

結合三參數校正法的充水阻抗管的發展與應用

黃清哲*¹ 沈宗佑* 董昌銘* 劉冠汶* 楊永欽**

*國立成功大學 水利及海洋工程學系
**國立台北科技大學 材料及資源工程系

關鍵詞：直立式充水阻抗管、三參數校正法、平面波、反射係數、轉移函數

摘 要

本研究主要是依據 ASTM E1050-98 (2006)設計規範，發展出直立式充水阻抗管，用來量測材料於水中的聲學阻抗。此外，本研究引進三參數校正方法，由兩個不同位置的水聽器所測得的聲波電壓訊號比值，或稱為轉移函數，直接求出材料的聲波反射係數。本研究先利用所發展的系統量測聲波在水與空氣界面的反射係數。試驗結果顯示與以往使用的轉移函數法或交換麥克風法相較，本研究發展的系統量測所得到的不同頻率聲波在自由液面的反射係數的振幅與相位，與理論值更為吻合，且實驗結果具可重複性。在確立試驗結果的準確性與可重複性之後，本研究量測水中聲波在不同材料試片表面的反射係數，以測試所發展的系統在量測材料於水中聲學阻抗特性的實用性；測試材料包括鋼板、矽膠及 PU 膠。測試結果顯示本研究發展的充水阻抗管結合三參數校正法，可簡易並準確地測得在不同聲波頻率下材料表面的反射係數與聲學阻抗。

前 言

材料的聲學特性一般是指材料對正向聲波的反射率，主要是在空氣阻抗管中進行量測。其方法主要是於阻抗管中發出平面聲波(plane acoustic waves)，正向入射放置於阻抗管終端的材料試片，產生一單頻駐波，並藉由移動麥克風量測聲壓極大值與極小值的駐波比，進而推算出材料的反射係數(Beranek, 1988)。由於空氣與阻抗管之鋼材管壁的彈性模數差異甚大，可將阻抗管視為理想剛體，且聲波是以平面波的形式傳遞。

後來發展出了不需移動麥克風的轉移函數法，於阻抗管中安裝兩支麥克風量測兩個不同位置的聲壓，此兩支麥克風所測得的聲壓比值稱為轉移函數，再透過傅立葉轉換，推求材料的反射係數。轉移函數法最早由 Seybert and Ross (1977)提出，其方法為：於阻抗管中發射週期波，並以雙麥克風法量測聲壓，分離管內入射及反射聲波譜，進而求得吸音材料的反射係數。之後 Chung and Blaser (1980 a & b)考慮隨機聲波，並提出以轉移函數的概念推導出兩麥克風間的聲壓與入射聲波、反射聲波的相關性，最後求得與 Seybert and Ross (1977)相同的結果。該文獻中並說明了實驗中如何透過交換麥克風以消除兩麥克風間的儀器誤差，如：靈敏度差異。Seybert and Soenarko (1981)及 Bodén and Åbom (1986)持續針對

該類實驗可能產生的誤差進行探討，並提出改善方法。經由上述研究，空氣阻抗管中應用雙麥克風轉移函數法進行材料的聲學特性量測已有完整的理論基礎。相較於駐波比法，轉移函數法實驗較為簡便，並已廣泛的被應用在空氣阻抗管材料聲學特性量測中。目前已有相關量測標準與阻抗管的設計規範，也有市售的空氣阻抗管實驗儀器，如一般常用的 Brüel & Kjær Impedance Tube Kit, Type 4206 (50 Hz - 6.4 kHz)及 Type 4206-A (100 Hz - 3.2 kHz)。

隨著水下技術與國防科技的發展，材料在水中的聲學特性也是需要知道的物理參數(宋等人，2003)。因此，有研究將轉移函數法應用到充水阻抗管中(Corbett, 1983; Dunlop, 1992)。Corbett (1983)於實驗中利用交換麥克風法進行了水及空氣界面(自由液面)的反射係數驗證，得到的幅度及相位分別與理論值有 7%及 30°的誤差。為改善傳統雙麥克風方法於充水阻抗管中量測的準確性以及操作上的不便，Wilson et al. (2003) 於充水阻抗管的量測中導入 Gibiat and Laloë (1990)所提出的改善空氣阻抗管量測準確度的三參數校正法，以修正阻抗管內之聲傳誤差、水聽器和擷取系統等量測誤差。此外，關於阻抗管實驗聲源的選擇，Jones and Stiede (1997)做了不同聲源類型的比較，分別運用一連串的單頻聲音及白噪音(white noise)作為阻抗管量測中的聲源，前者可獲得更高的準確性。不同聲源所造成的相關的誤差在 Bodén and Åbom (1986)的研究中也有討論。

¹ 責任作者 (cjhuang@mail.ncku.edu.tw)

阻抗管實驗之基本假設為聲場需符合平面波傳遞。因為充水阻抗管內部聲傳介質為水，其與管壁(不鏽鋼)之特徵阻抗(characteristic impedance)接近，故管壁之彈性波將對管內聲波傳遞產生影響。聲波傳遞介質的特徵阻抗定義為該介質的密度乘上聲波在該介質傳遞的速度。Del Grosso (1971)提出了彈性波導的相關理論解析解，並得到了管內介質點的位移變化與頻散關係；Lafleur 和 Shields (1995)以不同管壁材質的實驗驗證了其理論。此外，Wilson (2002)和簡(2005)於其論文中比較了不同管壁厚度的阻抗管所得結果的差異。

在充水的阻抗管中量測材料的聲學特性，除了水與阻抗管鋼材的特徵阻抗差異不大，使得阻抗管內的聲波可能不完全是平面波外，注水的過程會將空氣導入管內形成小氣泡。由於聲波在水中傳遞速度與氣泡多寡及大小有很大的關係(黃等人, 2016)，因此氣泡的存在會大大增加量測的不確定性。此外，使用交換麥克風法量測，量測系統的設置相當耗時，在安裝的過程中也會帶入更多的誤差，包含氣泡的產生與對系統的擾動(Wilson et al., 2003)。

雖然 Wilson et al. (2003)已在多年前於充水阻抗管中利用三參數校正法驗證量測結果的準確性，但後續相關文獻仍較少採用此種方法(簡, 2005; Fu et al., 2021)。簡(2005)利用交換麥克風法實施校正，其將管長由 1.2 m 增加至 3 m 後，與原本長度相較下有較佳的校正效果，但在頻率為 8 kHz 時反射係數幅度與理論值相較有 0.11 的誤差。Fu et al. (2021)利用傳統的轉移函數法得到矽基橡膠(silicon-based rubber)吸音材料在不同靜水壓下的吸音係數，量測結果的重複性不是很好，有接近 20% 的誤差。Wilson et al. (2003)雖然證實利用三參數校正法可以得到自由液面附近聲波反射係數準確的結果，但沒有實際測試此方法在量測材料反射係數時，實驗結果是否也有不錯的可重複性。周等人(2010)證實於充水阻抗管中利用三參數校正法所得自由液面附近聲波反射係數結果與轉移函數法所得結果相比，更為接近理論值。此外，利用三參數校正法所得一種水下吸音材料的吸音係數結果，與轉移函數法所得結果相較，可重複性更高。

本研究主要目的為發展一套可靠的及準確的材料於水中的聲波反射係數與阻抗之量測系統。本研究依 ASTM E1050-98 (2006)設計規範設計了一阻抗管，並引進三參數校正法，先透過量測水柱自由液面附近聲波的反射係數，並且與理論值及利用轉移函數法與交換麥克風法所得結果比較。在確定充水阻抗管量測系統的準確性與可重複性之後，本研究量測一橡膠多孔材質的聲波反射係數。在確立試驗結果的可重複性之後，接著量測一些常作為水中吸音材的基質材料，如矽膠與聚氨酯膠(Jayakumari et

al., 2019; Guillermic et al., 2019; Fu et al., 2021)，其試片的聲波反射係數，以測試整套量測系統的可靠性與實用性。此外，由於 Jones and Stiede (1997)指出相較於白噪音，選擇單頻聲音作為阻抗管量測的聲源，可獲得較高的準確性。因此，本研究選用單頻聲源的方法，量測材料的聲波反射係數。測試頻率範圍主要介於 2 kHz 到 7 kHz 之間。

理論介紹

本章將介紹充水阻抗管的理論基礎，首先第 1 節定義材料的聲阻抗，第 2 節討論圓管內的聲場特性，第 3 及第 4 節分別介紹轉移函數法及交換麥克風法，第 5 節介紹三參數校正法，並說明如何從水聽器量測的聲壓值求出反射係數及聲阻抗值。最後，第 6 節說明阻抗管相關設計規範。

1. 材料的聲阻抗

當聲波傳遞遇到不同介質時，會於界面處產生反射波與透射波。進行材料聲學特性研究時，一般探討平面聲波(plane waves)正向入射材料時之反射係數與吸音係數。反射係數(R)定義為反射聲波與入射聲波的聲壓比值，當聲波正向入射如圖 1 所示的界面時，在滿足界面處壓力與法線方向速度連續的條件下，可求得反射係數為

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1)$$

式中 ρ 、 c 分別表示介質的密度與聲波在介質中的速度。由(1)式可知，影響聲波在界面的反射係數主要與 ρc 有關；因此，一般常稱 ρc 為聲波傳遞介質的特徵阻抗。當聲波由空氣正向入射水面時($\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2$)， $R \approx 1$ ，接近正全反射；相反的，當聲波由水面正向入射空氣時($\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$)， $R \approx -1$ ，接近負全反射。正、負全反射表示在界面之反射波與入射波振幅一樣，而前者中反射波與入射波的相位差為 0° ，但後者中相位差為 180° 。材料表面的聲波反射係數可藉由量測平面聲波正向入射材料表面時，界面附近入射和反射波的聲壓而求得。吸音係數(β)定義為

$$\beta = 1 - |R|^2 \quad (2)$$

由(2)式可知，吸音係數表示被吸收聲波能量與入射聲波能量的比值。材料的聲學特性一般也常用聲阻抗值(acoustic impedance) Z 來表示，其定義為

$$Z = \frac{p}{u} = X + iY \quad (3)$$

式中 p 為材料表面之局部聲壓(local acoustic pressure)， u 為材料表面法線方向流體的速度。聲阻抗

為一複數，上式中的實數部分稱為聲阻(acoustic resistance)，而虛數部分稱為聲抗(acoustic reactance)。\$u\$ 與 \$p\$ 之間一般會有相位差 \$\varphi\$，\$\varphi = \tan^{-1}(Y/X)\$。聲阻抗的因次(dimension)與 \$\rho c\$ 相同；因此，也可以定義無因次的聲阻抗 \$z\$ 為

$$z = \frac{Z}{\rho c} \quad (4)$$

\$z\$ 可稱為比聲阻抗(specific acoustic impedance)。

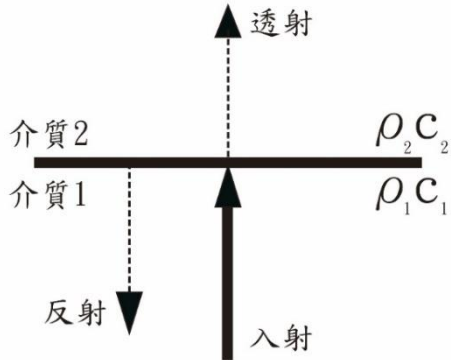


圖 1 聲波正向入射不同介質界面之反射與透射

2. 圓管內的平面波聲場特性

假設圓管中的聲波為一維聲波(參閱圖 2)，波方程式可寫為

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中 \$x\$ 為圓管的軸向座標、\$t\$ 為時間、\$p\$ 為聲壓、\$c\$ 為聲波速度，\$c = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{E_v/\rho}\$，式中 \$\rho\$ 為流體的密度，\$E_v\$ 為流體的容積模式(bulk modulus)。假設聲波為單頻波(monochromatic wave)，

$$p(x,t) = P(x)e^{i\omega t} \quad (6)$$

(5)式變為

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + k^2 P = 0 \quad (7)$$

(6)及(7)式中，\$\omega\$ 為角頻率(angular frequency)，\$k\$ 為波數(wavenumber)，\$\omega = kc\$。

此外，無黏性流體的動量方程式(Euler 方程)可線性化為

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

假設聲波為單頻波，

$$u(x,t) = U(x)e^{i\omega t} \quad (9)$$

(3)式變為

$$Z = \frac{P}{U} \quad (10)$$

將(6)、(9)及(10)式代入(8)式，可得

$$\rho(i\omega) \frac{P}{Z} = -\frac{dP}{dx} \quad (11)$$

或

$$P + \frac{Z_L}{\rho(i\omega)} \frac{dP}{dx} = 0 \quad (12)$$

若圓管內的聲波為一維平面波，則滿足(7)式的聲場通解可寫為

$$P(x) = P_i \cdot e^{ik(L-x)} + P_r \cdot e^{-ik(L-x)} \quad (13)$$

式中 \$i = \sqrt{-1}\$，右邊第一、二項分別表示朝 \$+x\$ 方向及 \$-x\$ 方向傳遞的入、反射波的聲場，將兩個聲波疊加即為管內聲場。(13)式的解需滿足下述邊界條件：

在 \$x=0\$ 時，

$$P(x=0) = P_o \quad (14)$$

式中 \$P_o\$ 為圓管內聲源的振幅。此外，在 \$x=L\$ 時，邊界條件為(12)式。由(12)、(13)及(14)式，可得

$$P_i = P_o(1 + Z_L/\rho c)/D, \quad P_r = -P_o(1 - Z_L/\rho c)/D \quad (15)$$

式中 \$D = 2(Z_L/\rho c) \cos kL + 2i \sin kL\$。經整理，可得圓管內聲場的壓力解為

$$P = P_o \frac{Z_L \cos k(L-x) + i\rho c \sin k(L-x)}{Z_L \cos kL + i\rho c \sin kL} \quad (16)$$

如前所述，反射係數 \$R\$ 定義為反射聲波與入射聲波的聲壓比值，即

$$R(x) = \frac{P_r \cdot e^{-ik(L-x)}}{P_i \cdot e^{ik(L-x)}} \quad (17)$$

因此，位於 \$x=L\$ 處的反射係數為

$$R_L = R(x=L) = \frac{P_r}{P_i} \quad (18)$$

此外，將(13)式代入(12)式，可得

$$P_i(1 - \frac{Z_L}{\rho c}) + P_r(1 + \frac{Z_L}{\rho c}) = 0 \quad (19)$$

上式整理後可得到反射係數與聲阻抗的關係式如下：

$$R_L = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_L/\rho c - 1}{Z_L/\rho c + 1} \quad (20)$$

或

$$\frac{Z_L}{\rho c} = \frac{1 + R_L}{1 - R_L} \quad (21)$$

實驗量測得到反射係數 \$R_L\$ 後，代入(21)式即可求得材料的聲阻抗值。

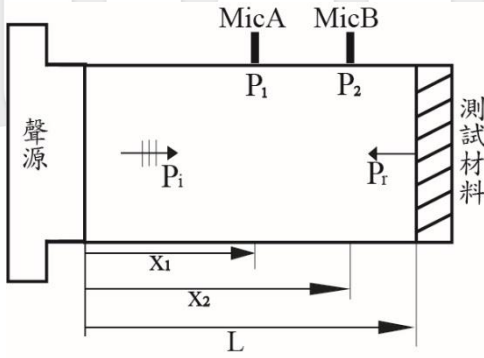


圖 2 圓管中的入射、反射聲波及量測聲壓的儀器麥克風 A 及 B

3. 轉移函數法

本節將推導轉移函數法所需用到的公式，並運用於計算材料的反射係數。此方法改善了單麥克風駐波比法需要一直移動麥克風量測的缺點，大大增進了實驗的效率及準確性。因此許多空氣阻抗管量測材料反射係數的實驗，皆使用此方法，量測系統示意圖請參閱圖 2。

安裝於阻抗管 x_1 及 x_2 處的麥克風 A 及 B 所測得的聲壓 P_1 及 P_2 可分別寫為

$$P_1 = P_i e^{ik(L-x_1)} + P_r e^{-ik(L-x_1)} \quad (22a)$$

$$P_2 = P_i e^{ik(L-x_2)} + P_r e^{-ik(L-x_2)} \quad (22b)$$

定義轉移函數 H 為麥克風 A 及 B 所測得聲壓的比值：

$$H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_i e^{ik(L-x_2)} + P_r e^{-ik(L-x_2)}}{P_i e^{ik(L-x_1)} + P_r e^{-ik(L-x_1)}} \quad (23)$$

由(17)式和(18)式，可以得到位置 x_1 與 $x=L$ 處的反射係數之間的關係為

$$R_{x_1} = \frac{P_r e^{-ik(L-x_1)}}{P_i e^{ik(L-x_1)}} = R_L e^{-2ik(L-x_1)} \quad (24)$$

再將(24)式代入(23)式，整理後得到

$$H = \frac{e^{-ik(x_2-x_1)} + R_{x_1} e^{ik(x_2-x_1)}}{1 + R_{x_1}} \quad (25)$$

或

$$R_{x_1} = \frac{e^{-ik(x_2-x_1)} - H}{H - e^{ik(x_2-x_1)}} \quad (26)$$

把(26)式代入(24)式可得到材料的反射係數 R_L 如下

$$R_L = \frac{e^{-iks} - H}{H - e^{iks}} e^{2ik(L-x_1)} \quad (27)$$

式中 $s = x_2 - x_1$ 為兩麥克風間距。由(27)式可知要求材料之反射係數，需先測得轉移函數 H 。求得反射

係數 R_L 後，代入(21)式即可求出測試材料的阻抗值 Z_L 。

4. 交換麥克風法

定義麥克風的複數靈敏度 $\alpha(f)$ 為電壓訊號 $V(f)$ 與實際聲壓 $P(f)$ 間的比值，則 $V(f) = P(f) \cdot \alpha(f)$ ，式中 f 為聲波的頻率。令聲音擷取系統麥克風 A 及麥克風 B 的複數靈敏度分別為 $\alpha_A(f)$ 及 $\alpha_B(f)$ ，所接收到的電壓訊號分別為 $V_A(f)$ 及 $V_B(f)$ ，於標準量測情況下，如圖 3 左，可獲得轉移函數 H_{11} 如下

$$H_{11} = \frac{V_B}{V_A} = \frac{P_2 \cdot \alpha_B}{P_1 \cdot \alpha_A} \quad (28)$$

接著交換麥克風，如圖 3 右，可獲得轉移函數 H_{12} 如下

$$H_{12} = \frac{V_B}{V_A} = \frac{P_1 \cdot \alpha_B}{P_2 \cdot \alpha_A} \quad (29)$$

利用(28)與(29)式計算修正因數 H_c

$$H_c = \sqrt{H_{11} \cdot H_{12}} = \frac{\alpha_B}{\alpha_A} \quad (30)$$

最後將(28)式與(30)式相除，即可消除麥克風間靈敏度差異影響，求得實際聲壓之轉移函數 H 。

$$H = \frac{H_{11}}{H_c} = \frac{P_2}{P_1} \quad (31)$$

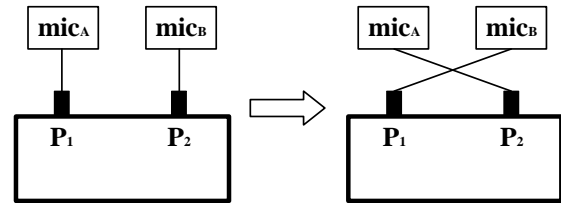


圖 3 交換麥克風法示意圖

實際量測時，先測得 H_{11} 及 H_{12} ，再由 H_{11} 及 H_{12} 求出 H_c ；最後由(31)式求出轉移函數 H 的值，再代入(27)式，即可求出反射係數。

5. 三參數校正法

三參數校正法為 Wilson et al. (2003)所提出，用來修正充水阻抗管量測時的誤差，包含接收系統之間的電路誤差、兩水聽器間靈敏度誤差、聲波於水中傳遞時振幅衰減誤差、以及相位變化誤差等。

令 α_A 及 α_B 分別為水聽器 A 及 B 的複數靈敏度， V_A 及 V_B 為水聽器 A 及 B 接收到的電壓訊號；而電壓訊號與聲壓間的關係式為

$$V = P \cdot \alpha \quad (32)$$

重新定義轉移函數 H 為

$$H = \frac{V_B}{V_A} = \frac{P_2 \cdot \alpha_B}{P_1 \cdot \alpha_A} \quad (33)$$

由(13)式可知， P_i 與 P_r 分別為圓管中入射與反射聲波實際的聲壓，然而聲波於充水阻抗管中傳遞時會受到管內微小氣泡、結構干擾及相位傳遞等影響，使得量測到的聲壓含有誤差。將入射和反射聲波在水聽器 A 量測處的修正因子分別設為 α_{i1} 和 α_{r1} ，而在水聽器 B 量測處的修正因子設為 α_{i2} 和 α_{r2} ，則兩水聽器所測得的聲壓可表示成

$$P_1 = P_i \alpha_{i1} + P_r \alpha_{r1} \quad (34a)$$

$$P_2 = P_i \alpha_{i2} + P_r \alpha_{r2} \quad (34b)$$

α_{i1} 、 α_{r1} 、 α_{i2} 、 α_{r2} 亦為複數係數，同時包含了幅度(modulus)與相位(phase)的變化。將(34)式代入(33)式中，可得

$$H = \frac{(P_i \alpha_{i2} + P_r \alpha_{r2}) \cdot \alpha_B}{(P_i \alpha_{i1} + P_r \alpha_{r1}) \cdot \alpha_A} \quad (35)$$

將(20)式反射係數定義代入(35)式，可得

$$H = \frac{\alpha_{i2} \alpha_B + R_L \alpha_{r2} \alpha_B}{\alpha_{i1} \alpha_A + R_L \alpha_{r1} \alpha_A} \quad (36)$$

或

$$R_L = \frac{-H \alpha_{i1} \alpha_A + \alpha_{i2} \alpha_B}{H \alpha_{r1} \alpha_A - \alpha_{r2} \alpha_B} \quad (37)$$

令 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 為三個待求的校正參數，並定義為

$$\lambda_1 = -\frac{\alpha_{i1}}{\alpha_{r1}}, \lambda_2 = \frac{\alpha_{i2} \alpha_B}{\alpha_{r1} \alpha_A}, \lambda_3 = -\frac{\alpha_{r2} \alpha_B}{\alpha_{r1} \alpha_A} \quad (38)$$

將(38)式代入(37)式，(37)式可簡化為

$$R = \frac{\lambda_1 H + \lambda_2}{H + \lambda_3} \quad (39)$$

假設三種已知參考材料的反射係數分別為 R_1 、 R_2 和 R_3 ，且由水聽器測得這三種材料時的轉移函數分別為 $H_1 = V_B^{(1)} / V_A^{(1)}$ 、 $H_2 = V_B^{(2)} / V_A^{(2)}$ 和 $H_3 = V_B^{(3)} / V_A^{(3)}$ ，將此三種條件代入(39)式聯立求解，可解出 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的值分別為

$$\lambda_1 = -\frac{R_2 R_3 (H_3 - H_2) + R_1 R_3 (H_1 - H_3) + R_1 R_2 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \quad (40a)$$

$$\lambda_2 = \frac{R_2 R_3 H_1 (H_3 - H_2) + R_1 R_3 H_2 (H_1 - H_3) + R_1 R_2 H_3 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \quad (40b)$$

$$\lambda_3 = -\frac{R_1 H_1 (H_3 - H_2) + R_2 H_2 (H_1 - H_3) + R_3 H_3 (H_2 - H_1)}{R_1 (H_3 - H_2) + R_2 (H_1 - H_3) + R_3 (H_2 - H_1)} \quad (40c)$$

雖然目前並無量測反射係數之標準試片，但三參數校正法利用三個不同水柱高，如圖 4 所示，做為已知反射係數材料量測，可求出 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 ，用來修正轉移函數法的量測誤差。

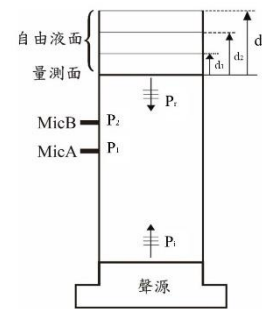


圖 4 直立充水阻抗管進行三參數校正法實驗示意圖

聲波由水中傳遞至水/空氣交界面時，由於水和空氣的特徵阻抗值差異非常大，如第 1 節所述，會發生負全反射。負全反射的相位為 180 度，因此(24)式中 $R_L = R_{水/空氣} = e^{i\pi}$ 。選定阻抗管中任意位置為假想量測面(即圖 4 中標示量測面處)，而自由液面與量測面間會有一水柱，自由液面與量測面間所夾水柱即可視為一種參考材料。由此計算所得校正參數，僅適用於此量測面上。為了求解三參數 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 ，故需要三個不同的水柱高。設不同自由液面與量測面間的距離為 d_i ($i=1,2,3$)，由(24)式可求得量測面的反射係數 R_i 為

$$R_i = R_{水/空氣} \cdot e^{-2ik d_i} = e^{i(\pi - 2k d_i)} \quad (41)$$

由(41)式所得之理論反射係數 R_1 、 R_2 和 R_3 與水聽器量測到的材料轉移函數 H_1 、 H_2 和 H_3 代入(40)式中，即可求得三校正參數 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 。最後，將待測吸音材置於離量測面 d^* 的位置，進行轉移函數 H 的量測，即可由(39)式求得吸音材於量測面的反射係數 R^{**} ，並由(24)式求得吸音材實際表面的反射係數 R^* 為

$$R^* = R^{**} \cdot e^{2ik d^*} \quad (42)$$

6. 阻抗管相關設計規範

本節將介紹充水阻抗管之設計依據，主要參考美國材料和試驗協會 ASTM E1050-98 (2006) 規範，還有其他關於充水阻抗管之研究。

一般定義阻抗管工作頻率如下：

$$f_l < f < f_u \quad (43)$$

其中 f 為阻抗管工作頻率(operating frequency)， f_u 為頻率上限，而 f_l 為頻率下限。根據 ASTM E1050-98 (2006) 規範，為使管內聲波符合平面波傳假設，阻抗管直徑將影響實驗操作之高頻界限，高頻界限如下：

$$f_u < Kc/b \quad (44)$$

其中 $K = 0.586$ ， c 為管中聲速， b 為管內徑。工作頻率下限 f_l 應滿足

$$f_l > (c/s) \times 1\% \quad (45)$$

式中 s 為水聽器間距，ASTM E1050-98 (2006) 建議

$$s = (c/2f_u) \times 80\% \quad (46)$$

在管長方面，為避免聲源產生之非平面波對量測造成影響，需讓麥克風遠離非平面波消散的範圍，因此聲源與麥克風的間距必須至少是阻抗管直徑的三倍以上。

ASTM E1050-98 (2006) 標準規範主要是針對空氣阻抗管訂定，當阻抗管中的聲波傳遞介質為空氣時，因為空氣與管壁的特徵阻抗值差異極大，此時阻抗管可視為理想剛體。若阻抗管中之傳聲介質為水時，因為水與管壁特徵阻抗接近，管壁材料所產生的彈性波將影響阻抗管內的平面波傳。Del Grosso (1971) 提出彈性波導理論，探討管壁中彈性波對管中聲傳的影響，得知管內平面波傳的假設基本上不再成立。然而，當管壁材料為鋼材且厚度增加時，可使管內最低階聲波模態，亦即 (0,0) 模態，之相位速度接近平面波模態 (Lafleur and Shields, 1995; Wilson, 2002; 簡, 2005)。此時，管內聲波傳播速度亦須以最低階模態修正。簡(2005)於論文中探討管壁厚度的影響，並提出了管內波速修正的計算方法。

實驗儀器配置與方法

1. 充水阻抗管的規格

根據上述規範與理論解析，我們以 304L 不鏽鋼材質設計了一支充水阻抗管，阻抗管規格如表 1 所示。阻抗管長 150 公分，內徑 11.6 公分，外徑 17.6 公分，管壁厚度 3 公分，水聽器間距 6.5 公分。相關參數如表 1 所示。管中聲波的速度根據最低階聲波模態修正為 $c_{eff} = 1438 m/s$ (簡, 2005)。根據(44)式

及(45)式，阻抗管於實驗操作中，高頻界限為 7264 Hz，而低頻界限為 221 Hz。

表 1 阻抗管相關參數

	聲速 (m/s)	密度 (kg/m ³)	尺寸(cm)	
水(20°C)	$c_1 = 1480$	$\rho_1 = 998.2$	內徑	b=11.6
管壁	$c_L = 5640^*$	$\rho_w = 7900$	外徑	d=17.6
	$c_T = 3070^*$		長度	L=150

*304L 不鏽鋼中縱向與橫向彈性波速度值 c_L 與 c_T 取自 ASM International (1989)

2. 聲波發射與接收系統

由個人電腦(PC)內的 Labview 軟體配合 DAQ 資料擷取卡及數位類比轉換器(A/D Converter)操作實驗的進行，控制聲音發射以及水聽器(水下麥克風)收音的各項參數。聲音發射部分包含了 TX-0335 水中低頻音鼓(Projector)及 RT-335AP 水下音鼓功率放大器(Power Amplifier)；收音部分則使用 B&K 8104 水下麥克風(Hydrophone)以及 B&K 2692 電荷放大器(Charge Amplifier)，實驗架構圖如圖 5 所示。TX-0335 水下音鼓可提供低功率損耗的指向性聲源，為一單活塞工作形式的聲源，最佳工作頻率範圍為 2 kHz 至 8 kHz，最大工作環境深度可達水下 600 公尺。

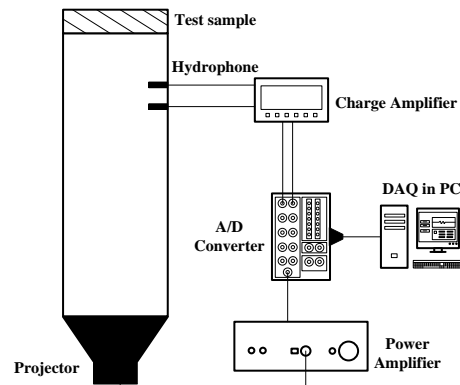


圖 5 實驗架構圖

3. 實驗流程

實驗流程如圖 6 所示。實驗儀器安裝完成後，注水於管內，並量測液面高度。將已注水的阻抗管靜置一段時間，讓水中氣泡慢慢消散。由於水中可能有肉眼無法辨識的小氣泡，加上阻抗管壁不透明，因此實驗進行前，很難判斷氣泡是否完全消散。水中氣泡含量的多寡，會造成實驗結果的差異，使得實驗結果可重複性的要求受到影響。因此，本研究中一般將注水的阻抗管先靜置至少 24 小時，才開始進行實驗。為了避免水中氣泡對實驗的影響，

Wilson et al. (2003)的實驗使用蒸餾水，在將水注入阻抗管 24 小時後，再進行實驗。

實驗時先量測計算校正參數所需的三個不同水柱高，接著於設定的測量面上放置待測材料。受聲源發射器性能與本章第 1 節中計算之高頻界限限制，本研究選取的量測頻率範圍在 2000 Hz 到 7000 Hz 之間，每隔 10 Hz 做單頻量測，將兩把水下麥克風接收到訊號擷取後，於 Matlab 中撰寫分析程式做後運算，針對不同的頻率計算出轉移函數、三校正參數以及反射係數。

本研究得到水柱高的方法為：先利用游標卡尺量測自由液面到阻抗管終端之距離，再由已知的量測面與阻抗管終端之距離減去此值，即為水柱高度，參閱圖 4。游標卡尺的量測會有誤差，實驗時通常量測三次，取其平均值作為被採用的量測值。由上可知，游標卡尺量測的誤差，會造成水柱高度的誤差，進而會影響校正效果的好壞。

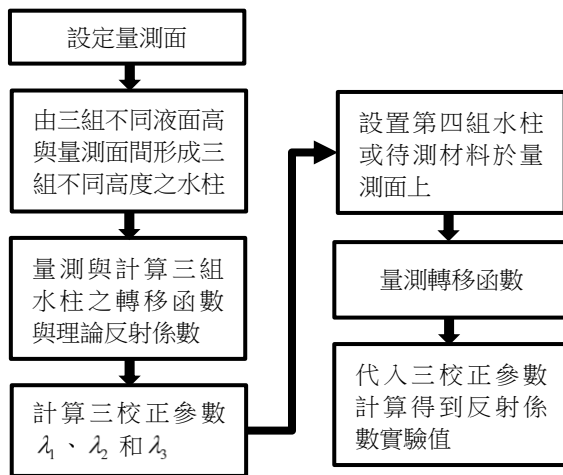


圖 6 實驗流程圖

結果與討論

1. 量測結果準確性與可重複性驗證

在利用本研究所發展的阻抗管量測材料於水中的聲波反射係數前，必須先確認實驗及計算方法所得結果的準確性及可重複性。因為目前尚無標準試片做為驗證材料在充水阻抗管中所測得阻抗或反射係數的準確性，所以本研究先以量測自由液面反射係數結果與理論值比較，驗證實驗結果的準確性及可重複性。

圖 7 (a)及(b)所示為聲波由水中正向入射自由液面的反射係數的量測結果；圖 7 (a)為幅度，而(b)為相位值。圖中三種標記(圓形、三角形、十字)分別代表三次不同時間所量測的實驗結果。圖 8 (a)及(b)則為三次自由液面反射係數量測結果的算數平均值。聲波由水中正向入射自由液面的反射係數理論值為

$R_i = e^{i\pi}$ ，亦即反射係數幅度為 1.0，而相位為 $\pi (=180^\circ)$ 。

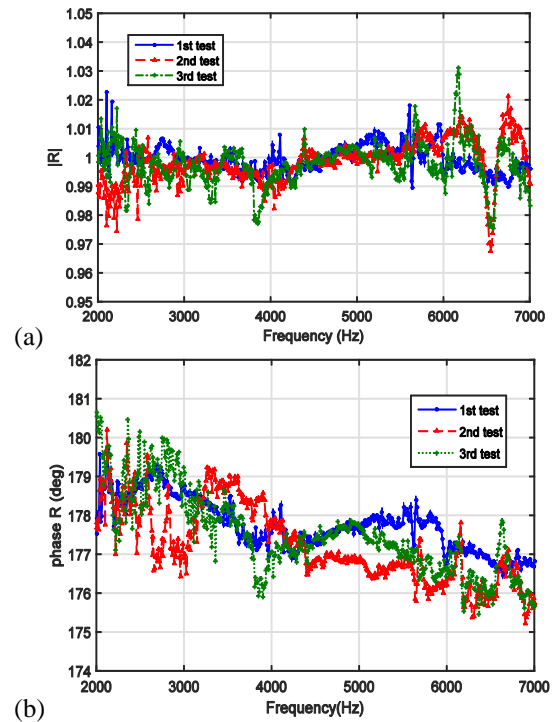


圖 7 自由液面聲波反射係數重複三次量測結果；(a) 幅度、(b) 相位(圓形、三角形、十字標記分別代表三次量測所得結果)

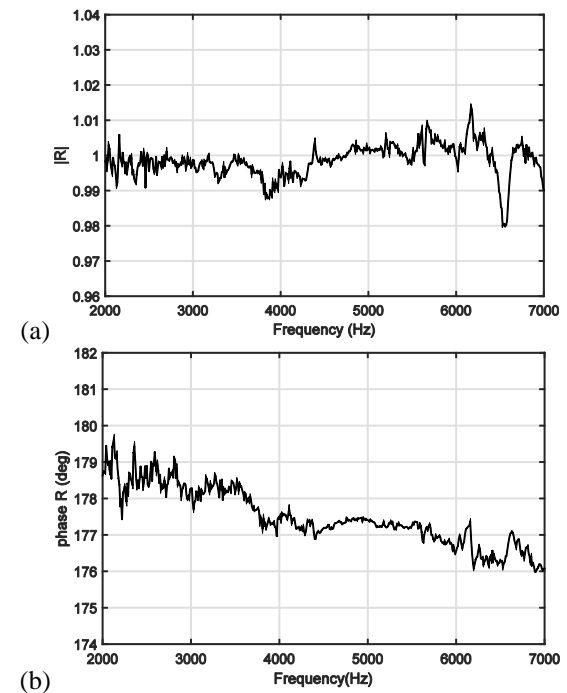


圖 8 圖 7 中自由液面聲波反射係數量測結果平均值；(a) 幅度、(b) 相位

由圖 7 可以看出，於充水阻抗管中利用三參數校正法進行反射係數重複量測時，其量測結果呈現相同的趨勢，表示量測具有可重複性。而由圖 8 得知，聲波由水中正向入射自由液面的反射係數幅度及相位之量測值與理論值吻合，最大的誤差分別約為 0.02 和 4°。其中反射係數最大誤差出現在 6570 Hz，此頻率亦為本充水阻抗管後續進行量測時，經常於量測結果中出現誤差的頻率位置。相位誤差則隨著頻率而上升，推測是由於進行參考水柱之轉移函數量測時，水柱高度的量測誤差所造成。由(41)式得知，參考水柱之反射係數為 $e^{i(\pi-2kd_i)}$ ，若水柱高度 d_i 存在量測誤差，由其所導致的反射係數相位誤差將隨著頻率上升而被放大。

2. 三參數校正法與雙麥克風校正法量測結果比較

在確定量測結果的準確性與可重複性之後，本節比較利用三參數校正法與雙麥克風校正法所得自由液面聲波反射係數量測結果的差異，圖 9 (a)及(b)所示為以不同校正方法量測自由液面聲波反射係數所得結果之比較；圖 9 (a)為幅度，而(b)為相位值。

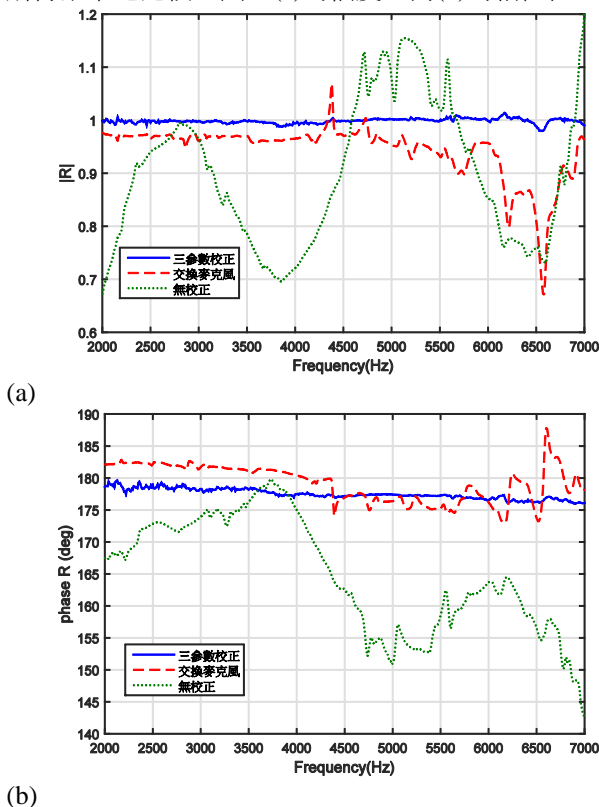


圖 9 以不同校正方法量測自由液面聲波反射係數之比較；(a)幅度、(b)相位(實線為三參數校正法、虛線為交換麥克風校正法、點線為沒有使用校正方法)

由圖 9 中的點線可以得知，若在量測與計算過程中不採取任何的校正方法，直接以兩支水聽器所量得的聲壓代入(27)式中進行反射係數的計算，其結果將容易受兩支水聽器間的靈敏度差異影響，而產生顯著的量測誤差。此外，由圖中實線與虛線的比較亦可看出，在同樣的阻抗管環境、聲源及水聽器所構成的量測系統下，不論是反射係數的幅度或相位值，以三參數校正法進行量測確實能取得比交換麥克風法更接近理論值的結果。

此外，為了解本研究與其他相關研究所得自由液面反射係數量測結果的差異，將相關成果整理在表 2。表 2 中的誤差為反射係數量測值與理論值相較所出現的最大誤差值。由表 2 可知，利用三參數校正所得反射係數之幅度與相位，如 Wilson et al. (2003)及本研究，與利用交換麥克風法所得結果相較，如 Corbett (1983)及簡(2005)，明顯更接近理論值。幅度誤差由 0.07 (Corbett, 1983)或 0.11 (簡, 2005)降為 0.015 (Wilson et al., 2003) 或 0.02 (本研究)；而相位誤差由 30°降為 0.7°(Wilson et al., 2003) 或 4° (本研究)。Wilson et al. (2003)的結果優於本研究結果，可能是與水聽器的安裝與其採用蒸餾水避免殘餘氣泡的影響有關。此外，為達到轉移函數法量測規範中阻抗管壁應為直通且光滑表面之要求，其於實驗中使用了經過特別設計的「非侵入式水聽器」。

表 2 不同方法所得自由液面反射係數量測結果與理論值相較之最大誤差

	Corbett (1983)	Wilson et al. (2003)	簡 (2005)	本研究
校正方法	交換麥克風	三參數校正	交換麥克風	三參數校正
頻率範圍	2-21 kHz	5-9 kHz	1-8 kHz	2-7 kHz
反射係數幅度	0.07	0.015	0.11	0.02
反射係數相位	30°	0.7°	30°	4°

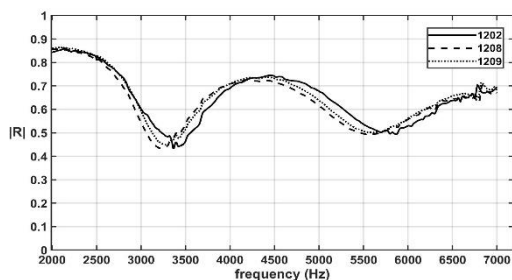
3. 橡膠多孔材料反射係數可重複性的試驗

在確認利用三參數校正方法所得聲波在水與空氣界面反射係數的準確性與可重複性後，本研究利用同樣方法在充水阻抗管中進行橡膠多孔性材料試片在水中的反射係數可重複性的試驗。該試片直徑為 11.52 cm、厚度 6.53 cm，參閱圖 10。

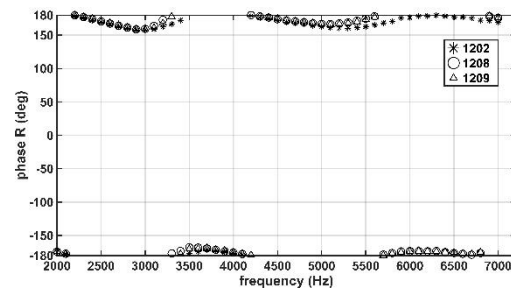
由於試片為多孔性材料，為避免不同含水量造成量測上的差異，試驗前先將試片泡於水中至少 4 小時。試驗時，將泡過水的試片插入充水阻抗管中，試片上層與阻抗管對齊，且整個阻抗管是處於滿水的狀態。因此，試驗時試片下端為水，而上端為空氣。試驗頻率範圍為 2000-7000 Hz，每 10 Hz 進行量測一次。試驗分別於三個不同日期(2020 年 12 月 2、8、9 日)重複進行，亦即先進行三參數校正實驗，取得三校正參數的值，然後裝入試片量測反射係數。三個不同日期所得三校正參數 λ_1 、 λ_2 、及 λ_3 的值列於表 3，而所得反射係數的幅度及相位分別示於圖 11 (a)及(b)。由於校正參數為複數，因此表 3 中 λ_1 、 λ_2 、及 λ_3 的值前者為實數部分，而後者為虛數部分。圖 11 (b)中為了比較實驗數據的差異，只列出間隔 100 Hz 的實驗結果。由圖 11 的結果可看出，三個不同試驗日期所得反射係數的幅度與相位差異不大，顯示實驗結果的可重複性。此外，圖 11 (b)中相位看起來似乎隨頻率的變化甚大，在 $\pm 180^\circ$ 附近擺盪；但由於 $+180^\circ$ 與 -180° 一樣，因此相位其實皆是在 180° 附近。實驗結果沒有完全相同的原因可能是試驗在不同日期進行，且每次進行上述的重複過程，因此每次實驗條件沒有百分之百相同；如校正試驗時水柱高誤差。此外，水中聲波傳遞受氣泡影響很大(黃等人, 2016)，每次試驗時水中含微氣泡的多寡，也會造成試驗上的差異。



圖 10 橡膠多孔材料試片，直徑為 11.52 cm、厚度 6.53 cm



(a)



(b)

圖 11 水與橡膠多孔材料試片界面聲波反射係數量測結果；(a)幅度、(b)相位。

表 3 不同試驗日期所得三校正參數(複數)的值

日期	λ_1	λ_2	λ_3
1202	1.1991 +0.6836i	0.9283 -0.8738i	0.5510 +1.0913i
1208	1.2208 +0.7549i	0.9191 -0.7505i	0.5777 +0.9940i
1209	1.1044 +0.7913i	0.9300 -0.5589i	0.5960 +0.8583i

4. 不同材料水中聲音反射係數量測

在進一步確認本研究所發展的水中阻抗管及量測方法能用來量測材料在水中的反射係數後，為了提供不同材料水中吸音特性參考，本研究也進行三種單一及均勻的材料試片反射係數的量測，量測方法與上述多孔材料相同。此三種材料分別為鋼板、矽膠(silicone rubber)、與聚氨酯膠(polyurethane rubber，一般俗稱 PU 膠)。選擇測試矽膠與聚氨酯膠的原因為：空氣中的吸音材料基本上是利用發泡材(foam material)，而水中的吸音材料基本上是橡膠材質(Fu et al., 2021)，尤其常以矽及聚氨酯當基質材料(matrix material)加入不同成分的添加物，以增加其吸音效果(Jayakumari et al., 2018; Guillemic et al., 2019; Fu et al., 2021)。圖 12 所示為三種不同材料試片的外觀，三個試片直徑皆為 11.6 cm，與阻抗管的內徑相同；鋼板試片厚度為 0.3 cm、矽膠試片厚度為 6.5 cm、而聚氨酯試片厚度為 2.5 cm。表 4 所列為此三種材料與水的密度、聲速、及特徵阻抗值的比較，此三種材料的密度是由重量與體積比所算出。由於文獻上不易找到聚氨酯膠與矽膠中的聲速值，因此表 4 中所列的聚氨酯膠與矽膠中的聲速，係分別由 Mott et al. (2002)及 Folds (1974)論文中的量測結果，粗略推估而得到的。

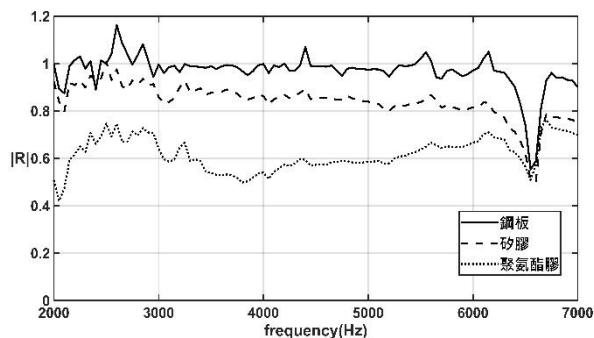
圖 13 (a)及(b)所示為三種不同材料在水中反射係數的幅度與相位的量測結果，其中實線代表鋼板、

虛線代表矽膠、點線代表聚氨酯膠。由量測結果得知，鋼板在大部分頻段的反射係數量測值接近於 1，表示當聲波由水中正向入射鋼板表面時，幾乎達到全反射。而矽膠與聚氨酯膠兩種軟性材料的反射係數較低，表示有部分的聲波能量被材料吸收；其中又以聚氨酯膠吸音效果較佳，尤其是其試片厚度約只有矽膠試片厚度的 40%。

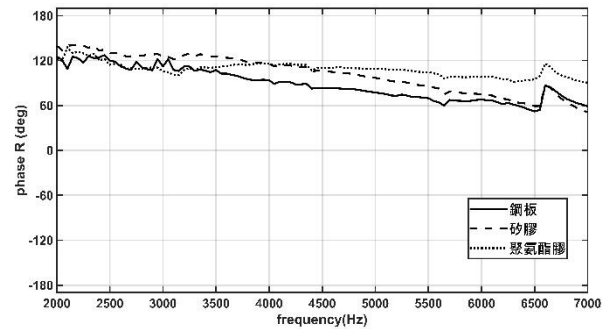
由(1)式可知，當聲波由一介質入射到另一半無限長的介質時，兩不同介質的特徵阻抗愈接近，則反射係數愈小。由表 4 可知三種材料中，鋼的特徵阻抗遠大於水，而 PU 膠的特徵阻抗與水的最接近，由此可了解為什麼圖 13(a)中鋼材的反射係數最大，而 PU 膠的反射係數最小。雖然(1)式只適用於半無限長的介質，但由於水與鋼材的特徵阻抗差異極大，聲波由水體入射到鋼片時，大部分聲波會被反射，因此可利用(1)式來估算出反射係數。由(1)式得出的聲波在水與鋼片界面的反射係數為 0.937，與實驗結果基本上吻合。圖 13 呈現出的結果仍有許多的不規則震盪，推測此結果是受實驗儀器誤差影響。此外，在 6570 Hz 時，三種不同材料試片的反射係數趨於相同，不太合理，造成此現象的原因仍然不明，有待後續的研究澄清。



圖 12 三種單一材料水中反射係數量測試片；鋼板(上)、聚氨酯膠(左下)、及矽膠(右下)



(a)



(b)

圖 13 圖 12 中三種不同材料在充水阻抗管中反射係數的量測結果；(a) 幅度、(b) 相位

表 4 不同材料特徵阻抗值比較

材料	ρ (kg/m^3)	c (m/s)	特徵阻抗 (ρc)	$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$
水(20°C)	998.2	1480	1.477×10^6	1.000
不鏽鋼	7850	5800*	45.530×10^6	30.826
聚氨酯膠 (PU 膠)	1090	1550**	1.690×10^6	1.144
矽膠 (silicon rubber)	1030	1100***	1.133×10^6	0.767

* <https://www.classltd.com/>

**根據 Mott et al. (2002)的實驗結果粗略估計而得

***根據 Folds (1974)的實驗結果粗略估計而得

反射係數的幅度基本上反應出反射波與入射波間聲壓振幅的比值，而相位則是兩者間的相位差。由圖 11(b)的結果可知，在多孔材料表面反射波與入射波間的相位差約為 180° ，與自由液面時(180°)，約略相同。然而圖 13(b)的結果顯示，在三種不透水材料表面，分別為鋼片、矽膠與 PU 膠，反射波與入射波間的相位差主要介於 60° – 120° 之間。上述結果顯示反射波與入射波間的相位差，也跟材料是否為孔隙介質有關；不過由於本研究的重點為充水阻抗管的發展與應用，上述議題不在本研究範圍內。

水中吸音材料耗損聲波能量的物理機制主要如下：一、利用材料表面特性改變聲波傳遞模式，如將原來的縱向波變為縱向及橫向波，減少縱向聲波能量；二、藉由材質的不均勻性，造成多重散射 (multiple-scattering)，達到分散聲波能量的效果；及三、聲波在孔隙中傳遞，因流體黏滯摩擦效應消耗能量。此外，當材料為吸音材料時，反射係數的大小除了與試片的厚度有關外，也跟試片另一端的試驗環境(如空氣、水、或鋼片)有關；後者會影響到聲波在試片上層的反射係數，進而影響到試片下層與水界面間的反射係數。因此，試驗時應仔細考慮

試驗環境與材料的實際環境一致。本研究所發展的充水阻抗管，雖然目前只侷限於材料試片後端為自由液面的情形，但也可以在試片後端加上鋼蓋，測試其反射係數。

5. 材料的聲阻抗值

將上節中之試驗材料反射係數量測結果代入(21)式中，即可求得試驗材料的無因次聲阻抗值 $Z_L / \rho c$ 。若以水的特徵阻抗當作無因次化的參考值，則 $Z_L / \rho c$ 表示試驗材料相對於水的無因次聲阻抗值。圖 14(a)及(b)所示分別為自由液面與三種不同材料的無因次聲阻抗的幅度及相位。由圖 14(b)可以發現，容易造成聲波全反射的兩種界面：自由液面與鋼板交界面，其擾動聲壓與介質質點運動速度間的相位差異約為 90° 。

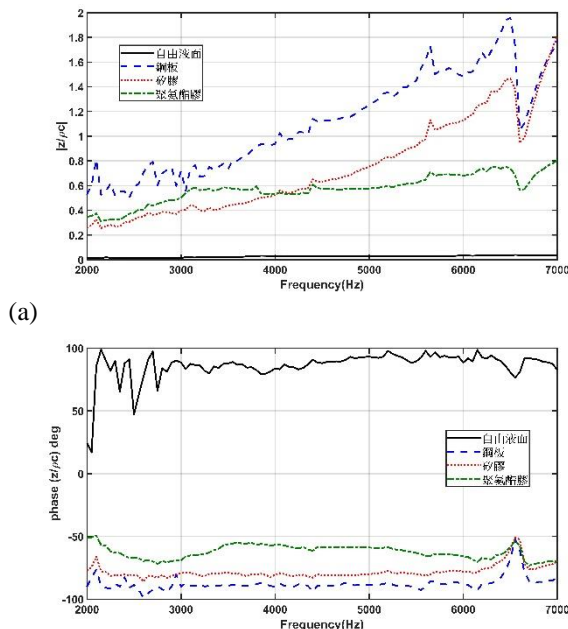


圖 14 以水的特徵阻抗當作無因次化的參考值時，自由液面與三種不同材料的無因次聲阻抗；(a)幅度、(b)相位

結 論

本研究依據 ASTM E1050-98 (2006)設計規範與應用三參數校正方法，發展出直立式充水阻抗管，可用來量測材料在水中的聲波反射係數。由於目前尚無標準試片做為驗證材料在充水阻抗管中所測得反射係數的準確性，本研究量測聲波在水與空氣界面的反射係數，試驗結果顯示與以常用的轉移函數法或交換麥克風法相較，利用三參數校正方法所

得到的聲波在自由液面的反射係數與理論值更為吻合，且實驗結果具可重複性。

在確立聲波在水與空氣界面的反射係數量測結果與理論值相吻合，且實驗結果的可重複性後，本研究利用同樣方法量測橡膠多孔性材料試片在水中的反射係數，且驗證了結果的可重複性。本研究也量測不同材料試片表面的水中聲波反射係數，以測試所發展的充水阻抗管量測材料於的實用性；測試材料包括鋼板、矽膠及 PU 膠。三種材料中，聲波在 PU 膠表面反射係數最小，表示其吸音效果最佳。上述測試結果顯示本研究發展的充水阻抗管結合三參數校正法，可簡易測得在不同聲波頻率下材料表面的反射係數。

參 考 文 獻

1. 宋家驥、邱大維、何文達、楊瑞鋒 (2003)，「阻抗管之設計與水下吸音材之量測」，第五屆水下技術研討會，142-146 頁。
2. 簡志宇 (2005)，以注水彈性阻抗管測量材料之水中聲學特性之研究，國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所碩士論文，102 頁。
3. 黃清哲、林彥岑、張宏煜、田宗謨、許泰文 (2016)，「水中聲波通過氣泡幕衰減特性實驗探討」，海洋工程學刊，第 16 卷第 1 期，43-53 頁。
4. 周城光、白國鋒、劉碧龍、李曉東 (2010)，「充水阻抗管中測量材料聲學性能的校准方法研究」，聲學學報，第 35 卷第 2 期，154-161 頁。
5. ASM International (1989). Metal Handbook, 9th ed. (ASM international, Materials Park, OH), Vol. 17, p. 235.
6. ASTM E1050-98 (2006). "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system," ASTM E1050-98 (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States).
7. Beranek, L.L. (1988). Acoustical Measurements (Acoustical Society of America, Woodbury, NY), Chap. 7, pp. 294-353.
8. Bodén, H. and Åbom, M. (1986). "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 79(2), pp. 541-549.
9. Chung, J.Y. and Blaser, D.A. (1980 a). "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties, I. Theory," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68(3), pp. 907-913.
10. Chung, J.Y. and Blaser, D.A. (1980 b). "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties, II. Experiment," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 68(3), pp. 914-921.
11. Corbett, S.S. III (1983). A Two-Hydrophone Technique for Measuring the Complex Reflectivity of Materials in Water-Filled Tubes, M. S. thesis, Pennsylvania State University, 158 pages.
12. Del Grosso, V.A. (1971). "Analysis of multimode acoustic propagation in liquid cylinders with realistic boundary

- conditions-application to sound speed and absorption measurements,” *Acustica*, Vol. 24(6), pp. 299-311.
13. Dunlop, J.I. (1992). “Measurement of acoustic attenuation in marine sediments by impedance tube,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91(1), pp. 460-469.
 14. Folds, D.L. (1974). “Speed of sound and transmission loss in silicone rubbers at ultrasonic frequencies,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 56(4), pp. 1295-1296.
 15. Fu, Y., Fischer, J., Pan, K., Yeoh, G.H., and Peng, Z. (2021). “Underwater sound absorption properties of polydimethylsiloxane/carbon nanotube composites with steel plate backing,” *Applied Acoustics*, Vol. 171. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107668>.
 16. Gibiat, V. and Laloë, F. (1990). “Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration method,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88(6), pp. 2533-2545.
 17. Guillermic, R.-M., Lanoy, M., StryBulevych, A., and Page, J.H. (2019). “A PDMS-based broadband acoustic impedance matched material for underwater applications,” *Ultrasonics*, Vol. 94, pp. 152-157.
 18. Jayakumari, V.G., Shamsudeen, R.K., Rajeswari, R., and Mukundan, T. (2019). “Viscoelastic and acoustic characterization of polyurethane-based acoustic absorber panels for underwater applications,” *J. Appl. Polym. Sci.*, DOI: 10.1002/APP.47165.
 19. Jones, M.G. and Stiede, P.E. (1997). “Comparison of methods for determining specific acoustic impedance,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101(5), pp. 2694-2704.
 20. Lafleur, L.D. and Shields, F.D. (1995). “Low-frequency propagation modes in a liquid-filled elastic tube waveguide,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97(3), pp. 1435-1445.
 21. Mott, P.H., Michael Roland, C., and Corsara, R.D. (2002). “Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 111(4), pp. 1782-1790.
 22. Seybert, A.F. and Soenarko, B. (1981). “Error analysis of spectral estimates with application to the measurement of acoustic parameters using random sound fields in ducts,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 69(4), pp. 1190-1199.
 23. Seybert, A.F. and Ross, D.F. (1977). “Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 61(5), pp. 1362-1370.
 24. Wilson, P.S. (2002). *Sound Propagation and Scattering in Bubbly Liquid*, Ph.D. Dissertation, Boston University.
 25. Wilson, P.S., Roy, R.A. and Carey, W.M. (2003). “An improved water-filled impedance tube,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 113(6), pp. 3245-3252.

DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF A WATER-FILLED IMPEDANCE TUBE BY EMPLOYING THE THREE-PARAMETERS-CALIBRATION METHOD

C.-J. Huang* Z.-Y. Shen* C.-M. Dong* K.-W. Liu* Y.-C. Yang**

*Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

**Department of Materials and Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology

Keywords: Vertical Water-Filled Impedance Tube, Three-Parameters-Calibration Method, Plane Wave, Reflection Coefficients, Transfer Function

ABSTRACT

Based on the standard test method provided by ASTM E1050-98 (2006), this work develops a vertical water-filled impedance tube for measuring the underwater acoustic impedance of materials. The three-parameters-calibration method was employed to determine the complex reflection coefficients from the voltage ratio of the sound signals measured by hydrophones at two different locations. This voltage ratio is also referred to as transfer function. Firstly, the developed system was used to measure the complex reflection at the interface between the water and the free surface. Experimental results reveal that the measured reflection coefficients were closer to the theoretical values compared with those obtained using the transfer function method or the sensor-switching technique. The repeatability of the experimental data was also assured. After having verified the accuracy and repeatability of the experimental results, the developed system was used to measure the acoustic reflection coefficient of various material to test the capability of the developed system for measuring the reflection coefficient of material in the underwater environment. The tested material includes steel, silicon rubber, and PU (polyurethane) rubber. The tests demonstrate that the acoustic reflection coefficients and impedance of material can be easily and accurately measured by the proposed impedance tube combined with the three-parameters-calibration method.

(Manuscript received Jun. 12, 2021,
Accepted for publication Nov. 03, 2021)