

考虑轴线偏差的钢顶管允许顶力计算方法^{*}

邵光辉¹,薛双¹,赵志峰¹,樊凤凯²

(1.南京林业大学 土木工程学院,南京 210037;2.中煤隧道工程有限公司,江苏 徐州 221000)

摘 要:钢顶管轴向稳定性直接影响到允许顶力大小。若顶力控制不当,顶管可能发生轴向失稳破坏。顶进过程中的轴线偏差会降低轴向稳定性。为解决存在轴线偏差的钢顶管允许顶力计算问题,考虑管周土体的约束、管土摩阻力的共同作用,将钢顶管顶进过程中的轴线偏差作为初弯曲,建立并求解能量方程,获得了临界顶力荷载的解析解。结合实际工程,提出了根据容许轴线偏差量与管长共同确定初弯曲的方法,计算了不同初弯曲条件下的稳定系数与允许顶力。稳定系数与轴线偏差呈二次曲线关系,轴线偏差越大,顶管轴向稳定性越低,允许顶力越小。钢顶管施工过程中,应根据轴线偏差造成的不同初弯曲计算稳定系数与允许顶力,以控制顶管顶力,避免发生轴向屈曲。

关键词:轴线偏差;钢顶管;初弯曲;轴向稳定;允许顶力

中图分类号:TU990.3 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)03-0729-06

Allowable Jacking Force Calculating Method of Steel Jacking Pipe
Considering Axial Deviation

Shao Guanghui¹, Xue Shuang¹, Zhao Zhifeng¹, Fan Fengkai²

(1.School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P.R.China;
2. China Coal Tunnel Eng. Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000, P.R.China)

Abstract: The allowable jacking force of steel jacking pipe is directly dominated by the axial stability. Steel jacking pipe may damage due to axial buckling by improper jacking force during constructing. In jacking process, the axial deviation from operating would decrease the stability of pipe. The effects of constraint by surrounding soil and fraction between soil and pipe were taken into account to analysis the problem of axial buckling for steel jacking pipe with axial deviation. The axial deviation of pipe was treated as an initial bending of slender member to deduce the analytical solution of critical jacking force by energy method. On the basis of engineering case, the method to determine initial bending values was proposed from allowable axial deviation values and length of steel jacking pipe. The stability coefficients and allowable jacking forces were calculated. The results show that there is a quadratic curve relation between stability coefficients and axial deviation. The stability and allowable jacking force are decreasing with the pipe axial deviation increasing. Therefore, during the construction process, the allowable jacking force should be determined according to the actual values of axial deviation and guide the construction. The analytical solution of critical jacking force can be used to calculate the allowable jacking force, which provides the guideline to avoiding the steel jacking pipe axial buckling damage.

Keywords: axial deviation; steel jacking pipe; initial bending; axial stability; allowable jacking force

^{*} 收稿日期:2017-12-10(修改稿)
作者简介:邵光辉(1973-),男,湖北新洲人,博士,副教授,主要从事城市地下工程与软土特性试验研究方面的工作。
E-mail:gh_shao@njfu.edu.cn
基金项目:住房和城乡建设部科学技术项目(2010-K3-10)

0 引言

顶管技术是一种常用的地下管道施工非开挖技术,中国是世界上非开挖技术发展速度最快且发展潜力巨大的国家^[1],实际工程中顶管直径越来越大,顶距越来越长,超长距离顶管一次顶进长度往往超过1 000 m^[2-3]。在软土地层中顶进的长距离钢管,由于土体的侧向约束弱,顶进时容易发生轴线偏移,继而出现轴向整体失稳^[4-5]。顶管顶进过程中的轴线偏差和差异沉降变形会降低顶管的轴向稳定性,是管线屈曲破坏的诱因^[6]。轴线偏差往往导致管体和周围土体直接接触,从而会增大侧摩阻力^[7],增加顶进的难度。李兆超等^[8]通过有限元分析,认为在顶管外侧存在径向约束力时会显著改变钢管能承受的最大轴向顶力。在上述因素的共同作用下,使钢管的稳定问题的分析变得复杂。

有关钢管屈曲分析,国内外已有一些研究。赵志峰等^[9]分析了钢管壁厚对轴向局部稳定性的影响,但是未讨论长顶管在顶力作用下的整体稳定问题。Zhen等^[10]通过建立恒定围压钢管有限元模型,计算了其临界顶力并分析了破坏模式,但未考虑管-土之间的变形协调与相互作用问题。Senda等^[11]通过数值模拟分析了管周超挖间隙对顶管的变形稳定影响。邵光辉等^[12]通过能量法求解了均质土约束下的钢管临界顶力,认为管-土相互作用改变了钢管的受力模式,使其稳定性不同于普通的受压钢管结构。因此,钢管设计计算时,应充分考虑其实际的轴线偏差与周围土体约束对稳定性的影响。

笔者拟考虑钢管轴线偏差引起的初始弯曲缺陷与管-土相互作用,通过弹性稳定分析的能量法获得钢管轴向压曲时的临界顶力计算公式。结合实际工程,进行允许顶力分析,研究当顶管具有不同的轴线偏差量时允许顶力的变化规律。为钢管设计与施工时的顶力动态控制提供理论依据。

1 钢管的稳定系数与允许顶力

钢管在顶进施工时可能的破坏模式主要有局部失稳和整体失稳。按照钢结构设计规范^[13]要求,钢管壁厚设计应首先满足局部稳定性要求,因此,本文假定分析对象钢管不会发生局部失稳,只考虑其整体稳定性问题。

在钢管承载能力极限状态设计中,考虑到钢管的轴向稳定性问题,钢管允许最大顶力按式(1)计算^[5]:

$$F_{ds} = \frac{\varphi_1 \varphi_3 \varphi_4}{\gamma_{Qd}} f_s A_p \quad (1)$$

式中: F_{ds} 是钢管允许顶力设计值; φ_1 是钢材受压强度折减系数,可取1.00; φ_3 是钢材脆性系数,可取1.00; φ_4 是钢管稳定系数,根据施工经验确定; f_s 是钢材受压强度设计值,钢管材料要求为Q235B钢; γ_{Qd} 是顶力分项系数,取1.3。在式(1)中,钢管稳定系数 φ_4 的取值是根据施工经验确定的,既包含了钢管轴线弯曲产生的弯曲应力影响,又包含轴向受压临界稳定压应力的影响,后续分析将主要针对该参数的取值进行讨论。

2 力学计算模型

由于地质条件不均匀或者掘进控制误差等因素,钢管在顶进过程中不可避免地存在轴线偏移现象。如青草沙水源地原水工程,直径3.6 m钢管顶进轨迹的实测水平偏差^[14](图1)使钢管轴线呈现“S”形曲线,顶进28 m时,水平偏差极差就达到了16.5 cm,初弯曲 v_0/l 达到5.9/1 000,其中轴线偏差量为 v_0 ,顶管长度为 l ,顶管轴线偏移造成的初弯曲显著。在现行规范中,如果轴线偏移量不

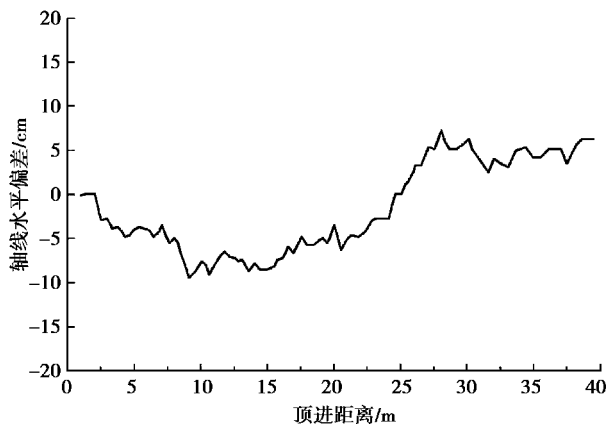


图1 青草沙水源地原水工程钢管顶进轨迹偏差^[14]

Fig. 1 Steel pipe jacking track deviation of the Qingcaosha water source engineering^[14]

超过规范允许值,是不需要考虑其对顶管稳定性影响的。但是,对于钢管整体稳定性分析而言,初弯曲问题显然不能简单忽略。

为分析轴线偏差的钢管稳定系数与允许顶力,设顶管周围存在弹性土体约束,土体与钢管之间通过弹簧连接。在现有的规范和施工实践中,钢管顶进过程中的顶力平衡只考虑管土阻力与机头迎土面的土水压力,没有计算钢管前方机头的掘土作用产生的扭矩,而这部分扭矩对长顶管而言影响比较小,因此本文忽略了这一影响。同时,由于

机头和顶推底座的约束作用,使顶管在顶进过程中几乎不会发生切向转动,尽管钢顶管在隧洞中的轴线偏移可能会产生部分切向管土摩擦,但由于减摩擦剂的存在,该切向力与管侧土体的支撑约束相比可以忽略不计,因此本文也不考虑管土切向作用力。假定顶管机头端为固定铰支座,工作井端为活动铰支座,按照最不利条件考虑,设其轴线偏差形成的初始弯曲可表示为正弦曲线的一个半波^[15],此时轴线失稳的波数最小,钢顶管能承受的临界顶力最小。考虑轴线偏差的顶管受力计算模型如图 2 所示。

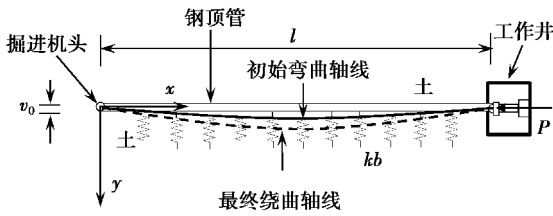


图 2 考虑轴线偏差的钢顶管受力计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculating model of the steel jacking pipe with axial deviation

初始状态下,长度为 l 的钢顶管已发生的最大轴线偏移量为 v_0 ,此时顶管尚未受到顶力作用。设 y_0 为钢顶管轴线上距离掘进机头 x 处的初始弯曲的挠度,则:

$$y_0 = \sum_{n=1}^{\infty} v_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \tag{2}$$

在施加顶力荷载 P 后,顶管轴线上各处的挠度 y 变化为:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin\left(\frac{(2n-1)\pi x}{l}\right) \tag{3}$$

式中: c_n 为系数,与钢顶管轴线的最大挠度有关。式(3)满足约束方程:

$$\begin{aligned} y(0) &= 0, y'(0) = \delta, y''(0) = 0; \\ y(l) &= 0, y'(l) = \delta, y''(l) = 0; \\ y'(l/2) &= 0 \end{aligned}$$

由此可得含轴线偏移量 v_0 的钢顶管挠曲线微分方程:

$$EIy'' + Py = -EI\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 v_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \tag{4}$$

3 钢顶管临界顶力与稳定系数

在建立顶管挠曲线微分方程的基础上,根据能量守恒,可以建立钢顶管的总能量平衡方程^[12]:

$$\Pi = U_p + U_s + V_p + W_f \tag{5}$$

式中: Π 为顶管-土共同作用体系的总势能; U_p 为顶管轴线弯曲所产生的弹性应变能; U_s 为管侧土体与

顶管协调变形时产生的弹性应变能; V_p 为施加顶进荷载 P 产生的外力势能; W_f 为顶管侧壁与管周土体之间的摩擦力产生的势能。

在存在初弯曲的情况下,管身弯曲增量产生的弹性应变能为:

$$U_p = \frac{EI}{2} \int_0^l (y'' - y''_0)^2 dx \tag{6}$$

式中: E 为钢顶管的弹性模量,MPa; I 为钢顶管横截面的惯性矩, m^4 。

管侧土体与顶管协调变形时产生的弹性应变能由管侧土体受顶管侧向挤压而产生。管侧土抗力按照 Winkler 梁计算,即 $q = b_0 ky$,其中, k 为地基反力系数(单位为 kN/m^3); b_0 为是根据顶管直径 D 确定的计算宽度,当 $D > 1\text{ m}$ 时, $b_0 = 0.9(D+1)$,当 $D \leq 1\text{ m}$ 时, $b_0 = 0.9(1.5D+0.5)$ 。管侧土体弹性应变能为:

$$U_p = \frac{kb_0}{2} \int_0^l (y - y_0)^2 dx \tag{7}$$

顶进荷载 P 产生的外力势能是其在顶管轴线上位移所做的功,即:

$$V_p = -\frac{P}{2} \int_0^l [(y')^2 - (y'_0)^2] dx \tag{8}$$

对于管-土摩擦势能,假设管侧摩阻力沿管长方向均匀分布,单位面积管-土之间的摩阻力为 τ ,视作管侧的分布外荷载。设钢顶管周长为 U ,则沿管长方向的集度 f 等于 $U\tau$,其相应的荷载势能为

$$W_f = \frac{U\tau}{2} \int_0^l (l-x) [(y')^2 - (y'_0)^2] dx \tag{9}$$

由式(5)得管土相互作用体系的总能量方程为:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{EI\pi^4}{4l^3} \left[\sum_{n=1}^{\infty} c_n^2 (2n-1)^4 - 2c_1 v_0 + v_0^2 \right] + \\ & \frac{kb_0 l}{4} \left[\sum_{n=0}^{\infty} c_n^2 - 2c_1 v_0 + v_0^2 \right] - \\ & \frac{P\pi^2}{4l} \sum_{n=0}^{\infty} [c_n^2 (2n-1)^2 + v_0^2] + \\ & \frac{U\tau\pi^2}{8} \left[\sum_{n=0}^{\infty} c_n^2 (2n-1)^2 + v_0^2 \right] \end{aligned} \tag{10}$$

令:

$$X = \frac{Pl^2}{EI\pi^2} \tag{11}$$

根据势能驻值原理,对总能量方程(10)取变分并:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial c_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, \infty) \tag{12}$$

$$\begin{cases} c_1 \left(1 + \frac{kb_0 l^4}{EI\pi^4} - X + \frac{U\tau l^3}{2EI\pi^2} \right) - v_0 \left(1 + \frac{kb_0 l^4}{EI\pi^4} \right) = 0 \\ c_i \left[(2i-1)^2 + \frac{kb_0 l^4}{EI\pi^4} - X + \frac{U\tau l^3}{2EI\pi^2} \right] = 0 \quad (i > 1) \end{cases} \quad (13)$$

因为存在初始轴线偏移量, $v_0 \neq 0$, 可知方程组 (13) 中 $c_1 \neq 0$, 且仅当 $c_i = 0 \ (i > 1)$ 时, 方程组 (13) 才有非零解, 故

$$1 + \frac{kb_0 l^4}{EI\pi^4} - X + \frac{U\tau l^3}{2EI\pi^2} = 0 \quad (14)$$

将欧拉临界荷载公式 $P_{\text{Euler}} = EI\pi^2/l^2$ 代入式 (14) 得:

$$c_1 = \frac{v_0(P_{\text{Euler}} + \xi)}{(P_{\text{Euler}} + \xi + \psi - P)} \quad (15)$$

式中: $\xi = \frac{kb_0 l^2}{\pi^2}, \psi = \frac{U\tau l}{2}$ 。

由式 (3) 及 $c_i = 0 \ (i > 1)$ 可得, 在荷载 P 作用下的最大挠度为 $y_{\text{max}} = c_1$, 在此挠度下的最大弯矩为:

$$M_{\text{max}} = \frac{v_0 P(P_{\text{Euler}} + \xi)}{(P_{\text{Euler}} + \xi + \psi - P)} \quad (16)$$

$$f_p = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{v_0(P_{\text{Euler}} + \xi)}{\rho(P_{\text{Euler}} + \xi + \psi - P)} \right] \quad (17)$$

式中: f_p 为顶推力产生的顶管轴线中点截面边缘纤维最大压应力, MPa。顶管施工过程中的轴线偏差形成轴线弯曲, 在无顶推力条件下, 也存在弯曲应力 f_b , 其值可以按式 (18) 通过钢顶管的弯曲率半径计算得到:

$$f_b = \frac{DE}{2R} \quad (18)$$

式中: R 为钢顶管轴线曲率半径, m。其最大限值为^[5]: 当 $D \leq 1.6$ m 时, $R \geq 2\ 080$ m; 当 $D > 1.6$ m 时, $R \geq 1\ 260D$ 。可得, 当 $D \leq 1.6$ m 时, $f_b \leq 79.2$ MPa; 当 $D > 1.6$ m 时, $f_b \leq 81.8$ MPa。按最不利条件考虑, 如果轴线偏差超出允许限值, 分析钢顶管稳定条件时可取 $f_b = 81.8$ MPa, 否则根据实际轴线偏差曲率按式 (18) 计算 f_b 。

按照边缘屈服准则^[14], 顶管轴线中点截面边缘纤维最大压应力达到钢材屈服强度 f_y 时顶管破坏, 有:

$$f_y = f_p + f_b \quad (19)$$

将式 (18) 和式 (19) 代入式 (17) 可得

$$\begin{aligned} P^2 - P \left[(P_{\text{Euler}} + \xi + \psi) + \frac{v_0(P_{\text{Euler}} + \xi)}{\rho} + (f_y - f_b)A \right] + \\ (f_y - f_b)A(P_{\text{Euler}} + \xi + \psi) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\rho = \frac{D(1+\alpha^2)}{8}; \alpha = \frac{D}{D-2t}$; A 为钢顶管的横截面积, m^2 ; t 为钢顶管的壁厚, m。

方程式 (20) 有两个不相等的非零解, 其中较小的解即是所求有初弯曲的钢顶管轴向整体稳定临界荷载 P_{cr} 。

顶管施工中会采用减摩措施以减小顶进阻力, 当采用触变泥浆减阻时, 钢顶管侧壁摩阻力一般在 3 kPa (软黏土中) 到 13 kPa (中粗砂中) 之间变化^[5]。因此, 式 (20) 中反映管-土摩阻力影响的参数 ψ 实际值将远远小于参数 ξ 和 P_{Euler} 的值, 参数 ψ 在实际可能的取值变化范围内对方程式 (20) 的求解结果没有明显影响。忽略参数 ψ , 式 (20) 可简化为:

$$P^2 - P \left[\eta + \frac{v_0 \eta}{\rho} + (f_y - f_b)A \right] + (f_y - f_b)A\eta = 0 \quad (21)$$

式中: $\eta = \frac{EI\pi^2}{l^2} + \frac{kb_0 l^2}{\pi^2}$ 。

将实际钢顶管的轴线偏差量 v_0 代入式 (21), 解方程取其最小解即为轴线偏差条件下的钢顶管临界顶力 P_{cr} 。钢顶管稳定系数 $\varphi_4 = P_{\text{cr}}/f_y A$, 将 φ_4 代入式 (1) 即可得到钢顶管的允许顶力。

4 工程算例

4.1 工程概况

靖江发电厂循环供水钢顶管工程位于江苏省靖江市东南方向距离市中心约 12 km 的斜桥镇内, 场地地貌单元主要为长江河漫滩, 局部为河床。如图 3 所示, 顶管下穿长江大堤, 堤坝顶宽约 6 m, 底宽 38.7 m, 高 3.5 m, 顶管直线段长度为 125 m, 顶管中心距离地面 9.4 m, 直径为 3.4 m, 设计壁厚为管径的 1%, 即 0.034 m, 管节长度为 8.0 m。钢顶管材料为 Q235B 钢, 采用强度设计值 $f_y = 205$ MPa, 弹性模量 $E = 206\ 000$ MPa。钢顶管穿越土层主要为粉质黏土夹粉土, 其基本岩土参数见表 1。采用触变泥浆减阻, 钢顶管与土之间的平均摩阻力为 5.0 kPa^[5-16]。

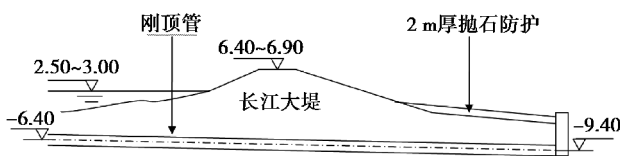


图 3 靖江电厂钢顶管顶进线路纵剖面图 (单位: m)

Fig. 3 Profile of steel jacking pipe jacking path (unit: m)

表 1 钢顶管穿越土层的基本岩土参数

Table 1 Geotechnical properties of steel jacking pipe crossing soil

土层名称	含水率/ %	重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	压缩模量/ MPa	地基反力系数/ (kN·m ⁻³)
粉质黏土	40.3	17.5	1.144	11	14	4.0	4 500
夹粉土							

4.2 稳定系数与允许顶力计算

4.2.1 施工偏差与轴线初弯曲对稳定系数的影响

顶管工程验收标准^[5]给出了允许的水平轴线偏差限值和曲率半径限值,可计算得本算例钢顶管的允许水平轴线偏差为 130 mm,允许曲率半径为 4 284 m。钢顶管是逐步顶进土体的,按最不利条件考虑,假定每一顶进步都有可能达到轴线偏差限值,可以算得不同顶进长度时钢顶管轴线的最大允许初弯曲值(图 4)。本工程钢顶管的最大初弯曲值为 0.001 948,发生在顶进长度 66.75 m 处。最大初弯曲值显著大于而钢结构设计规范^[11]按照初弯曲 0.001 确定的稳定系数的计算值。可见,钢结构设计规范依据的初弯曲值比钢顶管工程实际发生的小,更加偏于不安全。

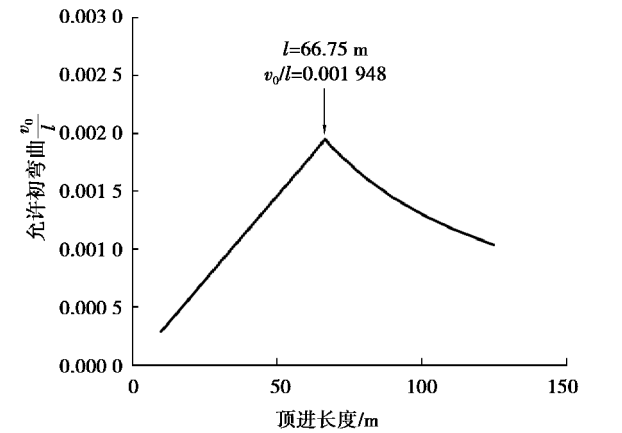


图 4 不同顶进长度时顶管的允许初弯曲值

Fig. 4 Allowable initial bending values for different jacking pipe distance

图 5 是最大允许初弯曲下稳定系数与顶进长度关系曲线。对于 $D=3.4$ m 的钢顶管,当顶进长度小于 66.75 m 时,稳定系数随顶进长度增大而减小。当顶进长度大于 66.75 m 时,钢顶管轴向整体稳定系数 φ_4 基本恒定在 0.52,不再随着顶进土层中的顶管长度而变化。稳定系数 φ_4 的规范经验值为 0.45,与解析解相比更偏于保守,尤其在顶管长度小于 66.75 m 的短顶管,如果采用经验值稳定系

数设计,会造成较大的浪费。

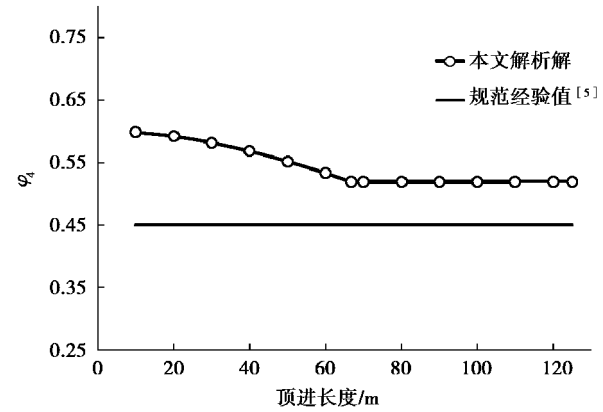


图 5 不同顶进阶段的稳定系数

Fig. 5 Stability coefficients for different jacking operating stages

4.2.2 允许顶力

将稳定系数 $\varphi_4=0.52$ 代入式(1)可得钢顶管允许顶力设计值 $F_{ds}=29\,757$ kN。钢顶管所需总顶力由管侧摩阻力与顶管机刀盘面土水压力组成。对大刀盘切削式顶管机,总顶力计算公式为:

$$F_0 = \pi D l \tau + \frac{1}{4} \pi D_g^2 \gamma H \tag{22}$$

式中: F_0 为总顶力,kN; D_g 为顶管机的外径,m; γ 为土的重度,kN/m³; H 为土覆盖层厚度,m。

对本文工程, $\gamma=17.5$ kN/m³, $H=9.4$ m, $D_g \approx D$, $\tau=5.0$ kPa,顶管机迎土面阻力为 1 493.5 kN,故总顶力=8 169.4 kN,远小于允许顶力。按允许顶力设计值 F_{ds} ,结合式(22)可估算最大允许顶进长度为 529 m。

在钢顶管顶进过程中,还需要根据实测轴线偏差随时校对或调整顶力,以保证工程安全。图 6 是不同轴线偏差对应的稳定系数,对应的方程为:

$$\varphi_4 = 6 \times 10^{-7} v_0^2 - 0.000\,7 v_0 + 0.600\,5 \tag{23}$$

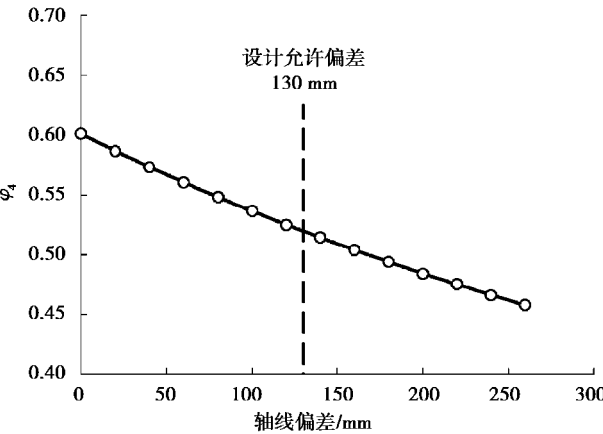


图 6 不同轴线偏差对应的稳定系数

Fig.6 Stability coefficients for different axial deviation

稳定系数与轴线偏差呈二次曲线关系,轴线偏差越大,顶管轴向稳定性越低。但是,只要轴线偏差超出允许限值,稳定系数可保证足够的安全储备。如果轴线偏差超出允许限值,则应根据实际轴线偏差按式(23)与式(1)计算稳定系数与允许顶力,及时控制施工顶力值,保证施工安全。

5 结论

(1)管周土体的约束作用能提高钢顶管的轴向稳定性,顶管顶进施工的轴线偏差会显著降低轴向稳定性。钢管设计时,应根据规范允许得轴线偏差最大限值设计允许顶力。

(2)轴线偏差越大,顶管轴向稳定性越低,稳定系数与轴线偏差呈二次曲线关系。

(3)钢顶管施工过程中,应根据实测轴线偏差确定相应的初弯曲值,计算稳定系数与允许顶力,以动态控制顶管顶力。当实际轴线偏差超过规范允许限值时,应重新计算允许顶力,保证施工安全。

参考文献(References)

- [1] Ma B S, Najafi M. Development and applications of trenchless technology in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 476-480.
- [2] Bergeson W. Review of long drive microtunneling technology for use on large scale Projects [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 39(1): 66-72.
- [3] 张玉生,周明艺.大断面长距离顶管施工工艺及机理分析[J].岩土工程学报, 2000, 22(4): 506-509. (Zhang Yusheng, Zhou Mingyi. Jacking process of a pipe with large diameter through a long distance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 506-509. (in Chinese))
- [4] 陈楠,陈锦剑,夏小和,等.长钢顶管稳定特性的有限元分析[J].上海交通大学学报, 2012, 46(5): 832-836. (Chen Nan, Chen Jinjian, Xia Xiaohe, et al. FEM Analysis on the Buckling of a Long Steel Jacking Pipe [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(5): 832-836. (in Chinese))
- [5] 上海市政工程设计研究总院给排水工程顶管技术规程(CECS246—2008) [S]. 2008. (Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd. Technical specification for pipe jacking of water supply and sewerage engineering (CECS246—2008) [S]. 2008. (in Chinese))
- [6] Mohareb M, Kulak G L, Elwi A, et al. Testing and analysis of steel pipe segments [J]. Journal of Transport Engineering (ASCE), 2001, 127(5): 408-417.
- [7] 向安田,朱合华,丁文其.顶管施工中顶力和平均摩阻力与顶程关系分析[J].岩土力学, 2008, 29(4): 1105-1109. (Xiang Antian, Zhu Hehua, Ding Wenqi. Relationship of jacking force and average friction with jacking path in pipe-jacking construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1105-1109. (in Chinese))
- [8] 李兆超.地下管道屈曲稳定研究[D].杭州:浙江大学, 2012. (Li Zhaochao. Investigation on buckling mechanics of buried pipes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [9] 赵志峰,邵光辉.顶管施工的三维数值模拟及钢管壁厚度的优化[J].地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 161-165, 172. (Zhao Zhifeng, Shao Guanghui. Stability analysis of pipe wall stability in pipe-jacking and the optimization of wall thickness of steel Pipe [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 161-165, 172. (in Chinese))
- [10] Zhen L, Chen J J, Qiao P Z, et al. Analysis and remedial treatment of a steel pipe-jacking accident in complex underground environment [J]. Engineering Structures, 2014, 59(2): 210-219.
- [11] Senda T, Maeda Y, Shimada H, et al. Studies on surrounding soil during construction using the deep pipe jacking method in the deep strata [A] // International Symposium on Earth Science and Technology, CINEST 2012, Procedia Earth and Planetary Science [C]. 2013: 396-402.
- [12] 邵光辉,苏毅,赵志峰.均质土中钢顶管顶进稳定性的能量法分析[J].岩土工程学报, 2016, 38(8): 1490-1496. (Shao Guanghui, Su Yi, Zhao Zhifeng. Energy method for stability of steel jacking pipes during construction in uniform soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1490-1496. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国建设部.钢结构设计规范(GB 50017—2003) [S]. 2003. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of steel structures (GB 50017—2003) [S]. 2003. (in Chinese))
- [14] 顾利军.大直径长距离钢顶管施工风险及控制[J].城市道桥与防洪, 2012(6): 263-267. (Gu Lijun. Construction risk and control of long-distance large-diameter steel pipe jacking [J]. Urban road and bridge and flood control, 2012(6): 263-267. (in Chinese))
- [15] 陈骥.钢结构稳定理论与设计[M].北京:科学出版社, 2001. (Chen Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 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 Riqing, Shao Jianming, 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))