

# 爆炸荷载作用下型钢混凝土柱的动力 响应影响因素分析

齐宝欣<sup>1</sup>, 阎石<sup>1,2</sup>, 张文新<sup>1</sup>, 武行<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 目的 数值模拟爆炸荷载作用下型钢混凝土柱损伤破坏, 分析混凝土等级、型钢截面形式、纵筋配筋率、柱高等因素对型钢混凝土柱在爆炸荷载作用下动态响应的影响规律. 方法 采用有限元显示动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立型钢混凝土柱的三维有限元模型, 在进行型钢混凝土柱的动态响应分析时, 对型钢混凝土柱各材料间共线共结点方式建模, 并考虑型钢与混凝土之间的摩擦接触. 通过比较相同荷载幅值条件下, 爆炸与静力作用下的应力分布的异同来说明爆炸作用下应力的分布特点. 结果 提高型钢强度和纵向受力钢筋配筋率对型钢混凝土柱抗爆性能的提高并没有显著效果; 相同最大荷载值的静载与爆炸荷载两种情况下, 爆炸荷载下的破坏能力较强, 破坏程度较大. 结论 采用高强度混凝土, 选用截面惯性矩较大的型钢, 以及选用截面和高度尺寸适宜的型钢混凝土柱有利于提高型钢混凝土柱的抗爆性能; 细长柱的抗爆性能较弱, 实际工程中尽量避免选用.

**关键词** 型钢混凝土柱; 爆炸荷载; 数值模拟; 动力响应; 截面惯性矩

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Influencing Factor Analysis on Dynamic Response of Steel Reinforced Concrete Column under Blast Loading

QI Baoxin<sup>1</sup>, YAN Shi<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenxin<sup>1</sup>, WU Xing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing, China, 100081)

**Abstract:** Finite element analysis (FEA) software ANSYS/LS-DYNA was used to establish a three dimensional finite element model of the steel reinforced concrete column and analyze the influence factors of the damage and failure of the steel reinforced concrete (SRC) column. The collinear and common nodes will be used between the materials of steel reinforced concrete column during the

收稿日期: 2015-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278313); 住房和城乡建设部科技攻关项目(2015-K2-018); 爆炸科学与技术国家重点实验室项目(KFJ10-14M); 辽宁省教育厅项目(L2015448); 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室开放基金项目(JSKL2014K10); 沈阳市科学技术计划项目(17-231-1-89)

作者简介: 齐宝欣(1982—), 男, 博士, 主要从事建筑结构抗爆性能研究.

FEA, considering the friction contact between steel and concrete. The influence of the concrete strength grade and the section form of steel cross section was numerically analyzed. By comparing the blast and static load under the same load amplitude, the cross-sectional distribution characteristic of stress under the blast loading was explained. The results showed that using higher strength concrete, larger section moment of inertia of steel and suitable size of column section and height will improve the blast resistance properties of SRC columns. In practical engineering, it is suggested to avoid using slender column because of the weak blast resistance properties. In some reinforcement rate interval, there is no significant effect on blast resistance properties of steel reinforced concrete columns by increasing the longitudinal reinforcement ratio of the column. Under the blast or static load under with the same load amplitude, the force of the blast loading is stronger, resulting in relatively large damage.

**Key words:** steel reinforced concrete column; blast loading; numerical simulation; dynamic response; moment of inertia of section

型钢混凝土结构具有良好的受力性能和较高的承载能力,通常作为工程结构最重要的受力构件使用,一旦因爆炸产生严重损伤或破坏,将给工程结构带来严重的危害。由于爆炸作用时间短、能量大,对建筑物产生瞬间高能的冲击作用。在爆炸冲击的强力作用下,型钢混凝土构件的动态响应十分复杂。近年来,国内外学者对建筑结构构件在爆炸冲击作用下的响应已展开一系列研究,并取得一定成果。参考文献[1-4]通过实验模拟了10根钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的动态响应,表明截面形式对结构构件的承载力有很大影响。匡志平等<sup>[5]</sup>,通过对3根两端铰接低配箍钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的力学性能进行实验研究,分析了梁的裂缝、应变和挠度变化情况,发现梁的破坏首先从薄弱处开始,通过提高混凝土强度和增大配箍率,能有效增强梁的抗爆能力。师燕超等<sup>[6]</sup>,通过对3根参数相同的钢筋混凝土柱分别在3种不同的爆炸荷载作用下的数值模拟,表明不同种类荷载作用下,钢筋混凝土柱发生的破坏模式不同。孙建云等<sup>[7]</sup>,研究了型钢混凝土柱爆炸冲击荷载作用下的破坏模式包括,冲击波直接破坏,冲击波能量破坏和冲击波冲量破坏。阎石等<sup>[8-9]</sup>,对爆炸荷载作用下方钢管混凝土柱和钢筋混凝土柱的动力响应和破坏机理进行了研究,随着比例距离增大,方

钢管混凝土柱的水平位移逐渐减小。然而,由于爆炸荷载作用下组合结构的动态响应问题比较复杂,与其在静载下有较大差异,研究成果相对较少。笔者采用非线性有限元显式动力分析软件 ANSYS/LS - DYNA 对型钢混凝土柱进行数值模拟,分析多种因素对型钢混凝土柱在爆炸荷载作用下动态响应的影响规律。

1 材料模型

采用混凝土、型钢、钢筋共结点的方式建立模型。混凝土采用 ANSYS/LS-DYNA 中的 Holmquist-Johnson-Cook 模型<sup>[10]</sup>,简称 HJC 模型 (Type111)。关键字为 \* MAT-JOHN-SON-HOLMQUIST-CONCRETE。型钢和钢筋都采用 Plastic-Kinematic (MAT - 03) 塑性模型 (Type003)<sup>[11-14]</sup>,关键字为 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC<sup>[15-17]</sup>。混凝土、型钢和钢筋的材料模型参数分别如表1和表2所示。表1中A为给定静水压力下完全断裂强度与无损伤强度的比值;B为量纲是1的压力强化系数;C为应变率敏感系数;N为量纲是1的压力硬化系数;F<sub>c</sub>为静态单轴抗压强度;T为最大抗拉伸强度;ε<sub>min</sub>为最小开裂塑性应变;F<sub>k,max</sub>为混凝土所能达到的最大标准强度;P<sub>c</sub>混凝土压碎压力;ε<sub>c</sub>混凝土压碎体积应变;P<sub>l</sub>混凝土锁紧压力;P<sub>i</sub>混凝土锁

紧体积应变; $D_1$ 、 $D_2$  为损伤系数; $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为材料常数; $F_s$  为混凝土失效应变.表2 中根据相关规范规定,弹性模量的取值,型钢为  $2.06 \times 10^2$  GPa,一级钢筋为  $2.10 \times 10^2$  GPa,二级钢筋及以上为  $2.0 \times 10^2$  GPa,C、P 为考虑型钢材料失效应变的参数.

表1 混凝土材料模型基本参数<sup>[18-19]</sup>

Table 1 Fundamental parameters of concrete model

密度/(g·mm <sup>-3</sup> )	剪切模量/ GPa	A	B	C	N	F <sub>C</sub> /MPa
2.25 × 10 <sup>-3</sup>	13.8	0.75	1.65	0.007	0.76	40
T /MPa	应变率	ε <sub>min</sub>	F <sub>k,max</sub>	P <sub>c</sub> a	ε <sub>c</sub>	P <sub>1</sub> /GPa
3.92	0.001	0.01	7	13.33	7.3 × 10 <sup>-4</sup>	0.8
UL	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	K <sub>1</sub> /GPa	K <sub>2</sub> /GPa	K <sub>3</sub> /GPa	F <sub>s</sub>
0.1	0.038	1.0	17.4	-38.8	29.8	0.003 3

表2 型钢材料模型基本参数

Table 2 Fundamental parameters of steel model

密度/(g·mm <sup>-3</sup> )	弹性模量 /GPa		泊松比	屈服强度 /MPa	
	型钢	钢筋		型钢	钢筋
7.85 × 10 <sup>-3</sup>	206	210	0.3	235	300/400/500
失效应变	剪切模量 /GPa		随动硬化参数	C	P
	型钢	钢筋			
0.2	206	210	0	40	5

2 建立有限元模型

2.1 爆炸冲击荷载

爆炸产生的冲击波过程是非常复杂的.很多学者在研究过程中,根据研究不同的目的,将爆炸产生的冲击波荷载进行简化<sup>[20]</sup>.董义领等<sup>[21]</sup>将其简化为递减三角荷载,因为爆炸过程中,爆炸荷载从零达到冲击波超压峰值的时间是极短的,可将爆炸荷载时程曲线简化为折线三角形曲线<sup>[22]</sup>.

爆炸冲击波超压峰值荷载与炸药量及物体到爆心的距离有关,即超压峰值  $P_{s0}$  是比例距离  $Z$  的函数<sup>[21]</sup>.

$$P_{s0}=0.67Z^{-1}+3.01Z^{-2}+4.31Z^{-3},(1)$$
$$Z=R/W^{1/3}.$$

(2)

式中: $R$  为物体到爆心的距离; $W$  为炸药量; $Z$  为比例距离,  $0.5 < Z < 70.9$ ,通过大量试

算,取  $Z=1.9$ .  
根据文献[21]及式(1)得到,  $P_{s0}=1.81$  MPa.达到冲击波超压峰值的时间  $t_1=30$  ms,爆炸荷载作用结束时间  $t_0=150$  ms,总计算时间为400 ms.

2.2 计算模型

取型钢混凝土柱的柱高  $L=3\ 400$  mm,型钢混凝土柱计算模型如图2所示.

柱的上下两端皆为固定端,柱的上端施加集中荷载  $F=0.3F_p=2\ 286$  kN.其中  $F_p$  的表达式为

$$F_p=\varphi(f_cA_c+f_aA_a).$$

(3)

式中: $F_p$  为型钢混凝土柱的静载极限承载力; $f_c$  为混凝土的抗压强度; $f_a$  为型钢的抗压强度; $A_c$  为型钢混凝土柱截面混凝土面积; $A_a$  为型钢混凝土柱截面型钢面积(钢筋截面面积忽略不计).

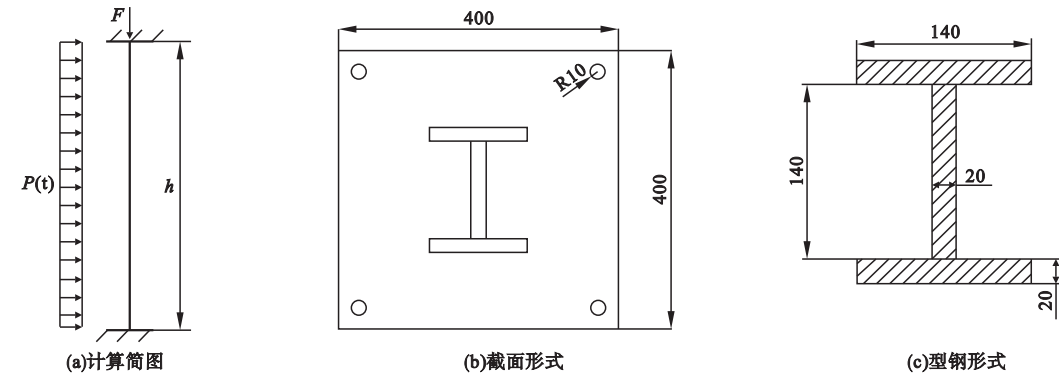


图2 型钢混凝土柱计算模型示意图

Fig. 2 The schematics of steel concrete column cross-section

2.3 有限元模型

选择单元类型时,型钢和混凝土都选用 3D SOLID164 单元,钢筋选用 3D LINK160 单元. 选用型钢和混凝土的材料模型. 型钢选用 Q235;混凝土等级选用 C40;纵向受力钢筋选用直径为 20 mm 的三级钢筋,抗拉强度  $f_y = 400$  MPa;箍筋选用直径为 8 的一级钢筋,抗拉强度  $f_y = 300$  MPa. 有限元模型如图 3 所示.

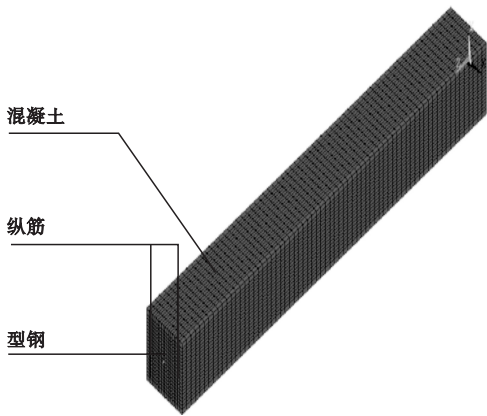


图3 有限元模型示意图

Fig. 3 The schematic of FE model

3 不同影响因素的动力响应分析

在数值模拟过程中主要的影响因素:①3 种常用的混凝土强度等 C40、C50 和 C60;②型钢截面形式,H 型钢、十字型钢和 U 型钢;③3 种纵筋配筋率  $\rho = 0.87\%$ 、 $\rho = 1.06\%$  和

$\rho = 1.37\%$ ;④两种柱高  $h$  分别为 3 400 mm 和 4 000 mm. 采用参数化的分析方法分析混凝土强度、截面形式、纵筋配筋率和柱的高度因素对爆炸荷载作用下的型钢混凝土柱动力响应的影响. 各分组的爆炸峰值荷载均采用  $Z = 1.9$  时的数值,即  $P_{s0} = 1.81$  MPa.

3.1 混凝土强度等级

选择 C40、C50 和 C60 三种等级混凝土强度. 研究构件中混凝土的强度等级对型钢混凝土柱动力响应的影响,保持其他参数数值不变,分别对 C40、C50 和 C60 不同混凝土强度的构件在同一爆炸荷载作用情况下的动力响应进行分析. 其他参数分别取型钢屈服强度  $f_a = 235$  MPa,纵筋抗拉强度  $f_y = 400$  MPa,纵向受力钢筋配筋率  $\rho = 0.87\%$ ,型钢为 H 型钢,柱高  $h = 3\ 400$  mm.

图 4 为不同混凝土强度下型钢混凝土柱的柱中点水平位移时程曲线. 3 种混凝土强度等级下的柱中点水平位移均在 30 ms 左右之后迅速增加,50 ms 之后达到位移最大值,随后降低并趋于某固定的残余位移值. 由图 4 可以看出,随着混凝土强度的增加,柱中点水平最大位移和残余位移均有不同程度的降低,混凝土强度为 C60 时,降低程度较大. 这是因为,混凝土强度增加,在相同的爆炸荷载作用下,混凝土进入塑性的区域减少,进而降低柱中的水平位移值.

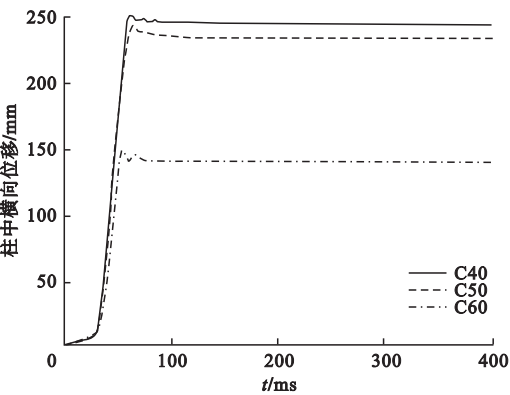


图 4 不同混凝土强度等级柱中点水平位移时程曲线

Fig. 4 Displacement time history at mid-span of column under various concrete strength

3.2 型钢截面形式

3 种不同型钢截面形式如图 5 所示,考虑的是不同型钢截面形状对型钢混凝土柱动力响应的影响.保持其他参数不变,分别取型钢屈服强度 $f_a = 235\text{ MPa}$ ,纵筋抗拉强度 $f_y = 400\text{ MPa}$ ,纵向受力钢筋配筋率 $\rho = 0.87\%$ ,混凝土强度等级为 C40,柱高 $h = 3\ 400\text{ mm}$ .型钢的截面如图 5 所示.

对于 3 种不同的型钢截面形式,型钢混凝土柱的用钢量是相同的,都是 4.75%,符合《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)中的构造要求,即大于 4% 且不宜大于 10%.其中,H 型钢和 U 型钢的横轴

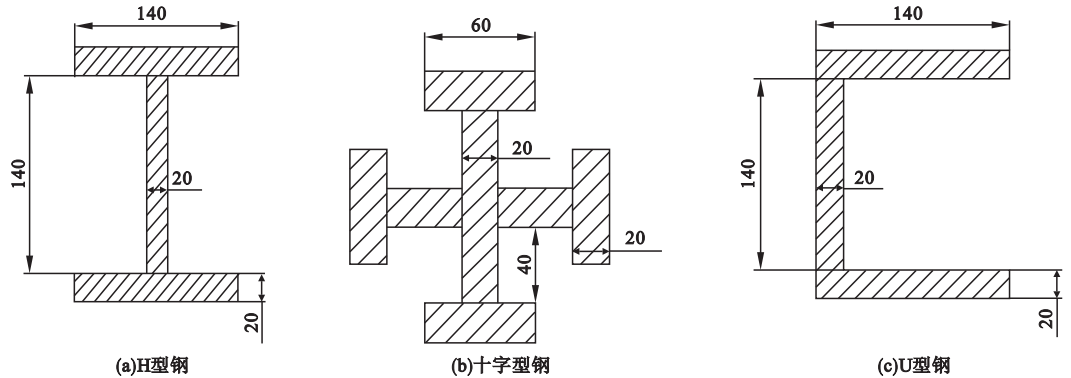


图 5 3 种不同型钢截面形式

Fig. 5 Three types of steel sections

截面惯性矩为 $I_1 = I_2 = 4.508 \times 10^7\text{ mm}^4$ ,十字型钢的横轴截面惯性矩 $I_3 = 1.26 \times 10^7\text{ mm}^4$ .图 6 为不同型钢截面形式时柱中点时程位移曲线.从图中可以看出,柱中横向位移残余值 H 型钢情况下最大,其次是十字型钢,U 型钢最小.这可能是因为,H 型钢双轴对称,U 型钢在与迎爆面垂直的轴上不对称,相同的爆炸荷载作用下,H 型钢吸收的能量几乎都作用于弯曲,而 U 型钢情况下,一部分能量使其弯曲,一部分能量使其扭转,所以弯曲程度 U 型钢小于 H 型钢,同理,弯曲程度 U 型钢小于十字型钢. H 型钢与十字型钢相比较,相同的爆炸荷载作用下,十字型对爆炸荷载的接收面积比 H 型钢大,能量更分散,所以弯曲程度十字型钢小于 H 型钢.同

一时刻,荷载值相同,3 种型钢截面的惯性矩不同,其刚度不同,H 型钢的刚度最大,因此同时刻其位移值最小.

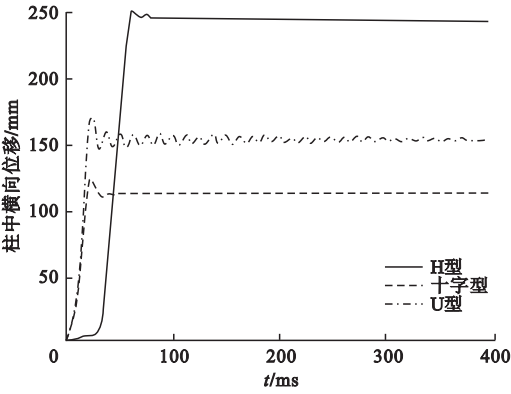


图 6 不同型钢截面形式下柱中点位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time history at mid-span of column under various steel sections



图7为U型钢上下翼缘和腹板单元垂直于荷载加载方向的横向位移.在30ms前的时间内,两翼缘的位移方向相反,腹板位移与下翼缘方向相同.最终三个单元的位移都趋于稳定,说明柱截面发生扭转.

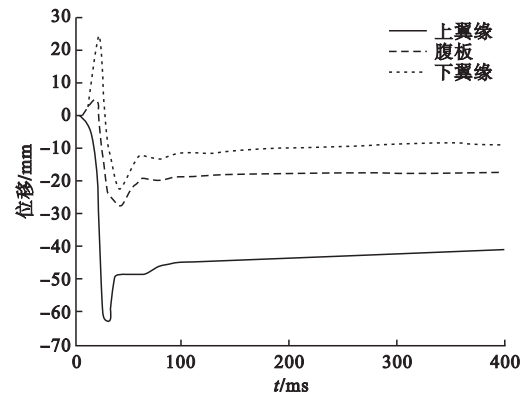


图7 U型钢不同位置单元位移时程曲线

Fig.7 Displacement time history curve of U type steel at different elements

3.3 纵向受力钢筋配筋率

在其他参数保持不变的情况下,分别对3种拥有不同的纵向受力钢筋配筋率的型钢混凝土柱进行爆炸荷载数值模拟分析.分别取3种配筋率为 $\rho = 0.87\%$ 、 $1.06\%$ 和 $1.37\%$ ,其他保持不变的参数分别取:型钢抗拉强度 $f_a = 235\text{ MPa}$ ,纵筋抗拉强度 $f_y = 400\text{ MPa}$ ,混凝土强度等级为C40,型钢为H型钢,柱高 $h = 3\,400\text{ mm}$ .

图8为不同纵向受力钢筋配筋率下的柱中点位移时程曲线.从图中可以看出,当型钢混凝土柱的纵筋配筋率由 $0.87\%$ 增加到 $1.06\%$ 时,无论是柱中水平位移还是残余位移,都没有显著降低.这是因为增加型钢混凝土柱的纵筋配筋率对柱抗弯刚度的影响有限,同时,在这一配筋率区间,爆炸荷载作用下钢筋屈服程度相差不大,增加钢筋对柱受弯承载力的提高作用并不明显.配筋率继续增加至 $1.37\%$ 时,柱中横向位移与残余位移均降低了 $50\text{ mm}$ 左右,说明在规定配筋率范围内继续增加配筋率,钢筋的屈服程度减小,使型钢混凝土柱的受弯承载力有一定程度的

提高.

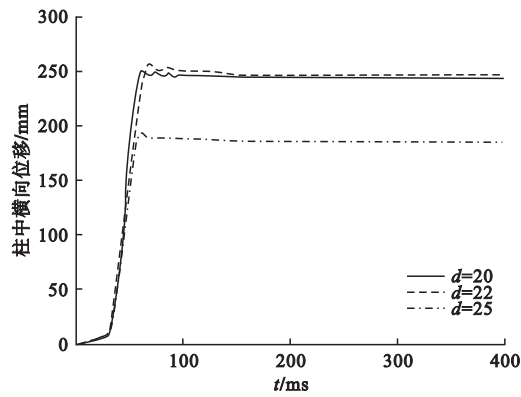


图8 不同纵向钢筋配筋率下柱中点位移时程曲线  
Fig.8 Displacement time history at mid-span of column under various longitudinal reinforcement ratio

3.4 型钢混凝土柱的高度

此组研究型钢混凝土柱高度对型钢混凝土柱动力响应的影响,保持其他参数数值不变,分别对 $h = 3\,400\text{ mm}$ 和 $h = 4\,000\text{ mm}$ 两种不同高度的型钢混凝土柱在同一爆炸荷载作用情况下的动力响应进行分析.其他参数分别取型钢抗拉强度 $f_a = 235\text{ MPa}$ ,混凝土强度等级为C40,纵向受力钢筋配筋率 $\rho = 0.87\%$ ,型钢为H型钢,纵向受力钢筋强度 $f_y = 400\text{ MPa}$ .图9为不同高度的型钢混凝土柱在同一爆炸荷载作用下的柱中点位移时程曲线.

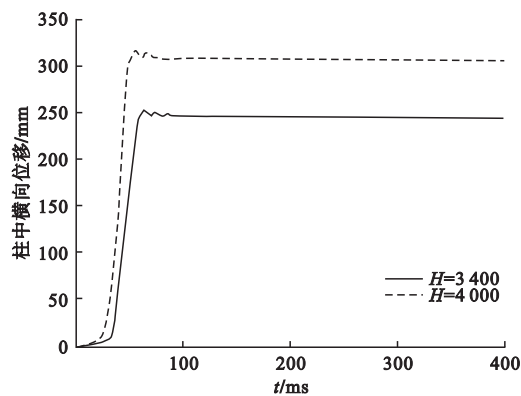


图9 不同柱高的柱中位移时程曲线  
Fig.9 Displacement time history at mid-span of column under various height of column

从图 9 可以看出,型钢混凝土柱的柱中最大位移和残余位移均随柱高的增大而增大,这是因为,在相同的爆炸荷载作用下,型钢混凝土柱高度的增加,提高其柔度,降低其侧移刚度. 所以柱高越高,型钢混凝土柱的柱中横向位移越大.

4 正截面应力分布分析

型钢混凝土柱在静力荷载作用下的内力分布规律及相关计算理论已比较成熟,通过比较相同荷载幅值条件下,爆炸与静力作用下的应力分布的异同来说明爆炸作用下应力的分布特点. 数值模拟过程中,选用静载 1.63 MPa 与峰值为 1.63 MPa 的爆炸荷载进行对比. 两种荷载条件下,其他参数均相同,混凝土等级选用 C40,型钢牌号选用 Q235,

纵筋强度 HRB400,直径 20 mm,箍筋抗拉强度 HPB300,直径 8 mm,柱高 3 400 mm.

在大小为 1.63 MPa 的静荷载作用下,柱中横截面的单元应变、应力分布如图 10 所示. 图中取变形破坏最严重时截面的应变、应力分布情况. 分居截面两侧的各五个单元为混凝土单元,中间九个单元为型钢单元. 左侧为受压侧,右侧为受拉侧. 由图 10 可知,受拉侧混凝土应力几乎为零,说明混凝土已开裂,图中三角形图标部分表示,由于软件计算中添加的失效准则,开裂单元被删除,实际上这部分的应变是存在的;左侧受压区混凝土仍处于弹性阶段,应变、应力均呈线性变化;柱中型钢截面应力呈线性分布,说明型钢处于弹性阶段,未屈服.

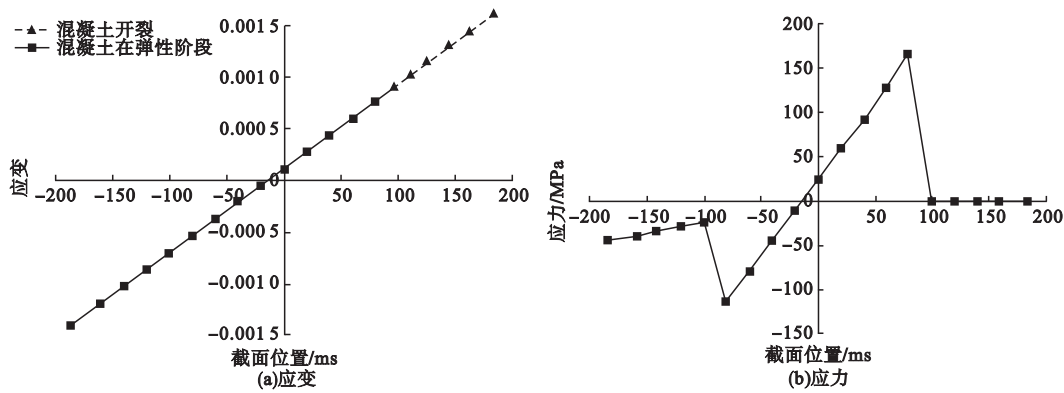


图 10 1.63 MPa 静载下柱中横截面应变、应力分布曲线

Fig. 10 Strain and stress distribution at column mid-span under 1.63 MPa static load

在大小为 1.63 MPa 的爆炸荷载作用下,柱中横截面的单元应变、应力分布如图 11 所示. 由图 11 可知,左侧受压区大部分混凝土单元应变为零,这是由于软件计算的原因,被压碎的混凝土单元退出工作,其应变数据为零,实际上其应变是存在的,理论上是呈线性的;应力图变化未呈线性,受拉区边缘混凝土单元中应力已超过其极限应力,应力下降,应变增长;右侧受拉区混凝土被拉坏,均

已开裂,图中三角形图标部分表示,同上,由于软件计算中添加的失效准则,开裂单元被删除,实际上这部分的应变是存在的;柱中型钢的中和轴向受压侧偏移很大,型钢单元之间是连续的,所以型钢单元的应变呈线性分布,应力失去线性规律,不再遵循弹性模量、应变、应力之间  $E = \sigma/\epsilon$  的关系,型钢已屈服进入塑性区.

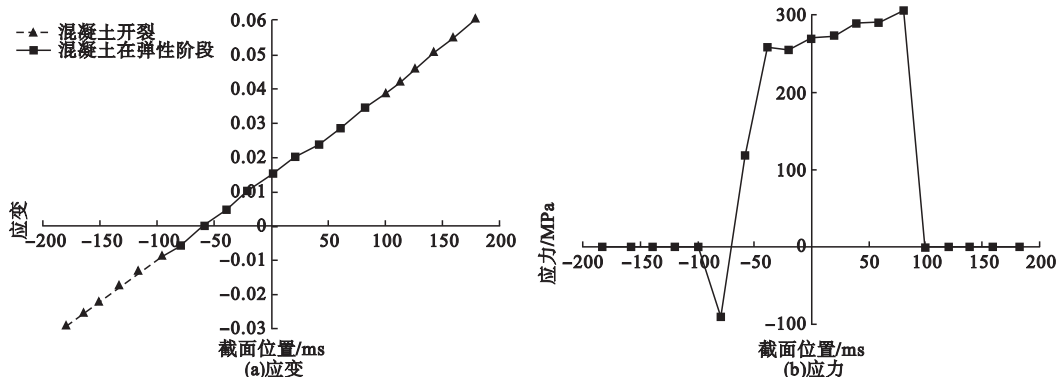


图 11 1.63 MPa 爆炸荷载下柱中横截面应变、应力分布

Fig. 11 Strain and stress distribution at column mid-span under 1.63 MPa blast load

## 5 结 论

(1) 型钢混凝土柱中, 使用高强混凝土可明显提高柱的抗爆性能; 对于型钢混凝土柱的抗爆性能, C40、C50 混凝土没有 C50、C60 之间相差的那么明显; 不同型钢截面形式对柱抗爆性能的影响比较明显. 在进行型钢混凝土柱抗爆设计时, 宜更多考虑截面惯性矩大的, 分散在周围且有一定扭转能力截面的型钢.

(2) 在型钢混凝土柱抗爆设计过程中, 在《型钢混凝土组合结构设计规范》(JGJ 138—2001) 要求范围内, 低纵筋配筋率对抗爆能力的提高并不明显, 此时不需要特别考虑纵向受力钢筋配筋率对柱抗爆性能的影响; 而高配筋率对柱抗爆性能提高较为明显. 在条件允许的情况下, 可选择高配筋率的型钢混凝土柱.

(3) 在型钢混凝土柱抗爆设计过程中, 尽量避免细长柱, 要选择高度和截面尺寸适宜的型钢混凝土柱; 相同最大荷载值的静载与爆炸荷载两种情况下, 爆炸荷载下的破坏能力较强, 破坏程度较大.

(4) 在结构抗爆设计过程中, 可通过改变结构构件内部因素提高其抗爆能力 (如适当提高型钢、混凝土、钢筋的强度等); 也可通过改变外部因素 (如建筑物外围设置障碍等) 避免结构受到较强的爆炸冲击作用.

## 参考文献

- [1] WILLIAMSON E B, BAYRAK O, DAVIS C. Performance of bridge columns subjected to blast loads. I; experimental program [J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(6): 693–702.
- [2] WILLIAMSON E B, BAYRAK O, DAVIS C. Performance of bridge columns subjected to blast loads. II; Results and recommendations [J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(6): 703–710.
- [3] WILLIAMS G D. Analysis and response mechanisms of blast-loaded reinforced concrete columns [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2009.
- [4] WILLIAMS G D, WILLIAMSON E B. Response of reinforced concrete bridge columns subjected to blast loads [J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(9): 903–913.
- [5] 匡志平, 杨秋华, 崔满. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的试验研究和破坏形态 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, 37(9): 1153–1156.  
(KUANG Zhiping, YANG Qiuhua, CUI Man. Experiment research and failure modes analyses of RC-beams under blast loading [J]. Journal of tongji university (natural science), 2009, 37(9): 1153–1156.)
- [6] 师燕超, 李忠献. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱动态响应和破坏模式 [J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 112–117.  
(SHI Yanchao, LI Zhongxian. Dynamic responses and failure modes of RC columns under blast loading [J]. Journal of building structures, 2008, 29(4): 112–117.)
- [7] 孙建运, 李国强, 陆勇. 爆炸荷载作用下 SRC 柱中混凝土的断裂破坏原理 [J]. 振动、测试



- 与诊断,2008,28(2):168-171.  
(SUN Jianyun, LI Guoqiang, LU Yong. Fracture failure principle of concrete in SRC column under explosion loading[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2008, 28(2): 168-171.)
- [8] 阎石,刘蕾,齐宝欣,等.爆炸荷载作用下钢管混凝土柱的动力响应及破坏机理[J]. 防灾减灾及防护工程学报,2011,31(5):477-482.  
(YAN Shi, LIU Lei, QI Baoxin, et al. Dynamic response and failure mode analysis of concrete infilled rectangular steel tube columns under blasting loading[J]. Journal disaster prevention and mitigation engineering, 2011, 31(5): 477-482.)
- [9] 阎石,王丹,张亮.爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱损伤 FEM 分析[J]. 工程力学,2008,25(增刊 I),90-93.  
(YAN Shi, WANG Dan, ZHANG Liang. Damage analysis for RC column under explosive loads[J]. Engineering mechanic, 2008, 25(SI): 90-93.)
- [10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [11] 刘蕾.爆炸荷载作用下轻钢柱动态响应和破坏模式数值分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2012.  
(LIU Lei. Numerical analysis on dynamic response and failure modes of light-weight steel columns under blast loads[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [12] 齐宝欣,阎石,刘蕾,等.高温和爆炸荷载作用下轻钢柱破坏影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(2):200-207.  
(QI Baoxin, YAN Shi, LIU Lei, et al. Influencing factor analysis on failure modes of light steel column under high temperature and blast loading[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2012, 28(2): 200-207.)
- [14] 孙宇,毛鑫,杜欣新.爆炸荷载作用下钢管混凝土柱的动力响应分析[J]. 天津城建大学学报,2015,21(4):258-261.  
(SUN Yu, MAO Cui, DU Xinxin. Dynamic response analysis of concrete rectangular steel tube columns under blasting loading[J]. Journal of Tianjin chengjian university, 2015, 21(4): 258-261.)
- [15] 方秦,程国亮,陈力.爆炸荷载作用下承重柱的弹性动力响应分析[J]. 工程力学,2013,30(3):112-119.  
(FANG Qin, CHENG Guoliang, CHEN Li. The linear dynamic responses of columns subjected to blast loads[J]. Journal of engineering mechanics, 2013, 30(3): 112-119.)
- [16] LIEW J Y R, CHEN H. Explosion and fire analysis of steel frames using fiber element approach[J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(7): 991-1000.
- [17] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shock in air[M]. New York: Berlin Heidelberg, 1985.
- [18] 何涛,杨竞,金鑫,等. ANSYS10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.  
(HE Tao, YANG Jing, JIN Xin, et al. ANSYS10.0/LS-DYNA Nonlinear finite element analysis of examples tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.)
- [19] 杨蕾.爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应及抗爆加固研究[D]. 青岛:山东科技大学,2013.  
(YANG Lei. Dynamic response and anti-explosive reinforce research of reinforced concrete columns under explosion load[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013.)
- [20] 宋春明,王明洋,刘斌.边界约束对梁抗爆动力响应的影响(I)-理论研究及分析[J]. 振动与冲击,2014,33(5):82-86.  
(SONG Chunming, WANG Mingyang, LIU Bin. Effects of boundary restraints on dynamic responses of a beam under blast loadings(I)-theoretical study and analysis[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(5): 82-86.)
- [21] 周听清.爆炸动力学及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.  
(ZHOU Tingqing. The dynamics of explosion and its application[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2001.)
- [22] 董义领.爆炸荷载作用下混凝土柱的动力响应分析[D]. 上海:同济大学,2008.  
(DONG Yiling. The dynamic analysis of RC columns subjected to blast loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.)