

文章编号: 1001-1455(2008)04-0355-05

边坡预裂爆破参数优化研究^{*}

许名标^{1,2}, 彭德红²

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 义乌工商学院土木工程系, 浙江 义乌 322000)

摘要: 边坡工程施工中常用到预裂爆破, 预裂爆破参数对爆破降震起着非常重要的作用。通过大量的预裂爆破试验, 得出了适用于该边坡的炮孔直径、炮孔间距、线装药密度、不耦合系数等一系列常规预裂爆破参数。通过 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟, 得出了与 4 种炮孔直径对应的理想的预裂爆破参数, 且与爆破试验的结果基本一致。通过回归分析, 得出了用于该边坡选取预裂爆破参数的简易公式, 用以指导该工程的后续施工。实践证明, 采用爆破试验与数值模拟相结合的方法, 对于爆破参数的优化选择, 效果明显。

关键词: 爆炸力学; 预裂爆破参数; 数值模拟; 爆破试验; 回归分析

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引 言

岩质边坡开挖施工过程中无疑要用到爆破技术, 爆破对边坡稳定性的影响与爆炸能量、爆破地震波传播形式和边坡的性质有关, 来自边坡施工开挖爆破所产生的地震效应, 对岩质边坡稳定性的影响是极其复杂的岩体工程地质力学问题, 作为一种影响边坡稳定的外部因素, 越来越受到关注, 如何将爆破震动降到最低, 而又不影响施工质量, 是亟待解决的重要问题。

为了降低爆破震动, 施工中常采用预裂爆破。预裂爆破是沿预定的爆破边界按一定的间距布置一排预裂爆破钻孔, 在钻孔中装较少量的不耦合药包, 在主爆孔起爆之前先起爆预裂孔, 使炸药爆炸的冲击波到达预裂面时被折射、扩散、扰动和吸收, 破坏能力大大削弱, 从而可以避免或大为降低主爆孔爆破对预裂面以外岩体的松动和破坏, 提高边坡的稳定性。因此, 对预裂爆破参数的优化研究具有一定的实际意义。

在本文中, 通过大量的预裂爆破试验及数值模拟, 以得出适合于某工程边坡的预裂爆破参数。

2 预裂爆破试验

根据岩土工程勘察报告, 该边坡岩体主要为夹有少量片岩的致密黑云花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩, 用于预裂爆破 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟的具体参数见表 1。

表 1 边坡岩体数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters of a slope rock

密度	动抗压强度	动抗拉强度	动弹性模量	泊松比	内摩擦角	临界能量释放率
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	σ_p/MPa	σ_t/MPa	E/GPa	μ	$\varphi/(^{\circ})$	$/(\text{kg}/\text{m})$
2 680	120	7.2	62.8	0.25	47	30

2.1 炮孔直径

为了适应不同性质及结构的岩体, 一般采用较小直径 D 的预裂孔。施工现场, 根据实际钻机决定孔径和开挖深度。当开挖深度小于 4 m 时, D 取 38~45 mm; 大于 4 m 时, D 取 60~130 mm, 最大不超过 150 mm。

* 收稿日期: 2007-02-12; 修回日期: 2007-05-20

作者简介: 许名标(1978—), 男, 硕士, 讲师。

2.2 炮孔间距^[1-2]

在预裂爆破中,炮孔间距 a 的大小直接影响预裂缝的宽度和坡面的平整度,是保证形成贯通裂缝的主要参数。根据经验:中硬以上岩体, $a=(8\sim12)D$;软弱岩层 $a=(6\sim8)D$ 。当 $D\leq 60\text{ mm}$ 时, $a=(9\sim14)D$,软岩取小值,硬岩取大值。该边坡岩体相对较硬,试验时依据上述经验值,并结合钻孔深度、钻孔误差及其他一些情况及时做出调整。

2.3 线装药密度 ρ_l

炮孔装药结构上要尽可能使药卷和炸药能量分布均匀,预裂爆破应采用底部连续、中段和上部间隔的装药形式。先将药卷按照设计的规格、数量和间隔距离绑扎在导爆索上,构成药串,再通过导爆索引爆。为了克服孔底的夹制作用,确保裂缝到底,底部 $(1.5\sim2.0)a$ 高度范围内加强装药,线装药密度取 $(2.4\sim4)\rho_l$;孔口 $0.8\sim1.5\text{ m}$ 处不装药,进行堵塞;不装药段以下 $1\sim2\text{ m}$ 处(称为减弱段)岩层相对较软,为防止表层岩石抬开松动,线装药密度取 $(1/3\sim1/2)\rho_l$ 。

该预裂爆破试验中,线装药密度 ρ_l 首先采用文献[3]的计算公式 $\rho_l=0.36\sigma_{\text{压}}^{0.60}a^{0.67}$ 和长江水利委员会推荐的经验公式^[1] $\rho_l=0.83\sigma_{\text{压}}^{0.50}a^{0.60}$ 进行计算,然后再结合工程实际进行试验。表 2 为不同孔距所对应的线装药密度理论计算值与工程试验值的对比表,不难发现试验值与计算公式^[3]吻合较好。

2.4 装药不耦合系数

为减轻爆破对孔壁的冲击压力,不致使孔壁破坏,通常采用不耦合装药,不耦合系数 $\eta=D/D_0$ (D_0 为药卷直径)。该工程试验表明,所设计的线装药密度只有在采用的药卷满足径向不耦合系数 $\eta=1.5\sim4$ ($D<100\text{ mm}$ 时, η 取 $1.5\sim3$; $D>100\text{ mm}$ 时, η 取 $3\sim4$) 时,才能形成质量较好的预裂缝。表 3 为该边坡预裂爆破试验所采用的部分参数值,其爆破效果依据半孔率、微裂隙多少和边坡平整度模糊定性为较好或较差。

表 3 边坡部分预裂爆破试验参数

Table 3 Partial parameters of the slope pre-splitting blasting test

D/mm	a/mm	D_0/mm	η	$\rho_{l,e}/(\text{g}/\text{m})$	爆破效果
42	500	25	1.68	220	较好
42	600	32	1.31	300	较差
89	700	25	3.56	350	较差
89	800	32	2.78	500	较好
105	1000	25	4.20	400	较差
105	1000	32	3.28	550	较好
120	1200	25	4.80	450	较差
120	1200	35	3.43	600	较好
120	1500	35	3.43	700	较差

3 预裂爆破数值模拟

3.1 基本假设

近年来,有限元方法已成为解决流体弹塑性计算和爆炸数值模拟问题的一个重要手段。ANSYS/LS-DYNA 是 ANSYS 的一个非线性动力分析模块,由美国 ANSYS 公司和 LSTC 公司合作开发。在 ANSYS/LS-DYNA 中,ANSYS 仅为 LS-DYNA 提供前后处理功能,具体求解过程由 LS-DYNA 求解器来完成。后处理既可采用 ANSYS 的后处理器,也可采用 LS-DYNA 自带的 LSPOST 进行后处理。LS-DYNA 作为世界上最著名的通用显式动力分析程序,特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高

速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题,同时也可以求解传热、流体及流固耦合问题^[4-5]。

目前,岩体在动载作用下的破坏特征以及塑性特征的研究尚未上升到数学描述阶段,岩石在爆炸作用下的震动载荷作用特性还不是很清楚,为简化计算,在进行数值模拟时,采用 Mises 屈服和断裂条件,通过裂缝开裂图来直观的描述岩石材料的破坏,并做如下假设:(1) 岩石材料按弹塑性体考虑,不考虑岩石的损伤;(2) 炮孔均为垂直孔,不考虑倾斜的影响;(3) 爆炸压力在炮孔内沿孔壁均匀分布;(4) 采用径向不耦合装药,考虑空气对爆破效果的影响。

3.2 计算模型与破坏判据

首先建立实体模型,采用四边形自由网格划分技术划分网格,炸药和空气的网格共节点,并与岩石网格相对独立。由于该模型只是半无限岩体的一部分,出现了人为的边界,为了减少计算量和消除人为边界处的反射波对结构动力响应的影响,计算过程中将模型外围上、下、左、右 4 条边界线设定为非反射边界。图 1 为实体模型剖面网格划分图。

考虑到模型单元过多,计算过程要花费大量的时间,有时甚至导致计算无法顺利进行,故先不设置岩石失效命令 MAT-ADD-EROSION,根据第一强度理论即最大拉应力理论,通过应力等值线图来判断岩石的破坏情况。如果破坏成立,再次建立只需选取模型 Z 轴方向(炮孔延深方向)的“准二维”(沿孔深方向仅取 2 mm 厚度)实体模型,通过失效命令直接判断岩石破碎成缝效果^[6-7]。笔者分别针对 4 种炮孔直径($D=42、89、105、120\text{ mm}$)、通过改变炮孔间距 a 、药卷直径 D_0 ,建立了 4 组 40 个(每组 10 个)不同的计算模型。

3.3 结果分析

从爆炸冲击波传播过程不同时刻的云图可以看出,由于空气间隙的存在,炸药起爆瞬间,爆炸冲击波衰减明显,当冲击波作用到孔壁上后,随即在岩体内产生应力波,并主要向两炮孔中心连线方向传播。首先,裂纹在两个炮孔之间产生并有沿两炮孔中心连线方向传播的趋势;随着两炮孔间的应力波相遇,经叠加后继续向四周传播,裂纹继续扩展;最后,两炮孔中心连线间的裂纹贯通,形成平整的断裂面。

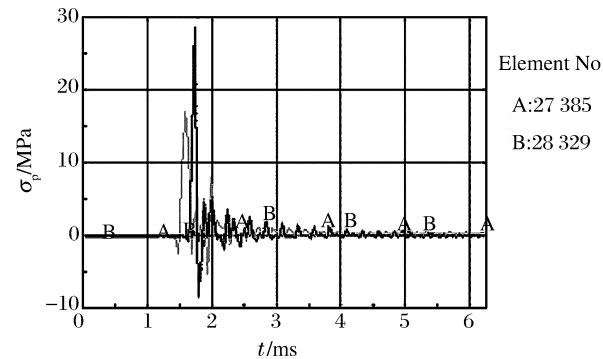


图 2 炮孔纵向中心线上两单元应力时程曲线

Fig. 2 Stress-time curves of two elements along the longitudinal center line of the gun hole

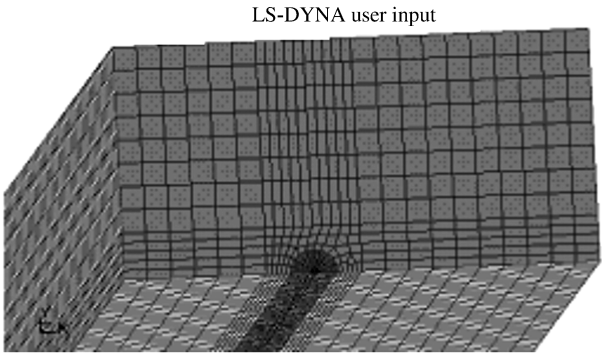


图 1 模型剖面网格划分图

Fig. 1 Grid meshing of the model profile

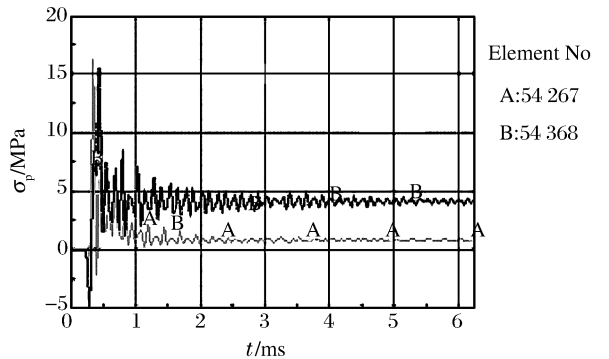


图 3 炮孔横向中心线上两单元应力时程曲线

Fig. 3 Stress-time curves of two element along the horizontal center line of the gun hole

在两炮孔间纵向中心线及横向中心连线上分别选取两单元,其应力时程曲线分别如图 2、3 所示。应力时程曲线显示,所选的 4 个单元的最大拉应力(分别为 15.3、16.0、17.4 和 28.1 MPa)均大于边坡岩体的动抗拉强度(7.2 MPa)。随着传播距离增大,爆炸冲击波衰减增多,根据第一强度理论即最大拉应力理论,可以认为两炮孔延深平面上任意单元都被拉坏,预裂孔中心连线上有裂缝产生,也就是说边

坡在此预裂爆破的作用下预裂缝形成并具有比较好的减震隔震效果。

对所建立的 40 个模型通过数值计算并分析发现,当有关参数选取如表 4 所示时,预裂缝贯通速度快、时间 t 短,中心连线外的其他部位微裂隙很少,断裂面平整,爆破效果相对理想。图 4 为与表 4 所示参数相对应的 4 种模型的预裂爆破效果图。从图表可知,对此边坡岩体(中硬以上),当开挖深度小于 4 m,炮孔直径 D 取 42 mm 时,炮孔间距 a 取 $11.9D$ 即 500 mm、药卷直径取 25 mm,预裂爆破效果理想。当开挖深度大于 4 m 时,炮孔直径 D 若取 89 mm,则炮孔间距 a 取 $9.0D$ 即 800 mm、药卷直径取 32 mm,预裂爆破效果理想;炮孔直径 D 若取 105 mm,则炮孔间距 a 取 $9.5D$ 即 1 000 mm、药卷直径取 32 mm,预裂爆破效果理想;炮孔直径 D 若取 120 mm,则炮孔间距 a 取 $10.0D$ 即 1200 mm、药卷直径取 35 mm,预裂爆破效果理想。其他情况,爆破效果相对较差。比较表 3、4 可知,数值模拟结果与爆破试验结果基本一致,说明由爆破试验所得到的预裂爆破参数是正确的。

通过对模拟结果回归分析可知,当炮孔直径 D 一定时,炮孔间距 a (mm)、线装药密度 ρ_1 (g/m)、不耦合系数 η 三者之间存在如下关系

$$a=0.215\eta+0.001\rho_1-0.083$$

该式显示,当炮孔直径 D 选定时,预裂爆破的炮孔间距 a 主要与不耦合系数 η 有关,而线装药密度 ρ_1 的影响相对较小;当线装药密度 ρ_1 一定时,在适当范围内增加不耦合系数 η ,炮孔间距 a 增大,这说明不耦合装药爆炸破岩,降低了爆轰产物及应力波作用于孔壁的初始压力,减少了孔壁的破坏,但延长了作用时间,使裂缝扩展时间增长,加大了裂缝扩展距离,即增加了孔间距 a 。

表 4 爆破效果理想的预裂爆破参数

Table 4 Pre-splitting blasting parameters for ideal blasting

模型编号	D/mm	a/mm	D_0/mm	η	$\rho_1/(\text{g/m})$	$t/\mu\text{s}$
1	42	500	25	1.68	220	145
2	89	800	32	2.78	500	200
3	105	1 000	32	3.28	550	250
4	120	1 200	35	3.43	600	345

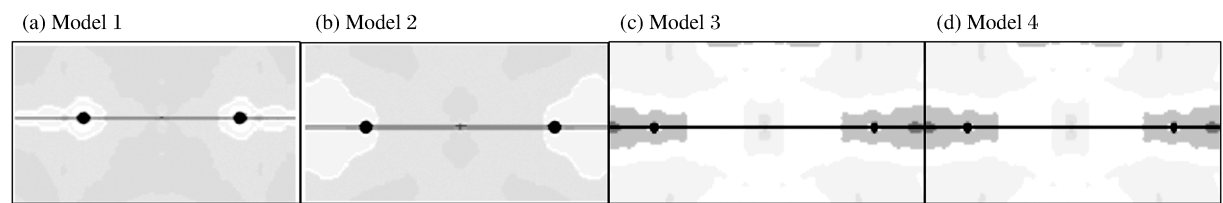


图 4 不同参数对应的模型预裂爆破效果

Fig. 4 Presplitting blasting effects of the different models with different parameters

4 结 论

- (1) 通过大量的爆破试验,得出了适合于该边坡的炮孔直径 D 、炮孔间距 a 、线装药密度 ρ_1 、不耦合系数 η 等一系列常规预裂爆破参数;
- (2) 通过 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟,得到了 4 种炮孔直径 D 对应的理想预裂爆破参数,与爆破试验结果基本一致。根据模拟结果,通过回归分析得出,当炮孔直径 D 一定时,炮孔间距 a 、线装药密度 ρ_1 、不耦合系数 η 之间存在一个简易公式,可用于指导该工程的后续施工,也为类似工程提供了参考;
- (3) 采用爆破试验与数值模拟相结合的方法得到的各个参数值,比单纯的爆破试验或数值模拟所得的结果更有说服力,对于该边坡爆破开挖更具有指导意义。实践证明,将数值模拟结果反馈到施工现场用以指导施工,再以施工效果进一步验证数值模拟的正确性,对于经验科学,非常重要;
- (4) 数值模拟采用了一些假设,这无疑削弱了模拟的准确性,尽管对指导工程实践具有一定的积极意义,但要使模拟的结果更精确就必须进一步减少假设,所建立的模型应尽量符合实际边坡岩体。

参考文献：

[1] 李彬峰. 预裂爆破参数设计及其在边坡工程中的应用分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2003, 55(2): 25-28.

[2] 李彬峰, 潘国斌. 光面爆破和预裂爆破参数研究[J]. 爆破, 1998, 15(2): 14-18.
LI Bin-feng, PAN Guo-bin. Studies on mechanism and parameters in the smooth and presplitting blasting[J]. Blasting, 1998, 15(2): 14-18.

[3] 刘建亮. 石方机械化施工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

[4] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[5] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 科学出版社, 2005.

[6] 许名标. 小湾水电站边坡开挖爆破震动动力响应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.

[7] 赵泉. 小湾水电站开挖中预裂爆破参数的优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

Parameter optimization of the slope pre-splitting blasting

XU Ming-biao^{*}, PENG De-hong

- (1. School of Civil Resources and Environmental, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;
2. Department of Civil Engineering, Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, Zhejiang, China)

Abstract: Pre-splitting blasting is often used in slope engineering construction, pre-splitting parameters have important effects on reducing blasting vibrations. Pre-splitting blasting experiments were carried out to obtain normal pre-splitting blasting parameters such as hole diameter, hole space, gun-powder charge line density, and uncoupling factor. Ideal pre-splitting blasting parameters for four different hole diameters gained by the code ANSYS/LS-DYNA agree with the blasting experiments. By regression analysis, a simple fomula was given to choose the pre-splitting blasting parameters and to guide the succedent construction. Practice shows that combination of blasting experiments and numerical simulations is helpful to optimize pre-splitting blasting parameters.

Key words: mechanics of explosion; blasting parameters of pre-splitting; numerical simulation; blasting experiment; regression analysis

^{*} Corresponding author: XU Ming-biao
E-mail address: xmb305@126.com
Telephone: 86-579-3803662