

隧道施工爆破诱发的围岩累积损伤规律研究

彭 波, 蔡 铖, 刘 韬

(通号建设集团有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:隧道钻爆法推进式爆破过程会不可避免地会对岩体造成损伤,岩体累积损伤源于持续的岩体动力响应。然而,目前尚缺乏量化隧道各分段炸药陆续爆破、隧道推进式重复爆破对围岩造成累积损伤值的计算方法。文章以某隧道工程为研究背景,提出一种模拟隧道各分段炸药陆续爆破、推进式重复爆破的方法,并量化了各个工况对围岩造成的累积损伤程度,最终结合现场测试数据佐证了该方法的可靠性。结果表明:1)计算大规模起爆引起的损伤时,采用等效荷载方式模拟爆破具有优势;2)隧道单循环进尺开挖诱发的围岩损伤是多段炸药延期爆破叠加引起的,主要受邻近辅助眼爆破的影响;3)多循环进尺的爆破开挖会诱发围岩损伤的累积,且累积过程主要受当前爆破进尺和上一个爆破进尺影响;相比于单循环进尺,多循环进尺对隧道中间侧墙的损伤累积程度增大26.7%。

关键词:隧道工程; 爆破开挖; 围岩累积损伤; 数值模拟

中图分类号: TU973⁺. 23

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)06-0032-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.06.074

Study on cumulative damage law of surrounding rock induced by blasting during tunnel construction

PENG Bo, CAI Cheng, LIU Tao

(China Railway Signal and Communication Construction Group Company Limited, Changsha, 410205, Hunan, China)

Abstract: During the propulsive blasting process of tunnel drilling and blasting method, it is inevitable to cause damage to the rock mass. The cumulative damage of rock mass originates from the continuous dynamic response of rock mass. At present, there is still no quantification method to calculate the cumulative damage of surrounding rock subjected to the successive blasting of tunnel each subsection and the repeated blasting of tunnel propulsion. Relying on a tunnel project, a method is proposed to simulate the successive blasting and propulsive repeated blasting of each tunnel subsection, and the cumulative damage extent caused by each working condition to surrounding rock is quantified. The feasibility of this method is proved by field test data. The results show that: 1) when calculating the damage simulation of large-scale blasting, it is advantageous to use equivalent load to simulate blasting load; 2) the surrounding rock damage induced by single-cycle footage excavation of the tunnel is caused by the superposition of multiple stages of delayed blasting, which is mainly affected by the adjacent auxiliary; 3) the blasting excavation of multi-cycle footage will also induce the accumulation of surrounding rock damage, and the accumulation process is mainly affected by the current blasting footage and the previous blasting footage; compared to the single-cycle footage, the cumulative damage extent of the tunnel middle side wall caused by the multi-cycle footage increased by 26.7%.

Key words: tunnel engineering; blasting excavation; surrounding rock cumulative damage; numerical simulation

收稿日期: 2023-09-27

作者简介: 彭 波(1981—),男,工程师,从事工程项目管理方面的研究。

通信作者: 刘 韬(1991—),男,工程师,从事工程项目管理方面的研究。

钻爆法开挖时, 炸药爆破产生的能量在完成岩体破碎和抛掷的同时, 还会对岩体造成损伤, 导致岩体力学性能劣化、强度降低、完整性变差, 进而影响施工安全。爆破损伤一直是该领域的研究热点^[1,2], 学者们分别针对单孔装药、单段爆破诱发的岩体损伤问题开展了诸多研究^[3-5]。吉凌等^[6]借助数值模拟与现场测试方法, 分析了单循环进尺内掏槽爆破引起的振动响应和损伤效应; 杨建华等^[7]利用统计损伤演化模型, 模拟了单循环进尺圆形隧道全断面毫秒爆破过程中重复爆破荷载作用下的岩体的累积损伤演化规律。实际工程中, 爆破作业是推进式的重复爆破, 相比于单循环进尺造成的累积损伤范围和程度更大^[8]。基于上述思路, 张国华等^[9]采用现场声波监测研究了双侧壁导坑法施工造成的隧道围岩累积损伤范围; 闫长斌^[10]利用大量的现场声波测试数据, 获得了岩体爆破累积损伤与爆破次数之间非线性递增关系; 阳生权等^[11]结合现场爆破地震波分析, 阐述了岩体中节理裂隙等不连续面的动载累积效应。总之, 目前对于爆破施工诱发的岩体损伤研究, 主要是采用现场监测的手段来测量围岩的累积损伤, 工作量大, 且尚缺乏量化隧道各分段炸药爆破对围岩造成的累积损伤值。

爆破动力过程的试验复杂且存在较大安全隐患, 尽管有限元软件被广泛运用于爆破的动力效应研究, 目前也主要是针对小范围的爆破模拟。因此, 在考虑大规模、工况复杂的爆破荷载对岩体造成的累积损伤时, 亟待提出一种兼具计算效率且合理有效的模拟方法。为此, 在既有研究基础上, 本文采用理论分析、数值模拟、现场监测的研究手段, 提出能模拟隧道各分段炸药陆续爆破、推进式重复爆破的方法, 并量化各个工况对围岩造成的累积损伤范围, 最终结合现场测试数据验证该方法的可靠性, 研究成果可为后续爆破施工诱发的围岩损伤分析提供参考。

1 爆破荷载数值模拟方式

1.1 爆破荷载施加方式

数值模拟是研究工程爆破理论和技术的重要手段, 目前, 爆破荷载的模拟主要有以下 4 种途径。

(1) 采用有限元软件 LS-DYNA 中提供的

JWL 状态方程直接模拟炸药爆轰过程^[12]。JWL 状态方程中含诸多待标定的参数, 且需建立精细化的炮孔及炸药单元, 建模复杂且耗时较多。

(2) 建立精细化的炮孔模型, 通过在孔壁上施加压力时程荷载的方式来模拟^[13], 该方法同样存在建模难度大, 计算效率低的特点。

(3) 根据地震波衰减规律, 将实际监测的振动速度、加速度等回归分析后还原成爆炸荷载施加在围岩上^[9]。该方法受岩体结构、地质条件等影响较大, 还原的爆炸荷载可能与实际情况有较大差异, 目前应用相对较少。

(4) 爆炸荷载折减后等效施加在爆破时炮孔周围形成的粉碎区边界、裂隙区边界上, 或直接施加在开挖轮廓面上, 即将爆炸荷载等效施加在同段炮孔中心连线与炮孔轴线所确定的面上^[7]。该方法不需要建立炮孔结构, 模型相对简单, 计算效率高, 能够有效模拟隧道工程中群孔爆破条件下岩体动力学响应问题, 是目前应用较为广泛的一种方法^[14,15]。

1.2 等效爆破荷载

对于隧道开挖的柱状装药条件, 作用在炮孔壁的气体压力:

$$P_H = \frac{\rho_e D^2}{2(1+\gamma)} \quad (1)$$

式中: P_H 为波阵面上气体压力, Pa; ρ_e 为炸药密度, kg/m^3 ; D 为炸药的爆速, m/s ; γ 为等熵指数, 近似取 $\gamma = 3.0$ 。

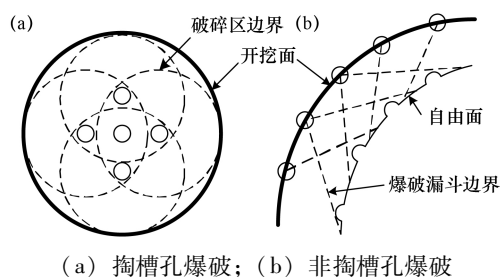
炮孔壁岩体受到的冲击压力为

$$P_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(1+\gamma)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^\gamma n \quad (2)$$

式中: P_0 为孔壁压力, Pa; l_c 和 l_b 分别为炮孔装药段长度和炮孔深度, m; d_c 和 d_b 分别为装药直径和炮孔直径, m; n 为爆轰气体产物膨胀撞击炮孔壁时的压力增大系数, 取 $n = 10$ 。

对于隧道掏槽眼爆破, 认为各个掏槽眼形成的破碎区的包络线就是掏槽爆破开挖面; 对于隧道崩落孔、缓冲孔、光爆孔爆破, 认为本圈炮孔中心连线为爆破开挖面^[16], 如图 1 所示。

进而, 可进一步得到作用在开挖面上的等效荷载:



(a) 掏槽孔爆破; (b) 非掏槽孔爆破

图 1 爆破等效荷载开挖面

$$P_c = \left(\frac{d_b}{S} \right) P_0 \quad (3)$$

式中: P_c 为孔壁压力, Pa; S 为相邻炮孔中心连线的距离, m。

2 等效爆破数值实现

2.1 数值模型

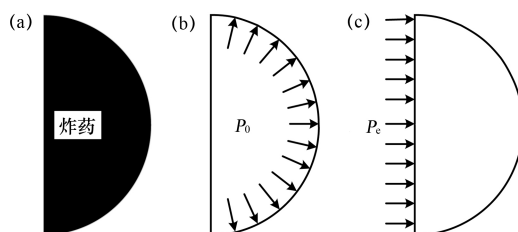
为了更加直观地体现爆破等效荷载施加在开挖面方法的适用性, 建立单次爆破数值模型, 如图 2 所示。由于炸药的长度远大于其直径, 可以简化为平面应变问题。模型尺寸为直径为 500 cm 的半圆, 炸药直径为 32 mm, 炮孔直径为 40 mm, 模型周围设置无反射边界, 分别建立以下 3 种不同方式的爆破荷载施加工况:

1) 流固耦合方法: 空气耦合半径设置为装药半径的 10 倍^[17], 炸药、空气采用 ALE 算法, 岩体采用 Lagrange 算法。

2) 爆破荷载施加在孔壁: 爆破荷载简化为三角形爆破荷载进行动力加载, 设置荷载升压作用时间为 0.8 ms, 正压作用时间 6.0 ms, 岩体采用 Lagrange 算法。

3) 爆破等效荷载施加在开挖面上: 爆破荷载简化为三角形爆破荷载进行动力加载, 为考虑实

际爆破荷载是沿着炮孔径向各个方向作用, 罗笙等^[18]通过将爆破荷载对孔壁的冲量等效为标量, 得到正压时间为孔壁荷载的 $\pi/2$ 倍, 故荷载升压时间设为 1.2 ms, 正压作用时间 $t = 9.4$ ms, 岩体采用 Lagrange 算法。



(a) 工况一; (b) 工况二; (c) 工况三

图 2 不同的爆破荷载作用工况

2.2 材料本构与参数

为模拟炸药瞬时爆炸产生的巨大能量而使岩石处于大应变、高应变率的状态, 模型中岩石采用 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 动态本构^[19], 参数如表 1 所示。爆破荷载作用下, 岩石的损伤演化方程为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (4)$$

式中: D 为损伤变量; $\Delta \varepsilon_p$ 、 $\Delta \mu_p$ 表示岩石在一个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变; $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ 表示常压下岩石断裂时的塑性应变。

炸药选用常用的 2 号岩石乳化炸药, 其状态方程为

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) + \frac{w E_0}{V} \quad (5)$$

式中: P 为爆轰压力, Pa; V 为相对体积; E_0 为初始比内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 w 为常数, 具体如表 2 所示。

表 1 岩石 HJC 本构模型参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	准静态抗压 强度/MPa	剪切模 量/MPa	归一化内 聚强度	最大等 效应力	压力硬 化指数	应变率 系数	损伤系 数 D_1	损伤系 数 D_2	归一化压力 硬度系数
2 300	60	10 093	0.55	20	0.89	0.009 7	0.04	1	1.23
压实体积 应力/MPa	准静态最大拉 伸强度/MPa	压实体 积应变	压碎体积 应力/MPa	压碎体 积应变	压力系 数 K_1	压力系 数 K_2	压力系 数 K_3	参考应 变率	断裂前塑 形应变变量
20	4	0.001 25	2 000	0.174	39	-223	550	10^{-6}	0.01

表 2 2 号岩石乳化炸药材料参数

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	w	E_0 / GPa
1 000	3 400	229	0.55	6.5	1.0	0.35	3.51

采用空物质材料模型模拟空气,其状态方程为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + (C_3\mu^3 + C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)$$

$$E_0 \quad (6)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为常数; μ 为体积比, 参数如表 3 所示。

2.3 结果分析

戴俊^[20]基于岩石的破坏准则,提出了柱状装药条件下的裂隙区的理论计算公式,当采用不耦合装药且不耦合系数较小时,裂隙区的半径为

$$R = \left(\frac{\sigma_R B}{\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\rho_0 D^2 n K^{-2\gamma} l_e B}{8\sqrt{2}\sigma_{cd}} \sigma_{cd} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (7)$$

式中: $\sigma_R = \sqrt{2}\sigma_{cd}/B$; $a = 2 + \mu_d/(1 - \mu_d)$; $B = \sqrt{(1+b)^2 + (1+b^2) - 2\mu_d(1-\mu_d)(1-b)^2}$; $b = \mu_d/(1 - \mu_d)$; $\beta = 2 - \mu_d/(1 - \mu_d)$; ρ_e 、 D 为炸药密度、爆速, kg/m^3 、 m/s ; n 为压力增大系数,取 $n = 10$; γ 为等熵指数,取 $\gamma = 3.0$; r_b 、 K 、 l_e 分别为炮孔半径、装药径向不耦合系数、轴向不耦合系数,取 $l_e = 1.0$; σ_R 为岩石压碎区与裂隙区分界面上的径向应力, MPa 。 α 、 β 分别为压碎区内、外荷载传播衰减系数; μ_d 为岩石的动态泊松比,取 $\mu_d = 0.8\mu$; σ_{cd} 为岩石的单动态抗压强度, MPa , $\sigma_{cd} = \sigma_c \sqrt[3]{\varepsilon}$, σ_c 为单轴静态抗压强度, MPa , ε 为加载应变率,取 $\varepsilon = 100 \text{ s}^{-1}$; σ_{ld} 为岩石的单动态抗拉强度, MPa , $\sigma_{ld} = \sigma_t$, σ_t 为静态抗拉强度, MPa 。

根据相关参数计算得到爆破裂隙区的半径为 0.585 m ,对比其与 3 种工况下的数值模拟结果,如图 3 所示。分析可知:不同模拟工况下的损伤区域范围与理论结果相近,工况三中数值模型网格数、计算时间都远远小于其他工况。可见,在计算大规模起爆的损伤模拟时,采用等效荷载模拟爆破荷载具有优势和可行性。

3 隧道爆破围岩累积损伤特征

3.1 计算模型

以某实际隧道工程为背景建立数值模型。该

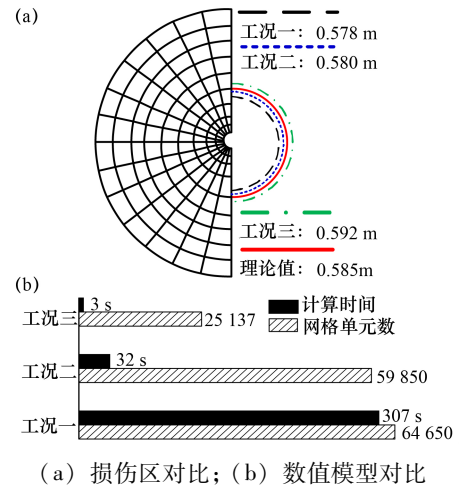


图 3 不同工况下的模拟结果对比

隧道穿越地层主要为Ⅲ级弱风化熔结凝灰岩,隧道断面积为 114 m^2 ,采用全断面毫秒爆破开挖,炮孔孔径和药卷直径分别为 42 mm 和 32 mm ,循环进尺为 4.0 m ,雷管段号分别为 MS1、MS3、MS5、MS7、MS9 和 MS11,装药系数分别为 0.8 、 0.7 、 0.7 、 0.6 和 0.2 ,等效荷载分别为 136.3 、 45.6 、 45.6 、 57.1 、 57.5 和 26.6 MPa ,具体的爆破参数设计如图 4 所示。

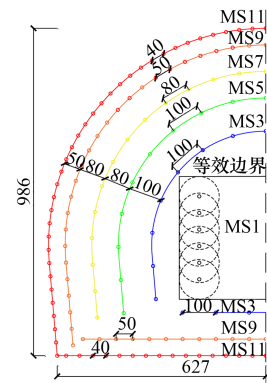


图 4 爆破设计方案参数

计算模型中,将爆破荷载简化为等效荷载施加在开挖面上的方式进行模拟,等效荷载 P_e 计算由式(3)确定。模型中,不考虑爆破前的初始损伤。将每段毫秒延期爆破视为一次等效荷载加载,利用重启数值模拟技术,开展三维尺度下围岩重复爆破数值模拟计算。同时,为对照分析,实际计算时分别计算了单循环进尺和多循环进尺两种爆破工况。

表 3 空气材料参数

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/GPa
空气	1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.025

(1) 单循环进尺工况: 如图 5(a) 所示, 模型的尺寸为 $12\text{ m} \times 16\text{ m} \times 20\text{ m}$, 隧道开挖段为 4 m , 连续在同一个循环进尺内不同开挖面施加 A→F 共 6 次荷载。

(2) 多循环进尺工况: 如图 5(b) 所示, 模型的尺寸为 $12\text{ m} \times 28\text{ m} \times 20\text{ m}$, 隧道开挖段为 4 m , 单个循环工况仅考虑 MS7、MS9、MS11 段爆破, 建立①→⑤ 5 个循环开挖进尺。

有限元网格最小单元尺寸为 0.2 m , 最大单元尺寸为 1 m 。模型的右侧设置为对称边界, 其余边界设置为无反射边界。材料参数及算法同前文所述。

3.2 单循环进尺围岩累积损伤特征分析

在全断面毫秒微差爆破作用下, 围岩的损伤范围和损伤程度在径向均有明显的扩大过程, 隧道单循环进尺的损伤累积主要发生在当前工况断面。

由图 4 可知, 拱腰处岩体受掏槽爆破影响较大。后续爆破期间, 隧道周围各处岩体受爆破影响程度近乎相等。总的来看, 拱腰处岩体受爆破影响最大, 损伤最为明显, 故以数值模型中掌子面与洞壁交线上的隧道拱腰 (高度为 1.5 m) 为研究参考点, 来监测该质点处岩体受分段爆破的损伤累积特征, 同时以参考点远离径向方向损伤值在 $0.2 \sim 1$ 的范围视为围岩在该工况下的开挖损伤范围^[21]。图 6 给出了整个分段爆破过程的损伤演化过程。分析可知:

(1) 隧道单循环进尺开挖诱发的围岩损伤并不是单段炸药爆破的结果, 而是多段炸药延期爆破的叠加引起的。

(2) 隧道拱腰处的累积损伤叠加效应在辅助眼 MS7、MS9、MS11 段爆破时体现得较明显, 监

测点的累积损伤值分别为 0.29 、 0.42 、 0.45 。

(3) 隧道单循环进尺开挖诱发的围岩的径向开挖损伤范围为 1.20 m , 主要受辅助眼 MS7 段、辅助眼 MS9 段爆破的影响, 且在辅助眼 MS7、MS9 段爆破时损伤范围分别达到 0.40 、 1.20 m 。

3.3 多循环进尺围岩累积损伤特征分析

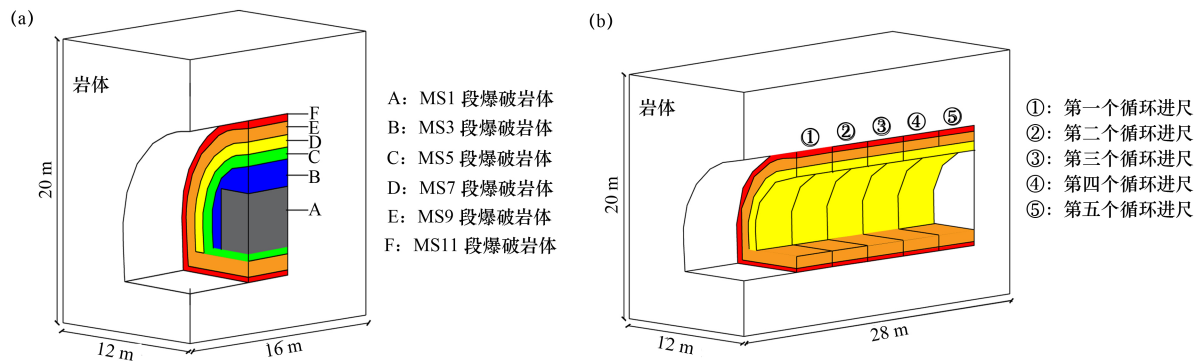
实际隧道工程的爆破作业往往是推进式爆破的过程, 为尽可能还原隧道开挖爆破施工作业过程, 本节基于前文提出的等效爆破荷载施加方式, 利用重启动数值模拟技术, 探讨在多循环进尺爆破作用下围岩的开挖损伤区的累积演化过程。由前文可知, 隧道单循环进尺主要受辅助眼 MS7 段、辅助眼 MS9 段爆破的影响, 因此将计算模型简化成如图 5(b) 所示, 得到的多循环进尺开挖爆破岩体累积损伤规律如图 7 所示。从中分析可知:

(1) 多循环进尺的爆破开挖也会诱发围岩损伤的累积, 且累积过程主要受当前爆破进尺和上一个爆破进尺的影响。

(2) 在第三次循环进尺爆破后, 围岩的损伤演化趋于稳定, 围岩的开挖损伤区为 1.52 m , 相比第一个循环进尺诱发的损伤范围 (1.2 m) 增大了 26.7% 。与 JI 等^[15]的研究结论 (多循环进尺相比于单循环进尺, 隧道中间侧墙的损伤累积范围增大 27.04%) 极为接近。

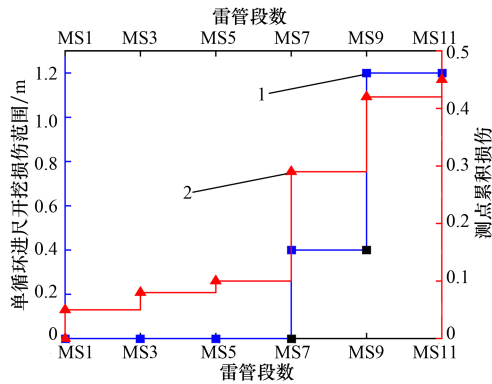
4 原位测试验证

为进一步揭示爆破开挖对围岩的损伤发展情况, 验证上述数值模拟方法的可靠性, 结合依托工程开展了声波检测测试。如图 8 所示, 在距离掌子面 5 m 处设置孔径为 10 cm 、孔深为 5.0 m 的测孔,



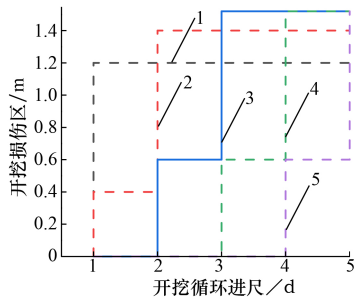
(a) 单循环进尺工况; (b) 多循环进尺工况

图 5 围岩爆破数值模拟工况



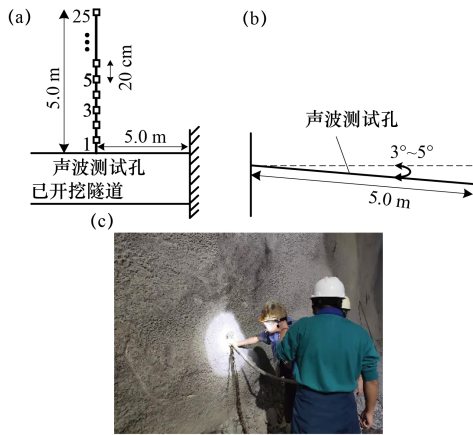
1—开挖损伤范围; 2—测点累积损伤。

图6 单循环进尺分段爆破岩体累积损伤规律



循环进尺顺序: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

图7 多循环进尺开挖爆破岩体累积损伤规律



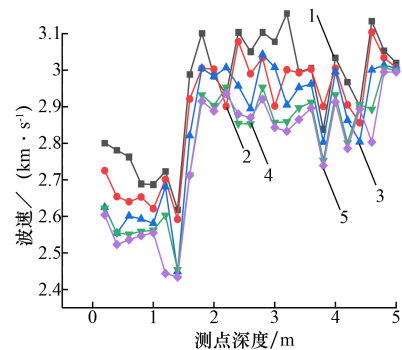
(a) 测孔平面; (b) 测孔侧视; (c) 现场钻孔

图8 测区布置

测孔距离底板 1.5 m, 钻孔方向为垂直边墙水平向下 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。现场单次爆破循环进尺为 4.0 m, 共进行了 4 次爆破, 在测孔中用声波仪每隔 20 cm 依次测试共计 25 个测点在爆破前后的波速值, 测试结果如图 9 所示。

从中分析可知, 在爆破前测试, 在测点深度为 1.6 m 以内时声波波速值较小, 且波速变化无规律; 当测点深度大于 1.6 m 时, 声波波速呈现反复上下波动的趋势且波速波动幅度慢慢减小并

趋于稳定值 3 000 m/s, 可将该值视为施工中未受扰动的岩体的纵波传播波速值。



1—爆破前; 2—第一次爆破; 3—第二次爆破; 4—第三次爆破; 5—第四次爆破。

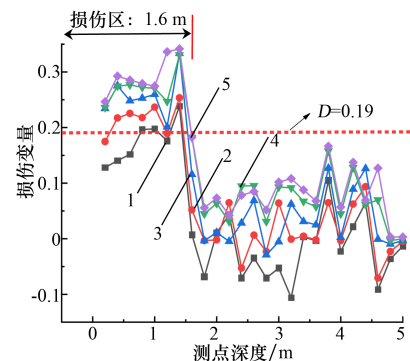
图9 声波波速与测点深度的关系

进一步, 参考《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DL/T 5389—2007)^[22] 中的定义, 即当声波变化率大于 10% 时, 认为岩体受到扰动, 其损伤变量为:

$$D = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (8)$$

式中: η 为声波变化率, $\eta = 1 - (V_p/V_{p0})$; V_{p0} 、 V_p 分别为爆破前、后纵波波速, m/s。

进而, 根据式(8)可计算得到 $D > 0.19$ 时围岩受到损伤破坏。由此, 结合图 9 所测得的围岩波速情况, 可得到依托工程爆破损伤区范围约为 1.6 m (图 10), 与数值模拟的结果较相符, 验证了本文所建立的隧道爆破累计损伤计算方法的可靠性。



1—爆破前; 2—第一次爆破; 3—第二次爆破; 4—第三次爆破; 5—第四次爆破。

图10 损伤变量值与测点深度的关系

5 结 论

(1) 在计算大规模起爆引起的围岩损伤时,

采用等效荷载方式模拟爆破具有优势。

(2) 隧道单循环进尺开挖诱发的围岩损伤是多段炸药延期爆破叠加引起的, 主要受邻近辅助眼爆破的影响。

(3) 多循环进尺的爆破开挖会诱发围岩损伤的累积, 且累积过程主要受当前爆破进尺和上一个爆破进尺的影响; 相比于单循环进尺, 多循环进尺对隧道中间侧墙的损伤累积范围增大 26.7%。

参考文献:

- [1] XIE L, YAN P, LU W, et al. Effects of Strain Energy Adjustment: A case study of rock failure modes during deep tunnel excavation with different methods[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22 (10): 4143 - 4154.
- [2] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (8): 1413 - 1426.
- [3] 黄佑鹏, 王志亮, 毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报, 2018 (5): 95 - 102.
- [4] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. 岩石爆破损伤模型的比选与改进[J]. 岩土力学, 2012, 33 (11): 3278 - 3284.
- [5] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (5): 857 - 866.
- [6] 吉凌, 周传波, 张波, 等. 大断面隧道爆破作用下围岩动力响应特性与损伤效应研究[J]. 铁道学报, 2021, 43 (7): 161 - 168.
- [7] 杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性[J]. 岩土力学, 2014, 35 (2): 511 - 518.
- [8] VILLAESCUSA E, ONEDERRA I, SCOTT C. Blast induced damage and dynamic behaviour of Hangingwalls in Bench Stopping [J]. Fragblast, 2004, 8 (1): 23 - 40.
- [9] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (8): 1610 - 1619.
- [10] 闫长斌. 基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应[J]. 岩土力学, 2010, 31 (S1): 187 - 192.
- [11] 阳生权, 吕中玉, 刘宝琛. 隧道围岩爆破地震累积效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3 (8): 1451 - 1454.
- [12] LI H, XIA X, LI J, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48 (2): 210 - 218.
- [13] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (5): 771 - 784.
- [14] YAN P, LU WB, CHEN M, et al. Contributions of in-situ stress transient redistribution to blasting excavation damage zone of deep tunnels [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48 (2): 715 - 726.
- [15] JI L, ZHOU C, LU S, et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54 (12): 6393 - 6411.
- [16] 杨建华. 深部岩体开挖爆破与瞬态卸荷耦合作用效应[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [17] 黄佑鹏, 王志亮, 杨辉, 等. 流固耦合法模拟岩石爆破时耦合范围的确定[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42 (12): 1672 - 1694.
- [18] 罗笙, 严鹏, 卢文波, 等. 深埋隧洞开挖爆破损伤数值模拟及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (S1): 2761 - 2771.
- [19] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31 (3): 197 - 204.
- [20] 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, 20 (2): 144 - 147.
- [21] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale [J]. 1980, 17 (3): 147 - 157.
- [22] 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范: DL/T5389 - 2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.