

隧洞开挖过程初始地应力动态卸载效应研究

严 鹏^{1, 2}, 卢文波², 陈 明², 周创兵²

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 采用理论计算、数值模拟和工程实测资料验证相结合的方法分析了圆形隧洞钻爆开挖时开挖边界上初始应力场动态卸荷效应, 并计算了其破坏范围。计算结果表明在高地应力条件下进行爆破开挖时, 初始应力动态卸荷在岩体中所产生的损伤范围比准静态卸荷所产生的损伤范围要大; 侧压力系数 λ 和极角 θ 是影响初始应力动态卸载应力场的两个主要因素; 在一定的卸载速率条件下, 侧压力系数 λ 越大, 动态卸载效应越显著, 其所产生的损伤范围也相应较大。工程实例证明了该结论的合理性。

关键词: 钻爆开挖; 初始应力; 动态卸载; 准静态卸载; 损伤范围

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)12-1888-07

作者简介: 严 鹏 (1981 -), 男, 湖北天门人, 博士后, 从事水电施工技术与岩石动力学研究。E-mail: yansd034@yahoo.com.cn。

Effect of initial geo-stress dynamic unloading during tunnel excavation

YAN Peng^{1, 2}, LU Wen-bo², CHEN Ming², ZHOU Chuang-bing²

(1. East China Investigation and Design Institution, CHECC, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and

Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Effect of the initial geo-stress unloading on the circular tunnel boundary is studied, and the damage area is calculated by use of combined method of theoretical analysis, numerical simulation by Dynamic FEM and verification with field monitoring vibration data. The results indicate that the damage area induced by the dynamic unloading is larger than that induced by the static unloading during blasting excavation. The main factors, which affect the dynamic stress of unloading, are side-face stress coefficient λ and angle θ . The larger the λ is, the more remarkable the unloading effect is, and the damage area is much bigger under given unloading rate. The results of theoretical analysis are validated by the monitoring damage data.

Key words: drilling and blasting; initial geo-stress; dynamic unloading; quasi-static unloading; damage area

0 引 言

近年来在实施“西部大开发”和“西电东送”的战略的背景下, 正在兴建或待建的包括小湾、溪洛渡、瀑布沟、拉西瓦、锦屏等一大批大型水电工程均涉及高地应力条件下大规模的坝基、高边坡和地下洞室群的岩石爆破开挖工作, 面临严峻的大型岩体的卸载松弛及变形控制难题。一般认为, 开挖引起的卸荷松弛(应力重分配)过程会持续一段较长的时间, 主要取决于岩性和岩体的结构特性, 属于准静态卸荷的问题^[1]。但理论分析和现场爆破高速摄影资料均表明: 在爆破破岩过程中, 被爆岩体从母岩上脱离并发生抛掷运动的时间约为数毫秒至几百毫秒量级, 因此岩体原始应力场的开挖卸载是一实实在在的动态过程。

早在1966年, 库克(Cook)等^[2]就指出: 作用荷载的突然释放可能导致岩石的超松弛, 在介质中产生拉应力; 爱迪尔(J N Edl Jr)^[3]分析了理想化岩柱在柱端

恒压突然卸除时的反应; 卢文波^[4]分析了节理岩体中的初始应力动态卸荷效应, 认为岩体初始应力场的瞬态卸载理论能较好解释不同结构面条件下岩体开挖过程的动态松动机理; 易长平^[5]通过数值模拟计算比较了爆破荷载和岩体初始应力动态卸荷对岩体的动态影响, 其结果表明, 开挖轮廓面上的平均爆破荷载和地应力处于同一个量级, 初始地应力动态卸除对围岩的动态影响不容忽视。

任建喜等^[6]、谢红强等^[7]、尤明庆等^[8]分别完成了岩石卸荷损伤断裂破坏全过程试验, 得到了卸荷条件

基金项目: 中国博士后科学基金项目(200904501317); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目(50639100); 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(50725931); 国家自然科学基金面上项目(50779050); 湖北省自然科学基金杰出青年人才项目(2007ABB026)

收稿日期: 2008-09-03

下岩石损伤扩展的初步规律和卸荷岩体的强度特性。张正宇等^[9]在东风水电站地下厂房的爆破试验结果表明岩体初始应力瞬态卸荷对围岩影响甚至大于爆破荷载作用对围岩的影响。可见,明确开挖引起的初始应力瞬态卸荷的作用,在岩石高边坡和地下工程围岩的稳定性安全评价过程中,具有重要的意义。

室内试验的卸载速率往往较低,不能正确地模拟爆破破岩过程中新生成自由面上的瞬态卸荷情况^[10],本文采用理论计算和数值模拟相结合方法分析了深埋圆形隧洞钻爆开挖时初始应力场的动态卸荷效应,计算了不同侧压力条件下初始应力动态卸荷过程在岩体中所造成的损伤范围,并与准静态卸荷情况进行对比。

需要指出的是,本文先暂不考虑开挖边界上爆破荷载和初始应力动态卸载的耦合作用,仅仅考虑初始地应力的动态卸除。有关爆破荷载和初始应力动态卸载的耦合作用的效应将在另文中进行阐述。

1 初始地应力动态卸载应力场计算

1.1 动态卸载力学模型

在无限山体深部开挖一条足够长的圆形隧洞,忽略轴向应力的影响,取平面应变模型,如图 1(a)所示。假设隧洞截面较小($D < 10$ m),一次爆破开挖成型。对于大断面的洞室,为了简便起见,仅考虑直孔掏槽爆破的情况。

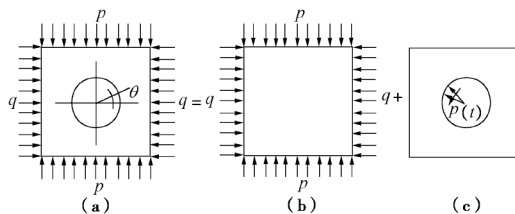


图 1 圆形隧洞开挖过程力学模型

Fig. 1 Mechanical model of circular tunnel during excavation

由于暂不考虑爆破荷载的影响,可以认为在整个开挖过程中岩体处于线弹性范围内,则开挖过程(a)可以分解为初始静应力场(b)和开挖过程所激起的动态应力场(开挖荷载)(c)二者的叠加^[11]。

初始静应力场(b)可以简单地由弹性力学解得到,于是开挖荷载 $p(t)$ 所引起的动态应力场和位移场的求解成为解决整个问题的关键。 $p(t)$ 在 $t=0$ 时刻等于初始地应力,开挖完成时刻 $t=t_0$ 时 $p(t)=0$ 。

进一步假设开挖过程中,开挖边界上的地应力以直线方式卸载。如图 2 曲线①所示,当开挖边界上的炮孔起爆时,隧洞壁面上的径向应力和切向应力在很短的时间 t_0 内变为零。

参照图 1,图 2 中的应力过程①可以分解为初始静应力过程②和动态拉应力过程③的叠加。

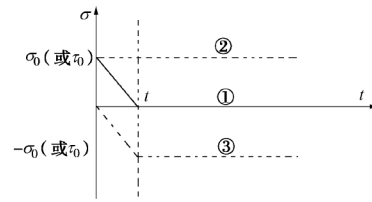


图 2 动态卸荷应力状态等效图

Fig. 2 Equivalent image of initial stress dynamic unloading

1.2 初始应立场的求解

以计算区域中心点为柱坐标系圆心,图 1(a)的应力状态可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_r}{p} &= \left[(1+\lambda)(1-\alpha^2) - (1-\lambda)(1-4\alpha^2+3\alpha^4)\cos(2\theta) \right] / 2, \\ \frac{\sigma_\theta}{p} &= \left[(1+\lambda)(1-\alpha^2) + (1-\lambda)(1+3\alpha^4)\cos(2\theta) \right] / 2, \\ \frac{\tau_{r\theta}}{p} &= (1-\lambda)(1+2\alpha^2-3\alpha^4)\sin(2\theta) / 2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, λ 为侧压力系数, $\lambda = q/p$; $\alpha = a/r$, a 为所开挖的隧洞的半径, r 为考察点距隧洞中心直线距离。

当 $a=0$ 时, $\alpha = a/r = 0$, 此时 (1) 式退化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_r}{p} &= \left[(1+\lambda) - (1-\lambda)\cos(2\theta) \right] / 2, \\ \frac{\sigma_\theta}{p} &= \left[(1+\lambda) + (1-\lambda)\cos(2\theta) \right] / 2, \\ \frac{\tau_{r\theta}}{p} &= (1-\lambda)\sin(2\theta) / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

即为图 1(b) 所示的初始应力状态。

1.3 卸荷时间的确定

爆破开挖过程中,新生成自由面由施工设计的轮廓面确定,当轮廓面上的炮孔起爆,炮孔内爆轰压力和爆生气体压力大于岩石的抗压强度时,在炮孔周围将产生裂纹,随着裂纹的发展并与邻孔产生的裂纹贯通,形成新的自由面,在这一过程中,轮廓面处围岩的径向地应力和剪应力瞬间变为 0,即初始地应力动态卸荷完成,如图 3 所示。

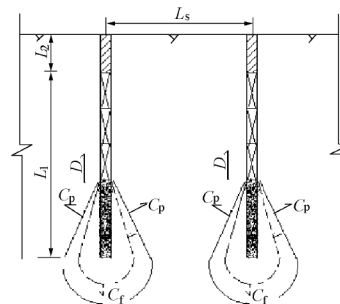


图 3 两相邻炮孔间裂纹扩展示意图

Fig. 3 Cracking between two adjacent boreholes

图 3 中所示两炮孔间距为 L_s , 炮孔装药段长度 L_1 , 堵塞段长度为 L_2 , D 为炸药的爆轰速度, C_p 为岩体中传播的弹性纵波的波速, C_f 为爆生气体驱动裂纹扩展的速度。

新自由面的形成时间, 就是爆破裂纹沿炮孔轴线贯通的时间, 即地应力的卸载时间, 因此地应力动态卸载时间的大小与炮孔的孔深度有关。

根据文献[12]的结论, 取爆生气体驱动裂纹稳定扩展的速度

$$v_s = 0.25C_p \quad (3)$$

根据上式, 对装药段长度 L_1 的相邻炮, 爆破开挖时岩体中初始应力动态卸载的时间为

$$t_0 = \frac{L_1}{C_f} = \frac{L_1}{0.25C_p} \quad (4)$$

若取隧洞开挖的进尺微 3 m, 装药段长度 2.5 m, 岩体的纵波速度 4500 m/s, 则根据 (4) 式, 爆破开挖时的卸载时间为 2.5 ms, 在掏槽爆破时卸载时间将更短。本文在计算时取卸载时间 $t_0 = 2$ ms。

1.4 开挖荷载的求解

爆区的竖直向地应力为 p , 水平向地应力为 $q = \lambda p$, λ 为侧压力系数。赵德安等^[13]给出了我国大陆地区平均水平地应力与垂直地应力的比值 ($\sigma_{h,av}/\sigma_v$) 随埋深的统计分布规律, 如图 4 所示。

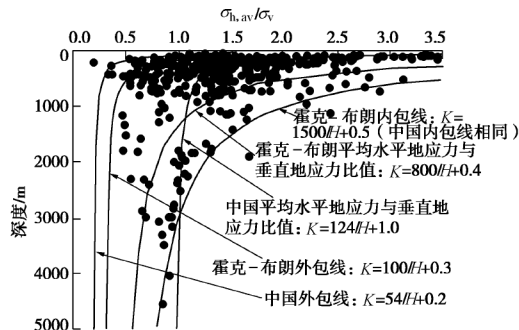


图 4 中国大陆地区 $\sigma_{h,av}/\sigma_v$ 随埋深的关系^[13]

Fig.4 Relationship between $\sigma_{h,av}/\sigma_v$ and depth in Chinese mainland^[13]

图 4 中 $\sigma_{h,av}$ 为平均水平地应力, 即

$$\sigma_{h,av} = (\sigma_H + \sigma_h)/2 \quad (5)$$

σ_H , σ_h 分别为最大和最小水平主应力, σ_v 为垂直应力, H 为埋深。

从图 4 中可以看到, λ 值绝大部分落在 1~3 之间, 因此本文将讨论 $\lambda=1$ 时的静水地应力场和 $\lambda=2, 3$ 时的非均匀地应力场两种情况下的地应力动态卸载对围岩的影响。

当侧压力系数 $\lambda=1$ 时, 隧洞开挖边界上 $\sigma_r = \sigma_\theta = p = q$, $\tau_{r\theta} = 0$, 整个开挖区域处于静水应力状

态中, 这意味着在隧洞开挖时只有径向应力 σ_r 卸载。

这样, 实际钻孔爆破过程中, 初始应力动态卸载的问题归结为如下的柱腔激发问题:

处于初始无应力状态的无限弹性介质(各向同性)中的柱形空腔, $t=0$ 时, 有一随时间变化的径向作用力 $p(t)$ 作用在腔壁上。设柱腔半径为 a_0 , 规定压力为正, 拉力为负, 考虑平面应变的情况, 在柱坐标系下, 该问题中弹性波的控制方程和初、边值条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} &= \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \sigma_r(r, t) &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{u}{r}, \\ \sigma_\theta(r, t) &= \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2\mu) \frac{u}{r}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$u(r, t) = \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} = 0; \quad (r \geq a, t < 0) \quad (7)$$

$$[\sigma_r(r, t)]_{r=a} = \begin{cases} 0 & (t \leq 0), \\ -\frac{\sigma_0 t}{k} & (0 < t \leq t_0), \\ -\sigma_0 & (t \geq t_0), \end{cases} \quad (8a)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [u(r, t)] = 0 \quad (t > 0) \quad (8b)$$

以上诸式中, $u(r, t)$ 为介质质点径向位移 (m); r 为介质质点距球腔中心的距离 (m); a 为即将开挖的隧洞的半径 (m); σ_r , σ_θ 分别为卸载柱面波在介质中引起的径向应力、切向应力 (Pa); λ , μ 为拉梅常数; C_p 为介质的弹性纵波波速 (m/s), $C_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, ρ 为介质密度 (kg/m^3)。

式 (8a) 中 $\sigma_0 = p$ 表示初始应力, t_0 表示卸载时间, 此式是隧洞开挖过程中隧洞洞壁上应力减去初始应力后的值。将使用该条件得出的解迭加上式 (1) 所表示的初始静力解就得到该动态卸载问题的解^[11]。

若侧压力系数 $\lambda \neq 1$ ($\lambda=2, 3$), 则隧洞开挖时, 轮廓面上的径向应力和剪应力同时卸载, 而且轮廓面上各点的径向应力和剪应力均随极角 θ 的变化而变化。这种情况下, 需要借助 ANSYS/LS-DYNA 进行求解, 其有限元计算模型见图 5。

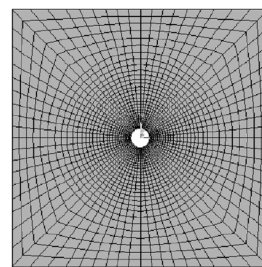


图 5 $\lambda \neq 1$ 时的有限元计算模型

Fig.5 Finite element model when $\lambda \neq 1$

利用有限元方法进行计算时, 利用式 (2) 求得即

将开挖的隧洞轮廓面上的初始应力, 然后反向施加于模型内表面。模型四周采用无反射边界模拟无限岩体。

2 计算结果分析

计算参数选取如下: 岩石的弹性模量 $E = 47.2$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.23$, 密度 $\rho = 2700$ kg/m³, 纵波波速 $C_p = 4500$ m/s。

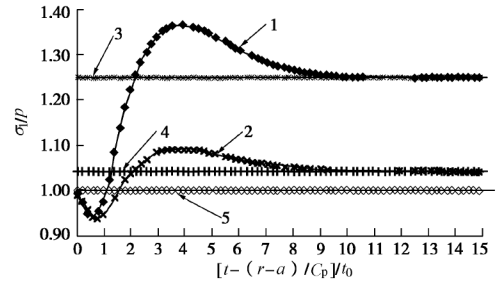
2.1 初始地应力动态卸载应力场

当侧压力系数 $\lambda = 1$ 时, 开挖区域处于静水应力状态下, 爆破开挖时隧洞轮廓线上剪应力为零, 仅有径向应力卸载, 且径向应力在轮廓线上处处相等, 与极角 θ 无关。本文利用 Laplace 积分变换和围道积分反演方法求解式 (6) ~ (8), 得到了问题的解。

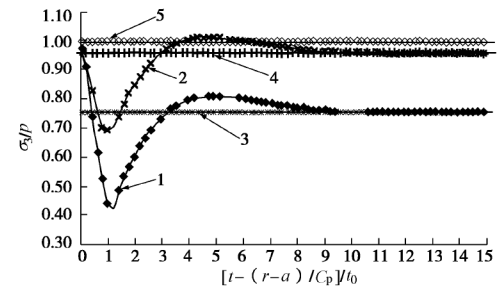
图 6 给出了隧洞半径 $a = 1$ m, 卸荷时间 $t_0 = 2$ ms 时, 周围岩体中 2 倍和 5 倍洞径处第一、第三主应力的时程曲线。其中 1、3 和 2、4 分别表示 $r = 2a$ 和 $r = 5a$ 处的动态卸荷解、准静态卸荷解, 5 表示初始应力。准静态卸荷解, 即图 1 (a) 所示的应力状态, 可以由弹性力学解式 (2) 得到。

图 6 表明, 爆破开挖时初始地应力动态卸载效应是显著的。卸载扰动以声速 C_p 在岩体中传播^[8], 当卸载波的波阵面到达时, 岩体原有的平衡应力状态被打破, 引起强烈的应力分异现象。隧洞 σ_1 、 σ_3 都是先减小后增大, 最后均稳定于准静态卸荷应力值。在这个动态扰动过程中, 动应力在第一主应力方向出现动应

力集中, 表现为加载, 在第三主应力方向表现为卸荷回弹。



(a) 第一主应力 σ_1 (切向应力)



(b) 第三主应力 σ_3 (径向应力)

图 6 $\lambda = 1$ 时初始应力动态卸载

Fig. 6 Stress of dynamic unloading when $\lambda = 1$

图 7 给出了几种不同的侧压力条件下 2 倍洞径边界上 0° , 45° 和 90° 处的动态应力时程曲线。

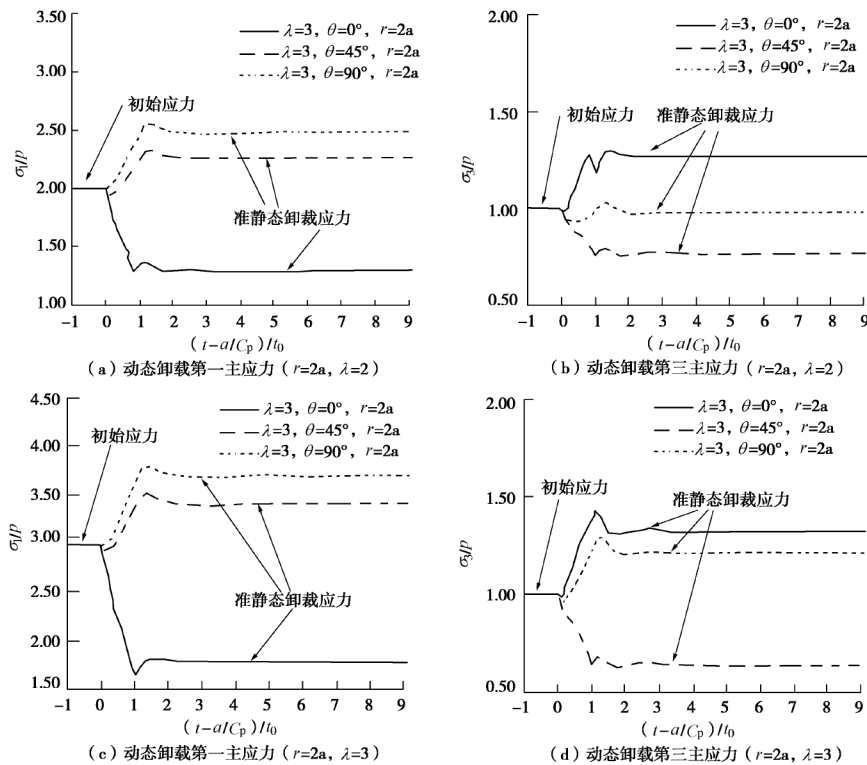


图 7 不同侧压力条件下初始应力动态卸载

Fig. 7 Stress of initial stress dynamic unloading under different λ

从图 7 可以看出,在各种侧压力条件和极角 θ 下,动态扰动过后,二次应力场都稳定于准静态卸载值。在非均匀应力场中爆破开挖时,开挖边界上的初始地应力高速卸载所产生的动态扰动引起周围岩体中地应力的剧烈调整,地应力的二次分布是一个动态过程。

2.2 初始地应力动态卸载的损伤范围

考虑到实际工程岩体中存在大量的微裂纹以及卸荷过程岩体的脆性破坏现象,选用 Griffith 强度准则作为初始应力动态卸荷破坏准则。该理论认为,微裂纹的周围,特别是缝端,会产生应力集中现象,造成裂缝扩展,引起岩体的脆性破坏。但是该准则只反映了岩石发生脆性破坏的起始状况,不能反映岩石破坏的整个过程^[14],所以本文的计算结果只是动态卸荷在岩体中所造成的损伤的范围,即裂纹产生的范围。

规定应力以压为正,以拉为负, σ_t 表示抗拉强度, Griffith 强度理论的破坏准则为

$$\begin{cases} (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) - 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) = 0 & (\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0), \\ \sigma_3 = -\sigma_t & (\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0). \end{cases} \quad (9)$$

在本文的计算条件下, $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$, 且 Griffith 强度准则可以简化为 $k = (\sigma_1 - \sigma_3)/(8\sigma_t)$ 。若 $k \geq 1$, 则认为卸荷扰动在此处的岩体中产生了损伤。

文献[7~8, 15]通过岩体加、卸荷试验证实:同类型的岩体在相同的主差应力作用下,卸荷破坏的强度比加荷的更低,因此计算中岩体动抗拉强度 σ_t 参照静态抗拉强度取值。这里取 $\sigma_t = 2.5$ MPa, 图 8 给出了侧压力系数 $\lambda = 1$ 时 k 值随距离衰减的规律。

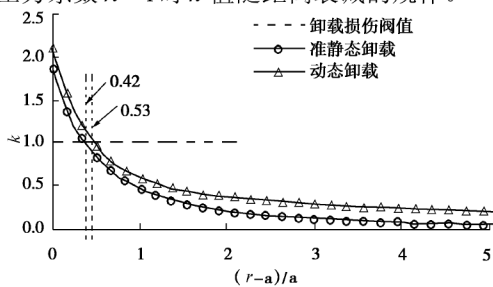


图 8 准静态、动态卸载条件的 k 值

Fig. 8 k under static unloading and dynamic unloading

图 8 表明,初始地应力动态卸载和准静态卸载时, k 值随距离的衰减规律基本相同,但前者的 k 值要明显大于后者的 k 值,因此在地应力条件下爆破开挖时,初始地应力的动态卸载影响时不能忽略的。

图 9 给出了各种侧压力系数条件下初始地应力动态卸载和准静态卸载情况下隧洞围岩的损伤情况,具体数值见表 1。图中 1、2 分别为准静态、动态卸载情况下圆形洞室周围损伤范围, D_1 、 D_2 分别表示二者的损伤半径。

从图 9 可以看出,初始应力动态卸荷在岩体中所产

生的损伤范围比准静态卸荷所产生的损伤范围要大,具体数值见表 1。

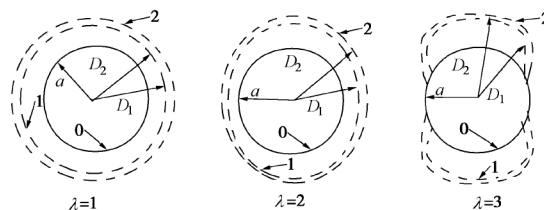


图 9 准静态、动态卸载情况下圆形洞室周围损伤范围

Fig. 9 Damage area of static unloading and dynamic unloading of circular tunnel

表 1 准静态、动态卸载情况下圆形洞室周围损伤范围

Table 1 Damage area of static unloading and dynamic unloading of circular tunnel

$\theta / (^{\circ})$	$\lambda = 1.0$		$\lambda = 2.0$		$\lambda = 3.0$	
	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$
	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$	$\frac{D_2}{a}$	$\frac{D_1}{a}$
0	1.53	1.42	1.34	1.23	1.00	1.00
15	1.53	1.42	1.36	1.25	1.00	1.00
30	1.53	1.42	1.41	1.30	1.20	1.00
45	1.53	1.42	1.46	1.36	1.48	1.38
60	1.53	1.42	1.52	1.42	1.61	1.52
75	1.53	1.42	1.55	1.45	1.62	1.53
90	1.53	1.42	1.55	1.45	1.61	1.52

在相同的卸载速率条件下,侧压力系数 λ 越大,动态卸载效应越显著,其所产生的损伤范围相应较大。

以上的计算结果充分说明,在地应力条件下,隧洞开挖过程中,初始地应力动态卸载效应不应该被忽略,动态卸载过程对围岩的影响要大于准静态卸载过程,初始地应力的动态卸载效应应该得到重视。

3 工程实例

国内某大型水电工程四条引水隧洞平行布置,平均长约 16.67 km,洞断面为圆形,开挖洞径 12.4~13 m,衬砌后洞径 11.8 m。上覆岩体一般埋深 1500~2000 m,最大埋深约为 2525 m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点。引水隧洞采用钻爆法施工过程中,为确保围岩稳定,评价围岩质量,确定松弛深度,同时为洞室围岩稳定性分析和围岩加固支护动态设计提供依据,对洞壁围岩进行了声波检测,如图 10、11 所示。检测过程中围岩松弛深度 = (1 - 松弛岩体平均波速/原岩平均波速) × 100%。

根据引水隧洞工程地质剖面图,图 10、11 给出的引水隧洞洞段都在 T2Z 地层中,岩性为灰白色、花状杂骨脑组大理岩,单轴抗压强度约为 85 MPa,湿抗压强度 82 MPa。实测地应力成果表明,工程区地应力随埋深增加而增大,实测最大主应力值达 46.14 MPa。根据实测地应力进行三维初始地应力场反演回归分析,最大埋深 2525 m 处第一主应力反演值高达 70 MPa,具体如图 12 所示(根据需要,只给出了 0+200~

2+000 桩号之间的情况)。

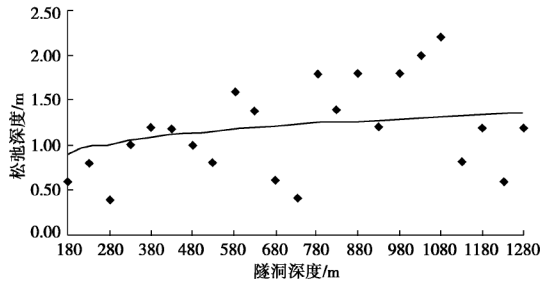


图 10 #1 引水隧洞桩号 0+130~1+280 洞壁岩体松弛深度

Fig. 10 Damage area of #1 inlet-tunnel (0+130~1+280)

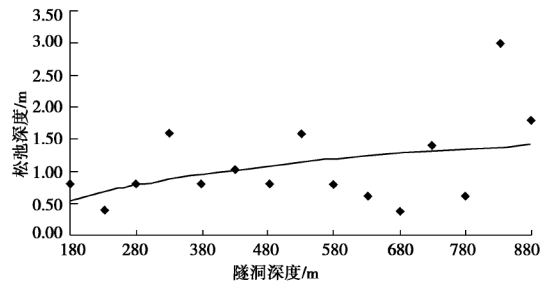


图 11 #2 引水隧洞桩号 0+180~0+880 洞壁岩体松弛深度

Fig. 11 Damage area of #2 inlet-tunnel (0+180~0+880)

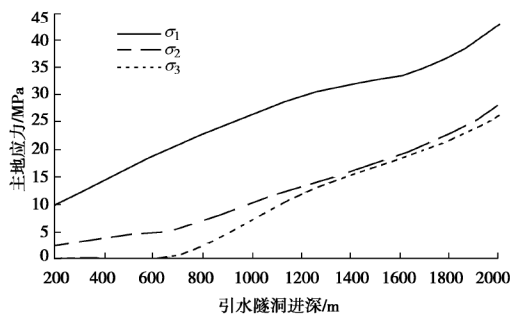


图 12 引水隧洞沿轴线地应力分布

Fig. 12 Geo-stress along inlet tunnel axis

由于#1、#2 引水隧洞采用了相同的开挖方式(钻爆开挖),所采用的钻爆设计、开挖程序均相同,火工产品也是同一厂家生产的,且开挖区域的岩性较为均一,因此,基本可以认为整个检测段爆炸荷载对围岩的损伤是相同的,但检测结果表明(对比图 10、11 和图 12),随着引水隧洞埋深的增加,围岩开挖松动范围随着地应力的增加而增加,这充分说明了高地应力条件下隧洞钻爆开挖过程中地应力动态卸载对围岩松弛的影响,证实了本文的计算结论。

加拿大的 URL 所进行的不同地应力条件下圆形洞室爆破开挖损伤对比试验也得到了类似的结论,试验结果如图 13 所示^[16]。

图 13 中 TSX 表示地应力较高的隧洞, BDA 表示地应力较低的隧洞,两条隧洞洞径相同、岩性相同,均采用钻爆法全断面开挖,炮孔深度、装药结构和炸药类型等也都相同。试验结果表明,在存在初始地应力的条件下,钻爆法开挖的隧洞的损伤区大致可以分

为内、外两个区域,如图 13 所示,两条隧洞的内损伤区相近,表示这一损伤区主要由爆炸冲击荷载产生,而 TSX 隧洞的外损伤区明显要大于 BDA 隧洞的外损伤区,表明这一区域主要由爆破开挖过程中地应力的调整高速和释放引起,初始地应力值越大,地应力重分布所引起的损伤越大。

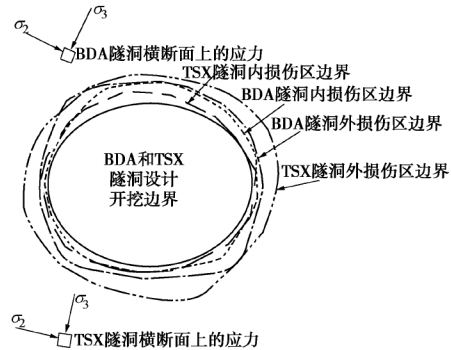


图 13 不同地应力水平下圆形洞室钻爆开挖损伤对比^[16]

Fig. 13 Comparison of extent of damage zones around circular tunnel under different stress levels (URL)^[16]

因此,地应力动态卸载所引起的开挖松动是围岩总体开挖松动区的重要组成部分。

4 结 论

(1) 在地应力条件下进行爆破开挖时,初始应力动态卸荷效应不应被忽视。

(2) 侧压力系数 λ 和极角 θ 对初始应力动态卸荷应力场都有一定的影响。在平面应变状态下,第一、三主应力随着 λ 和 θ 的变化在卸荷回弹和动力集中两种变化规律之间相互转换。

(3) 初始应力动态卸荷在岩体中所产生的损伤范围比准静态卸荷所产生的损伤范围要大。在相同的卸载速率条件下,侧压力系数 λ 越大,动态卸载效应越显著,其所产生的损伤范围也相应较大。

(4) 实测工程资料证明了本文计算结果的正确性和合理性。

(5) 在实际爆破开挖的过程中,还需要进一步研究初始应力动态卸荷和爆炸荷载动态卸荷的耦合关系,以及裂纹在初始应力动态卸荷应力场作用下的扩展、建立合理的动态卸荷模型,这是今后的研究方向。

致 谢: 感谢华东勘测设计研究院施工所教授级高工周垂一和江金章对本文提出的宝贵意见!

参考文献:

- [1] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (LI Jian-lin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press 2003. (in Chinese))

- [2] COOK M A, COOK U D, CLAY R B, et al. Behavior of Rock during blasting[J]. Trans Soci Min Engrs, 1966, **10**(2): 17 - 25.
- [3] EDL J N Jr. 应力波在爆炸引起的岩石膨胀移动过程中的作用[C]// 第一届爆破破岩国际会议论文集, 长沙, 1985: 32 - 40. (EDL J N Jr. The action of stress wave in moving of rock expanding induced by blasting[C]// Proceedings of the First International Conference of Blasting in Rock, Changsha, 1985: 32 - 40. (in Chinese));
- [4] 卢文波, 金 李, 陈 明. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 4653 - 4657. (LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming. Study on the mechanism of the loosening of the jointed rock mass caused by the dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 4653 - 4657. (in Chinese))
- [5] 易长平, 许红涛, 卢文波. 大型岩体结构开挖过程中初始应立场动态卸荷效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 4750 - 4754. (YI Chang-ping, XU Hong-tao, LU Wen-bo. The dynamic unloading effect study of initial stress field in excavation process of large-scale rock mass structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 4750 - 4754. (in Chinese))
- [6] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬, 等. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(6): 697 - 701. (REN Jian-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 697 - 701. (in Chinese))
- [7] 谢红强, 何江达, 徐 进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(3): 336 - 338. (XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, XU Jin. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2003, **25**(3): 336 - 338. (in Chinese))
- [8] 尤明庆, 苏承东, 徐 涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 588 - 592. (YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, XU Tao. Loading or unloading process in axial direction and Young's modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2001, **23**(5): 588 - 592. (in Chinese));
- [9] 张正宇, 刘 颖, 张文煊. 东风水电站地下厂房爆破振动效应的研究[C]// 工程爆破文集(第五辑), 1993: 299 - 305. (ZHANG Zheng-yu, LIU Ying, ZHANG Weng-xuan. Study on blasting vibration effect of underground powerhouse of Dongfeng Power Station[C]// Proceedings of the 5th Conference of Engineering Blasting, 1993: 299 - 305. (in Chinese))
- [10] 李建林, 熊俊华, 杨学堂. 岩体卸荷力学特性的试验研究[J]. 水利水电技术, 2001, **32**(5): 48 - 51. (LI Jian-lin, XIONG Jun-hua, YANG Xue-tang. The experimental study on the Mechanics of unloading rock[J]. Hydraulic and Hydropower Mechanics, 2001, **32**(5): 48 - 51. (in Chinese))
- [11] MIKLOWITZ J. Plane-stress unloading waves emanating from a suddenly punched hole in a stretched elastic plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, **27**: 165 - 171.
- [12] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, **14**(7). (LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. A study of fracture propagation driven by gases of explosion products[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, **14**(7). (in Chinese))
- [13] 赵德安, 陈志敏, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1266 - 1272. (ZHAO De-an, CHEN Zhi-ming, et al. The statistical analysis to the distribution of the geo-stress in the continental area of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1266 - 1272. (in Chinese))
- [14] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1921, (Series A)**221**: 163 - 198.
- [15] 吴 刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, **9**(2): 174 - 181. (WU Gang. The present and expectation of the study to mechanism of engineering rock broke unloading[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, **9**(2): 174 - 181. (in Chinese))
- [16] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Engineering Sciences, 2004, **41**: 1413 - 1426.