

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021096

穿斗式木构架抗侧性能参数计算方法对比

王双永^{1,2}, 邓昊¹, 周海宾¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102)



摘要: 抗侧性能参数, 包括水平抗侧承载力、初始抗侧刚度和延性系数等, 是评价穿斗式木构架承受水平荷载(如地震和风荷载)能力的重要指标。以穿斗式木构架为研究对象, 以单调加载试验的荷载-位移曲线为例, 采用国内外4项标准的方法计算穿斗式木构架的抗侧性能参数, 分析不同方法的适用性。GB/T 37745—2019中未给出屈服位移和延性系数的具体定义, 仅计算水平抗侧承载力和初始抗侧刚度。结果表明, 采用不同方法得到的水平抗侧承载力峰值相同、初始抗侧刚度结果接近, 但延性系数存在较大差异。按GB/T 37745—2019方法计算的初始抗侧刚度较其他方法偏低, JGJ/T 101—2015和EN 12512: 2005切线法计算的延性系数均大于4.0, 按ASTM E 2126-11计算的延性系数为2.5。根据穿斗式木构架的受力特性和荷载-位移曲线的双线性段特征, JGJ/T 101—2015和EN 12512: 2005切线法规定的计算方法适用于穿斗式木构架的抗侧性能参数的计算。

关键词: 穿斗式木构架; 抗侧性能; 标准; 计算方法

中图分类号: TU366.2; TU502.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 04-0063-07

Comparative Study on Calculation Methods of Lateral Performance Parameters for Chuan-dou Style Wooden Frames

WANG Shuang-yong^{1,2}, DENG Hao¹, ZHOU Hai-bin¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: Lateral performance parameters such as the lateral-resisting capacity, the initial lateral-resisting stiffness, and the ductility coefficient are important indicators for evaluating the lateral performance of Chuan-dou style wooden frames. Based on the load-displacement curve of the monotonic loading test of Chuan-dou style wooden frame, the lateral performance parameters were calculated according to different codes and standards respectively. The specific definitions of the yield displacement and the ductility coefficient are not given in GB/T 37745—2019, While only were the initial lateral-resisting stiffness and lateral-resisting capacity of the structure calculated according to the definition in this standard. The results showed that the lateral-resisting capacity calculated by different standards was the same, and the initial lateral-resisting stiffness results were similar, however the ductility coefficients were significantly different. The initial lateral-resisting stiffness calculated according to GB/T 37745—

收稿日期: 2021-07-22; 修改日期: 2022-06-27

基金项目: 内蒙古自治区重点研发计划“装配式井干木结构无沉降横木制造技术研究”(2022YFDZ0002); 中国文化遗产研究院开放课题“应县木塔残损木构件修复与加固关键技术”(2022002)。

作者简介: 王双永(1988—), 男, 助理研究员, 博士研究生。Email: tzlswsy@163.com

通讯作者: 周海宾, 男, 研究员。Email: zhouhb@caf.ac.cn

2019 is lower than other methods. The ductility coefficient is greater than 4.0 using the calculation method specified in both JGJ/T 101—2015 and EN 12512:2005. The ductility coefficient is 2.5 when the calculation is following the method in ASTM E 2126-11. According to the force characteristics of Chuan-dou style wooden frame and the bilinear segment characteristics of the load-displacement curve, the methods specified in JGJ/T 101—2015 and EN 12512:2005 are applicable to the calculation of lateral performance parameters of Chuan-dou style wooden frame.

Key words: Chuan-dou style wooden frame; lateral performance; standard; calculation methods

穿斗式木结构作为中国传统建筑木结构的重要形式之一,广泛应用于中国西南地区的民居建筑,具有重要的历史文化价值和现代木结构参考价值。穿斗式木结构在横向采用一根通长的穿枋贯穿几根立柱形成一榀构架,纵向采用斗枋连接相邻构架形成稳定的空间框架结构。穿枋和柱之间采用直榫连接,斗枋和柱之间一般采用燕尾榫或其他榫卯形式连接。枋柱节点通过构件之间的摩擦及横纹嵌压变形抵抗一定弯矩,为半刚性节点^[1-2]。柱脚可直接搁置于基础上方或与地脚枋通过榫卯连接后搁置于基础上,在水平荷载作用下会发生柱脚抬升。基于此构造特征,穿斗式木结构表现出良好的水平变形能力^[3-4]。

地震和风荷载是穿斗式木结构在服役期间所承受的主要水平荷载。抗侧性能是评价穿斗式木结构承受水平荷载能力的重要指标,其中水平抗侧承载力、抗侧刚度和延性系数等可定量分析结构的抗侧性能。Dutu等^[5]分别采用两种标准EN 12512:2005 “*Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners*”^[6]和ASTM E 2126-11 “*International. Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings*”^[7]计算两榀木构架的抗侧性能参数,屈服位移、延性系数等结果存在较大差异。因此,探讨合理的穿斗式木构架抗侧性能参数计算方法成为研究此类木构架抗侧能力的重要前提。

本研究以一榀单层两跨穿斗式木构架的单调加载试验结果为例,采用国内外4项标准方法计算穿斗式木构架的抗侧性能参数,并进行对比研究,为合理选择穿斗式木结构抗侧性能参数计算方法提供依据。

1 材料与方法

1.1 穿斗式木构架模型制作

木构架模型构件均由贵州当地杉木(*Cunninghamia lanceolata*)原木经切削加工而成,根据木材物理力学性质试验方法标准^[8-13]进行材性试验,测得含水率为9.03%,其他力学性能参数列于表1。

表1 杉木力学性能参数

Tab.1 Mechanical properties of Chinese fir

指标	抗弯强度	抗弯弹性模量	顺纹抗拉强度	顺纹抗压强度	横纹全部径向抗压强度
平均值/MPa	71.46	10 192.50	76.54	48.68	4.68
变异系数/%	10	7	13	12	19

注:每个参数由20个试件测得。

基于贵州黔东南地区的实地调研结果,依据当地穿斗式木结构构造形式,制作一榀单层两跨横向木构架足尺模型(图1a)。试件数量为1个。模型由三根立柱、两根穿枋和一根地脚枋组成,枋柱节点均为透榫节点(图1b),且辅以木销定位。

柱长3 000 mm,圆形截面直径220 mm;地脚枋尺寸为3 860 mm×55 mm×180 mm;穿枋尺寸为4 260 mm×55 mm×180 mm;木销长度为280 mm,两端头直径分别为23 mm和26 mm。

1.2 主要设备及仪器

加载装置如图2所示,包括:MTS液压伺服器,ZB4-500型电动油泵,DH5921静态应变测试数据采集系统,液压作动器(最大载荷250 kN、行程±250 mm),位移计(精度0.1 mm、量程100 mm)。

1.3 试验方法

1.3.1 加载方案

木构架直接搁置于混凝土梁上,以模拟实际的柱脚平摆浮搁情况。混凝土梁采用地锚螺栓与

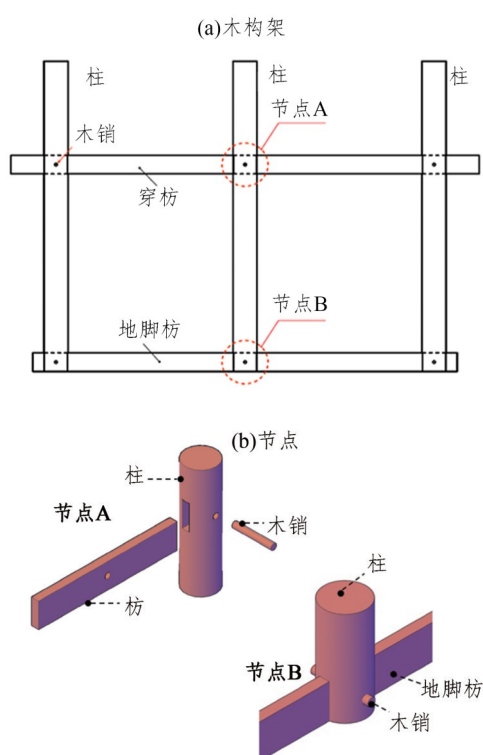


图1 穿斗式木构架构造

Fig.1 Schematic diagram of Chuan-dou style wooden frame

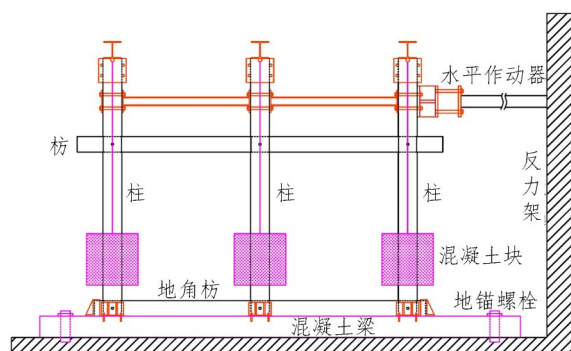


图2 加载装置

Fig.2 Loading setup

地面固接。竖向荷载采用在柱顶悬挂混凝土块的方式进行模拟, 根据柱顶实际受荷情况, 确定各柱的竖向荷载为 10 kN。三根立柱的柱顶分别搁置工字钢, 通过夹板与柱头夹紧, 工字钢两端悬挂混凝土质量块以施加恒定的柱顶竖向荷载, 每个混凝土块质量为 0.5 t。立柱之间采用钢系梁相连, 以保证加载过程中三根立柱受力的协同性。考虑柱顶混凝土块、工字钢和钢系梁的质量, 边柱和中柱的实际竖向荷载分别为 10.98 kN 和 11.1 kN。通过液压作动器 (荷载极值为 250 kN、量程为 ± 250 mm) 施加水平荷载, 作动器在上层枋顶部往上 250 mm 处与右侧柱相连。

试验采用位移加载控制, 速率为 0.2 mm/s, 包括预加载和正式加载两个阶段。

1) 预加载阶段: 加载至 40 mm 后卸载, 在此阶段检验观测仪表是否正常工作、试验装置是否可靠;

2) 正式加载阶段: 持续加载至 150 mm 后, 为保证大位移时的安全加载, 分 5 级加载, 增幅为 10 mm, 每加载 1 级, 短时停止加载, 观察木结构状态, 如无肉眼可见的倾覆趋势, 继续进行下一级加载, 直至模型破坏或加载至最大位移 200 mm。

1.3.2 测点布置

模型测点布置如图 3 所示。

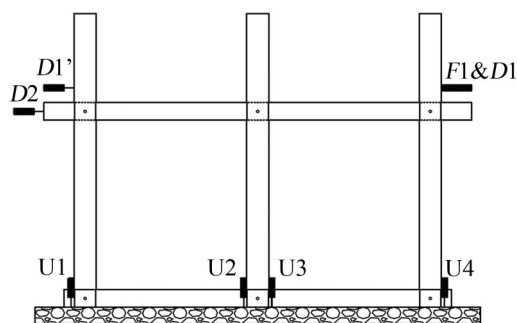


图3 测点布置

Fig.3 Instrumentation locations

作动器加载点位置的荷载 (F_1) 和位移 (D_1) 由作动器上的测力元件测得; 为防止 D_1 在采集过程中出现问题, 在左柱的加载高度位置布置拉线式位移计 D_1' 以测得水平位移; 穿枋或斗枋左侧枋端中心布置拉线式位移计测得上层枋的水平位移 D_2 ; 柱底分别布置位移计 $U_1 \sim U_4$ 以测得相应柱脚的抬升位移。

1.3.3 抗侧性能参数计算

采用国内外各2项标准: JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[14]和 GB/T 37745—2019《木结构剪力墙静载和低周反复水平加载试验方法》^[15], EN 12512:2005^[6]中的切线法和割线法、ASTM E 2126-11^[7]共5种方法, 计算穿斗式木构架的抗侧性能参数——水平抗侧承载力、初始抗侧刚度和延性系数。按照4种标准的要求, 均可在木构架顶部采用作动器施加水平往复荷载, 以获得木构架的荷载-位移全过程曲线。不同标准对荷载-位移曲线各特征值的计算方法存在差异。

1) 建筑行业标准 JGJ/T 101—2015^[14]规定了适用于所有结构类型的计算方法, 本研究计算抗侧性能参数如图4所示。

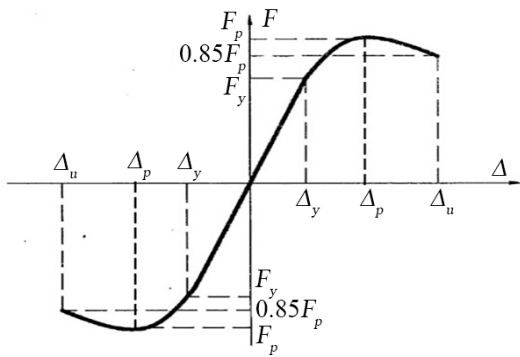


图4 抗侧性能参数示意图^[14]
Fig.4 Schematic of lateral performance parameters

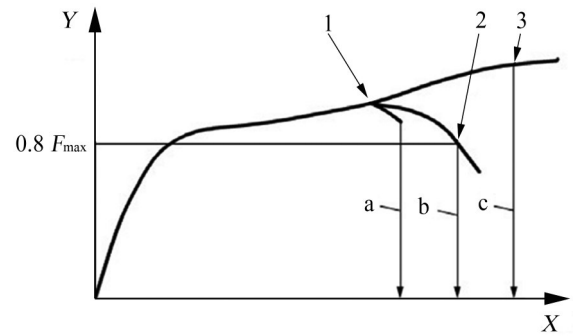
以荷载-位移曲线上的第一个明显拐点视为屈服点, 屈服点相应的承载力和位移分别为屈服荷载 F_y 和屈服位移 Δ_y ; 曲线荷载最大值对应水平抗侧承载力峰值 F_p , 对应位移为 Δ_p ; 极限荷载 F_u 取值 $0.85F_p$, 对应极限位移为 Δ_u , 最大位移对应荷载大于 $0.85F_p$ 时, 极限位移等于最大位移, 对应荷载为 F_u 。结构的延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。

2) 国家标准 GB/T 37745—2019^[15]中给出了不同破坏情况下极限位移的确定方法, 如图5所示。

极限位移定义: $F_{\max}$ 对应下列三种情况中的任何一个, 包括: 破坏段的位移 (例a), 或最大荷载点后 $0.8F_{\max}$ 时的位移 (例b), 或 $H/15$ 的位移 (例c), 并以上述三种情况中最先出现的情况为准。

初始抗侧刚度按公式 (1) 进行计算。

$$K_{\text{ini}} = \frac{0.3F_{\max}}{l_{40\%F_{\max}} - l_{10\%F_{\max}}} \quad (1)$$



1— $F_{\max}$ (例a, 例b); 2—破坏点位移; 3— $F_{\max}$ (例c); a— l_u (例a), 破坏点的位移; b— l_u (例b), $0.8F_{\max}$ 时的位移; c— l_u (例c), 位移 $= H/15$ 。

图5 不同破坏情况下极限位移确定方法^[15]

Fig.5 Determination method of ultimate displacement under different failure conditions

式中: K_{ini} 为结构的初始抗侧刚度, $F_{\max}$ 为结构的抗侧承载力峰值, $l_{40\%F_{\max}}$ 和 $l_{10\%F_{\max}}$ 是曲线上 $40\%F_{\max}$ 和 $10\%F_{\max}$ 时的相应位移。

3) 欧洲标准 EN 12512:2005^[6]根据不同的荷载-位移曲线类型, 给出了两种参数定义方法。

当荷载-位移曲线呈现出两段明确定义的线性段时, 采用切线法 (图6a), 取两段线性段交点对应的荷载作为屈服荷载 F_y , 对应位移为 Δ_y ; 抗侧刚度 $K_{\text{ini}} = F_y / \Delta_y$ 。

当荷载-位移曲线未呈现两段明确定义的线性段时, 采用割线法 (图6b), F_y 由以下两条直线的交点确定: 连接荷载-位移曲线上 $0.1F_p$ 和 $0.4F_p$ 两点绘制第一条直线, 第二条直线为荷载-位移曲线的切线, 且斜率为第一条直线的 $1/6$ 。

4) 美国标准 ASTM E 2126-11^[7]基于能量等效原理, 定义结构的各抗侧性能参数, 如图7所示。

其中: F_p 为水平抗侧承载力峰值, 对应曲线的荷载最大值; Δ_p 为其对应位移; F_u 为极限荷载, 当曲线的最后一个荷载值大于 0.8 倍峰值荷载时, 取此荷载值作为极限荷载 (图7a); 当曲线的最后一个荷载值小于 0.8 倍峰值荷载时, 取 $F_u = 0.8F_p$ (图7b), 极限荷载对应位移为极限位移 Δ_u ; 弹性阶段刚度 $K_{\text{ini}} = 0.4F_p / \Delta_{0.4F_p}$; 屈服荷载 F_y 按公式2进行计算。

$$F_y = K_{\text{ini}} \times (\Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - 2A/K_{\text{ini}}}) \quad (2)$$

其中 A 为曲线从零点 to 结构破坏位移点所包围的面积。

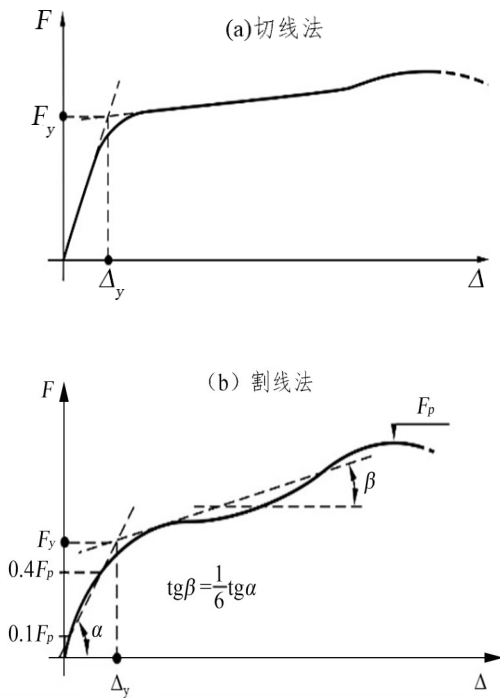
图6 屈服荷载确定方法^[6]

Fig.6 Determination method of yield load

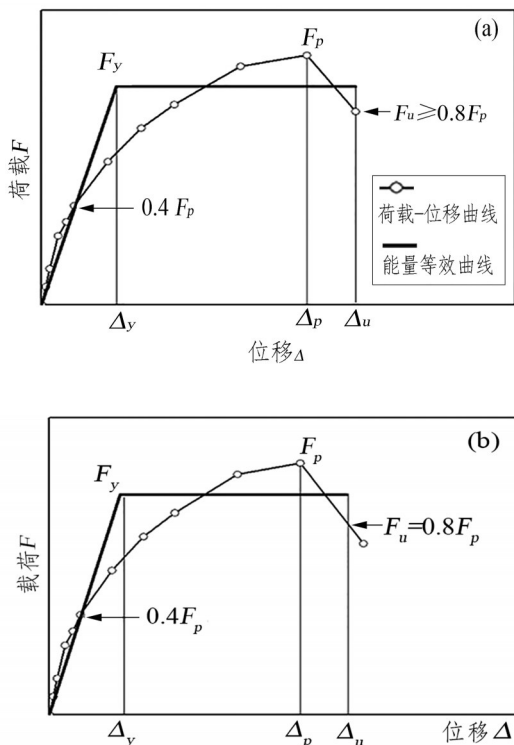
图7 试件抗侧性能参数的确定^[7]

Fig.7 Determination of specimen lateral performance parameters

2 结果与讨论

2.1 穿斗式木构架模型的荷载-位移曲线

穿斗式木构架模型的荷载-位移曲线如图8所示。

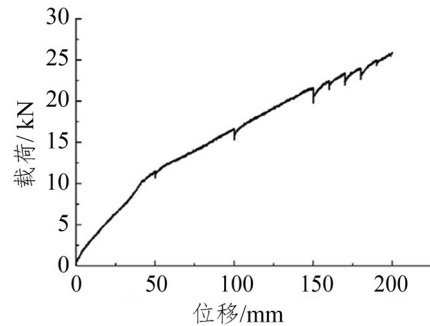


图8 穿斗式木构架荷载-位移曲线

Fig.8 Force-displacement curve of Chuan-dou style wooden frame

从图8可以看出:荷载整体呈现随位移增加而增加的趋势,直至加载位移达到200 mm(层间位移为1/12.5)时,曲线未出现下降段。其他文献中的穿斗式木构架荷载-位移曲线也表现为相似的曲线特征^[3-4]。中间短时间停止加载时,荷载会出现小幅下降,再加载后又持续上升。

在加载前期,穿斗式木构架的荷载和位移呈近似线性关系,此阶段各构件主要发生弹性变形。随着位移增加,柱枋节点的榫头和卯口逐渐接触挤紧,木销和相邻构件发生挤压。当位移大于40 mm后,荷载-位移曲线斜率减小,说明穿斗式木构架的水平抗侧刚度降低,这是由于构件之间相互挤压产生塑性变形所导致。

由于EN 12512:2005切线法适用于荷载-位移曲线表现为明显两线性段特征的结构,而EN 12512:2005割线法适用于荷载-位移曲线为非明显两线性段特征的结构。基于图8穿斗式木构架的荷载-位移曲线表现出明显的两线性段特征,因此可采用EN 12512:2005切线法标准进行抗侧性能指标计算。

根据穿斗式木构架荷载-位移曲线特征,4项标准对应的木构架抗侧性能参数计算方法列于表2。

2.2 抗侧性能参数

采用不同标准计算得到的穿斗式木构架模型抗侧性能参数结果列于表3。GB/T 37745—2019中未给出屈服荷载、屈服位移和延性的具体定义方

表 2 抗侧性能参数计算方法

Tab.2 Calculation of lateral performance parameters

标准方法	F_p	Δ_p	F_u	Δ_u	F_y	Δ_y	K_{ini}	μ
JGJ/T 101—2015	最大荷载	F_p 对应位移	Δ_u 对应荷载	最大位移	第一个明显拐点	F_y 对应位移	F_y/Δ_y	Δ_u/Δ_y
GB/T 37745—2019	最大荷载	F_p 对应位移	Δ_u 对应荷载	$H/15$	—	—	$K_{ini} = \frac{0.3F_{max}}{l_{40\%F_{max}} - l_{10\%F_{max}}}$	—
EN 12512:2005	最大荷载	F_p 对应位移	Δ_u 对应荷载	最大位移	两段线性段交点 对应荷载	F_y 对应位移	F_y/Δ_y	Δ_u/Δ_y
ASTM E 2126-11	最大荷载	F_p 对应位移	最后荷载	F_u 对应位移	$F_y = K_{ini} \times (\Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - 2A/K_{ini}})$	F_y 对应位移	$0.4F_p/\Delta_{0.4F_p}$	Δ_u/Δ_y

表 3 结构抗侧性能参数

Tab.3 Parameters of Lateral performance

标准方法	F_p/kN	Δ_p/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	F_y/kN	Δ_y/mm	$K_{ini}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	μ
JGJ/T 101—2015	25.90	199.92	25.86	200.00	10.39	42.00	247.38	4.76
GB/T 37745—2019	25.90	199.92	25.86	200.00	—	—	224.05	—
EN 12512:2005 切线法	25.90	199.92	25.86	200.00	11.66	47.76	244.14	4.19
ASTM E 2126-11	25.90	199.92	25.86	200.00	19.70	80.07	245.98	2.50

法，仅计算初始抗侧刚度、极限位移和抗侧承载力峰值。从表 3 可以看出：

1) 穿斗式木构架模型的抗侧承载力峰值 F_p 及对应位移 Δ_p 、极限荷载 F_u 及对应位移 Δ_u 相同。这是由于 4 种标准对于抗侧承载力峰值的定义相同，因此 F_p 取值相同。根据穿斗式木构架荷载-位移曲线特征，4 种计算方法得到极限荷载均为最大位移处对应的荷载，因此 F_u 取值也相同。

2) 屈服荷载 F_y 和屈服位移 Δ_y 存在较大差异，JGJ/T 101—2015 计算值最小，ASTM E 2126-11 计算值最大。EN 12512:2005 切线法的计算结果略大于 JGJ/T 101—2015 的计算结果，这是由于穿斗式木构架的荷载-位移曲线表现出较为明显的两线性段特征（图 6），按切线法得到的两线性段的交点位置稍滞后于荷载-位移曲线上的第一个明显拐点，则其对应的 F_y 和 Δ_y 稍大于曲线上第一个明显拐点对应的 F_y 和 Δ_y 。

3) 初始抗侧刚度 K_{ini} 不同，变化范围为 224.05 kN/m~247.38 kN/m，其中按 GB/T 37745—2019 计算得到的抗侧刚度值略低，另外 3 种方法计算得到的结果十分接近。

4) 延性系数 μ 存在较大差异，按 JGJ/T 101—2015 计算得到的延性系数最大，JGJ/T 101—2015 和 EN 12512:2005 切线法的计算结果接近，均大于 4，按上述两个标准得到的计算结果，穿斗式木结

构可归类为延性较好的建筑结构；而采用 ASTM E 2126-11 方法得到的计算结果小于 3，延性明显小于前两个标准的计算结果。

根据不同标准方法的计算对比结果，按 JGJ/T 101—2015 规定计算得到的抗侧承载力峰值 F_p 及峰值位移 Δ_p 与 EN 12512:2005 切线法的取值相同，前者的初始刚度 K_{ini} 、屈服荷载 F_y 、屈服位移 Δ_y 和延性系数 μ 的计算结果与后者计算结果十分接近；按 GB/T 37745—2019 的规定计算得到的抗侧承载力峰值 F_p 及峰值位移 Δ_p 与 EN 12512:2005 切线法的取值相同，前者的初始刚度 K_{ini} 的计算结果与后者计算结果十分接近。可认为我国标准 JGJ/T 101—2015 和 GB/T 37745—2019 也适用于穿斗式木结构的抗侧性能指标计算。

3 结论

1) 穿斗式木构架在水平荷载作用下表现出良好的变形能力，其荷载-位移曲线呈现两段式曲线特征，在层间位移角达到 1/12.5 时，未出现下降段，抗侧性能优异。

2) 采用 JGJ/T 101—2015、GB/T 37745—2019、EN 12512:2005 切线法和 ASTM E 2126-11 标准中的规定方法，分别计算穿斗式木构架模型的抗侧承载力峰值、初始抗侧刚度和延性系数等参数，4 种方法得到的抗侧承载力峰值相同，初始

抗侧刚度接近, 但延性系数存在较大差异。按 JGJ/T 101—2015 和 EN 12512:2005 切线法规定的计算方法得到的延性系数较大, 均大于 4; 按 ASTM E 2126-11 规定的计算方法得到的延性系数小于 3。

3) 根据穿斗式木构架的受力特性和荷载-位移曲线的双线性段特征, 基于 EN 12512:2005 切线法适用范围, 结合不同标准的计算结果, 认为 EN 12512:2005 切线法、JGJ/T 101—2015 和 GB/T 37745—2019 标准方法适用于穿斗式木构架的抗侧性能指标计算。

参考文献:

- [1] 陈春超, 邱洪兴. 直榫节点受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 292-298.
CHEN C C, QIU H X. Study on flexural behavior of straight mortise-tenon joints[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 292-298.
- [2] 谢启芳, 郑培君, 崔雅珍, 等. 古建筑木结构直榫节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 232-241.
XIE Q F, ZHENG P J, CUI Y Z, et al. Experimental study on seismic behavior of straight mortise-tenon joints of ancient timber buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(3):

- 232-241.
- [3] 熊海贝, 王洁, 吴玲, 等. 穿斗式木结构抗侧力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 122-129.
- XIONG H B, WANG J, WU L, et al. Experimental study on lateral resistance performance of Chuandou wooden frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 122-129.
- [4] HUANG H, WU Y T, LI Z, et al. Seismic behavior of Chuan-Dou type timber frames[J]. Engineering Structures, 2018, 167: 725-739.
- [5] Dutu A, Niste M, Spatarelu I, et al. Seismic evaluation of Romanian traditional buildings with timber frame and mud masonry infills by in-plane static cyclic tests[J]. Engineering Structures, 2018, 167: 655-670.
- [6] EN12512-2005, Timber structures-test methods-cyclic testing of joints made with mechanical fasteners[S].
- [7] ASTM E 2126-11, Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings [S].
- [8] GB/T 1931—2009, 木材含水率测试标准[S].
- [9] GB/T 1935—2009, 木材顺纹抗压强度试验方法[S].
- [10] GB/T 1936.1—2009, 木材抗弯强度试验方法[S].
- [11] GB/T 1936.2—2009, 木材抗弯弹性模量测定方法[S].
- [12] GB/T 1938—2009, 木材顺纹抗拉强度试验方法[S].
- [13] GB/T 1939—2009, 木材横纹抗压试验方法[S].
- [14] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- [15] GB/T 37745—2019, 木结构剪力墙静载和低周反复水平加载试验方法[S].

(本文编校 张鹏、向琴)

(上接第50页)

- [8] Jimenez J P, Acda M N. Tobacco (*Nicotiana tabacum*) stalk particles as additive in urea formaldehyde bonded plywood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(24): 2658-2666.
- [9] Mirski R, Kawalerczyk J, Dziurka D, et al. The application of oak bark powder as a filler for melamine-urea-formaldehyde adhesive in plywood manufacturing[J]. Forests, 2020, 11(12): 1249.
- [10] Réh R, Kriššák U, Sedlářová U, et al. Utilization of birch bark as an eco-friendly filler in urea-formaldehyde adhesives for plywood manufacturing[J]. Polymers, 2021, 13(4): 511.
- [11] Cademartori P H G, Artner M A, Alves de Freitas R, et al. Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and *in situ* cure performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107281.
- [12] 崔启鹏, 叶春香, 杨旭, 等. 脲醛树脂胶粘剂添加剂不同配比研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(6): 67-70.
CUI Q P, YE C X, YANG X, et al. Study on additives ratio of urea formaldehyde resin[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2015, 31(6): 67-70.
- [13] 郁昭轩, 王丽茹, 康兆颜, 等. 白腐菌产漆酶活化木粉制备纤维板的力学性能[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(4): 86-89.
YU Z X, WANG L R, KANG Z Y, et al. Mechanical properties of the fiberboard from production of laccase from white rot fungus[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(4): 86-89.
- [14] 王允飞, 刘盛全, 周月, 等. 几种废弃木材木粉对脲醛树脂固化行为的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(1): 47-49.
WANG Y F, LIU S Q, ZHOU Y, et al. Effect of different waste wood powders on urea-formaldehyde resin curing[J]. China Wood Industry

- 2011, 25(1): 47-49.
- [15] 谢序勤, 王新洲, 汪雪. 纳米蒙脱土改性脲醛树脂耐久性研究[J]. 中国人造板, 2019, 26(S1): 35-40.
XIE X Q, WANG X Z, WANG X. Investigation of hot-water resistance of nanoclay modified urea-formaldehyde adhesive[J]. China Wood-Based Panels, 2019, 26(S1): 35-40.
- [16] 吴宪玲, 侯晓玉, 王笑可, 等. 玉米芯的综合利用研究现状[J]. 农业科技与装备, 2019(6): 59-60.
WU X L, HOU X Y, WANG X K, et al. Research progress on comprehensive utilization of corncob[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2019(6): 59-60.
- [17] 2020 中国统计年鉴[J]. 统计理论与实践, 2021(1): 2.
- [18] 陈先勇, 唐琴, 刘代俊. 碳酸钙微米球的制备与表征[J]. 化学研究与应用, 2012, 24(2): 314-317.
CHEN X Y, TANG Q, LIU D J. Preparation and characterization of calcium carbonate micro-spheres[J]. Chemical Research and Application, 2012, 24(2): 314-317.
- [19] 生物源碳酸钙对污水中 Pb(II) 的吸附[EB/OL]. (2021-01-11)[2022-07-11]. <https://www.dowater.com/jishu/2021-01-11/1551662.html>.
- [20] 何香凝. 玉米芯木聚糖的酶解提取工艺及生物活性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [21] 李正光. 无机粉体填充改性热塑性塑料机理探讨[J]. 工程塑料应用, 2008(3): 83-85.
- [22] 汪友明. 玉米芯碳基吸附材料的水热制备及其吸附性能与机理研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.

(本文编校 孟凡丹)