

盾构隧道施工期管片上浮机理数值模拟研究

傅鹤林¹, 史越¹, 陈俐光², 于艺林², 陈峰²

(1.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2.中建市政工程有限公司)

摘要: 近年来,随着各类盾构隧道的大规模兴建,管片上浮始终是施工中迫切需要解决的一大难题,为此,国内外许多学者对管片上浮机理及其处置办法进行了深入研究,形成了不少科研成果,在生产实践中也得到了良好的应用。该文借助数值分析手段,依托衡阳二环东路合江套湘江隧道工程,对盾构隧道施工期渗流场、地应力场、隧道埋深、地下水位、泥水和注浆压力等因素进行分析,明确了各因素对隧道施工的影响程度和作用机理。

关键词: 盾构隧道; 管片上浮机理; 数值模拟

1 引言

在盾构管片脱离盾尾后,发生的局部上浮或整体上浮现象,称之为管片上浮。管片上浮会引发其局部受力不均产生破损裂缝或错台,甚至会产生掘进轴线偏离设计轴线等问题。

近年来,依托具体工程背景,原华、张君、段坚堤等对管片上浮的机理及控制方法进行了深入研究,渗流—应力耦合效应、注浆压力和荷载等因素得到了量化分析,相关科研成果在工程实际中也得到了很好的应用,取得了可观的经济与社会效益。

衡阳市二环东路合江套湘江隧道工程为设计全长2.27 km的双向四车道城市快速路。线路起于石鼓区来雁新城规划中的北二环路和五一路交叉口,穿越后街路、滨江北路、湘江和规划中的湘江东路后,止于珠晖区京广铁路上行线西北侧,如图1所示。

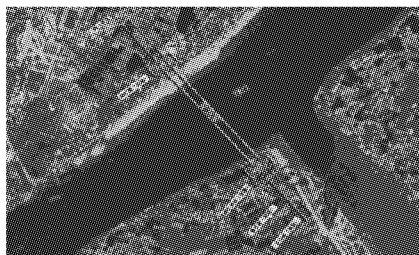


图1 工程位置示意图

隧道工区线路分东岸接线道路、东岸隧道明挖敞

口段、东岸隧道明挖暗埋段、盾构段、西岸隧道明挖暗埋段、西岸隧道明挖敞口段和西岸接线道路等,其中暗埋段隧道断面图如图2所示。暗埋过湘江段分南北两线采用盾构法施工,其中北线长923 m,南线长921.31 m,北线纵断面如图3所示。

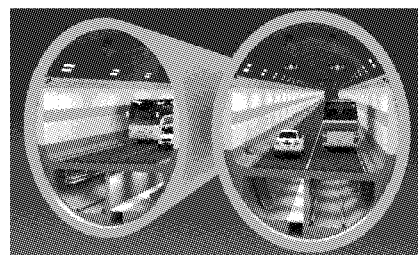


图2 盾构段隧道断面

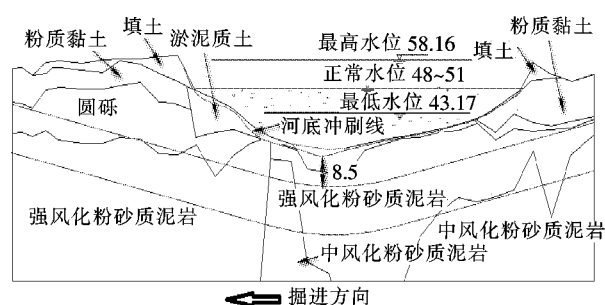


图3 隧道北线纵断面图(单位:m)

隧道管片采用C50和P12高强防渗混凝土预制:内径10.3 m,外径11.3 m,环片厚度500 mm,环片宽度2 m,纵向最大楔形量40 mm,每环由9块管片组成,最后采用双面楔形通用楔形管片封顶。隧道管片

收稿日期:2018-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51578550,51538009);中建股份科技研发计划项目(编号:CSCEC-2016-Z-24)

作者简介:傅鹤林,男,教授,博士生导师.E-mail: fu.h.l@csu.edu.cn

拼装模式如图 4 所示。

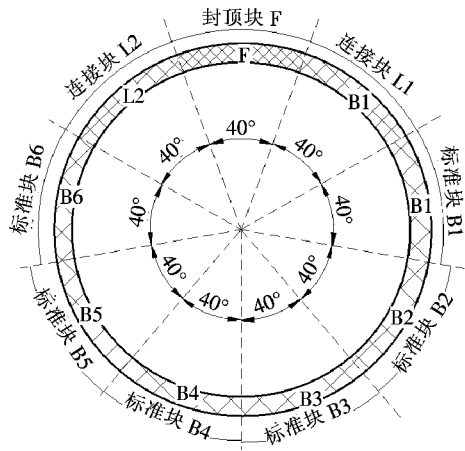


图 4 隧道管片拼装示意图

因此,弄清该工程管片上浮机理并对其进行有效控制是项目成败的关键。该文采用模拟软件对盾构掘进过程进行分析,重点研究渗流场、地应力场、隧道埋深、地下水位、泥水和注浆压力等因素对管片上浮的影响效应,明确各因素的影响程度和作用机理,力求为今后盾构隧道的设计施工提供可靠技术对策。

2 分析模型建立

2.1 基本假设

为了便于结构模型的计算和各因素的对比分析,

对模型进行一些简化处理:① 将管片每环六片简化成一个整体;② 因盾构穿越地层均为粉砂质泥岩,所以将周围土体全部简化为该土质;③ 管片接头视为平面;④ 开挖过程为无坡度开挖;⑤ 掌子面泥水压力为均匀大小。

2.2 建立有限元模型

为单独研究各因素对管片上浮的影响,对一条隧道的开挖过程进行模拟。模型长 200 m,宽 200 m,高 55 m,覆土厚度 5 m,洞外径 11.3 m,内径 10.3 m,等代层外径 11.65 m,模型边界均满足 3~5 倍洞径。

土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,土体、等代层和管片共划分为 46 280 个八节点六面体实体单元,如图 5 所示。

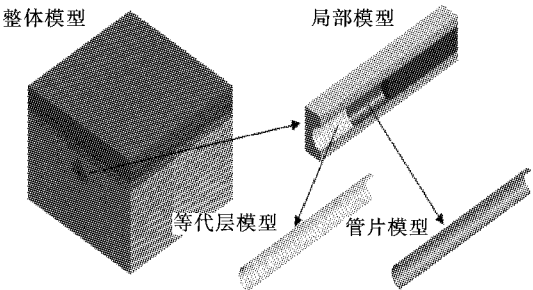


图 5 有限元分析模型图

设定左右界面约束 x 方向位移,前后界面约束 y 方向的位移,地面约束 x 、 y 、 z 3 个方向的位移,河床土层及材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 河床土层及材料物理力学参数

材料	弹性模量/ MPa	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	厚度/ m	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
强风化粉砂质泥岩	35	22	0.25	—	40	28	40
管片	3×10^4	25	0.20	0.50	—	—	—
等代层	50	24	0.30	0.14	100	35	—

2.3 模拟开挖过程

隧道开挖过程中,考虑注浆力、上浮力和掌子面推力的影响。注浆力分为浆液对围岩的压力和浆液对管片的压力,上浮力为管片所受的均布荷载,泥水压力为掌子面所受的均布压力,如图 6~9 所示。

每环开挖 2 m,100 环管片的开挖过程为:Step0 自重平衡;Step1 钝化第 1 环土,激活第 1 环管片和第 1 环等代层,对掌子面施加泥水压力,同时第 1 环管片外施加约束;Step2 钝化第 2 环土,激活第 1 环管片所受的注浆力和上浮力,对掌子面施加泥水压力;

Step3 钝化第 3 环土,激活第 2 环管片和等代层,激活第 2 环管片所受注浆力和上浮力,对掌子面施加泥水压力,并撤除 Step2 上所施加的力;重复 Step3,直至隧道开挖完成。

加入渗流场耦合分析时;Step0 初始水位平衡;Step1 自重平衡;Step2 选择渗流模式,钝化第 1 环土,并在第 1 环掌子面和围岩处激活水头;Step3 关闭渗流模式,选择应力模式,激活第 1 环管片和第 1 环等代层,同时对第 1 环管片外施加刚体位移约束;Step4 选择渗流模式,钝化第 2 环土及 Step0 施加的水头,激活

第 2 环周围处围岩和掌子面水头; Step5 关闭渗流模式, 选择应力模式, 激活第 2 环管片及对第 2 环管片的注浆力; 重复 Step4 和 Step5 直至开挖完成。

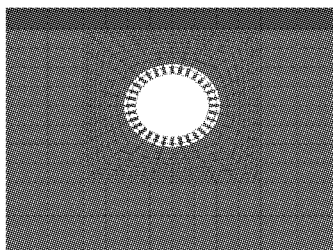


图 6 围岩注浆压力图

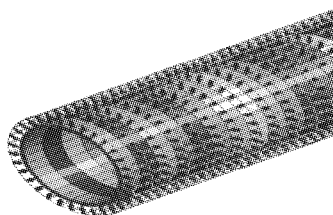


图 7 管片所受的注浆压力图

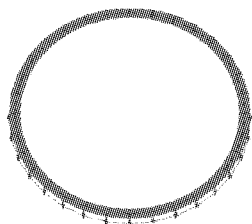


图 8 管片所受的上浮力图

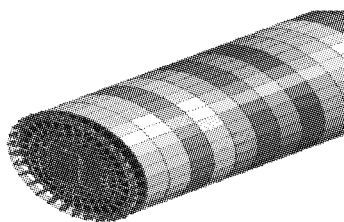


图 9 掌子面所受的泥水压力

2.4 各影响因素取值

(1) 注浆压力。工程采用同步注浆方式, 可达到及时填充盾尾建筑空隙、增强隧道的防水能力和为管片提供早期稳定的作用。但在注浆过程中应根据所处位置随时调节注浆压力大小, 一般注浆压力等于管片外水土压力之和。

由于同步注浆浆体由液态逐渐硬化成固态, 液态浆体难以模拟, 该文采用等效均布力来模拟盾尾同步注浆: 设立注浆层为等代层, 在刚拼装好的管片外圆面上施加均布压力, 方向指向隧道中心, 同时在隧道洞室

单元面上施加均布压力, 方向背离隧道中心。

此工程中浆液胶凝时间为 3~6 h, 根据地层条件和掘进速度, 通过加入促凝剂及变更配比来调整胶凝时间; 浆液凝固后强度不小于 0.2 MPa, 弹性模量 0.9 MPa (相当于软质岩层无侧限抗压强度), 28 d 强度不小于 25 MPa, 弹性模量 50 MPa (略大于强风化岩天然抗压强度)。

(2) 泥水压力。泥水压力即为盾构为维持掌子面稳定而施加的力, 理论上泥水压力应等于侧向水土压力之和, 但实际中很难精确实现, 因此往往通过预压来弥补理论计算与实际土压力之间的误差。

预压是指考虑地下水压和土压的设定误差, 根据经验确定的压力, 通常取 20~30 kPa。泥水压力的理论计算公式为:

$$\sigma_x = \sum k_i \gamma'_i H_i + \sum \gamma_w H_i + P \quad (1)$$

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (2)$$

式中: σ_x 为侧向水土压力; k_i 为侧向土压力系数; H_i 为各土层厚度; γ' 为土的干重度; γ 为土的饱和重度; γ_w 为水的重度; P 为预压值, 根据中轴线上自重应力平衡计算, 模型中取为 0.27 MPa。

(3) 上浮力。不透水的隧道管片被浆液包围, 会受到浮力的作用。模型中设置均布荷载代表注浆力, 此时浮力以均布荷载施加在管片下半周, 方向与重力方向相反, 大小根据浮力计算公式取值, 该文中浮力大小为:

$$F_{\text{浮}} = \frac{\pi R^2 \gamma}{2R} = \frac{3.14 \times 5.65^2 \times 19.6}{2 \times 5.65} = 0.17 \text{ MPa}。$$

3 数值分析结果

选取模型内 4 个位置作为研究点, 如图 10 所示, 进行渗流—应力耦合模型和应力模型的对比分析, 研究埋深、地下水位、泥水压力和注浆压力等因素对管片上浮的影响。

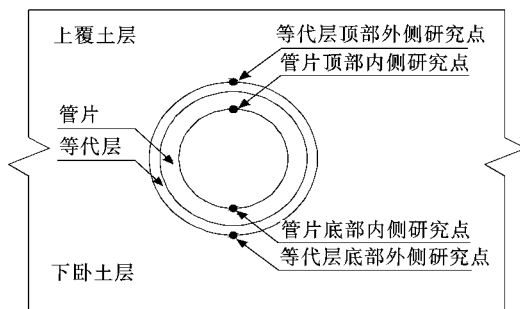


图 10 4 个主要研究点的位置

3.1 渗流—应力耦合模型

为分析渗流场的作用效应,从地表竖向位移和管片底部上浮量两个方面进行对比,论证渗流—应力耦合模型建立的合理性和必要性,结果如图 11、12 所示。

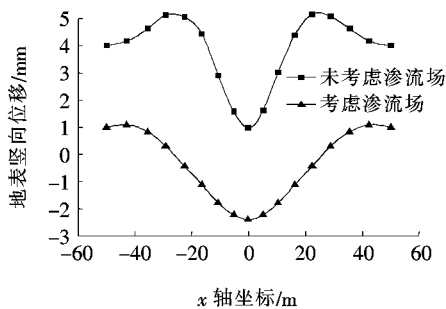


图 11 模型中点(纵深 100 m 处)地表竖向位移

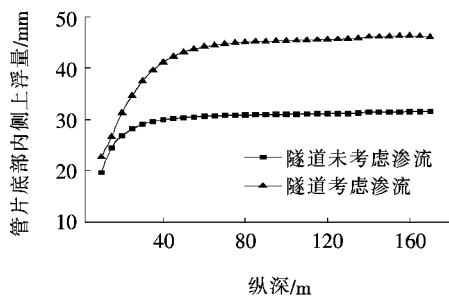


图 12 管片底部内侧上浮量

将地层开挖和注浆对土体的扰动效应叠加,从图 11 可看出:考虑渗流后地表竖向位移由“双拱”形变为“单拱”形,大部分区域竖向位移由上浮变为沉降,表明渗流场的存在削弱或抵消了地层注浆引起地表隆起,计算结果也与现场实际趋势吻合。从图 12 可看出:两种工况下管片的上浮量趋势均为先增后稳定,但渗流会对管片底部产生浮力作用,使管片上浮量增大。

3.2 隧道埋深

工程中,管片埋深即拱顶上方覆土厚度,最小只有 5~8 m,最大约为 30 m。为研究埋深对管片上浮的影响,选取埋深为 5、10、15 和 20 m 共 4 种工况分别计算,泥水压力和注浆压力均为 0.2 MPa,地下水位 55 m。管片底部内侧上浮量曲线、管片顶部内侧上浮量曲线、管片顶部和底部最大上浮量对比曲线和开挖过程中模型中点(纵深 100 m 处)位移曲线如图 13~16 所示,最大上浮量如表 2 所示。

由图 13~16 和表 2 可知:① 管片底部内侧上浮量随埋深增加而增大,管片顶部内侧上浮量随埋深增加而降低且曲线斜率更大,埋深敏感性更强;② 等代层底部和管片底部上浮量变化规律相似;③ 等代

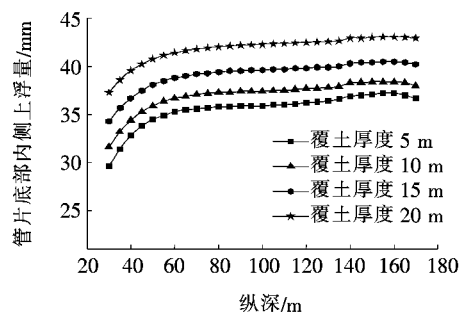


图 13 管片底部内侧上浮量

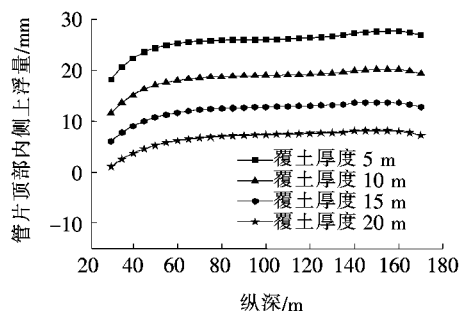


图 14 管片顶部内侧上浮量

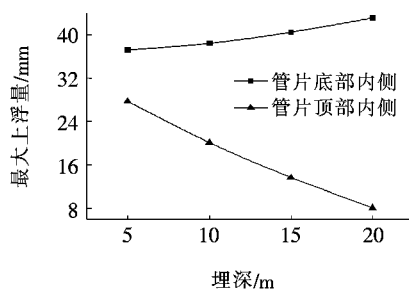


图 15 管片最大上浮量

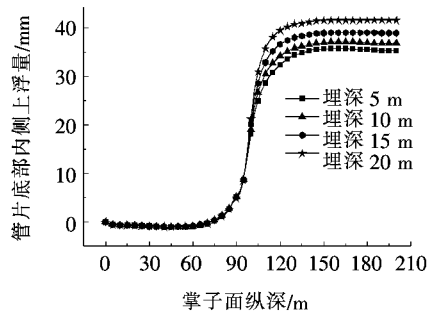


图 16 开挖过程中模型中点(纵深 100 m 处)位移曲线图

层底部外侧上浮量略大于管片底部内侧上浮量,等代层顶部外侧上浮量略小于管片顶部外侧上浮量。

3.3 地下水位

越江隧道开挖过程中渗流是不可避免的,水位的高低对管片上浮也会有一定的影响。为研究水位对管片上浮的影响,选取水位为 55、60、65 和 70 m 共 4 种

表 2 不同工况下 4 个研究点最大上浮量

埋深/ m	最大上浮量/mm			
	管片底部 部内侧	管片顶部 部内侧	等代层底 部外侧	等代层顶 部外侧
5	37.19	27.72	37.72	27.66
10	38.41	20.14	39.18	19.84
15	40.45	13.72	42.07	13.19
20	43.08	8.10	49.80	7.35

工况分别计算,泥水压力和注浆压力均为 0.2 MPa,隧道埋深 20 m。

管片底部内侧上浮量曲线和管片顶部内侧上浮量曲线如图 17、18 所示,管片最大上浮量如表 3 所示。

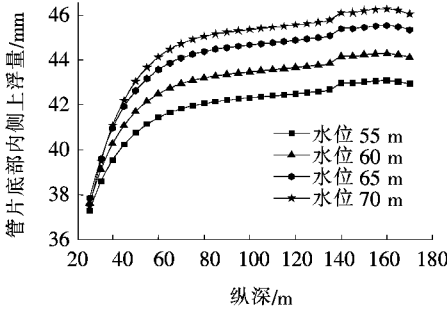


图 17 管片底部内侧上浮量

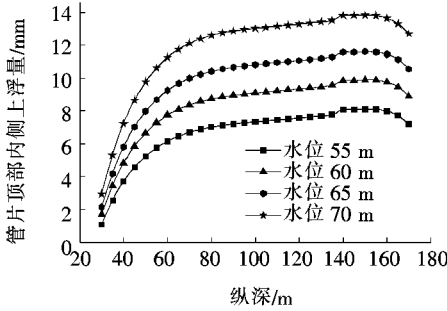


图 18 管片顶部内侧上浮量

表 3 4 种工况管片最大上浮量

地下水位/ m	最大上浮量/mm	
	管片底部	管片顶部
55	43.08	8.09
60	44.29	9.88
65	45.53	11.61
70	46.27	13.84

由图 17、18 和表 3 可知:管片顶部和底部内侧上浮量均随水位的上升而增大。开挖面处水压基本为零,四周因存在水头差而产生渗流,渗流过程中水对土

体产生应力作用,所以土体有局部上浮的趋势。

3.4 泥水压力

为研究泥水压力对管片上浮的影响,选取压力为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 MPa 共 4 种工况分别计算,注浆压力为 0.2 MPa,隧道埋深 20 m,地下水位 55 m。

管片底部内侧上浮量曲线和管片顶部内侧上浮量曲线如图 19、20 所示。

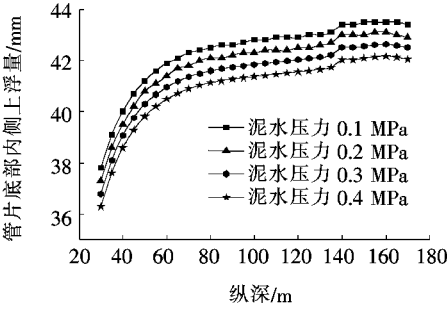


图 19 管片底部内侧上浮量

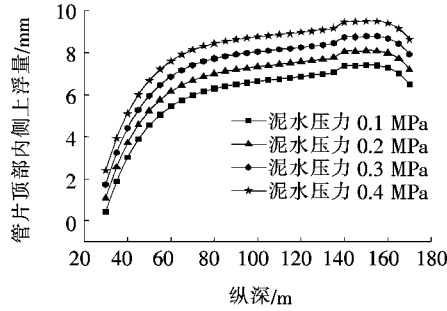


图 20 管片顶部内侧上浮量

由图 19、20 可知:① 随开挖纵深的增加,管片上浮量逐渐增大至稳定;② 随泥水压力的增大,管片底部内侧上浮量减小,管片顶部内侧上浮量增大。

3.5 注浆压力

在施工过程中采用盾构机自带的 3 台双活塞注浆泵在盾尾分 6 路同步注浆,注浆压力实测值为 0.2~0.4 MPa。

在模拟过程中采用均布压力代替注浆压力,撤掉注浆压力后用等代层代替凝固后的注浆体。选取压力为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 MPa 共 4 种工况分别计算,泥水压力为 0.2 MPa,隧道埋深 20 m,地下水位 55 m。

管片底部内侧上浮量曲线和管片顶部内侧上浮量曲线如图 21、22 所示。

由图 21、22 可知:① 随着注浆压力的增大,管片上浮量逐渐增大,但增幅并不明显;② 刚安装的管片因受到注浆压力的作用,和土体之间会有均匀的压力,土体受到挤压会向外扩散,下方土体因挤土作用会向

上微微隆起,从而造成底部管片上浮量略增;③管片顶部土体因注浆力的作用,坍塌量减小,对管片的挤压变小,使其相对上浮量增大。

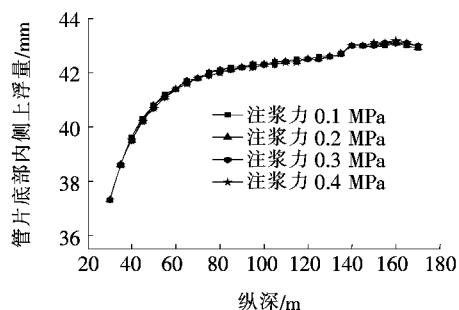


图 21 管片底部内侧上浮量

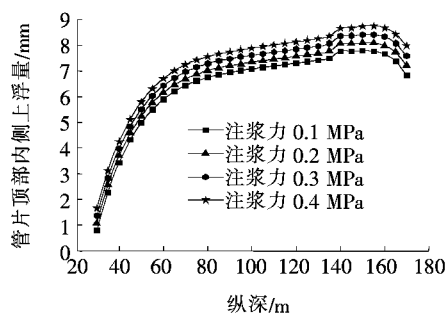


图 22 管片顶部内侧上浮量

4 结论

以衡阳二环东路合江套湘江隧道为工程背景,采用均布环向注浆力和等代层模拟盾尾浆液变化的过程,论证了渗流—应力耦合模型的可靠性,分析了隧道埋深、地下水位、泥水压力及注浆压力等因素对管片上浮的影响规律,得出以下结论:

(1) 模型加入渗流场后,地表竖向位移曲线由“双拱”形变为“单拱”形,更加符合现场实际,表明在水下隧道建模分析中,渗流—应力耦合模型更为准确。

(2) 管片上浮量随隧道埋深的增大而增大,管片顶部内侧上浮量相对于管片底部内侧上浮量对埋深因素的敏感性更强。

(3) 地下水位对管片的上浮量影响较大,地下水位越高,管片上浮量越大。

(4) 泥水压力对管片上浮量有一定的影响,但影响并不显著,随着泥水压力的增大,管片底部内侧上浮量减小,管片顶部内侧上浮量增大。

(5) 注浆压力对管片上浮量的影响并不显著,随着注浆压力的增大,管片上浮量逐渐增大。

参考文献:

- [1] 叶飞,朱合华,丁文其.考虑管片环间接头抗浮效应的盾构隧道抗浮计算与控制分析[J].中国公路学报,2008(3).
- [2] J.N.Shirlaw, D.P.Richards, P.Ramond, et al. Recent Experience in Automatic Tail Void Grouting with Soft Ground Tunnel Boring Machines[J].Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(4-5): 446.
- [3] 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(4).
- [4] 王远祥.盾构隧道管片上浮机理及控制技术[J].铁道建筑,2009(5).
- [5] 原华,张庆贺,胡向东,等.大直径越江盾构隧道各向异性渗流应力耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2008(10).
- [6] 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(10).
- [7] 段坚堤,傅鹤林,张敬宇,等.浅埋盾构隧道管片设计荷载的确定[J].铁道科学与工程学报,2014(2).
- [8] 孙波,傅鹤林,张加兵.基于修正惯用法的水下盾构管片的内力分析[J].铁道科学与工程学报,2016(5).
- [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(S1).
- [10] 曾学艺,李垚,彭斌.大直径盾构隧道穿越粉细砂层注浆加固预处理研究[J].中外公路,2017(2).
- [11] 毕景佩.堆土导致的地铁盾构隧道病害及处治对策分析[J].中外公路,2017(1).