

DOI: 10.11779/CJGE201509012

# 考虑泥浆触变性的顶管顶力计算方法

叶艺超, 彭立敏, 杨伟超, 雷明峰, 施成华, 王哲

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 顶管的顶力是顶管工程设计的关键控制参数之一, 直接影响到其它参数的确定和工程造价, 它的准确计算对顶管工程具有重要意义。在分析了目前顶管顶力计算方法的缺陷之后, 基于弹性力学半无限空间柱形圆孔扩展理论和黏性流体力学平板模型理论, 采用顶管顶进过程中管土“固—液”接触状态, 推导了考虑泥浆触变性的顶管顶力的一种新的计算方法, 并进行了实例验证。与既有方法的对比分析表明: 该方法的计算结果与实测值更为吻合, 而既有方法相对保守。

**关键词:** 顶管; 注浆; 触变性; 摩阻力; 顶力

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1653-07

作者简介: 叶艺超(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面的科研。E-mail: 1040932575@qq.com。

## Calculation of jacking force for pipe-jacking considering mud slurry thixotropy

YE Yi-chao, PENG Li-min, YANG Wei-chao, LEI Ming-feng, SHI Cheng-hua, WANG Zhe

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Jacking force is one of the key parameters for pipe-jacking engineering, which directly affects the determination of other parameters and the cost. Therefore, its accurate calculation is of great significance. The existing methods for the jacking force have many to be satisfied. To deal with this problem, a new method considering mud slurry thixotropy is deduced based on the analytical solution to the classic problems of an elastic half plane with a circular cavity and the flat plates model of viscous fluids mechanics. It is different from the existing methods because it takes the contact state of the pipeline and its surrounding soils as “solid to liquid”, rather than “solid to solid”. Furthermore, the new method is used in an engineering case. Compared with the existing methods, the proposed method is more reasonable, and the existing methods are relatively conservative.

**Key words:** pipe-jacking; injecting slurry; mud slurry thixotropy; friction resistance; jacking force

## 0 引言

目前, 国内外关于顶管顶力理论计算方法, 均是基于 Haslem<sup>[1]</sup>提出的挖掘面稳定假设和 O'Reilly 等<sup>[2]</sup>提出的管土全接触假设, 采用管土“固—固”接触方式而推导得到的, 集中在解决管土摩擦系数和管周土压力的问题<sup>[3-7]</sup>。然而, 摩擦系数的确定和土压力的计算受土体性质、埋深等诸多因素的影响, 不同计算方法得到的结果往往差别很大, 难以令人满意。事实上, 顶管推进过程中, 管壁与周围土体之间存在一层触变性显著的减阻泥浆, 该泥浆静止状态时为凝胶(固态), 被振动后又变为溶胶(液态), 大幅起到减阻的作用<sup>[8]</sup>。因此, 在顶管顶进过程中, 管土实际应为“固—液”接触状态, 摩擦方式的转变, 势必导致摩擦力的改变。故而, 考虑泥浆触变性, 采用“固—液”接触方式进行计算更贴近工程实际。

本文充分考虑泥浆的触变特性, 结合顶管顶进的实际施工状态, 采用全接触假设及黏性流体力学与弹性力学的相关理论, 对顶管顶力的理论计算公式进行了推导, 以期完善顶管顶力的计算方法。

## 1 顶力理论计算方法

由于顶管施工的特性, 顶管一般是直线顶进。顶力由管周摩阻力和迎面阻力组成, 并考虑实际施工中顶管产生的顶进偏差会使顶力增大的情况, 引入了纠偏系数  $n$ 。于是, 顶力理论计算公式可写为

$$F = n \cdot (F_f + F_y) , \quad (1)$$

式中,  $F_f$  为管周摩阻力,  $F_y$  为迎面阻力。

### 1.1 基本假设

研究表明<sup>[9]</sup>,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,都按不可压流体进行理论分析;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,此时泥浆套触变后的性质与压注浆液的性质接近。根据黏性力学平板模型理论<sup>[10]</sup>,假定顶管匀速顶进,速率为U,顶管表面泥浆流动速率与顶进速率相同,泥浆套与土层接触面泥浆流动速率为0,沿顶管任一截面的速度分布情况应当与其他截面的速度分布一样。

根据上述分析作如下计算假设:①顶管施工过程中注入的泥浆在管道周围形成完整的泥浆套,且泥浆是均匀、不可压缩的;②顶管匀速顶进,管周泥浆流动速率与顶进速率相同,泥浆套与土层接触面泥浆流动速率为0,顶进速率取顶管顶进平均速率;③泥浆流动速率仅是坐标y,z(直角坐标系)或r(圆柱坐标系)的函数,与管轴x方向无关;④泥浆压力与周围土体的相互作用简化为平面应变问题;⑤管周压注的泥浆完全填充施工空隙,且稳定后压力与管周水土压力相平衡。

### 1.2 摩阻力计算

顶管顶进及相关参数如图1所示,坐标系如图2所示。顶管以平均速率U顶进,顶管外半径为r<sub>0</sub>,顶管机头外半径R',泥浆套的外半径为R<sub>0</sub>,顶管机头与后续管节施工间隙为h<sub>0</sub>,在泥浆压力作用下,泥浆套厚度变化为Δh,泥浆套厚度为h。

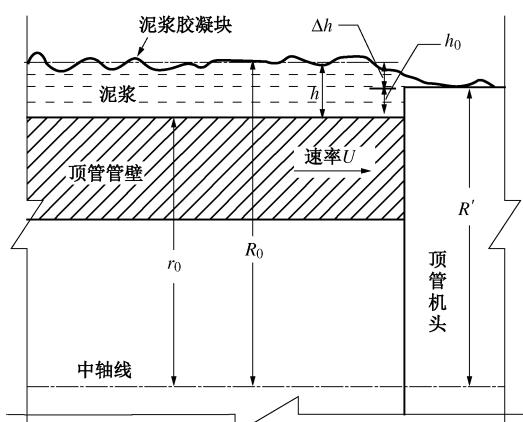


图1 顶管顶进及相关参数示意图

Fig. 1 Construction of pipe-jacking and its relative parameters

取管轴为x轴,根据假设③,在直角坐标系中,泥浆任意一点A(x,y,z)的速率应为

$$\left. \begin{array}{l} u = u(y, z), \\ v = 0, \\ w = 0. \end{array} \right\} \quad (2)$$

根据黏性不可压流体服从的动力学规律,任意一点处的泥浆运动状态服从纳维-斯托克斯方程<sup>[10]</sup>:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = \\ X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} = \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \end{array} \right\}. \quad (3)$$

式中X,Y,Z为单位质量流体中体力的分量;ν为运动黏性系数;p为流体的应力,即泥浆压力。

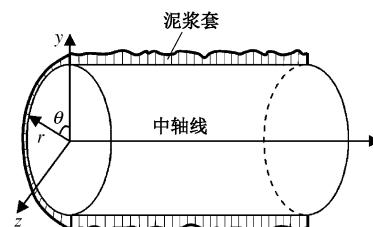


图2 直角坐标系和圆柱坐标系

Fig. 2 Rectangular and cylindrical coordinate systems

由假定⑤,泥浆充满施工空隙,则满足连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

将式(2)代入式(3),并利用连续性方程式(4),得

$$\left. \begin{array}{l} u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \end{array} \right\}. \quad (5)$$

由式(5)的中间2个方程可知p只是x的函数,即

$$p = p(x). \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)的第1个方程,并由u=u(y,z)可得

$$\frac{dp}{dx} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

式中,  $\mu = \rho v$  表示流体黏性系数, 计算泥浆与管周之间切应力时, 应使用泥浆与管外壁的黏性系数。

观察式(7), 左边为  $x$  的函数, 右边为  $y$  和  $z$  的函数, 故方程  $p = p(x)$  应等于同一常数  $K$ , 则

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = K \\ \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = K \end{cases} \quad (8)$$

从式中可知,  $K$  的物理意义为单位长度的泥浆压强降, 与设计的顶管顶进线路坡度有关。

为了简便, 下面采用圆柱坐标系进行推导, 仍取管轴方向为  $x$  轴, 如图 2 所示。利用圆柱坐标变换式:

$$\begin{cases} x = x, \\ y = r \cos \theta, \\ z = r \sin \theta. \end{cases} \quad (9)$$

于是, 有

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = \frac{K}{\mu}. \quad (10)$$

观察式(10), 该式是一个二阶非齐次的微分方程, 可求得其通解为

$$u = \frac{1}{4} \frac{K}{\mu} r^2 + A \cdot \ln r + B. \quad (11)$$

式(11)应满足如下边界条件

$$\begin{cases} r = r_0 \rightarrow u = U \\ r = R_0 \rightarrow u = 0 \end{cases}. \quad (12)$$

于是, 可得速度分布函数为

$$u = \frac{\frac{K}{2\mu} \left( r^2 \ln \frac{r_0}{R_0} + r_0^2 \ln \frac{R_0}{r} + R_0^2 \ln \frac{r}{r_0} \right) + U \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{r_0}{R_0}}. \quad (13)$$

根据牛顿黏性定律, 管周流体所受剪应力  $\tau_w^{[10]}$  为

$$\tau_w = (\tau)_{r=r_0} = \left( \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\frac{2\mu U + KC}{2r_0 D} + r_0 K, \quad (14)$$

式中,  $C = R_0^2 - r_0^2$ ,  $D = \ln(R_0/r_0)$ 。

进一步, 根据牛顿第三定律, 可求得管周所受的剪应力  $\tau$  为

$$\tau = -\tau_w = \frac{2\mu U + KC}{2r_0 D} - r_0 K. \quad (15)$$

从而, 可得长度为  $l$  的管段所受摩阻力  $F_f$  为

$$F_f = \tau \cdot 2\pi r_0 \cdot l = \left( \frac{2\mu U + KC}{D} - 2r_0 K \right) \cdot \pi l. \quad (16)$$

### (1) 泥浆套厚度计算

由图 1 可知  $R_0 = r_0 + h$ , 要得到  $R_0$  的值, 关键就是计算泥浆套的厚度  $h$ 。泥浆套最终形成的厚度受到多种因素的影响, 为简化计算, 本文考虑两个主要影响

因素: 施工空隙和泥浆压力。施工空隙主要是由于顶管机头与后续管段之间的直径不同造成的。注浆后泥浆完全填充施工空隙, 此时对应泥浆套厚度为  $h_0 = R' - r_0$ 。若定义不致使管周土体产生变形的泥浆压力为临界泥浆压力  $p_0$ , 则当泥浆压力  $p$  大于临界泥浆压力  $p_0$  时, 泥浆套厚度会增加; 当泥浆压力  $p$  小于临界泥浆压力  $p_0$  时, 泥浆套厚度会减小。在实际顶管工程中, 为使顶进过程中土体变形最小化, 一般取  $p_0 = p_w + (20 \sim 50) \text{ kPa}$ <sup>[9]</sup>。

建立如图 3 所示的泥浆压力作用下管周土体位移图。图中, 地面到顶管中心距离为  $H$ , 泥浆压力为  $p$ , 机头外径为  $R'$ , 管段顶部土体位移  $\Delta h_1$ , 顶管底部土体位移为  $\Delta h_2$ , 利用弹性力学中半无限空间弹性体柱形圆孔扩张理论可计算出图中二维平面模型各点的位移, 泥浆套厚度的变化量  $\Delta h$  可用下面公式近似计算:

$$\Delta h = \frac{1}{2}(\Delta h_1 + \Delta h_2). \quad (17)$$

因此, 泥浆套厚度  $h$  为

$$h = h_0 + \Delta h. \quad (18)$$

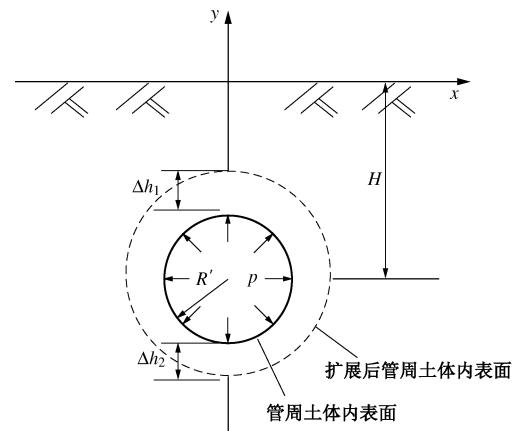


图 3 泥浆压力作用下管周土体位移图

Fig. 3 Displacement of surrounding soils under pressure of mud slurry

半无限空间中柱形圆孔受均布荷载作用下的平面扩张问题已由 Verrijt 采用复变函数的方法给出了  $Z$  的平面解析函数<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \varphi(Z) = iP \left[ -2(1+\beta^2) + 2\zeta + 2\beta^2 \frac{1}{\zeta} \right] \\ \psi(Z) = iP \left[ -3(1+\beta^2) + 2\beta^2 \zeta + \beta^2 \zeta^2 \right] \end{cases}. \quad (19)$$

$$\text{式 中 } \zeta = \frac{Z-m}{Z+m}; \quad P = \frac{\beta^2 pH}{(1-\beta^2)(1-\beta^4)}; \quad m = -iH \frac{1-\beta^2}{1+\beta^2}; \quad \beta = \frac{H - \sqrt{H^2 - R'^2}}{R'}.$$

位移场为

$$\begin{cases} u_0 = \operatorname{Re} \left[ \frac{(3-4\nu)(1+\nu)}{E} \varphi(Z) - \frac{1+\nu}{E} (Z \cdot \bar{\varphi}'(Z) + \bar{\psi}(Z)) \right], \\ v_0 = \operatorname{Im} \left[ \frac{(3-4\nu)(1+\nu)}{E} \varphi(Z) - \frac{1+\nu}{E} (Z \cdot \bar{\varphi}'(Z) + \bar{\psi}(Z)) \right]. \end{cases} \quad (20)$$

式中  $E$  和  $\nu$  分别是土体的弹性模量和泊松比;  $u_0$  和  $v_0$  分别是土体水平位移和竖向位移。

管周土体内表面圆孔顶部坐标为:  $x=0$ ,  $y=R'-H$ , 所以,  $Z=x+iy=i(R'-H)$ 。代入式(20)可得

$$\Delta h_1 = -2P \frac{(1+\nu)(3-4\nu)}{E} (\beta^2 + 2\beta + 1) - P \frac{(1+\nu)}{E} \left( \frac{2\beta^4 + 3\beta^3 + 2\beta + 2}{\beta} \right). \quad (21)$$

同理, 可得

$$\Delta h_2 = -2P \frac{(1+\nu)(3-4\nu)}{E} (\beta^2 - 2\beta + 1) - P \frac{(1+\nu)}{E} \left( \frac{-2\beta^4 + 3\beta^3 + 2\beta - 2}{\beta} \right). \quad (22)$$

将式(21)和(22)代入式(17)即可得  $\Delta h$  为

$$\Delta h = \frac{1+\nu}{E} \beta^2 PH \left[ \frac{(9-8\nu)\beta^2 - 8\nu + 8}{(1-\beta^2)(1-\beta^4)} \right]. \quad (23)$$

进一步, 作  $\beta$  与  $H/R'$  的变化曲线图, 如图 4。从图中可见, 当半径一定, 随着埋深的加大,  $\beta$  值快速的减小, 最后趋近于 0, 此时  $\Delta h=0$ 。所以, 对于埋深较深的隧道, 泥浆套的厚度近似等于施工空隙, 即  $h=h_0$ ; 对于埋深较浅的隧道, 则可将式(23)代入式(18), 即得到泥浆套厚度  $h$  的计算表达式为

$$h = h_0 + \frac{1+\nu}{E} \beta^2 pH \left[ \frac{(9-8\nu)\beta^2 - 8\nu + 8}{(1-\beta^2)(1-\beta^4)} \right]. \quad (24)$$

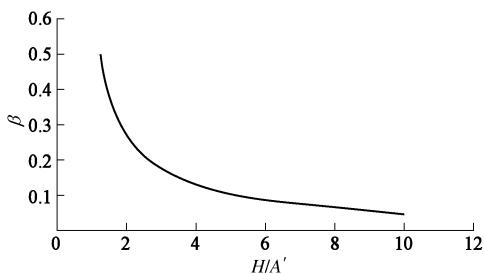


图 4  $\beta$  与  $H/R'$  的关系图

Fig. 4 Relationship between  $\beta$  and  $H/R'$

## (2) 泥浆单位长度压强降计算

取出泥浆的一个微小平行六面体, 受力分析如图 5 所示。它在  $x$  和  $r$  方向的尺寸分别为  $dx$  和  $dr$ 。为了计算简便, 它在  $\theta$  方向的尺寸取为一个单位长度。水平方向与顶进方向夹角为  $\alpha$  角,  $\alpha$  角顺时针为正, 逆时针为负。以  $x$  轴为投影轴, 由平衡方程可得

$$\left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dr - pdr + \left( \tau + \frac{\partial \tau}{\partial r} dr \right) dx - \tau dx + f_x dx dr = 0. \quad (25)$$

将式(25)两边同除以  $dx dr$ , 并化简可得

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial \tau}{\partial r} + f_x. \quad (26)$$

因为  $p$  只与  $x$  有关,  $\tau$  只与  $r$  有关, 因此  $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx}$ ,  $\frac{\partial \tau}{\partial r} = \frac{d\tau}{dr}$ , 即

$$\sum F_x = 0 \quad K = \frac{dp}{dx} = -\frac{d\tau}{dr} + f_x. \quad (27)$$

然后应用式(14), 即可得管周单位长度压强降  $K$  为

$$K = \frac{2\gamma' r_0^2 D \sin \alpha - \mu U}{6r_0^2 D + C}. \quad (28)$$

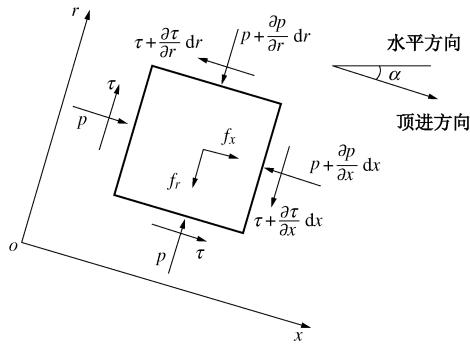


图 5 泥浆单元受力分析

Fig. 5 Stress analysis of mud slurry unit

## 1.3 顶管迎面阻力计算

当顶管的直径、地层、顶管机的类型、管道埋设深度确定以后, 顶管机的迎面阻力一般是一个定值。目前, 顶管工程基本采用压力平衡式顶管机(土压平衡或泥水平衡), 其迎面阻力主要由作用在切屑刀盘上的阻力  $F_1$  和切削面上的压力  $F_2$  两部分组成<sup>[12]</sup>。 $F_1$  可以用切削刀盘的单位面积阻力  $f_1$  表征, 即, 一般地, 土层  $f_1$  取 0.15 MPa, 砂砾  $f_1$  取 0.30 MPa<sup>[13]</sup>,  $\eta$  为切削刀盘开挖覆盖率;  $F_2$  可以用工作仓压力  $f_2$  表征, 即  $F_2 = \pi r_0^2 f_2$ 。

所以, 压力平衡式顶管机的迎面阻力为

$$F_y = F_1 + F_2 = \eta \pi R'^2 f_1 + \pi r_0^2 f_2. \quad (29)$$

若未知  $f_1$  和  $f_2$ , 可以采用迎面阻力的经验计算公式进行估算。在《顶管施工技术及验收规范(试行)》中规定在封闭式压力平衡顶管施工中, 迎面阻力可以按如下经验公式进行估算

$$F_y = 13.2 \times \pi \times D_s \times N. \quad (30)$$

式中  $D_s = 2R'$  为掘进机外径(m);  $N$  为土的标准贯入指数。

#### 1.4 纠偏系数计算

顶管施工过程中, 经常会偏离设计线路, 产生一个偏角 $\gamma$  (如图 6 所示), 导致顶力增大, 顶力增加量与偏角 $\gamma$ , 顶进距离 $l$ 直接相关, 对管轴方向受力分析可得

$$F = F_{\text{fl}} + \frac{F_{\text{f2}} + F_y}{\cos\gamma} , \quad (31)$$

式中,  $F_{\text{fl}}$ 为顶管偏离设计线路前的管周摩阻力,  $F_{\text{f2}}$ 为偏离部分的摩阻力。

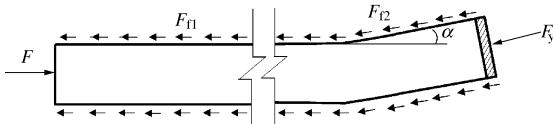


图 6 顶管偏离线路示意图

Fig. 6 Deviating from design of line in construction process of pipe-jacking

而设计顶力为

$$F_0 = F_{\text{fl}} + F_{\text{f2}} + F_y . \quad (32)$$

所以, 纠偏系数 $n$ 为

$$n = \frac{F}{F_0} = \frac{1}{\cos\gamma} \cdot \frac{F_{\text{fl}} \cos\alpha + F_{\text{f2}} + F_y}{F_{\text{fl}} + F_{\text{f2}} + F_y} . \quad (33)$$

令 $\frac{F_{\text{f2}} + F_y}{F_{\text{fl}}} = Q$ , 则式(32)变形为

$$n = \frac{F_{\text{fl}} + \frac{F_{\text{f2}} + F_y}{\cos\gamma}}{F_{\text{fl}} + F_{\text{f2}} + F_y} = \frac{1 + \frac{Q}{\cos\gamma}}{1 + Q} . \quad (34)$$

作不同 $Q$ 值下 $n$ 与 $\gamma$ 的关系曲线图, 如图 7 所示。从图中可见, 偏角越大,  $Q$ 值越小, 产生的纠偏系数越大。在实际工程中, 顶进方向是通过测量实时纠偏的, 产生的方向偏角一般是一个较小值, 若偏角在 $10^\circ$ 以内, 相应的纠偏系数小于 1.02; 而 $Q$ 值是随着顶进长度越大,  $Q$ 值越小, 顶进长度足够长后,  $Q$ 值趋近于 0; 本次分析只是一次纠偏的情况, 工程中往往会有多次纠偏, 所以, 整体纠偏系数还要大于单次纠偏系数, 但不具有累加效应。

综合考虑,  $n=1.05$ 是一个比较合理的值。

#### 1.5 顶力理论计算公式

综合上述分析, 将式(16)、式(29)和式(34)代入式(1)即可得到顶力理论计算公式如下:

$$F = n(F_{\text{f}} + F_y) = f \cdot l + n(\eta\pi R'^2 f_1 + \pi r_0^2 f_2) , \quad (35)$$

式中,  $f = \pi \left( \frac{2\mu U + KC}{D} - 2r_0^2 K \right)$ , 表示单位长度管周摩阻力。

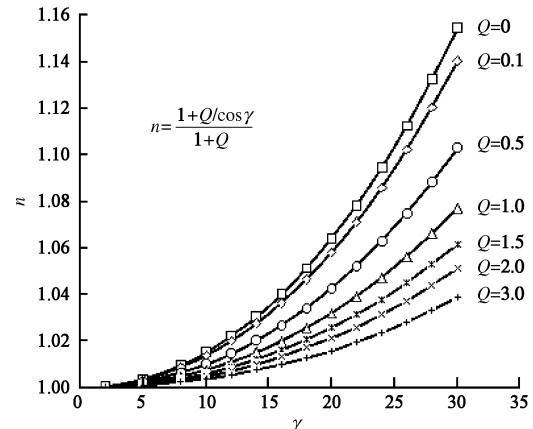


图 7 不同 $Q$ 值下 $n$ 与 $\gamma$ 的关系曲线图

Fig. 7 Relationship between  $n$  and  $\gamma$  under different values of  $Q$

#### 2 工程案例计算及分析

某顶管工程施工参数如下: 顶管直线顶进, 顶进线路坡度 $-0.3\%$ , 总顶程为 105 m,  $H=7.62$  m,  $R'=5$  m,  $U=25$  mm/min,  $f_1=0.15$  MPa,  $f_2=0.15$  MPa,  $\eta=97\%$ ,  $n=1.05$ 。

管节参数:  $E_0=3.45 \times 10^4$  MPa,  $\nu_0=0.20$ ,  $\gamma_c=25$  kN/m<sup>3</sup>,  $t_0=0.6$  m,  $r_0=4.98$  m。

泥浆参数:  $p=0.146$  MPa,  $\mu=1.7$  MPa·s,  $\gamma'=10.81$  kN/m<sup>3</sup>。

土层参数(取土层加权平均值):  $E=16.0$  MPa,  $\nu=0.30$ ,  $\gamma=19.2$  kN/m<sup>3</sup>,  $\varphi=19.08^\circ$ ,  $c=10.60$  kPa。

各参数的物理意义见文中, 兹不赘述。将各参数代入式(35)可得

$$F = 200.65l + 19932 .$$

顶力计算值与实测值的对比如图 8 所示。从顶力实测数据可以发现, 0~7.5 m 顶力快速增加到 33604 kN, 7.5~13.5 m 又快速回落到 20440 kN, 而后顶力曲线震荡上升, 整体基本成直线分布, 大小与顶程成正比, 拟合方程见图 8。顶力快速增加是由于开始施工时没有及时注入减阻泥浆, 在顶进 7.5 m 的时候注入减阻泥浆后, 顶力快速减小, 减小幅度将近 40%, 说明了减阻泥浆在减小顶力方面的重要作用。根据本文推导的顶力理论计算公式计算的结果要比实测值要大一些, 增幅最大为 22.2%, 最小为 7.6%, 平均在 13%左右, 是偏于安全的。

取顶程为 100 m, 不同顶力计算公式计算所得顶力与现场实测顶力值对比如表 1 所示。

公式中的参数具体参见《顶管施工技术》<sup>[14]</sup>、《顶管施工技术及验收规范》和文献[15]这里不一一列出。从表 1 的计算结果可知, 与现有顶力计算公式相比, 本文公式的计算结果更为接近实测值。

表 1 不同顶力计算公式计算所得顶力与实测值对比表  
Table 1 Comparison between calculated and measured jacking forces using different formulae

计算公式	顶力 /kN	误差 /%
实测值	36378	
本文公式	39997	9.9
$F = F_0 + [Wu' + \alpha\pi B_c \tau_\alpha] \cdot L^{[14]}$	42836	15.2
$F = F_0 + [(\pi B_c q + W)u' + \pi B_c c'] \cdot L^{[14]}$	53070	45.9
$P = P_0 + f(\pi D_l q + W) + \pi D_l c L^{[15]}$	63162	73.6
$P = \frac{\pi D_l^2}{4} \cdot B + \pi \cdot D_l \cdot L \cdot f_s^{[15]}$	51547	41.7
$P = f\gamma D_l L \left[ 2H + (2H + D_l) \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{\omega}{\gamma D_l} \right] + P_s$	85652	135.4
《顶管施工技术及验收规范》		

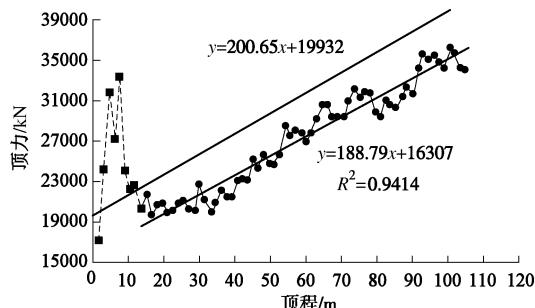


图 8 顶力计算值与实测值对比图

Fig. 8 Comparison between calculated and measured jacking forces

### 3 结 论

(1) 基于泥浆的触变性, 本文借鉴黏性力学平板模型理论, 采用管土“固—液”接触方式, 推导了一种新的顶管顶力理论计算公式, 适用于黏性土和砂性土地层。

(2) 利用弹性力学中半无限空间弹性体柱形圆孔扩张理论, 推导了注浆压力与泥浆套厚度变化的关系, 得出了关键参数泥浆套厚度的计算式。

(3) 顶管施工过程中, 经常会偏离设计线路, 产生一个偏角  $\gamma$ , 导致顶力增大, 经过计算, 得出了顶力增幅的纠偏系数为 1.05。

(4) 结合工程实例, 对既有顶力计算公式与本文顶力计算公式的计算结果进行比较表明: 既有顶力理

论计算公式偏于保守, 本文顶力计算公式考虑了注浆压力、泥浆触变性、纠偏等因素, 更接近实际情况。

### 参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] O'REILLY 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] 薛振兴, 何利民. 顶管施工顶力计算与力学特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010. (XIE Zhen-xing, HE Li-min. Investigation on jacking force calculation and mechanical properties of pipe jacking construction[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010. (in Chinese))
- [4] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Site-based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 3 – 24.
- [5] 杨仙, 张可能, 黎永索, 等. 深埋顶管顶力理论计算与实测分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 757 – 761. (YANG Xian, ZHANG Ke-neng, LI Yong-suo, et al. Theoretical and experimental analyses of jacking force during deep-buried pipe jacking[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 757 – 761. (in Chinese))
- [6] SHOU K, YEN J, LIU M. On the frictional property of lubricants and its impact on jacking force and soil-pipe interaction of pipe-jacking[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25: 469 – 477.
- [7] SHIMADA H, KHAZAEI S, MATSUI K. Small diameter tunnel excavation method using slurry pipe-jacking[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(2): 161 – 186.
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 王双, 夏才初, 葛金科, 等. 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. (WANG Shuang, XIA Cai-chu, GE Jin-ke, et al. Formulae of

- lateral friction resistance for pipe-jacking considering different forms of mud screen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 159 – 166. (in Chinese))
- [10] 阎超, 钱翼稷, 连祺祥, 等. 黏性流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005. (YAN Chao, QIAN Yi-ji, LIAN Qi-xiang, et al. Mechanics of viscous fluids[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005. (in Chinese))
- [11] VERRUIJT A. Deformation of an elastic half plane with a circular cavity[J]. International Journal of Solids Structures, 1998, 35(21): 2795 – 2804.
- [12] 熊翦. 矩形顶管关键受力分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. (XIONG Jian. Analysis of critical mechanics of rectangular pipe jacking[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [13] 王绵坤. 顶管施工中力学效应问题研究[D]. 广州: 广州大学, 2007. (WANG Mian-kun. Research on the mechanics in the pipe jacking construction[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2007. (in Chinese))
- [14] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998. (YU Bin-quan, CHEN Chuan-can. The pipe jacking construction technology[M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese))
- [15] 丁传松. 直线及曲线顶管施工中的顶力研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004. (DING Chuan-song. Study on the jacking curved pipe force induced by linear and jacking construction[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2004. (in Chinese))

## The 1st International Conference on Geo-Energy & Geo-Environment

### 4th–5th December 2015 Hong Kong University of Science and Technology

**Supported by:** TC215 Environmental Geotechnics of ISSMGE; TC308 Energy Geotechnics of ISSMGE; Hong Kong Geotechnical Society; Geotechnical Division of Hong Kong Institution of Engineers.

**Introduction:** This is the first conference of its kind to cover both Geo-energy and Geo-environment areas that are highly relevant and essential to maintaining the sustainability of the society. Researchers who are interested in these areas are most welcome to join, to contribute and share new ideas and information, and to advance scientific knowledge for the benefit of mankind.

**Format of conference:** This conference will be featured by Two IAS distinguished lectures; Eleven invited keynotes; Extended abstracts; Elevator pitch sessions.

Two-page extended abstracts will be included in the 2015 Geo-Energy and Geo-Environment Conference Proceedings. Authors will be notified whether their extended abstract is selected for an oral presentation or a poster presentation. Authors of high-quality abstracts will be invited to extend their abstracts to full papers, which will be reviewed and published as a theme-based volume in an international journal.

Elevator pitch sessions will be organized to encourage authors

of submitted abstracts to promote their ideas orally.

**Themes:** Energy geo-structures such as piles and walls; Geo-storages such as CO<sub>2</sub> sequestration and radioactive waste disposal; Energy extraction application such as conventional and unconventional energy, and geothermal energy; Energy policy and management relating to geotechnical aspects; Reused and recycled materials for geotechnical works; Bio-geotechnology such as the use of vegetation and bacteria; Landfills; Geo-environmental policy and management.

**Call for extended abstracts:** Format available in the conference website Download now at [gege2015.org](http://gege2015.org).

Submission deadline: 30th September 2015.

Early bird registration deadline: 30th September 2015.

**How to register:** Information on all registration procedures, entitlement and relevant terms and conditions are provided on the Conference website. Payment is accepted by credit cards and cheques. Visit [gege2015.org](http://gege2015.org) to register now.

**Contact us:** Ms Shirley Tse (Administrative Secretary), Geotechnical Centrifuge Facility. The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, HKSAR. Tel: (852) 2358-0216; Fax: (852) 2243-0040 E-mail: [gege2015@ust.hk](mailto:gege2015@ust.hk).