DOI：10.11779/CJGE201412022

隧道分部开挖的围岩松动区演变分析

章慧健[1,2]，龚 伦[1,2]，仇文革[1,2]，赵 斌[1,2]
（1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室，四川 成都 610031；2. 西南交通大学土木工程学院，四川 成都 610031）

摘 要：以乌蒙山二号四线铁路隧道为工程背景，通过数值模拟手段对比研究分部开挖与一次成洞的松动区形态和大小差异，再结合现场测试结果，分析隧道分部开挖的松动区演变规律。结果表明：一次成洞松动区范围要普遍大于多部开挖的最终松动区范围，最大径向松动深度高出12.6%，最小径向松动深度高出41.2%；在松动区分布形态上，一次成洞表现为左右基本对称，多部开挖具有一定的不对称性，且多部开挖基本是从拱顶到边墙部位依次减小，而一次成洞则呈“拱顶>拱脚>拱肩>边墙”的分布形式。多部开挖时，先挖部分的松动区随着后续开挖部的推进有所增加，后挖部对先挖部的影响表现为：“上下关系”强于“左右关系”；另一方面，左右对称位置后挖侧松动区略大于先挖侧，说明先挖部对后挖部亦有劣化作用；其最终松动区是各开挖部相互影响和发展的结果，体现过程相关性。

关键词：松动区；切向应力扰动系数；数值模拟；地质雷达；过程相关
中图分类号：TU457；U451.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2014)12－2323－07

作者简介：章慧健(1982－)，男，博士，讲师，主要从事隧道及地下工程施工过程力学行为等方面的研究。E-mail: huijianz@163.com。

Evolution of loosened zone of surrounding rock for tunnels constructed by multi-partition excavation method

ZHANG Hui-jian[1,2], GONG Lun[1,2], QIU Wen-ge[1,2], ZHAO Bin[1,2]
(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on Wumengshan No. 2 railway station tunnel with four tracks, numerical simulation is performed to comparatively study the differences of loosened zone between multi-partition excavation and full face excavation. Based on the field monitoring data, the evolution of loosened zone by multi-partition excavation is analyzed. The results indicate that: from the viewpoint of thickness of loosened zone, the full face excavation makes it greater than the multi-partition excavation does, with the maximum value being 12.6% greater and the minimum value being 41.2% greater. From the viewpoint of distribution of loosened zone, the full face excavation makes it generally symmetrical, but the multi-partition excavation does not. Besides, for the multi-partition excavation, the thickness of loosened zone decreases from the crown to the side wall, but for the full face excavation, the thickness has a distribiotion of “crown > arch toe > arch shoulder > side wall”. For the multi-partition excavation case, the loosened zone near the earlier excavated part will increase owing to the later excavation of other parts. This influence of “up and down position” is greater than that of “left and right position”. Furthermore, for the left and right position, the loosened zone near the later excavated part is little greater than that near the earlier excavated part. This makes it clear that the earlier excavation has deteriorating effect on the later excavated part. The final loosened zone is the result of excavation interaction of all parts, so it is highly process-related.

Key words: loosened zone; tangential stress disturbance factor; numerical simulation; ground penetrating radar (GPR); process-dependent

0 引 言

地下工程的施工过程是一个几何形状与材料特性逐步变化的不完整结构在时间和空间上承受不断变化的施工荷载的受力过程[1-2]。与“过程”对应的是“状态”。隧道的状态设计方法认为隧道是一次开挖完成，不考虑施工过程对相关物理量（如松动区或松动荷载）

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（51208437）；铁道部科技研究开发计划项目（2010G016-H）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（SWJTU12BR039）
收稿日期：2014－03－20

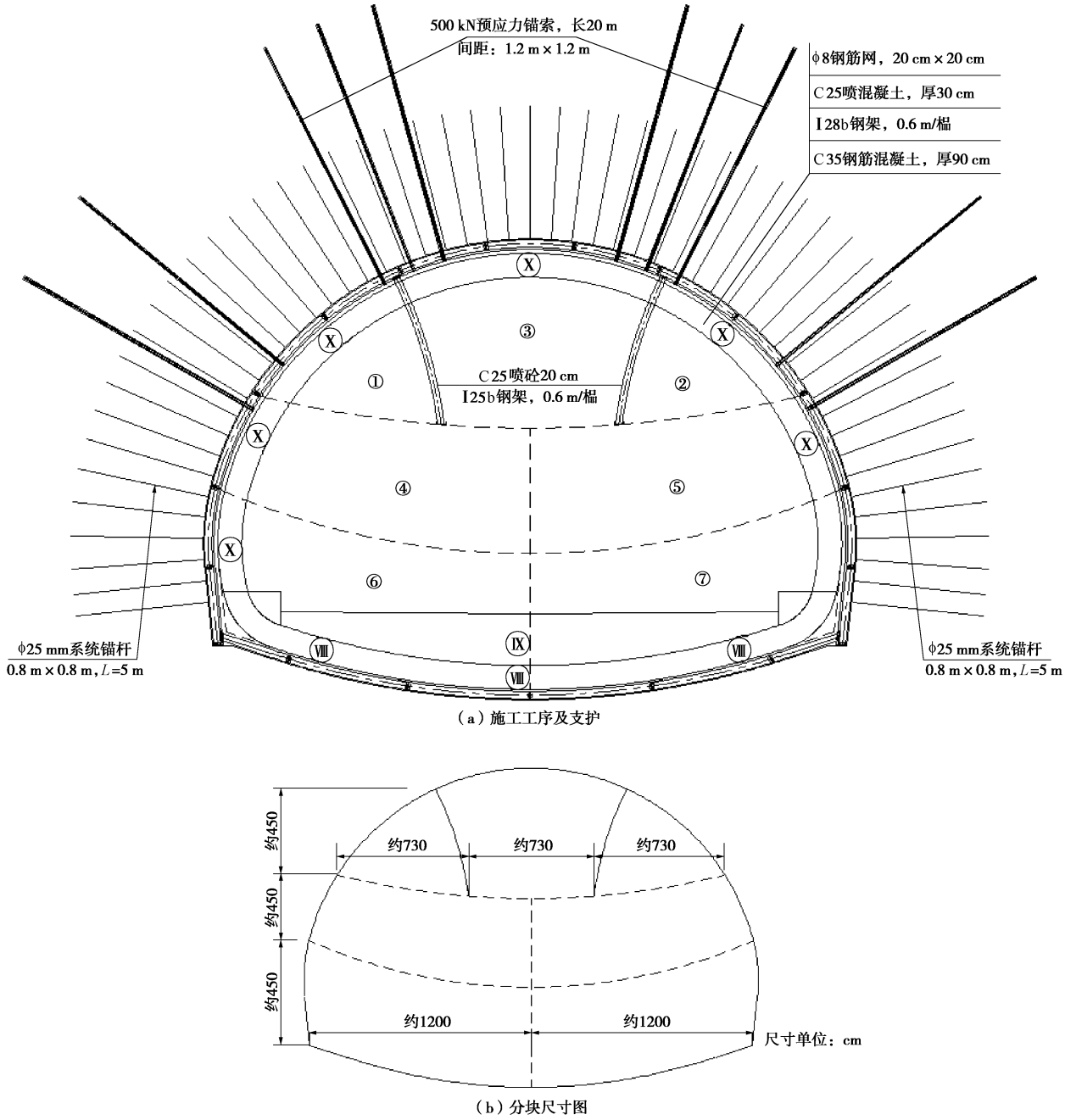


图 1 七部法施工工法图

Fig. 1 Drawing of seven-partition construction method

的影响[3-5]。状态设计方法对于传统的小断面隧道的结构设计起到了非常重要的作用，同时积累了丰富的研究成果，如：用于荷载计算的现行铁路隧道设计规范推荐公式、泰沙基理论、普氏理论等。然而，对于当前大量出现的大跨大断面隧道，分部开挖、多部开挖不可避免，采取不同的开挖方案，围岩和支护结构的应力应变都是有差异的，每一步施工不仅对本开挖部有直接影响，而且对后续的开挖部以及最终完整结构的受力状态均有不可忽视的持续作用。松动区作为设计支护参数的重要依据[6-8]，开展对其过程相关性研究意义显著。

本文以乌蒙山二号隧道四线车站段的多部开挖工法为工程背景，通过数值模拟手段对比研究分部开挖与一次成洞的松动区形态和大小差异，再结合现场测试结果，分析隧道分部开挖的松动区演变规律。

1 围岩松动区的数值模拟

1.1 依托工程概况

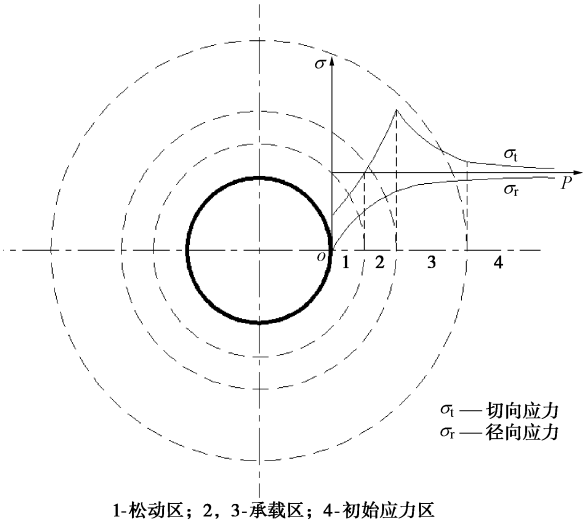
乌蒙山二号隧道出口段四线车站隧道，是改建铁路贵昆线六盘水至沾益段增建二线的重难点工程。乌蒙山二号隧道，全长 12.260 km，单洞双线，设计时速 160 km，通行双层集装箱。洞口扒挪块车站深入隧

道 572 m，其中过渡段 34 m，四线段 538 m，洞室断面参见图 1。

隧道洞身主要通过以泥岩、页岩夹砂岩为主的软岩地层，为确保开挖稳定性，将断面化大为小，多部开挖，采用如图 1 所示七部法施工。需要说明一点：图中预应力锚索主要作用是“撑索转换，以索代撑，减小拆撑风险”，另文专题讨论。

1.2　松动区的判别方法

对于半无限体中的孔洞问题，根据塔罗勃、卡斯特奈等给出的弹塑性围岩中的应力图形（见图 2）分析，围岩内出现塑性区后，一方面使应力不断地向围岩深部转移，另一方面又不断地向洞室方向变形并逐渐解除塑性区的应力。根据塑性区内应力高低，又可将塑性区分为内外两层，内层塑性区的应力低于初始应力，外层塑性区的应力高于初始应力。外层塑性区与围岩弹性区中应力升高部分合在一起称作“承载区”；内层塑性区内，围岩应力和强度都有明显下降，出现了明显的塑性滑移，称作“松动区”[1, 8]。



1-松动区；2，3-承载区；4-初始应力区

图 2 弹塑性围岩应力状态图

Fig. 2 Elastic-plastic stress state of surrounding rock

根据上述对于围岩松动区的既有认识，本文拟采用切向应力降低区来界定松动区范围，如图 2 所示，通过比较切向应力与初始应力的大小关系来界定松动区边界。定义“切向应力扰动系数”为施工扰动后切向应力与初始应力的比值，以 D 表示，即

$$D=\frac{\sigma_t}{\sigma_0}\quad 。\tag{1}$$

当 D<1 时，认为围岩处于松动区。由前述的分析可知，尽管 D=1 除了在松动区和塑性区边界处出现外，亦有可能在远离洞室的原岩应力区出现，但是，两者有明显差别，一个是处于 D 增大阶段，一个是处于 D 减小阶段，很好区别，因此，以切向应力扰动系数 D=1 来划界具有操作可行性。

具体操作过程如下：①沿着隧道的径向方向，向围岩深处绘制不同角度的考察路径，如图 3 所示，长度暂定 15 m，可根据切向应力扰动系数值 D 适当调整。②分别考察多部开挖和一次成洞工况的松动范围。编制 fish 程序提取相关应力，并进行处理后导出考察路径上不同深度处的切向应力扰动系数 D。③将不同路径上的 D=1 的点连接成线，绘出松动范围。

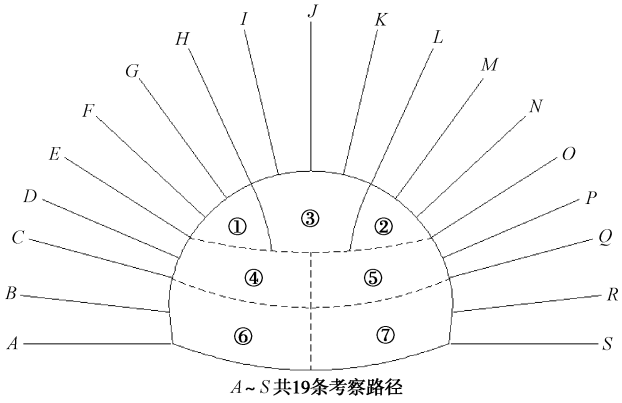


图 3 切向应力扰动系数考察路径示意

Fig. 3 Observed paths for tangential stress disturbance factors

1.3　计算模型与计算参数

基于上述图 1 所示工法，运用 FLAC^{3D} 有限差分程序[9]对围岩松动区演变进行数值模拟研究。

计算范围左右各取 100 m（约 4d，d 为开挖跨度）；仰拱下取为 100 m；拱顶以上覆土厚取为 100 m，为减小边界影响，纵向取 120 m。边界约束为前、后、左、右边界施加相应方向的水平约束，下边界竖向约束，上边界为自由面。初始应力仅考虑自重应力场的影响。围岩、二次衬砌采用实体单元模拟，分别服从 Mohr-Coulomb 准则和弹性准则；锚杆、锚索采用 cable 单元模拟；喷混凝土选用 shell 单元，钢拱架的作用按其弹性模量折算给喷混凝土考虑，具体计算式为

$$E=E_0+\frac{S_g E_g}{S_c}\quad ,\tag{2}$$

式中，E 为折算后混凝土弹性模量，E_0 为原混凝土弹性模量，S_g 为钢拱架截面积，E_g 为钢材弹性模量，S_c 为混凝土截面积。

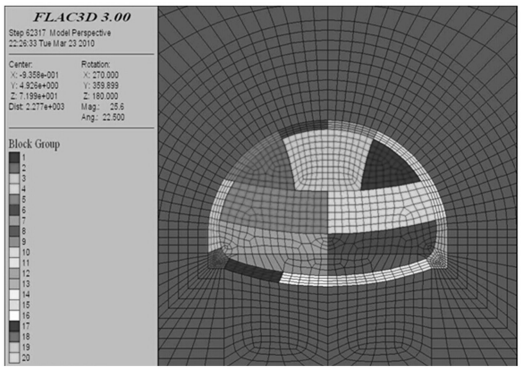
折算后的支护结构计算参数如表 1 所示。

表 1 支护结构计算参数

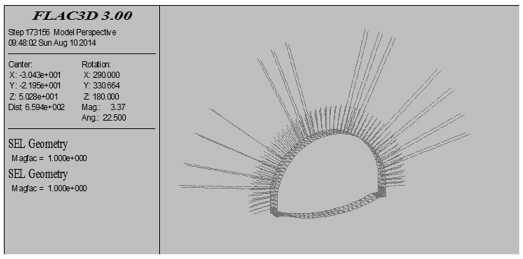
Table 1 Parameters of supporting structures

支护结构	重度 /(kN·m^{-3})	换算弹性模量/GPa	泊松比	厚度 /cm
初期支护	23	30.37	0.2	30
临时支护	23	32.80	0.2	20
二次衬砌	25	30.00	0.2	90

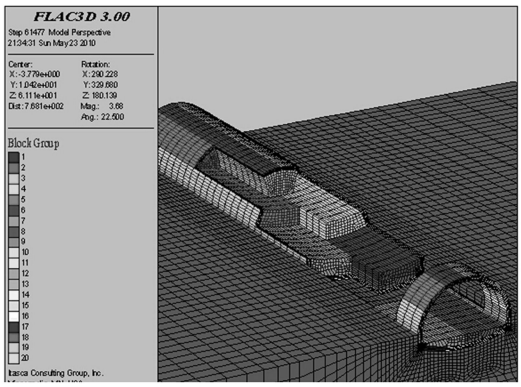
根据地勘资料，该段隧道主要通过泥岩、页岩夹砂岩地层，岩质软硬不均，节理发育，岩体破碎，稳定性差。设计文件根据《铁路隧道设计规范（TB10003—2005）》将围岩级别定为Ⅴ级。具体围岩物理力学参数：重度为 20 kN/m^3，弹性模量为 1.5 GPa，泊松比为 0.33，内摩擦角为 25°，黏聚力为 0.15 MPa。整体计算模型如图 4 所示。



（a）开挖分块



（b）初期支护



（c）施工过程

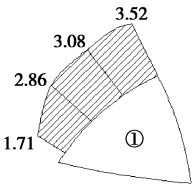
图 4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

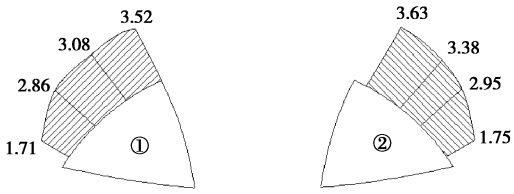
1.4 基于依托工程的围岩松动区演变分析

（1）多部开挖的松动区形态演变分析

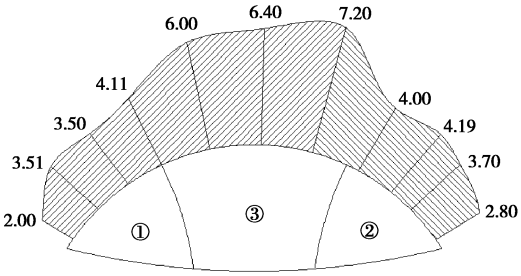
根据每一部开挖后相应路径上的切向应力扰动系数值，推测围岩可能松动范围如图 5 所示。



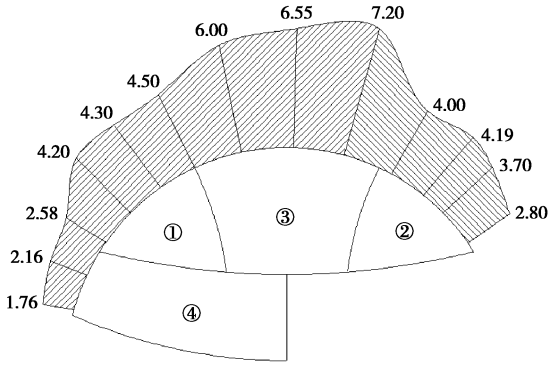
（a）①部开挖后围岩松动范围



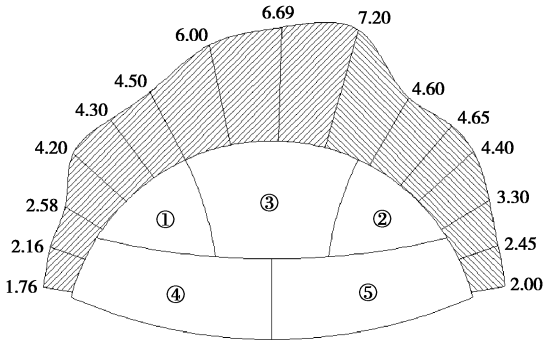
（b）②部开挖后围岩松动范围



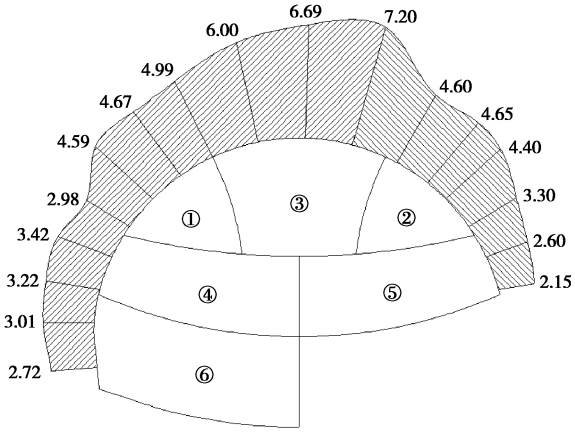
（c）③部开挖后围岩松动范围



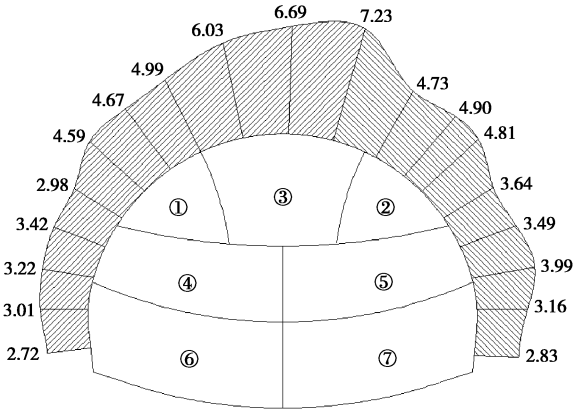
（d）④部开挖后围岩松动范围



（e）⑤部开挖后围岩松动范围



（f）⑥部开挖后围岩松动范围



（g）⑦部开挖后围岩松动范围

图 5 分部开挖的围岩松动范围演变（单位：m）

Fig. 5 Evolution of loosened zone of surrounding rock based on multi-partition excavation (unit: m)

图 5 中数值表示松动范围的深度。从图 5 中可以看出，先挖部分的松动区随着后续施工步的推进，会有所增加；同时后挖部由于先挖部对围岩的扰动，其松动区反而较先挖部（指对称部位）大；从计算结果看，左右水平分块之间后挖对先挖的影响很小，上下重叠分块之间后挖对先挖的影响较大。最终的松动区范围呈现拱顶大、边墙小的特点，且后挖侧稍大于先挖侧。计算的最大松动区深度 7.23 m，最小松动区深度 2.72 m。

（2）一次成洞的松动区形态分析

不考虑施工过程影响，按隧道一次成洞进行模拟。

根据相应路径上的切向应力扰动系数值，推测一次成洞围岩可能松动范围如图 6 所示。从图 6 中可以看出：一次成洞的松动范围左右基本对称，且呈现“拱顶＞拱脚＞拱肩＞边墙”的分布形式，计算所得最大松动区深度 8.14 m，最小松动区深度 3.84 m。

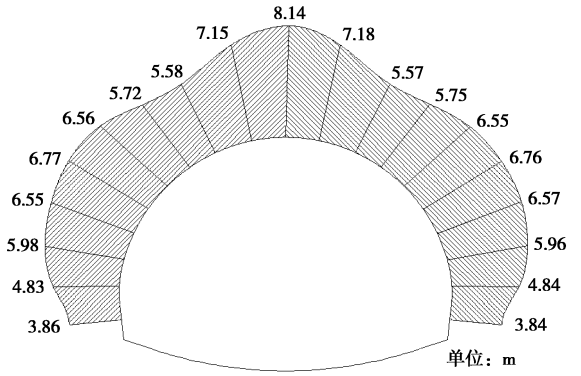


图 6 一次成洞的围岩松动范围

Fig. 6 Loosened zone of surrounding rock based on full face excavation

对比多部开挖和一次成洞的松动区形态可以看出：一次成洞松动区范围要普遍大于多部开挖的最终松动区范围，最大径向松动深度高出 12.6%，最小径向松动深度高出 41.2%；松动区分布形态上，多部开挖的不对称性相对更显著，且多部开挖基本是从拱顶到边墙部位依次减小，而一次成洞则呈“拱顶＞拱脚＞拱肩＞边墙”的分布形式。说明通过分部开挖、支护可以有效减小松动区范围，改变松动区形态；过程荷载小于一次成洞的状态荷载。

2　围岩松动区的现场测试

地质雷达法仍是目前常用的一种围岩松动区测试方法[10-13]。为减小人为判读波形图像的先入为主思想，本次测试人员未参与数值模拟计算。

2.1　测线布置

本次测试在横断面上选定 13 个部位，沿纵向做 13 条测线，如图 7 所示。每条测线的长度取 2 m 左右。

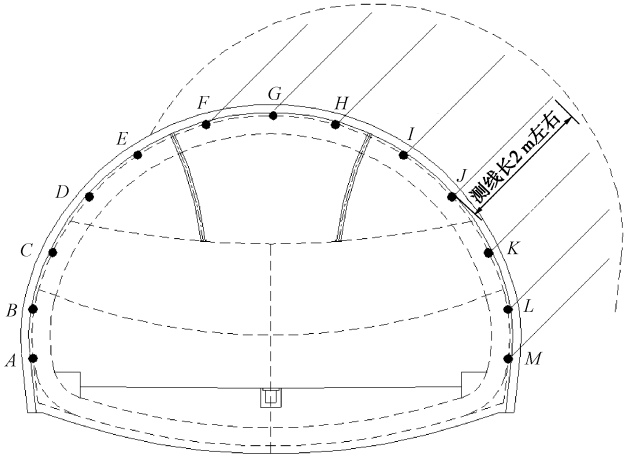


图 7 地质雷达测试围岩松动区的测线布置

Fig. 7 Layout of testing line used to test loosened zone of surrounding rock by GPR

2.2　现场测试结果

以测线 L 为例，地质雷达测试波形如图 8 所示。

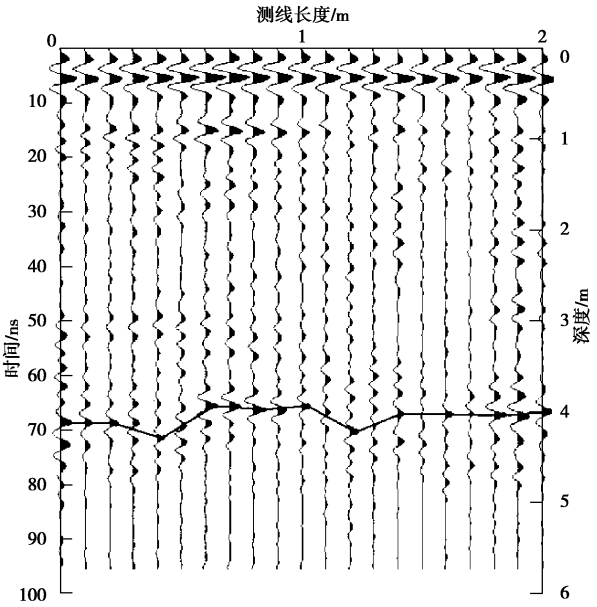


图 8 测线 L 的地质雷达测试波形图

Fig. 8 Waveforms of testing line L tested by GPR

表 2 地质雷达测试松动区数据

Table 2 Data of GPR tests

(m)

序号	测线纵向长度	松动范围/测线												
		A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*	*L*	*M*
1	0.0	3.73	3.57	4.05	4.26	4.62	4.70	4.87	4.72	4.50	4.37	4.12	4.12	4.22
2	0.2	3.61	3.79	4.06	4.20	4.56	4.79	4.95	4.78	4.44	4.26	4.40	4.12	3.93
3	0.4	3.78	3.73	3.81	4.32	4.23	5.04	5.20	4.81	4.73	4.36	4.17	4.25	3.81
4	0.6	3.39	3.75	3.99	4.19	4.29	4.87	5.10	5.02	4.79	4.25	4.02	3.91	4.13
5	0.8	3.40	3.79	4.12	4.15	4.27	4.86	5.07	4.56	4.67	4.44	4.19	3.96	3.91
6	1.0	3.74	3.74	4.05	3.88	4.53	4.94	4.94	4.68	4.73	4.43	4.06	3.90	4.20
7	1.2	3.77	3.56	3.83	3.92	4.67	4.72	5.21	4.68	4.79	4.20	4.31	4.22	3.86
8	1.4	3.62	3.44	4.02	4.04	4.25	4.59	4.95	4.80	4.36	4.15	4.31	4.07	3.87
9	1.6	3.81	3.50	3.87	4.27	4.66	4.77	4.89	4.79	4.80	4.28	4.27	4.03	3.95
10	1.8	3.47	3.80	3.89	4.25	4.22	4.67	4.87	4.98	4.40	4.22	4.41	4.05	4.24
11	2.0	3.38	3.78	3.74	4.00	4.65	4.71	5.10	4.99	4.63	4.53	4.40	3.97	3.94
最小值		3.38	3.44	3.74	3.88	4.22	4.59	4.87	4.56	4.36	4.15	4.02	3.90	3.81
最大值		3.81	3.80	4.12	4.32	4.67	5.04	5.21	5.02	4.80	4.53	4.41	4.25	4.24
平均值		3.61	3.68	3.95	4.13	4.45	4.79	5.01	4.80	4.62	4.32	4.24	4.05	4.01

根据地质雷达工作原理[11]，在松动区外边界应有较为明显的波反射，根据波形图判释测线 L 的松动区边界如图 8 所示，每隔一条波形线读取一次数据，最后以平均值作为该测线的松动区深度，如表 2 中第 L 列数据所示。

与上同理，统计出各条测线的松动范围最大值、最小值、平均值如表 2 所示。

根据上表中各条测线的松动范围推测本工程松动区形态如图 9 中实线所示。从图 9 可以看出：实测松动范围左右两侧有不对称性，但不显著；左边墙松动区深度最小，为 3.61 m，拱顶松动区深度最大，达 5.01 m；松动区形态总体基本呈现拱顶大，边墙小的规律，但拱顶和边墙的差值不大。

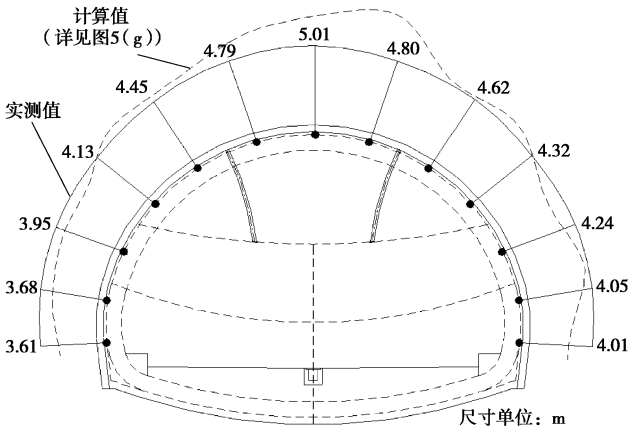


图 9 松动区的实测结论与计算结果对比

Fig. 9 Comparison between measured loosened zones and calculated values

2.3 现场测试和数值模拟的对比分析

对比分析图 9 所示的松动区现场测试结论和数值模拟结果，可以看出：①松动区分布形态上，均为拱顶大，边墙小，但在量值上，实测值拱顶和边墙差别小，最大最小值相差 38.78%；计算值拱顶与边墙的差别较为明显，最大最小值相差 165.8%。②计算值和实测值均表现出一定的左右不对称性，且是后挖侧略大于先挖侧，说明先挖侧的施工扰动对后挖侧起到劣化作用。③由于现场因素的复杂性和不确定性，松动区深度的计算值和实测值在隧道的不同部位差异较大。拱顶计算值比实测值大 44.3%，边墙实测值比计算值大 32.7%，拱肩拱脚部位计算值和实测值吻合较好。

3 结论与建议

（1）提出采用“切向应力扰动系数”来界定松动区范围，通过数值模拟计算对比分析多部开挖和一次成洞的松动区大小及分布形态如下：

a）松动区范围（深度），多部开挖成洞 2.72～7.23 m，一次成洞 3.84～8.14 m。一次成洞松动区范围要普遍大于多部开挖的最终松动区范围，最大径向松动深度高出 12.6%，最小径向松动深度高出 41.2%。

b）松动区分布形态上，一次成洞表现为左右基本对称，多部开挖具有一定的不对称性，后挖侧稍大于先挖侧，且多部开挖基本是从拱顶到边墙部位依次减小，而一次成洞则呈“拱顶＞拱脚＞拱肩＞边墙”的分布形式。

c）先挖部分的松动区随着后续施工步的推进，会有所增加；后挖部对先挖部的影响表现为“上下关系”强于“左右关系”。松动区范围及形态体现过程相关性。

（2）现场（多部开挖）地质雷达测试松动区结果在一定程度上验证了计算结果的正确性。在分布形态上均表现为拱顶大，边墙小的特点，仅是拱顶与边

墙的差值现场测试不如计算值明显；左右对称位置后挖侧松动区大于先挖侧，说明先挖部对后挖部有劣化作用。

多部开挖的松动区范围随施工而动态发展，它是各开挖部松动区范围相互影响和发展的结果。

参考文献：

[1] 王后裕, 陈上明, 言志信. 地下工程动态设计原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. (WANG Hou-yu, CHEN Shang-ming, YAN Zhi-xin. Dynamic design principle of underground engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese))

[2] CHEN Chee-nan, HUANG Wen-yen, TSENG Cheng-tsung. Stress redistribution and ground arch development during tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, **26**: 228 – 235.

[3] 曲海峰. 扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (QU Hai-feng. Study on load mode of road tunnel with extra-large cross-section and low flat-ratio and its application[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

[4] 武　军, 廖少明, 张　迪. 基于颗粒流椭球体理论的隧道极限松动区与松动土压力[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 714 – 721. (WU Jun, LIAO Shao-ming, ZHANG Di. Loosening zone and earth pressure around tunnels in sandy soils based on ellipsoid theory of particle flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 714 – 721. (in Chinese))

[5] 陈建功, 贺　虎, 张永兴. 巷道围岩松动圈形成机理的动静力学解析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1964 – 1968. (CHEN Jian-gong, HE Hu, ZHANG Yong-xing. Dynamic and static analysis of mechanism of loosen zone in surrounding rock of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 80 – 85. (in Chinese))

[6] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**: 726 – 740.

[7] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**: 99 – 105.

[8] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (XU Gan-cheng, BAI Hong-cai, ZHENG Ying-ren, et al. Support structure of underground engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002. (in Chinese))

[9] Itasca Consulting Group, Inc. Theory and Background: Constitutive Models [M]. FLAC^{3D} Manuals, 2005.

[10] 杨永杰, 刘传孝, 蒋金泉, 等. 巷道围岩松动圈的地质雷达探测及应用[J]. 工程地质学报, 1997, **5**(3): 276 – 281. (YANG Yong-jie, LIU Chuan-xiao, JIANG Jin-quan, et al. Fractured detection of rock zone in mine roadway with ground penetrating radar and its application[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, **5**(3): 276 – 281. (in Chinese))

[11] 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, **31**(4): 370 – 373. (SONG Hong-wei, WANG Chuang, JIA Ying-xuan. Principle of measuring broken rock zone around underground roadway with gpr and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, **31**(4): 370 – 373. (in Chinese))

[12] 蔡成国, 孟照辉, 熊昌盛. 围岩松动圈地球物理方法检测[J]. 西部探矿工程, 2004(7): 87 – 89. (CAI Cheng-guo, MENG Zhao-hui, XIONG Chang-sheng. The geophysics methods to detection of flexible circle[J]. West- China Exploration Engineering, 2004(7): 87 – 89. (in Chinese))

[13] 郭　亮, 李俊才, 张志铖, 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. (GUO Liang, LI Jun-cai, ZHANG Zhi-cheng, et al. Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S1): 3009 – 3015. (in Chinese))