

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S1.040

软弱围岩隧道掌子面及超前核心土 挤出位移特征研究

叶 飞¹, 宋 京¹, 唐勇三², 林剑飞³, 贾 涛⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 福建省高速公路建设总指挥部, 福建 福州 350001;
3. 莆田湄渝高速公路有限责任公司, 福建 莆田 351100; 4. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘 要: 为研究软弱围岩隧道掌子面及超前核心土的挤出位移特征, 用 Solexperts AG 公司生产的 GMD 滑动测微计对湄渝高速岐山隧道 F215 构造破碎带区域进行了挤出位移实测, 通过有限差分程序进行系列数值试验, 着重研究了隧道穿越软弱围岩期间挤出位移的变化特征, 并分析了破碎带长度和硬软岩刚度比的影响。结果表明, (1) 挤出位移的大小可反映前方围岩质量, 挤出位移在超前核心土内的分布可反映前方围岩的节理裂隙发育情况; (2) 隧道开挖在掌子面前方造成的扰动范围大致为 1.5 倍的隧道开挖跨度; (3) 隧道接近前方变化地质区域时, 挤出位移的增大或减小具有超前性; (4) 软岩段长度在一定范围内会影响掌子面进入软岩区后挤出位移的大小和变化趋势; (5) 硬岩与软岩间的刚度比越大, 挤出位移变化速率越大, 且隧道由软岩区向硬岩区掘进时挤出位移的变化时机越早, 而由硬岩区向软岩区掘进时的变化时机不受刚度比影响; (6) 可将挤出位移的监测分析作为超前地质预报的补充手段判断掌子面前方围岩情况。

关 键 词: 隧道; 软弱围岩; 岩土控制变形分析法; 挤出位移; 滑动测微计; 现场实测; 数值计算

中图分类号: U 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0323 - 08

Research on extrusion displacement of face and advanced core in tunnel with weak surrounding rock

YE Fei¹, SONG Jing¹, TANG Yong-san², LIN Jian-fei³, JIA Tao⁴

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;
2. Fujian Expressway Construction Headquarters, Fuzhou, Fujian 350001, China; 3. Putian Meiyu Expressway Co., Ltd., Putian, Fujian 351100, China;
4. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of extrusion displacement in the tunnel face and advanced core in tunnel with weak surrounding rock, the extrusion displacement of the soft fault area F215 in the left line of Qishan tunnel in Fujian province is measured with the GMD sliding micrometers produced by Solexperts AG Company. A series of numerical simulations are carried out with finite difference program to study the characteristics of extrusion displacement during the time tunnel passes through the weak rock zone; and the influence of the length of weak rock zone and the stiffness ratio of hard rock to weak rock are analyzed. The results show that: (1) The magnitude of extrusion displacement can reflect the quality of the surrounding rock of the advanced core, while the distribution of extrusion displacement in advanced core can reflect the condition of joint crack ahead of the tunnel face. (2) The range of disturbance in front of the tunnel face caused by excavation are around 1.5 times as long as the excavation span of the tunnel. (3) The extrusion displacement is able to increase or decrease in advance before the tunnel face approaches the area where the surrounding rock is changed. (4) When the tunnel face enters into weak rock zone from hard rock zone, the length of weak rock zone can affect the magnitude and the change trend of extrusion displacement in some extent. (5) The bigger the stiffness ratio of hard rock to weak rock, the faster the rate of extrusion displacement change increases; and the earlier the extrusion change occurs when the tunnel face approaches from hard rock zone to weak rock zone, while there is no difference when the tunnel face approaches from weak rock zone to hard rock zone. (6) The monitoring and analysis of extrusion displacement can be a supplementary method of advance geological forecast to distinguish the condition of surrounding rock ahead of the tunnel face.

Keywords: tunnel; weak surrounding rock; analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS); extrusion displacement; sliding micrometers; field monitoring; numerical calculation

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 51478044); 国家自然科学基金面上项目(No. 51678062)。

This work is supported by the National Natural Science Foundation for Surface Project of China (51478044) and National Natural Science Foundation for Surface Project of China (51678062).

第一作者简介: 叶飞, 男, 1977 年生, 博士, 博士后, 教授, 硕士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: xianyefei@126.com

1 引言

中国是世界上隧道工程建设规模最大、数量最多和难度最高的国家^[1],新奥法在20世纪70年代引入中国后得到了迅速推广,对我国隧道建设的发展做出了巨大贡献。新奥法施工中通过监控量测可及时反馈围岩和结构动态、优化支护参数,已成为指导隧道施工的重要手段^[2]。我国相关规范^[3]规定,隧道施工中必须对洞室收敛位移进行监测,最终得到的是各点在与隧道掘进方向正交平面内的位移。然而,隧道开挖本质上是一个三维空间问题^[4],将其简化为平面问题会不可避免地带来安全隐患,随着我国隧道工程结构形式与修建环境的不断突破,这一隐患将愈加突出。

Lunardi^[5]在Rabcewicz^[6]新奥法思想的基础上,考虑掌子面前方的变形,提出了新的隧道施工方法即岩土控制变形分析法。该法将隧道开挖产生的变形分为预收敛变形、挤出变形以及收敛变形,见图1。其核心观点认为隧道最初变形发生在超前核心土中(即预收敛和挤出变形),而掌子面前方核心土的稳定性决定整个隧道的稳定性,提倡采用玻璃纤维锚杆、近水平注浆以及机械预切槽等超前工法预保护或加固超前核心土。

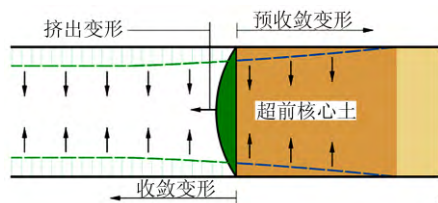


图1 隧道变形分类

Fig.1 Classification of tunnel deformations

岩土控制变形分析法的提出不仅使极端地质条件下隧道的全断面安全开挖成为可能,也大大推进了隧道施工的机械化进程。过去30年间在欧洲被成功应用于大量的隧道工程,总长度已经超过1000 km^[7],Lunardi等^[7]对于岩土控制变形分析法和新奥法在实际应用效果的比较中也可以体现出前者在多个方面的优越性。

岩土控制变形分析法强调在隧道施工过程中实时监测掌子面前方变形,以更好地了解超前核心土的状态,必要时调整施工措施,由于测量手段的限制,预收敛位移目前只能在浅埋隧道中利用多点沉降计得到,而挤出位移可以利用滑动测微计进行监测,不受埋深限制^[5]。

Lunardi^[8]1995年首次利用滑动测微计监

测了隧道挤出位移,并对掌子面及洞室的稳定性做出了判断,后来该方法陆续在大量隧道中得到应用。围绕掌子面挤出变形的研究也在近20多年间得到了部分学者的关注,在计算理论方面,Wong等^[9]考虑掌子面超前锚杆的预加固作用,提出了用于确定掌子面挤出量的球面模型。Mair^[10]基于球面模型,提出了“影响线”的概念,用于描述掌子面推进对前方某一点挤出变形的影响。Lunardi^[5]基于核心土体积守恒原理,不考虑围岩屈服造成的剪胀作用,提出了掌子面前方挤出变形及预收敛变形之间的关系,可以根据预收敛变形重新评估地层特性曲线并利用收敛约束原理估算支护结构受力。Hoek^[11]通过拟合数值计算结果,提出核心土轴线变形与切向变形的关系,认为毛洞状态下切向与轴向变形比值约为1.5。Lee等^[12]利用数值计算,提出了掌子面受刚性支护约束情况下挤出位移与支护压力之间的关系。此外,也有大量学者通过数值计算方法研究了超前锚杆预加固情况下掌子面的挤出变形特征及稳定性^[13-15]。然而,我国绝大多数山岭隧道仍采用传统新奥法施工,仅浏阳河隧道和桃树坪隧道对岩土控制变形分析法进行了尝试性应用,施工中的监测大多仍停留在洞室二维变形上,对掌子面前方变形的关注远远不足。

基于上述情况,本文利用滑动测微计对涪渝高速岐山隧道F215构造断裂带区域掌子面及超前核心土挤出位移进行实测与分析,通过有限差分程序进行系列数值计算,着重分析隧道穿越软弱围岩段期间的挤出位移特征。

2 工程背景

依托工程岐山隧道位于涪洲湾至重庆高速公路莆田段,隧道左线长8039 m,右线长8044 m,为目前全国最长的双向6车道高速公路隧道,也是所在标段的重点控制性工程。隧道最大开挖断面约184 m²,最大开挖宽度约为19 m,隧址区发育有18条断层,根据地质勘察资料和试验前已施工的情况来看,隧道地质情况变化反复,预计IV、V级软弱围岩占隧道全长将超过30%。

拟试验段位于隧道左线F215构造破碎带及构造影响带附近,埋深约500 m。试验段构造影响带围岩为弱风化流纹岩,掌子面节理裂隙稍有发育,拱顶层理发育较为明显,围岩整体性一般,综合判定为Ⅱ级围岩。构造破碎带处围岩为强风化流纹岩,掌子面层理、节理裂隙发育,围岩整体性较差,呈碎裂状镶嵌结构,偶有掉块现象,无渗水情况,综

合判定为 Ⅱ级围岩。

3 滑动测微计组成及其原理

滑动测微计^[16]主要由测管、感应探头、操作杆、控制电缆和便携读数仪等组成，测管上每米设置有金属环，金属环可通过浆液粘结作用与周围围岩共同变形，感应探头可测出相邻金属环之间的距离变化，从而得到轴线上各点的挤出位移，其基本构造及测量原理详见图 2。滑动测微计用于地下洞室位移量测的独特优点是其导管及测环可在施工过程中共同被开挖掉，其余部分仍可继续用于观测，可测量试验段整个施工期间的位移。国内有部分学者将滑动测微计用在了桩体轴向变形测试^[17-18]及大型水电厂房岩体内部变形^[19-20]的监测中。

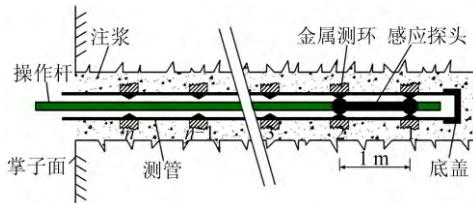


图 2 滑动测微计基本构造及原理

Fig.2 Basic structure and principle of sliding micrometer

经过反复查阅文献，慎重比选后最终选用瑞士 Solexperts AG 公司生产的 GMD 滑动测微计进行现场实测。

4 现场试验

4.1 前期准备

根据现场施工进度及项目部超前地质预报结果，在岐山隧道掌子面进入 F215 断层带范围前进驻现场，以提前协调各方工作，同步跟进施工进度，确保在条件满足试验要求时及时进场。

4.2 测管安装

(1) 钻孔

采用浙江开山 KG920B 潜孔钻机成孔，成孔直径为 110 mm，符合试验要求。理论上，最大挤出位移位于掌子面中心位置处，因此，试验中成孔位置大致位于隧道拱顶正下方 5 m 处，为方便后期向测管内注水清理，钻孔相对水平方向小角度下倾，钻孔完成后进行了清孔。

(2) 测管安装

将测管接口处擦拭干净并用凡士林涂抹后连接并用螺丝固定，接缝处用胶带密封防止土渣进入管内。为提高效率，首先在洞外将测管 2~3 根一组进行安装，进入隧道后随着测管推入钻孔再将其逐组连接，测管无法推动时停止安装并用顶盖封堵管口。

测管推入时将注浆管固定在其一侧随之共同推入钻孔，安装完成后用土工布塞紧孔口并截取 50 cm 注浆管作为排气管。

(3) 注浆

注浆采用由强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥拌合而成的水泥浆，浆液在保证能够注入的前提下尽量粘稠，测管安装完成后，用注浆机通过注浆管进行反向压浆直至浆液从孔口流出。为保证测管的稳定，浆液终凝前掌子面不进行爆破施工。

4.3 数据采集

施工恢复前首先进行初始数据量测，之后隧道每循环出渣完成后进洞采集数据。数据采集时，用操作杆连接探头并将探头推入测管最底部，依次从测管底部开始逐一测量各测环处的位移并记录读数，每个节点进行两次测量取平均值。为防止爆破过程中石渣等杂物进入测管影响读数，每次测读数数据前用小口径水管对测管内部进行冲洗。



图 3 现场试验情况

Fig.3 Scenarios of field test

现场实测工作共进行了两循环，两循环测量区间起止桩号分别为 ZK79+047-ZK79+073、ZK79+065-ZK79+089，搭接长度为 8 m，如图 4 所示。

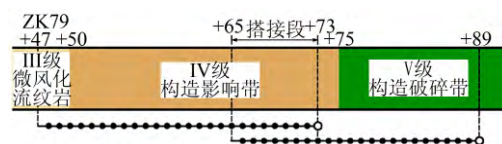


图 4 测点布置示意图

Fig.4 Equipment layout sketch of measuring points

5 试验结果分析

两循环挤出位移量测结果整理如图 5 所示。其中，第一循环由于经验欠缺导致 2 次读数未能正常进行。

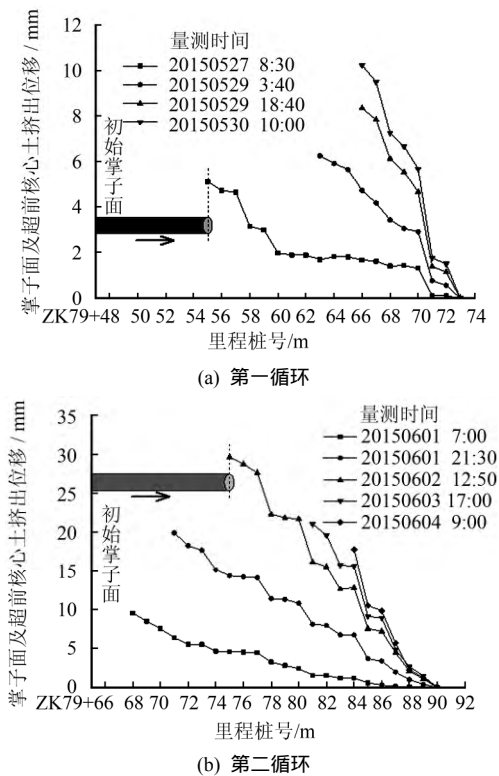


图5 现场测量结果

Fig.5 Results of field measurement

对两循环试验结果分析如下:(1)隧道开挖后掌子面作为临空面,其挤出位移较为明显且位移大小与围岩质量有明确关系,里程 ZK79+047~ZK79+072 段围岩相对完整,其挤出位移累计最大值为 10.2 mm,里程 ZK79+075~ZK79+089 段围岩较为破碎,其挤出位移累计最大值为 29.6 mm;(2)围岩整体性较好时超前核心土挤出位移在数值上呈现出均匀变化的趋势,围岩整体性较差时,挤出位移则在某些里程节点处出现突变,节点之间的位移增长较为均匀。这是由于滑动测微计通过测环之间的相对变形来计算挤出位移,测环以 1 m 为间距均匀分布于测管上,某些位置处存在较大的节理裂隙时,附近的测环随着围岩的挤出变形其相对位移会明显大于其他部位,而这些裂隙之间的围岩可视为一个整体,其相对位移较小,也可以根据超前核心土挤出位移的分布情况来判断围岩在洞身轴向上的完整性。本次现场试验中里程 ZK79+057、ZK79+065、ZK79+070 以及 ZK79+068、ZK79+073、ZK79+077、ZK79+080、ZK79+082 处挤出位移值增大较为明显,可初步判定这些位置处存在较大的节理裂隙;(3)隧道开挖后掌子面附近的围岩发生应力重分布,根据 Lunardi 的理论,隧道开挖引起应力重分布的区域在纵平面上是以掌子面理论中心点为圆心,以开挖影响范围 R_p 为半径的圆形。本次

现场试验数据显示,第一循环挤出变形发生的起始位置为距掌子面 16 m 的位置;第二循环挤出变形发生的起始位置为距掌子面 22 m 的位置,由于第一循环前两次均未能进行正常的数据采集,因此实际上第一循环挤出变形发生的起始位置可能大于 16 m,但最大不大于 24 m,据此可初步判定 $R_p \approx 1.5D$ ($D = 16.5$ m,为隧道开挖跨度);(4)根据现场资料及试验期间对掌子面的观察,隧道在里程 ZK79+75 附近由构造影响带进入 F215 构造破碎带,而现场试验结果显示,在掌子面达到破碎带之前,隧道开挖至里程 ZK79+63 之后掌子面挤出位移便从 6.3 mm 开始逐渐增长,并在里程 ZK79+75 处达到最大值 29.6 mm,而掌子面及超前核心土挤出位移曲线的整体斜率也不断增大。根据 Schubert 等^[21]的理论,隧道向前方软弱围岩掘进时前方软弱围岩会因无法承受地拱效应产生的高应力而在硬岩区域产生纵向集中应力,随着掌子面接近地质界面,硬岩范围逐渐减小,纵向应力不断集中,最终导致隧道纵向位移急剧增大,上述结果初步验证了这一假说。

6 隧道穿越软弱围岩段掌子面挤出位移特征分析

现场实测结果已初步表明,隧道在接近前方软弱破碎带时挤出位移会在掌子面到达破碎带之前预先产生增长趋势,为进一步验证并深入研究这一问题,采用有限差分程序进行一系列数值试验,对隧道穿越软弱围岩段时掌子面及超前核心土的挤出位移特征进行系统研究。

6.1 计算模型及计算方案

选取 1/2 的实际模型进行分析,建立的模型长度为 76 m,高 100 m,纵向长度在考虑纵向边界效应的前提下视计算工况而定,为保证计算精度,掌子面中心处进行网格细化与加密。初期支护采用实体单元模拟并按照抗弯刚度 EI 相等的原则将钢拱架强度折算到其中,模型不考虑 2 次衬砌的作用,最终建立的模型如图 6 所示。

采用摩尔-库仑模型 (Mohr-Coulomb) 模拟围岩材料,弹性模型 (elastic) 模拟支护材料,空模型 (null) 模拟开挖部分,模型设置软弱破碎区(后文简述为软岩区)及硬岩区,围岩参数分别按照依托工程 F215 构造破碎带及构造影响带围岩取值,参数取值见表 1。

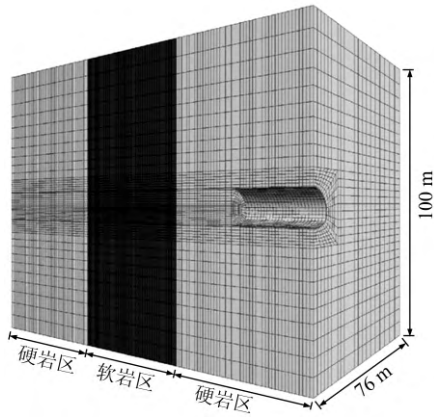


图 6 模型网格

Fig.6 Mesh of model

表 1 围岩参数取值

Table 1 Parameters of surrounding rock

围岩区域	重度 γ / (kN/m ³)	变形模量 E / GPa	内摩擦角 φ / MPa	黏聚力 c / MPa	泊松比 μ
硬岩	25	2.4	30	0.30	0.33
软岩	21	1.3	22	0.12	0.39

试验段隧道埋深达 500 m，必须考虑构造应力的影响，参考地应力资料，采用快速应力边界法^[22]将地应力施加在模型周围。

此外，所有计算工况下每循环开挖长度均设定为 2 m，开挖过后及时施作初期支护。

6.2 穿越软弱围岩段挤出位移特征分析

首先按照依托工程中破碎带的长度与围岩参数，模拟隧道由硬岩区穿越软岩区并再次进入硬岩区，软岩段长度按照试验段破碎带实际长度 30 m 取值。

图 7 为计算得到的掌子面处挤出位移随隧道向前掘进的变化曲线，包括现场实测数据，横坐标中负值代表掌子面位于软岩区后方，正值则代表掌子面已进入或穿越软岩区。图 8 为隧道掘进至不同位置时掌子面前方超前核心土挤出位移分布曲线。图中，每条曲线分别代表当前掌子面前方各点挤出位移的分布情况。将计算结果与实测值进行对比，图 7 中硬岩区掌子面处挤出位移计算结果与实测结果在规律上大致相同，而破碎区掌子面挤出位移以及图 8 中超前核心土挤出位移的发展规律与实测规律（见图 5）则表现出了一定的差异。造成这一差异的原因是实际情况中围岩发育的节理裂隙对各点位移的影响较大，而数值模型中选取的材料为连续介质。

从图 7 可以看出，隧道在远离软岩区时每循环开挖过后掌子面处挤出位移保持在 5 mm 左右，而

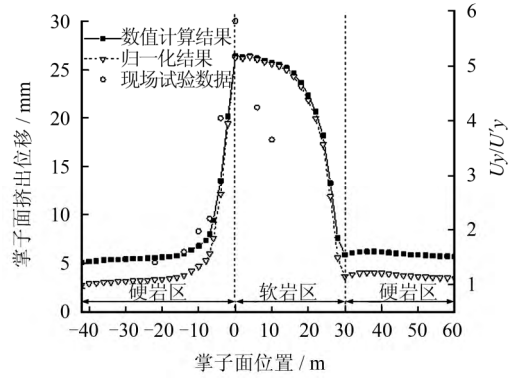


图 7 掌子面挤出位移随隧道掘进的变化曲线

Fig.7 Changing curves of face extrusion displacement along with tunnel advancement

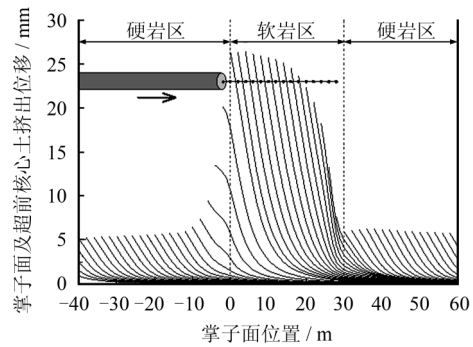


图 8 掌子面及超前核心土挤出位移随隧道掘进的变化曲线

Fig.8 Changing curves of face and advance-core extrusion displacement along with tunnel advancement

到达距软岩区约 15 m 的位置后挤出位移开始逐渐增长，且增长趋势随着掌子面的推进愈加明显，最终在掌子面进入软岩后挤出位移达到最大值 26 mm。在隧道继续推进约 10 m，即掌子面距硬岩区约 20 m 时掌子面挤出位移开始下降且速率不断增大，掌子面重新进入硬岩区后，挤出位移再次回到先前的恒定值。图 7 中，虚线为对计算结果进行归一化后的数据，右竖坐标 U_y 为掌子面接近弱带前挤出位移在恒定地层中的稳定值； U_y 为各位置掌子面的挤出计算值。显然，归一化处理后的曲线同样能够表现应有的规律，为方便对比研究，后续计算结果均按照此方式进行处理。

在图 7 的基础上图 8 展示的掌子面及超前核心土挤出位移变化曲线可以得到以下规律：(1) 随着掌子面不断接近软岩区，相邻挤出位移曲线间的面积不断增大，而由软岩区靠近硬岩区时，相邻曲线间面积则不断减小；(2) 在掌子面接近软岩区时，硬岩区围岩挤出曲线逐渐趋于平缓，即各点间位移增量减小，可以认为随着软弱围岩纵向作用力的增大，残余硬岩区域的“刚体位移”所占比例逐渐增大，而前方软岩区挤出位移曲线斜率则逐渐增大直

至掌子面到达。

图9为拱顶下沉随掌子面推进的变化曲线。实际的监控量测中监测仪器是在掌子面通过后架设，图中数据不包括掌子面通过测点前产生的前期位移^[23]。图中，测点设置时位于掌子面后方2m处， P_y 为测点距软岩区位置（负值表示在软岩区后方，正值在软岩区内或软岩区前方）。从图中可以看出，随着隧道向软岩区掘进，掌子面后方各测点拱顶下沉规律并没有呈现出明显变化，比较测点之间的规律，测点越靠近软岩区，其拱顶沉降发展速率越快，测点进入软弱破碎带后沉降值与发展速率的增长更为明显。然而，后方拱顶下沉变化特征与现场多种因素相关，依靠传统的后方收敛数据可以判断当前洞室的稳定性，但很难对掌子面前方地质情况做出预判。

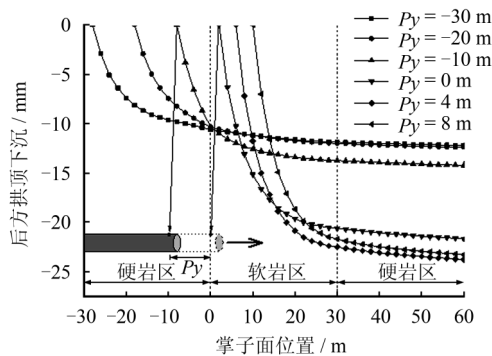


图9 后方拱顶下沉随隧道掘进的变化曲线
Fig.9 Changing curves of rear crown settlement along with tunnel advancement

以上分析说明，较传统监控量测中的洞室收敛位移，掌子面-超前核心土挤出变形特征不仅能够反应洞室的稳定情况，还能够对掌子面前方变化的地质条件产生超前的反应，可将其作为超前地质预报的辅助手段，两种手段组合不仅可以了解前方地质条件，还可以对前方围岩在当前赋存环境下的施工反应做出预判。

6.3 软岩区长度的影响

隧道在穿越软弱围岩段时在掌子面到达前方变化围岩之前挤出位移会产生超前变化，为研究软弱围岩长度对挤出变形特征的影响，分别在数值模型中将破碎区长度 L_s 设置为 10、20、30、40、50、100 m，材料参数不变，图 10 为不同长度破碎区下挤出位移的计算结果。分析图 10 可以得出：(1) 隧道向不同长度的软岩区掘进时挤出位移开始偏离恒定值时掌子面距软岩区的距离基本不变；(2) 软岩区长度较短 ($L_s < 30$ m) 时，掌子面到达软岩区

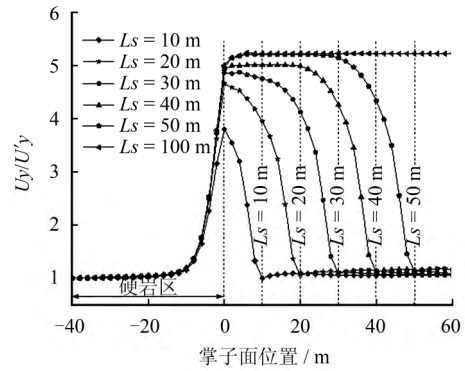


图10 不同软岩区长度对掌子面挤出位移的影响
Fig.10 Influence curves of different lengths of soft rock areazone on face extrusion displacement

时挤出位移随着软岩区长度的增加而增加，而软岩区长度大于 30 m 后位移几乎不再增长，因此依据先前挤出位移变化的剧烈程度难以判断前方软岩区的长度；(3) $L_s = 10、20$ m 时掌子面挤出位移在隧道进入软岩区后迅速下降， $L_s = 30$ m 时掌子面挤出位移则在软岩区内短距离保持稳定后开始下降，而 $L_s = 40、50、100$ m 时隧道进入软岩区后挤出位移出现小幅度增长，之后保持稳定，直到掌子面再次到达硬岩区约 20 m 位置时开始下降，因此可根据挤出位移在掌子面进入软岩区后的突然下降或逐渐稳定大致判断前方软岩区长度。

6.4 地层刚度比的影响

为研究两侧地层刚度比的影响，参考王国富等^[24]在研究盾构隧道穿越不同围岩介质时的方式，将地层刚度比 SR 定义为过渡界面两侧围岩弹性模量的比值，即

$$SR = \frac{E_{硬岩}}{E_{软岩}} \quad (1)$$

式中： E 为围岩弹性模量。

由于弹性模量取值过小会造成计算中材料变形过大而导致网格畸形中断计算，故设定软岩区围岩刚度不变，改变硬岩区围岩刚度，计算刚度比 $SR = 2、4、6、8$ 共 4 种工况，为消除软岩区长度的影响，取 $L_s = 50$ m。

岩体的变形参数与强度参数之间必然存在一种内在联系，一般岩体的强度参数越大，则弹性模量越高，泊松比越低。因此，若采用摩尔-库仑本构，只改变弹性模量所得参数必然不符合实际情况，但同时改变变形参数与强度参数又无法明确单因素的影响规律，且参数之间的关系难于把握，综合考虑本节数值模型采用弹性本构模拟围岩。

图 11 为不同刚度比下掌子面挤出位移计算结果。计算结果表明，与先前采用摩尔-库仑本构相

比,弹性本构计算结果所表现出的总体规律并无差异,原计算参数(见表1)中两围岩刚度比约为2,比较由原参数计算得到的图10中 $L_s = 50\text{ m}$ 曲线与图11中 $SR=2$ 曲线可知,两条曲线中的差别主要为原参数中强度参数 c 、 φ 的影响所致,可认为计算方案可以用于定性分析。从图11中可以看出,(1)不同刚度比下隧道进入软岩区前挤出位移开始偏离恒定值时的掌子面位置基本相同,但开始偏离后围岩刚度比越大,挤出位移增长速率越大,根据挤出位移先前的的发展速率可以大致判断前方围岩相对于当前围岩的刚度差异;(2)围岩刚度比 $SR=2$ 时掌子面进入软岩区后挤出位移基本不再变化,而两侧围岩刚度比较大时掌子面进入硬岩区后挤出位移仍有一定的上升幅度,且刚度比越大,这种上升幅度也越大;(3)隧道由软岩区接近硬岩区时,围岩刚度比越大,挤出位移开始偏离的时机越早,下降的速率也越大。

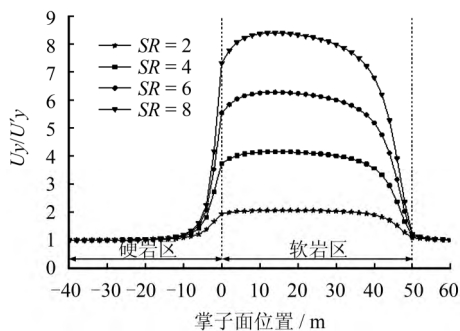


图 11 不同围岩刚度比对掌子面挤出位移的影响

Fig.11 Influence of different rock stiffness ratios on face extrusion displacement

7 结 论

(1) 隧道掌子面及超前核心土挤出位移的大小可在一定程度上反映前方围岩质量,且软弱破碎围岩中掌子面前方挤出位移在轴向上的分布可反映前方围岩的节理裂隙发育情况。

(2) 岐山隧道现场挤出位移实测结果显示,开挖在掌子面前方的造成的扰动区域范围大致为 1.5 倍的隧道开挖跨度。

(3) 隧道由硬岩区向软岩区掘进时,在掌子面未到达软岩区时挤出位移就开始呈现增长趋势,说明前方软弱围岩会因无法承受地拱效应向硬岩区传递纵向应力,验证了 Schubert 等提出的假说,而隧道由软岩区接近硬岩区时也会产生类似的现象。

(4) 归一化的数值试验结果显示,隧道穿越软弱围岩地段时软弱围岩段的长度基本不影响挤出位移变化的时机及变化速率,但会在一定范围内影响挤出位移的变化趋势。硬岩与软岩间的刚度比越大,

位移增长或减小的速率越大,隧道由软岩向硬岩掘进时的变化时机越早,而由硬岩向软岩掘进时挤出位移的变化时机基本不变。

(5) 相比于收敛位移,隧道挤出位移的变化不仅可更加全面地反映洞室稳定性,还能对掌子面前方围岩条件及其变形反应做出预测,因此可将同步监测挤出位移作为超前地质预报工作的辅助和补充手段,现场试验也证实了可操作性。

考虑到计算效率的限制,同时为得到更加明确的计算结果,原文计算模型采用了连续介质,无法体现破碎围岩中节理裂隙对挤出位移分布规律的影响,但对于初期研究该计算得到的规律不失一般性,另外,受现场因素限制,实测数据反映出的信息也不够充足。后续研究在继续完善不足的同时,积极借鉴欧洲地区已有经验也是必要的手段。

参 考 文 献

- [1] 马建, 孙守增, 赵文义, 等. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1 - 65.
MA Jian, SUN Shou-zeng, ZHAO Wen-yi, et al. Review on China's tunnel engineering research: 2015[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5): 1 - 65.
- [2] 蒋树屏, 赵阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3460 - 3464.
JIANG Shu-ping, ZHAO Yang. Study on monitoring and back analysis for road tunnel with complex geology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3460 - 3464.
- [3] 张宇, 何川, 伍晓军. 复杂地质条件下隧道三维变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1465 - 1471.
ZHANG Yu, HE Chuan, WU Xiao-jun. Analysis of 3D deformation of tunnels under complex geological conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1465 - 1471.
- [4] 洪开荣, 杨朝帅, 李建华. 超前支护对软岩隧道空间变形的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 429 - 433.
HONG Kai-rong, YANG Chao-shuai, LI Jian-hua. Analysis on impact of advanced support on space deformation of tunnel in soft rock mass[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 429 - 433.
- [5] LUNARDI P. Design and construction of tunnels: analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS)[M]. Springer: [s. n.]. 2008.

- [6] RABCEWICZ L V. The new Austrian tunnelling method, part one[J]. **Water Power**, 1964, 11: 453 - 457.
- [7] LUNARDI P, BARLA G. Full face excavation in difficult ground[J]. **Geomechanik Und Tunnelbau**, 2014, 7(5): 461 - 468.
- [8] LUNARDI P. L'importaza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie[J]. **Gallerie e Grandi Opere Sotterranee**, 1995, 45(3): 16 - 37.
- [9] WONG H, SUBRIN D, DIAS D. Extrusion movements of a tunnel head reinforced by finite length bolts—A closed-form solution using homogenization approach[J]. **International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics**, 2000, 24(6): 533 - 565.
- [10] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: New horizons[J]. **Géotechnique**, 2008, 58(9): 695 - 736.
- [11] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(9): 726 - 740.
- [12] LEE K M, ROWE R K. Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils, part 2. Results[J]. **Computers & Geotechnics**, 1990, 10(2): 111 - 138.
- [13] BERNAUD D, MAGHOUS S, BUHAN P D, et al. A numerical approach for design of bolt-supported tunnels regarded as homogenized structures[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology**, 2009, 24(5): 533 - 546.
- [14] PEILA D. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 1994, 12(3): 145 - 168.
- [15] ORESTE P P, PEILA D, PELIZZA S. Face reinforcement in deep tunnels[J]. **Felsbau**, 2004, 22(4): 20 - 25.
- [16] 李光煜, 黄粤. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. **岩石力学与工程学报**, 2001, 20(1): 99 - 109.
LI Guang-yu, HUANG Yue. Linewise observation and portable instruments on strain monitoring in geomechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 99 - 109.
- [17] 徐松林, 吴玉山. 桩土荷载传递的测试分析和模型研究[J]. **岩石力学**, 1996, 18(2): 42 - 52.
XU Song-lin, WU Yu-shan. Pile-soil load transfer behavior and model study[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 18(2): 42 - 52.
- [18] 覃卫民, 赵刚, 周伟江. AM 扩底桩在静载试验中的应变测试分析[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(增刊 2): 101 - 104.
Qin Wei-min, ZHAO Gang, ZHOU Wei-jiang. Strain of AM bottom-expanded piles in static loading tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.2): 101 - 104.
- [19] 覃卫民, 孙役, 陈润发, 等. 全站仪和滑动测微计在水布垭地下厂房监测中的应用[J]. **岩土力学**, 2008, 29(2): 557 - 561.
QIN Wei-min, SUN Yi, CHEN Run-fa, et al. Application of total station instrument and sliding micrometer to monitoring Shuibuya underground powerhouse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 557 - 561.
- [20] 王浩, 吴振君, 汤华, 等. 地下厂房监测信息管理、预测系统的设计与应用[J]. **岩土力学**, 2006, 27(1): 163 - 167.
WANG Hao, WU Zhen-jun, TANG Hua, et al. Development and application of monitoring information management and prediction software system for underground powerhouse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 163 - 167.
- [21] SCHUBERT W, BUDIL A. The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation[C]// *Proceedings of the 8th ISRM Congress on Rock Mechanics*. Rotterdam: BALKEMA A A, 1995: 1411 - 1415.
- [22] 李仲奎, 戴荣, 姜逸明. FLAC^{3D} 分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(增刊 2): 2387 - 2392.
LI Zhong-kui, DAI Rong, JIANG Yi-ming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC^{3D} and application in a huge underground cavern group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.2): 2387 - 2392.
- [23] 李煜龄, 林铭益, 许文贵. 三维有限元分析隧道开挖收敛损失与纵剖面变形曲线关系研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(2): 258 - 265.
LI Yu-lin, LIN Ming-yi, XU Wen-gui. Study on relationship between convergence loss and longitudinal deformation curve in tunnel excavation by using three dimensional finite element analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 258 - 265.
- [24] 王国富, 路林海, 孙捷城. 突变地质界面围岩稳定性分析及盾构推力判定研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(11): 2362 - 2372.
WANG Guo-fu, LU Lin-hai, SUN Jie-cheng. Stability of surrounding rock and thrust calculation of shield passing through geological mediums[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2362 - 2372.