

厚粉黏土层中盾构掘进诱发地层变形响应因素影响^{*}李亮¹ 陆勇¹ 范存新¹ 郭兵² 朱文轩³

(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;

3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 200240, 上海)

摘要 [目的] 厚粉黏土层中, 盾构掘进产生的扰动受地层条件及施工参数等多个因素影响, 地层变形较为复杂, 因此有必要研究地层条件及施工参数对盾构掘进诱发地层变形的影响规律。[方法] 以苏州轨道交通 11 号线某掘进段工程为例, 开展饱和土层中盾构掘进的应力-渗流耦合计算, 土体力学特性采用考虑孔隙相关性的下负荷面本构模型进行计算, 并与实测结果进行对比分析。分析盾构掘进过程中地层条件(土体渗透系数)及施工参数(掌子面压力、掘进速度)对地层变形的影响, 并进行因素敏感性分析。[结果及结论] 采用下负荷面本构模型的应力-渗流耦合计算, 能够很好地再现盾构掘进诱发的地层变形响应; 掌子面压力及掘进速度的增大会使得地面总沉降量减小, 而土体渗透系数越大, 会使得地面总沉降量增大; 盾构掘进诱发地层变形的各影响因素敏感性依次为: 掌子面压力敏感性 > 土体渗透系数敏感性 > 掘进速度敏感性。

关键词 城市轨道交通; 盾构掘进; 地层变形响应

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.05.011

Influence Factors of Strata Deformation Response Induced by Shield Tunneling in Thick Silty Clay Layer

LI Liang¹, LU Yong¹, FAN Cunxin¹, GUO Bing², ZHU Wenxuan³

(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; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200240, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In thick silty clay layers, the disturbance caused by shield tunneling is affected by multiple factors such as strata conditions and construction parameters. Given the complexity of strata deformation, it is necessary to study

the influence law of strata conditions and construction parameters on shield tunneling induced strata deformation. [Method] Taking a tunneling section of Suzhou Rail Transit Line 11 as an example, the stress-seepage coupling calculation of shield tunneling in saturated soil is carried out. Soil mechanical properties are calculated using the lower load surface constitutive model capable of considering pore correlation. Calculation results are analyzed and compared with the measured results. The influence of formation conditions (soil permeability coefficient) and construction parameters (face pressure, tunneling speed) on strata deformation during shield tunneling is analyzed, together with the factors sensitivity. [Result & Conclusion] Adopting the stress-seepage coupling calculation of the lower load surface constitutive model can well reproduce strata deformation response induced by shield tunneling; the increase of face pressure and tunneling speed will reduce the total ground settlement, while the greater the soil permeability coefficient, the greater the total land subsidence. The sensitivity of each influencing factor for strata deformation induced by shield tunneling is in the following order: face pressure sensitivity > soil permeability sensitivity > tunneling speed sensitivity.

Key words urban rail transit; shield tunneling; strata deformation response

盾构法作为我国城市轨道交通建设的重要施工方法, 正朝着精细化控制的方向发展, 但盾构掘进对地层及周围环境的影响仍是施工中最关注的问题。因此, 有必要研究不同地层及施工参数条件下的盾构掘进响应, 掌握不同因素对盾构施工中地层变形的影响规律。

目前, 已有学者针对复杂地层中盾构掘进对地层的响应影响进行了大量研究。在实测方面, 文献[1]对盾构总推力和刀盘扭矩的计算值与实测值进行了对比分析, 提出典型板岩地层中盾构施工参数

^{*} 国家自然科学基金项目(42207220); 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)

的控制值。在数值模拟方面,文献[2]基于参数敏感性分析,研究了不同隧道埋深下,地层条件变化对地面沉降的影响规律。然而,既有数值模拟研究中仍有两方面不足之处:①采用全应力分析法及单屈服面本构方法,不能准确地描述富水软弱地层中由盾构掘进诱发的地层变形真实时空响应;②既有盾构掘进诱发地层变形影响主要考虑隧道埋深、隧道直径及土体强度等参数,还未系统地掌握施工参数和土体渗透特性对地层变形的影响规律。

本文采用文献[3-4]提出的应力-渗流耦合有限元 SOFT 程序,以及能够考虑土体孔隙相关性的下负荷载面本构模型,以苏州轨道交通 11 号线鱼池泾站—白河潭站区间某掘进段为例,开展富水软弱地层中盾构掘进响应模拟。在实测结果验证计算模型可靠的前提下,开展不同掌子面压力、掘进速度和土体渗透系数的盾构施工模拟,分析各因素对地层变形的影响规律及敏感性程度。本文研究可为盾构隧道施工中的地层变形控制提供理论依据与工程指导。

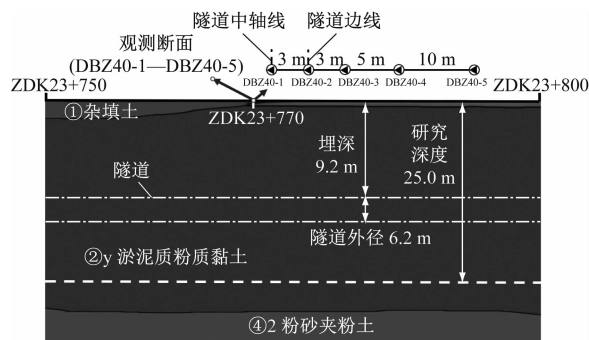
1 盾构施工建模计算及实验验证

1.1 工程概况及 SOFT 有限元建模

研究范围内的地质剖面图如图 1 所示,主要为淤泥质粉质黏土。选取 DBZ40-1—DBZ40-5 观测断面为研究对象,各测点间距为 3 m、3 m、5 m、10 m。考虑对称性,所建模型的长、宽、高分别为 50 m、20 m、25 m,隧道顶部埋深为 9.2 m,管片外径、内径、厚度、宽度分别为 6.2 m、5.6 m、0.3 m、1.0 m,注浆层厚度为 0.2 m。隧道三维模型及断面尺寸示意图如图 2 所示。该模型采用八节点六面体单元,共 4 650 个单元、5 590 个节点,其中节点编号 2 294、2 157、2 290、2 482、2 505 与 DBZ40-1—DBZ40-5 相对应。计算模型的边界设置为:除顶面外均设置法向位移约束且为不排水面。计算模型的材料为: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;土层为饱和粉质黏土,其重度为 18 kN/m³,渗透系数为 8 × 10⁻⁸ m/s。

1.2 下负荷载面模型及土体参数

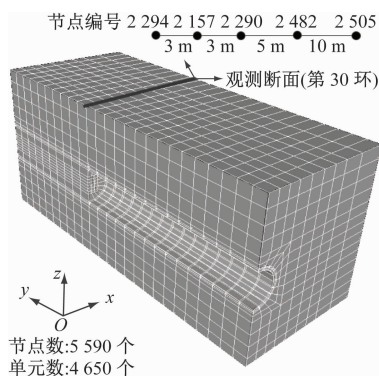
文献[5]提出一种下负荷载面模型,该模型能够描述屈服面内的非线性弹塑性应力应变关系(即应力历史相关性)。文献[6]将下负荷载面模型进一步拓展用于研究考虑土体力学特性的孔隙比(密实度)相关性。本构模型的屈服面函数及超固结演化



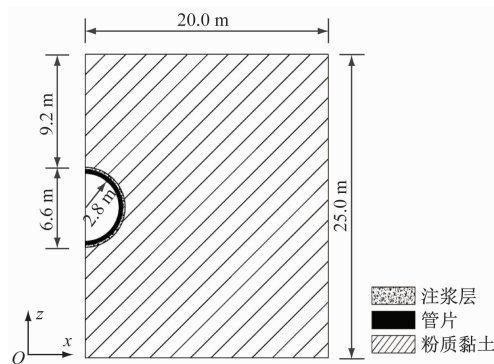
注:DBZ 为左线地面监测断面;ZDK 为左线开挖里程。

图 1 地质剖面图

Fig. 1 Geological cross-section



a) 隧道三维模型



b) 隧道断面尺寸

图 2 隧道三维模型及断面尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel 3D model and section dimensions

式可以表示为^[7]:

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

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

式中:

σ_m 、 $\sqrt{J_2}$ ——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^* ——临界状态下的剪切应力比;

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

e_0 ——参考应力下的孔隙比;

ε_{vp} ——塑性体应变;

Λ ——非负塑性乘子;

β ——超固结状态与正常固结状态之间的孔隙比之差;

a ——超固结演化控制参数,可决定 β 的发展速度。

针对实际掘进段地层情况,文献[8]已通过三轴试验获得了基于下负荷面本构的粉质黏土本构参数及初始状态变量,如表 1 所示。

1.3 基于实测结果的计算验证

根据盾构掘进对地层的影响规律,本文的施工进程划分为 5 个阶段,采用实际工程的盾构施工参

数(掌子面压力、掘进速度)对盾构施工过程进行模拟分析。盾构施工参数及阶段划分情况如表 2 所示。

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
	a	0.9
初始状态变量	σ_{m0}/kPa	1.1
	e_0	0.9

注: e_N 为正常固结曲线上在压力为 1 kPa 下的参考孔隙比; ν 为泊松比。

不同施工时序及阶段下的地面竖向位移实测值与模拟值对比如图 3 所示。

表 2 盾构施工参数及阶段划分情况

Tab. 2 Shield construction parameters and stage divisions

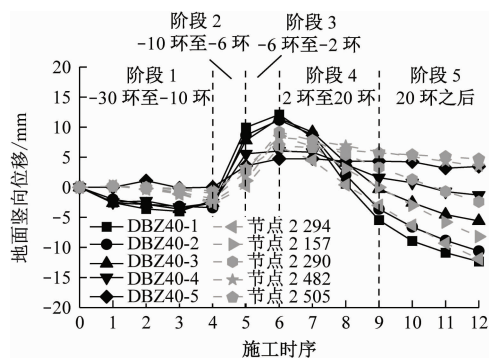
施工阶段划分	施工阶段描述	施工时序	施工日期	掌子面压力/kPa	掘进速度/(m/d)
阶段 1(驶向)	盾头接近数 10 m ~ 10 m	1	2020-07-05	70	8
		2	2020-07-06	80	4
		3	2020-07-07	100	4
		4	2020-07-08	140	4
阶段 2(接近)	盾头接近 10 m 内	5	2020-07-09	200	4
阶段 3(下穿)	盾头下穿	6	2020-07-10	200	8
阶段 4(远离)	盾尾通过正下方至 盾尾通过一段距离	7	2020-07-11	140	12
		8	2020-07-12	120	6
		9	2020-07-13	90	6
阶段 5(极远)	盾尾远离数 10 m 后	10	2020-07-14	100	12
		11	2020-07-15	140	10
		12	2020-07-16	110	6

由图 3 a)可知:①实测值与模拟值的地面沉降均呈现“沉降-隆起-沉降”的变化趋势。②在阶段 1(驶向),地面沉降量均在 4 mm 左右;这是由于掘进面距观测断面较远,掘进对地面影响较小,使得地面沉降变化不大。③在阶段 2 与阶段 3(接近、下穿),实测值与模拟值的地面隆起量分别为 13 mm、9 mm 左右;这是由于盾构掌子面压力和掘进速度的增大,使得掘进面前方土体受到显著的挤压影响,导致地层有明显的隆起变形。④在阶段 4 与阶

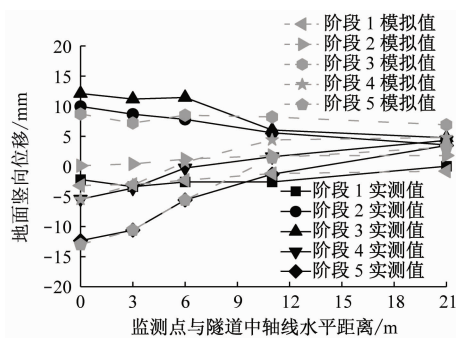
段 5(远离、极远),地面最终沉降量约为 13 mm;这表明富水软弱地层中,盾构掘进对地层的扰动影响具有显著的时空效应,即掘进扰动后土体渗流固结变形。

由图 3 b)可知:V 型对称的地面沉降槽宽度距隧道中轴线 12 m 左右,符合 Peck 理论。

综上所述,实测值与模拟值的地面沉降趋势及量级基本一致,验证了基于下负荷面本构的应力-渗流耦合计算能够很好地再现盾构掘进的影响效应。



a) 地面竖向位移时程曲线



b) 地面竖向位移断面曲线

注:实际工程中以 DBZ40-1—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;余类推。

图3 不同施工时序及阶段下的地面竖向位移实测值与模拟值对比

Fig.3 Comparison of measured vs. simulated ground vertical displacement values during different construction time sequences

2 不同因素影响分析

为分析地层条件及施工参数对盾构掘进诱发地面沉降的影响规律,控制掌子面压力与掘进面土体自重应力(本文取为 140 kPa)的比值 η 、掘进速度 v 和土体渗透系数 k 在一定范围内取值,并进行盾构掘进施工模拟分析。不同计算工况下的影响因素取值如表 3 所示。

2.1 η 因素影响

不同 η 下的地面沉降时程曲线如图 4 所示。当 η 为 0.4~1.1 时,地面呈现出沉降的趋势;当 $\eta > 1.6$ 时,地面呈现先隆起后沉降的变化趋势。不同工况下,隧道中心轴上方地面最终沉降量分别为 9.5 mm(工况 1)、7.4 mm(基准工况)、4.0 mm(工况 2)和 3.9 mm(工况 3),即隧道中心轴上方地面最终沉降量随掌子面压力的增大而减小,但当掌子面压力超过一定范围时易诱发地面隆起,造成地面

表 3 不同计算工况下的影响因素取值

Tab.3 Values of influencing factors under different calculation conditions

计算工况	η	掘进速度/ (m/d)	土体渗透系数/ (m/s)
基准工况	0.7	6	1×10^{-7}
工况 1	0.4	6	1×10^{-7}
工况 2	1.1	6	1×10^{-7}
工况 3	1.6	6	1×10^{-7}
工况 4	0.7	4	1×10^{-7}
工况 5	0.7	8	1×10^{-7}
工况 6	0.7	12	1×10^{-7}
工况 7	0.7	6	5×10^{-8}
工况 8	0.7	6	8×10^{-8}
工况 9	0.7	6	2×10^{-7}

沉降至稳定的时间较长。

2.2 掘进速度因素影响

不同掘进速度下的地面竖向位移时程曲线如图 5 所示。由图 5 可知:随着掘进速度的增加,隧道中心轴上方地面的最终沉降量依次为 10.0 mm(工况 4)、7.4 mm(基准工况)、6.6 mm(工况 5)和 5.3 mm(工况 6),即隧道中心轴上方地面最终沉降量随着掘进速度的增加而有所减小。

2.3 不同土体渗透系数下地面沉降分析

不同土体渗透系数下的地面竖向位移时程曲线如图 6 所示。由图 6 可知:随着土体渗透系数的增大,隧道中心轴上方地面的最终沉降量依次为 4.7 mm(工况 7)、6.4 mm(工况 8)、7.4 mm(基准工况)和 10.9 mm(工况 9),即隧道中心轴上方地面的最终沉降量越来越大。

3 因素敏感性分析

3.1 敏感性分析方法

为深入分析地面沉降的主要影响因素,拟采用无量纲式因素敏感性分析方法,系统地研究地面沉降与 η 、掘进速度及渗透系数之间的敏感性关系。假设有一系统,其系统特性 ξ 主要由 φ 个因素 $h = \{h_1, h_2, \dots, h_\varphi\}$ 所决定,可以表示为 $\xi = f(h_1, h_2, \dots, h_\varphi)$ 。在某一基准状态下有 $\xi^* = f(h_1^*, h_2^*, \dots, h_\varphi^*)$,将各因素 h_φ ($\varphi = 1, 2, \dots, n$) 在其各自的可能范围内变动,获得 $\xi^* = f(h_1^*, h_2^*, \dots, h_{i-1}^*, h_i^*, h_{i+1}^*, \dots, h_\varphi^*)$,分析系统特性 ξ 偏离基准状态 ξ^* 的趋势和程

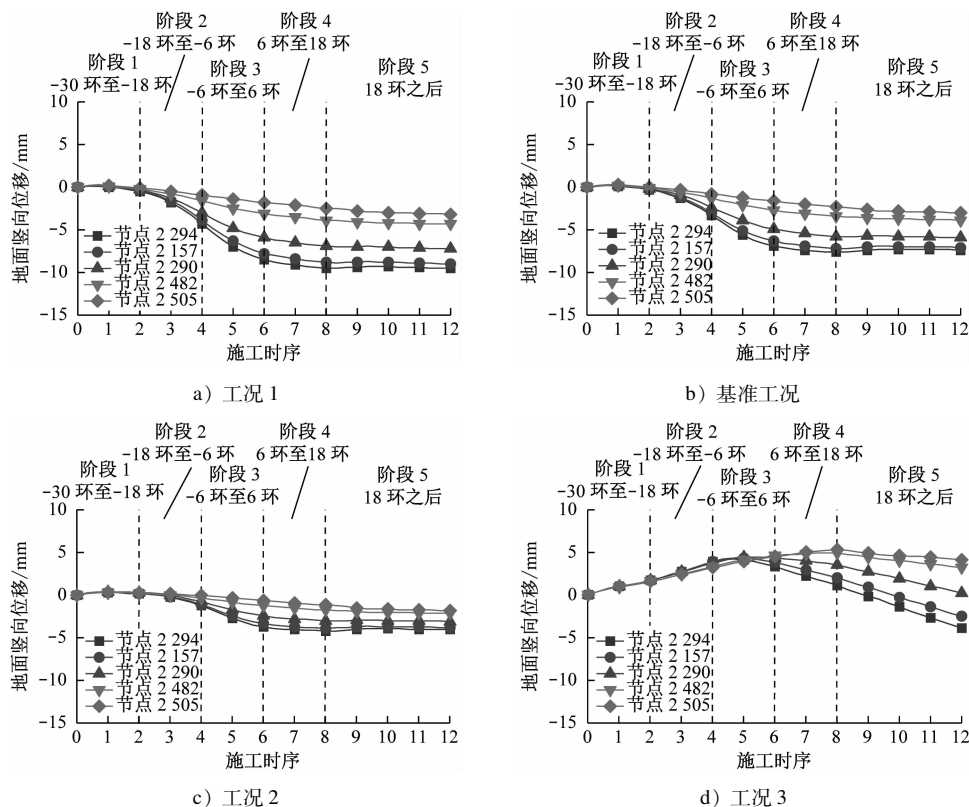
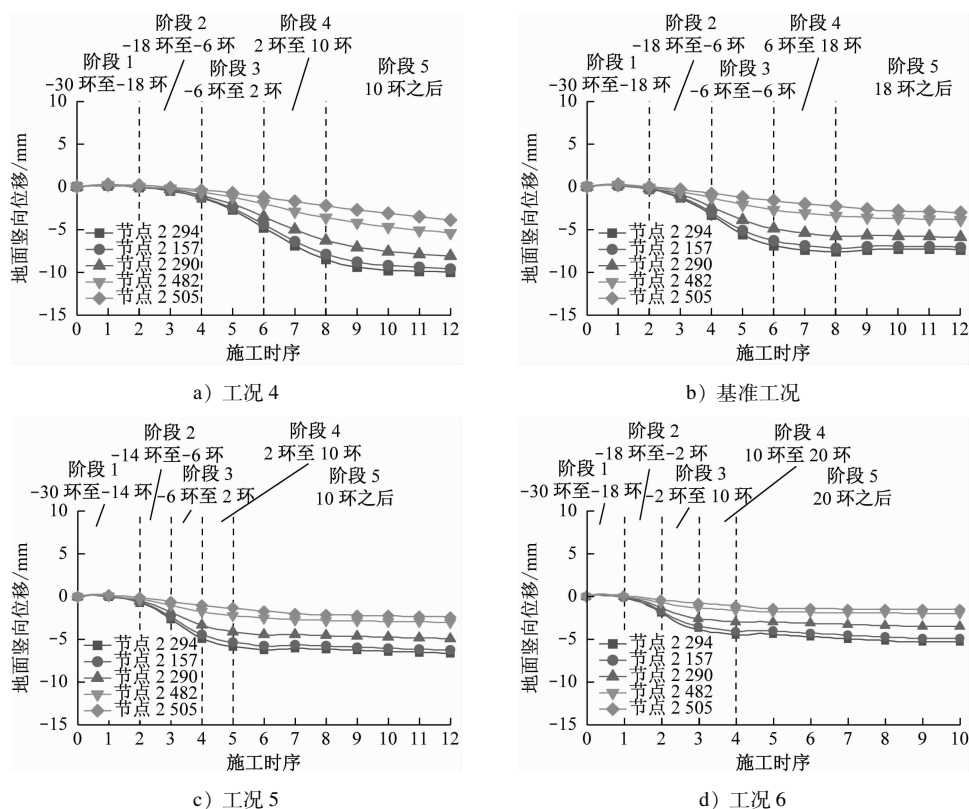
图4 不同 η 下的地面竖向位移时程曲线Fig. 4 Ground vertical displacement time-history curves at different η 

图5 不同掘进速度下的地面竖向位移时程曲线

Fig. 5 Ground vertical displacement time-history curves at different excavation speeds

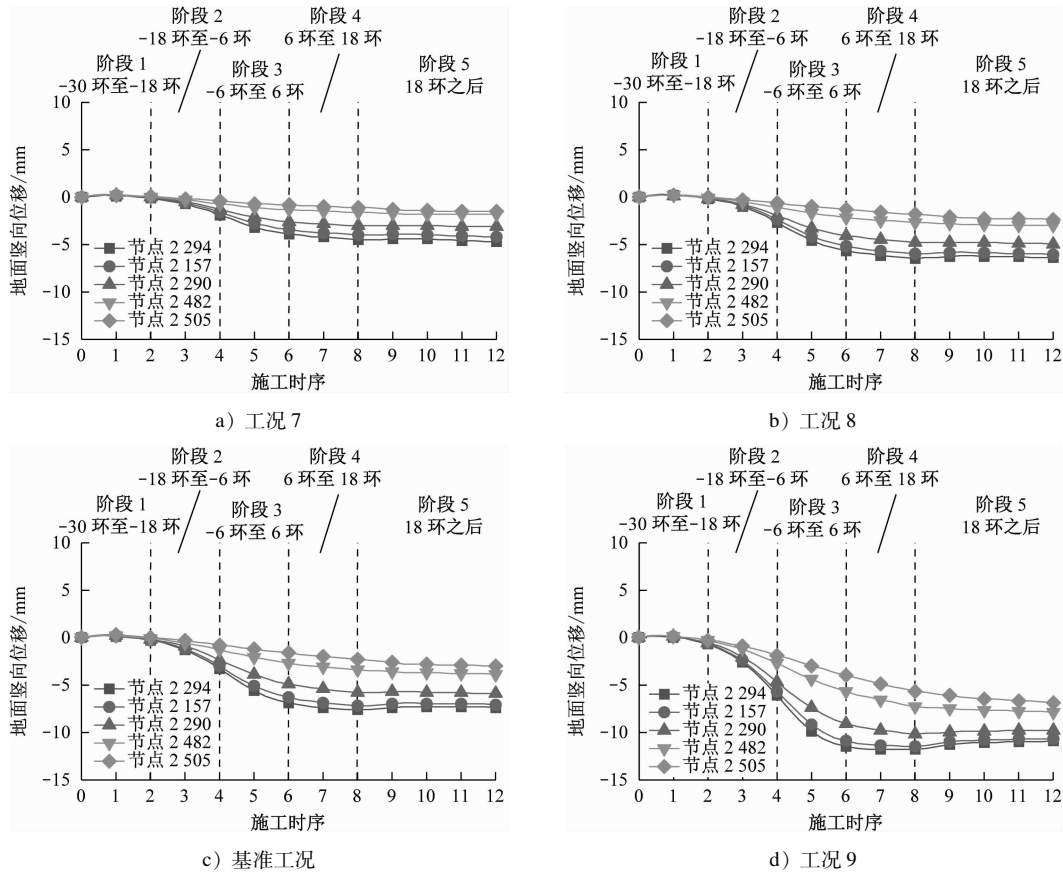


图6 不同土体渗透系数下地面竖向位移时程曲线

Fig. 6 Ground vertical displacement time-history curves at different soil permeability coefficients

度,这种分析方法称为因素敏感性分析^[9]。为便于对不同性质和单位的影响因素进行敏感性分析,本文采用量纲一化形式的敏感性函数,对比分析各影响因素对系统的敏感程度。

参数敏感性 S_g^* ($g=1,2,\dots,n$)是一组量纲为一的量的非负实数, S_g^* 越大,系统特性对该参数越敏感,则有:

$$S_g^* = \left| \frac{h_i^* \Delta \xi}{\Delta h_i \xi^*} \right| \quad (3)$$

式中:

- $|\Delta \xi / \xi^*|$ ——系统特性的相对变化率;
- $|\Delta h_i / h_i^*|$ ——某一因素的相对变化率。

3.2 敏感性计算结果

基于上述敏感性分析,采用多项式拟合法可以获得系统特性(隧道中心轴上方地面最终沉降量)与各因素(η 、掘进速度和渗透系数)间的函数关系式:①掌子面压力拟合表达式为 $y = 0.053 - 0.001x + 1.719 \times 10^{-4}x^2 - 2.604 \times 10^{-7}x^3$;②掘进速度拟合表达式为 $y = 25.7 - 6.313x + 0.703x^2 - 0.027x^3$;③土体渗透系数拟合表达式为 $y = 1.37 + 7.31 \times 10^7x -$

$$1.269 \times 10^{14}x^2 - 4.38 \times 10^7x^3。$$

通过式(3)计算各因素的敏感性,将基准工况作为 P^* ,其余工况(工况1~9)作为 P 。通过计算可知:掌子面压力的敏感性为0.827;掘进速度的敏感性为0.603;土体渗透系数的敏感性为0.644,则盾构掘进诱发地层变形的各因素敏感性排序为:掌子面压力敏感性>土体渗透系数敏感性>掘进速度敏感性。盾构掘进时,地面沉降受到不同因素的影响,在特定地层中(土体渗透系数视为客观条件),控制掌子面压力是限制地面沉降的关键要素,也是施工控制的核心因素。在此基础上,可通过优化盾构机的刀盘切削效率来提高掘进速度,进而提升施工效率。

4 结论

1) 通过对比现场实测值与模拟值的地面沉降趋势及量级可知,基于下负荷载面本构模型的应力-渗流耦合计算方法能够有效再现盾构掘进过程中的地面沉降效应。

2) 掌子面压力及掘进速度的增加会使得地面

总沉降量有所减小,而土体渗透系数越大,则会使得地面总沉降量越大。当掌子面压力过大时,会造成地面产生一定量的隆起变形。

3) 通过因素敏感性分析可知,盾构掘进诱发地层变形的各影响因素敏感性依次为:掌子面压力敏感性 > 土体渗透系数敏感性 > 掘进速度敏感性。

参考文献

- [1] 肖超, 阳军生, 褚东升, 等. 长沙地铁典型板岩地层土压平衡盾构掘进参数精细化控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 261.
XIAO Chao, YANG Junsheng, CHU Dongsheng, et al. Detailed control for shield excavation parameters in typical slate strata of Changsha Metro[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(1): 261.
- [2] 张洋, 刘陕南, 吴俊, 等. 盾构隧道掘进时地层参数变化对地表沉降的敏感性研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 127.
ZHANG Yang, LIU Shannan, WU Jun, et al. Sensitivity and its impact of strata parameters on ground surface settlements during shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 127.
- [3] ZHANG F, XIONG Y, ZHANG S, et al. Thermo-hydro-mechanical-air coupling finite element method and its application to multi-phase problems[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(2): 77.
- [4] LU Y, ZHU W X, XIONG Y L, et al. Unified description of thermoelastoplastic behavior of geomaterials considering interparticle bonding[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22

(6): 1.

- [5] HASHIGUCHI K. Subloading surface model in unconventional plasticity[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(8): 917.
- [6] 张锋. 计算土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
ZHANG Feng. Computational soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [7] 李亮, 陆勇, 范存新, 等. 基于下负荷面本构的盾构掘进响应计算[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 24.
LI Liang, LU Yong, FAN Cunxin, et al. Calculation of shield tunneling response based on subloading cam-clay model[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(12): 24.
- [8] 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.
- [9] 章光, 朱维申. 参数敏感性分析与试验方案优化[J]. 岩土力学, 1993, 14(1): 51.
ZHANG Guang, ZHU Weishen. Parameter sensitivity analysis and optimizing for test programs[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(1): 51.

· 收稿日期:2023-03-10 修回日期:2023-05-23 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-10 Revised:2023-05-23 Published:2025-05-10
· 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 60 页)

- ZHAO Cheng. Experimental study on slurry ratio of slurry shield in cross-sea tunnel[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [2] 王焰. 城际铁路大直径泥水盾构施工风险及对策:以佛莞城际铁路狮子洋隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 983.
WANG Yan. Construction risks and countermeasures for large-diameter slurry shield used in shiziyang tunnel on Foshan-Dongguan intercity railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 983.
- [3] 王志成, 王涵. 穿越多种典型地层的超大直径泥水盾构选型研究:以芜湖长江隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 493.
WANG Zhicheng, WANG Han. Type selection of super-large-diameter slurry shield tunneling through various typical strata: a case

study of Wuhu Yangtze River tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 493.

- [4] 孟绥宝, 王尧, 詹森, 等. 泥水盾构长距离穿越高水压破碎带施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 177.
MENG Suibao, WANG Yao, ZHAN Sen, et al. Construction technology of long-distance slurry shield tunneling through fracture zone under high water pressure[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12): 177.

· 收稿日期:2023-03-14 修回日期:2023-05-09 出版日期:2025-05-10
Received:2023-03-14 Revised:2023-05-09 Published:2025-05-10
· 通信作者:孙明祥,工程师,826736192@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