

顶管顶力的理论计算与分析

赖冠宙¹ 房营光²

(1、广东工业大学 广州 510640; 2、华南理工大学 广州 510641)

摘要: 研究分析顶管顶力的组成及其影响因素, 从理论上推导了顶力计算公式, 给出了考虑注浆减阻的计算公式, 并提出了顶力计算中应注意的问题。

关键词: 顶管; 顶力; 摩阻力

1 前言

在顶管施工设计中, 顶力的计算结果直接影响工作井的设计、管节强度的确定、中继环的布置以及顶进设备的选择等, 因此对顶管工程的成败具有重要的影响。目前, 一些文献对顶力的计算给出了各种理论公式^{[1][2]}, 但对它们各自的适用条件并未明确, 且各公式的计算结果差异较大, 设计计算时便无所适从。为此, 很有必要从理论上弄清顶力的组成及其影响因素, 并明确各理论公式的适用条件, 以便设计能正确地计算顶力, 提高设计的可靠性。

本文从理论上分析了顶力的组成及其影响因素, 推导了顶管顶力计算公式, 给出了考虑注浆减阻的计算公式并结合工程实例进行分析, 同时指出了顶力计算中应注意的问题。

2 顶力的组成及其影响因素

2.1 顶力组成

图1所示的是顶管顶力的计算模型, 为了推动土中的管道前进, 千斤顶的顶力 R_t 需克服工具头前方的迎面阻力和土压力与管节自重共同产生的摩阻力。图中 P_v 、 P_H 分别为垂直和水平土压力施加在管外壁的径向压力; P_B 为管节自重; F 为摩阻力; P_A 为迎面阻力; R_t 为总顶力。

根据轴向力平衡原理, 得:

$$R_t = F + P_A \quad (1)$$

设计时应乘以安全系数 K (一般取1.2), 即:

$$R_t = K (F + P_A) \quad (2)$$

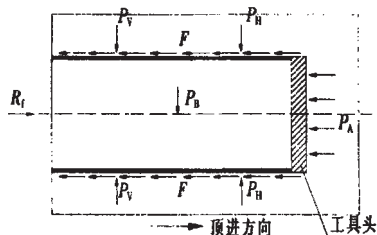


图1 作用于顶管的外力示意图

从上式可知, 顶管施工所需顶力的大小与管道外壁的摩阻力和前端阻力有关, 而这些阻力则与许多因素有关, 以下就这一问题进行探讨。

2.2 影响顶力的因素

顶管施工中影响顶力的因素多且复杂, 既有一定的规律性, 也有其特殊性, 主要有以下几方面:

(1) 土层性状

主要包括土的重度 γ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 、含砂量和地下水位等, 作用于管外壁的土压力与土的重度、粘聚力和内摩擦角等有关, 土的含砂量大小影响管与土之间的摩擦系数, 地下水位变化影响土的有效重度。因此, 当上述因素改变时, 作用于管外壁的摩阻力将随之改变, 从而影响顶力的大小。

(2) 顶管尺寸、埋深和管材

摩阻力的大小与管径 D 、管长 L 及埋深 H 成正比关系, 同时顶管外壁粗糙度越大, 管与土间的摩擦系数就越大, 从而使顶力增大。

(3) 注浆效果

在管外壁与土之间注入润滑泥浆, 避免管与土层的直接接触, 对减小顶进阻力非常有效, 实际注浆效果直接影响摩阻力的减小程度, 据实测注浆后顶力一般可减小至注浆前的25%~30%。

(4) 施工因素

① 顶进过程中若停歇时间过长, 则重新启动时顶力会增大, 四周松土会坍落在管壁上抱实, 同时水分也会从减阻浆液中离析出来, 使减阻作用失效, 造成顶进阻力增大。

② 在顶进过程中管线不可避免地会偏离设计轨迹, 故需进行纠偏, 主要根据管外壁上不对称的土压力使管线改变方向, 由此将增大顶进阻力, 一般在进出口处纠偏次数较多, 顶力将明显增大。

3 顶力计算公式

顶力由摩阻力和工具头迎面阻力组成,故其计算时应先求出摩阻力和工具头迎面阻力。

3.1 摩阻力计算^[1]

$$F=f(QP_V+2P_H+P_B) \quad (3)$$

$$P_V=K'\gamma HDL \quad (4)$$

$$P_H=\gamma(H+\frac{D}{2})DL\tan^2(45^\circ-\frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

$$P_B=WL \quad (6)$$

式中 f 为管壁与土间的摩擦系数,其取值可参考表1; P_V 为作用于管上下两侧的由管上方土体产生的垂直土压力(kN); P_H 为管两侧的水平土压力(kN); P_B 为管段的重力(kN); D 为管节外径(m); W 为管长每1m的重力(kN/m); L 为计算顶进长度(m); γ 为土的等效重度(kN/m³); H 为管顶上覆土层的厚度(m); φ 为管道所在土层的内摩擦角($^\circ$); K' 为垂直土压力系数,由试验确定。文献[1]给出了 K' 的取值曲线,如图2。

表1 摩擦系数 f 值^[1]

土质 类型	钢筋混凝土管			钢管		
	干燥	湿润	一般值	干燥	湿润	一般值
软土	--	0.20	0.20	--	0.20	0.20
粘土	0.40	0.20	0.30	0.40	0.20	0.30
砂粘土	0.45	0.25	0.35	0.38	0.32	0.34
粉土	0.45	0.25	0.35	0.38	0.32	0.34
砂土	0.47	0.35	0.40	0.48	0.32	0.39
砂砾土	0.50	0.40	0.45	0.50	0.50	0.50

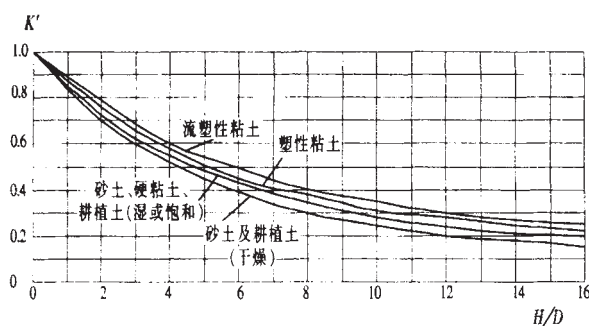


图2 $H/D-K'$ 关系曲线

3.2 迎面阻力的计算

迎面阻力与前端面的土压力有关,应根据土压力的性质来确定其计算方法^[6],而且计算时还应考虑地下水的影响,通常是通过“水土分算”或“水土合算”来体现,前者适用于砂性土,后者适用于粘性土。

根据前方土体所处的状态,将其对工具头产生的土压力分为3种情况进行计算,即:①出土体积大

于顶进体积:超挖或出现临空面时,土压力按主动土压力计算;②出土体积等于顶进体积:土体处于弹性平衡状态,土压力按静止土压力计算;③出土体积小

① 砂性土(水土分算)

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_a\sum(\gamma_i h_i)+\gamma_w h_w] \quad (\text{主动}) \quad (7)$$

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_0\sum(\gamma_i h_i)+\gamma_w h_w] \quad (\text{静止}) \quad (8)$$

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_p\sum(\gamma_i h_i)+\gamma_w h_w] \quad (\text{被动}) \quad (9)$$

② 粘性土(水土合算)

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_a\sum(\gamma_i h_i)-2c\sqrt{K_a}] \quad (\text{主动}) \quad (10)$$

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_0\sum(\gamma_i h_i)] \quad (\text{静止}) \quad (11)$$

$$P_A=\frac{1}{4}\pi D^2[K_p\sum(\gamma_i h_i)+2c\sqrt{K_p}] \quad (\text{被动}) \quad (12)$$

式中: γ_i 为第 i 层土的重度,当土体位于地下水位以下时,砂性土取浮重度,粘性土取饱和重度; c 为土的粘聚力; h_i 为第 i 层土的厚度; γ_w 、 h_w 分别为水的重度和水位面到管道中心处的高度; D 为管道外径; K_a 、 K_0 、 K_p 分别为主动、静止和被动土压力系数。

3.3 考虑注浆影响的顶力计算

在长距离顶管施工中,注浆已成为减小顶进阻力的必不可少的一道工序,且对顶力的影响极大,而现行的顶力计算公式基本未考虑这一因素。注浆的减阻效果在公式中体现为摩擦系数的大幅减小,注浆后影响摩擦系数的主要因素是浆液材料的性质,而与土层性质和管材则关系不大,故摩擦系数不能再按前文的方法确定,原先的摩阻力计算公式已不再适用,因此提出适用于采用触变泥浆顶管的顶力计算公式是很有必要的。

采用触变泥浆顶管的摩擦阻力可按下式计算:

$$F=\pi D L f' \quad (13)$$

式中: f' 为单位面积管壁与土的平均摩阻力(kN/m²),文献[4]认为该值可通过试验确定,根据软土地层顶管施工经验,一般取4~12kN/m²。文献[2]根据实测数据,通过分析得出 f' 与 L 的关系并非呈线性变化,而是呈幂指数关系,初始阶段单位面积摩阻力较大,随着距离的加长而趋于稳定。经总结可对 f' 作如下规定,即对于软土地层,当 $L\leq 100$ m时, $f'=20\sim 50$) $L^{-0.5}$ kN/m²;当 $L>100$ m时, $f'=2\sim 8$ kN/m²;其它地层可乘以相应的系数。

迎面阻力 P_A 仍按前文的方法计算,因此考虑注浆减阻效果的顶力计算仍用式(2)表示,其中摩擦阻力按式(13)计算;安全系数 K 对于非粘性土取1.5~2.0,对于粘土则取1~1.5。采用上述顶力公式的计算结果与多个工程实例的实测结果均较为吻合。

4 算例分析

4.1 管径和顶进长度对顶力的影响

某工程场地砂性土重度 $\gamma=18\text{kN/m}^3$, 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}=18.6\text{kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi=30^\circ$, 土的内聚力 $c=8\text{kPa}$, 地下水位在地面以下 2.5m 处, 管顶覆土厚度为 9.0m。

图 3 给出了顶力随管长、管径变化的计算结果, 图中曲线表明它们近似成正比关系。

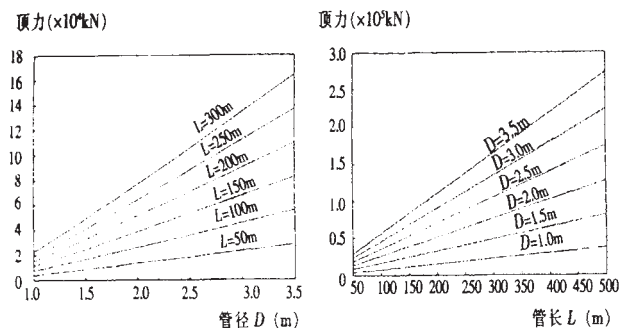


图 3 顶力随管长、管径的变化曲线

4.2 注浆对顶力的影响

广州市珠江新城电力隧道工程, 体育东路段采用外径 3.6m 的钢筋混凝土顶管施工, 每隔 150m 设 1 个中继间。该隧道位于粉质粘土层中, 主要物理力学指标为: 重度 $\gamma=18.5\text{kN/m}^3$, 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}=19\text{kN/m}^3$, 内聚力 $c=25\text{kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=11.9^\circ$, 地下静水位离地面 2m, 管顶覆土厚度为 5.7m。经实测, 最大顶推力为 $1.2\times 10^4\text{kN}$, 且随推进长度基本呈线性增大。我们利用文中的顶力公式分别计算了注浆减阻和不注浆两种情况下的顶力值。

(1) 不注浆: 根据表 1 和图 1 的曲线确定摩擦系数 ($\xi=0.25$) 和垂直土压力系数, 求得摩擦阻力 $F=4.8994\times 10^4\text{kN}$, 迎面阻力按静止土压力 (水土合算) 计算, $P_A=1143\text{kN}$, 总顶力 $R_t=5.0137\times 10^4\text{kN}$ 。

(2) 注浆减阻: 摩擦系数 $f'=6.5\text{kN/m}$, 摩擦阻力 $F=11027\text{kN}$, 总顶力 $R_t=11027+1143=1.217\times 10^4\text{kN}$ 。

从上述比较可以看出, 注浆减阻后的顶力仅为不注浆时的 25%, 因此注浆对减小顶进阻力是非常有效的, 实测顶力值为 $1.2\times 10^4\text{kN}$, 两者相差 1.4%, 相当吻合, 说明了公式的适用性。

5 结论

5.1 顶管顶力的计算关系到工作井后背的设计、变形计算、中继间的设置及机械设备的选用等, 因此对顶管工程的成败有重要影响;

5.2 施工中顶力克服工具头前端阻力以及管外壁与土之间的摩阻力, 长距离顶管中摩阻力成为总顶力的主要部分;

5.3 顶力随顶进长度和管径近似按线性增大;

5.4 摩擦系数的取值对顶力的计算影响较大, 应结合当地经验和具体土层性质合理选取, 不宜盲目套用;

5.5 注浆减阻效果显著, 相应顶力计算公式中的参数取值需根据工程实践进一步检验和验证。

参 考 文 献

- 1 高乃熙, 张小珠. 顶管技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984
- 2 何莲等. 顶管施工的顶力设计计算研究. 给水排水, 2001 (7)
- 3 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术. 北京: 人民交通出版社, 1998
- 4 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999