

覆面板钉连接的承载性能试验研究

祝恩淳, 陈志勇, 潘景龙

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 通过对 60 个采用国产圆钉制作的轻型木结构覆面板钉连接试件进行单调加载和单向反复加载试验, 研究了钉连接的刚度退化和承载力变化规律. 试验结果表明, 除个别试件的覆面板断裂破坏外, 绝大部分钉连接试件皆以 M-c1 屈服模式破坏, 符合欧洲木结构设计规范钉连接计算对应的屈服模式; 覆面板主方向与规格材木纹夹角对钉连接的承载性能有一定影响, 但这种影响随试件放置时间的增长而减小; 试件放置时间增长导致钉连接承载力和刚度下降; 单向反复加载使钉连接刚度退化, 而承载力略有提高, 但随着反复加载次数的增加, 两者都趋于稳定. 通过对试验数据统计分析, 得到了考虑退化的钉连接刚度计算公式.

关键词: 钉连接; 轻型木结构; 反复荷载; 刚度退化

中图分类号: TU 360.2

文献标识码: A

Experimental Study of Behaviour of Panel-to-Lumber Nail Connections in Light Wood Frame Construction

ZHU Enchun, CHEN Zhiyong, PAN Jinglong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Totally 60 specimens of panel-to-stud nail connections were designed and manufactured. Tests of the specimens both under monotonic loading and cyclic loading were conducted. Except for a few specimens that failed due to rupture of the structural panel, most nail connections failed following yield mode M-c₁, which was consistent with Eurocode 5-Design of timber structures. The angle between the panel orientation and the grain of dimension lumber affects the performance of nail connections to some extent, while with the increasing of the conditioning time, the effect decreases and eventually become negligible. The load-carrying capacity and stiffness of nail connections decrease with the conditioning time. The load-carrying capacity of the nail connections increases slightly under cyclic loading, whilst the stiffness

decreases, and both of them tend to be stable after a number of cycles of loading. A formula to evaluate the stiffness of the nail connections considering the stiffness degeneration is obtained from statistics of the experimental results.

Key words: nail connection; light wood frame construction; cyclic loading; stiffness degeneration

木材是天然绿色的建筑材料, 由其建造的房屋建筑具有施工快捷、构造简单、节能、美观及抗震性能好等优点, 因此, 木结构住宅在欧洲、美洲和亚洲的多个国家和地区得到广泛应用. 我国的木结构经上世纪 80~90 年代停滞期后, 在世纪之交再度复兴, 尤以北京、上海、苏州及成都等地区建造的轻型木结构住宅为热点.

轻型木结构(light wood frame construction)是由规格材和木基结构板材钉合的剪力墙和横隔(楼盖和屋盖)组合而成的^[1], 故钉连接的侧向抗剪承载性能是研究轻型木结构的关键. 经过大量传统构造钉连接试验对其承载力计算方法(屈服理论^[2])的验证后, 国内外学者分别从连接形式、承载性能退化效应、抗侧力与抗拔力共同作用, 以及其他连接形式性能比较等四大方面对钉连接进行了研究^[3]. 其中, Dolan 等通过一系列钉连接试验, 得到了反复荷载作用下钉连接承载力计算模型^[4]. Dujic 等对使用南斯拉夫钉子制作的钉连接进行低周反复加载试验, 得到了钉连接的刚度退化公式^[5].

既有钉连接的试验和理论研究, 大都基于具有足够边距和端距的直钉钉连接试件的侧向抗剪试验, 但轻型木结构的覆面板钉连接往往并不满足设计规范^[6-7]对其边距或端距的要求, 尤其是两块覆面板共用一根规格材(墙骨或搁栅)采用斜钉方式的情况, 更是如此. 同时, 尚未有学者研究单向反复加

收稿日期: 2010-05-27

基金项目: 哈尔滨工业大学海外留学人员回国工作科研启动项目

第一作者: 祝恩淳(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为木结构和薄壳结构. E-mail: e. c. zhu@hit. edu. cn

载次数和试件放置时间对钉连接承载性能的影响. 笔者参照工程实际情况,设计了60个具有轻型木结构覆面板钉连接构造特点的试件,通过单调加载与单向反复加载试验,揭示单向反复加载次数和覆面板主方向与规格材木纹夹角对钉连接刚度和承载力的影响规律,同时研究放置时间对钉连接承载性能的影响.

1 覆面板钉连接抗剪试验

1.1 试件材料

根据我国《木结构设计规范》(GB50005—2003)^[6]的规定和当前工程实践,轻型木结构中覆面板和规格材之间的钉连接最常用的是直径2.8 mm、长度50 mm的2寸(6.67 cm)普通圆钢钉.从市场购得钉子的实测平均直径为2.93 mm,平均弯曲屈服强度为802 MPa,平均抗拉强度为1 007 MPa.覆面板采用北美进口厚度为9.5 mm的定向木片板(OSB),实测平均含水率(moisture content) $W = 9.8\%$,平均气干密度($W = 12\%$)为 $620 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.规格材选用截面尺寸为 $38 \text{ mm} \times 89 \text{ mm}$ 的北美进口Ⅱ级云杉-松-冷杉(S-P-F),实测平均含水率为 13.3% ,平均气干密度($W = 12\%$)为 $440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.2 试件设计

在轻型木结构中,剪力墙和横隔通常由规格材构成框架,再覆以木基结构板材(结构胶合板或OSB)作面板.覆面板与规格材用钉子按规定的间距钉接.由于规格材的截面宽度为38 mm,沿剪力墙和横隔周边覆面板钉连接的边距或端距为19 mm;当两块覆面板与同一根规格材连接时,钉连接的边距或端距则为10 mm,且需斜钉连接.这些都比GB 50005—2003^[6]对直径为2.93 mm钉子的最小边距(11.72 mm)和端距(42 mm)要求低.当剪力墙和横隔受面内水平荷载作用时,覆面板上各点钉连接的荷载方向与规格材木纹的夹角 θ 均不相同.欧洲木结构设计规范EC5^[7]规定,木结构钉连接的边距和端距不得小于 $(3 + 4 \sin \theta)$ 倍钉子直径.由此可知,只有当夹角 θ 小于 5.9° 时所要求的钉连接的最小边距和端距方不大于10 mm.然而,大部分覆面板钉连接的夹角 θ 都大于 5.9° ,不能满足最小边距和端距的要求.因此,笔者通过16组共222个剪力墙钉连接试件进行单调加载试验,研究荷载方向与规格材木纹夹角 θ 对钉连接承载性能的影响^[8].在此基础上制作了8组共60个构造与文献^[8]中夹角 $\theta = 0^\circ$

且斜钉的钉连接相同的试件(如图1所示),分别进行单调加载和单向反复加载试验.各组试件类型及其参数详见表1,其中,“M”和“C”分别代表单调加载和单向反复加载; α 为覆面板主方向与规格材木纹夹角;“Ⅰ”和“Ⅱ”分别表示两者平行($\alpha = 0^\circ$)和垂直($\alpha = 90^\circ$)两种情况;“00”,“05”,“25”和“50”为加载次数; n 为循环次数; τ 为放置时间; m 为试件数量.

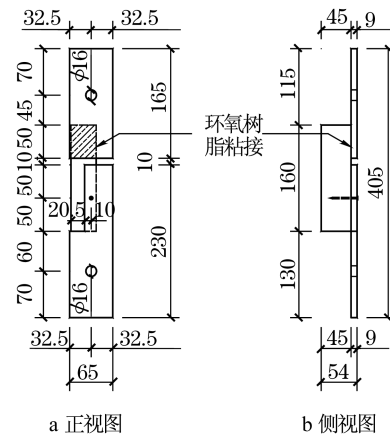


图1 钉连接试件形式(单位:mm)

Fig.1 Details of nail connection specimen (unit:mm)

表1 试件设计
Tab.1 Design of specimen

性能	试件组别							
	MI-00	MII-00	CI-05	CII-05	CI-25	CII-25	CI-50	CII-50
$\alpha/(^\circ)$	0	90	0	90	0	90	0	90
τ/d	14	14	7	7	7	7	7	7
$n/\text{次}$	0	0	5	5	25	25	50	50
$m/\text{件}$	15	15	5	5	5	5	5	5

切割好的覆面板与规格材放置于温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和相对湿度为 $(65 \pm 5)\%$ 的人工气候室中养护,直至含水率达到平衡后再钉合成试件.为使试件尽可能地接近实际工程中轻型木结构的使用与受力特点,以及研究试件放置时间的影响,将钉合好的试件分别存放在标准环境人工气候室中1周(C系列试件)或2周(M系列试件),然后在具有同样温湿度环境的实验室内进行单调加载和单向反复加载试验.

1.3 试验过程

我国尚无关于钉连接侧向抗剪试验方法的标准,故参考国际上常用的三个试验标准——ASTM D1761^[9],EN 26891^[10]和NT Build 133^[11],制定了试验方法并研制了加载夹具(如图2所示).

(1) 单调加载 将钉连接试件、力传感器和百分表安装到加载夹具上并连通采集数据系统(图2)



图 2 钉连接试件及试验装置

Fig. 2 The nail connection specimen and the test unit

后,以 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度匀速加载. 荷载 P 由零达到最大荷载值 P_{\max} , 然后下降, 当降至 $0.8P_{\max}$ 时停止加载. 钉连接的荷载和滑移 Δ 由计算机采集记录并实时绘制出荷载—滑移 ($P-\Delta$) 曲线, 如图 3 所示 (图中 K 为曲线斜率; Δ_{limit} 和 P_r 等定义详见 3.1 节). 由图可见, 钉连接在受力的初始阶段, $P-\Delta$ 呈近似线弹性关系, 然后进入屈服强化阶段, 达到最大荷载后, 逐渐丧失承载力.

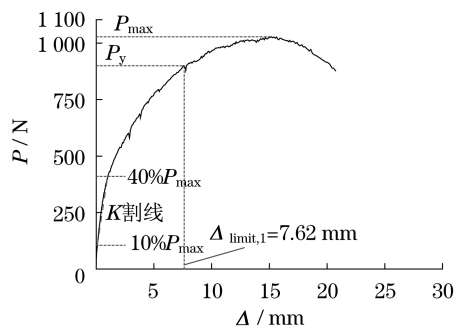


图 3 钉连接单调加载的典型荷载—滑移曲线

Fig. 3 Typical load-slippage curve of nail connection under monotonic loading

(2) 单向反复加载 轻型木结构建筑在风荷载作用下, 会持续或多次遭受单向反复荷载作用. 我国一般建筑的设计基准期为 50 年, 设计基本风压为 $w^{[12]}$, 本文将其定义为长期风荷载. 在结构设计中, 风荷载的分项系数取为 1.4, 钉连接上的作用效应为 P (乘以 1.4 后). 假设此时钉连接处于线弹性状态, 那么正常使用阶段时, 钉连接所受剪力则为 $0.71P$. 根据文献[13]塑性模型的下限算法, 以及由 GB 50005—2003^[6] 表 Q.0.1-1 查得的 f_{vd} , 可估算得所用钉连接的 $0.71P$ 约为 400 N. Dujic 等的试验表明, 反复加载频率不影响钉连接的工作性能^[5]. 因

此, 采用荷载控制的方式对钉连接进行单向反复加载: $0 \rightarrow 400 \text{ N} \rightarrow 0$ 为一循环. 为避免实际加载时出现反向推力使钉连接发生平面外变形, 故将循环下限上调至 20 N, 即 $20 \text{ N} \rightarrow 400 \text{ N} \rightarrow 20 \text{ N}$ 为一循环; 每分钟循环 1 次, 次数分别有 5, 25 和 50 等; 然后以 $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度单调加载. 经 5 次反复加载的某钉连接的荷载—滑移曲线如图 4 所示. 由图可见, 反复加载作用使钉连接产生残余变形和刚度变化, 而钉连接的整体工作性能与单调荷载作用下相似.

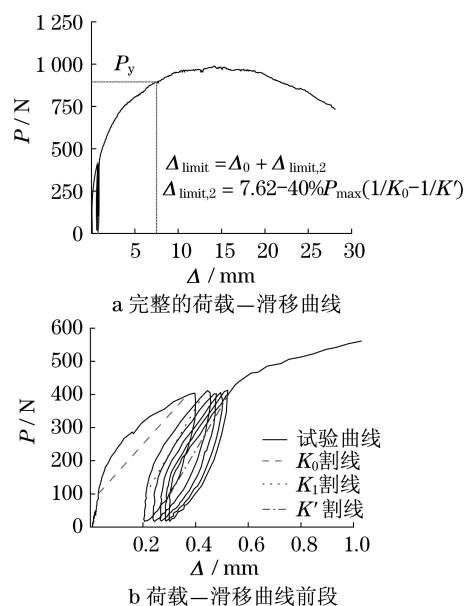


图 4 钉连接单向反复加载的典型荷载—滑移曲线

Fig. 4 Typical load-slippage curve of nail connection under cyclic loading

试验表明, 试验方案及加载夹具可靠和有效.

2 覆面板钉连接的破坏模式

钉连接的承载力与其屈服模式密切相关^[2]. 受主、边材厚度, 销槽承压强度, 钉直径及其抗弯强度等因素影响, 单剪钉连接共有 6 种屈服模式^[7] (如图 5 所示): M-a1——钉杆与主材未屈服而边材屈服; M-a2——钉杆与边材未屈服而主材屈服; M-b——钉杆未屈服而主、边材都屈服; M-c1——钉杆屈服出现一个塑性铰, 边材完全屈服而主材部分屈服; M-c2——钉杆屈服出现一个塑性铰, 主材完全屈服而边材部分屈服; M-d——钉杆屈服出现两个塑性铰, 主、边材部分屈服. 根据钉连接试件所用材料特性, 按欧洲木结构设计规范 EC5^[7] 钉连接承载力计

算公式预测,这里所有试件的屈服模式均应为 M-c1. 从破坏试件上将钉子取出,其屈服形态如图 6 所示. 可见,95%以上钉连接试件的屈服模式为 M-c1,尚有不足 5%的试件为 M-d 模式. 个别试件在连接屈服前覆面板断裂破坏,如图 7 所示.

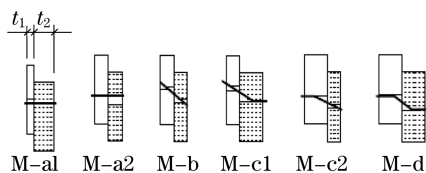


图 5 钉连接理论屈服模式

Fig.5 Theoretical yield mode of nail connections

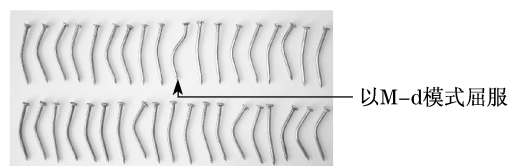


图 6 部分钉子的试验屈服形态

Fig.6 Some yield patterns of nails from test

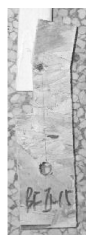


图 7 钉连接覆面板断裂破坏

Fig.7 The panel rupture of nail connection

3 试验结果分析

3.1 钉连接刚度和承载力的定义

对于仅单调加载的钉连接试件(M 系列),按 EN 26 891^[10] 规定,取荷载分别为 $10\%P_{\max}$ 和 $40\%P_{\max}$ 两点之间的割线斜率为钉连接的刚度 K ;参照 NT Build 133^[11],将钉连接在滑移为 7.62 mm (0.3 in ,即承载力滑移界限 $\Delta_{\text{limit},1}$) 时对应的荷载和在该滑移界限内的最大荷载,两者的较大值,定义为钉连接的承载力 P_y ,如图 3 所示.

对于单向反复加载的钉连接试件(C 系列),为研究钉连接刚度在长期风荷载反复作用下的退化机理,定义如下刚度: K_0 为荷载一位移曲线上第一次上升段 100 N 与 400 N 两点之间的割线斜率; K_n 为荷载一位移曲线上第 $n+1$ 次上升段 100 N 与 400 N 两点之间的割线斜率; K' 为经 n 次单向反

复加载后单调加载时 100 N 与 400 N 两点的割线斜率,如图 4 所示. 而经 n 次单向反复加载后钉连接的刚度 K 仍按单调加载的规定确定,即荷载分别为 $10\%P_{\max}$ 和 $40\%P_{\max}$ 两点的割线斜率. 由于反复加载使钉连接产生残余变形和刚度变化,如仍按单调加载的规定确定承载力,结果不准确. 故提出如下方法确定承载力 P_y (如图 4): ①为消除残余变形的影响,将经 n 次反复加载后的滑移 Δ_0 作为承载力滑移界限 $\Delta_{\text{limit},2}$ 的计算起点; ②仅考虑反复加载在弹性阶段 ($0\sim 40\%$) P_{\max} 对刚度的影响,将 $\Delta_{\text{limit},2}$ 由 7.62 mm 降至 $7.62 - (40\%P_{\max,0}/K_0 - 40\%P_{\max,n}/K')$, 其中, $P_{\max,0}$ 和 $P_{\max,n}$ 分别为钉连接仅单调加载和经过 n 次反复加载后再单调加载的最大荷载. 假设 $P_{\max,0} \approx P_{\max,n}$ 并统一用 P_{\max} 表示,则 $\Delta_{\text{limit},2}$ 可简化为 $7.62 - 40\%P_{\max}(1/K_0 - 1/K')$. 那么,经 n 次反复加载后,钉连接承载力的总滑移界限为 $\Delta_{\text{limit}} = \Delta_0 + \Delta_{\text{limit},2}$.

将试验结果与国际上几个主要木结构设计规范的钉连接承载力和刚度计算式计算值比较,发现与欧洲木结构设计规范 EC5^[7] 的计算结果吻合最好^[14] (详见表 2). 表中,仅 M 系列的实测承载力与计算值接近(差值小于 10%). 可见,轻型木结构覆面板钉连接的承载力宜由 EC5^[7] 的设计公式计算; M 系列试件的实测刚度约为计算刚度的 0.5 倍,这是因为试件钉合后并未立即加载试验,而是放置了 14 d 后再试验,使钉连接的销槽承压应力松弛导致钉连接刚度降低. 这正体现了试件放置时间对钉连接刚度的显著影响. 经过多次单向反复加载的试件,实测承载力和刚度之所以比计算值大,是由于销槽木材在多次单行反复荷载下被压密实且不计残余变形的结果.

3.2 刚度退化

3.2.1 单向反复加载次数 n 的影响

C 系列试件,每经一次反复加载就有一对应的刚度 K_n ,现将所有试件的 K_n/K_1 在反复加载次数 n (第一次加载时, $n=0$) 上平均统计,即可得如图 8a 所示关系曲线. 由图可见,钉连接经过第一次循环后,由于销槽木材被压密实,导致 K_1 急剧增大;而后每经一次反复加载,销槽木材对钉杆的紧箍力逐渐降低,致使刚度衰减. 故可得关系: $K_0 < K_{n(n>0)} < K_1$ 且 $K_0 \approx 0.5K_1$. 实际工程中,轻型木结构的覆面板钉连接至少经历一次以上长期风荷载的作用,刚度与 K_n ($n>0$) 接近. 因此,以 K_1 作为 C 系列钉连接刚度退化的基准,并对图 8a 的数据拟合,即可得

表 2 试件承载性能
Tab.2 The load-carrying capability of specimens

项目	性能	试件组别							
		MI-00	MII-00	CI-05	CII-05	CI-25	CII-25	CI-50	CII-50
承载力	$P_y/(N)$	867	906	952	901	1 051	943	1 050	940
	$c/\%$	9.4	8.2	15.0	7.0	13.7	14.7	6.8	11.3
	P_{ser}/N	829	842	820	820	841	830	829	834
刚度	$K/(N \cdot mm^{-1})$	448	432	1 595	1 370	1 302	1 139	1 337	1 121
	$c/\%$	24.1	18.4	20.4	45.5	43.0	28.3	17.3	37.6
	$K_{ser}/(N \cdot mm^{-1})$	938	962	1 020	1 022	1 023	1 021	1 026	1 025

注： P_{ser} 与 K_{ser} 分别是由欧洲木结构设计规范 EC5^[7]中钉连接计算公式(8.6)和表 7.1 公式计算得到的承载力和刚度， c 为变异系数。

钉连接在长期风荷载作用下的刚度退化系数 λ_{K_n}

$$\lambda_{K_n} = K_n / K_1 = \begin{cases} 0.5, & n = 0 \\ 0.76 + 0.24 \exp[-(n - 1)/32], & n \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

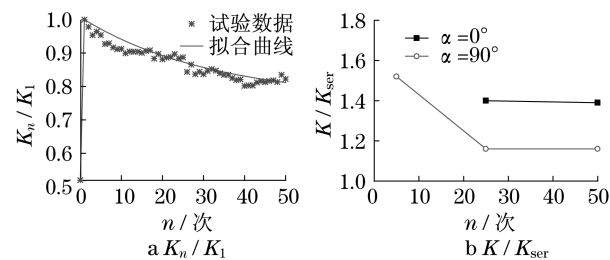


图 8 钉连接刚度与反复加载次数的关系
Fig.8 The relationship between nail connection stiffness and the times of cyclic loading

为分析覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 不同时, n 对钉连接刚度的影响, 将实测刚度 K 除以由欧洲木结构设计规范 EC5^[7] 钉连接计算公式得到的刚度 K_{ser} , 即 K/K_{ser} . 该比值与 n 的关系如图 8b 所示. 由图可见, 无论经过多少次反复加载, II 类 ($\alpha = 90^\circ$) 钉连接试件的 K/K_{ser} 始终比 I 类 ($\alpha = 0^\circ$) 试件约低 16%, 可认为 α 与反复加载次数对钉连接刚度的影响不相关. 在单向反复加载作用下, 由于销槽木材对钉杆的紧箍力逐渐变小, 导致钉连接的 K/K_{ser} 降低, 即其刚度较之 K_1 逐渐退化, 并在最多经 25 次作用后趋于稳定. 这是因为钉杆周围木材被压密实导致两者之间存在空隙, 降低了钉连接的刚度.

3.2.2 夹角 α 与放置时间的影响

由表 2 可见, 当放置时间不长 ($\tau \leq 7$ d) 时, II 类试件的刚度为 I 类的 84% (亦见图 8b); 当放置时间足够长 ($\tau \geq 14$ d) 时, 钉连接的刚度受 α 的影响变小, 且这种影响可忽略不计. 同时, M 系列试件在荷载为 100 N 和 400 N 两点间割线斜率与 K_{ser} 之比的平均值为

0.61, 而 C 系列试件的 K_0/K_{ser} 平均值为 0.82, 即钉连接的刚度从 7 d 到 14 d 大约降低了 25.6%.

3.2.3 考虑退化的刚度计算公式

在考虑 α 的影响以及试件存放时间和单向反复加载导致刚度衰减的基础上, 对试验数据统计得轻型木结构覆面板钉连接刚度计算公式

$$K = \lambda_\alpha \lambda_\tau \lambda_n K_{ser}$$

式中: λ_α 为 α 的影响系数, 当 $\alpha \neq 0^\circ$ 且 $\tau < 14$ d 时, $\lambda_\alpha = 0.02 \tau + 0.72$, 其他情况取 1.0; λ_τ 为时间衰减系数, 当 $\tau \leq 14$ d 时, $\lambda_\tau = 1 - 0.03 \tau$, 当 $\tau > 14$ d 时, λ_τ 尚有待进一步的研究; λ_n 为刚度退化系数, 由于 C 系列的最高荷载平均值为 1 090 N, 10% P_{max} 和 40% P_{max} 分别与 100 N 和 400 N 接近, 故可认为 K 的退化机理与 K_n 相似, 取 $\lambda_n = 2\lambda_{K_n}$.

3.3 承载力变化

3.3.1 单向反复加载次数的影响

为分析覆面板主方向与规格材木纹夹角 α 不同时, n 对钉连接承载力的影响, 与 3.1 的处理类似, 将实测承载力 P_y 除以 P_{ser} , 即 P_y/P_{ser} . 该比值与 n 的关系如图 9 所示. 由图可见, 在单向反复加载作用下, 钉连接的 P_y/P_{ser} 不但没有退化反而略有提高, 即反复加载对钉连接试件的承载力没有削弱而略有增强作用, 并在最多经过 25 次反复荷载作用后, 其承载力基本趋于平稳. 这是因为销槽木材被压密实, 从而提高了销槽承压强度.

3.3.2 α 与放置时间的影响

从表 2 可知, 当放置时间不长 ($\tau \leq 7$ d) 时, II 类 ($\alpha = 90^\circ$) 承载力为 I 类 ($\alpha = 0^\circ$) 的 91.6% (见图 9); 当放置时间足够长 ($\tau \geq 14$ d) 时, I 和 II 类试件的承载力相差甚小, 受夹角 α 的影响可忽略不计. 同时, M 系列试件的 P_y/P_{ser} 平均值为 C 系列的 90.5%. 考虑到 M 系列试件的承载力因反复加载而有所提高, 故钉连接的承载力从 7 d 到 14 d 至少降低了 9.5%.

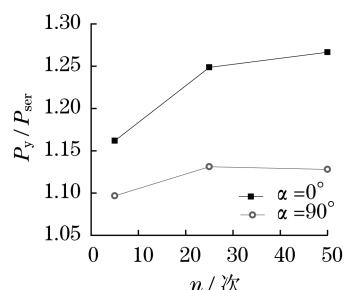


图9 钉连接承载力与反复加载次数的关系

Fig.9 The relationship between the load-carrying capacity and the times of cyclic loading

4 结论

(1) 除个别试件发生覆面板断裂破坏外,绝大部分钉连接试件按 M-c1 屈服模式破坏,符合欧洲木结构设计规范钉连接计算对应的屈服模式。

(2) 经长期风荷载作用后,钉连接的刚度退化,而承载力略有增加。在最多经历 25 次反复荷载作用后,二者皆基本趋于稳定。

(3) 覆面板主方向与规格材木纹方向的夹角 α 对钉连接的影响随放置时间的增长而减小,当放置时间大于等于 14 d 时,影响可以忽略不计。

(4) 试件放置时间对钉连接的承载力和刚度影响很大,放置时间从 7~14 d,钉连接的刚度下降了 25.6%,而承载力至少下降 9.5%。当然,放置时间的影响估计与蠕变、荷载持续作用及单向反复加载作用相似,初期承载性能变化较快、较大,而后变缓、减轻,最后趋于稳定。更深入的放置时间影响机理,尚有待进一步研究。

(5) 经对试验结果统计分析,得到了覆面板钉连接考虑退化的刚度计算公式。

参考文献:

[1] 潘景龙,祝恩淳.木结构设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
PAN Jinglong, ZHU Enchun. Design of wood structures [M]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2009.

[2] Johansen K. Theory of timber connections [J]. International Association of Bridge and Structural Engineering, 1949(9):249.

[3] 陈志勇,陈松来,樊承谋,等.木结构钉连接研究进展[J].结构工程师,2009,25(4):152.
CHEN Zhiyong, CHEN Songlai, FAN Chengmou, et al. A review on the nail connection of wood structures [J]. Structural Engineers, 2009, 25(4):152.

[4] Dolan J D, Madsen B. Monotonic and cyclic nail connection tests [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 19 (1):104.

[5] Dujic B, Kocetovmisulic T, Gramatikov K, et al. Hysteretic responses of different sheathing to framing joints [C]// The 8th World Conference on Timber Engineering. Helsinki: Finish Association of Civil Engineers RIL, 2004:407-412.

[6] 中华人民共和国建设部. GB 50005—2003 木结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB50005—2003 Code for design of timber structures [S]. Beijing: China Architectural & Building Press.

[7] European Committee for Standardization. EN 1995 - 1 - 1 (Eurocode 5) Design of timber structures—part 1. 1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

[8] 陈志勇.轻型木结构中剪力墙钉连接承载性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2006.
CHEN Zhiyong. Performance of nail connections in shear-walls of light wood frame houses—an experimental study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. School of Civil Engineering, 2006.

[9] American Society for Testing and Material. ASTM D 1761—06 Standard test methods for mechanical fasteners in wood [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.

[10] European Committee for Standardization. EN 26891—1991 Timber structures—joints made with mechanical fasteners-general principles for the determination of strength and deformation characteristics [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1991.

[11] Nordtest. NT Build 133—1981 Nordtest method, nails in wood, lateral strength [S]. Stockholm: Nordtest, 1981.

[12] 中华人民共和国建设部. GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB 50009—2001 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architectural and Building Press, 2002.

[13] Källsner B, Lam F. Diaphragms and shear walls [C]// Holzbauwerke nach Eurocode 5—STEP 3. Dusseldorf: Arbeitsgemeinschaft Holz e V, 1995:15/1-15/19.

[14] 陈松来,陈志勇,樊承谋,等.木结构剪力墙中钉连接的实验研究[J].中山大学学报:自然科学版,2008,47(4):133.
CHEN Songlai, CHEN Zhiyong, FAN Chengmou, et al. Experimental study on nail fasteners in wood shear walls [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(4):133.