

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.11.056

盾构隧道通缝拼装管片上浮的理论分析

张 强

(成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 盾构隧道拼装管片的上浮一直是盾构隧道施工中的技术难题。随着盾构法隧道施工技术的发展和规范的要求,管片上浮引起的拼装困难和防水隐患等问题对施工和运营的影响日益凸显,并直接影响到工程质量。管片上浮主要是管片在施工开挖的复杂的因素作用下,失去抗浮能力导致的。至今的研究表明,导致盾构隧道管片发生上浮的因素很多,如地质水文条件、卸土、注浆不均及盾构姿态控制等。以上海轨道交通 2 号线西延段盾构隧道工程为背景,通过对管片上浮的理论研究,得出了描述管片上浮与相关因素的定量关系,为消除盾构隧道管片在推进过程中的上浮、确保施工精度、提高工程质量提供了理论依据。

关键词: 盾构隧道;管片;上浮;通缝拼装;理论分析

中图分类号: U451

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0235-03

0 引 言

盾构隧道拼装管片的上浮一直是盾构隧道施工中的技术难题。规范规定,管片拼装后,隧道轴线的高程和水平位移不得超过 $\pm 50 \text{ mm}$ ^[1]。导致盾构隧道管片发生上浮的因素很多,如工程地质、水文地质、衬背注浆质量、盾构姿态等^[2]。由于盾构机的开挖直径大于管片的直径,并且盾构机的蛇形推进,在管片周围产生的超挖为上浮提供了外在条件。管片脱离盾尾之后受到周围浆液(或地下水)的浮力大于自身重力作用,并且由于注浆工艺和浆液质量使得浆液的初凝时间较长^[2-3],就成为了上浮的内在原因。脱离盾尾的管片就在上述若干条件的共同作用下在一定时间内产生竖向位移。该位移的方向基本都向上,故被称为管片的上浮(在一些特殊情况下也可能出现向下的位移,如发生漏浆等)。

目前国内外针对管片上浮的研究还处于起步阶段。本文以上海轨道交通 2 号线西延段盾构隧道工程为背景,通过对管片上浮的理论研究,得出了描述管片上浮与相关因素的定量关系,为消除盾构隧道管片在推进过程中的上浮、确保施工精度、提高工程质量提供了理论依据。

1 工程概况与地质条件分析

1.1 工程概况

上海轨道交通 2 号线西延伸工程(VI 标)包括出

入段线区间盾构隧道(含一个旁通道和一个盾构工作井)、暗埋段和敞开段。本标段虹桥临空园站-北翟路工作井区间隧道工程,入段线全长 1 257.937 m,出段线全长 1 241.55 m。隧道最大覆土厚度约为 15.5 m,隧道水平曲线最小转弯半径为 399.851 m,最大纵坡为 37‰。隧道外径为 6 200 mm,内径为 5 500 mm,衬砌为环宽 1 200 mm 的通缝管片,环纵向均设有凹凸槽。管片采用通缝拼装,M30 双头直螺栓联接;环缝及纵缝间防水材料采用三元乙丙弹性密封垫。开挖设备采用小松 TM-634 PSX 土压平衡式盾构机,注浆使用的浆液配比膨润土:水:粉煤灰:砂为 1:5:3.4:7。在施工过程中,管片受到现场地质水文,以及开挖和浮力的影响而产生上浮。

1.2 水文地质条件

本区段隧道埋深中间深,两端浅,隧道顶板标高 $-1.361 \sim -11.129 \text{ m}$ 。隧道所在场地地层分布较稳定,分层界限明显,土层起伏变化不大。整个区间隧道穿越土层主要为软土层,包括③₁层灰色淤泥质粉质黏土、③₂层灰色黏质粉土、④层灰色淤泥质黏土、⑤₁₋₁层灰色黏土层。除③₂层透水性好外,其余土层呈流塑状态,尚均匀。第 4 层灰色淤泥质黏土是盾构施工的主要土层,但由于其压缩性高、含水量高、孔隙比大、强度低、稳定时间长,在动力作用下极易产生流变、触变现象。表 1 中列出了本文模拟的所有土体的参数情况。

本场地浅部地下水属潜水类型,补给来源主要为大气降水与地表径流,水位动态为气象型,地下水埋深取 0.5~0.7 m。本标段施工区域微承压含水层分布

收稿日期: 2022-12-05

作者简介: 张强(1981—),男,硕士,高级工程师,从事岩土工程设计研究工作。

表1 土层参数

土层名称 (由上 至下)	土层厚 度 /m	压缩模量 / MPa	泊松 比	密度 / (kg·m ⁻³)	黏聚力 / kPa	内摩擦 角 / (°)
褐黄色粉 质黏土	1.42	6.09	0.35	18.5 × 10 ²	21	15.5
灰色淤泥 质黏土	3.81	3.07	0.35	17.5 × 10 ²	15	13.5
灰色粉质 黏土	1.95	5.40	0.35	18.5 × 10 ²	10	34
灰色淤泥 质黏土	11.40	2.68	0.35	17.1 × 10 ²	15	11
灰色黏土	4.59	2.52	0.35	17.3 × 10 ²	16	12
灰色粉质 黏土	4.17	3.99	0.35	17.8 × 10 ²	14	19
灰色 粉细砂	7.12	8.60	0.30	18.2 × 10 ²	4	28

于⑤₂粉细砂层中。

2 管片上浮的理论分析

2.1 假设条件

(1) 由于上浮研究仅限于整环管片的竖向位移,故不考虑水平方向的位移。

(2) 不考虑块体间的相互作用,将一环管片作为一个整体的刚体考虑。

(3) 忽略管片间的纵向影响,将其简化成平面问题。

(4) 由于管片上浮速率很小,近似将管片所受力系作为平衡力系考虑。

(5) 因为管片失去抗浮能力,将向上产生一定的位移,所以忽略管片下部地基反力的作用。

2.2 管片受力分析

管片的上浮主要是由于管片所处的条件使其失去抗浮能力而产生的。影响管片上浮的因素主要包括土压力、重力、浮力和黏滞阻力等。图1中显示了管片的受力情况。

2.3 管片上浮理论推导

由于管片的上浮是在较长的一段时间内发生和发展的,并且这段时间内管片的上浮速率和上浮加速度都较小,所以在理论分析中可以将管片所受的力系简化为一个平衡力系来考虑,即管片处于一个平衡状态。那么可以运用理论力学的方法对管片的上浮进行分析^[4-5]。

$$\sum F=0 \quad (1)$$

由竖直方向管片受力的关系可以得到管片有如

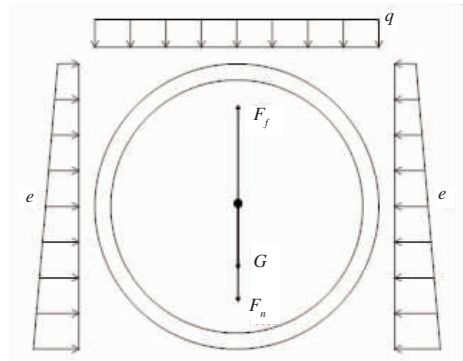


图1 管片受力图示

下关系:

$$F_f - F_t - G - F_n = 0 \quad (2)$$

式中: F_n 为浆液对管片的黏滞阻力作用,它与浆液的黏性系数、管片的上浮速度和管片的几何形状等条件有关。

$$F_n = \tau A \sin \theta = 2 \cdot \int_0^\pi \mu \dot{s} \cdot \sin \theta \cdot r \cdot b \sin \theta d\theta = \mu \dot{s} r b \pi$$

将浆液的黏性系数随时间的关系用一个二次多项式来拟和:

$$\mu = k_1 + k_2 \cdot t + k_3 \cdot t^2$$

所以液对管片的黏滞阻力公式变化为:

$$F_n = (k_1 + k_2 \cdot t + k_3 \cdot t^2) \cdot \dot{s} r b \pi$$

由于土体具有流变性质,所以作用在管片上的土压力会随时间而变化。根据这种特性将管片上部的土体流变逐渐施加在管片的土压力简化为线性关系:

$$F_t = k_t \cdot t$$

综合上述关系,将 F_t 和 F 代入式(2)可以得到管片的受力平衡方程:

$$F_f - G - k_t \cdot t - (k_1 + k_2 \cdot t + k_3 \cdot t^2) \cdot \dot{s} r b \pi = 0 \quad (3)$$

可以看出,经过前面的推理得到了一个关于管片上浮的一个微分方程,求解该微分方程即可得到管片上浮结果。所以将式(3)移项得:

$$F_f - G - k_t \cdot t = (k_1 + k_2 \cdot t + k_3 \cdot t^2) \cdot r b \pi \frac{ds}{dt}$$

根据边界条件,解微分方程得:

$$s = \frac{1}{r b \pi} \left\{ \left[2(F_f - G) - \frac{k_2 \cdot k_t}{k_3} \right] \frac{1}{\sqrt{4k_1 k_3 - k_2^2}} \arctan \frac{2k_3 t + k_2}{\sqrt{4k_1 k_3 - k_2^2}} - \frac{k_t}{2k_3} \ln |k_1 + k_2 \cdot t + k_3 \cdot t^2| + \frac{k_t}{2k_3} \ln |k_1| - \left[2(F_f - G) - \frac{k_2 \cdot k_t}{k_3} \right] \frac{1}{\sqrt{4k_1 k_3 - k_2^2}} \arctan \frac{k_2}{\sqrt{4k_1 k_3 - k_2^2}} \right\} \quad (4)$$

式中: F_f 为一环管片受到的浮力,355 kN; F_t 为管片受到上部土体塌落的压力; F_n 为管片受到的浆液黏滞阻力; r, b 为管片的外半径和管片宽度; k_1, k_2, k_3 ,

k_i, c 为待定系数。由于针对不同配合比的浆液,它的黏性系数将有所变化。针对本区间隧道注浆分别取 $k_1=1\ 000\ \text{MPa}\cdot\text{s}, k_2=0, k_3=1\ 00\ \text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

至此,得到了式(4),即为管片在浆液中上浮的计算公式。它描述了管片在上浮过程中与时间的关系,特别是管片的上浮量和浮力、重力、管片的几何性质,以及浆液和土压力参数之间的定量关系。

2.4 工程实例计算

根据实际情况可以确定该土压力增大系数的范围为 $[0, 6.3\ \text{kN/s}]$ 。下面就该范围内的几个不同的参数值对管片的上浮进行讨论。由于土压力系数 k_i 在一定的范围内变化,它表征了土体发生流变而作用在管片上的土压力随时间的变化。下面针对在范围内的 5 个不同的 k_i 值进行讨论,详见表 2。

表 2 系数 k_i 列表

$k_i / (\text{kN}\cdot\text{s})$				
6.3	4.41	3.15	1.89	0.6

表 2 中列出了 5 个不同的 k_i 值,将不同 k_i 和其他参数分别代入式(4)中计算便可得到管片在该种工况下的上浮。图 2 显示了当 k_i 取不同的 5 个值时,管片的上浮量的变化情况。从中可以看出,每条上浮曲线从时间零点开始逐渐增大。这与现场监测的结果一致。但是从中也可以看到,在 k_i 值为 3.15 kN/s, 4.41 kN/s, 6.3 kN/s 时,管片的上浮曲线在逐渐增大到最大值后有逐渐下降的现象。这是因为如假设(5)所述,在管片的上浮理论分析的模型中忽略了管片下部地基反力的作用,使管片在后期由于上部土压力较大又得不到地基反力的支持,所以管片高程产生了一定的下降。但是在一般的实际工程条件下,如果管片在受到上部较大的土压力而产生向下的运动趋势时,下部的地基会施加给管片一个地基反力以平衡较大的方向向下的土压力,使管片维持在一个较稳定的状态。甚至在有些高流变的土体中,管片下方的土体会出现较大流变回弹,并对管片施加向上的土压力,可能会导致管片的上浮更为明显。这里本文就不深入讨论了。

图 3 中显示了理论计算的上浮曲线和现场监测的上浮曲线之间的比较。其中‘o’表示的是管片编号为 713 的现场监测上浮情况。从中可以清楚地看出,理论计算的结果比实测结果偏大,理论计算的最终上浮量集中在 0.05 ~ 0.07 m 之间,而现场监测的上浮量在最大值约为 35 mm。并且理论计算的上浮曲线在前期增大迅速,并很快达到极值。这主要是由于

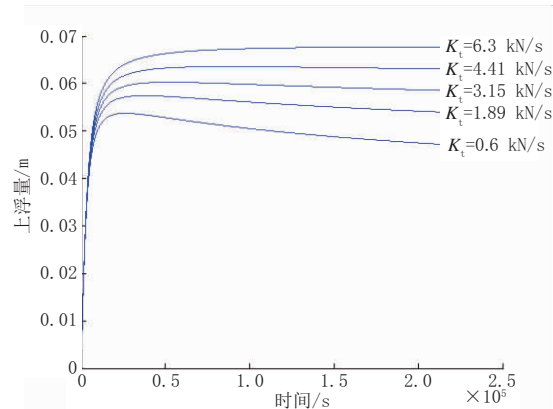


图 2 管片上浮随时间的变化情况比较

理论分析中忽略了管片之间的相互作用和千斤顶对管片的约束,即如假设(3)所述。但是实际工程中,一环管片的上浮都会受到它相邻管片的约束作用,这样就造成了理论计算得到的结果相对于现场监测的结果稍微偏大一些。而且管片缺乏约束使得初期的上浮加速度偏大,并出现了图 3 中显示的理论上浮在前期增大迅速的现象。但是理论分析和现场监测得到的上浮规律是基本一致的。

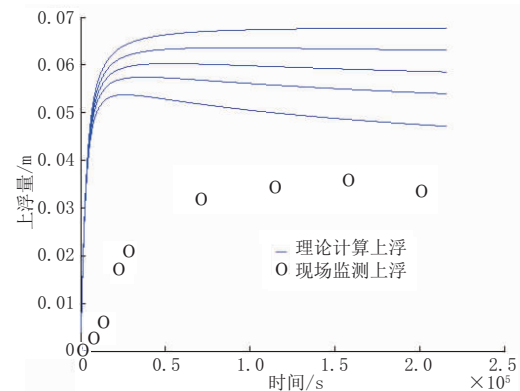


图 3 管片上浮理论计算结果和实测结果比较

3 结语

本文关于盾构隧道通缝拼装管片上浮的理论研究运用最基本的力学和高等数学理论推导出了有关的定量关系,明确了不同因素对上浮的影响关系,如式(4)所示。

工程实例计算的结果表明,理论计算的结果与现场实测的结论有较好的一致性。由于研究结果确定了管片上浮与其影响因素之间的关系,就能够一定程度上指导实际的施工,消除或减小管片的上浮及其带来的弊端,具有一定的理论意义和实用价值。

由于研究现状和水平的限制,本文的研究是建立在诸多假设条件的基础上的,所以得到的结论与实际情况之间有一定的差异。特别是对于土体和注浆的流变等性质的假设和其他一些因素的忽略。影

(下转第 249 页)

5 结 论

本研究以上海市蒲汇塘工作井基坑工程为例,分析该工程难点与应对措施,采用地下连续墙加高压旋喷桩加内支撑的支护方案,采用 Plaxis 有限元软件对基坑开挖进行模拟,并结合监测数据验证支护方案的可靠性。主要结论如下:

(1)对于基坑较深、周边环境要求较高的基坑,选取地下连续墙加围护桩加内支撑或其他类似基坑围护方案是一个合适的选择。

(2)采取“止降结合”的技术对策,增大承压水的流通路径,可有效减小承压水降水对周围环境的影响。

(3)采用数值模拟和监测数据对基坑围护体系可靠性进行验证,可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 王笃礼,匡健,沈宇鹏.临近建筑物的基坑支护结构体系设计研究[J].岩土工程技术,2017,31(4):173-179.

- [2] 张戈,毛海和.软土地区深基坑围护结构综合刚度研究[J].岩土力学,2016,37(5):1467-1474.
- [3] 罗战友,刘薇,夏建中.基坑内土体加固对围护结构变形的影响分析[J].岩土工程学报,2006(S1):1538-1540.
- [4] 殷一弘.深厚软土地层紧邻地铁深大基坑分区设计与实践[J].岩土工程学报,2019,41(S1):129-132.
- [5] 王海成,刘秀珍,张龙.复杂环境下软土基坑支护设计实践与分析[J].岩土工程技术,2022,36(2):160-164.
- [6] 王海成,王卫,张龙.某软土基坑支护设计实践与分析[J].土工基础,2022,36(2):168-172.
- [7] 居晨,李俊才,周小俊.深厚饱和软土区基坑支护设计与监测成果分析[J].建筑科学,2012,28(3):107-110.
- [8] 吴旭君,郑平,赵伟,等.滨海地区软土地层超深基坑支护设计实例[J].岩土工程学报,2010,32(S1):388-391.
- [9] 刘合寨,周元,尤波.软土地区大面积不规则深基坑支护设计实践与分析[J].岩土工程技术,2018,32(4):212-217.
- [10] 付宪章,武登辉,赵庆亮,等.滨海软土地区深基坑支护设计与施工[J].施工技术,2020,49(17):75-79.
- [11] 李夕林,魏祥,梁志荣.软土地区深基坑变形控制设计实践与分析[J].岩土工程学报,2014,36(S1):160-164.

(上接第 237 页)

响盾构管片上浮的因素很多,本文未能考虑完全,而这些都将在以后的研究工作中进一步完善。

参考文献:

[1] GB 50299—1999,地下铁道工程施工验收规范[S].

[2] 沈征难.盾构掘进过程中隧道管片上浮原因分析及控制[J].现代隧道技术,2004,41(6):51-56.

- [3] 王才庆.盾构施工壁后注浆 C_S 浆液的研制与应用[J].市政技术,2006,24(3):163-167.
- [4] 范钦珊.理论力学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [5] 谷超豪,李大潜,陈恕行,等.数学物理方程[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [6] 张强.盾构隧道通缝拼装管片的上浮和错台研究[D].上海:上海交通大学,2007.