

引用本文: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.
TAN Yi-jun, PENG Yuan-dong, LIU Shuang, et al. Influence of Reinforcement Thickness on Anti-floating of Large-diameter Shield Tunnel in Soft Soil Stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 163-169.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08047

加固厚度对软土地层大直径盾构隧道抗浮的影响

谭毅俊¹, 彭元栋², 刘爽³, 苏栋^{1,4,5}, 雷国平¹

(1. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 中铁十五局集团有限公司, 上海 200070;
3. 珠海大横琴城市新中心发展有限公司, 广东 珠海 519030; 4. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施
教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 5. 深圳大学 深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造
重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要:为研究软土地层隧道工程中软土地基的加固厚度对隧道上浮量的影响,以珠海市横琴杧洲隧道为依托,采用小应变硬化模型(HSS模型)作为软土本构模型,在PLAXIS 3D软件中建立了软土地层大直径盾构隧道的有限元模型,计算并对比了不同环形加固厚度下的隧道上浮量、河底土体位移和隧道周围土体的受扰动范围。结果表明:未对软土进行加固时,数值模拟得到的土体位移与二维理论推导的结果吻合较好;软基地层预加固处理能使加固土体与隧道整体抗浮,有效抑制隧道局部的上浮变形;软土加固厚度为 $0.10D$ (D 为隧道外径)时,河底上浮量和隧道上浮量分别比未加固时减小了32.8%和36.4%,隧道上浮量和地层受扰动区域随加固厚度增加逐渐减小;该工程中隧道环形加固厚度大于 $0.20D$ 时,计算得到的管片上浮量控制在30 mm以内,河底最大上浮量控制在20 mm以内;根据管片接头错台量和隧道上浮量的关系得到可控制管片接头偏差在5 mm以内,满足规范中管片拼装和验收时接头允许偏差量的要求。

关键词:大直径盾构隧道;软土地层;加固厚度;管片上浮

中图分类号:TU472

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)06-0163-07

Influence of Reinforcement Thickness on Anti-floating of Large-diameter Shield Tunnel in Soft Soil Stratum

TAN Yi-jun¹, PENG Yuan-dong², LIU Shuang³, SU Dong^{1,4,5}, LEI Guo-ping¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;
2. China Railway 15 Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. Zhuhai Dahengqin City New Center
Development Co., Ltd., Zhuhai 519030, Guangdong, China; 4. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient
Infrastructures of Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;
5. Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Underground Metro
Station, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the influence of the reinforcement thickness of the soft soil foundation on the up-floating amount of the tunnel lining in soft soil stratum, a hardening small strain model (HSS Model) was selected as the constitutive model, and a finite element model of large-diameter

收稿日期:2021-08-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51938008);中铁十五局科研项目[CR15CG-ZH-HQMZSD-2021-00001(KJ)]

作者简介:谭毅俊(1997-),男,广东佛山人,工学硕士研究生,E-mail:2070474036@email.szu.edu.cn.

通讯作者:雷国平(1989-),男,湖北汉川人,副研究员,工学博士,E-mail:guoping.lei@foxmail.com.

shield tunnel was established by PLAXIS 3D software according to the Mangzhou tunnel project in Hengqin. The up-floating amount of the tunnel, the displacement of the soil at the river bottom, and the disturbed soil range around the tunnel were calculated and compared considering different reinforcement thicknesses. The results show that when the soft soil is not reinforced, the soil displacements from the numerical simulation are in good agreement with the two-dimensional analytical solution. Through the pre-reinforcement treatment of the soft soil, the reinforced soil and the tunnel lining work together to restrain the local tunnel floating. When the soft soil reinforcement thickness is $0.10D$ (D is the tunnel outer diameter), the vertical displacement of the soil at the river bottom and the floating amount of the tunnel lining is reduced by 32.8% and 36.4% respectively. With the increase of the reinforcement thickness, the floating amount of the tunnel and the area of the disturbed soil decrease gradually. For this project, when the reinforcement thickness is greater than $0.20D$, the calculated maximum floating displacement of the tunnel lining is controlled within 30 mm, and the maximum vertical displacement of the soil at the river bottom is controlled within 20 mm. According to the relationship between the dislocation amount of lining joints and the floating amount of tunnel, the dislocation of lining joints can be controlled within 5 mm, meeting the requirements of the design standard.

Key words: large-diameter shield tunnel; soft soil stratum; reinforcement thickness; lining up-floating

0 引言

近年来,随着中国各大城市地铁和越江盾构隧道的需求增加,大直径盾构已广泛应用于实际工程建设中。然而,随着盾构直径的增大,管片外圈的空隙也会变大,砂浆填充空间及填充量增大,管片脱出盾尾后,管片拼装体单位容量减小,受到地层及浆液作用的浮力会更大,盾构隧道结构更容易发生上浮^[1]。工程数据表明,滨海城市越江隧道在软土地层中的施工极易引发盾构上浮以及管片脱离盾尾后上浮。更重要的是,管片上浮量的 70% 发生于安装后 48 h^[1] 以内,所以有必要对软弱地层大直径盾构隧道抗浮进行研究,并探讨相应的处理措施。

盾构法施工过程中,《地下铁道工程施工质量验收标准》(GB/T 50299—2018)^[2] 中规定:管片拼装允许偏差为轴线 ± 50 mm;成型隧道轴线允许偏差为轴线 ± 100 mm;管片拼装环内错台和环间错台允许偏差分别为 ± 5 mm 和 ± 6 mm;成型管片环内错台和环间错台允许偏差分别为 ± 10 mm 和 ± 15 mm。在实际工程中,隧道管片施工期结构形式对上浮量影响很大^[3]。管片上浮量小于 50 mm,接头处由于隧道上浮引起的错台和管片破损也经常发生,因此有必要结合接头的错台允许量对管片允许上浮量进行研究。

目前,对盾构隧道上浮问题的研究已经取得了

一定的进展,主要集中在盾构隧道上浮模型预测分析和控制措施上。林存刚等^[4] 基于 Mindlin 解,建立了可用来预测盾构掘进引起的地面竖向位移的模型。魏纲等^[5] 考虑静态上浮力和动态上浮力,提出了上浮阶段的衬砌环受力模型及计算公式。叶飞等^[6] 重点考虑了邻接管片的约束作用,推导得到大断面盾构隧道抗浮控制公式。王道远等^[7] 建立了运河开挖下盾构隧道纵向上浮量的预测模型,并对模型进行了求解。刘学彦等^[8] 分别从施工期和运营期 2 个角度提出了隧道抗浮稳定的合理覆土厚度设定原则和理论计算方法。黄旭民等^[9] 提出了综合考虑浆液黏度时变性、上覆土体基床系数各向异性以及施工荷载步叠加效应影响的一种施工期盾构隧道管片上浮预测方法。肖明清等^[10] 通过有限元分析认为,软土地层中盾构隧道管片上浮是地层应力重分布的结果。曾学艺等^[11] 提出了可采取地表注浆的方式改善上覆土性能,防止管片上浮。黄钟晖等^[12] 认为地质条件较差的潜覆土区段,采取地层加固措施可减少成型隧道的上浮量。合理的加固范围能有效减小上浮变形量^[13],实际工程中通常采取对隧道结构周围土体预加固或设置抗浮锚杆的方式来抑制管片上浮变形。采用土体加固时的加固厚度主要依靠工程经验取值,因此有必要对其进行研究。

本文以珠海忙洲隧道工程盾构区间隧道为研究对象,结合上浮值预测公式和有限元模拟,探究了软

关键问题之一。混凝土衬砌管片结构采用线弹性模型,加固土和浆液采用摩尔-库仑模型,模型参数见表 2。其中管片简化为均质圆环,其参数根据工程报告所得;浆液参数参考肖立等^[17]泥水盾构同步注浆材料试验数据;加固土参数参考曾斓等^[18]对深层水泥搅拌桩加固沿海软基试验研究成果。软土地层采用小应变硬化模型(HSS 模型)模拟,该模型能反映软土地层剪切模量和压缩模量在微小应变范围内的变化。模型参数取值主要依据工程详勘报告的土体物理力学性质,并参考了顾晓强等^[19]、梁发云

等^[20]对上海软土地区 HSS 模型参数研究成果,具体结构计算参数见表 3。

表 2 主要结构计算参数

Table 2 Calculation Parameters for Main Structures

结构	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	ν
浆液	0.255	13.5	5.50	5.5	11	0.400
管片	0.600	25.0			36 500	0.167
加固土	t	23.0	21.3	13.2	300	0.200

注: γ 为土的重度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; t 为等效土层加固厚度, $t=0,0.10D,0.15D,0.20D,0.25D,0.30D$ 。

表 3 土层数值计算参数

Table 3 Numerical Calculation Parameters of Soil Layer

岩土名称	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	K_0	$\Psi/(^{\circ})$	m	R_f	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	ν_{ur}	$E_{\text{SI-2}}$	$E_{\text{red}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$
淤泥	13.1	13.3	0.72	0.1	0.8	0.9	100	0.2	2.01	1.91	2.29	16.03	40.1	1×10^{-4}

注: c' 和 φ' 分别为土体的有效黏聚力和有效内摩擦角; K_0 为初始静止侧压力系数; Ψ 为土的剪胀角; m 为应力相关幂指数; R_f 为失效率; p^{ref} 为参考应力; ν_{ur} 为卸载泊松比; $E_{\text{SI-2}}$ 为固结试验 100~200 kPa 对应的压缩模量; $E_{\text{red}}^{\text{ref}}$ 为主压密加载试验的切线模量; E_{50}^{ref} 为三轴试验中的割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载模量; G_0^{ref} 为小应变剪切模量; $\gamma_{0.7}$ 为初始剪应变。

本文研究大直径盾构软土层周围土体加固以及加固厚度对隧道抗浮的影响,加固厚度分别取为 0,0.10*D*,0.15*D*,0.20*D*,0.25*D*,0.30*D*。

3 数值模拟结果分析

3.1 加固厚度对抗浮的发展规律

参考袁文军等^[16]对未加固隧道上浮引起的土体变形的二维解,上浮力作用下土体位移计算模型如图 3 所示。该模型主要考虑隧道超挖引起周围土体的卸载回弹力 q_1 和浆液浮力对周围土体的挤压力 q_2 两部分作用,引起的土体竖向位移 v_1 和 v_2 分别为

$$v_1 = \int_0^{2\pi} \frac{q_1 R \sin(\alpha) \mathrm{d}\alpha}{8\pi\mu(1-\nu)} \{ -(3-4\nu)\ln(r_1) - [1 + 4(1-\nu)(1-2\nu)]\ln(r_2) + \frac{[y-h+R\sin(\alpha)]^2}{r_1^2} + (3-4\nu)\frac{[y+h-R\sin(\alpha)]^2}{r_2^2} - \frac{2[h-R\sin(\alpha)]y}{r_2^2} + \frac{4[h-R\sin(\alpha)]y[y+h-R\sin(\alpha)]^2}{r_2^4} \} \quad (1)$$

$$v_2 = \int_0^{\pi} \frac{q_2 R \sin(\alpha) \mathrm{d}\alpha}{8\pi\mu(1-\nu)} \{ -(3-4\nu)\ln(r_1) - [1 + 4(1-\nu)(1-2\nu)]\ln(r_2) + \frac{[y-h+R\sin(\alpha)]^2}{r_1^2} + (3-4\nu)\frac{[y+h-R\sin(\alpha)]^2}{r_2^2} - \frac{2[h-R\sin(\alpha)]y}{r_2^2} + \frac{4[h-R\sin(\alpha)]y[y+h-R\sin(\alpha)]^2}{r_2^4} \} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \gamma' \{ h + R[1 - \cos(\theta)] \} \\ q_2 &= \frac{F_b - W - (2 - \pi/2)R^2 \gamma'}{\pi R} \\ r_1 &= \sqrt{[x - R\cos(\alpha)]^2 + [y - h + R\sin(\alpha)]^2} \\ r_2 &= \sqrt{[x - R\cos(\alpha)]^2 + [y + h - R\sin(\alpha)]^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: x 为距隧道轴线的水平距离; y 为距地面的垂直距离; h 为地面到隧道中心的竖直距离; R 为隧道外半径; μ 为土体剪切模量; θ 为管片环向压力与竖向轴线的夹角; α 为任意管片位置 $\mathrm{d}A$ 与隧道圆心的连线与水平方向的夹角; W 为管片自重; γ' 为土体浮重度; F_b 为浆液上浮力。

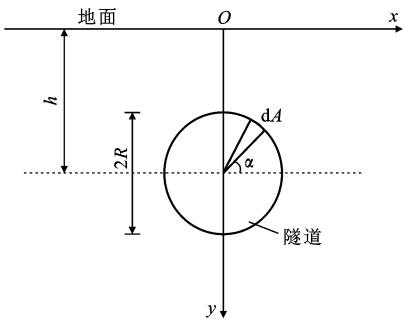


图 3 上浮力作用下土体位移计算模型

Fig. 3 Calculation Model for Soil Displacement Under Upward Buoyancy Effect

图 4 展示了未加固和不同加固厚度下的河底土体(图 2 中 A-A 截面)竖向位移曲线,其中竖向位移向上为正。可以看出,在未加固情况下隧道正上方河底土体上浮最严重(最大上浮量达 37.2 mm)。随着隧道两侧土体与隧道距离的增大,竖向位移逐

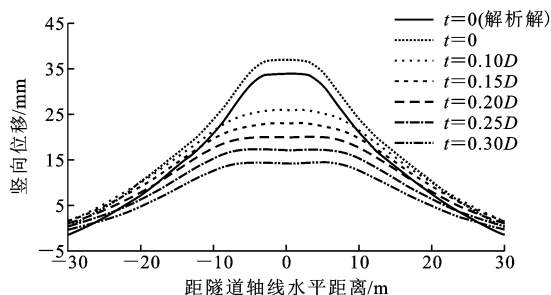


图 4 河底土体(A-A 截面)竖向位移曲线

Fig. 4 Curves of Soil Vertical Displacements at River Bottom (A-A Section)

渐减小,距隧道竖向轴线 $2D$ (29.5 m) 处的竖向位移接近于 0。图 4 也展示了袁文军等^[16]推导的土体变形二维解析解的计算结果,由公式(1),(2)计算的河底土体最大上浮量为 34.3 mm。数值模拟结果与该解析解在上浮量最大值上仅相差 2.9 mm,并且曲线形状比较吻合,初步验证了计算结果的准确性。

由于大直径盾构机的结构刚度要求,盾尾壁后注浆填充区域随隧道盾构直径增大而增大,其对管片上浮的影响不可忽视。文献^[16]的土体变形计算公式忽略了隧道管片对上半部分薄弱注浆层的影响,只考虑浆液上浮对上覆土的挤压力作用,其计算结果偏危险,而本文数值模型考虑了注浆层的影响,得到的结果较该公式预测结果大,更为合理。

图 5 展示了各工况下隧道受到上浮作用时土体埋深为 9.745 m (图 2 中 B-B 截面) 处的竖向位移曲线。同样可以看出,隧道开挖面上方土体上浮量最大,经过土体加固处理后,土体局部上浮能得到有效的抑制,竖向位移随加固厚度的增加逐渐减少。由于浆液的上浮力直接作用于隧道开挖面上方土体,经过加固后的土体最大上浮量仍然出现在隧道竖向轴线上方。对软土地层进行加固后,虽然隧道周围土体仍然向上移动,但加固厚度为 $0.10D$ 时与未加固情况下相比,变形量减小了 36.4%。从图 4 可以看出,经过对软土地层预加固后,河底土体上浮量呈减小趋势,加固厚度为 $0.10D$ 时与未加固情况相比,最大变形量减小了 32.8%。

比较不同的加固土体厚度所引起的土体上浮影响范围,图 5 显示隧道两侧土体上浮段有轻微的拐点,2 个拐点之间的距离随加固厚度增加而增加,大致为隧道管片外径与对应加固土厚度所组成的直径大小 ($D+2t$)。由于加固区改良土的刚度较天然土体大,整体稳定性较好,隧道上浮变形时可与隧道整

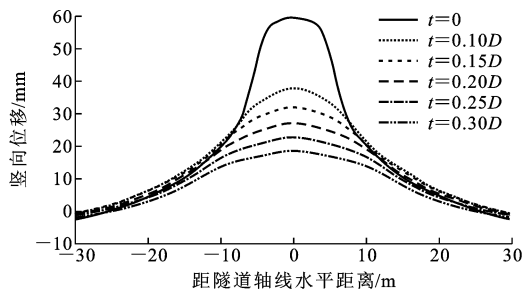
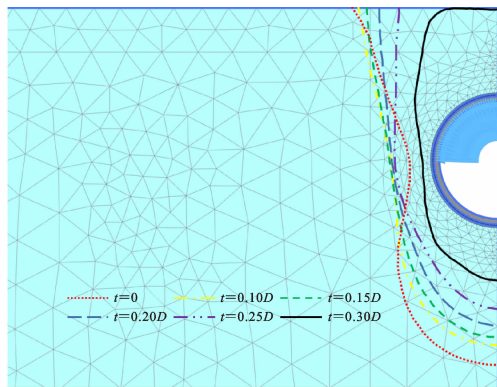


图 5 埋深 9.745 m 土体(B-B 截面)竖向位移曲线

Fig. 5 Curves of Soil Vertical Displacements at Depth of 9.745 m (B-B Section)

体承受上浮力作用,最终表现为隧道上方土体整体向上移动,但是埋深为 9.745 m 处土体直接受到隧道上浮力的作用,其受影响范围比河底土体要大。

图 6 为不同加固厚度下隧道周围土体竖向位移为 $0.10D$ (14.5 mm) 的等值线云图。经过加固处理后,土体竖向位移等值线往隧道方向收缩,这表明隧道周围土体的竖向扰动范围随加固厚度增加而减小,主要集中在隧道的上下部分。另一方面,除了加固厚度为 $0.30D$ 的情况,隧道两侧竖向扰动范围均比未加固情况下要大。这是由于加固区改良土的密度较天然土体大,隧道上浮变形时与隧道土体整体承受上浮力作用,最终表现为隧道两侧土体竖向变形量增大,但也消除了隧道局部变形的隐患。

图 6 不同加固厚度下土体竖向位移为 $0.1D$ 的等值线云图Fig. 6 Contour Lines of Vertical Displacement of $0.1D$ for Different Reinforcement Thicknesses

3.2 合理加固厚度的确定

图 7 为等效土层加固厚度 t 与隧道上浮量的关系曲线,同时给出了 $t=0, 0.10D, 0.20D, 0.30D$ 隧道周围土体的竖向位移矢量云图。可以看出,隧道上方土体上浮比下方严重,上浮量较大。随加固厚度的增加,隧道上浮量基本呈线性减小,加固厚度为 $0.30D$ 时隧道上浮量仅为 18.8 mm。

根据文献^[3]对管片接头错台量和隧道上浮量

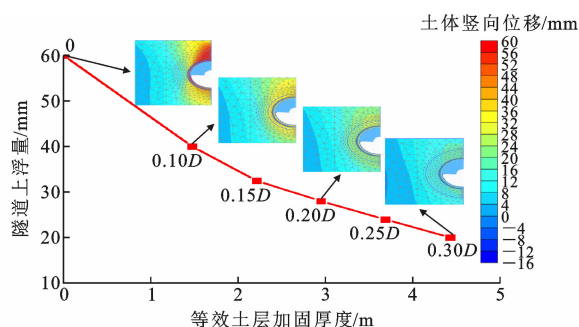


图7 加固厚度与隧道上浮量关系曲线

Fig. 7 Relationship Curves Between Reinforcement Thickness and Tunnel Floating Displacement

关系的研究结果可知,隧道上浮量不小于 30 mm 时管片接头偏差不大于 5 mm,达到规范^[2]在管片拼装和验收时对接头允许偏差量的要求。从图 7 可以看出,当加固厚度达到 0.20D 时,枞阳隧道管片上浮量可控制在 30 mm 以内,即可避免管片接头错台。另外,从图 4 可以看出,加固厚度达到 0.20D 时,河底的上浮量能控制在 20 mm 以内。

4 结 语

(1)未对软土进行加固时,数值模拟得到的土体位移与二维理论推导的结果吻合较好,最大上浮量仅相差 2.9 mm。

(2)软土地层预加固改良能使加固土体与隧道整体抗浮,软土加固厚度为 0.10D 时与未加固的情况相比,河底上浮量和隧道上浮量分别减小了 32.8% 和 36.4%,并且隧道上浮量和地层受扰动区域随加固厚度的增加逐渐减小。

(3)隧道环向加固厚度大于 0.20D 时,计算得到的枞阳隧道管片上浮量控制在 30 mm 以内,河底土体最大上浮量控制在 20 mm 以内。根据管片接头错台量和隧道上浮量的关系,管片接头偏差可控制在 5 mm 以内,满足规范要求。

参考文献:

References:

- [1] 钱七虎,陈 健.大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J].隧道建设:中英文,2021,41(2):157-164.
QIAN Qi-hu, CHEN Jian. Analysis of Tunneling Risks of Large-diameter Shield and Thoughts on Its Challenges[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 157-164.
- [2] GB/T 50299—2018,地下铁道工程施工质量验收标准[S].

GB/T 50299—2018,Standard for Construction Quality Acceptance of Metro Engineering[S].

- [3] 叶俊能,刘 源,陈仁朋,等.盾构隧道管片施工期容许上浮量研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增2):4067-4074.
YE Jun-neng, LIU Yuan, CHEN Ren-peng, et al. Study of the Permissible Value of Upward Floating for Segment in Shield Tunnel Construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4067-4074.
- [4] 林存刚,张忠苗,吴世明,等.软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2583-2592.
LIN Cun-gang, ZHANG Zhong-miao, WU Shi-ming, et al. Study of Ground Heave and Subsidence Induced by Shield Tunnelling in Soft Ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2583-2592.
- [5] 魏 纲,洪 杰,魏新江.盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1257-1263.
WEI Gang, HONG Jie, WEI Xin-jiang. Mechanical Analysis of Segment Floating During Shield Tunnel Construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1257-1263.
- [6] 叶 飞,朱合华,丁文其,等.大断面盾构隧道施工抗浮计算研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(5):849-853.
YE Fei, ZHU He-hua, DING Wen-qi, et al. Analysis on Anti-buoyancy Calculation in Excavation of Big Cross-section Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 849-853.
- [7] 王道远,王锡朝,袁金秀,等.运河开挖卸载下水下盾构隧道纵向上浮量预测研究[J].现代隧道技术,2015,52(2):110-114,127.
WANG Dao-yuan, WANG Xi-chao, YUAN Jin-xiu, et al. Prediction of the Longitudinal Uplift of an Underwater Shield Tunnel During Canal Excavation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 110-114, 127.
- [8] 刘学彦,袁大军,姜 曦.基于抗浮稳定的盾构隧道合理覆土厚度研究[J].中国工程科学,2015,17(1):88-95.
LIU Xue-yan, YUAN Da-jun, JIANG Xi. Research on Depth of Earth Cover for Shield Tunnel Anti-buoyancy Security[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(1): 88-95.

- [9] 黄旭民,黄林冲,梁禹.施工期同步注浆影响下盾构隧道管片纵向上浮特征分析与应用[J/OL].岩土工程学报,1-9[2021-08-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20210510.1706.012.html>. HUANG Xu-min, HUANG Lin-chong, LIANG Yu. Analysis and Application of the Longitudinal Characteristics of the Shield Tunnel Segments Uplift Affected by Synchronous Grouting During Construction [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-9[2021-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20210510.1706.012.html>.
- [10] 肖明清,孙文昊,韩向阳.盾构隧道管片上浮问题研究[J].岩土力学,2009,30(4):1041-1045,1056. XIAO Ming-qing, SUN Wen-hao, HAN Xiang-yang. Research on Upward Moving of Segments of Shield Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1041-1045, 1056.
- [11] 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. ZENG Xue-yi, LIANG Yu, LI Ke, et al. Study on Segment Floating and Its Control Measures During Construction of Large-diameter Cross River Shield Tunnel with Shallow Covering[J]. Railway Engineering, 2017(5): 71-75.
- [12] 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. HUANG Zhong-hui, SHU Yao, JI Chang, et al. Analysis of Weight of Influencing Factors of Shield Tunnel Segment Uplifting During Construction Based on Equivalent Beam Model[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1295-1301.
- [13] 许有俊,陶连金,李文博,等.地铁上穿工程中既有隧道结构周围土体注浆加固范围研究[J].铁道建筑,2012(11):42-44. XU You-jun, TAO Lian-jin, LI Wen-bo, et al. Study on Grouting Reinforcement Range of Soil Around Existing Tunnel Structure in Metro Overpass Project [J]. Railway Engineering, 2012(11): 42-44.
- [14] TYAGI A, LIU Y, PAN Y T, et al. Equivalent Strength for Tunnels in Cement-admixed Soil Columns with Spatial Variability and Positioning Error [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(10): 04020101.
- [15] 和晓楠,周晓敏,郭小红,等.深埋隧道注浆加固围岩非达西渗流场及应力场解析[J].中国公路学报,2020,33(12):200-211. HE Xiao-nan, ZHOU Xiao-min, GUO Xiao-hong, et al. Analysis of Non-Darcy Seepage Field and Stress Field of Surrounding Rock Strengthened by Grouting in Deep Buried Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 200-211.
- [16] 袁文军,张少钦.城市地铁越江隧道上浮引起的土体变形分析[J].现代隧道技术,2014,51(4):73-80. YUAN Wen-jun, ZHANG Shao-qin. Analysis of Soil Deformation Induced by the Floating of a River-crossing Metro Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 73-80.
- [17] 肖立,张庆贺,赵天石,等.泥水盾构同步注浆材料试验研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):59-64. XIAO Li, ZHANG Qing-he, ZHAO Tian-shi, et al. Study on Mortar Material of Tail Void Grouting in Slurry Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 59-64.
- [18] 曾澜,赵利平,张建球.沿海软基深层水泥搅拌桩复合地基工程性能室内模型试验研究[J].西部交通科技,2020(4):15-19. ZENG Lan, ZHAO Li-ping, ZHANG Jian-qiu. Laboratory Model Test Study on Engineering Performance of Deep Cement Mixing Pile Composite Foundation in Coastal Soft Foundation[J]. Western China Communications Science & Technology, 2020(4): 15-19.
- [19] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等.上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J].岩土力学,2021,42(3):833-845. GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS Model Parameters for Shanghai Soils with Engineering Verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845.
- [20] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等.上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(2):269-278. LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental Study on Parameters of HSS Model for Soft Soils in Shanghai [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269-278.