

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.009

近桥施工振动对某既有旧桥结构特性 影响及加固分析

郭月峰

(泉州市公路事业发展中心,福建泉州 362000)

摘要: 为分析施工振动和加固方案对既有旧桥的影响,通过现场布设振动测点并收集数据,结合 Midas 有限元软件建立动力分析模型,采用现场测振与有限元分析相结合的方法,对旧桥在施工振动下的位移和内力响应进行详细评估。针对旧桥的加固维修方案,考虑到加固后托梁变化较大,为研究不同加固效果,通过建立局部有限元模型进行对比分析,验证施工过程的合理性并提出优化建议。结果表明:施工振动对旧桥的影响有限,但需持续监测关键部位,尤其针对 1/4 跨处的动位移极值和拱脚内力等参数需要重点关注;加固维修时增加钢斜撑能有效降低托梁应力,但需建立精细的荷载管理制度,严格控制人行道板等加固部位的荷载,防止超载导致的结构损伤,保障桥梁加固效果及长期运营安全。

关键词: 旧桥;施工振动;动力分析;加固维修

中图分类号: TU997.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0062-06

Impacts of Construction Vibrations and Repair and Strengthening on an Existing Old Bridge

GUO Yuefeng

(Quanzhou Highway Development Center, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: To analyze the impacts of construction vibrations and reinforcement measures on the existing bridge, vibration monitoring stations were installed on-site to collect data. A dynamic analysis model was developed using Midas finite element software, combining field vibration measurements with finite element simulations to comprehensively evaluate the bridge's displacement and internal force responses under construction vibrations. For the bridge's reinforcement and maintenance plan, given the significant changes in the support beams post-reinforcement, a comparative analysis was conducted using localized finite element models to assess different reinforcement effects, validate construction process rationality, and propose optimization recommendations. The findings indicate that construction vibrations have limited impact on the bridge, but continuous monitoring of critical areas-particularly dynamic displacement extremes and arch foot internal forces at the quarter-span-is essential. Adding steel diagonal braces during reinforcement effectively reduces support beam stresses, though a meticulous load management system must be implemented to strictly control loads on reinforced components such as pedestrian walkway slabs, preventing structural damage from overload and ensuring both reinforcement effectiveness and long-term operational safety.

Keywords: old bridge; construction vibration; dynamic analysis; reinforcement and maintenance

由于交通量增加、桥梁设计标准提高、车辆超载等原因,我国危桥病桥数量不断增加。因此,桥梁的扩宽改造、加固维修成为主流趋势。但邻近桥梁在

扩宽改造中的施工振动很可能会危及到在役桥梁的安全性,造成人员伤亡和经济损失。同时对旧桥的加固维修一定程度上也会增加桥梁负担。因此需要

收稿日期:2025-09-11

修稿日期:2026-01-17

基金项目:国家自然科学基金(51778149)

作者简介:郭月峰(1976—),女(回族),高级工程师,主要从事公路与桥梁工程技术与管理工作。E-mail:651874291@qq.com

对旧桥的施工振动和加固维修进行论证,以保证桥梁安全。

杨红全等^[1]针对改扩建水中新建承台对邻近旧桥基础的影响进行力学分析,结果表明新桥承台基础施工对既有桥梁的承台基础影响小。金生吉等^[2]研究表明在已有建(构)筑物近接范围内进行新建结构施工必须保证足够的安全距离和采取有效的安全施工措施以降低影响。李智彦等^[3]采用三维数值模拟的方法,对新建桥梁的钻孔灌注桩的施工对邻近桩基应力变形的影响进行了分析,结果表明,在考虑桩基施工对周围土体扰动的情况下,桩基施工对既有桥桩的沉降影响不大。郑华堂^[4]针对桥梁桩基施工与邻近高铁运营相互影响表明,打桩的振动能量通过土介质的传播会对高铁桥梁结构与地基产生不可忽视的影响。徐略勤等^[5]针对不同加固方案,并对不同拆除加固施工次序下的主拱圈力学性能进行了分析,结果表明,拱上结构的拆建次序对加固后主拱圈的力学性能影响较小,但对加固过程中主拱圈的受力状态影响较大。刘帅^[6]利用有限元分析对不同加固施工过程进行了数值模拟,总结了连拱桥加固施工的主要影响因素在于加固施工的程序和加固施工过程中施工动荷载的扰动情况。

目前规范中并未明确桥墩振动限值,多数情况下需要参考房屋建筑类的情况进行分析,而针对情况复杂、施工难度较大的工程则需要结合实际工况作单独分析。以泉州大桥为例,该桥作为泉州市区的重要通道,需要经历扩宽改造与加固维修的双重挑战。为深入研究施工振动和加固改造对既有旧桥的影响,针对泉州大桥进行详细的现场监测与数据分析,并结合 Midas 有限元软件建立动力分析模型,判断施工振动对旧桥的影响程度。同时,针对泉州大桥的加固维修方案,评估加固方案的合理性,并对施工过程进行了适当的优化,对施工振动和加固维修过程提出了具体的注意事项和合理建议,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

泉州大桥位于泉州市,北连鲤城区丰泽区,南联南安晋江,是泉州市区上跨晋江干流的通道之一,是国道 324 线泉州段的组成部分。泉州大桥(旧桥)为钢筋混凝土拱桥,上部结构采用 $(5 \times 30 + 5 \times 50 + 12 \times 30)$ m 空腹式等截面悬链线 π 型拱,横向由九片 π 形肋组成,拱圈宽度为 12.1 m。拱上建筑为钢筋混凝土立柱、盖梁及托梁和空心板,下部构造桥

墩(除 5#推力墩)基础为桩基础;厦门台与 5#推力墩为沉井基础;福州台为组合桥台桩基础。桥面布置为:2.25 m 人行道 + 12.0 m 行车道 + 2.25 m 人行道。人行道板架设在盖梁(托梁)上。设计荷载:汽-20 kg/m^2 ,挂-100 kg/m^2 ,人群-350 kg/m^2 ,旧桥维修加固于 2021 年 6 月开工,2022 年 1 月开放交通。

新建的泉州大桥 26 m 宽,全桥分 5 联设置,第一联为 (4×32) m 预应力砼连续等高箱梁,第二联为 $(34.5 + 5 \times 55 + 34.5)$ m 预应力砼连续变截面箱梁,第三、四联为 $(2 \times 32 + 2 \times 33.5)$ m 预应力砼连续等高箱梁,第五联为 (3×32) m 预应力砼连续等高箱梁。下部桥墩均采用双柱方墩,钻孔桩基础;桥台采用 U 台,钻孔桩基础。设计荷载:公路-I 级(城-A 级验算),人群-3.5 kN/m^2 。新桥与旧桥拼成总宽 43 m,双向六个机动车道 + 双向两个非机动车道 + 双向两个人行道,新桥于 2021 年 6 月开工,2023 年 7 月完工通车。

桥梁结构现场立面图、桥梁现场施工照见图 1—图 3。泉州大桥新桥毗邻旧桥,新桥桥梁基础主要为钻孔桩基础。通过旧桥的立面图、地勘报告以及旧桥下部结构竣工图互相对照,可以得出以下结



图 1 桥梁侧面照

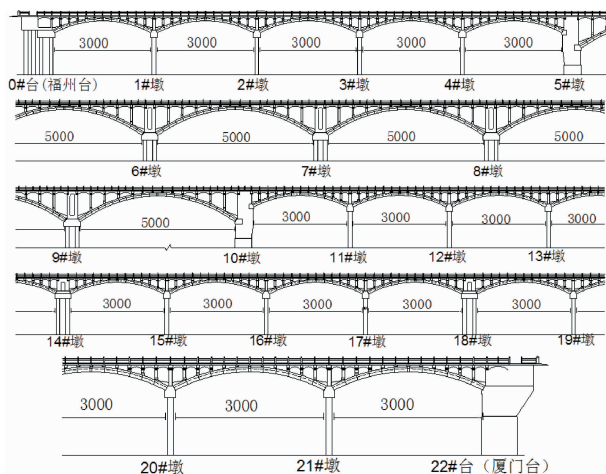


图 2 桥梁立面图(单位:cm)



图 3 桥梁现场施工照

论:旧桥桩基相较于新桥而言,大部分桩基持力层位于浅层卵石层中,少部分位于强风化(粒状)风化层中。在钻孔灌注桩施工过程中,卵石层属于极易塌孔的土层。新旧桥距离近(桩间净距仅 2.65 m),且泉州大桥旧桥建造时间久远,考虑保护旧桥的结构安全,经综合评估,确定水上桩基采用全套管旋转钻机与旋挖钻机组合施工工艺。对于施工钢栈桥,采用振动沉管方式进行,距离旧桥墩最近距离仅为 0.35 m。

2 现场测振数据分析

现场在旧桥桥墩承台上与新桥施工临近部位布置振动采集点,采用 TC-4850N 无线网络测振仪进行采样,如图 4 所示。沉管施工由于河床地质复杂,难以沉管,施工单位首先使用旋挖钻孔进行初步开挖,与沉井基础最近距离约为 0.35 m。旋挖过程中振动速度最大值为 0.625 mm/s(竖直向);旋挖结束后进行初步振动沉管,整个过程钢管平稳下沉,沉管初期振动速度最大值从 0.434 mm/s 增长到 0.600 mm/s(水平向),持续约三分钟;沉管中期,振动速度最大值从 0.313 mm/s 增长到 0.788 mm/s(竖直向);沉管末期,振动速度最大值从 0.325 mm/s 增长到 1.038 mm/s(竖直向)。

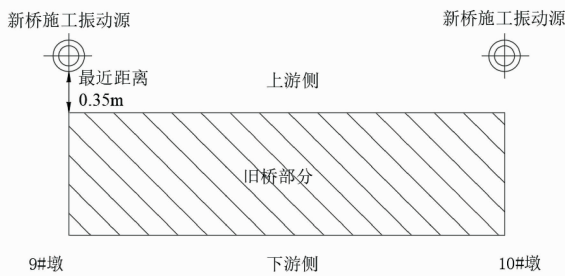


图 4 桥梁施工振动示意

沉管末期振动速度变化趋势如图 5 所示,由图 5 测振数据得出,当进行沉管作业时,机器的振动方

向会影响桥墩自身的振动方向,即竖直方向上会出现振动速度最大值。为探究上述施工过程对拱桥整体受力的影响程度,基于现有实测数据进行旧桥动力分析。

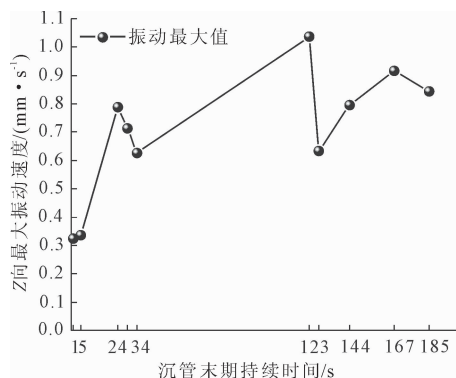


图 5 沉管末期振动速度变化趋势

3 有限元模型建立

Midas 系列软件是以有限元为理论基础开发的分析和设计软件。软件可模拟施工仿真分析、抗震设计特征值分析、应力分析、拉索锚固部位的细部分析、满堂支架稳定性分析、桥梁静力分析、柱模静力分析等多种功能^[7]。由于旧桥主桥附近既有钢栈桥振动沉管施工,又有旋挖钻孔施工,因此建立主桥模型进行重点分析。

参考旧桥设计图纸,建立泉州大桥的主桥有限元模型,材料参数根据检测报告的实测推定强度取值。主桥由主拱圈,桥面板,拱上立柱等组成,属于细长构件,同时考虑研究侧重于整体动力特性分析,对于全桥尺度的动力响应研究,梁单元模型计算效率高,是国内外此类桥梁安全评估的通用做法,因此,采用梁单元对主桥进行模拟。该模型采用梁单元共计 1 892 个,拱上立柱单元通过刚性连接与拱肋单元连接,拱肋之间通过刚性连接形成整体,拱脚为无铰拱,故使用固结。鉴于本桥桥墩坐落于浅层卵石层,物理力学特性较好,分析中将桥墩底部的边界条件设定为完全固定约束,以模拟桩基与周围土体之间的刚性协同作用,有限元模型如图 6 所示。基于中交公路规划设计院有限公司检测中心于 2015 年进行的荷载试验,在最大正弯矩等工况下,模型的参数值与荷载试验现场实际测得值误差不大于 15%,验证了有限元模型的可靠性,可作为后续动力响应分析的基础。

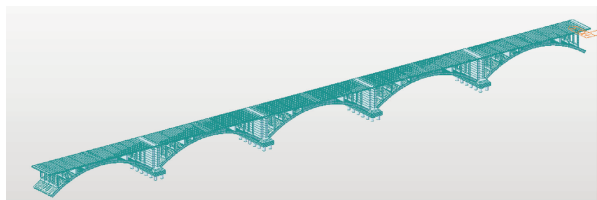


图6 桥梁有限元模型

4 桥梁振动动力分析

4.1 时程荷载确定

根据测振仪采集的数据进行初步处理,桥墩承台的振动波形图如图7所示。Midas Civil有限元分析软件提供了振型叠加法、直接积分法等计算动力作用下结构响应的方法。

此次分析运用直接积分法,将现有振动波运用随时间进展的逐步积分过程,直接对结构进行时态分析。为方便计算,将其合理简化成正弦波形函数进行分析,探究振动施工过程对既有旧桥位移、内力的影响程度。

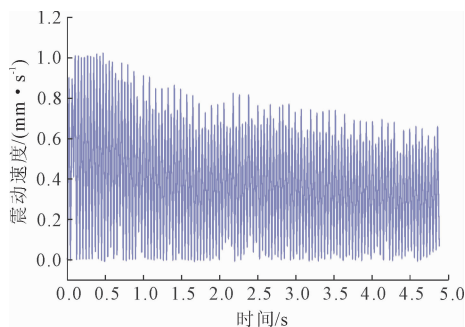


图7 实测振动速度曲线图

4.2 位移分析

时程分析时长为每阶段3s,分别提取主拱圈拱脚处、1/4跨处、跨中处进行位移时程分析,结果如图8所示。可以看出随着时间的增加,拱脚处的位移变化幅度很小,位移极值仅为0.004mm;拱顶处位移变化幅度较大,位移极值为0.04mm,随着时间的增加呈现等周期性变化;1/4跨处的位移极值为0.16mm,为3者中最大,且在2s后呈现等幅值变化。

根据设计图纸要求,以车辆设计荷载和人群荷载为主要荷载项,通过有限元模型计算可得汽-20,挂-100作用下拱顶最大挠度为3.28mm。主拱圈拱脚处、拱顶、1/4跨处的动位移极值与最大静挠度比为0.12%、1.22%、4.88%。

综上所述,桩基的旋挖钻孔和振动沉管施工过

程对旧桥的位移影响程度较小,但是在施工过程中,应该保持对旧桥的持续监测和定期外观检查,尤其针对1/4跨等动位移极值相对较大处需要加以关注。

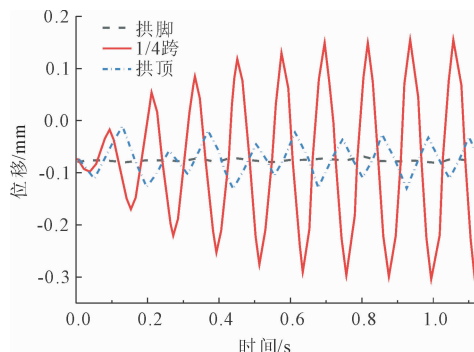


图8 位移时程曲线图

4.3 内力分析

拱桥的构造特性会使得其承担较大的轴力,因此内力分析重点针对拱桥在动力时程下的轴力和弯矩响应情况。

(1) 轴力

随着时间的增加,拱脚、1/4跨处、拱顶处轴力值呈现同步变化趋势,并在2s后呈现等幅值变化。在汽-20,挂-100设计荷载下,拱脚、1/4跨处、拱顶处轴力值分别为2729.6、2525.7、1983.4kN。在振动时程下,3个位置轴力极值与汽-20,挂-100荷载作用下的轴力比值分别为14.12%、9.97%、9.44%。拱脚处轴力在振动作用下增长比例最大,但整体增长幅度有限,如图9。

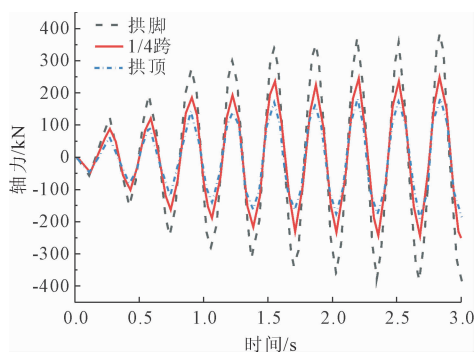


图9 轴力时程曲线图

(2) 弯矩

随着时间的增加,拱脚、拱顶处正负弯矩值呈现同步变化趋势,1/4跨处正负弯矩极值出现与前两处呈现错峰。在汽-20,挂-100设计荷载下,拱脚、1/4跨处、拱顶处弯矩值分别为1711、1378、1170kN。在振动时程下,3个位置弯矩极值与汽-20,挂-100荷载作用下的弯矩比值分别为12.39%、

6.13%、5.37%。拱脚处弯矩在振动作用下增长比例最大,但整体增长幅度较小,如图 10 所示。

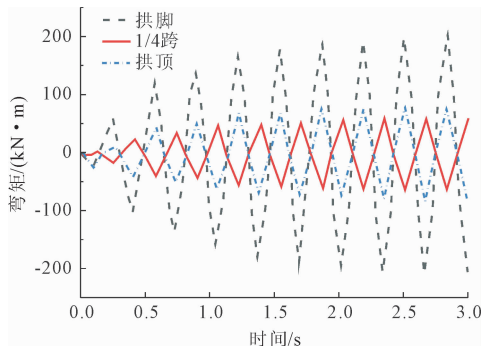


图 10 弯矩时程曲线图

综上所述,桩基的旋挖钻孔和振动沉管施工过程中对旧桥的内力影响程度较小,主要是拱脚处的轴力和弯矩值有一定增长幅度,因此在施工监测过程中,建议采用振弦式应变计对拱脚等关键部位进行应变实时监测,并据此推算结构的内力响应,并结合振动速度监测和外观巡查,对施工振动影响进行综合判断,保证旧桥的运营安全。

5 加固维修方案分析

我国于 1970 年开始研究旧桥的加固技术^[8-9]。国内外研究表明,既有拱桥的联合作用效应是非常大的,既有石拱桥通过维修加固能满足现代桥梁的服务水平^[10-11]。而钢筋混凝土拱桥在有缺陷情况下的加固改造可以良好地提升桥梁的承载能力水平^[12-14]。泉州大桥建成至今已接近 40 年,在最新一次 2021 年 10 月的全桥检测评估中,按分层综合法评定为 3 类,即桥梁“有中等缺损,尚能维持正常使用功能”。

桥梁主要病害主要存在于①主拱圈:拱背上存在 8 处纵向裂缝,总长 9.15 m;1 处横向裂缝,总长 0.6 m;全桥拱肋存在 15 处混凝土剥落露筋,总面积 0.476 m²。②拱上结构:盖、托梁上存在 30 处混凝土剥落露筋,总面积 1.204 m²,腹拱圈存在 6 处横向裂缝,总长 37 m。③桥面板:全桥空心板存在 108 处砼剥落露筋,总面积 2.9 m²;50 处破损、脱落和胀裂,总面积 0.618 m²。

针对上述病害,制定了相应的加固维修方案。其中,对于托梁的加固方案变化较大,将其作为此次加固维修工程中的重点分项部分。由于旧桥人行道板(将原有混凝土板更换为预制 UHPC 板)的主要承载构件为托梁,在运营过程中,托梁表面出现了严

重的混凝土剥落露筋现象,其承载安全系数不足。后期由于与新桥拼宽的要求,旧桥有一侧人行道上需要摆放花箱当作分隔带,改变了原有设计状态下承担人群荷载的要求,一定程度上增加了托梁的负担。目前有以下两种布置方案。花箱方案 1:花箱长、宽、高都为 50 cm,加土后每个重量 165 kg,间隔 1.5 m 布置,共 525 副;花箱方案 2:花箱长 1.2 m,宽、高都为 50 cm,加土后每个重 450 kg,在桥上连续 50 m 的范围内布置 41 副。托梁的承载能力在现有加固维修的方案下是否满足要求,关系到行人的生命安全和桥梁运行的可持续性,因此重点针对该项加固措施进行分析。

对托梁的加固方式主要分为单独加设钢板、同时加设钢板和钢斜撑两种,如图 11 所示。



图 11 托梁加固现场照

针对以上构造以及承载荷载的不同情况,建立有限元分析局部模型,如图 12 所示。

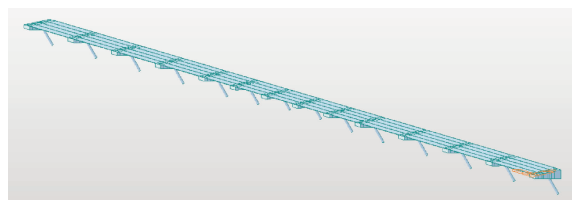


图 12 托梁局部模型

总共分析 6 种工况下的托梁受力状况,具体如表 1 所示。可以看出,增加斜撑后比未加斜撑时,在对应荷载下位移分别减少 23.20%、22.20%、20.80%;最大拉应力分别减少 50%、54.50%、53.80%。

增加钢斜撑有利于同时减少位移和拉应力,但同时也会增加工程成本。在同等情况下,优先选用花箱方案 1 的方式对结构的影响程度最低。另外,应考虑雨季等气候状况会增加花箱重量。而混凝土最大拉应力为 1.7~2.0 MPa,为避免混凝土表面开裂,需要控制好人行道板上的荷载,避免加载过大荷载造成安全隐患。

表1 托梁受力分析

工况	加固措施	最大位移/mm	最大拉应力/MPa	对应荷载
1	未加固	0.69	1.62	人群荷载
2	未加固	0.54	1.15	花箱方案1
3	未加固	0.72	1.32	花箱方案2
4	加斜撑	0.53	0.81	人群荷载
5	加斜撑	0.42	0.52	花箱方案1
6	加斜撑	0.57	0.64	花箱方案2

6 结论

(1) 临近的桩基施工振动对泉州大桥旧桥的位移和内力影响有限,但竖直方向振动显著,需持续监测关键部位,确保结构安全。

(2) 基于实测振动数据进行的桥梁动力分析结果表明,桥梁桩基的施工振动对旧桥的位移、内力影响程度较小。在施工过程中需要保持对旧桥的持续监测和定期外观检查,尤其针对1/4跨的动位移极值和拱脚内力等参数需要重点关注。

(3) 旧桥加固维修托梁时,增加钢斜撑能够有效降低托梁的位移和应力,对于未加斜撑的托梁部位,需要控制好人行道板上的荷载,避免荷载值过大造成安全隐患。

(4) 加固维修完成后,应建立精细的荷载管理制度,严格控制人行道板等加固部位的荷载,防止超载导致的结构损伤,保障桥梁加固效果及长期运营安全。

参考文献:

[1] 杨红全,杨兴. 改扩建水中新建承台对邻近旧桥基础的影响分析[J]. 公路,2024,69(07):278-284.

[2] 金生吉,慕安鑫,毕博,等. 某新建桩基近接施工对毗邻地铁区间隧道的影响[J]. 中外公路,2023,43(03):191-197.

[3] 李智彦,丁振明. 钻孔灌注桩施工对邻近桥桩基影响的数值模拟[J]. 公路交通科技,2013,30(04):70-75,93.

[4] 郑华堂. 桥梁桩基施工与邻近高铁运营相互影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[5] 徐略勤,杨忠友,周水兴,等. 钢筋混凝土拱桥加固施工次序方案及效果评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(06):8-15.

[6] 刘帅. 连拱桥加固施工过程数值模拟与监控控制研究[D]. 重庆:西华大学,2018.

[7] Bierbauer J W, Eiseman J A, Fazal F A, et al. System simulation with MIDAS[J]. AT & T Technical Journal, 2014,70(01):36-51.

[8] 杨文渊,徐进. 桥梁维修与加固[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

[9] 王福敏,肖贤德,连启滨. 桥梁加固技术的应用与研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会,重庆市交通委员会. 中国公路学会桥梁和结构工程学会2001年桥梁学术讨论会论文集. 人民交通出版社,2001:6.

[10] Zhao Mengzhi, Chen Fengjin, Chai Jinyi, et al. Analysis and evaluation on strengthening and widening of a catenary stone arch bridge with solid spandrels[J]. Advanced Materials Research, 2013,838-841:1042-1047.

[11] Yuan Shuai, Chen Weizhen, Yang Fan, et al. Reinforcement analysis of rigid hangers for existing old arch bridges: a case study of ling bridge[J]. International Journal of Steel Structures,2019,19(06):1743-1754.

[12] Ademović N. Structural assessment & strengthening of the first single-arch RC bridge in Sarajevo, BIH[J]. Engineering Structures, 2021,235:112002.

[13] Yang Jun, Chen Rui, Zhang Zhongya, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of damaged RC arches strengthened with ultra-high performance concrete[J]. Engineering Structures,2023,279:115611.

[14] 吴应雄,郑泽炜,颜桂云,等. 远场长周期地震动下桩-土-层间隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(12):11-22.