

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222560

地层参数和掘进参数对富水砂层盾构隧道地表沉降的影响

马子昌¹, 张继勋¹, 任旭华¹, 张玉贤¹, 王长生², 赵亮², 朱代富³, 陆嘉伟⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南省西霞院水利枢纽输水及灌区工程建设管理局, 河南 郑州 450000; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 4. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 针对现有盾构施工中地层材料参数测量计算不准确、不同掘进参数对地表沉降影响难以评价的问题, 依托某富水砂层盾构施工的引水隧洞, 通过三维数值模拟, 设计地表沉降为指标的正交试验, 分析了不同材料参数的敏感性; 此外, 依据实测沉降, 反演了材料的力学参数, 并计算不同开挖仓压力、同步注浆压力和推进速度等盾构掘进参数下的地表沉降曲线。结果表明, 砂层内摩擦角对地表沉降影响较大, 增加砂土内摩擦角和衬砌弹性模量会减小沉降; 盾构掘进速度对地表沉降影响较大, 增加掘进速度会增加最大沉降量和“沉降槽”宽度, 增加开挖仓压力或增加同步注浆压力会减小最大沉降量和“沉降槽”宽度。

关键词: 富水砂层盾构; 地表沉降; 地层参数; 掘进参数; 参数敏感性分析

中图分类号: U457; TV672⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0149-05

1 工程概况

河南省某引水隧洞地下水埋深 2 m, 隧洞平均埋深 30 m, 采用刀盘直径 6.88 m 泥水平衡盾构机施工, 衬砌外径 6.6 m、厚 0.35 m、长 1.5 m, 监测点分布见图 1, 设计开挖仓压力 500 kPa, 同步注浆压力为 650 kPa, 推进速度为 3 m/d。监测

点最大平均沉降值为 7.10 mm, 监测点 DBC350 沉降值为 7.34 mm 与平均沉降值接近, 因此采用监测点 DBC350 的位移变化量反演材料力学参数具有代表性。隧洞拱顶设有沉降监测点, 使用 30 d 内拱顶监测沉降的改变量与计算值对照, 验证反演结果的可靠性。土层材料的力学参数和盾构掘进参数对富水砂层盾构施工的地表沉降的影响不可忽视, 对此已有较多研究^[1-7]。但已有研究很少涉及埋深 30 m 的富水砂层盾构施工引起的地表沉降, 且根据监测数据获得准确土层参数的问题仍需解决, 盾构掘进参数选择依据仍需探寻。鉴于, 本文依托某埋深 30 m 的盾构隧洞, 建立渗流应力耦合有限元模型, 通过正交试验分析砂土内摩擦角、弹性模量、渗透系数等参数对沉降的影响, 根据地表监测数据反演土层材料参数, 基于多组数值试验, 研究了掘进参数对地表沉降的影响。

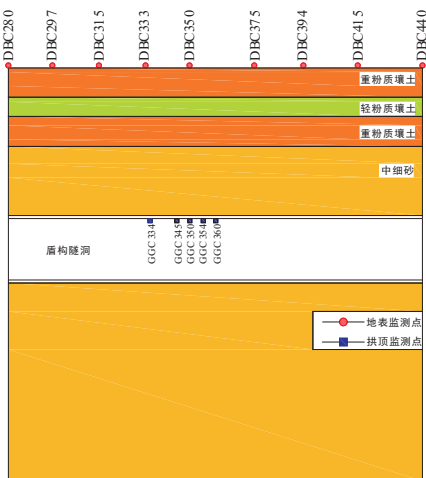


图 1 监测点布置

Fig. 1 Layout of monitoring points

2 土层材料参数对地表沉降的影响

2.1 数值计算模型

Abaqus 有限元模型高 60 m、长 60 m、宽 100 m, 剖视图见图 2, 采用渗流-应力耦合单元。土

收稿日期: 2022-12-07, 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(202102AF080001); 中央高校业务费项目(B220204001)

作者简介: 马子昌(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为盾构隧洞数值模拟, E-mail: 1121269271@qq.com

通讯作者: 张继勋(1974-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水工地下洞室, E-mail: zhangjixun@hhu.edu.cn

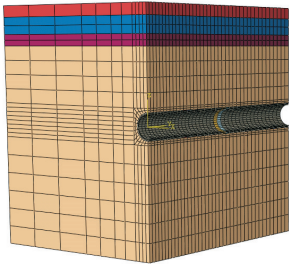


图 2 有限元计算模型剖视图

Fig. 2 Cutaway view of the finite element calculation model

体采用莫尔-库伦本构,盾构机壳、同步注浆层和衬砌采用弹性本构。计算参数见表 1。边界取法向约束,盾构机壳设置为不排水边界,在衬砌接缝处出现水渍,因此将衬砌内侧设置为孔隙水压力为零的排水边界。

表 1 有限元模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of the finite element model

材料名称	厚度 /m	渗透系数 k	重度 γ	弹性模量 $E_{砂}/MPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 C/kPa
重粉质壤土	3.0	5.3	19.8	4.9	16	25
轻粉质壤土	4.5	9.5	17.4	5.1	19	26
重粉质壤土	3.0	3.5	19.0	4.7	15	20
中细砂	49.5	*	19.8	*	*	0
同步注浆层	0.2	*	2.0	*		
衬砌	0.35	*	2.5	*		
盾构机壳			7.0	200 000		

注: * 表示待反演参数;渗透系数 k 、重度 γ 单位分别为 $10^{-7} m/s$ 、 kN/m^3 。

有限元计算过程如下。

步骤 1 设置初始条件,进行地应力平衡。

步骤 2 在地应力平衡后,将盾构机置于指定位置,所在位置用盾构机壳单元代替。

步骤 3 盾构机向前掘进一环,移除盾构机前方一环范围土体单元,向掌子面施加开挖仓压力,向盾构机壳尾部一环范围的土体表面施加同步注浆压力,取消前一次施加的同步注浆压力。

步骤 4 激活盾尾同步注浆单元和衬砌单元,取消前一次施加的同步注浆压力。

步骤 5 重复步骤 3~4 至开挖结束。

2.2 正交试验

选择砂层内摩擦角 $\varphi_{砂}$ 、弹性模量 $E_{砂}$ 、渗透系数 $k_{砂}$ 、同步注浆层弹性模量 $E_{注浆}$ 、同步注浆层渗透系数 $k_{注浆}$ 、衬砌弹性模量 $E_{衬砌}$ 和衬砌渗透系数 $k_{衬砌}$ 作为敏感性分析因素,砂层参数以室内试验结果为基础,其他参数根据室内试验和现场情况设置基准水平,见表 2 中水平 2,在敏感性分析中以基准水平 20% 增减量作为试验水平。

选择 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 正交表,将试验因素分配到后 7 列,计算每个试验方案地表监测点最大沉降量 S_{max} ,正交试验设计方案及试验结果见表 3。

表 2 敏感性分析因素水平

Tab. 2 Factor levels for sensitivity analysis

因素水平	$\varphi_{砂}/(^\circ)$	$E_{砂}/MPa$	$k_{砂}$	$E_{注浆}/MPa$	$k_{注浆}$	$E_{衬砌}/GPa$	$k_{衬砌}$
1	21.6	12	1.6	360	0.8	1.6	1.60
2	27.0	15	2.0	450	1.0	2.0	2.00
3	32.4	18	2.4	540	1.2	2.4	2.40

注: $k_{砂}$ 、 $k_{注浆}$ 、 $k_{衬砌}$ 单位分别为 $10^{-5} m/s$ 、 $10^{-11} m/s$ 、 $10^{-11} m/s$ 。

表 3 正交试验方案

Tab. 3 Orthogonal test scheme

方案	$\varphi_{砂}/(^\circ)$	$E_{砂}/MPa$	$k_{砂}$	$E_{注浆}/MPa$	$k_{注浆}$	$E_{衬砌}/GPa$	$k_{衬砌}$	S_{max}/mm
1	21.6	12	1.60	360	0.8	1.6	1.60	17.134 2
2	21.6	15	2.00	450	1.0	2.0	2.00	15.918 8
3	21.6	18	2.40	540	1.2	2.4	2.40	15.168 9
4	27.0	12	1.60	450	1.0	2.4	2.40	5.972 8
5	27.0	15	2.00	540	1.2	1.6	1.60	6.550 7
6	27.0	18	2.40	360	0.8	2.0	2.00	5.870 1
7	32.4	12	2.00	360	1.2	2.0	2.40	5.201 0
8	32.4	15	2.40	450	0.8	2.4	1.60	4.419 4
9	32.4	18	1.60	540	1.0	1.6	2.00	6.253 5
10	21.6	12	2.40	540	1.0	2.0	1.60	15.890 3
11	21.6	15	1.60	360	1.2	2.4	2.00	14.630 1
12	21.6	18	2.00	450	0.8	1.6	2.40	17.042 9
13	27.0	12	2.00	540	0.8	2.4	2.00	5.119 7
14	27.0	15	2.40	360	1.0	1.6	2.40	6.328 8
15	27.0	18	1.60	450	1.2	2.0	1.60	6.695 5
16	32.4	12	2.40	450	1.2	1.6	2.00	5.001 6
17	32.4	15	1.60	540	0.8	2.0	2.40	5.903 6
18	32.4	18	2.00	360	1.0	2.4	1.60	5.271 1

注: $k_{砂}$ 、 $k_{注浆}$ 、 $k_{衬砌}$ 单位分别为 $10^{-5} m/s$ 、 $10^{-11} m/s$ 、 $10^{-11} m/s$ 。

2.3 极差分析法

设 A 、 B 、 \dots 分别表示不同因素, t 为因素水平数, A_i 为因素 A 的第 i 个水平值 $i=1, 2, \dots, t$; X_{ij} 为因素 j 的第 i 个水平值, $j=A, B, \dots$ 。在 X_{ij} 时得到 n 个试验结果 $Y_k, k=1, 2, \dots, n$ 。

计算统计量:

$$K_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k - \bar{Y} \quad (1)$$

式中, K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下各次试验结果平均值; n 为因素 j 在水平 i 下试验次数; Y_k 为第 k 个试验指标值; \bar{Y} 为所有试验结果平均值。

极差分析的评价指标是各因素的极差值 R_j :

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} \quad (2)$$

极差值 R_j 越大,表明该因素水平的改变对试验指标影响越大。

各因素试验结果平均值 K 和极差值 R 见表 4。 $\varphi_{砂}$ 的变化对 S 影响最大, $E_{衬砌}$ 次之, $k_{砂}$ 、 $k_{衬砌}$ 、 $E_{砂}$ 对 S 影响相近,计算中应合理选择 $\varphi_{砂}$ 、 $E_{衬砌}$ 的值。

表 4 中 K 随 $\varphi_{砂}$ 、 $E_{衬砌}$ 等参数增加而减少,表明 $\varphi_{砂}$ 、 $E_{衬砌}$ 等参数增加均能减少 S_{max} 。 $\varphi_{砂}$ 由

表 4 极差分析结果

Tab. 4 Results of range analysis

极差分析	$\varphi_{砂}$	$E_{砂}$	$k_{砂}$	$E_{注浆}$	$k_{注浆}$	$E_{衬砌}$	$k_{衬砌}$
K_1	6.832 3	-0.078 6	0.299 8	-0.059 3	0.116 5	0.586 8	0.195 0
K_2	-3.042 2	-0.173 3	0.052 2	0.043 3	0.140 7	0.114 7	-0.332 9
K_3	-3.790 1	0.251 8	-0.352 0	0.016 0	-0.257 2	-0.701 5	0.137 8
R_j	10.622 5	0.425 1	0.651 8	0.102 6	0.397 9	1.288 3	0.527 9
敏感性	$\varphi_{砂} > E_{衬砌} > k_{砂} > k_{衬砌} > E_{砂} > k_{注浆} > E_{注浆}$						

21.6°增至 27.0°, K 减少 9.874 5, 超过了其他因素的极差值, 表明 $\varphi_{砂}$ 是影响 S 的主要因素; $\varphi_{砂}$ 由 27°增至 32.4°, K 减少 0.746 9, $E_{衬砌}$ 由 2.4 GPa 减至 2.0 GPa, K 增加 0.816 2, 这表明由 $\varphi_{砂}$ 增加引起 S 的减少量小于 $E_{衬砌}$ 降低引起 S 的增加量, $\varphi_{砂}$ 超过 27.0°后, $\varphi_{砂}$ 对 S 的影响降低。

2.4 砂土层内摩擦角对地表沉降影响分析

$\varphi_{砂}$ 对地表沉降的影响较大, 以表 3 中计算方案 2、6、7 为例, 取 $\varphi_{砂}$ 分别为 21.6°、27.0°、32.4°, $E_{衬砌}$ 不变, 分析 $\varphi_{砂}$ 的影响。盾尾通过 350 环后, 土体塑性区和 350 环断面竖向位移见图 3。由图 3 可知, 塑性区主要分布在盾构的前方和上方; 最大沉降位于盾构中心处, 向两侧逐渐减小。 $\varphi_{砂}$ 由 21.6°增至 27.0°, 土体塑性区范围减小、同一区域塑性变形量减小; $\varphi_{砂}$ 较小时, 由于盾构施工的扰动, 土体应力状态改变后更易进入塑性状

态、产生不可恢复变形, 出现较大的 S ; $\varphi_{砂}$ 由 27.0°增至 32.4°, 土体塑性区范围变化小, 塑性变形量减少, 在 $\varphi_{砂}$ 超过 27.0°后, 多数土体处于弹性状态, 弹性模量等参数对地表竖向位移的影响相对增加。

3 围岩材料参数反演

3.1 参数反演问题描述

设地表有 n 个监测点, 第 i 个监测点在某时刻实测值为 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$; 第 i 个监测点在某时刻数值计算值 $S'_i(t)$ 为:

$$S'_i(t) = g_i[k_{砂}, E_{砂}, \varphi_{砂}, E_{注浆}, k_{注浆}, E_{衬砌}, k_{衬砌}, t] \tag{3}$$

在某时间序列中($t_0, t_1, t_2, \dots, t_m$), t_0 为初始时刻, m 为观测时长。对于相关参数的反演可以描述为某时段实测值与计算值误差平方和最小:

$$\min \sum_i^n [S_i(t) - S_i(t_0)] - [S'_i(t) - S'_i(t_0)]^2 \tag{4}$$

式中, $S_i(t)$ 、 $S_i(t_0)$ 分别为第 i 个测点在 t 、 t_0 时刻的实测值; $S'_i(t)$ 、 $S'_i(t_0)$ 分别为第 i 个测点在 t 、 t_0 时刻的计算值。

3.2 基于改进遗传算法的反演方法

遗传算法拥有全局搜索、并行计算优势, 采用以下措施对其改进: ①采用最优保留策略, 允许父代最优个体直接进入子代; ②将当代个体按适应度大小排序, 相近两者组合进入交叉遗传环节, 若两者的平均值较大, 则减小交叉概率, 增加变异概率, 增加局部搜索。

所选反演模型的最优化函数为:

$$f(k) = \frac{1}{\sum_i^n [(S_i(t) - S_i(t_0))] - [(S'_{ik}(t) - S'_{ik}(t_0))]^2} - \min \left(\frac{1}{\sum_i^n [(S_i(t) - S_i(t_0))] - [(S'_{ik}(t) - S'_{ik}(t_0))]^2} \right) \tag{5}$$

式中, $f(k)$ 为算法中个体计算值; k 为个体编号 ($k=1, 2, \dots, l$); $S'_{ik}(t)$ 、 $S'_{ik}(t_0)$ 分别为个体 k 的第 i 个测点在 t 、 t_0 时刻的计算值。

利用 Matlab 编写改进遗传算法及与 Abaqus 接口, 计算过程如下。

步骤 1 输入待反演参数范围和精度、种群个数、最大进化代数、交叉概率和变异概率的范围、盾构开挖仓压力和同步注浆压力, 盾构掘进速

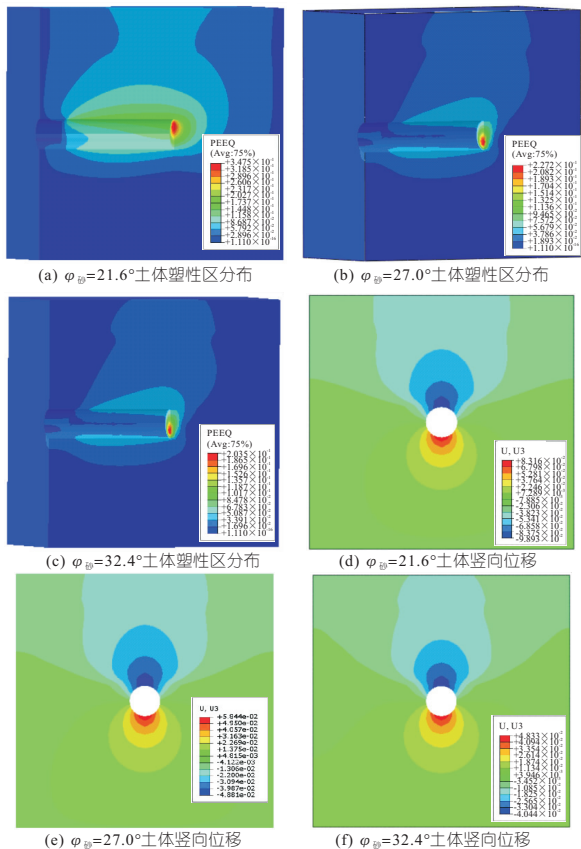


图 3 土体塑性区分布和竖向位移图

Fig. 3 Distribution of plastic zone and vertical displacement of soil mass

度等模型参数。

步骤 2 根据待反演参数范围和精度,设置二进制编码长度,生成初始种群。

步骤 3 解码待反演参数,将个体的二进制编码转换为待反演参数,写入对应有有限元计算文件,根据盾构掘进速度,设置分析步时长,并设置开挖仓压力和同步注浆压力。

步骤 4 提交有限元计算,提取地表位移值,计算个体适应度。

步骤 5 根据适应度值将个体排序,提取最优个体不参与自然选择,其余个体按照比例选择法选择。

步骤 6 进化代数达到设定的最大代数终止进程;若未达到最大代数,将交叉变异后的个体中加入最优个体,形成下一代的初始种群,继续步骤 3。

3.3 反演结果

待反演参数的取值范围、计算精度和编码长度见表 5。种群个数取 40、最大代数取 100 时,反演结果稳定。各参数的反演结果见表 5。将表 5 中结果用于模型正分析,中线点沉降随时间变化见图 4,计算值与实测值差距较小,变化趋势一致。

表 5 参数取值范围及反演结果

Tab. 5 Parameter value range and parameter inversion results

指标	$\varphi_{砂}/(^{\circ})$	$E_{砂}/\text{MPa}$	$k_{砂}$	$E_{注浆}/\text{MPa}$	$k_{注浆}$	$E_{衬砌}/\text{GPa}$	$k_{衬砌}$
取值下限	21.6	12	1.6	360	0.8	1.6	1.60
取值上限	32.4	18	2.4	540	1.2	2.4	2.40
计算精度	0.001	0.01	0.01	10	0.01	0.01	0.01
编码长度	13	10	7	7	6	7	7
反演结果	26.320	15.65	2.33	392	1.00	1.98	2.10

注: $k_{砂}$ 、 $k_{注浆}$ 、 $k_{衬砌}$ 单位分别为 10^{-5} m/s 、 10^{-11} m/s 、 10^{-11} m/s 。

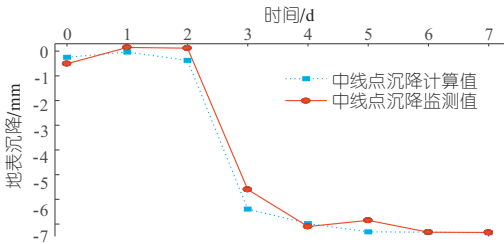


图 4 中线点沉降随时间变化

Fig. 4 Midline point subsidence changes over time

4 盾构掘进参数对地表沉降分析

盾构开挖引起的地表沉降曲线一般称为“沉降槽”,沉降槽的两个重要指标分别为地面沉降最大值 S_{max} 、“沉降槽宽度” i , S_{max} 位于沉降曲线中点, i 为沉降曲线中心点到拐点的距离。

4.1 掘进速度对地表沉降的影响

计算盾构机在 0.50 倍设计推进速度(1.5

m/d)、0.75 倍设计推进速度(2.25 m/d)、设计推进速度(3 m/d)和 2.00 倍设计推进速度(6 m/d)下,沉降最大值和沉降槽宽度见图 5。由图 5 可知,增加开挖仓压力、降低推进速度均能减小 S_{max} 。速度增加会引起 i 增加,推进速度不超过 3 m/d 时, i 会随开挖仓压力的增加而显著减小,推进速度 6 m/d,开挖仓压力对 i 影响较小。

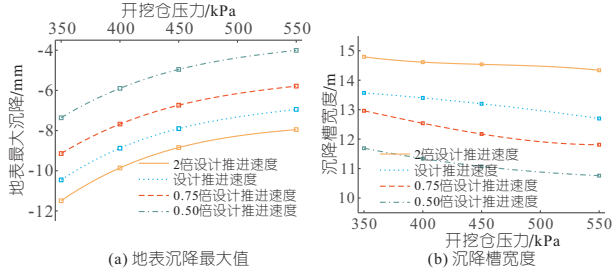


图 5 不同推进速度下地表沉降最大值和沉降槽宽度图
Fig. 5 Maximum surface subsidence and width of the settling tank at different propulsion speeds

4.2 同步注浆压力对地表沉降的影响

在盾构推进过程中,为避免开挖仓向盾尾泄压,盾尾同步注浆压力应略大于开挖仓压力,在设计推进速度下,计算了四组开挖仓压力下不同的同步注浆压力引起的地面沉降最大值 S_{max} 和沉降槽宽度 i ,见图 6。由图 6 可得, S_{max} 与同步注浆压力和开挖仓压力差值呈线性关系。增加同步注浆压力能减小 S_{max} 、 i 。 i 会随开挖仓压力的增加而减小;开挖仓压力小于 450 kPa 时,同步注浆压力对 i 影响明显。

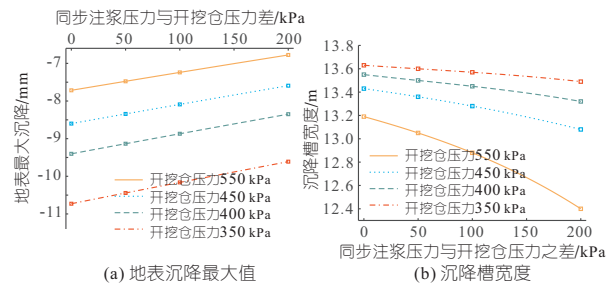


图 6 不同同步注浆压力下沉降槽宽度

Fig. 6 Maximum surface subsidence and width of settling tank under different simultaneous grouting pressures

4.3 掘进参数对地表沉降影响分析

改变单一掘进参数对地表沉降影响有限,应根据地表要求,系统调整掘进参数。利用已有计算结果,分析当前掘进参数下,降低 S_{max} 和 i 所需调整的掘进参数。参数调整方案见表 6。由表 6 可知,降低 S_{max} 的方案也会减少 i ,减少 i 的方案可能会引起 S_{max} 的增加;掌子面压力和同步注浆压力需根据方案掘进速度调整以达到地表沉降要求。

表 6 参数调整方案

Tab. 6 Parameter adjustment scheme

地表变化量	可行的参数调整方案	相关影响
最大沉降量 S_{\max} 降低 1 mm	方案 1:掘进速度降至 2.25 m/d,掌子面压力调整至 480 kPa,同步逐渐压力调整至 630 kPa 方案 2:掘进速度降至 1.5 m/d,掌子面压力调整至 380 kPa,同步逐渐压力调整至 530 kPa	i 减少 1.0 m i 减少 1.7 m
最大沉降量 S_{\max} 降低 2 mm	掘进速度降至 1.5 m/d,掌子面压力调整至 440 kPa,同步逐渐压力调整至 590 kPa	i 减少 1.9 m
最大沉降量 S_{\max} 降低 3 mm	掘进速度降至 1.5 m/d,掌子面压力调整至 510 kPa,同步逐渐压力调整至 650 kPa	i 减少 2.1 m
沉降槽宽度 i 降低 1.0 m	掘进速度降至 2.25 m/d	S_{\max} 降低 1.1 mm
沉降槽宽度 i 降低 1.5 m	方案 1:掘进速度降至 2.25 m/d,掌子面压力调整至 550 kPa,同步逐渐压力调整至 750 kPa 方案 2:掘进速度降至 1.5 m/d,掌子面压力调整至 370 kPa,同步逐渐压力调整至 520 kPa	S_{\max} 降低 0.84 mm S_{\max} 降低 0.44 mm
沉降槽宽度 i 降低 2.0 m	掘进速度降至 1.5 m/d,掌子面压力调整至 460 kPa,同步逐渐压力调整至 610 kPa	S_{\max} 降低 2.54 mm

5 结论

本文发现 $\varphi_{\text{砂}}$ 对地表沉降量影响较大;当盾构机推进速度增大时,地表沉降曲线的最大沉降量 S_{\max} 会增加,“沉降槽”宽度 i 亦会增加;盾构掘进参数相互影响,在开挖仓压力不足时,应减小盾构推进速度,增加同步注浆压力,降低 S_{\max} 、 i ;在富水砂层盾构施工中,根据反演得到的材料力学参数选择盾构掘进参数是合理可行的。

Influence of Soil Parameters and Shield Operation Parameters on Surface Settlement of Shield Tunnel in Water-rich Sand Layer

MA Zi-chang¹, ZHANG Ji-xun¹, REN Xu-hua¹, ZHANG Yu-xian¹, WANG Chang-sheng²,
ZHAO Liang², ZHU Dai-fu³, LU Jia-wei⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Henan Province Xixiyuan Water Conservancy Project Water Conveyance and Irrigation District Engineering Construction Administration, Zhengzhou 450000, China; 3. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Corporation Limited, Shanghai 200092, China)

Abstract: There are some problems in construction, such as inaccurate material parameters and unclear influence of shield operation parameters on ground settlement. Based on a water-rich sand layer shield construction diversion tunnel, an orthogonal experiment is designed by setting the index of ground surface settlement, and a three-dimensional numerical simulation is used to analyze sensitivity of different material's parameter. Mechanical parameters of materials are inverted according to the observed settlement. The subsidence lines under different excavation pressures, different synchronous grouting pressures and different speeds of the shield are calculated. The result shows that the surface subsidence is most sensitive to the change of internal friction angle of sand layer. Increasing the internal friction angle of the sand layer and the elastic modulus of the lining will reduce the settlement. The speed of the shield has a great influence on the subsidence. Increasing the speed of the shield, the maximum settlement of the surface settlement curve will increase, and the width of the "settlement tank" will also increase. The maximum settlement and the width of "settlement tank" decrease with the increase of excavation chamber pressure or synchronous grouting pressure.

Key words: tunnel shield in water rich sand layer; ground surface settlement; soil parameters; tunneling operation parameters; parameter sensitivity analysis

参考文献:

- [1] 王长虹,朱合华,徐子川,等. 考虑岩土参数空间变异性的盾构隧道地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 270-277.
- [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): 127-134.
- [3] LI Z, LUO Z, XU C, et al. 3D fluid-solid full coupling numerical simulation of soil deformation induced by shield tunnelling[J]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 90: 174-182.
- [4] 冯慧君,俞然刚. 双线隧道盾构掘进对地表沉降影响的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 78-83.
- [5] 杜胜,钟俊辉,尹培林. 福州砂土地层土压平衡盾构隧道掘进参数和地表沉降特性分析[J]. 现代隧道技术, 2019(增刊 2): 379-385.
- [6] 田勇坚,杜守继,孙伟良,等. 基于半舱气压法的大直径泥水盾构掘进参数与地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2530-2537.
- [7] 白洋,蒋斌松,杨乐,等. 苏通 GIL 电力综合管廊大直径泥水盾构泥浆成膜特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 184-187, 108.