

考虑螺栓布置的胶合木螺栓—钢插板连接抗拉性能

刘应扬¹, 郭 森¹, 何海杰², 曹纪兴³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 台州学院 建筑工程学院, 浙江 台州 318000;

3. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 多螺栓—钢插板连接是应用较为广泛的胶合木结构节点连接方式。依据螺栓数目、排列方式、螺栓直径、木材厚度 4 个影响因素将试件分为了 12 组(每组 6 个)进行受拉试验, 得到了各试件的破坏模式以及初始刚度、屈服荷载、峰值荷载和延性系数等参数, 试验结果表明在木材厚度和螺栓直径相同的条件下, 破坏现象随着螺栓数量增加, 破坏模式的变化规律比较相近, 木材的左右侧面产生不同程度的劈裂裂缝, 裂缝从顶部延伸至最后一行螺栓以下。对比力学性能, 随着螺栓数量的增加, 试件的初始刚度、屈服荷载和峰值荷载均增加, 而延性会发生减小。最后以螺栓直径与数量为自变量对多螺栓—钢插板连接节点初始刚度和峰值荷载的公式进行了拟合, 结果与试验数据有良好的一致性。

关键词: 胶合木; 抗拉连接; 螺栓布置; 试验研究; 拟合公式
中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A

Bolt-Layout-Influence Study on Tensile Performance of Glulam Timber Bolted Connection with Slotted Steel Plate

LIU Yingyang¹, GUO Miao¹, HE Haijie², CAO Jixing³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Architectural Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China; 3. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: This paper introduces a novel node connection method in wooden structures known as the multi-bolt steel insert plate connection. It categorizes specimens into 12 groups, each containing six specimens, for tensile testing, with four influencing factors, i.e., bolt number, arrangement, bolt diameter, and base material thickness considered. The parameters obtained include failure modes, initial stiffness, yield load, peak load, and ductility coefficient. The test results reveal that, under the same conditions of consistent wood thickness and bolt

diameter, damage occurrence increases with the number of bolts, and the failure mode exhibits a similar pattern. Splitting cracks of different degrees emerge on the left and right sides of the wood, extending from the top to below the last row of bolts. In terms of mechanical properties, an increase in the number of bolts corresponds to higher initial stiffness, yield load, and peak load, accompanied by a decrease in ductility. Ultimately, formulas for the initial stiffness and peak load of multi-bolt steel insert plate connection nodes are derived, utilizing bolt diameter and quantity as independent variables. These formulas align closely with the experimental data, validating their accuracy.

Keywords: glulam timber; tensile connection; bolt layout; experimental study; fitted formula

在木结构建筑中, 破坏大多来自连接节点部位^[1]。现代木结构建筑广泛采用金属连接件, 使得结点的可靠性和稳定性得到有效提升。螺栓—钢插板的连接节点以其安装方便、钢板不外露等优点, 在现代木结构建筑中广泛应用。

许多学者采用试验和数值模拟对螺栓—钢插板节点的力学性能展开研究。Sawata 等^[2]进行了大量的木材销连接承载试验和木结构螺栓节点的剪切试验, 并用欧洲屈服理论(EYM)对螺栓连接木材的屈服和极限强度进行了估算, 两者结果较为一致。Hayashi 等^[3]对 2 种金属连接件的连接性能进行了研究, 发现连接的强度与梁的高度、连接件以及连接构件的类型有关。王明谦等^[4]通过对 22 个胶合木梁柱螺栓—钢填板足尺节点进行单调和低周反复加载试验以及数值模拟研究梁柱螺栓—钢填板节点的转动性能, 发现胶合木梁柱螺栓—钢填板节点性能主要

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金(2022492011)

第一作者: 刘应扬, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为木结构。E-mail: liuyingyang5687@qq.com

通信作者: 曹纪兴, 工学博士, 主要研究方向为健康监测。E-mail: cao.cee@outlook.com



论文
拓展
介绍

取决于螺栓和螺孔周边木材的承压能力;在同等条件下,节点初始刚度和极限弯矩随螺栓直径的减小而减小,节点初始刚度随螺栓边距的增加而减小。

Yurrita等^[5]以多螺栓—钢插板连接节点为研究对象,发现当节点中有多个钢板时,节点一般发生脆性破坏,并基于试验结果提出了节点刚度的力学模型。张盛东等^[6]对11个内嵌钢板单销木连接试件进行单调加载顺纹受压试验,得到了其破坏模式和力学性能,并推导了内嵌多块钢板单销连接节点顺纹受压承载力计算公式。Shu等^[7]通过节点试验和有限元分析等方法,深入研究了标准化的螺栓连接节点的破坏模式和受力机理,提出了钢插板—螺栓连接节点初始刚度、屈服荷载和极限荷载的理论分析方法。何敏娟等^[8]对4组螺栓—钢插板的梁柱连接节点进行单调和往复加载下抗侧力试验,研究了不同螺栓排数对节点抗侧力性能的影响。结果表明,普通节点中裂缝出现早、开展迅速;增加螺栓排数可提高节点的强度和延性,其中强度提高更明显。

综上所述,国内外研究重点在于探讨影响胶合木—钢插板螺栓节点力学性能的因素以及螺栓—钢插板结构部分承压过程的力学关系,然而关于多螺栓—钢插板连接节点的力学模型仍需要进一步研究。本文旨在通过试验进行分析,得到关于以螺栓数量及直径为变量的初始刚度及峰值荷载的表达式,并且为了保证公式的适用性,将其与按照规范计算的结果进行对照,为规范的完善和进一步推广提供理论支持。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了探究不同试件参数变量对多螺栓—钢插板连接节点力学性能的影响,试验设计依据螺栓数目、排列方式、螺栓直径、木材厚度4个影响因素将试件分为了12组,每组包含了6个试件进行顺纹抗拉试验。

表1为多螺栓—钢插板连接节点试件各参数的具体信息。以编号“M4A-12-230”为例说明,其中“M4A”代表采用4根4行1列排列形式的螺栓,编号“M4B”则代表采用4根2行2列排列形式的螺栓;“12”代表连接节点使用的螺栓直径为12mm;“230”代表试件厚度为230mm。如图1所示,螺栓具体的排列方式分为4种,设置有2根螺栓的排列方式为竖向2×1(图1a);有4根螺栓的排列方式有4×1(图

1b)和2×2(图1c)2种形式,有8根螺栓的排列方式为4×2(图1d)。图2为4种螺栓排列方式的多螺栓—钢插板连接节点具体尺寸详图。

表1 多螺栓—钢插板连接节点试件各参数信息

Tab. 1 Parameter information of glulam multi-bolted connection with slotted steel plate

试件编号	螺栓数量	螺栓排列		螺栓直径/mm	木材厚度/mm	数量
		行	列			
M2-12-230	2	2	1	12	230	6
M4A-12-230	4	4	1	12	230	6
M4B-12-230	4	2	2	12	230	6
M8-12-230	8	4	2	12	230	6
M2-14-175	2	2	1	14	175	6
M4A-14-175	4	4	1	14	175	6
M4B-14-175	4	2	2	14	175	6
M8-14-175	8	4	2	14	175	6
M2-16-105	2	2	1	16	105	6
M4A-16-105	4	4	1	16	105	6
M4B-16-105	4	2	2	16	105	6
M8-16-105	8	4	2	16	105	6

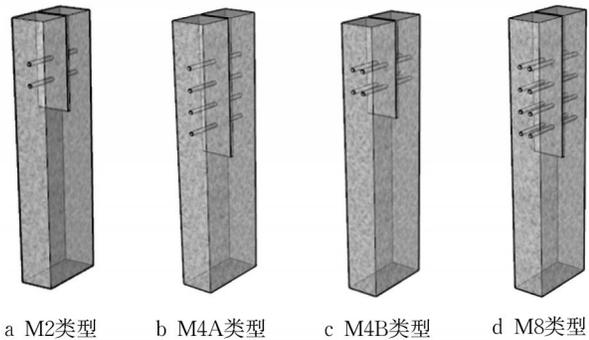


图1 多螺栓—钢插板连接节点木构件设计示意

Fig. 1 Design diagram of glulam multi-bolted connection with slotted steel plate

1.2 试件加载装置及方案

试验在河南工业大学结构试验大厅进行,试验使用的加载装置如图3a所示,采用上海新三思计量仪器制造有限公司生产的600 kN微机控制电液伺服万能试验机进行加载,试验通过由Q235钢制成的带孔钢板和底部夹具将试验构件安装固定到试验机上。

试验加载方法参考了国内木结构试验规范和美国规范^[9]相关试验标准,并进行优化。采用位移控制方法对试件进行受拉方向的匀速加载,加载速率为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,当试件产生明显破坏或荷载下降至最大荷载的60%时,停止加载。

试件的力由液压伺服作动器直接输出,位移 Δ 通过式(1)计算:

$$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} - \frac{\Delta_3 + \Delta_4}{2} \quad (1)$$

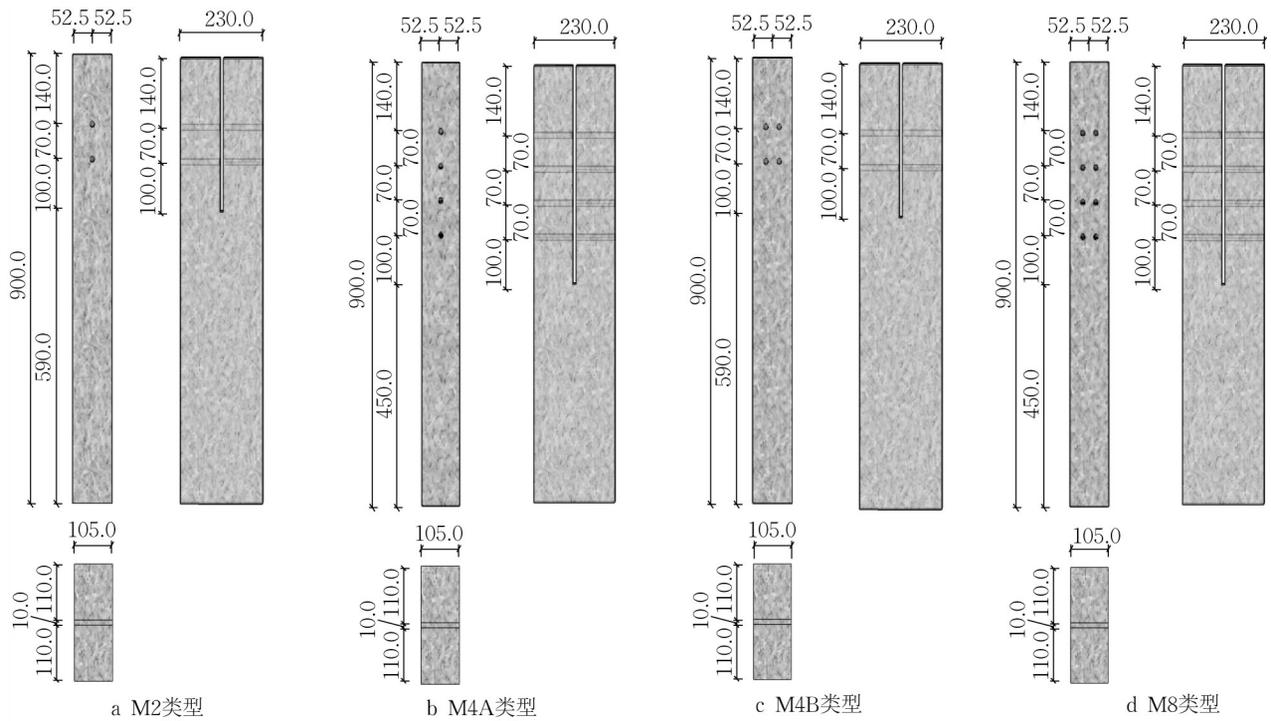
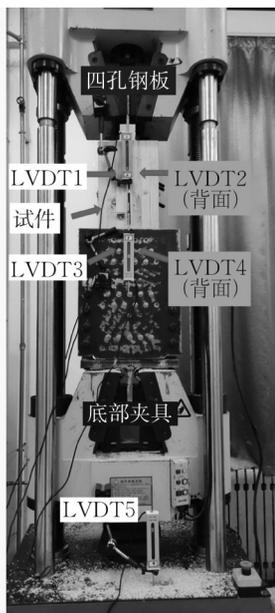


图2 多螺栓—钢插板连接节点设计详图(单位:mm)

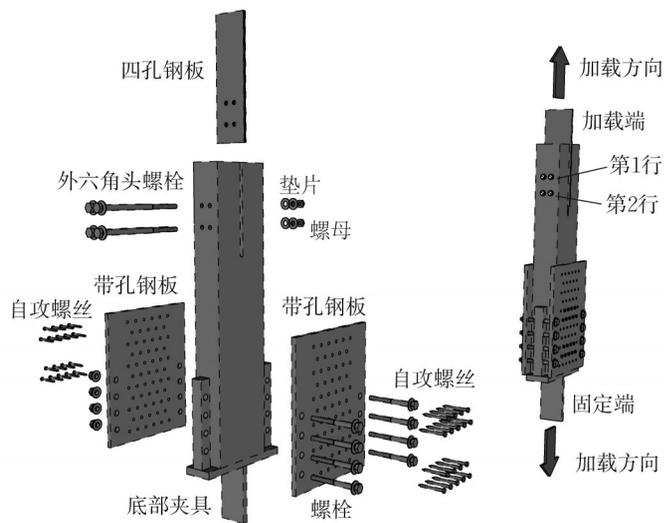
Fig. 2 Design details of glulam multi-bolted connection with slotted steel plate (unit: mm)

式中:LVDT1和LVDT2采集试件相对于作动器的位移 Δ_1 和 Δ_2 ;LVDT3和LVDT4采集试件底部夹具相对

于试件的位移 Δ_3 和 Δ_4 ;LVDT5测量加载装置移动的距离。现场加载试验装置及位移计的布置如图3所示。



a 加载装置



b 多螺栓连接试件及夹具示意图

图3 加载装置及多螺栓—钢插板连接节点各元件示意

Fig. 3 Loading device and connection components

2 试验破坏模式

选用 M2-12-230、M4A-12-230、M4B-12-230、M8-12-230 这4种相同尺寸试件,研究破坏现象与螺

栓数量的关系,如图4所示。木结构螺栓连接破坏模式的定义详见《木结构设计标准》(GB 50005—2017)的6.2节条文说明。由图4可见,不同连接节点在木材厚度和螺栓直径相同的条件下,破坏现象

随着螺栓数量增加,破坏模式的变化规律比较相近。M2-12-230左侧面和右侧面劈裂,裂缝从第1行延至第2行螺栓下部(图4a、4e、4i),螺栓弯曲,属于轻微的“两铰”破坏;M4A-12-230的破坏形式与M2-12-230相似,但左侧开裂缝隙连续且明显较长,延至第4根螺栓底部(图4b、4f、4j),但是螺栓弯曲的程度较M2有所减小,属于程度较轻的“一铰”破坏;M4B-12-230试件破坏产生2条较大裂缝,2个螺栓间木材

段破坏较大,和整体试块间产生较大空隙(图4c、4g、4k),虽然同样采用4根螺栓形式,但试件内部木材破坏情况和螺栓弯曲程度比起M4A更加明显,属于程度较大的“一铰”破坏;M8-12-230试件破坏有2条较长的裂缝,裂缝形式与M2-12-230类似,裂缝延至第4根螺栓下,螺栓及垫片几乎没有陷入木材内部(图4d、4h、4m),仅发生轻微的“一铰”破坏。

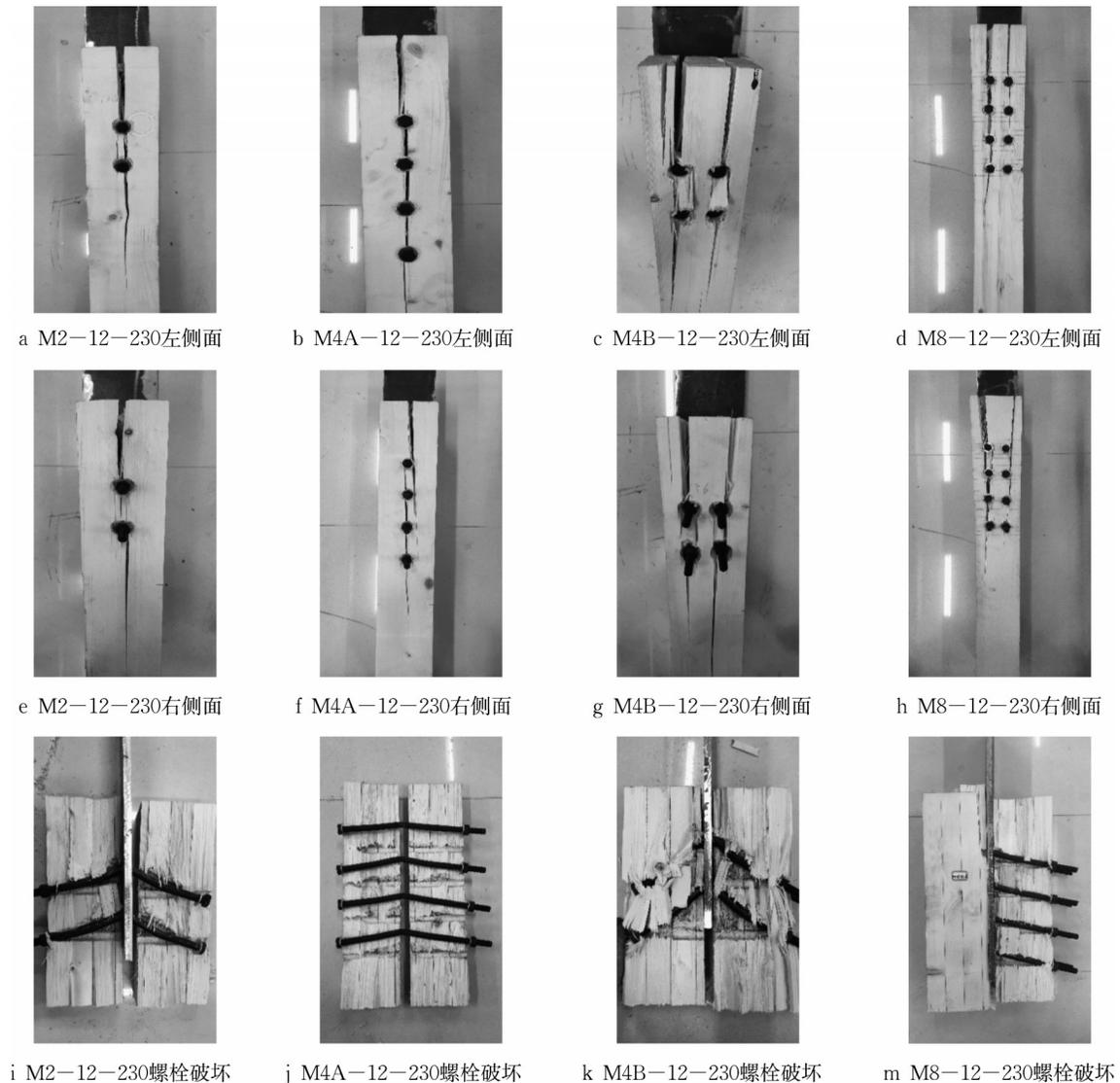


图4 试件类型12-230不同螺栓数量破坏现象

Fig. 4 Failure modes of specimen types 12-230 with different the numbers of bolts

3 力学性能分析

不同组别试件的力-位移曲线如图5所示。当试件类型为12-230(d 为12 mm, t 为230 mm)时,随着螺栓数量的增加,屈服平台进一步缩短,当螺栓达到

8个时,曲线刚进入弹塑性阶段后就立刻发生破坏,因为螺栓数量布置较多,螺栓还没有发生屈服,木材就已经发生劈裂破坏。当试件类型为14-175时,随着螺栓数量的增加,曲线屈服平台的距离也在不断降低,当达到8个螺栓时,试件刚进入刚度退化阶段

就发生破坏。当试件类型为16-105时,由于螺栓直 平台阶段的距离更小,当螺栓数量达到8个时,试件 径的增加和试件厚度的减少,各类型试件处于屈服 几乎不进入弹塑性阶段,就发生破坏。

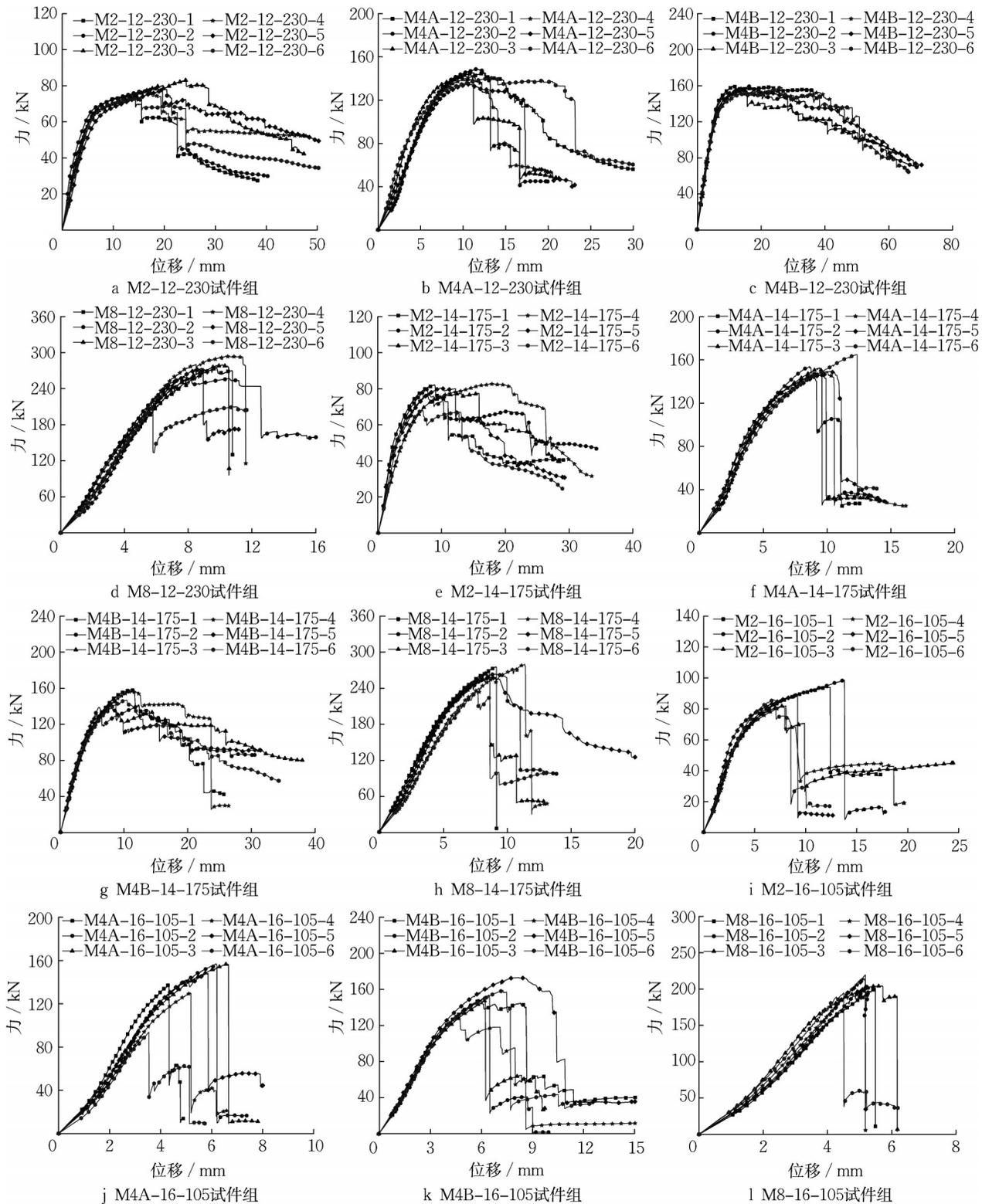


图5 12组节点试件试验荷载—位移曲线

Fig. 5 Load-displacement of 12 series of specimens

多螺栓—钢插板连接节点各试件组力学性能参 数的平均值及标准差如图6所示,随着螺栓数量的增

多,初始刚度和峰值荷载逐渐增大,其中M8-14-175的 初始刚度均值最大;延性则随着螺栓数量的增多而减

小,但是 2×2 的排列形式的延性比 4×1 的排列形式高出不少,且随着螺栓直径增大延性系数趋近于1。

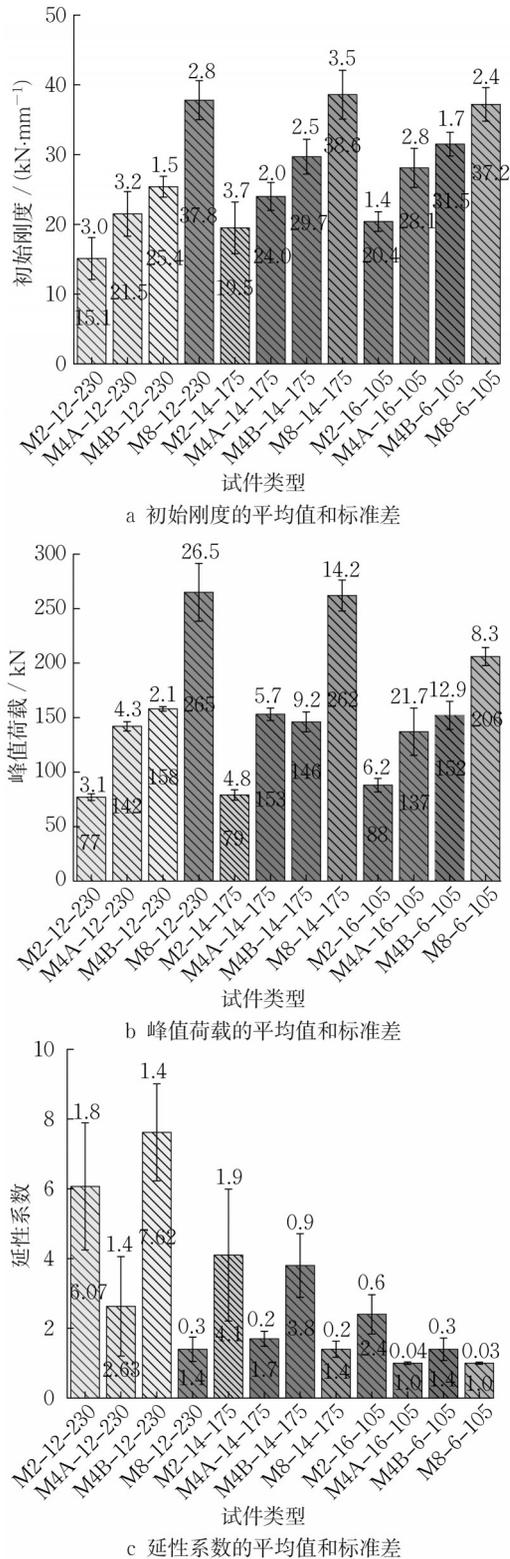


图6 各试件力学性能参数的平均值及标准差

Fig. 6 Average values and standard deviations of mechanical performance parameters of specimens

3.1 初始刚度

根据国内外学者对螺栓连接节点的研究结果^[10-11]以及较好地处理初始滑移对弹性刚度的影响,初始刚度 k_c 取 $0.1P_p$ 至 $0.4P_p$ 之间的直线斜率。同一试件类型在不同螺栓数量下初始刚度 k_c 的变化规律如图7所示,图中处于同一横坐标位置的小三角代表6个重复试件,其中的折线的连接点代表这6个重复试件的均值。不同试件类型的均值对比如图7d。从图7可以看出,随着螺栓数量的增量的增加,初始刚度明显增大。虽然M4A与M4B试件类型使用螺栓数量同为4个,但是排列模式为 2×2 的M4B试件类型具有更高的初始刚度。同时12-230、14-175、16-105这3种试件类型在相同螺栓数量及种类下具有相近的初始刚度。

3.2 峰值荷载

峰值荷载 P_p 为荷载位移曲线中的峰值点,螺栓数量及种类与峰值荷载 P_p 的关系如图8所示,随着螺栓数量的增加,试件的峰值荷载呈上升趋势。在12-230和16-105试件类型中,M4B的峰值荷载大于M4A,但是在14-175试件类型中,M4B的峰值荷载为136.05 MPa略小于M4A的139.06 MPa。由图8d可见,这3种试件在同种螺栓数量及种类下具有相近的峰值荷载及变化趋势。

3.3 延性系数

延性系数 D 是极限位移比屈服位移,得到的螺栓数量及种类与延性系数的关系如图9所示。可以发现,随着螺栓数量增加,这3种试件的延性和延性系数的离散程度不断降低,当螺栓数量达到8个时,试件的延性接近1。这是因为试件基本不会出现屈服平台阶段,当试件达到屈服点后便立刻到达峰值点,试件发生劈裂破坏,荷载一位移曲线急速下降。

从图9d可见,在4根螺栓下, 2×2 的排列形式的延性大于 4×1 的排列形式,表明当螺栓在2列排列形式下试件具有更好的变形能力。同时可以看出,试件类型为12-230时延性变化曲线取值优于14-175和16-105的,可以得出当螺栓数量相同时,螺栓直径越小,试件的延性系数越大。

4 初始刚度及峰值荷载的数值计算

4.1 初始刚度

从图10可以看出,随着螺栓数量的增量的增加,初始刚度呈现明显的上升趋势。 K_c 被认为与螺栓数量 n 和直径 d 有关,如式(2):

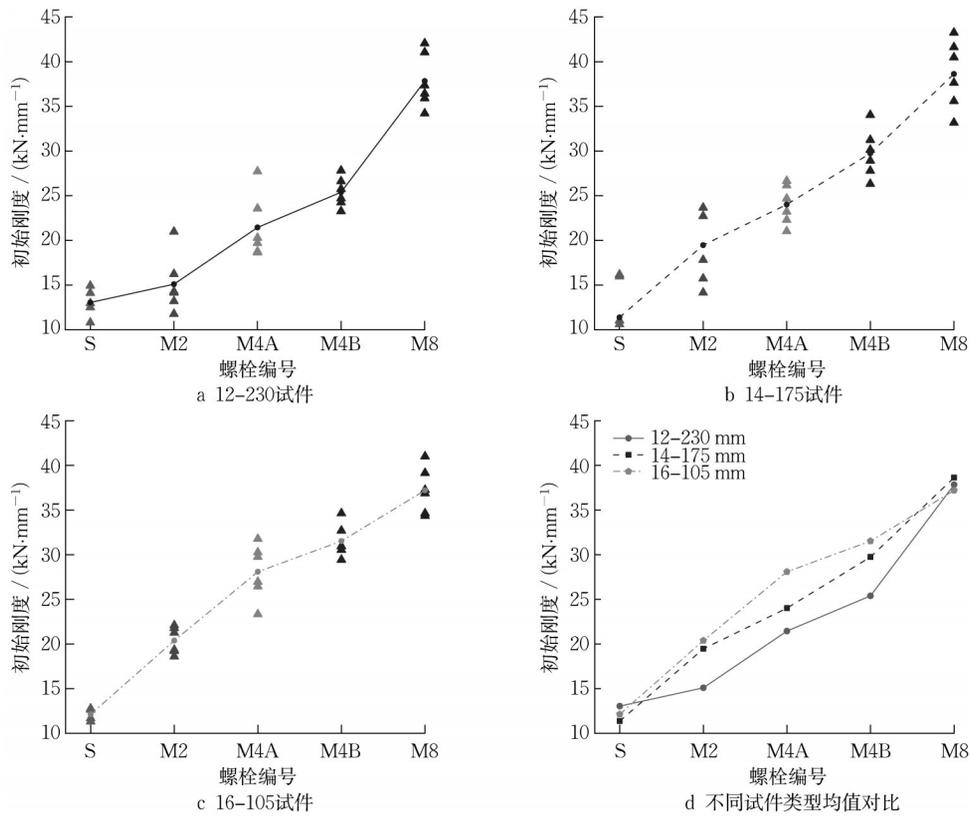


图7 初始刚度随螺栓数量变化规律

Fig. 7 Variation law of initial stiffness with the number of bolts

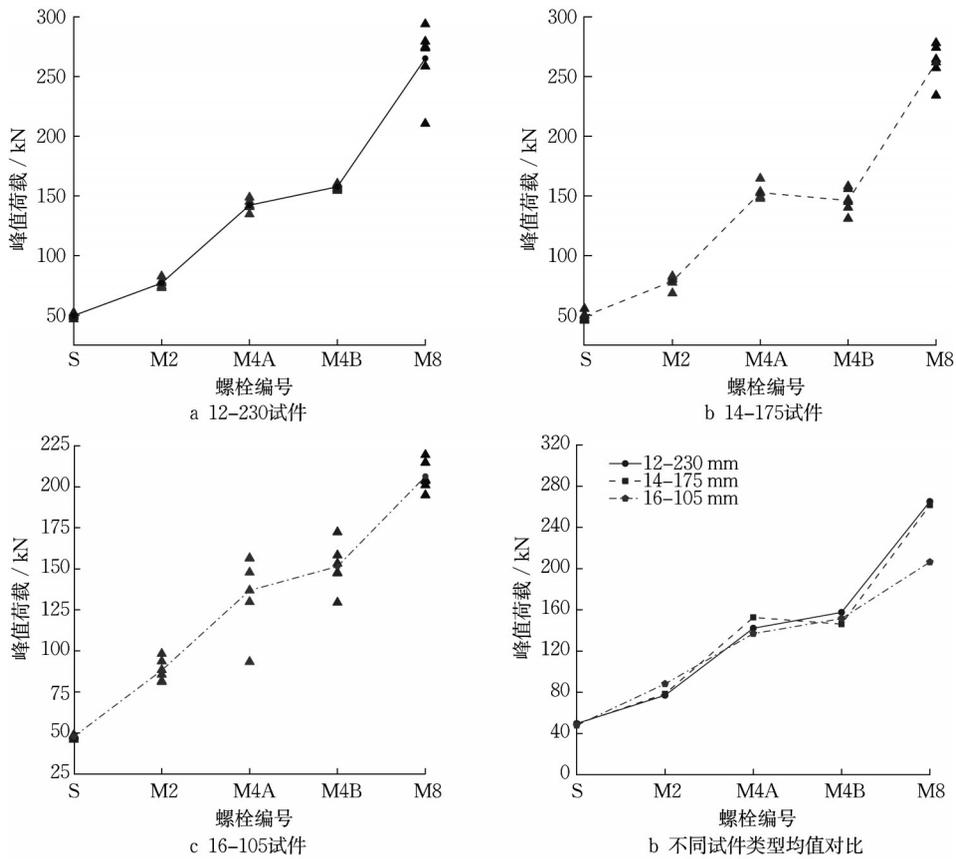


图8 峰值荷载随螺栓数量变化规律

Fig. 8 Variation law of peak loads with the number of bolts

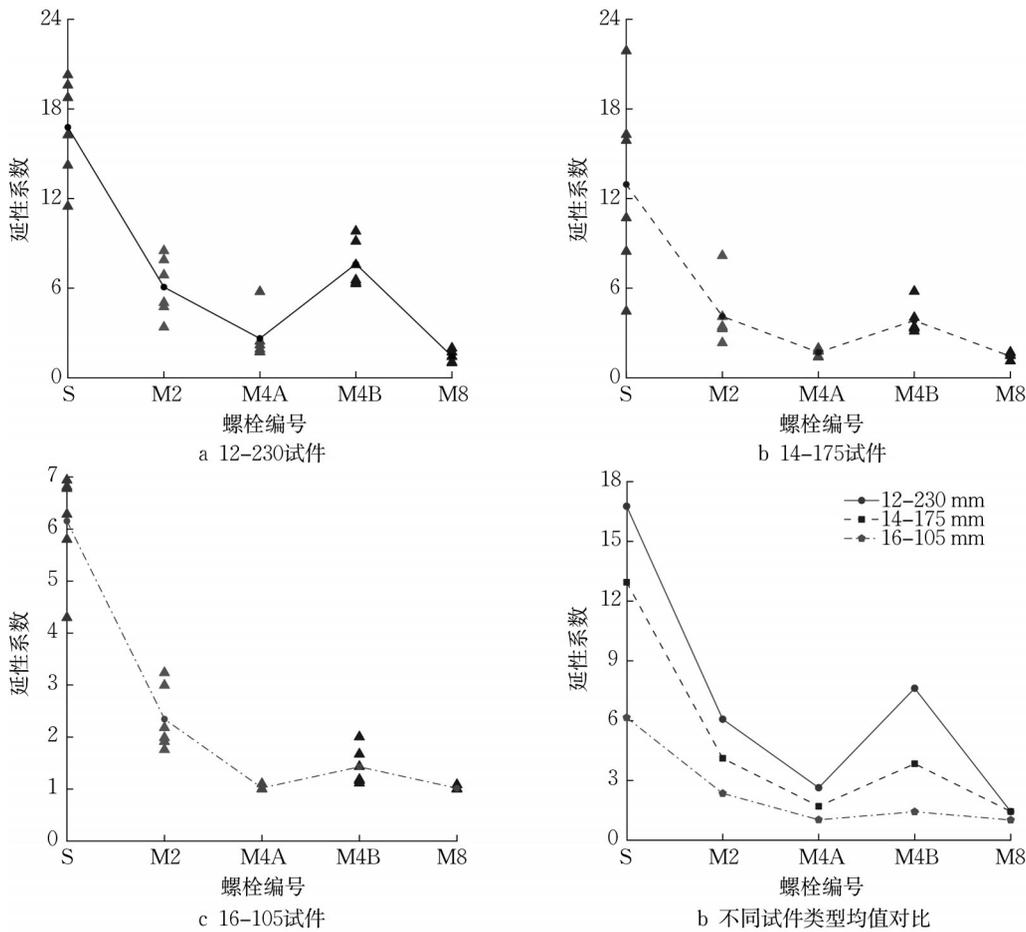


图 9 延性系数随螺栓数量变化规律

Fig. 9 Variation law of ductility coefficient with the number of bolts

$$K_e = a_0n + b_0d + c_0n^2 + e_0d^2 + f_0nd + g_0 \quad (2)$$

式中： a_0 、 b_0 、 c_0 、 e_0 、 f_0 为量纲为一的系数。图 10 为初始刚度与螺栓数量以及直径之间的关系以及拟合的曲面，且 $R^2=0.983$ ，这表明拟合的曲面和测试所得的数据具有高度一致性，回归系数如表 2 所示。拟合的曲面从左到右逐渐增大(图 10)。这表明初始刚度与螺栓直径和数量呈正相关。如果螺栓数量和螺栓直径已知，则式(2)可用于估计初始刚度。

表 2 式(2)的回归系数

Tab. 2 Regression coefficient in Equation (2)

a_0	b_0	c_0	e_0	f_0	g_0
9.42	9.44	-0.233	-0.259	-2.972 41	-72.67

4.2 峰值荷载

对于螺栓直径为 12 mm、14 mm 以及 16 mm 的连接系列，峰值荷载随着螺栓数量的增加而呈现增加趋势，然而，图 11 中最大的峰值荷载是 M8-12-230。这表明螺栓直径不是影响峰值荷载的唯一因素。 P_p 也被认为与螺栓数量 n 和直径 d 有关，如式(3)：

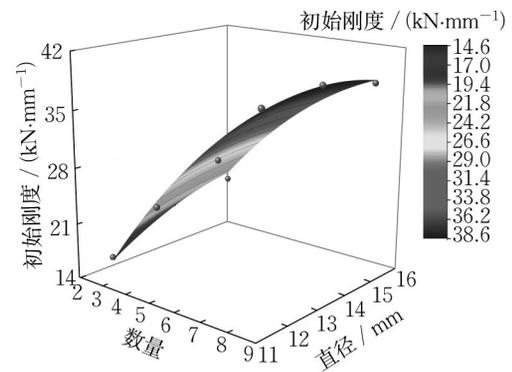


图 10 试件初始刚度与螺栓数量、直径之间的关系

Fig. 10 Initial stiffness of specimens versus numbers and diameters of bolts

$$P_p = a_1n + b_1d + c_1n^2 + e_1d^2 + f_1nd + g_1 \quad (3)$$

式中： a_1 、 b_1 、 c_1 、 e_1 、 f_1 为量纲为一的系数。图 11 为峰值荷载与螺栓数量以及直径之间的关系以及拟合的曲面，且 $R^2=0.978$ ，这表明拟合的曲面和测试所得的数据具有高度一致性，回归系数如表 3 所示。如果螺栓数量和螺栓直径已知，则式(3)可用于估计峰值荷载。

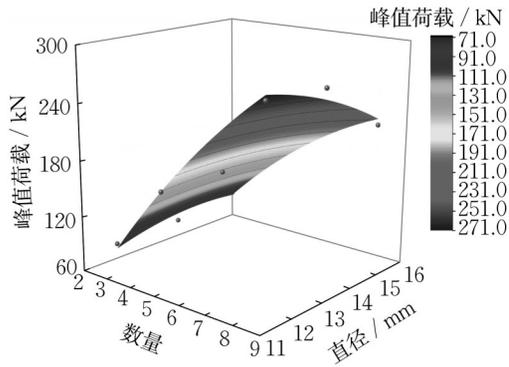


图 11 多螺栓—钢插板连接峰值荷载与螺栓数量、直径之间的关系

Fig. 11 Peak forces of specimens versus numbers and diameters of bolts

4.3 与现行规范的对比

参考现行规范《木结构设计标准》(GB 50005—2017),对节点承载力进行计算,承载力计算值与本文试验值和拟合值的对比如表4所示。表4中的屈服模式是根据试验现象按《木结构设计标准》(GB 50005—2017)的相关条文进行确定的。误差的计算方式为:试验值与规范值(拟合值)的差值除以试验值并乘以100%。

由表4可见,试验值普遍大于规范值,这是因为规范在指导设计时考虑了一定的安全裕度,参与计算的一些参数取的是规范给出的设计值,因此规范计算值偏小,其中最小误差为4.44%,最大误差为46.43%;试验值与拟合值吻合较好,误差在10%以内。

表3 式(3)的回归系数

Tab. 3 Regression coefficient in Equation (3)

a_1	b_1	c_1	e_1	f_1	g_1
84.047 92	65.977 08	-1.524 03	-2.019 58	-2.972 41	-519.984 17

表4 试验值和拟合值与现行规范的对比

Tab. 4 Comparison of experimental and fitted values with current specifications

试件编号	屈服模式	试验值/kN	规范值/kN	与规范值误差/%	拟合值/kN	与拟合值误差/%
M2-12-230	IV	77.01	42.2	45.20	71.64	6.97
M4A-12-230	IIIs	142.2	84.4	40.65	150.22	5.64
M4B-12-230	IIIs	157.56	84.4	46.43	150.22	4.66
M8-12-230	IIIs	265.16	168.8	36.34	270.9	2.16
M2-14-175	IV	78.53	45.69	41.82	86.68	10.38
M4A-14-175	IIIs	152.7	88.78	41.86	153.38	0.45
M4B-14-175	IIIs	146.15	88.78	39.25	153.38	4.95
M8-14-175	IIIs	261.68	177.55	32.15	250.3	4.35
M2-16-105	IV	88.19	59.67	32.34	85.56	2.98
M4A-16-105	IIIs	136.88	98.61	27.96	140.38	2.56
M4B-16-105	IIIs	151.47	98.61	34.90	140.38	7.32
M8-16-105	IIIs	206.38	197.22	4.44	213.54	3.47

5 结论

采用螺栓数量、螺栓直径和试件厚度等影响因素对多螺栓—钢插板连接节点进行试验研究,通过分析72个多螺栓试件的试验破坏现象及数据结果,得到了多螺栓木材破坏现象和螺栓的屈服模式随螺栓数量的变化规律,并依据试验数据给出了多螺栓初始刚度及峰值荷载的拟合公式,得到如下结论:

(1)多螺栓—钢插板连接节点的破坏模式为:两侧面沿着螺栓的竖向排列方向产生较大竖向裂纹,随着螺栓数量的增加,从“两铰”破坏变为裂缝有所减短、破坏轻微的“一铰”破坏,试件中的各螺栓弯曲程度较为一致。在4根螺栓数量下,螺栓2行2列的排列形式为比4行1列具有更长的屈服平台阶段,表

现出更好的变形能力。

(2)对于同一试件类型,随着螺栓数量的增加,多螺栓试件的初始刚度和峰值荷载呈现明显的上升趋势,延性系数呈现下降趋势。当螺栓数量为8个时,延性系数D接近1。

(3)依据试验数据给出了多螺栓钢插板初始刚度及峰值荷载拟合公式,其包括螺栓数量以及螺栓直径2个影响因素,并且初始刚度及峰值荷载均与螺栓直径和数量呈正相关。

作者贡献声明:

- 刘应扬:指导研究开展、论文撰写及修改。
- 郭 森:开展试验研究。
- 何海杰:开展理论分析及公式拟合。

曹纪兴:指导试验及理论分析。

参考文献:

- [1] 刘伟庆, 杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 16.
LIU Weiqing, YANG Hui Feng. Research progress in modern timber structures [J] Journal of Building Structures, 2019, 40 (2): 16.
- [2] SAWATA K, YASUMURA M. Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory [J]. Journal of Wood Science, 2003, 49 (5): 383.
- [3] HAYASHI T, KARUBE M, HARADA K, *et al.* Shear tests of timber joints composed of sugi composite glulam beams using newly developed steel connectors [J]. Journal of Wood Science, 2002, 48(6): 484.
- [4] 王明谦, 宋晓滨, 顾祥林, 等. 胶合木梁柱螺栓—钢填板节点转动性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 141.
WANG Mingqian, SONG Xiaobin, GU Xianglin, *et al.* Research on the rotational performance of glued wood beam column bolted steel filled plate joints [J] Journal of Building Structures, 2014, 35 (9): 141.
- [5] YURRITA M, CABRERO J M, QUENNEVILLE P. Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners [J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 296.
- [6] 张盛东, 范新海, 屈文俊. 内嵌多块钢板销式木连接力学性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1163.
- ZHANG Shengdong, FAN Xinhai, QU Wenjun. Research on the mechanical properties of embedded multiple steel plate pin wood connections [J] Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (8): 1163.
- [7] SHU Z, Li Z, YU X, *et al.* Rotational performance of glulam bolted joints: Experimental investigation and analytical approach [J]. Construction and Building Materials. 2019, 213: 675.
- [8] 何敏娟, 赵艺, 高承勇, 等. 螺栓排数和自攻螺钉对木梁柱节点抗侧力性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(6): 845.
HE Minjuan, ZHAO Yi, GAO Chengyong, *et al.* The influence of bolt arrangement and self tapping screws on the lateral force resistance performance of wooden beam column joints [J] Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43 (6): 845.
- [9] American Society for Testing and Materials. Test methods for bolted connections in wood and wood-based products: ASTM D5652-15 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [10] DORN M, BORST K D, EBERHARDSTEINER J. Experiments on dowel-type timber connections [J]. Engineering Structures, 2013, 47: 67.
- [11] 陈佳炜, 熊海贝, 王治方. 正交胶合木-混凝土螺栓连接力学性能试验研究及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (4): 203.
CHEN Jiawei, XIONG Haibei, WANG Zhifang. Experimental study and parameter analysis on the mechanical properties of orthogonal glued wood concrete bolt connections [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 203.