

软土地区地面出入式盾构法掘进 全过程土体扰动研究

郑 斌

上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司, 上海
Email: jsbctyj@163.com

收稿日期: 2021年8月24日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年9月30日

摘 要

地面出入式盾构法(Ground Pass Shield Tunneling Method, 简称GPST)克服了传统盾构法在两端始发和接收工作井施工时对地面交通影响大等弊端, 实现了地表出发和地表接收的全过程盾构施工新技术。本文通过理论和数值分析研究了软土地区地面出入式盾构法掘进全过程的土体扰动规律, 尤其是不同埋深比C/D(隧道覆土深度/隧道直径)情况下盾构掘进导致的土体变形发展规律, 给出了在施工时可考虑将埋深比0.3作为超浅埋施工的关键阈值, 为地面出入式盾构法掘进过程中的沉降或抗浮控制措施的选取提供参考依据。

关键词

地面出入式盾构法, 土体扰动, 数值模拟, 软土

Research on Soil Disturbance through GPST Tunnelling in Soft Area

Bin Zheng

Shanghai Huangpu River Crossing Facility Investment Construction Development Co., Ltd., Shanghai
Email: jsbctyj@163.com

Received: Aug. 24th, 2021; accepted: Sep. 23rd, 2021; published: Sep. 30th, 2021

Abstract

The advance of Ground Pass Shield Tunneling Method, hereinafter referred to as GPST Method, has overcome the disadvantage of constructing working shaft for shield launching and arrival

which is typical for traditional tunnelling method, making an innovative tunnelling era on shield tunnelling history. In this paper, based on theoretical equation and numerical simulation, soil disturbance through GPST tunnelling process was investigated in soft area. Especially, soil deformation development caused by GPST tunnelling under different C/D condition was explored. And a key C/D threshold was suggested as 1/3 for super-shallow GPST tunnel, which also provides a sound basis for settlement/up-floating control of GPST tunnelling.

Keywords

Ground Pass Shield Tunnelling Method, Soil Disturbance, Numerical Simulation, Soft Soil

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国民经济的高速发展,大中城市正逐步向资源密集型、集约型城市发展,围绕土地的综合利用,国内外学者开展了一系列的研究,其中地面出入式盾构技术(Ground Penetrating Shield Technology,即地面出入式盾构法)首先在日本实施,国内首条 GPST 隧道应用于南京机场线工程。该类型盾构工程以浅埋导坑取代深大工作井,可以最大限度减小地面开挖面积及搬迁对周围环境的影响,进而减少施工风险,缩短建设工期[1] [2] [3] [4] [5]。GPST 隧道具有环境影响小和建设工期短等显著优势,但在国内应用较少,且尚无相关设计规范,成熟案例借鉴较少,积极探索该新型盾构工法是优化今后城市化建设的有益尝试[6] [7]。

与 GPST 盾构施工方法相比较,传统盾构法其始发和接收均依赖工作井,即需要修建工作井基坑、推进施工引道等。这就要求建筑场地范围较广且需大型设备进行辅助施工,不仅影响地面交通,还会产生噪声等环境污染[8]。GPST 盾构法具有可避免深大工作井基坑施工和保护周围环境等一系列优点,但同时也要面对超浅覆土、大坡度等复杂工况。其中,最为关键的是由于注浆压力以及地下水浮力等造成的隧道上浮以及超浅覆土下结构受力特征复杂等诸多问题,现已成为 GPST 盾构法必须要克服的难点。

据统计,70%以上的盾构事故发生在盾构进出洞过程中。国内外一些学者[9] [10]在进、出洞的稳定理论、风险控制及加固盾构进、出洞的施工环境等方面作了深入研究。通常,工程中常采取降低地下水位、加固洞口周围土体等方式,为此需要投入较大资金与工期投入以及环境代价。此外,国内外针对软土地区地面出入式盾构法掘进全过程土体扰动研究目前较少,主要是对地面出入式盾构掘进过程中历经的负覆土-零覆土-浅覆土工况进行研究,着重探究隧结构在不同覆土工况下受力特性,并针对土体侧向土压力系数进行敏感性分析,揭示了处于不同地层条件时,隧道结构收敛变形的发展规律[11] [12] [13] [14]。

本文在对背景工程龙水南路新建工程进行充分调研后,借助 ABAQUS 大型有限元数值模拟软件,采用适用于软土地区的剑桥本构模型,对软土地区 GPST 大尺度盾构掘进全过程进行模拟分析,着重研究在不同埋深下土体的变形发展规律,并对注浆压力、正面附加推力等施工因素进行分析,将模拟结果与 Peck 理论公式进行相互印证和对比分析,证明了数值模拟方法和结果的可靠性,研究成果可为地面出入式盾构法掘进过程中的沉降或抗浮控制措施的选取提供参考依据。

2. 工程概况

上海市龙水南路越江隧道新建工程是中心城南部地区重要的越江通道，对增强黄浦江南延伸徐汇滨江核心区域与浦东前滩的两岸联系，分流上中路隧道承担的近江越江交通具有重要作用。

本工程西起徐汇区的龙水南路喜泰路交叉口，工程分南北两线，北线至浦东新区海阳西路耀龙路路交叉口，南线至浦东新区高青西路耀龙路路交叉口。其中隧道工程为双管双向四车道，采用盾构法施工。龙水南路新建工程的地理位置详见图 1。



Figure 1. Location arrangement of Longshui south new project
图 1. 龙水南路新建工程地理位置图

北线隧道盾构从浦西工作井始发，洞口中心标高为-10.17 m，覆土为 8.7 m，盾构推进长度为 1140 m；南线隧道盾构从浦西始发井始发，南线洞口中心标高为-15.12 m，盾构推进长度为 1298 m。南线与北线采用错位始发，北线洞门比南线洞门高约 4.95 m。其中北线盾构在浦东海阳西路工作井接收，接收洞口中心标高为-2.06 m，覆土约为 0.982 m。南线盾构在浦东高青西路工作井接收，接收洞口中心标高为-3.37 m，覆土约为 2.943 m。工程采用两台土压平衡盾构机，北、南线盾构先后从浦西始发井始发，工程平面布置如图 2 所示。

盾构隧道结构外径 11.36 m，内径 10.36 m，管片厚度 500 mm，中心环宽 1.5 m，采用通用管片错缝拼装而成，衬砌圆环由一块封顶块(K)，两块邻接块(L1, L2)以及 5 块标准块(B1~B2)组成，共 8 块管片组成，其中封顶块 16.36°，其余 7 块均 49.09°，错缝拼装衬砌管片环间错角 32.72°。

每环衬砌共有 M36 环向螺栓 16 个，M30 纵向螺栓 22 个，M27 通常螺栓 22 个，衬砌环面设置剪力销，22 个/环，螺栓预埋件均采用快速内插式接头，管片混凝土强度等级为 C60，抗渗等级 P12。

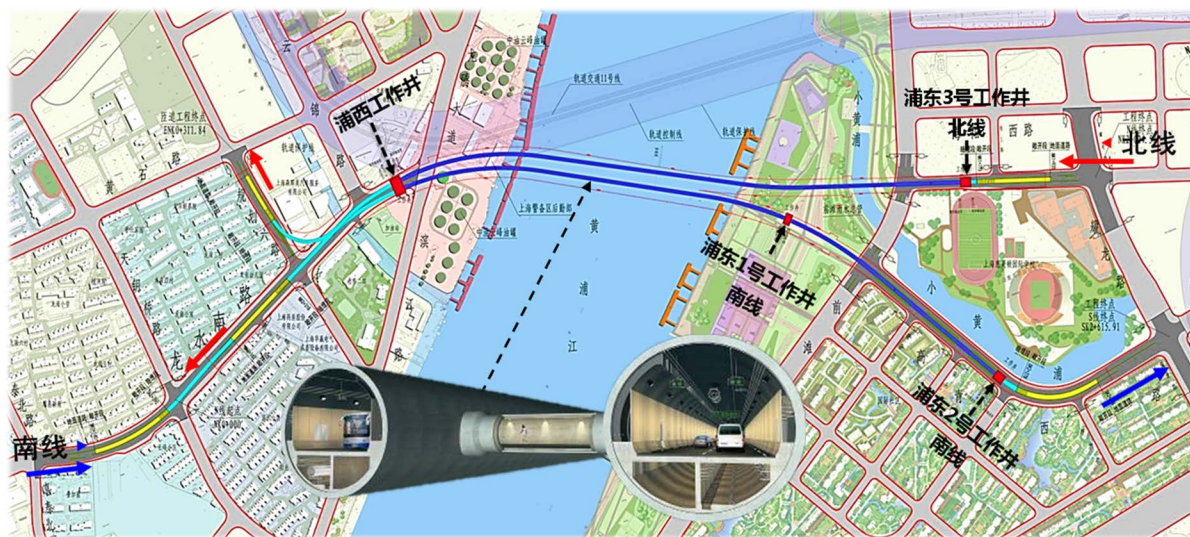


Figure 2. The plan of Longshui south new project

图 2. 龙水南路新建工程平面图

3. GPST 盾构掘进全过程三维数值模型

3.1. 本构模型及参数

针对 GPST 盾构法的计算模型选择中需要充分反映其特点, 有效模拟零覆土和超浅覆土的地层响应。因此, 对于上海地区软粘土选用能够反映软土流变特性的修正剑桥模型, 而砂性土则采用 MC 模型, 相关参数结合详勘报告和试验获得, 详见表 1。表中, γ 为土体重度, E 为杨氏模量, c' 是有效粘聚力, φ' 为有效内摩擦角, μ 为泊松比, e_0 是初始孔隙比, k_0 为渗透系数, M 、 k 、 λ 为 MCC 模型参数。

本文着重研究考虑 GPST 盾构掘进过程中土体的扰动规律, 故对衬砌结构及注浆层进行了简化, 将管片结构及注浆层均用线弹性模型模拟, 且考虑接头对结构刚度的影响, 对管片结构弹性模量进行相应的折减, 折减系数基于上海工程经验取 0.8, 管片结构及注浆层参数如表 2。

3.2. 荷载与边界条件

本研究依托工程为大坡度软土盾构, 故施工荷载应考虑非均匀分布, 结合大量的工程经验, 注浆压力可取静止土压力的 1.1 至 1.2 倍, 随隧道埋深线性增大, 在盾尾两环范围内施加。在浅覆土掘进时, 周围土体不具备成为“自然拱”的条件, 不具备自稳能力, 故拱顶处注浆压力可取拱顶处的土压力, 其余位置沿埋深线性递增。

对于本工程所采用的土压平衡盾构, 虽然支护介质由开挖土体混以一定比例的添加剂组成, 其均质性和流动性较难控制, 支护压力梯度不如泥水平衡盾构那样均匀分布, 但在数值计算分析中仍可以均匀梯度进行考虑, 因此正面附加推力取相应土层埋深处的静止土压力值, 同样沿隧道埋深近似线性增大, 针对泥水盾构及土压平衡盾构常用支护形式如图 3 所示。

Table 1. Parameters of MCC model in Shanghai area

表 1. 上海地区 MCC 模型数值模拟参数

土层序号	γ (kN/m ³)	E (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)	μ	M	λ	k	e_0	k_0 (m/s)
③	17.4				0.34	1.19	0.1165	0.0097	1.214	1×10^{-7}

Continued

④	16.8				0.4	0.89	0.1313	0.0109	1.416	4×10^{-9}
⑤2	18.3				0.32	1.30	0.1090	0.091	0.899	1×10^{-6}
⑦2	18.8	95×103	11	25	0.3				0.768	2×10^{-5}

Table 2. Parameters of lining segment and grouting layer
表 2. 管片及注浆层参数

材料	γ (kN/m ³)	E (kPa)	μ
衬砌	25	28.8×10^6	0.175
注浆层	18	15×10^4	0.2

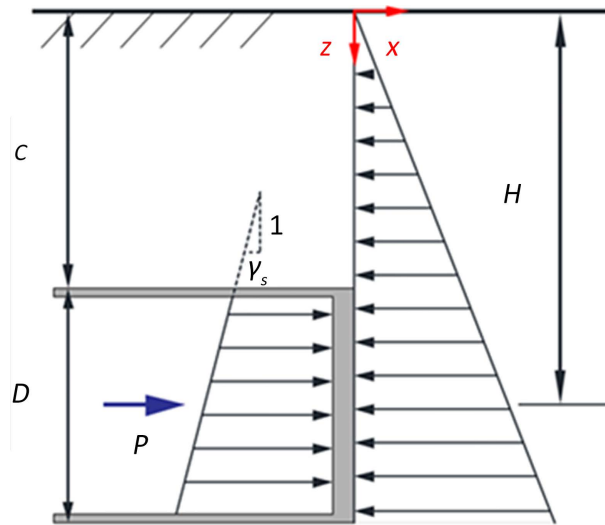


Figure 3. Supporting pressure distribution of shield tunnelling
图 3. 盾构掘进支护压力分布形式

无论是泥水平衡盾构还是土压平衡盾构，借助连通器原理或者安装土压力传感器的形式均能达到对支护压力的准确控制，在分析上述支护压力时，常常依据切口处的支护压力对上述支护压力分布形式进行计算，即：

$$P = P_0 + \gamma_s(z - H) \tag{1}$$

$$P_0 = K_0\gamma(C + D/2) \tag{2}$$

式中， P 是开挖面任意点处的支护压力， P_0 是开挖面中心点的支护压力， K_0 是开挖面前方土体的静止侧压力系数，针对上海软粘土工况，建议取值 0.7，同理 γ 是周围土体的容重， γ_s 是支护介质的容重，针对上海地区工况，可取 $\gamma_s = 10 - 12 \text{ kN/m}^3$ ， z_0 为隧道中心点埋深，即切口埋深。

数值分析运用大型 ABAQUS 软件，在 ABAQUS 中剑桥模型需搭配多孔介质弹性模型使用，同时鉴于上海软粘土地下水位线较高，压缩性较高，所以在数值模拟时应考虑饱和土的渗流固结，选取耦合孔压分析。

针对上海饱和软粘土的特性，地下水位线较高，采用耦合孔压分析时需在水位线处给定孔压边界，本模型在地平面处设置孔压边界。此外，限制模型的水平位移边界和底部几何位移边界，同时为了提高计算效率，采用对称模型模拟，故在对称面上采用对称边界条件。

本研究重点是无工作井大尺度盾构掘进时周围土体扰动特征，故在盾构到达至盾尾经过这段采取收敛位移法来模拟盾构机的推进过程同时也可将盾构机，即虚拟盾构法，选取的收敛位移模式如图4所示。

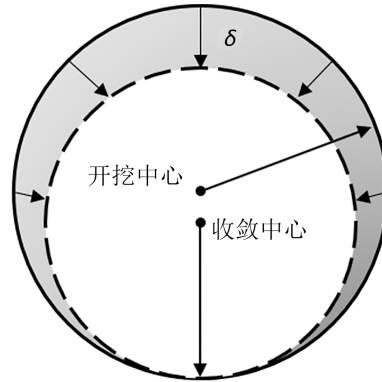


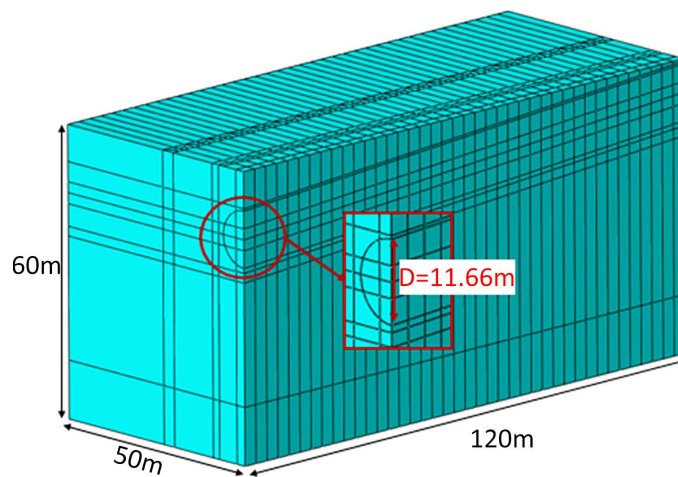
Figure 4. Convergence mode of soil mass

图4. 土体收敛位移模式

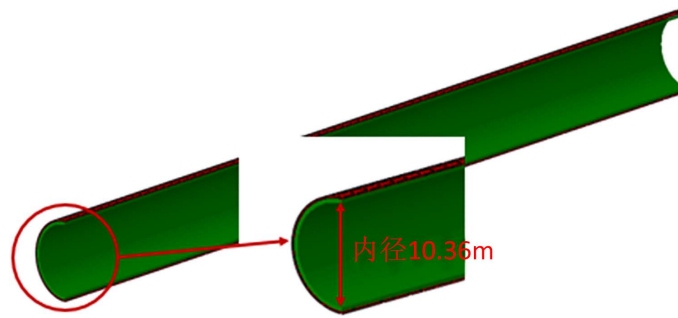
图中 δ 表示数值模拟中施加到周围土体上的最大环向收敛位移。假设掘进过程中土体开挖后且未施加支护前，周边土层向图中虚线圆环的圆心收敛，该圆心与超挖所形成的实线圆的圆心之间的距离即为 δ ，这里取工程中盾构掘进时切削直径和盾构机外径的差值，但在实际施工中，超挖量可能会受到多种因素的影响，包括土体性质、盾尾同步注浆、刀盘磨损等。因此，在数值计算中，为确定这一参数，可选取地表沉降值作为标准进行基准测试。

3.3. 开挖过程模拟

图5为龙水南路 GPST 有限元模型。该模型共 71,761 个节点，62,800 个单元。模型尺寸取 120 m (长) \times 50 m (宽) \times 60 m (高)，隧道掘进历经 0.6D 至 0.1D 覆土工况(D 为隧道外径)，坡度为 5.9%。软粘土采用适用于上海地区的剑桥模型，砂性土采用库伦模型，并采用“Soils”分析步，考虑孔压-应力耦合，衬砌及注浆层采用线弹性本构模型。在 ABAQUS 中采用 57,040 个 C3D8P 单元来模拟土体，3840 个 C3D8R 单元模拟隧道衬砌，1920 个 C3D8I 单元来模拟注浆层。



(a) 土体模型



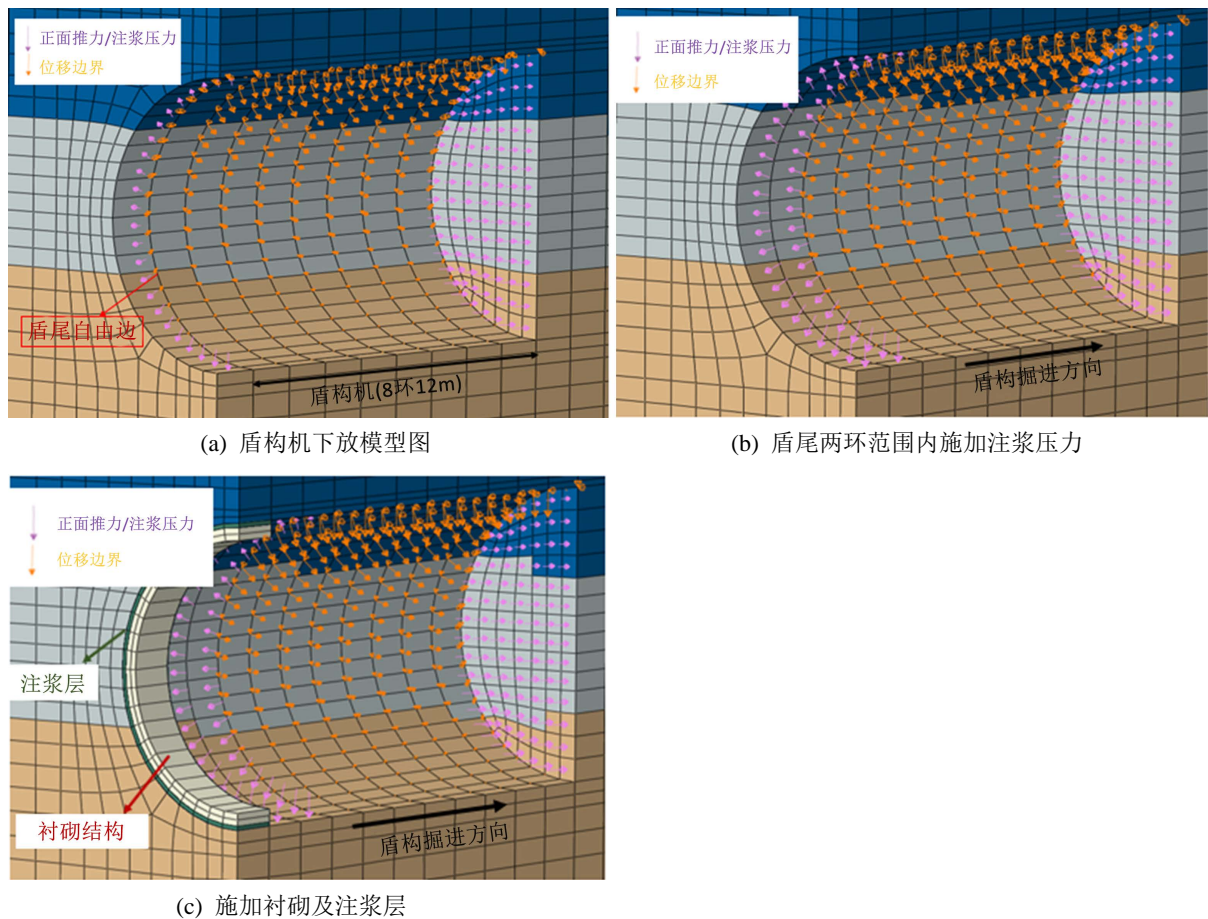
(b) 管片及注浆层模型(红色为注浆层、绿色为衬砌结构)

Figure 5. Numerical model for shield tunnelling of Longshui south road
图 5. 龙水南路盾构掘进数值模型

利用 ABAQUS 软件中 Model Change 功能实现盾构掘进开挖，开挖过程如下：

第一步，“杀死”全部衬砌和注浆层进行地应力平衡。平衡效果满足：最大位移 $< 1E-6$ m；

第二步，“杀死”前 9 环的开挖区土体单元(每环宽度 1.5 m)，包含 8 环盾构机(12 m)以及 1 环注浆压力区。同时在周边临空土体的节点处施加向隧道中心收敛的非均布位移边界，并激活开挖面支护压力和盾尾注浆压力；



(a) 盾构机下放模型图

(b) 盾尾两环范围内施加注浆压力

(c) 施加衬砌及注浆层

Figure 6. Shield tunnelling diagram for numerical simulation
图 6. 数值模拟盾构掘进流程图

第三步，“杀死”第 10 环的开挖区土体单元，盾尾施加第二环注浆压力；

第四步，“杀死”第 11 环的开挖区土体单元，移除第一环范围内的注浆压力并激活该位置衬砌和注浆层；

第五步，重复上一步骤，同时在每一步施加相应的支护压力和注浆压力，并激活相应的衬砌和注浆层单元，直至开挖结束。

开挖过程模拟流程如图 6 所示。

4. 结果分析

4.1. 不同 C/D 工况下地表沉降规律

目前常用的盾构隧道地层沉降预测方法是 1969 年提出的 Peck [5] 公式，以及 Verruijt [9] [15] (1996) 在 Sagaseta 研究的基础上假定隧道变形主要由隧道表面的均匀径向位移和隧道椭圆化构成，并利用均匀半弹性平面方法，推导出对于任意泊松比都适用的土体垂直向和水平向变形的解析解，随后 Loganathan [10] (1998) 基于 Verruijt 的解析解，针对粘土及砂性土层提出了等效土层损失模型，推导出不考虑开挖过程中土体固结影响时的地层垂直、水平位移解析解。

根据已有的上海地区盾构掘进工况数据显示，对于大直径软土盾构隧道，在严格控制施工条件的基础上可以保证在 0.6 倍洞径埋深情况下，地表的沉降可维持在 20 mm 范围内，达到了上海地区盾构隧道建设规范要求。结合已有的工程经验，本文以 0.6D (D 隧道直径) 埋深 (C 隧道埋深) 为基准进行有限元模拟的基准测试。

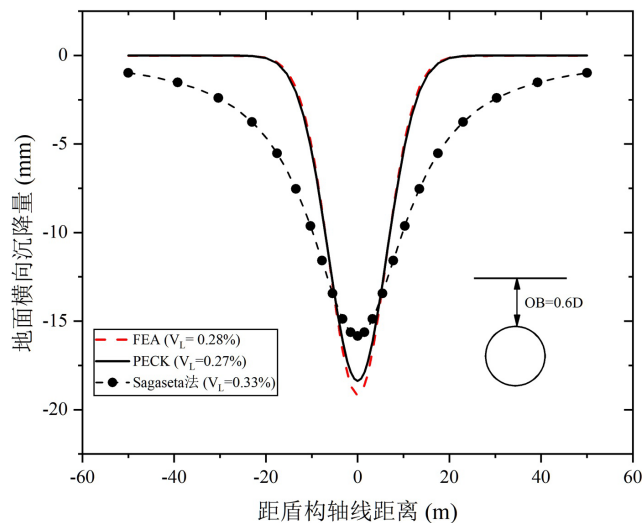


Figure 7. Settlement comparison of FEM result and analytical solution caused by shield void

图 7. 盾尾经过时有限元计算与理论公式计算地表沉降对比

由图 7 可知，对于软土地区超浅覆土大直径盾构掘进地表沉降预测，Peck 公式与有限元计算的沉降槽具有较高的相似度，当盾尾经过时有限元计算地表最大沉降量为 19 mm，略高于 Peck 公式拟合值，两者沉降槽宽度基本一致，此时 i 为 6.4 m，对应值 K 为 0.5。而 Sagaseta 法预测地表沉降与有限元结果有较大出入，其预测地表最大沉降值偏小，且沉降槽明显宽于 Peck 公式及有限元计算结果，地层损失率也较前两者偏大。模拟结果与 Peck 公式及工程经验对比可知，该工况可以作为后续有限元计算的基准。

将有限元计算结果经高斯拟合绘图如下(图 8)。

由图 9 可知，不同埋深比条件下，地面沉降均表现为明显的沉降槽形式，随着埋深变浅，沉降槽宽

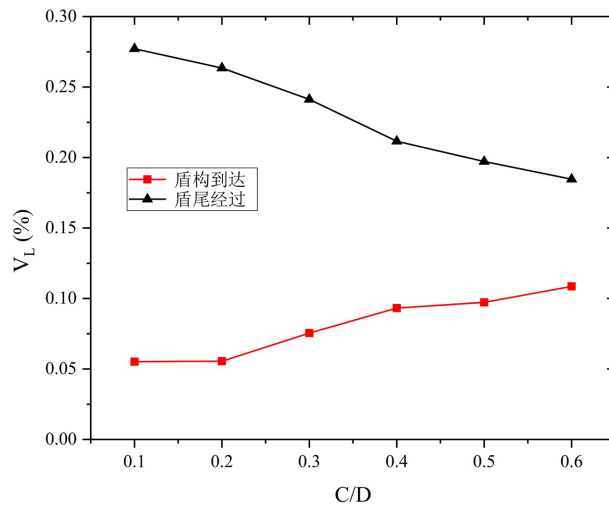
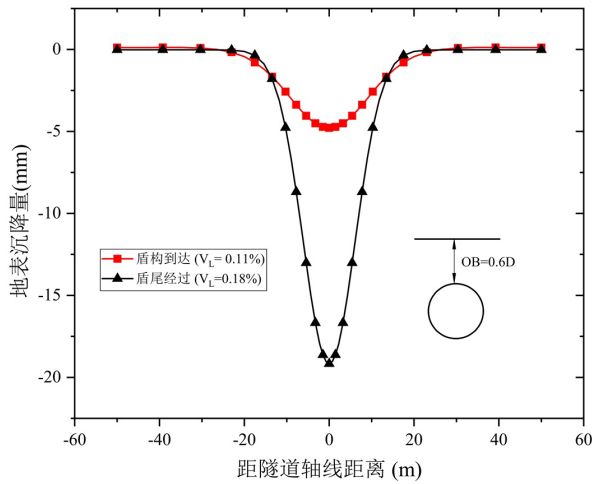
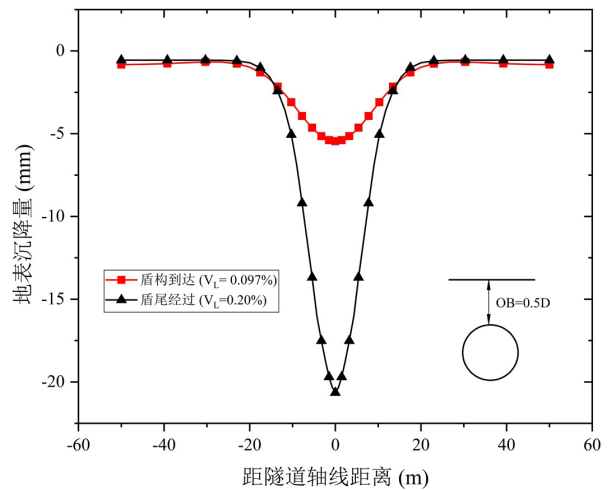


Figure 8. Variation of ground loss ratio under different embedded depth

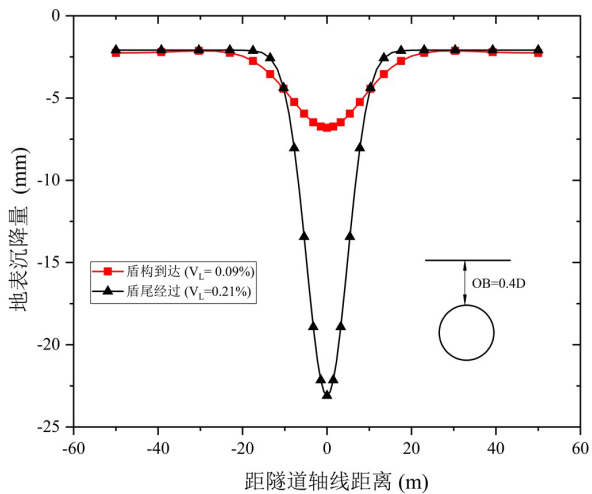
图 8. 不同埋深下地层损失率变化规律



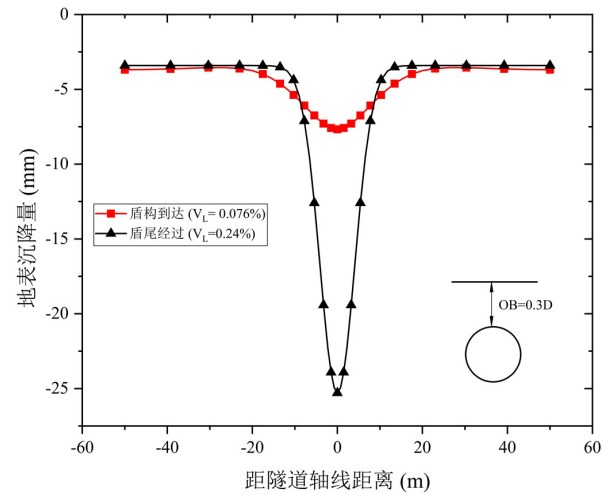
(a) 0.6D 埋深地表沉降曲线



(b) 0.5D 埋深地表沉降曲线



(c) 0.4D 埋深地表沉降曲线



(d) 0.3D 埋深地表沉降曲线

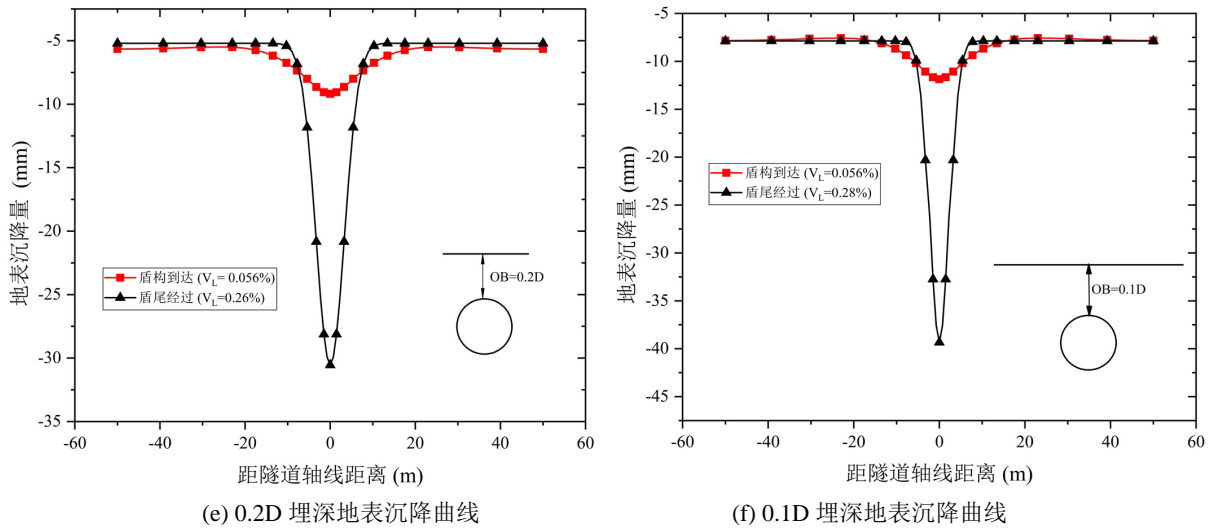


Figure 9. Settlement law under different embedded depth
图 9. 不同埋深下地表沉降规律

度逐渐变窄，最大沉降量逐渐增大。在 0.1 倍洞径埋深时，盾构到达和出盾尾时，地表沉降出现较大差异，究其原因应是此时盾构掘进对土层影响较大，土层对于施工参数较为敏感所致。

盾构开挖面到达时，随着覆土深度增加，地层损失率(V_L)会有所增加；盾尾经过时，呈现相反的变化规律。这是由于随埋深越深上覆土体体积越大，导致盾构到达时土体损失量有所增大，另一方面埋深越深土层本身抗扰动能力会有所增强，所以盾构穿越时引起的地层损失有所减小，具体变化见图 10，在 0.6D 至 0.4D 埋深时地层损失率变化较为平缓，埋深小于 0.4D 时，地层损失出现较大的变化，说明此时周围土层对盾构掘进敏感性较强，施工时应精细化控制此时的各项施工参数。

图 10 为盾构掘进时地表最大沉降量变化曲线，由图 10(a)可知在盾构到达阶段随埋深比减小地表最大沉降量有所增大，且随埋深比线性变化，由于盾构到达时开挖面土方体具有很好的支护效果，最大地面沉降约为 11 mm；当盾尾经过时，地面最大沉降量 S_{max} 出现明显增大趋势，在 $C/D = 0.1$ 时达到最大

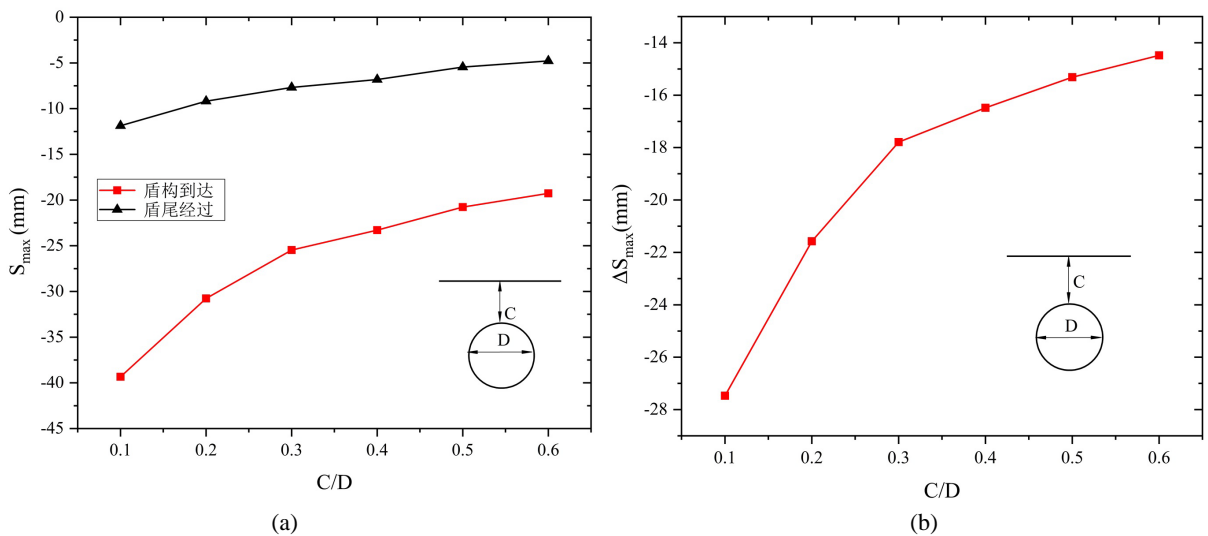


Figure 10. Surface maximum settlement under different embedded depth
图 10. 不同埋深下地表最大沉降变化规律

值约为 10 mm。同时由图 10(b)可知, 盾构穿越引起的最大相对沉降 ΔS_{\max} 随埋深近似线性变化, 当 $C/D < 0.3$ 时, 曲线斜率变大, 意味着此时盾构掘进造成了较大的土体扰动, 此时应注意严格控制盾构掘进时的各项施工参数, 以免造成土体大变形及失稳。

4.2. 不同 C/D 工况下土体横向位移变化规律

盾构掘进过程中, 土体位移的监测, 除了土层纵向沉降, 土体横向位移也是关注的重点, 其值反映了盾构施工质量, 并且横向位移将直接影响盾构附近已有的建筑物, 按位移方向不同可将横向位移分为垂直于盾构轴线的横向位移和平行于隧道轴线的横向位移。

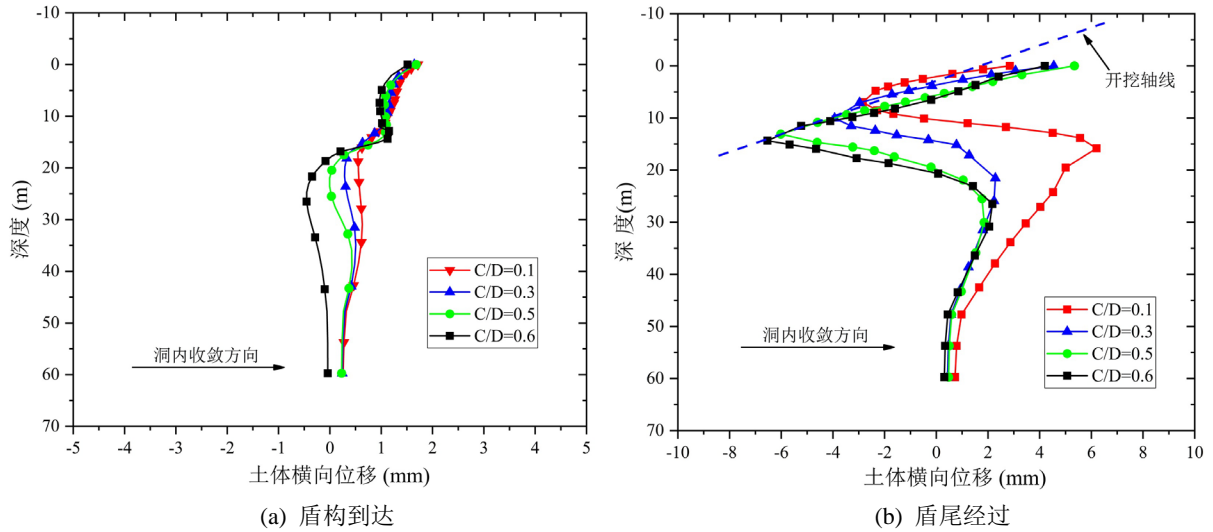


Figure 11. Lateral displacement vertical to tunnelling direction
图 11. 垂直于隧道轴线方向横向位移变化规律

对于垂直于轴线方向的土体位移由图 11(a)可知, 盾构到达时, 由于开挖面支护压力以及盾构机的存在, 其在不同埋深条件下分布规律接近, 均在近地表处达到 2 mm 左右的最大值, 而当盾尾经过时, 取相同注浆压力系数时, 不同 C/D 工况下的横向位移模式近似, 均在隧道轴线附近取得极大值, 并随埋深

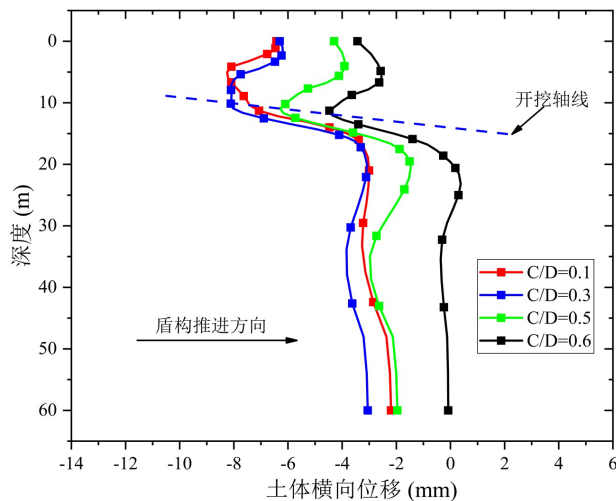


Figure 12. Lateral displacement of shield front soil
图 12. 盾构前方土体横向位移变化规律

增大而增大，且在近地表处土体有向洞内收敛的趋势。当埋深为 0.1 倍洞径时，土体垂直于轴线方向横向位移较其他埋深工况有较大变化，主要体现在洞内收敛值在隧道底部取得最大值，其原因应是此埋深下拱底土体回弹值较大导致下方土体挤入隧道所致。

盾构前方土体在隧道轴线方向的横向位移变化规律如图 12 所示，整体来看不同埋深下土体横向位移模式相似，但相对于其余工况当埋深比为 0.6 时，土体横向位移在深部土体中取值较小，表明当埋深小于 0.6 倍洞径时，周围土体对盾构掘进较为敏感。横向位移最大值同样随埋深减小而增大，最大值均出现在开挖面中下部位。当埋深比小于 0.3 时，开挖范围内土体横向位移值近似，在施工时可考虑将埋深比 0.3 作为超浅埋施工的关键阈值。

4.3. 施工参数敏感性分析

1) 开挖面支护压力影响

盾构掘进过程中，合理采用开挖面支护压力是保证前方土体稳定的关键因素，即控制前方土体隆起和沉降的关键在于控制掘进界面的支护力大小，目前多采用经验公式、室内试验、实测数据分析及数值模拟进行支护力的研究。已有研究表明，开挖面支护压力多取开挖面处静止土压力为参考值进行动态调整，静止土压力可按式：

$$p_0 = K_0 \gamma z \quad (3)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (4)$$

式中： K_0 是静止土压力系数， $\sin \varphi'$ 为有效内摩擦角， γz 为土体自重。结合地勘报告可得，该工程主要穿越上海③、④层土，静止侧压力系数为 0.6。

本研究选取 $C/D = 0.6$ 工况作为研究对象，通过改变开挖面支护压力系数在开挖面上施加不同的梯度面力来模拟不同的支护效果，过支护或者欠支护可根据开挖面前方土体沿隧道掘进方向土体横向位移进行相应的评估。

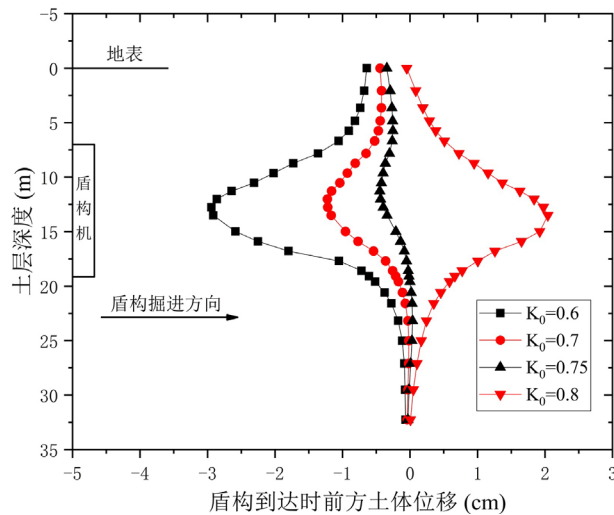


Figure 13. Effect of supporting pressure on excavating lateral displacement

图 13. 支护压力对开挖面横向位移的影响

图 13 结果显示对于软土地区浅覆土大直径盾构掘进，开挖面横向位移对支护压力较为敏感，当支护压力系数取 0.75 时，开挖面横向位移较小，说明此时前方土体得到了较好的支护，而当取值大于 0.75 时，

土体将产生较大被动位移。支护压力系数取 0.7 时，开挖面横向位移朝洞内收敛 1.2 cm，且当支护压力系数小于 0.7 时会产生较大的洞内收敛位移，说明在软土地区进行 GPST 大尺度盾构掘进时，开挖面支护压力应略大于前方土体的静止土压力。

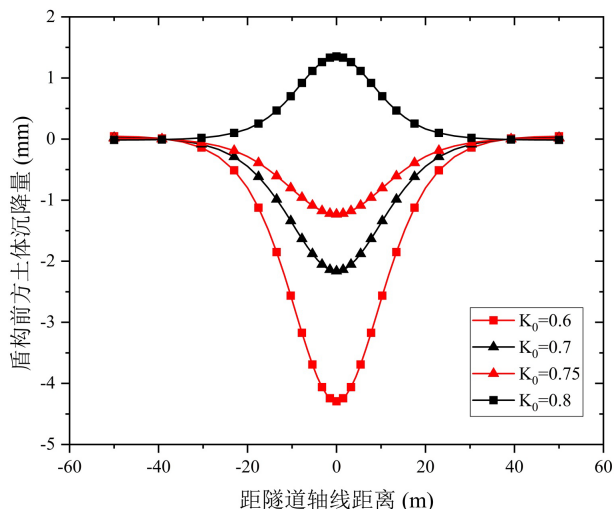


Figure 14. Effect of supporting pressure on excavation face soil
图 14. 支护压力对开挖前方土体沉降的影响

支护压力主要影响开挖面引起的地层损失导致的土体沉降，选取盾构前方土体作为对象，研究不同支护压力对地表沉降的影响规律，图 14 结果显示，和盾构前方土体横向位移一样，地表沉降同样对支护压力较为敏感，在支护压力系数取 0.75 附近时地表沉降较小，表明此工况施工荷载对周围土体扰动较小。

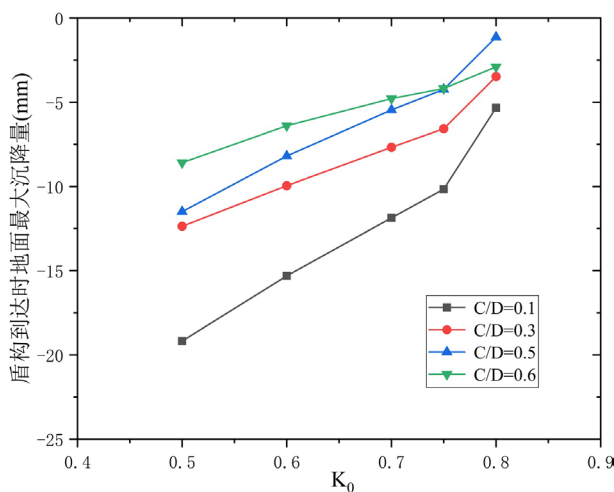


Figure 15. Effect of supporting pressure on surface maximum settlement
图 15. 开挖面支护压力对地表最大沉降的影响

图 15 展现了不同埋深条件下，地表最大沉降量随支护压力的变化规律，总体而言，不同埋深下，地表最大沉降量均随支护压力增大而减小，但是由图 15 和图 16 可知当支护压力系数大于 0.75 时，开挖面将产生被动位移且盾构前方土体将会隆起。同时随支护压力增大，不同埋深比下最大地表沉降量差值逐步减小。埋深比大于 0.3 时，地表最大沉降量较为接近，埋深小于 0.3 时地表最大沉降量出现剧增。综上

所述，对于软土地区无工作井大尺度盾构掘进时，开挖面支护压力系数取 0.7 至 0.75 较为合适，约为前方土体的静止土压力的 1.2 倍，此时对前方土体支护效果最好。

2) 同步注浆压力影响

同步注浆压力主要影响盾尾经过时土体沉降，是控制隧道结构稳定以及土体扰动的有效措施。盾构法隧道同步注浆工艺是在盾构掘进的同时，通过注浆泵将具有一定工作性能和强度的浆液注入盾尾空隙中，起到填充盾尾建筑空隙的作用，与此同时可以减小地面沉降、提高隧道整体稳定。在软土地区 GPST 大尺度盾构掘进过程中，伴随埋深减小土压力会逐渐减小，更需严格控制注浆压力，以减少土体扰动并控制隧道结构的上浮。已有研究表明，在浅埋盾构掘进中，可将土体自重设置为注浆压力的标定值，故在研究数值模拟中采取土体自重作为注浆压力设定的参考值，当 K_0 取 1 时，代表此时注浆压力值为埋深工况下对应的土体自重。

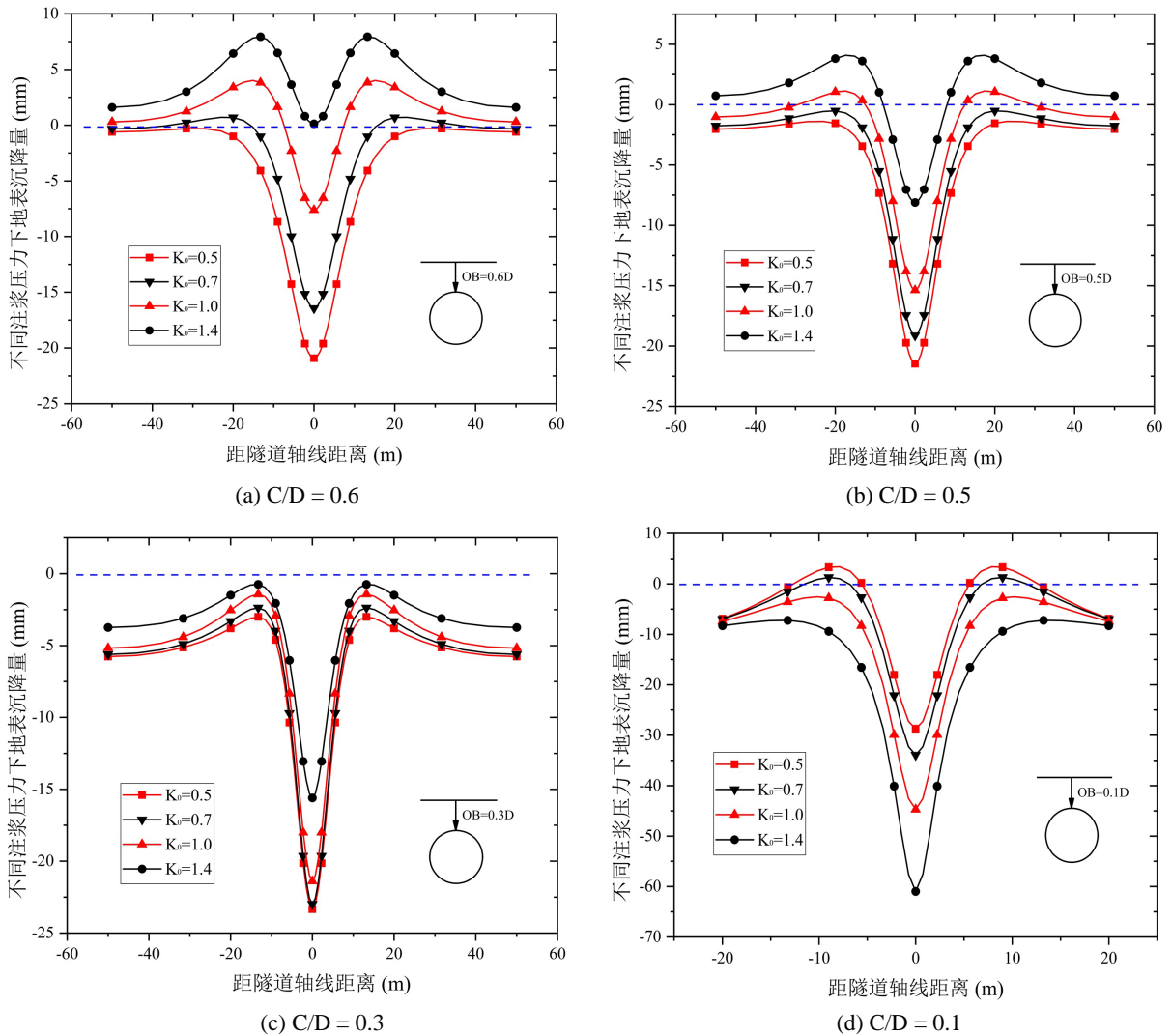


Figure 16. Effect of different grouting pressure on soil disturbance

图 16. 不同注浆压力对地层扰动的规律

图 16 展示了不同注浆压力对地表沉降的影响规律，可以发现当埋深比大于 0.5 时，增大注浆压力可以有效控制土体扰动，地表沉降量可以得到有效控制，随着注浆压力增大，沉降槽逐步变窄，但当大于

土体自重时,地面会逐步出现隆起,建议埋深 0.6 倍洞径时注浆压力可取土体自重的 0.7 倍,埋深在 0.5 倍洞径时可取土体自重;当埋深比为 0.3 时,由图 16(b)可知此时地表沉降对注浆压力敏感度较低,注浆压力的变化不会引起土体扰动的明显变化,表明此时不能通过控制注浆压力来达到控制土体扰动的效果,需其他施工措施,例如土体加固、抗拔桩等技术限制土体位移;埋深比为 0.1 时,与上述工况出现相反的影响规律,此时建议选取较小的注浆压力减少对周围土体的扰动。

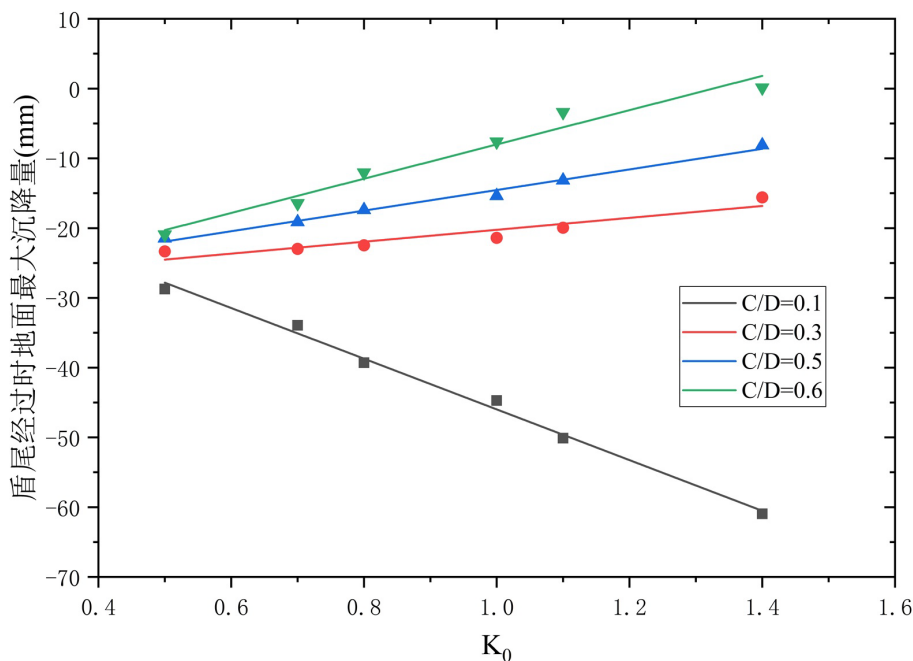


Figure 17. Effect of grouting pressure on surface maximum settlement
图 17. 注浆压力对地表最大沉降的影响

图 17 展示了不同注浆压力下,不同埋深工况下的地表最大沉降量变化规律,可知当 C/D 在 0.3 附近时,地表最大沉降量随注浆压力变化较小(图中对应直线斜率较小),埋深大于 0.3 倍洞径时,周围土体对注浆压力敏感度上升,且随着注浆压力增大能有效减少地表沉降,相反当埋深比小于 0.3 时,随注浆压力增大地表沉降反而增大,在此工况下建议选取较小的注浆压力系数进行施工。

综上,在软土地区 GPST 大尺度盾构掘进过程中,应严格控制各项注浆参数,当埋深比大于 0.3 时,注浆压力可以明显起到控制土体扰动减少地面沉降的作用,埋深在 0.3 倍洞径埋深时,周围土层对注浆压力敏感程度降低,注浆压力并不能有效减低地面沉降,故建议埋深比小于 0.3 时,可以采取土体加固等土体改良措施减少盾构掘进对周围土体的扰动。

5. 结论

结合上海市龙水南路新建工程,对北线盾构接收段 GPST 盾构工法掘进全过程进行模拟分析,在考虑注浆、衬砌、盾构机等部件基础上对不同埋深比下土体扰动进行分析,并对支护压力、注浆压力在不同埋深工况下的影响进行分析,主要结论如下:

- 1) 不同埋深比条件下,地面沉降均表现为明显的沉降槽形式,随着埋深变浅,沉降槽宽度逐渐变窄,地表最大沉降相应增大。
- 2) 盾构穿越引起的最大相对沉降随埋深比近似线性变化,当突变时,意味着此时盾构掘进造成了较大的土体扰动,此时应注意严格控制盾构掘进时的各项施工参数,以免造成土体大变形及失稳。

3) 对于软土地区无工作井大尺度盾构掘进时, 开挖面支护压力系数取 0.7 至 0.75 较为合适, 约为前方土体的静止土压力的 1.2 倍, 此时前方土体不会出现较大土体横向位移, 可以得到有效的支护。

4) 当埋深比大于 0.3 时, 注浆压力可以明显起到控制土体扰动减少地面沉降的作用, 但埋深比为 0.3 左右时, 周围土层对注浆压力敏感程度降低, 改变注浆压力并不能有效减少土体扰动, 故建议, 可以采取土体加固、灌注桩等土体改良措施, 以减少周围土体的扰动, 增加隧道结构的稳定性。

基金项目

本项目得到了上海市科委重大科技攻关项目(18DZ1205100)的资助, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] 张子新, 胡文, 刘超, 等. 地面出入式盾构法隧道新技术大型模型试验与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2161-2169.
- [2] 赵峻, 戴海蛟. 盾构法隧道软土地层盾构进出洞施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 5147-5152.
- [3] 廖一蕾, 张子新, 张冠军. 大直径盾构进出洞加固体稳定性判别方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 256-260.
- [4] 周文波. 盾构进出洞施工风险分析及防治[C]. 地下工程建设与环境和谐发展——第四届中国国际隧道工程研讨会文集. 上海: 同济大学出版社, 2009: 156-165.
- [5] Peck (1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico Press, Mexico, 225-290.
- [6] Yu, J., Standing, J., Vollum, R., et al. (2017) Experimental Investigations of Bolted Segmental Grey Cast Iron Lining Behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **61**, 161-178. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.002>
- [7] Miki, K., Yokomizo, F., Ueda, H., et al. (2009) Development of Construction Method for a Road Underpass at Intersection. *ITA, World Tunneling Congress*, Tokyo, 15-21 May 2009, 1-8.
- [8] 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.
- [9] Zhang, Z.X., Liu, C., Huang, X., et al. (2016) Three-Dimensional Finite-Element Analysis on Ground Responses during Twin-Tunnel Construction Using the URUP Method. *Tunneling and Underground Space Technology*, **58**, 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.05.001>
- [10] Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998) Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **124**, 846-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:9\(846\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846))
- [11] Zhao, H., Liu, X., Bao, Y., et al. (2016) Simplified Nonlinear Simulation of Shield Tunnel Lining Reinforced by Epoxy Bonded Steel Plates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**, 362-371. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.004>
- [12] 张旭, 叶冠林, 吴惠明, 等. 地面出入式盾构隧道受力变形特征数值分析[J]. 地下空间工程学报, 2016, 12(2): 436-441.
- [13] 王发民, 孙振川, 李凤远, 等. 浅覆土超大直径泥水盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 施工技术, 2020, 49(7): 58-64.
- [14] 韩磊, 叶冠林, 王建华, 等. 浅覆土大直径盾构穿越对河堤影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 125-128.
- [15] Verruijt, A. and Booker, J.R. (1996) Surface Settlements Due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane. *Géotechnique*, **46**, 753-756. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.4.753>