

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.107



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



山地古建筑木结构抗震性能研究评述

潘毅^{a, b}, 陈建^a, 安仁兵^a, 易督航^a

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031)

摘要: 山地古建筑木结构是中国古建筑的重要组成部分, 因其柱底不等高约束而与平地古建筑木结构存在建筑布局、结构特点和抗震性能等方面的差异。近年的古建筑震害调查表明: 高烈度区山地古建筑木结构的破坏程度一般重于平地古建筑木结构。为更好地保护山地古建筑木结构, 阐述了山地古建筑木结构的基本概念, 总结了山地古建筑木结构的建筑特点、结构形式和结构特点, 根据多次古建筑震害调查结果, 分析了山地古建筑木结构的基础破坏、柱脚滑移、榫卯破坏、柱架扭转、屋面破坏和构架垮塌等典型震害特征及其震害原因, 并指出其与平地古建筑震害的异同, 从动力特性、分析模型、抗震机理、破坏模式和加固方法等方面阐明了山地古建筑木结构抗震研究的关键科学问题, 为后续抗震性能研究指明思路 and 方向。

关键词: 山地建筑; 古建筑; 木结构; 抗震性能; 震害特征

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0010-12

A review on seismic performance of ancient timber structures on sloped lands

PAN Yi^{a, b}, CHEN Jian^a, AN Renbing^a, YI Duhang^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Ancient timber structures on sloped lands are an important part of the ancient Chinese architecture. Due to the unequal height constraint at the bottom of columns, they are different from the ancient timber structures on flat lands in the aspects of architecture layout, structure characteristics and seismic performance. In recent years, the investigations on seismic damage of ancient buildings show that the damage degree of ancient timber structures on sloped lands is generally more serious than that on flat lands. To protect ancient timber structures on sloped lands much better, the basic concept of ancient timber structures on sloped lands is expounded and the architecture characteristics, structure forms and structure characteristics of ancient timber structures on sloped lands are summarized. According to the results of many investigations on seismic damage of ancient buildings, the typical earthquake damage characteristics and causes of ancient timber structures on sloped lands are analyzed, such as foundation failure, column foot slip, mortise-tenon failure, column frame torsion, roof failure and frame collapse. The similarities and differences between seismic damage of the ancient timber structures on flat lands and those

收稿日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51878559)

作者简介: 潘毅(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构工程抗震与加固研究, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

Received: 2021-02-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878559)

Author brief: PAN Yi (1977-), PhD, professor, main research interests: seismic and reinforcement of structure engineering, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

on sloped lands are pointed out. The key scientific problems of seismic research on ancient timber structures on sloped lands are illustrated from the aspects of dynamic characteristics, analysis model, seismic mechanism, failure mode and reinforcement method and the thinking and direction for the subsequent seismic performance research are pointed out.

Keywords: structures on sloped lands; ancient structures; timber structures; seismic performance; seismic damage characteristics

中国幅员辽阔,地形地貌丰富多样。其中,山地约占全国总面积的 $1/3$ ^[1]。由于地理环境、宗教文化和生产生活等原因,许多古建筑修筑于山地之上。山地起伏大、坡度陡,一些古建筑不得不建于坡地之上,导致结构底部抗侧力构件的约束部位不在同一水平面,且不能简化为同一水平面。这类古建筑定义为山地古建筑。底部抗侧力构件主要是由木材组成的山地古建筑则定义为山地古建筑木结构。

自 21 世纪以来,中国先后发生 5 级以上地震 600 余次^[2],大多分布于西部地区。而西部多有山地、丘陵地貌,其间分布着大量古建筑木结构。历次震害调查表明,古建筑木结构均受到不同程度的地震破坏,尤其是处于高烈度区的地山地古建筑木结构^[3-5]。与平地古建筑木结构相比,山地古建筑木结构不仅具有柱脚平摆浮搁和榫卯连接等常规特征,还具有由地形引起的柱底不等高约束、平面和竖向不规则等独特性。在地震作用下,山地古建筑木结构的受力更为不利,震害特征更为显著。文献^[6-14]对山地古建筑的历史演变、营造手法和构造特点进行了阐述,文献^[15]对尼泊尔的山地古建筑震害进行了调查和分析,文献^[16]对不等高木构架的受力机理进行了分析,文献^[17]对某典型山地古建筑木结构的抗震性能进行了分析,文献^[18]对青城山灵官殿的动力特性做了动力测试和分析。目前,古建筑木结构抗震性能研究主要针对平地古建筑,虽然有部分山地古建筑木结构构造特点和抗震性能的分析,但山地古建筑木结构的抗震性能研究还存在很多不足。

基于对山地古建筑木结构的定义,本文介绍了山地古建筑木结构的建筑特征,总结山地古建筑木结构的结构形式和特点,结合多次震害调查,分析其震害特征和原因,探讨山地古建筑木结构抗震性能研究的不足,并提出其抗震研究中的关键科学问题。

1 建筑特征

中国山地古建筑木结构受地理环境、宗教文化和生产生活等因素的影响,形成了丰富多样的山地建筑形态特征。首先,山地古建筑木结构在选址时

受地理环境的影响。以西南地区为例,境内地形地貌复杂多样,其中,四川、重庆和贵州等地的山地面积分别达到各自总面积的 79.52%、75.33% 和 61.70%,丘陵面积分别达到各自总面积的 11.03%、15.60% 和 31.10%,大量的山地、丘陵促使了山地古建筑木结构的产生。

其次,山地古建筑木结构在建造时受宗教文化的影响。道教作为中国本土宗教,在其发展过程中形成了崇尚自然,追求天人合一的思想,使得道观往往选址于环境清幽的名山大川^[8]。道观的修建十分注重与自然环境的共生共荣,避免大面积的开挖、回填,而选择“筑台、吊脚、下跌、上爬、让出、钻进”等依山就势的山地营建方法^[9-10]。同时,古代摩崖石刻的发展促使了摩崖建筑的兴起,摩崖建筑“靠山、附崖”,应势而生,使寺院与山川共融^[11-12]。这些道观、寺院等山地古建筑木结构由于需要公共空间,通常体型较大,形式复杂,可归纳为寺观类山地古建筑木结构,如图 1 所示。



图 1 寺观类山地古建筑

Fig. 1 Temples-like ancient buildings on sloped lands

再次,山地古建筑木结构的建造还受到生产生活的影响。西南山地、丘陵间的大量传统聚落将较平坦的地形留作耕作生产之需,民居不得不面对复杂、局促的山地、丘陵地形。与寺观类山地古建筑木结构不同,民居的空间相对私密。因此,民居通常体型较小、构架简单,建筑的营造形式更加灵活机动、

不拘一格,采用“架、吊、挑”等处理方法来消除地形高差,以“拖、梭、落”等营造方式,使建筑形态变化与高差变化有机结合^[13-14],形成层层叠叠、错落有致的空间布局。虽然这些民居多为近代建造,但仍然沿用了古建筑木结构的营造方式。因此,将这类建筑归纳为民居类山地古建筑木结构,如图 2 所示。



图 2 民居类山地古建筑群

Fig. 2 Dwellings-like ancient buildings on sloped lands

2 结构特征

2.1 结构形式

由于建筑布局的丰富性,山地古建筑木结构的结构形式具有多样性。根据底部抗侧力构件的约束端与地面或边坡不同的连接形式,并参考《山地建筑设计标准》(JGJ/T 472—2020)的术语,山地古建筑木结构可分为 4 种结构形式:掉层式、吊脚式、附崖式和悬挑式,如表 1 所示。

2.2 结构特点

尽管山地古建筑木结构结构形式多样,但具有一些共同的结构特点。

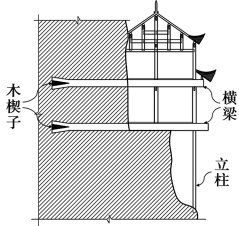

1) 柱底不等高约束。柱底不等高约束直观地表现在柱底与山体连接的标高不同,这在掉层式、吊脚式和附崖式结构中均有体现。地震作用通过不同接地高度的立柱传递到结构上,导致结构各层受到的作用力差异较大,易产生薄弱层,引起结构的破坏^[22-23]。不等高约束是造成山地古建筑在受力、变形方面与平地古建筑存在差异的主要原因。

表 1 山地古建筑木结构的结构形式

Table 1 Structure forms of ancient timber structures on sloped lands

结构形式	结构特征	结构示意	典型实例
掉层式	掉层式结构在与山体的竖向连接中设置了两个或多个不在同一平面的约束端,使得建筑内部形成不同标高的上、下接地端,且上、下接地端间可利用坡地高差设置楼层 ^[19] ,常见于寺观类山地古建筑。		四川青城山灵官殿 四川青城山祖师殿 四川都江堰二王庙 四川峨眉山纯阳殿 四川青城山灵官殿
吊脚式	吊脚式结构采用不同高度的接地柱来弥补坡地的高差,使上部结构保持同一水平面上。具有较强的地形适应性,可运用于缓坡地带和临坎峭壁处,吊脚下部空间可作杂贮、畜栏之用,常见于民居类山地古建筑中 ^[20] 。		福建泰宁甘露岩寺 四川理县筹边楼 贵州千户苗寨 四川福宝古镇 重庆龚滩古镇 重庆中山古镇 福建泰宁甘露岩寺
附崖式	附崖式结构依山靠崖,将部分横枋插入山体崖壁中,使整个结构与山体层层相连。山体在增强木结构稳定性的同时,承担了部分木结构自重,这为穿斗式木结构建筑向多高层发展提供了有利条件。附崖式结构常用于摩崖佛殿之中 ^[6] 。		重庆潼南大佛寺 重庆涪滩二佛寺 重庆忠县石宝寨 重庆江津石门大佛寺 山西玉莲洞 山西云冈石窟 重庆潼南大佛寺

续表 1

结构形式	结构特征	结构示意	典型实例
悬挑式	悬挑式结构将大截面的横梁嵌固于崖壁中,利用悬挑的横梁托起上部木结构,在横梁悬挑末端设置细长的立柱。一般情况下,结构的承重构件为嵌固于山体中的横梁,而非立柱。悬挑式结构主要运用于地形局促狭小的山体台面,以增加建筑的使用面积 ^[21] 。		山西恒山悬空寺 山西广灵圣泉寺 山西芦芽山悬空寺 浙江大慈岩悬空寺  山西恒山悬空寺

2)结构抗侧刚度不均匀。山地古建筑木结构将长短不一的立柱平摆浮搁于两个或多个不同标高的础石之上,将横枋、横梁嵌固于不同标高的山体崖壁之中,这些抗侧力构件布置往往随形就势,灵活多变,充分利用地形地势,导致结构的抗侧刚度不均匀^[16]。

3)结构扭转效应显著。由于结构的平面和竖向布置不规则,抗侧刚度不均匀,抗扭构件非对称性布置等因素,使得山地古建筑木结构的刚心和质心具有较大的偏离,在地震作用下会产生较为明显的扭转效应^[17,24]。当结构建造于高台基、山顶或局部突出地形上时,地震的扭转分量进一步放大^[25],导致上部结构的扭转效应更为显著。

4)土-结构相互作用明显。山地古建筑木结构与山体崖壁间联系紧密,尤其在靠崖式与悬挑式结构中,横梁插入山体中,采用木楔子将横梁与山体挤紧,形成类似于现代“膨胀螺钉”的嵌固方式^[26]。因此,土体与结构的相互作用对结构的刚度、振型和稳定性有较大影响^[27-28]。

3 震害特征

近十余年来,中国先后发生了汶川地震、玉树地震、芦山地震、九寨沟地震和长宁地震等多次强震,对山地古建筑木结构造成了较为严重的破坏。历次震害调查表明,山地古建筑木结构有基础破坏^[29]、柱脚滑移^[30]、榫卯破坏^[30]、柱架扭转^[3]、屋面破坏^[31-32]和构架垮塌^[32-33]等震害特征。有些震害特征与平地古建筑木结构类似,有些震害特征则体现出山地古建筑木结构的独有特点。

3.1 基础破坏

一般来说,古建筑的地基基础主要由地基、基础和台基 3 个部分组成^[34]。而山地古建筑的地基通常为不等高的台面或斜坡,甚至是局部凸起的巨石。在建造时通常采用砖石在边坡或巨石上砌筑宽大的台基,上部木结构则常采用掉层式和吊脚式,以获得更大的建筑空间。在强震作用下,台基处的剪力较

大^[35],导致砌体的灰缝开裂,严重时引起台基的不均匀沉降,甚至局部垮塌。由于山地结构与边坡之间的联系一般比较紧密,微小的边坡变形可能会在结构中引起较大的附加内力^[36]。在地震中,山地古建筑木结构不仅要承受地震作用,还要承受边坡、台基变形所导致的结构附加内力。

理县筹边楼的台基砌筑于突起的巨石之上,台基上部再修建木结构楼阁,楼阁局部采用吊脚的结构形式。在汶川地震中,筹边楼的台基受剪出现局部垮塌,严重威胁到上部木结构的安全,如图 3 所示。都江堰秦堰楼修筑于山体斜坡之上。在汶川地震中,由于边坡地基下沉导致戏楼、厢房等建筑严重损毁或局部垮塌,如图 4 所示。同时,都江堰二王庙内多处也因地基失稳、山体滑坡而导致上部木结构出现不同程度的垮塌,如图 5 所示。



图 3 理县筹边楼^[37](汶川地震 8 度)

Fig. 3 Choubianlou in Lixian(Wenchuan Earthquake intensity 8)



图 4 都江堰秦堰楼^[3](汶川地震 11 度)

Fig. 4 Qinyanlou in Dujiangyan(Wenchuan Earthquake intensity 11)



(a) 都江堰二王庙灌澜亭



(b) 都江堰二王庙疏江亭

图 5 都江堰二王庙山地古建筑局部垮塌^[37](汶川地震 11 度)

Fig. 5 Local collapse of ancient buildings on a slope of Erwang Temple in Dujiangyan(Wenchuan Earthquake intensity 11)

3.2 柱脚滑移

古建筑木结构的立柱平摆浮搁于础石之上,在地震作用下,柱子可能会出现滑移^[38]、摇摆^[39]等现象。这使得柱脚滑移成为了平地和山地古建筑木结构较为常见的震害特征之一,但山地古建筑木结构的柱脚滑移量往往更大。由于掉层式山地建筑木结构存在明显的抗侧刚度不均匀,其层间位移和楼层剪力的最大值出现在上接地层^[17],加大了上接地层的柱脚滑移量。在汶川地震中,青城山祖师殿就发生了较大的柱脚滑移,如图 6 所示。

图 6 青城山祖师殿柱脚滑移^[30](汶川地震 11 度)

Fig. 6 Slip of the column foot of Zushi Hall in Qingcheng Mountain(Wenchuan Earthquake intensity 11)

3.3 榫卯破坏

古建筑木结构梁柱节点采用榫卯连接。在地震中,这种半刚性节点通过自身榫和卯之间反复的摩擦滑移和挤压来消耗地震能量^[40-41],使得结构具有良好的减震耗能性能^[29]。因此,在地震作用下,平地古建筑木结构榫卯节点的震害特征通常表现为拔榫^[4]。而山地古建筑木结构的抗侧刚度不均匀,其

受力较平地古建筑木结构更为不利,榫卯节点震害更为严重。除了常见的拔榫,榫卯还可能出现榫头、卯口的劈裂。在汶川地震中,掉层式青城山祖师殿的榫卯节点卯口处就严重开裂,如图 7 所示。

图 7 青城山祖师殿卯口开裂^[30](汶川地震 11 度)

Fig. 7 Failure of the mortise-tenon of Zushi Hall in Qingcheng Mountain(Wenchuan Earthquake intensity 11)

3.4 柱架扭转

在山地古建筑木结构中,柱底的不等高约束会使上接地层的刚度中心和质心不重合,导致结构在水平地震作用下发生一定程度的扭转^[42]。同时,由于地形、地势的限制,山地古建筑的布局往往还存在平面不规则,进一步加大结构的偏心,放大结构的扭转效应。在汶川地震中,由于结构平面不规则和竖向刚度不均匀,青城山真武宫木构架发生了明显的扭转,墙面出现了不同程度的倾斜,如图 8 所示。同时,山地古建筑木结构显著的扭转效应使结构产生过大的柱脚滑移量和榫卯转动量,导致柱架出现严重倾斜。在芦山地震中,芦山佛图禅寺发生了较大的倾斜,如图 9 所示。

图 8 青城山真武宫柱架扭转^[30](汶川地震 11 度)

Fig. 8 Torsion of the column frame of Zhenwu Palace in Qingcheng Mountain(Wenchuan Earthquake intensity 11)

3.5 屋面破坏

古建筑木结构屋面多采用小青瓦铺作而成,屋脊装饰有吻兽、人物等。屋面震害主要是屋面溜瓦、吻兽脱落等。由于小青瓦通常直接铺作在屋架椽条间,或辅以灰浆摊铺于望板之上,瓦件与木屋架间缺



图 9 芦山佛图禅寺柱架倾斜(芦山地震 9 度)

Fig. 9 Inclination of the column frame of Fotu Temple in Lushan(Lushan Earthquake intensity 9)

乏牢固的连接,在地震下发生扰动而脱落^[3]。同时,屋脊处的各种吻兽、人物等装饰物仅依靠灰浆与屋架连接,地震作用下容易产生鞭梢效应,地震反应加剧,易发生脱落损坏。在汶川地震中,都江堰二王庙入口的屋面瓦件几乎全部掉落损毁,如图 10 所示;都江堰伏龙观屋脊吻兽脱落、屋脊受损,如图 11 所示。



图 10 都江堰二王庙入口屋面溜瓦(汶川地震 11 度)

Fig. 10 Tile slip of the roof of Erwang Temple entrance in Dujiangyan(Wenchuan Earthquake intensity 11)



(a) 地震前



(b) 地震后

图 11 都江堰伏龙观吻兽脱落^[32](汶川地震 11 度)

Fig. 11 Shedding of the animal sculptures in Fulongguan in Dujiangyan(Wenchuan Earthquake intensity 11)

3.6 构架垮塌

在地震作用下,山地古建筑木结构垮塌的概率通常大于平地古建筑木结构,特别是修建在高耸山顶上的山地古建筑木结构。这主要是因为地震波在高耸孤立的山体内经过反射、散射和叠加后,在到达坡顶时,其水平分量会有明显放大,同时,坡顶处的竖向地震作用效应显著,不可忽略^[25]。在汶川地震中,建于窦圉山山顶的云岩寺窦真殿完全垮塌,如图 12 所示,而山下的古建筑损毁却相对轻微。



(a) 地震前



(b) 地震后

图 12 江油云岩寺窦真殿完全垮塌^[34](汶川地震 8 度)

Fig. 12 Complete collapse of the Douzhen Hall of Yunyan Temple in Jiangyou(Wenchuan Earthquake intensity 8)

4 待解决的问题

由于山地古建筑木结构的特殊性,导致其结构特征、震害特征与平地古建筑有所区别,到目前为止,还没有形成系统的抗震理论,尚存在许多不足,有待深入研究。

4.1 动力特性不清楚

山地古建筑木结构的动力特性是研究其抗震机理的重要基础。而结构刚度、非结构构件^[43]以及柱脚约束形式^[44]等非确定性参数也会影响古建筑木结构的动力特性,且数值模型很难准确建立。学者们对平地古建筑木结构进行了很多原位动力实测与分析^[44-48],有助于人们掌握其动力特性规律。由于柱底不等高约束、侧向刚度不均匀等结构特点,山地古建筑木结构动力特性规律不能照搬平地古建筑木结构。然而,目前山地古建筑的动力特性测试较少^[18,49],尚不能掌握其动力特性的基本规律。尽管文献^[18]对青城山灵官殿进行了原位动力特性实测,但仅关注结构前两阶频率与振型,而对于扭转模

态和高阶模态参数的识别还不够。因此,有必要对典型山地古建筑木结构进行动力特性测试,搞清楚结构的动力特性规律和影响因素,为准确建立数值分析模型奠定基础。

4.2 分析模型不完善

数值模拟作为科学研究的重要方法之一,建立合理准确的山地古建筑木结构数值分析模型是研究其抗震与加固的重要基础。目前,学者们针对山地古建筑木结构的半刚性榫卯节点^[16,50]、柱脚节点^[17]进行了理论分析,建立了能够在结构弹塑性地震反应分析中反映节点变刚度性质的弯矩-转角力学模型,并将其运用到整体结构的杆系模型中。不少山地古建筑木结构由于地处深山,气候潮湿,为避免底层柱的过早腐朽,通常采用石柱营造,平摆浮搁于础石之上,但目前尚无较为完善的石柱柱脚力学模型,在分析模型中仍采用铰接处理^[18]。在地震响应分析中,利用杆系模型能够高效快速地得出结构的宏观响应,但无法获取关键节点的应力、应变以及损伤情况,不能明确具体的薄弱部位和破坏机理,而实体模型则需较高的计算成本。因此,有学者将多尺度建模方法引入到一榀等高木构架的抗震分析中,榫卯节点采用精细化实体单元,梁柱采用杆系单元,利用多点约束方法实现两种模型单元的变形协调^[51],然而,多尺度模型至今尚未在山地古建筑木结构中得到应用。因此,当前亟需完善山地古建筑木结构相关节点的力学模型,提高杆系模型的合理性、精确性,完善山地古建筑木结构多尺度建模方法。

4.3 抗震机理不明确

抗震机理是分析山地古建筑木结构抗震性能的必要内容。强震下,山地古建筑结构平面质心的惯性力对刚心产生扭转力矩,迫使结构产生平动和扭转的耦合变形,导致结构的抗震机理复杂^[52]。正因如此,山地古建筑结构的震害更为严重。通过理论分析和模型试验,学者们研究了掉层和吊脚 RC 框架结构的地震响应以及抗震机理^[53-55]。而古建筑木结构中的半刚性榫卯节点和柱脚连接形式,使得山地古建筑木结构的地震响应和抗震机理与 RC 框架结构有很大区别,因此,不能照搬山地 RC 框架结构的抗震机理。当前,亟待建立山地古建筑木结构动力响应方程,分析影响抗震机理的关键因素,明确山地古建筑木结构的抗震机理。

4.4 破坏模式不清晰

山地古建筑木结构的破坏模式是古建筑木结构进行抗震加固的重要前提。尽管山地古建筑与平地古建筑的震害特征类似,但也有所区别^[56-57]。文献

[18]对某典型山地古建筑木结构的抗震分析表明,由于结构平面和竖向不规则、抗侧刚度不均匀,山地古建筑木结构的破坏模式是由上接地层扭转和上接地端柱脚滑移控制,且地震作用方向的不同也会使其地震响应规律和薄弱位置发生改变。虽然通过数值模拟可初步判别山地古建筑木结构的破坏模式,但无法直观反映薄弱层或关键构件的破坏对结构整体破坏影响的全过程。同时,一些山地古建筑木结构靠近断层,在近断层脉冲型地震动作用下,其破坏模式也可能不同^[58]。因此,建议通过拟静力试验、振动台试验、多尺度数值模拟等方法,明确典型山地古建筑木结构的破坏模式,为山地古建筑木结构抗震加固提供指导。

4.5 加固方法不合理

山地古建筑木结构的抗震加固一般沿用传统加固方法,如使用钢构件^[59]、扒钉^[60]及扁钢^[61]加固榫卯节点、梁柱节点附加支撑^[62]等。但在强震下,传统抗震加固方法可能造成梁和柱的损伤或破坏,不一定能更好地保护古建筑,且有的加固方法不符合古建筑保护原则。对古建筑木结构抗震加固方法进行有益的探索,近年来成为热点^[63-65]。其中,阻尼器能给木结构提供附加阻尼,增强榫卯节点和穿斗式木结构的耗能能力^[66-67]。与传统加固方法相比,阻尼器能有效减小加固节点相邻构件的内力和结构地震响应,在一定程度上克服传统加固方式的不足^[38,68]。因此,可采用阻尼器对山地古建筑木结构进行抗震加固,并通过模型试验研究阻尼器参数、加固位置及阻尼器数量对加固效果的影响,以探明阻尼器在山地古建筑木结构抗震加固的有效性,进而提出适宜山地古建筑木结构的抗震加固方法。

5 结论

阐述了山地古建筑木结构的基本概念,总结了山地古建筑木结构的建筑特点、结构形式和结构特点,归纳了山地古建筑的震害特点,分析了其震害原因,并阐明了山地古建筑木结构抗震研究中亟待解决的关键科学问题,主要结论如下:

1)按照柱脚约束端与地面或边坡不同的连接形式,山地古建筑木结构可分为掉层式、吊脚式、附崖式和悬挑式4种结构形式。山地古建筑木结构具有柱底不等高约束、抗侧刚度不均匀、结构扭转效应显著和土-结构相互作用明显等结构特点。

2)强震作用下,山地古建筑木结构有基础破坏、柱脚滑移、榫卯破坏、柱架扭转、屋面破坏和构架垮塌等典型震害特征。同等条件下,山地古建筑木结

构震害通常比平地古建筑木结构严重。

3)由于山地古建筑木结构的独有特点,建议从动力特性、分析模型、抗震机理、破坏模式和加固方法等方面开展山地古建筑抗震性能研究,为山地古建筑保护提供理论支持。

(致谢:感谢西南交通大学建筑与设计学院张宇、陈颖,成都文物考古研究院陈晓宁,都江堰市文化体育和旅游局傅浩等提供的帮助和部分资料!)

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知 [EB/OL]. (2011-06-08) [2021-02-18]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
- [2] 中国地震局. 历史地震列表 [DB/OL]. (2021-02-09) [2021-02-20]. <https://www.cea.gov.cn/eportal/ui?struts.portlet.mode=view&struts.portlet.action=/portlet/earthquakeHistory!toListView.action&pageId=366506&startDate=2000-01-01%2000:00:00&endDate=2021-02-20%2023:59:59&startMagnitude=5&endMagnitude=10&areaname=%25E4%25B8%25AD%25E5%259B%25BD&searchType=2&isshow=yes>.
- [3] 潘毅,王超,季晨龙,等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析 [J]. 建筑科学, 2012, 28(7): 103-106.
PAN Y, WANG C, JI C L, et al. Investigation and analysis of seismic damage for Chinese ancient timber buildings in Wenchuan earthquake [J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (in Chinese)
- [4] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等. 芦山 7.0 级地震古建筑震害调查分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 140-146.
PAN Y, TANG L N, WANG H Q, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146. (in Chinese)
- [5] 潘毅,谢丹,袁双,等. 尼泊尔文化遗产建筑震害特征及加固对策:以尼泊尔 Ms8.1 级地震中 3 个杜巴广场为例 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 172-182.
PAN Y, XIE D, YUAN S, et al. Seismic damages of Nepalese cultural heritage buildings and strengthening measures: Case studies on three Durbar Squares in Ms8.1 Gorkha earthquake [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 172-182. (in Chinese)
- [6] 郭璇,张兴国. 巴蜀地区摩崖佛殿建筑结构及构造特点探析 [J]. 古建园林技术, 2004, 22(1): 33-40.
GUO X, ZHANG X G. Analysis on the architectural structure and structural characteristics of cliffside buddhist temple in Bashu area [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2004, 22(1): 33-40. (in Chinese)
- [7] 郭璇. 巴蜀地区摩崖佛寺的流变 [J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(6): 21-25.
GUO X. Origin and development of cliff-side buddhist temple in Ba-Shu area [J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2005, 27(6): 21-25. (in Chinese)
- [8] 陈颖,田凯,张先进. 四川古建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
CHEN Y, TIAN K, ZHANG X J. Sichuan ancient buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 肖晓丽. 巴蜀传统观演建筑 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
XIAO X L. Bashu traditional theater building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
- [10] 李先逵. 川渝山地营建十八法 [J]. 西部人居环境学刊, 2016, 31(2): 1-5.
LI X K. 18 methods of mountainous construction in Sichuan and Chongqing [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2016, 31(2): 1-5. (in Chinese)
- [11] 李良. 四川石窟、摩崖造像综述 [J]. 四川文物, 2001, 18(4): 49-55.
LI L. Summary of Sichuan Grottoes and Cliffs Statues [J]. Sichuan Cultural Relics, 2001, 18(4): 49-55. (in Chinese)
- [12] 林从华,张兴国,黄东海,等. 巴蜀摩崖石刻建筑空间类型探析 [J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 1-4.
LIN C H, ZHANG X G, HUANG D H, et al. Construction space types of Bashu Cliffside carvings [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(3): 1-4. (in Chinese)
- [13] 吴樱. 巴蜀传统建筑地域特色研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
WU Y. Research on regional characteristics of Bashu traditional building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- [14] 陈蔚,胡斌. 重庆古建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
CHEN W, HU B. Chongqing ancient buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 潘毅,谢丹,袁双,等. 尼泊尔 8.1 级地震文化遗产建

- 筑震害调查与分析[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1039-1046.
- PAN Y, XIE D, YUAN S, et al. Investigation and analysis of seismic damage to cultural heritage buildings induced by Gorkha earthquake, Nepal [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1039-1046. (in Chinese)
- [16] 王晓玥. 山地古建筑木结构榫卯节点力学模型与受力机理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- WANG X Y. Mechanical model and force mechanism analysis of mortise-tenon joints of mountain ancient timber structures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [17] 张启. 山地古建筑木结构柱脚节点力学模型与抗震性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- ZHANG Q. Mechanical model of column foot joints and seismic performance analysis of ancient timber structures on the slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [18] 潘毅, 易督航, 陈建, 等. 考虑墙体影响的青城山灵官殿动力特性及地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 95-104.
- PAN Y, YI D H, CHEN J, et al. Analysis on dynamic characteristics and seismic response of Lingguan deity hall in Qingcheng Mountain by considering effects of wall [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 95-104.
- [19] 李英民, 刘立平, 韩军. 山地建筑结构基本概念与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LI Y M, LIU L P, HAN J. Basic concept and performance of structure on a slope [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [20] 余海超. 巴蜀传统建筑木构架地域特色研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- SHE H C. A research on regional characteristics of the timber frame of the traditional architecture in Bashu [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [21] 左冉东, 张铮, 苏飞, 等. “空而不悬”的悬空寺[J]. 力学与实践, 2018, 40(3): 348-351.
- ZUO R D, ZHANG Z, SU F, et al. Safely hanged Hanging Temple [J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(3): 348-351. (in Chinese)
- [22] 韩军, 李英民, 唐格林, 等. 坡地掉层结构上接地支座形式对框架结构抗震性能的影响分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(Sup2): 93-100.
- HAN J, LI Y M, TANG G L, et al. Influence of ground support types on the seismic performance of structures supported by foundations at different ground levels [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup2): 93-100. (in Chinese)
- [23] 李英民, 唐洋洋, 姜宝龙, 等. 山地掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8): 68-78.
- LI Y M, TANG Y Y, JIANG B L, et al. Shaking table test of RC frame structure on a slope and supported by foundations with different elevations [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8): 68-78. (in Chinese)
- [24] 李英民, 韩军, 刘建伟. 建筑结构抗震设计扭转周期比控制指标研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 77-85.
- LI Y M, HAN J, LIU J W. Study on torsional period ratio control index for seismic design of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 77-85. (in Chinese)
- [25] BOORE D M, HARMSSEN S C, HARDING S T. Wave scattering from a step change in surface topography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(1): 117-125.
- [26] 许月梅. 悬空寺“悬而不险”的力学揭秘[J]. 力学与实践, 2011, 33(2): 112-114.
- XU Y M. Mechanical secrets of "hanging without danger" of the Hanging Temple [J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(2): 112-114. (in Chinese)
- [27] 王一功. 特殊场地上的土-结构共同作用初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- WANG Y G. Study on soil-structure interaction on the especial site [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [28] 刘方成. 土-结构动力相互作用非线性分析及基于 SSI 效应的结构隔震研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- LIU F C. The research on nonlinear soil structure interaction and structural seismic isolation based on SSI effects [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [29] 宋晓胜, 苏经宇, 郭小东. 中国木结构传统建筑典型震害分析与保护对策[J]. 世界地震工程, 2014, 30(2): 43-50.
- SONG X S, SU J Y, GUO X D. Analysis of seismic damage to traditional Chinese timber buildings and their protection countermeasures [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(2): 43-50. (in Chinese)
- [30] 潘毅, 赵世春, 余志祥, 等. 对汶川地震灾区文化遗产建筑震害与保护的几点思考[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(Sup1): 82-85.
- PAN Y, ZHAO S C, YU Z X, et al. Analysis and investigation on the seismic damage and protection of cultural heritage architecture in Wenchuan earthquake [J].

- Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(Sup 1): 82-85. (in Chinese)
- [31] 潘毅, 陈建, 包韵雷, 等. 长宁 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(Sup1): 297-306.
PAN Y, CHEN J, BAO Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in MS6. 0 Changning earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [32] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁. 汶川地震中古建筑震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(Sup2): 18-23.
XIE Q F, XUE J Y, ZHAO H T. Seismic damage investigation and analysis of ancient buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(Sup2): 18-23. (in Chinese)
- [33] 宋耀春, 李占国. 4·14 玉树地震古建筑损害调查及急性保护对策[J]. 青海社会科学, 2010, 31(4): 94-98.
SONG Y C, LI Z G. Investigation on damage of ancient buildings in Yushu earthquake on April 14 and emergency protection countermeasures [J]. Qinghai Social Sciences, 2010, 31(4): 94-98. (in Chinese)
- [34] 张凤亮, 高宗祺, 薛建阳, 等. 古建筑木结构地震作用下的破坏分析及加固措施研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(Sup1): 29-35.
ZHANG F L, GAO Z Q, XUE J Y, et al. Research on failure analysis and reinforcement measures of ancient timber structure under earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup 1): 29-35. (in Chinese)
- [35] 余志祥, 赵世春, 潘毅, 等. 青城山上清宫门楼古建筑震害机理分析与研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 292-296.
YU Z X, ZHAO S C, PAN Y, et al. Seismic analysis and research of gate tower of Shangqing Temple on Qingcheng Mountain [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 292-296. (in Chinese)
- [36] 刘立平, 李英民, 罗建, 等. 边坡变形作用下坡地建筑结构的力学行为探讨[J]. 土木工程学报, 2013, 46(Sup2): 63-67.
LIU L P, LI Y M, LUO J, et al. Mechanical behavior of structure with uneven foundation built on hillside affected by foundation deformation [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup2): 63-67. (in Chinese)
- [37] 四川省文物管理局. 四川汶川地震灾后文化遗产抢救保护年度工作报告[R]. 成都: 四川省文物管理局, 2009: 10-19.
Sichuan Provincial Bureau of Relic Management. First annual report on the post-Wenchuan earthquake rescue and preservation of cultural heritage [R]. Chengdu: Sichuan Provincial Bureau of Relic Management, 2009: 10-19. (in Chinese)
- [38] 唐丽娜. 古建筑木结构柱础连接力学模型与减震加固的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
TANG L N. Study of mechanical model of column base connection and vibration strengthening in ancient timber structures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [39] 潘毅, 安仁兵, 陈建, 等. 基于摇摆柱的古建筑木结构柱脚节点力学模型研究[J/OL]. 建筑结构学报. <https://doi.org/10.14006/jzjgxb.2020.0728>.
PAN Y, AN R B, CHEN J, et al. Study on mechanical model of column footing joint in ancient timber structures based on rocking column [J/OL]. Journal of Building Structures. <https://doi.org/10.14006/jzjgxb.2020.0728>.
- [40] 王超. 木结构古建筑榫卯节点力学模型与抗震加固研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WANG C. Study of mechanics model and seismic strengthening of tenon-mortise joints in Chinese ancient timber structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [41] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82-89.
PAN Y, WANG C, TANG L N, et al. Study on mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82-89. (in Chinese)
- [42] 李英民, 姬淑艳, 唐洋洋, 等. 山地建筑结构特殊问题与研究进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 76-82.
LI Y M, JI S Y, TANG Y Y, et al. Special problems and research progress of structure on a slope [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 76-82. (in Chinese)
- [43] 熊海贝, 康加华, 吕西林. 轻型木结构房屋动力特性测试及研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 346-352.
XIONG H B, KANG J H, LU X L. Test and investigation on dynamic characteristics of wood-frame constructions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(3): 346-352. (in Chinese)
- [44] 袁建力, 李胜才, 陆启玉, 等. 砖石古塔动力特性建模方法的研究[J]. 工程抗震, 1998, 21(1): 22-25.
YUAN J L, LI S C, LU Q Y, et al. Research on modeling method of dynamic characteristics of masonry ancient pagodas [J]. Earthquake Resistant

- Engineering, 1998, 21(1): 22-25. (in Chinese)
- [45] 方东平, 俞茂宏, 宫本裕, 等. 木结构古建筑结构特性的实验研究[J]. 工程力学, 2000, 17(2): 75-83.
FANG D P, YU M H, MIYAMOTO Y, et al. Experimental studies on structural characteristics of ancient timber architectures [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(2): 75-83. (in Chinese)
- [46] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 应县木塔实体结构的动态特性试验与分析[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 141-146.
LI T Y, WEI J W, ZHANG S Y, et al. Experiment and analysis of vibration characteristics of Yingxian Wooden Tower [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 141-146. (in Chinese)
- [47] 赵守江, 杨永强, 戴君武. 故宫雨花阁动力特性及地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 85-92.
ZHAO S J, YANG Y Q, DAI J W. Study on dynamic characteristics and seismic response of Yuhua Pavilion in the Forbidden City [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 85-92. (in Chinese)
- [48] 薛建阳, 吴晨伟, 周姝琴, 等. 考虑高台基影响的西安安定门城楼动力特性及地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9): 12-21.
XUE J Y, WU C W, ZHOU S Q, et al. Analysis on dynamic characteristics and seismic response of Xi'an Anding Gate Tower by considering high stylobate [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9): 12-21. (in Chinese)
- [49] 常鹏, 吴楠楠, 王钊, 等. 藏式山地结构有限元模型修正及动力可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 13-20, 41.
CHANG P, WU N N, WANG Z, et al. Finite element model updating and dynamic reliability analysis of Tibetan structure on the slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 13-20, 41. (in Chinese)
- [50] 潘毅, 张启, 王晓玥, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点力学模型研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 151-159.
PAN Y, ZHANG Q, WANG X Y, et al. Research on mechanical model of dovetail joint for Chinese ancient timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 151-159. (in Chinese)
- [51] 姜绍飞, 吴铭昊, 唐伟杰, 等. 古建筑木结构多尺度建模方法及抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 44-53.
JIANG S F, WU M H, TANG W J, et al. Multi-scale modeling method and seismic behavior analysis for ancient timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 44-53. (in Chinese)
- [52] 李宏男, 尹之潜. 偏心结构在多维地震作用下扭转耦联反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(4): 45-53.
LI H N, YIN Z Q. Torsional coupling response of eccentric structures to multi-dimensional ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(4): 45-53. (in Chinese)
- [53] 单志伟. 掉层建筑结构的抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
SHAN Z W. Study on the seismic performance of step-terrace structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
- [54] WANG L P, LI Y M, SHAN Z W, et al. Comparative analysis on the seismic performance of terraced reinforced concreted concrete frame [C]//14th World Conference of Earthquake Engineering. Beijing: 2008.
- [55] 赵耀. 掉层结构动力特性及整体抗倾覆分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
ZHAO Y. Study on dynamic characteristics and overturning stability for structures supported by foundations with different horizontal levels [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [56] BIRAJDAR B G, NALAWADE S S. Seismic analysis of buildings resting on sloping ground [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.
- [57] NARAYANAN A R V, GOSWAMI R, MURTY C V R. Performance of RC buildings along hill slopes of himalayas during 2011 sikkim earthquake [C]//15th World Conference of Earthquake Engineering. Losiba: 2012.
- [58] 潘毅, 王晓玥, 许浒, 等. 脉冲型地震动作用下尼泊尔砖木遗产建筑易损性分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1156-1163.
PAN Y, WANG X Y, XU H, et al. Seismic fragility analysis of Nepalese brick-timber heritage structures under near-fault pulse-like ground motions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1156-1163. (in Chinese)
- [59] 周乾, 闫维明, 周宏宇, 等. 钢构件加固古建筑榫卯节点抗震试验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 1063-1071.
ZHOU Q, YAN W M, ZHOU H Y, et al. Experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient tenon-mortise joint strengthened by steel components [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(6): 1063-1071. (in Chinese)
- [60] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 3种材料加固古建筑木构架榫卯节点的抗震性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4):

- 649-656.
- ZHOU Q, YAN W M, JI J B. Aseismic behaviors of tenon-mortise joints in wooden frame in Chinese ancient building strengthened by three materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16 (4): 649-656. (in Chinese)
- [61] 薛建阳, 翟磊, 张凤亮, 等. 扁钢加固古建筑木结构残损节点的性能分析与设计方法[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(5): 621-625.
- XUE J Y, ZHAI L, ZHANG F L, et al. Performance analysis and design recommendations for damaged mortise-tenon joints of ancient timber structure strengthened with flat steel [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 47(5): 621-625. (in Chinese)
- [62] 刘大可. 中国古建筑营造技术导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- LIU D K. Technical guidelines for the construction of Chinese ancient buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [63] HAY S, THIESSEN K, SVECOVA D, et al. Effectiveness of GFRP sheets for shear strengthening of timber [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(6): 483-491.
- [64] 潘毅, 安仁兵, 张春涛, 等. BFRP布加固圆截面木梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(10): 197-206.
- PAN Y, AN R B, ZHANG C T, et al. Experimental study on flexural behavior of BFRP reinforced circular timber beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(10): 197-206. (in Chinese)
- [65] LI H M, LAM F, QIU H X. Flexural performance of spliced beam connected and reinforced with self-tapping wood screws [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152 (1): 523-534.
- [66] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑直榫节点扁钢与阻尼器加固比较研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49 (6): 981-986, 1031.
- PAN Y, WANG C, TANG L N, et al. Comparative research on flat steel and damper strengthening of straight type of tenon-mortise joints [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(6): 981-986, 1031. (in Chinese)
- [67] 聂雅雯, 陶忠, 高永林. 黏弹性阻尼器增强传统木结构半榫节点试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(1): 125-133.
- NIE Y W, TAO Z, GAO Y L. Experimental study on ovetail mortise-tenon joints with viscoelastic dampers in traditional timber structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(1): 125-133. (in Chinese)
- [68] 高永林, 陶忠, 叶燎原, 等. 传统穿斗木结构榫卯节点附加黏弹性阻尼器振动台试验[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 59-68.
- GAO Y L, TAO Z, YE L Y, et al. Shaking table tests of mortise-tenon joints of a traditional Chuan-Dou wood structure attached with viscoelastic dampers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49 (2): 59-68. (in Chinese)

(编辑 胡玲)