

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211004039

浅埋富水软岩隧道大变形机理与控制研究*

袁青^{1,2,3}, 陈世豪^{1,2}, 肖靖^{1,2,3}, 熊齐欢^{1,2}, 张子平^{1,2,3}, 于锦^{1,2}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对洞口段富水浅埋软弱围岩隧道易发生挤压性大变形的特点, 依托某隧道, 通过监控量测、室内试验、数值模拟等手段分析隧道的变形特征、影响因素及其致灾机制与力学破坏模式。结果表明, 隧洞开挖后变形具有流变特性, 且持续时间长、变形量大; 此外, 上、中台阶开挖造成的拱顶沉降、围岩收敛分别占总变形的61.16%、63.34%, 是大变形产生的主要阶段; 洞内大变形是在多种影响因素的耦合作用下产生的, 地下水是造成该软岩隧道大变形的主要控制因素, 地下水的软化、渗流是大变形的主要变形机理, 破坏力学模式主要有软岩塑流和累进性松脱扩展两种, 软岩塑流造成侧墙鼓出、顶压以及钢拱架扭曲等现象, 累进性松脱扩展造成垮塌、地表裂缝等现象。数值模拟验证了大变形力学机理的正确性并反演了大变形发展趋势。最终针对该隧道大变形产生的主要原因, 提出并实践形成了“内外结合”的主动控制技术: 洞外掌子面动态跟进超前降水, 洞内“中管棚+小导管”超前支护、上台阶“核心土+扩大拱脚”、中台阶“临时仰拱+大锁脚”、下台阶“短进短衬, 快速支护”, 成功穿越300 m浅埋富水极软岩段, 研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 隧道工程; 大变形机理; 软岩; 富水; 浅埋; 主动控制

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0723-09

Research on Large Deformation Mechanism and Countermeasures of Shallow Buried Tunnel in Soft Rock with Abundant Water

YUAN Qing^{1,2,3}, CHEN Shihao^{1,2}, XIAO Jing^{1,2,3}, XIONG Qihuan^{1,2}, ZHANG Ziping^{1,2,3}, YU Jin^{1,2}

(1. CCC Second Harbor Engineering Company LTD., Wuhan 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: Aiming at the large deformations due to the squeezing of water-rich soft rock mass around shallowburied tunnels, this article analyzes the deformation characteristics, influencing factors, disaster-causing mechanisms and mechanical failure mode of a typical tunnel through monitoring measurement, indoor testing, and numerical simulation. The results show that the deformation of the surrounding rock mass after tunnel excavation has rheological characteristics. The deformation is large with a long-lasting time. In addition, the crown settlement and the lateral convergence of the surrounding rock caused by the excavation of the upper and middle steps account for 61.16% and 63.34% of the total deformation, respectively, indicating that the excavation of the two steps is the main stage of

* 收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-12-14

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新示范项目(云交科教2019[15]号)资助

作者简介: 袁青(1990—), 男, 高级工程师, 博士。主要从事地质工程和岩土工程方面研究。E-mail: 491073238@qq.com

large deformation; The large deformation around the tunnel is caused by coupling action of a variety of influencing factors, in which groundwater is the main controlling factor. The seepage of groundwater and softening of the surrounding rock are the main reasons for large deformation. The failure mechanics model mainly includes plastic flow and progressive loosening expansion of soft rock. The plastic flow of soft rock causes side wall bulging, top pressure, and steel arch distortion. Progressive loosening expansion causes collapse, surface cracks, etc. Numerical simulation verifies the correctness of the large deformation mechanics mechanism and inverts the development trend of large deformation. Finally, in view of the main reason for the large deformation of the tunnel, the active control technology of "internal and external integration" was proposed and practiced; the follow-up and advanced drainage at the tunnel working face, the advanced support technique of "medium tube shed and little tremie grouting", the "core soil and enlarged arch foot" for the upper step, the "temporary invert and large footlock" for the middle step, and the "short drill depth and lining, fast support" for the low lower step. The tunnel successfully passed through the 300 m-long shallow buried water-rich and extremely soft rock section with the help of the presented techniques. The research results can provide references for similar projects.

Keywords: tunnel engineering; large deformation mechanism; soft rock; rich water; shallow buried; Active control

引言

近年来,随着我国经济建设的飞速发展,我国公路、铁路隧道也呈现出高速发展的趋势,在我国沿海地区,由于地质环境复杂多变,构造活动频繁、台风降雨较多,这些都给隧道建设带来诸多挑战,尤其是强渗流条件下超大断面浅埋软岩隧道的大变形问题成为工程建设中亟待解决的重要难题。

为此,不断有国内外学者对软岩大变形问题进行系统研究。李术才等^[1]从大变形的定义、分类、发生机制及原因,工程对策等方面,对国内外软岩大变形进行总结探讨,提出“先让再抗后刚”的大变形控制思想。杨忠民等^[2]以模型试验为手段,研究了隧道开挖过程中围岩渐进性破坏过程及位移、应力的变化规律。徐国文等^[3]对鹧鸪山千枚岩软岩隧道多次出现的大变形现象进行分析,将围岩破坏分为板梁弯曲变形及结构面滑移等。徐前卫等^[4]采用模型试验与数值模拟相结合的方法,对大断面隧道全过程进行模拟,指出软弱围岩破坏始自两侧拱腰以下的岩体,而后继续向上扩展成拱,发生剪切破坏。孟陆波等^[5]依据现场监测数据对千枚岩软岩隧道大变形引起二衬开裂的原因、机理进行分析,指出围岩质量差、地下水软化是致灾的主要因素,并对二

次衬砌支护时机进行探讨,认为变形量达到最终收敛值的65%~70%时施作二衬最为合理。孙钧等^[6]认为软岩隧道挤压大变形问题按照非线性流变理论进行分析得到的结果更贴合实际。综上所述,前人研究多集中于高地应力条件下软岩隧道的变形,且相关机理、变形控制措施不具普适性。不同地质条件对应变形特征、机理亦不相同,目前尚缺乏针对复杂地质条件下浅埋大断面软岩隧道变形特征、机理及控制措施研究。

鉴于此,本文以某隧道典型全风化、砂土状强风化花岗岩大变形段为工程背景,运用监控量测、室内试验、数值模拟等研究手段,深入探讨浅埋、富水、强渗流、四洞并行、特大断面、小净距等复杂地质条件下围岩变形特征、大变形机理、破坏模式及控制技术,研究成果以期指导工程实践。

1 工程概况

隧道为国内最大断面的双向12车道公路隧道,是八车道主路隧道+四车道辅路隧道的4条小净距隧道群,如图1所示。现场施工揭露隧道洞口300 m浅埋段长距离穿越残坡积土、全风化、砂土状强风化花岗岩地层,土层结构稳定性差,岩芯极破碎,遇水软化,手易捏散,属极软岩。隧址区地下水丰富,

地下水位高于隧顶高程,土体天然含水率高,掌子面溜塌、围岩大变形灾害频发。现场揭示围岩如图2所示。

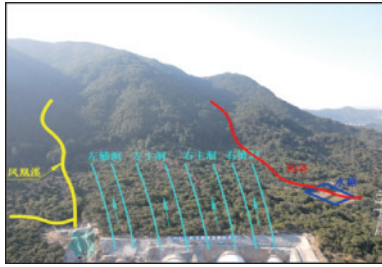


图1 隧道进口端富水浅埋段示意

Fig.1 Schematic diagram of water-rich shallow buried section at a tunnel entrance



(a) 全风化花岗岩



(b) 砂土状强风化花岗岩

图2 现场揭示围岩

Fig.2 Field exposed surrounding rock mass

表1为发生塌方部位,大变形部位,拱架侧移、扭曲部位统计。其中围岩拱顶塌方5处,大变形10处,初支渗漏水16处,侵限总长度达120 m。因此有必要对隧道开展系统、全面的现场测试,对监测数据进行深入分析,掌握隧洞开挖后围岩变形及支护受力的时空演化规律与特点。

2 特征断面变形时程曲线分析

2.1 拱顶沉降变形

选取典型监测断面,将监测数据进行汇总处理,右辅洞FYK6+200监测断面拱顶沉降随时间变化曲线如图3所示。各部位开挖造成拱顶沉降变形

表1 塌方、大变形及初支开裂统计

Table 1 Statistics of collapse, large deformation and initial support cracking

围岩类型	隧道编号	破坏里程	破坏位置	病害描述
右辅洞		FYK6+163.6—176.8	拱顶	大变形,初支侵限,环向裂缝1条,初支渗水
		FYK6+200	拱顶	大变形,初支侵限,环向裂缝1条,初支渗水
		FYK6+245.8	拱顶	塌方(20方),环向裂缝1条
		FYK6+250	拱顶	塌方(25方)
		FYK6+243—285	隧底	仰拱底鼓开裂
砂土状全、强风化花岗岩(V)		YK12+269—285	左拱肩	塌方、大变形、纵向裂缝,初支渗水
		YK12+271—282	右拱肩	塌方、大变形、纵向裂缝,初支渗水
		YK12+265	右拱腰	初支拱架扭曲
		YK12+245—280	隧底	仰拱底鼓开裂
左辅洞		FZK6+105—139	拱顶、左拱肩	大变形,初支侵限,初支渗水
		FZK6+200.9	拱顶	塌方(18方)
左主洞		ZK12+220—235	左拱肩	大变形,初支侵限,初支渗水

的权重如图4所示。

由图3可知每个部位开挖都会引起拱顶沉降急剧变化,上部弧形导坑开挖后,最大变形速率为20 mm/d;中台阶开挖后,最大变形速率为36.3 mm/d;下台阶开挖后,最大变形速率为12.2 mm/d;仰拱开挖后,最大变形速率为4.4 mm/d,仰拱浇筑回填以后既断面封闭成环后沉降速率减小,沉降变形趋于稳定,最终变形量215 mm。由此可见,中台阶开挖引起拱顶沉降突变值最大,上台阶开挖次之,表明围岩应力及土体结构在此过程中调整程度也最剧烈,在施工过程中应多加关注。

由图4可知,开挖中台阶左右侧对拱顶沉降影响最大,权重占比为51.98%;开挖下台阶左右侧对拱顶沉降影响次之,占比为24.53%;开挖仰拱对拱顶沉降的影响最小,占比仅为4.16%。

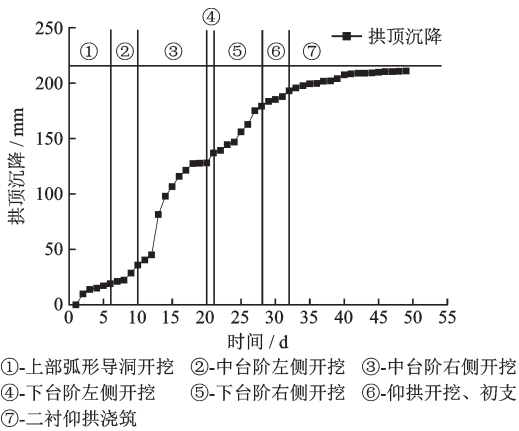


图3 FYK6+200断面拱顶沉降—时间曲线

Fig.3 Curve of crown settlement and time at cross-section FYK6 + 200

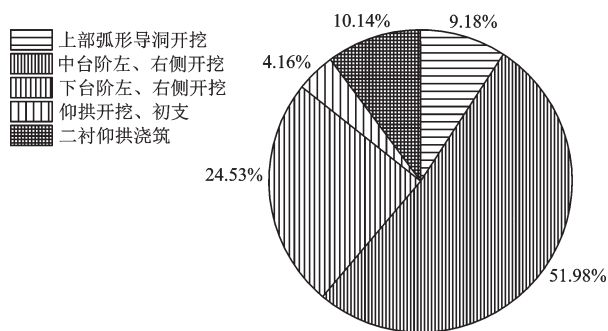


图4 各部位开挖对拱顶沉降的权重占比

Fig.4 Weight proportion of crown settlement due to excavation of each part

2.2 周边收敛变形

将FYK6+200围岩收敛数据整理,得到围岩收敛的时程曲线如图5、图6所示,由图5、图6可知围岩收敛最大位移83.2 mm,上台阶开挖后围岩收敛速率达到最大,为19.4 mm/d;中台阶左右侧开挖、

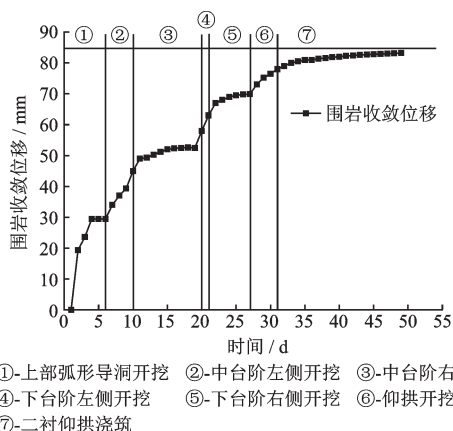


图5 FYK6+200断面围岩收敛位移—时间曲线

Fig.5 Curve of convergence and time of surrounding rock at cross-section FYK6 + 200

下台阶左右侧开挖对围岩收敛速率影响程度基本一致,最大围岩收敛速率5.3 mm/d;仰拱开挖、初支对围岩收敛速率影响最小,最大围岩收敛速率3.0 mm/d。由图7可知,上部弧形导坑开挖对围岩收敛的影响最大,权重占比为35.46%;开挖仰拱对围岩收敛的影响较小,权重占比为10.94%;仰拱浇筑后,围岩仍有收敛变形,但是收敛变形基本稳定,变形仅占总变形的5.05%。因此在控制围岩收敛变形方面,建议在开挖上部弧形导坑时,加强支护,以减小围岩变形^[7-8]。

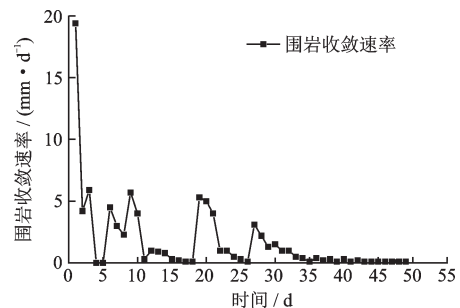


图6 FYK6+200断面围岩收敛速率—时间曲线

Fig.6 Curve of convergence rate and time of surrounding rock of FYK6 + 200 section

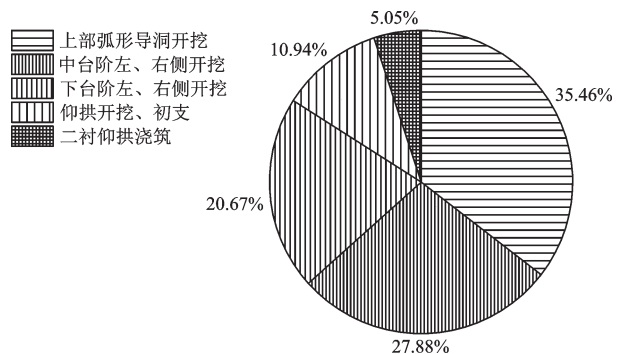


图7 各部位开挖对围岩收敛的权重占比

Fig.7 Weight proportion of surrounding rock convergence due to excavation of each part

3 大变形成因机理

3.1 地下水的软化、渗流

浅埋段地表水、地下水丰富,地表发育凤凰溪,雨季峰值流量4.3 m³/s,地下稳定水位埋深2.3~7.5 m,高于隧顶20~30 m,水头压力大。

洞身开挖后,形成临空面,为地下水出露创造条件,围岩在地下水软化作用下,抗压强度减小,抗剪强度减小、弹性模量减小、泊松比增大,使岩土体在低地应力量值条件下既进入屈服状态,进而产生

塑性变形甚至破坏。

在地下水出露量比较大(股状、柱状涌水)的地方,由于地下水的流速、孔压差较大,导致地下水渗流产生的作用于隧道两侧岩土体上的切向推力增大,进而加剧围岩向隧道临空方向的变形,促进大变形的产生。

3.2 岩体工程特性影响

浅埋段主要穿越地层为全风化、砂土状强风化花岗岩,取土样进行室内试验,得到岩土体物理力学参数见表2、级配曲线如图8所示。由表2可知全风化、砂土状强风化花岗岩均处于可塑状态,且抗剪强度低、压缩模量低、渗透系数大,稳定性差。由图8可知,砂土状强风化花岗岩所含砂粒组($0.075 < d \leq 2 \text{ mm}$)占比最高为59.7%,细颗粒含量($d < 0.075 \text{ mm}$)占比为31.2%,不均匀系数 $C_u > 10$,土体结构松散,易产生细颗粒侵蚀流失。细颗粒流失导致土体孔隙率增大,黏聚力与内摩擦角也随之降低,进一步降低围岩的自稳性。取大变形部位拱架背后的土样进行颗粒筛分,如图8所示,所含砂粒组占比为55.1%,细颗粒含量占比为13.27%,表明确实发生细颗粒流失。

表2 围岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

地层	天然含水率 $\omega/\%$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa
全风化花岗岩	33.4	24.6	7.1	40	25	0.18	3.98
砂土状强风化花岗岩	27.8	35	24.3	36	25	0.21	5.92

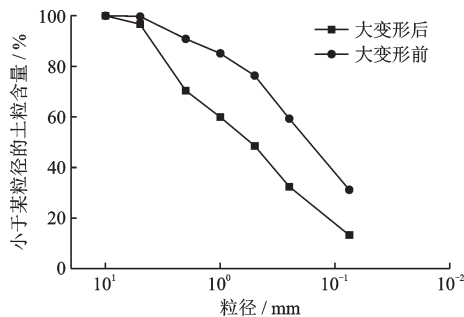


图8 围岩大变形前后颗粒级配

Fig.8 Particle gradation of surrounding rock before and after large deformation

综上,围岩结构松散、强度低、自稳能力差等特性,为大变形产生创造了地质条件。

3.3 施工步序影响

上、中台阶施作引起的拱顶沉降和周边收敛占比达60%以上,是大变形产生的主要施工阶段,这主要是因为隧道上台阶与中台阶开挖后无法及时封闭仰拱,全断面初期支护未形成闭合受力环,初期支护变形较大,引起较大的拱顶下沉,导致地表下沉和地裂缝。

4 大变形破坏力学模式

4.1 软岩塑流

隧道开挖导致围岩应力调整,形成二次应力场,围岩中的径向应力减小,切向应力增大,围岩所受应力差增大,当应力超过围岩的屈服强度时,围岩进入塑性变形阶段,软岩的流变特性凸显,围岩变形时间较长,同时变形量较大,如图9所示。围岩变形,又导致原本闭合的结构面张开滑移,以及围岩岩体进一步碎裂化^[9],同时地下水沿张开的结构面渗流并软化围岩,加剧围岩的塑性流动变形,宏观表现为拱顶下沉、拱腰与边墙的收敛变形,初期支护因变形过大产生侧墙鼓出、钢架扭曲变形等现象,如图10所示。

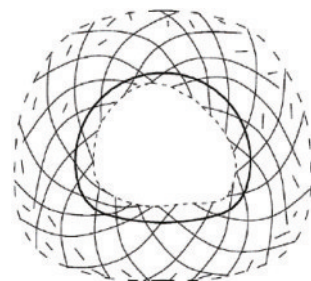


图9 软岩塑流变形

Fig.9 Plastic flow deformation of soft rock



图10 侧墙鼓出

Fig.10 Side wall bulking

4.2 累进性松脱扩展

处于浅表生改造带遭受过浅表生改造过的岩体,围岩岩体较破碎,围岩岩体表现出近散体结构特征^[10-13],围岩变形破坏的扩展过程很快,可以一直发展到地表。进而表现为地裂缝、地表塌陷、错台等,左辅洞地表塌陷开裂分布如图 11 所示。

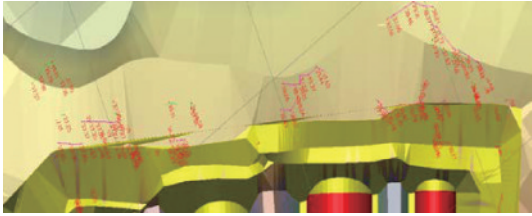


图 11 地表裂缝示意

Fig.11 Schematic diagram of ground cracks

5 数值模拟

采用数值计算软件,建立二维隧道模型,对隧道在施工过程中围岩及支护结构变形及初支受力特征进行分析。模型如图 12 所示,隧道开挖宽度 12.15 m,开挖高度 10.14 m,考虑地下水时取稳定水位位于地表下 5 m,不考虑地下水影响时取稳定水位于隧底以下 0.5 m,模型尺寸考虑开挖对周围土体的影响范围,并参考文献[14-18],左右土层尺寸取开挖宽度的 4 倍,模型下部土层尺寸为隧道高度的 2 倍,模型上部土层到地表表面为止。模型参数取值见表 3。

由图 13(a)可知,在考虑地下水的影响下拱顶下沉变形最大值为 216.4 mm,周边收敛最大值为

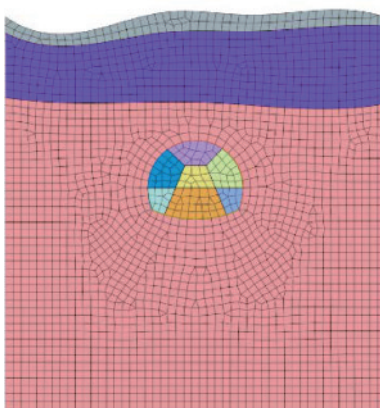


图 12 隧道模型

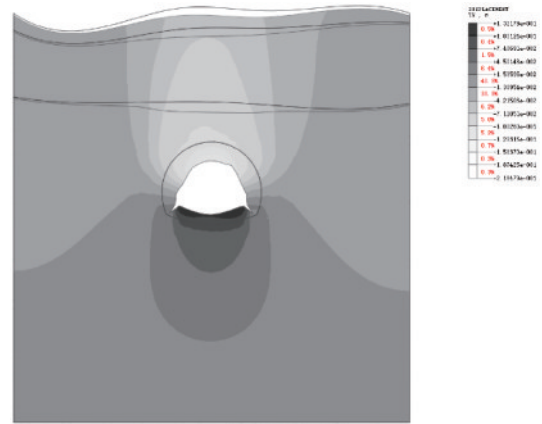
Fig.12 Tunnel model

表 3 围岩及支护结构计算参数

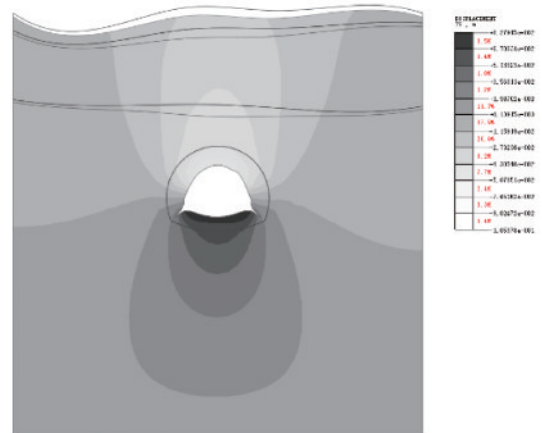
Table 3 Calculation parameters of surrounding rock and support structure

类别	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	内摩擦角 φ / (°)	黏聚力 c /kPa	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
残坡积粉质黏土	3.55	0.43	19	27	1 700
全风化花岗岩	45	0.44	25	19	1 900
砂土状强风化花岗岩	65	0.40	36	30	2 100
初期支护	2 900	0.2	/	/	2 500

71.2 mm,地表沉降变形最大值为 91.8 mm,与现场实际基本吻合,表明模型有效^[14-15]。由图 13(b)可知,在不考虑地下水的影响下,拱顶下沉变形最大值为 105 mm,周边收敛最大值为 43 mm,地表沉降变形最大值为 38 mm。此外,由图 14~15 可知由于地下水的影响,初支所受轴向力(最不利位置)及弯矩(最不利位置)分别增大 61.6%、98%。



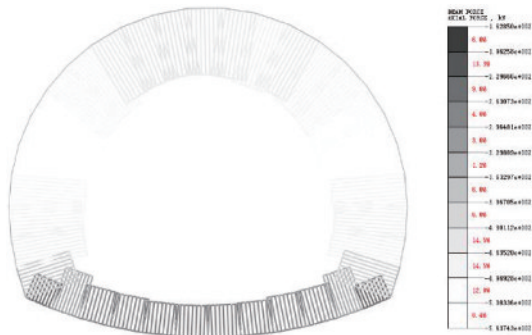
(a) 考虑地下水影响



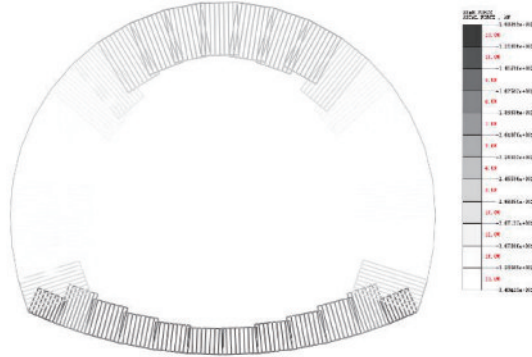
(b) 不考虑地下水影响

图 13 竖向位移云图

Fig.13 Contour of vertical displacement



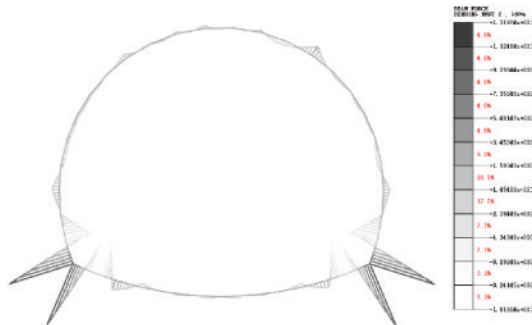
(a) 考虑地下水影响



(b) 不考虑地下水影响

图 14 初支轴向力图

Fig.14 Axial force of initial support



(a) 考虑地下水影响



(b) 不考虑地下水影响

图 15 初支弯矩图

Fig.15 Bending moment diagram of initial support

综上,数值模拟验证了关于隧道大变形的理论分析,初支变形轮廓线与软岩塑流变形破坏模式示意图基本吻合,表明隧道穿越此种地质条件,确实

易发生软岩塑流;此外洞内变形造成累进性松脱扩展,导致地表发生沉降变形并出现裂缝。再者,数值模拟结果表明,地下水对隧道影响显著,地下水的软化及渗流作用助推了围岩向隧道净空的变形,促进大变形的产生。

6 主动控制技术

6.1 掌子面动态超前降水

经降水计算,在隧道两侧开挖轮廓线 5 m 范围外对称布置井点降水,水井纵向间距 10 m,井径 219 mm,井深至隧底以下 15 m,超前降水至掌子面前方 30 m,目标降水位为隧底以下 0.5 m,现场井点降水如图 16 所示。降水前后围岩含水率见表 4。降水后,围岩含水率明显减小,由软塑状态转变为硬塑或半坚硬状态,围岩整体强度参数提高,渗流力减小。



图 16 洞外井点降水

Fig.16 Well point dewatering outside the tunnel

表 4 降水前后围岩含水率

Table 4 Water content of surrounding rock before and after drainage

序号	取样位置	含水率 $\omega/\%$		降水后状态
		降水前	降水后	
1	左辅洞	28.2	15.9	半坚硬状态
	FZK6+226			
2	右辅洞	29.7	17.9	半坚硬状态
	FYK6+287			
3	左辅洞	29.5	17.3	半坚硬状态
	FZK6+229			
4	右辅洞	31.4	19.3	硬塑或半坚硬状态
	FYK6+292			

6.2 围岩超前支护

超前支护采用“中管棚+小导管”的方式,管棚采用 $\phi 89 \times 5$ mm 无缝钢花管,单环长度 12 m,环与环之间搭接 3 m;小导管长度 3 m,环向间距 0.3 m,纵向间距 1.2 m。在管棚管内加装 PVC 管(图 17),让浆液从管底返出,保证注浆压力的最大点在中管棚的后半部分,实现弹性圈采用高注浆压力,松动圈采用衰减后的注浆压力。最终形成厚度 2 m 的“多环小导管+中管棚”保护层,抑制开挖过程中围岩的变形和坍塌,防止围岩松动而降低强度及稳定性。

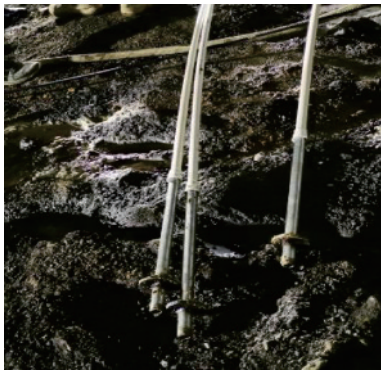


图 17 管棚管内加装 PVC 管

Fig.17 Installing of PVC pipes in the shed pipes

6.3 上台阶“核心土+扩大拱脚”

上部弧形导坑开挖后,采用“核心土+扩大拱脚”的方式,预留核心土并在两侧拱脚处做扩大拱脚,将两侧拱脚处由点一线支撑转变为线一面支撑,抵抗上台阶弧形导坑开挖造成的初支变形,核心土抑制掌子面挤出变形。

6.4 中台阶“临时仰拱+大锁脚”

中台阶开挖后,采用“临时仰拱+大锁脚”的方式,临时仰拱采用工 18 型钢,与中台阶两侧拱脚采用钢板螺栓连接,钢架下铺钢筋网,喷浆后可使初支尽早成环,增强受力性能;中台阶两侧拱脚处每榀钢拱架采用 2 根长 5 m,直径 $\phi 89$ mm \times 壁厚 5 mm 的钢花管锁脚,打设角度为 45° ,并注浆,抑制沉降变形。

6.5 下台阶“短进短衬、快速支护”

下台阶秉承“短进短衬,快速支护”的原则,提

高施工效率,尽早调用二次衬砌抵抗围岩及初支变形。

7 结 论

(1)对于富水浅埋全风化、砂土状强风化花岗岩软岩隧道,开挖后围岩变形速度快、变形量大、稳定时间长,具有流变特性。中、上台阶开挖占总变形量 60% 以上,是大变形产生的主要阶段。

(2)本隧道大变形是由多种因素耦合作用的结果,地下水的软化是大变形的主要控制因素,地下水的渗流促进了大变形的发生,大变形的破坏力学模式主要为软岩塑性流动,并伴有软岩的累进性松脱扩展。

(3)提出并实践形成了“内外结合”的主动控制技术:洞外掌子面动态跟进超前降水,洞内“中管棚+小导管”超前支护、上台阶“核心土+扩大拱脚”、中台阶“临时仰拱+大锁脚”、下台阶“短进短衬,快速支护”,实现了围岩变形控制并成功穿越浅埋富水极软岩段。

参考文献:

- [1] 李术才,徐飞,李利平,等.隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1366-1376.
Li S C, Xu F, Li L P, et al. Research status, problems and countermeasures of large deformation in tunnel engineering and application of new support system[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (7): 1366-1376. (in Chinese)
- [2] 杨忠民,高永涛,吴顺川,等.隧道大变形机制及处治关键技术模型试验研究[J].岩土力学,2018,39(12):4482-4492.
Yang Z M, Gao Y T, Wu S C, et al. Model test study on large deformation mechanism and treatment key technologies of tunnel[J]. Geotechnical Mechanics, 2018, 39 (12): 4482-4492. (in Chinese)
- [3] 徐国文,何川,代聪,等.复杂地质条件下软岩隧道大变形破坏机制及开挖方法研究[J].现代隧道技术,2017,54(5):146-154.
Xu G W, He C, Dai C, et al. Study on large deformation failure mechanism and excavation method of soft rock tunnel under complex geological conditions [J]. Modern Tunnel Technology, 2017, 54 (5): 146-154. (in Chinese)

- [4] 徐前卫,丁文其,朱合华,等.超大断面隧道软弱围岩卸荷渐进破坏特性研究[J].土木工程学报,2017,50(1):104-114,132.
Xu Q W, Ding W Q, Zhu H H, et al. Study on unloading progressive failure characteristics of soft surrounding rock of super large section tunnel [J]. Journal of Civil Engineering, 2017, 50(1): 104-114, 132. (in Chinese)
- [5] 孟陆波,潘皇宋,李天斌,等.鹫山隧道二次衬砌开裂机理及支护时机探讨[J].现代隧道技术,2017,54(2):129-136.
Meng L B, Pan H S, Li T B, et al. Discussion on cracking mechanism and support opportunity of secondary lining of Zhegushan tunnel [J]. Modern Tunnel Technology, 2017, 54(2): 129-136. (in Chinese)
- [6] 孙钧,潘晓明,王勇.隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特征及其锚固机制研究[J].隧道建设,2015,35(10):969-980.
Sun J, Pan X M, Wang Y. Study on nonlinear rheological mechanical characteristics and anchorage mechanism of large extrusion deformation of tunnel soft surrounding rock [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(10): 969-980. (in Chinese)
- [7] 任育珍,杜俊,张伦华,等.浅埋软弱围岩隧道变形特征研究[J].现代隧道技术,2018,55(2):84-90,95.
Ren Y Z, Du J, Zhang L H, et al. Study on deformation characteristics of shallow buried soft surrounding rock tunnel [J]. Modern Tunnel Technology, 2018, 55(2): 84-90, 95. (in Chinese)
- [8] 余旭.煤系软岩隧道变形特征及稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2020.
Yu X. Study on deformation characteristics and stability of coal measure soft rock tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [9] 李畅.成兰铁路某软岩隧道大变形机制研究[D].成都:成都理工大学,2019.
Li C. Study on large deformation mechanism of a soft rock tunnel in Chengdu Lanzhou Railway [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] 李磊,谭忠盛.挤压性破碎软岩隧道大变形特征及制研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增1):3593-3603.
Li L, Tan Z S. Study on large deformation characteristics and mechanism of extruded broken soft rock tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (Sup1): 3593-3603. (in Chinese)
- [11] 姜云.公路隧道围岩大变形的预测预报与对策研究[D].成都:成都理工大学,2004.
Jiang Y. Study on prediction and countermeasures of large deformation of surrounding rock of highway tunnel [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 李天斌.高地应力条件下隧道大变形的机制、预测及防治研究[R].成都:成都理工大学,2006.
Li T B. Research on the mechanism, prediction and prevention of large deformation of tunnel under high ground stress [R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [13] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].合肥:安徽教育出版社,2004.
Wang M S. General theory of shallow buried and concealed excavation technology of underground engineering [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 金冬梅.节理岩体隧道施工过程三维数值模拟分析[D].沈阳:东北大学,2013.
Jin D M. Three-dimensional numerical simulation analysis of jointed rock tunnel construction process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- [15] 胡继实,张励云,张鑫.黄土隧道施工稳定性数值模拟对比研究[J].科学技术创新,2021(28):134-139.
Hu J S, Zhang L Y, Zhang X. Comparative study on numerical simulation of loess tunnel construction stability [J]. Science and Technology Innovation, 2021(28): 134-139. (in Chinese)
- [16] 方星桦,刘澍,陈维,等.软岩隧道围岩变形季节性特征与防控措施研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(6):1331-1338.
Fang X H, Liu S, Chen W, et al. Study on the seasonal characteristics and prevention and control measures of surrounding rock deformation in soft rock tunnels [J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1331-1338. (in Chinese)
- [17] 白维仕,李荣建,赵学勤,等.基于滑移线网络法的黄土隧道坍塌拱分析及其承载评价[J].防灾减灾工程学报,2020,40(1):132-138.
Bai W S, Li R J, Zhao X M, et al. Analysis and bearing evaluation of collapsed arch of loess tunnel based on slipline network method [J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 132-138. (in Chinese)

(本文责编:池营营)