

胶合竹-混凝土组合梁 RPC-钢复合连接件试验研究

单波^{1,2†}, 王艺莹¹, 肖岩³, 张长青^{1,4}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

3. 浙江大学 浙大-伊利诺大学联合学院, 浙江 海宁 314400;

4. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对现有凹槽连接件与销连接件性能上的不足,提出了一种适用于装配式胶合竹-混凝土组合梁的活性粉末混凝土(RPC)-钢复合连接件,复合连接件由带轴向开孔的螺杆外包RPC组成.对6组复合连接件开展了推出试验,研究参数包括外包RPC厚度和螺杆直径.获取了荷载-滑移曲线、抗滑移刚度、抗剪承载力等力学指标.试验结果表明,外包RPC对复合连接件的抗滑移刚度有显著贡献,对抗剪承载力也有一定的提高作用,但复合连接件的抗剪承载力主要取决于螺杆直径.相比于凹槽连接件,复合连接件的单位面积受力效率更高;相比于销连接件,复合连接件的抗滑移刚度显著提高.复合连接件结合了凹槽连接高刚度与销连接高延性的优点,且便于现场装配,在性能上具有突出优势.基于试验结果,提出了复合连接件的设计原则与尺寸范围.

关键词:组合梁;胶合竹;剪力连接件;活性粉末混凝土;推出试验

中图分类号:TU398.4

文献标志码:A

Experimental Research on RPC-steel Composite Connection for Glulam-concrete Composite Beams

SHAN Bo^{1,2†}, WANG Yiyi¹, XIAO Yan³, ZHANG Changqing^{1,4}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency (Hunan University) of the Ministry of Education, Changsha 410082, China;

3. Zhejiang University-University of Illinois Institute, Zhejiang University, Haining 314400, China;

4. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Changsha 410082, China)

Abstract: The existing connections for glulam/bamboo-concrete composite (BCC) beam, including notched connection and dowel connection, exhibit performance deficiencies. Therefore, a new kind of connection, named as reactive powder concrete (RPC)-steel composite connection, was presented for prefabricated BCC beams in this paper, in which steel screw with an axial hole was covered by a layer of RPC. Total 6 groups of specimens were performed by push-out tests. The major mechanical properties such as the load-slip curves, shear capacity and shear stiffness were measured and then evaluated. The results showed that the RPC coat significantly improved the shear

* 收稿日期:2019-02-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703502), National Key R&D Program of China(2017YFC0703502);湖南省财政厅专项(801201008, 858501153), Special Fund of Hunan Provincial Department of Finance(801201008, 858501153)

作者简介:单波(1976—),男,湖南益阳人,湖南大学副教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: supershan@hnu.edu.cn

stiffness of composite connection and increased the shear capacity in a certain degree, while the shear capacity was mainly decided by the diameter of steel screw. Compared with the notched connection and dowel connection, the proposed connection has higher carrying efficiency per unit area and higher shear stiffness, respectively. Therefore, the RPC-steel composite connection combines the merits of high shear stiffness and high ductility from two conventional connections, and it is fit to prefabricated construction. Based on the test results, the design size of the proposed connection was also provided.

Key words: composite beams; laminated bamboo; shear connectors; reactive powder concrete (RPC); push-out test

我国正在大力发展绿色建筑和装配式建筑,作为实现建筑业可持续发展的突破点^[1].以可再生的木材作为结构材料的现代木结构,具备绿色建筑和装配式建筑的技术特征,符合国家建筑业的政策指向,在我国正处于加速发展期^[2].当前,我国的结构用木材资源有限,绝大部分工程木依靠进口.另一方面,我国拥有世界上最丰富的竹材资源,将竹材用作结构材料,实现“以竹代木”,日益受到重视,并初步形成了具有中国特色的现代竹结构体系^[3].

格鲁班(glubam)是一种新型竹质工程材料,其强度/质量比较高,因此由 glubam 制成的构件具有自重小、承载力高等优势.但由于竹材弹性模量低,导致胶合竹梁抗弯刚度低,承载力往往由变形控制,材料的强度难以发挥,极大地限制了胶合竹结构的跨度^[4-6].

国外木结构的发展过程中,普遍采用组合梁(板)的形式提高木梁的抗弯性能.即在木梁(板)上部浇筑混凝土板,通过剪力连接件形成木-混凝土组合梁(板).这一组合形式可以充分发挥混凝土的抗压性能和木材的抗拉性能,有效提高构件的刚度和承载能力,增大结构的跨度,并提高结构的隔声、隔振能力和保温隔热性能^[7].在欧洲和北美等木结构发达国家,木-混凝土组合梁得到了系统深入的研究,并已广泛应用^[8-10].我国也有学者在这方面开展了相关研究^[11-14].近年来,为了克服现场浇筑混凝土所带来的施工困难,减少混凝土板收缩对组合梁性能的影响,并提高施工效率,一些研究者提出了适用于预制、半预制装配式木-混凝土组合梁(板)的剪力连接形式,并开展了相关试验研究. Lukaszewska 等^[15]报道了7种装配式连接件;Yeoh 等^[16]提出了一种基于凹槽连接件的半预制装配式木-混凝土组合梁;Crocetti 等^[17]以及 Khorsandnia 等^[18]通过在混凝土板中预留孔洞及预埋木块,实现组合梁的装配施工.这些研究表

明,采用装配式组合方式,可极大地提高木-混凝土组合梁的施工效率,缩短工期,节约费用^[18].

木-混凝土组合梁的剪力连接件,可分为销连接与凹槽连接两类^[19].销连接延性好,但抗滑移刚度较低;凹槽连接抗滑移刚度高,但延性较差.这两类连接件在性能上均存在不足.试验表明,即使在凹槽中插入销杆,由于混凝土本身的延性很差,两者不能有效地共同工作,连接依然表现为脆性破坏^[8].考虑到混凝土的受压破坏和木材的受拉破坏都具有显著的脆性,组合梁在发生弯曲破坏前的延性基本来自于连接件本身的变形.因此,在保证具有一定延性的条件下,提高连接件的抗滑移刚度具有重要意义. Auclair 等^[20]设计了一种在螺杆外包超高性能混凝土壳的剪力连接件,利用超高性能混凝土优异的抗裂能力,在保证维持一定延性的条件下,提高连接件的力学性能.然而,该连接件缺乏竖向抗拔措施,对连接件的可靠性影响大,也不适用于装配式施工.

目前,一些研究者对胶合竹-混凝土组合梁开展了初步研究,主要集中在常规连接件的抗剪切滑移性能方面^[21-25],而对于装配式连接件基本没有涉及.基于已有研究成果,本文提出一种活性粉末混凝土(RPC)-钢复合连接件,开展连接件的推出试验与分析,为基于此类连接件的装配式胶合竹-混凝土组合梁的进一步研究与应用,提供基础性数据.

1 连接件设计

RPC-钢复合连接件,其基本结构为中心钻孔的螺杆外包 RPC,如图1所示. RPC 是一种超高性能混凝土,具有高强度、高延性、高耐久性等优异性能^[26-27].由于掺入钢纤维,跨越裂缝处的钢纤维具有桥接作用,提高了 RPC 的抗裂性能与变形能力.将 RPC 与螺杆结合起来,共同承担组合界面的剪力,可

以增加连接件的受剪面积,在变形较小时,能有效提高连接件的抗滑移刚度;此外,RPC具有良好的延性,在变形较大时能有效维持所承担的界面剪力,避免连接件的脆性破坏.因而,RPC和螺杆能够协同工作,复合连接件同时具备高刚度与高延性.

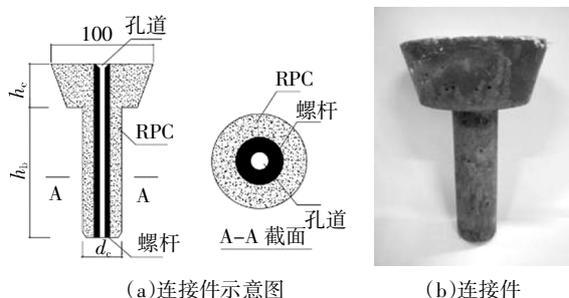


图1 RPC-钢复合剪力连接件(单位:mm)
Fig.1 RPC-steel composite shear connector(unit:mm)

如图1所示,本文设计的复合连接件分为上下两部分:上部嵌入预制混凝土板中,为圆台形,上表面直径100mm,高度 h_c 为40mm,侧面倾角 15° ;下部插入胶合竹梁内,为圆柱形,其长度 h_b 与外径 d_c 有关,在本试验中, h_b/d_c 约为5.

这一组合体系中,在上部预制混凝土板和下部胶合竹梁的对应部位分别预留或钻取安装孔道,如图2所示.其中,混凝土板中的预留孔锥度与连接件上端相同,胶合竹梁中的孔道直径,与连接件下端的外径一致.现场装配时,直接将复合连接件插入安装孔道中,抵抗界面剪力,形成组合效应.此外,由于混凝土板与竹梁的抗弯刚度不一致,组合梁受弯时会导致界面产生竖向分离,降低组合效应.因此,连接件本身需要抵抗竖向抗拔力.为此,在螺杆的中心钻取一个内径为6mm的通长孔道,装配时插入木螺钉并拧入胶合竹梁内,形成竖向抗拔构造.本试验中,木螺钉的规格为M4.8,其尖端拧入胶合竹梁中的深度约为20mm.

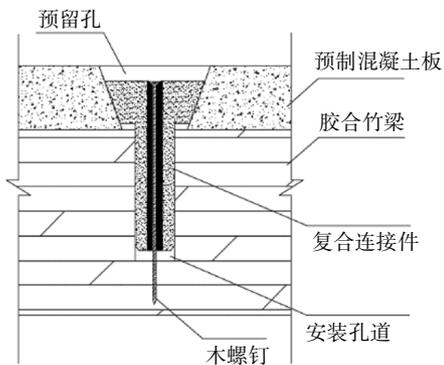


图2 胶合竹梁与预制混凝土板组合示意图
Fig.2 Schematic diagram of glulam-concrete composite beam

试件的基本装配过程如图3所示.需要说明的是,多个连接件的装配与单个连接件的装配有区别,混凝土板中预留孔与竹梁钻孔的位置可能存在一定误差,以及竹梁在自重下的弯曲变形等,都会对装配造成影响.在装配试验中发现,胶合竹材的弹性模量低,孔道在连接件的插入过程中会产生一定的变形,且连接件的插入端本身也会产生较小的弯曲,这些适应性变形可有效减少装配误差导致的施工困难.当然,这需要在大幅度组合梁试验中加以验证.



图3 装配过程
Fig.3 Assembly process

2 试验材料

2.1 胶合竹(glulam)

本试验的竹梁均由厚度为28mm的glulam板材制成.glulam是由多层单向竹帘交错叠铺热压而成的正交各向异性材料^[4].板材纵向和横向分别对应于木材的顺纹方向和横纹方向,如图4所示.纵向是主要受力方向,也是纤维较多的方向,本试验glulam板材的纵向与横向竹纤维之比为4:1.参照相关国家标准进行试验^[28-32],glulam的基本物理力学指标见表1.

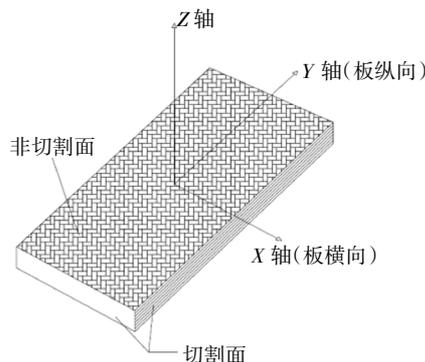


图4 Glulam 板材结构示意图
Fig.4 General view of glulam sheet

表1 Glulam 基本力学性能指标

Tab.1 Basic mechanical properties of glulam

顺纹抗弯 模量/GPa	顺纹抗弯 强度/MPa	顺纹抗拉 强度/MPa	顺纹抗压 强度/MPa	体积质量 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
9.4	99	82	51	880

2.2 RPC

RPC 的原材料基本情况如下:水泥为 42.5 的硅酸盐水泥,湘潭产;粉煤灰为细度为 10%的 II 级灰,湘潭产;硅灰为贵州产,平均粒径为 $0.1 \mu\text{m}$;石英砂规格为 $420\sim 841 \mu\text{m}$ (20~40 目),长沙产;石英粉规格为 $44 \mu\text{m}$ (325 目),长沙产;减水剂为聚羧酸高效减水剂,粉剂;镀铜钢纤维,直径为 0.12 mm ,长度为 13 mm ,河南产。

RPC 的配合比为:水泥:粉煤灰:硅灰:石英砂:石英粉:减水剂:钢纤维(体积比)= $1.0:0.1:0.2:1.1:0.1:0.015:0.02$,水胶比为 0.2 。制成边长为 100 mm 的立方体试件,在 90°C 的热水中养护 48 h 后的抗压强度为 110.5 MPa 。

2.3 螺杆

试验采用 4.8 级的 M14、M16 和 M18 三种型号螺杆作为复合连接件的芯杆。螺杆的屈服强度 f_y 、极限抗拉强度 f_t 和弹性模量 E_t 的实测结果见表 2。

表 2 螺杆材料参数

Tab.2 Mechanical properties of threaded rods

型号	直径/mm	f_y/MPa	f_t/MPa	E_t/MPa
M14	14	348	440	2.0×10^5
M16	16	330	431	2.0×10^5
M18	18	342	428	2.0×10^5

表 3 剪切试验试件参数

Tab.3 Parameters of shear test specimens

试件编号	d_c/mm	d_s/mm	d_n/mm	h_b/mm	试件数	A_s/mm^2	$A_{\text{RPC}}/\text{mm}^2$	A_s/A_{RPC}	破坏模式
S14-35	35	14	6	120	5	125	808	0.15	a(5)
S16-25	25	16	6	95	5	172	289	0.60	a(1)+b(4)
S16-30	30	16	6	110	5	172	505	0.34	a(2)+b(3)
S16-35	35	16	6	120	5	172	761	0.23	a(2)+b(3)
S16-40	40	16	6	140	5	172	1055	0.16	a(4)+b(1)
S18-35	35	18	6	120	5	226	707	0.32	b(5)

注: a 为剪切破坏; b 为拔出破坏;括号内数字为试件数。

试件下部的胶合竹梁由 4 层 glubam 板材冷压叠合而成。首先将 glubam 板材切割,然后在叠合面涂刷胶黏剂进行冷压,待胶黏剂达到固化要求后对试件进行修整,使其符合设计的尺寸要求。其中,胶合竹梁的冷压胶合面垂直于上部混凝土板,即竹梁在侧立面内受弯;最后,在竹梁顶面中心位置钻孔,孔道直径与复合连接件外径 d_c 相同。

上部预制混凝土板采用定制钢模浇筑,板中心处安装一钢制预埋块,通过螺栓固定在底模中心,拆

3 试验设计

3.1 试件设计

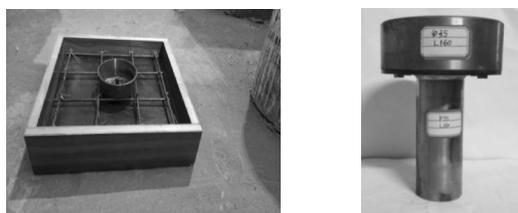
试件中的竹梁尺寸为 $300 \text{ mm}\times 112 \text{ mm}\times 250 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。预制混凝土板尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}\times 40 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),其厚度与复合连接件的上部嵌入端的高度相同,对应于复合连接件的锥帽与混凝土板预留的锥孔齐平。需要说明的是,在实际使用中,混凝土板的厚度可以大于连接件锥帽的高度(如图 2 所示),这样更有利于锥帽在敲击作用下与锥孔紧密接触,不留间隙,提高装配的紧实性。

本试验设计了 6 组试件,每组 5 个,共 30 个。试验的主要参数是螺杆的直径和外包 RPC 的厚度。各组试件参数见表 3,其中, d_n 为螺杆中心钻孔的直径, d_s 为螺杆直径, A_s 为螺杆的净面积, A_{RPC} 为外部 RPC 的净面积。试件的编号说明如下: S 表示复合连接件,随后的数值分别代表螺杆直径 d_s 和连接件下端的外径 d_c 。以 S16-25 为例,表示采用螺杆直径为 16 mm 、连接件下端外径为 25 mm 的试件。依据试验参数,表 3 中的试件可分为两组:第一组为螺杆直径 d_s 不变,连接件的外径 d_c (外包 RPC 的厚度)变化,如 S16-25、S16-30、S16-35 和 S16-40;第二组为连接件的外径 d_c 不变,螺杆直径 d_s 变化,如 S14-35、S16-35、S18-35 试件。

模后形成预留孔,如图 5(a)所示。混凝土板采用 C40 等级的钢纤维混凝土。为防止混凝土板开裂,在板中布置构造钢筋网,规格为 HRB335 $\Phi 6@90\times 90$ 。本试验中,混凝土板可重复使用。

复合连接件采用定制钢模浇筑成型,钢模外观如图 5(b)所示。连接件的基本制作流程如下:首先,在按长度要求切割好的螺杆中,钻出通长的孔道;其次,将螺杆插入模具中,并将模具固定在自制的支架上;然后,将搅拌好的 RPC 浇筑入钢模中,并在振动

台上振捣密实. 连接件在室内自然养护 1 d 后拆模; 最后, 放在 90 °C 热水中养护 48 d, 加速 RPC 强度的发展.



(a) 混凝土板钢模

(b) 连接件钢模

图 5 连接件制作过程

Fig.5 Production process of connector

3.3 试验装置及加载制度

本试验的推出试验为单面直剪试验, 在自制的试验架上进行, 设备的基本构造如图 6 所示. 加载设备为 2 000 kN 长柱试验机, 荷载由安装在试件顶部的压力传感器测量, 组合界面的相对滑移由安装在试件中部的 2 个位移传感器(LVDT)测量. 为尽量减小竹梁与加载架接触面之间的摩擦力对试验结果的影响, 在接触部位设置了 2 层特氟龙板(聚四氟乙烯板).

推出试验按照欧洲标准 EN 26891—1991^[33]进行, 该标准包含了测试抗滑移刚度的方法. 首先, 试件加

载到预估破坏荷载的 40%, 暂停 30 s; 然后卸载至破坏荷载的 10%, 暂停 30 s; 最后继续加载至破坏. 试件的破坏状态定义为: 相对滑移量达到 15 mm 或出现其他不适于继续加载的破坏现象.

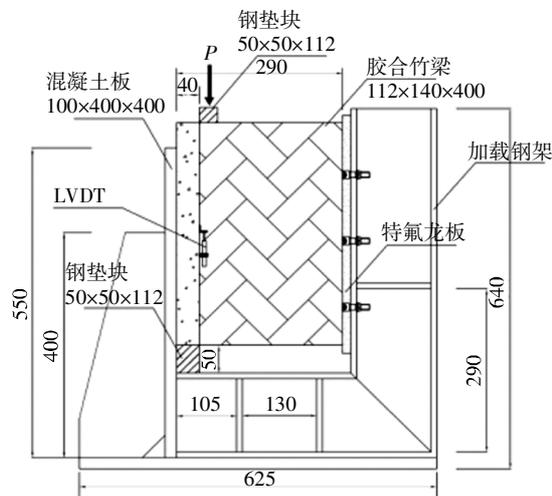


图 6 剪切试验加载装置(单位:mm)

Fig.6 Test setup (unit:mm)

4 试验结果

4.1 破坏形态及荷载-滑移曲线

各组试件的试验结果列于表 4 中, 数据均为 5

表 4 推出试验结果

Tab.4 Test results of push-out tests

组别	项目	抗滑移刚度/(kN·mm ⁻¹)			F_{max}/kN	s_p/mm	s_u/mm
		$k_{0.4}$	$k_{0.6}$	$k_{0.8}$			
S14-35 组	平均值	62.4	54.1	47.7	55.2	1.5	8.28
	标准差	5.8	4.0	3.5	3.8	0.16	1.66
	变异系数/%	9.4	7.5	7.4	6.9	10.6	20.0
S16-25 组	平均值	43.7	36.3	34.3	46.0	2.9	>15.00
	标准差	2.9	2.7	2.7	2.7	0.17	—
	变异系数/%	6.7	7.5	7.9	5.9	5.9	—
S16-30 组	平均值	61.5	51.5	47.4	58.6	2.5	>15.00
	标准差	3.3	2.9	2.4	3.0	0.26	—
	变异系数/%	5.4	5.7	5.0	5.2	10.4	—
S16-35 组	平均值	74.5	63.1	56.2	64.7	2.0	>15.00
	标准差	3.9	3.1	2.5	3.5	0.17	—
	变异系数/%	5.3	5.0	4.5	5.4	8.5	—
S16-40 组	平均值	95.1	81.7	69.6	70.5	1.7	>15.00
	标准差	4.5	4.3	4.4	3.8	0.19	—
	变异系数/%	4.8	5.2	6.3	5.0	11.2	—
S18-35 组	平均值	84.1	71.9	63.7	73.7	2.5	>15.00
	标准差	4.0	3.9	3.3	3.6	0.31	—
	变异系数/%	4.8	5.4	5.2	4.9	12.4	—

个试件的平均值. 其中,抗剪承载力 F_{max} 定义为在加载过程中的最大荷载,对于荷载-滑移曲线无明显下降段的试件,取为滑移量达到 15 mm 时的荷载值; s_p 为峰值荷载对应的滑移; s_u 为极限滑移,定义为荷载下降到 $0.8F_{max}$ 所对应的滑移,或取为 15 mm^[19].

抗滑移刚度 k 是评价连接件性能的重要指标,取 $k_{0.4}$ 、 $k_{0.6}$ 和 $k_{0.8}$ 分别代表正常使用极限状态(SLS)、承载能力极限状态(ULS)和接近破坏时的抗滑移刚度,取值分别为在荷载-滑移曲线上升段中,极限荷载 40%、60%和 80%对应点的割线刚度^[33].

试件的破坏主要集中在连接件和胶合竹梁的连接部位,混凝土板完好,无明显的破坏现象. 表 3 列出了各组试件的破坏类型及对应的数量,破坏分为两类:一类为剪切破坏,对应于连接件在界面处被剪断,而竹梁在连接部位的挤压变形较小,如图 7(a)所示. 这种破坏模式主要出现在螺杆直径比较小、外包 RPC 较厚的试件中,如 S14-35 和 S16-40;另一类为拔出破坏,螺杆从上部锚固端拔出,其原因应该是连接件受力倾斜后产生的法向拉力导致的,与此相对应,连接件弯曲变形导致的滑移较为显著,如图 7(b)所示. 这种破坏模式多出现在螺杆相对直径较大、外部 RPC 厚度相对较薄的试件中,如 S16-25 和 S18-35. 此外,当复合连接件中螺杆直径较大时,如 S18-35,glubam 出现纵向分层劈裂,如图 7(c)所示. 这主

要是因为连接件的承载力过高,推出过程中对胶层的挤压、剪胀作用产生的环向应力超过了 glubam 的内结合强度,导致分层开裂.

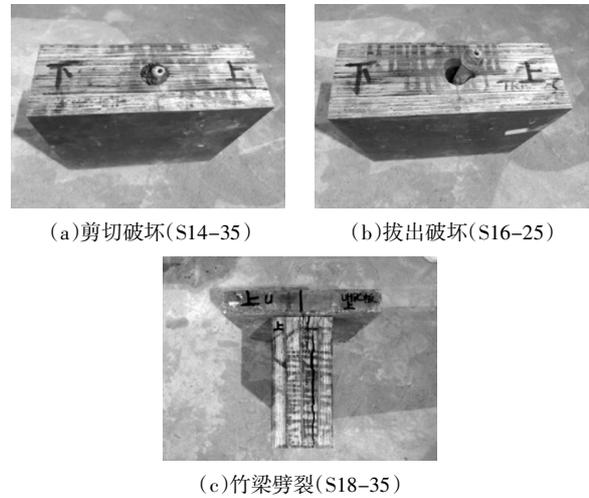


图 7 试件的主要破坏形态

Fig.7 Typical failure modes of specimens

所有试件均未观察到连接件从胶合竹梁中拔出现象,其主要原因是推出试验条件决定了混凝土板与胶合竹梁之间没有相对的竖向位移. 因此,木螺钉的抗拔性能在试验中未表现出来,这一抗拔构造措施的可靠性需要在组合梁的抗弯试验中加以验证.

图 8 给出了各组试件的荷载-滑移曲线,为两个

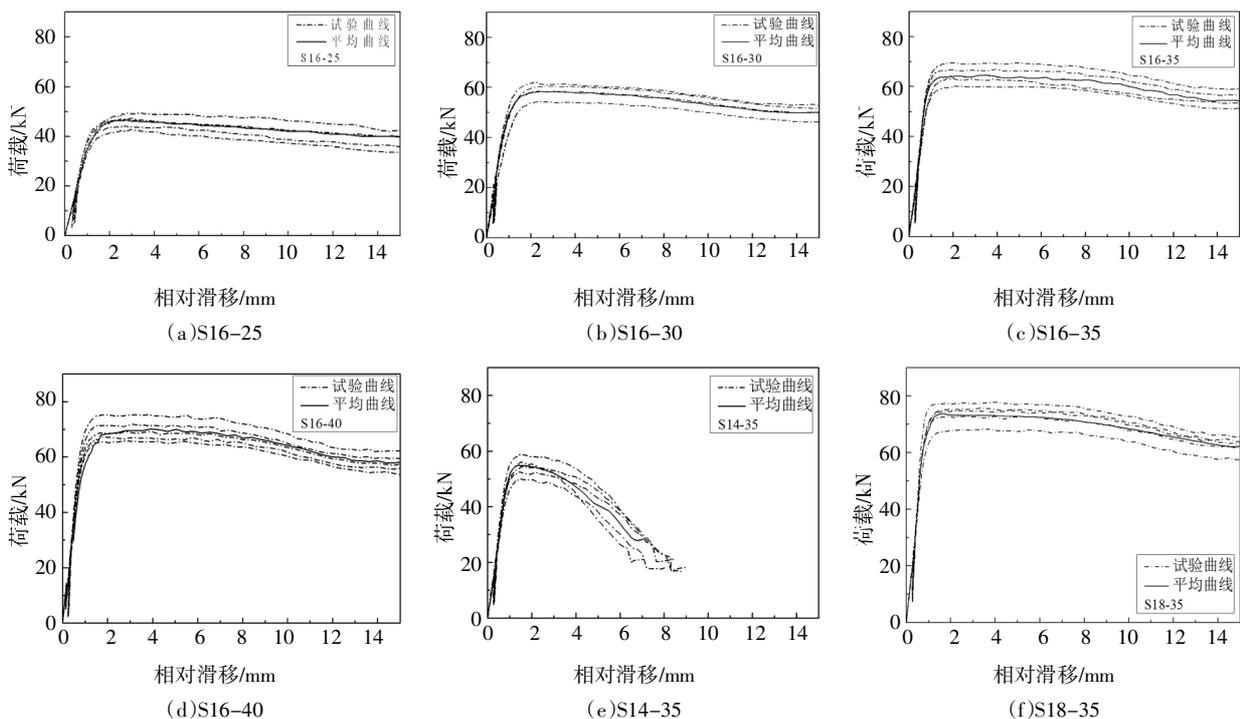


图 8 各组试件荷载-滑移相对曲线

Fig.8 Load-slip curves of each group

LVDT 测量数据的平均值. 从图 8 以及表 4 可看到, 各组 5 个试件的结果较为接近, 离散性较小, 表明复合连接件的性能稳定. 此外, 各组试件的荷载-滑移曲线的上升段基本类似, 从开始加载至荷载峰值的 70% 左右, 荷载-滑移曲线基本呈线性, 随后出现一定的非线性, 直至达到荷载峰值, 随后进入下降段. 曲线的下降段与破坏模式有关系. 对于以拔出破坏模式为主的试件, 下降段平缓, 形成一个平台段, 一直持续到相对滑移达到 15 mm, 承载力下降幅度没有超过 20%, 表现出良好的延性, 与典型的销类连接件较为接近^[25]. 而对于剪切破坏为主的试件, 荷载-滑移曲线退化显著, 如 S14-35 试件, 呈现脆性破坏模式, 类似于凹槽连接件^[24]. 其主要原因是 RPC 外包层承担的界面剪力与其厚度成比例, 在滑移较大的情况下, 其承担的剪力由于开裂而减小, 相应的螺杆所承担的界面剪力增大, 而由于螺杆直径较小, 承载力不足, 导致连接件迅速被剪断.

4.2 抗滑移刚度

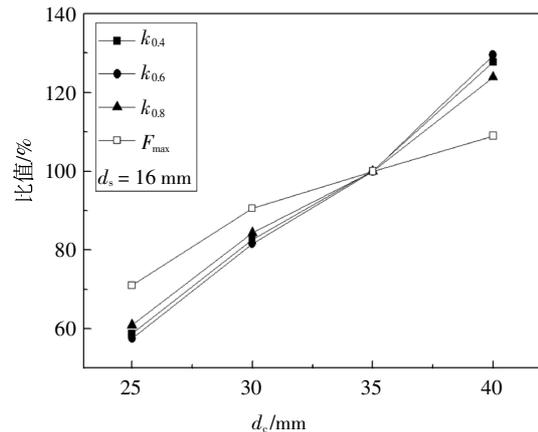
图 9 给出了抗滑移刚度、抗剪承载力与连接端直径 d_c 及螺杆直径 d_s 的相关关系, 图中, 以 S16-35 试件的力学指标作为 100%. 首先, 从图 9(a) 可看到, 在螺杆直径 d_s 一定的情况下, 复合连接件的力学性能随连接端外径 d_c (外包 RPC 厚度) 增大而显著增加, 其中, 抗滑移刚度几乎呈线性增长. 以 $k_{0.4}$ 为例, 对于 S16 系列试件, 当连接端外径由 25 mm 依次增长为 30 mm、35 mm、40 mm 时, $k_{0.4}$ 的增长率分别为 24%、27% 和 28%. 这表明外包 RPC 对连接件刚度的贡献非常显著.

相对而言, 增加螺杆直径对抗滑移刚度的影响幅度相对较小, 在连接端直径不变的情况下, d_s 由 14 mm 增大到 16 mm 和 18 mm 时, $k_{0.4}$ 的增长幅度分别为 15% 和 14%, 如图 9(b) 所示. 已有试验表明, 采用大的螺杆直径来提高连接件的刚度并不合适, 这容易导致 glubam 发生劈裂破坏, 材料性能得不到有效发挥^[25]. 本试验中也出现了此类破坏现象, 如 S18-35. 因此, 在复合连接件中, 选择相对较细的螺杆, 并适当增加外包 RPC 厚度, 才是提高复合连接件抗滑移刚度的合理方式.

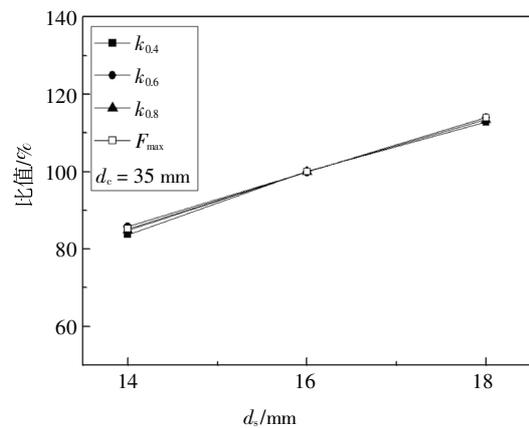
4.3 抗剪承载力分析

螺杆直径 d_s 一定时, 复合连接件的抗剪承载力随外包 RPC 厚度的增大而增大, 如图 9(a) 所示. RPC 中的钢纤维具有阻裂作用, 使得 RPC 在界面滑移较大的情况下, 依然可以与螺杆共同承受界面剪力, 这与凹槽连接有显著区别^[25]. 也应注意, 外包

RPC 对承载力的提高幅度显著小于其对刚度的影响, 且随着外包 RPC 厚度的增加, 增强效应逐渐降低. 对应于 S16 系列试件, 当连接端外径由 25 mm 依次增长为 30 mm、35 mm、40 mm 时, F_{max} 的增长幅度依次为 19%、10% 和 9%. 其主要原因是在峰值荷载下, RPC 的开裂损伤导致其抗剪性能退化, 外包层的厚度越大, 退化也就越显著, 因而其对抗剪承载力的提高效应递减.



(a) 外包 RPC 厚度的影响



(b) 螺杆直径的影响

图 9 外包 RPC 厚度及螺杆直径与连接件力学性能的关系

Fig.9 Relationship of mechanical performance between diameter of screw and RPC thickness

对于连接端外径 d_c 相同的 3 组试件, 其抗剪承载力 F_{max} 随螺杆直径的增加而呈线性增长. 与 S14-35 相比, S16-35 和 S18-35 的 F_{max} 增长幅度分别为 15% 和 30%, 如图 9(b) 所示. 显然, 这一增长得益于螺杆直径的增加, 因此, 螺杆对连接件抗剪承载力的影响要显著大于外包 RPC. 从承载力的角度来看, 增大螺杆直径对于提高复合连接件的抗剪承载力更为有效. 如前所述, 螺杆直径不宜过大.

以上试验结果都是基于 40 mm 预制混凝土板试

件的推出试验所得到的. 如前所述,对于实际的组合梁,上部混凝土板的厚度很可能更大,故与本试验条件存在差异. 考虑到所有试件的破坏现象主要集中在连接件本身及胶合竹梁中,混凝土板完好,可认为复合连接件的抗滑移性能与混凝土板厚度的相关性小,因此,本文试验结果可推广到厚度较大的混凝土板所对应的胶合竹-混凝土组合梁. 当然,在后续研究中,也有必要开展验证性的推出试验.

5 讨论

5.1 与两类连接件的对比

表 5 给出了文献中胶合竹-混凝土凹槽连接与销连接 2 个试件的连接件尺寸及推出试验结果^[24-25]. 其中,凹槽连接试件 C-3 与 S18-35 采用的螺杆规格完全一致,销连接试件 SC-1-16 与 S16 系列试件采用的螺杆规格完全一致. 虽然两组对比试件的混凝土板厚为 100 mm,大于本试验混凝土板厚,但是考虑到对比试件破坏现象也集中在连接件及胶合竹梁中,混凝土板基本完好,因而,直接比较是合理的.

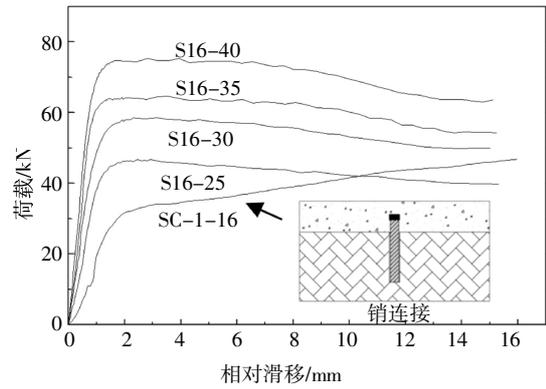
表 5 文献中连接件参数

Tab.5 Connector parameters in references

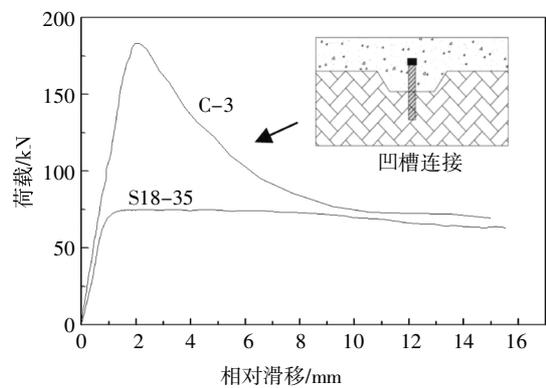
连接件名称	连接件形式	连接件参数	F_{max} /kN	$k_{0.4}$ /(kN·mm ⁻¹)	s_u /mm
C-3	凹槽连接	凹槽尺寸为 100 mm×112 mm×50 mm,螺杆为 M18×180 mm	172.4	119.1	4.45
SC-1-16	销连接	螺杆为 M16×180 mm	44.6	24.5	>15

图 10(a)给出了复合连接件与销连接件的对比. 从荷载-滑移曲线来看,复合式连接的抗滑移刚度显著高于销连接件,且随着外包 RPC 厚度的增加,提高的量也更大. 相对于 SC-1-16,外包 25~40 mm 的 RPC,复合连接件 $k_{0.4}$ 的提高幅度分别为 79%、151%、204%、288%,十分显著. 另一方面,相比于销连接试件,外包 RPC 对承载力的提高作用相对较小,且只有在外包 RPC 厚度达到 30 mm 后才显现出来. 此外,可以看到,在试验范围内,S16 系列的试件在相对滑移达到 10 mm 时,其承载力下降幅度均小于 20%,属于延性破坏^[33]. 如前所述,销连接最大的问题在于其抗滑移刚度过低,这会导致组合梁因变形过大而不满足正常使用要求. 而外包 RPC 在基本不影响连接件延性的前提下,可以大幅度提高连接件的刚度,因此,复合连接件相比于销连接件具有突

出的优势.



(a)复合连接件与销连接件的对比



(b)复合连接件与凹槽连接件的对比

图 10 复合连接件与凹槽及销连接件对比

Fig.10 Comparisons between RPC-steel composite connector, notched connector and dowel connector

从图 10(b)可看到,凹槽连接试件 C-3 的抗滑移刚度大、承载力高,但延性小. 与之相比较,复合连接件试件 S18-35 的抗滑移刚度与其接近,但抗剪承载力相对较低. 应该注意到,S18-35 的抗剪截面积显著小于 C-3,有必要按单位面积的受力效率来考察. 由于两个试件的差别仅在于螺杆外的混凝土,因此,需要从混凝土对连接件力学性能的贡献方面进行比较. 由 SC-1-16 试件的推出试验结果,可获得单位面积的螺杆对抗滑移刚度和抗剪承载力的贡献值. 因此,可在扣除螺杆影响后,计算得到 S18-35 与 C-3 试件单位面积混凝土对抗滑移刚度 $k_{0.4}$ 及抗剪承载力 F_{max} 的贡献值,其中,复合连接件分别为 0.08 kN/mm³ 和 0.033 kN/mm²,而凹槽连接件分别为 0.011 kN/mm³ 和 0.015 kN/mm². 显然,复合连接件的受力效率远高于凹槽连接件,特别是 $k_{0.4}$,且为延性破坏. 因此,复合连接件的受力性能相比于凹槽连接件有实质性的改善.

综合来看,外包 RPC 与螺杆能够形成较好的协

同效应,将凹槽连接的高刚度与销连接的高延性有效结合了起来,且适用于装配式施工,在性能上具有突出的优势。

5.2 复合连接件设计

从设计的角度来看,复合连接件应该在具有较好延性的前提下,具有尽可能高的刚度和承载力。因此,一方面,为了保证复合连接件的延性,螺杆与外包RPC的截面积比 A_s/A_{RPC} 不能过小,防止RPC开裂后螺杆迅速被剪断,避免脆性破坏;另一方面,为了避免连接件过强导致glulam分层开裂,需要限制螺杆的直径。从本试验结果来看,复合连接件中不宜采用直径大于18 mm的螺杆。基于试验结果,复合连接件的尺寸应满足如下条件:

$$0.16 < A_s/A_{RPC} < 0.6, d_s \leq 18 \text{ mm}. \quad (1)$$

显然,式(1)所确定的复合连接件范围,需要更多试验数据进行验证。此外,需要指出,单个连接件的抗剪切滑移性能,并不能完全决定组合梁的抗弯性能,还与连接件的数量和布置方式有关,这方面需要开展试验研究。

6 结论

1)RPC-钢复合连接件的破坏模式分为两类:当螺杆直径较小而外包RPC较厚时,以连接件在组合界面处被剪断为主;当螺杆直径较大而外部RPC相对较薄时,以螺杆从连接件的锚固端被拔出为主。试验中没有出现连接件从胶合竹梁中拔出现象,复合连接件具有可靠的竖向抗拔能力。

2)复合连接件的抗滑移刚度和抗剪承载力都随外包RPC的厚度增加而增大,外包RPC对抗滑移刚度的影响更为显著,增加外包RPC厚度是提高抗滑移刚度的有效方式;复合连接件的抗剪承载力主要取决于螺杆直径。

3)相比于凹槽连接件,复合连接件单位面积的受力效率更高,且具有良好的延性;相比于销连接件,复合连接件的抗滑移刚度显著提高。因此,复合连接件结合了凹槽连接高刚度与销连接高延性的优点,且便于现场装配,在性能上具有突出的优势。

4)基于试验结果,提出了复合连接件的设计原则,既避免复合连接件出现脆性破坏,又防止出现glulam分层开裂,并给出了尺寸范围。

本文仅对RPC-钢复合连接件的装配方式和推出性能开展了初步研究。为综合考察这一新型连接件的性能,验证竖向抗拔措施的可靠性,有必要开展

胶合竹-混凝土组合梁的抗弯试验。复合连接件本身的长期性能,也必须开展专门的试验研究。

参考文献

- [1] 张树君. 装配式现代木结构建筑[J]. 城市住宅, 2016, 23(5): 35—40.
ZHANG S J. Prefabricated modern timberwork building [J]. City House, 2016, 23(5): 35—40. (In Chinese)
- [2] 何敏娟, 李征. 我国装配式现代木结构发展展望[J]. 工程建设标准化, 2017(4): 16—17.
HE M J, LI Z. Prospects for the development of modern prefabricated wood structures [J]. Standardization of Engineering Construction, 2017(4): 16—17. (In Chinese)
- [3] 肖岩, 陈国, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 195—203.
XIAO Y, CHEN G, SHAN B, et al. Research and application of lightweight glue-laminated bamboo frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 195—203. (In Chinese)
- [4] 肖岩, 单波. 现代竹结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 13—47.
XIAO Y, SHAN B. Glulam structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 13—47. (In Chinese)
- [5] 陈国, 张齐生, 黄东升, 等. 胶合竹木工字梁受弯性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 72—79.
CHEN G, ZHANG Q S, HUANG D S, et al. Bending tests of OSB webbed bamboo I-joist [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5): 72—79. (In Chinese)
- [6] 单波, 周泉, 肖岩. 现代竹结构技术在人行天桥中的研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(10): 29—34.
SHAN B, ZHOU Q, XIAO Y. Research and application of modern bamboo structure pedestrian bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(10): 29—34. (In Chinese)
- [7] CLUSTON P, BATHON L A, SCHREYER A. Shear and bending performance of a novel wood-concrete composite system[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(9): 1404—1412.
- [8] YEOH D, FRAGIACOMO M, DE PAMPANIN S, et al. Experimental tests of notched and plate connectors for LVL-concrete composite beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(2): 261—269.
- [9] GUTKOWSIK R, BROWN K, SHIGIDI A, et al. Laboratory tests of composite wood-concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22: 1059—1066.
- [10] DIAS A M P G, JORGE L F C. The effect of ductile connectors on the behavior of timber-concrete composite beams [J]. Engineering Structures, 2011, 33(11): 3033—3042.
- [11] 程东辉, 杜园元, 王丽, 等. 木-混凝土连接性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 626—635.
CHENG D H, DU Y Y, WANG L, et al. Test research of performance of wood-concrete connection [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(4): 626—635. (In Chinese)

- [12] 姜雨辰,胡夏闽,曹雪娇,等. 胶合木-混凝土组合梁螺钉连接件推出试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2016,38(5):74—80.
JIANG Y C, HU X M, CAO X J, *et al.* Experimental study on push-out tests of screw connectors for glulam-concrete composite beams [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science), 2016, 38(5): 74—80. (In Chinese)
- [13] 胡夏闽,李巧,彭虹毅,等. 木混凝土组合梁静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(1):371—376.
HU X M, LI Q, PENG H Y, *et al.* Experimental study on wood-concrete composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 371—376. (In Chinese)
- [14] HONG W, JIANG Y C, LI B, *et al.* Nonlinear parameter identification of timber-concrete composite beams using long-gauge fiber optic sensors [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 217—227.
- [15] LUKASZEWSKA E, FRAGIACOMO M, JOHNSON H. Laboratory tests and numerical analyses of prefabricated timber-concrete composite floors [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 136(1): 46—55.
- [16] YEOH D, FRAGIACOMO M, BUCHANAN A, *et al.* Preliminary research towards a semi-prefabricated LVL-concrete composite floor system for the Australasian market [J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2009, 9(3): 225—238.
- [17] CROCETTI R, SARTORI T, TOMASI R. Innovative timber-concrete composite structures with prefabricated FRC slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(9): 04014224.
- [18] KHORSANDNIA N, VALIPOUR H, SCHÄNZLIN J, *et al.* Experimental investigations of deconstructable timber-concrete composite beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016130.
- [19] THOMPSON W. Shear tests of wood-concrete composites [R]. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1997: 10—15.
- [20] AUCLAIR S, SORELLI L, SALENIKOVICH A. A new composite connector for timber-concrete composite structures [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 84—92.
- [21] XIAO Y, YANG R Z, SHAN B. Production, environmental impact and mechanical properties of Glulam [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(3): 765—773.
- [22] SHAN B, XIAO Y, ZHANG W L, *et al.* Mechanical behavior of connections for Glulam-concrete composite beams [J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 158—168.
- [23] 魏洋,吴刚,李国芬,等. 新型FRP-竹-混凝土组合梁的力学行为[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4384—4392.
WEI Y, WU G, LI G F, *et al.* Mechanical behavior of novel FRP-bamboo-concrete composite beams [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12): 4384—4392. (In Chinese)
- [24] 单波,梁龙辉,肖岩,等. 胶合竹-混凝土复合式凹槽连接性能的试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(4):18—25.
SHAN B, LIANG L H, XIAO Y, *et al.* Experimental research on notched connector for Glulam-concrete composite beams [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 18—25. (In Chinese)
- [25] 单波,王震宇,肖岩,等. 胶合竹-混凝土组合梁销栓连接性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):97—105.
SHAN B, WANG Z Y, XIAO Y, *et al.* Experimental research on dowelled connection of Glulam-concrete composite beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(1): 97—105. (In Chinese)
- [26] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501—1511.
- [27] BONNEAU O, LACHEMI M, DALLAIRE É, *et al.* Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94: 286—90.
- [28] GB 1933—91 木材密度测定方法[S]. 北京:中国标准出版社, 1991: 1—4.
GB 1933—91 Method for determination of the density of wood[S]. Beijing: China Standard Press, 1991: 1—4. (In Chinese)
- [29] GB/T 1935—2009 木材顺纹抗压强度试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009: 1—6.
GB/T 1935—2009 Method of testing in compressive strength parallel to grain of wood [S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 1—6. (In Chinese)
- [30] GB/T 1936.1—2009 木材抗弯强度试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009: 1—6.
GB/T 1936.1—2009 Method of testing in bending strength of wood [S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 1—6. (In Chinese)
- [31] GB/T 1936.2—2009 木材抗弯弹性模量测定方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009: 1—5.
GB/T 1936.2—2009 Method for determination of the modulus of elasticity in static bending of wood [S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 1—5. (In Chinese)
- [32] GB/T 1938—2009 木材顺纹抗拉强度试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009: 1—5.
GB/T 1938—2009 Method of testing strength parallel to grain of wood [S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 1—5. (In Chinese)
- [33] EN 26891—1991 Timber structures joints made with mechanical fasteners—general principles for the determination of strength and deformation characteristics[S]. Brussels: Committee European Normalisation, 1991: 2—8.