

双角钢组合截面构件在往复弯曲下的恢复力模型研究

冉红东¹, 朱 兵², 赵道程³, 弓欢学¹, 杨 靖⁴

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176

3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 4. 西安鹏程爆破工程有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为建立延性交错桁架钢框架结构双角钢组合截面弦杆在往复弯曲下的恢复力模型, 对6个双角钢组合截面足尺试件进行了低周往复加载试验, 研究了填板间距及加劲肋布置对构件滞回性能的影响。通过对试验数据的回归分析, 得到了试件的骨架曲线及刚度退化规律, 确定了双角钢组合截面弦杆的恢复力模型, 其骨架曲线为弹性阶段、强化阶段和承载力退化阶段组成的三折线模型。最后, 进行了计算骨架曲线、恢复力模型与试验骨架曲线、滞回曲线的对比分析, 结果吻合较好。计算结果表明, 提出的恢复力模型可以良好的表达延性交错桁架钢框架结构双角钢组合截面弦杆的承载力和刚度退化等特征, 可为结构的非线性动力分析提供参考。

关键词: 延性交错桁架钢框架结构; 双角钢组合截面; 往复弯曲; 骨架曲线; 恢复力模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0827-08

Study on restoring force model of double-angle built-up members under cyclic bending

RAN Hongdong¹, ZHU Bing², ZHAO Daocheng³, GONG Huanxue¹, YANG Jing⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Capital Engineering & Research Incorporation Ltd, Beijing 100176, China;

3. Central Research Institute of Building and Construction of China Metallurgical Group Corporation, Beijing 100088, China;

4. Xi'an Pengcheng Blasting Engineering Co. Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: To establish the restoring force model of double-angle built-up chords under cyclic bending in special staggered truss steel frame structure, six full-size double-angle built-up specimens were tested under cyclic bending, and the influence of the stitch spacing and stiffeners settings on the hysteretic behavior of the specimens were studied. Through analysis of test dates, the skeleton curve and rigidity degradation rule of the specimens were obtained and the restoring force models were determined as well. The three-liner skeleton curve of the restoring force was composed of the elastic stage, the reinforcement stage as well as bearing-degradation stage. Finally, the calculating skeleton curve and the restoring force model with the test skeleton curve and hysteretic curve were compared. The calculating model showed good agreement with the test curve. It showed that the calculating restoring force model can well express the bearing-capacity and rigidity degradation characteristics of the double-angle built-up chords in special staggered truss steel frame structure and can offer reference for the nonlinear dynamic analysis of the structure.

Key words: special staggered truss steel frame structure; double-angle built-up members; cyclic bending; skeleton curves; restoring force model

恢复力模型是根据大量从试验中获得的恢复力与变形的关系曲线经适当抽象和简化而得到的实用数学模型, 是结构构件的抗震性能在结构非线性动力反应分析中的具体体现。一个合格的恢复力模型可以良好的表达结构的强度、刚度退化, 延性及耗能能力等主要特征。在工程抗震领域,

几十年来国内外学者通过研究, 提出了不同的恢复力曲线模型, 已有的恢复力模型大体可以分为两类, 折线型模型(PHM)和光滑曲线型模型(SHM)^[1]。目前建立恢复力模型的方法主要有理论计算、试验拟合和系统识别等^[2], 而对于钢结构构件恢复力模型的建立以试验拟合方法居多。

收稿日期: 2016-12-16

修改稿日期: 2017-11-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208412); 陕西省教育厅重点实验室项目(15JS049)

第一作者: 冉红东(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构稳定及抗震研究。E-mail: ranhd@163.com

文献[3]指出,在往复水平荷载下,混合式交错桁架的破坏开始于桁架空腹节间两侧腹杆的压屈或拉断,结构的塑性铰发展顺序为:桁架腹杆→桁架弦杆→柱,这将导致结构在罕遇地震作用下呈现脆性破坏的特征,严重影响结构的抗震性能,大大限制了该结构体系在抗震地区的应用.为改善该结构体系的抗震性能,考虑混合式交错桁架的受力特点——即在水平地震作用下中间空腹节间弦杆主要承受弯矩和剪力^[4],而构件的剪切耗能及弯曲耗能能力均较大,文献[5]提出了延性交错桁架结构体系的概念:通过合理的设计方法,将结构中为布置走廊而设置的空腹节间弦杆设计为延性区段,在罕遇地震作用下延性区段首先形成塑性铰,结构其余部分保持弹性,利用延性区段屈服耗散地震能量,从而提高结构整体的抗震性能.由以上概念知,延性区段弦杆的延性和耗能能力是延性交错桁架钢框架结构抗震设计的关键.

交错桁架弦杆常用截面形式有H型钢,双角钢、双槽钢组合截面.2006年Subhash C. Goel等人进行了双槽钢组合截面构件在往复弯曲下的滞回性能试验研究^[6],2008年湖南大学的肖岩等人进行了H型钢柱的抗震性能试验研究^[7],1991年Farhang Aslani等人进行了双角钢组合截面支撑在往复拉压下的滞回性能研究^[8],2012年李正良等人进行了双角钢十字组合截面压杆承载力的研究^[9],目前对双角钢组合截面的研究主要集中在轴心受力构件方面,对于承受反复弯曲作用下的双角钢组合截面构件滞回性能的研究尚未见相关报道.本文对6个双角钢组合截面足尺试件进行低周往复加载试验,研究了构件的破坏形态、滞回性能,并基于试验结果建立了考虑刚度退化的双角钢组合截面构件在往复弯曲下的恢复力模型.

1 试验概况

1.1 试验方案

试验中的双角钢组合截面试件取自一12层延性交错桁架钢框架空腹延性区段,试件取样位置见图1,该结构按照我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)^[10]、《交错桁架钢框架结构技术规程》(CECS323:2012)^[11],并参考美国钢结构设计规范AISC-LRFD99^[12]设计,采用结构设计软件

MIDAS Gen8.36设计完成.本次试验采用拟静力试验,通过电液伺服作动器为试件提供水平循环荷载,模拟结构在地震作用下的受力情况.试验中采用位移计观测试件位移,沿作动器方向布置于试件顶端及地梁端部;采用应变片观测塑性铰区截面应力及应变变化情况,布置于节点板或加劲肋上方约150 mm处.试验加载装置及观测点布置见图2.

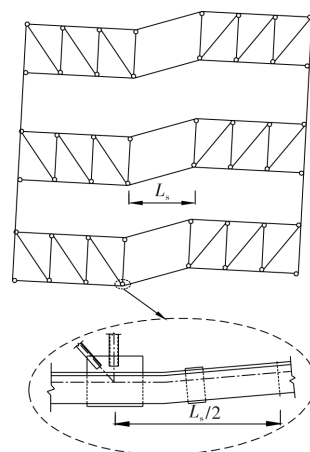
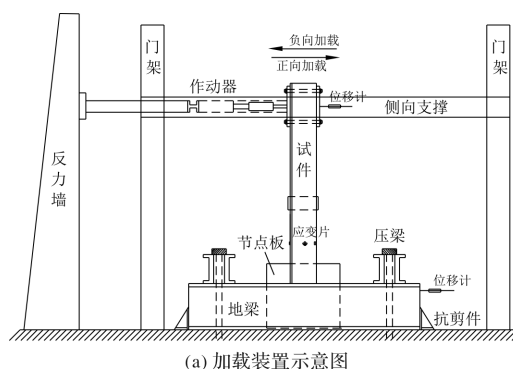
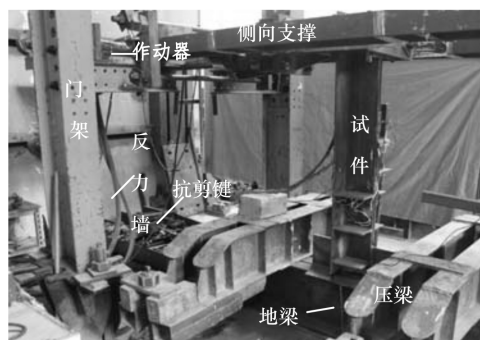


图1 试件取样位置

Fig. 1 Sampling place of specimens



(a) 加载装置示意图



(b) 加载装置照片

图2 试验加载装置及观测点布置

Fig. 2 Test setup and measurement points on specimens

1.2 试件设计

试验共设计了6个长肢相并的双角钢组合截面足尺试件,截面尺寸为2L200×125×14,材质为

Q235B, 角钢和节点板采用角焊缝连接(焊条采用 E43 系列). 为研究往复弯曲作用下填板间距对双肢共同工作性能的影响, 设计了试件 SJ1、SJ2、SJ3, 填板间距分别为 $40i$ 、 $20i$ 、 $10i$, 其中 i 为一个角钢对平行填板自身形心轴的回转半径; 为研究加劲肋设置间距对板件局部屈曲的影响, 在试件 SJ3 的基础上, 试件 SJ4、SJ5、SJ6 在节点板

与第一块填板之间分别设置间距为 200 mm、100 mm、50 mm 的加劲肋. 试件加工图见图 3.

1.3 材性试验

试验所用钢材均为 Q235B, 材性试验为单向拉伸试验, 主要测定了钢材屈服强度、抗拉强度、弹性模量及伸长率等力学性能指标, 试验结果见表 1.

表 1 材性试验结果

Table. 1 Result of material test

钢材型号	取样位置	板厚/mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率 δ /%
L200×125×14	角钢长肢	13.20	290	445	2.02×10^5	39.96
	角钢短肢	13.06	285	430	2.10×10^5	40.64

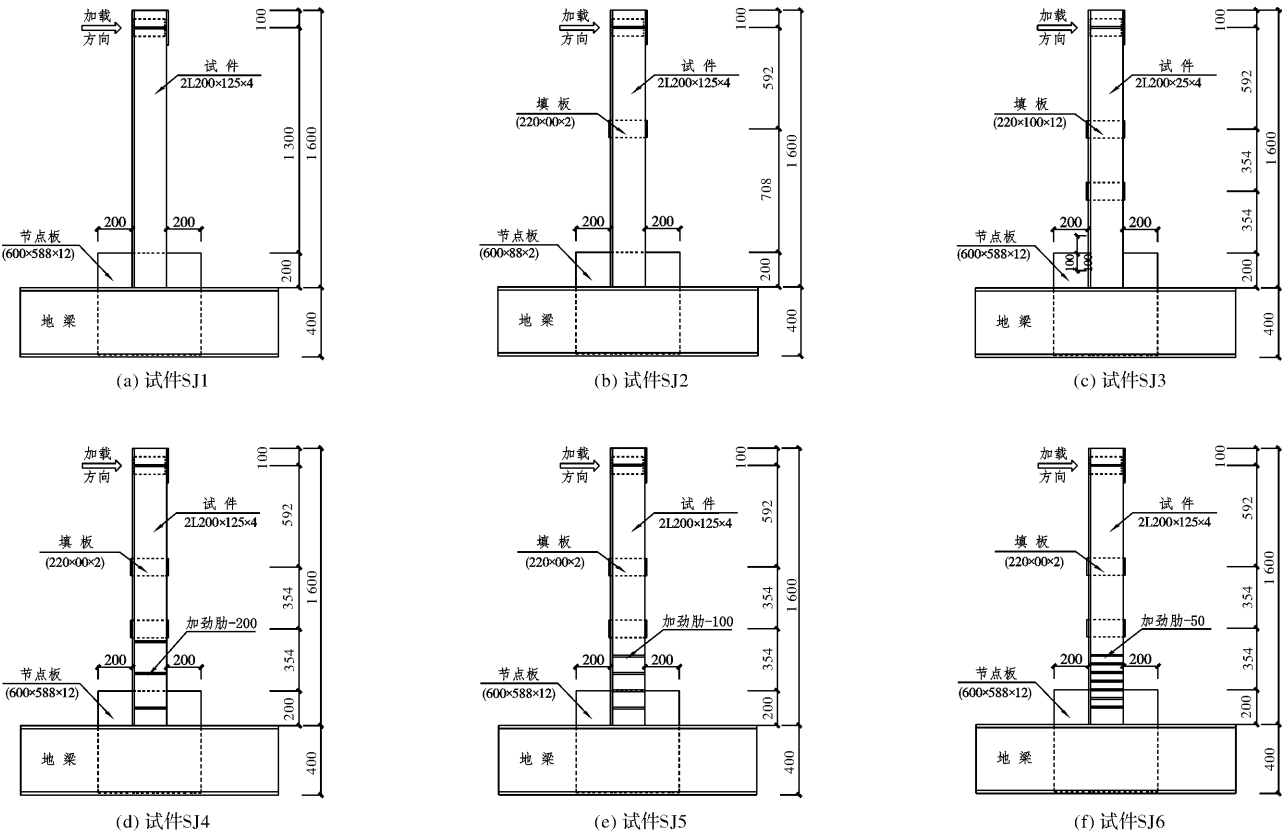


图 3 试件加工详图(单位: mm)

Fig. 3 Specimens details/mm

1.4 加载制度

试验加载制度按照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)^[13]确定, 采用荷载、位移双控加载制度. 正式加载前进行预加载, 预载值为 $10\%P_y$, 以检查试件和装置能够正常工作; 正式加载时, 屈服前采用荷载控制, 分两级加载分别为 $1/3P_y$ 和 $2/3P_y$, 屈服后采用位移控制, 每级位移以屈服位移为倍数 (Δ_y 、 $1.5\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ ……), 循环三周, 直至试件破坏. 本次试验加载制度如图 4 所示.

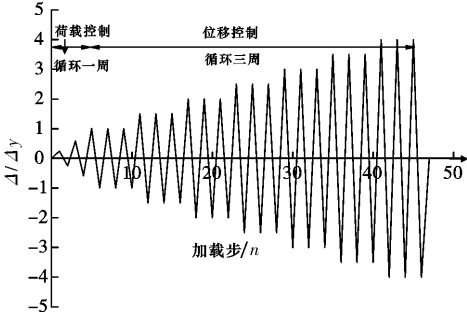


图 4 试验加载制度

Fig. 4 Loading history

2 试件结果及分析

2.1 试件的主要破坏形态

加载初期为荷载控制阶段,各试件均处于弹性工作状态,荷载和位移呈线性关系变化.加载达到试件屈服位移 Δ_y 后,随着位移幅值的增加试件开始呈现不同的破坏形态.其中,试件SJ1在加载位移为12mm时开始屈服,加载位移为 $+2.5\Delta_y$ (“+”表示正向,“-”表示负向,下同)时,节点板处角钢双肢开始闭合(见图5(a)),加载位移为 $+3.5\Delta_y$ 时腹板开始出现轻微局部屈曲并伴随不可恢复残余变形,加载位移为 $+4\Delta_y$ 时,腹板出现严重鼓屈(见图5(b)),加载位移为 $-4.5\Delta_y$ 时,节点板处角钢腹板边缘由于焊接缺陷开始出现撕裂,此后裂缝不断开展(见图5(c)),当加载位移

为 $-5.5\Delta_y$ 时裂缝扩展至腹板中部,试件完全破坏.试件SJ2、SJ3破坏形态与试件SJ1基本一致(见图5(d)),但试件SJ3并未出现双肢闭合,说明减小填板间距可使双角钢组合截面双肢更好共同工作.试件SJ4、SJ5和SJ6在节点板与第一块填板间设置不同间距的加劲肋,相对于试件SJ3,其塑性区域腹板局部屈曲变形得到有效控制,且随加劲肋设置间距的减小效果更加明显,说明减小加劲肋的设置间距可有效防止板件的局部屈曲,但增设加劲肋的同时也使原本变形能力较差的焊接节点板处腹板边缘开裂提早出现,其中试件SJ4的开裂位移仅为 $-3.5\Delta_y$ (见图5(e)),导致试件的负向承载力突降,试件SJ5、SJ6的开裂位移相对有所推迟,但仍先于试件SJ3(见图5(f)).

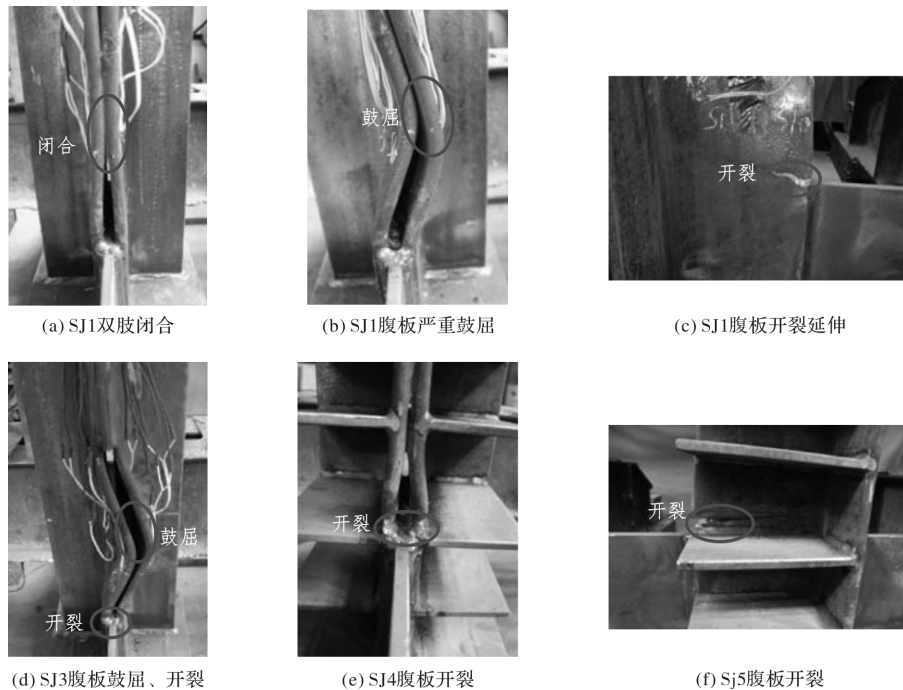


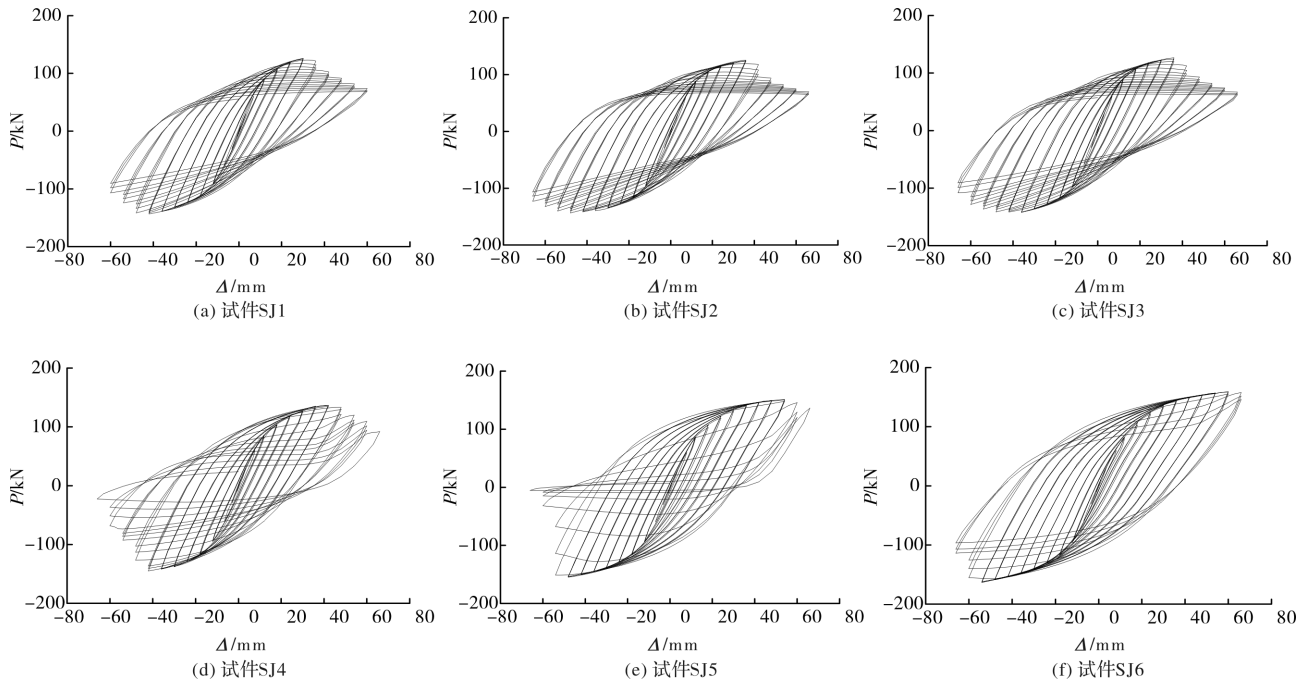
图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of specimens

2.2 滞回性能

图6给出了各试件对应的 $P-\Delta$ 滞回曲线,从中可以看出:(1)加载初期,各试件均处于弹性工作状态,荷载和位移呈线性关系变化,残余变形很小.(2)加载达到屈服位移后,随着位移幅值的增加,各试件加载刚度开始逐渐减小,且随循环加载次数的增加有所加剧,而卸载刚度则变化较为平缓.(3)在达到极限承载力前各试件的滞回曲线均呈较丰满的“梭形”,而达到极限承载力后试

件滞回曲线出现不同程度“捏缩”.(4)试件SJ1、SJ2和SJ3滞回曲线整体趋势基本一致,加载后期正向承载力突降,主要是由于塑性区角钢腹板发生严重局部屈曲所致.(5)与试件SJ3相比,试件SJ4、SJ5和SJ6的滞回曲线则更为饱满,且随加劲肋设置间距的减小表现的更加突出,说明减小加劲肋设置间距能有效缓解腹板的局部屈曲,但在加载后期角钢腹板的提早开裂使得其滞回曲线的“捏缩”现象较为突出.

图6 各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线Fig. 6 $P-\Delta$ hysteretic loops of specimens=

3 恢复力模型的建立

3.1 骨架曲线模型

将试验得到的骨架曲线特征点 P 、 Δ 进行无量纲化处理, 得到 $P/P_u-\Delta/\Delta_u$ 曲线, 如图7所示. 其中, $\pm P_u$ 分别表示正负向杆端极限荷载, $\pm \Delta_u$ 分别为正负向杆端极限荷载所对应的极限位移. 根据各试件无量纲化后骨架曲线走势, 将恢复力骨架曲线简化为以屈服点、极限荷载点和破坏点为控制点的三折线模型, 如图8所示. 其中, A、A'分别为正负向屈服点, B、B'分别为正负向极限荷载点, C、C'分别为正负向破坏点. 以无量纲点 C'、B'、A'、O、A、B、C 为控制点, 对相邻控制点间的无量纲点进行线性回归分析, 可得到各阶段骨架曲线的回归方程, 见下式:

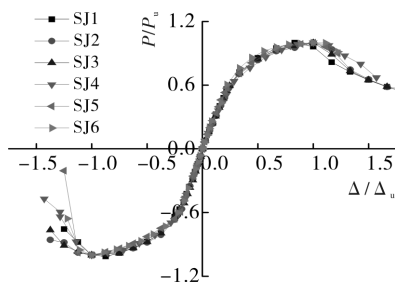


图7 无量纲化处理的骨架曲线

Fig. 7 The dimensionless skeleton curve

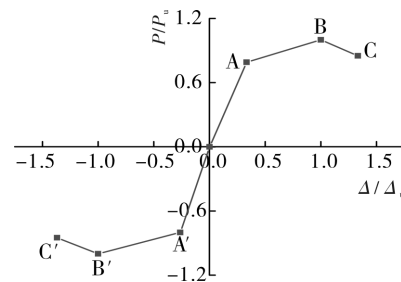


图8 骨架曲线模型

Fig. 8 The skeleton curve model

$$\text{OA 阶段: } P/P_u = 2.394\Delta/\Delta_u \quad (1)$$

$$\text{AB 阶段: } P/P_u = 0.6866 + 0.3134\Delta/\Delta_u \quad (2)$$

$$\text{BC 阶段: } P/P_u = 1.45 - 0.45\Delta/\Delta_u \quad (3)$$

$$\text{OA' 阶段: } P/P_u = 3.04\Delta/\Delta_u \quad (4)$$

$$\text{A'B' 阶段: } P/P_u = -0.7286 + 0.2714\Delta/\Delta_u \quad (5)$$

$$\text{B'C' 阶段: } P/P_u = -1.4054 - 0.4054\Delta/\Delta_u \quad (6)$$

3.2 刚度退化规律

为了解延性交错桁架钢框架结构双角钢组合截面弦杆在往复弯曲作用下的刚度退化规律, 分别对各位移幅值情况下的试件加、卸载刚度进行求解, 并通过数据拟合的方法找到试件的刚度退化规律. 以下分别研究试件在加、卸载方向的刚度退化规律.

3.2.1 加载刚度退化规律

(1) 正向加载刚度 K_1 退化规律 加载刚度的确定须考虑每次荷载从零点开始时残余变形的影响, 因此将试件加载终点 Δ 与加载开始零点之间的点进行曲线拟合, 即可得到加载到点 Δ 的加载刚度 K_1 , 对 K_1 进行无量纲化处理, 并以 Δ/Δ_u 、 K_1/K_0^+ 为坐标对无量纲散点(去除部分腹板开裂后散点)进行回归分析, 得到正向加载刚度 K_1 退化曲线如图 9(a)所示, K_0^+ 为正向初始刚度. 其回归方程可以表示为

$$\frac{K_1}{K_0^+} = 1.392 \cdot e^{\frac{1.727 \cdot \Delta}{\Delta_u}} - 0.013 \quad (7)$$

(2) 负向加载刚度 K_2 退化规律 将负向加载终点 Δ 与加载开始零点之间的点进行曲线拟合, 即可得到加载到点 Δ 的加载刚度 K_2 , 采用上述同样方法得到负向加载刚度 K_2 退化曲线如图 9(b)所示, K_0^- 为负向初始刚度. 其回归方程可以表示为:

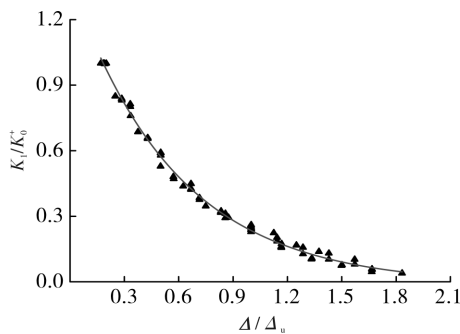
$$\frac{K_2}{K_0^-} = 1.2918 \cdot e^{\frac{2.403 \Delta}{\Delta_u}} + 0.0897 \quad (8)$$

3.2.2 卸载刚度退化规律

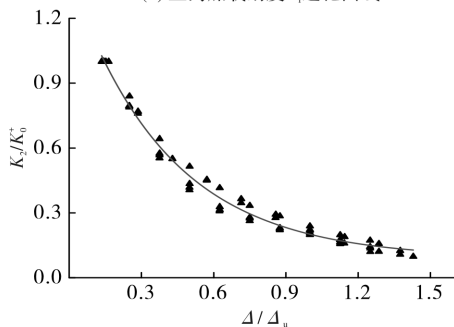
仍采用上述方法进行曲线拟合可得到正(负)向卸载刚度 K_3 (K_4) 退化曲线如图 9(c-d)所示. 其回归方程可以表示为:

$$\frac{K_3}{K_0^+} = -0.1861 \cdot \frac{\Delta}{\Delta_u} + 1.07 \quad (9)$$

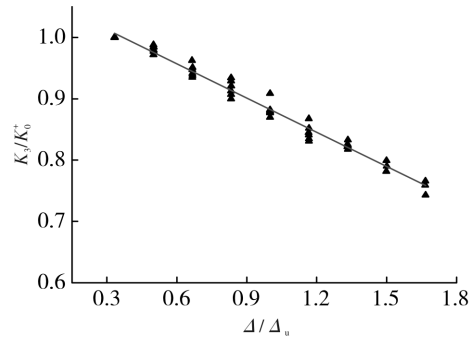
$$\frac{K_4}{K_0^-} = -0.1545 \cdot \frac{\Delta}{\Delta_u} + 1.04 \quad (10)$$



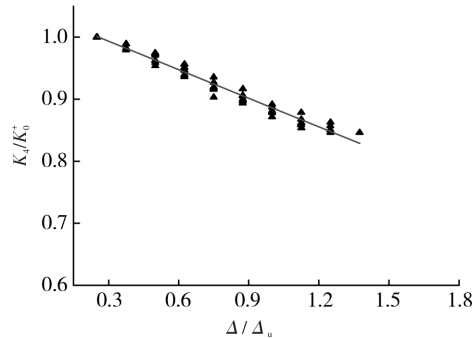
(a) 正向加载刚度 K_1 退化曲线



(b) 负向加载刚度 K_2 退化曲线



(c) 正向卸载刚度 K_3 退化曲线



(d) 负向卸载刚度 K_4 退化曲线

图 9 刚度退化曲线

Fig. 9 The stiffness degradation curves

3.3 恢复力模型的建立

根据前面分析获得的骨架曲线模型、刚度退化模型, 结合试验滞回曲线, 可以得到往复弯曲作用下的双角钢组合截面弦杆恢复力模型如图 10 所示.

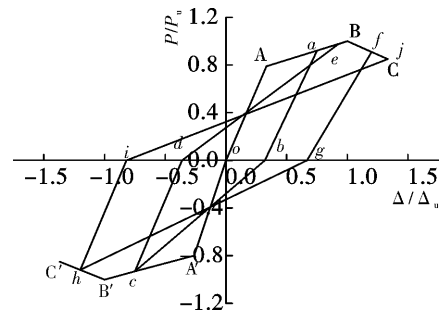


图 10 恢复力模型

Fig. 10 The restoring force model

恢复力模型的滞回环规则为: 弹性阶段 OA, 在此阶段任意点卸载, 可沿路线 AO 返回至原点. 当加载超过屈服点 A 时, 曲线转入强化阶段, 在此阶段任意点卸载, 将沿路线 ab 进行, 正向卸载刚度 K_3 可由式(9)得到, 卸载至零点后继续负向加载, 将沿路线 bc 进行, 负向加载刚度 K_2 可由式(8)得到, 在点 c 卸载时, 将沿路线 cd 进行, 负向卸载刚度 K_4 可由式(10)得到, 卸载至零点后继续正向加载, 将沿路线 de 进行, 正向加载刚度 K_1 可由式(7)得到. 当加载超过极限荷载点 B 时, 曲线转入

破坏阶段,按上述规律,在此阶段任意点正向卸载-负向加载-负向卸载-正向加载,将沿路线 $f-g-h-i-j$ 进行。以此类推,按此规律进行往复加载。

3.4 恢复力模型的验证

图 11 给出了计算骨架曲线模型与试验骨架曲线的对比,图 12 给出了计算恢复力模型与试验滞回曲线的对比。从中可以看出:(1)计算骨架曲线模型与试验骨架曲线在弹性阶段基本重合;在弹塑性阶段由于计算骨架曲线模型为简化三折线模型,存在人为拐点,与试验骨架曲线有少许偏差;在承载力退化阶段试件 SJ1、SJ2 和 SJ3 由于腹板严重局部屈曲,导致计算模型的正向水平荷载高

于试验结果,而试件 SJ4、SJ5 和 SJ6 增设加劲肋后则吻合较好,但在负向由于腹板开裂的提早出现致使其承载力突降。(2)计算恢复力模型与试验滞回曲线在达到极限承载力前均吻合较好,而达到极限承载力后试件 SJ1、SJ2 和 SJ3 由于腹板严重鼓屈导致其正向承载力及刚度退化速率与计算值存在一定偏差,而试件 SJ4、SJ5 和 SJ6 由于腹板的提早开裂,导致其反向承载力及刚度退化速率与计算值存在一定偏差。总体上,计算恢复力模型可以良好的表达延性钢交错桁架双角钢组合截面弦杆的承载力及刚度退化等特征,可以用于结构的弹塑性分析计算。

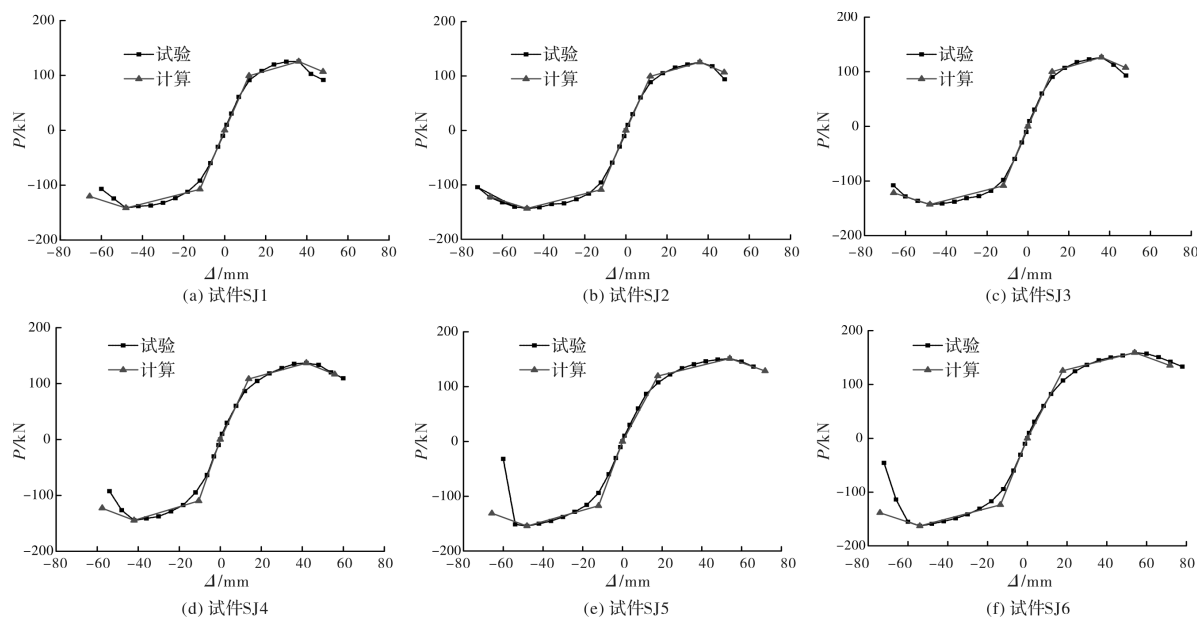


图 11 计算骨架曲线模型与试验骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison between calculate skeleton curve model and test skeleton curve

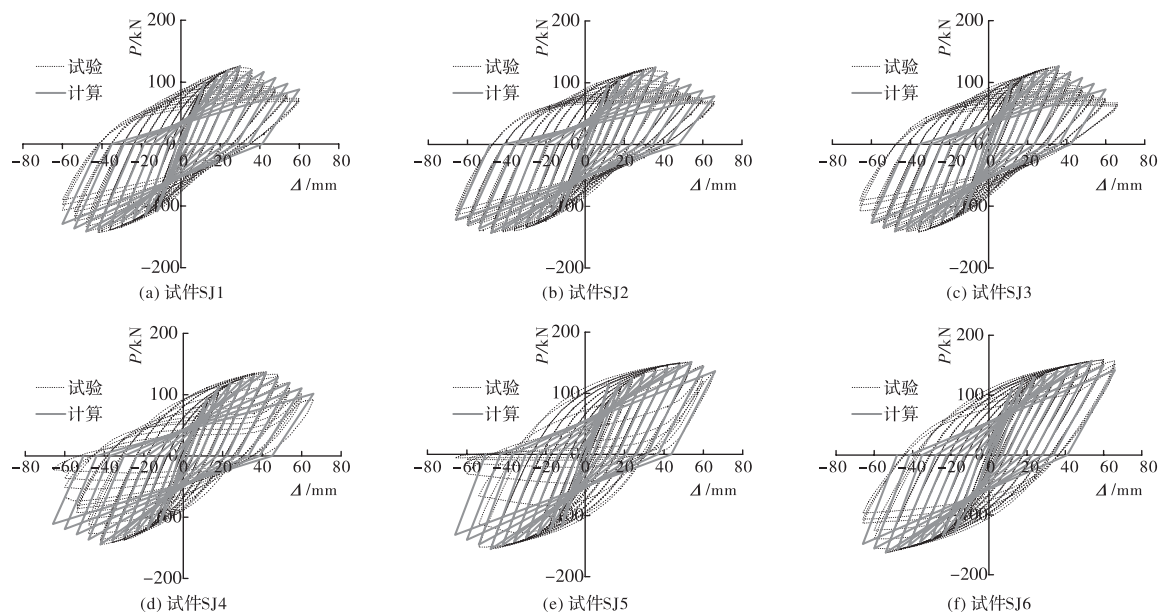


图 12 计算恢复力模型与试验滞回曲线对比

Fig. 12 Comparison between calculate restoring force model and test hysteretic curve

4 结论

(1)对6个双角钢组合截面足尺试件进行低周往复加载试验研究,在获得骨架曲线、刚度退化规律的基础上,结合试验滞回曲线,建立了延性交错桁架钢框架结构双角钢组合截面弦杆的恢复力模型。

(2)建立了以屈服点、极限荷载点和破坏点为控制点的简化三折线骨架曲线模型,考虑了填板间距及加劲肋布置等参数的影响。并与试验骨架曲线进行了对比,两者吻合较好,同时该模型计算方法简单,便于工程应用。

(3)本文建立的双角钢组合截面构件的恢复力模型同时考虑了加卸载方向的刚度退化,与试验滞回曲线吻合较好,能良好的表达延性交错桁架钢框架结构双角钢组合截面弦杆的承载力及刚度退化等特征,可为结构的非线性动力分析提供参考。

参考文献 References

- [1] 姚谦峰. 地震工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001:198.
YAO Qianfeng. Earthquake engineering[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001:198.
- [2] 李国强, 李杰. 地震工程导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
LI Guoqiang, LI Jie. Introduction to earthquake engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.
- [3] 冉红东. 钢交错桁架结构体系在循环荷载作用下的破坏机理及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008:48-65.
RAN Hongdong. Collapse mechanism and design criteria of steel staggered truss framing structure system under cyclic loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Arch. & Tech., 2008:48-65.
- [4] 周绪红, 周期石. 水平荷载作用下交错桁架结构的内力和侧移计算[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4):66-71.
ZHOU Xuhong, ZHOU Qishi. Calculation of internal forces and drift of staggered truss structures under lateral loads[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4):66-71.
- [5] 陈向荣, 宗智芳, 冉红东. 基于能量平衡的延性交错桁架塑性设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4):236-243.
CHEN Xiangrong, ZONG Zhifang, RAN Hongdong. Plastic design of special staggered truss based on energy balance [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(4):236-243.
- [6] GUSTAVO J. PARRA-MONTESINOS Subhash C Goel, KWANG Yeon Kim. Behavior of steel double-channel built up chords of special truss moment frames under reversed cyclic bending [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(9):1343-1351.
- [7] 肖岩, 周涛, 李华. 局部约束轧制 H 型钢柱的抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2):118-124.
XIAO Yan, ZHOU Tao, LI Hua. Experimental study of confined hot-rolled H-shape steel column under cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2):118-124.
- [8] FARHANG Aslani, SUBHASH C. Goel. Stitch spacing and local buckling in seismic resistant double angle braces. Journal of Structural Engineering, 1991, 8(117):2442-2463.
- [9] 赵仕兴, 李正良. 双角钢十字组合截面压杆承载力研究[J]. 钢结构, 2012, 1(27):5-10.
ZHAO Shixing, LI Zhengliang. Study on ultimate strength of eccentric compression members with combined angle iron cross-section[J]. Steel Construction, 2012, 1(27):5-10.
- [10] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017-2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Construction of People's Republic of China: Code for design of steel structures; GB 50017-2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [11] 中国工程建设标准化协会. 交错桁架钢框架结构技术规程: CECS 323-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for staggered truss steel framing system: ECS 323-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] Specification for structure steel buildings-load and resistance factor design: AISC-1999 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc, 1999.
- [13] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101-96 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
Ministry of Construction of People's Republic of China: Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996.

(编辑 吴海西)