

木质组合梁抗弯性能试验研究

熊海贝, 康加华, 吕西林

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 通过 12 根矩形截面梁、24 根 T 型组合梁和 6 根工字型组合梁, 共计 42 根木质梁试件的 2 点加载受弯试验, 研究了木基结构板—矩形截面木搁栅组合梁的抗弯性能。结果表明, 木质梁试件破坏前能产生较大的变形, 最终破坏主要有 4 种模式: 纯弯段腹板弯曲破坏、沿腹板顺纹方向劈裂破坏、弯剪区沿腹板截面高度剪切破坏和梁端部局部扭转。木质组合梁中连接翼缘与腹板的钉连接节点在梁受弯时滑移变形较小, 因此其能有效地传递翼缘与腹板之间的组合作用。T 型组合梁与矩形截面梁相比, 刚度和承载力有明显增加, 工字型组合梁与 T 型组合梁相比, 受弯性能进一步提高。因此可按组合梁理论进行更加合理的木楼盖相关设计。

关键词: 组合梁; 组合作用; 破坏模式; 木楼盖

中图分类号: TU366.2

文献标识码: A

Bending Tests Investigation on Composite Timber Beam

XIONG Haibei, KANG Jiahua, LU Xilin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: 42 timber beams including 12 rectangular beams (RB), 24 composite T-beams (CTB), and 6 composite I-beams (CIB) were tested to experimentally examine the bending performance of the composite timber beam. Four failure modes were identified, namely, a flexural failure of the web in the pure bending region, a splitting failure along the wood grain of the web, a shear failure of the web in bending shear region, and a local rotation at the end of beam. The relative slip between the web and the flange in the composite timber beam was small enough to ensure the composite action and load sharing between the flange and the web. The tests demonstrated that, as expected, the bending stiffness and capacity of the CIB was the largest, followed by the CTB, and ending with the RB. The results of these tests clearly demonstrate that composite action should be taken into

account to economically design timber floors.

Key words: composite beam; composite interaction; failure mode; timber floor

轻型木结构房屋中, 木楼盖主要由搁栅、横撑和楼面板组成。搁栅一般有 3 种类型: 实锯木搁栅、平行弦桁架搁栅和工字型木搁栅。其中实锯木搁栅为截面高度较大的规格材, 搁栅之间的横撑一般采用规格材, 楼面板主要采用两类木基结构板, 分别为定向木片板(OSB)和胶合板(Plywood)。通常在楼面板上还需铺设约 40 mm 厚轻质混凝土或细石混凝土层以减小木楼盖的振动。同时因防火要求, 还需在搁栅底部覆上 1 层或 2 层石膏板。典型的现代木结构楼盖构造如图 1 所示。

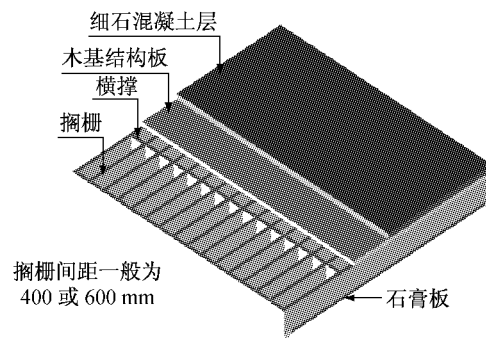


图 1 典型木楼盖构造

Fig.1 Typical timber floor configurations

实际木楼盖设计中, 通常只考虑搁栅的抗弯作用, 并按简支梁对搁栅进行计算, 楼面板的作用被认为是将均布荷载平均分配到每根搁栅。单根搁栅除满足承载力要求外, 还必须满足变形控制要求, 我国《木结构设计规范》(GB 50005—2003)规定木楼盖中搁栅在竖向荷载作用下, 跨中挠度限值为 $L/250$,

收稿日期: 2010-12-22

基金项目: 国家国际科技合作项目(2008DFA71990)

第一作者: 熊海贝(1964—), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、现代木结构及混合结构的抗震性能。

E-mail: xionghaibei@126.com

其中 L 为其计算跨度. 北美等轻型木结构房屋使用较为普遍的地区和国家对木楼盖通常也采用此类设计方法. 事实上, 由于楼面板和搁栅之间钉连接节点的存在, 此类木楼盖在实际工作时, 楼面板和搁栅之间存在组合作用, 特别当木基结构板作为楼面板投入工程应用以来, 这种组合作用越发明显^[1]. 国外相关木楼盖试验研究表明^[2-4]: 考虑楼面板与搁栅之间组合作用后, 木楼盖抗弯性能有显著提高.

近年来, 轻型木结构房屋逐渐引入我国建筑市场, 因此迫切需要开展木楼盖力学性能的一些基础性试验和理论研究. 本文主要论述试验及得到的结论.

1 试验概况

1.1 试件设计

采用简化方法, 以单根梁试件为研究对象, 对木楼盖中楼面板与搁栅的组合作用进行试验研究. 共设计 42 根梁试件, 含 3 种截面形式: 矩形截面梁 (RB)、T 型组合梁 (CTB)、工字型组合梁 (CIB), 基本信息列于表 1. 图 2 和图 3 为木质梁试件示意及截面构造详图. 制作试件采用的国产麻花钉长为 82 mm, 直径为 3.6 mm. 试验参考了国内和国外相关试验标准^[5-7].

表 1 试件基本信息

Tab.1 Test specimen information

截面形状	翼缘材料	钉间距/mm	数量	梁编号
矩形			共 12 根	4-11#—4-31#, 6-11#—6-31#, 7-1#—7-6#
T 型	OSB/Plywood	150	各 4 根	1-4#, 3-11#—3-13# / 2-4#, 5-11#—5-13#
		100	各 4 根	1-5#, 3-21#—3-23# / 2-5#, 5-21#—5-23#
		75	各 4 根	1-6#, 3-31#—3-33# / 2-6#, 5-31#—5-33#
工字型	OSB/Plywood	150	各 1 根	1-1# / 2-1#
		100	各 1 根	1-2# / 2-2#
		75	各 1 根	1-3# / 2-3#

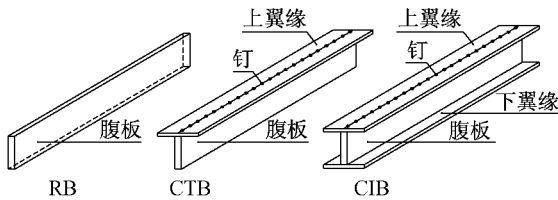


图 2 3 种类型梁试件示意图

Fig.2 Sketch of the three types of specimens

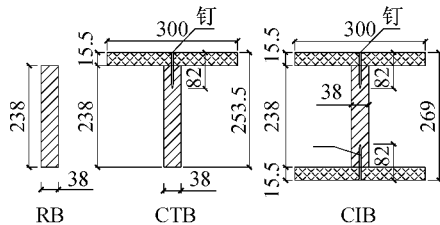


图 3 3 种类型梁截面示意图 (单位: mm)

Fig.3 Section of the three types of specimens (unit: mm)

1.2 试件装置

CTB 试验加载及仪器布置如图 4 所示, RB 和 CIB 试验加载及仪器布置类似, 试验装置中对梁设有侧向支撑系统. 图中, 1#—4# 位移计主要用来记录上翼缘与腹板之间的相对滑移, 5#, 6# 位移计用

来记录支座处的竖向变形, 7#—9# 位移计主要用来记录梁的竖向变形 (挠度). 沿腹板高度布置应变片用来记录纯弯状态下跨中腹板沿截面高度的应变. 跨中上翼缘处亦布置应变片用于记录翼缘的应变. 正式试验前进行 5 次反复预加载, 控制力为 3 kN, 预加载过后, 对梁进行连续加载, 加载速率约为 $1.5 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$. 图 5 为试验中的 CTB.

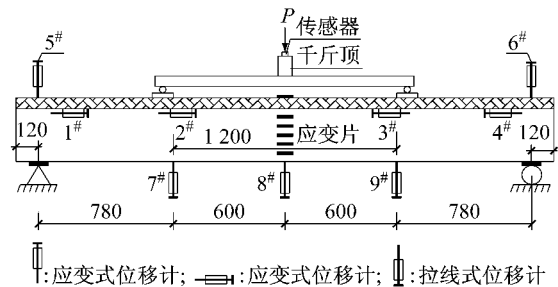


图 4 CTB 试验加载及仪器布置示意图 (单位: mm)

Fig.4 Test setup for CTB (unit: mm)

2 试验主要结果及现象

本部分论述主要包括梁试件在达到规范允许挠度 ($L/250$) 时所能承受的弯矩, 相等弯矩作用下梁的

跨中挠度以及梁试件破坏模式. 下文提及的相等弯矩值 $2.51 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 为根据上海市工程建设规范《轻型木结构建筑技术规程》(DG/TJ 08-2059—2009) 推荐的木楼盖构造形式按活荷载 $5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 计算得到. 下文出现的 CTBO/CIBO 或 CTBP/CIBP 表示组合梁翼缘采用 OSB/Plywood, S_n 表示钉间距.

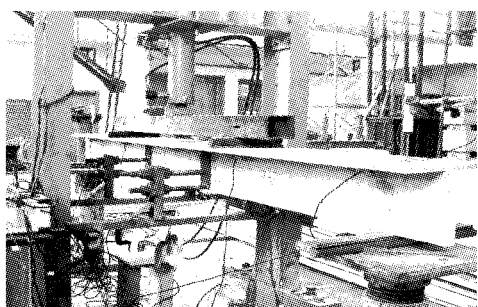


图5 CTB 加载试验现场照片

Fig. 5 CTB test

2.1 试验主要结果

木质组合梁典型的跨中挠度—弯矩试验结果及其拟合值(达到规范允许跨中挠度之前)如图6所示(以 $S_n=150 \text{ mm}$ 的 CTBO 为例). 图7和8是 CTB 和 RB 跨中挠度—弯矩拟合直线比较. 拟合直线的斜率从意义上说为梁的整体表现抗弯刚度, 当钉间距为 150, 100, 75 mm 时, CTBO 与 RB 相比, 抗弯刚度提高幅度分别为 13.27%, 40.31% 和 57.73%; CTBP 与 RB 相比, 抗弯刚度提高幅度分别为 8.23%, 27.01% 和 34.78%. 从试验数据的对比可以看到 CTB 的抗弯刚度显然要大于 RB, 且钉间距越小, CTB 抗弯刚度越大, 抗弯刚度的增幅与钉间距呈线性关系(图9). 表2—5列出了本次试验的 RB, CTB 和 CIB 在达到规范允许挠度时所承受的弯矩试验值和相等跨中弯矩作用下梁试件对应的跨中挠度试验值. RB 和 CTB 还以平均值形式给出了试验结果, 由于 CIB 不同构造类型(钉间距不同)只进行单根对比试验, 故只给出单根试验值的对比. 从表2—4中可以看到, CTB 在跨中达到规范允许挠度值时($L/250=11.04 \text{ mm}$)所能承受的弯矩较 RB 有明显提高. 当钉间距为 150, 100, 75 mm 时, CTBO 与 RB 相比, 提高幅度分别为 10.35%, 37.68% 和 55.90%; CTBP 与 RB 相比, 提高幅度分别为 6.83%, 20.08% 和 31.88%. 随着连接上翼缘与腹板的钉间距减小, CTB 抗弯承载力逐渐提高, 提高幅度与钉间距呈线性关系(图10). 从表5可以看到, 若 CTB 腹板下再采用钉连接形式覆以下翼缘, 则梁的承载力还将会进一步提高. 当钉间距为 150, 100, 75

mm 时, CIBO 与 CTBO 相比, 提高幅度分别为 17%, 22% 和 10%; CIBP 与 CTBP 相比, 提高幅度分别为 10%, 10% 和 11%.

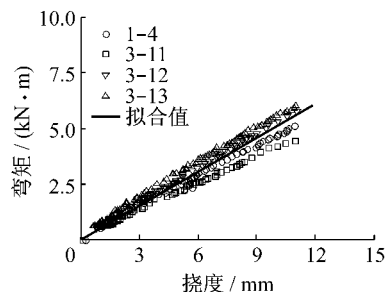


图6 跨中挠度—弯矩关系

Fig. 6 Deflection—moment relationship

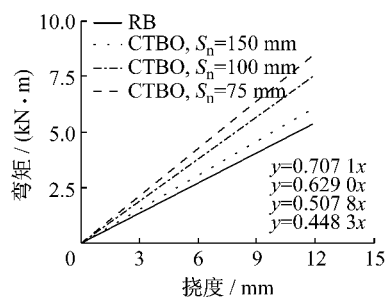


图7 CTBO 与 RB 跨中挠度—弯矩比较

Fig. 7 Deflection—moment behavior comparison of RB and CTBO

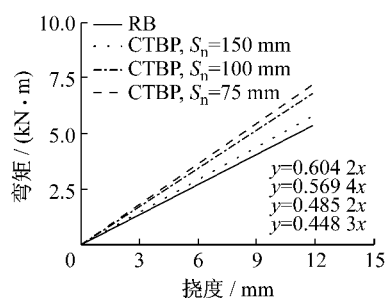


图8 CTBP 与 RB 跨中挠度—弯矩比较

Fig. 8 Deflection—moment behavior comparison of RB and CTBP

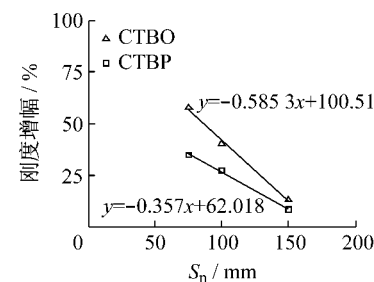


图9 抗弯刚度增幅— S_n 关系

Fig. 9 Stiffness increment— S_n relationship

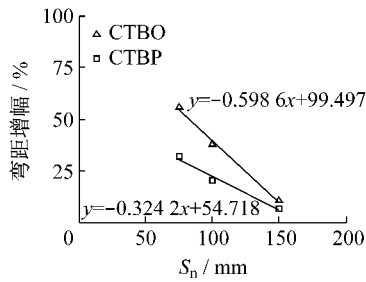


图 10 弯矩增幅— S_n 关系

Fig.10 Bending resistance increment— S_n relationship

表 2 CTBO 相关弯矩及挠度试验值

Tab.2 Bending capacity and deflection of CTBO

梁编号	钉间距/ mm	弯矩/ (kN·m)	弯矩均值/ (kN·m)	挠度/ mm	挠度均值/ mm
3-11#	150	4.45	5.33	5.94	5.02
3-12#		5.76		4.74	
3-13#		6.00		3.87	
1-4#	100	5.11	6.65	5.52	3.85
3-21#		6.71		3.90	
3-22#		6.97		3.71	
3-23#		6.97		3.38	
1-5#*		5.95		4.39	
3-31#		7.37		3.40	
3-32#	75	7.68	7.53	3.21	3.24
3-33#		7.40		3.31	
1-6#*		7.68		3.03	

表 3 CTBP 相关弯矩及挠度试验值

Tab.3 Bending capacity and deflection of CTBP

梁编号	钉间距/ mm	弯矩/ (kN·m)	弯矩均值/ (kN·m)	挠度/ mm	挠度均值/ mm
5-11#	150	4.66	5.16	5.70	5.01
5-12#		5.18		5.32	
5-13#		5.08		4.52	
2-4#	100	5.72	5.80	4.48	4.32
5-21#		5.09		5.03	
5-22#		5.96		4.00	
5-23#		5.63		4.38	
2-5#*		6.52		3.87	
5-31#		6.47		3.66	
5-32#	75	6.17	6.37	4.35	4.02
5-33#		6.00		4.21	
2-6#*		6.82		3.84	

表 4 RB 相关弯矩及挠度试验值

Tab.4 Bending capacity and deflection of RB

梁编号	弯矩/ (kN·m)	挠度/mm	梁编号	弯矩/ (kN·m)	挠度/mm
7-1#	5.65	5.70	4-21#*	6.22	4.18
7-2#	4.80	5.03	4-31#*	5.52	4.63
7-3#	4.42	3.66	6-11#	3.93	6.76
7-4#	4.26	6.76	6-21#	4.35	6.11
7-5#	5.18	6.11	6-31#	5.22	4.97
7-6#	4.87	4.67	均值	4.83	5.52
4-11#	3.50	7.66			

表 5 CTB 与 CIB 弯矩及挠度试验值

Tab.5 Bending capacity and deflection of CTB and CIB

梁编号	弯矩/ (kN·m)	增幅/ %	挠度/ mm	削减/ %	S_n / mm
1-4#	5.11	17	5.53	41	150
1-1#*	5.99		3.28		
1-5#*	5.95	22	4.39	27	100
1-2#*	7.24		3.22		
1-6#*	7.68	14	3.03	11	75
1-3#*	8.73		2.71		
2-4#	5.72		10		
2-1#	6.29	10	3.65	23	100
2-5#	6.52		3.87		
2-2#	7.15		2.97		
2-6#	6.82	11	3.84	23	75
2-3#	7.60		2.95		

取跨中弯矩为 2.51 kN·m 时的挠度进行比较(表 2—4),CTB 跨中挠度较 RB 有明显削减,特别是当上翼缘采用 OSB 且钉间距为 75 mm 时,削减幅度达到 41.3%。与 RB 相比,CTB 在相等跨中弯矩下挠度的削减幅度与钉间距呈线性关系(图 11)。CIB 与 CTB 相比(表 5),在相等跨中弯矩下,挠度进一步减小,如当翼缘采用 OSB 且钉间距为 75 mm 时,削减幅度为 11%。

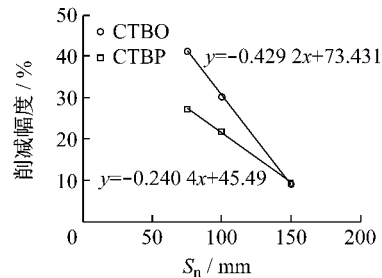


图 11 挠度削减— S_n 关系

Fig.11 Deflection reduction— S_n relationship

由抗弯刚度、允许挠度对应承载力以及相等弯矩值对应挠度的分析可知,翼缘的存在有效提高了木质组合梁的抗弯性能。

2.2 试验现象

试验观测和数据记录显示木质梁试件在破坏之前都可以产生较大变形,且破坏前腹板和翼缘都没有显见破坏发生,少数梁在破坏之前发出木材变形或挤压的声音。在达到规范允许跨中挠度值之前,梁试件跨中挠度与弯矩呈明显线性关系(图 6—8、图 12),部分梁(共 7 根,表 2—5 中带“*”者)随着跨中挠度增大逐渐表现出非线性特征,但多数梁在达到极限承载力之前非线性特征都不明显(图 12)。

木质梁试件一旦破坏承载力随即丧失,破坏时发出巨大的木材断裂或劈裂声音,翼缘无明显破坏

发生. 本次试验中观察到的梁试件破坏模式可分为 4 种: 纯弯段腹板弯曲破坏, 沿腹板顺纹方向劈裂破坏, 弯剪区沿腹板截面高度剪坏, 局部扭转, 分别如图 13—16 所示.

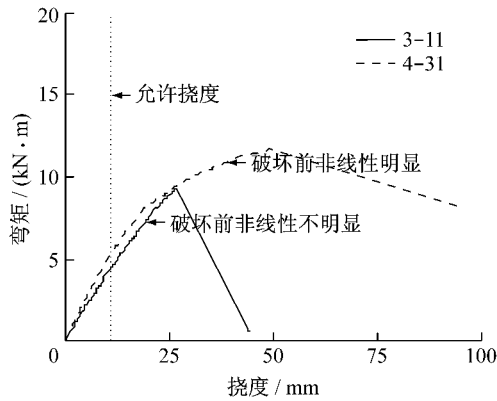


图 12 跨中挠度—弯矩线性及非线性行为
Fig.12 Linear and nonlinear deflection—moment behavior

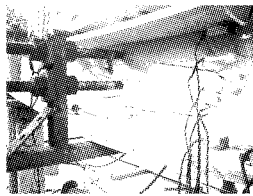


图 13 弯曲破坏
Fig.13 Flexural failure

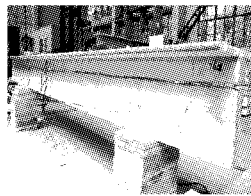


图 14 顺纹劈裂破坏
Fig.14 Split failure

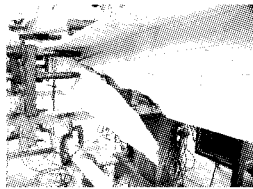


图 15 沿腹板高度剪坏
Fig.15 Shear failure

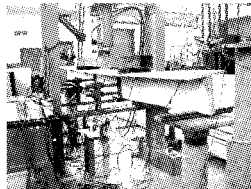


图 16 局部扭转
Fig.16 Local rotation

3 试验结果分析

3.1 翼缘-腹板相对滑移分析

以 $S_n=150$ mm 的 CTBO 为例, 图 17 和 18 分别为距跨中 1.2 m 和 0.6 m 处的翼缘—腹板的相对滑移(以下分别简称“滑移 1”和“滑移 2”)与梁跨中挠度关系的试验值及其拟合值. 不同 S_n 的 CTBO 和 CTBP 翼缘-腹板相对滑移与梁跨中挠度关系拟合值比较见图 19—22. 从图 19—22 中可以看到, 随着连接上翼缘与腹板的钉间距减小, 翼缘—腹板相对滑移值呈逐渐变小趋势. 规范允许跨中挠度对应各根

梁试件翼缘—腹板相对滑移试验值及其平均值见表 6 和 7. 从表 6 和 7 中可以看到, 在梁达到规范允许的跨中挠度时, 上翼缘与腹板之间相对滑移水平比较低. 上翼缘采用 OSB, 且钉间距为 150 mm 时, 滑移 1 值为 0.76 mm, 滑移 2 值为 0.29 mm; 上翼缘采用 Plywood 时, 滑移 1 值为 1 mm, 滑移 2 值为 0.4 mm. 因此在达到规范允许跨中挠度之前, 连接上翼缘与腹板的钉连接节点非常有效, 具备传递翼缘与腹板之间组合作用的条件. 图 23 所示为典型的上翼缘在跨中处的应变与跨中挠度关系(以 $S_n=150$ mm 的 CTBO 为例), 图 24 和 25 为不同钉间距的 CTBO 和 CTBP 上翼缘在跨中处的应变与跨中挠度拟合值的比较. 可以看到, 相同跨中挠度时上翼缘应变随着钉连接间距减小而逐渐增大. 因为钉间距减小使上翼缘与腹板之间连接增强, 弯矩作用下, 相对滑移减小, 组合作用增强, 因此相同跨中挠度时上翼缘轴向应变增大.

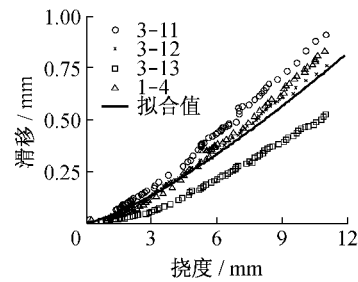


图 17 滑移 1 与跨中挠度关系
Fig.17 Slip 1—deflection

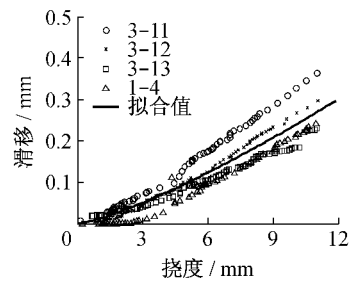


图 18 滑移 2 与跨中挠度关系
Fig.18 Slip 2—deflection

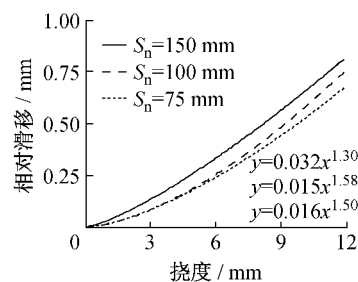


图 19 CTBO 滑移 1 与跨中挠度关系
Fig.19 Slip 1—deflection of CTBO

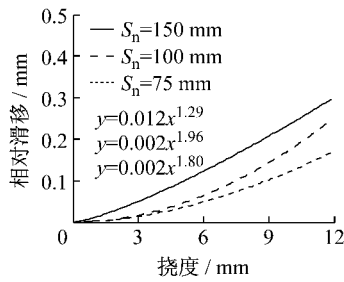


图 20 CTBO 滑移 2 与跨中挠度关系
Fig.20 Slip 2—deflection of CTBO

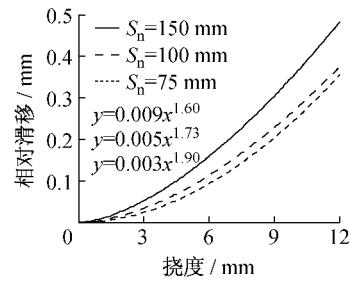


图 22 CTBP 滑移 2 与跨中挠度关系
Fig.22 Slip 2—deflection of CTBP

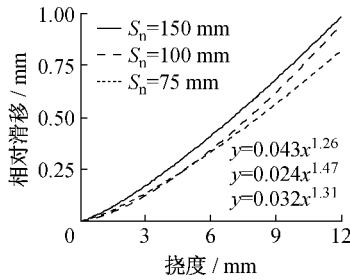


图 21 CTBP 滑移 1 与跨中挠度关系
Fig.21 Slip 1—deflection of CTBP

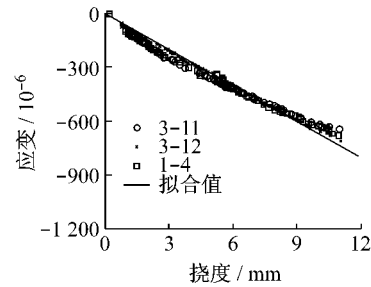


图 23 翼缘应变—跨中挠度关系
Fig.23 Flange strain—deflection

表 6 CTBO 翼缘—腹板相对滑移

Tab.6 Relative slip between flange and web of CTBO

梁编号	钉间距	mm			
		滑移 1	滑移 1 均值	滑移 2	滑移 2 均值
3-11#	150	0.91	0.76	0.37	0.29
3-12#		0.76		0.30	
3-13#		0.53		0.23	
1-4#		0.83		0.24	
3-21#	100	0.52	0.66	0.14	0.22
3-22#		0.54		0.38	
3-23#		0.84		0.21	
1-5#*		0.74		0.13	
3-31#	75	0.53	0.60	0.20	0.13
3-32#		0.57		0.11	
3-33#		0.57		0.08	
1-6#*		0.72		0.13	

表 7 CTBP 翼缘—腹板相对滑移

Tab.7 Relative slip between flange and web of CTBP

梁编号	钉间距	mm			
		滑移 1	滑移 1 均值	滑移 2	滑移 2 均值
5-11#	150	1.14	1.00	0.49	0.40
5-12#		1.01		0.44	
5-13#		0.98		0.27	
2-4#		0.87		0.40	
5-21#	100	0.73	0.79	0.16	0.33
5-22#		0.93		0.34	
5-23#		0.68		0.29	
2-5#*		0.86		0.53	
5-31#	75	0.88	0.77	0.25	0.27
5-32#		0.75		0.28	
5-33#		0.63		0.27	
2-6#*		0.82		0.26	

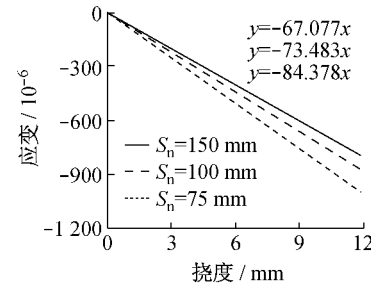


图 24 CTBO 翼缘应变—跨中挠度关系
Fig.24 Flange strain—deflection of CTBO

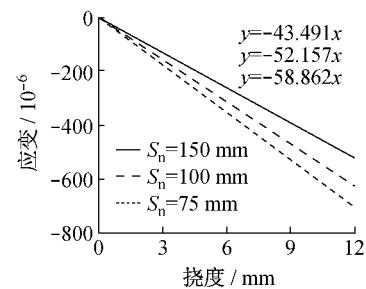


图 25 CTBP 翼缘应变—跨中挠度关系
Fig.25 Flange strain—deflection of CTBP

3.2 腹板沿截面高度应变分析

CTBO 与 CTBP 和 RB 在相同跨中弯矩作用下沿腹板截面高度的应变比较分别示于图 26 和图 27。

从图中可以看到,相等跨中弯矩作用下, RB 沿腹板高度的应变较 CTB 要大,显然此时 RB 较 CTB 的腹板所承受的弯矩要大,因此在 CTB 中必然有另

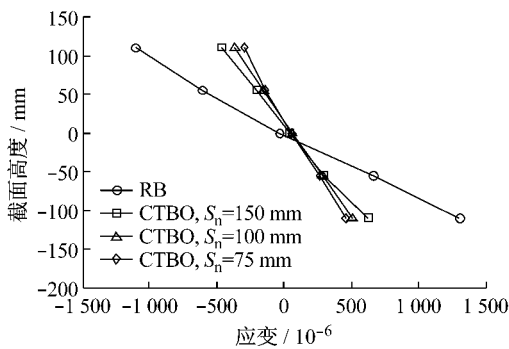


图26 相同弯矩下CTBO沿腹板截面高度应变

Fig.26 Web strain of CTBO along the section height

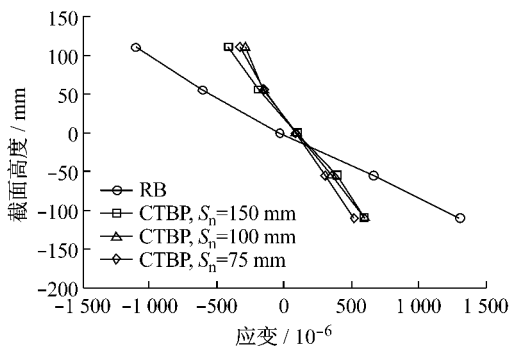


图27 相同弯矩下CTBP沿腹板截面高度应变

Fig.27 Web strain of CTBP along the section height

外因素使其增加了抗弯能力,进而在其腹板应变比较小的情况下达到与RB(腹板应变较大)相等的抗弯承载力.从前述分析可知,上翼缘与腹板之间的钉连接具备传递翼缘与腹板之间组合作用的条件,且翼缘在梁试件受弯时有轴向应变发生.由于CTB和CIB中上翼缘较薄,因此翼缘本身的抗弯能力几乎可以忽略不计.因此可以推论得到,在弯矩作用下,CTB和CIB中翼缘的轴向力参与了梁的抗弯工作.

从试验结果分析中可以看到,翼缘与腹板之间的组合作用的确明显改善木质梁的抗弯性能.

4 结论

(1) 木质梁破坏前能产生较大的变形,但没有显现破坏发生,破坏主要有4种模式,即纯弯段腹板弯曲破坏、沿腹板顺纹方向劈裂破坏、弯剪区沿腹板截面高度剪坏和梁端部局部扭转.

(2) CTB翼缘与腹板之间相对滑移较小(<1 mm),且随着钉间距的减小滑移值不断变小,因此CTB受弯时,钉连接节点能有效地传递翼缘与腹板之间的组合作用.

(3) CTB与RB梁相比,刚度和承载力有明显增加,且两者都随着钉间距减小逐渐增大.当钉间距为75 mm,CTBO较RB的刚度和承载力增幅分别为57.73%和55.90%,CTBP较RB的刚度和承载力增幅分别为34.78%和31.88%.

(4) CIB的受弯性能较CTB有进一步提高,相同钉间距条件下,刚度和承载力增幅都在10%以上.

(5) 通过对试验数据的分析可知,木结构楼盖中,楼面板与搁栅之间由于钉连接的有效性而存在着组合作用.因此可按组合梁理论来进行木楼盖的设计,这样可以适当增大木楼盖的设计跨度或荷载,达到更经济合理的设计目的.

参考文献:

- [1] Onysko D M. Performance of wood-joint floor systems: a literature survey [R]. Ottawa: Eastern Forest Products Laboratory, 1970.
- [2] Polensek A, Atherton G H, Corder S E, et al. Response of nailed wood-joint floors to static loads [J]. Forest Products Journal, 1972, 22(9): 52.
- [3] Corder S E, Jordan D E. Some performance characteristics of wood joist floor panels [J]. Forest Products Journal, 1975, 25(2): 38.
- [4] Vanderbilt M D, Goodman J R, Criswell M E, et al. Service and overload behavior of wood joist floor systems [J]. Journal of the Structural Division: ASCE, 1974, 100(1): 11.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB/T 50329—2002 木结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50005—2003 Standard for methods testing of timber structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [6] American Society for Testing and Material. D143 Standards test methods for small clear specimens of timber [S]. Philadelphia: ASTM International, 2000.
- [7] American Society for Testing and Material. D198 Standards test methods of static tests of lumber in structural sizes [S]. Philadelphia: ASTM International, 2002.