

复合地层下泥水盾构管片上浮规律及影响因素分析

耿大新, 廖煜祺, 胡宇琛, 蒋亚龙

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对在盾构隧道施工中经常出现的管片上浮问题, 以南昌轨道交通4号线泥水盾构过江隧道为工程依托, 通过数理统计方法对泥水盾构穿越不同地层时管片上浮量进行归纳分析, 探讨地层参数以及盾构掘进参数对管片上浮的影响规律。研究结果表明: 在全断面砂层中掘进, 管片上浮量小且上浮值变化稳定; 而当进入上软下硬地层和泥质粉砂岩层, 管片上浮量急剧变化, 尤其是在过江段中风化泥质粉砂岩中掘进, 管片上浮量最大。考虑盾构掘进参数单因素影响, 随着注浆压力、泥水压力和盾构推力的增大, 管片上浮量均会出现增大, 而掘进速度的变化对施工期间管片上浮影响较小。在掘进过程中需要结合地层特性对管片上浮影响并且对主要掘进参数进行实时调整, 在一定程度上可以实现对管片上浮的有效控制。

关键词: 地铁隧道; 泥水盾构; 管片上浮; 现场监测; 演化规律; 影响因素

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

本文引用格式: 耿大新, 廖煜祺, 胡宇琛, 等. 复合地层下泥水盾构管片上浮规律及影响因素分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 47-53.

Research on the Floating Law and Influencing Factors of Mud-Water Shield in Composite Strata

Geng Daxin, Liao Yuqi, Hu Yuchen, Jiang Yalong

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problem of segment floating in shield tunnel construction, based on the project of slurry shield cross-river tunnel of Nanchang Metro Line 4, through mathematical statistics method, this paper summarizes and analyzes the segment floating amount when slurry shield passes through different strata, and discusses the influence law of stratum parameters and shield tunneling parameters on segment floating. The research results show that: when driving in the full section sand layer, the floating amount of segment is small and the change of floating value is stable; when it enters the upper soft and lower hard stratum and argillaceous silt stratum, the floating amount of segment changes rapidly, especially in the weathered argillaceous silt stone of river crossing section, the floating amount of segment is the largest. Considering the single factor influence of shield tunneling parameters, with the increase of grouting pressure, slurry pressure and shield thrust, the segment buoyancy will increase, while the change of tunneling speed has little influence on segment floating during construction. In the process of tunneling, it is necessary to combine the influence of stratum characteristics on segment floating and adjust the main driving parameters in real time, which can effectively control segment floating to a certain extent.

Key words: metro tunnel; slurry shield; segment floating; field monitoring; evolution law; influencing factors

Citation format: GENG D X, LIAO Y Q, HU Y C, et al. Research on the floating law and influencing factors of mud-water shield in composite strata[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 47-53.

收稿日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768021); 江西省教育厅科技项目(GJJ190300); 江西省青年科学基金项目(20192BAB216031)

作者简介: 耿大新(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为隧道检测及病害整治技术。E-mail: gengdaxin@ecjtu.edu.cn。

随着我国经济建设的快速发展,城市交通压力日益增长,大力兴建地铁对于满足城市交通需求愈发重要。盾构法因其受地面干扰小、施工效率高、环境友好等显著优势^[1]而在地铁隧道施工中受到广泛应用。而在盾构掘进过程中,由于盾构壳体大于管片衬砌的外径,管片在脱出盾尾后与周围土体之间会形成一个环形间隙,如不及时进行同步注浆及二次补充充填,将诱发管片发生局部或者整体上浮,进一步导致管片错台、裂损甚至掘进轴线严重偏离等危害^[2-3]。诱发管片上浮的影响因素较多,主要包括盾构掘进参数、同步注浆效果、地层性质等^[4-7]。通过对管片上浮量进行实时监测并及时调整施工参数,在一定程度上可有效控制管片上浮,从而保证盾构隧道的整体施工质量^[8-10]。

国内学者针对管片上浮问题进行了大量研究,并取得了较为丰富的研究成果。林蔚劲等^[11]以长春地铁2号线的解放大路车站为依托工程,建立了该地铁车站的有限元模型,并且将有限元计算结果与现场实测的施工沉降数据进行对比分析;汤扬屹等^[12]以武汉地铁8号线黄浦路站—徐家棚站盾构区间段为背景,建立基于云模型与D-S证据理论的盾构施工隧道管片上浮风险评价模型;吕乾乾等^[13]分析盾构施工过程中管片上浮的诱因,得出软弱地层中管片的上浮主要是地层应力重分布产生的地基回弹力引起的;叶飞等^[14]针对施工期

盾构隧道管片衬砌的受力特性及其施工荷载对管片结构造成的影响开展研究。上述分析多为基于理论建模或者数值模拟,从力学角度推导上浮量计算公式,将设定参数代入并将计算值与现场上浮值进行比较,进而研究预测管片上浮规律。然而,目前少有学者对现场监测数据进行系统分析研究。要解决实际工程问题,仅依靠理论分析往往难以满足需求,通过对长期监测数据的分析与总结,能够更好地指导现场施工。

采用数理统计方法分析实时监测的掘进参数、地层参数与管片上浮量,得到掘进速度、同步注浆压力、泥水压力等盾构掘进参数以及地层参数对管片上浮的影响规律,为控制管片上浮提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

南昌轨道交通4号线安丰站—东新站盾构区间过江隧道总长约为3.05 km,隧道顶部覆土厚度9.9~25.8 m,地下稳定水位埋深3.07~11.2 m。该盾构区间自赣江西岸先后下穿淤泥质黏土、粉质黏土、砂砾及强风化、中风化泥质粉砂岩,过江段穿越全断面中风化泥质粉砂岩,东岸先后下穿中砂、粗砂、砂砾、中风化泥质粉砂岩,工程地质纵断面图如图1所示。

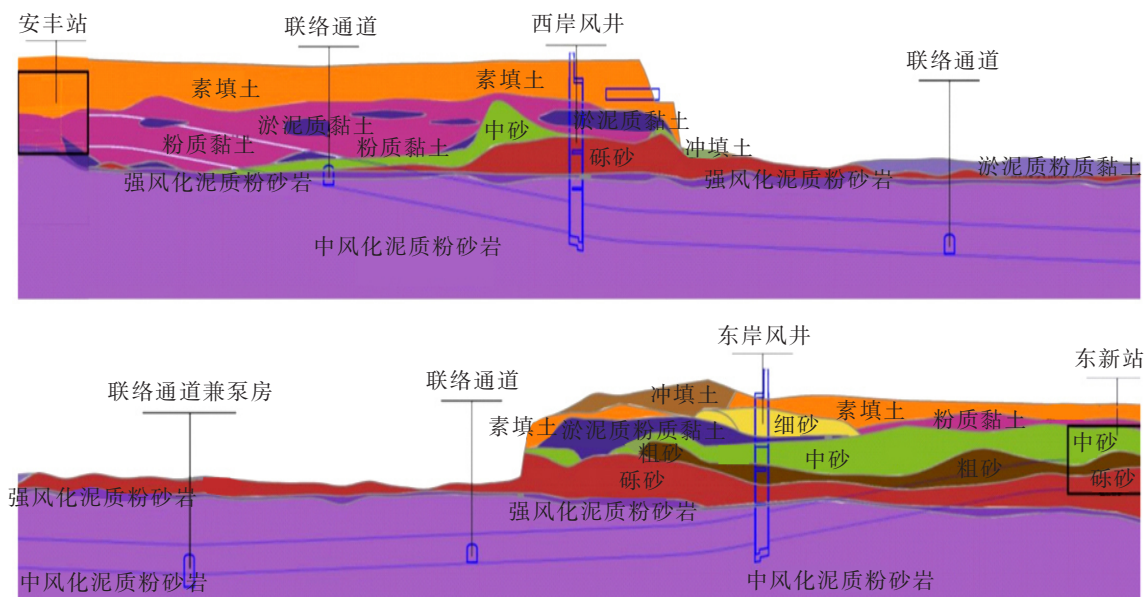


图1 工程地质纵断面图

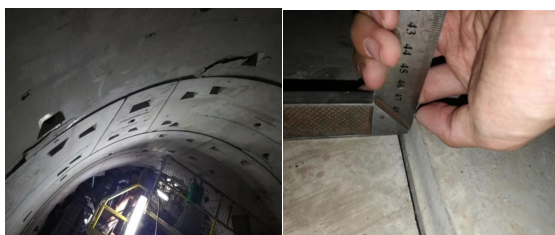
Fig.1 Vertical section of engineering geology

1.2 工程及水文地质条件

该盾构区间穿越的典型地层为:①全断面砂层;②上软下硬地层(上部砂层、下部中风化泥质粉砂岩);③全断面中风化泥质粉砂岩。对应管片里程分别为 AK13+177.158~AK13+61.504 (1~78 环)、AK13+60.002~AK12+779.152(79~269 环)及 AK12+738.598~AK12+40.168(296~761 环)。其中全断面砂层自稳性较差、透水性较强、水压较高,而中风化泥质粉砂岩为典型不透水地层,围岩强度较高、自稳性好。当盾构依次穿越上述 3 种不同性质的典型地层时,盾构机以及围岩所表现出的力学行为特征具有较大差异,对于盾构管片拼装以及盾构同步注浆均有较大影响。

1.3 管片错台破损

当管片受力不均匀时,会导致管片某点的集中荷载超过其设计极限值,进而导致管片间产生相对位移。引起管片出现破损与管片制作误差、管片拼装规范程度、盾构姿态及管片上浮等因素有关^[5]。经过现场检查发现,在 290~310 环存在少量几环管片出现错台及开裂的现象(如图 2 所示)。由于该工区管片在拼装前已经剔除破损管片,并且在管片拼装过程中严格遵守操作规范,故初步推断造成管片错台及破损极可能与盾构过江管片上浮有关,在施工工程中进行管片上浮量监测,进一步探寻导致管片错台破损的原因。



(a) 管片破裂 (b) 管片错台

图 2 管片破裂及管片错台图

Fig.2 Broken tube segment and misaligned tube segment

2 管片上浮现场监测

基于上述管片出现错台破损现象,借助人工方法以一定的监测频率对管片上浮情况进行实时监测。通过统计分析的方法对所得监测数据进行分析,针对管片上浮问题展开规律性研究,为后续掘进工作提供参数指导,从而提升工程质量。

管片上浮监测内容主要包括管片中心平面和高程测量,通过高程变化反映管片上浮的动态变化。具体监测方案:管片拼装后需测量其中心三维、旋转及俯仰度、法面、正圆度(俗称横竖鸭蛋)等数值。衬砌环片必须每工班测量 1 次,测量时每环都需测量,并测定待测环的大里程。相邻衬砌环测量时重合测定 2~3 环环片。环片平面和高程测量允许误差为 ± 10 mm。通过在衬砌当中架标尺的方法,可测出其实际存在偏差,通过选取左右特征位置观测高差可测出旋转,用吊重线球法可测其法面,利用伸缩尺可测量管片正圆度上下左右偏差。观测的偏差值应在技术规定允许范围内,测量数据应准确、完整,记录规范。

3 上浮量随地层参数演化规律分析

针对盾构在 3 种典型地层掘进时管片衬砌上浮量的演化规律展开研究,所选用的典型地层依次为:全断面砂层(1~78 环)、上软下硬地层(79~269 环)、全断面中风化泥质粉砂岩地层(296~761 环),其中从 518 环开始盾构进入赣江。对所研究的地层进行分析,在 3 种典型地层条件下掘进时管片上浮量如图 3 所示。

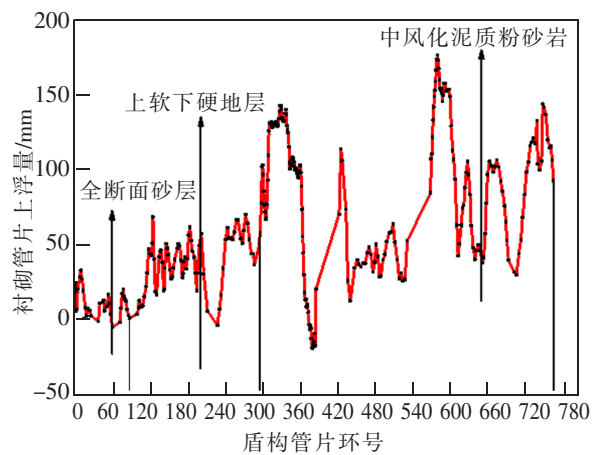


图 3 管片上浮量

Fig.3 Segment uplift

由图 3 可知,当盾构在全断面砂层掘进时,管片上浮量在 $-7\sim+31$ mm 间浮动,经计算平均上浮量为 $+10.6$ mm。在盾构掘进穿过全断面砂层并进入上软下硬地层后,在此地层中掘进时管片上浮量在 $-7\sim+69$ mm 间浮动,经计算此阶段管片平均上浮量为 $+35.4$ mm。当盾构穿过上软下硬地层进入全断

面中风化泥质粉砂岩时，管片上浮量数值普遍偏大，其中 565~607 环间管片上浮量最大值达到+176 mm，根据现场检查发现泥水盾构在该区间内掘进时隧道钢管片发生漏气，进而导致该区段内管片发生严重上浮；因此在分析时不考虑该区段内的上浮数据，经数据处理后，在中风化泥质粉砂岩中掘进时管片有效上浮量在-19~+146 mm 间浮动，经计算平均管片上浮量为+77.0 mm，其中当掘进进入 518 环后，盾构掘进至赣江水位线以下，此时经计算平均管片上浮量为+80.3 mm。

根据上述数据分析可得：管片上浮量与地层参数密切相关，当盾构在全断面砂层中掘进时，管片上浮量最小且上浮量相对更稳定；而在中风化泥质粉砂岩中掘进时，管片上浮量最大，其平均上浮量为全断面砂层中的 7 倍，最大上浮量为全断面砂层中的 4 倍；尤其在盾构进入赣江后，管片均出现上浮情况，且存在较大的增幅。当从上软下硬地层过渡到中风化泥质粉砂岩时上浮量差值会发生+15~+25 mm 的突增。

对上述现象产生的主要原因分析如下：

1) 盾尾间隙中存在的地下水、同步注浆浆液等多种液体会形成一定的浮力，对泥水盾构施工会产生影响^[16-17]。在透水性较好的饱和土层或者富水地层中掘进时，隧道整体结构均被水和注入的浆液包裹，管片处在液体环境中因而产生向上的浮力，会对管片上浮产生加剧作用。

2) 盾构机在掘进过程中，整机质量集中于刀盘和前盾上，当盾构在不同地层交界处推进时易发生“载头现象”，因而当盾构掘进到上软下硬过渡地层时，管片上浮量差值会出现+15~+25 mm 的突增。

3) 当盾构在中风化泥质粉砂岩中掘进时，中风化泥质粉砂岩较砂土和上软下硬土层强度更高，在中风化泥质粉砂岩中掘进时周围土层短时间内不易发生变形，故管片脱出盾尾后，其盾尾间隙可能在一定时间内仍然完整存在，此时围岩收敛包裹管片速度较慢，围岩与衬砌间易形成渗流跑浆通道，不利于注浆浆液的凝固填充。

4 上浮量随掘进参数演化规律分析

当管片受到的抗浮力不足以抵抗其所受的上浮力时，合力方向向上，进而发生管片上浮，当管片受到的上浮力小于其所受的抗浮力时，则发生管片

下沉现象。管片上浮力的成因一方面主要是地下水包裹作用及注浆浆液包裹引起，此类作用在施工阶段难以避免，另一方面施工扰动也是影响管片上浮力的重要因素。主要盾构施工参数包括掘进速度 v 、泥水压力 δ 、盾构总推力 N 和注浆压力 T 等。机器参数在一定程度上会为管片提供一个竖向分力，通过调节机器参数可以改变管片所受竖向合力；因此机器参数与管片上浮之间存在一定的联系，合理的机器参数有助于改善管片上浮现象，有必要探究机器参数与管片上浮之间的影响规律。

4.1 掘进速度与管片上浮量关系

基于 167~196 环的现场监测数据，考虑盾构掘进速率对盾构管片上浮的影响并进行规律分析。当盾构在 167~196 管片环号之间掘进时，除掘进速度外其它主要掘进参数较为稳定，经计算各参数平均值如表 1 所示。

掘进速度变化对管片上浮量影响情况如图 4 (蓝色散点)所示，此时的掘进速度在 13~38 mm/min 范围内变化，可见在盾构掘进施工过程中，管片上浮量与掘进速度线性关系差，掘进速度单因素对施

表 1 167~196 环间主要掘进参数平均值
Tab.1 Average values of main driving parameters between Ring 167 to 196

泥水压力/MPa	单孔注浆压力/MPa	盾构推力/t
0.186	0.30	1 691

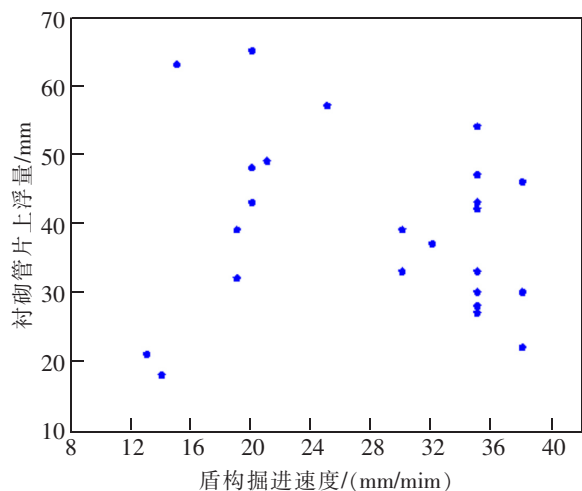


图 4 盾构掘进速度变化对管片上浮的影响

Fig.4 The influence of shield tunneling speed change on the rise of segment

工期间管片上浮量没有显著的影响规律。

4.2 同步注浆压力与管片上浮量关系

盾构在 718~761 环掘进时,注浆采用四点注浆模式,即一环管片上对应有编号为 1~4 的 4 根注浆孔,每根注浆管均保持 0.27~0.30 MPa 等值注浆压力,盾构周围同处于中风化泥质粉砂岩地层,控制泥水压力、掘进速度和盾构推力等机器参数基本不变,通过调节注浆压力盾构掘进参数,对管片上浮情况进行实时监测。在该区间段盾构掘进中,除同步注浆压力外其它主要掘进参数较为稳定,经计算各参数平均值如表 2 所示。

注浆压力对管片上浮量影响情况如图 5(蓝色散点)所示,该区段内的注浆压力在 0.25~0.27 MPa 变化,其中管片上浮量 u 与注浆压力 T 的拟合关系为

$$u=511.180 12T-15.900 62 \quad R^2=0.534 09 \quad (1)$$

由式 (1) 可知注浆压力与管片上浮量存在正相关性,即当注浆压力单因素增大时,管片上浮量增大。主要原因为:一方面随着注浆压力增大,管片周围土层将受到更大的扰动而造成后期地层沉降,容易

发生跑浆,不利于保障管片周围环形空间内被浆液充分填充;另一方面注浆压力过大也会增加对管片的压力,会造成管片动态上浮,进而导致管片上浮加剧。

4.3 泥水压力与管片上浮量关系

在 337~359 环区间内掘进时,盾构处于中风化泥质粉砂岩之中,掘进速度、注浆压力和盾构推力等机器参数保持稳定,而泥水压力处于变化状态,故可探究泥水压力参数变化对管片上浮的影响规律。在该盾构区间掘进时,除泥水压力外的其它主要掘进参数较为稳定,经计算各参数平均值如表 3 所示。

337~359 环的泥水压力在 0.15~0.156 MPa 浮动,所得注浆压力变化对管片上浮量影响情况如图 6(蓝色散点)所示,其中管片上浮量 u 与泥水压力 δ 的关系可拟合为

$$u=376.883 12\delta-469.374 03 \quad R^2=0.592 48 \quad (2)$$

由式(2)可知泥水压力与管片上浮量存在较好的正相关性,即当泥水压力增大时,管片上浮量增大。出现这一变化规律的主要原因在于:在泥水平衡盾构

表 2 718~761 环间主要掘进参数平均值

Tab.2 Average values of main driving parameters between Ring 718 to 761

泥水压力/ MPa	掘进速度/ (mm/min)	盾构推力/t
0.15	30.2	946

表 3 337~359 环间主要掘进参数平均值

Tab.3 Average values of main driving parameters between Ring 337 to 359

单孔注浆压力/ MPa	掘进速度/ (mm/min)	盾构推力/t
0.26	26.5	1 046

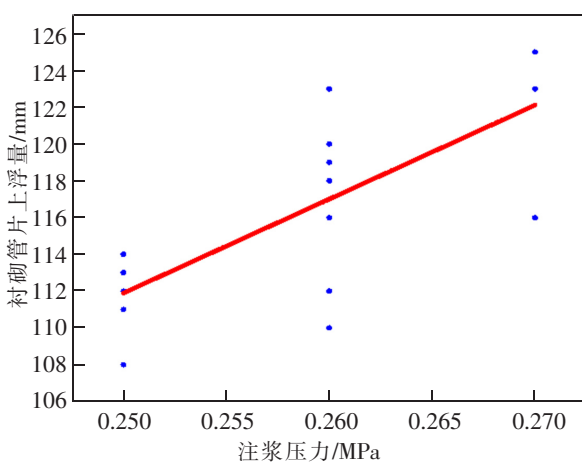


图 5 注浆压力变化对管片上浮的影响

Fig.5 Influence of the grouting pressure changes on the rise of the segment

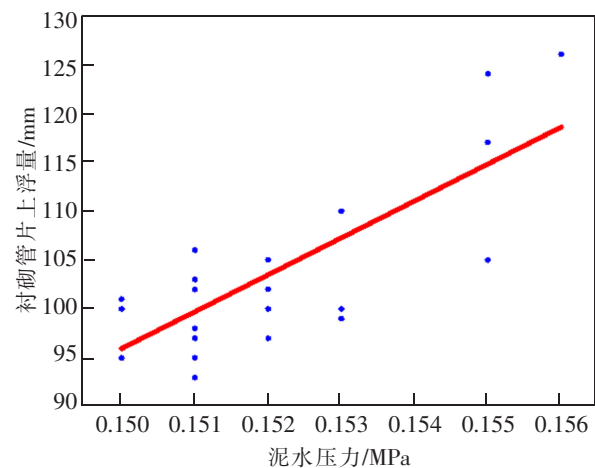


图 6 泥水压力变化对管片上浮的影响

Fig.6 Influence of muddy water pressure changes on the uplift of pipe segments

掘进过程中,通过泥水仓的泥水压力与切口处的水土压力形成平衡,从而保证盾构掌子面前方与上部土体稳定;当泥水压力增大时,泥水极易沿着与围岩间的间隙向盾构后方流窜,一方面由于冲刷作用影响同步注浆效果,另一方面泥水充填盾尾下部间隙,进而产生较大的浮力作用,造成管片上浮。

4.4 盾构推力与管片上浮量关系

对 238~292 环间的监测数据展开分析,该区间内盾构掘进经过上软下硬地层和强风化泥质粉砂岩地层,考虑到掘进速度、泥水压力和注浆压力维持稳定状态,因而该区间段仅考虑盾构推力对管片上浮的影响。除盾构推力外其它主要掘进参数平均值如表 4 所示。

盾构在该区段内的掘进时,盾构推力在 1 500~1 850 t 变化,所得盾构推力对管片上浮量影响情况如图 7(蓝色散点)所示,其中管片上浮量 u 与盾构推力 N 的拟合关系式为

$$u=0.074\ 38N-69.846\ 88\quad R^2=0.620\ 88\quad (3)$$

由式(3)可知盾构推力与管片上浮量存在一定的正

表 4 238~292 环间主要掘进参数平均值
Tab.4 Average values of main driving parameters between Ring 238 to 292

单孔注浆压力/ MPa	掘进速度/ (mm/min)	泥水压力/ MPa
0.29	17	0.190

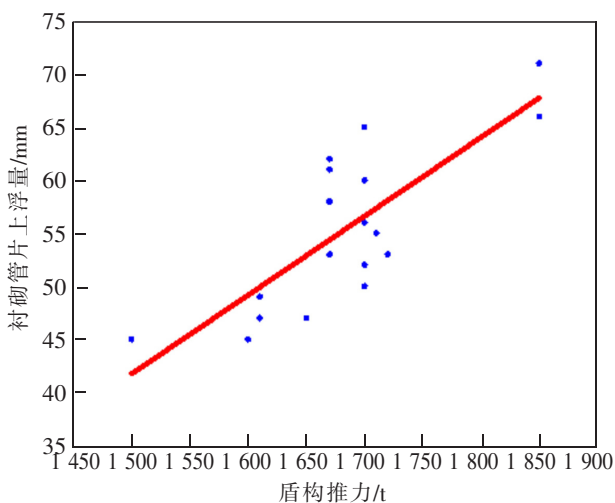


图 7 盾构推力变化对管片上浮的影响

Fig.7 The influence of shield thrust changes on the floating of segment

相关性,即当盾构推力增大时,管片上浮量也会增大。主要原因在于:盾构推进系统采用 30 个缸径为 220 mm 的千斤顶油缸,千斤顶油缸布置形式为上下两端均分布 8 个油缸,左右两侧均分布 7 个油缸,盾构推力等于推进油缸提供的推力总和,区间隧道在设计时一般设计为“V”字型,隧道在竖向存在一定的纵向坡度,壁后注入的浆液达到初凝后千斤顶反力的残余应力仍会提供给管片一定的竖向分力,较大的盾构推力会对管片带来更大的扰动,进而加剧管片上浮。

5 结论

以南昌轨道交通 4 号线过江隧道工程为依托,基于管片上浮这一典型问题,对施工过程中管片上浮量进行监测,并对管片上浮量与地层性质、主要掘进参数之间的相互关系展开研究,得出结论如下:

1) 管片上浮量与所处地层有关。盾构穿越岩质地层时,由于围岩强度较高,周围土层在短时间内不易发生变形且盾尾间隙在一定时间内仍完整存在,不利于注浆浆液的凝固填充,当盾构在中风化泥质粉砂岩中掘进时,管片上浮量最大,最大值达到+146 mm;而当盾构在全断面砂层中掘进时,管片上浮量最小,此时最大值仅为+31 mm;盾构掘进过程中穿越不同地层交界处时易发生“载头现象”,当从上软下硬地层过渡到中风化泥质粉砂岩时,上浮量差值会发生+15~+25 mm 突增。盾构在相同地层中掘进时,管片上浮情况受盾构所处液体环境影响,当盾构掘进至赣江水位线以下后管片的平均上浮量相比于水位线之上时高 3.3 mm。

2) 管片上浮量与盾构掘进参数有关。在各项掘进参数中,注浆压力、泥水压力和盾构推力均对管片上浮存在加剧作用,即随着注浆压力、泥水压力和盾构推力的增大,管片上浮量均会增大,而掘进速度单因素对管片上浮不具明显规律。

3) 在盾构掘进过程中,管片上浮问题是由多种因素综合影响造成,而地层参数、盾构掘进参数为主要影响因素。尤其在长距离过江盾构隧道工程中,地质条件往往复杂多变;在掘进过程中需要结合地层特性对管片上浮的影响,并且对主要掘进参数进行实时调整,在一定程度上可以实现对管片上浮的有效控制。

参考文献:

- [1] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.
- [2] 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.
- [3] 陈仁朋,刘源,刘声向,等. 盾构隧道管片施工期上浮特性[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(6):1068-1074.
- [4] 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.
- [5] 刘畅,周顺华,季昌,等. 类矩形盾构隧道施工期上浮影响因素分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(1):94-99.
- [6] 刘洪啟. 某盾构区间富水硬岩段管片上浮控制措施及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [7] 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(S1):3464-3474.
- [8] 杨超. 冲刷线下的杭州越江隧道抗浮分析[J]. 华东交通大学学报,2017,34(2):10-19.
- [9] 黄式浩,狄宏规,王友文,等. 管片厚度对大直径盾构隧道受力及变形的影响[J]. 华东交通大学学报,2020,37(1):15-22.
- [10] MA W,PENG H,YANG C. Construction parameters control of shield tunnel underneath praversing existing dual shield tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018,53(1):119-127.
- [11] 林蔚劲,张孟喜,肖晓春,等. 考虑浆液黏滞特性的大直径盾构隧道管片上浮机理分析[J]. 中外公路,2019,39(1):164-169.
- [12] 汤扬屹,吴贤国,陈虹宇,等. 基于云模型与D-S证据理论的盾构施工隧道管片上浮风险评价[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(12):2011-2019.
- [13] 吕乾乾,周建军,杨振兴,等. 基于地基回弹因素的盾构隧道管片上浮预测[J]. 隧道建设(中英文),2017,37(A02):87-93.
- [14] 叶飞,何川,王士民. 盾构隧道施工期管片受力特性及其影响分析[J]. 岩土力学,2011,32(6):1801-1807.
- [15] 王选祥. 盾构隧道管片上浮机理及控制技术[J]. 铁道建筑,2009(5):52-55.
- [16] 董赛帅,杨平,姜春阳,等. 盾构隧道管片上浮机理与控制分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(1):49-54.
- [17] 陈自海. 软土地层中盾构施工参数对管片上浮的影响研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2013.