

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.04.001

闽浙木拱廊桥结构研究综述

张铮¹, 张博恒¹, 缪远², 李振^{2,3}

- (1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建工程学院 城乡与建筑规划学院, 福建 福州 350118;
3. 寿宁县住房和城乡建设局, 福建 宁德 355500)

摘要: 在分析闽浙木拱廊桥结构发展背景和营造特点的基础上,总结了国内外对闽浙木拱廊桥木材材性、受力系统、传力机理、节点等方面的研究方法和研究内容。文献分析表明,廊屋等竖向荷载对廊桥整体稳定有利,但廊桥抵抗横向荷载的能力不强。该体系中构件受力以轴力为主,各个系统之间相互搭接传力,拥有拱桥的受力特性,是现存廊桥最为成熟的结构形式。通过综述研究指出闽浙木拱廊桥受力系统和节点是对结构受力性能影响的关键问题,为廊桥的保护修缮和新建改造提供理论依据。

关键词: 闽浙木拱廊桥;木材材性;受力系统;结构分析;节点性能

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)04-0307-07

Research review on structure of timber arch covered arcade bridges in Fujian and Zhejiang provinces

ZHANG Zheng¹, ZHANG Boheng¹, MIAO Yuan², LI Zhen^{2,3}

- (1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. School of Architecture and Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. Bureau of Housing and Urban-Rural Development of Shouning, Ningde 355500, China)

Abstract: Based on the analysis of the structural development background and construction characteristics of timber arch covered arcade bridges in Fujian and Zhejiang provinces, a summary was made of the domestic and foreign research methods and contents of timber properties, stress system, force transmission mechanism and joints of such bridges in the two provinces. Literature analysis shows that the vertical loads such as corridor and house loads contribute to the stability of the bridges, but these bridges show a poor performance in resisting the transverse loads. Axial force mainly exists in the component of its system, and each system overlapping with each other could transmit forces. It has the mechanical characteristics of arch bridges, and is the most mature structure of existing ancient gallery bridges. Through the review, it is pointed out that the stress system and joints of these bridges are the key problems affecting the stress performance of the structure, and provides a theoretical basis for the repair, protection and construction of these bridges.

Keywords: timber arch covered arcade bridges in Fujian and Zhejiang provinces; timber properties; stress system; structural analysis; joint performance

木拱廊桥是一种“河上架桥,桥上盖廊,以廊护桥,桥廊一体”的古老而独特的桥廊类型,又称“虹桥”和“虹桥式木拱廊桥”。而闽浙木拱廊桥

是其中技术含量最高的一种,是我国古代木构桥梁的杰出代表。闽浙木拱廊桥与传统木构桥相比,其独特的编木形式不仅增大了桥的跨度,而且

收稿日期: 2022-01-29

基金项目: “十三五”国家科技重大专项课题(2019YFD110904)

第一作者简介: 张铮(1978—),男,河南焦作人,教授,博士,研究方向:钢结构和新型结构体系。

双系统结构使廊桥衔接紧密,结构稳固精巧,受力更加合理。为此国内学者对闽浙木拱廊桥展开了多方面研究,并取得一些成果。茅以升^[1]、唐寰澄^[2-3]、方拥^[4]最早开始关注闽浙木拱廊桥,通过研究发现闽浙木拱廊桥和汴水虹桥结构类型的相似性,论述了木拱廊桥的发展过程,结构特征以及建筑史上的意义。之后,更多的学者对木拱廊桥进行了更为详细的研究和结构分析,并从工艺传承、营造技术、结构受力、工匠团队等方面进行了研究。

近年来,木结构建筑受到学者越来越多的关注,特别是拥有特殊结构形式的闽浙木拱廊桥,研究多集中于廊桥宏观的文物保护、建筑特色和人文影响,分析其文化艺术价值和建筑构造等,对廊桥结构性能的研究大部分为整桥结构,对廊桥节点转动刚度和横向荷载的传力研究仍然不足,缺乏较为可靠准确的计算方法和设计规范,不利于廊桥的保护修缮和设计建造。本文以闽浙木拱廊桥的营造特点为基础,从结构工程的研究视角,对国内外闽浙木拱廊桥结构性能的研究进行综述,探讨此类廊桥结构的受力体系、传力路径和影响因素,以期今后此类廊桥体系在结构工程领域的科学研究与工程应用提供参考。

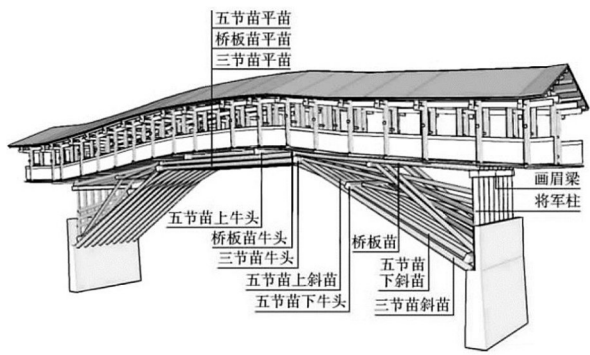


图 1 廊桥结构^[5]

Fig.1 Structure of timber arch covered arcade bridges^[5]

1 闽浙木拱廊桥的构造特点

闽浙木拱廊桥主要是由苗杆通过杆端的榫卯连接搭接而成的。以福建省宁德市寿宁县犀溪镇福寿桥为例(见图 1),第一系统由一排三节苗组成,是主要的受力构件,第二系统由一排五节苗构成。两系统相互交织,共同受力,荷载通过苗杆传到底部桥台上。同一系统的苗杆通过牛头传递内

力,牛头侧面凿出卯口,苗杆端部凿出榫头与牛头连接。为减小上桥坡度,架设桥板,两侧桥板苗与紧靠桥台的将军柱榫卯连接,中间其余的桥板苗搭接在将军柱的画眉梁上。

在桥板苗与下部苗杆拱架之间架设“马腿”传递桥板荷载。为增加廊桥侧向刚度,架设剪刀苗,此种构件类似框架结构中的斜撑。廊桥上部搭设廊屋,这既可以遮风避雨,给人们提供娱乐集会的场所也可以增加桥体重量,有利于提高廊桥的整体性和稳定性。廊屋部分完成后,绝大多数廊桥会铺设风雨板避免结构部分被雨水侵蚀。

2 闽浙木拱廊桥的材料性能

2.1 木材材性

木材是一种不均匀的各向异性材料,可看作是正交各向异性材料,由顺纹纵向、横纹径向和横纹切向 3 个互相垂直的材料主轴组成,3 个方向物理力学性质差异很大。木材顺纹方向的抗拉、抗压强度都远大于横纹,所以木材适合做以轴压为主的构件,如传统古建中的柱和闽浙木拱廊桥拱架结构中的苗杆等。

杨娜^[6]提出的只包含单一参数的纤维复合材料的本构模型,在假设材料为各向同性的条件下,提出一种包含双参数的弹塑性木材本构模型。陈志勇^[7]基于有限元软件 ABAQUS,模拟木材在复杂应力状态下的力学性能,并建立了能够反映木材正交各向异性的弹性、抗拉、抗压强度不等、受拉受剪时发生脆性破坏和受压时发生塑性变形的本构模型,见图 2。姜绍飞^[8]考虑木材生长环境与长期荷载共同作用下的温湿变形、蠕变、机械吸附蠕变以及塑性行为,推导并建立环境与荷载长期作用下的木材弹塑性模型。

杉木的树干通直,枝小节小,材质软,压弯性能优越,膨胀小,是闽浙木拱廊桥苗杆的主要材料,毕胜^[9]从结构受力、自然环境、人文因素等方面阐述闽浙木拱廊桥使用杉木做构件的优越性。陈瑞英^[10]进行了杉木间伐材和天然杉木的物理力学性能研究,对杉木的物理性质、3 个方向的抗压强度、冲击韧性和抗劈性能进行了试验分析。王展光^[11]以黔东南的杉木为对象,进行 3 个方向受压、受拉和受弯性能的试验,研究表明,杉木的抗弯性能很差,顺纹的抗压强度和抗压弹性模量都远大于横纹径向和弦向的抗压强度和抗压弹性

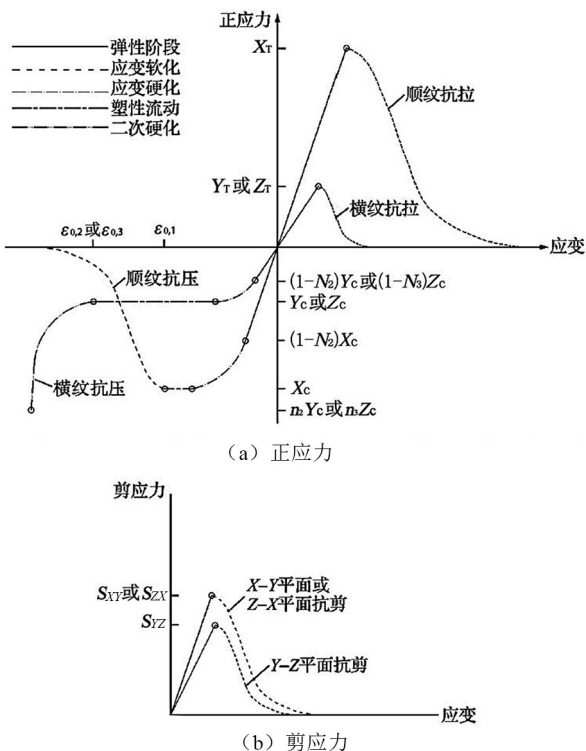


图 2 木材的应力-应变关系^[8]

Fig.2 Stress-strain relationship of timber^[8]

模量。在结构受力方面,闽浙木拱廊桥拱架中的苗杆存在轴力,这充分利用了木材顺纹抗压、抗拉强度好的特点。

2.2 木材的老化与腐蚀

在廊桥长期使用过程中,木材由于长时间的风吹、雨打或微生物的侵害而朽烂,物理性能降低,最终使木构件破坏。很多学者对古建筑木材的老化腐蚀进行了研究,闽浙木拱廊桥苗杆多采用杉木等软木,徐明刚^[12]对古建筑中的旧杉木与新杉木进行材性试验,得出旧杉木内部组织老化,各种物理性能衰减,与新杉木相比,旧杉木的横纹抗压强度、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度都有不同程度的降低。闽浙木拱廊桥牛头是重要的节点构件,多采用松木等硬木,陈国莹^[13]对应县古塔里的松木进行材性试验,通过新旧木材的力学性质比较,分析得出旧松木的横纹抗压和抗拉强度显著降低,硬度和剪切模量有所增加,力学性能的下降最终导致木结构构件的弯曲、劈裂、折断。

木材受含水率影响较大,作为主要构件的木材使用前会进行露天晒干等方式控制其含水率,

过湿会引起腐烂变形,过干也会引起龟裂松弛。新旧木材的强度随着含水率的升高而降低,在一定范围内两者基本呈线性关系^[12],根据木结构设计规范^[14]现场制作的圆木或方木结构的含水率不应大于 25%。

廊桥残损部位一般通过更换构件或增加支撑强化结构,对于廊桥多处损坏腐朽的构件,常常落架大修。廊桥构件表面刷生桐油漆以此来延长使用寿命,桥面铺设鹅卵石、砖块,并在其下层铺以石灰木炭等防潮材料,以此达到防火和防潮的目的^[15]。

3 闽浙木拱廊桥结构受力机理研究

3.1 荷载

(1) 竖向荷载

廊桥承受的竖向荷载作用,包括廊屋静荷载、桥面静荷载、桥面活荷载等。

张鹰^[16]提出了闽浙木拱廊桥在二维平面上仅考虑单榀三节苗、五节苗系统及其支点的受力状态的力学结构模型,明确表示了在均布荷载作用下,三节苗与五节苗系统之间的作用力。欧加加^[17]建立了三节苗单系统、五节苗单系统和三节苗+五节苗系统的三维力学结构模型,对比后发现在均布荷载作用下三节苗+五节苗系统发生整体变形,变形使五节苗中牛头与三节苗斜苗接触处脱空不受力,在非均布荷载作用下,脱空现象会更明显,降低了结构利用率。若考虑辅助构件马腿,桥面荷载将会通过马腿作用在五节苗中牛头脱空的反方向,这样不仅可以避免牛头脱空,还可以分担桥面荷载,提高结构利用率。

闽浙木拱廊桥属于轻型拱桥,不对称荷载对廊桥结构的影响很大。王柏生^[18]对浙江景宁县的东坑下桥进行荷载试验,对桥体施以均布荷载,分析桥体关键节点的挠度变形,通过试验,得到东坑下桥的正常工作荷载,并通过有限元计算发现非对称荷载对桥体的稳定不利。季光耀^[19]对闽浙木拱廊桥结构的简化模型进行机动性分析,发现在对称荷载下,廊桥是超静定结构,但是在不对称荷载下,结构未受荷一侧牛头与苗杆脱空,廊桥变为几何可变体,导致廊桥的刚度变小,容易失稳。在非对称荷载作用下,主拱结构会产生沿桥体方向的纵向位移,而且荷载作用侧的位移更大^[5]。淳庆^[20]、刘妍^[21]等人对浙江泰顺的文兴

桥进行了结构分析,发现文兴桥桥板刚度不足,加上长期不对称荷载造成了文兴桥桥肩一高一低的大变形。所以在廊桥设计时以非对称荷载作为变形控制荷载。

廊屋荷载通过梁柱传到桥面板上,桥板苗连接到五节苗上牛头,五节苗横苗是桥板的一部分,如图 3 所示。竖向荷载直接作用在五节苗横苗和三节苗牛头上,三节苗上牛头的荷载通过三节苗下斜苗传到垫苗木。五节苗苗杆通过牛头连接传递荷载,辅助构件马腿将一部分桥面荷载直接传递到五节苗中牛头,使五节苗中牛头与三节苗斜苗紧密接触,最终荷载通过五节苗下斜苗传递到垫苗木。垫苗木放置在桥墩上,荷载通过桥墩传递到地基里。在荷载传递过程中,节点除了传递轴力,是否还承担一部分的弯矩和剪力,还需要通过实桥试验进一步探究。

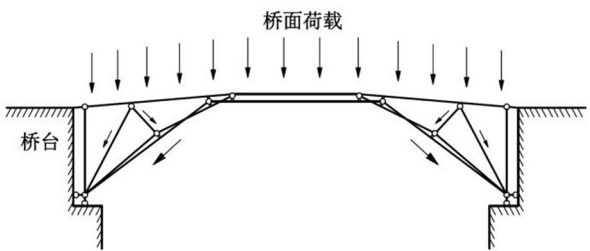


图 3 廊桥竖向荷载传递简图
Fig.3 Vertical load transmission

(2) 横向荷载

廊桥承受的水平荷载作用,包括风荷载、洪水荷载等。

闽浙地区沿海多台风,台风对于廊桥的影响主要集中在廊屋部分,廊屋位于廊桥最高处,所受风力较大,风荷载作用下,廊桥的破坏往往始于廊屋的非结构部分。刘明晖^[22]研究廊桥在风荷载下的结构特性,发现在水平荷载作用下,廊屋比桥体侧移更大,跨中侧移最大,剪刀苗可以显著减小风荷载作用下的廊桥侧移。风荷载作用下,还会形成使廊屋和桥面向上位移的顶推力,进而使廊桥失稳破坏。但是刘明晖的廊桥模型没有考虑将军柱和桥墩的作用,这可能导致理论分析桥板的竖向和横向位移都很大。此外,廊桥还采用上窄下宽的侧脚处理限制桥体侧向变形。

洪水是各种自然灾害中对廊桥结构影响最大的,其破坏集中在桥体部分,洪水作用下整体性

差、构件强度不高的廊桥极易倒塌。2016 年,闽浙地区受台风“莫兰蒂”影响,洪水冲毁了两地区“国宝级”廊桥 6 座,廊桥的防洪保护刻不容缓。张璇^[23]在不同频率洪水作用下,对有无风雨板两种廊桥进行分析,研究表明有风雨板会大大增加廊桥所受到的侧向力和竖向力。而且,洪水作用会削弱廊桥的自重效应,使桥身上浮,构件脱榫,最终导致整体结构的破坏和倒塌。此外,洪水的冲刷和浸泡还会直接或间接破坏桥墩地基,导致基础位移,随之上部结构遭到破坏^[24]。

风雨板是木拱廊桥防风防雨的重要部件,但在水平荷载下风雨板对整体结构是不利的,风雨板增大了水平荷载的接触面积,使原本抗侧向力就很差的廊桥受到更大的水平力。所以,如何在风雨板传统样式和改进风雨板利弊之间进行取舍有待进一步研究。

3.2 结构体系

闽浙木拱廊桥结构体系包括三节苗、五节苗、桥板和廊屋 4 个受力系统,如图 4。三节苗作为主要受力构件组成第一系统,五节苗作为第二系统与三节苗相互编织传力,组成整个廊桥拱架。桥板一开始只被作为辅助构件,刘妍^[21]通过分析确立了桥板苗在整体结构稳定方面的重要性,并将其归为第三系统,与三节苗或五节苗牛头连接。廊屋作为闽浙木拱廊桥的第四系统搭建在桥面板上。闽浙木拱廊桥各个系统之间是否能够协同受力是决定廊桥整体结构稳定的关键。

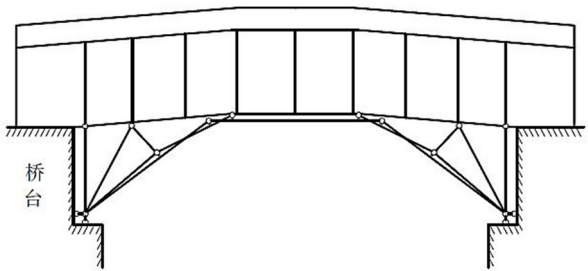


图 4 廊桥结构简图
Fig.4 Structure sketch of timber arch covered arcade bridges

3.2.1 三节苗+五节苗系统

唐寰澄^[2-3]最早提出了木拱廊桥的两个系统,并指出两个系统之间的相互作用关系,如图 5 所示。苏旭东^[25]对双三节苗、三节苗+四节苗和三节苗+五节苗 3 种不同结构形式的廊桥进行分

析,认定三节苗+五节苗廊桥是现存廊桥最为成熟的结构形式。杨艳^[26]对福建省寿宁县的溪南桥进行有限元受力分析,发现荷载作用下廊桥与两铰拱的变形和受力非常相似,具有拱结构的受力特征,可将闽浙木拱廊桥认为是拱结构。欧加加^[17]通过有限元分析发现三节苗+五节苗系统不仅可以相互传递荷载,避免局部变形过大,并且增加了廊桥的整体性,通过三节苗和五节苗相互编织产生的协调变形共同承受外部荷载,三节苗或五节苗单系统的变形较大,有明显的应力集中现象。李小午^[27]通过探究发现五节苗系统在协调廊桥结构变形与内力分布中有着重要作用,三节苗和五节苗双系统相互编织,传递荷载,避免了应力集中,增强了廊桥的结构性能。吕伟荣^[28]对浙江丽水九龙国家湿地九龙木拱廊桥进行有限元分析,得出苗杆上存在轴力,弯矩和剪力很小,苗杆通过牛头衔接相互交叉实现拱结构机制。

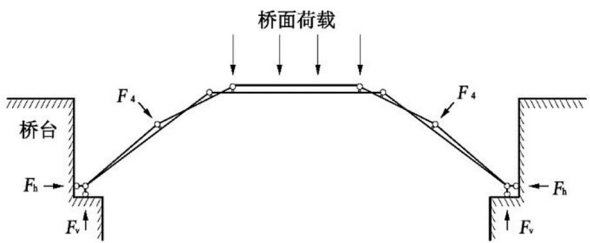


图 5 三节苗+五节苗系统受力简图

Fig.5 Stresses on three-five member system

3.2.2 桥板系统

桥板系统是闽浙木拱廊桥除三节苗系统和五节苗系统以外不可忽略的第三系统。桥板对三节苗和五节苗有显著的分担荷载的作用,即使在桥板苗和五节苗下牛头之间使用马腿分担桥面荷载,桥板苗所承受的弯矩仍然大于三节苗和五节苗。对于没有“马腿”的小型拱桥,桥板苗的结构作用将更加重要。季光耀^[18]探讨闽浙木拱廊桥主体结构具有互承特性,通过分析几何构造,发现廊桥是有限次的静定结构,桥板苗和廊桥主体结构不同的连接方式会使廊桥转变为瞬变体系或者几何可变体系,即使拱架系统中出现腐蚀和裂缝等局部损伤,结构的超静定和良好的整体性使廊桥不至于毁坏。浙江泰顺文兴桥的桥板苗中间连接是三节苗牛头,三节苗牛头与五节苗上牛头之间以短苗连接,见图 6(a),与传统闽浙木拱廊桥桥板苗连接五节苗牛头不同,见图 6(b),这种做

法导致桥板苗刚度严重不足,在长期非对称荷载作用下,文兴桥发生较大不对称变形^[20]。从廊桥结构的演变过程来看,其本质上是桥板系统和三节苗与五节苗系统的不同组合^[21]。

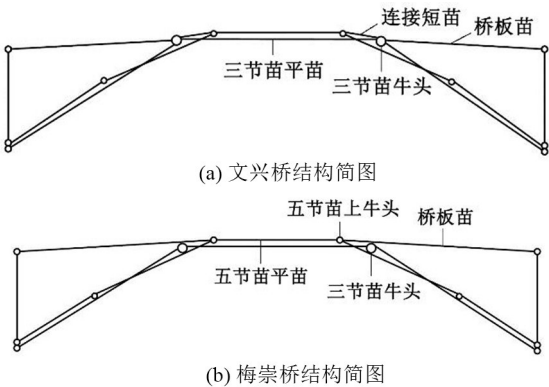


图 6 桥板苗系统受力简图

Fig.6 Stresses on bridge floor system

3.2.3 廊屋系统

闽浙木拱廊桥桥板上搭设廊屋,除了防风挡雨的作用外,廊屋对结构受力也是有利的,结构简图见图 7。刘建新^[29]通过对与廊桥结构相似的汴水虹桥进行荷载分析,发现虹桥有廊屋比没廊屋的苗杆轴力值增大了一倍,弯矩值减小了 40%,进一步分析表明,有廊屋的苗杆应力值总体上呈减小趋势。通过廊屋增大桥面荷载使苗杆基本处于受压状态,这也减小了榫卯节点受拉能力不足的缺点。闽浙木拱廊桥的廊屋大部分为重檐屋顶,这种做法不仅为了装饰美观和神佛祭祀,从结构力学角度来看,桥面上的均布荷载会使桥面跨中发生向上挠曲的现象,向上挠曲处会产生负弯矩,这对于受力角度来说是不利的,所以加大桥跨中的荷载也在一定程度上减小向上挠曲现象,抵消跨中的负弯矩。所以,对于闽浙木拱廊桥这种轻型的拱式结构,增加桥面均布荷载是有利于结构受力的,非均布荷载作用下这种优势将更明显。

3.3 节点

牛头是廊桥传力的重要构件,牛头与苗杆之间采取榫卯连接,以燕尾榫和直榫为主。桥梁结构领域对榫卯节点问题研究较少,但木结构古建筑方面对榫卯节点有较多的研究。因此在资料不足的情况下,可以参考木结构古建筑的榫卯节点研究成果。

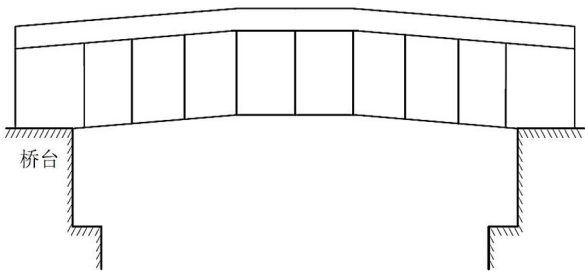


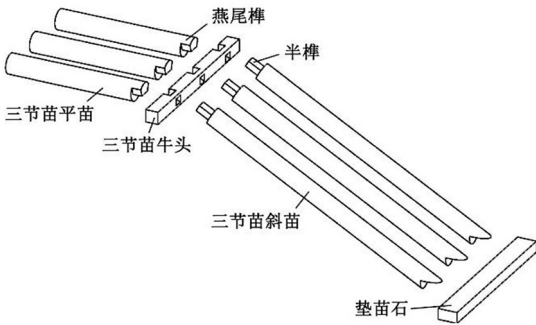
图 7 廊屋系统
Fig.7 Gallery house system

在木结构古建筑节点研究中,梁柱榫卯节点一般作为半刚度连接。赵鸿铁^[30-33]通过低周反复荷载试验,探究燕尾榫、半榫、透榫的半刚性连接特性和刚度退化规律。赵均海^[34-35]研究不同转动刚度对西安东门城楼动力特性的影响。隋允康^[36]、康敏^[37]从转动刚度和半刚性方面进行了榫卯节点的有限元模拟,应鹏杰^[38]从材性方面对榫卯节点进行精细化的有限元建模分析,李双^[39]进行了榫卯节点接触特性的研究。

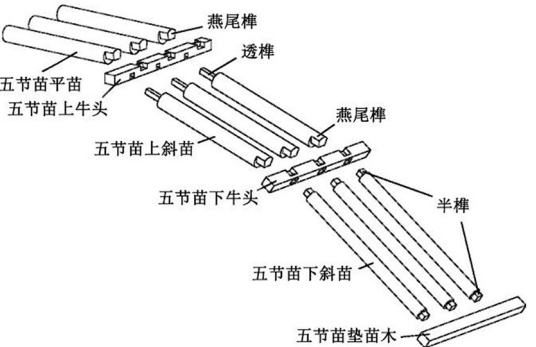
闽浙木拱廊桥榫卯节点与传统木结构古建的梁柱榫卯节点并不完全相同,廊桥的部分榫卯节点搭接在下部苗杆,而且两苗杆之间在榫卯连接处形成大于 90°的夹角,牛头上多处开口,对榫卯节点的受力、转动刚度都可能产生影响,如图 8 所示。所以在闽浙木拱廊桥力学性能研究中,张鹰^[16]、淳庆^[5]、刘妍^[21]、李小午^[27]、刘建新^[29]等将廊桥的榫卯节点当作铰接处理。

此外,有学者进行了廊桥铰接和固接的比较研究。杨艳^[40]进行了闽浙木拱廊桥节点刚度的整桥试验,模拟廊桥节点的铰接和固接形式,探究了铰接、固接两种节点形式的廊桥在不同荷载工况下的受力变形,研究发现非对称荷载下铰接对于廊桥整体的挠度影响比刚接更大。而且在不同荷载工况下,铰接形式的廊桥的最大挠度是刚接形式廊桥挠度的 2~5 倍,因此不可忽略节点刚度对于廊桥受力变形的影响。

榫卯结构在传统木结构建筑中常常被当作半刚性连接,所以欧加加^[17]分析了闽浙木拱廊桥的廊桥节点刚度对于结构性能的影响,通过廊桥节点的缩尺试验,分析得到节点刚度对廊桥的受力、变形有较大的影响,在非对称荷载下节点刚度对廊桥构件的变形影响很大,而且榫卯连接处同时是薄弱位置,在施工阶段就要保证榫卯节点的牢



(a) 三节苗结构



(b) 五节苗结构

图 8 三节苗结构和五节苗结构
Fig.8 Three and five member structure

固和刚度,使廊桥具有良好的稳定性和承载力。吕伟荣^[28]通过 Sap2000 有限元分析探究到木拱廊桥的三节苗和五节苗上牛头的弯矩和剪力很大,应保证牛头节点处的刚度。

在节点加固措施上,熊俊峰^[41]使用钢木节点加强廊桥节点,以此避免传统榫卯节点开孔对构件抗剪能力和刚度的影响,此种做法不仅提高了节点可靠度而且使廊桥修建高度标准化,提高了加工效率和安装效率,降低了传统榫卯节点营造技术对于传统工匠的依赖,是廊桥节点加固的一种可行方案。

节点刚度对廊桥结构的受力变形有显著的影响,廊桥节点拥有其构造的特殊性,在设计和后期加固维护措施上不能完全参照传统木结构建筑的榫卯节点,需要对此类廊桥独特的节点形式进行试验和有限元的进一步研究。

4 结论

目前,闽浙木拱廊桥正在申请世界文化遗产,相关科研机构 and 地方政府对遗留下来的廊桥也进行了大量的研究和修复,近几年民间也新建了大

量的廊桥,深入开展廊桥的结构性能研究已经迫在眉睫。

1)廊屋等均布荷载对闽浙木拱廊桥的受力变形和结构稳定是有利的,但廊桥抵抗非均布竖向荷载和横向荷载的能力较弱,风荷载对廊屋的影响更大,如何提高廊桥侧向刚度需要进一步的研究。现阶段缺少对于闽浙木拱廊桥水平荷载下的传力分析以及地震荷载作用下的结构受力变形分析。

2)闽浙木拱廊桥结构是比较成熟的结构体系,有拱的受力特征,构件中主要存在轴力,各系统之间相互作用,共同受力,拥有良好的受力特征。三节苗系统和五节苗系统相互编织是廊桥主要承重结构,桥面系统加强廊桥整体的稳定和刚度,廊屋系统加大桥面荷载,使廊桥整体结构受力更合理。

3)三节苗系统与五节苗系统是闽浙木拱廊桥最主要的受力系统,目前,对廊屋和桥板系统以及非主体结构的马腿、剪刀苗等与主体受力系统

之间相互作用的研究还不充分。为了达到更加良好的受力和变形性能,对闽浙木拱廊桥构件的布置优化需要一个完善的研究理论方法。

4)闽浙木拱廊桥的结构多为宏观角度分析,缺少榫卯节点构造、受力性能等细观层次的分析。传统木结构建筑与闽浙木拱廊桥的榫卯节点并不完全相同,对于闽浙木拱廊桥的节点研究大多参考的是传统木结构建筑中的榫卯节点,这不能恰当地反映真实的廊桥节点特性。需要对闽浙木拱廊桥榫卯节点构造和受力性能进行更为系统的研究,探讨理论分析的节点刚度与实际情况是否相符。

5)廊桥从开始修建到使用后的保护修缮,全靠以往的经验积累,缺乏科学依据,这会导致资源浪费和无法保证安全性。基于现代结构工程技术,给出廊桥体系的计算模型,并提出适用于廊桥的系统设计方法,这不仅是廊桥保护修缮的需要,也可对新建的廊桥进行规范性指导。

参考文献:

- [1] 茅以升. 中国古桥技术史[M]. 北京:北京出版社, 1986.
- [2] 唐寰澄. 中国木拱桥[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 唐寰澄. 中国科学技术史-桥梁卷[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [4] 方拥. 虹桥考[J]. 建筑学报, 1995(11): 55-60.
- [5] 淳庆, 胡石. 泰顺廊桥-文兴桥结构残损分析及修缮探讨[J]. 建筑技术, 2011, 42(6): 495-498.
- [6] 杨娜, 张雷, 秦术杰. 一种描述木材受压的非线性本构模型及试验验证[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 80-88.
- [7] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 复杂应力状态下木材力学性能的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 629-634, 640.
- [8] 姜绍飞, 乔泽惠, 吴铭昊, 等. 考虑环境与荷载长期共同作用的木材本构模型研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 160-168.
- [9] 毕胜. 木拱桥——一种中国建构文化遗产的研究[D]. 南京:南京大学, 2002.
- [10] 陈瑞英, 吴纯初. 福建杉木间伐材的物理力学性质[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(4): 41-43.
- [11] 王展光, 石昂, 王婷婷, 等. 黔东南州杉木物理力学性能研究[J]. 福建建筑, 2020(6): 87-91.
- [12] 徐明刚, 邱洪兴. 古建筑旧木材材料性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(4): 53-55, 31.
- [13] 陈国莹. 古建筑旧木材材质变化及影响建筑形变的研究[J]. 古建园林技术, 2003(3): 49-52, 60.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计标准: GB50005-2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- [15] 吴卓珈. 廊桥营造[M]. 北京:中国文史出版社, 2015.
- [16] 张鹰. 闽浙木拱廊桥的建构技术解析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 917-922.
- [17] 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.
- [18] 王柏生, 张亮, 欧加加. 景宁东坑下桥荷载试验[J]. 古建园林技术, 2014(2): 28-30, 59.
- [19] 季光耀. 基于结构几何构造分析木拱廊桥结构特性[J]. 丽水学院学报, 2014, 36(2): 46-50.
- [20] 纪丹琳. 闽浙木拱桥受力性能试验研究[D]. 福州:福州大学, 2014.
- [21] 刘妍. 浙闽木拱桥类型学研究:以桥板苗系统为视角[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 430-436.
- [22] 刘明晖, 虞乾魁, 孟迪. 木拱廊桥的地震响应分析及风荷载特性研究[J]. 建筑与文化, 2017(10): 46-48.
- [23] 张璇. 基于数值模拟的木拱廊桥抗洪性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.