

某木拱廊桥安全性鉴定和抗震评估

杨 佐¹, 叶灵鹏²

(1. 浙江省建设工程质量检验站有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028)

摘要: 针对一座建于2015年的木拱结构仿古景观廊桥, 通过现场勘查与有限元模拟相结合的方法, 对其安全性和抗震性能进行系统评估。该廊桥采用传统工艺建造, 主拱由“三节苗”和“五节苗”系统构成稳定结构, 桥墩及桥台为钢筋混凝土与石构混合结构, 上部为木构廊屋。重点分析了结构在对称与非对称荷载下的力学响应, 该廊桥的结构体系安全性等级评定为A级, 抗震性能满足相关规范要求。研究内容为类似木拱廊桥的维护与评估提供技术参考。

关键词: 木拱廊桥; 安全性鉴定; 抗震评估

中图分类号: TU366

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0258-06

Safety Appraisal and Seismic Evaluation of a Timber-arched Corridor Bridge

YANG Zuo¹, YE Lingpeng²

(1. Zhejiang Construction Engineering Quality Inspection Station Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China)

Abstract: In response to a timber-arched structural antique landscape corridor bridge built in 2015, its safety and seismic performance are systematically evaluated through a combination of on-site investigation and finite element simulation. The bridge is constructed by traditional craftsmanship, its main arch is composed of a stable structure formed by the interweaving of "three-section-sapling" and "five-section-sapling" systems, its piers and abutments are a mixture of reinforced concrete and stone structures, and its superstructure is a timber-frame corridor house. The focus is on analyzing the mechanical response of the structure under symmetric and asymmetric loads. The results show that the structural system of the bridge is rated as Class A in terms of safety, and the seismic performance meets the requirements of the relevant codes, which also provides a technical reference for the maintenance and evaluation of similar timber-arched corridor bridges.

Keywords: timber-arched corridor bridge; safety appraisal; seismic evaluation

0 引言

某木拱结构仿古景观廊桥约建于2015年, 全桥共5跨, 总长为203.75 m, 桥面宽5.4 m。木拱架按传统工艺制作, 采用由3根圆木连接成的“三节苗”和由五根圆木连接成的“五节苗”互相穿插而成。上部廊屋为木结构, 下部桥墩和桥台为钢筋混凝土框架和石构结构。廊桥效果图和实景图分别如图1和图2所示。因使用时间较长, 结构构件存在一定损伤, 需评估该廊桥的安全性和抗震性能。由于木拱廊桥的安全性鉴定和抗震鉴定无现行可依据规范, 本文通过结合现场勘查情况和有限元计算结果, 对该廊桥进行安

全性鉴定和抗震评估, 研究结果对该廊桥的后续维护和管理具有指导意义, 也可类似木拱廊桥项目的评估与保护提供有益的参考与借鉴。



图1 廊桥效果图

1 项目概况

根据原设计图纸及其他相关资料^[1], 该廊桥主要由桥墩、桥台、拱架和廊屋等组成。桥墩和桥台为钢筋混凝土框架和石构相结合的结构, 廊屋及拱架

收稿日期: 2025-10-19

作者简介: 杨佐(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构检测、鉴定研究。



图2 廊桥实景图

均为木结构,其中拱架由端竖排架、三节苗、五节苗、剪刀苗和端平苗等组成(见图3)。所用木材三节苗、五节苗选用铁杉或优质老杉木,强度不小于TC15,大小牛头选用进口花梨木或非洲大红檀,强度不小于TC17,剪刀苗、端竖排架等选用优质老杉木,强度不小于TC13,廊屋柱、梁、椽子、望板、封檐板、连檐等选用优质老杉木,牛腿、雀替、花篮柱垫等装修构件选用香樟木。

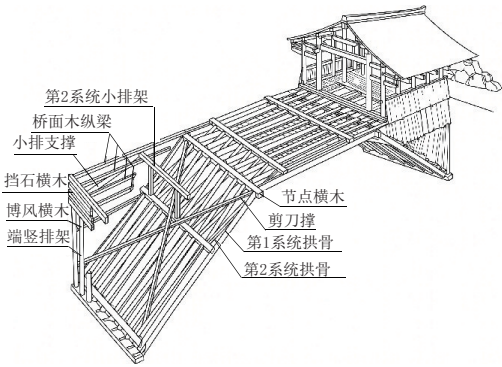


图3 廊桥基本结构图

1.1 拱架结构

三节苗系统为拱架的第1系统拱骨,由9组(1组包括2根斜苗和1根平苗)圆木与2根横串梁木(大牛头)组成,斜苗下端支承于桥台的垫苗石,上端通过大牛头与平苗连接,连接处用燕尾榫;五节苗系统为第2系统拱骨,由8组(1组包括2根下斜苗、2根上斜苗和1根平苗)圆木与4根横串梁木(上牛头和下牛头)组成,以三节苗作为主要支撑,在端排竖架与三节苗斜苗所构成的夹角内安放五节苗垫木。五节苗的下斜苗与三节苗斜苗呈交错布置,其下端抵住垫木,上端则插入下牛头,并与下牛头紧密连接,同时下牛头紧贴于三节苗斜苗表面。随后,将五节苗的上斜苗下端与下牛头相连,沿三节苗大牛头底部穿出,最终延伸至三节苗平苗的上部。在上斜苗的顶端安装上牛头,并与五节苗的平苗相接。五节苗系统所用材料尺寸相对较小,且长度不等。三节苗与五节苗2个系统相互穿插、压叠,通过紧密编搭,将各自原本不稳定的单元组合为整体稳定且超静定的结构体系,从而构成木拱廊桥的核心承载构架,提高了桥梁的承载力^[1](见图4、图5)。

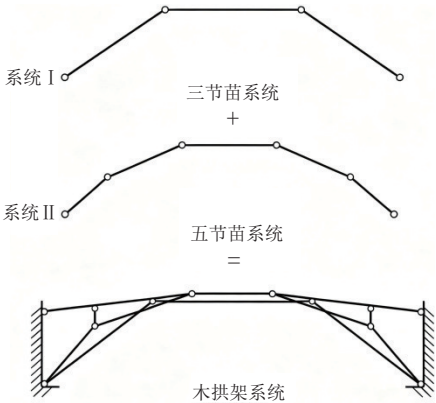


图4 拱架系统组成



图5 三节苗、五节苗系统

另外为加强廊桥抵抗横向水平力的能力,避免产生侧移现象,在两天门柱至“五节苗下牛头”和“三节苗大牛头”之间用两圆木交叉支撑形成两组剪刀苗系统(见图6)。端平苗也称桥板苗,为使端平苗平稳支撑于拱架,在端平苗跨中位置设一横梁,横梁下方两端各设1根短木支撑于五节苗下牛头,1根斜苗支撑于桥台,形成1个“人”形木撑,俗称“马腿”。再将端平苗架设在此横梁之上,其一端连接五节苗的上牛头,另一端则与将军柱横梁相接。随后在端平苗上方横向铺设桥面板,形成完整的桥面。端平苗作为连接牛头与将军柱的重要构件,将桥体主要受力部分连为整体,显著提升结构抵抗横向水平推力的能力^[2]。



图6 剪刀苗系统

本廊桥共5跨,其中第1、5跨结构布置相同,第2、4跨结构布置相同。第1跨和第5跨的跨度为22 m,拱高约4.64 m,拱脚宽约6.7 m;第2跨和第

4跨的跨度为28 m,拱高约5.76 m,拱脚宽约7 m;第3跨跨度最大,为39 m,拱高约7.91 m,拱脚宽度约为7.6 m。其中第3跨主拱构件结构布置情况、构件长度及截面尺寸等详如图7所示。

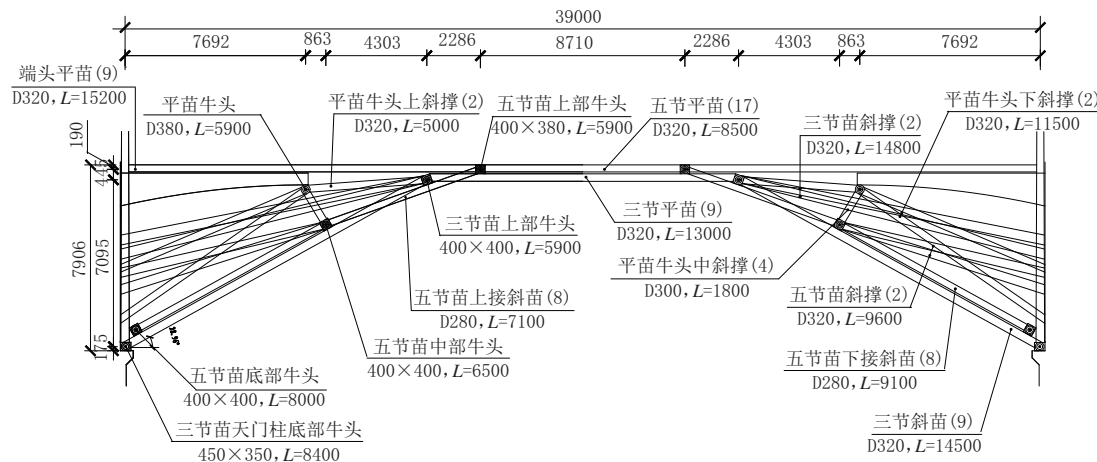


图7 第3跨主拱结构示意图(单位:mm)

1.2 廊屋结构

廊屋兼具服务与结构双重功能,既是为公众提供避雨与社交的场所,其恒载也是使三节苗和五节苗2套拱骨系统紧密咬合,形成协同受力不可或缺的一环。本文项目中廊屋的典型剖面图如图8所示,采用抬梁式木构架,最上层梁上立脊瓜柱,承担脊檩,单榀共设4柱,外侧檐柱间距约为5.4 m。屋面南北向找坡,在廊桥跨中位置设局部加高的桥中阁。

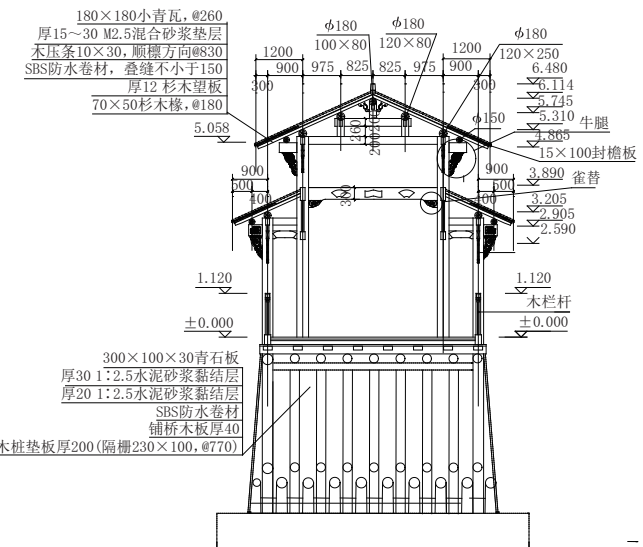


图8 廊屋剖面图[单位:mm(尺寸);m(高程)]

2 结构承载力复核

采用MIDAS Gen软件复核本文廊桥的结构承载力^[3-4],以跨度最大的第3跨为例简述计算结果。

2.1 建立模型

2.1.1 单元选取

本文木拱廊桥主要是由苗杆通过榫卯连接组

成,苗杆主要受到的荷载为弯矩、轴力和剪力,采用梁单元对该廊桥进行建模模拟。

2.1.2 半刚性榫卯节点

木拱廊桥的苗杆通过牛头相互连接成整体,苗杆与牛头之间的连接通过榫卯节点实现。榫卯连接是一种半刚性连接,能传递一定的弯矩。榫卯节点的连接刚度与木材种类、榫卯节点的制作工艺、节点尺寸等有关。在参考已有研究数据的基础上,取木拱廊桥三节苗及五节苗系统榫卯节点刚度为300 kN·m/rad。

2.1.3 苗杆与牛头的接触关系

木拱廊桥的结构特点是三节苗与五节苗编织在一起,形成编木拱,三节苗与五节苗之间的这种编织关系通过牛头实现。三节苗的大牛头与五节苗的上斜苗相接触,五节苗的上牛头与三节苗平苗接触,五节苗下牛头以及底部枋木与三节苗的斜苗相接触。这种接触关系是一种只受压关系,如果在受拉状态下会脱开,不能传递拉力。在软件中可以采用间隙单元模拟。木拱廊桥建造完成时,牛头与苗杆之间一般呈紧密接触状态,即在建立有限元模型时,可以令初始的缝隙值为0,接触刚度值可以取较大值来模拟这种类似硬接触的行为。

2.1.4 木材材料参数

木材是一种典型的正交各向异性材料,用工程弹性常数表达的正交各向异性材料的应力应变关系如式(1)所示,若要确定木材的应力应变关系,需要知道9个工程常数:弹性模量 E_1 、 E_2 、 E_3 ,泊松比 ν_{12} 、 ν_{23} 、 ν_{31} ,以及剪切模量 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{31} 。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

表 1 拱架材料参数表

木材	顺纹弹性模量 E_t /MPa	横纹弹性模量/MPa		剪切模量/MPa			泊松比			抗弯 / MPa	顺纹抗拉 / MPa	顺纹抗压 / MPa
		径向 E_2	弦向 E_3	G_{12}	G_{23}	G_{31}	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}			
杉木	9 000	900	500	1 500	400	600	0.1	0.35	0.1	15	9.0	13

2.1.6 荷载工况

木拱廊桥受到的荷载主要包括恒载与活载,其中恒载为拱架自重、廊屋、屋架自重以及桥面板自重,活载主要是行人荷载^[6]。拱架自重由程序自动计算。廊屋每榀屋架底部有一根垫木,可假设廊屋恒载最终通过横木传递到每根苗杆,将屋面恒载以及廊柱、屋架等构件荷载折算为恒荷载 1.5 kN/m²;另外考虑屋面活荷载为 0.7 kN/m²,分别通过计算转化为集中荷载作用在每榀屋架垫木与苗杆的接触位置。桥面恒荷载取 2.0 kN/m²,桥面活荷载取 3.5 kN/m²,转化成线荷载作用在与桥面板接触的端平苗及五节苗平苗上。恒荷载分项系数取 1.2,活荷载分项系数取 1.4。根据实际使用情况,考虑 2 种活荷载布置形式,1 种为活荷载满跨均布布置,另 1 种为活荷载半跨均布布置。第 3 跨主拱模型如图 9 所示。



图 9 第 3 跨廊桥主拱模型

2.2 主要计算结果

2.2.1 对称荷载工况

对称荷载作用下,三节苗最大的轴力为-208.8 kN,发生在三节苗牛头上斜撑相对应的平苗,三节苗平苗的最大弯矩为 19.2 kN·m,三节苗斜苗的最大弯矩为 20.5 kN·m(见图 10);五节苗最大轴力为-78.0 kN,发生在五节苗下斜苗,最大弯矩为 54.7 kN·m,发生在五节苗平苗(见图 11)。在荷载基本组合作用下,三节苗系统与五节苗系统构件的最大拉应力约为

木拱廊桥的主要材料为杉木,由于未能获得现场旧木料的性能参数,根据现有的规范及资料^[5],廊桥拱架的弹性模量、剪切模量、泊松比及苗杆强度设计值等参数取值详如表 1 所示。

2.1.5 边界条件

据现场查勘可知,廊桥拱架仅搁置在桥台上,无其他可靠的锚固加强措施,因此拱脚边界条件可以视为简支。另外,端竖排架与桥台紧挨在一起,桥台为其提供一个纵向约束,在模型中可通过在端竖排架设置沿桥体的纵向约束来模拟。

11.6 MPa,最大压应力约为-12.3 MPa,发生在五节苗平苗上,接近材料强度值。

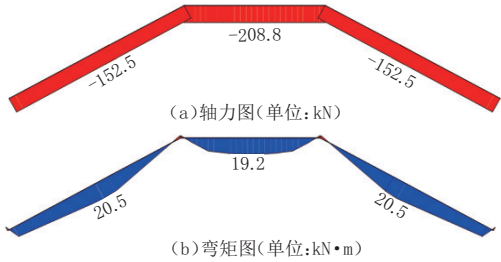


图 10 对称荷载工况下第 3 跨三节苗内力图

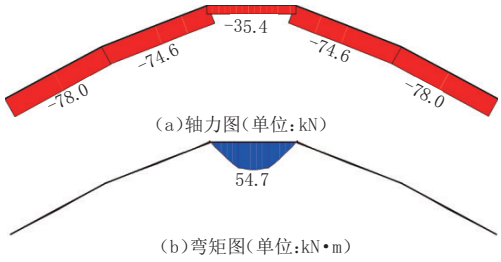


图 11 对称荷载工况下第 3 跨五节苗内力图

在对称荷载工况的标准组合作用下,主拱整体位移呈对称分布,位移云图如图 12 所示。最大挠度发生在跨中与屋架立柱相接触的五节苗平苗上,考虑支座挠度后跨中最大挠度约 55 mm,五节苗平苗跨度为 8.5 m,挠度接近跨度的 1/150。

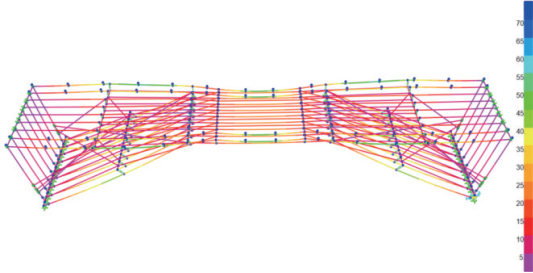


图 12 对称荷载工况下第 3 跨主拱结构位移云图(单位:mm)

2.2.2 非对称荷载工况

非对称荷载作用下,三节苗最大的轴力为-173.0 kN,发生在三节苗平苗,最大弯矩为25.5 kN·m,发生在活荷载作用侧的三节苗下斜苗,无桥面活荷载作用侧的三节苗斜苗弯矩也较大,为23.9 kN·m(见图13);五节苗最大轴力为-149.0 kN,发生在活荷载作用侧的五节苗下斜苗底部,最大弯矩为44.9 kN·m,发生在五节苗平苗;另外,活荷载作用侧的五节苗上斜苗的弯矩为6.8 kN·m(见图14)。在荷载基本组合作用下,三节苗系统与五节苗系统构件的最大拉应力约为9.1 MPa,最大压应力约为-10.52 MPa,发生在五节苗平苗上,小于材料强度值。

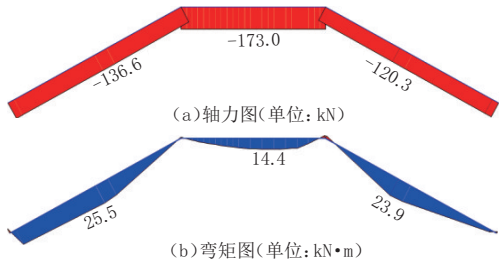


图13 非对称荷载工况下第3跨三节苗内力图

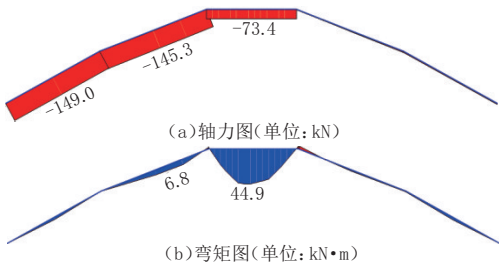


图14 非对称荷载工况下第3跨五节苗内力图

在非对称荷载工况的标准组合作用下,主拱的位移云图如图15所示。可以看出,主拱呈非对称变形,活荷载作用侧的下挠大于无活荷载作用侧。非对称荷载作用下的结构变形要大于对称荷载工况,最大挠度发生在活荷载作用侧三节苗斜苗上,考虑支座挠度后跨中最大挠度约为61 mm,三节苗斜苗跨度为12.8 m,挠跨比为1/210,计算挠度满足要求。

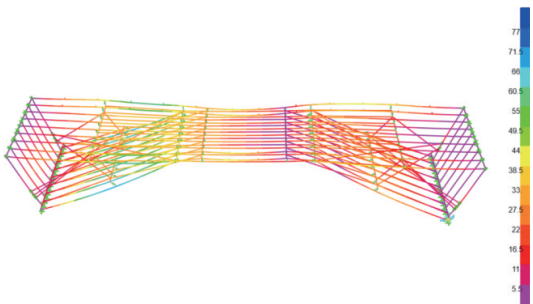


图15 非对称荷载作用下第3跨主拱结构位移云图(单位:mm)

3 安全性鉴定

本文项目廊桥的安全性鉴定无现行规范可依据,且廊桥是按历代工匠的实践经验设计建造,与现行的可靠性理论有一定差别。因此鉴定和评估内容参考《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB/T 50165—2020)^[7](简称古建标),按勘查项目、构件和结构体系划分为3个层次,逐层进行。

3.1 勘查项目安全性鉴定

本文项目廊桥结构的残损点勘查按古建标进行,后由相关单位完成残损点的有效修缮工作后,廊桥结构残损等级评定为a'级。

3.2 构件安全性鉴定

承重构件的安全性鉴定,按残损勘查项目和承载能力验算项目,分别评定构件的残损等级和承载能力能力,并取其中最低一级作为构件的安全性等级。

根据3.1节构件残损等级评定为a级;根据第3节,当桥面活荷载取3.5 kN/m²时,若考虑结构重要性系数为1.2,则按承载能力评定第3跨五节苗平苗的安全性等级评定为b级,其余构件评定为a级。

3.3 结构体系安全性鉴定

按所含构件集的安全性等级和结构体系整体牢固性等级综合评定结构体系的安全性。根据表2结果,结构体系整体牢固性等级评定为B级,构件集安全性等级评定为A级,则结构体系的安全性等级评定为A级。

表2 结构体系评级

对象	评定项目	检查结果	评级	依据
构件集	主要构件集	b级构件含量不多于30%	A	表6.4.3
	一般构件集	b级构件含量不多于35%	A	表6.4.4
结构整体牢固性	结构布置及构造	结构布置合理,形成完整体系	A	表6.4.5
	整体倾斜	未发现沿结构平面外的倾斜	A	表6.4.5
	局部倾斜	未发现柱头与柱脚间的相对位移	A	表6.4.5
	梁柱节点的连接	拉结构造基本完好	B	表6.4.5
	构架间的连系构造	纵向梁、枋及其连系构件现状基本完好	B	表6.4.5
	榫卯完好程度	基本完好	B	表6.4.5

注:依据《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB/T 50165—2020)。

4 抗震评估

根据设计资料和相关规范^[8],该工程位于 6 度抗震设防区,设计基本地震加速度值为 0.05g,设计地震分组为第 1 组,设计使用年限为 50 年。根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)^[9],本文项目廊桥抗震设防分类为丁类。同时参照《公路桥梁抗震性能评价细则》(JTG/T 2231-02—2021)^[10],木拱廊桥作为特殊复杂桥梁可按该细则进行评价。结合工程实际设防目标定为:在 E1(多遇)地震作用下,一般不受损坏或不需修复可继续使用。评估依次分为定性评价与详细评价两个阶段。

4.1 定性评价

定性评价侧重于场地与构造细节核查。

(1)场地地质灾害评价:桥址位于 6 度区,依据细则标准,场地可判定为不液化且无地表断裂风险,地质条件良好。

(2)抗震构造评价:桥台为端竖排架提供了有效的纵向约束。根据安全性鉴定,结构体系评定为 A 级,未见明显倾斜,节点拉结构造完好,结构整体连接紧密。

4.2 详细评价

详细评价以构件抗震承载力和变形的“能力/需求比”检算为主。依据细则,该拱桥属非规则桥梁,需基于实际尺寸与刚度建立模型进行分析。本文廊桥的三节苗与五节苗通过半刚性榫卯节点相连,根据前述计算结果,在最不利非对称活荷载与恒载组合下,构件的最大应力值未超出材料强度限值。由于 6 度区 0.05g 地震作用产生的附加内力需求极小,现有构件的承载力储备(抗力能力)与荷载组合(需

求)之比大于 1.0,且跨中最大挠度满足规范要求。

4.3 评估结论

综合《公路桥梁抗震性能评价细则》(JTG/T 2231-02—2021)要求:该廊桥场地无地震地质灾害风险,节点连接紧密,结构体系安全性达 A 级。结构在不利荷载工况下的抗震能力/需求比满足要求,具备抵御本地区 6 度地震作用的能力,整体抗震性能满足要求。

5 结 语

通过有限元分析,本文木拱结构廊桥在得到有效修缮后,三节苗和五节苗系统的应力值接近或小于材料强度值,结构变形在允许范围内。参考《古建筑木结构维护与加固技术标准》(GB/T 50165—2020)和《公路桥梁抗震性能评价细则》(JTG/T 2231-02—2021),结构体系安全性等级评定为 A 级,结构整体安全可靠,并满足抗震性能要求。同时也验证了传统木拱结构的工程合理性,为同类桥梁的维护管理及性能评估提供了相关依据。

参考文献:

- [1] 吴卓珈.廊桥营造[M].北京:中国文史出版社,2015.
- [2] 蒋烨.中国廊桥建筑与文化研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [3] 张亮.木拱廊桥受力机理的模型试验研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [4] 欧加加.木拱廊桥受力机理的有限元分析[D].杭州:浙江大学,2014.
- [5] GB 50005—2017 木结构设计标准[S].
- [6] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
- [7] GB/T 50165—2020 古建筑木结构维护与加固技术标准[S].
- [8] GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准(2024年版)[S].
- [9] CJJ 166—2011 城市桥梁抗震设计规范[S].
- [10] JTG/T 2231-02—2021 公路桥梁抗震性能评价细则[S].