

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.235



# 木质桥梁 2020 年度研究进展

赵冉, 张锐, 胡棚, 陈可道

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:**木质桥梁是指以木材为主要建造材料的桥梁,具有绿色环保、轻巧美观、施工便捷、性能可靠等优点。近年来,由于我国森林资源逐渐恢复,现代木结构的加工、防腐和连接技术也不断提高,木桥成为中小跨径桥梁建造的理想桥型。为了能够更好地适应当前桥梁建设形势,推动木桥应用与发展,就木桥的应用现状、木质桥面板技术、木桥的检测与加固技术与木-混凝土组合桥梁等方面进行总结,希望对广大木桥工作者有所帮助。

**关键词:**木质桥梁;桥面板;桥梁检测;桥梁加固;木-混凝土组合梁

**中图分类号:**U448.31 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0315-06

## State-of-the-art review of timber bridge in 2020

ZHAO Ran, ZHANG Rui, HU Peng, CHEN Kedao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Timber bridge is a kind of bridge built with timber as the main building material, which is eco-friendly, lightweight and aesthetic, convenient for construction and reliable in performance. In recent years, as the gradual recovery of forest resources in China, the processing, anticorrosion and connection technologies of modern timber structure are improving continuously, and timber bridge has become an ideal type for middle and small span bridge construction. To better adapt to the current situation of bridge construction, promote the application and development of wooden bridges, the application status of timber bridge, timber decking technology, the detection and strengthening technology, timber-concrete combined bridges and other aspects are summarized in this paper. Hoping to assist the reference of practitioners in the industry.

**Keywords:** timber bridge; bridge deck slab; bridge assessment; bridge reinforcement; timber-concrete composite beam

桥梁是指跨越复杂地形,或者满足其他交通需要而架设的保证车辆和行人顺利通行而设计的工程构筑物。由于我国地理文化环境的独特性,在古代我国建造技术的代表是木桥建造技术,其以木质为主要材料,而后传入国外并发展甚好。但随着现代新型建筑材料的推广应用,木桥在我国的应用受到了很大冲击。从 20 世纪 70 年代以来,我国木桥的相关研究工作进展迟缓。近年来,由于我国森林资源逐渐恢复,现代木结构的加工、防腐和连接技术也不断提高,木桥又重新成为中小跨径桥梁建造的理想桥型。结合这一发展趋势,为了在 2021 年对木桥有更加深入的研究,推动木桥的应用与发展,作者就木桥应用现状、木质桥面板技术、木桥的检测与加固技术与木-混凝土组合桥梁等方面进行总结,以供广大木桥工作者参考,为木桥在新时代重新焕发生机,实现木桥应用的复兴添砖加瓦。

## 1 木桥应用现状

随着现代木产品引入了加工、连接和防护等技术,相关技术规范在持续完善,促使现代木结构桥梁以崭新的面貌展现在大众面前,其施工简便、耐久性好、保护资源、抗震稳定等各项优势日益凸显,非常受桥梁工程师们重视<sup>[1]</sup>,在欧美的很多发达国家中得到了应用<sup>[2-4]</sup>。

美国联邦公路管理局(FHWA)的桥梁库存调查表明:整个美国有 75 000 座木结构桥梁,达到美国公路桥梁全部数量的 15%,目前数量还在稳步增加,且大部分木结构桥梁具有超过 50 年的使用年限<sup>[5]</sup>。另外,一系列木结构桥梁相关技术的研究课题在北欧国家开展,旨在提升木结构桥梁的优势,加大竞争力。随着大众环保意识的提高,优先选择可再生资源的人数不断增长,且木结构桥梁的应用领域逐步拓展

收稿日期:2019-10-20

作者简介:赵冉(1996-),女,主要从事桥梁新材料与新结构研究,E-mail:zhaoran1123@my.swjtu.edu.cn。

张锐(通信作者),男,博士,E-mail:rayz430@swjtu.edu.cn。

加深,其在北欧的桥梁工程选择中已经成为不可或缺的一项。在芬兰,已有 700 座木结构桥梁由交通管理部门建造;在挪威,自 1995 年起,已有 100 多座跨径达 70 m 的木结构桥梁由交通管理部门建造,如图 1 所示为挪威 Evenstand bridge;在欧洲大陆,特别是以阿尔卑斯山脉为代表的地区,现代木结构桥梁也广泛存在。



(a) 全桥视图



(b) 支座局部结构图

图 1 Evenstand bridge

木质桥梁不仅在数量上越来越多,且在桥面结构形式上从传统的锯木梁发展到多种形式,例如多种截面形式的层板胶合木(如图 2 所示)、木-混凝土桥面系、钢-木组合桥面系等;结构形式也从单一的简支梁桥发展到桁架桥、拱桥、悬索桥、斜拉桥,再到不同造型的地标性桥梁。此外,在力学性能、耐久性能、抗震性能等方面,木结构桥梁都获得了丰富的研究成果,并被各个国家的公路桥梁设计规范所采用,如美国规范《公路桥梁设计——荷载与抗力系数设计法》<sup>[6]</sup>、加拿大规范《公路桥梁设计》<sup>[7]</sup>、欧洲规范《木结构设计》第二部分—桥梁<sup>[8]</sup>等。不仅在欧美发达国家,木结构桥梁在部分亚洲地区、拉丁美洲、很多新兴国家也得到了极大的认可。就发展中国家而言,“劣质材料”绝不是木材的代名词,木结构桥梁的重新应用促进了桥梁的未来发展。

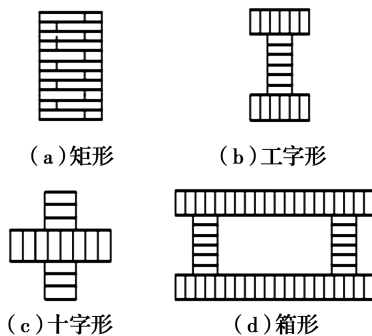


图 2 层板胶合木截面形式

随着国外现代木桥的大量应用,近年来国内也有相关研

究结合实际情况关注木桥在国内的发展。王镜铤等<sup>[9]</sup>对牡丹江市木业公司进行调研,在调研结果和相关资料的基础上,概括出牡丹江市木桥产业的发展现状,对木桥产业发展特点进行了总结。木桥的发展不仅可以带动相关木业行业的发展,还可以促进自然生态可持续发展。对于该地区来说,发展木结构桥梁不但可以促使当地木业公司对于生产产品或加工工艺的转型,同时可以使当地经济得到一定的发展,进而一定程度上响应振兴东北的政策,木结构的新鲜“血液”有利于其在土木行业的研究和发展。

姚晓荣等<sup>[10]</sup>以木结构桥梁的特点为中心,介绍了木结构桥梁的先进技术,指出木结构桥梁因现代的木材加工技术得到了较为快速的发展,主要体现在:1)固有缺陷愈发无法影响木材;2)整体性能和双向力学性能等受力性能得到提升;3)树木尺寸对木结构尺寸的局限性因木结构尺寸的增加而得到突破。另外,木结构节点连接和承载板连接实现了可靠安全的木结构多构件间连接。随着部分新型钢-木连接件的普遍应用,进一步推进钢-木组合结构桥梁的发展,现代木结构桥梁的适用跨径范围被扩大。该文表示近些年木材的防腐技术和处理工艺水平都得到了很大的提升,木材易腐烂的特点不再是其在桥梁结构中应用的限制因素。就当前而言,加压浸注处理法是木材防腐处理中最常用、最科学的方法。

当前,中国林科院针对国产木结构房屋的特点展开了深入研究<sup>[10-11]</sup>,另一方面,国内目前仍缺乏开发研究木结构桥梁及与之关联的工程木结构材料的单位。因此,在我国推广、应用木结构桥梁,将推动胶合层积木、应力层压木等工程木结构材料的发展。

## 2 木桥的应用研究现状

现代木桥的应用研究主要集中在桥面板技术、木桥的检测与加固技术以及木-混凝土组合桥梁 3 个方面。

### 2.1 木质桥面板技术

在桥面板技术方面,刘永健等<sup>[12]</sup>调研发现,木产品加工技术主要有层板胶合木(Glued Laminated Timber, GLT)技术、应力叠合木(Stress Laminated Timber, SLT)技术以及交错叠合木(Cross Laminated Timber, CLT)技术。具体结构形式如图 3 所示。

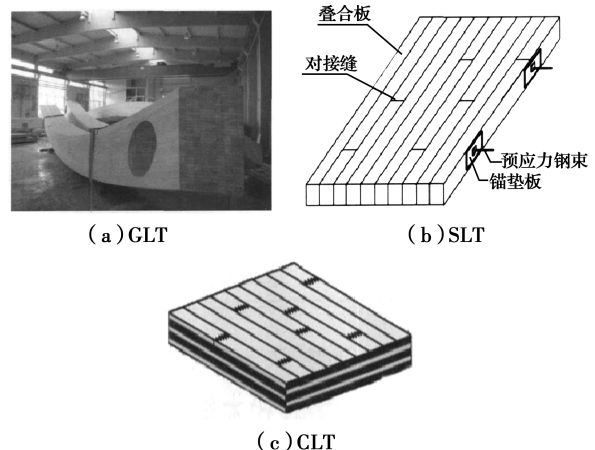


图 3 桥面板结构形式

对 GLT 技术而言,其能根据木构件每个部位应力要求的不同,配置出相应等级的木材,同时将木材缺陷完全去除或分摊到每一层,构件的尺寸可以根据需要制作且不受木材天然尺寸的限制,并能够根据受力要求不同,胶合出不同形式的曲线和截面。赵艳华等<sup>[13]</sup>提出木材断裂破坏的主要受力模式是复合型应力状态,同时基于复合断裂模型和试验方法这两个方面总结了木材复合断裂研究的发展过程。其中,当对木材断裂韧度进行计算时,将面临定义极限载荷的问题。木材作为线弹性材料存在于早期的断裂模型中,也就是说线弹性破坏极值点为最大载荷值,同时部分人表示作为类似于混凝土的准脆性材料,木材由于裂纹的扩展需要经历稳定扩展这一阶段,从而线弹性极限点为起裂载荷值,而最大载荷出现在裂纹不稳定扩展阶段。因此,木材的复合型断裂破坏面包含起裂和裂纹扩展这两个阶段。徐博瀚等<sup>[14]</sup>总结了针对层板胶合木顺纹断裂的研究,发现木材顺纹长木质纤维的构造特性导致其抵抗横纹断裂能力很高,却具有较低的抵抗顺纹断裂能力。对于评价木材抵抗横纹断裂能力而言,通常采用传统的材料力学强度准则,而研究其抵抗顺纹断裂能力可以采用断裂力学方法。评价木材的强度一般采用传统的材料力学方法,然而目前拥有较多应用线弹性断裂力学研究木材顺纹断裂的成果,为此问题提供了一种有效的新方法。研究无裂纹构件的破坏问题时,考虑塑性区并对裂纹长度进行修正后,材料力学方法可以被断裂力学方法替代。王智丰等<sup>[15]</sup>利用设计软件 Midas Civil 2010 对已有的一座胶合木结构示范人行桥进行了有限元建模。他们关于示范人行桥主要测点的静载试验发现其结构校验系数小于理论计算值,且相对残余应力和残余变位都小于 20%(均满足国内相关规范要求),这说明结构处于较好的弹性工作状态,承载能力达到设计要求。但是对于结构性能这方面,由于没有开展动力性能试验,因此不能做出全方位评价。

对 SLT 技术而言,木结构间的整体性由于 SLT 技术的引入而得到优化<sup>[16]</sup>,从而木结构桥梁的使用性能得到提升。姚晓荣等<sup>[17]</sup>提出影响应力叠合木桥面板性能的主要因素为:1)预应力水平:随着时间的增长,叠合板间的压力因预应力松弛而不断减小,木桥面板之间的摩擦力也在不断减小,当板件间不能传递荷载时桥面板性能下降;2)使用现场的温度:早晚温度变化和季节交替导致的温度变化会引起使用现场的温度变化,其中最主要的是季节变化对叠合板应力带来的影响,但通常可以忽略早晚温差的影响。3)木材的徐变:木材的徐变会导致应力叠合木桥面板的初始预应力损失。研究指出,预应力损失值至少为张拉力的 40%,其中第一周内受到徐变效应的影响最大,其损失值大于等于张拉力的 50%。4)对接接头:可以引入对接接头将叠合板接长,以解决叠合板长度无法达到应力叠合板长度要求的问题。但是,由于刚度决定了应力叠合木桥面板的跨越能力,而使用对接接头导致木板的刚度大幅度降低,因此不能只追求低造价而使桥面板的承载能力和跨越能力受到影响,必须根据规范进行设计。Ekholm 等<sup>[18]</sup>针对 SLT 层间滑移进行了相关研究,

通过采用不同的预应力水平、荷载次数、跨深比、梁宽和对接构型组合进行多次试验,对试验结果进行分析,最后与非线性有限元分析结果进行比较后发现:在高跨深比且无对接节点的情况下,层间滑移很小;未对接试件在 300 kPa 及以上预应力水平下滑移较小;在带有对接接头的测试单元观察到滑移后刚度显著降低的现象。

对 CLT 技术而言,由于木材具有较高的顺纹抗拉强度和横纹抗压强度,因此 CLT 技术的加工方式使用交错叠合技术,木产品的整体性和均质性得到优化。目前已有许多针对其层间剪切性能的研究。龚迎春等<sup>[19]</sup>使用国产日本落叶松制造 CLT,分别从层板模量、层厚、层板数目、组坯纹理方向这四个方向分析了 CLT 层板间剪切强度的影响因素,其破坏形式如图 4 所示。作者发现:1)CLT 层板间剪切强度在组坯纹理方向的变化下大幅度增加;增加层板锯材自身的弹性模量、降低层厚、减少层板数目,对层板间剪切性能有很大的影响,但对 CLT 的层间剪切弹性模量几乎没有影响。2)以中横向层剪切破坏、底层锯材的拉伸断裂以及表层和横向层的胶层破坏为主要模式的层间剪切破坏。该文中表示预测 CLT 等效剪切刚度通常使用剪力类比法,此方法不仅能够保证预测值和实测值相对误差小于等于 7%,同时还可以预测 CLT 的剪切性能。王正等<sup>[20]</sup>首先利用 CLT 正交各向异性的特点,提出了 CLT 梁正应力沿其矩形截面高度的计算公式;接着由梁截面上剪力和弯矩的微分关系推导出 CLT 梁剪应力计算公式;由此可以计算出 CLT 梁在 3 层、5 层和 7 层间的剪应力和其最大值;最后对铁杉 CLT 梁层间剪切强度采用跨厚比为 6 的短跨三点弯曲法进行测试。试验显示:在三点弯曲加载过程中,CLT 短跨距梁(加载示意图如图 5 所示)总共产生三种破坏模式,依次为垂直层滚动剪切破坏、层间剪切破坏和平行层弯曲破坏。周巍宇等<sup>[21]</sup>研究了日本落叶松胶合木的销槽承压性能,结果表明:1)试件在横纹纹理方向的压应力即使达到屈服阶段仍会不断增加,然而压应力在顺纹纹理方向达到最大值后骤降;2)日本落叶松胶合木销槽承压强度在不同试验方法中几乎没有差异,但其大小与密度成正比。Winistorfer<sup>[22]</sup>为了研究销槽承压强度是否受到木材含水率的影响,分别对 6% 和 12% 含水率的南方松和云杉的销槽承压性能进行测试。结果表明,木材种类相同的情况下,销槽的承压强度随含水率的降低而增加。

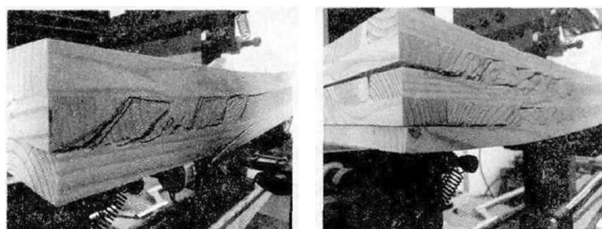


图 4 CLT 破坏形式

## 2.2 木桥的检测与加固技术

在木桥的检测与加固技术方面,Dewey 等<sup>[23]</sup>提出了采用现有的纤维增强聚合物技术来加固和修复损坏的木桥梁体

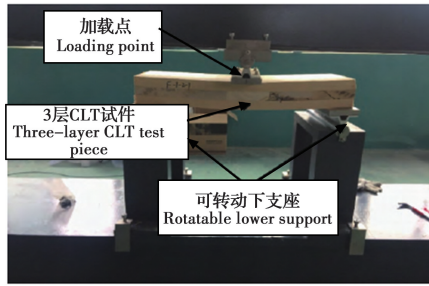


图 5 三点弯曲加载示意图

的方法,对三根已拆除的木结构梁体使用 CFRP、GFRP 材料加固并进行四点加载试验。试验表明经过加固之后,其中 2 根试件在破坏前的弯矩和挠度都有不同程度的增加,未破坏的试件抗弯刚度和弯矩分别提高了 30% 和 25%,三者的延性都得到了很大的提高,因此可以认为纤维增强聚合物技术可以有效改善老化木结构梁体的修复。

Balendra 等<sup>[24]</sup>基于澳大利亚现有木结构桥梁老化严重的情况,提出有必要使用无损评估(NDE)对现有木桥进行一个全局系统的初步评估,以确定可能的损伤区域。然后,使用更局部的无损检测形式对识别出的区域进行进一步调查,以确认损害并评估损害程度。前者主要包括动态系统识别和诊断负载测试,后者则通过目视检查、冲击试验、微波/探地雷达技术进行。

Kim 等<sup>[25]</sup>提出使用 FRP 复合材料加强木材结构构件,通过对使用 FRP 材料加固的木桩试件进行压缩试验和推覆试验,研究其可行性。FRP 约束木桩如图 6 所示。压缩试验表明,FRP 约束木材的整体性能类似于混凝土,FRP 约束提高了其峰值强度,对延性有所改善,并且不影响其本身的抗拉强度。木墩恶化引起的截面损失对其结构性能有较大的影响,推覆试验表明,FRP 约束对恶化木墩的性能改善有限。因此,有必要对恶化桥墩进行额外改造,将 FRP 用于木桩的外围加固。



图 6 FRP 约束木桩<sup>[25]</sup>

Mahini 等<sup>[26]</sup>通过对两座已有桥梁的可靠性监测,研究了使用高速摄像机和基于激光的方法对木结构桥梁进行实时损伤检测的可行性。用于检测桥梁挠度的 NDM 系统如图 7 所示。试验显示,高速摄像机和激光测量系统可以连续记录木结构桥梁在正常交通流下引起的挠度,识别车辆装载的细节、最大桥梁荷载、桥梁的动态特性和主梁失效的概率。

通过及时识别和更换损伤的部件,可以提高木结构的可靠性。此外,该系统安装简单,且可以在不干扰正常交通的情况下进行。

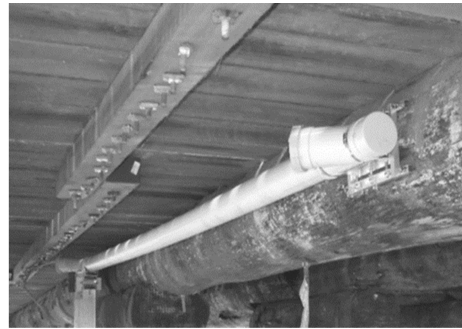


图 7 用于检测桥梁挠度的 NDM 系统<sup>[26]</sup>

Burgers 等<sup>[27]</sup>提出了通过增加由玻璃纤维制成的剪力钉的方法,以修复恶化的木桥。剪力钉通过环氧树脂和木桥联结在一起,全尺寸木桥的弯曲试验显示,部分环氧树脂进入了木质纤维中,提高了木质纤维的性能;纵向的剪力钉有效恢复了全尺寸纵梁的有效刚度。

Abbott 等<sup>[28]</sup>通过调查澳大利亚现存的 27 000 多座木桥,总结了木桥的主要劣化原因:梁体腐蚀、开裂和白蚁侵蚀。在此基础上提出了检测以上缺陷的方法,并找到用于减轻木桥退化的预防措施。基于各个州管理机构的修复程序和经验,提出了预测木桥剩余寿命的经验模型。

### 2.3 木-混凝土组合桥梁

木质材料质量轻,可回收,加工性强,但在钢筋混凝土材料出现后,其在桥梁工程中被大规模替代。木材-混凝土复合材料(timber-concrete composite, TCC)在上个世纪 30 年代就有相关学者提出,但是由于木材性能限制,相关研究较少。随着近代胶合木板技术的发展和国内外对环境保护日益增长的需求,TCC 材料引起了国内外学者的注意。

作为现代木与混凝土相结合的一种新型结构形式,木-混凝土组合结构采用胶合木梁作为腹板,选用配置构造钢筋的混凝土板作为 T 型结构梁的翼板,其混凝土抗压性能和木材的抗拉性能得到充分的发挥。剪力连接件使得腹板和翼板两者协同工作,并可以传递纵向剪力,限制了混凝土和木梁之间的相对滑移,同时抵抗了两种材料间的掀起效应。相较于传统木梁,现代木-混凝土组合梁很大程度提升了整体性、刚度、承载力和防火能力<sup>[29]</sup>。

袁帅等<sup>[29]</sup>通过对 8 根胶合木-混凝土简支梁桥进行静力试验和有限元分析,对 TCC 梁桥的整体性能进行了研究,如图 8 所示。试验和数值模拟结果显示,组合梁端滑移、跨中截面沿梁高方向应变、跨中挠度都随荷载的增加而在一定比例下增大,说明木梁和混凝土板两者充分地协同工作,组合梁桥的整体刚度理论值较实际值小,结构整体性好。

贺国京等<sup>[30]</sup>为了得到木-混凝土组合梁弹性阶段弯曲变形的计算方法,将修正折减刚度法用于计算木-混凝土组合梁挠度,此方法在钢-混凝土组合梁折减刚度法的基础上被提出,利用试验结果对此计算方法进行验证,并与钢-混凝土

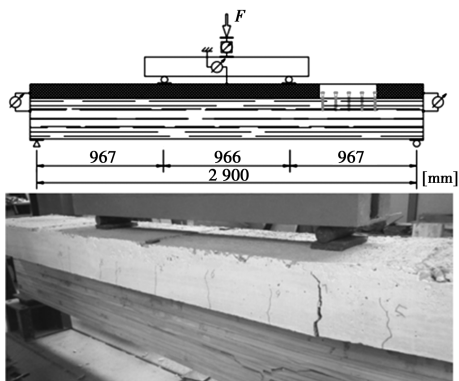
图 8 TCC 梁桥静力试验<sup>[29]</sup>

组合梁的折减刚度法进行对比。结果表明,相比钢-混凝土组合梁的折减刚度法,修正折减刚度法计算精度更高,能够较准确地反映木-混凝土组合梁的变形能力。修正折减刚度法用于计算木-混凝土组合梁挠度,此方法在钢-混凝土组合梁折减刚度法的基础上被提出。

曹雅蒙等<sup>[31]</sup>利用有限元软件分析木-混凝土组合梁桥的自振特性,从而对其抗震性能进行研究。建立了 2 个相同截面尺寸和跨径的木-混凝土组合梁桥、混凝土梁桥有限元模型,通过反应谱法对两座桥进行动力分析,并比较其抗震性能。结果显示,混凝土梁桥的抗震性能较差,木-混凝土结构在地震波作用下更加安全。

Shi 等<sup>[32]</sup>为了研究使用开槽螺钉连接的 TCC 梁桥的长期性能,开展了推出试验,即一个 TCC 梁桥和木桥的长期试验。试验结果表明,环境湿度对木材和 TCC 梁的长期变形有显著影响。但是,由于环境温度在长期测试中变化缓慢,无法验证温度变化的影响。此外,与纯木梁相比,混凝土板对 TCC 梁的徐变系数贡献显著。采用 3 种现有的蠕变模型和一种改进的模型对推出试件的长期滑移曲线进行拟合。修正模型与记录数据的拟合精度最好,对整个使用寿命的预测趋势最合理。

Schanack 等<sup>[33]</sup>为了研究 TCC 梁桥中混凝土开裂对力和变形分布的影响,对使用弹性剪力钉的 TCC 梁桥开展了剪切试验,如图 9 所示,并基于试验数据利用有限元模型进行了参数研究。结果表明,混凝土开裂导致了剪力钉滑移模量减少,木材拉伸应力增加,梁跨中挠度高达 20%。

图 9 TCC 梁桥剪切试验<sup>[33]</sup>

### 3 热点与展望

检索目前现有文献发现,由于木材具有施工简便、耐久性好、保护资源、抗震稳定等优点,近年来我国针对木质桥梁

的研究正在逐年增加。关于木质桥梁方向的未来发展,笔者认为可从以下几个方面开展工作:

- 1) 木质桥面板技术的研究与应用。
- 2) 木桥检测与加固技术的进一步发展。
- 3) 探索木-混凝土组合桥梁结构的新形式。

#### 参考文献:

- [1] METTEM C J. Timber bridges [M]. New York: Spon Press, 2011.
- [2] WACKER J P, JOYAL M R, MURPHY J F, et al. Monitoring the performance of timber bridges over the long term [R]. Ames: Iowa State University, 2007.
- [3] GEROLD M. Bloc-glued laminated decks for timber bridges [J]. Structural Engineering International, 2002, 12(3): 214-217.
- [4] DYKEN T, KLEPPE O. The Norwegian Approach to Modern Timber Bridge Design [R]. Oslo: Norwegian Public Roads Administration, 2010.
- [5] 《木结构设计手册》编辑委员会. 木结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] AASHOT LRFD Bridge. Design Specifications [S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001.
- [7] CSA. CAN/CSA-S6-06. Canadian Highway Bridge Design Code [S]. Canada: Transportation Association of Canada (TAC), 2006.
- [8] BS EN 1995-2: 2004. Eurocode 5: Design of timber structure-Part 2: Bridges [S]. British, 2004.
- [9] 王镜镔, 杨海旭, 刘捷钰, 等. 牡丹江市木桥应用分析 [J]. 山西建筑, 2019, 45(6): 153-154.
- [10] 姚晓荣, 叶兰洲. 木结构桥梁的发展和应 [J]. 现代商贸工业, 2021, 42(8): 161-162.
- [11] 费本华, 王戈, 任海青, 等. 我国发展木结构房屋的前景分析 [J]. 木材工业, 2002, 16(5): 6-9.
- [12] 刘永健, 傅梅珍, 刘士林, 等. 现代木结构桥梁及其结构形式 [J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 83-91.
- [13] 赵艳华, 李征, 常建梅. 木材 I/II 复合型断裂破坏研究进展 [J]. 力学与实践, 2017, 39(1): 7-17.
- [14] 徐博瀚, 王亚勋, 赵艳华. 木材顺纹断裂韧度的研究进展 [J]. 力学与实践, 2016, 38(5): 493-500.
- [15] 王智丰, 尹攀, 曹磊, 等. 现代胶合木拱桥结构性能评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4): 107-111.
- [16] RTA. Timber Bridge Manual: Stress Laminated Timber Systems [S]. New South Wales: ARRB, 2008.
- [17] 姚晓荣, 叶兰洲. 应力叠合木桥面板的发展与应用 [J]. 吉林广播电视大学学报, 2020(6): 105-106, 109.

- [18] EKHOLM K, EKEVAD M, KLIGER I R. Modeling slip in stress-laminated timber bridges: Comparison of two finite-element-method approaches and test values [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(9): 04014029.
- [19] 龚迎春, 徐俊华, 武国芳, 等. 国产日本落叶松正交胶合木的层间剪切性能[J]. *木材工业*, 2018, 32(2): 6-9.
- [20] 王正, 卢尧, 谢文博, 等. 正交胶合木(CLT)梁剪应力分析及其层间剪切强度测试[J]. *林业科学*, 2019, 55(2): 152-158.
- [21] 周巍宇. 落叶松胶合木销槽承压强度影响因素研究[J]. *中外建筑*, 2017(6): 253-256.
- [22] WINISTORFER S G. Validation of European yield model connections [M]//Structures congress'94. Atlanta: American society of Civil Engineers, 2014.
- [23] DEWEY J, BURRY M, TULADHAR R, et al. Strengthening and rehabilitation of deteriorated timber bridge girders [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 302-309.
- [24] BALENDRA T, WILSON J L, GAD E F. Review of condition assessment and retrofitting techniques for timber bridge assets in Australia [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(1): 171-180.
- [25] KIM K H E, ANDRAWES B. Multihazard assessment and retrofit of deteriorated timber pile bridges [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2018, 32(3): 04018020.
- [26] MAHINI S S, MOORE J C, GLENCROSS-GRANT R. Monitoring timber beam bridge structural reliability in regional Australia [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016, 6(4): 751-761.
- [27] BURGERS T A, GUTKOWSKI R M, BALOGH J, et al. Repair of full-scale timber bridge chord members by shear spiking [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(4): 310-318.
- [28] ABBOTT T, GAMAGE N, SETUNGE S, et al. Predicting the remaining life of timber bridges[M]//Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2018: 1-10.
- [29] 袁帅, 贺国京, 李礼, 等. 木-混凝土组合梁桥受力性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(5): 107-111.
- [30] 贺国京, 冷骏, 杨传建, 等. 木-混凝土组合梁变形计算的修正折减刚度法[J]. *建筑结构*, 2017, 47(17): 24-28.
- [31] 曹雅蒙, 彭乐宁, 陈子昂. 地震波作用下木-混组合梁桥的动力响应[J]. *湖南交通科技*, 2018, 44(1): 123-125, 165.
- [32] SHI B K, LIU W Q, YANG H F, et al. Long-term performance of timber-concrete composite systems with notch-screw connections [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110585.
- [33] SCHANACK F, RAMOS Ó R, OSMAN J P, et al. A contribution to understanding the influence of concrete cracking on timber concrete composite bridge beams [J]. *Bautechnik*, 2015, 92(2): 105-110.

(编辑 黄廷)