

# 郑东新区顶管施工中顶进阻力的确定方法探讨

王刚<sup>1</sup>, 景兆凯<sup>1</sup>, 吕小凡<sup>1</sup>, 师永霞<sup>1</sup>, 何波<sup>2</sup>

(1. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 2. 唐山市青少年宫, 河北 唐山 063000)

**摘要:**介绍顶管施工尤其是长距离顶管施工中顶进阻力的重要性, 列举了采用《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)、《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)计算顶进阻力的公式和日本下水道协会制定的顶进钢筋混凝土管顶力的计算公式。在郑东新区土压平衡顶管工程实例中对顶进阻力进行了测试和研究, 指出理论计算结果与实际值之间存在的差异。提出了适合郑东新区的顶管顶进阻力的计算方法。

**关键词:**土压平衡顶管; 长距离顶管; 顶进阻力; 摩阻力; 郑东新区

**中图分类号:** TU992; P634.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0088-05

**Discussion of Jacking Resistance Determination Method in Pipe-jacking Construction in Zhengdong New District/** WANG Gang<sup>1</sup>, JING Zhao-kai<sup>1</sup>, LU Xiao-fan<sup>1</sup>, SHI Yong-xia<sup>1</sup>, HE Bo<sup>2</sup> (1. No. 2 Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. Tangshan Youth & Children's Palace, Tangshan Hebei 063000, China)

**Abstract:** This paper introduces the importance of pipe jacking resistance in pipe jacking construction, especially in long distance pipe jacking construction. The formulas for calculating jacking resistance in Technical Specification for Pipe Jacking in Water Supply and Drainage Engineering(CECS:2008) and Code for Construction and Acceptance of Water Supply and Drainage Pipeline Engineering(GB 50268—2008) as well as the formula for calculating jacking force of jacking reinforced concrete pipe made by Japan Sewer Association are listed. In a case of earth pressure balancing pipe jacking engineering in Zhengdong new district, the jacking resistance is tested and studied, the difference between theoretical calculation results and actual value is pointed out and new calculating method for the pipe jacking resistance suitable for Zheng Dong new district is put forward.

**Key words:** earth pressure balancing pipe jacking; long distance pipe jacking; jacking resistance; frictional resistance; Zhengdong new district

顶管是城市建设中施工地下管道的一种常用方法,具有明挖铺管施工所不具有的优越性。顶进阻力是制约顶管施工尤其是长距离顶管施工的一个重要因素,它直接决定顶管的施工方案,也影响到工程的造价高低。顶进阻力包括工作面的迎面阻力和管壁与其四周土体之间的摩阻力2部分,而后者则是决定总顶进阻力大小的主要因素。摩阻力是管道工程勘察中要提供的一个参数指标,如何提供一个准确的摩阻力值一直以来也是勘察技术人员比较头疼的问题。笔者根据顶管施工的经验,提出根据实测顶力反算摩阻力,再由迎面阻力和摩阻力准确计算拟建顶管顶进阻力的技术方法。

## 1 顶进阻力的概念和计算顶进阻力的经验公式

### 1.1 顶进阻力的概念及影响摩阻力的因素与注浆减摩原理

顶进阻力是指管道顶进过程中管外壁四周受土体摩擦产生的摩擦阻力及管端受土压、水压造成的阻力,阻止管节向前移动或滑动。影响顶进阻力的因素很多,主要有土层的物理力学性质、场地水文地质条件、顶管管道的尺寸和埋深、管壁的粗糙程度和顶管施工方法,以及施工误差造成的管道轴线弯曲情况等。为减小顶管总顶进阻力,保证顶管单元的顺利完成,施工中常用压注触变泥浆的办法来减小摩阻力。就是在顶管过程中通过注浆管在管外壁与周围土体之间注入润滑浆液,使触变泥浆在管道周围形成一个封闭的泥浆套。当顶进管道时,将克服管壁与土层之间的摩擦力转化为触变泥浆的剪切力,降低管壁与土之间的摩擦系数,从而达到减小摩阻力的效果。这种方法工艺简单,效果好,而且有利于提高顶进速度,是目前长距离顶管施工中经常采用的减摩措施。

收稿日期:2016-12-20; 修回日期:2017-03-27

作者简介:王刚,男,汉族,1971年生,水环分院副院长,高级工程师,从事水文地质、工程地质、环境地质工作,河南省郑州市南阳路56号河南地矿大厦6楼607室,617623706@qq.com。

## 1.2 计算顶进阻力的经验公式

影响顶进阻力的因素很多,不同的地区或同一地区不同的地质条件下差别都较大。国内外有多种计算顶管顶进阻力的方法,《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)和《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)也分别提供了计算顶管总顶进阻力的公式。前者是上海市政行业根据本地区触变泥浆减摩顶管施工的经验并结合地区土层的具体条件总结出来的计算公式,这个公式在近些年用得比较多。后者是北京市政工程局根据北京地区顶管中实测顶力统计结果总结出来的经验公式,也是传统计算顶管顶进阻力的公式。日本下水道协会也制定过顶进钢筋混凝土管计算顶力的公式,计算程序相对复杂一些,在国内使用得不多。

1.2.1 《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的顶管顶力计算公式

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

式中: $F_0$ ——总顶力标准值,kN; $D_1$ ——管道的外径,m; $L$ ——管道的顶进长度,m; $f_k$ ——管道外壁与土的平均摩阻力,kN/m<sup>2</sup>,取值见表1所列; $N_f$ ——掘进机的迎面阻力,kN。

表1 触变泥浆减阻管壁与土的平均摩阻力 kN/m<sup>2</sup>

土的种类	软粘土	粉性土	粉细土	中粗砂
混凝土管	3.0~5.0	5.0~8.0	8.0~11.0	11.0~6.0
钢管	3.0~4.0	4.0~7.0	7.0~10.0	10.0~13.0

注:玻璃纤维增强塑料夹砂管可参考钢管乘以0.8的系数。

土压平衡机械顶管掘进机的迎面阻力:

$$N_f = \pi D^2 \gamma_s H_s$$

式中: $N_f$ ——顶管机的迎面阻力,kN; $D$ ——顶管机的外径,m; $\gamma_s$ ——土的重度,kN/m<sup>3</sup>; $H_s$ ——覆土厚度,m。

1.2.2 《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)提供的顶管顶力计算公式

$$P = f \gamma D_1 \left[ 2H + (2H + D_1) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{\omega}{\gamma D_1} \right] L + P_f \quad (2)$$

式中: $P$ ——计算的总顶力,kN; $\gamma$ ——管道所处土层的重度,kN/m<sup>3</sup>; $D_1$ ——管道的外径,m; $H$ ——管道顶部覆土厚度,m; $\varphi$ ——管道所处土层的内摩擦角,(°); $\omega$ ——管道单位长度的自重力,kN/m; $L$ ——管道的计算顶进长度,m; $f$ ——顶进时,管道表面与其周围土层的摩擦系数,其取值可按表2所列; $P_f$ ——

顶进时,工具管的迎面阻力,kN。

表2 顶进管道与其周围土层的摩擦系数

土类	湿	干
粘土、亚粘土	0.2~0.3	0.4~0.5
砂土、亚砂土	0.3~0.4	0.5~0.6

1.2.3 日本下水道协会制定的顶进钢筋混凝土管顶力计算公式

$$P = F_0 + \mu' (\pi B_c q + W) L + \pi B_c c L \quad (3)$$

式中: $P$ ——总顶力,t; $F_0$ ——顶端阻力, $F_0 = 1.3 \pi B_c N$ ,t; $N$ ——标准贯入试验的 $N$ 值; $q$ ——管道上的垂直荷载, $q = p + \omega$ ; $B_c$ ——管道直径; $p$ ——活荷载, $p = 3.78 / (H + 0.1)$ ,当 $p > 1.0$ 时,取 $p = 1.0$ ,t/m<sup>2</sup>; $H$ ——覆土深度,m; $\omega$ ——太沙基公式计算的土的垂直均布荷载, $\omega = \gamma - (2c/B_c) C_e$ ,t; $\gamma$ ——土的重度,t/m<sup>3</sup>; $c$ ——土的粘结力,t/m<sup>2</sup>; $B_c$ ——土的松弛宽度, $B_c = B_t \{ 1 + \sin[45^\circ - (\varphi/2)] \} / \cos[45^\circ - (\varphi/2)]$ ,m; $B_t$ ——管道的直径, $B_t = B_c + 0.1$ ,m; $C_e$ ——太沙基荷载系数, $C_e = [B_c / (2K\mu)] [1 - e^{-(2K\mu/B_c)H}]$ ; $K$ ——太沙基侧向系数,1.0; $\mu$ ——土的摩擦系数, $\mu = \tan \varphi$ ; $\varphi$ ——土的内摩擦角; $\mu'$ ——土和管的摩擦系数; $W$ ——管道单位长度的质量,t/m; $L$ ——顶进长度,m。

这些计算公式都是根据特定地区顶管施工经验总结出来的,计算结果差别也比较大,在不同的地区也不一定适用。由于影响顶进阻力的因素较多,目前为止,还没有一个可以利用管道设计参数和土层的岩土指标来准确计算顶进阻力的成熟的公式或方法。本文将以郑东新区的顶管工程为实例,探讨一下几种顶力经验公式的计算结果与实际顶力值的对比情况,提出另外一种计算顶进阻力的技术方法。

## 2 区域工程地质与水文地质条件

### 2.1 地质条件

据勘察资料,本区管道勘探深度范围内地层主要由全新统填土 $Q_4^{ml}$ ,粉土 $Q_4^{al+pl}$ ,粉质粘土 $Q_4^{al+pl}$ 和粉细砂 $Q_4^{al+pl}$ 组成。根据地层结构特点、成因和地质时代及其工程地质特征,主要分为4个主要地层及2个亚层,自上而下为:

①填土 $Q_4^{ml}$ ,杂色,疏松,层厚0.5~1.2m,层底标高77.85~81.88m;

②粉土 $Q_4^{al+pl}$ ,褐黄色,稍湿,稍密,层厚1.0~

6.4 m,层底标高 74.40~78.92 m;

②<sub>1</sub> 粉质粘土  $Q_4^{al+pl}$ , 褐灰色, 软塑, 层厚 0.5~4.0 m, 层底标高 73.37~77.27 m;

③ 粉土  $Q_4^{al+pl}$ , 褐黄色, 湿, 稍密, 层厚 0.7~4.8 m, 层底标高 70.75~75.90 m;

③<sub>1</sub> 粉质粘土  $Q_4^{al+pl}$ , 褐灰色, 软塑, 层厚 0.9~

5.1 m, 层底标高 69.24~73.29 m;

④ 粉土  $Q_4^{al+pl}$ , 褐黄色, 湿, 稍密, 层厚 1.0~5.2 m, 层底标高 67.90~71.54 m;

⑤ 粉细砂  $Q_4^{al+pl}$ , 灰褐色, 饱和, 中密—密实, 该层在 20 m 勘探深度内未揭穿。

各土层岩土参数如表 3 所示。

表 3 土层岩土参数指标统计

层号	岩土名称	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙 比 $e$	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	粘聚力/ kPa	标贯试验 击数 $N$	地基承载力特征 值 $f_{ak}$ /kPa	管壁与土摩阻力/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	触变泥浆减阻管壁与 土摩阻力/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )
②	粉土	17.5	0.776	14.0	8.7	10.1	90	40	8.0
② <sub>1</sub>	粉质粘土	18.1	0.848	11.3	25.0	5.8	85	35	7.0
③	粉土	18.1	0.788	20.7	11.0	11.2	130	40	10.0
③ <sub>1</sub>	粉质粘土	17.7	0.886	12.9	21.5	9.4	110	35	7.0
④	粉土	18.9	0.721	16.2	9.8	12.3	140	45	10.0
⑤	粉细砂	19.0	0.584	28.0	0	32.0	180	55	15.0

## 2.2 水文地质条件

据勘察资料,场地地下水类型为第四系孔隙潜水,地下水位埋深 3.25~7.27 m,年变幅 2~3 m,接受大气降水和河流补给,排泄类型为自然蒸发和人工开采活动。

## 2.3 工程概况

郑州市郑东新区污水处理厂厂外配套管网工程管道沿城市主干道一侧布置,管道为 D3000 钢筋混凝土管,埋深 11.7~13.1 m。根据施工图设计,工作井采用钢筋混凝土沉井结构,管道施工采用顶管施工工艺。场地地下水位埋深约 3.5 m,顶管施工层位为第③<sub>1</sub>层粉质粘土层和第④层粉土层,采用土压平衡机械顶管施工工艺。推进设备采用 4~8 台 DTL350-18 型等液压千斤顶,单千斤顶提供最大顶力为 2000 kN。为减少施工对周边居民及道路交通的影响,经综合研究取消 4 个顶管接收井,接收井取消后使对应的 4 个区段管道单向顶进长度均超过了 600 m,最大长度达 678 m。

## 3 顶进阻力计算

根据勘察资料提供的岩土参数,以埋深 12.0 m、单向顶进长度 678 m 的 D3000 钢筋混凝土管顶管单元为代表,分别采用 3 种不同方式计算本单元的总顶进阻力。

采用公式(1)即《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的顶力计算公式模拟计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 2261.50$  kN,常态下总顶进阻力为 270505.4 kN,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力

为 55910.3 kN。不计算迎面阻力的情况下,触变泥浆减摩后摩阻力为常态摩阻力的 20.0%。

采用公式(2)即《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)提供的顶力计算公式模拟计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 2261.50$  kN,常态下总顶进阻力为 371771.5 kN。按照 20.0%的摩阻力折减系数,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力应为 76163.5 kN。

采用公式(3)即日本经验公式计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 122.86$  t,即 1228.6 kN,常态下总顶进阻力为 247187 kN。按照 20%的摩阻力折减系数,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力应为 50420.0 kN。

根据以上 3 种经验公式计算触变泥浆减摩状态下 678 m 顶管单元采用土压平衡机械施工的总顶进阻力,计算结果对比如表 4 所示。

表 4 各阶段顶进阻力值

顶进长度/ m	公式(1)计算 顶进阻力/kN	公式(2)计算 顶进阻力/kN	公式(3)计算 顶进阻力/kN
迎面	1512.5	1512.5	1332.6
100	9422.5	12372.5	8572.6
200	17332.5	23232.5	15816.6
300	25242.5	34092.5	23056.6
400	33152.5	44952.5	30296.6
500	41062.5	55812.5	37536.6
600	48972.5	66672.5	44776.6
678	55142.3	75143.3	50423.8

## 4 顶管可行性分析与处理措施

### 4.1 管材抗压强度计算

利用《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的计算公式计算 D3000 强度等级 C50 的钢筋混凝土管允许最大顶力:

$$F_{dc} = 0.5\varphi_1\varphi_2\varphi_3f_cA_p/(r_{Qd}\varphi_5)$$

式中:  $F_{dc}$ ——混凝土管道允许顶力, N;  $\varphi_1$ ——混凝土材料受压强度折减系数, 可取 0.9;  $\varphi_2$ ——偏心受压强度提高系数, 可取 1.05;  $\varphi_3$ ——材料脆性系数, 可取 0.85;  $\varphi_5$ ——混凝土强度标准调整系数, 取 0.79;  $f_c$ ——混凝土受压强度设计值, N/mm<sup>2</sup>;  $A_p$ ——管道最小传力面积, mm<sup>2</sup>;  $r_{Qd}$ ——顶力分项系数, 可取 1.3。

通过计算, 强度等级 C50 的 D3000 钢筋混凝土管的允许最大顶力为 17991.3 kN。

#### 4.2 顶管可行性分析

根据计算结果, 3 种公式计算管道顶进 200 m 的顶进阻力平均值为 18793.8 kN, 大于管材允许的最大顶力值 17991.3 kN, 也大于顶进设备可以提供的最大顶力 16000 kN。也就是说必须采取有效的处理措施, 否则顶管的单元长度不能超过 200 m, 不增加中继间的话 678 m 的顶管单元不可能顺利完成。

勘察资料提供的触变泥浆减摩下混凝土管壁与粉质粘土的摩阻力值为 7.0 kN/m<sup>2</sup>, 按照这个数值计算出来总顶进阻力为 75143.3 kN。本次顶管层位土质均都在第③<sub>1</sub> 层粉质粘土和第④层粉土中, 这两层土在饱水状态下土质很软, 且在扰动下会出现砂土液化现象, 这有利于降低顶进阻力。从经验上判断, 勘察单位提供的管壁与土的摩阻力值 7.0 kN/m<sup>2</sup> 有些偏高。《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的触变泥浆减摩下管壁与软粘土的摩阻力为 3.0~5.0 kN/m<sup>2</sup>, 按照规程提供的摩阻力值下限 3.0 kN/m<sup>2</sup> 进行计算, 总顶进阻力为 25253.8 kN。由此看来, 采取有效的触变泥浆减摩措施并提高注浆减阻效果在降低顶进阻力方面有很大的潜力可以挖掘。

#### 4.3 处理措施

为高效、经济顺利完成本次顶管施工任务, 决定将最长的 678 m 区段作为顶管试验段, 以便准确掌握各项顶进参数, 积累地区施工经验, 科学指导后面的顶管施工。施工过程中利用千斤顶上的油压表对顶力进行连续性跟踪监测, 精确记录每个时段、不同顶进长度时的顶进阻力值。在地面设置沉降变形监测点, 对沉降值进行监测, 及时掌握施工对环境造成

的影响情况, 以便调整施工工艺和技术参数。

根据计算结果分析, 单一采用压注触变泥浆减摩措施不能保证顶管施工顺利完成, 必须在区段中间设置顶进中继间。当顶力达到管材允许顶力的 90% 时, 即顶力达到 16200 kN 时必须设置一道中继间, 以确保管材不被顶坏。按照这种原则结合中继间的常规设置方法, 试验段中分别在距离掘进机机头 160、340、538 m 等处设置了 3 道中继间, 利用中继间将本区段划分为 4 个分段。同时, 采用机头同步注浆和管道跟进补浆相结合的方法确保注浆质量和减摩效果。机头后每 3 根管节设置一根定制的注浆管节, 这根管节四周均布有 3 根 DN30 注浆管, 通过 DN50 总注浆管连接 BM160 型三柱塞式泥浆泵。通过注浆泵向管四周压注触变泥浆, 触变泥浆配比及性能为: 膨润土 15%, 纯碱 6‰, CMC2‰, 含水量 78.8%, 粘度 > 30 s。注浆压力控制在 0.2~0.8 MPa。根据以往施工经验, 控制注浆量不小于计算体积的 1.5 倍, 掘进机外径 3620 mm, 管道外径 3600 mm, 计算出顶管中单位注浆量 < 0.17 m<sup>3</sup>。

### 5 施工中顶进阻力与摩阻力反算

#### 5.1 施工中监测

顶管施工中发现实际顶进阻力值并没有事先估算的那么大, 详细情况如表 5 所列。虽然按照经评审的专项方案要求在预定位置安装了 3 道中继间, 一直到顶管施工结束中继间也没有被开启使用。而且, 监测中发现当注浆压力达到 0.5 MPa 以上时, 注浆量可以达到计算量的 3 倍以上, 减摩效果好且经泥浆置换后控制地面沉降效果也好。

表 5 各阶段实测顶进阻力值

顶进距离/m	实测总顶力/kN	千斤顶数量/个	油缸压强/MPa
迎面	1330	4	5.5
100	2462	4	10.0
200	3938	4	16.0
300	4800	6	14.0
400	4431	6	12.0
500	5908	6	16.0
600	7369	8	12.0
678	8238	8	13.4

#### 5.2 计算顶进阻力与实测顶力对比

对比施工前估算的顶进阻力值与施工中实测顶力值发现: 施工中实际顶力值远小于计算的顶进阻力, 无论机头迎面阻力还是区段总顶进阻力均小于

计算值。而且,实际顶进阻力并不是随着顶管推进长度的增加相应的线性正比增加,而是开始阶段顶力值增加快,中间有趋于稳定甚至有略微降低的区段,最后阶段顶力值又增加较快。实测的机头迎面阻力值与日本经验公式(公式3)计算的值非常吻合。

### 5.3 原因分析

根据施工中顶力变化趋势分析,起到降低顶进阻力作用的关键因素是注浆减摩,注浆减摩是顶管施工一个非常重要的环节。混凝土管与土体之间的摩擦属于滑动摩擦,顶进施工中如果压注的润滑浆液可以在管子的四周形成一个完整的浆套,顶进阻力将大幅度降低。刚开始顶进阶段之所以顶力增加比较快,就是因为浆套没有形成或是形成的浆套不完整,管壁与土之间的摩擦力自然就随着接触面积加大而增加。后期阶段顶力值又增加较快,原因是随着顶管距离加长顶进偏差越来越多,造成管道前进的轨迹不是直线,从而直接导致顶进阻力增加。由于顶管层位土层较软,又处于粉质粘土和粉土的变层部位,注浆压力稍大时,浆液扩散范围较大,因此实际注浆量超过计算注浆量较多。

### 5.4 摩阻力反分析

根据施工中顶力监测结果,利用《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的顶力计算公式反算混凝土管壁与土体的实际摩阻力值(见表6),以用来指导后面的顶管施工方案设计与施工。

表6 摩阻力反分析统计

顶进区段/ m	实测总 顶力值/ kN	区段顶 力值/ kN	机头迎 面阻力/ kN	区段总 摩阻力/ kN	反算摩阻 力/(kN· m <sup>-2</sup> )
0~100	2462	2462	1330	1012	1.00
100~200	3938	2926	1330	1596	1.41
200~300	4800	2192	1330	862	0.76
300~400	4431		1330		
400~500	5908	2438	1330	1108	0.98
500~600	7369	2791	1330	1461	1.29
600~678	8238	2199	1330	869	0.99

摩阻力反分析计算结果表明,试验段在触变泥浆减摩措施下混凝土管壁与土体的单位摩阻力值为0.76~1.29 kN/m<sup>2</sup>。

## 6 应用与效果分析

根据施工监测结果和反分析计算,郑东新区长

距离顶管中在触变泥浆减摩情况下,无论勘察单位提供的管壁与土体的摩阻力值还是《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的摩阻力值均大于实际值。机头迎面阻力值可以根据土层岩土参数和标准贯入试验击数采用日本经验公式计算,摩阻力值可以按照试验段实测顶力值进行反算,这样就可以准确计算出每个拟施工顶管区段的总顶进阻力。在保证注浆质量的情况下,确定的顶力在本区实际顶进长度要大于按照规范下限值计算长度的2~3倍,可以大幅度减少长距离顶管中中继间的使用数量。根据这种地区经验,在郑东新区后续的长距离顶管施工中加强了注浆质量的控制,注浆时按照注浆压力和注浆量双控的原则,注浆压力控制在0.5~0.8 MPa,注浆量不小于计算体积的2~3倍,从而保证了注浆减摩效果。另外,顶进中的每阶段尤其是开始顶进阶段严格控制管道水平向和垂直向的偏差,保证管道轴线顺直,降低管子行进阻力。同时,根据施工区段地质条件计算出施工层位土体的主动土压力和被动土压力,控制掘进机的土仓压力保持在两者之间,降低了施工对环境造成的不良影响。

按照施工中总结的迎面阻力和摩阻力的计算方法,准确计算了各项管单元的顶进阻力,科学指导施工,顺利完成全部顶管施工任务,而且提高了施工效率,降低了工程造价,创造了良好的经济效益。

这种顶进阻力计算方法与施工技术对周边地区的顶管施工也有很大的借鉴意义,值得进一步推广应用。

### 参考文献:

- [1] 余彬泉,陈传灿,等.顶管施工技术[M].上海:人民交通出版社,2003.
- [2] 王刚.郑东新区顶管施工中影响顶进阻力的因素分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(4):32-34.
- [3] 王刚,赵建粮,赵目军.郑东新区地下管道顶管施工中常遇到的几个问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(12):21-29.
- [4] 隆威,傅斌,纪鹏,等.长距离管道顶管下无粘土浆液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):68-70.
- [5] 简崇林,马孝春.长距离顶管工程中注浆减摩作用机理及效果分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(12):65-67,73.
- [6] 白建市,贾志献,肖长波.中粗砂地层中顶管顶进力计算分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(7):37-40.
- [7] CECS:2008,给水排水工程顶管技术规程[S].
- [8] GB 50268—2008,给水排水管道工程施工及验收规范[S].
- [9] JG J8—2007,建筑变形测量规范[S].
- [10] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].