

腹板开孔型节点空间钢框架在低周反复荷载作用下的抗震性能研究

石丹, 孟春辉

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:采用 ABAQUS 有限元分析软件对普通节点和腹板开孔型节点两种不同的节点形式建立三维的空间钢框架模型,进行有限元的模拟。对比分析了两种钢框架模型的破坏形式、承载力、滞回性能、耗能能力、强度及刚度退化性能。研究表明,腹板开孔型节点可使梁端塑性铰外移至梁端腹板开孔处,避免梁端焊缝处应力集中导致发生脆性破坏,增加了结构延性,但同时会降低结构承载能力;腹板开孔型节点等效粘滞阻尼系数与普通钢框架相比有明显的提高,进入屈服阶段后由于应力重分布,其刚度及承载力退化速度较普通节点钢框架较慢,腹板开孔型节点钢框架具有梁铰延性破坏机制,抗震性能较好。研究内容可为腹板开孔型节点在空间钢框架的应用和理论分析提供参考。

关键词:腹板开孔型节点;空间钢框架;ABAQUS;塑性铰外移;滞回性能;抗震性能

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)01-0031-06

0 引言

在1994年美国北岭地震和1995年日本阪神大地震中,被认为具有优良延性的钢框架结构发生了严重的脆断现象,钢材的良好延性并没有表现出来,调查表明破坏的主要原因是由于梁根部翼缘坡口焊缝出现应力集中以及梁柱连接焊缝质量缺陷造成的^[1-4]。焊接节点钢结构在强震作用下易发生脆性破坏^[5],震后钢框架梁柱节点问题成为研究热点^[6]。国内外学者大量研究表明,目前有削弱型节点和加强型节点两种类型能够实现塑性铰转移,前者是离开梁柱焊缝区域一定距离对梁截面进行适当削弱,后者是对节点区域进行加强,两者均可形成梁铰破坏机制,达到“强柱弱梁,强节点弱构件”的抗震设计要求,充分发挥了钢材的塑性承载力和延性性能,提高结构的抗震性能。然而国内外学者的研究工作主要集中在加强型和削弱型节点的外移机理的研究,而对钢框架在低周反复荷载作用下整体结构的抗震性能及破坏机理上研究较少。本文在削弱型节点的抗震性能研究基础上^[7-9],采用 ABAQUS 有限元软件,建立三维空间普通钢框架节点有限元模型(Ordinary Node Steel Frame,以下简称 OSF)和空间腹板开孔型节点钢框架(Opening on beam websconnection Steel Frame,以下简称 OWF)有限元模型,研究梁腹板开孔型节点和普通节点空间钢框架模型在低周反复荷载作用下的破坏形式、承载力、滞回性能、变形能力、耗能能力、强度及刚度退化等抗震性能。

1 有限元建模及加载制度

1.1 空间钢框架几何参数

为确定钢框架的基本尺寸,采用 PKPM 软件设计十层钢框架。框架的跨度、柱距和层高均采用工程常用尺寸。楼面荷载设计值取 6 kN/m^2 ,基本风压为 0.5 kN/m^2 ,II类场地土,设防烈度为8度,抗震等

收稿日期:2016-01-18 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.01.06

作者简介:石丹(1989-),女,硕士研究生,主要从事钢与混凝土组合结构抗震性能研究工作。E-mail:2497038127@qq.com.

石丹,孟春辉.腹板开孔型节点空间钢框架在低周反复荷载作用下的抗震性能研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):31-35.

级为 2 级,水平地震影响系数最大值 $\alpha=0.16g$,罕遇地震影响系数最大值 $\alpha=0.9g$,多遇地震下的计算阻尼比取 0.04,罕遇地震下的弹塑性分析,阻尼比为 0.05。根据分析结果按照《建筑抗震设计技术规范(GB50011—2010)》选定基本空间钢结构梁柱截面尺寸分别为:H450×200×8×14 和 H400×400×12×20,钢材均为 Q235 钢;开孔参数参照文献[18]取值范围:开孔直径建议取值 $0.55h_b\sim 0.75h_b$,开孔位置按照孔中心线距柱翼缘表面 $0.75h_b\sim 1.15h_b$ (h_b 为梁腹板的高度),故本文几何参数取 $B=400\text{ mm}$, $R=125\text{ mm}$ (B 为开孔圆心距柱表面的距离; R 为开孔半径)。

1.2 材料本构模型

采用有限元软件 ABAQUS^[11] 建立空间钢框架计算模型,采用 C3D8I 单元(8 节点 6 面体线性非协调单元),材料本构模型采用多线性随动强化三折线模型(如图 1),采用 VonMises 屈服准则及塑性流动法则^[19],同时考虑循环荷载作用下钢材的包辛格效应。材料力学性能参照文献[11]钢材拉伸试验结果,屈服强度 $\sigma_y=318\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,屈服应变 $\varepsilon_y=0.154\%$,极限强度 $\sigma_u=470\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,极限应变 $\varepsilon_u=12\%$,极限强度 $\sigma_s=367\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,破坏时应变 $\varepsilon_s=17\%$ 。建立有限元模型如图 2 所示。

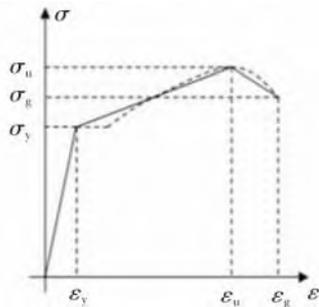


图 1 钢材应力-应变关系

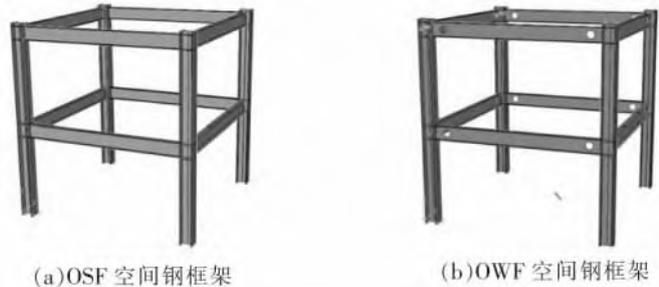


图 2 三维空间钢框架计算模型

1.3 边界条件及加载方法

在钢框架空间建模中,沿主梁轴线方向为 X 轴,沿次梁轴线方向为 Y 轴,沿柱子轴线方向为 Z 轴。为了防止加载处出现应力集中现象,将 2 层加载端柱翼缘上的所有节点进行 X 方向耦合。为了防止主梁在加载过程中过早地发生平面外失稳,对主梁上翼缘 $1/3$ 跨度处施加 X 方向的位移约束,以模拟次梁对主梁约束。为了模拟钢柱脚固定支座,将柱底端面全部约束。空间框架需考虑重力的二阶效应影响,加载制度参考 ECCS^[13]。采用通用屈服弯矩法^[13] 得到普通节点和开孔型节点两种钢框架的屈服位移分别为 30 mm 和 26 mm 。

2 有限元分析结果

2.1 塑性铰的形成过程及应力云图

图 3 和图 4 分别为普通节点与腹板开孔型节点空间钢框架在循环加载过程的应力云图及塑性铰的发展情况,依次为 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $5\delta_y$ 、 $6\delta_y$,加载过程中钢框架模型没有发生平面外失稳破坏。



图 3 OSF 普通节点钢框架的应力发展(单位: $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

图 3 所示为普通钢框架的等效应力云图,由 OSF 普通钢框架的等效应力云图可知,在加载过程中,空间钢框架节点域内率先进入弹塑性状态,紧接着是柱脚和梁端部位。这主要是由于节点域受力情况较

复杂,等效应力值较大,因此工程设计时应当对节点域给予加强,防止节点域出现局部屈曲现象。与此同时,OSF 钢框架的高峰应力首先出现在框架梁的梁端与柱翼缘连接焊缝处,随之钢框架的柱脚的翼缘板屈曲,梁端与柱翼缘连接焊缝处的应力始终较大,实际地震作用中易发生钢框架梁端与柱翼缘连接焊缝的开裂破坏,致使框架过早的破坏。

图 4 所示为 OWF 腹板开孔型钢框架的应力云图。可以看出,OWF 腹板开孔型钢框架在应力发展依次为开孔处、节点域、柱脚;在结构承载力下降阶段,主要通过梁的弯曲变形和柱脚屈曲耗能;在整个加载过程中,梁翼缘与腹板连接处的焊缝处应力较小,相比普通框架而言,实现了塑性铰的转移,防止钢框架出现脆性破坏。

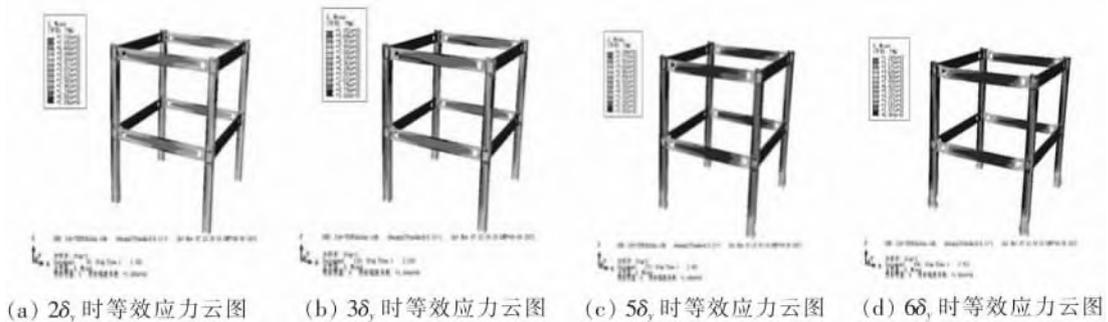


图 4 OWF 腹板开孔型钢框架的应力发展(单位: $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)

2.2 滞回性能及骨架曲线

滞回曲线是评价结构抗震性能主要依据之一,滞回曲线越丰满,表示试件的耗散地震能量的能力越好,抗震性能越强。循环荷载作用下空间钢框架的荷载-位移滞回曲线如图 5 所示。

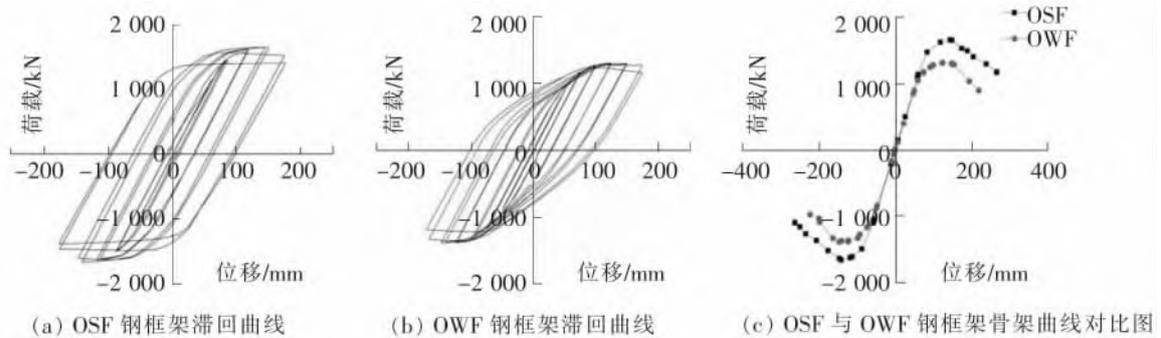


图 5 OSF 钢框架与 OWF 钢框架滞回曲线

由图 5(a)、图 5(b)对比分析可知,循环荷载作用下普通钢框架和腹板开孔型钢框架的滞回曲线均较丰满,体现了抗弯钢框架本身具有较好的抗震耗能能力;在弹性阶段,两种钢框架的滞回曲线基本趋势一致,说明此时两钢框架的抗震耗能基本接近;加载到弹塑性受力阶段之后,腹板开孔型钢框架的滞回面积与普通钢框架基本相当;当进入塑性破坏阶段时,腹板开孔型钢框架滞回曲线最大值比普通钢框架下降较快。总体来看,普通钢框架的滞回面积更大,滞回性能更好。

由图 5(c)可知,循环荷载作用下两种钢框架都经历了弹性、弹塑性、塑性、破坏 4 个阶段。在弹性阶段两种钢框架的骨架曲线吻合较好,但进入弹塑性及塑性受力阶段,腹板开孔型钢框架的骨架曲线略低于普通钢框架,开孔型钢框架的表现出较好的延性性能。

由表 1 发现两种钢框架弹性承载力基本相同,但是腹板开孔型钢框架的屈服承载力和极限承载力较普通节点钢框架分别降低了 4.3% 和 15.3%,说明削弱型节点钢框架可以降低承载力,实现强柱弱梁的抗震规范要求。但是削弱型节点钢框架承载力较普通钢框架低,加载过程中削弱梁端腹板易发生局部鼓曲,应在腹板处设置加劲肋,防止削弱梁端过早发生局部鼓曲。

表 1 钢框架承载力对比

类型	弹性承载力	屈服承载力	极限承载力
普通节点钢框架	877.3	1 132.6	1 659.62
开孔型节点钢框架	875.4	1 080.4	1 367.07

2.3 耗能能力

结构的耗能性能可以用来评价结构抗震性能的好坏,空间钢框架的耗能能力可以用等效粘滞阻尼系数 h_e ^[14] 来衡量。钢框架的等效粘滞系数是图 6 中滞回曲线 ABC 与横轴所围成的面积与 BOD 的面积之比。等效粘滞阻尼系数计算公式: $h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A_{ABCOA}}{A_{\Delta BOD}}$, 钢框架等效粘滞阻尼系数 h_e 计算结果如表 2 所示。腹板开孔型节点钢框架的等效粘滞阻尼系数明显高于普通框架,二者的等效粘滞阻尼系数相差 6.6%,说明腹板开孔型节点钢框架的耗能能力有相应的提高。

表 2 钢框架等效粘滞阻尼系数 h_e

框架类型	$A_{ABCOA}/(\text{kN} \cdot \text{mm})$	$A_{\Delta BOD}/(\text{kN} \cdot \text{mm})$	h_e
OSF	193 797	114 344	0.281
OWF	245 287	133 795	0.301
比值/%	28	19.1	6.6

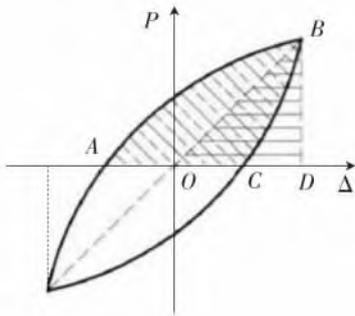


图 6 等效粘滞阻尼系数计算示意图

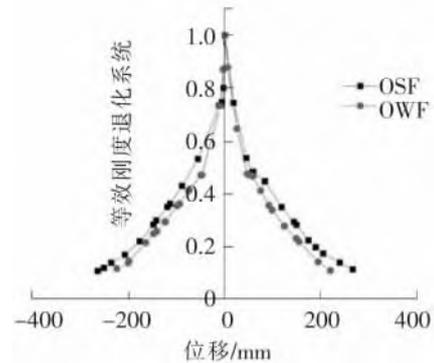


图 7 刚度退化

2.4 刚度退化分析

刚度退化是评价结构抗震性能好坏的重要指标之一。等效刚度是将各钢框架结构模型滞回曲线中坐标原点与各条循环曲线的峰值点相连连线的斜率。等效刚度退化系数是衡量刚度退化的重要参数,框架等效刚度退化系数即等效刚度与最大刚度的比值。由图 7 所示 OSF 普通钢框架及 OWF 腹板开孔型钢框架有限元计算模型的刚度退化曲线。可以看出,两种钢框架有限元模型的退化规律相似,退化曲线分布呈现“几”字形,刚度退化系数基本对称。处于弹性工作阶段时,模型刚度基本保持不变,承载力可增加;进入塑性阶段时,刚度退化曲线开始慢慢下降。

当 OSF、OWF 钢框架在循环荷载分别增大至 $2\delta_y$ 时,刚度退化曲线基本稳定,进入塑性阶段。OWF 钢框架的极限位移为 210 mm, OSF 钢框架的极限位移为 220 mm, OWF 钢框架的刚度退化曲线位于 OSF 钢框架的下部,退化较为缓慢。

3 有限元验证

为了验证有限元模拟方案的正确性,利用 ABAQUS 对文献[17]已有试验试件进行了有限元模拟。单跨两层 1:3 缩尺的钢框架结构。梁 HW100×100×6×8,柱为 HM150×100×6×9,钢材为 Q235B,焊条采用 E43 型,跨度为 1 500 mm,层高为 1 000 mm。框架的试验滞回曲线和有限元模拟曲线如图 8 所示。

对比试验和有限元模拟滞回曲线可知:由于有限元模拟分析未能考虑结构的初始缺陷,导致有限元模拟结果的刚度稍大于试验的结果;有限元模拟承载力略微大于试验结果是由于未考虑焊缝的缺陷、焊

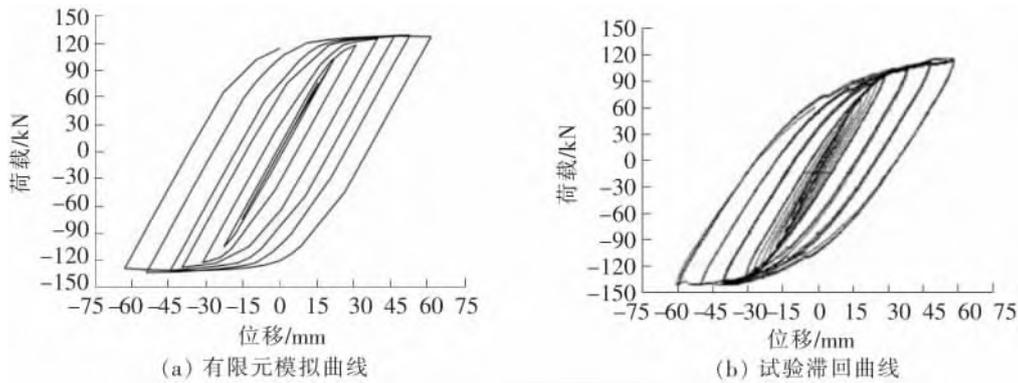


图 8 试验与有限元模拟滞回曲线

接残余应力以及材料性能等实际中可能存在的影响因素。总而言之,有限元模拟结果的刚度和承载力与试验值差别较小,计算模拟值和试验值吻合较好,证明了有限元建模的可行性及有效性。

4 结论

(1)通过有限元模拟分析,发现腹板开孔型节点可使梁端塑性铰出现腹板削弱处,实现塑性铰的外移,避免梁柱焊缝处应力集中发生脆性断裂现象。

(2)在弹塑性及塑性阶段,开孔型节点在腹板开孔处腹板过早的屈曲,导致其承载力和普通钢框架相比明显降低,但耗能能力高于普通钢框架。

(3)两种空间钢框架的刚度退化曲线趋势基本一致,但屈服阶段后腹板开孔型节点钢框架的负向强度退化速度大于普通钢框架,在中强震地区可用开孔型节点钢框架。

参 考 文 献

- [1] Miller D K. Lessons learned from the Northridge earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 249-260.
- [2] Chen S J, Yeh C H, Chu J M. Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(11): 1292-1299.
- [3] Brandon Chi, Chia-Ming Uang. Cyclic response and design recommendations of reduced beam section moment connections with deep columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 464-473.
- [4] Nakashima M, Inoue K, Tada M. Classification of damage to steel building observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 271-281.
- [5] 段树金, 王冉, 金坎辉. 一般半刚性节点连接框架结构分析方法[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2014, 27(3): 1-7.
- [6] 索婉秋, 段树金. 不同荷载比下嵌固式钢框架节点 M- θ 曲线拟合[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(4): 28-34.
- [7] Chen S J, Tsao Y C, Chao Y C. Enhancement of ductility of existing seismic steel moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(5): 538-545.
- [8] Kim T, Whittaker A S, Gilani A S, et al. Experimental evaluation of plate-reinforced steel moment-resisting connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 483-491.
- [9] Zhang X F, Ricles J M. Seismic behavior of reduced beam section moment connections to deep columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 358-367.
- [10] 杨尉彪, 高小旺. 高层建筑钢结构梁柱节点试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 8: 3-8.
- [11] Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. ABAQUS Theory Manual[M]. Pawtucket, USA: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 2006.
- [12] 陶帅. 扩翼型节点钢框架的抗震性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- [13] ECCS-Technical Committee 1, Structural Safety and Loadings. Study of design of steel building in earthquake zones [M]. Michigan: ECCS General Secretariat, 1986.

(下转第 51 页)

Research on Stability of Continuous Welded Rail Based on DSTFT

Guo Lei, Lei Ming, Qi Xin

(School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: On the basis of the Discrete Short Time Fourier Transform (DSTFT) thoughts, a new method has been proposed to analyze the stability of continuous welded rail (CWR). In this approach, the DSTFT algorithm is utilized to calculate the stress that is measured at each sampling point in longitudinal direction of rail. Then the three-dimensional distribution maps of amplitude and frequency of stress for each sampling point of rail are plotted. And through the study of distribution maps, the stability evaluation condition of CWR is derived to quantitatively analyze the stability of CWR. The results prove that the method is accurate and reliable after much experimentation conducted to CWRs located at Fengtai District in Beijing.

Key words: continuous welded rail; the discrete short time fourier transform; stability assessment; non-destructive testing

(上接第 35 页)

[14]姚谦峰,陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[15]Mao C S, Ricles J, Lu L W, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 127(9): 1036-1044.

[16]王薇. 钢框架板式加强型焊接节点的断裂性能分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.

[17]王纪斌. 空间钢框架在循环荷载作用下的受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

[18]王秀丽, 沈世钊, 殷占忠, 等. 钢框架梁腹板开孔型连接节点力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 65-76.

[19]喻岩, 段树金, 张裕. 榫卯式连接钢框架节点承载力性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 1-5.

Study on Seismic Performance of Space Steel Frames with Opening on Beam Webs Section Connections Under Low-Cyclic Loading

Shi Dan, Meng Chunhui

(School of Civil and Architecture Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to compare the seismic performance of the conventional connection steel frames and the opening on beam webs section connection steel frames, three-dimensional finite element models of steel frames with two types of connections under low-cyclic loading are established utilizing ABAQUS software. Main properties including failure mode, ultimate bearing capacity, hysteretic behavior, energy dissipation capacity, strength and stiffness degradation are evaluated on steel frames with these two types of connections. Analysis results show that the opening on beam webs joint can let the plastic hinge away from the welded connection of beam-column and avoid welded connection brittle fracture induced by the tie-beam stress connection. The equivalent viscous damping ratio of the opening on beam webs joint steel frame is obviously greater than the common joint steel frame, and when the steel frames enters the yield stage, the stiffness and bearing degradation of the reduced joint steel frame is more slower for the stress redistribution. The opening on beam webs joints steel frame has a clear and ductile beam-hinge failure mechanism. The research contents can provide reference for the application and theoretical analysis of space steel frame with the reduced beam connections.

Key words: opening on beam webs; space steel frame; ABAQUS; relocation of the plastic hinge; hysteretic behavior; seismic performance