

复杂地层大断面圆形顶管结构设计

马龙祥

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着城市建设向纵深推进,非开挖工艺中的大直径顶管在综合管廊等工程中应用广泛,但复杂地层给顶管结构设计带来挑战,当前相关规范与研究多基于均匀地层,对复杂不均匀地层的设计研究较为欠缺。在福州江南片区综合管廊工程中,场地具有“上软下硬”的复杂地质特征,以此项目为背景,采用PLAXIS有限元软件,分析不同入岩深度和岩层倾角对顶管结构受力与变形的影响。研究表明:顶管进入岩层 120° 支承角范围时,拱效应发挥最佳,结构受力最有利;且入岩深度的改变对结构的内力影响较大,考虑不周会对结构的安全造成影响。岩层倾斜会导致结构弯矩分布不对称,结构向岩层低处变形趋势明显。

关键词: 大断面顶管;数值模拟;上软下硬地层;结构内力;结构变形

中图分类号: TU992.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0440-05

Structural Design of Large-Section Circular Pipe Jacking in Complex Strata

MA Longxiang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the in-depth advancement of urban construction, large-diameter pipe jacking in trenchless technologies has been widely applied in projects such as utility tunnels. However, the complex stratum conditions pose challenges to the structural design of pipe jacking. Currently, the relevant specifications and researches are mostly based on homogeneous stratum, and there is a lack of research on design of complex heterogeneous stratum. In the utility tunnel project in the Jiangnan area of Fuzhou, the site features the complex "soft-over-hard" geological characteristics. Based on this project, the PLAXIS finite element software is adopted to analyze the impacts of different rock penetration depths and rock stratum dip angles on the stress and deformation of the pipe jacking structure. The research results show that when the pipe jacking enters the range of the 120° bearing angle of the rock stratum, the arching effect performs optimally and the structural stress condition is the most favorable. In addition, the change in rock penetration depth exerts a significant influence on the internal forces of the structure, and inadequate consideration of this factor will threaten the structural safety. The inclination of the rock stratum will lead to asymmetric distribution of structural bending moments, and the deformation trend of the structure towards the lower part of the rock stratum is obvious.

Keywords: large-section pipe jacking; numerical simulation; soft-over-hard stratum; structural internal force; structural deformation

0 引言

随着我国城市建设向纵深发展,顶管、盾构等非开挖工艺以其对环境影响小、工期短、占地面积小等优点,越来越广泛的运用到城市开发建设中。其中,大直径的顶管常用于综合管廊、电力隧道、给排水管道等工程^[1-3]。随着大直径顶管工艺的广泛应用,顶管工程面临的地质条件也愈发复杂。

目前,很多学者对大直径顶管的管道受力模式进行了研究,如雷晗^[4]等以上海市污水治理白龙港片区南线输送工程为背景,对内径为4 m的钢筋混凝土顶管进行了分析,提出由于土拱效应的存在,目前规范^[5]的计算有局限性,采用有限元法可以优化管道结构设计。刘翔^[6]采用数值分析和实测的方法,对软土地层中顶管结构的受力特性进行了研究,并提出了合理的管道压力分布模式。但现有规范及研究成果多基于均匀地层展开;对于不均匀地层(尤其是变化剧烈的地层),相关研究多集中于施工技术层面^[7-8],而针对结构设计的研究相对匮乏^[9]。地层

收稿日期: 2026-01-05

作者简介: 马龙祥(1988—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。

的不均匀会导致顶管的地基土弹簧、顶管受到的侧向土压力等均处于复杂状态,对顶管的均质圆环形成的拱效应产生不利影响。如不充分考虑可能造成设计结果偏于激进,影响结构的安全。

本文基于福州江南片区综合管廊工程项目,采用数值分析的方法,对大直径顶管在复杂地层中的受力特性进行分析,研究管道的内力及变形特征,以期对复杂地层中的顶管结构设计提供参考。

1 工程概况

福州市江南片区综合管廊工程项目起点位于现状先农变电站南侧,接入现状先农变电站内,沿线途径北园路、南台大道、南三环路,终点与现状盖山变电站衔接,项目全长 6 745 m。由于项目位于建成区,周边地上地下情况复杂,受制于这些因素,管廊结构大量采用对周边环境影响小的顶管工艺,全线顶管段总长约 3 975 m。顶管采用钢筋混凝土管节,管节内径 3.5 m,壁厚 32 cm,管节横断面见图 1。

项目拟建场地呈现出明显的“上软下硬”的地质特点,上层有 10~15 m 的淤泥层,最深处可达 20 m。淤泥层下方有薄层粉质黏土和全、强风化花岗岩,之后便是强度较高的中风化花岗岩。同时地势起伏较大,顶管在软土及岩层中穿越,受线路纵断面布置限制,顶管存在“下部位于岩层、上部位于软土”的特殊工况,导致结构受力状态极为复杂。

表 1 软土地层 HSS 模型主要参数取值

土层	$c'_{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	$P^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$E^{\text{ref}}_{\text{oed}}/\text{kPa}$	$E^{\text{ref}}_{50}/\text{kPa}$	$E^{\text{ref}}_{\text{ur}}/\text{kPa}$	$G^{\text{ref}}_0/\text{kPa}$
素填土	10.0	10.0	0	100	3	1 800	2 700	12 600	36 000
粉质黏土	26.0	17.0	0	100	3	3 600	4 320	30 240	51 840
淤泥	15.0	6.0	0	100	3	2 820	4 230	19 740	42 300

2.2 数值模型工况选择

数值模型采用 PLAXIS 有限元软件,模型如图 2 所示,模型尺寸水平向 100 m,竖向 50 m,顶管埋深 7.5 m。为了更直观地反映地层变化对管廊结构的影响,采用控制变量法,结合项目地层实际情况,不改变管廊埋深及其他相关因素,只调整地层情况,研究地层变化对结构受力的影响。

计算主要考虑以下两种工况:

(1)上软下硬地层中,管廊上部位于软土中,下部位于岩层中,在管廊入岩不同深度情况下,管廊结构内力特征;

(2)上软下硬地层中,岩层处于倾斜状态,分析

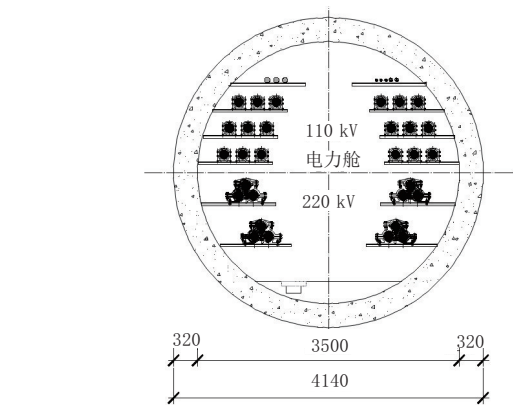


图 1 顶管法管廊典型横断面(单位:mm)

2 数值模拟方法

2.1 地质参数及本构模型

根据项目地勘揭露的地层结构、岩性特征、埋藏条件及物理力学性质,场地地层主要包含:素填土、粉质粘土、淤泥、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩等岩土地层。

软土的本构选用基于 HS 模型改进的小应变硬化(HSS)模型。该模型能够比较合理考虑土体小应变阶段的非线性特性,可以较好的运用于隧道、顶管开挖问题^[10-12]。同时,参考学者对福州地区土体 HSS 模型的研究成果^[13-14],并结合本项目的地勘成果,对项目中软土地层的 HSS 模型参数取值见表 1。对于岩石地层,则采用摩尔库伦模型^[15],选取计算断面全、强风化岩层缺失,中风化花岗岩模型参数参考勘察报告,黏聚力 c 取 300 kPa,内摩擦角取 32° 。

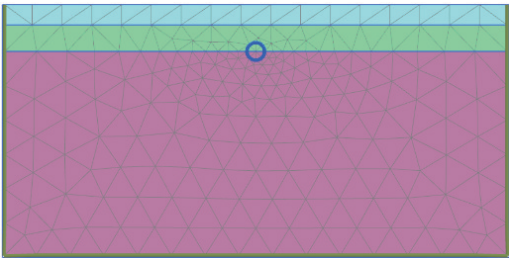


图 2 典型断面有限元模型

不同岩层倾角对结构的影响。

3 计算结果分析

3.1 不同入岩深度对结构受力的影响

为了研究结构内力与顶管结构进入岩层深度之

间的变化规律,从结构刚接触岩层到全部进入岩层分别建立有限元模型,以每增加0.25 m入岩深度作为一个工况进行计算。

刚接触岩层、入岩1.75 m、全部进入岩层的几个典型的弯矩见图3至图5。从图中可以看出,顶管上下部承受正弯矩,内侧受拉;左右部承受负弯矩,外侧受拉。刚接触岩层时,顶管下部正弯矩数值较大,达32.27 kN·m,同时两侧负弯矩区呈现中下部弯矩显著偏大的特征。这体现下部支撑土弹簧刚度剧烈变化对结构内力的影响。

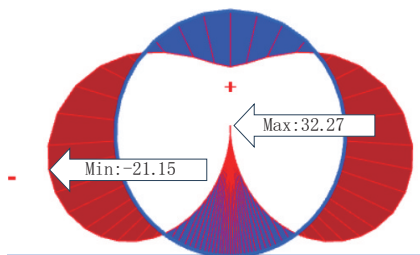


图3 结构刚接触岩层时的弯矩图(单位:kN·m)

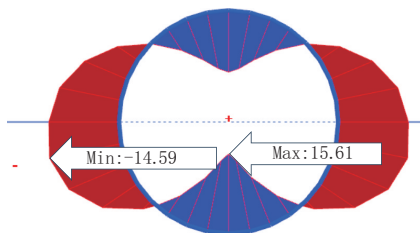


图4 入岩1.75 m时的弯矩图(单位:kN·m)

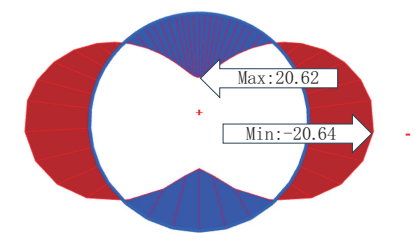


图5 全部入岩时的弯矩图(单位:kN·m)

结构最大正负弯矩值与入岩深度之间的关系曲线见图6。从图6中可以看出,结构最大正负弯矩都在刚入岩层时处于最大值,最大正弯矩32.27 kN·m,最大负弯矩-21.15 kN·m;随后逐渐减小,结构正弯矩在入岩1 m时,处于最小值12.20 kN·m,结构负弯矩在入岩1.25 m时处于最小值-13.31 kN·m;随后正负弯矩逐步增加,在入岩3 m后,逐步趋于稳定。结构正弯矩最小值仅相当于最大值的37.8%,负弯矩最小值仅相当于最大值的62.93%,可见管廊入岩深度对结构弯矩的影响是非常大的。

究其原因,管廊下方的土体提供了支承角,按照规范规定^[5],在常规计算时,土体的支承角为120°,本项目顶管直径为3.75 m,当顶管结构进入岩层

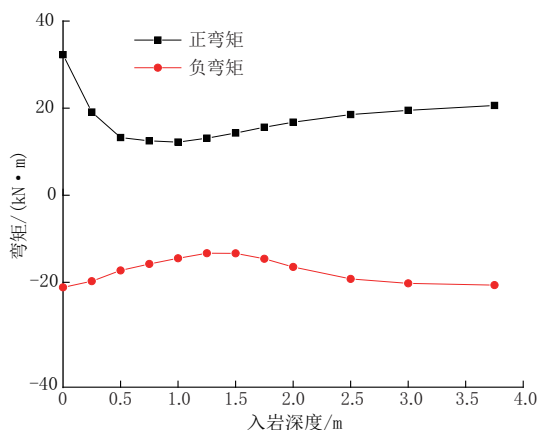


图6 结构最大正负弯矩与入岩深度的关系曲线

0.94 m时,正好处于120°支承角范围,与本项目计算相匹配。即当管廊结构进入岩层120°支承角范围,岩层能够使得结构的拱效应得到最大程度的发挥,荷载更多的转化为轴力。

图7至图9是刚接触岩层、入岩1.0 m、全部进入岩层的几个典型的轴力图。图10是结构轴力随入岩深度的变化曲线,从结构轴力变化角度,也可以发现,结构轴力最大值随着入岩深度逐渐增加,当入岩0.5 m时,达到最大值188.8 kN,之后逐渐减小,在入岩2.5 m时达到最小值169.4 kN,之后缓慢增加,但幅度不大。

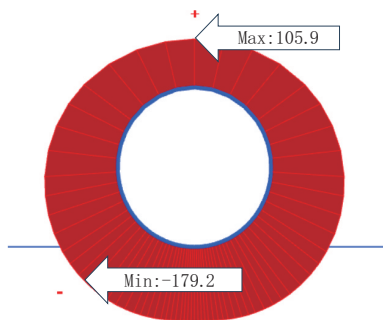


图7 结构刚接触岩层时的轴力图(单位:kN)

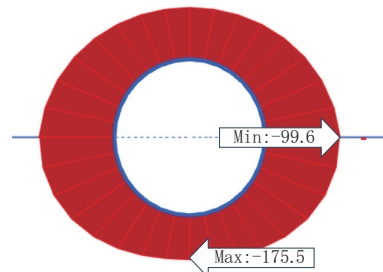


图8 入岩1.75 m时的轴力图(单位:kN)

图11是每个工况下,轴力最大最小值之间的差值,当入岩深度达到1.25 m时,轴力最大最小值之间的差值最小,为73.3 kN,占最大轴力的37.31%,说明结构拱效应发挥显著,荷载大部分转化为结构轴力。在全部进入岩层后,轴力最大最小值之间的差值最

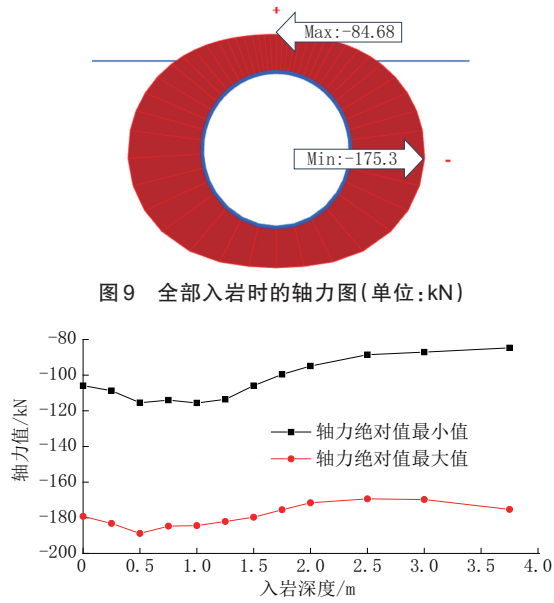
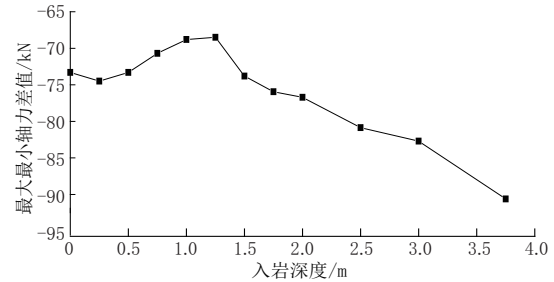


图 10 结构轴力随入岩深度的关系曲线

大,为 90.62 kN,占最大轴力的 51.69%,如图 9 所示,结构将承担相对较大的弯矩。



通过对结构弯矩和轴力分析,都可以验证管廊结构进入岩层 120° 支承角范围,岩层能够使得结构的拱效应得到最大程度的发挥,结构受力最为有利。但实际情况千变万化,应根据具体情况进行分析,若直接采用 120° 支承角计算,误差较大,结构的安全将难以保证。

3.2 岩层倾斜对结构受力的影响

上一节分析了结构进入岩层不同深度对结构受力的影响,但是在本项目的工程实际中,岩层起伏大,变化剧烈,岩层倾斜角度大。为分析不同岩层倾斜角对结构受力的影响,选取结构中心点进入岩层一半时,即入岩 1.75 m 时的工况,通过调整岩层倾斜角度进行分析。

当岩层倾斜角度达到 10° 时,结构弯矩见图 12。与岩层为水平时的工况相比(见图 4),左右两侧负弯矩呈现显著差异,岩层高处最大负弯矩较大,为 -15.42 kN·m,岩层低处负弯矩较小,为 -12.55 kN·m,两者相差 22.9%,表明倾斜岩层导致结构弯矩分布呈

现明显的不对称性。岩层水平时,两侧负弯矩值相等,均为 14.59 kN·m,岩层倾斜时结构负弯矩最大值要比岩层水平时,增加 0.83 kN·m,增加 5.7%,结构计算时要特别注意。

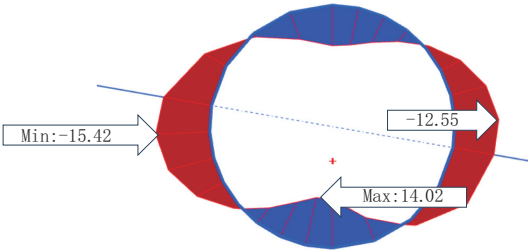


图 12 岩层倾斜 10° 时的弯矩图(单位:kN·m)

同时,结构的变形也体现出明显的不对称性,管廊结构的变形见图 13,由于岩层低的一侧结构处于软土中的比例更高,土体提供的支承作用较弱,结构体现出向岩层较低处变形的趋势。在管节中部位位置,水平变形 0.33 mm,竖向变形 1.0 mm,水平变形占到竖向变形的 33%。

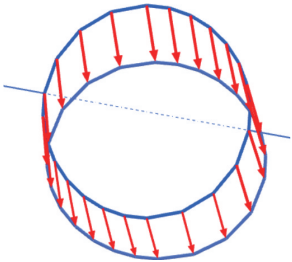
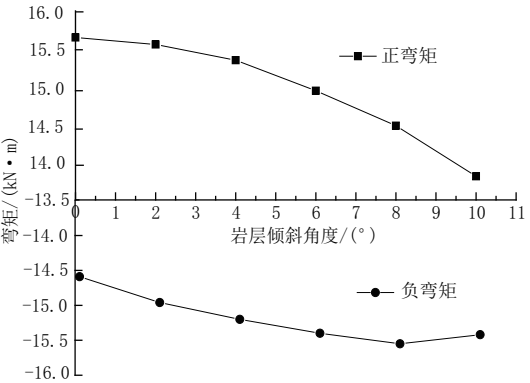


图 13 岩层倾斜 10° 时的结构变形

图 14 展示了随着岩层倾角的改变,结构正负弯矩的变化情况。随着岩层倾角的增加,结构上下部的正弯矩逐渐减小,但左右两侧负弯矩逐渐增大。针对岩层倾斜的情况,在管廊管节设计时,应特别加强结构外侧主筋的设置。



4 结 论

本文依托福州江南片区综合管廊工程项目,针对复杂“上软下硬”地层条件,通过数值模拟方法系

统分析了大直径顶管的受力与变形特征,得出以下主要结论:

入岩深度对顶管结构内力影响显著。刚接触岩层时,结构最大正负弯矩均达到峰值,随后逐渐减小并在特定深度后趋于稳定;当顶管进入岩层 120° 支承角范围时,拱效应得到最大程度发挥,结构受力状态最优。但若不在这个区间内,若直接采用 120° 支承角计算,误差可能达到数倍。

岩层倾斜会引发顶管结构受力与变形的不对称性。与水平岩层工况相比,倾斜岩层下结构左右两侧负弯矩存在明显差异,高处负弯矩绝对值更大,且整体负弯矩绝对值随倾角增加而增大;同时结构向岩层较低处变形,水平变形占竖向变形比例较高,设计中需加强结构外侧主筋配置以应对这一特性。

复杂地层中的顶管结构设计,不能简单套用均匀地层的相关规范或 120° 支承角的固定计算模式。设计时需充分结合工程实际地质条件,重点考量入岩深度、岩层倾角等关键影响因素,并通过数值模拟等方法开展针对性分析,方可确保结构设计的安全性与合理性。

参考文献:

[1] 牛国伦,马保松,张鹏,等.大直径顶管施工管土相互作用实测分析——以佛山市电力隧道顶管工程为例[J].隧道建设(中英文),

2021,41(8):1353-1360.

- [2] 王志林,蒋望.柳州市桂柳路综合管廊总体设计方案研究[J].城市道桥与防洪,2025(2):311-316.
- [3] 钱七虎,陈晓强.国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):191-194.
- [4] 雷晗,陈锦剑,王建华,等.大直径顶管的管道受力特性分析[J].上海交通大学学报,2011,45(10):1493-1497.
- [5] CECS 246:2008 给水排水工程顶管技术规程[S].
- [6] 刘翔.软土中4 m直径混凝土顶管施工管土受力特性测试与分析[D].上海:上海交通大学,2014.
- [7] 肖先.上软下硬复合地层顶管施工技术研究[J].铁道建筑技术,2021(5):118-122.
- [8] 徐毅夫,肖洪波,倪志国,等.上软下硬砂砾地层地铁通道施工技术比选[J].施工技术(中英文),2023,4(52):46-50.
- [9] 吴正恺.上软下硬地层大断面类矩形顶管结构的力学特性分析[J].中国市政工程,2023(6):68-72.
- [10] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等.上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J].岩土力学,2021,42(3):833-845.
- [11] 张晋勋,赵刚,张雷,等.HSS模型在盾构模拟中的应用及参数敏感性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊2):618-625.
- [12] 于瑞东,邹丹,闫程晟.基坑工程施工对邻近防汛墙安全影响分析[J].城市道桥与防洪,2024(10):234-238.
- [13] 夏华灿.MJS工法在福州滨海涉铁软基加固工程中的应用研究[D].福州:福建工程学院,2023.
- [14] 胡钟予.福州滨海软土基坑SMW工法桩支护变形监测与数值模拟[D].福州:福建理工大学,2023.
- [15] 张晓悦,胡凯,乐豪峰,等.基于ABAQUS的群锚加固岩质边坡效果评价方法研究[J].水利水电技术,2012(43):83-85.