

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0378

## 浅埋小净距隧道爆破损伤探测及数值模拟分析\*

刘闽龙<sup>1</sup>, 陈士海<sup>1</sup>, 孙杰<sup>2</sup>, 何方<sup>3</sup>, 揭海荣<sup>3</sup>

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 济南城建集团有限公司, 山东 济南 250031;

3. 中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司, 福建 福州 350013)

**摘要:** 为了研究爆破荷载对浅埋小净距隧道围岩造成的损伤影响,以济南顺河快速路南延工程浅埋暗挖段为工程背景,通过LS DYNA软件将建立的各向异性动态损伤本构用于隧道爆破的损伤数值模拟,研究炮孔周围的损伤范围;并基于声波测试原理,对浅埋小净距隧道围岩的损伤进行了现场探测。结果表明:在数值模拟中,单个炮孔爆破形成的最大损伤影响半径为0.58 m,最大损伤影响深度为1.88 m,根据岩体的损伤破坏阈值,岩体的破坏水平范围可达0.14 m,破坏深度为1.70 m;根据现场探测,中夹岩受双线隧道交替爆破开挖其损伤程度较围岩其他部位要高,爆破开挖对隧道围岩造成的损伤范围在0.50 m左右,与模拟结果相接近,验证了各向异性动态损伤本构的准确性。研究成果对浅埋小净距隧道的爆破开挖和损伤控制具有一定指导作用。

**关键词:** 小净距隧道; 损伤本构; 声波探测; 爆破开挖; 浅埋

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

### Detection and numerical simulation of blasting-induced damage in shallow-buried twin tunnels with small spacing

LIU Minlong<sup>1</sup>, CHEN Shihai<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, HE Fang<sup>3</sup>, JIE Hairong<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China;

2. Jinan Urban Construction Group Co. Ltd., Jinan 250031, Shandong, China;

3. Fujian Railway Construction Co. Ltd., China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Fuzhou 350013, Fujian, China)

**Abstract:** In order to study the damage effect of blasting load on the surrounding rock of shallow-buried small spacing twin tunnels, the shallow-buried tunneling section of the south extension project of Shunhe Expressway is taken as the engineering background. Firstly, based on the dynamic damage evolution and Hoffman failure criterion, an anisotropic dynamic damage constitutive model for rock materials is established. Then, by using the secondary development function of the LS DYNA software, the constitutive model is applied to the numerical simulation of the tunnel blasting damage. Finally, based on the acoustic wave measurement theory, the wave velocities in the surrounding rock of the shallow-buried small spacing twin tunnels before and after blasting were measured by using non-metallic ultrasonic detectors, and the damage of the surrounding rock is evaluated from changes in wave velocity. The applicability of the anisotropic dynamic damage constitutive model and the accuracy of the numerical results are verified by comparing the numerical simulation results with the field test results. The numerical simulation results show that the maximum damage radius of single-hole blasting is 0.58 m, and the maximum damage depth is 1.88 m. According to the failure threshold of the rock mass, the horizontal failure range of the rock mass can reach 0.14 m, and the failure depth is 1.70 m. According to the field test, the damage degree of the middle intercalated rock is

\* 收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(51974136); 厦门市高校产学研项目(3502Z20203045)

第一作者: 刘闽龙(1996—), 男, 硕士研究生, 458652447@qq.com

通信作者: 陈士海(1964—), 男, 博士, 教授, cshblast@163.com

higher than that of the other parts of the surrounding rock in the alternate blasting excavation of the double track tunnel. The damage range of the surrounding rock caused by blasting excavation is about 0.50 m, which is close to the simulation results, and verifying the accuracy of the anisotropic dynamic damage constitutive model. The research results have a certain guiding role on the blasting excavation and damage control of shallow-buried twin tunnels with small spacing.

**Keywords:** small spacing tunnel; damage constitutive model; acoustic detection; blasting excavation; shallow-buried

在采用钻爆法开挖时, 爆炸产生的应力波除了用于破坏岩石介质形成隧道外, 不可避免会对围岩产生一定损伤。而围岩作为小净距隧道设计、施工的关键部位, 对开挖的稳定性和支护结构参数的选取起着重要作用<sup>[1]</sup>。因此, 爆炸对围岩造成的损伤是工程中重点关注的问题。

对爆破引起的岩体损伤已进行了大量研究, 在损伤模型方面, Grady 等<sup>[2]</sup>和 Taylor 等<sup>[3]</sup>率先提出了一些适用于岩石爆破的损伤力学模型, 为后续研究提供了基础。陈俊桦等<sup>[4]</sup>建立了考虑初始损伤的弹塑性爆破损伤本构模型及提出了用于评价围岩受爆破影响的损伤判据; 汪杰等<sup>[5]</sup>综合考虑岩体结构效应与荷载耦合作用, 建立了节理岩体损伤演化模型及损伤本构模型; 欧雪峰等<sup>[6]</sup>采用分离式霍普金森压杆探究了动态加载条件下层状板岩的各向异性行为, 利用元件组合模型理论, 建立了考虑宏观层理影响的层状岩体动态损伤本构模型。

在实际工程应用中, 通常采用岩体的声波实验来评定爆炸荷载对岩体造成的损伤程度<sup>[7-9]</sup>。但现场的岩体声波测试实验过程较繁琐、操作不便, 且这种事后的检测方法不利于爆破开挖中对于保留岩体损伤的主动控制。随着数值计算软件的不断发展, 一些学者开始结合数值模拟来研究岩体的爆破损伤。Tang 等<sup>[10]</sup>采用累计拉应变和极限应变的比例关系来反映岩体的损伤程度, 开发了用于研究岩体断裂破坏过程的 RFPA 软件; Ma 等<sup>[11]</sup>将 Johnson-Holmquist 模型嵌入 LS-DYNA, 研究了爆破裂纹扩展的影响因素, 并对爆破损伤控制提出了建议; 胡英国等<sup>[12]</sup>基于 FORTRAN 和 LS-DYNA 自定义接口, 根据具体的工程实例, 对 5 种爆破损伤模型计算的精确性进行了对比计算和验证; 曹峰等<sup>[13]</sup>通过 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 本构模型引入损伤变量, 来研究在循环荷载作用下小净距隧道保留岩体的累积损伤演化过程; 杨栋等<sup>[14]</sup>采用三维有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 讨论了爆破荷载和地应力动态卸荷复合作用下隧道围岩损伤分布; 李新平等<sup>[15]</sup>结合现场爆破振动测试和数值模拟以爆炸应力波作用下岩石内的有效应力确定了地下厂房爆破的损伤范围。谢福君等<sup>[16]</sup>根据提出的冲击荷载加载条件下的岩石压、拉统计损伤本构模型和冲击损伤判据模型分别进行爆破损伤数值模拟, 并将数值计算结果和现场实测结果进行对比。

本文中, 以济南顺河快速路南延工程浅埋暗挖段为依托, 借助 LS-DYNA 软件的二次开发功能将正交各向异性动态损伤本构用于爆破损伤模拟, 探究各向异性条件下爆破荷载对隧道围岩的损伤效应; 同时根据现场的围岩声波探测来评价岩体的爆破损伤程度, 并与模拟的结果进行比较; 以期研究成果可以为小净距隧道爆破开挖和岩体损伤控制提供参考依据。

## 1 工程概况

济南市顺河快速路南延建设工程, 是构建济南市快速路路网骨架的重要组成部分, 承担着主城区对外进出交通的快速集散任务, 同时承担重要的公共交通走廊功能。地下道路工程暗挖段采用小净距隧道的结构形式, 左、右线最小净距为南端洞口 5 m, 采用钻爆法施工。南口暗挖段起止里程 K1+656.245 至 K3+125.101, 顶板埋深为 3.0~13.3 m, 底板埋深为 12.0~22.3 m。小净距段隧道设计断面, 如图 1 所示。

## 2 隧道爆破动态损伤数值模拟

### 2.1 岩石类材料正交各向异性动态损伤本构及应用

数值模拟是分析岩体爆破损伤行为的有效工具, 但岩石类材料在爆破作用下具有明显各向异性的特征<sup>[17]</sup>。针对目前主流的数值模拟软件中对岩土体材料模型和结构模型都偏于简化, 通常假定岩石为

各向同性损伤材料,但在地质情况复杂、涉及到大量高应力的情况下,难以准确模拟出实际工况。故本文通过建立岩石类材料正交各向异性动态损伤本构,借助 LS-DYNA 的二次开发功能将建立的损伤本构编译成动力有限元程序,对小净距隧道爆破损伤进行模拟计算。损伤本构的建立过程如下。

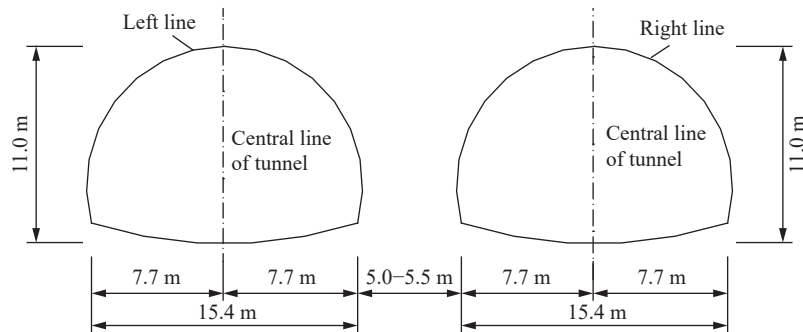


图 1 小净距隧道设计断面

Fig. 1 Designed cross-sections of neighborhood tunnels with small clear spacing

### 2.1.1 应变率效应

在动荷载作用下,岩石材料的力学响应和特性会发生变化,一般采用动态增长因子(dynamic increase factor, DIF,  $\beta$ )来考虑应变率效应, $\beta$ 一般通过实验来确定<sup>[18]</sup>:

$$\beta_\sigma = 1.0 + 0.19481 \lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s) + 0.03583[\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)]^2 \quad (1)$$

$$\beta_\epsilon = 1.0 + 0.16121 \lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s) + 0.02117[\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)]^2 \quad (2)$$

式中: $\beta_\sigma$ 和 $\beta_\epsilon$ 分别为应力动态增长因子、应变动态增长因子; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率,取为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

### 2.1.2 动态损伤损伤演化

首先,根据 Sidoroff 能量等价原理<sup>[19]</sup>,受损材料与虚构无损材料的弹性余能密度相同,即:

$$\phi^e(\sigma, D) = \tilde{\phi}^e(\tilde{\sigma}, D) \quad (3)$$

$$\phi^e(\sigma, D) = \frac{1}{2}\sigma^2/E, \quad \tilde{\phi}^e(\tilde{\sigma}, D) = \frac{1}{2}\tilde{\sigma}^2/E_0 \quad (4)$$

式中: $\phi^e$ 为受损材料弹性余能密度, $\tilde{\phi}^e$ 为无损材料弹性余能密度, $D$ 为损伤变量, $E$ 为材料损伤后的弹性模量, $E_0$ 为材料初始弹性模量。则 $\sigma^2/\tilde{\sigma}^2 = E/E_0$ ,又根据有效应力 $\tilde{\sigma} = (1-D)^{-1}\sigma$ ,可推导出:

$$D = 1 - \sqrt{E/E_0}, \quad E = (1-D)^2 E_0 \quad (5)$$

然后,采用 Mazars 损伤模型<sup>[19]</sup>描述主轴方向的损伤变量 $D_i (i=1,2,3)$ ,则对于单轴拉伸情况:

$$D_t = \begin{cases} 0 & \epsilon_s \leq \epsilon_{t1} \\ 1 - \frac{\epsilon_{t1}(1-A_t)}{\epsilon_s} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\epsilon_s - \epsilon_{t1})]} & \epsilon_s > \epsilon_{t1} \end{cases} \quad (6)$$

对于单轴压缩情况:

$$D_c = \begin{cases} 0 & -\epsilon_s \leq \epsilon_{c1} \\ 1 + \frac{\epsilon_{c1}(1-A_c)}{\epsilon_s} - \frac{A_c}{\exp[-B_c\mu\sqrt{2}(\epsilon_s + \epsilon_{c1})]} & -\epsilon_s > \epsilon_{c1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $D_t$ 为拉伸损伤变量, $D_c$ 为压缩损伤变量, $\epsilon_{t1}$ 、 $\epsilon_{c1}$ 分别为拉伸和压缩时初始损伤对应的应变值, $\epsilon_s$ 为静态应变, $A_t$ 、 $A_c$ 、 $B_t$ 、 $B_c$ 为常数, $\mu$ 为泊松比。

另外,为保证计算收敛,又分别设定了拉伸和压缩时极限损伤对应的极限应变值 $\epsilon_{t2}$ 、 $\epsilon_{c2}$ 。

### 2.1.3 破坏屈服准则

采用 Hoffman 正交各向异性体破坏准则<sup>[20]</sup>:

$$C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{31}^2 + C_9\tau_{12}^2 = 1 \quad (8)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为材料 3 个正交主方向上的应力;  $\tau_{23}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{12}$  为剪应力;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\dots$ 、 $C_9$  为 9 个基本强度参数, 由 3 个主方向的抗压强度、抗拉强度和 3 个主平面内的剪切强度决定, 具体表达式见文献 [20]。

#### 2.1.4 LS-DYNA 的二次开发

要想对前述建立的岩石类材料动态损伤本构模型进行计算, 必须借助有限元分析软件。由于涉及用户自定义的本构模型, 因此采用具备二次开发功能的通用显式非线性有限元分析程序 LS-DYNA。其目前材料库有 300 多种材料模型, 能满足大多数的工程需要。但有时针对某一领域的具体应用, 需要用到特殊的材料模式。LS-DYNA 通过开放程序内核, 让用户根据实际问题开发相应的模块来增强主程序的功能。

LS-DYNA 的二次开发, 实际上就是要修改原有的可执行文件, 在其中加入自己的程序。目前, LS-DYNA 开发商给用户提供的二次开发方式过程为: 根据自己建立的材料模型编译相应的用户子程序代码, 然后嵌入到主程序目标文件中的相应位置, 再编译生成新的含有用户子程序的 LS-DYNA 执行程序用于数值计算。

## 2.2 数值模型及参数

### 2.2.1 数值模型的建立

虽然在爆破工程上通常采用预裂或光面爆破技术, 但事实上无论采用何种爆破技术都不可避免地保留的岩体产生不同程度的损伤, 造成围岩的力学性能劣化, 承载能力下降<sup>[21]</sup>。根据掌子面上炮孔的布置规律, 相邻周边孔的间距通常在 0.5~1.0 m, 而周边孔距隧道开挖轮廓线通常在 0.1~0.2 m, 因此在隧道爆破开挖时, 爆破造成的围岩损伤主要来自邻近炮孔即周边孔的爆破作用。为简化模型, 通过建立单个炮孔, 来模拟周边孔爆破后形成的损伤范围, 从而评判对围岩造成的损伤情况。为减少计算量, 根据对称性建立 1/4 模型如图 2 所示, 模型的净宽边界几何尺寸为 2.5 m×2.5 m×3.0 m (X×Y×Z), 模型右下角为 1/4 炮孔如图 2(b) 所示, 炮孔半径为 0.02 m, 孔深为 1.4 m, 炮孔网格尺寸小于 0.7 cm, 在对称面上施加法向位移约束。

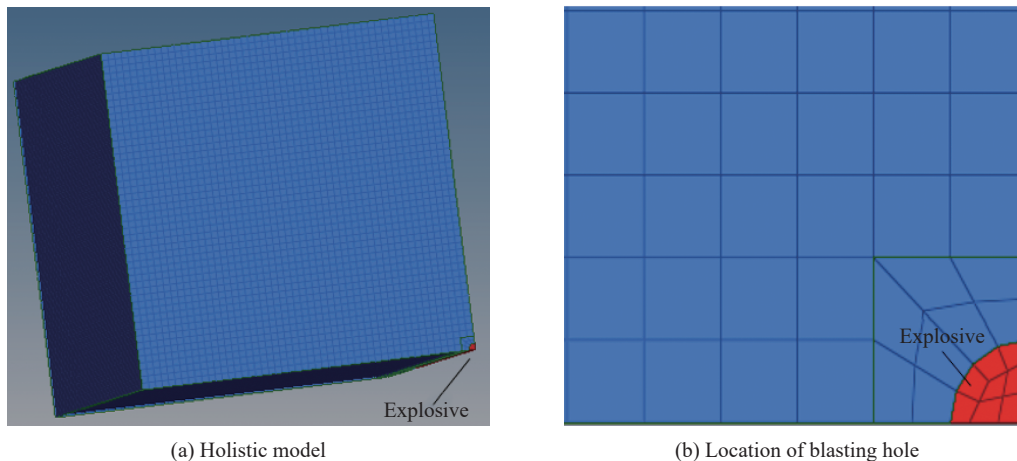


图 2 数值计算模型及网格划分

Fig. 2 Numerical model and meshing

### 2.2.2 材料参数

爆破数值模拟采用流固耦合算法, 炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型定义, 炸药的爆炸过程采用 JWL 状态方程进行模拟, 其状态方程为<sup>[13]</sup>:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega e_0}{v} \quad (9)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为材料常数;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为状态方程的常数;  $v$  为相对体积;  $e_0$  为初始比内能。

炸药材料及状态方程参数见表 1。

表 1 炸药材料及状态方程参数

Table 1 Explosive material and parameters of the equation of state

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	爆速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$e_0/\text{GPa}$
1 200	3 600	214.4	0.182	0.26	0.9	0.15	4.192

根据勘察报告及隧道设计参数建议, 岩石材料所用物理力学参数见表 2。损伤演化采用 Mazars 损伤模型<sup>[19]</sup>, 损伤演化方程所用参数中常数  $A_t$ 、 $B_t$ 、 $A_c$ 、 $B_c$  按取值范围选取, 拉伸和压缩时极限损伤对应的极限应变值  $\varepsilon_{t2}$ 、 $\varepsilon_{c2}$  通过岩石强度计算得出, 详细参数见表 3。

表 2 岩石材料物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock material

弹性模量 $E/\text{GPa}$	剪切模量 $G/\text{GPa}$	体积模量 $K/\text{GPa}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 $\mu$
7.00	2.78	4.86	2 600	0.7	39	0.26

表 3 损伤演化方程中的参数

Table 3 Parameters of the damage evolution equation

$\varepsilon_{t1}$	$\varepsilon_{c1}$	$\varepsilon_{t2}$	$\varepsilon_{c2}$	$A_t$	$B_t$	$A_c$	$B_c$
$3.43\times 10^{-5}$	$6.95\times 10^{-5}$	$2.1\times 10^{-4}$	$4.0\times 10^{-3}$	0.7	$1\times 10^4$	1.5	$1.0\times 10^3$

### 2.3 数值计算结果与分析

图 3 为爆破作用下岩石损伤演化趋于稳定后形成的损伤云图。对于岩体在爆破作用下的损伤判别, 严格意义上, 损伤因子  $D > 0$  即表示岩体受到了损伤。图 4 中黑色虚线为根据数值模型的计算结果得到爆破损伤的影响范围, 假定损伤水平半径  $r$  为装药几何中心至损伤部位的水平距离, 损伤深度  $h$  为炮孔顶部水平面至损伤部位的距离, 可以看出此次爆破造成的最大损伤水平影响半径为 0.58 m, 最大损伤影响深度为 1.88 m。同时考虑到爆破损伤对岩体产生的影响, 通常以岩体损伤破坏阈值  $D_{cr} = 0.19$ , 作为判定岩体是否破坏的依据<sup>[22]</sup>, 则根据  $D_{cr} = 0.19$  即可确定岩体的损伤破坏范围如图 4 中红色虚线所示, 岩体破坏水平半径为 0.14 m, 破坏深度为 1.70m。从数值模拟结果可以看出, 为尽量减小爆破对围岩的损伤, 根据岩体破坏水平半径, 周边孔距开挖轮廓线的距离应当大于 0.14 m。

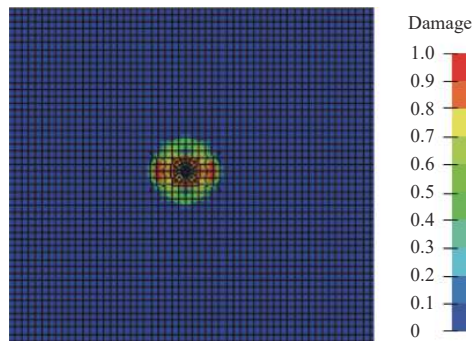


图 3 炮孔周围爆破损伤范围

Fig. 3 Blasting damage range around the blasting hole

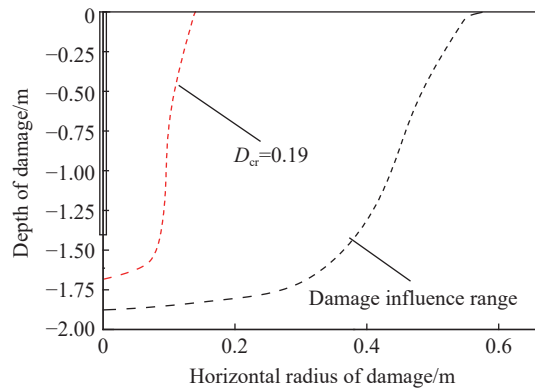


图 4 爆破损伤范围

Fig. 4 Range of blasting damage

### 3 现场围岩损伤探测

#### 3.1 现场声波探测孔布置

在隧道南口桩号 K2+947 中夹岩及隧道两边侧墙布置 6 个探测孔如图 5 所示, 探测孔直径为 0.04 m, 孔深度为 2 m, 3 个探测部位位于同一水平面上, 两孔间距选取为 1.2 m。为防止测点布置过高, 在下台阶开挖后难以探测, 各探孔均沿隧道纵向布置在离隧道底板 1.5 m 高的下台阶左右导坑的边墙上。

#### 3.2 测试仪器

现场测试采用智博联 U5300 非金属超声探测仪, 仪器由主机分析系统以及用于发射和接收超声波的声测管组成, 其主要参数: 单发双收通道, 声时测读精度为 25 ns, 采样周期为 25~409.6 ns, 波形点数为 512~4 096。测试时每两根声测管为一组, 通过水的耦合, 超声脉冲信号从一根声测管中的换能器发射出去, 在另一根声测管中的换能器接收信号记录该脉冲波在介质内传播过程中表现的波动特征, 测试现场如图 6 所示。

#### 3.3 岩体爆破损伤深度

根据探测布置位置, 该处围岩级别为 V 级, 稳定性较差, 双线隧道均采用双侧壁法开挖, 如图 7 所示 (I~VII 代表开挖顺序)。由于测孔均布置在下台阶左右导坑的边墙上, 而下台阶两侧导坑的炮孔布置如图 8 所示 (数字为雷管段号), 其中炮孔直径为 0.04 m, 孔深均为 1.4 m, 辅助孔间距为 1 m, 周边孔间距 0.6 m, 周边孔距隧道轮廓线 0.2 m。探测时, 掌子面距测孔已推进 10 m, 后续的爆破对岩体的损伤影响不大, 岩体声速现场实测数据见表 4, 根据表 4 绘制声波速度-孔深关系曲线如图 9 所示。

由声波速度-孔深关系曲线可以看出, 波速曲线在孔深 0.50 m 前出现较大变化, 波速下降明显, 说明既有开挖爆破对围岩的损伤影响范围在 0.50 m 左右。另外由于爆破时迎爆侧的围岩受到的扰动一般更大, 因此中夹岩受双线隧道交替爆破开挖的影响下, 其损伤程度较围岩其他部位要高, 这在曲线图上也可以看出中夹岩 3-4 断面整体波速较 1-2 断面和 5-6 断面要小。在深度达到 0.50 m 后, 波速测试结果均较稳定, 这是由于随着深度不断加大, 岩石的夹制作用也在增强, 导致围岩的损伤发展受到限制。

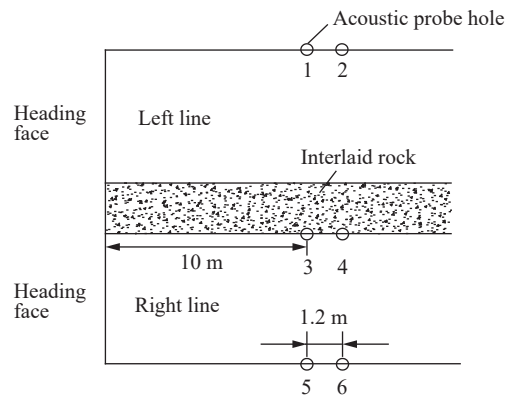


图 5 孔位布置示意图

Fig. 5 Arrangement of probe holes



图 6 声波现场测试

Fig. 6 Acoustic test

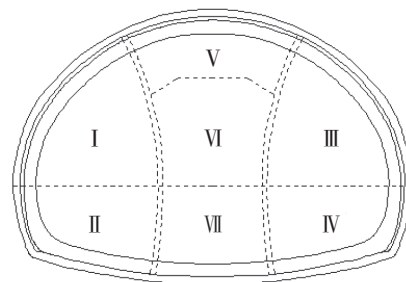


图 7 施工顺序横断面

Fig. 7 Cross section of construction sequence

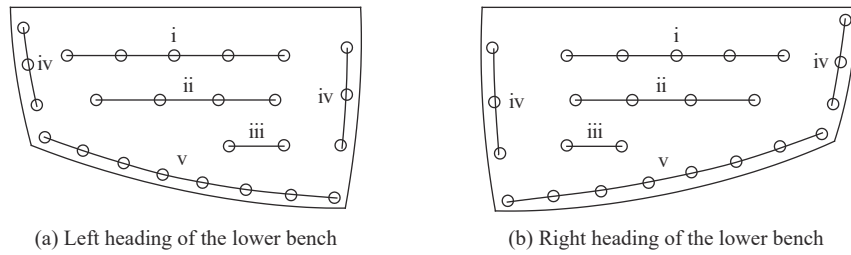


图 8 炮孔布置

Fig. 8 Layout of blast holes

表 4 岩体声速测试结果

Table 4 Test results of acoustic velocity in the rock mass

深度/m	声速/(m·s <sup>-1</sup> )		
	测试孔1~2	测试孔3~4	测试孔5~6
0.25	5 005	4 212	4 017
0.50	5 733	5 578	5 733
0.75	5 806	5 696	5 806
1.00	5 863	5 628	5 844
1.25	5 788	5 714	5 769
1.50	5 733	5 662	5 788
1.75	5 788	5 578	5 806
2.00	5 769	5 432	5 679

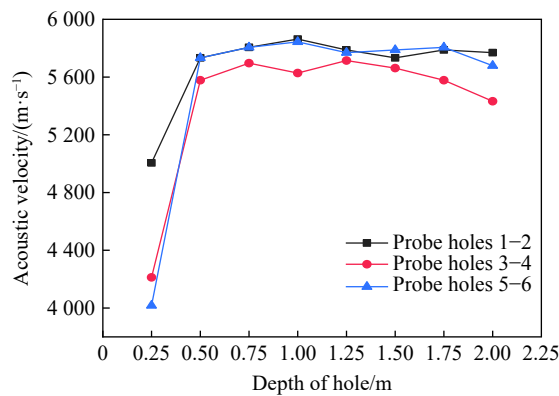


图 9 声波速度-孔深关系曲线

Fig. 9 Acoustic velocity varying with depth of hole

根据数值模拟的计算结果, 单个炮孔爆破引起的损伤影响范围在 0.58 m, 考虑到周边孔距轮廓线 0.2 m, 因此实际对围岩的影响范围应当在 0.38 m, 这与现场探测的损伤影响范围 0.50 m 相接近, 两者的误差在工程允许范围内, 从而也验证了以建立的动态损伤本构用于损伤数值模拟的准确性。另外, 需要指出的是, 虽然在实际工程中围岩是随着隧道的掘进而受到多次的循环爆破作用, 而本模拟只进行了一次爆破分析, 但多次的循环爆破作用一般只会对损伤范围内的损伤程度有着明显影响, 对造成的损伤范围则影响不大, 因此在只考虑损伤影响范围的情况下比较数值模拟结果和损伤探测结果是合理的。

## 4 结 论

(1)通过建立的正交各向异性损伤本构模拟周边孔的爆破,研究炮孔周围的损伤范围,根据数值模拟的结果,爆破造成的最大损伤水平影响半径为 0.58 m,最大损伤影响深度为 1.88 m;同时以  $D_{cr} = 0.19$  作为确定岩体是否损伤破坏的依据,则岩体的破坏水平范围可达 0.14 m,破坏深度为 1.70 m。

(2)现场围岩损伤探测结果显示,中夹岩受双线隧道交替爆破影响,其损伤程度较围岩其他部位要高;爆破开挖对围岩引起的损伤影响范围在 0.50 m 左右,这与数值模拟结果相接近,验证了该正交各向异性损伤本构用于爆破损伤模拟的准确性。

## 参考文献:

- [1] 蔚立元,李术才,徐帮树. 青岛小净距海底隧道爆破振动响应研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(8): 100–108. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.08.008.  
YU L Y, LI S C, XU B S. Study on the effect of blasting vibration for Qingdao twin subsea tunnels [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(8): 100–108. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.08.008.
- [2] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(3): 147–157. DOI: 10.1016/0148-9062(80)91361-3.
- [3] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1986, 55(3): 301–320. DOI: 10.1016/0045-7825(86)90057-5.
- [4] 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. DOI: 10.11779/CJGE201605011.  
CHEN J H, ZHANG J S, LI X P. Model of rock blasting-induced damage considering integrity of rock mass and its application [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(5): 857–866. DOI: 10.11779/CJGE201605011.
- [5] 汪杰,宋卫东,付建新. 考虑节理倾角的岩体损伤本构模型及强度准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 2253–2263. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0496.  
WANG J, SONG W D, FU J X. A damage constitutive model and strength criterion of rock mass considering the dip angle of joints [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 2253–2263. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0496.
- [6] 欧雪峰,张学民,张聪,等. 冲击加载下板岩压缩破坏层理效应及损伤本构模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3503–3511. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0391.  
OU X F, ZHANG X M, ZHANG C, et al. Study on bedding effect and damage constitutive model of slate under compressive dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3503–3511. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0391.
- [7] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006: 21–27. DOI: 10.7666/d.y1190354.
- [8] 孟凡兵,林从谋,蔡丽光,等. 小净距隧道爆破开挖中夹岩累积损伤计算方法及其应用 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1491–1494; 1499. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.05.032.  
MENG F B, LIN C M, CAI L G, et al. Cumulative damage evaluation of clip rock in small-distance tunnels caused by blasting excavation and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1491–1494; 1499. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.05.032.
- [9] 王智德,夏元友,周雄,等. 顺层岩质边坡爆破的振动控制及损伤特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 27–36. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0027-10.  
WANG Z D, XIA Y Y, ZHOU X, et al. Blasting vibration control and damage characteristics of bedding rock slopes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 27–36. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0027-10.
- [10] TANG C M. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 249–261. DOI: 10.1016/S0148-9062(96)00039-3.
- [11] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(6): 966–975. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2007.12.002.



- [12] 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.012.  
HU Y G, LU W B, CHEN M, et al. Comparison and improvement of blasting damage models for rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3278–3284. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.11.012.
- [13] 曹峰, 凌同华, 李洁, 等. 循环爆破荷载作用下小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(23): 141–148. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.23.020.  
CAO F, LING T H, LI J, et al. Cumulative damage feature analysis for shared rock in a neighborhood tunnel under cyclic explosion loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(23): 141–148. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.23.020.
- [14] 杨栋, 李海波, 夏祥, 等. 高地应力条件下爆破开挖诱发围岩损伤的特性研究 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 1110–1116; 1122. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.04.012.  
YANG D, LI H B, XIA X, et al. Study of blasting-induced dynamic damage of tunnel surrounding rocks under high in-situ stress [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 1110–1116; 1122. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.04.012.
- [15] 李新平, 陈俊桦, 李友华, 等. 溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2042–2049.  
LI X P, CHEN J H, LI Y H, et al. Study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground powerhouse of Xiluodu hydropower station [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2042–2049.
- [16] 谢福君, 张家生, 陈俊桦. 冲击荷载作用下岩石压动态和拉动态损伤模型 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2019, 50(2): 420–427. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.022.  
XIE F J, ZHANG J S, CHEN J H. Dynamic damage model of rock under impact loads of compression and tension [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(2): 420–427. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.022.
- [17] 闫长斌, 徐国元, 杨飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 88–93. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2007.01.014.  
YAN C B, XU G Y, YANG F. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 88–93. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2007.01.014.
- [18] LI Q B, ZHANG C H, WANG G L. Dynamic damage constitutive model of concrete in uniaxial tension [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, 53(3): 449–455. DOI: 10.1016/0013-7944(95)00123-9.
- [19] 杨大勇. 基于能量原理的岩石损伤研究 [D]. 武汉: 武汉工业学院, 2008: 9–12. DOI: 10.7666/d.d051299.
- [20] 孙培峰, 杨天鸿. 基于 Hoffman 准则的层状岩体巷道稳定性研究 [C]//第 25 届全国结构工程学术会议论文集: 第 II 册. 包头, 2016: 54–60.
- [21] 杨仁树, 许鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3065–3071. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0107.  
YANG R S, XU P. Fractal study of media damage under blasting loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3065–3071. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0107.
- [22] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究 [J]. *工程爆破*, 2001, 7(1): 12–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2001.01.003.  
ZHU C Y, YU S C. Study on the criterion of rockmass damage caused by blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(1): 12–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2001.01.003.

(责任编辑 张凌云)