

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 2-0311-07

高地应力下隧道围岩动力损伤分析

杨 栋¹, 李海波¹, 夏 祥¹, 罗超文¹, 李卫兵²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 中铁十六局集团 第五工程有限公司, 河北 唐山 063030)

摘 要: 为预估和控制爆破荷载作用下围岩损伤范围, 在赣龙铁路梅花山隧道工程现场进行岩体声波测试, 得到围岩的损伤范围。根据爆破荷载作用下岩体损伤发展规律, 采用基于概率形式的损伤变量定义, 运用三维有限差分软件对不同地应力状态下爆破产生的围岩损伤范围进行数值模拟, 并与现场岩体声波测试结果进行比较。计算结果表明, 数值计算与实测结果有较好的一致性, 随着地应力大小增大, 围岩损伤范围呈现先减小后增大的趋势, 且增大幅度较大, 地应力较高时, 局部部位如顶板、底板损伤更为明显, 说明地应力大小对围岩损伤分布有着显著影响; 随着侧压力系数增大, 损伤范围先减小后增大, 但增速逐渐减小。所得到的结论可为高地应力下隧道稳定性分析和支护设计提供依据。

关 键 词: 岩石力学; 围岩损伤; 爆破; 高地应力**中图分类号:** TU 452**文献标识码:** A

Study of dynamic damage of surrounding rocks for tunnels under high in-situ stress

YANG Dong¹, LI Hai-bo¹, XIA Xiang¹, LUO Chao-wen¹, LI Wei-bing²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. China Railway 16th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tangshan, Hebei 064000, China)

Abstract: In order to forecast and control the damage zone of surrounding rock under blasting load, sound wave tests have been conducted in the construction site of Meihuashan Tunnel in Jiangxi province dragon railway. Based on the change rate of sound wave speed, damage zone size of surrounding rock are obtained. On this basis, a statistics-based damage variable of rockmass has been proposed based on micromechanics. Damage zone size of surrounding rock under blasting load at different in-situ stresses is thus studied by using three-dimensional finite difference software. Calculations show that the numerical simulation results agree well with the site monitoring results. With the in-situ stress increasing, the size of damage zone decreases first, then increases, and increases by a large margin; when the in-situ stress is high, local parts such as tunnel roof, floor damage is more obvious; it is shown that the in-situ stress has significant impact on surrounding rock damage distribution. With the lateral pressure coefficient increasing, the size of damage zone decreases first, then increases, but the growth rate decreases. The results provide foundation for stability analysis of tunnels under high in-situ stress and supporting design of the cracked surrounding rock.

Key words: rock mechanics; surrounding rock damage; blast; high in-situ stress

1 引 言

在 高 地 应 力 环 境 下 地 下 隧 道、硐 室 的 开 挖 改 变 了 围 岩 的 初 始 应 力 状 态, 引 起 围 岩 应 力 重 分 布, 局 部 区 域 出 现 应 力 集 中 现 象, 超 过 岩 体 抗 压 或 抗 拉 强 度 时 造 成 围 岩 破 坏, 引 发 工 程 事 故, 同 时 由 开 挖 引 起 的 一 定 范 围 内 的 围 岩 卸 荷 松 弛, 使 岩 体 强 度 降 低, 也 造 成 岩 体 屈 服 或 破 坏, 产 生 面 向 开 挖 区 域 的

变 形 和 破 裂, 严 重 时 还 会 引 发 岩 爆、垮 塌 等 一 系 列 破 坏 失 稳 现 象, 给 隧 道、硐 室 的 施 工 开 挖 和 工 程 稳 定 性 带 来 了 严 重 安 全 隐 患。

爆 破 开 挖 扰 动 对 隧 道 围 岩 的 影 响 主 要 体 现 在 两 方 面, 一 是 在 岩 体 内 产 生 裂 纹 或 使 原 有 裂 纹 扩 展 从 而 影 响 到 岩 石 的 完 整 性; 二 是 爆 炸 冲 击 波 在 围 岩 在 自 由 面 附 近 产 生 反 射 拉 伸 波, 使 靠 近 围 岩 壁 面 处 的 岩 体 出 现 拉 伸 破 坏 和 松 动, 并 伴 有 岩 体 参 数 劣 化,

收稿日期: 2012-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.50809070); 国家 973 计划项目资助 (No.2010CB732001)。

第一作者简介: 杨栋, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: yd198855@163.com

直接影响岩体损伤程度和范围。

国内外学者对于爆破荷载下岩石损伤特性已经取得了大量研究成果,比较具有代表性的成果有 Sandia 实验室提出的 NAG-FRAG 和 BCM 岩体损伤模型; Grady 等^[1-3]提出的 GK 模型,采用一个标量描述被拉应力激活的微裂纹所引起的岩石刚度的劣化; Taylor 等^[4]提出 TCK 模型,对爆炸荷载作用下岩体的损伤分布特征进行分析,并将损伤变量以概率的形式耦合到动态本构方程中,研究了岩体在体积拉伸荷载下的动态响应; Kuszmaul^[5]提出 KUS 模型,考虑了高密度微裂纹的屏蔽作用,即在裂纹的激活率中考虑由于损伤引起的裂纹减少。随后,许多学者在这些模型的基础上建立了自己的损伤模型,进行了围岩损伤范围模拟方面的研究。Yang 等^[6]、Liu 等^[7]基于对岩石破坏模式、应变率相关性及损伤累积的分析,根据连续介质损伤力学和临界拉应变准则提出了爆破损伤模型,综合反映了损伤变量与裂纹密度、拉应变、应变率的相关关系。卢文波等^[8]修正了 KUS 模型中的几个问题,推导出新的动力损伤本构关系及相应的数值求解格式,并用于确定岩石周边控制爆破所引起的围岩爆破影响范围。蔡德所等^[9]以三峡工程基岩开挖爆破为背景,建立了基岩爆破损伤本构模型,将其嵌入 SHALE 程序中,实现了基岩开挖爆破损伤范围的数值模拟。夏祥^[10]基于概率损伤模型,分析了岩体爆炸损伤特性,研究了距爆源一定距离处岩体振动速度与损伤特征的关系,提出了岭澳核电站二期工程岩体爆炸损伤深度的控制方法。李新平等^[11]基于 Yang-Liu 损伤模型,将损伤变量引入弹塑性本构方程中,通过数值模拟方法及现场爆破振动测试,研究了溪洛渡水电站地下厂房爆破损伤范围及判据。张国华等^[12]计算了大断面隧道爆破作业中双侧壁导坑法施工的围岩累积损伤范围。然而,隧道开挖过程实质上是初始地应力动态调整的过程,初始地应力的状态将直接影响围岩损伤程度和范围,而以往的研究成果对于地应力状态在围岩损伤破坏中作用的系统研究并不多见。

本文以赣龙铁路梅花山隧道工程为例,利用现场声波测试数据和已有的岩体损伤研究成果,采用三维有限差分软件 FLAC3D,利用其内置的 fish 语言引入爆破荷载作用下岩体的各向同性损伤模型,模拟了不同地应力状态下的隧道围岩损伤范围并进行了对比,分析结果可为隧道设计、围岩加固方案的优化及变破坏的治理提供参考。

2 声波试验及结果分析

2.1 工程概况

梅花山隧道位于福建省连城、上杭县境内,全长 13 780 m,隧道最大埋深为 688.21 m。隧址区在大地构造上属于闽西南拗陷带,北东-北东东向及北北东向断裂最为发育,基本控制着本区构造格局。梅花山隧道轴线方向 NW23°~NW46°,隧址区实测地应力数据显示,测区现场应力场以 NEE 向挤压为主,最大主应力大小约为 10.20~25.39 MPa,方向一般为 N67°E 左右,隧道走向与区域应力场大角度相交。

2.2 声波检测方案

为了准确判断爆破对隧道围岩的损伤效应,选择了一个断面进行了岩体声波测试。声波测试孔布置如图 1 所示,编号为 S1~S9。

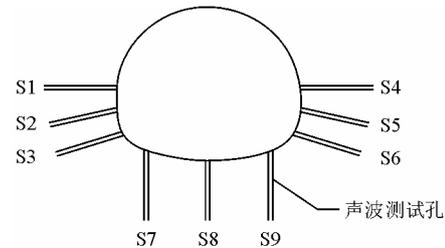


图 1 声波测试孔布置示意图

Fig.1 Sketch of arrangement of acoustic test

2.4 损伤区域检测结果及分析

各测试孔波速-深度变化曲线如图 2 所示,图中,横坐标为声波孔内各测点到隧道洞壁的深度,洞壁处深度为 0。由图 2 可见,各测试孔的岩体声波波速在隧道洞壁附近一定范围内均随深度增大急剧增大,此后基本保持稳定。比如,测孔 S1,孔口(即隧道洞壁)附近声波波速为 2 240 m/s,随深度增加波速急剧增大,深度达 1.8 m 时波速达到 4 444 m/s,此后只有小幅度增长。可以根据实验结果,可认为 S1 附近岩体爆炸产生的影响范围为 1.73 m。同理,可以得到其他测试孔岩体损伤深度见表 1。

表 1 测试孔损伤区检测结果

Table 1 Detecting results of damage zone in testing holes

孔号	损伤深度/m	孔号	损伤深度/m
S1	2.1	S6	1.8
S2	2.0	S7	1.8
S3	1.6	S8	2.0
S4	2.4	S9	2.4
S5	2.2		

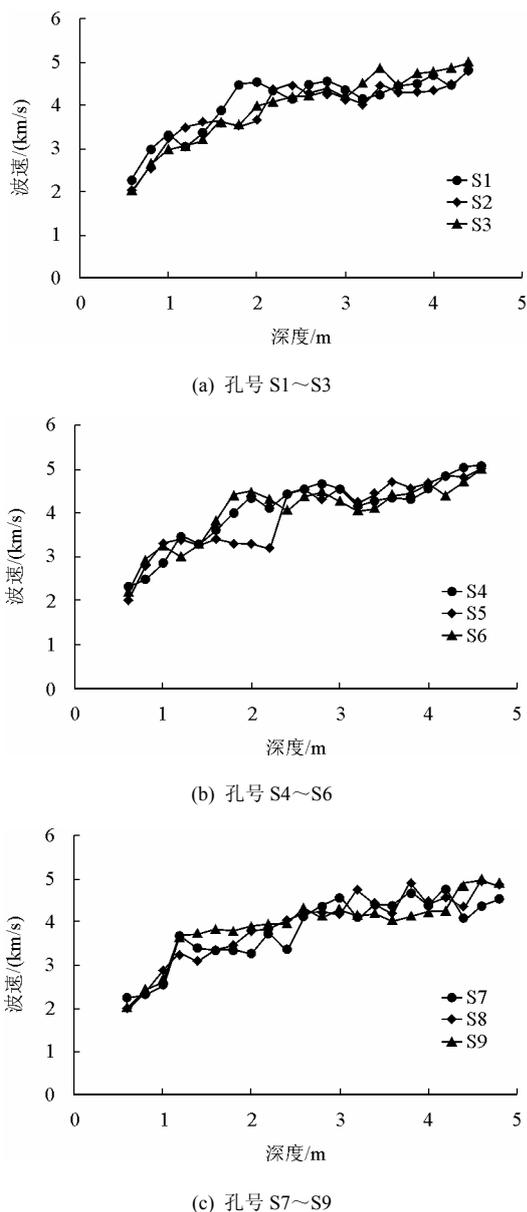


图 2 损伤区检测结果

Fig.2 Detecting results of damage zone

根据各声波孔测试结果和孔位布置, 即确定出隧道该横截面处的围岩损伤范围, 如图 3 所示。

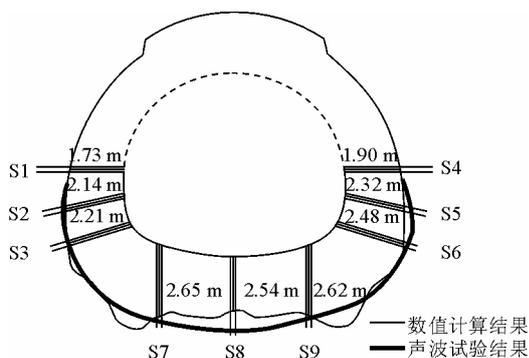


图 3 爆破荷载作用下围岩损伤范围

Fig.3 Damage zone of surrounding rock under blasting load

由图 3 可见, 隧道平均损伤深度约为 2.12 m。隧道底板以及拱底左右两侧底角与底板交汇区 (S3、S6、S7~S9) 损伤深度明显要大于其他区域, 综合地应力测试及开挖稳定性分析, 可知拱底两底侧区域及底板为压应力集中区域, 表明地应力的存在对岩体开挖损伤有着显著影响。

3 数值计算及对比分析

采用 FLAC3D 软件引入各向同性损伤模型对高地应力下围岩动力损伤效应进行了计算, 同时改变地应力状态进行对比计算。以损伤区实测资料为依据, 验证了数值计算的正确性。

3.1 爆破荷载的确定

假设洞断面采用全断面一次开挖成型。爆破采用楔形掏槽、周边光面爆破, 梅花山隧道典型爆破设计如图 4 所示。

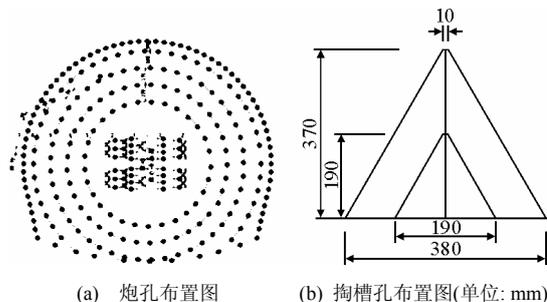


图 4 梅花山隧道爆破设计图

Fig.4 Blasting design sketch of meihuashan tunnel

假设爆破为耦合装药形式, 根据声学近似理论^[13-14], 冲击波作用在粉碎区边界处的岩体峰值压力可以根据式 (1) 计算。

$$\left. \begin{aligned} P_d &= \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \frac{2\rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D} \\ P_r &= \frac{P_d}{d^3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P_r 、 P_d 分别为冲击波作用在粉碎区边界和孔壁岩石上的初始冲击压力 (Pa); ρ 、 ρ_0 分别为岩体和炸药的密度 (kg/m^3); C_p 为岩体纵波波速, 这里取 3 400 m/s; γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数, 一般取 3; d 为粉碎区半径和装药半径的比例, 参考相关文献研究成果^[10]取 3。取炸药密度 $\rho_0 = 1\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$, 炸药爆速 $D = 4\ 000\ \text{m}/\text{s}$, 根据式 (1) 计算所得的粉碎区边界爆破荷载峰值压力为 342 MPa。

目前国内外对于炮孔中爆炸荷载变化历程的确定多采用半经验半理论公式, 本文采用由 Starfield and Pugliese^[15]率先提出并由 Jong 等^[16]修正的压力

计算式作为爆炸荷载变化历程的表达:

$$P_t = 4P_0 \left(e^{-\beta t / \sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\beta t} \right) \quad (2)$$

式中: P_t 为随时间变化的爆炸荷载; β 为阻尼系数; t 为作用时间; P_0 为粉碎区边界冲击波峰值压力。由式 (2) 可知, 爆炸荷载曲线主要由爆炸荷载上升时间 t_r 及荷载峰值确定。由数学推导可知荷载峰值出现在时间 $t_r = -\sqrt{2} \ln(1/2) / \beta$ 处。

有研究表明^[17-18], 荷载峰值到达时间约为 20~150 us, 取决于爆破类型和临空面情况。本文取上升时间为 t_r 为 50 us, 此时 β 约为 19 604.96, 作用时间 t 为 1 000 us, 荷载曲线如图 5 所示。

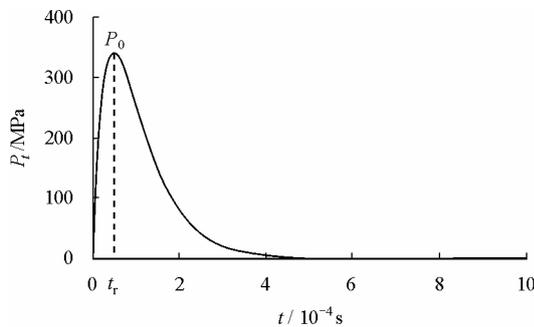


图 5 爆破荷载曲线
Fig.5 Curves of blasting load

3.2 爆破损伤演化方程

岩石损伤演化采用 Yang-Liu 等的研究成果^[6-7], 通过概率形式表示动力荷载作用下所激活的岩体裂纹数和损伤的扩展过程, 岩体中的等效体积累积拉应变是决定微裂纹是否激活和扩展的重要参考指标, 达到产生裂纹的临界应变与加载的应变率及时间有关。这里采用岩体损伤的各向同性模型, 损伤定义^[6-7]如下:

$$D_i = p_f = 1 - e^{-C_{di}^2}, \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

式中: p_f 为岩体损伤破坏的几率; C_{di} 为 i 方向的裂纹密度, 表示单位体积 V_0 中包含的裂纹数。损伤参数 D_i 取值在 0~1 之间, 分别对应于完整、无损材料和裂纹充分发展的材料。裂纹密度定义^[6-7]如下:

$$C_{di} = \begin{cases} a(\varepsilon_i - \varepsilon_{cri})^{\beta_i}, & (\varepsilon_i > \varepsilon_{cri}) \\ 0, & (\varepsilon_i \leq \varepsilon_{cri}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_i 、 β_i 为材料常数; ε_i 为 i 方向的主应变 (拉为正); ε_{cri} 为相对应的临界拉应变; t 为达到断裂应力所经历的时间。对各向同性损伤, 式 (4) 中主应变则变为岩体等效拉应变, 见式 (5)。

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle^2} \quad (5)$$

式中: ε_i 为主应变; $\langle \varepsilon_i \rangle$ 表示当方括号中的变量大于 0 时有效, $\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{|\varepsilon_i| + \varepsilon_i}{2}$ 。

对于临界拉应变 ε_{cri} , 可以通过岩体三轴拉伸实验数据得到, 但目前试验测定还十分困难, 根据文献^[19-22]的研究成果, 岩体的损伤往往由拉应变产生, 可通过单轴静态抗拉实验确定, 计算^[19-21]如下:

$$\varepsilon_{cri} = \frac{1-2\nu}{E_i} \sigma_{sti} \quad (6)$$

式中: σ_{sti} 为岩体在 i 方向的静态抗拉强度; E_i 为岩体材料的等效弹性模量; ν 为泊松比。由式 (6), 将 i 方向的对应于岩体开裂应力的拉应变和裂纹密度分别记为 ε_{fi} 和 C_{dfi} , 则对应于岩体开裂应力的裂纹密度为

$$C_{dfi} = \alpha_i (\varepsilon_{fi} - \varepsilon_{cri})^{\beta_i} (t_i - t_{ci}), \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

式中: t_i 为岩体由初始状态达到开裂应力的所需要的总时间, 而由开裂应力对应的应变状态达到临界状态时间记为 t_{ci} , 则

$$t_i - t_{ci} = \frac{\varepsilon_{fi} - \varepsilon_{cri}}{\dot{\varepsilon}_i}, \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_i$ 为岩体单轴拉伸应变率。从而有

$$C_{dfi} = \alpha_i (t_i \dot{\varepsilon}_i - t_{ci} \dot{\varepsilon}_i)^{\beta_i} (t_i - t_{ci}), \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

岩体破裂应力与对应的应变之间的关系为

$$\sigma_{fi} = \frac{E_i(1-D_{fi})}{1-2\nu} \varepsilon_{fi}, \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

根据式 (8)~(10) 得岩体损伤的率相关本构方程为

$$\sigma_{fi} = (1-D_{fi})\sigma_{sti} + \frac{E_i(1-D_{fi})}{1-2\nu} \left(\frac{C_{dfi}}{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{1+\beta_i}} \dot{\varepsilon}_i^{\frac{1}{1+\beta_i}}, \quad (i=1,2,3) \quad (11)$$

参考已有损伤研究结果^[19-21], 损伤相关参数取 $\alpha = 3.5 \times 10^{10}$, $\beta = 2$ 。

3.3 计算模型及参数

隧道网格划分后模型见图 6 所示。模型大小 (宽×高) 为 100 m×100 m。四周采用黏性边界以减小边界应力波反射的影响。根据隧址区工程地质报告等资料, 声波测试断面处主要为微风化花岗岩,

因此数值计算时假设整个隧道围岩均为微风化花岗岩，其主要岩体参数见表 2。

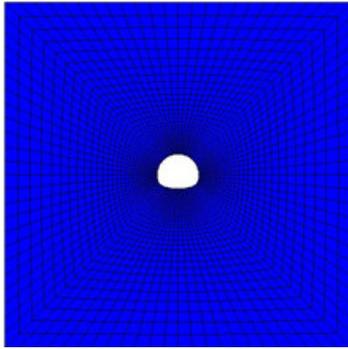


图 6 计算模型及网格划分
Fig.6 Calculation model and mesh

表 2 围岩力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock

密度 (g/cm ³)	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
2 700	45.78	0.22	12	45	5

3.4 计算结果及对比分析

根据实测地应力资料水平方向初始地应力取 20 MPa，垂直方向取 13 MPa，将爆破荷载施加于洞周边界上，计算得到隧道围岩损伤结果见图 7。

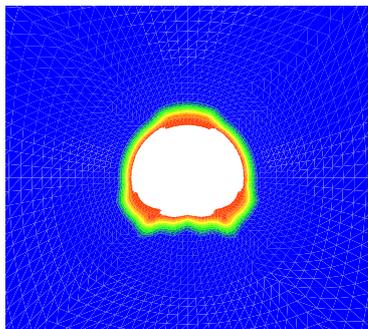


图 7 爆炸荷载作用下围岩损伤变量的分布
Fig.7 Distribution of surrounding rock damage under blasting load

由图 7 可以看出，隧道围岩平均损伤范围约为 2.07m，与现场声波测试的结果基本吻合。同时，拱顶以及底板与边墙交汇处由于应力集中明显，损伤深度明显要大于其他区域，这与现场声波测试的趋势一致（见图 3）。

改变模型中的地应力大小，可得到在不同地应力水平下的围岩损伤分布，本文采用 10、15、20、25、30、40 MPa 六种工况进行对比计算，损伤分布见图 8。

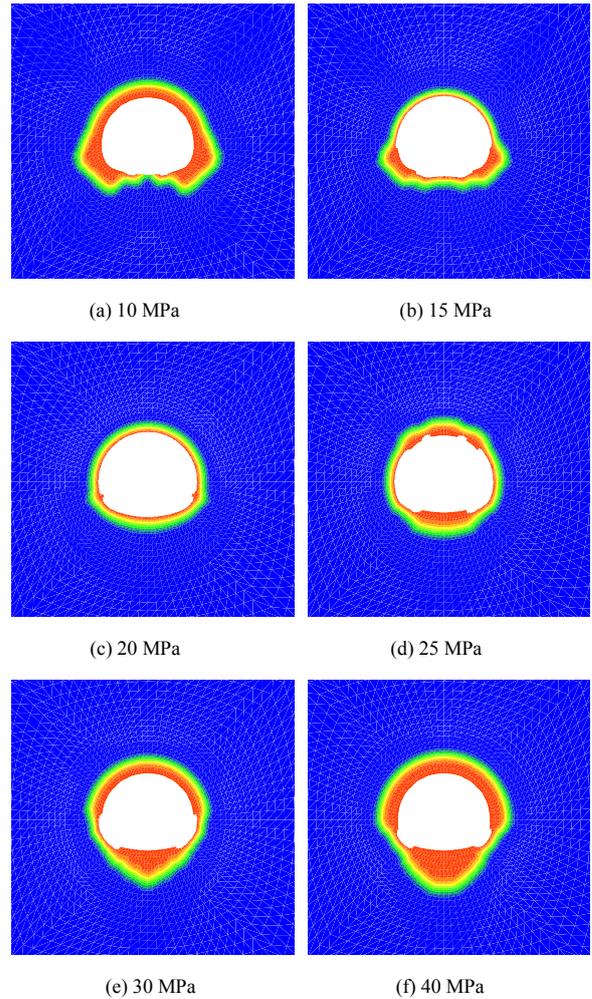


图 8 不同地应力水平下的损伤分布
Fig.8 Distribution of surrounding rock damage under different in-situ stresses

为了便于比较分析，取平均损伤深度后绘制了损伤范围随地应力大小的变化如图 9 所示。从图中可以看出，随着地应力从 10 MPa 增大为 40 MPa，损伤范围先减小后增大，且增加幅度较大。15 MPa 时损伤深度最小，为 1.79 m，而后随着地应力增大至 40 MPa 损伤深度增大为 3.47 m。

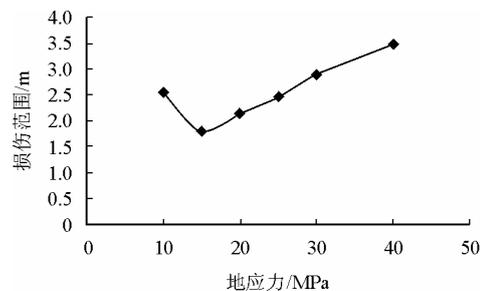


图 9 围岩损伤范围随地应力变化
Fig.9 Variation of damage area with the in-situ stresses

同理，改变侧压力系数大小，本文取 0.5、0.8、

1.0、1.5、2.0 五种工况进行了计算,得到围岩损伤范围随侧压力系数的变化曲线如图 10 所示。从图中可以看出,损伤范围随侧压力系数增大同样呈现先减小后增大的趋势,但增长幅度逐渐减小。侧压力系数为 0.8 时对应的损伤范围最小,为 2.04 m,而后随着侧压力系数增大,损伤范围增至 2.48 m。

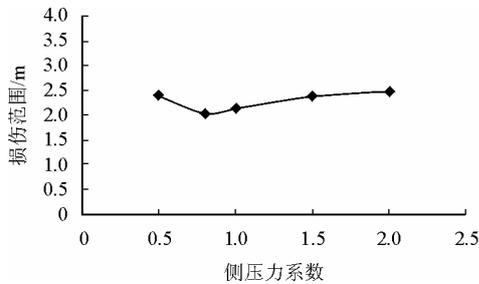


图 10 围岩损伤范围随侧压力系数变化

Fig.10 Variation of damage area with different lateral pressure coefficients

由图 9、10 可见,损伤范围随着地应力大小和侧压力系数增大均呈现了先减小后增大的趋势,这是因为实际中当地应力较小时,岩体所处深度更接近于地表,一方面由于岩石夹制作用小,爆破产生的损伤更大,另一方面顶部水平面反射波强度较大,更易引起岩石拉裂损伤。然而随着深度逐渐变深,地应力大小与侧压力系数逐渐变大,尽管夹制作用增强,顶部水平面反射波强度减弱,但是此时围岩因开挖调整后的应力状态对围岩损伤分布起到了控制作用,超过了一个临界值后,随着地应力大小和侧压力系数继续增大,围岩损伤范围同时增大,但增大的幅度逐渐减小。

4 结 论

(1) 采用有限差分程序 FLAC^{3D},利用其内置的 fish 语言引入爆破荷载作用下岩体的各向同性损伤模型,模拟高地应力下围岩动力损伤范围是可行的,数值计算结果与现场声波测试结果的一致。

(2) 随着地应力大小增大,围岩损伤范围呈现先减小后增大的趋势,且增大幅度较大,地应力较高时,局部部位如顶板、底板损伤更为明显,说明地应力大小对围岩损伤分布有着显著影响。

(3) 随着侧压力系数的增大,损伤范围同样呈现先减小后增大的趋势,但增长幅度逐渐减小。

参 考 文 献

[1] GRADY D E. The mechanics of fracture under high-rate stressloading[C]//Preprints of the William Prager

Symposium on Mechanics of Geomaterials: Rocks, Concretes and Soils. Evanston: Northwestern University, 1985: 129 - 155.

[2] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1980, 17(2): 147 - 157.

[3] GRADY D E, KIPP M E. Dynamic rock fragmentation[C]//Fracture Mechanics of Rock. London: Academic Press, 1987: 429 - 475.

[4] 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.

[5] KUSZMAUL J S. A new constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Columbia: [s.n.], 1987: 412 - 423.

[6] YANG R, BRWDEN W F, KATSABANIS P D. A new constitutive model for blast damage[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33: 245 - 254.

[7] LIU Li-qing, KATSABANIS P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34: 217-231.

[8] 卢文波,董振华,赖世骤. 确定周边控制爆破围岩影响深度的动力损伤计算方法[J]. **工程爆破**, 1996, 2(4): 55-59.

LU Wen-bo, DONG Zhen-hua, LAI Shi-zhou. Calculation on dynamic damage of surrounding rock caused by contour control blasting[J]. **Engineering Blasting**, 1996, 2(4): 55-59.

[9] 蔡德所,张继春,刘浩吾. 基岩爆破损伤的数值模拟及其工程应用[J]. **水利学报**, 1997, 42(4): 67-71.

CAI De-suo, ZHANG Ji-chun, LIU Hao-wu. Numerical simulation and application of blasting damage of bed rock mass[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, 42(4): 67-71.

[10] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究 [博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.

[11] 李新平,陈俊桦,李友华. 溪洛渡电站地下厂房爆破

- 伤范围及判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2042—2049.
- LI Xin-ping, CHEN Jun-hua, LI You-hua. Study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground power-house of Xiluodu hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2042—2049.
- [12] 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.
- ZHANG Guo-hua, CHEN Li-biao, XIA Xiang. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1610—1619.
- [13] 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(20): 144 - 147.
- DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Nature Science)**, 2001, 20(20): 144 - 147.
- [14] 徐颖, 丁光亚, 宗琦, 等. 爆炸应力波的破岩特征及其能量分布研究[J]. 金属矿山, 2002, 30(2): 13 - 16.
- XU Yin, DING Guang-ya, ZONG Qi, et al. Study on the characteristics of rock fragmentation and energy distribution by blast stress wave[J]. **Metal Mine**, 2002, 30(2): 13 - 16.
- [15] STARFIELD A M, PUGLIESE J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1968, 5(1):65 - 77.
- [16] JONG Y, LEE C, JEON S, et al. Numerical modeling of the circular-cut using particle flow code[C]//31st Annual Conference of Explosives and Blasting Technique. Orlando, USA: [s.n.], 2005.
- [17] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [18] 杨建华, 卢文波, 陈明. 炮孔爆炸荷载变化历程的确定[C]//第二届全国工程安全与防护学术会议. 北京: [出版者不详], 2010: 773—777.
- [19] HAO H, WU C, ZHOU Y. Numerical analysis of blasting-induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage models. part 1. Equivalent material property approach[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35(2): 79 - 94.
- [20] HAO H, MA G W, ZHOU Y X. Numerical simulation of underground explosion[J]. **International Journal of Blasting and Fragmentation**, 1998, 2(5): 383 - 395.
- [21] HAO H, WU C Q. Scaled-distance relationship for chamber blast accident in underground storage of explosives[J]. **International Journal of Blasting and Fragmentation**, 2001, 5(1/2): 57 - 90.
- [22] THORNE B J, HOMMERT P J, BROWN B. Experimental and computational investigation of the fundamental mechanisms of cratering[C]//Proceedings of 3rd International Symposium on Fragment by Blasting. Brisbane: [s.n.], 1990: 117—124.
- [23] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in three dimensions(version 3.0)[M]//User Smanual. [S.l.]: Itasca Consulting Group, 2003.