

带 RC 楼板双槽钢组合截面构件恢复力模型

冉红东, 蔡洲鹏, 冯俊翔, 卢嘉玮

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为建立带钢筋混凝土(RC)楼板双槽钢组合截面构件的恢复力模型, 对 4 个带 RC 楼板足尺试件进行了常轴力和往复弯曲共同作用下的拟静力试验, 研究了填板间距、有无加劲肋和腹板高厚比等参数对试件抗震性能的影响, 并根据试件滞回特性提出了构件恢复力模型。结果表明: 各试件的滞回曲线较为饱满, 表明其具有良好的耗能能力和延性; 减小填板间距, 对构件的承载力和刚度影响较小, 但减小腹板高厚比, 可显著提高构件的承载力和刚度; 提出的构件恢复力计算模型与试件的试验曲线吻合较好, 可用于结构的弹塑性分析。

关键词: RC 楼板; 双槽钢组合截面构件; 拟静力试验; 骨架曲线; 恢复力模型

中图分类号: TU398⁺.9; TU317⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0015-09

Restoring force model of steel double-channel build-up members with RC slabs

RAN Hongdong, CAI Zhoupeng, FENG Junxiang, LU Jiawei

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

Abstract: In order to set up the restoring model of steel double-channel build-up members with the reinforced concrete (RC) slabs, the pseudo-static tests of four specimens with RC slabs under the constant axial force and reversed cyclic bending were carried out. The influence of stitch spacing, stiffener in plastic hinge region and web depth-thickness ratio on the seismic behavior of specimens were investigated. According to the hysteretic characteristics of specimens, the restoring force model of members was put forward. Results show that all hysteresis curves are stable, with excellent energy dissipation capacity and ductility. With the decrease of stitch spacing, the strength and stiffness of specimens change insignificantly. But the strength and stiffness of the specimens can be significantly improved by reducing the web depth-thickness ratio. The calculation curve of force restoring model is in good agreement with the experimental curve. Therefore, it could be used for the elastic-plastic analysis of the special staggered truss frame structure.

Key words: reinforced concrete slab; steel double-channel built-up member; quasi-static test; skeleton curve; restoring force model

交错桁架钢框架结构主要由柱、桁架和楼板组成, 具有施工速度快、实用和经济效益好等特点, 符合我国绿色建筑及装配式建筑发展趋势^[1-5]。研究^[6]表明, 混合式交错桁架结构耗能能力和延性性能均较差, 且结构破坏呈脆性, 不适合在高烈度地区应用。为改善该结构的抗震性能, 有学者将桁架跨中空腹节间设计为延性区段, 提出了延性交错桁架钢框架结构^[7-8]的概念。在罕遇地震作用下, 因该结构延性区段进入塑性耗能, 而其余部分保持弹性, 故延性区段弦杆的抗震性能成为延性交错桁架钢框架结构抗震设计的关键。

近年来, 国内外许多学者对带楼板的节点、

框架和构件等进行了一系列研究。卢林枫等^[9]对带混凝土楼板的钢框架梁柱弱轴连接节点的滞回性能进行了试验研究。研究表明, 由于楼板的影响, 梁下翼缘出现了不同程度的开裂。徐晋东等^[10]对两个 1:2 缩尺的带楼板钢管混凝土柱钢梁节点试件进行了往复加载试验, 结果表明, 楼板的存在使节点表现出了良好的耗能能力。Li 等^[11]通过对 5 个带楼板节点和 1 个无楼板节点进行循环荷载试验, 主要研究了楼板对梁截面削弱型 (RBS) 节点抗震性能的影响。结果表明, 组合节点具有良好的抗震性能, 并建议在设计 RBS 型节点时应考虑楼板的影响。王勤等^[12]为研究楼板对

钢筋混凝土柱和钢梁组成的框架(RCS框架)抗震性能的影响,完成了两幅1:3缩尺RCS框架的拟静力试验和有限元分析。结果表明,楼板的存在虽然提高了框架的承载力,但降低了其延性。周旺保等^[13]通过对4根钢-混凝土组合箱梁试件进行循环荷载试验研究,提出了考虑界面滑移的钢-混凝土组合箱梁正向、负向截面弹性刚度及截面屈服弯矩计算方法,并建立了组合箱梁的恢复力模型。以上研究多是考虑楼板对节点抗震性能的影响,鲜有学者考虑楼板对双槽钢组合截面构件的影响,并建立其恢复力模型。

根据大量从试验中获得的恢复力与变形的关系曲线,再经适当抽象和简化可得到恢复力模型。它能很好地反映结构及构件的承载力、刚度和耗能能力等抗震性能,建立合理的恢复力模型是进行结构及构件非线性地震反应分析的基础^[14-15]。已有学者^[16-17]对延性区段双槽钢组合H型截面构件和双角钢组合截面构件进行了试验研究,并根据构件的滞回特性建立了相应的恢复力模型。但在实际工程中,延性区段弦杆与混凝土楼板协同工作。因此,本文对4个带RC楼板的双槽钢组合截面试件进行了拟静力试验,得到试件的破坏形态和滞回性能,并基于试验结果建立考虑刚度退化的带RC楼板双槽钢组合截面构件在常轴力和往复弯曲下的恢复力模型。

1 试验概述

1.1 试件设计

带RC楼板双槽钢组合截面试件取自一个延性交错桁架钢框架结构延性区段,试件取样位置如图1所示。为了研究填板间距、有无加劲肋和腹板高厚比对试件抗震性能的影响,共设计了4个足尺带RC楼板的双槽钢组合截面试件,试件几何尺寸和剖面图如图2所示。

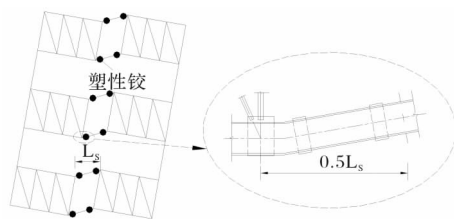
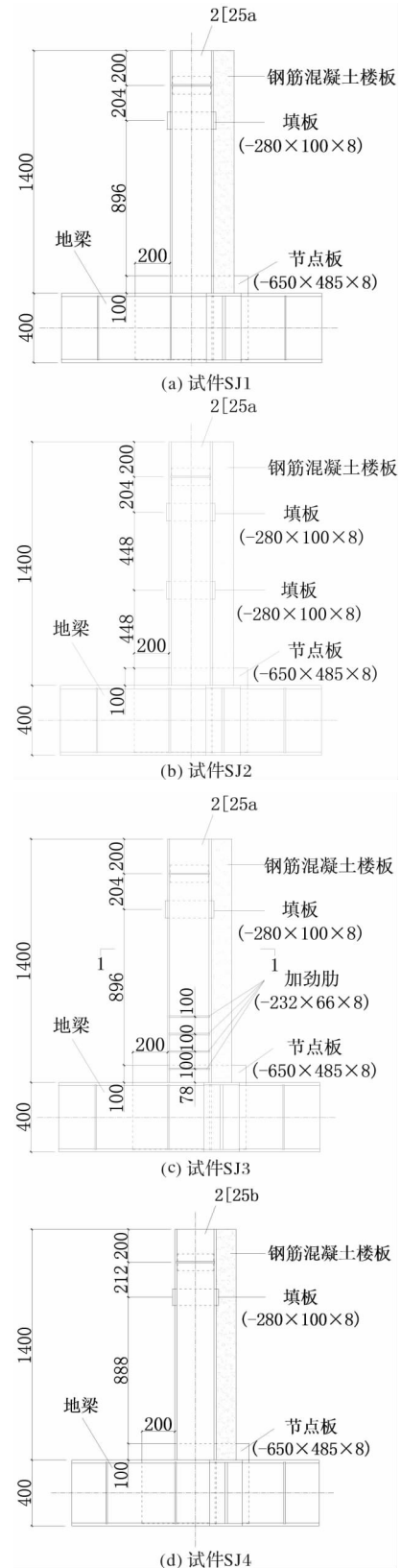


图1 试件取样位置

Fig. 1 Sampling place of specimens

槽钢采用Q235B级的[25a和[25b热轧槽钢。RC楼板的厚度为120 mm,其宽度根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017)^[18]中关于钢筋混凝土楼板

有效宽度的计算取为1 000 mm,混凝土强度等级为C30。板内钢筋均采用HPB300热轧钢筋,横向分布钢筋为 $\Phi 8@150$,纵向受拉钢筋为 $\Phi 10@125$,混凝土保护层厚度为20 mm。RC楼板与槽钢之间布置 $\Phi 16 \times 100$ 栓钉作为抗剪连接件,以满足规范规定的完全剪力连接。



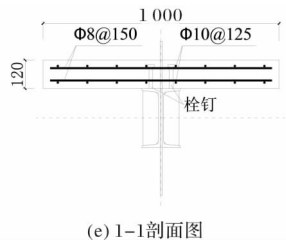


图 2 试件几何尺寸

Fig. 2 Dimensions and details of specimens

1.2 材性试验

试验所用的钢材、钢筋和混凝土都要进行材性试验, 其主要材料性能见表 1、表 2 和表 3, 表中数据均为材料性能的平均值。

表 1 钢材材料性能

Tab. 1 Material properties of steel

取样位置	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率 /%	颈缩率 /%	强屈比 f_u/f_y
[25a 翼缘	271.5	419.5	2.08×10^5	38.1	41.6	1.55
[25a 腹板	283.9	434.1	1.97×10^5	37.8	42.0	1.53
[25b 翼缘	253.9	406.3	2.08×10^5	35.1	38.5	1.60
[25b 腹板	281.4	420.4	2.02×10^5	37.3	38.2	1.50

表 2 钢筋材料性能

Tab. 2 Material properties of reinforcement

试件	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率 /%
Φ10	305.3	437.2	2.01×10^5	16.5
Φ8	332.1	465.0	2.06×10^5	20.2

表 3 混凝土材料性能

Tab. 3 Material properties of concrete

试件编号	试件尺寸 /mm	立方体抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa
C1	100×100×100	35.70	—
C2	100×100×300	—	29 799

1.3 加载及量测方案

试验时, 首先由竖向千斤顶施加轴压比为 0.2 的常轴力。然后利用作动器在距构件自由端 200 mm 处施加水平荷载, 试验装置如图 3 所示。水平荷载按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101-2015)^[19] 规定的荷载-位移控制加载制度施加, 如图 4 所示。试件屈服前按荷载控制, 每级荷载增量为 50 kN, 每级循环一周; 屈服后按位移控制, 每级位移增量为 8 mm, 每级循环三周, 直至试件出现明显断裂或荷载下降为峰值荷载 85% 以下时, 停止加载。

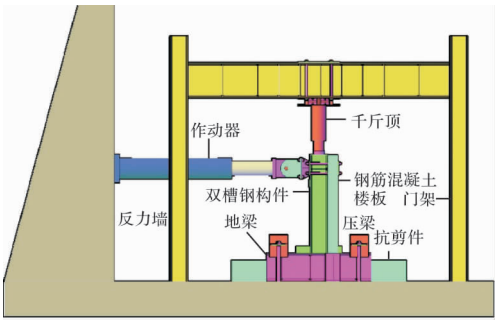


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

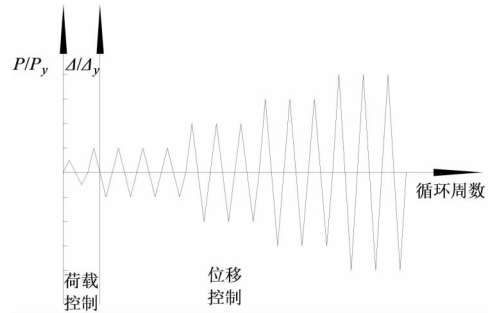


图 4 循环加载制度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cyclic loading system

在试件加载端和地梁一端布置位移计, 分别用于测量加载点位移和监测地梁的滑移。在距节点板上约 100 mm 处布置应变片来观测槽钢的应力及应变变化。在楼板内的纵向钢筋和楼板表面布置应变片, 分别用于测量纵向钢筋和楼板的应力及应变变化。位移计及应变片布置见图 5~6。

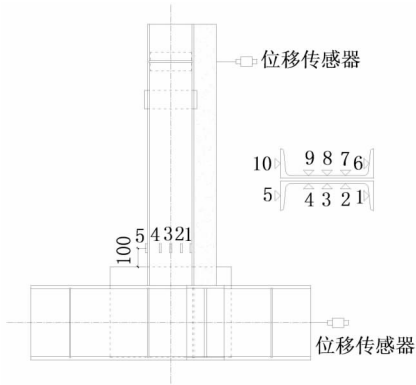


图 5 槽钢的应变片和位移计布置图

Fig. 5 Arrangement of strain gauges and transducers for channel steel



(a) 钢筋应变片布置

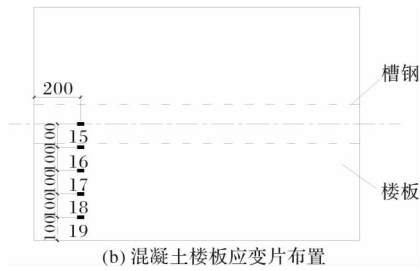


图 6 楼板应变片布置图

Fig. 6 Arrangement of strain gauges for the slab

2 试验结果及滞回特性分析

2.1 试验现象及破坏形态

在荷载控制加载阶段, 试件几乎处于弹性阶段, 无任何肉眼可见的现象产生. 试件屈服后, 进入位移控制加载阶段, 试件 SJ1 在位移为 32 mm 的第一循环负向加载时(对应荷载为 169 kN), 节点板附近的构件下翼缘出现明显屈曲. 随后, 在第三循环负向加载时(对应荷载为 143 kN), 节点板附近的腹板出现明显的鼓曲变形, 双肢间距变大. 当正向加载至 56 mm 的第二循环时(对应荷载为 365 kN), 槽钢与节点板连接处的腹板出现裂缝, 随后腹板裂缝进一步开展并导致槽钢下翼缘发生断裂. 试件破坏形态如图 7(a)所示. 试件 SJ2 由于填板间距减小为 $20i$, 其中 i 为单槽钢绕弱轴的回转半径, 故在位移为 40 mm 的第三循环负向加载时(对应荷载为 137 kN), 节点板附近的槽钢腹板才出现较为明显的鼓曲变形, 且未发生断裂破坏. 试件破坏形态如图 7(b)所示. 试件 SJ3 在塑性铰区域增设加劲肋, 当正向加载至 40 mm 的第一循环时(对应荷载为 454 kN), 槽钢与节点板的连接焊缝处, 翼缘开始出现微小撕裂, 随后便出现裂缝, 最终两侧槽钢下翼缘全部断裂. 试件破坏形态如图 7(c)所示. 与试件 SJ1 相比, 试件 SJ4 的腹板厚度增加, 当负向加载至 40 mm 的第一循环时(对应荷载为 228 kN), 槽钢下翼缘才出现明显的局部屈曲现象. 后期加载过程中, 翼缘屈曲更加明显, 且槽钢上翼缘也出现屈曲现象. 试件破坏形态如图 7(d)所示.

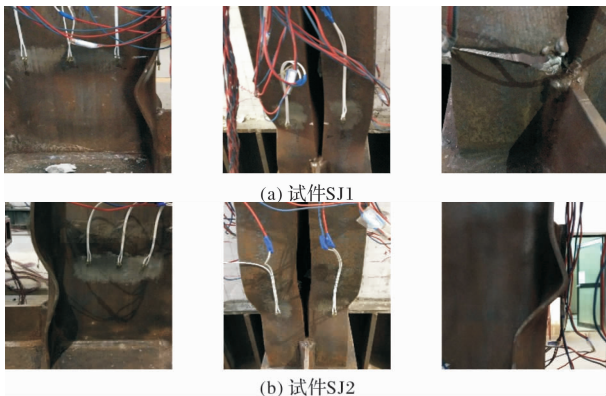


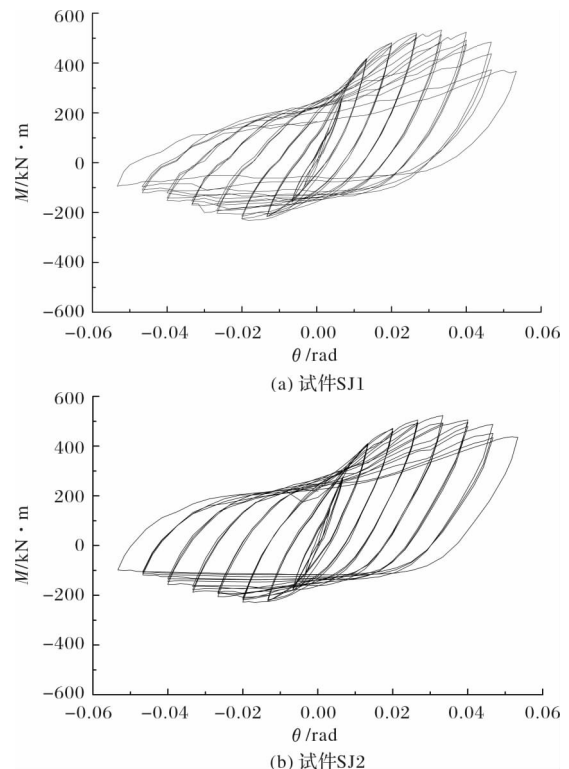
图 7 试件破坏形态

Fig. 7 The failure modes of specimens

所有试件的 RC 楼板的试验现象基本一致, 在进行位移控制加载的初期, 楼板出现了一些横向和竖向裂纹, 加载后期节点板附近的楼板表面出现斜裂缝, 最终地梁附近的楼板底部被压碎, 混凝土脱落, 如图所示 7(e)所示.

2.2 滞回曲线

各试件滞回曲线如图 8 所示. 由图可知, 除试件 SJ3 由于槽钢翼缘发生严重的断裂现象, 导致其滞回环相对较小外, 其余滞回曲线均较为饱满. 所有试件的滞回曲线均不对称, 正向滞回性能明显优于负向滞回性能, 这是由于钢筋混凝土楼板与槽钢的组合作用, 提高了构件的正向承载力和刚度.



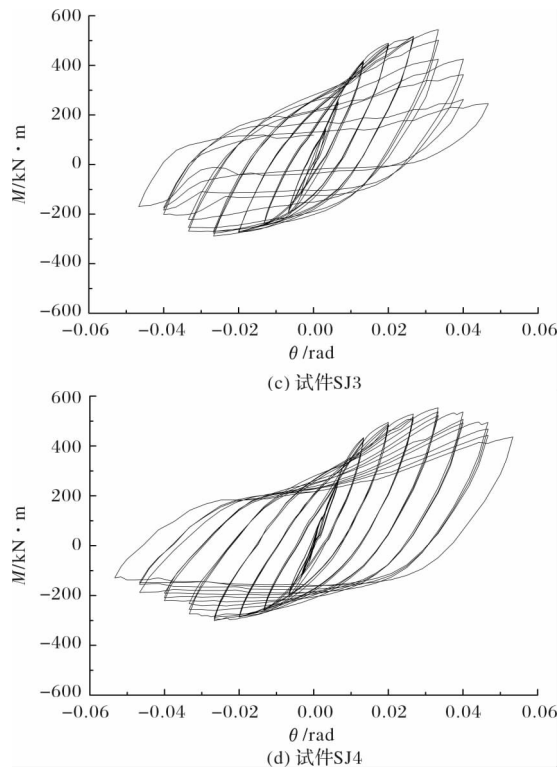


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimens

2.3 骨架曲线

各试件骨架曲线如图 9 所示. 所有试件在屈服点、峰值点和极限点对应的弯矩和转角如表 5 所示. 结合图 9 和表 4, 可以得出以下结论:

(1) 总体来看, 各试件骨架曲线均不对称, 正向加载性能明显优于负向加载性能, 这是由于楼板的组合作用, 正向加载时楼板受压, 充分发挥了混凝土良好的抗压性能.

(2) 在整个加载过程中, 试件 SJ1 和试件 SJ2 的骨架曲线基本重合, 说明减小填板间距, 对构件

的承载力和刚度影响较小. 正向加载初期, 各试件骨架曲线基本重合, 加载后期, 试件 SJ1 和试件 SJ3 由于节点板与槽钢连接焊缝处翼缘出现撕裂, 导致其承载力和刚度出现不同程度下降. 负向加载时, 试件 SJ3 和试件 SJ4 的骨架曲线明显高于试件 SJ1, 试件 SJ3 和试件 SJ4 的峰值荷载相比试件 SJ1 的分别提高了 28.42% 和 33.88%, 表明在塑性铰区域设置加劲肋以及减小腹板高厚比可以显著提高试件负向承载力.

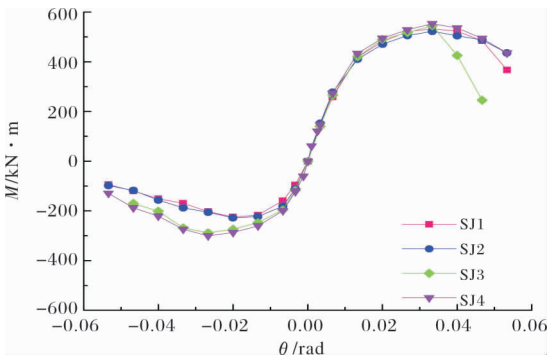


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

3 构件恢复力模型

建立恢复力模型的方法主要有理论方法和试验拟合法等^[20]. 本文基于对构件的拟静力试验建立带 RC 楼板双槽钢组合截面构件的恢复力模型. 由于试件 SJ3 发生了较为明显的断裂破坏, 使其承载力、刚度和耗能能力在加载后期出现突降, 与实际工程要求不符. 因此, 本文利用试件 SJ1、试件 SJ2 和试件 SJ4 的试验结果, 采用试验拟合法建立构件恢复力模型.

表 4 骨架曲线特征点试验结果

Tab. 4 The characteristic points of the skeleton curve

试件编号	加载方向	M_y /MPa	θ_y /rad	M_m /MPa	θ_m /rad	M_u /MPa	θ_u /rad
SJ1	正	450.06	0.016 7	532.51	0.033 4	452.64	0.048 5
	负	191.75	0.010 5	224.70	0.020 0	190.99	0.029 1
SJ2	正	435.04	0.016 0	522.88	0.033 4	444.44	0.052 2
	负	192.71	0.008 5	227.88	0.020 0	193.70	0.031 2
SJ3	正	460.07	0.017 2	544.69	0.033 4	462.98	0.037 9
	负	232.10	0.011 5	288.56	0.026 7	245.28	0.035 7
SJ4	正	452.45	0.015 4	553.34	0.033 4	470.34	0.049 4
	负	227.03	0.009 7	300.82	0.026 7	255.70	0.035 6

注: M_y 、 θ_y 为屈服弯矩及对应转角; M_m 、 θ_m 为峰值弯矩及对应转角; M_u 、 θ_u 为极限弯矩及对应转角.

3.1 骨架曲线模型

由于各试件的峰值荷载和对应转角各有不同, 很难用一个统一的公式加以表达, 所以需要将试验

所得骨架曲线无量纲化. 构件峰值荷载(M_m)和相应位移(θ_m)确定较为准确, 故可作为无量纲化的基准点, 从而得到 M/M_m 与 θ/θ_m 曲线, 见图 10. 由

图可知,可采用以屈服荷载点、峰值荷载点和极限荷载点为控制点的三线型模型为骨架模型,如图 11 所示.将试验数据无量纲化并进行回归分析,得到的骨架模型各阶段的直线回归方程见表 5.

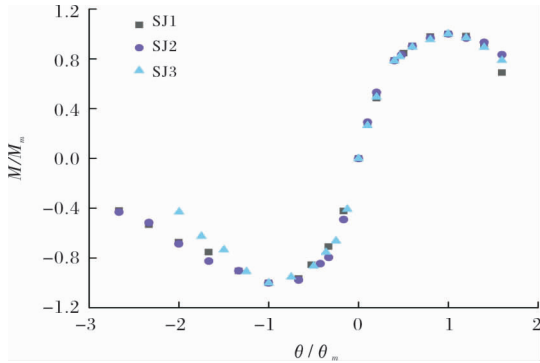


图 10 无量纲骨架曲线

Fig. 10 Normalized skeleton curves

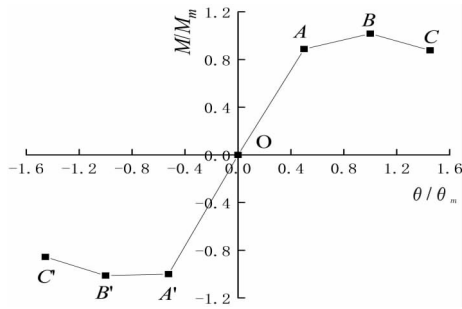


图 11 三折线骨架曲线模型

Fig. 11 Trilinear skeleton curve model

表 5 骨架曲线恢复力模型回归方程

Tab. 5 Regression equations of restoring force model of skeleton curves

折线线段	回归方程
OA	$M/M_m^+ = 1.776\ 37(\theta/\theta_m^+)$
AB	$M/M_m^+ = 0.307\ 67(\theta/\theta_m^+) + 0.709\ 1$
BC	$M/M_m^+ = -0.310\ 42(\theta/\theta_m^+) + 1.327\ 42$
OA'	$M/M_m^- = 1.906\ 52(\theta/\theta_m^-)$
A'B'	$M/M_m^- = 0.271\ 71(\theta/\theta_m^-) - 0.740\ 79$
B'C'	$M/M_m^- = -0.322\ 1(\theta/\theta_m^-) - 1.324\ 85$

注:式中 M_m^+ 和 θ_m^+ 分别表示正向峰值荷载和对应转角; M_m^- 和 θ_m^- 分别表示负向峰值荷载和对应转角.

3.2 刚度退化规律

加载刚度的确定应该考虑每次荷载从零点开始加载时残余变形的影响,因此,将试件正向加载终点与加载开始零点之间的数据点进行线性拟合,所得直线的斜率即为正向加载刚度 K_1 ,同理可得负向加载刚度 K_2 、正向卸载刚度 K_3 和负向卸载刚度 K_4 .采用初始刚度 K_0 ,即初次加载弯矩-转角曲线的切线刚度,作为基准点对所有试件刚度进行无量纲化处理并进行回归分析,从而得到 K/K_0 与

θ/θ_m 曲线,如图 12 所示.而回归分析得到的刚度退化公式如下:

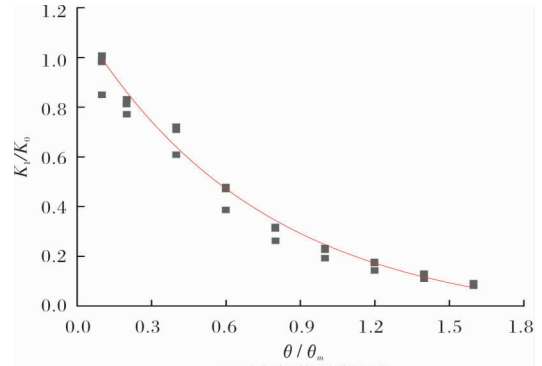
$$K_1/K_0^+ = 1.213\ 98e^{-1.363\ 79(\theta/\theta_m^+)} - 0.06377 \quad (1)$$

$$K_2/K_0^- = 1.244\ 02e^{-1.355\ 33(\theta/\theta_m^-)} - 0.040\ 24 \quad (2)$$

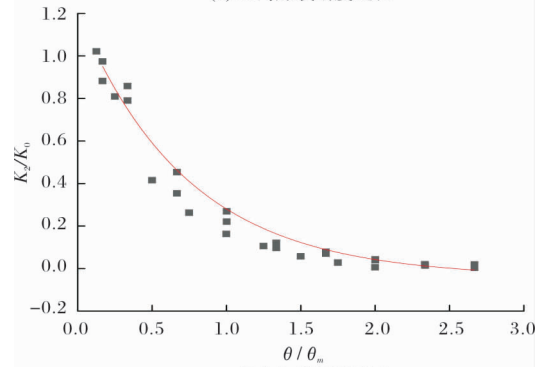
$$K_3/K_0^+ = -0.322\ 95(\theta/\theta_m^+) + 1.032\ 48 \quad (3)$$

$$K_4/K_0^- = -0.301\ 2(\theta/\theta_m^-) + 1.175\ 81 \quad (4)$$

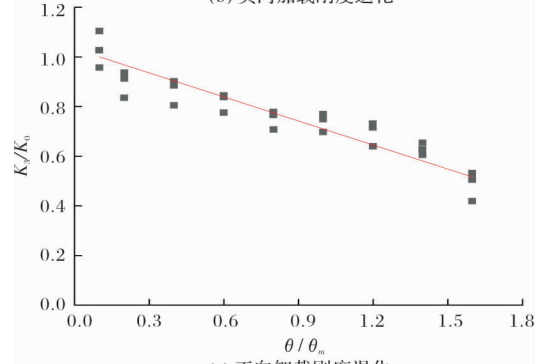
式中, K_0^+ 为正向初始刚度, K_0^- 为负向初始刚度.



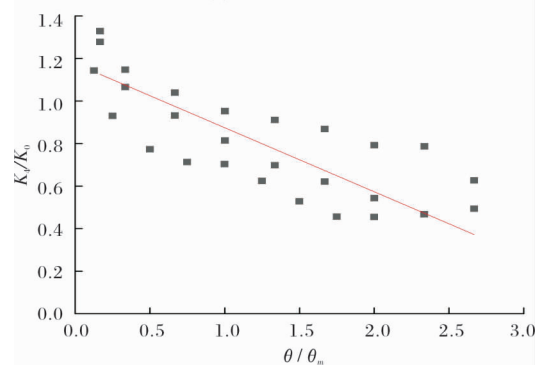
(a) 正向加载刚度退化



(b) 负向加载刚度退化



(c) 正向卸载刚度退化



(d) 负向卸载刚度退化

图 12 刚度退化规律

Fig. 12 Stiffness degradation curves

3.3 恢复力模型及试验验证

结合骨架曲线模型和刚度退化规律, 建立刚度退化的三折线恢复力模型, 如图 13 所示. 模型滞回规则: 在弹性阶段时, 构件加、卸载均以弹性刚度沿弹性段进行; 当构件屈服后, 进入强化阶段时, 构件加、卸载将分别以刚度 K_2 、 K_3 、 K_4 和 K_1 沿 12 段、23 段、34 段和 41 段进行; 最后, 当构件进入破坏阶段时, 滞回规则同上.

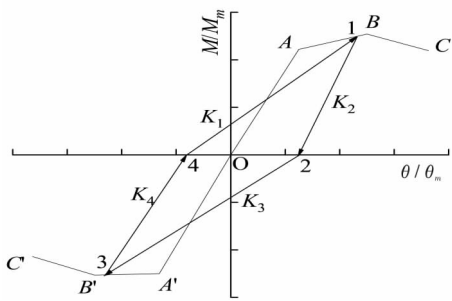


图 13 三折线恢复力模型

Fig. 13 Trilinear restoring force model

将骨架曲线模型与试验所得骨架曲线进行对比, 如图 14 所示. 同时, 将恢复力模型计算曲线与试验所得滞回曲线进行对比, 如图 15 所示. 由图可知, 计算模型与试验结果吻合良好, 表明本文建立的带 RC 楼板双槽钢组合截面构件模型能够很好的反映构件在常轴力和往复弯曲下弯矩与转角的关系, 可用于结构的弹塑性反应分析.

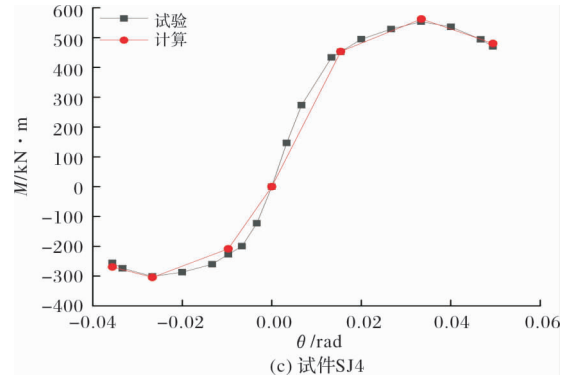
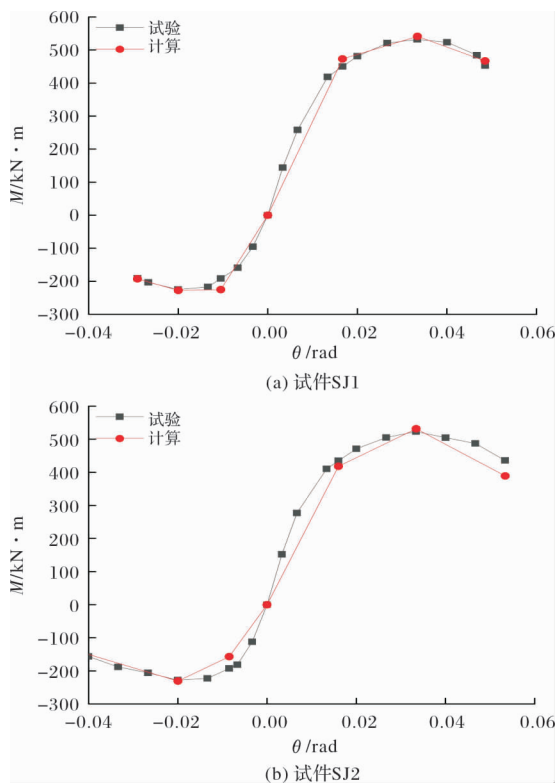


图 14 骨架曲线模型与试验曲线对比

Fig. 14 Comparison between skeleton curve model and test curves

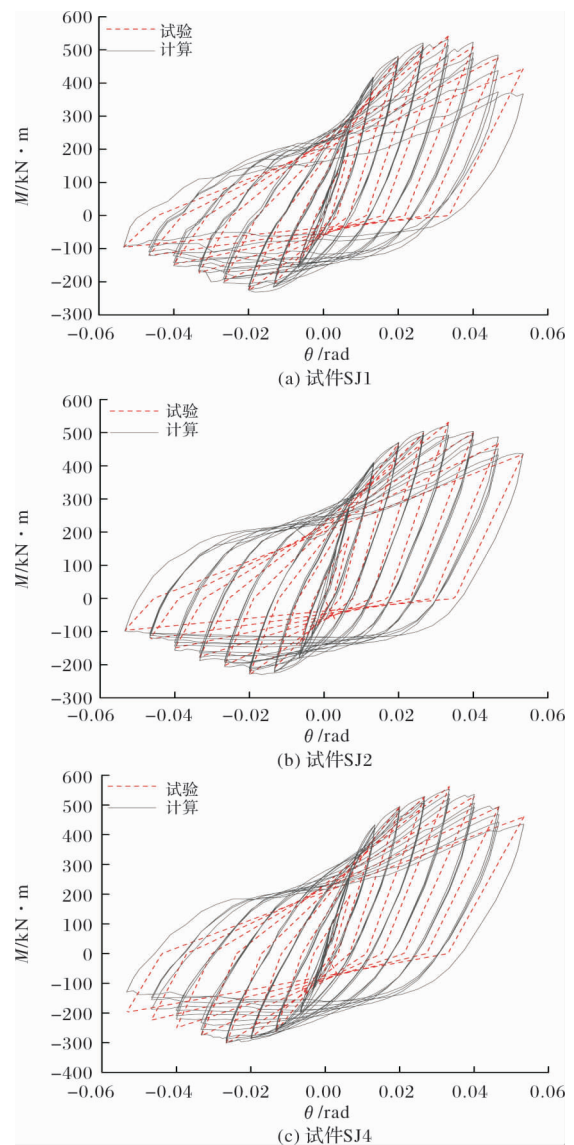


图 15 恢复力模型曲线与试验曲线对比

Fig. 15 Comparison between restoring force model and test curves

4 结论

(1) 所有试件的滞回曲线均较为饱满, 只有轻

微的“捏缩”现象,表明其具有良好的耗能能力和延性。填板间距对构件的承载力和刚度影响较小,但减小腹板高厚比可显著提高构件刚度和承载力。

(2)基于试验所得骨架曲线数据,建立了以屈服点、峰值点和极限点为控制点的三线型骨架模型,并将模型计算结果与试验骨架曲线对比,结果吻合良好,同时,该模型计算方法简单,便于工程应用。

(3)本文建立了带RC楼板双槽钢组合截面构件的恢复力模型,该模型考虑了加卸载方向的刚度退化,将模型计算结果与试验结果进行对比,发现吻合较好,说明该恢复力模型能较好的反映构件在常和往复弯曲下的力学和抗震性能,可用于结构的弹塑性反应分析。

参考文献 References

- [1] HANSEN R J, LEMESSURIER W J, PAHL P J, et al. New steel framing system promises major savings in high-rise apartments [J]. Architectural Record, 1966, 139(6): 191-196.
- [2] GUPTA R P, GOEL S C. Dynamic analysis of the staggered truss framing system [J]. Journal of the Structure Division, ASCE, 1972, 98(7): 1475-1491.
- [3] SCALZI J B. The staggered truss system: structural consideration [J]. Engineering Journal, AISC, 1971, 10(2): 138-143.
- [4] 莫涛,周绪红,刘永健,等. 交错桁架结构体系的受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(4): 49-54.
MO Tao, ZHOU Xuhong, LIU Yongjian, et al. Analysis of the load bearing behavior of staggered truss structures [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(4): 49-54.
- [5] 刘红梁,刘志雄,陆钦年. 交错桁架体系结构性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 35(9): 1173-1176.
LIU Hongliang, LIU Zhixiong, LU Qinnian. Structural performance of the staggered-truss system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 35(9): 1173-1176.
- [6] 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: 45-66.
- RAN Hongdong. Collapse mechanism and design criteria of steel staggered truss framing structure system under cyclic load [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008: 45-66.
- [7] 薛鹏. 延性交错桁架体系抗震设计方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 19-41.
XUE Peng. Study on the seismic design method of the staggered truss framing systems [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013: 19-41.
- [8] 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.
- [9] 卢林枫,徐莹璐,郑宏,等. 带混凝土楼板的钢框架梁柱弱轴连接节点滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 12-21.
LU Linfeng, XU Yinglu, ZHENG Hong, et al. Experimental investigation on cyclic performance of beam-to-column weak-axis connections with concrete slab in steel frame [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 12-21.
- [10] 徐晋东,田江平,廖恒,等. 考虑楼板组合作用的钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10864-10870.
XU Jindong, TIAN Jiangping, LIAO Heng, et al. Seismic behavior of concrete filled steel tubular columns with consideration of floor combination [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10864-10870.
- [11] LI R, SAMALI B, TAO Z, et al. Cyclic behaviour of composite joints with reduced beam sections [J]. Engineering Structures, 2017, 136: 329-344.
- [12] 王勤,李桅,杨克家,等. 楼板对RCS框架抗震性能影响的理论分析及改进措施研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(6): 56-68.
WANG Qin, LI Wei, YANG Kejia, et al. Research on theoretical analysis and improvement measures of seismic performance of RCS frames considering slabs [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(6): 56-68.
- [13] 周旺保,蒋丽忠,李书进. 钢-混凝土组合箱梁弯矩-曲

- 率恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 78-84.
- ZHOU Wangbao, JIANG Lizhong, LI Shujin. Moment-curvature restoring force model research of steel-concrete composite box-beams[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 78-84.
- [14] 张艳青, 贡金鑫, 韩石. 钢筋混凝土杆件恢复力模型综述(I)[J]. 建筑结构, 2017, (9): 65-70.
- ZHANG Yanqing, GONG Jinxin, HAN Shi. Reviews of restoring force model for reinforced concrete members(I)[J]. Building Structure, 2017(9): 65-70.
- [15] 熊仲明, 王社良. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- XIONG Zhongming, WANG Sheliang. Civil engineering structure test[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [16] 冉红东, 赵道程, 梁文龙, 等. 延性交错桁架钢框架双槽钢组合 H 型截面弦杆恢复力模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 56-63.
- RAN Hongdong, ZHAO Daocheng, LIANG Wenlong, et al. Restoring force model of steel double-channel built-up chords of special staggered truss frame structure[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 56-63.
- [17] 冉红东, 朱兵, 赵道程, 等. 双角钢组合截面构件在往复弯曲下的恢复力模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6): 827-834.
- RAN Hongdong, ZHU Bing, ZHAO Daocheng, et al. Restoring force model of steel double-angle built-up members under cyclic bending[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(6): 827-834.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T101-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of building: JGJ/T101-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [20] 姚谦峰, 常鹏. 工程结构抗震分析[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012: 180-183.
- YAO Qianfeng, CHANG Peng. Seismic analysis of engineering structure[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012: 180-183.
- (编辑 沈 波)