

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.04.010

饱和水岩体中大断面巷道群的爆破安全研究*

逢焕东^① 高文乐^① 郭得福^② 师传志^② 魏 征^②^①山东科技大学土木建筑学院(山东青岛,266590)^②中铁隧道集团烟台LPG地下储气硐库项目部(山东烟台,264000)

[摘要] 利用爆破振动作为信号源,运用3种不同的计算和测试方法,对爆破施工现场地下饱和含水巷道群的矿山法施工安全进行了计算和安全评价。结合现场岩石条件,对含饱和水、不含水2种工况进行了模拟计算,比较了计算结果,围岩充水时岩体内部受力情况劣化,内部应力增大约13%~15%;通过对爆破振动的现场测量,结合测点几何坐标,计算出了巷道围岩在爆破时产生的振动附加力,对隧道围岩的稳定性进行了评价,为现场支护的时间安排提供了指导意见。另外,结合地震勘探的方法,进一步求出了围岩的品质因子,细化了围岩在受到爆破振动时的衰减规律,为区域隧道群的合理、安全开挖提供了工程参考。

[关键词] 爆破地震;围岩;波速;品质因子

[分类号] TD235.4

引言

地下硐室群的施工中,爆破对围岩的作用^[1],特别在围岩含水的条件下,始终是一个重要的问题^[2]。如果能够利用分段爆破产生的振动作为地震波信号发射源,检测已完成巷道围岩的状态变化,结合数值计算进行判断,将会有很大的实用价值^[3]。本文试图借用一些方法,对饱和水岩体中大断面巷道群的安全爆破进行有益的探索。

烟台万华工业园液化烃地下水封硐库,是目前世界上最大的液化烃地下水封硐库。工程规划占地约4 km²,设计总库容为1×10⁶ m³,其中丁烷库0.25×10⁶ m³,液化石油气(LPG)库0.25×10⁶ m³,丙烷库0.5×10⁶ m³。丁烷和LPG硐库位于地下-90 m以下,丙烷硐库位于地下-120 m以下。硐库地面附近均为农田,距南侧村庄400 m,距西侧村庄600 m。地下硐库开挖的同时,地面工业园也在同步建设。

库区岩体主要为细中粗粒花岗岩,有较好的自稳能力,仅局部出现软弱结构面或不利结构面。岩石力学性质较好,饱和抗压强度50~100 MPa。地表覆有深20 m左右土体。硐库由交通巷道、水幕巷道、主硐室和竖井组成。交通巷断面尺寸为10 m×9 m(宽×高),水幕巷断面尺寸为7 m×6 m,主硐室断面尺寸为18 m×26 m,竖井直径6 m。地下硐库

结构复杂,多条硐室平行布置,爆破施工时平行进行,所以临硐的保护也是至关重要的。

根据《爆破安全规程》对爆破振动安全允许标准^[4],本工程地表建筑物选取的安全允许振速不大于2.0 cm/s,相邻硐室选取的安全允许振速不大于7.0 cm/s。

1 研究现状

岩石内在损伤的检验,大多在实验室通过试件检测其间接动态参数等指标。而在实验室测得的数据,因为已经从地下取到地面,其受力状态已发生改变,所以不能准确地反映在现场的实际应力状况,与现场围岩的真实状态存在一定差距,应用这些指标进行生产现场围岩安全状态的判定有很大的不确定性,更加合理的方法应当是原位测试。

在周围岩体已经注水的条件下,施工过程中的爆破地震波对良好的围岩条件影响较小^[2],但对岩体中的已有节理和裂隙会产生很强的劣化作用,从而加剧围岩的破裂。所以控制爆破造成的岩体损伤,就成为设计、施工的关键。当前有直接判断和间接判断2种方法,但主要是采用非直接的方法:如检测岩体力学参数、爆前爆后对比检测^[5-6]、钻孔电视、CT扫描等^[7]。其中,声波检测方法测试简单、成本低、精度高,在施工现场得到了较多的应用。李新平等提出了一种施工控制方法,把临界损伤振动速度

* 收稿日期:2013-09-23

基金项目:国家自然科学基金(51379116)

作者简介:逢焕东(1969~),男,副教授,博士,主要从事岩土力学和爆破安全技术的教学与科研工作。E-mail:phd2050@163.com

作为爆破损伤安全判据^[8];由于工程爆破的衰减规律不同于天然地震^[9],与后者相比,工程爆破地震传播范围小、频率高、衰减快,在计算、评估时应当注意。岩体注水、大断面、巷道群交叉存在,都对巷道的爆破施工产生极为不利的影响^[10],可能会威胁到安全施工,所以必须控制爆破振动效应。

为保证贮存气体的安全,使之不发生逃逸,需要对岩体充水处理,让围岩裂隙之中充满水,防止液化可燃气体泄露。此方法以前曾经在瑞典和法国采用过。但在大规模的硐室群内采用,万华液化烃地下水封硐库还是首次。本文结合对岩体的观测数据和数值计算,对围岩在爆破过程中的稳定性变化给出指标,做出定量的判断。

2 数值计算

爆破过程中,巷道周围围岩已经注水,并且已达到饱和、稳定状态。岩体内的水开挖后,发生单向流动,其流动遵守 Navier-Stokes 方程。根据以上工程情况,建立计算模型,利用 COMSOL 软件,进行数值模拟计算,该软件可以比较方便地考虑流体的作用。为了判断现场施工安全情况,取最不利工况进行耦合数值计算。模型参数如下:材料为花岗岩,杨氏模量 $E = 10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu = 0.26$,密度 $\rho = 2700$ kg/m³。为简单起见,不考虑热交换,采用 D-P 准则,准则表达式的系数根据岩石性质,近似取 $\alpha = 0.32$, $K = 3.67$ 。上部为注水巷道,直径 6 m;下部为贮气巷道,直径 7 m。饱和水计算工况:因水的温度较低,取 10 °C 时的动力黏度为 1.308×10^{-3} Pa·s。

计算结果见图1、图2(云图表示应力,单位为 Pa)。可以看出,巷道爆破时,对上部巷道的影响比同一水平上的巷道影响大;上部注水巷道对地震波的传播有一定的阻碍作用,但是相应地会使得爆破作用集中于上部注水巷道的底板处;而下部巷道的爆破对周围贮气巷道的影响不大。对比发现,不含

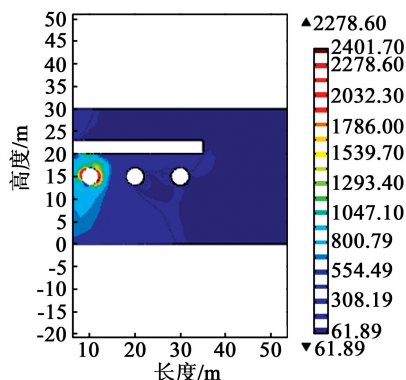


图1 不含水时的岩体应力状态

Fig.1 Stress distribution in dry rocks

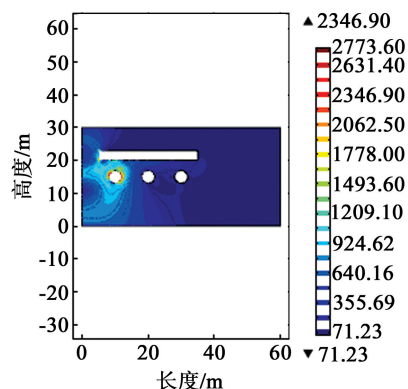


图2 含饱和和水时的岩体应力状态

Fig.2 Stress distribution in water saturated rocks

水时巷道围岩最大应力约为 2400 Pa,含饱和水时巷道围岩最大应力约为 2770 Pa。

比较上述不含水、含饱和水时巷道围岩最大应力数值可以发现,后者(2770 Pa)比前者(2400 Pa)围岩内部应力增大约 13% ~ 15%。这意味着围岩变为饱和水状态以后,岩体的受力状态、受力条件劣化,即使不考虑巷道围岩因为水的作用导致自身稳定的阈值(或门槛值)降低,其危险性也增大约 13% ~ 15%。所以在含饱和水的地质条件下,更容易出现围岩不稳定问题^[11],特别是底鼓或者冒顶,应当引起施工方足够注意。

3 现场试验

丁烷和丙烷库爆破时,在上层注水巷道进行测震试验,通过爆破地震数据对围岩完好状况进行判断。各测震点布置见图3,测震结果见图4、图5。

爆破瞬时,其时间历程上会产生爆破作用附加力。根据岩石内应力与振动相速度、质点速度的关系,爆破振动导致的岩体内应力为^[12]:

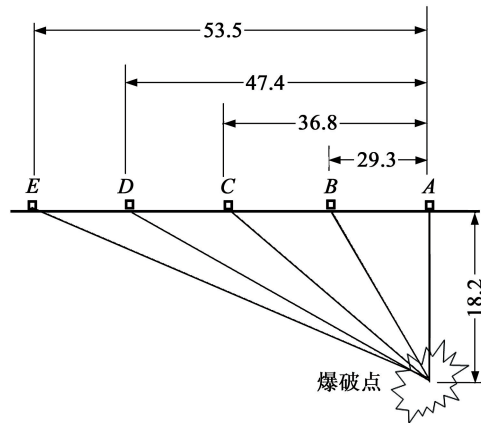
$$\sigma = \rho cv. \quad (1)$$

式中: σ 、 ρ 、 c 、 v 分别为爆破时岩石内的应力、密度、波速和质点振动速度。

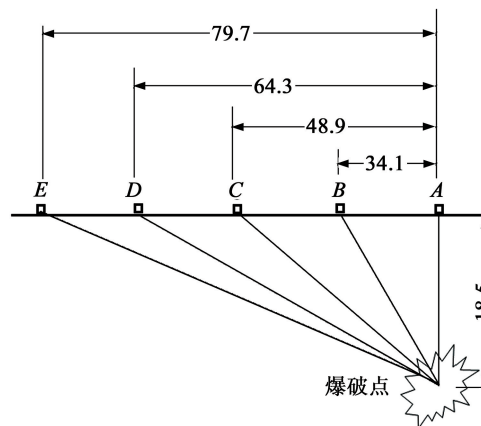
取岩石密度 $\rho = 2700$ kg/m³,根据式(1)计算得到的瞬时爆破作用附加力见表1、表2。表中时差可以通过波形最大峰值的相关运算得到。

根据已经测定的岩石力学性质,其(静态)饱和抗压强度在 50 ~ 100 MPa。而爆破导致的瞬间(动态)附加力,丙烷库围岩约在 0.24 ~ 0.41 MPa,丁烷库围岩约在 0.10 ~ 0.24 MPa。从工程施工的角度看,爆破振动产生的附加力不足以对这2处巷道的围岩造成破坏性影响。

从地震波勘探过程知道,品质因子能够在动态情形之下,随地层性质的变化比地震波波速等其他震波参数更为灵敏^[13],可以借助品质因子反映岩体



(a) 丁烷库爆破测震点



(b) 丙烷库爆破测震点

图3 爆破测震布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of blasting vibration measurement (unit: m)

内部的力学状态变化。由于岩体不是严格意义的各向同性材料,所以其性质非常复杂,对爆破的响应也

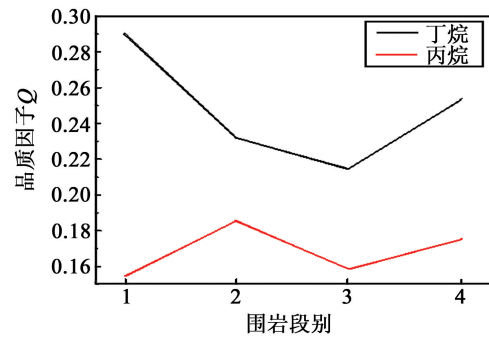
图4 丁烷、丙烷库围岩品质因子 Q 的变化

Fig. 4 Quality factor variation for the butane confined and propane confined rocks

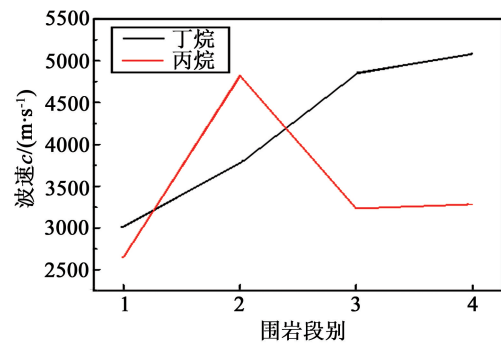


图5 丁烷、丙烷库围岩地震波速变化

Fig. 5 Seismic velocity variation for the butane confined and propane confined rocks

各不相同。巷道围岩的振动不是严格意义的单自由度体系,振动波的成分也并非单一。借助傅里叶分析的方法,不考虑频散,计算卓越频率的振动情形。因为距离爆破巷道比较远,波的衰减较小,振动时满

表1 丁烷库围岩地震波参数

Tab. 1 Recorded parameters for the butane confined rocks

测点	时间/ s	质点震速 $v/(m \cdot s^{-1})$	水平距离差/ m	倾斜距离/ m	时差/ s	波速 $c/(m \cdot s^{-1})$	瞬时爆破振动附加力 σ/MPa
11	0.03708	0.0246	0	—	—	—	—
12	0.04681	0.0237	29.3	34.49	0.00973	3545	0.23
13	0.05772	0.0237	36.8	41.05	0.01091	3763	0.24
14	0.07161	0.0241	47.4	50.77	0.01389	3655	0.24
15	0.08582	0.0089	53.5	56.51	0.01421	3977	0.10

表2 丙烷库围岩地震波参数

Tab. 2 Recorded parameters for the propane confined rocks

测点	时间/ s	质点震速 $v/(m \cdot s^{-1})$	水平距离差/ m	倾斜距离/ m	时差/ s	波速 $c/(m \cdot s^{-1})$	瞬时爆破振动附加力 σ/MPa
21	0.06361	0.0321	0	—	—	—	—
22	0.07821	0.0443	34.1	38.80	0.01460	2657	0.32
23	0.08902	0.0315	48.9	52.28	0.01081	4836	0.41
24	0.10970	0.0291	64.3	66.91	0.02068	3235	0.25
25	0.13460	0.0267	79.7	81.82	0.02490	3286	0.24

足以下关系^[14]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{2ac}{\omega} \quad (2)$$

由式(2)进一步推得:

$$Q = \frac{\omega}{2ac} \quad (3)$$

式中: a 是围岩的地震波吸收系数,目前还难以测到,根据此围岩的种类和力学性质,采用工程类比的方法^[13,15],取 $a = 5 \times 10^{-3}$; ω 是爆破地震波的频率; c 是波速。

对丁烷、丙烷库的爆破振动进行傅里叶分析,人工点取各个坐标点极值数据,得到了各个测点的卓越频率变化数据。在此基础上,按照式(3)的方法,计算得到了品质因子 Q ,见表 3、表 4。

表 3 丁烷库围岩的品质因子计算

Tab. 3 Quality factor calculation for the butane confined rocks

测点	对应频率 ω / Hz	波速 c / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	品质因子 Q
11	1.20	—	—
12	8.76	3012	0.29
13	8.76	3779	0.23
14	10.40	4847	0.21
15	12.92	5092	0.25

表 4 丙烷库围岩的品质因子计算

Tab. 4 Quality factor calculation for the propane confined rocks

测点	对应频率 ω / Hz	波速 c / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	品质因子 Q
21	3.25	—	—
22	4.11	2657	0.15
23	8.98	4836	0.19
24	5.12	3235	0.16
25	5.75	3286	0.17

品质因子 Q 表征了传输地震波介质的品质,能描述介质对地震能量的吸收和散射,可以定量地反映地震波传播过程中能量的变化及介质的物理性质。品质因子 Q 值能综合、准确地反映岩石物理力学性质的变化。通过对围岩层品质因子的变化,可以根据品质因子 Q 值,进一步研究岩层的稳定性。

应当指出,表 3、表 4 所列出的围岩层品质因子数值,其参考值为图 3 中 A 点。与一些教科书相比,数值明显偏小,但仍然能够反映出围岩的变化情况。图 4、图 5 列出了品质因子、波速随不同围岩监测段的变化,其中,横坐标表示不同的围岩监测段(5 个

测点对应 4 段围岩)。具体内部不同位置劣化数值的量化,还需要增加测点、优化计算参数等进一步的研究工作。但是,丁烷库围岩的波速度一直走高, Q 值却出现降低后又增加的“凹”形变化。这应当是围岩内部地震波传播过程中的复杂性引起的,特别是针对不同的围岩段,内部存在某种构造,例如节理、含水量变化等,这些构造的存在数量也有差异。说明采用式(3)衡量围岩的情况,参数偏少,尚需要考虑更多的参数。

图 5 表明,丁烷库围岩地震波波速逐渐增大,说明其围岩保护良好,未发生劣化;而丙烷库围岩地震波波速有所降低,其围岩产生了一定程度损伤。但没有出现剧烈的下降,所以围岩仍然在一定的时间内保持稳定。但需要缩短施工周期,抓紧时间进行支护工作。

4 结论

本文利用围岩品质因子的特性,把爆破作业对围岩的影响量化,加深了人们对围岩在受到爆破振动时的衰减规律的认识,为附近区域隧道群的下一步开挖提供了工程依据。主要结论如下:

1) 计算表明,围岩充水时,岩体内部受力情况劣化,与未充水工况比较,内部应力增大约 13% ~ 15%;

2) 通过现场的动态、实时观测和不断强化安全措施,该地下气库的施工始终能安全、稳定地进行,未发生不良事故,证实综合利用数值水固耦合分析、波速、品质因子进行围岩状况综合判断分析,是能够正确反映工程实际状况的。

由于这些方法以前运用不多,对于如何进一步量化、比较,更紧密地与围岩的状态联系起来还存在不足,需要在以后的工程实践中进一步完善。

致谢: 中铁隧道集团一处有限公司,参加现场测试的技术人员蔚蒙灿等同志,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 汪旭光,于亚伦,刘殿中. 爆破安全规程实施手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 谷兆祺,彭守拙,李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [3] 杜修力,崔江余,陈厚群. 区域介质品质因子对地震动参数衰减的影响[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(1):15-20.
Du Xiuli, Cui Jiangyu, Chen Houqun. Effects of quality factor of region medium on earthquake motion parameters [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999,19(1):15-20.
- [4] 中国工程爆破协会. GB6722—2003 爆破安全规程

- [S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [5] 闫长斌,王贵军,石守亮,等. 岩体爆破损伤声波测试信号频谱特征的小波(包)分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(7):1496-1502.
- Yan Changbin, Wang Guijun, Shi Shouliang, et al. Analysis of acoustic wave frequency spectrum characters of rock mass under blasting damage based on wavelet (packet) transformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7):1496-1502.
- [6] 严鹏,卢文波,单治钢,等. 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1552-1561.
- Yan Peng, Lu Wenbo, Shan Zhigang, et al. Detecting and study of blasting excavation-induced damage of deep tunnel and its characters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8):1552-1561.
- [7] 夏红兵,徐颖,宗琦,等. 爆炸荷载作用下裂隙岩体内损伤范围的观测研究[J]. 岩土力学,2007,28(4):795-799,802.
- Xia Hongbing, Xu Ying, Zong Qi, et al. Observation study of fissure rock damage range under blasting load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4):795-799, 802.
- [8] 李新平,陈俊桦,李友华,等. 溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10):2042-2049.
- Li Xinping, Chen Junhua, Li Youhua, et al. Study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground power-house of Xiluodu hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10):2042-2049.
- [9] 李洪涛,卢文波,舒大强,等. 爆破地震波的能量衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):3364-3369.
- Li Hongtao, Lu Wenbo, Shu Daqiang, et al. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supplement 1):3364-3369.
- [10] 宋波,李悦,单宏兰,等. 爆破作用对地下金属矿山围岩稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):3461-3467.
- Song Bo, Li Yue, Shan Honglan, et al. Study on effects of blasting on stability of surrounding rockmass in underground metallic mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supplement 1):3461-3467.
- [11] Cui Z D, Yuan L, Yan C L. Water-silt composite blasting for tunneling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(6):1034-1037.
- [12] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [13] 张平松,刘盛东,赵秋芳,等. 淮南矿区煤层衰减特征及品质因子分析[J]. 煤炭科学技术,2006,34(5):83-85.
- Zhang Pingsong, Liu Shengdong, Zhao Qiufang, et al. Factor analysis on seam reduced features and quality in Huainan Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(5):83-85.
- [14] 何樵登. 地震波理论[M]. 长春:吉林大学出版社,2005.
- [15] Lokajck T, Goel R K, Rudajev V, et al. Assessment of velocity anisotropy in rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013 (57):142-152.

Safety Research on Blasting Operation for Large Dimension Rock Tunnels Saturated by Water

PANG Huandong^①, GAO Wenle^①, GUO Defu^②, SHI Chuanzhi^②, WEI Zheng^②

^①College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology
(Shandong Qingdao, 266590)

^②Yantai LPG Storage Cavern Project Management Department, China Railway Tunnel Group Co., Ltd.
(Shandong Yantai, 264000)

[ABSTRACT] Computation and safety evaluation was conducted on the execution of blasting works at the construction site for rock tunnels saturated by underground water using blasting vibration as the signal source and three different calculating and measuring approaches. Simulations under the on site rock conditions of water saturated and unsaturated show the degradation of stress distribution, an increase of about 13%-15% in inner stress. The measurements on the blasting vibrations and coordinates for survey positions were carried out to calculate the extra vibration stress and to evaluate the stability of the confined rocks during the blasting operation for rock tunnels, which can be served as the guidelines for scheduling the on site supports and protections. In addition, the quality factor of confined rock was determined by seismic exploring technique, and its attenuation law of blasting vibration was clarified to provide a reference frame for the rational and safe excavation of the tunnels.

[KEY WORDS] blasting vibration; confined rock; wave velocity; quality factor