

漫談噪音防制尖兵 - 隔音牆

余忠和*

摘 要

在我們的生活周圍，隔音牆一直是我們最常看到的噪音防制措施，它不單在交通噪音上被大量採用，事實上在很多的工廠噪音防制措施常常看到隔音牆的傑出表現，不論對於戶外高噪音設備的防制，對於室內的噪音防制也是不錯的措施。隔音牆不是硬梆梆一道牆面式的造型，它可以是二面、三面甚至四面圍起來的構造，材料也是多樣化的，可以是硬質的、也可以是軟質的；可以是固定式的、也可以是移動式的，端賴現場使用需求，是非常富變化而且實用的噪音防制措施。

本文主要介紹隔音牆的防制原理、減音效果計算、防音材料特性以及常見的式樣，希望能透過深入淺出的介紹，讓一般非噪音防制專業的人士能夠對隔音牆有更進一步的認識。

【關鍵字】 隔音牆、隔音材料、吸音材料

*歐怡科技股份有限公司 總經理

一、隔音牆的防制原理及減音量計算

噪音問題的產生，主要是由噪音源產生噪音，再藉由各種傳遞路徑傳到受音者處，造成受音者的困擾，而形成噪音問題。因此，能夠阻礙聲音的傳遞則可以有效的降低噪音，而聲音在空氣中傳播時碰到了障礙物時會有以下三種行徑機制：反射(reflect)、穿透(transmit)以及繞射(diffract)。隔音牆就是在聲音的傳遞路徑上，插入一個有足夠面密度(kg/m^2)的密實材料做為屏障，強迫聲音採取繞射路徑來傳遞，相對於原先在無隔音狀況時的聲音能量，因為隔音牆的阻隔大部份能量被反射或吸收(如果隔音牆內側有襯吸音材料)，因此經由繞射路徑而傳遞到受音者處的聲音能量較原先減少，因而達到了減音效果。隔音牆的減音量端看聲音音波遇到的隔音牆時，容不容易“繞射”到隔音牆的另外一側，因此隔音牆的高度、設置位置、噪音源聲音的波長等都是影響繞射的重要參數，圖 1 為隔音牆的示意圖。

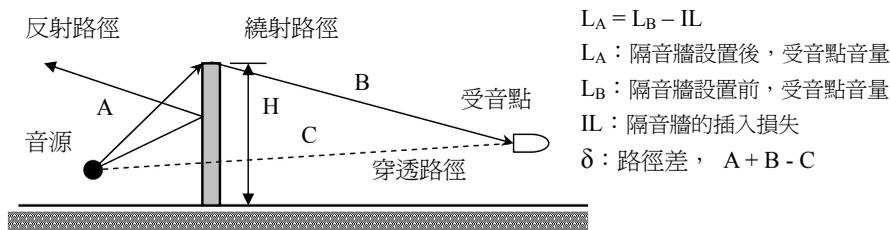


圖 1 隔音牆示意

隔音牆減音效果如何？一般我們都採用插入損失 IL (insertion Loss)做為評估指標，插入損失 IL 指的是沒有隔音牆以及有隔音牆時受音者處的音量差。爲了要聲音不容易繞射，我們都會希望隔音牆蓋得越高越好、或者隔音牆設置位置越貼近噪音源或貼近受音者，這都是正確的作法，此外由於波長較長(低頻)的聲音比波長較短(高頻)的聲音會繞射，因此對於既有隔音牆而言，對於高頻噪音的減音效果比對低頻噪音的減音效果爲佳。

通常噪音防制工程師在計算隔音牆減音量時會採用 Fresnel Number 的計算近似公式，近似公式計算如下：

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2(A+B-C)}{\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

$$IL = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\text{th}\sqrt{2\pi N}} \right) + 5 \text{ (dB)} \dots\dots\dots (2)$$

上(1)式公式中，N 即為 Fresnel Number， δ 俗稱路徑差(即 A+B-C)， λ 為波長。當我們決定了隔音牆的位置以及高度時，就可以簡單的計算出路徑差 δ ，由於波長 (λ) 乘以頻率 (f) 即等於音速 C ($\lambda \times f = C$)。在 20°C 常溫狀況下，音速 C 值約為 344 m/sec，因此可以很快的計算出該隔音牆對於不同頻率 f 之 Fresnel Number N 值，代入(2)即計算該頻率噪音之插入損失。

有的技術資料會將類似(2)式的近似公式以曲線圖，如圖 2 的方式表示，以方便工程師在計算出 Fresnel Number N 值後，藉由圖中橫軸 Fresnel Number N 值，對應到縱軸的隔音牆插入損失分貝數。

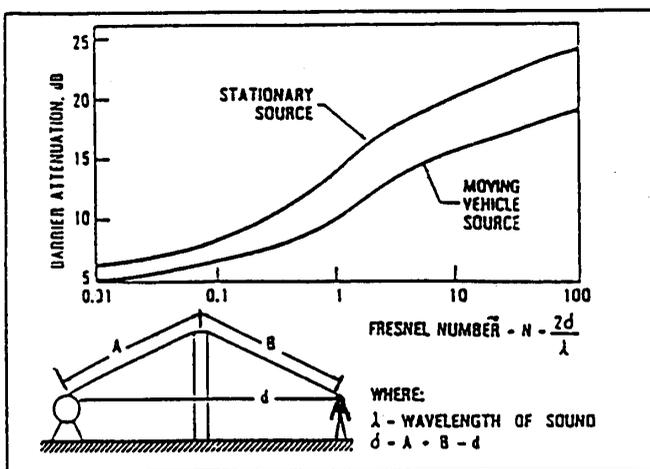


圖 2 Fresnel Number N 與音量衰減值

二、隔音牆減音量計算範例

146 漫談噪音防制尖兵-隔音牆

假設工廠有一台鼓風機，進風口離地高 1.5m，距離鼓風機 30m 外民宅室外，離地面 1.5m 高處位置測得之噪音量為 88.1 分貝，其噪音各頻率測得之分貝數如下表 1， $L_{p, 30m}$ 欄位內各值，廠方計畫在距離鼓風機 15m 處位置建築一道高 3.6m 隔音牆，試計算民宅處噪音量將減少到多少分貝數？

計算路徑差 $\delta = A + B - C$ ，藉由簡單的三角關係，即可算出 $\delta = 0.29$ ，將各噪音頻率的波長 λ 值以及所計算的 δ 值，代入計算隔音牆相對於各頻率噪音之 Fresnel Number N 值(如下表 1)，Fresnel N 欄位內各值，以此 Fresnel Number N 值代入上述(2)式近似公式中，或由上圖中查得縱軸中對應 $I L$ 值，可以求得之各頻率之插入損失值，如上表中之 $I L$ 欄位內各值，將各頻率橫例中的 $L_{p, 30m}$ 欄位內分貝數，減去該橫例中的插入損失 $I L$ 欄位內分貝數，即可得到該頻率噪音在隔音牆設置後之分貝數，如表 1 中 $L_{p, 30m} - I L$ 欄位內值，將各頻率改善後的噪音量($L_{p, 30m} - I L$ 欄位內值)加總後，即可得到隔音牆設置後的計算噪音值為 76.6 分貝，相對於隔音牆未設置前所測得的噪音量 88.1 分貝，該隔音牆預估之減音量 $I L = 88.1 - 76.6 = 11.5$ 分貝。

表 1 各頻率之 Fresnel N 及 $I L$ 值

頻率 (Hz)	波長	Fresnel N	$I L$	$L_{p, 30 m}$	$L_{p} - I L$
63	5.397	0.11	8	72	64
125	2.720	0.22	9	80	71
250	1.360	0.44	10	82	72
500	0.680	0.87	13	82	69
1,000	0.340	1.75	15	83	68
2,000	0.170	3.5	18	72	54
4,000	0.085	7	21	62	41
8,000	0.043	14	24	52	28
			L_{AP}	88.1	76.6

對於一些非噪音領域的人來說，以上案例可能有些地方不是很清楚，首先是如何得到 $L_{p, 30m}$ 欄位內之各頻率噪音值；其次是如何將 $L_{p, 30m} - I L$ 欄位內各頻率噪音值加總為總量 76.6 分貝。對於第一個問題主要是用儀器量測到的，一般噪音計可以量到噪音總量，但好一點的噪音計另外有頻譜量測功能，除了能量測到噪音總

量外，還可以量測在人耳聽力範圍內各個頻率的噪音量，也就是把噪音總量依據頻率特性分解為各頻率噪音量；第二個問題恰巧為第一個問題的逆向分析，是把所計算得到各頻率噪音量“加總”起來得到噪音總量，加總的方法為一般人比較不了解的分貝加法，要說明分貝加法就必需先說明噪音量分貝的定義，而後才能了解分貝加法。基本上噪音量分貝的定義如下：

$$L_p = 10 \times \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\Rightarrow \frac{p^2}{p_0^2} = 10^{0.1 \times L_p}$$

其中 L：音量位準（單位：分貝）

P：音壓量測值（單位：Pa）

P₀：參考音壓值， 2×10^{-5} Pa

因此當數個噪音量 $L_1 \dots L_n$ 相加時，其計算方法(即分貝加法)如下：

$$L_1 + L_2 + \dots + L_n = 10 \times \log \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{p_0^2} \right) \quad \text{dB} \quad \dots\dots(4)$$

以上範例計算隔音牆設置完成後的噪音總量($L_{p, 30m} - I$ L欄位內各頻率噪音值加總為總量 76.6 分貝)，就是依據公式(4)計算得來。

三、隔音牆材料選用

1. 隔音材料的原理

爲了要讓隔音牆有效的阻隔噪音，因此隔音牆所使用的材料必需對聲音有足夠的阻隔性能，而對聲音有良好阻隔能力的材料，通常稱為隔音材料。

隔音材料其阻隔聲音的機制是如何達成的？想像我們在一間密閉的房間裡，周圍是由傳統薄夾板製作而成的輕隔間牆，室內的人可以清晰聽到室外的講話聲音，而且認為薄夾板本來隔音效不好，並沒有進一步去了解爲什麼不好？基本上大

家都知道聲音是一種以空氣為介質傳送的振動波(或稱聲波)，但是當我們在密閉的房間裡，室外的空氣沒有跑進室內來，為何室外的聲音會傳到室內？那是因為室外的聲音(聲波)打在輕隔間室外側牆面上，讓薄夾板產生相同頻率的振動，這個振動傳到室內側牆面上，使得牆面上周圍空氣振動產生聲波，在室內傳遞產生原音重現的聲音，也就讓室內的人覺得室外的聲音傳到室內來了。

或許有人會質疑牆壁面會“振動”？形成空氣振波產生噪音？是的！只是牆壁面振動量非常小，我們感受不出來。反過來說，既然聲波是一種振動波，為什麼我們的皮膚感覺不出來，這是因為聲波的能量非常小，以 60 分貝的音量來說，其壓力變化約只有 0.02Pa (1 Pa = 1 N/m²)，在我們的身體器官中，只有耳膜對聲波最敏感。耳膜直徑約為 1cm，厚度約 0.1mm 左右的薄膜，耳膜對 1,000 Hz 最小可聽音值之振幅位移約 10⁻⁸ mm，因此我們皮膚無法感覺到牆壁面微弱的振動是很正常的，但這些微弱的振動確實能產生聲波的，而讓室內的人感覺到室外的聲音傳進來了。

既然材料阻隔聲音的機制是因為固體振動的關係，因此材料隔音能力的好壞端視材料容不容易振動，一般而言結構厚實的材料，要讓它振動需要更大的能量，所以隔音效果就好，像鋼筋混凝土牆隔音效果就很好，相反的像保麗龍、紙張都不是好的隔音材料，至於我們洗澡用的海綿，具有多孔隙特性，聲音更是容易穿透，絕對不能拿來當隔音材料使用。

在噪音防制工程領域中，我們採用面密度的觀念來評價材料隔音性能的優劣，所謂面密度是指當你站在材料正前方看過去，單位材料面積的重量就是面密度(單位kg/m²)，它和我們用以體積為分母所計算的密度(kg/m³)是不一樣的，通常面密度越高的材料隔音性能越好，所以密度高的材料但厚度薄一點，如鋼板等；或者是密度差一點的材料但厚度厚一點，如磚牆、RC牆，都是不錯的隔音材料。

2. 隔音性能評估指標

一般我們評估隔音材料性能所採用的評估指標為透過損失(或稱穿透損失, TL, transmission loss)，如圖 3 所示。它的單位是分貝；故名思義它指的是聲音從材料的一側傳到材料另一側所減少的分貝數，它是依據標準方法在實驗室所測試出來的結果，透過損失值越高代表材料隔音性能越好。

由於不同頻率的聲音波長不同，所以既是同一塊材料基本上它的透過損失 TL 的值是隨頻率不同而不同，通常同一塊材料對低頻噪音(波長較長)的透過損失 T.L. 值較小；對高頻噪音(波長較短)的透過損失 TL 值較大。表 2 為一般我們較常使用的隔音材料它的面密度以及不同頻率的透過損失值，可以看出材料對低頻噪音的透過損失 TL 值較低；對高頻噪音的透過損失 TL 值較高。

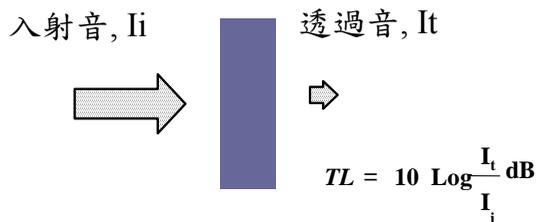


圖 3 穿透損失示意圖

表 2 常見材料透過損失 TL 值表

材料種類及厚度	頻率 Hz						面密度 (kg/m ²)
	125	250	500	1k	2k	4k	
9mm 石膏板	11	15	21	28	35	39	10.8
1.6 mm 鋼板	22	24	28	33	39	44	12.4
0.8 mm 鉛板	22	24	29	33	40	43	10.0
6 mm 玻璃	11	24	28	32	27	35	
100 mm 普通水泥板	33	36	42	49	56	60	

3. 隔音材料的選擇

由以上的說明我們概略地了解隔音材料的隔音機制原理，只要是厚重、面密度高的材料，大致上可說是不錯的隔音材料，像水泥牆、金屬板等都是不錯的隔音材料。材料的透過損失 TL 值越高，隔音性能越好，然而隔音材料 TL 值並不是任意的選擇越高越好，隔音牆的減音量機制在於聲音繞射的難易程度，它的評估指標為插入損失 IL，和隔音牆所選用隔音材料的透過損失值，兩者之間又是什麼樣的

150 漫談噪音防制尖兵-隔音牆

關係？

假如我們站在受音者的位置往噪音源處看過去，而隔音牆就擋在我們和噪音源之間，此時聲音會有兩個傳遞路徑，一個是從隔音牆的頂端繞過來，一個藉由隔音牆固體振動的方式傳過來，前者評估方式就是隔音牆的插入損失 IL，後者就是隔音牆材料的透過損失 TL，通常透過損失 TL 值遠大於插入損失 IL，也就是聲音從隔音牆頂端繞射過來的音量要遠大於從隔音牆透過來的音量，因此我們計算隔音牆減音量時可以把從隔音牆透過來的音量予以忽略不計，即使如此我們還是要了解要選擇隔音材料透過損失 TL 值為何時，才可以忽略隔音牆的透過音？

在設計隔音牆時，當隔音牆高度、位置決定時，我們就可以約略計算出隔音牆對各頻率聲音的減音量(即插入損失 IL 值，詳以上範例)，算出插入損失 IL 值後要選擇隔音材料時，只要選擇該材料的透過損失 TL 值大於插入損失 IL 值 10 分貝以上即可，通常噪音防制工程師會加 5 分貝做為安全係數，也就是所選用材料的透過損失 TL 值要大於所計算插入損失 IL 值 15 分貝以上即可，當然可以選擇隔音更好的材料，但隔音牆的插入損失並不會因此而提高。

上述隔音牆計算範例，工廠隔牆的插入損失 IL 計算結果約為 12 分貝，所以選用隔音材料的透過損失 TL 值需要在 27 分貝以上，因此表 2 中的 1.6mm 的鋼板或 100mm 的水泥板都是不錯的選擇，當然鋼筋混凝土牆透過損失 TL 值更高，但不會進一步增加隔音牆的減音量。

三、吸音材料的使用

1. 為什麼要用吸音材料

當隔音牆阻隔噪音時，聲音打在隔音牆內側壁面時，一部份聲音會藉由繞射傳到外側，一部份會反射回音源側，倘若噪音源距離隔音牆很近時(通常設計時為了要得到較大的減音效果，我們會儘量把隔音牆設置在越靠近噪音源越好)，由於隔音牆是由結構緊密、厚重的隔音材料所構成，隔音好但也是具備良好反射聲音的性能，所以當低位置的噪音源聲音打到隔音牆面時會反射到噪音源表面，而後再反射到隔音牆面，然後再反射回噪音源表面(如圖 4)，如此聲音經過多次反射後會從

隔音牆頂端繞射到隔音牆的另外一側，這樣的結果造成隔音牆的有效高度降低，自然減音效果也就無法達到原先的設計目標。這種現象在隔音牆用於防制交通噪音時更為明顯，解決的方法很簡單，只要在隔音牆的音源側壁面上安裝吸音材料即可將反射現象降到最低，而使得隔音牆能夠達到原始設計目標。依據英國的鐵路噪音隔音牆減音效果研究顯示，6 英尺高、內側(音源側)有加吸音材料的隔音牆，所達到的減音量相同於 12 英尺高無吸音材料的隔音牆所達到的減音量，由此可知隔音牆內側安裝吸音材料的重要性。

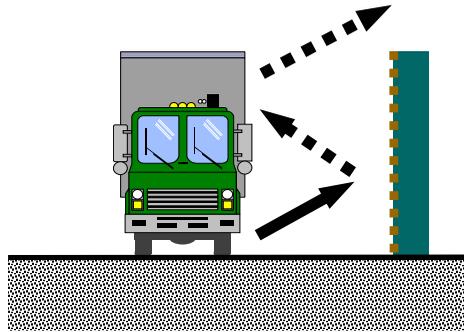


圖 4 音源繞射示意圖

2. 吸音材料的原理

目前較常使用的吸音材料多為多孔隙構造材料，如發泡類或纖維類的吸音材料，前者代表為吸音泡棉；而後者則為玻璃棉及岩棉(或稱礦棉)。這兩種吸音材料的構造雖然不盡相同，但其吸音的原理、機制都是一樣的。聲音原是以空氣為傳遞介質的振波，當聲音傳入發泡類或纖維類的吸音材料內時，這些材料內的發泡結構或纖維會增加空氣振動的阻力，讓振動和發泡結構或纖維磨擦，將振動能量變成熱能而減少振動的強度，振動強度小了，聲音音量自然就變小了。圖 5 為顯微鏡下美國 CSI 多孔隙吸音發泡水泥材料的多孔隙構造。

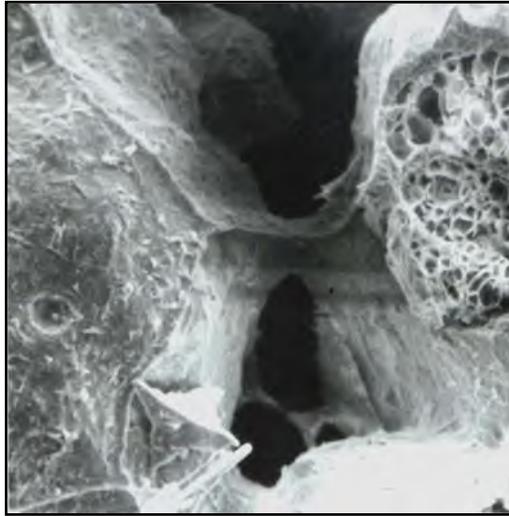


圖 5 多孔隙構造

3. 吸音材料的評估指標

當聲音(E_i)傳向吸音材料內，一部份聲音被反射(E_r)、一部份被吸收(E_a)和穿透(E_t)，如圖 6。評估吸音材的性能指標為吸音係數(absorption coefficient, α)，其定義為當聲音傳入材料時有多少的聲音沒有被反射，由於吸音材料結構多孔隙，聲音很容易穿透，通常吸音材料會安裝在隔音材料上(厚重結構，聲音不容易穿透，但容易反射)，因此 E_t 值很小可以忽略不計，所以吸音係數定義可以簡化為：

$$\alpha = \frac{E_i - E_r}{E_i} = \frac{E_a + E_t}{E_i} = \frac{E_a}{E_i} \dots\dots\dots(5)$$

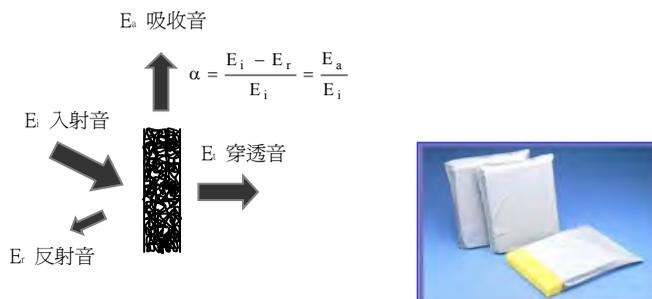


圖 6 戶外金屬隔音牆內襯防水吸音棉(外層包覆氟化膜套保護吸音材)

由公式(5)式的定義中可以明顯的看出，吸音係數 α 的範圍在 0.0-1.0 之間， α 值越高表示材料吸音效果越好，反之表示材料吸音效果差，屬於反射性的材料， $\alpha=1.0$ 表示全吸收， $\alpha=0.0$ 則是全反射，一般材料的吸音係數則是介於兩者之間。表 3 為我們一般常用吸音材料以及隔音材料之吸音係數，由於多孔隙性吸音材料的吸音性能和孔隙多寡、孔隙大小、纖維直徑、纖維數量等因素都有直接的關係，表 3 中的數值僅為參考，實際選用時以材料製造商型錄內的吸音係數為準。此外，不少材料製造商型錄內的吸音係數 α 值會有超過 1.0 的數值(尤其在美國吸音材料製造商型錄內較為常見)，這是因為標準測試之理論公式以及實驗誤差所產生的，使用時對於超過 1.0 的數值僅能當做 1.0 使用。和隔音材料透過損失 TL 值一樣，多孔隙吸音材料的吸音係數對低頻噪音(波長較長)的 α 值較差；對高頻噪音(波長較短)的 α 值較好。

表 3 常見材料吸音係數表

材料名稱	頻率 (Hz)					
	125	205	500	1 k	2 k	4 k
32k, 50mm 厚玻璃棉	0.24	0.63	0.99	0.97	0.98	0.99
240k, 60mm 厚礦棉	0.25	0.55	0.78	0.75	0.87	0.91
2" 厚山型吸音泡棉	0.15	0.17	0.49	0.73	0.66	0.68
3" 厚 CSI 水泥發泡吸音板	0.23	0.60	0.99	0.97	0.95	0.96
普通玻璃	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
1.3mm 木板, 背後 25mm 空氣層	0.30	0.30	0.16	0.10	0.10	0.10
混凝土牆、磨石子地面等	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02

四、總 結

隔音牆不僅僅只是用在道路交通方面，事實上在產業界的噪音防制都經常被採用，尤其是針對一些需要有通風(或進、排氣)、操作和維修空間的設備(如冷卻水塔、變壓器、大型幫泵等機具)，隔音牆都是很不錯的噪音防制措施的選擇，如圖 7。隔音牆並不是單單一面牆的設計，它可以是二面呈“Γ”字型或者是三面呈“Π”型，甚至於為四面為“Π”型加上頂部面，僅留一面供人員或物料進出，如圖 8。採用何種設計，全依實際狀況的需求。



圖 7 戶外多面型隔音牆

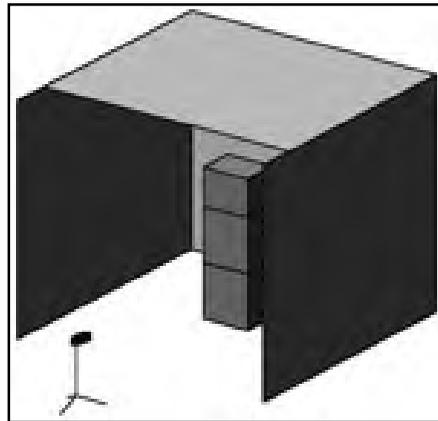


圖 8 四面型隔音牆(屏)

噪音防制工程師在設計及施行隔音牆設置工程時，會考慮以下三項要素：

- 1.聲學技術：包含所需要減音量計算、防音材料的正確選用等。
- 2.環境耐久性：對於戶外的環境使用條件，例如結構強度能耐颱風來時的風壓，防音材料對日曬雨淋之抵制力，金屬材料的防銹處理。
- 3.噪音源設備作業特性：對於防制對象(高噪音機具及設備)的操作及維護所需預留空間、人員及加工物料進出動線、通風散熱問題等都需要一併加以考慮。

隔音牆並不限於在室外使用，在室內它也能有不錯之發揮，尤其是對於一些

開放式空間的工作區域，有些區域作業噪音特別高，例如鈹金作業，需要保留空間供人員活動、物料移動，才能作業，因此隔間密閉式的防音設計就不實用。圖 9 為移動式防音屏(工作區背後三片斜紋軟質防音屏)，對於一些高噪音量工作區可以達到不錯的防制噪音效果，同時對現場工作人員的作業也不會有太多的妨礙。



圖 9 移動式防音屏