

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202209026



# 明代石拱桥永昌桥的动力特性 及其抗震性能分析

马宇坤, 淳庆

(东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为研究明代三孔石拱桥的抗震性能,建立永昌桥的三维有限元模型,并分析其动力特性、振型分解反应谱和地震时程,得出固有频率、模态振型、地震作用效应、地震位移,以及地震应力响应。结果表明:三孔石拱桥的第3阶扭转振型频率与前两阶平动振型频率相差不大;在抗震设防烈度为7度、E1和E2地震作用下,三孔石拱桥受力最危险的是雁翅桥台与次孔拱券交接处、分水尖与次孔拱券交接处,其他拱脚、拱券和拱顶桥面也易发生拉裂破坏。

**关键词:** 明代三孔石拱桥; 动力特性; 抗震性能; 抗震加固; 永昌桥

**中图分类号:** U 448.322.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)03-0336-10

## Analysis of Dynamic Characteristics and Seismic Performance of Yongchang Stone Arch Bridge in Ming Dynasty

MA Yukun, CHUN Qing

(School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance of the 3 holes stone arch bridge in Ming Dynasty, a 3-dimensional finite element model of Yongchang Bridge was established, and its dynamic characteristics, mode decomposition response spectrum and seismic time history were analyzed. The natural frequency, mode shape, seismic action effect, seismic displacement, and seismic stress response were obtained. The results show that there is little difference between the 3rd torsional mode frequency and the 1st-2nd translational mode frequencies of the 3 holes stone arch bridge. Under the E1 and E2 seismic action with the 7 degrees seismic fortification intensity, the most dangerous force parts of the 3 holes stone arch bridge are the junction of the wild goose wing abutment and the secondary arch, and the junction of the water diversion tip and the secondary arch. Other arch feet, arches and arch crown decks are also vulnerable to tensile damage.

**Keywords:** 3 holes stone arch bridge in Ming Dynasty; dynamic characteristic; seismic performance; seismic strengthening; Yongchang Bridge

石拱桥是中国古代桥梁的基本形式之一,是我国建筑遗产的重要组成部分,以取材方便、造型美观等优点得到了广泛应用。明代开始,随着砖石结构技术的发展,石拱桥的营造技术变得先进和成熟,保留至今的许多明代石拱桥仍在使用中。但许多石拱桥由于年久失修、荷载增加等原因,已出现明显的残损病害,严重威胁到桥梁的结构安全。石拱桥具有质量分布不集中、桥面不水平等特点,在地震作用下的响

**收稿日期:** 2022-09-26

**通信作者:** 淳庆(1979-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事历史建筑保护、结构安全评估的研究。E-mail: cqj1979@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52078111)

应与建筑结构、梁式桥梁等其他结构类型的响应均显著不同. 考虑到大多数明代石拱桥位于抗震设防区, 为了保障其安全使用, 保护其历史价值、艺术价值和科学价值, 迫切需要研究中国古代石拱桥的动力特性及抗震性能, 为该类型文化遗产的保护提供科学依据.

Behnamfar 等<sup>[1]</sup>采用离散元法对伊朗 3 座铁路石拱桥在地震作用下的倒塌进行了模拟; Gönen 等<sup>[2]</sup>对土耳其某石拱桥进行环境振动测试和模态识别, 并采用有限元方法对其进行非线性静力分析、非线性动力分析和增量动力分析, 最后, 评估石拱桥的抗震特性; Bayraktar 等<sup>[3]</sup>采用有限元方法研究了地基土非线性特性对砖石砌体半圆拱桥地震损伤机理的影响; Demirel 等<sup>[4]</sup>结合有限元微观模型和极限分析原理, 提出适用于干砌石拱桥的抗震性能评估方法, 并以土耳其某干砌石拱桥为例进行评估应用; Aytulun 等<sup>[5]</sup>利用模态识别对土耳其某石拱桥有限元模型进行修正, 并对其进行抗震评估; Bayraktar 等<sup>[6]</sup>采用试验方法得出适用于中东地区砖石拱桥建筑遗产的频率、阻尼比和振型的求解公式. 杜义欣等<sup>[7]</sup>采用有限元软件、反应谱法对金水桥石拱结构的抗震性能进行分析; Hua 等<sup>[8]</sup>采用有限元方法对不同砌筑形式的中国古代石拱桥的倒塌模式及承载能力进行研究.

由于中国古代石拱桥的形制构造和材料特性与国外石拱桥存在显著差异, 而针对中国典型石拱桥的抗震性能研究却鲜有报道, 本文以明代石拱桥的代表永昌桥为例, 对明代石拱桥的动力特性及抗震性能进行研究.

### 1 永昌桥概况

永昌桥地处江苏省南京市秦淮源头的溧水区宝塔路, 始建于明万历年间, 为纵联分节三孔石拱桥, 东西走向. 永昌桥现状, 如图 1 所示.

永昌桥形制典型, 是明代石拱桥的重要代表之一, 其造型优美、线条简洁、轻巧素雅、工艺精湛, 桥上各部分构件如护拱石、分水尖、拱券石等加工比较精细. 2017 年对永昌桥进行修缮, 目前其作为人行景观桥使用, 永昌桥测绘图, 如图 2 所示.



图 1 永昌桥现状  
Fig. 1 Current situation of Yongchang Bridge

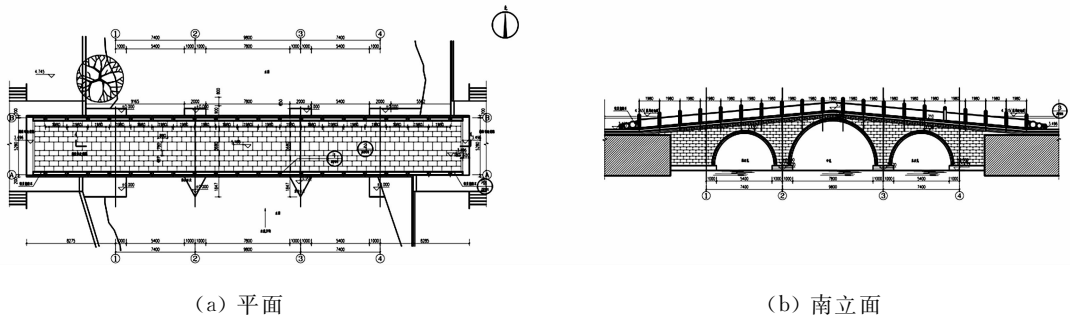


图 2 永昌桥测绘图(单位: m)  
Fig. 2 Survey diagrams of Yongchang Bridge (unit: m)

永昌桥长约 29.6 m, 宽约 5.7 m, 基本符合刘大可<sup>[9]</sup>指出的石拱桥长与宽的关系. 永昌桥举架高约为 1.3 m, 为桥长的 4.4%, 基本接近“三孔桥以下或桥长 10 丈以内: 6% 桥身直长”的原则. 中孔矢高(矢高为分水尖至孔顶端下口高度)约 4.4 m, 孔宽约 8.2 m; 次孔矢高约 3.1 m, 孔宽约 5.8 m;  $l$ (中孔):  $l$ (河宽) = 1.0 : 3.6,  $l$  为长度, 次孔宽比中孔宽小 2.4 m, 符合“按河口实际宽度及使用功能核定”的原则. 分水金刚墙宽度为 2.0 m, 基本符合分水金刚墙宽度较中孔宽 50% 或略小的原则. 中孔矢高与弦长之半比值为 1.10, 次孔矢高与弦长之半比值为 1.16, 券形为双心圆, 基本符合文献<sup>[10]</sup>比值为 1.10 的规定. 因此, 永昌桥各部分尺寸和形制基本符合官式石桥的尺度比例, 是典型的明代三孔石拱桥.

### 2 动力特性分析

在精确测绘和现场检测的基础上, 采用 ANSYS 2020 R2 商业有限元软件对永昌桥进行有限元数值模拟, 分析其动力特性.

2.1 材性分析和荷载取值

永昌桥为石砌体结构,砌体材料主要包括石材和石灰粘接剂. 石材的抗压强度检测采用回弹法,根据 GB/T 50315—2011《砌体工程现场检测技术标准》<sup>[11]</sup>,现场随机选择 10 块石材,对每块石材均匀布置 5 个弹击点,并进行回弹测试,初步判定石材的抗压强度是 7.5 MPa;石灰粘结剂的抗压强度检测采用回弹法,现场均匀布置 12 个弹击点,并进行回弹测试,判定石灰粘结剂抗压强度为 1.0 MPa. 据 GB 50003—2011《砌体结构设计规范》<sup>[12]</sup>,砌体材料强度计算式为

$$f_m=k_1f_1^a(1+0.07f_2)k_2,\quad f_{t,m}=k_3\sqrt{f_2},\quad f_{v,m}=k_5\sqrt{f_2}.$$

上式中: $f_m$  为砌体的抗压强度,MPa; $f_{t,m}$  为砌体的抗拉强度,MPa; $f_{v,m}$  为砌体的抗剪强度,MPa; $f_1$  为砌块抗压强度,MPa; $f_2$  为砂浆抗压强度,MPa; $a$  是与砌块高度和砌体类别有关的参数; $k_1,k_2,k_3,k_5$  均为系数.

通过计算,砌体抗压强度为 1.75 MPa,砌体抗拉强度为 0.14 MPa,砌体抗剪强度为 0.13 MPa,弹性模量为 1.524 GPa,密度为  $2\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,泊松比为 0.2. 采用弹塑性分析方法,砌体材料本构曲线,如图 3 所示. 图 3 中: $\sigma$  为应力; $\epsilon$  为应变. 根据地勘报告,原状土的压缩模量取 7 MPa,弹性模量取 5~10 倍的压缩模量值,此处取 40 MPa. 由于填土已充分固结,按线弹性进行简化处理.

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[13]</sup>和永昌桥荷载值<sup>[14]</sup>,永昌桥恒荷载的石板荷载为  $5.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,分项系数为 1.3;永昌桥活荷载的行人荷载为  $3.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,分项系数为 1.5. 采用 Rhino 7 三维造型软件建立适当简化的永昌桥模型,如图 4 所示.

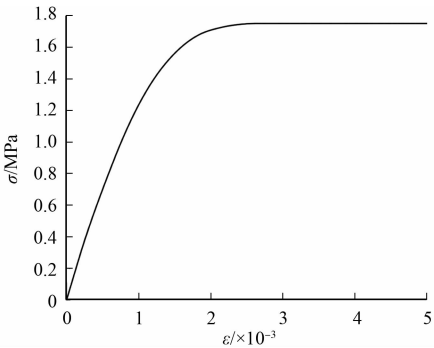
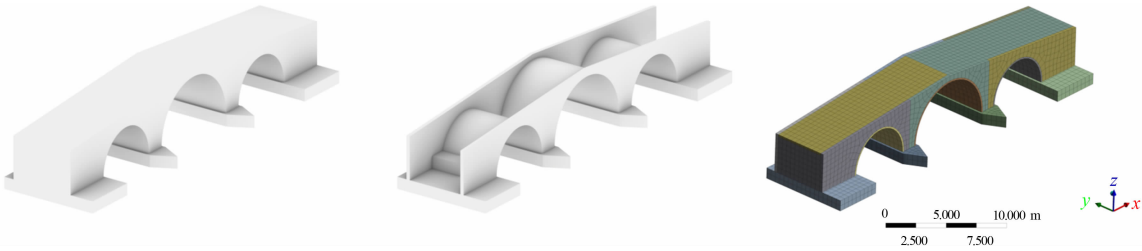


图 3 砌体材料本构曲线

Fig. 3 Constitutive curves of masonry materials



(a) 整体几何模型

(b) 砌体部分几何模型

(c) 有限元模型

图 4 永昌桥模型

Fig. 4 Model of Yongchang Bridge

永昌桥模型采用 7 323 个 SOLID 186 六面体单元以模拟石砌体. 该单元有 20 个节点,每个节点有 3 个自由度,可以很好地模拟材料的弹塑性行为. 永昌桥建模时,将砂浆和砌体作为一个整体输入,整体单元的综合材料参数根据砌体规范取值. 考虑到填土已经固结,砌体与填土的相互作用关系简化为固定连接. 建模不考虑残损缺陷及桥面石栏杆的影响(2017 年修缮永昌桥时,修补了该桥的残损缺陷,增加了桥面石栏杆).

2.2 动力特性

为研究永昌桥的动力特性,对其进行模态分析以确定结构的固有频率和模态振型. 结构前 10 阶振型的固有频率及模态系数,如表 1 所示. 表 1 中: $f$  为自振频率; $\delta$  为模态系数; $x$  为桥长方向(东西方向); $y$  为垂直桥长方向; $z$  为竖直方向; $x_{rot}$  为绕桥长方向的扭转; $y_{rot}$  为绕垂直桥长方向的扭转; $z_{rot}$  为绕竖直方向的扭转.

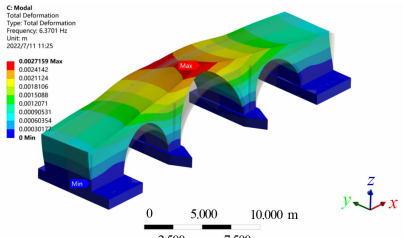
由表 1 可知:永昌桥第 1 阶振型为垂直桥长方向为主的平动,自振频率为 6.370 08 Hz(图 5(a));第 2 阶振型为沿桥长方向为主的平动,自振频率为 6.483 78 Hz(图 5(b));第 3 阶振型为绕竖直方向的单节点扭转,自振频率为 6.797 59 Hz(图 5(c));第 4 阶振型为绕竖直方向 2 节点扭转,固有频率为 7.319 73 Hz(图 5(d));第 5 阶振型为绕竖直方向伸缩,固有频率为 8.691 97 Hz(图 5(d));第 6 阶振型为绕竖直方向 3 节点扭转,固有频率为 9.503 78 Hz(图 5(e));第 7 阶振型为竖直方向伸缩,固有频率

表 1 结构前 10 阶振型的固有频率及模态系数

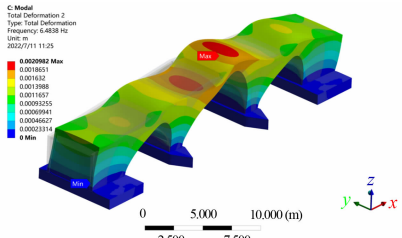
Tab. 1 Natural frequencies and modal coefficients of 1st-10th modes of structure

振型阶数	$f/\text{Hz}$	$\delta$					
		$x$	$y$	$z$	$x_{\text{rot}}$	$y_{\text{rot}}$	$z_{\text{rot}}$
1	6.370 08	0.000 465	1.000 000	0.002 120	0.177 976	0.001 327	0.147 834
2	6.483 78	1.000 000	0.000 084	0.000 499	0.000 440	0.574 644	1.000 000
3	6.797 59	0.000 868	0.002 845	0.002 635	0.003 291	0.002 155	0.056 873
4	7.319 73	0.000 763	0.424 703	0.006 650	0.019 274	0.005 649	0.063 477
5	8.691 97	0.000 112	0.000 027	1.000 000	1.000 000	0.645 103	0.000 096
6	9.503 78	0.000 117	0.000 128	0.001 902	0.001 854	0.004 748	0.007 192
7	11.444 00	0.000 137	0.000 006	0.644 946	0.645 030	0.421 491	0.000 136
8	11.699 60	0.265 995	0.000 009	0.021 626	0.021 612	0.714 097	0.265 978
9	12.221 40	0.032 221	0.000 457	0.036 312	0.036 036	1.000 000	0.032 142
10	12.322 10	0.000 696	0.038 982	0.017 016	0.003 202	0.001 357	0.006 462

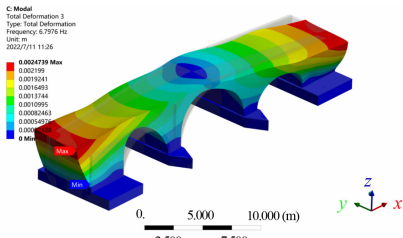
为 11.444 00Hz(图 5(f));第 8 阶振型为绕中孔垂直桥长方向扭转,固有频率为 11.699 60 Hz(图 5(h));第 9 阶振型为次孔竖直方向伸缩,固有频率为 12.221 40 Hz(图 5(i));第 10 阶振型为绕竖直方向 4 节点扭转,固有频率为 12.322 10 Hz(图 5(j)).



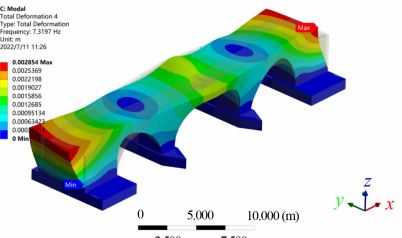
(a) 第 1 阶振型



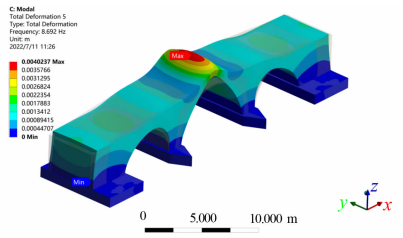
(b) 第 2 阶振型



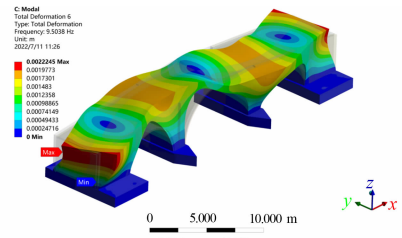
(c) 第 3 阶振型



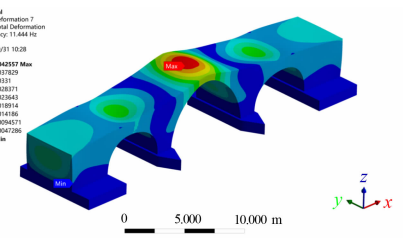
(d) 第 4 阶振型



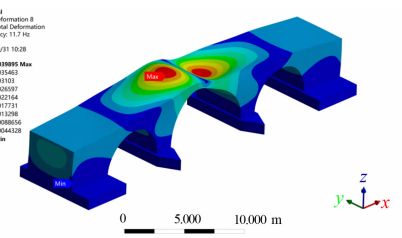
(e) 第 5 阶振型



(f) 第 6 阶振型



(g) 第 7 阶振型



(h) 第 8 阶振型



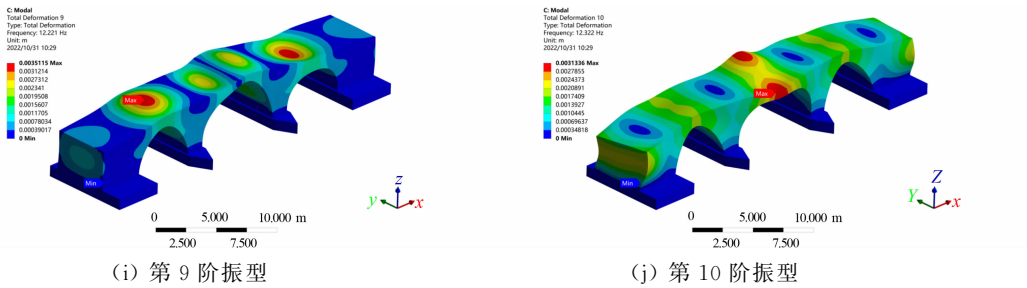


图 5 永昌桥的前 10 阶模态振型

Fig. 5 1st-10th modes shapes of Yongchang Bridge

根据模态分析,永昌桥在  $x,y,z$  方向的有效参与质量比例为  $152.88:165.07:1.00$ ,即参与  $x,y$  方向的有效参与质量在同一数量级,远大于  $z$  方向的有效参与质量。

由表 1 和图 5 可知:永昌桥的第 1 阶振型为垂直桥长方向的平动,第 2 阶振型为沿桥长方向的平动,振动方向正交,第 3 阶振型为扭转振动;扭转振动振型频率与平动振型频率比值为 0.937,相差不大,可以认为扭转振型与平动振型在永昌桥结构振动中的贡献相当。

3 抗震性能分析

结构抗震分析方法主要有底部剪力法、振型分解反应谱法和时程分析法 3 种。底部剪力法仅考虑第 1 阶振型的贡献,且将结构简化为单质点体系,不符合石拱桥的结构工程实际。根据 CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》<sup>[15]</sup>,永昌桥作为古代石拱桥,不属于规范定义的规则桥梁,因此,分别采用振型分解反应谱法和时程分析法对永昌桥进行抗震分析。

3.1 振型分解反应谱法

振型分解反应谱法是指多自由度弹性体系的最大地震反应分解为独立的等效单自由度体系的最大地震反应,从而求得对应于每一个振型的作用效应,再按一定的法则将每一个振型作用效应组合成总的地震作用效应。

南京市溧水区抗震设防烈度为 7 度,地震动峰值加速度为  $0.098\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,阻尼比  $\xi=0.05$ 。场地类别为 II 类。地震加速度谱曲线,如图 6 所示。图 6 中: $T$  为周期;特征周期值  $T_g=0.35\text{ s}$ ;衰减指数  $\gamma=0.9$ ;斜率调整系数  $\eta_1=0.02,\eta_2=1.00$ ;  $S$  为加速度反应谱值; $S_{\max}$  为加速度反应谱峰值。

考虑到永昌桥的文物价值及损坏后的不可恢复性,将其抗震设防分类定为乙类,E1 地震(工程场地重现期较短的地震作用,对应第 1 级设防标准)和 E2 地震(工程场地重现期较长的地震作用,对应第 2 级设防水准)作用下的调整系数分别为 0.61,2.20,则该桥的地震动加速度峰值( $A$ )分别为  $0.598,2.156\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , $S_{\max}$  分别为 1.34,4.85。

根据 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》<sup>[16]</sup>,水平地震作用分项系数取 1.4,竖向地震分项系数取 0.5。在 ANSYS Workbench 软件中的分析状态为反应谱分析,采用振型组合方法(SRSS)对振型进行组合。在静荷载的基础上叠加相应的加速度谱曲线,得到结构的响应。

永昌桥  $x,z$  方向联合 E2 地震作用下的应力云图,如图 7 所示。由图 7 可知:第 1 主应力超限最严重,故比较第 1 主应力结果与抗拉强度,从而判定是否产生拉裂。

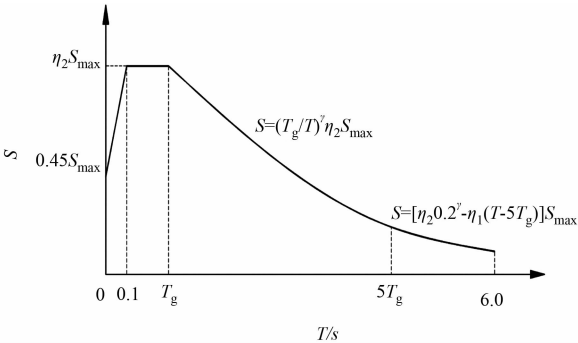
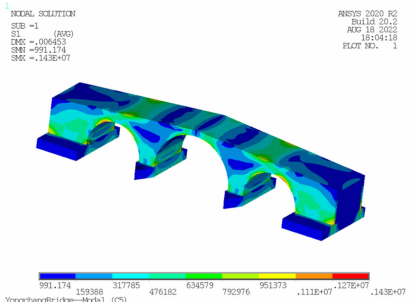


图 6 地震加速度谱曲线

Fig. 6 Curves of seismic acceleration spectrum



(a) 第 1 主应力

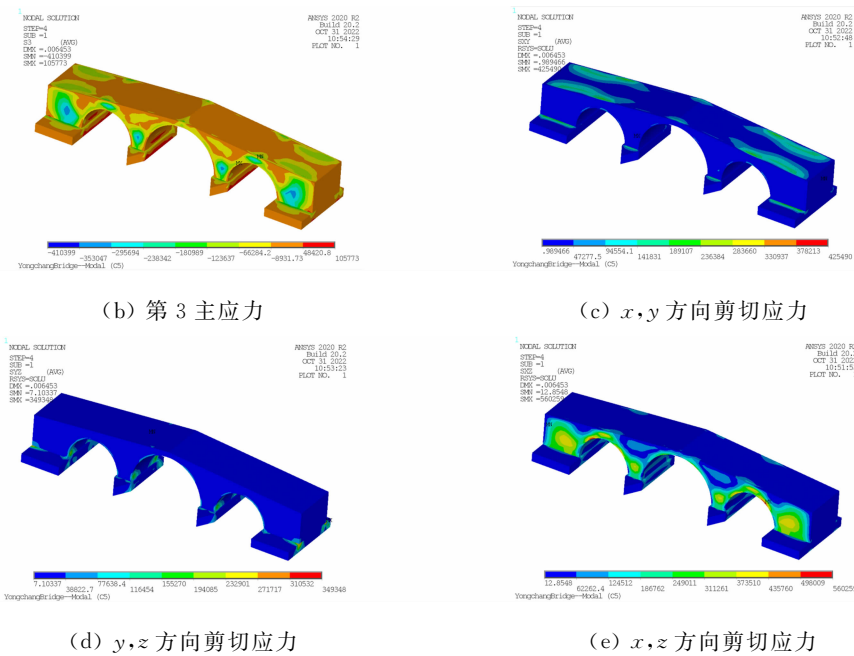


图 7 永昌桥在  $x,z$  方向联合 E2 地震作用下的应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of Yongchang Bridge under  $x,z$  direction combined E2 seismic action  
永昌桥在 E1,E2 地震作用下的反应谱分析结果,如图 8,9 所示.

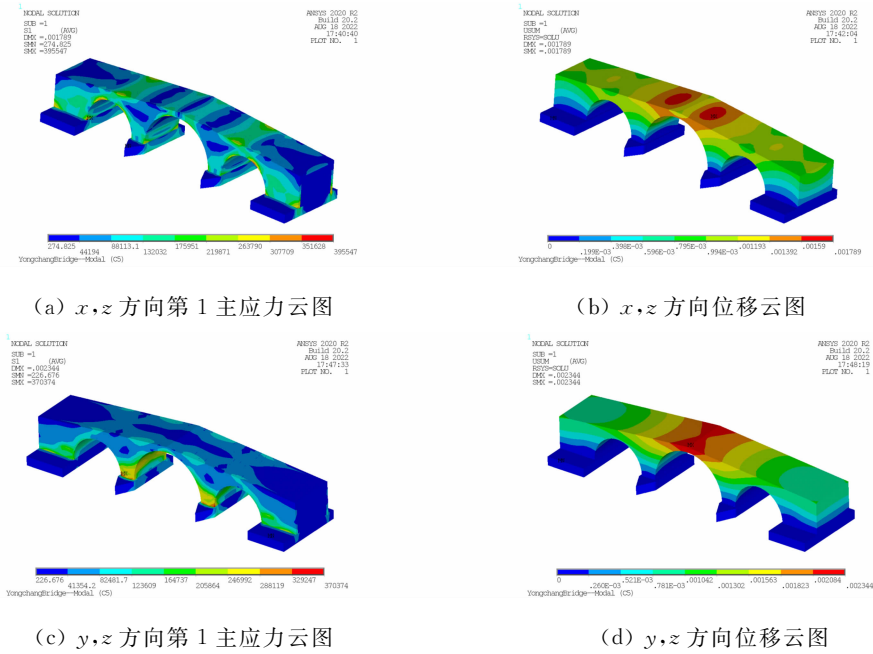
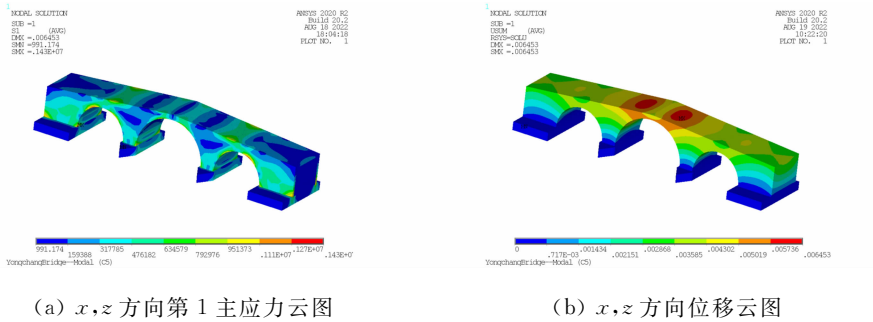
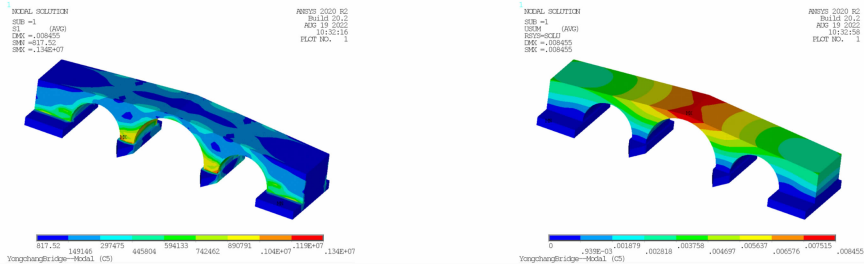


图 8 永昌桥在 E1 地震作用下的反应谱分析结果

Fig. 8 Response spectrum analysis results of Yongchang Bridge under E1 seismic action





(c)  $y,z$  方向第 1 主应力云图 (d)  $y,z$  方向位移云图

图 9 永昌桥在 E2 地震作用下的反应谱分析结果

Fig. 9 Response spectrum analysis results of Yongchang Bridge under E2 seismic action

永昌桥的最大第 1 主应力和最大位移,如表 2 所示.表 2 中: $\sigma_{1,\max}$  为最大第 1 主应力; $d_{\max}$  为最大位移. $x,z$  方向的最大第 1 主应力出现在雁翅桥台与次孔拱券交接处,最大位移出现在中孔顶部的桥面处; $y,z$  方向的最大第 1 主应力出现在分水尖与次孔拱券交接处,最大位移出现在中孔顶部的桥面处;各拱脚在地震作用下均出现了较明显的应力集中; $x,z$  方向的最大第 1 主应力比  $y,z$  方向的大,而  $y,z$  方向的最大位移比  $x,z$  方向的大;4 种工况下最大第 1 主应力值均已超过了现场实测的材料抗拉强度 0.141 MPa.因此,在地震作用下,永昌桥受力最危险的是雁翅桥台与次孔拱券交接处、分水尖与次孔拱券交接处,其他拱脚也易发生拉裂破坏.

表 2 永昌桥的最大第 1 主应力和最大位移

Tab. 2 Maximum 1st principal stress and maximum displacement of Yongchang Bridge

地震作用	$x,z$ 方向		$y,z$ 方向	
	$\sigma_{1,\max}/\text{MPa}$	$d_{\max}/\text{mm}$	$\sigma_{1,\max}/\text{MPa}$	$d_{\max}/\text{mm}$
E1	0.396	1.789	0.370	2.344
E2	1.427	6.453	1.336	8.455

3.2 时程分析法

时程分析法是将无规律的地震波以外的荷载施加给结构,经过逐步积分法求解运动微分方程,得出不同时刻地震作用下结构不同位置的应力、位移、变形等,统计后分析地震全过程中结构的最大应力.

三向 EL Centro 地震波,如图 10 所示.因此根据 CJJ 166—2011《城市桥梁抗震设计规范》<sup>[15]</sup>, $A$  分别为 0.059,0.216  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .因此,将图 10 中标准的三向 EL Centro 地震波加速度乘以不同的系数可转换为符合抗震设防烈度为 7 度、E1 和 E2 地震下的地震加速度,地震波时长为 58.3 s,时间间隔为 0.02 s,共 2 690 个荷载步.永昌桥在 E1,E2 地震作用下的响应,如图 11,12 所示.

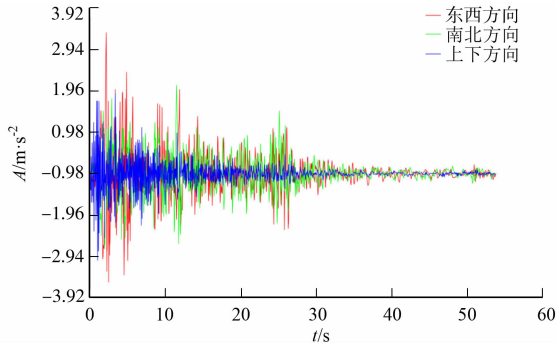
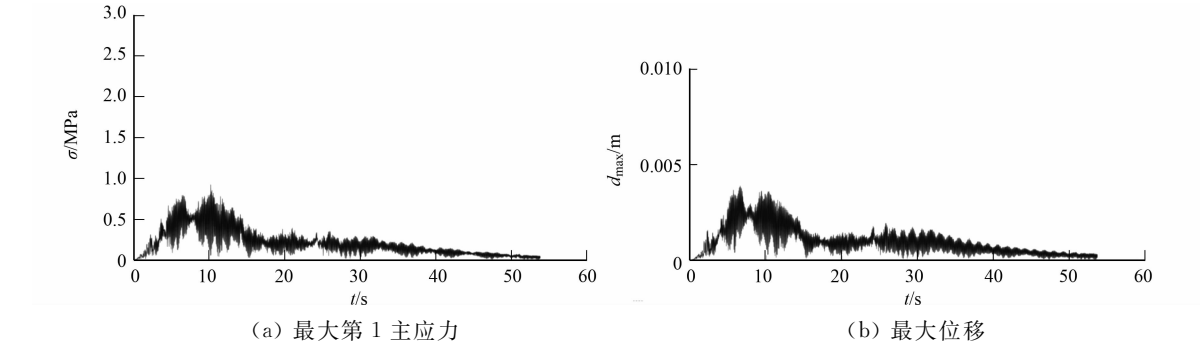


图 10 三向 EL Centro 地震波

Fig. 10 3-directional EL Centro seismic waves



(a) 最大第 1 主应力 (b) 最大位移

图 11 永昌桥在 E1 地震作用下的响应

Fig. 11 Response of Yongchang Bridge under E1 seismic action

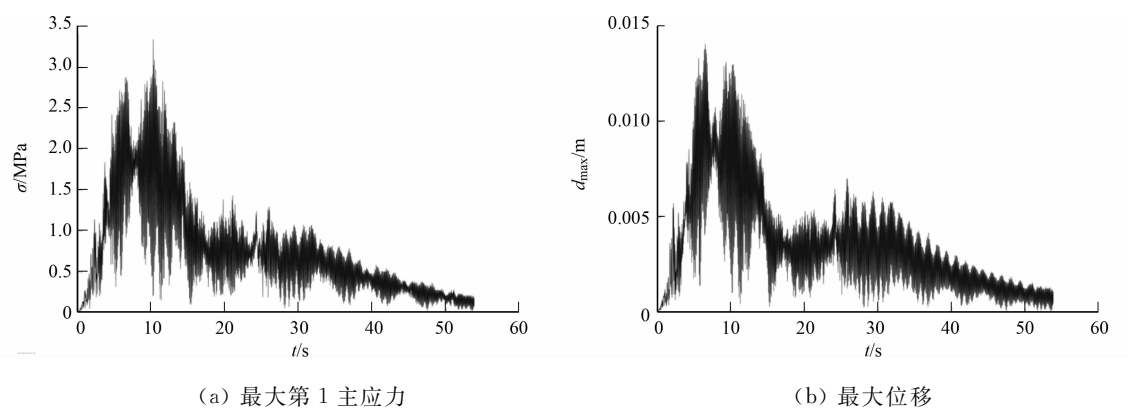


图 12 永昌桥在 E2 地震作用下的响应

Fig. 12 Response of Yongchang Bridge under E2 seismic action

响应结果表明,最大第 1 主应力出现在 10.2 s,最大位移出现在 6.56 s.在这两个时刻,永昌桥在 E1,E2 地震作用下最大第 1 主应力和最大位移云图,如图 13,14 所示.

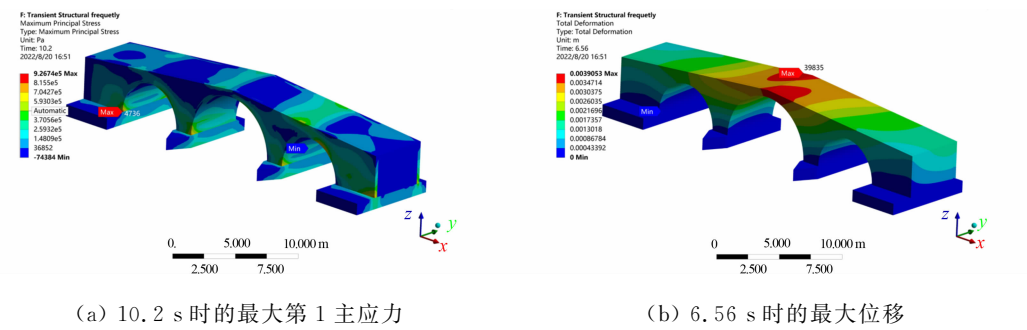


图 13 永昌桥在 E1 地震作用下最大第 1 主应力和最大位移的云图

Fig. 13 Nephograms of Yongchang Bridge under action of E1 seismic action at 1st maximum principal stress and maximum displacement

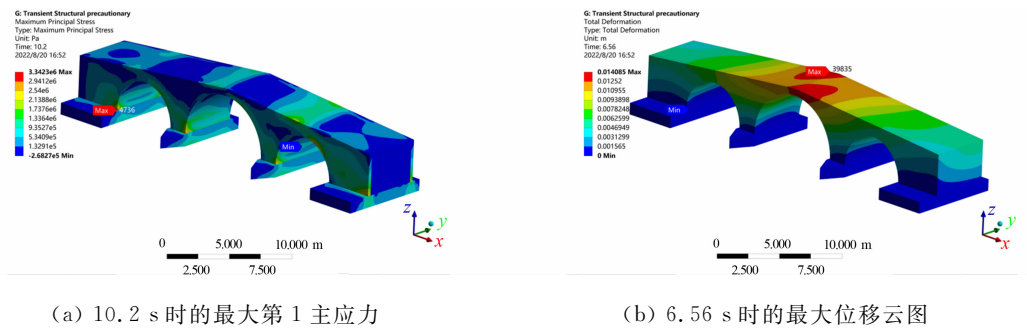


图 14 永昌桥在 E2 地震作用下最大第 1 主应力和最大位移的云图

Fig. 14 Nephogram of Yongchang Bridge under action of E2 seismic action at 1st maximum principal stress and maximum displacement

三向 EL Centro 地震波下永昌桥的最大第 1 主应力和最大位移,如表 3 所示.最大第 1 主应力出现在 10.2 s 时,雁翅桥台南面与次孔拱券交接处(节点编号 4 736);最大位移出现在 6.56 s 时,中孔拱券顶部北侧桥面(节点编号 39 835).

由表 3 可知:永昌桥在 E1,E2 地震下最大第 1 主应力值均已超过了现场实测的材料抗拉强度 0.141 MPa,且比振型分解反应谱法结果更加危险.因此,在地震作用下,永昌桥受力最危险的是雁翅桥台南面与次孔拱券交接处,拱券和拱顶桥面也易发生拉裂破坏,这与振型分解反应谱法的结果可以互相印证,亟需对永昌桥采取抗震

表 3 三向 EL Centro 地震波下永昌桥的最大第 1 主应力和最大位移

Tab.3 Maximum 1st principal stress and maximum displacement of Yongchang Bridge under 3-directional EL Centro seismic waves		
地震作用	$\sigma_{1,max}/\text{MPa}$	$d_{max}/\text{mm}$
E1	0.927	3.905
E2	3.342	14.085



保护措施.

永昌桥在 E1,E2 地震作用下第 1 主应力响应和位移响应,如图 15,16 所示.

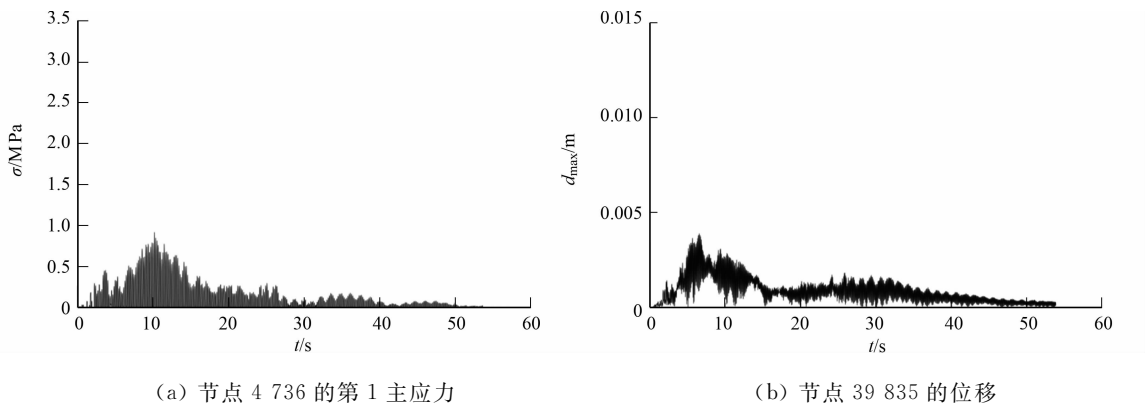


图 15 永昌桥在 E1 地震作用下第 1 主应力响应和位移响应

Fig. 15 1st principal stress response and displacement response of Yongchang Bridge under E1 seismic action

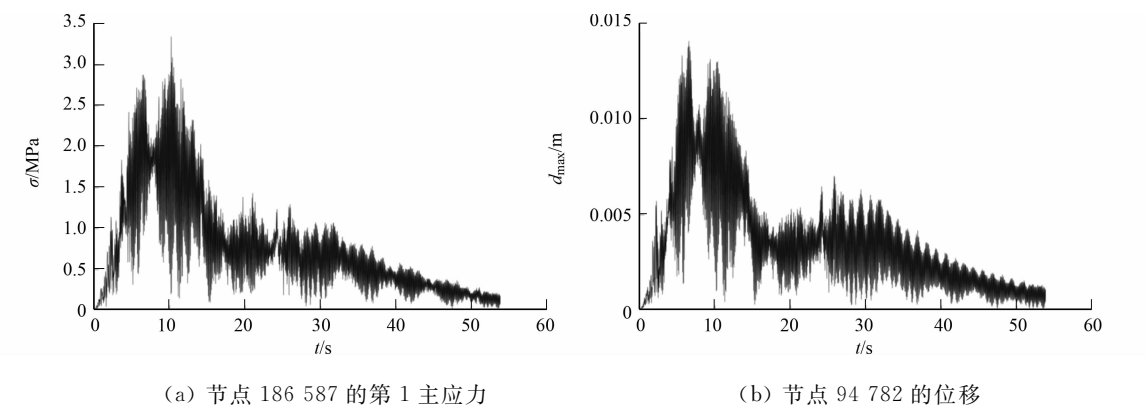


图 16 永昌桥在 E2 地震作用下第 1 主应力响应和位移响应

Fig. 16 1st principal stress response and displacement response of Yongchang Bridge under E2 seismic action

3.3 抗震加固建议

通过对永昌桥的抗震性能分析计算,发现结构发生破坏的原因主要是由于最大第 1 主应力超过限值,根据计算结果对抗震加固提出以下 2 点建议.

- 1) 对抗拉强度不足的区域,采用局部置换砂浆加固的方式,加强石拱桥砌体结构的承载力,其中,进行置换的石灰基砂浆可以选择掺胶石灰砂浆、天然水硬性石灰砂浆和石灰-火山灰质材料砂浆.
- 2) 在开裂区域采用注浆法加固修缮的方式,使用改性环氧树脂这种高分子材料对砌体进行注浆加固,必要时可以沿水平灰缝埋设不锈钢钢筋.

4 结论

永昌桥是明代石拱桥的典型案例,对该类型建筑遗产的动力特性和抗震性能进行研究是制定其抗震加固方案的基础.通过对永昌桥的动力特性和抗震性能分析,得出了以下 4 点有价值的结论.

- 1) 以永昌桥为代表的三孔石拱桥结构的第 1,2 阶振型均为平动,振动方向正交,第 3 阶振型为扭转振动,扭转振型与平动振型频率相差不大.
- 2) 当以沿桥长方向水平地震为主时,三孔石拱桥受力最危险的是雁翅桥台与次孔拱券交接处,第 1 主应力数值均超过了砌体的抗拉强度;当垂直桥长方向水平地震为主时,受力最危险的是分水尖与次孔拱券交接处,第 1 主应力超过了砌体的抗拉强度,其余拱脚也会发生不同程度的拉裂破坏.
- 3) 在三向 EL Centro 地震波作用下,三孔石拱桥受力最危险的是雁翅桥台与次孔拱券交接处,第 1 主应力数值远超砌体的抗拉强度,拱券和拱顶桥面也易发生拉裂破坏.
- 4) 在同等地震强度下,采用时程分析法对永昌桥进行抗震计算,得到最大应力和位移均比振型分解反应谱法的更大,因此,对三孔石拱桥使用时程分析法进行抗震验算比振型分解反应谱法更为保守.

考虑到此类明代石拱桥的历史价值、艺术价值、科学价值及受震害后的不可恢复性,推荐分别使用两种方法进行分析后,采用更为保守的结果.在对该类型石拱桥进行抗震加固时,应遵循文物保护的相关要求,选择符合文物保护原则且技术合理可行的抗震加固方法.

参考文献:

[1] BEHNAMFAR F,AFSHARI M. Collapse analysis and strengthening of stone arch bridges against earthquake[J]. International Journal of Architectural Heritage,2013,7(1):1-25. DOI:10. 1080/15583058. 2011. 606594.

[2] GÖNEN S,SOYÖZ S. Seismic analysis of a masonry arch bridge using multiple methodologies[J]. Engineering Structures,2021,226(1):111354. DOI:10. 1016/j. engstruct. 2020. 111354.

[3] BAYRAKTAR A,HÖKELEKLI E. Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges[J]. International Journal of Damage Mechanics,2021,30(3):431-452. DOI:10. 1177/1056789520974423.

[4] DEMIREL I,ALDEMIR A. Simplified approach for seismic performance assessment of dry-joint masonry arch bridges[J]. Buildings,2021,11(7):313. DOI:10. 3390/buildings11070313.

[5] AYTULUN E,SOYOZ S,KARCIOGLU E. System identification and seismic performance assessment of a stone arch bridge[J]. Journal of Earthquake Engineering,2022,26(2):723-743. DOI:10. 1080/13632469. 2019. 1692740.

[6] BAYRAKTAR A,TÜRKER T,ALTUNIKK A C. Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges[J]. Construction and Building Materials,2015,75(1):234-241. DOI:10. 1016/j. constrbuildmat. 2014. 10. 044.

[7] 杜义欣,刘晶波,聂建国,等. 金水桥石拱结构的抗震分析[J]. 建筑结构,2005(8):43-45,51. DOI:10. 19701/j. jzjg. 2005. 08. 011.

[8] HUA Yiwei,CHUN Qing,JIN Hui. Research on collapse modes and bearing capacities of ancient chinese stone arch bridges built with different stone arrangements[J]. International Journal of Architectural Heritage,2022,16(4):1-24. DOI:10. 1080/15583058. 2020. 1812763.

[9] 刘大可. 中国古建筑瓦石营法[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[10] 梁思成. 梁思成全集(第六卷)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体工程现场检测技术标准: GB/T 50315—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[14] 张时琦,淳庆. 明代石拱桥永昌桥的加固修缮技术研究[J]. 文物保护与考古科学,2019,31(6):54-61. DOI:10. 16334/j. cnki. cn31-1652/k. 2019. 06. 007.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁抗震设计规范: CJJ 166—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与市政工程抗震通用规范: GB 55002—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)