

文章编号:1673-2049(2016)05-0022-07

基于梁柱节点性能的钢-竹组合框架结构地震反应分析

李玉顺,何佳伟,张家亮,许科科,杜永飞

(宁波大学 建筑工程与环境学院,浙江 宁波 315211)

摘要:为研究钢-竹组合框架中连接钢-竹组合柱和钢-竹组合梁的节点性能,通过拟静力试验得到不同参数下半刚性节点的弯矩与转角的多项式拟合关系,在此基础上建立了 6 榀 2 层钢-竹组合框架的数值模型,进行了地震作用下的有限元分析,探讨了节点对钢-竹组合结构抗震性能的影响。为充分考虑节点的半刚性特性,采用 Combin39 非线性弹簧单元模拟节点,研究了 6 榀框架在不同情况下的最大水平位移与最大基底剪力、水平位移与基底剪力时程曲线和滞回曲线等指标。结果表明:钢-竹组合框架滞回曲线饱满,抗震性能突出,提高节点处螺栓的强度和设置加劲肋对提高钢-竹组合框架的抗震性能有明显效果,节点的构建因素对框架的抗震性能有显著影响。

关键词:钢-竹组合梁柱节点;钢-竹组合框架;有限元模型;地震波;抗震性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Seismic Response Analysis of Bamboo-steel Composite Frame Structure Based on Performance of Beam-column Joints

LI Yu-shun, HE Jia-wei, ZHANG Jia-liang, XU Ke-ke, DU Yong-fei

(School of Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the performance of bamboo-steel composite frame joint which connected bamboo-steel composite column and bamboo-steel composite beam, moment and angle polynomial fitting relationship of semi-rigid joints under different parameters were obtained by quasi-static test. Based on this, the numerical models of six pieces of two-layer bamboo-steel composite frame were built, the finite element analysis under seismic action were carried out, and the influence of joints on the seismic performance of bamboo-steel structure were discussed. In order to fully consider the characteristics of semi-rigid joints, Combin39 nonlinear spring element was used to simulate joint, the maximum displacement and base shear force curves, displacement and base shear time history curves and hysteresis curves of six frames under different situations were studied. The results show that the hysteresis curves of bamboo-steel composite frame is plump, the seismic performance is outstanding, improvements of the bolt strength in the joint and the stiffeners set have obvious influences on improvement of the seismic performance of bamboo-steel frame, the build factors of joints have distinct effects on seismic performance of frame.

Key words: bamboo-steel composite beam column joint; bamboo-steel composite frame; finite element model; seismic wave; seismic performance

收稿日期:2016-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51378265,51678310)

作者简介:李玉顺(1968-),女,黑龙江五常人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lys0451@163.com。

0 引 言

竹材是一种重要的丰产林业资源,具有绿色环保、生长周期短、力学性能优良等特点,经现代技术可将原始竹材加工成各种规格的人造竹材板,扩大了竹材的应用范围^[1-2]。冷弯薄壁型钢作为一种轻质、高效、经济的新型型材,在各国工程界的应用日趋广泛^[3]。在实践中,使用人造竹材板难以制造具有复杂截面的结构构件,而薄壁型钢容易发生局部屈曲和整体失稳,导致 2 种材料应用范围受限。宁波大学课题组提出了一种全新的钢-竹组合结构体系^[4],通过合理的设计和特殊的结合方式,使 2 种材料共同工作,既发挥了各自的优势,又拓宽了两者的应用前景。近年来,宁波大学课题组致力于钢-竹组合结构构件的研究,对组合柱^[5-7]、组合梁^[8-10]、组合楼板^[11-13]、组合墙体^[14-16]等主要结构构件进行了研发试验,对钢-竹界面粘结-滑移进行了研究^[17-18]。研究表明:钢-竹组合构件具有良好的组合效应和较高的承载能力,可作为主要受力构件应用于实际工程。

目前,宁波大学课题组已对梁柱边节点进行了相关研究,在此基础上,本文对 6 榀框架数值模型进行了地震波作用下的有限元数值分析,探讨了节点对钢-竹组合结构抗震性能的影响,对最大水平位移与最大基底剪力、水平位移与基底剪力时程曲线和滞回曲线等指标进行了研究。考虑到钢-竹组合节点的连接属于半刚性连接^[19-20],本文采用非线性弹簧单元进行模拟。

1 节点拟静力试验

1.1 试件制作

节点拟静力试验包含 6 个钢-竹组合梁柱边节点试件,编号为 J-1~J-6。组合柱为箱形截面,高 1.8 m,截面尺寸为 200 mm×200 mm;组合梁为工字形截面,长 1.5 m,截面尺寸为 160 mm×200 mm,如图 1 所示。组合梁与组合柱通过节点相连,该节点由螺栓和 T 型钢连接件(Q235 钢)构成,连接件截面尺寸分为 2 种,分别为 T166×150 与 T206×150。T 型钢连接件腹板与钢-竹组合梁通过 4 根或 6 根螺栓相连,翼缘与组合柱则通过 4 根螺栓连接。考虑到钢-竹组合柱节点核心处的剪力均由节点处组合柱的结构胶承受,为了提高梁柱节点的抗震性能和极限承载力,在组合柱节点处围焊 4 块钢板形成钢筒,并使其与 T 型钢连接件翼缘进行连接^[21],如图 2 所示。

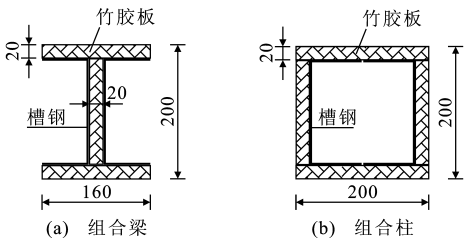


图 1 组合构件横截面(单位:mm)

Fig. 1 Cross-sections of Composite Components (Unit:mm)

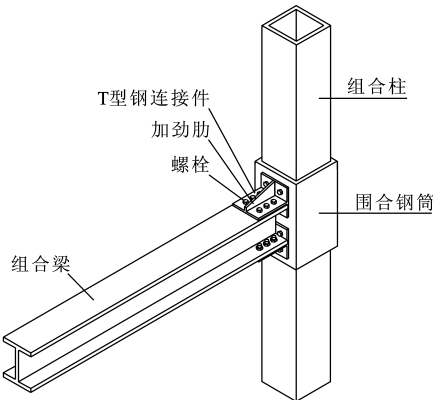


图 2 钢-竹组合梁柱边节点

Fig. 2 Bamboo-steel Composite Beam-column Exterior Joint

试件 J-1,J-3,J-5 的 T 型钢连接件截面尺寸为 T166×150,腹板螺栓数目为 4,螺栓强度等级依次增加;试件 J-2,J-4,J-6 的 T 型钢连接件截面尺寸为 T206×150,腹板螺栓数目为 6,螺栓强度等级同样依次递增。除试件 J-1,J-2 外,其余试件均设置节点加劲肋,节点拟静力试件参数如表 1 所示。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件 编号	T 型钢连接件截 面尺寸	螺栓强度 等级	节点腹板螺栓数 目(2 排)/根	加劲肋 设置
J-1	T166×150	4. 8	4	无
J-2	T206×150	4. 8	6	无
J-3	T166×150	8. 8	4	有
J-4	T206×150	8. 8	6	有
J-5	T166×150	10. 9	4	有
J-6	T206×150	10. 9	6	有

1.2 试验加载

节点拟静力试验在宁波大学建筑工程与环境学院土木工程实验室进行。为研究钢-竹组合梁柱边节点在反复荷载作用下的抗震性能及组合柱节点核心区的各项力学性能,忽略地震作用时楼层位置发生的水平位移。试验时将组合柱两端固定,上端与

反力梁相连,下端则使用定制夹具固定。在组合梁端部,通过 MTS 电液伺服程控结构试验系统施加低周反复荷载模拟地震作用力。同时,为模拟组合柱真实工况,通过千斤顶在组合柱上端施加 30 kN 的竖向荷载,荷载大小通过反力梁与千斤顶之间的传感器进行控制。

1.3 试验结果分析

节点拟静力试验结果显示,由螺栓、T 型钢连接件及围合钢筒构成的节点整体工作性能优良,具有良好的刚度、强度、延性与耗能能力。通过对试验结果的分析可获得各个试件的节点弯矩 M 与转角 θ 的关系曲线,对每一条曲线进行拟合可以得到 $M-\theta$ 的多项式,如表 2 所示。 $M-\theta$ 关系曲线对梁柱节点性能研究有重要的意义,不仅能够反映节点连接半刚性的特性,而且能够体现节点的抗震特性。

表 2 $M-\theta$ 多项式
Tab. 2 $M-\theta$ Polynomial

试件编号	$M-\theta$ 关系曲线拟合多项式
J-1	$M=-4.084\theta^2+502.44\theta+0.2141$
J-2	$M=-8711.8\theta^3+1017.9\theta^2+165.75\theta+0.9619$
J-3	$M=23289\theta^3-31019\theta^2+1385.1\theta+1.057$
J-4	$M=205225\theta^3-265980\theta^2+1185.8\theta+0.6589$
J-5	$M=-2\times10^7\theta^4+2\times10^6\theta^3+93684\theta^2+1993.2\theta+0.48$
J-6	$M=-4.084\theta^2+502.44\theta+0.2141$

2 ANSYS 有限元模型

2.1 材料模型的定义

在有限元模型定义中,采用 MISO(双线性等向强化模型)模拟冷弯薄壁型钢,而竹胶板使用 BISO(多线性随动强化模型)进行模拟;型钢的材料弹性模量取 2.06×10^5 MPa,竹材为 5.76×10^3 MPa;型钢轴向拉伸试验的屈服强度和极限强度分别取 271.3×10^5 MPa 和 341.7×10^5 MPa,竹材则用多段折线简化表示试验的应力-应变关系,按照多线性随动强化模型输入相应关键点的应力、应变值;两者的泊松比均取为 0.3,并忽略温度对它们的影响。

2.2 单元类型的选择

本文在对钢-竹组合框架进行整体抗震性能模拟时,忽略两者间的界面滑移和框架的局部破坏。本文使用 Beam189^[22] 单元建立梁、柱模型;考虑到连接梁和柱的节点具有半刚性的特点,选用 Combin39 单元来建立节点模型,因为这种具有转动刚度的单元可以用于研究半刚性连接对组合框架力学性能的影响。

2.3 有限元模型尺寸的选择

本文模拟的钢-竹组合梁、柱截面尺寸均与节点拟静力试验相同,截面尺寸如图 1 所示。钢-竹组合框架的层高为 1.5 m,跨度为 3.0 m,如图 3 所示。

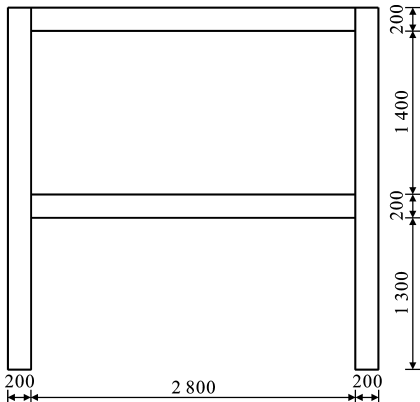


图 3 钢-竹组合框架尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Dimension of Bamboo-steel Composite Frame (Unit:mm)

2.4 有限元模型的建立

本文进行的是地震波作用下钢-竹组合框架的数值模拟。地震波作用下的模型需要在梁柱节点处创建 Mass21 单元,以便在动力分析时形成质量矩阵来模拟结构的惯性作用。本文一共建立了 6 个框架模型,编号为 KJ-1~KJ-6,分别与 6 个节点的 $M-\theta$ 多项式相对应,其中框架模型 KJ- i 采用的节点形式与表 1 中试件 J- i 对应。建立钢-竹组合框架模型的具体步骤如下:

- (1)选择所需要的单元类型,如 Beam189 单元,同时对各单元的关键选项进行设置。
- (2)定义所选单元的实常量,Combin39 单元的实常量为 6 个节点模型所对应的 $M-\theta$ 多项式。Mass21 单元的实常量为 2 000 kg;Beam189 单元的实常量不需要定义。
- (3)建立点线模型并划分网格,为便于研究,在节点处定义 2 个关键点,划分网格后分别在柱上和梁上产生 2 个节点,梁柱网格的划分仍然使用 Beam189 单元。
- (4)建立弹簧单元,网格划分后在 4 个节点处建立弹簧单元。
- (5)施加所需约束,在框架的底端施加固端约束,约束其底部全部节点的所有自由度;本文结构模型采用层间剪切型,故框架结构的各楼层在振动过程中始终保持水平,其变形为层间错动,各层的层间位移互不影响,具有相对独立性。对于以剪切变形为主的结构,通常可采用该类模型。本文耦合了每

层全部节点 x 方向和 z 方向的位移;由于本文模拟的结构属于平面框架结构,因此对全部节点均施加了 x 方向和 z 方向的转角约束以及 y 方向的位移约束。

(6)选择加载方案,本文采用地震波进行加载,动力分析选择的地震波为 El Centro 波,如图 4 所示。该波持续时间为 30 s,时间步长为 0.02 s,加速度峰值为 $3.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,采用命令流输入,地震波作用下的有限元模型如图 5 所示。

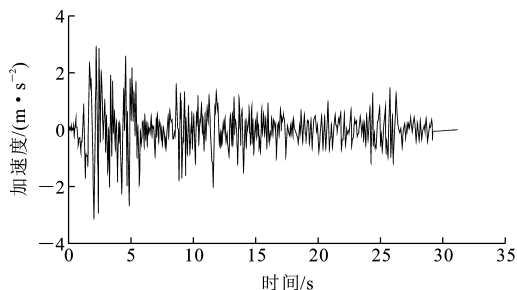


图 4 El Centro 波加速度曲线

Fig. 4 Acceleration Curve of El Centro Wave

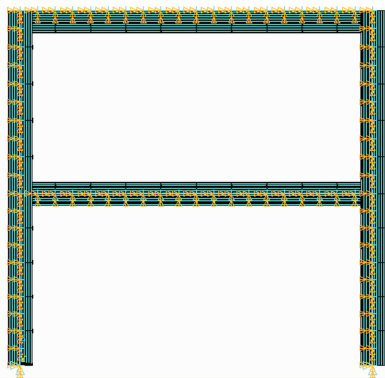


图 5 地震波作用下的有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model Under Earthquake Wave

3 有限元分析结果

3.1 最大水平位移和最大基底剪力

图 6 与图 7 分别为各钢-竹组合框架的最大水平位移和最大基底剪力。从图 6 可见, KJ-1 和 KJ-2 的各层最大位移值比较接近, KJ-3~KJ-6 的各层最大位移值比较接近,且 KJ-1 和 KJ-2 的各层最大位移值要大于 KJ-3~KJ-6 的各层最大位移值。由图 7 可见, KJ-3~KJ-6 的最大基底剪力大于 KJ-1 和 KJ-2,这是由于 KJ-1 和 KJ-2 在节点处未设置加劲肋且未使用高强螺栓,导致框架整体刚度相对于 KJ-3~KJ-6 较小,故侧移相对较大,承载力相对较小。图 6,7 的最大水平位移和最大基底剪力正、反 2 个方向的值比较对称,这表明钢-竹组合框架结构

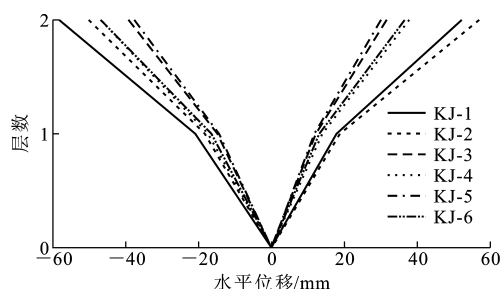


图 6 框架最大水平位移

Fig. 6 Maximum Horizontal Displacements of Frames

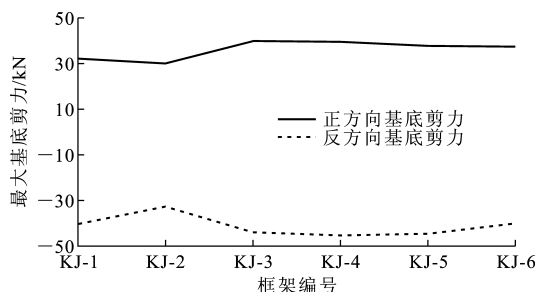


图 7 框架最大基底剪力

Fig. 7 Maximum Base Shear Forces of Frames

良好的恢复力特性和抗震性能。

3.2 水平位移和基底剪力时程曲线

图 8 和图 9 分别为钢-竹组合框架的水平位移时程曲线和基底剪力时程曲线,反映了各框架水平位移和基底剪力随时间的具体变化规律。

从图 8 可以看出, KJ-1 和 KJ-2 的位移变化趋势一致, KJ-3~KJ-6 的位移变化趋势也一致,此外,各框架顶层和底层的位移反应趋势基本相同,位移达到最大值的时刻基本相同,这正是地震作用最强烈的时刻^[23]。

从图 9 可以看出,各个框架的基底剪力时程曲线和其相应的位移时程曲线具有相同的变化趋势,同样是在地震作用最强烈的时刻基底剪力达到最大值。由于 KJ-1 和 KJ-2 与 KJ-3~KJ-6 的节点构造形式不同, KJ-1 和 KJ-2 的基底剪力具有相同的变化趋势, KJ-3~KJ-6 的基底剪力也具有相同的变化趋势。

3.3 滞回性能

图 10 为钢-竹组合框架在地震波作用下的基底剪力-顶层水平位移滞回曲线。从图 10 可以看出,各框架的滞回曲线大体上一致,但 KJ-1 和 KJ-2 的滞回曲线明显没有 KJ-3~KJ-6 的饱满,其最大值比 KJ-3~KJ-6 要小,这是由于 KJ-1 和 KJ-2 没有设置加劲肋且没有使用高强螺栓。从前面的分析还可知,滞回曲线大体上一致是由于各框架的侧移刚度

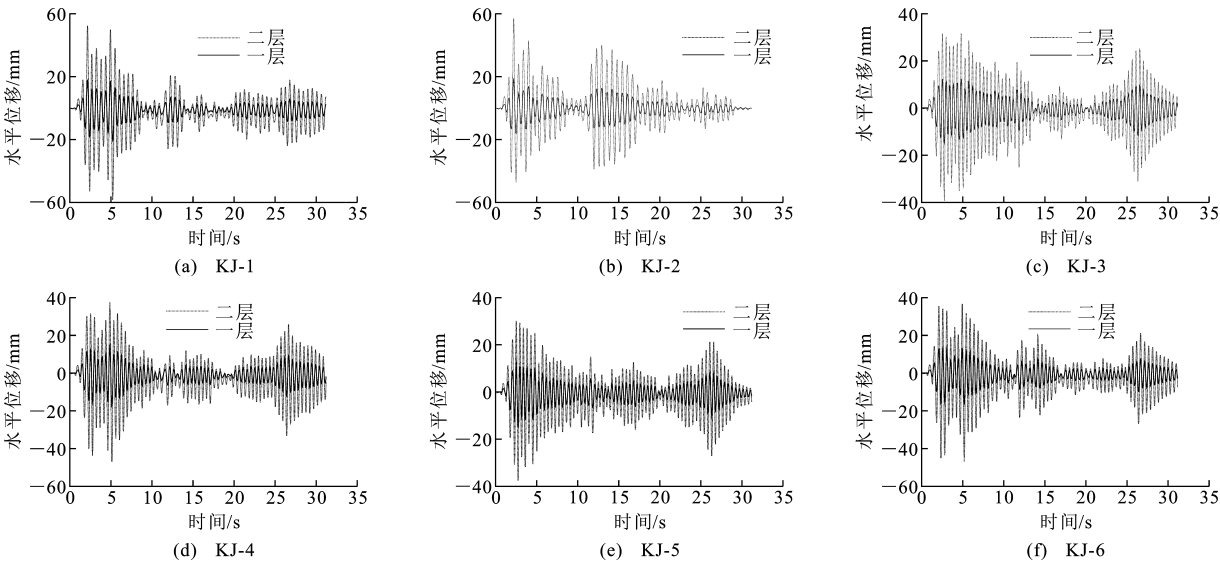


图 8 框架的水平位移时程曲线

Fig. 8 Time History Curves of Horizontal Displacements of Frames

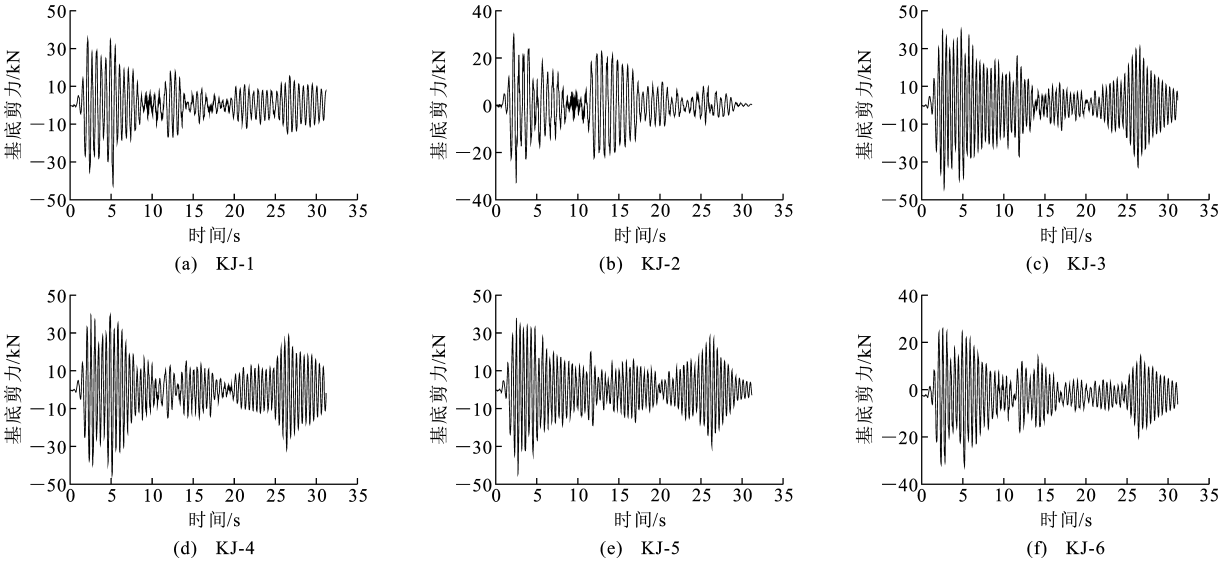


图 9 基底剪力时程曲线

Fig. 9 Time History Curves of Base Shear Forces of Frames

差别较小,这种差别在水平位移和基底剪力的变化中比较容易体现出来,而在由这 2 个变量构成的滞回曲线上体现的不是特别明显。从图 10 还可以看出,框架结构在初期保持弹性状态,当地震波达到峰值的时候,开始出现滞回环,并出现某些交叉,结构出现了非线性的变形。滞回环的形状都比较饱满,这反映了钢-竹组合框架结构良好的抗震性能。

4 结 语

(1)钢-竹组合框架结构的抗震性能优良,钢-竹组合框架节点的构造因素对其抗震性能有着重要的影响。

(2)节点连接时使用高强螺栓并设置加劲肋不仅可以保证框架结构在地震作用下具有良好的延性,而且具有较高的承载力,使其符合半刚性节点的要求。

(3)地震反应分析结果表明,钢-竹组合框架结构的水平位移较大,节点刚度偏低,应对节点构造进行改进,以提高节点刚度,控制框架侧移,并确保组合框架的承载能力。

参考文献:

References:

[1] 孙正军,程 强,江泽慧.竹质工程材料的制造方法与性能[J].复合材料学报,2008,24(1):80-83.

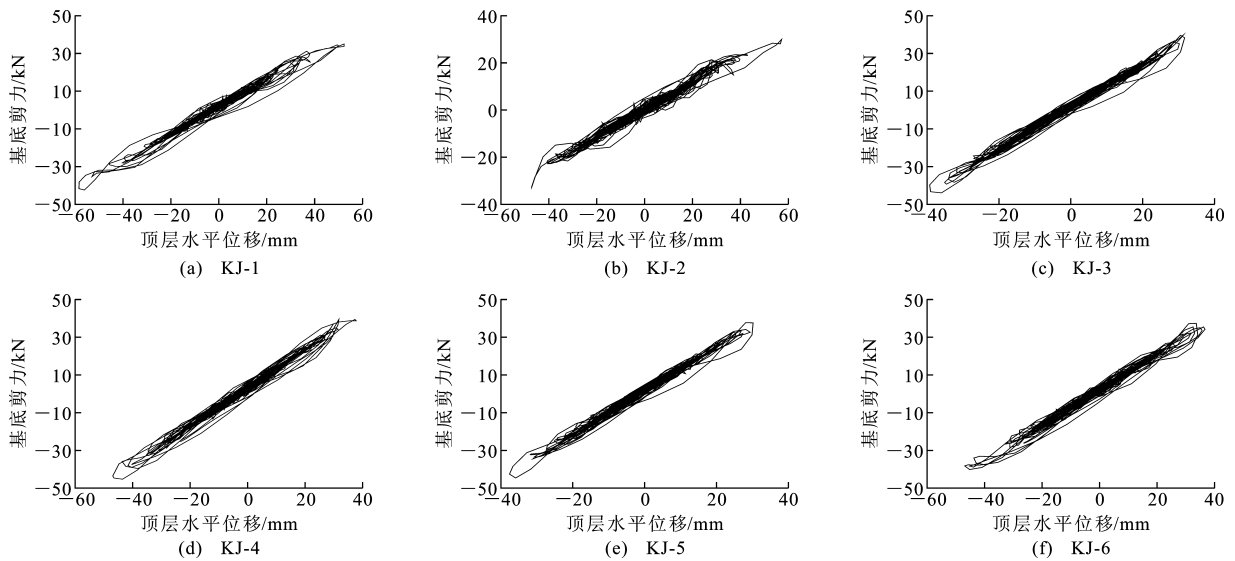


图10 框架基底剪力-顶层水平位移滞回曲线

Fig. 10 Base Shear Force-top Horizontal Displacement

Hysteresis Curves of Frames

- SUN Zheng-jun, CHENG Qiang, JIANG Ze-hui. Processing and Properties of Engineering Bamboo Products[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 24(1): 80-83.
- [2] 李 琴, 汪奎宏, 华锡奇, 等. 重组竹生产工艺的初步研究[J]. 人造板通讯, 2001(7): 6-9.
- LI Qin, WANG Kui-hong, HUA Xi-qi, et al. A Preliminary Study on the Production Technology of Recombinant Bamboo[J]. China Wood-based Panels, 2001(7): 6-9.
- [3] 张立娜, 韩彦芳. 冷弯薄壁型钢结构及其在房屋建筑中的应用[J]. 中国科技信息, 2010(1): 67-68.
- ZHANG Li-na, HAN Yan-fang. The Cold-formed Thin-walled Steel Structure and Application of It in House Building[J]. China Science and Technology Information, 2010(1): 67-68.
- [4] 李玉顺, 张家亮. 钢-竹组合构件及其结构体系研究进展[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 1-6.
- LI Yu-shun, ZHANG Jia-liang. State of the Art of Steel-bamboo Composite Components and Structural System[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 1-6.
- [5] 蒋天元, 李玉顺, 单 炜, 等. 薄壁C型钢-竹胶板组合箱型柱抗震性能试验[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(12): 82-85.
- JIANG Tian-yuan, LI Yu-shun, SHAN Wei, et al. Seismic Behavior of Thin-walled C Steel-bamboo Plywood Composite Column[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(12): 82-85.
- [6] 刘 涛, 李玉顺, 许科科, 等. 钢-竹组合箱形短柱力学性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 25-29.
- LIU Tao, LI Yu-shun, XU Ke-ke, et al. Research on Mechanical Performance of Steel-bamboo Composite Box Short Column[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 25-29.
- [7] 解其铁, 张王丽, 蒋天元, 等. 钢-竹组合柱轴心受压性能的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(增 2): 221-225.
- XIE Qi-tie, ZHANG Wang-li, JIANG Tian-yuan, et al. Experimental Study on Performance of Steel-bamboo Composite Column Under Axial Compression[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S2): 221-225.
- [8] 李玉顺, 沈煌莹, 单 炜, 等. 钢-竹组合工字梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7): 80-86.
- LI Yu-shun, SHEN Huang-ying, SHAN Wei, et al. Experimental Study on Shear Behavior of I-shaped Section Bamboo-steel Composite Beams[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 80-86.
- [9] LI Y S, SHAN W, SHEN H Y, et al. Bending Resistance of I-section Bamboo-steel Composite Beams Utilizing Adhesive Bonding[J]. Thin-walled Structures, 2015, 89: 17-24.
- [10] 翟佳磊, 李玉顺, 张家亮, 等. 冷弯薄壁型钢-重组竹组合工字形梁受弯性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 20-24.
- ZHAI Jia-lei, LI Yu-shun, ZHANG Jia-liang, et al. Study on Flexural Behavior of I-section Cold-formed Thin-walled Steel-reconstituted Bamboo Composite Beams[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 20-24.
- [11] 李玉顺, 单 炜, 黄祖波, 等. 压型钢板-竹胶板组合楼

- 板的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 96-102, 111.
- LI Yu-shun, SHAN Wei, HUANG Zu-bo, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of Profiled Steel Sheet-bamboo Plywood Composite Slabs [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 96-102, 111.
- [12] 单 炜, 李玉顺, 张秀华, 等. 冷弯薄壁 C 型钢-竹胶板组合楼板受弯性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 30-35.
- SHAN Wei, LI Yu-shun, ZHANG Xiu-hua, et al. Study on Flexural Behavior of Cold-formed Thin-walled C Steel-bamboo Plywood Composite Slabs[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 30-35.
- [13] 郭 军, 张家亮, 唐 静, 等. 钢-竹组合楼板受弯试验及变形分析[J]. 森林工程, 2013, 29(6): 145-148.
- GUO Jun, ZHANG Jia-liang, TANG Jing, et al. Test and Deformation Analysis of Steel-bamboo Composite Slabs[J]. Forest Engineering, 2013, 29(6): 145-148.
- [14] 李玉顺, 郭 军, 蒋天元, 等. 冷弯薄壁 C 型钢-竹胶板组合墙体抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(6): 969-976.
- LI Yu-shun, GUO Jun, JIANG Tian-yuan, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled C Steel-bamboo Plywood Composite Walls[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2013, 29(6): 969-976.
- [15] 李玉顺, 沈煌莹, 张王丽, 等. 压型钢板-竹胶板组合墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(增 1): 108-112.
- LI Yu-shun, SHEN Huang-ying, ZHANG Wang-li, et al. Experimental Study on Aseismic Behavior of Profiled Steel Sheet-bamboo Plywood Composite Walls[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S1): 108-112.
- [16] 张家亮, 李玉顺, 翟家磊, 等. 冷弯薄壁型钢-竹胶板组合墙体传热性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 13-19.
- ZHANG Jia-liang, LI Yu-shun, ZHAI Jia-lei, et al. Experimental Study on Heat Transfer Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel-bamboo Plywood Composite Walls[J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 13-19.
- [17] 李玉顺, 张家亮, 张秀华, 等. 短期荷载作用下钢-竹界面黏结应力和滑移分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 114-123.
- LI Yu-shun, ZHANG Jia-liang, ZHANG Xiu-hua, et al. Study on Bond Stress and Bond Slip of Bamboo-steel Interface Under Static Load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 114-123.
- [18] ZHANG Z W, LI Y S, LIU R. An Analytical Model of Stresses in Adhesive Bonded Interface Between Steel and Bamboo Plywood[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 52: 103-113.
- [19] 王新武, 孙 犁. 钢框架半刚性连接性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(11): 33-35.
- WANG Xin-wu, SUN Li. Research of Behaviour of Semi-rigid Connections in Steel Frame[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(11): 33-35.
- [20] 冯东海, 朱连军. 半刚性连接对钢框架受力性能的影响[J]. 科技视界, 2012(30): 321-323.
- FENG Dong-hai, ZHU Lian-jun. Effect of Semi-rigid Connection on Performance of Steel Frame[J]. Science & Technology Vision, 2012(30): 321-323.
- [21] 蒋天元. 钢-竹组合梁柱边节点抗震性能试验研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- JIANG Tian-yuan. Anti-seismic Performance Test on Steel-bamboo Composite Beam-column Exterior Joints [D]. Ningbo: Ningbo University, 2012.
- [22] 李庆福. 半刚性连接钢框架的变形研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
- LI Qing-fu. Study on Deformation Behavior of Steel Frames with Semi-rigid Connections [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2004.
- [23] 刘彩玲. 钢框架结构拟动力试验及结构动力相似关系研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- LIU Cai-ling. Steel Frame Pseudodynamic Testing and Research on Dynamic Similarity of the Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.