

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.004

顶管施工的地表沉降数值分析和顶力计算

陈 杨¹, 马保松², 曾 聪¹

(1. 中国地质大学<武汉> 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 闽江北水南调(平潭引水)工程管道施工将采用非开挖顶管法施工,穿越地层主要有淤泥质土层、中砂层及中风化凝灰熔岩。顶管顶力计算得到了4个顶进段的顶力预测值。根据已有的工作成果,将顶管施工对周围土体产生的扰动情况进行了分析总结。通过模拟顶管地表沉降并分析规律,将模拟结果与Peck公式计算结果进行对比,验证了所建模型得到的地层沉降的基本趋势,分析了不同横断面沉降幅度变化的可能原因,为该工程施工提供了设计参考。

关键词: 顶管施工; 顶力; 地面沉降; Peck公式

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0027-05

Numerical Analysis of Surface Settlement and Calculation of Jacking Force for Pipe-jacking Construction

CHEN Yang¹, MA Bao-song², ZENG Cong¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Trenchless pipe jacking technology is proposed to be used in the pipeline construction of Minjiang River North to South Water Diversion Project (Pingtan Water Diversion Project), and the strata mainly includes silt soil layer, middle sand layer and middle weathering lava. The predicted values of jacking force of four jacking sections are obtained by calculation. Based on the previous results, the perturbation of the surrounding soil is investigated. By simulating the surface settlement of pipe jacking and analyzing the patterns, the simulation results are compared with the calculation results from the Peck formula, the basic trend of ground settlement obtained by the established model is verified. And the possible reasons for the change of settlement amplitude of different cross sections are discussed, which provides preliminary supports for the engineering construction design.

Key words: pipe jacking construction; jacking force; surface settlement; Peck formula

在地下基础设施建设领域,相比于明挖方法,采用非开挖技术进行地下管线穿越具有明显优势。该施工方法施工阶段不阻碍地面交通,受外界因素影响小,尤其是在穿越障碍物时应用广泛,并具有良好的经济效益,有利于地下管线的更换和修复。

1 工程简介

1.1 工程概况

闽江北水南调平潭引调水(福州、长乐线城门

过江管段)管线起于青口镇中院村(HM0+000),西接城门引水支线大康厝~中院输水隧洞出口,呈北东向穿越316国道,在尚干镇综合农场球山龙鞋厂附近穿越乌龙江经祥谦农场、四十八份岛、龙祥岛接入福州市城门水厂(福州南台岛受水点,桩号HM4+845.374),全长4.845 km。其中,穿越江底部分约为4 km。管道施工拟采用1根DN2000钢管非开挖穿越形式。

根据初步设计阶段的勘察报告,青口镇中院村(桩号 HMO + 000)至龙祥岛北侧(桩号 HM4 + 294.63)处管道沿线穿越的地层有淤泥含砂、淤泥质黏土含砂、粉质黏土、细砂、细砂含淤泥和中砂,局部夹淤泥含砂和淤泥质土含砂等软弱土层;龙祥岛北侧(桩号 HM4 + 294.63)至福州市城门水厂(福州南台岛受水点,桩号 HM4 + 845.374),拟建管道穿越该段地区地层以晚侏罗系南园组凝灰熔岩(J3n3)及其风化层为主。

目前国内的顶管非开挖穿越工程逐渐朝着大直径、长距离的方向发展,如广州市西江引水工程中顶管采用的是 DN2 400 钢管,其中广清高速路段采用的 DN2 800 套管顶管后内敷 DN2 400 钢管方案^[1];汕头过海水管工程中采用 DN2 000 钢管顶管,一次顶进 2 080 m,并穿越块石结构海堤和中风化花岗岩层^[2]。

1.2 管线轨迹

该工程跨江段约 4 km,乌龙江中有四十八份岛和龙祥岛,均有条件施工顶管工作井。计划采用 5 井 4 顶设计方案,即在四十八份岛上施工 2 个工作井,龙祥岛上设置 1 个工作井,乌龙江两岸分别施工 1 个工作井,进行 4 次顶管顶进施工,工作井点位见图 1。顶进段距离由南到北分别为 870.41、679.28、1 132.68 和 1 198.20 m。



图 1 5 井 4 顶工作井点位

Fig. 1 Working well location of “four-part jacking through five well”

依据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)中的相关规定,结合在有地下水地区及穿越江河时,管顶覆盖层的厚度还应满足管道抗浮要

求,并考虑冲刷线和挖沙深度的影响,推荐管道上方覆土厚度为 10 m。在龙祥岛至城门水厂穿越段约 600 m 需穿越岩层,上覆较浅的中砂、下为碎块状强风化凝灰熔岩和中风化凝灰熔岩,建议将顶管轨迹定于距碎块状强风化凝灰熔岩层顶部 3 m 以下的地层中。

2 顶力计算

顶管顶力由管周摩阻力和迎面阻力组成,影响顶力大小的主要因素有管材、管径、管长、埋深、土体物理力学性质以及泥浆特性等。叶艺超等^[3]在计算顶管顶力时考虑了泥浆触变性和顶进轴线偏角,引入了纠偏系数,计算结果与实际顶力值对比后较为接近;何莲等^[4]研究了软土地区顶力在顶距、管径影响下的变化规律,得出了在软土地区的单位面积管土平均摩阻力参考值;针对现有迎面阻力理论与经验公式较多、适用条件不明确且参数取值盲目性大等问题,刘华清等^[5]整理分类了现有迎面阻力的计算公式,并提出了改进公式。

依据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008),管道的总顶力可按式估算:

$$F_0 = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (1)$$

式中 F_0 ——总顶力标准值, kN

D_1 ——管道外径, m

L ——管道设计顶进长度, m

f_k ——管土平均摩阻力, kN/m²

N_F ——顶管机迎面阻力, kN

根据目前顶管施工的经验,在使用触变泥浆减阻时,管土平均摩阻力大幅降低,最低可以降至 1 kN/m²,当形成稳定的泥浆套时此值变化较小,在计算时可取为 3 kN/m²。

大刀盘切削的泥水(土压)平衡式顶管机的迎面阻力计算式为:

$$N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 \gamma_s H_s \quad (2)$$

式中 D_g ——顶管机外径, m

γ_s ——土的重度, kN/m³

H_s ——顶管机头覆土厚度, m

顶进段 4 中会穿越岩石层,在日本推进技术协会的《推进工法应用篇》中有关硬岩层采用泥水平衡顶管机顶进的迎面阻力公式如下:

$$N_F = (P_w + P_e) \pi \left(\frac{B_s}{2}\right)^2 \quad (3)$$

式中 P_w ——平衡压力,取(地下水压 +20) kN/m^2
 P_e ——切削阻力,可取标准贯入试验值 $10N$,
 当 $N \geq 50$ 时可取 $P_e = 500 \text{ kN/m}^2$
 B_s ——掘进机外径, m

根据以上公式计算得到的各段最大顶力见表 1。

表 各顶进段顶进力估算值

Tab.1 Estimated value of jacking force in each jacking section kN

顶进段编号	最大顶进力
1	16 801
2	13 336
3	22 006
4	23 137

3 地表沉降数值模拟与分析

在顶管隧道起止点两侧均为城镇居民区,需要控制地表变形。顶管施工引起的地表变形是三维变形,其影响因素十分复杂,主要有以下几方面^[6-7]:
 ①顶管机刀盘的正面支护压力与土压力的不完全平衡;
 ②掘进机与土体、管节与土体之间的摩擦力,采取注浆措施后可降至 $3 \sim 5 \text{ kPa}$;
 ③顶进轴线偏差和纠偏操作引起的地层损失,对管节两侧的土体作用力大小不一致;
 ④前方土体开挖和掘进机、管节之间环形空隙产生的土体损失而引起地面沉降。

地表产生沉降的原因是顶管施工对周围土体产生了扰动,土体在经过掘进机的挤压、管节的摩擦作用后,应力得到释放,土体的含水量、孔隙水压力等性质均有所改变,这种作用在土体中相互传递,表现在地表为隆起或沉降。张庆贺等^[8]等根据受扰动土体的受力状态和扰动程度,对周围土体进行了分区,具体如图 2 所示。

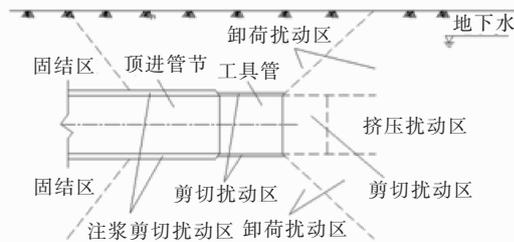


图 2 土体受扰动分区

Fig.2 Soil disturbance zone

现有地表沉降计算方法很多,计算最为简便、应用最广泛的是 Peck 公式,虽是经验公式,存在不足之处,但可采用数学手段对其进行修正,效果良好。

利用计算机辅助软件 ABAQUS,对比模拟结果

与计算结果,进一步验证此计算方法的合理性。为现场施工提供指导,以辅助分析大部分复杂的固体力学、结构力学问题。

3.1 模型建立

在建立模型之前提出几点假定条件,即假定土体中整个管道轴向不存在偏转,不考虑时间效应,以弱化层代替泥浆与顶管周围土层组成的混合物,等效代表周围地层的土层损失^[9]。考虑到顶进地层为软土,等代层的厚度可取为顶管机与管节环形间隙的 2 倍。土体模型采用摩尔-库伦强度准则,而等代层、钢管采用线弹性强度准则,其中钢管由于壁厚较薄,采用壳结构单元。所用材料参数见表 2。

表 2 模型材料参数

Tab.2 Model material parameters

项 目	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	层厚/ m	弹性模 量/MPa	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^\circ$)
淤泥质土	16.6	7.1	4.7	20	14
粉质黏土	19.6	24.9	20	36	18
钢管	76.9	—	210×10^3	—	—
泥浆等代层	10.8	—	0.3	—	—

顶管外径 2 m,壁厚 20 mm,顶部埋深 10 m。取土体模型长、宽、高分别为 50、40、32 m。首先进行初始地应力平衡,最大位移变形达到了 $1 \times 10^{-7} \text{ m}$,可以认为已经满足下一步计算要求。钢顶管前方为机头,简化为钢材质。

3.2 结果分析

经过软件的计算,对结果进行分析,得到了土体的变形云图,如图 3 所示。

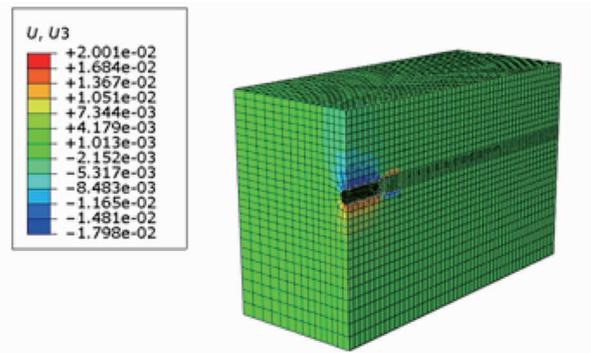


图 3 模型纵剖面沉降云图

Fig.3 Model longitudinal profile settlement cloud map

图 3 中 U_3 表示土体的竖向位移。由于地层损失、卸载等原因造成顶管轴线附近的“沉降槽”。

Peck 认为土体损失引起的土体移动,在土体不排水和体积不可压缩(即泊松比为 0.5)的条件下,

土体损失体积等于沉降槽的体积。基于大量地面沉降数据和工程资料的分析,提出了估算隧道上方地表某点沉降的公式^[10]:

$$s(x) = s_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (4)$$

$$s_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{0.313V_L D^2}{i} \quad (5)$$

式中 $s(x)$ ——隧道上方某点沉降量, m
 x ——分析点和隧道中心轴线的距离, m
 s_{\max} ——隧道轴线上方的最大地面沉降量, m
 V_{loss} ——隧道单位长度土体损失量, 可根据土体损失率进行计算
 i ——地面沉降槽宽度系数, m
 D ——隧道外径, m
 V_L ——土体损失率, %

对于 i 取值, 可采用刘建航等^[11]、Loganathan 等^[12]提出的两公式计算平均值, 具体如下:

$$i = \frac{h}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (6)$$

$$i = 1.15R\left(\frac{h}{2R}\right)^{0.9} \quad (7)$$

式中 h ——地面至隧道轴线的距离, m
 φ ——开挖土层的内摩擦角
 R ——开挖隧道半径, m

依据设计, 取 $h = 11$ m, $\varphi = 15.42^\circ$, $D = 2$ m, $V_L = 2.0\%$, 分别代入式(4)~(7), 计算得 $i = 5.549$ m, 从而得到理论 Peck 公式为:

$$s(x) = 4.513 \exp(-0.016x^2) \quad (8)$$

软件模拟得出在距离开挖面 -4、-2、0、3、5、7、9 m 处(取顶进方向的反向为正)的沉降曲线以及按照土体损失率为 1.5% 计算得到的 Peck 公式沉降曲线如图 4 所示。在开挖面前方, 地表略有隆起, 这是因为一般情况下施工中的开挖面要保证有足够的支护力, 以维持开挖面稳定, 开挖仓泥水压力应略大于地下土压力, 导致前方土体微量隆起。另外, 顶管机刀盘的扰动造成前方土体中的水、气被挤压排出, 压缩土体致使土体颗粒发生相对移动。

模拟结果显示, 在顶管机通过后的地表具有较大沉降量, 横向沉降影响范围为 -12 ~ 12 m, 纵向受影响范围为 -4 ~ 7 m。随着与开挖面距离的增大, 各个横断面的沉降量逐渐减小, 最后趋于稳定。实际上沿轴线负方向的地面变形逐渐趋于稳定, 原因

是掘进机通过时, 两侧的土体受到挤压, 掘进机外径较后续管节外径大 2 ~ 4 cm, 当掘进机尾部通过后, 管节周围的土体向管壁移动, 以填补这个环形空隙, 即造成了地层土体损失, 这样就造成了整体性的土体移动。在土质较好的地层中有利于顶管施工, 适当的注浆措施能够减小这种土体损失, 避免产生过大的沉降。

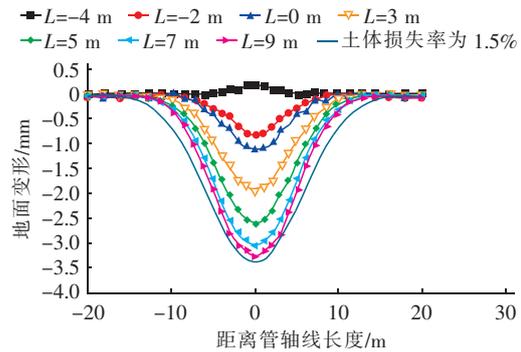


图 4 横断面地表沉降曲线

Fig. 4 Surface settlement curve of cross section

对土体损失率计算曲线和地表沉降数值模拟曲线进行对比, 可知在距离开挖面 -4 ~ 7 m 时, 由于地表还未完全沉降, 所以理论计算和模拟会有较大误差。在距离顶管机头后 9 m、土体损失率取 1.5% 时, 通过 Peck 公式计算的沉降值和模拟沉降值接近一致, 误差在 10% 以内, 曲线吻合良好, 建立的数值模型能够反映顶管施工对地层扰动的规律。

4 结语

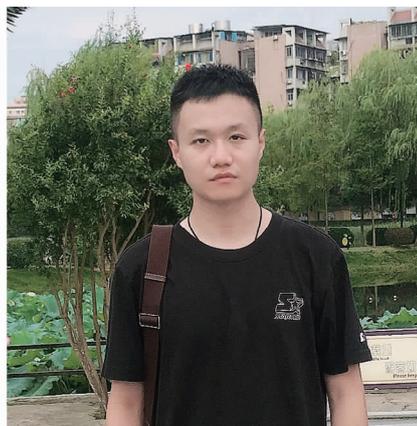
顶力计算可为顶管工程设备选型提供参考, 对管道的壁厚、稳定计算都具有良好的指导性意义。数值模拟结果显示了地表沉降横向受影响范围为 -12 ~ 12 m, 纵向受影响范围为 -4 ~ 7 m。结合实际工程, 根据地层情况和施工设备情况选取合理的参数, 不断完善的理论和经验公式计算结果具有很强的适用性。

顶管施工对周围环境的影响很小, 顶力计算和地表沉降是主要的关注点。顶管方法对土体的扰动作用是可控的, 利用 Peck 公式计算理论沉降量和数值模拟分析施工状态, 是分析这种作用的有力工具, 可为现场施工提供借鉴。

参考文献:

[1] 钟显奇, 周志强, 黎东辉. 西江引水工程大直径钢管顶管施工关键技术措施及效果[J]. 给水排水, 2011,

- 37(2):93-96.
Zhong Xianqi, Zhou Zhiqiang, Li Donghui. Key measures for large diameter steel pipe jacking engineering in Xijiang water diversion project and their practical effects [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(2): 93-96 (in Chinese).
- [2] 钟俊彬, 王作民, 曹玉萍. 汕头第二过海水管工程顶管穿越障碍物技术[J]. *岩土工程技术*, 2009, 23(6): 321-323.
Zhong Junbin, Wang Zuomin, Cao Yuping. The technology for pipe jacking of the second water-pipeline engineering in Shantou [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2009, 23(6): 321-323 (in Chinese).
- [3] 叶艺超, 彭立敏, 杨伟超, 等. 考虑泥浆触变性的顶管顶力计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(9): 1653-1659.
Ye Yichao, Peng Limin, Yang Weichao, et al. Calculation of jacking force for pipe-jacking considering mud slurry thixotropy [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(9): 1653-1659 (in Chinese).
- [4] 何莲, 刘灿生, 帅华国. 顶管施工的顶力设计计算研究[J]. *给水排水*, 2001, 27(7): 87-89.
He Lian, Liu Cansheng, Shuai Huaguo. On the design and calculation in jacking layout of pipeline [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(7): 87-89 (in Chinese).
- [5] 刘华清, 付亚雄, 郑宏, 等. 顶管工程中顶进迎面阻力计算探讨[J]. *给水排水*, 2016, 42(3): 106-111.
Liu Huaqing, Fu Yaxiong, Zheng Hong, et al. Discussion on the calculation of head resistance of jacking in pipe jacking engineering [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(3): 106-111 (in Chinese).
- [6] 余芳. 顶管施工引起地面沉降的分析研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Yu Fang. Analysis and Research on Ground Settlement Caused by Pipe Jacking [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [7] 魏纲, 黄志义, 徐日庆, 等. 顶管施工引起地面变形的计算方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增刊2): 5808-5815.
Wei Gang, Huang Zhiyi, Xu Riqing, et al. Study on calculation methods of ground deformation induced by pipe jacking construction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(S2): 5808-5815 (in Chinese).
- [8] 张庆贺, 朱忠隆, 杨俊龙, 等. 盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(6): 699-703.
Zhang Qinghe, Zhu Zhonglong, Yang Junlong, et al. Theory analysis and testing study of soil disturbance caused by shield-driven [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(6): 699-703 (in Chinese).
- [9] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(3): 388-392.
Zhang Yun, Yin Zongze, Xu Yongfu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 388-392 (in Chinese).
- [10] 韩焯, 李宁, Standing J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 23-28, 35.
Han Xuan, Li Ning, Standing J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 23-28, 35 (in Chinese).
- [11] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
Liu Jianhang, Hou Xueyuan. *Shield Tunnel* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991 (in Chinese).
- [12] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 1998, 124(9): 846-856.



作者简介: 陈杨(1995-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 从事非开挖顶管、管道修复研究工作。

E-mail: 313358341@qq.com

收稿日期: 2020-07-22