

文章编号: 1000-7598-(2013)增2-0464-07

深埋隧道围岩松动圈探测技术与数值模拟分析

徐 坤, 王志杰, 孟祥磊, 孙长升

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 围岩松动圈支护理论已被工程界广泛认同和接受, 如何准确快速地探测松动圈深度更好的为工程服务, 成为大家所关注的问题。以新建兰新铁路大梁隧道现场试验为依托, 对测试断面围岩松动圈深度采用单孔声波测试法、地质雷达法进行探测, 结合现场地应力及岩体物理力学参数实测结果进行数值模拟分析可知, 以单孔声波测试法结果为基准, 地质雷达测试结果与声波法测试结果基本一致, 在围岩含水区域测试结果存在一定偏差, 地质雷达发出的电磁波对含水区域比较敏感, 发射和接收干扰较大, 但地质雷达作为一种快速、无损的检测方法应该得到大力推广应用。由于数值计算时没有考虑爆破对围岩松动圈的影响, 其计算结果与声波法探测结果相比偏小, 但是两者的变化趋势基本上是一致的。数值计算应以现场地应力及岩体物理力学参数测试结果为依据, 使计算结果更加真实, 更好地为工程决策服务。

关 键 词: 隧道; 围岩松动圈; 探测技术; 地应力场; 数值模拟

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Research on detection technology for deep tunnel surrounding rock loose circle and numerical simulation analysis

XU Kun, WANG Zhi-jie, MEMG Xiang-lei, SUN Chang-sheng

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Surrounding rock loose circle support theory has been widely recognized and accepted by engineers, how accurate and fast detection loose circle depth better for engineering services become all issues of concern, the new Lan-xin railway girder tunnel based on field test, the test section of surrounding rock loose circle depth by single-hole sonic test method, the ground penetration radar(GPR) for detection and combining with the ground stress and physical and mechanical parameters of rock mass according to the result of the benchmark for the numerical simulation analysis shows that with single span acoustic test results for reference, GPR test results and acoustic method test results are basically the same, in the surrounding rock water area test results in some deviation, geological radar emit electromagnetic fields to water area is relatively sensitive, transmit and receive interference is bigger, but the geological radar as a rapid and nondestructive detection method should be strongly applied: Due to the numerical calculation of surrounding rock loose blasting without considering the influence of the circle, the calculation results are slightly smaller than ones obtained by the acoustic detection, but the trend is basically consistent. Numerical calculation should be based on the physico-mechanical parameters of rock mass stress and according to the test results, so as to make the results of calculation more real and better for the decision of project service.

Key words: tunnel; surrounding rock loose circle; detection technology; geostress field; numerical simulation

1 引 言

松动圈理论在地下工程领域已得到广泛的认可和应用, 松动圈支护理论对地下工程的生产和安全起到了巨大的作用^[1]。

地下空间的施工破坏了围岩的初始平衡状态, 洞室周边的径向应力消失、切向应力剧增, 围岩进行应力重分布。随着洞室开挖, 洞室周边岩体首先进入塑性状态进而发生破坏, 应力向岩体深部转移, 围岩破坏范围逐渐扩大, 直到围岩应力小于或

收稿日期: 2013-03-05

基金项目: 铁道部科技研究开发重大项目资助 (No. 2009G020-B-1); 山西省交通运输厅交通建设科技项目资助 (No. 2012-2)。

第一作者简介: 徐坤, 男, 1981年生, 硕士, 工程师, 主要从事隧道与地下工程设计及研究工作。E-mail: xuyanlun810911@163.com

等于岩体强度, 形成新的平衡, 破坏才终止, 洞室周边形成一个破碎带, 称之为松动圈^[1-4]。松动岩体宏观主要表现为微裂隙增多, 变形突然增大, 黏聚力、内摩擦角和变形模量降低。围岩松动范围及其变化是地下工程支护和评价围岩稳定的重要参数之一, 松动圈研究已经成为洞室开挖评价和洞室整体稳定评价的关键^[5]。国外对于地下工程松动圈的研究起步较早, 实践及理论成果较为丰富, 主要有松动裂隙学说、破碎区图示学说和苏联的不连续学说^[1], 近些年来我国的科研工作者也做了大量有益的工作, 取得了不错的成果。邹红英等^[6]根据围岩松动的主要影响因素, 结合实验研究成果, 基于施工开挖的声波资料, 在统计分析的基础上给出洞室松动圈判别的数学模型, 运用监测位移时间和空间上的特性, 提出主级松动、松动扩展百分比等新概念。赵海斌等^[7]阐述了声波法在松动圈动态分析中的适用性, 并采用声波法对某大型地下厂房上游边墙松动圈进行了测试分析, 绘制了开挖深度、岩体波速、时间、空间位置与松动圈的相互关系曲线, 通过对上述关系曲线的分析, 获得了松动圈的变化分布规律, 提出了相应的工程措施。余永强等^[8]运用FLAC^{3D}软件对爆破后松动圈进行了数值模拟研究, 采用超声测井探测方法, 对隧道中极风化槽段围岩松动圈进行了测试分析, 将其结果与数值模拟进行对比分析, 表明数值模拟结果与现场测试结果规律具有一致性。由于理论方法具有许多假定条件, 地下工程在施工中受到的影响因素千变万化, 因此上述方法具有很大的局限性, 但现场实测数据没有做任何原理方面的假设, 得到测试结果更加准确可靠。实际工程中多采用物理探测的方法对围岩松动圈进行现场实测, 从而提出合理的隧道支护参数, 确保地下工程施工的稳定性^[9]。

本文依托新建兰新的铁路大梁隧道工程, 总结前人关于松动圈的研究成果, 对大梁隧道发生大变形段运用声波探测法与地质雷达法进行测试, 结合中国科学院武汉岩土力学研究所关于大梁隧道高地应力测试及围岩变形研究报告^[10], 运用数值模拟的方法对松动圈测试结果进行佐证, 为现场施工及时修改支护参数, 提供参考依据供类似工程借鉴。

2 现场测试分析

2.1 工程概况

大梁隧道起迄里程 DK328+820~DK335+370, 全长 6 550 m, 位于青海省门源县, 为客运专线铁路双线隧道。进、出口 V 围岩段各为 990 m

和 530 m, 地处祁连山中高山区, 平均海拔 3 600~4 200 m, 最高海拔为 4 430 m。隧道穿越地层以砂岩、板岩、灰岩为主, 不良地质主要有断层、冻土层, 冻土层厚度为 8~140 m。隧址区山高坡陡, 基岩部分裸露, 沟壑纵横。隧道进、出口两端低而洞身部位高, 进口段沟谷发育, 基本呈东西向展布, 沟内有季节性流水, 堆积有大量块石, 出口位于硫磺沟侧陡坡, 洞内线路纵坡为 6‰, -9‰的人字坡, 除进口端 2 260.707 m 位于曲线上外, 其余均位于直线。被铁道部列为 I 级高风险隧道。

在大梁隧道施工至 DK331+810~890 里程段时支护发生较大的变形, 见图 1。

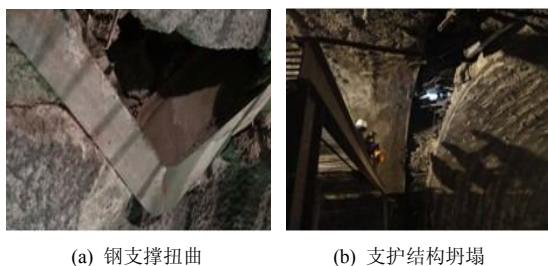


图 1 初期支护钢拱架扭曲及支护坍塌
Fig.1 The early supporting steel arch distorted supporting collapse

2.2 现场测试

隧道围岩松动圈较常用的物理探测方法包括声波法、多点位移计法、地震波法、地质雷达法以及先进的钻孔摄像法等。

各国围岩松动圈物理探测方法具有如下优缺点:

(1) 声波法应用起步较早, 操作简单, 技术方面比较成熟, 测试结果准确, 在我国许多工程领域应用广泛, 但应用中容易塌孔或测孔堵塞, 需要水耦合和持续灌水, 适用于破碎程度低的围岩; (2) 多点位移计法能够获得大量测试数据, 量测精度不高, 所需的工作量大, 测试周期长, 可获得隧道开挖后一段时间内松动圈的变化规律; (3) 地震波的层析成像法测试精度高, 成本较高, 现场安装较困难, 但是其测试结果准确、可靠; (4) 地质雷达法近些年来在隧道工程领域发挥了越来越重要的作用, 其可实现快速、无损检测, 对测试区域围岩条件及施工环境要求不高, 在隧道围岩松动圈测试方面的精度尚需进一步验证; (5) 钻孔摄像法适用于岩性较好的岩体, 所得的信息量大, 测试结果精度高, 但是仪器较贵, 现场操作复杂。

综合上述检测方法, 对大梁隧道大变形里程段采用声波探测法与地质雷达法进行对比测试, 验证

地质雷达法的准确性。

2.2.1 声波探测法

(1) 探测原理

声波在岩体中传播,其波速会因岩体介质中存在裂隙发育、密度降低、声阻抗增大而降低;假如岩体完整性较好、受原岩应力较大、密度也较大,此时声波的传播速度也较大,因此,在现场测试过程中测得的声波波速高则岩体完整性好。波速低说明岩体存在裂缝,围岩发生了破坏。采用声波探测法可以测出距围岩表面不同深度的岩体波速值,从而可以推断出围岩松动圈的大小范围。声波探测法按测试方式的不同分为单孔测试法与双孔测试法。单孔测试法原理如图 2 所示。

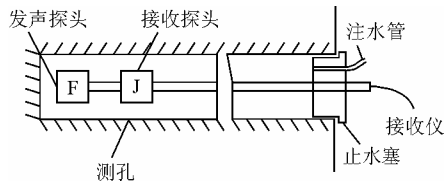


图 2 单孔测试法示意图

Fig.2 Sketch of single span test method

(2) 现场测试结果

由于双孔测试法因钻孔工作量相对单孔测试法较大,对围岩损伤大,且发声探头和接收探头达到同步移动较为困难已逐步被单孔测试法所取代。在本次测试中采用单孔测试法进行测试,见图 3。



(a) 现场测试钻孔

(b) 测试元器件

图 3 单孔测试法现场测试

Fig.3 Single span test method of field test

对大梁隧道大变形里程段 DK331+810~890 共选取 6 个测试断面,分别为 DK331+820、DK331+830、DK331+840、DK331+850、DK331+860、DK331+870。声波法探测松动圈结果见表 1,其中每个断面测试拱顶、左右拱腰、左右边墙共 5 个测孔。

2.2.2 地质雷达法

(1) 探测原理

地质雷达是一种用于探测地下介质分布的广谱

表 1 单孔测试法声波测试结果表

Table 1 Results of single span test method of acoustic test

孔号	低波速深度 /m	低波速带声 速平均值 /(m/s)	稳定段围岩声 速平均值 /(m/s)
DK331+820(A)	2.32	2 690	5 345
DK331+820(B)	2.45	2 745	5 569
DK331+820(C)	2.68	2 853	5 897
DK331+820(D)	2.41	2 699	5 412
DK331+820(E)	2.65	3 011	5 562
DK331+830(A)	2.41	2 895	5 413
DK331+830(B)	2.55	3 256	5 798
DK331+830(C)	2.47	2 931	5 894
DK331+830(D)	2.59	3 546	5 567
DK331+830(E)	2.71	3 254	5 497
DK331+840(A)	2.36	2 987	5 353
DK331+840(B)	2.49	3 121	5 461
DK331+840(C)	2.54	3 256	5 569
DK331+840(D)	2.87	3 356	5 879
DK331+840(E)	2.61	3 568	5 901
DK331+850(A)	2.44	2 989	5 568
DK331+850(B)	2.59	3 254	5 367
DK331+850(C)	2.46	3 396	5 697
DK331+850(D)	2.68	3 102	5 901
DK331+850(E)	2.74	2 991	5 978
DK331+860(A)	2.55	3 524	5 468
DK331+860(B)	2.68	3 265	5 302
DK331+860(C)	2.74	3 341	5 567
DK331+860(D)	2.71	3 421	5 324
DK331+860(E)	2.56	2 907	5 539
DK331+870(A)	2.41	3 464	5 678
DK331+870(B)	2.68	3 879	5 142
DK331+870(C)	2.65	3 458	5 754
DK331+870(D)	2.74	3 474	5 369
DK331+870(E)	2.69	2 962	5 505

注:表中 A 代表拱顶; B 代表左拱腰; C 代表右拱腰; D 代表左边墙; E 代表右边墙。

(1 MHz~1 GHz) 电磁技术。其工作过程是:由于地面的发射天线送入地下一高频电磁脉冲波,当其在地下传播过程中遇到不同的目标体(岩石破碎带、溶洞、断层裂隙等)的电性介面时,就有部分电磁能量被反射折向地面,被接收天线接收,并由主机记录,得到从发射经地下界面反射回到接收天线的双程走时 t 。当地下介质的波速已知时,可根据测到的精确 t 值求得目标体的位置和埋深^[11]。探测反射原理如图 4 所示。

(2) 现场测试结果

大梁隧道大变形里程段采用弧形导坑法开挖,松动圈测试范围是隧道上台阶,雷达检测现场示意图如图 5 所示。

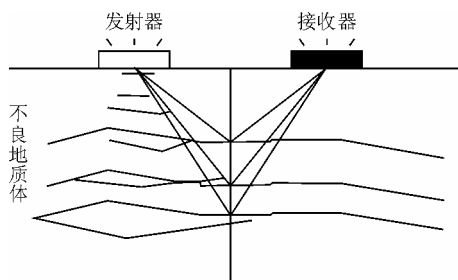


图 4 地质雷达原理示意图

Fig.4 Principle sketch of ground penetration radar

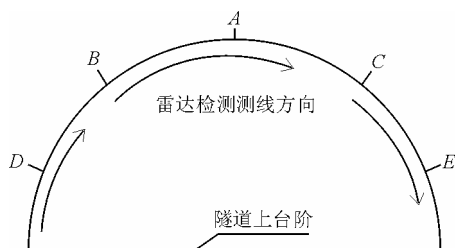


图 5 地质雷达现场检测示意图

Fig.5 Ground penetration radar site test plan

地质雷达在进行检测时,对于地层来说,均为非磁性介质,因此各层介质的介电常数都会有明显的差异,它们之间的分界面能形成良好的电磁波反射界面。当隧道开挖轮廓线周边岩体发生破损时,在雷达图像上就会出现明显的反射特征。由松动圈的定义可知,隧道开挖过程中周边洞室应力发生重分布,洞室周边形成破碎带,雷达测试图上围岩破损区即对应于隧道洞室松动圈部位。其雷达图像特征见图 6。

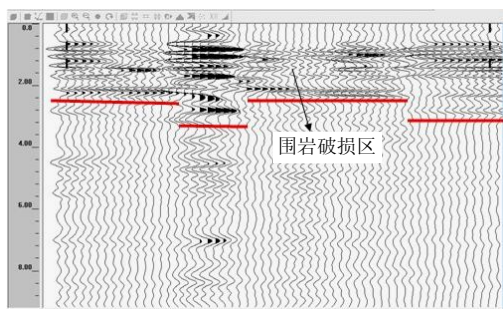
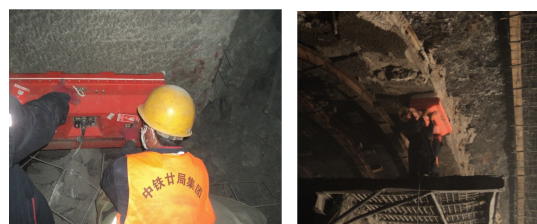


图 6 地质雷达测试松动圈波形堆积图

Fig.6 Ground penetration radar test loose circle waveform accumulation diagram

对大梁隧道 DK331+820、DK331+830、DK331+840、DK331+850、DK331+860、DK331+870, 6 个测试断面用地质雷达进行现场测试,现场检测见图 7。对测试数据经过认真分析处理后,得出破损岩体深度范围见表 2。



(a) 松动圈边墙测试

(b) 松动圈拱顶测试

图 7 地质雷达测试松动圈现场检测图

Fig.7 Ground penetration radar test loose circle field test photos

表 2 地质雷达测试围岩松动圈成果

Table 2 Results of ground penetration radar test surrounding rock loose circle

断面里程	拱顶/m	左拱腰/m	右拱腰/m	左边墙/m	右边墙/m
DK331+820	2.39	2.41	2.72	2.35	2.67
DK331+830	2.32	2.51	2.45	2.60	2.75
DK331+840	2.31	2.54	2.51	2.82	2.66
DK331+850	2.47	2.31	2.51	2.37	2.69
DK331+860	2.29	2.35	2.43	2.72	2.51
DK331+870	2.38	2.71	2.61	2.70	2.73

2.3 单孔声波测试法与地质雷达法测试结果对比

对大梁隧道大变形里程段松动圈采用单孔声波测试法与地质雷达法,对测试断面的拱顶、左右拱腰、左右边墙 5 个部位的测试数据进行对比分析,其结果见表 3。从表中可以看出,两者的测试结果基本上是一致的,但在 DK331+850 断面左拱腰与左边墙、DK331+860 断面拱顶与左右拱腰部位偏差较大。这两个测试断面处可见上述部位有水流出,地质雷达在检测时发出的电磁波遇到含水介质时,受水的作用比较明显,雷达波能量损耗较大,电磁波在发射与接收的过程中干扰较大,因此在这两个测试断面测试结果有一定的误差^[10-11]。鉴于此,对于含水部位松动圈探测应该采取声波法进行测试,因为声波法探测时需要注水进行耦合,测试部位含水更好的起到了耦合作用。

3 围岩松动圈数值模拟分析

地应力是地质环境和地壳稳定性评价、地质工程设计和施工的重要基础资料之一。岩体稳定性受控于地应力作用下形成的各种结构面和现今地应力场与岩体的相互作用。地应力不仅是决定区域稳定的重要因素,而且是各种地下或地面开挖岩土工程变形和破坏的根本作用力。工程区的岩体地应力状态是确定该地下洞室群围岩岩体力学属性,进行地下围岩稳定性分析、隧道开挖设计和决策科学化的

表 3 单孔声波测试法与地质雷达法测试围岩
松动圈结果对比

Table 3 Comparison of the results of single-hole sonic
testing method and ground penetration radar test for
surrounding rock loose circle

断面里程	测试位置 /m	声波测试值 /m	雷达测试值 /m	雷达与声波法 测试差值/m
DK331+820	拱顶	2.32	2.39	0.07
	左拱腰	2.45	2.41	-0.04
	右拱腰	2.68	2.72	0.04
	左边墙	2.41	2.35	-0.06
	右边墙	2.65	2.67	0.02
DK331+830	拱顶	2.41	2.32	-0.09
	左拱腰	2.55	2.51	-0.04
	右拱腰	2.47	2.45	-0.02
	左边墙	2.59	2.6	0.01
	右边墙	2.71	2.75	0.04
DK331+840	拱顶	2.36	2.31	-0.05
	左拱腰	2.49	2.54	0.05
	右拱腰	2.54	2.51	-0.03
	左边墙	2.87	2.82	-0.05
	右边墙	2.61	2.66	0.05
DK331+850	拱顶	2.44	2.47	0.03
	左拱腰	2.59	2.31	-0.28
	右拱腰	2.46	2.51	0.05
	左边墙	2.68	2.37	-0.31
	右边墙	2.74	2.69	-0.05
DK331+860	拱顶	2.55	2.29	-0.26
	左拱腰	2.68	2.35	-0.33
	右拱腰	2.74	2.43	-0.31
	左边墙	2.71	2.72	0.01
	右边墙	2.56	2.51	-0.05
DK331+870	拱顶	2.41	2.38	-0.03
	左拱腰	2.68	2.71	0.03
	右拱腰	2.65	2.61	-0.04
	左边墙	2.74	2.7	-0.04
	右边墙	2.69	2.73	0.04

前提。

从大梁隧道开挖掌子面围岩可以看出,围岩受构造作用强烈,岩层有挠曲现象,开挖后掌子面发生较大的收敛变形。最大累积沉降量为 45.31 cm,最大单天沉降量为 4.45 cm,最大收敛值为 43.82 cm。针对上述情况施工单位委托中国科学院岩土力学研究所对大梁隧道内岩体采用水压致裂法进行了现场地应力量测。从测试结果分析可知,侧压系数均大于 1,隧道区的水平地应力以构造应力为主,同时可知地应力场以水平应力为主导^[12]。

3.1 计算基本假定

大梁隧道松动圈试验段数值模拟采用 FLAC^{3D} 有限差分软件进行计算。大梁隧道大变形段为 V 级围岩,模拟计算时假设围岩为均质、单一的连续介

质,围岩物理力学性质根据现场的地勘资料并结合现行相关规范取值。超前预支护的加固效果,根据经验通过提高围岩的物理力学参数模拟,一般将围岩级别提高一级。同样,锚杆的作用效果也通过提高围岩参数的方法等效模拟,V 级围岩可将加固区的围岩黏聚力提高 20%来处理。钢拱架的作用也采用等效方法予以考虑,即将钢拱架弹性模量折算给初期支护及临时支护^[13]。

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_c} \quad (1)$$

式中: E 为折算后支护弹性模量; E_0 支护喷射混凝土弹性模量; E_g 为工字钢弹性模量; S_g 为钢拱架横截面积; S_c 为支护喷射混凝土横截面积。

计算没有考虑钢筋网的作用效果,作为结构的安全储备。根据现场地应力及岩体物理力学参数实测结果,侧压力系数取 1.8^[12]。岩体的本构关系采用理想弹塑性模型,并服从 D-P 屈服准则;考虑到围岩破碎,初期支护、临时支护及二次衬砌均采用理想弹性材料来模拟。本次计算围岩及支护的物理力学参数见表 4。

表 4 材料物理力学参数
Table 4 Material physico-mechanical parameters

材料类别	弹性模量 /GPa	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	泊松比
泥岩灰岩	1.5	26.0	0.201	32	0.40
锚杆加固	0.24	20.5	0.020	21	0.40
超前支护	0.5	22.0	0.062	27	0.35
初期支护	27.2	22.0			0.25
二次衬砌	31.0	25.0			0.20

3.2 计算模型及边界条件

为保证计算结果的可靠性,同时考虑合理的计算工作量,三维计算模型的边界范围按如下要求选取:水平方向自隧道中心线至模型边界取 45 m;垂直方向自隧道底部向下约 40 m;考虑到隧道深埋,模型向上取 40 m,剩余部分折算成竖向荷载施加在模型表面;模型沿隧道纵向取 80 m 即大梁隧道 DK331+810~890 里程段。模型共有 127 575 个节点,121 760 个单元。大梁隧道在大变形里程段采用弧形导坑法进行开挖,模型网格划分如图 8 所示。

3.3 计算结果分析

隧道开挖后,当洞室周围围岩局部区域应力超过岩体强度,岩体物理状态即随之发生改变,围岩进入塑性破坏状态,结合松动圈(围岩破损区)范围确定的理论方法,认为岩体屈服即形成洞室周边

松动圈, 由计算软件查看模型开挖后发生拉伸及剪切屈服破坏单元, 根据网格尺寸从塑性区云图确定松动圈范围。限于篇幅本文仅列出 DK331+870 断面塑性区分布图, 见图 9。

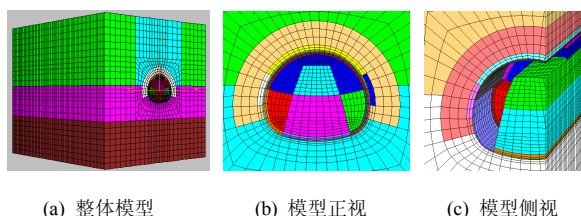


图 8 三维数值计算模型图
Fig.8 Three-dimensional numerical model

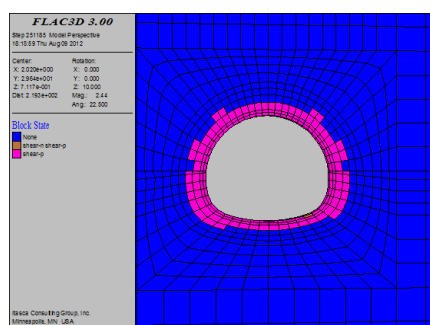


图 9 DK331+870 断面塑性区分布图
Fig.9 DK331+870 section plastic zone map

通过对大梁隧道松动圈试验段数值分析得出了隧道开挖轮廓范围塑性区范围, 以单孔声波测试法测试围岩松动圈范围为基准, 对测试断面拱顶、左右拱腰、左右边墙 5 个测试部位数据进行对比分析, 具体结果见表 5。由表可见, 数值计算结果要小于声波法测试结果, 究其原因, 由于计算中没有考虑开挖时爆破震动的影响, 造成计算结果偏小^[14-15]。但从测试断面 5 个测试部位数据对比可以看出, 两者的变化趋势基本是一致的, 数值计算作为当前工程界分析问题的一种必要手段能否真实模拟工程问题与分析者的实际工程经验、工程区岩体物理力学性质、地应力场有很大的关系, 其计算结果可以作为工程设计与施工的依据与参考。

4 结 语

地质雷达法测试结果与声波法测试结果基本一致, 在有水的探测区域两者有一定的误差, 含水区域应采取声波法进行测试。雷达法作为一种快速无损的检测方法应该大力推广应用。数值计算结果小于声波法测试结果, 与计算时没有考虑爆破对围岩松动圈的影响, 但两者的变化趋势基本上是一致

表 5 单孔声波测试法与数值计算围岩松动圈成果对比
Table 5 Comparison of single-hole sonic testing method and the numerical calculation results of surrounding rock loose circle

断面里程	测试位置 /m	声波测试值 /m	数值计算值 /m	数值计算与声波 法测试差值/m
DK331+820	拱顶	2.32	2.17	-0.15
	左拱腰	2.45	2.32	-0.13
	右拱腰	2.68	2.51	-0.17
	左边墙	2.41	2.26	-0.15
	右边墙	2.65	2.51	-0.14
DK331+830	拱顶	2.41	2.24	-0.17
	左拱腰	2.55	2.40	-0.15
	右拱腰	2.47	2.31	-0.16
	左边墙	2.59	2.41	-0.18
	右边墙	2.71	2.56	-0.15
DK331+840	拱顶	2.36	2.23	-0.13
	左拱腰	2.49	2.34	-0.15
	右拱腰	2.54	2.37	-0.17
	左边墙	2.87	2.72	-0.15
	右边墙	2.61	2.43	-0.18
DK331+850	拱顶	2.44	2.29	-0.15
	左拱腰	2.59	2.41	-0.18
	右拱腰	2.46	2.31	-0.15
	左边墙	2.68	2.50	-0.18
	右边墙	2.74	2.59	-0.15
DK331+860	拱顶	2.55	2.43	-0.12
	左拱腰	2.68	2.55	-0.13
	右拱腰	2.74	2.55	-0.19
	左边墙	2.71	2.56	-0.15
	右边墙	2.56	2.40	-0.16
DK331+870	拱顶	2.41	2.29	-0.12
	左拱腰	2.68	2.53	-0.15
	右拱腰	2.65	2.54	-0.11
	左边墙	2.74	2.57	-0.17
	右边墙	2.69	2.54	-0.15

的。数值模拟计算与工程区域岩体的物理力学性质、地应力场（自重应力场与构造应力场主导性）有很大关系, 计算时应该进行岩体物理力学性质与地应力测试。

参 考 文 献

- [1] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [2] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 71-74.
DONG Fang-ting, SONG Hong-wei, GUO Zhi-hong, et al. Tunnel wall rock loose circle support theories[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-31.
- [3] 靖洪文, 傅国彬, 郭志宏. 深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学

- 报, 1999, 18(1): 70—74.
- JING Hong-wen, FU Guo-bin, GUO Zhi-hong. Measurement and analysis of influential factors of broken zone of deep roadways and study on its control technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(1): 70—74.
- [4] 周希圣, 宋宏伟. 国外围岩松动圈支护理论概况[J]. 建井技术, 1994, 15(4): 67—71.
- ZHOU Xi-seng, SONG Hong-wei. Overseas wall rock loose circle support theories research general situation[J]. **Mine Construction Technology**, 1994, 15(4): 67—71.
- [5] LAI X P, REN F H, WU Y P, et al. Comprehensive assessment on dynamic roof instability under fractured rock mass conditions in the excavation disturbed zone[J]. **International Journal of Minerals Metallurgy and Materials**, 2009, 16(1): 12—18.
- [6] 邹红英, 肖明. 地下洞室开挖松动圈评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 514—519.
- ZHOU Hong-ying, XIAO Ming. Study of method-logy for assessment of excavation disturbed zone of underground caverns[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 514—519.
- [7] 赵海斌, 付建军, 周江平. 高地应力区大型地下洞室边墙松动圈动态分析研究[J]. 长江科学院学报, 2011, 28(9): 35—38.
- ZHAO Hai-bin, FU Jian-jun, ZHOU Jiang-ping. Dynamic analysis of loose zone at the sidewall of large underground cavern in high geostress zone[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(9): 35—38.
- [8] 余永强, 路耀邦, 杨小林, 等. 翔安海底隧道爆破开挖围岩松动圈数值模拟及测试分析[J]. 金属矿山, 2011, 46(8): 53—55.
- YU Yong-qiang, LU Yao-bang, YANG Xiao-lin, et al. Numerical simulation and tests analysis on the loosen zone of surrounding rock in Xiang'an undersea tunnel blasting[J]. **Metal Mine**, 2011, 46(8): 53—55.
- [9] 杨旭旭, 王文庆, 靖洪文. 围岩松动圈常用测试方法分析与比较[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 1—6.
- YANG Xu-xu, WANG Wen-qing, JING Hong-wen. Analysis and comparison on conventional loose zone measuring and test methods[J]. **Coal Science and Technology**, 2012, 40(8): 1—6.
- [10] 徐坤. 隧道施工质量控制的关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [11] 徐坤, 王志杰, 周艺, 等. 基于地质雷达技术隧道安全行评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 33(3): 691—696.
- XU Kun, WANG Zhi-jie, ZHOU Yi. Evaluation of tunnel safety based on geological radar technology[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2013, 33(3): 691—696.
- [12] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 高地应力测试及围岩变形研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.
- [13] 王乐明, 徐坤. 立体交叉隧道施工力学行为研究[J]. 铁道标准设计, 2012, 46(1): 45—48.
- WANG Le-ming, XU Kun. Stereoscopic cross tunnel construction mechanics behavior research[J]. **Railway Standard Desing**, 2012, 46(1): 45—48.
- [14] 肖明, 张雨霆, 陈俊涛, 等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2613—2618.
- XIAO Ming, ZHANG Yu-ting, CHEN Jun-tao, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2613—2618.
- [15] 左双英, 肖明, 续建科, 等. 隧道爆破开挖围岩动力损伤效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3171—3176.
- ZHUO Shuang-ying, XIAO Ming, XU Jian-ke, et al. Numerical simulation of dynamic damage effect of surrounding rocks for tunnels by blasting excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3171—3176.