

# T型钢结构临时作业棚抗冲击性能有限元分析

杨志坚,张亚雯,刘一迪,李帼昌

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 为解决施工现场高空坠物对现场人员、设备以及材料引发的安全问题,对T型钢结构临时作业棚的抗冲击性能进行有限元分析.方法 采用脚手板(花旗松木)和模板(杨木)作为上部防护结构,应用有限元软件ABAQUS建立模型,开发木材材料性能的子程序,研究冲击过程中作业棚的受力性能,并考虑坠落物质量、坠落高度、冲击接触面等参数的影响.结果 脚手板和模板在冲击过程中均经历了冲击力从0迅速上升至最大值,坠落物与木材速度逐渐一致,冲击力趋于稳定,冲击力下降四个阶段.破坏模式为顺纹断裂、横向剪切破坏与击穿.结论 木材作为上层防护材料,可以有效吸收坠落物的动能,确保整体钢框架的安全.模板由于面积大,吸收的动能以及延性均优于脚手板.

**关键词** T型钢结构;木材;临时作业棚;抗冲击性能;有限元分析

中图分类号 TU733

文献标志码 A

## Finite Element Analysis on Impact Behavior of T-Shaped Steel Temporary Work Shed

YANG Zhijian, ZHANG Yawen, LIU Yidi, LI Guochang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To solve the safety problems caused by falling objects on the construction site to the on-site personnel, equipment and materials, finite element analysis was conducted on the impact property of the T-shaped steel temporary work shed. Scaffolding board (Douglas) and template (poplar) were used as the upper protective structure. The finite element software ABAQUS was used to establish a model and develop a subroutine for the properties of wood materials. The influences of the weight of the falling object, height of the fall, and impact contact surface were considered to study the behavior of the work shed subjected to the impact force. The impact forces of the scaffolding board and the template had gone through the four stages during the impact process: rise rapidly from 0 to the maximum, the falling speed is gradually consistent with the wood, tends to stabilize and finally decline. The failure modes are along the grain fracture, lateral shear failure and breakdown. As the upper protective material, wood can effectively absorb the kinetic energy of falling objects, thereby ensure the safety of the overall steel frame. Due to its

收稿日期:2019-08-24

基金项目:国家十三五重点研发计划项目(2016YFC0702102)

作者简介:杨志坚(1984—),男,副教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构方面研究.

large area,the kinetic energy and ductility of the template are better than that of the scaffold.

**Key words:** T-shaped steel structure; wood; temporary work shed; impact behavior; finite element analysis

临建设施是指施工企业在施工现场内进行工程施工所必须搭设供生活和生产使用的临时设施,是限时拆除、结构简单、临时性的建筑物或其他设施<sup>[1]</sup>.临时作业棚作为施工现场的常见临建设施,主要作用是防雨、防雪、抵御高空坠落物体等,对施工作业中的材料、设备、工人等进行防护.但实际施工现场中,临时作业棚多数是由施工现场中的钢管等材料简单搭设后直接使用,形状尺寸各异、施工安装水平低,存在极大的安全隐患.为改善上述情况,研究人员研发了一种新型装配式临时作业棚<sup>[2-3]</sup>.该作业棚具有整体稳定性好、制作简单、安装简易、可多次使用且运输方便等优点.由高空坠落物引发的安全事件数见不鲜,并且一旦发生后果严重,因此对新型装配式临时作业棚的抗冲击性能研究显得尤为重要.

为防止高空坠物对作业人员及机器造成伤害,需在钢结构临时作业棚上方设置防护层.防护层主要由木材组成,木材绿色环保,具有各向异性,且有良好的弹韧性、耐冲击性.另外,木材易在施工现场得到,如果出现损害也可以及时就地取材更换.目前国内外关于以木材作为防护层的临时作业棚抗冲击性能的研究较少,仅有杨志坚等<sup>[4]</sup>对杨木和花旗松木作为防护材料的装配式临时作业棚抗冲击性能进行研究.基于此,笔者参考国内外学者对木材在高速撞击下的应力、位移、能量变化关系<sup>[5-7]</sup>和杨木<sup>[8-9]</sup>、云杉木<sup>[10-13]</sup>在不同应变速率下冲击作用下的力学性能,以及 T 型方钢管节点<sup>[14-15]</sup>和钢框架<sup>[16-17]</sup>的抗冲击性能研究,对木材作为防护材料的 T 型钢结构临时作业棚抗冲击性能进行研究,为钢结构临时作业棚的防护层设计提供参考.

1 建立模型

1.1 材料的本构关系

钢材的本构关系采用双线性模型,屈服强度为 235 MPa,弹性模量  $E_s = 206\ 000$  MPa,强化阶段的弹性模量为  $0.02\ E_s$ .钢材本构关系见式(1)、式(2):

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad \varepsilon < \varepsilon_s. \tag{1}$$

$$\sigma_s = \sigma_y + 0.02E_s(\varepsilon - \varepsilon_y), \quad \varepsilon \geq \varepsilon_s. \tag{2}$$

木材的本构关系比较复杂,直接进行相关参数设置不能较好地反映其特性.因此,在 ABAQUS 软件中的用户自定义中编写了适合具有各向异性的木材材料子程序 VUMAT.首先利用 Yamada-Sun<sup>[18]</sup>屈服准则建立顺纹方向 L、横纹径向 R 以及剪切方向 T,判断木材是否屈服.其次参考 Sandhass<sup>[20]</sup>建立损伤模型,受压为延性破坏、受拉为脆性破坏.然后采用 Linde<sup>[19]</sup>提出的折减方案,通过损伤变量对木材进行刚度折减.

T 型钢结构临时作业棚中上层防护采用脚手板和模板两种形式,其中脚手板材料为花旗松木,模板材料为杨木.花旗松木和杨木的本构关系模型参数见表 1、表 2.表中 L 表示顺纹方向,R 表示横纹径向,T 表示横纹切向; $E_L$ 、 $E_R$ 、 $E_T$  分别为 L、R、T 方向弹性模量; $G_{LR}$ 、 $G_{RT}$ 、 $G_{LT}$  分别为 L-R、R-T、L-T 平面内剪

表 1 花旗松木本构关系模型参数

Table 1 Parameters of constitutive relation of douglas

模量/MPa	强度/MPa	泊松比	断裂能/(J·m <sup>-2</sup> )
$E_L = 10\ 178$	$X_t = 78$	0.292	29 820
$E_R = 692$	$X_c = 29.38$	0.292	29 820
$E_T = 509$	$Y_t = 4$	0.449	352
$G_{LR} = 651$	$Y_c = 8.84$	0.449	352
$G_{RT} = 71$	$Z_t = 4$	0.390	352
$G_{LT} = 794$	$Z_c = 3.56$	0.390	352

切模量; $X_t$ 、 $X_c$ 、 $Y_t$ 、 $Y_c$ 、 $Z_t$ 、 $Z_c$  分别为 L、R、T 方向抗拉及抗压强度。

表 2 杨木本构关系模型参数

Table 2 Parameters of constitutive relation of poplar

模量/MPa	强度/MPa	泊松比	断裂能/(J·m <sup>-2</sup> )
$E_L = 12\ 600$	$X_t = 122.5$	0.3	37 000
$E_R = 1\ 260$	$X_c = 44.3$	0.3	37 000
$E_T = 630$	$Y_t = 5$	0.3	437
$G_{LR} = 945$	$Y_c = 12$	0.3	437
$G_{RT} = 227$	$Z_t = 5$	0.3	437
$G_{LT} = 756$	$Z_c = 12$	0.3	437

1.2 单元选取

T 型钢结构临时作业棚模型包括立柱、横梁、斜撑、下层檩条、横向框架、纵向框架、上层檩条、防护木材及坠落物体。其中立柱、横梁、斜撑、下层檩条、横向框架、纵向框架、上层檩条采用 S4R 壳体单元;防护木材采用 C3D8R 实体单元;由于坠落物体的变形并不是研究重点,故坠落物体采用离散刚体。

1.3 接触关系

立柱底端与基础进行固接,立柱与横梁、立柱与斜撑、横梁与斜撑、下层檩条与斜撑横梁、横梁与纵向框架、纵向框架与连接板、横向框架与连接板、横向框架与上层檩条均采用绑定约束;横向框架与下层檩条、木材与上层檩条采用面与面接触,其中法向采用硬接触,切向采用库仑摩擦,摩擦系数为 0.4;坠落物体与木材的面与面接触,法向采用硬接触,切向采用库仑摩擦,摩擦系数为 0.3。

1.4 边界条件与加载方式

立柱底端与基础进行固接,故在立柱底端施加三个方向线位移约束 ( $U1$ 、 $U2$ 、 $U3$ ) 和转动约束 ( $UR1$ 、 $UR2$ 、 $UR3$ );坠落物体通过施加速度场模拟从高处自由下落,对坠落物体施加  $x$ 、 $z$  两个方向的线位移约束 ( $U1$ 、 $U3$ ) 和转动约束 ( $UR1$ 、 $UR2$ 、 $UR3$ ),释放  $y$  方向线位移 ( $UR2$ )。T 型钢结构临时作业棚有限元模型如图 1 所示。

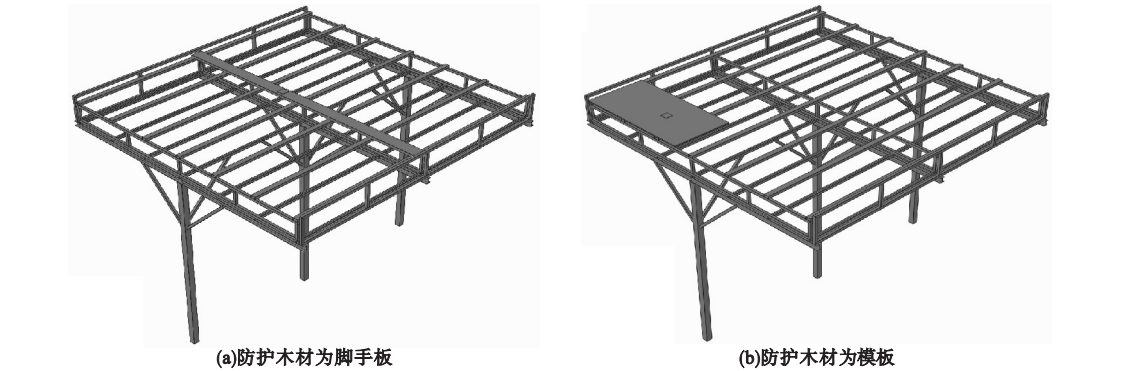


图 1 T 型钢结构临时作业棚有限元模型

Fig. 1 Finite element model of T-shaped steel temporary work shed

2 冲击全过程分析

通过改变坠落物质量、坠落高度、坠落物体与木材的冲击接触面积,对 16 个 T 型钢结构临时作业棚进行有限元模拟,通过有限元模拟得到木材和上层檩条的最大冲击力、最大竖向位移,木材及整体钢框架的最大应力,木材的破坏面积以及破坏形式对 T 型钢结构临时作业棚的抗冲击性能进行分析。

有限元模型中抗冲击材料有两种类型,分别为脚手板(JS)和模板(M);坠落高度  $H$  设置为 5 m、10 m、15 m 不同高度;坠落物体质量  $M$  选取 5 kg、8 kg、10 kg、15 kg 不同质量;坠落物体与木材的冲击接触面积  $A$  选取 100 mm × 100 mm、150 mm × 150 mm、200 mm × 200 mm 三种不同面积,计算结果见表 3。

表3 有限元分析结果  
Table 3 Finite element analysis results

模型编号	冲击力/kN		最大位移/mm		最大应力/MPa		木材破坏 面积/m <sup>2</sup>	破坏形式
	木材	上层檩条	木材	上层檩条	木材	上层檩条		
JS-H10-M10-A100	71.121	13.734	3.55	3.83	17.8	51.06	0.04	穿透
JS-H5-M10-A150	246.798	18.6	11.99	10.94	34.05	184.6	0.02	顺纹剪切破坏
JS-H10-M5-A150	342.467	16.202	11.85	8.42	27.62	134.6	0.062 5	横纹剪切破坏
JS-H10-M8-A150	345.939	20.3	20.78	10.88	28.03	182.9	0.062 5	横纹剪切破坏
JS-H10-M10-A150	347.112	19.01	26.62	12.21	38.21	234	0.062 5	横纹剪切破坏
JS-H10-M15-A150	348.688	17.819	10.93	6.17	22.52	78.27	0.087 5	穿透
JS-H15-M10-A150	385.569	15.355	8.53	3.7	18.55	45.84	0.062 5	穿透
JS-H10-M10-A200	416.815	22.192	12.4	5.6	23.92	96.89	0.1	穿透
M-H10-M10-A100	147.672	8.79	41.99	9.82	87.54	107.6	0.052 5	穿透
M-H5-M10-A150	230.201	9.999	24.05	10.87	27.06	111.2	0.022 5	横向剪切破坏
M-H10-M5-A150	309.682	9.094	21.32	8.72	25.19	95.46	0.037 5	横向剪切破坏
M-H10-M8-A150	311.446	16.107	28.52	12.54	32.65	137.5	0.037 5	横向剪切破坏
M-H10-M10-A150	312.038	13.403	38.64	14.41	54.15	142	0.175	顺纹断裂破坏
M-H10-M15-A150	312.832	15.328	30.35	16.03	90.51	150.5	0.225	穿透
M-H15-M10-A150	385.530	24.621	24.67	12.26	94.9	142.8	0.212 5	穿透
M-H10-M10-A200	524.358	16.046	30.58	14.46	31.31	162.4	0.04	横纹剪切破坏

当防护木材选用脚手板时,对JS-H10-M10-A150模型的冲击全过程进行分析.图2为脚手板在冲击过程中模态的变化情况.图3为模型中脚手板冲击力和竖向位移时程曲线,可以看出曲线大致分为四个阶段. AB段:坠落物在A点与脚手板刚刚接触,此时脚手板已产生较小变形,脚手板的模态如图2(a)所示,随后冲击力迅速增大至最大值B点. BC段:坠落物与脚手板的冲击接触面不断增大,以接触面为中心的位置变形逐渐明显.坠落物与脚手板充分接触后在C点具有相同的速度. CD段:坠落物与脚手板

以相同的速度向下运动,冲击力趋于稳定.在此阶段,脚手板的变形仍不断增大,与坠落物接触的受压区域发生横纹剪切破坏,脚手板通过自身变形消耗的动能开始下降. D点时脚手板的竖向位移达到最大值为26.62 mm,此时脚手板的模态如图2(b)所示. DE段:坠落物与脚手板逐渐分离,储存在脚手板中的变性能开始释放,弹性变形开始恢复,冲击力逐渐减小. E点时冲击力减少为0,脚手板恢复部分变形,整个冲击过程结束,此时脚手板的模态如图2(c)所示.

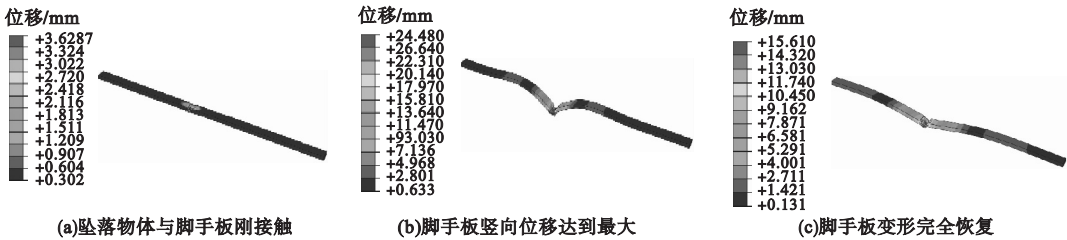


图2 JS-H10-M10-A150 受冲击时模态变化过程  
Fig. 2 Mode change process of JS-H10-M10-A150 under impact

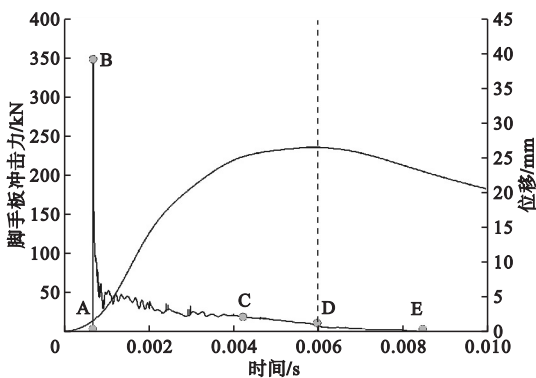


图3 脚手板冲击力及竖向位移时程曲线

Fig.3 Time history curves of impact force and vertical displacement of scaffold

图4为JS-H10-M10-A150模型受冲击之后整体钢框架的应力图,从图中可以看出,最大竖向位移出现在上层檩条,达到12.21 mm.最大应力出现在中间框架腹板处(117 MPa),小于允许应力160 MPa,此时整体钢框架安全.

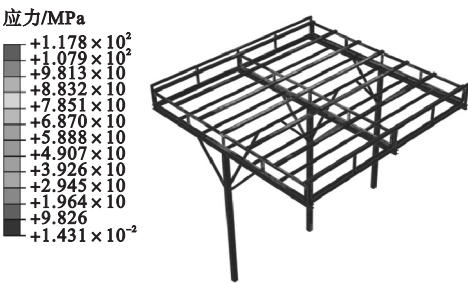


图4 JS-H10-M10-A150 整体框架应力云图

Fig.4 Mises stress of JS-H10-M10-A150

图5、图6为M-H10-M10-A150模型中,模板的模态变化图以及冲击力、竖向位移时程曲线.由图可知,模板在冲击过程中的受力情况与脚手板相似,但M-H10-M10-A150模型中模板的破坏形式与脚手板有所不同,为顺纹断裂破坏,且模板最大竖向位移大于脚手板的最大竖向位移.图7为M-H10-M10-A150模型受坠落物冲击后整体钢框架的应力图,从图中可以看出,上层檩条的竖向位移最大,达到14.41 mm.最大应力出现在中间框架腹杆处(109.7 MPa),小于其允许应力,整体钢框架安全.

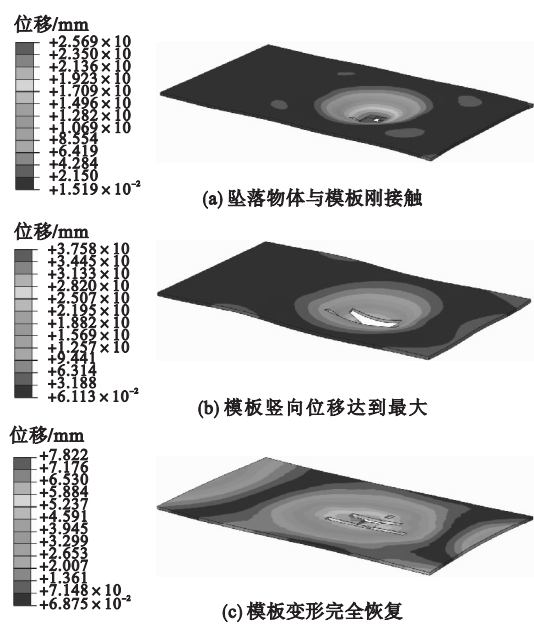


图5 M-H10-M10-A150 受冲击时模态变化过程  
Fig.5 Mode change process of M-H10-M10-A150 under impact

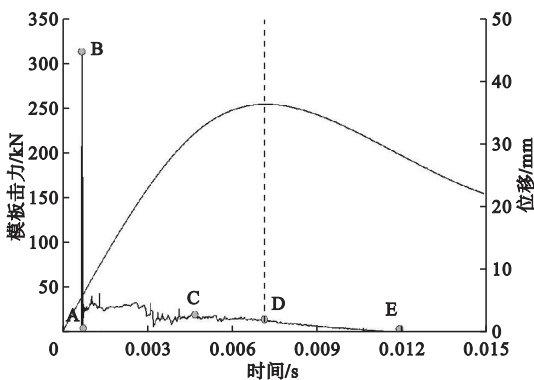


图6 模板冲击力及竖向位移时程曲线  
Fig.6 Time history curves of impact force and vertical displacement of poplar

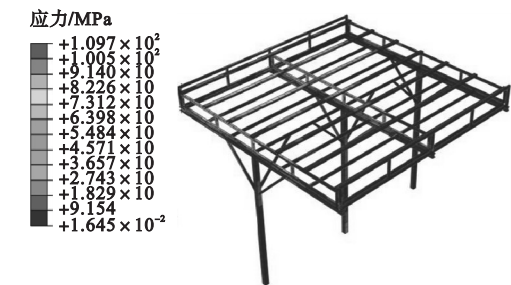


图7 M-H10-M10-A150 整体框架应力云图  
Fig.7 Mises stress of M-H10-M10-A150



3 参数分析

3.1 坠落物体质量

图8为不同质量下脚手板冲击力时程曲线.

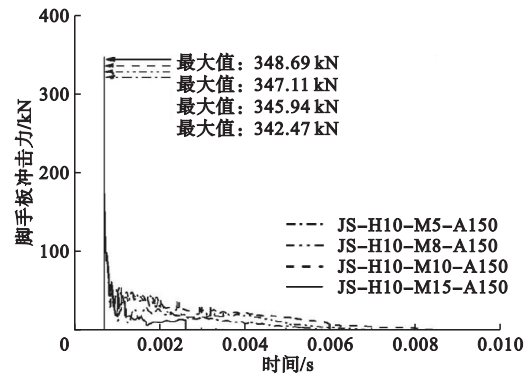


图8 不同质量下脚手板冲击力时程曲线  
Fig. 8 Impact time history curves of scaffold under different mass

由图可知,脚手板冲击力均在0.0007s左右达到最大值,故坠落物体质量对脚手板冲击力达到最大值的时间几乎没有影响. 脚手板的最大冲击力随着坠落物体质量的增加而增大. 当脚手板未被击穿时,脚手板的最大竖向位移和上层檩条的最大冲击力、最大竖向位移以及冲击持续时间随之增加,木材的破坏形态以横纹剪切破坏为主.

图9为不同质量下模板冲击力时程曲线.

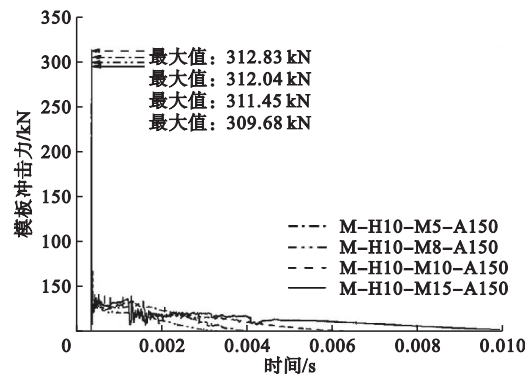


图9 不同质量下模板冲击力时程曲线  
Fig. 9 Impact time history curves of template under different mass

由图可知,模板冲击力均在0.00073s左右达到最大值,故质量对模板AB段的时

长几乎没有影响. 随着坠落物体质量的增加,木材和上层檩条的冲击力、位移、应力以及破坏面积也随之增大. 而且模板增长速率小于脚手板的增長速率.

3.2 坠落高度

图10为脚手板在不同高度下冲击力时程曲线.

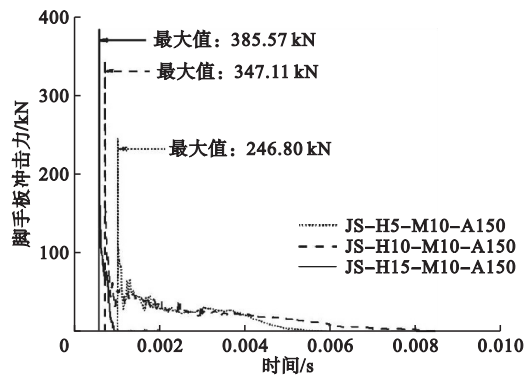


图10 不同高度下脚手板冲击力时程曲线  
Fig. 10 Impact time history curves of scaffold under different height

从图中可以看出,坠落高度越高,脚手板的最大冲击力越大,且冲击力达到最大值需要的时间越短. 当脚手板未被击穿时,脚手板和上层檩条的位移、应力以及破坏面积均随坠落高度的增加而增大. 当坠落高度为15m时,脚手板被击穿,上层檩条的冲击力、位移、应力均较小,破坏面积与10m相比没有变化.

图11为不同高度下模板冲击力时程曲线.

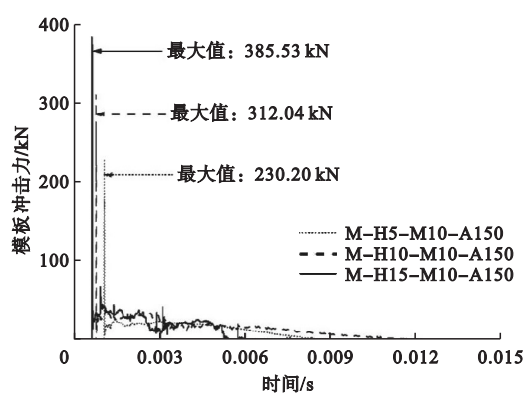


图11 不同高度下模板冲击力时程曲线  
Fig. 11 Impact time history curves of template under different height

从图中可以看出,模板最大冲击力随着坠落物高度的增加而明显增大. 坠落高度越高,模板冲击力达到最大值需要的时间越短. 坠落物体未穿透模板时,冲击过程的时长随坠落高度的增加而增加. 坠落高度为 15 m 时,坠落物体穿透模板,冲击过程持续时间较短,图 11 为 0.005 3 s.

3.3 坠落物体与木材冲击接触面积

图 12 为不同高度下脚手板冲击力时程曲线.

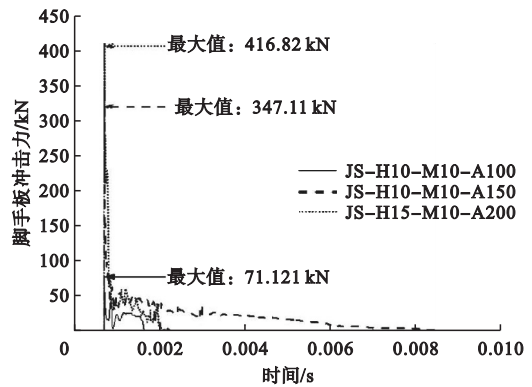


图 12 不同接触面积下脚手板冲击力时程曲线

Fig. 12 Impact time history curves of scaffold under different contact area

由图中可以看出,脚手板冲击力均在 0.000 68 s 左右达到最大值,故冲击接触面积对 AB 段的时长几乎没有影响. 当脚手板未被击穿时,发生的是横纹剪切破坏,且整个冲击过程的持续时间随接触面积的增加而增加. 另外脚手板和上层檩条的最大冲击力、破坏面积也随冲击接触面积的增加而增大.

图 13 为不同高度下模板冲击力时程曲线. 由图可知,模板冲击力均在 0.000 7 s 左右达到最大值,故冲击接触面积对 AB 段的时长几乎没有影响. 冲击接触面边长从 100 mm 以 50 mm 的级差增加到 200 mm 时,冲击力最大值分别增加 111.3%、68.04%. 因此模板冲击力最大值随冲击接触面积增大而明显增大. 坠落物体未穿透模板时,冲击过程持续时间随接触面积的增加而减少.

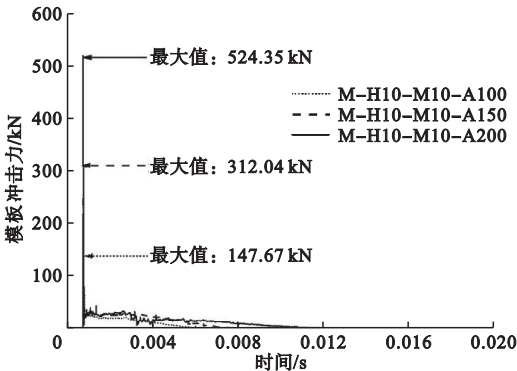


图 13 不同接触面积下模板冲击力时程曲线

Fig. 13 Impact time history curves of template under different contact area

4 结 论

(1)采用脚手板和模板作为防护结构,二者在整个冲击过程中的受冲击力情况相似,均经历了冲击力从 0 迅速增加至最大值、坠落物与木材速度逐渐一致、冲击力趋于稳定、冲击力下降四个阶段.

(2)脚手板和模板的破坏模式均分为顺纹断裂,横向剪切破坏与击穿,但都能确保整体钢框架安全. 模板由于面积较大可以充分吸收坠落物的动能,因此选择模板作为防护材料其性能优于脚手板.

(3)脚手板和上层檩条的冲击力、位移、随着坠落物体质量、坠落高度、冲击接触面积的增加而增大. 模板和上层檩条的冲击力随着坠落物质量、坠落高度、冲击接触面积的增大而增大,模板的位移随着接触面积的增大而减小.

参考文献

[ 1 ] 李运闯. 施工现场可重复使用的临时设施 [ J ]. 建筑工人, 2018, 19(1): 12 - 14.  
( LI Yunchuang. Reusable temporary facilities at construction site [ J ]. Builders' monthly, 2018, 19(1): 12 - 14. )  
[ 2 ] 杨志坚, 刘一迪, 李幅昌, 等. 新型装配式临时作业棚结构开发与有限元分析 [ J ]. 沈阳建筑大学学报 ( 自然科学版 ), 2019, 35 ( 4 ): 613 - 620.  
( YANG Zhijian, LIU Yidi, LI Guochang, et al. Structural development and finite element analysis of a new prefabricated temporary work

- shed[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(4): 613–620.)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code of design of steel structure: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)
- [4] 杨志坚, 苏志华, 李幅昌, 等. 新型钢结构作业棚抗冲击性能有限元分析[J]. 钢结构, 2019, 34(4): 80–86.  
(YANG Zhijian, SU Zhihua, LI Guochang, et al. Finite element analysis of impact resistance of new steel structure work shed[J]. Steel construction, 2019, 34(4): 80–86.)
- [5] 李树森, 马文龙, 曾剑峰, 等. 基于 abaqus 的木材抵抗高速撞击能力的仿真实验研究[J]. 现代科学仪器, 2013, 15(1): 105–107.  
(LI Shusen, MA Wenlong, ZENG Jianfeng, et al. Study on simulation experiment of wood ability of resisting high speed impact based on abaqus[J]. Modern scientific instruments, 2013, 15(1): 105–107.)
- [6] 李树森, 马文龙, 曾剑峰, 等. 基于 ABAQUS 的木材顺纹动态压缩仿真实验[J]. 中南林业科技大学学报, 2013(4): 108–111.  
(LI Shusen, MA Wenlong, ZENG Jianfeng, et al. Experimental study on dynamic compression simulation of wood parallel to grain based on ABAQUS[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2013(4): 108–111.)
- [7] 张秋实, 李树森, 谷志新, 等. 基于 ABAQUS 的木材侵彻性能的仿真研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(1): 125–128.  
(ZHANG Qiushi, LI Shusen, GU Zhixin, et al. Simulation study of wood penetration performance based on ABAQUS[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2014, 34(1): 125–128.)
- [8] 窦金龙, 汪旭光, 刘云川. 杨木的动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 367–371.  
(DOU Jinlong, WANG Xuguang, LIU Yunchuan. Dynamic mechanical properties of poplar[J]. Explosion and shock waves, 2008, 28(4): 367–371.)
- [9] 刘云川, 窦金龙, 汪旭光. 冲击压缩载荷作用下杨木的力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 93–96.  
(LIU Yunchuan, DOU Jinlong, WANG Xuguang. Research on mechanical properties of poplar under impact compressive load[J]. Journal of vibration and shock, 2009, 28(4): 93–96.)
- [10] ZHONG W Z, SONG S C, XIE R Z, et al. Numerical simulation on dynamic cushion properties of spruce wood in three kinds of impact directions[J]. Applied mechanics and materials, 2011, 44: 2321–2325.
- [11] 钟卫洲, 宋顺成, 黄西成, 等. 三种加载方向下云杉静动态力学性能研究[J]. 力学学报, 2011, 43(6): 1141–1150.  
(ZHONG Weizhou, SONG Shuncheng, HUANG Xicheng, et al. Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood under three kinds of impact directions[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2011, 43(6): 1141–1150.)
- [12] 钟卫洲, 黄西成, 郝志明, 等. 中应变率加载下云杉各向异性力学行为研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 25–33.  
(ZHONG Weizhou, HUANG Xicheng, HAO Zhiming, et al. Investigation on anisotropic behavior of spruce mechanical properties under medium strain rate loading conditions[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(5): 25–33.)
- [13] NEUMANN M, HERTER J, DROSTE B O, et al. Compressive behavior of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates[J]. European journal of wood and wood products, 2011, 69(3): 345–357.
- [14] 陈凡. 冲击荷载作用下热轧 T 型方钢管节点力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.  
(CHEN Fan. Research on dynamic behavior of hot-rolled square tubular t-joints under impact load[D]. Changsha: Hu'nan University, 2012.)
- [15] 欧阳翊龙. 轴力作用下冷弯 T 形方钢管节点受冲击荷载力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
(OUYANG Yilong. Research on dynamic behavior of axially pre-loaded cold-formed square steel tubular T-joints under impact load[D]. Changsha: Hu'nan University, 2015.)
- [16] 毛海波. 钢框架在冲击荷载下的性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
(MAO Haibo. Research on properties for steel frame under impact loading[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.)
- [17] 孔德阳, 席丰, 杨波. 受落锤撞击钢框架结构的动力响应及其梁-柱连接性能比较[J]. 兵工学报, 2017, 39(1): 30–37.  
(KONG Deyang, XI Feng, YANG Bo. Dynamic response of steel frames subjected to drop hammer shock and comparison of beam-column connection property[J]. Acta armamentarii, 2017, 39(1): 30–37.)
- [18] 徐博瀚, 周双龙. 基于 ABAQUS 的木材本构关系数值模拟方法: CN108256211A[P]. 2018.  
(XU Bohan, ZHOU Shuanglong. Numerical simulation method of wood constitutive relationship based on ABAQUS: CN108256211A[P]. 2018.)
- [19] LINDE P, PLEITNER J, BOER H, et al. Modelling and simulation of fibre metal laminates[C]. Boston: Dassault Systemes Company, 2004.
- [20] SANDHASS C. Mechanical behavior of timber joints with slotted-in steel plates[D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)