

王现伟,孙柏涛,陈洪富. 2024. 西南地区穿斗式木结构民居构造特点及震害特征分析——以贵州山区为例[J]. 地震研究, 47(2): 290–299, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0008.

Wang X W, Sun B T, Chen H F. 2024. Analysis of architectural and structural characteristics and typical earthquake damage to the Chuandou-type timber frame in Southwest China: A case study of the mountainous areas in Guizhou province[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(2): 290–299, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0008.

西南地区穿斗式木结构民居构造特点及震害特征分析 ——以贵州山区为例*

王现伟^{1,2}, 孙柏涛^{1,2}, 陈洪富^{1,2,✉}

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程及工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了深入了解穿斗式木结构的抗震能力, 从该结构的建筑构造特点出发对其进行详细介绍。基于对贵州黔东南州、黔南州的乡镇村落的实地调查, 对穿斗式木结构的建筑特点和构造特点进行了分类归纳; 根据2021年四川泸县6.0级、2022年泸定6.8级地震震中的现场震害调查结果以及自2013年以来西南地区6.0级以上典型地震的震害资料, 总结了穿斗式木结构房屋的典型震害, 包括屋面破坏、围护墙破坏、木构架破坏等, 并分析了其震损原因。结果表明: 穿斗式木结构独特的榫卯连接形式, 使其木构架在地震作用下表现出良好的抗震能力, 而填充墙抗震性能相对较差。

关键词: 穿斗式木结构; 现场调研; 建筑特点; 构造特点; 震害特点; 西南地区

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)02-0290-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0008

0 引言

中国传统的木结构建筑历史悠久、体系独特、形式多样, 按照结构形式一般可分为抬梁式、穿斗式、井干式等。穿斗式木结构房屋多分布在山地较多、雨量较大、气候湿热、杉木存量较大的西南地区少数民族民居聚集区。该结构最为显著的特点是墙体不承重、通柱承重、柱上搁檩, 其建造技术在汉代已经相当成熟(刘敦桢, 1984; 陆伟东, 2014), 建造采用的木柱直径与枋的截面尺寸

较小、用材较少、结构轻盈、适用性强, 具有省工、省料和经济的优点, 因此流传至今。

由于穿斗式木结构房屋的建造过程主要依靠当地工匠的经验进行施工, 其过程缺乏有效的监管, 房屋施工质量难以得到保证, 导致其震损现象存在较大的差异。为了更加明确地了解穿斗式木结构房屋的抗震机理, 众多学者对其进行了震害调查及研究, 如姚侃等(2007)通过总结木结构的抗震机理, 认为木结构的特殊构造特点和构件连接方式使其具有更好的抗震性能; 2013年四川芦山7.0级地震后, 孙柏涛等(2014a, b)对

* 收稿日期: 2022-03-27.

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2019EEV0103); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2239252); 国家重点研发计划课题(2019YFC1509301).

第一作者简介: 王现伟(1997-), 硕士研究生在读, 主要从事结构抗震方面研究. E-mail: 1397745583@qq.com.

✉通信作者简介: 陈洪富(1983-), 副研究员, 博士, 主要从事地震灾害风险评估和抗震加固研究.

E-mail: chen-hongfu@163.com.

该地震灾区进行了详细考察，总结出穿斗式木构架的典型震害现象并分析了原因，曲哲等（2014）对该地震中未经抗震设计的民居震害进行了调查分析，发现相较于砌体结构，穿斗式木结构房屋平均震损程度较轻，其木构架主体具有相对较好的抗震性能；陈相兆等（2017）和闫培雷等（2018）对2014年四川康定6.3级地震中穿斗式木结构房屋的构造方式、震害特点进行分析，发现该结构房屋在此次地震中表现出良好的抗震能力，主体木构架完好，但仍有部分石围护墙出现歪闪或倒塌；杜轲等（2021）和叶阳等（2021）对2021年云南漾濞6.4级地震进行了现场震害调查，发现云南滇西地区存在大量以土墙作为围护墙的穿斗式木结构房屋，通过分析该结构的构造特点，总结归纳了典型震害特点并提出了相应的加固意见及修缮措施。

尽管对于穿斗式木结构房屋震害的研究已较多，但由于建造时期和分布地域的不同，穿斗式木结构在其建筑及构造特点上存在着较大差异，这也导致其震害特征和破坏程度也不相同。因此，有必要对穿斗式木结构的建筑、构造及震害特点进行详细调查和分析。本文结合贵州山区穿斗式木结构房屋的现场调研结果，分别从其建筑特点及构造特点两个方面进行分析，并在此基础上，基于2013年以来西南地区6.0级以上地震震中的震害调查结果及相关文献资料，分析了穿斗式木结构房屋的典型震害特征，以期为穿斗式木结构房屋的抗震性能评估与加固提供参考。

1 贵州山区穿斗式木结构房屋的建筑特点

针对贵州山区穿斗式木结构的建筑特点，孙柏涛课题组于2022年6月7—17日对其开展了现场调研，调研工作采用无人机航拍与现场采访相结合的方式。调研区涉及黔西南州、黔南州等地乡镇26个村落，面积约为2 849 km²，调研路线如图1所示。

调查结果表明，贵州山区穿斗式木结构房屋占比约为既有村镇建筑的7%~8%。该地区穿斗式木结构的平面布局主要以四扇三开间为主，

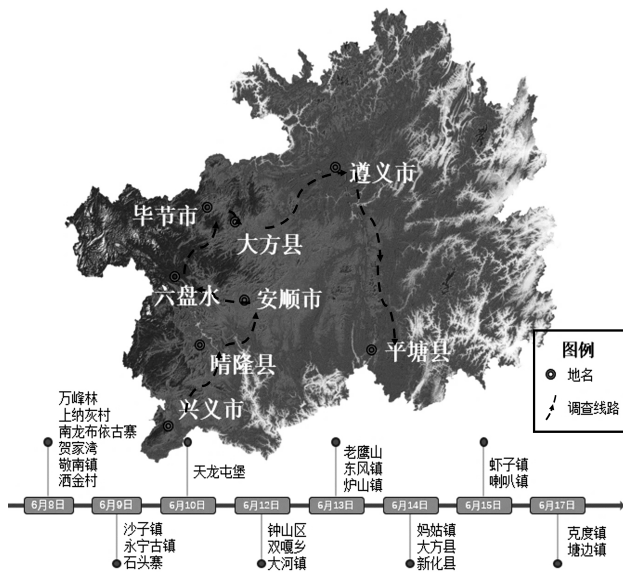


图1 现场调研路线图（2022年6月7—17日）

Fig. 1 Field survey roadmap (June 7-17, 2022)

占比为85%~90%，同时也存在少量的六扇五开间、八扇七开间。穿枋通柱的截面形状为方形或圆形，其边长或直径约为200~220 mm，且边柱与中柱的尺寸大致相同，屋面形式多为悬山顶冷摊瓦。针对贵州山区穿斗式木结构的建筑特点进行归纳。

1.1 屋面

坡屋顶因具有排水迅速、不宜积水等优点，被广泛应用于我国西南地区的村镇民居建筑中。经现场调查分析得到，贵州山区穿斗式木结构的屋面形式以悬山顶冷摊瓦屋面（图2）为主，占比约为90%，屋面坡度约为30°~40°，同时穿斗式木结构房屋中也存在少量的硬山顶及歇山顶。

悬山顶各檩条直接伸到山墙外，悬挑于屋面外。冷摊瓦屋面的设计过程中仅需确定瓦片尺寸后便可进行施工，但施工质量难以得到保障，其耐久性、安全性都相对较低（王峰，2013）。

1.2 木构架

中部木构架部分作为穿斗式木结构的骨架和主体，其在形制上决定了建筑的开间、进深、高度等。现场调研发现，贵州山区穿斗式木结构房屋平面布置上以规则的“长方形”最为普遍，其开间方向的长度约为12~14 m，每榀木构架的间距约为4 m；进深方向尺寸为7~8 m，每根木柱间距的约为1.3 m，如图3所示（杨宇振，2002）。



(a) 克度镇金山村航拍图



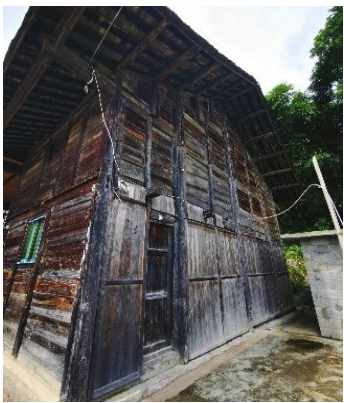
(b) 悬山顶冷摊瓦屋面

图 2 穿斗式木结构房屋的外观及环境

Fig. 2 Appearance and environment of the Chuandou-type timber frame



(a) 开间 - 四扇三间



(b) 进深 - 七柱六瓜

图 3 穿斗式木结构房屋平面基本布局

Fig. 3 Basic layout of the Chuandou-type timber frame

立面上同样十分规整，通过斗枋、穿枋之间铺设楼面板，可将建筑物在立面上分为 3 部分，即夹层（用于堆积杂物）、二层（用于储物粮食）、一层（起居室），如图 4 所示。建筑高度约为 7~8 m，夹层高度约为 2 m，二层层高约为 2.5 m，一层层高约为 2.8 m。

常见的围护墙形式有木板墙、砖墙、石墙、土坯墙、编竹夹泥墙、混合墙等。调查区范围内的穿斗式木结构房屋的围护墙多以木板墙为主，不承重仅起到围护的作用。为避免木板墙出现大面的翘曲，常见的做法是将多根枋件与木柱连接形成一个枋框（图 5 中的白色虚线框），再将多块木板沿横向或竖向固定在枋框上的榫槽内即可，形成整块木板墙。

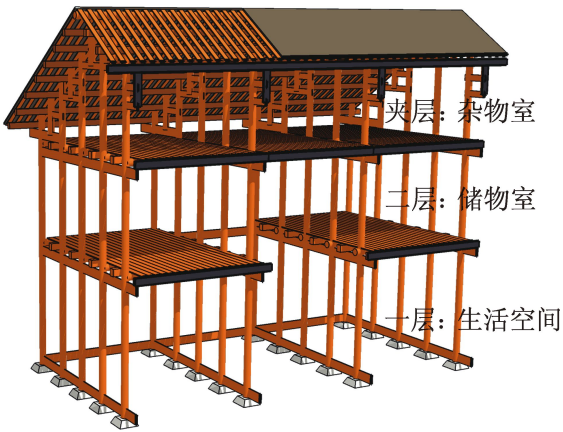


图 4 穿斗式木结构房屋立面基本功能分区

Fig. 4 Facade basic function partition of the Chuandou-type timber frame



图5 穿斗式木结构房屋的木板墙拼装方式

Fig. 5 Assembly of the wooden wall of the Chuandou-type timber frame

2 贵州山区穿斗式木结构房屋构造特点

穿斗式木结构房屋的主体结构部分是以柱、枋作为承重构件，其能够在地震中有出色的表现，离不开其自身的构造措施，其构造特点如图6所示。

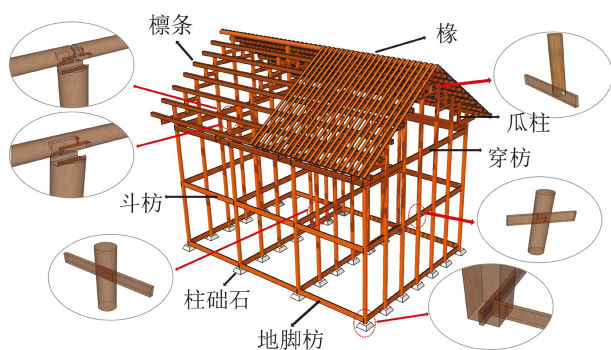


图6 穿斗式木结构房屋的构造特点

Fig. 6 Structural characteristics of the Chuandou-type timber frame

2.1 整体构造措施

整体构造措施通常是为了保证建筑物的整体稳定性及抗倒塌能力，同时使结构构件具有更好的协调性，常见的构造措施有收分、侧脚、升山。

传统木结构的木柱（除去瓜柱一类的短柱）上下端直径并非相等的，而是上细下粗的圆台体。这种根部粗、端部细的做法，称为收分。穿斗式木

结构房屋中，木柱的收分一般为柱高的 $1/100$ ，即柱高3 m，柱子收分3 cm（马炳坚，2003）。

为加强建筑物的整体稳定性，穿斗式木结构房屋最外圈柱子的柱脚通常会向外侧移一定的距离，使得外圈柱的上端略向内侧倾斜，这种做法称为侧脚，如图7所示。柱子的侧脚尺寸与收分尺寸基本相同，如柱高3 m，收分3 cm，侧脚同样是3 cm。

穿斗式木结构房屋整体两侧的木构架略高于中间木构架，中间木构架稍低进行内收处理，这种做法使得建筑重心趋中，房屋不易发生倾斜，增加了建筑物的稳定性，称之为升山（杨宇振，2002）。



图7 穿斗式木结构房屋侧脚处理

Fig. 7 Side foot treatment of Chuandou-type timber frame

2.2 屋面构造

冷摊瓦屋面的做法是根据瓦片的大小确定好椽子间距后，将椽子钉装在檩条上，然后在椽子上铺设瓦片。穿斗式木结构房屋中，椽子多采用细长的木条，屋面通常为直线坡面，无需进行折断处理，使用钉子将椽子直接钉在檩条上。椽子的间距取决于瓦片的尺寸，通过现场调研发现，椽子的间距约为瓦片宽度的 $4/5$ ，当地瓦片的尺寸多为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，椽间距约为160 mm，如图8a所示。屋面瓦片的铺设顺序应按照“先底瓦后盖瓦、从下至上、从左到右”的顺序。瓦片之间的叠压应符合“一搭三”的要求，即上下瓦面间的搭接长度一般为压六漏四，满足第一块瓦片和第三块瓦片能够做到首尾相接，使得搭接处有三皮瓦的厚度。为了达到更好的排水效果，走水垄宽宜为底瓦宽度的 $1/3$ ，如图8b所示（王晓华，冯美宇，2013）。

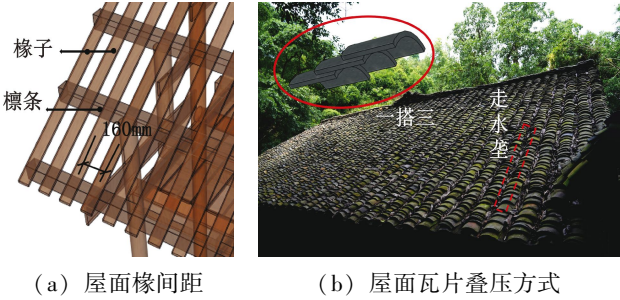


图 8 穿斗式木结构房屋的屋面构造关系
Fig. 8 Roof structure of the Chuandou-type timber frame

2.3 榫卯连接节点

传统穿斗式木结构房屋采用的榫卯节点种类繁多，形状各异，这不仅与榫卯节点的功能有关，还与使用位置、安装方式有着直接的关系。

(1) 穿枋、斗枋与柱的连接

穿枋是连接木构架进深方向的重要构件，其主要的作用是连接相邻通柱及承接上部瓜柱，穿枋的断面多为 80~150 mm 的矩形截面。斗枋是连接木构架开间方向的构件，主要起到将木构架连接成一个整体空间构架，其尺寸略大于穿枋的截面尺寸。穿枋、斗枋与木柱常做贯穿连接，并延伸出柱卯口一定的距离，其可在一定程度上限制拔榫、脱榫的现象发生。由于木材的长度限制，贯通过程并不能由单根枋件完成，通常需要进行搭接处理，可将其分为通榫和钩榫，通榫多用于常见长度范围内的连接处理，钩榫多用于贯穿多根木柱的搭接处理（薛建阳等，2019；许丹，2019），见表 1。

(2) 瓜柱与穿枋的连接

瓜柱是穿斗式木结构上部的小短柱，主要起到承接上部檩条的作用。瓜柱在连接上较为简单，常见的连接方式是在瓜柱底部开出与穿枋断面宽度尺寸大小相似的榫槽，其槽深多为穿枋高度的一半，之后架于穿枋上即可（表 1）。

(3) 檩条与柱顶的连接

穿斗式木结构中的檩条通常直接搁置在木柱上，其主要作用是承接传递上部屋面荷载。在连接上，檩条直接搁置在木柱上，两者之间无有效的拉结。常见的做法是在通柱或瓜柱的柱顶做榫口，方便搁置檩条，在檩条的两侧进行削切，最后将其搁置在瓜柱或通柱上即可（表 1）。

(4) 地脚枋与立柱的连接

贵州山区的穿斗式木结构房屋的柱脚大多数浮搁于柱础石上，柱脚与柱础石之间不设连接，但在各柱脚之间设置地脚枋，以增强木构架整体的稳定性。也有极少数木结构会做管脚榫，以固定木柱与柱础石的位置。值得注意的是，当穿枋与斗枋相交于角柱时，常见的做法是将穿枋做成通榫，斗枋做成半榫进行连接，见表 1。

表 1 穿斗式木结构房屋榫卯连接节点

Tab. 1 Tenon joint connection node of the Chuandou-type timber frame

节点	概念图	实例图
柱与枋连接节点	通榫	
	钩榫	
瓜柱与穿枋的连接节点	—	
檩条与柱顶的连接节点	—	
	—	
地脚枋与立柱的连接	—	

2.4 基础构造

从基本构成上看,穿斗式木结构房屋的下部基础由基础、台基、柱础石3部分组成。贵州山区的穿斗式木结构房屋的基础形式以毛石基础为主,使用毛石进行垒筑,并用黄砂填充石头间的缝隙,但黄砂的含泥量较大,结构较为松散,但随着长时间的沉淀,其承载能力会有所提升。

台基是指位于基础之上,柱础石之下的部分,如图9所示。该部分不仅可以起到稳固基础的作用,还可以一定程度上提高建筑高度,具有一定的防水、防潮的作用,能够提高木结构的抗腐蚀能力(王峰,2013)。

柱础石位于台基之上,木柱之下,其能够起到传导柱身的集中荷载至基础的作用,同时也起到了防雨防潮、保护柱脚的作用。不仅如此,柱础石还承担着装饰、表达民族文化等作用,但其并不具有像台基、斗拱那样表达等级关系的功能,如覆盆式柱础石在宋代常用于等级较低的民用建筑,而在清代则又成为了官式建筑中指定造型(刘致平,1957)。



图9 穿斗式木结构房屋基础部分

Fig.9 Base component of the Chuandou-type timber frame

3 西南地区穿斗式木结构震害特征分析

穿斗式木结构房屋特殊的连接建造方式,使其具有良好的抗震、耗能减震的性能,但在历次地震中也暴露了该结构的抗震薄弱部位。按照建筑特色相近、震区相邻、震害相似的原则,依据

贵州山区穿斗式木结构房屋的构造特点,并根据2021年9月16日四川泸县6.0级地震、2022年9月5日四川泸定6.8级地震中的房屋震害现场调查结果,以及西南地区历史地震的震害资料,如2013年芦山7.0级地震、2014年康定6.3级地震、2021年漾濞6.4级地震等,将西南地区穿斗式木结构的典型震害特征归纳为:屋面震损、围护墙震损、木构架震损等。两次四川泸县地震震害影响场与调研区地理空间关系如图10所示。

3.1 屋面震损

对于冷摊瓦屋面,瓦片之间采用叠压的方式进行连接,瓦片与椽子之间缺乏有效的连接措施,仅靠瓦片之间的摩擦力抵抗地震作用,在地震作用下易造成屋面溜瓦、堆瓦、落瓦等破坏现象(孙柏涛等,2014a, b)。在地震作用下,椽子和檩条等截面较小的屋面构件也容易发生折断、脱落等破坏现象,如2022年泸定6.8级地震中穿斗式木结构房屋的椽子、檩条破坏引起了屋面瓦破坏,如图11所示。

3.2 围护墙震损

石墙作为围护墙的穿斗式木结构房屋的常见震害现象为木构架基本完好,顶部山墙局部掉落(图12a),山墙破坏最为严重甚至整体倒塌。这是由于石墙中砂浆强度较差,且与木构架之间并未设置有效的拉结措施。砌体围护墙常见的震损现象为墙体与木构架脱开、平面内墙体开裂及墙片整体倒塌(图12b),这是由于砌体墙体厚度多为120 mm,稳定性较差,在地震作用下,墙体易发生失稳现象(孙柏涛等,2014a, b)。木板墙作为围护墙体时,穿斗式木结构的震损相对较轻,常见的现象为山墙尖部木板墙脱落、底层木板倒塌(图12c),这是由于木板墙与木构架之间的材料相同变形能力较为相近,但两者之间多以榫槽的形式进行处理,两者连接并不可靠。

综上所述,在地震作用下,不同墙体之间的震害表现存在着差异性,但总体上看木结构具有更好的抗震性能,而砌体填充墙与石墙次之,造成这种震害差异的原因可总结为:①围护墙与木构架之间缺乏有效的连接措施;②围护墙与木构架两者之间的动力特性及变形能力相差较大,在地震作用下两者不能协同工作;③围护墙体本身的稳定性与整体性较差。

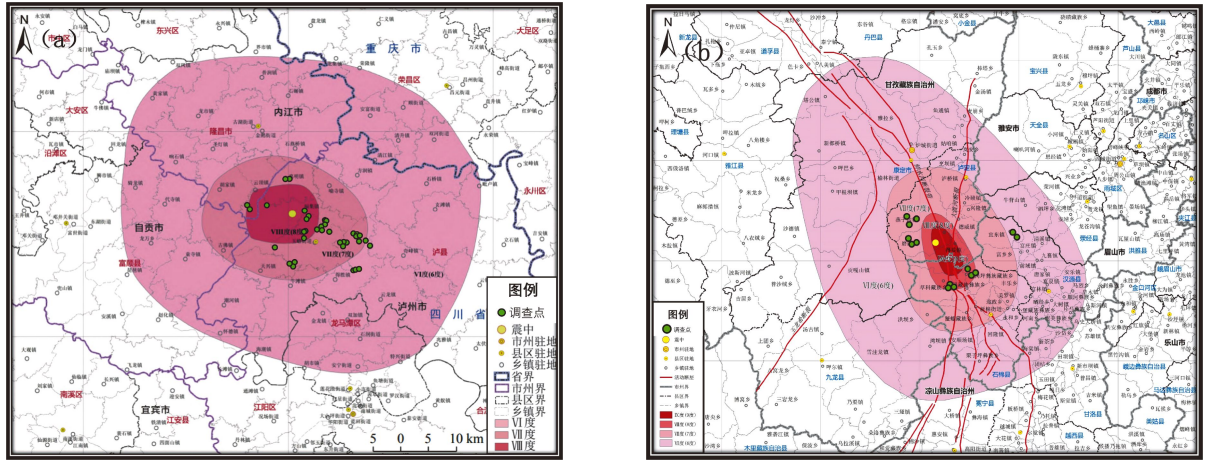


图 10 2021 年四川泸县 6.0 级地震 (a) 和 2022 年四川泸定 6.8 级地震 (b) 影响场与现场调查区分布图

Fig. 10 Earthquake-affected areas and the earthquake-intensity areas by field investigation of the 2021 Luxian $M_s6.0$ earthquake (a) and the 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake (b)



(a) 屋面溜瓦 (IX 度区)



(b) 椽子折断 (IX 度区)

图 11 2022 年泸定 6.8 级地震木穿斗式木结构房屋屋面震损

Fig. 11 Roof damage to Chuandou-type timber frame in the disaster areas of the 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake



(a) 2014 年康定 6.3 级地震 VIII 度区房屋山墙倒塌



(b) 2022 年泸定 6.8 级地震 IX 度区房屋砌块墙体整体倒塌



(c) 2013 年芦山 7.0 级地震 IX 度区房屋底层石膏板墙局部倒塌

图 12 穿斗式木结构房屋围护墙震损

Fig. 12 Damage to the wall of Chuandou-type timber frame

3.3 木构架震损

木构架之间多采用榫卯进行连接，地震作用时建筑多向受力，节点及构件受力复杂，常见的震损现象包括榫卯节点连接破坏、柱（枋）构件破坏、木柱柱脚移位以及整体纵向倾斜。

(1) 榫卯节点连接破坏

穿斗式木结构为半刚性节点超静定结构，部分榫卯节点的轻微松动或个别榫卯的脱开损坏并不会直接导致结构倒塌，荷载也可通过木构架的

内力重分布得到平衡。节点处的卯口尺寸通常略大于榫头的截面尺寸且节点处的构件存在截面削弱现象，在往复荷载作用下易发生脱榫、拔榫、折榫等现象（徐红杰等，2010），严重时甚至可能会引起构件的局部破坏及整体垮塌，如图 13a 所示。但榫头与卯口之间的缝隙，在不断的挤压、拔榫过程中节点能够产生较大的转动和变形，两者之间的摩擦滑移具有一定的耗能能力，可消耗一定的地震能量（姚侃等，2007）。



(a) 2013 年芦山 7.0 级地震Ⅷ度区房屋榫卯节点脱开



(b) 2021 年漾濞 6.4 级地震Ⅷ度区房屋木柱折断



(c) 2013 年芦山 7.0 级地震Ⅷ度区房屋柱脚移位



(d) 2013 年芦山 7.0 级地震Ⅷ度区房屋木构架纵向倒塌

图 13 穿斗式木结构房屋木构架典型震损

Fig. 13 Typical earthquake damage to the wooden frame of the Chuandou-type timber frame

(2) 柱枋构件破坏

现场调研的穿斗式木结构多以老旧建筑为主，此类建筑基本未经过抗震加固处理，随着房屋的使用年限的增加，木构架逐渐老化，常常会出现开裂、腐朽等现象。在地震作用下，柱枋构件的破坏位置通常位于立柱开洞处（即构件截面削弱较大处）、木构架遭受腐蚀的位置或木柱枋接长的位置，如图 13b 所示（李成煜，1996；张方浩等，2021）。

(3) 木柱柱脚移位

穿斗式木结构柱底基本都未设置柱脚榫或拉结构造，而是直接浮搁于柱础石上，这种浮放的处理方式允许柱脚可以发生轻微的变形。在地震

作用下，柱底与柱础石之间的摩擦力与微小变形来抵抗侧向作用，可减轻上部结构的地震作用，但常出现柱脚移位现象，严重时会引起结构的倒塌，如图 13c 所示。

(4) 整体纵向倾斜

穿斗式木结构的横向由多根立柱及穿枋组成并加以填充墙形成一榀稳定的木构架；纵向由多根斗枋通过榫卯连接将木构架组成木框架，但缺乏可靠的连接构造措施。整体上看，横向刚度优于纵向刚度，在地震作用下纵向易出现晃动，从而引起房屋发生整体纵向倾斜，如图 13d 所示（高永武等，2013）。

4 结论

本文基于现场调研结果分类归纳了贵州山区穿斗式木结构的建筑构造特点,并通过总结西南地区地震现场震害调查结果,以及2013年芦山7.0级地震、2014年康定6.3级地震、2021年漾濞6.4级地震等震害资料,分析了穿斗式木结构房屋典型震害的震损原因,得到以下结论:

(1) 通过总结历次地震穿斗式木结构房屋震害及现场调查结果发现:在低烈度区主要以屋面及围护墙等非结构构件的破坏为主,常出现屋面溜瓦、墙体局部倒塌等现象;在高烈度区主体木构架往往会达到轻微破坏,主要表现为榫卯节点处出现脱榫、拔榫等现象,而围护墙的震损较为严重,多出现整体倒塌等现象。总而言之,穿斗式木结构主体木构架具有较好的抗震能力,而围护墙的震损现象相对较为严重,结构具有“墙倒架歪、立而不倒”的特点。

(2) 基于对榫卯节点的构造特点及抗震机理的认识,对于震后出现拔榫、脱榫现象的建筑,建议采用外贴碳纤维复合材料(CFRP)布条的方法进行加固,该方法既可约束节点脱榫,又不限制节点的转动,且能够增强节点的抗弯、抗剪承载力及耐腐蚀性;对于新建建筑,可适当增大木柱的截面尺寸,并在柱顶与柱中等截面削弱处设置必要的拉结措施等。

(3) 根据总结得到的西南地区历次地震中穿斗式木结构房屋的震损现象,可将不同围护墙的地震易损性按照从高至低的顺序划分为3个梯度。第一梯度:石墙、土坯墙;第二梯队:夯土墙、砖墙;第三梯度:木板墙。建议在新建及修缮加固工程中,优先选用易损性较低的木板墙、砖墙作为围护墙,并在墙体与木构架之间设置拉结铁件等构造措施。

参考文献:

陈相兆,孙柏涛,闫培雷,等.2017.四川康定6.3级地震灾害分布特点及结构震害简析[J].地震工程与工程振动,37(2):1-9.

Chen X Z, Sun B T, Yan P L, et al. 2017. The characteristics of earthquake disasters distribution and seismic damage to structures in Kangding M_s 6.3 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 37(2):1-9. (in Chinese)

杜轲,高嘉伟,温卫平,等.2021.漾濞6.4级地震穿斗木房屋震害特征及其原因简析[J].世界地震工程,37(4):38-45.

Du K, Gao J W, Wen W P, et al. 2021. Brief analysis of the characteristics and causes of the earthquake damage of the Chuandou-type timber frames in the $M_6.4$ Yangbi earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 37(4):38-45. (in Chinese)

高永武,金波,戴君武,等.2013.芦山7级地震村镇木结构震害调查及加固建议[J].地震工程与工程振动,33(3):48-52.

Gao Y W, Jin B, Dai J W, et al. 2013. Damage to rural wooden structures in $M7.0$ Lushan earthquake and reinforcement suggestions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 33(3):48-52. (in Chinese)

李成煜.1996.丽江地震土木结构房屋震害分析[J].云南大学学报(4):1-3,12.

Li C Y. 1996. The damage analysis of earth/wood structure house on Lijiang Earthquake[J]. Journal of Polytechnic University, (4):1-3, 12. (in Chinese)

刘敦桢.1984.中国古代建筑史[M].北京:中国建筑工业出版社.

Liu D Z. 1984. History of Ancient Architecture in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)

刘致平.1957.中国建筑类型及结构[M].北京:建筑工程出版社.

Liu Z P. 1957. Chinese building types and structures[M]. Beijing: Construction Engineering Press. (in Chinese)

陆伟东.2014.村镇木结构建筑抗震技术手册[M].南京:东南大学出版社.

Lu W D. 2014. Rural wood structure building seismic technical manual[M]. Nanjing: Southeast University Press. (in Chinese)

马炳坚.2003.中国古建筑木作营造技术-第2版[M].北京:科学出版社.

Ma B J. 2003. Wood construction techniques of ancient Chinese architecture - second edition[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

曲哲,钟江荣,孙景江,等.2014.四川芦山7.0级地震中非抗震设防民居震害特征[J].建筑结构学报,35(5):157-164.

Qu Z, Zhong J R, Sun J J, et al. 2014. Seismic damage to masonry structures in $M7.0$ Lushan earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering Vibration, 35(5):157-164. (in Chinese)

孙柏涛,闫培雷,王明振,等.2014a.四川省芦山“4·20”7.0级强烈地震建筑物震害图集[M].北京:地震出版社.

Sun B T, Yan P L, Wang M Z, et al. 2014a. Seismic damage atlas of buildings in Lushan “4.20” 7.0 strong earthquake, Sichuan Province[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

孙柏涛,张昊宇,闫培雷,等.2014b.芦山7.0级地震穿斗木构架房屋震害特点及原因简析[J].土木工程学报,47(3):1-11.

Sun B T, Zhang H Y, Yan P L, et al. 2014b. Earthquake damage and feature analysis of Chinese traditional timber frame structures subjected to the Lushan 7.0 earthquake[J]. Journal of Building Structures, 47(3):1-11. (in Chinese)

王峰.2013.古建筑瓦石工程技术[M].北京:化学工业出版社.

Wang F. 2013. Ancient building tile engineering technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press. (in Chinese)

王晓华,冯美宇.2013.中国古建筑构造技术[M].北京:化学工业出版社.

Wang X H, Feng M Y. 2013. Chinese ancient building construction technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press. (in Chinese)

- 徐红杰,陶忠,余文正,等.2010.姚安7·9地震土木结构民居震害及基于震害的穿斗木构架节点抗震加固分析[J].科学技术与工程,10(20):5101–5105.
- Xu H J, Tao Z, Yu W Z, *et al.* 2010. Analysis of seismic damages of rural raw-soil and timber structure houses in 7·9 Yao'an Earthquake and scheme of seismic strengthening for Chuandou timber joints based on seismic damages[J]. Science Technology and Engineering, 10(20):5101–5105. (in Chinese)
- 许丹.2019.穿斗木结构抗震性能试验研究及地震易损性分析[D].西安:西安建筑科技大学.
- Xu D. 2019. Experimental study on seismic performance and seismic fragility analysis of column-and-tie timber structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology. (in Chinese)
- 薛建阳,任国旗,许丹,等.2019.传统民居穿斗木结构榫卯节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,40(10):158–167.
- Xue J Y, Ren G Q, Xu D, *et al.* 2019. Experimental study on seismic performance of dowel joints in traditional Chuan-Dou style timber structures[J]. Journal of Building Structures, 40(10):158–167. (in Chinese)
- 闫培雷,孙柏涛,陈相兆,等.2018.四川康定6.3级地震建筑物震害特点及原因分析[J].建筑结构,48(S2):250–254.
- Yan P L, Sun B T, Chen X Z, *et al.* 2018. Seismic damage and feature analysis of buildings during Kangding M_s 6.3 earthquake in Sichuan [J]. Building Structure, 48(S2):250–254. (in Chinese)
- 杨宇振.2002.中国西南地域建筑文化研究[D].重庆:重庆大学.
- Yang Y Z. 2002. Study of regional architecture culture of SW China[D]. Chongqing: Chongqing University. (in Chinese)
- 姚侃,赵鸿铁,薛建阳,等.2007.木结构古建筑的抗震性能分析[J].建筑科学,(7):47–50.
- Yao K, Zhao H T, Xue J Y, *et al.* 2007. Study on the seismic characteristics of Chinese historical timber buildings[J]. Building Science, (7):47–50. (in Chinese)
- 叶阳,明小娜,卢永坤,等.2021.漾濞6.4级地震大理地区穿斗木结构震害分析及加固措施[J].世界地震工程,37(4):28–37.
- Ye Y, Ming X N, Lu Y K, *et al.* 2021. Earthquake damage analysis of Dali timber frame structures subjected to the Yangbi $M_6.4$ earthquake and methods of rebuild, reinforcement[J]. World Earthquake Engineering, 37(4):28–37. (in Chinese)
- 张方浩,杜治国,张原硕,等.2021.基于倾斜摄影的2021年云南漾濞 M_s 6.4地震典型震害调查分析[J].地震研究,44(3):481–489.
- Zhang F H, Du H G, Zhang Y S, *et al.* 2021. Investigation of typical earthquake-damage caused by the 2021 Yangbi, Yunnan M_s 6.4 earthquake based on the oblique photography[J]. Journal of Seismological Research, 44(3):481–489. (in Chinese)

Analysis of Architectural and Structural Characteristics and Typical Earthquake Damage to the Chuandou-type Timber Frame in Southwest China: A Case Study of the Mountainous Areas in Guizhou Province

WANG Xianwei^{1,2}, SUN Baitao^{1,2}, CHEN Hongfu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

In this paper we firstly introduce the characteristics of the Chuandou-type structure in detail, in order to help further understand the seismic capacity of the Chuandou-type timber frame. Based on the field investigation of towns and villages in Qianxinan and Qiannan prefecture of Guizhou province, we classified the architectural characteristics and structural characteristics of the Chuandou-type timber frame. According to the field survey in the disaster areas of the 2021 Luxian M_s 6.0 earthquake and the 2022 Luding M_s 6.8 earthquake in Sichuan, and the seismic damage data of the typical earthquakes ($M_s \geq 6.0$) in southwest China since 2013, the typical earthquake damage to the roof, wall, wood frame, etc. of the Chuandou-type timber frame is summarized. Finally, the causes of damage to the Chuandou-type timber frame are analyzed. The results show that it's unique tenon-mortise connection ensures the good seismic performance of the Chuandou-type timber frame when It's hit by earthquakes. Yet the seismic performance of the Chuandou-type timber frame's infilled walls is relatively poor.

Keywords: Chuandou-type timber frame; field investigation; architectural characteristics; structural characteristics; earthquake damage features; Southwest China