

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.11.052

# 大口径排水顶管在山地城市的应用

向建鹏

(重庆市勘测院, 重庆市 401121)

**摘要:** 在市政排水工程中,顶管工法相较于传统开槽工法具有对环境影响小、地下管网迁改量少、征地拆迁少等优点。以山地城市大口径(DN≥2 000)排水顶管工程为例,介绍了顶管受力估算和管道允许顶力计算,分析了沉降原因,介绍了沉降数值估算方法,分析了影响顶力的主要因素,并提出相关控制措施,为重庆等类似山地城市顶管工程设计及施工提供了一定参考。

**关键词:** 大口径(DN≥2 000)顶管;顶力估算;沉降数值估算;顶管受力;影响因素;控制措施

中图分类号: TU992.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0219-03

## 0 引言

在市政排水工程中,顶管工法相较于传统开槽工法具有对道路交通影响小、地下管网迁改量少、征地拆迁少等优点,在穿越山地地区更具有土石方开挖工程量少的显著优势,有利于保护山水本底,具有良好的经济和生态效益,有利于推动实现人与自然和谐共生。

## 1 工程概况

### 1.1 工程概况

本项目位于重庆市大渡口区金鳌山,因北侧道路规划雨污水排出口受限,需将管径为 DN1200 的雨水和管径为 DN400 的污水由北引至南侧市政预留排水接口处。道路东侧地势较高,为金鳌山非建设用地。道路西侧地势较低,为在建的开发商地块,用地条件局促。如图 1 所示排水管道由北向南敷设,需要穿越两处高度超过 20 m 的山脊,顶管中段为最不利点,其覆土深度为 6 m,故设计考虑采用顶管工法。方案将雨污水管道共沟敷设,采用管径为 DN2400 的钢筋混凝土钢承口接头的顶管专用管道,管壁厚度为 230 mm,混凝土强度等级 C50,单次顶进长度为 311 m。

### 1.2 地质概况

根据设计方案分析,顶管管底标高为 301.121 ~ 298.161 m,覆土深度约 6 ~ 29.2 m 不等,管道均位

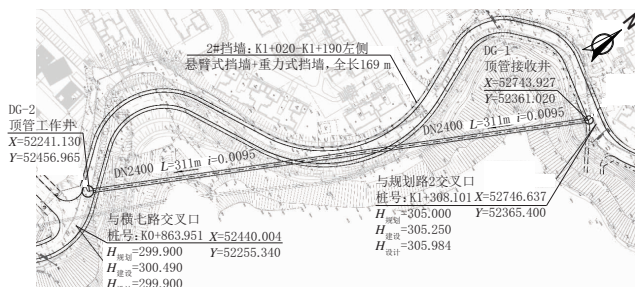


图 1 项目平面图

于中风化岩石内,围岩岩性主要为砂质泥岩,中风化岩体厚度 0 ~ 22.0 m,围岩等级为 IV 级。地下水类型为基岩裂隙水,依据勘察结论:工程范围的基岩内地下水不发育,场地基岩裂隙水贫乏。拟建场地地质条件较好,未发现不良地质现象和不良地质作用,以及对工程不利的埋藏物。

本项目顶管计算参数取值见表 1。

表 1 计算力学参数

编号	管径 / mm	天然重度 / (kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 φ / (°)	泊松比 μ	平均摩擦阻力(触变泥浆减阻)/(kN·m <sup>-3</sup> )
1	2 400	230	37	0.38	3

## 2 顶管受力计算

### 2.1 管道总顶力估算

依据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS246:2008)<sup>[1]</sup>,管道总顶力估算公式:

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

式中: $F_0$  为总顶力标准值, kN;  $D_1$  为管道外径, m, 取 2.86 m;  $L$  为管道设计顶进长度, m, 取 311 m;  $f_k$  为管道外壁与土的平均摩擦阻力, kN/m<sup>2</sup>, 采用触变泥浆减阻,本工程穿越砂质泥岩,形成稳定的泥浆套时可取

收稿日期: 2023-02-08

作者简介: 向建鹏(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程设计工作。

3kN/m<sup>2</sup>[2];NF为顶管机的迎面阻力,kN。

采用大刀盘切削的泥水(土压)平衡式顶管机,顶管机迎面阻力计算公式:

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

式中: $D_g$ 为顶管机外径,m,一般大于管道外径约2~6cm,取2.9m; $\gamma_s$ 为土的重度,kN/m<sup>3</sup>,取25.6kN/m<sup>3</sup>; $H_s$ 为覆盖层厚度,m。

本项目顶管穿越砂质泥岩厚度最大为29.2m,依据详细地质勘察,该砂质泥岩为稳定土层,可以考虑顶进管节时在顶管上方形成“土拱效应”,在考虑“土拱效应”情况下,作用在管道上的垂直土压力并不是上覆土体自重,主要为拱顶下松弛层厚度的土体自重,拱顶以上稳定土层直接作用在管顶上的垂直土压力较小可忽略。

故可认为顶管顶上覆盖层计算厚度为拱顶松弛层厚度,该厚度计算可采用太沙基松弛土压力公式计算[3]:

$$H_s = \frac{0.5 + \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})}{K_g \tan \phi} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{H}{D_1} \cdot \frac{K_g \tan \phi}{[0.5 + \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})]}} \right) \cdot D_1 \quad (3)$$

式中: $H_s$ 为松弛层厚度,m; $D_1$ 为管道外径,m,取2.86m; $\phi$ 为土体内摩擦角,°,取37°; $H$ 为覆土层厚度,m,取最大覆土层29.2m; $K$ 为静止土压力系数, $K = \frac{\mu}{1-\mu}$ ,由泊松比 $\mu$ 计算得 $K=0.6129$ 。

计算得到 $H_s$ 约为6.13m, $H_s$ 取7m。代入式(2),计算得到顶管机迎面阻力 $N_F$ 约为1183kN。代入式(1),估算管道总顶力 $F_0$ 为9562kN。

### 2.2 钢筋混凝土管道允许顶力计算

钢筋混凝土管顶管传力面允许最大顶力可按式(4)计算:

$$F_{dc} = 0.5 \frac{\phi_1 \phi_2 \phi_3}{\gamma_{Qd} \phi_5} f_c A_p \quad (4)$$

式中: $F_{dc}$ 为混凝土管道允许顶力设计值,N; $\phi_1$ 为混凝土材料受压强度折减系数, $\phi_1=0.90$ ; $\phi_2$ 为偏心受压强度提高系数, $\phi_2=1.05$ ; $\phi_3$ 为材料脆性系数, $\phi_3=0.85$ ; $\phi_5$ 为混凝土强度标准调整系数, $\phi_5=0.79$ ; $F_c$ 为混凝土受压强度设计值,N/mm<sup>2</sup>; $A_p$ 为管道的最小有效传力面积,mm<sup>2</sup>; $\gamma_{Qd}$ 为顶力分项系数, $\gamma_{Qd}=1.3$ 。

选用顶管专用钢筋混凝土管,管道混凝土强度等级C50,混凝土受压强度设计值23.1N/mm<sup>2</sup>。管道的最小有效传力面积1.65×106mm<sup>2</sup>,代入式(4),计算得到混凝土管道允许顶力 $F_{dc}$ 设计值为14988.6kN,

大于管道总顶力 $F_0$ 为9562kN。

依据估算结果分析,本项目DN2400的钢筋混凝土顶管,采用触变泥浆减阻的措施条件下,在砂质泥岩中一次顶进311m是基本可行的。

## 3 地表沉降数值估算

### 3.1 沉降原因分析

顶管掘进引起的地表沉降分布是三维的,随机头掘进而动态变化的。引起地面沉降或隆起因素很多,主要有以下几方面:

(1)工具管开挖引起的地层损失。

(2)掘进机具与土体、顶管管节与土体之间的摩擦力。

(3)顶进轴线的偏差和工具管的纠偏,对一侧土体的挤压,另一侧则产生间隙,造成地层损失。

(4)掘进机前方土体的开挖和掘进机、管节外周空隙,造成土体产生径向位移。

除此之外,地层损失还与工程地质情况、顶管管径、顶管机设备、操作技术水平、顶管纵向轴线垂直度以及顶管持续时间、注浆情况等很多不可预见的因素有关。因此很难精确计算顶管引起的地面沉降,一般对地面沉降计算只能估算。

### 3.2 沉降数值估算

沉降分析一般采用的peck法估算公式,peck法公式假定在土体不排水和体积不可压缩的条件下,地层损失的体积等于沉降槽的体积,提出了估算顶管上方地表某点沉降的公式[4]:

$$S_{(x)} = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i}\right) \quad (5)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i} = \frac{0.313 3V_L D_1^2}{i} \quad (6)$$

式中: $S_{(x)}$ 为顶管上方某点沉降量,m; $X$ 为顶管轴线的横向水平距离,m; $S_{\max}$ 为顶进管道轴线上方的最大地面沉降量,m; $V_s$ 为顶管单位长度土体损失量,可根据土体损失率进行计算; $I$ 为地面沉降槽宽度系数,m; $D_1$ 为顶管外径,m; $V_L$ 为土体损失率,%,在采取注浆及压力平衡法施工时,土层损失率一般为1%~3%。

对于 $i$ 取值,按照刘建航等[5]提出的公式计算:

$$i = \frac{H_s + D_1 / 2}{\sqrt{2\pi} \cdot \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})} \quad (7)$$

式中: $H_s$ 为管顶至地面的覆土厚度,m; $\phi$ 为土体内摩擦角,°,取37°。

依据管道纵断面设计,取最不利覆土深度  $H_s=6\text{ m}$ ,  $\phi=37^\circ$ ,  $D_1=2.86\text{ m}$ ,  $V_L=3\%$ ,分别代入式(5)~式(7),计算得  $i=5.945\text{ m}$ ,可得理论 Peck 公式为:

$$S_{(x)}=0.0129 \cdot \exp(-0.014 x^2) \quad (8)$$

以最不利点覆土 6 m,按照土体损失率 3%,依据理论 Peck 公式计算,得到沉降曲线如图 2 横断面地表沉降曲线所示。

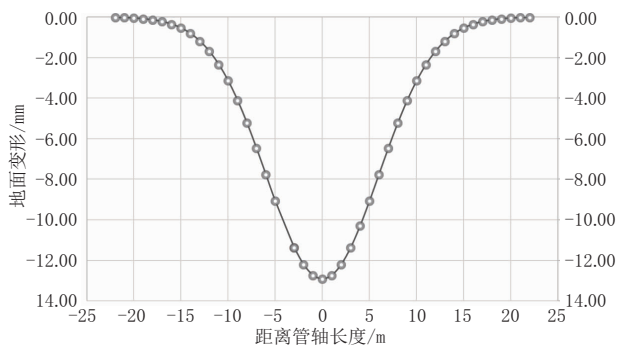


图 2 横断面地表沉降曲线

其开挖断面管轴中心处的最大沉降量为 12.9 mm,满足《给水排水工程顶管技术规程》(CECS246:2008)公路沉降量不大于 20 mm 的要求。

值得注意的是,在管径、覆土深度等确定的情况下,土体损失率的控制对于顶管工程的沉降控制尤其重要,故对施工设备、施工工艺、注浆工艺和操作技术水平提出了较高的要求。

## 4 影响顶力的主要因素分析和控制措施

### 4.1 影响顶力的主要因素

影响顶力的因素有:地层岩性、地下水位高低、管道自身情况、管道尺寸与埋深、注浆润滑、中继间设置、方向纠偏、管道超挖、顶进距离、施工停顿时间间隔、管道弯曲大小、施工技术水平高低等<sup>[6]</sup>。经分析,影响本项目顶管顶力的主要因素如下:

#### (1) 地层岩性

不同类型地层的岩土性质与相同类型的管壁之间的平均摩阻力相差较大,粉细土与钢筋混凝土管壁之间的平均摩阻力是岩石的 3~5 倍。除了地层岩性导致的摩擦系数不同外,地层的自稳定性也对顶力有巨大影响。若顶管穿越地层处土层能形成“拱顶效应”,则作用在顶管上的土压力较小,反之则大。

#### (2) 顶程、管道埋深、管道尺寸和管道自身状况

管道总顶力的大小与顶进长度  $L$ 、管道外径  $D$ 、覆盖层厚度  $H_s$  成正比关系。同时,管道的自身状况如管材类型、自重大小、外表粗糙程度、管道接头类别等,均影响平均摩阻力大小。

#### (3) 注浆润滑

触变泥浆的制浆工艺和注浆水平,直接决定了泥浆的黏性系数、泥浆套的完整性和稳定性。若触变泥浆配比不合理、注浆压力不合理,均会影响泥浆减阻性能的发挥。

#### (4) 顶进方向偏离

顶进过程中需要持续地对顶进方向进行修正,管道纠偏过程中致使管道外侧土压力不对称分布,管壁会与岩层直接接触,增大顶进阻力。

#### (5) 施工停顿时间间隔

顶进施工停顿时间间隔时间过长,触变泥浆静置导致水分离析出来,致使减阻失效,重新顶进施工时顶力会增加。

综上所述,顶管顶进阻力主要克服顶管机前端的迎面阻力和管壁的摩擦阻力。顶管机的迎面阻力主要与土体的自重和覆盖层的厚度密切相关,在总阻力中占比相对较小,不随顶进长度增加而增加。管壁的摩擦阻力与地层岩性、管材类型、管道外径尺寸、泥浆减阻等密切相关,在总阻力中占比相对较大,随顶进长度的增加而增加。尤其与地层岩性、注浆水平和施工技术密切相关。

## 4.2 主要控制措施

基于影响顶力的主要因素分析,本项目施工主要控制措施如下:

(1)合理选择顶进路线,顶进线路均控制在砂质泥岩中,岩体能形成良好的“拱顶效应”,可一定程度上减小顶进阻力。

(2)选择外壁光滑、接口严密的顶进专用管道,并采取管外壁涂刷润滑涂层的方式进一步减阻。

(3)采用触变泥浆减阻。严格控制制浆工艺和注浆工艺,保证泥浆的减阻性能;合理选择注浆压力和布设注浆孔,以形成完整稳定的泥浆套。

(4)严格控制顶进过程中的方向偏差和自转偏差,以免管壁与土体直接摩擦接触和大范围扰动土体。顶进纠偏必须勤测量、多微调,纠偏角度应保持在  $10' \sim 20'$ ,不得大于  $1^\circ$ ,并设置偏差警戒线。

(5)严格控制吊装管节等正常施工作业停顿时间,保证触变泥浆的减阻性能,尽量避免非正常情况下的施工停顿。

顶管顶力计算为理论公式所得,实际施工中顶管顶力所受影响因素复杂多变,各种影响因素的影响作用很难量化<sup>[7]</sup>。建议施工过程中应实时监测顶进过程中顶程与顶力的变化曲线,动态监测顶进方向、

(下转第 226 页)



由表6可知,示范工程中的伸缩缝混凝土流动度、凝结时间等性能与最优配方下材料的室内性能相当,抗压强度和抗折强度略低于室内测试值,其各项指标均满足设计要求,工程应用效果良好。本研究成果可为其他项目应用提供技术指导。

## 4 结 语

(1)聚合物胶粉最佳掺量为2%,聚丙烯纤维最佳掺量为2%。在该掺量下,材料流动度能达到190 mm左右,凝结时间控制在20~25 min,2 h抗折强度和抗压强度分别达到7.4 MPa和26.2 MPa,28 d抗折强度和抗压强度分别达到8.5 MPa和50 MPa以上,干缩率小于0.015%。

(2)少量的聚合物胶粉能改善砂浆的流动度,提高凝结时间,增加材料的力学强度,改善干缩性,但过多的聚合物胶粉会形成聚合物薄膜,影响砂浆密实性,使其力学强度降低。

(3)聚丙烯纤维随着掺量的增加会降低砂浆的流动度,减少凝结时间,但能大幅提高砂浆抗折强度,对抗压强度影响不大。

(4)通过把快速修补材料应用于G326国道实际工程当中,验证得到材料的流动度、凝结时间、抗折强度和抗压强度均满足设计要求,可推广应用于类似工程之中。

## 参考文献:

- [1]刘孝.桥梁伸缩缝施工工艺及要点分析[J].中国高科技,2022(9):68-69.
- [2]王延平,赵晓峰.公路桥梁伸缩缝病害案例分析[J].交通科技,2013(增刊1):37-39.
- [3]刘淑娟.普通公路桥梁伸缩缝的病害原因分析及维修措施[J].科学技术创新,2017(3):248.
- [4]张海涛.高速公路桥梁伸缩缝病害原因分析和快速维修更换工艺[J].交通标准化,2012(2):123-125.
- [5]史文兴.高等级公路桥梁伸缩缝常见病害分析及维修养护措施[J].交通世界,2016(22):31-33.
- [6]王凯,葛翠翠,李柏殿,等.公路桥梁伸缩缝过渡区混凝土修复技术研究[J].硅酸盐通报,2017,36(8):2838-2843.
- [7]韩雨生,李娜,韩微微.聚合物和矿物掺合料对水泥砂浆性能的影响研究[J].路基工程,2017(5):119-124.
- [8]曾德亮,刘艳,闫东波,等.聚合物砂浆作为道路养护材料的应用研究[J].新型建筑材料,2020,47(9):119-122.
- [9]刘磊,魏镇,李庆涛.聚合物砂浆强度发展规律的研究[J].混凝土,2020(5):102-104.
- [10]罗炉,雷宗建,颜加俊.聚丙烯纤维改性砂浆力学性能研究[J].湖南交通科技,2017,43(3):62-66.
- [11]丁明浩,高玥,方明胜,等.聚丙烯纤维砂浆物理力学性能试验研究[J].华南地震,2014,34(增刊1):80-84.
- [12]李萍,何流,梁旭之,等.桥梁伸缩缝快速修补材料配制及性能研究[J].公路交通技术,2023,39(2):114-119.
- [13]康明旭,黄乙纯,鲁耀刚,等.掺聚合物胶粉的硫铝酸盐水泥砂浆耐久性研究[J].四川水泥,2018(11):7-8.
- [14]秦龙,迟玉萌,杨晨熙,等.聚丙烯纤维对水泥砂浆性能影响研究[J].江苏建筑,2022(4):105-108,120.

(上接第221页)

调整顶力参数和注浆工艺等措施,保障工程顺利实施。

## 5 结 语

本文以山地城市大口径顶管工程应用为例,介绍了顶管顶力估算方法,为顶管管材选择、顶管设备选型提供了参考。分析了地表沉降原因,介绍了沉降估算方式,提出在顶管施工中土体损失率的控制对于顶管工程的沉降控制尤其重要。同时,分析了影响顶力的主要因素,并提出了相应的施工控制措施,为其他类似项目设计及施工提供一定参考。

## 参考文献:

- [1]CECS246-2008,给水排水工程顶管技术规程[S].
- [2]陈杨,马保松,曾聪.顶管施工的地表沉降数值分析和顶力计算[J].中国给水排水,2020,36(20):27-31.
- [3]丁传松.直线及曲线顶管施工中的顶推力研究[D].南京:南京工业大学,2004.
- [4]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.
- [5]刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [6]马龙飞,马保松.顶管顶进力计算方法综述与探究[J].特种结构,2019,36(3):26-35.
- [7]向安田,朱合华,丁文其.顶管施工中顶力和平均摩阻力与顶程关系分析[J].岩土力学,2008,29(4):1005-1009.