

近邻高压充水溶洞隧道爆破施工围岩损伤研究

吴波^{1,2}, 朱文华¹, 徐世祥¹, 郑卫强¹, 林一石³, 黄勇华⁴, 林孝明⁴

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广东 广州 510900;

3. 福建省榕圣市政工程股份有限公司, 福建 福州 350800;

4. 连江县城投建设集团有限公司, 福建 福州 350599)

摘要: 为了研究隧道爆破施工近邻高压水溶洞对围岩稳定性的影响,以龙潭村隧道为工程基础,利用 LS-DYNA 软件,构建了近邻高压充水溶洞隧道爆破施工数值模型,通过分析数值计算结果,得到了隧道掌子面与高压充水溶洞相对距离及不同溶洞尺寸对围岩损伤的影响规律。基于爆破裂纹发展趋势建立隧道围岩突水判据,确定了隧道围岩防突体安全厚度。研究表明,在高静水压力作用下,当溶洞尺寸一定时,随着与隧道掌子面相对间距的增加,溶洞对隧道的的影响逐渐减弱;当相对间距一定时,溶洞尺寸越大对隧道的安全影响越严重;同时根据溶洞与隧道之间的中夹岩是否通过爆破裂纹贯通,得到了隧道围岩的最小抗突厚度。

关键词: 隧道施工; 爆破裂纹; 充水溶洞; 围岩损伤; 防突厚度

中图分类号: U455.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0220-08

Study on surrounding rock damage in tunnel blasting construction near high-pressure water-filled karst caves

WU Bo^{1,2}, ZHU Wenhua¹, XU Shixiang¹, ZHENG Weiqiang¹, LIN Yishi³, HUANG Yonghua⁴, LIN Xiaoming⁴

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Architectural Engineering, Guangzhou Urban Construction Vocational College, Guangzhou 510900, China;

3. Fujian Rongsheng Municipal Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350800, China;

4. Lianjiang County Urban Investment Construction Group Co., Ltd., Fuzhou 350599, China)

Abstract: This research aims to study the influence of high water-pressure karst cave on the stability of surrounding rock in tunnel blasting construction. Focused on the Longtan Village Tunnel project, it employs ANSYS/LS-DYNA software to construct a numerical model for tunnel blasting near neighboring high-pressure water-filled karst caves. Analyzing simulation results, the study finds out the influence of the relative distance between the tunnel face and high-pressure karst caves, along with the effects of varying cave sizes on surrounding rock damage. By establishing criteria derived from the trends in blasting-induced crack development for tunnel water bursting, the research determines the safety thickness of the water bursting prevention layer in the tunnel's surrounding rock. The results reveal that, under the influence of high hydrostatic pressure and a constant cave size, the impact of caves on the tunnel diminishes gradually as the relative distance from the tunnel face increases. Additionally, with a consistent relative distance, larger caves exert a more pronounced safety impact on the tunnel. Concurrently, the study establishes the minimum water bursting prevention thickness of the tunnel surrounding rock based on whether the caves and the tunnel face are penetrated by blasting-induced cracks.

Keywords: tunnel construction; blast cracks; water-filled caves; surrounding rock damage; anti-outburst thickness

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278397, 52168055); 江西省自然科学基金项目(20212ACB204001); 江西省“双千计划”创新领军人才项目(jxsq2020101001)

第一作者简介: 吴波(1971—), 男, 四川阆中人, 教授, 博士, 研究方向: 隧道与地下工程技术。

我国西南地区多为岩溶地质,尤其是高压充水溶洞,在这种地质中近距离的隧道爆破,会产生潜在的突涌水风险,一旦隧道围岩在开挖及卸荷扰动下发生破裂,极易引发严重的突水事故^[1],因此,近邻高压充水岩溶隧道的爆破施工安全已成为隧道建设者高度关注、亟待解决的热点问题之一。

国内外学者围绕岩溶地区隧道爆破安全问题,开展了一系列关于岩溶隧道突水机制方面的理论与试验研究。李术才等^[2-4]对岩溶隧道突水和突泥的构造分类及形成机理进行了深入分析,系统研究了岩溶隧道突水最小安全厚度的计算方法,并对典型的岩溶隧道进行了分析与预测。LI 等^[5]通过引入岩体均匀度来思考岩体的离散性和不确定性,并确定隧道围岩防水厚度。王绪^[6]利用 PFC 离散元软件,结合不同的突水破坏模式,综合考虑溶洞和围岩等因素对隧道突水破坏的影响,通过拟合得出了各参数与隧道临界防水厚度之间的关系,最终提出了隧道防水临界厚度的计算方法。翟友成等^[7]针对隧道围岩剪切破坏问题,基于非概率可靠性分析方法,构建了掌子面临界防水厚度的计算模型,并成功将该方法应用于实际工程中。DUAN Y 等^[8]采用 SPH-FEM 耦合计算方法,研究了爆破条件下岩溶隧道突水的演化过程,并以围岩应力峰值为研究重点,深入分析并确定了隧道的最小防水厚度。

上述研究主要围绕岩溶隧道突水突泥机理展开,而对近邻高压充水溶洞下爆破裂纹对隧道围岩损伤的影响研究较少,本文以实际隧道工程中邻近高压充水溶洞的爆破施工为依托,通过有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立数值仿真模型,分析近邻充水溶洞隧道掌子面爆破对中夹岩的损伤程度及关键参数影响,并确定近邻溶洞在不同静水压力下隧道围岩防水层的安全厚度。

1 数值模拟力学模型

采用有限元分析软件 ANSYS 建立单孔爆破模型,模型平面尺寸为 400 cm × 300 cm,炮孔直径取 10 cm,如图 1 所示。模型导入 LS-DYNA 中,将模型 XY 方向添加自由边界,并且设置溶洞静水压力,利用软件完全重启动技术,将第一步静水压力计算结果作为爆破开挖的初始条件,通过

* STRESS_INITIALIZATION 关键字实现初始化,确保计算过程中的信息连续性。

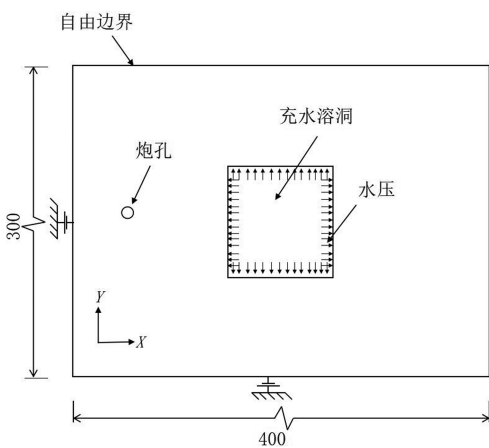


图 1 单孔爆破数值模型(单位:cm)
Fig.1 Numerical model of single-hole blasting(unit: cm)

1.1 岩石力学模型

根据龙潭村隧道的围岩物理力学特性,用 HJC 模拟岩石本构模型,在软件 LS-DYNA 中的定义方式为 * MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE。HJC 模型能较好地描述脆性材料在动态载荷作用下的破碎行为,而且它考虑了应变速率和损伤累积的影响。该模型有 20 个参数,包括物理、强度、损伤和压力方面的参数,通过添加 * MAT_ADD_EROSION 关键字调节拉剪失效参数,计算结果后展现出的裂纹延展能够吻合实际岩石爆破效果^[9]。

HJC 模型包含强度面方程、状态方程和损伤演化方程。图 2 展示了强度面方程,其形式为:

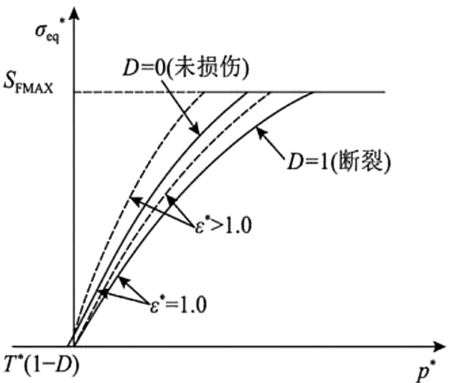


图 2 强度模型
Fig.2 Intensity model

$$\sigma^* = [A(1 - D_h) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$
$$A = c/f_c \quad (2)$$

式中, σ^* 为特征化等效应力 ($\sigma^* \leq S_{\text{FMAX}}, S_{\text{FMAX}}$ 为材料的最大特征化等效应力), MPa; f_c 为准静态单轴抗压强度, MPa; $P^* = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / (3f_c)$ 和 $\dot{\varepsilon}^*$ 是无量纲应变速率; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别是实际应变速率和参考应变速率, s^{-1} ; c 是内聚力; D_h 是 HJC 模型的损伤变量 ($0 \leq D_h \leq 1$); A 、 B 、 N 和 C 是强度参数。

D_h 损伤变量被定义为等效塑性应变和塑性体积应变的累计, 表示为:

$$D_h = \sum \frac{d\varepsilon_p + d\mu_p}{D_1(P^* + T^*)D_2} \quad (3)$$

式中, ε_p 和 μ_p 分别为等效塑性应变和塑性体积应变; T^* 为规范化条件下压力与材料所能承受的最大拉伸静水压力, MPa; D_1 和 D_2 为损伤常数。

根据隧道勘察设计报告中岩石物理力学性质及围岩级别的探测结果, 围岩密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 剪切模量为 G 为 26.7 GPa , 压力硬化指数 f_c 为 152 MPa , 标准化内聚强度 A 为 0.28 , 标准化压力硬化 B 为 2.5 , 应变率系数 C 为 $0.001\,86$, 标准化最大强度 S_{FMAX} 为 5 , 最大拉伸静水压力 T 为 6.2 MPa , 断裂塑性应变参数 D_1 为 0.04 , 断裂塑性应变参数 (指数) D_2 为 1 。

1.2 炸药模型参数

在 LS-DYNA 模拟工程爆破中, 通过添加 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 关键字来模拟炸药本构参数, 使用 2 号岩石乳化炸药, 密度为 $1\,150\text{ kg/m}^3$ 。为精确反映炸药爆炸时的能量变化, 采用 JWL 状态方程, 见式 (4)。

$$P_j = A_j(1 - \omega/R_1 V)e^{-R_1 V} + B_j(1 - \omega/R_2 V)e^{-R_2 V} + \omega E_0 / V \quad (4)$$

式中, P_j 为爆轰产物的压力, MPa; V 为爆轰产物的相对体积, m^3 ; E_0 为初始比内能, J/kg ; A_j 、 B_j 、 R_1 、 R_2 和 ω 是 JWL 参数。

1.3 岩溶水模型参数

通过添加 * MAT_NULL 关键字来模拟岩溶水的材料性能, 岩溶水中声波的传播速度 C 为 $0.165\text{ cm}/\mu s$, 一阶非线性系数 S_1 为 1.92 , 二阶非线性系数 S_2 为 -9.6×10^{-2} , 三阶非线性系数为 0 , 孔隙率 γ_0 为 0.35 , 动态黏度系数 μ 为 1 。为了模拟高压岩溶水的初始内能, 赋予水介质单位体积内能为 20 MPa , 通过添加 * EOS_GRUNEISEN 状

态方程更好地模拟岩溶水在高压环境下的行为。Grüneisen 的状态方程见式 (5)。

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (5)$$

式中, C 为 $V_s(V_p)$ 曲线中 V_p 为 0 时的纵截距, cm ; S_1, S_2, S_3 为 $V_s(V_p)$ 曲线斜率的系数; E 为水介质的单位体积初始内能, J/kg ; γ_0 是 Grüneisen 的无量纲伽马系数; a 是对 γ_0 的无量纲一阶体积修正项, μ 的公式表示为:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6)$$

式中, ρ 为当前密度, kg/m^3 ; ρ_0 为初始密度, kg/m^3 。

1.4 模型验证

在爆破过程中, 单一的失效准则不能同时描述破碎区和断裂区的形成, 但是采用“最大拉应力”和“最大剪应变”的复合失效准则可模拟裂纹扩展的过程^[10], 如式 (7)。

$$\begin{cases} P_1 \geq P_{\text{tmax}} \\ \gamma_1 \geq \gamma_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_1 为拉应力, MPa; P_{tmax} 为破坏时的最大拉应力, MPa; γ_1 为剪切应变, γ_{max} 为破坏时的工程剪切应变。

采用复合失效准则的双孔爆破裂纹损伤模拟结果如图 3(a) 所示, 炮孔附近的岩石完全碎裂, 形成破碎区, 测得破碎区半径为 34 cm , 且损伤程度随着与炮孔距离的增加而逐渐减小。炮孔附近的损伤裂纹呈交叉分布, 远区的损伤裂纹呈放射状分布, 形成裂隙区, 当应力波传播到远场时, 由于拉伸破坏产生了一些拉伸裂纹, 近区的二次裂纹呈十字形演化, 且主裂纹向远区径向扩展, 测得主裂纹长度在 $66 \sim 107\text{ cm}$ 之间, 破碎区和裂隙区半径与理论值吻合^[11]。通过建立验证爆破裂纹损伤数值模型可以看出, 采用复合失效准则的双孔爆破裂纹损伤模拟可完整再现爆破作用下图 3(b) PMMA 试验试样孔周压碎区、径向微裂纹区和径向主裂纹区的分布形态, 与 CHO 等^[12] PMMA 双孔爆破试验结果具有较好的一致性。

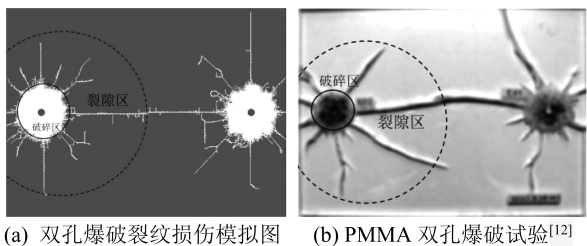


图 3 PMMA 爆破数值模拟结果与试验结果的比较
Fig.3 Comparison of numerical simulation results of PMMA blasting with test results

通过对比采用复合失效准则的双孔爆破裂纹损伤模拟结果和 PMMA 双孔爆破实验可知,采用本参数产生的裂纹演化判定围岩损伤和溶洞贯通是可行的。

2 结果分析

由于龙潭村隧道洞身处溶洞大小和分布情况未精确探明,而根据隧址区地表溶洞踏勘结果发现存在小型溶洞,高度在 0.5 ~ 2 m 之间,因而在建立溶洞计算模型时,将相对炮孔位置的溶洞 Y 方向边长分别设置为 50、100、150、200、250 cm 五种情况,X 方向的溶洞边长取 50 ~ 150 cm。

2.1 无静水压力作用时溶洞间距对围岩损伤的影响

由于考虑的是近邻溶洞的危害,因此在炮孔水平右侧建立相对距离为 50、100、150、200、250 cm 的模型,溶洞分布示意图见图 4。

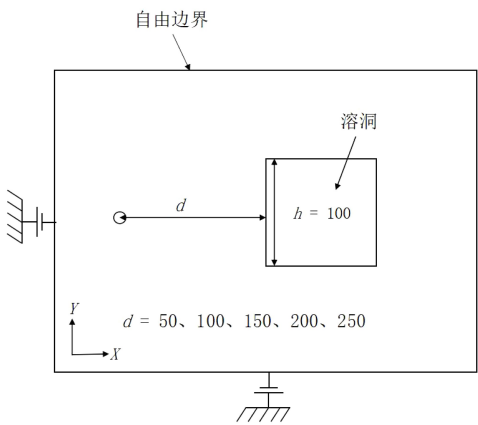


图 4 溶洞不同位置分布图(单位:cm)
Fig.4 Distribution of different locations of karst caves (unit:cm)

方形溶洞边长设置为 100 cm,当炮孔与溶洞净距 ≤ 100 cm 时,爆破中中夹岩均会产生贯通裂缝,因此仅展示净距为 100、150、200 cm 工况下的

中夹岩裂纹及损伤分布图,而净距为 50 cm 工况时的中夹岩裂纹分布可参照图 5(a)。同理,净距为 250 cm 工况时,中夹岩裂纹分布可参照图 5(c),此时得到各模型岩体裂纹损伤如图 5。

由图 5(a)可看出,炮孔爆破产生的主裂纹已完全贯通相对距离为 100 cm 的近邻溶洞,施工时会造成溶洞突水的现象,且测得粉碎区半径为 29~34 cm,裂隙区径向裂纹长度为 78~106 cm;而图 5(b)和图 5(c),近邻溶洞相对隧道掌子面间距为 150、200 cm 时,爆生裂纹并没有延展到溶洞,不易造成突水现象,因此不再分析相对距离为 250 cm 的模型。

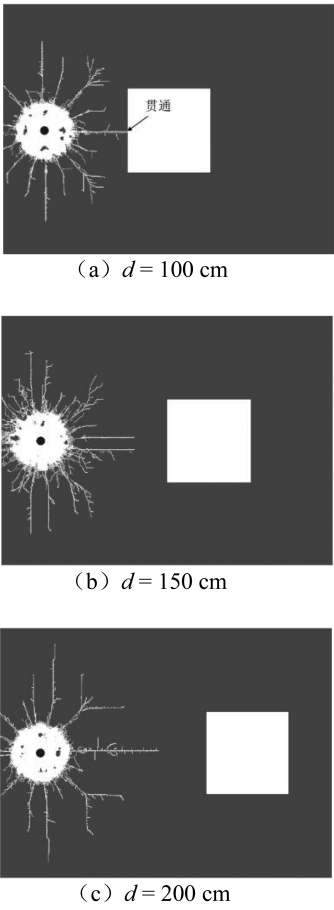


图 5 无静水压力溶洞不同间距下的裂纹损伤
Fig.5 Crack damage at different spacing in the cave without hydrostatic pressure

2.2 无静水压力作用时溶洞尺寸对围岩损伤的影响

由于图 5(b)相对间距为 150 cm 时爆破产生的裂纹没有贯通近邻溶洞,根据无静水压力溶洞不同间距下裂纹损伤的模拟分析,建立相对距离为

150 cm 的安全厚度,并设置溶洞边长为 50、100、150、200、250 cm 的模型,溶洞不同尺寸图见图 6。

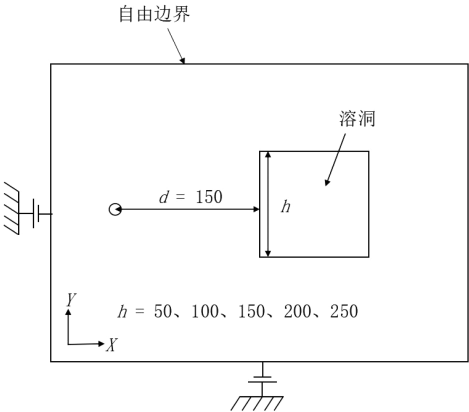
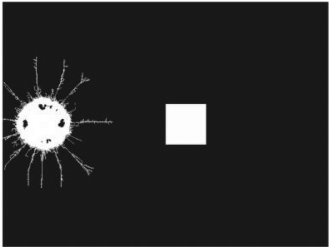


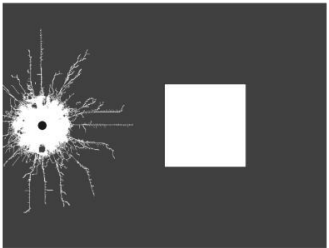
图 6 溶洞不同尺寸图(单位:cm)

Fig.6 Diagram of different dimensions of karst caves (unit: cm)

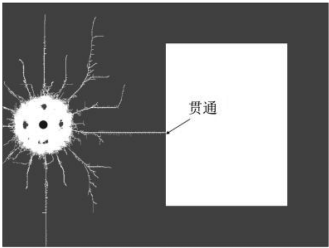
当溶洞与炮孔净距固定为 150 cm,溶洞边长分别为 50、100、200 cm 时,其爆破裂纹损伤见图 7。



(a) $h = 50$ cm



(b) $h = 100$ cm



(c) $h = 200$ cm

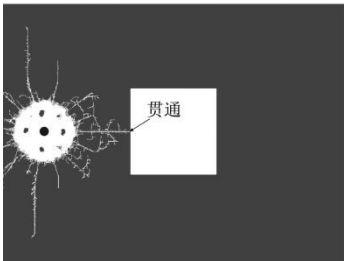
图 7 无静水压力溶洞不同尺寸下的裂纹损伤

Fig.7 Crack damage of different sizes in karst caves without hydrostatic pressure

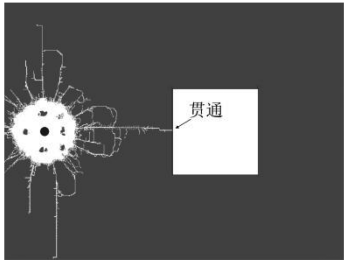
由图 7(c)可看出,当近邻溶洞边长尺寸达到 200 cm 时,爆破产生的裂纹已经完全贯通溶洞,且在炮孔右侧和近邻溶洞的损伤区间内有 4 条主裂纹产生,损伤范围大于溶洞尺寸;而图 7(a)和图 7(b)并没有被贯通,且主裂纹范围、主裂纹长度也随着溶洞尺寸的减小而减小,测得图 7(a)主裂纹峰值长度为 102 cm,而图 7(b)主裂纹峰值长度为 108 cm,可见,近邻溶洞尺寸越大,越容易被爆生裂纹所贯通。

2.3 高静水压力作用时溶洞间距对围岩损伤的影响

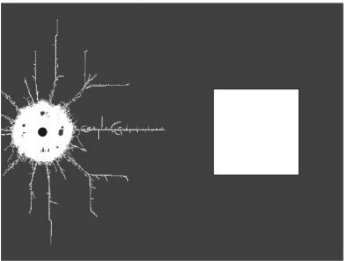
在溶洞内部添加 20 MPa 的静水压力,建立相对距离为 50、100、150、200、250 cm 的模型,取 100、150、200 cm 有代表性的裂纹损伤图进行分析,见图 8。



(a) $d = 100$ cm



(b) $d = 150$ cm



(c) $d = 200$ cm

图 8 高静水压力溶洞不同间距下的裂纹损伤

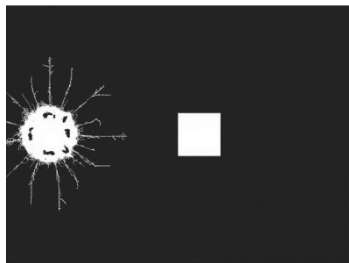
Fig.8 Crack damage at different spacings in caves with high hydrostatic pressure

图 8(a)为 20 MPa 静水压力溶洞间距 100 cm

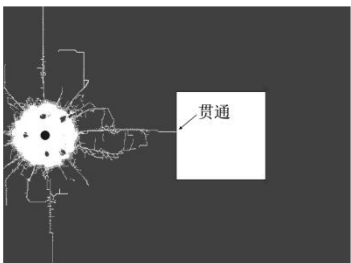
下的围岩裂纹损伤,爆破产生的径向裂纹已经完全贯通溶洞,且围岩损伤区域大于无静水压力溶洞不同间距下的裂纹损伤,如图 5(a);由图 8(b)可看出,爆生裂纹已经贯通溶洞,且裂纹的演化向着高静水压力下的溶洞方向发展;图 8(c)距离溶洞最近的径向裂纹长度为 164 cm,且围岩损伤区域相较无静水压力进一步扩大,但是并没有贯通溶洞,可视为安全厚度。

2.4 高静水压力作用时溶洞尺寸对围岩损伤的影响

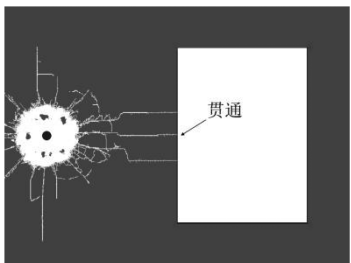
在无静水压力溶洞不同尺寸对围岩损伤的模拟分析基础上,给溶洞添加高静水压力,并同样设置溶洞边长为 50、100、150、200、250 cm 的模型,取 50、100、200 cm 具有代表性的裂纹损伤图进行分析,见图 9。



(a) $h = 50\text{ cm}$



(b) $h = 100\text{ cm}$



(c) $h = 200\text{ cm}$

图 9 高静水压力溶洞不同尺寸下的裂纹损伤
Fig.9 Crack damage under different sizes of high hydrostatic pressure caves

由图 9(b)和图 9(c)可看出,在溶洞静水压力和隧道掌子面相对距离相同的条件下,尺寸为 100 和 200 cm 的近邻溶洞已经被径向爆生裂纹贯通,且尺寸为 200 cm 的高压充水溶洞被 3 条爆生裂纹所贯通,而尺寸为 100 cm 的高压充水溶洞只被 1 条爆生裂纹所贯通;图 9(a)尺寸为 50 cm 的高压充水溶洞没有被爆生裂纹所贯通,测得主裂纹峰值长度为 108 cm,则其可考虑为溶洞安全尺寸。

3 围岩损伤对比分析

考虑到掌子面前方与溶洞间围岩体破碎较严重,将掌子面前方岩体 I 区的裂纹数量与主裂纹峰值长度作为围岩损伤和安全厚度的考量, d 为炮孔至溶洞的尺寸, h 为溶洞的尺寸,爆生裂纹扩展区域模型如图 10 所示。

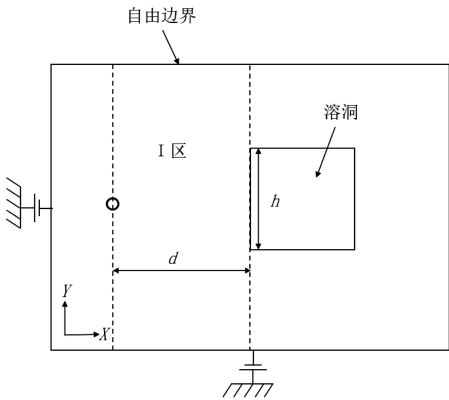


图 10 爆生裂纹扩展区域模型

Fig.10 Model of burst crack propagation region

图 11 为溶洞高水压和无水压随隧道掌子面相对距离和溶洞尺寸的裂纹数量变化图,由图 11(a)可看出,随着溶洞相对隧道掌子面相对距离增加,裂纹数量呈减小的趋势,且在高静水压力的条件下,围岩产生的裂纹数量高于无静水压力下的裂纹数量,说明在静水压力条件下,爆破对围岩产生的损伤影响大于无静水压力条件下的爆破。

图 11(b)为不同溶洞尺寸下有水压和无水压溶洞裂纹数量变化图,由图可看出,随着溶洞尺寸的增加,裂纹数量呈增加的趋势,且在高水压条件下围岩产生的裂纹数量多于无水压时的裂纹数量。

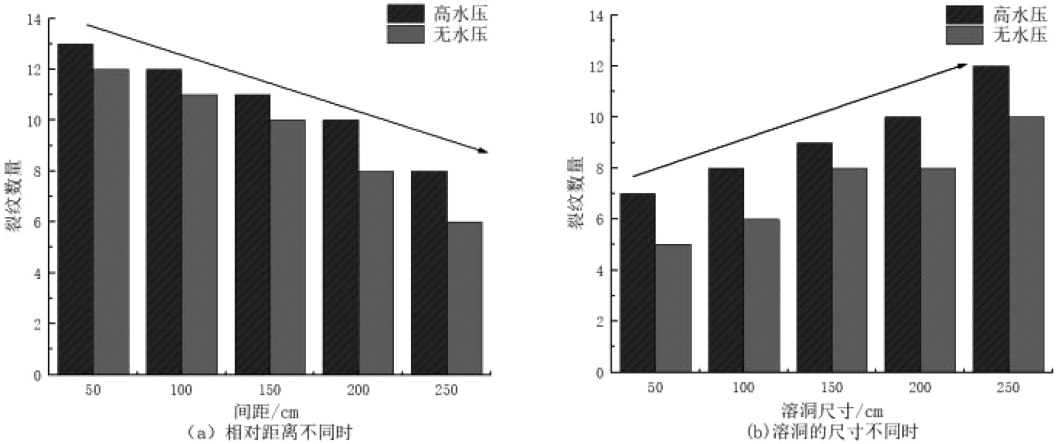


图 11 高水压和无水压裂纹数量变化图

Fig.11 Variation of the number of cracks under high water-pressure and without water-pressure

图 12 为高水压和无水压溶洞与隧道掌子面相对距离和溶洞尺寸的主裂纹峰值变化图,由图 12(a)可看出,主裂纹峰值长度随溶洞与隧道掌子面间距呈增大到一个峰值然后减小的趋势,且高水压主裂纹峰值长度在相对距离为 200 cm 时最大,裂纹长度为 164 cm,同样无水压裂纹峰值长度在相对间距为 200 cm 时最大,裂纹长度为 118 cm。且相对距离分别为 50、100、150 cm 时,近邻高压充水溶洞已经被裂纹贯穿,而相对间距为 200 cm 时,溶洞并未贯穿,因此在实际工程中,建立溶洞相对间距为 200 cm 的安全厚度,不易造成隧道突水现象。

图 12(b)为不同尺寸下高水压和无水压溶洞主裂纹峰值长度变化图,可以看出,主裂纹峰值长度随着溶洞尺寸的增大呈增长并放缓的趋势,可见近邻大尺寸高压充水溶洞对爆破裂纹的延展起到促进作用。在高静水压力条件下,尺寸大于等于 100 cm 的高压充水溶洞全部被贯穿,且高压充水溶洞尺寸在小于 100 cm 时,对裂纹的演化长度很明显,在尺寸大于 100 cm 后,主裂纹峰值增长速度便趋于平缓。在无静水压力情况下,尺寸为 200、250 cm 的近邻溶洞被贯通,且溶洞尺寸在小于 200 cm 时,对主裂纹扩展的影响比较明显。

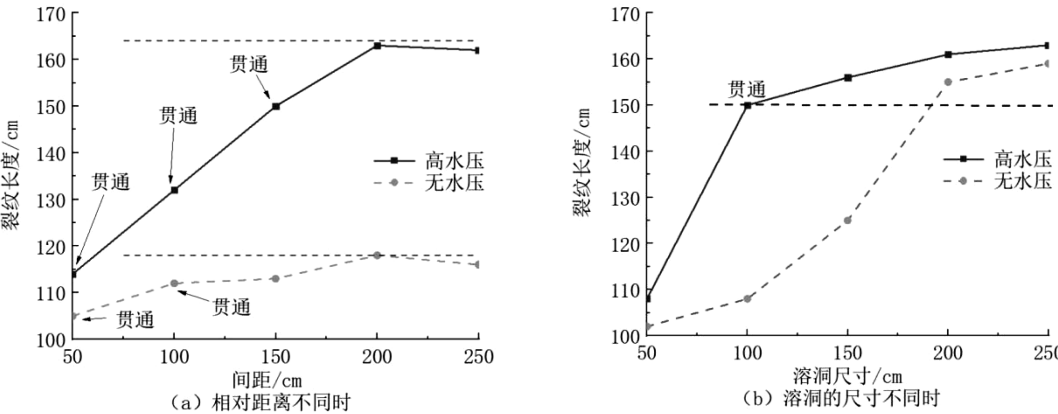


图 12 高水压和无水压主裂纹峰值变化

Fig.12 Peak variation of main cracks under high and no water-pressure

4 结论

1)无静水压力时,尺寸为100 cm的近邻溶洞在与隧道掌子面相对距离为50、100 cm时贯穿,且围岩损伤范围随着相对距离的增加呈减小的趋势;隧道掌子面与近邻溶洞距离为150 cm时,尺寸为200、250 cm的溶洞被贯穿,尺寸为50、100 cm的未被贯穿。随着溶洞尺寸的增大,近邻溶洞对爆破的影响越大。

2)高静水压力时,尺寸为100 cm的溶洞在相

对间距为150 cm时贯穿,而相对间距为200 cm未被贯穿,且主裂纹峰值长度随着与隧道掌子面相对距离的增大呈增大后趋于平缓的趋势;当隧道掌子面与高压充水溶洞相距150 cm时,尺寸大于等于100 cm的高压充水溶洞全部被主裂纹贯穿,且近邻高水压溶洞对爆生裂纹具有促进作用。

3)高静水压力时,溶洞相对隧道掌子面相对距离为200 cm时,高压充水溶洞不会被贯通,因此可将其视为防突层安全厚度,可以有效控制近邻高水压溶洞对爆破造成的围岩损伤,提高施工效率。

参考文献:

[1] 源小梦,张佳华. 深埋岩溶隧道掌子面突水灾害可靠性上限分析[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(2):301-312.

[2] 李术才,许振浩,黄鑫,等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.

[3] 李术才,潘东东,许振浩,等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学,2018,39(9):3164-3173.

[4] 李术才,王康,李利平,等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报,2017,49(1):22-30.

[5] LI Z Q,XUE Y G,LI G K,et al. Probabilistic determination and application of rock thickness resisting water inrush from karst cave[J]. Process Safety and Environmental Protection,2023,172:462-472.

[6] 王绪. 岩溶隧道突水机理及防突安全厚度研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.

[7] 翟友成,曹文贵,罗忠涛,等. 隧道掌子面防突水安全厚度的区间非概率可靠性分析方法[J]. 水文地质工程地质,2016,43(6):81-87.

[8] DUAN Y,ZHANG X M,ZHOU X S,et al. Research on the mechanism and safe thickness of karst tunnel-induced water inrush under the coupling action of blasting load and water pressure[J]. Applied Sciences,2022,12(23):11891.

[9] 庞宁波,杨永康. 地应力下岩石多孔爆破损伤演化数值模拟[J]. 矿业研究与开发,2023,43(10):119-125.

[10] WANG Z L,WANG H C,WANG J G,et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics,2021,135:104172.

[11] 马泗洲,刘科伟,杨家彩,等. 初始应力下岩体爆破损伤特性及破裂机理[J]. 爆炸与冲击,2023,43(10):152-173.

[12] CHO S H,NAKAMURA Y,MOHANTY B,et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting[J]. Engineering Fracture Mechanics,2008,75(13):3966-3984.

(责任编辑:陈雯)