

DOI: 10.7672/sgjs2026040001

# 爆炸作用下钢骨再生混凝土柱受力性能研究\*

张小毛<sup>1</sup>, 闫鑫雨<sup>2</sup>, 刘柱<sup>1</sup>, 李登峰<sup>3</sup>

(1. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511400;

2. 广东省市政轨道交通精益建造工程技术研究中心, 广东 广州 510220;

3. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610031)

[摘要] 为研究爆炸作用下钢骨再生混凝土柱的受力性能,通过数值模拟分析了不同钢骨厚度、含钢率、爆炸荷载及长细比下混凝土柱受到的剪力变化和跨中位移特征。研究表明:混凝土柱中钢骨厚度越大,柱身的抗爆性能越强,爆炸发生时,柱身的跨中位移越小;混凝土柱的含钢率越大,跨中位移越小,钢骨厚度越大,相应含钢率增大,混凝土柱抗变形能力越强;爆炸荷载越大,混凝土柱受到的应力越大,柱身的跨中位移越大,当爆炸荷载大时,应增大混凝土柱的钢骨厚度;当混凝土柱长细比增大时,混凝土柱的跨中位移增大,柱身稳定性差,更易在爆炸过程中被破坏。

[关键词] 钢骨混凝土;再生混凝土;爆炸荷载;数值模拟

[中图分类号] TU398.9

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0001-06

## Research on Mechanical Performance of Steel Reinforced Recycled Concrete Columns Under Explosive Action

ZHANG Xiaomao<sup>1</sup>, YAN Xinyu<sup>2</sup>, LIU Zhu<sup>1</sup>, LI Dengfeng<sup>3</sup>

(1. CCCC (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;

2. Guangdong Engineering Technology Research Center of Municipal Rail Transit Lean Construction, Guangzhou,

Guangdong 510220, China; 3. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd.,

Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** In order to study the stress performance of steel reinforced recycled concrete columns under explosion, this paper analyzes the shear force and mid span displacement characteristics of concrete columns under different steel section thicknesses, steel content ratios, explosion loads, and slenderness ratios through simulation calculations. The research results show that the thicker the steel section in the concrete column, the stronger the anti explosion performance of the column, and the smaller the mid span displacement of the column during explosion. The higher the steel content of concrete columns, the smaller the mid span displacement, the thicker the steel section, and the corresponding increase in steel content, resulting in stronger deformation resistance of concrete columns. The larger the explosion load, the greater the stress on the concrete column, and the greater the mid span displacement of the column body. When the explosion load is large, the steel section thickness of the concrete column should be increased. When the slenderness ratio of the concrete column increases, the mid span displacement of the concrete column increases, and the stability of the column body is poor, making it more susceptible to damage during the explosion process.

**Keywords:** steel concrete; recycled concrete; explosive load; simulation

### 0 引言

随着建筑行业的快速发展,城市建筑中混凝土

柱的跨度逐渐增大,因此对混凝土柱强度的要求也越来越高,当建筑内发生爆炸时,混凝土柱需承受爆炸产生的荷载。为探求混凝土柱在爆炸过程中的受力性能,提高其抗爆能力,学者们进行了多方

\* 国家自然科学基金(51978545);中施企协科研课题((2025)37号)

[作者简介] 张小毛,高级工程师,E-mail:18520885169@139.com

[收稿日期] 2025-09-05

面研究,李鹏飞等<sup>[1]</sup>对爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应及抗爆加固进行了研究,研究结果表明,当构件受初始冲击作用时,应力较大位置集中于两端,此时构件以剪切变形为主;夏梦涛等<sup>[2]</sup>对大当量爆炸作用下预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的失效模式进行了研究,研究结果表明,地面爆炸作用下墩柱在墩身底部接缝有较大的剪切滑移,核心混凝土的损伤主要出现在接缝处和预应力筋挤压处;李明鸿等<sup>[3]</sup>对近爆作用下双层方钢管混凝土墩柱的抗爆性能试验进行了研究,研究结果表明,近距离及接触爆炸作用下,双层方钢管混凝土墩柱正对爆心区域局部凹陷变形;齐宝欣等<sup>[4]</sup>研究了截面短长轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能的影响,研究结果表明:椭圆钢管混凝土柱沿长轴迎爆的抗爆性能明显优于沿短轴方向;吕辰旭等<sup>[5]</sup>对近爆荷载作用下装配式钢筋混凝土柱的抗爆性能进行了研究,并进行了受损加固试验,研究结果表明,近爆荷载作用下,PC 柱呈现出局部损伤破坏模式,爆心附近混凝土剥落,出现斜裂缝,装配位置界面出现贯穿裂缝;倪赛雄等<sup>[6]</sup>采用数值模拟计算的方法,研究了高强螺栓尺寸、螺栓间距、钢管厚度、钢管强度对采用螺栓连接的外套钢管加固柱轴压性能的影响;李勇<sup>[7]</sup>通过机器视觉技术的智能化检测手段,对高层建筑地震损伤进行定量评估;郑茜等<sup>[8]</sup>对钢管混凝土柱环梁节点受力性能进行了研究,研究结果表明,节点主要由钢筋和牛腿传力,增加环梁纵筋,环梁箍筋、拉筋和腰筋应力均大幅下降;詹界东等<sup>[9]</sup>对相同截面面积、不同截面形式的钢管混凝土柱轴压性能进行了研究,研究结果表明,含钢率的提升对于圆钢管混凝土柱极限承载力的提升较大,核心混凝土强度的提升对于方钢管混凝土柱的极限承载力提升较大;付朝江等<sup>[10]</sup>对侧向冲击后钢管混凝土柱的剩余轴压承载力进行了研究,研究结果表明,冲击位置越靠近跨中,剩余承载力越小,随着边界条件自由度的增加,剩余承载力减小。以上学者研究了钢管混凝土柱的抗爆性能,分析了钢筋混凝土柱的动力响应。然而,在爆炸作用下,混凝土柱参数变化对其受力性能的影响方面的研究较少。本文通过数值模拟对爆炸作用下钢筋再生混凝土柱的受力性能进行研究,分析了不同钢筋厚度、含钢率、爆炸荷载和长细比下混凝土柱的受力特征。

## 1 数值模型建立

钢筋混凝土在爆炸作用下,外层混凝土破坏导致混凝土柱的承载力降低,通过 ABAQUS 有限元软

件对钢筋混凝土柱在爆炸作用下的受力性能进行模拟,柱表层的混凝土采用再生混凝土,混凝土强度等级为 C45,再生粗骨料取代率为 45%,柱的长度为 1 650mm,截面为方形,截面边长均为 220mm,混凝土内钢筋级别为 Q235 级,形状为十字形,厚度为 4mm,混凝土柱内纵筋和箍筋均采用 HPB300 级钢材,纵筋直径为 12mm,箍筋直径为 6mm,如图 1 所示。

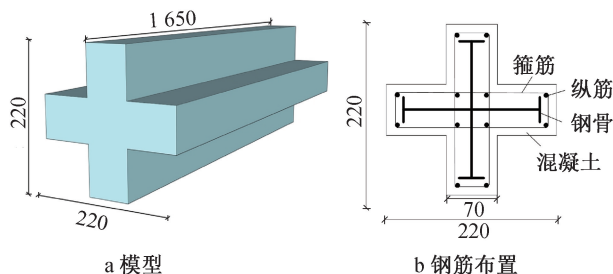


图 1 混凝土柱

Fig. 1 Concrete column

设置再生混凝土和钢筋为连续的各向同性材料,混凝土柱的本构模型选取塑性损伤模型,钢筋和钢筋为理想弹性材料,各材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 各材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each material

材料	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松 比	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa
钢筋	78.4	224.8	0.26	236	352
纵向钢筋	78.4	212.4	0.26	298	384
箍筋	78.4	205.3	0.26	284	352
再生混凝土	25.6	314.6	0.34	45	50

建模过程中,设置混凝土柱在任何方向均为自由加载,爆炸产生的荷载均匀分布在混凝土柱上,再生混凝土、钢筋、纵筋和箍筋均采用 C3D8R 单元进行模拟,设置完成后,对混凝土柱进行网格划分,将模型分解为 8 653 个单元,9 876 个节点。

## 2 研究方案

为研究爆炸荷载下混凝土柱的受力特征,设计了 2 种钢筋厚度 (0mm 和 4mm)、4 种含钢率 (10.8%, 15.2%, 19.5%, 23.9%)、3 种爆炸荷载 (5, 10, 15kN) 和 4 种长细比 (7.05, 7.95, 8.86, 9.77),将以上参数进行组合,制定不同的研究方案,如表 2 所示。当钢筋厚度为 4mm、含钢率为 10.2%、爆炸荷载为 5kN、长细比为 7.5 时,设置混凝土柱编号为 Z4-G10.2-B5-C7.5,其他混凝土柱编号均以此方式设置。

表 2 混凝土柱规格及参数

Table 2 Specifications and parameters of concrete columns

研究方案	混凝土柱编号	长度/mm	宽度/mm	钢骨厚度/mm	纵向钢筋	箍筋	含钢率/%	爆炸荷载/kN	长细比
不同钢骨厚度	Z0-G6.8-B5-C7.5	1 650	220	0	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	6.8	5	7.50
	Z4-G10.2-B5-C7.5	1 650	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	5	7.50
	Z4-G10.8-B10-C7.5	1 650	220	4	12 $\phi$ 8	$\phi$ 8@100	10.8	10	7.50
不同含钢率	Z6-G15.2-B10-C7.5	1 650	220	6	12 $\phi$ 8	$\phi$ 8@100	15.2	10	7.50
	Z8-G19.5-B10-C7.5	1 650	220	8	12 $\phi$ 8	$\phi$ 8@100	19.5	10	7.50
	Z10-G23.9-B10-C7.5	1 650	220	10	12 $\phi$ 8	$\phi$ 8@100	23.9	10	7.50
爆炸荷载	Z4-G10.2-B15-C7.5	1 650	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	15	7.50
	Z4-G10.2-B10-C7.05	1 550	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	10	7.05
不同长细比	Z4-G10.2-B10-C7.95	1 750	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	10	7.95
	Z4-G10.2-B10-C8.86	1 950	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	10	8.86
	Z4-G10.2-B10-C9.77	2 150	220	4	12 $\phi$ 12	$\phi$ 6@100	10.2	10	9.77

### 3 混凝土柱抗爆性能参数分析

#### 3.1 钢骨厚度的影响

爆炸荷载为 5kN 条件下,混凝土柱中不含钢骨和含 4mm 厚钢骨时的应力云图如图 2 所示。

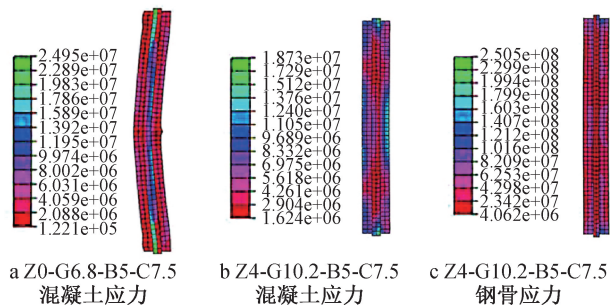


图 2 不同钢骨厚度下混凝土柱应力云图(单位:Pa)

Fig. 2 Stress cloud map of concrete columns under different steel section thicknesses (unit: Pa)

在爆炸荷载作用下,无钢骨混凝土柱的应力分布呈现明显梯度:两端应力最大(达 24.95MPa),并向中部递减,导致两端率先出现塑性变形,最终因混凝土单独承受全部荷载、应力集中而破坏。相比之下,含钢骨混凝土柱的应力分布更为协调,两端压力虽仍大于中部,但最大压力仅为 18.73MPa。这是由于钢骨作为主要承力构件,优先吸收并传递大部分爆炸应力,仅将剩余部分传递给混凝土,从而显著降低混凝土所受应力,避免其过早破坏。综上所述,加入钢骨不仅改变了混凝土柱的应力分布模式,更通过钢骨与混凝土的协同工作,提升了整体承载能力和抗爆性能。

爆炸荷载为 5kN 条件下,混凝土柱中不含钢骨和含 4mm 厚钢骨时的跨中位移如图 3 所示。

随着爆炸时间增长,无钢骨的混凝土柱跨中位移先快速增大(在 0.005s 达到峰值)后逐渐减小并趋于平稳,此时混凝土因脆性已超过极限变形而发生破坏,结构失去承载能力;而加入钢骨后,柱身跨

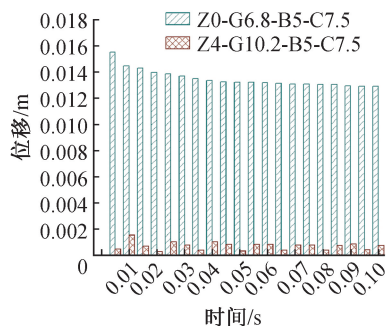


图 3 不同钢骨厚度下混凝土柱跨中位移变化

Fig. 3 Changes in mid span displacement of concrete columns under different steel section thicknesses

中位移则呈小幅波动趋势,整体位移明显减小。这是由于钢骨的高延性改变了结构的变形模式,其通过弹塑性变形缓慢吸收爆炸能量,避免了能量集中导致的混凝土快速破坏,同时钢骨与混凝土之间的黏结作用有效限制了混凝土的剥离变形,从而显著提升了混凝土柱的抗爆性能与承载能力。

#### 3.2 含钢率的影响

爆炸荷载为 10kN 条件下,选取钢骨厚度为 4mm 和 8mm 的混凝土柱作为研究对象,即含钢率分别为 10.8%,23.9%时,混凝土柱受到的剪力如图 4 所示。

当含钢率为 10.8%时,混凝土与钢骨剪力在 0.005s 同时达到峰值(分别为 23.77kN 与 16.23kN),随后迅速衰减,至 0.1s 趋近于 0,表明构件已整体破坏;而当含钢率提高到 23.9%时,混凝土剪力在 0.005s 达到 23.22kN 后快速下降(0.015s 降至 2.24kN),钢骨剪力则在 0.01s 达到 16.15kN 后持续波动,未发生屈服。这一区别源于含钢率对抗剪机制的影响:低含钢率下,钢骨数量少、约束不足,混凝土一旦开裂即迅速丧失承载力,钢骨无法单独承担剩余荷载,导致整体失效;高含钢率下,钢

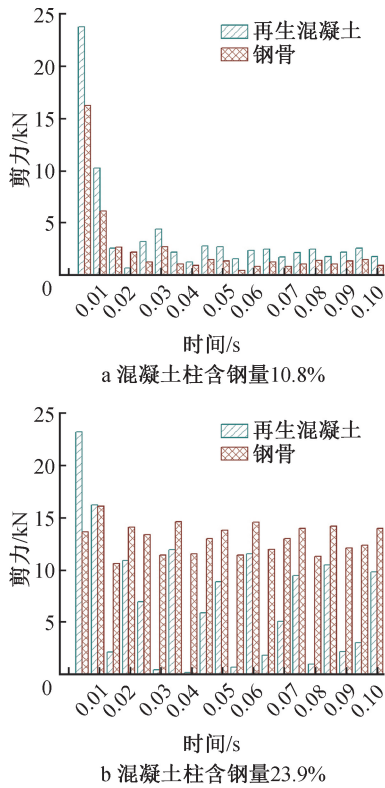


图4 不同含钢率下混凝土柱的剪力变化

Fig. 4 Shear force variation of concrete columns under different steel content ratios

骨不仅能增强对混凝土的约束、延缓其破坏,更在混凝土失效后成为主要抗剪构件,通过其延性形成持续的荷载传递路径,从而显著提升柱体的抗爆与抗倒塌能力。

在爆炸荷载为 10kN 条件下,选取混凝土柱 Z4-G10.8-B10-C7.5, Z6-G15.2-B10-C7.5, Z8-G19.5-B10-C7.5, Z10-G23.9-B10-C7.5 为研究对象,即混凝土柱含钢率分别为 10.8%, 15.2%, 19.5% 和 23.9% 时,混凝土柱的跨中位移变化如图 5 所示。

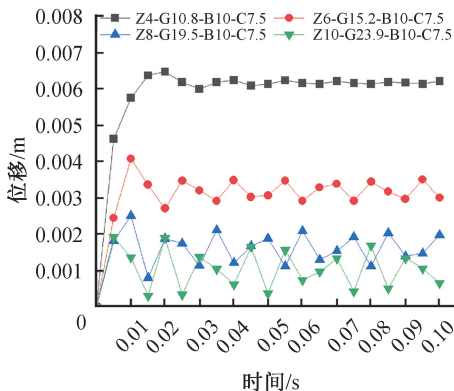


图5 不同含钢率下混凝土柱的跨中位移变化

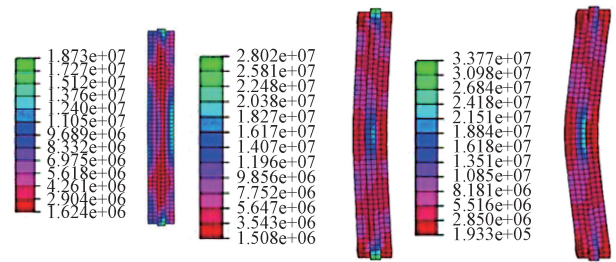
Fig. 5 Changes in mid span displacement of concrete columns under different steel content ratios

由图 5 可知,当爆炸发生时,不同含钢率混凝土

柱的跨中位移均快速增大,且含钢率越高,位移响应越小;含钢率为 10.8% 的试件 Z4 在 0.02s 时达到位移峰值 6.47mm,随后位移逐渐减小,表明构件已发生破坏;含钢率为 15.2% 的试件 Z6 在 0.01s 时位移最大(4.07mm),至 0.02s 时降至 2.71mm,此时表层混凝土已破坏,钢筋位移呈上下波动;含钢率更高的试件(19.5% 和 23.9%)在整个过程中位移持续波动,两者均未发生明显屈服。以上结果表明,钢筋的加入可显著提高混凝土柱的抗变形与抗爆性能,其作用机理在于:低含钢率下,钢筋对混凝土的约束与辅助承载作用有限,混凝土迅速达到极限变形而导致整体失稳;随着含钢率提高,钢筋能与混凝土共同承担冲击荷载,有效抑制混凝土早期开裂,并在混凝土破坏后成为主要承力构件,利用自身延性持续抵抗冲击、吸收能量,从而避免柱体失稳,表现出更优的抗爆性能。

### 3.3 爆炸荷载的影响

当爆炸荷载分别为 5, 10, 15kN 时,混凝土柱的应力分布如图 6 所示。



a Z4-G10.2-B5-C7.5 b Z4-G10.8-B10-C7.5 c Z4-G10.2-B15-C7.5

图6 不同爆炸荷载下混凝土柱应力云图(单位:Pa)

Fig. 6 Stress cloud map of concrete columns under different explosive loads (unit: Pa)

当爆炸荷载为 5kN 时,混凝土柱受到的应力集中在两端和中部区域,两端最大应力为 18.73MPa,此时混凝土柱未受到破坏;荷载增至 10kN 时,混凝土柱中部呈现弯曲变形,柱体两端受到的最大应力为 28.02MPa,导致表层混凝土发生塑性开裂并最终破坏;继续提高荷载至 15kN,柱体仍表现为中部弯曲破坏,但应力峰值区域转移至中部,最大应力达 33.77MPa,混凝土柱迅速失效。以上结果表明,随着爆炸荷载增大,混凝土柱应力水平显著提高,且破坏模式由两端应力集中逐步转变为中部弯曲主导,反映出结构在更高冲击能量下整体响应的演变规律。

当爆炸荷载分别为 5, 10, 15kN 时,在不同爆炸荷载下,混凝土柱的跨中位移如图 7 所示。

由图 7 可知,当爆炸发生时,不同爆炸荷载下的

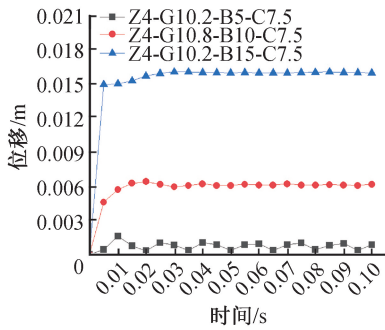


图7 不同爆炸荷载下混凝土柱跨中位移变化

Fig. 7 Changes in mid span displacement of concrete columns under different explosive loads

混凝土柱的跨中位移快速增大,然后趋于平稳。当爆炸发生 0.01s 时,混凝土柱的跨中位移达到最大,最大位移为 1.62mm,随着爆炸时间的增大,混凝土柱的位移逐渐减小然后趋于平稳,在此阶段,混凝土柱已被破坏。当爆炸发生 0.02s 时,混凝土柱的跨中位移达到最大,最大位移为 6.39mm,在该阶段,混凝土柱已被破坏。当爆炸发生 0.005s 时,混凝土柱的跨中位移快速增大至 14.93mm,当爆炸时间持续增大时,混凝土柱的跨中位移呈缓慢增大趋势,混凝土柱遭受破坏,且爆炸荷载越大,混凝土柱的跨中位移越大。由于爆炸荷载属于典型的短时冲击荷载,其对结构的影响本质是快速向结构输入冲击能量,且爆炸荷载越大,单位时间内向混凝土柱输入的冲击能量越多,结构需要承担的能量负荷相应越高,若输入能量超过结构(混凝土+钢骨)的极限抵抗能量,结构会快速发生变形甚至破坏,且荷载越大,能量超出幅度越显著,变形与破坏越剧烈。

### 3.4 长细比的影响

在爆炸荷载为 10kN 条件下,当混凝土柱的长细比分别为 7.05, 7.95, 8.86, 9.77 时,混凝土柱的跨中位移变化如图 8 所示。

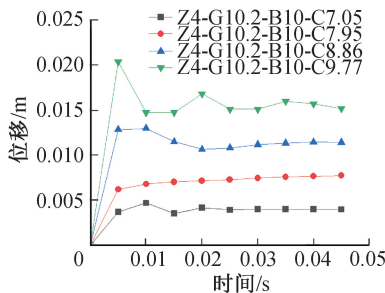


图8 不同长细比下混凝土柱的跨中位移变化

Fig. 8 Changes in mid span displacement of concrete columns under different slenderness ratios

由图 8 可知,当爆炸发生时,混凝土柱的跨中位移快速增大,当爆炸时间为 0.01s 时,混凝土柱的跨

中位移达到最大。当爆炸时间为 0.005s 时,混凝土柱的跨中位移增大至 6.21mm,随着爆炸时间的持续增大,跨中位移逐渐增大。当爆炸时间为 0.01s 时,混凝土柱的跨中位移达到最大。当爆炸时间为 0.005s 时,混凝土柱的跨中位移达到最大,最大位移为 20.35mm。由此可知,随着长细比的增大,混凝土柱的跨中位移逐渐增大,柱身的稳定性差,更易在爆炸过程中被破坏。混凝土柱的长细比是物体的计算长度与截面回转半径的比值,长细比越小,柱越短粗,截面抗弯能力相对更强,整体刚度大,长细比越大,柱越细长,截面抗弯能力相对更弱,整体刚度小。爆炸荷载是瞬时脉冲荷载,会瞬间对混凝土柱产生侧向冲击,迫使柱发生弯曲变形,而柱体的抗侧移刚度是抵抗该弯曲变形的核心能力,且混凝土柱刚度越大,相同荷载下变形越小。相应的细长比越小,相同荷载下混凝土柱变形越小。

## 4 结语

1) 在爆炸荷载为 5kN 条件下,当混凝土柱钢骨厚度不同时,随着爆炸时间的增大,混凝土柱两端受到的应力最大,未加入钢骨的混凝土柱跨中位移快速增大,当爆炸发生 0.005s 后,混凝土柱被破坏。加入钢骨的混凝土柱的抗爆性能增加,柱身的跨中位移相对减小,混凝土柱可承担更大的爆炸荷载。

2) 在爆炸荷载为 10kN 条件下,当混凝土柱含钢率不同时,随着爆炸时间的增大,混凝土柱受到的剪力均先增大再减小,在爆炸过程中,含钢率为 10.8% 的混凝土柱遭受破坏,含钢率为 23.9% 的混凝土柱中混凝土被破坏,钢骨未出现屈服变形。因此,混凝土柱的含钢率越大,跨中位移越小,钢骨厚度越大,混凝土柱抗变形能力越强。

3) 爆炸荷载越大,混凝土柱受到的应力越大,柱身的跨中位移越大。当爆炸荷载过大时,应增大混凝土柱的钢骨厚度,增大柱身抗爆性能。

4) 在爆炸荷载为 10kN 条件下,随着混凝土柱长细比的增大,混凝土柱的跨中位移逐渐增大,柱身的稳定性差,更易在爆炸过程中被破坏。

### 参考文献:

- [1] 李鹏飞,田超,赵耀辉,等. 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[J]. 重庆建筑, 2024, 23(4): 48-50.  
LI P F, TIAN C, ZHAO Y H, et al. Study on dynamic response and anti-explosion strengthening of reinforced concrete columns under explosion load[J]. Chongqing architecture, 2024, 23(4): 48-50.
- [2] 夏梦涛,李明鸿,宗周红,等. 大当量爆炸作用下预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的失效模式[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 12-25.

- XIA M T, LI M H, ZONG Z H, et al. Failure mode of precast segmental double-layer concrete-filled steel tubular pier under large equivalent explosion[J]. *Explosion and shock waves*, 2023, 43(11):12-25.
- [ 3 ] 李明鸿,夏梦涛,宗周红,等. 近爆作用下双层方钢管混凝土墩柱的抗爆性能试验[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(11):386-394.
- LI M H, XIA M T, ZONG Z H, et al. Experimental study on anti-explosion performance of double-layer concrete-filled square steel tubular pier under near explosion[J]. *China journal of highway and transport*, 2023, 36(11):386-394.
- [ 4 ] 齐宝欣,刘雪微,任庆新,等. 截面短长轴比对椭圆钢管混凝土柱抗爆性能影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2023, 39(2):202-210.
- QI B X, LIU X W, REN Q X, et al. Influence of that ratio of short axis to long axis on the anti-explosion performance of elliptical concrete-filled steel tubular column [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(natural science)*, 2023, 39(2):202-210.
- [ 5 ] 吕辰旭,闫秋实,李亮. 近爆荷载作用下装配式钢筋混凝土柱抗爆性能及受损加固试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(6):118-131.
- LÜ C X, YAN Q S, LI L. Experimental study on blast resistance performance and damage repair of precast concrete column under close-in explosion[J]. *Explosion and shock waves*, 2023, 43(6):118-131.
- [ 6 ] 倪赛雄,陈兆荣,郭朋鑫,等. 外套螺栓连接钢管夹层混凝土加固柱轴压力学性能数值模拟[J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(22):41-51.
- NI S X, CHEN Z R, GUO P X, et al. Numerical simulation of axial compression performance of bolt-connected steel tube and sandwiched concrete jacketed RC columns [J]. *Construction technology*, 2023, 52(22):41-51.
- [ 7 ] 李勇. 超高层内拉筋钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(15):22-28.
- LI Y. Experimental study on seismic performance of concrete filled steel tubular columns with inner reinforcement in super high-rise building[J]. *Construction technology*, 2023, 52(15):22-28.
- [ 8 ] 郑茜,王洪欣,王义,等. 钢管混凝土柱环梁节点受力性能研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(16):109-114.
- ZHENG Q, WANG H X, WANG Y, et al. Study on mechanical behavior of concrete filled steel tubular column ring beam joint [J]. *Construction technology*, 2023, 52(16):109-114.
- [ 9 ] 詹界东,王奕开. 相同截面面积不同截面形式的钢管混凝土柱轴压性能[J]. *金属功能材料*, 2024, 31(1):51-62.
- ZHAN J D, WANG Y K. Axial compression performance of concrete filled steel tubular columns with the same cross section area and different cross section forms [J]. *Metallic functional materials*, 2024, 31(1):51-62.
- [ 10 ] 付朝江,高颖,陈华艳,等. 侧向冲击后钢管混凝土柱剩余轴压承载力研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(4):57-69.
- FU C J, GAO Y, CHEN H Y, et al. Residual axial bearing capacity of concrete-filled steel tubular columns after lateral impact[J]. *Progress in steel building structures*, 2024, 26(4):57-69.