

文章编号: 1008-2786-(2010)2-141-06

# 爆破地震效应对坡体稳定性的影响

曹兴松<sup>1</sup>, 刘鸿雁<sup>2</sup>, 赵其华<sup>1</sup>, 刘世雄<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治国家专业实验室, 四川 成都 610059; 2. 重庆交通建设集团有限公司, 重庆 401147;

3. 重庆建工涪南高速公路有限公司 重庆 401122)

**摘要:** 天然边坡在开挖过程中, 由于爆破动力作用破坏了原岩的完整性, 造成边坡岩体发生局部或整体层裂而形成边坡岩体松动带, 使岩体的自稳能力降低(边坡抗滑力减小), 甚至可能导致路堑滑坡或坍塌。而目前在边坡设计中没有考虑由于开挖爆破地震效应对边坡稳定性的影响, 从而造成个别边坡在开挖过程中或施工完成后产生滑动。通过现场爆破地震效应试验, 根据应力波在岩体中的传播规律和运动规律, 得出岩体内质点振动加速度和不同部位岩体平均加速度对边坡稳定性的影响效果, 给出了水平和垂直方向振动加速度作用下边坡安全系数的计算公式, 并通过了实例验证, 从而为边坡稳定性设计提供了有力依据。

**关键词:** 边坡; 爆破地震效应; 稳定性分析

**中图分类号:** P642 TU457

**文献标识码:** A

天然边坡经人工开挖后, 打破了原有的力学平衡状态, 坡体内应力进行重新分布, 形成应力松弛区<sup>[1]</sup>。由于路堑开挖速度较快, 坡体内应力尚未完全释放, 因此存在潜在的破坏动力<sup>[2]</sup>。在路堑边坡开挖过程中, 由于爆破动力作用使滑动力增加, 很可能造成边坡岩体发生局部或整体层裂, 破坏原岩的完整性, 使岩体的自稳能力降低(边坡抗滑力减小), 甚至可能导致已形成的路堑滑坡或坍塌<sup>[3]</sup>。由于爆破作用形成边坡岩体松动带, 使地表及地下水易于渗入, 致使边坡岩体及层面力学强度降低, 这不仅影响施工的顺利进行, 而且使支挡防护施工难度增大, 工程费用增加<sup>[4]</sup>。而目前在边坡设计中没有考虑由于开挖爆破地震效应对边坡稳定性的影响, 从而造成个别边坡在开挖过程中或施工完成后产生滑动。因此, 必须对开挖爆破产生的地震效应加以严格控制, 从而降低以至消除爆破地震对路堑

边坡自稳能力的危害, 即在边坡稳定性计算时必须考虑由于爆破震动而造成层间抗剪强度参数的折减。本文作者根据现场工点爆破动力的适时监测数据进行统计分析, 由于爆破产生的地震效应和层裂效应致使边坡开挖的松动范围增大、深度增加, 爆破震动作用极大地削弱了边坡的自稳能力, 降低了边坡的安全系数。本文通过对坡体受力分析, 给出了在爆破震动作用下水平和垂直方向边坡安全系数的计算公式, 并通过了实例验证, 供设计人员参考。

## 1 爆破地震效应现场测试及数据分析

由于不同的爆破方式产生的地震效应不同, 相应的地震波传播特征也有差异, 因此, 分别选取某线路 K77+400~+620、K76+80~+120和 K75+410~+500三个工点进行了深孔、浅孔小台阶和光面

收稿日期 (Received date): 2009-05-20 改回日期 (Accepted): 2009-10-11

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40671195 40771004), 国家科技支撑计划林业项目 (2006BAD26B08-03) 和国家科技支撑计划项目 (2007BAD46B08)。[National Sciences Foundation of China(40671195 40771004); Forestry projects in the National Key Technology R & D Program(2006BAD26B08-03); Projects in the National Key Technology R & D Program(2007BAD46B08).]

作者简介 (Biography): 曹兴松 (1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 2006年毕业于西南交通大学岩土工程专业, 导师周德培教授, 现为成都理工大学在站博士后, 合作导师赵其华教授, 主要从事岩土体大变形分析及其控制等方面的研究工作。[Cao Xingsong(1972-), male doctor professor engineer graduated from Southwest Jiaotong University in 2006 with a specialty in rock and soil engineering tutor is professor Zhoudepei who is working in postdoctoral station of Chengdu Polytechnic University cooperated tutor is professor Zhaoqihua who is mainly engaged in analysis and control large deformation of soil and rock.] E-mail: xinsong10@126.com

等 3 种爆破方式的地震效应现场测试。通过测量岩体质点振动速度, 统计分析爆破地震波传播规律, 确定在不同爆破条件下的地震波衰减系数  $K$  和衰减指数  $\alpha$ , 从而为研究减震爆破技术措施提供依据。

1.1 试验爆破方式

在深孔爆破时, 为避免相邻炮孔同时起爆而出现地震波相互叠加现象, 爆破采用微差起爆方式, 且相邻段别之间的微差时间须  $>50\text{ ms}$ 。小台阶爆破分为多孔小台阶爆破和单孔小台阶爆破 2 种形式, 各种爆破试验的工点、爆破条件、试验次数列于表 1 中。

振动速度测点的布置形式

由于岩体的非均质性和各向异性, 使爆破地震波在岩体中的传播具有方向性, 尤其是对于层理发育岩体, 沿层理走向和垂直层理走向的地震波衰减规律可能存在一定的差异。为此, 每次爆破试验时, 分别沿路堑走向和横向的岩体表面布置测线, 每条测线上布置 4~6 个测点, 各测点的振速传感器须尽量保证在同一条测线上, 偏差  $<0.1\text{ m}$ 。

此外, 沿路堑横向布置的测线至少保证有 2~3 个测点位于路堑开挖边界外 (即形成的路堑边坡面上)。每次爆破试验的测点平面布置方式如图 1 所示。

深孔爆破时, 第 1 个横向测点和第 1 个纵向测点与爆破孔的最小距离为 3~5 m, 其余测点的相邻间距视现场情况而定, 一般取为 3~4 m。

多孔小台阶爆破时, 沿路堑倾向布置的测线为爆破孔的对称轴线, 沿路堑走向布置的测线与炮孔排列线一致, 且第 1 个横向测点和第 1 个纵向测点与爆破孔的最小距离为 3~4 m, 其余测点的相邻间距选取为 2.0~4.5 m。单孔小台阶爆破时, 第 1 个横向测点和第 1 个纵向测点与爆破孔相距 0.75~1.6 m, 横向测点的相邻间距为 0.15~0.6 m, 纵向测点的相邻间距为 1.4~1.7 m。

光面爆破的振动速度测点的布置形式与多孔小台阶爆破时相似, 第 1 个横向测点和第 1 个纵向测点与相邻爆破孔相距 1.6~3.5 m, 其余测点的相邻间距为 2.0~4.5 m。

边坡岩体的爆破振动特性对比

边坡岩体爆破所产生的地震效应随着开挖爆破方法的不同而存在着明显的差异, 即使对于同一种爆破方法, 在边坡横向和纵向的振动特性也有所不同。即不论是深孔爆破, 还是小台阶爆破、小台阶光面爆破, 对于同一段别的炮孔爆破, 在爆源距相近的条件下, 纵向测点的振动速度都大于横向测点的振动速度, 也就是说, 横向上产生的爆破地震效应比纵向的弱, 这对于路堑开挖爆破有利, 其原因主要是在路堑横向的层理面较纵向发育, 对爆破地震波的传播起到了阻隔作用。同时, 深孔爆破、小台阶爆破和小台阶光面爆破产生的地震效应明显不同, 这 3 种爆破方式形成的地震强度由强变弱, 以光面爆破为最小。此外, 地震波传播时的衰减特性也不同。表 2 列出了这 3 种爆破方式的地震波衰减系数和衰减指数。

由表 2 中的数据可知, 不论采用哪一种爆破方法, 路堑纵向的地震波衰减指数都不小于其横向, 说明纵向上的地震波衰减比横向快。无论是路堑横向还是纵向, 深孔爆破的衰减系数最大, 小台阶爆破次之, 小台阶光面爆破最小。

从不同爆破方式的路堑横向的地震波衰减系数的变化可看出, 深孔爆破的地震效应比小台阶爆破和光面爆破强约 6 倍, 也比路堑纵向的相应值都大, 说明在路堑横向上, 爆破方式在很大程度上影响着爆破地震效应的强弱。因此, 为保证边坡岩体的稳定, 在选择路堑开挖爆破方法时, 必须充分考虑爆破地震效应, 才有可能尽量避免因爆破方式不当而导致的滑坡灾害。

表 1 爆破地震效应试验方式及其条件  
Table 1 Testing method and its conditions of blasting seismic effect

爆破方式	工点位置	试验次数	炮孔孔径 (mm)	孔深 (m)	炮孔间距 (m)	单孔装药 (kg)
深孔爆破	K77+400~+620	3	90	5~12		$\leq 40$
多孔小台阶爆破	K75+410~+500	2	40	2.0~3.0		0.8~1.2
单孔小台阶爆破	K76+80~+120	2	40	1.2~1.4		0.12~0.3
浅孔光面爆破	K75+410~+500	3	40	2.0~3.0	0.4~0.6	0.15~0.5

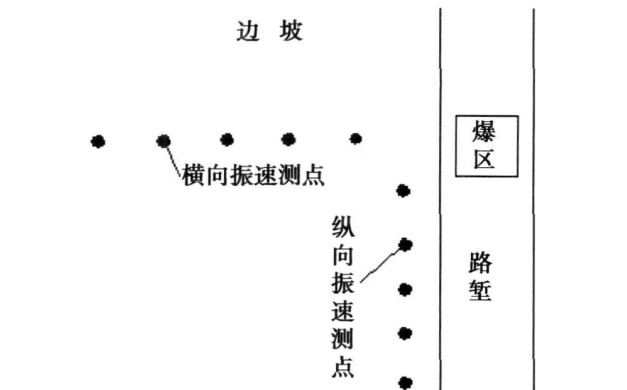


图 1 爆破地震效应试验的振速测点布置方式  
Fig.1 The vibration velocity measuring point layout of blasting seismic effect test

表 2 不同爆破方式的地震波衰减参数  
Table 2 Different blasting method of the seismic waves attenuation parameters

爆破方式	路堑 横向		路堑 纵向	
	衰减系数 K	衰减指数 α	衰减系数 K	衰减指数 α
深孔爆破	240.40	1.54	298.48	1.63
小台阶爆破	42.96	1.52	58.92	1.58
光面爆破	35.03	1.21	72.24	1.67

## 2 爆破地震效应与边坡稳定性

### 爆破松动破坏作用对边坡稳定性的影响

路堑边坡爆破时, 由于层面强度远小于岩石强度, 爆破破坏区和影响区明显受层面控制, 当装药量较小时, 岩体主要以层裂形式破坏。爆破后, 边坡岩体将出现一松动带, 松动带的范围与爆破工艺、爆破方法及岩性质、岩体结构有关。根据对路堑边坡采用三种爆破方法可能产生的岩体层裂范围所进行分析, 深孔台阶爆破形成的边坡松动带厚度约 10~15 m, 而浅孔台阶爆破和浅孔光面爆破形成的边坡松动带厚度仅 1.5~2.5 m。由于结构面间的松动, 起咬合作用丧失或部分丧失, 致使结构面强度大大降低。根据现场试验资料的综合统计分析, 爆破后松动区岩体黏聚力  $C$  比爆破前降低 40%~60%, 摩擦角降低 10%~15%。因此, 爆破使得边坡抗滑力降低。在进行顺层边坡稳定性计算时, 必须将爆破松动带范围内的岩体及层间抗剪强度参数予以折减。

岩体结构面的产状与边坡坡面的产状之间的关系是影响路堑边坡稳定性的控制因素。当岩层走向与边坡坡面走向一致时, 应主要考虑爆破层裂的影响, 此时边坡受力状况和计算模型如图 2 所示, 边坡稳定性取决于抗滑力  $R$  与下滑力  $S$  之比, 其边坡稳定系数  $k$  为

$$k=\frac{R}{S}=\frac{G\cos\theta\tan\varphi+c}{G\sin\theta}\quad(1)$$

式中  $\varphi$  为岩层层间的内聚力和内摩擦角;  $\theta$  为层面的倾角和长度;  $G$  为岩体自重,  $G=\frac{1}{2}\gamma h=\frac{1}{2}\gamma H\frac{\sin(\alpha-\theta)}{\sin\alpha}$ ;  $\gamma$  为岩体的重度,  $H$  为边坡高度,  $h$  为边坡切层高度。将  $C$  代入式, 整理得

$$k=\frac{\tan\varphi}{\tan\theta}+\frac{2c\sin\alpha}{\gamma H\sin(\alpha-\theta)\sin\theta}=\frac{\tan\varphi}{\tan\theta}+\frac{2c}{\gamma h\tan\theta}\quad(2)$$

由式 2 可看出, 在岩层倾角  $\theta$  一定的条件下, 边坡稳定性随层间抗剪强度 ( $\varphi$ ) 的增大而增大, 随边坡高度 ( $H$ ) 的增大而减小。当保持边坡切层高度  $h$  不变时, 在其他条件相同情况下, 边坡稳定性不随边坡坡角  $\alpha$  的变化而改变。也就是说, 开挖边坡坡角越小, 则稳定边坡高度越大。因此, 在小于边坡极限切层高度的条件下, 设计边坡可陡于岩层倾角, 从而减小顺层清方边坡高度及土石方清方量。

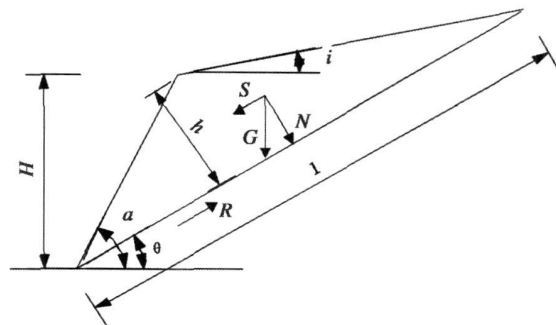


图 2 层面与坡面走向一致计算模型  
Fig.2 The same calculation model in level and slope

### 爆破动力作用对边坡稳定性的影响

在路堑边坡的形成过程中, 不断受到爆破动力的破坏作用, 因爆破动力作用使滑动力增加, 可以利用爆破对边坡可能产生的最大加速度来求其动态作用力, 作为滑动力, 用于边坡稳定性分析与评价。根据爆破地震效应试验, 测定应力波边坡岩体中的传播规律和运动参数, 确定岩体内质点振动加速度和不同部位岩体平均计算加速度。将动应力简化为等效静力, 根据牛顿第二定律  $F=ma$  计算动荷载影响, 进行边坡稳定性计算。在计算爆破动力作用下的边坡稳定系数时, 爆破动荷载按照拟静力处理。岩石质点振动加速度产生的动荷载分别按照水平向和垂直向两种情况进行计算。

#### 2.2.1 水平向振动加速度作用下的边坡安全系数

按照最不利情况考虑, 水平向加速度的作用将增大边坡的下滑力、减小潜在滑面上的正压力。潜在滑坡体的受力状况如图 3 所示。为爆破产生的水

平向动力, R为 AB面的抗滑力。由于岩体在 AB面的法线方向上无运动,则该方向受力满足平衡方程

$$F \sin \theta + N = G \cos \theta$$

则有  $N = G \cos \theta - F \sin \theta$  抗滑力 R由下式给出

$$R = N \times \tan \varphi + c = (G \cos \theta - F \sin \theta) \times \tan \varphi + c$$

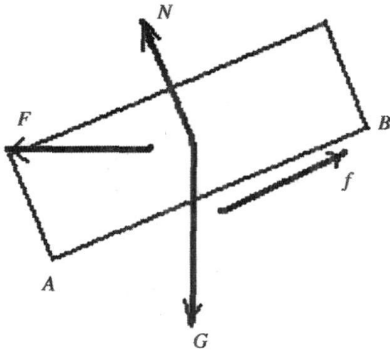


图 3 水平加速度作用下的潜在滑体受力状况

Fig 3 The force of Potential sliding body under the level of acceleration

爆破动力的等效静力值 F可按照下面的方法确定: 根据爆破加速度实测值, 可以回归出加速度  $\alpha$  沿边坡一定分布规律的线性回归方程。在  $x = l$  处,  $\alpha = 0$  即: 只有  $0 \sim l$  范围内的边坡岩体有加速度 (按此简化计算出的安全系数偏于安全, 因为爆破动力的作用范围更大, 不是线性衰减)。作为初步计算, 设爆破动力作用于该范围的几何中心, 则可估算出几何中心点的加速度  $\alpha$ 。由此可得爆破动力的等效静力值

$$F = Kma$$

式中  $m$ 为边坡潜在滑体的质量 ( $kg$ ),  $\alpha$ 为振动加速度 ( $m/s^2$ ),  $K$ 为静力系数, 一般为  $0.1 \sim 0.3$ 。下滑力

$$S = G \sin \theta + F \cos \theta$$

所以, 考虑爆破动力作用时, 天然状态下爆破层裂长度为  $l$ 时边坡的安全系数为

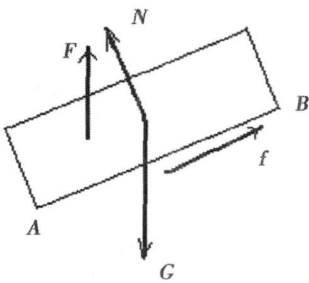


图 4 垂直加速度作用下的潜在滑体受力状况

Fig. 4 The force of Potential sliding body Under vertical acceleration

$$k = \frac{R}{S} = \frac{\tan \varphi \times (G \cos \theta - F \sin \theta) + c}{G \sin \theta + F \cos \theta} \tag{3}$$

式 (3)表明, 考虑爆破振动的水平力影响, 抗滑力减小, 下滑力增大, 边坡稳定性降低。

2.2.2 垂直向振动加速度作用下的边坡安全系数

爆破在边坡岩体内激起的垂直向振动加速度按照向上作用计算, 其受力状况如图 4所示。由于向上的振动力减小了潜在滑面上的正压力, 使摩擦形成的抗滑力降低, 却同时又形成了沿滑面向上的抗滑分力。然而考虑到向上振动力产生的抗滑力只有在边坡稳定时才起作用, 为安全考虑, 这里计算边坡安全系数时不计入上向加速度的抗滑力。

根据滑体受力分析可知, 天然状态下爆破层裂长度为  $l$ 时, 边坡受到垂直向振动力作用的安全系数为

$$k = \frac{\tan \varphi \times (G - F) \cos \theta + c}{G \sin \theta} \tag{4}$$

从上式可看出, 在只考虑爆破地震的垂直向动力作用时, 抗滑力减小, 下滑力增大, 边坡稳定性降低。比较水平振动力时的安全系数知, 垂直振动对边坡的稳定性影响作用没有水平向强烈。

3 实例分析

某公路 K77+400 ~ +620工点路堑边坡设计, 设计方案为顺层面进行清方。清方后最大边坡高度 32 m 边坡斜长达 60 m。图 5 为该工点的典型断面。为便于分析爆破对边坡稳定性的影响, 本工点施工采用先从中线部位中深孔爆破拉槽开挖, 由内向外、从下向上分批爆破开挖的施工顺序。由于受到大爆破的影响, 爆破产生的一定层裂范围内边坡岩体发生坍塌, 爆破后边坡岩体沿层面滑落下的岩体体积均大于预计的爆落方量, 其爆破宽度超过 10 m 爆区上部形成了较为光滑的坡面。

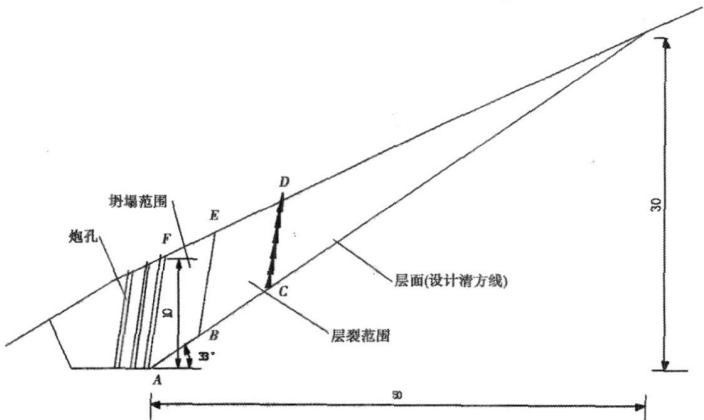


图 5 K77 工点典型断面图

Fig. 5 Typical Sectional drawing of k77 work Place

现场爆破方案

根据试验需要, 在该工点进行了 3 次深孔爆破试验。深孔爆破的炮孔直径为 90 mm, 孔深 5~9 m, 炮孔倾角 70°~75°。爆破孔距 3.5~4.0 m, 排距 2.5~3.5 m。采用 2 岩石乳化炸药为主爆药包, 连续装药结构 (每米装药量约 5 kg)。用非电导爆管微差起爆系统起爆, 排间微差时间 100 ms。单孔装药量 15~40 kg 在爆破过程中沿边坡横向的振动加速度与距离的关系列于表 3 中, 振动加速度的单位为重力加速度 g。

表 3 不同距离处的振动加速度

Table 3 Different distance of the vibration acceleration

与坡顶线距离 (m)	5	8	12	15
振动加速度 (g)	4.44	3.85	2.34	1.32

将 3 次爆破获得的同一方向的振动数据进行综合回归计算, 得到深孔爆破时路堑横向的地震波衰减系数和衰减指数为  $K=240.40$ ,  $\alpha=1.54$ 。路堑纵向为  $K=298.48$ ,  $\alpha=1.63$ 。当单孔装药量 5~40 kg 时, 岩体内产生的层裂范围为 7.36~14.73 m。

表 4 深孔爆破不同单孔装药量的岩体层裂范围

Table 4 Deep-hole blasting the volume of different single charge range of rock spallation

药量 (kg)	40	30	25	20	15	10	5
层裂范围 (m)	14.76	13.41	12.62	11.71	10.64	9.30	7.38

边坡的稳定性分析

3.2.1 不考虑爆破作用, 边坡稳定分析

根据边坡稳定计算方法, 采用极限平衡法计算边坡稳定系数。经计算得到边坡稳定整体系数为:

1. 天然状态下, 当层面为硬性结构面 (综合摩擦角  $\varphi=43.2^\circ$ ),  $k=1.45$ 。当层面为黏土及岩屑充填物 ( $C=41\text{ kPa}$ ,  $\varphi=22^\circ$ ),  $k=1.36$ 。

2. 饱水状态下, 当层面为硬性结构面 (综合摩擦角  $\varphi=33.8^\circ$ ),  $k=1.03$ 。当层面为黏土及岩屑充填物 ( $C=11\text{ kPa}$ ,  $\varphi=16^\circ$ ),  $k=0.64$ 。

计算表明: 不考虑爆破作用, 天然状态下边坡是稳定的; 饱水状态下, 当层面为硬性结构面, 边坡基本稳定, 当层面为黏土及岩屑充填物时, 边坡不稳定。

对于爆破层裂范围边坡 ACDF 局部稳定, 当不考虑爆破作用, 天然状态下, 当层面为硬性结构面,  $k=1.45$ 。当层面为黏土及岩屑充填物,  $k=1.04$ 。说

明此种条件下, 靠临空面的局部边坡也是稳定的。

3.2.2 考虑爆破作用, 边坡稳定分析

由于现场为旱季施工, 因此仅对天然状态下爆破作用对层裂范围内边坡 ACDF 进行稳定分析。

1. 爆破松动破坏作用对边坡稳定性的影响

考虑爆破层裂的影响时, 爆破后松动区岩体黏聚力  $C$  比爆破前降低 40%~60%, 摩擦角降低 10%~15%, 层间综合强度降低 30%~50%。在进行边坡稳定性计算时, 将爆破松动带范围内的岩层层间抗剪强度参数予作如下折减:

硬性结构面按原综合摩擦角的 60% 折减, 即  $\varphi=26^\circ$ ;

黏土及岩屑充填物夹层  $C$ ,  $\varphi$  分别按 60%、90% 折减, 即  $C=25\text{ kPa}$ ,  $\varphi=20^\circ$ 。

根据萨道夫斯基公式计算得到层裂范围内边坡 ACDF 稳定系数: 当层面为硬性结构面,  $k=0.75$ 。当层面为黏土及岩屑充填物,  $k=0.69$ 。处于不稳定状态。

2. 爆破动力作用对边坡稳定性的影响

爆破动力的等效静力值可按照下面的方法确定: 根据爆破加速度实测值, 可以回归出加速度沿边坡的分布规律为  $\alpha=-0.32x+6.2$ 。式中  $x$  为坡面上任一点到爆破点的距离。由该式可得, 在  $x=19.375\text{ m}$  处,  $\alpha=0$ 。即: 只有 0~19.375 m 范围内的边坡岩体有加速度。而层裂范围的断面面积为  $126\text{ m}^2$ ,  $G=3100\text{ kN}$ 。作为初步计算, 设爆破动力作用于该范围的几何中心, 则可估算出几何中心点的加速度为  $3.1\text{ g}$ 。由此可得爆破动力的等效静力值

$F=Kma=0.15\times 3.1\times 8\times 2.5\times 126=1435\text{ kN}$   
下滑力

$$\begin{aligned} S &= G\sin 33^\circ + F\cos 33^\circ = 3100\times \sin 33^\circ + \\ &1435\times \cos 33^\circ \\ &= 2892\text{ kN} \end{aligned}$$

抗滑力

$$R=N\times \mu + cL=(G\cos\theta - F\sin\theta)\times \mu + cL$$

硬性结构面

$$\begin{aligned} R &=(3100\cos 33^\circ - 1435\sin 33^\circ)\times \mu_{43.2^\circ} + \\ &0\times 16.7 \\ &= 1708\text{ kN} \\ k &=\frac{R}{S}=0.59 \end{aligned}$$

软弱结构面

$$\begin{aligned} R &=(3100\cos 33^\circ - 1435\sin 33^\circ)\times \mu_{22^\circ} + \\ &41\times 16.7 \\ &= 1419\text{ kN} \end{aligned}$$

$$k = \frac{R}{S} = 0.49$$

由计算结果表明,考虑爆破振动的水平力影响,边坡处于不稳定状态。

从现场实际情况看,爆破产生的层裂范围内近50%岩体发生坍塌(图5中的ABEF),滑面较为光滑。由于爆破影响随距爆破中心距离的增大而急剧衰减,因此层裂范围内岩体未全部坍塌。

## 4 结 语

在路堑边坡施工中,爆破震动作用将极大地削弱边坡的自稳能力,很容易导致边坡的失稳破坏。爆破产生的层裂效应在一定程度上会降低边坡的安全系数。安全系数的降低幅度主要与爆破产生的层裂范围、层状岩体的完整层面长度有关。爆破过程中由于爆破动力的影响,边坡的安全系数进一步下降。不当的爆破方法将可能导致边坡出现牵引式滑动。尽管天然状态下边坡整体是稳定的。但是,由于爆破作用将使边坡节理裂隙扩大,边坡的稳定性会随着地表水的渗入而降低,最终可能导致边坡失稳破坏,因此,必须对开挖爆破产生的地震效应加以严格控制,从而降低以至消除爆破地震对路堑边坡自稳能力的危害,即在边坡稳定性计算时必须考虑

由于爆破震动而造成层间抗剪强度参数的折减。本文通过现场爆破地震效应试验,根据应力波在岩体中的传播规律和运动规律,得出岩体内质点振动加速度和不同部位岩体平均加速度对边坡稳定性的影响效果,给出了水平和垂直方向振动加速度作用下边坡安全系数的计算公式,并通过了实例验证,从而为边坡稳定性设计提供了有力依据。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Yunpeng, Yang Zhiliu, Wang Zhijun. Displacement analysis of structure stability for rock mass bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 747~750 [李云鹏, 杨治林, 王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定性位移理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 747~750]
- [2] Chinese Association for Anchorage Engineering in Rock and Soil. New Techniques in Rock-soil Anchorage Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 1998 [中国岩土锚固工程协会. 岩土锚固新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998]
- [3] Hoek E, Bray J W. Rock Slope Engineering [M]. Translated by Lu Shizong, Li Chengcup, Xia Jixiang, et al. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1983 [岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 李成村, 夏继祥, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 1983]
- [4] Wang Lajun. Research and application of rock anchorage mechanism [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1995 [王拉才. 岩体锚固机理研究及应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土研究所, 1995]

# Seismic Influence on Slope Stability due to Blasting

CAO Xingsong, LU Hongyan, ZHAO Qihua, LIU Shixiong

(1. National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chongqing Communications Construction Group Co. LTD, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Construction Engineering Group Fuzhou Expressway Co. LTD, Chongqing 401122, China)

**Abstract:** In the excavation process of natural slope, as a result of blasting power damage, the integrity of the original rock, resulting in the occurrence of rock slope, in part or in whole formed by spallation slope with loose rock, cause rock solid steady ability to reduce (reduce the slope against sliding force), and may even lead to landslides or the collapse of cutting. At present, the design of the slope does not take as a result of excavation blasting seismic effect on the impact of slope stability, resulting in the excavation process of an individual slope or sliding after the completion of construction. Through on-site testing, the effect of blasting seismic, according to stress wave propagation in rock mass movement of law, and come to rock the body mass in different parts of the seismic acceleration and average acceleration of the rock slope stability of the results, given the horizontal and vertical under the direction of seismic acceleration slope formula for calculating the safety factor and the adoption of an example, so as to slope stability provided a strong basis for design.

**Key words:** slope; blasting seismic effect; stability analysis