

基于流固耦合的风荷载作用下声屏障强度分析

彭 举¹, 亢寒晶², 胡学成², 邓 宝², 闫书明²

(1.广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510623; 2.北京华路安交通科技有限公司, 北京市 100070)

摘 要: 为了解道路上风荷载作用下声屏障周围的流场、所受风压、结构强度等情况, 采用流固耦合分析方法对声屏障进行强度分析。采用单向流固耦合技术, 首先建立声屏障流场模型, 采用有限体积法求解稳态不可压流体湍流方程, 分析流场计算结果, 并提取流场中声屏障表面的风压数据; 然后建立声屏障有限元模型, 依次施加重力、风压进行静力计算, 对声屏障强度进行校核。结果表明: 受验模型的声屏障立柱、基础连接、螺栓均满足强度要求, 并且采用单向流固耦合分析方法对声屏障进行风荷载条件下的强度分析具有可行性。

关键词: 流固耦合; 风荷载; 声屏障; 强度分析

中图分类号: TU112.59+4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0262-04

0 引 言

声屏障是一种隔声降噪设施, 路上距学校、医院、居民聚居区等环境敏感点较近、用地受限且环境噪声超出标准一定范围时, 可采用声屏障进行防治^[1], 国内外有已大量学者对声屏障降低噪声的效果进行研究。但另一方面, 声屏障结构也需满足使用环境中各种荷载作用下的强度要求, 若强度不足导致在使用中发生损坏, 将对道路安全运营产生不利影响。近些年在对声屏障强度分析方面的研究取得了较多成果: 赵丽滨等^[2]采用有限元分析方法对列车风致脉动力下声屏障的动力学性能进行了研究; 王宏朝等^[3]采用流固耦合分析方法对高速铁路中声屏障在列车风致脉动力及自然风荷载作用下的效应进行了瞬态动力学分析和模态分析, 得到了自然风荷载对于声屏障的结构性能影响更为显著的结论; 姚澍等^[4]采用流固耦合分析方法对列车气动力作用下的声屏障强度进行了分析; 康健等^[5]采用流固耦合分析方法对列车通过时的声屏障进行了强度计算和疲劳性能分析; 蔡理平等^[6]分析了轮轨动荷载作用下声屏障的振动响应; 刘靖天^[7]对高速铁路减载式声屏障进行了气动载荷数值模拟及结构承载分析研究。这些研究均集中于声屏障在动车组列车高速运行通过时承受列车风致脉动力下的工况。道路车流

运行产生的风致脉动力较小, 考察道路中的声屏障结构强度最主要考虑的是风荷载。常规的强度校核方法是将风荷载假定为均布荷载, 通过公式计算得到^[8], 然后进行结构验算, 但这并不符合实际规律。

在已有研究成果的启示下^[9-10], 本文以笔者建立的声屏障及其基础连接结构模型为基础, 采用单向流固耦合中的间接计算法对其在风荷载作用下的强度进行分析, 由此可得到更加直观且符合吹风标志荷载实际规律的结果。文章探索采用流固耦合分析方法计算声屏障结构强度的可行性, 以为声屏障的实际应用和测试提出工程建议。

1 模型建立和求解设置

路基填方边坡挡土墙路段上设置的声屏障结构如图1所示, 高3118.1 mm, 由金属吸声屏与通透隔声屏组合而成, 屏体上下部为金属吸声屏, 金属吸声屏面板为1.5 mm铝合金板, 后板为1.5 mm镀锌钢板, 隔声板中间镶嵌超细玻璃棉; 中部为1.5 m通透隔声屏, 采用12 mm加筋亚克力板, 屏体或透视窗采用压条和螺栓固定在H型钢立柱上, 立柱腹板厚7 mm、翼板厚10 mm、间距2 m, 立柱底部通过U型底板和高强螺栓锚固在路侧1.1 m高的混凝土护栏顶部。

首先, 建立声屏障流场分析模型。风对声屏障等结构的绕流虽是个完全开放的流场, 但是在进行流场数值模拟计算时, 仍然需要设定一个有限大小的计算区域。根据相关经验^[11-12], 所取计算区域到一定大小

收稿日期: 2023-07-26

作者简介: 彭举(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高速公路交通工程建设管理。

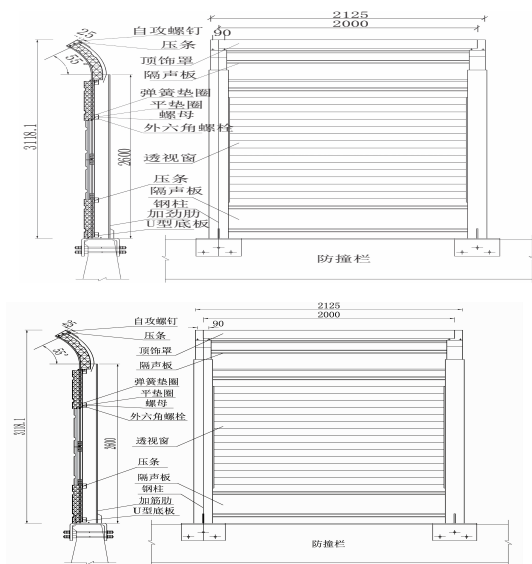


图1 声屏障结构(单位:mm)

时,区域大小的增加对分析对象的流场模拟结果影响可忽略不计。忽略中央分隔带的设施,按声屏障长度40 m、路基宽度42 m建立流场模型,包括路基、两道混凝土护栏、两道声屏障。取流域长400 m、宽200 m、高50 m,计算区域大小足够的同时,计算效率也需满足要求,如图2所示。风速入口与声屏障板面平行、风速与声屏障板面垂直,参照广东中山地区50 a重现期的风速取30.9 m/s^[13]。

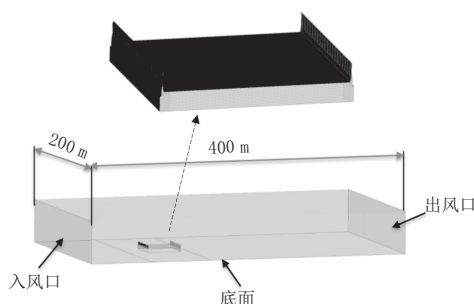


图2 流体模型和设定

计算控制采用质量守恒方程与动量守恒方程,假设空气是理想气体,且对流场的计算不考虑热传递,则不可压缩牛顿流体的质量守恒方程为式(1),动量守恒方程为式(2)、式(3)和式(4)^[3]。

$$\operatorname{div}(\rho \vec{u})=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho u \vec{u})=\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u)-\frac{\partial p}{\partial x}+S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho v \vec{u})=\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v)-\frac{\partial p}{\partial y}+S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho w \vec{u})=\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w)-\frac{\partial p}{\partial z}+S_w \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; $\vec{u}$ 为速度矢量, u, v, w 为 x, y, z 方向上的速度分量,m/s; μ 为动力黏度,Pa·s; p 为大气压力,Pa; S_u, S_v, S_w 为动量守恒方程的广义

源项。

通过雷诺平均法中应用最广泛的标准k- ε 湍流模型^[14-19]进行对湍流区域的模拟,计算式如式(5)和式(6)所示,采用壁面函数法处理近壁面区域^[14]。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial t_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{2} P_{ij}-\rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{2} C_{1 \varepsilon} P_{ij}-C_{2 \varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能,m²/s²; ε 为湍流动能耗散率,m²/s³; i, j, k 为局部直角坐标系上三个坐标轴的方向; u_i 和 u_j, u_k 是速度矢量在 i, j, k 方向上的分量; μ_t 为湍动黏度且 $\mu_t=\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; P_{ij} 为剪应力项; $C_\mu, C_{1 \varepsilon}, C_{2 \varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为经验常数。利用有限体积法进行对三维稳态不可压缩流场的数值计算^[20]。

接着建立声屏障的有限元强度分析模型。如图3所示,按声屏障长度6 m建立声屏障、混凝土护栏及其下方部分路基结构的有限元模型。该模型一共包含3处声屏障立柱,整体结构在长度方向上对称,两端施加对称约束,底部施加高度方向约束。金属构件采用壳单元,玻璃棉、混凝土和路基结构采用实体单元,螺栓、钢筋等连接件采用线单元。

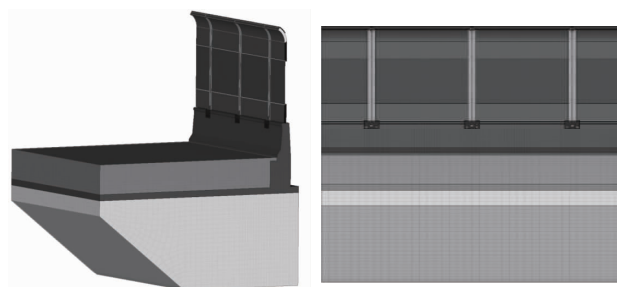


图3 有限元分析模型

荷载设置上首先施加重力,然后施加从流场模型计算结果提取的风荷载,风荷载以压强形式施加,最后采用隐式算法求解应力平衡方程进行准静态计算^[21-22]。

2 流场特性分析

经过对流场流动的仿真计算,得到流场流线如图4所示。风吹过声屏障等设施时形成了较为复杂的绕流,在多处形成旋涡,风速在不同位置发生多种变化。模型中间断面的流速矢量图如图5所示,当风吹到第一道声屏障时,最大风速出现在声屏障顶部区域,为37.527 m/s;当风吹到后面的路面区域时,风速显著减小。仿真结果整体上符合一般规律。

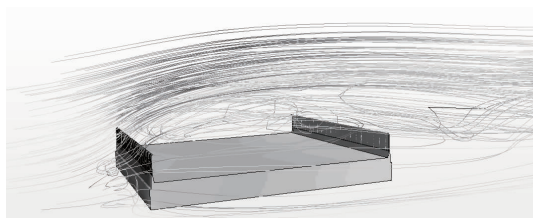


图4 流线图

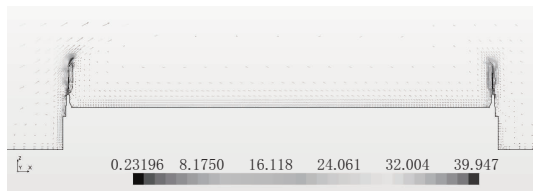
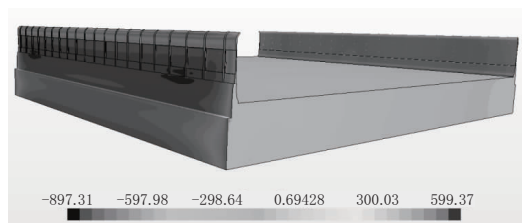
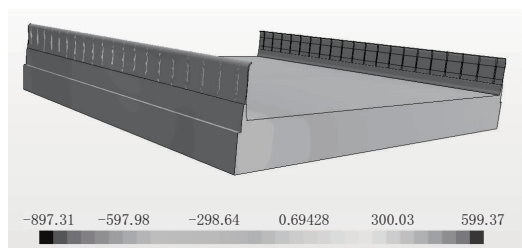


图5 断面流速矢量图(单位:m/s)

整个系统的压力分布如图6所示,声屏障所受风压为非均布荷载,迎风侧和非迎风侧的两道声屏障、同一道声屏障的正面和背面的风压分布和大小均不相同。从迎风侧和非迎风侧的对比可以看到,迎风侧声屏障所受的风压明显大于非迎风侧声屏障的风压,符合一般规律。选取迎风侧的声屏障作为分析对象,提取其表面风压数据,得到最大值为598 Pa,最小值为210 Pa。



(a)迎风侧



(b)非迎风侧

图6 压力等值线图(单位:Pa)

按照基本风压计算公式计算得到 $\omega = \rho v^2 / 2 = 1.29 \times 30.9^2 / 2 \text{ Pa} = 615.85 \text{ Pa}$, 式中: ω 为风压, Pa; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风速, m/s 。流场分析结果的风压值与基本风压公式计算值处于同一数量级,流场分析结果的最大风压值与风压公式计算值相近,说明此流场分析结果具有一定的可信度。

3 声屏障结构强度分析

3.1 立柱强度分析

通过对声屏障承受重力荷载和风压荷载的有限

元计算得到立柱位移云图如图7所示,最大位移出现在立柱顶部,符合一般规律,值为5.376 mm,小于立柱高度的0.5%(15.59 mm)。立柱应力云图如图8所示,最大应力出现在立柱底部的加强肋上,也即悬臂结构的根部,符合一般规律,最大应力值为39.058 MPa,小于材料屈服值(235 MPa)。分析结果表明,该声屏障在受到风荷载时立柱的刚度和强度均满足设计要求。

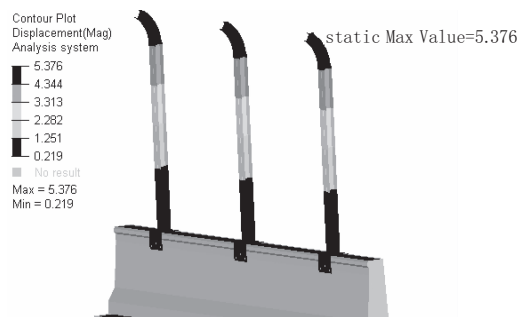


图7 立柱位移等值线图(单位:mm)

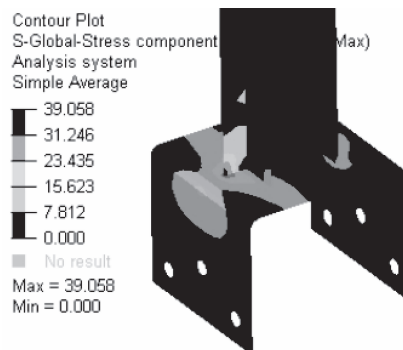


图8 立柱应力等值线图(单位:MPa)

3.2 基础锚固螺栓强度分析

锚固螺栓为M24的8.8级螺栓,屈服强度为640 MPa,剪切强度取屈服强度的0.6倍为384 MPa。M24螺栓有效面积取353 mm^2 ,则螺栓拉力在225.9 kN以内不发生屈服,并可承受135.6 kN的剪切力。提取仿真计算结果锚固螺栓受力,得受力最大的螺栓位置如图9所示,最大拉力为5.784 kN,最大剪力为4.873 kN,远小于设计值,说明锚固螺栓强度满足要求。

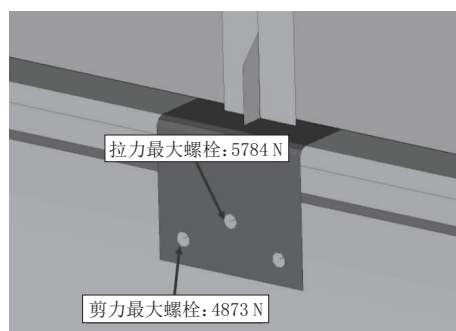


图9 受力最大螺栓位置

4 结 论

采用流固耦合分析方法对道路上设计应用的声屏障模型进行风荷载作用下的强度分析计算,结果表明:

(1) 受验声屏障强度满足设计的风速风荷载下的要求;

(2) 计算得到的流场状态、强度分析结果与一般规律相符,得到的风压值与理论计算值在同一数量级,说明所用分析方法在计算准确性上具有一定的可靠性;

(3) 流固耦合分析方法的计算分析过程更高效,结果更直观,投入工程应用中有利于快速解决实际问题。

参考文献:

- [1] JTG B04—2010,公路环境保护设计规范[S].
- [2] 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.
- [3] 王宏朝,谢金法.复合工况下高速铁路声屏障的流固耦合研究[J].河南科技大学学报(自然科学版),2013,34(2):35-42.
- [4] 姚澍,李人宪,康健.高速铁路声屏障在列车脉动风荷载下的强度计算[J].交通运输工程与信息学报,2015,13(1):39-44.
- [5] 康健,李人宪.高速列车脉动压力作用下声屏障疲劳性能分析[J].机械工程与自动化,2016(1):23-25.
- [6] 蔡理平,李小珍,陈锡民,等.轮轨动荷载作用下全封闭声屏障的振动分析[J].中国铁路,2017(4):59-67.
- [7] 刘靖天.高速铁路减载式声屏障气动载荷数值模拟及结构承载分析[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] GB/T 51335—2018,声屏障结构技术标准[S].
- [9] 宋学官,蔡林,等.流固耦合分析与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [10] 邢景棠,周盛,崔尔杰.流固耦合力学概述[J].力学进展,1997,27(1):19-38.
- [11] 刘君,王振国,吴桂馥.类客车体绕流场的数值模拟[J].长沙交通学院学报,2000,16(2):40-43.
- [12] 江洪,唐鹏.轿车车身外流场的CFD仿真与实验验证[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(3):470-475.
- [13] JTG/T 3360-01—2018,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [14] 傅德薰,马延文.计算流体力学[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.
- [15] 熊莉芳,林源,李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在FLUENT软件中的应用[J].工业加热,2007,36(4):13-15.
- [16] 王福军.计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [17] 张兆顺,崔桂香.流体力学[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [18] 张凯,张程然,曹政,等.基于三维数值模拟的洪水期组合围堰结构水流作用研究[J].中外公路,2020(1):120-125.
- [19] 李万平.计算流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [20] 李人宪.有限体积法基础(第二版)[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [21] 刘鸿文.材料力学(I)(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [22] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.

《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com