

# 浅覆土超大直径盾构上浮与诱发地表隆起机理研究

苏稚寅<sup>1</sup>, 覃 鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海隧道工程有限公司盾构工程分公司, 上海

<sup>2</sup>同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年4月18日; 发布日期: 2024年4月26日

## 摘要

盾构隧道具有扰动小, 适应性强等特点, 因此广泛应用于城市交通基础设施建设。在实际施工过程中, 隧道开挖引起的衬砌上浮和地表隆起现象明显。而在浅覆土开挖下, 超大直径盾构隧道施工引起的扰动将更加显著。因此, 本文依托上海北横通道项目的超大直径盾构开挖区间案例, 建立精细化三维数值模型, 通过对比数值模拟结果和监测结果验证了模拟方法的可靠性。在此基础上展开参数分析, 探究了超大直径开挖下隧道上浮和地表隆起的机理, 以及覆土厚度和注浆压力分对地表隆起的影响。研究结论对类似的浅覆土超大直径盾构隧道施工具有一定的参考和借鉴意义。

## 关键词

盾构隧道, 超大直径隧道, 隧道上浮, 地表隆起

# Mechanisms of Uplift of Super-Large-Diameter Shield Tunnel in Shallowly Buried Condition and Its Induced Surface Heave

Zhiyin Su<sup>1</sup>, Peng Qin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TBM Construction Branch, Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Shield tunnels are characterized by small disturbance and strong adaptability, so they are widely used in the construction of urban transportation infrastructure. In the actual construction process, the lining uplift and surface uplift caused by tunnel excavation are obvious. Under shallow overburden excavation, the disturbance caused by the construction of super-large diameter shield tunnel will be more significant. Therefore, this paper relies on the case of super-large-diameter shield excavation interval of Shanghai Beiheng Expressway Passage Project to establish a refined three-dimensional numerical model, and verifies the reliability of the simulation method by comparing the numerical simulation results with the monitoring results. On this basis, the parameter analysis is carried out to investigate the mechanism of tunnel uplift and surface heave under super-large diameter excavation, and the influence of overburden thickness and grouting pressure on surface heave. The conclusions of the study have certain reference and significance for the construction of similar shallow overburden super-large diameter shield tunnels.

## Keywords

Shield Tunnel, Super-Large-Diameter Shield Tunnel, Tunnel Uplift, Surface Heave

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

盾构隧道具有扰动小, 适应性强的特点, 因此在城市地区的交通基础设施建设中广泛使用。随着市政交通运输的需要, 大直径盾构隧道的需求逐渐增加。

盾构隧道实际施工中上浮和地表隆起问题尤为突出, 相关研究表明隧道上浮与地质条件、覆土厚度、掘进参数、千斤顶顶力, 注浆压力等因素[1] [2] [3]有关。马芹等[4]说明了隧道截面计算的四种方法, 叶飞等[5]假设刚脱离盾尾的管片环出现整体错动在的分析模型, 推导出抗浮的最小覆土厚度。张强[6]通过力学分析计算得到隧道上浮力的理论值。黄钟晖等[7]通过建立盾构隧道施工期纵向等效梁模型, 分析了盾构隧道施工期影响管片上浮各因素的权重大小。季昌等[8]依托现场管片位移监测结果, 分析注浆压力、千斤顶推力和浆液配比等因素对隧道上浮量的影响。李忠诚等[9]通过对软土地区的特点分析得到刀盘垫高机制和地层因素对上浮的影响。

上述研究已经对隧道上浮的机理已有较为深入的研究, 然而上述研究大多基于常规盾构隧道。现今超大直径(超过 15 m)盾构已经有了广泛应用, 施工过程中还可能穿越既有隧道和建筑, 其实际影响可能是非典型的, 因此需要根据实际工程特点具体分析。本文依托上海北横通道工程, 根据实地监测调查, 基于三维数值方法对超大直径盾构上浮机理与地表隆起机理展开研究。

## 2. 工程背景

### 2.1. 上海北横通道VIII标段工程

北横VIII标盾构工程盾构隧道段范围为黄兴路西端头井(ZXK17 + 912.415)~杨树浦东端头井(ZXK17 + 383.628)、杨树浦西端头井(ZXK17 + 313.628)~安国路东端头井(ZXK15 + 000.567), 两区间共长 2841.732

m。新建隧道外径为 15 m，管片厚度为 0.65 m，环宽为 2 m，标段隧道采用一台直径 15,560 mm 的海瑞克超大型泥水气压平衡式盾构掘进机进行隧道掘进施工。盾构由黄兴路工作井始发，于杨树浦港东端头井接收。在杨树浦港井完成盾构过站。后于杨树浦港西端头井始发，于安国路工作井接收完成本标段盾构掘进工作。工程平面图如图 1 所示。

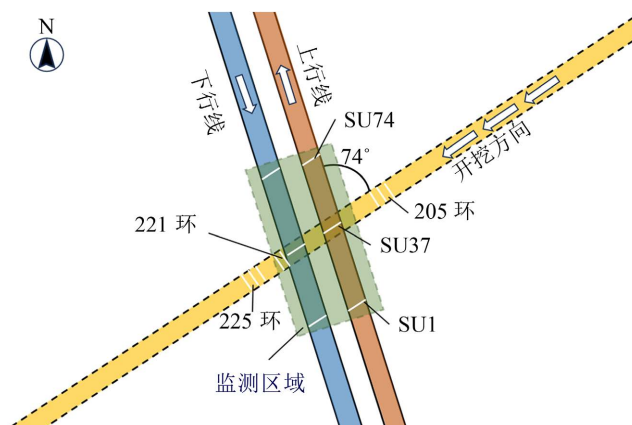


Figure 1. Plate view  
图 1. 平面图

图 2 显示了地质剖面图。土体从地表到底部分别为：①填土、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，北横通道隧道顶覆土埋深 27.59~27.85 m。



Figure 2. Geological profile  
图 2. 地质剖面图

## 2.2. 盾构施工诱发地表隆起情况

在盾构法进行隧道施工时, 盾构管片承受上浮力的影响。当出现上浮现象时, 管片脱离盾尾可能导致错台、开裂、渗漏水等一系列问题, 对隧道的防水和安全性造成威胁。除此之外, 隧道上浮还会造成土体扰动和地表隆起, 对地表建筑的安全性造成影响。

图 3 为典型隧道横截面(221 环)横向上地表监测点获得的地表沉降变化曲线。结果表明在横向上地表沉降变化不均匀, 呈现波浪形, 沉降槽的分布不规则。在施工过程中, 当盾构穿过监测面之后, 地表沉降迅速变化, 呈现两边上浮中间沉降的规律。地表最大沉降和最大上浮分别为-2.7 mm 和 1.8 mm, 隧道两侧出现明显隆起, 同一个点位在施工过程中可能出现上浮沉降不断变化的现象, 这些现象会对盾构施工周边建筑以及地下管线造成不利影响, 因此需要及时监测, 并对影响因素进行分析。

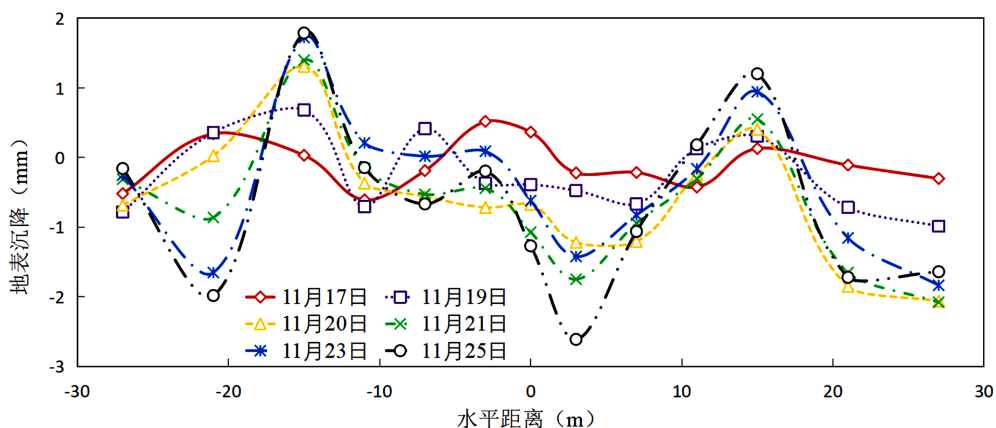


Figure 3. Surface settlements at Ring 221  
图 3. 221 环处地表沉降

## 3. 三维数值模型

### 3.1. 盾构模拟方法

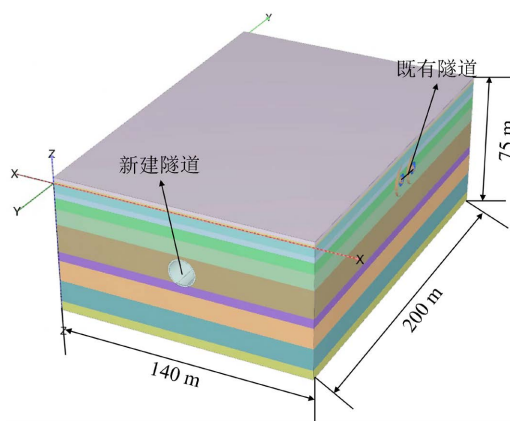


Figure 4. 3D FEM model  
图 4. 三维有限元模型

本文通过建立数值模型分析隧道上浮影响。数值模型的尺寸为  $X \times Y \times Z = 140 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 75 \text{ m}$ , 由图 4 所示, 新建隧道的挖掘方向为模型的 X 轴的正向。模型模拟计算分为 64 个分析步骤包括: 初始

阶段、激活既有隧道、和 61 个新建隧道施工步。为了消除边界效应, 从  $X = 0$  开始预设了 19 环, 每环的宽度为 2 m, 然后在此基础上进行掘进。

### 3.2. 模型参数

此模型盾构和注浆段设置为 6 环。隧道的平均推力设置  $2725 \text{ kN/m}^2$ , 模型模拟隧道的土体损失在盾尾处设置为 0.2%, 同时在隧道纵向上设置一个  $-0.02\%/m$  的增量, 隧道的支护压力设置为  $338.7 \text{ kPa}$ , 注浆压力在隧道顶部设置为  $450 \text{ kPa}$ , 且在竖向上设置  $14.5 \text{ kPa}$  的增量。

隧道衬砌结构采用混凝土材料, 其物理性能分别设置为: 密度为  $2500 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量为  $34.5 \text{ GPa}$ , 泊松比为 0.167。模型土体本构采用摩尔-库伦模型, 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 灰色淤泥质粉质粘土、④ 灰色淤泥质粘土、⑤<sub>1</sub> 灰色粘土、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 粉砂且各土体参数如下表 1 所示。

Table 1. Physical and mechanical properties of stratum

表 1. 土体参数表

土层	密度( $\text{kg/m}^3$ )	饱和重度( $\text{kg/m}^3$ )	内摩擦角 $\phi$ ( $^\circ$ )	粘聚力 $c$ (kPa)	割线模量 $E_{\text{sed}}$ (MPa)	层厚(m)
② <sub>1</sub>	18.5	18.9	17	20	22.3	0.9
③ <sub>1</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

## 4. 计算结果与上浮机理分析

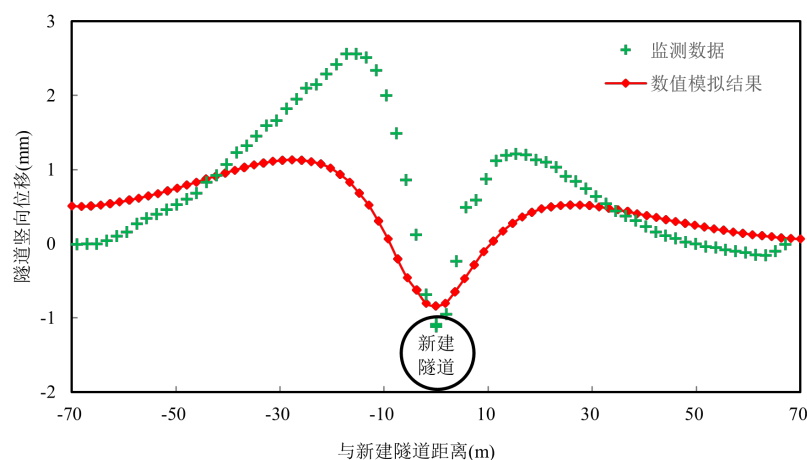


Figure 5. Comparison of numerical result and measured longitudinal displacement

图 5. 隧道竖向变形监测数据和数值模拟结果对比图

图 5 显示了盾构推进至 222 环时下行线监测数据与数值模拟结果的对比, 结果表明两组数据沿现有隧道轴线的竖向位移趋势基本一致。既有隧道左侧上浮明显大于右侧, 原因是当隧道斜穿推进至 222 环, -70 m 至 0 m 范围内的既有隧道已进入开挖区域, 所在区域土体扰动较大, 隆起程度较右侧明显。实际测得的最大隆起大于数值模拟结果, 而实际测得的最大沉降则小于数值模拟结果。总体而言, 数值模拟结果与实际监测的结果较为接近, 变化趋势一致, 数值模型可用于后续参数分析。

图 6 为盾构机穿越后 222 环处地层位移云图, 结果表明当盾构通过监测断面后, 新建隧道底部迅速隆起, 隧道顶部出现部分沉降, 管片受到的上浮力大于管片自重, 覆土重量等向下的应力导致管片上浮, 而隧道顶部则因为受地层损失的影响更大, 使得隧道顶部出现部分沉降, 这种位移模式与周围土体的位移趋势一致。当盾构推进至 222 环时, 地面发生了明显的隆起, 在盾构远离监测界面之后, 地层卸载变形会逐步减小。从等值线图可以看出, 超大型盾构掘进引起了不均匀的附加位移场, 从而导致影响区域内的地表发生了不同程度的位移。

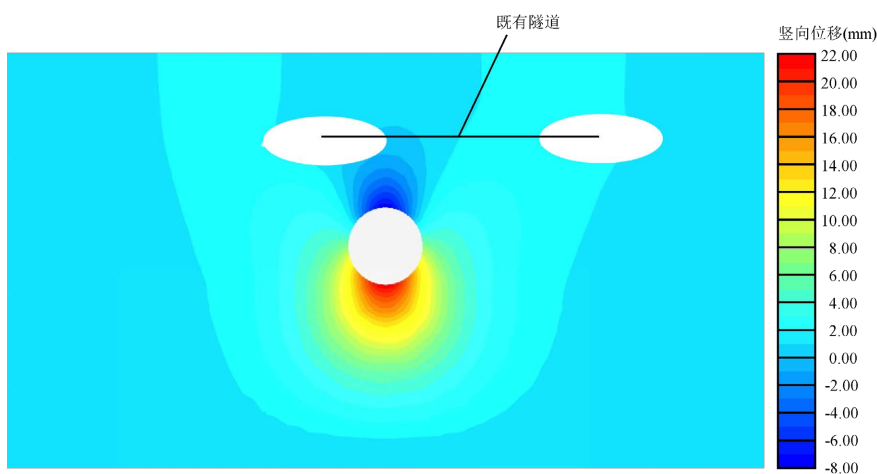


Figure 6. Contours of vertical displacement at profile of Ring 222  
图 6. 222 环处竖向位移云图

#### 4.1. 覆土厚度影响

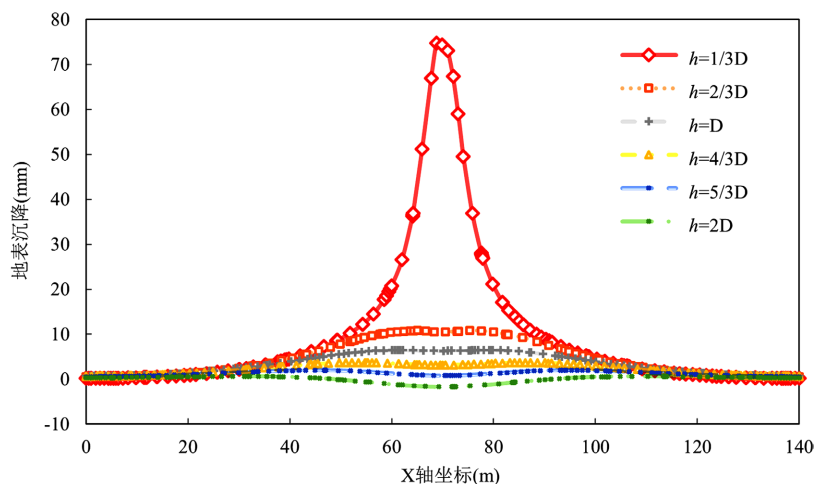


Figure 7. Comparison of ground settlement for different thicknesses of overburden  
图 7. 不同覆土厚度地表沉降对比图



为了分析覆土厚度对于本项目地表隆起的影响, 设置覆土厚度  $h$  分别为  $1/3 D$ 、 $2/3 D$ 、 $D$ 、 $4/3 D$ 、 $5/3 D$  和  $2 D$  ( $D$  为盾构外径), 盾构掘进至 221 环时, 221 环投影处的地表沉降图如图 7 所示。对比各覆土厚度时的变形量可以得到, 随着覆土厚度的增加, 地表隆起逐渐减少。同时能够发现覆土厚度存在一个最小厚度的阈值。当  $h = 1/3 D$  时, 覆土厚度小于阈值, 上部覆土的荷载无法抵消上浮力, 导致出现巨量的地表隆起, 且呈正态分布, 而  $h = 2/3 D$  大于阈值因此  $h = 1/3 D$  到  $h = 2/3 D$  时地表隆起减少尤为明显。覆土厚度从  $h = 2/3 D$  到  $h = 2 D$ , 随着厚度的增加, 虽然地表隆起同样减小, 但变化速度逐渐减缓, 且地表变形逐渐从隆起变为沉降, 同时, 地表变形的分布模式也逐渐产生变化, 地表变形曲线逐渐从正态分布变为 V 形沉降槽。分析原因为随着覆土厚度的增加, 底层损失造成的影响大于隧道上浮力的影响, 导致出现沉降。因此在实际施工中需要根据地质条件大致计算出最小覆土厚度, 在至少满足最小覆土厚度的前提下选择合理埋深。

## 4.2. 注浆压力影响

以覆土厚度为  $5/3 D$  为例, 设置不同的注浆压力, 监测地表沉降位移。由图 8 可知, 随着注浆压力增大, 地表隆起逐渐增加, 但是整体变化幅度不大。注浆压力由 300 kPa 增加到 600 kPa 对于地表变形的影响不到 1 mm, 同时也能发现注浆压力基本不影响地表变形的分布曲线形态, 均呈现 V 形沉降槽。因此在选择注浆压力时, 首先需要满足能够克服浆液流动的阻力, 确保注浆材料充分渗透, 但也不能使注浆压力过大, 过大会导致隧道受到的上浮力增加, 导致隧道上浮使地表出现隆起。

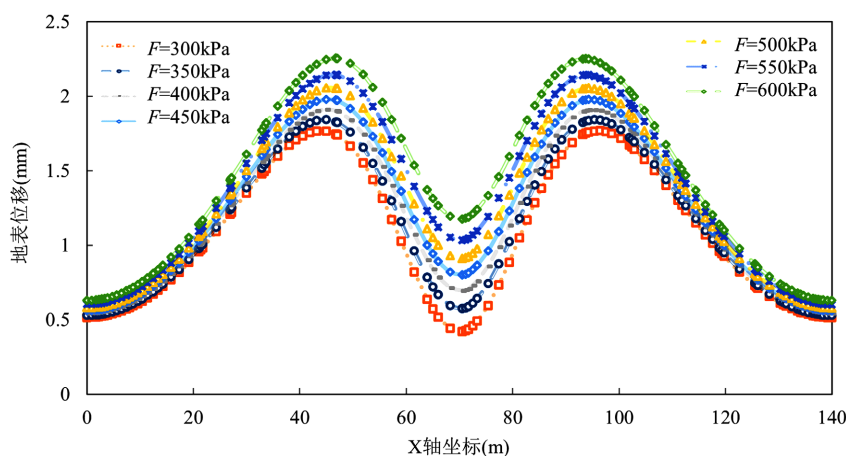


Figure 8. Comparison of ground settlement with different grouting pressures  
图 8. 不同注浆压力地表沉降对比图

## 5. 结论

本文基于北横通道实际参数进行三维数值模拟, 分析覆土厚度及注浆压力对地表隆起的影响, 得出结论如下:

- 1) 数值模拟结果与监测结果较为接近, 且地表沉降变化趋势相同, 可以将数值模型结果用于参数分析。
- 2) 覆土厚度存在一个最小厚度, 设计时需要考虑这一条件, 当覆土厚度低于此值, 上部覆土的荷载无法抵消上浮力, 将导致地表出现巨量的隆起。
- 3) 覆土厚度的增加, 会导致地表沉降分布曲线发生改变, 沉降曲线会逐渐由正态分布曲线变为 V 形沉降槽, 隧道中心相较于两侧出现下沉现象。

4) 注浆压力增加不会改变地表分布曲线形态, 但会导致地表沉降曲线整体上移, 过大的注浆压力会导致地表出现隆起。

## 基金项目

上海市科技创新行动计划(21DZ1201103)。

## 参考文献

- [1] 皮景坤, 赵运臣. 盾构隧道管片上浮与对策综述[J]. 隧道建设, 2009, 29(6): 616-618.
- [2] 傅鹤林, 史越, 陈俐光, 等. 盾构隧道施工期管片上浮机理数值模拟研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 174-179.
- [3] 张君, 赵林, 周佳媚, 等. 盾构隧道管片上浮的机制研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(10): 88-93.
- [4] 马芹, 蒋首超, 柳献. 盾构隧道设计方法研究现状及展望[J]. 土木工程, 2014, 3(6): 168-175.
- [5] 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.
- [6] 张强. 盾构隧道通缝拼装管片上浮的理论分析[J]. 城市道桥与防洪, 2023(11): 235-237+249+328.
- [7] 黄钟晖, 舒瑶, 季昌, 等. 基于等效梁模型的盾构隧道施工期管片上浮影响因素权重分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1295-1301.
- [8] 李忠诚, 成广谋, 吴勇, 等. 软土地区盾构隧道管片上浮机制新认知与探讨[J]. 中国标准化, 2021(22): 131-135.
- [9] 季昌, 周顺华, 许恺, 等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3619-3626.