

## 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云

### Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

ZHANG Xiaoyu, BI Huanjun, CAO Feng, and XIA Wanyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004074>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 135-143

#### 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113

#### 玄武岩纤维加筋黄土承载比试验研究

An experimental study of the California bearing ratio of basalt fiber reinforced loess

李沛达, 骆亚生, 陈箐芮, 汪国刚 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 131-137

#### 无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

#### 频域反射分析法测定土壤含水率标定试验研究

An experimental study of calibration of soil moisture content by using the frequency domain reflectometry

董翰川, 庞丽丽, 史云 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 55-55

#### 基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析

Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy

江杰, 魏丽, 钟有信, 胡盛斌, 杨杉楠 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 73-80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004074

# 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

张晓宇<sup>1,2</sup>, 毕焕军<sup>1,2</sup>, 曹 峰<sup>1,2</sup>, 夏万云<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省铁道及地下交通工程  
重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710043)

**摘要:** 富水黄土隧道施工开挖后含水率增加对隧道工程施工影响较大, 前人建立了多种以黄土含水率为指标的工程措施判别标准, 但对于黄土含水率的变化原因及时空变化特征缺乏系统研究。银西高铁驿马一号隧道不同工况下含水率的变化特征表明, 自然渗流状态下隧道洞身黄土含水率平均为 25.9%, 局部为软塑; 施工排水阶段受渗涌水影响, 黄土含水率平均上升到 31.3%, 下拱腰上升到 32.2%, 引起了隧底软化、掌子面滑塌失稳、围岩稳定性变差等问题; 采取地表降水后, 黄土含水率下降为 25.4%, 改善了黄土的物理性质, 确保了隧道施工安全与进度; 水位恢复后, 黄土含水率平均上升到 29.4%, 拱顶与上拱腰变化较小, 下拱腰达到了 37.2%。研究认为地下水渗流变化将使得隧道洞身黄土含水率变幅达 15%~33%, 通过控制地下水渗流作用可以达到隧道安全施工的目的。

**关键词:** 隧道工程; 软塑黄土; 渗流作用; 含水率; 地下水; 地表降水; 时空变化

中图分类号: P642.13<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0041-07

## Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

ZHANG Xiaoyu<sup>1,2</sup>, BI Huanjun<sup>1,2</sup>, CAO Feng<sup>1,2</sup>, XIA Wanyun<sup>1,2</sup>

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** The increase of moisture content after excavation of water-rich loess tunnel has a great influence on the construction of tunnel. Many discriminant standards of engineering measures based on loess moisture content were established by predecessors, but there is a lack of systematic researches on the causes and temporal and spatial characteristics of the change in loess moisture content. The variation characteristics of moisture content under different working conditions of the Yima No.1 Tunnel along the Xi'an-Yinchuan High-Speed Railway show that the average moisture content of loess in the tunnel body under the state of natural seepage is 25.9%, with some part being soft plastic. Under the influence of seepage and water gusher, the loess moisture content rises to 31.3% on the average, and the moisture content in the lower arch waist rises to 32.2%, which causes problems such as tunnel bottom softening, slide and instability of the tunnel face, and poor stability of surrounding rock. After the adoption of surface precipitation, the moisture content of loess decreases to 25.4%, which improves the physical properties of loess and ensures the safety and progress of tunnel construction. After the groundwater level is restored, the loess moisture content rises to 29.4% on the average. The loess moisture content of the arch roof and upper arch waist changes little, and that of the lower arch waist reaches 37.2%. It is believed that the variation of groundwater seepage will make the moisture content of loess range from 15% to 33%, and the safe construction of

收稿日期: 2020-04-23; 修订日期: 2020-06-28

基金项目: 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(17-11)

第一作者: 张晓宇(1982-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事铁路工程地质与水文地质勘察。E-mail: 693673108@qq.com

tunnel can be achieved by controlling groundwater seepage.

**Keywords:** tunnel engineering; soft Loess; seepage; moisture content; groundwater; surface precipitation; temporal and spatial variation

水分是影响黄土性质和工程安全的关键因素之一。张宏刚<sup>[1]</sup>分析评价水分对西安黄土区深基坑支护工程稳定性的可靠度影响,并将西安地区土钉墙失效的报警含水率定为 20.62%。郭安邦等<sup>[2]</sup>研究了青海地区原状黄土在不同含水率下的力学特性,认为黏聚力随着含水率的增加降幅比较大。邢鲜丽等<sup>[3]</sup>利用三轴固结不排水试验测出了不同含水率下黄土的抗剪强度参数,含水量对黄土有效残余抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上。谢超<sup>[4]</sup>针对引水灌溉引起的泾河南岸黄土台塬滑坡灾害频发,通过现场原位渗水试验获得了试验土剖面水平向和竖向的含水率变化。赵景波等<sup>[5]</sup>利用双环入渗法研究了洛川黄土剖面层土壤水分入渗特点,认为黄土层孔隙度高,含水空间较大,利于形成含水层,红褐色古土壤层孔隙度低,含水空间较小,利于形成隔水层。习羽等<sup>[6]</sup>利用甘肃陇东黄土塬开挖的 100 m 深人工水井,通过测试物理力学指标,研究结果表明含水率与饱和度、液性指数正相关,同时黄土含水率在黄土中低,在古土壤中高。

针对隧道工程,李寿福<sup>[7]</sup>系统分析了黄土地区隧道渗漏水的危害,主要表现为渗漏水会软化围岩,水害引发基地下沉裂损、翻浆冒泥等病害。王新东<sup>[8]</sup>总结了黄土含水率对隧道变形的影响,提出了一般含水率( $\omega < 17\%$ )、中高含水率( $17\% \leq \omega < 25\%$ )、高含水率( $\omega \geq 25\%$ ),尤其是当黄土含水率  $\omega \geq 28\%$  时,土体近饱和一饱和状态,多呈流塑状,承载力很低,掌子面土体无法自稳。陈福江<sup>[9]</sup>以郑西高铁张茂隧道为例,模拟隧道围岩在天然状态、饱和状态等不同施工工况下对隧道形态的影响。赵永虎等<sup>[10]</sup>以银西高铁董志塬区上阁村隧道,采用现场监测方法,对黄土隧道围岩体积含水率变化规律和钢拱架受力特征进行分析研究。张晓宇<sup>[11]</sup>分析了银西高铁驿马一号隧道地表降水过程中黄土含水率的变化特征,认为地表降水改善了黄土的物理性质,提高了黄土围岩的稳定性。

国内学者有关含水率对土体强度及工程的影响做了大量研究,并建立了多种以黄土含水率为指标的土体强度及工程措施判别标准<sup>[1, 8, 12]</sup>,但对于黄土含水

率的变化原因及时空变化特征缺乏系统研究。本文以驿马一号隧道洞身附近软塑黄土为例,通过分析不同空间、不同时间、不同方法黄土含水率测试结果,得到渗流变化情况下软塑黄土含水率时空变化规律,对高含水率黄土隧道的勘察设计施工提出了一些思考。

## 1 软塑黄土分布特征

银西高铁驿马一号隧道区地层主要为第四系上更新统(Qp<sub>3</sub>)、中更新统(Qp<sub>2</sub>)风积黏质黄土。第四系上更新统黏质黄土分布于梁塬表层,厚度 10~20 m,硬塑为主。中更新统黏质黄土分布梁塬中部,厚度大于 150 m,硬塑为主,地下水位附近及含水层位置以软塑为主。

根据勘探成果,驿马一号隧道在塬区地下水水位埋深约 40~75 m,根据勘探资料,DK255+290—DK256+220、DK256+300—DK257+580 通过黄土软塑层,勘探孔深度范围内含水层厚约 20~40 m。高精度瞬变电磁法结论表明软塑状黏质黄土:视电阻率变化较小,其数值基本分布在 180~260 Ω·m 范围内;物探揭示隧道 DK255+800—DK257+570 穿越地层为 Qp<sub>2</sub> 软塑黄土。图 1 表明的是驿马一号 DK255+880—DK257+550 段隧道洞身软塑黄土分布范围,室内试验以及高精度瞬变电磁法揭示的黄土软塑层分布、范围、厚度、趋势基本一致。

## 2 地表降水措施

驿马一号隧道由于长大段落位于地下水位以下,施工出现的渗涌水、隧底软化、黄土含水率高、掌子面滑塌失稳、影响围岩稳定等问题,为此开展了地表降水辅助施工措施。降水井布置于隧道轮廓线两侧 4 m 处,井间距 25 m,井深位于软塑层以下 15~25 m,一般井深 95~105 m,井管内径为 325 mm,过滤器位置及长度根据成井揭示黄土含水层确定。潜水泵配置流量 10~20 m<sup>3</sup>/h,扬程大于 100 m。施工表明地表降水疏干了隧道洞身地下水,降低了黄土含水率和液性指数,改善了黄土物理性质,提高了黄土围岩稳定性,隧道于 2019 年 7 月顺利贯通。图 2 是 DK256+880—DK256+500 降水井平面布置示意图。

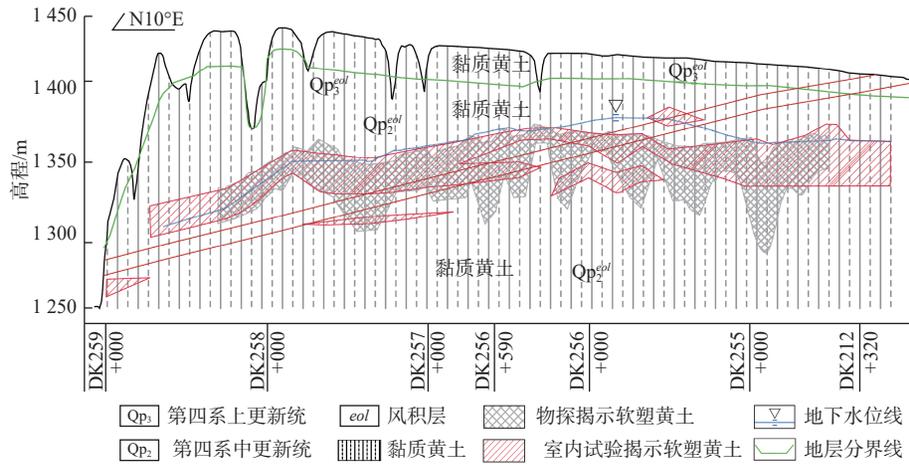


图 1 驿马一号隧道洞身软塑段分布示意图

Fig. 1 Distribution map of soft and plastic loess section of the Yima No. 1 tunnel

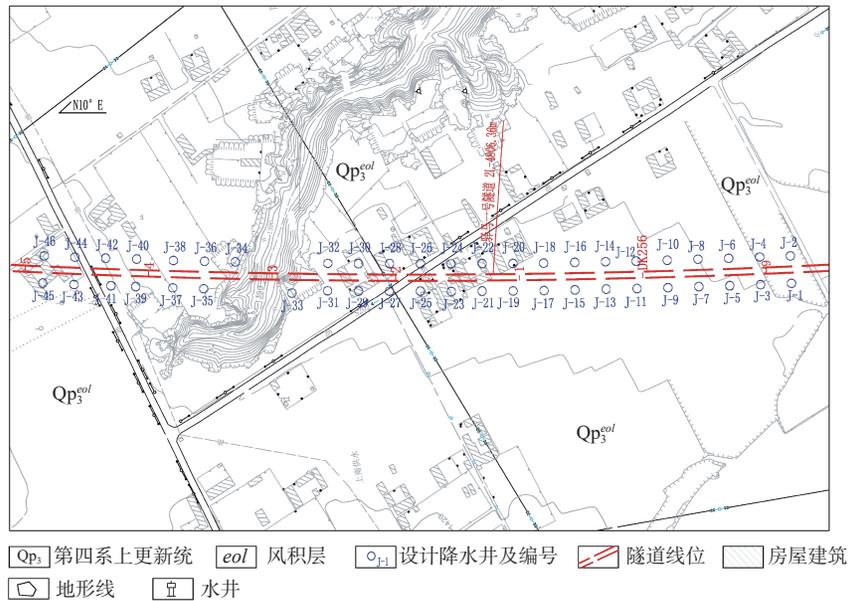


图 2 驿马一号隧道 DK255+880—DK256+500 间距 25 m 降水井平面布置示意图

Fig. 2 Extraction wells layout map for the Yima No. 1 tunnel DK255+880—DK256+500 spacing for 25 m

### 3 不同渗流状态下软塑黄土含水率特征

#### 3.1 自然渗流软塑黄土含水率

董志塬地下水径流, 一般从水位比较高的塬心向塬边流动, 径流速度比较慢, 塬心水力坡度比较平缓为 8.5‰。而塬边地带水力坡度可达 33‰。驿马一号隧道周边地下水渗流亦是从塬中心向塬边流动。

2015 年 7 月根据驿马一号隧道 YM1DZ-17 钻孔 (里程 DK256+415) 含水率随深度变化 (图 3) 可以看出, 地下水位以上 (40 m 以上) 的含水率基本小于 23%; 40~80 m 水位线及以下含水率为 23%~27%, 其中位于洞顶埋深 58, 62 m 含水率分别为 25.2%、26.6%, 隧

道洞身 66 m 处含水率为 26.1%, 含水率平均值为 25.9%。说明含水率明显受到地下水的影响。根据液性指数判定其塑性状态结果: 0~40 m 硬塑为主; 40~80 m 软塑为主, 地下水以下及黄土含水层附近的黄土物理性质明显变差。

#### 3.2 洞内排水施工软塑黄土含水率

2017 年 9 月驿马隧道一号斜井洞身从 X0+208 通过软塑层, 局部地段出现了渗水及股状出水, 地下水位下降到掌子面及拱腰附近, 洞身成为地下水排泄通道。以驿马一号隧道 1 号斜井施工至斜 X0+413.7 典型断面为例, 洞内处于排水状态, 黄土含水率在拱顶、上拱腰、下拱腰测试的结果分别为 29.9%、31.8%、

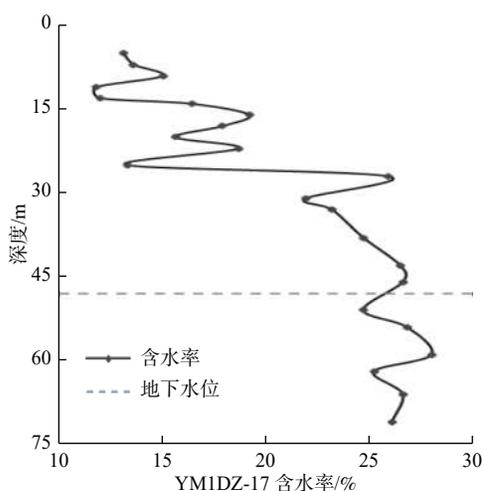


图 3 YM1DZ-17 黄土含水率-深度图

Fig. 3 Change in moisture content with depth in the YM1DZ-17 loess

32.2%，平均值为 31.3%，较上阶段上升 20.8% (表 1)。含水率和液性指数均呈明显的上升趋势，黄土呈饱和、软塑状态，局部达到了流塑，造成掌子面失稳坍塌，严重影响施工进度与安全。

表 1 洞内排水黄土含水率监测结果  
Table 1 Monitoring results of moisture content of the drained loess in the hole /%

序号	断面里程	拱顶	上拱腰	下拱腰	平均值
1	X0+408.9	29.1	29.3	29.7	29.4
2	X0+413.7	29.9	31.8	32.2	31.3
3	X0+426.9	29.8	30.1	30.2	30.0

### 3.3 降水施工软塑黄土含水率

2019 年 3 月在采取地表降水辅助施工后，地下水位于拱底以下，对掌子面拱顶、上拱腰、下拱腰不同位置的含水率进行监测，获取了施工降水期间含水率在掌子面的分布状态。从表 2 中可以看出，地表降水后，掌子面黄土的含水率一般为 23.8%~28.1%，掌子面不同位置含水率存在含水率拱顶最小，上拱腰次之，下拱腰较大的差异。以 DK256+288 掌子面取样监测结果为例，拱顶、上拱腰、下拱腰黄土含水率测试结果分别为 25.3%、24.6%、26.1%，平均值为 25.4%，较排水施工下降 18.8%。

表 2 降水期间掌子面黄土含水率监测结果  
Table 2 Monitoring results of loess moisture content in the tunnel face during extraction of water /%

序号	断面里程	拱顶	上拱腰	下拱腰	平均值
1	DK256+288	25.3	24.9	26.1	25.4
2	DK256+587	26.8	27.4	28.1	27.4
3	DK256+978	23.8	26.2	27.9	26.0

### 3.4 水位恢复软塑黄土含水率

2019 年 1 月底在驿马隧道银川端方向 DK256+280 断面埋设了 6 组浅埋水分传感器 (图 4)，图 5 为驿马一号隧道西安端的测试断面围岩含水率变化趋势。拱顶围岩水分在经历 28 d 后达到基本稳定，上拱腰及仰拱围岩水分在经历 3~9 d 后达到基本稳定。在围岩开挖初期，进行了连续地表深井排水、洞内排水等措施，围岩含水率明显降低；水位恢复，影响到上拱腰及下拱腰，其含水率接近饱和状态。2019 年 5 月在停止降水后，水位恢复，形成新的排泄通道，地下水位于下拱腰附近，DK256+280 黄土断面监测约 40 d 后含水率分布基本稳定，其中拱顶黄土含水率为 24.1%，上拱腰含水率为 27%，下拱腰为 37.2%，平均值为 29.4%，较上阶段上升 15.7%。

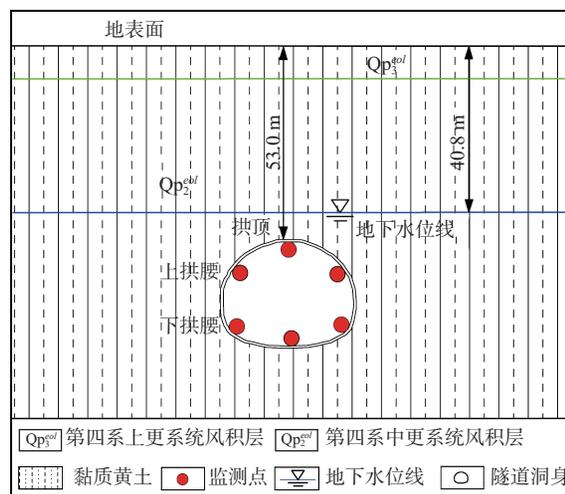


图 4 驿马一号隧道 DK256+280 含水率监测横断面

Fig. 4 Moisture content in the DK256+280 cross-section of the Yima No. 1 tunnel

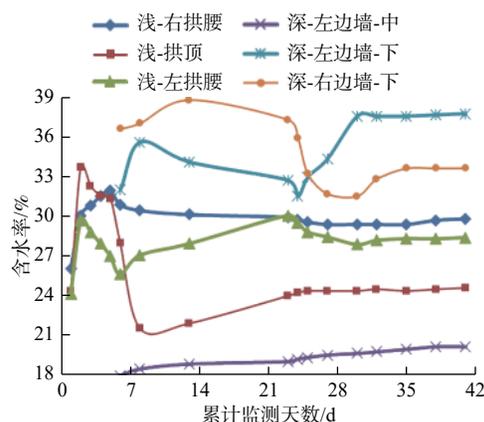


图 5 驿马一号隧道 DK256+280 断面围岩含水率测试结果

Fig. 5 Test results of moisture content in the surrounding rock of DK256+280 section of the Yima No. 1 tunnel

### 4 软塑黄土含水率变化规律

虽然对比分析的软塑黄土含水率测试结果不在同一隧道里程、不在同一埋深, 测试方法也不同, 但通

过大量实测数据分析, 认为选取的位置工程地质及水文地质条件一致, 测试结果具有很强的代表性。通过分析发现(表 3), 隧道洞身黄土含水率时间与所处的工况及地下水渗流状态有很大的关系。

表 3 驿马一号隧道不同时空黄土含水率

Table 3 Test results of loess moisture content in different time and space of the Yima No.1 tunnel

时间	里程位置	工况	测试方式	埋深/m	与隧道关系	黄土含水率 /%	黄土含水率 平均值/%	不同位置最大 变化值/%	与上一阶段 对比
2015年7月	DK256+415	自然渗流	钻孔取样	58	拱顶	25.2	25.9	1.4	-
				62	上拱腰	26.6			
				66	下拱腰	26.1			
2017年9月	X0+413.7	排水施工	掌子面取样	65	拱顶	29.9	31.3	2.3	上升20.8%
				68	上拱腰	31.8			
				71	下拱腰	32.2			
2019年3月	DK256+288	降水施工	掌子面取样	60	拱顶	25.3	25.4	3.0	下降18.8%
				64	上拱腰	24.9			
				68	下拱腰	26.1			
2019年5月	DK256+280	水位恢复	断面监测	60	拱顶	24.1	29.4	13.1	上升15.7%
				64	上拱腰	27.0			
				68	下拱腰	37.2			

2015年7月, 在自然渗流状态下, DK256+415位于地下水位以下, 处于Qp<sub>2</sub>中更新统黄土含水层中, 隧道洞身附近的黄土含水率测试结果相近, 不同位置差值较小, 平均值达到了25.9%, 明显高于上更新统以及中更新统非含水层黄土。

2017年9月, 施工开挖后, 隧道改变了黄土的渗流状态, 隧道成为地下水排泄通道, 渗流状态改变, 施工进度缓慢, 进一步加速软化了原本就是软塑的黄土, 地下水与施工开挖扰动共同作用使得掌子面黄土难以维持原始状态。与天然状态相比, 黄土含水率明显增加, 不同空间差异性略变大(图6), 整体上施工开挖隧道洞身黄土含水率较天然状态上升了20.8%。

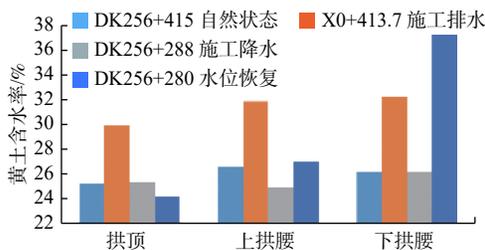


图 6 驿马一号隧道不同时空黄土含水率

Fig. 6 Box chart and column chart for the test results of loess moisture content in different time and space of the Yima No.1 tunnel

2019年3月, 采取地表降水后, 由于长期的预降水以及施工期间的降水, 隧道不再是地下水的主要排

泄通道。DK256+288段施工降水分析结果, 与未降水阶段相比, 掌子面的黄土含水率明显降低, 不同空间测试的差异性进一步扩大, 下拱腰高出上拱腰4%, 拱顶与上拱腰的黄土含水率明显低于下拱腰, 且下降较大, 可以达到24%, 下拱腰下降了约13.3%。与自然状态相比, 两个阶段的黄土含水率平均值较为接近, 拱顶与下拱腰普遍低于自然状态, 下拱腰普遍高于天然状态。下拱腰含水率大的原因为: (1)地表降水虽然使地下水位降至隧底以下, 但由于隧底距离地下水位较近, 毛细上升作用造成水分补给; (2)洞内未梳干的水在下台阶汇集, 从而引起下台阶含水率偏高。

2019年5月, DK256+280二衬施工完成, 停止降水, 黄土含水率普遍增加, 约40d达到稳定。与降水阶段对比, 拱顶的黄土含水率总体没有变化, 上拱腰与下拱腰位置黄土含水率明显上升, 平均上升了15.7%, 下拱腰最大上升了33%, 不同空间测试差异性进一步扩大, 下拱腰高出拱顶13.1%。水位恢复后拱顶与上拱腰位置含水率低于排水状态的拱顶和上拱腰的含水率, 下拱腰位置测试结果高于下台阶; 与自然状态相比, 拱顶与上拱腰位置含水率与自然状态相近, 而下拱腰位置测试结果高于自然状态。这是由于停止降水后, 地下水水位恢复, 隧道成为地下水的排泄通道, 地下水位线形成的自然降落漏斗位于上拱腰上部或附近, 下拱腰附近黄土受到了地下水渗流影响, 而

拱顶位置不再受地下水排泄的影响,造成黄土含水率的差异性。下拱腰黄土含水率普遍大于 30%,说明隧道施工完成后,基地的含水率普遍较高,需要采取地基处理措施。

## 5 驿马一号隧道勘察设计施工思考

刘贵平等<sup>[13]</sup>分析认为黄土层潜水广泛分布在梁峁区和塬区,梁峁区地形极为破碎,难以形成稳定连续的含水层。塬区黄土层潜水主要分布在延安以南和陇东地区,能够形成相对稳定连续的含水层,水量相对丰富。

针对黄土地区的隧道工程,刘彤<sup>[14]</sup>通过调查已建和在建黄土及软岩公路隧道的地形、地貌、地质、植被条件,以及隧道结构、施工方法、地下水出漏情况,分析甘肃黄土及软岩公路隧道渗漏水的原因。杨晓华等<sup>[15]</sup>指出,对隧道涌水条件认识不全面,遗漏隧道出水条件是隧道漏水的主要原因,尤其是未重视隧道位于地下水以下。张志勇等<sup>[16]</sup>将甘肃黄土公路隧道涌水类型进行划分,将隧道涌水类型划分为:滴渗、淋漓、股水、突水。

根据银西高铁驿马一号隧道监测资料及研究成果,地下水位及地下水渗流改变可以使隧道洞身附近黄土含水率变化幅度达到 15%~33%,同时掌子面不同位置黄土含水率变化幅度也约为 5%。银西高铁成果表明,降水后黄土含水率即使在 26%~30% 亦可以正常按照台阶法施工,因此控制黄土隧道地下水的渗流,尽量做到洞内无渗水施工,应该是富水黄土隧道施工最主要的思路。可以根据地下水不同富水段落长度、出水量,有针对性地采取喷射混凝土、洞内集水井、帷幕注浆以及地表降水等措施。应重点对待埋深 30~100 m、围岩含水率大于 25%、掌子面涌水量大于 200 m<sup>3</sup>/d 的黄土隧道。

## 6 结论及建议

(1)通过钻孔取样、掌子面取样监测,揭示了自然状态、施工排水、施工降水、水位恢复等不同条件下隧道影响范围内黄土含水率演化规律,结果表明,地下水渗流作用是控制隧道洞身含水率变化的主要因素。

(2)自然渗流状态下隧道洞身黄土含水率平均为 25.9%;施工排水阶段受渗涌水影响,黄土含水率平均上升到 31.3%;采取地表降水后,黄土含水率下降为 25.4%;水位恢复后,黄土含水率平均上升到 29.4%。

不同工况条件下,隧道洞身拱顶、上拱腰、下拱腰含水率变化值为 1.4%~13.1%,其中在水位恢复阶段不同位置含水率变化值最大。

(3)与自然状态相比,施工排水、地表降水以及水位恢复出现了黄土含水率升高、下降以及再升高的变化趋势。地下水渗流变化将使得隧道洞身黄土含水率变幅达 15%~33%。

(4)银西高铁黄土隧道勘察设计施工表明埋深在 30~100 m、围岩含水率大于 25%、掌子面涌水量大于 200 m<sup>3</sup>/d 的黄土隧道会受到地下水渗流的影响,同时通过控制地下水渗流作用可以达到隧道穿越黄土含水层安全施工的目标。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 张宏刚. 含水率变化对西安地区深基坑土钉支护稳定性的可靠度影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 32 - 38. [ ZHANG Honggang. Impacts of moisture content on the reliability of soil nail support stability of deep foundation pit in Xi'an area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(4): 32 - 38. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 2 ] 郭安邦, 张吾渝, 刘凌霄, 等. 含水率对青海地区原状黄土力学性能的影响[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 10 - 17. [ GUO Anbang, ZHANG Wuyu, LIU Lingxiao, et al. Influence of moisture content on mechanical properties of intact loess in Region Qinghai[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 10 - 17. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 3 ] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53 - 59. [ XING Xianli, LI Tonglu, LI Ping, et al. Variation regularities of loess shear strength with the moisture content[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 53 - 59. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 4 ] 谢超. 泾阳南塬黄土渗透特性及黄土滑坡研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. [ XIE Chao. Study on the permeability and landslide of loess in south Jingyang Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 5 ] 赵景波, 王长燕, 刘护军, 等. 陕西洛川黄土剖面上部土层水分入渗规律与含水条件研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 124 - 129. [ ZHAO Jingbo, WANG Changyan, LIU Hujun, et al. A study of water

- infiltration and water-bearing condition of the L1—S4 layers in Luochuan, Shaanxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(1): 124 – 129. ( in Chinese with English abstract )
- [ 6 ] 习羽, 李同录, 江睿君, 等. 陇东黄土工程地质分层及其物理特性[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 67 – 72. [ XI Yu, LI Tonglu, JIANG Ruijun, et al. Engineering geological stratigraphy and physical properties of the loess in eastern Gansu[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 67 – 72. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 7 ] 李寿福. 黄土隧道渗漏水病害治理方法研究[J]. *甘肃科技*, 2008, 24(8): 107 – 109. [ LI Shoufu. Study on the control method of seepage leakage disease in Loess tunnel[J]. *Gansu Science and Technology*, 2008, 24(8): 107 – 109. ( in Chinese ) ]
- [ 8 ] 王新东. 高含水率黄土大断面隧道变形特性及施工方法[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(5): 59 – 61. [ WANG Xindong. Deformation characteristics and construction method for large section loess tunnel with high water content[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(5): 59 – 61. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 9 ] 陈福江. 黄土隧道围岩含水量变化对隧道形态影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 1–2. [ CHEN Fujiang. Study on the tunnel's modality impact of changes of surrounding rock water content at loess tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008: 1–2. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 10 ] 赵永虎, 罗浩洋, 苗学云, 等. 黄土隧道围岩含水率变化及拱架受力特征研究[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(4): 128 – 131. [ ZHAO Yonghu, LUO Haoyang, MIAO Xueyun, et al. Research on the characteristics of steel arch stress and variation of water content of loess tunnel surrounding rock[J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(4): 128 – 131. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 11 ] 张晓宇. 银西高铁软塑黄土隧道地表降水试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2019, 56(3): 154 – 160. [ ZHANG Xiaoyu. Experimental study on ground dewatering of the soft plastic loess tunnel on the Yinchuan-Xi'an railway[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2019, 56(3): 154 – 160. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 12 ] 陈鹤, 管振祥, 乔春生. 富水黄土隧道的开挖监控及变形判别[J]. *岩土工程界*, 2002(10): 44 – 46. [ CHEN He, GUAN Zhenxiang, QIAO Chunsheng. Excavation controlling and deformation identifying of water-rich loess tunnels[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2002(10): 44 – 46. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 13 ] 刘平贵, 李雪菊. 黄土高原缺水的地质环境及找水途径[J]. *水文地质工程地质*, 2001, 28(3): 18 – 22. [ LIU Pinggui, LI Xueju. Geological environment deficient in water and way to seek water in the loess plateau[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2001, 28(3): 18 – 22. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 刘彤. 黄土地区公路隧道渗漏水分析[J]. *路基工程*, 2007(3): 16 – 17. [ LIU Tong. Analyze the leakage water of highway tunnel in loess zone[J]. *Subgrade Engineering*, 2007(3): 16 – 17. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 15 ] 杨晓华, 王航, 张小荣. 黄土软岩隧道渗水病害成因与防治对策研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2007, 3(5): 5 – 7. [ YANG Xiaohua, WANG Hang, ZHANG Xiaorong. Study on the causes and prevention of seepage disease of soft rock tunnel in Loess[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application technical edition)*, 2007, 3(5): 5 – 7. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 16 ] 张志勇, 杨晓华, 李宁军. 甘肃黄土公路隧道渗涌水类型划分[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2006, 2(5): 40 – 43. [ ZHANG Zhiyong, YANG Xiaohua, LI Ningjun. Classification of infiltration and water gusher in loess highway tunnel in Gansu Province[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application technical edition)*, 2006, 2(5): 40 – 43. ( in Chinese ) ]

编辑: 张若琳