

软土地区无工作井大尺度盾构掘进抗浮技术模拟分析

袁一川¹, 范杰², 张子新¹

¹同济大学地下建筑与工程系, 上海

²上海隧道工程有限公司, 上海

Email: 13026110361@163.com

收稿日期: 2021年2月11日; 录用日期: 2021年3月4日; 发布日期: 2021年3月11日

摘要

GPST盾构隧道是盾构机直接由地面出发和接收的新型工法, 在盾构始发和接收阶段, 难免会经历不同浅覆土工况。地面堆载、抗浮板、隧道内压重等抗浮技术是防止隧道上浮的有效技术措施。本文借助Abaqus有限元数值模拟软件, 揭示了不同抗浮技术对隧道上浮的影响规律, 并针对上海软土地区工况, 给出了不同埋深比下隧道抗浮措施的建议。研究表明, 软土地区无工作井大直径盾构掘进时, 地面堆载的抗浮作用明显小于隧道内压重, 且同等压重条件下, 隧道内压重产生的上浮量减小百分比约为地面堆载的3倍。

关键词

软土盾构, 隧道抗浮, 数值模拟

Simulation Analysis of Anti-Floating Technologies for Large-Scale Shield Tunneling without Working Shaft in Soft Soil

Yichuan Yuan¹, Jie Fan², Zixin Zhang¹

¹Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai

²Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Email: 13026110361@163.com

Received: Feb. 11th, 2021; accepted: Mar. 4th, 2021; published: Mar. 11th, 2021

Abstract

GPST shield tunnel is a new type of construction method in which the shield machine directly starts and receives from the ground. It is inevitable that it will experience different shallow overburden conditions during the initial and receiving stages of the shield. Technologies such as ground loading, anti-floating plates, and pressure in the tunnel are effective technical measures to prevent the tunnel from floating. In this paper, with the aid of Abaqus finite element numerical simulation software, the influence of different anti-floating measures on the floating of the tunnel is investigated. According to the working conditions of the soft soil area in Shanghai, suggestions for anti-floating measures of the tunnel under different buried depth ratios are given. The research results show that when large-diameter shield tunneling in soft soil areas, the anti-floating effect of the ground load is significantly less than the pressure in the tunnel, and under the same weight, the reduction in the amount of floating caused by the pressure in the tunnel is about three times of the ground loading.

Keywords

Soft Soil Shield, Tunnel Anti-Floating, Numerical Simulation

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. 前言

传统盾构工法的始发和接收依赖于工作井，需要修建基坑、开挖施工引道等，这就要求建筑场地范围较广且需大型设备进行施工，不仅影响地面交通，还会产生很大的噪声等环境污染，随着城市化的发展，传统盾构工法上述弊端日渐显露，同时鉴于国内大中城市正逐步向集约型、密集型城市发展，土地等资源的高效利用是保证城市健康发展的必然要求，在此基础上积极开展盾构新工法的研究也是可持续发展的必然选择。GPST 无工作井盾构隧道施工具有可避免深大基坑施工等一系列优点，同时也要经历超浅覆土、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衬砌结构上浮，现已成为 GPST 工程施工必须要克服的难点。

已有研究表明，韩焯等[1]通过分析国内 8 个地区 30 多组观测数据，对 Peck 公式在不同地区的适用性进行了探讨，并对相关计算参数提出初步建议值。张社荣等[2]采用数值模拟方法，考虑软土的固结作用和周边建筑物的影响，对隧道施工的全过程进行模拟并与监测数据进行对比分析。杨方勤等[3]采用模拟试验对上海长江隧道进行抗浮研究，并在明确大直径隧道动态上浮力与隧道上浮稳定机理基础上，建立了盾构隧道上浮计算的理论模型，提出对应的抗浮措施。曹文宏等[4]从释放地层应力角度，分析了隧道结构上浮直至达到新的平衡状态的机理、过程及控制要点。叶飞等[5]认为浆液环产生的浮力不是导致衬砌结构上浮的关键因素，而由注浆压力产生的动态上浮力才是隧道上浮的主要原因，在此基础上建立了控制管片上浮的最小覆土厚度及最大注浆压力计算式，并对控制隧道结构上浮提出了一些建议。吴惠明等[6][7]研究了地面堆载和隧道内部压重对南京 GPST 示范工程隧道稳定性的影响规律。金浩等[8]采用理论分析、现场监测及数值模拟相结合的方法，开展了浅覆土对盾构隧道上浮的影响规律及管片结构上浮损伤诊断技术的研究，并提出了改善土体特性、减小上覆土体扰动等抗浮措施。王其炎等[9]采用数值

模拟对软土地层盾构推进过程中管片上浮机理进行探究, 得出了管片上浮、地层回弹及土体沉降随注浆压力、浆液弹性模量、土舱压力、千斤顶压力等因素的变化规律。刘超等[10]通过对国内首条 GPST 隧道的监测研究, 发现不同埋深下地表沉降均可用高斯函数表示地表沉降, 且荷载参数法可以较好的预测地层损失, 并结合数值模拟分析得出对于 GPST 盾构隧道, 临界覆土深度建议值为 $0.55D$ (D 为隧道直径)。张子新等[11]将有限元数值模拟与实测数据进行比较分析, 发现在 GPST 工法盾构推进处于浅覆土和负覆土两个工况时, 合理控制注浆压力, 调整注浆孔位, 保证盾尾注浆率, 可有效控制地面沉降量。

目前国内 GPST 盾构隧道的研究大多基于南京机场线示范工程, 经验相对欠缺, 实际工程验证也较少。本文基于上海地区 GPST 实际工程, 采用数值模拟的方法, 对软土地区无工作井大尺度盾构隧道不同抗浮技术进行研究, 可为类似工程提供理论支撑。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

龙水南路越江隧道新建工程是上海市中心城南部地区重要的越江通道, 拟采用直径 11.79 m 的土压平衡式盾构机进行无工作井盾构施工, 接收洞口中心标高为 -2.06 m, 覆土约 0.982 m, 盾构不可避免经历超浅覆土、大坡度、隧道上浮等一系列极端复杂工况。隧道主要穿越③ 灰色淤泥质粉质粘土、④ 灰色淤泥质粘土、⑤ 1 灰色粘土、⑤ 2 灰色砂质粉土夹粉质粘土、⑤ 3-1 灰色粉质粉土夹砂质粘土地层, 工程地质条件详见图 1。

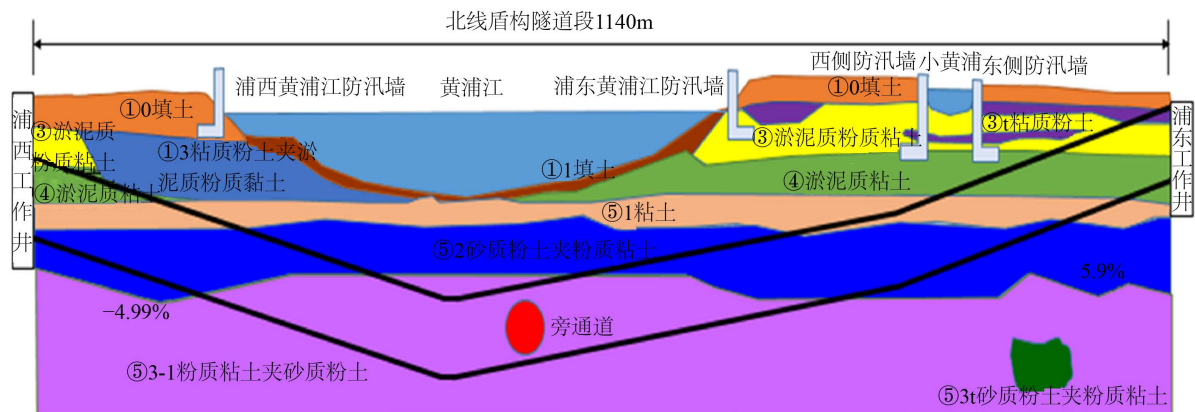


Figure 1. Geological profile of the north line of the Longshui South Road Tunnel

图 1. 龙水南路越江隧道北线盾构段地质剖面图

本工程所涉及的地层是上海软粘土, 故土体本构采用剑桥模型, 具体土层参数由详勘报告及类似工程确定。管片采用 C60 混凝土, 考虑到管片接头影响, 对管片弹性模量进行强度折减, 模拟分析中具体参数见表 1。

2.2. 有限元模型

如图 2 所示为龙水南路 GPST 有限元模型。该模型共 71761 个节点, 62800 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 $0.6D$ - $0.1D$ 覆土工况, 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, 衬砌及注浆层采用线弹性本构模型。在 Abaqus 中采用 57040 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。采用半对称模型以提高计算效率, 限制水平位移及底部位移, 对称面上采用对称边界条件。

Table 1. GPST finite element simulation material parameters
表 1. GPST 有限元模拟材料参数

材料	γ (kN/m ³)	E (kPa)	c'	ϕ'	μ	M	λ	k	e_0	k (m/s)
③	17.4				0.34	1.19	0.1165	0.0097	1.214	1×10^{-7}
④	16.8				0.4	0.89	0.1313	0.0109	1.416	4×10^{-9}
⑤ 2	18.3				0.32	1.30	0.1090	0.091	0.899	1×10^{-6}
⑦ 2	18.8	95×10^3	11	25	0.3				0.768	2×10^{-5}
衬砌	25	28.8×10^6			0.175					
注浆层	18	15×10^4			0.2					

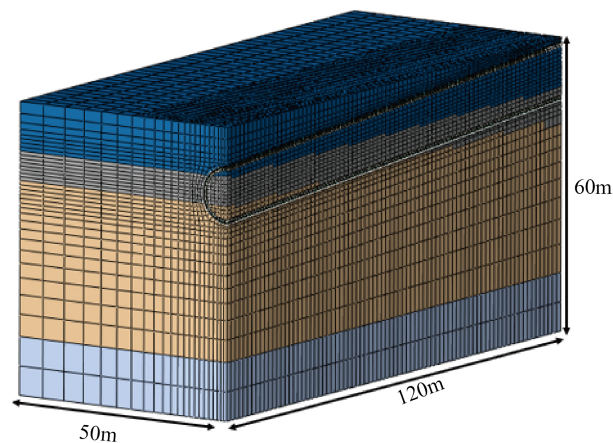


Figure 2. GPST finite element model
图 2. GPST 有限元模型

本文考虑超挖故采用收敛位移法来模拟盾构机掘进过程，本文所采用的收敛位移模式如图 3 所示：

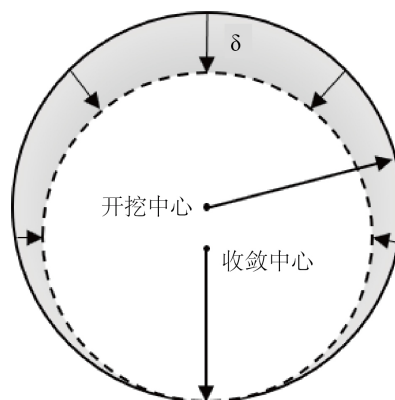


Figure 3. Convergent displacement mode
图 3. 收敛位移模式

其中 δ 表示模拟中所施加的最大环向收敛位移。本文取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，选可取地表沉降作为标准进行基准测试。

针对上海地区软粘土, 本文选取静止土压力系数为 0.7, 盾构正面推力及盾尾注浆压力均采用非均匀分布, 沿深度递增, 并施加 20 kN/m^2 的地面超载。

采用 Abaqus 软件中 Model Change 功能实现盾构掘进开挖, 同时在每个开挖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。

3. 结果分析

3.1. 软土地区 GPST 盾构隧道结构上浮规律

模型共掘进 80 环长度, 通过调整 δ , 将地表沉降值控制在规范要求内, 掘进结束后, 取衬砌结构拱顶垂直位移作为上浮观测值, 如图 4 所示。

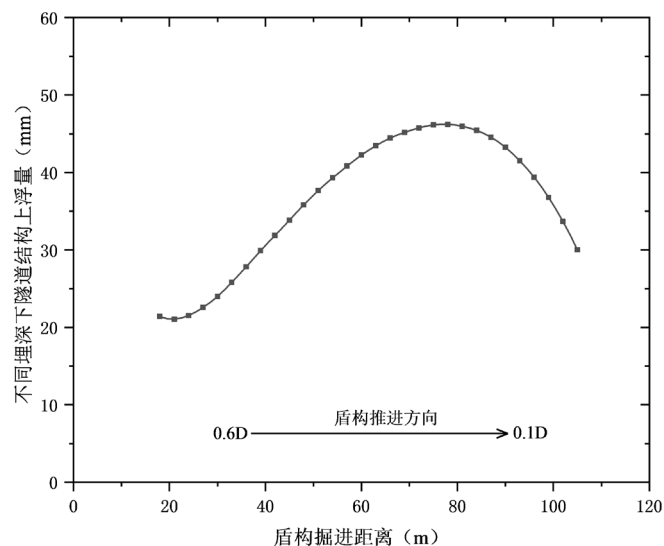


Figure 4. The floating amount of the tunnel under different buried depths

图 4. 不同埋深条件下隧道上浮量

可以看出在 0.6 倍洞径埋深时上浮量最小约为 20 mm, 此后掘进过程中上浮量近似直线递增, 并在 0.3 倍洞径埋深时到达峰值 46 mm, 之后随着埋深变小, 上浮量逐步减小。

在不同埋深下, 隧道结构上浮量有着明显的变化, 呈现不同的变化规律, 所以在超浅埋盾构隧道工程中, 针对不同的埋深情况下应采用不同的抗浮措施来减小隧道上浮, 针对该工程不同埋深工况拟采用如表 2 所示抗浮技术。

Table 2. Anti-floating technologies on Longshui South Road

表 2. 龙水南路抗浮技术

抗浮措施	隧道埋深
隧道内压重	0.6D-0.1D
地面堆载	0.6D-0.5D
钢筋混凝土抗浮板	0.5D-0.1D

3.2. 地面堆载对抗浮的影响规律

由于工程场地限制, 地面堆载拟采用在隧道水平投影范围内堆载的方式, 地面堆载可采用填土或者

管片结构等堆载物，本模型采用在投影范围内施加均布荷载的方式模拟地面堆载的抗浮效果。

考虑到本工程坡度为 5.9%，属于大坡度盾构，本文为对比地面堆载和内压重两种抗浮措施，选取埋深为 0.6D 至 0.1D 范围为地面堆载区，其中均布堆载选取 10 kN/m² 至 60 kN/m² 六种工况，模拟结果如图 5 和图 6 所示。

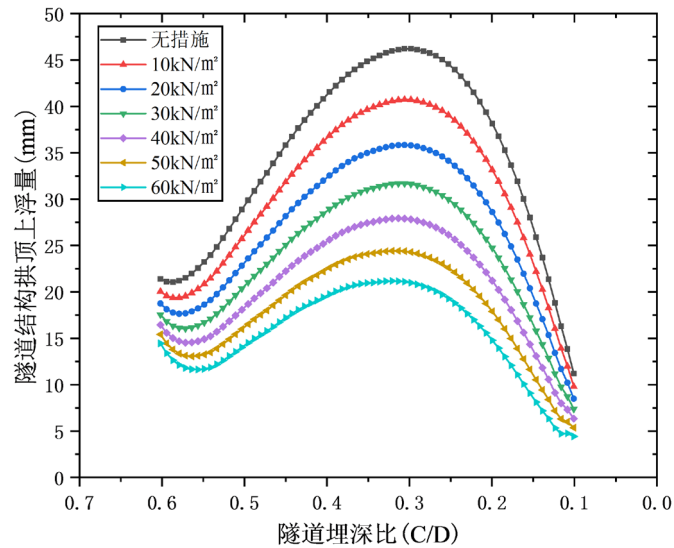


Figure 5. The floating law of tunnel structure under uniformly distributed ground surcharge

图 5. 均布地面堆载下隧道结构上浮规律

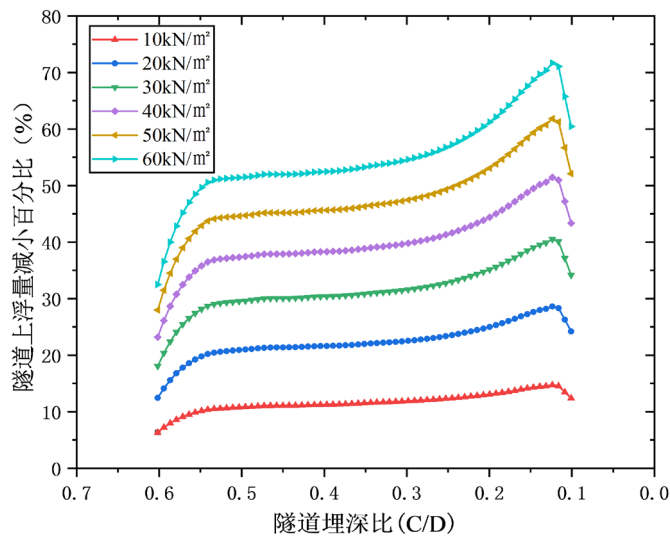


Figure 6. Percentage reduction of tunnel structure floating under ground loading

图 6. 均布地面堆载下隧道结构上浮量减小百分比

由图 5 可知，随着堆载重量的增加，隧道结构上浮量有显著减小，且在 0.3D 埋深时抗浮作用最为明显。此外，采用地面堆载的方式在 0.3D 埋深时虽可以有效减少隧道上浮量，但当堆载大于 40 kN/m² 时，每增加 10 kN/m² 时，隧道最大上浮量仅减少 5 mm 左右，在采用 60 kN/m² 堆载工况时，拱顶上浮量仍有

20 mm, 说明地面堆载的抗浮作用具有明显的局限性。

由图 6 可知地面堆载每增加 10 kN/m^2 , 隧道上浮量可减少 10% 左右, 且不同埋深下, 抗浮效果差距较小, 但随着荷载增大, 上浮量减小百分比增量会逐步减小, 说明抗浮作用逐步减弱。

3.3. 隧道内压重对抗浮的影响

隧道内压重设计范围为 $0.6D$ 埋深至工作井处, 数值模拟中, 采用在衬砌结构下半部分结构面上施加竖直向下均布荷载的方式模拟内压重, 见图 7。

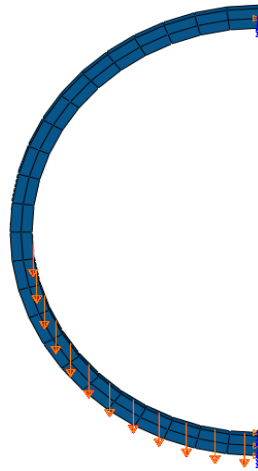


Figure 7. Schematic diagram of simulation of pressure in the tunnel
图 7. 隧道内压重模拟示意图

本文结合实际工程, 选取埋深为 $0.6D$ 至工作井处为隧道内压重区域, 其中内压重同样选取 10 kN/m^2 至 60 kN/m^2 六种工况。随着掘进过程中, 衬砌安装完成后施加隧道内压重, 模拟结果如图 8 所示。

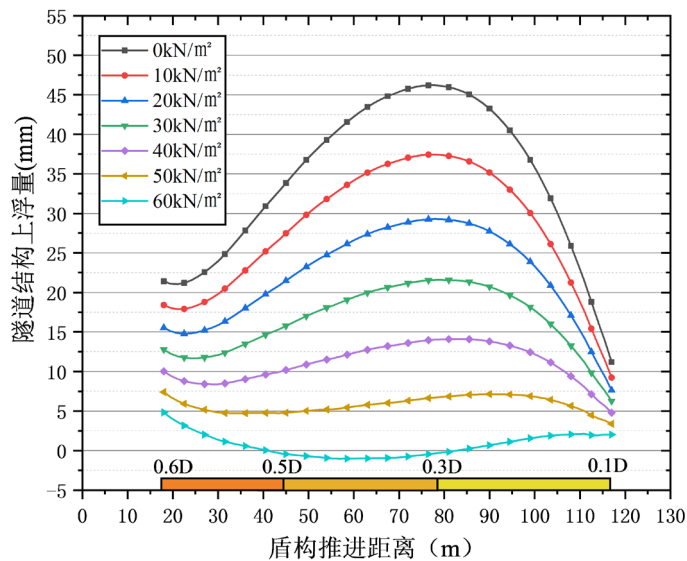


Figure 8. The influence of tunnel internal pressure on structure floating
图 8. 隧道内压重对结构上浮量的影响

由图 8 可知，采用隧道内压重的方式可以显著减小隧道上浮量，当内压重到达 50 kN/m² 时，隧道结构上浮量可控制在 10 mm 以内，并且产生的隧道上浮变化较为平缓。

由图 9 可知，在不同埋深比下，同种荷载引起的隧道上浮量减小百分比没有明显不同，且每增加 10 kN/m²，隧道结构上浮量百分比约少 20%，当采用 50 kN/m² 内压重时，隧道上浮量减少百分比可达 80% 以上。

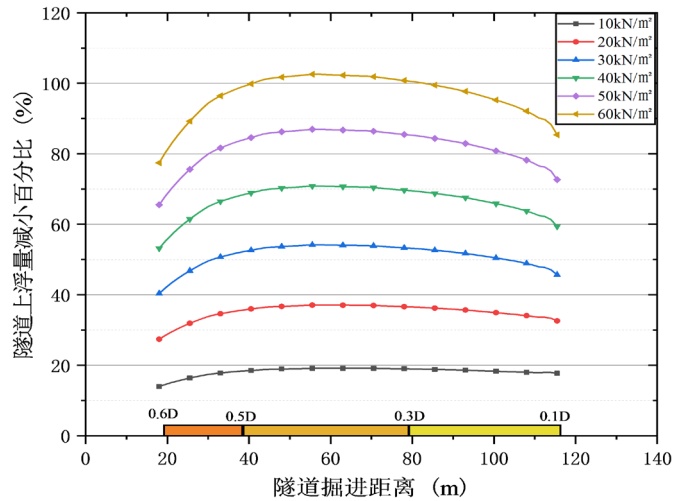


Figure 9. The influence of tunnel internal pressure on the percentage reduction of structure floating

图 9. 隧道内压重对结构上浮量减小百分比的影响

由图 10 可以得知，无论是采取地面堆载还是隧道内压重，在软土地区大直径浅埋盾构隧道掘进过程中，结构上浮量减小百分比随压重重量近似线性变化，且同等荷载工况下，内压重的方式抗浮效果明显优于地面堆载，隧道上浮量减小百分比约为 3 倍关系。

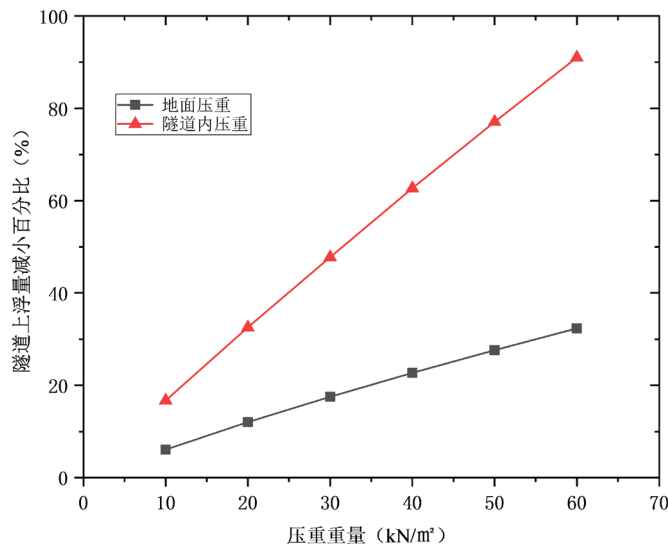


Figure 10. Comparison of anti-floating effects between ground loading and tunnel internal pressure

图 10. 地面堆载与隧道内压重抗浮效果对比

3.4. 抗浮板对隧道抗浮的影响

不影响施工前提下, 在 0.5D 埋深至工作井处施加钢筋混凝土抗浮板, 如图 11 所示, 抗浮板和土体采用绑定约束, 保证两者间变形协调。

盖板采用 C40 混凝土, 厚度为 0.7 m, 宽度为 14.36 m。不考虑塑性变形, 采用线弹性本构模拟, 参数如表 3:

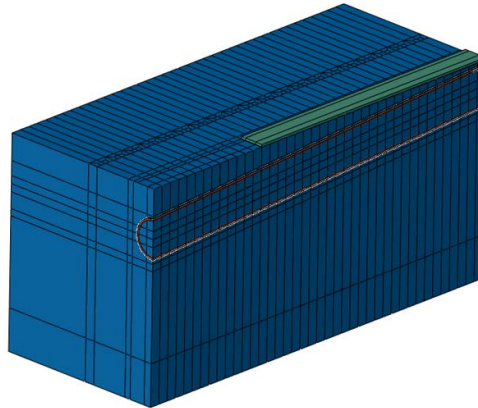


Figure 11. Anti-floating plates model (green area)
图 11. 混凝土盖板模型(绿色区域)

Table 3. Simulation parameters of reinforced concrete anti-floating board
表 3. 钢筋混凝土抗浮板模拟参数

材料	γ (kN/m ³)	E (kPa)	μ
抗浮板	25	32.5×10^6	0.3

由图 12 可知采用混凝土抗浮板时, 隧道结构最大上浮量由 46 mm 降低至 30 mm, 并且在不同埋深比下, 隧道上浮量减小百分比均在 35%左右, 但仅采用抗浮板并不能使上浮量达到规范设计要求。

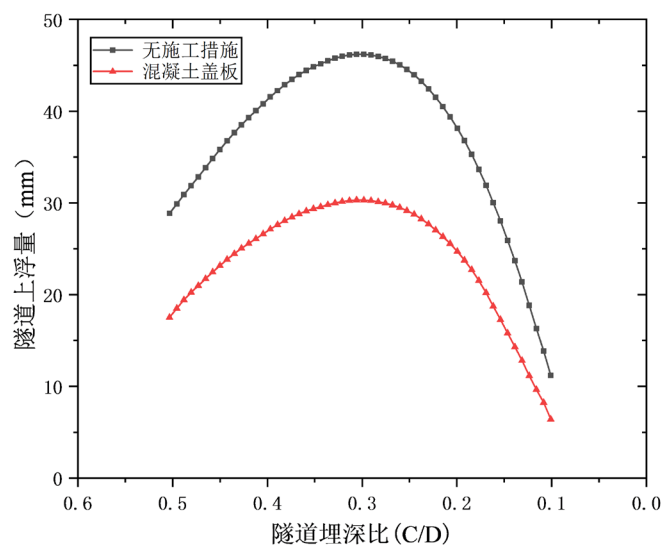


Figure 12. Anti-floating effect of concrete plate
图 12. 混凝土盖板抗浮效果

实际工程中一般采用多种抗浮措施，从而起到高效经济的抗浮效果。本工程拟采用地面堆载、抗浮板、隧道内压重复合抗浮措施，如表 2。

模拟结果图 13 表明，当采用地面堆载、抗浮板、隧道内压重复合抗浮措施时，隧道上浮量可有效控制在 10 mm 以内，隧道上浮量可减小 80%以上，相对于单一抗浮措施，多种抗浮措施可以同时满足工程场地限制、经济性等要求。

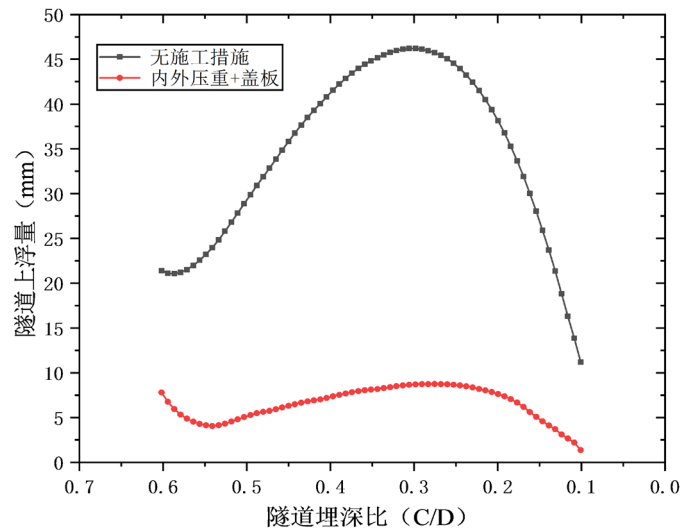


Figure 13. Compound anti-floating measures

图 13. 复合抗浮措施

4. 结论

本文借助 Abaqus 有限元模拟软件，分析了软土地区大直径 GPST 盾构隧道在不同埋深条件下隧道结构的上浮规律，并研究了不同抗浮措施对隧道结构抗浮的影响规律，可得出以下结论：

- 1) 软土地区大直径盾构隧道在浅覆土工况下，当埋深比为 0.3D 时，隧道结构上浮量达到最大值。
- 2) 采用地面堆载或内压重等压重措施时，不同埋深比下，隧道结构上浮量减小值未有明显不同，但同等荷载工况下，内压重抗浮效果明显优于地面堆载，且引起的隧道上浮量减小值百分比约为 3 倍关系。
- 3) 在不同埋深比下，采用抗浮板的方式均能起到很好的抗浮效果，结构上浮量减小百分比约为 35%。
- 4) 地面堆载以及隧道内压重虽均有很好的抗浮效果，但其适用条件也受到了工程场地、隧道结构等限制，为了达到高效经济的抗浮效果，建议采用复合抗浮措施。

参考文献

- [1] 韩焯, 李宁, J. R. Standing. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007(1): 23-28+35.
- [2] 张社荣, 田新星, 王刚, 崔激. 软土地区盾构法隧道施工三维数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 807-814.
- [3] 杨方勤, 段创峰, 吴华荣, 袁勇. 上海长江隧道抗浮模型试验与理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 454-459.
- [4] 曹文宏, 杨志豪, 李冬梅. 盾构隧道上浮的力学机理研究[J]. 地下工程与隧道, 2011(4): 1-6+60.
- [5] 叶飞, 朱合华, 丁文其, 杨宏伟. 施工期盾构隧道上浮机理与控制对策分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(6): 738-743.

-
- [6] 吴惠明, 滕丽, 于亚磊, 叶冠林. 地面出入式盾构隧道稳定性控制措施有效性研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 61-65.
- [7] 吴惠明, 汤漩. 负覆土隧道结构变形分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 49-56.
- [8] 金浩. 浅覆土对水下盾构隧道管片上浮影响及损伤诊断技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [9] 王其炎, 杨建辉, 薛永利, 陈自海. 盾构在软土地层掘进过程中的管片上浮研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 144-152.
- [10] Liu, C., Zhang, Z.X., Kwok, C.Y., Jiang, H.Q. and Teng, L. (2017) Ground Responses to Tunneling in Soft Soil Using the URUP Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**, No. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001695](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001695)
- [11] Zhang, Z.X., Liu, C., Huang, X., Kwok, C.Y. and Teng, L. (2016) Three-Dimensional Finite-Element Analysis on Ground Responses during Twin-Tunnel Construction Using the URUP Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **58**, 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.05.001>