

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.006



干缩裂缝对木梁承载力的影响

陈孔阳, 邱洪兴, 朱忠漫

(东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 制作了4组带有不同深度纵向干缩裂缝的木梁进行三分点加载试验, 观察试验现象并记录极限承载力。根据试验现象, 结合有限元应力分析和木材双折线顺纹本构模型, 推导出木梁由受弯破坏变为顺纹剪切破坏的裂缝临界指标, 以及相应的极限承载力计算公式, 并将推导所得承载力公式归纳简化成承载力下降系数曲线。将试验数据代入后, 发现试验现象符合临界指标的判定, 且根据承载力下降系数曲线得到的极限承载力理论值与试验值相符。

关键词: 纵向干缩裂缝; 承载力; 顺纹剪切; 临界指标

中图分类号: TU266.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)01-0039-09

Bearing capacity of timber beams with shrinkage cracks

Chen Kongyang, Qiu Hongxing, Zhu Zhongman

(Key laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: Firstly, four groups of timber beams with shrinkage cracks in diversified depth were made and one-third loading method to observe the experimental data and record the ultimate bearing capacity was carried out. Then, according to the experimental data, combining finite element stress analysis, and the model of bilinear constitutive model of wood, the critical indicators which indicated that bending failure become shear failure and the corresponding ultimate bearing capacity formula were deduced. After that, the bearing capacity formula was simplified as the bearing capacity reduction coefficient curve. Finally, by comparing theoretical analysis with experiment, the results show that the theoretical values of ultimate bearing capacity coincide well with the test values, and the test phenomenon is consistent with the judgement of the critical indicator.

Keywords: longitudinal shrinkage cracks; capacity of timber beams; shear parallel to the grain; critical value

木材受湿度的影响非常明显, 主要表现为产生顺纹干缩裂缝, 而历史建筑中的木梁构件在长期干湿交替作用下, 干缩开裂现象更是严重。干缩裂缝

的存在会减小木梁之间的连接面积, 降低其顺纹抗剪能力, 随着裂缝深度的增加, 木梁破坏形式将由受弯破坏转变为顺纹受剪破坏。

收稿日期: 2017-05-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ14B02)

作者简介: 陈孔阳(1993-), 女, 博士生, 主要从事木结构耐久性研究, E-mail: 230149373@seu.edu.cn。

邱洪兴(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: qiuhx@seu.edu.cn。

Received: 2017-05-18

Foundation item: Twelfth-Five National Science & Technology Program(No. 2012BAJ14B02)

Author brief: Chen Kongyang (1993-), PhD candidate, main research interest: durability of timber structure, E-mail: 230149373@seu.edu.cn.

Qiu Hongxing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: qiuhx@seu.edu.cn.

王雪亮^[1]对木材含水率变化和裂缝开展进行了相应试验,并建立了裂缝深度与含水率、裂缝深度与时间的拟合曲线。周乾等^[2]对古建筑木结构叠合梁弯曲受力情况进行了分析,发现木梁在完全开裂后,弯应力峰值急剧增加,更加容易发生受弯破坏。陆伟东等^[3-7]就纤维增强复合材料加固木构件的受力性能进行了研究,证明了此种材料在加固木构件上的有效性。上官蔚蔚等^[8]、陈志勇等^[9]研究了带裂纹木材以及复杂应力状态下木材力学性能的有限元分析方法,为对带干缩裂缝工作的木构件进行有限元分析提供了基础。Dietsch 等^[10]、Berg 等^[11]通过试验以及数值模拟分析了干缩裂缝对胶合木梁裂缝开展以及承载力的影响。当下对于胶合木梁的裂缝研究较多,对于古建筑木梁的研究较少。且现阶段对古建筑木梁承载力的研究主要针对加固后的木梁,并没有对待加固前木梁的剩余承载力进行评估,现阶段研究成果也缺乏破损木构件承载力下降程度的衡量指标。因此,研究不同破坏条件对木梁承载力的影响以及相应的裂缝临界指标非常必要。

在对干缩裂缝对木梁承载力影响的试验基础上,结合有限元以及材料力学进行分析,绘出带干缩裂缝工作木梁的承载力下降系数曲线,并建立了临界指标公式,将干缩裂缝对木梁承载力的影响分析量化。

1 试验

1.1 试验内容

试验设计了相同尺寸的矩形截面木梁构件 4 组,每组 2 根,共计 8 根,其中 B0 组为完整截面的参照木梁,其余 3 组为开裂试验木梁,具体裂缝位置及构件设计参数见表 1 和图 1。采用三分点加载,加载装置见图 2。构件安装就位后,在正式开始试验测试前先预加载 15%,以校正构件和其他测试仪表设备正常工作,卸载后隔 5 s 再开始正式加载,加载制度为连续加载直至木梁构件破坏。

表 1 构件设计表

Table 1 Design of components

木梁 编号	L_0 / mm	b / mm	h / mm	裂缝 条数	裂缝长 度/mm	裂缝宽度 w /mm	裂缝深度 d /mm
B0-1	1 800	80	100	0	0	0	0
B0-2	1 800	80	100	0	0	0	0

续表 1

木梁 编号	L_0	b	h	裂缝 条数	裂缝长 度/mm	裂缝宽度 w /mm	裂缝深度 d /mm
B1-1	1 800	80	100	2	600	15	10
B1-2	1 800	80	100	2	600	15	10
B2-1	1 800	80	100	2	600	15	20
B2-2	1 800	80	100	2	600	15	20
B3-1	1 800	80	100	2	600	15	35
B3-2	1 800	80	100	2	600	15	35

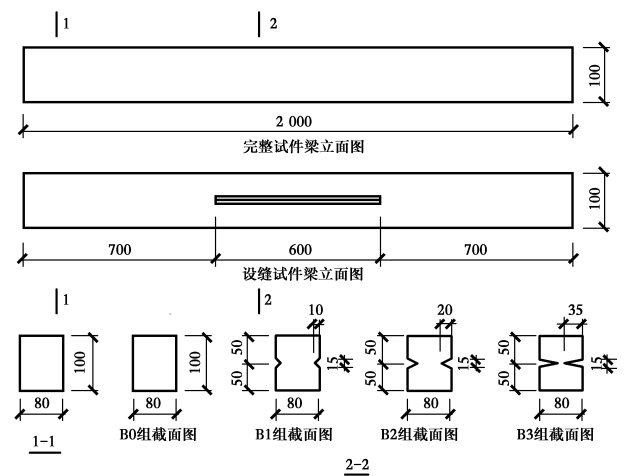


图 1 木梁构件尺寸及裂缝位置详图

Fig. 1 Details of the size and crack location of timber beams

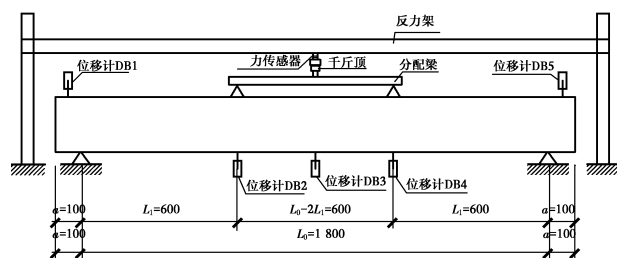


图 2 木梁加载装置布置图

Fig. 2 The arrangement of loading device and measurement

1.2 材性测试

材性测试方法按照相关标准进行,并按照标准中的要求进行含水率修正,试件含水率在 9%~15% 范围内时修正公式为

$$f_{m,12} = f_{m,w} [1 + 0.04(w - 12)] \quad (1)$$

式中: $f_{m,12}$ 为试件含水率为 12% 时的抗弯强度; w 为试件含水率, %。

具体木材材性测试结果见表 2。

表 2 木梁抗弯强度材性试验结果

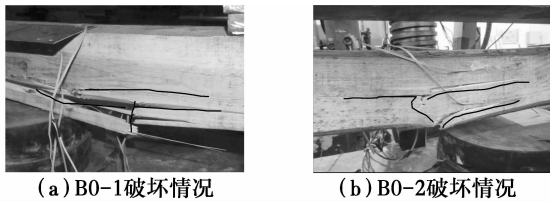
Table 2 Bending strength

木梁 编号	试件 编号	截面有效尺寸/mm		含水率/%	测试强度 $f_{m,w}$ /MPa	修正强度 $f_{m,12}$ /MPa	平均值/ MPa	标准差	离散系 数/%
		宽度	高度						
B0-1	1	20.78	20.59	12.0	53.35	53.35	52.93	3.13	5.91
	2	21.11	20.78	11.8	57.90	57.43			
	3	20.98	21.18	11.9	49.15	48.96			
	4	21.04	20.85	12.2	53.17	53.59			
	5	20.9	20.48	12.4	50.53	51.34			
B0-2	1	21.06	21.84	11.9	49.27	49.07	45.66	3.12	6.83
	2	21.28	21.21	12.3	46.72	47.28			
	3	21.02	21.73	11.7	41.47	40.97			
	4	21.09	21.24	11.2	48.19	46.64			
	5	21.25	21.87	11.6	45.06	44.34			
B1-1	1	20.96	20.86	11.3	39.40	38.30	40.94	2.85	6.96
	2	22.10	21.70	12.4	44.88	45.60			
	3	20.98	20.75	11.5	42.21	41.36			
	4	21.12	20.96	11.9	39.33	39.17			
	5	20.96	20.53	12.3	39.78	40.26			
B1-2	1	20.78	20.75	11.5	34.26	33.58	32.94	1.07	3.25
	2	21.16	20.92	12.3	32.53	32.92			
	3	20.94	20.57	11.4	34.48	33.65			
	4	21.04	20.74	11.9	33.58	33.45			
	5	21.08	21.21	11.6	31.60	31.09			
B2-1	1	21.25	18.89	11.3	54.30	52.78	48.58	3.08	6.34
	2	20.67	19.45	11.6	47.23	46.48			
	3	21.07	19.93	12.1	49.11	49.31			
	4	21.08	20.94	11.9	44.96	44.78			
	5	20.97	20.85	11.7	50.17	49.57			
B2-2	1	20.96	20.84	12.0	42.39	42.39	43.68	3.05	6.98
	2	21.16	19.78	11.8	48.76	48.37			
	3	20.95	20.91	11.6	43.35	42.66			
	4	21.20	20.70	11.8	40.62	40.29			
	5	20.99	20.95	11.9	44.84	44.67			
B3-1	1	21.12	20.75	12.4	44.24	44.95	42.93	2.70	6.29
	2	20.99	21.01	12.3	42.32	42.83			
	3	21.64	21.05	12.0	39.01	39.01			
	4	21.23	20.41	11.9	46.08	45.90			
	5	20.86	21.156	12.2	41.64	41.97			
B3-2	1	20.27	20.91	12.3	49.08	49.67	50.78	2.94	5.79
	2	20.90	20.70	12.4	47.74	48.50			
	3	20.07	19.87	12.0	55.48	55.48			
	4	20.23	20.8	11.9	48.70	48.51			
	5	20.14	20.65	12.6	50.53	51.74			

1.3 试验结果

1.3.1 参照组 B0 组为完整矩形截面的试验构件。加载过程中由于木材顺纹抗压强度低于顺纹抗拉强度,木梁顶面受压区首先出现褶皱,继续加载至极限荷载 60%左右时,伴随清晰的木纤维脆断响

声,梁在跨中底面形成一横纹竖向裂缝;持续加载过程中,竖向裂缝发展成顺纹水平裂缝并突然发出一声巨响,木梁跨中爆裂,受拉区木纤维脆断并弹出大量木屑,木梁承载力达到极限值,试验构件破坏。木梁构件 B0-1、B0-2 的具体破坏情况见图 3。



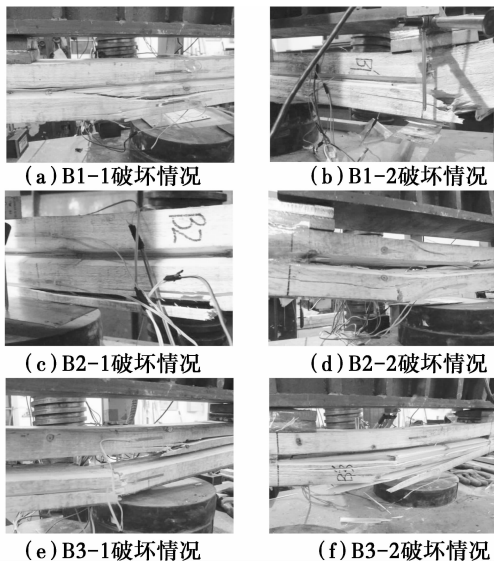
(a) B0-1破坏情况

(b) B0-2破坏情况

图 3 参照木梁破坏形态

Fig. 3 The failure mode of reference timber beams

1.3.2 设缝组 B1、B2、B3 组为设有纵向人工扇形裂缝的试验构件。加载初期,开裂木梁的试验现象与参照组木梁构件基本相同。但是,在持续加载至极限荷载时,纵向干裂木梁构件的最终破坏形态会因纵向裂缝深度的影响而不同:纵向裂缝深度较浅时影响较小,其最终破坏形态与 B0 组类似;纵向裂缝深度较深时构件沿裂缝位置水平撕裂成上下两肢,具体各纵向干裂构件破坏形态见图 4。



(a) B1-1破坏情况

(b) B1-2破坏情况

(c) B2-1破坏情况

(d) B2-2破坏情况

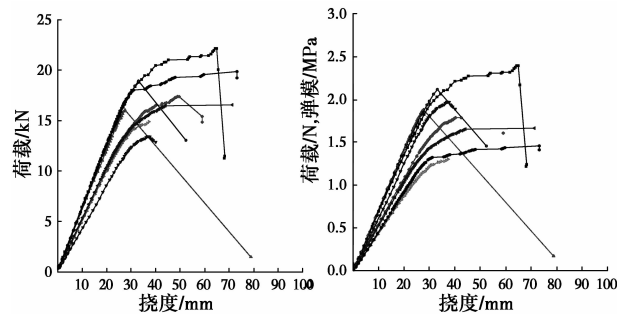
(e) B3-1破坏情况

(f) B3-2破坏情况

图 4 纵向干裂木梁破坏形态

Fig. 4 Failure mode of timber beams with longitudinal cracks

1.3.3 荷载挠度关系 将各构件荷载-挠度对比曲线绘于图 5。考虑到木材材性离散较大,为剔除各木梁构件抗弯弹性模量差异性的影响,取荷载值除以构件抗弯弹性模量为“相对荷载”作为曲线纵坐标绘制各构件相对荷载-挠度曲线如图 5(b)。由图 5 可以看出,木梁在受三点竖向荷载作用下,加载初期时构件荷载-挠度曲线基本上呈线性关系;纵向裂缝的存在影响构件的抗弯性能,且随着纵向裂缝深度的逐步增加,木梁的极限承载力和整体抗弯性能均有明显降低,当裂缝总深度不超过矩形截面宽度的 1/4 时,开裂梁的荷载-挠度曲线与完整梁几乎重合,裂缝对截面弯曲刚度的影响可忽略不计;裂缝深度超过截面宽度的 1/4 后,截面刚度明显下降,且裂缝深度越大刚度下降越明显。



(a)各组构件荷载-挠度曲线 (b)各组构件相对荷载-挠度曲线

注: — B0-1 — B0-2 — B1-1 — B1-2 — B2-1 — B2-2 — B3-1 — B3-2

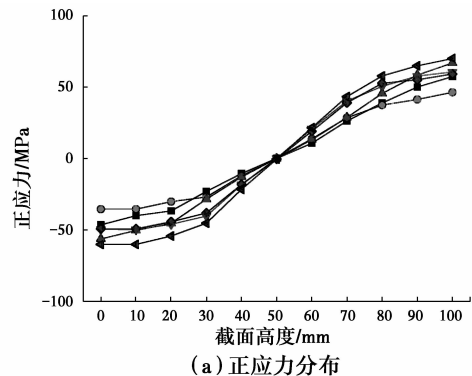
图 5 各构件荷载-挠度对比曲线

Fig. 5 Load-deflection curves

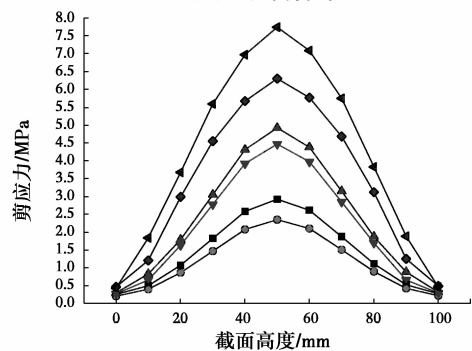
2 理论分析

2.1 应力分析

由于木梁开裂后受力状态有别于完整木梁,故而根据试验梁参数在 ABAQUS 有限元软件中建模,对开裂木梁进行应力分析。根据 ABAQUS 结果文件,得到开裂木梁的应力沿梁高的分布情况,如图 6 所示。



(a) 正应力分布



(b) 剪应力分布

注: — B1-1 — B1-2 — B2-1 — B2-2 — B3-1 — B3-2

图 6 开裂木梁应力分布图

Fig. 6 Stress distribution diagram

根据应力分布情况可知,部分受压区木材进入塑性工作,而拉应力基本呈线性分布,故可将受拉区木材视为线弹性工作状态,剪应力则是在裂缝处有最大值。

2.2 基本假定

在试验研究以及有限元分析的基础上,进行如下假定:

1)纵向开裂木梁受竖向荷载作用弯曲后,各截面木材应变符合平截面假定。

2)木梁横截面简化为矩形整截面,裂缝视为通长裂缝,仅分析裂缝深度和位置影响,不考虑宽度影响。

3)顺纹剪切破坏时受压区仍处于线弹性工作状态或部分进入塑性工作,且塑性受压区高度不大于 h_A (h_A 为梁顶至裂缝高度)。

4)木梁在干缩裂缝深度达到临界指标后,沿裂缝所在位置发生顺纹剪切破坏,破坏面齐平,由一根木梁变为 A、B 两根叠合梁。

5)木材顺纹受拉、受压弹性模量相同,木材顺纹受拉为线弹性状态,顺纹受压为理想弹塑性状态,结合文献[12-15],采用如图 7 所示的顺纹本构关系。

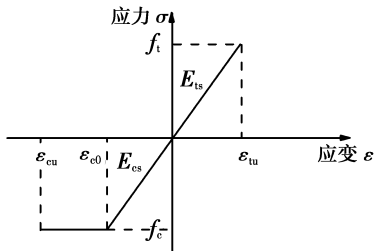


图 7 木材顺纹本构关系

Fig. 7 Constitutive relation of wood along the grain

$$I_z = \frac{b^2 h^4 + 4d^2 w^4 - 4bhdw[(2h^2 - 3hw + 2w^2) - 6h_2(h - w) + 6h_2^2]}{12(bh - 2dw)} \quad (2)$$

$$y_{\max} = \max\{y_z, h - y_z\} \quad (3)$$

式中: b 、 h 分别为梁宽度、高度; w 、 d 分别为裂缝宽度、深度。

根据图 9,木梁所受极限弯矩 M_u

$$M_u = \frac{FL_1}{2} \quad (4)$$

根据材料力学,有

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{I_z} \quad (5)$$

将式(2)~式(4)代入式(5),可得到木梁受弯控制时所能承受的极限荷载为

$$F_m = \frac{2I_z}{L_1 y_{\max}} f_m \quad (6)$$

式中: f_m 为木梁抗弯强度。

2.4 裂缝临界指标分析

根据试验现象,当裂缝深度达到一定程度后,木梁将会在裂缝处发生顺纹剪切破坏,由一整根木梁顺纹剪切破坏为上下两肢,将此种破坏形式定义为

2.3 受弯破坏极限荷载

根据试验现象可知,在裂缝深度不大的情况下,木梁最终破坏是受拉区木纤维拉断破坏,将此种破坏形式定义为“受弯破坏”。

此时的计算简图如图 8、图 9 所示。

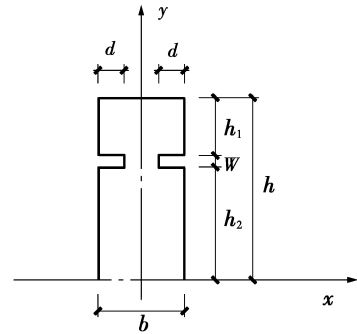


图 8 受弯破坏时截面计算简图

Fig. 8 Diagram of cross-section under bending failure

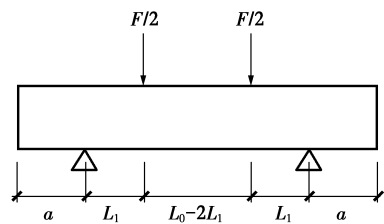


图 9 弯矩计算简图

Fig. 9 Calculation diagram of moment

根据图 8,可得截面惯性矩 I

“顺纹剪切破坏”,故而需要推出受弯破坏与顺纹剪切破坏的裂缝临界指标,以便于对已有裂缝的木梁承载力控制条件进行判定。

2.4.1 木梁受压区高度 x_c 。此时计算简图如图 10 所示。

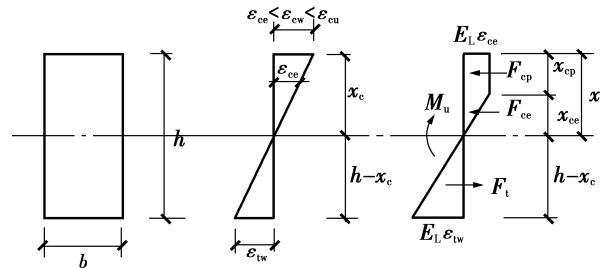


图 10 木梁截面应变-应力图

Fig. 10 Strain-stress diagram

根据静力平衡,有

$$F_t = F_{ce} + F_{cp} \quad (7)$$

根据平截面假定,可知

$$\frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_{tw}} = \frac{x_{ce}}{(h - x_c)} \quad (8)$$

令

$$m = \frac{\epsilon_{ce}}{\epsilon_{tw}} = \frac{E_L \epsilon_{ce}}{E_L \epsilon_{tw}} = \frac{f_c}{\sigma_{tw}} \quad (9)$$

可得

$$\begin{cases} x_{ce} = m(h - x_c) \\ x_{cp} = (1 + m)x_c - mh \\ x_t = h - x_c \end{cases} \quad (10)$$

则各部分力分别为

$$\begin{cases} F_{ce} = \frac{1}{2}bx_{ce}E_L\epsilon_{ce} = \frac{1}{2}bm(h - x_c)E_L\epsilon_{ce} \\ F_{cp} = bx_{cp}E_L\epsilon_{ce} = b[(1 + m)x_c - mh]E_L\epsilon_{ce} \\ F_t = \frac{1}{2}bx_tE_L\epsilon_{tw} = \frac{1}{2}b(h - x_c)E_L\epsilon_{tw} \end{cases} \quad (11)$$

式中： F_{ce} 、 F_{cp} 分别为木梁受压区弹性区、塑性区合力； F_t 为木梁受拉区合力； x_{ce} 、 x_{cp} 、 x_c 分别为木梁受压区弹性区高度、塑性区高度、总高度； x_t 为木梁受拉区高度； E_L 为木梁顺纹受拉、受压弹性模量； ϵ_{ce} 、 ϵ_{tw} 分别为木梁最大弹性压应变、最外侧拉应变。

将式(11)代入式(7)，解得受压区高度为

$$x_c = \frac{1 + m^2}{(1 + m)^2}h \quad (12)$$

2.4.2 木梁受压区已部分进入塑性工作阶段 若发生顺纹剪切破坏时木梁受压区已部分进入塑性工作阶段，由于此时尚未发生弯曲破坏，故有临界条件

$$\epsilon_{ce} \leq \epsilon_{tw} \leq \epsilon_{tu} \quad (13)$$

结合假定 4)，有

$$h_A \geq \frac{f_t - f_c}{f_t + f_c}h, \quad m \in \left[\frac{f_c}{f_t}, 1 \right] \quad (14)$$

$$h_A < \frac{f_t - f_c}{f_t + f_c}h, \quad m \in \left[\frac{h - h_A}{h + h_A}, 1 \right] \quad (15)$$

此时，计算 F_B 的计算简图如图 11。

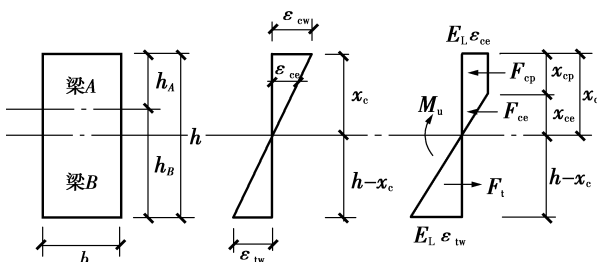


图 11 受压区已部分进入塑性工作的木梁的顺纹剪切破坏计算简图

Fig. 11 Calculation diagram of timber beams under shearing failure, when the compression zone has partially worked in plastic stage

根据图 11，有

$$F_B = \frac{bf_c h_B}{2m} \left[2 - \frac{h_B(1 + m)^2}{2mh} \right] \quad (16)$$

假设顺剪破坏时木梁沿裂缝所在位置发生相互错动，顺剪破坏为为梁 A 和梁 B 两段梁，取图 9 中左段梁为分离体，根据静力平衡得到

$$(b - 2d)f_v(a + L_1) = F_B \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)，得到

$$d = \frac{b}{2} + \frac{f_c h_B [(1 + m)^2 h_B - 4mh]}{8m^2 h f_v (a + L_1)} b \quad (18)$$

由于 F_B 在 m 容许范围内随着 m 增大而减小，故按照 h_A 的大小在式(14)、(15)对应的 m 范围内的选取 m 最小值代入式求得临界指标 d 。

2.4.3 木梁受压区仍处于线弹性工作阶段 当裂缝深度足够深时，发生顺纹剪切破坏时木梁受压区仍处于线弹性工作阶段，有 $\epsilon_{ce} \leq \epsilon_{tu}$ ，且由于此时尚未发生弯曲破坏，故有临界条件

$$\epsilon_{tw} \leq \epsilon_{ce} \quad (19)$$

此时，计算 F_B 的计算简图如图 12 所示。

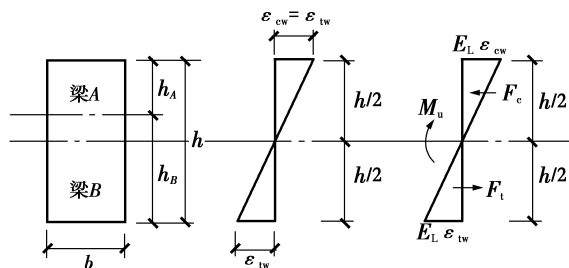


图 12 受压区仍处于线弹性工作的木梁的顺纹剪切破坏计算简图

Fig. 12 Calculation diagram of timber beams under shearing failure, when the compression zone is still in elastic work

根据图 12，有

$$F_B = E_L \epsilon_{tw} b \frac{h_A h_B}{h} \quad (20)$$

将式(20)代入式(17)，得到

$$\epsilon_{tw} = \frac{(b - 2d)(a + L_1)h}{E_L b h_A h_B} f_v \quad (21)$$

再根据式(19)，有

$$\epsilon_{tw} = \frac{(b - 2d)(a + L_1)h}{E_L b h_A h_B} f_v \leq \epsilon_{ce} \quad (22)$$

$$\frac{(b - 2d)(a + L_1)h}{b h_A h_B} f_v \leq E_L \epsilon_{ce} = f_c \quad (23)$$

整理得到

$$d \geq \frac{b}{2} \left(1 - \frac{f_c h_A h_B}{f_v (a + L_1) h} \right) \quad (24)$$

2.5 顺纹剪切破坏极限荷载

由于顺纹剪切破坏前木梁尚未撕坏，仍然为一

根整截面梁,故而可以此为依据来分析其极限承载力。

$$m = \frac{bh_B f_c (2h - h_B) + 2\sqrt{bh f_c h_B^2 (bh_A f_c - f_v (b - 2d)(a + L_1))}}{bf_c h_B^2 + 4hf_v (b - 2d)(a + L_1)} \quad (25)$$

根据图 11,有极限弯矩 M_u

$$M_u = F_{cp} \left(h - \frac{x_{cp}}{2} \right) + F_{ce} \left(h - x_{cp} - \frac{x_{ce}}{3} \right) - F_t \frac{(h - x_c)}{3} \quad (26)$$

将式(25)代入式(10)~式(12)求解得到 F_{cp} 、 F_{ce} 、 F_t 、 x_{cp} 、 x_{ce} 、 x_c ,并将结果代入式(26),可得到木梁破坏由顺纹剪切控制时所能承受的极限荷载

$$F_v = \frac{2M_u}{L_1} \quad (27)$$

2.5.2 木梁受压区仍处于线弹性工作阶段 根据图 12,有

$$F_c = F_t = \frac{(b - 2d)(a + L_1)h^2 f_v}{4h_A h_B} \quad (28)$$

$$M_u = \frac{(b - 2d)(a + L_1)h^3 f_v}{6h_A h_B} \quad (29)$$

对应的极限荷载为

$$F_v = \frac{2M_u}{L_1} = \frac{(b - 2d)(a + L_1)h^3 f_v}{3h_A h_B L_1} \quad (30)$$

2.6 理论公式归纳

根据有限元应力分析图、基本假定、力的平衡条件、材料力学基本公式推导出木梁由受弯破坏变为顺纹剪切破坏的裂缝临界指标,以及相应的极限承载力计算公式,再对极限承载力计算公式进行合理拟合以及简化。由于木梁受压区已部分进入塑性工作阶段时 m 值公式太过复杂,且初步绘得的曲线显示木梁受压区已部分进入塑性工作阶段与仍处于线弹性工作阶段的曲线斜率差异很微小,故而简化为只用木梁受压区仍处于线弹性工作阶段的相应公式绘制曲线。总结归纳承载力下降系数曲线如图 13 所示。

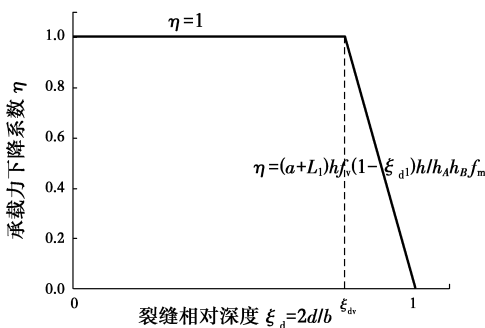


图 13 裂缝相对深度-承载力下降系数曲线图
Fig. 13 Relative depth of crack-the decreasing coefficient of bearing capacity

2.5.1 木梁受压区已部分进入塑性工作阶段 将式(18)代入式(7)~式(12),得到

图 13 中, h_A 、 h_B 分别为梁顶、梁底至裂缝高度; b 、 h 分别为梁的宽度、高度; d 为裂缝深度; f_c 、 f_t 、 f_v 、 f_m 分别为木梁抗压、抗拉、抗剪、抗弯强度; ξ_{dv} 具体定义见式(31)。

$$\xi_{dv} = \begin{cases} 1 + \frac{f_c h_B \left[\left(1 + \frac{f_c}{f_t} \right)^2 h_B - 4 \frac{f_c}{f_t} h \right]}{4 \left(\frac{f_c}{f_t} \right)^2 h f_v (a + L_1)}, & h_A \geq \frac{f_t - f_c}{f_t + f_c} h \\ 1 + \frac{f_c h_B \left[\left(1 + \frac{h - h_A}{h + h_A} \right)^2 h_B - 4 \frac{h - h_A}{h + h_A} h \right]}{4 \left(\frac{h - h_A}{h + h_A} \right)^2 h f_v (a + L_1)}, & h_A < \frac{f_t - f_c}{f_t + f_c} h \end{cases} \quad (31)$$

3 试验值与理论值比较

根据式(31),可以判断 B0、B1、B2 组木梁均发生受弯破坏,而 B3 组木梁则发生顺纹剪切破坏,且木梁受压区已部分进入塑性工作阶段,这与试验现象相符。各组木梁相应的承载力降低系数参照图 13,根据此系数推出极限荷载理论值,并将试验值与理论值的比较结果列于表 3。根据表 3 可知,带裂缝木梁极限承载力的试验值与理论值误差基本都在 25% 以内,考虑到进行理论推导时进行了一定的简化分析,且由表 2 可知木材本身材性离散性较大,因此,认为这样的误差在容许范围内,提出的理论公式合理。

误差分析:

1)除了干缩裂缝外,木材还存在木节、斜纹等天然缺陷会影响木梁的抗弯承载力,故而对于受弯破坏的梁,试验值较理论值偏小。

2)对于顺纹剪切破坏的梁,做试验时,可能刚出现顺纹剪切现象时并未观察到,木梁仍在继续加载,而且理论分析木梁承载力时将裂缝视为通长裂缝,而试验中的裂缝主要设置在木梁中间一段,并非通长,可能试验构件中裂缝对木梁顺剪截面的削弱没有通长缝那么严重,故而试验值较理论值偏大。

表3 试验值与理论值比较

Table 3 Comparison of test value and theoretical value

编号	f_v / MPa	f_m / MPa	试验值/ kN	承载力 降低系 数 η /%	理论值/ kN	误差 δ /%
B0-1	9.50	52.93	20.45	0.00	23.52	15.03
B0-2	8.20	45.66	18.91	0.00	20.29	7.32
B1-1	7.35	40.94	16.01	0.00	18.20	13.65
B1-2	5.91	32.92	13.42	0.00	14.63	9.02
B2-1	8.72	48.58	17.37	0.00	21.59	24.30
B2-2	7.84	43.68	16.55	0.00	19.41	17.30
B3-1	7.71	42.93	13.91	62.85	11.99	13.80
B3-2	9.12	50.78	17.13	62.85	14.19	17.16

注:用于理论值计算的各项力学参数参照试验实测数据以及文献[16]

4 结论

1)当木梁破坏处于受弯控制时,干缩裂缝对木梁承载力的影响相当微弱,当裂缝深度超过其临界指标变为顺纹剪切破坏时,裂缝对木梁承载力的削弱较大。

2)当裂缝所处位置越接近木梁上下表面时,裂缝临界指标越大,即越不容易发生顺纹剪切破坏。

3)理论值与试验值的误差在可接受范围内,可以认为本文推导的理论公式合理,但是对发生顺纹剪切破坏时,受压区已部分进入塑性工作阶段的木梁进行分析时,假定塑性受压区高度不大于 h_A ,这对裂缝非常靠近木梁上边缘的情况分析不是很准确。

参考文献:

- [1] 王雪亮. 历史建筑木结构基于可靠度理论的剩余寿命评估方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
WANG X L. Research on evaluation method of reliability residual life of historic timber structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 周乾, 闫维明. 古建筑木结构叠合梁与组合梁弯曲受力研究[J]. 建筑结构, 2012(4):157-161.
ZHOU Q, YAN W M. Bending analysis on composite beam and combination beam of Chinese ancient wooden buildings [J]. Building Structure, 2012(4):157-161. (in Chinese)
- [3] 陆伟东, 刘伟庆, 耿启凡, 等. 竖嵌CFRP板条层板增强的胶合木梁受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014,

35(8):151-157.

LU W D, LIU W Q, GENG Q, et al. Study on flexural behavior of glued laminated timber beams reinforced with vertical CFRP lath inlay [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8):151-157. (in Chinese)

- [4] 欧阳煜, 范雷芹. 纤维增强聚合物加固带裂缝圆截面木梁的弯曲[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, (3):385-396.
OUYANG Y, FAN L Q. Bending of split circular timber beam strengthened with fiber reinforced polymer [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2014, (3):385-396. (in Chinese)
- [5] NAJM H, SECARAS J, BALAGURU P. Compression tests of circular timber column confined with carbon fibers using Inorganic Matrix [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(2):198-204.
- [6] 宋晓滨, 吴亚杰, 顾祥林, 等. 带纵缝木梁抗弯承载力及修复方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):528-535.
SONG X B, WU Y J, GU X L, et al. Flexural and shearing capacities of longitudinally cracked and retrofitted wood beams [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2016, 44(4):528-535. (in Chinese)
- [7] ZHANG W, SONG X, GU X, et al. Compressive behavior of longitudinally cracked timber columns retrofitted using FRP sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(1):90-98.
- [8] 上官蔚蔚, 任海青, 邢新婷, 等. 基于有限元方法的木材模型—实际应用[J]. 木材加工机械, 2015, 26(3):52-57.
SHANGGUAN W W, REN H Q, XING X T, et al. Practical application of wood model based on finite element method [J]. Woodworking Machinery 2015, 26(3):52-57. (in Chinese)
- [9] 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.
CHEN Z Y, ZHU E C, PAN J L. Numerical simulation of mechanical behaviour of wood under complex stress [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4):629-634. (in Chinese)
- [10] DIETSCH P, GAMPER A, MERK M, et al. Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(2):153-165.

- [11] BERG S, SANDBERG D, EKEVAD M, et al. Crack influence on load-bearing capacity of glued laminated timber using extended finite element modelling [J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2015, 10(4): 335-343.
- [12] BECHTEL S C, NORRIS C B. Strength of wood beams of rectangular cross section as affected by span-depth ratio [M]. Madison, Wis.: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1952:42.
- [13] BAZAN I M M. Ultimate bending strength of timber beams [D]. Halifax: Nova Scotia Technical College, 1980.
- [14] BUCHANAN A H. Strength model and design methods for bending and axial interaction in timber members [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1984.
- [15] BUCHANAN A H. Bending strength of lumber [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1990, 116(5): 1213-1229.
- [16] 包轶楠. 古建木结构榫卯节点的力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- BAO Y N. Study on mechanical properties of mortise-tenon joint in ancient timber structures[D]. Nanjing: Southeast University. 2014. (in Chinese)

(编辑 胡玲)