

曲线顶管技术及顶进力分析计算

马保松¹ 张雅春^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074; 2. 中国地质调查局勘探技术研究所,河北廊坊 065000)

【摘要】 曲线顶管施工技术以其特有的优势和应用领域,越来越受到重视。总结了国际上常用的曲线顶管施工技术,分别以 SS MOLE 和 Ultimate Method 两种具有代表性的工法为例介绍了曲线顶管技术的地层适应性、适用管道直径、应用领域和所能达到的最小曲率半径。对曲线顶管施工中顶进力计算这一重点和难点,给出了曲线顶管顶推力计算公式,并举例说明了曲线段顶推力计算公式的实际应用。

【关键词】 曲线顶管; 顶进力; 计算; SS MOLE; Ultimate Method

【中图分类号】 TU 74

Curved Pipe Jacking Technology and the Calculation of Jacking Loads for Curved Section

Ma Baosong¹ Zhang Yachun^{1,2}

(1. College of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan Hubei 430074;

2. Institute of Exploration Technique, CGS, Langfang Hebei 065000 China)

【Abstract】 Because of the advantages and application fields, curved pipe jacking technology is paid more and more attention. The application of curved pipe jacking techniques all over the world is reviewed. Based on the two examples of "SS MOLE" and "Ultimate Method" curved pipe jacking techniques, the author introduces the suitable soil conditions, reasonable pipe diameter can be installed, application field and the minimum curved radius for curved pipe jacking technology. In order to solve the key and difficult problem of jacking loads calculating, an equation for the jacking loads calculation during curved section driving is given, as well there is an example shows the application of this equation.

【Key Words】 curved pipe jacking; jacking loads calculation; SS MOLE; ultimate method

1 曲线顶管技术概述

在顶管的设计与施工过程中,由于地质条件的差异性、地面建筑物的环境保护要求以及原有地下构筑物的拥挤等原因,往往迫使工程的路线定为曲线。在此情况下,采用顶管或盾构机械设施使管节的中心线按照设计的弧线前进的施工技术,即称为曲线顶管技术。曲顶技术在日本和欧美国家早已开始使用,并有了一些成功经验。日本的曲顶技术开始于 1965 年熊本市直径 1 200 mm 下水管道的施工,随后又得到不断研究和发展,到 20 世纪 80 年代,应用已较广泛,代表了该领域当今世界的最先进水平。从国内外曲顶技术的发展现状来看,目前曲顶的管径以中、大口径为主,曲线类型有平面的、有垂直向的,还有 S 形的,基本上能按工程的要求而变换。同时,顶进长度向长距离方向发展,比如:在上海合流污水一期工程中德国 Zueberlin 公司将直

径 2 500 mm 的钢筋混凝土管曲线一次顶进约 1 500 m^[1-2]。

在过去的几十年时间内,顶管施工技术的主要应用范围一直局限于直线或者大曲率半径的曲线顶管。在曲线顶管施工中,首先要选择合适的曲率半径,然后根据曲率半径的要求,使每一节管道在连接处都发生一定的偏斜,最终形成所要求的曲线。为了避免在顶进和导向过程中对管道的损坏,管道对接处不应出现张开的缝隙。因此,在顶管施工中(这里指的是可进入的管道),为了尽可能地减小损坏管道的危险,曲率半径应 ≥ 200 m^[2-3]。

为了能够实现更小曲率半径的曲线顶管或者 S-曲线顶管,人们进行了不断的研究和探索,近几年曲线顶管技术的发展主要集中在以下几个方面:

- 相关机械技术的研究和开发;
- 管接头技术的发展;

- 管线润滑技术的进步;
- 测量与控制技术的发展。

由于机械技术的进一步发展,可以通过辅助的转向接头改善曲线顶管施工过程。这种特殊的导向式顶管机(盾构机)由切削头和导向头组成,或者由切削工具管和几个相互铰链在一起的工具管组成,这些工具管的作用一是可以安装导向油缸,同时还可以起到修正孔壁的作用,以便后续管道的顺

利进入。同样,这里的泥土输送管道也必须是和施工管道轴线相一致的曲线管道。因此,像微型隧道工法中的螺旋式输土装置在这种情况下是不能考虑的;对于其它类型的输土系统(如气动的输土装置或传送带),必定会导致施工效率的下降,并且在曲线段施工时还要考虑到一些特殊的要求。目前国际上常用的具有代表的曲线顶管设备和工法见表 1^[1-2]。

表 1 曲线顶管技术的代表机型和工法^[4-6]

顶管机类型	工作原理和方式	使用管道直径/mm	曲率半径
RASA DT-K	泥土水力输送	DN/ID 700~2 000	≥30 m
Deino-Type	泥土气力输送	DN/ID 700~1 500	≥30 m
Uncemok TCT	水力输送	DN/ID 1 500~2 400	≥50DN/ID
SS MOLE	土压平衡式	DN/ID 700~2 200	≥21 m
ULTIMATE METHOD	液力或者土压平衡	DN/ID 800~3 000	≥8 m

在当前各种市政管道工程中,需要采用曲线顶管的场合非常多,归纳起来,曲线顶管主要适用于^[7-8]:

- 在管线穿越河道、江底时,将其轴线设计成倒虹管或抛物线形状,采用曲线顶管施工,则可以大大减少两岸工作井的深度,降低工程费用。
- 在管线穿过繁华街道而沿线马路又不顺直时,往往采用S形曲线顶管敷设,既可不影响交通,又可省去建造中转工作井的费用。
- 当新老管道立体交叉时,使用曲顶技术可以

避免管道空间相撞。

下面将分别以 SS MOLE 和 Ultimate Method 两种具有代表性的工法为例进行介绍。

2 SS Mole 曲线顶管工法

SS MOLE (SS=Super Slurry) 工法采用的是一种气力输送液力平衡式顶管机/盾构机,该顶管机由切削头和导向头组成,或者由切削工具管和 2~3 个(根据施工管道的直径确定)相互铰接的后续工具管组成(见图 1)^[2,9]。

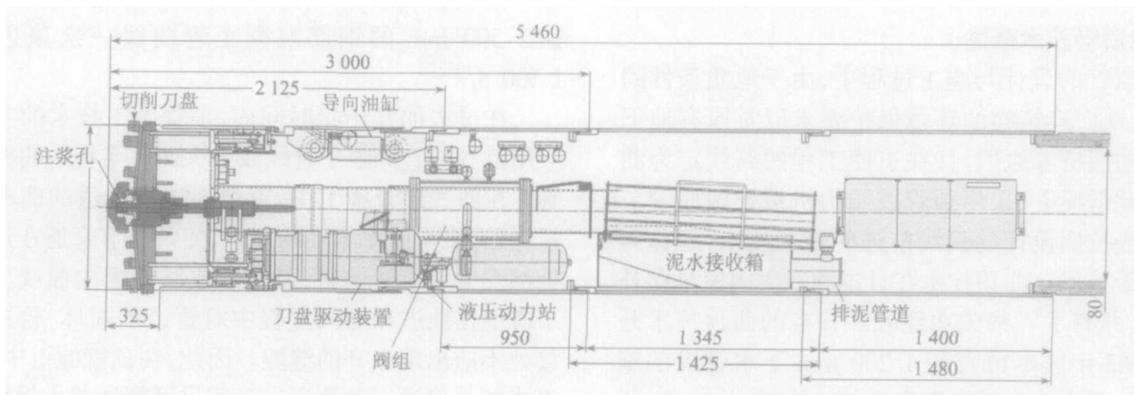


图 1 SS MOLE 工法采用的顶管机

根据制造商提供的参数,该施工方法可以应用于砾石含量<90%且 N 值<100 的松散地层中,适用的管径范围为 DN/ID 700~2 200。但是,对于单轴抗压强度>5 N/mm² 的硬地层,这种工法就不再适用了。当该工法应用于不含地下水的地层时,则必须采用辅助的润滑措施(如 T. B. K-润滑系统)。该工法的施工长度主要决定于地层的类型以及施工

过程中曲线管节的数量和位置,其最大施工长度可达 500 m。施工中采用的曲率半径(见表 2)也是根据管道的直径、单根管节的长度以及管接头的形状来确定的。

3 ULTIMATE METHOD 工法

ULTIMATE METHOD 工法采用液力或土压平衡工作面,适用管径范围为 DN/ID 800~3 000。

该工法与 SS MOLE 工法非常相似, 但是, 该工法通过采用带导向油缸的辅助机械导向装置、特殊结构的切削刀盘(双刀盘)以及带有间隙导向块的管接

头, 可以实现更小曲率半径的顶管施工, 该工法适用的地层类型见表 2^[10]。带有间隙导向块的管接头, 可以实现更小曲率半径的顶管施工(见图 2)

表 2 土压平衡 ULTIMATE METHOD 工法的适用地层分类

土层类型	地层条件		地层的标贯指数 N 值及砾石含量	说明
A	粘土, 淤泥		$N \leq 10$	
	含砾砂层		砾石含量 $\leq 20\%$ 砾石最大直径 ≤ 20 mm	
B	B1	砂层	砾石含量 $\leq 20\%$ 20 mm $<$ 砾石最大直径 ≤ 65 mm	施工中应考虑含砾石直径 > 65 mm 的情况
	B2	硬粘土层	$10 < N \leq 30$	
C	含砾砂层		$N > 30$	泥炭土层
			$N > 50$	

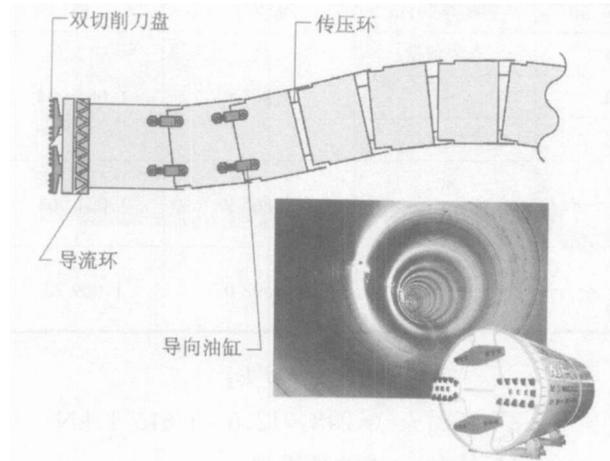


图 2 ULTIMATE METHOD 工法设备及铺设管道

4 曲线顶管施工顶进力的计算

4.1 直线顶进时的顶进力计算

在计算初始顶进力和单位管道长度上所受的摩阻力时, 仍然采用直线顶进时的顶进力计算公式

$$F = F_0 + fL \quad (1)$$

式中: F 为顶进力, kN;

F_0 为初始顶进力(迎面阻力), kN;

$$F_0 = (P_w + P_e)\pi \left(\frac{B_c^2}{4} \right)$$

式中: P_w 为掘进机舱内的压力, 等于地下水压力加上 20.0 kN/m²; P_e 为切削土的摩擦力。

$$P_e = 10.0 \times a \times N;$$

式中: $a = 0.5$ (岩石除外), N 为标准贯入指数。

当 N 值 > 50 时, 取 N 值 = 50; 当 N 值 = 0 时, 取 N 值 = 1。

f 为单位长度管道上的摩阻力, kN/m;

$$f = \left[\frac{1}{8} \cdot \alpha \cdot B_c^{0.5} \cdot N^{0.125} \cdot g \cdot S \right] + 0.1W$$

式中: g 为重力加速度, 取 $g = 9.8$ m/s²;

α 为考虑砾石含量的摩阻力系数,

$$\alpha = 0.6 + R_g/100;$$

R_g 为砾石体积分, %;

B_c 为顶进管道外径, m;

S 为顶进管道的外周长, $S = \pi \cdot B_c$, m;

W 为单位长度管道的重量, kN/m;

L 为顶进长度, m。

4.2 曲线顶进时的顶进力计算^[2]

曲线顶进时, 应分别计算其直线段和曲线段的顶进力, 然后累加即得总的顶进力。直线段的顶进力仍然按照上述公式来计算, 而曲线段的顶进力则可按照下式进行计算^[6-8]:

$$F_n = K^n F_0 + \frac{F'(K^{(n+1)} - K)}{K - 1} \quad (2)$$

式中: F_n 为顶进力, kN;

K 为曲线顶管的摩擦系数;

$$K = 1 / (\cos \alpha - k \cdot \sin \alpha)$$

其中: α 为每一根管节所对应的圆心角, k 为管道和土层之间的摩擦系数, $k = \tan \varphi/2$;

n 为曲线段顶进施工所采用的管节数量;

F_0 为开始曲线段顶进时的初始推力, kN;

F' 为作用于单根管节上的摩阻力, kN。

在曲线段的顶进力计算完毕后, 如要接着计算随后的直线段顶进力, 可按下式进行计算

$$F_m = F_n + fL \quad (3)$$

式中: F_m 为曲线段后的直线段顶进力, kN;

L 为直线段的顶进长度, m。

4.3 曲线顶管顶进力计算实例

下面举例说明复杂条件曲线顶管施工的顶进力计算。

4.3.1 施工条件

管道直径: DN/ID 1 000

曲线段数量: 3 段

初始顶进力: $F_0 = 244.8 \text{ kN}$

土的重度: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

土的内摩擦角: $\varphi = 35^\circ$

砾石含量: $R_g = 10\%$

覆土厚度: $h = 5.0 \text{ m}$

土的标贯击数: $N = 30$

土层类型: A 型(见表 2)。

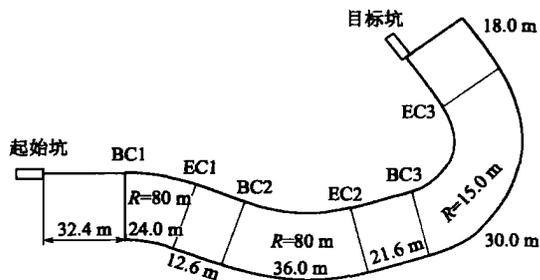


图 3 实际顶进曲线示意图

4.3.2 顶进轨迹参数

顶进轨迹的基本参数见图 3 和表 3。

表 3 顶进轨迹的基本参数

顶进区间	管节长度/m	所用管节数量	顶进距离/m	曲率半径/m	$\alpha/(\circ)$	K
起始坑—BC1			32.4	直线顶进		
BC1—EC1	1.2	20.0	24.0	80	0.8659	1.004904
EC1—BC2			12.6	直线顶进		
BC2—EC2	1.2	30.0	36.0	80	0.8659	1.004904
EC2—BC3			21.6	直线顶进		
BC3—EC3	0.4	75.0	30.0	15	1.5920	1.00923
EC3—目标坑			18.0	直线顶进		

4.3.3 顶进力的计算

①目标坑到 EC3 的顶进力 $F_n = F_0 + fL_3$

即 $F_1 = 244.8 + 6.25 \times 18 = 357.3 \text{ kN}$

②目标坑到 BC3 的顶进力

$$F_n = K^n F_0 + \frac{F'(K^{(n+1)} - K)}{K - 1}$$

式中: $F_n = F_2, F_0 = F_1, n = 75, K = 1.00923,$

$F' = 2.5 \text{ kN}$ 。所以有:

$$F_2 = 1.00923^{75} \times 357.3 + 2.5 \times \frac{(1.00923^{(75+1)} - 1.00923)}{(1.00923 - 1)} = 982.8 \text{ kN}$$

③目标坑到 EC2 的顶进力

$$F_3 = F_2 + fL_2$$

$F_3 = 982.8 + 6.25 \times 21.6 = 1117.8 \text{ kN}$

④目标坑到 BC2 的顶进力

$$F_n = K^n F_0 + \frac{F'(K^{(n+1)} - K)}{K - 1}$$

$F_n = F_4, F_0 = F_3 = 1117.8$

$n = 30, K = 1.004904, F' = 7.5 \text{ kN}$

$$F_4 = 1.004904^{30} \times 1117.8 + 7.5 \times \frac{(1.004904^{(30+1)} - 1.004904)}{(1.004904 - 1)} = 1538.7 \text{ kN}$$

⑤目标坑到 EC1 的顶进力

$$F_5 = F_4 + fL_1$$

$F_5 = 1538.7 + 6.25 \times 12.6 = 1616.1 \text{ kN}$

⑥目标坑到 BC1 的顶进力

$$F_n = K^n F_0 + \frac{F'(K^{(n+1)} - K)}{K - 1}$$

$F_n = F_6, F_0 = F_5 = 1616.1,$

$n = 20, K = 1.004904, F' = 7.5 \text{ kN}$

$$F_6 = 1.004904^{20} \times 1616.1 + 7.5 \times \frac{(1.004904^{(20+1)} - 1.004904)}{(1.004904 - 1)} = 1940.2 \text{ kN}$$

⑦目标坑到起始坑的顶进力

$$F_7 = F_6 + fL_0$$

$F_7 = 1940.2 + 6.25 \times 32.4 = 2142.6 \text{ kN}$

由以上计算可知,在整个顶进过程中,所需的最小顶进力为 2142.6 kN。

参 考 文 献

[1] Stein D, Grabenloser Leitungsbau[M]. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2003
 [2] 马保松, D Stein, 蒋国盛. 顶管和微型隧道技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
 [3] 余彬泉, 陈传灿编著. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998

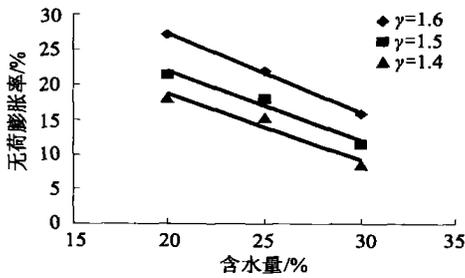


图6 初始含水量对膨胀变形量影响曲线图

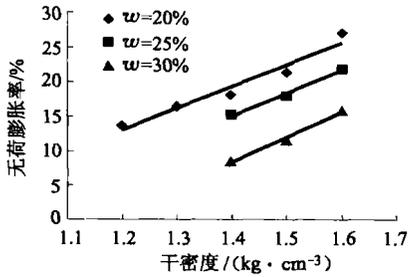


图7 干密度对膨胀变形量影响曲线图

4 结论

本文利用常规土工试验仪器对膨胀土的胀缩变形特性进行了研究,通过上述试验和分析,我们可以得出以下结论:

1) 膨胀土膨胀曲线和收缩曲线都有明显的规律性,都可分为3个阶段:直线剧烈等速膨胀(收缩)阶段、外凸弧线减速膨胀(收缩)阶段、直线缓慢膨胀(收缩)阶段。

2) 通过膨胀曲线和收缩曲线的对比分析,我们发现了膨胀与收缩并非可逆过程,膨胀变形量要远大于收缩变形量;膨胀土吸水剧烈膨胀,膨胀变形的初始速度要远大于收缩变形的初始速度;膨胀变形

达到稳定的时间比收缩变形达到稳定的时间短得多。

3) 膨胀土的初始含水量、干密度与膨胀变形量存在着一维线性关系,初始含水量减小和干密度的增大,膨胀变形量和膨胀力呈增大的趋势,反之,初始含水量减小和干密度的增大,膨胀变形量和膨胀力呈减小的趋势。

参 考 文 献

- [1] 刘特洪. 工程建设中膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 缪林昌. 非饱和膨胀土的变形和强度特性研究[D]. 南京: 河海大学, 1999.
- [3] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].
- [4] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 10(5): 826-830.
- [5] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 5(3): 422-424.
- [6] 李振, 邢义川, 等. 膨胀土的浸水变形特性[J]. 水利学报, 2005, 11(11): 1385-1391.
- [7] 肖宏彬, 张春顺, 等. 南宁膨胀土变形时程特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 12(6): 47-52.
- [8] 何漓江. 高速公路膨胀土路基处治研究. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [9] 杨庆, 张慧珍, 等. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 2(3): 420-425.
- [10] 谭罗荣, 孔令伟, 等. 膨胀土胀缩特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1555-1559.

收稿日期: 2006-06-19

(上接第 232 页)

- [4] DGB 50286—97 给水排水管道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [5] James C. Thomson. Pipe jacking and Microtunnelling [M]. London: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1995.
- [6] Stein D, Moellers K, Bielecki R. Microtunnelling [M]. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1989.
- [7] Marco Barla, Marco Camusso, Santina Aiassa. Analysis of jacking forces during microtunnelling in limestone [J], Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 668-683.
- [8] G W E Milligan, P. Norris. Site-based research in pipe jacking objectives, procedures and a case history [J]. Tunneling & Underground Space Technology, 1996, 11(1): 3-24.
- [9] Pecora III, John M., Sheahan, Thomas C. Pipe jacking forces in soft ground construction during utility installation related to central artery/tunnel project construction [J], Civil Engineering Practice 2004, 19(2): 29-44.
- [10] Atalah, Alan. Design of microtunnelling and jacking pipe [C], ASCE Specialty Conference, Proceedings, 1996. 395-402.

收稿日期: 2006-07-26