

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.002

承载立柱爆破破坏特征及应变演化规律研究

费鸿禄,李文焱,魏世众,山 杰,甄 帅

(辽宁工程技术大学 爆破技术研究院,阜新 123000)

摘 要: 为分析不同单位面积炸药量及不同截面应力下的钢筋混凝土立柱爆破后破坏特征及应变演化规律,以弹性力学理论为基础,利用自主研发的单轴惯性动载力学模型试验系统对12个钢筋混凝土立柱进行爆破试验。当钢筋混凝土立柱上部截面应力为0 MPa时对应单位面积炸药量为0.11 kg/m²、0.23 kg/m²、0.27 kg/m²;上部截面应力为2 MPa时对应单位面积炸药量为0.13 kg/m²、0.18 kg/m²、0.23 kg/m²;上部截面应力为3 MPa时对应单位面积炸药量为0.18 kg/m²、0.23 kg/m²、0.32 kg/m²;上部截面应力为4 MPa时对应单位面积炸药量为0.13 kg/m²、0.18 kg/m²、0.23 kg/m²,并且运用数值仿真模拟软件对不同截面应力影响爆破效果进行模拟分析。定义纵向中轴线破碎距离来描述立柱爆破后的破碎范围,通过理论推导、现场试验及数值模拟软件分析不同影响因素下的中轴线破碎距离及应变演化规律得出:随着截面应力的增加,越接近中轴线的耦合切向应力越大,与加载方向垂直的耦合切向拉应力相对减小;当单位面积炸药量约小于0.15 kg/m²时,随立柱截面应力增大,立柱中轴线破碎距离不断减小;当单位面积炸药量约大于0.15 kg/m²时,随着截面应力的递增,中轴线破碎距离不断增大,立柱的切向拉应变峰值呈上升趋势,径向压应变峰值绝对值逐渐减小;当截面应力一定时,随着单位面积炸药量的增加,立柱纵向中轴线破碎距离增大,但是增长幅度却随着单位面积炸药量的增加而减小,同时立柱的切向拉应变峰值增大,径向压应变峰值绝对值也呈上升趋势;随着截面应力的增大,立柱损伤云中轴线上损伤距离不断增大,且裂纹倾向于加载轴向扩展,进一步验证试验结论的正确性。

关键词: 爆破荷载;钢筋混凝土立柱;截面应力;单位面积炸药量;破坏特征;应变演化规律

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)01-0010-011

Research on Blasting Failure Characteristics and Strain Evolution Law of Bearing Column

FEI Hong-lu, LI Wen-yan, WEI Shi-zhong, SHAN Jie, ZHEN Shuai

(Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to analyze the failure characteristics and strain evolution law of reinforced concrete columns after blasting under different amount of explosives per unit area and section stresses, blasting tests of 12 reinforced concrete columns were carried out by using a self-developed test system with uniaxial inertial dynamic loading model, which is based on the theory of elastic mechanics. When the upper section stress of the reinforced concrete columns was 0 MPa, the corresponding amounts of explosives per unit area were 0.11 kg/m², 0.23 kg/m², 0.27 kg/m², respectively. When the upper section stress was 2 MPa, the corresponding amounts of explosives per unit area were 0.13 kg/m², 0.18 kg/m², 0.23 kg/m², respectively. When the upper section stress was 3 MPa, the corresponding amounts of explosives per unit area were 0.18 kg/m², 0.23 kg/m², 0.32 kg/m², respectively. When the upper cross-sectional stress was 4 MPa, the corresponding amounts of explosives per unit area were 0.13 kg/m²,

收稿日期:2022-09-22

作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授、博士生导师,主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作,(E-mail) feihonglu@163.com。

通讯作者:李文焱(1995-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程和爆破工程方面的研究,(E-mail) liwenyan4017@163.com。

0.18 kg/m², 0.23 kg/m², respectively. In addition, numerical simulation software was used to analyze the impact of different section stresses on blasting effect. The longitudinal central axis crushing distance is defined to describe the crushing range of the column after blasting, and the central axis crushing distance and strain evolution law are analyzed under different influencing factors through theoretical deduction, field experiment and numerical simulation. The analysis results show that with the increase of section stress, the greater the coupling tangential stress close to the central axis, and the coupling tangential tensile stress which is perpendicular to the loading direction is relatively reduced. When the amount of explosive per unit area is less than 0.15 kg/m², the crushing range of the central axis of the column decreases with the increase of the section stress. When the amount of explosive per unit area is more than 0.15 kg/m², with the increase of section stress, the crushing range continues to increase. The peak of tangential tensile strain shows an upward trend, and the absolute value of the peak radial compressive strain gradually decreases. When the section stress is fixed, the crushing range of the column increases with the increase of the amount of explosive per unit area, but the growth rate decreases with the increase of the amount of explosive per unit area. Meanwhile, the peak of the tangential tensile strain of the column increases, and the absolute value of the peak radial compressive strain also shows an upward trend. With the increase of section stress, the crushing range in the column damage cloud is increasing, and the crack tends to extend axially with the load, which further verifies the correctness of the test conclusions.

Key words: explosive loads; reinforced concrete columns; section stress; amount of explosive per unit area; destructive characteristics; strain evolution laws

在高层高耸结构爆破拆除过程中,立柱、筒壁等主要承重构件的爆破破坏是结构失稳的前提。对于承重构件的爆破破坏,既要确保其失去承载能力,又要避免因爆炸能量过剩造成爆破飞石、空气冲击波等危害效应^[1]。因此,研究爆破拆除楼体构件爆破破坏特征与保留部分的应力状态动态演化规律是拆除爆破设计和有害效应控制的基础理论问题。此前,许多科研人员开展了大量的立柱爆破破坏特征及应变演化规律及其相关试验的研究,如 Kazunori Fujikake 通过试验研究表明^[2],约束钢筋混凝土柱试件的剪切钢筋对钢筋混凝土柱试件的爆破损伤有显著影响,因此可以通过截面分析来评估爆破损伤钢筋混凝土柱试件的剩余抗力;陈洋自制了一台轴向加、卸载实验测试平台^[3],通过实验获得了爆破卸荷过程中岩杆的时程动态应变数据,建立了初始应力卸载一维力学模型,揭示了卸载波的传播机制;陈运轩基于能量平衡原理^[4],分析多种非定常因素对炸药单耗的影响规律,并推导出炸药单耗与各因素之间的定量关系;张庆彬等基于相似准则进行爆破试验^[5],得到了不同强度的混凝土试块埋深和炸药单耗之间的关系,并以模型试验结果修正以往的经验公式;姚颖康通过建筑物底层立柱的现场爆破试验^[6],得出探究结构柱在初始应力作用下的破坏机制与动力响应等问题;Jinshan Sun 等基于试验结果^[7],结合爆炸荷载、钢筋拉伸和初始应力释放,提出了一种应力瞬态概念模型,详细描述了高层建筑拆除后爆破钢筋混凝土柱的应力状态;杨建华等采

用 SPH-FEM 耦合数值模拟方法^[8],对岩石爆破开裂和爆破地震波进行分析,发现岩石开裂和地震波能量都受到地应力的改变;Zhang Fengpeng 通过爆炸坑试验^[9],得出高应力条件下的岩石爆破与低应力条件下的岩石单耗爆破不同;肖思友等根据理论分析探究出高地应力作用下单孔爆破的动态卸载作用以及破岩机理^[10];葛进进以相似模型试验为主^[11],理论分析为辅,得出初始应力限制了裂纹面的张开,即裂纹的扩展需要更多的能量。陈明等以摩尔-库仑准则为基础进行理论分析^[12],研究了初始地应力对爆炸应力波作用下爆生裂隙区比例半径的影响。现阶段主要考虑炸药量对混凝土立柱爆破效果的影响,而忽略的被爆破建筑物初始应力的影响,因此对于承载结构柱爆破破坏的基础研究是不够全面。

以钢筋混凝土立柱为研究对象,通过改变截面应力以及单位面积炸药量,对钢筋混凝土立柱中轴线破碎距离以及应变演化规律展开研究,并运用 LS-DYNA 数值模拟软件进一步了分析不同截面应力下立柱爆破效果,以期拆除爆破参数设计提供更可靠的参考依据。

1 初始应力条件下炮孔应力集中问题分析

运用弹性力学的知识很难直接分析出混凝土立柱炮孔周边的应力演化规律,所以将立柱简化成受一对边界均布压力的均质弹性平板,板中带有半径

为 a 的小圆孔, 设初始压应力为 F , 不考虑体力作用, 其受力示意图如图 1 所示, 求解混凝土立柱平面的应力场。

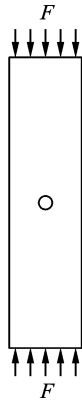


图 1 混凝土立柱受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concrete column force

根据圣维南原理, 圆孔对板内应力分布的影响主要在小孔的附近区域, 在离孔较远处可以忽略不计, 对炮孔周围各应力分量进行求解可得^[13]

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{F}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{F}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{F}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{F}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} = -\frac{F}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 分别为计算点的径向应力、切向应力和剪切应力, Pa; F 为轴向初始压应力, Pa; θ 为计算点和爆源的连线与水平方向的夹角, °; r 为计算点到爆源的距离, m; a 为炮孔半径, m。

在爆炸荷载作用下, 炸药产生的冲击波在混凝土中传播衰减为应力波, 则混凝土中任意一点的切向应力与径向应力可以分别表示为^[14]

$$\sigma_{r1} = P_d \bar{r}^{-\alpha} \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta1} = -b\sigma_r \quad (3)$$

式中: σ_{r1} 、 $\sigma_{\theta1}$ 分别为炸药爆炸在混凝土产生的径向应力和切向应力, MPa; $\bar{r}$ 为相对距离, $\bar{r} = r/r_b$, 其中 r 为计算点到装药中心的距离, m; r_b 为炮孔半径, m; α 为载荷传播衰减指数, $\alpha = 2 \pm \mu_d / (1 - \mu_d)$, 其中正、负号分别对应冲击波区和应力区; μ_d 为混凝土的动态泊松比; b 为侧向应力系数, $b = \mu_d / (1 - \mu_d)$ 。

根据相关学者的研究成果^[15], 在单个炮孔爆破作用下, 炮孔壁所受到的峰值应力为

$$P_d = \frac{\rho D^2}{4} \left(\frac{d}{d_0} \right)^3 \quad (4)$$

式中: P_d 为炸药爆炸作用于孔壁的峰值应力, MPa; ρ 表示为炸药密度, kg/m³; D 为炸药爆轰速度, m/s; d 为药卷直径, mm; d_0 为炮孔直径, mm。

因此将初始应力与爆破荷载叠加的应力场为

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_r = \frac{F}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{F}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \left(1 - 3 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + p_d \left(\frac{a}{r} \right)^\alpha \\ \bar{\sigma}_\theta = \frac{F}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{F}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \lambda_d p_d \left(\frac{a}{r} \right)^\alpha \end{cases} \quad (5)$$

本试验使用 C30 混凝土容重为 23.5 kN, 泊松比 μ , 经过计算可得动态泊松比为 $\mu_d = 0.8\mu = 0.2$; 使用炸药密度 $\rho = 1000$ kg/m³ 的二号岩石乳化炸药, 爆速为 $D = 3200$ m/s, 爆破动荷载 $p_d = \rho D^2 / 4 = 2560$ MPa。

假设施加的轴向压力 F 分别为 0 MPa、5 MPa、10 MPa、15 MPa。将以上参数代入式(5)中进行计算, 由于爆破产生的冲击波衰减为应力波时间很短, 因此主要分析不同截面应力混凝土中应力波传播, 计算出不同初始加载条件下钢筋混凝土结构柱炮孔周围径向及切向应力, 并使用 MATLAB 软件将计算结果绘制成三维演化图和应力场等值线图(图 2), 通过对比分析总结出上部加载作用对炮孔周围耦合应力场分布的影响。

观察图 2 可以得出, 随着竖向轴压的增加, 炮孔周围的切向拉应力相对于耦合径向应力发生显著变化。在与竖向中轴线方向垂直的区域附近, 炮孔壁的耦合切向拉应力峰值减小, 在 θ 为 0° 和 180° 时出现最小值, 并随着远离炮孔切向拉应力逐渐降低。而在竖直轴线方向附近, 炮孔周围混凝土的切向拉应力随着轴压增加相对增大, 但增大幅度较小。因此随着立柱截面应力的增大, 对于与加载方向垂直的混凝土破碎起到抑制作用, 而沿截面应力方向的混凝土破碎起到促进作用。所以在对不同截面应力作用下的钢筋混凝土立柱进行爆破时, 需要根据不同加载大小调整炸药量以取得更好的爆破效果。

2 试验设计

2.1 试验装置

目前, 应用于模拟钢筋混凝土立柱上部载荷的试验装置主要是静压爆破试验装置。其缺点主要是: 当模拟试件爆破破坏后, 模拟试件与加载装置所接触平面立即分离, 所施加的载荷瞬间变为零, 不能持续作用在试件上。为了贴近实际爆破工况, 本文

采用自主研发的一种力学模型系统进行试验^[16]。本试验装置解决了传统的静压爆破试验装置只能施加静压载荷作用的缺陷^[17],通过弹簧对立柱施加一

个惯性动载作用。本装置包括反力框架、载荷施加机构、储能机构、试验构件固定机构及防护机构。具体试验装置如图 3 所示。

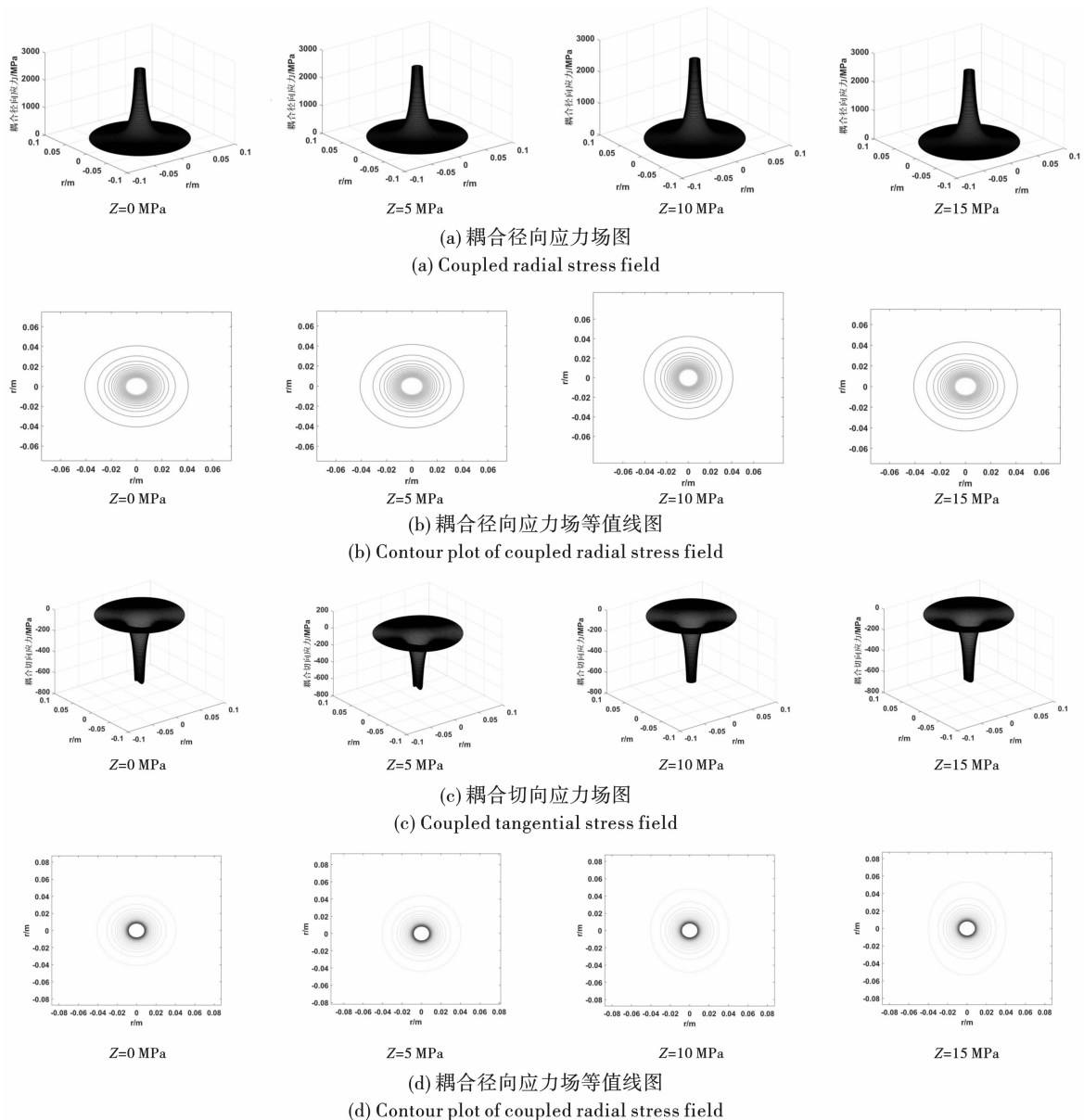


图 2 不同轴压作用下炮孔周边耦合应力演化图

Fig. 2 Coupling stress evolution diagram around the blast hole under different axial pressures

2.2 立柱炸药量的选取及上部荷载的计算

本爆破试验中,所有钢筋混凝土结构均采用单孔爆破,各试件炸药量的选取首先采用下面经验公式进行计算^[2]

$$M = q \cdot S \quad (6)$$

式中: M 为立柱所需炸药量,kg; q 为立柱单位面积炸药量,kg/m²; S 为立柱横截面积,m²。

试验中对立柱上部所加载荷为均布载荷,所加载荷的大小通过设计的截面应力并采用式(7)进行计算

$$F = Z \cdot S \quad (7)$$

式中: F 为上部所加载荷,N; Z 为试验设计截面应力,Pa。

2.3 爆破试验工况

本次对 12 根 C30 钢筋混凝土立柱(立柱长宽高分别为 150 mm、150 mm、600 mm)进行爆破试验。爆破试验采用二号岩石乳化炸药,试验一共设计 6 种单位面积炸药量,分别为 0.11 kg/m²、0.13 kg/m²、0.18 kg/m²、0.23 kg/m²、0.27 kg/m²、0.32 kg/m²。试验时,改变立柱截面应力和单位面积炸药量并依

次对立柱进行爆破试验,实时采集数据并做好试验记录。爆破试验工况如表 1 所示。

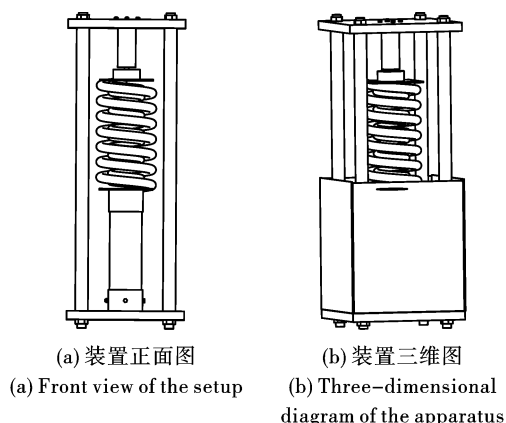


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

表 1 钢筋混凝土立柱爆破试验工况

Table 1 Blasting test results of reinforced concrete specimens

序号	立柱编号	上部截面 应力/MPa	单位面积炸药 量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
1	Z0E11	0	0.11
2	Z0E23	0	0.23
3	Z0E27	0	0.27
4	Z2E13	2	0.13
5	Z2E18	2	0.18
6	Z2E23	2	0.23
7	Z3E18	3	0.18
8	Z3E23	3	0.23
9	Z3E32	3	0.32
10	Z4E13	4	0.13
11	Z4E18	4	0.18
12	Z4E23	4	0.23

2.4 承载立柱动态应变测点布置及爆破试验

(1) 承载立柱动态应变测点布设

考虑到爆炸试验具有瞬态性,电测法更适用于

测量爆破时立柱的动态应变演化规律^[18]。本试验选用试验采用 BMB120-80AA-P300-D 应变片,电阻值为 $120.0 \pm 0.5 \Omega$,灵敏系数为 $2.0 \pm 1\%$ 。应变片按照半桥方式连接,并设置采样频率为 10 kHz。测试软件选择 DH5922D 动态信号测试分析系统。

为有效获得承载立柱在爆破作用下动态应变演化规律,需合理布设应变片测点位置,采集炮孔周边区域的径向应变、切向应变的变化规律。本次试验针对 Z2E13、Z2E18、Z2E23、Z3E18 和 Z4E18 五个模型试件 40 个测点进行了径向和切向应变的测试,应变片测点分别布置在炮孔所在临空面和与炮孔轴向平行的临空面(共 8 个应变片)。测点 1 设置于立柱正立面顶端,测点 2 设置于距上端部 1/3 处的中轴线上,测点 3 设置于测点 2 等高处但更靠近立柱边缘,测点 4 设置于立柱侧面距上端部 1/3 处的中轴线上,测点 5~8 分别与测点 1~4 对称,测点具体布置位置如图 4 所示。

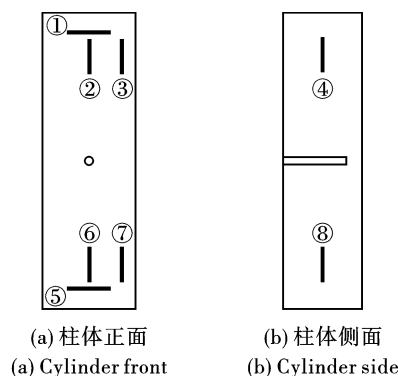


图 4 应变片测点布置图

Fig. 4 Layout of strain gauge measuring points

(2) 爆破试验

试验选取适合的场地,连接好相应仪器并做好防护,进行现场试验,爆破完成后对立柱爆破破坏形态进行测量和记录,更换试件,开展下一轮试验。具体试验过程如图 5 所示。

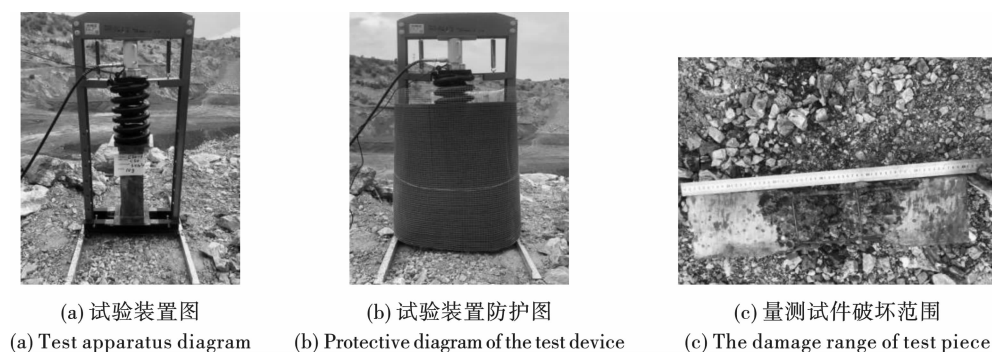


图 5 野外爆炸试验

Fig. 5 Field explosion test

3 承载立柱爆破破坏形态特征现象及分析

3.1 承载立柱爆破破坏形态特征现象及分析

部分承载立柱爆破后爆破形态如6图所示。

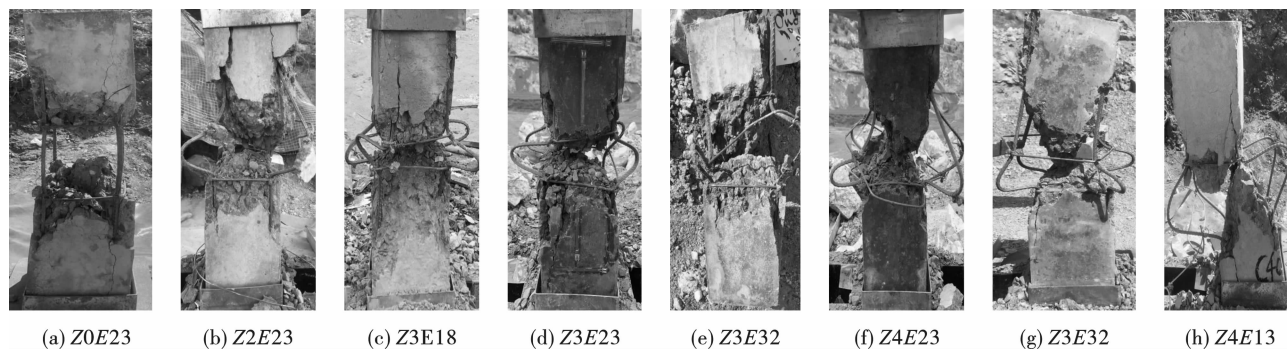


图6 试验破坏现象

Fig. 6 Test damage phenomenon

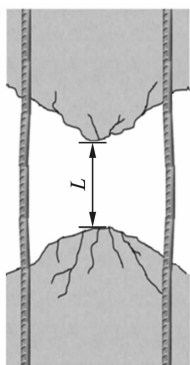


图7 爆破后立柱破坏形态特征示意图

Fig. 7 Schematic diagram of column failure characteristics after blasting

观察图6 爆破后立柱破坏形态特征示意图可以得出:

(1) 试件 Z3E18、Z3E23、Z3E32 随着单位面积炸药量的增加,立柱中轴线距离也呈增长趋势,中轴线破碎距离分别为 7.3 cm、9.5 cm、10.8 cm,且随着单位面积炸药量的增大纵向钢筋及箍筋的弯曲程度不断变大,纵向钢筋的裸露长度也逐渐增大。

(2) 试件 Z0E23 立柱装药周围的混凝土被完全炸碎并抛出而形成空腔区,立柱装药部分周围纵向钢筋完全裸露,但仍有剩余承载力;试件 Z2E23、Z3E23、Z4E23,随着截面应力的增加,纵向钢筋弯曲程度变大,丧失承载力,试件上保留部分在荷载的作用下迅速向下,在弹簧释放能量及自身重力作用下,中轴线附近混凝土“二次破坏”,进一步增加中轴线破碎长度。

爆破试验后对立柱的中轴线破碎距离进行测量

因为中轴线破碎距离单位面积炸药量和截面应力等因素密切相关^[19],现将混凝土立柱在爆破后保留部分形态特征绘制成图7,距离 L 表示立柱纵向中轴线破碎距离,对钢筋混凝土立柱在爆破后的试验现象观察并分析。

及统计分析,将截面应力和单位面积炸药量双因素与中轴线破碎距离拟合三维图,如图8所示。

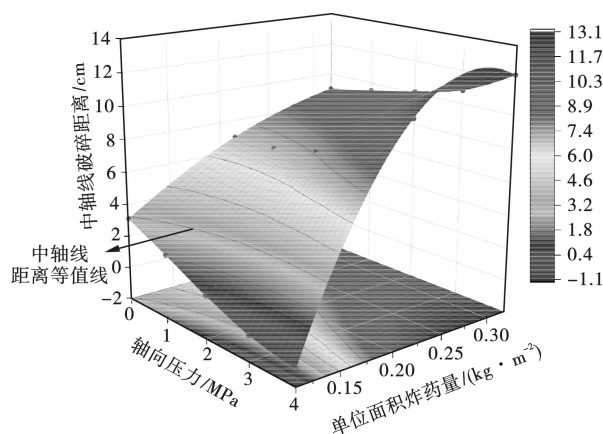


图8 截面应力、单位面积炸药量双因素与中轴线破碎距离拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of axial pressure, explosive quantity per unit area and central axis crushing range

由图8可知,当单位面积炸药量约小于 0.15 kg/m^2 时,随立柱截面应力增大,立柱中轴线破碎距离不断减小,是因为试验混凝土立柱模型有不均匀性,其中存在许多细小裂隙,随着立柱截面应力增加承载立柱模型内部逐渐压密,有效提高了混凝土的密实度,增大了混凝土立柱的裂纹扩展阻力,在一定程度上提高了混凝土强度^[20],因此反映出荷载对中轴线破碎距离的抑制作用,当单位面积炸药量约大于 0.15 kg/m^2 且为定值时,随着立柱截面应力的增大,中轴线破碎距离逐渐增大,是因为截面应力的加载方向对爆生裂纹的扩展有引导作用^[21],裂纹沿着

混凝土立柱竖向发展,爆炸产物会随着裂纹进行优先释放,所以中轴线破碎距离不断增大。当混凝土立柱截面应力一定时,随着单位面积炸药量的增加,炸药产生的能量变大,试件纵向中轴线破碎距离增大,但是增长幅度却随着单位面积炸药量的增加而减小,是因为随着单位面积炸药量增大爆破损失的能量占比增加,作用于碎块破碎所用的能量占比在

减小,所以混凝土立柱破碎范围的增长幅度随着单位面积炸药量的增加反而减小。

3.2 爆破作用下承载立柱动态应变监测及规律分析

(1) 试验试件 Z2E13 应变时程曲线如图 9、10 所示

对试件 Z2E13 进行爆破试验,8 个测点对应的 X 方向和 Y 方向的动态应变时程曲线如图 9、10 所示。

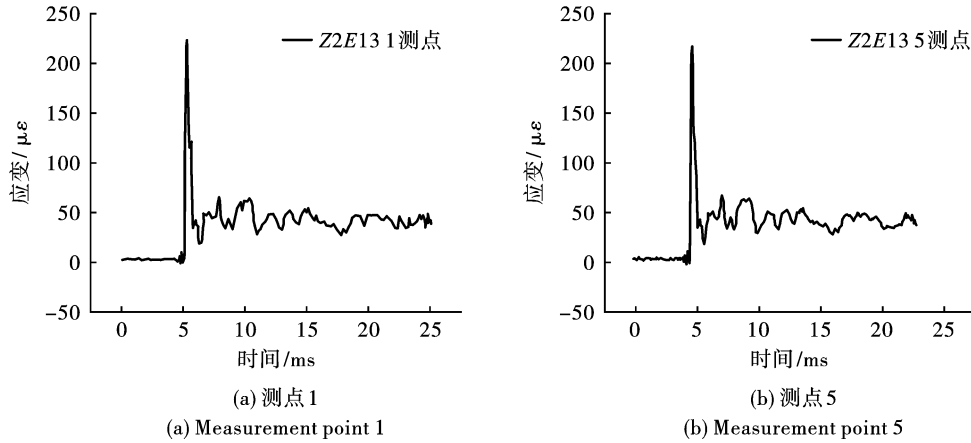


图 9 Z2E13 试件 X 方向应变时程曲线

Fig. 9 The strain time history curve of Z2E13 specimen in X direction

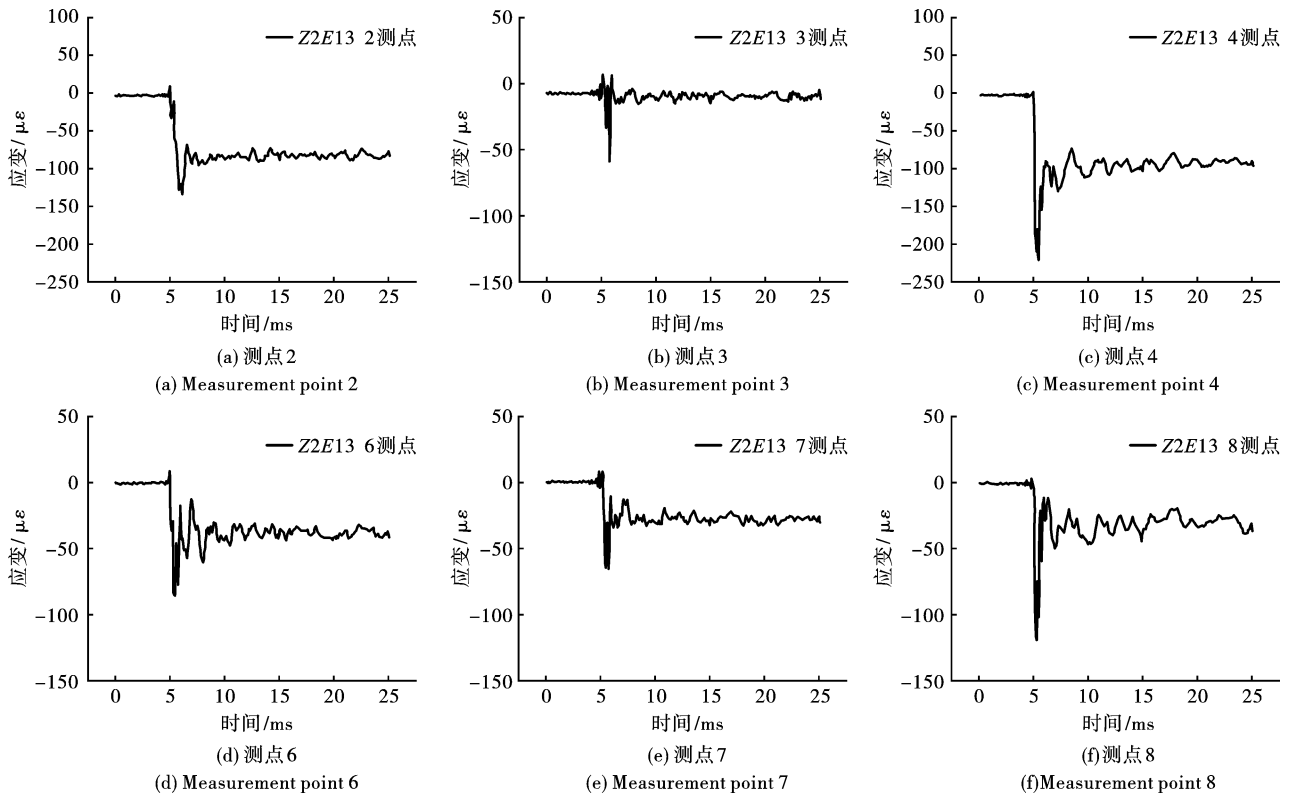


图 10 Z2E13 试件 Y 方向应变时程曲线

Fig. 10 Y -direction strain time history curve of Z2E13 specimen

由图 9、10 可知沿试件 X 方向主要受到拉伸作用,沿试件 Y 方向主要受到压缩作用,进行不同试

件应变测点的时程曲线图分析可得,试件在爆炸过程中主要经历两个阶段,第一个阶段为爆炸冲击加

载阶段,第二个阶段为爆炸冲击荷载卸载阶段。应变正数为该测点受到拉伸作用,应变负数为该测点受到压缩作用,且在爆炸作用完成后测点均产生不可恢复的变形。由于篇幅限制,且不同试件应变时程曲线图走势无明显变化,仅应变峰值大小不同,其余爆炸应变波形图不做过多展示。

(2)分别对不同单位面积炸药量和不同截面应力条件下试件的应变峰值进行分析,因为试件上、下对称测点应变相差很小,所以选取测点1~4观察分析:

1)对试件 Z2E13、Z2E18、Z2E23 各测点的应变峰值进行对比分析得出不同单位面积炸药量对加载作用下立柱动态应变演化规律的影响。

由图 11 可以得出:试件 Z2E13、Z2E18、Z2E23 的单位面积炸药量自 0.13 kg/m^2 增大至 0.23 kg/m^2 ,立柱正立面端部横向应变峰值呈现不断增大趋势,即爆炸应力波产生的切向拉应变随单位面积炸药量的增加而变大;测点 2 应变峰值绝对值由 $110.0 \mu\epsilon$ 增大至 $2365.8 \mu\epsilon$ 再增大至 $4102.3 \mu\epsilon$,测点 4 应变峰值绝对值也呈上升趋势,即随着单位面积药量的不断增大径向压应变不断增大,对比测点 2 及测点 3 的应变峰值可得中轴线混凝土所受径向压应力大于边界混凝土所受径向压应力。

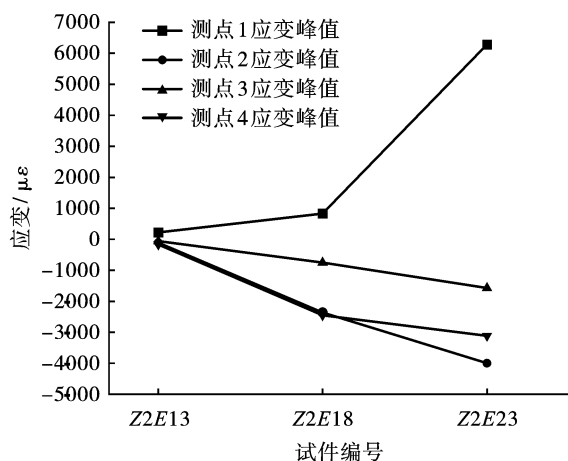


图 11 应变随单位面积炸药量变化图

Fig. 11 Variation of strain with charge amount

2)对试件 Z2E18、Z3E18、Z4E18 各测点的应变峰值进行对比分析得出不同截面应力作用下立柱动态应变演化规律的影响。

由图 12 可以得出:试件 Z2E18、Z3E18、Z4E18 的截面应力从 2.0 MPa 增大至 4.0 MPa ,测点 1 应变峰值由 $825.875 \mu\epsilon$ 增大至 $953.065 \mu\epsilon$ 再增大至 $1094.105 \mu\epsilon$,分析可得,随着截面应力的增加爆炸应力波产生的切向拉应力也逐渐增加;测点 2 应变

峰值的绝对值由 $2365.8 \mu\epsilon$ 减小至 $1938.1 \mu\epsilon$ 再减小至 $1372.7 \mu\epsilon$,测点 4 应变峰值也呈下降趋势,分析可得,随着截面应力增加,加载同向的径向压应力峰值逐渐降低,两者协同变化,呈负相关关系。

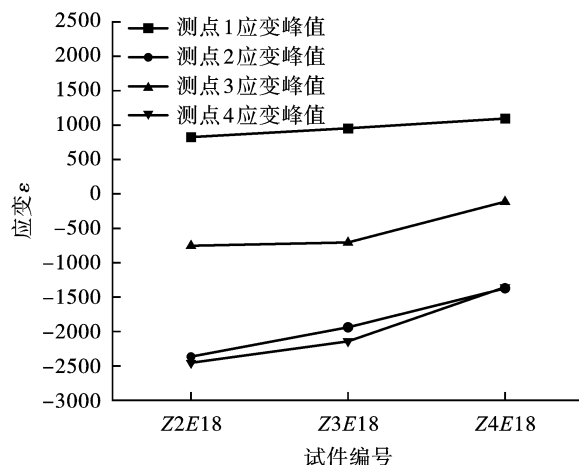


图 12 应变随截面应力变化图

Fig. 12 Diagram of strain variation with sectional stress

4 数值模拟

4.1 LS-DYNA 数值模型

结合爆破试验,利用 ANSYS 数值模拟软件建立如图 13 所示的模型进行数值模拟,模型采用 ALE 算法,且在立柱周围四个临空面为自由边界,模型尺寸与试验混凝土立柱完全一致长宽高分别为 150 mm 、 150 mm 、 600 mm ,模型在两端平面施加竖向加均布荷载。



图 13 模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the model

4.2 材料参数及状态方程

在 LS-DYNA 数值模拟软件中选择 4 种材料,分别为炸药材料模型、空气材料模型、混凝土材料模型和钢筋材料模型。炸药材料模型采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURE 材料模型,模型中采用 JWL 状态方程

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} \bar{E} \quad (8)$$

式中: P 为所求得压力值, kPa; $\bar{E}$ 为单位体积爆轰产物的内能, kJ; V 为爆轰产物的体积与未爆轰炸药的体积之比, 即 $V = v/v_0$; E_0 为由热化学实验或热力学计算确定的化学键能归一化量; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验确定的经验参数。

空气模型采用 NULL 材料, 其状态方程为 *EOS-Air(*EOS-001), 该状态方程为线性多项式和热力学的初始状态材料定义参数。混凝土材料采用 MAT_RHT, 钢筋材料模型采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC。具体材料模型参数见表 2。

表 2 材料模型参数

Table 2 Material model parameters

材料	参数名称	参数值	参数名称	参数值	参数名称	参数值
炸药	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3200	PCJ 压力/Pa	1×10^{10}
	A/Pa	1×10^9	B/Pa	4.19×10^{10}	R_1	10
	R_2	3.6	ω	0.038	E_0	7×10^9
空气	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.29×10^{-3}	材料内能/Pa	2.5×10^5	相对体积	1.0
混凝土	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2300	弹性模量/MPa	3×10^4	泊松比	0.2
钢筋	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.5×10^3	弹性模量/MPa	2.1×10^5	泊松比	0.25

为了更加直观地比较不同截面应力时混凝土立柱的损伤分布差异, 分别改变截面应力为 0 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa、10 MPa 观察并分析不同截面

应力时, 图 14 为混凝土立柱爆破作用下损伤演化区域稳定后形成的损伤云图。

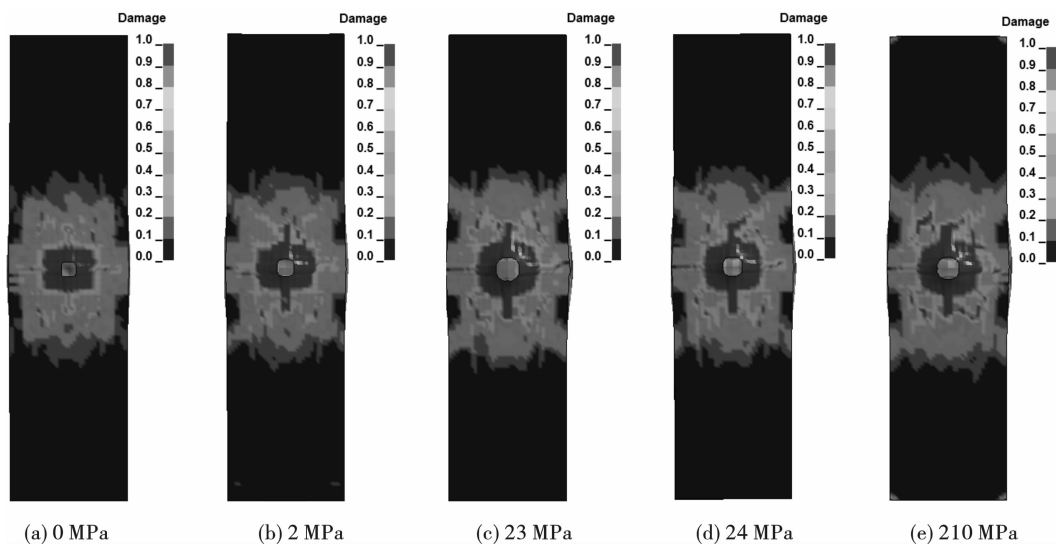


图 14 不同截面应力下混凝土立柱损伤图

Fig. 14 Damage diagram of concrete column under different section stresses

观察图 14 可以看出, 以 $\text{Damage} = 1$ 作为损伤阈值, 图中红色部分为粉碎区, 黄色区域为粉碎区和块状破碎区的过渡区域, 绿色区域为块状破碎区; 由图 14 分析可得截面应力为 0 MPa 时, 爆炸产生的爆轰压力使立柱产生的压碎区范围基本对称, 随着截面应力的增大, 中轴线的损伤距离不断扩大, 同时外部块状破碎区也逐渐增大, 当截面应力增大至 3 MPa 时发现裂纹明显倾向于轴向发展, 与现场试验结果大致相同, 进一步验证了数值模拟的可靠性, 当截面应力增大至 10 MPa 时沿加载方向裂纹最多。

表 3 混凝土立柱中轴线破碎距离

Table 3 Central axis crushing range

截面应力/ MPa	实际中轴线 破碎距离/cm	模拟中轴线 破碎距离/cm
0	8.8	9.5
2	9.5	10.4
3	10.3	10.9
4	10.9	11.4
10	—	11.8

通过比较表 3 中试验中轴线破碎距离与模拟中

轴线破碎距离得出:两者都是随着截面应力的增大而不断增大,实际中轴线破碎距离与模拟中轴线破碎距离十分接近,误差在工程允许范围内。

在立柱模型选取如图4中测点1和测点2相同位置作为监测单元,5种不同截面压力的同一监测点时程曲线图如图15、16所示。

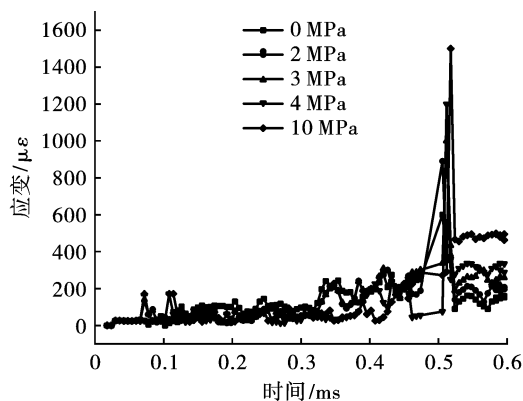


图15 端部水平应变时程曲线图

Fig. 15 End horizontal strain time course curve

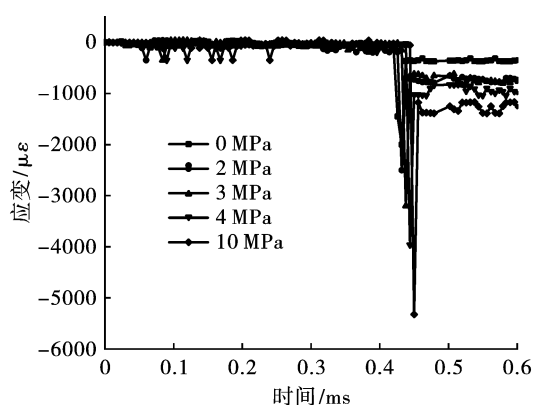


图16 距离上端1/3处竖向应变时程曲线图

Fig. 16 Vertical strain time course curve at 1/3 length of the column from the upper part

由图15可知,随着截面应力的不断增大爆破立柱端部的环向拉应力不断增大,数值模拟截面应力为0 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa时应变大小基本与试验相同,截面应力增大至10 MPa时,混凝土端部最大拉应变为1500 $\mu\epsilon$ 左右。由图16可知,随着截面应力的不断增大距离上端1/3处的径向压应变也呈上升趋势,当截面应力增大至10 MPa时该处的最大压应变为5500 $\mu\epsilon$ 左右。结合试验结果可知,当混凝土立柱单位面积炸药量一定时,随着轴压的递增,立柱径向压应变增大。

5 结论

通过12组不同试验条件作用下的混凝土立柱

进行理论分析、爆破试验以及数值仿真模拟,探究了不同条件下立柱爆破后的破坏形态特征和应变演化规律,得出以下结论:

(1)炮孔周围的切向应力随轴向截面应力的增加变化显著,越接近中轴线的耦合切向应力越大,反之则减小。

(2)当单位面积炸药量一定时,随着立柱截面应力的增大,切向拉应变呈增长趋势,径向压应变则相反;当单位面积炸药量约小于0.15 kg/m²时,立柱截面应力与中轴线破碎距离呈负相关,当大于0.15 kg/m²时,两者呈正相关关系。

(3)当承载立柱单位面积炸药量一定时,随着截面应力的增大,立柱损伤图的中轴线破碎距离呈增长趋势,并且对于爆生裂隙的引导作用越明显。

参考文献 (References)

- [1] 贾永胜,谢先启,姚颖康,等. 高层建筑物折叠爆破拆除关键技术参数探讨[J]. 爆破,2016,33(3):75-80.
- [1] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, YAO Ying-kang, et al. Discussion on key technical parameters of folding blasting demolition of high-rise buildings [J]. Blasting Period, 2016,33(3):75-80. (in Chinese)
- [2] KAZUNORI Fujikake, AEMLAOR Peerasak. Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting [J]. Engineering Structures, 2013, 55:116-125.
- [3] 陈洋,吴亮,陈明,等. 高应力岩体爆破卸荷过程中应变率及应变能特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10):60-70.
- [3] CHEN Yang, WU Liang, CHEN Ming, et al. Strain rate and strain energy characteristics during blasting and unloading of high stress rock mass [J]. Explosion and Impact, 2019, 39(10):60-70. (in Chinese)
- [4] 陈运轩. 炸药单耗非定常因素的探讨[J]. 爆破, 1989(4):23-26.
- [4] CHEN Yun-xuan. Discussion on the non-definite factors of unit consumption of explosives [J]. Blasting, 1989(4):23-26. (in Chinese)
- [5] 张庆彬,阳军生,吴从师,等. 上覆岩土条件下孤石爆破预处理炸药单耗实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5):695-702.
- [5] ZHANG Qing-bin, YANG Jun-sheng, WU Cong-shi, et al. Unit consumption experiment of solitary rock blasting pre-treatment explosive under overlying geotechnical conditions [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5):695-702. (in Chinese)
- [6] 姚颖康,孙金山,贾永胜,等. 压缩脆性介质爆破破坏时冲击荷载与初始应力卸载特征[J]. 振动与冲击,

- 2019,38(24):257-266.
- [6] YAO Ying-kang, SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, et al. Characteristics of impact load and initial stress unloading during blasting failure of compressive brittle medium[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24):257-266. (in Chinese)
- [7] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns in the blasting demolition of buildings[J]. Engineering Structures, 2020, 210(1):110411-110417.
- [8] 杨建华, 吴泽南, 姚 池, 等. 地应力对岩石爆破开裂及爆炸地震波的影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13):64-70.
- [8] YANG Jian-hua, WU Ze-nan, YAO Chi, et al. Effect of ground stress on rock blasting cracking and explosion seismic waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13):64-70. (in Chinese)
- [9] ZHANG Feng-peng, HAO Qi-qi, WANG Xiu-long, et al. Design method for specific charge in deep mining considering influence of in situ stress[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021:1-9.
- [10] 肖思友, 姜元俊, 刘志祥, 等. 高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15):143-149.
- [10] XIAO Si-you, JIANG Yuan-jun, LIU Zhi-xiang, et al. Characteristics and energy distribution of blasting rocks in hard rocks under highland stress[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15):143-149. (in Chinese)
- [11] 葛进进. 初始应力状态下岩石爆破裂纹扩展的模型试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2020.
- [11] GE Jin-jin. Model test study on the expansion of rock burst cracks under initial stress[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 陈 明, 卢文波, 周创兵, 等. 初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2254-2258.
- [12] CHEN Ming, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Effect of initial ground stress on the excavation of blasting fissure area in tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2254-2258. (in Chinese)
- [13] 杨桂通, 编著. 弹塑性力学引论[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- [14] 戴 俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001(2):144-147.
- [14] DAI Jun. Calculation of rock crushing circle and fracture circle for columnar charge blasting[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001(2):144-147. (in Chinese)
- [15] 苏哈努卡耶夫 AH. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中, 译. 北京:冶金工业出版社, 1980.
- [16] 费鸿禄, 魏世众, 蒋安俊, 等. 一种承受上部惯性动载作用的爆破相似模拟实验装置: 中国, CN113324782B [P]. 2022-06-10.
- [16] FEI Hong-lu, WEI Shi-zhong, JIANG An-jun, et al. A kind of blasting similar simulation experimental device subjected to upper inertial dynamic load: China, CN113324782B [P]. 2022-06-10. (in Chinese)
- [17] 张羽强. 一种新型物理相似模拟实验架结构设计[D]. 西安:西安科技大学, 2008.
- [17] ZHANG Yu-qiang. Structural design of a novel physically similar simulation experimental frame[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [18] 陈 洋. 深部岩体爆破开挖卸荷损伤演化机制及其数值模拟方法[D]. 武汉:武汉科技大学, 2019.
- [18] CHEN Yang. Evolution mechanism of load relief damage in deep rock mass blasting excavation and its numerical simulation method [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 李绍琦. 爆炸作用后钢筋混凝土柱损伤程度快速评估[D]. 天津:天津大学, 2020.
- [19] LI Shao-qi. Rapid assessment of damage degree of reinforced concrete column after explosion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [20] 杨海涛, 仪海豹, 王广成, 等. 单向初始荷载下爆破漏斗破坏效应试验研究[J]. 金属矿山, 2021(3):54-60.
- [20] YANG Hai-tao, YI Hai-bao, WANG Guang-cheng, et al. Experimental study on the failure effect of blasting funnel under unidirectional initial load [J]. Metal Mines, 2021(3):54-60. (in Chinese)
- [21] 王梦想. 围压作用下的爆炸应力场及岩石损伤破坏机理模型试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2019.
- [21] WANG Meng-xiang. Experimental study on the model of explosion stress field and rock damage failure mechanism under confining pressure[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)