

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.034

富水黄土隧洞加固方式对其力学响应的影响

孙志杰¹, 袁杰², 宿钟鸣¹, 薛晓辉¹, 赵紫阳¹

(1. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044)

摘要: 依托某富水黄土隧洞, 应用有限元分析软件对常水位作用不同工况下洞周围岩渗流场和位移场进行了模拟, 对开挖过程中不同加固方式对洞周围岩的响应(渗流场、应力场和位移场)进行了研究。结果表明: 洞周加固体的渗透性能对围岩的渗流路径、孔隙水压力和流速都有较大影响, 对隧洞周围土体位移也有影响。在进行富水黄土隧洞注浆加固材料设计时, 既要考虑材料的阻水效果, 同时还要考虑加固体阻水后导致的土体孔隙水增加引起的土体抗剪强度的降低效应。

关键词: 渗流; 富水黄土隧洞; 加固; 变形

中图分类号: U457+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0172-06

Influences of Strengthening on Mechanical Response of Water-rich Loess Tunnels

SUN Zhijie¹, YUAN Jie², SU Zhongming¹, XUE Xiaohui¹, ZHAO Ziyang¹

(1. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region Shanxi

Transportation Research Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. China State Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Taking a water-rich loess tunnel as an example, the FEM software was adopted to simulate the influence of different strengthening methods on mechanical response of tunnel surrounding soil (seepage field and stress field and deformation field) in water-rich loess tunnel excavation. The influence of flow field characteristics and displacement field characteristics caused by variation of grouting-reinforcement structure permeability coefficient in ordinary water level was also analyzed. The results show that the permeability coefficient of grouting-reinforcement structure play an important role in the seepage path, pore water pressure and seepage velocity. It also has impacts on the displacement of surrounding rock. Therefore designs of grouting-reinforcement structure of water-rich loess tunnel should consider impacts of seepage-stress coupling effect. First, the waterproofing effect of grouting-reinforcement structure should be considered, otherwise, it will avoid the pore water pressure increasing by increase of waterproofing effect of grouting-reinforcement structure and the soil shear strength will reduce.

Keywords: seepage; water-rich loess tunnel; grouting-reinforcement; deformation

富水黄土隧洞开挖过程中, 渗水现象较为严重, 从掌子面渗出的水体在重力作用下最后基本都汇到作业面最低处仰拱底^[1], 严重降低了基底的承载能力。

隧洞施工时, 由于开挖形成了二次应力场, 同时开挖造成原始土体中地下水平衡的改变, 造成了渗

流场的改变及应力场的重分布。水的渗透力可能增加岩土体的孔隙度和连通性, 改变岩土体的渗透性, 使岩土体剪切变形和劈裂扩展, 影响岩土体稳定性, 最终导致岩土体强度降低^[2]。因此, 在进行水位线以下黄土隧洞施工时, 隧洞周边的水环境更应进行细致勘察, 以考虑隧洞渗流场与位移场相互作用对

隧洞支护结构的影响,采取有效加固措施确保隧洞安全施工和运营。

目前,对富水软岩隧洞施工多采用注浆加固方法,一方面提高围岩的自承载能力,另一方面封闭地下水入渗通道,在这方面国内有大量成功施工案例^[3-7]。

国内学者针对岩体的流-固耦合规律等也开展了大量的研究工作^[8-15],王金男等^[8]采用三维有限元法对盾构穿过大堤,隧洞、大堤加固前后各工况的渗流场进行了模拟。王道良^[9]模拟了连拱隧洞围岩渗透系数大小对渗流场特征的影响,并对常水位作用下隧洞渗漏水特点进行了研究。魏纲等^[10]对盾构出洞条件下地下水渗流造成涌砂涌水的灾害影响进行了分析。乔金丽等^[11]通过工程实例,应用软件集成可视化系统,对盾构隧洞开挖面的稳定性进行了渗流分析。邹金锋^[12]采用解析方向考虑水-力耦合时交通隧洞非线性解。杜朝伟等^[13]以复变函数和地下水水力学理论为基础,推导由围岩、注浆圈、衬砌混凝土组成的水下隧洞渗流场解析解。笔者^[14]也曾对支护结构不同渗透系数下黄土隧洞渗流场进行了初步分析^[13]。

综上所述,目前对富水黄土隧洞支护结构加固措施从渗流与应力相互作用的研究甚少。而黄土的水敏性是造成黄土强度急剧损失的最不利因素,当黄土隧洞处于富水环境中时,土体中的孔隙水处于封闭状态,整个地下水体处于平衡状态,几乎是静止,不会产生渗流^[14-15]。随着隧洞的开挖,洞周土体孔隙水压力、水的入渗路径、渗流速度怎样分布?土体位移场与无水隧洞位移场分布有何区别?同时,洞周不同加固材料对土体位移场和渗流场又有何影响?

基于此,本文综合考虑隧洞开挖应力边界与地下水入渗渗流边界条件,建立两车道富水黄土隧洞应力-渗流耦合数值模型,对隧洞在地下水渗流作用下注浆加固体抗渗性能对隧洞渗流场和围岩位移场的影响进行分析,以期对富水黄土隧洞注浆加固材料参数提供参考。

1 基本理论

对于二维饱和土体,流入微单元的水量等于流出的水量^[16],即

$$v_x dz + v_y dx = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx \quad (1)$$

即:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

根据达西渗流定律:

$$v_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \quad v_y = -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (3)$$

式中: H 为水头函数; k_x 、 k_y 分别为 x 方向、 y 方向的渗透系数。

将式(3)代入式(2),得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

根据变分原理和伽辽金(Galerkin)法,在渗流区域 Ω 中构造的泛函为:

$$I(H) = \iint_{\Omega} \left\{ S_s H \frac{\partial H}{\partial t} \right\} dx dz + \int_{\Gamma_2} q H d\Gamma + \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

假设单元形函数 N_i 由单元相应 k 个结点的位置坐标构成,划分渗流场 Ω 为 K 个独立单元 Ω_e ,则单元 e 内任一点水头为:

$$H(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^k N_i(\xi, \eta) H_i \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),用 $I^e(H)$ 表示单元 e 上的泛函,得到式(7):

$$I^e(H) = \iint_{\Omega_e} \left\{ S_s H \frac{\partial H}{\partial t} \right\} dx dz + \int_{\Gamma_2} q H d\Gamma + \iint_{\Omega_e} \left\{ \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} dx dz \quad (7)$$

对式(7)各项求导和极小值,得到:

$$\left\{ \frac{\partial I}{\partial H} \right\}^e = [K]^e \{H\}^e + [S]^e \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\}^e + [D]^e \{q\}^e + [P]^e \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\}^e \quad (8)$$

将上述单元泛函求微分并叠加,求极值,得到 N 个未知结点水头的方程组,用矩阵形式表示为:

$$[K]\{H\} + [S]\left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} + [D]\{q\} + [P]\left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} = \{F\} \quad (9)$$

其中: $\{F\}$ 为已知常数项,由已知结点得出。

对于稳定渗流,式(9)变为:

$$[K]\{H\} = \{F\} \quad (10)$$

展开:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ K_{m1} & \cdots & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_m \end{Bmatrix} = [K]^e \{H\}^e \quad (11)$$

其中:

$$K_{ij} = \iint_{\Omega_e} \left\{ \left[k_x \frac{\partial N_k}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_z \frac{\partial N_k}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \right\} dx dz$$

2 隧洞加固方式对力学响应的分析

2.1 模型建立

依托工程为某高速公路富水黄土隧洞,断面型式为两车道断面,隧址区地层上层以新黄土、饱和黄土和古土壤为主的上更新统地层,下层以老黄土为主的中更新统地层。隧洞穿越层主要为以老黄土为主的中更新统地层,该层土体含水率达到饱和,其承载力小,抗剪强度低,对施工极为不利。

本文采用有限元软件进行模拟分析,考虑到边界效应对计算结果的影响,水平方向模型左右边界范围取值>4倍洞径,模型水平向取240m;竖直方向模型底部高度取值>4倍洞高,模型顶部按隧洞实际埋深选取,模型竖向取120m。模型有限元网格如图1所示。

应力边界条件:底部边界约束竖向、水平位移,水平边界约束水平位移,顶部边界不约束^[14]。

渗流边界条件:地下水位距模型上表面30m,模型两侧距模型上表面以下30m~90m范围内取总水头60m。隧洞开挖面取压力水头为零。

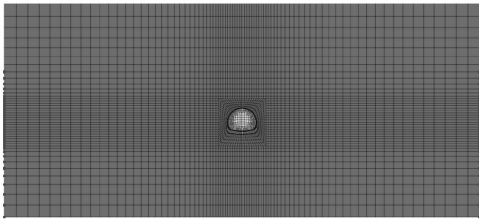


图1 二维隧洞应力-渗流网格图

2.2 模型参数

计算模型围岩参数根据隧址区所取原状土室内三轴试验获得。土体本构模型为摩尔-库仑模型,初期支护为线弹性模型,均采用平面应变单元,模型材料的物理力学参数见表1。

表1 材料物理力学参数

参数	E/MPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	μ	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
围岩	130	18.4	0.28	86.4	32
加固区	950	20.6	0.24	180.0	39
支护	27	23.0	0.20	—	—

为分析支护结构加固效果,模型通过调整加固体渗透系数来体现加固区的阻水效果。土体的渗透

系数通过现场试验获得, $k=0.1\text{ m/h}$ 。加固区渗透系数 $k'_1=10\%k$ 、 $k'_2=1\%k$ 、 $k'_3=1\%ck$ 、 $k'_4=0.1\%ck$,共4个工况。加固体渗透系数 k' 取值如表2所示。

表2 加固体各工况渗透系数

工况	一	二	三	四
渗透系数 $k'/(m\cdot h^{-1})$	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}
与土体 k 比值/%	10	1	0.1	0.01

3 模拟结果

3.1 渗流场特征分析

研究常水头条件下隧洞开挖引起的洞周渗流场变化特征,对不同加固参数(加固体渗透系数)围岩渗流路径、孔隙水压力、渗流速度的分布特点及变化规律进行对比分析,揭示加固体渗透系数对渗流特性的影响。

不同工况下隧洞洞周关键点渗流路径分布如图2。

当围岩未加固时(图2(a)),拱部无外部补给水体,拱脚水体由两侧地下10m深水源补给;加固体渗透性较大时(图2(b)),拱部无外部补给水体,拱脚由两侧地下约40m深水体水平渗入;当渗透系数减小到一定程度(图2(c)、图2(d)),拱顶水体由上方地表入渗,拱脚由底层水体向上渗入。

仰拱部位水体渗流路径全部由仰拱下部向上渗入。当无加固时(图2(a)),向仰拱部位入渗水源水平分布长度约为70m,随着加固体渗透系数的减小,入渗水源水平分布范围减小。

由图2可见,加固体渗透系数对隧洞拱部的渗流路径影响程度大于仰拱的渗流路径。

不同工况洞周孔隙水压力云图如图3所示。由于孔隙压力分布云图形式类似,仅列出无加固和加固体渗透系数 $k=1\times 10^{-5}$ 工况。

隧洞周边孔隙水压力随初支渗透系数减小而增大。加固体的抗渗性能对洞周围岩体孔隙水压力的影响较大。当洞周围岩未加固时,地下水从洞室净空及时排出,孔隙水压力等值线在洞周的平行趋势被打破,如图3(a)。在加固效果较好(加固体渗透系数较小)的情况下,加固体可以很好封闭地下水渗流路径,孔隙水压力等值线趋于水平,如图3(b)。

不同工况下渗流速度分布如图4所示。

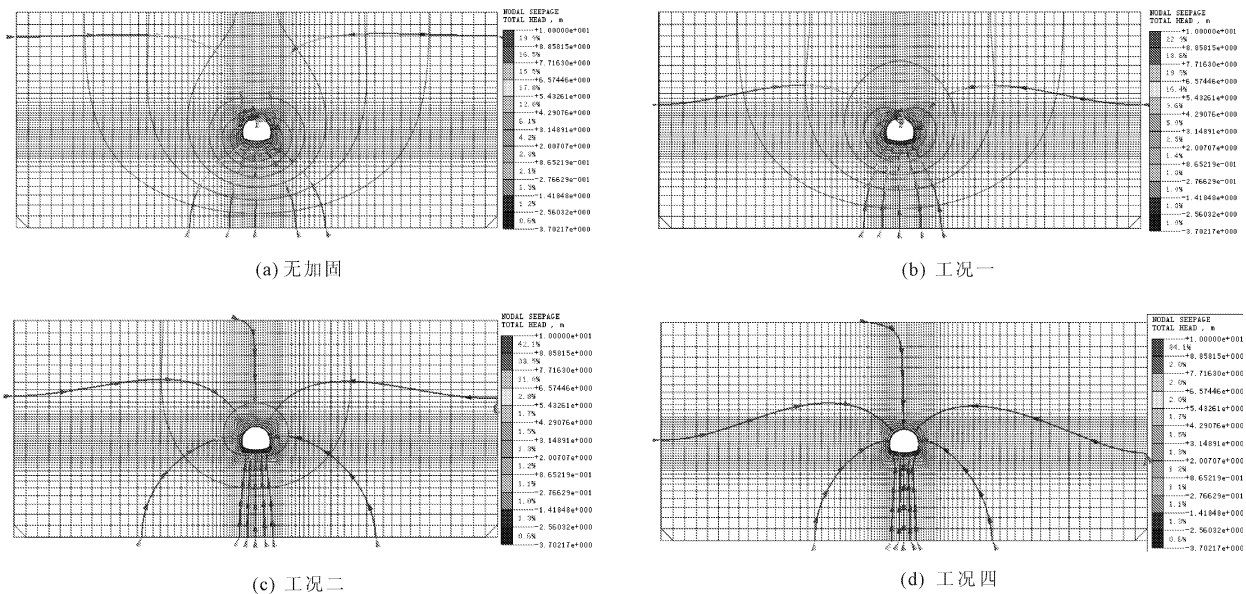


图 2 洞周渗流路径分布图

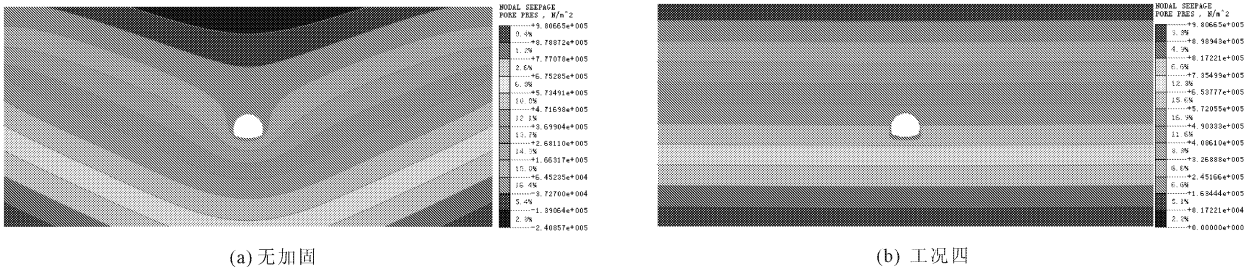


图 3 孔隙水压力分布

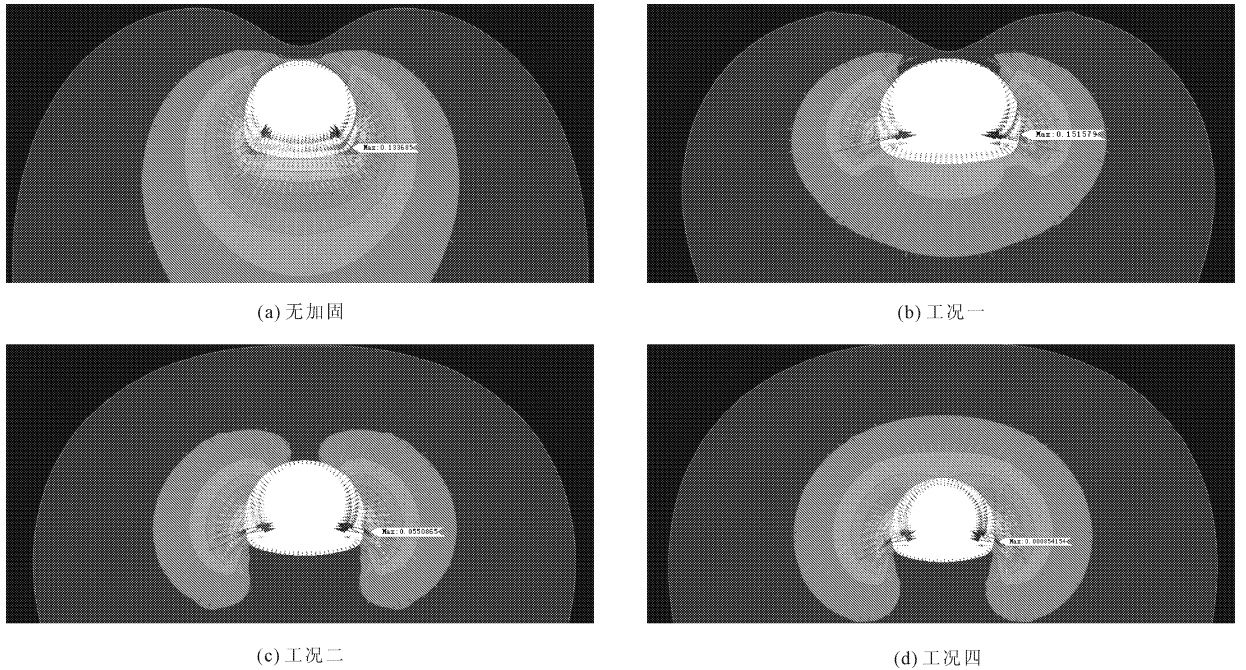


图 4 洞周渗流速度分布

如图 4 所示,当洞周围岩无加固时,较大渗流流速分布于仰拱部位,最大值在仰拱拱脚部位,为 0.134 m/h,最大流速方向为拱顶方向。围岩加固后,最大渗流流速依然出现在仰拱拱脚部位,随着渗透系数

减小,最大流速依次为 0.15 m/h、0.055 m/h、0.0085 m/h。由于仰拱部位进行了后期二次注浆加固,仰拱部位阻水效果较其他部位更强。伴随固体渗透系数减小,边墙和拱部的流速进行重分布,边墙和拱部的流速差异逐渐减小。

3.2 位移场特征分析

除渗流场外,还对比分析了渗流和应力耦合作

用下加固体对围岩竖向位移和塑性区的影响。

不同工况下围岩关键点距洞周不同深度处竖向位移如图 5 所示,隧洞围岩最大竖向位移分布在隧洞拱部和仰拱部位。

分析图 5,加固可以从一定程度上减小围岩竖向位移。但加固对仰拱部位围岩变形的约束依旧不明显,致使仰拱部位进行了二次注浆加固。

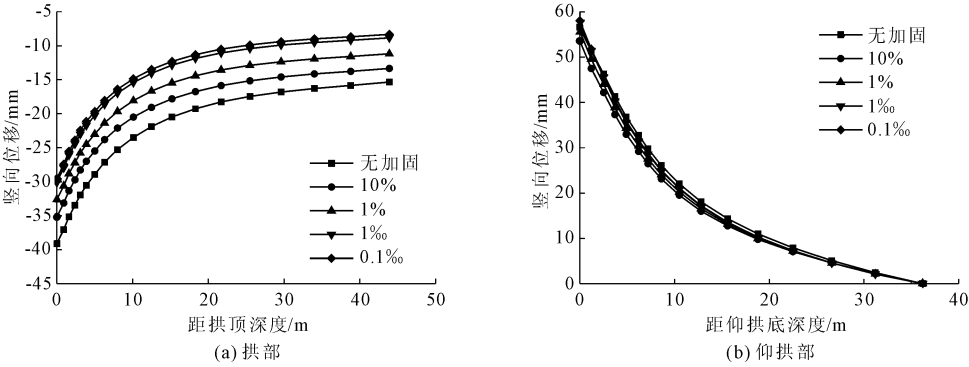


图 5 隧洞不同部位地中位移

加固体渗透系数对拱顶和仰拱竖向位移的变化规律不同。拱顶部位竖向位移随加固体渗透系数减小而减小,但当 $k < 1 \times 10^{-4}$ m/h 时,渗透系数的减小对拱顶竖向位移影响较小。仰拱部位竖向位移随加固体渗透系数减小而增大,但增幅较小。因为随着仰拱部位二次注浆加固体阻水效果增强,导致该部位孔隙水压力增大,致使该部位仰拱隆起增加。

拱顶和仰拱处竖向位移与渗透系数关系曲线如图 6 所示。

综合图 5、图 6 看出,拱顶沉降随加固体渗透系数的减小而减小,仰拱隆起随加固体渗透系数的减小而增大,但当 $k < 1 \times 10^{-4}$ m/h 时,渗透系数的减

小对竖向位移影响幅度降低。隧洞围岩塑性区分布云图如图 7 所示。

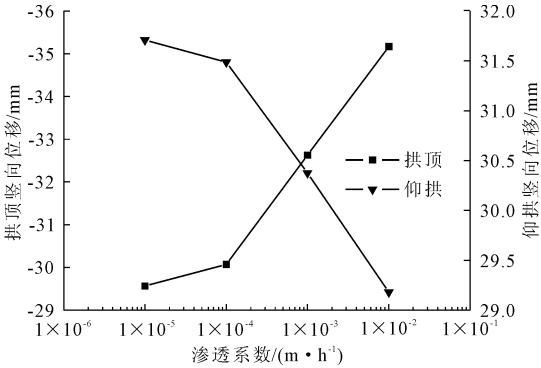


图 6 洞周竖向位移和渗透系数曲线图

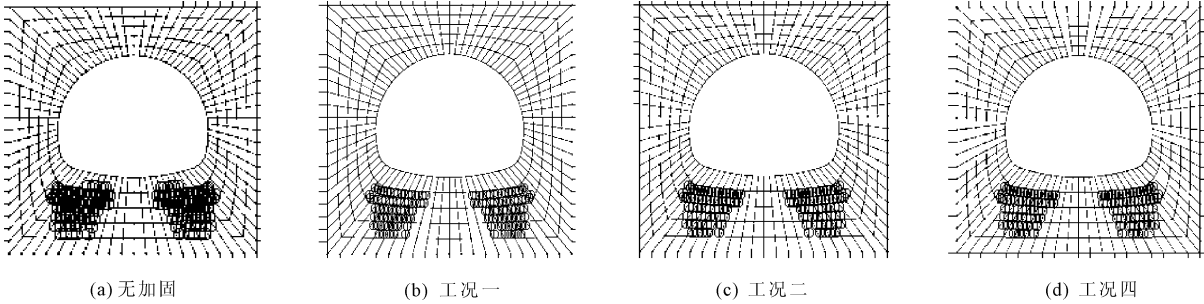


图 7 塑性区分布图

如图 7 所示,隧洞围岩塑性区主要发生在仰拱两侧拱肩部位。未加固时,仰拱拱肩临隧洞侧有少部分区域发生破坏。加固后,工况一、工况二塑性区范围未明显改善,但未出现破坏区域。工况三在塑

性区域的远离隧洞侧有少部分区域破坏,分析是由于仰拱加固体渗透系数减小,导致仰拱阻水性能提高,外侧水不能入渗,孔隙水压力增大,土体有效应力下降,土体抗剪强度下降,导致塑性区扩展。

4 结 论

采用有限元数值模拟方法,依托某高速公路两车道富水黄土隧洞,分别针对隧洞周边围岩未加固和不同加固条件多个工况,对隧洞支护结构不同加固效果进行了模拟分析。对富水黄土隧洞在地下水渗流作用下注浆加固体抗渗性能对隧洞渗流场和围岩位移场的影响进行了研究,结果表明,洞周加固体的渗透性能对洞室周边土体的渗流路径、孔隙水压和流速都有较大影响,对洞周围岩竖向位移也有影响,具体表现为:

(1) 加固体渗透性对隧洞拱部的渗流路径影响大于仰拱部位。

(2) 由于仰拱部位进行了后期二次注浆加固,仰拱部位阻水效果较其他部位更强。伴随加固体渗透系数减小,边墙和拱部的流速进行重分布,边墙和拱部的流速差异逐渐减小。

(3) 仰拱隆起随加固体渗透系数的减小而增大,拱顶沉降随加固体渗透系数的减小而减小。但结构渗透性对围岩位移影响有一定范围,渗透系数减小到一定程度,对围岩位移影响减弱。

综上,在进行富水黄土隧洞注浆加固材料设计时,既要考虑材料的阻水效果,同时还要考虑加固体阻水后导致的土体孔隙水增加引起的土体抗剪强度的降低效应。

参考文献:

- [1] 薛富春,马建林,颜利平,等.客运专线富水黄土隧洞隧底振动特性试验研究[J].振动与冲击,2010,29(2):202-207.
- [2] 靳晓光,李晓红,张燕琼.越江隧洞施工过程的渗流-应力耦合分析[J].水文地质工程地质,2010,37(1):62-67.

- [3] 孙会想,沈才华.玻璃纤维锚杆注浆加固掌子面效果研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):131-135.
- [4] 肖三民.浅谈富水黄土隧洞渗漏水处理[J].山西建筑,2009,35(4):335-336.
- [5] 庞新刚.黄土隧洞塌方冒顶处治方案浅谈[J].山西交通科技,2013(5):33-34.
- [6] 李玉平.太平隧洞黄土地层帷幕注浆技术的应用[J].公路隧洞,2010(3):31-33.
- [7] 来弘鹏,康佐,谢永利,等.地铁区间隧道黄土地层注浆预加固技术研究[J].中国铁道科学,2014,35(1):47-54.
- [8] 王金男,马莹,梁亮.某长江大堤盾构隧道变形裂缝渗流控制加固方案[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):52-55.
- [9] 王道良,刘新荣,陈山泉,等.连拱隧道围岩渗透系数对渗流场影响的数值模拟研究[J].西华大学学报(自然科学版),2011,30(5):106-109.
- [10] 魏纲,郭志威,魏新江,等.软土隧道盾构出洞灾害的渗流应力耦合分析[J].岩土力学,2010,31(Z1):383-387.
- [11] 乔金丽,张义同,许春彦.考虑渗流的盾构隧洞开挖面稳定性分析[J].水文地质工程地质,2009,36(1):80-85.
- [12] 邹金锋.考虑水-力耦合时交通隧洞非线性解析[J].工程力学,2011,28(12):105-111.
- [13] 杜朝伟,王梦恕,谭忠盛.水下隧洞渗流场解析解及其应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3567-3573.
- [14] 孙志杰,申俊敏,马林.考虑渗流效应的黄土隧洞围岩稳定性分析[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集第Ⅱ册.北京:工程力学杂志社,2013:449-456.
- [15] 吉武军.黄土隧洞工程问题调查分析[J].岩土力学,2009,30(Z2):387-390.
- [16] 刘杰.土的渗透稳定与渗流控制[M].北京:水利水电出版社,1992.