencies of the impulsive noise by different expansion joints are completely different. The following are the results of this study:

- 1、The L_{max} is ensured to be the best method to evaluate the loudness of impulsive noise.
- 2、The result shows that the loudness of the modular joint is higher than the narrow fingerplate joint by 6 dB and higher than the wide fingerplate joint by 13 dB. The modular joint is the most harmful device to the resident.
- 3、Because the wide fingerplate joint which is the least harmful can't provide enough expansion for the highway expansion, the narrow fingerplate joint is the only choice to replace the broken modulate joint. It is still suggested to redesign the narrow fingerplate joint in order to less the impulsive noise.
- 4、Some abnormal time waveforms were found during the measurement of the modular joint. Maybe, it is signified to be damaged. This abnormal time waveforms could be developed to diagnose the availability of the modular joint.

Keywords : Expansion Joint、 Impulsive Noise

一、前言

近些年來，快速道路或高速公路的興建，逐漸以高架取代傳統填土的方式。當高架道路通過人口密集區段時，譬如國道三號的台中路段及十號快速道路的大中路段，皆引起周邊居民的強烈抗爭。所爭議的，並不是車輛引擎或輪胎所發出的連續噪音，而是車輛通過伸縮縫時所引發的衝擊噪音。高架道路此採用的伸縮縫，計有模組伸縮縫、窄齒指鉸縫及寬齒指鉸縫等三種。上述引起抗爭的路段，清一色是使用模組伸縮縫。

車輛本身所發出的噪音，可以隔音牆的架設隔離降低；然而伸縮縫所發出的衝擊音，卻是未經任何防護，以空氣或是結構傳遞的方式，竄進周邊居民的住宅裡。斷斷續續的衝擊音，一再激起人們潛意識裡的感覺。長久以後，所出現的都是與人精神、情緒有關的疾病。

衝擊音有別於一般的噪音，它不是連續的，頻率也不高，對聽力的傷害低微，卻是近來引起抗爭的主要對象。因此，評估交通噪音對人的影響，不僅要考量噪音的物理量、發生次數、持續時間及變化幅度，同時也要納入人對此噪音的感覺，以及心理與生理的反應。

有關衝擊音的評估，噪音管制手冊¹關於營建工程的部份，特別提到打樁機施工時的衝擊噪音，除了制定均能音量 (L_{eq}) 與最大音量 (L_{max}) 兩種標準外，也提到施工時間須予特別限定的建議。

台灣早期的高架道路，則以台北市的建國南、北路最為人所熟知。針對它所產生的衝擊音，目前所能查得的文獻²，是以 L_{eq} 的方式進行量測評估，發現台北市建國南北路 Unix 型的伸縮縫使得 L_{eq} 值增加了 0.6 ~ 1.3 dBA。此評估方式無法將衝擊音的衝擊特性具體顯現出來，更無法用以比較不同伸縮縫所產生衝擊音的差異。

車輛行經伸縮縫所造成的衝擊噪音，目前並無特定的評估模式，更遑論可供依循的法則。現今的噪音計已具有量測衝擊噪音的功能(即 Slow、Fast、Impulse 三選項裡的 Impulse)，但迄今還用於研究性階段，尚未根據其指示值，確立伸縮縫衝擊噪音的評價方法³，因此衝擊音對周遭環境的影響，也尚未有明確法規的制定。只能由施工品質提

升或由伸縮縫的設計及材質改良著手以降低衝擊噪音。

本研究實地量測車輛輪胎經過不同伸縮縫的瞬間聲音時間波形及頻譜，解析車輛經過各種伸縮縫時的動態特性。此動態特性的了解有助於評估不同伸縮縫所產生的衝擊音，並提出最佳的評估方法。由評估值大小，了解到不同伸縮縫所產生衝擊音對周邊環境的影響。並進而探討有效的改善方法，以降低伸縮縫的衝擊音量。

二、伸縮縫與衝擊音的特性

目前高架路所常採用的伸縮縫，不外乎「模組」與「指鋸縫」兩種型式。指鋸縫外型類似鋸齒，因為鋸齒寬度不同，又分為寬齒指鋸縫與窄齒指鋸縫，此兩者間不只在齒的寬度上有所不同，在構造上也有很大的差異，如圖 1 所示。

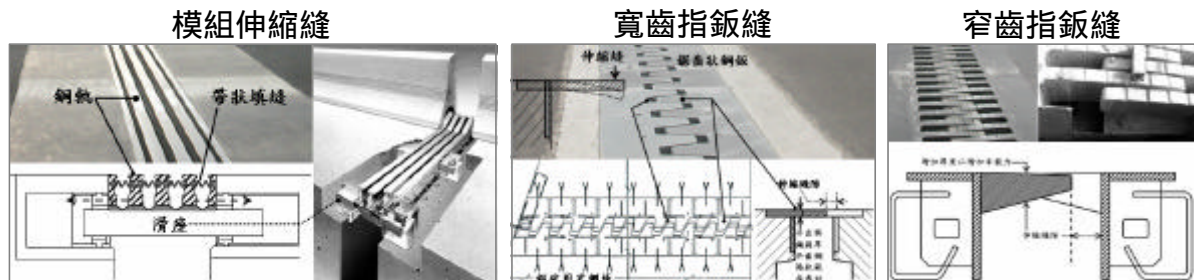


圖 1、高架道路常採用的三種伸縮縫

圖 2 是車輛輪胎經過模組伸縮縫時的接觸狀況及所發出衝擊音的時間波形。模組伸縮縫主要是由鋼軌與滑座所構成，鋼軌可在鐵質構成的滑座上滑動。當輪胎行駛到鋼軌之間時，因為路面凹陷，輪胎會有四次的撞擊鋼軌，而每次的撞擊也引發鋼軌與滑座間的碰撞；鋼軌的數量越多，產生衝擊音的數量更多。

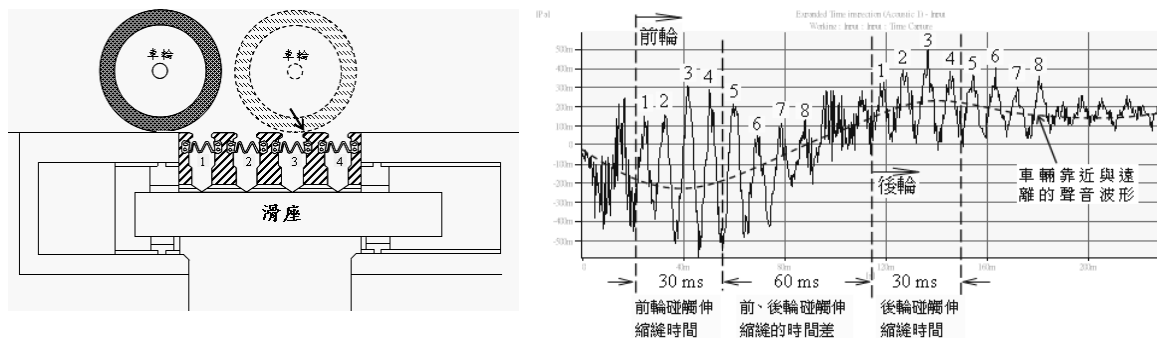


圖 2、車輛通過模組伸縮縫及其衝擊音時間波形

觀察圖 2 的聲音時間波形，每個輪胎經過伸縮縫會產生八次的起伏。其中的四次來自於輪胎直接撞擊鋼軌，另外的四次可能來自於鋼軌與橡皮之間的空間共鳴聲。八次起伏發生的時間約為 0.07 秒，換算頻率為 110 Hz。這 110 Hz 在模組伸縮縫的衝擊音頻譜裡非常的明顯，代表輪胎通過模組伸縮縫時與鋼軌的碰撞頻率(屬於低頻音)；至於鋼軌與滑座間的碰撞，則會激發出高頻的聲音。波形也顯示，前輪產生的衝擊音量最高為 900 mPa，後輪最高則為 500 mPa，這是因為前輪的承載重於後輪。

圖 3 是是車輛輪胎經過寬齒指鋸縫及所發出衝擊音的時間波形。寬齒指鋸縫主要是兩塊切成鋸齒的鋼板平鋪銜接而成，宛如一塊存有連續凹洞的完整鋼板；也沒有如模組伸縮縫鋼軌在滑座上滑動的設計。齒與輪胎行進方向平行，增長了輪胎與伸縮縫的『接

觸時間』；齒間間隙與車輛行進方向不平行，加上鋸齒的寬度大，因而減少輪胎與伸縮縫的撞擊能量，使得輪胎經過寬齒指鋸縫時，不會產生尖銳刺耳的衝擊噪音。

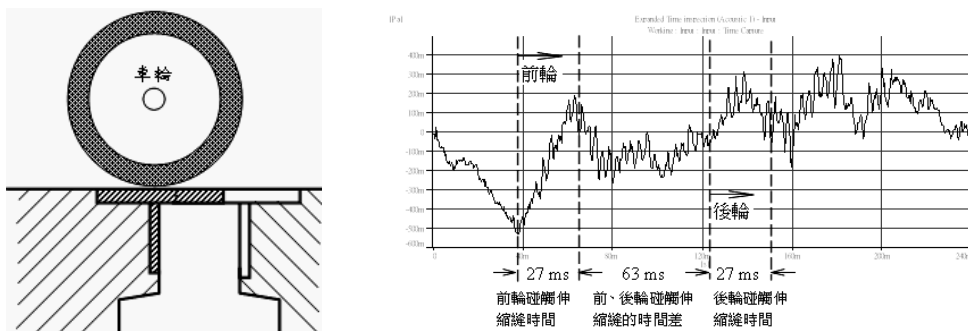


圖 3、車輛通過寬齒指鋸縫及其衝擊音時間波形

觀察圖 3 的聲音時間波形。由於寬齒指鋸縫的長度較小，車輪通過伸縮縫所需時間較短(0.027 秒)。圖中大週期的音壓變化，導因於車輛的靠近與遠離，因此頻率極低。當輪胎與伸縮縫接觸時，無論是前輪或是後輪，所產生的衝擊音量平均為 100 mPa，且週期平均穩定，大約為 0.0025 秒，換算頻率為 400 Hz；這表示車輛通過寬齒指鋸縫的聲音頻率將會在 400 Hz 以下。

圖 4 則是車輛經過窄齒指鋸縫及所發出衝擊音的時間波形。窄齒指鋸縫是將厚鋼板豎焊而成鋸齒，鋼板在道路表面呈些微傾斜，使得伸縮縫在中央部位凹陷；路面接合及伸縮縫的不平整，再加上鋼板表面有止滑的凹痕設計，造成輪胎經過指鋸縫時產生跳動。由於鋸齒寬度小，齒間間隙與車輛行進方向平行，輪胎可以同時經過多個窄齒指鋸縫。因此，車輛經過窄齒指鋸縫時，除了輪胎跳動產生的低頻聲音外，輪胎所經過的伸縮縫路面及壓過的齒間縫隙，也會因為空氣受壓或共鳴而產生其他頻率的聲音。

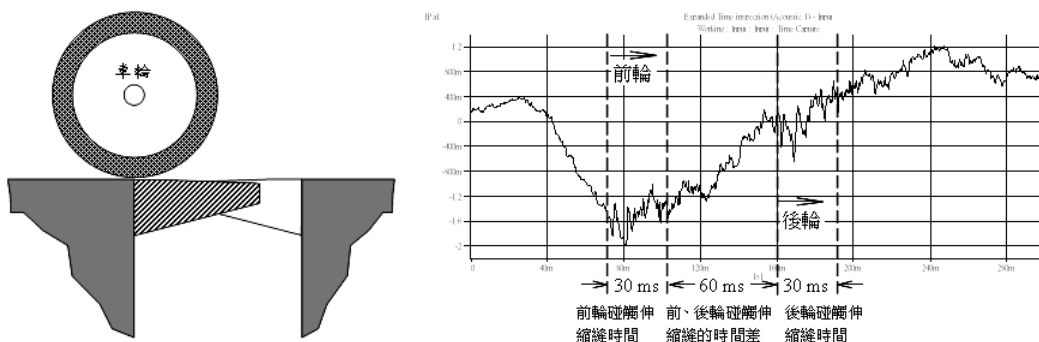


圖 4、車輛通過窄齒指鋸縫及其衝擊音時間波形

圖 4 的聲音時間波形是小客車行經窄齒指鋸縫時所發出的衝擊噪音時間波形。由於窄齒指鋸縫的長度大於寬齒，車輪通過伸縮縫所需時間較長(0.030 秒)。與寬齒指鋸縫一樣，因為車輛的靠近與遠離，產生大週期的音壓變化，屬於極低頻的聲音。輪胎跳動產生的聲音週期約在 0.005 至 0.008 秒之間，音量可達到 1000 mPa，顯現在頻譜裡的 125 至 200 Hz 之間。輪胎經過窄齒指鋸縫過程，也會出現較高頻的聲音；它是因為伸縮縫間隙空氣受壓所產生的聲音，此頻率的聲音強度可以達到 300 mPa，是不可忽視的音量。

圖 5 是將上述圖 2 圖 3 與圖 4 時間波形的 Y 座標取相同的刻度與大小以互相比較車輛經過窄齒指鋸縫時，音量變化的幅度最大，但此高振幅的週期長，屬於 50 Hz 以下

的聲音；若能濾除此長週期的聲音，剩下的與經過模組伸縮縫的衝擊音做比較，會發現到彼此間的差異並不大；寬齒指鋸縫的衝擊音則較其他兩者為小。

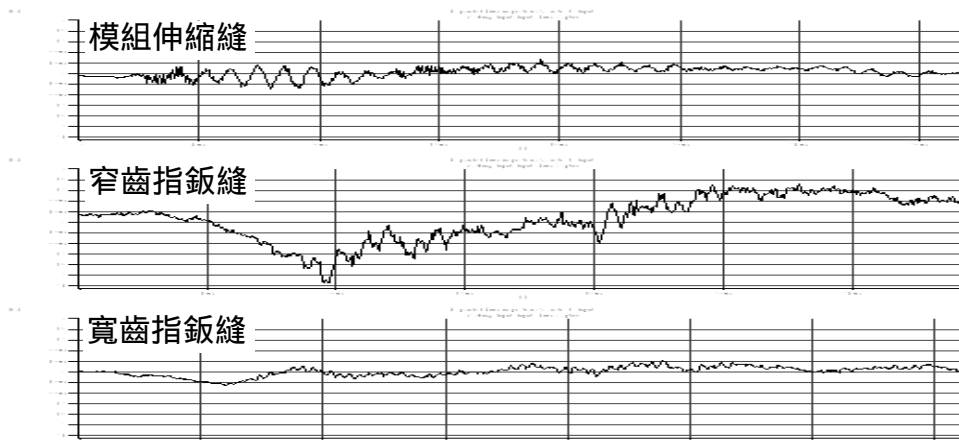


圖 5、車輛通過各種伸縮縫衝擊音時間波形的比較

三、衝擊音量測與評估方式的探討

聲音的量測位置選在高架路伸縮縫底下，如圖 6 所示。不同構造的伸縮縫與橋墩，對隔離高架路上車輛聲音的效能也不同。進行本研究的評估工作時，須注意到不同伸縮縫對車輛聲音隔離的影響，避免被車輛聲音影響到評估結果。

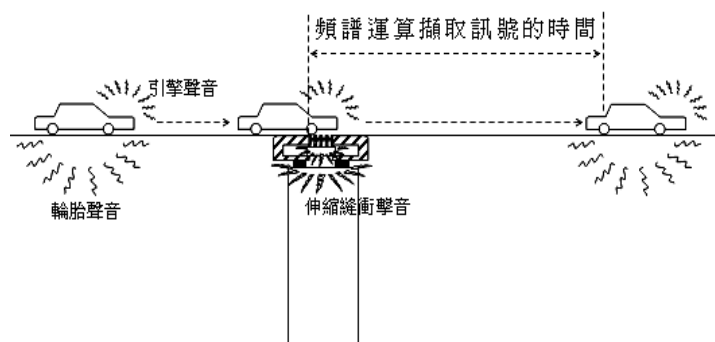


圖 6、在高架路伸縮縫底下進行量測

圖 7、車輛行經高架路伸縮縫前後的噪音狀況

由於衝擊訊號發生的時間極短，因此在量測與分析時，應當隔離不相關訊號的進入。這是因為數位訊號的處理，須擷取不同時間段的量測訊號，以進行運算得到頻譜圖；衝擊音發生的時間極短，相對於擷取時間段裡的其他時間，衝擊音所佔的比例極低；若持續有背景噪音的干擾，求得的頻譜圖將無法單純的只表現出衝擊音的頻率特性。尤其當背景的背景訊號強度太大時，背景音甚至會掩蓋掉衝擊音的頻率特性。

圖 7 裡當車輛以時速 100 公里通過寬度約 0.8 公尺的伸縮縫，接觸過程歷時約 0.03 秒。實務上，為了得到 1-2 Hz 的解析條數，頻譜運算擷取訊號的時間長度大都取在 0.5

1 秒之間；伸縮縫衝擊音的時間只佔了上述擷取時間的 4% 左右。在車輛接近及離開伸縮縫的過程，引擎及輪胎持續產生背景聲音。這些引擎及輪胎產生的聲音與伸縮縫的衝擊音都將進入同一時間段的運算裡。因此，分析與評估車輛通過伸縮縫的衝擊噪音時，必須排除背景噪音對量測結果所造成的影響。

目前常採用訊號分析的方法，計有 FFT、STFT 及八度音三種。FFT 或 STFT 適運用於機械或電氣問題的診斷上，衝擊音須以 STFT 進行頻率特性的分析；八度音則用於評估人們對頻率特性的感受，衝擊音的評估則應採用八度音裡的 L_{max}

四、量測結果與分析

進行伸縮縫衝擊噪音的量測，是選擇在高架路伸縮縫的正下方，對於通過車輛的種類，並不容易掌握。由於車輛類別對伸縮縫衝擊噪音的影響極大，因此必須針對同個伸縮縫進行多次的量測，再由結果的分佈進行各類型伸縮縫衝擊噪音的評估。

圖 7、8、9 是車輛通過不同伸縮縫的頻譜特性與八度音 L_{max} 量測結果， L_{max} 包含了 Linear 與 A 加權。圖 7 在 110 Hz 附近存在著很大的振幅量，這 110 Hz 即輪胎壓過模組伸縮縫各個鋼軌的碰撞頻率。由於鋼軌與滑座的碰撞，產生了 600 1000 的聲音頻率。110 Hz 音量大小是決定 L_{max} (Linear)總量的重要因素， L_{max} (A 加權)的總量則決定於 600 1000 Hz 音量的大小。

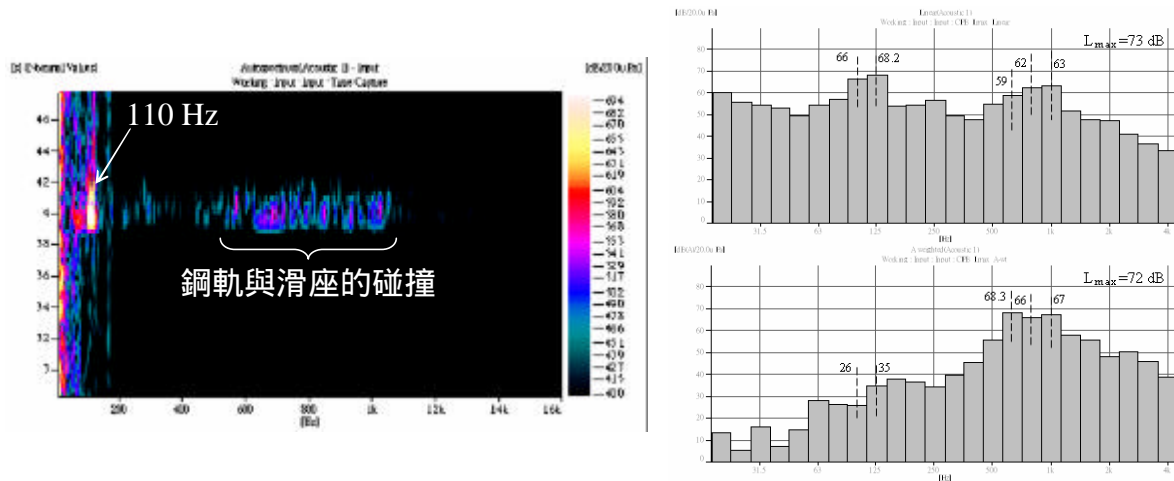


圖 7、車輛通過模組伸縮縫頻譜特性與八度音 L_{max} (包含 Linear 與 A 加權)

圖 8 裡的 100 200 Hz 的低頻衝擊音，是因為路面及窄齒指鉸縫的不平整，造成輪胎跳動而產生。但 100 Hz 以下車輛產生的背景噪音量也不小。此外，因為輪胎壓過齒間縫隙，造成空氣受壓縮而產生寬頻聲音。同樣的，100 200 Hz 音量大小是決定 L_{max} (Linear)總量的重要因素， L_{max} (A 加權)的總量則決定於高頻音量的大小。

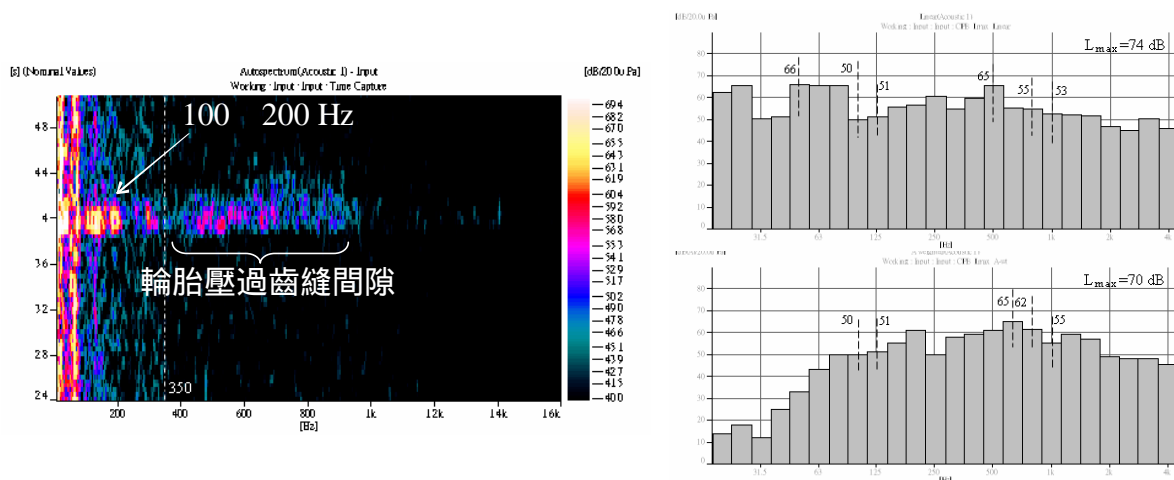


圖 8、車輛通過窄齒指鉸縫頻譜特性與八度音 L_{max} (包含 Linear 與 A 加權)

寬齒指鋸縫衝擊音的頻率都在 400 Hz 以下，屬於低頻範圍的聲音，通常來自於路面及伸縮縫的不平整，或是輪胎壓過齒間的縫隙。寬齒指鋸縫的鋼板採平鋪方式，路面平整且齒間間隙小，不易出現圖 7 或圖 8 裡的高頻及高振幅衝擊音。

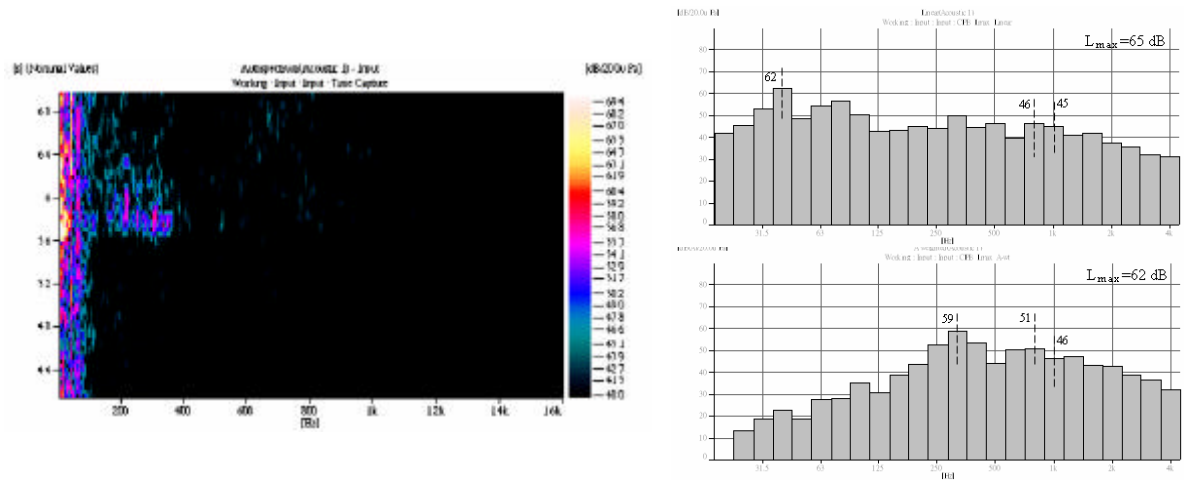


圖 9、車輛通過寬齒指鋸縫頻譜特性與八度音 L_{max} (包含 Linear 與 A 加權)

圖 10 是各種伸縮縫 Linear 與 A 加權 L_{max} 評估值的相互比較。每種伸縮縫的 Linear 與 A 加權 L_{max} 評估值之間相差約 5 dB，模組伸縮縫約高出窄齒指鋸縫 7~8 dB，窄齒指鋸縫高出寬齒指鋸縫 6 dB，模組伸縮縫則高出寬齒指鋸縫 13 dB。此結果說明何以模組伸縮縫一直是高架道路旁住戶抗爭的主要對象。

寬齒指鋸縫以 Linear L_{max} 的 64~69 dB 或 A 加權 L_{max} 的 59~64 dB，確定對高架路周邊居民的干擾程度最為輕微。經實地訪談高架道路寬齒伸縮縫下工作或休閒的居民，對寬齒指鋸縫所造成的衝擊音，並不會有太多的埋怨。寬齒伸縮縫的缺點是伸縮量只有 10 cm，遠低於窄齒指鋸縫的 48 cm，目前幾乎只使用在高架道路的橋樑部位，因為它的跨距最短。

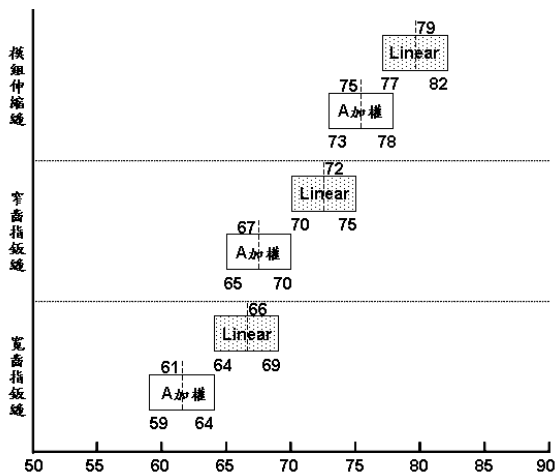


圖 10、各種伸縮縫評估值的比較

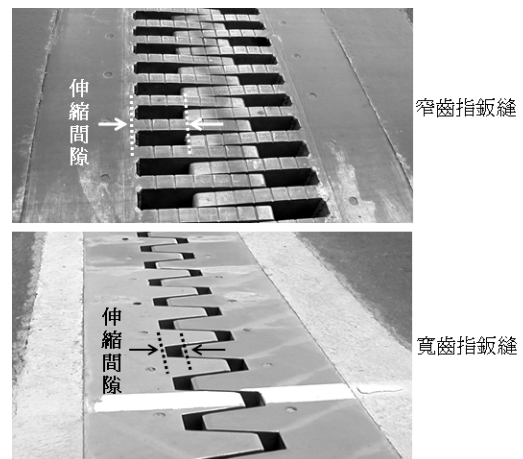


圖 11、窄齒與寬齒指鋸縫路面平整度的比較

目前台灣高架道路的模組伸縮縫損壞後，皆以窄齒指鋸縫替換，在衝擊音的降低上，正好處於有利的位置。如何有效降低窄齒指鋸縫的衝擊噪音量，是施工單位與設計製造廠商必須努力的方向。當以窄齒指鋸縫逐漸取代模組伸縮縫時，若能參考寬齒指鋸縫設計上的優點，將窄齒指鋸縫的衝擊音再予降低，對高架道路旁的住戶將會有莫大的助益。

寬齒指鋸縫能夠擁有如此低的噪音值，主要原因在路面的平整度極佳、齒間縫隙較小及較寬的齒面等三項優勢，如圖 11 所示。因此，在窄齒指鋸縫的設計與建造上，如能掌握上述三項寬齒指鋸縫的優點，在衝擊噪音的改善上，必定有顯著的成效。

五、結論

本研究主要在進行高架道路伸縮縫衝擊音的量測、分析與評估。由於伸縮縫衝擊音發生時間極為短暫，而且過程中始終受到車輛所發出背景噪音的影響。為了避免衝擊音評估結果受到背景噪音的影響，必須掌握衝擊音的特性，以確定評估值來自於衝擊音。

量測與特性分析採用 STFT 方法，經由時間波形與頻譜特性，了解不同伸縮縫的衝擊音特性。評估方式則是採用八度音 L_{max} ，分別取 Linear 與 A 加權。進行測試的過程，無法對通過車輛的種類與特性進行控管。幸而相同伸縮縫大部份的衝擊音的評估值都能落在特定的範圍內，並未因為車輛的差異而造成很大的不同。

經整理實際量測所得的評估結果，確定能作為伸縮縫衝擊音優劣的參考數據。本研究所得之結論如下：

- 一、由於模組伸縮縫採鋼軌設計，且鋼軌與滑座間是可活動的；兩項不利的因素，使得模組伸縮縫衝擊音的評估值最大，也驗證了何以模組伸縮縫是長期以來抗爭的主要對象。窄齒指鋸縫少了上述兩項不利因素，但因為路面平整度欠佳、輪胎經過的鋸齒較多，衝擊音的評估值居次。寬齒指鋸縫沒有上述的缺點，評估值最小。不論加權與否，模組伸縮縫約高出窄齒指鋸縫 7~8 dB，窄齒指鋸縫高出寬齒指鋸縫 6 dB，模組伸縮縫則高出寬齒指鋸縫 13 dB。
- 二、衝擊音發生的時間極為短暫，本研究以 STFT 進行量測與分析，確實掌握到輪胎經過伸縮縫的動態特性。經由特性的掌握，確定各伸縮縫評估結果是來自於衝擊音，而非背景噪音。再將伸縮縫與其所產生的衝擊音相互比對，了解到輪胎經過伸縮縫產生聲音的機制，在後續衝擊音的改善策略裡找到方向。
- 三、針對伸縮縫衝擊音，本研究提出以 Linear 及 A 加權的 L_{max} 進行評估。由於在測試過程中，一直存在著車輛所發出背景噪音的干擾，而它的影響範圍在 20 Hz 以下。因此，選擇 20 ~ 4000 Hz 頻帶做為 L_{max} 的評估範圍，可讓伸縮縫衝擊音的評估不致受到背景噪音的影響。
- 四、目前高架路所使用的模組伸縮縫損壞情況嚴重，以具有相同伸縮量的窄齒指鋸縫進行替換，價格便宜且可以國產。經過此量化的研究後，證明窄齒指鋸縫所產生的衝擊音評估值較模組伸縮縫低了 7~8 dB，對周邊居民的安寧將有著莫大的助益。

六、建議

- 一、高架道路使用模組伸縮縫至今，一直為它的高損壞率所困擾。由建造初期的施工品質到後續是否堪用的鑑定，檢測能力的開發必定是亟欲突破的技術。本研究在量測過程中發現，某些模組伸縮縫的聲音時間波形，會屢屢出現異常的高頻訊號，如圖 12 所示。是否可由這異常高頻訊號印證伸縮縫的瑕疵，應是值得進一步研究與開發。
- 二、本研究在整個測試過程，皆以麥克風做為衝擊音量測的主要工具。若能輔助以加速規，將其黏貼在伸縮縫上，當車輛經過時，量取振動與聲音的衝擊訊號，並相互比對，將會對伸縮縫的特性有更進一步的認識。這也反應到，目前國內並無『實驗公路』的設置，許多大型的道路設施，並無法進行實測驗證，使得施工的品質

難以掌握。

- 三、本研究在伸縮縫衝擊聲音特性的分析及評估上，確實掌握到其中的關鍵，成果也非常好。衝擊能量的分析與評估，並不是只侷限在伸縮縫的衝擊音。高速鐵路的經過對高科技廠房振動的影響，水庫輸水管路的水錘對管壁的破壞及預警系統的建立，與伸縮縫衝擊音的分析及評估工作都有著異曲同工之處，這是個值得推廣的應用技術。
- 四、寬齒指鋸縫的優點在路面的平整度佳、齒間縫隙小及較寬的齒面等三項優勢，因此衝擊噪音值最低。目前以窄齒指鋸縫替換損壞的模組伸縮縫過程，必須注意到衝擊噪音對周邊居民的影響，掌握上述三項寬齒指鋸縫的優點，做為窄齒指鋸縫設計與建造的重要指標。
- 五、雖然模組伸縮縫的 L_{max} 評估值最高，但它音壓變化的幅度卻最小。探討原因，應是出在模組伸縮縫的鋼軌之間，以厚橡皮連接密封，具有隔音的功能。窄齒指鋸縫應在隔離車輛背景噪音方面加強，避免路面上的噪音由此縫隙流竄到周邊住宅。

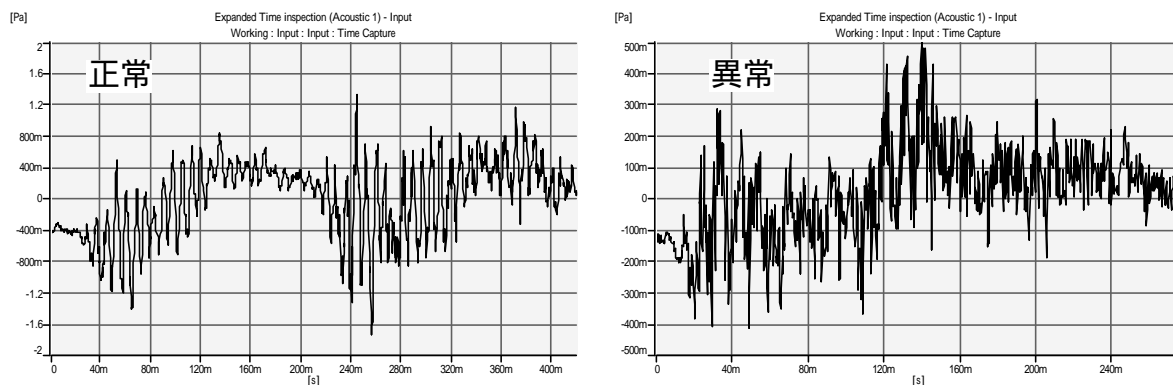


圖 12、車輛通過不同模組伸縮縫時間波形的差異

七、參考文獻

1. 施鴻志、莊進源，「噪音管制手冊」，行政院衛生署環境保護局，1987
2. 施鴻志、黃乾全、黃榮村、郭宏亮、吳聰能、徐淵靜，「交通噪音預測方法與曝露推估模式建立之研究」，行政院環境保護署 1991
3. 行政院衛生署環境保護局，「噪音的測定與評價」，1985
4. 黃士賓，「牆版衝擊音之量測與改善測略之研究」，成功大學博士論文
5. 胡思聰，「現行環境噪音振動測定與分析方法評論」，國政研究報告，財團法人國家政策研究基金會，2002
6. 施鴻志，「都市噪音測定及分析方法之研究」，成功大學都市計畫系 1982
7. 陳龍泉，「橋樑高架道路伸縮縫之設計與施工研究」，交通大學碩士論文 1981