

隧道破裂围岩抗剪力学性能分布规律研究

高有湖¹,杨旭旭^{2*},王明法¹,赵爽²,周洋洋¹,刘国山¹

(1. 山东高速基础设施建设有限公司, 山东 济南 250101;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为探究隧道破裂围岩剪切力学性能随距离隧道边墙不同深度的变化规律,采用现场测试与数值模拟相结合的方法开展研究。首先,基于窗口法建立了隧道围岩表面裂隙网络模型;然后,采用钻孔摄像获取距离隧道边墙不同深度位置的裂隙分布图像,对不同深度位置的裂隙网络参数进行优化,将围岩由表面到内部分为5个区域,得到了破裂围岩从表面到内部的裂隙网络优势组的直径和体密度变化规律;随后,采用离散元数值软件 PFC3D 建立不同区域破裂岩体模型,开展直剪试验获得剪切力学参数,结果表明黏聚力随着深度的增加逐渐增大,与6~8 m 深度相比,8~10 m 深度黏聚力呈继续增大趋势,而内摩擦角开始趋于稳定,且随着深度的增加而略微减小,采用双孔声波测试法对围岩剪切力学性能参数分布规律进行了验证;最后,基于直剪试验中对不同深度处岩体剪切力学参数的研究,采用数值模拟方法构建不同围岩区域数量的隧道模型,将围岩按深度划分成代表不同剪切力学参数的区域,并对赋予不同力学参数下的隧道变形情况与现场监测结果进行对比分析,结果表明,划分更多区域的隧道模型的拱顶沉降值与拱脚水平收敛值更符合现场实际情况。

关键词: 钻孔摄像;三维裂隙网络;双孔声波测试;PFC3D 数值模拟;剪切力学性能

中图分类号: U45

文献标识码: A

Study on Distribution of Shear Mechanical Properties of Fractured Surrounding Rock Masses Within Tunnel

GAO Youhu¹, YANG Xuxu^{2*}, WANG Mingfa¹, ZHAO Shuang², ZHOU Yangyang¹, LIU Guoshan¹

(1. Shandong Expressway Infrastructure Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China; 2. College of Civil Engineering and Architectures, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To investigate the variation in shear mechanical properties of fractured surrounding rock at different depths from the tunnel sidewall, combining field tests and numerical simulations. First, a surface fracture network model of the surrounding rock was established using the window method. Then, drilling cameras were used to obtain images of crack distribution at different depths from the tunnel sidewall, and the crack network parameters at different depth positions were optimized. The surrounding rock was divided into 5 regions from the surface to the interior, and the diameter and bulk density variation patterns of the dominant fracture network from the surface to the interior of the fractured surrounding rock were obtained; Subsequently, discrete element numerical calculation software was used to establish models of fractured rock masses in different regions, and direct shear tests were conducted to obtain shear mechanical parameters. The results showed that both cohesion and internal friction angle of the rock mass generally increase with depth. Compared with the 6 to 8 m region, the cohesion in the 8 to 10 m region continued to increase, while the internal friction began to stabilize and slightly decreased with

收稿日期:2024-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274088);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME056)

第一作者:高有湖(1968—),男,山东泰安人,硕士,高级工程师,主要从事隧道围岩稳定性方面的研究。

* 通信作者:杨旭旭(1989—),男,山东金乡人,博士,教授,主要从事岩石裂隙剪切力学特性等方面的教学与科研工作。

depth. And verify the distribution law of shear mechanical performance parameters of surrounding rock through dual hole acoustic wave testing method; Finally, based on the study of shear mechanical parameters of rock mass at different depths in direct shear tests, numerical simulation methods were used to construct tunnel models with different numbers of surrounding rock areas. The surrounding rock was divided into regions representing different shear mechanical parameters according to depth, and the deformation of the tunnel under different mechanical parameters was compared and analyzed with the on-site monitoring results. The results showed that the settlement value of the arch crown and the horizontal convergence value of the arch foot of tunnel model, which divided more regions, were more in line with the actual situation on site.

Key words: borehole imaging technology; three-dimensional fracture network; biaxial acoustic wave testing; PFC3D numerical simulation; shear mechanical properties

隧道围岩稳定性是确保隧道安全施工、运营的前提条件。随着计算机技术的快速发展,相关学者应用各种数值方法对隧道围岩稳定性进行分析,但是无论这些数值方法多么强大,如果不能正确赋值岩体力学参数,计算结果的可信度将大大降低^[1]。围岩破裂程度越高,隧道围岩越容易发生破坏^[2]。因此,充分认识破裂岩体的力学特性,进而合理确定其力学参数具有重要的理论及现实意义。岩体力学参数的确定需要综合考虑完整岩石材料和裂隙分布特征,其中裂隙分布特征起到了主导性作用。

宋晓康等^[3-4]基于蒙特卡罗法构建离散裂隙网络,研究发现裂隙密度、倾角和迹长等几何参数对岩体力学强度有显著影响。近年来,随着数字测量摄影技术的应用^[5-7],表面裂隙分布特征的获取在精确性和采样效率方面得到显著提高。然而,这些研究主要基于岩体表面裂隙,未考虑围岩内部裂隙分布的影响。冯兴隆等^[8-9]基于钻孔裂隙数据,建立了更符合地层内部真实岩体裂隙分布状态的裂隙网络。刘冬寿^[10]基于三河口水利枢纽工程中的7组直剪试验,通过分析剪切应力-位移曲线发现直剪试验中岩体基本呈脆性破坏;冉耀等^[11]在岩质边坡中进行直剪试验,所测得的黏聚力均远小于室内试验;Guo等^[12]通过现场原位剪切试验,获得了青岛地区典型中风化花岗岩的剪切力学参数,并通过试样解剖获取内部裂隙分布特征,建立了裂隙分布参数与剪切力学参数的关系式。原位试验虽然可以较好地反映岩体的真实力学特性,克服室内试验试件状况相对单一的劣势,但原位试验存在场地要求苛刻、成本高等问题。因此,基于现场地质条件的数值模拟成为获取裂隙岩体力学参数的主要方法。Wu等^[13]通过建立坝基岩体裂隙网络模型,开展了真三轴压缩

数值模拟研究,获得了复杂裂隙岩体的变形和强度特性;Harthong等^[14]使用离散元软件YADE open DEM建立了基于离散裂隙网络的岩体模型,研究了三轴压缩条件下,既有裂隙尺寸、聚集分布对岩体强度的影响及裂缝的扩展模式;阮杰等^[15]基于蒙特卡罗法构建裂隙网络模型,通过离散元数值软件模拟研究裂隙分布对岩体力学参数的影响,发现结构面对岩体的力学性质起到了决定性的作用,岩体力学参数受裂隙产状的影响较大。

综上所述,多数研究者仅对表面或特定地层裂隙分布特征开展研究,没有考虑到裂隙分布随围岩深度改变的变化规律,基于此获得的围岩体力学参数不能全面反映围岩的力学性能,在隧道围岩稳定性分析方面存在较大误差。针对破裂围岩表面与内部裂隙发育程度的较大差异,本文以临沂—临淄高速公路石泉隧道围岩为研究对象,采用钻孔摄像技术获取岩体内部裂隙图像,研究了裂隙在破裂岩体不同深度区域内的分布规律。采用离散元数值软件PFC3D建立合成岩体数值模型,开展直剪试验获取不同区域、不同裂隙网络条件下围岩体的剪切力学性能参数,探究围岩体的剪切力学性能随深度变化的分布规律。同时基于双孔声波测试技术^[16],探讨数值模拟结果的准确性。基于直剪试验获得的不同深度下岩体力学强度,通过现场监测,对数值模拟结果的准确性进行验证。

1 裂隙网络模型的优化

1.1 工程背景

临沂—临淄高速公路石泉隧道位于淄博市与临沂市交界处,为分离式隧道。隧道左线轴线起止桩号为ZK123+775—ZK124+996,长1 221 m,隧

道右线轴线起止桩号为 K123+715—K125+000,长 1 285 m,最大埋深约 135 m。隧址区为剥蚀低山丘陵地貌区,围岩以页岩、灰岩和泥灰岩为主,围岩较为破碎,结构面显著发育。为了对隧道围岩进行稳定性分析,需要对隧道围岩中的裂隙分布规律开展研究。

1.2 钻孔摄像法

采用窗口法(窗口尺寸为 1 m×2 m)对隧道围岩面裂隙分布情况进行统计,围岩优势组是指隧道或地下工程围岩中,对岩体力学行为和稳定性起主导作用的一组优势结构面。通过统计与计算,得到优势组的迹长、直径和体密度等裂隙参数,如表 1 所示。

表 1 隧道露头面裂隙产状

Tab. 1 Fracture characteristics of the exposed surface of the tunnel

优势组	迹长/m	直径/m	体密度/(条·m ⁻³)
I	0.25	0.46	47
II	0.22	0.69	40
III	0.20	0.61	44

利用钻孔成像分析仪,对隧道 ZK123+775 处岩壁的 HB-1、HB-2、HB-3 测孔内的裂隙分布情况进行统计,测试结束后,通过钻孔深度校准、图像拼接合成等操作生成钻孔柱状图,具体如图 1 所示。

1.3 裂隙网络随深度的变化规律

由图 1 可知,随着深度的增加,测孔内的裂隙数量与裂隙迹长逐渐减小。由于松动圈范围为 4 m,刚好可以将松动圈内分为 2 个区域,松动圈外分为 3 个区域,这样可以更好地得到裂隙的分布规律,既能满足计算的精度要求,又不至于产生过大的工作量。0~2 m 区域内的裂隙产状接近于隧道围岩面裂隙产状,采用公式(1)(2)对不同区域内裂隙直径的平均值(某一区域内所有裂隙的总长度/裂隙数量)、体密度进行计算^[17]。

$$D_i = \frac{\bar{P}_i}{P} \times \mu_s \quad (1)$$

式中: D_i 为区域 i 内裂隙直径的平均值, m ; \bar{P}_i 为图 1 测孔中区域 i 内裂隙直径的平均值, m ; \bar{P} 为测孔中 0~2 m 区域内裂隙直径的平均值, m ; μ_s 为现场实测围岩面裂隙直径的平均值, m 。

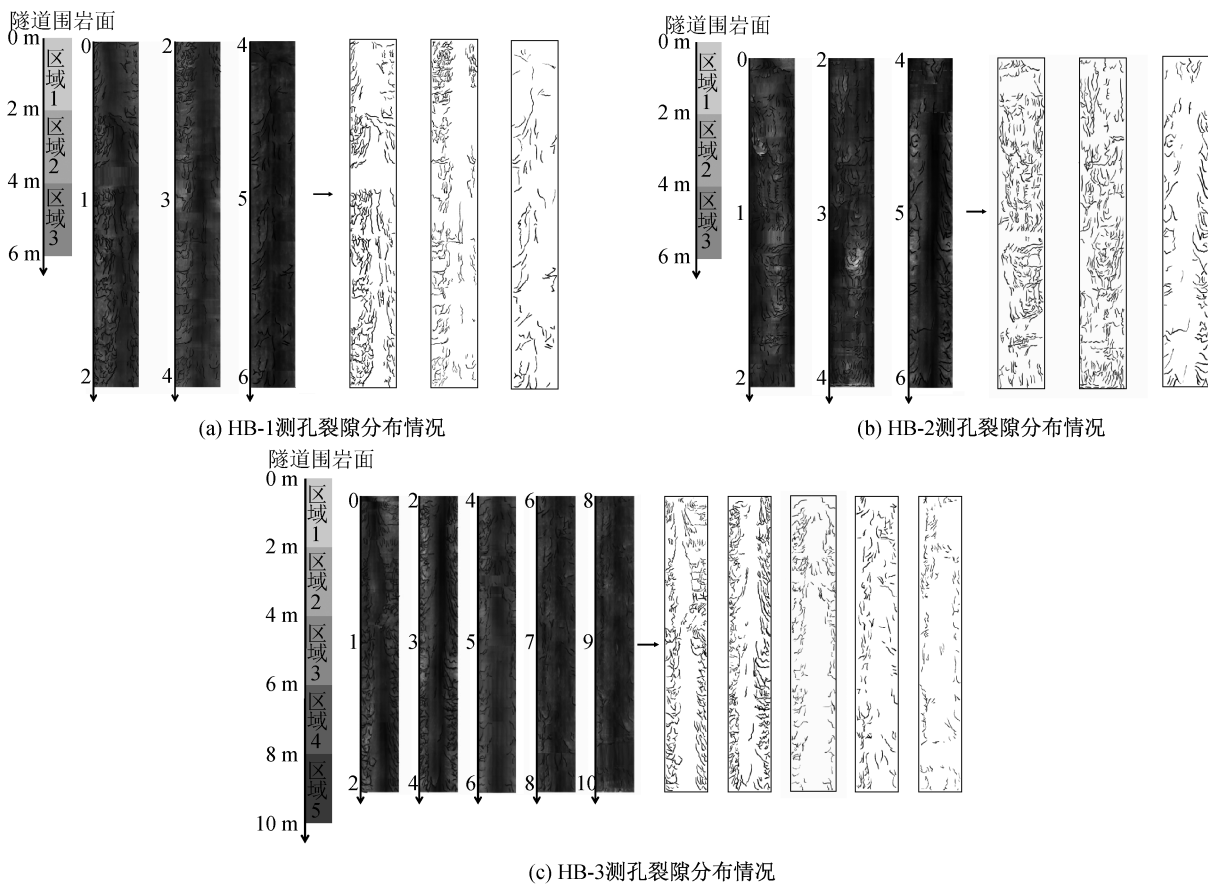


图 1 测孔内裂隙分布情况

Fig. 1 Distribution of cracks within boreholes

表2 裂隙产状信息

Tab. 2 Information of fracture characteristics

深度范围/m	优势组裂隙直径均值/m			优势组裂隙体密度/(条·m ⁻³)		
	I	II	III	I	II	III
0~2	0.460	0.690	0.610	47	40	44
2~4	0.451	0.676	0.598	40	34	37
4~6	0.400	0.600	0.531	14	12	13
6~8	0.382	0.573	0.506	9	8	8
8~10	0.373	0.559	0.494	6	5	6

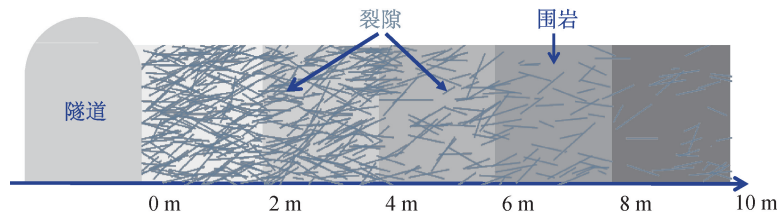


图2 不同区域内裂隙的分布规律

Fig. 2 Distribution patterns of cracks in different regions

$$\lambda_{vi} = \frac{q_i}{q} \times \lambda_s \quad (2)$$

式中: λ_{vi} 为区域 i 内的体密度, 条/m³; q_i 为柱状图中区域 i 内的裂隙数量, 条; q 为柱状图中 0~2 m 区域内的裂隙数量, 条; λ_s 为 0~2 m 区域内的体密度, 条/m³。

根据公式(1)(2), 计算得到不同区域内的裂隙平均直径和体密度如表2所示, 裂隙随深度变化如图2所示。

2 合成岩体模型的建立

为了获得不同深度位置岩体的力学参数, 本文采用 PFC3D 软件建立尺寸为 2 m×2 m×2 m 的岩体试样, 对不同区域内的合成岩体试样开展直剪试验研究。岩体模型利用颗粒单元随机填充, 颗粒半径取 10 mm, 共生成颗粒 78 162 个, 如图3所示。

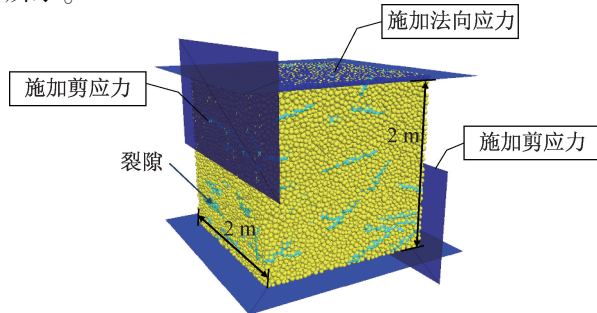


图3 三维岩体数值计算模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical calculation model of rock mass

根据地质资料获得完整的岩石材料基本力学参数, 考虑到现场应力状态下岩石剪切力学参数对模拟结果的影响, 本文通过钻孔剪切试验获取完整岩石材料的黏聚力和内摩擦角, 钻孔剪切测试操作过程如图4所示。经测试, 黏聚力为 3.36 MPa, 内摩擦角为 39.2°。



(a) 安装钻孔剪切测头

(b) 剪切测试

图4 钻孔剪切测试

Fig. 4 Drilling and shear test procedure

本文采用试错法确定完整岩石材料微观参数, 即通过不断调整数值模型中的微观参数, 直至模型的宏观力学参数与真实岩石材料的力学参数相匹配^[18]。如表3所示, 将测试值和模拟值进行对比, 二者的误差在规定合理范围之内(相对误差小于10%)。

根据 Kulatilake 等^[19]的研究可知, 裂隙的变形刚度参数往往比完整岩石材料低 1~2 个数量级。对数值模型进行法向变形试验和恒定法向载荷下的直剪试验, 通过多次校正, 最终得到光滑节理模型微观参数, 如表4所示。

3 模拟结果分析与验证

根据本次数值模拟研究中得到的剪切应力-位

表 3 完整岩石参数标定结果

Tab.3 Complete calibration results of rock parameters

结果	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
测试值	4.29	0.260	2.60	12.21	3.36	39.20
模拟值	4.35	0.262	2.55	12.14	3.65	39.80
相对误差/%	1.40	0.770	-1.92	-0.57	8.63	1.53

表 4 裂隙微观力学参数

Tab.4 Microscopic mechanical parameters of fractures

结果	法向刚度/ (GPa·m ⁻¹)	切向刚度/ (GPa·m ⁻¹)	摩擦系数
目标值	8.03	2.60	0.35
参数标定结果	7.90	2.85	0.33
相对误差/%	-1.62	9.62	-5.71

移曲线,获得不同深度条件下试样的抗剪强度参数,见表 5。由表 5 可知,黏聚力和内摩擦角随深度的变化规律略有不同。随着深度的增加,黏聚力逐渐增大,与 6~8 m 深度相比,8~10 m 深度黏聚力呈继续增大趋势,而内摩擦角开始趋于稳定,并随着深度的增加而略微减小。二者的变化规律证明了破裂围岩表面与内部的力学参数存在较大差异,深度对破裂围岩力学参数的影响较大。

表 5 不同深度下试样的抗剪强度参数

Tab.5 Shear strength parameters of samples at different depths

深度范围/m	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
0~2	0.673	23.3
2~4	1.055	22.4
4~6	2.310	43.1
6~8	2.623	44.5
8~10	3.622	39.4

声波测试法是根据岩体物理力学指标与超声波在岩体介质中传播速度之间的内在关系来判断岩体完整性的一种方法。一般来说,岩体完整性越好,波速越大;岩体岩性越差,岩体越破碎,波速越小,波速与岩体抗拉强度、黏聚力之间呈正相关关系^[20]。采用声波测试法验证模拟结果的准确性,将左测孔、右测孔波速和黏聚力的变化规律进行比较。如图 5 所示,波速和黏聚力的变化曲线在 8~10 m 深度内有明显的差异,但总体来说,二者具有较好的相关性。

4 隧道稳定性分析

4.1 模型建立

本文以临沂—临淄高速公路石泉隧道为基

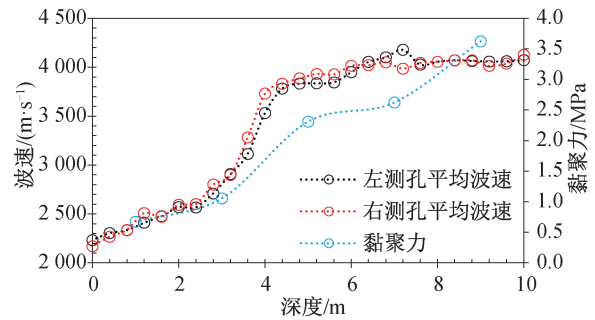


图 5 波速与黏聚力的变化趋势

Fig.5 Trend of variation in wave velocity and cohesion

础,利用 PFC3D 软件建立 2 个隧道模型。2 个模型整体尺寸为隧道直径的 3~5 倍,模型 A 根据松动圈范围将围岩分为两部分,模型 B 被分为多个区域便于后续对围岩力学参数进行赋值。模型 B 中每个区域的厚度为 2 m,最外层围岩的力学强度与完整岩石材料相等。随着向围岩内部深入,不同范围内岩体的裂隙分布情况以及岩体力学参数均有所不同,隧道模型中不同颜色的区域代表着不同的围岩力学参数。在模型的左右两侧施加 X 方向的位移约束,前后两侧、底部施加位移约束,上表面为自由边界,顶部埋深 135 m,施加法向应力 2.88 MPa,2 种计算模型如图 6 所示。



(a) 隧道模型A

(b) 隧道模型B

图 6 隧道模型

Fig.6 Tunnel model

在模型 B 中引入更准确的围岩抗剪强度参数,对裂隙类型、裂隙密度、裂隙角度等参数进行更精细地分析和建模,模拟裂隙对隧道围岩的影响。

4.2 参数的选取

隧道内围岩体破裂程度较高,并且随着深度的增加,围岩的破裂程度会发生改变,相应的围岩力学性质会随之改变。模型 A 和模型 B 的围岩参

数见表6,初期支护参数取值见表7。

表6 围岩力学强度

Tab. 6 Mechanical strength of rock mass

隧道模型 A			隧道模型 B		
区域	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	区域	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
黄色	1.038	14.13	黄色	1.038	14.13
			蓝色	1.383	20.38
			红色	2.533	32.57
			橙色	2.822	32.10
灰色	3.360	39.20	粉色	3.074	31.37
			灰色	3.360	39.20

表7 支护结构参数取值

Tab. 7 Values for support structures

喷射混凝土		锚杆	
参数	数值	参数	数值
容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	22.00	直径/m	25×10^{-3}
弹性模量/GPa	29.16	弹性模量/GPa	1 000
泊松比	0.20	抗拉强度/MPa	1 660
黏聚力/MPa	1.66	黏聚力/MPa	2
屈服强度/MPa	0.50	摩擦角/(°)	30

4.3 结果对比分析

结合石泉隧道的工程地质条件及现场施工情况,进行现场监控量测,并将监测结果与2种隧道模型结果进行对比分析。断面拱顶、拱肩沉降和拱脚水平收敛值的现场监测结果与模拟结果对比如图7所示。

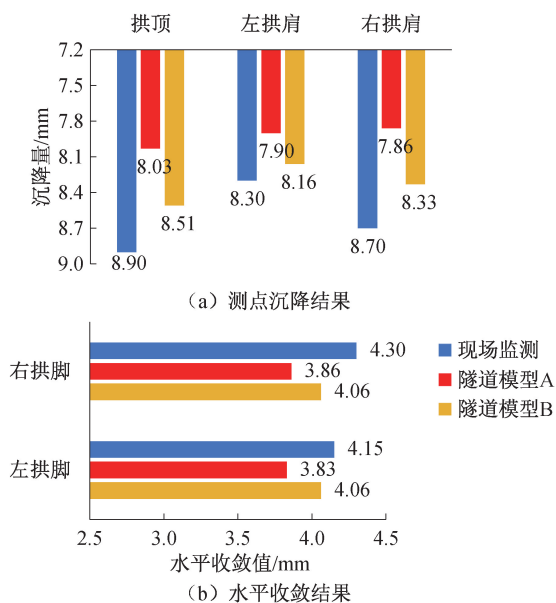


图7 测点沉降及水平收敛量

Fig. 7 Settlement and horizontal convergence measurements at monitoring points

由图7可以看出,隧道模型A拱顶、左拱肩和右拱肩的最大沉降量分别为8.03、7.90、7.86 mm,隧道模型B拱顶、左拱肩和右拱肩的最大沉降量分别为8.51、8.16、8.33 mm;隧道模型A左右拱脚的水平收敛值分别为3.83、3.86 mm,隧道模型B左右拱脚的水平收敛值均为4.06 mm,与现场监测结果相比,隧道模型B的模拟结果的相对误差更小,更符合现场真实情况。

5 结论

本文采用现场测试与数值模拟相结合的方法,基于钻孔摄像技术,对隧道破裂围岩不同深度位置的裂隙网络分布规律进行了研究,并对岩体在剪切作用下的黏聚力与波速之间的变化规律进行了深入分析。本文的主要研究结论如下:

1)采用钻孔摄像技术,得到了破裂围岩从表面到内部的裂隙网络变化规律;各优势组的直径从0.46、0.69、0.61 m减小到0.373、0.559、0.494 m;各优势组的体密度从47、40、44条/ m^3 减小为6、5、6条/ m^3 。

2)对于不同深度处试样的抗剪强度参数,试样的黏聚力从0.673 MPa增大到3.622 MPa;内摩擦角从23.3°增大到39.4°,剪切强度在区域2~4 m和4~6 m内差异最大。

3)采用声波测试技术验证了数值模拟结果的准确性,对比了随深度变化的黏聚力和波速情况。研究表明,在8~10 m深度范围内存在轻微差异,整体趋势相近。

4)通过对比现场监测和数值模拟的结果,隧道模型A的沉降量和水平收敛值与实际监测结果相比,相对误差均在11%以内;而隧道模型B的沉降量和水平收敛值与实际监测结果相比,相对误差均在6%以内。表明隧道模型B的模拟结果更符合实际情况。

参考文献:

- [1] 吴琼. 复杂节理岩体力学参数尺寸效应及工程应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
WU Q. The mechanical parameters of jointed rock mass: scale-effect research and its engineering application[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [2] 言志信, 黄文贵, 史盛. 埋深与围岩质量对隧洞围岩稳定性的影响探究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 18-25.
YAN Z X, HUANG W G, SHI S. Numerical analysis of

- the influence of buried depth and rock mass properties on the surrounding rock stability of tunnel [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2013, 32(6): 18-25.
- [3] 宋晓康, 张昌锁, 王天琦. 离散裂隙网络的几何参数对裂隙岩体力学参数的影响研究 [J]. *中国矿业*, 2021, 30(12): 160-169.
SONG X K, ZHANG C S, WANG T Q. Study on the influence of geometrical parameters of discrete fracture network on mechanical parameters of fractured rock mass [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(12): 160-169.
- [4] 夏子晋, 袁海平, 方兴业, 等. 裂隙网络几何参数对岩体抗压强度影响及破坏模式研究 [J]. *金属矿山*, 2023(11): 191-197.
XIA Z J, YUAN H P, FANG X Y, et al. Influence of geometrical parameters of fracture network on compressive strength and failure mode of rock mass [J]. *Metal Mine*, 2023(11): 191-197.
- [5] 靖盼盼. 岩体结构面几何特征参数统计及三维模型研究 [D]. 南京: 南京大学, 2021.
JING P P. Study on geometric characteristic parameters of discontinuity and research on 3D model of rock mass [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.
- [6] 宣程强. 地表和地下联合摄影测量获取岩体裂隙参数及三维网络模型研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
XUAN C Q. Research on rock fracture parameters and three-dimensional network model obtained by joint surface and underground photogrammetry [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.
- [7] 张维, 曹茂永, 张炳文. 基于 Harris 多摄像头孔壁图像的全景拼接技术 [J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2018, 37(3): 90-96.
ZHANG W, CAO M Y, ZHANG B W. Panoramic image mosaic technology of multi-camera borehole image based on Harris algorithm [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 37(3): 90-96.
- [8] 冯兴隆, 吴坤, 沈啟武, 等. 基于数字式全景钻孔摄像技术的矿山岩体结构面特征研究 [J]. *采矿技术*, 2023, 23(6): 191-194.
FENG X L, WU K, SHEN Q W, et al. Study on structural plane characteristics of mine rock mass based on digital panoramic borehole camera technology [J]. *Mining Technology*, 2023, 23(6): 191-194.
- [9] 纪景仁. 离散裂隙网络模拟在北山地下实验室深部硐室稳定性评价的应用研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2023.
JI J R. Application of discrete fracture network simulation in stability evaluation of deep chamber in Beishan underground research laboratory [D]. Hengyang: University of South China, 2023.
- [10] 刘冬寿. 岩体抗剪强度试验方法及分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(S2): 445-446+451.
LIU D S. Experimental method and analysis of shear strength of rock body [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(S2): 445-446+451.
- [11] 冉耀, 裴向军, 何如许, 等. 直立岩质切向边坡岩体原位直剪试验研究 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(9): 165-167.
RAN Y, PEI X J, HE R X, et al. In-situ direct shear test of rock mass in vertical tangential slope [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(9): 165-167.
- [12] GUO J W, YANG X X, KULATILAKE P H S W, et al. Development of a shear strength model for a rock mass containing a complex fracture system based on direct shear tests: a case study [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83: 34.
- [13] WU Q, KULATILAKE P H S W. REV and its properties on fracture system and mechanical properties, and an orthotropic constitutive model for a jointed rock mass in a dam site in China [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 43: 124-142.
- [14] HARTHONG B, SCHOLTES L, DONZE F V. Strength characterization of rock masses, using a coupled DEM-DFN model [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(2): 467-480.
- [15] 阮杰, 张金龙, 张成辉, 等. 离散裂隙网络对岩体力学特性影响数值模拟研究 [J]. *河北工程大学学报 (自然科学版)*, 2021, 38(1): 40-46.
RUAN J, ZHANG J L, ZHANG C H, et al. Numerical simulation of influence of discrete fracture network on mechanical properties of rock mass [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2021, 38(1): 40-46.
- [16] 古今用, 王红. 跨孔声波法在某水库坝址区岩体检测中的应用 [J]. *岩土工程技术*, 2022, 36(1): 43-48.
GU J Y, WANG H. Application of cross hole sonic wave method in rock mass detection of dam site of a reservoir [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2022, 36(1): 43-48.
- [17] 李轶惠, 许振浩, 潘东东, 等. 基于数字图像的隧道岩体裂隙智能识别与参数提取方法 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(6): 1427-1443.
LI Y H, XU Z H, PAN D D, et al. An intelligent identification and parameter extraction method for rock fractures based on digital images [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(6): 1427-1443.

- Research, 2005(45): 2397-2416.
- [14] 王凤娇,田媚,黄雅平,等. 基于眼动数据的分类视觉注意模型[J]. 计算机科学,2016(1):85-89.
WANG F J, TIAN M, HUANG Y P, et al. Classification model of visual attention based on eye movement data[J]. Computer Science,2016(1):85-89.
- [15] 任洪国,李振宇,刘颖,等. 基于脑电-眼动的乡村线状空间感知效能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(3):97-105.
REN H G, LI Z Y, LIU Y, et al. Research on the perceived effectiveness of rural linear spaces based on electroencephalography and eye-tracking[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025,42(3):97-105.
- [16] 冷红,罗紫元,袁青. 寒地城市大型商业建筑室外视觉景观满意度分析[J]. 建筑学报, 2020(S2):73-77.
LENG H, LUO Z Y, YUAN Q. Analysis on outdoor visual landscape satisfaction of large-scale commercial buildings in winter city[J]. Architectural Journal, 2020(S2):73-77.
- [17] BYLINSKII Z, JUDD T, OLIVA A, et al. What do different evaluation metrics tell us about saliency models? [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017(3):740-757.
- [18] HAASS M J, MATZEN L E, MCNAMARA L A, et al. Saliency estimation for advanced imaging scenes using pixel statistics. Abstracts of the 18th European Conference on Eye Movements, Vienna[J]. Journal of Eye Movement Research, 2015(4): 25.
- [19] MUHAMMAD R S, REBECCA N. Comparative analysis of saliency map algorithms in capturing visual priorities for building inspections [J]. Journal of Building Engineering, 2024,97(8): 110678-110686.
- [20] SUN L, XU Y, TENG S J, et al. Research into the visual saliency of guide signs in an underground commercial street based on an eye-movement experiment [J]. Sustainability, 2022,14(23):16062-16072.
- [21] ITTI L, REES G, TSOTSOS J. Neurobiology of Attention[M]. San Diego: Elsevier, 2005:576-582.
(责任编辑 王利君)

(上接第85页)

- [18] YANG X X, QIAO W G. Numerical investigation of the shear behavior of granite materials containing discontinuous joints by utilizing the flat-joint model [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 69-80.
- [19] KULATILAKE P H S W, SHREEDHARAN S, SHERIZADEH T, et al. Laboratory estimation of rock joints stiffness and fractional parameters [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34: 1725-1735.
- [20] 孟召平,张吉昌, JOACHIM T. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系 [J]. 地球物理学报, 2006,49(5): 1505-1510.
MENG Z P, ZHANG J C, JOACHIM T. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1505-1510.
(责任编辑 张爱丽)