

# 砂砾地层盾构施工土体变形规律三维数值分析

奚晓广<sup>1</sup>, 吴淑伟<sup>2\*</sup>, 王哲<sup>2</sup>, 孙九春<sup>1</sup>, 许四法<sup>2</sup>, 王瑞<sup>1</sup>

(1. 腾达建设集团股份有限公司, 浙江 杭州 311215; 2. 浙江工业大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 盾构法隧道施工是一种常用开挖工法, 但对于砂砾地层隧道施工引起的地层变形规律及机理, 人们还缺乏足够的工程经验积累。因此本文以杭州地铁3号线盾构穿越砂砾地层为工程背景, 采用三维有限元软件 Plaxis 3D 建立了包含盾构机、管片和注浆层的三维模型。分析了地表沉降随盾构推进的变化规律、不同深度处地层的沉降变化规律和距隧道轴线不同位置处的土体水平位移规律, 所得结论可为砂砾地层地铁隧道设计与施工提供借鉴。

**关键词:** 盾构隧道; 土体变形; 砂砾地层; 数值分析

中图分类号: TU17

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)01-0029-05

## Three-dimensional numerical analysis of the soil deformation law of shield tunneling in sandy gravel stratum

XI Xiao-guang<sup>1</sup>, WU Shu-wei<sup>2\*</sup>, WANG Zhe<sup>2</sup>, SUN Jiu-chun<sup>1</sup>, XU Si-fa<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>

(1. Tenda Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 311215, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Shield tunnel construction is a common excavation method. However, there is still a lack of sufficient engineering experience in the formation deformation law and mechanism caused by the construction of sandy gravel stratum tunnel. Therefore, this paper takes the shield tunneling of Hangzhou metro line 3 as the engineering background, and uses the 3D finite element software Plaxis 3D to establish a 3D model including the shield machine, segment and grouting layer. The law of ground settlement changes with shield advancement, ground settlement changes at different depths, and horizontal displacement of soil at different locations from the tunnel axis are analyzed. The conclusions obtained can provide a reference for the design and construction of subway tunnels in gravel strata.

**Key words:** shield tunnel; soil deformation; sandy gravel stratum; numerical analysis

## 0 引言

城市地铁隧道修建过程中, 盾构法凭借其环境影响小、高控制精度、施工进度快等优点在国内外城市地铁建设中得到广泛使用。然而, 隧道开挖在岩土体内部进行, 仍不可避免对隧道周围土体造成扰动<sup>[1-2]</sup>。当地层变形超过规范规定的警戒值以后, 会对邻近建(构)筑物造成极大危害, 轻则开裂, 重则塌陷。因此, 探讨地铁修建过程对周围建(构)筑物的影响, 分析地层变形的发展规律具有重要的现实意义, 以期指导实际施工。

目前, 国内外常用的研究方法主要有模型试验、数值分析和现场监测。姜忻良等<sup>[3]</sup>对天津地铁

盾构穿越粉质黏土地层开展隧道周围土体沉降和水平位移监测, 并结合 ABAQUS 数值分析验证, 揭示了隧道周围土体随时间效应的变形规律。魏纲等<sup>[4]</sup>开展杭州地铁1号线盾构穿越粉砂层现场监测试验, 研究了盾构掘进参数相互关系及其对地层位移的影响。渠开胜<sup>[5]</sup>建立盾构掘进施工三维数值模型, 重点研究了土舱压力、注浆压力对地表沉降的影响。郑刚等<sup>[6]</sup>结合模型试验及数值模拟, 研究了砂土地层盾构隧道开挖对周围土体的扰动特性, 有效利用了 Peck 公式对地表沉降的预测。已有研究中针对软土和砂土隧道施工对周围土体影响的变形规律分析较多, 少有涉及砂砾地层隧道施工, 盾构穿越不同地层对周围土体的扰动程度不一, 需要

收稿日期: 2020-12-08

作者简介: 奚晓广(1992—), 男, 上海青浦人, 硕士, 主要从事地下工程施工对周边环境控制方面的研究工作。E-mail: xiaoguangxi1992@163.com。

\*通讯作者: 吴淑伟(1995—), 男, 浙江丽水人, 硕士, 主要从事隧道施工对周边环境控制方面的研究工作。E-mail: washaway\_1995@163.com。

深入分析土体变形发展规律。

基于此, 本文拟采用三维数值分析软件 Plaxis 3D 建立了考虑施工过程的盾构隧道三维数值计算模型, 分析考虑施工过程中盾构穿越砂砾地层引起的土体变形规律, 可为今后类似地层盾构施工引起的地层变形预测提供借鉴。

## 1 工程概况

杭州地铁 3 号线访溪路站-联胜路站区间, 采用土压平衡复合式盾构施工, 最小曲线半径为  $R=450\text{ m}$ , 线间距  $15.8\sim 45.5\text{ m}$ 。盾构机外径  $6.48\text{ m}$ , 内径  $6.2\text{ m}$ , 厚度  $0.14\text{ m}$ ; 管片外径  $6.2\text{ m}$ , 内径  $5.5\text{ m}$ , 厚度  $0.35\text{ m}$ 。区间纵断面采用节能坡, 隧道覆土起点处为  $9.9\text{ m}$ , 最大覆土埋深  $14.5\text{ m}$ , 终点处为  $9.9\text{ m}$ , 拟建区间如图 1 和图 2 所示。区间主要穿越土层为①<sub>2</sub>素填土、④<sub>1</sub>淤泥粉质黏土、⑤<sub>1</sub>粉质黏土、⑨<sub>4</sub>圆砾、⑳<sub>a-1</sub>层全风化泥质粉砂岩、⑳<sub>a-2</sub>层强风化泥质粉砂岩和⑳<sub>a-3</sub>层中风化泥质粉砂岩。



图 1 盾构区间地质平面图

Fig. 1 Geological plan of the shield section

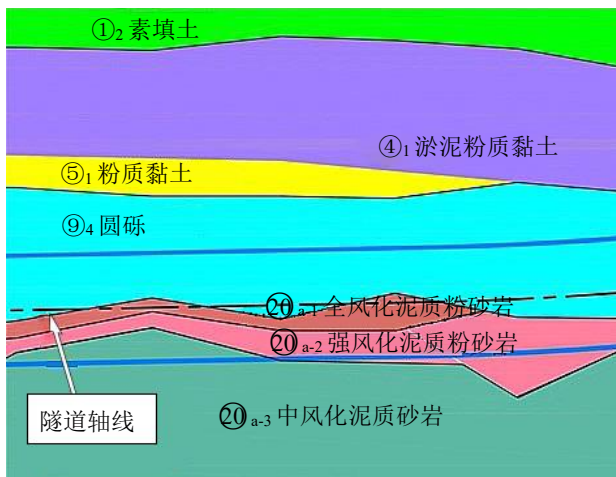


图 2 盾构区间地质纵断面图

Fig. 2 Geological profile of the shield section

## 2 三维数值模型建立

本文模拟选取杭州地铁 3 号线访溪路-联胜路区间  $330\sim 370$  环施工段, 考虑到盾构施工在横向上的主要影响范围为  $3D$  ( $D=6.48\text{ m}$ ), 纵向上的主要影响范围为  $-3D\sim 3D$ <sup>[6]</sup>, 故本次建模选取模型几何尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 深度为  $80\text{ m}\times 60\text{ m}\times 40\text{ m}$ , 基本能覆盖隧道施工的全部影响范围, 可以忽略边界条件对计算结果的影响, 已经建模型如图 3 所示。共有 143 136 个单元, 220 933 个节点。

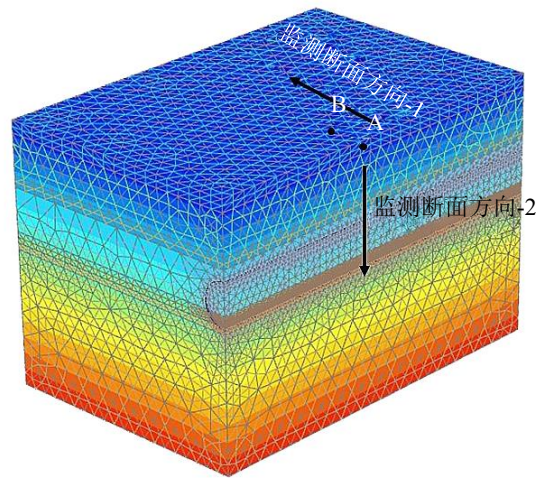


图 3 已建模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the built model

### 2.1 模型基本假定

(1) 土层均质、连续等厚度分布, 盾构推进沿轴线水平掘进。

(2) 不考虑管片接头错缝拼接及地下水渗流的影响。

(3) 土体与隧道衬砌的相互作用选择接触面折减的方式, 考虑强度因子  $R_{\text{inter}}=0.67$ <sup>[7]</sup>。

### 2.2 模型参数选择

本文选用摩尔-库伦模型 (MC 模型) 模拟隧道周围岩土体。盾构机壳采用板单元模拟, 衬砌管片用实体单元模拟。模拟盾尾同步注浆时, 将浆体注入盾尾空隙等效为等代层, 其厚度与盾壳厚度一致, 计算模型参数如表 1 所示。土体物理力学参数来自工程单位提供的地勘报告, 如表 2 所示。

### 2.3 盾构施工过程模拟

本次模拟基于有限元中的生死单元法, 具体步骤如下: (1) 生成初始隧道段, 并进行初始地应力分析, 位移清零; (2) 向前开挖一环盾构管片, 土体单元杀死, 并添加开挖面支护压力; (3) 盾尾拼

表 1 计算模型参数

Table 1 Computational model parameters

项目	外径/mm	内径/mm	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m <sup>3</sup> )
盾构机	6 480	6 200	140	210 000	0.30	78.0
衬砌管片	6 200	5 500	350	34 500	0.20	25.0
等代层	—	—	140	100	0.22	18.4

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil

岩土类别	含水率/%	天然重度/(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比	压缩模量/MPa	黏聚力/(kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦角/°
① <sub>2</sub> 素填土	30.9	18.2	0.34	3.2	10	10
④ <sub>1</sub> 淤泥粉质黏土	46.8	17.0	0.40	2.3	13	9
⑤ <sub>2</sub> 粉质黏土	26.7	19.5	0.36	5.5	43	17
⑨ <sub>4</sub> 圆砾	22.5	20.5	0.26	17.0	2	34
⑩ <sub>a-1</sub> 强风化泥质粉砂岩	22.2	19.5	0.28	13.0	35	15.5
⑩ <sub>a-2</sub> 全风化泥质粉砂岩	21.9	20.3	0.25	6.0	25	27
⑩ <sub>a-3</sub> 中风化泥质粉砂岩	23.5	24.5	0.30	不可压缩	170	33

装一环管片进行同步注浆, 激活管片和注浆等代层属性, 并添加注浆压力; (4) 依次类推开挖下一环管片, 并把盾尾处的注浆压力撤销。

### 3 结果分析

#### 3.1 地表变形

以距离初始开挖面 30 m 的位置为监测断面, 分析地表变形随盾构推进的变化规律。图 4 为监测断面随着盾构推进过程中地表变形的变化情况, 图中“刀盘即将到达”表示盾构掌子面距监测断面 7.2 m (6 环) 距离, “刀盘通过时”表示掌子面到达监测断面正下方, “盾尾脱出”表示盾构机尾部(拼装管片位置)已经穿越监测断面并生成了一环管片, “盾尾脱出后 15 环”表示盾尾穿越监测断面后 15 环 (18 m) 的位置处。如图 4 所示, 横轴表示测点距离隧道中心距离, 纵轴表示地表土体的累积沉降量。盾构掘进过程中的 4 个阶段地表沉降量最大值发生在隧道轴线位置, 分别为 -2.18、-4.37、-5.05、-5.25 mm。从图中可以得出: (1) 沉降槽曲线符合 Peck 曲线特征, 沉降槽曲线宽度随着盾构推进逐渐加深加宽; (2) 盾构刀盘在到达监测断面前发生微小沉降, 在刀盘通过时沉降量显著增大, 近似等于到达前沉降量的 2 倍, 主要是因为盾构在接近并且通过监测断面时, 对上方土体产生较大扰动变形, 进而引发地表沉降。

#### 3.2 深层土体沉降

图 5 表示隧道轴线位置在不同土层深度处 (0,

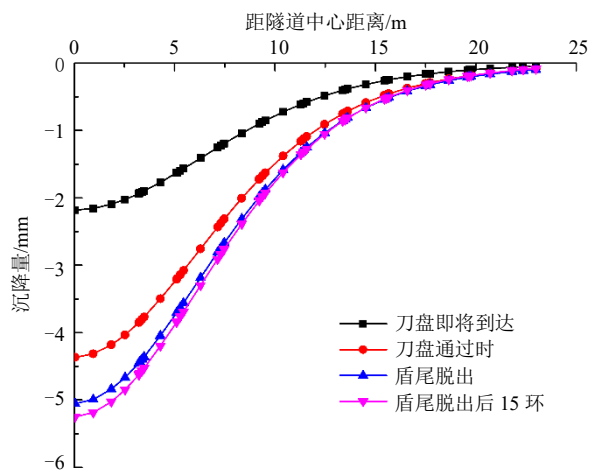


图 4 横向地表沉降随盾构推进的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of lateral ground settlement with shield advancement

-4, -8, -10 m) 的沉降量随盾构推进的发展规律, 图 6 表示距隧道轴线 3 m 处在不同土层深度处的沉降量随盾构推进的发展规律。如图 5 和图 6 所示, 横轴表示测点与开挖面的纵向水平距离, 纵轴表示各测点在不同土层深度处的累积沉降量。距地表 0、-4、-8、-10 m, A 监测点沿不同深度处达到最大沉降量分别为 -5.27、-6.29、-8.77、-10.12 mm。B 监测点沿不同深度处达到最大沉降量分别为 -4.58、-5.74、-6.04、-6.14 mm。从图中可以得出: (1) A、B 监测点在不同深度处随着盾构推进发生的土体变形规律曲线基本一致, 主要经历了到达断面前的微隆起、接近断面时的快速沉降、通过断面后的缓慢沉降、远离断面后的逐渐稳定 4 个阶段; (2) 横向

上比较, 距离隧道轴线越近土体沉降量越大, 随着土层深度加深, 土体沉降量在不断增大, 这主要是因为越靠近隧道, 土体的扰动度越大, 进而引发的变形也越大。

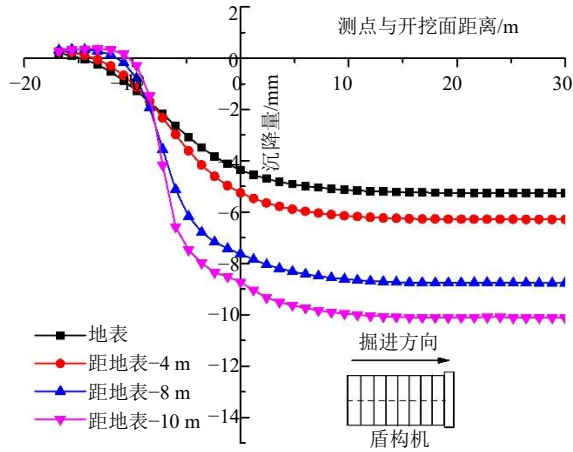


图5 A测点(轴线)深层土体沉降

Fig. 5 A measuring point (axis) deep soil settlement

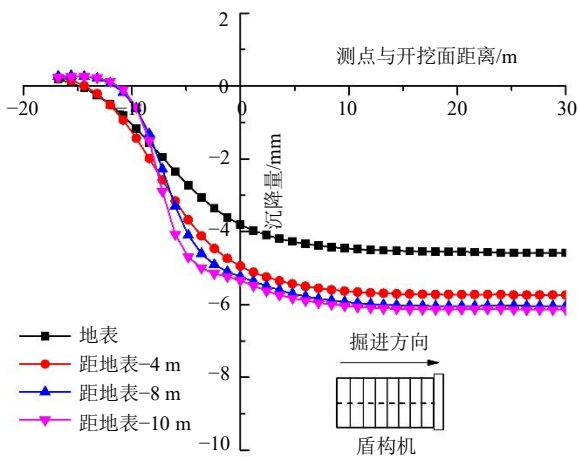


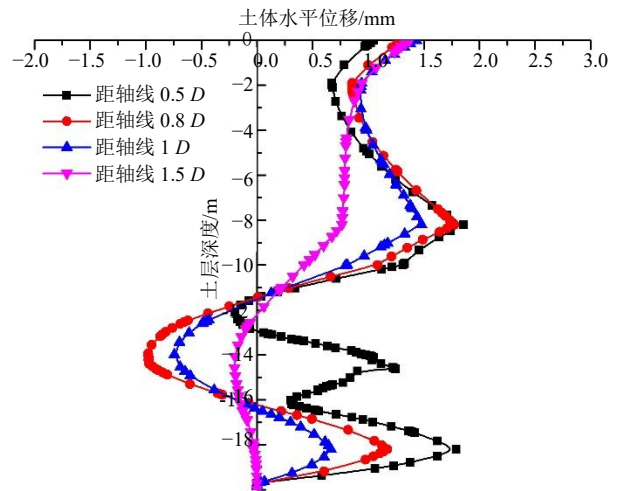
图6 B测点(距轴线3 m)深层土体沉降

Fig. 6 B measuring point (3 m from the axis) deep soil settlement

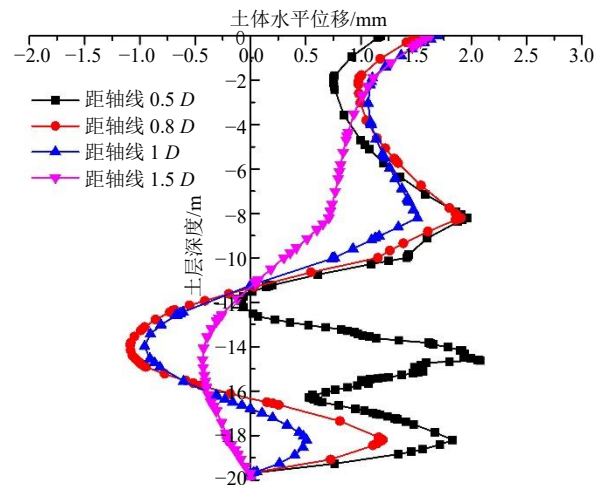
### 3.3 土体水平位移

图7为监测断面沿不同深度处的土体水平位移。其中图7(a)为盾构掌子面在监测断面正下方, 图7(b)为盾尾脱出后距监测断面7.2 m。图中横轴表示土体水平位移, 正值为远离隧道方向, 负值为靠近隧道方向, 纵轴表示不同深度的土层。分别绘制了4条距隧道轴线同一侧不同位置处(距轴线0.5、0.8、1、1.5 D)的深层土体水平位移曲线。如图7所示, 土体水平位移随着深度加深总体呈先增大后减小再增大的趋势, 图中曲线出现了多个拐点: 距地表-8 m位置, 该处土层为粉质黏土层, 由于土层性质差异明显导致土体变形; 隧道中心位置

-14.5 m, 该处土体变形受隧道施工影响最明显; 隧道底部位置-18 m, 该处土体处于隧道扰动辐射范围内。并且随着盾构穿越监测断面, 各位置处的土体水平变形量均有略微增大的趋势, 这可能是由于盾尾通过后, 受盾尾注浆影响, 土体会进一步发生外扩变形。



(a) 刀盘在监测断面正下方



(b) 盾尾距监测断面7.2 m

图7 不同深度处土体水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of soil at different depths

## 4 结 论

本文建立了盾构穿越砂砾地层三维数值模型, 计算中考虑了盾构掘进逐环推进全过程施工, 可得出以下结论:

(1) 地表沉降槽曲线符合 Peck 曲线特征, 其曲线宽度随着盾构推进逐渐加深加宽。盾构刀盘在到达监测断面前发生微小沉降, 在刀盘通过时沉降量显著增大, 近似等于到达前沉降量的 2 倍。

(2) 监测点在不同深度处土体变形时程曲线

规律基本一致, 主要经历了到达断面前的微隆起、接近断面时的快速沉降、通过断面后的缓慢沉降、远离断面后的逐渐稳定4个阶段, 并且随着土层深度加深, 土体沉降量在不断增大。

(3) 土体水平位移曲线沿不同深度处总体呈先增大后减小的趋势, 曲线出现了多处拐点。随着盾构穿越监测断面, 土体水平变形值呈现增大趋势。

### 参考文献

- [1] 何川, 曾东洋. 盾构隧道结构设计及施工对环境的影响[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [2] 王哲, 吴淑伟, 姚王晶, 等. 盾构穿越既有桥梁桩基磨桩技术的研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 117-125. WANG Zhe, WU Shu-wei, YAO Wang-jing, et al. Grinding pile technology of shield tunnels crossing pile foundation of existing bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 117-125.
- [3] 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): 1662-1616. JIANG Xin-liang, 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): 1662-1616.
- [4] 魏纲, 周洋, 魏新江. 土压平衡盾构掘进参数对地面隆起影响的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S2): 1703-1709. WEI Gang, ZHOU Yang, WEI Xin-jiang. Research of influence of EBP shield tunneling parameters on ground uplift[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S2): 1703-1709.
- [5] 渠开胜. 软土地层中盾构施工引起地表沉降规律研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014. QU Kai-sheng. Research on the law of ground settlement by shield construction of metro tunnels in soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [6] 郑刚, 张扶正, 张天奇, 等. 盾构隧道开挖及补偿注浆对地层扰动影响的室内试验及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1741-1753. ZHENG Gang, ZHANG Fu-zheng, ZHANG Tian-qi, et al. Disturbance of shield tunnel excavation and compensation grouting to surrounding soil: laboratory tests and numerical simulations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1741-1753.
- [7] 吴昌胜. 大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. WU Chang-sheng. Study on the ground deformation induced by large diameter shield tunneling construction[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [8] 黄宏伟, 黄栩, SCHWEIGER F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 182-189. HUANG Hong-wei, HUANG Xu, SCHWEIGER F H. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 182-189.