

迎坡条件下盾构隧道开挖面极限支护力计算与分析

雷明锋, 彭立敏, 施成华, 赵丹

(中南大学土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 开挖面的稳定性是盾构隧道施工技术的关键。针对目前考虑坡度因素的盾构隧道开挖面极限支护力计算尚未见到报道的现状, 基于筒仓理论, 采用极限平衡分析法, 引入线路坡度角, 建立了迎坡施工条件下, 盾构隧道开挖面极限支护力的计算模型, 推导了相应的计算公式, 并进行了实例分析, 结果表明: 该方法具有很好的可靠性, 可用于同类工程的设计与施工。在此基础上, 进一步计算得到了不同坡度时的盾构隧道开挖面极限支护力的大小, 探讨了线路坡度对开挖面极限支护力大小的影响, 主要得出了以下结论: 开挖面极限支护力随线路坡度增大而呈线性显著增大; 而开挖面前方土体破裂角随线路坡度增大反而线性减小, 且两者之和可视为一常数。可见, 线路坡度的存在对开挖面支护力的影响较大, 不能简单地等同为平坡条件, 设计、施工过程中应予以充分考虑。

关键词: 盾构隧道; 极限支护力; 线路坡度; 筒仓理论; 极限平衡分析法

中图分类号: U456.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0488-05

作者简介: 雷明锋(1983-), 男, 湖南祁东人, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程结构理论与应用方面的研究工作。E-mail: mingfenglei@yahoo.com.cn。

Calculation and analysis of limit support force of shield tunnel excavation face under facing-slope conditions

LEI Ming-feng, PENG Li-min, SHI Cheng-hua, ZHAO Dan

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

Abstract: Stability of excavation face is a key problem to shield tunnel construction technology. According to the present situation that the calculation of the limit support force of shield tunnel excavation face is rarely reported, based on the silo theory, a calculation model of the limit support force due to facing-slope construction is put forward by use of the limit equilibrium analysis method, and the track gradient is introduced. The corresponding formulas are obtained by theoretical derivation, and an engineering project is analyzed as an example. The results indicate that this method is reliable and can be applied to the design and construction in similar projects. Furthermore, the limit support forces to different track gradients are calculated for discussing their influences. Conclusions are drawn as follows: the limit support force of excavation face increases largely and linearly with the increase of the track gradient; but the rupture angle of soil before the excavation face decreases linearly with it, and the sum of them is approximately a constant. It can be seen that the existence of the track gradient has significant effect on the limit support force, and it should be fully taken into account during the design and construction process.

Key words: shield tunnel; limit support force; track gradient; silo theory; limit equilibrium analysis method

0 引言

随着我国城市人口的日益增多, 城市交通拥挤加剧, 而在现代化建设高度发达的各大城市中, 寸金寸土, 传统的地面交通显得捉襟见肘, 于是纷纷向地下寻求出路, 作为现代化城市标志的地下铁道应运而生。因其具有改善地面交通环境, 提高城市交通舒适度, 合理利用城市资源^[1]而得到广泛的应用。

纵观各地铁隧道工程的建设, 盾构法是最为普遍的施工方法, 相对传统的施工方法, 盾构施工更能满足城市对环境、高效、安全等标准的高要求。同时,

城市地铁的发展, 必然会对盾构法技术要求越来越高。比如, 近期出现的大坡度盾构隧道, 目前, 世界上坡度最大的地铁盾构隧道为瑞士洛桑地铁2号线奥奇升至莱斯克鲁赛特区段, 平均坡度达58‰, 最大坡度达177‰^[2]。大坡度盾构隧道可以在较短的水平距离内, 使得线路高程升降较快, 但同时造成很多新的问题。其中, 由于线路坡度的存在, 使得开挖面的稳定性计算必然与平坡条件有所区别。文献检索表明: 目前本

领域的研究主要集中在平坡条件^[3-9], 而并未考虑线路坡度的影响。因此, 如何准确计算有坡度(迎坡)条件下盾构隧道开挖面极限支护力的大小, 了解线路坡度对其稳定性的影响, 确保施工安全和尽量减小对环境的影响, 具有重要的学术意义和指导价值。本文基于筒仓理论, 采用极限平衡法, 探讨了迎坡施工条件下, 盾构隧道开挖面极限支护力的计算及其稳定性影响问题, 得出了一些有益结论。

1 基于筒仓理论的计算模型

Horn 于 1961 年根据筒仓理论首先提出了均匀软质地层隧道开挖面稳定性的计算模型, 如图 1^[3, 8-9]。图中, ABCO 为隧道开挖面, MNKL 为地表, GHIJ 为地下水位面。ABCOEF 为隧道开挖面失稳时下滑土体, ABEF、AOE、BCF 为滑动面, COEF-MNKL 为下滑土体 ABCOEF 所带动的上部下沉土体, w 为土体破裂角。

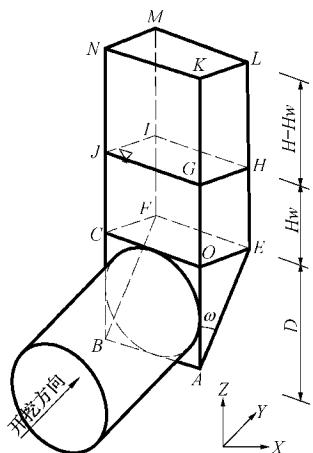


图 1 基于筒仓理论的计算模型

Fig. 1 Calculation model based on silo theory

计算时取圆形开挖面的面积和正方形 ABCO 面积大致相等, 此时, 楔形体的宽 $L_{AB} = D$, 国外学者有的也采用 $L_{AB} = \pi D/4$ 或 $L_{AB} = 1.8D$ ^[10]。此后, Anagnostou G 和 kovar K^[3, 8]对此模型进行了发展和应用, 验证了模型的可靠性, 其基本思路: 通过考虑楔形体和棱柱体极限平衡列出分析体的水平和竖直方向上的平衡方程进行求解, 从而获得维持开挖面稳定所需要的最小盾构支持力, 即开挖面的极限支护力。该模型的求解关键是确定开挖面前方土体的破裂角 w 。

2 极限平衡法推导

极限平衡法分析中事先假定破坏面的形式为平面, 并沿着破坏面上各点都满足屈服极限, 以此建立力或力偶的静态平衡方程来进行求解。

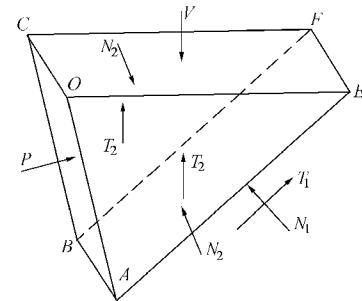


图 2 楔形体受力分析

Fig. 2 Analysis of forces acting on wedge

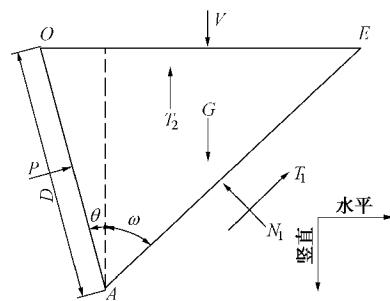


图 3 力的平衡分析模型

Fig. 3 Equilibrium analysis model for force

图 2 和图 3 为理想情况下的盾构开挖面失稳的简单几何模型, 图中不仅考虑了开挖面前方土体破裂角 w , 还引入了线路坡度角 q , 其中坡度角 q , 可根据线路坡度换算得到。为简化推导, 在计算中, 进行如下假定:

- (1) 土体是均匀且各向同性, 对于多层土体可采用加权平均的方法处理。
- (2) 开挖面的破坏范围由楔形体和棱柱体构成。
- (3) 楔形体顶面及倾斜滑动面应力为均匀分布。
- (4) 土体认为是刚塑性材料, 服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 则滑裂面的抗剪公式

$$t = c + s \tan j \quad , \quad (1)$$

式中, c 为土体黏聚力, j 为土体摩擦角。

假定开挖面前方土体处于极限平衡状态, 滑动面有向下滑动趋势, 即隧道开挖面即将出现坍塌情况。考虑楔形体的平衡, 进行受力分析, 有

$$\text{水平: } P \cos q + T_1 \sin w = N_1 \cos w \quad , \quad (2)$$

$$\text{竖直: } V + G = T_1 \cos w + N_1 \sin w + 2T_2 + P \sin q \quad . \quad (3)$$

上式中各符号意义及计算如下。

2.1 楔形体自重 G

由楔形体的几何关系可得

$$G = g D S_{\Delta AOE} \quad , \quad (4)$$

整理得

$$G = \frac{g D^3 \cos^2 q (\tan w + \tan q)}{2} \quad . \quad (5)$$

式中 G 为楔形体自重; g 为土体饱和重度; D 为隧道直径; $S_{\Delta AOE}$ 为滑动面 AOE 的面积; w 为破裂角; q 为线路坡度角。

2.2 棱柱体作用于楔形体上的力 V

根据文献[3, 8]和 Janssen HA 的筒仓公式, 可得作用于楔形体 $COEF$ 面上的竖向应力 s_v 为

$$\begin{aligned} s_v &= \frac{gr - c}{I \tan j} \left(1 - e^{-I \tan j H_w/r} \right) + \\ &\quad \frac{g_d r - c}{I \tan j} \left(e^{-I \tan j H_w/r} - e^{-I \tan j H/r} \right)。 \end{aligned} \quad (6)$$

又由假定(3), 可得棱柱体作用于楔形体上的竖向力 V :

$$V = s_v D^2 \cos q (\tan w + \tan q)。 \quad (7)$$

式中 V 为筒仓理论计算模型中棱柱体作用于楔形体上的竖向力; s_v 为棱柱体作用于楔形体顶面 $COEF$ 上的竖向应力; I 为 Janssen HA 筒仓理论中水平方向与竖直方向应力比值, 对于棱柱体 $I=0.8$, 对于楔形体 $I_w=0.4^{[3, 8]}$; g_d 为干重度; r 为体积比, $r=0.5D(1+\tan w)/\tan w$; H 为地表到盾构机顶部距离; H_w 为盾构机顶部水位深。

2.3 倾斜滑动面 $ABEF$ 上的剪力 T_1

土体材料假定为刚塑性体, 且满足假定(3), 则

$$T_1 = c S_{\Delta ABFE} + s \tan j S_{\Delta ABFE}, \quad (8)$$

整理得

$$T_1 = \frac{c D^2 \cos q}{\cos w} + N_1 \tan j, \quad (9)$$

式中, T_1 , N_1 为倾斜滑动面 $ABEF$ 上的剪力和压力, $S_{\Delta ABFE}$ 为倾斜滑动面 $ABFE$ 的面积。

2.4 竖直滑动面 AOE 、 BCF 上的剪力 T_2

对于竖直滑动面 AOE 、 BCF 上的剪力 T_2 的计算, 可按照图 4 所示进行计算。根据文献[3], 假定楔形体 AOE 、 BCF 滑动面上的竖向应力随深度呈线性增加, 又楔形体顶面 $COEF$ 上的竖向应力为 s_v , 则滑动面 AOE (BCF) 各点处的竖向应力 $s_v(z)$ 为

$$s_v(z) = s_v + \left(g - \frac{s_v}{D \cos q} \right) (D \cos q - z), \quad 0 \leq z \leq D \cos q。 \quad (10)$$

由筒仓理论可得 AOE (BCF) 滑动面上任意点处的侧压力 $s_z(z)$ 为

$$s_z(z) = I_w s_v(z)。 \quad (11)$$

取 AOE (BCF) 滑动面上一微元面积, 则作用于该微元面积上的剪力 dT_2 为

$$dT_2 = [c + s_z(z) \tan j] ds, \quad (12)$$

即

$$dT_2 = [c + s_z(z) \tan j] (\tan q + \tan w) z dz。 \quad (13)$$

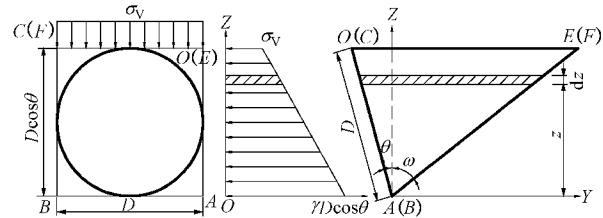


图 4 剪力 T_2 计算图式

Fig. 4 Graphic expressions of shear T_2

于是, 可求得作用于 AOE (BCF) 滑动面上的剪力 T_2 :

$$T_2 = \int_0^{D \cos q} dT_2, \quad (14)$$

将式(10)~(13)代入式(14)并整理得

$$T_2 = \frac{1}{2} D^2 \cos^2 q (\tan q + \tan w) \cdot \left[c + I_w \tan j \left(\frac{2}{3} s_v + \frac{1}{3} g D \cos q \right) \right]。 \quad (15)$$

将式(5)、(7)、(14)、(15)代入式(2)、(3)联立即可求得迎坡施工时盾构隧道开挖面支护力 P 的表达式(16):

$$\begin{aligned} P &= D^2 \{ \cos^2 q (\tan w + \tan q) [\frac{s_v}{\cos q} + \frac{1}{2} D g - \\ &\quad c - I_w \tan j (\frac{2}{3} s_v + \frac{1}{3} g D \cos q)] - c(1+ \\ &\quad \tan^2 w) (\cos q + \frac{\tan w}{\cot j - \tan w}) \} / [\cos q \cdot \\ &\quad (\tan w + \tan q) + \frac{\cos q (1 + \tan^2 w)}{\cot j - \tan w}]。 \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可知, 对于某一特定工程而言, 坡度角 q 和土体内摩擦角 j 是一定的, 此时, 支护力 P 仅为破裂角 w 的函数 $P=f(w)$, 将不同的破裂角 w 代入式(16)中, 进行迭代求解, 得到 P_{max} 所对应的 w 即为土体极限平衡时的破裂角, 而 P_{max} 便是维持开挖面稳定的最小支护力, 即极限支护力。

3 实例计算与分析

为验证本文计算方法的可靠性以及探讨线路坡度 q 对迎坡施工条件下盾构隧道开挖面极限支护力 P 大小的影响, 选取广州地铁三号线上的某双线圆形隧道区间工程为基础, 进行实例计算与分析。

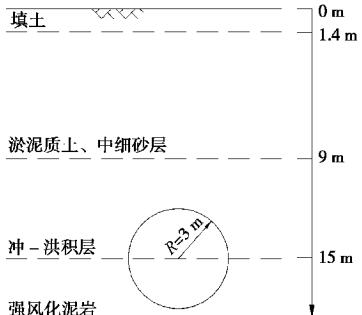
3.1 计算实例

秦建设^[6]介绍了广州地铁三号线某双线圆型盾构隧道工程。该工程隧道内径 5.4 m, 采用 2 台土压平衡式盾构机分左右线掘进施工, 隧道衬砌采用直径 6 m 的预制钢筋混凝土管片。隧道区间的主要地质情况为: 人工填土、淤泥质土、淤泥质砂土、冲-洪积中、

细砂层、中等风化泥质粉砂岩等。隧道地层条件及计算参数见表1和图5。

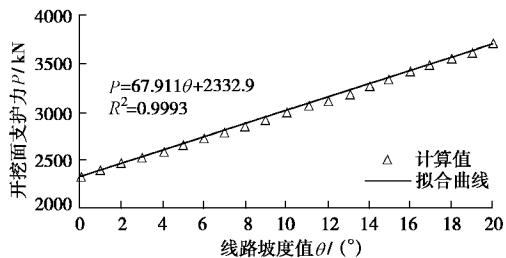
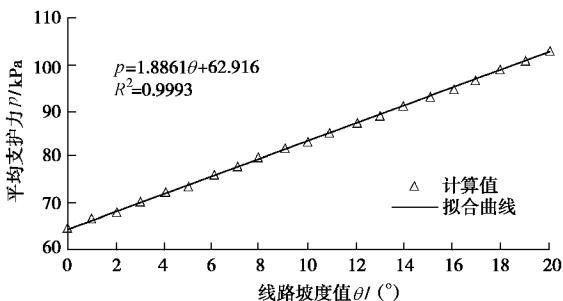
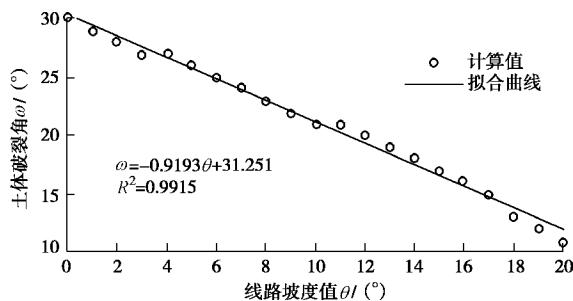
表1 计算材料参数^[6]Table 1 Parameters of surrounding rock^[6]

土层名称	重度 $g/(kN \cdot m^3)$	内摩擦角 $j/^\circ$	黏聚力 c/kPa
人工填土	17.3	28	12
淤泥质土、砂	18.5	18	6
冲洪积层	19.5	20	1
强风化泥岩	21.6	24	200

图5 计算地层分布及隧道埋深^[6]Fig. 5 Tunnel depth and stratum distribution for calculation^[6]

3.2 结果分析

以上述实例为基础,自行编制计算机程序,并根据目前线路坡度的设计范围,分别计算了坡度角 $q \in [0, 20^\circ]$ (对应的线路坡度为[0, 36.4%])范围内的盾构隧道开挖面极限支护力 P ,计算结果见表2及图6~8。

图6 $P - q$ 关系曲线图Fig. 6 Relationship between limit support force P and track gradient q 图7 $p - q$ 关系曲线图Fig. 7 Relationship between limit support pressure p and track gradient q 图8 $w - q$ 关系曲线图Fig. 8 Relationship between rupure angle w of soil and track gradient q 表2 各线路坡度时开挖面极限支护力 P 计算结果Table 2 Computed results of limit support force P under different track gradients

坡度角 $q/^\circ$	破坏角 $w/^\circ$	总支护力 P/kN	平均支护压力 p/kPa
0	30	2349.5	65.3
1	29	2413.6	67.0
2	28	2477.7	68.8
3	27	2541.7	70.6
4	27	2605.9	72.4
5	26	2670.9	74.2
6	25	2736.0	76.0
7	24	2801.4	77.8
8	23	2867.2	79.6
9	22	2933.4	81.5
10	21	3000.0	83.3
11	21	3067.5	85.2
12	20	3135.7	87.1
13	19	3204.6	89.0
14	18	3274.3	91.0
15	17	3344.9	92.9
16	16	3416.5	94.9
17	15	3489.2	96.9
18	13	3563.2	99.0
19	12	3639.0	101.1
20	11	3716.4	103.2

从中分析可得出以下主要结论:

(1) 平坡条件,即线路坡度角 $q=0^\circ$ 时,维持盾构隧道开挖面稳定的极限支护力 P 为2349.5 kN。若考虑盾构支持力在开挖面上均匀分布,则极限平均支护压力 p 为65.3 kPa,与文献[6]的结论:开挖面极限平衡支护压力为65 kPa,吻合很好,可见本文所推导的计算方法是可靠的。

(2) 维持盾构隧道开挖面稳定的极限支护力 P 或极限平均支护压力 p ,随线路坡度增大而明显增大(如图6和图7)。通过曲线拟合,得到其线性拟合相

关性系数 $R^2 = 0.9993$, 可见其变化趋势呈线性特征。

(3) 随着线路坡度的增大, 盾构隧道开挖面前方土体破裂角 W 逐渐减小, 近似线性变化(如图 8), 同时, 线路坡度角 q 与土体破裂角 W 之和均处在 $30^\circ \sim 32^\circ$ 之间, 可见两者之和可近似认为一常数。

综合上述分析可知, 有坡度条件下, 盾构隧道开挖面稳定性的计算与平坡条件存在区别, 且坡度对其稳定性的影响明显, 实际设计与施工过程中, 应予以具体考虑, 以预计和施加更准确的开挖面支护力, 防止工程事故的发生。

4 结论与讨论

(1) 引入线路坡度角 q , 基于筒仓理论, 采用极限平衡分析法, 建立了迎坡施工条件下盾构隧道开挖面极限支护力 P 的理论计算模型, 推导出了相应的计算公式, 并进行了实例分析和验证, 结果表明: 本文提出的计算方法和模型是可靠的, 可用于类似工程的施工与设计。

(2) 自行编制计算机程序, 计算得到了不同线路坡度时, 盾构隧道开挖面极限支护力 P 值, 归纳总结了其变化规律: 迎坡施工条件下, 维持盾构隧道开挖面稳定所需要的极限支护力 P 随线路坡度增大而呈线性显著增大; 而开挖面前方土体破裂角 W 随之线性减小, 且两者之和为一常数。可见, 坡度的存在对开挖面的稳定性影响十分明显, 应充分考虑, 而不能简单地等同为平坡条件, 以确保施工安全。

参考文献:

- [1] 彭立敏, 刘小兵. 地下铁道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006. (PENG Li-min, LIU Xiao-bing. Subway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [2] 苏晓声. 世界坡度最大的地铁[J]. 铁道知识, 2005 (3): 25. (SU Xiao-sheng. The world's largest slope subway[J]. Railway Knowledge, 2005(3): 25. (in Chinese))
- [3] ANAGNOSTOU G, KOVARL K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 165 - 174.
- [4] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 均匀软质地层条件下土压平衡盾构施工的合理顶进推力分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 79 - 85. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Analysis of reasonable thrust force during tunnel excavation in homogeneous soft ground by use of earth pressure balance shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 79 - 85. (in Chinese))
- [5] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1587 - 1594. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on thrust force during tunnel excavation with earth pressure balance shield machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1587 - 1594. (in Chinese))
- [6] 秦建设. 盾构隧道施工中开挖面失稳事故分析[J]. 浙江建筑, 2005, 22(增): 48 - 54. (QIN Jian-she. Analysis on the face instability of shield tunnel excavation[J]. Zhejiang Construction, 2005, 22(S): 48 - 54. (in Chinese))
- [7] 秦建设, 尤爱菊. 盾构隧道开挖面稳定数值模拟研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(1): 27 - 30. (QIN Jian-she, YOU Ai-ju. Study on the face stability of shield tunnel in sand with numerical simulating technique[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(1): 27 - 30. (in Chinese))
- [8] ANAGNOSTOU G, KOVARL K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 165 - 173.
- [9] LEE In Mo, LEE Jae Sung, NAM Seok Woo. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19: 551 - 565.
- [10] 裴洪军, 孙树林, 吴绍明, 等. 隧道盾构法施工开挖面稳定性研究方法评析[J]. 地下空间与工程学报, 2005: 117 - 119. (PEI Hong-jun, SUN Shu-lin, WU Shao-ming, et al. Analysis of research methods for face stability at shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005: 117 - 119. (in Chinese))
- [11] 赵丹. 小半径、大坡度盾构隧道施工力学特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007. (ZHAO Dan. The mechanics character analysis of shield-driven tunnel construction under small-radius curve and big-gradient condition[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese))