

冲击荷载作用下钢框架的动态响应分析

杨绵越¹, 付朝江^{1,2}, 陈洪均¹

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 在冲击荷载作用下, 钢框架结构的动态响应是一个复杂的非线性过程。运用 ANSYS/LS-DYNA 建立了钢框架的三维模型, 对冲击荷载作用下钢框架的动态响应和破坏形态进行研究。采取多点积分算法, 有效避免沙漏问题, 保证计算结果精确。以冲击块与钢框架的碰撞冲击为例, 研究了冲击速度、冲击块质量、冲击位置等参数对钢框架在横向冲击作用下动力响应的影响, 并分析冲击荷载下钢框架的破坏形态。结果表明: 冲击块的质量、速度、冲击位置的增加都会不同程度地加剧钢框架的动态响应; 在冲击作用下, 高应变主要出现在被冲击柱子的冲击区域、柱脚处和梁柱节点处; 冲击荷载下钢框架的破坏形态为整个框架发生侧移, 受冲击柱在冲击处翼缘出现局部屈曲, 受冲击区域的截面发生弯扭, 未受冲击柱出现倾斜。

关键词: 冲击荷载; 钢框架; 多点积分; 动态响应; 破坏形态

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)04-0317-07

Dynamic response analysis of steel frame subjected to impact load

Yang Mianyue¹, Fu Chaojiang^{1,2}, Chen Hongjun¹

(1.College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2.Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The process of dynamic response for steel frame subjected to impulsive load is a complicated nonlinear problem. A three-dimensional model of the steel frame was established using ANSYS/LS-DYNA finite element analysis software. The dynamic response and failure modes of the steel frames under impact loading were studied. Multi-point integration algorithm was adopted to avoid hourglass problem effectively and to ensure accurate calculation results. Taking the collision of impact block and steel frame as an example, the effect of impact velocity, impact mass and impact position on the dynamic response of the steel frame were analysed, and the failure mode of the steel frame under impact was discussed. With the increase of impact mass, impact velocity and impact position, the dynamic response of the steel frame increases. High strain mainly occurs at the impact area, the bottom of the column and the beam column joints. The failure mode of the steel frame under the impact load is lateral displacement of the whole frame. Local buckling occurs at the flange of the impact column, bending-torsion takes place at the section of the impacted area, and tilting appears in the another column.

Keywords: impact load; steel frame; multi-point integration algorithm; dynamic response; failure mode

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378124))

通讯作者: 付朝江(1966-), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 主要研究方向: 钢结构理论及结构数值分析。

在钢结构的使用期间,其遭遇冲击、碰撞等多灾变交合破坏作用的事件频频在世界各地发生,其中损失和伤亡最大要属于美国“911”事件。并且由于钢结构的自重较轻、截面开展的特点,其一旦遭遇撞击或冲击等外界动力荷载的作用,结构或构件的损伤和破坏程度势必会高于一般的混凝土结构和组合结构。因而,开展对钢框架的抗冲击研究,对于理解整个结构在冲击荷载作用下的力学行为,考察钢框架的抗冲击性能,对钢框架的抗冲击设计具有一定的指导意义,对现实的工程具有一定的理论意义和现实意义。

国外学者对冲击荷载下单个构件的研究较多,对冲击荷载作用下钢框架的研究较少。G.M. Nagel^[1]等人采用三角脉冲荷载对自由梁进行冲击响应分析,得到了冲击荷载作用下自由梁的动态变形机制; HengPiseth 和 HjiajMohammed^[2]等人对两端固支梁进行了冲击试验,提出了固支梁在均布冲击荷载下的 3 种失效模式:非弹性大变形、拉伸破坏、支承处的剪切破坏。

在国内,朱斌^[3]等人对水上埋置框架结构进行在撞击力作用下的动力特性研究;霍静思^[4]等采用落锤冲击试验机对 4 个热轧 H 型钢梁进行了动态抗冲击力学性能试验研究;王蕊^[5]等采用 Abaqus 有限元软件对热轧型钢 (HW100 mm × 100 mm × 6 mm × 8 mm) 受侧向冲击荷载作用下的力学性能进行了参数分析研究;张峰峰^[6]通过 ANSYS/LS-DYNA 软件数值模拟对性连接钢框架和半刚性连接钢框架受冲击过程进行了数值仿真研究;宿专青^[7]通过对通过有限元软件建立数个传统钢框架和新型梁翼缘削弱型钢框架有限元模型,研究其在撞击作用下的动力响应。

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 的显式中心差分算法,对钢框架受冲击荷载的动态响应及破坏模式进行数值模拟,研究冲击质量、冲击速度、冲击位置参数对钢框架动态响应的影响,并探讨了钢框架在冲击荷载下的破坏形态。

1 数值模拟

1.1 模型简介

钢框架采用 Q235 的热轧 H 型钢,柱净高 3 m,梁净宽 3 m。柱的截面尺寸设为 302 mm × 294 mm × 12 mm × 12 mm,梁的截面尺寸设为 204 mm × 200 mm × 12 mm × 12 mm。梁与柱的节点

采用全焊缝节点,通过 ANSYS/LS-DYNA 的 glue 命令流实现。柱顶端采用自由约束,柱脚端为固定约束。

冲击质量块的尺寸为 $H \times B \times L$ 为 500 mm × 302 mm × 1 500 mm。可通过调节冲击质量块的质量密度,来实现改变冲击质量。为了保证结构的动能全部由钢框架吸收或耗散,把冲击质量块约束为刚体。冲击质量块在速度 V 运动方向移动,沿 R 柱强轴方向冲击钢框架。框架模型见图 1。

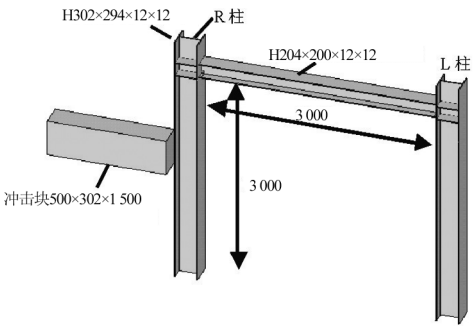


图 1 钢框架模型 (单位:mm)

Fig.1 Model of steel frame (unit:mm)

本文的分析参数包括:冲击质量 T 设为 3 种情况:1、3、6 t;冲击速度 V 设为 4 种情况:5、10、15、20 m/s;冲击位置 L 设为 2 种情况:1、1.5 m; L 代表柱脚到达冲击区域下边缘的距离。文中出现 1T10V1L 表示冲击质量 $T = 1$ t、冲击速度 $V = 10$ m/s、冲击位置 $L = 1$ m,其余类推。

1.2 钢材本构模型

Q235 钢材材料模型采取 Cowper-Symond 等效强化模型,其本构关系为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{n}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中, $E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}}$ 为塑性硬化模量,式中 E 与 E_{tan} 的物理意义如图 2; σ_y 为动态流动应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 和 n 都为 Cowper-Symonds 应变参数,有实验确定; σ_0 为 Q235 钢的静力屈服强度; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变,其表达式为: $\epsilon_p^{\text{eff}} = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} dt$ 式中, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变率,它等于总应变减去弹性应变率: $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e$; β 为可调参数,当 $\beta = 1$ 时为等向强化模型; $\dot{\epsilon}$ 为应变率。

关于钢材的力学性能,其中弹性模量 E 为

2.06×10⁵ MPa, 剪切模量 E_{tan} 为 1.18×10³ MPa, Q235 钢的静力屈服强 σ_0 为 235 MPa, 参数 C 为 40.4, 参数 β 为 1。

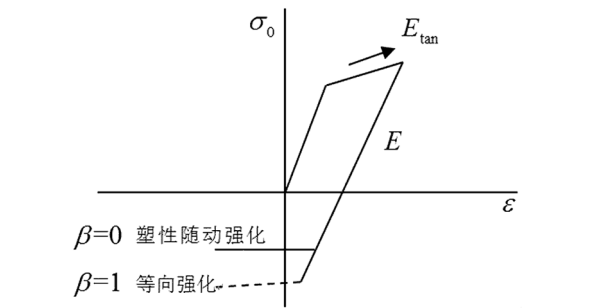


图 2 Cowper-Symonds 模型
Fig.2 Model of Cowper-Symonds

通过 Von Mises 等效应力来判别结构是否进入塑性状态。采用延性损伤准则来模拟钢材的失效破坏。假定损伤开始时候的等效塑性应变 $\varepsilon_D^{\text{pl}}$ 是关于三维应力和应变率的函数:

$$\varepsilon_D^{\text{pl}} = (\eta, \dot{\varepsilon}^{\text{pl}}) \tag{2}$$

式中, $\eta = -p/q$ 是应力三轴度, p 是指压应力, q 是 Miss 等效应力, $\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 是等效塑性应变率。

为了更好的得到模型在不同的冲击作用下的能量、冲击反力以及框架整体的应力分布情况, 本文采用等效塑性应变值为 0.34^[7]。

1.3 网格划分

钢框架采用的单元为 ANSYS/LS-DYNA 单元库中的 SOLID164 单元, 这是一种 8 节点 6 面体单元, 单元没有实常数, 精度和收敛性较高。同时采用多积分算法进行计算, 这样可以有效地避免由于点积分产生单元计算不稳定, 使结构在弯曲计算过程中容易产生刚度过于僵硬, 导致单元退化, 产生较大的沙漏能, 使计算结果更加精确^[7]。

为了划分较规格的单元, 将钢框架和冲击质量块用 ANSYS/LS-DYNA 中映射网格对其整体划分, 根据文献[8], 为了更好地提高计算效率, 保证计算精度。将整个框架模型的划分网格尺寸设为 60 mm, 冲击碰撞区域网格尺寸设为 20 mm。冲击块的单元尺寸取为 50 mm。

2 动态响应分析

2.1 冲击力

通过用数值模拟, 得到不同工况下的冲击力时程曲线和最大冲击力, 并绘制最大冲击和速度

相关曲线。

图 3 是冲击位置为 1 m 在不同冲击速度下冲击力时程曲线。由图 3 可知, 只改变冲击速度, 其余参数不变条件下, 随着速度越大, 冲击力的峰值越大, 冲击持续时间越长。图 4 是冲击位置为 1 m 在不同冲击质量下冲击力时程曲线, 表 1 是所有计算参数下的最大冲击力汇总表。由图 4 和表 1 可知, 只改变冲击质量, 其余参数不变时, 随着冲击质量增加, 整个模型的最大冲击力没有变化, 但冲击时间增加。由此可得出, 冲击速度影响最大冲击力, 冲击质量对最大冲击力无影响。

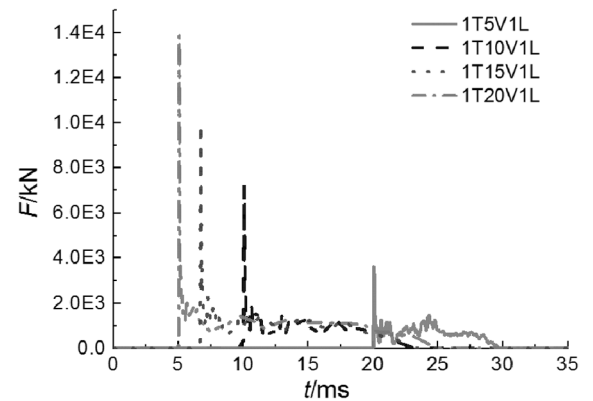


图 3 冲击位置为 1 m 不同冲击速度下冲击力时程曲线
Fig.3 The impact force-time history curves with different speeds at 1 m

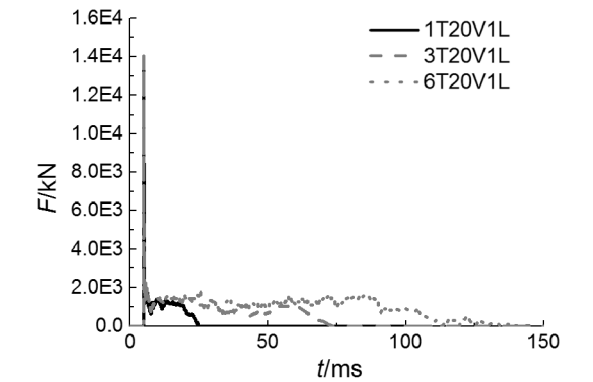


图 4 冲击位置为 1m 不同冲击质量下冲击力时程曲线
Fig.4 The impact force-time history curves with different speeds at 1 m

图 5 是冲击位置为 1.5 m 时不同冲击速度下冲击力时程曲线。通过图 5 与图 3、表 1 比较得到, 当冲击位置在 1.5 m, 整个冲击过程会发生二次冲击, 冲击位置 1 m 的最大冲击力和冲击位置 1.5 m 的最大冲击力基本不变。由此可知, 冲击

位置对整个结构冲击力最大值无影响。

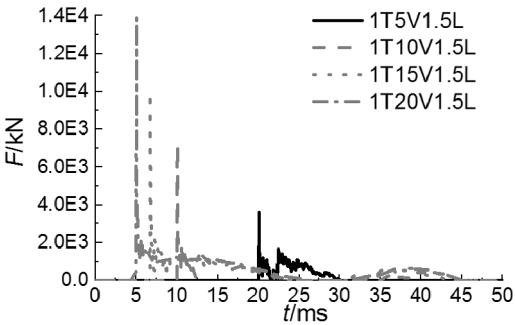


图 5 冲击位置为 1.5 m 不同冲击速度下冲力时程曲线

Fig. 5 The impact force-time history curves with different speeds at 1.5 m

通过以上参数分析和比较可知,影响整个结构冲击最大值的主要因素是冲击质量块速度。通过图 6 最大冲击力与速度的关系曲线图,拟合得到最大冲击力和冲击速度相关方程:

$$F_{\max} = 671.656\,6v + 275.365 \quad R^2 = 0.992\,64 \quad (3)$$

其中, R^2 是相关指数,其值越接近 1,表明 F_{\max} 和 v 线性关系越强。

表 1 最大冲击力

Tab.1 Maximum impact force

计算参数	F_{\max}/kN	计算参数	F_{\max}/kN
1T5V1L	3 621.76	6T20V 1.5L	14 120.40
1T10V1L	7 222.81	1T5V 1.5L	3 621.78
1T15V1L	9 924.12	1T10V 1.5L	7 222.83
1T20V1L	13 915.60	1T15V 1.5L	9 924.14
3T20V1L	14 078.70	1T20V 1.5L	13 915.70

注:表中 1T10V1L 表示质量 $T=1\text{ t}$ 、冲击速度 $V=10\text{ m/s}$ 、冲击位置 $L=1\text{ m}$ 的参数组合,其余类推。

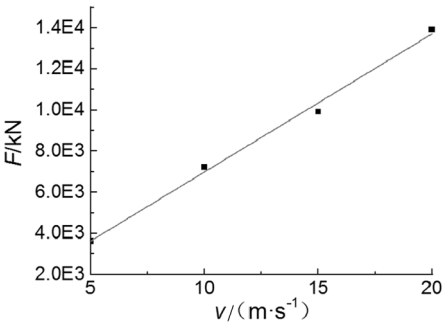


图 6 最大冲击力和速度关系曲线

Fig. 6 Relation curves of maximum impact force and speed

2.2 位移

图 7 是冲击位置为 1 m 在不同冲击速度下 L

柱 1/2 处位移时程曲线,图 8 是冲击位置为 1 m 在不同冲击速度下 R 柱柱顶位移时程曲线。从图 7、8 可看出,冲击速度在 20 m/s (72 km/h) 以内,随着冲击速度的增加,整个模型的 L 柱 1/2 处的水平位移峰值及残余位移逐渐增加。如速度从 5 m/s (18 km/h) 增至 10 m/s (36 km/h) 时, L 柱 1/2 处的水平位移最大值增幅为 35.67 mm, R 柱柱顶水平位移最大值增幅为 37.28 mm;速度从 10 m/s (36 km/h) 增至 15 m/s (54 km/h) 时, L 柱 1/2 处的水平位移最大值增幅为 46.98 m, R 柱柱顶

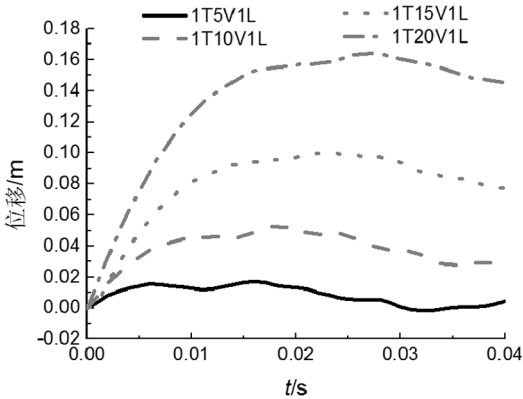


图 7 冲击位置为 1 m 不同冲击速度下 L 柱 1/2 处位移时程曲线

Fig. 7 Lateral displacement-time history curves of mid L column with different speeds at 1 m

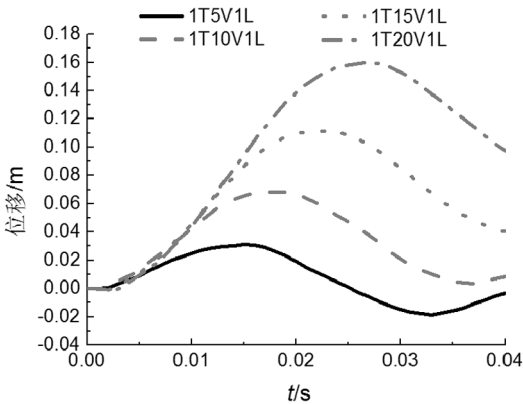


图 8 冲击位置为 1m 不同冲击速度下 R 柱柱顶位移时程曲线

Fig. 8 Lateral displacement-time history curves of top R column with different speeds at 1 m

水平位移最大值增幅为 43.22 mm;速度从 15 m/s (54 km/h) 增至 20 m/s (72 km/h) 时, L 柱 1/2 处的水平位移最大值增幅 64.37 mm, R 柱柱顶水平

位移最大值增幅为 48.18 mm。说明冲击速度越大,激起结构的反应越大;随着速度增加,钢框架塑性区域发展越来越快。通过图 7、8 比较可看出,未受冲击侧 R 柱也受冲击影响,但残余水平变形相对受冲击 L 柱处要小。

图 9 是冲击位置为 1 m 在不同冲击质量下 L 柱 1/2 处的位移时程曲线,图 10 是冲击位置为 1 m 在不同冲击质量下 R 柱柱顶位移时程曲线,从图 9、10 可见,冲击质量在 6 t 以内,随着冲击质量增加,整个模型 L 柱 1/2 处的水平位移峰值及残余位移逐渐增加。当 1 t 增至 3 t 时,L 柱 1/2 处的水平位移最大值增幅为 265.38 mm,R 柱柱顶水平位移最大值增幅为 217.20 mm;当 3 t 增至 6 t 时,L 柱 1/2 处的水平位移最大值增幅为 248.10 mm,R 柱柱顶水平位移最大值增幅为 48.20 mm,说明冲击质量越大,激起结构的反应越激烈;在相同质量增幅情况下,峰值位移增幅及残余位移增幅均呈递减之势,钢框架塑性区域发展速度减缓。通过比较图 9、10 可以发现,未受冲击侧 R 柱也受冲击影响,而且得到受冲击侧 L 柱的冲击响应比未受冲击侧 L 柱的冲击响应更加激烈。

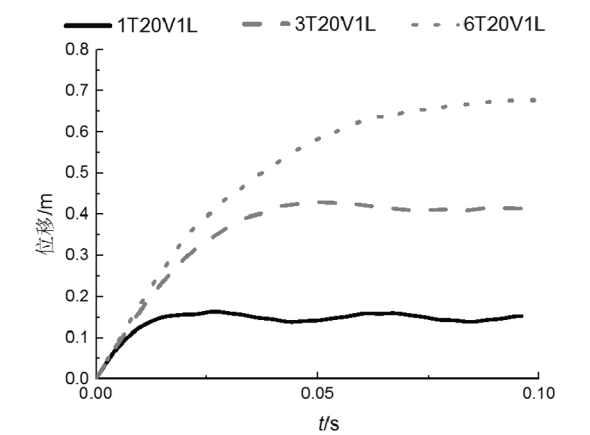


图 9 冲击位置为 1m 不同冲击质量下 L 柱 1/2 处位移时程曲线

Fig.9 Lateral displacement-time history curves of mid L column with different masses at 1 m

图 11 是冲击位置为 1.5 m 在不同冲击速度下 L 柱 1/2 处的位移时程曲线,图 12 是冲击位置为 1.5 m 在不同冲击速度下 R 柱柱顶位移时程曲线。通过图 7、11 比较发现,速度为 5 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 的 L 柱 1/2 处的最大水平位移比

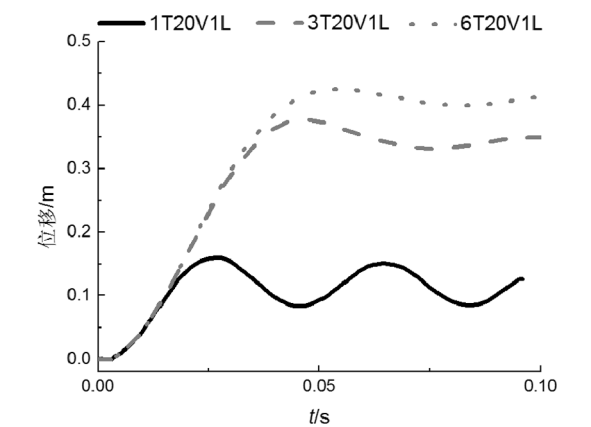


图 10 冲击位置为 1m 不同冲击质量下 R 柱柱顶位移时程曲线

Fig.10 Lateral displacement-time history curves of top R column with different masses at 1 m

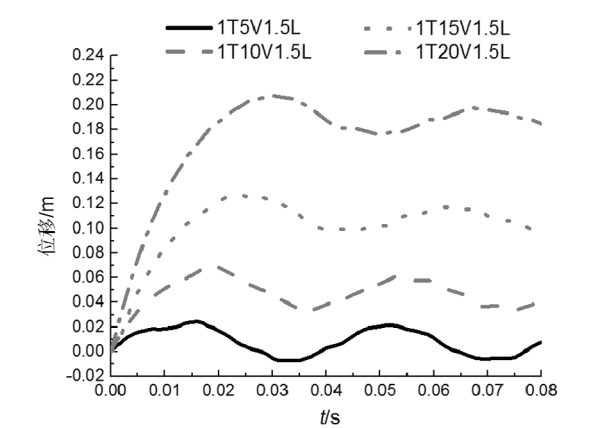


图 11 冲击位置为 1.5 m 不同冲击速度下 L 柱 1/2 处位移时程曲线

Fig.11 Lateral displacement-time history curves of mid L column with different speeds at 1.5 m

冲击位置为 1 m 的 L 柱 1/2 处的最大水平位移增加 12.61 mm;速度为 10 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 L 柱 1/2 处的最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 L 柱 1/2 处的最大水平位移增加 24.25 mm;速度为 15 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 L 柱 1/2 处的最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 L 柱 1/2 处的最大水平位移增加 40.81 mm;速度为 20 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 L 柱 1/2 处的最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 L 柱 1/2 处的最大水平位移增加 66.70 mm。通过图 8、12 比较发现,速度为 5 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 R 柱顶

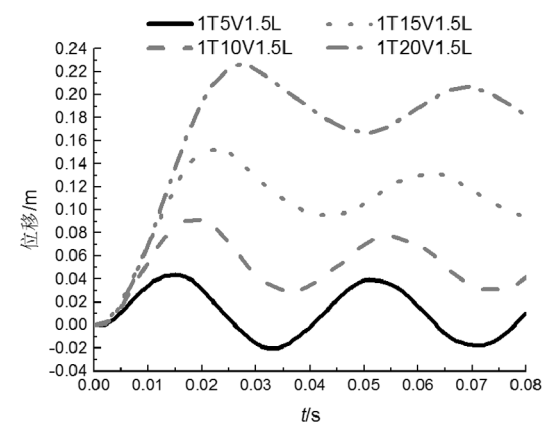


图 12 冲击位置为 1.5 m 不同冲击速度下 R 柱柱顶位移时程曲线

Fig.12 Lateral displacement-time history curves of top R column with different speeds at 1.5 m

最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 R 柱柱顶最大水平位移增加 7.13 mm;速度为 10 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 R 柱顶最大水平位移比冲击位置为 1 m 处 R 柱柱顶最大水平位移增加 16.07 mm;速度为 15 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 R 柱顶最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 R 柱柱顶最大水平位移增加 27.27 mm;速度为 20 m/s 时,冲击位置为 1.5 m 处 R 柱顶最大水平位移比冲击位置为 1 m 处的 R 柱柱顶最大水平位移增加 43.38 mm。这说明冲击质量块在冲击位置为 1.5 m 处响应激烈。这是因为相同冲击速度在冲击位置为 1.5 m 处对柱底产生弯矩比在冲击位置为 1 m 处的大,导致冲击位置在 1.5 m 处柱底由于弯矩产生转角比冲击位置在 1 m 处大。

3 破坏形态分析

根据有限元模拟结果,钢框架在冲击作用下破坏形态如图 13。破坏形态主要特征为整个框架发生侧移,受冲击柱在冲击区域翼缘处出现局部屈曲,受冲击区域的截面发生弯扭,受冲击柱在冲击区域的翼缘和腹板产生单元失效,钢梁出现弯曲,未受冲击的柱出现倾斜,柱脚出现屈曲。这说明在冲击荷载作用下钢框架的破坏形态是由于结构受到冲击荷载的水平力与框架产生弯扭应力共同作用下导致的结果。

这种破坏形态对应的计算参数是 3T20V1L、6T20V1L。通过比较所有参数模型,可以发现,破坏形态的出现和冲击块的质量和速度相关。又因

为冲击块的动能是由冲击块质量和速度共同决定,所以可以表明,破坏形态与整个结构的冲击动能相关。

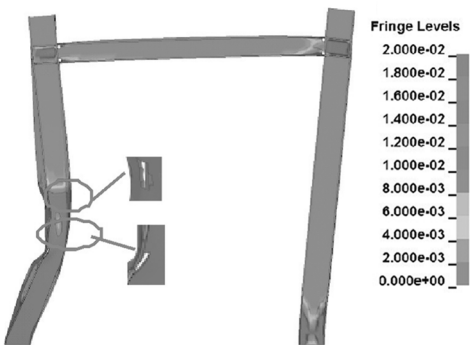
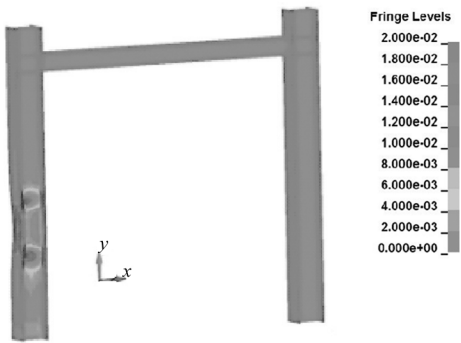


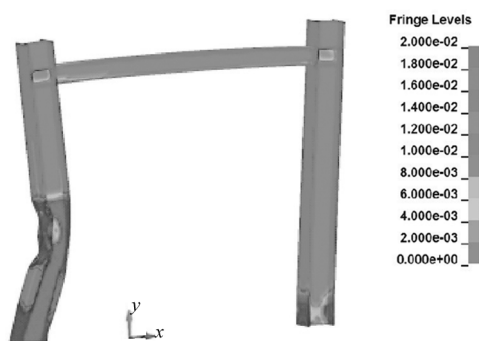
图 13 冲击作用下钢框架破坏形态

Fig.13 Failure modes of steel frame under impact

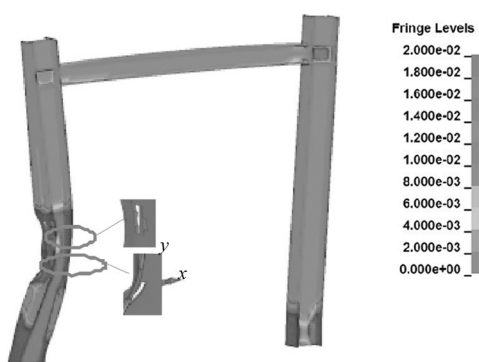
为更加清楚地表达一榀钢框架在受横向冲击作用下破坏损伤过程。以冲击速度为 20 m/s、冲击块质量为 3 t、冲击位置为 1 m 所对应的计算模型为研究对象。如图 14,当计算时间到达 0.006 s 时,冲击体和钢框架刚接触,受冲击的 L 柱在冲击区域产生塑性区域,且塑性区域发生在冲击区域的腹板处,冲击区域的翼缘板处发生屈曲,R 柱和梁上未出现塑性应变;当计算时间到达 0.013 s 时,整个钢框架发生明显侧移,受冲击侧 L 柱发生翼缘板屈曲、腹板鼓屈、截面弯扭破坏,连接梁发生弯扭现象,未受冲击 R 柱发生倾斜,柱脚屈曲变形;当计算时间到达 0.034 s,整个冲击过程结束,出现框架整体侧移,受冲击柱子在冲击区域翼缘处出现局部屈曲、整个截面发生弯扭、翼缘出现破坏,受冲击柱子在冲击区域的腹板也产生破坏,连接梁出现弯曲,未受冲击的柱子出现倾斜,R 柱和 L 柱的柱脚都出现屈曲。



(a) 0.006s 时刻冲击钢框架塑性应变云图



(b) 0.013s 时刻冲击钢框架塑性应变云图



(c) 0.034s 时刻冲击钢框架塑性应变云图

图 14 冲击作用下钢框架不同时刻塑性应变云图

Fig.14 Plastic strain cloud of steel frame at different time under impact

由图 14 可知,在冲击荷载作用下,因为冲击的时间极短,冲击力峰值大,所以一榀钢框架的破坏具有局部性,高应变主要集中在被冲击柱子的冲击区域,距离冲击区域较远的柱脚处和梁柱节点没有发生太大损伤。

参考文献:

- [1] Nagel G M, Thambiratnam D P. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1595-1620.
- [2] Heng P, Hjjaj M, Battini J M, et al. A simplified model for nonlinear dynamic analysis of steel column subjected to impact[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2016, 86: 37-54.
- [3] 朱斌,陈仁朋,罗军.低速运动船只撞击埋置框架结构动力分析模型[J].海洋工程, 2008, 26(2): 17-25.
- [4] 霍静思,张晋清,陈柏生,等.冲击荷载作用下热轧 H 型钢梁力学性能试验研究[J].建筑结构学报, 2011, 32(12): 242-249.
- [5] Pei Chang, Wang Rui. Parametric analysis of the dynamic response of hot-rolled H-shaped steel beam under lateral impact load[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 215-216: 998-1002.
- [6] 张峰峰,殷福新.基于 LS-DYNA 刚性钢框架受撞击整体性能的有限元分析[J].中国新技术新产品, 2009(18): 21.
- [7] 宿专青.削弱型钢框架在冲击荷载作用下的数值分析[D].大连:大连理工大学, 2012.
- [8] Makarem F S, Abed F. Nonlinear finite element modeling of dynamic localizations in high strength steel columns under impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 52: 47-61.

(责任编辑:陈雯)

4 结论

1) 利用非线性显式动力学有限元分析方法,对冲击荷载作用下钢框架的动态响应和破坏形态进行了研究。采用的 SOLID164 单元没有实常数,精度和收敛性较高,同时采用多积分算法进行计算,可以有效避免由于点积分产生单元计算不稳定、使单元退化而产生较大的沙漏能,以保障计算结果的可靠性。

2) 冲击体的质量、速度的增加和冲击位置的改变都会不同程度加剧钢框架的动态响应。在其它条件不变的情况下,随着冲击速度的增加, L 柱 1/2 和 R 柱柱顶处水平位移的响应峰值呈现增加趋势;其它条件不变情况下,冲击质量的增加, L 柱 1/2 和 R 柱柱顶处水平位移峰值增加;且在相同质量增幅情况下峰值位移增幅呈递减之势;冲击体的位置从 1 m 提高到 1.5 m,在其它条件不变的情况下, L 柱 1/2 和 R 柱柱顶处水平位移峰值增加。

3) 在冲击荷载作用下,钢框架破坏形式表现为框架的整体侧移,局部破坏形式表现为翼缘的出现局部屈曲,受冲击区的截面发生扭转,高应变主要出现在被冲击柱子的冲击区域、柱脚处和梁柱节点处。

4) 分析钢框架冲击荷载作用下的应变云图可以发现,框架的塑性应变是从受冲击处向柱脚和梁柱连接点处传递,受冲击侧柱塑性变形的速度明显快于未受冲击侧柱。