

基于下负荷面本构的盾构掘进响应计算*

李亮¹ 陆勇¹ 范存新¹ 郭兵² 李安勇¹

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 215011, 苏州; 2. 中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 100018, 北京)

摘要 [目的] 盾构在富水软弱地层中施工时, 地层变形往往会受土体强度、变形及渗透特性的共同影响, 其中渗透特性导致的时间效应会进一步影响周围环境。因此, 有必要采用合理的本构模型开展应力渗流耦合计算, 研究饱和粉质黏土中盾构掘进诱发的地层变形响应。[方法] 以苏州轨道交通 11 号线鱼池泾站—白河潭站区间为例, 采用能够反映土体力学特性状态相关性的下负荷面本构模型, 并结合应力渗流耦合有限元程序, 计算分析饱和粉质黏土中盾构掘进引起的地面沉降及孔隙水压力响应规律, 并与工程实测数据进行对比。[结果及结论] 基于下负荷面本构模型的应力渗流耦合计算能够较好地再现盾构掘进影响效应; 饱和粉质黏土地层中的盾构掘进容易诱发地层变形, 且掌子面压力的变化对地层变形有显著影响, 掌子面压力过大往往会诱发地面隆起; 盾构施工会对掘进面前方土体产生挤压扰动, 继而诱发周围土层中超孔隙水压力演化, 这也是地层变形时间效应的内在机制。

关键词 隧道; 盾构掘进响应; 下负荷面本构模型; 应力渗流耦合计算

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.005

Calculation of Shield Tunneling Response Based on Subloading Cam-Clay Model

LI Liang¹, LU Yong¹, FAN Cunxin¹, GUO Bing², LI Anyong¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 215011, Suzhou, China; 2. China Railway 16th Bureau Group Beijing Metro Engineering Construction Co., Ltd., 100018, Beijing, China)

Abstract [Objective] During shield tunneling in water-rich soft strata, ground deformation is often influenced by the combined effects of soil strength, deformation, and permeability characteristics. The time effect caused by permeability characteristics may further impact the surrounding environment. Therefore, it is necessary to use a reasonable constitutive model to conduct stress-seepage coupling calculations, and study

the ground deformation response induced by shield tunneling in saturated silty clay. [Method] Taking the Yuchijing Station-Baihetan Station interval on Suzhou Rail Transit Line 11 as an example, a subloading Cam-Clay model that reflects the state correlation of soil mechanical properties is adopted, and combined with a stress-seepage coupling finite element program, to calculate and analyze the land subsidence and pore water pressure response patterns induced by shield tunneling in saturated silty clay. The results are compared with the field-measured engineering data. [Result & Conclusion] The stress-seepage coupling calculation based on the subloading Cam-Clay model can effectively reproduce the effects of shield tunneling. Shield tunneling in saturated silty clay can easily induce ground deformation, which is significantly affected by changes in the excavation face pressure. The excessive excavation face pressure often induces ground heave. Shield construction causes extrusion disturbance to the soil in front of the excavation face, which in turn induces the evolution of excess pore water pressure in the surrounding soil layers. This is also the intrinsic mechanism for the time effect of ground deformation.

Key words tunnel; shield tunneling response; subloading Cam-Clay model; stress-seepage coupling calculation

随着我国地下轨道交通网络体系的蓬勃发展, 盾构法施工所面临的地层环境也越来越复杂, 其中最常遇到的施工环境是富水软弱地层。在此类地层中的盾构掘进会诱发地层扰动变形, 进而影响地下管线和周围建筑的正常使用, 引发一系列的环境岩土工程问题。这种地层变形受土体强度、土体变形和渗透特性的共同影响, 其中渗透特性使得地层变形存在时间效应。因此, 有必要开展富水软弱地层中盾构施工响应的建模计算, 从而为实际工程的灾变预测提供参考。

针对盾构掘进诱发的地层变形响应问题, 已有学者采用现场实测和数值模拟的方法开展研究。

* 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB170020); 江苏省建设系统科技项目(2017ZD204); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX22_3284)

文献[1]以杭州紫之隧道北口浅埋暗挖段工程为例,采用三维流固耦合数值模型开展施工过程模拟,揭示了渗流条件下的孔隙水压力及地面沉降发展规律。文献[2]基于流固耦合和非耦合工况进行了综合分析,研究结果表明,考虑流固耦合作用能较为真实地反映地面沉降规律。文献[3]基于松花江砂土的基本力学特性,采用 Abaqus 软件的材料属性子程序提出了松花江砂土的本构模型,计算分析了双线隧道掘进过程中隧道周围的地层变形规律。文献[4]通过对厦门海底隧道进行流固耦合模拟发现,考虑地下水的作用能更好地描述地层的变形规律及孔隙水压力的变化情况。已有研究进一步揭示了盾构掘进诱发地层变形的规律,然而,其存在两方面的不足之处:①土体材料多数采用 Mohr-Coulomb 本构模型、Drucker-Prager 本构模型及剑桥模型等,此类本构模型无法反映天然土体力学特性的密实度(孔隙比)相关性,难以合理描述土体在盾构掘进这一复杂应力路径(加载、卸载、再加载等)下的变形响应;②部分研究采用全应力分析方法,不考虑地下水渗流的作用,未能明确地层变形响应的时效效应。

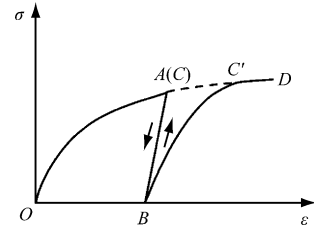
鉴于此,本文以苏州轨道交通 11 号线鱼池泾站—白河潭站区间工程为例,采用能够反映土体力学特性状态相关性的下负面本构模型,将其接入 SOFT 有限元代码^[5-6]中研究应力渗流耦合条件下的盾构掘进响应,并与工程实测数据进行对比分析。本文研究可为相关工程分析提供借鉴。

1 材料本构及应力渗流耦合理论

1.1 下负面本构模型

在经典的弹塑性土力学理论(包括剑桥模型)中,土体在卸载-再加载过程中的应力-应变关系是弹性的,而这与实际情况并不相符。土体卸载-再加载过程中的应力-应变关系示意图如图 1 所示。正常固结黏土在卸载后($A \rightarrow B$)就变成了超固结黏土,在重新再加载时($B \rightarrow C'$)会产生塑性应变。

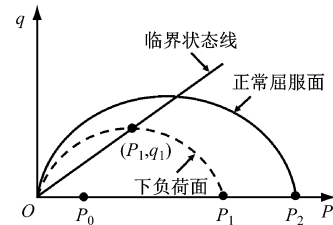
为此,文献[7-8]基于剑桥模型提出下负面面的概念来解决上述问题。下负面有两个基本特征:①下负面是经过现有应力点且和正常屈服面几何相似的面(见图 2);②能够描述图 1 中连续平滑的弹塑性应力-应变关系,以及卸载-再加载过程中的塑性变形。



注:ABCD 为经典弹性理论的应力-应变关系曲线,ABC'D 为实际情况的应力-应变关系曲线; σ 为应力; ε 为应变。

图 1 土体卸载-再加载过程中的应力-应变关系示意图

Fig. 1 Diagram of soil stress-strain relationship in the process of unloading and reloading



注: (P_1, q_1) 为下负面与临界状态线的交点; P_0 为初始围压应力; P_1, P_2 分别为超固结屈服应力和正常固结屈服应力; P 为主应力; q 为轴差应力。

图 2 超固结土的正常屈服面及下负面示意图

Fig. 2 Diagram of normal yield surface and subloading surface of over-consolidated soil

鉴于下负面模型能够很好地描述土体真实的应力-应变关系,文献[9]提出了一个能够表征超固结比的状态变量 β (β 为超固结状态与正常固结状态之间的孔隙比之差),使得下负面本构模型能够描述土体的重要特性,即力学行为不仅取决于固有力学参数,还受其初始状态参数的影响。

下负面本构模型的屈服面方程、相关联流动法则及一致性方程可以表示为:

$$f = \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{J_2}}{M^* \sigma_m} - \frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \left(\varepsilon_{vp} - \frac{\beta}{1+e_0} \right) = 0 \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{ij,p} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

$$d\varepsilon_{vp} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ii}} \quad (3)$$

$$d\beta = - (1 + e_0) \frac{q\beta^2}{\sigma_m} \Lambda \quad (4)$$

$$P_1 = \sigma_m \exp \left(\frac{\sqrt{3}J_2}{M^* \sigma_m} \right) \quad (5)$$

$$P_2 = P_0 \exp \left[\frac{\varepsilon_{vp}(1+e_0)}{\lambda - \kappa} \right] \quad (6)$$

$$\beta = (\lambda - \kappa) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (7)$$

$$i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$$

式中:

f ——屈服面函数;

σ_m 与 $\sqrt{J_2}$ ——一般应力空间中的不变量, 单位 kPa;

σ_{m0} ——初始平均有效应力, 单位 kPa;

M^* ——临界状态下剪切应力比;

λ 和 κ —— $e - \ln p$ 空间(e 为孔隙比)中的压缩指数和回弹指数;

e_0 ——参考应力下的孔隙比;

$\varepsilon_{ij,p}$ ——塑性应变张量;

σ_{ij} ——应力张量;

σ_{ii} ——应力矢量;

ε_{vp} ——塑性体应变;

Λ ——非负塑性乘子;

i ——力作用面的法向;

j ——力的作用方向;

a ——超固结演化控制参数, 决定了 β 的发展速度。

1.2 应力渗流耦合理论

在部分工程应用中, 针对地基土采用全应力理论(将土作为单相介质来处理)是可行的。然而, 对于需要考虑孔隙水压力增长、消散的工程问题, 有必要采用应力渗流耦合作用下的有效应力理论。此处, 采用文献[10]提出的基本假定和 FE-FD(有限元-有限差分)分析法, 并基于 Biot 固结理论来描述 $u_s - p_w$ (固相位移-孔隙水压力)形式方程。

基本假定有: ①应变是微小的; ②孔隙率的时间、空间变化率相较于其他变量非常小; ③相较于固相加速度, 液相与固相之间的相对加速度非常小; ④土颗粒是不可压缩的。

FE-FD 分析法指平衡方程采用 FEM(有限元法)的插值形函数来表示空间位移变化, 而连续方程采用 FDM(有限差分法)来求解单元中心的孔隙水压力。应力渗流耦合的平衡方程和连续方程为:

$$\rho \ddot{u}_{i,s} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (8)$$

$$\rho_f \ddot{\varepsilon}_{ii,s} - \frac{\partial^2 P_d}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{\gamma_w}{k} \left(\frac{\ddot{\varepsilon}_{ii,s}}{n} + \frac{1}{K_f} \dot{P}_d \right) = 0 \quad (9)$$

式中:

ρ ——固液混合体密度;

$u_{i,s}$ ——固相位移矢量;

b_i ——体积分布力;

ρ_f ——液相密度;

$\ddot{\varepsilon}_{ii,s}$ ——固相的应变矢量;

P_d ——超孔隙水压应力;

γ_w ——液相的重度;

k ——土体渗透系数;

n ——土体孔隙率;

x_i, x_j ——空间坐标系上 I 点与 J 点在 x 方向的矢量;

K_f ——液相压缩模量。

2 盾构掘进施工建模计算

2.1 工程背景

苏州轨道交通 11 号线呈东西走向, 其中鱼池泾站—白河潭站左、右线以一段半径为 3 000 m 的曲线沿前进东路向西推进, 隧道主要位于道路下方, 隧道上方两侧建筑均距离隧道较远。鱼池泾站—白河潭站区间地质剖面图如图 3 所示。本文选取左线始发段进行分析, 该区域下方土层以饱和粉质黏土为主, 含水量较丰富, 盾构施工地面沉降控制难度大。隧道顶部埋深为 9.2 m, 管片环外径为 6.2 m, 内径为 5.6 m, 厚度为 0.3 m, 注浆层厚度为 0.2 m。

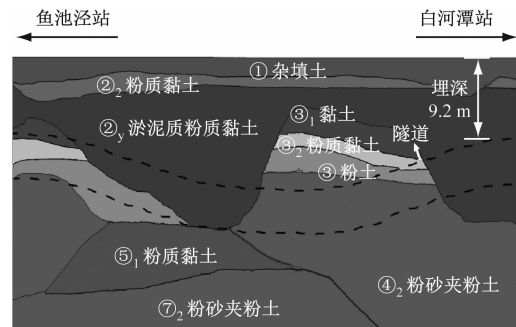


图 3 鱼池泾站—白河潭站区间地质剖面图

Fig. 3 Diagram of Yuchijing Station-Baihetan Station interval stratigraphical profile

本工程左线于 2020 年 7 月 1 日开工, 右线于 2020 年 8 月 2 日开工, 每日以 5 环至 12 环的速度掘进。在 8 月 30 日—10 月 5 日, 盾构机停工 1 个多月。左线于 2020 年 11 月 1 日贯通, 右线于 2020 年 12 月 12 日贯通。

2.2 建模及参数选取

鉴于隧道的对称性, 建立长、宽、高分别为 50

m、20 m、25 m 的计算模型,隧道三维模型和断面尺寸如图 4 所示。采用八节点六面体单元进行划分(共计 4 650 个单元、5 590 个节点),其中边界条件为四周及底部法向位移约束,顶面设置排水面,其余面不排水。土层材料为饱和粉质黏土,重度为 18 kN/m³,渗透系数为 8 × 10⁻⁸ m/s,本构参数和初始状态变量依据文献[11]中的粉质黏土数据确定,如表 1 所示。管片结构采用 C60 混凝土,重度为 25 kN/m³,渗透系数为 10⁻¹⁰ m/s,弹性模量为 36 GPa,泊松比为 0.2。注浆层采用大孔隙比土体材料,用以近似模拟管片-围岩间的空隙填充。

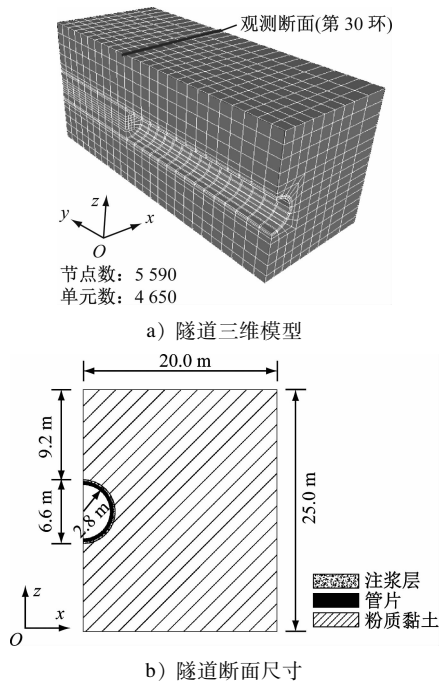


图 4 隧道三维模型和断面尺寸

Fig. 4 Dimensions of tunnel 3D model and section

表 1 本构参数和初始状态变量

Tab. 1 Constitutive parameters and initial state variables		
项目	参数	取值
本构参数	M^*	1.125
	e_N	1.17
	λ	0.109
	κ	0.010 9
	ν	0.3
初始状态变量	a	0.9
	P_{m0}/kPa	1.1
	e_0	0.9

注: e_N 为正常固结曲线上在 1 kPa 下的参考孔隙比; ν 为泊松比; P_{m0} 为初始有效应力。

2.3 模拟工况

隧道施工过程示意图如图 5 所示。盾构施工过程的模拟步骤为:①自重应力计算,还原地层应力场及孔隙状态;②在第 $m(m \geq 2)$ 个分析步中,利用生死单元功能杀死沿掘进方向(y 轴正方向)的土体,并激活管片及注浆层单元;通过施加一定荷载来模拟掌子面压力和掘进设备质量,其中掘进设备荷载在第 $m+3$ 个分析步中去除;③重复上述第 2 步,直至施工全过程完成。

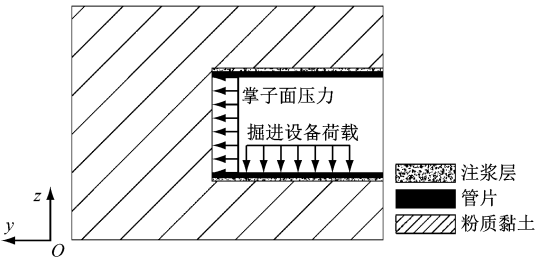


图 5 隧道施工过程示意图

Fig. 5 Diagram of tunnel construction process

3 实测与模拟结果分析

土体竖向有效应力和孔隙比分布云图如图 6 所示。由图 6 可知:土层顶面至底面的竖向应力范围为 0 ~ 406 kPa,孔隙比范围为 1.103 ~ 0.790。由此可知,通过自重应力计算能够再现实地地层应力及孔隙分布状态。

本文基于实测掌子面压力大小开展盾构掘进模拟,选取计算模型观测断面第 30 环(见图 4 a))与研究范围内实测地面断面的监测数据进行对比分析,地面监测断面情况如表 2 所示。基于模拟计算数据与实测数据,将两个监测断面的施工阶段划分为 5 个阶段:①阶段 1——盾头接近数 10 m ~ 10 m;②阶段 2——盾头接近 10 m 内;③阶段 3——盾头下穿;④阶段 4——盾尾通过正下方至盾尾通过一段距离;⑤阶段 5——盾尾远离数 10 m 后。

表 2 地面监测断面情况

Tab. 2 Ground monitoring section condition			
数据类型	监测断面	埋深情况	地质情况
模拟	第 30 环	9.2 m 左右	粉质黏土
实测	DBZ 90-1—DBZ 90-5	9.2 m 左右	淤泥质粉质黏土

注:DBZ 为左线地面监测断面;DBZ 90-1—DBZ 90-5 为左线地面监测断面侧 1 ~ 5 号监测点。

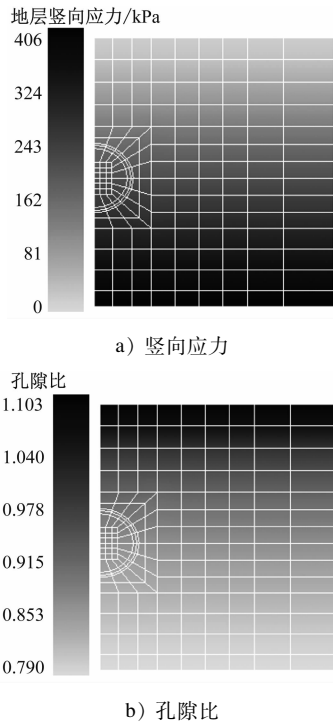


图6 地层竖向应力场和孔隙比分布云图

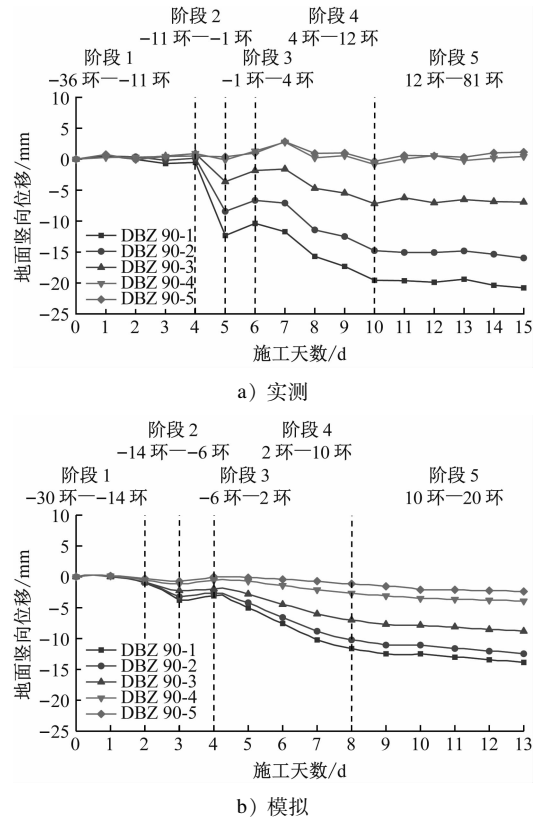
Fig. 6 Nephogram of stratum vertical stress field and porosity ratio distribution

3.1 地面沉降时程曲线

实测与模拟地面沉降监测点在不同施工阶段的时程曲线如图7所示。由于实际施工过程中边界条件较为复杂,模拟结果与实测结果在地面沉降量值上存在一定的差异,但两者的变化趋势基本一致,表明模拟计算能够再现盾构掘进对地层的扰动影响。

各施工阶段下,隧道纵向剖面地面沉降量云图如图8所示,其中:阶段1、阶段2和阶段4的掌子面压力根据静止土压力设定;阶段3的掌子面压力根据被动土压力设定。由图8 a)、图8 b)和图8 d)可知:该阶段掌子面上方土体在一定范围内有明显的沉降现象,且该沉降延伸至地面形成“漏斗型”沉降区域,这与文献[12]总结出的黏土地层开挖面破坏轮廓一致。由图8 c)可知:该阶段掌子面前上方土体有明显的隆起现象,即掘进面前方土体受到挤压诱发地面产生一定量的抬升。从整体来看,模拟结果较好地再现了监测断面地层受盾构掘进影响的5个阶段。

盾构在饱和粉质黏土中掘进会对周围地层产生扰动,且施工参数的调整会显著影响地层变形,具体表现为:



注:实际工程中以 DBZ90-1—DBZ90-5 为监测断面,数值模拟中以第 30 环为监测断面,盾构开挖至该监测断面前的环数以负数表示,反之以正数表示;余类同。

图7 实测与模拟地面沉降监测点在不同施工阶段的时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of field-measured and simulated land subsidence monitoring points at different construction stages

1) 阶段1(驶向阶段)。结合图7 a)和图8 a)可以看出,掘进面距监测断面较远,盾构掘进对地面影响较小,地面沉降变化不大。

2) 阶段2(接近阶段)。从图8 b)可以看出,此时掘进面逐渐接近监测断面,诱发地面呈现一定程度的下沉,且沉降扰动范围大致为 $2D$ (D 为盾构直径)。

3) 阶段3(下穿阶段)。从图8 c)可以看出,监测断面地层在该阶段对盾构掘进的影响较为敏感,掌子面压力加大(实际施工过程中该阶段盾构推力参数被人为调大)显著改变了地层变形趋势,掘进面前上方地层明显隆起,地面有着一定幅度的抬升。

4) 阶段4(远离阶段)。从图8 d)可以看出,此时掘进面开始远离监测断面,但盾构掘进对该地层仍产生了一定的扰动影响,地面继续呈现缓慢下沉趋势。

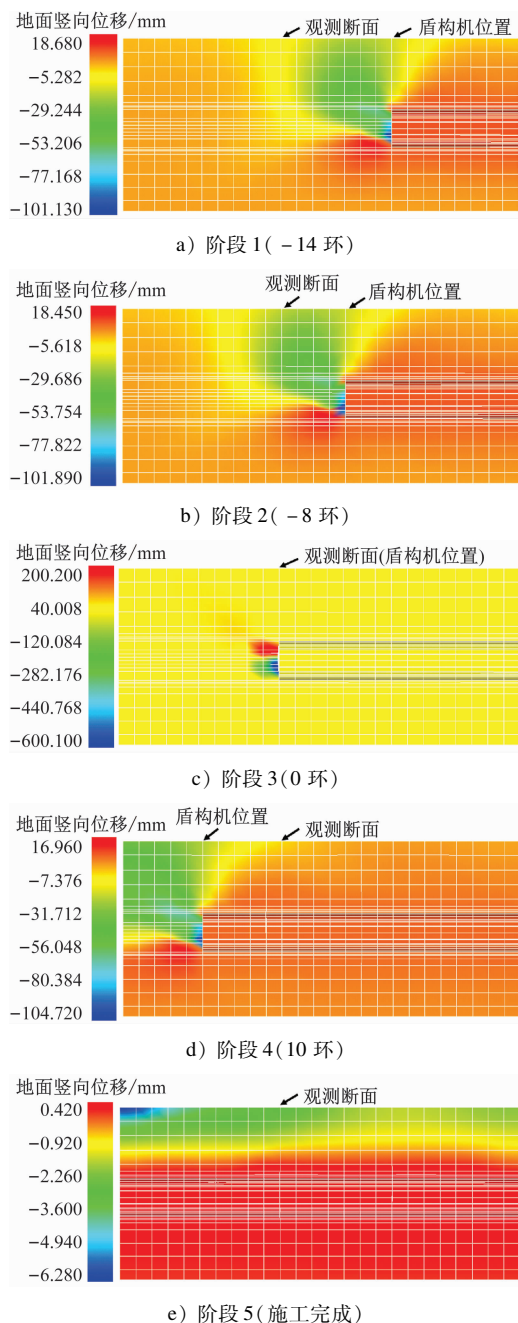


图 8 各施工阶段的隧道纵向剖面地面沉降量云图

Fig. 8 Nephogram of tunnel longitudinal profile land subsidence increment at each construction stage

5) 阶段 5(极远阶段)。从图 8 e)可以看出,此时的监测断面受盾构掘进的影响较小,地面沉降整体趋于稳定,每天的沉降增量在微量级,即扰动后的渗流固结变形。

3.2 地面沉降断面曲线

各施工阶段下,实测与模拟地面沉降断面曲线图如图 9 所示。由图 9 可知:实测与模拟地面沉降量有一定的差异,分别达到了 14 mm 和 22 mm,但

两者的变化趋势一致。由此可知:①实测与模拟的地面沉降大致呈 V 型对称分布,符合 Peck 理论,且 V 型沉降槽的宽度在距隧道中轴线 12 m 处;②实测与模拟的地面沉降呈现“下沉-隆起-下沉”的变化趋势,其对应着受掌子面压力影响的监测断面地面沉降时程曲线。

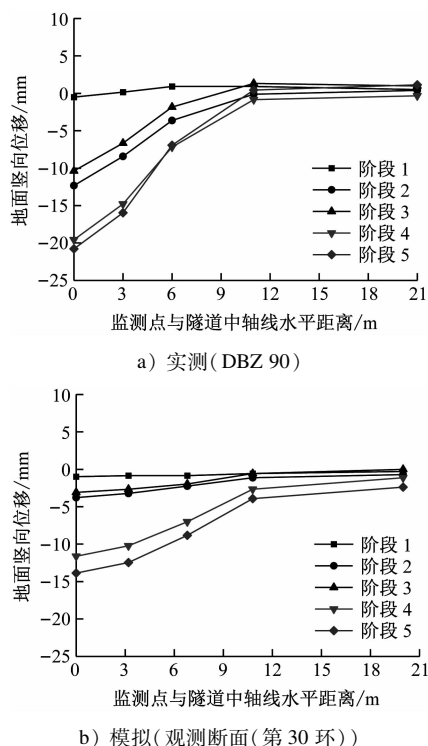


图 9 各施工阶段的实测与模拟地面沉降断面曲线图

Fig. 9 Diagram of field-measured and simulated land subsidence section curves at each construction stage

3.3 孔隙水压力响应分析

为进一步分析盾构掘进诱发地层响应的时间效应,提取各施工阶段下,第 30 环断面处 5 个单元(见图 10)的孔隙水压力及孔隙比时程曲线,如图 11 所示。由图 11 可知:距隧道中轴线 1.5D 范围内的土体孔隙水压力和孔隙比受盾构掘进影响较大(单元 1 501 和 1 836),且呈现出显著的阶段性特征。阶段 3 和阶段 4 的隧道纵向剖面孔隙水压力分布云图如图 12 所示。

将孔隙水压力和孔隙比的演化过程根据盾构施工过程划分为 5 个阶段,可以看出:

1) 阶段 1(驶向阶段)。此阶段孔隙水压力和孔隙比的变化较小,这是由于盾构机距监测断面较远,地层未受扰动(见图 8 a))。

2) 阶段 2(接近阶段)。此阶段孔隙水压力微

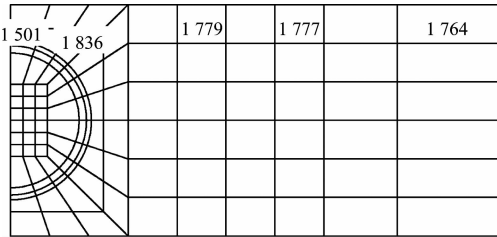
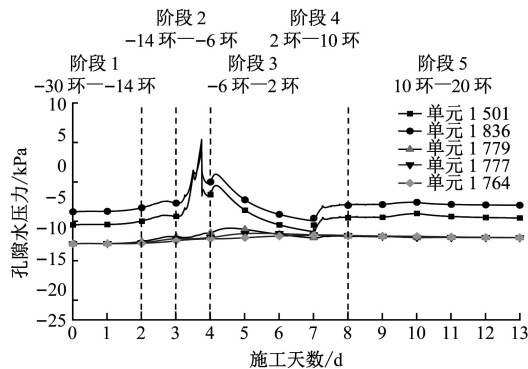
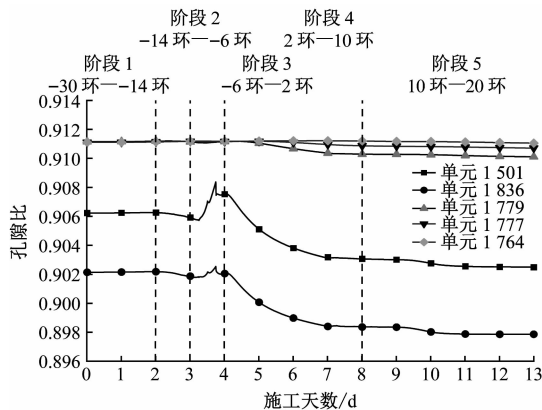


图 10 第 30 环断面处孔隙水压力观测单元示意图

Fig. 10 Diagram of pore water pressure observation unit at the 30th ring section



a) 孔隙水压力



b) 孔隙比

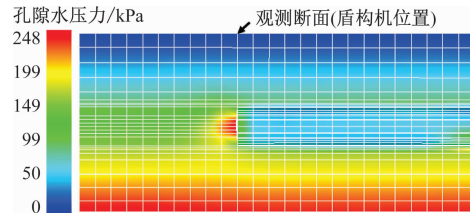
图 11 各施工阶段的孔隙水压力及孔隙比时程曲线

Fig. 11 Time-history curve of pore water pressure and porosity ratio at each construction stage

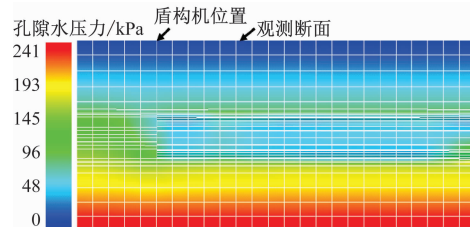
幅上升,孔隙比微幅下降。这是由于掘进面前方土体开始受到盾构推力的挤压影响(见图 8 b)),隧道前方土层有变密实的趋势,诱发孔隙水压力微幅上升。

3) 阶段 3(下穿阶段)。当掌子面压力增大时,掘进面前方土体会受到显著的挤压作用(见图 8 c)),产生的超孔隙水压向周围传递,使得附近一定范围内的土体孔隙水压力和孔隙比呈现明显增大的趋势(见图 12 a))。

4) 阶段 4(远离阶段)。此阶段掌子面压力恢



a) 阶段 3(0 环)



b) 阶段 4(10 环)

图 12 阶段 3 和阶段 4 的隧道纵向剖面孔隙水压力分布云图

Fig. 12 Nephogram of tunnel longitudinal profile pore water pressure distribution at stages 3 and 4

复正常且盾构机逐渐远离,掘进面附近土体中的超孔隙水压力逐渐消散,孔隙比也随之减小(见图 12 b))。

5) 阶段 5(极远阶段)。当盾构施工完成后,孔隙水压力和孔隙比整体趋于稳定,微小的变化速率与前述地层扰动后的渗流固结变形相对应。

不同阶段的地层变形与孔隙水压力响应间的关联性,揭示了“渗流”是盾构掘进响应时间效应的内在机制,进一步突出了应力渗流耦合计算的必要性。

4 结语

本文采用下负荷面本构模型,结合应力渗流耦合计算程序,对苏州轨道交通 11 号线鱼池泾站—白河潭站区间进行了盾构掘进响应的建模计算,研究了饱和粉质黏土中盾构掘进对地层的影响。主要获得以下几个结论:

1) 基于下负荷面本构的应力渗流耦合计算能够合理地再现原有地层的自重应力状态,并能较好地模拟饱和粉质黏土中盾构掘进引起的地层变形、孔隙水压力和孔隙比的响应规律,再现盾构掘进影响效应。

2) 饱和粉质黏土地层中的盾构掘进容易诱发地层变形,且掌子面压力的变化对地层变形有显著影响,掌子面压力过大往往会诱发地面隆起。

3) 在应力渗流耦合条件下,盾构施工对掘进面前方土体产生挤压扰动,继而诱发周围土层中超孔

隙水压力演化,这也是地层变形时间效应的内在机制。

参考文献

- [1] 邹金杰,陈钢,甘鹏路,等. 富水软弱地层中浅埋暗挖隧道施工地表沉降分析:以杭州紫之隧道为例[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 141.
ZOU Jinjie, CHEN Gang, GAN Penglu, et al. Analysis of ground surface settlements induced by construction of shallow-covered mined tunnel in water-rich and soft-weak strata: a case study of Zizhi Tunnel in Hangzhou[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 141.
- [2] 李明,严松宏,潘春阳,等. 富水大断面黄土隧道开挖流固耦合效应分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 81.
LI Ming, YAN Songhong, PAN Chunyang, et al. Analysis of fluid-solid coupling effect during excavation of the water-rich large-section loess tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 81.
- [3] 周子莲. 松花江富水砂层过江隧道盾构施工力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHOU Zilian. Study on shield construction mechanics of Songhua River water-rich sand layer river-crossing tunnel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] 易小明,张顶立,陈铁林. 厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2302.
YI Xiaoming, ZHANG Dingli, CHEN Tielin. Stratum deformation monitoring and mechanism analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2302.
- [5] XIONG Y L. Thermo-hydraulic-mechanical-air coupling finite element analysis and its application to geotechnical engineering problems[D]. Nagoya: Nagoya Institute of Technology, 2013.
- [6] ZHANG F, XIONG Y, ZHANG S, et al. Thermo-hydro-mechan-

ical-air coupling finite element method and its application to multi-phase problems[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(2): 77.

- [7] HASHIGUCHI K, UENO M. Elasto-plastic constitutive laws for granular materials[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 73.
- [8] HASHIGUCHI K. Subloading surface model in unconventional plasticity[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(8): 917.
- [9] 张锋. 计算土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 40.
ZHANG Feng. Computational soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 40.
- [10] OKA F, YASHIMA A, SHIBATA T, et al. FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model[J]. Applied Scientific Research, 1994, 52(3): 209.
- [11] LU Y, JIANG Y, ZHU W, et al. Unified description of different soils based on the superloading and subloading concepts[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 239.
- [12] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored tunnelling in the urban environment[C]//The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: Balkema, 1997: 2353.

• 收稿日期:2022-10-23 修回日期:2022-11-23 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-23 Revised:2022-11-23 Published:2024-12-10
• 第一作者:李亮,硕士研究生, liliang01234@126.com
通信作者:陆勇,讲师, cumtluyong@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第6页)

- [2] 陈小鸿,刘迁,何志工,等. 城市轨道交通快线规划与建设:中国城市轨道交通发展论坛第22次研讨会[J]. 城市交通, 2019, 17(4): 114.
CHEN Xiaohong, LIU Qian, HE Zhigong, et al. Express rail transit planning and construction: highlight of the 22nd urban transportation development forum in China[J]. Urban Transport of China, 2019, 17(4): 114.
- [3] 钮心毅,岳雨峰,李凯克. 长三角城市群中心城市与周边城市的城际出行特征研究[J]. 上海城市规划, 2020(4): 1.
NIU Xinyi, YUE Yufeng, LI Kaike. Inter-city travel characteristics between central and surrounding cities in the Yangtze River Delta urban agglomerations[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2020(4): 1.
- [4] 刘纯洁,于宁. 世纪大道换乘枢纽的建设和管理[J]. 中国市政工程, 2009(5): 48.
LIU Chunjie, YU Ning. On construction and management of Central Ave. Station transfer hub[J]. China Municipal Engineering, 2009(5): 48.

- [5] 蔡润林,何兆阳,杨敏明. 轨道交通四网融合的发展需求、内涵和路径:以长三角城市群为例[J]. 城市交通, 2022, 20(5): 13.
CAI Runlin, HE Zhaoyang, YANG Minming. Development demand, connotation and path of four-network integration of rail transit: a case study of Yangtze River Delta city cluster[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(5): 13.
- [6] 刘纯洁. 上海智慧地铁的研究与实践[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 1.
LIU Chunjie. Research and application of Shanghai smart metro[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 1.

• 收稿日期:2024-03-27 修回日期:2024-06-11 出版日期:2024-12-10
Received:2024-03-27 Revised:2024-06-11 Published:2024-12-10
• 通信作者:冒晨,高级工程师, 75735310@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license