DOI: 10.11883/bzycj-2016-0335 文章编号: 1001-1455(2018)04-0841-06

轴向冲击下 C 型冷弯卷边槽钢构件的动力响应*

张 旭[1],孙国军[2],黄翊浩[3],叶文华[1],朱 珏[1]
(1. 宁波大学机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211;
2. 浙江省二建钢结构有限公司,浙江 宁波 315207;
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200030)

摘要: 针对轴向冲击载荷下 C 型冷弯薄壁钢构件的动力响应,采用商业有限元软件 Abaqus 建立了能够反映冲击过程的有限元模型。通过对比有限元模拟和落锤实验中利用数字散斑技术采集的数据以及试样残余变形,验证了数值模型的可靠性。采用该模型分析了在不同冲击速度下翼缘、腹板和卷边质点的轴向位移-时间曲线以及腹板横向挠度的变化,结果表明:在较低冲击能量的作用下,翼缘对卷边的约束作用明显;而在较高冲击能量的加载过程中,冲击端卷边的轴向位移和速度明显大于翼缘和腹板,卷边破坏严重;随着冲击速度的提升,C 型冷弯薄壁钢构件的动态屈曲临界载荷相应提升。

关键词: 钢结构;动力响应;落锤实验;轴向冲击
中图分类号: O347.1 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

冷弯薄壁钢构件由于重量轻、强度高、便于加工、能工业化生产,越来越广泛地应用于各种高层建筑的承重结构,同时也被用于强地震、大风压或可能遭受冲击载荷的军事工程。然而,国内外对于常见的开口薄壁冷弯钢构件(C 型、Z 型等)在动态冲击载荷作用下的失稳和失效研究却非常缺乏,从而影响该类结构在设计、施工尤其是灾后安全使用的评估工作。目前,国内外冷弯钢结构设计规范,如中国规范[1]、北美规范[2]等,都没有对承受冲击载荷的结构设计给出明确的条款,因此研究开口薄壁冷弯钢构件在冲击载荷下的失稳有很大的实际工程意义。

开口薄壁冷弯钢构件有 3 种常见屈曲模式:局部屈曲、畸变屈曲和整体屈曲(见图 1)[3]。随着截面形式的复杂化及用钢量的最优化,畸变屈曲很可能成为主导构件的屈曲模式。研究在冲击载荷作用下开口薄壁冷弯钢构件的动力屈曲,需要考虑以下因素的影响:(1) 构件在受到冲击载荷作用时往往进入塑性状态,而低碳钢的屈服和极限强度都与应变率有很大的关系[4],故当冷弯钢构件采用普通低碳钢时,采用材料的静态本构关系分析动力失稳问题是很不合适的;(2) Kenny 等[5]的研究表明,像 C 型冷弯薄壁钢构件这样的开口薄壁结构,在分析动力失稳时需要考虑几何缺陷对屈曲模式的影响,尤其在数值模拟中,之后 Bonada 等[6]研究发现,引入合适的屈曲模态作为初始缺陷对达到符合实际效果有着至

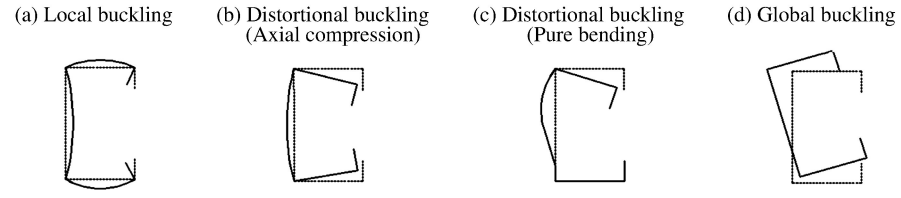


图 1 冷弯薄壁型钢构件的屈曲模式

Fig. 1 Buckling modes of cold-formed thin-wall steel members

* **收稿日期**: 2016-11-01; **修回日期**: 2017-04-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(11572162);浙江省自然科学基金项目(LY13A020007);
第 47 批国家教育部留学回国人员基金项目;宁波大学王宽诚基金项目
第一作者: 张 旭(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 朱 珏,zhujue@nbu.edu.cn。

关重要的影响;(3) Karagiozova 等[7]研究表明,当试样受到轴向冲击时,应力波会在结构中传播,轴向惯性(纵波传播)和横向惯性效应之间具有强烈的相互作用,实验中试样屈曲一般发生在结构的两个端部。由此可以看出,研究开口冷弯钢构件的动力失稳是非常重要且必要的。然而,目前国内外已有的研究均无法较好地理解开口冷弯钢的动力特性,对开口冷弯钢结构的动态冲击实验研究仍较少。为此,本研究中先对 C 型冷弯薄壁钢构件进行几组落锤冲击实验,得到试件残余变形和轴向位移时程曲线,并通过 Abaqus 软件建立的数值模型进行对比验证;在此基础上,根据数值计算结果,进一步分析不同撞击能量下构件卷边、腹板和翼缘的轴向位移以及腹板横向挠度的变化,从中获得一些有益的结论。

1 实验装置和数值模拟模型

采用宁波大学自行研制的大型落锤式冲击试验机,锤头质量为 50～100 kg,冲击速度范围为 0～19 m/s。选取静态受压时以畸变屈曲为主的截面尺寸:腹板高度 120 mm,翼缘宽度 60 mm,卷边长度 15 mm,厚度 2.85 mm,总长度采用畸变屈曲的半波长 410 mm。型钢材料为 Q235 冷弯钢,经静态和动态压缩试验,测得弹性阶段杨氏模量为 209.88 GPa,泊松比为 0.3;经材料拉伸实验,测得在 10 s^{-1} 应变率下(后续落锤试验实际应变率)动态屈服应力为 353.08 MPa,真实极限应力为 467.36 MPa。试样钢材的塑性阶段取为线性强化,最终引入双线性材料本构模型(见图 2),其中塑性阶段的弹性模量为 631.82 MPa。

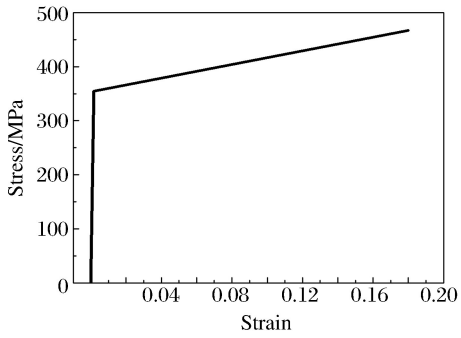


图 2 双线性材料模型

Fig. 2 Bilinear material model

在有限元模型中,将落锤和底部支撑平台简化为离散刚性平板,将锤头质量赋予顶端平板参考点上,为保证理想轴压,此参考点正对槽钢截面形心。顶端平板与槽钢顶端建立面-面接触,切向接触属性使用罚函数接触算法,摩擦系数取一般经验值 0.3,法向接触采用硬接触方法,底部平板与试样建立绑定接触,底部平板及参考点 6 个自由度均固定,顶端锤头除了 z 方向其余也全部固定,这些约束条件使计算结果很好地模拟了动态冲击下锤头的回弹过程。在网格划分模块,以 0.03 为整体单元尺寸在平板上撒种子,以 0.005 为整体单元尺寸在槽钢上撒种子,选择结构化剖分模型网格。平板选用线性离散刚体单元(R3D4),槽钢构件选择线性壳单元(S4R),接受默认的单元沙漏控制。边界条件和网格划分结果如图 3 所示。为了得到后屈曲响应,先对整体模型进行屈曲分析,得到前 10 阶屈曲模态,然后结合基于广义梁理论的屈曲分析软件(GBTUL)对主要的有限元模态进行识别,并产生一个特定的各模态组合和参与比例作为初始缺陷引入有限元的非线性屈曲分析[6]中,如表 1 所示。在非线性屈曲分析中,将网格属性修改为相应的显式类型,最终的网格模型如图 3 所示。

表 1 非线性分析中引入的屈曲模态及比例系数

Table 1 Buckling modes and their proportional coefficients in nonlinear analysis

有限元模态	临界载荷/kN	模态分数/%	模态比重	缺陷幅值
Ⅰ	415.24	22.76	1.00	0.137
Ⅱ	440.53	21.46	0.94	0.129
Ⅲ	461.18	20.50	0.90	0.127
Ⅳ	504.07	18.76	0.84	0.115
Ⅴ	572.11	16.52	0.80	0.169

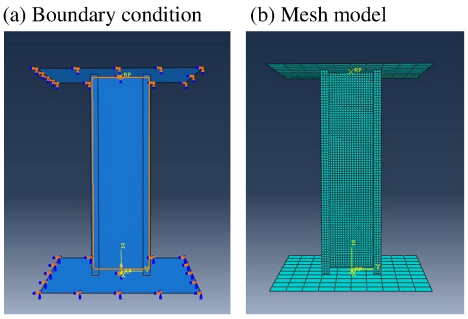


图 3 数值模拟边界条件和网格模型

Fig. 3 Boundary condition and mesh model in numerical simulation

2　实验与数值模拟对比

2.1　残余变形

为了论证数值模拟的准确性，采用落锤冲击试验机进行落锤冲击试验，锤头质量为 50 kg，冲击速度分别为 6.7 和 9.0 m/s。试样的残余变形如图 4 所示。可以看到，在较高速度的冲击下试样的卷边变形破坏严重。实验和数值模拟得到的两组试样的屈曲残余变形基本一致，验证了数值模型具有较高的准确性，保证数值模拟得到的其他数据具有一定的可靠性。

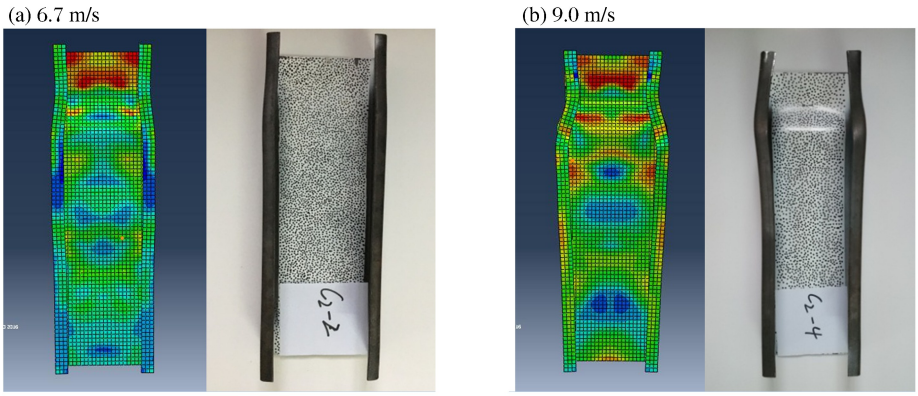


图 4　实验与模拟试样的残余变形对比

Fig. 4　Comparison of experiment and simulation for residual deformation

2.2　轴向位移

采用高速摄影仪对准腹板散斑区域采样，利用数字散斑技术和 Vic-2d 分析软件得到试样轴向位移时程曲线，并与模拟结果比较，如图 5～6 所示。

实验和模拟得到的冲击加载过程中腹板受冲击段的轴向位移-时间曲线基本吻合，进一步证明了数值模拟的准确性。由于试件变形后的回弹、自身振动和试件内部应力波的传播效应，导致落锤实验采集到的腹板受冲击段的轴向位移-时间曲线发生波动。但总体来说，数值计算结果与实验结果具有良好的一致性，从而证明了有限元模型的正确性。

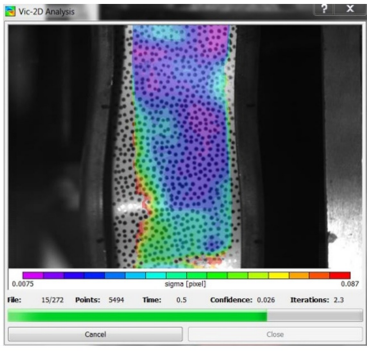


图 5　数字散斑分析结果

Fig. 5　Digital spackle analysis

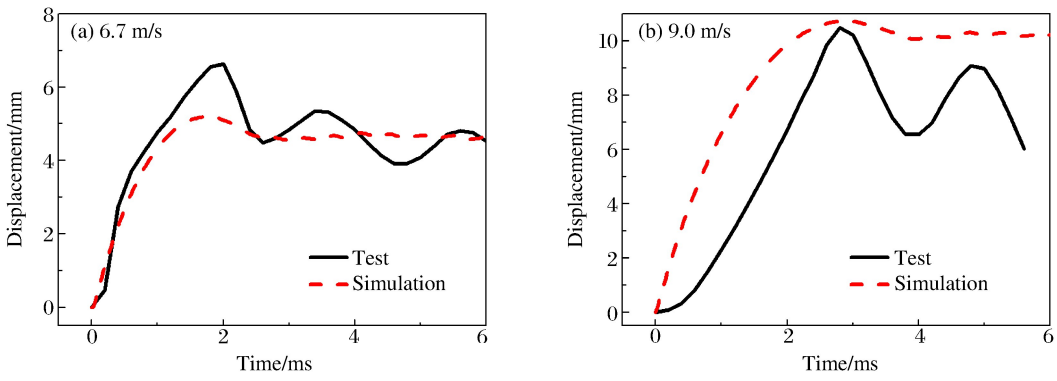


图 6　腹板顶部轴向位移的实验与模拟结果比较

Fig. 6　Comparison of experiment and simulation for axial displacement of the web top

3 数值计算结果分析与讨论

3.1 质点位移和质点速度

基于上述对数值计算结果正确性和可靠性的论证，进一步计算和分析槽钢构件在 50 kg 锤头分别以 3.0、5.0、6.7 m/s(实验对照组)和 8.0 m/s 撞击下的变形情况。在承受冲击的端面上于腹板中心、翼缘中心和卷边最外侧取点(具体位置见图 7)，提取其轴向位移和速度时程曲线，并与锤头轴向加载的位移时程曲线做对比，以 6.7 和 3.0 m/s 为例进行详细描述和讨论。

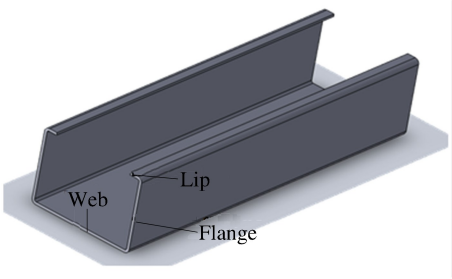


图 7 提取质点位置示意

Fig. 7 Positions of the extracted particles

从图 8(a)可以看出，当受到 6.7 m/s 速度撞击时，试样在锤头回弹之前，也就是顶端平板轴向位移达到最大值之前，卷边在图中虚线(t = 1.32 ms)处与锤头脱离，翼缘对卷边的约束作用率先失效。图 8(b)也证明了这一点：从同一时刻开始，卷边的轴向位移和速度高于腹板和翼缘，撞击结束后试样残余变形中卷边的轴向位移也大于腹板和翼缘。图 9 中，在 3.0 m/s 的较低速度冲击下，在整个冲击过程中试样顶端一直与锤头紧密接触，卷边没有先失去承载能力而发生局部变形，试样的整体残余变形幅度较小。也就是说，在冲击载荷下，由于冷弯薄壁槽钢的翼缘失去对卷边的约束作用，卷边率先发生变形继而失去加劲作用，导致腹板和翼缘的荷载能力下降；随着冲击速度的提高，翼缘和腹板也发生失稳，试样整体变形更加明显。

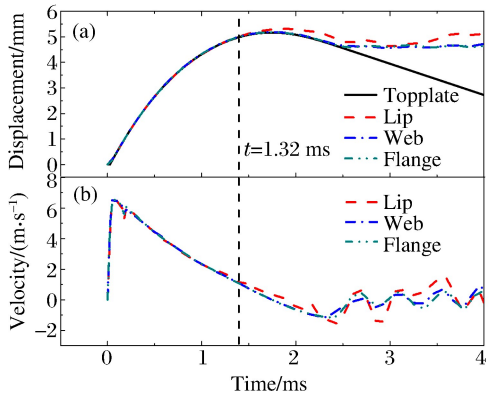


图 8 质点位移(a)及速度(b)时程曲线(6.7 m/s)

Fig. 8 Particle displacement (a) and velocity (b) history curves (6.7 m/s)

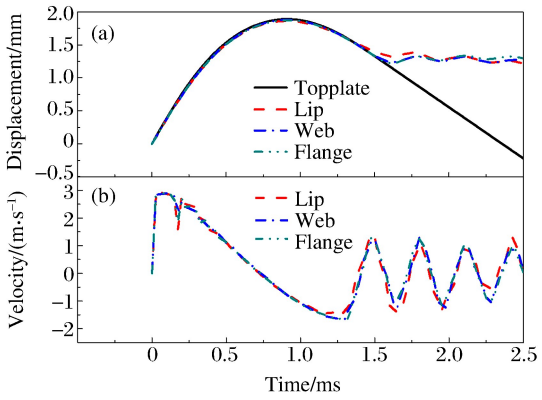


图 9 质点位移(a)及速度(b)时程曲线(3.0 m/s)

Fig. 9 Particle displacement (a) and velocity (b) history curves (3.0 m/s)

3.2 冲击力时程曲线和应力波效应分析

提取 4 种冲击速度下顶端平板与槽钢构件接触对的接触力，以 6.7 m/s 冲击速度为例，对比质点竖向速度时程曲线，详细分析在整个过程中冲击力的变化，如图 10 和图 11 所示。为了分析在撞击过程中应力波的传播过程，从冲击端开始，在腹板中间每隔 100 mm 取 1 个节点，输出该点的轴向位移时程曲线，如图 12 所示。零节点为冲击端，最先沿轴向发生位移；随着应力波的传播，每隔约 0.025 ms 传递 1 个节点，使其发生轴向位移；当应力波传播到试样的 200 mm 节点即腹板中间时(约 0.05 ms)，冲击力的初始上升段出现明显的拐点(见图 10)，此时试样的横向挠度开始显著增加(如图 13 虚线所示)；当应力波继续传播到固定端并反射形成反射波时，靠近固定端节点(即 400 mm 节点)的轴向位移将不再增加，如图 12 所示，即从约 0.1 ms 开始 400 mm 节点的轴向位移未发生变化；经过约 0.2 ms，反射波回到冲击端(即图 10 各曲线中冲击力达到最大值时刻)，如图 11 所示，经过竖向虚线处的冲击力拐点后，冲

击力持续上升，直到反射波回到冲击端产生拉伸波，冲击力开始下降。应力波传播和轴向位移的关系与国内其他学者研究发现的受冲击直杆中的应力波效应[8]一致，而图 10 中冲击力拐点的出现及其随冲击速度增加而提高的现象，截至目前所见的关于冷弯钢结构的动态冲击研究中尚未涉及。将冲击力拐点和材料的动态屈曲应力进行比较，发现拐点值并不是动态屈服应力，其提升也不是由材料屈服强度的应变率效应导致；另外，从 3.1 节中的分析可以看出，拐点出现时，翼缘、腹板和卷边都没有与锤头分离，即拐点也不是由构件局部变形产生的。综上分析，认为此拐点是该尺寸槽钢构件的动力屈曲载荷，且随着冲击速度（应变率）的增大，动态屈曲载荷也相应提升。另外，整个试样的轴向位移在冲击力达到最大值之后继续增加，说明应力波的传播在槽钢构件承受冲击作用发生动态失稳中起到主要作用。

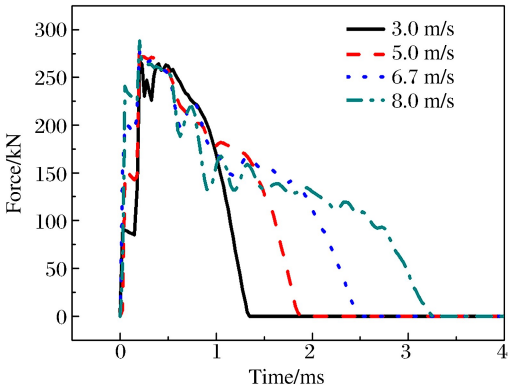


图 10　不同速度冲击下冲击力时程曲线

Fig. 10　Impact force history curves at different impact velocities

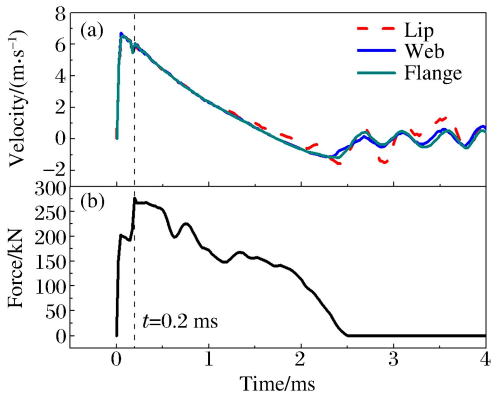


图 11　质点速度(a)及冲击力(b)时程曲线(6.7 m/s)

Fig. 11　Particle velocity (a) and impact force history (b) curves (6.7 m/s)

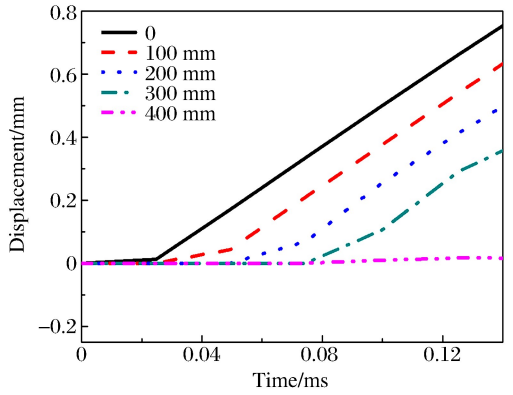


图 12　应力波沿腹板中线的传播

Fig. 12　Stress wave propagation along the web's center line

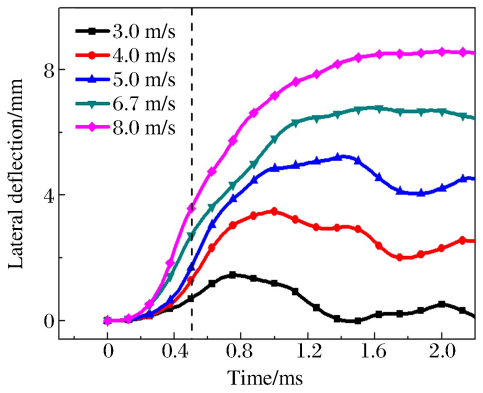


图 13　不同速度冲击下腹板最大横向挠度时程曲线

Fig. 13　Maximal transversal deflection history in the web at different compact velocities

比较发现：在较低速度（如 3.0 m/s）冲击下腹板基本没有出现大的横向挠度，甚至回到最初的平衡状态，根据目前国内外已有的板件动态屈曲判断准则（如 Volmir 准则[9]），此时试样腹板只发生了弹性屈曲，随着应力波的传播来回振动；随着冲击能量的提升，试样变形增大，腹板横向挠度不断变大且不可恢复，结合之前对冲击力-时间曲线的分析，得出冲击能量的提升会增加冲击力平台值的作用时间，再结合应力波传播效应，导致槽钢构件的卷边失去加劲作用，继而使构件整体失稳，达到塑性屈曲状态。

4　结　论

建立了轴向冲击载荷下薄壁冷弯钢构件的数值分析模型，并通过落锤冲击实验进行对比验证，得到以下结论：(1) 数值分析得到的槽钢构件轴向位移曲线和试样残余变形与实验结果具有良好的一致性，

保证数值分析所得结论具有可靠性;(2) 在较低的轴向冲击速度下,槽钢构件的翼缘仍然对卷边起到较大的约束作用,腹板的横向挠度也较小,随着冲击速度的提升,腹板的横向变形愈加明显,加载阶段中卷边的轴向位移明显大于翼缘和腹板,即卷边率先失去动态承载能力;(3) 随着轴向冲击速度的增大,槽钢构件的动态屈曲载荷相应提升。

参考文献:

[1] 冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB50018-2002[S]. 北京:中国计划出版社,2002.

[2] AISI. Specification for the design of cold-formed steel structural members, cold-formed steel design manual-Part Ⅴ [M]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, 2005.

[3] ZEINODDINI V M, SCHAFER B W. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach[J]. Thin-Walled Structures, 2012,60:105-117.

[4] RUSINEK A, ZAERA R, KLEPACZKO J R. Constitutive relations in 3-D for a wide range of strain rates and temperatures-application to mild steels[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007,44(17):5611-5634.

[5] KENNY S, PEGG N, TAHERI F. Dynamic elastic buckling of a slender beam with geometric imperfections subject to an axial impulse[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000,35(3):227-246.

[6] BONADA J, CASAFONT M, ROURE F, et al. Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns[J]. Thin-Walled Structures, 2012,51:99-111.

[7] KARAGIOZOVA D, JONES N. Dynamic elastic-plastic buckling phenomena in a rod due to axial impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(7/8):919-947.

[8] 肖刚. 结构在约束下和动力作用下屈曲的数值模拟[D]. 上海:上海交通大学,2008.

[9] VOLMIR S A. Nonlinear dynamics of plates and shells[M]. Moscow: Science, 1972.

Dynamic response of cold-formed thin-wall steel lipped channel under axial impact

ZHANG Xu[1], SUN Guojun[2], HUANG Xuhao[3], YE Wenhua[1], ZHU Jue[1]

(1. *Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
2. *Zhejiang Er Jian Steel Structure Company, Ningbo* 315207, *Zhejiang*, *China*;
3. *Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200030, *China*)

Abstract: In our study, we established a finite element model using Abaqus, a commercially available software, to simulate the dynamic response of a cold-formed thin-wall steel lipped channel under axial compact, and verified its reliability by the highly consistent data and residual deformation obtained both from the finite element simulation and a drop hammer test. Based on the finite element model, we analyzed the axial displacement histories of the web, the flange and the lip, and the changing process of the web's lateral deflection under different impact energies. The results indicate that the axial displacement and the speed of the lip are significantly greater than those of the web and the flange during the loading process of higher impact energy, while the flange exerts an obvious constraint on the lip under lower impact energy. The dynamic critical load of the cold-formed steel channel under axial impact increases as the impact velocity goes up.

Keywords: steel structure; dynamic response; drop hammer test; axial impact

(责任编辑 王 影)