

逢甲大學
交通工程與管理學系碩士班
碩士論文

高速公路鋪面種類與齡期
對行車噪音特性之影響
Effect of Pavement Types and Ages on
Traffic Noise Characteristics

指導教授：劉 霈

研 究 生：蔡欣翰

中 華 民 國 九 十 六 年 二 月

誌 謝

研究所生涯隨著論文完成而即將結束，回首修業期間點點滴滴，首先要感謝的是啟蒙恩師 劉霈教授，從大三到研究所四年的時間中，在恩師的悉心指導及不吝傳授所學下，充實學生在交通領域中的知識與技能，使學生獲益良多。

於撰寫論文階段，承蒙系上 邱裕鈞教授於方法論上的啟發與提供寶貴意見，使學生在論文研究內容中更臻完善。於論文口試期間，承蒙嘉義大學 張立言教授及逢甲大學 陳世晃教授於百忙之中撥冗細心審閱及指正，特此表達感謝之意。在此感謝系上諸多師長充實學生在交通專業上的知識與技能，以及助教在選課、學習、設備上的大力支持，讓論文能更加順利完成。

感謝研究所的同窗好友欣憲、鵬升、梅舜、妍菁、聖奇、志豪、宗勳、怡霖、姿雁、庭銀、智超、堂展、耿楨、昱彰、家勝、雅雯、智淮、韻珏、仁維、雅博、尚輯、芋頤，有你們一起努力打拼熬夜趕報告、一起玩樂…等時光，在我的回憶中烙下深刻回憶。同時感謝學長姐於求學過程中提供協助與解惑，特別是在蒐集資料過程中有學長伯村與品宏的陪伴，以及學姊世傑、學妹洪店的協助，讓學生論文能進展順利。還要特別感謝好友義明、偉倫、郁文、絲盈、為翔、維倫、宗鈺…等，有你們的協助與陪伴使得論文能順利的完成，且充實了這段匆匆而紮實的生活，特此深表謝意。

感謝父母親於求學過程中的支持與照顧，以及感謝妹妹對我在精神上的支持，使我能無後顧之憂，專心的從事研究，方能完成這篇論文。感謝身邊關心我的每個人，因為有你們的支持才會有此成就。在此，僅將我的論文獻給你們，一起分享這份喜悅。

欣翰 謹誌于

逢甲大學丘逢甲紀念館 2007 年 2 月

摘 要

伴隨國道路網相繼開放通車，大量交通衍生之公路噪音問題已成為亟需改善與防治之課題。其防治可由控制音源與阻絕路徑兩方式達成，常見之隔音牆屬於阻絕路徑之設施，而降低車輛行駛噪音或動力噪音則屬控制音源措施。據研究指出，鋪面形式與公路噪音有絕對之關連，隨鋪面形式改變，噪音量之差異可達 11 dB(A)之譜，故改良鋪面形式應為值得嘗試用以降低車輛行駛噪音之方式。

本研究以現場實測搭配實驗模擬之方式，探討鋪面種類對行車噪音量及頻率產生之影響。依據 ISO 11819-1 之通過噪音統計法、ASTM E965 之鋪砂法及日本道路協會現場透水量試驗法之規定，於國道三號及四號選定適當地點進行資料蒐集。利用統計迴歸分析方法，針對不同鋪面種類之行車噪音、頻率特性進行相關之研究，將測得之鋪面特性因子與噪音量、噪音頻帶分佈特性做差異性比較。另依據 ISO 13472-1 之延伸表面法，以國道最常見之開放級配鋪面為研究對象，製作多組不同壓實程度之試體並量測其吸音率與相關特性因子，探討鋪面壓實程度改變其吸音率、透水率、孔隙與密度等相關因子之變化。

鋪面類型對於噪音產生存在差異性，柔性鋪面以鋪面之透水性於噪音量產生上較具有較佳之代表性，且受服務齡期的增加，鋪面隨著車輛行駛造成壓密使得鋪面孔隙率降低，亦導致噪音量逐漸增加。受測鋪面中以 Porous 路面之減音效能最佳，且其減音效果與透水率隨服務齡期之衰退程度也較小，為能夠有效減低噪音之鋪面種類。透過實驗模擬確認鋪面透水率與孔隙率具有高度關連性。所採用之鋪面試體其吸音效能於低頻部份表現較佳，隨著頻帶越高其吸音能力逐漸減弱；而試體之平均吸音係數約為 0.8。

然而受限於實測中車速之判定準確度不足以及模擬試驗中試體吸音率受孔隙與粒料之影響，對於鋪面服務齡期、壓密等狀況改變下，其噪音量與吸音率之變化並無法明顯判定，為本研究中較為遺憾之處。

關鍵字：公路噪音、頻率、吸音率、鋪面型式、ISO 11819-1、透水率



Abstract

While national highways being gradually integrated as a highway network, traffic noise normally becomes an annoying problem that needs to be prevented or mitigated. Highway traffic noise can be prevented by measures of blocking propagation path or controlling sound source. Noise barriers, the most prevalent measures adopted by highway authorities in Taiwan, block propagation path. On the other hand, reducing noise from running vehicles are the way of controlling sound source. Most literatures indicated that traffic noise is highly related to pavement types, and the difference of noise in decibels due to pavement types can be as high as 11 dB(A). Consequently, it is worthwhile to investigate effect of pavement types on traffic noise.

In this study, field tests and laboratory experiments/simulation were performed to evaluate the difference between pavement types and traffic noise and its frequency. According to ISO 11819-1 "SPB Method", ASTM E965 "Sand Patch Method", and permeation test, suitable sites on the national highway No. 3 and 4 were selected for field measurement. By using statistics regression method, traffic noise and frequency between various pavement types were studied. From the field test data, we compare the difference among characteristic factors of pavements. For ISO 13472-1 "Extended Surface Method", the most common surface course, open-graded friction course (OGFC), was selected. Using Superpave gyratory compactor (SGC), 6-in diameter specimens with different compact levels were produced. Sound absorption coefficients and other related characteristics of these specimens

were measured for understanding variation of noise characters with respect to compaction efforts.

It was found that various pavement types do have different noise characters. The permeated rate has better representative on noise generation. With the service time increases, accumulated traffic volume will re-compact the pavement and reduce void rate, the induced traffic noise will then become louder. The test results also indicated that porous surface has the best noise reducing effect. Meanwhile, less decline on noise reducing and permeability capabilities are also observed for porous asphalt pavement. It can be concluded that porous asphalt may be the pavement type. By laboratory experiments, finding that permeation rate is highly related to porosity. Sound absorption efficiency of the specimens at low frequency is better than high frequency. Noise reduction coefficient (NRC) is approximately 0.8.

Limited to accuracy on speed measurement at field tests and the difference between pore space and aggregate on sound absorption coefficients are too large at laboratory experiments, it's unable to find out variations in road noise and sound absorption coefficient.

Key Words : highway noise 、 noise frequency 、 sound absorption coefficient 、 pavement 、 ISO 11819-1 、 permeation rate.

目 錄

誌 謝	I
摘 要	II
A b s t r a c t	IV
目 錄	VI
圖 目 錄	IX
表 目 錄	XI
表 目 錄	XI
第一章 研究緣起	1
1.1 研究動機與背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究範圍	3
1.4 研究流程	3
第二章 文獻回顧	6
2.1 噪音傳播特性與公路噪音	6
2.1.1 傳播特性	6
2.1.2 公路噪音	8
2.2 車胎鋪面音之生成機制與量測方式	9
2.2.1 車胎鋪面音之生成機制	9
2.2.2 車胎鋪面音之量測方式	11
2.3 鋪面紋理分類與量測方式	14
2.3.1 紋理分類	14
2.3.2 鋪面型式對噪音之影響	16
2.3.3 量測方式與儀器	17
2.4 鋪面吸音率量測	19
2.5 鋪面老化對於公路噪音之影響	22
2.5.1 鋪面老化之原因	22
2.5.2 老化對於公路噪音之影響	22
第三章 研究方法	24

3.1	車胎鋪面音之量測	24
3.1.1	量測定義與原理	24
3.1.2	測點選擇	26
3.1.3	量測使用儀器	28
3.1.4	實測上考量	29
3.1.5	現場量測程序	30
3.1.6	噪音資料處理	31
3.2	鋪面特性之量測	33
3.2.1	透水量試驗	34
3.2.2	鋪砂法	35
3.2.3	密度試驗	37
3.3	吸音率之量測	38
3.3.1	量測定義與原理	38
3.3.2	量測使用儀器	40
3.3.3	現場量測程序	43
3.3.4	量測上考量	47
3.4	模擬試驗	49
3.4.1	試體製作	49
3.4.2	試體物性調查	50
第四章	實測結果比較與分析	53
4.1	實測結果	53
4.1.1	鋪面特性	54
4.1.2	車流量統計	56
4.2	實測結果分析	57
4.2.1	各種鋪面之車速與噪音	57
4.2.2	SPBI 值	67
4.2.3	均能音量 (L_{eq})	68
4.2.4	頻率分佈	69
4.2.5	氣溫對噪音特性之影響	71
4.3	鋪面吸音率量測結果分析	72
4.3.1	鋪面試體特性	72

4.3.2 鋪面試體壓實程度對吸音率之影響	78
第五章 結論與建議	84
5.1 結論	84
5.2 建議	85
參考文獻.....	87



圖目錄

圖 1.1	研究流程圖	5
圖 2.1	車胎鋪面音生成機制示意圖【31】	10
圖 2.2	車外噪音量與車速關係曲線【32】	11
圖 2.3	SPB 法現場配置示意圖【31】	13
圖 2.4	CPX 法蓬罩式拖車配置【34】	14
圖 2.5	CPX 法蓬罩式拖車內部配置實例【34】	14
圖 2.6	紋理對行車舒適性、安全性及噪音之影響	15
圖 2.7	鋪砂法示意圖【14】	18
圖 2.8	直接與反射訊號以時間窗分離【26】	20
圖 2.9	訊號刪減技術原理【26】	21
圖 3.1	Rion 精密型噪音計	29
圖 3.2	實測現場示意圖	30
圖 3.3	交通維持及器材架設位置	31
圖 3.4	噪音計與氣象儀架設位置	31
圖 3.5	透水量試驗所需器材	34
圖 3.6	透水量測點試驗後之情形	35
圖 3.7	水由儀器與鋪面間縫隙流出	35
圖 3.8	使用屏風避免標準砂被吹開	36
圖 3.9	鋪砂法完成之圓面積	36
圖 3.10	路面潮溼毛細現象而不易鋪平	37
圖 3.11	密度試驗儀	38
圖 3.12	吸音率量測佈置圖	39
圖 3.13	Zircon 揚聲器探測器	41
圖 3.14	吸音率測量儀器連接示意圖	42
圖 3.15	吸音率測量現場配置圖	42
圖 3.16	Dirac 軟體量測設定	44
圖 3.17	鋪面試體量測結果	45
圖 3.18	訊號刪減技術	45

圖 3.19	時間窗設定	46
圖 3.20	鋪面試體各頻帶反射率	46
圖 3.21	SGC 試體	47
圖 3.22	吸音率試測成果	48
圖 3.23	試體測點分佈示意圖	48
圖 3.24	SGC 旋轉式試驗儀	49
圖 4.1	國三北向 64k+800 各車種之車速與噪音關係	58
圖 4.2	國三北向 84k+540 各車種之車速與噪音關係	58
圖 4.3	國三北向 90k+100 各車種之車速與噪音關係	59
圖 4.4	國三北向 132k+600 各車種之車速與噪音關係	59
圖 4.5	國三北向 233k+400 各車種之車速與噪音關係	59
圖 4.6	國四西向 7k+800 各車種之車速與噪音關係	60
圖 4.7	各測點小型車之 L_{Amax} 與車速對數值關係	63
圖 4.8	小型車於各測點、各車速下之鋪面噪音	65
圖 4.9	雙軸重車於各測點、各車速下之鋪面噪音	65
圖 4.10	多軸重車於各測點、各車速下之鋪面噪音	66
圖 4.11	小型車於 OGFC-N 鋪面之 L_{Amax} 與車速對數值關係	67
圖 4.12	各測點 SPBI 值	68
圖 4.13	各測點均能音量	69
圖 4.14	各測點小型車噪音頻率分佈圖	70
圖 4.15	各測點雙軸重車噪音頻率分佈圖	70
圖 4.16	各測點多軸重車噪音頻率分佈圖	70
圖 4.17	試體壓實圈數與高度關係圖	73
圖 4.18	試體壓實圈數與比重關係圖	74
圖 4.19	試體壓實圈數與孔隙率關係圖	74
圖 4.20	試體壓實圈數與透水率關係圖	77
圖 4.21	試體透水率與孔隙率關係圖	78
圖 4.22	試體 1-1 各測點吸音率曲線圖	79
圖 4.23	鋪面試體吸音率曲線圖	80

表 目 錄

表 2.1	PIARC 鋪面紋理分類	15
表 3.1	各分類車輛之參考速度及權重	33
表 4.1	各測點鋪面相關資料	53
表 4.2	各測點鋪面密度值	54
表 4.3	各測點鋪面透水率	55
表 4.4	各測點鋪面平均紋理深度	55
表 4.5	瀝青混凝土鋪面特性	56
表 4.6	高速公路量測路段平均小時流量	57
表 4.7	車速對噪音量變化影響之係數檢定表	61
表 4.8	各車種於各測點、各車速下之鋪面噪音	63
表 4.9	氣溫對噪音量變化影響之係數檢定表	72
表 4.10	SGC 試體基本物理特性	75
表 4.11	SGC 試體透水率	76
表 4.12	各壓實圈數下之平均吸音率	81
表 4.13	各壓實圈數下之吸音係數	82

第一章 研究緣起

1.1 研究動機與背景

台灣地區地狹人稠、生活空間狹窄，所衍生交通擁擠、空氣污染、水質污染、噪音污染等問題，嚴重威脅民眾的健康與居家生活環境品質。其中噪音污染公害除令人感到不舒適外，更容易干擾生活作息與身體健康，危害生活品質，且機動車輛與人們日常生活息息相關，因此管制機動車輛噪音以維護健康與環境品質，乃成為環保之重要課題。

近年來台灣地區整體國道路網逐漸完整使得公路運輸更為順暢快捷，也吸引更多車輛利用國道以快速抵達目的地，可預見未來於公路上因大量車流所衍生之交通噪音問題將較目前更為嚴重。又因土地取得不易，故導致路線選擇上時常與民眾之住所相當接近，噪音問題已成為公路鄰近居民相當不耐之困擾。為改善此問題，政府部門始於公路鄰近住宅處加設隔音牆，由於隔音牆安裝容易且對安撫民眾心理具明確效果，但隔音牆之設置成本極高，且隔音牆也具有對用路人造成視覺阻隔及心理壓迫等疑慮，故就設置之適當性及效能來說尚具相當爭議。

公路噪音之防治一般可由兩方面著手，其中之一是以隔絕方式，藉由隔音牆之設置以阻隔噪音對周遭受音體之影響，屬於被動式噪音防治，並無法直接降低噪音源之產生。相對於此，另一方式是以直接減少交通噪音為考量的主動式防治。主動式的噪音防治只有從車輛因素及道路因素下較為可行，車輛因素於行政院環境保護署以及各汽車廠商努力下，行駛時所產生之動力音相較過去已大幅降低；至於道路方面則因相關人員之長期忽視而未有明顯之進步，近來於車胎鋪面音之相關研究中顯示，在車輛行駛速度超過 50 km/h 時，車胎鋪面音（tire/road noise，即輪胎與鋪面交互作用下所產生之噪音）係為公路噪音之最主要因素。

Sandberg 提出有關鋪面影響公路噪音之調查比較，認為對大部分歐洲小汽車而言，車胎鋪面音約在時速 50 km/h 時即已成為主控噪音；且不同鋪面所產生之車胎鋪面音具有高達 11 dB(A)之差異，故對鋪面之噪音特性有進一步研究之價值。由此推測，一般車輛於高速公路正常行駛下，整體噪音之貢獻主要來自於車胎鋪面音，故可藉由降低車胎鋪面音以達成降低公路噪音之目標。

1.2 研究目的

相關研究顯示鋪面型式對於公路交通噪音具有相當程度之影響，故本研究針對車胎鋪面音與鋪面試體吸音率兩部份進行量測之研究目的大致如下：

1. 分析高速公路之鋪面噪音特性

依 ISO 標準規範之 SPB 法 (Statistical Pass-By method) 以及相關鋪面紋理試驗方法進行，藉由實地測量蒐集不同鋪面型式與其他因子交互影響下所產生的噪音資料，除比較各式鋪面之間所產生噪音之差異外，透過迴歸分析法了解各因子間之關係。另導入更早期之量測資料進行比較，探討各測點鋪面經歷約兩年的時間，鋪面特性的改變以及對於吸音效能的影響。

2. 探討鋪面壓實程度對吸音特性之影響

以實驗模擬之方式，藉由不同壓實程度之試體代表實際路面開放通車後被逐漸壓實之狀況，依 ISO 標準規範之延伸表面法 (Extended Surface Method) 進行鋪面試體之吸音率調查，同時並針對鋪面試體進行物理特性量測。透過試體之吸音率、壓實程度與相關因子間之比較，探討其間之關連性，冀望未來可應用於模擬推估公路噪音之增加程度。

1.3 研究範圍

本研究分為現場實測與實驗室模擬兩部份進行，現場實測研究部份以 ISO 11819-1:1997(E)之「Statistical Pass-By Method(SPB 法)」為主軸，礙於規範中部分要求之標準與我國道路現況有所差異，因此於本土適用性部分加以調整；鋪面性質方面之測定則依據 ASTM E965 之「鋪砂法 (Sand Path Method)」、日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」之現場透水量試驗法辦理。實驗室模擬部份依據 ISO 13472-1 Part 1: 2002(E)之「Extended Surface Method (延伸表面法)」進行鋪面試體之吸音率量測。

現場實測以國道高速公路各式鋪面為測定對象，因中山高速公路車流密度高、車輛間距太小，以致量測之車輛噪音易產生重疊，不易分離單一車輛之噪音位準，恐怕造成有效樣本資料數量不足，故選擇車流量較小且行車速度較穩定之國道三號、四號高速公路進行噪音量測。研究路段之選擇以國道上各種不同柔性及剛性鋪面型式為主，且為符合 ISO 11819-1 之量測規範，儘量避免量測路段之縱坡度及周邊環境影響量測噪音位準，故選擇縱坡度於 1% 以下之路段，且周邊環境無明顯之建築物與隔音牆等反射物存在處作為實測地點。

由於目前台灣地區國道鋪面於柔性路面部份以開放級配為大宗，故在模擬試驗部份，本研究選用開放級配粒料進行鋪面試體之製作。為模擬實際路面受車輛壓實前後之變化，試體分為六種不同壓實程度，並針對上述試體分別進行吸音率測量，以瞭解壓實過程對於鋪面吸音率之影響。

1.4 研究流程

依據本研究確立研究目的與研究範圍後，除了進行相關文獻回顧外，於噪音量量測分為現場實測與實驗模擬兩部份進行，現場實測依據 ISO 11819-1 之規定至高速公路不同鋪面型式路段量

測噪音量、車速、車種組成、透水量、鋪面平均紋理深度、密度等資料，經轉換及判讀有效樣本後求 SPBI 值，並以簡單迴歸預測模式分析噪音量與各車種間之關係、鋪面與噪音之關係；另透過前後間隔約兩年之兩次實測資料比較，瞭解鋪面老化對於噪音量產生方面之差異。實驗模擬部份依據 ISO 13472-1 之規定進行鋪面試體吸音率量測，透過針對不同壓實程度之試體進行量測，比較其間吸音率之變化。

本研究之流程如圖 1.1，研究步驟所涵蓋內容說明如下：

1. 緒論：闡明本文之研究動機、目的、範圍與研究流程。
2. 文獻回顧：此部份針對噪音傳播特性、公路噪音的產生、鋪面型式與服務齡期對於噪音之影響，以及本研究中擬定實測之噪音與鋪面紋理量測之方法與儀器進行回顧，以利研究在方向及實務上之運用與參考。
3. 車胎鋪面音與柔性鋪面試體吸音率量測：就車胎鋪面音、鋪面吸音率之量測加以定義，並針對本研究之噪音、吸音率量測內容（量測目的、作業流程、量測方式、程序及資料處理等）加以說明。
4. 研究鋪面型式、服務齡期對噪音特性之影響：利用實測資料進行不同鋪面型式與車速之關係、SPBI 值及鋪面紋理與 L_{Amax} 、頻率關係等之分析與探討；並搭配早期量測之資料加以比較，以瞭解於服務齡期對於車胎鋪面音產生之變化。另一方面，透過吸音率量測，瞭解開放級配鋪面於不同壓實程度下吸音率之影響。
5. 結論與建議：彙集研究之結果與過程中之心得加以歸納整理，並說明未來可供研究之方向。

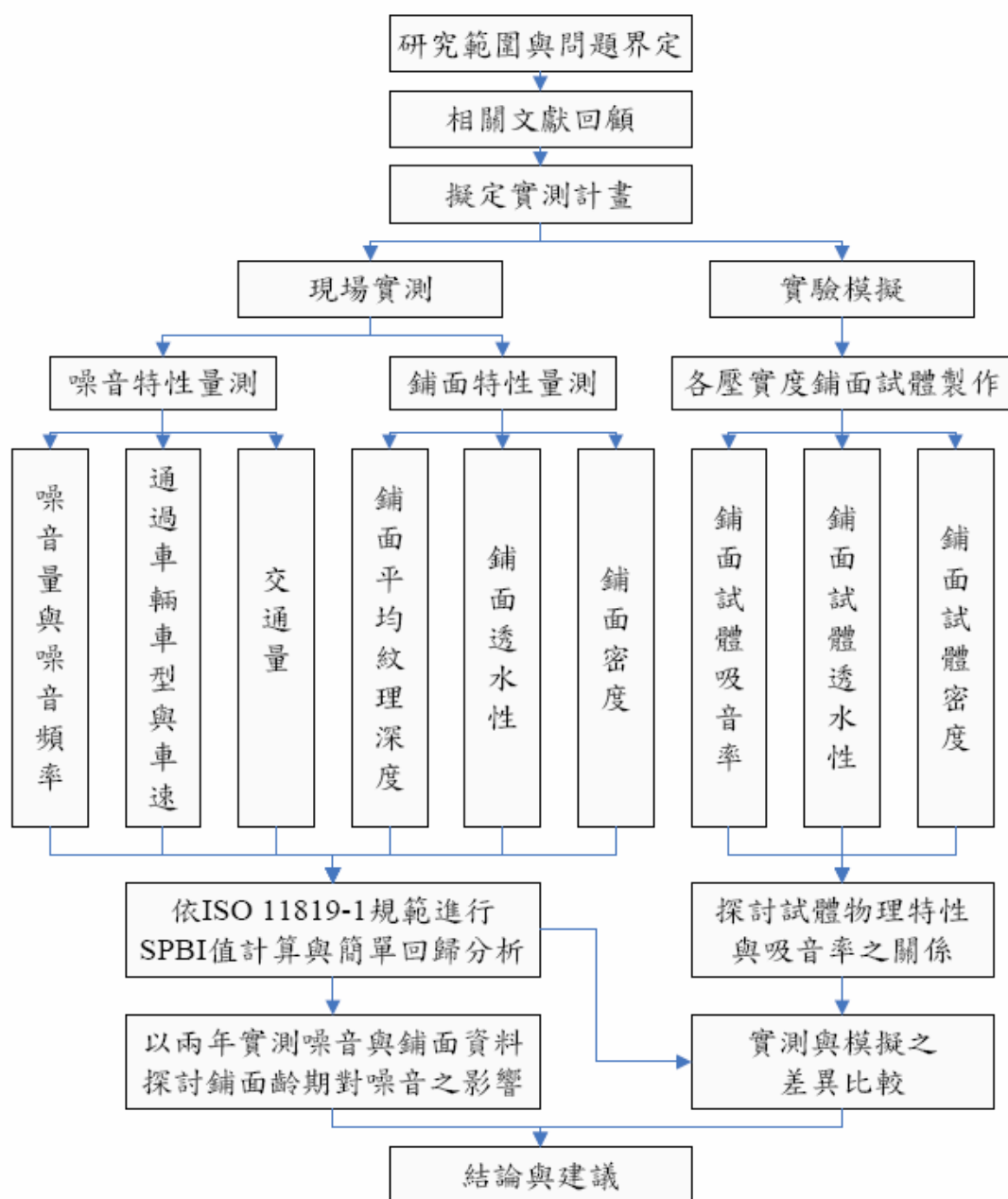


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 噪音傳播特性與公路噪音

2.1.1 傳播特性

施鴻志與張富南（民 72）【4】、徐淵靜（民 81）【5】、陳永昇（民 86）【7】及蘇德勝（民 80）【12】等研究報告內容就噪音傳播特性綜合以下：

聲音傳播（propagation）指音源發出之聲音經媒介傳送到受音者之傳送現象。影響聲音傳播之因素如下列五點：

1. 溫度

$$V = 331.5 + 0.6 t \quad (2-1)$$

式中 t 為攝氏溫度， V 為聲音在空氣中傳導之速率，由上式可知，溫度越高，聲音在空氣中傳導之速率越快，而大氣中並非各處溫度均為相等，故聲音在大氣中常產生折射之效應，而此種效應使聲音在夜晚比白天更容易沿地面傳播，即發生在接近地面的空氣溫度改變所產生之效應，而使聲音在白天呈向上折射，在夜晚則是向下折射。

2. 風效應

聲波傳播之介質為空氣分子，而空氣分子會受到風速及風向而改變其密度、運動方向等，亦使音源與受音者之間亦會受風效應之影響，而逆風會較順風造成更大之衰減

3. 距離衰減

在一開放空間，聲波之能量會隨著距離之增加而造成能量之損失，此稱為距離衰減。點音源在自由空間之衰減為：

$$\begin{aligned} L &= L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) \\ &= L_w - 20 \log d - 11 \end{aligned} \quad (2-2)$$

點音源在半自由空間之衰減為：

$$L = L_w - 20 \log d - 8 \quad (2-3)$$

其中

L 為距點音源 d 距離之音強位準 (SIL)

L_w 為點音源之音功率位準 (SPL)

d 為音源與受音點之距離(m)

由上式可知，當距離加倍時其音強位準將減少 3 dB。

線音源在自由空間之衰減為：

$$\begin{aligned} L &= L_w + 10 \log \left(\frac{1}{2\pi d} \right) \\ &= L_w - 10 \log d - 8 \end{aligned} \quad (2-4)$$

線音源在半自由空間之衰減為：

$$L = L_w - 10 \log d - 5 \quad (2-5)$$

其中

L 為距線音源 d 距離之音強位準 (SIL)

L_w 為線音源之音功率位準 (SPL)

d 為音源與受音點之距離(m)

4. 反射、傳透、吸收、繞射

當音波在不同介質中傳遞時，假設在障礙物前有能量 I 之入射波傳來，經過介質後，部份音能 R 被反射，部份 A 被障礙

物所吸收，僅有音能 T 被傳透，依能量不減定律，可得下列關係式：

$$I=R+A+T \quad (2-6)$$

其中 R/I 稱為反射率， T/I 稱為傳透率，則 $1-R/I=(I-R)/I=(A+T)/I$ 為吸收率。

當聲音於傳送過程中遭遇障礙物時該聲音會繞過此障礙物傳送，此現象稱為繞射。其傳送特性之差異大小與傳送路徑、障礙物之材料性質、波長、頻率有關，此乃導源於光學之繞射原理。

5. 地表衰減

當聲波通過地面時，部份能量可能會被地面吸收及散射，此效應僅適用於離地面 6 公尺內，且隨地面類型及聲音頻率而有不同之衰減程度。根據研究顯示，森林地之衰減大於草地，而頻率越高衰減亦越大。

2.1.2 公路噪音

Bendtsen (1999) 【15】指出道路交通噪音的主要來源為車輛引擎聲及輪胎與道路面的接觸，小客車於低速（低於 50 km/h）行駛時以引擎聲為主要噪音，車輛高速行駛時輪胎與道路面的接觸易產生噪音，可是在都市地區往往忽略車輛行駛時之速度限制。一般來說，影響公路噪音的因素如下：

1. 車輛行駛狀況

道路上之車輛行駛狀況對交通噪音具有極大影響。一般情況下，車輛於加速行駛時，交通噪音隨之增大；在固定速度下行駛，變速箱檔位越低，引擎轉數將越高，相對的交通噪音也越大，這主要是由於作為交通噪音源的車輛噪音增加而使交通

噪音合成值上升的緣故。

2. 交通流量與交通流中的車種組成

彭保華（民 73）【11】指出，隨交通量的增加，構成交通噪音源增多，不論是噪音量還是統計音量都是呈上升趨勢。交通量對統計音量 L_{99} 、 L_{90} 、 L_{50} 影響較大，但當流量超過 2000 輛以後，噪音量基本恆定不變，統計參數的標準偏差減小，而對交通噪音之預測常以實際數據為依歸，以迴歸分析的方法歸納出具有地區特性的交通量與交通噪音關係。另於日本交通安全公害研究所（1979）【2】之研究結果：

$$L=85+0.2V+10\text{Log}(C_1+2.8C_2+5.6C_3+12.9C_4) \quad (2-7)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 之係數可看出不同類型車輛所產生之噪音量比例，也就是當車流組成中重型車輛比例越高，則噪音量普遍有增加趨勢。

3. 道路結構與表面狀況

影響交通噪音大小的道路因素很多，如道路的縱橫斷面形狀、路面狀況、路型幾何形式、隔離設施、沿路建築物多少等等。當車輛在坡道上行駛，由於發動機負荷與轉速增加，汽車噪音明顯增加，特別是重型車輛在不同坡度的道路上行駛時均能音量的變化情形。另路面粗糙度不同，將使汽車噪聲大小產生差異，因而影響交通噪音。

2.2 車胎鋪面音之生成機制與量測方式

2.2.1 車胎鋪面音之生成機制

車胎鋪面音（tire/road noise）意指車輛行駛時車胎與鋪面交互作用下產生之噪音，Kuijpers 等人（2001）【13】及 Sandberg（2002）【34】指出車胎鋪面音生成機制可大致分解成如圖 2.1

所示之三部分：

1. 車胎與鋪面接觸時所產生之衝擊與振動。

車胎之胎體具有彈性，可吸收路面高低起伏、減少車身振動，並提高乘車者之舒適度，因此胎體本身之胎壁（Sidewall）與胎面（包含織帶 Tire belt）皆可變形並恢復原狀。當胎面因行駛滾動與地面接觸時，胎紋與胎塊隨著與地面接觸逐漸承受壓力而變形，經過接觸點後又恢復原狀，如此反覆的變形運動帶動周圍空氣振動，振動即產生噪音。

2. 極短時間內，困於胎紋與鋪面間之空氣之氣體動力行為。

車胎除上述之壓縮變形外，同時朝橫向膨脹，兩種變形皆導致胎塊間之空間縮小。與鋪面接觸的極短暫時間內，空氣於其中受到急速壓縮後又迅速被排出，產生空氣壓縮噪音，稱之為音爆（Air-pumping）。此外空氣被釋放處為車胎脫離鋪面端，該處胎面與鋪面呈三角狀，以致音爆聲響受到「喇叭效應（horn effect）」而導致音量增加。

3. 胎紋與鋪面接觸期間之黏滯行為以及微移效應。

車胎與鋪面接觸之區塊受到重力及摩擦力作用，此摩擦力可分解為磁滯力及黏滯力兩部分，在特定情形下，兩者均可造成車胎額外之振動及噪音。

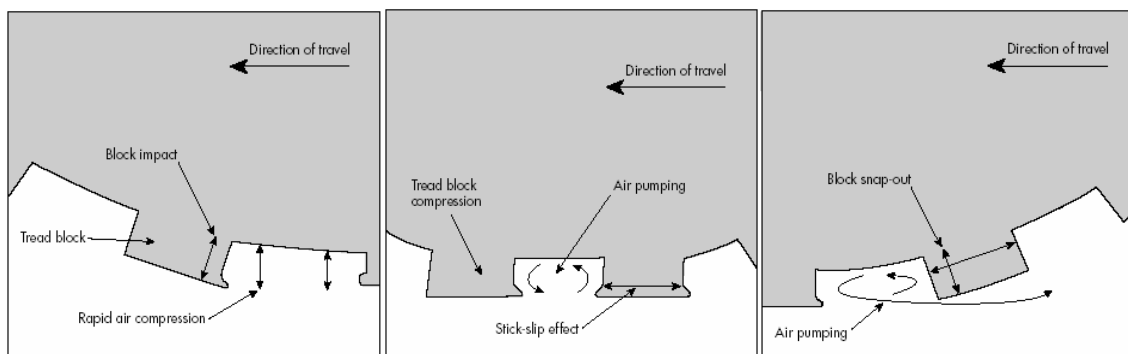


圖 2.1 車胎鋪面音生成機制示意圖【31】

Sandberg (1979) 【34】認為大部分歐洲小汽車之車胎鋪面音在時速 40~50 km/h 時即已成為主控噪音。Robertson 等人 (1998) 【33】採用配備五速變速箱之車輛，其動力音、車胎鋪面音與車速間之關係如圖 2.2 表示，動力音因換檔導致引擎轉速落差而呈鋸齒狀波動，整體噪音亦因換檔而成輕微鋸齒狀；但可看出約在 50 km/hr 以上之速度時，整體噪音量以車胎鋪面音之貢獻為主。Hibbs 與 Larson (1996) 【24】之研究也呼應此一看法，但認為車胎鋪面音約在時速 80 km/h 時始具絕對主控地位。而大型車輛因車輛本身重量及載重等因素使得引擎須承受較大負重，其所產生之動力及廢氣排放音量均較高，故車胎鋪面音即不似小客車般在較低速度即成主控音響。

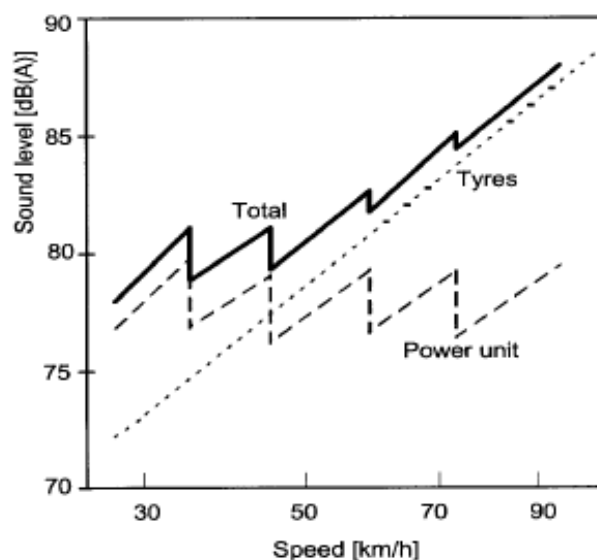


圖 2.2 車外噪音量與車速關係曲線【32】

2.2.2 車胎鋪面音之量測方式

目前以實際量測車胎鋪面音之標準方法有兩種，分別為 ISO 11819-1 之 Statistical Pass-By Method (SPB 法) 及 ISO 11819-2 之 Close-ProXimity Method (CPX 法)，另有量測鋪面吸音特性之 ISO 13472-1 之 Extended Surface Method (延伸表面法) 分別說明如下：

1. SPB 法

本法全名為「Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical Pass-By method」，此方法主要是以現場量測車輛行駛於公路上所產生之噪音，利用正規化之車速與駛過已知公路鋪面之各車型組所產生之統計平均噪音量，以間接之方式求取及分析鋪面形式對公路噪音之影響。

量測方式為自行駛於外線車道之穩定車流中，隨機選取並測量符合樣本條件之車輛其通過測點時之 A 加權最大噪音量 (L_{Amax}) 及車速，再以迴歸分析求取各車型組之間噪音量與車速之關係。為方便針對不同鋪面形式進行比較，通常以規範中提供之基準車速值 (reference speeds) 在迴歸線上所對應之噪音量為各車型組之噪音量並進行比較。現場配置示意圖如圖 2.3 所示。其量測程序如下：

(1) 噪音計的位置：

噪音計架設位置距離欲量測車輛所行駛之車道中心線為 7.5 ± 0.1 m，而噪音計距離路面高度為 1.2 ± 0.1 m。

(2) 噪音等級測量法：

量測通過車輛之 L_{Amax} ，並採用時間加權 F。

(3) 測量頻率範圍：

建議將三分之八度音頻 (One-third-octave band frequency spectra) 一併納入量測。其時間權衡應該與噪音量測一致，噪音頻譜由車輛通過時之噪音量最大值取得。

(4) 車速量測：

量測車輛中心點通過噪音計時之速度。若由路側以雷射測速，測得速度將會較真實車速低，此部分應予以校正。

(5) 溫度量測：

溫度測量必須持續至少 15 秒，若無法連續監測，則應每隔 15 分鐘量測一次，感應器不可受屏障阻擋，且盡可能接近測試表面；另可藉由使用遮陽板解決感應器暴露陽光

直射下的情況。感應器應置於距道路表面 1~1.5 m 處，使道路表面氣流造成的影響降到最低。路面溫度感應器應放置於能代表輪胎軌跡溫度的地方，並且以不妨礙噪音量測為原則。

由於本法係以大量樣本數進行迴歸分析，故因車型、車種或車胎所造成之系統差異，假設為可於統計平均過程中被除去。此外由於量測距離、高度及所用車速均為一致，故其餘系統差異亦可被除去，因此鋪面形式所造成之噪音差異可被獨立突顯。本法亦經多項研究結果確認具有高度重複性，且誤差值僅在 1.0 dB(A) 以內。

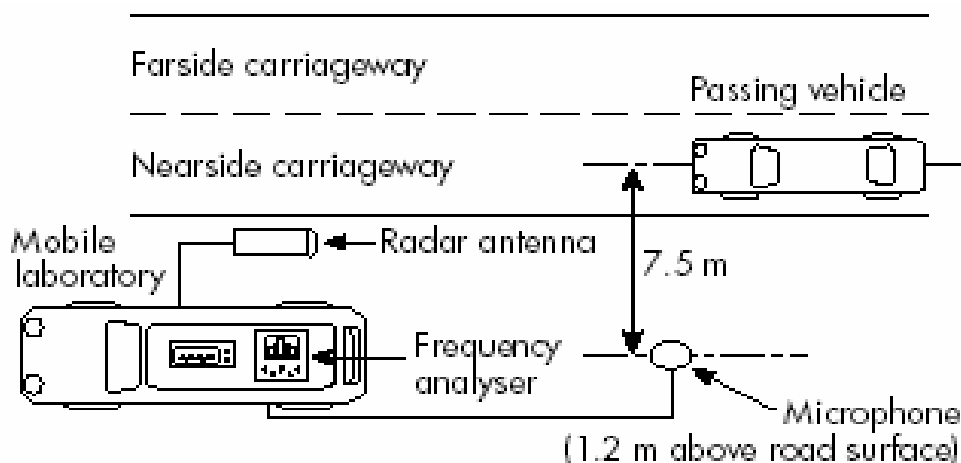


圖 2.3 SPB 法現場配置示意圖【31】

2. CPX 法

CPX 法全名為 Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: Close-proximity method，係以直接量測車胎鋪面音之方式瞭解鋪面形式對公路交通噪音之影響。本法採用特殊形式之有罩式無動力單輪拖車，蓬罩內部鋪有吸音材質，且於蓬罩內距車輪約 20 cm (8 in)、離地約 10 cm (4 in) 處架設兩支麥克風，以確保車胎鋪面音為量測所得之唯一聲響（如圖 2.4 及圖 2.5 所示）。



圖 2.4 CPX 法蓬罩式拖車配置【34】



圖 2.5 CPX 法蓬罩式拖車內部配置實例【34】

2.3 鋪面紋理分類與量測方式

2.3.1 紋理分類

Plotkin 等人（1980）【29】指出由於不同波長之鋪面紋理對於行車安全性、舒適性及噪音量皆有不同的影響，因此世界道路協會（World Road Association）PIARC（Permanent International

Association of Road Congresses) 組織之鋪面特性技術委員會以鋪面紋理波長之範圍將鋪面紋理分為四類，如表 2.1。

表 2.1 PIARC 鋪面紋理分類

鋪面紋理波長	分 類
< 0.5 mm	微紋理 (microtexture)
0.5~50 mm	粗紋理 (macrotexture)
50~500 mm	巨紋理 (megatexture)
0.5~50 m	粗 糙 (roughness)

「微紋理」通常與骨材表面之細微粗糙或水泥混凝土鋪面之細小紋理有關，其可提供車胎與鋪面基本之黏滯力，但數量不大，因此僅與低速行駛且鋪面乾燥狀況下之抗滑力有關。「粗紋理」則約略與骨材顆粒尺寸或水泥混凝土施以掃紋後所呈現之粗糙程度類似，其可在鋪面表面形成微型溝渠而協助鋪面排水，同時可使車胎在煞車時產生變形而消耗部分能量，因此對高速行駛下之鋪面抗滑性有關。至於「巨紋理」則與車胎鋪面接觸面之尺寸類似，較大振幅之巨紋理通常易造成行車不舒適、車輛磨耗及較大噪音等負面影響。國際標準組織 (ISO) 在綜合許多研究成果後，進一步提出此四類紋理對行車舒適性、安全性及噪音之影響 (如圖 2.6 所示)。

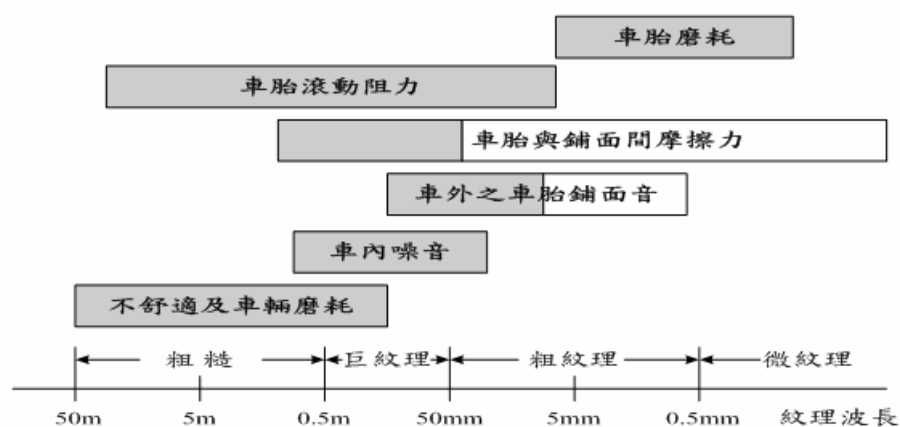


圖 2.6 紋理對行車舒適性、安全性及噪音之影響

上圖所示與先前討論大致相同，即「微紋理」對增加車胎與地面摩擦力（即對行車安全）有所助益，但與公路噪音無明顯關連性；而「粗紋理」與「巨紋理」則在噪音之產生及行車安全均扮演相當重要角色，尤其於粗紋理部份，波長於 5 mm 以下的粗紋理對於降低車胎鋪面音具正面效益；至於鋪面紋理達不平整之粗糙程度時，對行車則完全是負面效應。

2.3.2 鋪面型式對噪音之影響

由先前之討論可知鋪面型式對於車胎鋪面音量具有一定的影響程度，一般公路鋪面大致可分為瀝青混凝土路面與鋼筋混凝土路面，兩者各具有不同因素影響車胎鋪面音的產生，故以下針對二者加以討論。

1. 瀝青混凝土路面（柔性路面）

Kragh (1990) 【27】曾針對八處不同之柔性鋪面進行噪音量及頻譜之研究，發現開放級配瀝青混凝土較密級配瀝青混凝土約安靜 1 dB(A)，經由頻譜分析發現噪音量與頻譜隨著鋪面形式改變有關，亦即鋪面紋理改變將導致振動與傳播特質改變進而改變噪音量。Fujikawa 等人 (2005) 【21】也提出相似論點，認為路面之粗糙程度於車胎鋪面音的產生扮演重要角色。Heystraeten (1990) 【23】等人指出排水性瀝青混凝土鋪面 (PA) 的吸音性較密級配瀝青混凝土鋪面佳，主要原因為排水性路面具有大量連通之孔隙，可達到噪音降低效果。Fujiwara (2005) 【22】等人之研究發現多孔性彈性路面在減低噪音的效果更優於排水性路面，其降低之音量約為 5 dB。由此可見，柔性鋪面之車胎鋪面音主要取決於鋪面孔隙的多寡與連通性及鋪面紋理的差異。

2. 鋼筋混凝土路面（剛性路面）

鋼筋混凝土路面之車胎鋪面音則與鋪面之掃紋型式有關。科羅拉多交通局（1979）【19】針對九種不同掃、鋸紋類型的剛性路面進行研究，發現縱向掃紋鋪面之噪音量較低，而橫向掃紋鋪面具有較佳抗滑性，但噪音量較高。掃紋間距與噪音之頻率也有所關連，且掃紋間距應加以安排，以免導致用路人不適。Billera 等人（1996）【16】也針對剛性路面進行相關研究，發現具橫向掃紋之剛性路面產生之主要頻率接近 1 kHz，為易於被人耳接收之頻率區域，亦指出剛性鋪面掃紋使噪音量較瀝青混凝土鋪面高約 5 dB(A)。Kuemmel 等人（1997）【28】提出掃紋最佳間距為 10~40 mm，呈任意變化且有 50% 以上間距小於 25 mm 之隨機掃紋鋪面最為安靜。綜上所述，在剛性路面部份，掃、鋸紋之間距、方向等將會是影響鋪面噪音特性之主要因素。

2.3.3 量測方式與儀器

1. 鋪面紋理深度

鋪面表面之「微紋理」及「粗紋理」為必然存在的鋪面紋理，而「巨紋理」及「粗糙」則為影響公路路面服務性最關鍵之因素，二者將直接影響用路者對於道路平坦度之感受，因此與平整度相關之「巨紋理」及「粗糙」才是受關注之重點，並針對這些較大波長之鋪面不平整程度建立許多相關量測儀器、方法及指標，儀器方面如：三米直規、粗糙儀及各種機械式或雷射式平坦儀，而指標則如：國際糙度指標（International Roughness Index, IRI）。至於「粗紋理」及「微紋理」之量測，則因長久以來未受重視而無實質發展，目前最常被採用的方法為 ASTM E965 之「鋪砂法（sane patch method）」，此外亦有以應用雷射技術製作之「雷射平坦儀

(laser profilometer)」進行量測紋理剖面圖(texture profile)。

(1) 鋪砂法

ASTM E965 之鋪砂法主要利用已知體積之標準砂平鋪於路面，量測鋪出之面積，在與體積進行計算，即可求得鋪面之平均紋理深度。其做法為沿測試車行進路徑車輪軌跡附近等間距取十點以上之檢測取樣點，將已知體積之潔淨圓形顆粒標準砂倒於已清除潔淨之乾燥鋪面上，盡量將標準砂大致成圓形抹開，使得標準砂嵌入鋪面紋理內，當所倒之砂已與鋪面切齊時，量測砂所涵蓋面積直徑平均值，如圖 2.7 鋪砂法示意圖，計算所展開之圓面積，由以下公式計算表面紋理深度：

$$T = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2-8)$$

其中

T 為厚度

V 為標準砂體積

D 為標準砂涵蓋之近似圓形面積範圍之平均直徑

經計算後，該區塊鋪面紋理之平均深度可由標準砂體積與展開面積之比值求得。

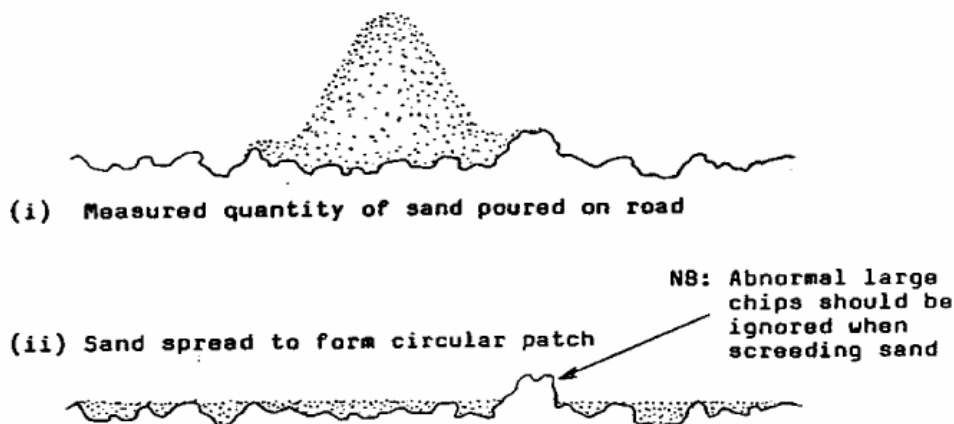


圖 2.7 鋪砂法示意圖【14】

(2) 雷射平坦儀

係利用雷射取得路面紋理資料，可直接量測並計算鋪面之平均斷面深度，通常與道路檢測車搭配使用，如交通部公路局所擁有之 ARAN 檢測車即載有此種裝備，而英國運輸道路實驗中心（TRL）開發之手提式雷射平坦儀量測系統長度僅有 1 m，攜帶及使用上均相當方便。

2. 鋪面透水性

透水量試驗主要為評估鋪面之透水能力，換言之即為檢測鋪面孔隙之連通性。試驗方法有日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」之現場透水量試驗法。此試驗之測量方式是由鋪面上約 177 cm^2 左右之表面積測定 400 ml 水量流過鋪面孔隙之時間，再換算出 15 秒可流過的水量即定義為該鋪面之透水量，測得之透水量數據亦視為鋪面之材料性質。試驗設備包括：透水儀、油性黏土及碼錶。其試驗步驟：

- (1) 將鋪面上雜物清除。
- (2) 將黏土製成直徑約 1 cm 並環繞於透水儀底部，其次將透水儀架設於試驗位置，加設環型重塊使得儀器底部與鋪面密合。
- (3) 於圓筒內加水至筒內水量超過水位記號 X_1 。
- (4) 打開閥門，以碼錶測定圓筒內水位自記號 X_1 降至記號 X_2 之時間。
- (5) 與測點周圍施作數次，將測得時間換算出 15 秒可流出之水量即為透水量。

2.4 鋪面吸音率量測

鋪面吸音率量測之標準方法有 ISO 13472-1 之延伸表面法，其全名為「Acoustics - Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 1 : Extended surface method」，透過

現場量測鋪面之吸音係數 (Sound absorption coefficient)，並以 250 Hz 至 4 kHz 頻譜之函數表示該鋪面之吸音率。

量測方法主要利用訊號產生器驅動置於鋪面試體上方之音源，另於音源及受測鋪面間放置一麥克風，藉由麥克風收到之訊號加以分析。其中接收之訊號可分為兩部份，一是來自直接路徑，由音源直接傳達至麥克風；另一部份則是來自受測鋪面反射之訊號。此二訊號可利用兩種方式加以分離：

1. 時域訊號分離技術：

將直接與反射訊號加入一個時間窗的作用，時間窗的目的在於濾掉反射波中之雜訊（如圖 2.8）。

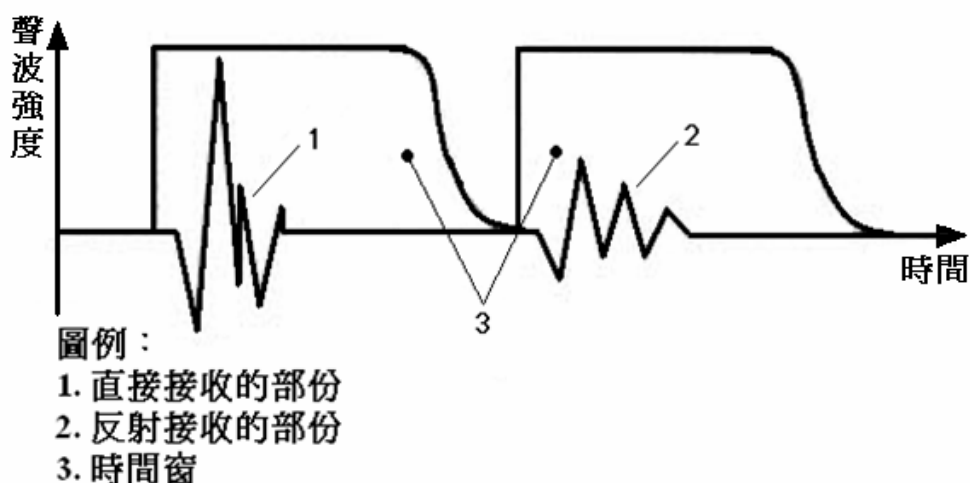


圖 2.8 直接與反射訊號以時間窗分離【26】

2. 訊號刪減技術：

擷取所有脈衝訊號之後，分離直接與反射路徑的訊號，再由相減一個自由音場的訊號，以取得直接路徑與反射路徑的脈衝訊號（如圖 2.9）。

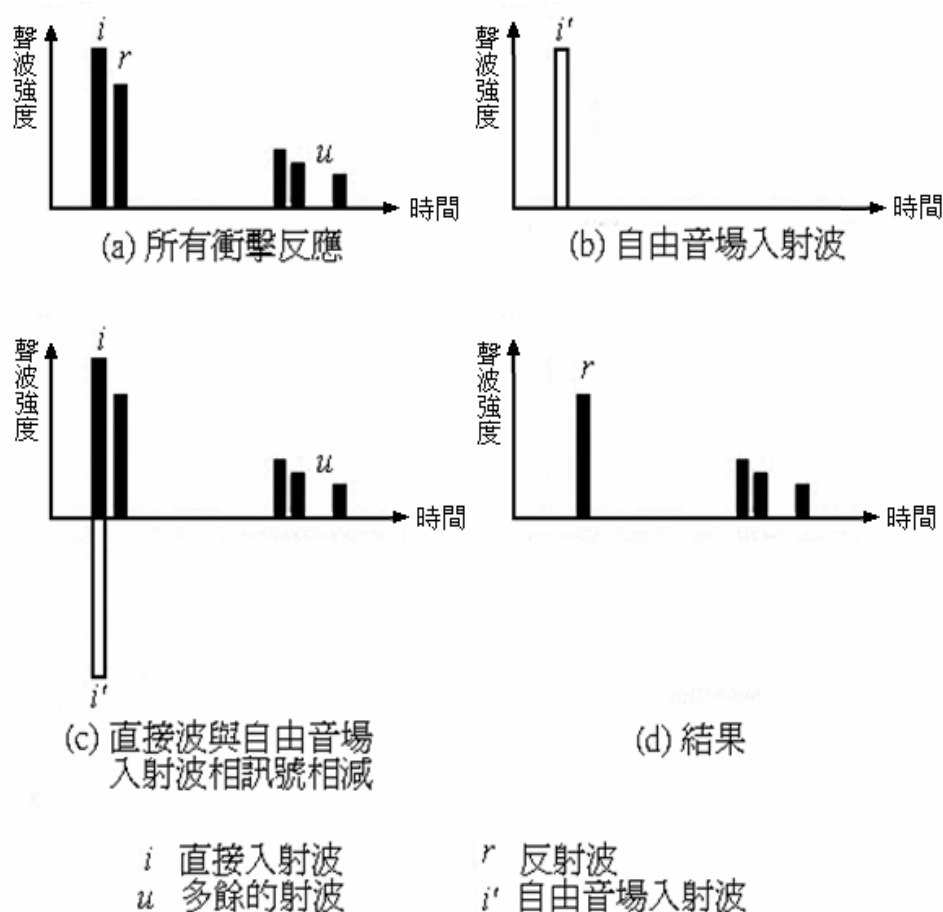


圖 2.9 訊號刪減技術原理【26】

利用上述分離技術對直接與反設訊號處理後，即可計算而得受測物體的吸音係數。

林文清（2004）【3】於道路鋪面吸音特性量測及降噪預估之研究中，即依據 ISO 13472 規範建立道路鋪面材料吸音特性之量測步驟，應用訊號刪減技術分離入射波與反射波訊號，透過快速傅利葉轉換作訊號處理，計算出道路鋪面之吸音率。該研究以瀝青混凝土鋪面、剛性鋪面與紅磚人行道表面為主要的吸音率量測對象，該研究量測結果：瀝青混凝土鋪面之吸音係數 $\alpha = 0.09$ 、剛性鋪面之 $\alpha = 0.23$ ，而人行道紅磚表面 $\alpha = 0.20$ 。

2.5 鋪面老化對於公路噪音之影響

2.5.1 鋪面老化之原因

瀝青混凝土老化主要經由溫度及壓力反覆作用下產生瀝青膠泥硬化的現象，亦可藉由瀝青基本物性變化及瀝青混凝土之力學行為以推估瀝青混凝土老化的程度。瀝青混凝土之老化行為可分為短期與長期兩階段。加熱拌合過程中，瀝青膠泥產生短期的老化現象，主要來自於瀝青材料中輕質碳氫成份之揮發；而長期的老化現象，則是來自瀝青的氧化作用。

1. 短期老化

短期老化是指瀝青於拌合過程中經高溫及高度暴露於空氣中因氧化及揮發性物質損失造成的老化現象，會因拌合型式與拌合過程中的溫度及時間等因素而具有不同的老化程度。張兆斌（2003）【9】也提出溫度越高、時間越長，氧化作用和揮發的損失將愈劇烈，老化程度也愈大。

2. 長期老化

Chiu 等人（1994）【17】指出長期老化主要為氧化作用所控制，公路開放通車後，瀝青於空隙含量較低之環境中以較緩慢的速率繼續老化，其速率依混凝土的瀝青含量、交通量造成孔隙率變化及鋪面所在處的環境、溫度、深度及時間而定。Mirza 與 Witczak（1995）【30】則指出愈接近表面，老化速率愈快。

2.5.2 老化對於公路噪音之影響

由華盛頓州運輸部門【18】的研究評估因鋪面年齡導致車胎鋪面音的改變。剛開始時瀝青路面比波特蘭混凝土路面安靜，但瀝青路面之噪音等級隨時間而增加之增量較大。瀝青路面之噪音

等級隨時間增加的原因可能是路面孔隙受到堵塞，造成吸音特質消失。其他噪音等級增加的原因為交通荷重導致硬度增加。終於，如瀝青表面隨時間磨損，粗糙的混凝土暴露導致噪音增加。

同樣由華盛頓運輸部門之研究，混凝土路面於開放通車的前八年，其噪音等級會隨著時間而減低。經過八年以後，混凝土路面之噪音等級將呈現逐漸增加之趨勢。此一情況之發生，主要原因與鋪面上之掃紋有所關係，當剛性路面近完工時，於鋪面上施以掃紋以增加路面之摩擦力。在前八年的期間內，由於掃紋逐漸消失以至於鋪面逐漸平滑，使得噪音等級減少。經歷約八年通車之後，因磨損導致混凝土暴露，造成表面紋理較為粗糙且噪音量也轉為增加。



第三章 研究方法

於本章節中將由「現場實測」與「實驗模擬」兩方面分別就車胎鋪面音、鋪面吸音率之量測以及鋪面特性等相關因子加以定義，並針對量測目的、量測原理、量測方式、作業流程、所使用儀器、相關設定及資料處理等加以說明。

3.1 車胎鋪面音之量測

3.1.1 量測定義與原理

本研究依據 ISO 11819-1 之 SPB 法規範針對高速公路鋪面音進行量測，其定義與原理如下說明：

1. 定義

(1) 交通噪音：

車輛於公路上行駛產生之噪音的放射。

(2) 車輛噪音：

車輛行駛時，由引擎運轉以及輪胎與路面上產生的噪音所組成。

(3) 輪胎與路面的噪音：

輪胎與路面交互作用下所產生的噪音。

(4) 引擎的噪音：

經由車輛引擎運轉、排氣系統、空調、風扇、傳送軸等產生噪音。

(5) SPB 方法：

此方式用於測定不同路面下之交通狀況下產生之車輛噪音與交通噪音，藉由蒐集大量正常車流下之車輛行駛噪音資料，再以正規化方式計算出基準車速對應之噪音量。

(6) 道路速度分類：

車流之速度分為低、中、高速三類，分類通常與道路之功

能性有關。中速道路之平均運作速度介於 65~99 km/hr 之間，此種條件通常在郊區或高速公路出現。

(7) 車輛分類：

車輛分類依車流中之車輛的共同特徵（如車輛之軸數、尺寸等）加以分類，並假設具有共同特徵之車輛在相同運行狀況下所產生之噪音大致相同。本研究將車輛分為三類：

車種 1：小型汽車，在此僅指一般小客車；

車種 2：雙軸重車，指卡車、巴士和公車等具有雙軸且超過四個輪胎者；

車種 3：多軸重車，指卡車、巴士和公車至少三軸以上且超過四個輪胎者。

(8) 最大音量等級：

在使用適當頻率加權與時間加權下選擇不受其他車輛影響之單一車輛加以測量噪音位準。

(9) 車輛音量等級：

由 L_{Amax} 對應車速對數值之迴歸線上，利用參考速度對應出之 L_{Amax} 值。

(10) SPBI：

噪音指數是基於車輛車種噪音值及基準車速加以混合計算得鋪面之混合車型交通噪音指數。

(11) 基準鋪面：

基準鋪面依本規範之規則選取其噪音修正值為 0 dB，其餘鋪面以差值表示。主要目的在於比較不同路面與其噪音等級的差異，將各路段所測出來之值與基準鋪面值比較，可瞭解於噪音上之差距。

(12) 吸音性路面：

指可吸收相當數量入射音之道路鋪面或地表，例如：吸音性路面、多孔隙鋪面及被草、藤蔓等植物覆蓋的鋪面。

2. 測量原理

於選定之路段旁，以噪音計量測足夠數量且為有效樣本之車輛通過時的 L_{Amax} 及車速，並依車輛類型加以分類，將分類後之資料將噪音量 L_{Amax} 與車速進行迴歸分析以找尋其中之關係。由求得之迴歸線可知，平均加權音量等級決定於參考速度，這個等級稱為車輛音量等級 (L_{veh})。另為比較各路面的差異，將三種車型之 L_{veh} 依 (假設) 車型數之比例以加權方式計算 SPBI。

3.1.2 測點選擇

考量高速公路實際現況，測點選擇儘可能依照 ISO 11819-1 SPB 法之規範挑選，以下幾點為選址考量原則：

1. 涵蓋高速公路現有之不同道路鋪面形式，且具有興建鋪面或保養時間等相關資料之路段。
2. 量測地點為避免背景音量及反射音的影響，以無其他交通或機械音之環境為佳，例如：道路旁無隔音牆、無建物，非路塹等路段。
3. 為車輛速度量測之便利，量測路段以接近直線者為佳。
4. 為求人員安全，測點以高速公路上具有避車彎處為佳。
5. 公路之縱坡度影響公路交通噪音值，由於縱坡度非本研究之變數，故選擇地點以小於 1% 之坡度為適當之測試路段。
6. 測試路段兩側若有路塹等障礙物，應距離噪音計至少 30 m。
7. 鋪面狀況應良好，無高低不平、裂縫、冒油、石頭過度鬆動或膨脹等現象。
8. 在測試路段應包含足夠數量的各車型，以取得足夠的樣本資料以供分析。

目前高速公路大部份的鋪面為厚度 1.5 cm 之 OGFC，近來相關單位亦曾嘗試過較厚的設計；而 PA 及 SMA 則為近來積極研究

推廣之鋪面型式，目前已有部分路段在翻修時改鋪 PA 或 SMA，國道一號及三號皆有 PA 或 SMA 小幅試鋪路段；至於 GA 則僅於國道三號新店高架橋路段之鋪面嘗試使用。

因不同型式瀝青混凝土鋪面之粒料級配架構、瀝青膠泥性質及含量等均不盡相同，其衍生出之瀝青混凝土亦因此具備不同結構強度及孔隙含量，加上施工困難度不同，故各型式之瀝青混凝土鋪面具有不同的吸音性質。

至於剛性鋪面之型式則主要為接縫式鋼筋混凝土鋪面（Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP），目前國道高速公路之剛性鋪面主要應用在收費站區域、交流道匝道路段及隧道段鋪面，另於北二高龍潭段、中二高民間收費站以南及南二高善化收費站以北等三處各有長約 9 km 之剛性鋪面路段。剛性鋪面之平整度直接影響其行駛舒適性及公路噪音量，此外剛性鋪面之表面處理方式（如橫向掃紋、縱向掃紋及拖紋等）亦對其噪音特性有所影響。

在測點選擇方面則由國工局提供高速公路各鋪面形式路段位置，經實地踏勘後，初步認定符合量測安全及周邊環境符合 ISO11819-1 規範後，使選擇該量測地點；至於量測時間之選擇則配合天候等因素，儘量符合量測規範之規定。然而在通車路段之養護陸續進行下，可能有部份路段車道翻新的情形，常有新舊鋪面間不平整之問題存在，導致車輛在變換車道時產生額外的聲響而影響量測結果，此問題雖存在但不易被發現，因此施測前之踏勘工作須儘量仔細。另在鋪面特性之調查時，為量測中央車道之鋪面特性，因此需高公局於實測時協助進行封閉車道、車流引導等交通維持措施。

3.1.3 量測使用儀器

本研究為取得有效車輛噪音位準等變數樣本，除使用車輛載送器材及足夠維持交通並維護安全之交通錐外，主要使用以下儀器及器材：噪音計、聲音位準測定計、氣象儀（包含溫度計、風向球、風速器）、攝影機、影帶、梯子、多組備用電池。為便利量測噪音位準及車速調查後之判讀，在實驗路面以粉筆或噴漆加以劃定位置及加深車輛通過點垂直線。

公路交通噪音測定儀器標準範圍的適當，對於噪音位準測定分析結果的代表性及取樣的方便性將有幫助。聲音位準測系統由聲音接收器（Microphone），聲音增幅及頻率加權器，位準顯示器三部份所構成。本研究採用符合國際電工委員會（International Electrotechnical Commission, IEC）TYPE I 規格之 Rion NL-31 與 NL-32 之精密型聲音位準測定計（圖 3.1），分別用於噪音與頻率之測量。測定儀器基準音校正程序，主要作用是在於使儀器接受訊號及處理衰減現象的調整。使之具一致性的效果；基準音之錄製，做為室內分析校正之依據。

本研究使用氣象儀取得風速、氣溫等資料，用以判定量測之噪音量是否受天候影響，倘超過標準，則該樣本屬無效，應予以捨棄，如實驗時段皆受天候影響而無法另行量測，則此量測資料應以於報告內標示。



Rion NL-31



Rion NL-32

圖 3.1 Rion 精密型噪音計

3.1.4 實測上考量

根據 ISO 11819-1 之 SPB 法規定，測點週遭環境應盡量避免護欄或其他可能造成聲音反射之物體存在，然我國高速公路路權範圍常受限於用地範圍而相對狹小，故路塹或路堤之坡度通常較為陡峭，且均裝設護欄以策安全，此點使得在選擇符合規範要求之測點時有相當難度。為盡量減少反射體之影響，本研究選擇以中間車道作為量測車道，以單一車道寬度 3.65 m 再加上路肩寬度 3 m 而言，足以達到規範所述「噪音計距離車道中心線 7.5 m」之規定，如圖 3.2 所示。如此一來，儀器可架設於路肩以減少架設上的困難度，且噪音計與欲量測之車道間無護欄影響量測結果，為盡可能避免影響量測結果之選擇。測點之選擇則儘量挑選具有警用避車彎處，然對部分特殊之鋪面路段而言，倘無警用避車彎之設置，則測點係位於距離路側護欄僅約 1 m 之路肩，實屬不得已之選擇。而除鋪面需為選定之型式外，為有效比較鋪面型式之

影響，測點周遭環境亦應盡量維持一致，因此量測地點之區位選擇尚須注意鄰近路段之坡度、有無伸縮縫、交流道、顯著裂縫或不平整等可能影響噪音量測之因子存在。

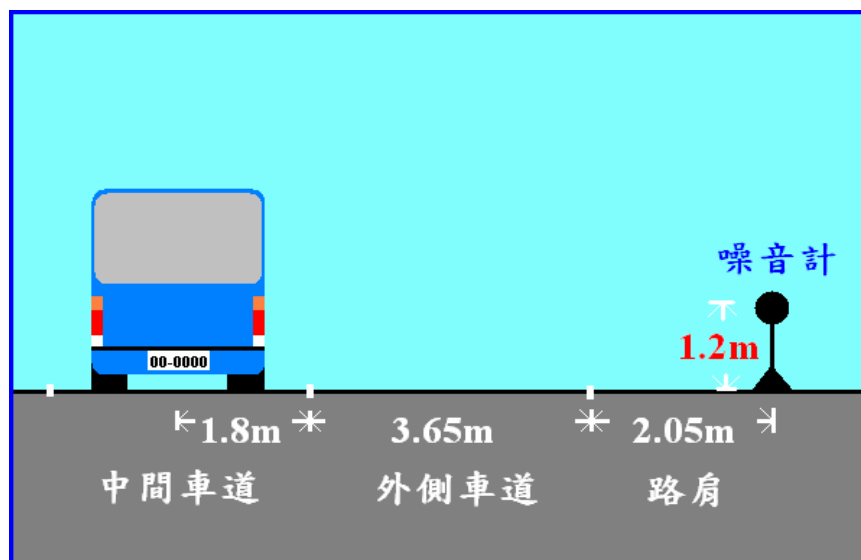


圖 3.2 實測現場示意圖

另於規範中規定量測車輛通過測點時之瞬間速度，因設備之限制無法順利測得瞬間速度。因此本研究中假設車流為穩定情況，車輛之平均速度與瞬間速度相近，且接近定速，故採用車輛通過測點附近之平均速度取代瞬間速度。平均車速之量測係於噪音計遠端擺設交通錐作為判讀記號，利用攝影機拍攝整個噪音量測過程，計算目標車輛行駛於遠端交通錐與噪音計之間所耗費時間，以兩點距離除以測得之通過時間即可求得平均速度。為降低時間量測之誤差，並兼顧可辨識性，交通錐以置於測點前方 150 m 處為原則，然由於各測點道路幾何狀況不同，部分測點遠端路線平曲線曲度較大，因此擺設距離略有變動以利判讀上之便利性。

3.1.5 現場量測程序

抵達測點後，首先擺置交通錐以分隔量測區域，並保護施測人員之安全，緊接著架設噪音計、攝影機及氣象儀等儀器，由於噪音的資料需要搭配該車輛之車速等變數方可進行分析，因此噪

音計與攝影機上記錄之時間必須先進行同步處理，以便於測量結束之後的資料處理步驟。現場測器材擺放位置如圖 3.3，而噪音計及氣象儀架設位置則如圖 3.4。



圖 3.3 交通維持及器材架設位置



圖 3.4 噪音計與氣象儀架設位置

3.1.6 噪音資料處理

採用 ISO 11819-1 之規定作為篩選有效樣本之依據，其主要內容如下所述：

1. 在預定測量的車輛前後通過者，其通過時的最大噪音 A 加權值必須與前後之噪音位準值相差至少超過 6 分貝。
2. 選擇目標車輛時，應避免有超車或有其他車道車輛，以免對量測結果造成影響。
3. 測量之目標車輛若有額外噪音產生者應予捨去。
4. 選擇穩定車速之車輛，行車軌跡偏離量測車道中心者亦排除。

為取得有效車輛之噪音位準，噪音計蒐集資料設定以每 0.1 秒紀錄一次，於各測點量測至少進行三小時，各測點累積之資料量相當龐大，且為符合 ISO 11819-1 之規定，即有效樣本須超過前後一秒測值 6 dB(A) 以上，故以自撰程式先行篩選噪音樣本，經程式篩出之樣本進一步就現場記錄影片之時間紀錄比對，找出行駛中間車道之車輛樣本，至此始獲得 ISO 11819-1 之有效樣本，此時並辨識各有效樣本對應之車輛種類。

ISO 11819-1 規定應量測車輛通過測點時之瞬間速度，由於設備之限制，無法順利測得瞬間速度。當車流在穩定狀態下，車輛之平均速度與瞬間速度相近，因此本研究假設車流為穩定情況，且車速接近定速，因而採用車輛通過測點附近之平均速度取代瞬間速度。平均車速之量測係於噪音計遠端擺設交通錐作為判讀記號，利用攝影機拍攝整個噪音量測過程，計算目標車輛行駛於遠端交通錐與噪音計之間所耗費時間，以兩點距離除以測得之通過時間即可求得平均速度。為降低時間量測之誤差，並兼顧可辨識性，交通錐置於測點上游 150 公尺處為原則，然由於各測點狀況不同，部分測點遠端路線平曲線曲度較大，因此擺設距離略有變動以策判讀上之便利。

依據前述所得通過中央車道之有效樣本，並計算出各目標車輛之平均速度後，再加以搭配氣象資料。氣象係與噪音同步監測，而儀器設定之最小監測頻率為每分鐘一次，與噪音資料頻率不同，因此亦須與有效樣本比對，始能逐一附記於有效樣本資料之後。上述過程相當繁瑣，須耗時費力始能完成，若儀器設備上可

以配合應不致如此。

取得各測點有效樣本後，即可針對各鋪面，依各車型組有效樣本對應噪音量（ L_{Amax} ）及車速對數值（ $\log V$ ）作圖，並計算迴歸式，並依據 ISO 11819-1 建議之「基準車速值（Reference speeds）」求取各車型組之「車種音量值（Vehicle sound levels）」。
另依據下式求取「混和車型交通噪音指數（Statistical Pass-By Index, SPBI）」

$$SPBI = 10 \log \left[W_1 \times 10^{L_1/10} + W_{2a} (v_1/v_{2a}) \times 10^{L_{2a}/10} + W_{2b} (v_1/v_{2b}) \times 10^{L_{2b}/10} \right] \quad (3-1)$$

其中

L_1 、 L_{2a} 及 L_{2b} 分別為小客車、雙軸及多軸重車之車種音量值。

W_1 、 W_{2a} 及 W_{2b} 分別為小客車、雙軸及多軸重車之權重值。

v_1 、 v_{2a} 及 v_{2b} 分別為小客車、雙軸及多軸重車之基準車速值。

參考速度及權重值如下表 3.1：

表 3.1 各分類車輛之參考速度及權重

車輛分類	參考速度 (km/h)	權重 (w_x)
小汽車	110	0.7
雙軸重車	85	0.075
多軸重車	85	0.225

3.2 鋪面特性之量測

針對鋪面特性之資料蒐集，本研究採用透水性試驗、鋪砂法與密度試驗三種試驗方式以瞭解各測點鋪面資料特性。因此部份量測之目標為中間車道，故進行試驗之前須先聯絡高公局主管工務段協助封閉中間及內側車道，並引導車流以便試驗；由麥克風架設點垂直對至中央車道輪跡處作為實測地點，並於測點前後 10 m 處再分別施作一次，共計於同一測點施作三處。

3.2.1 透水量試驗

鋪面透水量試驗依據日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」之現場透水量試驗法進行量測，利用透水儀進行測量，所需儀器如圖 3.5 所示。進行透水量試驗前，需先清理施測地點之鋪面表面；於儀器底部以條狀黏土環繞黏牢，將儀器放置測點上，並加上環形重塊施力壓緊，使儀器底部之黏土與鋪面密合，避免水自儀器與鋪面間之縫隙流出。將水倒入圓筒中並超過筒身上 X_1 記號；打開底部閥門使水流入鋪面中，測量水位自 X_1 降至 X_2 之時間，試驗後如圖 3.6 所示。於同一測點共重複施作三處，取平均時間，以計算該測點鋪面之 15 秒透水量。計算方式由測得之平均透水時間 $T(\text{sec})$ ，代入下列公式，求出之數值即代表鋪面之 15 秒透水量。

$$\text{透水量 (ml/15sec)} = (400 \text{ ml}/T) \times 15 \quad (3-2)$$

施作時須確實檢視所有水流係由儀器覆蓋鋪面下流出，而非於儀器與鋪面間縫隙流出，如圖 3.7，若出現此現象應立即終止該實驗。



圖 3.5 透水量試驗所需器材



圖 3.6 透水量測點試驗後之情形



圖 3.7 水由儀器與鋪面間縫隙流出

3.2.2 鋪砂法

鋪砂法試驗過程中，為避免鄰近車道通過之車輛所造成瞬間風速過大而將實驗砂吹開導致影響量測結果，故施作時設有屏障予以阻隔風的影響（如圖 3.8）。將標準砂倒在車道輪跡處平鋪成一個均勻的圓形，使得標準砂嵌入鋪面紋理內（如圖 3.9）。當標準砂與鋪面切齊時，量測此圓之直徑以求得圓面積，該區塊鋪面紋理之平均深度可由標準砂體積與展開面積之比值求得。



圖 3.8 使用屏風避免標準砂被吹開



圖 3.9 鋪砂法完成之圓面積

ASTM E965 建議圓之平均直徑宜小於 12 in. (約 305 mm)，根據試調結果判斷，本研究採用 100 克標準砂為施作一次鋪砂法的使用量。經由鋪砂法測得之各圓之直徑並加以平均，可求出平均圓面積，再將已知 100 克標準砂之平均體積 (50.1 cm^3) 除以平均圓面積，即可求得各鋪面之平均紋理深度。

實際施作鋪砂法過程中發現「圓」不易達成，且位於邊緣之標準砂的範圍不易精確，故在量取直徑時之讀數僅精確至 0.5 cm，因此本法在準確性上仍值得探討。此外，鋪砂法應在連續晴天的情況下施作，若前一日降雨，易發生表面已呈現乾燥狀態，但鋪面內部仍含水分之情形；若是如此，內部水分極易於施作時經毛細現象上升至面層，造成面層之標準砂潮溼而不易鋪平。如

圖 3.10。



圖 3.10路面潮溼毛細現象而不易鋪平

3.2.3 密度試驗

密度試驗部份採用電磁式密度儀 TROXLER Model 2701 PaveTracker (圖 3.11) 進行鋪面密度量測，其利用單位體積中化學組成不同時，具有不同導電特性的原理，隨瀝青混凝土單位體積中組成的不同，導電性也將隨之改變，藉此量測出鋪面之密度。操作上需先將儀器進行校正，校正後將儀器置於測點鋪面上判讀機器本身量出之數據即可。在量測過程中，於各測點之三處測試點分別將機器以四個方位擺放，共可測得 12 筆密度數據，將其加以平均後之數值視為測點之鋪面密度值。

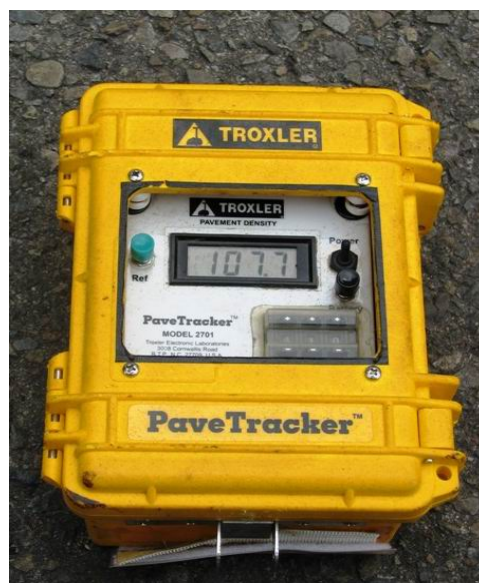


圖 3.11 密度試驗儀

3.3 吸音率之量測

3.3.1 量測定義與原理

本研究依據 ISO 13472 之延伸表面法法規範針對鋪面試體進行吸音係數量測，其定義與原理如下說明：

(1) 入射角：

受測鋪面之垂直線與聲波入射線方向間之夾角。

(2) 音能反射因子 (Q_w)：

指由鋪面材料反射之音能比例。

(3) 吸音係數 (α)：

指進入受試體表面之音能與入射音能之比值。

$$\alpha = 1 - Q_w$$

(4) 音壓反射因子 (Q_p)：

指入射波與鋪面反射波振幅之複比值 (Complex ratio)。

(5) 幾何散布因子：

音壓之波動隨著傳播距離而衰減，且呈球狀散佈。

(6) 鋪面基準平面：

假設之平面垂直於多數的測試表面。

(7) 最大取樣面積：

包含受測面的表面，須保持無其他引起反射的物體。

(8) 背景音量：

非試驗音源傳來之噪音。

(9) 訊號噪音比：

有效訊號與背景噪音間於分貝上的差異。

(10) 衝擊反應：

對 Dirac 函數有所輸入時，系統的輸出端將出現時間訊號。

(11) 轉換函數：

衝擊反應的傅立葉轉換。

吸音率量測主要利用訊號產生器驅動置於鋪面試體上方之音源，並於音源及試體間放置一麥克風，量測佈置如圖 3.12 所示。

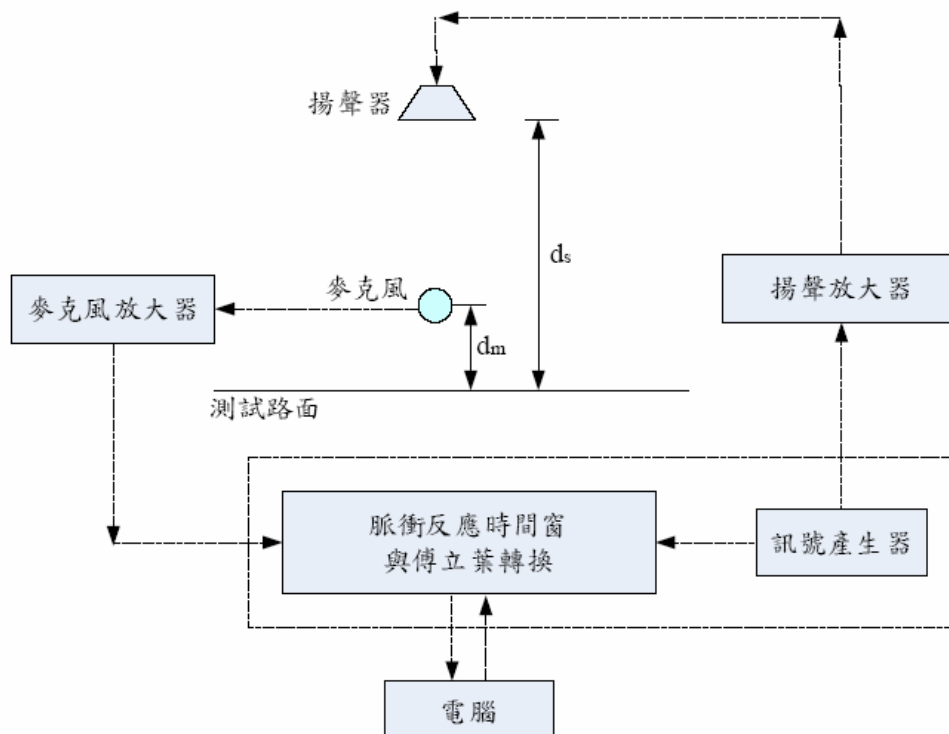


圖 3.12 吸音率量測佈置圖

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 $H_r(f)$ ，利用此二轉換函數，即可由 ISO 13472-1 來計算吸音係數。

吸音係數之算式為

$$\alpha(f) = 1 - Q_w(f) = 1 - \frac{1}{K_r^2} \left| \frac{H_r(f)}{H_i(f)} \right|^2 \quad (3-3)$$

式中

$Q_w(f)$ ：聲功率反射係數

K_r ：幾何傳播係數 ($K_r = \frac{d_s - d_m}{d_s + d_m}$)

d_s ：聲源到測試表面間之距離，一般取 1.25 m。

d_m ：麥克風到測試表面間之距離，一般取 0.25 m。

3.3.2 量測使用儀器

量測鋪面吸音特性所需器材大致可分為探測器、擴大機、電腦與電腦軟體四部份。探測器部份採用 Acoustics Engineering 公司生產之 Zircon (Loudspeaker-microphone Probe) 儀器。Zircon 為一套揚聲器探測器，用於量測物體表面對於聲音的吸收和反射特性，適用於音樂廳、體育館、道路表面和隔音牆等室內、外場地。Zircon 套件中包含 LS14 揚聲器本體外，尚有 DPA 4060-B 麥克風、麥克風支架、線組與腳架等。另為能推動 Zircon 中之揚聲器，另準備 Audio King 公司生產之 TH-200 Pro 擴大機，以提供充足訊號予揚聲器使用。

量測所需聲音訊號來源則由電腦軟體提供，本研究採用 Acoustics Engineering 公司之 Dirac (Dual Input Room Acoustics Calculator) 軟體與 Zircon 吸音率測定設備作搭配。Dirac 內備有

能量測所需之訊號，包含 MLS、lin-Sweep、e-Sweep 等訊號源，並可針對麥克風接收之訊號進行運算，求出受測試體於聲學特性上之相關數據。



圖 3.13 Zircon 揚聲器探測器

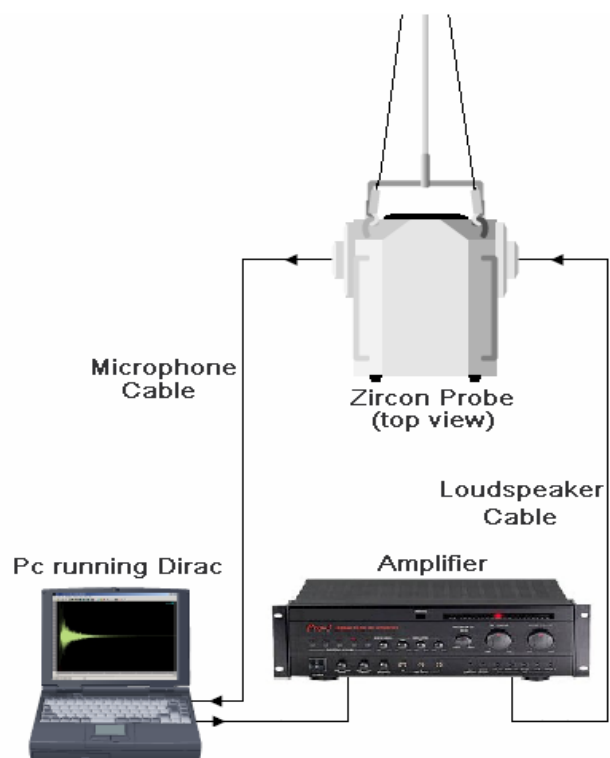


圖 3.14 吸音率測量儀器連接示意圖



圖 3.15 吸音率測量現場配置圖

吸音率量測之主要目的為找出鋪面吸音係數，故利用上述儀器之搭配，由電腦軟體送出 MLS 訊號，經擴大機傳送至揚聲器，朝著受測試體發出聲響，再由麥克風接收直接與反射訊號後，回傳至電腦中，利用訊號刪減技術針對直接與反射訊號進行相減後，Dirac 即可計算出試體對於訊號之反射率。當聲功率反射係數求出後，即可利用兩者間之關係式：吸音率 $\alpha = 1 - Q_w$ ，計算出鋪面試體之吸音率。

在此測得之鋪面試體吸音率為 250~4000 Hz 間各頻帶之吸音率，為簡略描述物體之吸音特性，一般常用平均吸音係數（Noise Reduction Coefficient, NRC），作為材料的吸音率指標，以 250、500、1 k、2 kHz 等 4 個頻率的吸音係數加以平均，作為該物體之吸音性質代表，其計算方式如下：

$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1k} + \alpha_{2k})}{4} \quad (3-4)$$

其中

α_{250} ：受測物體於 250 Hz 頻率之吸音率。

α_{500} ：受測物體於 500 Hz 頻率之吸音率。

α_{1k} ：受測物體於 1k Hz 頻率之吸音率。

α_{2k} ：受測物體於 2k Hz 頻率之吸音率。

3.3.3 現場量測程序

量測過程中，依照說明書指示將架設儀器架設完成，再針對 Dirac 軟體進行設定（如圖 3.16），其中訊號源採用 MLS 訊號，過濾器採用 Pink+Blue，訊號長度為 0.34 秒，Pre-Average 設定為 20 次進行測量。

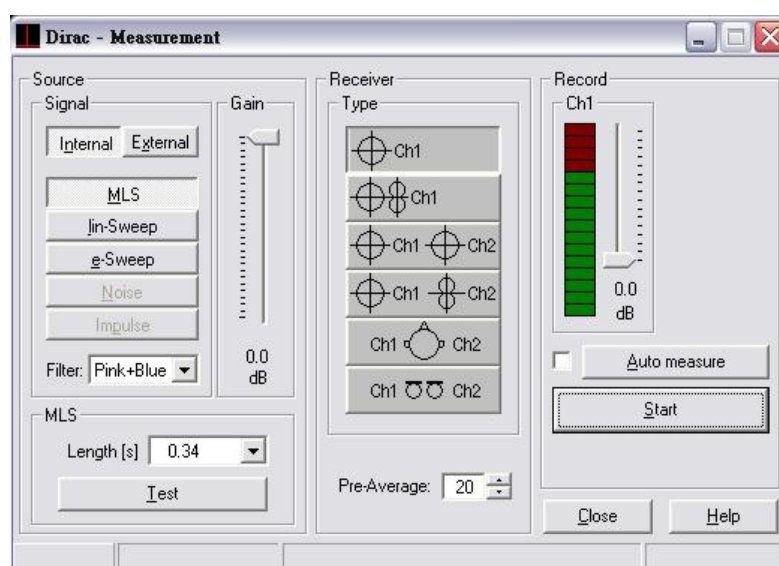


圖 3.16 Dirac 軟體量測設定

量測過程需先於自由音場狀態下先進行一次測量，作為參考基準值，供後續訊號刪減步驟使用。再將試體置於規範所訂之位置（距離喇叭 1.25 m、麥克風 0.25 m）進行測量，對於每一試體之兩平面上各選 5 個點，分別量測 5 次，共計於同一試體可測得 50 筆反射率數據。針對試體量測之結果如圖 3.17 所示，再利用訊號刪減技術，依據測得之波形進行時間窗（Time Window）之設定後（如圖 3.19），即可依靠 Dirac 軟體計算出受測試體於各頻帶的的聲功率反射係數（ Q_w ），如圖 3.20 所示，反射係數求出後即可換算出試體之吸音係數。

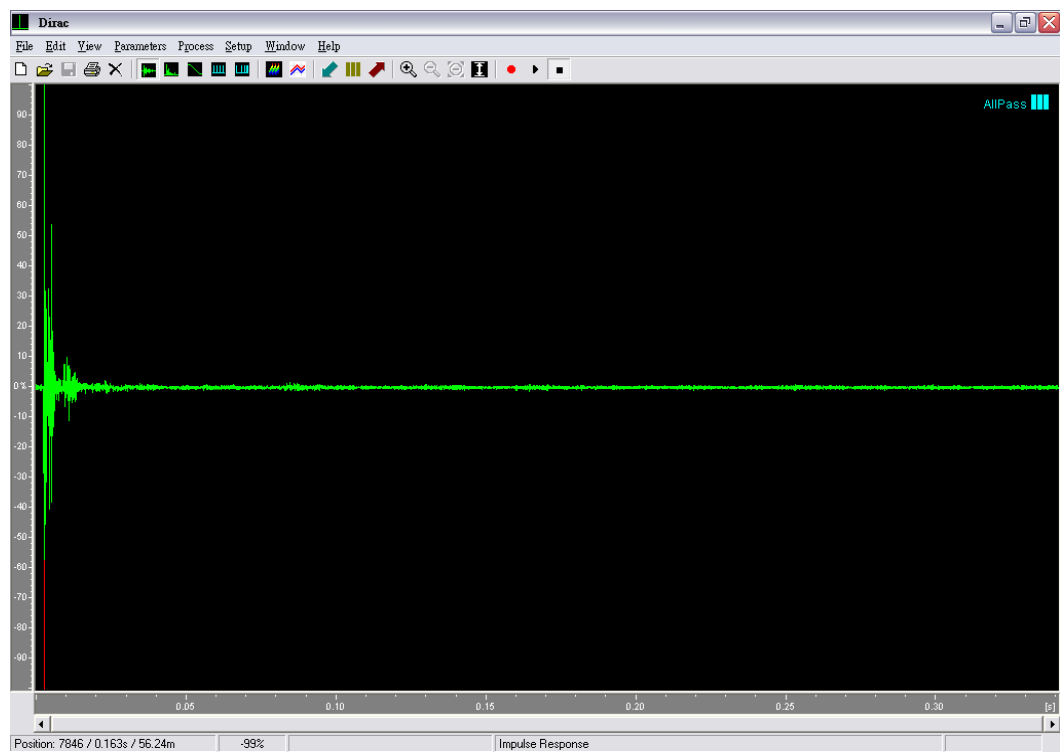


圖 3.17 鋪面試體量測結果

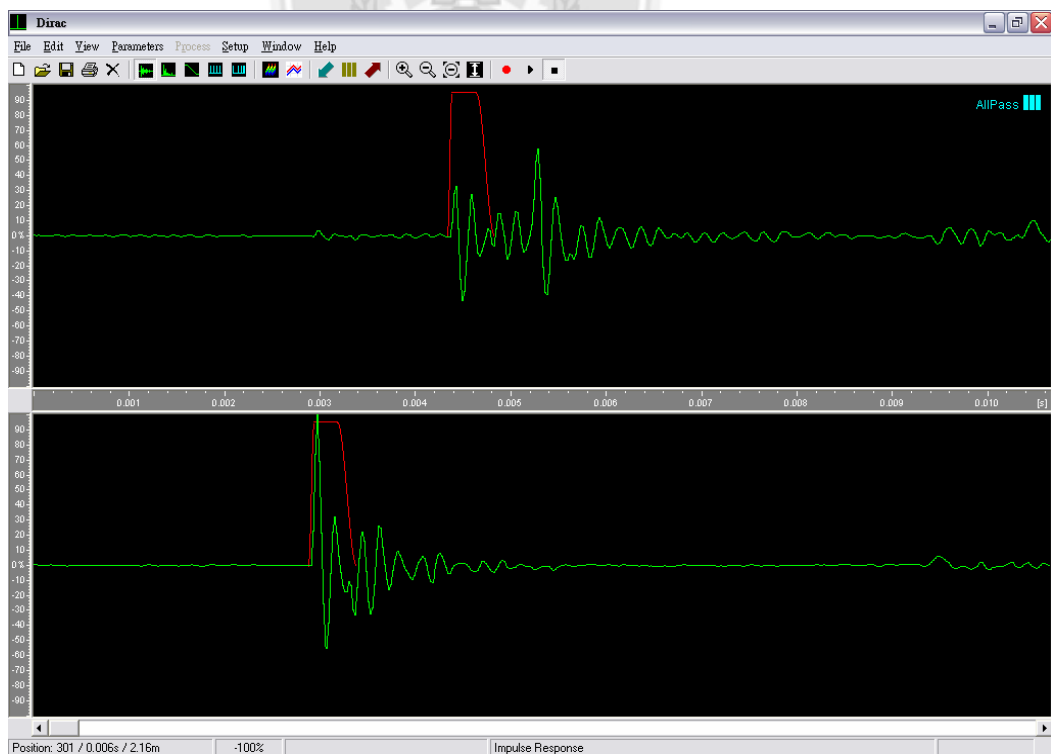


圖 3.18 訊號刪減技術

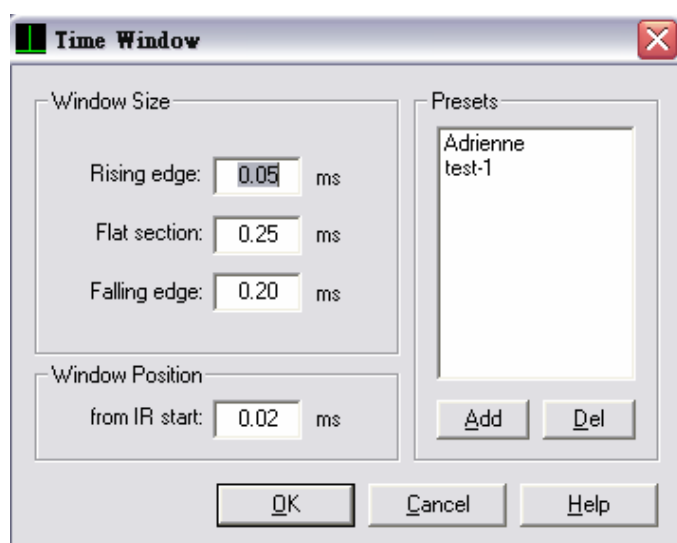


圖 3.19 時間窗設定

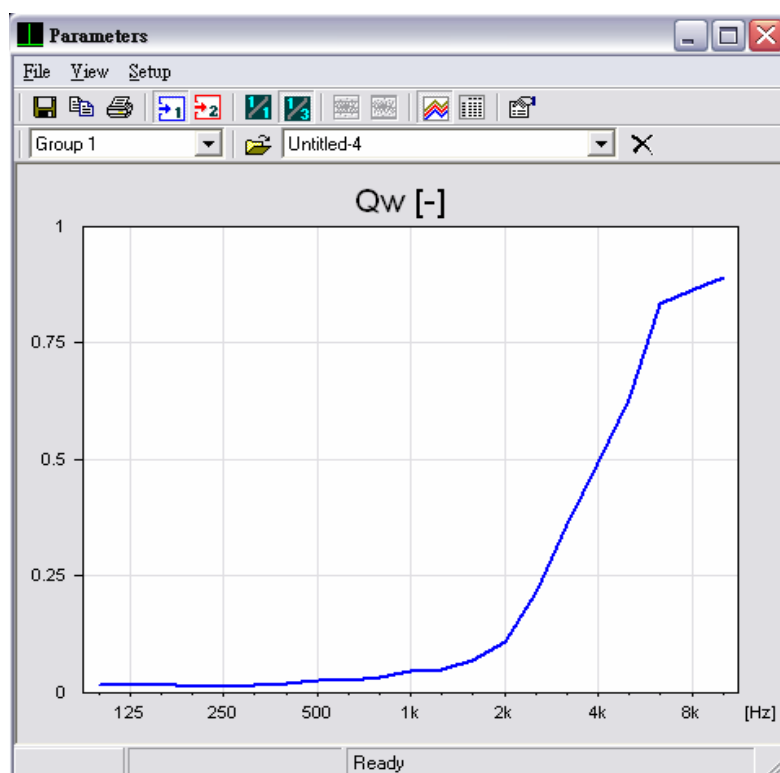


圖 3.20 鋪面試體各頻帶反射率

3.3.4 量測上考量

在正式進行吸音率量測之前，先行利用六組試作之 SGC 試體進行吸音調查的試測，除熟悉儀器的使用並尋找操作上是否有問題之外，另可預先瞭解後續實測中可能面臨之問題及相關參數之設定。

試測之過程中發現，發現當吸音率儀器指向試體不同位置時，測得之吸音率結果也不盡相同。推測此狀況之原因，可能因鋪面表面是由粒料、孔隙等共同組成，屬非均質平面；故在測定吸音率時，當喇叭的中心線對準粒料或者是孔隙時，其測得之吸音率也就有所不同。舉例來說，在試測過程中針對圖 3.21 之中 A 與 B 兩點分別進行量測，其中 A 點為孔隙、B 點為粒料，對兩點各量測 10 次，透過測得資料加以觀察，在相同一點測得之數據幾乎完全相同；但若將兩點所得數據分別加以平均（如圖 3.22 所示）後，由圖中可發現兩點於 2500 Hz 以下之吸音率幾乎相同，但在 2500 Hz 以上的高頻部份則出現明顯差異，屬於孔隙部份之 A 點其吸音率於高頻處較佳，而屬粒料部份之 B 點吸音率於高頻部份則稍差。



圖 3.21 SGC 試體

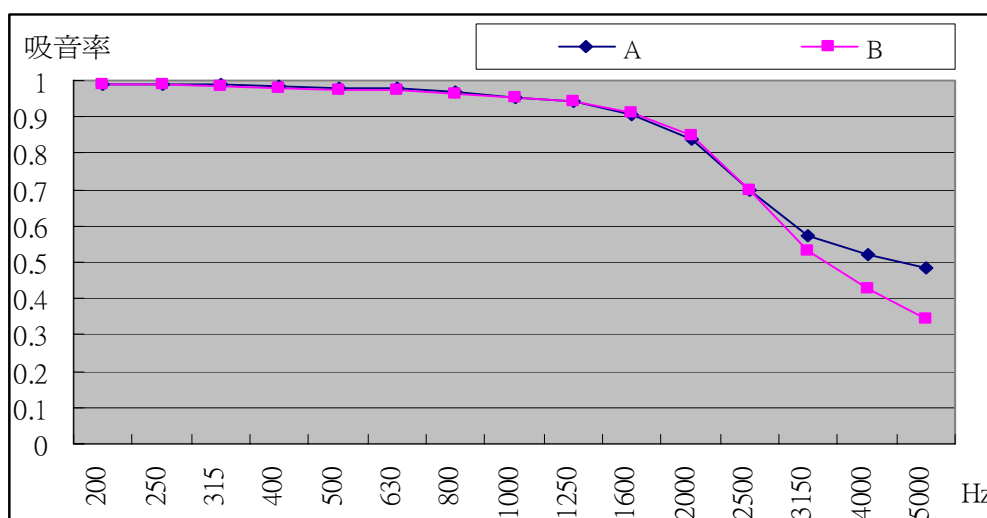


圖 3.22 吸音率試測成果

面對上述之狀況，為降低受到鋪面表面之粒料與孔隙等凹凸面對吸音率量測產生差異，故後續進行正試量測時，本研究採用對各試體之兩面各取 5 個點進行量測（如圖 3.23），每一點各量測 5 次，故每一試體共計可測得 50 筆吸音率數據，再取其平均值作為該試體之吸音率，以期可測得較平均之試體吸音率。

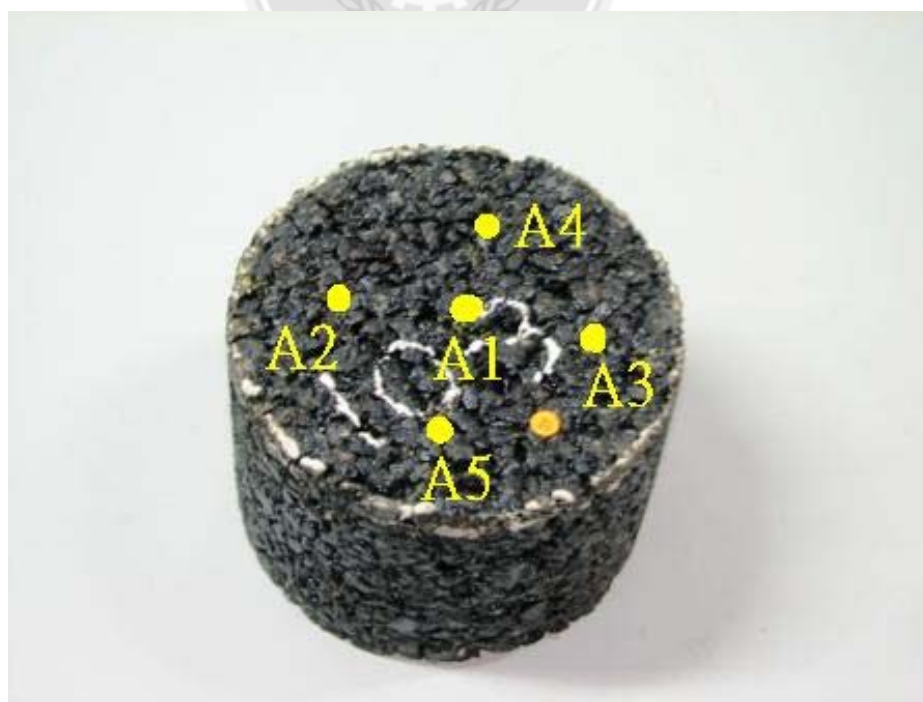


圖 3.23 試體測點分佈示意圖

3.4 模擬試驗

3.4.1 試體製作

針對鋪面吸音特性之調查，本研究利用旋轉式試驗儀（Superpave Gyrotory Compactor, SGC）製作瀝青混凝土試體。SGC 為 Superpave 配合設計中的一個重要部分，被設計用於壓實瀝青混凝土試體，使試體可模擬現場交通荷重作用下之密度。

SGC 由一壓實機、試體模具、加壓設備與模具底座所組成。拌合完成之瀝青混凝土試體，經過 135°C 老化 4 小時後，即可利用本壓實機製作試體。本試驗所使用壓實機為 TROXLER Model 4140 旋轉式壓實機，儀器如圖 3.24 所示，試驗設備包括：

1. 控制面板：包含了此壓實機的電子訊號控制與提供連接其他設備之界面。
2. 模具：包含一個插入的底蓋，尺寸有直徑 100 mm 與 150 mm 兩種，本試驗中採用直徑 150 mm 模具。
3. 頂樣器。
4. 印表機：提供列印資料，此外亦可外接電腦設備記錄。



圖 3.24 SGC 旋轉式試驗儀

於試體製作方面施做開放級配（OGFC）鋪面試體，試體所選用之瀝青膠泥與級配則盡量與國道高速公路相同。針對三種鋪面類型，再分別製作六種不同壓實程度之試體，用以代表鋪面於開放通車後不同服務齡期受到車輛壓實之現象。試體製作之步驟如下：

1. 試樣準備：製作一顆試體需粒料 3700 克，另準備一未壓實之混合料進行最大理論密度試驗，所需數量依粒料尺寸大小而異。
2. 利用黏滯度與溫度關係圖決定拌合及滾壓溫度。
3. 將粒料放入烘箱中預熱兩小時，溫度約高於拌合溫度 15°C ，於拌合前，將拌合設備一起放入烘箱加熱。
4. 試樣拌合：取適當之攪拌器，攪拌試樣至粒料完全包裹為止（約 60~90 秒）。
5. 將拌合完成之混合料置於淺盆內，鬆散之混合料厚度以 $21\sim 22\text{ kg/m}^2$ 為原則。放入 135°C 烘箱內進行 4 小時之短期老化。
6. 如試樣用於進行最大理論比重，老化完成後，即可進行。
7. 壓實試體前 30 分鐘將模具放入另一烘箱內預熱至滾壓溫度，並進行壓實機之各項設定。
8. 老化完成後，移入另一烘箱中至達滾壓溫度為止，但不可超過 30 分鐘。
9. 取出模具，放入一張試紙後，倒入混合料，整平頂部後，再放一張試紙。
10. 將模具移入壓實機內，並啟動壓實機進行壓實。
11. 壓實完成後，放置 5 分鐘後，再以頂樣器將試樣頂出。

3.4.2 試體物性調查

除針對各種級配與壓實設定之鋪面試體進行吸音特性調查外，另一方面對試體之透水性、比重及孔隙率等物理特性進行測量，主要為瞭解鋪面試體於各種壓實程度之性質變化。另與現場

實測數據進行比對，可瞭解試體於各種壓實狀況下所相對的實際鋪面開放齡期。

透水性試驗依據日本道路協會「鋪裝試驗法便覽」之現場透水量試驗法進行量測，量測步驟如 3.2.1 小節中所述。試體比重部份則包含最大理論比重試驗與虛比重試驗，用以測定比重與孔隙率。

1. 最大理論比重試驗

本試驗係依據 ASTM D-2041 之規範進行，主要目的在於測定 25°C 時鬆散瀝青混合物之最大理論密度。其試驗步驟如下：

- (1) 分離試樣中顆粒，冷卻至室溫，放入容器內秤其質量。試樣質量定為 W_1 ，注入 25°C 水掩蓋試樣。
- (2) 使容器內承受 30 mmHg 以下之真空 15 分鐘，以移除內部之空氣。每隔兩分鐘以機械設備連續或以手激烈振動容器。
- (3) 移除試樣內空氣後，將容器裝滿水稱其重量記為 W_3 ，移除容器內試樣再裝滿水後稱其重量記為 W_2 。

$$\text{最大理論密度} = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3} \quad (3-5)$$

其中

W_1 ：試樣在空氣中質量(g)

W_2 ：25°C 下容器裝滿水之質量(g)

W_3 ：25°C 下容器裝滿水與試樣之質量(g)

2. 虛比重試驗

本研究以飽和面乾法測定比重，試驗方法係依據 ASTM D-2726 之規範進行，主要目的在於測定 25°C 時壓實瀝青混合物之虛比重及密度。假設 G 為虛比重：

$$G = \frac{C}{A-B} \quad (3-6)$$

其中

A：試體飽和面乾重

B：試體水中重

C：試體乾重

孔隙率 (V_a) 代表壓實混合物中各瀝青包裹顆粒間之空隙，經由以上步驟求出最大理論比重與虛比重後，利用以下公式計算試體之孔隙率：

$$V_a = (1 - G_{mb}/G_{mm}) \times 100\% \quad (3-7)$$

式中

G_{mm} ：瀝青混合物之最大理論比重

G_{mb} ：瀝青混合物之虛比重



第四章 實測結果比較與分析

4.1 實測結果

本研究針對國道高速公路共計六種不同鋪面進行公路噪音與鋪面特性等量測，鋪面種類分別為通車齡期不等之縱向掃紋剛性鋪面（Rigid-O）、橫向掃紋剛性鋪面（Rigid-N）、開放級配鋪面（OGFC-O、OGFC-N）、改良式開放級配（OGFC-M）及排水性路面（Porous）。其中鋪面新舊差異主要以道路開放通車至今之使用時間與保養記錄加以區別，各測點鋪面之基本資料整理如表 4.1。鋪面齡期最久為國道三號北向 84k+540 處（OGFC-M）及北向 90k+100 處（OGFC-O）；若以保養或處理紀錄來看，經保養後齡期最久的則是國道三號北向 64K+800 處的剛性鋪面。縱坡度方面，最大的地點為國道三號北向 64K+800 處，為+0.82%，縱坡最小的地點為國道四號西向 7K+800 處，為 0.00%；而六處測點之縱坡度皆合乎 ISO 11819-1 規範之規定，於±1%範圍內。

表 4.1 各測點鋪面相關資料

測點位置	代號	現有鋪面型式	通車齡期	養護記錄	縱坡度
國三北向 64k+800	Rigid-O	剛性路面 (縱向掃紋)	12 年 4 個月	88 年	+0.82%
國三北向 84k+540	OGFC-M	改良式開放級配	12 年 5 個月	91 年	+0.40%
國三北向 90k+100	OGFC-O	傳統開放級配	12 年 5 個月	89 年	+0.73%
國三北向 132k+600	Porous	排水性瀝青 混凝土	2 年 11 個月	無	+0.67%
國三南向 233k+400	Rigid-N	剛性路面 (橫向掃紋)	4 年 1 個月	無	-0.50%
國四西向 7k+800	OGFC-N	開放級配	4 年 1 個月	無	0.00%

4.1.1 鋪面特性

鋪面特性調查部份，本研究針對 OGFC-O、OGFC-N、OGFC-M 與 Porous 四種瀝青混凝土鋪面進行量測，量測內容包含鋪面之密度、透水率及平均紋理深度，量測結果整理分別如表 4.2~表 4.4 所示。

鋪面密度採用電磁式密度儀於各測點施測所得之 12 筆數據加以平均而得；量測結果則以 OGFC-M 密度 2.220 g/cm^3 最高、而 OGFC-N 密度 1.731 g/cm^3 最低。鋪面透水性方面，由實測數據顯示 Porous 為四者中排水能力最佳；而 OGFC-O 之排水性最差。較特殊的是在 OGFC-O 點之第二次施作時，其排水所需時間為另兩點之四倍，可見得鋪面於長期使用後，排水效能減低之狀況。鋪面平均紋理深度主要受車胎長期磨損而減少，量測之結果顯示以 Porous 之平均紋理深度最深，而 OGFC-M 之平均紋理深度最淺。

表 4.2 各測點鋪面密度值

量測點		密度 (lb/ft^3)					平均 密度 (g/cm^3)
		方向 1	方向 2	方向 3	方向 4	平均	
國三北向 84k+500 (OGFC-M)	1	135.00	136.00	135.10	135.10	138.62	2.220
	2	141.50	142.60	141.20	141.10		
	3	140.00	138.10	138.10	139.60		
國三北向 90k+100 (OGFC-O)	1	124.50	128.20	130.70	130.80	128.52	2.059
	2	128.10	127.00	126.10	131.60		
	3	130.00	127.50	128.60	129.10		
國三北向 132k+600 (Porous)	1	116.40	114.70	115.10	116.70	114.48	1.834
	2	111.80	112.60	112.10	114.20		
	3	115.30	115.30	114.50	115.00		
國四西向 7k+800 (OGFC-N)	1	107.20	108.80	108.20	107.90	108.05	1.731
	2	109.80	107.30	109.20	107.00		
	3	106.70	109.10	107.60	107.80		

表 4.3 各測點鋪面透水率

量測點		透水時間 (秒)	平均透水 時間(秒)	透水率 (ml/15sec)
國三北向 84k+500 (OGFC-M)	1	5.93	6.32	959.15
	2	7.25		
	3	5.78		
國三北向 90k+100 (OGFC-O)	1	22.22	44.37	207.50
	2	89.88		
	3	21		
國三北向 132k+600 (Porous)	1	5.37	5.32	1128.29
	2	5.17		
	3	5.42		
國四西向 7k+800 (OGFC-N)	1	6.28	6.30	952.46
	2	6.38		
	3	6.24		

表 4.4 各測點鋪面平均紋理深度

量測點		直徑(cm)					平均紋 理深度 (mm)
		直徑 1	直徑 2	直徑 3	直徑 4	平均	
國三北向 84k+500 (OGFC-M)	1	27.50	28.50	27.50	27.20	27.92	0.818
	2	28.50	28.60	29.00	28.00		
	3	27.50	27.50	28.00	27.20		
國三北向 90k+100 (OGFC-O)	1	29.50	28.00	28.50	28.00	27.83	0.823
	2	28.00	27.50	27.00	28.00		
	3	27.00	27.00	28.00	27.50		
國三北向 132k+600 (Porous)	1	21.50	21.50	21.50	21.00	21.44	1.387
	2	21.50	21.50	21.30	21.50		
	3	21.00	21.50	21.50	22.00		
國四西向 7k+800 (OGFC-N)	1	26.00	26.50	26.00	26.00	25.21	1.003
	2	24.00	24.50	24.50	24.00		
	3	25.00	26.00	25.00	25.00		

另透過 2003 年實測資料加以比較，整理如表 4.5，因該次量測僅進行鋪面之透水率與平均紋理深度，故在此僅針對此二項進行討論。由相關研究表示，造成透水率降低之原因主要為鋪面受交通量二次壓密以致於鋪面內部連通孔隙減少使得透水率下降。以實測結果來看，四處測點之透水率狀況符合上述說明，呈現減少之狀態，其中三處 OGFC 路面透水率之衰退程度相近，經兩年時間後透水率減少約 140 ml/15sec；相較之下 Porous 無論在透水性表現或衰減量之表現皆較為出色，僅降低約 25 ml/15sec。鋪面平均紋理深度則受車胎長期磨損而減少，其中以 Porous 減少幅度最大，但在四者之中仍為深度最大；而 OGFC-O 則為四者中紋理深度最淺且變化最小者。由此可見各鋪面間之深度差異或許代表著與服務齡期有相當程度之關連。

表 4.5 瀝青混凝土鋪面特性

代號	密度 (g/cm ³)	透水率 (ml/15sec)		平均紋理深度(mm)	
		03 年	05 年	03 年	05 年
OGFC-M	2.220	1102.94	959.15	1.087	0.818
OGFC-O	2.059	342.47	207.50	0.875	0.823
Porous	1.834	1153.85	1128.29	1.579	1.387
OGFC-N	1.731	1094.89	952.46	1.177	1.003

4.1.2 車流量統計

車流量資料來源為進行噪音量測當時所拍攝之影帶中所記錄之車流資料，經計算後，將兩次調查所測得各路段之平均小時流量表整理如表 4.6。由交通量數據觀察，國道三號於北部地區之車流量明顯較中部地區大，其中又以小型車之數量變化最多，於 2005 年資料顯示國道三號北部與中部路段小型車之車流量差距接近 800 輛/小時。若由兩次實測現場之車流量觀之，國道三號之

車流量總量大致呈現稍微增加狀態，其中增幅較大則屬中部路段，於國三北向 132k+600 與南向 233k+400 兩處之車流量增加約 400 輛/小時。若單從車流量之觀點來判斷，車流輛增加將會導致整體公路噪音量增加，故若單以此部份數據加以判斷，05 年之均能音量應該將會較 03 年高；然而本研究主要測量目的為單一車輛通過測點時之音量以比較車輛通過不同鋪面之噪音量，故車流量並非影響量測結果之主要因素。

表 4.6 高速公路量測路段平均小時流量

測點 位置	代號	小時車流量							
		小型車		雙軸重車		多軸重車		總和	
		03 年	05 年	03 年	05 年	03 年	05 年	03 年	05 年
國三北向 64k+800	Rigid-O	1888	2006	461	311	276	268	2625	2605
國三北向 84k+540	OGFC-M	1237	2055	429	224	150	236	1816	2515
國三北向 90k+100	OGFC-O	1514	1543	295	245	130	183	1939	1971
國三北向 132k+600	Porous	662	1245	211	161	227	185	1100	1491
國三南向 233k+400	Rigid-N	753	1202	227	136	66	107	1046	1445
國四西向 7k+800	OGFC-N	1053	1020	278	210	227	173	1558	1403

4.2 實測結果分析

4.2.1 各種鋪面之車速與噪音

實測噪音量資料經規範之條件篩選後，將符合規範之噪音資料配合車輛通過車速比對後，將各測點、各車型組之有效樣本加以分類，依據 ISO 11819-1 規範中所述，分別製作 L_{Amax} 與車速對數值 ($\log V$) 對應圖，並以最小平方法計算各車型組之迴歸趨勢，如圖 4.1 至 4.6 所示。觀察各鋪面三種車型趨勢線，可清楚發現 L_{Amax} 與 $\log V$ 成線性正相關，亦即車速愈快則產生之音量

愈大，此結果與一般認知相符；而對特定鋪面而言， L_{Amax} 為多軸重車 > 雙軸重車 > 小客車，唯各車種之趨勢線斜率彼此近似平行，由此可推論 L_{Amax} 對 $\log V$ 之變化速率受車輛種類之影響並不明顯，亦即各車種因增加速率而增加之噪音量大致類似。由於在接近定速巡行之情形下，車輛動力音不致隨巡行速度而顯著改變，由此結果可進一步推知車輛高速行駛時之噪音主控機制為行駛音而非動力音。

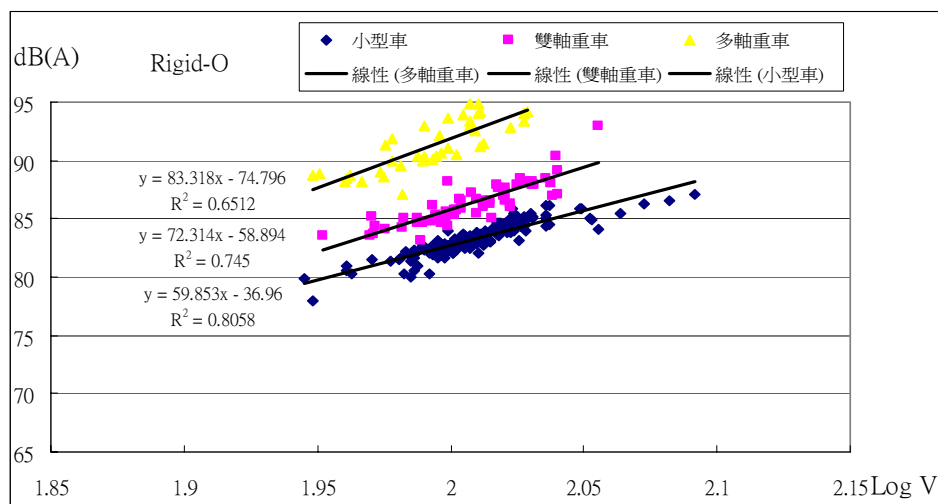


圖 4.1 國三北向 64k+800 各車種之車速與噪音關係

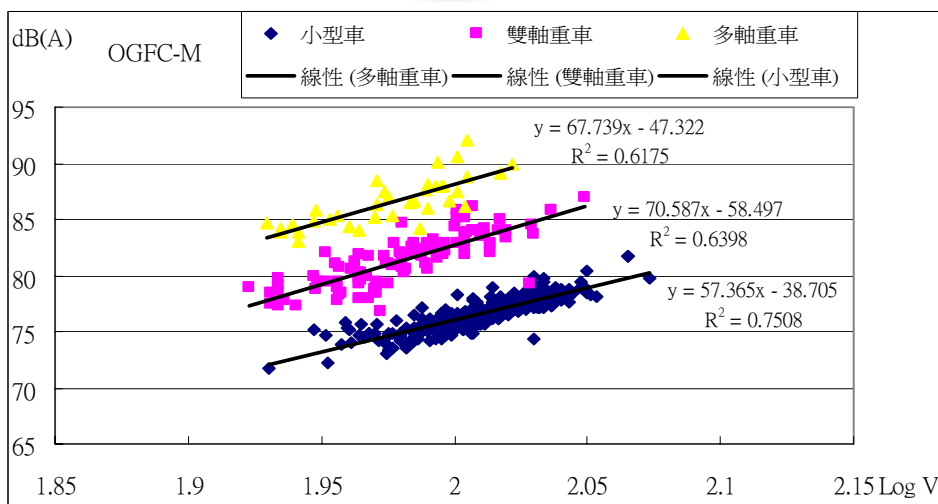


圖 4.2 國三北向 84k+540 各車種之車速與噪音關係

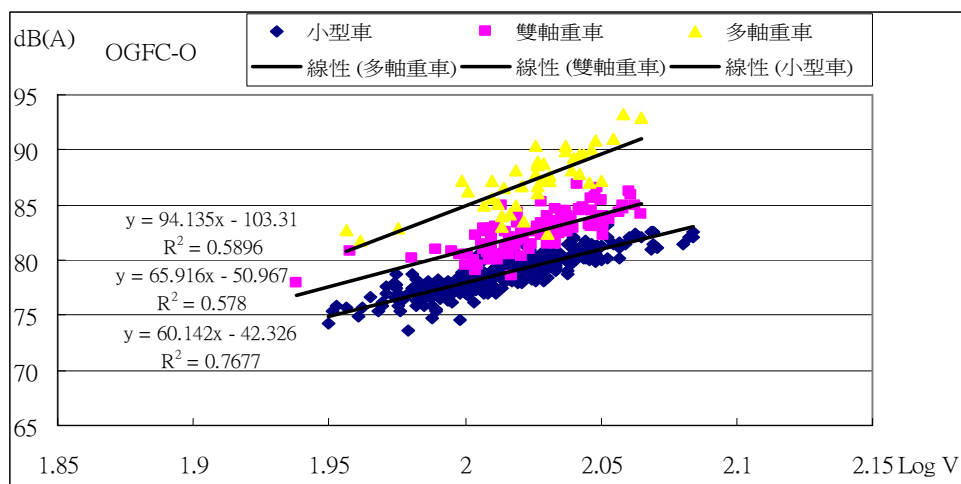


圖 4.3 國三北向 90k+100 各車種之車速與噪音關係

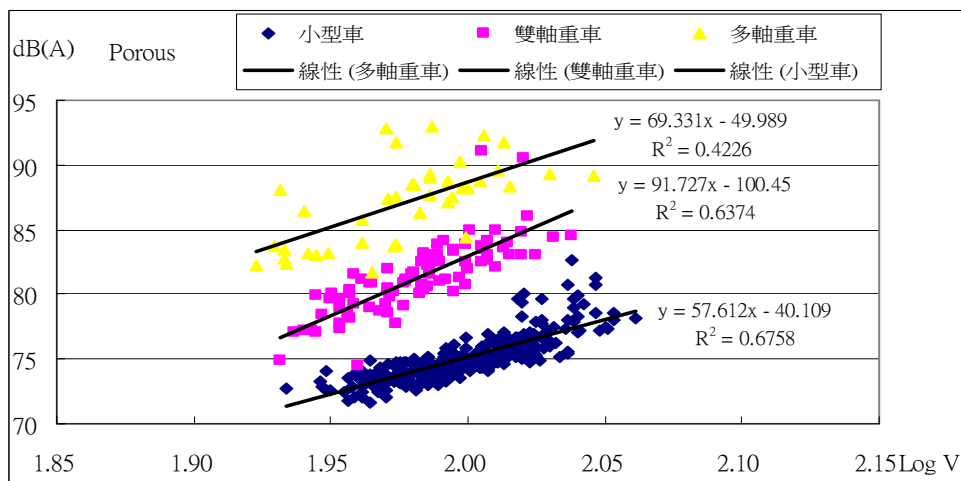


圖 4.4 國三北向 132k+600 各車種之車速與噪音關係

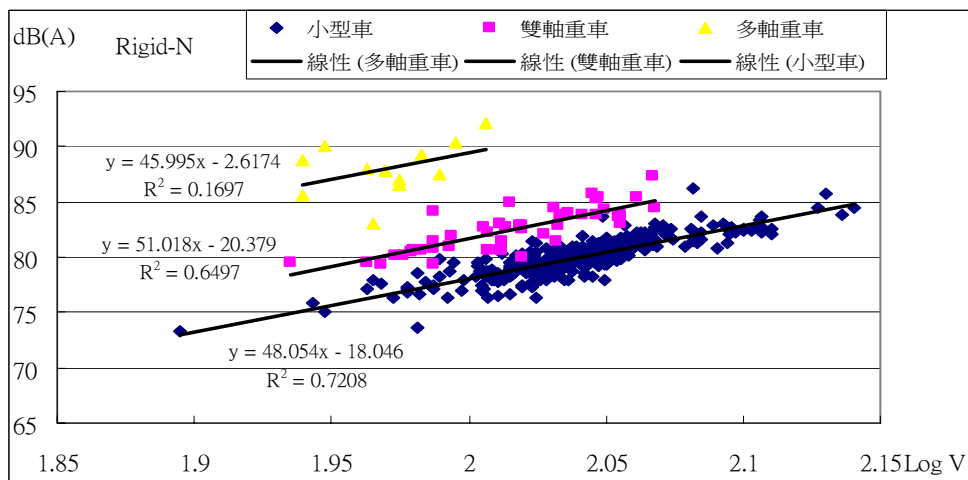


圖 4.5 國三北向 233k+400 各車種之車速與噪音關係

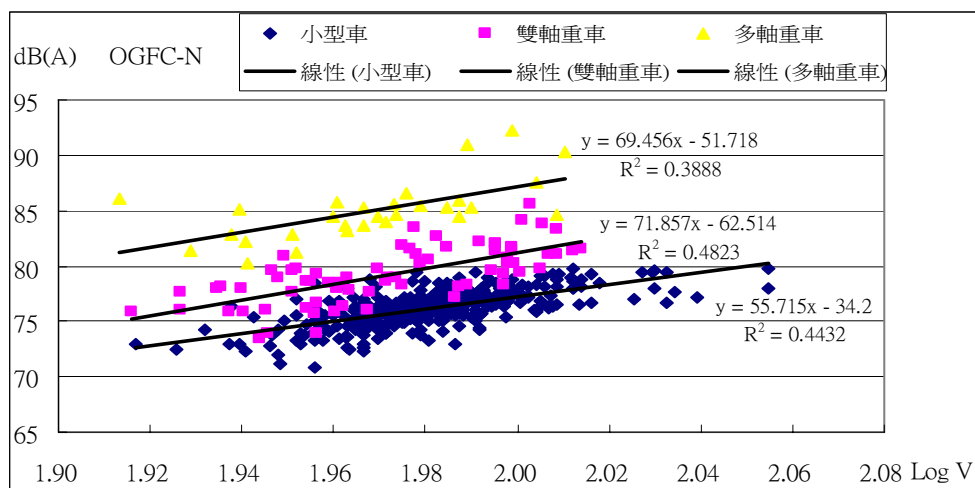


圖 4.6 國四西向 7k+800 各車種之車速與噪音關係

表 4.7 為針對各車種組合於六處測點測得之車速與噪音量數據分別加以進行 T 檢定。大致上 Log V (車速對數值) 對於噪音量之影響於各車型、各測點皆呈現顯著 ($P < 0.05$)，且 Log V 之係數皆為正值，即隨著車速增加，噪音量亦伴隨增加；各迴歸線之 R^2 值可達 0.5 以上，代表迴歸式解釋變數之能力應具有一定以上水準。其中僅 Rigid-N 鋪面上多軸重車部份呈不顯著 ($P=0.183$)，且 R^2 值亦僅有 0.170，為各測點所有車型組其中最低；經檢視原始資料後，推測其不顯著之主因應為資料筆數過少，僅有 12 筆數據導致噪音量與車速之關係較不明顯。整體而言，變數檢定驗證車速對於噪音量具有相當高度之代表性。另一方面，透過檢定結果中各測點三種車型中變數 Log V 之係數加以比較，雙軸及多軸重車之係數皆較小型車來得大，代表車速每增加一單位，雙軸及多軸重車之噪音量增量將會較小型車大，對於公路噪音之影響將更為明顯。

表 4.7 車速對噪音量變化影響之係數檢定表

測點	車種	R ² (顯著性)	變數	係數	標準誤	t 值	p 值	是否 顯著
國三北向 64k+800	小型車	0.806 (0.000)	常數項	-36.960	4.685	-7.888	0.000	★
			Log V	59.853	2.330	25.684	0.000	★
	雙軸 重車	0.745 (0.000)	常數項	-58.894	10.615	-5.548	0.000	★
			Log V	72.314	5.289	13.673	0.000	★
	多軸 重車	0.651 (0.000)	常數項	-74.796	19.979	-3.745	0.001	★
			Log V	83.318	10.024	8.312	0.000	★
國三北向 84k+540	小型車	0.751 (0.000)	常數項	-38.705	3.530	-10.966	0.000	★
			Log V	57.365	1.757	32.657	0.000	★
	雙軸 重車	0.640 (0.000)	常數項	-58.497	10.546	-5.547	0.000	★
			Log V	70.587	5.323	13.260	0.000	★
	多軸 重車	0.618 (0.000)	常數項	-47.322	17.809	-2.657	0.011	★
			Log V	67.739	9.012	7.517	0.000	★
國三北向 90k+100	小型車	0.768 (0.000)	常數項	-42.326	3.313	-12.777	0.000	★
			Log V	60.142	1.644	36.581	0.000	★
	雙軸 重車	0.578 (0.000)	常數項	-50.967	10.832	-4.705	0.000	★
			Log V	65.916	5.346	12.331	0.000	★
	多軸 重車	0.590 (0.000)	常數項	-103.314	24.532	-4.211	0.000	★
			Log V	94.135	12.118	7.768	0.000	★
國三北向 132k+600	小型車	0.676 (0.000)	常數項	-40.109	4.688	-8.556	0.000	★
			Log V	57.612	2.343	24.587	0.000	★
	雙軸 重車	0.637 (0.000)	常數項	-100.454	14.963	-6.713	0.000	★
			Log V	91.727	7.548	12.153	0.000	★
	多軸 重車	0.423 (0.000)	常數項	-49.989	25.661	-1.948	0.059	X
			Log V	69.331	12.977	5.343	0.000	★

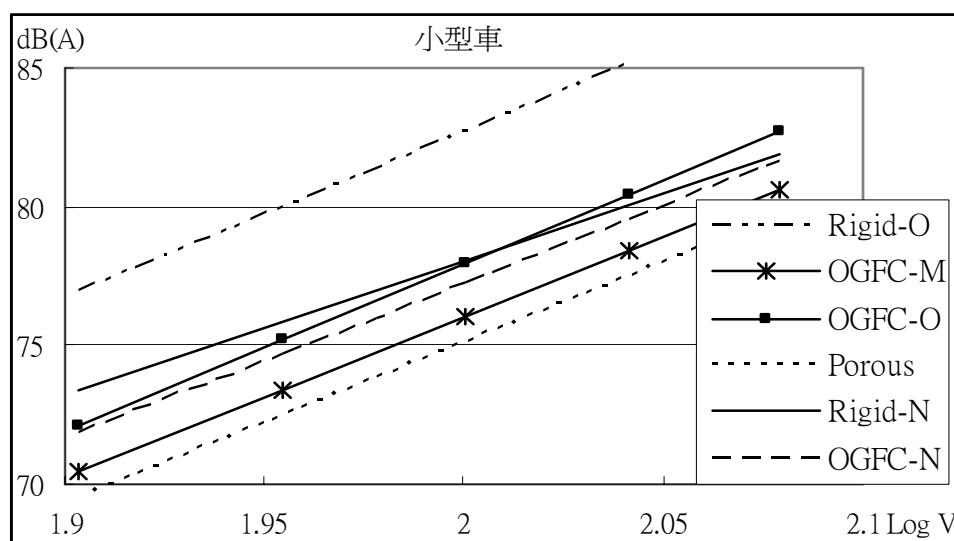
(註：★：顯著、X：不顯著)

表 4.7 車速對噪音量變化影響之係數檢定表 (續)

測點	車種	R ² (顯著性)	變數	係數	標準誤	t 值	p 值	是否 顯著
國三南向 233k+400	小型車	0.721 (0.000)	常數項	-18.046	3.493	-5.166	0.000	★
			Log V	48.054	1.712	28.061	0.000	★
	雙軸 重車	0.650 (0.000)	常數項	-20.379	11.646	-1.895	0.064	X
			Log V	51.018	5.777	8.978	0.000	★
	多軸 重車	0.170 (0.183)	常數項	-2.617	63.405	-0.041	0.968	X
			Log V	45.995	32.172	1.430	0.183	X
國四西向 7k+800	小型車	0.768 (0.000)	常數項	-34.200	3.313	-4.936	0.000	★
			Log V	55.715	1.644	15.935	0.000	★
	雙軸 重車	0.578 (0.000)	常數項	-62.514	10.832	-3.537	0.001	★
			Log V	71.857	5.346	8.018	0.000	★
	多軸 重車	0.590 (0.000)	常數項	-51.718	24.532	-1.568	0.129	X
			Log V	69.456	12.118	4.145	0.000	★

(註：★：顯著、X：不顯著)

選取六測點中相同種類車輛通過噪音量與車速關係加以比較，如圖 4.7 所示。若以時速 100 km/h 之情況針對各點資料加以比較，可看出在 Rigid-O 所產生的車胎鋪面音量明顯高出其他鋪面，而其次為 Rigid-N 及 OGFC-O，且二者相當接近；六者中噪音量最低則屬 Porous 路面。若單由小型車種噪音量與各測點鋪面特性加以比較，發現透水率與鋪面噪音量似乎具有較大之關係，鋪面透水率越佳則噪音量較低；而在平均鋪面紋理深度、密度與噪音量間之關係則不似透水率般明顯。因此，以透水率代表似乎為較佳之選擇，且其中以 Porous 路面於減音效能之表現最佳。

圖 4.7 各測點小型車之 L_{Amax} 與車速對數值關係

透過上述各種鋪面之車速與噪音關係式，由車速與噪音間之關係探討是否可由限制車速達到控制公路噪音之效果。在此假設以台灣地區國道三號之速限作為基準，小型車速限為 110 km/hr、大型車速限為 90 km/hr（雙軸重車在此以小型車速限計算），將速限及其 ± 10 km/hr 之數值代入圖 4.1~6 中各鋪面之車速與噪音關係式中計算各車速下對應之噪音量，計算之結果如表 4.8 所示。

表 4.8 各車種於各測點、各車速下之鋪面噪音

車種	小型車			雙軸重車			多軸重車		
車速 (Km/hr)	100	110	120	100	110	120	80	90	100
Rigid-O	82.75	85.22	87.49	85.73	88.73	91.46	83.77	88.03	91.84
OGFC-M	76.03	78.40	80.57	82.68	85.60	88.27	81.59	85.06	88.16
OGFC-O	77.96	80.45	82.72	80.87	83.59	86.08	75.84	80.65	84.96
Porous	75.12	77.50	79.68	83.00	86.80	90.27	81.95	85.50	88.67
Rigid-N	78.06	80.05	81.87	81.66	83.77	85.70	84.92	87.27	89.37
OGFC-N	77.23	79.54	81.64	81.20	84.17	86.89	80.46	84.02	87.19

將上表資料依車種分類作車速與噪音對應之直條圖，如圖 4.8~10，於車速改變 10 km/hr 之情況下，噪音量之改變量約於 2~5 dB。小型車部份之噪音變化量較低，每增減 10 km/hr 之噪音量約增減 2 dB；由圖 4.8 可發現六種鋪面中，當車速改變對於噪音之影響並無特別明顯差別。雙軸重車部份，其噪音隨車速之變化量明顯較小型車來得大，增減 10 km/hr 之噪音量約增減 3 dB；特別在 Porous 路面噪音量變化達到近 4 dB。多軸重車之車速每增減 10 km/hr 之噪音量約增減 4 dB；在 OGFC-O 路面噪音量變化則達到近 5 dB；在 Rigid-N 路面之減音效果則較不明顯，於相同車速之減少量下，其減音效果僅為 OGFC-O 路面之一半。

考量由控制車速對公路噪音加以管制，由計算之數據顯示車速減低對於公路之噪音是具有效果的。若僅就單一車輛之噪音加以探討，而不考量各車型車流量比例，明顯的，針對雙軸及多軸重車加以限制車速將會具有較大之效果。以減音效果較佳之 Porous 路面為例，若依據現行高速公路速限再降低 10 km/hr，車輛行駛之噪音量於多軸重車方面可降低 3.6 dB、雙軸重車可降低 3.8 dB、小型車則可減少 2.4 dB。另一方面，若將高速公路各車種之車流量分佈納入考量，小型車之數量約為雙軸或多軸重車之 8 倍，若能針對小型車輛之車速加以控制，對於公路噪音「均能音量 (L_{eq})」之降低將具有相當程度之效果；且均能音量為目前環保單位對於公路噪音評估之指標，透過限制車速減低公路之均能音量，對於周邊環境改善亦可有所改善。故日後交通相關單位於公路噪音之管制上，除了透過隔音牆設置以及具較佳減音效果之透水性鋪面外，對於公路之速限加以控制亦為一有效方式；然而若採用此一方式，要如何使公路噪音降低但又不影響車輛行駛順暢與效率，則又是另一值得討論之問題。

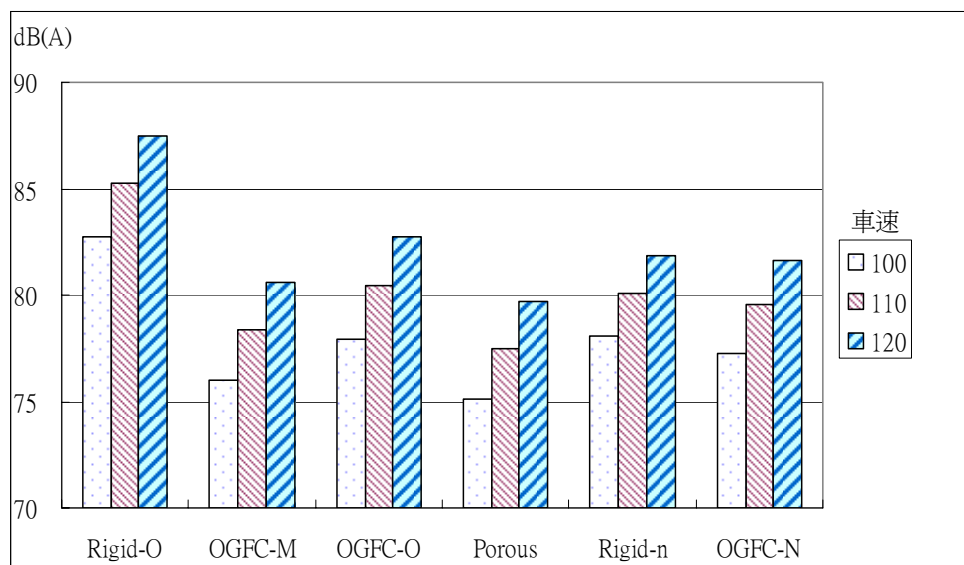


圖 4.8 小型車於各測點、各車速下之鋪面噪音

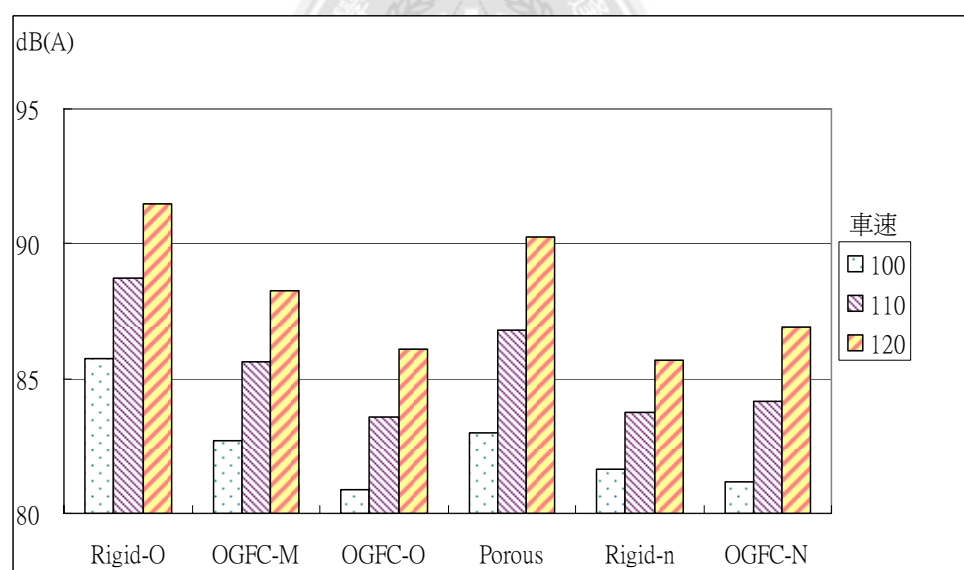


圖 4.9 雙軸重車於各測點、各車速下之鋪面噪音

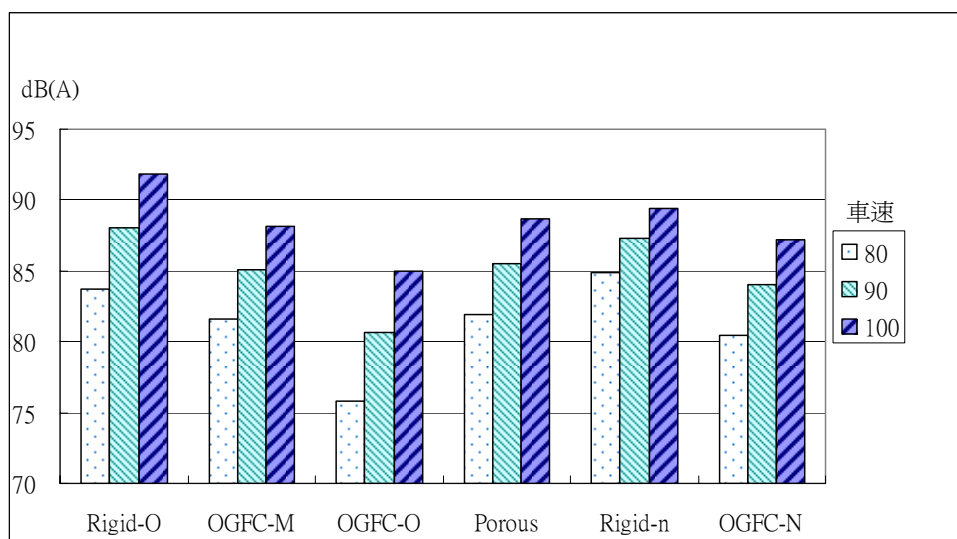


圖 4.10 多軸重車於各測點、各車速下之鋪面噪音

另以間隔兩年之實測資料互相比較，發現噪音量隨車速增加之趨勢將伴隨鋪面服務齡期的增加而變大，也就是在車速增加幅度相同時，通車較久之鋪面所產生噪音量差異會較大。圖 4.11 為在 OGFC-N 處兩次實測之小客車資料，由圖可看出兩組資料趨勢之差異。但由圖可看出兩組資料之趨勢線呈現交叉，代表當車速低於 105 km/h 時噪音量以服務齡期較短之鋪面較高；相反的，若高於此速度則噪音量以齡期較久之鋪面較大，此狀況不甚合理。推測其原因可能為受限於量測設備導致車速判定上有所誤差，因此需要再針對車速判定部份加以確認，才可較確實的瞭解服務齡期對噪音產生之影響。

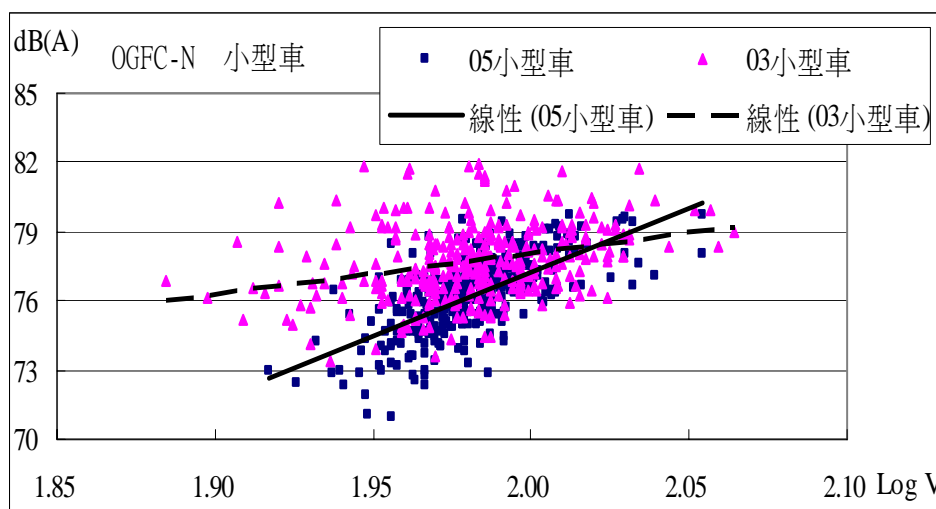


圖 4.11 小型車於 OGFC-N 鋪面之 L_{Amax} 與車速對數值關係

4.2.2 SPBI 值

SPBI 值為利用各式鋪面上實測得之各車種音量值以及 ISO 11819-1 建議之各車種基準車速值與權重值，依據前述公式 3-1 計算而得，兩次高速公路實測之結果如圖 4.12 所示。由圖可看出於 03 年資料中，國三 64k+800 處 Rigid-O 路面之 SPBI 值為最高；國四 7k+800 處 OGFC-N 路面最低。05 年資料仍以 Rigid-O 路面最高；但最低值則出現於 90k+100 處之 OGFC-O 路面。且以相同時間點測得之結果比較，各測點之 SPBI 值與上節所述之噪音量於數值大小之排序上，所呈現之結果亦有所差異。另若以前後兩年資料進行比較，依據相關研究之結果，理論上鋪面應隨著服務齡期增加而使得車胎鋪面音上升；但在此由下圖可看出在 03 年計算出的 SPBI 值皆較 05 年之值高，明顯與理論不符。

此部份經研究推測之結果，除前述車速判定上造成之誤差外，在 ISO 11819-1 規範中提及之基準車數值於重型車輛部份因與國內高速公路行車現況差異甚大，約有近 15 km/hr 之差距，或許亦可能為造成此問題之原因。

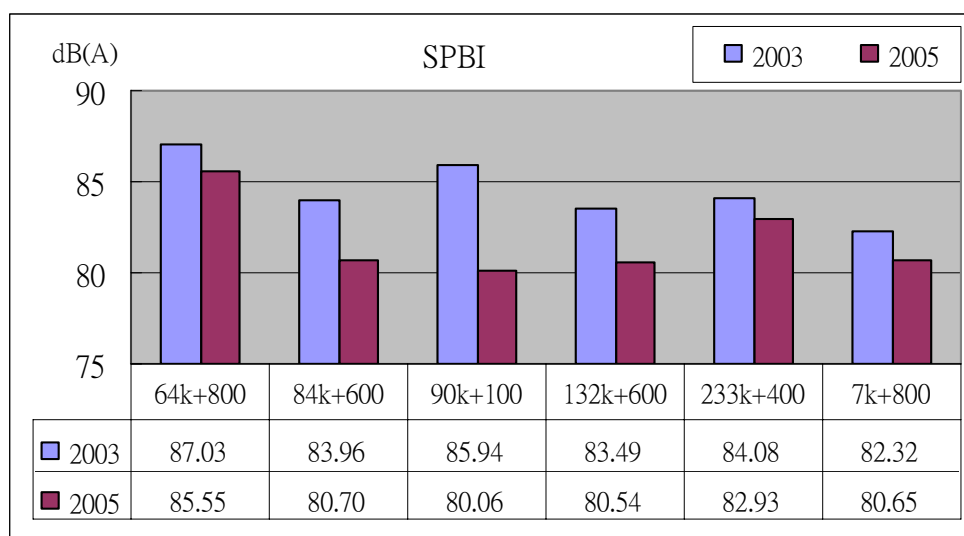


圖 4.12 各測點 SPBI 值

4.2.3 均能音量 (L_{eq})

若由各測點測得之均能音量 L_{eq} 觀之，見圖 4.13，在 Rigid-O 上明顯較其餘五處鋪面高約 6 dB(A)，但各路段之車流量、車速差異也可能對 L_{eq} 造成影響，Rigid-O 之車流量總數為六路段中最高，因此若在相同狀況下 L_{eq} 之差異應未達 6 dB(A)；而車流量相近之 Porous、Rigid-N、OGFC-N 路段，其中以 Porous 之 L_{eq} 最低，而 Rigid-N 之 L_{eq} 與柔性路面相近之原因，可能為多軸重車之數量較少所致。另若與 03 年實測資料比較，兩組資料間之差異並非相當明顯，甚至部份路段出現車流量增加但 L_{eq} 卻降低之現象，除了車流量與車速不同外，即為測點當地環境改變而對整體聲音傳播的改變。這也顯示若欲以 L_{eq} 之改變探討車胎鋪面音之變化，除非確認相關因子皆保持固定，否則採用 L_{eq} 判斷車胎鋪面音之差異是具有困難存在的。

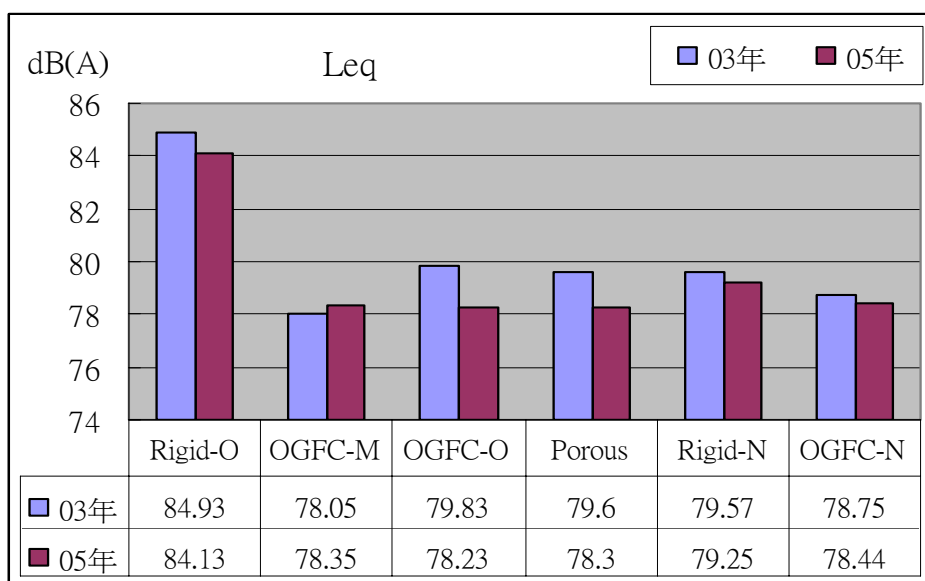


圖 4.13 各測點均能音量

4.2.4 頻率分佈

由噪音頻率分佈圖可看出不同的鋪面特性所具有之頻率差異，圖 4.14~4.16 分別為三種車型分類於不同鋪面上所產生之噪音頻率分佈情形。剛性鋪面部份，具橫向掃紋之 Rigid-N 主要頻率稍高於 Billera 等人提出之 1 kHz，這可能受掃紋間距不同所致；又在 Rigid-O 的部份，主要頻率約為 800 Hz，可見掃紋方向不同導致頻率改變之差異。又柔性鋪面部份，主要頻率較高者為 OGFC-N，約出現於 800 Hz 附近，並與 Rigid-O 相近，但整體噪音量較低；而 Porous 與 OGFC-M 的主要頻帶約出現於 630 Hz 處，OGFC-O 之頻帶分佈約在 500~600 Hz 為六者之中最低。可推測伴隨鋪面齡期越長，其車胎鋪面音之主要頻率分佈應會有逐漸降低之趨勢。

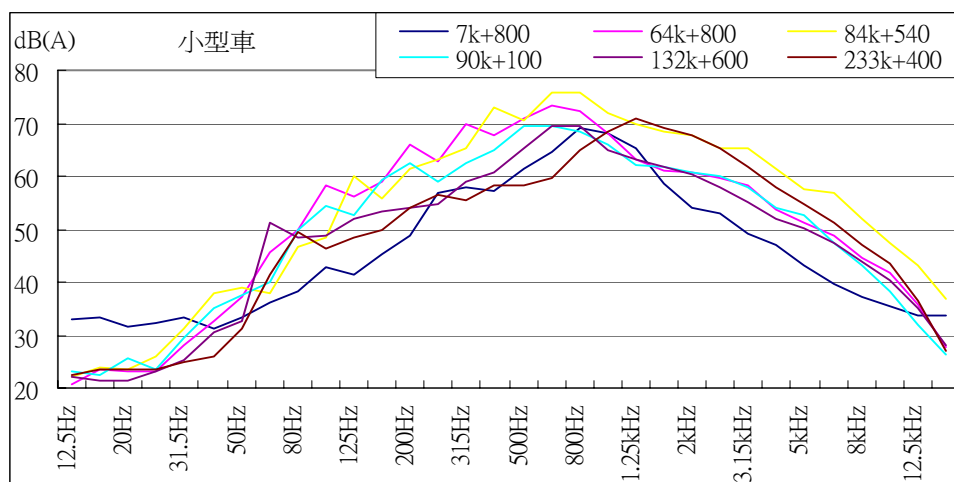


圖 4.14 各測點小型車噪音頻率分佈圖

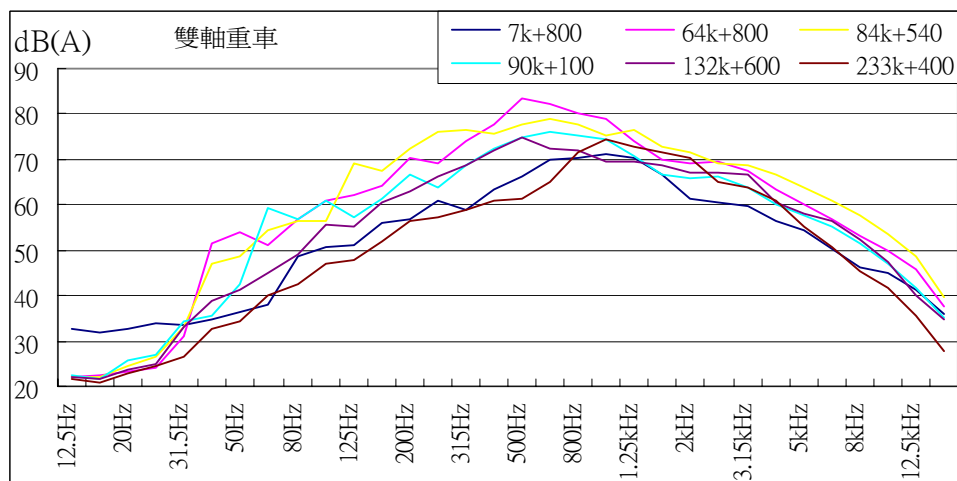


圖 4.15 各測點雙軸重車噪音頻率分佈圖

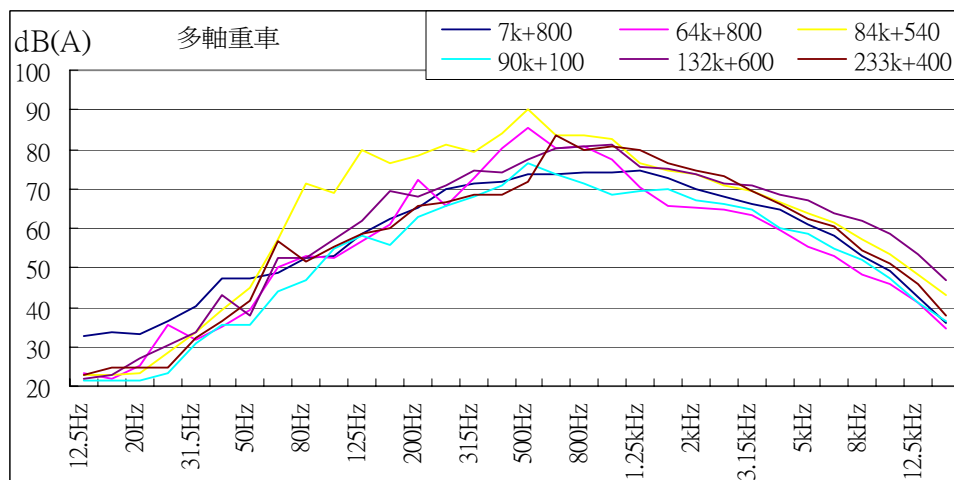


圖 4.16 各測點多軸重車噪音頻率分佈圖

4.2.5 氣溫對噪音特性之影響

Fabienne 指出當氣溫上升時對於公路噪音將會有降低之作用，該研究針對柔性與剛性鋪面進行討論。於柔性鋪面呈現氣溫每上升 1°C ，其噪音量約可下降 -0.06 dB(A) ；但在剛性鋪面上則不受氣溫之影響【20】。整理本研究實測資料，探討氣溫對於噪音產生之影響是否與上述之研究結果相符，以國道三號南向 233k+400 之 Rigid-N 路面與國道四號西向 7k+800 之 OGFC-N 路面為例，經 T 檢定之結果（表 4.9）顯示，各車型組於兩種鋪面上產生之車胎鋪面音與氣溫之間皆無顯著之關係（ $P > 0.05$ ），顯示氣溫改變對於兩種鋪面所產生之公路噪音並無影響。

推論實測資料檢定結果與上述文獻內容之差異，主要應為量測之條件與方式不盡相同所致。該研究中採用固定車輛、車胎等於特定條件於選定鋪面上進行噪音量量測，並控制大氣溫度於 $0\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、鋪面表面溫度 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 範圍內，量測車輛以 90 km/hr 通過時之車胎鋪面音。相較之下，本文之資料蒐集對象為大量非固定款式車輛通過測點時之噪音量，相較之下，於不同車輛、車胎等造成之差異較大，且量測過成中之大氣溫度約於 $25\sim 31^{\circ}\text{C}$ 之間，變化幅度並不如該研究中具有較明顯之溫度差異，應為造成本研究中氣溫與公路噪音之間無顯著關係之主要原因。

表 4.9 氣溫對噪音量變化影響之係數檢定表

測點	車種	R ² (顯著性)	變數	係數	標準誤	t 值	p 值	是否顯著
國三南向 233k+400	小型車	0.003 (0.346)	常數項	81.015	1.124	72.076	0.000	★
			氣溫	-0.031	0.033	-0.943	0.346	X
	雙軸 重車	0.011 (0.490)	常數項	84.730	3.226	26.268	0.000	★
			氣溫	-0.065	0.093	0.696	0.490	X
	多軸 重車	0.011 (0.749)	常數項	82.951	15.452	5.368	0.000	★
			氣溫	0.146	0.444	0.329	0.749	X
國四西向 7k+800	小型車	0.003 (0.342)	常數項	74.916	1.349	55.549	0.000	★
			氣溫	0.045	0.047	0.952	0.342	X
	雙軸 重車	0.016 (0.270)	常數項	84.225	4.529	18.596	0.000	★
			氣溫	-0.175	0.157	-1.111	0.270	X
	多軸 重車	0.000 (0.978)	常數項	84.749	9.184	9.228	0.000	★
			氣溫	0.009	0.315	0.028	0.978	X

(註：★：顯著、X：不顯著)

4.3 鋪面吸音率量測結果分析

4.3.1 鋪面試體特性

本研究採用 SGC 旋轉壓實機進行鋪面試體製作，以供吸音率調查使用，試體採用與開放級配鋪面相同之材料，共計六種不同的壓實程度，壓實圈數分別為 50、100、150、200、250 與 300 轉，各轉數分別製作 3 顆試體（300 轉試體為 4 顆）。透過這些試體進行基本物理特性及吸音率特性之量測，基本物理特性方面共測定各試體之高度、比重、孔隙率與透水率等數據，整理如表 4.10、4.11。

針對測得數據進行整理，受到壓實後在試體高度、比重、孔隙率、透水性之改變如同一般認知之情況。隨著壓實圈數越多，試體之高度逐漸減低，圖 4.17 所示為編號 5-1 試體於壓實過程中其壓實圈數與高度之關係，試體於受壓之前 50 圈內高度變化甚大，但於受壓 50 圈過後其高度下降之速度則逐漸趨緩。又因試體之重量固定，當試體高度下降意味著試體體積亦將降低，故呈現壓實圈數越多試體比重逐漸上升之趨勢。於孔隙率部份則隨著壓實圈數增加，受到逐漸壓密後內部殘留空間被縮小而導致孔隙率逐漸下降。上述之三種物理特性皆與壓實圈數呈現對數之關係，亦即此類特性於試體受壓實初期之變化量較大，且將隨著壓實圈數增加變化量逐漸減低。

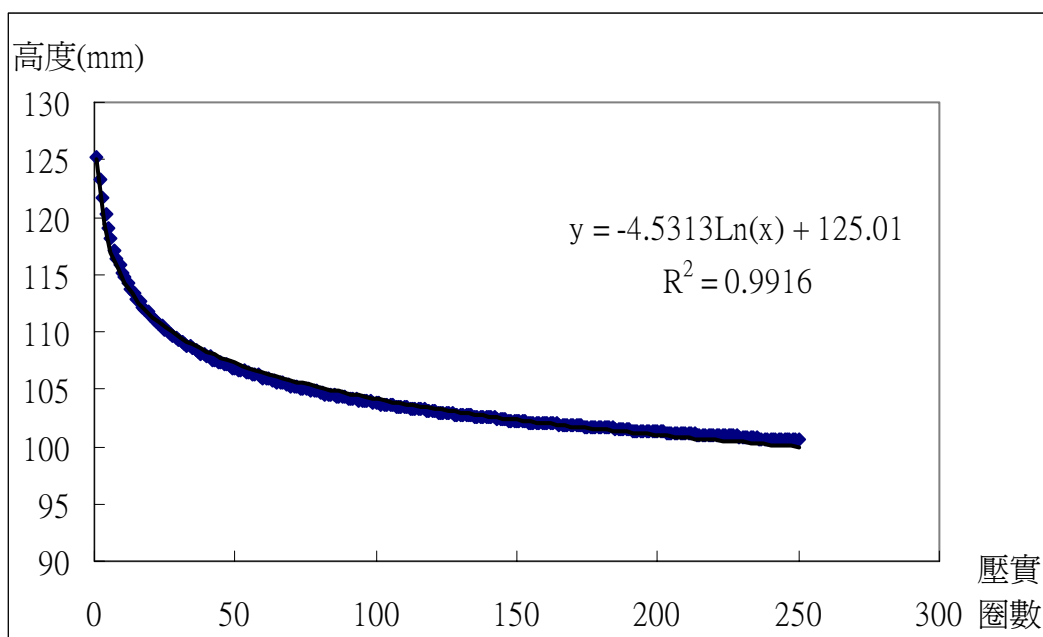


圖 4.17 試體壓實圈數與高度關係圖

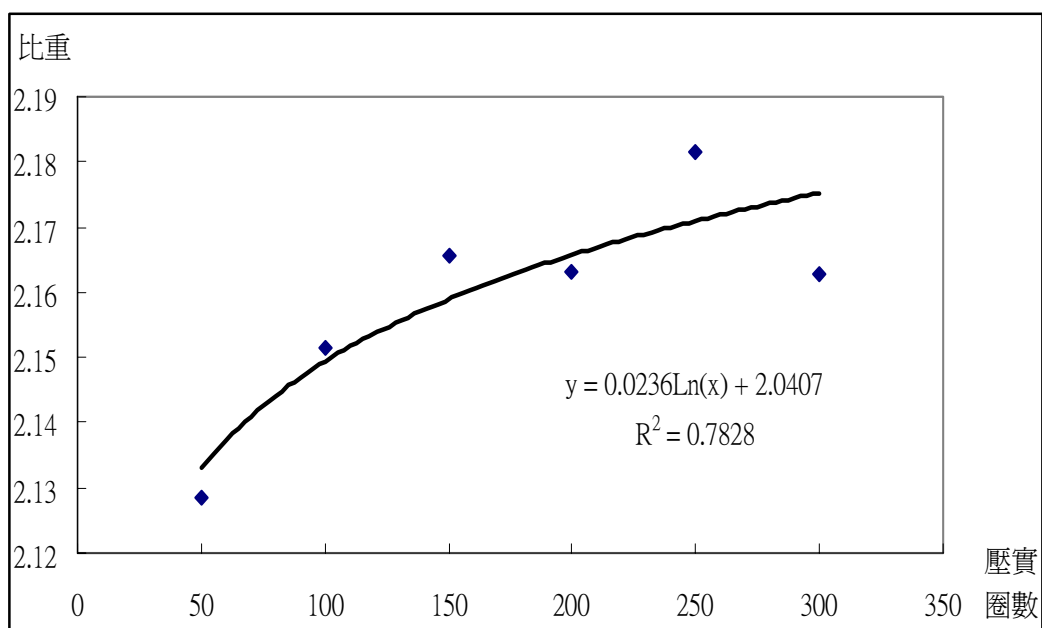


圖 4.18 試體壓實圈數與比重關係圖

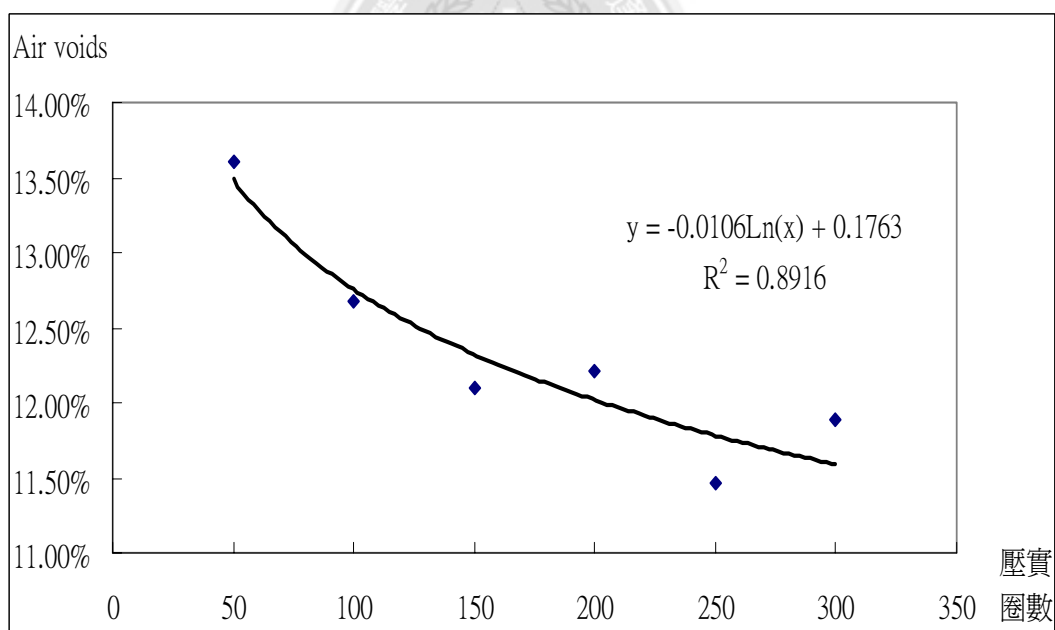


圖 4.19 試體壓實圈數與孔隙率關係圖

表 4.10SGC 試體基本物理特性

編號	壓實圈數	高度(cm)					比重	Air Voids
		1	2	3	4	平均		
1-1	50	10.70	10.73	10.75	10.73	10.73	2.115	14.1%
1-2		10.73	10.77	10.75	10.76	10.75	2.118	14.0%
1-3		10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	2.153	12.6%
2-1	100	10.45	10.48	10.46	10.49	10.47	2.149	12.8%
2-2		10.44	10.44	10.47	10.44	10.45	2.133	13.4%
2-3		10.50	10.49	10.45	10.49	10.48	2.173	11.8%
3-1	150	10.30	10.30	10.29	10.30	10.30	2.180	11.5%
3-2		10.26	10.26	10.30	10.31	10.28	2.157	12.5%
3-3		10.34	10.30	10.33	10.33	10.33	2.161	12.3%
4-1	200	10.28	10.30	10.35	10.31	10.31	2.159	12.4%
4-2		10.25	10.27	10.27	10.3	10.27	2.166	12.1%
4-3		10.27	10.23	10.23	10.25	10.25	2.165	12.2%
5-1	250	10.10	10.10	10.14	10.10	10.11	2.184	11.4%
5-2		10.12	10.12	10.13	10.13	10.13	2.181	11.5%
5-3		10.12	10.13	10.12	10.13	10.13	2.180	11.5%
6-1	300	10.20	10.21	10.20	10.18	10.20	2.164	12.2%
6-2		10.00	10.08	10.08	10.08	10.07	2.163	12.2%
6-3		10.08	10.09	10.09	10.12	10.08	2.186	11.3%
6-4		10.10	10.11	10.07	10.09	10.10	2.139	13.2%

表 4.11SGC 試體透水率

編號	壓實圈數	時間(秒)			平均時間 (秒)	透水率 (ml/15 sec)	平均透水率 (ml/15 sec)
		第一次	第二次	第三次			
1-1	50	4.69	5.09	4.94	4.91	1222.83	1196.56
1-2		4.97	5.09	5.15	5.07	1183.43	
1-3		4.65	5.19	5.37	5.07	1183.43	
2-1	100	5.43	5.90	5.80	5.71	1050.79	1057.49
2-2		5.92	6.21	5.61	5.91	1014.66	
2-3		5.43	5.33	5.50	5.42	1107.01	
3-1	150	5.36	5.81	5.85	5.67	1057.58	1035.36
3-2		5.96	6.22	6.10	6.09	984.68	
3-3		5.47	5.74	5.71	5.64	1063.83	
4-1	200	5.84	5.91	5.87	5.87	1021.57	1008.32
4-2		5.93	6.06	5.90	5.96	1006.15	
4-3		5.87	6.09	6.09	6.02	997.23	
5-1	250	6.87	7.04	6.84	6.92	867.47	854.07
5-2		6.63	6.69	6.75	6.69	896.86	
5-3		7.18	7.69	7.69	7.52	797.87	
6-1	300	6.72	7.16	7.25	7.04	851.87	856.84
6-2		6.75	7.03	6.93	6.90	869.15	
6-3		6.88	7.02	6.98	6.96	862.07	
6-4		6.91	7.10	7.31	7.11	844.28	

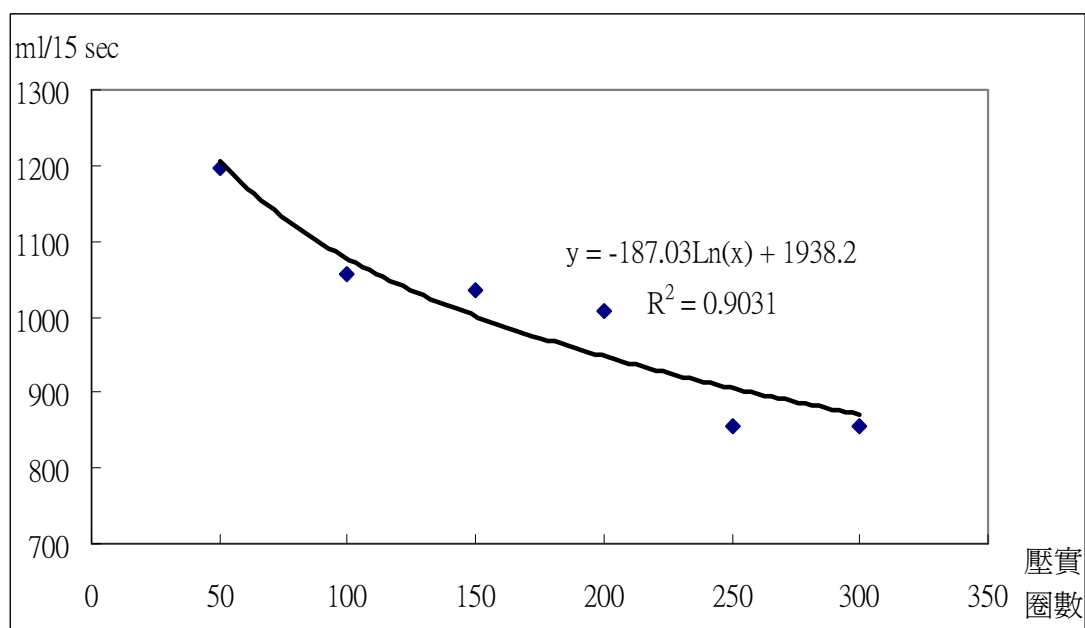


圖 4.20 試體壓實圈數與透水率關係圖

觀察透水率試驗之結果與壓實圈數間之差異（圖 4.20），於壓實圈數越高之情況下，鋪面透水率與孔隙率相同亦具有逐漸降低之趨勢，而兩者趨勢線走向類似。透過圖 4.21，透水率與孔隙率間應具有相當程度之關連性，亦映證透水率量測主要功用在測定鋪面內部孔隙之多寡。由相關研究文獻顯示車胎鋪面音產生之大小與鋪面孔隙之多寡有關，在實驗結果顯示透水率與鋪面孔隙間呈正向相關之關係，在此可推論鋪面透水率之優劣可取代鋪面孔隙之多寡，故透水率與車胎鋪面音產生之間應也有所關連。如此一來，即映證於 4.2.1 節中高速公路現場實測結果推測，以鋪面透水率評估車胎鋪面音為較佳之選擇。

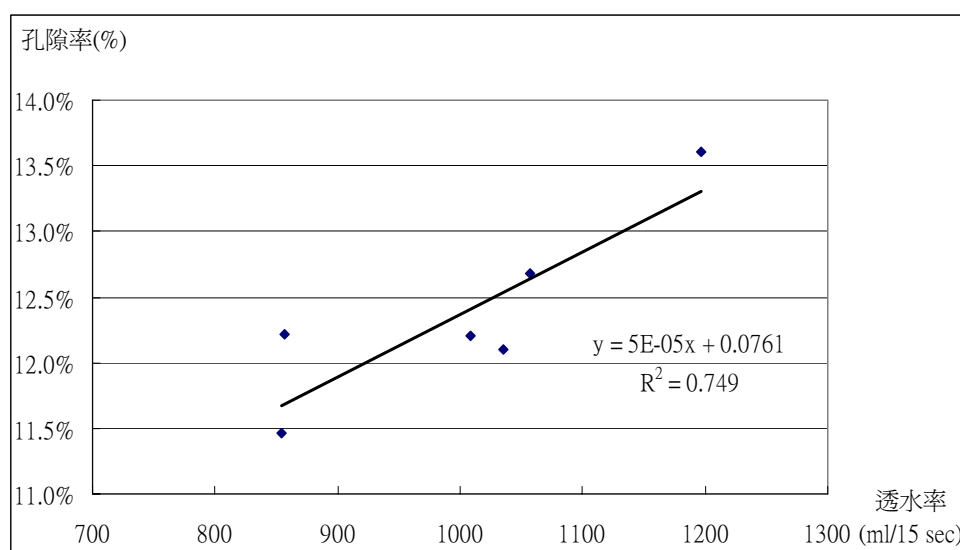


圖 4.21 試體透水率與孔隙率關係圖

4.3.2 鋪面試體壓實程度對吸音率之影響

針對實驗所需而製作之 19 顆試體進行吸音率測定，於試體兩端平面上各分別選取 5 個點進行量測，於同一點重複量測 5 次，故每一試體共可測得 50 筆吸音率數據。數據經剔除有問題之樣本後，先針對同一點測得之數據加以平均後，再對同一試體上 10 個測點之資料加以平均，作為該試體之吸音率。

如 3.3.4 節中所述，鋪面試體表面並非均質，測試點可能為粒料或是粒料間之孔隙，故測點分配於粒料或孔隙的多寡，對於試體平均吸音率之計算上將會有所影響。經吸音率調查後，針對各試體測得之 50 筆數據加以整理，以圖 4.22 為例，圖中所示為編號 1-1 試體之吸音率曲線圖，其中 A1~A5、B1~B5 分別代表試體兩側平面之測點。由吸音率曲線之分佈可看出 10 個測點之試體吸音率於 1 kHz 以下之低頻部份大致約落在 0.8~0.9 間；而高於 1 kHz 部份之頻帶，其吸音率則大致分為兩種趨勢，第一種為頻帶高於 1 kHz 後，吸音率即逐漸下降，至 4 kHz 時吸音率約為 0.5；第二種趨勢則是吸音率持續維持於 0.8~0.9 之間，直至高過 2 kHz

後吸音率往下降，於 4 kHz 處降至約 0.5~0.6。造成高頻音之吸音率差異原因如前所述，受到試體表面之孔隙與粒料所影響。經過與試體上測點之記號比對，其中量測結果偏向第一種趨勢之測點為粒料，而屬於第二種趨勢為孔隙的部份。於其餘 18 顆鋪面試體上皆呈現相似的狀況，代表著本研究所採用之開放級配鋪面試體其表面粒料與孔隙間對於吸音率測定之影響主要落在較 1 kHz 更高頻的部份。

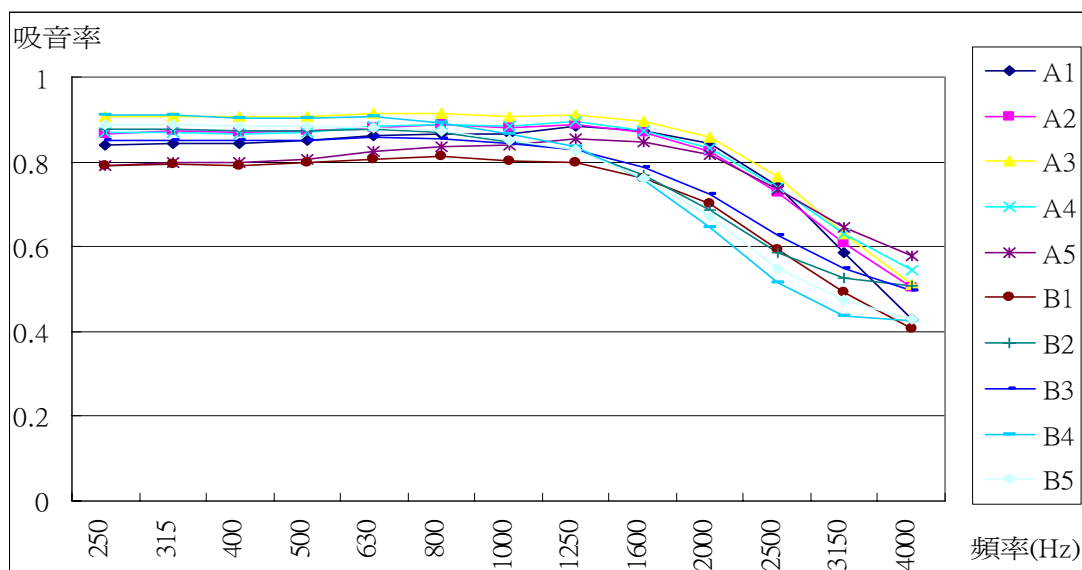


圖 4.22 試體 1-1 各測點吸音率曲線圖

針對各別試體計算吸音率後，依據試體壓實圈數加以分類，計算各種壓實圈數之平均吸音率，整理如表 4.12 與圖 4.23 所示。由各種壓實圈數試體之平均吸音率曲線分佈來看，其特性與上述各測點結果相似，六種壓實程度試體之吸音率趨勢相近，其所呈現之特點大致可以 1 kHz 作為吸音率特性之分界點，於 1 kHz 以下低頻音之吸音率約可維持在 0.8 以上之水準；而高頻音部份之吸音率則逐漸往下降，至 4 kHz 之吸音率約為 0.5。由此可見得採用之開放級配試體其吸音率表現以低頻音部份之效能較佳，而對於高頻音之吸收效果則稍差。

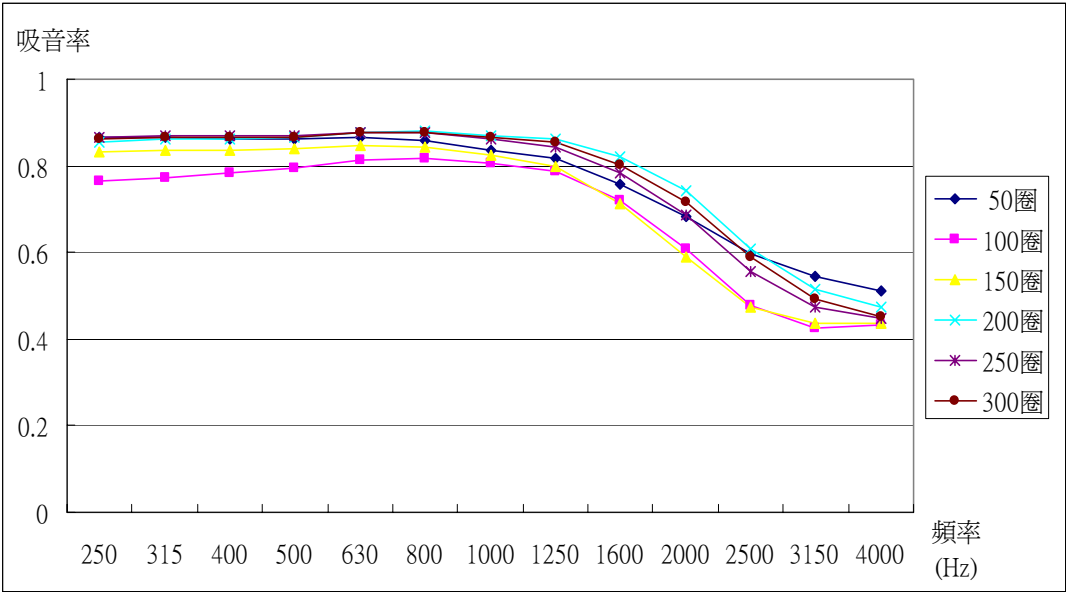


圖 4.23 鋪面試體吸音率曲線圖



表 4.12 各壓實圈數下之平均吸音率

壓實 圈數	各頻帶(Hz)吸音率						
	250	315	400	500	630	800	1000
50	0.866	0.867	0.864	0.863	0.866	0.859	0.837
100	0.764	0.774	0.782	0.795	0.813	0.818	0.807
150	0.830	0.835	0.835	0.839	0.847	0.843	0.823
200	0.855	0.860	0.862	0.867	0.877	0.879	0.869
250	0.867	0.870	0.869	0.870	0.877	0.875	0.860
300	0.862	0.865	0.864	0.867	0.876	0.876	0.865
壓實 圈數	各頻帶(Hz)吸音率						
	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
50	0.837	0.816	0.756	0.683	0.598	0.544	0.513
100	0.807	0.789	0.719	0.609	0.476	0.426	0.434
150	0.823	0.797	0.714	0.589	0.475	0.437	0.435
200	0.869	0.863	0.821	0.744	0.608	0.514	0.475
250	0.860	0.845	0.784	0.688	0.557	0.475	0.449
300	0.865	0.854	0.803	0.718	0.591	0.494	0.451

針對六種壓實程度之試體計算其平均吸音係數（計算方式見式 3-3），但受限於上述狀況影響，對於試體壓實程度與吸音率間並無明顯之相關性。但可確定的，於本研究中所採用的開放級配鋪面試體其吸音係數約在 0.8 左右。

表 4.13 各壓實圈數下之吸音係數

壓實 圈數	吸音率				
	250	500	1k	2k	NRC
50	0.866	0.863	0.837	0.683	0.812
100	0.764	0.795	0.807	0.609	0.743
150	0.830	0.839	0.823	0.589	0.770
200	0.855	0.867	0.869	0.744	0.834
250	0.867	0.870	0.860	0.688	0.821
300	0.862	0.867	0.865	0.718	0.828

針對六種不同壓實程度試體所求出之平均吸音率加以比較，透過圖 4.23，在鋪面試體壓實程度與吸音率間似乎無法找出其間具有特別明顯之關連性存在，此狀況與原本預期吸音率將隨著鋪面被壓實後亦將逐漸降低之推論有所出入。本研究針對可能造成此問題之原因加以推測，大致可朝以下三個部份加以討論。

1. 受測點為孔隙或粒料：

先前提到受測點為試體表面之孔隙或粒料，將導致吸音率有所變化所造成。於測點選擇方式，本研究採用隨機取樣，對鋪面試體兩側分別取五個點進行測量，故在最終計算試體平均吸音率時，可能會因測點為孔隙或粒料之其中一種較多，進而影響平均吸音率之數值。在這部份受限於測點選擇所造成之影響可能較鋪面受壓密前後之吸音率降低程度來得大，故本研究於吸音率測定鋪面壓實程度部份並無法明確指出鋪面受壓密與吸音率間之變化。

2. 試體壓實圈數之選定：

由試體壓實圈數與高度之關係圖（圖 4.17）顯示，鋪面試體於壓實初期前 50 圈內高度下降約 20 mm，而其後 250 圈之壓密僅使高度減少 5 mm；且鋪面透水性、孔隙率分別與

壓實圈數之關係圖亦顯示出隨著試體越被壓密，透水性與孔隙率之變化亦逐漸趨緩。代表鋪面具有鋪設初期物理特性變化較大，而隨著受到逐漸壓實後其變化量逐漸減低之現象。本研究選用以每 50 轉為單位，於表現鋪面試體之特性變化上，於壓實後期似乎無較明顯之落差。故在壓實圈數之選定上，若選擇之間隙非固定，而是以間隙逐步寬，例如以試體高度每減低 5 mm 作為間隔去選擇，對於吸音率之差異性或許將有較明顯的特徵出現。

3. 吸音率測定儀器的適用性：

本研究之試體圓柱直徑 150 mm、面積約 177 cm^2 、高度約 100 mm，測定鋪面吸音率時僅針對此一小區域進行測定，而所採用之 Zircon 吸音率測定器材是否適用於此類試體量測，是值得探討之問題。由於此套器材尚未曾於一般道路進行量測，故未來若能針對一般道路進行量測，判斷是否為取樣面機不足之問題所造成；若量測真受限於此一原因，或許在鋪面試體吸音率測定上採用阻抗管法會是較準確之選擇。

第五章 結論與建議

5.1 結論

藉由高速公路現場實測，測定各式鋪面之車胎鋪面音並量測相關鋪面特性因子，利用迴歸分析法了解各因子間之相互關係，經分析後歸納出以下幾點結論：

1. 各類型鋪面具有不同之噪音特性，柔性鋪面內部具有孔隙可吸收部份噪音，相較於剛性路面具有較佳之吸音能力。柔性鋪面又因粒料及瀝青膠泥等之不同，在吸音效能上有所差異。在本研究考量之鋪面特性中較能代表鋪面噪音特性者應屬鋪面之透水性。
2. 車胎鋪面音確實受到車輛型式影響，車型越大、軸數越多其產生之噪音量越大；且噪音量隨著車速之增加而上升，代表車輛於高速行駛狀態下，其噪音來源主要為車胎鋪面音而非車輛動力音。
3. 噪音頻率部份，剛性路面之中，橫向掃紋鋪面之車胎鋪面音主要頻帶明顯較高；柔性鋪面則呈現服務齡期越久主要頻率越低之現象。
4. 量測六種鋪面中以 Porous 路面之減音效能最佳，且經歷相同通車時間後，其減音效果衰退與透水率衰退之程度也較小，為能夠有效減低噪音之鋪面種類。
5. 於現場實測過程中受限於量測設備限制，在車速判定部份僅能採用車輛通過測點附近之平均速度以代表瞬間車速，測定上相對的增加許多誤差存在，以致於無法確實瞭解隨著鋪面齡期增加導致噪音變化之大小。且車速值具有誤差存在，於前後兩年之資料比較上缺乏一基準點，以致於無法探討出各式鋪面服務

齡期對噪音量變化之影響，為本研究較遺憾之處。

另透過鋪面試體之模擬試驗，以開放級配試體進行吸音率之測定，配合相關鋪面特性因子，探討其間之關係，經分析後歸納出以下幾點結論：

1. 試體壓密度與透水率間據有高度之關連性，當壓實圈數越多，代表密度越大且孔隙率減少，將使得鋪面透水性下降。鋪面若擁有優秀之透水性則表示鋪面內部具有較多之連通孔隙，將具有較佳之吸音效果。且透過針對試體特性之量測，驗證先前所提出鋪面吸音特性以透水率代表為較佳之選擇。
2. 本研究中所採用的開放級配鋪面試體其吸音係數約 0.8。試體之吸音率受測點為粒料或孔隙而有所差異，於低頻音部份吸音率皆約落在 0.8~0.9 間；而高頻音部份則分為兩種趨勢，粒料部份之吸音率於頻帶高過 1 kHz 後逐漸下降，至 4 kHz 時降至約 0.5；孔隙部份則延續低頻音之趨勢，直至高過 2 kHz 後才往下滑，至 4 kHz 處降至約 0.5~0.6。整體來看，所採用之開放級配試體吸音率表現以低頻音部份之效能較佳，而對於高頻音之吸收效果則稍差。
3. 不同壓實圈數試體之平均吸音率受限測點處為孔隙或粒料，兩者之比例多寡不同將影響平均吸音率數值。而此狀況造成之差異可能較鋪面壓密前後之吸音率改變程度來得大，故本研究於鋪面試體壓實程度與吸音率間並未能找出兩者中是否具有特別明顯之關連性存在。

5.2 建議

就本研究整體量測過程中所遭遇之問題與缺失在此提出，以供後續相關研究參考：

1. 現場量測受限於儀器設備限制，於車速判定之準確度上有待提昇。未來進行相關量測時建議改採用雷達測速槍等測速儀器進行車速之判定，另於測速器、噪音計與氣象儀等相關量測儀器之間若能在時間上達到完全同步，於後續資料整理上將能較為準確與節省時間。
2. 對於噪音之控制，除利用隔音牆阻隔噪音傳播路徑或鋪設較佳減音效果之鋪面外，利用速限控制行車速度亦為一降低公路噪音之方法；然而速限應降低多少才能在維持正常行車效率下達到減低公路噪音之成效，亦為一值得探討之問題。
3. 對於吸音率儀器之適用性應再更進一步確認；另透過實驗模擬結果，測點選擇對於平均吸音率易造成影響，往後若進行此類量測時，建議在測點選擇上能再多增加測點數量，藉由對大量測點量測以期能降低孔隙與粒料對平均吸音率造成之影響。
4. 本研究中試體吸音率量測部份僅針對台灣地區高速公路最常見之開放級配鋪面，未來可朝向排水性鋪面、密級配等更多不同型式之鋪面試體進行吸音率測定，以瞭解各式鋪面吸音率之差異。

參考文獻

中文部份：

- 【1】 日本道路協會，「鋪裝試驗法便覽」，昭和63年。
- 【2】 日本運輸省交通安全公害研究所，「平面道路交通噪音預測模式」，1979年。
- 【3】 林文清，「道路鋪面吸音特性量測及降噪預估之研究」，國立海洋大學碩士論文，民國93年。
- 【4】 施鴻志、張富南，「公路斷面型態對交通噪音傳送的影響」p23~26，行政院國科會72年度專題研究計畫，民72年。
- 【5】 徐淵靜，「道路交通環境工程」，民國81年。
- 【6】 陳世晃，「台灣鋪面（Taipave）配比設計法之初擬」，國立中央大學博士論文，民國92年。
- 【7】 陳永昇，「捷運木柵線列車行駛噪音特性之研究」，國立交通大學碩士論文，民國86年。
- 【8】 陳金文，「噪音量測與控制技術應用」，科技圖書，民國87年。
- 【9】 張兆斌，「老化作用對瀝青-纖維膠漿性質的評估」，國立成功大學碩士論文，民國92年。
- 【10】 張錦松、韓光榮、張錦輝，「噪音振動控制」，高立出版社，民國93年。
- 【11】 彭保華，「台北市建國南北高架道路噪音之研究」，國立交通大學碩士論文，民國73年。
- 【12】 蘇德勝，「噪音原理及控制」，台隆書局，民國80年。

英文部份：

- 【13】 Ard Kuijpers and Gijsjan van Blokland, “Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation”, The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Hague, Netherlands, August 27-30, 2001
- 【14】 ASTM E965, “Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique”, 2000.
- 【15】 Bendtsen “Noise-reducing pavements for urban roads” Nordic Road & Transport Research , Number 3 1999 .
- 【16】 Billera, D., B. Schmidt and W. Miller, “Stop the Whine! Narrow Band Noise Level Measurements of Three Highway Pavements,” Paper presented at the summer meeting of the Transportation Research Board Summer Meeting Chicago, 1996.
- 【17】 Chiu, C. T., Mang Tia, Byron E. Ruth and Page, G.C., “Investigation of Laboratory Aging Processes of Asphalt Binder Used in Florida,” Transportation Research Record 1430, pp. 60~70, 1994.
- 【18】 Chalupnik, J.D. and D.S. Anderson., ”The effect of Roadway Wear on Tire Noise,” Seattle, WA: Washington State Transportation Center. WA-RO 276.1, 1992.
- 【19】 Colorado DOT, Internal Report, 1979.
- 【20】 Fabienne Anfosso-Ledee, Yves Pichaud, “Temperature effect on tyre-road noise”, Applied Acoustics 68, pp.1-16, 2006.
- 【21】 Fujikawa, T., Koike, H., Oshino, Y., Tachibana, H., “Definition of Road Roughness Parameters for Tire Vibration Noise Control”, Applied Acoustics 66, pp.501-512, 2005.
- 【22】 Fujiwara, T., Meiarashi, S., Namikawa, Y., Hasebe, M.,

- “Reduction of Equivalent Continuous A-weighted sound pressure levels by Porous Elastic Road Surfaces”, *Applied Acoustics* 66, pp.766-778, 2005.
- 【23】 Heystraeten, G. V. and C. Mouraux, “Ten Years’ Experience of Porous Asphalt”, *Transportation Research Record* 1265, pp.34~40, 1990.
- 【24】 Hibbs, B.O. and R.M.Larson, “Tire Pavement Noise and Safety Performance”, FHWA, Final Report, FHWA-SA-96-068, 1996.
- 【25】 ISO 11819-1 : 1997(E), “Acoustics-Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise-Part 1: Statistical Pass-By method”, 1997.
- 【26】 ISO 13472-1 : 2002(E), “Acoustics-Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ-Part 1: Extended surface method”, 2002.
- 【27】 Kragh, J., “Traffic Noise Measurement at Asphalt Road Surfaces,” *Proceedings of the International Tire/Road Conference* 1990, Gothenburg, Sweden, pp.113-114, 1990.
- 【28】 Kuemmel, D. A., J. R. Jaeckel, A. Satanovshy, S.F. Shober, R. B. Schmiedlin, *Impacts Related to Pavement Texture Selection, Final Report, Report No. WI/SPR-6-96*, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 1997.
- 【29】 Mirza, M.W. and Witczak, M.W., “Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements,” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.64, pp.393-430, 1995.
- 【30】 Plotkin, K J, M L Montroll and W R Fuller, *The generation of tire noise by air pumping and carcass vibration. Proceedings of Inter-Noise 80*, 1980.
- 【31】 P.M. Nelson and S.M. Phillips, “Quieter Road Surfaces”, *TRL Annual Review*, TRL Limited, UK, 1997.

- 【32】 Roberts, F. L., Kandhal, P.S., Brown, E. R., Lee, D. Y., and Kennedy, T. W., “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, NAPA Education Foundation, Second Edition, Lanham, Maryland, 1996.
- 【33】 Robertson, S., Ward, H., Marsden, G., Sandberg, U., Hammerstrom, U., “The Effect of Speed on Noise, Vibration and Emissions from vehicles”, Working Paper R 1.2.1, Contract No. RO-96-SC.202, VTT Communities & Infrastructure, Finland, 1998.
- 【34】 Sandberg, U., ”A Road Surface for Reduction of Tire Noise Emission,” Inter-Noise 79, Warszawa, Poland, September 11-13, 1979.
- 【35】 Sandberg, U. and Jerzy A. Ejsmont, “Tyre/road noise–Reference Book”, Publisher: INFORMEX, Harg, SE-59040 Kisa, Sweden, 2002.

