

复杂地层下穿湖泊顶管施工关键技术分析

范志超

中国电建市政建设集团有限公司, 天津

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月16日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

顶管掘进施工是水利工程中常用的地下工程施工方法, 对于复杂地层下穿湖泊顶管施工顶力计算和施工技术要求较高。为此, 本文依托珠三角水资源配置工程东莞配套松山湖水厂一期管线工程顶管下穿松山湖工程, 采用理论推导方法, 计算得到了顶管顶力值, 验证了施工的安全性, 阐述了顶管掘进施工关键技术, 为类似工程提供参考。

关键词

顶管顶力, 下穿湖泊, 施工技术, 复杂地层

Analysis of Key Techniques for Pipe Jacking Construction under Complex Strata through Lakes

Zhichao Fan

STECOL Corporation, Tianjin

Received: Jul. 26th, 2023; accepted: Aug. 16th, 2023; published: Aug. 28th, 2023

Abstract

Pipe jacking construction is a commonly used underground engineering construction method in hydraulic engineering, which requires high requirements for the calculation of jacking force and construction technology for pipe jacking construction in complex formations that penetrate lakes. Therefore, this article relies on the Pearl River Delta Water Resource Allocation Project Dongguan Matched Songshan Lake Water Plant Phase I Pipeline Project for Pipe Jacking and Undercrossing Songshan Lake. The theoretical derivation method is used to calculate the value of pipe jacking force, verifies the safety of construction, and the key technology of pipe jacking excavation con-

struction is elaborated, providing a reference for similar projects.

Keywords

Pipe Jacking Force, Underneath the Lake, Construction Technology, Complex Strata

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水利工程输水管道穿越江河湖泊时,常采用顶管施工方法。然而,在复杂地层中顶管掘进对于顶力计算和施工技术要求较高,进而增加了施工难度。闵广山等[1]总结了污水收集管道施工技术的特点,探讨了最佳施工工艺,基于顶管施工常见问题及控制要点,阐述了顶管施工技术。黄腾飞[2]针对目前市政道路排水工程污水管顶管施工技术进行分析。杜磊[3]针对水利工程顶管施工工期影响因素及保证措施进行了系统分析与总结。李晓楠[4]简要分析顶管施工技术的特点及其在水利工程建设中的应用原则,结合水利工程建设中顶管施工的前期准备工作,研究水利工程建设中顶管施工技术的具体应用。王海[5]以谢家桥站排水顶管施工为工程背景,对顶管施工涉及到的工作井施工、设备吊装顶管施工等关键环节施工技术进行阐述,探讨顶管施工期间常见问题原因并给出应对措施。为此,本文依托珠三角水资源配置工程东莞配套松山湖水厂一期管线工程顶管掘进顶力计算与施工,采用理论推导方法,开展了顶管施工顶力计算,验证了工程设计的科学可行性,阐述了顶管掘进施工关键技术,为类似工程提供参考。

2. 工程概况

珠三角水资源配置工程东莞配套松山湖水厂一期管线工程地点位为广东省东莞市松山湖、大朗镇、大岭山镇。配水管线总长度约 12,864 m,管径范围为 DN1000~DN2400,采用球墨铸铁管和钢管。其中,西线环湖路下穿松木山水库,顶管管材采用焊接钢管 DN1800,双排管道,长度约 504 m。地层岩性主要为素填土、强风化花岗岩(土)、中风化花岗岩。风化花岗岩数弱透水层。

由于水厂位置为松湖南岸,同时也是松山湖园区的南侧。与湖西北侧的管网连接路由需进行比选。可供选择的方案有四个:一是穿库区,以顺直的距离接到北岸管网;二是环湖接管;三是以最短的穿湖距离到对岸后,再环湖接管;第四个方案是贴临环湖路穿湖。详细对比见表 1。

Table 1. Compare plan

表 1. 方案比较

	方案一	方案二	方案三	方案四
优点	管道短 节约投资	均为陆地施工, 难度相对不大	相比方案一 缩短穿湖距离	管道最短 节约投资
缺点	穿湖围堰有 一定施工难度	管道距离长水头损失 大,投资高,涉及征地 拆迁多,对松山湖园区 周边影响大	管道距离长、弯头较多 水力工况不好、涉及环 湖碧道长距离坡路施 工,对松山湖园区周边 影响大	距离现况桥较近,工程 实施需要考虑对现况桥 梁的影响,安全风险增 加

综合比较，方案一、四虽然是横穿松山湖，施工较难，但考虑到该位置是松木山水库的库尾，根据水下地形图，库底标高 19.2 m~21.2 m，水库死水位 14.5 m，汛限水位 22 m~23.5 m，施工难度可控；加之方案四管道最短，故推荐方案四作为西线配水管道连接方案，见图 1。

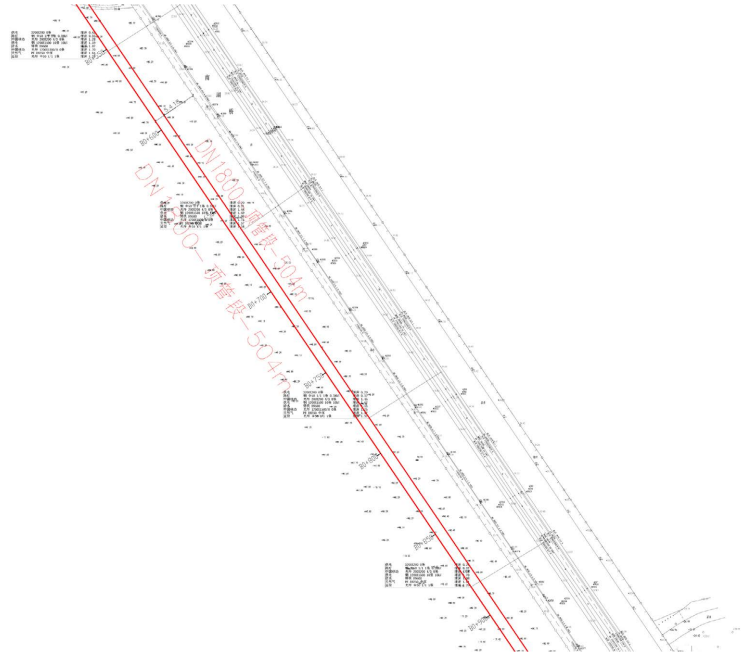


Figure 1. Engineering schematic diagram
图 1. 工程示意图

3. 顶管施工顶力分析

以西线环湖路下穿松木山水库的复杂土层为例，综合考虑土层特性、管道材质、管道直径、注浆减阻、中继环的设置等因素，开展顶管施工顶力分析。

DN1800 球墨铸铁管顶管，顶管中心线最大埋深 21.197 m。

$$F = F_1 + F_2$$

其中， F ——总推力； F_1 ——迎面阻力； F_2 ——顶进阻力。

$$F_1 = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times (P + 20)$$

(D ——管外径 1.875 m， P ——控制土压力)

$$P = K_0 \times \gamma \times H_0$$

式中， K_0 ：静止土压力系数，取 0.65； H_0 ：地面至掘进机中心的厚度，取最大值 21.197 m； γ ：土的湿重量，取 1.8 t/m³。

$$P = 0.65 \times 1.8 \times 21.197 = 24.8 \text{ t/m}^2$$

$$F_1 = \frac{3.14}{4} \times 1.875 \times 1.875 \times (24.8 + 20) = 12.36 \text{ t}$$

$$F_2 = \pi D \times f \times L$$

式中， f ——管外表面平均综合摩阻力，详见表 2。

Table 2. Average frictional resistance per unit area of pipe outer wall using thixotropic mud f_k (KN/m²) [6]**表 2.** 采用触变泥浆的管外壁单位面积平均摩擦阻力 f_k (KN/m²) [6]

管材	粘性土	粉土	粉、细砂土	中、粗砂土
球墨铸铁管	3.0~3.4	4.0~7.0	7.0~10.0	10.0~13.0

注：当触变泥浆技术成熟可靠、管外壁能形成和保持稳定、连续的泥浆套时， f 值可直接取 3.0 KN/m²~5.0 KN/m²。

D ——管外径 1.875m； L ——最长顶距，取值 503.94 m。

总顶进阻力：穿越砂质粘性土、粉细砂、全风化花岗岩、强风化花岗岩。

$$F_2 = 3.14 \times 1.875 \times 5.0 \times 503.94 = 14,834.73 \text{ KN} = 1483.473 \text{ t}$$

取泥水平衡顶管施工段最大的顶进阻力进行验算得知：

$$\text{总推力 } F = 12.36 + 1483.473 = 1495.833 \text{ t}。$$

根据设计要求顶管井容许最大顶力为 10,000 KN = 1000 t。

顶力 < 工作井最大允许顶力 $F = 10,000 \text{ KN} < N$ ，可满足要求。

根据计算所得，对比工程要求，工作中采用的材料与结构均满足支护结构的强度、刚度和稳定性要求。

4. 施工关键技术

论文顶管机选型：考虑本工程地层复杂，为确保工程质量和施工安全，根据以往施工经验，决定采用具有破碎功能的泥水平衡顶管掘进机和岩石泥水平衡顶管掘进机。一般情况下，刀盘每分钟旋转 4~5 转，每当刀盘旋转一圈时，偏心的轧碎动作达 20~23 次。由于本机有以上这些特殊的构造，因此它的破碎能力是所有具有破碎功能的掘进机中最大的，破碎的最大粒径可达掘进机口径的 40%~45% 之间，破碎的卵石强度可达 200 MPa。详见图 2。

泥仓压力的设定：本工程根据地质资料结合顶管施工经验，得知泥水压力控制值 P 为 25 KPa~35 KPa。施工时设备自控可保证 10% 的泥仓压力：遇有砂层、砂砾石层时，泥仓压力设定适当加大 30% 左右，以提高安全系数。

泥浆配合比：顶进时应经常检查循环泥浆粘度，应控制为 22 s~35 s。

顶进速度控制：顶进速度控制在 30 毫米/分钟~50 毫米/分钟，入洞后的前 10 米以及纠偏时用较低速度，以后视出泥压力情况、刀盘扭矩情况适当加快顶进速度。



Figure 2. Pipe jacking machine

图 2. 顶管掘进机

顶进施工：顶进系统采用整体式顶进构架，由主顶油缸及附件、导轨、主顶油泵及控制阀组成，其作用是把顶管机从工作井内穿过土层顶进接收井内，与此同时，将紧随工具头后的管道埋设在工作井与接收井之间。

顶管排泥：机头刀盘切削土体的同时，在机内两道管路同步运作，一边打入一定比例的泥浆到机内你仓中对土体进行细化，另一边接入排泥系统将分解细化的泥浆抽入到地面泥浆暂存区。

安装管节：管节下坑前先进行外观检查，包括管端面是否平直、管壁表面是否光洁、管体上无裂缝等等，检查合格的管子用吊车放到顶进坑内的导轨上，进行顶进。

顶进纠偏：顶进中发现管位偏差 5 mm 左右，即应进行校正。纠偏校正应缓缓进行，使管节逐渐复位，不得猛纠硬调。校正方法采用工具头自身纠偏法：控制工具头的状态(向下、向上、向左、向右)，这种方法纠偏方法良好，每次纠偏的幅度以 5 mm 为一个单元，再顶进 1 m 时，如果根据工具头的激光经纬仪测量偏位趋势没有减少时，增大纠偏力度(以 5 mm 为一个单元)，如果根据工具头的激光经纬仪测量偏位趋势稳定或减少时，保持该纠偏力度，继续顶进，当偏位趋势相反时，则需要将纠偏力度逐渐减少。

触变泥浆压浆减阻：顶进过程中，需要经常进行压触变泥浆工作，以减少顶进的阻力，并能有效减少地表沉降。触变泥浆系统由拌浆、注浆和管道三部分组成。拌浆是把注浆材料兑水以后再搅拌成所需的浆液(造浆后应静置 24 小时后方可使用)。注浆是通过注浆泵进行的，根据压力表和流量表，它可以控制注浆的压力(压力控制在水深的 1.1~1.2 倍)和注浆量(计量桶控制)。管道分总管和支管，总管安装在管道内一侧，支管则把总管内压送过来的浆液输送到每个注浆孔上去。注浆孔布置为：每节钢管各设一道，孔位位于钢管中部，环周分 120 度对称布置 3 个孔。

注浆施工：顶管段顶管完成，进出洞管道外侧缝隙填塞严密→安装注浆设备→连接注浆管道及注浆孔连接→搅拌水泥成浆液→检查注浆机压力表完好状态→检查注浆管路密封情况→开始注浆，随时关注注浆压力值→注浆完成一根管道再转入下一根管道注浆→检查注浆状态，发现前端管道上方注浆孔出浆液即合格→关闭注浆机，关闭注浆阀门，保持注浆压力→由一侧向另一侧按照管道注浆孔连续注浆→检查→结束注浆→复拧注浆孔丝堵。

5. 结论

复杂地层下穿湖泊顶管掘进顶力计算与施工的控制管理，对于富水地层地下工程建设质量至关重要。为此，本文依托珠三角水资源配置工程东莞配套松山湖水厂一期管线工程顶管掘进顶力计算与施工，采用理论推导方法，开展了顶管施工顶力计算，验证了工程设计的科学可行性，阐述了顶管掘进施工关键技术，为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 闵广山, 李红建, 高来顺. 污水全收集工程顶管施工研究[J]. 工程建设与设计, 2023(10): 180-182.
- [2] 黄腾飞. 市政道路排水工程污水管顶管施工技术研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(5): 170-172.
- [3] 杜磊. 水利工程顶管施工工期影响因素及保证措施[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(4): 87-88.
- [4] 李晓楠. 水利工程建设中顶管施工技术的应用探讨[J]. 建材发展导向, 2023, 21(8): 154-157.
- [5] 王海. 长沙地铁六号线谢家桥站排水顶管施工技术[J]. 大众标准化, 2023(3): 46-48.
- [6] 焦永达, 苏耀军, 杨毅, 等. GB50268-2008. 给水排水管道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2008.