

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2025.01.008

【工程应用】

# 粉土地层双线平行顶管地面沉降及 注浆压力数值研究

张昌桔<sup>1</sup>, 姚言<sup>2</sup>, 应宏伟<sup>2,3</sup>, 李冰河<sup>4</sup>

(1. 杭州市市政工程集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030;  
3. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 4. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310005)

**摘要:** 基于杭州某大直径双线平行顶管施工案例, 采用 Plaxis 2D 软件对双线顶管施工引起的地表沉降进行二维有限元分析, 通过左线顶管施工计算结果与实测数据的对比验证了参数选取的合理性, 在此基础上进一步分析了注浆压力与先行顶管施工对地层扰动的影 响。结果表明: 顶管穿越区域的砂质粉土地层经全方位高压喷射 (MJS) 工法的加固作用, 土体性质得到进一步改良, 开挖隧洞附近土体能够充分发挥自身的承载力, 只需施加较小的注浆压力即可保证管节周围土体的稳定性, 建议控制注浆压力不小于 0.8 倍管顶水压力或者 0.4 倍管顶土覆土压力; 先行顶管顶进对管周土体产生扰动, 继而增大近距离后行顶管引发的地面沉降, 可采用弱化顶管周围土体来模拟先行顶管施工扰动影响, 双线平行顶管工程对后行顶管可适当增大触变泥浆的注浆压力以减小地面沉降。

**关键词:** 双线顶管; 地表沉降; 沉降槽; 注浆压力; 数值模拟; 施工扰动

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0060-09

## Numerical study on ground settlement and grouting pressure of double-line parallel pipe jacking in silty soil stratum

ZHANG Changju<sup>1</sup>, YAO Yan<sup>2</sup>, YING Hongwei<sup>2,3</sup>, LI Binghe<sup>4</sup>

(1. Hangzhou Municipal Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China; 4. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310005, Zhejiang, China)

**Abstract:** Based on a large-diameter double-line parallel pipe jacking construction project in Hangzhou, the software Plaxis 2D was used to conduct two-dimensional finite element analysis on ground settlement induced by double-line pipe jacking construction. The rationality of parameter selection was verified by comparing the calculation results of left-line pipe jacking construction with the field-measure data. On this basis, the influence of grouting pressure and preceding pipe jacking on ground disturbance was further analyzed. The results show that the silty sand layer in the area where pipe jacking crosses is reinforced by Metro Jet System (MJS) method, and the soil properties are further strengthened. The soil adjacent to the excavated tunnel can fully exert its bearing capacity. The stability of the soil around the pipe can be guaranteed by applying only small grouting pressure. It is recommended to control the grouting pressure no less than 0.8 times of pipe top water pressure or 0.4 times of pipe top soil pressure. The soil around the pipe is disturbed by the preceding pipe jacking and the disturbance increases ground settlement with the close distance of subsequent pipe jacking. Its influence can be simulated by weakening the soil around the pipe jacking. The double-line parallel pipe jacking project can appropriately increase the grouting pressure of the thixotropic mud to reduce ground settlement for the subsequent pipe jacking.

收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2024-03-18; 录用日期: 2024-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678523); 浙江省建设科研项目 (2018K025, 2020K108); 杭州市建设科研项目 (2018027, 2020013)。

作者简介: 张昌桔 (1987—), 男, 重庆荣昌人, 硕士, 高级工程师, 从事隧道和岩土设计与施工研究工作。E-mail: 663996093@qq.com。

**Key words:** double-line pipe jacking; ground settlement; settlement trough; grouting pressure; numerical simulation; construction disturbance

## 0 引言

随着城市地下空间的开发和顶管等非开挖隧道施工方法在城市地下管网建设中的普及, 面临的施工工况日渐复杂, 双线甚至多线顶管施工的情况越来越常见。在多线顶管的施工中, 先施工的顶管会对周围土体产生扰动, 使得后施工的顶管对周边环境产生更不利的影响。因此, 研究先后施工顶管间的相互影响具有重要意义。

目前有学者们对双线隧道施工的环境影响进行了丰富的理论、试验和实测研究。魏新江等<sup>[1]</sup>认为先行顶管的施工扰动会加剧后行顶管施工造成的环境响应, 通过分析水平平行顶管间的相互作用, 提出了横向扰动区范围的计算公式。丁智等<sup>[2]</sup>分析了杭州地铁 2 号线某盾构区间实测数据, 结果表明双线隧道在软土地区施工有较明显的二次扰动效应, 后行线施工造成的土体损失明显大于先行线土体损失。白海卫等<sup>[3]</sup>收集并分析了杭州、武汉两地 14 组双线盾构隧道的实测数据, 结果表明后行隧道土体损失率相对单线隧道明显增加。张晓清等<sup>[4]</sup>开展了双线隧道上穿既有隧道的室内模型试验, 验证了先行隧道对周围土体扰动的现象。

顶管施工的环境影响因素有开挖面支护压力、管壁摩阻力、注浆和地层损失的作用。若掘进机支护面上的泥水压力与土压力完全平衡, 不存在超挖与欠挖的情况, 则可以忽略顶管正面附加推力对前方土体的影响。冯海宁等<sup>[5]</sup>的数值计算结果表明管壁摩阻力对地表变形的影响较小, 可不单独考虑摩阻力作用。丛茂强等<sup>[6]</sup>基于 Abaqus 有限元软件, 采用平面应变模型重点研究了顶管施工中的注浆作用, 分析了不同注浆压力下的地表沉降规律以及孔隙水压力分布规律, 并给出了注浆压力的建议值。在上述假定与简化下, 可将顶管施工看作是平面应变问题, 并采用二维有限元软件平面应变模型对顶管施工进行模拟, 同时只需要考虑注浆与土体损失的作用。在目前的顶管二维数值研究中, 对注浆与地层损失作用的模拟主要采用降低模量或弱化土体强度的等代层法<sup>[7]</sup>, 或以力、位移条件模拟<sup>[8]</sup>。

目前, 在双线隧道的数值模拟研究<sup>[8-12]</sup>中, 学者们常不单独考虑先行隧道对周围土体的扰动, 仅在先行隧道施工完成后的模型中增加后行隧道施工的工况进行计算, 且对先后行隧道取相同的施工参数。但根据现有双线隧道施工的实测研究, 这种模拟方法会低估后行隧道施工带来的环境影响, 因此需要对注浆压力等施工参数进行优化。本文以杭州

某电力隧道工程某区段的大直径双线平行顶管施工工况为背景, 采用 Plaxis 2D 有限元软件, 研究了双线顶管顶进引发的地表沉降分布和发展规律, 进一步分析了注浆压力与先行顶管施工对地层扰动的影响。

## 1 工程概况

电力隧道里程总长度为 2 044.4 m, 其中双线顶管段为 285.1 m。顶管埋深约 4.1 m, 管节内径为 3 500 mm, 外径为 4 140 mm, 壁厚为 320 mm, 单节长度为 2.5 m, 采用泥水平衡顶管掘进机施工。顶管从北至南由 8 号井推至 9 号井, 西线顶管先行施工, 东线顶管后行施工。

顶管施工期间穿越地铁 1 号线, 为了减小顶管穿越对地铁的影响, 控制地铁设施的受力与变形, 地铁隧道上方采用全方位高压喷射 MJS (Metro Jet System) 工法桩进行水泥土加固, 加固深度为地表以下 2.0 m 到盾构隧道拱顶上方 1.0 m。顶管与 MJS 加固区的平面图与断面图分别如图 1、图 2 所示。

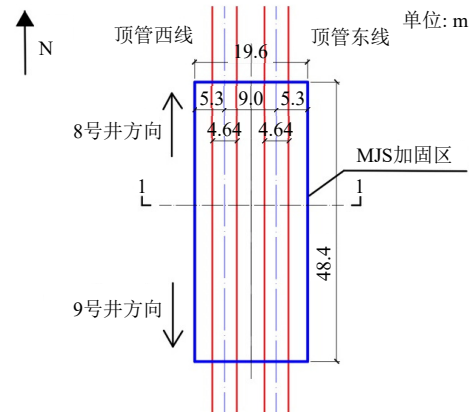


图 1 顶管与 MJS 加固区平面图

Fig. 1 Plan of pipe jacking and MJS reinforcement area

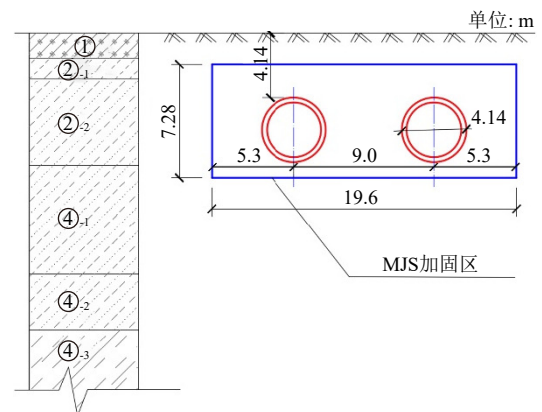


图 2 顶管与 MJS 加固区 1-1 断面图与地层分布

Fig. 2 Section 1-1 of pipe jacking and MJS reinforcement area and stratum distribution

施工场地内地下水位埋深约为 1.60~3.00 m, 主要土层从上而下有: ①杂填土, 厚度为 1.6 m; ②<sub>1</sub>黏质粉土, 厚度为 1.4 m; ②<sub>2</sub>砂质粉土, 厚度为 5.2 m; ④<sub>1</sub>砂质粉土, 厚度为 5.8 m; ④<sub>2</sub>砂质粉土, 厚度为 4.6 m; ④<sub>3</sub>粉土夹黏性土, 厚度为 5.9 m。电力顶管隧道主要穿越②<sub>2</sub>砂质粉土层, 地层剖面如图 2 所示。

## 2 有限元模拟

### 2.1 有限元模型

采用 Plaxis 2D 有限元软件进行计算, 模型单元采用平面应变 15 节点单元, 根据地勘资料土层分布情况建立如图 3 所示的有限元模型。对隧道周围、加固区内网格进行了适当加密, 模型单元总数为 4 605, 节点总数为 37 559。计算模型所取土体宽度为 60 m, 深度为 25 m, 取水位埋深 1.6 m。隧道周围的矩形框为 MJS 加固区的范围, 根据实际施工取 MJS 工法桩加固区域宽度 20 m, 厚度 7.28 m, 埋深 2 m。顶管直径 4.14 m, 管节厚度 0.32 m, 轴线埋深 6.2 m, 左右顶管轴线水平间距 9.0 m, 根据实际工况, 顶管左线(西线)先行

施工。

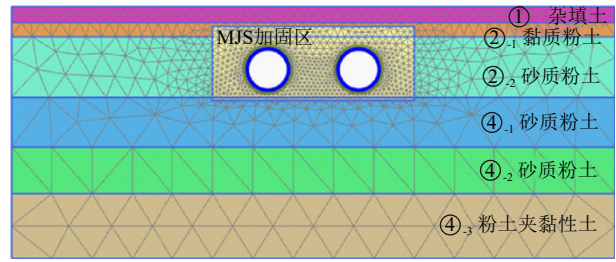


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

### 2.2 计算参数取值

土体本构模型采用 HSS 模型。模型共包含 13 个参数, 包括 2 个土体强度参数  $c'$ 、 $\phi'$ , 剪胀角  $\Psi$ , 泊松比  $\nu$ , 破坏比  $R_f$ , 幂指数  $m$ , 静止侧压力系数  $K_0$ , 参考应力  $p^{ref}$  下的 3 个土体刚度参数  $E_{oed}$ 、 $E_{50}$ 、 $E_{ur}$  和 2 个小应变参数  $G_0$ 、 $\gamma_{0.7}$ 。

原状土参数根据地质勘察报告以及地区经验<sup>[13-14]</sup>进行选取, MJS 加固土取参考文献<sup>[15]</sup>参数。最终确定的土体参数如表 1 所示, 其余参数均采用软件默认值。顶管管节采用板单元模拟, 采用弹性模型, 重度取  $24 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量取  $34.5 \text{ GPa}$ , 泊松比取 0.25。

表 1 土体参数表  
Table 1 Soil parameters

土层名称	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$c'/\text{kPa}$	$\phi'/(^{\circ})$	$R_f$	$E_{oed}/\text{MPa}$	$E_{50}/\text{MPa}$	$E_{ur}/\text{MPa}$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$	$\nu$
①杂填土	18.0	5.0	15.0	0.64	8.0	8.0	24.0	40.0	3.2	0.3
② <sub>1</sub> 黏质粉土	18.7	9.0	25.0	0.64	6.0	8.3	41.3	34.7	3.2	0.3
② <sub>2</sub> 砂质粉土	18.9	7.5	28.5	0.64	10.5	14.1	43.1	55.5	3.6	0.3
④ <sub>1</sub> 砂质粉土	19.1	7.1	28.4	0.64	11.1	14.9	44.3	55.5	3.6	0.3
④ <sub>2</sub> 砂质粉土	19.1	8.7	27.5	0.64	10.8	14.4	42.8	55.5	3.6	0.3
④ <sub>3</sub> 粉土夹黏性土	18.3	10.9	26.5	0.64	6.6	9.0	45.0	37.8	3.2	0.3
加固土	19.0	80.0	30.0	0.51	20.0	20.0	80.0	50.0	3.2	0.3

### 2.3 基本分析步骤

在顶管施工的二维有限元分析中, 只需考虑注浆与土体损失的作用。对于注浆压力, 为了减小顶管顶推过程中的摩阻力, 该范围顶管顶进在一周内完成, 施工全过程都对后续管节进行同步注浆, 因此在施工期忽略后续管节的摩阻力影响, 采用二维平面应变模型进行分析在一定程度上是合理的。在后续管节注入触变泥浆后, 泥浆在注浆压力作用下向周围土体扩散和渗透, 经过一段时间后形成相对密实、不透水的泥浆套。本文假定施工过程中在后续管节周围注入触变泥浆后形成比较完整的泥浆

套, 将注浆压力简化为均匀分布于管节周围土体的荷载作用, 参考 Plaxis 中盾构隧道注浆压力的模拟方法<sup>[16]</sup>, 即通过激活隧道内水力边界条件的方式进行模拟; 对于土体损失, 采用 Plaxis 中的隧道收缩参数进行模拟<sup>[17]</sup>, 即对隧道周围施加一个位移边界条件。

根据现场施工情况, 共分为 5 个工况进行计算, 分别为: (1) 平衡地应力。(2) MJS 施工。(3) 左线顶管施工: 冻结顶管内土体, 将其水力条件设置为干, 并激活顶管衬砌; 激活隧道收缩; 激活注浆压力: 冻结衬砌, 激活水力边界条



件, 注浆压力分布如图 4 所示; 施工结束: 重新激活衬砌, 顶管内水力条件设置为干。(4) 设置施工扰动区: 模拟先行顶管施工对周围土体的扰动弱化作用。(5) 右线顶管施工, 分析步骤和计算参数与左线顶管相同。

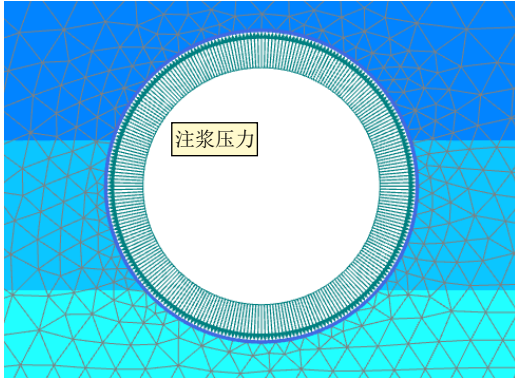


图 4 注浆压力分布

Fig. 4 Grouting pressure distribution

### 3 工程验证

为了监测双线顶管施工过程中产生的地表沉降, 在 MJS 加固区内沿顶管轴线方向布设 7 个地表沉降监测断面 (DBC-1—DBC-7), 每个断面设置 9 个测点, 具体如图 5 所示。

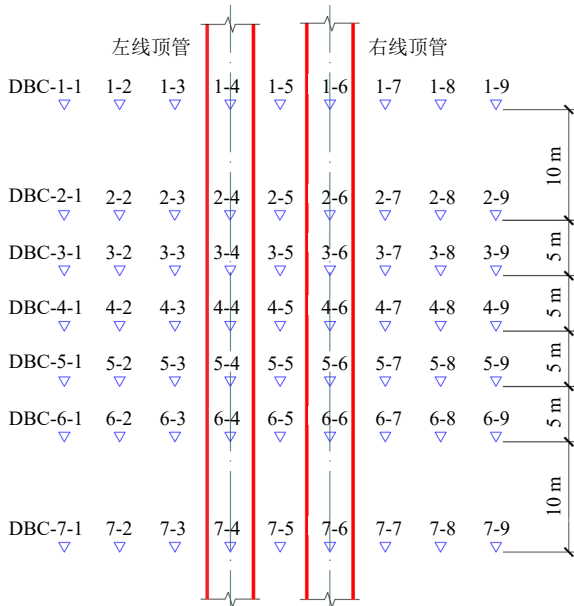


图 5 地表沉降监测点平面布置图

Fig. 5 Layout plan of ground settlement monitoring points

根据顶管掘进机与后续管节直径之差计算得到的隧道收缩率参数为 2%, 同时取注浆压力为管顶水压力。将工况 3 左线顶管施工完成后的计算结果与实测结果进行对比, 如图 6 所示为不同隧道收缩

率情况下地表沉降计算值与左线顶进完成后实测值的对比, 可见各断面实测值均分布在隧道收缩率为 2% 的数值计算曲线附近, 能够有效反映顶管施工完成后的地表沉降规律, 验证了本文模拟方法与土体参数选择的合理性。

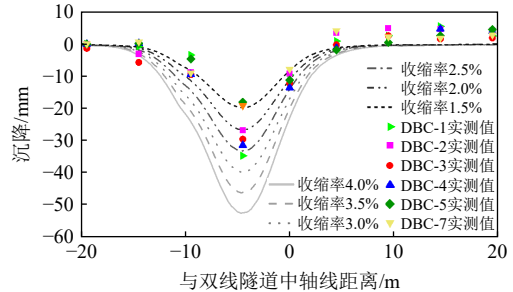


图 6 不同收缩率计算值与左线顶进完成后实测值的对比  
Fig. 6 Comparison of calculated values of different shrinkage ratios and measured values after completion of left line pipe jacking

进一步对比不同隧道收缩率 (1.5%~4%) 下的数值计算结果与各断面实测数据, 对于西线顶管轴线上方的沉降最大值, 断面 DBC-4、DBC-7 实测最大值与隧道收缩率为 1.5% 的计算结果较为接近, 其余 4 个断面实测最大值分布在隧道收缩率为 2.0%~2.5% 的计算结果之间。实际预测过程中采用隧道收缩率为 2.0%~2.5% 都是合理的。

### 4 数值模拟结果分析

#### 4.1 左线顶管施工

取隧道收缩率为 2.0% 以反映顶管掘进机与管节管径差造成的土体损失, 对左线顶管注浆压力进行分析。

在数值模型中, 顶管管顶覆土压力约为  $p_0=80$  kPa, 水压力约为  $p_w=25$  kPa。考虑到现场施工中注浆压力控制在 1.1~1.2 倍管顶水压力, 分别计算注浆压力  $p=0.4 p_w$ 、 $0.6 p_w$ 、 $0.8 p_w$ 、 $1.0 p_w$ 、 $1.2 p_w$ 、 $0.6 p_0$ 、 $0.8 p_0$ 、 $1.0 p_0$ 、 $1.2 p_0$ 、 $1.4 p_0$  的情况, 得到如图 7 所示不同注浆压力下的地表沉降对比图, 如图 8 所示为注浆压力与地表最大沉降关系曲线。

如图 7 所示, 随着注浆压力的增大, 地表沉降逐渐减小, 当注浆压力增大至 0.8 倍管顶水压力时, 计算结果与蓝线表示的注浆前一阶段由顶管掘进机与后续管节管径差引起的地表沉降分布曲线重合。表明在本案例中设置注浆压力为 0.8 倍的管顶水压力就足以支撑顶管管节周围形成的泥浆套, 使收缩后的隧洞保持稳定从而不继续发生变形。

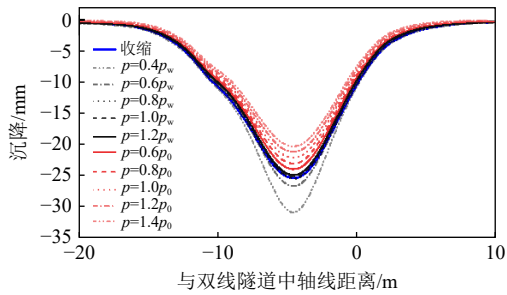


图7 不同注浆压力下的地表沉降

Fig. 7 Ground settlement under different grouting pressures

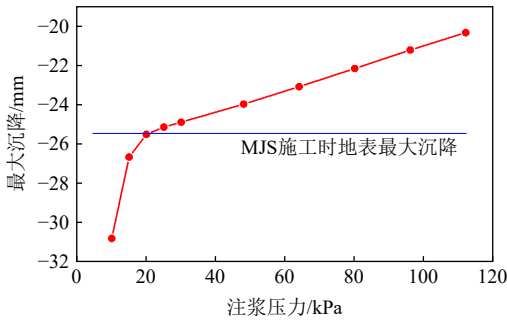


图8 注浆压力与最大沉降关系

Fig. 8 Relationship between grouting pressure and maximum settlement

如图8所示,当注浆压力小于0.8倍管顶水压力(20 kPa)时,随着注浆压力的减小地表最大沉降急剧增大,这表明注浆压力过小时周围土体不再保持稳定,无法形成较为完整的泥浆套,顶管上方土体会继续塌陷至顶管管节上,导致土体与管节的接触面积增大,最终使管壁摩阻力增大,影响施工的正常进行;当注浆压力大于0.8倍管顶水压力时,地表最大沉降随注浆压力的增大逐渐减小,这表明注浆压力能够在一定程度上补偿地层损失,但压力过大的同时也会挤压周围土体,造成较大扰动。

顶管穿越区域原状土为砂质粉土,其本身的物理力学性质较好,采用MJS加固后土体得到进一步改良,开挖隧洞附近土体能够充分发挥自身的承载力,只需施加较小的注浆压力即可保证管节周围土体的稳定性,与新奥法中初衬的作用有异曲同工之处。在实际工程中,后续管节每2~3管节设置一套触变泥浆管,每个管节设置均匀分布的4个注浆孔。为了使触变泥浆到达管壁各处以形成完整泥浆套,设置注浆压力为1.1~1.2倍管顶水压力是合理的,根据图8曲线所示,该范围内的注浆压力能够支撑周围土层且造成的扰动较小。本文建议只要控制注浆压力不小于0.8倍管顶水压力或0.4倍管顶上覆土压力即可。

#### 4.2 右线顶管施工

##### (1) 不考虑施工扰动

首先讨论不考虑施工扰动对土体性质影响时双

线顶管引起的地表沉降,即保持工况4扰动区内土体物理力学性质不变。根据实际施工工况,将左线顶管的注浆压力设置为 $1.2 p_w$ 。右线顶管各施工参数也取左线顶管相同参数,分别取隧道收缩率为2.0%、注浆压力为 $1.2 p_w$ 。

不考虑扰动双线顶管地表沉降如图9所示,竖向位移云图如图10所示。可见在不考虑施工扰动对土体性质的影响时,左右线单独顶进引起的沉降槽几乎一致,双线顶进完成后的累计沉降曲线中左线顶管轴线上方的峰值略大于右线顶管。

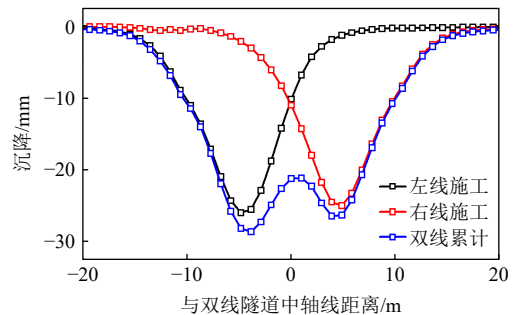


图9 不考虑扰动双线顶管地表沉降

Fig. 9 Ground settlement of double-line pipe jacking without considering disturbance

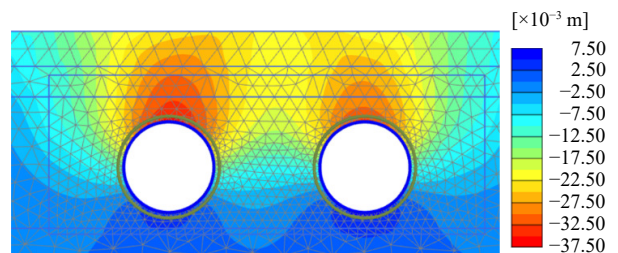


图10 不考虑扰动双线顶管竖向位移云图

Fig. 10 Vertical displacement nephogram of double-line pipe jacking without considering disturbance

##### (2) 考虑施工扰动

但根据现场实测数据,双线顶管完成施工后穿越区域各监测断面右线顶管轴线上方的沉降值普遍大于左线顶管。考虑到实际施工过程中对左右两线采用相同的施工参数,笔者认为产生该现象的原因是先行顶管施工对周围土体产生扰动,造成后行顶管周围土体力学性质降低,导致其产生了较大的土体损失。

目前常采用等代层法模拟地层损失和注浆作用下隧道周围土体产生弱化的性质。等代层是对隧道周围土体扰动、壁面土体向管壁间隙移动、注浆等作用的抽象概括<sup>[6]</sup>,实际上综合了多种施工效应的影响,只能片面反映隧道周围土体受施工扰动产生弱化的性质。等代层物理力学性质与原状土性质、浆液材料、注浆压力有关,评价其模量、厚度存在

一定难度。目前学者们常将等代层考虑为模量较低的弹性材料, 对于其厚度的取值也十分保守。

根据现有的有关顶管、盾构隧道的实测研究资料, 施工扰动区范围是远远大于上述等代层厚度的。根据房营光等<sup>[18]</sup>对顶管施工扰动区的分类, 顶管掘进机前方土体受正面推力挤压作用、刀盘切削搅拌和震动作用, 应力路径十分复杂, 正面推力过小使开挖面土体产生塌陷, 推力过大造成地表隆起。刀盘切削搅拌产生的剪力可能使土体产生剪切变形, 刀盘的震动可能会引起饱和砂土或砂质粉土的液化。掘进机通过后其外壳直径与后续管节直径之差会对顶管上方土体造成卸荷作用。后续管节在千斤顶作用下随掘进机前进时, 周围土体受到侧壁摩阻力持续剪切作用, 也会产生扰动。高毅等<sup>[19]</sup>指出浅埋顶管正上方土体受随顶程逐渐增大的摩擦力作用可能发生整体背土效应, 使地表产生较大变形。

蒋洪胜等<sup>[20]</sup>基于上海地铁 2 号线施工土体测斜、

分层位移和孔隙水压力测试, 分析得到盾构外侧约 2 倍管径范围内的土体都受到施工扰动影响; 姜忻良等<sup>[21]</sup>基于天津地铁 1 号线施工实测地表沉降与地层水平位移数据, 分析得到隧道轴线 3 倍洞径范围内的土体都会受到盾构施工扰动; 袁大军等<sup>[22]</sup>基于南京某超大直径盾构施工地表沉降、水土压力等实测数据, 分析得到盾构推进对土体的显著应力扰动区在盾构外侧约 1 倍洞径范围内; 顾荣华等<sup>[23]</sup>基于宁波地铁 1 号线项目盾构推进实测数据, 采用静力触探结果评价现场土体扰动度, 分析结果表明盾构隧道底部以下深度 3 m 扰动度较大。

诸多实测研究皆表明, 顶管实际的施工扰动区范围相当大, 土体所受扰动也相当复杂。借鉴等代层法的思想并做简化处理, 本文以 MJS 加固区范围内土体的弱化来简化模拟左线先行顶管施工扰动影响, 以此讨论左右顶管在采用相同施工参数的情况下扰动对地表沉降的影响。扰动土模型参数取值如表 2 所示。

表 2 扰动土参数

Table 2 Disturbed soil parameters

土体名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$R_f$	$E_{\text{ocd}}/\text{MPa}$	$E_{50}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}/\text{MPa}$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/(\times 10^{-4})$	$\nu$
扰动土	19.0	40	30	0.64	10	10	40	50	3.6	0.3

将工况 4 扰动区内的土替换为扰动土, 如图 11 所示。根据实际施工工况, 将左线顶管的注浆压力设置为  $1.2 p_w$ 。右线顶管各施工参数也取左线顶管相同参数, 分别取隧道收缩率为 2.0%、注浆压力为  $1.2 p_w$ 。

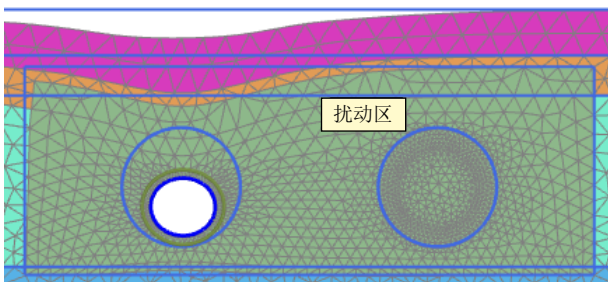


图 11 扰动区示意图

Fig. 11 Disturbance zone

考虑扰动双线顶管地表沉降如图 12 所示, 对应竖向位移云图如图 13 所示。可见当考虑了左线顶管施工扰动的影响后, 双线顶管的地表沉降曲线相对于不考虑扰动时发生了明显的变化, 右线顶管施工产生了更大的沉降槽, 顶管轴线上方的累计沉降值达到 35.4 mm, 大于左线顶管轴线上方的 29.3 mm, 同时顶管施工完成后的累计沉降曲线形状更接近实

测结果, 表现为不对称的“W”形。原因为后行顶管在经先行顶管施工扰动后的土体中施工, 采用了与先行顶管相同的注浆压力  $1.2 p_w$ , 但该注浆压力已不足以支撑扰动土收缩后形成的隧洞, 上方土体坍塌至管节, 导致泥浆套不完整, 造成管土摩阻力增大, 进而产生更大的土体损失。故建议后行顶管采用比先行顶管更大的注浆压力, 以保证施工顺利进行。同理, 掘进机前方的泥水平衡压力也应该适当增大以应对土体扰动带来的不利影响, 具体应根据现场施工情况进行调整。

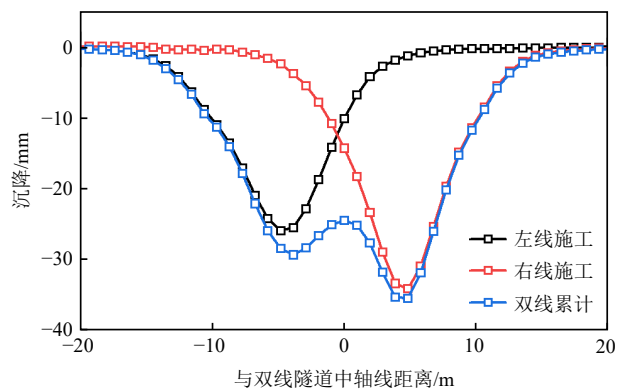


图 12 考虑扰动双线顶管地表沉降

Fig. 12 Ground settlement of double-line pipe jacking considering disturbance



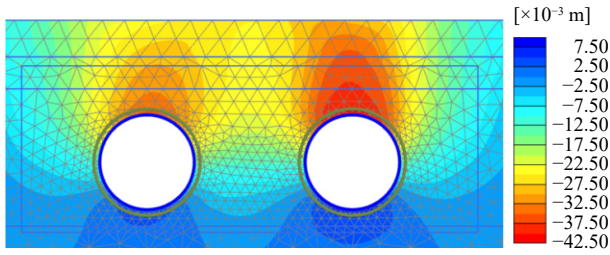


图 13 考虑扰动双线顶管竖向位移云图

Fig. 13 Vertical displacement nephogram of double-line pipe jacking considering disturbance

### (3) 土体参数影响

下面分析扰动土参数变化对计算结果的影响。根据汤怡新等<sup>[24]</sup>、李建军等<sup>[25]</sup>对水泥土的抗剪性能试验与变形模量试验研究,水泥土主要通过增大黏聚力来增大抗剪强度,而且其刚度也会随着水泥掺量的增大而增大。根据孟凡超等<sup>[26]</sup>对结构性砂土的抗剪强度试验,重塑结构性砂土的摩擦角相对于原状土变化较小。综上,考虑顶管施工引起的扰动主要破坏水泥土颗粒之间的胶结作用,因此主要通过改变黏聚力  $c'$  来评价扰动土的弱化特性。

由于扰动也会影响刚度与摩擦角,同时也考虑刚度参数和摩擦角的改变,以供参考。以表 2 的扰动土参数为基础,分别取  $E_{50}=10、15、20$  MPa,使刚度参数间保持一定的比例关系  $E_{oed}=E_{50}=1/4E_{ur}$ ,并分别取摩擦角  $\varphi'=28^\circ、30^\circ$ 。图 14 为扰动土参数取  $\varphi'=30^\circ、E_{50}=10$  MPa 时(即表 2 对应参数),不同黏聚力  $c'$  条件下双线顶管沉降计算值与实测值的对比图。对比各计算值,随着黏聚力不断减小,右线顶管轴线上方的沉降逐渐增大,且黏聚力越小,影响越显著。

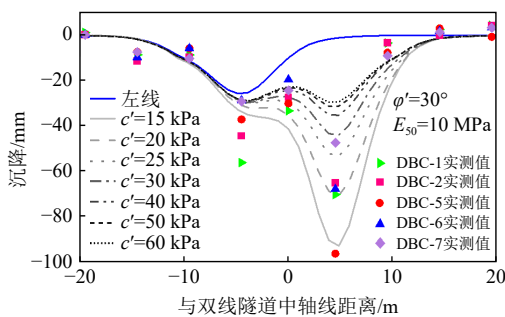


图 14  $\varphi'=30^\circ、E_{50}=10$  MPa 时不同黏聚力双线顶管计算值与实测值对比

Fig. 14 Comparison of calculated and measured values for double-line pipe jacking at  $\varphi'=30^\circ$  and  $E_{50}=10$  MPa with different cohesion values

对比实测值与计算值可知,除了个别测点,实测值均分布于不同黏聚力双线顶管沉降计算值附近,而各断面实测值的差异也恰恰说明了施工扰动

引起地层响应的不确定性,对于不同断面在整个施工过程中实际产生的扰动可能确实存在差异。

## 5 结 论

(1) 采用 Plaxis 2D 针对双线顶管施工引起的地表沉降进行二维有限元分析,通过左线顶管施工计算结果与实测数据的对比验证了参数选取的合理性,在此基础上,进一步分析了注浆压力与先行顶管施工对地层扰动的影响。

(2) 顶管穿越区域原状土为砂质粉土,经水泥土加固后开挖隧洞附近土体能够充分发挥自身的承载力,只需施加较小的注浆压力即可保证管节周围土体的稳定性。建议控制注浆压力不小于 0.8 倍管顶水压力或者 0.4 倍管顶土覆土压力。

(3) 采用弱化顶管周围土体来简化模拟左线先行顶管施工扰动影响,计算结果表明采用与先行顶管相同的注浆压力时,后行顶管上方地面将产生更大的沉降,双线平行顶管工程对后行顶管可适当增大触变泥浆的注浆压力以减小地面沉降。

## 参考文献

- [1] 魏新江,魏纲.水平平行顶管引起的地面沉降计算方法研究[J].岩土力学,2006,27(7):1129-1132.  
WEI Xinjiang, WEI Gang. Study on calculational method of ground settlement induced by level parallel pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1129-1132.
- [2] 丁智,王凡勇,魏新江.软土双线盾构施工地表变形实测分析与预测[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(1):61-68.  
DING Zhi, WANG Fanyong, WEI Xinjiang. Prediction and analysis of surface deformation caused by twin shield construction in soft soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(1): 61-68.
- [3] 白海卫,宋守信,王剑晨. Peck 公式在双线盾构隧道施工地层变形中的适应性分析[J].北京交通大学学报,2015,39(3):30-34.  
BAI Haiwei, SONG Shouxin, WANG Jianchen. An adaptability study of Peck formula applied to predicting ground settlements induced by double shield tunneling[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(3): 30-34.
- [4] 张晓清,张孟喜,吴应明,等.多线叠交盾构隧道近接施

- 工模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1040–1045.
- ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, WU Yingming, et al. Model test on approaching construction of multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(7): 1040–1045.
- [5] 冯海宁, 龚晓南, 徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1158–1162.
- FENG Haining, GONG Xiaonan, XU Riqing. Finite element analysis of influence of pipe-jacking construction on environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1158–1162.
- [6] 丛茂强, 陈锦剑, 王建华. 基于注浆压力控制的混凝土顶管施工微扰动机理[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 867–871.
- CONG Maoqiang, CHEN Jinjian, WANG Jianhua. Micro disturbance mechanism of concrete pipe-jacking with slurry pressure control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(6): 867–871.
- [7] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388–392.
- ZHANG Yun, YIN Zongze, XU Yongfu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 388–392.
- [8] 黄宏伟, 胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 400–406.
- HUANG Hongwei, HU Xin. 3D numerical analysis on construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 400–406.
- [9] 张孟喜, 张靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100–108.
- ZHANG Mengxi, ZHANG Jing, WU Yingming, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 100–108.
- [10] 林志, 朱合华, 夏才初. 近间距双线大直径泥水盾构施工相互影响研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1181–1186.
- LIN Zhi, ZHU Hehua, XIA Caichu. Study of field monitoring on interaction between twin slurry shield tunnels in close space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1181–1186.
- [11] 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.
- FENG Huijun, YU Rangang. Numerical analysis of influence of double-line tunnel shield tunneling on ground surface settlement[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 78–83.
- [12] 刘超, 张子新. 超大直径双线泥水盾构施工的三维数值模拟[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 2): 118–122.
- LIU Chao, ZHANG Zixin. Three dimensional simulation of super-large double-line slurry shield tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 118–122.
- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833–845.
- GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833–845.
- [14] 陈尚荣, 李通达, 梁发云, 等. 上海临港砂质粉土硬化土小应变模型参数研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 841–846.
- CHEN Shangrong, LI Tongda, LIANG Fayun, et al. Parameters of hardening soil model with small strain of shallow sandy silt in Shanghai Lin-Gang special area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(6): 841–846.
- [15] 赵保, 田雷, 赵伟阳, 等. 杭州富水粉砂水泥土 HSS 模型参数实验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(1): 53–59.
- ZHAO Bao, TIAN Lei, ZHAO Weiyang, et al. Experimental study on parameters in HSS model for cemented water-rich silty sand in Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(1): 53–59.
- [16] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling under-crossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 78–90.
- [17] 林思. 矩形管廊顶管施工对邻近地下管线的变形影响及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- LIN Si. Study on influence and control of deformation of adjacent underground pipeline by pipe jacking in rectangular pipe gallery[D]. Hangzhou: Zhejiang University,



- 2020.
- [18] 房莹光, 莫海鸿, 张传英. 顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 601–605.  
FANG Yingguang, MO Haihong, ZHANG Chuanying. Theoretic and testing analysis of soil deformation in the area of disturbance caused by pipe-jacking[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 601–605.
- [19] 高毅, 冯超元, 程鹏. 浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(10): 1936–1942.  
GAO Yi, FENG Chaoyuan, CHENG Peng. Overall-carrying-soil effect of shallow buried rectangular pipe jacking[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(10): 1936–1942.
- [20] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1514–1520.  
JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1514–1520.
- [21] 姜忻良, 崔奕, 李园, 等. 天津地铁盾构施工地层变形实测及动态模拟[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1612–1616.  
JIANG Xinliang, CUI Yi, LI Yuan, et al. Measurement and simulation of ground settlements of Tianjin subway shield tunnel construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(10): 1612–1616.
- [22] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2074–2080.  
YUAN Dajun, YIN Fan, WANG Huawei, et al. Study of soil disturbance caused by super-large diameter slurry shield tunnelling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2074–2080.
- [23] 顾荣华, 沈卓恒, 王益坚, 等. 盾构掘进引起土体扰动的数值模拟与现场验证[J]. *地基处理*, 2023, 5(1): 33–42.  
GU Ronghua, SHEN Zhuoheng, WANG Yijian, et al. Numerical simulation and field verification of the soil disturbance caused by shield tunneling in structural soft soil[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2023, 5(1): 33–42.
- [24] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(5): 549–554.  
TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 549–554.
- [25] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(2): 473–477.  
LI Jianjun, LIANG Renwang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 473–477.
- [26] 孟凡超, 赵云辉, 蔡晓光. 人工制备结构性土抗剪强度试验研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊 1): 2463–2467.  
MENG Fanchao, ZHAO Yunhui, CAI Xiaoguang. Experimental study on shear strength of artificially prepared structural soil[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S1): 2463–2467.