

中粗砂地层中顶管顶进力计算分析

白建市, 贾志献, 肖长波

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:以长春市伊通河排水管网改造工程为例,通过现场实测中粗砂地层条件下采用泥水平衡顶管顶进过程中顶进力的变化情况,系统研究了影响顶进力的因素及其变化规律,并对顶进力的计算进行了理论分析,与实际顶进力进行了对比,最后运用 Matlab 软件对实测数据进行数值分析,得出在该地质条件下的泥水平衡顶管摩擦力和顶进力计算公式。

关键词:中粗砂地层;顶管;顶进力;摩阻力

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2012)07-0037-04

Calculation and Analysis on Jacking Force of Pipe-jacking in Medium Coarse Sand Formation/BAI Jian-shi, JIA Zhi-xian, XIAO Chang-bo (China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Take the example of reconstruction project of Yitong River drainage pipelines in Changchun, based on the change of jacking force measured in jacking process by using slurry balance pipe jacking in medium coarse sand formation, the factors affecting jacking force and the changing rule were systematically studied, and the calculation of jacking force were analyzed and compared to the field measured data, finally the measured data were numerically analyzed with Matlab software, calculation formulas of jacking force and friction under the condition of medium coarse sand formation were deduced.

Key words: medium coarse sand formation; pipe jacking; jacking force; friction

0 引言

随着城市建设的发展,顶管施工技术在地下管道铺设中的应用日益增多。但对该项技术的理论研究还相对滞后,相关设计规范给出的理论公式应用到具体工程中产生的偏差较大。所以,有必要加强对该项技术的理论研究,以更好地指导工程实践。

1 顶进力计算存在的问题

顶进力是顶管施工中的最为关键的因素,顶进力的计算直接影响着工作井后背墙的设计和管节强度的要求以及中继站的设计和设置。特别是在长距离顶管施工中,顶进力计算的不准确会直接导致中继站的数量设置过多或过少,过多则造成人力物力大量浪费;过少则造成顶进力不足,或超过管材的强度引起管节受损,或超过后背墙设计受力极限,墙体剪切破坏而变形失稳,影响工程的顺利进行甚至导致工程失败。

国内外在顶管顶进力计算方面进行了大量研究,得出了许多理论公式、半经验公式和经验公式。对这些公式进行分析后发现存在以下几个问题。

(1)各公式计算偏差很大。理论公式大多建立

在经典土力学的基础上,引入了诸多简化假定,未考虑触变泥浆润滑引起的管土摩擦系数的折减,所得结果比实际值大很多。另外,由于影响顶管顶进力大小的因素较多,不同地区地质条件也有较大的差异,顶管顶进力的变化情况不尽相同,即使是同一地区,同一管段的顶进力变化差异也很大。所以很多经验公式都只能适用于特定的条件,如某种土质、一定的顶进长度、管径范围等^[1]。

(2)在各公式中,摩阻力均采用定值进行计算,而实际因土层和触变泥浆及管壁的相互作用,在顶进过程中,摩阻力随着顶距的增大是不断变化的。

(3)大多数公式未考虑管线偏差、地层变化及地下水的影响。这样导致顶进力计算差异很大。

本文结合长春市伊通河排水官网改造工程,研究影响顶进力的因素及其变化规律,提出中粗砂地层条件下的泥水平衡顶管摩阻力和顶进力计算公式。

2 工程概况

现场测试主要针对其中6段顶管进行,各段具体情况如表1、表2所示。

收稿日期:2012-03-24;修回日期:2012-06-11

作者简介:白建市(1988-),男(汉族),河南禹州人,中国地质大学(武汉)在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事非开挖工程理论与技术相关方面的研究工作,湖北省武汉市鲁磨路388号中国地质大学(武汉)工程学院硕1201013信箱, baijianshi@163.com;贾志献(1986-),男(汉族),河南新乡人,中国地质大学(武汉)在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事非开挖工程理论与技术相关方面的研究工作, 285689027@qq.com。

表1 各项管段现场基本情况

各段 标号	顶进长度 /m	顶进管径 /mm	管道埋深 /m	穿越 地层	注浆 情况	掘进机
01	178.6	2400	9.3	中粗砂	有	泥水平衡
02	176.7	2400	9.9	中粗砂	有	泥水平衡
03	149.3	2200	10.2	中粗砂	有	泥水平衡
04	166.4	2200	10.5	中粗砂	有	泥水平衡
05	173.7	2000	9.6	中粗砂	有	泥水平衡
06	165.9	2000	9.8	中粗砂	有	泥水平衡

表2 顶管段地层状况

层 号	地基(岩)土名称	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力标 准值/kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
1	人工土	17.8	20.3	13.7
2	粉质粘土	18.4	25.1	11.3
3	有机质粉质粘土	18.5	23.9	11.0
4	细砂	(19.0)	(0)	(28.0)
5	中粗砂	(19.5)	(0)	(33.5)
6	全风化粉砂质泥岩			
7	强风化粉砂质泥岩			

3 现场测试及结果分析

3.1 现场测试内容

对现场各段顶管顶进过程进行全程测定,内容如下:

(1)根据千斤顶压力表的读数记录各管段顶进过程中顶进力的变化情况,并绘制出顶进力顶距变化曲线图(见图1);

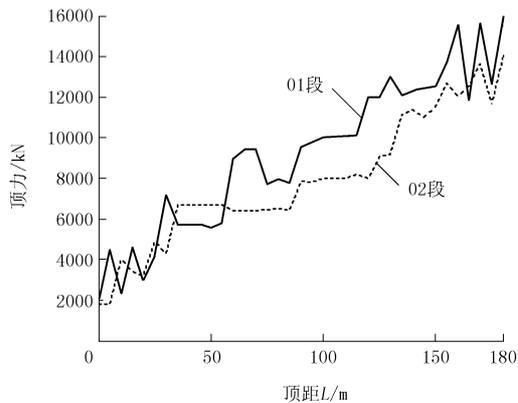


图1 01、02段顶管实测顶进力曲线

(2)通过顶管机舱内的土压力表读数测定掘进面土压力随顶进力的变化关系;

(3)通过全站仪和经纬仪测定顶进过程中管线的水平和高程偏差情况;

(4)通过泥浆泵的读数测定顶进过程中的注浆量和注浆压力变化情况;

(5)每隔一定距离进行土体取样,分析穿越地层土质的变化情况(含水量、含砂量、土的重度、土的内摩擦角等)。

3.2 测试结果分析

综合该工程的工程地质条件和现场测试结果进行分析,总结出顶管施工中影响顶进力的主要因素有如下几个方面。

(1)地层条件和地下水的影响。顶进过程中地层的变化对顶进力的影响是非常明显的。穿越的地层不同,作用在刀盘或工作仓的水、土压力也不一样,导致迎面贯入阻力也不同。另外,不同类型地层和同类型管管壁之间的摩擦阻力往往差别也很大。

在地下水位以下地层中进行顶管施工时,地下水位的变化,必然会引起作用于管壁和掘进面上正压力的变化而导致管壁侧摩擦阻力和迎面贯入阻力的变化。

(2)管道直径和外表面状况的影响。根据实测顶进力变化情况,将相同条件下不同管径的顶进力进行比较发现,顶进力随着管径的增大而呈线性上升趋势,管径愈大,顶进力愈大。

另外,管道外表面材质的粗糙程度、管接头的平滑与否以及管道润滑涂层的减阻性能对顶进摩擦阻力都会产生很大的影响。

(3)注浆的影响。注浆减摩是顶管工程中非常重要的一个环节,尤其在长距离顶管中,注浆效果的好坏,直接关系到顶管施工的成败^[2]。

注浆对顶进力的影响主要体现在泥浆的质量、注浆压力的控制和泥浆套的完整性上。若泥浆的配比选取不合理、搅拌不充分或者静置时间不足,则泥浆的减阻性能就得不到充分发挥。若进出洞口时未采取有效的密封措施或顶进过程中产生泥浆漏失,又不及及时补浆,则不能形成完整泥浆套而使顶进力增大。注浆压力越大,作用在管壁上的压力相应增加,摩擦阻力也就越大;注浆压力过小,由于地下水压力的存在使得泥浆不能有效扩散到顶管周围形成完整泥浆套,则管道侧面阻力会增大^[3]。

(4)顶进中断的影响。顶进过程中中断时间过长,重新启动顶进力会增大。由于停顿时间长,管壁四周松土坍塌在管壁上将管道抱死,同时触变泥浆中水分也会离析出来,失去减阻支承作用,导致顶进阻力增大。该工程四标段一段顶管在顶进过程中遇到障碍物,清除障碍物(10天后)重新启动后顶进力达到9700 kN,但是在顶进2 m之后,顶进力下降到了4500 kN。

(5)管线偏差的影响。由于在顶进过程中会不断出现管线偏差,需要经常纠偏,纠偏过多时因阻力增加也会使顶进力增大。一般在进出洞口处,管线

偏差较大,纠偏次数也较多,顶进力增加很大^[4]。从图 1 中可以看出,在顶进力曲线的两端顶进力变化较剧烈。

4 顶进力计算分析

顶进过程中,管道的受力情况如图 2 所示。

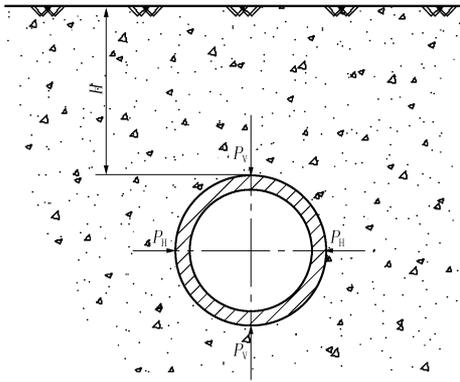


图 2 管道受力分析图

总顶进力计算的理论公式为:

$$R_t = K[\mu(2P_v + 2P_H + P_2) + P_1] \quad (1)$$

式中: R_t ——顶进力, kN; K ——安全系数; μ ——管壁与土间的摩擦系数; P_v ——管顶上的垂直土压力, kN; P_H ——管侧的侧土压力, kN; P_2 ——全部顶进的管段重力, kN; P_1 ——管端部的贯入阻力, kN。

考虑到地下水水位的影响,作用在管道上的垂直压力计算采用文献[5]中给出的公式:

$$P_v = L[\gamma h_1 + (\gamma - \gamma_w)h_w + \gamma_w h_w] \quad (2)$$

$$P_H = \gamma[H + (D_{外}/2)]D_{外} L \tan^2[45^\circ - (\varphi/2)] \quad (3)$$

$$P_2 = GL \quad (4)$$

$$P_1 = (\pi/4)D_{外}^2 \gamma H \quad (5)$$

式中: γ ——土的容重, kN/m³; h_1 ——地下水水位以上覆土厚度, m; γ_w ——水的容重, kN/m³; h_w ——管道顶面至地下水水位的高度, m; H ——管顶覆土深度, m; $D_{外}$ ——管道外径, m; φ ——土的内摩擦角, (°); G ——管道单位长度质量, t/m; L ——管道顶进长度, m; $D_{内}$ ——管道内径, m。

以 01 段顶管顶进 DN2400 钢筋混凝土管道为例:顶进地层为中粗砂, $G = 4.66$ t/m; $H = 7$ m; $h_1 = 4$ m; $\varphi = 33.5^\circ$; $K = 1.2$; $\mu = 0.40$; $D_{外} = 2.86$ m; $D_{内} = 2.40$ m。

将数据代入公式(1)~(5)进行计算可得出:

$$R_t = 276.768L + 1024.8 \text{ kN} \quad (6)$$

从公式(6)可以得知,在顶进至 70 m 左右顶进力已经超过了 20000 kN,并且增长的速度没有变化。显然该顶进力远远超过了顶管工作井设计时所

考虑的顶进力大小,并且与现场实测数据对比也发现是不准确的。

5 顶进力计算的数值模拟

显然,用公式(1)~(5)进行顶进力的计算未考虑注浆润滑作用引起的管土摩擦系数的折减,导致计算结果与工程实际相差较大。在进行长距离顶管时,通常需要采取注浆减阻措施以达到减小侧摩阻力的作用。在考虑注浆减阻条件下,顶进力可以按照以下公式进行计算^[6]:

$$R_t = K(F + P_1) \quad (7)$$

$$F = \pi D_{外} L f \quad (8)$$

式中: F ——侧摩阻力, kN; f ——单位面积管壁与土的平均摩阻力, kN/m²,根据中粗砂地层顶管施工经验,一般取 7~16 kN/m²。

在现场数据收集的基础上,把实测顶进力数据代入公式:

$$f = (R_t - KP_1) / (K\pi D_{外} L)$$

算出各段的单位面积摩擦力随顶距的变化情况,作出 f 与顶距 L 的关系曲线,并采用 matlab 数值分析方法进行曲线拟合,得出 $f-L$ 曲线的拟合曲线和拟合方程。

鉴于篇幅有限,仅对该工程 01、02 两段实测顶进力数据进行分析,结果如图 3、图 4 所示。

01 段摩阻力与顶距关系曲线的拟合方程为: $f = 45.1264L^{-0.2958}$;

02 段摩阻力与顶距关系曲线的拟合方程为: $f = 45.0782L^{-0.2923}$ 。

结果分析:

(1) 顶进初始阶段,泥浆注入量较少,减摩效果不明显,摩阻力较大,但随着顶进距离的增大,泥浆套逐渐形成,注浆减摩的效果逐渐显示出来,单位面积摩阻力逐渐减小;

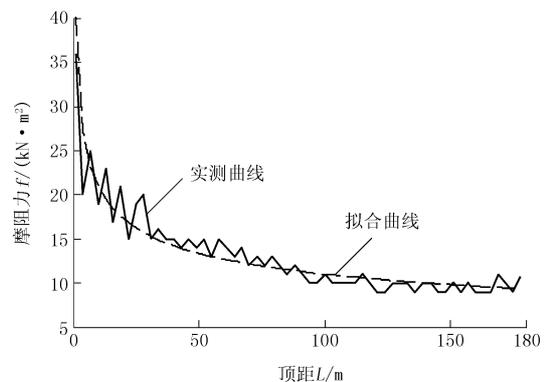


图 3 01 段单位面积摩阻力与顶距曲线

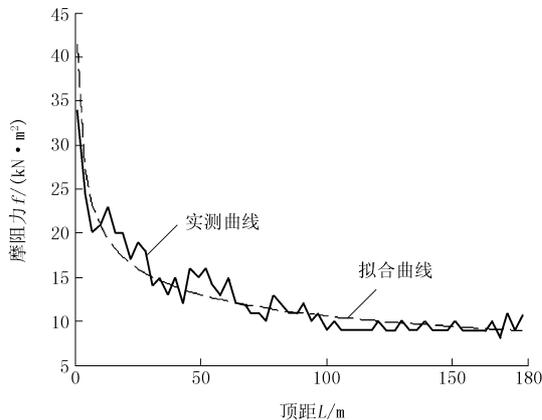


图4 02段单位面积摩擦力与顶距曲线

(2)100 m以后,单位面积摩擦力基本保持稳定,已形成完整的泥浆套,泥浆的润滑减阻作用得到充分发挥。

通过分析可知 f 与 L 并非呈线性关系,而是呈幂指数关系,初始阶段单位面积摩擦力较大,随着距离的加长而逐渐趋于稳定^[7]。根据摩擦力的实际变化规律,考虑到各段的差异,以及为便于理解和计算,拟对 f 作如下规定:

$$f = \begin{cases} 45L^{-0.3} (\text{kN/m}^2), L < 100 \text{ m} \\ 9 \sim 10 (\text{kN/m}^2), L \geq 100 \text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

联合公式(7)~(9),可得出在中粗砂地层条件采用泥水平衡顶管工艺顶进钢筋混凝土管道的顶进力计算公式:

$$R_t = \begin{cases} K(45\pi D_{\text{外}} L^{0.7} + P_1) (\text{kN}), L < 100 \text{ m} \\ (9 \sim 10)K\pi D_{\text{外}} Lf + KP_1 (\text{kN}), L \geq 100 \text{ m} \end{cases} \quad (10)$$

6 理论顶力与现场实测顶力及新公式计算结果的对比分析

图5是采用公式(10)对01段顶管的计算结果与理论顶进力及现场实测顶进力的对比图。

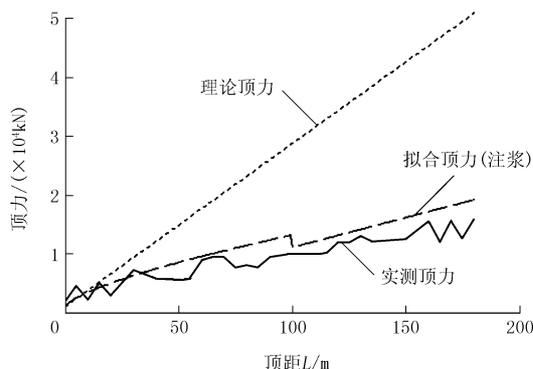


图5 01段理论顶进力、现场实测顶进力与新公式计算顶进力对比图

从图5中可以看出,公式(10)的计算结果与现场实测顶进力拟合得很好。

另外,理论计算顶进力比实测顶进力大得多,尤其是随着顶进距离的增加呈线性增加,而实测顶进力呈曲线上升趋势,但时大时小,这是由于瞬间注浆效果时好时坏的原因,也说明实测顶进力就是顶管施工过程中注浆减阻效果的真实体现^[1]。因此,在计算顶进力时,不考虑注浆减阻会使计算结果偏大。

通过对实际顶进力与理论计算顶进力的对比可以得出,采用触变泥浆润滑后,顶进力可减小到原来的25%~30%。

7 结论

通过对现场数据分析以及顶进力计算的对比分析,得出如下结论。

(1)提出了中粗砂地质条件下采用泥水平衡顶管技术的摩擦力计算公式,该公式代入实际工程验证,结果与实际拟合得很好。

(2)在进行长距离顶管顶进力计算时,应当考虑泥浆的润滑作用引起的折减系数,使得计算结果更接近工程实际,以确保工程的经济性。

(3)在湿润性中粗砂地层中进行长距离顶管施工时,迎面贯入阻力在顶进阻力中所占的比例较小,因此在采取减阻措施过程中要着重考虑减少侧摩阻力。

(4)在长距离顶管工程中采用触变泥浆润滑,顶进力明显减小,注浆后顶进力可减到原来的25%~30%。

(5)顶进中断、注浆润滑、管线方向偏离等施工中常见的问题对顶进力影响较大,在设计中应全面考虑,以保证设计的经济性和安全性。

参考文献:

- [1] 赵旭峰,王春苗,孔祥利. 泥岩中顶管顶推力计算的理论分析[J]. 岩土工程技术,2006,20(1).
- [2] 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).
- [3] 向安田,丁文其,朱合华,等. 顶管施工中顶力与顶程关系及其影响因素分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(10).
- [4] 丁传松. 直线及曲线顶管中的顶推力研究[D]. 江苏南京:南京工业大学,2004.
- [5] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [6] GB 50268-2008, 给水排水管道工程施工及验收规范[S].
- [7] 何莲,刘灿生,帅华国. 顶管施工的顶力设计计算研究[J]. 中国给水排水,2001,27(7).