

钢箱梁系杆拱桥静动力分析

梁胜

(吉首市海昇交通建设有限责任公司, 湖南 吉首 416000)

摘要: 以某下承式钢箱梁系杆拱桥为研究对象, 利用有限元软件 MIDAS/Civil 建立桥梁仿真模型, 对施工和成桥阶段的静力、动力特性进行分析。结果表明, 成桥状态下受力和承载能力均满足规范要求, 极限承载力状态下主梁、拱肋及吊杆的动力特性满足规范要求。

关键词: 桥梁; 钢箱梁系杆拱桥; 静力分析; 动力分析

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0104-05

系杆拱桥按先梁后拱施工, 当主梁承受荷载作用时, 荷载通过吊杆传递给拱肋, 使其与主梁共同分担荷载, 充分体现了梁受弯、拱受压的受力特点。其独特性能使其成为土木领域学者潜精研思的方向, 如戴公连等采用有限变形理论, 考虑几何非线性的影响, 对连续钢管拱系杆拱桥进行了稳定性分析; 李新平等基于倒拆法和影响矩阵法, 利用 ANSYS 软件对空间系杆拱桥的吊杆张拉力进行了研究; 刘钊基于最小应变能原理, 对有无约束条件下系杆拱桥的吊杆最优内力进行了研究; 张振伟等对正常使用和承载能力极限状态下飞燕式系杆拱桥的静动力特性进行了分析; 黄云等采用基于纤维单元模型的核心砼本构关系, 考虑钢管径向应力梯度影响的套箍效应, 对灌注拱肋弦管砼工况和成桥运营阶段结构

稳定性进行了分析。该文以某下承式钢箱梁系杆拱桥为研究对象, 分析其在施工和成桥中的静力及动力性能。

1 工程概况

赏月路桥位于湖南省长沙市赏月路起点附近, 上跨龙王港河道, 为跨越龙王港连接梅溪湖西延线与梧桐路的桥梁工程。主桥采用钢箱梁系杆拱桥结构, 引桥采用简支现浇箱梁结构, 跨径布置为 18 m+78 m+18 m。两侧悬挑滨河慢行步道, 桥面宽度为 37.4~46.4 m, 为双向六车道。钢主梁为两幅, 纵向包括 3 道腹板和 1 道外封板的扁平箱梁截面, 截面尺寸见图 1。

主桥采用跨径为 75 m 的系杆拱肋, 主拱和钢

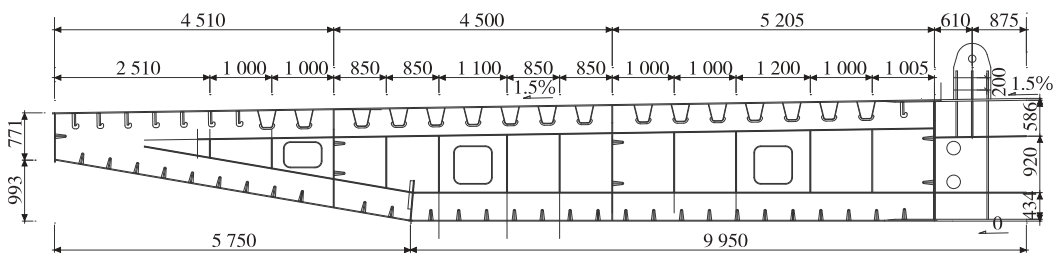


图 1 单幅钢主梁跨中横截面(单位:mm)

主梁互相垂直, 取二次抛物线为其设计拱轴线; 系杆设在桥面中央, 为镂空结构, 以平衡拱脚推力; 双拱放置在桥面中心, 采用工字形横梁连接, 间距 3 m, 与吊杆对齐; 拱肋外腹板设置装饰性结构。全桥采用 42 根兰格尔体系吊杆, 顺桥向每相邻 3 m 设置 1 根吊杆, 横桥向为双吊杆, 拉索采用黑色内层、彩色外层双层结构的高密度聚乙烯护套料。吊杆索拱端为冷铸锚固体系, 梁端为固定端锚具, 拱端为张拉端锚具。桥梁的主要结构参数及立面布置见表 1 和图 2。

表 1 桥梁的主要结构参数

构件	弹性模量/ (10^5 MPa)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	强度/ MPa
拱肋	2.06	77.0	345
系杆	1.95	78.5	1 860
吊杆	2.05	78.5	1 770

2 有限元模型建立

采用 MIDAS/Civil 建立系杆拱桥模型(见图 3), 主梁和拱肋采用梁单元模拟, 吊杆采用桁架单元模

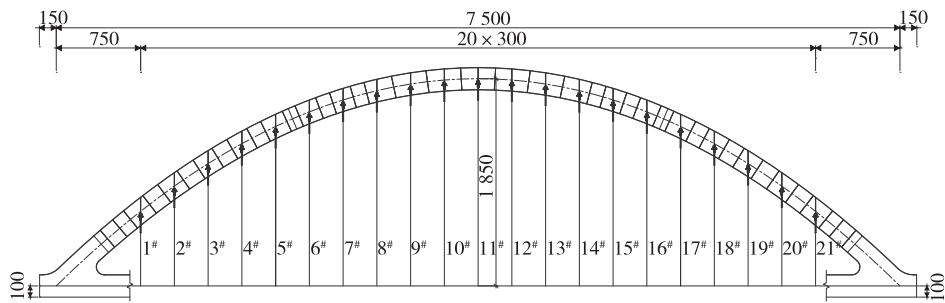


图 2 主桥拱肋立面布置(单位:cm)

拟。在拱脚处设固定支座,视为固结,主梁和拱肋临时支架用弹性连接模拟,对模型进行无墩模拟分析。

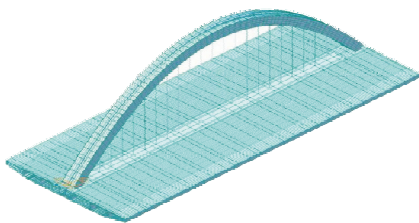


图 3 系杆拱桥有限元模型

3 静力特性分析

3.1 成桥状态受力分析

选取以下 3 种荷载组合研究该桥的静力特性:组合 1 为恒荷载;组合 2 为活荷载;组合 3 为恒荷载+活荷载+温度荷载。桥梁的恒荷载根据结构材料及几何参数由 MIDAS/Civil 程序自动加载;汽车荷载采用城市—I 级;人群荷载按 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》取用,计算值为 2.59 kN/m^2 ;温度荷载以升温 15°C 计算;吊杆和系杆的张拉力按施工阶段通过对桁架单元施加索力实现。各荷载组合作用下系杆拱桥关键截面的位移和内力见图 4~6。

由图 4~6 可知:1) 桥梁结构在承受荷载作用时,结构挠度受到很大影响。由于恒荷载和活荷载的特性,如恒荷载中的自重和二期荷载在结构承受所有荷载中比例较中,而活荷载中的汽车荷载和人群荷载是当有车辆或行人通过时才作用到桥梁上,

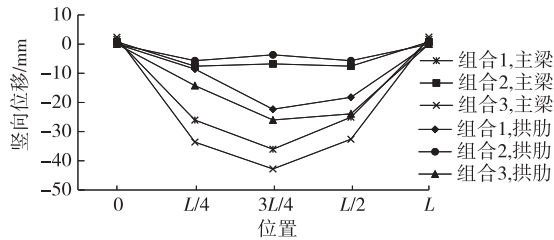


图 4 3 种荷载组合下主梁和拱肋的竖向位移

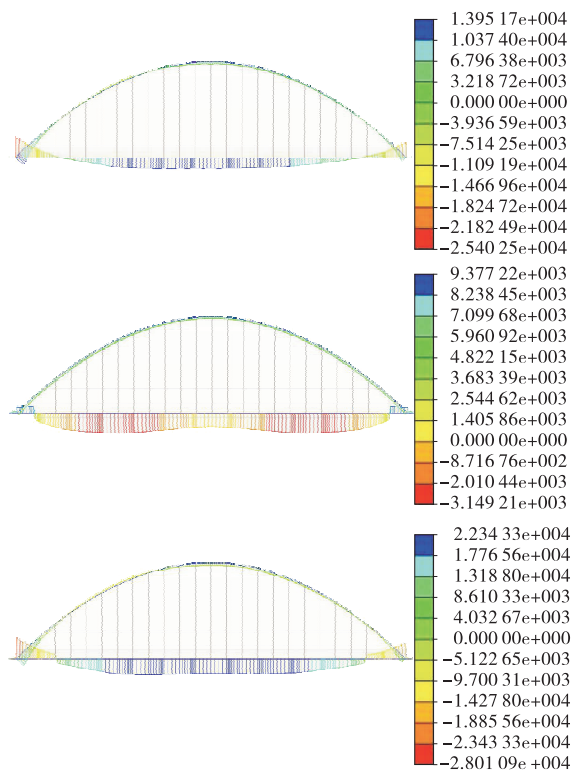


图 5 3 种荷载组合下主梁和拱肋的内力(单位:kN)

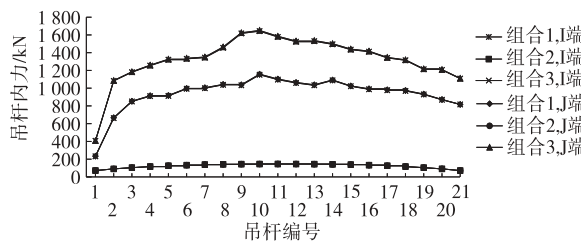


图 6 3 种荷载组合下吊杆的内力

故桥梁遭受恒荷载产生的竖向位移远大于活荷载产生的竖向位移;组合 3 中温度荷载对桥梁的影响主要是钢结构的温度次应力和自应力,对位移影响较小。2) 桥梁承受的内力主要是恒载作用产生的,活载产生的内力占比很小。3) 在 3 种荷载组合作用下,吊杆内力分布规律符合设计要求,吊杆所受张力除 1#、21# 吊杆外,其他吊杆都关于跨中对称,1#、

21#吊杆由于吊杆计算长度较小,张拉时无法完成张拉受力,导致有所差别。

系杆拱桥的受力特点主要是主梁承受荷载,随之通过吊杆传递给拱肋,使两者共同作用,故在吊杆初张拉后索力的施加对桥梁位移和受力均存在影响。现场对主梁、拱肋位移和应力进行监测,并与控制值进行对比,施工过程中吊杆索力初张拉完成后主梁位移变化和主梁、拱肋应力变化见图7~10。

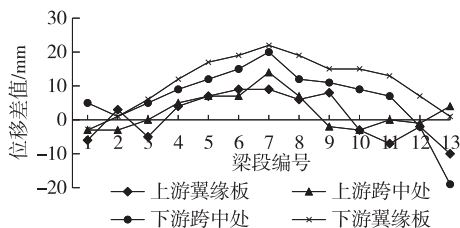


图7 吊杆张拉前后主梁位移变化

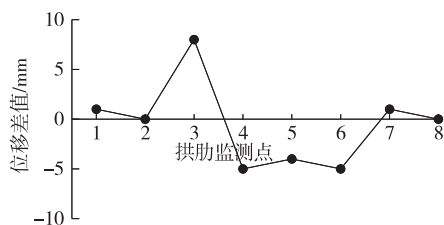


图8 吊杆张拉前后拱肋位移变化

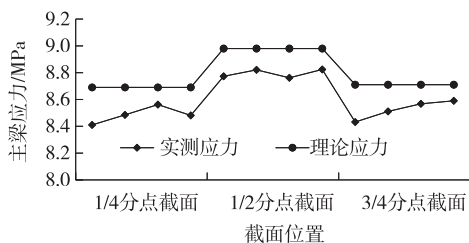


图9 吊杆张拉前后主梁应力变化

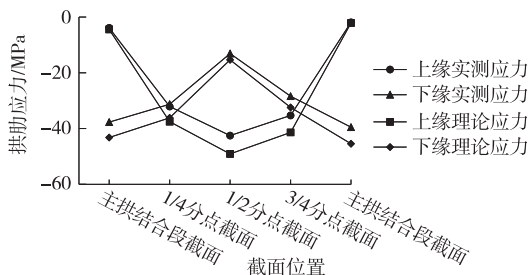


图10 吊杆张拉前后拱肋应力变化

由图7、图8所知:吊杆初张拉后,吊杆开始传递来自主梁的荷载,使主梁呈上挠趋势,高程随之变化;由于吊杆的存在,拱肋承受从下到上的荷载,使拱肋受拉,导致拱肋呈下挠趋势。主梁上挠的最大位移为22 mm,拱肋下挠的最大位移为8 mm,由于

该桥主梁和拱肋均为钢结构,结构变形较小,两者均符合要求。

由图9、图10可知:主梁在吊杆张拉后应力变化较小,拱肋应力变化较大。其原因是主梁在施工过程中主要承受恒荷载和活荷载,经吊杆传递给拱肋,拱肋承担大部分荷载,导致主梁应力较小、拱肋应力较大,符合下承式系杆拱桥的受力特征。

3.2 成桥状态承载能力分析

桥梁二期恒载铺装完成后,依据CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》、JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》对桥梁极限承载能力状态进行验算,验算其是否满足行车和使用要求。验算采用2种荷载组合:组合Ⅰ为1.2恒载+1.4汽车荷载+0.75×1.4人群荷载+0.75×1.4整体升温;组合Ⅱ为1.2恒载+1.4汽车荷载+0.75×1.4人群荷载+0.75×1.4整体降温。2种荷载组合下桥梁拱肋、主梁应力及吊杆应力包络图见图11、图12。

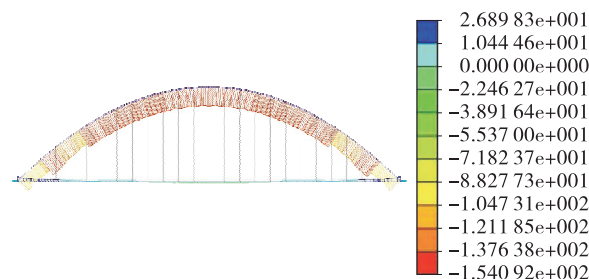


图11 拱肋、主梁应力包络图(单位:MPa)

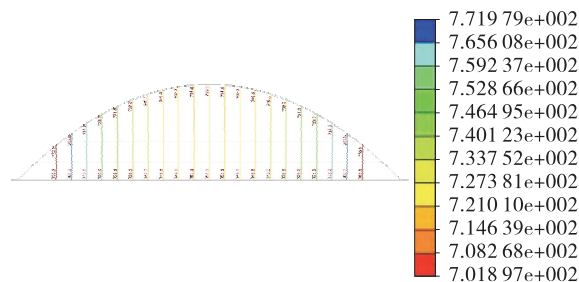


图12 吊杆应力包络图(单位:MPa)

由图11、图12可知:极限承载能力状态下,桥梁拱肋最大应力为154.1 MPa,小于规范要求的345 MPa;吊杆最大应力为772 MPa,小于吊杆的抗拉强度1 770 MPa。桥梁投入使用后其强度和承载能力均满足设计要求,验证了桥梁的安全性。

4 动力特性分析

运用MIDAS/Civil模型进行动力特性研究,只取用前6阶频率及振型,结果见图13和表2。

由图 13 和表 2 可知:1) 模态 1 的自振频率最高,且随着模态的增加,结构的自振频率减小。桥梁

的基本频率为 0.154 Hz,对应的周期为 6.507 s,表明该系杆拱桥具有横向刚度不大且结构轻较巧的特

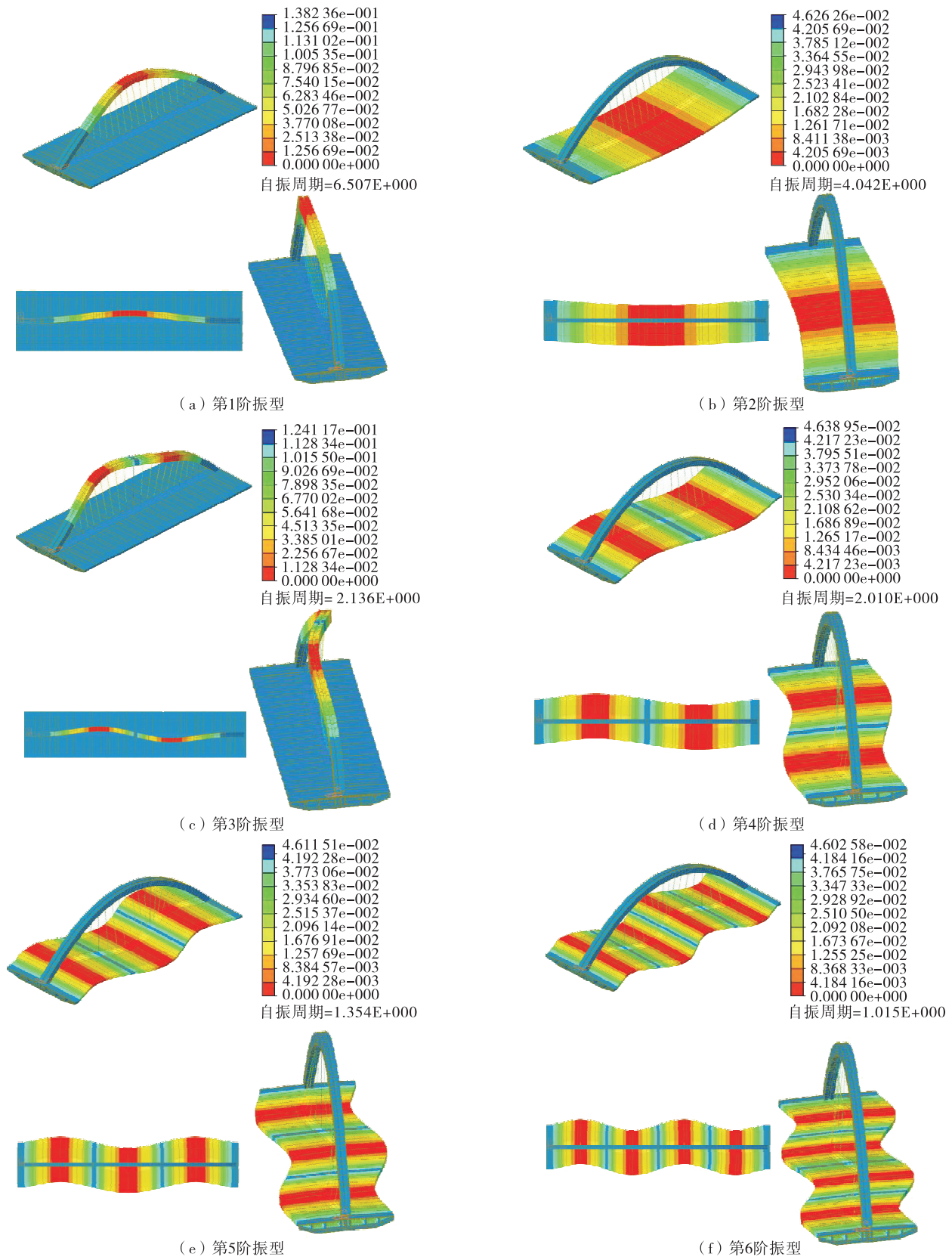


图 13 桥梁的振型图(单位: $\text{N} \cdot \text{mm}$)

表2 桥梁的自振频率及振型

阶次	频率/Hz	周期/s	振型
1	0.153 689	6.506 647	拱肋1阶正对称侧弯
2	0.247 420	4.041 703	主梁1阶正对称侧弯
3	0.468 205	2.135 814	拱肋2阶反对称竖弯
4	0.497 515	2.009 991	主梁2阶反对称竖弯
5	0.738 301	1.354 461	主梁3阶正对称竖弯
6	0.985 580	1.014 631	主梁4阶反对称竖弯

性。此外,频率随着阶数的增加逐渐加大,对应的周期则迅速减小。桥梁振型与衰减速度成反比,振型阶数越高,衰减越快。实际工程抗震设计中应优先考虑较低振型。2)系杆拱桥的振型主要有拱肋正反对称侧弯、主梁正反对称侧弯。桥梁振型的耦合及复杂程度随阶数的增加而增强,主梁振型随模态数的提高呈正反对称规律循环变化。3)桥梁竖向由于吊杆能传递拱肋和主梁之间的荷载,三者共同受力,形成完整的梁拱组合结构,使桥梁在承受动荷载时拱肋和吊杆能基本保持同步,拱肋和主梁在自重作用下振动保持相对协调。

5 结论

(1)在系杆拱桥施工中,主梁、拱肋的变形和内力主要承受恒载和活载,温度荷载对其有所影响。由于温度受环境影响较大,现场仪器受限,未及时进行量化,有待进一步研究。

(2)主梁标高变化比拱肋明显,而拱肋应力变化比主梁大,这是由系杆拱桥吊杆的传力作用和两者的受力特点决定的。

(3)主梁、拱肋及吊杆在极限承载能力状态下的动力特性满足规范要求。系杆拱桥的动力特性关系着桥梁的安全性和稳定性,前6阶频率和振型计算结果显示,随着阶数的增加,结构频率减小,成负相关;而结构周期逐渐增大,成正相关。

参考文献:

- [1] 戴公连,李德建,曾庆元,等.深圳市芙蓉大桥连续钢管拱系杆拱桥空间稳定性分析[J].中国公路学报,2001,14(1):48-51.
- [2] 李新平,钟健聪.空间系杆拱桥吊杆张拉控制分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2004,32(7):89-92.
- [3] 刘钊.基于能量法的系杆拱桥最优吊杆内力的确定[J].工程力学,2009,26(8):168-173.
- [4] 张振伟,张伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥静动力特性分析[J].中外公路,2019,39(1):113-116.
- [5] 黄云,张清华,叶华文,等.钢管混凝土系杆拱桥空间稳定性分析[J].桥梁建设,2014,44(4):50-56.
- [6] 刘焕辉,朱芝荏.基于均匀试验的大跨悬索桥静力性能参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(4):125-128+134.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [8] 上海市市政工程设计研究总院.城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

收稿日期:2021-02-26

(上接第103页)

4 m以内。

参考文献:

- [1] 沈星,叶爱君,王晓伟.柔性横系梁双柱墩的抗震行为分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(3):342-347.
- [2] 王文科,李雪红,徐秀丽,等.基于Pushover的双柱墩桥梁抗震延性能力分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(5):75-81.
- [3] 孙治国,华承俊,司炳君,等.设置延性系数系梁的桥梁双柱墩抗震能力研究[J].桥梁建设,2015,45(1):39-44.
- [4] 吴宜峰,李爱群,王浩,等.钢筋混凝土双柱墩滞回性能数值模拟与分析[J].东南大学学报(自然科学版),

2015,45(4):776-781.

- [5] 焦驰宇,胡彪,刘路宇,等.不同墩柱形式曲线桥主梁合理数值模拟方法研究[J].工程力学,2018,35(增刊1):246-252.
- [6] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [7] 李漪.山区桥梁设计浅析[J].工程与建设,2012,26(1):62-65.
- [8] 刘贝.土-桩-结构相互作用对砗自锚式悬索桥地震响应的影响研究[J].公路与汽运,2020(4):129-134.
- [9] 余智敏,吴庆雄,袁辉辉,等.纵桥向变刚度支座布置的V形河谷高低墩梁桥受力性能分析[J].南昌大学学报(工科版),2021,43(3):249-254+262.

收稿日期:2021-04-08