

# 浅埋超大直径盾构隧道施工上浮控制技术研究

苏稚寅

上海隧道工程有限公司盾构工程分公司，上海

收稿日期：2024年3月21日；录用日期：2024年4月11日；发布日期：2024年4月23日

## 摘要

当前盾构隧道得到了广泛的应用，但在实际施工过程中常遇到开挖卸荷而导致的隧道上浮，地表隆起等问题。此类现象在大直径盾构隧道施工中将更明显，因此需要采用有效的隧道上浮控制措施。本文总结了一系列常用的控制措施，依托上海北横通道超大直径盾构区间项目案例，建立三维精细化数值模型，基于此分析地面堆载、隧道内压重和设置抗浮板三种常用上浮控制技术的效果差异，并给出不同条件下的施工建议。本文的研究结论对类似项目的抗浮措施的选择具有一定的指导意义。

## 关键词

盾构隧道，超大直径隧道，隧道上浮，上浮控制

# Research on Uplift Control Technology of Shallowly Buried Super-Large-Diameter Shield Tunnel Construction

Zhiyin Su

TBM Construction Branch, Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: Apr. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024

## Abstract

Shield tunnels are commonly used in construction, but they can encounter issues such as uplift during excavation and unloading, as well as surface uplift. These problems are more pronounced in the construction of large-diameter shield tunnels. Effective control measures are necessary to address these issues. This paper presents a summary of commonly used control measures, using the case of the Shanghai Beiheng Passage super-large-diameter shield tunnel interval project. It

establishes a three-dimensional refined numerical model and analyzes the effectiveness of three commonly used uplift control techniques: ground stacking, in-tunnel pressurization, and installation of anti-floating boards. The paper concludes with construction recommendations for different conditions. The conclusions of this paper are significant in guiding the selection of anti-floating measures in similar projects.

## Keywords

Shield Tunnel, Super-Large-Diameter Tunnel, Tunnel Uplift, Anti-Floating Treatments

Copyright © 2024 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

盾构隧道工法具有扰动小、适应性强、施工质量好、机械程度高等特点，因而广泛用于城市轨道交通的建设。在实际施工过程中，盾构施工经常会面临隧道上浮、管片不均匀上浮的问题，尤其在软土地地区上浮现象更加明显[1]，管片不均匀上浮会导致管片开裂、破损、错台，破坏隧道正常使用的工作性能和防水性，过大的上浮还会导致隧道超过偏移轴线界限，增加施工的风险。因此需要对管片进行及时的监测，并提出隧道上浮的控制措施，控制上浮。

吴永[2]和门小熊等[3]通过实际监测数据和数值模拟说明可以通过控制注浆压力以及浆液性质，控制盾构姿态和管片姿态来控制上浮。谭毅俊等[4]提出可以加固厚度控制软土地层隧道上浮。蓝淦洲[5]提出一种基于门式抗浮框架控制隧道上浮的方法。叶飞等[6]提出增加纵向螺栓数量，加大螺栓直径，设置剪切键的方法增加整体纵向抗弯刚度，改善抗弯性能。沈征难[7]提出可以通过隧道底部打开注浆孔泄压，释放管片底部的有压水和未凝固的水泥砂浆的方法作为隧道上浮后的处理。曾学艺等[8]提出可以通过二次注浆，二次补浆时，隔几环补注一次双液浆凝浆，切断地下水与管片的水力联系通道的方法来作为隧道上浮后处理。冷建等[9]研究了地面堆载对地面出入式盾构隧道上浮的影响。

上述研究均基于盾构隧道上浮的机理提出了一系列措施。本文依托的上海北横通道项目区间隧道具有超大直径和浅覆土的特点，对上浮控制提出了更高的要求。依托该项目典型区间建立了三维精细化数值模型，对常用的三种上浮控制措施进行对比分析，提出了各类上浮控制措施间的差异和应用场景，分析结论对大直径隧道上浮控制具有普适意义。

## 2. 工程背景

### 2.1. 上海北横通道 VIII 标

北横通道是中心城区北部东西向小客车专用通道，服务北部重点地区的中长距离到发交通，是三横北线的扩容和补充。北横通道西起北虹路，东至内江路，贯穿上海中心城区北部区域，全线经长宁路 - 长寿路 - 天目西路 - 天目中路 - 海宁路 - 周家嘴路，向西接北翟快速路，向东接周家嘴路越江隧道，长约 19.1 km。本工程新建隧道外径 15,000 mm，内径 13,700 mm，环宽 2000 mm，管片厚度 650 mm，盾构首先从工作井始发至杨树浦港井过站，至安国路井完成本标段盾构掘进施工。区间采用一台德国海瑞克公司生产的  $\Phi 15,560$  mm 泥水气平衡盾构机进行掘进。

图 1 显示了施工地区的地质剖面图。土体从地表到底部分别为②<sub>1</sub>粉质黏土、③<sub>1</sub>粉土夹淤泥质粉质黏土、③<sub>t</sub>淤泥质粉质黏土、④淤泥质黏土、⑤<sub>1</sub>粘土、⑤<sub>3-1</sub>灰色粉质粘土、⑤<sub>4-2</sub>灰绿~灰色粘质粉土、⑧<sub>1</sub>灰色粘土⑧<sub>2</sub>粉质粘土与粉砂互层、⑨<sub>1</sub>粉砂。

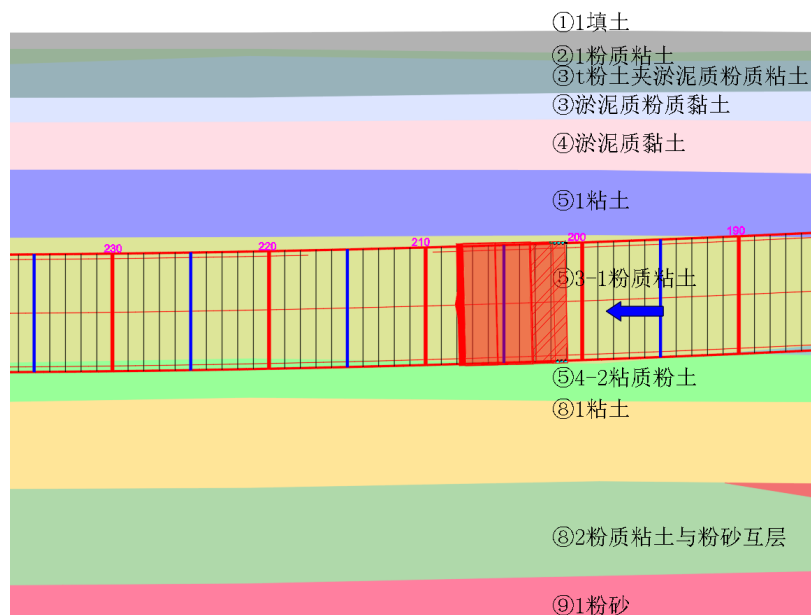


Figure 1. Engineering geological profile

图 1. 工程地质剖面图

## 2.2. 常用控制上浮措施

控制隧道上浮需要根据隧道上浮的机理采用相应的抗浮措施。隧道上浮的主要成因有超浅覆土施工，管片受到的向上的应力如尚未凝固的浆液的上浮力，盾构姿态偏移导致推力在竖直方向上产生向上应力大于向下的管片自重，覆土重量等应力，浆液质量差、填充不充分给隧道上浮留有空间。因此可以针对这些成因对隧道的上浮进行有效控制[1]。

图 2 为典型区间 2、3、4 环处实施控制上浮措施前后的地表沉降监测图，可见在 25 日之前地表存在明显的隆起。其中第 3 环处尤为明显，地表隆起达到了 107 mm，而第 2 环和 4 环处也有着 93 mm 左右的明显地表隆起。在 25 日之后，在此区域进行施加上浮控制，可以看见地表隆起迅速下降，分别下降了 10~25 mm。为了能对地表隆起进行有效控制，此项目采用了多种控制措施。改变隧道上浮掘进参数，在施工过程中不断总结归纳和调整掘进参数的设置，使其能适应不同的地质条件，最大限度的限制隧道管片在施工过程中的位移与变形，如适当地放慢掘进速度，保证浆液有足够的时间凝固，减少管片受到的上浮力[2]。针对超浅覆土施工和隧道管片上浮力过大，此项目在地面进行压密注浆和在隧道内增重的方法增加向下应力，还通过控制注浆压力以对隧道受到的上浮力进行控制[6]。在掘进过程中通过慢纠缓纠，适当选点，尽量减小盾构机与管片折角的方法，控制掘进过程中的盾构姿态，即管片与轴线的偏移角度，尽量减少垂直于轴线应力的产生[10]。

本文为了使计算结果更具有普适性意义，选择地面压重、隧道内压重以及设置抗浮板这些可以在施工过程中进行实施动态调整的控制措施，结合本项目浅覆土、超大直径的工程特点建立数值模型，通过不同的简化数值模拟方法，分析对比这些控制措施控制上浮的效果。

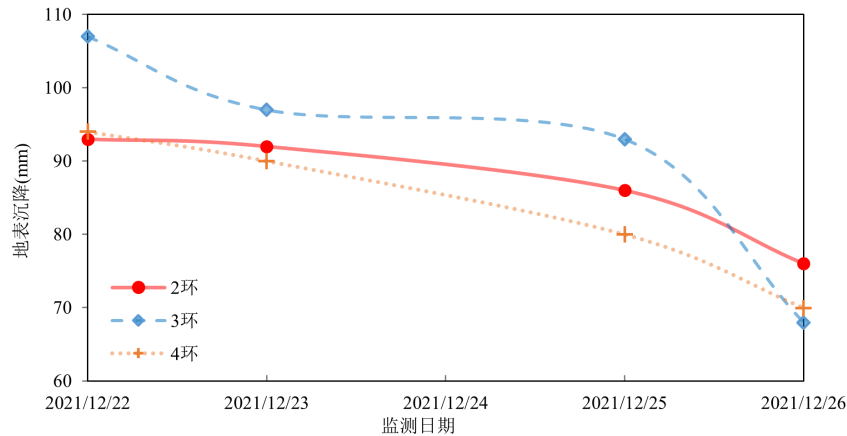


Figure 2. Ground settlement monitoring  
图 2. 地表沉降监测

### 3. 上浮控制分析数值模型

#### 3.1. 模型参数

为了对比分析上浮控制技术,建立了数值模型,此模型的规格为:长度 140 m,宽度 200 m,高度 75 m。如图 3 所示,新建隧道的挖掘方向与 Y 轴正向一致。

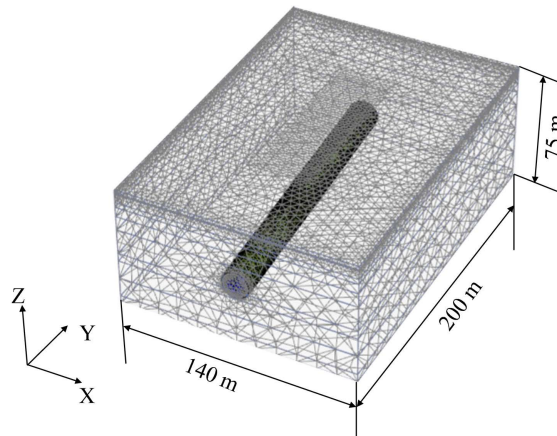


Figure 3. 3D FEM model  
图 3. 三维有限元模型

该模型的分析过程共分为 64 个步骤,包括初始阶段挖掘以后的 61 个施工步骤。为消除边界效应,从  $X = 0$  处预设了 19 环已经施工完毕的隧道结构,每个环宽 2 m。盾构和注浆段共占据 6 环。在隧道模拟中,盾尾的土体损失率为 0.2%,且土体损失率在纵向上设置-0.02%的增量。隧道顶部支护压力设定为 338.7 kPa,并设置 11.6 kPa 的向下增量。注浆压力在顶部为 450 kPa,竖向增量为 14.5 kPa。隧道的平均轴向推力为  $2725 \text{ kN/m}^2$ 。隧道衬砌结构的材料属性为:密度  $2500 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 34.5 GPa,泊松比 0.167。

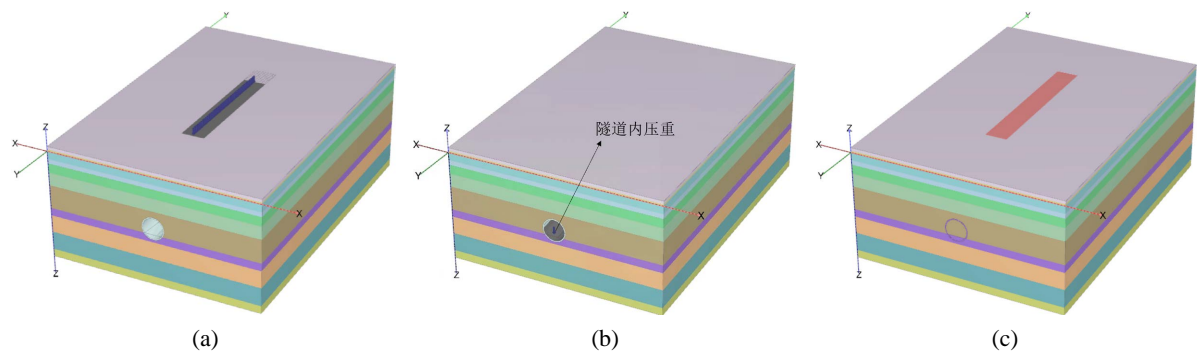
模型土体本构选择采用摩尔-库伦模型。土体从地表到底部分别为②<sub>1</sub>粉质黏土、③<sub>1</sub>粉土夹淤泥质粉质黏土、③灰色淤泥质粉质黏土、④灰色淤泥质黏土、⑤<sub>1</sub>灰色黏土、⑤<sub>3.1</sub>灰色粉质黏土、⑤<sub>4.2</sub>灰绿~灰色粘质粉土、⑧<sub>1</sub>灰色黏土⑧<sub>2</sub>粉质粘土与粉砂互层、⑨粉砂。从上到下各地层土体参数如表 1 所示:

**Table 1.** Physical and mechanical properties of stratum  
**表 1.** 土体参数表

土层	密度(kg/m <sup>3</sup> )	饱和重度(kg/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 $\Phi$ (°)	粘聚力 $c$ (kPa)	割线模量 $E_{\text{ocd}}$ (MPa)	层厚(m)
② <sub>1</sub>	18.5	18.9	17	20	22.3	0.9
③ <sub>t</sub>	18.5	19	26	9	48.4	5.26
③	17.4	17.5	15	13	15.2	3.06
④	16.8	17	11.5	13	11.6	6.04
⑤ <sub>1</sub>	17.8	18	15.5	17	12	8.66
⑤ <sub>3-1</sub>	18.1	18.5	21	17	9.5	15.5
⑤ <sub>4-2</sub>	19.8	21.2	31.5	7	53.2	5.13
⑧ <sub>1</sub>	17.9	18.1	18.5	22	12.3	11.44
⑧ <sub>2</sub>	18.6	19.19	22	21	14.6	12.06
⑨ <sub>1</sub>	19.6	19.93	35	0	32.9	5.07

### 3.2. 上浮控制技术模拟方法

为了模拟各种上浮控制技术, 根据实际工程的地质条件, 几何尺寸等参数建立一个隧道坡度为 7.5% 的模型, 以此模拟不同埋深时上浮措施的控制效果。在进行分析时取隧道施工结束时隧道位移, 同时根据不同措施对上浮技术(见图 4)进行模拟, 据此建立相应的模型进行对比分析。



**Figure 4.** Simulation methodology for uplift control technology: (a) Ground weight; (b) Tunnel weight; (c) Setting anti-floating plate

**图 4.** 上浮控制技术模拟方法: (a) 地面压重; (b) 隧道内压重; (c) 设置抗浮板

为了模拟地面堆载, 选择堆载范围为隧道在地表的投影范围, 建立两个模型在堆载范围内分别施加 10 kPa、20 kPa 的均布荷载来模拟地面堆载, 模型如图 4(a)所示。为了模拟隧道内压重对隧道上浮的影响, 对隧道的下表面施加均布荷载分别为 10 kPa、20 kPa 来模拟隧道内的堆载, 模型如图 4(b)所示。为了模拟抗浮板的影响, 在隧道投影区施加抗浮板, 模型如图 4(c)所示, 盖板采用 C40 混凝土模拟, 厚度为 0.7 m, 宽度为 14.36 m。不考虑塑性变形, 采用线弹性本构模型, 参数如表 2 所示。

### 4. 上浮控制技术对比分析

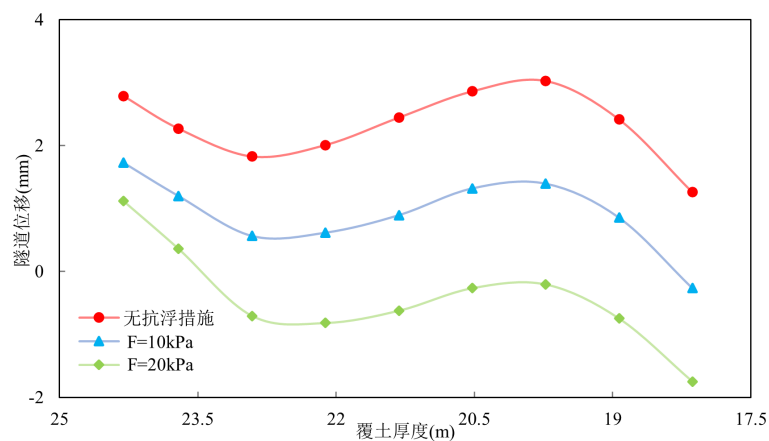
图 5 所示为不同地面堆载下, 穿越结束后不同覆土厚度隧道位移对比图, 可以观察到地面堆载会使隧

道位移明显下降,且随着堆载的增大,隧道位移呈正相关。压强  $P$  每增加 10 kPa,隧道位移减小 1 mm 左右,但在隧道埋深较大时,地面堆载从 10 kPa 增加到 20 kPa,对隧道位移变化影响明显小于从 0 kPa 变化到 10 kPa,仅有 50% 的效果,相同荷载变化下的隧道上浮控制效果减弱。因此在覆土厚度较大时,考虑到附加应力随深度变化,增加地面堆载对隧道位移的影响会逐渐减小,埋深较浅时选择施加地面堆载作为辅助措施更为有效。

**Table 2.** Parameter of anti-floating board

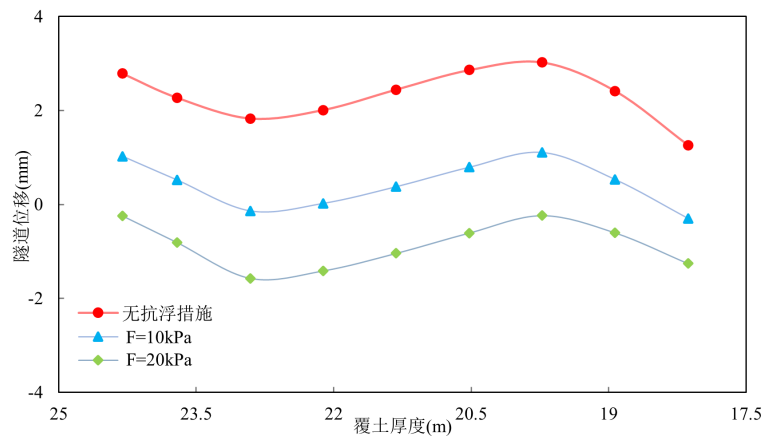
**表 2.** 抗浮板参数

材料	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (kPa)	泊松比 $\mu$
抗浮板	25	$32.5 \times 10^6$	0.3



**Figure 5.** Comparison of tunnels displacement with different ground pressure  
**图 5.** 不同地面压重下隧道位移对比图

图 6 所示为不同隧道内压重条件下,不同覆土厚度情况下隧道位移对比图,可以发现在所有覆土厚度条件下隧道内压重  $P$  从 0 kPa 增加到 10 kPa,隧道位移变化明显,且基本不受覆土厚度变化的影响,但从 10 kPa 增加到 20 kPa,隧道位移变化速度明显放缓,隧道位移变化约为从 0 kPa 到 10 kPa 的 60%,因此,隧道内压重适合作为隧道埋深较大时的辅助控制措施。



**Figure 6.** Comparison of tunnel displacement with different internal pressure  
**图 6.** 不同隧道内压重下隧道位移对比图

图7所示为穿越结束后是否设置抗浮板时,不同覆土厚度隧道位移对比图。由结果可知设置抗浮板使隧道位移有所下降,但在埋深较大时,抗浮板对隧道位移变化的影响降低,隧道位移变化约为其他埋深工况下的80%,但总体而言,抗浮板受覆土厚度变化影响较小。但是设置抗浮板需要进行额外的施工,成本明显较大,因此该措施更适用于上浮控制要求较高,适用于永久对隧道上浮进行控制的区间。

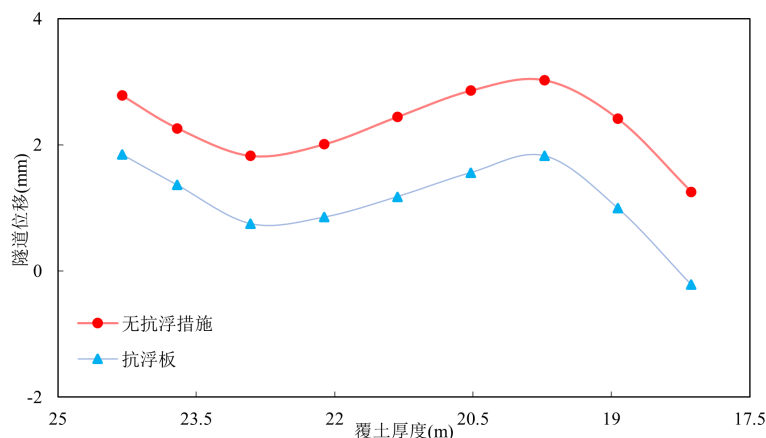


Figure 7. The effect of setting anti floating board  
图7. 设置抗浮板效果图

横向对比三种抗浮措施,隧道内堆载和地面堆载在埋深较浅时,抗浮的效果相差不大,但在埋深较大时,地面堆载的效果低于隧道内堆载,因为埋深较大时,地面堆载会导致隧道受到的应力显著降低。在埋深较大时,增加地面堆载以及隧道内堆载的影响具有显著非线性,随着埋深增加不断增加荷载来控制隧道上浮的效果会逐渐降低。因此使用地面堆载和隧道内堆载的方法,均更适宜作为辅助措施来控制隧道上浮,且地面堆载适用于浅埋隧道的辅助措施,隧道内堆载适用于埋深较大情况下的辅助措施。与设置堆载的方法相比,设置抗浮板下埋深的影响不敏感。

## 5. 结论

本文基于北横通道实际工程,建立三维数值模型分析不同抗浮措施下的抗浮效果得出以下结论:

- 1) 地面堆载对于隧道上浮的控制效果呈正相关,但在埋深较大时,地面堆载带来的效果会使抗浮效果显著降低,因此地面堆载更适用于浅埋隧道的上浮控制。
- 2) 隧道内堆载在施加荷载时,随着荷载的增加,上浮控制的提升效果降低,因此隧道内堆载适用于埋深较大时的辅助措施。
- 3) 设置抗浮板同样能有效提高抗浮能力,且几乎不受埋深影响,但成本较大,因此适用于对隧道位移变化控制要求较高位置。

## 基金项目

上海市科技创新行动计划(21DZ1201103)。

## 参考文献

- [1] 张小龙. 盾构隧道施工期管片上浮机理与预测研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [2] 吴永. 盾构法隧道管片上浮机理及控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
- [3] 门小雄, 任辉, 郭保和, 等. 浅埋极软地层超大直径盾构隧道施工期上浮控制措施及实测数据分析[J]. 交通节能

- 与环保, 2024, 20(1): 222-226.
- [4] 谭毅俊, 彭元栋, 刘爽, 等. 加固厚度对软土地层大直径盾构隧道抗浮的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 163-169.
- [5] 蓝淦洲. 基于门式抗浮框架的基坑开挖下卧隧道变形控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [6] 叶飞, 朱合华, 丁文其, 等. 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.
- [7] 沈征难. 盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2004(6): 51-56.
- [8] 曾学艺, 梁禹, 李科, 等. 浅覆大直径越江盾构隧道施工阶段管片上浮分析及控制措施研究[J]. 铁道建筑, 2017(5): 71-75.
- [9] 冷建, 叶冠林, 吴惠明, 等. 地面堆载对地面出入式盾构隧道上浮影响规律分析[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会. 2014 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集. 杭州: 《现代隧道技术》编辑部, 2014: 5.
- [10] 杨永强, 武金城. 盾构隧道管片上浮原因分析及主要控制措施[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2021 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册). 北京: 《施工技术(中英文)》编辑部, 2021: 4.