

DOI: 10.11779/CJGE201905004

盾构隧道施工预测与动态调控方法研究

周 健^{1, 2}, 柴嘉辉¹, 丁修恒³, 于仕才¹, 张艳伟¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中铁上海工程局集团有限公司城市轨道交通工程分公司, 上海 201900)

摘要: 隧道近距离穿越已有结构的风险不容忽略, 而盾构隧道开挖引起的地层变形主要由地层损失引起, 通过对施工过程的调整控制可影响开挖过程中的地层损失率。基于此, 提出一种盾构隧道施工预测与动态调控的方法: 基于地层损失理论建立地层损失率与地层变形的关系, 同时基于经验公式对盾构施工过程进行动态调控, 使盾构施工引起的变形满足控制要求。具体而言, 通过试算确定满足变形要求的最大地层损失率, 并进一步依据已盾构区段的施工情况, 通过动态调控使风险区段地层损失率符合要求, 从而满足安全施工的要求。相对其他方法, 本方法易于操作、具有实用性, 同时减少了人为因素, 结果较准确。通过苏州轨道交通 3 号线下穿 1 号线重叠隧道的工程实例验证, 具有可行性, 针对该下穿区段, 提出地层损失率应控制在 0.76% 以内, 并为 3 号线下穿 1 号线给出安全施工建议。

关键词: 重叠隧道; 地层损失; 施工预测; 动态调控; FLAC^{3D}

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)05-0821-08

作者简介: 周 健(1957—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程风险管理、软土地基处理技术等研究。E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn。

Construction prediction and dynamic control of shield tunnel

ZHOU Jian^{1,2}, CHAI Jia-hui¹, DING Xiu-heng³, YU Shi-cai¹, ZHANG Yan-wei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Civil Engineering Co., LTD of CREC Urban Rail Transit Engineering Company, Shanghai 200092, China)

Abstract: It can not be ignored that the construction of shield tunnel in the proximity of the existing structures is risky. The stratum loss is the major cause of ground deformation during the construction process of shield tunnel. It is suggested that the stratum loss rate should be controlled by regulating the construction procedure. Therefore, based on these two premises, a method for construction prediction and dynamic control during shield tunneling is proposed: to establish a relationship between the stratum loss rate and the ground deformation based on the stratum loss theory, meanwhile to dynamically regulate the construction procedure to make ground deformation meet the control requirements. To be more specific, firstly through pilot calculation the maximum stratum loss rate is obtained under the control requirements, then, the construction procedure is dynamically regulated based on the data from constructed sections to make sure that the stratum loss rate of risky sections does not exceed the maximum value and thus meets the requirements of construction safety. Compared with other methods, this method is relatively simple and practical, and at the same time less impressionable by human factors, which makes the results more accurate. Through the example of the project case of Suzhou Metro Line 3, the feasibility of the proposed method is illustrated. The results show that the stratum loss rate should be kept within the limit of 0.76% in the overlapped section. Moreover, some construction advices are also put forward regarding the project of Suzhou Metro Line 3 tunneling beneath Line 1 to significantly lower the construction risks.

Key words: overlapped tunnel; stratum loss; construction prediction; dynamic control; FLAC^{3D}

0 引言

随着城市的发展, 城市中的建筑物越来越密集, 促使许多的地铁隧道建设在原有结构的附近, 隧道近距离下穿结构物的复杂环境现象明显增多, 其中, 隧

道近距离穿越已有隧道的风险更不容忽略。

对于周边结构物上产生变形的机理, 众多学者已

做出大量研究, 研究方法主要聚焦于以下 4 类: ①经验公式法^[1-3], 其中以 Peck 公式最为典型; ②理论计算法^[4-6]; ③随机介质法^[7-8]; ④数值模拟法^[9-10]等。不少学者认为地层损失是引起地层变形的首要原因。地层损失的概念最早由 Peck^[1]于 1969 年系统地提出。Peck 认为, 开挖过程中产生的地层损失是引起地层变形的首要原因, 而开挖引起的地表沉降通常在不排水条件下发生, 因此 Peck 假定, 地表沉降槽的体积与地层损失的体积相等^[11], 同时给出公式来描述地层损失与地层变形的经验关系。周健等^[10]从实用且快速评估的角度出发, 基于 FLAC^{2D} 数值模拟的方法对地层损失率进行研究, 在对开挖过程的模拟过程中引入地层损失的概念, 对开挖过程进行了简化, 同时隧道施工引起的地层变形得到充分的考虑。

另一方面, 通过对施工过程的控制可对地层损失率产生影响。王建秀等^[12]从数值模拟的角度出发, 对隧道施工过程进行分析, 通过分析地层损失率计算结果和现场监测数据, 建立了地面沉降 - 地层损失率 - 施工参数之间的关系。王洪新等^[13-15]认为, 在隧道盾构掘进过程中, 刀盘对于围岩的挤土效应非常明显, 这是地层受到扰动的首要因素, 而挤土效应受到多方因素的影响, 其中土体力学特性、盾构掘进速度等指标的影响最为显著, 在此基础上, 王洪新等建立了盾构推进对前方土体的总附加接触压力的半理论、半经验公式。李忠超等^[16]基于王洪新等的结论, 认为地层损失率与刀盘挤土附加应力具有显著的相关关系, 随着 Δp_0 增大, 地层损失率先减小后增大, 变化形态接近二次函数型。

综上所述, 通过对施工过程进行动态调控来影响地层损失率, 从而降低盾构施工对周围结构的影响具有可行性。反过来, 通过制定地表沉降、近邻结构的变形、沉降控制标准反算应控制的地层损失率, 并进一步通过动态调整来使地层损失满足施工要求同样具有可行性, 可为降低同类风险提供指导。相比于其他方法, 本方法易于操作、具有实用性, 同时减少了人为因素, 结果较准确。

1 方法介绍

本文提出一种施工盾构施工参数的预测方法: 基于地层损失理论建立地层损失率与地层变形的关系, 同时基于经验公式对盾构施工进行动态调控, 使盾构施工引起的变形满足控制要求。即通过试算确定满足变形要求的最大地层损失率, 并进一步通过动态调控, 使地层损失率符合要求, 从而满足安全施工的要求。

1.1 地层损失率与地层变形的关系

地层损失率的概念最早由 Peck^[1]提出。Peck 在分

析大量地铁施工引起的沉降观测数据的基础上, 提出了地表沉降槽符合正态分布曲线(图 2)。Peck 认为, 开挖过程中产生的地层损失是引起地层变形的首要原因, 而开挖引起的地表沉降通常在不排水条件下发生, 因此他假定, 地表沉降槽的体积与地层损失的体积相等。

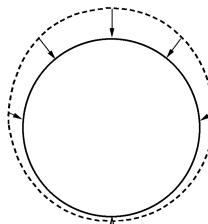


图 1 地层损失示意图

Fig. 1 Diagram of stratum loss

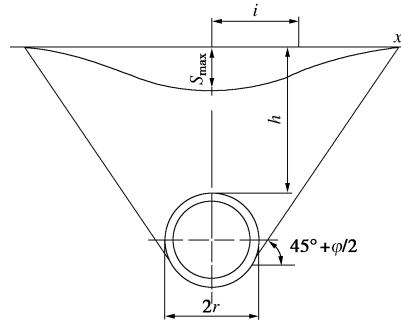


图 2 开挖地面沉降槽示意图

Fig. 2 Diagram of settling tank above ground

在隧道盾构施工过程中, 实际开挖土体土体通常会大于竣工后的隧道体积, 两者的差值通常被称为地层损失, 常以地层损失率 V_L 表示:

$$V_L = \frac{\Delta V}{V_0} \quad , \quad (1)$$

式中, ΔV 为盾构隧道单位长度上的地层损失量 (m^3/m), V_0 为盾构隧道单位长度上的理论体积 (m^3/m)。

隧道施工引起的地层损失会造成土体的位移与变形, 对于地层损失率与地表沉降的数量关系, 常用经验公式及数值模拟两种方法计算。

(1) Peck 公式

Peck 同时给出了均质黏性土中, 盾构隧道引起地面沉降的估算公式。对于均质黏性土层, 盾构隧道引起的地表沉降可表示为^[1]

$$S_x = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi}i} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad , \quad (2)$$

$$S_{\max} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_1}{2.5i} \quad , \quad (3)$$

$$i = \frac{h+r}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad . \quad (4)$$

式中 S_x 为据隧道中心距离 x 处的地面沉降 (m); V_1 为隧道中单位长度的地层损失 (m^3/m); i 为沉降槽宽度系数, 取值为中心点与地表沉降反弯点处的距离; S_{\max} 为最大地表沉降值; φ 为土体内摩擦角; h 为覆土层厚度 (m); r 为隧道盾构半径 (m)。

(2) 数值模拟

借助数值模拟软件, 可给定地层损失率对地表及周围构筑物的变形、沉降进行预测。如周健等^[10]基于 FLAC^{2D} 数值模拟的方法对地层损失率进行研究, 在对开挖过程的模拟过程中引入地层损失的概念, 对开挖过程进行了简化, 同时隧道施工引起的地层变形得到充分的考虑。

1.2 盾构施工与地层损失率的经验关系

根据之前学者研究以及本项目的工程实际^[13-16], 盾构施工参数中的总推力 N 、扭矩 T 、掘进速度 v 等指标是影响地层损失率的重要参数, 本节考虑各参数间的相关性, 从中选取主要的独立参数来建立模型。

通常来讲, 盾构总推力与刀盘扭矩、推进速度与刀盘扭矩具有比较强的相关关系, 可用函数表示为

$$N = f_1(T) \quad , \quad (5)$$

$$v = f_2(T) \quad , \quad (6)$$

式中, N 为总推力, v 为盾构推进速度, T 为刀盘扭矩, $f(T)$ 为与扭矩 T 有关的函数关系。

王洪新等^[13-15]认为在隧道盾构掘进过程中, 刀盘对于围岩的挤土效应非常明显, 这是地层受到扰动的首要因素, 而挤土效应受到多方因素的影响, 其中土体力学特性、盾构掘进速度等指标的影响最为显著。他提出刀盘面板正面的接触压力应为

$$p = p_0 + \Delta p_0 \quad , \quad (7)$$

式中, p_0 为土层初始侧向土压力 (kPa), Δp_0 为面板挤土附加应力 (kPa)。

同时进一步指出:

$$\Delta p_0 = \frac{10.13(1-\mu)E_u}{(1+\mu)(3-4\mu)D} \cdot \frac{\pi v(1-\xi)^2}{k\omega} \quad , \quad (8)$$

式中, μ 、 E_u 为总应力条件下土的泊松比和弹性模量, k 为刀盘分块数, D 为盾构直径, ω 为刀盘转速 (rpm), ξ 为刀盘开口率 (%)。

王洪新等^[13-15]通过计算 Δp_0 , 可以得到 $V_L-\Delta p_0$ 散点图, 认为地层损失率与刀盘挤土附加应力具有显著的相关关系, 随着 Δp_0 增大, 地层损失率先减小后增大, 变化形态接近二次函数型。其近似拟合公式可表示为

$$V_L = A\Delta p_0^2 + B\Delta p_0 + C \quad , \quad (9)$$

式中, A 、 B 、 C 为地层损失率 V_L 与面板挤土附加应力 Δp_0 关系的经验系数。

联立式 (5) ~ (9) 得到的施工参数与地层损失率之间的经验模型:

$$\left. \begin{aligned} N &= f_1(T) , \\ v &= f_2(T) , \\ \Delta p_0 &= \frac{10.13(1-\mu)E_u}{(1+\mu)(3-4\mu)D} \cdot \frac{\pi v(1-\xi)^2}{k\omega} , \\ V_L &= A\Delta p_0^2 + B\Delta p_0 + C . \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, $f(T)$ 为与扭矩 T 有关的函数关系, 其余参数在上文中均已有所说明。

1.3 施工预测与动态调控方法

动态调控施工过程可影响地层损失率, 降低盾构施工对周围结构的影响。对于含风险源区段 (以下简称“风险段”) 的施工, 具体步骤如下:

(1) 进行试验段施工, 对盾构推进施工参数、地表沉降进行监测, 确定主要施工参数之间的相关关系、得到施工参数 - 地层损失率经验模型的模型参数。

(2) 根据相关规范制定变形控制标准, 基于变形控制标准由经验公式 (Peck 公式) 或数值模拟的方法得到风险段应控制的地层损失率。

(3) 基于以上模型和应控制的最大地层损失率, 对风险段的盾构施工进行动态调整, 使地层损失率满足要求, 从而降低工程风险。

本方法的具体流程可用图 3 表示。

2 方法应用

本节将结合苏州地铁 3 号线试验段的实测数据, 确定式 (10) 中的待定系数, 并拟合得到盾构总推力 - 刀盘扭矩、推进速度 - 刀盘扭矩的相关关系, 并基于经验模型及应控制的地层损失率, 为施工过程的动态调控提供建议, 从而验证方法的实用性。

2.1 施工预测与动态调控方法

苏州轨道交通 3 号线工程土建施工项目(第三批) III-TS-14 标, 主要包括二站三盾构区间 (含一区间竖井)。由于位于城市密集区, 隧道区间经过区域条件复杂, 对于近距离下穿已有隧道等风险源, 在苏州缺少相关施工经验, 因此本工程的施工存在很多技术难题和挑战^[18]。

苏州轨道交通 3 号线在距离东方之门站南端 18.55 m 位置下穿 1 号线已运营隧道, 3 号线与 1 号线隧道竖向最小净距为 2.3 m, 平面上基本正交。3 号线金鸡湖西站—东方之门站与 1 号线平面关系图如图 5 所示。3 号线、1 号线立面关系及土层情况如图 4 所示, 覆土层参数情况如表 1 所示。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of seepage properties for sandstone

土层序号	编号及岩土名称	土层厚度 /m	天然重度 γ /(kN·m ⁻³)	压缩模量 $E_{s(1-2)}$ /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	摩擦角 $\phi/(^\circ)$
①	2 素填土	3.4	19.0	5.39	0.35		
②	1 黏土	4.2	19.7	7.00	0.32	45.0	11.0
③	2 粉质黏土	2.2	19.3	6.76	0.34	23.2	11.5
④	2 粉土夹粉砂	5.3	19.2	12.92	0.29	26.3	6.4
⑤	1 粉质黏土	11.2	19.2	6.32	0.37	20.6	13.4
⑥	2 粉质黏土	5.8	19.4	6.28	0.35	26.3	12.2
⑦	1 粉质黏土	16.6	19.1	5.76	0.37	25.5	10.7
⑧	粉质黏土	11.3	19.2	6.14	0.37	23.7	11.9

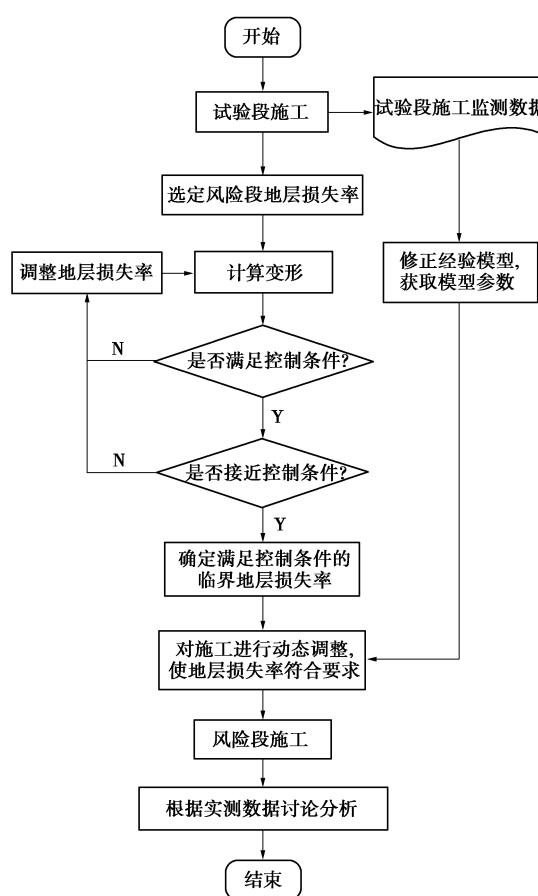


图 3 本方法流程图

Fig. 3 Flow chart of proposed method

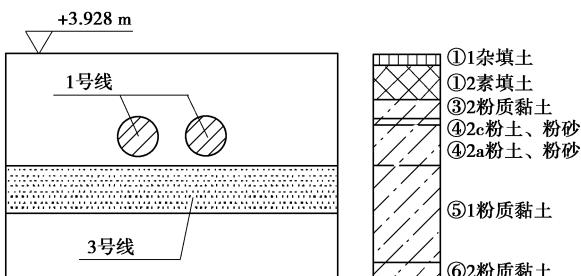


图 4 立面关系及地质剖面图

Fig. 4 Vertical plan and geological section

2.2 经验模型的修正与参数选取

首先以试验段 808 环为例，计算试验段各环的地

层损失率，作为后文中修正“施工参数-地层损失率经验模型”的关键参数。试验区段及 808 环所处位置见图 6。地表沉降如图 7 所示，其中以 808 环为横坐标的零点。

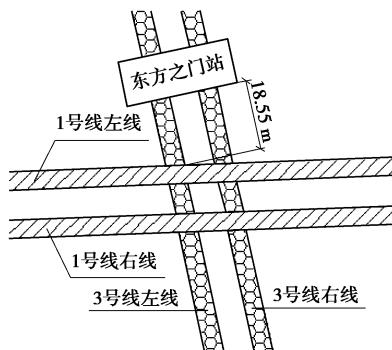


图 5 平面关系图

Fig. 5 Site plan

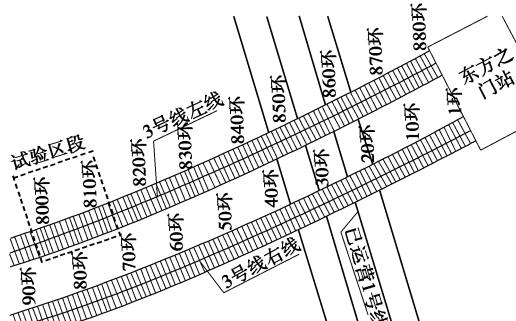


图 6 试验段区位平面示意图

Fig. 6 Site plan of test section

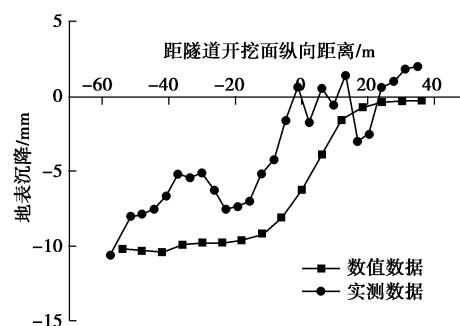


图 7 地层损失率为 0.95% 时的地表沉降图

Fig. 7 Curves of ground settlement at stratum loss rate of 0.95%

有限差分软件 FLAC^{3D}采用动态方程进行求解, 可以很有效地模拟非线性问题和大变形问题^[17]。假定地表和各土层均质且水平层状分布, 岩土体采用 Mohr-Column 本构模型。采用的三维计算模型尺寸为 96 m×60 m×60 m(长度×宽度×深度), 使用有限元软件 ANSYS 进行网格划分, 取 3 号线左线隧道最终直径 $D=6.2$ m, 隧道顶部与地表距离取 14.235 m。根据实际地勘报告建立模型, 将土层等效为 8 层, 土层分布状况及模型参数如表 1 所示。

图 7 为采用有限差分软件 FLAC^{3D}计算出 3 号线左线施工而引起的地表沉降曲线及采用 DS05 水准仪对该区段的地表位移进行监测得到的地表沉降。从图 7 中可知: 当地层损失率为 0.95% 时, 计算得到的 3 号线左线施工而引起的最大地表沉降与实际工程中试验段监测出来的最大地表沉降相近, 且使用 FLAC^{3D}计算得到的地表沉降曲线能够包含实际工程中测量出的地表沉降曲线, 因此计算得到的地层损失率为 0.95%。

类似地, 通过对试验段监测数据的计算分析, 可以获得如表 2 所示的计算地层损失率:

表 2 试验段计算地层损失率

Table 2 Calculated stratum loss rates of test section

环号	780	787	800	802	808	818
地层损失率 /%	0.66	0.68	0.73	0.76	0.95	0.72

(1) 总推力 - 刀盘扭矩参数关系

根据 1—776 环试验段施工参数, 整理得到的总推力与刀盘扭矩数据如图 8 所示, 总推力与刀盘扭矩变化趋势总体上一致, 个别区段受施工意外情况等影响存在一些偏差。

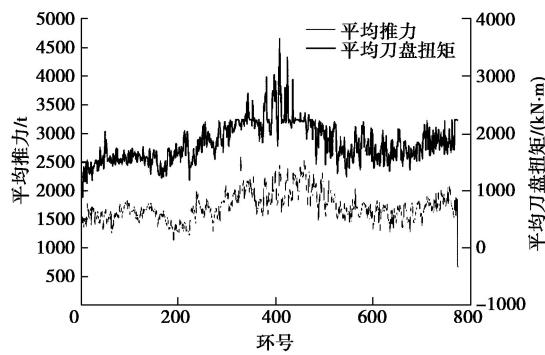


图 8 总推力和刀盘扭矩随施工的变化

Fig. 8 Curves of total thrusts and cutter torques under change of construction

对总推力与刀盘扭矩数据进行回归分析, 结果如图 9 所示, 两者基本呈线性关系, 拟合方程为

$$N = 0.4833T + 836.83 \quad (11)$$

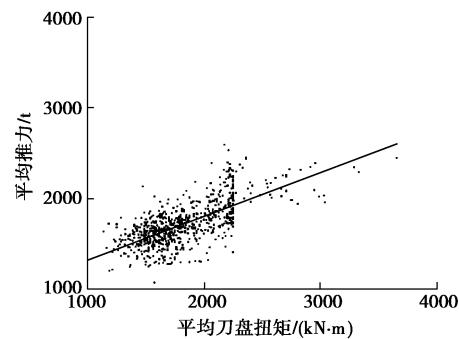


图 9 总推力 - 刀盘扭矩回归分析

Fig. 9 Regression analysis of total thrusts and cutter torques

(2) 刀盘扭矩 - 推进速度参数关系

根据施工数据分析推进速度与刀盘扭矩随推进环数的变化规律, 如图 10 所示, 与总推力和刀盘扭矩随施工环数的变化规律相似, 推进速度与刀盘扭矩之间总体上具有相同的变化趋势。

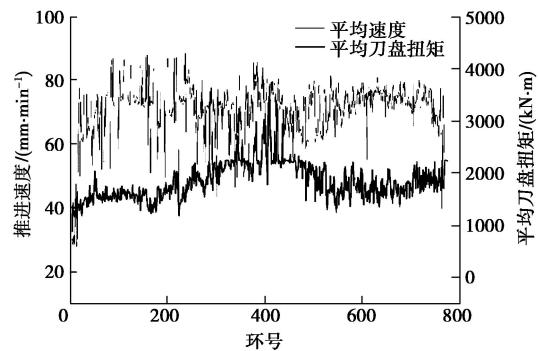


图 10 推进速度和刀盘扭矩随施工的变化

Fig. 10 Curves of tunneling speeds and cutter torques under change of construction

对图 11 中推进速度与刀盘扭矩数据进行回归分析, 拟合方程为

$$T = 1599.33e^{0.00185v} \quad (12)$$

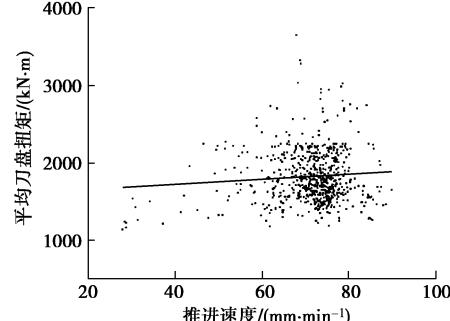


图 11 刀盘扭矩-推进速度回归分析

Fig. 11 Regression analysis of cutter torques and tunneling speeds

(3) 经验模型参数选取

上文中, 通过对试验段监测数据的计算分析, 可以获得计算地层损失率如表 2 所示, 利用式 (8), 分别计算表 2 中各环施工参数之下的 Δp_0 可得表 3。

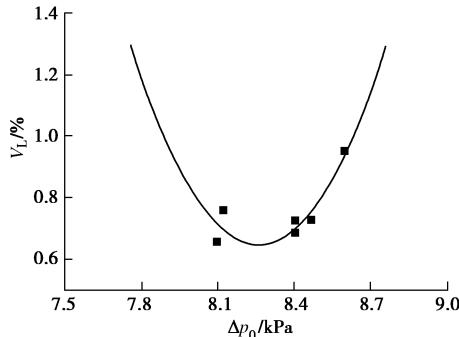
表 3 Δp_0 计算值Table 3 Calculated values of Δp_0

环号	780	787	800	802	808	818
Δp_0 /kPa	8.10	8.40	8.47	8.12	8.60	8.40

代入式(9)可得拟合公式

$$V_L = 2.5866\Delta p_0^2 - 42.736\Delta p_0 + 177.1 \quad (13)$$

$V_L - \Delta p_0$ 关系如图 12 所示, 相关系数 $R^2=0.8356$, 相关性较高。

图 12 $V_L - \Delta p_0$ 拟合模型Fig. 12 $V_L - \Delta p_0$ fitting model

2.3 下穿段最大地层损失率的计算

苏州轨道交通 3 号线在 840—870 环下穿已运营的 1 号线, 具有一定风险, 如图 13 所示。苏州地铁 3 号线与 1 号线隧道最终直径均为 $D=6.2$ m。

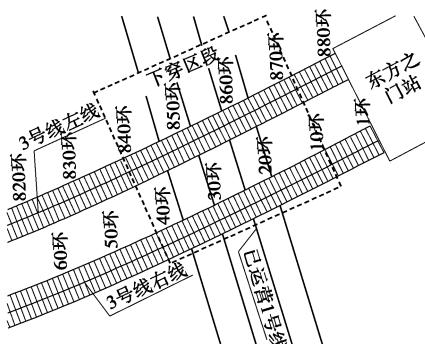


图 13 下穿段区位平面示意图

Fig. 13 Site plan of overlapped section

通常来讲, 重叠隧道需要控制的变形有两个方面: 一是盾构施工导致的地表变形, 二是近距离下穿导致的既有结构上的变形。如北京市地方标准《地铁工程监控量测技术规程 (DB11/490—2007)》中规定盾构隧道施工时引起的地面沉降值不应超过 30 mm, 隆起值不应超过 10 mm^[18]。参考以上经验制定变形控制标准, 如表 4 所示。

表 4 隧道施工对地表变形控制标准

Table 4 Control criteria of ground deformations caused by tunnel construction

变形控制标准	预警值	警戒值	允许值
地表沉降/mm	10	20	30
地表隆起/mm	3	7	10

对于已有隧道的变形控制, 中铁上海局给出的沉

降量控制值为 10 mm, 隆起量控制值为 5 mm^[18], 如表 5 所示。

表 5 隧道施工对已有隧道变形控制标准

Table 5 Control criteria of existing tunnel deformations caused by tunnel construction

变形控制标准	沉降量/mm	隆起量/mm
已有隧道	10	5

应用 FLAC^{3D} 软件、参照 2.2 节中的方法进行试算, 试算结果表明, 当地层损失率减小到 0.76% 时, 3 号线下穿 1 号线施工对周围土体和 1 号线隧道变形影响满足相关规范和要求。

地层损失率为 0.76% 时的地表沉降最大值为 -12.3 mm, 小于警戒值, 如表 6 所示。

表 6 地表沉降最大值

Table 6 Maximum ground settlements

工况	地表沉降最大值/mm
3 号线左线开挖	-2.54
3 号线右线开挖	-12.3

通过 FLAC^{3D} 数值模拟得到地层损失率为 0.76% 时, 盾构施工在已有隧道上引起的竖向变形均为沉降, 最大沉降范围为 -3.33~ -10.16 mm, 最大沉降值略大于沉降控制值 10 mm, 如表 7 所示。

表 7 隧道施工对已有隧道变形影响

Table 7 Deformations of existing tunnels caused by tunnel construction

工况	拱顶	拱底	左腰	右腰	(mm)
1 号线 左线	3 号线左线 开挖	-3.33	-2.83	-3.28	-3.06
	3 号线右线 开挖	-9.98	-10.15	-10.07	-9.82
1 号线 右线	3 号线左线 开挖	-3.15	-3.12	-3.14	-3.21
	3 号线右线 开挖	-10.16	-9.34	-9.83	-9.28

通过 FLAC^{3D} 数值模拟得到地层损失率为 0.76% 时, 3 号线右线隧道施工引起的已有 3 号线左线隧道的竖向变形均为沉降, 范围为 -0.1~ -3.4 mm, 最大沉降值为 -3.4 mm, 小于沉降量控制值 10 mm, 如表 8 所示。

表 8 3 号线右线隧道施工对左线隧道变形影响

Table 8 Deformations of left tunnel caused by construction of right tunnel

工况	拱顶	拱底	左腰	右腰	(mm)
3 号线右线开挖	-3.4	-0.1	-1.6	-1.6	

2.4 盾构施工动态调控方案

试验段施工引起的地层损失率范围在 0.66%~0.95% 之间, 部分超出应控制的最大地层损失率 0.76%, 因此需采取措施对下穿段的盾构施工进行调

控, 以使盾构施工引起地层损失率满足施工要求。

为使施工引起的理论地层损失率最小, 由二次函数的性质可得, 当 $\Delta p_0=8.26 \text{ kPa}$ 时, 地层损失率有最小值, 此时

$$V_L = 0.648\% \quad . \quad (14)$$

不妨取刀盘转速 $\omega=0.8 \text{ rpm}$, 将 $D=6.35 \text{ m}$, $\xi=40\%$, $k=6$, $\Delta p_0=8.26 \text{ kPa}$ 。代入式(8), 解得推进速度 $v=51.0 \text{ mm/min}$ 。

根据2.2节中参数经验关系式(11)、(12), 可得如下施工控制参数: $N=1686.20 \text{ t}$, $T=1757.45 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

根据第2.2节计算, 满足相关规范和变形标准的最大地层损失率是0.76%, 在该地层损失率和理论最小地层损失率范围之间计算关键施工参数。

将 $V_L=0.76\%$, 代入式(13), 计算得 $\Delta p_0=8.42 \text{ kPa}$, 或 $\Delta p_0=8.10 \text{ kPa}$ 。分别代入模型:

$\Delta p_0 = \frac{10.13(1-\mu)E_u}{1000(1+\mu)(3-4\mu)D} \cdot \frac{\pi v(1-\xi)^2}{k\omega}$ 计算, 分别解得 $v_1=51.97 \text{ mm/min}$, $v_2=49.99 \text{ mm/min}$ 。对应的施工参数为: $N_1=1687.78 \text{ t}$, $T_1=1760.73 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $N_2=1684.68 \text{ t}$, $T_2=1754.30 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

综上所述, 在3号线穿越1号线盾构施工中, 需要调整控制的关键施工参数: $N=1685 \sim 1688 \text{ t}$, $T=1754 \sim 1760 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $v=50.0 \sim 52.0 \text{ mm/min}$ 。

由于土仓压力和盾尾注浆率影响离散性较大, 按照目前数据无法直接确定具体取值范围, 可按软土地区相关盾构隧道工程经验取为 $\frac{P_s}{\sigma_v}=0.8 \sim 1.0$, $\delta=200\% \sim 220\%$ 。

3 方法讨论

隧道施工完成后得到的最大地表沉降实测值为12.13 mm, 小于警戒值, 满足安全施工的要求。

根据预测结果和提出的相对对策, 施工方对施工方案进行了调整, 增加了注浆量, 并对环均出土量等关键参数进行了控制, 实测施工参数如表9所示。

表9 盾构下穿施工参数平均值

Table 9 Average values of construction parameters of tunnel				
刀盘转速 /(r·min ⁻¹)	推进速度 /(mm·min ⁻¹)	总推力 /t	刀盘扭矩 /(kN·m)	地层损失率/%
1	42	1141	814	—

经验模型建议的施工参数及目标地层损失率如表10所示。

表10 盾构下穿施工参数建议值

Table 10 Suggested values of construction parameters of tunnel				
刀盘转速 /(r·min ⁻¹)	推进速度 /(mm·min ⁻¹)	总推力 /t	刀盘扭矩 /(kN·m)	地层损失率/%
1	51.0	1686	1757	0.76

通过对比可以发现, 实际穿越施工参数与经验模型建议参数相差较多, 但盾构施工仍满足安全施工的要求, 经分析总结, 可能原因如下:

(1) 盾构在接近穿越环时曾遭遇地层透镜体空洞, 土压力、总推力均有降低, 推进速度也发生了变化, 穿越过程中也有类似情况发生。

(2) 穿越过程中, 环均出土量由试验段的48 m³降低为42.7 m³, 而环均同步注浆量由试验段的2.2 m³增加为2.88 m³, 这两个因素弥补了因盾构施工参数设定变化而引起的地层损失率变化, 使穿越施工得以安全完成。

综上所述, 本方法的主要优势在于: 基于地层损失理论, 可以准确识别盾构施工过程的风险, 并可依据已施工段的实测数据对风险段施工方案进行动态调整, 以降低盾构施工风险。与此同时, 本方法也存在尚需改进的地方: ①试验段与风险段地层差异较大的情况下本方法应用具有一定的局限性; ②本文提出的经验模型很难将注浆量等外部因素纳入考虑范围, 难以对同步注浆量提供量化的建议。

4 结论

本文总结前人的研究成果与工程实际, 提出一种盾构隧道施工预测与动态调控方法, 并通过苏州轨道交通3号线下穿1号线重叠隧道的工程实例予以说明。本文主要得到的结论如下:

(1) 盾构施工引起地层变形主要由地层损失引起, 通过对施工过程的调整控制可影响开挖过程中的地层损失率, 从而降低盾构施工对周围结构的影响。

(2) 提出一种盾构隧道施工预测与动态调控的方法: 基于地层损失理论建立地层损失率与地层变形的关系, 同时基于经验公式对盾构施工过程进行动态调控, 使盾构施工引起的变形满足控制要求。与其他方法相比, 本方法简化了计算步骤, 具有易操作性与实用性, 同时减少了人为因素, 结果较准确。

(3) 试算结果表明, 对苏州轨道交通3号线下穿1号线区段, 当地层损失率减小到0.76%时, 下穿施工对周围土体和1号线隧道变形影响满足相关规范和要求, 该区段盾构施工过程存在一定的风险。通过调控施工参数、增加注浆量等方法可影响地层损失率, 将下穿施工时的地层损失率控制在0.76%以内, 保障了施工安全。故本方法对指导盾构隧道安全施工具有可行性。

(4) 结合实际施工情况, 本方法在风险段与其他区段土层差异较大的情况下应用具有一定的局限性, 在注浆量等外部因素的纳入方面尚有改进空间, 目前只适用于各区段土层差异不大、均匀注浆的情况。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]/Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969: 225 - 290.
- [2] MAIR R J. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(2): 361 - 362.
- [3] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling: I Estimating the gap parameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, **29**(6): 929 - 940.
- [4] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**(3): 301 - 320.
- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(9): 846 - 856.
- [6] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, **4**(4): 310 - 318.
- [7] 刘宝琛, 张家生. 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, **14**(4): 289 - 296. (LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Stochastic method for ground subsidence due to near surface excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, **14**(4): 289 - 296. (in Chinese))
- [8] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1): 56 - 59. (ZHU Zhong-long, ZHANG Qing-he, YI Hong-chuan. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, **22**(1): 56 - 59. (in Chinese))
- [9] 于 宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (YU Ning, ZHU He-hua. Analysis of earth deformation caused by shield tunnel construction and 3D-FEM simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(8): 1330 - 1334. (in Chinese))
- [10] 周 健, 陆丽君, 贾敏才. 基于 FLAC^{2D}数值方法的盾构隧道地层损失率研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, **10**(4): 902 - 907. (ZHOU Jian, LU Li-jun, JIA Min-cai. Research of the strata loss rate of shield tunnel excavation based on FLAC^{2D} numerical method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, **10**(4): 902 - 907. (in Chinese))
- [11] 王建秀, 付慧仙, 朱雁飞, 等. 基于地层损失的盾构沉降计算方法研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(1): 112 - 119. (WANG Jian-xiu, FU Hui-xian, ZHU Yan-fei, et al. Advance in calculation of subsidence caused by shield tunnel based on strata loss[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, **6**(1): 112 - 119. (in Chinese))
- [12] 王建秀, 田普卓, 付慧仙, 等. 基于地层损失的盾构隧道地面沉降控制[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(3): 569 - 576. (WANG Jian-xiu, TIAN Pu-zhuo, FU Hui-xian, et al. Ground settlement controlling of shield tunnel by strata loss theory[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, **8**(3): 569 - 576. (in Chinese))
- [13] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构掘进的数学物理模型及各参数间关系研究[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(9): 86 - 90. (WANG Hong-xin, FU De-ming. A mathematical model and the related parameters for EPB shield tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(9): 86 - 90. (in Chinese))
- [14] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构平衡控制理论及试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(5): 61 - 68. (WANG Hong-xin, FU De-ming. Theoretical and test studies on balance control of EPB shields[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(5): 61 - 68. (in Chinese))
- [15] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(7): 113 - 118. (WANG Hong-xin. Effect of cutter head compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, **42**(7): 113 - 118. (in Chinese))
- [16] 李忠超, 陈仁朋, 孟凡衍, 等. 软黏土中盾构掘进地层变形与掘进参数关系[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, **49**(7): 1268 - 1275. (LI Zhong-chao, CHEN Ren-peng, MENG Fan-yan, et al. Tunnel boring machine tunneling-induced ground settlements in soft clay and influence of excavation parameters[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, **49**(7): 1268 - 1275. (in Chinese))
- [17] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC-fast Lagrangian analysis of continua(Version 6.0) users' manual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2008.
- [18] 高 冰, 杨再兴. 重叠盾构地铁隧道下穿施工对上方隧道的影响[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(5): 134 - 135, 90. (GAO Bing, YANG Zai-xing. Influence of overlapped shield tunneling on existing tunnel above[J]. *Theoretical Research of Urban Construction (Electronic Edition)*, 2018(5): 134 - 135, 90. (in Chinese))