

国产齿板连接抗剪承载力的概率分布研究

赵培焱, 张新培, 施柏楠, 王 闯

(四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065)

摘要: 根据可靠度理论确定轻型木结构齿板连接抗剪承载力设计指标时, 需先确定其概率分布。选择轻型木结构连接普遍使用的一种国产齿板及北美二级 SPF 规格材, 进行了五个角度的齿板连接抗剪承载力试验; 并以两种分布拟合检验方法, 结合残差平方和分析。结果显示, 齿板连接抗剪承载力的概率分布为对数正态分布, 通过参数估算和分布检验, 最终确定均值与标准值的比值 K 及其变异系数, 为后续可靠度分析和确定设计值提供依据。

关键词: 齿板连接; 抗剪承载力; 分布拟合检验

中图分类号: S781.2; TU312

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2017) 06-0026-04

Shear Strength Probability Distribution of Metal-plate-connected Joints

ZHAO Pei-yan, ZHANG Xin-pei, SHI Bai-nan, WANG Chuang

(School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: According to reliability theory, probability distribution must be first understood to determine shear strength design values of metal-plate-connected joints. The authors conducted a shear strength test on five connecting angles of specimens composed of widely used domestic metal-plates and second grade SPF dimensional lumber from North America. The testing data were analyzed by distribution fitting methods combined with sum of squared residual analysis. The test results showed normal logarithmic shear strength distribution for the metal-plate-connected joints. Finally, using ratios of mean values and standard values, “ K ” were determined for reference for further analysis of reliability and determination of design values.

Key words: metal-plate connection; shear strength; distribution fitting test

我国结构构件的承载力设计指标需要按照可靠度理论来确定, 而我国轻型木结构齿板连接承载力的设计指标是通过国外设计指标转换而来, 与我国现行标准 GB 50068-2001《建筑结构可靠度设计统一标准》相矛盾。

按照可靠度理论, 确定齿板连接承载力设计指标, 需首先确定齿板连接承载力的概率分布。目前,

相关文献仅有一种国产正交主轴齿板的受拉承载力概率分布的初步研究^[1]。

鉴于此, 笔者采用应用普遍的国产齿板及二级北美云杉 (SPF) 规格材, 依据 GB/T 50329-2002《木结构试验方法标准》, 进行五个角度齿板连接的抗剪承载力试验, 并采用分布拟合检验及残差平方和分析, 进行齿板连接抗剪承载力概率分布的研究, 提出齿板连接抗剪承载力的合理分布及相关参数, 旨在为确定齿板连接抗剪承载力的设计指标确定提供依据。

收稿日期: 2017-05-04; 修改日期: 2017-09-29

作者简介: 赵培焱, 男 (1993—), 四川大学建筑与环境学院硕士研究生。

责任作者: 张新培, 男, 四川大学建筑与环境学院教授。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 规格材: 二级北美云杉 (SPF 2[#]), 对应国内 IIIc 级。五种规格试材的截面尺寸分别为:

38 mm×89 mm, 38 mm×140 mm, 38 mm×184 mm, 38 mm×235 mm 和 38 mm×284 mm, 含水率 12.8%~15.6%。

2) 齿板: 由苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司提供。齿板宽度为 85 mm, 长度为 255 mm。镀锌薄钢齿板齿孔分布及齿长见图 1。镀锌层质量为 296 g/m², 齿密度为 1.20 个/cm²; 板齿长 8.4 mm, 板齿宽 3.2 mm, 齿板厚度约为 1 mm; 齿板材质为 Q235 钢, 屈服强度 276.24 MPa, 抗拉强度 352.68 MPa, 伸长率 0.34。

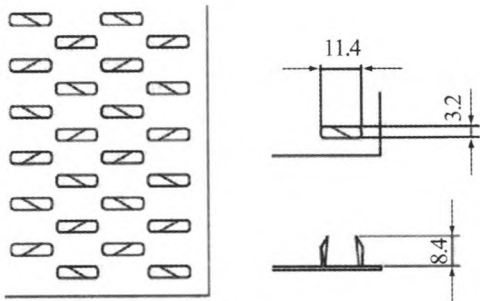


图 1 国产齿板 (单位: mm)

Fig.1 Domestic metal-plate

1.2 试验设备

200 t 液压压力试验机及配套分析测试系统。

1.3 试验设计

根据 GB/T 50329-2002, 设计五个角度的抗剪承载力试验, 分别为 30° 剪拉、60° 剪拉、90° 纯剪、120° 剪压和 150° 剪压。不同角度齿板连接的示意图, 见图 2。

试验所需的最少试件数量按公式 (1) 确定, 根据 GB/T 1928-2009 《木材物理力学试验方法总则》中的相关公式计算试验数据统计量。

$$n_{\min} = v^2 t^2 / p^2 \quad (1)$$

式中: $n_{\min}$ —最少试件数量; v —变异系数; p —准确指数; t —结果可靠性指标。

假定 v 取 15%, p 取 5%, 当 95% 的置信水平时, t 取 1.96, 计算试件数为 35。

本试验中, 五个角度的有效试件数为 37 或 38, 满足 GB/T 1928-2009 要求, 所得试验数据可靠。

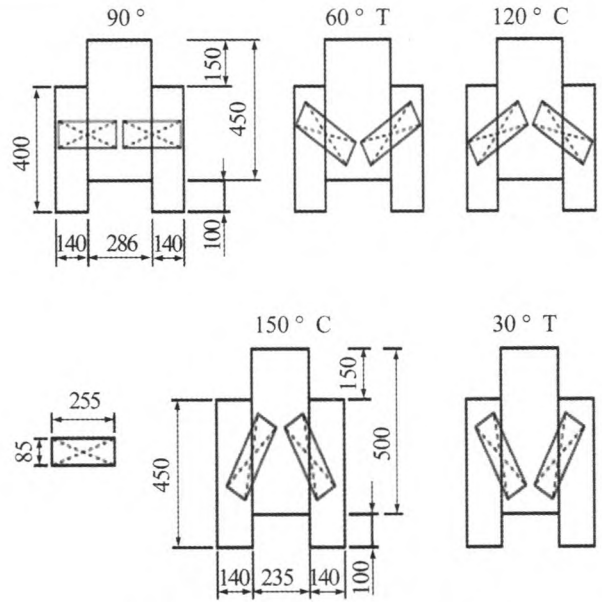


图 2 不同角度齿板连接的示意图

Fig.2 Metal-plate connection with different angles

1.4 试验方法

按 GB/T 50329-2002 规定, 受剪齿板连接承载力试验采用等位移加载, 加载速度为 (1.0±0.5) mm/min, 在 5~20 min 达到极限承载力。其中:

30° 剪拉、120° 剪压、150° 剪压试验, 加载速度均为 1.0 mm/min, 破坏时间分别为 5~7、5~8、5~6 min;

60° 剪拉和 90° 纯剪试验, 加载速度均为 1.5 mm/min, 破坏时间分别为 6~10、6~8 min。

每个角度的有效试件均出现典型的破坏形态。

2 结果与分析

2.1 抗剪承载力检测

五个角度齿板连接的抗剪承载力试验结果, 列于表 1。

表 1 抗剪承载力分布试验结果

Tab.1 Results of shear strength of metal-plate connection with different angles

角度	承载力/MPa	标准差	变异系数	准确指数/%
30°	130.066	7.457	0.0573	1.823
60°	131.924	7.578	0.0574	1.851
90°	114.968	3.270	0.0284	0.917
120°	91.705	2.880	0.0314	0.998
150°	77.184	2.741	0.0355	1.144

表 1 显示,准确指数和变异系数远小于最初确定最少试件数量时假定的 5%和 15%,其离散程度低于假定值,表明有效试件个数足够。

2.2 分布拟合类型

不同角度齿板连接节点的抗剪承载力频数直方图相似,以 60° 剪拉试件为例,其频数直方图如图 3 所示。

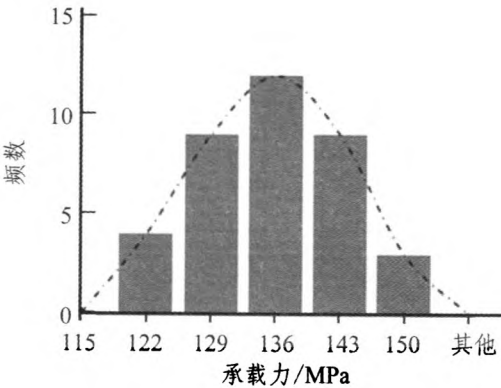


图 3 抗剪承载力频数直方图

Fig.3 Shear strength frequency histogram

图 3 显示,齿板节点抗剪承载力数据大致服从正态分布,对数正态分布或威布尔分布。由于所有齿板连接试件的承载力均为正值,故采用截尾正态分布、对数正态分布和三参数威布尔分布三种分布来拟合。

截尾正态分布的函数为:

$$F(x) = \frac{[\Phi(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}) - \Phi(\frac{-\mu_x}{\sigma_x})]}{[1 - \Phi(\frac{-\mu_x}{\sigma_x})]} \quad (2)$$

均值 (μ_x) 和标准差 (σ_x) 的极大似然估计为:

$$\mu_x = \bar{x} \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

对数正态分布,三参数威布尔分布函数公式及估计量计算方法参照文献 2-3。

2.3 参数估计

采用极大似然法,进行截尾正态分布和对数正态分布参数估计;采用相关系数法和极大似然法,对三参数威布尔分布的未知参数进行估计。各种拟合分布的参数估计结果列于表 2。

2.4 分布检验

采用 K-S 检验法^[4]和 Anderson-Darling (AD) 检验法^[5]对试验数据的概率分布进行检验。

表 2 参数估计计算结果

Tab.2 Results of parameter estimations

拟合类型	参数	角度				
		30°	60°	90°	120°	150°
截尾	μ_x	130.066	131.924	114.968	91.705	77.184
正态	σ_x	7.358	7.475	3.226	2.842	2.704
对数	λ	4.866	4.881	4.744	4.518	4.346
正态	ζ	0.0558	0.0565	0.0276	0.0310	0.0349
	γ	116.238	113.600	104.558	82.712	70.482
威布尔	η	15.602	20.620	11.541	9.982	7.540
	β	1.994	2.654	3.666	3.593	2.702

注: λ —数据取对数后的均值, ζ —数据取对数后的标准差, γ —位置参数, η —尺度参数, β —形状参数。

2.4.1 K-S 检验

K-S 检验,是采用经验分布函数 $F_n(x)$ 与假设分布函数 $F_0(x)$ 之间差值的最大值作为统计量 (D_n),其计算公式见公式 (5):

$$D_n = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_n(x) - F_0(x)| \quad (5)$$

其中经验分布函数 $F_n(x)$ 可取为:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & x < x_1 \\ \frac{i}{n} & x_1 \leq x < x_n \\ 1 & x \geq x_n \end{cases} \quad (6)$$

对各个角度计算,得到的 D_n 值见表 3。

表 3 K-S 检验 D_n 值

Tab.3 D_n value of K-S testing

拟合类型	角度				
	30°	60°	90°	120°	150°
截尾正态	0.1396	0.1005	0.0971	0.0990	0.1006
对数正态	0.1287	0.0898	0.0918	0.0964	0.1016
威布尔	0.1093	0.0808	0.0881	0.1010	0.1018

注: $D_{n,0.95}=0.143$

表 3 显示, α 取 0.05 时,各个角度的 D_n 值均小于 0.143,故截尾正态分布、对数正态分布、三参数威布尔分布均通过检验。

2.4.2 AD 检验

AD 检验是检验数据是否服从某个分布的一种非参数检验方法,其统计量 A^2 值越小,说明该分布对数据的拟合度越好。其中 A^2 简化计算公式为:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i-1)\ln Z_i + \ln(1-Z_{n+1-i})] \quad (7)$$

式中: Z_i 代表不同分布下的概率分布函数。

对截尾正态分布, 取:

$$Z_i = \Phi(w_i), w_i = (x_i - \mu)/\sigma \quad (8)$$

对三参数威布尔分布, 取:

$$Z_i = F_0(w_i) \quad (9)$$

对对数正态分布, 试验值取对数后, 即为正态分布。

三种分布的 A^2 修正统计量计算方法见文献 6。
五个角度的 A^2 修正值和检验临界值, 见表 4。

表 4 A^2 修正值计算结果和检验临界值
Tab.4 A^2 modified value and critical value

角度	拟合类型		
	截尾正态	对数正态	威布尔
30°	0.5579	0.1960	0.3512
60°	0.2601	0.2231	0.2312
90°	0.4396	0.3212	0.3467
120°	0.3698	0.1900	0.4136
150°	0.6945	0.5450	0.6828
$\alpha=0.01$	1.035	1.035	0.73
$\alpha=0.05$	0.752	0.752	0.54

由表 4 可以看出, α 取 0.01 时, 截尾正态分布、对数正态分布、三参数威布尔分布均通过检验; 但当 α 取 0.05 时, 威布尔分布没通过检验, 其余 2 种分布均通过检测。

2.5 确定较优分布

利用公式 (10) 进行拟合的分布函数与真实分布的残差平方和 (Q) 比较, 计算结果见表 5。

$$Q = \sum_{i=1}^n [F_n(x_i) - F_0(x_i)]^2 \quad (10)$$

表 5 各角度残差平方和
Tab.5 Residual sum of squares of all angles

拟合类型	角度				
	30°	60°	90°	120°	150°
截尾正态	0.1089	0.0598	0.0759	0.0598	0.1080
对数正态	0.0854	0.0493	0.0515	0.0599	0.1110

由表 5 结果可以看出, 对数正态分布具有更小的残差平方和, 表明其精度最高。故齿板连接抗剪承载力的分布函数取对数正态分布, 5 个角度的对数正态分布的参数如表 2 所示。

根据 GB 50068-2001, 齿板连接抗剪承载力的标准值可按式 (11) 确定。

$$F(x_k) = \mu_x * \exp(-1.645 v) \quad (11)$$

式中: x_k —承载力标准值, MPa; μ_x —承载力平均值, MPa; v —变异系数。

各个角度的均值 (原试验结果均值)、标准值及比值 K, 均列于表 6。

表 6 齿板剪切承载力标准值与 K 值
Tab.6 Standard value and K-value of shear strength

承载力	角度				
	30°	60°	90°	120°	150°
平均值/MPa	130.066	131.924	114.968	91.705	77.184
标准值/MPa	118.366	120.037	109.721	87.088	72.806
K=均值/标准值	1.10	1.10	1.05	1.05	1.06

由表 6 结果可知, K 的均值为 1.07, 变异系数为 0.0216。表明得到的 K 值、概率分布类型、承载力标准值, 可以作为后续可靠度分析、设计值确定的依据。

3 结论

1) 轻型木结构中不同角度的齿板连接, 其抗剪承载力概率分布可采用对数正态分布。

2) 在本试验范围内, 5 个角度下齿板抗剪承载力, 均值与标准值的比值 K 的均值为 1.07, 变异系数为 0.0216; 研究得到的概率分布类型、标准值、K 值, 可为后续可靠度分析和确定设计值提供依据。

参考文献:

- [1] 何敏娟, 何桂荣, 倪骏, 等. 轻木结构正交主轴齿板连接承载力试验及分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (12): 1581-1585.
- [2] 史景钊, 杨星钊, 陈新昌. 3 参数威布尔分布参数估计方法的比较研究[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43 (4): 405-409.
- [3] 于洋, 孙月静. 对数正态分布参数的最大似然估计[J]. 九江学院学报: 哲学社会科学版, 2007 (6): 55-57.
- [4] 冯振宇, 诸德培. 威布尔分布的拟合优度检验[J]. 机械强度, 1996, 18 (4): 28-31.
- [5] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [6] 费鹤良. 分布拟合优度检验方法综述[J]. 上海师范学院学报: 自然科学版, 1982 (2): 129-142.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)