

花岗岩中深埋隧道扰动区应力测试与分析

宋志鹏¹, 徐金明¹, 涂齐亮²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 中设设计集团股份有限公司, 南京 210014)

摘要: 在深埋隧道施工过程中, 掌子面推进将引起围岩内部应力的重新分布, 洞壁附近围岩处于扰动状态, 确定扰动区应力对于深埋隧道结构设计和安全施工有着极为重要的作用。在阐述扰动区应力主要测试方法的基础上, 使用钻孔式测试方法得到了某深埋隧道花岗岩围岩中扰动区应力及其随时间的变化过程, 提出了使用双曲线拟合确定扰动区应力测试稳定值对应时刻的方法, 研究了水平方向和垂直方向扰动区应力测试稳定值的分布特征。结果表明, 与其他扰动区应力测试方法相比, 钻孔式测试方法具有快捷、方便、实用的特点, 可用于确定深埋隧道围岩扰动区应力。

关键词: 深埋隧道; 扰动区应力; 双曲线; 测试稳定时刻

中图分类号: U 456 **文献标志码:** A

Measurement and Analysis of Disturbed Zone Stress in Granite of a Deep Tunnel

SONG Zhipeng¹, XU Jinming¹, TU Qiliang²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: During the construction of a deep tunnel, the stresses in surrounding rocks will be redistributed due to the pushing of the tunnel wall while the stresses in wall rocks reach to a disturbed state. Therefore, it is quite important to determine the disturbed zone stress for the design and construction of the deep tunnel. After discussing the features of various techniques used in the measurement of disturbed zone stresses, the borehole measurement technique was used to determine the magnitude and the change with time of the disturbed field stresses in the granite of the deep tunnel. The technique for estimating the detected stable instant of disturbed zone stresses was then proposed by the use of the hyperbolic fitting method. The distribution features of the measured stable disturbed zone stresses in the horizontal and vertical directions were thereafter analyzed. The results show that compared with other methods, the borehole measurement technique is more quick, convenient and feasible, and especially suitable to measure disturbed field stresses in deep tunnels.

Keywords: deep tunnel; disturbed zone stress; hyperbola; stable instant measuring

收稿日期: 2018-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254); 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(17-C13)

第一作者: 宋志鹏(1994-), 男, 硕士研究生。研究方向: 岩土工程。E-mail: SZPeng2016@163.com

通信作者: 徐金明(1963-), 男, 教授。研究方向: 岩土工程。E-mail: xjming@163.com

深埋隧道施工时, 掌子面掘进将影响原岩应力的平衡状态, 引起岩体内的应力重新分布, 洞壁附近围岩以扰动状态反映出来。扰动区应力及其变化直接影响到深埋隧道的正常施工和安全运营, 因此, 深埋隧道围岩扰动区应力测试与分析, 不仅可为隧道施工提供重要基础资料, 对深埋隧道断面形状设计也具有一定的参考价值。

对于扰动区应力分析, 王洪德等^[1]将受扰动危岩体变形动态的同步监测结果用于反馈设计, 有效保证了施工进度和施工人员的安全; Lu等^[2]研究了使用钻爆法开挖岩体过程中的地应力变化过程; 李扬帆等^[3]根据开挖扰动区的概念分区、现场测试和数值模拟结果, 对开挖扰动区已有研究成果进行了总结; 张向东等^[4]研究了扰动影响下巷道支护设计方案的支护效果, 提出了采用锚索注浆的耦合支护方案; 朱泽奇等^[5]研究了实际工程掌子面推进过程中的围岩应力状态, 分析了扰动区应力的变化特征; 卢宏建等^[6]通过建立采空区围岩的数值计算模型, 采用数值模拟软件分析了扰动区应力的变化规律; 徐连满等^[7]研究了扰动支撑压力的分布规律, 为巷道超前支护提供了可靠的理论依据; 陈峰等^[8]利用岩石破坏分析软件对扰动影响下覆岩破坏的动态发展过程进行了模拟; Shen等^[9]采用二维离散元模拟程序对隧道开挖进行数值模拟, 研究了节理间距对隧道开挖扰动区大小的影响; 徐前卫等^[10]采用模型试验和数值模拟相结合的方法, 研究了扰动区应力的变化规律, 为隧道支护结构的设计提供了借鉴和参考。

近年来, 扰动区应力测试方法研究也取得了很大进展。蔡美峰^[11]阐述了地应力测量的基本理论、指导原则和主要技术, 介绍了不同测量方法和测量仪器的基本原理; Cai等^[12]分析了不同地应力测试技术的测量结果, 介绍了地应力测量结果在采矿设计中的应用; 宋广东等^[13]提出根据扰动区应力理论分析确定扰动区应力监测方案的方法; 周奎等^[14]对隧道工程施工过程中围岩压力监测结果进行了拟合分析; 欧阳振华等^[15]采用套孔应力解除法和钻孔应力计分别测量矿区地应力和扰动区应力, 获得了地应力场和扰动区应力的分布规律; 张芳等^[16]使用流变应力恢复法测试岩体中的三向压应力, 探讨了传感器的优化设计问题; 靳晓光等^[17]提出了现场扰动区应力的应力恢复监测方法, 使用弹性力学理论和单孔应力解除

法验证了测试结果的正确性; 周辉等^[18]使用原位监测方法得到了深井巷道围岩开挖扰动区的演化特征; Gao等^[19]研究了预加应力锚杆对巷道围岩应力重分布的影响; 徐文全等^[20]基于静水压原理开发了扰动区应力监测传感装置并进行了现场实测; Wang等^[21]使用钻孔应力计测量岩石深部应力, 得到了岩石深部应力的变化规律; 白世伟等^[22]根据隧道应力扰动区的应力实测值, 通过三维数值模拟确定了侧压系数和初始地应力的分布大小。

使用钻孔应力计法测试围岩扰动区应力, 既可以有效减小现场测试对隧道施工进度的影响, 又可以弥补现有测试方法的不足; 但是, 在现场方便快捷地测得扰动区应力、确定扰动区应力测试稳定时刻, 目前这方面研究成果还不多。本文拟以某深埋隧道花岗岩围岩为例, 选用钻孔应力计法测试围岩扰动区应力、分析扰动区应力随时间的变化过程, 使用双曲线拟合确定扰动区应力测试稳定值的对应时刻, 进而分析扰动区应力测试稳定值的分布特征。

1 扰动区应力测试方法

1.1 扰动区应力现有测试方法简述

扰动区应力现场测试常用切槽式(包括位移测试和应力测试)和钻孔式测试方法。为了选择合适的方法, 下面对这些方法作一简述。

使用切槽式位移测试时, 在测点位置附近凿一狭长的扁平槽, 通过在扁槽内安装扁千斤顶(液压枕)进行加载恢复原岩应力, 直接测定岩体中的应力大小。测试时, 在测量点位置附近凿一扁平槽, 边凿槽边测量槽两侧变形(位移), 凿槽结束后获得局部应力对应的变形值; 然后在槽中埋设扁千斤顶并加压, 同时测量由扁千斤顶加压引起的变形值; 当槽两侧变形恢复到初始状态时, 扁千斤顶的压力即为槽中垂线方向上岩壁表层的正应力。

使用切槽式应力测试时, 采用充液膨胀压力枕和配套使用的频率计测量岩石内部的应力。钻孔内应力变化通过应力枕两面的包裹体传递到注油膨胀起来的应力枕, 并被转变为应力枕内的液体压力。该压力经油管传递到压力-频率转换器, 转变为频率, 根据频率来计算应力的变化量。

使用钻孔式测试方法时, 在测点位置打出一一定深度的钻孔, 使用配套工具把振弦式钻孔应力

计放入到钻孔内,再把应力计活动块升起一定高度,使内部振弦式压力传感器受有较小的初压力。岩石发生变形时,钻孔应力计活动块受力,油压通过传感器传出频率信号,进而使用频率-应力换算关系得到岩体中的应力。

使用切槽式位移测试方法,需要在切割围岩上花费大量的时间、人力和物力,难以确定扰动区应力测试稳定值的对应时刻;使用切槽式应力测试方法,相关设备运输到现场通常存在一定困难,可能影响测试进度;使用钻孔式测试方法,测试设备运输方便,测试操作简单,扰动区应力测试稳定时刻易于确定。因此,本次研究测试扰动区应力时,使用钻孔式测试方法,所用的传感器是振弦式钻孔应力计。

在选定测试方法之后,需要确定测点的位置。因为扰动区应力值是相对变化量,所以,测点位置应该选在尽量靠近掌子面的隧道两侧岩壁。同时,本次研究对应的深埋隧道采用钻孔爆破法进行开挖,每次爆破后向前开挖 1.80~2.40 m,爆破过程产生的岩石碎屑绝大部分位于掌子面后方约 11 m 以内(少数碎屑会弹射到掌子面后方 20~30 m 处)。为保证测试工作的安全,测点位置选为掌子面后方 30 m 处的岩壁。测点位置见图 1。

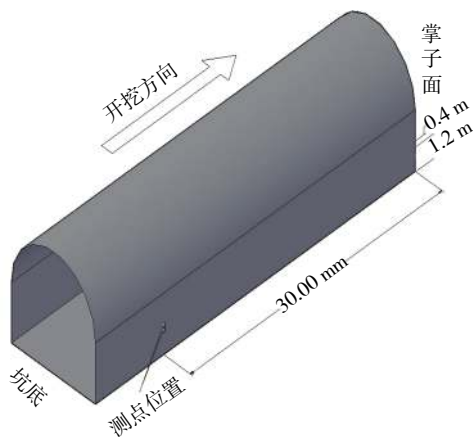


图1 测点位置示意图

Fig.1 Diagram of measuring point positions

确定好钻孔位置后,需要确定被测位置钻孔的孔径大小。基于钻孔应力计埋设需要,现场钻孔直径初选为 40, 42, 44 和 47 mm。其中: 40 mm 的孔径太小,无法将预定应力计安装到孔内; 42 mm 的孔径略小,在安装过程中活动块的磨损严重; 47 mm 的孔径过大,活动块完全升起后不能与岩壁贴合; 44 mm 的孔径较为合理,应力计安装便

利,活动块升起 1~3 mm 可与岩壁贴合。因此,现场钻孔直径选为 44 mm。

1.2 测量原理

本次测试所用应力计是山东泰安科大洛赛尔传感技术有限公司生产的 ZLGH 型振弦式钻孔应力计(见图 2),应力计测量范围为 0~40 MPa,准确度为 1.00%FS,重复性为 0.05%FS。相应的频率测量采用 GSJ-2A 型振弦式数据计算存储器。



图2 ZLGH 型振弦式钻孔应力计

Fig.2 ZLGH type of vibrating wire borehole stress sensor

应力计内部含有特定材质与尺寸的钢弦,钢弦周围布有磁感线圈。孔壁收缩时,活动块上的应力增加,钢弦向磁感线圈发射一个脉冲电流、并在磁感线圈磁力作用下开始振动。根据弦的振动方程,可得钢弦振动频率与应力关系

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\sigma/\rho_1} \quad (1)$$

式中: f 为钢弦振动频率; l 为钢弦长度; ρ_1 为钢弦的线密度; σ 为钢弦受到的应力。

将应力计固定于钻孔内部,尽量将应力计上的活动块与岩壁紧密贴合。由传感器所测频率算得扰动区应力

$$F = A(f_1^2 - f_0^2) \quad (2)$$

式中: $A = 4l^2\rho_1E_2/(E_1A_1)$, 其中, E_1 为钢弦弹性模量, E_2 为岩体弹性模量, A_1 为面积; f_1 为钢弦某一时刻频率; f_0 为钢弦初始频率。

因温度漂移和零点漂移的影响,直接用式(2)计算扰动区应力会有一定误差。为了减小拟合误差,邓铁六等^[23]基于对实验数据的分析,提出了计算扰动区应力的数学模型

$$F = A(f_1^2 - f_0^2) + B(f_1 - f_0) \quad (3)$$

式中, B 为传感器常数,可由标定数据使用最小二乘法求出。

本项目用式(3)进行扰动区应力计算。实际操作时,GSJ-2A型振弦式数据计算存储器中已将式(3)存储。

1.3 测试过程

为了研究深埋隧道开挖后围岩扰动区应力随时间的变化过程,在掌子面后方30 m处右侧岩壁(面向掌子面)选取两个测试点N1和N2,分别测试垂直方向和水平方向的扰动区应力。测点N1和N2处于同一竖直线,间隔为0.4 m,埋深分别为979.00 m和979.40 m。

在每一测点处,使用XY-1A-4型钻机沿水平方向钻出直径为44 mm、深度为50 cm的钻孔;然后把钢筋穿入管子并插入传感器的中心凹槽,工具管子上的缺口扣在传感器的销子和电缆上,从管子尾端记下传感器的活动块方位(需要测量哪个方向的力,就将传感器的活动块对准哪个方向);用工具管子将传感器送入孔内一定深度。传感器的安装见图3。



图3 传感器安装示意图
Fig.3 Diagram of sensor's installation

传感器安装之后,需要确定传感器的初始频率。此时,左手紧握工具管子,使它不产生转动,用右手顺时针拧动钢筋,以便给传感器一个初应力,直到活动块承受压力,频率出现变化;停止拧动钢筋,将钢筋抽出,再退出工具管子,频率稳定后的读数即为初始频率。

确定初始频率后将数据调零处理,此后直接读出存储频率大小就可得到岩石中的应力增量。每隔一定时间测量一次读数,当连续2次测试频率读数相对误差小于0.1%时,将该频率通过式(3)换算得到的应力值视为扰动区应力测试稳定值。

与其他扰动区应力测试方法相比,钻孔式测

试方法具有相关设备运输方便,试验步骤简单,操作便捷,可实施性强,对测试埋深无限制要求等方面的优点。使用该方法测试围岩扰动区应力,可以有效提高测试效率。

2 扰动区应力测试稳定值的确定

隧址位于呈北北西—近南北走向的里龙断裂带,属冈底斯山、念青唐古拉山、喜马拉雅山之间的藏南谷地。基岩岩性以花岗岩为主,隧道内裂隙主要见于地表及浅部,裂隙多而细小、杂乱无章。节理间距多在2~4 m。隧道断面形状为直墙三心拱形,跨度8.38 m,隧道断面图见图4。测点里程为DK285+312。对于垂直方向扰动区应力测点N1,钻孔的方位角为东偏南10°,钻孔倾角为4°,传感器常数为 $A = -1.495\ 30 \times 10^{-5}$, $B = 2.836\ 96 \times 10^{-3}$ 。对于水平方向扰动区应力测点N2,钻孔方位角为东偏南12°,钻孔倾角为5°,传感器常数为 $A = -1.687\ 14 \times 10^{-5}$, $B = -2.011\ 40 \times 10^{-3}$ 。

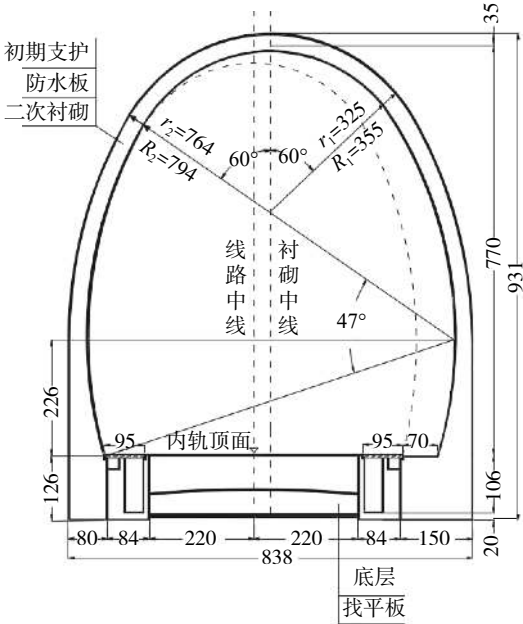


图4 隧道断面图(单位:厘米)
Fig.4 Section chart of the tunnel (unit: cm)

图5和图6分别是测点N1处垂直方向扰动区应力(σ_z)随时间变化的曲线,测点N2处水平方向扰动区应力(σ_x)随时间的变化曲线。

由图5和图6可以看出,两个测点处围岩扰动区应力起始值均为零,扰动区应力值均随时间逐步增大。在垂直方向,测试开始后第1.5 h扰动区应力值达到4.16 MPa,第22 h达到16.29 MPa,22 h

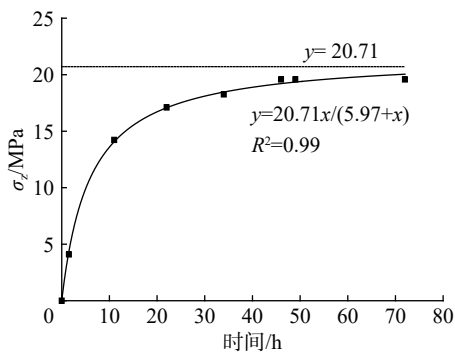


图 5 测点 N1 处扰动区应力随时间的变化曲线

Fig. 5 Disturbed zone stress varying with time at point N1

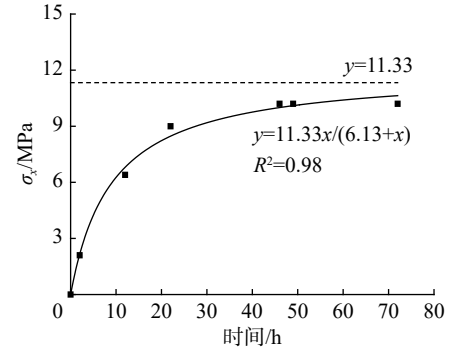


图 6 测点 N2 处扰动区应力随时间变化曲线

Fig. 6 Disturbed zone stress varying with time at point N2

后曲线增长速度缓慢，第 42 h 达到 18.13 MPa，42 h 后曲线趋于平缓。在水平方向，测试开始后 1.5 h 扰动区应力值达到 2.23 MPa，为同一时刻垂直方向扰动区应力的 54%，42 h 之后曲线也趋于平缓。

可以使用数据拟合方法，得到不同方向扰动区应力与时间的函数关系。垂直方向上双曲线拟合函数为

$$y = 20.71x / (5.97 + x) \tag{4}$$

式中： x 为从测试开始后某一时刻的数值； y 为某时刻围岩扰动区应力值。

水平方向上双曲线拟合函数为

$$y = 11.33x / (6.13 + x) \tag{5}$$

围岩扰动区应力通常随时间而变化，现有文献中的扰动区应力本质上是指随时间变化的测试稳定值，但这一稳定值对应时刻的确定方法，目前还没有共识。下面结合实测数据，先求得拟合双曲线函数的渐近线，将渐近线对应的数值作为扰动区应力的测试稳定值；然后将达到稳定值 90% 时所对应的时刻作为扰动区应力的测试稳定时刻。对于垂直方向，拟合双曲线函数的渐近线为 $y = 20.71$ ，根据双曲线函数可求得扰动区应力的测试稳定时刻为 53.76 h。从图 6 也可以比较明

显地看出这一点：在稳定时刻之前拟合曲线比较陡峭，在稳定时刻以后拟合曲线比较平缓，扰动区应力变化不大。水平方向同样可得到扰动区应力测试稳定值对应时刻 (56.16 h)。

在该隧道附近的另外两条隧道中各选测点 N3 和 N4，使用钻孔式测试方法分别测试围岩 (也为花岗岩) 中垂直和水平方向的扰动区应力。测试结果见图 7 和图 8。

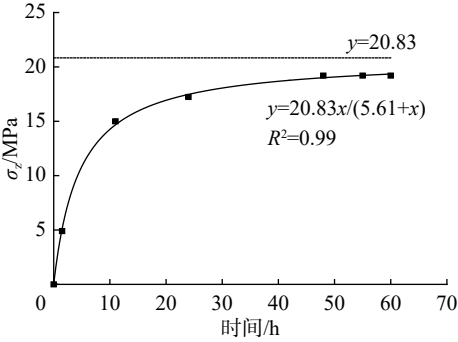


图 7 测点 N3 处扰动区应力随时间的变化曲线

Fig. 7 Disturbed zone stress varying with time at point N3

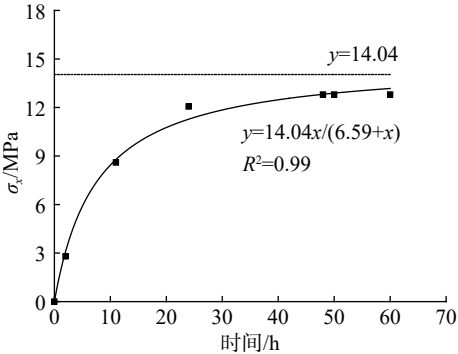


图 8 测点 N4 处扰动区应力随时间变化曲线

Fig. 8 Disturbed zone stress varying with time at point N4

同样地，使用最小二乘法得到图 7 和图 8 中的拟合双曲线方程分别为 $y = 20.83x / (5.61 + x)$ ， $y = 14.04x / (6.59 + x)$ ，两条双曲线方程的渐近线分别为 $y = 20.83$ ， $y = 14.04$ ，围岩扰动区应力测试稳定值对应的时刻分别为 50.50 h 和 59.31 h。

现场测试期间，测点附近围岩在初衬完成一段时间之后出现岩片剥落现象，说明围岩变形破坏过程与历时有关，作用在衬护结构上的围岩压力，在衬护受力以后因围岩蠕变而增长。现场测试 50 h 之后围岩变形量极小，说明测试开始后约 50 h 围岩趋于稳定。

由图 5~8 可以看出，测点 N1，N2，N3 和 N4 处在受到扰动后的第 42 h 扰动区应力值分别为 18.13，9.89，18.38 和 12.14 MPa，分别是同一测点处

扰动区应力测试稳定值的 87.54%, 87.29%, 88.24% 和 86.47%, 说明围岩变形主要发生在受扰动后的 42 h 内。

3 扰动区应力的分布特征

为了研究围岩扰动区应力的分布特征, 在测

点 N1 和 N2 所在位置之外, 另选两个测点 N5 和 N6。测点 N5 和 N6 位于深埋隧道进口(里程为 DK283+695)的左侧岩壁上, 两测点处于同一竖直线, 与掌子面相距 30 m, 埋深分别为 920.00 m 和 920.40 m。测点 N1, N2 与测点 N5, N6 所在竖直线的水平距离为 1617.50 m。测点 N1, N2, N5 和 N6 的布置图见图 9。

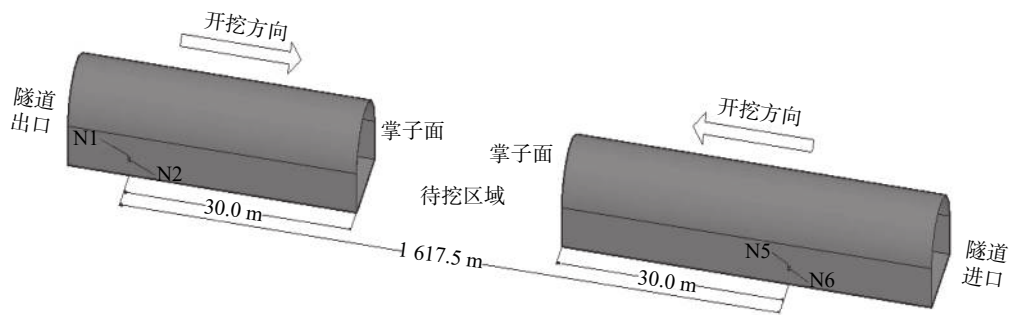


图 9 测点 N1, N2, N5 和 N6 的布置图
Fig.9 Layout of four measure points N1, N2, N5 and N6

使用钻孔式测试方法测得花岗岩围岩垂直和水平方向的扰动区应力, 再使用双曲线拟合分别求得扰动区围岩应力测试稳定时刻和相应应力值, 计算结果见表 1。

表 1 花岗岩扰动区应力测试结果

Tab.1 Measured disturbed zone stresses in the granite			
测点编号	测试方向	扰动区应力测试稳定值 对应时间/h	扰动区应力/ MPa
N1	垂直	53.76	20.71
N2	水平	56.16	11.33
N5	垂直	52.43	20.04
N6	水平	53.81	11.83

由表 1 可知, 垂直方向扰动区应力为 20.04~20.71 MPa, 水平方向扰动区应力为 11.33~11.83 MPa。垂直方向的扰动区应力大于水平方向的扰动区应力, 是水平方向的 169%~183%, 说明扰动区应力以垂直应力为主。垂直方向的扰动区应力均值为 20.38 MPa, 扰动区围岩中应力水平很高, 极易发生失稳破坏, 应提高支护结构性能, 并尽快支护。

由表 1 还可以看出, 不同方向扰动区应力测试稳定值对应的时刻均为 52.43~56.16 h(垂直方向为 52.43~53.76 h, 水平方向为 53.81~56.16 h), 测试稳定时刻平均值为 54.04 h, 两个方向扰动区应力测试稳定值对应时刻最大相差 3.73 h, 仅为 4 个测点处扰动区应力测试稳定值对应时刻均值

的 6.90%。这说明, 围岩扰动区应力测试稳定时刻与测试方向关系不大。为了保证施工安全, 建议每次爆破结束后施工人员不要过早到隧道掌子面附近, 应在掌子面附近岩体充分释放应力(即每次爆破结束 54.04 h)后再进入该隧道掌子面附近进行施工。

4 结 论

本文使用钻孔式测试方法测试, 得到了隧道围岩(花岗岩)扰动区应力及其随时间的变化特征, 提出了使用双曲线拟合确定扰动区应力测试稳定值对应时刻的方法, 探讨了不同方向扰动区应力测试稳定值的分布特征, 得到如下结论:

- a. 与其他扰动区应力测试方法相比, 钻孔式测试方法具有快捷实用、操作简单和可实施性强、对测试埋深无限制要求等方面的优点;
- b. 所测隧道围岩变形主要发生在开始测试后的 42 h 以内, 使用双曲线拟合法得到扰动区应力测试稳定时刻为 54.04 h;
- c. 所测隧道围岩中垂直和水平方向扰动区应力分别为 20.04~20.71 MPa 和 11.33~11.83 MPa, 垂直方向的扰动区应力是水平方向的 169%~183%, 扰动区应力以垂直应力为主。

参考文献:

[1] 王洪德, 王爱军, 韩子夜. 监测工作在链子崖危岩体防治

- 工程中的重要作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(S1): 101–104.
- [2] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 53: 129–141.
- [3] 李扬帆, 盛谦, 张勇慧, 等. 地下洞室开挖扰动区研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S2): 2083–2092.
- [4] 张向东, 李庆文, 李桂秀, 等. 采动影响下大跨度软岩巷道耦合支护效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 70–76.
- [5] 朱泽奇, 盛谦, 周永强, 等. 隧洞围岩应力开挖扰动特征与规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 349–358.
- [6] 卢宏建, 梁鹏, 顾乃满, 等. 多次开挖扰动下采空区围岩应力演化数值模拟[J]. 矿产保护与利用, 2016(6): 17–20.
- [7] 徐连满, 潘一山, 李忠华, 等. 深部开采覆岩应力变化规律模拟实验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 61–66.
- [8] 陈峰, 潘一山, 钟勇. 采动影响下覆岩应力变化规律的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 74–78.
- [9] SHEN B, BARTON N. The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1): 117–125.
- [10] 徐前卫, 程盼盼, 朱合华, 等. 软弱围岩隧道开挖应力扰动特征试验及数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 154–164.
- [11] 蔡美峰. 地应力测量原理和方法的评述[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(3): 275–283.
- [12] CAI M F, QIAO L, LI C H, et al. Results of in situ stress measurements and their application to mining design at five Chinese metal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(3): 509–515.
- [13] 宋广东, 刘统玉, 王昌. 基于采动应力监测的深部动力灾害预测技术[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1): 520–522.
- [14] 周奎, 刘奕斌, 余金鑫. 隧道开挖对近接既有人防工程影响的监测方法[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(1): 91–96.
- [15] 欧阳振华, 蔡美峰, 李长洪. 北洛河铁矿地应力与采动应力测量[J]. 中国矿业, 2005, 14(12): 67–70.
- [16] 张芳, 刘泉声, 张程远, 等. 流变应力恢复法地应力测试及装置[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1506–1513.
- [17] 靳晓光, 王兰生, 李晓红. 地下工程围岩二次应力场的现场测试与监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 651–653.
- [18] 周辉, 渠成堃, 王竹春, 等. 深井巷道掘进围岩演化特征模拟与扰动应力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1821–1831.
- [19] GAO F Q, KANG H P. Effect of pre-tensioned rock bolts on stress redistribution around a roadway-insight from numerical modeling[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(4): 509–515.
- [20] 徐文全, 王恩元, 沈荣喜, 等. 采动应力监测传感装置及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1123–1129, 1137.
- [21] WANG L G, SONG Y, HE X H, et al. Side abutment pressure distribution by field measurement[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(4): 0527–0530.
- [22] 白世伟, 韩昌瑞, 顾义磊, 等. 隧道应力扰动区地应力测试及反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2887–2891.
- [23] 邓铁六, 赵胜利, 赵振远, 等. 高准确度振弦式传感器研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 52–57.

(编辑: 丁红艺)