

DOI: 10.11779/CJGE201810016

裂隙岩体小净距超大断面隧道围岩非连续变形分析

贺 鹏^{1, 2}, 李术才¹, 李利平^{*1}, 许振浩¹, 石少帅¹, 陈云娟¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 由于现有隧道规范不足与设计、施工经验匮乏, 裂隙岩体中小净距超大断面隧道的围岩稳定性分析与中夹岩柱变形破坏特征及其支护方案优化仍是大型隧道工程建设中遇到的棘手难题。以济南市东南二环绕城高速大岭超大断面隧道为工程依托, 通过对掌子面岩体结构信息的精细化描述, 获取各评定指标分布概率, 并应用 Monte Carlo 法生成符合围岩等级评价指标分布概率的大量随机数, 通过归纳统计获得隶属各围岩亚级分级的概率分布, 由此对岩体质量进行了稳健评估。此外, 用改进的非连续变形分析(DDARF)法对大岭隧道浅埋小净距段围岩的变形破坏规律及裂隙演化过程进行了数值模拟; 以裂隙扩展破碎区贯通与否作为中夹岩柱稳定性的评定依据, 分别针对无锚、有锚支护条件下的围岩稳定性状况及变形特征进行了对比分析。结果表明: 无锚支护条件下, 隧道后行洞开挖对先行洞的裂隙扩展及变形有一定影响, 但不明显; 而锚杆支护则可显著约束围岩尤其是中夹岩柱的裂隙扩展及贯通, 锚杆支护条件下二次扰动后先行洞围岩的裂隙扩展情况、变形破坏特征与单洞开挖无异, 且系统锚杆支护与中夹岩柱水平加长锚杆支护对裂隙演化的控制效应无较大区别。研究结果对裂隙岩体中小净距超大断面隧道围岩的支护方案优化有实际指导意义。

关键词: 裂隙岩体; 小净距超大断面隧道; 改进非连续变形(DDARF)法; 中夹岩柱; 围岩等级可靠概率

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)10-1889-08

作者简介: 贺 鹏(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道岩体结构稳定性分析、动态评估及控制研究。E-mail: hepenghank@163.com。

Discontinuous deformation of surrounding rock for small-space tunnel with super-large section in jointed rock mass

HE Peng^{1,2}, LI Shu-cai¹, LI Li-ping¹, XU Zhen-hao¹, SHI Shao-shuai¹, CHEN Yun-juan¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Shandong Province Key Lab of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Due to insufficiency of the existing specifications and lack of experience in design and construction, the stability of the surrounding rock, deformation characteristics and optimization of supporting schemes of middle rock pillar for small-space tunnels in jointed rock mass are still a tough problem encountered during the construction of tunnels with super-large section. Based on the Daling tunnel of ring expressway in Jinan, the actual distribution information and the related probability distribution model for joints and fractures are obtained. Then lots of random numbers that obey the probabilistic distribution models for these evaluation indexes can be produced by the Monte Carlo method, and the corresponding random rating-values of these evaluation indexes are also gained. The distribution probability affiliated with different rock mass levels can be attained through the inductive statistics, and the robust evaluation of the surrounding rock classification is carried out. Moreover, an improved discontinuous deformation analysis method is adopted to simulate the deformation failure mechanism and fracture evolution process of the surrounding rock in Daling tunnel with small space. Taking the crack propagation zone as the estimate basis for the stability of the middle rock pillar, the comparative analysis of surrounding rock stability with or without anchor supports is carried out. The results reveal that the excavation of the following tunnel hole has an influence on the crack extension and deformation of the advanced tunnel hole (but less obvious), and the anchor bolting can significantly restrict the crack extension and penetration of the surrounding rock, especially for the middle rock pillar. Under the anchor supports, the crack extension situation and deformation failure characteristics of the advanced tunnel hole with secondary disturbance are almost indistinguishable from those of single-hole excavation only, and there is little difference of the controlling effect on crack evolution between systematic and extended bolt supports

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题(2016YFC0801607); 国家自然科学基金项目(51679131); 山东大学基本科研业务费资助项目(交叉学科培育)(2016JC002)

收稿日期: 2017-07-05

*通讯作者(E-mail: yuliyangfan@163.com)

for the middle rock pillar. The research results may offer practical guidance for field construction and optimization of supporting schemes.

Key words: jointed rock mass; small-space tunnel with super large-section; improved discontinuous deformation analysis method; middle rock pillar; reliable probability of surrounding rock level

0 引言

随着“西部大开发”及“一带一路”战略的实施，我国交通基础设施建设发展迅猛，其中，小净距大断面隧道因其不受地形条件、线路线型限制，又兼具独立双洞与连拱隧道两者之优势，在全国各地不断涌现。在现有规范、细则^[1-3]中，小净距隧道中夹岩柱最小厚度及其加固措施的确定与岩体质量密切挂钩，不同围岩等级条件下其最小合理净距、围岩衬砌类型、中夹岩柱的加固措施以及监控量测方案均有较大差异。但由于岩土体参数本身的不确定性，加之各定性、定量评定指标在获取过程中由仪器误差、人为操作等产生的随机性，往往是应用同一岩体质量评价体系及分级标准，却得出不同的评定等级，尤其是在围岩亚级分级中，评定结果鲁棒性差，甚至出现跳级^[4-5]。因此，围岩等级的稳健、可靠评定是小净距隧道施工工法、支护方案确定的首要工作之一。

然而，在裂隙岩体的小净距隧道修建中，岩体运动、变形在很大程度上受制于不连续结构面。隧道先行洞周边岩体及中夹岩柱由于在多次施工扰动情况下其内部节理、裂隙、断层等缺陷及其发展造成失稳，尤其是对诸如双向八车道这种超大断面隧道而言，现有设计、施工经验不足，开挖跨度的增大更是加剧了岩体的切割程度及其失稳概率，致使围岩特别是中夹岩柱区域裂隙扩展、贯通直至破碎。而目前各分级方法均未将开挖跨度、隧道形状等尺寸效应考虑在内，也未将断层、软弱破碎带、软弱夹层等非连续性结构面作为评定指标进行分析。因此，在裂隙岩体的小净距超大断面隧道围岩稳定性分析方面，除了进行可靠的围岩等级评定，应综合其它方法对隧道围岩尤其是中夹岩柱区域岩体的稳定性状况及其变形破坏规律进行合理分析。在以往数值计算中，多是采用有限元法、有限差分法等相应软件进行模拟，并以屈服区接近度或极限位移收敛值作为小净距隧道中夹岩柱稳定与否的判据，并未考虑裂隙岩体尤其是中夹岩柱因其内部节理、裂隙、断层等缺陷对围岩的变形破坏特征造成的影响，所得结果往往是偏安全的，若以此作为设计、施工依据，则存在较大安全隐患。

非连续变形分析方法是由石根华博士提出的分析块体运动和变形的一种数值方法^[6-7]，该方法基于最小势能原理建立系统方程，具有完备的块体运动学理论，

能够较好地模拟多块体系统的大位移和大变形问题，因此在数值模拟和工程应用方面取得了较大发展。而针对 DDA 中一些算法不能解决断续节理岩体破坏的问题，焦玉勇等^[8-9]构建了一种断续节理岩体破坏过程的分析方法——DDARF。DDARF 实现了模拟岩体裂纹萌生、扩展、贯通、破碎的全过程，在隧道围岩稳定性分析，岩体的变形破坏过程及裂隙演化规律，锚杆的加固与失效机理方面均得到了广泛认可与持续研究^[10-19]。

基于此，本文以济南市东南二环项目中大岭隧道为工程依托，通过对掌子面岩体结构信息的精细化量测，获取各指标概率分布模型，应用 Monte Carlo(MCS) 法生成符合各围岩等级评价指标分布概率的大量随机数，通过归纳统计获得评价结果的分布概率，由此对围岩等级进行了可靠性评估。其次，用改进的非连续变形分析(DDARF) 方法对大岭隧道浅埋小净距段的围岩变形规律及裂隙演化过程进行了数值模拟。以裂隙扩展破碎区贯通与否作为中夹岩柱稳定性的评定依据，分别就无锚、系统锚杆支护、中夹岩柱水平加长锚杆支护 3 种工况下的围岩变形及裂隙扩展情况进行了对比分析，以确定合理的支护方案。

1 围岩等级可靠评定

1.1 工程概况

在建济南市东南二环项目（包括二环东路南延及二环南路东延）桥隧比高达 64.6%，6 条隧道全长占总路线长度的 42.8%，且均为双向八车道公路隧道，是全国最大规模的八车道隧道群。其中大岭隧道作为项目的难点工程，左线起讫里程 ZK6+511.3—ZK7+473，长 961.7 m，右线起讫里程 YK6+535—YK7+500，长 965 m。采用分离式结构，左右线相距约 15~50 m，隧道主洞净空为（宽×高）17.608 m×8.961 m，每延米开挖土石方量均超过 200 m³。隧址区为鲁中南构造侵蚀为主的中低山丘陵区，剥蚀溶蚀中低山丘陵亚区（见图 1）。经工程地质测绘及勘探，出露和揭露地层为第四系残坡积土层及基岩组成，大岭隧道地质剖面图如图 2 所示。受燕山运动影响，其单斜构造中发育有多条规模较大的 NNW 向断裂，由东向西依次有文祖断裂、东坞断裂、千佛山断裂等；地下水类型主要为松散岩类孔隙水、基岩风化带网状裂



图1 大岭隧道隧址区及航拍图

Fig. 1 Location of Daling tunnel and its satellite image

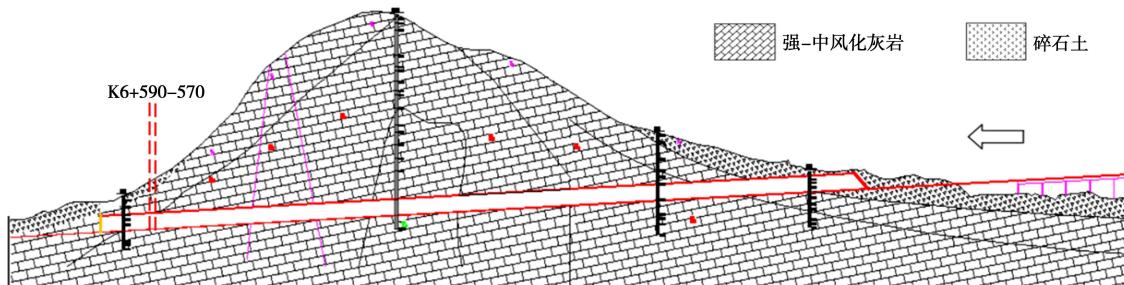


图2 大岭隧道地质剖面图

Fig. 2 Geological section of Daling tunnel

隙水和基岩构造裂隙水。岩体整体均一性较差，局部岩层存在不整合接触带、岩性接触带、破碎带及小型灰岩溶蚀裂隙。

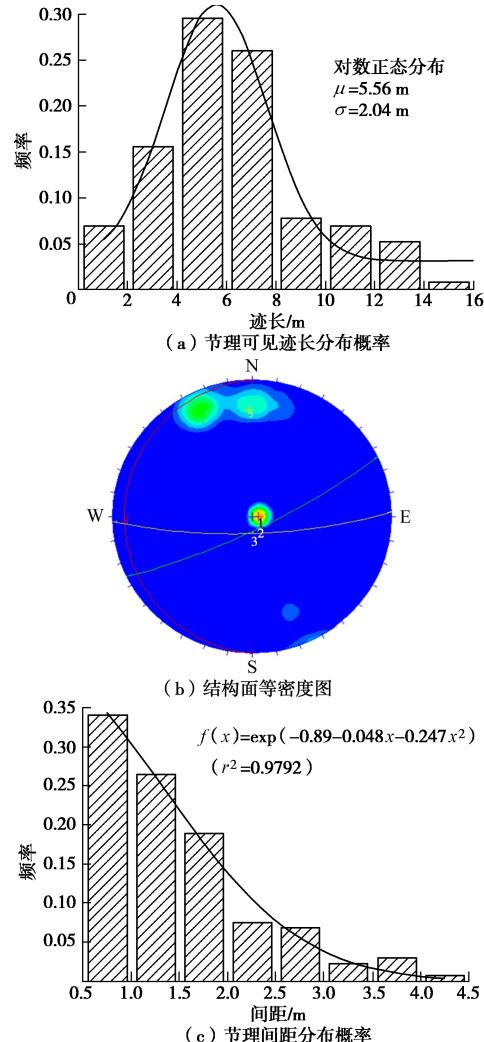
1.2 等级可靠性评定

(1) 结构面信息概率统计

岩体结构几何特征分布信息是岩体质量评定与围岩非连续变形分析的重要前提，因此，需首先进行岩体结构信息的获取与统计分析。由于隧道开挖断面较大，单独某区域岩石强度或岩体完整性无法代表整个掌子面的围岩情况，因此在进行现场岩体结构信息获取中，将各掌子面分为左、中、右三子部进行分区评定。且考虑在一定工程岩体范围内，如无特殊岩性突变或地层变化，在相邻爆破循环内岩体质量变化情况不大，即围岩在小区间段内存在近相关性，为保证所得数据的鲁棒性及获取合理的指标概率分布函数，每爆破一个循环进行一次精细化量测，共计四次数据采集。以ZK6+590—570段为例，基于统计模型与概率模型相结合的统计演绎方法，获取各结构面的产状玫瑰花图、结构面迹长、间距等信息的概率分布模型（见图3）。

(2) 围岩等级隶属概率评定

依据《国标》BQ法评价体系及文献[5]，对各掌子面进行精细化地质编录，获取岩体结构面产状及评定指标概率分布模型及参数（见表1）。其中，岩石强度通过现场点荷载试验获取，岩体完整程度由岩体



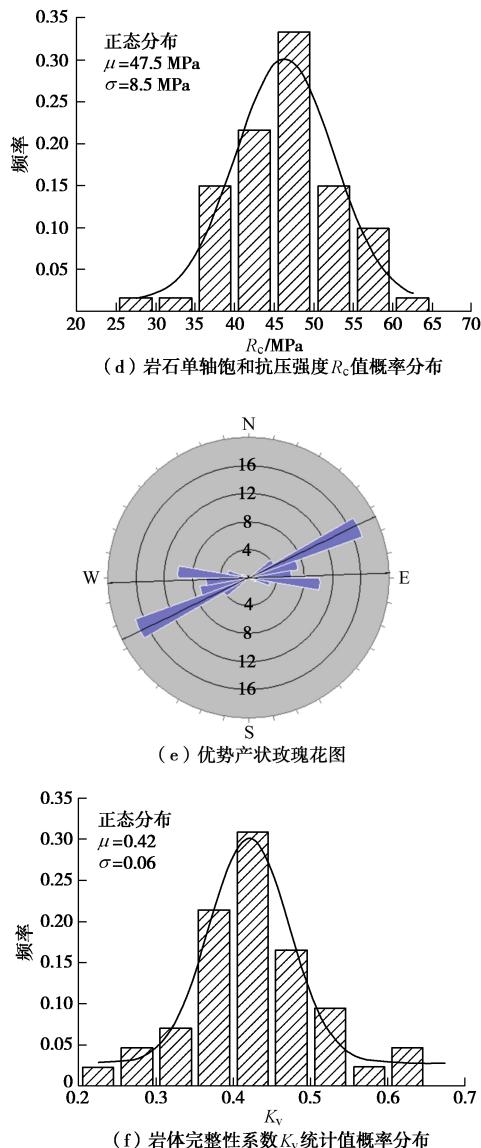


图 3 结构面产状及评定指标概率分布模型及参数

Fig. 3 Probabilistic distribution models and their relevant parameters of structural planes and evaluation indexes

表 1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model

类别	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 (°)	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
岩体	24	20	0.3	35	5	4
虚拟节理	—	—	—	35	5	4
真实节理	—	—	—	30	0	0

体积节理数统计获得,以此为基准,对离散性较大的区域辅以岩体声波参数测定,并对 K_v 值进行适当修正,最终获取其岩体完整系数的概率分布。为简化计算,在统计各修正系数 k_i 过程中引用区间数理论^[20-21],综合定性分析与所给定量评定标准,仅确定 k_i 的最大值 $k_{i\max}$ 与最小值 $k_{i\min}$,令 $k_{i\max} = \mu + 3\sigma$, $k_{i\min} = \mu - 3\sigma$ ^[21],并假定 k_i 服从正态分布。各修正系数 k_i 可参考文献[1]

中表 5.22-1、表 5.22-2 分别通过区间值确定其概率分布函数。

基于上述各评定指标分布模型,应用 MCS 法生成符合各指标分布模型的大量随机数(取 $n=10^6$),而后参照《国标》^[1]BQ 之评定方法及《公路隧道设计细则》^[3]对岩质围岩亚级分级之评定标准^[1, 5],建立各评价指标描述体系与分类评分体系的对应关系,进而得到 BQ 的大量随机评分值,通过归纳统计评价结果的分布状况,最终获得岩体隶属于各围岩等级的可靠概率^[22](表 2)。

表 2 ZK6+590—570 段围岩隶属于各等级的统计概率

Table 2 Membership probabilities attached to different surrounding rock levels in ZK6+590—570

围岩级别	BQ 评定隶属概率	设计等级	隶属等级
III ₂	0.0842		
IV ₁	0.3235		
IV ₂	0.3779	V ₁	IV ₂
IV ₃	0.1895		
V ₁	0.0249		

由表 2 可知,在充分考虑各评定指标的概率分布条件下,ZK6+590~570 段围岩评定为 IV₂ 级的隶属概率最大,且有 IV₂ 级偏 IV₁ 级的迹象,整体来看围岩质量相较于初期勘探结果要好。

但由于大岭隧道为双向八车道隧道,且开挖揭露岩体持续发育有贯通的软弱夹层及长大控制性裂隙,而目前各围岩分级方法中均未考虑隧道跨度、断面形状,以及所发育软弱夹层、破碎带等不良地质体对围岩稳定性的影响,加之现有规范也未对双向八车道小净距隧道的支护类型及其参数作出明确规定,单一的岩体质量评定无法综合地对超大断面小净距隧道围岩尤其是中夹岩柱岩体的稳定性状况及其支护方案做出合理评定。为此,基于上述所得岩体结构面几何特征分布信息,采用改进非连续变形分析(DDARF)方法对大岭隧道小净距段围岩的变形破坏规律及裂隙演化过程进行数值模拟,以进一步分析其稳定性状况。

2 围岩稳定性非连续变形分析

DDARF^[8-9]法是基于改进的 DDA 方法,用来解决断续节理岩体的破坏问题。该方法采用有限元网格生成法——行波法将计算区域自动剖分成三角形块体单元,块体边界分为真实节理边界和虚拟节理边界。对于模型中的所有节理,在没有达到断裂破坏准则时都将其定义为虚拟节理,其强度在计算过程中达到断裂破坏准则后则转化为真实节理,形成裂隙,并对其赋以真实的节理强度参数。裂纹扩展沿虚拟节理进行并

按照界面破裂准则进行开裂。断续节理的变形、破坏过程可认为是虚拟节理的开裂、扩展和贯通，在这一过程中伴随着虚拟节理力学属性减弱、断续节理整体强度降低。因此，DDARF 可很好地模拟岩体裂纹萌生、扩展、贯通及破碎的全过程。

2.1 模型构建

计算模型选取大岭隧道 K6+570 断面构建其平面应变模型（见图 4），模型尺寸为 $110\text{ m} \times 60\text{ m}$ ，隧道宽 17.61 m ，高 8.96 m ，两隧道净距为 15 m ，该段隧道埋深约 $13\sim 16\text{ m}$ ；模型左右及底部边界均限制法向位移，上边界受力主要为岩重，侧压力系数为 1.2 ，计算中不考虑隧道支护的作用，求解时逐步超松弛迭代因子取 1.4 ，共划分 8000 个单元。在节理网络模拟过程中，所有层理与统计意义上的细小节理、裂隙均假定为虚拟节理，其力学参数与岩石力学参数等同；而确定性结构面则以真实节理形式借助 MCS 法进行模拟，即根据实测节理各参数的概率密度函数来求服从这些分布规律的节理网络结构的集合图形。基于 Monte-Carlo 原理编制网络模拟分析程序，可通过 CAD 转化为 DDARF 计算网络模型时，能直接生成 DDARF 前处理所需要的切割文件。具体可参考文献 [16, 19]。真实节理几何参数见表 3，计算模型力学参数见表 1。考虑远离掌子面区域的节理分布对隧道开挖无较大影响，为简化计算，相应减少远离掌子面区域的节理数，但结构面产状、迹长及间距分布不变。其中，监测点分别布设于隧道的拱顶、拱肩及边墙中点。

表 3 真实节理几何参数

Table 3 Geometric parameters of real joints

节理组号	间距 /m	间隙 /m	迹长 /m	倾向 /($^{\circ}$)	倾角 /($^{\circ}$)
1	4.0	3.0	7.5	265	5
2	5.0	5.0	8.0	155	80
3	6.0	5.0	7.0	195	85

2.2 结果分析与方案优化

(1) 计算结果分析

计算结果如图 5 所示，就裂隙演化过程来看，隧道先行洞（右洞）开挖过程中，掌子面周边区域原生裂隙扩展、贯通，拱肩及边墙处萌生大量次生裂隙，形成明显的围岩破碎区及大量潜在滑动块体。裂隙数量越多，说明围岩破碎程度越严重，隧道岩体开挖后各区域裂隙萌生数量呈现为拱肩>边墙>拱顶的规律，岩体破碎区沿隧道轮廓整体呈“X”形分布，拱肩处尤为显著（见图 5）。在后行洞（左洞）的开挖过程中，其周边岩体同样伴随着裂隙的萌生、扩展、贯通直至破碎，尤其是右侧拱肩靠近中夹岩柱区域，形成了规模较大的岩体破碎区。

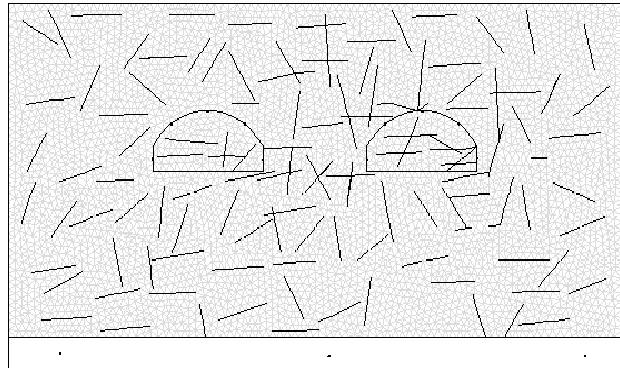
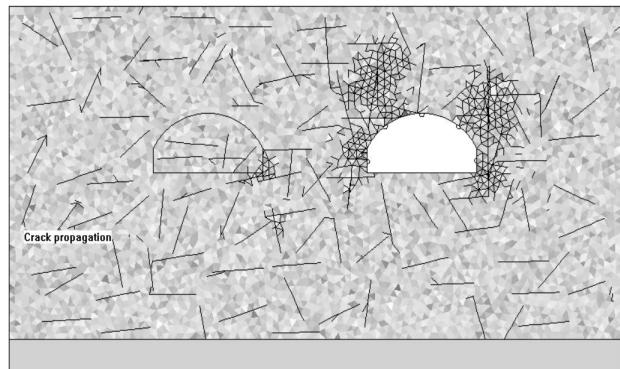
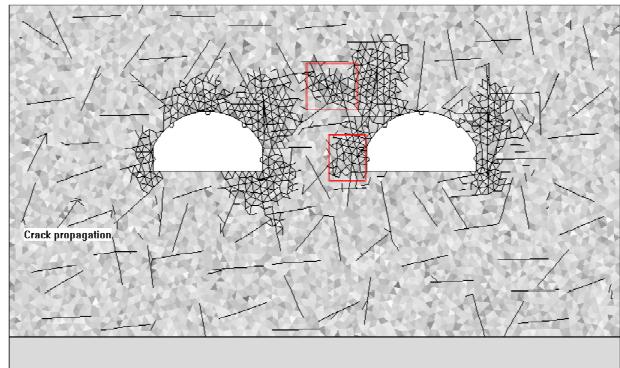


图 4 大岭隧道计算模型

Fig. 4 Computational model for Daling tunnel



(a) 先行洞开挖



(b) 后行洞开挖

图 5 隧道开挖后裂隙扩展图

Fig. 5 Crack propagation after tunnel excavation

由图 5 (a)、(b) 中红色框选区可见，受后行洞开挖扰动及应力重分布影响，先行洞靠近中夹岩柱侧（左拱肩及左拱脚处）的裂隙呈现出二次扩展、发育，且有与后行洞围岩破碎区贯通之趋势。其充分表明：相较于单洞开挖，后行洞的开挖对先行洞周边岩体裂隙的扩展、贯通确有影响。

值得注意的是，随着隧洞拱肩区域裂隙的持续扩展，除中岩柱区域外，所发育裂隙亦有延伸至地表之趋势。加之该处为浅埋段，上覆介质为杂土及破碎岩体，因此，施工过程中需加强该段围岩，尤其是地表处的监控量测，并做好防排水工作。

就变形破坏规律来讲, 围岩变形量与裂隙发育数量的变化趋势基本一致, 裂隙扩展程度越大, 该区域位移变化值越大, 其中, 先、后行洞靠近中夹岩柱侧拱肩区域总位移变化值分别达到 22.96, 25.87 mm。表明在断续节理岩体的裂隙演化过程中伴随着围岩的变形破坏, 裂隙的演化规律与岩体的变形破坏特征存在着内在关联。

为进一步研究后行洞对先行洞的变形破坏影响, 以先行洞为研究对象, 在相同设置条件下, 分别模拟仅单洞(先行洞)开挖(工况 I)和双洞先后开挖(工况 II)两种施工工况。在先行洞靠近中夹岩柱侧的左拱肩、左边墙及拱顶布设监测点, 以获取各监测点的总位移。从位移变化趋势及其收敛值来看(图 6), 仅单洞开挖与双洞先后开挖两工况下, 先行洞拱顶、左边墙处的位移差值并不大(小于 5.0%), 拱肩靠近中夹岩柱区域总位移变化约为 8.4%。表明在当前净距及围岩条件下, 后行洞对先行洞的影响存在, 但并不十分显著。

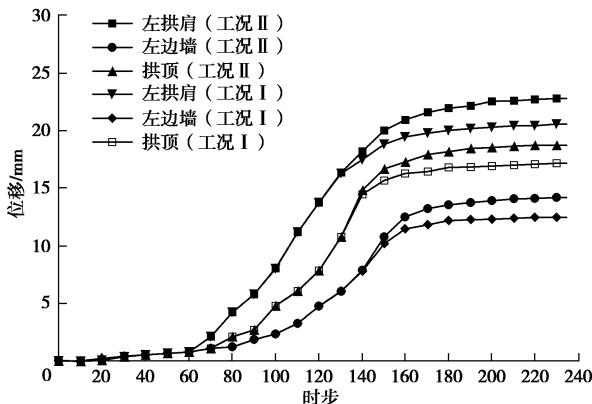


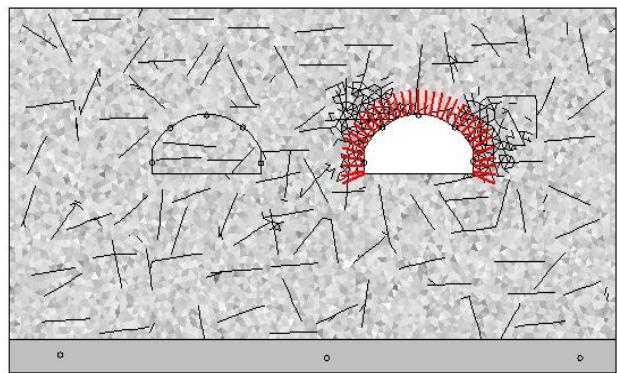
图 6 不同工况下关键点位移

Fig. 6 Displacements of key points with different conditions

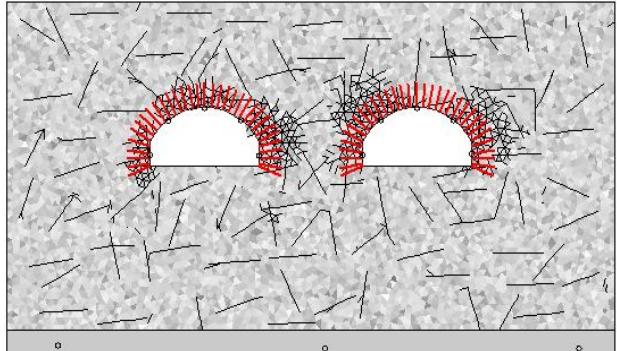
然而值得注意的是, 就左右单洞围岩本身来讲, 开挖隧道周边岩体的裂隙发育程度已然较为破碎, 实际工程中应尽量减少围岩的扰动并及时施加合理支护。为此, 鉴于该段为浅埋小净距段隧道, 综合考虑现场岩体质量评定结果, 分别开展系统锚杆支护与中夹岩柱水平加长锚杆支护的对比分析, 以优化支护方案。

(2) 支护方案优化

依据IV级初支设计, 系统锚杆(设为方案 I)支护每环设 33 根锚杆, 环向锚杆长度 400 cm, 间距为 100 cm, 设定弹性模量为 200 GPa, 预应力为 120 MPa; 中夹岩柱水平加长锚杆支护方案(设为方案 II)中, 左右洞靠中岩柱侧边墙区域内布设 500 cm 长水平预应力锚杆, 其余拱、墙位置的布设及其参数取值与前述锚杆等同。在两种支护方案下, 分别进行隧道左、右洞开挖, 计算结果如图 7, 8 所示。



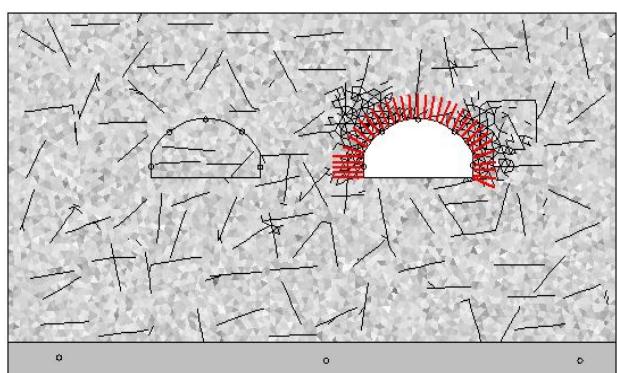
(a) 先行洞开挖



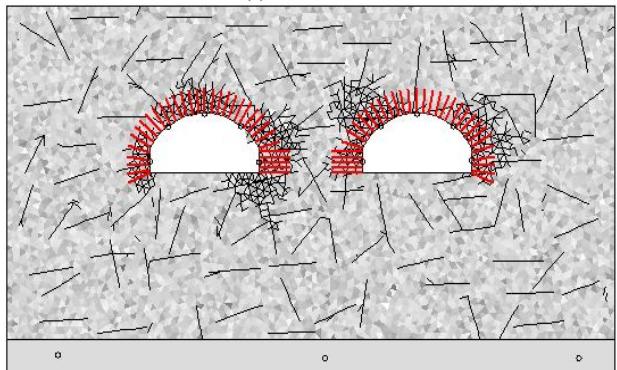
(b) 后行洞开挖

图 7 支护方案 I 条件下隧道开挖后裂隙扩展图

Fig. 7 Crack propagation after tunnel excavation under scheme I



(a) 先行洞开挖



(b) 后行洞开挖

图 8 支护方案 II 条件下隧道开挖后裂隙扩展图

Fig. 8 Crack propagation after tunnel excavation under scheme II

由图 7, 8 可见, 锚杆对断续节理岩体中裂隙的萌

生、扩展、贯通有显著地抑制作用, 比之于无锚支护岩体, 锚固后围岩的裂隙范围和规模均有所减小, 尤其是中夹岩柱区域, 裂隙扩展率显著降低, 支护条件下后行洞对先行洞的裂隙扩展无较大影响; 二次扰动后, 先行洞的裂隙扩展分布与仅单洞开挖的裂隙分布无异。

对比图 7, 8 可知: 两支护方案条件下, 隧道周边岩体裂隙扩展情况与围岩破碎区分布无较大差别, 远离中夹岩柱侧的两隧洞边墙及拱肩基本一致, 仅后行洞右拱脚处存在较小差异, 即: 系统锚杆支护条件下, 该处拱脚与边墙裂隙尚未完全贯通, 而中夹岩柱水平锚杆支护条件下, 该处拱脚与边墙裂隙反而连通为一体。究其原因是该段围岩完整性较好, 所模拟真实节理在该区域近水平发育, 水平锚杆与结构面角度近乎平行, 并未完全发挥应有的锚固效应, 而系统锚杆的设置由于与该处结构面呈大角度斜交, 锚固效果相对较好, 可见锚杆支护设计应综合考虑岩体内所发育优势结构面的产状及其分布。

综上分析, 建议施工方在既有围岩条件下, 可考虑采用 IV 级系统锚杆支护; 但仍须控制爆破振动以减少扰动, 及时施加支护并尽快封闭成环, 加强该段围岩特别是中夹岩柱变形及地表沉降的监控量测。

3 结 论

本文以济南东南二环高速大岭隧道为工程依托, 基于岩体结构信息的概率分布模型, 对其围岩等级隶属概率进行了可靠性评定, 并通过 DDARF 对小净距超大断面隧道围岩尤其是中夹岩柱的裂隙演化过程及变形破坏规律进行了数值模拟, 所得结论如下:

(1) 岩体结构几何特征分布信息是岩体质量评定与围岩非连续变形分析的重要前提, 围岩等级评定的概率统计分析方法充分考虑了各评价指标获取的不确定性及离散性, 计算结果可更为精确、定量化地对围岩等级做出稳健评估。

(2) 各围岩分级方法中均未考虑隧道跨度及长大结构面等对围岩质量及局部稳定状况的影响, 结合非连续变形分析(DDARF)法可对断续节理岩体隧道开挖过程中的裂隙演化过程及变形破坏规律作出有效分析。

(3) 以裂隙扩展破碎区贯通与否作为中夹岩柱稳定性的评定依据, 可对小净距隧道中夹岩柱本身以及后行洞对先行洞的影响程度作出有效评定。

(4) 锚杆支护可显著地约束围岩尤其是中夹岩柱的裂隙扩展、贯通及其变形破坏; 现场施工及支护方案设计应充分考虑裂隙岩体中优势结构面的产状及其

分布情况, 以更为合理地布置锚杆。

参 考 文 献:

- [1] JTGD 70—2004 公路隧道设计规范[S]. 2004. (JTGD 70—2004 Code for design of road tunnel[S]. 2004. (in Chinese))
- [2] JTGF60—2009 公路隧道施工技术细则[S]. 2009. (JTGF60—2009 The technical rules for construction of highway tunnel[S]. 2009. (in Chinese))
- [3] JTGT D 70—2010 公路隧道设计细则[S]. 2010. (JTGT D 70—2010 Guidelines for design of highway tunnel[S]. 2010. (in Chinese))
- [4] 王明年, 刘大刚, 刘彪, 等. 公路隧道岩质围岩亚级分级方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1591–1594. (WANG Ming-nian, LIU Da-gang, LIU Biao, et al. Methods for surrounding rock sub-classification of road tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1591–1594. (in Chinese))
- [5] 邬爱清, 柳赋铮. 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1514–1522. (WU Ai-qing, LIU Fu-zheng. Advancement and application of the standard of engineering classification of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1514–1522. (in Chinese))
- [6] SHI GH. Discontinuous deformation analysis:a new numerical model for the statics and dynamics of block system[D]. Berkeley: University of California, 1988.
- [7] CHANG T C. Nonlinear dynamic discontinuous deformation analysis with finite element meshed block systems[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [8] 焦玉勇, 张秀丽, 刘泉声, 等. 用非连续变形分析方法模拟岩石裂纹扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 682–691. (JIAO Yu-yong, ZHANG Xiu-li, LIU Quan-sheng, et al. Simulation of rock crack propagation using discontinuous deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 682–691. (in Chinese))
- [9] 焦玉勇, 张秀丽, 李廷春. 模拟节理岩土破坏全过程的 DDARF 方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (JIAO Yu-yong, ZHANG Xiu-li, LI Ting-chun. DDARF method for simulating the whole damage process of jointed rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 张秀丽. 断续节理岩体破坏过程的数值分析方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007. (ZHANG Xiu-li. Study on numerical methods for modeling failure process of semicontinuous jointed rock mass[D]. Wuhan:

- Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))
- [11] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声, 等. 用改进的 DDA 方法模拟公路隧道的稳定性[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1710 - 1714. (ZHANG Xiu-li, JIAO Yu-yong, LIU Quan-sheng, et al. Modeling of stability of a highway tunnel by using improved DDA method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1710 - 1714. (in Chinese))
- [12] ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, CHEN Yun-juan, et al. Rock failure and its jointed surrounding rocks: A multi-scale grid meshing method for DDARF[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **43**: 370 - 376.
- [13] 李术才, 陈云娟, 朱维申, 等. 岩石破坏非连续变形分析弹脆性本构模型的二次开发[J]. 岩土力学, 2014, **35**(8): 2145 - 2148. (LI Shu-cai, CHEN Yun-juan, ZHU Wei-shen, et al. Secondary development of elastic brittle constitutive model of discontinuous deformation analysis for rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(8): 2145 - 2148. (in Chinese))
- [14] 李术才, 陈云娟, 朱维申, 等. DDARF 中锚杆失效及收敛判据的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1607 - 1610. (LI Shu-cai, CHEN Yun-juan, ZHU Wei-shen, et al. Failure and convergence criteria for bolts in DDARF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **35**(8): 1607 - 1610. (in Chinese))
- [15] 王文, 朱维申, 马海萍, 等. 不同倾角节理和锚固效应对岩体特性的影响[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 888 - 893. (WANG Wen, ZHU Wei-shen, MA Hai-ping, et al. Influence of joints set with different dip angles and anchorage effect on rock mass behaviour[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 888 - 893. (in Chinese))
- [16] 陈云娟, 李术才, 朱维申, 等. DDARF 网络模拟新方法及其在公路隧道中的应用[J]. 中南大学学报, 2013, **44**(6): 2495 - 2499. (CHEN Yun-juan, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. New method of DDARF network simulation and its application on highway tunnel[J]. Journal of Central South University, 2013, **44**(6): 2495 - 2499. (in Chinese))
- [17] JIAO Yu-yong, ZHAO Qiang, ZHENG Fei, et al. Latest advances in discontinuous deformation analysis method[J]. Science China-Technological Sciences, 2017, **60**(6): 963 - 964.
- [18] TAN Fei, JIAO Yu-yong. The combination of the boundary element method and the numerical manifold method for potential problems[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, **74**: 19 - 23.
- [19] HE Peng, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Discontinuous deformation analysis of super section tunnel surrounding rock stability based on joint distribution simulation[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **91**: 218 - 229.
- [20] 张亦飞, 程传国, 张海丰, 等. 公路隧道围岩的区间数组合分类法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1916 - 1919. (ZHANG Yi-fei, CHENG Chuan-guo, ZHANG Hai-feng, et al. Interval numbers-based integrated classification method for surrounding rock of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1916 - 1919. (in Chinese))
- [21] 曹晋华. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (CAO Jin-hua. An introduction to mathematics of reliability[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [22] 张明. 结构可靠度分析-方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (ZHANG Ming. Structural reliability analysis: methods and procedures[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))