

# 防音牆戶外插入損失測試規範及邊界條件影響研究

盧威宇<sup>1</sup>、王偉輝<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 宇泰威工程有限公司 總經理、系統工程博士候選人

<sup>2</sup> 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

防音牆由各頻帶穿透損失值所決定之 STC 等級，進而預測其於現場安裝後的插入損失效果，在過去一直是防音牆工務設計單位所採用的準則。但由實驗結果證實，由於測試樣板與實際防音牆板尺寸及邊界條件不同，使由實驗室測得之防音牆穿透損失頻譜與實際狀況有顯著誤差。因此本研究將在實驗室中，量測防音牆穿透損失及背板振動聲輻射頻譜，將其結果與戶外全尺寸防音牆振動聲輻射頻譜相比較，以瞭解兩者主要差異頻帶範圍，並確立誤差之頻率範圍，以符合實際安裝後防音牆之穿透損失值。

針對新式與多種變化造型的防音牆設計發展，行政院公共工程委員會近期制訂公佈之第 02868 章吸音圓筒類隔音設施規範，內容雖已針對國內對防音牆頂邊加裝消音圓筒之需求而提出其性能要求，但對該項聲學性能要求，並未說明明確的測試方式。本文擬參考 ANSI-S12.8 及 ISO-10847，並彙整日本建設省公告第 1324 號...等戶外防音牆插入損失相關性能測試方法，為國內研擬一套較為完整的防音牆戶外插入損失之測試規範，以供未來防音工程設計單位應用參考。

關鍵字：結構聲輻射、振動聲輻射響應頻譜

## 一、前言

防音牆的吸隔音效果與其使用的材料及幾何形狀有關，就防音牆外型的發展而言，具有傾斜角的防音牆及弧形外型的防音牆有較佳的防音功效，如圖 1、圖 2 所示。而防音牆頂緣的形狀又可增加繞射角及整體插入損失性能，一般而言防音牆頂緣消音裝置可分為單緣(single edge)與多緣(multiple edges)兩類，包括箭頭形、Y 形、T 形、圓筒形、鹿角形或蘑菇造型...等如圖 3-5。就實際安裝後的效果量測[4,5,6,7,8]，防音牆約可增加插入損失 3 dB 左右。但就國內目前的工程合約規範而言，並無頂緣消音裝置防音性能的測試規範可資依循，因此，本文擬參考美國國家標準 ANSI-S12.8 及國際標準組織之 ISO-10847 有關道路防音牆插入損失性能相關驗證標準，並以日本建設省已採用多年的第 1324 號戶外防音牆插入損失相關性能測試方法，為國內制定一套能夠驗證各種類型防音牆頂邊消音裝置插入損失性能的測試方法，並就目前實驗室與現場防音牆穿透損失值在低頻範圍的差異性作探討與分析，並尋求改善之道。



圖 1.具不規則傾角造型的防音牆[1]



圖 2.弧形造型的防音牆[1]



圖 3.(a)圓筒形頂邊消音裝置[2]



圖 3.(b)圓筒形頂邊消音裝置[2]



圖 4.(a)蘑菇形頂邊消音裝置[2]



圖 4.(b)蘑菇形頂邊消音裝置[2]

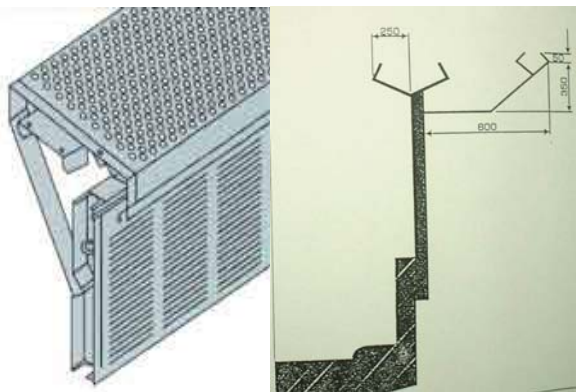


圖 5.倒 L 形與鹿角形消音裝置[3]

## 二、基本原理

防音牆的設計在過去主要以穿透損失值加上繞射衰減量來推估插入損失值[9]:

$$\Delta L = \Delta L_d - 10 \log_{10} \left[ 1 + 10^{-\frac{(\Delta L_t - \Delta L_d)}{10}} \right] \quad (1)$$

式中

$\Delta L$  防音牆插入損失值 (d B)

$\Delta L_d$  防音牆繞射噪音衰減值 (d B)

$\Delta L_t$  防音牆穿透損失值 (d B)

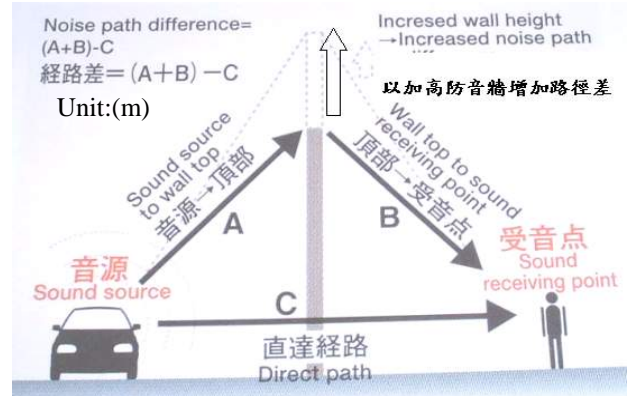


圖 6. 防音牆插入損失值與繞射路徑差、穿透損失值關係圖[2]

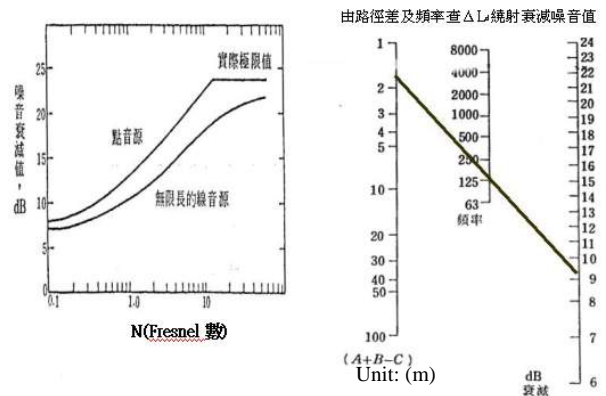


圖 7. 繞射路徑差 Fresnel 數對照圖

由式(1)可知,插入損失值( $\Delta L$ )與繞射路徑差衰減值( $\Delta L_d$ )及防音牆材料穿透損失值( $\Delta L_t$ )有關,其中 $\Delta L_d$ 可利用圖6及圖7決定。

由圖6可得音源與受音位置間的傳播路徑差 $\delta = A+B-C$ ,進而 Fresnel 數 $N = 2\delta / \lambda$ ,  $\lambda$ 為波長;再由圖7查表取得防音牆繞射噪音衰減值( $\Delta L_d$ )。或可代入下列 Maekawa 式[14],直接計算得各頻率繞射噪音衰減值( $\Delta L_d$ ):

$$\Delta L_d = \begin{cases} 0 & N < -0.1916 - 0.0635 \epsilon \\ 5(1 + 0.6\epsilon) + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tan \sqrt{2\pi|N|}} & (-0.1916 - 0.0635 \epsilon) \leq N \leq 0 \\ 5(1 + 0.6\epsilon) + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} & 0 \leq N \leq 5.03 \\ 20 & N \geq 5.03 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\epsilon = 0$  為防音牆情況;  $\epsilon = 1$  為斜坡情況。

另者,  $\Delta L_t$  係由防音牆試片在實驗室依照 CNS8466 或 ASTM E413 量得各頻率之穿透損失值。

由前期研究[10]之實驗得知，穿透損失若利用透過迴響室與無響室間之測試窗放置防音牆樣品測得，其佈置如圖 9，此樣品裝置情況之邊界條件係四邊固定，與實際防音牆安裝之邊界條件，如圖 8，並非相同，除了無法呈現防音牆於實地現場安裝後噪音繞射現象的行為模式外，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，因而中低頻結構振動輻射音對受音處產生明顯差異，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。

在實驗室所量得的穿透損失值或於戶外防音牆全尺寸插入損失性能試驗，聲音傳遞的方式主要可分為兩類，分別為結構音(structureborne sound)與空氣音(airborne sound)，其中空氣音對插入損失量的影響，Garai 及 Guidorzi [11]所進行的相關實驗得知一個現象，即在頻率範圍 200Hz-5000Hz 間，由戶外測試所得之插入損失值比實驗室內經由穿透損失量測所推算出的插入損失值為高[11]。因此設計單位以實驗室穿透損失值經由式(1)去計算防音牆插入損失值，在設計戶外防音牆時，安全係數不需設計很大就可獲得不錯的隔音效果，但是若將 200Hz 以下頻率範圍音壓以實驗室穿透損失數值代入將會有明顯的誤差出現，因為這時必須考慮結構音(structureborne sound)對防音牆背板聲輻射的影響[10]。

藉由戶外插入損失頻譜值，逆推算低頻處正確的防音牆穿透損失值，該修正值才可作為在環境聲場模擬軟體中的防音牆之正確穿透損失輸入參數，以便獲得較為正確的聲場模擬效果。

### 三、實驗比較

#### 3.1 插入損失值比較試驗

於無響室內以全尺寸防音牆量測插入損失值，如圖 8。並將該防音牆試片於測試窗進行穿透損失值量測，如圖 9。

由測試窗所量得的穿透損失值代入式(1)中，所推算出的插入損失值與無響室內全尺寸防音牆插入損失值相比較，如圖 10 顯示於低頻(500Hz以下)誤差達 10dB。而在高頻範圍亦有 Garai 及 Guidorzi 所發覺之現象。



圖 8 無響室全尺寸防音牆插入損失量測



圖 9 測試窗穿透損失量測

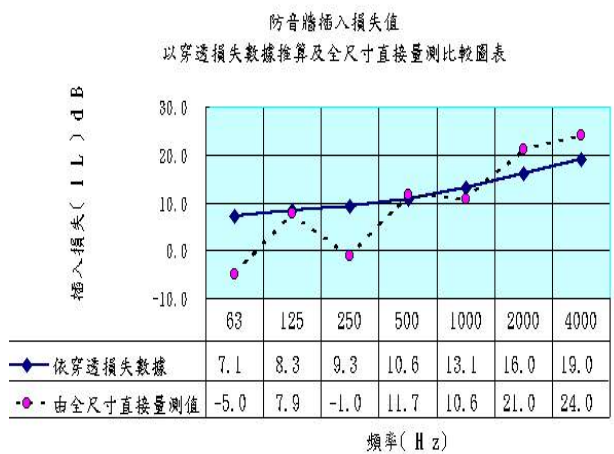


圖 10 無響室防音牆全尺寸量測與測試窗穿透損失推算之插入損失比較

#### 3.2 防音牆背板結構振動輻射聲壓響應頻譜比較試驗

本實驗為進行戶外全尺寸防音牆背板受結構振動所輻射的音壓頻率響應圖，量測佈置如圖 11，圖中防音牆前板與背板分別劃九宮格，並在前板以激振槌於各點激發寬頻振動，並於背板九宮格各點量測振動加速度值與 30 cm 外位置之聲壓響應頻譜。以相同的實驗方法於實驗室穿透損失測試窗進行同樣的結構振動輻射的音壓頻率響應圖，量測佈置如圖 12，兩者頻譜圖相互比較其關係，以驗證結構音傳導以低頻為主要範圍。

本實驗分別於全尺寸防音牆與穿透損失測試窗樣板防音牆進行激振實驗，於防音牆前板受音面，以激振槌(hammerkit)激發板結構寬頻振動，量測防音牆背板結構振動所引起的聲壓響應頻譜，量測結果如圖 13 與圖 14。



圖 11 (a) 戶外全尺寸防音牆量測



圖 11 (b)戶外全尺寸防音牆量測

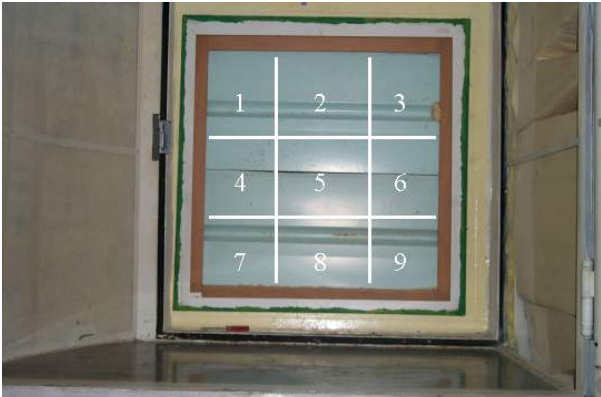


圖 12 (a)實驗室內穿透損失測試窗量測



圖 12 (b)實驗室內穿透損失測試窗量測

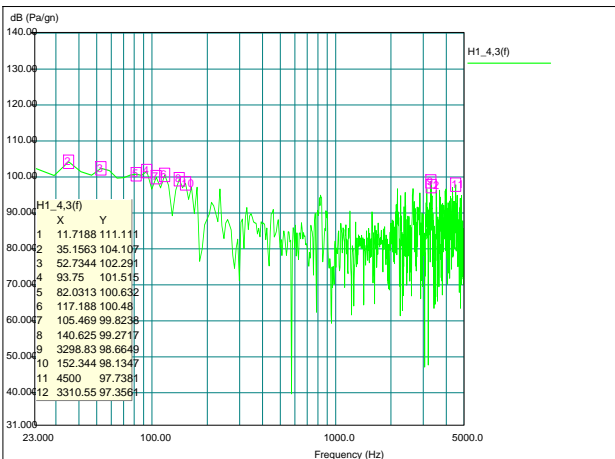


圖 13 戶外全尺寸防音牆背板振動輻射音壓響應頻譜

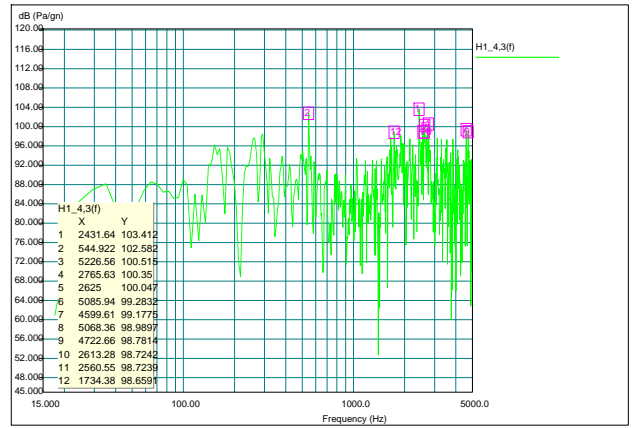


圖 14 實驗室測試窗防音牆背板振動輻射音壓響應頻譜圖

### 3.3 全尺寸防音牆以音能激發背板振動輻射聲壓響應實驗

為模擬戶外全尺寸防音牆受低頻音壓作用時之背板輻射音量與激振鏈激發時的響應頻譜相關性，實驗中以音源產生器在防音牆前方發出單頻音能，如圖 15，以獲得防音牆背板之振動輻射音壓響應頻譜，圖 16 是 125Hz 音源的背板振動輻射音壓響應頻譜，以判斷該方法的適用性。



圖.15 (a)以音源產生器激發防音牆背板結構輻射音壓實驗圖



圖.15 (b)以音源產生器激發防音牆背板結構輻射音壓實驗圖

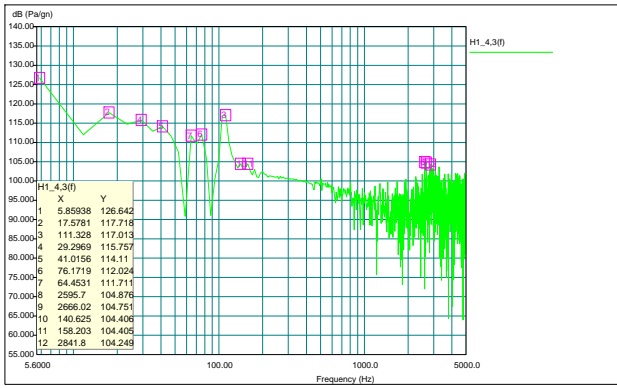


圖.16 以音源產生器激發防音牆背板結構輻射音壓響應頻譜圖

### 3.4 結果與討論

#### 3.4.1 插入損失值低頻的差異性比較試驗

由圖 10 中，於無響室所進行的全尺寸防音牆插入損失數值與實驗室測試窗樣本量得的穿透損失值所推算的插入損失數據，兩者相比較，有以下兩結論：

1. 由實驗室測試窗所量得的穿透損失頻譜代入式(1) 所換算出的插入損失在 250Hz 以下數據，將高估於全尺寸防音牆試體數據有 5-10 dB 上下的誤差。
2. 為獲得防音牆板較為正確的低頻穿透損失值，在 250Hz 以下的穿透損失值，需經由全尺寸防音牆插入損失值，以式(1)逆推算穿透損失數值。

#### 3.4.2 防音牆背板結構振動輻射聲壓響應頻譜試驗

由圖 13 與圖 14 的振動聲壓響應頻譜圖可知，由實驗室穿透損失測試窗大小的防音牆板樣本所獲得的背板振動聲壓響應頻譜，範圍多以 250Hz 以上高頻結構輻射音為主，而戶外試驗場的背板振動聲壓響應頻譜，範圍則為 200Hz 以下的低頻結構輻射音，這顯示戶外全尺寸防音牆低頻音能當經由地面振動或結構音傳遞引起共振現象時，將無法由實驗室穿透損失樣本來獲得實際隔音效果。

#### 3.4.3 以音源產生器激發背板振動輻射音壓響應實驗

為獲得全尺寸防音牆前板受到聲壓作用下，背板振動聲輻射的情形，由圖 16 可知背板輻射的現象主要出現在 100Hz 以下的低頻範圍，此現象也正是全尺寸防音牆板低頻處隔音效果降低的主要原因。

## 四、防音牆效能預測模擬的正確步驟

目前常用的聲場模擬軟體如 RAYNOISE 或 SOUNDPLANE，在使用時，為模擬都會地區如高速鐵路、捷運、高速公路...等交通噪音防治所安裝的防音牆效能，需先輸入該防音牆的基本材料參數如各頻率吸音率、各頻率穿透損失值及防音牆高度...等，而相關參數值主要是由防音牆材料實驗室測試值作為輸入依據，但往往在進行防音牆模擬分析環境聲場之結果，與實際防音牆工程完工後現場隔音效果並不相符，尤其在 250Hz 以下的隔音效果其差異更為明顯。

為彌補及修正低頻範圍的穿透損失正確數值，對於 250Hz 以下

的穿透損失數值，需經由戶外插入損失值藉由式(1)逆推算穿透損失數值，該穿透損失數值代入聲場模擬分析軟體後，先以戶外測試場不同位置各點音壓量測值與模擬數值進行比對，當誤差量在± 3dB 內即停止修正，如圖 17。此時材料各頻率的穿透損失值便可進一步作為大環境防音牆聲場模擬軟體輸入分析之用，分析結果如圖 18。

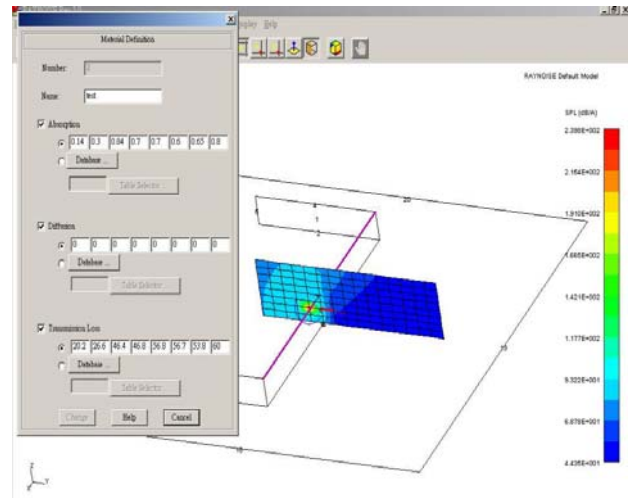


圖 17 由正確穿透損失值輸入的聲場模擬圖

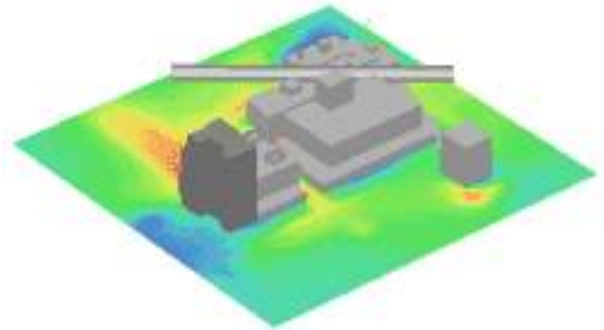


圖 18 模擬防音牆對大環境周界聲場圖

## 五、頂邊消音裝置插入損失量測規範與聲場模擬

防音牆頂緣消音裝置如箭頭形、Y 形、T 形、圓筒形、鹿角形或蘑菇形...等，國內設計單位過去對於此類頂緣消音設施始終無明確的性能測試方式及聲場模擬之參數輸入依據，為了因應新式防音裝置的性能測試，日本建設省第 1324 號戶外防音牆插入損失性能測試方法中也提及頂緣消音裝置亦可以戶外插入損失測試法進行性能評估。因此對於此類裝置的插入損失性能測試方式，也可依以下戶外防音牆插入損失試驗步驟進行[10][12]:

### 5.1 適用範圍

本規範規定在戶外場所測定隔音牆插入損失之方法，以音源於試驗場所之位置，來模擬測試防音牆頂邊消音裝置插入損失功能，本規範亦可適用在各類干涉型或消音筒裝置。

### 5.2 測定條件

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 19 所示，地面平坦(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(小於 5m/s)，氣候限制可參考 ISO 10847[13]戶外隔音牆量測標準。



圖 19 防音牆頂緣消音裝置戶外插入損失試驗場示意圖

### 5.3 測試項目

以直接量測方式，於防音牆頂緣安裝消音裝置前與安裝消音裝置後，於同一位置音源分別產生 63Hz、125Hz、250Hz、500Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz 倍頻帶聲功率音量，在多處指定位置及高度下量測該音壓大小，作為該頻率插入損失值。

### 5.4 使用儀器

#### 5.4.1 訊號產生設備：

- 多頻道頻譜分析儀 (OR25)：作為訊號產生器之用。
- 功率放大器 (power amplifier, B&K2706) 推動揚聲器之用。
- 頻帶濾波器 (filter, B&K 1617)：過濾訊號產生 1/1 倍頻帶訊號
- 指向性喇叭 (isotropic speaker)：產生各頻帶聲音。
- 校正器 (pistonphone, B&K Type 4228)：實驗時使用之標準音，用以校正儀器之準確及實驗數據之正確性，此設備會產生單頻 250 Hz 大小為 124 dB 之聲音。

#### 5.4.2 接收訊號設備：

接收訊號設備亦可採用(RION-NA27) 1/1、1/3 頻帶分析及積分 TYPE 1 精密級噪音計。

### 5.5 實驗方法：

#### 步驟一：防音牆頂緣消音裝置安裝前

##### 1. 音源聲壓量測

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，並由防音牆頂上距地面高 3m 處的音源校正麥克風量測各頻率的音源音壓大小，以便作為後續校正音壓使用，如圖 20。

##### 2. 受音處聲壓量測

該測試場防音牆未安裝消音裝置前，如圖 21，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 20 防音牆頂校正用麥克風安裝位置示意圖



圖 21 頂緣消音裝置安裝前量測音壓圖

#### 步驟二：防音牆頂緣消音裝置安裝後如圖 22

##### 1. 音源聲壓調整

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，調整音源聲功率大小，直到與校正麥克風處量得的數值與先前未安裝消音裝置前的音壓一致為止，始進行後續各點音壓的量測，如圖 23 所示。



圖 22(a) 防音牆頂緣消音裝置安裝圖

## 六、結論

本研究藉由建立戶外吸隔音牆之標準測試法，除了可量測比較不同防音牆各頻率插入損失值外，也可經由換算推得該材料低頻音能的正確穿透損失值，以提供後續模擬大環境聲場較為準確的預測報告。

再者，本方法適用於各類型(干涉式楔型、T型、Y型、箭頭型、消音筒...等)隔音牆插入損失性能測試。

未來的聲場模擬分析中，可由模擬軟體獲得音源聲場的音壓頻譜值，如圖 25，再以 RAYNOISE 或 SOUNDPLANE 軟體分析該交通噪音對於經過都市地區所產生的噪音影響，以決定如何選擇合適的防音牆及設計高度，使該區域能符合環境噪音管制標準如圖 26。



圖 22(b) 防音牆頂緣消音裝置安裝圖



圖 23 以校正用麥克風調整音源功率大小

### 2. 受音處聲壓量測

將防音牆頂緣消音裝置試件安裝完成固定於防音牆後，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。

### 步驟三:換算插入損失值

將步驟二所得之各量測值與步驟一相對數值相減再加上修正麥克風的音壓差如式 3，即可獲得 IL 頻譜，如圖 24 所示。

$$IL_{a-b} = SPL_{una-b} - SPL_{ina-b} + (SPL_{un-re} - SPL_{in-re}) \quad (3)$$

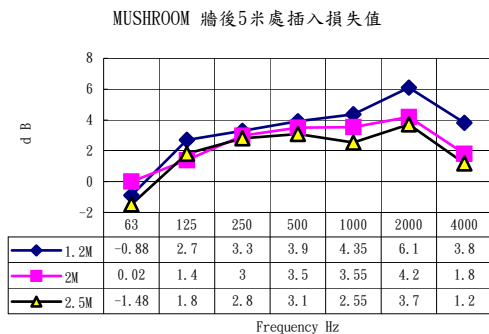


圖 24 頂邊消音裝置插入損失頻譜圖

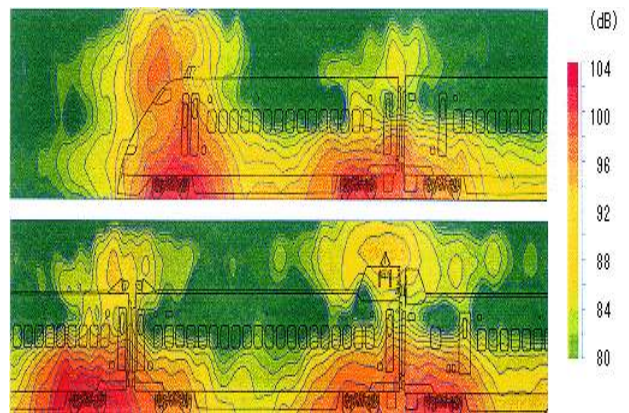


圖 25 模擬高速鐵路軌道噪音頻譜

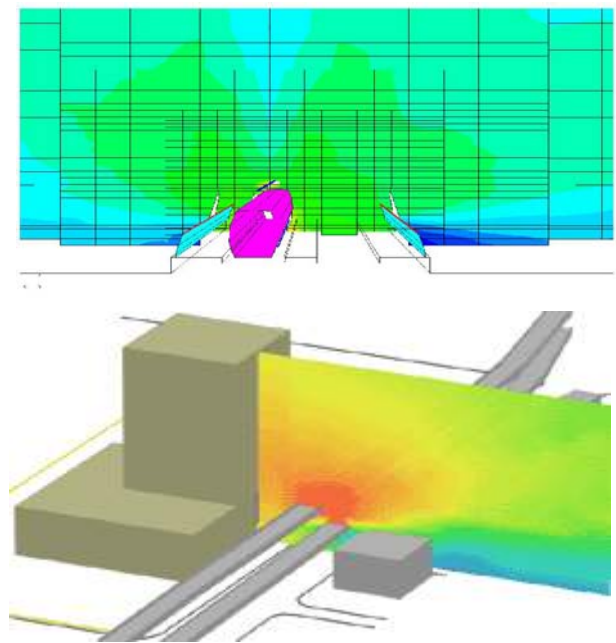


圖 26 鐵路噪音經過都市地區之聲場模擬

## 七、參考文獻

- [1] Benz Kotzen and Colin English, Environmental Noise Barriers, E & Fn Spon, London and New York, pp.47-53(1998).
- [2] 日東紡績株式會社音響事業部產品型錄.
- [3] 森騰 良夫, 日本における高速道路の防音壁について, 隔音牆技術研討會, 工研院工業材料研究所(1998).
- [4] Y.Shono, T.Matsumura, T.Suzuki, Y.Momiyama, Development of cylindrical noise-reduction unit, Inter-noise 2000, pp. 1451-1454,(2000).
- [5] Y.Shono, S.Mori and H.Ochiai, Practical use and verification tests of noise abatement due to absorptive devices at the top of highway noise barriers, In Proceeding of Japan Society of Civil Engineers, pp. 51-60,(1998).
- [6] Kohei Yamamoto, Yutaka Shono, Hiroaki Ochiai, Yoshihiro Hirao, Measurements of noise reduction by absorptive devices mounted at the top of highway noise barriers, Inter-noise 95, pp..389-392 (1995).
- [7] Kyoji Fujiwara, Tomonao Ohkubo and Akira Omoto, A note on the noise shielding efficiency of a barrier with absorbing obstacle at the edge, Inter-noise 95, pp..393-396 (1995).
- [8] Areg Gharabegian, Improving soundwall performance using route silent, Inter-noise 95, pp..385-388 (1995).
- [9] T.M.Barry and J.A.Reagan, FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model, Report No.FHWA-RD-77-108, U.S.Federal Highway Administration, Washington, DC(1978).
- [10] 盧威宇, 王偉輝, 劉德源, 吸隔音牆背板共振輻射問題對戶外插入損失性能預測與環境聲場模擬探討, 中華民國音響學會第十四屆學術研討會, 台灣科技大學(2001).
- [11] Massimo Garai and Paolo Guidorzi, " European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data", The Journal of the Acoustical Society of America . 108, 1054-1067,( 2000).
- [12] 盧威宇, 王偉輝, 劉德源, 吸隔音牆實體插入損失性能戶外測試標準方法, 第六屆中華民國實驗室管理與認證論文發表會, 台北劍潭(2001).
- [13] ISO 10847 Acoustics-In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types °.
- [14] T.M.Barry and J.A.Reagan, FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model, Report No.FHWA-RD-77-108, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC(1978). Myles A. Simpson, Noise Barrier Design Handbook , Report No. FHWA-RD-76-58 , Federal Highway Administration , Washington , DC , (1976).