

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.03.010

全断面与台阶法爆破作用下围岩的振动特征^{*}

费鸿禄 张超逸 洪陈超 吕金齐
辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新, 123000)

[摘 要] 基于现场试验和实测数据,通过量纲分析,建立了全断面爆破与台阶法爆破时岩体振动主频与单段最大药量及爆心距之间的函数关系,并进行了回归分析;通过声波试验,分析了在这两种爆破方式下,经过5次爆破作用后岩体的累积损伤规律。研究结果表明:岩体的振动主频随单段最大药量和爆心距的增加而减少,台阶法爆破比全断面爆破减少得更为迅速,而且相对于爆心距,单段最大药量对主振频率的影响更为显著;岩体在爆破作用下的损伤呈现非线性累积规律,前3次爆破对岩体损伤程度更深,且全断面爆破引起的岩体损伤较台阶法爆破更为严重。

[关键词] 全断面爆破;台阶法爆破;量纲分析;振动主频;累积损伤

[分类号] TD235.1;O382⁺.2

Dynamic Response of Surrounding Rock under Full Face or Bench Blasting Excavation

FEI Honglu, ZHANG Chaoyi, HONG Chenchao, LÜ Jinqi
Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT] Dimensional analysis was conducted on the measured data and field experiments to establish functional relationship between the main vibration frequency of surrounding rock subjected to full face blasting or bench blasting and single maximum loading or blasting distance, regression analysis was then employed to process the measured data. Acoustic study on the two blasting methods revealed the accumulative damage law of rock in five times of blasting. Results show that the main vibration frequency decreases with the increase of the maximum single charge and blasting center distance, and this decrease is much more faster in bench blasting than in full face blasting. Effect of the maximum single dose on the main vibration frequency is more significant than that of distance. It shows a nonlinear accumulative damage for rock under blasting effect. The damage is deeper at the first three blasting, and rock damage caused by full face blasting is more serious than that caused by bench blasting.

[KEYWORDS] full face blasting; bench blasting; dimensional analysis; vibration frequency; accumulative damage

引言

鉴于爆破具有经济、高效的特点,利用爆破开挖岩石的方法被广泛应用于矿山、地下空间及交通运输等岩土工程中。岩体是一种非均匀地质材料,长期的地质作用可导致其内部存在大量随机分布的节理裂隙、微孔洞与裂缝等缺陷^[1]。Langefors等^[2]认为,在爆破振动作用下,这些损伤进一步扩展,最终导致岩体失稳破坏。因此,爆炸过程产生的巨大能

量,在破碎岩体并抛掷的同时,对开挖区周围的岩体造成损伤,导致其力学性能恶化、完整性变差,从而威胁岩体工程的安全稳定^[3]。为了了解岩体在爆破中的损伤情况,在实际工程中,一般利用质点振动速度来衡量爆破振动强度。目前,国内普遍使用萨道夫斯基公式^[4]来表达质点峰值振动速度的衰减规律,并且该公式已经成为工程中控制爆破振动速度的重要的理论依据^[5-6]。同时,频率作为爆破振动的重要特征之一,也得到了广泛的研究^[7-9]。

很多学者对岩体在爆破作用下产生的损伤进行了研究,阳生权等^[10]分析了现场爆破地震波,阐述

^{*} 收稿日期:2016-12-08
作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授,博导,主要从事工程爆破、地下工程教学和科研工作。E-mail:feihonglu@163.com
通信作者:张超逸(1992-),男,硕士研究生,主要从事地下工程方面的研究。E-mail:738927620@qq.com

了岩体中节理裂隙等不连续面的动载累积效应;闫长斌^[11]、刘明贵^[12]、Ramulu^[13]等利用声波速度测试试验,研究了爆破产生的岩体损伤及其累积效应,得到了岩体爆破累积损伤与爆破次数之间的非线性递增关系。然而,目前大多数爆破损伤与振动特征的研究是针对某种爆破类型或者将各种爆破类型归结在一起分析,关于不同爆破类型的对比分析比较少见^[14]。

本文中,以新鼓山隧道为工程背景,从岩体振动主频和声波速度衰减两方面对比分析了采用全断面与台阶法两种爆破方法时岩体的振动响应特征及其与爆心距、起爆段药量之间的关系。

1 振动频率的量纲分析

大量的爆破振动试验表明,虽然在一定的爆破方式下,影响爆破振动的主要因素是药量和爆源的距离,但是,爆区的地质条件与传播介质的性质对爆破振动也存在明显的影响。因此,可选择单段最大药量 Q 、爆心距 r 、岩体强度 σ 和岩石密度 ρ 作为影响爆破振动频率 f 的主要物理量^[15]。

根据 π 定理^[7],爆破振动频率 f 与 Q 、 r 、 σ 和 ρ 之间的函数关系可表示为

$$\Phi = (f, Q, r, \sigma, \rho)。$$

(1)

选取 Q 、 r 、 σ 作为基本物理量,则有:

$$\pi_1 = r^{\alpha_1} Q^{\beta_1} \sigma^{\gamma_1} f;$$

(2)

$$\pi_2 = r^{\alpha_2} Q^{\beta_2} \sigma^{\gamma_2} \rho。$$

(3)

对于式(2),其量纲公式为

$$[L^0 T^0 M^0] = [L]^{\alpha_1} [M]^{\beta_1} [LT^{-2} M]^{\gamma_1} [T^{-1}]。$$

(4)

根据量纲和谐原理,有

$$\begin{cases} \alpha_1 + \gamma_1 = 0; \\ -2\gamma_1 - 1 = 0; \\ \beta_1 + \gamma_1 = 0。 \end{cases}$$

(5)

解得: $\alpha_1 = 1/2, \beta_1 = 1/2, \gamma_1 = -1/2$,所以

$$\pi_1 = f \cdot \sqrt{\frac{rQ}{\sigma}}。$$

(6)

同理,对于式(3),有

$$\pi_2 = \frac{\rho r^3}{Q}。$$

(7)

在一定范围内,参照萨道夫斯基公式,结合量纲和谐原理,爆破振动频率相似准数方程的一般形式可表示为

$$f \cdot \sqrt{\frac{rQ}{\sigma}} = K \cdot \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{r}\right)^{\alpha}。$$

(8)

2 工程概况

拟建新鼓山隧道^[16]穿越福州市鼓山风景区,进口位于福州市东山村东侧约 400 m,分别在 DK5 + 205、DK5 + 230 下穿南三环和机场高速;出口位于福州市魁岐村北侧的山坡上,线路分别在 DK12 + 189、DK13 + 009、DK13 + 319 自既有的温福铁路、福厦铁路联络线隧道上方的立方体交叉通过。隧道起讫里程 DK5 + 095 ~ DK13 + 294,全长 8 199 m。隧道的最大埋深为 393 m(里程 DK7 + 720 处,地表山顶的高程为 430 m)。除进、出口地段,隧道的最浅埋深为 97.5 m(里程 DK10 + 440 处,地表山顶的高程为 160.3 m)。

研究范围内的隧道属于 II 级围岩,围岩为钾长花岗岩,灰黄色、肉红色,中细粒花岗结构,块状构造,节理裂隙稍发育,地下水不发育,风化程度较弱,岩体的完整性较好。

围岩的相关力学参数见表 1。

表 1 花岗岩力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of granite				
密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	抗拉强 度/MPa	抗压强 度/MPa
1.24	48	0.23	5	100

3 爆破振动监测

根据现场实际情况,在距离掌子面 125 m 处,每隔 5 m 布置一个 TC-4850 振动传感器,每次设置 7 个监测点,每个监测点上仪器的 x 方向与隧道开挖方向平行,如图 1。监测在全断面和台阶法爆破开挖两种方式下围岩的振动特征。

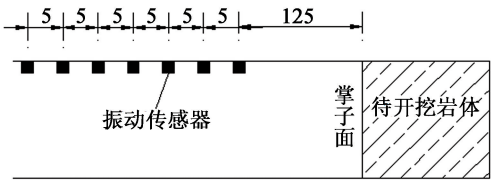


图 1 仪器布置(单位:m)

Fig. 1 Arrangement of instruments(unit:m)

3.1 监测数据分析

以单段最大药量和爆源位置作为影响爆破振动的两个主要因素^[17],结合岩石强度和密度对爆破作用下振动主频的衰减规律进行了研究。

结合式(8),对全断面和台阶法爆破单段最大

药量为 22.8 kg、爆心距为 125 ~ 155 m 时的振动主频(表 2)进行了非线性回归分析(图 2)。

表 2 单段最大药量为 22.8 kg 时
不同爆心距爆破的振动主频

Tab.2 Blast vibration frequency at different explosion
distances with the maximum single dose of 22.8 kg

全断面爆破		台阶法爆破	
r/m	f/Hz	r/m	f/Hz
125	21.27	125	23.62
130	21.06	130	23.03
135	20.75	135	22.43
140	20.69	140	22.06
145	20.33	145	21.53
150	19.84	150	21.05
155	19.76	155	20.27

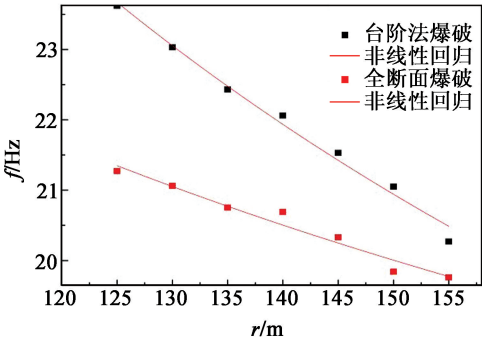


图 2 振动主频与爆心距之间的关系

Fig.2 Relationship between the main vibration
frequency and the distance of the explosion

得到的振动主频随爆心距的变化关系为：
全断面爆破

$f=331.42r^{-0.568\ 3},R^2=0.940\ 1;$ (9)

台阶法爆破

$f=605.98r^{-0.671\ 6},R^2=0.963\ 5。$ (10)

从回归公式式(9)、式(10)和图 2 看出,在单段最大药量相同的情况下,振动主频随爆心距的增加不断减小,而且台阶法爆破产生的振动主频大于全断面法爆破产生的振动主频,且衰减得更为迅速。

当爆心距为 150 m 时,不同单段最大药量作用下两种爆破方式的振动主频见表 3。

根据表 3 的数据,利用式(8)对不同单段最大药量与振动主频之间的关系进行了回归分析(图 3),具体关系如下：

全断面爆破

$f=175.68Q^{-0.653\ 7},R^2=0.958\ 9;$ (11)

台阶法爆破

$f=460.71Q^{-0.918\ 8},R^2=0.976\ 4。$ (12)

表 3 距离爆源 150 m 处不同单段最大药量
爆破的振动主频

Tab.3 Blast vibration frequency with various
maximum charge weights at the distance of
150 m from explosion area

全断面爆破		台阶法爆破	
Q/kg	f/Hz	Q/kg	f/Hz
28.8	19.84	25.2	23.56
32.0	18.42	28.8	21.05
34.4	17.69	32.0	19.34
41.6	15.25	33.2	18.62
44.8	14.83	35.2	17.64

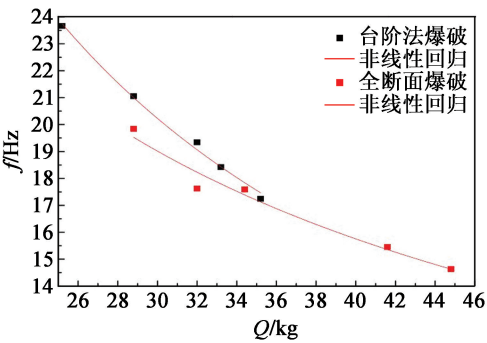


图 3 振动主频与单段药量之间的关系

Fig.3 Relationship between the main
vibration frequency and the single dose

从回归公式式(11)、式(12)和图 3 可以看出,在爆心距相同的情况下,振动主频随单段最大药量的增加而不断减少,且台阶法爆破比全断面爆破衰减得更加迅速。

综合上述可知,爆破产生的振动主频随单段最大药量和爆心距的增加而减少,而且单段最大药量对振动主频的影响更为显著。

3.2 声速测试与分析

基于声波测试原理^[18],对隧道围岩在爆破动荷载作用下产生的损伤效应进行了现场声波测试研究。具体试验方案:在距离掌子面 5.0 m 处布置声波测试孔(如图 4),孔间距为 1.0 m(倾斜两孔间距为 1.4 m),孔深为 3.6 m,由于测试需要,孔与侧壁的夹角为 65°~75°。表 4 分别为两种爆破方式下 5



图 4 声波孔现场布置图

Fig.4 Site layout of acoustic holes

表 4 5 次爆破作用下岩体的累积损伤度
Tab.4 Accumulative damage degree from five blasting

孔深/ m	第 1 次爆破		第 2 次爆破		第 3 次爆破		第 4 次爆破		第 5 次爆破	
	全断面	台阶法	全断面	台阶法	全断面	台阶法	全断面	台阶法	全断面	台阶法
3.4	0	0.001	0.003	0.001	0.003	0.001	0.007	0.001	0.007	0.001
3.2	0.007	0.001	0.003	0.001	0.007	0.002	0.003	0.001	0.003	0.002
3.0	0	0.002	0.003	0.003	0	0.001	0.003	0.003	0.003	0.001
2.8	0.008	0.001	0.004	0.005	0.008	0.003	0.008	0.005	0.007	0.001
2.6	0.003	0.003	0.007	0.005	0.007	0.007	0.011	0.005	0.007	0.005
2.4	0.008	0.001	0.003	0.005	0.008	0.001	0.003	0.005	0.003	0.001
2.2	0.003	0.003	0.007	0.001	0.011	0.005	0.007	0.001	0.018	0.001
2.0	0.008	0.001	0.004	0.003	0.008	0.001	0.008	0.003	0.007	0.001
1.8	0.007	0.007	0.019	0.009	0.030	0.005	0.030	0.007	0.049	0.009
1.6	0.029	0.002	0.036	0.003	0.047	0.007	0.054	0.009	0.073	0.011
1.4	0.035	0.003	0.053	0.013	0.066	0.028	0.076	0.034	0.095	0.035
1.2	0.054	0.032	0.080	0.062	0.095	0.078	0.098	0.089	0.122	0.088
1.0	0.074	0.045	0.115	0.091	0.140	0.120	0.153	0.132	0.169	0.147
0.8	0.095	0.076	0.147	0.110	0.199	0.163	0.201	0.188	0.228	0.181
0.6	0.124	0.101	0.181	0.141	0.223	0.196	0.250	0.223	0.265	0.211

次爆破对岩体的损伤情况。

从表 4 可以看出,在循环爆破作用下,岩体的损伤呈现非线性累积规律:台阶法爆破作用下,隧道围岩的影响深度为 1.2~1.6 m;全断面爆破对围岩的影响深度为 1.6~1.8 m;前 3 次爆破对围岩的损伤程度较为显著,随着爆心距的不断增加,损伤程度不断减小,最终只引起岩体的弹性振动,损伤不会再增加;全断面爆破对围岩的损伤程度比台阶法爆破更为严重。

4 结论

对全断面与台阶法爆破作用下的围岩振动特征进行了分析与对比,得出:

- 1)隧道爆破作用下,岩体的振动主频随爆心距的增加不断减少,且台阶法爆破振动主频衰减的程度比全断面爆破更为迅速。
- 2)爆破作用下,隧道岩体的振动主频随单段最大药量的增加不断减少;单段最大药量和爆心距相同时,台阶法爆破的振动主频也高于全断面爆破;且能看出,单段最大药量对振动主频的影响比爆心距的影响更加显著。
- 3)爆破荷载作用下,岩石损伤的累积呈现非线性。在 5 次爆破荷载的过程中,前 3 次爆破对岩体的损伤最为明显,并且全断面爆破比台阶法爆破对

岩体的损伤程度更大。

参 考 文 献

[1] 闫长斌. 爆破作用下岩石累积损伤效应及其稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2006.
YAN C B. Study on cumulative damage effects and stability of rock mass under blasting loading[D]. Changsha: Central South University,2006.

[2] LANGFORS U, KIHLESTRÖM B. The modern technique of rock blasting[M]. New York: John Wiley and Sons Incorporation, 1963.

[3] 杨建华,卢文波,胡英国,等. 隧道开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性[J]. 岩土力学,2014, 35 (2):511-518.
YANG J H, LU W B, HU Y G, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(2):511-518.

[4] 张雪亮,黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社,1981.

[5] 李俊如,李海波,高建光,等. 黄麦岭采场边坡爆破振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004, 23 (17):2954-2958.
LI J R, LI H B, GAO J G, et al. Response of Huang-mailing rock slope to explosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(17):2954-2958.

- [6] 唐海,李海波. 岭澳核电站二期工程基础开挖爆破震动衰减规律[J]. 爆破,2008,25(4):88-91.
TANG H, LI H B. Analysis for blasting vibration attenuation law in groundwork digging in the second-stage project in Lingao Nuclear Power Station[J]. Blasting, 2008,25(4):88-91.
- [7] 高富强,侯爱军,杨小林,等. 基于量纲理论的爆破振动频率分析[J]. 爆破,2010,27(3):1-3,8.
GAO F Q, HOU A J, YANG X L, et al. Analysis of blasting vibration frequency based on dimensional method[J]. Blasting, 2010,27(3):1-3,8.
- [8] 杨建华,卢文波,严鹏,等. 全断面开挖爆破产生的自由面对振动频率的影响研究[J]. 振动与冲击,2016,35(7):192-197.
YANG J H, LU W B, YAN P, et al. Influence of blast-created free surfaces on blasting vibration frequencies during full-face excavation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(7):192-197.
- [9] 胡冬冬,程康,刘阳,等. 频率因素对爆破振动影响的分析探讨[J]. 爆破,2012,29(4):127-130.
HU D D, CHENG K, LIU Y, et al. Discussion of blasting vibration effect on frequency factor condition[J]. Blasting, 2012,29(4):127-130.
- [10] 阳生权,吕中玉,刘宝琛. 隧道围岩爆破地震累积效应研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(8):1451-1454.
YANG S Q, LÜ Z Y, LIU B C. Study on blasting seismic cumulative effects of road tunnel and its surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007,3(8):1451-1454.
- [11] 闫长斌. 基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 187-192.
YAN C B. Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(suppl. 1): 187-192.
- [12] 刘明贵,张国华,刘绍波,等. 大帽山小净距隧道群中夹岩累计损伤效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(7):1363-1369.
LIU M G, ZHANG G H, LIU S B, et al. Research on accumulative damage effect of interlaid rock in Damaoshan Tunnel group with small clear distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(7):1363-1369.
- [13] RAMULU M, RAINA A K, CHOUDHURY P B, et al. Effect of repeated blast vibrations on damage intensity of granitic rock mass at an hydroelectric construction project[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2009,57(5/6):148-155.
- [14] 杨风威,李海波,刘亚群,等. 台阶与预裂爆破岩体振动特征的对比研究[J]. 煤炭学报,2012,37(8):1285-1291.
YANG F W, LI H B, LIU Y Q, et al. Comparative study on vibration characteristic of rock mass induced by bench blasting and pre-splitting blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(8):1285-1291.
- [15] 夏英杰. 爆破振动对矿山岩体边坡损伤弱化规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2012.
XIA Y J. The research for the mine blasting vibration fatigue damage of rock mass slope weakening[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.
- [16] 秦海洋,赖金星,唐亚森,等. BIM 在隧道工程中的应用现状与展望[J]. 公路,2016(11):174-178.
- [17] 谢兴博,钟明寿,陈勇,等. 爆破振动速度与加速度的等效换算研究[J]. 爆破器材,2015,44(5):51-55.
XIE X B, ZHONG M S, CHEN Y, et al. Research on the equivalent conversion of blasting vibration velocity and acceleration[J]. Explosive Materials, 2015,44(5): 51-55.
- [18] 费鸿禄,王世凯,杨智广. 扎哈淖尔露天煤矿岩体边坡爆破的损伤研究[J]. 爆破,2014,31(2):51-56.
FEI H L, WANG S K, YANG Z G. Blasting damage study of rock slope in opencast coal mine[J]. Blasting, 2014,31(2):51-56.