

长距离复杂地质条件下顶管的顶力计算

秦亚琼, 刘 钢

(武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430014)

摘 要: 影响顶管顶力的主要影响因素是土的性质、管道弯曲大小、注浆润滑、上覆土厚度及施工技术水平高低。目前对于圆形顶管的顶力计算做了很多的简化和假设, 不考虑上覆土的力学性质及厚度, 对于上覆土为软土层, 顶管基底为较硬土层的情况, 经验的计算公式与实测值有较大的出入。针对目前经验公式的不足, 通过一定量的实测摩阻力数据采用神经网络反演管-土间的平均摩阻力, 再利用推导的考虑土拱效应顶力计算公式预测顶力。为施工中合理安排后续工作, 控制减少理论顶力计算与实际的顶力的误差方面具有重要的意义。

关键词: 长距离顶管; 复杂地质条件; 大直径顶管; 神经网络; 顶力预估

中图分类号: U445.47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0289-05

0 引言

顶管法是一种把顶管机从工作井顶推至接收井的非开挖地下工程施工技术。整个顶管施工中顶力是最重要的控制因素, 顶力设计太大, 将会导致后背墙所需强度及措施过高、千斤顶选择过大、后背土体处理力度较大等的工程浪费。顶进力设计太小, 则可能会造成后背墙及后背土体因强度不够造成破坏, 影响顶进施工。因此, 准确设计顶进力是顶管顺利施工的保证^[1-3]。

1 顶管顶力性状分析

经过多年的顶管施工经验, 影响顶力的因素主要有: 管道的大小、顶进距离、管道顶进的曲线半径、注浆效果、顶管穿越土层的主要性质、施工技术水平等。通过大量实测数据的研究, 发现顶进距离对顶力的影响最大, 随着顶程的增大, 其它因素的影响作用明显降低。在现代顶管施工中, 除极短距离外, 都需要减阻措施, 减阻扩孔后管道顶进过程中基本不直接承受周边土压力, 由于减阻泥浆的作用, 管道的理想状况是在泥浆套中前进的^[4], 故理论状况下顶管顶力与土压力及覆土厚度关系不大, 但在实际施工中, 当顶管覆土厚度大于 1 倍管外径, 且覆土均为老黏土时, 顶管上覆土的土拱作用明显, 按现有规范计算顶力过大, 与实测顶力偏差过大。

收稿日期: 2023-10-13

作者简介: 秦亚琼(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事市政结构设计研究工作。

2 顶管顶力公式

国内外学者对顶管顶力进行了大量的研究, 根据研究方法的不同主要分为经验公式法、理论公式法。经验公式法主要依据工程实测顶力数据, 将数据进行分析拟合总结并得出顶力计算公式, 由于实际工程中管道的埋深、管径大小及管节长度、土层条件等的不同, 因此经验公式对于上述条件不同的工况指导性不大。

理论公式法主要考虑触变泥浆减阻及顶管埋置深度的影响, 并考虑顶管顶进土层的力学性质。相对经验公式有一定的理论依据, 但是理论公式的摩阻力多为经验值, 有一定的取值范围, 故理论公式计算的顶力值与实测值会有偏差。

2.1 顶管顶力经验公式

国内外部分学者依据工程实测顶力数据, 通过分析总结提出了经验公式。由于这些经验公式都是基于较小直径顶管, 顶管管径均在 1~2 m 范围, 对于式对于管径较小的顶管有一定指导意义, 但是对于较大直径顶管往往与实测值偏差较大。常用的经验公式主要有以下几种方法^[5]:

(1) 考虑土层系数的经验公式:

$$P = K_{黏}(22D_1 - 21)L \quad (1)$$

$$P = K_{砂}(34D_1 - 21)L \quad (2)$$

式中: P 为总顶力标准值, kN; D_1 为管道外径; L 为顶进长度; $K_{黏}$ 为黏性土系数, 取值范围为 1.0~1.3; $K_{砂}$ 为砂性土系数, 取值范围为 1.0~1.5; 上述经验公式的

适用条件:顶管直径为1~2 m;顶管长度为40~100 m,顶管的覆土厚度不下于1.8的顶管外径。

(2)考虑管道重力的经验公式:

$$P = (1.5 \sim 2.0)W \quad (3)$$

式中: P 为总顶力标准值,kN; W 为管道重力,kN;

(3)考虑管道重力及土层系数的经验公式:

$$P = n\omega L \quad (4)$$

式中: P 为总顶力标准值,kN; ω 为管道重力,kN/m; n 为土层系数,取值范围为0.8~1.0; L 为顶进长度。

2.2 顶管顶力理论公式

通过分析顶管推力的主要影响因素,把作用于管道的阻力主要分为摩阻力 N_s 和迎面阻力 N_F 。摩阻力 N_s 主要为管道与土之间的摩阻力 N_A 、管自身的重力产生的摩阻力 N_C 以及管道外侧摩阻力 N_B 。管道外侧摩阻力 N_B 与管顶的覆土厚度及顶进土层的土层性质有关。工程中经常使用的顶管定力理论公式有:

(1)《给水排水工程顶管技术规程》(T/CECS 246—2020)中的管道总顶力

$$P = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (5)$$

$$N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 \gamma_s H_s \quad (6)$$

式中: P 为总顶力标准值,kN; D_1 为管道外直径; f_k 为管道外壁与土的平均摩阻力,kN/m²; L 为顶进长度; N_F 为掘进机迎面阻力,kN; D_g 为掘进机外径; γ_s 为土的重度,kN/m³; H_s 为覆盖层厚度,m。

(2)《实用给水排水工程施工手册》中的管道总顶力的计算公式

$$P = \pi R D_1 L \frac{\pi}{4} D_2^2 [\gamma H \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2)] \quad (7)$$

式中: P 为总顶力标准值,kN; R 为综合摩擦力,kPa; D_1 为管道外径,m; D_2 为掘进机外径,m; L 为顶进长度; γ 为土的重度,kN/m³; H 为覆盖层厚度,m; c 为土的黏聚力,kPa; φ 为土的内摩擦角,°。

(3)《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50258—2008)中的管道总顶力的计算公式

$$P = f\gamma R D_1 L \left[2H + (2H + D_1) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + \frac{\omega}{\gamma D_1} \right] + P_F \quad (8)$$

式中: f 为顶管与土层的摩擦系数,kPa,饱和黏土取0.2~0.3,非和黏土取0.4~0.5,饱和砂土、亚砂土取0.3~0.4,非饱和砂土、亚砂土取0.5~0.6; P_F 为掘进机迎面阻力,kN。

(4)《给水排水工程施工及验收规范实施手册》中的管道总顶力的计算公式

$$P = K[f(D_1 H L \gamma + W) + P_F] \quad (9)$$

式中: K 为安全系数,一般取1.5。

2.3 公式分析及推导

对现有的顶力计算公式进行分析,存在如下问题:

(1)顶管在同样的土层中施工,由于施工人员的操作水平不同,顶力也会不同,现有顶力计算公式会有一定的偏差;

(2)计算公式中没有反映土层参数和土压力,在顶力计算公式中采用不变的数值进行计算,考虑管道是浮在泥浆套中顶进的,管壁与土的平均摩阻力假定不变,而实际上土层比较复杂,注浆的效果对摩阻力均有影响,故采用不变的摩阻力计算地顶管那里与实际工况不相符。且经验公式中考虑管壁与土摩阻力的土层系数一般为经验值,对于土层复杂的长距离顶管的顶力计算,土层系数在顶进区间变化较大,故采用经验公式计算顶力与实测值偏差较大。

(3)计算公式中没有充分考虑上部土层参数及厚度的影响,当顶管埋深较大时,顶管运动过程中,使土体产生相对位移,由于土体内摩擦力及黏聚力的存在,发生位移的土体与不动产生摩擦力,减小了在管道上部的荷载。现有公式中没有考虑土拱卸荷作用的影响。

针对上述常用的经验公式及理论公式顶力计算出现的问题,利用实测顶力资料和优化方法,反分析出土层参数,再利用所建立的模型预测后续的顶管顶力。反分析法可以考虑减阻措施在不同地层中的作用,具有明确的力学意义。

顶管顶力计算的主要步骤为:

(1)建立顶管管壁与土平均摩阻力的预测模型序列,平均摩阻力序列预测模型可描述为

$$X(L) = \varphi[X(L-1), \dots, X(L-P)] \quad (10)$$

式中: $\varphi[g]$ 为非线性作用函数; P 为模型阶数,即输入矢量的神经元个数。

(2)构造样本数据

管壁与土平均摩阻力序列预测模型建立的过程就是寻找 $\varphi[g]$ 的过程。为了预测摩阻力,建立了一个多输入单输出的BP网络模型。常见的BP网络模型一般由三层组成(输入层、隐含层和输出层),其拓扑结构如图1所示。

由顶管长度序列可以构造出个样本。在实际工程中,通常得到的是不同顶进长度对应的摩阻力。在

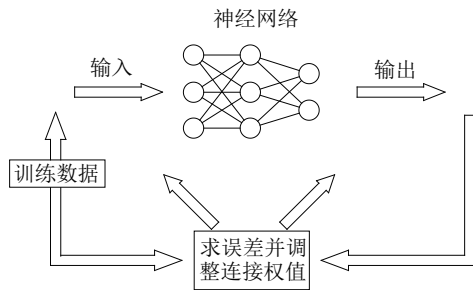


图1 三层BP神经网络拓扑结构

应用时,就可以取不同顶管长度的实测顶力数据作为模型学习样本。取,即依照顶进长度次序依次取5个不同顶管距离的摩阻力实测值,其中前4个作为输入矢量,第5个作为输出矢量。

(3)利用组织的网络模型进行学习训练

将所组织的个样本输入神经网络模型进行学习训练,学习训练结束后即可得到阈值和连接权,进而得到稳定的网络结构。这样就建立了基于神经网络的管壁与土摩阻力的序列预测模型。将待预测的样本的输入向量代入网络,利用已获得的稳定网络结构对该样本进行预测。

(4)利用预测出的平均摩阻力计算顶力^[6]

$$P = \pi D_1 L f_k + N_F \tag{11}$$

$$N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 k_p \gamma_s H_s \tag{12}$$

考虑顶管上覆土较厚,且有一定厚度的黏土层,黏土层的土颗粒产生的楔紧块产生拱作用^[7],则顶管上覆土可考虑土拱作用产生的竖向土压力。采用以下公式进行计算:

$$\gamma_s H_s = C_j (\gamma_s B_i - 2c) \tag{13}$$

$$B_i = D_i [1 + \tan(45^\circ - \varphi/2)] \tag{14}$$

$$C_j = \frac{1 - \exp\left(-2K_a \mu \frac{H_s}{B_i}\right)}{2K_a \mu} \tag{15}$$

由式(11)~(15)可推出

$$P = [\pi D_1 L + C_j (\gamma_s B_i - 2c)] f_k + \frac{\pi}{4} D_g^2 k_p \gamma_s H_s \tag{16}$$

式中: P 为总顶力标准值,kN; D_1 为管道外径,m; k_p 为顶管机机头处的被动土压力系数; f_k 为预测出的管道外壁与土的平均摩阻力,kN/m²; L 为顶进长度; D_g 为掘进机外径; γ_s 为土的重度 kN/m³; B_i 为上覆土层压力传递至顶管处的影响宽度,m; C_j 为顶管竖向土压力系数; φ 为土的内摩擦角,°; $K_a \mu$ 为原状土的主动土压力系数和内摩擦系数的乘积,一般黏性土取0.13,饱和黏土取0.11,砂和砾石可取0.165; c 为原状土的黏聚力。

由于式(16)顶力计算公式考虑了土的内聚力,故采用式(16)计算顶管顶力应基于以下几个方面条件:

(1)顶管覆盖层较厚,大于1倍顶管外径。

(2)上覆土有较为密实的黏土层,致使土颗粒产生互相“楔紧”的作用,顶管上覆土“土拱”作用明显。

(3)顶管机选用大刀盘切削,顶管施工中有减阻措施^[8]。

(4)由于顶管管壁与土间的摩阻力是一部分顶力实测数据基于神经网络反演出的数值,故采用调整后的顶力计算公式需要有一定量的实测顶力数据经过预处理。对经过预处理后的输入向量和目标向量,采用设计好的网络进行训练。即可得到所需顶进距离的平均摩阻力。

3 工程应用

3.1 工程概述

汤逊湖污水处理厂尾水排江工程新建尾水排江管道将尾水从污水处理厂排至东港,再转至巡司河后入江。工程范围起点为汤逊湖污水处理厂,经滨湖区—武大园路—华师园北路—华师园一路—华师园路—汤逊湖,终点为东港,全长约10.8 km。线路主要分为陆地段和穿湖段,陆地段总长约7.07 km,采用双排D1240×20钢管,顶管施工。穿湖段总长约3.77 km,共设置4座竖井,采用内径为4 m的钢筋混凝土管作为套管,顶管法施工,内套双排内径为1.4 m 给水用聚乙烯PE管,全部采用泥水平衡施工工艺,顶管施工详见图2。穿湖段顶管管道直径达4 m,壁厚为0.4 m,顶管机直径为4.92 m,单段顶进长度达1540 m,穿湖段顶管埋深为7.5~9.0 m,属于目前亚洲单次最长的顶管施工项目。

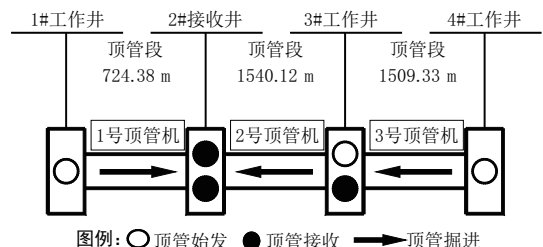


图2 顶管施工示意图

1#竖井~2#竖井段顶管主要穿越地层为中风化及强风化泥质砂岩以及半岩半土软弱交界;3#竖井~2#竖井段顶管主要穿越地层为淤泥质软土、黏土层、泥质砂岩以及岩土软弱交界;4#竖井~3#竖井段顶管主要穿越地层为淤泥质软土层。地勘土层参数如

表 1。

表 1 土层参数表

土层名称	F_{a0}/kPa	压缩模量 /MPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
(1-4)淤泥	35	2.0	8	3
(2-1)黏土	100	4.0	17	9
(2-2)淤泥质粉质黏土	60	3.2	10	5
(3-1)粉质黏土	180	7.5	26	13
(3-2)黏土	420	16	50	18
(3-3)黏土	350	13	40	15
(3-3a)粉质黏土夹粉土	180	7.5	24	12
(3-3b)黏土夹碎石	400	15	34	15
(5-1)强风化泥质粉砂岩	$f_a=450$	45.0	48	17
(5-2)中风化泥质粉砂岩	$f_a=1500$		70	22

穿湖段 2#~3# 竖井顶管段长度 1 540.12 m, 由于在顶进距离时, 顶力较小, 减阻泥浆的接触面积也较小, 泥浆的分布对顶力计算影响较大, 为防止计算模型失真, 分析时采用区段内实测顶力作为分析依据, 现场实测顶力如图 3 所示。依据公式(16)计算在该区段内的管壁与土的平均摩阻力如图 4 所示。

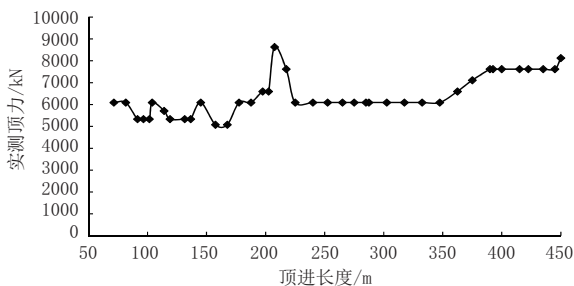


图 3 现场实测顶力

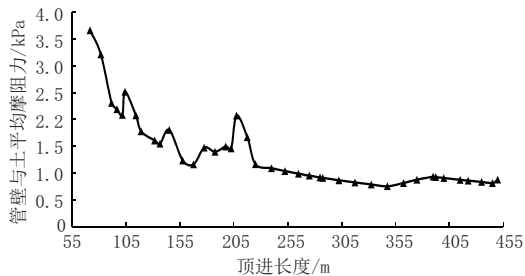


图 4 平均摩阻力

3.2 利用调整后的公式计算顶力

2#~3# 顶管区间段有约有 1 100 m 在汤逊湖湖底施工, 汤逊湖平均水深为 2.5 m, 顶管覆土厚度约 7.5~8 m, 顶部淤泥厚度约 4.4~5.7 m。顶管穿越土层特点为上软下硬。结合本工程特殊的覆水地层, 利用调整后的考虑软弱层及部分土拱效应的顶力计算公式(16)计算顶力并与实测顶力比较。

(1)利用 BP 神经网络反演管壁与土的平均摩擦力输入矢量个数和预测顶管段的取值如表 2。用图

4 所示的值, 建立 BP 神经网络预测模型, 训练样本见表 3。利用编制的神经网络程序预测管壁与土的平均摩擦力。选定的 BP 神经网络结构为 $4 \times 6 \times 1$, 最大训练次数取为 500 000 次, 总的误差平方和取为 0.01, 动量常数取为 0.9, 学习率取为 0.01。

表 2 BP 神经网络预测模型建模取值

2#~3# 竖井顶管段	预测顶管段的选择		输入矢量个数
	利用顶管段	预测顶管段	
	$70\text{ m} < L \leq 450\text{ m}$	$450\text{ m} < L \leq 650\text{ m}$	40

表 3 训练样本数据

个数	输入矢量				输出矢量
1	3.664	3.215	2.311	2.191	2.083
2	3.215	2.311	2.191	2.083	2.519
3	2.311	2.191	2.083	2.519	2.076
4	2.191	2.083	2.519	2.076	1.777
5	2.083	2.519	2.076	1.777	1.608
...
36	0.878	0.931	0.925	0.908	0.875
37	0.931	0.925	0.908	0.875	0.859
38	0.925	0.908	0.875	0.859	0.835
39	0.908	0.875	0.859	0.835	0.816
40	0.875	0.859	0.835	0.816	0.882

将已知的前 4 个平均摩擦力作为预测样本代入网络, 利用网络的联想和记忆功能预测后一区段的摩阻力。预测结果如图 5 所示。

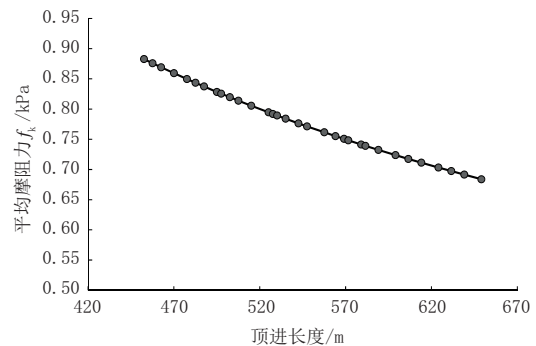


图 5 平均摩阻力

(2)顶力计算

利用预测的平均摩阻力结合顶力计算公式(16)计算顶力, 计算结果与实测值比较见表 4, 计算效果如图 6 所示。

3.3 现场实测顶力与计算值的比较及分析

由表 4 及图 6 可看出, 利用式(16)计算所得的顶力值总体上与实测值比较吻合, 误差基本在 20% 以内, 对于顶力计算来说, 属于可接受的误差范围,

表4 顶力计算结果

顶管长度 L/m	实测值 /mm	计算值 /mm	相对误差 /%
452.5	11 174.6	11 715.3	4.84
457.5	10 793.6	11 734.15	8.7
462.5	10 793.6	11 752.8	8.88
470	10 793.6	11 780.6	9.14
606.5	9 904.8	11 617.5	17.29
614	9 904.8	11 691	18.03
624	12 190.5	12 293.6	0.85
631.5	11 428.6	11 862.4	3.79
639	11 428.6	11 935.9	4.44
649	9 904.8	11 540.8	16.5

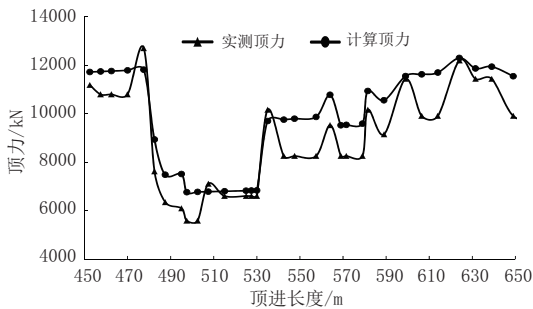


图6 计算效果图

能较好的对下穿湖相段覆水地层的顶管顶力进行预测。这表明了利用BP神经网络反演管壁与土之间的平均摩阻力并结合考虑软弱层及部分土拱效应的顶力计算公式(16)计算顶力的可行性。

顶管在区段的顶力计算值和实测值误差最大达到18.03%。造成这种情况的主要原因是:

(1)利用BP神经网络反演管壁与土之间的平均摩阻力时,在进行网络训练时利用的区段的摩阻力实测序列的规律性不明显,导致预测模型的失真。

(2)利用调整后的式(16)计算顶力,顶力与土层性质有关。实际工程中,随着顶进长度的增加,土层性质变化较大,特别是处于软弱交界处的顶进区段,土层的黏聚力及内摩擦角有较大变化,这也是导致利用式(16)所得顶力值与实测值有偏差的原因。

(3)实际顶管顶进过程中因地层不均匀,导致刀盘在各区域受力不均匀、顶管机姿态有所偏移,且在顶管过程中,土体开挖卸荷及顶管的剪切拖拽会对周围土体产生扰动,顶管上方的土体会产生位移。顶管机开挖面受顶管推力的挤压作用,前方开挖面的土体会产生隆起^[9]。利用式(16)计算顶力时考虑部分土拱效应,但是由于土体变形的影响,顶进周边的土

体受到扰动,土层力学性质均发生变化,这也是导致计算值较实测有偏差的原因。

(4)影响触变泥浆的减阻效果有很多因素^[10],随着顶进距离的增加,顶管遇到一些特殊情况下的单位面积摩阻力会增加,进而对管节的顶力计算有影响。

4 结语

在长距离顶管施工过程中,顶力计算对于中继间的布置,顶管机的选择、顶管井的井壁及配筋计算均有重要的意义。泥水平衡法顶管施工采用式(16)公式预测顶力,对于复杂地质条件下的顶力计算,在计算中考虑埋深效应的影响,即上覆硬质土层的土拱效应,并利用用BP神经网络反演摩阻力,所得顶力预测值与实测值进行相比,得出以下主要结论:(1)预测值与实测值误差约在20%以内,满足顶管施工需要。可以为设计提供参考,并指导后续施工。

(2)利用BP神经网络预测管壁与土的平均摩阻力,不需要事先人为假定顶力计算模式,最大限度地减少了人为因素对预测值的干扰,可信度较高。

(3)顶力计算与顶管穿越土层性质有关,对于顶管穿越土层变化较大,软弱交界处的顶进区段,预测值与实测值偏差最大。

参考文献:

- [1] 魏刚,郑金涛.顶管施工中顶力计算公式的探讨[J].市政技术,2008,26(5):404-409.
- [2] 安关峰,殷坤龙,唐辉明.顶管顶力计算公式辨析[J].岩土力学,2002,23(3):358-367.
- [3] 王洪恩.顶管法施工顶力计算模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- [4] 王双,夏才初,葛金科.考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩阻力计算公式[J].岩土力学,2014,35(1):159-166.
- [5] 赫文峰.顶管工程设计中的顶力计算方法[J].建筑设计,2004,33(4):133-134.
- [6] CECS 246:2008,给水排水工程顶管技术规程[S].
- [7] 韩冰,阿力普江·杰如拉,王述红,等.基于普氏卸荷拱理论的矩形顶管顶推力预估方法研究[J].建筑设计管理,2017,247(9):84-87.
- [8] 贾蓬,焦程龙,张雯超.沈阳地区大直径顶管顶力预估与减阻效果的数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(8):1206-1209.
- [9] 李超.复杂接触条件下超长距离岩质地层顶管施工力学效应研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [10] 顾长虹.深埋长距离顶管推进管-土-浆相互作用关系与减阻技术[D].徐州:中国矿业大学,2020.