

文章编号: 1000-7598 (2014) 01-0159-09

考虑泥浆套不同形态的顶管管壁摩阻力计算公式

王 双¹, 夏才初¹, 葛金科²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065)

摘 要: 大直径、长距离顶管施工常通过注浆形成泥浆套来减小阻力, 泥浆套的形态及其完整性对管壁摩阻力大小有决定性作用, 现有摩阻力计算公式一般未考虑不同泥浆套形态对摩阻力的影响, 计算结果与实际情况相差较大。根据不同施工状况对顶管外壁泥浆套的可能形态进行了分类及成因分析, 提出了判断 3 种常见泥浆套形态的方法。利用半无限弹性体中柱形圆孔扩张理论探讨了注浆压力对泥浆套厚度的影响, 结合非线性流体力学计算泥浆与管壁接触产生的摩阻力, 最终采用挖掘面稳定假设, 针对 3 种泥浆套形态提出了摩阻力计算公式。采用该方法对工程案例进行计算, 计算结果与实测数据对比表明: 现有摩阻力计算公式的计算结果过于保守, 所提出的计算公式是合理和有效的。

关 键 词: 顶管; 泥浆套; 注浆; 摩阻力

中图分类号: TU 28

文献标识码: A

Formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking considering different forms of mud screen

WANG Shuang¹, XIA Cai-chu¹, GE Jin-ke²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Mud screen is formed to reduce the jacking friction in long-distance and large-diameter pipe jacking; the form and wholeness of mud screen determine the lateral friction resistance for pipe-jacking; the existing formulae of lateral friction resistance do not take account of the effect of different forms of mud screen; there are large differences between the calculation results and the actual friction resistance. The possible forms of mud screen are classified and analysed based on different construction conditions; the method for determining the forms of mud screen is presented. The influence of the injecting pressure on the thickness of mud screen is discussed; the lateral friction resistance caused by mud slurry is calculated using nonlinear fluid mechanics. Finally, a formula of lateral friction resistance for pipe jacking with different forms of mud screen is put forward using the assumption of stable mining face. The new calculation method is used in an engineering case; the calculation results are compared with the measured data; it is shown that the existing formulae are conservative and the formula of this article is more reasonable.

Key words: pipe jacking; mud screen; injecting slurry; friction resistance

1 引 言

大直径、长距离顶管施工中常采用注浆减摩措施来减小管壁侧摩阻力, 施工中管段、土体与泥浆三者的相互作用, 使得管外壁形成了一定厚度的泥浆套^[1], 管段在泥浆套的包裹中顶进摩阻力会大幅度减小。因此, 计算顶管管壁摩阻力时应考虑泥浆套的影响。

目前顶管管壁摩阻力计算主要采用两种管土作

用假设: 挖掘面稳定假设^[2]和管土全接触假设^[3]。根据以上两种管土作用假设, 国内外提出了多种摩阻力计算理论公式并制定了相关规范。

国内顶管管壁摩阻力计算常采用管土全接触假设: 《给水排水管道工程施工及验收规范》^[4]利用管周土压力加上管段自重与相应摩擦系数的乘积来计算管壁摩阻力; 余彬泉^[5]、王承德^[6]、何莲^[7]、汤华深^[8]等采用管周土压力乘以摩擦系数得到管壁摩阻力, 其中部分学者考虑了注浆对摩擦系数的影响。

收稿日期: 2013-05-13

基金项目: 上海城建集团科技攻关项目(No. 11231202400)。

第一作者简介: 王双, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下建筑工程方面的研究工作。E-mail: shuang19890@hotmail.com

通讯作者: 夏才初, 男, 1963 年生, 博士, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学、地下结构和能源地下工程等方面的教学与研究工作。

E-mail: tjxiacbb@126.com

各公式中摩擦系数的取值是影响公式计算结果的关键因素,计算时摩擦系数按照经验值确定,不同地区和施工条件下经验取值差异较大,导致设计与施工人员难以准确确定。计算公式较少考虑触变泥浆的润滑作用,与实际情况不符,因此计算结果与工程实测数据相比常偏于保守。

国外顶管管壁摩阻力计算常采用挖掘面稳定假设: Milligan^[9]、Shimada^[10]、Barla^[11]等采用重力乘以摩擦系数来计算管壁摩阻力, Khazaei 等^[12]分两部分计算摩阻力(管土接触与管泥浆接触),其中泥浆摩阻力取经验值。与管土全接触假设相比,在注浆条件下该假设更接近实际施工情况,但摩擦系数的取值仍取经验值,对计算结果影响较大,难以准确确定。

以上论述表明:目前国内顶管管壁摩阻力计算主要采用摩擦系数与管周压力相乘的方法,其中摩擦系数依靠经验确定,采用上述方法计算所得顶管管壁摩阻力与实际工程施工测得摩阻力相差较大,根本原因在于计算参数取值范围较大,难以选择,未考虑或较少考虑泥浆与管段之间的流体剪切作用。实际工程中的注浆减摩措施直接决定了管周压力大小,因此摩阻力计算中需减少经验因素的影响并充分考虑泥浆套与管段的相互作用。

本文充分考虑了泥浆套与管段的相互作用,对施工中泥浆套的可能形态进行了分类,采用非线性流体力学相关原理计算管壁与泥浆之间的摩阻力,本文公式中采用的参数可通过室内试验测得或弹性力学计算得到,降低了现有公式中参数取值范围过大,难以准确确定对摩阻力计算结果的影响,在一定程度上提高了摩阻力计算的准确性。结合泥浆套的不同形态,采用挖掘面稳定假设得出了摩阻力计算公式,最后利用本文公式及国内常用公式对实际工程案例进行了计算,探讨了不同计算公式计算结果的准确性。

2 泥浆套形态分类及成因分析

根据泥浆套的形成过程,顶管管周泥浆呈3种状态:渗流胶凝状态、挤压状态与自由状态。其中渗流胶凝状态的泥浆最为常见,挤压状态与自由状态的泥浆只有在注浆量达到一定值时才会产生。管周泥浆套的形成是减少管壁摩阻力的关键,因此不同的注浆量将导致管段-泥浆-土体三者的相互作用状态发生改变,进而改变泥浆套的形态,对注浆减摩效果产生影响。据此将不同泥浆套形态分为以下5类:浆液渗透形态、管段下沉形态、管段悬浮

形态、管段上浮形态与管段水平偏转形态(见图1)。

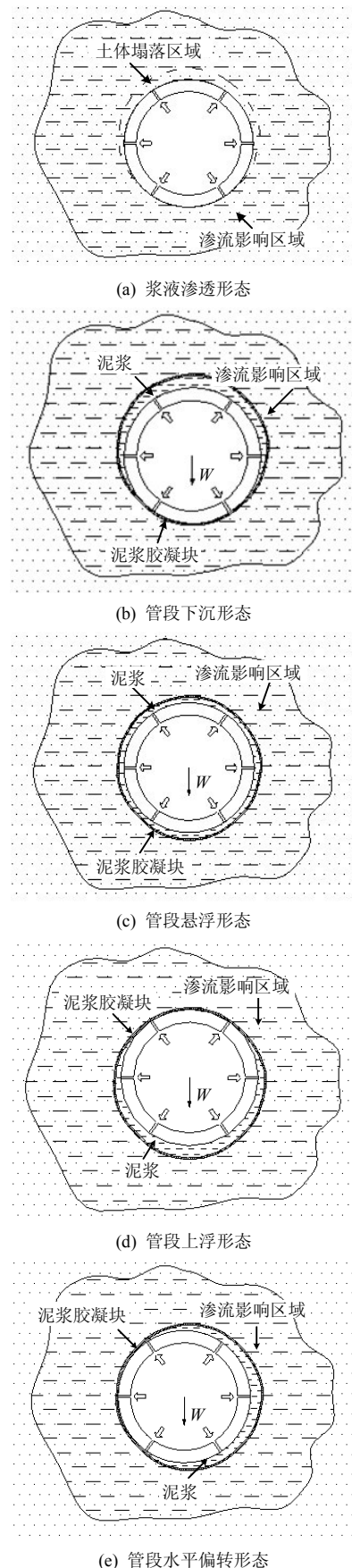


图1 不同形态泥浆套示意图

Fig.1 Different forms of mud screen

2.1 浆液渗透形态泥浆套

当顶管机机头向前顶进时, 机尾同步注入的浆液会迅速填充施工空隙, 阻止管周土体向顶管靠拢。与此同时, 在浆液与土体的渗透作用的影响下, 管段周围土体将逐渐形成泥浆渗透区域, 若同步注浆量较少, 随着时间推移, 起填充作用的浆液将部分渗入土体, 泥浆对施工空隙的支撑作用减弱, 导致土体变形, 极端情况下压注的泥浆完全渗入土体, 此时在重力 W 作用下管段底部与土体紧密接触, 管顶与两侧区域无后续注入的浆液填充施工空隙, 泥浆与土壤的混合土体塌落在管壁上, 与管段一起移动, 土体产生较大的水平位移与垂直位移, 对周围环境造成不良影响。此时管外壁泥浆套形态如图 1(a) 所示。

2.2 管段下沉形态泥浆套

随着注浆量的增加, 泥浆会在浆液与混合土体之间形成致密的渗透块, 渗透块在后续注浆压力的作用下产生黏结与巩固, 进而形成不透水的泥膜, 阻止浆液继续渗入土层^[1]。当泥浆在土体中的渗透距离已达到最大值时, 后续压注的泥浆将产生以下现象: 在管段自重 W 的作用下, 管段底部与混合土体紧密接触, 顶部与两侧的施工空隙被塌落的土体填充, 随着浆液压注的进行, 未能渗透的浆液将在土体表面形成泥膜, 对管壁周围土体产生挤压作用, 在此作用下管段顶部与两侧的混合土体会产生一定的位移, 位移空隙被后续压注的浆液填充, 泥浆对土体产生一定的支撑作用, 管壁与土体部分脱离, 管土之间的接触状态开始逐渐向“固—液—固”作用状态转化, 管段下沉形态泥浆套见图 1(b) 所示。

2.3 管段悬浮形态泥浆套

管段所受重力与浮力的大小决定了管壁与土体之间的摩擦状态, 随着注浆量的增加, 管段所受浮力逐渐增大, 土体与管段底部的接触宽度随之减小。当重力与浮力相等时, 顶管可能完全处于悬浮状态 (见图 1(c)), 此时管土之间的接触状态完全转变为“固—液—固”状态, 此时计算管壁所受摩阻力时仅需考虑管壁与泥浆之间的相互作用, 管壁所受摩阻力大幅度减小, 注浆减摩措施达到最佳效果。

2.4 管段上浮形态泥浆套

当注浆量较充足时, 工程中单位长度管段所受浮力较大, 若浮力大于其所受重力, 管段将受到竖直向上的合力, 此时管段顶部与混合土体接触并受到挤压, 挤压将使得管段与土体产生一定的接触宽度, 接触宽度之外的管段仍被浆液包裹, 形成管段上浮形态 (见图 1(d)), 该状态下的注浆减摩效果与

单位长度管段所受竖直向上的合力大小有关。

2.5 管段水平偏转形态泥浆套

由于地层不均匀、施工误差等多种因素的影响, 顶管施工中会出现轴线偏差的现象, 该偏差会对管段外的泥浆套的形态产生影响。当管段发生垂直方向的轴线偏差时, 管段在泥浆套中处于上浮或下沉状态; 当管段发生水平方向的轴线偏差时, 管段左侧或右侧可能与混合土体接触。除此之外, 顶管曲线段在顶力的作用下管段一侧会与混合土体挤压产生接触, 此时泥浆套形态如图 1(e) 所示。

3 管壁摩阻力计算理论

顶管轴线方向土—泥浆—顶管三者的相互作用示意图如图 2 所示, 图中 v 为顶管管节顶进速率, h 为泥浆套厚度, h_0 为由于顶管机机头与混凝土管段外径不同导致的施工空隙。

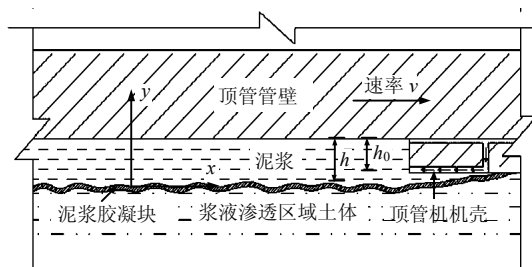


图2 土—泥浆—顶管相互作用示意图
Fig.2 Interactions among soil, slurry and pipe

在直线顶管中, 由于纠偏等因素造成的施工空隙较小, 可近似认为施工空隙是由于顶管机头与后续管段之间的直径不同造成的, 即 $h_0 = r - r_0$; 一般液体的压缩系数很小, 在相当大的压强变化范围内, 密度几乎不变, 一般的平衡和运动问题, 都按不可压缩流体进行理论分析, 据此计算中假设泥浆不可压缩; 若施工过程中形成的泥浆套较为完整, 泥浆套中的泥浆与外界土体将不发生物质交换, 此时泥浆套中的泥浆性质与压注浆液的性质接近, 可使用常压下的泥浆参数对泥浆套中的润滑泥浆进行计算。

根据以上分析, 针对泥浆套作如下假设:

- (1) 施工空隙大小 $h_0 = r - r_0$, 其中 r 为顶管机机头半径, r_0 为混凝土管段外半径;
- (2) 注入的泥浆均匀且无压缩性;
- (3) 顶管匀速运动, 速度为 v 且顶管表面泥浆速率与顶管顶进速率相同, v 取施工时顶管顶进平均速率, 一般为 50 mm/min;
- (4) x 方向泥浆压力梯度为 0, 即泥浆沿隧道轴

线方向处处均匀、压力相同, 计算过程中不考虑体积力;

(5) 浆液速率仅为坐标 y 的函数。

3.1 泥浆与顶管之间剪应力计算

根据上述假设, 土-泥浆-顶管三者相互作用模型可进一步简化为流体平行平板模型 (见图 3), 由于流体平行平板模型的应力场对牛顿流体和非牛顿流体均适用^[13], 无压力梯度两平行平板间的流速 u 可表示如下:

$$u = \frac{v}{h} y \quad (1)$$

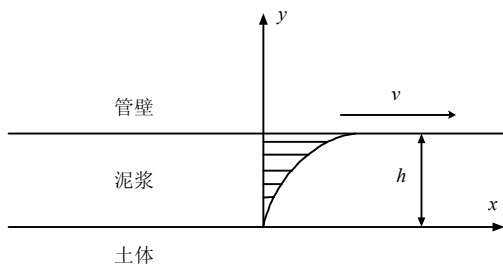


图 3 流体平行平板模型

Fig.3 Model of fluid between parallel plates

试验表明, 除非压力极高, 压力对流体黏度的影响一般可以忽略, 由于顶管外壁泥浆压力并不大, 可认为流体黏度为常数, 因此泥浆本构模型选用常压条件下幂律模型。幂律模型表述如下^[14]:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

式中: τ 为应力张量; K 为流体稠度系数; $\dot{\gamma}$ 为形变速率张量; n 为流型参数。 n 与 K 均可采用范氏六速旋转黏度计测试触变泥浆得到。

结合平行平板模型中流体的受力特性, 上述非线性流体幂律模型水平方向可简化如下:

$$\tau_1 = K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

式中: τ_1 为流体水平方向剪应力, 即管段与泥浆接触部分的剪应力; $\dot{\gamma}$ 为流体水平方向剪切变形率, $\dot{\gamma} = du/dy$ 。

将式 (1) 代入式 (3), 顶管管壁与泥浆之间剪应力计算公式如下:

$$\tau_1 = K \left(\frac{v}{h} \right)^n \quad (4)$$

3.2 泥浆压力对泥浆套厚度的影响

当顶管施工参数确定后, 顶管管壁与泥浆之间的剪应力计算公式中的计算参数 K 、 v 与 n 均确定,

此时泥浆套厚度 h 的变化情况决定了管壁与泥浆之间剪应力的大小。顶管施工时泥浆套的厚度受到多种因素的影响, 为简化计算, 仅考虑两个主要影响因素: 施工空隙和管周土体位移。管周土体位移主要考虑泥浆压力造成的土体位移。

由于顶管周围土体会在泥浆压力的作用下产生位移, 当泥浆压力较大时, 管周泥浆套厚度增加, 当泥浆压力较小时, 土体沉降将导致泥浆套厚度减小, 泥浆套厚度的变化间接反映出管周土体位移的变化。为表示出泥浆压力与泥浆套厚度的关系, 分别对泥浆压力偏大与泥浆压力偏小的情况进行计算。

3.2.1 泥浆压力偏大对泥浆套厚度的影响

针对泥浆套特性作如下四点假设:

(1) 注浆压力对土体的作用简化为平面应变问题, 注浆压力不随隧道轴线而变化;

(2) 在设计注浆压力值作用下, 浆液完全填充施工空隙且稳定后压力与顶管水土压力平衡;

(3) 土体为均匀的线弹性半无限体, 注浆压力为均布的径向压力, 且沿管道均匀分布;

(4) 泥浆套厚度变化仅受注浆压力变化的影响。

如图 4 所示, 顶管埋深为 H , 与地面距离为 d , 泥浆压力为 p , 管段顶部土体位移为 Δh_1 (方向与 y' 轴正向相反), 管段底部土体位移为 Δh_2 (方向与 y' 轴正向相同), 利用弹性力学中半无限弹性体柱形圆孔扩张理论可计算出图 4 中二维平面模型各点的位移。根据针对泥浆套特性的假设, 令半无限弹性体弹性模量和泊松比分别为 E 与 μ , 泥浆套厚度的变化量 Δh 可近似表示如下:

$$\Delta h = \frac{1}{2} (\Delta h_1 + \Delta h_2) \quad (5)$$

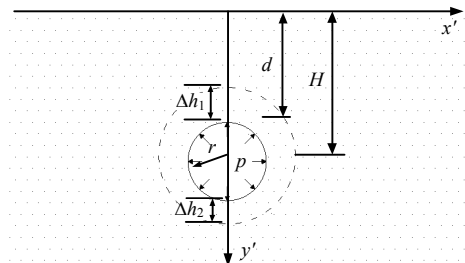


图 4 泥浆压力对管周土体的影响示意图

Fig.4 Diagram of the effect of mud pressure on soil

半无限弹性体柱形圆孔各点位移为该点坐标和扩张压力的函数, 当工程参数确定时, Δh_1 与 Δh_2 可表示为注浆压力 p 的函数, 据此可得出泥浆套厚度

h 与注浆压力值 p 的关系表达式。

利用弹性力学中平面问题的复变函数解答, 令 $Z = x' + iy'$, 对于平面应变情况, Verruijt 给出了 Z 的平面解析函数^[15]:

$$\varphi(Z) = iP \left[-2(1 + \alpha^2) + \frac{2(Z - m)}{Z + m} + \frac{2\alpha^2(Z + m)}{Z - m} \right] \quad (6)$$

$$\psi(Z) = iP \left[-3(1 + \alpha^2) + \frac{2\alpha^2(Z - m)}{Z + m} + \frac{2(Z + m)}{Z - m} + \frac{\alpha^2(Z + m)^2}{(Z - m)^2} \right] \quad (7)$$

$$\text{式中: } P = -\frac{\alpha^2 p H}{(1 - \alpha^2)(1 - \alpha^4)}; \quad \alpha = \frac{H - \sqrt{H^2 - r^2}}{r};$$

$$m = -iH \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2}.$$

利用 Verruijt 所给出的复变函数解答求解 Δh , 半无限弹性体柱形圆孔顶部坐标: $x' = 0$, $y' = H - r$, 计算可得顶管顶部泥浆套厚度变化量 Δh_1 :

$$\Delta h_1 = \frac{1 + \mu}{E} \alpha^2 p H \cdot \left[\frac{Hr}{\lambda} (12 - 16\mu) + \frac{16H^2(H - r)^2(1 + \alpha^2)}{\lambda^2} + \frac{1}{(1 - \alpha^2)^2} + \frac{4Hr}{\lambda} + \frac{\alpha^2[2\alpha^2 H - r(1 + \alpha^2)]^4}{(1 - \alpha^2)(1 - \alpha^4)\lambda^2} \right] \quad (8)$$

同理, 半无限弹性圆腔底部坐标 $x' = 0$, $y' = H + r$, 计算可得顶管底部泥浆套厚度变化量 Δh_2 :

$$\Delta h_2 = \frac{1 + \mu}{E} \alpha^2 p H \cdot \left\{ -\frac{Hr}{\lambda_0} (12 - 16\mu) - \frac{16H^2(H + r)^2(1 + \alpha^2)}{\lambda_0^2} - \frac{1}{(1 - \alpha^2)^2} - \frac{4Hr}{\lambda_0} - \frac{\alpha^2[2\alpha^2 H + r(1 + \alpha^2)]^4}{(1 - \alpha^2)(1 - \alpha^4)\lambda_0^2} \right\} \quad (9)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= H^2(1 - \alpha^2)^2 - (H - r)^2(1 + \alpha^2)^2 \\ \lambda_0 &= H^2(1 - \alpha^2)^2 - (H + r)^2(1 + \alpha^2)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

泥浆套厚度变化 Δh 可由式 (5) 计算得出。式 (8) 与式 (9) 表明, 在工程施工参数确定的情

况下泥浆套厚度的变化量 Δh 与泥浆压力 p 成正比。对埋深较大顶管, 即 $H \gg r$ 时, $\alpha = 0$, 此时 $\Delta h = 0$, 即埋深较大顶管的泥浆套厚度的变化量可忽略不计, 可近似认为仅受到施工空隙的影响: $h = h_0$ 。

3.2.2 泥浆压力偏小对泥浆套厚度的影响

当顶管外壁泥浆压力偏小时, 该压力不足以起到支撑管周土体的作用, 管周土体会存在一定程度的塌落。特别地, 当顶管外壁泥浆套完全缺失时, 管周土体会直接塌落在管壁周围, 即泥浆套厚度大小存在以下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } p = 0 \text{ 时, } h &= 0 \\ \text{当 } p = p_0 \text{ 时, } h &= h_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: p_0 为维持管周土体无变形时的泥浆压力, 以下称为最佳注浆压力。

最佳注浆压力应使得注浆减摩措施达到以下两种效果: ①有效减少施工顶力; ②使得土体变形最小化。当注浆压力小于最佳值时, 浆液不能很好地起到支撑与润滑作用, 容易导致地面沉降以及施工顶力增大; 当注浆压力大于最佳值时, 在压力的作用下, 地面将会产生隆起, 对周围环境产生影响。在顶管施工中, 为使顶进过程中土体变形最小化, 需维持泥浆压力的值为地下水压力 p_w 加上 20~50 kPa^[16], 即 $p_0 = p_w + (20 \sim 50) \text{ kPa}$ 。

由于在工程施工参数确定的情况下泥浆套厚度的变化量 Δh 与泥浆压力 p 成正比, 结合式 (11) 边界条件, 可得泥浆压力偏小情况下泥浆套厚度计算公式如下:

$$h = \frac{h_0}{p_0} p \quad (12)$$

引入参数 ω , 令 $\omega = (\Delta h_1 + \Delta h_2)/(2p)$, 则当工程参数确定时 ω 即可确定, 泥浆套厚度变化可用参数 ω 表示:

$$\Delta h = \omega p \quad (13)$$

结合式 (4) 可得顶管管壁与泥浆之间剪应力计算公式如下:

$$\tau_1 = \begin{cases} \tau \left(\frac{v}{h_0 + \omega p} \right) = K \left(\frac{v}{h_0 + \omega p} \right)^n, & p > p_0 \\ \tau \left(\frac{vp_0}{h_0 p} \right) = K \left(\frac{vp_0}{h_0 p} \right)^n, & 0 < p \leq p_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: 参数 p_0 根据工程地质情况计算确定, 参数 p 取施工设定注浆压力。

3.3.3 管段上浮形态泥浆套摩阻力计算

当泥浆套为管段上浮形态时, 管顶与土体存在一定的接触宽度 b_2 (见图 6), 同理, 可利用弹性圆筒位于圆腔中的弹性力学解来计算。

由竖直方向受力平衡可知:

$$P_u = 2 \int_0^{\pi(\frac{b_2}{r_0})} p \cos \theta d\theta - W \quad (25)$$

结合式 (17) 与式 (25) 可得

$$\frac{b_2^2}{2.56k_d C_e} - 2p \sin \frac{b_2}{r_0} + W = 0 \quad (26)$$

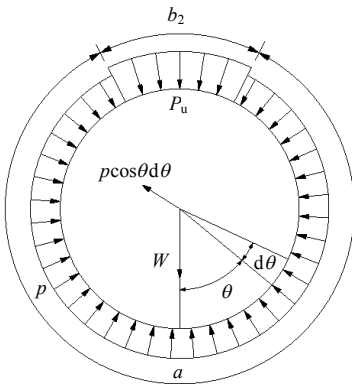


图 6 管段上浮受力示意图
Fig.6 Force of floating pipe

利用上式可求出管顶与土体的接触宽度 b_2 , 据此可计算出顶管管壁所受阻力:

$$F = \begin{cases} \left[\tau_2 b_2 + K \left(\frac{v}{h_0 + \omega p} \right)^n (2\pi r_0 - b_2) \right] l, & p > p_0 \\ \left[\tau_2 b_2 + K \left(\frac{v p_0}{h_0 p} \right)^n (2\pi r_0 - b_2) \right] l, & 0 < p \leq p_0 \end{cases} \quad (27)$$

4 工程案例计算

软土区域某顶管工程施工参数取值如下: $H = 12.09$ m, $r_0 = 2.32$ m, $r = 2.34$ m, $v = 50$ mm/min, $p = 0.2$ MPa, 混凝土管段参数如下: $E_0 = 3.35 \times 10^4$ MPa, $\mu_0 = 0.2$, $\gamma_c = 26.0$ kN/m³, $t_0 = 0.32$ m, 泥浆材料参数如下: $\rho_0 = 1.05$ g/cm³, $\eta = 40.9$ MPa·s, $n = 0.5$, $K = 1.31$ Pa·s ^{$\frac{1}{n}$} , 土层参数取各层土平均值: $E = 7.4$ MPa, $\mu = 0.35$, $c = 11.2$ kPa, $\varphi = 10.9^\circ$, $\gamma = 17.4$ kN/m³, $c' = 0.2$ kPa。

(1) 计算方法 1: 《顶管施工技术》^[5]推荐

① 公式 1

$$f = \frac{(2\pi r_0 q_0 + W)\mu' + 2\pi r_0 c'}{2\pi r_0} = 7.13 \text{ kPa}$$

式中: q_0 为管周边均布荷载。

② 公式 2

$$f = \alpha_0 \beta q \mu' + \alpha c' + W \mu' / (2\pi r_0) = 3.76 \text{ kPa}$$

式中: α_0 为顶管法向土压力取值范围 ($\alpha_0 = 0.5 \sim 0.8$); β 为管周边的载荷系数 ($\beta = 1.0 \sim 1.5$); q 为管顶垂直均布荷载。

③ 公式 3

$$f = \alpha_0 q \mu' + c' + \frac{W}{\pi(2r_0 - t_0)} \mu' = 3.45 \text{ kPa}$$

④ 公式 4

$$f = R + W f_0 / (2\pi r_0) = 3.66 \text{ kPa}$$

式中: R 为综合摩擦阻力, 软土中可取 $R = 8$ 。

(2) 计算方法 2: 经验算法

考虑注浆减摩作用的经验计算公式如下^[7]:

$$F = 2\pi r_0 l f_0 \quad (28)$$

由于工程处于软土地区, 该公式中 f_0 取值与顶进距离 l 有关: 当 $l \leq 100$ m 时, $f_0 = 50l^{-0.5}$ kPa; 当 $l > 100$ m 时, $f_0 = 2 \sim 5$ kPa。

(3) 计算方法 3: 本文公式

顶管施工时对注浆压力 p 以及管壁平均摩阻力进行了监测, 实测注浆压力变化曲线如图 7 所示。

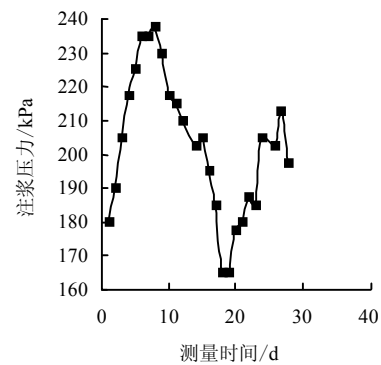


图 7 实测注浆压力变化曲线
Fig.7 Curve of measured slurry pressure

首先对管周泥浆套的可能形态进行判断, 以选择最接近实际情况的理论公式进行计算。经计算, 该工程 $W = 121.28$ kN/m, $F' = 174.00$ kN/m, $W < F'$, 说明在注浆量充足的条件下, 管段在泥浆套中处于上浮形态的概率较大。因此, 计算时采用式 (27)

计算不同时刻管壁所受阻力 F , 利用 $f = F / (2\pi r_0 l)$ 可得出管壁计算摩阻力。将实际测得注浆压力值 p 代入, 可计算出该时刻管段摩阻力, 计算结果与实测管段平均摩阻力对比曲线如图 8 所示。

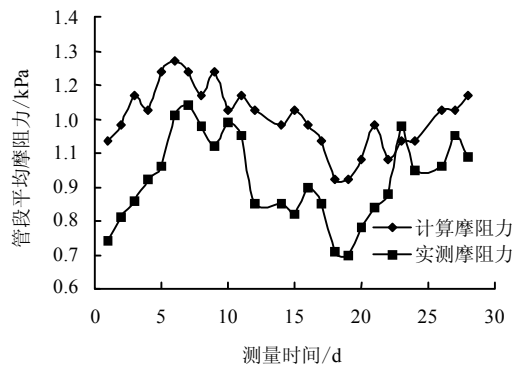


图 8 摩阻力计算值与实测值对比
Fig.8 Comparison of calculated and measured friction resistance

实测数据说明, 在注浆量充足的情况下注浆压力与管段摩阻力的变化趋势一致, 本文所提出的摩阻力计算理论公式充分体现了注浆压力对摩阻力的影响。当计算参数取设定注浆压力 $p=0.2$ MPa 时, 计算所得管段摩阻力 $f=1.10$ kPa。

根据不同摩阻力公式计算所得摩阻力与现场实测数据对比如表 1 所示。对比表中计算结果可知, 与现有摩阻力计算公式相比, 本文所提出的摩阻力计算公式更加精确; 本文中的计算公式考虑了注浆压力以及管段外壁泥浆套形态等施工因素的作用, 更加接近实际情况。

表 1 不同方法得到的摩阻力比较表
Table 1 Comparison of friction resistance by different calculation methods

计算方法	摩阻力/kPa	与现场实测数据误差/%
现场实测	0.92	
本文公式	1.10	20
文献[5]建议公式 1	7.13	675
文献[5]建议公式 2	3.76	308
文献[5]建议公式 3	3.45	275
文献[5]建议公式 4	3.66	298
软土地区经验公式 ^[7]	2~5	117~443

注: 现场实测摩阻力 0.92 kPa 为均值。

5 结 论

(1) 根据土-泥浆-顶管三者的不同作用情况, 施工中泥浆套形态可分为 5 种: 浆液渗透形态、管段下沉形态、管段悬浮形态、管段上浮形态与管段

水平偏转形态。阐明了不同形态泥浆套的成因。

(2) 利用弹性力学以及非线性流体力学原理提出了考虑泥浆套形态以及浆液压力的管壁摩阻力计算公式。

(3) 针对直线顶管中常见的 3 种泥浆套形态分别给出了不同的摩阻力计算公式, 可通过比较顶管所受重力与浮力的相对大小来选择计算公式。

(4) 分别采用现有的不同摩阻力公式和本文的计算公式对实际工程管段所受摩阻力进行计算, 并将计算所得结果与实测数据进行对比, 对比结果说明现有公式的计算结果过于保守, 本文计算公式由于充分考虑了施工泥浆压力的影响, 计算结果更为精确, 更加接近实际情况。

参 考 文 献

- [1] 魏纲, 徐日庆, 邵剑明, 等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 930—934.
WEI Gang, XU Ri-qing, SHAO Jian-ming, et al. Research on mechanism of reducing friction through injecting slurry in pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 930—934.
- [2] OREILLY M P, ROGERS C D F. Pipe jacking forces[C]//Proceedings of International Conference on Foundations and Tunnels. Edinburgh: Engineering Technics Press, 1987: 201.
- [3] HASLEM R F. Pipe-jacking forces :from practice to theory[C]//Proceedings of ICE North Western Association Centenary Conference in Infrastructure Renovation and Waste Control. Manchester: Manstock, 1986: 173.
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB50268—2008 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, 2008.
- [5] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [6] 王承德. 顶管施工中管壁摩阻力理论公式的商榷[J]. 特种结构, 1999, 16(3): 22—25.
- [7] 何莲, 刘灿生, 帅华国. 顶管施工的顶力设计计算研究[J]. 给水排水, 2001, 27(7): 87—89.
- [8] 汤华深, 刘叔灼, 莫海鸿, 等. 顶管侧摩阻力理论公式的探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 574—576, 580.
TNAG Hua-shen, LIU Shu-zhuo, MO Hai-hong, et al. Discussion on theoretical formulae of lateral friction resistance for pipe-jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp. 2): 574—576, 580.