



中華民國音響學會九十年會員大會
暨第十四屆學術研討會
台灣·台北·16 November 2001



吸隔音牆背板共振幅射問題對戶外插入損失 性能預測與環境聲場模擬探討

盧威宇¹、王偉輝²

¹ 宇泰威工程有限公司 總經理、系統工程博士候選人

² 國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系 教授

網址: www.luweiyu.com.tw

電話: 0932-023-043 ; 02-2547-4975

E-mail: luweiyu6050@yahoo.com.tw

摘要

在吸隔音牆設計過程中，以一般常用隔音牆設計分析公式或透過環境聲場分析軟體預測其性能，發現隔音牆於現場設置完成後，並無法達到預期隔音效果。本研究即針對此現象進行理論分析與現場實測比較，文中參考日本土木研究機構所設計的遮音壁性能測試法，並藉由國內第一座吸隔音牆戶外插入損失試驗場所進行測試，以量測隔音牆受聲壓後背板之振動及聲輻射響應頻譜，並可依此瞭解隔音板的插入損失頻譜特性，再以此插入損失特性修正隔音牆之穿透損失，輸入聲學分析軟體，來正確有效預測隔音牆完工後之現場環境噪音分佈。循此正確的預測模式，因而使我們能夠正確掌握隔音牆對環境聲場的分佈特性。

關鍵字：聲輻射響應頻譜、插入損失、穿透損失

一、前言

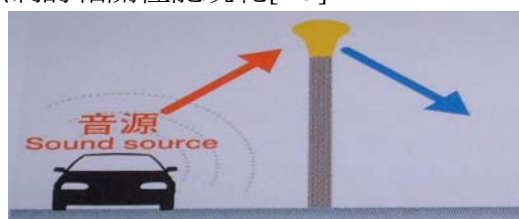
以往公共工程及交通建設中，對通過都會區的快速道路、捷運設施或高速鐵路，為防止噪音所設置的吸隔音牆在設計階段，插入損失(Insertion loss, IL)估算最常以 Maekawa、Kurze、Anderson 所提的經驗公式與由射線理論計算反射及繞射效應相關理論[1][2]進行預測分析，或透過各種環境噪音數值分析[3][4]，或以模擬聲場軟體來決定隔音牆應採用的高度及其插入損失效果。但往往周圍的環境

噪音值在隔音牆設置後，無法獲得如預期令人滿意的隔音功效，甚而出現隔音牆在設置後比設置前的噪音更大的現象[5]。此種放大的噪音其頻率大多集中在250Hz 以下屬低頻噪音，係由結構體的共振所產生，透過地表等介質的傳遞，長期在此噪音環境[6]，還會引起神經衰弱症候群，如頭痛、頭暈、耳鳴、記憶力衰退、視力降低等。

近代為因應高速鐵路、捷運等新式快速交通工具由於輪軌振動所引發之基板、胸牆、隔音牆等之低頻輻射噪音，專家試圖加高隔音牆或在其上方增設干涉型(如楔型、T型、Y型、箭頭型)或各式的消音筒試圖增大繞射角降低中低頻帶的繞射音量[8][9]如圖一至圖四所示，雖然在安裝上述裝置後可增加(3~7)分貝的隔聲效果，但國內工程界對於此類隔音牆頂部所加設的干涉裝置較為陌生，過去也一直未針對此類特殊功能的隔音牆去制訂相關性能規範[10]。



圖一.頂部加裝消除繞射音裝置之隔音牆(日東紡)



圖二.頂部為干涉裝置型隔音牆



圖三.頂部加裝消音圓筒之隔音牆(南亞)



圖四.弧形隔音牆

本研究將參考日本財團法人土木研究機構對此類防音設施所進行的相關聲響性能測試方法[11]，除了將對頂邊具有干涉型或消音筒的隔音牆研擬戶外插入損失性能測試規範，也將對傳統隔音牆板共振輻射問題對插入損失性能與環境聲場影響進行探討。並就隔音牆插入損失值，中低頻隔音效果不佳現象，提出改善方案，以提供未來吸隔音牆設計一套完善的參考準則。

二、隔音板聲學性能分析與改善

本研究以隔音牆戶外插入損失試驗中，分別量測頂部干涉消音裝置安裝前後之受音位置聲壓頻譜值，作為下一步電腦軟體數值分析時之輸入參數修正依據。在音場模擬軟體 RAYNOISE 中，以試驗場所建立數值分析模型，再將聲功率值輸入軟體參數中，求得隔音牆後方不同受音點之聲壓值大小，再與試驗場音壓量測值作為比對，待調整音場模擬軟體材料穿透損失(Transmission loss, TL)參數至所得之音壓為正確值時，此時之穿透損失值，便是下一步欲模擬分析隔音牆在大環境之聲場所應輸入之穿透損失參數，依據上述分析過程，再進行頂部安裝干涉消音裝置後之頂邊繞射係數值修正工作，最後將獲得此隔音牆板套裝軟體以 RAYNOISE 模擬環境聲場分布時，所應輸入之各頻帶穿透損失與邊界繞射係數值。

當隔音板性能無法達到預期之環境噪音改善效果時，勢必需更換或調整隔音板之內構材料，而材料的選取，則需進行隔音板振動與聲響間之頻率響應轉換函數(Frequency Response Function,FRF)分析[13]，選擇該轉換函數較低者為改善依據。

隔音牆之性能所以無法達到預期效果有兩項主要原因，由於鐵路列車之輪軌滾動噪音或道路車輛輪胎與路面間的摩擦音均會同時產生地面振動，而此地表振動的傳遞，往往藉由胸牆、隔音牆固定框架等的振動，讓隔音牆板產生低頻共振現象。再加上噪音聲波進入隔音牆板間，產生空腔共振。此兩效應將使隔音牆金屬背板產生劇烈振動，而該振幅大小將決定出背板結構輻射至遠場之聲壓大小[12]。

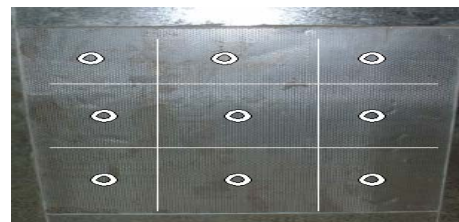
在進行戶外隔音牆插入損失試驗前，先進行背板結構自然振頻量測，由於實際噪音現場環境，在中低頻產生問題處，常以振動型式由地表傳至胸牆或隔音牆固定框架而產生結構共振問題，因此先以大型激振錘(hammer)如圖五所示，敲擊隔音牆之框架底座，即可量得隔音板單體的頻率響應函數，如圖六所示，此共振頻率模態將有助於觀察背板輻射現象產生的指標。

由此量測過程可獲得該板受到地表振動影響時，在何種頻帶範圍較易引發結構共振現象。



圖五. 以大型 hammer 敲擊固定隔音牆框架之底座 圖六. 試驗場量測背板結構振動頻譜圖

爲了驗證前述量測的正確性，再將部分隔音牆板移至無響室中進行結構振動與聲響之模態分析，如圖七所示，因爲在無響室內不受環境噪音的影響。於無響室隔音板前後方取相對應之九宮格，並依序標出座標位置，如圖八所示，再以激振錘於前板敲擊，並依序量測出背板之振動與音壓響應頻譜，如圖九、圖十所示。在無響室內量測與戶外量測最大差異在於地面效應的影響。



圖七. 無響室內量測背板結構振動頻譜

圖八. 隔音板量測九宮格位置示意



圖九. 無響室內量測背板結構振動頻譜

圖十. 隔音板量測九宮格位置示意

經由前述實驗流程，利用系統之動性矩陣可建立振動速度與振動力之關係如下：

$$\begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{19} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{29} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{91} & M_{92} & \cdots & M_{99} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_9 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 $[M_{ij}]$ 稱為動性矩陣(mobility matrix)， M_{ij} 為傳遞動性(transfer mobility)係數，代表隔音板位置 j 處施以單位簡諧力，而在板後位置 i 所量得知振動速度。

同時也可量出背板結構輻射音壓與前板振動力之關係式如下：

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{19} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{29} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{91} & H_{92} & \cdots & H_{99} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_9 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

H_{12} 及 H_{21} 為音壓頻率響應函數。 H_{12} 代表隔音板位置 j 處施以單位簡諧力，而在板後位置 i 所量得知音壓。

由(1)、(2)兩式可導得背板振動速度與輻射音壓的關係式如下：

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{19} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{29} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{91} & H_{92} & \cdots & H_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{19} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{29} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{91} & M_{92} & \cdots & M_{99} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_9 \end{Bmatrix} = [H][Z][V] \quad (3)$$

其中， $Z = M^{-1} = \text{Impedance}$

因此由背板振動速度與結構輻射音壓響應頻譜關係式來判斷隔音牆板在結構內，或在背板中所需附加的制振材料響應函數特性。

三、戶外插入損失實驗方法與步驟

3.1 測試場地

選擇一處戶外場地，並滿足下述條件：長 20 公尺，寬為 10 公尺之長方形平面，如圖十一所示，路面平坦(最好是以混凝土實心路面)，可以維持數分鐘無其他車輛經過，且風速不至太大，氣候限制可參考 ISO 10847 戶外隔音牆量測標準。



圖十一.隔音牆戶外插入損失試驗場示意圖

3.2 測試項目

以直接量測方式，於同一場地量測隔音牆安裝前與安裝後，於同一位置音源分別產生倍頻帶聲功率音量，在不同位置處量測該頻帶聲壓大小差，作為該頻帶

插入損失值。

3.3 測試儀器

3.3.1 訊號產生設備：

- (a) 多頻道頻譜分析儀 (OR25)：作為訊號產生器之用，如圖十二。
- (b) 功率放大器 (power amplifier, B&K 2706) 推動揚聲器之用。
- (c) 頻帶濾波器 (filter, B&K 1617)：過濾訊號產生 1/1 倍頻帶訊號
- (d) 指向性喇叭 (isotropic speaker)：產生各頻帶聲音。

3.3.2 接收訊號設備：

- (a) 聲音強度儀 (sound intensity probes ,B&K Type 3520)：接收聲強訊號計算音源功率，如圖十三。
- (b) 信號轉接器 (acoustic frond end, B&K 5966L)。
- (c) 多頻道頻譜分析儀 (multi-channel signal analyzer, B&K3550)：接收聲音強度儀訊號並經 B&K3550 計算，並可量得聲音強度的大小及方向，進而推算該頻帶音源之聲功率大小。



圖十二. 多頻道頻譜分析儀 (OR25)



圖十三. 聲音強度儀 B&K Type 3520

3.4 實驗步驟：

步驟一：

音源處以 1/1 倍頻帶，分別產生中心頻率 63 Hz、125 Hz、250 Hz、500 Hz、1000 Hz、2000 Hz、4000 Hz、8000 Hz。

為確保音源聲功率大小之穩定性，參考 ISO 9614-1 聲功率用定點聲強法以聲強量測推算音源所產生之聲功率大小，聲強量測試意圖，如圖十七所示。

$$W = \iint_s \vec{I} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

該測試場未安裝吸隔音牆前，如圖十四，於距牆面 5 公尺及 10 公尺兩個距離處，及在三種高度 1.2 公尺、2 公尺、2.5 公尺之位置，分別量測聲壓頻譜值 $SPL_{un\ a-b}$ 其中 un 代表未安裝隔音牆狀態，a 表示隔音牆後之水平距離，b 代表量測高度。



圖十四. 安裝隔音牆前之試驗場測視圖



圖十五. 安裝隔音牆後之試驗場測視圖

步驟二：

將吸隔音牆試件以全尺度安裝排列為口字形，兩側邊各寬 10 公尺，中央邊長為 20 公尺，該全尺度試件應包含等比例型鋼、彈簧固定夾、螺栓、頂蓋板或頂部消音圓筒裝置等。該隔音牆於安裝完成固定後，如圖十五所示，透過聲強推算未安裝隔音牆前之各個頻帶中心頻率之相同聲功率，且於步驟一相對位置量測

音壓值 $SPL_{in\ a-b}$ 其中 in 代表安裝隔音牆狀態， a 表示隔音牆後之水平距離， b 代表量測高度，如圖十六所示。



圖十六.安裝隔音牆後 OR25 與 NA-27 交互比對量測圖

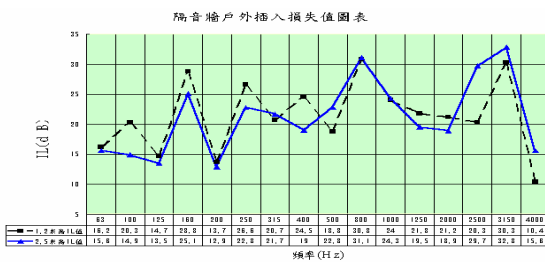


圖十七.半圓場聲功率以聲強推估量測圖

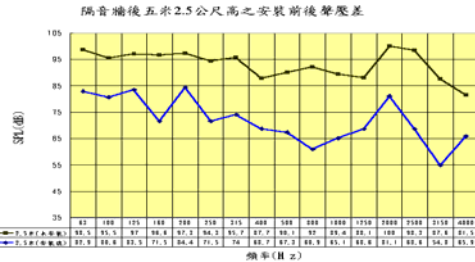
步驟三：

將步驟二所得之各量測值與步驟一相對數值相減，即可獲得 IL 頻譜，如圖十八與十九所示。

$$IL_{a-b} = SPL_{una-b} - SPL_{ina-b} \quad (5)$$



圖十八. 安裝隔音牆前後插入損失頻譜圖



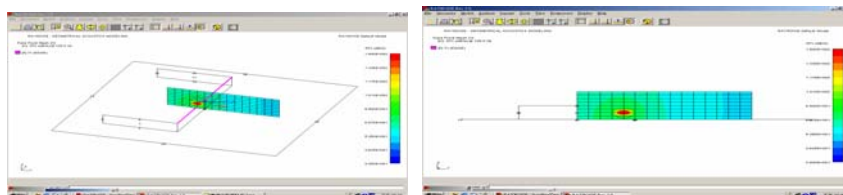
圖十九.安裝隔音牆前後音壓頻譜圖

於(5)式之計算中，當頂邊裝有繞射防止裝置之隔音牆需分兩次進行量測，分別是加裝繞射防止裝置前後各測一次，以利未來評估及推算邊界繞射參數輸入時修正之用。

四、隔音牆對環境聲場之模擬分析與修正

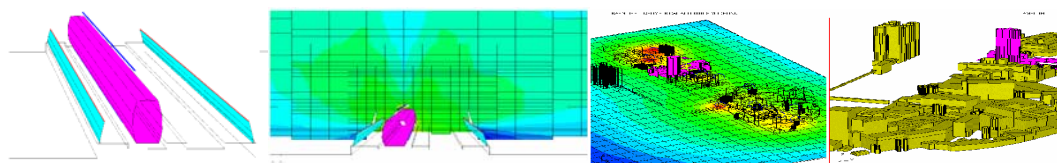
利用音場模擬軟體 RAYNOISE，發展噪音控制預估技術，在過去使用經驗中發現，其數值分析結果在 125Hz 以下安裝防音牆後的環境聲場，預測值與實際聲場有頗大差距。其主要原因在於隔音牆單元受低頻音能引發本體共振問題，而其背板結構表面振動後，表面振動波長大於聲音輻射波長(Supersonic)或結構表面振動波數小於聲音輻射波數，此時將產生遠場聲輻射效應[12]，而隔音牆背板後的低頻聲場大小，有可能高過音源聲場[7]。

因此在使用 RAYNOISE 軟體時，隔音板穿透損失參數(TL)輸入時便要經過修正，而該修正方式即是依據戶外插入損失試驗之 IL 值或環境音壓大小，藉由逐次調整隔音牆該頻率穿透損失參數，使 IL 或聲場大小符合現場實驗量測數值，如圖二十所示，該參數即是此隔音牆在模擬預測環境聲場中較為正確的參數。而對於具有特殊干涉型的頂邊消音裝置，則藉由 RAYNOISE 軟體中之邊界繞射條件係數加以修正，以獲得繞射係數輸入參數。



圖二十. 經過參數修正之隔音牆對環境聲場分布圖

噪音控制預估模式是利用音場模擬技術，將噪音源與具有噪音問題的空間，建構於音場模擬軟體上進行電腦模擬的工作，此即音場的預估工作，由上述修正方式確立正確的隔音材料穿透損失參數及繞射係數後，利用此方法，應用至預測鐵路沿線隔音牆環境聲場的模擬分析結果如圖二十一所示。



圖二十一由正確之隔音牆輸入參數模擬鐵路對環境聲場分布圖

五、討論

由過去常用防音牆之實測分析研究中[7]，所發現之背板低頻共振幅射現象，將導致開孔吸收式防音牆於中低頻隔音效能大幅降低，甚至比音源該頻帶音能更大，因而造成防音牆完成後民眾仍感受到噪音困擾的情況不斷發生。

利用 RAYNOISE 聲場分析軟體，將此隔音牆以往在實驗室中所量測之吸音率 (α) 與穿透損失值 (TL) 參數輸入後，由模擬聲場中獲得第一階段插入損失及聲壓頻譜值。

由於 RAYNOISE 分析出的收音位置聲場與戶外插入損失收音位置在實際聲場相比較，在中低頻位置會有極大誤差，因此便將 1/1 倍頻各頻帶穿透損失值進行修正，待輸入穿透損失值所獲得之收音位置聲壓值與實際測試場量測值相符時，此刻之 1/1 倍頻最終穿透損失值，即為未來模擬隔音牆設置現場之輸入正確參數。

每一隔音牆板均有其共振頻域模態[13]，該頻域反應模態將可決定當板內空腔共振現象發生時的振幅大小，而背板振幅頻域響應所換算得之表面波數將決定出結構輻射至遠場聲壓大小。

本研究未來將提出改善共振結構輻射傳音問題的解決之道，即設法應用適當制振材料披覆於背板結構上以抑制共振後結構輻射音的產生[14]，初步由實驗結果發現改善效果極佳[5]。

六、結論

一般防音牆性能評估僅透過無響室與迴響室間所進行的穿透損失測試後的數據，除了無法呈現防音牆於實體現場安裝後噪音繞射現象的行為模式，更因加勁後的樣本與實際防音牆安裝時板間空氣層共振之背板邊界條件並不一致，而呈現出中低頻共振結構輻射音對收音處的影響，這便是過去防音牆設計單位對於現場防音牆實體環境噪音改善成效，無法充分掌握的主要原因。

透過此戶外插入損失試驗場所獲得之隔音牆安裝前後之聲壓頻譜圖，可提供我們瞭解該試體之隔音牆面現場隔音性，該數值已包含了聲音的穿透音、繞射音及空腔共振後結構背板輻射遠場之音壓。

經由本研究之振動及聲輻射模態量測將可掌握各種不同型態隔音牆板之動性，再配合戶外隔音牆插入損失實驗可決定隔音牆背板輻射值，再由戶外隔音牆插入損失實驗可決定隔音牆現場實體安裝的隔音性能，以 RAYNOISE 環境噪音分析軟體來預測未來高速鐵路延線隔音材料各路段的適用情形，以供未來防音牆設計單位在制定噪音防治產品防音性能評估的參考。

七、參考文獻

1. W.F.Cheng and C.F.Ng, The acoustic performance of an inclined barrier for high-rise residents, *Journal of Sound and Vibration*, pp.295-308(2001) 242(2).
2. 陳金文，噪音量測與控制技術應用，第 291-296 頁，台北，科技圖書股份有限公司(1998)。
3. Hon Yiu Wong and Kai Ming Li, Prediction models for sound leakage through noise barriers, *The Journal of the Acoustical Society of America* .109, pp.1011-1022, March 2001.
4. J. Nicolas and G. A. Daigle, Experimental study of a slow-waveguide barrier on finite impedance ground, *J. Acoust. Soc. Am.*80 (3), pp.869-876, September (1986).
5. 王偉輝、劉德源、盧威宇，2001，國內各式防音牆性能改善研究，中華民國振動與噪音工程學會第九屆學術研討會，中華大學。
6. B J Smith and R J Peters. , *Acoustics and noise control* , Addison Wesley Longman England, pp.119-120 (1996).
7. D.C.Hothersall, K.V.Horoshenkov, P.A.Morgan and M.J.Swift, Scale modelling of railway noise barriers, *Journal of Sound and Vibration*, pp.207-223 (2000) 234(2).
8. 飯田 一嘉，”振動、騒音対策の方法とそのための材料選定”，*工業材料* Vol 49, No9, pp17-25, 九月號 (2001).
9. Y. Shono , T. Matsumura and Y. Momiyama, Development of cylindrical noise-reduction unit, *Inter-noise2000*, pp.1451-1454(2000).
10. 公路局，公路雜項工程隔音牆規範，第 3 章第 1 頁-第 32 頁，台北，公路局 (2001)。
11. 騒音低減効果の高い遮音壁「ミニトナカイ型防音装置」技術審査証明報告書，財團法人土木研究センター，平成 12 年 1 月。
12. 邱建霖、陳柏台，無響室中的輻射方向性計算與量測，台灣海洋大學系統工程暨造船學研究所碩士論文，2000 年 7 月。
13. K.V.Horoshenkov and K.Sakagami, A method to calculate the acoustic response of a thin, baffled simply supported poroelastic plate , *The Journal of the Acoustical Society of America* Vol 110, No2 , pp904-917, August 2001.
14. 板野 直文，”屋外環境で施工可能な吹付型吸音材”，*工業材料* Vol 49, No9, pp67-70, 九月號 (2001).