

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801008



# 突水突泥影响下隧道围岩 松动圈变化测试与分析

舒忠磊<sup>1</sup>, 林从谋<sup>1</sup>, 常方强<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 王海涛<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 中铁十六局集团 第一工程有限公司, 福建 三明 365000)

**摘要:** 为了探究突水突泥隧道围岩松动圈变化特征,采用地质雷达对荆西隧道进行现场实测,获得荆西隧道典型区段两种主要岩性断面松动圈图像.检测结果表明:突水突泥灾害部位所对应围岩松动圈较无灾害部位明显扩大;受到周围迂回导坑影响,围岩松动圈最大处由右侧拱肩向拱腰处转移.

**关键词:** 隧道工程; 突水突泥; 围岩松动圈; 地质雷达

中图分类号: O 10

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)04-0545-06

## Test and Analysis on Variation of loose Zone of Surrounding Rock in Tunnel Under Influence of Water and Mud Inrush

SHU Zhonglei<sup>1</sup>, LIN Congmou<sup>1</sup>, CHANG Fangqiang<sup>1</sup>,  
ZHANG Qiang<sup>2</sup>, WANG Haitao<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. China Railway 16th Bureau Group, First Engineering Company Limited, Sanming 365000, China)

**Abstract:** The shape and variation range of loose zone of surrounding rock are the important parameters for the stability evaluation and support of tunnels. In order to study the variation characteristics of loose zone of surrounding rock in water and mud inrush tunnel, the ground penetrating radar was adopted to monitor Jingxi tunnel. The images of loose zone in the two main sections of Jingxi rock tunnel were obtained. It is found that: the loose zone of surrounding rock under water and mud inrush is more extensive than the loose zone without hazard. Under the influence of surrounding bypass guides, the maximum loose zone of surrounding rock is transferred from the right shoulder to the arch waist.

**Keywords:** tunnel engineering; water and mud inrush; loose zone of surrounding rock; ground penetrating radar

松动圈理论最早是由采矿工程专家提出的,20 世纪 70 年代逐步发展成熟,并于 20 世纪 80,90 年代趋于完善.近年来,随着我国交通建设的快速发展,松动圈理论在隧道、硐室等地下工程领域得到了越

收稿日期: 2017-11-14

通信作者: 林从谋(1957-),男,教授,博士,主要从事隧道与岩土工程设计与施工技术的研究. Email: cmlin@hqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41306051);福建省自然科学基金资助项目(2015J01625);福建省自然科学基金资助项目(2014J01197)

来越多的关注<sup>[1]</sup>. 在隧道掘进过程中,原岩应力的平衡状态被破坏了,围岩受力状态由三向变成了近似两向,导致围岩应力重新分布和局部应力集中,岩石强度大幅度下降,直至围岩中出现了一个松弛破碎带,即为松动圈<sup>[2]</sup>. 关于松动圈范围的研究主要有数值模拟、模型试验及现场测试 3 种方式. 孙有为<sup>[3]</sup>基于 FLAC 软件,从地下硐室的面积、高跨比及断面形状等多个方面对松动圈进行数值模拟、计算和分析. 夏峰<sup>[4]</sup>采用 FLAC 3D 软件,模拟了不同条件下矩形硐室的松动圈,利用回归分析方法建立了围岩松动圈厚度与围岩压力、围岩粘聚力、摩擦角及硐室跨高比的同级关系. 孟波等<sup>[5]</sup>采用大比例尺物理模型试验的研究方法,将松动圈发育过程分为剪切滑移迹线形成期、楔体形成期、块体滑移期、块体塌落挤密期 4 个阶段. 肖建清等<sup>[6]</sup>基于松动圈的现场测试结果,研究声波波速沿孔深的变化规律及爆破施工对于松动圈的影响. 此外,由于松动圈受到多方面影响的不确定性,现场测试能够较为全面的反应松动圈实际大小. 郭亮等<sup>[7]</sup>基于地质雷达测试原理,论证地质雷达用于围岩松动圈探测的可行性,指出了偏压对松动圈的影响. 靖洪文等<sup>[8]</sup>在松动圈识别关键技术中,提出了用钻孔图像中围岩裂缝的圆形度指标作为判断围岩松动圈标准的新思路. 吴涛等<sup>[9]</sup>采用单孔超声波测试方法,对陕西黄陵 2 号煤矿隧道围岩松动圈范围进行了测试. 舒忠磊等<sup>[10]</sup>采用统一强度准则和 Schwarz 交替法,对小净距隧道的弹塑性状态进行分析,推导小净距隧道塑性区半径的解析表达式. 然而,国内学者对于受到突水突泥伴生灾害源影响的双孔隧道围岩松动圈分布特征的研究尚显不足. 因此,本文通过地质雷达(GPR)对突水突泥隧道围岩松动圈实测数据进行处理与分析,总结突水突泥隧道围岩松动圈分布及变化规律.

1 荆西隧道概况

1.1 隧道概况

荆西隧道是国家铁路网和福建省“三纵六横九环”铁路网的重要组成部分,隧道开挖的最大高度为 5 m,最大的断面面积达 30 m<sup>2</sup>. 荆西隧道为单洞特长铁路隧道,其起讫桩号为 DK91+070~DK94+709.54,隧道全长 3 639.54 m. 隧道穿过中低山丘陵地貌区,地形起伏较大,地面标高 234.1~588.4 m,相对高差约 354.3 m.

隧道洞身围岩主要为泥盆系上统桃子坑组石英砂岩夹粉砂岩、燕山早期花岗岩及下古生界罗峰溪群变质砂岩. 隧址区发育有花岗岩侵入接触带、泥盆系上统桃子坑组(D3tz)石英砂岩夹粉砂岩与下古生界罗峰溪群(Pz1lf)变质砂岩不整合接触带,未现断层迹象,荆西隧道围岩调整后纵断面,如图 1 所示. 燕山早期( $\gamma 52(3)c$ )花岗岩与泥盆系上统桃子坑组石英砂岩夹粉砂岩于隧道洞身 DK93+650 附近呈侵入接触. 隧道区地表水体较发育,地下水主要有第 4 系孔隙潜水、基岩裂隙水等几种类型.

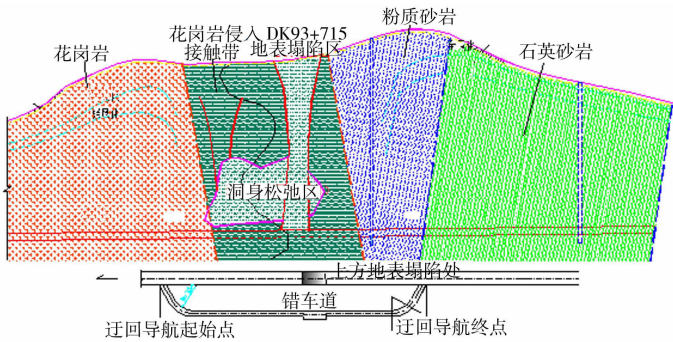


图 1 荆西隧道围岩调整后纵断面

Fig. 1 Rear section of Jingxi tunnel after adjustment

1.2 主要不良地质和地质灾害

荆西隧道曾经多次出现突水突泥险情. 2016 年 2 月 26 日 1:00,掌子面(DK93+715)右侧拱顶管棚施工时有小股水流出,1:10 水质变浑浊,有泥流涌出. 2016 年 3 月 19 日该断面处承压水沿左侧拱角处流出,继而突水,开始水压较大,经峰值测算,每小时出水量约 2 800 m<sup>3</sup>,如图 2 所示. 持续到 3 月 22 日 8:00,大量突水逐渐停止,转为间歇性突水突泥,突泥长度约 260 m,突泥量约 5 000 m<sup>3</sup>. 出于对 DK93+715 断面前方围岩情况的不确定性及泄水需求,在主洞旁 30 m 处设置迂回导坑,实现对上流地下水的

截流,减小主洞的突水量.



(a) 掌子面突水突泥



(b) 侧向变形

图 2 荆西隧道突水突泥典型灾害

Fig. 2 Typical disasters of water and mud inrush in Jingxi tunnel

## 2 测试原理

地质雷达是利用无线电波检测地下介质分布和对不可见目标或地下界面进行扫描,以确定其内部形态和位置的电磁技术,其理论基础为高频电磁波理论,将获取的反射电磁波经过一系列的处理和分析之后,可以得到探测介质的有关信息.地质雷达组成及探测示意图,如图 3 所示.

地质雷达基本原理是,雷达波在通过不同波阻抗界面岩体时,会产生折射波与反射波,反射波系数  $R$  决定了反射波能量的大小,反射波系数越大,电磁波的反射越强烈,此时,两不同界面则更易于辨别.由于发射天线与接收天线的距离很远,电场方向通常垂直入射平面,反射系数  $R$  可以表示为

$$R = \frac{\sqrt{X_1} - \sqrt{X_2}}{\sqrt{X_1} + \sqrt{X_2}}. \quad (1)$$

式(1)中: $X_1, X_2$  分别是相邻两层介质的相对介电常数.

由松动圈结构特征可知,松动圈界面内部岩体破裂且呈松弛状态,在突水突泥隧道中,裂隙内部通常填充有水( $R_{\text{水}}=81.0$ ),但是由于岩体反射系数( $R_{\text{岩体}}=6.0\sim 8.0$ )<sup>[11-23]</sup>与之相差较大,因此,地质雷达发射的电磁波在通过松动圈与弹塑性区分界位置时,必然会出现强烈反射,且波形杂乱无章,同相轴将很不连续,由此就可以判断该界面为围岩松动圈的临界值.

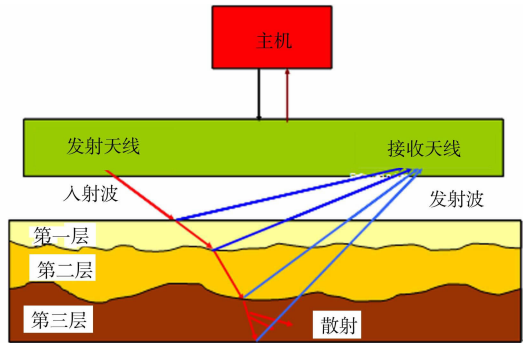


图 3 信号发射与数据采集

Fig. 3 Signal emission and data acquisition

## 3 松动圈测试

### 3.1 测试设备与参数设置

此次探测采用数据采集使用的是瑞典 MALA 公司生产的 ProEx 型 100 MHz 地质雷达,主要的采集参数设置如下:采样点数为 642;采样频率为 1 006.2 MHz;采样时窗为 420.5 ns;采样点叠加次数为 128;采样间隔为 0.1 m;触发方式为键盘点触发;测线条数为 4 条.

### 3.2 测点布置和测试方法

根据荆西隧道围岩等级、突水突泥类型及周围导坑情况<sup>[11]</sup>,选择具有代表性的隧道支护形式和破坏地段进行围岩破坏范围的探测工作,如表 1 所示.根据测试结果需要,共计布置 4 条测线,如图 4 所示.测线布置,如图 5 所示.

### 3.3 测试结果

采用专用处理软件 REFLEXW 将现场采集到的数据文件进行数据读入和处理,处理内容包括:静

态校正、一维滤波、增益、背景去噪、带通滤波及均一化处理. 处理后的回波信号图像,如图 6 所示. 图 6 中: $t$  为时间深度.

表 1 围岩松动圈探测断面

Tab. 1 Detection sections of loose zone of surrounding rock

测线	里程号	施工方法	超前支护	注浆措施	情况说明
1	K93+525	台阶法	Ⅱ超前小导管	无	洞身围岩为花岗岩,弱分化,围岩等级为Ⅱ,地下水主要为基岩裂隙水,不发育
2	K93+610	三台阶法	Ⅱ超前小导管	无	地层岩性为石英砂岩,围岩等级为Ⅳ,主洞侧壁两侧开裂变形,无突水情况
3	K93+671	三台阶临时仰拱法	管棚、超前小导管	帷幕注浆、径向注浆	地层岩性为全风化石英砂,围岩等级为Ⅴ,主洞、导坑侧壁两侧开裂变形,迂回导坑右肩处存在一突水点,突水量为 $350\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,该区间段内隧道上方存在洞身围岩松弛区,内饱水,电阻率低
4	K93+715	三台阶临时仰拱法	管棚、超前小导管	帷幕注浆、径向注浆	地层岩性为全风化石英砂,围岩等级为Ⅴ,2016 年 2 月 26 日 1:00 出现大量涌泥,涌出物呈土夹碎石,形态呈流体状;2016 年 3 月 19 日 15:00 主洞掌子面左侧拱角止浆墙存在突水口,突水量为 $2\ 800\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$

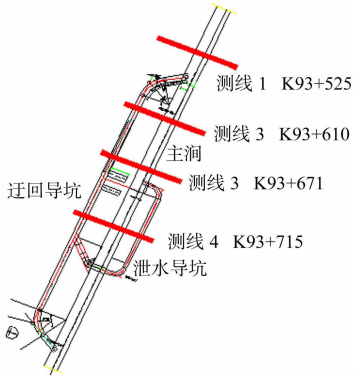


图 4 测点布置图

Fig. 4 Layout of detection points

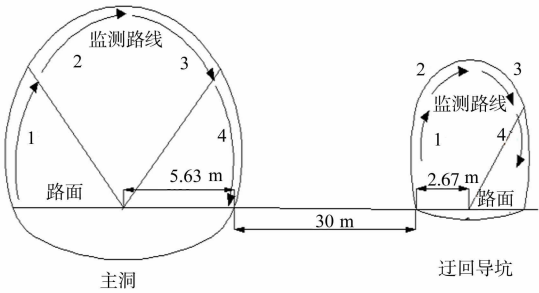
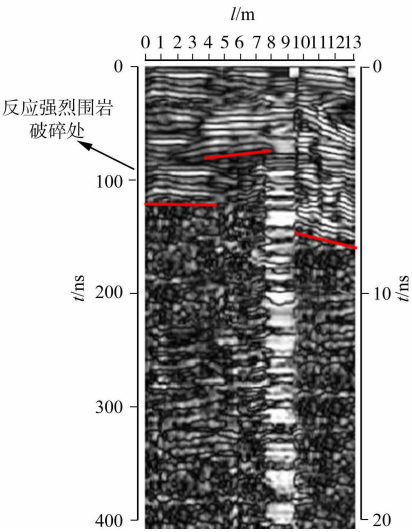
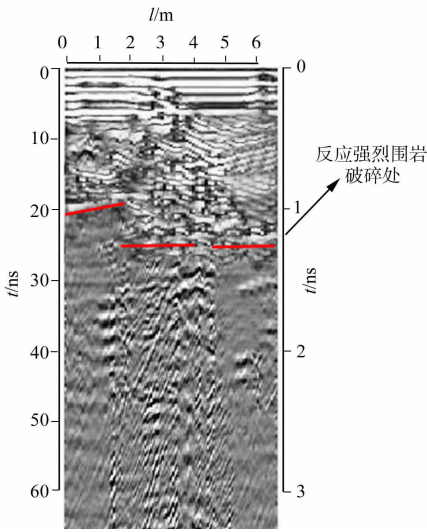


图 5 断面测线走向

Fig. 5 Detection line of section



(a) K93+715 断面主洞



(b) K93+715 引水导坑

图 6 K93+715 断面地质雷达检测波形

Fig. 6 Record of GPR of K93+715

由图 6 可知:K93+715 断面围岩整体松动范围较大,且呈右侧大于左侧之势,最大值在右侧拱腰处,达 8.0 m. 通过现场勘测可知:左右两侧拱腰处变形严重,拱顶收敛正常,与地质雷达检测结果较为吻合.

将 4 个不同断面地质雷达探测结果进行对比,对比结果如表 2 所示.



表 2 各断面地质雷达探测结果  
Tab. 2 Ground penetrating radar detection results of all sections

测量断面	洞口分类	松动圈厚度范围/m			
		第 1 个断面	第 2 个断面	第 3 个断面	第 4 个断面
K93+525	主洞	2.7~2.9	3.1~3.3	3.4~3.5	2.5~2.8
	引水导坑	—	—	—	—
K93+610	主洞	3.2~3.4	3.5~3.6	3.7~3.9	5.2~5.3
	引水导坑	1.3~1.5	1.2~1.4	1.5~1.8	0.8~1.2
K93+671	主洞	3.7~3.8	4.0~4.2	4.1~4.3	5.6~5.9
	引水导坑	1.1~1.3	0.9~1.2	2.0~2.3	0.9~1.4
K93+715	主洞	5.3~5.6	3.5~4.0	受周围挖机干扰	6.9~8.0
	引水导坑	0.9~1.0	1.2~1.6	1.2~1.6	1.0~1.1

由表 2 可知:不同断面位置处围岩松动圈范围差异较大,呈现不同的分布特征;K93+525 松动圈范围最小(2.5~3.5 m),最大松动圈厚度出现在右肩处;K93+610,K93+671,K93+715 松动圈范围逐渐增大,且最大松动圈厚度均出现在主洞右侧拱腰处,依次为 5.2~5.3,5.6~5.9,6.9~8.0 m.从现场监测数据得出:DK93+600~715 段已施工二次衬砌,由于处于塌陷影响区段,自 2017 年 6 月份二次衬砌先后发生开裂变形,且开裂变形范围较大,约为 35~80 cm;而 DK93+600~715 区段隧道监控量测数据显示,拱顶、上台阶左,以及上台阶右的累计沉降范围依次为 17.0~25.0,18.5~20.0,19.0~48.2 cm,基本同地质雷达检测结果较为吻合.

对比 K93+525 与 K93+610 断面结果可知:在施工方法、超前支护方式,以及注浆措施相同时,隧道围岩等级由Ⅱ降低至Ⅳ,隧道围岩松动圈逐渐增大;此外,K93+610 断面由于受到相邻迂回导坑的影响,导致主洞松动圈最大点由右肩转移至右侧拱腰处.

对比 K93+610 与 K93+671 断面结果可知:随着围岩等级的进一步降低,松动圈范围进一步扩大;其次,由于 K93+671 断面迂回导坑右肩存在一突水点,且该位置所对应的松动圈范围相对于 K93+610 增幅较大(27%).判断由于突水点的存在,必然存在贯通的突水通道裂隙,在隧道开挖掘进的过程中突水通道裂隙逐渐扩展,导致该部位的松动圈范围扩大.

对比 K93+671 与 K93+715 断面结果可知:在其余条件相似的情况下,出现突泥灾害的隧道断面围岩松动圈较无突泥灾害断面扩大 23.5%~47.4%.结果表明:在隧道突水突泥作用下,隧道周围大量固体颗粒随之流出,岩石强度急剧降低,围岩松动圈范围进一步扩大.

4 结论

采用地质雷达能够快速、连续、有效地测试突水突泥隧道围岩松动圈厚度,有效指导突水突泥隧道拱腰侧向变形修复及后续的换拱施工等,对于突水断面围岩支护设计也有一定的指导意义.

同常规单轨隧道相比,由于主洞旁设置了起到截水作用的迂回导坑,形成了一个双孔隧道.同时,受到坍塌区段的影响,主洞围岩松动圈最大值位置由右肩转移到右侧拱腰位置.

随着围岩等级的降低,隧道围岩松动圈范围随之增大;突水突泥隧道受突水通道裂隙影响较大,松动圈范围在突水断面大于无突水断面,突水点处松动圈范围大于无突水点位置,出现突泥灾害的断面围岩松动圈大于无突泥灾害.

参考文献:

[1] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.隧道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994(1):21-32.  
[2] 周希圣,宋宏伟.国外围岩松动圈支护理论研究概况[J].建井技术,1994(增刊 1):67-71,96. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1994.z1.018.  
[3] 孙有为.地下洞室的几何性质对松动圈的影响[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2006.  
[4] 夏峰.地下洞室围岩松动圈影响因素分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.  
[5] 孟波,靖洪文,朱谭谭.西部侏罗系软岩隧道松动圈演化机理模型试验[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1003-

1010,1037. DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.000248.

[6] 肖建清,冯夏庭,林大能.爆破循环对围岩松动圈的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2248-2255.

[7] 郭亮,李俊才,张志铨,等.地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):3009-3015.

[8] 靖洪文,李元海,梁军起,等.钻孔摄像测试围岩松动圈的机理与实践[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):645-649,669. DOI:10.3321/j.issn:1000-1964.2009.05.008.

[9] 吴涛,戴俊,杜美利,等.基于声波法测试技术的隧道围岩松动圈测定[J].煤矿安全,2015,46(1):169-172. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2015.01.049.

[10] 舒忠磊,常方强,林从谋.统一强度理论下小净距隧道围岩塑性区新解[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(1):31-36. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702062.

[11] 黄逸群,林从谋,黄清祥,等.隧道型钢喷混凝土初期支护的可靠度计算方法及应用[J].华侨大学学报(自然科学版),2014,35(2):212-216. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.02.0212.

[12] 屈施展,张金松,张恒亮.地质雷达测试技术在煤矿的应用[J].煤矿安全,2014,45(2):60-62. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2014.02.019.

[13] 徐坤,王志杰,孟祥磊,等.深埋隧道围岩松动圈探测技术研究及数值模拟分析[J].岩土力学,2013,34(增刊2):464-470. DOI:10.16285/j.rsm.2013.s2.045.

[14] 伍永平,翟锦,解盘石,等.基于地质雷达探测技术的巷道围岩松动圈测定[J].煤炭科学技术,2013,41(3):32-34,38. DOI:10.13199/j.cst.2013.03.38.wuyp.014.

[15] 宋宏伟,王闯,贾颖绚.用地质雷达测试围岩松动圈的原理与实践[J].中国矿业大学学报,2002(4):43-46. DOI:10.3321/j.issn:1000-1964.2002.04.010.

[16] 刘斌,李术才,李树忱,等.复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J].岩土力学,2009,30(7):2191. DOI:10.16285/j.rsm.2009.07.011.

[17] 刘新荣,刘永权,杨忠平,等.基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J].岩土工程学报,2015,37(增刊2):51. DOI:10.11779/CJGE2015S2011.

[18] 崔凡.基于地质雷达的土地整理质量检测关键技术研究[D].北京:中国矿业大学,2012.

[19] 杨艳青,贺少辉,齐法琳,等.铁路隧道衬砌地质雷达非接触检测模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1761.

[20] 王振宇,程围峰,刘越,等.基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3549.

[21] 康富中,齐法琳,贺少辉,等.地质雷达在昆仑山隧道病害检测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3641.

[22] 孟陆波.隧道超前地质预报技术与计算机辅助预报系统研究[D].成都:成都理工大学,2009.

[23] 肖宏跃,雷宛,杨威.地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J].煤田地质与勘探,2008(4):57. DOI:10.3969/j.issn.1001-1986.2008.04.015.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)