

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.011

盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响

叶 治¹,付岸然²,刘华北¹

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院,湖北 武汉 430074; 2. 湖北建科国际工程有限公司,湖北 武汉 430014)

摘要:通过建立三维隧道数值模型研究渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响。基于渗流侵蚀试验,应用强度及刚度折减法定性模拟渗流侵蚀过程;建立盾构隧道施工模型,通过对比数值模型与现场实测数据验证数值模型的可靠性;研究渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响。结果表明:拱顶部位渗流侵蚀引发的地表沉降量呈指数增长趋势;侵蚀过程的卸载作用使管片明显上抬,管片错台量逐渐增大;渗流侵蚀扩散范围越大,地表沉降及管片结构变形越大。

关键词:盾构隧道;渗流侵蚀;强度及刚度折减法;流固耦合;地表沉降;管片变形

中图分类号:U457 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)03-0279-09

Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling

YE Zhi¹, FU Anran², LIU Huabei¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Jianke International Engineering Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: By establishing the three-dimensional numerical model of tunnel, this study investigated the effect of seepage erosion on ground settlement and structural deformation. Firstly, the strength and stiffness reduction approaches were adopted to qualitatively simulate the erosion process based on the triaxial erosion tests. Then a comparison of ground settlements between the field monitoring and the numerical result was conducted to verify the reliability of the numerical approach. The effects of seepage erosion on ground settlement and structural deformation were investigated in the end. The results indicated that the ground settlement induced by the progressive erosion process increased exponentially. The linings were pushed upward due to the erosion-induced unloading as seepage erosion occurred on the tunnel crown, and then resulted in a gradual increase of dislocation of segment joints. The extension of erosion region increased the ground settlement and structural deformation according to the parametric study.

Key words: shield tunneling; seepage erosion; stiffness and strength reduction method; fluid-solid coupling; ground settlement; lining deformation

渗流侵蚀是指不同级配的土体由于其松散特性,细颗粒在渗流力的作用下逐渐流失的渗透破坏现象。盾构隧道在高水压粉细砂层施工过程中容易引发渗流侵蚀现象,盾尾刷磨损使盾尾出现渗流侵蚀的风险较大,大量砂土流失不仅使隧道结构失去支撑,引起较大管片变形,还会导致地表出现较大的沉降。国内外有很多关于隧道渗流侵蚀灾害的报道,并提出各种防治渗流侵蚀灾害的施工技术及措施^[1-3]。有些学者通过数值模拟研究了盾构隧道涌水对地表沉降以结构内力的影响^[4]。涌水常常携带着大量细砂,水土流失使得隧道后方产生侵蚀空洞,很多学者通过试验和数值模拟方法研究侵蚀空洞对隧道的影响。张成平等^[5]结合试验和数值模拟研究了隧道背后空洞对衬砌内力以及安全状态的影响;徐晨等^[6]通过数值方法研究了高水压下的衬砌背后空洞对结构受力的影响;王士民等^[7]采用缩尺试验研究了盾构隧道侵蚀空洞对结构受力的影响。

一些学者通过三轴侵蚀试验研究不同级配土体在侵蚀过程中的力学行为。郑刚等^[8]结合试验及数值

作者简介:叶治(1990—),男,博士研究生,主要从事隧道及地下工程的研究。E-mail: yz1990@hust.edu.cn

通信作者:刘华北,教授。E-mail: hbliu@hust.edu.cn

引用本文:叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287.

YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 279-287.

方法研究了漏水漏沙灾害的演变过程;Chang 等^[9-10]通过应力控制方法来研究不同应力状态下土体的侵蚀过程;Ke 等^[11]通过试验研究了饱和砂土的弥散特性及力学响应。从试验结果可知,侵蚀现象会使土体强度和刚度的变化,而侵蚀过程还与水力梯度密切相关。

还有学者采取数值方法研究渗流侵蚀微观机理。张冬梅等^[12-13]结合离散元与有限元方法研究了二维隧道渗流侵蚀对地表沉降的影响;基于 Galerkin 有限元法,胡亚元等^[14]研究了三相耦合下的渗流侵蚀管涌机制;Hicher^[15]基于均一理论,利用离散元方法评估颗粒材料在侵蚀作用下的力学行为;Sterpi^[16]提出的侵蚀土体的密度降低法;Cividini 等^[17]研究了侵蚀过程对地表沉降的影响;Zhang 等^[18-19]基于热力学以及损伤力学,通过引入损伤系数研究渗流侵蚀对地表沉降的影响,并利用强度及刚度折减法研究侵蚀过程对土坝的影响^[20]。

近年来,国内外有很多关于盾构隧道施工过程中发生渗流侵蚀事故的报道,进而引发一系列次生灾害,如地表塌陷导致道路损坏,隧道结构损伤等,造成了较大的经济损失以及人员伤亡。盾构在高水压粉细砂层掘进过程中引起的渗流侵蚀灾害是最近几年的研究热点,由于渗流侵蚀过程的复杂性,目前工程界及学界对其尚存在模糊认识。

1 数值模拟方法

利用有限元软件 Abaqus 建立三维盾构隧道模型^[4,21],研究盾尾拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响。

1.1 盾构隧道施工模拟

利用 Mohr-Coulomb 本构模型模拟土体的力学行为,通过逐步杀死和激活相应的构件模拟盾构隧道施工过程,逐步激活盾构机支护开挖土体。利用薄层单元模拟盾构超挖^[21],为保持隧道开挖面的稳定,开挖面支护力稍大于侧向水土压力,通过对盾尾添加注浆层来填补因盾构超挖产生的间隙。通常采用压力注浆法^[4]或孔压注浆法^[21]模拟盾尾同步注浆,本研究采用孔压注浆法模拟同步注浆。图 1 为管片模型,每环管片由 3 个标准块 A1、A2、A3,2 个相邻块 B1、B2,以及封顶块 K 组成。研究表明,纵向钢筋和径向箍筋对管片变形的作用较小^[21],因此本文只考虑环向钢筋,并模拟环向接头的橡胶垫层。

利用孔压实体单元模拟饱和土体,注浆体及盾构机均采用实体单元模拟,环向钢筋附近的混凝土用实体单元来模拟,而剩余混凝土采用厚壳单元模拟^[21],接头螺栓和环向钢筋分别用梁单元和面单元模拟^[21],环向接头橡胶垫层采用实体单元模拟,采用混凝土损伤本构模型(CDP)模拟管片损伤,采用理想弹塑性模型模拟螺栓屈服。注浆层与管片,以及管片接头间的相互作用均采用法向硬接触以及切向罚函数模拟,注浆层外表面与周围土体绑定连接,螺栓两端以及钢筋都嵌入相应的管片混凝土单元中^[21]。

1.2 渗流侵蚀过程模拟

基于渗流侵蚀试验,提炼土体在侵蚀过程中的力学机理,应用强度及刚度折减法,定性地模拟侵蚀土体的力学响应。

Ke 等^[11]通过试验发现砂土发生侵蚀现象后,土体强度明显降低,据此提出了砂土在渗流侵蚀过程中的强度折减曲线。基于 Ke 等^[11]的结论,将强度折减法假定为

$$\varphi = \varphi(i) = \beta \varphi_0 \tag{1}$$
$$\beta = \begin{cases} 1 & i < i_{\text{start}} \\ A_0 \cos\left(\pi \frac{i - i_{\text{start}}}{\Delta i}\right) + B_0 & i_{\text{start}} \leq i < i_{\text{end}} \\ -A_0 + B_0 & i \geq i_{\text{end}} \end{cases}$$
$$\Delta i = i_{\text{start}} - i_{\text{end}}$$

其中

式中: φ_0 ——摩擦角; i ——施加于土样的水力梯度; φ_0 ——初始摩擦角; β ——强度比; A_0 、 B_0 ——控制强度折

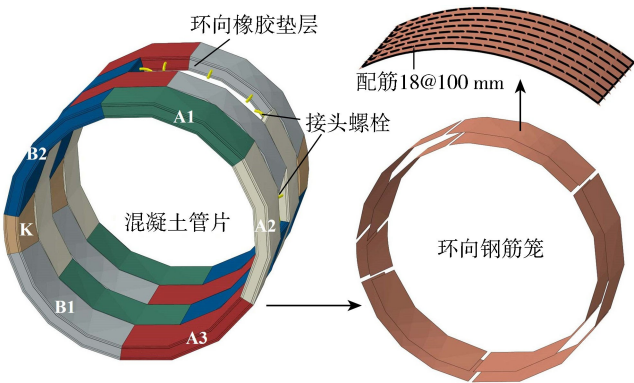


图 1 细化的管片模型
Fig. 1 Refined lining model

减的参数; Δi ——相对水力梯度; i_{start} ——初始水力梯度; i_{end} ——终止水力梯度,其值控制着粒土的流失速率。

Chang^[9]通过三轴渗流侵蚀试验研究侵蚀土体在不同应力状态下的力学响应,本研究基于 Chang^[9]试验结果,利用胡克定律推导 4 组侵蚀试验的土体刚度变化,结果如图 2 所示(图中 η 为应力比, p' 为平均有效应力)。可知侵蚀过程中较大的平均有效应力会产生相对较小的土体变形,较大的偏应力会产生相对较大的土体变形。

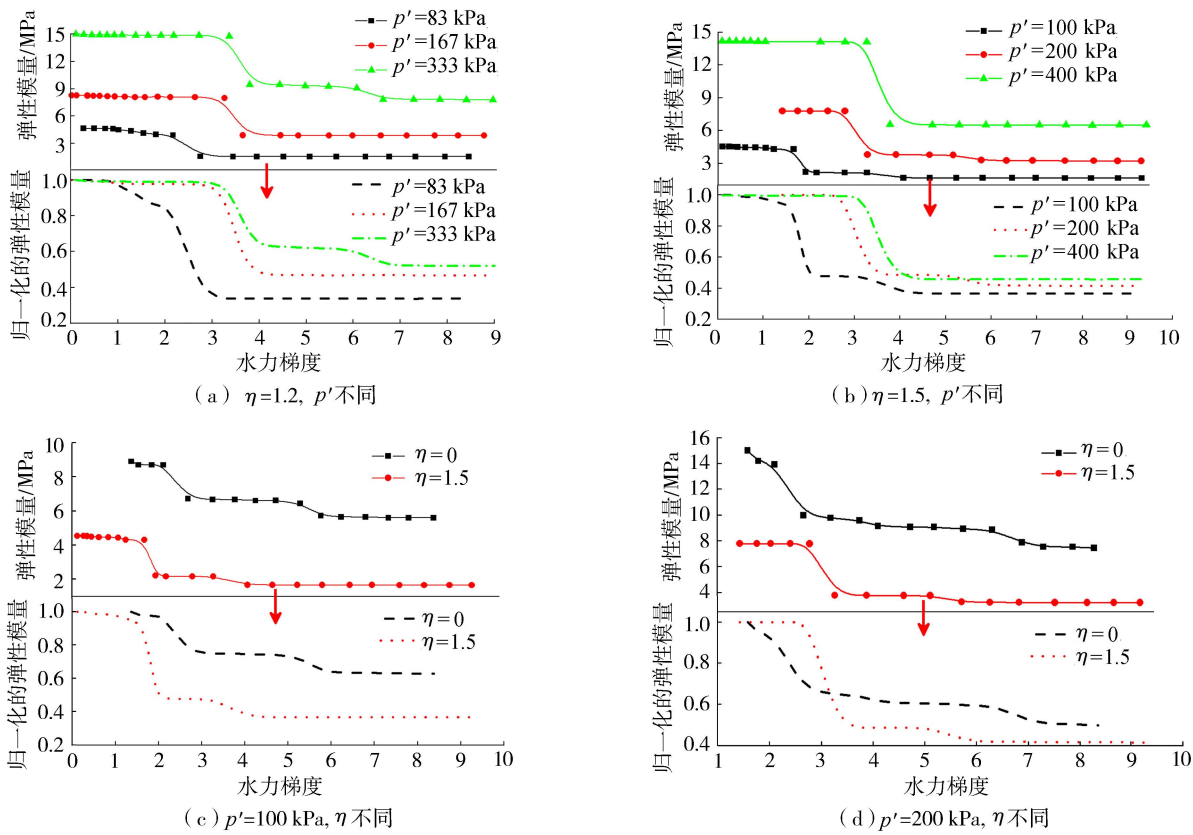


图 2 侵蚀土体弹性模量及归一化弹性模量的变化

Fig.2 Evolution of modulus and normalized modulus during seepage erosion process

基于此结论,综合土体侵蚀过程的 3 个主要影响因素,即水力梯度、平均有效应力及应力比,应用刚度折减法来模拟土体在侵蚀过程中的变形。

$$E = E(i, p', \eta) = \alpha E_0 = E_0 (1 - D) \tag{2}$$

其中

$$\eta = \frac{q}{p'}$$
$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$
$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$
$$D = \begin{cases} 0 & i < i_{\text{start}} \\ \left(\frac{i - i_{\text{start}}}{\Delta i}\right)^a \left(m - \frac{p'}{p'_{\text{ref}}}\right)^b \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} + n\right)^c & i_{\text{start}} \leq i < i_{\text{end}} \\ \left(m - \frac{p'}{p'_{\text{ref}}}\right)^b \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} + n\right)^c & i \geq i_{\text{end}} \end{cases}$$

式中: E ——土体在侵蚀过程中的变形; E_0 ——土体初始变形; η ——应力比; p' ——平均有效应力; q ——偏应力; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——最大、中间、最小主应力; α ——刚度比; D ——刚度折减系数; p'_{ref} 、 η_{ref} ——平均有效应力以及应力比的参考值; m 、 n ——平均有效应力和应力比对刚度折减的影响; a 、 b 、 c ——控制水力梯度、平均有效

应力及应力比对侵蚀过程的影响参数。

以上综合考虑了侵蚀土体强度及刚度的变化,可通过 Abaqus 子程序 USDFLD 来实现。根据试验结果^[9],假定初始水力梯度 i_{start} 与平均有效应力服从线性关系,当水力梯度小于初始水力梯度时,不会引发侵蚀现象,而当水力梯度大于初始水力梯度时,会引发细颗粒的流失,土体的强度与刚度将进行相应的折减,而当水力梯度大于终止水力梯度 i_{end} 时,土体的强度及刚度将保持稳定,意味着不再有细颗粒流失,侵蚀土体力学特征的演化假设服从式(1)和式(2)形式。

图3为本文提出的方法(以下简称“本文方法”)模拟结果与侵蚀试验结果^[9]对比。由图3可知,提出的数值方法与试验结果基本吻合,说明刚度折减法能够定性模拟侵蚀土体的变形特性。

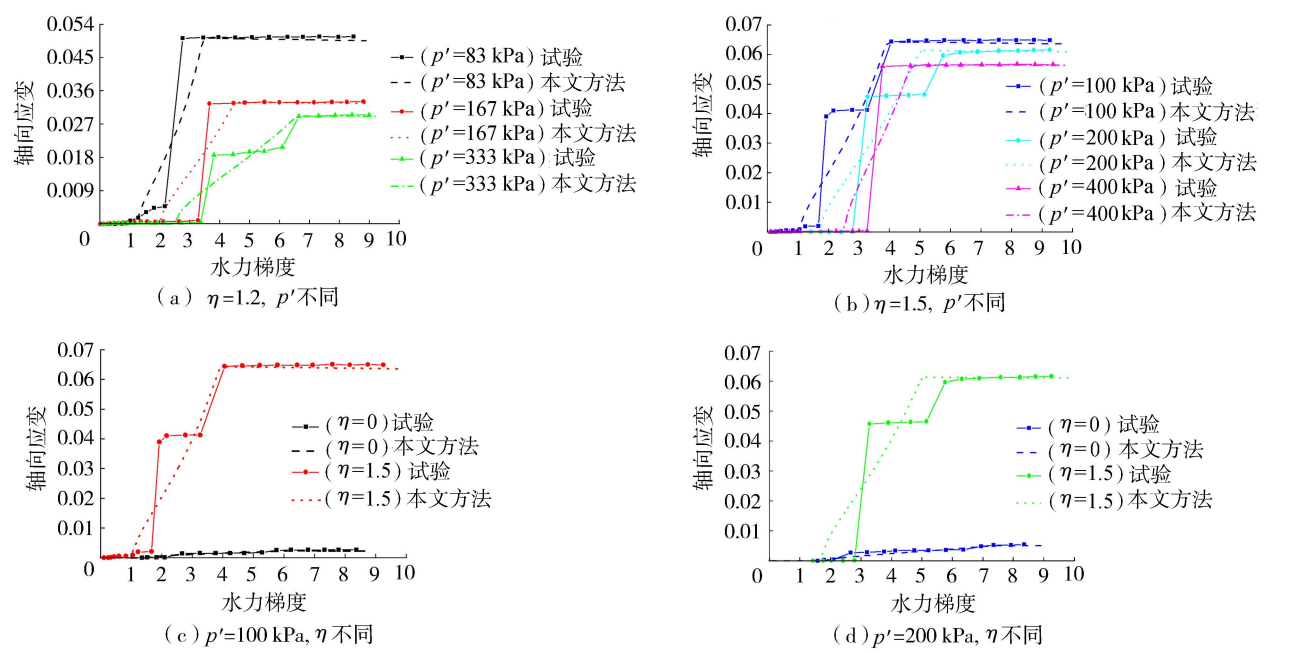


图3 本文方法模拟结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison of the proposed approach with experimental results

2 数值模型的建立

2.1 工程概况

以武汉某盾构隧道区间为研究背景,对施工期间隧道拱顶处发生渗流侵蚀事故进行案例研究,如图4所示,盾构掘进区间位于浅水湖附近,水位高度与地表基本持平,盾构隧道的设计线路需穿越粉砂层(S-5),隧道埋深为20 m左右。基于此案例研究渗流侵蚀事故对盾构隧道的影响。

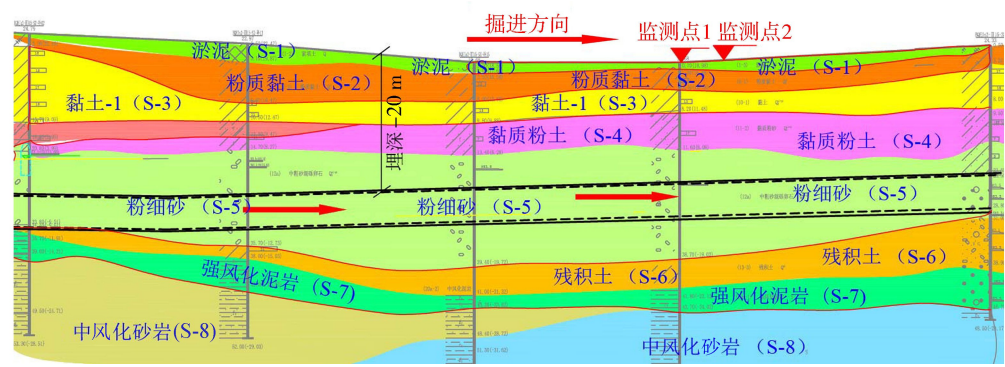


图4 盾构隧道区间土体分层

Fig.4 Soil profile in shield tunnelling section

2.2 数值模型

图5为有限元模型,模型的长、宽、高分别为90 m、150 m、60 m。约束住模型四周的法向位移,并固定模

型底部,由于盾构掘进区间位于湖边,因此将模型顶部的孔隙水压力边界设置为 0。每环管片宽度为 1.5 m,根据现场实际施工情况,因此将数值模型中每一分析步的掘进长度假定为一环,且时长设为 1 h。正常掘进过程分为 36 步,而假设渗流侵蚀过程为 30 h。

土体从上往下由八层组成,分别为淤泥(S-1)、粉质黏土(S-2)、黏土(S-3)、黏质粉土(S-4)、粉细砂(S-5)、残积土(S-6)、强风化泥岩(S-7)、中风化砂岩(S-8)。通过整理现场勘探报告,得到土体基本参数,Mohr-Coulomb 模型参数如表 1 所示。

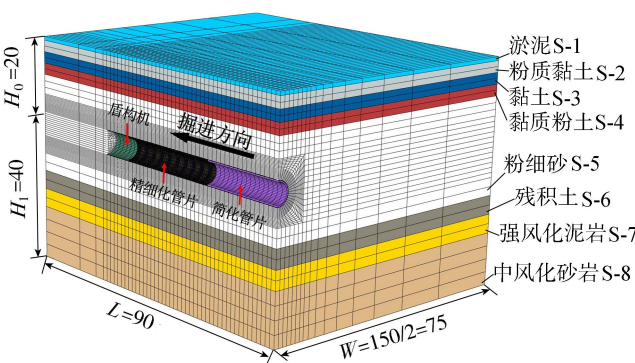


图 5 隧道模型(单位:m)
Fig.5 Tunnel model (units: m)

表 1 土层基本力学参数
Table 1 Basic mechanical parameters of soil layers

土层编号	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	渗透系数/(m·s ⁻¹)
S-1	1	1 850	879	0.36	8	18	1.5×10 ⁻⁷
S-2	3	1 970	10 050	0.28	65	29	1×10 ⁻⁸
S-3	3	1 950	10 281	0.31	36	10	3×10 ⁻⁷
S-4	3	1 980	11 298	0.30	10	34	5×10 ⁻⁶
S-5	26	2 100	12 218	0.30	5	30	1×10 ⁻⁵
S-6	5	1 970	39 519	0.29	16	24	1×10 ⁻⁷
S-7	5	1 980	81 940	0.29	40	30	2×10 ⁻⁸
S-8	14	2 100	101 943	0.30	43	25	1×10 ⁻⁸

隧道开挖面顶部支护力设为 400 kPa,竖向梯度设为 13 kPa/m;将注浆体顶部的孔隙水压力设为 250 kPa,其竖向梯度设为 10 kPa/m^[21]。管片接头间的摩擦系数设为 0.62,注浆体和管片外环的摩擦系数设为 0.01。将初始 16 环管片环假定为线弹性且简化为连续圆环,其刚度折减系数设为 0.7^[21]。将后 20 环管片进行了细致模拟,CDP 模型的参数来自文献[21],螺栓屈服应力假定为 500 MPa,其他模型参数见表 2。

表 2 数值模型参数
Table 2 Parameters of numerical model

模型部分	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	外径/m	内径/m
盾构机	7 850	210 000	0.125	6.400	6.2
超挖层	2 000	800	0.300	6.480	6.4
注浆层	3 000	50	0.200	6.400	6.2
管片	3 000	40 850	0.300	6.200	5.5
橡胶垫层	2 500	4.41	0.125	6.100	5.6
螺栓	7 850	210 000	0.125	0.030	
钢筋	7 850	210 000	0.125	0.018	

盾构隧道施工期间,盾尾刷的磨损导致其止水性能降低,极易诱发水砂涌入隧道。由于侵蚀现象使得盾尾周围土体出现较大变形,土体对隧道结构的支撑力减小,导致盾尾管片出现较大错台,如若未及时采取相应的补救措施,将会使地表沉降量急剧增大,导致管片发生严重变形。

渗流侵蚀区域在隧道横向及纵向逐渐扩散,本研究将盾尾拱顶处 A 点作为起始涌水点,假设涌水区域在隧道纵向及环向上均随时间线性拓展,结合强度和刚度折减法来模拟渐进渗流侵蚀过程。

假设盾尾拱顶 A 点涌水速率随时间线性增加,因此 A 点涌水速率可表示为

$$v = \frac{v_0}{t_0}t \quad 0 \leq v_0 \leq v_{\max}$$

(3)

式中:v——涌水速率;v₀——A 点的涌水速率;t——时间;t₀——初始时刻。

假设渗流侵蚀区域在隧道纵向上随时间线性增加,其表达式为

$$L = \frac{L_0}{t_0}t \quad 0 \leq L_0 \leq L_{\max}$$

(4)

式中:L——渗流侵蚀区域在隧道纵向上的长度;L₀——在 t₀ 时刻涌水区域在纵向延伸长度。

同样假设渗流侵蚀区域的在隧道环向上随时间线性增加,其表达式为

$$\theta = \frac{|\theta_0|}{t_0}t \quad |\theta_0| \leq \theta_{\max} \tag{5}$$

式中: θ ——在隧道环向上随时间线性增加的角度; θ_0 ——在 t_0 时刻隧道环向的角度。

在 t_0 时刻,涌水区域在纵向延伸长度为 L_0 ,横截面方向的角度为 $2\theta_0$,因此涌水区域内涌水速率的空间分布为

$$v = v_0 \left(1 - \frac{v_{\max}}{v_0} \frac{|\theta|}{\theta_{\max}}\right) \left(1 - \frac{v_{\max}}{v_0} \frac{L}{L_{\max}}\right) \quad |\theta| \leq \theta_0, 0 \leq L \leq L_0 \tag{6}$$

式中: $v_{\max}$ ——涌水速率最大值; $\theta_{\max}$ ——隧道环向角度最大值; $L_{\max}$ ——隧道纵向上长度最大值。

隧道拱顶处在隧道纵向涌水速率分布如图6(a)所示,在 t_0 时刻,拱顶处($\theta=0$)侵蚀区域的纵向长度为 L_0 。隧道盾尾处($L=0$)的环向侵蚀角度为 $2\theta_0$,涌水速率在极坐标系下的空间分布形式如图6(b)所示,渐进涌水过程可通过 Abaqus 子程序 UFLOW 来实现。参考案例中假定 A 点处最大涌水速率为 $9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。假定侵蚀区域在环向及纵向的延伸范围分别为 $2\theta_{\max} = 180^\circ, L_{\max} = 18 \text{ m}$ 。

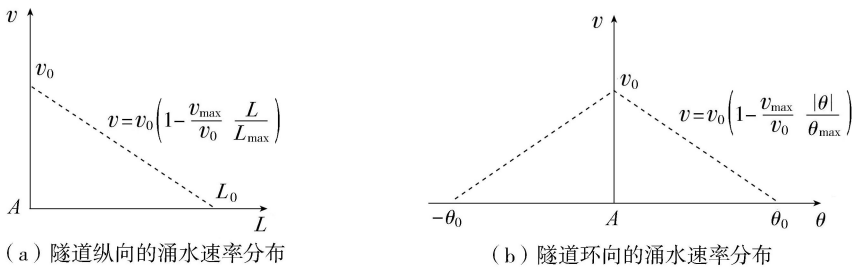


图6 盾尾拱顶处的涌水边界条件

Fig. 6 Gushing water boundary on tunnel crown of shield tail

式(1)和式(2)中不同的参数值代表着级配不同的砂土。通过假设强度折减率与 Ke 等^[11]试验结果的折减率相同,得到式(1)中的参数,通过调整侵蚀土体的刚度比 α 使其与试验结果^[9]基本保持一致,得到式(3)中的参数。侵蚀土体的参数为: $A_0=0.4, B_0=0.6, \Delta i=2.5, p'_{\text{ref}}=1\,000 \text{ kPa}, \eta_{\text{ref}}=10, m=1, n=0.85, a=0.5, b=0.5, c=0.5$ 。

3 结果分析

3.1 无渗流侵蚀情况的地层变形

图7为盾构隧道在正常掘进36环后的土体沉降,地表横向轴线F—F的沉降变化如图8(a)所示,其值逐渐增大,最大沉降值为7.4 mm,图8(b)所示的是隧道正上方轴线B—B的地表沉降,较大的开挖面支护力使开挖面前方土体出现一定隆起,盾构超挖引起的土体扰动使得地表沉降逐渐增大。

图9为正常掘进过程中地表监测点的沉降变化,在盾构机经过监测点之前,较大的支护力使土体出现上抬,当盾构开挖面经过监测点正下方时,监测点沉降速率增大,当盾构驶离监测点25 m左右,地表沉降趋于稳定。现象监测与数值结果的趋势基本一致,表明了数值方法的可靠性^[4]。

3.2 盾尾渗流侵蚀对地层变形及结构变形的影响

盾构隧道掘进36环后,假定盾尾拱顶处出现渗流侵蚀事故。大量的水体涌入隧道,使得盾尾处的孔隙水压力显著降低,进而导致盾尾上方土体出现如图10(a)所示的沉降模式,图10(b)为隧道管片的整体变形及损伤,盾尾管片出现明显上抬,而在盾尾较远处的管片出现了一定的损伤。

图11(a)是渗流侵蚀过程中盾尾上方的地表轴线D—D沉降量的变化,地表沉降槽逐渐增大,最大值为49.31 mm,相比正常掘进的沉降量,增加了近15倍。图11(b)为M点的沉降变化,侵蚀过程的地表沉降呈

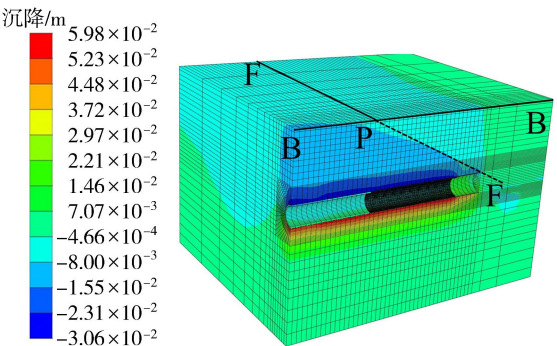


图7 无渗流侵蚀情况下的地层变形

Fig. 7 Ground deformation without seepage erosion process

指数增加趋势,如图 11(c)所示,管片最大错台量呈现非线性增加趋势。

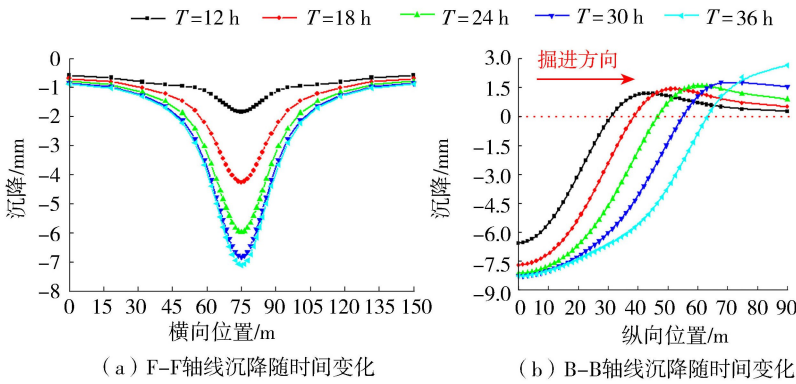


图 8 地表横向及纵向轴线沉降变化
Fig. 8 Evolution of transversal and longitudinal ground settlements

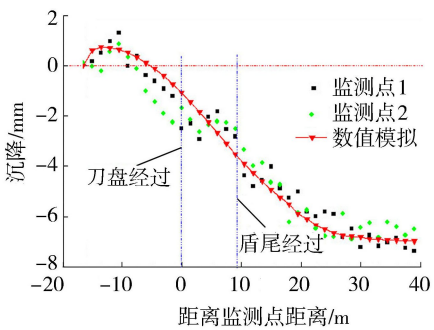


图 9 数值模拟与现场监测点的
地表沉降量对比
Fig. 9 Comparison of ground settlement
between filed monitoring and
numerical simulation

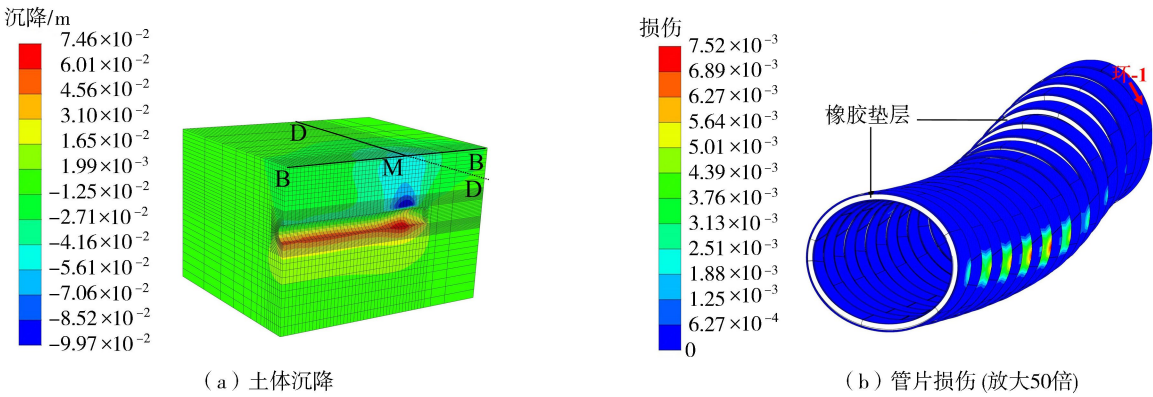


图 10 最大渗流速度时的土体及结构云图
Fig. 10 Nephograms of soil and linings at maximum fluid velocity

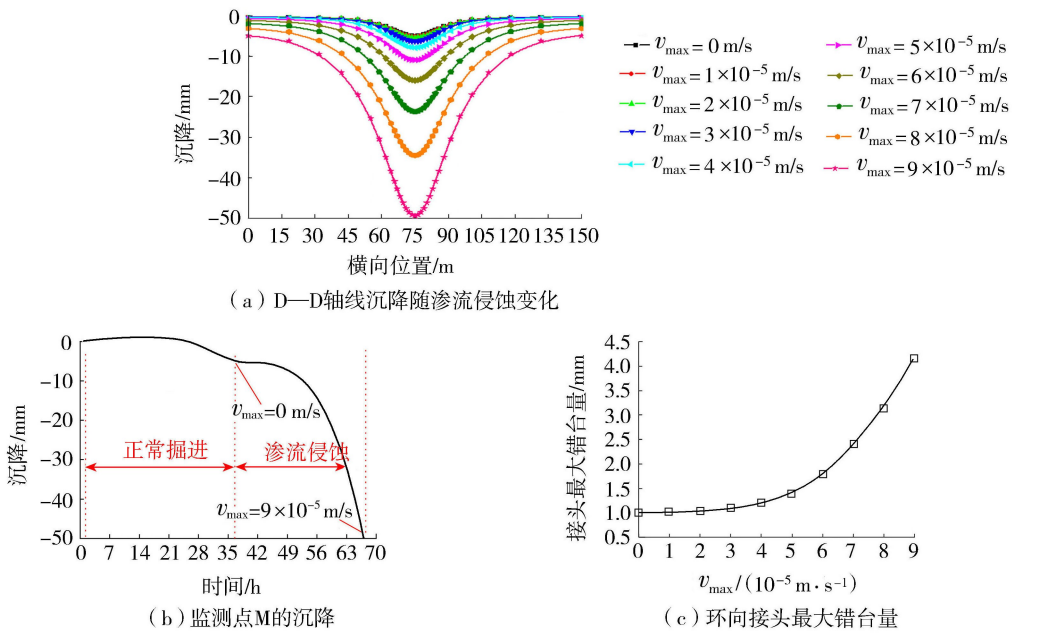


图 11 渗流侵蚀过程中的地表沉降及管片变形
Fig. 11 Ground settlement and lining deformation during seepage erosion process

3.3 参数分析

本节研究渗流侵蚀区域大小对地表沉降和结构的影响。如图 12(a)所示,纵向延伸长度越大,地表沉降值越大,如图 12(b)所示,延伸长度越大,管片环缝的错台量反而越小,因为环缝错台是由隧道纵向差异卸载引起的,纵向涌水区域越大,导致相邻管片的差异卸载量越小,进而使得管片错台量降低。图 13 为环向侵蚀延伸角度的影响,较大的侵蚀角度导致地表沉降及结构变形越大。

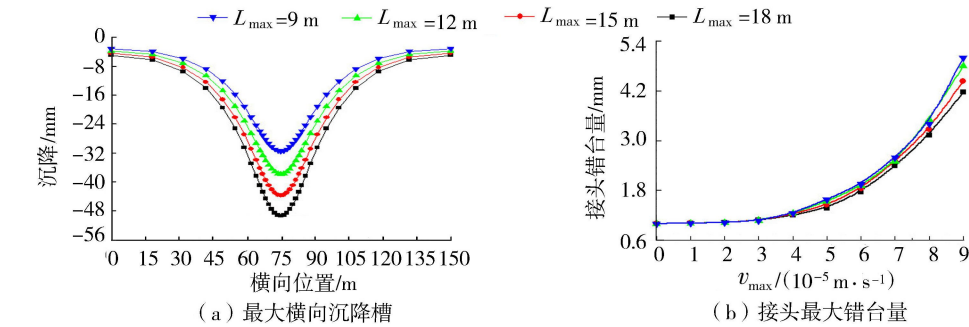


图 12 渗流侵蚀长度的影响
Fig. 12 Effects of different seepage erosion lengths

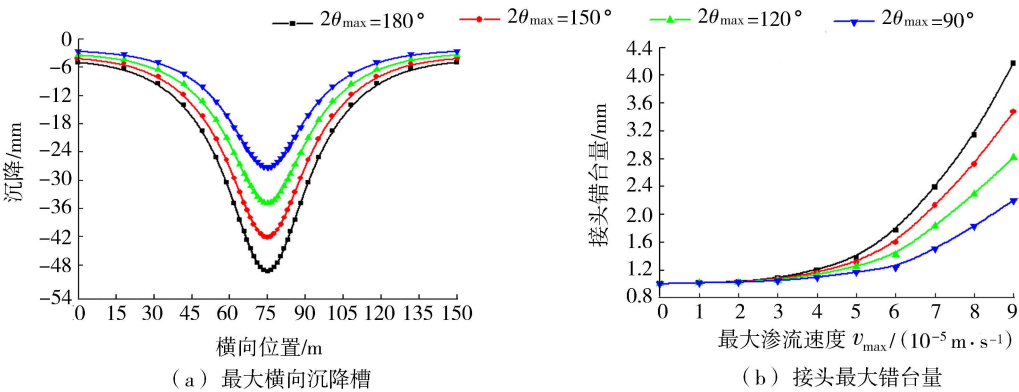


图 13 渗流侵蚀角度的影响
Fig. 13 Effects of different seepage erosion angles

4 结 论

- a. 基于三轴侵蚀试验,说明应用强度和刚度折减法可定性地模拟渗流侵蚀现象。
- b. 盾尾渗流侵蚀引起地表沉降呈现非线性增长趋势。
- c. 隧道拱顶侵蚀土体的竖向卸载使管片上抬,相邻管片间的不均匀卸载使管片错台。
- d. 渗流侵蚀区域在隧道纵向及环向延伸范围越大,导致地表沉降和结构变形越大。

参考文献:

[1] 陈剑,魏义山,江红,等. 地铁暗挖隧道断层破碎带突水涌砂原因分析及处治技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(7):857-863. (CHEN Jian, WEI Yishan, JIANG Hong, et al. Causes analysis and countermeasures for water inrush and sand gushing in fault and fracture zone during mined metro tunnel excavation[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(7):857-863. (in Chinese))

[2] 李阳刚,孟维孝,何小龙,等. 厦门海底隧道涌水涌砂应急预案与处理施工技术[J]. 现代交通技术, 2008, 5(1):50-53. (LI Yanggang, MENG Weixiao, HE Xiaolong, et al. Emergency plan and contermesur es for water and sand inflows of xiamen subsea tunnel[J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(1):50-53. (in Chinese))

[3] 陆记霞,刘向阳. 玉蒙铁路秀山隧道涌水涌砂地段施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(3):339-341. (LU Jixia, LIU Xiangyang. Construction techniques for water and sand gushing section in xiushan tunnel on Yuxi-Mengzi railway[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(3):339-341. (in Chinese))

[4] 叶治,刘华北,刘文. 盾构隧道开挖面涌水对地表沉降及管片内力的影响分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(10):1276-1286. (YE Zhi, LIU Huabei, LIU Wen. Analysis of influence of water inrush at shield tunneling face on ground surface

- settlement and internal stress of segment[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(10):1276-1286. (in Chinese))
- [5] 张成平, 冯岗, 张旭, 等. 衬砌背后双空洞影响下隧道结构的安全状态分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3):487-493. (ZHANG Chengping, FENG Gang, ZHANG Xu, et al. Effect of double voids behind lining on safety state of tunnel structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3):487-493. (in Chinese))
- [6] 徐晨, 邓如勇, 崔戈, 等. 高水压下衬砌背后空洞对结构受力的影响[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3):44-51. (XU Chen, DENG Ruyong, CUI Ge, et al. Influence of voids behind lining on mechanical behavior of the tunnel lining structure under a high water pressure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3):44-51. (in Chinese))
- [7] 王士民, 于清洋, 彭博, 等. 空洞对盾构隧道结构受力与破坏影响模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1):89-98. (WANG Shimin, YU Qingyang, PENG Bo, et al. Model tests on influences of cavity defects on mechanical characteristics and failure laws of segment linings of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1):89-98. (in Chinese))
- [8] 郑刚, 戴轩, 张晓双. 地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12):2458-2471. (ZHENG Gang, DAI Xuan, ZHANG Xiaoshuang. Experimental study and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12):2458-2471. (in Chinese))
- [9] CHANG D S. Internal erosion and overtopping erosion of earth dams and landslide dams[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2012.
- [10] CHANG D S, ZHANG Liming. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9):1454-1467.
- [11] KE L, TAKAHASHI A. Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4):698-711.
- [12] 张冬梅, 高程鹏, 尹振宇, 等. 隧道渗流侵蚀的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1):429-438. (ZHANG Dongmei, GAO Chengpeng, YIN Zhenyu, et al. Particle flow simulation of seepage erosion around shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup1):429-438. (in Chinese))
- [13] 张冬梅, 杜伟伟, 高程鹏. 间断级配砂土中管线破损引起的渗流侵蚀模型试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11):2129-2135. (ZHANG Dongmei, DU Weiwei, GAO Chengpeng. Model tests on seepage erosion caused by pipeline damage in gap-grading sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):2129-2135. (in Chinese))
- [14] 胡亚元, 马攀. 三相耦合渗流侵蚀管涌机制研究及有限元模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(4):913-921. (HU Yayuan, MA Pan. Mechanism study and finite element simulation of three-phase coupling seepage erosion piping[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):913-921. (in Chinese))
- [15] HICHER P Y. Modelling the impact of particle removal on granular material behaviour[J]. Géotechnique, 2013, 63(2):118-128.
- [16] STERPI D. Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow[J]. International Journal of Geomechanics, 2003, 3(1):111-122.
- [17] CIVIDINI A, BONOMI S, VIGNATI G C, et al. Seepage-induced erosion in granular soil and consequent settlements[J]. International Journal of Geomechanics, 2009, 9(4):187-194.
- [18] ZHANG X S, WONG H, LEO C J, et al. A thermodynamics-based model on the internal erosion of earth structures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 31(2):479-492.
- [19] ZHANG X, DONG J, HUANG Z, et al. Study of soil structures strength and stiffness loss based on thermodynamics and continuum mechanics[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 73(8):4143-4149.
- [20] 张兴胜, 宋丽娟, 董金玉, 等. 土坝渗流侵蚀机制及有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):1031-1038. (ZHANG Xingsheng, SONG Lijuan, DONG Jinyu, et al. Mechanism of seepage erosion and finite element calculation of earth dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 34(5):1031-1038. (in Chinese))
- [21] YE Z, LIU H. Mechanism and countermeasure of segmental lining damage induced by large water inflow from excavation face in shield tunneling[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(12):04018163.