

意杨旋切板胶合木中式木框架抗侧性能研究

丁佩蓉¹, 吴 荣¹, 刘 雁^{2*}, 缪小春¹, 王洪鹤³, 薛凤飞¹

¹扬州市建筑设计研究院有限公司, 江苏 扬州

²扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州

³如皋市审计局固定资产投资审核中心, 江苏 南通

Email: ¹liuyan@yzu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月30日; 录用日期: 2020年10月16日; 发布日期: 2020年10月23日

摘 要

梁柱式木框架又称中式木框架,是中国古建筑的主导结构形式。本文以意杨LVL为原材料,通过6榀中式木框架,研究了单调荷载下和低周反复荷载作用下,螺栓-钢填板木框架、植筋节点木框架、木框架剪力墙组合结构的抗侧性能,得出螺栓-钢填板木框架的抗侧刚度略小于植筋节点木框架,但最终承载力较之更大;木框架剪力墙组合结构在承载力、强度、刚度、耗能能力等方面均远优于纯框架;在低周反复荷载作用下,各构件呈现出明显的捏缩效应,其中以螺栓-钢填板木框架最明显;通过理论分析推导了意杨LVL纯框架和框架-剪力墙混合结构抗侧承载力计算公式。

关键词

意杨LVL, 框架, 剪力墙, 抗侧性能, 承载力

Research on the Lateral Resistance of Chinese Style Poplar Laminated Veneer Lumber Frames

Peirong Ding¹, Rong Wu¹, Yan Liu^{2*}, Xiaochun Miao¹, Honghe Wang³, Fengfei Xue¹

¹Yangzhou Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu

²College of Civil Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

³Fixed Assets Investment Audit Center of Rugao Audit Bureau, Nantong Jiangsu

Email: ¹liuyan@yzu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2020; accepted: Oct. 16th, 2020; published: Oct. 23rd, 2020

*通讯作者。

文章引用: 丁佩蓉, 吴荣, 刘雁, 缪小春, 王洪鹤, 薛凤飞. 意杨旋切板胶合木中式木框架抗侧性能研究[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1075-1085. DOI: 10.12677/hjce.2020.910112

Abstract

Beam column wood frame, also known as Chinese style wooden frame, is the dominant structural form of Chinese ancient architecture. This paper studied the lateral resistance of six Chinese style frames under one-way and low reversed cyclic loading. The results prove that the bearing capacity of the Poplar LVL connection with bolt steel plate is better, but the lateral stiffness is slightly less than frame connecting rebar. Poplar LVL frame-shear wall is far better than pure frame in bearing capacity, strength, stiffness and energy dissipation capacity. The hysteresis curve of the frames presents obvious pinch effect, the frame connected with bolt steel plate behave the most obvious shrinkage effect. The lateral bearing capacity calculation formula of poplar LVL pure frame and frame shear wall structure are derived.

Keywords

Poplar Laminated Veneer Lumber, Framework, Shear Wall, Lateral Resistance, The Bearing Capacity

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

木结构是建筑结构多元化时代的一种既传统又新颖的结构形式。目前国际主流的木结构建筑有梁柱式木结构和轻型木结构，其中梁柱式木结构是中国古建筑中的主导结构形式，因此梁柱式框架形式也被称为中式木框架。中式木框架以梁柱为承力构件，轻型木结构以木质墙板为承力构件，从使用功能上来看，中式木框架更能满足使用者对大空间的需求。近年来，国家政策的支持[1]和民众对于绿色居住环境的要求[2]给木结构在中国的发展带来了机遇。目前，国内外学者对于新型木结构、复合木材料研究成果丰富：刘雁[3]等研究得出了意杨 LVL 的各项物理力学性能，发现意杨 LVL 材质均匀，适合用作结构承重构件；刘伟庆[4] [5]等研究了 LVL 复合木梁的受弯性能，发现其强度变异性较稳定，结构性能优于锯材构件；李昌春[6]等对不同连接方式的木框架进行了低周反复荷载试验，发现梁柱式木框架呈现出较明显的捏缩效应；Frank Lam [7]等对钢填板连接的梁柱式框架进行了试验研究，发现螺钉加固梁柱接头能提高构件抗弯承载力及延性；徐德良[8]等研究了胶合木材 - 钢夹板连接节点的承载能力试验研究，发现螺栓连接节点的延性随着胶合木材相对厚度的增加而增大。可以看出，目前对于梁柱式木结构体系的试验研究主要集中于连接节点以及耗能性能等方面，但是对于梁柱式框架 - 剪力墙混合结构体系以及梁柱式框架的整体抗侧力性能的研究工作则很少涉及。意杨旋切板胶合木(简称 LVL)是新型木复合材料的一种，是以国内大面积种植的小径级速生材——意杨为原材料，经旋切、涂胶、压实后形成的复合重组式工程材料，具有结构均匀、强度高、经济型高等优点。在国内大径级木材稀缺的现状下，小径级工程木材有着广阔的应用前景。

本课题以意杨 LVL 为原材料，进行了框架结构抗侧性能试验，研究了意杨 LVL 梁柱式框架以及框架 - 剪力墙混合结构在单向和低周反复荷载作用下的破坏形态、强度、变形、刚度、抗侧力性能，进行了有限元模拟对照，建立了意杨 LVL 框架抗侧承载力理论计算公式，为意杨 LVL 在我国木结构体系中的应用提供借鉴。

2. 试验与结果

2.1. 试件尺寸及加载装置

试件设计参照《木结构设计规范》(GB50005-2005) [9]及《木结构设计手册》(第三版) [10], 制作了六组试件: 钢填板螺栓节点的纯框架试件(KJ1-a、KJ1-b), 植筋节点的纯框架试件(KJ2-a、KJ2-b), 钢填板螺栓节点的框架-剪力墙试件(KJ3-a、KJ3-b), 其中 a 代表进行单向荷载试验框架, b 代表进行低周反复荷载试验的框架。所有试件尺寸均一致, 梁截面尺寸为 $75\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 柱子截面尺寸 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 框架尺寸为 $2.55\text{ m} \times 2.3\text{ m}$ 。详见图 1、图 2。



Figure 1. Sketch of test piece

图 1. 试件简图

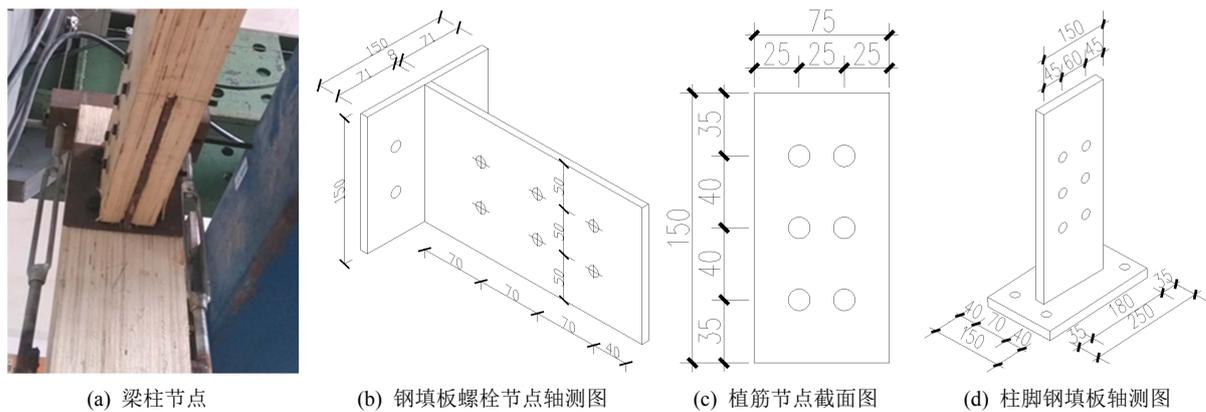


Figure 2. Node diagram

图 2. 节点简图

本次试验加载装置如图 3 所示, 其优点是可使试件受力时能够自由转动或上移, 从而保证试件更真实的受力性能。试验时在梁中轴线处安装两个位移计, 测量水平位移; 柱脚安放两个位移计, 测量柱脚位移; 对于木框架-剪力墙结构, 在纵墙底梁板上布置电阻位移计, 测量墙骨柱竖向位移。本次试验加载方案采用位移加载, 单向荷载试验加载速率为 7.5 mm/min , 低周反复荷载试验加载速率为 5 mm/秒 。

2.2. 试验现象及分析

KJ1 与 KJ2 的典型破坏现象为侧向变形大、节点处木材劈裂; KJ3 的典型破坏现象为剪力墙面板翘

曲、撕裂，墙骨柱上拔(图 4)。试验荷载位移曲线及滞回曲线列于图 5。由图可知，纯木框架构件刚度远小于木框架 - 剪力墙构件，KJ2-a 的刚度略大于 KJ1-a，但 KJ1-a 仍处于弹性阶段，可见其承载力将大于 KJ2-a；在低周反复荷载作用下，各个构件有明显的捏缩现象，其中 KJ1-b 最为明显；试件在几次循环中，后一次的承载力峰值和曲线斜率都在逐渐减小，说明循环加载对试件产生了结构损伤从而导致了强度和刚度的退化；由各试件骨架曲线可知，在低周反复荷载作用下，KJ1-b、KJ2-b 一直处于线弹性阶段，KJ2-b 刚度略大于 KJ1-b；KJ3-b 经历了弹性阶段、屈服强化阶段，最终破坏，但其刚度远大于前面两组试件，承载力约为纯框架的 2 倍。

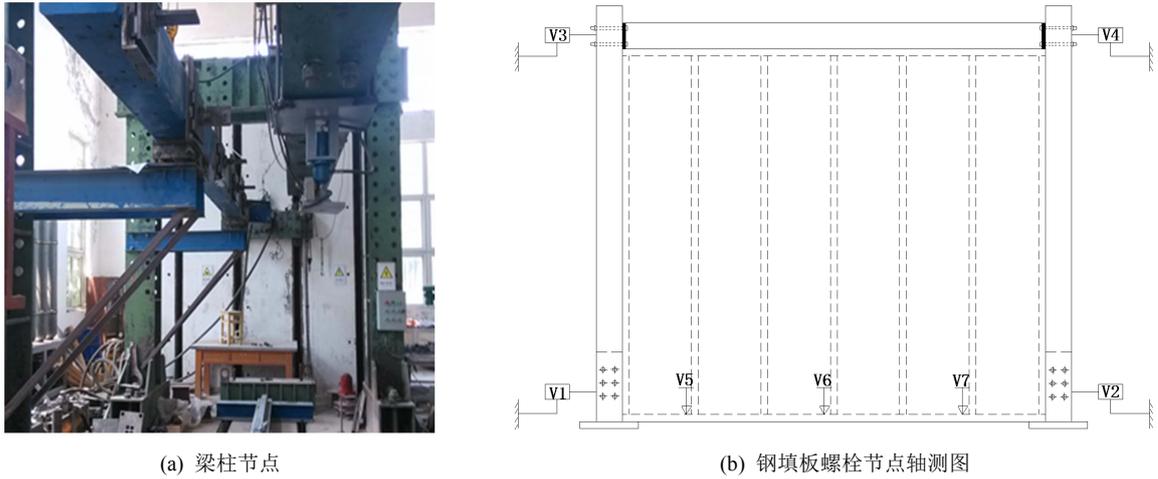
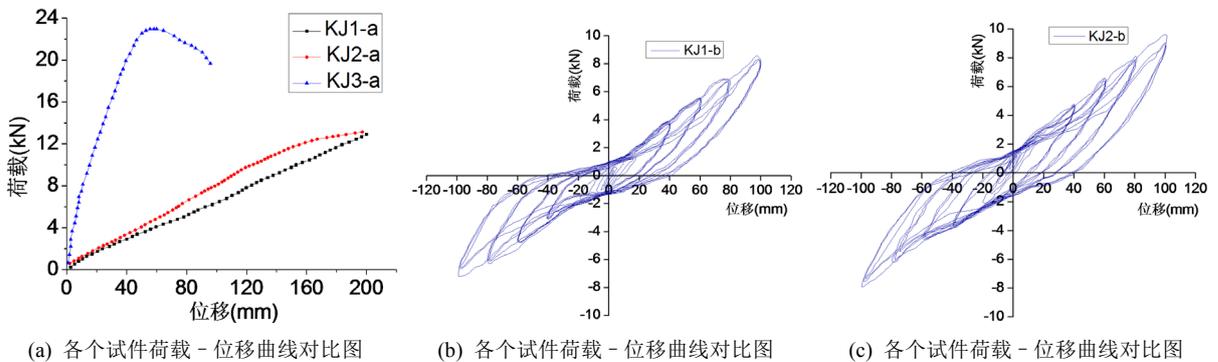


Figure 3. Test loading device and arrangement of test points
图 3. 试验加载装置及测点布置



Figure 4. Typical failure modes
图 4. 典型的破坏形式



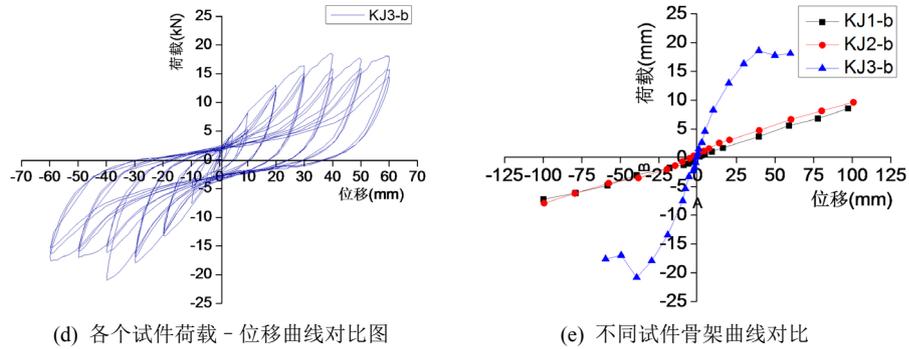


Figure 5. The test data

图 5. 试验数据

3. 有限元模拟分析

3.1. 模型概况

使用 ABAQUS 有限元软件对构件进行模拟分析。本文中对意杨 LVL 梁柱构件、钢填板、柱脚板、植筋、螺栓均采用了三维实体单元建模的方法，采用常应变 8 节点六面体单元 C3D8I 构件。网格划分如图 6 所示。由于意杨 LVL 具有各向异性，在模型中需对材料各个方向的参数进行定义，见表 1 [3]。

为了简化螺栓的预紧力作用，假定钢板与螺栓之间为完全刚性连接，螺栓与螺栓孔采用绑定约束；对于植筋节点，主要定义植入钢筋与木梁木柱中销槽的接触及梁底与柱表面的接触。对于各部件之间的钉连接，均采用实体单元模拟钉子，并采用内置式的相互作用模拟 OSB 面板与墙骨柱、墙骨柱与墙骨柱、剪力墙与框架梁柱间的钉连接。柱脚处采用完全固结的边界条件约束条件。加载时使用位移加载。

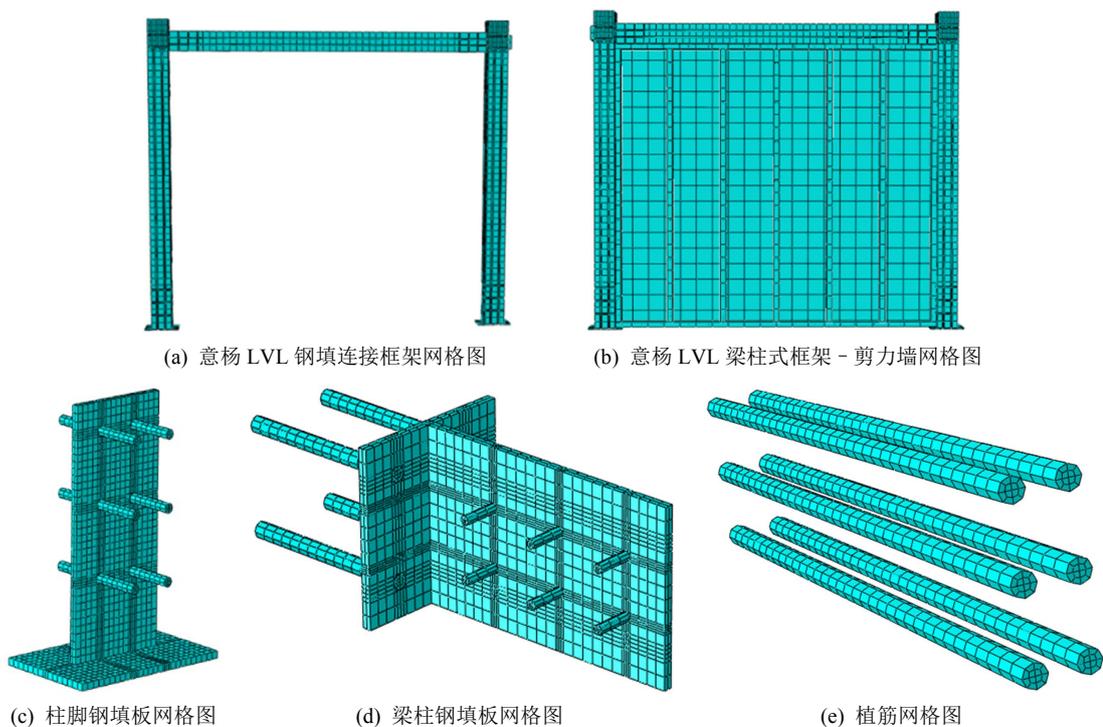


Figure 6. Grid division of specimens

图 6. 试件网格划分图

Table 1. Anisotropy parameters of Poplar LVL
表 1. 意杨 LVL 各向异性参数

E_1	E_2	E_3	ν_1	ν_2	ν_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}
11073	1630	622	0.445	0.32	0.278	664	830	199

3.2. 有限元模拟结果

通过有限元分析(图 7)可以看出, 在水平荷载作用下, KJ1 和 KJ2 节点处都产生了较大的应力, 节点承受水平剪力与弯矩的作用, 应力的最大值出现在节点最外排螺栓与钢板的交界处, 试验中试件最终状态也为梁柱交界处的钢筋屈服, 与模拟的结果相符; 试件最终状态为意杨 LVL 梁及意杨 LVL 柱上螺栓孔均出现销槽变形破坏, 应力较大, 两个试件中螺栓应力的分布特征也与理论分析中的结论相符合, 即距离中心处越远的螺栓, 其应力越大。KJ3 模拟结果可见, OSB 面板拼接处出现较大的变形并且具有较大的应力, 大于面板中部钉子的应力, 拼接处的钉子在加载过程中最先达到屈服, 这较好的解释了框架在试验过程中 OSB 面板与墙骨柱最拼接处最先发生破坏。边墙骨柱与顶梁板通过钉子与框架梁柱相连, 在模拟加载过程中并未与框架分离。

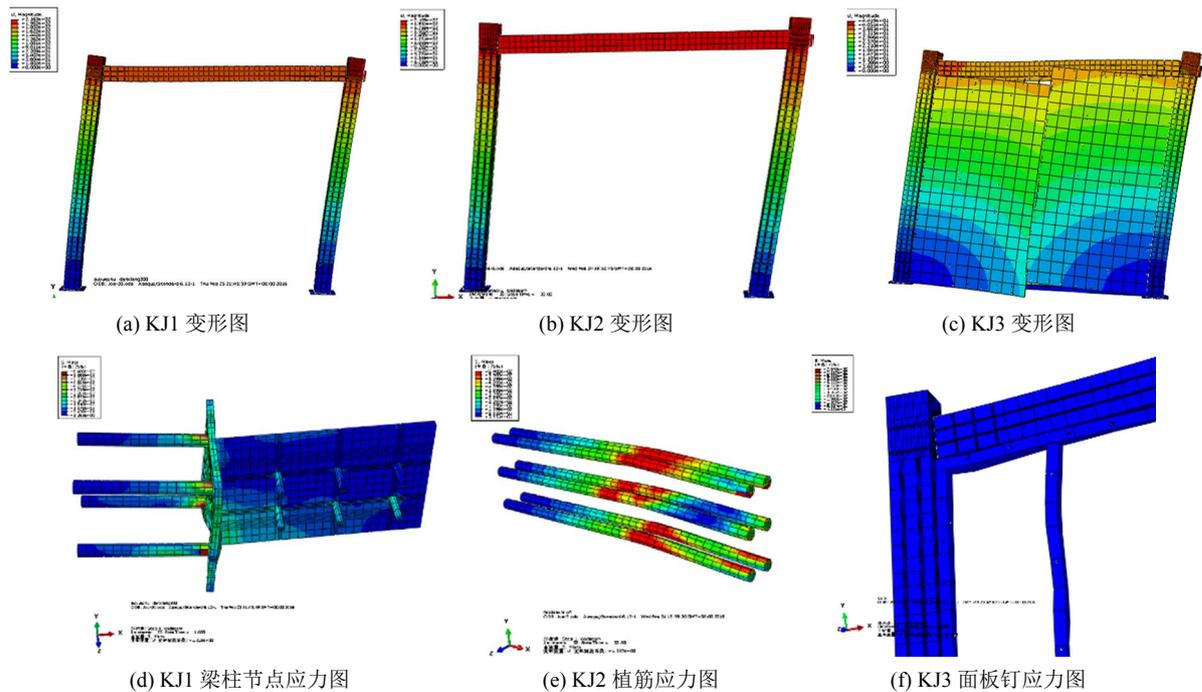


Figure 7. Finite element simulation stress diagram
图 7. 有限元模拟应力图

3.3. 骨架曲线

从 ABAQUS 模拟值与试验值所得的骨架曲线对比图(图 8)可以看出, 有限元模拟得出模拟值要略大于试验值, 峰值位移小于试验值, 模拟值所形成的曲线较试验结果形成的曲线更为光滑, 两者的骨架曲线总体上比较接近, 变化趋势基本一致。

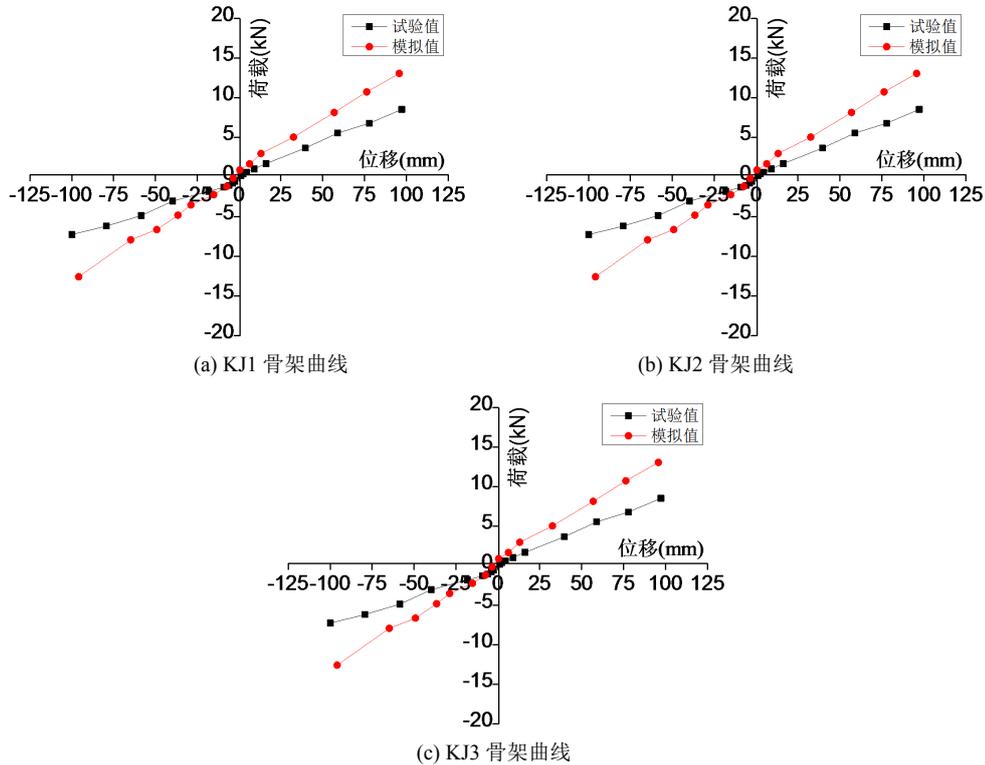


Figure 8. Comparison of experimental and finite element values of skeleton curve
图 8. 骨架曲线实验值与有限元值对比图

4. 理论分析

4.1. 梁柱式木框架抗侧移刚度计算

在荷载作用下，木框架的连接属于介于完全刚性与理想铰接之间的半刚性连接。框架结构在承受水平荷载的同时依然会承受竖向荷载，但竖向荷载下的侧移较小，在计算中可以忽略不计。仅考虑水平荷载 H 作用下的半刚性连接木框架的计算模型如图 9 所示。图中， l 为框架的跨度， h 为框架的高度， R_{JC} 为柱脚节点的转动刚度， R_{JCB} 为梁柱节点的转动刚度， $(EI)_c$ 表示意杨 LVL 柱的截面抗弯刚度， $(EI)_b$ 表示意杨 LVL 梁的截面抗弯刚度。将各点弯矩均用 M_B 表示，得到如图 10 表示的半刚性框架计算弯矩。在半刚性梁柱框架的水平侧移计算中只考虑梁、柱的弯曲应变能，则梁柱框架总的弯曲应变能 U_{BM} 为式 1；四个节点上弯矩荷载在转角位移上所做的功 U_{BJ} 等于水平力 H 在侧移方向上所做的功，可表示为式 2。

$$U_{BM} = 2 \times \frac{1}{2} \int_0^h (EI)_c (y'')^2 dy + \frac{1}{2} \int_0^l (EI)_b (x'')^2 dx \quad (式 1)$$

$$\begin{aligned} U_{BJ} &= \frac{1}{2} (M_A \theta_A + M_B \theta_B + M_C \theta_C + M_D \theta_D) \\ &= \frac{1}{R_{JC}} \left(M_B^2 - M_B H h + \frac{H^2 h^2}{4} \right) + \frac{M_B^2}{R_{JCB}} \end{aligned} \quad (式 2)$$

由挠曲线近似微分方程 $\frac{d^2 y}{dx^2} = \pm \frac{M(x)}{EI}$ 和势能驻值条件 $\delta \Pi = \frac{\partial (U_{BM} + U_{BJ})}{\partial M_B} = 0$ 推导出 M_B 可表示为式

3。根据结构力学求解公式可得到在水平力 H 作用下框架的水平侧移 Δ 为式 4。

$$M_B = \frac{Hh \left(\frac{h}{2(EI)_C} + \frac{1}{R_{JC}} \right)}{\left(\frac{2h}{(EI)_C} + \frac{1}{(EI)_B} \right) + \left(\frac{2}{R_{JC}} + \frac{2}{R_{JCB}} \right)} \quad (式 3)$$

$$\Delta = 2 \int_0^h \frac{M_y \bar{M}_y}{(EI)_C} dy + \int_0^l \frac{M_x \bar{M}_x}{(EI)_B} dx + 2 \frac{M_A \bar{M}_A}{R_{JC}} + 2 \frac{M_B \bar{M}_B}{R_{JCB}} \quad (式 4)$$

$$= \frac{Hh^3}{6(EI)_C} + \frac{Hh^2}{2R_{JC}} - \frac{3Hh^2(h+\alpha)^2}{4(EI)_C(6h+Lk+3\beta)}$$

结合以上各式，可推导出半刚性框架的抗侧刚度可表示为：

$$K_F = \frac{2}{\frac{h^3}{3(EI)_C} + \frac{h^2}{R_{JC}} - \frac{3h^2(h+\alpha)^2}{2(EI)_C(6h+Lk+3\beta)}} \quad (式 5)$$

其中： $\alpha = \frac{2(EI)_C}{R_{JC}}$, $\beta = 2(EI)_C \left(\frac{1}{R_{JC}} + \frac{1}{R_{JCB}} \right)$, $k = \frac{(EI)_C}{(EI)_B}$

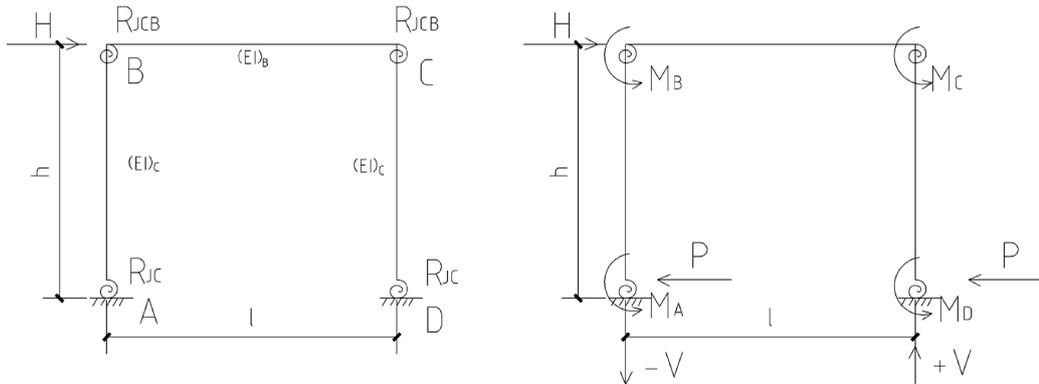


Figure 9. Calculation model of semi-rigid frame
图 9. 半刚性框架计算模型

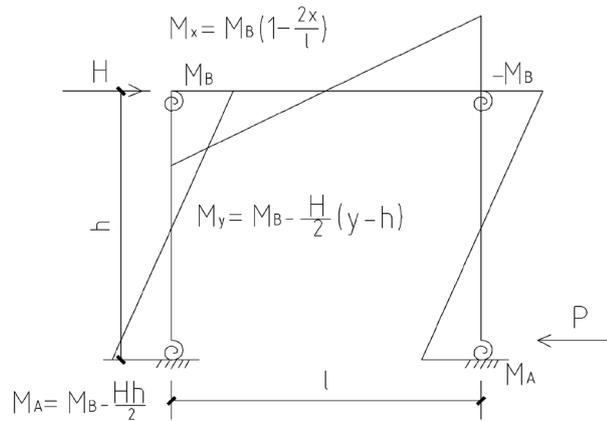


Figure 10. Calculation bending moment of semi-rigid frame
图 10. 半刚性框架计算弯矩

4.2. 木剪力墙抗侧承载力计算

木剪力墙在承受侧向荷载时，其抗侧力是由墙骨架和 OSB 面板在钉连接的作用下共同承担。在进行受力分析时，假设钉子作为弹性体单元，木剪力墙模型作为弹性模型，并满足以下四个基本假设。

- 1) 墙骨架为刚性体材料，骨架之间为铰接；
- 2) 墙体面板为刚性，相邻的面板之间无直接接触；
- 3) 在木剪力墙破坏之前，骨架与墙面板的钉连接处于线弹性阶段；
- 4) 侧向位移与面板宽度和高度相比很小。

求解钉受力时，将坐标系设置在墙骨架的左下方，并假设墙骨柱的转角为 γ ，面板的转角为 θ ，面板的左下角点在 x 和 y 方向上分别出现了 u_0 和 v_0 的位移(图 11)。钉连接抗侧力刚度为 K ，则钉节点在 x 和 y 方向上所受到的力为：

$$F_{x,i} = -Ku_i = -K[u_0 + y_i(\gamma - \theta)] \quad (\text{式 6})$$

$$F_{y,i} = -Kv_i = -K(v_0 + \theta x_i) \quad (\text{式 7})$$

通过最小势能法和墙肢的平衡，再将坐标系移到钉节点中心，将新坐标系下的坐标轴定义为 \hat{x} 和 \hat{y} ，

求得 $u_0 = 0$ ， $v_0 = 0$ ， $\theta = \frac{1}{K} Hh \frac{1}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2}$ ， $\gamma = \frac{1}{K} Hh \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \hat{y}^2} \right)$ 。在距离钉连接中心最远的位置处钉连接受力最大。假定此时钉连接的坐标为 $(\hat{x}_{\max}, \hat{y}_{\max})$ ，得到其受力：

$$F_{\max} = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2} = Hh \sqrt{\left(\frac{\hat{x}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}^2} \right)^2 + \left(\frac{\hat{y}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2} \right)^2} \quad (\text{式 8})$$

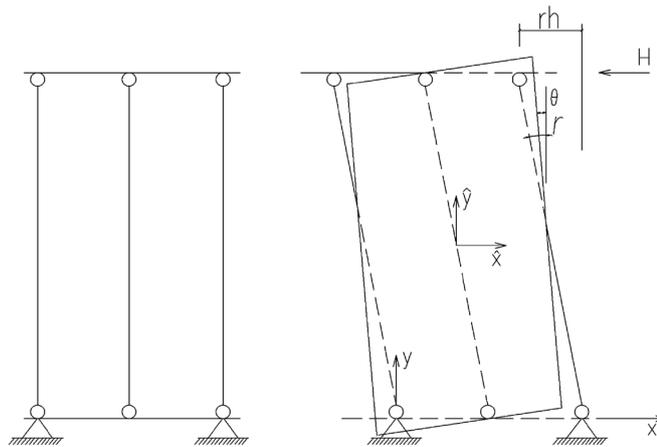


Figure 11. Deformation diagram of shear wall

图 11. 剪力墙变形示意图

实际受力中，面板存在着一定程度的剪切变形，假设一个新的未知量 γ_s 来表示墙面板的剪切变形对剪力墙产生的影响。假定剪力均匀的分布在墙面板上，那么剪切变形所产生的势能为 $U_3 = \frac{1}{2} G\gamma_s^2 bht$ ，

剪切变形产生的顶点位移对应的外力功为 $U_4 = -H\gamma_s h$ ，结合墙体总势能和能量驻值条件可得出 $\gamma_s = \frac{H}{Gbt}$ 。则顶梁板的水平侧移可以由下式表示：

$$u_d = (\gamma + \gamma_s)h = \frac{1}{K} Hh^2 \sqrt{\left(\frac{\hat{x}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}^2} \right)^2 + \left(\frac{\hat{y}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2} \right)^2} + \gamma_s h \quad (\text{式 9})$$

4.3. 框架 - 剪力墙混合结构抗侧承载力计算

在水平荷载作用下，框架-剪力墙混合结构的抗侧承载力是有外框架和剪力墙共同构成的，但是木剪力墙要先于梁柱框架破坏。剪力墙顶梁板与梁柱式框架具有相同的侧移量，因此通过半刚性梁柱式木框架的抗侧刚度 K_F 和顶梁板的水平侧移，计算可得到此时框架的抗侧力如下式：

$$F_k = K_F \times u_d = \frac{K_F n_g F_d h}{K} + n_g F_d K_F / \left\{ Gbt \sqrt{\left(\frac{\hat{x}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}^2} \right)^2 + \left(\frac{\hat{y}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2} \right)^2} \right\} \quad (\text{式 10})$$

梁柱式框架-剪力墙混合结构抗侧承载力可以近似的简化为梁柱式木框架在木剪力墙达到极限承载力时的抗侧力与木剪力墙的抗侧承载力之和，表达式如下：

$$F_H = F_k + H = \frac{K_F n_g F_d h}{K} + n_g F_d (hK_F + Gbt) / \left(Gbth \sqrt{\left(\frac{\hat{x}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}^2} \right)^2 + \left(\frac{\hat{y}_{\max}}{\sum_{i=1}^n \hat{x}^2} \right)^2} \right) \quad (\text{式 11})$$

结合本次试验中的意杨 LVL 梁柱式木框架 - 剪力墙混合结构，将相关参数带入上式中求得框架的抗侧承载力值为 18.63 kN，而试验所得的结果为 21.24 kN，理论值要小于试验值，原因是木剪力墙的抗侧力采用的是弹性模型，这种计算方法低估了木剪力墙的承载力，因而可以偏保守的采用此公式计算意杨 LVL 梁柱式木框架 - 剪力墙混合结构的抗侧承载力。

5. 结论

本文以意杨 LVL 为原材料，通过 6 榀框架，研究了单调荷载下和低周反复荷载作用下，螺栓 - 钢填板木框架、植筋节点木框架、木框架剪力墙组合结构的抗侧性能，得出的结论如下：

1) 在水平荷载作用下，螺栓 - 钢填板木框架和植筋节点木框架的破坏表现为柱脚节点的木材的劈裂；木框架剪力墙组合结构表现为木剪力墙的破坏；意杨 LVL 框架 - 剪力墙混合结构的水平极限位移要远小于纯框架，侧向刚度要大于纯框架。

2) 纯框架的抗侧性能较弱，其中螺栓 - 钢填板木框架的抗侧刚度略小于植筋节点木框架，但最终承载力较之更大；木框架剪力墙组合结构由于在受力方向加入了抗侧刚度大的木剪力墙，其结构的承载力、强度、刚度、耗能能力等方面得到了明显的提升，结构性能要远优于纯框架。

3) 各构件的滞回曲线均呈现出明显的捏缩效应，螺栓 - 钢填板木框架的捏缩效应最明显，其次是植筋节点木框架。木框架剪力墙组合结构在低周反复荷载作用下有明显的三个阶段：弹性阶段、屈服阶段及下降阶段，纯框架具有较长的弹性阶段。

4) 对意杨 LVL 框架的进行了有限元模拟分析, 采用了三维实体精细化建模的方法, 得到的应力结果与构件实际受力状态相符合, 且模拟结果值与试验值吻合度较高。

5) 通过试验数据观察与理论分析, 推导了意杨 LVL 纯框架和框架 - 剪力墙混合结构抗侧承载力计算公式。

从结论来看, 木框架剪力墙结构各方面受力性能均优于纯木框架结构。但在人们对使用空间要求愈来愈大的情况下, 如何做到既保留中国传统文化因素, 又拥有良好的抗侧性能, 是中式木框架的一个新的研究方向。

基金项目

扬州市建设科技计划项目: 基于旋切板胶合木的中式木框架体系关键技术研究; 项目编号: 201802。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于进一步加强的城市规划建设管理工作的若干意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2016-02/21/content_5044367.htm, 2016-02-21.
- [2] 王瑞胜, 陈有亮, 陈诚. 我国现代木结构建筑发展战略研究[J]. 林产工业, 2019, 56(9): 1-5.
- [3] 刘雁, 王洪鹤, 丁佩蓉, 等. 意杨旋切板胶合木材料的物理力学性能[J]. 林产工业, 2017, 44(2): 12-16.
- [4] 杨会峰, 刘伟庆. 一种新型复合木梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 97-99.
- [5] 刘伟庆, 杨会峰. 工程木梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(1): 90-95.
- [6] 李昌春, 等. 梁柱式木结构框架体系抗震性能试验研究[J]. 江苏建筑, 2010(3): 61-63.
- [7] Lam, F., Schulte, M., Yao, C.C. and James, J.G.U. (2008) Moment Resistance of Bolted Timber Connection with Perpendicular to Grain Reinforcements. *WCTE*.
- [8] 徐德良, 刘伟庆, 倪庚东. 木材 - 钢夹板螺栓连接的承载能力试验研究[J]. 江苏建筑, 2009(3): 18-20+33.
- [9] 《木结构设计手册》编辑委员会. 木结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [10] GB 50005-2003, 木结构设计规范[S].