DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260079

钢结构旋转活动桥受载研究

章淳建,周以达,朱烨森
(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

摘　要: 为提升强台风地区钢结构旋转活动桥的设计水平与安全性能,解决河道通航与陆地交通的矛盾,保障桥梁运行效率,以国内同类型承载吨位最大的配重式双旋转钢结构活动桥为对象,采用 MIDAS Civil 2019 建立空间有限元模型,针对悬臂和简支两种工作状态,分析结构自重、车辆活载、风载等多工况组合下的支反力、应力及变形情况。结果显示,桥梁纵梁、主桁、纵肋等各部位的正应力、剪应力均符合允许值要求,最大竖向变形量远低于设计限值,整体结构具备充足安全裕量,可为同类型桥梁设计提供规范指导与技术借鉴。

关键词: 钢结构旋转活动桥;受载性能;有限元分析;多工况组合
中图分类号: U441⁺.2;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)09-0236-06

Research on Loading of Steel Structure Rotating Movable Bridges

ZHANG Chunjian, ZHOU Yida, ZHU Yesen
(PowerChina HuaDong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: To enhance the design level and safety performance of steel structure rotating movable bridges in strong typhoon areas, resolve conflicts between river navigation and land transportation, and ensure bridge operation efficiency, and taking the largest load-bearing tonnage of the same type of domestic counterweight double-rotating steel structure movable bridge as the object, a spatial finite element model is established using MIDAS Civil 2019. For the cantilever and simply supported working states, the reaction force, stress and deformation conditions under multiple working conditions such as the self-weight of the structure, live load of the vehicle and wind load are analyzed. The results show that the normal stress and shear stress of components such as longitudinal beams, main trusses and longitudinal ribs of the bridge all meet allowable value requirements. The maximum vertical deformation is far below the design limit, and the overall structure has sufficient safety margin, providing standardized guidance and technical reference for the design of similar bridges.

Keywords: steel structure rotating movable bridge; load-bearing performance; finite element analysis; multiple combined working conditions

0　引　言

随着城市化进程的加速,城市交通网络不断完善,桥梁作为交通体系的重要组成部分,其设计与建造技术日益受到关注[1-5]。钢结构旋转活动桥以独特的可开启特性,有效解决了河道通航与陆地交通的矛盾,在城市景观和交通规划中具有重要应用价值[6-7]。例如,在一些内河航运繁忙的城市,如苏州、杭州等,钢结构旋转活动桥的建设不仅保障了船只的顺利通行,还为城市增添了独特的景观元素。

在钢结构旋转活动桥的设计过程中,结构的安全性和稳定性是首要考虑因素。由于这类桥梁在开启和闭合过程中会承受复杂的荷载作用,如自重、车辆荷载、风力、地震力及温度变化等,对其进行全面的受力性能分析至关重要。传统的设计方法主要基于经验公式和简化模型,难以准确考虑结构的复杂受力状态和实际工作性能。有限元分析方法的出现,为钢结构旋转活动桥的设计提供了更精确、高效的手段。在桥梁工程领域,有限元分析已广泛应用于桥梁的静力分析、动力分析、稳定性分析等多个方面[8-10]。例如,在某大型钢结构桥梁的设计中,通过有限元分析发现原设计方案在特定荷载工况下存在局部应力集中问题,通过优化结构形式和尺寸,成功解决了这一问题,确保了桥梁的安全[11-12]。

综上所述,开展基于有限元分析的钢结构旋转活动桥设计与受载性能研究,对推动桥梁工程技术的发展、提高钢结构旋转活动桥的设计水平和安全性具有重要的理论意义和工程实用价值。

收稿日期:2026-01-20
作者简介:章淳建(1993—),男,硕士,工程师,从事钢结构设计工作。

1　工程概况

本研究的旋转钢桥为配重式双旋转钢结构活动交通桥，位于锚地的江河入海口水道，处于水闸与船闸之间，是连接左右岸交通的关键通道（见图 1）。由于船闸通航净空要求及堤上交通竖向标高存在冲突，传统的固定桥梁无法满足需求，因此采用了开启钢结构桥梁方式。这种设计不仅解决了通航与海堤交通的矛盾，还充分考虑了景观要求，使桥梁与周边环境相协调，成为锚地工程中的一大亮点。

目前，该钢桥为国内同类型承载吨位最大的平面旋转钢桥，可在八级台风工况下运行，其先进的设计和可靠的性能为类似工程提供了宝贵的经验和借鉴。



图 1　旋转钢桥实拍

2　主要技术参数

本桥承载按照城市 B 级载荷进行[13]，其中永久载荷作用包括结构自重、二期载荷（桥上栏杆等，合计值取 6 kN/m）和配重（984 kN），可变载荷作用包括汽车活载（限速小于 20 km/h）、人群活载（取值 3.0 kN/m²，其中人行道宽度为 3 m）、风载荷（百年一遇风压强度取值为 1.4 kN/m²）、雪载荷（根据当地气象条件，雪载荷按 0.35 kN/m²）。

本研究选用 2 种载荷工况进行结构分析[14]，如表 1 所示。

表 1　计算载荷工况条件

工况	载荷
载荷工况一	1.2×结构自重+1.2×二期载荷+1.4×人车活载+0.75×风载荷+1.0×雪载荷+1.05×温度作用
载荷工况二	结构自重+二期载荷+人车活载+风载荷+雪载荷+温度作用

3　主体结构与计算模型

3.1　主体结构

本桥主要由主体结构、回转机构、配重块、支撑机构、支撑台和桥梁基础等组成，如图 2 所示。回转机构上端安装在与桥梁主体结构焊接的回转轴上，下端通过回转轴支承与桥梁基础相连。回转机构通过驱动装置驱动回转支承从而带动桥体转动。桥梁旋转中心布置在桥梁中心线偏左侧，距离最左侧 5 656 mm。桥梁一段设有配重，配重块布置在旋转中心左侧 3 257 mm 处。另一端设有支撑机构。当桥梁处于过人及过车阶段，桥梁转动到与河道平行，桥梁通过支撑机构支撑于支撑台上。

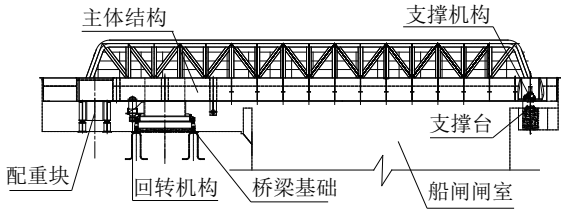
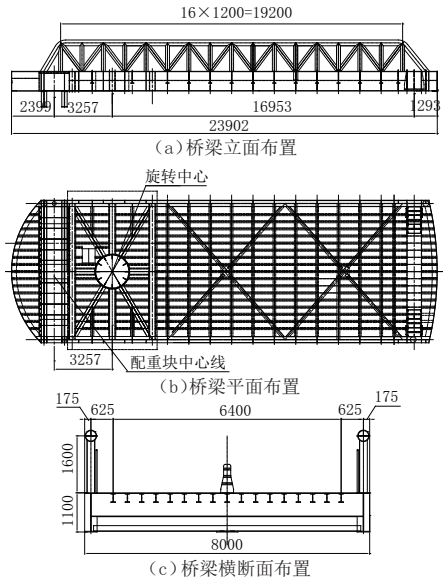


图 2　旋转钢桥

本桥主体结构采用钢桁结构形式，旋转轴与旋转阶段为悬臂结构，过人及过车阶段为简支结构，如图 3 所示。旋转结构一端最大悬臂长 5 656 mm，另一端最大悬臂长 18 246 mm，简支结构跨度 20 210 mm，全桥长 23 902 mm。桥面横向宽 8 000 mm，桁架中心间距 7 650 mm。



（a）桥梁立面布置

（b）桥梁平面布置

（c）桥梁横断面布置

图 3　旋转钢桥结构（单位：mm）

主桁采用两片钢桁梁，桁高 1.6 m，桁式为有竖杆三角形桁架；两片主桁间距 7 650 mm，节间距 1 200 mm。上弦杆采用 ϕ325×14 钢管，下弦杆采用 1 100 mm 高焊接工字形截面（包含顶板），腹杆均采用 ϕ219×10 钢管。正交异性板整体桥面结构是由节间横梁和带工字钢纵肋的钢桥面板组合的结构。工字钢纵肋横向间距 400 mm，型号为 25b。节间横梁

一般间距为 1 200 mm，采用倒 T 形截面，高 650 mm，腹板厚 16 mm，底板厚 20 mm，底板宽 150 mm。主体结构连接型式均为焊接。

3.2　计算模型

本研究采用 MIDAS Civil 2019 进行计算，建立空间有限元模型。为了提高计算效率并确保分析结果的准确性，对钢结构旋转活动桥进行了合理的模型简化与假设。除桥面板采用板单元，主桁、横梁、纵肋等均采用空间梁单元，各部构件均按结构设计尺寸建模，根据结构特点，进行结构离散。离散模型共有梁单元 985 个，板单元 378 个，节点 518 个，计算模型如图 4 所示。

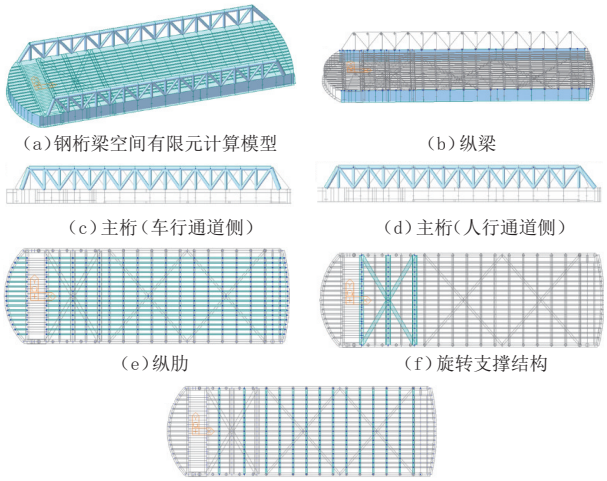


图 4　计算模型

4　计算结果

4.1　支反力计算结果

本研究采用钢结构活动桥，旋转部件为钢桥的旋转轴，因而本结构在旋转过程中可以简化为悬臂结构，在两岸钢桥搭接固定时为简支结构，两种状态下整体结构力计算如表 2 和表 3 所示。

表 2　钢桁梁悬臂状态支点反力

名称	竖向力/kN	不平衡弯矩/(kN·m)
结构自重	1 316	8 095
二期载荷	130	931
配重载荷	984	−3 205

表 3　钢桁梁简支状态支点反力　　单位：kN

名称	恒载	活载		风载	
		Max	Min	Max	Min
左侧	1699	471	−8	−14	14
右侧	689	455	−15	−40	40

由表 2 可知，在单侧钢桥运行受载时主要受到竖向力和弯矩。力的来源主要包括结构自重、二期载荷和配重载荷。其中，结构自重导致的竖向力和不平衡弯矩均占主导。由表 3 可知，在钢桥连接运行时，左侧作为车行通道，恒载较大。

4.2　应力计算结果

在本研究设定的两种工况下，分别考虑了纵梁、主桁(车行/人行)、纵肋、旋转支撑结构、横肋等结构的正应力和剪应力分布，计算云图如图 5~图 10 所示。

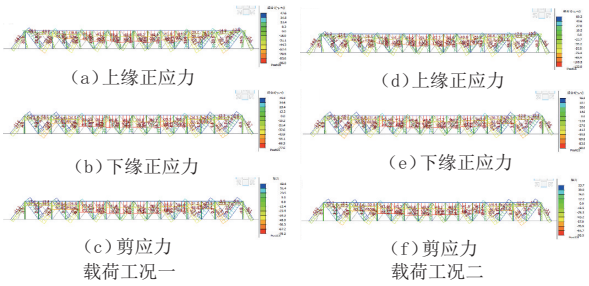


图 5　主桁(车行通道侧)计算云图(单位：MPa)

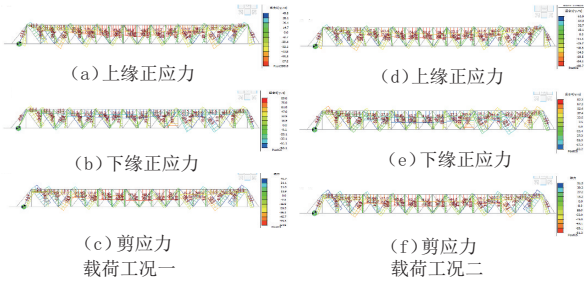


图 6　主桁(人行通道侧)计算云图(单位：MPa)

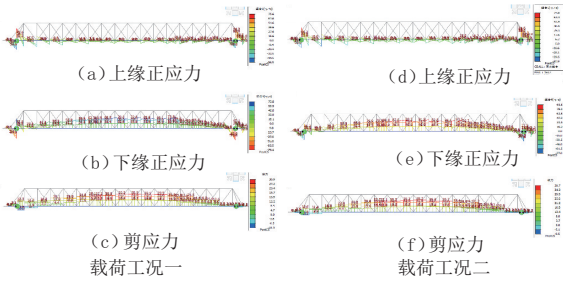


图 7　纵梁计算云图(单位：MPa)

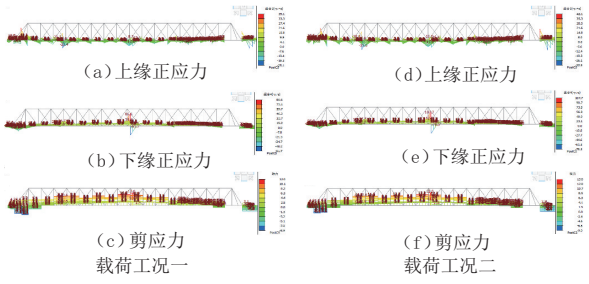


图 8　纵肋(车道载荷)计算云图(单位：MPa)

由图 5 和图 6 可知，载荷工况一条件下，正应力满足 140 MPa 的允许值，剪应力满足 80 MPa 的允许值；载荷工况二条件下，正应力满足 205 MPa 的允许值，剪应力满足 120 MPa 的允许值，表明车行道和人行道主桁结构设计满足强度要求。

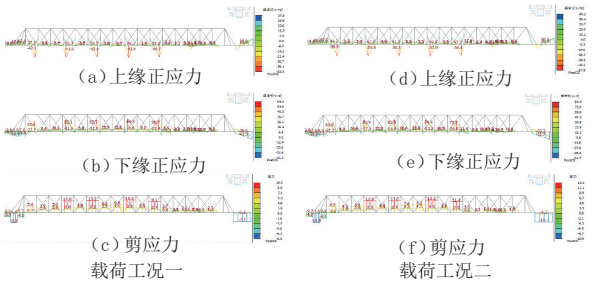


图 9　纵肋（车辆载荷）计算云图（单位：MPa）

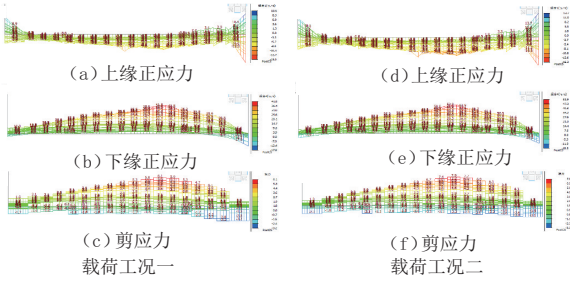


图 10　横肋计算云图（单位：MPa）

无论是车行道的主桁，还是人行道的主桁，载荷工况二时的受力均较载荷工况一的更大；并且，车行道侧的主桁受力较载荷工况一时的更大。

纵梁的受力分布情况如图 7 所示。两种载荷工况下，正应力和剪应力均满足允许值，表明纵梁结构设计满足强度要求。针对纵梁结构，两种载荷工况下的受力差异不明显。

图 8 和图 9 展示了纵肋在有无车辆载荷时的受力分布情况。两种载荷工况下，正应力和剪应力均满足允许值，表明车道载荷下纵肋结构设计满足强度要求。相对于车道载荷时，车辆载荷下纵肋的受力更为严重。针对纵肋结构，载荷工况二下的受力较载荷工况一时更严重。

图 10 展示了横肋在两种载荷工况时的受力分布情况。两种载荷工况下，正应力和剪应力均满足允许值，表明横肋结构设计满足强度要求。针对横肋结构，两种载荷工况下的受力差异不明显。

图 11 展示了旋转支撑结构在载荷工况一时的受力分布情况，旋转支撑结构设计满足强度要求。

此外，旋转钢结构桥的最大竖向变形量为 5.846 mm，满足设计允许的 $L/600=33.7$ mm。

5　分析讨论

5.1　载荷类型分析

活动钢结构桥所面临的载荷类型多样，包括永久载荷、可变载荷、温度荷载等。准确分析和评估这些载荷对桥梁结构的影响，对保证桥梁的安全性和可靠性至关重要。在设计和施工过程中，应根据实际情况合理选取荷载标准和计算方法，并进行综合评估，以确保活动钢结构桥的正常运行和使用。

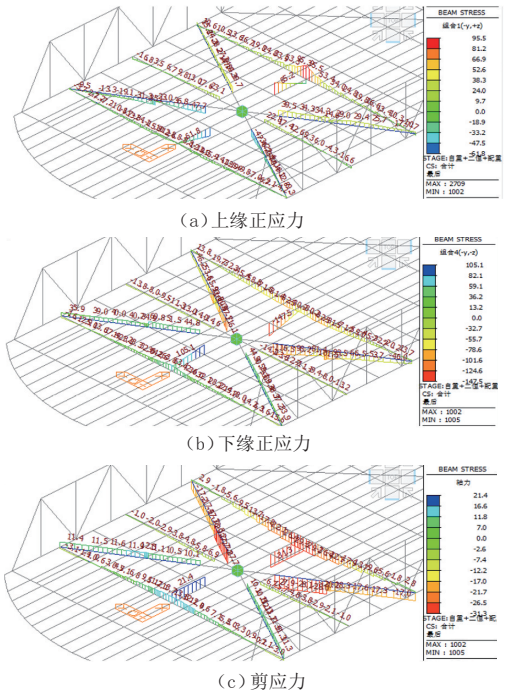


图 11　旋转支撑结构计算云图（单位：MPa）

本研究对象所处环境为江河入海口锚地，除了作为桥梁所必须承受的结构自重、二期载荷、汽车活载和人行活载外，近海海风带来的风载荷必须考虑在内。另外，由于锚地日夜温差较大，温度作用带来的载荷变化也不可忽视。温度荷载是指由于温度变化引起的结构变形和应力，对桥梁产生的荷载。温度荷载主要包括温度梯度荷载和温度应力荷载。温度梯度荷载是指由于桥梁不同部位受到不同温度影响而引起的荷载。本项目中桁架跨度的上弦和下弦之间的温度差为 7 ℃，需要进行温度分析和应力计算。因而，在本工程设计中，对上述载荷均进行了不同工况组合的结构计算。

5.2　结构型式分析

本设计涉及钢结构桥梁的整体结构计算和局部结构计算，桥梁结构整体计算采用城-B 级车道荷载，局部检算采用城-B 级车辆荷载。其中，城-B 级车道荷载分别检算主桁、纵梁、纵肋等结构正应力、剪应力和变形等，采用城-B 级车辆荷载检算纵肋正应力和剪应力。钢结构旋转桥的操作需要比开启桥或垂直升降桥复杂，当跨开或关闭时，摇摆桥的两端必须是自由的，但又必须有刚性的支撑来承载交通。因此，在摆动跨距的两端都设置了楔形物、可伸缩的滚轮或千斤顶和滑滚装置，以提升摆动跨距的两端，并使其与巷道或铁路轨道正确对齐。

根据上文的计算结果，可知纵梁、主桁（车行/人行）、纵肋、旋转支撑结构、横肋等结构均满足强度要求。虽然在不同载荷工况下，由于车载、人载及风载条件的不同，局部构件的受力分布有所差异，但基于旋转钢结构桥的结构设计满足下述基本条件，钢桥整体仍具备充足的安全裕量。一方面，中心轴承旋转桥的设计应使活动跨度的整个重量都由中心枢轴承载，当跨度移动时，应通过可调节高度的平衡轮稳定跨度，以防不平衡或倾覆力，如风载荷引起的力矩；且当跨度在关闭位置静止不动时，应通过中心楔将其稳定。另一方面，若在有一个中心桁架板的平转桥中，应使剪切力不会越过中心，即这种面板的腹板构件应足够坚固，以使桥梁在打开时能够抵抗纵向风压。

6　总　结

本研究以某强台风渔业避风锚地工程的江河入海口水道旋转钢桥为例，在钢结构活动桥旋转和承载两种工况下，分别考虑了结构自重、二期载荷、车辆活载、人行活载、风载荷、温度载荷的组合载荷，根据钢结构旋转桥的中心枢轴布置位置、中心桁架板结构尺寸。通过开展对纵梁、主桁（车行/人行）、纵肋、旋转支撑结构、横肋等结构的应力和变形分析，表明该钢桥结构型式满足强度和刚度要求。

本研究可以规范和指导旋转钢结构活动桥的设计工作，提高强台风地区交通桥的安全性能、保障运行效率，具有良好的推广应用价值。

参考文献：

[1] 王用中.我国桥梁钢结构的应用现状与展望[J].施工技术，2010(8)：18-21.

[2] 孙志轩.公路桥梁基础设计与施工技术问题研究[J].科学之友，2011(24)：102-103.

[3] 张欣，刘榕.株洲市枫溪大桥的设计与关键技术研究[J].中外公路，2017，37(2)：102-104.

[4] 韦学锋.市政道路桥梁现场施工技术研究与应用[J].城市建设理论研究(电子版)，2015(19)：3786-3787.

[5] 李艳荣.城市桥梁设计建造要点分析[J].工程技术研究，2017(5)：195-196.

[6] 徐伟炜，吕志涛.轻型立转开启桥设计参数研究[J].工程力学，2007，24(11)：106-112.

[7] Guo Wei, Xu Haiyang, Zhang Jiangyi, et al. Dynamic Mechanical Characteristics of Swivel Bridge during Rotation Process[J]. Transportation Research Record, 2025, 2679(9): 481-501.

[8] 陶利.基于有限元分析钢结构桥梁中应变与挠度测量数据的分析与验证[J].安徽地质，2022(增刊2)：268-271.

[9] 陈明，钱盈，曾向往，等.某钢结构景观桥基于ANSYS与MIDAS Civil的有限元分析[C]//第四届全国钢结构桥梁技术创新大会.湖北省城建设计院股份有限公司，2023.

[10] 李仲阳，刘伟.钢结构桥梁计算分析[J].建筑工程技术与设计，2017(14)：2001.

[11] 张博.结合有限元分析的钢结构桥梁检测与评估研究[D].重庆：重庆交通大学，2018.

[12] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范 [S].

[13] CJJ 11—2011 城市桥梁设计规范 [S].

[14] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范 [S].

（上接第221页）

应用研究[J].佳木斯大学学报（自然科学版），2017，35(5)：735-737.

[4] 刘钧，侯杰，邱法维.钢筋混凝土独柱式桥墩的拟动力试验研究[J].工程抗震与加固改造，2006(5)：43-48.

[5] 周勇军，王业路，赵煜，等.公路独柱墩桥梁抗倾覆研究综述[J].交通运输工程学报，2022，22(6)：46-66.

[6] 李翠华，杨利斌，傅志华，等.无锡市312高架桥倾覆事故分析[J].工程力学，2021，38(9)：203-211.

[7] 陈修和，董阁.一种独柱墩高架桥的单侧设桩加固装置[J].工程与建设，2020，34(6)：1135-1137.

[8] 邓雪峰，吴臻旺，张元恒.桥梁抗倾覆计算分析及对策措施[J].四川建筑，2024，44(2)：122-124.

[9] 梁柯峰.独柱墩连续箱梁桥抗倾覆性能设计方法研究[J].城市道桥与防洪，2016(8)：115-116.

[10] 魏吉明.独柱墩连续箱梁桥抗倾覆验算及加固设计[J].运输经理世界，2021(22)：127-129.

[11] 鲁昌河，万志勇，梁立农，等.独柱墩连续箱梁桥抗倾覆验算与加固分析[J].广东公路交通，2018，44(3)：35-39.

[12] 杨天宇.独柱墩桥梁抗倾覆加固方法对比与应用分析[J].城市道桥与防洪，2024(6)：106-109.

[13] 周晨.某城市独柱墩桥梁抗倾覆加固设计研究[J].西部交通科技，2023(1)：136-138.

[14] 张伟景，杜命刚.独柱墩连续箱梁桥横向抗倾覆加固技术研究[J].筑路机械与施工机械化，2020，37(5)：15-19.

[15] 赵文刚.独柱墩连续箱梁桥抗倾覆加固改造技术研究[J].江苏建筑，2023(4)：75-78.

[16] 周健民，吴文明，王辰杰.基于拉压杆的独柱墩抗倾覆加固结构及设计方法研究[J].公路交通科技，2021，38(8)：110-115.

[17] 徐康，王涛，刘博，等.大件车作用下独柱墩弯桥倾覆风险快速预测[J].防灾减灾工程学报，2023，43(3)：474-483.

[18] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].

[19] JTG D60—2015 公路桥涵通用设计规范 [S].