

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.06.010

城镇闹市区地铁车站基坑的控制爆破^{*}

胡 葵

北京安联国科科技咨询有限公司(北京,101312)

[摘 要] 为确保某市地铁车站基坑爆破的成功实施,以爆破危害和块度控制为重点内容,通过优化爆破设计,综合采取多种安全有效、经济环保的防护措施,成功将爆破施工过程中的安全危害(爆破振动、飞石、有害气体、外来电流等)和环境危害(爆破噪音、粉尘等)控制在许可范围内;同时,运用 LS-DYNA 模拟岩石破碎效果,成功控制了大块率。实际爆破效果符合预期,工程效益显著。

[关键词] 控制爆破;爆破危害;块度;LS-DYNA

[分类号] TD235

引言

控制爆破是一种对爆破效果和爆破危害双重控制的爆破技术^[1],可使爆破作业安全地在城镇居民区和闹市区等复杂的环境下实施。由于城镇闹市区建筑密集、地下管线复杂、人口集中、车流量大,必须严格控制爆破施工中地震波、空气冲击波及噪音、粉尘、飞石等无益能的产生,以防止对临近建筑物和环境造成损坏,避免对行人、车辆构成极大的安全威胁,同时,又要确保爆破质量符合工程的要求。

爆破危害和爆破质量是控制爆破技术的核心,基于此,以某市地铁滨江新城站爆破施工为例,在对施工现场进行反复踏勘和论证的基础上,结合爆破块度数值模拟分析,试图建立一套全过程、全范围立体式控制的爆破方案。

1 工程概况

拟建滨江新城站位于市区繁华地段,周边环境如图 1 所示。施工区域(红框内)密布通信光缆、市政供水管道和污水管、电信电缆等,环境极其复杂。基坑全长 250 m,标准宽度 25 m,开挖深度 27 m,在基坑 10 m 以下为残积土与全风化、半风化岩石,以黄褐色的粉质黏土和细圆砾土为主,厚度在 1~2 m 之间,部分需要爆破施工;再往下岩石属于冷家溪群组板岩,其中,以青灰色群组板岩为主、全风化黄褐色板岩为辅的板岩以及岩性 f 值在 4~8 之间的次坚石均需要爆破施工。由于周边情况复杂,属于在城镇闹市区中进行的大规模爆破,个别地段需贴近建筑物进行爆破施工,对飞石的控制、振动波传递方向的控制及粉尘、噪音的控制要求非常严格,同时,

必须达到业主希望的爆破效果。因此,爆破难度很大,对整个爆破施工要求极高。

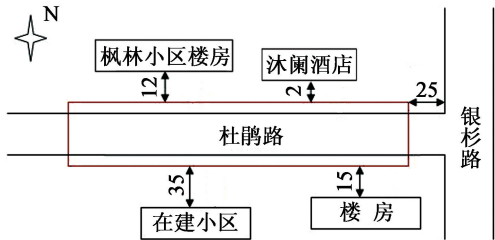


图 1 爆破区域周边环境(单位:m)
Fig.1 Surroundings around the blasting area(unit:m)

2 控制爆破技术可行性措施

2.1 爆破危害控制

2.1.1 爆破振动

爆破施工产生的地震波极为复杂,一般以位移 x 、速度 v 和加速度 a 3 个物理量对其介质质点的运动状态进行描述:

$$x = A \sin \omega t; \tag{1}$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \sin \left(\frac{\pi}{2} + \omega t \right); \tag{2}$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 A \sin (\pi + \omega t)。 \tag{3}$$

式中: x 为位移; v 为速度; a 为加速度; A 为质点振幅; ω 为圆频率, $\omega = 2\pi f$, f 为振动频率; t 为时间。

通常,在估算爆破振动地面运动参数最大幅度时,采用二分之一波峰到波谷的全振幅,于是有:

$$x = A; \tag{4}$$

$$v = \omega x = 2\pi f A; \tag{5}$$

$$a = \omega^2 x = 2\pi f v = 4\pi^2 f^2 A。 \tag{6}$$

^{*} 收稿日期:2016-02-29
作者简介:胡葵(1982-),男,高级工程师,主要研究方向:爆破工程与器材。E-mail:hukui_1982@163.com

由上述公式可见,只要能测得 x 、 v 、 a 中的任意 1 个,就可以通过关系式推算另外 2 个参数。目前,学者们基本都不采用质点运动矢量和作为安全标准,而是通过选择质点运动的最大分量来评价建(构)筑物的破坏^[2]。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014),一般建筑物和构筑物的爆破地震安全性应满足安全振动速度的要求,表 1 列出了规程中主要类型建(构)筑物的质点安全振动速度^[3]。

表 1 主要建(构)筑物爆破振动安全允许标准

保护对象类别	安全允许质点振动速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		
	$f \leq 10 \text{ Hz}$	$10 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$	$f > 50 \text{ Hz}$
土窑洞、土坯房、 毛石房屋	0.15 ~ 0.45	0.45 ~ 0.90	0.90 ~ 1.50
一般民用建筑物	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0
工业和商业建筑物	2.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	4.2 ~ 5.0
一般古建筑与古迹	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5
运行中的水电站及发 电厂中心控制室设备	0.5 ~ 0.6	0.6 ~ 0.7	0.7 ~ 0.9
水工隧洞	7 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 15
交通隧洞	10 ~ 12	12 ~ 15	15 ~ 20
矿山巷道	15 ~ 18	18 ~ 25	20 ~ 30

采取以下措施将爆破振动对爆区周围建筑物的影响减小到最小:

- 1)采用多段微差起爆;
- 2)施工中减少一次布孔量,尽量避免钻孔偏差和超钻,通过试爆,选取合理的爆破参数和单耗;
- 3)施工采用由远及近的方式,全程进行爆破振动监测,以此调整药量;
- 4)在特殊地段采用低爆速、低威力的炸药,可在 2[#]岩石炸药中加入质量分数 13% 的添加剂^[4],使炸药的密度降至 0.5 g/cm³ 以下;
- 5)使用孔底垫竹筒,或孔内采用不耦合装药或分段装药结构;
- 6)爆破前,在爆区周边布设若干排减振孔,可使降振率达 30% ~ 50%^[4];
- 7)临近建筑物位置采用预裂爆破技术,以减小爆破振动。

由于北侧沐澜酒店距离围栏较近,因此,在该处采取静态爆破预先钻孔,使主爆区爆破时爆破振动速度大大减弱。为了切实避免爆破振动事故的发生,在工程的早期,最大单段药量可以采用安全距离所对应的装药量的一半,同时必须实地实时监测爆

破振动,从而得到该范围内符合实际的参数 K 、 α 值,以此重新修正主要建筑物的安全距离。

2.1.2 爆破飞石

该控制爆破是在人口多、周围建筑稠密的城镇进行的,一旦飞石引发爆破事故,后果不堪设想。目前,对于爆破飞石的危险区域评价主要采用人工神经网络;文献[5]则介绍了一种支持向量机法(SVM),评价效果较为理想。在飞石控制方面,一般有主动与被动防护,具体做法可分为 3 种:覆盖防护、近体防护和保护性防护^[6-7]。本次爆破施工中,采取表面覆盖防护与空中隔离防护(即二次防护)措施,确保零飞石,同时对重点保护目标进行保护性防护。

1)表面覆盖防护。炮孔装药完成后,炮区表面整体覆盖,即每个炮孔用柴草覆盖,再用竹夹板压紧,最后用一个砂袋压住,覆盖层厚度 1 m 左右,单个砂袋质量不小于 20 kg,如图 2 所示,掏槽、扩槽孔爆破与台阶爆破相同。

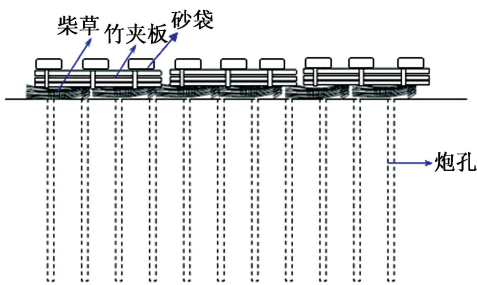


图 2 表面覆盖防护措施

Fig.2 Surface coverage protection considerations

2)空中隔离防护。采取表面覆盖防护措施后,为防止仍有个别飞石逸出,还须采取隔离防护。基坑爆破,其作业面均低于地表,深入地下,根据现场施工条件,采取空中隔离防护方法。

利用坑道横向钢支撑,其上铺设盖板(盖板以 2 cm 厚钢板为主,周边用角钢焊接加强,2 m × 4 m 左右大小),盖板上铺满木板,最后用砂袋压住。平常施工时拉开几张盖板,作为通道,爆破时再盖好,如图 3 所示。

当条件异常苛刻时,可参考香港地区类似工程的防护要求,使用铁笼防护,铁笼用工字钢焊成框架,五面包铁网,装药作业在笼内进行,爆区表面还要进行覆盖防护^[8]。

2.1.3 爆破有害气体

一氧化碳和氮的氧化物是炸药爆炸后生成的主要有害气体,为降低有害气体的危害程度,本工程综合采取了以下措施:选定配方合理的炸药;增大起爆能;选定合理的装药形式;加强爆后通风和洒水;加



图3 空中隔离防护措施

Fig. 3 Mid-air separation protection considerations

强炸药的质量管理,禁用过期变质的炸药;露天爆破尽量避免将起爆点设在下风方向。

2.2 爆破质量控制

工程上定量评价爆破质量普遍采用的指标是爆破块度分布^[9],主要采用摄影-图像分析法对爆堆进行摄影测量和块度分布分析^[10]。本文中,采用 LS-DYNA 模拟岩石破碎过程,从而得到选定参数(具体见本文第3节)下岩石的破碎效果,以此验证爆破设计方案选用的参数对于块度控制的可行性。

2.2.1 算法与材料模型

采用流固耦合算法来模拟具体爆破过程。炸药、空气采用 Euler 算法;岩体采用 Lagrange 算法,计算模型中使用非反射边界条件(吸收边界条件)以实现对无限域的模拟;炸药采用 JWL 状态方程,利用程序起爆控制爆轰波的传播,选取 LS-DYNA 材料模型库中的第 8 号材料模型;岩体材料采用 Lagrange 算法,JHC 材料本构模型,采用对称边界条件以考虑计算量的影响。

2.2.2 数值模拟结果

图 4 给出了不同时刻岩石等效应力的分布情况,能够较为清晰地描述出应力波传播的具体路径以及对结构造成的影响,可判断出最大载荷出现的时间以及具体位置。爆炸产生的应力波传播较为对称、均匀,各点起爆时间一致;因此,破坏响应比较一致,可为选定爆破参数下岩石结构的整体毁伤破坏提供依据。

图 5 给出了结构在不同时刻的失效毁伤。从图 5 中可以看出裂缝的产生过程,以及最终导致不同块度的岩石破碎,整个破碎响应过程是逐渐完成的。随着裂隙的不断产生与扩大,造成了单元的变形逐渐增加,从而导致了结构的失效。结果显示,最终导致的结构的破碎块度没有完全对称,计算选取的仅仅是整个爆破工程的一个很小的局部,周围的结构响应进行了对称处理,使得所有的计算等价于处理一个无限大的爆破区域。数值模拟得到的爆破块度分布规律可以较为准确地表征整个爆破条件下的岩

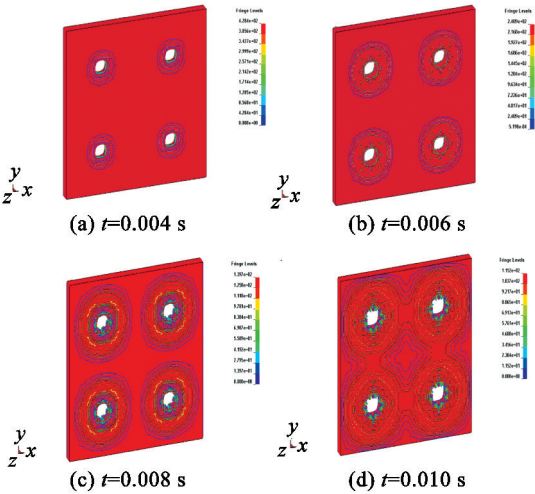


图4 不同时刻岩石等效应力分布

Fig.4 Distribution of equivalent stress for rock at different times

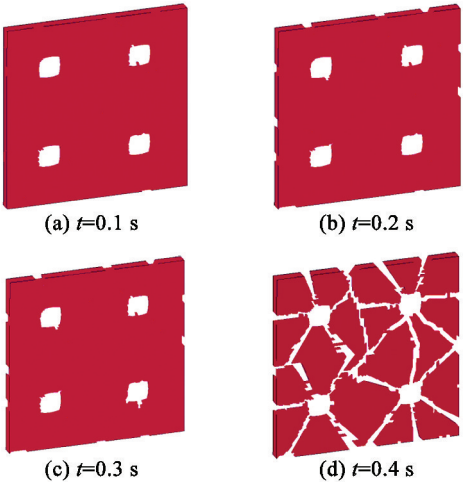


图5 不同时刻岩石破碎情况

Fig.5 Rock cracking condition at different times

石块度分布。
从模拟的破碎结果来看,没有出现较明显的连续大块,岩石在炸药的爆炸毁伤作用下破碎比较充分,大块率较低,说明爆破设计方案选定的基本参数能较好地控制大块率的产生,同时,也说明所进行的数值模拟方法具有良好的可行性,可用来事先预测设计方案的爆破效果。

3 爆破参数设计

对基坑划分不同区域,如图 6 所示。针对不同区域的重要性采用不同的施工方法。爆破施工主要采取静态控制爆破技术及浅孔台阶微差松动控制爆破技术来制定相应的爆破施工方案,综合运用前述爆破危害防护措施,实行全过程、全范围立体式控制爆破。

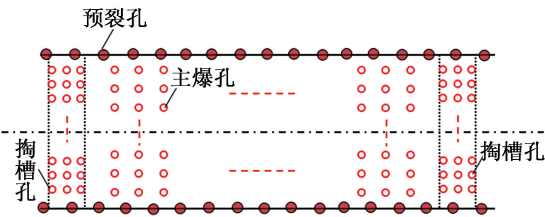


图 6 爆破作业平面布置图

Fig. 6 Arrangement plan of blasting operation

3.1 浅孔爆破

主爆区采用浅孔爆破,垂直梅花型布孔,钻孔直径 $D=42\text{ mm}$,台阶高度 $H=1\sim3\text{ m}$,孔深 $L=1.2\sim3.5\text{ m}$,超深 $h=0.2\sim0.5\text{ m}$,前排孔抵抗线 $W=0.6\sim1.4\text{ m}$,孔距 $a=0.6\sim1.2\text{ m}$,排距 $b=0.5\sim0.8\text{ m}$,炸药单耗 $q=0.45\sim1.00\text{ kg/m}^3$,单孔的装药量为 $Q=qabH$ 。

3.2 预裂爆破

对于临近居民区等受保护建筑地区,采用预裂爆破,浅孔孔径 $D=42\text{ mm}$,炸药采用 $\varnothing 32\text{ mm}$ 的乳化炸药,不耦合系数大于 1.15,孔深 3 m,孔距 $a=(8\sim12)D$,根据地质情况, a 取值 0.8 m,线装药密度 $q'=300\sim500\text{ g/m}$,单孔药量 $Q=2.4\text{ kg}$,口部堵塞长度为 0.8~1.0 m,顶部装药应适当减少 1/2,底部装药量视孔深大小确定,一般比正常线装药密度增加 1~2 倍。

装药结构采用孔内径向间隔装药,起爆网路采用孔内孔外相结合的微差起爆方法,孔内 MS10、孔外 MS2 段导爆管雷管,单孔起爆,间隔时间 25 ms。

3.3 掏槽爆破

由于在爆破开挖前,导流槽只有一个自由面,因此,岩石的夹制作用会极大地影响爆破效果。为了创造新的自由面,必须先对爆破中心区进行掏槽爆破,从而可以为后续的浅孔爆破创造良好的作业平台。炮孔直径 $D=42\text{ mm}$,孔深 $L=3\text{ m}$,孔距 $a=1.1\sim1.3\text{ m}$,线装药密度 $q'=0.3\sim0.5\text{ kg/m}$,单孔药量 $Q=1.63\text{ kg}$ 。

3.4 浅孔微差、挤压爆破

对于需严格控制爆破危害的部分主爆区域,同时为了降低大块率,可利用手风钻,采用浅孔微差、挤压爆破技术,分多台阶进行爆破作业。孔径 $D=40\text{ mm}$,孔距 $a=1.5\text{ m}$,排距 $b=1.2\text{ m}$,最小抵抗线 $W=1.2\text{ m}$,孔深 $L=2\text{ m}$,炸药单耗 q 控制在 0.5 kg/m^3 以内,孔内外微差间隔时间 $\Delta t=20\sim75\text{ ms}$ 。此外,可借鉴相关爆破工程采用中部分段、底部间隔的装药方法进一步降低大块率^[11]。

3.5 静态控制爆破

采用建筑材料科学研究院研制的静态破碎剂(SCA)^[12],根据开挖工期安排,爆破施工在 6~8 月份,该地区平均温度在 30℃ 左右,施工时选择 SCA-I 型材料,水灰质量比控制在 0.30~0.33 之间,流动度控制在 170~190 m 之间。根据围岩性质及现场实际情况,参考文献[13]进行钻孔参数及 SCA 使用量的选择。

针对本工程围岩多为中风化及微风化岩石,参数选择如下:孔径 $D=80\text{ mm}$;孔距 $a=(0\sim15)D=80\sim100\text{ cm}$,本次取 $a=100\text{ cm}$;排距 $b=(0.70\sim0.85)a$,本次取 $b=80\text{ cm}$,炮孔呈梅花型布置,孔深 L 根据分层开挖厚度要求确定。

3.6 爆破振动设计

根据本工程所处的地理位置,需要保护的建筑物为距离车站基坑爆源 50 m 之内的民房建筑物以及连续墙、钢支撑结构。对该范围内的民房进行爆破振动验算,以确定同段起爆最大药量。根据《爆破安全规程》可得公式:

$$Q_{\max}=R^3\cdot\left(\frac{v}{K}\right)^{\frac{3}{\alpha}}。$$

(7)

式中: Q_{\max} 为最大一段的装药量,kg; R 为距起爆点的距离,m; K 为与岩石特性、爆破方式等因素有关的系数,取 200; v 为非抗震性钢筋混凝土框架房屋允许振速,取 2 cm/s; α 为地震衰减指数,取 1.6。可得结果如表 2 所示。

表 2 不同距离处的同段起爆最大药量

Tab. 2 Maximum charges at different distances

R/m	20	30	40	50
Q_{\max}/kg	1.42	4.80	11.38	22.23

车站实际施工中,根据不同爆破部位控制单段起爆最大装药量,可确保爆破振动不会对周边居民房屋造成伤害。

4 爆破效果

采用控制爆破的施工工艺,确保了安全无事故,同时,严格控制了环境污染,最大限度地减少了爆破对周边房屋的损害,将爆破补偿控制在最低值,施工过程中未收到任何投诉,维持了社会稳定。图 7 分别给出了测点 GZGS-1 水平切向、水平径向和垂直方向的速度变化示意图。从图 7 中可以看出,各段位产生的最大振动速度为 1.749 cm/s,其余段位产生的最大振动速度均小于 1.000 cm/s,符合国家安全规程要求。

图 8 是基坑现场爆破后的修整施工图。从得到

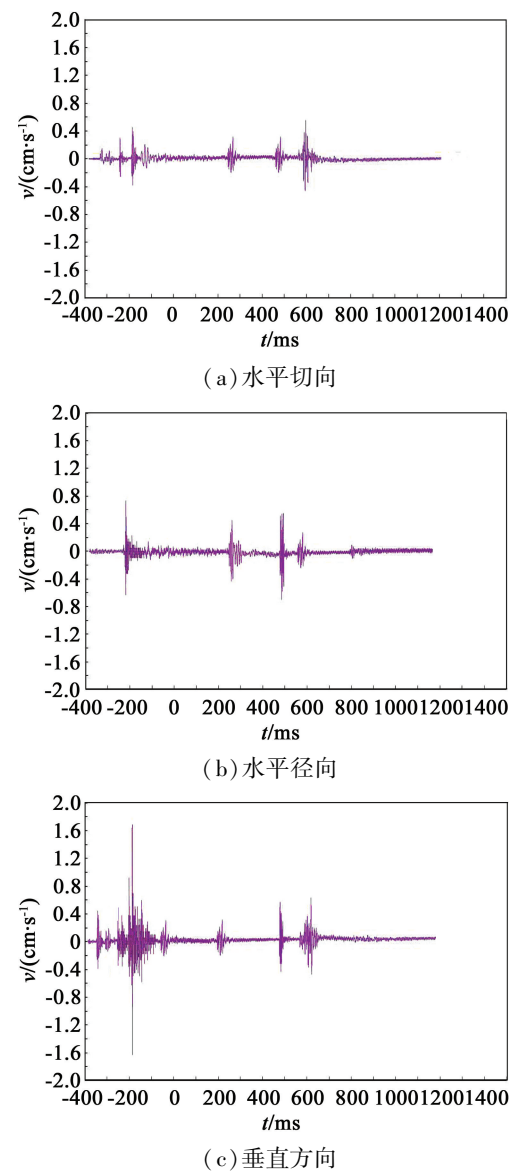


图 7 振动速度随时间的变化

Fig. 7 Vibration velocity variation with time



图 8 爆破作业后的现场施工图

Fig. 8 Construction site after blasting operation

的爆堆信息来看,爆后大块率较小,未使用挖机破碎锤即可装车清理,从而验证了所采用爆破设计参数的合理性和科学性。

本文中,主要利用孔网参数、装药参数和岩体条件在爆前大致预测爆破块度分布,后续工作将重点研究测定爆破块度的有效计算方法,以便对所获取

到的爆堆块度信息进行简便、迅速且准确的处理与计算。

5 结论

针对闹市区复杂环境下的地铁车站基坑爆破工程,制定了安全环保、经济有效的爆破安全设计方案,控制了爆破危害的传播方向和范围,最大限度地降低了爆破产生的负面影响;同时,确保了主体工程的顺利实施,爆破效果符合预期,工程效益显著,为以后在闹市区等复杂环境下进行类似的爆破工程提供参考。

参 考 文 献

[1] 郭进平, 聂兴信. 新编爆破工程实用技术大全[M]. 北京: 光明日报出版社, 2002: 781-790.

[2] CHEN S H, WU J, ZHANG Z H. Influence of milli-second time, charge length and detonation velocity on blasting vibration[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4787-4796.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程: GB6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety regulations for blasting: GB6722—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.

[4] 田运生, 张立国, 陈超, 等. 基坑开挖爆破振动速度的监测和控制[J]. 有色金属(矿山部分), 2004, 56(6): 35-37.

[5] AMINI H, GHOLAMI R, MONJEZI M, et al. Evaluation of flyrock phenomenon due to blasting operation by support vector machine[J]. Neural Computing and Applications, 2012, 21(8): 2077-2085.

[6] 谭卫华, 林临勇, 庄建康. 拆除爆破的飞石防护[J]. 爆破, 2010, 27(2): 103-105.

TAN W H, LIN L Y, ZHUANG J K. Protection of fly rock in explosive demolition[J]. Blasting, 2010, 27(2): 103-105.

[7] 周向阳, 徐全军, 邹锐, 等. 城市高架桥控制爆破飞散物防护技术研究与实践[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 34-37.

ZHOU X Y, XU Q J, ZOU R, et al. Research and practice on fly rock defense technology of urban viaducts controlled blasting[J]. Explosive Materials, 2012, 41(6): 34-37.

[8] 邹定祥. 香港的爆破器材管理和应用[J]. 工程爆破, 1999, 5(2): 67-70.

ZOU D X. Administration and application of explosion products in Hong Kong[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(2): 67-70.

[KEYWORDS] blasting height; delay time; special construction; numerical simulation; scheme optimization; directional blasting