

◇ 研究报告 ◇

计入地面附加衰减的声屏障插入损失估算方法*

赵剑强^{1,2†} 赵倩¹ 陈莹¹ 杨文娟¹ 胡博³ 刘珺⁴ 吴沛³

(1 长安大学环境科学与工程学院 西安 710054)

(2 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 西安 710054)

(3 长安大学建筑工程学院 西安 710061)

(4 长安大学材料科学与工程学院 西安 710061)

摘要 基于理论推导和计算,给出了公路声屏障声学设计中,在考虑地面附加衰减情况下计算插入损失的方法。该方法综合考虑了有限长线声源无限长声屏障绕射声衰减量、有限长线声源地面衰减量及遮蔽角对插入损失的影响。通过与《声屏障声学设计和测量规范》(HJ/T90-2004)的计算结果的对比,验证了该文所给方法的精确性及可行性,并对《声屏障声学设计和测量规范》所给地面衰减修正量进行了商榷。最后,给出了当预测点位于有限长路段中央法线上时,通过计算线声源地面衰减量得到计算插入损失所需参数值,再计算插入损失的简便方法。该研究为存在地面附加衰减情况下有限长声屏障插入损失计算提供了一个新的参考方法。

关键词 公路声屏障,插入损失,地面附加衰减,有限长线声源,绕射声衰减量

中图法分类号: X593

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)04-0582-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.04.018

A method for estimating the insertion loss of sound barriers including the ground additional attenuation

ZHAO Jianqiang^{1,2} ZHAO Qian¹ CHEN Ying¹ YANG Wenjuan¹ HU Bo³ LIU Jun⁴ WU Pei³

(1 School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

(2 Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

(3 School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

(4 School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract Based on acoustic theory, a new method for estimating the insertion loss of highway sound barriers was proposed in this study. In the method, the ground additional attenuation was considered, and the effects of the diffraction attenuation of a line sound source with a finite length propagated over a sound barrier with an infinite length, the ground attenuation of a sound source with a finite length and the shielding angle on the insertion loss were integrally included. Compared with "Norm on acoustical design and measurement of noise barriers" (HJ/T90-2004), the method proposed in this study was accurate and feasible. Meanwhile, the correction values of ground attenuation recommended by "Norm on acoustical design and measurement of noise barriers" (HJ/T90-2004) were discussed. Eventually, when the receiver located in the central normal of a road with a finite length, a simple and convenient method for estimating the insertion loss was given. The parameter required for calculating the insertion loss was determined by calculating ground attenuation of the line sound source. This research provided a new way for insertion loss calculation in acoustic design of finite length noise barriers when considering the ground attenuation of a sound source.

2018-01-10 收稿; 2018-02-26 定稿

*国家自然科学基金项目 (51778057)

作者简介: 赵剑强 (1963-), 男, 陕西商洛人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 污水处理及交通环保。

† 通讯作者 E-mail: 626710287@qq.com

Key words Highway noise barrier, Insertion loss, Ground additional attenuation, Finite line sound source, Diffraction attenuation

1 引言

道路交通噪声已是当前社会环境噪声影响中最为严重的噪声源,建设声屏障是控制道路交通噪声污染的主要措施。目前,我国道路声屏障的设计主要采用《声屏障声学设计和测量规范》(HJ/T90-2004)(以下简称《规范》)中规定的方法进行^[1]。《规范》中声屏障插入损失(Insertion loss, IL)的确定方法如下:(1)确定声源及预测点位置、高度,确定声屏障位置、长度,并根据经验设定一高度值;(2)根据假定的声屏障位置、高度、道路结构及地形确定声程差及菲涅尔数;(3)由菲涅尔数与声屏障衰减量曲线图或公式计算无限长线声源无限长声屏障绕射声衰减量;(4)计算遮蔽角,由无限长线声源无限长声屏障绕射声衰减量及遮蔽角查图得到有限长声屏障绕射声衰减量;(5)由有限长声屏障绕射声衰减量减去反射声、透射声、地面附加衰减或障碍物衰减等修正项,即得到所设定高度声屏障的插入损失。

《规范》在计算有限长声屏障插入损失时,给出的地面衰减修正量计算方法如下:等效距离为55 m时地面衰减修正值取2.5 dB(A),等效距离为150 m时地面衰减修正值取5.0 dB(A),其余为线性插值,且距离越远修正值越大。这种规律对于有限长声屏障的情形可能是不适用的。本文基于理论推导和计算,给出了公路声屏障声学设计中,同时考虑地面附加衰减情况下计算插入损失的方法。通过该方法的举例计算说明了方法的精确性和可行性,以及《规范》所给地面附加衰减修正值的适用性。

2 声屏障插入损失计算方法的推导

在计算有限长声屏障插入损失时步骤(1)~(2)与《规范》给出的前两个步骤相同。假设不存在反射

声源,声屏障透射声忽略不计,根据插入损失的概念,声屏障建设前后预测点声压级之差为

$$IL = L_{前} - L_{后}. \quad (1)$$

我国《环境影响评价技术导则-声环境》(HJ 2.4-2009)推荐的公路交通噪声预测模式^[2]为

$$L_{eqi} = (\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg \left(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T} \right) + 10 \lg \left(\frac{r_0}{r} \right) + 10 \lg \left(\frac{\Delta\varphi}{\pi} \right), \quad (2)$$

式(2)中, L_{eqi} 为第*i*类车型车流在预测点的等效声级,dB(A); $(\overline{L_{0E}})_i$ 为第*i*类车辆在参照点的平均辐射声级,dB(A); N_i 为对应观察时段*T*在观察点处第*i*类车通过的数量,辆; T 为观察时段或计算等效声级的时间段(常取1 h),h; r_0 为测试 $(\overline{L_{0E}})_i$ 的参照距离,m; V_i 为第*i*类车辆的平均车速,m/h; r 为行车道中心线至预测点的距离,m; $\Delta\varphi$ 为预测点到有限长路段两端的张角,rad。

当计入地面吸声附加衰减 ΔL_G 时,预测点交通噪声级为

$$L_{eqi,G} = L_{eqi} - \Delta L_G. \quad (3)$$

声屏障路段对预测点交通噪声级的贡献可写为

$$L_{eqi,S} = L_{eqi} - \Delta L_S, \quad (4)$$

式(4)中, ΔL_S 为有限长声源(声屏障路段)无限长声屏障绕射声衰减量,计算公式如下^[3-4]:

$$\Delta L_S = -10 \cdot \lg \frac{1}{\Delta\beta} \int_{\beta_1}^{\beta_2} 10^{-0.1\Delta L_P} d\beta, \quad (5)$$

式(5)中, ΔL_P 为点声源在无限长声屏障的绕射声衰减量; $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\theta$ 及 $\Delta\beta$ 定义参见图1。则IL为

$$IL = 10 \lg \sum_{i=1}^3 10^{0.1[(\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T}) + 10 \lg(\frac{r_0}{r}) + 10 \lg(\frac{\Delta\varphi}{\pi}) - \Delta L_{G,\Delta\varphi}]}$$

$$- 10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^3 10^{0.1[(\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T}) + 10 \lg(\frac{r_0}{r}) + 10 \lg(\frac{\Delta\theta}{\pi}) - \Delta L_{G,\Delta\theta}]}$$

$$+ \sum_{i=1}^3 10^{0.1[(\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T}) + 10 \lg(\frac{r_0}{r}) + 10 \lg(\frac{\Delta\beta}{\pi}) - \Delta L_{S,\Delta\beta}]} \right\}. \quad (6)$$

假设大、中、小型车声源高度相同,则有

$$\begin{aligned}
 \text{IL} &= 10 \lg \sum_{i=1}^3 10^{0.1[(\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T}) + 10 \lg(\frac{r_0}{r})]} \frac{\Delta \varphi}{\pi} 10^{-0.1 \Delta L_{G, \Delta \varphi}} \\
 &\quad - 10 \lg \sum_{i=1}^3 10^{0.1[(\overline{L_{0E}})_i + 10 \lg(\frac{\pi \cdot r_0 \cdot N_i}{V_i \cdot T}) + 10 \lg(\frac{r_0}{r})]} \left(\frac{\Delta \theta}{\pi} 10^{-0.1 \Delta L_{G, \Delta \theta}} + \frac{\Delta \beta}{\pi} 10^{-0.1 \Delta L_{S, \Delta \beta}} \right) \\
 &= -10 \cdot \lg \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta \varphi} \cdot \frac{10^{-0.1 \Delta L_{G, \Delta \theta}}}{10^{-0.1 \Delta L_{G, \Delta \varphi}}} + \frac{\Delta \beta}{\Delta \varphi} \cdot \frac{10^{-0.1 \Delta L_{S, \Delta \beta}}}{10^{-0.1 \Delta L_{G, \Delta \varphi}}} \right). \tag{7}
 \end{aligned}$$

根据ISO9613-2: 1996,适用于点声源地面衰减的计算公式^[5]为

$$A_{gr} = 4.8 - 2 \cdot \frac{h_m}{d} \cdot \left(17 + \frac{300}{d} \right), \tag{8}$$

式(8)中, d 为声源至接收点的距离, m; h_m 为传播路径的平均离地高度, m。

将 A_{gr} 在 $\Delta \varphi$ 对应路段积分, 则该路段的地面衰减量为

$$\Delta L_{G, \Delta \varphi} = -10 \cdot \lg \frac{1}{\Delta \varphi} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} 10^{-0.1 A_{gr}} d\varphi. \tag{9}$$

同样方法可得 $\Delta \theta$ 对应路段的地面衰减量为

$$\begin{aligned}
 \Delta L_{G, \Delta \theta} &= -10 \cdot \lg \frac{1}{\Delta \theta} \\
 &\times \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} 10^{-0.1 A_{gr}} d\varphi - \int_{\beta_1}^{\beta_2} 10^{-0.1 A_{gr}} d\beta \right). \tag{10}
 \end{aligned}$$

设 $A = \frac{1}{\Delta \varphi} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} 10^{-0.1 A_{gr}} d\varphi$, $B = \frac{1}{\Delta \beta} \cdot \int_{\beta_1}^{\beta_2} 10^{-0.1 A_{gr}} d\beta$, 代入式(7)得

$$\text{IL} = -10 \cdot \lg \left[1 - \frac{\Delta \beta}{\Delta \varphi} \cdot \frac{B}{A} \cdot \left(1 - \frac{10^{-0.1 \cdot \Delta L_{S, \Delta \beta}}}{B} \right) \right]. \tag{11}$$

当不存在地面吸收衰减时, 式(11)简化为

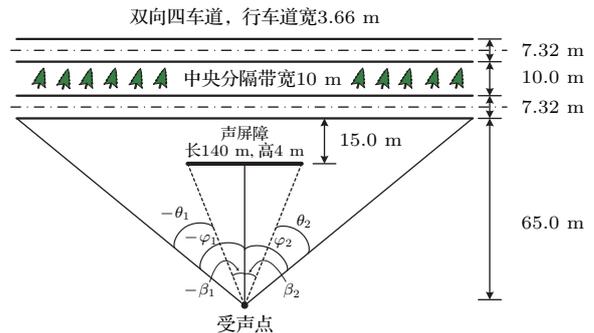
$$\text{IL} = -10 \cdot \lg \left[1 - \frac{\Delta \beta}{\Delta \varphi} (1 - 10^{-0.1 \cdot \Delta L_{S, \Delta \beta}}) \right]. \tag{12}$$

式(12)即为《规范》给出的由遮蔽角 $\left(\frac{\Delta \beta}{\Delta \varphi}\right)$ 和无限长线声源无限长声屏障衰减量查图得到的有限长声屏障衰减量的数学表达式。当不存在地面衰减以及反射声和透射声影响的情况下, 其值等于插入损失。

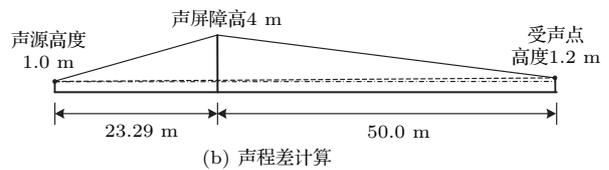
本文推导给出的包含地面衰减的插入损失计算方法, 即式(11), 可采用数值积分的方法进行计算。以下通过实例说明本文给出的插入损失计算方法的计算结果与《规范》计算结果的差别。

3 计算实例

图1为一条高速公路与声屏障相对位置及声程差计算示意图。该高速公路长567 m, 双向四车道, 行车道宽3.66 m, 拟建声屏障长140 m, 高4 m。忽略声屏障透射声, 公路边无反射体存在, 声屏障修建前声源和受声点之间也不存在其他屏障或障碍物, 只考虑公路修建前地面吸收声衰减, 计算接受点位于声屏障后距离声屏障50 m和20 m处的插入损失。



(a) 公路与声屏障相对位置



(b) 声程差计算

图1 公路与声屏障相对位置及声程差计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the position of road and noise barrier and calculating sound path difference

声屏障后距离声屏障50 m处的插入损失计算过程如下:

(1) 等效车道距离计算

采用调和平均值法计算等效车道距离^[6], 接收点至等效车道的距离 r 为

$$r = \text{接收点到声屏障的垂直距离} + 2 \times \frac{\text{声屏障至近车道中线距离} \times \text{声屏障至远车道中线距离}}{\text{声屏障至近车道中线距离} + \text{声屏障至远车道中线距离}}$$

$$= 50 + \frac{2 \times (15 + 3.66/2) \times (15 + 3.66 + 3.66 + 10 + 3.66 + 3.66/2)}{(15 + 3.66/2) + (15 + 3.66 + 3.66 + 10 + 3.66 + 3.66/2)} = 73.3 \text{ m.}$$

(2) 声程差计算

$$\delta = \sqrt{23.29^2 + (4-1)^2} - \sqrt{50^2 + (4-1.2)^2} - \sqrt{73.29^2 + (1.2-1)^2} = 0.27 \text{ m.}$$

(3) 菲涅尔数计算

$$N_0 = 2 \frac{\sigma_0}{\lambda} = 2 \frac{f \cdot \sigma_0}{c}$$

$$= 2 \times \frac{500}{343} \times 0.27 = 0.787.$$

(4) 有限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量计算

采用点声源无限长声屏障绕射声衰减量公式对有限长声屏障路段进行积分。该方法比采用无限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量近似代替有限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量的方法更精确。点声源、无限长声屏障的衰减量公式为^[1]

$$\Delta L_P = 5 + 20 \cdot \lg \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}{\tanh \sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}},$$

$$0 \leq N \leq 5.03. \quad (13)$$

有限长线声源、无限长声屏障的衰减量为^[3]

$$\Delta L_S = -10 \cdot \lg \frac{1}{\Delta \beta} \int_{\beta_1}^{\beta_2} 10^{-0.1 \Delta L_P} d\beta$$

$$= -10 \cdot \lg \frac{1}{\Delta \beta} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\tanh^2 \sqrt{2\pi \cdot N_0 \cdot \cos \varphi}}{\sqrt{10} \cdot 2\pi \cdot N_0 \cdot \cos \varphi} d\varphi$$

$$= 11.5 \text{ dB(A)}, \quad 0 \leq N \leq 5.03. \quad (14)$$

(5) 插入损失

采用式(11)计算得到的计入地面吸收衰减情况下的插入损失为3.9 dB(A),如采用式(12)计算可得到不考虑地面衰减的插入损失为4.8 dB(A),两者之差0.9 dB(A)即为地面衰减修正量。

当受声点位于声屏障后,距离声屏障20 m时,计入地面吸收衰减情况下的插入损失为6.6 dB(A),不考虑地面衰减的插入损失为8.3 dB(A),两者的差值为1.7 dB(A)。

(6) 与《规范》计算结果的对比

采用《规范》推荐方法,在不计地面吸收衰减情况下,计算声屏障后距离声屏障50 m处的插入损失。无限长线声源、无限长声屏障的衰减量为(也可采用规范给出的计算方法或查菲涅尔曲线图)

$$\Delta L_S = -10 \cdot \lg \frac{1}{90 + 90}$$

$$\times \int_{-90}^{90} \frac{\tanh^2 \sqrt{2\pi \times 0.787 \times \cos \varphi}}{\sqrt{10} \times 2\pi \times 0.787 \times \cos \varphi} d\varphi$$

$$= 9.6 \text{ dB(A)}. \quad (15)$$

当遮蔽角为 $108.9/151.0 = 72.1\%$,通过查遮蔽角影响修正图,有限长声屏障的噪声衰减量约为4.5 dB(A)。同样可计算出声屏障后20 m处的 ΔL_S 为10.5 dB(A),遮蔽角为 $148.1/162.6 = 91.1\%$,有限长声屏障衰减量为7.7 dB(A)。与前述采用式(14)和式(12)计算得到的不计地面衰减时,声屏障后距离声屏障50 m处的插入损失为4.8 dB(A)和声屏障后距离声屏障20 m处的插入损失为8.3 dB(A)相比,两者分别相差0.3 dB(A)和0.6 dB(A)。该结果表明用无限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量代替有限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量的方法是近似可行的,也说明本文推导给出的方法是可行的。

但是,《规范》在从有限长声屏障的噪声衰减量减去地面衰减修正量得到插入损失的计算步骤中,给出的地面衰减修正量取值方法为等效距离为55 m时地面衰减修正值取2.5 dB(A),等效距离为150 m时地面衰减修正值取5.0 dB(A),其余为线性插值,且距离越远修正值越大。这种取值方法是值得商榷的。如本文给出的例子中,等效距离为73.3 m的地面衰减修正值计算结果为0.9 dB(A),等效距离为43.3 m的地面衰减修正值计算结果为1.7 dB(A),与《规范》建议值相差较大且规律也不同。《规范》给出的这种取值方法可能仅适用于点声源无限长声屏障和无限长线声源无限长声屏障的情形,对于有限长声屏障的情形可能是不适用的。因为有限长声屏障作用下受声点的声压级主要来自声屏障两端直达声及其地面衰减的贡献。

4 计算方法的简化

本文给出的插入损失的计算方法,即式(11)需要采用编程计算。在无法采用编程计算的情况下,

可按文献[7]给出的方法估算有限长声源路段的地面衰减:

$$\Delta L_G = 4.8 - 2 \cdot \frac{h_m}{k \cdot d} \cdot \left(17 + \frac{300}{k \cdot d} \right), \quad (16)$$

式(16)中, k 值为点声源地面吸收衰减公式转化为有限长线声源时的地面吸收衰减量的修正系数, 具体取值见表1 (其余声源长度对应 k 值可采用内插法)。

表1 不同长度路段的 k 值

Table 1 Values of k for roads with different length

长直路段长度/m	≤ 20	50	100	200	400	≥ 1000
k 值	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5

得到 ΔL_G 后, 可采用式(17)和式(18)计算式(11)中的 A 值和 B 值:

$$A = 10^{-0.1\Delta L_{G,\Delta\varphi}}, \quad (17)$$

$$B = 10^{-0.1\Delta L_{G,\Delta\beta}}. \quad (18)$$

将求得的 A 值和 B 值代入式(11), 即可求得插入损失。其中, ΔL_S 可采用无限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量代替有限长线声源、无限长声屏障绕射声衰减量的近似方法计算。另外, 该方法仅适用于预测点位于线声源中央法线上, 即预测点到线声源两端点夹角相等, 且声屏障位于线声源中部的情况。采用该方法计算得到的本文示例中声屏障后距离声屏障 50 m 及 20 m 处的插入损失分别为 3.2 dB(A) 和 6.1 dB(A), 与数值积分方法计算得到的 3.9 dB(A) 和 6.6 dB(A) 相差 0.7 dB(A) 和 0.5 dB(A), 说明简化方法近似可行。

5 结论

针对现有《声屏障声学设计和测量规范》(HJ/T90-2004)对无限长线声源有限长声屏障插入损失计算中, 地面衰减修正量确定方法的不足, 本文基于理论推导和计算, 给出了公路声屏障声学设计中, 在考虑地面附加衰减情况下计算插入损失的一种新方法。通过实例计算, 验证了该方法的精确性及可行性。本文研究结果可作为《声屏障声学设计和测量规范》(HJ/T90-2004)的有益补充。

参 考 文 献

- [1] HJ/T90—2004, 声屏障声学设计和测量规范[S].
- [2] HJ 2.4—2009, 环境影响评价技术导则声环境[S].
- [3] 公路环保编译组. 公路建设项目环境影响评价技术与方法[M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 1994: 120-124.
- [4] Zhao J, Zhang X, Chen Y. A novel traffic-noise prediction method for non-straight roads[J]. Applied Acoustics, 2011, 73(3): 276-280.
- [5] GB/T 17247.2-1998, 声学户外声传播的衰减第2部分: 一般计算方法[S].
- [6] 赵剑强, 陈莹, 胡博, 等. 公路交通噪声等效车道距离的确定方法探讨[J]. 应用声学, 2010, 29(5): 382-386.
Zhao Jianqiang, Chen Ying, Hu Bo, et al. Optimum determination of equivalent lane distance in highway traffic noise prediction[J]. Journal of Applied Acoustics, 2010, 29(5): 382-386.
- [7] Zhao J, Chen Y, Hu B. An engineering method to determine the attenuation due to ground effects in traffic noise prediction for long straight roads based on the ISO method[J]. Noise Control Engineering Journal, 2012, 60(4): 374-378.