

## 泥质粉砂岩地层盾构隧道管片上浮影响因素\*

夏明<sup>1</sup> 张慧鹏<sup>1</sup> 张志强<sup>2</sup> 曾云嵘<sup>1</sup> 徐腾飞<sup>1</sup>

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

**摘要** [目的] 盾构隧道穿越富水泥质粉砂岩地层时会出现多环管片整体上浮的现象, 导致管片出现破损、错台、姿态超限等质量缺陷。为保证盾构隧道成型质量, 需对管片上浮影响因素进行研究。[方法] 基于盾构隧道纵向刚度折减理论和管片施工阶段受力特点, 建立管片施工期纵向整体上浮有限元分析模型, 研究管片衬砌结构纵向刚度及动、静浮力因素对盾构隧道长距离、大范围上浮挠曲变形的影响规律。[结果及结论] 管片上浮影响因素主要包括静浮力因素、动浮力因素和姿态控制因素。管片最大上浮量发生在脱离盾尾第5环—第8环处。纵向刚度越小, 最大上浮位置越靠近盾尾; 纵向刚度越大, 隧道越呈现长范围整体抬起现象。当水头高度位于管片顶部以上时, 管片上浮量不随静水头高度而改变, 且静水浮力造成的管片上浮量不超过30%。管片环最大上浮位置不随注浆压力的改变而改变, 注浆压力仅影响管片最大上浮量, 且最大上浮量与注浆压力线性相关。

**关键词** 城市轨道交通; 盾构隧道; 泥质粉砂岩地层; 管片上浮量

中图分类号 TU753; U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.021

## Influencing Factors of Shield Tunnel Segment Floating in Muddy Siltstone Stratum

XIA Ming<sup>1</sup>, ZHANG Huipeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>2</sup>, ZENG Yunrong<sup>1</sup>, XU Tengfei<sup>1</sup>

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] When shield tunnels crossing water-rich muddy siltstone stratum, the phenomenon of multi-ring tunnel segment overall floating often occurs, leading to quality defects such as segment damage, misalignment, and attitude exceeding limits. To ensure the quality of shield tunnel formation, it is necessary to study the influencing factors on segment floating. [Method] Based on the longitudinal stiffness reduction theory of shield tunnel and the stress characteristics during segment construction, a finite element analysis model of longitudinal overall floating during segment construction is estab-

lished. The influence law of segment lining structure longitudinal rigidity, dynamic and static buoyancy factors on long-distance and large-scale floating deflection deformation in shield tunnels is studied. [Result & Conclusion] Factors influencing segment floatation mainly include static buoyancy, dynamic buoyancy, and attitude control. The maximum segment floating occurs between the 5th and 8th rings behind the shield tail. The smaller the longitudinal stiffness, the closer the maximum floating occurs to the shield tail; the larger the longitudinal stiffness, the more the long-range overall heave phenomenon of the tunnel. When the water head height is above the segment top, the segment floating volume will not change with the static water head height, and the floatation caused by static buoyancy does not exceed 30%. The position of the maximum segment floating will not change with the changes in grouting pressure, and the grouting pressure only affects the maximum floating value of the segment, with the maximum floating value linearly correlated with the grouting pressure.

**Key words** urban rail transit; shield tunnel; muddy siltstone stratum; segment floating value

大量盾构隧道施工案例表明, 由于盾尾间隙的存在, 刚刚脱离盾构机尾部的拼装管片时常会出现环间局部或多环管片整体上浮的现象, 具体表现为管片产生环间错台、裂缝、破损, 更甚者将导致隧道轴线偏位明显, 严重影响隧道成型质量。因此为了保证隧道施工与运营安全, 有必要对盾构隧道施工期间管片的上浮机理及影响因素进行研究, 以便及时采取科学合理的应对措施。

作为常见的工程问题, 盾构隧道施工中的管片上浮问题已经引起了研究人员的广泛关注。在管片上浮机理研究方面, 文献[1-2]提出了盾构管片静态上浮力和动态上浮力的概念, 重点分析了壁后注浆浆液扩散过程对管片造成的上浮压力。在管片上浮影响因素研究方面, 文献[3-4]分析了泥岩地层盾构施工管片上浮特性及其影响因素。文献

\* 国家自然科学基金高铁联合基金(U1934213); 南昌轨道交通集团科研项目(2019HGKYB003)

[5]研究了壁后注浆厚度和浆液性质对隧道抗浮的影响。在管片上浮控制措施方面,文献[6-8]分别分析了软土大直径泥水盾构、全断面硬岩盾构、浅覆大直径越江盾构施工阶段控制管片上浮的措施。在管片上浮预测方面,文献[9-10]提出了考虑地层渗透性的上浮分析模型和多变复合地层盾构隧道的上浮量值预测方法。

目前,对于盾构隧道上浮现象的原因——注浆浆液在管片壁后的压力分布,已有比较成熟的理论计算模型及工程实测方法。然而,富水砂层中的管片上浮现象也时常发生,对于其上浮影响因素及防控措施的研究仍较少。隧道拼装管片衬砌在纵向上来看是一种细长、柔性连接的结构,在特定的地层、水文及施工条件下,管片受到上浮力作用时,将在一定纵向范围内表现出整体浮动的现象。本文基于盾构隧道纵向刚度折减理论,建立盾构隧道纵向整体上浮有限元分析模型,研究了管片衬砌结构纵向刚度及动、静浮力因素对盾构隧道长距离、大范围上浮挠曲变形的影响规律,并提出了控制管片上浮的主要施工措施。本文研究可为富水泥质粉砂岩地层或类似地层中盾构隧道的管片上浮控制提供参考。

## 1 工程概况

某城市轨道交通区间隧道采用盾构法开挖,全长约为944 m。隧道支护结构为预制钢筋混凝土管片,混凝土强度等级为C50,厚度为0.35 m,幅宽为1.5 m。管片拼装完成、盾尾逐渐脱离管片后,在管片背后进行同步注浆,注浆压力一般为0.2~0.4 MPa。盾构隧道穿越地层主要为粗砂层、砾砂层,局部穿越上软下硬地层(上部为粗砂层、强风化泥质粉砂岩,下部为中风化泥质粉砂岩)。盾构在富水强风化泥质粉砂岩地层中中长距离掘进,由于地层稳定性差,容易受到盾构刀盘的切削扰动而发生坍塌。洞身范围内,地层岩层间隙较多,水量丰富,容易出现涌水和流砂现象,从而引起开挖面失稳和地面下沉。在盾构掘进过程中,当水量很大时,还容易直接造成螺旋输送机出土口出现喷涌现象,进而引起地面下沉。隧道施工期间,盾构机后方已施作的管片出现上浮现象(见图1),盾构机姿态控制困难。受管片上浮影响,区间隧道部分管片之间出现了较为显著的错台及渗漏水问题(见图2)。管片上浮过大会造成管片局部受力不均匀,产生应力集中

问题,影响成型管片质量,甚至可能发生管片连接螺栓被剪断,甚至导致隧道渗漏水等严重质量安全事故,直接影响隧道施工安全。

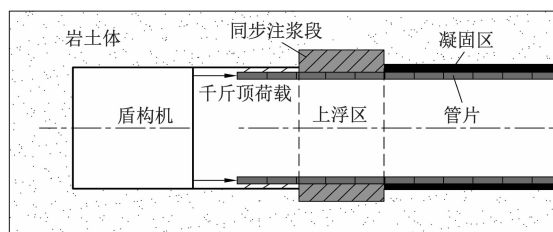
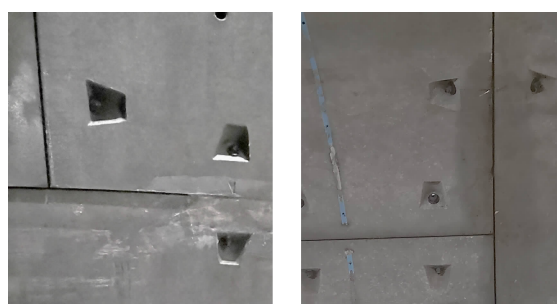


图1 盾构隧道管片上浮段示意图

Fig. 1 Diagram of shield tunnel segment floating section



a) 管片错台

b) 接缝渗漏

图2 管片错台及渗漏照片

Fig. 2 Photos of segment misalignment and leakage

## 2 管片上浮影响因素分析

对于盾构隧道施工期管片上浮的原因,通常认为:①由于地下水、泥浆或注浆浆液等液体富存的环境包裹着刚从盾尾脱离的管片,导致管片在液体作用下产生了明显的上浮作用力,而当该上浮作用力克服了管片自重、上覆土及管片间的约束力等作用时,便会产生上浮现象;②由于施工过程中各组千斤顶的顶推力调整不当,导致盾构姿态控制不当,蛇行量纠偏不及时,进而造成管片向上偏移。

造成盾构隧道施工期管片上浮的因素大致可总结为以下几个方面:

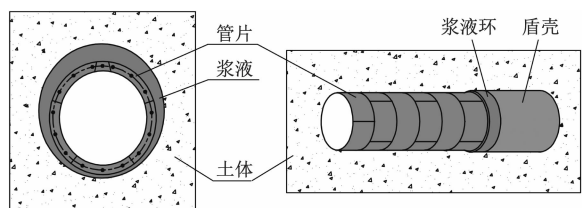
1) 静浮力因素。盾构管片外液体富存(侵入地下水、泥浆及注浆浆液等),将管片包裹在内。当液体产生的静态上浮力大于管片自重、上覆土及管片间约束等作用力时,管片将上浮。

2) 动浮力因素。伴随着注浆过程而产生的动态上浮力,其本质为注浆压力,因其大小及分布形式同盾尾或壁后注浆施工过程、注浆质量及浆液凝固时间密切相关,是一种可能造成管片有上浮趋势且动态变化的作用力因素。

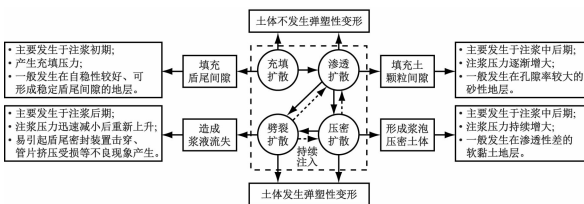
3) 姿态控制因素。盾构机的推进线路与设计轴线之间或多或少存在着偏差,在掘进过程中需要时刻对盾构机的姿态进行监控,并通过调整各组千斤顶推力来纠偏。当管片顶部与底部所受顶推力大小差异过大时,纵向管片环将产生偏心荷载,进而受到弯矩作用,在克服管片上部约束作用时,发生向上的弯曲变形。

4) 其他因素。除了上述3个主要因素之外,可能还存在一些其他的因素。例如:在盾构掘进过程中,切口水压过大可能造成盾构机尾部上抬,进而通过千斤顶连接带动盾尾处的管片上浮;隧道开挖卸荷作用导致地基回弹,可能造成管片整体或局部向上抬起;浆液与地层的性质也是影响管片上浮的因素。

根据施工经验及国内外学者的相关研究成果可知,前两个因素为影响管片上浮的主要因素,因此本文将重点关注前两个因素,即静浮力和动浮力因素对管片上浮的影响规律。静态上浮力形成过程及盾构管片壁后注浆浆液扩散过程示意图如图3所示。



a) 静态上浮力形成过程



b) 管片壁后注浆浆液扩散

图3 静态上浮力形成过程及盾构管片壁后注浆浆液扩散过程示意图

Fig.3 Diagram of static buoyancy formation process and shield segment back-wall grout spreading process

### 3 施工期隧道纵向整体上浮有限元分析

#### 3.1 建立数值模型

整体地层尺寸为80 m(长)×60 m(宽)×50 m(高),开挖轴线距地面20 m,盾壳厚度为0.15 m。施工现场日掘进拼装管片环数最大为12环,故模型

上浮段管片纵向长度设置为18 m。对于刚脱离盾尾的数环管片,可认为其壁后注浆浆液受地下水影响,无法及时形成一定的强度来固定管片,故上浮段管片壁后不设置实体浆液等代层,空隙环外径尺寸为盾构开挖直径,内径为管片环外径。模型中不设置管片接头,在横断面及纵向上对管片弹性模量进行折减。模型在上浮段后接16环正常拼装施工管片。

静态上浮力直接考虑为在管片环上施加一定水头高度的静水压力;动态上浮力考虑最不利情况,即下半环管片作用压密注浆压力,粗略考虑浆液凝固的时效性,压力在脱离盾尾3环管片内达到最大值,随后线性递减,在第12环管片位置处凝固成型,浆液压力消失。上浮段管片作用荷载示意图如图4所示。

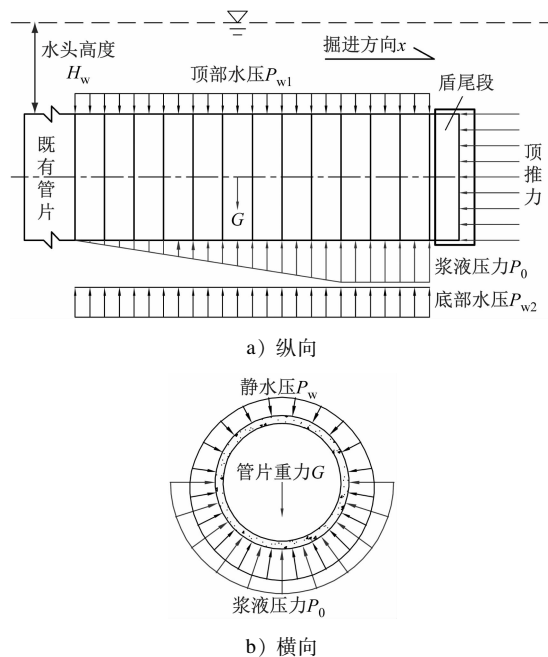


图4 上浮段管片作用荷载示意图

Fig.4 Diagram of load acting on floating section segments

对于刚脱离盾尾的管片,在其管片截面设置轴向约束。对于上浮段尾部连接的既有管片,假设其壁后浆液已经凝固,上浮段尾部管片的变形与既有管片的变形同步,设置两段管片之间为绑定约束。在上浮段管片环壁后存在空隙,通过设置地层-管片之间的法向、切向接触,来传递二者变形接触之后的相互作用力。对于早期施工的既有管片,假设其已经凝固且施工效果良好,在管片环-注浆等代层-地层之间都设置绑定约束。最终建立的数值模



型示意图如图 5 所示。

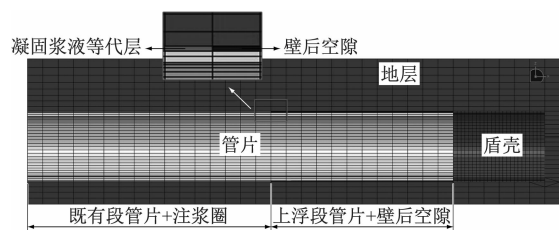


图 5 数值模型示意图

Fig. 5 Diagram of numerical model

### 3.2 工况设置

借鉴修正惯用法,采用刚度有效系数  $\eta$  来考虑接头对管片环向、纵向刚度的影响,即考虑接头影响的环向弹性模量为  $E_{cyz} = \eta_{cyz} E_c$  ( $\eta_{cyz}$  为环向刚度有效系数;  $E_c$  为管片实际弹性模量),纵向弹性模量为  $E_{cx} = \eta_{cx} E_c$  ( $\eta_{cx}$  为纵向刚度有效系数)。错缝拼装时,钢筋混凝土管片的  $\eta_{cyz}$  取为 80%,  $\eta_{cx}$  取为 10%~40%。通过计算不同静水头高度,并施加不同静水压力,分析不同水文地质条件下的管片静浮力影响。工况设置如表 1 所示。

表 1 工况设置

Tab. 1 Setting of working conditions

工况编号	纵向刚度有效系数/%	管片外径/m	净水头高度/m	注浆压力/MPa
1	40	6.7	10	0.30
2	35	6.7	10	0.30
3	30	6.7	10	0.30
4	25	6.7	10	0.30
5	20	6.7	10	0.30
6	15	6.7	10	0.30
7	10	6.7	10	0.30
8	10	6.0	10	0.30
9	10	6.7	10	0.30
10	10	6.7	-5	0.30
11	10	6.7	5	0.30
12	10	6.7	8	0.30
13	10	6.7	10	0.30
14	10	6.7	12	0.30
15	10	6.7	10	0.15
16	10	6.7	10	0.23
17	10	6.7	10	0.30
18	10	6.7	10	0.42
19	10	6.7	10	0.50

## 4 数值研究结果及其影响分析

### 4.1 管片纵向刚度

工况 1—工况 7 下,隧道拱顶、拱底上浮量及最

大上浮量分布情况如图 6 所示。由图 6 可知:①由于上浮段管片作用的附加上浮力,导致管片产生明显的整体上浮现象,上浮段管片两侧因受到既有段管片和盾构机的约束作用,上浮量较小。管片纵向刚度较大时(如工况 1),最大上浮量发生在脱离盾尾后第 6 环—第 8 环处。随着纵向刚度的减小,最大上浮位置发生在脱离盾尾后第 5 环—第 7 环处,更靠近盾尾。②纵向刚度越小(如工况 7),在第 5 环—第 7 环处的集中上浮现象越明显;纵向刚度越大(如工况 1),隧道越呈现出长距离、大范围内整体被抬起的现象。③随着管片纵向刚度的折减,最大上浮量不断增大;工况 1 的拱底最大上浮量为 18.1 mm,工况 7 的拱底最大上浮量为 54.8 mm,且纵向刚度越小,上浮量增速越快。由于本文考虑的注浆压力分布在底部,故拱底的上浮量略大于拱顶的上

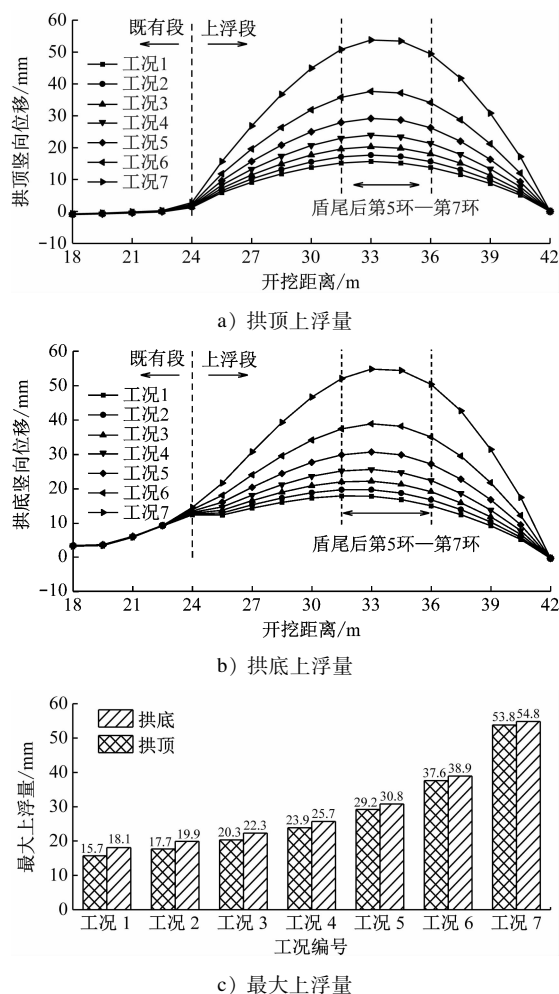


图 6 工况 1—工况 7 下的隧道拱顶、拱底上浮量及最大上浮量分布情况

Fig. 6 Distribution of tunnel vault, arch bottom floating and maximum floating under working conditions 1 to 7

浮量。④对于既有段管片,远离上浮段的管片环上浮量整体呈上沉下隆的规律,靠近上浮段的3环管片受上浮作用影响,也发生了明显的上浮现象。由于注浆圈、地层的约束作用,既有段管片的拱底上浮量较拱顶上浮量受上浮作用影响更明显。从数值上来看,既有段管片的扰动上浮量受混凝土纵向材料刚度折减量的影响较小。

#### 4.2 管片直径

工况8和工况9下,隧道拱顶和拱底上浮量随着开挖距离的变化情况如图7所示。由图7可知:不同管片环直径的纵向上浮规律大致相同;当管片环直径较小时,拱底上浮量在脱离盾尾3环处开始陡增,最大上浮量发生在脱离盾尾后第4环—第6环处,比管片环直径较大时的最大上浮量发生位置(第5环—第7环)更靠前;当管片环直径为6.0 m和6.7 m时,其最大上浮量分别为71.3 mm和57.2 mm,相差约24.7%。由此可知,小管径盾构隧道的纵向刚度更小,在同样的施工及地层条件下,更容易出现上浮现象。

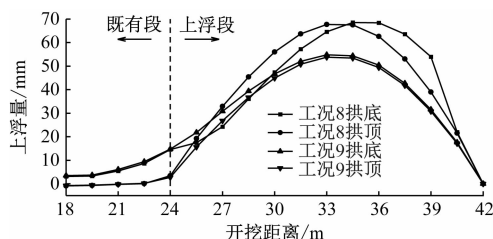


图7 工况8和工况9下隧道拱顶和拱底上浮量随着开挖距离的变化情况

Fig. 7 Tunnel vault and arch bottom floating changing with excavation distance under working conditions 8 and 9

#### 4.3 隧道静水头高度

工况10—工况14下,隧道拱底上浮量随着开挖距离的变化情况如图8所示。当水头高度位于管片顶部上方时,管片顶部与底部的水压差保持恒定,管片上浮量不随静水头高度的改变而改变,最大上浮量为57.2 mm。当水头高度位于管片底部下方时,管片不受静水浮力作用,此时最大上浮量为40.7 mm,可以判断由静水浮力造成的管片上浮量不超过30%。

#### 4.4 注浆压力

工况15—工况19下,隧道拱底上浮量随着开挖距离的变化情况如图9所示。隧道拱顶与拱底的注浆压力与最大上浮量之间的关系曲线如图10所示。

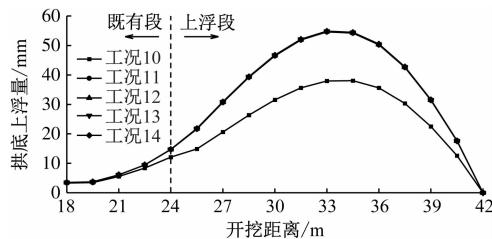


图8 工况10—工况14下隧道拱底上浮量随着开挖距离的变化情况

Fig. 8 Tunnel arch bottom floating changing with excavation distance under working conditions 10 to 14

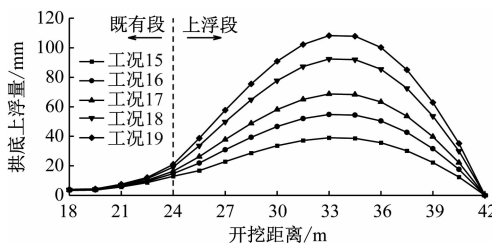


图9 工况15—工况19下隧道拱底上浮量随着开挖距离的变化情况

Fig. 9 Tunnel arch bottom floating changing with excavation distance under working condition 15 to 19

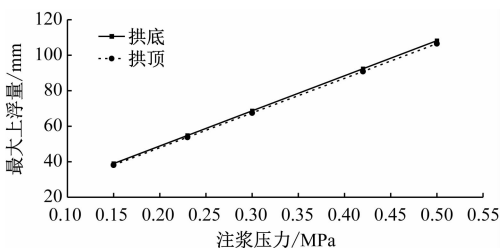


图10 拱顶与拱底的注浆压力与最大上浮量之间的关系曲线

Fig. 10 Relation curve of grouting pressure to maximum floating of vault and arch bottom

示。改变注浆压力,不会改变管片环最大上浮位置及其他规律,仅影响管片最大上浮量,且最大上浮量与注浆压力呈线性相关。

### 5 实测上浮量分析及工程控制措施

在盾构区间左线管片掘进完434环后,对第390环—第434环管片姿态进行测量,计算数据后发现第404环—第430环出现垂直姿态超限的情况。后续施工期间,每天对管片姿态进行持续跟踪测量,根据测量数据信息反馈可知,管片第404环—第430环、第449环—第470环垂直姿态连续超限,累计共49环,垂直姿态超限最大值为第420环的88 mm,水平姿态未出现超限情况。根据管片姿态、

盾构开挖位置姿态等施工测量信息,计算得到第390环—第470环实测最大上浮量,并结合数值模拟结果进行分析。

盾构管片实际上浮量受地层属性、注浆压力、地下水压、施工状况等多种因素的影响,在模拟时考虑管片承压和不承压,以及注浆压力为0.20 MPa、0.42 MPa、0.50 MPa的组合情况,采用所建立的有限元模型计算相应的数值解。隧道纵向上浮实测值与不同组合情况下的数值解对比如图11所示。

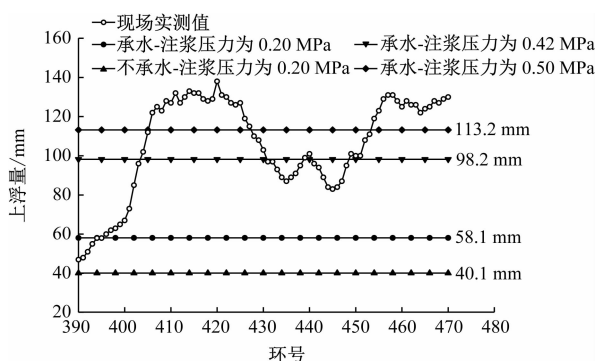


图11 隧道纵向上浮实测值与不同组合情况下的数值解对比

Fig. 11 Comparison of tunnel longitudinal floating between measured values and numerical solutions in different combination conditions

由图11可知:①在采用正常注浆压力(0.20 MPa)注浆时,通过数值模拟计算出管片在地下水贯通承压情况下的上浮量可达58.1 mm,不承压时的上浮量可达40.1 mm,这与第400环之前的未超限管片环实测上浮量较为吻合。②采用最大注浆压力(0.42 MPa)注浆时,通过数值模拟计算出管片在地下水贯通承压情况下的上浮量可达98.2 mm,这与第430环—第448环管片实测上浮量较为吻合。③对于第404环—第430环、第449环—第470环管片,实测最大上浮量为138.0 mm,远大于98.2 mm,即使采用0.50 MPa注浆压力进行数值模拟,其数值分析结果(113.2 mm)也不足以包络该严重上浮段。导致这种现象的原因为该上浮段管片壁后连续开孔泄水压并进行二次补浆,补浆量几乎等于同步注浆量,长距离管片环壁后处于承压水中,且无注浆圈约束,因此其上浮量严重超限。

为了控制施工中的管片上浮问题,施工中需加强对管片拼装质量的控制,加强螺栓紧固及二次复紧的检查。每环推进结束后,拧紧当前环管片的连

接螺栓,并在下环推进时进行复紧,克服作用于管片推力产生的垂直分力,减少成环隧道浮动。同时,通过二次注浆配合同步注浆控制管片上浮,采用快硬性浆液进行同步注浆,辅以水泥水玻璃双液浆进行二次注浆,使脱出盾尾管片在相对较短的时间内成型稳定,给盾构掘进提供一个良好的反作用力,使盾构机的轴线拟合设计轴线掘进。及时施作止水环,封堵后方来水,同时保证盾构管片背后注浆填充的密实性,减小地层变形。此外,还可通过增加管片衬垫厚度,使管片处于较理想的状态,以确保管片的拼装质量,使推进轴线控制在要求范围内。工程实践表明,这些措施最终取得了良好的应用效果,管片上浮量控制在允许范围内。

## 6 结语

本文建立了盾构隧道纵向整体上浮有限元分析模型,研究了管片衬砌结构纵向刚度及动、静浮力因素对盾构隧道长距离、大范围上浮挠曲变形的影响规律,主要获得以下结论:

1) 管片上浮影响因素主要包括静浮力因素、动浮力因素和姿态控制因素,且前两个因素为影响管片上浮的主要因素。

2) 通过隧道纵向整体上浮计算,最大上浮量发生在脱离盾尾后第5环—第8环处,且纵向刚度越小,最大上浮位置越靠近盾尾;纵向刚度越大,隧道越呈现长距离、大范围的整体抬起现象。

3) 小管片直径盾构隧道的纵向刚度更小,在同样的施工、地层条件下更易产生上浮现象;当水头高度位于管片顶部以上时,管片上浮量不随静水头高度的改变而改变,静水浮力造成的管片上浮量不超过30%。

4) 改变注浆压力并不会改变管片环最大上浮位置及其他规律,仅影响管片最大上浮量,且最大上浮量与注浆压力呈线性相关。

## 参考文献

- [1] 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]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1700.
- HUANG Xumin, HUANG Linchong, LIANG Yu. Analysis and application of longitudinal uplift characteristics of segments of shield tunnels affected by synchronous grouting during construction period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1700.

- [2] 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.  
WEI Gang, HONG Jie, WEI Xinjiang. Mechanical analysis of segment floating during shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1257.
- [3] 胡辉, 张恒, 刘晓迪, 等. 泥岩地层盾构隧道施工管片上浮影响因素分析[J]. 公路, 2018, 63(12): 312.  
HU Hui, ZHANG Heng, LIU Xiaodi, et al. Analysis on influencing factors of segment floating in construction of shield tunnel in mudstone stratum[J]. Highway, 2018, 63(12): 312.
- [4] 贾少东, 马杲宇, 王士民, 等. 考虑注浆压力的泥岩地层管片上浮特性与控制[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(2): 72.  
JIA Shaodong, MA Gaoyu, WANG Shimin, et al. Floating properties and control of segments in mudstone stratum considering grouting pressure[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(2): 72.
- [5] 李强, 甘鹏路, 钟小春. 盾构隧道管片壁后注浆厚度对隧道抗浮影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 27.  
LI Qiang, GAN Penglu, ZHONG Xiaochun. Study on effect of backfilling grouting thickness on anti-floating of the shield tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 27.
- [6] 王新, 李庭平, 王印昌. 软土大直径泥水盾构隧道施工期上浮的控制措施[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1168.  
WANG Xin, LI Tingping, WANG Yinchang. Countermeasures for floating of large-diameter slurry shield tunnel in soft soil[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(12): 1168.
- [7] 杨延栋, 陈馈, 李凤远, 等. 全断面硬岩地层盾构隧道管片上浮控制技术研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 180.  
YANG Yandong, CHEN Kui, LI Fengyuan, et al. Control technologies for up-floating of segment rings of shield-bored tunnel in full-face hard-rock ground[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 180.
- [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, 57(5): 71.  
ZENG Xueyi, 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, 57(5): 71.
- [9] 舒瑶, 季昌, 周顺华, 等. 考虑地层渗透性的盾构隧道施工期管片上浮预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3516.  
SHU Yao, JI Chang, ZHOU Shunhua, et al. Prediction of segment floating during shield tunnel construction considering stratum permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3516.
- [10] 舒瑶, 周顺华, 季昌, 等. 多变复合地层盾构隧道施工期管片上浮实测数据分析与量值预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3464.  
SHU Yao, ZHOU Shunhua, JI Chang, et al. Analysis and prediction of measured data of segment floating during construction of shield tunnel in changeable composite stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3464.
- 收稿日期:2022-01-28 修回日期:2022-05-20 出版日期:2024-07-10  
Received:2022-01-28 Revised:2022-05-20 Published:2024-07-10  
• 第一作者:夏明,高级工程师,xiamjxnc@163.com  
通信作者:张志强,教授,clarkchang68@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 119 页)

- [3] 李健斌, 陈健. 考虑参数空间变异性的盾构隧道施工地层变形综合可靠度分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(6): 127.  
LI Jianbin, CHEN Jian. Comprehensive reliability analysis of deformation induced by shield tunneling considering spatial variability of soil parameters[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(6): 127.
- [4] 包昊, 薛亚东, 葛彬. 考虑多层土的盾构隧道地表变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 431.  
BAO Hao, XUE Yadong, GE Bin. Surface deformation analysis of shield tunnel considering multi-layer soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 431.
- [5] 靳雪梅, 黄宏伟, 张东明. 关于土的空间变异性对盾构隧道施工影响的探讨[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 62.  
JIN Xuemei, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming. The impact of spatial variability of soils on shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 62.
- 收稿日期:2023-05-26 修回日期:2023-07-16 出版日期:2024-07-10  
Received:2023-05-26 Revised:2023-07-16 Published:2024-07-10  
• 第一作者:杨光,高级工程师,275744852@qq.com  
通信作者:甘彬霖,博士研究生,binlin\_g@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license