

道路鋪面吸音率量測及交通噪音預估

林文清¹ 王偉輝²

¹國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系碩士

²國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系教授

地址：基隆市北寧路二號 Email:whwang@sena.ntou.edu.tw

電話：(02)24622192ext.6015 傳真：(02)24625945

摘要

本文根據ISO 13472-1之延伸表面法，成功建立道路鋪面材料吸音特性之量測步驟，其中應用了最大長度序列(MLS)處理技術和快速傅利葉轉換，作產生訊號及接收訊號之頻譜處理，並使用訊號刪減技術分離入射波及反射波之訊號，透過入射音波及反射音波之傅利葉轉換頻譜，計算出道路鋪面之聲功率反射係數及吸音率。為驗證不同高度量測訊號結果之準確性，證實吸音率結果有重複性。文中分別對瀝青道路鋪面、混凝土道路鋪面及文獻中之多孔性鋪面、密粒鋪面、排水性鋪面，利用聲學軟體Raynoise模擬車流線音源，其結果顯示交通噪音之音壓位準，由大至小排序為，瀝青鋪面、密粒鋪面、混凝土鋪面、排水性鋪面、多孔性鋪面。

關鍵字：最大長度序列、道路鋪面、吸音率、交通噪音

Sound absorption coefficient measurement of road pavement and traffic noise prediction

Wen-Chin Lin Wei-Hui Wang

Department of System Engineering and Naval Architecture

Nation Taiwan Ocean University

ABSTRACT

In this paper, measurement of sound absorption coefficient of road pavement and its influence on traffic noise level is established by the extended surface method based on ISO 13472-1. While the developed measurement procedure has successfully acquired the incident impulsive sound signal and reflection sound signal from road surface. By using the Maximum Length Sequence (MLS) and the Fast Fourier Transform (FFT) techniques, the signal spectra are processing. Meanwhile, employing the signal subtraction technique for the separation of incident and reflected signals, the sound power reflection coefficient and sound absorption coefficient of road pavement can be calculated. To validate the correctness of the measurement results, several altitudes of measurement layout have been adopted in the study. Whilst the measurement results show to be repeated. The absorption coefficients of a number of road pavement, such as asphalt pavement、concrete pavement、porous asphalt pavement、dense gradation pavement、drainage porous pavement have been measured. Using the measured data, the traffic sound field can be analysed by utilizing the software

Raynoise. Take account the car flow as a line source. From the comparisons of the results, it shows that sound pressure level is the highest for asphalt pavement and dense gradation pavement, the second is concrete pavement, the third is drainage porous pavement, and the less noisy one is porous asphalt pavement.

Keywords: Maximum length sequence, Road pavement, Sound absorption coefficient, Traffic noise

一、前言

道路交通噪音係指車輛行駛之噪音，其所造成之環境音量大小與車流量、車種、荷重、車速、路面、胎紋、路基結構與受音點位置有關。而各車輛行駛之主要音源有四項：分別是引擎、排氣管、輪胎及空氣動力音。其它次要之音源如風扇、壓縮機及車體振動音等對環境噪音之貢獻度較小。由Iwao及Yamazaki [1]之統計知：引擎音源之貢獻度佔最大比例為34%；而輪胎/路面音源佔30.3%居次；排氣系統音源佔26.5%，其餘氣動音及進氣系統音佔9.2%。

本文旨在針對各式道路鋪面之吸音特性，參考ISO 13472-1 [2]建立其量測方法，及說明使用儀器，量測技術步驟與量測結果；並就道路鋪面不同吸音特性對交通噪音之影響，以Raynoise軟體加以模擬分析比較，在本研究中比較了瀝青鋪面、混凝土鋪面、多孔性鋪面、密粒性鋪面及排水性鋪面等五種路面之交通噪音場，以瞭解鋪面對降噪之影響量大小。

二、道路鋪面吸音率測試系統設備

量測道路鋪面吸音特性所使用之儀器包含以下設備：

3. 頻譜分析儀：頻譜分析儀(B&K Pulse Type 3560C)，必須能做相關函數時域與頻域間之轉換。
4. 麥克風：01dB公司Type 40AR，Sensitivity：50 mV/Pa，Frequency range：3.15 Hz–12.5 kHz，Dynamic range：17 dB - 148 dB ref. 20 μ Pa。
5. 支承腳架：將聲源固定，與麥克風放置在同一軸線。
6. 聲源產生器及揚聲器：必須為同軸式發音器也就是單指向性揚聲器，在自由場量測情況下，脈衝反應不大於2ms。揚聲器之規格列如表1。
7. 訊號產生器：01dB dBFA32 + MLS軟體與Symphonie分析儀，主要功能為產生聲源最大序列長度(MLS)脈衝訊號。

表 1 揚聲器規格表

揚聲器規格	
正常功率	10W
最大聲壓	102dB
放大器頻寬	100—24000Hz
揚聲器頻寬	120—17000Hz
電源供應	230V—50/60Hz
尺寸	175×142×247mm
重量	3.1kg

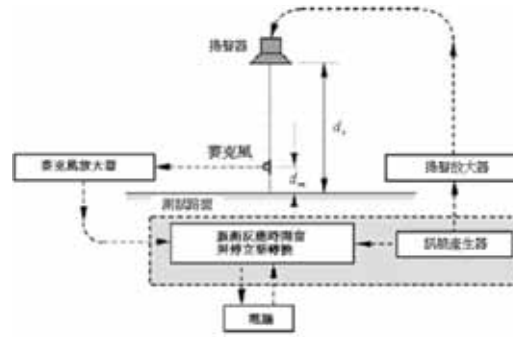


圖 1 量測佈置圖

三、鋪面吸音率量測基本原理

利用訊號產生器驅動置於測試道路鋪面上方之音源，並於音源及路面間放置一枚麥克風，量測佈置示如圖1。

基於對訊號產生器之輸出電壓與麥克風輸入音壓間之轉換函數的評估，因為此二轉換函數，一是來自直接路徑的轉換函數 $H_i(f)$ ；另一則是來自反射路徑的轉換函數 $H_r(f)$ ，利用此兩轉換函數，即可由ISO 13472-1[2]來計算吸音係數，其算式為：

$$\alpha(f) = 1 - Q_w(f) = 1 - \frac{1}{K_r^2} \left| \frac{H_r(f)}{H_i(f)} \right|^2 \quad (1)$$

式中 $Q_w(f)$ ：聲功率反射係數。 $K_r = \frac{d_s - d_m}{d_s + d_m} : K_r$ 幾何傳播係數。 d_s 聲源到測試表面間之距離，一般取1.25m。 d_m 麥克風到測試表面間之距離，一般取0.25m。

而對聲波傳波之計算，及比較量測結果，與理論計算值所需之聲壓反射係數 $Q_p(f)$ ，依ISO13472-1之規定，係採用下式計算：

$$Q_p(f) = \frac{1}{K_r} \cdot \frac{H_r(f)}{H_i(f)} \cdot \exp(i2\pi\Delta\tau) \quad (3)$$

$\Delta\tau$ 為直接脈衝與反射脈衝的時間差。

3.1 聲源MLS脈衝訊號

最大長度序列(Maximum Length Sequences, MLS)之發展始於Davies(1966) [3]，接著長時間經MacWilliams與Sloane(1976)[4]及Rife與Vanderkooy(1989)[5]在測距(range-finding)、倒頻(scrambling)、偵錯(fault detection)、調制(modulation)、同步校準(synchronizing)及聲波訊號量測(acoustic measurement)之應用開發，近來已廣被認知。MLS所產生之完整測試訊號現已可應用在各種測試領域，如電子音響感測器，測試與建築聲學領域等。

MLS也可稱作準隨機測試訊號(Pseudo random test signal)，與隨機噪音(random noise)特性相似，所不同者，MLS具有確定性及周期性。

利用MLS訊號處理技術的目的，是為了在短時間內量測脈衝訊號並快數分析其反應，此訊號序列為穩定且離散化之二進位序列，其長度為 $L = 2^n - 1$ ， n 稱為此週期序列的階次(Order)。例如階次 $n=3$ ，則序列有 $L = 2^3 - 1 = 7$ 項。序列各項之二進位數值若由一 $n-1$ 次原始多項式(primitive polynomial) $P(x)$ 之係數來表示，多項式之係數非0即1， $n=3$ 原始多項式 $P(x)$ 可取為：

$$P(x) = x^2 + x + 1 \quad (4)$$

則原始多項式 $P(x)$ 場域之成分項，及其對應係數可列如表2，其中 $P(x)$ 成分項之排列遞迴式(recursion formula)為：

$$S_{k+3} = S_{k+1} + S_k \quad (5)$$

在遞迴式(5)等號右邊 $S_{k+1} + S_k$ 中，若同時出現相同兩項，則該兩項合併後之係數取為0，如 $S_7 = S_4 + S_5$

$$\text{等號右邊} = (x+1) + (x^2 + x) = x^2 + 1$$

若隨機訊號產生之序列為：

1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0...

表2 原始多項式與遞迴式對應係數關係表

$n=3$ 之序列項 編號	$P(x)$ 之 成分項	$n=3$ 之多項式 係數	遞迴式之項			
			(1)	(2)	(3)	(4)
	0	000				
1	1	001	S_k			
2	x	010	S_{k+1}	S_k		
3	x^2	100		S_{k+1}	S_k	
4	$x+1$	011	S_{k+3}		S_{k+1}	S_k
5	$x^2 + x$	110		S_{k+3}		S_{k+1}
6	$x^2 + x + 1$	111			S_{k+3}	
7	$x^2 + 1$	101				S_{k+3}

將0以1取代，1以-1取代則此序列週期為-1，+1，+1，-1，+1，-1，-1。最大長度序列訊號還有一個特性，此週期值的加總合為-1。而將此序列作自相關運算，可得其離散值都為+1而其加總合為7；將原始序列作下移一數位後在一週期長度之自相關函數值可得其加總值為-1；若再繼續依序下移一數位在一週期長度內作自相關函數值計算也可得為-1。因此MLS之週期與自相關函數可示如圖1。

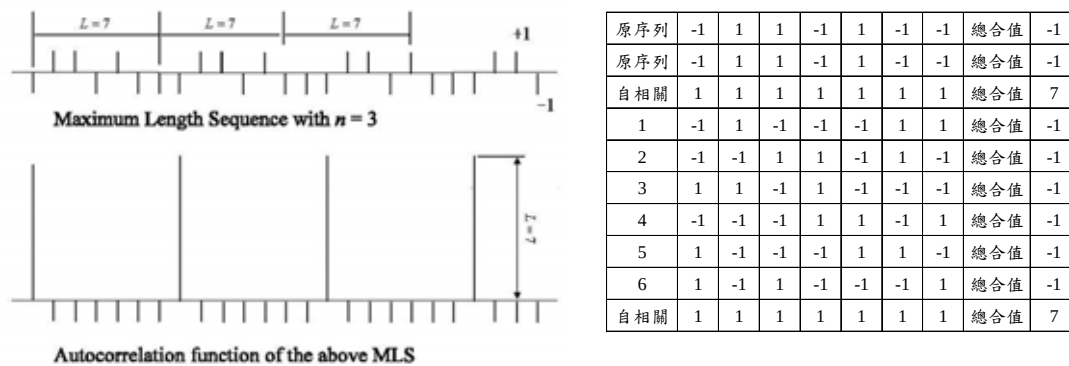


圖1 最大長度序列週期與自相關函數運算

3.2 訊號分離技術

在圖2中之脈衝訊號包含直接路徑訊號與反射路徑訊號，反射路徑訊號來自於從測試道路鋪面之反射外，尚有其他路面以外可能反射音波的物體所產生之訊號，所有這些量測所得之訊號，可以兩種不同方式來加以分離。

1. 時間窗訊號分離技術：

將入射和反射脈衝訊號，加入一個時間窗，即可將入射波與反射波訊信分離。如圖3之例將測得之脈衝訊號，加入一個時間窗後，即可將入射和反射之脈衝波分別擷取，本文設定時間窗為5ms。

2. 訊號刪減技術：

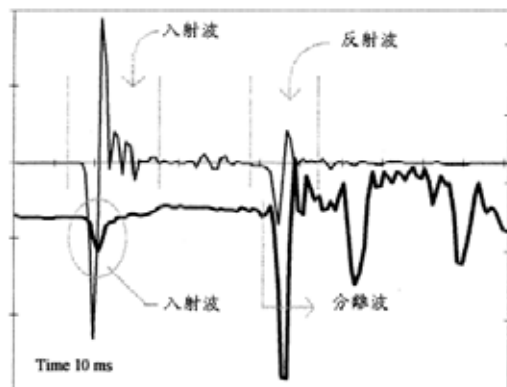


圖2 量測之訊號

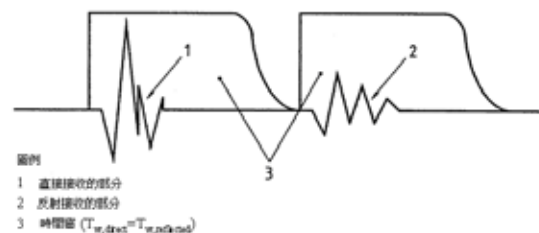


圖3 使用時間窗分離脈衝直接和反射脈衝反應

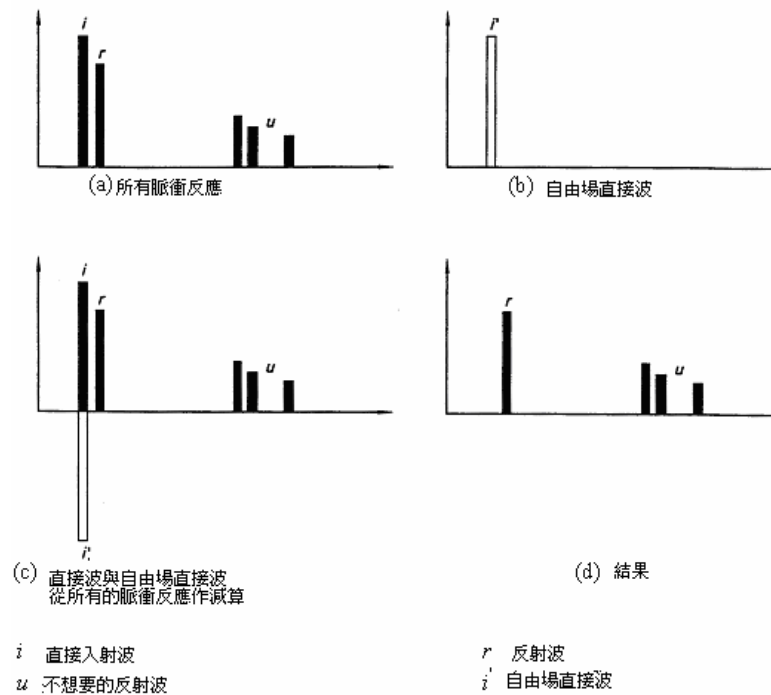


圖4 訊號刪減技術原理分離反射訊號[2]

擷取所有直接入射與反射脈衝訊號後，如圖4，減除直接入射脈衝之自由場訊號，即可分離直接路徑與反射路徑的脈衝訊號。

四、道路鋪面量測結果與分析

4.1 聲源刪減訊號

在無響室內作橫向與垂向及在戶外做自由場量測，也就是無任何反射情形的情況下，量得自由場無反射波之訊號。圖5為無響室內作橫向測試佈置圖，將麥克風與揚聲器的距離定為1m，使用MLS音源產生器，產生一個脈衝訊號，由麥克風來接收此脈衝訊號，將階次(Order)定為8也就是 $n=8$ ， $L=2^n-1$ ，所以序列為255項，量測50次脈衝反應來平均。圖6為在戶外路面上方量測自由場訊號之佈置圖，將揚聲器方向置於與地面平行，再由麥克風接收揚聲器之脈衝訊號。



圖5 無響室內橫向的自由聲場量測佈置圖



圖6 戶外量測自由場訊號之佈置圖

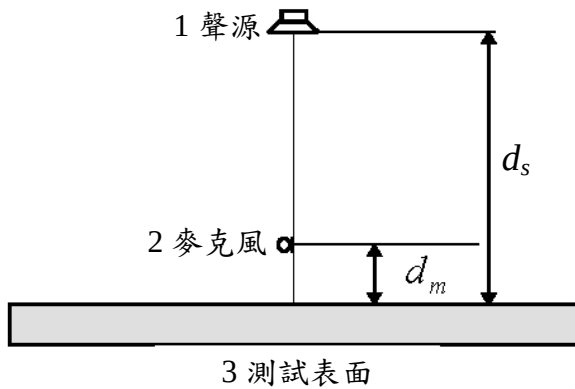


圖7量測訊號傳遞圖

一般量測情況下聲波傳遞情形，聲波由點1(點1為揚聲器)發出，傳到點2(點2為麥克風)，再傳到點3(點3為鋪面)產生反射聲波，再由點2完成接收。其佈置如圖7。按聲速公式：

$$c = 331 + 0.61 \times T = \frac{s}{t} = \lambda \times f \quad (6)$$

可算出在環溫 25°C 時，入射波時間為點1傳至點2的時間：

$$t_{12} = \frac{d_s}{331 + 0.61T} = \frac{1}{331 + 0.61 \times 25} = 2.88\text{ms}$$

點1232的時間：

$$t_{1232} = \frac{d_s + d_m}{331 + 0.61T} = \frac{1.5}{331 + 0.61 \times 25} = 4.33\text{ms}$$

反射波的時間為：

$$t_{23} = \frac{d_m}{331 + 0.61T} = \frac{0.5}{331 + 0.61 \times 25} = 1.44\text{ms}$$

設定觸發(Trigger)時間為延遲5ms，所以第一個波接收時間為5ms左右，第二個反射波接收時間為 $5 + 1.44 = 6.45\text{ms}$ 左右。

測試自由場入射波之結果，分別在無響室作橫向與垂向量測，與在戶外作自由場之量測，總量測時間長度為1秒，比較三種的入射波之情形，在圖8中可看出無響室垂向量測時有反射波的產生，可能原因為地下雜物的影響，在戶外其後面波動部分，可能有其他反射物所因起的，而在無響室內因為聲波被吸收掉，所以波形波動很小。

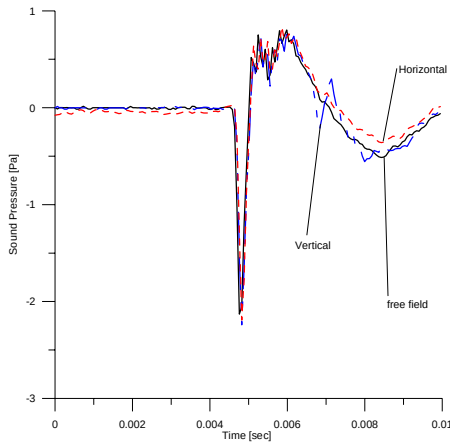


圖8 三種直接入射波比較圖10ms

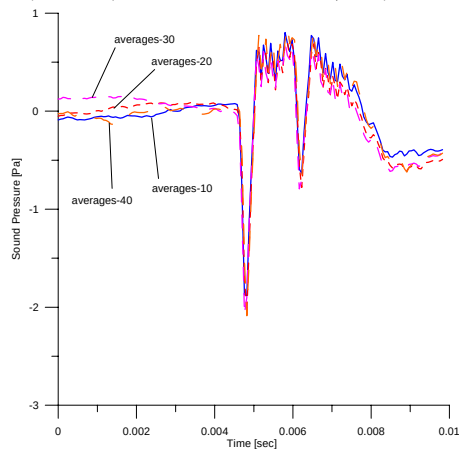


圖9 平均不同次數比較圖

4.2 平均不同次數脈衝反應之量測

為了解平均不同次數脈衝反應的訊號結果，分別量測平均10次、20次、30次、40次的脈衝訊號，由量測結果顯示其訊號在平均20次後，其訊號收斂性很高，如圖9。

4.3 麥克風距地面不同高度之量測

為了解麥克風距地面不同高度，其吸音率變化之情形，分別距地面25cm、50cm、75cm作量測，從圖10之訊號可看出，隨高度增高其反射波之訊號會延遲接收。

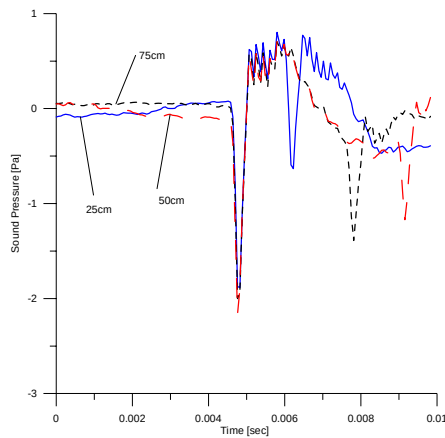


圖10 麥克風距地面不同高度比較圖

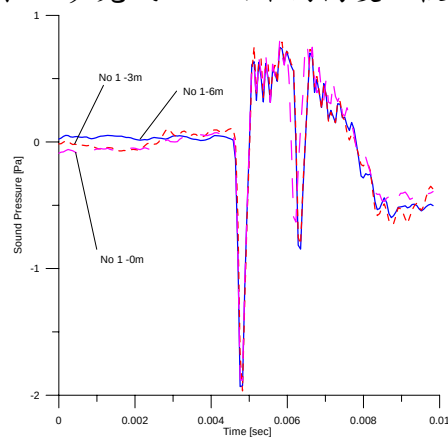


圖11 瀝青鋪面不同位置比較圖

4.4 鋪面取樣之量測

為了解同一鋪面不同位置之量測訊號是否相同，再瀝青鋪面上選取三個點量測，第一點量測完畢後往右移3m，也就是第二點，再右移3m也就是第三點，觀看這三點之量測訊號，其結果可看出在入射波訊號與反射波訊號之重複性。

4.5 鋪面材料吸音率量測

- 1.實際道路測試地點：選在海洋大學理工學院後道路。
- 2.道路鋪面材料：共選三種不同道路鋪面分別為瀝青道路鋪面，混凝土鋪面，及人行道紅磚作測試。
- 3.吸音率量測結果：三種鋪面於250Hz~4kHz之1/3倍頻帶之吸音率頻譜量測結果示如表3及圖12。

表3 量測三種鋪面材料之吸音率

各式路面 吸音率	1/3倍頻 (Hz)												
	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
瀝青道路鋪面	0.07	0.22	0.12	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04	0.07	0.11	0.31

混凝土鋪面率	0.51	0.32	0.36	0.00	0.02	0.10	0.24	0.00	0.02	0.01	0.08	0.21	0.39
紅磚鋪面	0.55	0.42	0.49	0.00	0.05	0.07	0.24	0.00	0.02	0.01	0.08	0.21	0.39

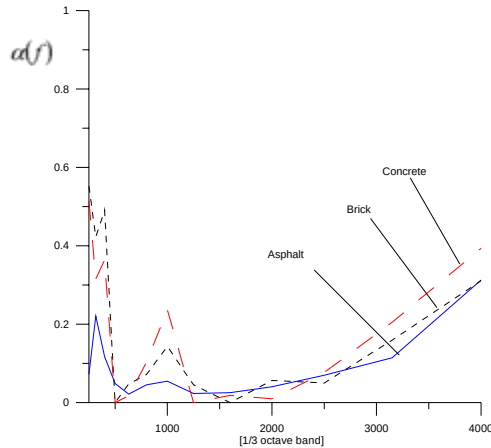


圖12 三種鋪面材料吸音率比較圖

五、不同路面材料對交通噪音之影響預測

5.1 交通噪音預測模式

利用Raynoise聲學軟體，預估道路鋪面材料噪音分佈之情形，將鋪面材料長、寬、高分別設定為50m×30m×1m，將吸音係數輸入材料條件之中，以線音源模擬噪音源，最後觀看道路鋪面聲壓位準分佈。

Raynois聲學軟體模擬操作過程：

- 設定鋪面材料之吸音係數：輸入所要模擬鋪面材料之吸音率，其1/3倍頻率範圍為63～8kHz。
- 輸入聲源數據：數據為內建之聲功率位準。

表4 線音源數值

頻率Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
聲功率dB	98	96	94	92	90	88	86	8

- 輸入聲源位置：將線音源位置設為x方向50m，y方向15m，x方向2m，等於將高度距地面為1m。
- 環境條件：
 - 氣溫：20.0°C；相對濕度：50.0%；聲速：343.32m/s。
- 輸入要觀看之聲場範圍：選取一個平面範圍，觀看音壓分佈情形，長×寬×高為50m×0m×10m。
- 觀看音壓分佈之節點：取距離線音源5m遠處，離鋪面高度1m處，節點在57的位置，如圖13。

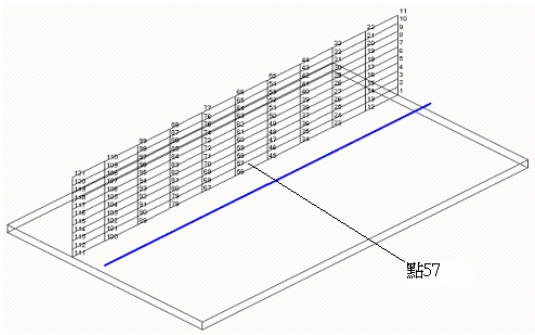


圖13 距線音源5m遠高度1m處

5.2五種道路鋪面之交通噪音預估

考慮瀝青、混凝土、多孔性、排水性及密粒性五種道路鋪面材料，其63～8kHz之倍頻帶吸音率列如表5。由Raynoise軟體分析出該五種鋪各道路距車流線音源5m遠，離鋪面高度1m處之受音點聲壓位準結果，比較如表6。

表5 鋪面材料吸音係數

各式路面 吸音率 α	1/3倍頻 (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
瀝青鋪面材料	0.02	0.01	0.07	0.05	0.05	0.04	0.31	0.00
混凝土材料	0.88	0.23	0.51	0.00	0.24	0.01	0.39	0.00
多孔性鋪面材料	0	0.06	0.13	0.4	0.48	0.48	0.6	0
排水性鋪面材料	0	0.04	0.08	0.45	0.12	0.16	0.35	0
密粒鋪面材料	0	0.05	0.05	0.04	0.03	0.1	0.12	0

表6 五種鋪面材料1/3倍頻受同一車流音源於節點57位置之聲壓位準比較

各式路面交 通噪音音壓 位準	1/3倍頻 (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	SPL(dB(A))
瀝青鋪面	53.9	62	67.2	69.9	71.1	70.7	66.8	81.5
混凝土鋪面	53.9	61.5	66.1	70	70.7	70.7	66.6	81.2
多孔性鋪面	53.9	61.8	67.1	69.1	70.1	69.6	66.1	80.7
排水性鋪面	53.9	61.9	67.2	68.9	70.9	70.4	66.7	81.1
密粒鋪面	53.9	61.9	67.2	69.9	71.1	70.5	67.3	81.5

將五種鋪面材料，經Raynoise軟體模擬整理示於表15，從表中可看出在距線音源5m遠，1m高的位置，其音壓位準由大至小排序為，瀝青鋪面、密粒鋪面、混凝土鋪面、排水性鋪面、多孔性鋪面。

六、結論

本文主要成功建立了道路鋪面材料吸音特性之量測步驟，其中應用了最大長度序列(MLS)處理技術的訊號產生器和快速傅利葉(FFT)轉換作訊號處理至頻率域，及使用訊號刪減技術分離入射波及反射波之訊號，透過入射音波及反射音波之傅利葉轉換頻譜，計算出道路鋪面之聲功率反射係數及吸音率，其平均吸音係數分別為：瀝青鋪面，混凝土鋪面，人行道紅磚鋪面。

Raynoise模擬結果，分別模擬五種鋪面材料之吸音率，以線音源模擬車流線音源之噪音量，其音壓位準由大至小排序為，瀝青鋪面、密粒鋪面、混凝土鋪面、排水性鋪面、多孔性鋪面。對於本實驗還需加強的地方為，可進一步測試不同階次長度，其不同長度週期訊號量測變化之情形，量測之結果再做進一步之討論。

參考文獻

- [1] Keijiro Iwao and Ichiro Yamazaki, "A study on the mechanism of tire/road noise", JSAE Review, Volume 17, Issue 2, April 1996, Pages 139-144。
- [2] ISO 13472-1 Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ–Part 1: Extended surface method。
- [3] Davies, V. D. T. (1966). "Generation and properties of maximum-length sequences", Control, June 1966, pp. 302-304。
- [4] MacWilliams, F. J. and Sloane, N. J. A. (1976). "Pseudo-random sequences and arrays", Proc. of the IEEE, vol. 64, no. 12, pp. 1715-1730。
- [5] Rife, D. D. and Vanderkooy, J. (1989), "Transferfunction measurement with maximum-length sequences", J. Audio Eng. Soc., vol. 37, no. 6, pp. 419-444。