

上海市中环线声屏障立柱稳定性的关键参数研究及判别准则

金昌哲, 曹传彩, 陈自能

(上海成基市政建设发展有限公司, 上海市 200433)

摘要: 针对城市高架道路声屏障立柱的稳定性问题, 以上海中环线直立式声屏障为研究对象, 建立 SAP2000 有限元模型, 通过模态分析和参数分析, 量化了立柱数量、支座刚度等因素与结构基频、顶端相对位移和动力特性之间的关联性。研究结果表明: 支座刚度是影响声屏障稳定性的关键参数, 当支座刚度降低 50% 时, 立柱基频下降至 3.62 Hz, 顶端位移增大至临界值的 1.5 倍。此外, 通过大量参数分析, 发现了相邻立柱的耦合效应, 结合现场实测数据分析提出了以基频 4.92 Hz 和顶端位移 307~436 μm 为阈值的稳定性分级标准并编制了相应的指南, 为声屏障的量化检测和日常预防性维护提供了理论依据和实操方法。

关键词: 声屏障立柱; 有限元分析; 支座刚度; 基频; 顶端位移; 稳定性评价

中图分类号: U417.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0336-06

Study on Key Parameters and Discrimination Criteria for Stability of Sound Barrier Columns along Middle Ring Line in Shanghai

JIN Changzhe, CAO Chuancail, CHEN Zineng

(Shanghai Chengji Municipal Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Aiming at the stability issue of the sound barrier columns on urban elevated roads, taking the vertical sound barrier on the Middle Ring Line of Shanghai as the research object, a SAP2000 finite element model is established. Through the modal analysis and parameter analysis, the correlations between factors such as the number of columns and the stiffness of supports and the fundamental frequency of the structure, the relative displacement at the top and the dynamic characteristics are quantified. The research results show that the support stiffness is the key parameter affecting the stability of the sound barrier. When the support stiffness is reduced by 50%, the fundamental frequency of the column drops to 3.62 Hz, and the top displacement increases to 1.5 times the critical value. Additionally, through a large number of parametric analyses, the coupling effect of adjacent columns is discovered. Combined with the analysis on the field measured data, a stability classification standard with a fundamental frequency of 4.92 Hz and a top displacement of 307 ~ 436 μm as the threshold is proposed and the corresponding guidelines are compiled, which provides a theoretical basis and practical method for the quantitative detection and daily preventive maintenance of sound barriers.

Keywords: sound barrier columns; finite element analysis; support stiffness; fundamental frequency; top displacement; stability assessment

0 引言

随着城市高架道路的快速发展, 交通噪声污染已成为亟待解决的环境问题。声屏障作为主要的降噪设施, 被广泛应用于高架道路两侧^[1-6]。然而, 在风荷载、车辆振动及材料老化等因素的长期作用下,

声屏障立柱的稳定性面临严峻挑战。特别是在上海等台风多发地区, 声屏障脱落事故频发, 严重威胁行车安全和公共基础设施。传统的声屏障检测主要依赖人工目测和简易工具, 缺乏量化评判标准, 难以准确识别潜在隐患。

国内外学者在声屏障稳定性研究方面已取得一定成果。早期研究多集中于高速铁路声屏障的气动性能^[7]和列车风致振动特性^[8]。近年来, 针对城市道路声屏障的研究逐渐增多, 刘功玉等^[9]与李恒斌等^[10]通过现场测试发现, 锚固螺栓松动会导致立柱

收稿日期: 2025-04-18

基金项目: 上海市政养护管理有限公司科研项目, 城市高架桥预应力筋锈蚀评估及检测处置措施研究(2024-YYKY-019)

作者简介: 金昌哲(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政设施维护、大中修工程工作。

刚度下降,进而改变结构的基频和阻尼比。然而,目前研究尚未建立完整的声屏障立柱稳定性评价体系,特别是在量化指标与失效模式的关联性方面仍存在不足。

本研究以上海中环线(浦西段)服役17 a的直立式声屏障(2.0 m×3.2 m)为研究对象,通过建立声屏障立柱的有限元模型,系统研究声屏障立柱的稳定性问题。研究内容包括:(1)建立考虑支座刚度变化的声屏障有限元模型;(2)分析立柱数量、支座刚度等参数对结构基频和顶端位移的影响规律;(3)提出基于动力参数的稳定性判别标准。研究采用SAP2000软件进行建模,通过模态分析和静力pushover分析,系统地研究不同工况下声屏障结构的响应特性和稳定性判别标准。

1 有限元模型的建立

1.1 声屏障结构有限元模型

本文以2.0 m×3.2 m直立式插板式声屏障为原型建立有限元模型,对声屏障结构进行有限元分析计算。

首先对声屏障结构进行简要说明:直立式插板式声屏障主要由H型钢立柱、柱脚底板、单元板(屏体)等结构组成,声屏障结构相关尺寸与连接方式如图1所示。对于H型钢立柱,从侧面图中可以看出立柱按照线型,可以分成顶端的圆弧段与主体的直线段。对于柱脚底板,其厚度为20 cm,声屏障立柱底板通过螺栓与基础锚固。对于吸声单元板,每个声屏障单元可分为位于立柱下端的下屏体,中部的透明屏体与上部的上屏体三个部分。屏体材料组成较为复杂。下屏体与上屏体的构成相同,由面板、背板、吸声玻璃棉、龙骨等组成。面板材质采用1.5 mm厚铝合金板,背板材质采用1.2 mm镀锌钢板。中部的透明屏体由铝合金边框与内部的夹胶钢化玻璃构成。

为便于声屏障稳定性分析和求解,根据声屏障结构各部件的组成及现场实际情况,对声屏障结构进行了如下简化与假设。

(1)对于柱脚底板:由于其厚度较小,且对于声屏障结构的模态影响较小,故将其简化为通过支座单元与基础连接的节点。

(2)对于屏体:由于其刚度由面板、背板与边框决定,在模态分析中,屏体的形状对结构基频的影响很小。再考虑到屏体仅通过橡胶垫与声屏障立柱接

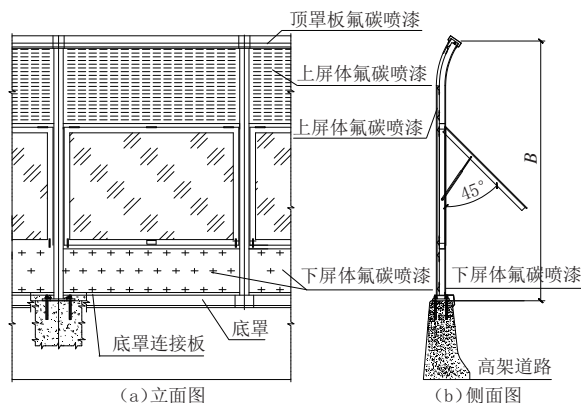


图1 声屏障立面图与侧面图

触,对于声屏障结构整体而言仅起到连接相邻立柱的作用,故将每段屏体的面板与背板简化为薄板单元,将边框简化为框架单元。

(3)对于声屏障立柱:用框架单元进行模拟,立柱的弧线段简化为直线。

因此,根据中环线(浦西段)声屏障整治工程(三标)施工图中的声屏障图纸及上述简化,本文采用SAP2000程序建立了如图2所示的三维声屏障结构动力分析模型,图中声屏障共计13个单元,14根声屏障立柱。

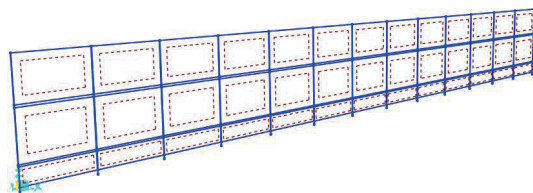


图2 声屏障结构有限元模型

1.2 边界条件的模拟

立柱支座相当于一个弹簧与声屏障立柱串联在一起,并通过螺栓固定在基础上,如图3所示。随着运营时间增加,在螺栓松动或腐蚀、材料劣化、累积损伤等多种因素的影响下,声屏障立柱支座的刚度将会降低,使得声屏障立柱的刚度下降,影响声屏障结构的基频与立柱的顶端位移。

由于支座通过螺栓固定在防护栏上,在支座或螺栓发生破坏前不会发生水平或竖向位移,因此支座的水平与竖向刚度设置一个较大值近似固定。而只有垂直于声屏障结构方向的支座转动刚度对结构基频有显著影响,该方向的转动刚度根据讨论的需要进行设置。因此,可以将声屏障立柱与基础的连接简化为线性支座单元。

声屏障单元板与H型钢立柱的连接如图4所示,声屏障单元板通过限位钢板、板间橡胶垫等固定于H型钢立柱的凹槽内,只能随立柱一起发生位移或

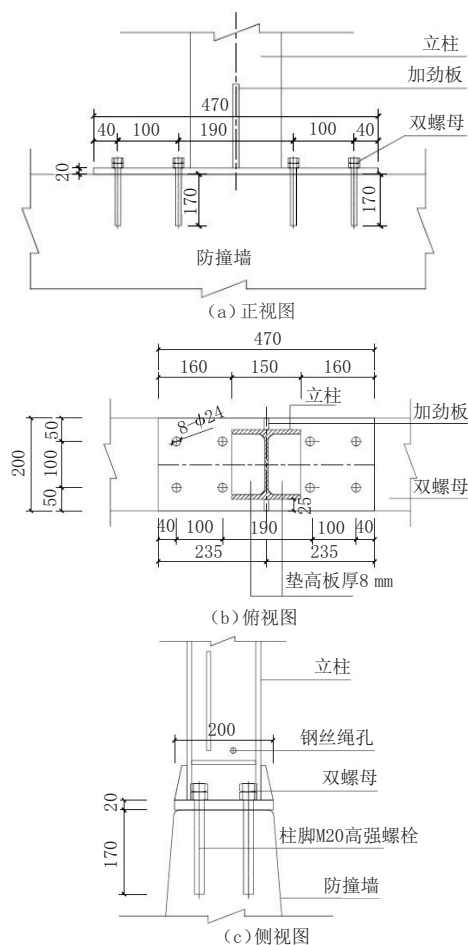


图3 声屏障立柱与基础的连接(单位:mm)

转动。因此将声屏障单元板与H型钢立柱的连接简化为线性支座单元,各方向刚度设置一个较大值近似固定。

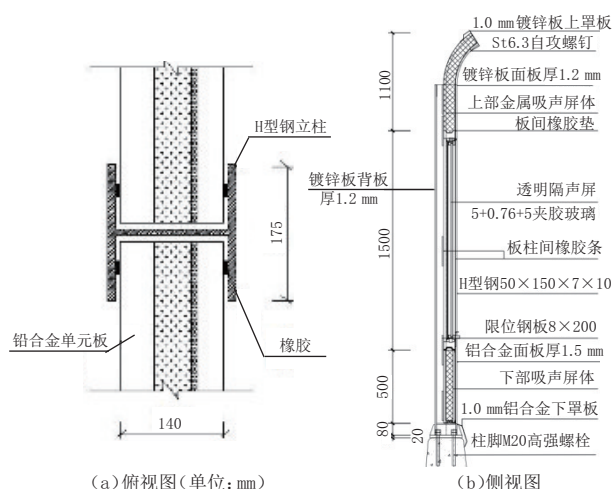


图4 声屏障与立柱的连接

为了确保模态分析和求解的顺利进行,有限元模型必须施加适当的约束。在动力分析中,若约束不足将导致求解失败,同时约束条件还会对低阶模态的频率和振型产生影响。此外,不合理的约束设置可能导致计算结果失真。为此,根据声屏障的实

际安装条件,模型中对立柱和单元板底部均采用了全约束处理,以真实反映工程实际情况。

2 模态分析

2.1 原理与方法

模态分析是识别结构动力特性的重要分析工具。结构的固有频率和振型等参数可通过模态分析获取,该方法基于结构自身的振动特性,可在设计阶段揭示系统的固有振动特性。系统的阻尼与固有频率之间的关系可通过以下公式计算得出:

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1)$$

式中: ω_d 为考虑阻尼后的固有频率; ξ 为结构体系的阻尼比; ω 为无阻尼固有频率。

研究表明,结构阻尼比通常较小,一般取值是在 0.01 ~ 0.10,在该范围内的阻尼对固有频率的作用影响不大。由此,模态分析的基本方程可简化为:

$$[K] \{\Phi_i\} = \omega_i^2 [M] \{\Phi_i\} \quad (2)$$

式中: $[K]$ 为结构的刚度矩阵; $\{\Phi_i\}$ 为第 i 阶模态的特征向量; $[M]$ 为结构的质量矩阵; ω_i, ω_i^* 分别为第 i 阶自振频率。

2.2 有限元模型的模态分析及验证

文献[9]和文献[10]基于京沪高铁实际应用的直立型金属插板式声屏障,采用 ANSYS 有限元软件建立了对应的实体有限元模型,并使用其中的 Block Lanczos 法对有限元模型进行模态分析,与本文的研究对象类似。为验证本文有限元建模的可靠性,将本文模型与文献中的模态分析结果进行比较。各立柱的支座设为固定支座,与文献[1]、文献[2]的模型保持一致。本模型前 10 阶模态与文献的模态分析结果如表 1 所列,本模型的各阶模态与文献[9-10]中的各阶模态近似,声屏障结构的基频也非常接近,因此本研究所建立的声屏障有限元模型可靠,模态分析结果能够真实反应实际声屏障结构的基频。

3 参数分析

3.1 影响声屏障立柱基频的主要因素

本节通过建立不同立柱数量的声屏障结构有限元模型,研究立柱数量对声屏障结构基频的影响。

3.1.1 立柱数量

图5所示为不同立柱数量声屏障结构的基频,可以看出随着立柱数量的增加,声屏障结构的基频逐渐降低。当声屏障立柱数量达到11根,声屏障结

表1 文献与本文模型的模态分析结果 单位:Hz

模态阶次	文献 ^[9]		文献 ^[10]		本文
	1跨	8跨	1跨	8跨	
1	17.64	12.89	10.68	10.26	12.57
2	21.60	14.63	26.62	10.57	12.64
3	31.26	15.75	41.01	11.60	12.78
4	45.69	19.02	81.77	13.25	13.02
5	60.92	20.74	83.83	15.50	13.38
6	65.75	22.64	84.72	18.29	13.88
7	77.19	29.95	112.02	21.57	14.51
8	78.72	37.07	151.61	25.11	15.17
9	87.95	42.47	152.46	33.30	15.73
10	100.19	43.74	188.02	34.32	16.20

构的1阶频率降低至12.57 Hz后,随着立柱数量的进一步增加,声屏障结构的1阶频率保持不变。

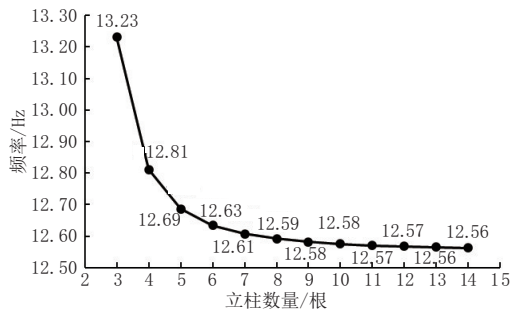


图5 不同立柱数量声屏障结构基频

根据文献[8]的研究,当声屏障的基本结构单元确定后,其固有频率与单元数量无关。基于这一特性,可将无限延伸的声屏障简化为有限个基本单元进行计算。这种简化方法不仅大幅降低了计算规模,同时仍能保证计算结果的准确性。本节中参数分析的结果也符合这一规律。

分析不同立柱数量声屏障结构的基频可以看出,当声屏障结构基频降低至12.57 Hz后,随着立柱数量的增加基频基本不变。

3.1.2 整体支座刚度

声屏障立柱支座的转动刚度是影响立柱稳定性与基频的关键因素。声屏障立柱支座的转动刚度可通过以下简化经验公式进行估算^[11-12]:

$$K_{\theta} = 0.4 \frac{EI}{H} \left(\frac{t_p}{2t_f} \right) \quad (3)$$

式中: K_{θ} 为柱脚转动刚度; E 为钢柱弹性模量; I 为钢柱截面惯性矩; H 为钢柱截面高度; t_p 为底板厚度, t_f 为翼缘厚度。本文中取钢柱弹性模量 E 为 2.1×10^{11} Pa,钢柱截面惯性矩 I 计算得 1.006×10^{-5} ,钢柱截面高度 H 取3.185 m,底板厚度 $t_p=20$ mm,翼缘厚度 t_f 为10 mm。计算得声屏障立柱支座的初始

刚度为 1.262×10^6 N·m/m。

表2为不同立柱数量的声屏障模型在不同立柱支座刚度下的基频。初始工作状态定义为声屏障立柱刚完成安装,支座螺栓未发生松动时的状态。根据有限元参数分析结果,声屏障立柱整体支座刚度对结构基频有着显著的影响,声屏障结构正常工作时的基频至少应为4.92 Hz。

表2 支座不同工作状态下不同立柱数量

声屏障结构基频	单位:Hz					
	立柱数量					
支座工作状态	3根	5根	7根	9根	11根	13根
完全固定	13.23	12.69	12.61	12.58	12.57	12.56
初始工作状态	5.48	5.09	5.01	4.95	4.93	4.92
刚度削弱 10%	5.25	4.87	4.79	4.73	4.71	4.70
刚度削弱 30%	4.71	4.38	4.31	4.24	4.22	4.21
刚度削弱 50%	4.05	3.78	3.72	3.65	3.63	3.62

3.1.3 相邻支座刚度

相邻立柱也是影响声屏障立柱稳定性的因素之一。本节通过改变相邻立柱支座刚度以研究相邻立柱对声屏障结构基频的影响,表3为相邻立柱支座刚度降低时声屏障立柱的基频。表4为13根立柱声屏障结构不同工况下基频的对比。由表3和表4看出,当相邻立柱支座刚度不变,立柱自身刚度削弱时,相邻立柱的存在减缓了声屏障结构基频降低的幅度。此外,与立柱自身刚度发生削弱引起声屏障结构基频降低相比,相邻立柱刚度发生削弱导致的声屏障结构基频降低的幅度更大。

表3 相邻立柱支座在不同工作状态下不同立柱数量

声屏障结构基频	单位:Hz					
	立柱数量					
支座工作状态	3根	5根	7根	9根	11根	13根
完全固定	13.23	12.69	12.61	12.58	12.57	12.56
初始工作状态	6.67	5.09	5.33	5.14	5.05	5.00
刚度削弱 10%	6.42	4.87	5.11	4.93	4.84	4.79
刚度削弱 30%	5.87	4.38	4.63	4.45	4.36	4.30
刚度削弱 50%	5.23	3.78	4.03	3.86	3.77	3.72

表4 不同工况下13根立柱声屏障结构基频 单位:Hz

支座工作状态	整体刚度削弱	自身刚度削弱	相邻立柱刚度削弱
完全固定	12.56	12.56	12.56
初始工作状态	4.92	7.08	5.00
刚度削弱 10%	4.70	6.94	4.79
刚度削弱 30%	4.21	6.63	4.30
刚度削弱 50%	3.62	6.29	3.72

3.1.4 实测数据对比

表5为对ZN0749段声屏障立柱进行现场测量的

结果。值得说明的是,表格中关于立柱稳定性的判定基于实际观察:当力锤敲击时,通过实际观察判定为不稳定的立柱表现出明显的晃动,表明其已进入失稳状态。

通过对比有限元参数分析结果与实测数据可以发现,不稳定立柱基频测量结果都小于有限元参数分析中声屏障整体立柱支座刚度在初始状态下的基频,而稳定立柱的基频大于参数分析中声屏障整体立柱支座刚度在初始状态下的基频。故可以取4.92 Hz为临界值作为判断声屏障立柱是否失稳。

表5 ZN0749声屏障立柱基频识别结果

桩号	立柱编号	体感稳固程度	环境激励	
			基频识别结果/ Hz	仪器测量结果/ Hz
ZN0749	1	稳定	6.59	6
ZN0749	2	稳定	6.09	6
ZN0749	3	稳定	4.72	6
ZN0749	4	稳定	4.95	3
ZN0749	5	稳定	6.37	6
ZN0749	6	稳定	6.11	6
ZN0749	7	稳定	4.27	4
ZN0749	8	不稳定	4.53	5
ZN0749	9	不稳定	4.72	4
ZN0749	10	不稳定	2.97	3
ZN0749	11	不稳定	4.27	3
ZN0749	12	不稳定	4.41	4
ZN0749	13	不稳定	3.93	4
ZN0749	14	不稳定	4.08	4

3.2 影响声屏障立柱顶端位移的主要因素

下面基于14根立柱的声屏障结构模型讨论立柱位置,整体支座刚度对声屏障立柱顶端位移的影响。

首先对声屏障立柱进行编号,按照从左到右顺序依次为1号至14号声屏障立柱。接下来在水平方向上从左向右移动水平推力,模拟人工测量声屏障结构不同标号的立柱时的情况。假设通过人工对声屏障立柱施加推力的方式来测量声屏障立柱顶端位移。一般而言,成年男性能够施加的推力大小约为身体重量的1/2~2/3,按照体重60 kg计算,推力约为300~400 N,故一个60 kg的成年人大概的推力约300~400 N。因此,考虑到成年人平均身高,选择在声屏障立柱的下屏体顶端位置施加垂直于声屏障立柱,大小为300 N的推力。如图6所示,改变水平推力的作用点,得到声屏障结构不同编号立柱的顶端位移。基于对称性,仅需讨论编号为1~7的声屏障立柱。改变声屏障立柱整体的支座刚度可以得到不同位置立柱的顶端位移结果,如表6所列。

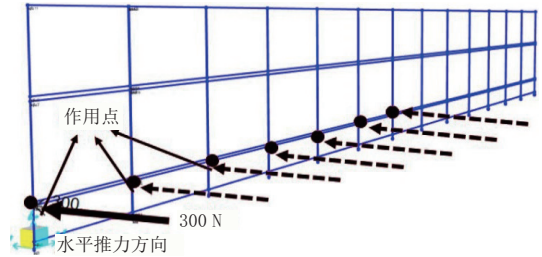


图6 声屏障立柱作用图

表6 不同整体支座刚度下声屏障各立柱顶端位移 单位:μm

立柱编号	工作状态				
	完全固定	初始工作状态	刚度削弱10%	刚度削弱30%	刚度削弱50%
1	61.30	436.97	474.15	576.47	748.56
2	55.39	317.56	340.53	402.77	505.66
3	54.14	307.58	329.75	389.54	487.01
4	54.12	307.07	329.12	388.50	485.14
5	54.12	307.06	329.11	388.48	485.07
6	54.12	307.06	329.11	388.48	485.07
7	54.12	307.06	329.11	388.48	485.07

显然,随着立柱支座刚度的降低,立柱顶端位移将增大。随着声屏障立柱位置逐渐靠近结构的中间,立柱顶端位移逐渐减小。从第3根立柱开始,声屏障立柱顶端位移基本不变。可以得出结论相邻立柱对于所测立柱顶端位移的影响局限于最近的2根立柱。该结论与声屏障立柱基频的参数分析结果——立柱数量大于11根后,声屏障结构基频基本不变相吻合。

此外,如果基于声屏障立柱在人工推力下的顶端位移来判断声屏障立柱的稳定性,需要根据实际声屏障立柱在结构中所处的位置。位于不同位置处的声屏障立柱顶端位移与稳定性的关系存在差异。取立柱刚度在初始状态下的顶端位移为稳定性的判断依据。对于编号为1与14的声屏障立柱,当其顶端位移大于436 μm,则认为立柱处于不稳定状态;对于编号为2与13的声屏障立柱,当其顶端位移大于317 μm,则认为立柱处于不稳定状态;对于编号为3~12的声屏障立柱,当其顶端位移大于307 μm,则认为立柱处于不稳定状态。

4 结 语

本文对声屏障结构进行了有限元计算、参数分析和现场实测验证,得出以下结论。

(1)随着声屏障立柱支座松动,声屏障结构基频将会下降。建议取声屏障立柱基频4.92 Hz作为临界值,认为根据现场检测识别的基频小于该值的声

屏障立柱处于不稳定状态,应该及时予以维修与加固。

(2)随着声屏障立柱支座松动,声屏障立柱顶端位移将会增大。建议取声屏障立柱在初始状态下的立柱顶端位移作为临界值,认为根据现场检测得到的立柱顶端位移大于该值的声屏障立柱处于不稳定状态,应该及时予以维修与加固。

(3)由于相邻立柱的耦合效用,需要根据立柱所处的具体位置来判断声屏障立柱的稳定性,通常相邻立柱对于所测立柱顶端位移的影响局限于左右各2根立柱。

参考文献:

- [1] Lai Y C, Barkan C P L, Önal H. Optimizing the aerodynamic efficiency of intermodal freight trains[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(5): 820-834.
- [2] 辜小安. 日本新干线铁路噪声现状及控制[J]. 铁道劳动安全卫生

与环保, 2000(3): 147-152.

- [3] 钟志强, 白中炎, 彭晓春, 等. 国内外轨道交通声屏障研究进展[J]. 广东化工, 2012, 39(8): 118-120.
- [4] 罗锐, 雷晓燕. 铁路声屏障降噪效果影响因素分析[J]. 噪声与振动控制, 2008(5): 142-146.
- [5] 尹皓, 刘兰华, 李晏良, 等. 高速铁路声屏障研究现状及发展趋势[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2015, 5(4): 148-151.
- [6] 马筠. 对高速铁路声屏障降噪效果影响因素的探讨[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2008(1): 5-8.
- [7] 周信, 肖新标, 何宾, 等. 高速铁路声屏障降噪效果预测及其验证[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 14-19.
- [8] 赵丽滨, 龙丽平, 蔡庆云. 列车风致脉动力下声屏障的动力学性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(4): 505-508.
- [9] 刘功玉. 风荷载作用下声屏障结构的动力特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [10] 李恒斌. 基于脉动风荷载作用下声屏障的研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [11] 范康, 王晓飞. 外露式柱脚的转动刚度及其对门式刚架设计的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(2): 204-208.
- [12] 陈绍蕃. 平板柱脚的转动刚度和柱的计算长度[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(1): 1-8; 27

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

