

文章编号:1000-7598- (2002)03-0358-05

顶管顶力计算公式辨析

安关峰¹, 殷坤龙², 唐辉明²

(1. 广州市政集团有限公司, 广东 广州 510060; 2. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 目前随着非开挖技术日益得到社会的认同与重视, 顶管工程出现了方兴未艾的局面。在工程实践中常常需要计算顶管顶进总推力, 但是顶管推力计算公式很多, 而且计算结果差别相当大。基于上述原因, 对各计算公式进行了对比分析并进行了归类, 进而提出在工程计算中应注意的问题。

关 键 词: 顶管; 摩阻力; 顶力

中图分类号: TU 81 文献标识码: A

Discrimination and analysis of formulae for jacking forces in pipejacking

AN Guan-feng¹, YIN Kun-long², TANG Hui-min²

(1. Guangzhou Municipal Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510060, China;

2. Engineering College, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The pipe-jacking engineering undergoes a rapid development at present when the trenchless technology receives more and more social recognition and attention with each passing day. The calculation of the pipe-jacking force is often needed badly in the engineering practice. However, there are many formulae given in books, and the calculation results differ from each other greatly. The above formulae were compared, clarified and classified for the convenient use. In addition, the noteworthy problems were brought forth.

Key words: pipe-jacking; friction resistance; jacking force

1 前 言

为了在土中顺利推进管道, 千斤顶的顶力需要克服顶进中的各种阻力 (摩阻力, 工具管前端端面阻力等), 同时在顶进过程中还不断受到各种外界因素影响 (纠偏、后背的位移等)。所以在顶管工程之前准确计算顶力, 不仅有利于合理确定千斤顶的数量和吨位, 而且对于后背墙的设计也是至关重要的。顶力计算的准确性对于实施顶管工程具有不可忽视的作用。

2 计算公式的比较

目前顶管推力的计算有两类方法。一是在采用顶管施工时管道所处的土层为稳定土层且厚度较大时, 作用于管道上的土压力仅是其上部分高度的土柱重, 即考虑土拱效应。此土柱的高度一般按照普罗托季扬宽诺夫公式或太沙基公式即隧道土压力公式计算。二是管道顶部以上覆盖土层的厚度超过一定值时, 作用于管道上的土压力为此定值高度的土柱重。若土层为

不稳定土层, 则不采用上述两个隧道土压力公式计算土压力, 而是按照覆盖层的全部厚度计算土压力。值得指出的是对具有稳定性土层而言, 按照全部厚度计算时得到的结果偏大。下面分两类进行分析。

2.1 考虑土拱效应的理论公式

(1) 管子顶部垂直均布荷载的确定^[1]

为了求出管周边的均布荷载。可先求出管顶上方土方的垂直荷载与地面的动荷载, 然后把两者加起来作为管周边的均布荷载。即

$$q = W_c + p \quad (1)$$

式中 W_c 为管顶上方的土的垂直荷载 (kPa); p 为地面的动荷载 (kPa); $W_c = \left(\gamma - \frac{2c}{B_c} \right) C_c$, γ 为土的重度 (kN/m³); c 为土的内聚力 (kPa); B_c 为管顶土的扰动宽度 (m); C_c 为土的太沙基荷载系数 (土的有效高度)。

$$C_c = \frac{1}{\left(\frac{2K\mu}{B_c} \right)} \left[1 - e^{-\left(\frac{2K\mu}{B_c} H \right)} \right] \quad (2)$$

式中 K 为土的太沙基侧向土压力系数 (一般取 $K =$

收稿日期: 2001-07-20

作者简介: 安关峰, 男, 1970 年生, 博士后, 主要从事岩土工程施工、数值仿真和城市信息化研究工作。

1) μ 为土的摩擦系数 ($\mu = \tan\phi$) ; H 为管顶以上覆土厚度 (m)。

$$B_c = B_t \left[\frac{1 + \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (3)$$

式中 B_t 为挖掘的直径 (m) ; $B_t = B_c + 0.1$ 。

$$p = \frac{2P'(1+i)}{B(a+2H\tan\theta)} \quad (4)$$

式中 P' 为汽车单只后轮的荷载 ($P' = 100 \text{ kN}$) ; i 为冲击系数 ; B 为车身宽度 (m) ; a 为车轮接地宽度 (m) ; θ 为车轮分布角度 ($\theta = 45^\circ$)。

冲击系数 i 取值见表 1。

表 1 冲击系数表

Table 1 Impact coefficients

H/m	≤ 1.5	$1.5 \sim 6.5$	≥ 6.5
i	0.5	$0.65 - 0.1H$	0

2) 不同顶力计算公式

① 顶力计算公式之一^[1]

$$F = F_0 + [(\pi B_c q + W)u' + \pi B_c c']L \quad (5)$$

式中 F 为总推力 (kN) ; F_0 为初始推力 (kN) ; B_c 为管外径 (m) ; q 为管周边均布荷载 (kPa) ; W 为管道单位长度自重 (kN/m) ; u' 为管与土之间的摩擦系数 ($u' = \tan\frac{\phi}{2}$) ; c' 为管与土之间的粘着力 (kPa) ; L 为推进长度 (m)。

在手掘式顶管中, 初始推力

$$F_0 = 13.2\pi B_c N \quad (6)$$

式中 N 为标准贯入值。

将式 (5) 适当变换后得

$$F = F_0 + \pi B_c q u' L + \pi B_c c' L + W u' L \quad (7)$$

② 顶力计算公式之二^[1]

在采用降水措施以后, 挖掘面的土体稳定而且能自立。这时的手掘式顶管施工的推力可以用下述方法计算:

$$F = F_0 + \alpha \pi B_c \tau_\alpha L + W \mu' L \quad (8)$$

式中 F 为总推力 (kN) ; F_0 为初始推力 (kN) ; α 为管与土的摩擦系数 ($\alpha = 0.5 \sim 0.75$) ; B_c 为管外径 (m) ; τ_α 为管与土之间的剪切应力 (kPa) ; L 为推进长度 (m) ; W 为每米管子的重力 (kN/m) ; μ' 为管与土的摩擦系数 ($\mu' = \tan\frac{\phi}{2}$)。

$$\tau_\alpha = \sigma \mu' + c' \quad (9)$$

$$\sigma = \beta q \quad (10)$$

式中 σ 为管周边的均部荷载 (kPa) ; c' 为管与土之间的粘着力 (kPa) ; β 为管周边的荷载系数 ($\beta = 1.0 \sim 1.5$) ; q 为管子顶上的垂直均布荷载 (kPa)。

初始推力为

$$F_0 = 13.2\pi B_c N' \quad (11)$$

式中 N' 为刃口贯入阻力系数; 在普通粘性土中 $N' = 1.0$; 在砂性土中 $N' = 2.5$; 在硬土中 $N' = 3.0$ 。

将式 (9) , (10) 代入式 (8) 并适当变换位置后得

$$F = F_0 + \alpha \pi B_c \beta q \mu' L + \alpha \pi B_c c' L + W \mu' L \quad (12)$$

③ 顶力计算公式之三^[1]

在普通泥水顶管施工中, 推力计算:

$$F = F_0 + \pi B_c \tau_\alpha L \quad (13)$$

式中 F 为总推力 (kN) ; F_0 为初始推力 (kN) ; B_c 为管外径 (m) ; τ_α 为管与土之间的剪切应力 (kPa) ; L 为推进长度 (m)。

初始推力

$$F_0 = (p_c + p_w + \Delta p) \frac{\pi}{4} B_c^2 \quad (14)$$

式中 p_c 为挖掘面前土压力 ($p_c = 150 \text{ kPa}$) ; p_w 为地下水的压力 (kPa) ; Δp 为附加压力 (一般为 20 kPa)。

$$\tau_\alpha = c' + \sigma' \mu' \quad (15)$$

$$\sigma' = \alpha q + \frac{W}{\pi(B_c - t)} \quad (16)$$

式中 c' 为管与土之间的粘着力 ; σ' 为管子法向土压力 ; μ' 为管与土的摩擦系数 ($\mu' = \tan\frac{\phi}{2}$) ; α 为管子法向土压力摩擦系数取值范围, 可参见表 2 ; q 为管子顶上的垂直均布荷载 (kPa) ; W 为每米管子的重力 (kN/m) ; t 为管壁厚度 (m)。

将式 (16) , (15) 代入式 (13) 经变换位置后得

$$F = F_0 + \alpha q \pi B_c \mu' L + \pi B_c c' L + \frac{W}{(B_c - t)} B_c \mu' L \quad (17)$$

在一般的泥水式所适应的土质中, 根据经验 α 与 c' 的取值可参见表 2。

④ 顶力计算公式之四^[1]

在一般的土压式顶管施工中, 推力计算

表 2 经验 α 与 c'

Table 2 Empirical parameters α and c'

土质及地面荷载情况	α	c'/kPa	土质及地面荷载情况下	α	c'/kPa
砂性土, 在一般荷载的情况下	0.75 ~ 1.1	0	砂砾土, 较大荷载情况下	1.50 ~ 2.70	0
砂性土, 在一般荷载的情况下	0.75	0	粘性土, 一般荷载的情况下	0.50 ~ 0.80	0.2 ~ 0.7
砂性土, 较大荷载的情况下	1.50 ~ 2.70	0	粘性土, 较大荷载的情况下	0.80 ~ 1.50	0.5 ~ 1.0

$$F = F_0 + f_0 L \tag{18}$$

式中 F 为总推力; F_0 为初始推力; f_0 为每米管子的综合阻力 (kN/m); $f_0 = (\pi B_c q + W) \mu' + \pi B_c c'$; L 为推进长度 (m)

初始推力为

$$F_0 = \alpha p_c \frac{\pi}{4} B_c^2 \tag{19}$$

式中 α 为综合系数, α 取值参见表 3; p_c 为土仓的压力; B_c 为管外径 (m)

$$p_c = p_A + p_w + \Delta p \tag{20}$$

式中 p_c 为土仓内的压力 (kPa); p_A 为掘进所处土层的主动土压力 (kPa); p_w 为掘进所处土层的地下水压力 (kPa); Δp 为给土仓的预加压力 (kPa)

表 3 综合系数表
Table 3 Comprehensive parameters

土质	软土	砂性土	砾石土
α	1.5	2.0	3.0

将综合阻力代入式 (18) 得

$$F = F_0 + \pi B_c q \mu' L + \pi B_c c' L + W \mu' L \tag{21}$$

由式 (7), (12), (17), (21) 可以看出,总顶力的计算公式基本由四部分组成:(1) 工具管前端的迎面阻力;(2) 由于上覆荷载作用管外壁上产生的摩阻力;(3) 由于管外壁与土之间的粘聚力产生的摩阻力;(4) 由于管段重量产生的摩阻力。不过不同公式修正各项的重点有所差别。尽管如此,对相同的工程问题,在不考虑迎面阻力的情况下计算结果仍有较大差别。

2.2 不考虑土拱效应的理论公式

不考虑土拱效应的顶力计算公式文献[2]认为有如下特点:(1) 公式计算的土压力一般偏大,尤其是对稳定土层偏大更多,而对不稳定土层,其偏大的程度也不相同,即在相对较为稳定的土层偏大较多,近于流动性土层则偏大较小。还应说明的是,粗颗粒的砂类土、砾石等一般按稳定土看待。但根据北京地区经验,其单位管道长度上的顶力相差很多,甚至彼此相差 2~3 倍,有的实测最大顶力已比较接近土柱土压力的计算结果。对这种土按不稳定土计算顶管土压力比较恰当。(2) 公式计算的土压力是稳定的土压力,其稳定的时间依土类不同而异,稳定土层的稳定时间较长,不稳定土层稳定时间较短。对稳定土层,在正常顶管工期内的土压力可能较其稳定的土压力小得多。对不稳定土层,尤其是流动性土层,可以认为顶管施工中的土压力为稳定的土压力。还应说明,有的土层虽属稳定土层,但是由于在顶管期间出现的特殊

情况,例如,附近管道渗水、施工操作等因素,其土压力虽未达到土柱压力,但是已明显增大。基于这些考虑,计算土压力虽偏大,但基于安全方面考虑,应允许计算值偏大。(3) 摩擦系数的选用是决定计算顶力的另一个重要因素,文献[2]中所给出 f 值是综合北京地区经验取用的,但是顶管中的摩擦系数有时可能比此数值大得多,最为明显的是土颗粒进入管接口的孔隙中,这相当于增大了管壁的粗糙程度,即使摩擦系数大为增加(尤其是较大颗粒的土)。(4) 纠偏是顶管过程中不可避免的经常的操作内容。每一纠偏过程都会增加土压力,亦即增加顶力。但是这一外力难以在土压力计算公式中反映,因此计算的土压力可偏大一点。

文献[3]详细推导了不考虑土拱效应的顶进公式,并对规范公式进行了修正。其基本假定有两点:(1) 土压力只有正值,没有负值;(2) 地基反力纳入到土压力范畴。其计算公式为

$$P = f \gamma D_1 \left[\frac{\pi}{2} (1 + K_1) \left(H + \frac{D_1}{2} \right) - \frac{1}{3} D_1 (2 + K_1) + \frac{W}{\gamma D_1} \right] L + P_F \tag{22}$$

式中 P 为计算的总顶力; γ 为管道所处土层的容重 (kN/m^3); D_1 为管道的外径 (m); H 为管道顶部以上的覆盖土层的厚度 (m); φ 为管道所处土层的内摩擦角 ($^\circ$); W 为管道单位长度自重 (kN/m); L 为管道的长度 (m); f 为顶进时,管道表面与其周围土层之间的摩擦系数; $K_1 = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$; P_F 为顶进时,工具管的迎面阻力 (kN)。具体计算见表 4^[2]。

值得指出的是表 5 中的摩擦系数是综合北京地区经验^[2]取用的。

2.3 经验公式

(1) 顶进管道为钢筋混凝土管时,总推力计算^[4]

$$P = nGL \tag{23}$$

表 4 顶进工具管迎面阻力 P_F 的计算公式表

Table 4 Calculation formulae

顶进方法	顶进时,工具管的迎面阻力/ kN
手工掘进,工具管顶部及两侧允许超挖	0
手工掘进,工具管顶部及两侧不允许超挖	$\pi D_{av} tR$
挤压法	$\pi D_{av} tR$
网格挤压法	$\frac{\pi}{4} \alpha D_1^2 R$

注 D_{av} 为工具管刃脚或挤压喇叭口的平均直径 (m); t 为工具管刃脚厚度或挤压喇叭口的平均宽度 (m); R 为手工掘进顶管法的工具管的迎面阻力,或挤压、网格挤压顶管法的挤压阻力。前者可采用 500 kN/m^2 ,后者可按照工具管的前端中心处的被动土压力计算 (kN/m^2); α 网格截面参数,可取 0.6~1.0。

表5 顶进管道与其周围土层的摩擦系数表

Table 5 Friction coefficient of the pile with the surrounding soil

土类	湿	干
粘土、亚粘土	0.2~0.3	0.4~0.5
砂土、亚砂土	0.3~0.4	0.5~0.6

式中 P 为计算总顶力 (kN); G 为单位长度管体自重 (kN/m); L 为顶进长度 (m); n 为土质系数。当土质为粘土、亚粘土及天然含水量较小的亚砂土, 管前挖土能形成土拱时, n 可取 1.5~2; 当土质为密实的砂土及含水量较大的亚砂土, 管前挖土不易形成土拱者, 但塌方尚不严重时, n 可取 3~4。

2) 一般金属管及轻质非金属管时, 总推力计算^[4]

$$P = mD^2 L \quad (24)$$

式中 P 为计算总顶力 (kN); G 为单位长度管体自重 (kN/m); L 为顶进长度 (m); m 为土质系数。当土质为粘土、亚粘土及天然含水量较小的亚砂土, 管前挖土能形成土拱者, m 可取 0.8~1.0; 当土质为密实的砂土及含水量较大的亚砂土, 管前挖土不易形成土拱者, 但塌方尚不严重者, m 可取 1.5~2.0。

3) 适于手握式顶管推力计算^[1]

$$F = F_0 + RSL \quad (25)$$

式中 F 为总推力; F_0 为初始推力; R 为综合摩擦阻力; S 为管外周长; L 为推进长度。有关计算值见表 6。

表6 各种土质的初始推力 F_0 及综合摩擦阻力 R 值表^[1]Table 6 Initial push F_0 and comprehensive friction R for various soils

土质	软土	砂夹粘土	砂夹粉砂	中细砂	砂砾
R/kPa	8	8	10	12	20
F_0/kN	80~90	90~170	50~70	40~70	100~200

4) 适于泥水顶管推力计算^[1]

$$F = F_0 + f_0 L \quad (26)$$

$$f_0 = RS + Wf \quad (27)$$

式中 R 为综合摩擦阻力 (kPa); S 为管外周长 (m); W 为每米管子的重力 (kN/m); f 为管子重力在土中的摩擦系数 ($f=0.2$)。 R 的取值见表 7。

将式 (27) 代入式 (26), 整理得到

$$F = F_0 + RSL + WfL \quad (28)$$

3 具体工程实例计算分析

3.1 工程基本参数

某工程砂性土根据标贯资料 N 平均值为 7, 依据

表7 综合摩擦阻力 R 参考表Table 7 Comprehensive friction resistance R

土质	粉砂夹砂	砂层	砂砾	粘土
R/kPa	5~10	7~16	8~20	5~30

《工程地质手册》标贯值查得砂性土的内摩擦角为 29° 。砂性土的重度 18 kN/m^3 , 土的内聚力为 11 kPa , 土与管子的粘着力 $c' = 0$, 覆土深度为 5.5 m ; 管外径 1.0 m , 壁厚 0.10 m , 每米管子的重力 17.67 kN/m , 推进长度 100 m 。计算无须考虑地面的动荷载。

3.2 上覆均布荷载计算

依据式 (1)~(3) 计算得到的上覆均布荷载

$$B_c = B_c + 0.1 = 1.0 + 0.1 = 1.1 \text{ (m)}$$

$$B_c = B_c \left[\frac{1 + \sin\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} \right] = 1.1 \times \left[\frac{1 + \sin\left(45^\circ - \frac{29^\circ}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{29^\circ}{2}\right)} \right] = 1.92 \text{ (m)}$$

$$C_c = \frac{1}{\left(\frac{2K\mu}{B_c}\right)} \left[1 - e^{-\left(\frac{2K\mu}{B_c} H\right)} \right] = \frac{1}{\left(\frac{2 \times 1 \times \tan 29^\circ}{1.92}\right)} \left[1 - e^{-\left(\frac{2 \times 1 \times \tan 29^\circ}{1.92}\right) \times 5.5} \right] = 1.66 \text{ (m)}$$

$$W_c = \left(\gamma - \frac{2c}{B_c} \right) C_c = \left(18 - \frac{2 \times 11}{1.92} \right) \times 1.66 = 10.86 \text{ (kPa)}$$

$$q = 10.86 \text{ (kPa)}$$

3.3 不同公式计算结果

(1) 理论公式计算结果

由式 (7) 计算得到

$$F = 290.136 + 881.84 \text{ kN} + 456.646 \text{ kN} = 1628.9 \text{ kN}$$

由式 (12) $F = F_0 + \alpha \pi B_c \beta q \mu' L + \alpha \pi B_c c' L + W \mu' L$ 取 $\alpha = 1.25$, 计算结果得

$$F = 103.62 + 1558.9 \text{ kN} = 1662.52 \text{ kN}$$

由式 (17) 取 $\alpha = 1.0$, 计算结果得

$$F = 176.625 + 1389.8 \text{ kN} = 1566.525 \text{ kN}$$

由式 (21) 计算得到

$$F = F_0 + 881.84 \text{ kN} + 507.384 \text{ kN} = 171.67 + 1338.8 \text{ kN} = 1510.47 \text{ kN}$$

由式 (22) 取 $f = 0.35$, $K_1 = 0.347$, $F = 1288.8 + P_f = 1288.8 + 218.779 = 1507.6 \text{ kN}$

(2) 经验公式计算结果

由式 (23) 若 $n = 1.75$, $P = 3092.25 \text{ kN}$, 若 $n =$

4 结 论

经过以上研究和分析,可以认为阶谱块体单元法是一种独特的结构分析数值方法,具有前处理简便、可以考虑介质的连续与非连续变形等优点。计算研究表明,通过适当而简单的处理,把这一方法应用于连续介质力学问题时可以获得与有限元法十分接近的结果。在应用过程中,以下几点认识可资参考:(1)升高阶次有利于提高计算精度;(2)块体单元的形状越接近于长方体,则精度越高;(3)适当加密块体单元网格有助于提高计算精度,但对网格的要求不象有限元法那样高;(4)如果人为地添加虚拟结构面,则虚拟结构面上的法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 应足够大,以减小虚拟结构面引起的不协调变形。但若 k_n 和 k_s 太大(从而 k_n/E 太大),则计算时间太长甚至不能保证收敛到正确解。因此建议 k_n/E 值取为 $1.0 \times 10^2 \sim 2.0 \times 10^4$ 之间。

参 考 文 献

- [1] Chen S H. A new development in elastic-viscoplastic

block theory of rock masses[A]. *Proc. 8th Int. Conf. on Computer Meth. and Advances in Geomech*[C]. West Virginia (U.S.A.): A. A. Balkema, 1994, 2 235-2 240.

- [2] Wang W M, Chen S H. A new implementation of elastic-viscoplastic block theory for rock masses[A]. In: Kundu T, Desai C S, ed. *Proc. 10th Int. Conf. on Compu. Meth. & Adv. in Geomech*[C]. Arizona (U.S.A.): A. A. Blkema, 2001, 417-422.
- [3] 程昭,陈胜宏. 水工结构的三维阶谱有限元分析[J]. 水利学报, 1999, (12): 53-58.
- [4] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [5] 陈胜宏等. 岩体三维弹粘塑性块体理论的初步研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23 (6): 55-61.
- [6] 林绍忠. 对称逐步超松弛预处理共轭梯度法的改进迭代格式[J]. 数值计算与计算机应用, 1997, (4): 266-270.
- [7] 汪卫明,徐明毅,陈胜宏. 水工结构的块体元和有限元耦合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (增1): 1 029-1 033.
- [8] 王水林,葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (5): 405-410.
- [9] 章光,王水林,阎红. 数值流形方法及其应用介绍[J]. 岩土工程界, 2000, (12): 44-46.

上接第361页

3.5 $P = 5\ 301\ \text{kN}$;

由式(25)取 $R = 8\ \text{kPa}$,得

$$F = F_0 + 800\ \text{kN} = 150 + 800 = 950\ \text{kN}$$

由式(28)取 $R = 8\ \text{kPa}$,得

$$F = F_0 + 1\ 153.4 = 176.625 + 1\ 153.4 = 1\ 330.0\ \text{kN}$$

对比分析以上计算结果发现,对于100 m的顶管,理论公式计算结果相差较少,经验公式相差甚多。所以经验公式选用修正参数时一定要慎重。必须明确的是随着顶管顶进距离的增大,不同理论计算公式的差别也会变得显著。主要是由于随着一次顶距的延长,克服的管道外侧摩阻力总力占绝对优势,所以不同公式中的修订参数的作用会被距离所放大出来,得到的计算结果也就出现较大差别。

另一方面,考虑土拱效应的理论计算结果基本大于未考虑计算公式的计算结果。这可能是式(22)中参数 K_1 未考虑土的内聚力的作用所致。同时说明文献[3]修订公式所建立的新力学模型是正确的。

4 基本结论

(1) 顶进力主要克服顶管工具管迎面阻力、由上

覆土荷载引起的管道外侧摩阻力、管与土之间的粘聚力以及由于管本身自重产生的摩阻力。

(2) 理论公式计算结果比较相近,但是随顶进距离的延长,差别会越来越来大。

(3) 经验公式计算结果相差较大,主要依据计算者所取用的修正参数大小。

(4) 考虑土拱效应的理论计算结果大于未考虑的计算结果,主要原因是式(22)中参数未考虑土的内聚力作用。这进一步证明文献[3]修正的力学模型是合理的。

参 考 文 献

- [1] 余彬泉,陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [2] GB50268-97, 给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, 1998.
- [3] 王承德. 顶管施工中管壁摩阻力理论公式的商榷. 网络电子版, 1998.
- [4] 杨林德. 软土工程施工技术与环境保护[M]. 北京:人民交通出版社, 2000.