

DOI: 10.11779/CJGE2021S1017

黄土地层含水率增大对大跨度隧道围岩压力影响

朱才辉^{1,2}, 贺豪楠^{1,2}, 兰开江^{1,2}, 李玉波³

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点试验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:以某黄土公路隧道为背景,通过室内常规三轴试验来获取原状 Q_2 黄土的物理力学参数,并基于数值分析方法探讨因地表水分入渗或地下水位抬升引起的洞周围岩压力的变化规律,并提出考虑含水率影响的修正围岩压力算法。结果表明:①随着地表水入渗深度或地下水位抬升高度的增大,围岩压力呈增大趋势,且最大围岩压力比 $\psi_{\max} = 1.1 \sim 3.5$, 最大收敛变形比 $\zeta_{\max} = 1.1 \sim 1.3$;②初始含水率越低,其最大围岩压力比和收敛变形比越大,因地表水分入渗或水位抬升引起的围压放大效应越明显;③隧道埋深越浅,围岩压力分布越不均匀,“猫耳朵”形状越明显,埋深越大围岩压力分布相对均匀;④引入围岩压力比,提出了半数值半经验的修正隧道围岩压力计算公式,可考虑因黄土地层含水率增大引起的围岩压力放大效应。

关键词:黄土地层;隧道;围岩压力;含水率;分布模式

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S1-0093-06

作者简介:朱才辉(1983—),男,陕西商南人,博士,2012年博士毕业于西安理工大学岩土工程专业,现任副教授,主要从事黄土力学与工程等方面的教学与研究工作。E-mail: zhucaihui123@163.com。

Influences of increase of moisture content on surrounding soil pressure of large-span tunnels in loess

ZHU Cai-hui^{1,2}, HE Hao-nan^{1,2}, LAN Kai-jiang^{1,2}, LI Yu-bo³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Based on a highway tunnel in loess, the triaxial tests under different moisture contents of undisturbed Q_2 loess are conducted to obtain the physical and mechanical parameters, and the numerical method is used to analyze the variation laws of surrounding earth pressure (SEP) under the infiltration of surface water or rising of underground water level. The modified methods for SEP are put forward by considering the effects of moisture content. The results show that: (1) With the increase of rising height of underground water level and the infiltration depth, the SEP exhibits a trend of increase, and the largest SEP ratio $\psi_{\max} = 1.1 \sim 3.5$, the largest surrounding earth convergence deformation ratio $\zeta_{\max} = 1.1 \sim 1.3$. (2) The lower the initial moisture content of the loess stratum, the greater the maximum SEP ratio and convergence deformation ratio, and the more obvious the SEP amplification effect caused by water infiltration or rising of water level. (3) The shallower the buried depth of tunnel is, the more uneven the SEP distribution is, the more obvious the shape of “cat’s ear” is, and the more evenly the SEP distribution is. (4) By introducing the SEP ratio, a semi-numerical and semi-empirical formula for calculating the SEP of the tunnel is put forward, and the amplification effect of SEP caused by the increase of moisture content of loess can be considered.

Key words: loess stratum; tunnel; surrounding earth pressure; moisture content; distribution mode

0 引言

黄土地区隧道工程的大量勘察经验表明,降雨,地表低洼地、洞穴或冲沟积水,及长期受季节性径流河谷、沟谷水的冲刷流失、农田灌溉,地下供、排水或蓄水系统(水井、管道、渠道、水塘、人工湖、水库)的渗漏等均会对黄土隧道产生增湿影响^[1]。地表水的渗透会弱化黄土地层的强度,进而影响隧道围岩的稳定性^[2-3];隧道施工还会诱发地表出现环形开裂、沉降、塌陷等破

坏问题^[3-4],进而诱发地表水源的汇入、渗透,从而浸泡隧道上覆地层或隧道地基,引起隧道结构产生附加形变荷载,导致结构不均匀沉降、开裂。由于排水效能差异、地层的非均匀性和渗透性等差异,降水后地层的

基金项目:西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点试验室项目(2019KJCXTD-12);国家自然科学基金项目(51678484);陕西省自然科学基金项目(2019JLP-22)
收稿日期:2021-12-15

含水率降低程度不一,随着隧道结构施工完毕,地下水水位最终会逐渐抬升并恢复至初始水位状态,洞周黄土地层会缓慢发生应力释放或湿陷性恢复现象,围岩压力会产生放大效应,从而对衬砌结构产生更大的附加变形荷载,从而出现开裂、渗水等病害问题。该现象可用图 1 描述。

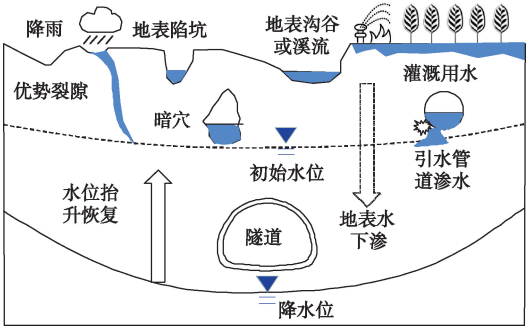


图 1 黄土地层隧道受周边水环境影响示意图

Fig. 1 Water environment around loess tunnel

为了研究增湿变形荷载分布规律及其对地下结构的力学响应,工程中多采用耗资巨大的原位试验或模型试验来研究地表浸水或隧道洞周局部浸水对隧道结构的影响^[5-9],总体认为:浸水后衬砌结构的受力和变形呈增大趋势,但由于试验局限性,在其他黄土地层中推广应用存在一定的难度。此外,更广泛的研究是基于室内试验和理论分析方法,来探索隧道地层含水率变化或增湿影响下的支护结构受力和变形特征^[10-13],公路隧道结构设计中围岩压力的计算仍采用 JTGD70—2004《公路隧道设计规范》(以下简称《规范》)^[14]。随着黄土隧道工程及存在的灾害问题的涌现,广大学者基于现场监测资料统计规律及隧道实际的破坏形式,提出了黄土围岩压力的分布模式及计算公式或修正公式,并建议对浅埋黄土隧道荷载按谢家杰公式计算^[15],深埋黄土隧道荷载按太沙基理论计算^[15-19]。然而,因地表水分入渗或地下水位抬升引起黄土地层干湿状态变化而诱发隧道围岩的附加变形荷载的计算仍缺乏经验可借鉴。

本文以西北地区某 Q₂ 黄土大断面公路隧道为背景,开展不同含水率下原状黄土室内三轴试验,获取其物理力学参数,并基于数值分析方法来探讨黄土地层含水状态变化下围岩压力的变化规律及分布模式,并提出考虑含水率影响的围岩压力修正计算方法。

1 原状 Q₂ 黄土力学性质

研究区域的黄土公路隧道断面为马蹄形,设计开挖断面的洞高 $h = 11 \sim 13$ m,洞跨 $B = 15 \sim 17$ m,隧道埋深为 $H = 10 \sim 70$ m,隧道所处地层,厚约 10 ~ 60 m 的 Q₂ 黏质黄土地层,隧道底板以下为 3 ~ 30 m 的砂页

岩层。常年水位高度距离隧道拱顶以上约 $0.41H$ 。通过现场取样,开展室内常规试验和三轴压缩试验,得到原状 Q₂ 黄土物理指标见表 1。

表 1 原状 Q₂ 黄土物理指标

Table 1 Physical indexes of undisturbed Q₂ loess

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G_s	$w_0/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_l/\%$
1.71 ~ 1.95	2.72 ~ 2.73	18.3 ~ 21.5	19.5 ~ 20.4	28.5 ~ 30.0

注: w_0 为天然含水率, ρ 为天然密度, w_p 为塑限, w_l 为液限。

基于三轴试验,开展 5 种含水率下排水条件下原状 Q₂ 黄土的剪切试验(8%, 14%, 20%, 26% 和 31% - 饱和状态),力学参数见表 2。

表 2 不同含水状态下 Q₂ 原状黄土力学参数

Table 2 Parameters of Q₂ loess under different moisture contents

$w/\%$	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
8	72.2	0.35	43.5	25.9	17.1
14	46.8	0.35	36.5	24.7	18.1
20	44.1	0.36	29.5	23.5	19.0
26	38.6	0.37	22.5	22.3	20.0
31	33.2	0.38	5.1	19.3	22.3

注: w 为含水率, E 为弹性模量, ν 为泊松比, c 为内聚力, φ 为内摩擦角, γ 为重度。

2 地表水入渗对隧道围岩压力影响

2.1 数值分析方案

地表水入渗引起围岩压力和收敛变形的放大效应受多种因素的影响:隧道埋深 H 、初始含水率 w 、地表水浸入深度 ΔH 等。本文基于 Plaxis-2D 数值分析软件,构建地表浸水工况下隧道应力-应变分析模型,见图 2 所示。

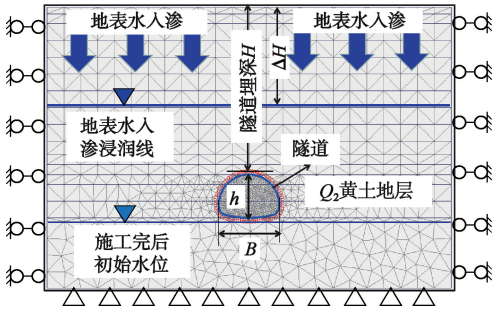


图 2 黄土隧道地表水入渗模型

Fig. 2 FEM of loess tunnel during water infiltration

根据文献[4,5]关于大断面黄土隧道深浅埋分界高度的建议($H = 40$ m 为深浅埋界限, $H = 11$ m 为超浅埋的界限),隧道埋深方案: $H = 10$ m(超浅埋)、30 m(浅埋)和 50 m(深埋);初始含水率分别为: $w = 8\%$, 14%, 20%, 26%, 31% (饱和);地表水入渗深度分别为: $\Delta H = 0, 2, 5, 10, 15$ m,直至隧道底板以下 1.0 m(即

$\Delta H = H + h + 1$)。黄土地层按理想弹塑性材料处理, 遵循 M-C(莫尔-库仑)屈服准则, 基岩、初期支护及钢筋混凝土二次衬砌按照线弹性模型考虑, 具体参数见表 3。

表 3 数值分析计算参数

Table 3 Parameters of numerical analysis

土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	泊松比 ν	厚度/m
基岩	26	1.5	0.26	20
初期支护	24	25.5	0.22	0.30
二衬	25	28.5	0.20	0.60

- 数值分析具体步骤如下:
- (1) Step-1:模型左右边界法向约束,底部双向约束,模拟初始自重应力场。
 - (2) Step-2:基于开挖体模量软化法,模拟隧道全断面一次性开挖和衬砌结构的施作,围岩 + 初期支护及二衬的荷载分担比分别为为 40% 和 60%。
 - (3) Step-3:隧道衬砌结构施工完成后初始水位(降水位)设定为隧道底板以下 1.0 m,水位以下黄土地层取为饱和参数,水位线以上为初始含水状态参数。
 - (4) Step-4:重复步骤 Step-3,通过修改地表以下 ΔH 深度处的黄土地层参数为饱和土参数,来模拟地表水入渗工况,直至地表水入渗至隧道底板以下 1.0 m。
 - (5) Step-5:根据 Step-4 计算结果,分析上覆黄土地层逐步“浸水软化”对洞周围岩压力及收敛变形的影响。

2.2 地表水入渗对围岩压力的影响

定义地表水入渗不同深度 ΔH 时,洞周不同部位的围岩压力(σ_y, σ_x)和收敛变形(U_y, U_x)与初始状态下围岩压力(σ_{y0}, σ_{x0})和收敛变形(U_{y0}, U_{x0})比值分别为:

$$\begin{cases} \psi_y = \sigma_y / \sigma_{y0}, \\ \psi_x = \sigma_x / \sigma_{x0}, \\ \zeta_y = U_y / U_{y0}, \\ \zeta_x = U_x / U_{x0}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, ψ_y 为竖向压力比, ψ_x 为侧向压力比, ζ_y 为拱顶沉降比, ζ_x 为侧墙水平收敛变形比。

文中仅给出深埋状态下的计算结果部分曲线,如图 3 所示。

通过图 3 可得到如下结论:

- (1) 随着 ΔH 的增大,洞周不同部位处围岩压力 σ_y, σ_x 呈增大迹象,不同含水率 w 下,围岩压力比 $\psi = 1.1 \sim 3.5$,且拱顶围岩压力比最大,围岩压力放大效应最强。
- (2) 当浸水入渗深度 $\Delta H = H + 0.62h$ 时,围岩压

力比达到最大,当入渗深度 $\Delta H > H + 0.62h$ 时,拱脚处围岩压力比稍有减小,平均减小幅度约 10%。

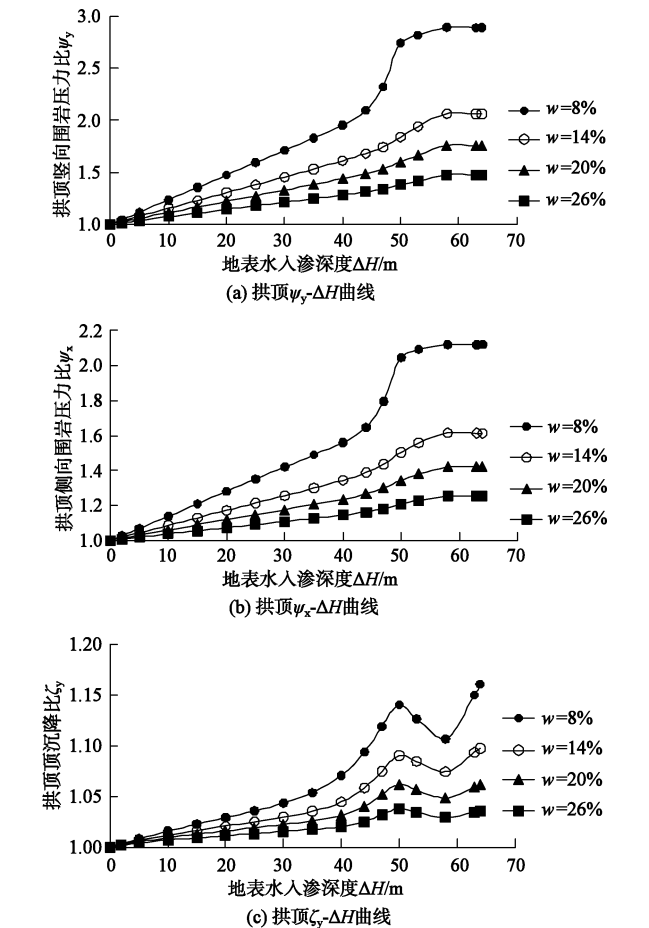


图 3 地表水入渗期间洞周围岩应力及变形演化规律
Fig. 3 Variation laws of surrounding earth pressure and displacement during water infiltration

- (3) 拱顶位移随着 ΔH 的增大而持续增大, $\zeta = 0.8 \sim 1.3$, 且拱顶处 ζ_y 最大; 当 $\Delta H \leq H + 0.62h$ 时,侧墙水平位移随着浸水深度的增大而减小,当浸水深度 $\Delta H > H + 0.62h$ 时,侧墙水平位移略呈增大趋势。

(4) 地层初始含水率越低,浸水饱和后对围岩压力比影响越强烈。随着 H 增加, $\psi_{y\max}, \psi_{x\max}, \zeta_{y\max}$ 总体呈减小趋势,而侧墙 $\zeta_{x\max}$ 则呈增大趋势。表明:随着隧道埋深的增大,地表浸水对其围岩压力和竖向位移的影响程度在降低,但对洞室水平位移的影响程度在上升。

3 地下水位抬升对隧道围岩压力影响

3.1 数值分析方案

地下水位的抬升 Δh 分别设定为: $\Delta h = 0, 1, 5, 8, 14$ m,直至地表。数值分析模型见图 4 所示。

3.2 地下水位抬升对围岩压力的影响

仅限于篇幅,仅给出深埋状态下的计算结果曲线,如图 5 所示。从图 5 可得到如下结论:

(1) 随着地下水位抬升高度 Δh 的增大,洞周不同部位处围岩压力整体呈增大趋势,不同初始含水率 w 状态下,围岩压力比 $\psi = 1.1 \sim 3.2$,拱顶处围岩压力的放大效应仍最为剧烈。

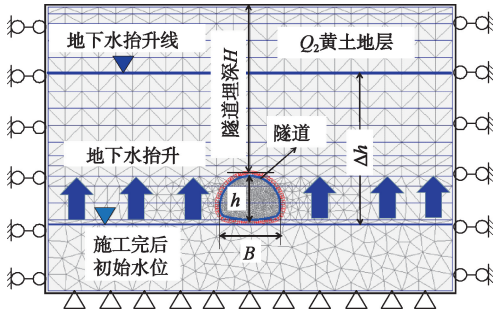


图4 地下水位抬升数值分析模型

Fig. 4 FEM of loess tunnel during rising of groundwater level

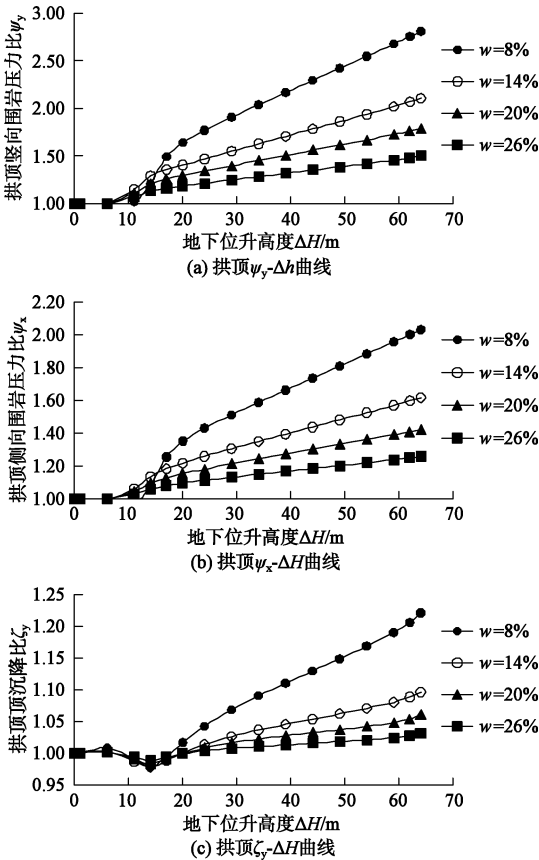


图5 地下水恢复期间洞周围岩应力及变形演化规律

Fig. 5 Variation laws of surrounding earth pressure and displacement during rising of water level

(2) 拱顶沉降比 ζ , 随水位的抬升高度 Δh 增加而持续增加,当水位抬升至隧道拱顶附近时,侧墙水平收敛变形达到最大值,此后略有减小趋势。

(3) 随着地层初始含水率的增大,水位抬升期间,不同埋深下 ψ_y 、 ψ_x 、 ζ_y 、 ζ_x 均呈减小趋势。地层饱和度较高时,水位抬升对围岩影响逐渐减小。

隧道埋深 H 的增大,围岩压力比及围岩收敛变形比也呈减小趋势。表明隧道埋深越大,地下水位

抬升对围岩弱化效应逐渐降低。

4 考虑含水率变化的围岩压力计算

4.1 修正公式法

(1) 深埋隧道围岩压力修正:深埋黄土隧道的围岩压力采用太沙基理论计算比较接近^[16],竖向围岩压力 σ_v 计算公式可修正为

$$\sigma_v = \frac{\gamma_{sw} b}{K_w tg\varphi_w} (1 - e^{-K_w tg\varphi_w \cdot \frac{h}{b}}) \quad (2)$$

式中, b 为塌落拱跨度的一半 (m), B 为隧道的最大开挖跨度 (m), h 为隧道的开挖高度 (m); K_w , φ_w , γ_{sw} 均为考虑增湿后黄土地层的侧压力系数、内摩擦角和重度,当 K_w 无实测值时,可采用 $K_w = 1 - \sin\varphi_w$ 来粗略估算。

(2) 深埋隧道围岩压力修正:当隧道上覆黄土地层含水率低于液限时 $S_w = 5$,即为 V 级围岩,当含水率超过液限接近饱和时 $S_w = 6$,即围岩级别降低为 VI 级,则《规范》中深埋隧道围岩压力可修正为^[14]

$$\sigma_v = 0.45 \times 2^{S_w-1} \times \gamma_{sw} [1 + i(B-5)] \quad (3)$$

式中, S_w 为考虑隧道上覆黄土地层增湿后的围岩分级, i 为经验系数。

(3) 浅埋隧道竖向围岩压力采用谢家桢公式^[15]进行修正:

$$\sigma_v = \gamma_{sw} H \left(1 - \frac{H \lambda_w \tan\theta_w}{B} \right) \quad (4)$$

式中, λ_w , β_w , θ_w , φ_{0w} 分别为增湿后黄土地层参数,具体物理含义,参见《规范》。

(4) 超浅埋隧道直接采用土柱理论进行计算,此时土体重度应采取饱和重度考虑,即

$$\sigma_v = \gamma_{sw} H \quad (5)$$

基于表 1、2 和式 (3) ~ (5) 分别计算不同含水率下超浅埋、浅埋和深埋隧道的竖向围岩压力比 $\psi_{y\max}$,通过计算表明:随着 w 的增大,不同埋深条件下的 $\psi_{y\max}$ 逐渐减小,且当地层初始含水率越低,竖向围岩压力放大效应越大,但随着隧道埋深的增大而呈增大趋势,这一现象与工程实际显然不符,隧道埋深的增大,承载拱效应越明显,其放大效应理应有减小趋势。

4.2 半数数值半经验法修正

为了对比公式法和数值方法在考虑隧道地层含水率变化引起的围岩压力的放大效应变化规律,分别计算上述两种方法下极端工况时的拱顶最大应力比 $\psi_{y\max}$,计算结果表明:

(1) 当地表水入渗至底板以下 1.0 m 或地下水位抬升至地表的极限状态时,不同初始含水率状态下黄土地层最终趋于饱和后,隧道拱顶最大竖向围岩压力比 (或放大系数) $\psi_{y\max} = 1.5 \sim 3.5$ 。

(2) 隧道超浅埋时,数值解 $\psi_{y\max} = 2.4 >$ 公式法 1.2;浅埋时,数值解 $2.1 >$ 公式法 1.7;深埋时,数值解 $2.0 <$ 公式法 2.8。

(3) 超浅埋隧道更易于出现由于降雨入渗或水位变化引起的衬砌病害问题,公式法的围岩压力荷载计算结果对于地下水影响的考量程度明显不足,深埋隧道过大的考虑了围岩压力。故对于地层含水率可能出现增大迹象的黄土地层隧道,建议采用半数值半经验方法来计算围岩压力:

$$\begin{cases} \sigma_v = \psi_{y\max} \sigma_{y0} \\ \sigma_h = \psi_{x\max} \sigma_{x0} \end{cases} \quad (6)$$

(4) 修正公式方法可表示为

深埋隧道竖向围岩压力 σ_v 修正公式:

$$\sigma_v = \psi_{y\max} \frac{\gamma_s b}{K \tan \varphi} (1 - e^{-K \tan \varphi \cdot \frac{h}{b}}) \quad (7)$$

浅埋隧道围岩压力修正公式:

$$\sigma_v = \psi_{y\max} \gamma_s H \left(1 - \frac{H \lambda \tan \theta}{B} \right) \quad (8)$$

式中, $\psi_{y\max}$ 为隧道拱顶最大竖向围岩压力比(或放大系数), $K, \varphi, \gamma_s, \lambda, \beta, \theta, \varphi_0$ 均为不考虑增湿状态下黄土地层的相关物理力学指标。

5 结 论

(1) 随着地表水入渗深度或地下水位抬升高度的增大,不同初始含水率和埋深条件下,洞周围岩压力和收敛变形均呈增大趋势,且最大围岩压力比 $\psi = 1.1 \sim 3.5$,围岩最大收敛变形比 $\zeta = 1.1 \sim 1.3$ 。

(2) 隧道所处地层的初始含水率越低,其最大围岩压力比和收敛变形比越大,因地表水分入渗或水位抬升引起的围压放大效应越明显,且地下水位抬升引起的围岩压力放大效应,总体上比地表水入渗的影响要更大。

(3) 隧道埋深越浅,受地层含水率增大影响后的围岩压力分布越不均匀,“猫耳朵”形状越明显,而隧道埋深越大,围岩压力分布相对均匀。

(4) 引入了围岩压力比,提出半数值半经验的隧道围岩压力修正计算公式,可考虑因黄土地层含水增大引起的围岩压力放大效应。

参考文献:

[1] 邵生俊,杨春鸣,焦阳阳,等. 湿陷性黄土隧道的工程性质分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1580-1590. (SHAO Sheng-jun, YANG Chun-min, JIAO Yang-yang, et al. Engineering properties of collapsible loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(9):1580-1590. (in Chinese))

[2] 王 成. 深埋黄土隧道初期支护破坏模式研究[J]. 铁道工程学报,2018,10:65-68. (WANG Cheng. Research on the Failure Modes of Initial Support for Deep-buried Tunnel in Loess[J]. Journal of railway engineering society, 2018,10:65-68. (in Chinese))

[3] 来弘鹏,杨晓华,林永贵. 黄土公路隧道病害分析与处治措施建议[J]. 公路,2006,6:197-202. (LAI Hong-peng, YANG Xiao-hua, LIN Yong-gui. Disease analysis for highway tunnel in loess and treatment countermeasures[J]. Highway, 2006,6:197-202. (in Chinese))

[4] 王明年,郭 军,罗禄森,等. 高速铁路大断面黄土隧道深浅埋分界深度研究[J]. 岩土力学,2010,31(4):1157-1162. (WANG Ming-nian, GUO Jun, LUO Lu-sen, et al. Study of critical buried depth of large cross-section loess tunnel for high speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(4):1157-1162. (in Chinese))

[5] 张玉伟,宋战平,翁效林,等. 大厚度黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(5):1030-1040. (ZHANG Yu-wei, SONG Zhe-ping, WENG Xiao-lin, et al. Model test study on influence of the collapsibility of large thickness loess stratum on subway tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):1030-1040. (in Chinese))

[6] 翁效林,王 俊,王立新,等. 黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(8):1374-1380. (WENG Xiao-lin, WANG Jun, WANG Li-xin, et al. Experimental research on influence of loess collapsibility on subway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(8):1374-1380. (in Chinese))

[7] 黄训洪. 黄土隧道地基纵向局部湿陷对结构的力学行为影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2017. (HUANG Xun-hong. Study on the Influence of Longitudinal Local Collapsibility on the Mechanical Behavior of Loess Tunnel Foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))

[8] 田少敏. 黄土隧道环向局部湿陷的围岩力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2017. (TIAN Shao-min. Study on the Mechanical Properties of Surrounding Rock in the Circumferential Collapse of Loess Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))

[9] 李 骏,邵生俊,李国良,等. 黄土隧道的湿陷变形规律及其对衬砌结构的作用[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):251-260. (LI Jun, SHAO Sheng-jun, LI Guo-liang, et al. Collapse deformation of loess tunnel and its effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(1):251-260. (in Chinese))

[10] 梁 燕,赵桂娟,谢永利,等. 黄土增湿变形的数值模型[J]. 建筑科学与工程学报,2007(3):43-46. (LIANG Yan, ZHAO Gui-juan, XIE Yong-li, LI Tong-lu, et al. Numerical Model of Loess Moistening Deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007(3):43-

46. (in Chinese))
- [11] 陈福江. 黄土隧道围岩含水率变化对隧道形态影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. (CHEN Fu-jiang. Study on the Tunnel's Modality Impact on Changes of Surrounding Rock Water Content at Loess Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [12] 邓国华, 邵生俊, 胡伟. 考虑 Q_3 黄土增湿特性的隧道围岩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007(8): 1455 – 1458. (DENG Guo-hua, SHAO Sheng-jun, HU Wei. Analysis on deformation of tunnel surrounding loess considering its moistening characteristics[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(8): 1455 – 1458. (in Chinese))
- [13] 田俊峰, 叶万军, 杨更社. 含水率及冻融循环对黄土隧道围岩变形规律影响研究[J]. 公路, 2015, 4: 271 – 276. (TIAN Jun-feng, YE Wan-jun, YANG Geng-she. Impact of moisture content and freeze-thaw cycle on rock deformation law of loess tunnel in Yangqu region [J]. Highway, 2015, 4: 271 – 276. (in Chinese)).
- [14] 公路隧道设计规范: JTGD70—2004[S]. 2004. JTGD70—2004. Code for Design of Road Tunnel: JTGD70—2004[S]. 2004.
- [15] 谢家杰. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报, 1964(6): 58 – 70. (XIE Jia-xiu. Earth pressure on shallow burial tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 1964(6): 58 – 70. (in Chinese))
- [16] 王春浩. 超大断面黄土公路隧道围岩压力计算方法分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 175 – 181. (WANG Chun-hao. Calculation Method for surrounding rock pressure of a loess highway tunnel with an extra-large section [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 175 – 181. (in Chinese))
- [17] 杨建民, 喻渝, 谭忠盛, 等. 大断面深浅埋黄土隧道围岩压力试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 2: 76 – 79. (YANG Jian-min, YU Yu, TAN Zhong-sheng, et al. Experimental research on the surrounding rock pressure of large sectional loess tunnel under deep and shallow submersion [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 2: 76 – 79. (in Chinese))
- [18] 王明年, 郭军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 54 – 58. (WANG Ming-nain, GUO Jun, LUO Lu-sen, et al. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high speed railway [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 54 – 58. (in Chinese))
- [19] 于丽, 吕城, 段儒禹, 等. 浅埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 69–76. (YU Li, LÜ Cheng, DUAN Ru-yu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow buried loess tunnel [J]. China railway science, 2019, 40(4): 69 – 76. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)