

文章编号: 1674-599X(2022)01-0063-07

## 大理某大跨度贯木拱桥仿真分析

赵聪<sup>1, 2</sup>, 陶忠<sup>1, 2</sup>, 戴金沙<sup>1, 2</sup>, 戴必辉<sup>1, 2, 3</sup>, 杨克文<sup>4</sup>, 孙俊<sup>5</sup>, 刘芳莲<sup>6</sup>

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2.云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500;  
3.西南林业大学 土木工程学院 云南 昆明 650500; 4.大理老艺人建设工程有限公司, 云南 大理 671000;  
5.云南建投建筑机械有限公司, 云南 昆明 650500; 6.西双版纳州民政局, 云南 西双版纳州 666100)

**摘 要:**新建的大理某大跨度人行木桥为采用传统榫卯节点连接的三跨贯木拱结构体系, 为验证该拱桥的结构安全性和舒适性, 利用SAP2000有限元软件对该结构进行了模态分析、静力分析, 对最不利荷载组合情况下的主要受压构件进行验算。研究表明: 在地震荷载和风荷载作用下, 人行桥具有良好舒适性, 避开了人行荷载谐波的基频范围, 不易发生明显的人致共振现象。风荷载不是控制结构安全性的主要因素。加支撑后的拱桥整体强度应力处于安全状态, 最大应力发生在拱脚附近区域。最不利荷载组合作用下, 主要构件承载能力满足要求。本工程的设计可供同类工程参考。

**关键词:** 贯木拱桥; 榫卯连接; 模态分析; 静力分析

**中图分类号:** TU366.2

**文献标志码:** A

## Numerical study on a large span timber arch bridge in Dali city

ZHAO Cong<sup>1,2</sup>, TAO Zhong<sup>1,2</sup>, DAI Jin-sha<sup>1,2</sup>, DAI Bi-hui<sup>1,2,3</sup>, YANG Ke-wen<sup>4</sup>, SUN Jun<sup>5</sup>, LIU fang-lian<sup>6</sup>

(1.Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2.Yunnan Institute of Seismic Engineering, Kunming 650500, China; 3.School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650500, China; 4.Dali Old Artist Construction Engineering Co., Ltd., Dali 671000, China; 5.Yunnan Jian Tou Construction Machinery Co., Ltd., Kunming 650500, China; 6.Civil Affairs Bureau of Xishuangbanna Prefecture, Xishuangbanna 666100, China)

**Abstract:** A new large-span timber footbridge located in Dali city was designed by three-span timber arch structure system connected by traditional mortise ten on joints. In order to prove the structural safety and comfortability of the arch bridge, the modal analysis and static analysis of the structure were conducted by using a finite element software SAP2000, the stability of main loaded members under the most unfavorable combined loading condition was checked. The analysis results show that the pedestrian bridge has good comfort under seismic load and wind load and avoids the fundamental frequency range of pedestrian load harmonic, such that the obvious phenomenon of syntony induced by walk hardly occurs. The wind load is not the main factor controlling the structure safety. The overall stress of the supported arch bridge is in a safe state, the maximum stress occurs near the arch foot. Under the worst combined loading condition, the main loaded components meet the safe requirements. The design of this project can provide a reference for similar engineering.

**Key words:** penetration wooden arch bridge; mortise and tenon connection; modal analysis; static analysis

由于历史文化遗产、文物保护和社会经济发展的需要, 传统木结构建筑将长期存在。榫卯连

接是西南地区古木建筑木结构的主要特点<sup>[1]</sup>, 这种连接方式使得各个节点刚柔并济<sup>[2]</sup>, 在地震力作用

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(51168025); 科技支撑计划课题(2013BAK13B01); 云南省教育厅科学研究基金项目(2019J0194)

作者简介: 赵聪(1996—), 男, 昆明理工大学硕士生。

下,通过榫卯间的摩擦滑移和体积变形耗散能量,可发挥出良好的抗震性能。

随着社会科技的进步,混凝土结构和钢结构发展迅速,绝大多数建筑采用钢筋混凝土结构<sup>[3]</sup>、钢木组合结构<sup>[4]</sup>等,采用木结构的新建仿古建筑愈来愈少。国内外学者在木结构节点的研究上取得了一定成果,昆明理工大学孙俊团队<sup>[5]</sup>研究了木结构榫卯节点的受力机理,借助木材嵌压理论,利用嵌压力与嵌压变形体积之间的关系,建立木结构榫卯节点弯矩-转角方程式。聂雅雯等人<sup>[6-8]</sup>通过振动台试验分析了1个两层传统穿斗式木结构房屋模型的破坏模式、动力响应、应变响应和耗能能力,还研究了传统木结构半榫、燕尾榫节点在改变木材种类、榫头宽度和是否安装黏弹性阻尼器情况下的耗能能力。

目前中国学者对木结构的研究大多停留在榫卯半刚性单节点或“两柱一梁”式框架抗震性能的研究上。由于新建的木结构仿古建筑比较少,木结构建筑抗震性能研究仍有空缺。本研究结合大理垒翠园风雨桥项目,介绍了其工程特点和计算分析。

## 1 工程概况

大跨人行木桥梁位于大理市苍山下洱湖畔,结构为三跨传统贯木拱结构,每跨由4组贯木拱结构通过横木连接而成,采用木材为楸木,垒翠园风雨桥如图1所示。木桥主要由主拱、拱上建筑、廊屋和基础4个部分组成,每跨由4组贯木拱结构通过横木连接而成,采用木材为楸木(胡桃楸)。拱结构上设置了廊桥,连通2座建筑。廊桥为禁止机动车通行的人行天桥,因此,整个结构按照人



图1 垒翠园风雨桥

Fig. 1 Leicuiyuan shelter bridge

行天桥设计规范<sup>[9]</sup>来执行。该桥全长约66 m,最大跨度为15.5 m,矢高为5.4 m,桥面结构宽度为5 m,桥墩采用钢筋混凝土浇筑而成,连接处将木结构与桥墩一起浇筑形成连接。

## 2 结构布置和构件截面

### 2.1 结构布置

拱结构杆件为直径300 mm的圆木,其余杆件为直径200 mm杆件,制作了实木1:10模型,如图2所示。桥上的廊屋不仅可以给行人提供方便,而且能增加桥梁重量,提高稳定性。拱结构对潮气腐蚀桥梁的问题有缓和作用。人行桥的布置图如图3所示。



图2 实木制作的1:10模型

Fig. 2 1:10 model made of solid wood

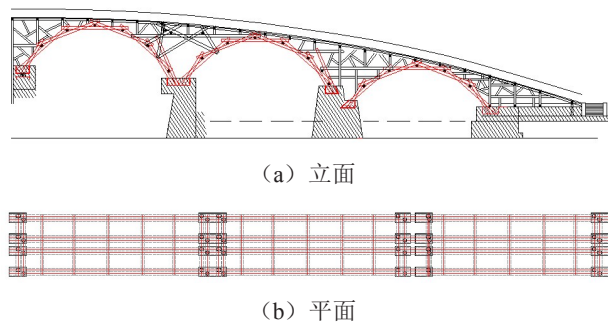


图3 人行木桥

Fig. 3 Layout of pedestrian wooden bridge

### 2.2 结构组成部分

贯木拱结构由2个系统的拱形结构组成,如图4所示,2个拱系统通过一根横向的木头贯穿相连为一个整体。

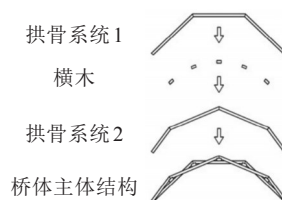


图4 贯木拱桥结构组成

Fig. 4 Structural composition of through timber arch bridge

对该木结构桥梁进行结构简化, 用SAP2000软件建立拱的计算模型, 结构简化的步骤为:

1) 去除拱桁架多余斜腹杆, 留下主要的竖杆和传递主要力的拱架杆;

2) 去除多余杆件的结构, 如图5~6所示的主要拱单元, 这2种拱系单元组成1组受力拱系, 并且在2根木材的交接节点处, 设置1根横向受力杆件, 连接其他的受力拱系如图5所示, 整个结构共有4组受力拱系。

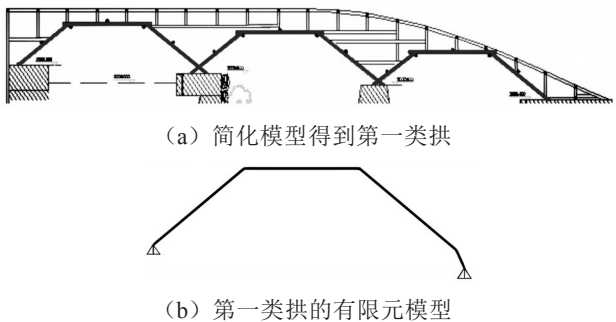


图5 第一类拱单元  
Fig. 5 The first kind of arch element

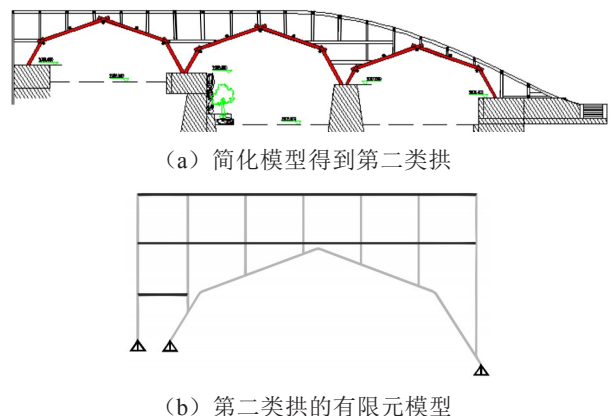


图6 第二类拱单元  
Fig. 6 The second kind of arch element

两类拱单元组合为1组受力拱系如图7所示。在实际结构中, 图7的圆点位置处设置1根横向杆件将两类拱单元耦合为1组受力拱系, 并与其余3组受力拱系连接。

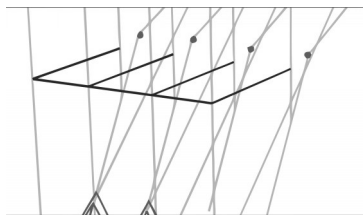


图7 两类拱系耦合为1组受力拱系  
Fig. 7 The two types of arch systems are coupled into a group of stressed arch system

2.3 连接形式

在本工程中, 通过1个穿插榫卯连接圆木拱肋组成主要受力拱系统, 如图8所示。拱肋1挖去穿插, 进入拱肋2凹槽的多余部分, 再将拱肋1穿插入拱肋2的凹槽, 小孔多余部分用塞木塞住。2个受力拱系的横木与2个拱系直接贯穿连接如图9所示。这种做法使得拱肋之间所受的力全部由榫卯节点承担, 在受力过程中, 由塞木同拱肋2杆卯口之间的摩擦力和拱肋1、拱肋2之间的摩擦力来抵抗拱肋杆上的轴向荷载, 一旦塞木脱落, 结构承载能力降低。若横木与拱系之间挤压密实, 则横木可以承担部分节点荷载。

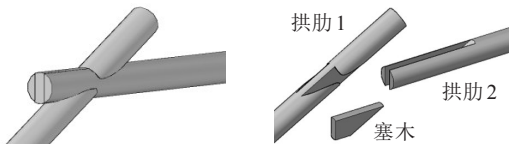


图8 拱肋榫卯连接  
Fig. 8 Mortise tenon connection of arch rib

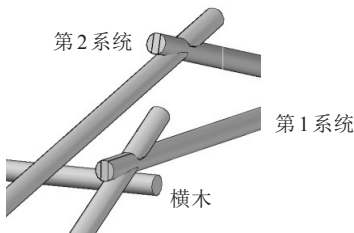


图9 两种拱系与横木连接示意  
Fig. 9 Schematic diagram of connection between two kinds of arch systems and crossbars

2.4 支座和边界约束

本工程的贯木拱结构直接嵌入现浇混凝土桥墩中。当拱结构与桥墩连接时, 为使得桥墩受力均匀, 在拱脚部位嵌入厚度为10 mm的钢板, 并在周围布置加强钢筋, 使得拱脚部位成为1个刚性槽口, 如图10所示。因此, 拱结构与桥墩之间的支座可以认为是刚性连接<sup>[10]</sup>。

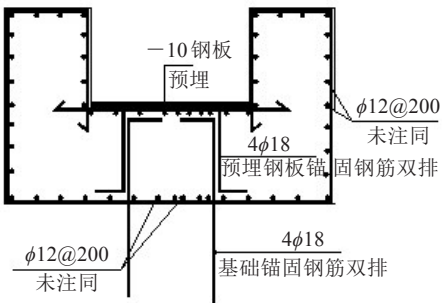


图10 拱脚与桥墩连接 (单位: mm)  
Fig. 10 Connection between arch foot and pier (unit: mm)



木拱桥的桥台与拱脚的连接还需要考虑到防水、防腐蚀。拱脚端部涂防腐材料。拱脚与基础为固接约束,每一榀受力拱系都嵌固入现浇混凝土桥墩当中。

### 3 结构计算分析

#### 3.1 计算方法

由于木结构的计算分析方法不成熟,缺乏准确的评判指标,需结合研究成果做出合理假设。该木结构桥梁多以楸木为结构主材,与钢结构或混凝土结构桥梁相比,更加有大跨、轻柔特点。大跨木结构人行桥的自振频率,若是落入了人行荷载谐波的基频范围内,极易产生显著的人致振动响应,甚至产生共振现象<sup>[1]</sup>,从而严重影响其使用性。考虑到工程复杂性,引入美国 Computers and Structures Inc(CSI)公司开发研制的通用结构分析与 SAP2000(v15)对该桥进行有限元分析。

由于桥的支座为钢筋混凝土墩台,刚度非常大,故只对桥梁的上部结构进行有限元建模。模型中的结构构件按照图纸进行布置,在明显薄弱部位增加了支撑<sup>[12]</sup>。在与桥墩相联的构件下端约束水平位移,桥面板和小青瓦屋面用无质量膜单元模拟,梁、柱、拱采用杆单元模拟。

结构自重根据定义的构件尺寸和材料容重由软件自行计算, SAP2000 计算分析模型如图 11 所示。按照面荷载的形式,施加附加恒荷载和附加活荷载,风荷载由程序按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)进行自动计算,地震质量根据结构自重、附加恒载和 50%活载计算。

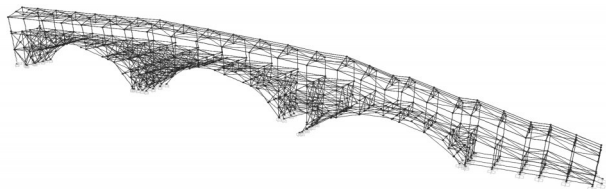


图 11 SAP2000 分析模型

Fig. 11 SAP2000 analysis model

#### 3.2 计算参数

本结构所用木材为楸木,通过材性试验,测得顺纹、径向、弦向的弹性模量分别为 11 580、890、430 MPa;顺纹、横纹的抗压强度分别为

35.2、4.60 MPa,木材顺纹的抗压性比横纹更好;泊松比为 0.3。木材容重取 7 kN/m<sup>3</sup>,廊坊瓦屋面永久荷载取 2.14 kN/m<sup>2</sup>,考虑走廊木制栏杆扶手和休息长椅等,桥面永久荷载合计取 1.35 kN/m<sup>2</sup>。

工程结构设计使用年限为 100 a,风荷载根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)的规定计算,基本风压取 0.45 kN/m<sup>2</sup>,走廊屋顶为坡度为 30°的双坡屋顶,迎风面体型系数取+0.2,背风面体型系数取-0.5,风振系数取 1.5,高度分布系数取 1.25(按 B 类场地,20 m 高度),桥身多孔,不进行风荷载计算。

根据抗震规范<sup>[13]</sup>的规定抗震设防烈度取为 8 度(0.2 G),第二组设计地震分组,第 III 类场地。

#### 3.3 模态分析

第一振型为平动,周期  $T_1=0.76$  s,频率为  $f_1=1.32$  Hz;第二振型为平动,周期  $T_2=0.658$  s,频率为  $f_2=1.52$  Hz;第三振型为平动,周期  $T_3=0.56$  s,频率为  $f_3=1.77$  Hz。综合结构前 3 个模态来看,人行桥具有良好舒适性,避开了人行荷载谐波的基频范围,振动周期相近。模型中分析了 300 个振型,结构前 15 阶周期、频率见表 1,结构前三阶振型和第十四、第十五阶竖向变形如图 12 所示。

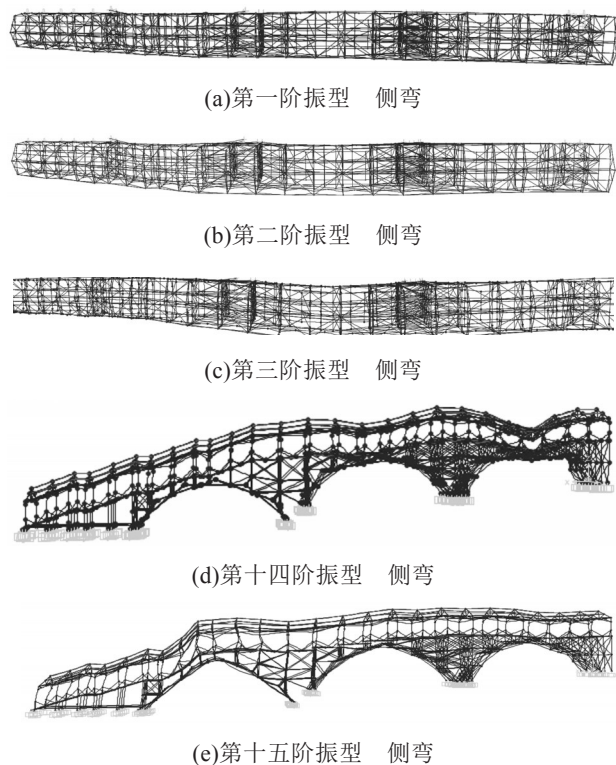


图 12 振型

Fig. 12 Vibration mode

表 1 周期频率  
Table 1 Periodic frequency

振型	周期/s	频率/Hz	方向
1	0.76	1.32	$U_y$
2	0.65	1.52	$U_y$
3	0.56	1.77	$U_y$
4	0.55	1.83	$U_x$
5	0.45	2.20	$U_y$
6	0.40	2.53	$U_y$
7	0.35	2.84	$U_x$
8	0.34	2.97	$U_y$
9	0.33	3.07	$U_y$
10	0.32	3.10	$U_x$
11	0.30	3.31	$U_y$
12	0.29	3.40	$U_x$
13	0.29	3.45	$U_y$
14	0.29	3.49	$U_z$
15	0.28	3.61	$U_z$

由前十五阶周期频率表 1 可知, 桥梁横向一阶自振频率为 1.32 Hz, 不处于人行横向第一阶简谐荷载频率 0.5~1.2 Hz 的范围内, 竖向自振频率 3.49 Hz 和 3.61 Hz 也不处于人行竖向第一阶简谐荷载频率 1.0~2.4 Hz 的范围内, 可知该人行桥不易发生明显的人致共振现象。同时, 第十四、第十五阶中竖向频率均为 3 Hz 以上, 满足城市人行天桥与人行地道技术规范要求, 桥梁的刚度满足设计和使用要求。

3.4 静力分析

根据此桥的使用情况, 《城市桥梁设计荷载标准》(CJJ77-98) 和《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-95) 将人行天桥设计荷载分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载三大类。考虑风荷载作用下最不利荷载组合情况, 模拟时采用的荷载或作用的分项系数见表 2, 组合情况见表 3, 在五组荷载组合作用下, 结构的基础反力之和见表 4。

由表 4 可知, 第五组组合的基础反力远大于前四组的, 表明: 风荷载并不是控制结构安全性的最重要因素, 不起决定性作用。

3.5 主要受压构件验算

本研究对最不利荷载组合下加支撑的拱桥进行受力分析, 拱桥的整体强度应力处于安全状态, 最大应力发生在拱脚附近区域。计算出最不利荷

载组合作用下主要构件的最大受力数值, 由木结构设计规范<sup>[14]</sup>可知, 主要构件的承载能力满足要求, 计算结果见表 5。

表 2 荷载分项系数  
Table 2 Partial load factors

组	恒荷载/ 合 (kN•m <sup>-2</sup> )	人群 荷载/ (kN•m <sup>-2</sup> )	风荷载/ kN	组	恒荷载/ 合 (kN•m <sup>-2</sup> )	人群 荷载/ (kN•m <sup>-2</sup> )	风荷载/ kN
1	1.00	0	1.40	12	1.20	0.98	-0.84
2	1.20	0	-1.40	13	1.35	0.98	-0.84
3	1.20	0	-0.84	14	1.20	0.98	0
4	1.35	0	-0.84	15	1.35	0.98	0
5	1.20	0	0	16	1.20	0.98	0.84
6	1.00	0	1.40	17	1.20	0.98	1.40
7	1.35	0	0	18	1.35	0.98	0.84
8	1.20	0	0.84	19	1.20	1.40	-0.84
9	1.20	0	1.40	20	1.20	1.40	0
10	1.35	0	0.84	21	1.20	1.40	0.84
11	1.20	0.98	-1.40				

表 3 荷载组合系数  
Table 3 Load combination factors

组合	组合方式		
	恒荷载/(kN•m <sup>-2</sup> )	活荷载/(kN•m <sup>-2</sup> )	风荷载/kN
1	1.35	0	-0.84
2	1.35	0	0.84
3	1.20	0.98	-1.40
4	1.20	0.98	1.40
5	1.20	1.40	0

表 4 各荷载组合下的基础反力

Table 4 Foundation reaction forces under various load combinations

组合	$F_x/10^{-12}$	$F_y/10^{-13}$	$F_z$
1	2.465	-8.945	3 440.141
2	2.465	-8.945	3 440.141
3	2.932	-8.863	4 061.509
4	2.932	-8.863	4 061.509
5	3.249	-9.253	4 491.626

表 5 轴向受力构件应力

Table 5 Stress of axially loaded members

组合	构件名称	截面直径/mm	最大轴力/kN	应力/MPa
1	拱	300	112.410	1.59
2	拱	300	112.410	1.59
3	拱	300	133.210	1.88
4	拱	300	133.209	1.88

## 4 改进措施与建议

在计算过程中发现, 2个受力拱系之间需要利用横木连接来提高侧向刚度, 拱系统与横木之间建议采用燕尾榫和透榫连接增加斜撑, 拱脚处采用横木连接或者绑扎, 柱子之间加支撑形成几何不变体系<sup>[15]</sup>增加拱系抗侧刚度。立柱间支撑根据具体位置采用马腿斜撑或剪刀撑。桥面系统增加斜撑, 可以增加桥面整体刚度。木桥施工时, 控制安装误差, 合理布置结构支撑体系, 保证施工精度和安全需求。使用时, 注意防虫、防腐、防火, 定期检查结构主要构件和支撑的安全性, 保证结构在设计基准期内能正常安全使用。

## 5 结论

本工程为传统榫卯节点连接的贯木拱结构体系, 整个结构型式合理, 造型独特, 对其进行分析, 得到结论为:

1) 人行桥具有良好舒适性, 通过模态分析, 可知该人行桥避开了人行荷载谐波的基频范围, 不易发生明显的人致共振现象。

2) 第十四、第十五阶竖向频率为3 Hz以上, 均满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-95)要求, 桥梁的刚度也满足设计和使用要求。

3) 加支撑后的拱桥, 整体强度应力处于安全状态, 最大应力发生在拱脚附近区域, 经分析该桥结构能满足各种荷载工况下的安全需求。

### 参考文献(References):

- [1] 王斌. 木结构榫卯节点抗火性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2013. (WANG Bin. Experimental study on fire resistance of mortise tenon joints of wood structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese))
- [2] 栾力文. 传统木结构节点区摩擦耗能机理及力学模型化有限元研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014. (LUAN Li-wen. Friction energy dissipation mechanism and mechanical modeling of traditional wooden structure node area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [3] 刘荣恒. 典型钢筋混凝土结构房屋楼层加速度反应谱分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020. (LIU Rong-heng. Study on floor acceleration response spectra of typical RC structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2020. (in Chinese))
- [4] 索华伟. 钢结构防火保护工程施工质量控制体系研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009. (SUO Hua-wei. Research on construction quality control system of steel structure fire protection engineering [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [5] 孙俊. 基于嵌压和摩擦机理的传统木结构透榫节点模型化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017. (SUN Jun. Research on modeling of conventional wood structure transonic joint based on inserting and friction mechanism [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [6] 聂雅雯, 陶忠, 高永林. 黏弹性阻尼器增强传统木结构燕尾榫节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 125-133. (NIE Ya-wen, TAO Zhong, GAO Yong-lin. Experimental study on dovetail mortise-tenon joints with viscoelastic dampers in traditional timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 125-133. (in Chinese))
- [7] 聂雅雯, 陶忠. 黏弹性阻尼器增强传统木结构半榫节点试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 107-113. (NIE Ya-wen, TAO Zhong. Experimental study on half mortise-tenon joints with viscoelastic dampers reinforced in traditional timber structure[J]. Building Structure, 2021, 51(1): 107-113. (in Chinese))
- [8] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(1): 240-247, 260. (GAO Yong-lin, TAO Zhong, YE Liao-yuan, et al. Shaking table tests for a Chuan-Dou timber building with viscoelastic dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240-247, 260. (in Chinese))
- [9] 中国建筑工业出版社编. 城市道路与桥梁设计规范: 第2版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社; 中国计划出版社, 2003. (China Construction Industry Press. Code for design of urban roads and bridges: 2nd edition[M]. Beijing: China Construction Industry Press; China Planning Press, 2003. (in Chinese))
- [10] 何建栋. 大跨度小半径曲线连续梁桥地震响应分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(7): 26-29. (HE Jian-dong. Analysis of

- seismic response of long span continuous girder bridge with small radius curve[J]. Railway Engineering, 2018, 58(7):26-29.(in Chinese))
- [11] 郑家杭,张怀杰,殷新锋,等.悬索管道桥施工阶段人致振动分析[J].公路与汽运,2020(6):97-100. (ZHENG Jia-hang, ZHANG Huai-jie, YIN Xin-feng, et al. Analysis of Human induced vibration in construction stage of suspension pipeline bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6):97-100.(in Chinese))
- [12] 张品乐,李青宁.短肢剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2010,40(12):98-100. (ZHANG Pin-le, LI Qing-ning. Experimental research on seismic performance of the short pier shear wall[J]. Building Structure, 2010,40(12):98-100.(in Chinese))
- [13] 李英民.建筑结构抗震设计:第3版[M].重庆:重庆大学出版社,2015. (LI Ying-ming. Seismic design of building structures: 3rd edition [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.(in Chinese))
- [14] 上海现代建筑设计(集团)有限公司.工程木结构设计规范[M].上海:同济大学出版社,2016. (Shanghai Modern Architectural Design (Group) Co., Ltd.. Design code for engineered wood structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2016.(in Chinese))
- [15] 吴社.大跨度采光顶钢结构设计[J].中国建筑金属结构,2021,(2):128-129. (WU She. Steel structure design of large span daylighting roof[J]. China Construction Metal Structure,2021,(2):128-129.(in Chinese))

---

(上接第26页)

- 79, 21. (DENG Zong-cai, LI Jia-yue, CHENG Chuan-chao, et al. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFN[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(6):73-79,21.(in Chinese))
- [14] 张玉平,高树威,李传习,等.基于钢纤维混凝土弹塑性损伤模型的钢混结合段吊装分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4):32-41.(ZHANG Yu-ping, GAO Shu-wei, LI chuan-xi, et al. Hoisting analysis of steel-concrete joint section based on steel fiber reinforced concrete elastoplastic damage model[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020,17(4):32-41.(in Chinese))
- [15] 张建仁,毛杰,彭建新,等.使用碳纤维板加固的RC梁桥服役过程可靠度指标分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,14(2):25-31.(ZHANG Jian-ren, MAO Jie. PENG Jina-xin, et al. Reliability index analysis of the service process of RC beam bridge reinforced by carbon fiber[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2014, 14(2): 25-31. (In Chinese))
- [16] 周朝阳,徐伟,贺学军,等.碳纤维片材抗弯加固高配筋混凝土大梁性能试验及分析[J].交通科学与工程,2010,26(1):35-43. (ZHOU Chao-yang, XU Wei, HE Xue-jun, et al. Experimental research on heavily reinforced concrete girders flexure-strengthened with externally bonded CFRP laminates[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010,26(1):35-43.(in Chinese))