

爆破震动对高速路边坡影响的数值模拟

林士炎¹⁾ 李长洪²⁾ 乔 兰²⁾ 刘宝许²⁾

1) 河北省政府办公厅建设环保处, 石家庄 050053 2) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘 要 以京秦高速公路某段路堑边坡爆破开挖为例, 采用数值模拟的方法分析了爆破震动波在边坡介质中的应力场、位移场、速度场等的分布规律, 多方面研究了爆破震动效应对山区高等级公路岩质边坡稳定性的影响。现场振动测试结果验证了数值模拟计算的可靠性。

关键词 路堑开挖; 爆破震动; 岩质边坡; 数值模拟; 稳定评价

分类号 TU 451; TD 235

边坡稳定性问题是许多山区高速公路工程所面临的重要技术问题, 来自路堑边坡开挖爆破所产生的震动效应^[1], 作为一种影响边坡稳定的外在因素, 得到日益广泛的关注。在不稳定或临界稳定的边坡上进行边坡施工, 爆破震动效应显得尤为重要, 有必要对爆破震动效应进行综合研究, 将爆破震动对边坡稳定性的影响降到最低。

京秦高速公路青龙连接线所经区域地处燕山山脉东段, 属山岭重丘区, 穿越的地形、地貌及地质条件环境复杂, 沿线多数路段需采用爆破的方法进行开挖施工^[2]。工程完工后将出现深路堑边坡, 台阶为具有三个自由面的半路堑开挖体, 上部预留边坡高度最高可达45 m, 山顶部位有古长城遗址需保护, 路基则为高台阶临河边坡。

1 边坡地质环境特征

1.1 地层岩性

采用爆破工程施工路段出露的地层多以燕山期侵入岩为主, 代表岩性为花岗岩、闪长岩; 其次为太古界变质岩, 代表岩性为片麻岩、混合岩及碎裂状大理岩等; 再次为第四系松散堆积物。花岗岩多为强风化似斑状粗粒结构。全路段穿越地形和地质构造条件复杂, 有包括褶皱、大断裂和各种节理裂隙在内的多种地质构造。边坡岩性以碎裂状混合岩和闪长玢岩为主, 垂直节理较为发育, 岩石硬度较大。该路段主要沿旧路进行开

挖, 地表岩层基本全部裸露, 开挖前旧路边坡经常有松动的岩块滑落, 坡面岩体节理裂隙发育, 多为垂向节理, 边坡剖面示意图见图1。

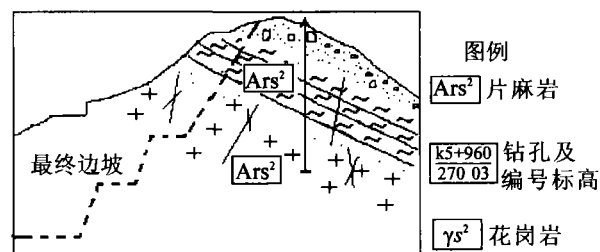


图1 边坡剖面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the slope section plane

1.2 岩体力学参数

岩体力学参数根据边坡岩样物理力学性质实验得到, 研究路段岩性较为均一, 主要是混合岩, 多组岩样力学性质基本相似, 在模拟计算过程中采用的物理力学参数取其均值见表1。

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Parameters of physical-mechanical properties of the rock

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	σ_c / MPa	σ_p / MPa	E / GPa
2.89	6520.9	228.15	9.80	93.49
G / GPa	ν	C / MPa	$\phi / (^\circ)$	
118.88	0.283	33.17	43	

2 爆破震动数值模拟

2.1 爆破数值分析模型的选择

边坡开挖数值模拟分析采用了 DYNA-2D 程

序,其状态方程为非线性结构材料的动力响应模型,对于模型的处理采用有限元的方法.结合本工程实际,所研究边坡为岩质边坡,其材料模型选取弹塑性模型.

2.2 数值模型的建立

数值模拟计算范围包括了整个边坡,通过研究边坡中爆破地震波所产生的应力场、速度场、加速度场以及位移场的综合分布情况,分析爆破地震波对整个边坡稳定性的影响程度.除了分析在整个平面上的计算结果外,还对一些典型的位置进行了具体分析.这些位置包括:(1)坡底面点,距离爆破点水平距离 2.5 m;(2)爆破台阶的坡脚点,距离爆破点 4.6 m;(3)坡中点;(4)坡顶面上与坡面走向平行的方向上三个点.边坡单元剖分见图 2.

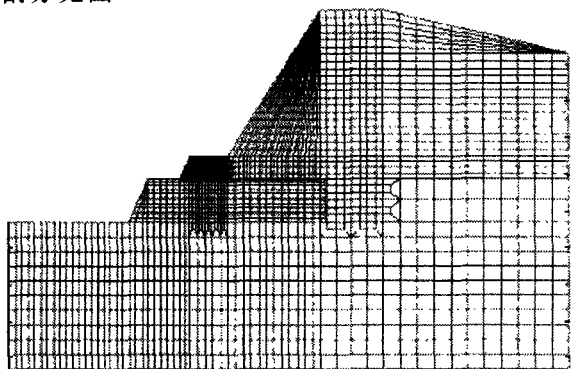


图 2 边坡计算模型单元划分示意图

Fig.2 Meshes of the slope-computing model

为了研究爆破震动对已形成边坡的影响及爆破地震波在边坡岩体内的传播规律,进行了水平和垂直坡面两个方向剖面的边坡模拟计算,计算模型采用的边坡尺寸及爆破参数见表 2. 炸药参数: $\rho=1 \text{ g/cm}^3$,爆速 $D=3600 \text{ m/s}$,C-J 压力 $P_{C-J}=1.03 \text{ GPa}$,采用 JWL 状态方程.

表 2 模拟边坡尺寸及爆破参数

Table 2 The size and blasting parameters of the simulating slope

H/m	W/m	A/m	h_0/m
6.0	1.15	1.45	1.15
ϕ/mm	$(h_d+h_z)/\text{m}$	Q/kg	$q/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
32	5.6	3.45	0.35

2.3 模拟计算结果分析

通过对边坡体内应力、速度、加速度和位移场数值模拟结果的综合分析,可以得到以下主要计算结果:

(1) 应力在炮孔周围产生巨大的应力集中,并出现了一定范围的拉应力区,拉应力值最大达到 302 MPa,远远大于工作边坡岩石的抗拉强度,这正是岩石爆破所要达到的效果.而在边坡岩体内部,由于岩体内节理裂隙的存在,应力波迅速衰减,压应力和拉应力值都很小,未对边坡内部的岩体造成实质性破坏.

(2) 坡脚位置质点震动的最大速度,水平方向为 20 cm/s,垂直方向为 44 cm/s,大于边坡的其他位置,因此坡脚是边坡受震动最容易破坏的区域之一.

(3) 通过分析波形图可以发现,坡底的振幅最大值出现在波形的第一个振幅上,然后衰减;而坡顶的最大振幅出现在第二个振幅以后,然后衰减,说明由于坡顶的放大效应造成了最大振幅的相对滞后.

(4) 坡顶由于夹制作用小,振动时间持续长,频率低;而坡底由于围岩的夹制作用,尽管振幅大,但是频率高.因此,结合最大振幅和频率特性,坡顶和坡底同样存在破坏危险的区域.

(5) 各点的位移值均比较小,最大为 1.6 mm,因此不是引起破坏的主要因素.

3 模拟计算值与实测值比较

数值模拟分析表明,坡底和坡顶处的速度和加速度是爆破敏感参量,所以在对爆破现场的实际监测中,对其进行了重点分析.爆破测试所用仪器为美国 SAULS 公司的 NCSC5000 型测震仪,测试参量为测点三个互相垂直方向上的最大速度分量及最大加速度、频率和位移.计算结果与现场及经验数值^[9]相比较,模拟计算数值偏大,一般认为爆破产生的震动速度小于 22 cm/s 时^[9],爆破震动对边坡不会产生影响,而计算结果值却要大许多(见图 3).

对这一差异,可以从以下两个方面来解释:

(1) 量级的差别.模拟计算时间精确度很高,计算中所用的爆破响应时间仅为微秒级,而现场实测的数据如爆破震动速度,爆破震动的响应时间最小为毫秒级,大多是在秒级上,时间量级不一致;(2) 测震距离的影响.由于采用有限元划分网格的局限,所建模型的大小一般取为一到几个抵抗线的大小,即 1~7 m;进行实测时,测震仪距起爆点相对较远,所测数据衰减量更大.另外,计算采用的响应时间很短,计算得出的应该是冲击波的

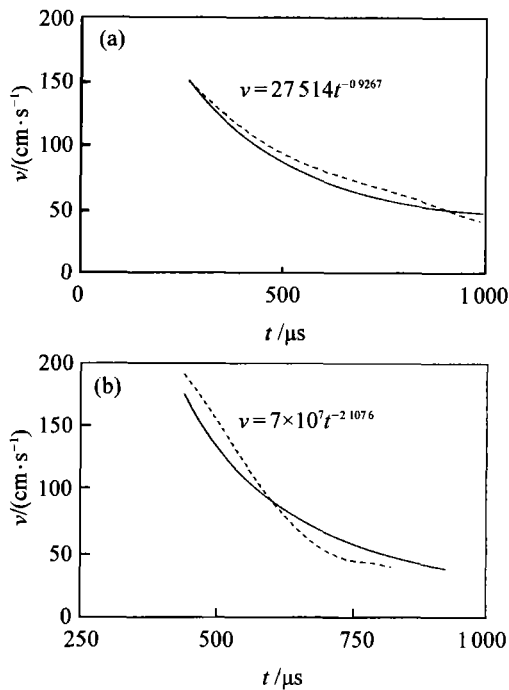


图3 坡脚及一定距离处质点震速与时间关系

Fig.3 Relations of particle vibration velocity to time in the slope foot and certain distance

效应;而实测时得到的则是应力波的效应,甚至是应力波经过衰减以后的效应.由于波的传播在时间和空间上的衰减很明显,经过衰减以后的波的效应会有很大的改变.因此导致了模拟计算的数值偏大.基于以上考虑,为了使计算更符合实际,对计算结果进行了折减,通过对大量计算结果的分析与比较以及参考相关资料^[5,6],确定折减系数为0.25较为合适.

在已形成的边坡上, $t=0.38\text{ ms}$ 时的质点震动速度最大,为50~100 cm/s,经折减后,速度值为

12.5~25 cm/s,而实际监测的震速则为21.12 cm/s,可以说数值模拟计算的结果与实测结果很接近,从而印证了数值模拟计算的可行性.

4 结论

(1) 爆炸开始后极短的时间内,在炮孔内壁及邻近范围内产生了较大的应力集中,其值远大于岩石强度,造成岩石破碎.爆破产生的应力波在岩体内部的传播过程中,应力极值逐步衰减.

(2) 坡脚位置质点震动的最大速度大于边坡的其他位置,是边坡最易破坏的区域之一.坡顶位置的震动持续时间长,频率低,也是边坡容易产生破坏的区域.距离边坡越近,破坏的可能性越大.在实际爆破施工过程中,应重点对坡脚处和坡顶位置进行爆破现场监测,保证其质点震速在允许的范围内.

参考文献

- 1 周晓杰,黄海,王振中,等. 爆炸震动效应对公路边坡的影响[J].西部探矿工程,2001(5): 73
- 2 王德志,谭文辉,乔兰. 高速路连接线路堑开挖中爆破震动监测与评价[J]. 工程爆破,2002(1): 10
- 3 王在泉,陆文星. 高边坡爆破开挖振动传播规律及质量控制[J]. 爆破,1994,11(3): 2
- 4 徐顺香. 临长高速公路路堑开挖中的控制爆破技术[J]. 爆破,2002,19(1): 6
- 5 陈寿如,宋光明. 确定露天边坡爆破震动临界振速的一种方法[J]. 矿业研究与开发,2001,21(4): 9
- 6 中国力学学会工程爆破专业委员会. 爆破工程[M]. 北京:冶金工业出版社,1992

Numerical Simulation on the Influence of Blasting Vibration on the Freeway Slope

LIN Shiyang¹⁾, LI Changhong²⁾, QIAO Lan²⁾, LIU Baoxu²⁾

1) Construction and Environment Protection Department, Government of Hebei Province, Shijiazhuang 050053, China

2) Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology, Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT Taking the cutting excavation of Beijing-Qinhuangdao freeway slope as an example, the dynamic features and the distribution regularity of blasting vibration waves such as stress field, displacement field and velocity field were analyzed and various aspects of the influence of blasting vibration on the mountainous freeway-cutting slope were studied by use of the numerical simulation method. The comparison of simulation results with in-situ measured results shows that they are approximate.

KEY WORDS cutting excavation; blasting vibration; rocky slope; numerical simulation; stability assessment