

中華民國音響學會
九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會
2009 Annual Meeting and 22th Symposium of
Acoustical Society of the Republic of China

單層及雙層石膏板輕隔間之隔音預估及驗證

The Prediction and Validation of Sound Insulation by Gypsum Board Partition

陳金文/中山科學研究院

摘 要

乾式石膏板輕隔間之工法擁有多種優異之物理條件，廣泛應用於集合住宅或透天厝。本文整理常用之經驗公式及解析數值方法預估其隔音量，並以內政部建築研究所國家聲學實驗室之試件量測結果為比對條件，驗證單層單面及雙層雙面之預估效益。

關鍵字：穿透損失，隔音，輕隔間，吻合頻率，經驗公式

A b s t r a c t

The gypsum board of dry walls are the popular sound insulation material in the market for the high building dwelling and home housing because of advantages of their physical properties. The high sound transmission loss of such partitions is one of them. The empirical formula and analytical solution for the sound insulation by single and double panels with different sides of installation will be studied, and compares with the testing results for demonstration the effectiveness of the prediction.

Keywords：Sound Transmission Loss, Sound Insulation, Partition, Coincidence Frequency, Empirical Scheme.

一、前言

單層單面及雙層雙面之輕隔間一直是建材市場上之隔間應用主流，其輕量化、乾式作業、短期施工、具備一定承載量、符合隔熱/防火/隔音等物理環境性能，所以能為業主/設計/材料商樂於引用之工法。其隔音量可採用實驗室之數據，也可採用經驗公式或解析數值預估其性能。本文主要回顧經驗公式及解析法之隔音預估值，與內政部建築研究所國家聲學實驗室之試驗結果相互比較，以驗證其準確性。

二、研究目的

德國聲學大師 Dr. Cremer 於 1942 年便以導出質量律之經驗公式，其質量或頻率加倍，隔音量可增加 6 dB 之效益，為最基本之概念，隨後又導引出吻合頻率以上隔音量之經驗修正式。至此以後，各種單層板、雙層板、多層板、單層雙面無聲橋之隔板、單層雙面線或點聲橋之隔板實驗測試、解析理論、統計能量法及有限元素法之隔音計算不斷被提出及精進。本文主要之目的以內政部建築研究所國家聲學實驗室之材料試驗結果，作為驗證上述部分理論隔音預估之準確性。研究步驟說明如次：

1. 蒐集及研讀相關研究之經驗與解析解。
2. 以 Matlab 程式撰寫各窄頻及 1/3 倍頻帶之聲壓位準。
3. 以國外發表論文之實驗數據，驗證程式之正確性。
4. 以內政部建築研究所發表論文之實驗數據，依據 CNS 8465-1(即 ISO 717-1)計算單一數值參量之隔音宣告值，比較其準確性。

三、基本理論

Dr. Cremer[1] 發表無限單層平板理論吻合頻率以下之隔音量經驗公式詳如式 1、吻合頻率以下之隔音量經驗公式詳如式 2。Sewell[2]將實際有限尺寸之模態邊界條件影響納入計算，並完成低頻區段之經驗修正式詳如式 3。 $TL, m, \rho, c, f, f_c, \theta, \eta, E, h, \nu, k, A, \Lambda$ 分別代表穿透損失、面密度、空氣密度、空氣速度、頻率、吻合頻率、入射波入射角、平板阻尼、彈性模數、平板厚度、波松比、波數、平板面積、平板長寬尺寸比。

$$TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left(\frac{m \pi f}{\rho c} \right)^2 \right\} - 5, \text{ 或 } TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left(\frac{m \pi f \cos \theta}{\rho c} \right)^2 \right\} \quad \text{式 1}$$

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{m \pi f}{\rho c} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{2 \eta f}{f_c} \right) - 5, \quad f_c = \frac{c^2}{2 \pi} \sqrt{\frac{12 m (1 - \nu^2)}{E h^3}} \quad \text{式 2}$$

$$TL = -10 \log_{10} \left\{ \frac{\ln(k \sqrt{A} + 0.16 - U(\Lambda)) + \frac{1}{4 \pi A k^2}}{\left[\left(\frac{m \pi f}{\rho c} \right) \left(1 - \frac{f^2}{f_c^2} \right) \right]^2} \right\} \quad \text{式 3}$$

$$U(\Lambda) = -0.0000311 \Lambda^5 + 0.000941 \Lambda^4 - 0.0107 \Lambda^3 + 0.0526 \Lambda^2 - 0.0407 \Lambda - 0.00534$$

Sharp[3]提出無聲橋之單層雙面之隔音量經驗公式詳如式 4、點/線聲橋之單層雙面之隔音量經驗公式詳如式 5。其中 $TL, m_1, m_2, m, f, f_c, d, e, b$ 分別代表穿透損失、第一面板材面密度、第二面板材面密度、頻率、吻合頻率、空氣層、點聲橋間距離、線聲橋間距離。

$$\begin{aligned} TL &= TL_m & f &< f_0 \\ TL &= TL_{m1} + TL_{m2} + 20 \log_{10}(fd) - 29, & f_0 &< f < f_l, \\ TL &= TL_{m1} + TL_{m2} + 6 & f &> f_l \end{aligned} \quad \text{式 4}$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$f_0 = 113 / \sqrt{2m_1m_2d / (m_1 + m_2)}$$

$$f_l = 55 / d$$

$$TL_m = 20 \log(mf) - 48$$

$$TL_{m1} = 20 \log(m_1f) - 48$$

$$TL_{m2} = 20 \log(m_2f) - 48$$

$$TL = TL_m \quad f < f_0$$

$$TL = TL_{m1} + TL_{m2} + 20 \log 10(fd) - 29, \quad f_0 < f < f_b$$

$$TL = TL_m + \Delta TL_m \quad f > f_b$$

$$f_b = f_0 * \left[\frac{\pi^2 e^3 f_c^2}{8c^2} \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 \right]^{0.25}$$

式 5

$$\Delta TL_m = 20 \log(ef_c) + 20 \log\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right) - 45 \quad \text{點接觸之聲橋傳遞}$$

$$\Delta TL_m = 10 \log(bf_c) + 20 \log\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right) - 18 \quad \text{線接觸之聲橋傳遞}$$

Alba[4,5]提出單層單面及雙層雙面之隔音量解析解，詳細之假設及推導過程可參考原文，僅將其單層單面預估之重點算式彙整如式 6。 $TL, m, \rho, c, w, \theta, \eta, h, \tau(\theta), \tau_d$ 分別代表穿透損失、面密度、空氣密度、空氣速度、角頻率、入射波入射角、平板厚度、各角度之穿透係數、平均穿透係數。

$$\tau(\theta) = \frac{(2\rho)^2}{\left(\frac{w^3 \cos \theta D \sin^4 \theta \eta}{c^5} + 2\rho \right)^2 + \frac{w^2 \cos^2 \theta (Dw^2 \sin^4 \theta - mhc^4)^2}{c^{10}}}$$

式

$$\tau_d = \frac{\int_0^{\theta_{im}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{im}} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad TL = 10 \log(1/\tau_d)$$

6

四、隔音量預估結果

先以 Callister[6]之單層單面玻璃為驗證程式正確性之作法，分析 4.9mm 厚度、阻尼 0.025、尺寸 0.61m*0.91m 之隔音量。圖 1 顯示入射角度愈大，隔音量越小之趨勢、圖 2 顯示吻合頻率以上之隔音量隨阻尼之增加而增加之基本現象。圖 3 為以 Cremer 經驗式計算與實驗之比較結果，顯示低頻及接近吻合頻率端之差異性過大，圖 4 為 Cremer+Sharp 經驗式與實驗之比較結果，顯示 Sharp 建議於吻合頻率之半與吻合頻率間

以線性內差法修正後之較優異性。圖 5 為 Cremer+Sharp+Sewell(簡稱 CSS Model)經驗式與實驗之比較結果，顯示 Swell 建議於吻合頻率之半下修正低頻固定邊界條件反射模態之效應，使經驗公式之隔音預估結果更為準確。圖 6 為採用 Alba[5,6]之解析數值解所預估之結果，與量測值比較之吻合度也相當高。

式 4 為雙面構造無聲牆條件下之經驗式，以 Sharp[4]早期分析 15.9mm 單層雙面/空氣層 10cm 之石膏板為比較對象，圖 7 顯示僅於 500 Hz 以下，可獲得較準確之結果，其間最大之差異在於支撐骨架之聲橋能量傳遞。Sharp 晚期分析木質骨架聲橋傳遞之能量，區分為點聲橋及線聲橋兩種邊界條件，並以式 5 為修正之經驗公式，圖 8 為分析 15.9mm/9.5mm 厚度、單層雙面/空氣層 10cm 石膏板、木骨架固定方式之線聲橋安裝實驗與預估式比較之結果，圖 9 為分析 15.9mm/9.5mm 厚度、單層雙面/空氣層 10cm 石膏板、木骨架配合軟棉固定方式之點聲牆安裝實驗與預估式比較之結果。兩者顯示修正式於吻合頻率之半範圍內可獲得合理之結果，與吻合頻率間仍可以線性內差獲得較佳結果，但吻合頻率以上之差異量仍大，為單層雙面材料隔音量之最大缺陷。

五、量測驗證

由上述驗證程式正確程式後，以內政部建築研究所[7]執行厚度 15mm 單層石膏板為比對試件，試件開口面積為 3m*3.5m，採用 94mm*30mm*20ga 之 U 型上下槽、92mm*35mm*20ga 之 C 型立柱、38mm*12mm*20ga 之橫向加強槽鋼為該單層石膏板之支撐，立柱間距為 61cm、橫向加強槽鋼間距為 120cm，四周以接縫膠泥填縫以防洩漏音。所有量測設備均可追校且依據 CNS 15160-6(即 ISO 140-3)[8,9]標準執行測試。此單層單面石膏板之量測結果與預估隔音量之比較詳如圖 10 及圖 11，兩者趨勢相當，CCS 模式之經驗式結果於此比對試件明顯優於解析解之預估值。依據 CNS A1031-1 標準(即 ISO 717-1)[10,11]之單一數值參量宣告 CSS/解析解/量測之隔音量分別為 $Rw-29(-1,-2)$; $Rw-32(-3,-4)$, $Rw-28(-1,-2)$ 。解析解之隔音量宣告值雖較高，當三者之設計應用值 $Rw-28/Rw-29/Rw27$ 確差異不大。

其次比對雙層雙面之試件，該試件為厚度 15mm 雙層石膏板為比對試件，試件開口面積為 3m*3.5m，採用 94mm*30mm*0.8mm 之 U 型上下槽、92mm*35mm*0.8mm 之 C 型立柱、19mm*10mm*1.0mm 之橫向加強槽鋼為該單層石膏板之支撐，立柱間距為 61cm、橫向加強槽鋼間距為 120cm，中間層以密度 $24kg/m^3$ 、厚度 50mm 之玻璃棉填塞，四周以接縫膠泥填縫以防洩漏音。所有量測設備均可追校且依據 ISO 140-3 標準執行測試。此雙層雙面石膏板之量測結果與預估隔音量之比較詳如詳如圖 12 及圖 13，兩者趨勢顯示不同，點聲橋模式明顯優於線聲橋模式之預估值。其主要原因係 Sharp 以木質龍骨為分析依據，其剛性高於鋼質龍骨，因此線聲橋模式預估值將低於量測值。

六、結論

經驗式及解析解之隔音量預估均能與實際量測試件有合理之吻合結果。Sharp 點聲

橋模式之隔音量預估式較適用鋼質骨架雙層雙面輕隔間之隔音運算。

七、誌謝

本文感謝李新懺博士之指導及修正。

八、參考文獻

1. L. Cremer, "Therrie der Schalldammung dummer Wande beischragem Einfall", Akust. Z. 7, pp. 81-102, 1942.
2. E. C. Sewell, "Transmission of Reverberation Sound Through a Single-Leaf Partition Surrounded by an infinite rigid baffle", J. of Sound & Vibration, Vol.12, pp.21-32, 1970.
3. B. H. Sharp, "Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements", J. of Noise Control Engineering, Vol11(2), pp.53-63, 1978.
4. J. Alba, J. Ramis, "Modelling of Impervious Layers from Measurements of the Sound Reduction Index", J. Applied Acoustics, Vol.64, pp. 385-400, 2003.
5. J. Alba, J. Ramis, V.J. Sanchez-Morcillo, "Improvement of the Prediction of Transmission Loss of Double Partitions with Cavity Absorption by Minimization Techniques", J. of Sound & Vibration, Vol.273, pp.793-804, 2004.
6. J.R. Callister, A.R. George, G.E. Freeman, "An Empirical Scheme to Predict the Sound Transmission Loss of Single-Thickness Panels", J. of Sound & Vibration, Vol.222(1), pp.145-151, 1999.
7. 郭清香,陳瑞鈴,陳金文, "不同施工法之輕隔間隔音性能", 中華民國音響學會年會第 20 屆論文發表會, 2007/11/23.
8. CNS-15160-3, 聲學-建築物及建築構建之隔音量量測-建築構件空氣音隔音之實驗室量測, 97 年 1 月 14 日公布。
9. ISO 140-3, Acoustics-Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements-part 3:Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements, 1995.
10. CNS 8465-1, 聲學-建築物及建築構建之隔音量評定-空氣音隔音, 96 年 5 月 14 日公布。
11. ISO 717-1, Acoustics-Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements-Part 1:Airborne Sound Insulation, 1996.

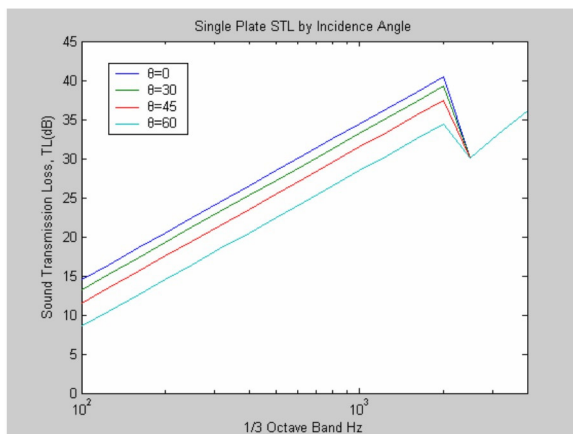


圖 1 單層玻璃隔板 TL 隨入射角而異

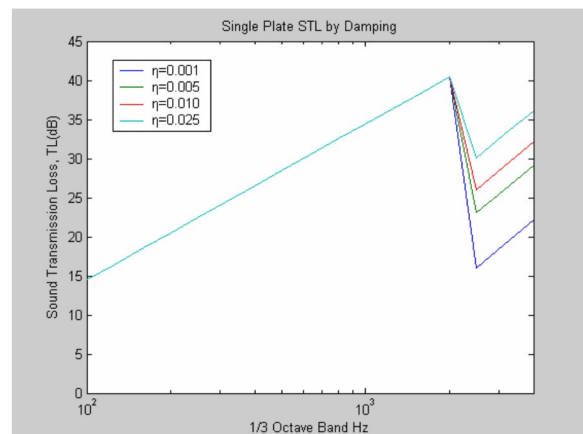


圖 2 單層玻璃隔板 TL 隨材料阻尼而異

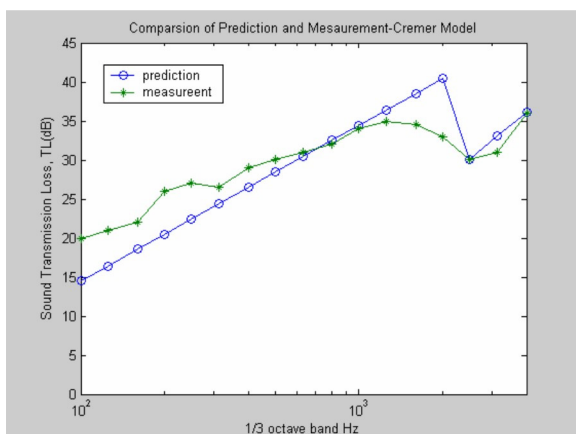


圖 3 Cremer 模式之單層玻璃隔板 TL 預估

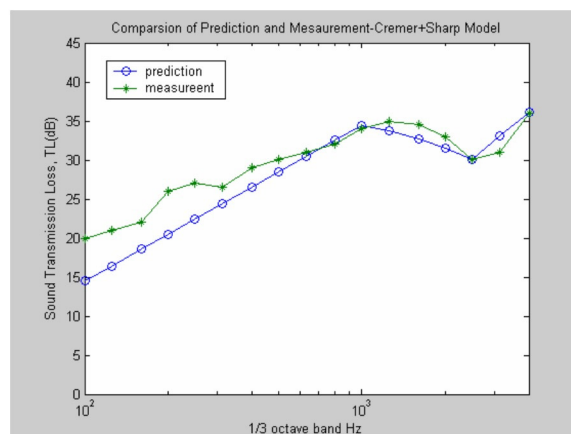


圖 4 Cremer+Sharp 模式之單層玻璃隔板 TL 預估

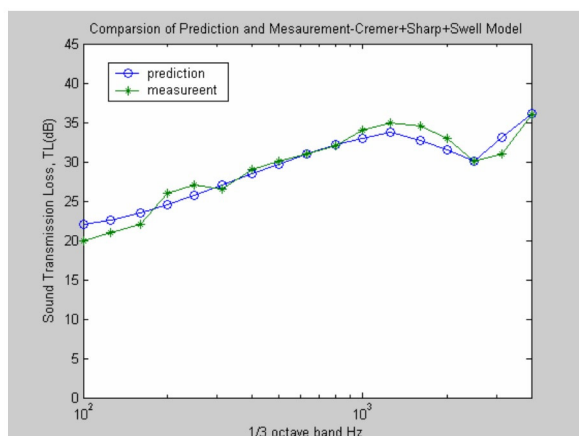


圖 5 CSS 模式之單層玻璃隔板 TL 預估

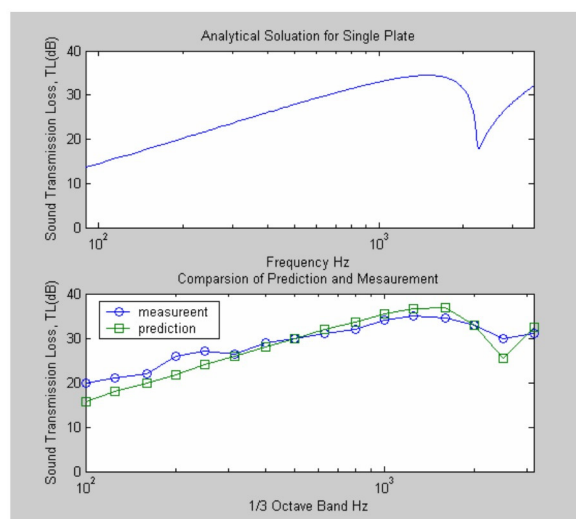


圖 6 解析解之單層玻璃隔板 TL 預估

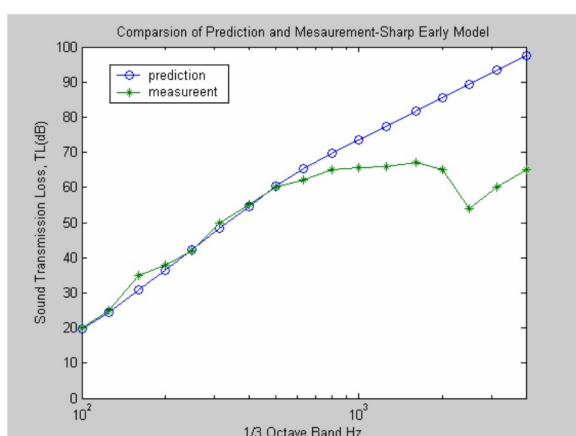


圖 7 早期 Sharp 模式之雙層隔板 TL 預估

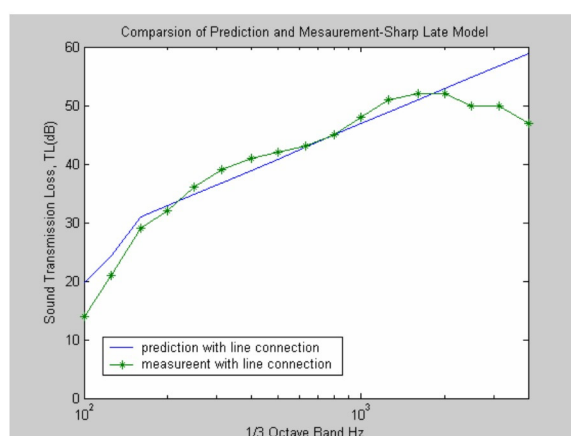


圖 8 後期 Sharp 模式一之雙層隔板 TL 預估
(木質骨架)

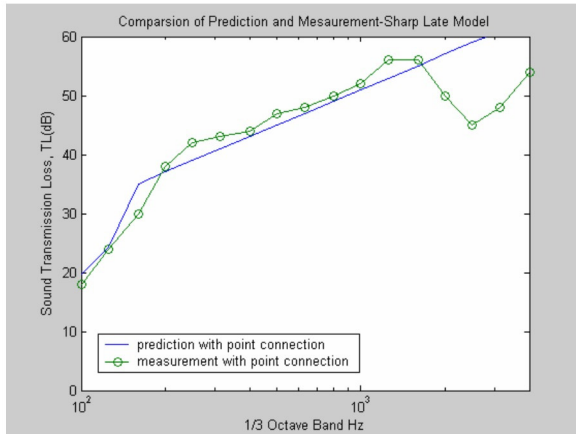


圖 9 後期 Sharp 模式二之雙層隔板 TL 預估
(木質骨架)

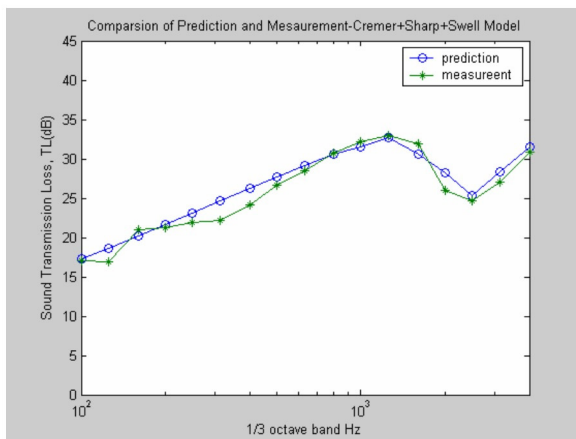


圖 10 CSS 模式之單層石膏板 TL 預估

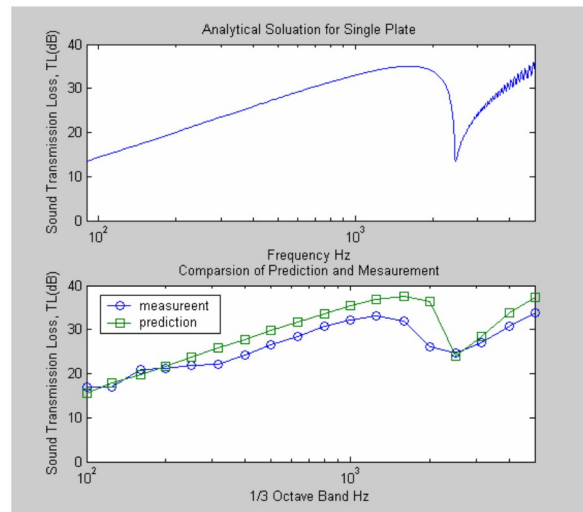


圖 11 解析解之單層石膏板 TL 預估

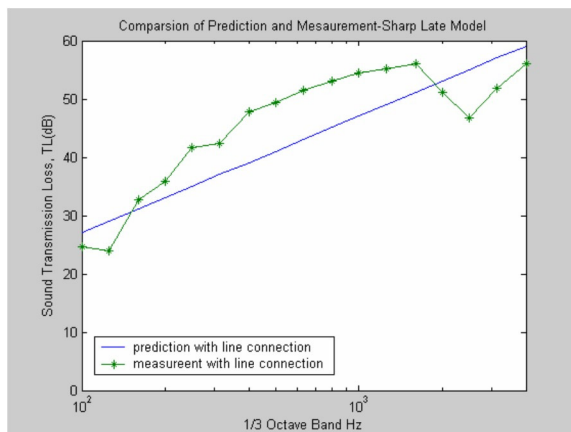


圖 12 後期 Sharp 模式一雙層隔板 TL 預估
(鋼質骨架)

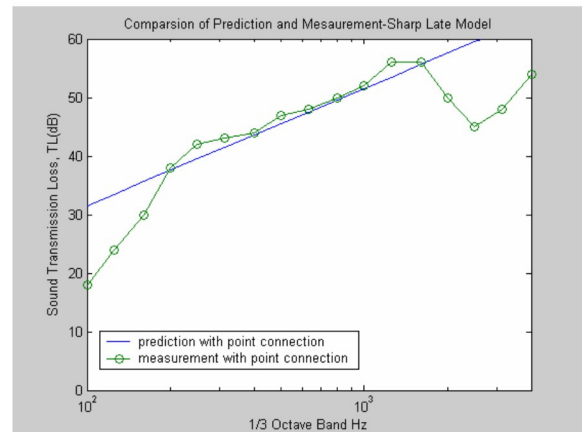


圖 13 後期 Sharp 模式二雙層隔板 TL 預估
(鋼質骨架)