

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.05.066

轨道交通桥梁声屏障柱脚节点计算方法研究

郭 蹦¹,刘洪波¹,吴 迪¹,朱剑月²
(1.上海申通地铁集团有限公司技术中心,上海市 201103; 2.同济大学 上海地面交通工具风洞中心,上海市 201804)

摘 要: 声屏障柱脚结构一般采用锚栓连接钢立柱与混凝土基础。此类节点受力方式既不同于钢筋混凝土结构,亦不同于钢结构的螺栓群连接,而钢结构相关设计规范和混凝土设计规范中均未给出此类节点结构受力分析计算方法。本文在轨道交通声屏障柱脚锚栓连接节点结构受力分析中,提出按平截面假定方法分析的计算原理,结合在上海申通地铁集团有限公司科研项目《声屏障风荷载特性研究》中得出的风荷载作用数值,按照计算原理得出的方法,计算了六种不同荷载组合下的柱脚节点受力,并采用有限元仿真分析并行计算,对比二者计算结果以验证该原理和方法,可供相关设计人员计算参考。

关键词: 声屏障柱脚;锚栓连接;平截面假定;计算方法

中图分类号: U442.5+9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2024)05-0285-06

1 概述

1.1 声屏障柱脚节点的重要性

声屏障通过隔断或干扰声音传播途径来治理噪声,是轨道交通高架线路中改善沿线声环境的主要手段。以上海轨道交通为例,从应用最早的3号线算起,声屏障应用历史已有二十多年,建设应用规模累积已超100 km,为轨道交通运营降噪发挥了重要作用。

声屏障主要承受水平风荷载作用,包括自然风和列车气动风。自然风控制极限承载能力设计,列车风控制疲劳设计。轨道交通声屏障钢立柱和混凝土基础之间一般采用外露式刚接。柱脚通常是声屏障结构中受力最集中的部位,而柱脚中的预埋锚栓,又是柱脚部位应力最集中的构件。钢立柱、混凝土和预埋件作为永久构件,设计使用年限均为50 a。因此,柱脚预埋锚栓的结构计算在整个声屏障结构计算中尤为重要,对声屏障结构的整体安全影响重大。

1.2 柱脚节点构造

上海轨道交通声屏障典型柱脚构造如图1所示。根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定,普通锚栓不承担抗剪,由预埋锚垫板和锚下混凝土土面之间的摩擦力或抗剪键提供抗剪承载力。因此,在横风及自重作用下,柱脚为大偏心受压受力模式。

受拉区锚栓受拉,受压区锚栓退出工作,预埋锚垫板下方混凝土受压。

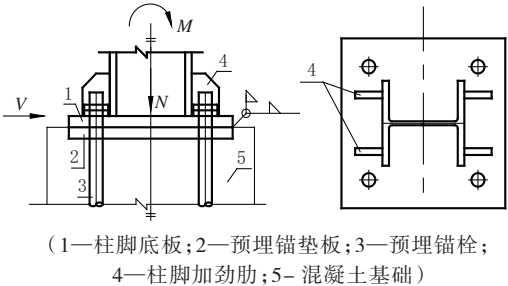


图1 柱脚节点构造图

1.3 设计中遇到的现实问题

柱脚节点中钢构件与混凝土之间通过锚板和锚栓连接(以下简称锚栓连接),在纯弯或大偏心受压受力时,受力方式即不同于钢结构的螺栓群连接,亦不同于钢筋混凝土结构。螺栓群连接以最外排螺栓中心为回转轴,最外排螺栓不受力,其余排螺栓均受拉,如图2所示;钢筋混凝土结构受压区钢筋随混凝土一起受压,受拉区混凝土开裂,中性轴向受压区移动,如图3所示;而锚栓连接受拉区锚栓受拉,受压区仅混凝土受压,中性轴位置由计算决定,如图4所示。现行钢结构设计规范和混凝土结构设计规范中均未给出锚栓连接受力分析计算方法。设计中容易将其与钢结构螺栓群连接计算混为一谈,套用普通螺栓连接受弯计算方法,或者通过《钢结构连接节点设计手册》中统计给出的几何参数关系曲线图表,查询混凝土受压区宽度这一关键参数后完成其余计算。前者属于方法不当,后者虽简化了设计人员计算工作,但缺

收稿日期: 2023-09-21
作者简介: 郭蹦(1975—),女,工学学士,高级工程师,从事轨道交通结构研究工作。

少对节点受力过程分析,导致设计人员只知结果不知原理,也不了解图表数据的合理性。

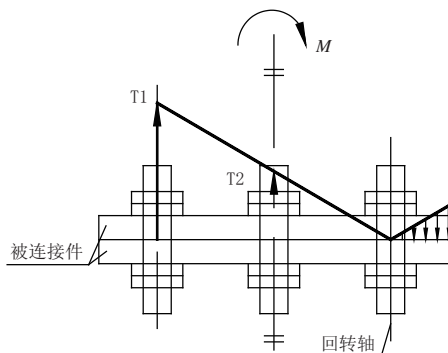


图2 钢结构螺栓群抗弯模式图

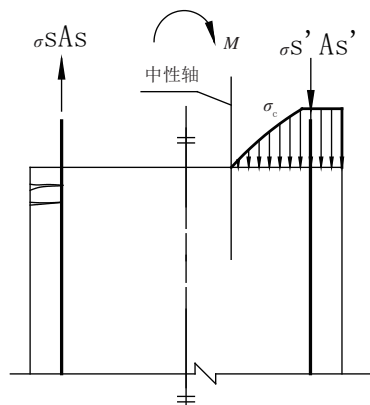


图3 钢筋混凝土抗弯模式图

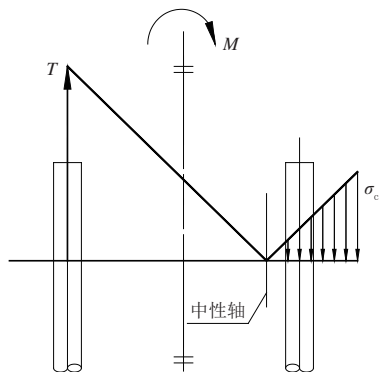


图4 混凝土预埋锚栓抗弯模式图

1.4 本文研究的意义

本文在轨道交通声屏障柱脚锚栓连接节点结构受力分析中,提出按平截面假定方法分析的计算原理,依托上海申通地铁集团有限公司科研项目《声屏障风荷载特性研究》中得出的风荷载作用数值,按照计算原理给出的方法,计算了六种不同荷载组合下的柱脚节点受力,采用有限元仿真分析并行计算,对比二者计算结果以验证该原理和方法,以供相关设计人员计算参考。

2 利用平截面假定原理分析计算

2.1 计算原理

上海轨道交通声屏障柱脚钢底板厚度一般直立

式声屏障不小于20 mm,封闭式不小于30 mm,厚度较厚,且设置竖向加劲肋,面外刚度较大,面外变形可忽略,即柱脚底平面无翘曲;而柱脚水平剪力较小,底钢板尺寸大,钢板材料弹性模量大,面内剪切变形及扭转变形亦可忽略。在锚栓材料拉应力不超过屈服强度 f_y ,锚下混凝土最大压应力不超过抗压设计强度 f_c ,即弹性受力情况下(实际上在满足疲劳设计情况下,柱脚在极限承载能力设计工况下通常在弹性受力范围内),柱脚节点满足平截面假定的无面外翘曲和无面内剪切变形的适用条件,柱脚底平面可认为是刚性平面,在柱脚弯矩作用下发生了刚性转动,柱脚平面上各点的竖向变形和应变沿平截面方向呈线性分布,平面上锚栓的拉应变与混凝土的最大压应变与各自到中性轴的距离成正比。如图5、图6所示。

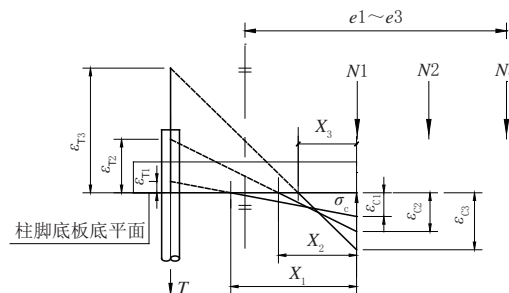


图5 平截面假定下应变分布规律图示

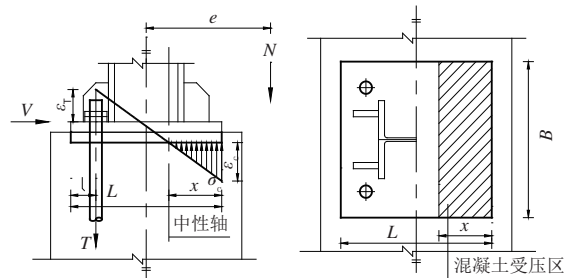


图6 柱脚节点受力图示

因此可在力的平衡和力矩平衡基础上,利用平截面上各点的应变与其到中性轴的距离成正比三个条件建立如下方程组,对锚栓拉力和锚下混凝土压应力分布进行求解:

对锚栓中心取矩的力矩平衡:

$$\frac{1}{2} (B \times x \times \sigma_c) \times (L - l - \frac{x}{3}) = N \times (e + \frac{L}{2} - l)$$

竖向力平衡: $N + T = \frac{1}{2} (B \times x \times \sigma_c)$

柱脚底平面应变成正比:

$$\frac{\epsilon_T}{\epsilon_c} = \frac{T / E \times A_c}{\sigma_c / E_c} = \frac{L - l - x}{x}$$

式中: N 为柱脚竖向力合力; T 为受拉侧锚栓总拉力; l 为受拉侧锚栓中心至柱脚底板边缘的距离; x 为混凝土受压区高度; σ_c 为柱脚底板下方混凝土基础最

大压应力; L 为柱脚底板受弯方向总宽度; B 为柱脚底板非受弯方向总宽度; e 为柱脚弯矩作用偏心距; ε_T 为受拉侧锚栓拉应变; ε_c 为受压侧混凝土压应变; E 为锚栓材料弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量; A_e 为受拉侧锚栓有效总截面积。

上述方程组中包含三个方程三个未知数 T 、 σ_c 、 x ,有解情况下便可求解。

2.2 计算条件

以某高架线路声屏障为例,声屏障高度 3 m,柱间距 1.5 m,柱脚设 4 根 Q355M20 预埋锚栓,柱脚底板尺寸 $L=B=300$ mm,C30 基础混凝土。立柱采用 150 型 H 型钢,柱脚底板和预埋锚板厚度均为 20 mm。

计算分别考虑恒载与下列不同工况风荷载或气动力荷载组合见表 1 所列。

表 1 不同风荷载工况下柱脚荷载作用表

荷载组合	弯矩效应 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	竖向力效应 N/kN	剪力效应 V/kN
组合一	6.5×1.4	1.42	4.33×1.4
组合二	$(3.19\text{ 自然风}+3.9\text{ 列车风})\times 1.4$	1.42	$(2.13\text{ 自然风}+1.82\text{ 列车风})\times 1.4$
组合三	0.50	1.42	0.42
组合四	5.42	16.2	1.86
组合五	1.33	1.42	1.16
组合六	12.28	16.2	4.81

注:列车气动力荷载效应已换算至柱脚,数据来自上海申通地铁集团有限公司《声屏障风荷载特性研究》科研项目成果。

组合一:直立式,与 50 a 一遇自然风停运工况基本组合;

组合二:直立式,与八级自然风、160 km/h 时速列车气动力运营工况基本组合;

组合三:直立式,与 80 km/h 时速列车气动力标准组合;

组合四:封闭式,与 80 km/h 时速列车气动力标准组合;

组合五:直立式,与 140 km/h 时速列车气动力标准组合;

组合六:封闭式,与 140 km/h 时速列车气动力标准组合。

2.3 平截面假定方法计算结果

求解方程组,将结构尺寸和柱脚荷载代入 2.1 的方程组中,利用 EXCEL 自带的规划求解器,控制 T 、 σ_c 、 x 这三个决策变量,以使方程成立为约束条件和目标,通过优化算法迭代求解得到一组决策变量的

最优解。求解结果汇总见表 2 所列。

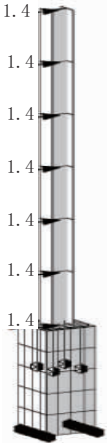
表 2 不同风荷载工况下柱脚计算结果表

荷载组合	单个锚栓拉力 T/kN	锚栓拉应力 σ/MPa	混凝土受压区宽度 x/mm	混凝土最大压应力 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$
组合一	35.57	72.59	69.85	4.10
组合二	39.43	80.48	67.72	4.35
组合三	1.78	3.63	78.63	0.24
组合四	15.42	31.47	86.62	2.43
组合五	5.09	10.38	71.47	0.61
组合六	41.65	85.01	76.11	5.42

3 有限元仿真计算分析

3.1 建模思路

根据柱脚节点受力和锚栓连接的传力特点,采用 midas 有限元分析软件建立结构模型。立柱受剪力和弯矩采用梁单元,柱脚底板采用板单元,预埋锚栓采用仅受拉桁架单元,混凝土基础采用实体单元,柱脚底板与混凝土之间通过弹性连接使仅传递压力。基础底部固结,锚栓底部施加线位移约束。如图 7 所示。



(图中所示荷载 N/m 为停运自然风荷载标准值)

图 7 声屏障结构模型示意图

3.2 组合一(恒加停运风基本组合)计算结果

恒加停运风基本组合(见图 8、图 9)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 $\text{N}\cdot\text{m}$)。

3.3 组合二(直立恒加运营自然风加 80 km/h 列车风基本组合)计算结果

直立恒加运营自然风加 80 km/h 列车风基本组合(见图 10、图 11)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 $\text{N}\cdot\text{m}$)。

3.4 组合三(直立恒加 80 km/h 列车风标准组合)计算结果

直立恒加 80 km/h 列车风标准组合(见图 12、图

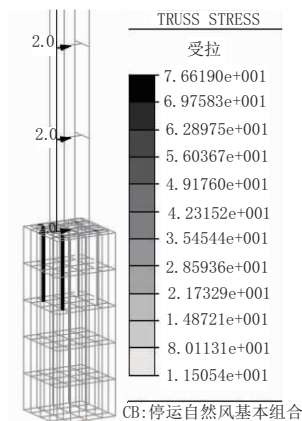


图8 组合一锚栓拉应力图(单位:MPa)

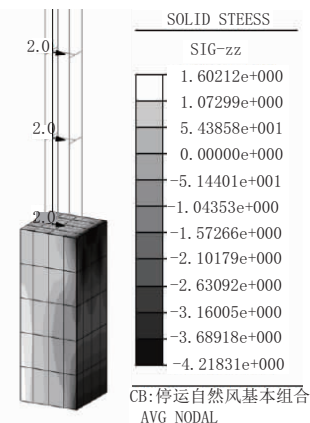


图9 组合一锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

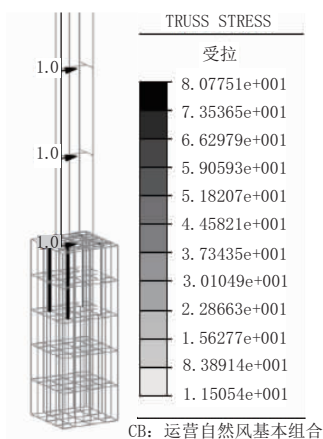


图10 组合二锚栓拉应力图(单位:MPa)

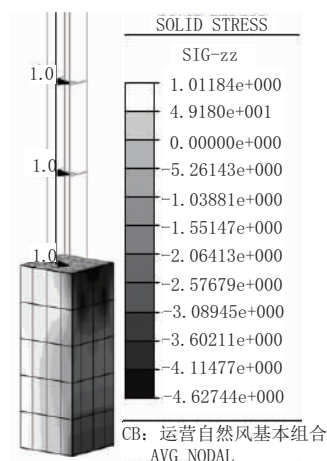


图11 组合二锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

13)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 N·m)。

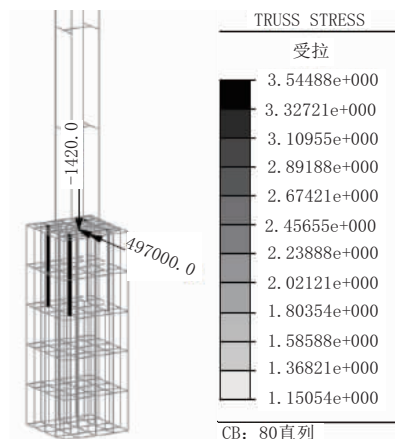


图12 组合三锚栓拉应力图(单位:MPa)

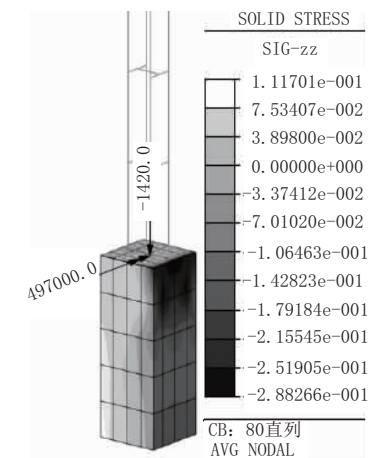


图13 组合三锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

3.5 组合四(封闭恒加 80 km/h 列车风标准组合) 计算结果

封闭恒加 80 km/h 列车风标准组合(见图 14、图 15)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 N·m)。

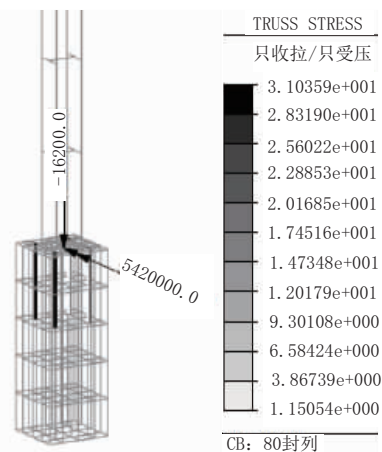


图14 组合四锚栓拉应力图(单位:MPa)

3.6 组合五(直立恒加 140 km/h 列车风标准组合) 计算结果

直立恒加 140 km/h 列车风标准组合(见图 16、

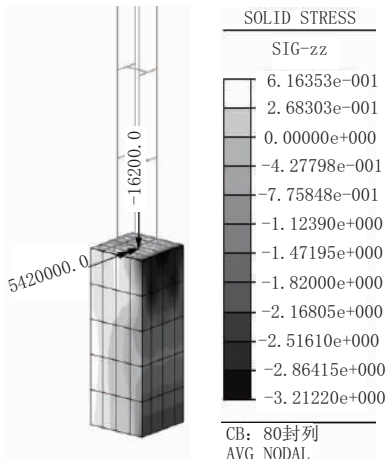


图 15 组合四锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

图 17)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 N·m)。

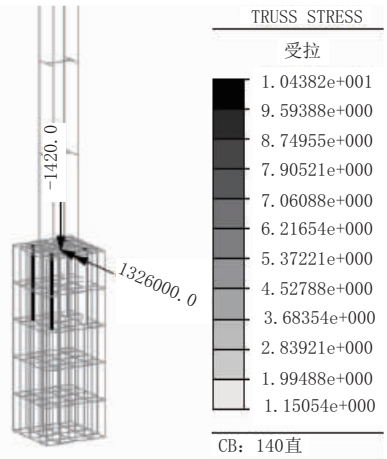


图 16 组合五锚栓拉应力图(单位:MPa)

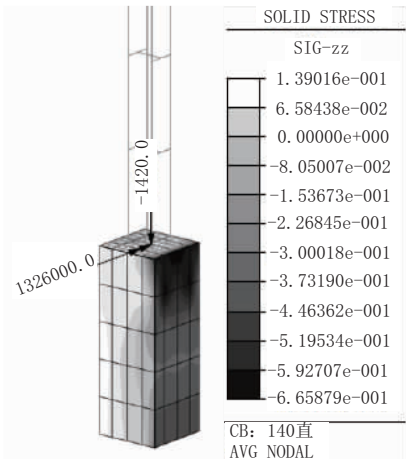


图 17 组合五锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

3.7 组合六(封闭恒加 140 km/h 列车风标准组合)计算结果

封闭恒加 140 km/h 列车风标准组合(见图 18、图 19)(图中均布荷载单位均为 N/m,力单位均为 N,弯矩荷载单位均为 N·m)。

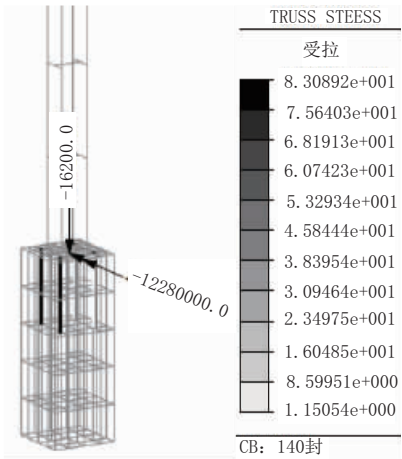


图 18 组合六锚栓拉应力图(单位:MPa)

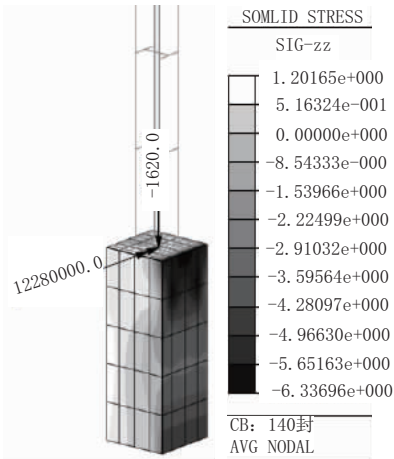


图 19 组合六锚下混凝土最大压应力图(单位:MPa)

4 两种计算方法结果对比

节点计算结果中锚栓拉应力和锚下混凝土压应力为最关键数据,二者的手算与有限元仿真分析计算结果见表 3 所列及图 20 所示。

表 3 手算和有限元分析结果比较表

荷载组合	锚栓拉应力 σ /MPa		混凝土最大压应力 $\sigma_{\max}$ /MPa	
	Excel 手算	MIDAS 有限元计算	Excel 手算	MIDAS 有限元计算
组合一	72.59	76.62	4.10	4.22
组合二	80.48	80.78	4.35	4.63
组合三	3.63	3.54	0.25	0.29
组合四	32.16	31.03	2.38	3.21
组合五	10.35	10.44	0.61	0.67
组合六	85.19	83.09	5.60	6.34

由表 3 及图 20 可见,通过解方程手算的结果与有限元分析的结果非常接近。有限元仿真分析有效验证了基于平截面假定方法计算的合理性和准确性,且各工况下锚栓拉应力及混凝土压应力均小于其设计强度,柱脚节点保持弹性受力。设计中可在平截面假定计算原理基础上,建立力与力矩平衡、几何

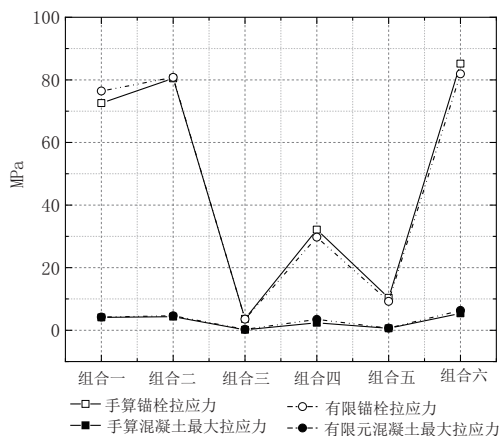


图20 计算结果对比折线图

变形协调方程组,借助 excel 工具便捷地手工计算。

5 结 语

本文研究了轨道交通声屏障柱脚节点的受力特点,柱脚节点满足平截面假定的使用条件,提出了基

于平截面假定原理进行柱脚节点受力分析的计算方法,结合在上海申通地铁集团有限公司科研项目《声屏障风荷载特性研究》中得出的风荷载作用数值,分别按此方法计算了六种不同荷载组合下的柱脚节点受力,并采用有限元仿真分析有效验证了该方法的合理性和准确性。

参考文献:

- [1] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].
- [2] DG/TJ 08-2303—2019, 轨道交通声屏障结构技术标准[S].
- [3] 李星荣,等. 钢结构连接节点设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 上海申通地铁集团有限公司.《声屏障风荷载特性研究》科研项目报告[R]. 上海: 上海申通地铁集团有限公司, 2018.
- [5] 童根树, 吴光美. 钢柱脚锚栓的设计方法[J]. 建筑钢结构进展, 2005(1): 27-36.
- [6] 洪晓辉. 刚性柱脚螺栓计算分析和应用[J]. 福建建材, 2012(11): 16-21.

《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