

黏土条件下隧道稳定率分析

尹小军¹, 谢 骏², 景海河¹

1. 黑龙江科技学院资源与环境工程学院, 哈尔滨 150027

2. JFT Canada 公司, 加拿大多伦多 M2J 4A6

摘要 隧道稳定是岩土工程领域一个重要问题。分析了岩土工程中常用来评价稳定性的安全系数, 引出了隧道稳定率的概念; 给出了几种不同情况下隧道稳定率的表述形式, 即不考虑土重影响时的稳定率, 考虑土重影响时的稳定率和隧道支撑力的稳定形式; 以 Davis 提出的一个变量隧道垮落模型为例, 构建块体速度场和受力分布图, 根据功能原理, 推导了基于一个变量的单圆形隧道稳定率。根据现场实测数据, 得出现场稳定率; 根据分析计算, 得出理论稳定率。针对 3 种不同形式的稳定率进行了分析, 当现场稳定率的值大于理论值时, 隧道已垮落; 当现场稳定率的值等于理论值时, 隧道处于临界垮落状态; 当现场稳定率的值小于理论值时, 隧道处于稳定状态; 由此, 可根据不同情况, 利用不同形式的稳定率表达式评价隧道是否稳定。

关键词 隧道稳定; 黏土; 稳定率

中图分类号 TU2

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0091-03

Stability Degree of Excavation in Clay Soil

YIN Xiaojun¹, XIE Jun², JING Haihe¹

1. College of Resource and Environment Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

2. JFT Canada Inc., Toronto M2J 4A6, Canada

Abstract Stability of the tunnel is a very important issue in geotechnical engineering. First the factor of safety is introduced into the assessment of stability in the geotechnical engineering, and then the concept of stability degree is defined. Various kinds of the stability degrees of tunnel are discussed, including those with and without consideration of earth weight and that related with support strength of tunnel. Then with a variable tunnel model of failure proposed by Davis's as an example, the block body velocity field and the stress distribution are obtained, based on the work-energy theorem, and the stability degree is calculated. According to measured data on the site, the site stability degree is obtained. The theoretical stability degree can be obtained by analysis. These three different stability degrees are compared when the value of site stability degree is greater than the theoretical value, then the tunnel would fail; when the value of site stability degree is equal to the theoretical value, then the tunnel is in a critical failure state; when the value of site stability degree is smaller than the theoretical value, then the tunnel is in a stability state. According to different circumstances, with the use of different expressions of the stability degree of the tunnel, the tunnel stability can be assessed.

Keywords stability of the tunnel; clay; stability degree

隧道稳定性研究是岩土工程领域的一项重要内容, 研究方法多种多样。隧道的应用在生产生活中越来越重要, 隧道工程中遇到的问题过去多凭经验解决。但工程实践表明, 单凭经验越来越难以适应日益发展的工程规模和工程复杂性^[1]。由

于隧道开挖问题的复杂性, 其变量很多, 给解决问题带来极大不便。在工程实践中, 由于问题的复杂性, 很难找出精确解^[2]。因此须给出相应准则, 作为判断隧道稳定与否的依据。

一般来说, 在隧道围岩安全稳定的数值计算中, 若以弹性

收稿日期: 2008-03-13; 修改稿收到日期: 2010-04-28

作者简介: 尹小军, 助教, 研究方向为隧道稳定及数值模拟, 电子信箱: yinxiaojun800@126.com

理论为基础,则认为当各质点应力值满足一定条件时发生屈服,此时的条件称为屈服(破坏)条件,即

$$f(\sigma)=H(\chi)$$

式中, f 为某一函数关系, σ 为总应力, 材料参数 H 为标量的内变量 χ 的函数。

安全程度可用安全系数^[3]表示,即

$$F_s=H(\chi)/f(\sigma) \quad (1)$$

将分析所得应力值代入式(1),可直接求出安全系数 F_s 。 $F_s>1$,表示未破坏(屈服面内部); $F_s=1$,表示处于临界状态(屈服面上部); $F_s<1$,表示已经破坏(屈服面外部)。

1967年, Broms等^[4]开展了压力作用下通过垂直圆形开挖挤压黏土实验,并考虑现场观察垮落的产生和稳定性的维护。定义稳定率 N 为在隧道轴向作用于地表的总外载应力的差(在隧道构建之前)和隧道压力之和除以土体湿剪切强度 C_u 。隧道稳定情况可用其稳定率衡量^[5-9]。

在实际应用中,不同表述形式有各自的优越性,本研究讨论几种形式的稳定率,以得出适合应用的稳定率形式。

1 临界隧道稳定率表达式

1.1 不考虑土重时的隧道稳定率

在埋藏较浅的隧道中,当隧道上方的作用力远大于隧道上部土体的重量时,土重影响很小,可视为无土重情形。

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t}{C_u} \quad (2)$$

式中, N_c 为稳定率或稳定系数, σ_s 为作用于地表的压力, σ_t 为

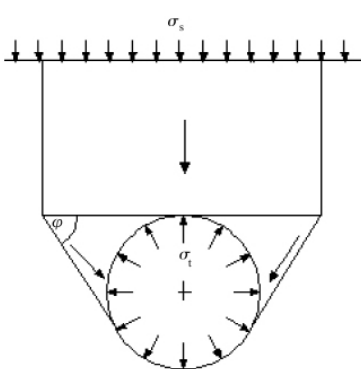


图1 上限机制 B
Fig. 1 Upper bound mechanism B

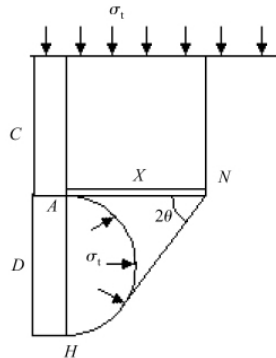


图2 右半面隧道示意
Fig. 2 Right half of the model

隧道内支护力。

1.2 考虑土重时的隧道稳定率

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t+\gamma\left(\frac{D}{2}+C\right)}{C_u} \quad (3)$$

式中, γ 为土体容重, D 为隧道直径, C 为隧道埋深。

1.3 隧道内支撑力的稳定形式

变换式(3)可得

$$\frac{(\sigma_s-\sigma_t)}{C_u}+\frac{\gamma D}{C_u}\cdot\left(\frac{C}{D}+\frac{1}{2}\right)=N=f\left(\frac{C}{D}\right)$$

如果 $\sigma_t>\sigma_s$ 且 $\sigma_t\leq\sigma_s+\gamma D$, 则

$$\frac{(\sigma_t-\sigma_s)}{C_u}=F\left(\frac{\gamma D}{C_u}+\frac{C}{D}\right)$$

可求出隧道支撑力表达式

$$\sigma_{tc}=\gamma D\cdot\left(\frac{C}{D}+\frac{1}{2}\right)+f\left(\frac{C}{D}\right)C_u+\sigma_s \quad (4)$$

2 单圆形隧道稳定率

2.1 单圆形隧道垮落模型

为分析隧道稳定性, Davis等^[6]在1980年提出4种隧道垮落模型。本研究以图1所示模型为例,推导其稳定率。由于对称性,因此只考虑模型的右半部分(图2)。在求解隧道稳定率时,利用上限定理,需要构造运动容许速度场,分析各区域内的速度模式。同时,需分析各区域内及交界面处间断线上的受力情况。所以,构造块体速度场(图3)、受力分布(图4)的模型。设 $\varphi=2\theta$ 。

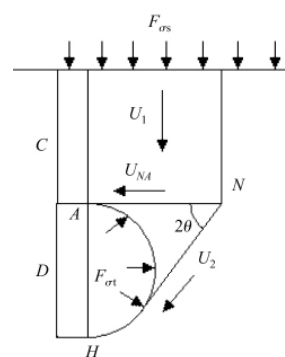


图3 块体速度场
Fig. 3 Velocity field of blocks

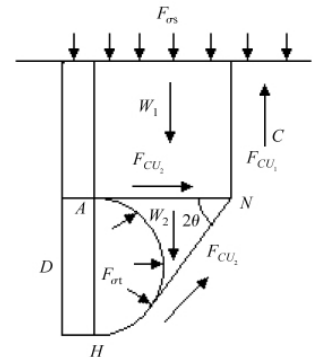


图4 力分布(滑移面上正应力不做功,未显示)
Fig. 4 Force distribution (normal forces on sliding faces are not shown as they do no work)

2.2 单圆形隧道稳定率推导

设块体1的下降速度 $U_1=U$, 由速度场中速度间关系可得

$$U_2=\frac{U}{\sin 2\theta} \quad U_N=\frac{U}{\tan 2\theta}$$

作用于滑移面上的剪力和外力如图4所示, W_1 、 W_2 为块体的重力; F_{σ_s} 、 F_{σ_t} 为作用于地表和隧道周边的合力; F_{cv1} 、 F_{cv2} 为作用于滑移面上的剪切力。有

$$F_{\sigma_s}=\sigma X \quad F_{\sigma_t}=2\sigma_r X \sin \theta$$

$$F_{cv1}=C_u C \quad F_{cv2}=C_u X$$

$$W_1=\gamma \cdot X C \quad W_2=\gamma \frac{D}{2} \left[X - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \frac{D}{2} \right]$$

由假设可知块体为刚体,块体内土体变形能为零,外力所做的功 W 和滑移面所耗内能 E 为

$$W=F_{\sigma_s} U_1+W_1 U_1+W_2 U_2 \sin 2\theta-F_{\sigma_t} U_2 \cos \theta$$

$$E=F_{c_{12}} U_1+F_{c_{12}}(U_2+U_{NA})$$

根据功能原理 $W=E$, 有

$$F_{\sigma_s} U_1+W_1 U_1+W_2 U_2 \sin 2 \theta-F_{\sigma_s} U_2 \cos \theta=F_{c_{12}} U_1+F_{c_{12}}(U_2+U_{NA}) \quad (5)$$

用 $X=\frac{D}{2 \tan \theta}$, $\sin 2 \theta=\frac{2 \tan \theta}{1+\tan ^2 \theta}$, $\tan 2 \theta=\frac{2 \tan \theta}{1-\tan ^2 \theta}$ 关系简化方程, 以稳定率 N 表示此方程, 有

第一种形式:

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t}{C_u}=\left(\frac{C}{X}+n\right)=\left(\frac{2 C}{D}\right) \cdot \frac{1}{n}+n \quad (6)$$

第二种形式:

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t+\gamma\left(\frac{D}{2}+C\right)}{C_u}=\frac{1}{n}\left(2 \cdot \frac{C}{D}+n^2\right)+\left(\frac{\gamma D}{C_u}\right)\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

第三种形式:

$$\begin{aligned} \sigma_{tc} &= \sigma_s + \gamma C + \gamma \frac{D}{2} \left(1 - \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) D}{2X} \right) \frac{1-n}{1+n} - C_u \left(\frac{C}{X} + n \right) \\ &= \sigma_s + \gamma C + \gamma \frac{D}{2} \left(1 - \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta \right)}{n} \right) \frac{1-n}{1+n} - C_u \left(\frac{2C}{D} \cdot \frac{1}{n} + n \right) \quad (8) \end{aligned}$$

式中, $n=\arctan \theta$ 。(6)式比较简单, 可通过求导得最小的稳定率; 在(7)、(8)式中, 表达式复杂, 可用其他数学或编程方法求得最小稳定率。

3 临界稳定率

根据稳定率表述形式, 进行下列分析。第一种形式中,

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t}{C_u}=\left(\frac{2 C}{D}\right) \cdot \frac{1}{n}+n$$

求解最小上限解, 应求出 θ 的最小值, 即 $dN/d\theta=0$ 。有

$$(\sec \theta)^2\left(2 \cdot \frac{C}{D}+(\tan \theta)^{-2}\right)+\tan \theta \cdot(-2)(\tan \theta)^{-3}(\sec \theta)^2=0$$

其中, $\theta=\arctan \frac{1}{\sqrt{2 \cdot C / D}}$, 滑移角 θ 为 C / D 的函数, 因而该形式的稳定率可简化为

$$N_c=2 \cdot \sqrt{2 \cdot C / D}$$

第二种形式中,

$$N_c=\frac{\sigma_s-\sigma_t+\gamma\left(\frac{D}{2}+C\right)}{C_u}$$

有 6 个变量。

第三种形式中,

$$\sigma_{tc}=\gamma D \cdot\left(\frac{C}{D}+\frac{1}{2}\right)+f\left(\frac{C}{D}\right) C_u+\sigma_s$$

有 6 个变量。

实际工程中, ① 如果隧道埋藏较浅, 隧道上方的作用力远大于隧道上方土重时 ($\gamma D / C_u=0$), 可忽略土重对隧道稳定的影响, 因而可利用第一种形式分析隧道稳定; ② 如果考虑土重的影响 ($\gamma D / C_u \neq 0$), 根据第二种形式的稳定率分析隧道稳定; ③ 在隧道设计中, 往往会关心最小支护力, 可根据第三种表示的形式, 进而求出最小支护力。

如果定义 N_f 为现场稳定率, 可实际测出 $\sigma_s, \sigma_t, \gamma, C, D, C_u$ 的值, 通过计算, 可得出 N_f 的值。

例 1 已知 $\sigma_s, \sigma_t, \gamma, C, D, C_u$ (现场实测) 和 N_c (理论值)。

利用第二种形式的稳定率, 对实际问题进行分析, 可得出安全系数的最小上限解, 结合相应的下限解可以得出: 如果 $N_f > N_c$, 则隧道已垮落; 如果 $N_f = N_c$, 则隧道处于临界垮落状态; 如果 $N_f < N_c$, 则隧道处于稳定状态。

4 结论

通过对 3 种不同形式稳定率的分析, 就基于一个变量的隧道垮落模式推导了稳定率的表达式, 表明隧道稳定率第二种表达式可作为评价隧道稳定的理想模式。实际工程中, 如果现场稳定率大于此稳定率, 则隧道已垮落; 等于该稳定率, 则隧道处于临界状态; 小于此稳定率, 则隧道处于稳定状态。

参考文献 (References)

- [1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 1-10.
Zhou Weiheng. Advanced rock mechanics [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1989: 1-10.
- [2] 李亮, 杨小礼. 圆形浅基础地基承载力极限分析的上限解析解 [J]. 铁道学报, 2001(1): 96-97.
Li Liang, Yang Xiaoli. Journal of the China Railway Society, 2001(1): 96-97.
- [3] 李树忱, 李术才, 徐帮树. 隧道围岩稳定分析的最小安全系数法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 550-551.
Li Shuchen, Li Shucai, Xu Bangshu. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 550-551.
- [4] Broms B B, Bennemark H. Stability of clay in vertical openings[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 193(S1): 71-94.
- [5] Davis E H, Gunn M J, Mair R J, et al. The stability of shallow tunnel and underground openings in cohesive material [J]. Geotechnique, 1980, 30(4): 397-416.
- [6] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969: 225-290.
- [7] Schofield A N. Cambridge geotechnical centrifuge operations[J]. Geotechnique, 1980, 30(3): 227-268.
- [8] Eisenstein Z, Samarasekera L. Stability of unsupported tunnels in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 609-613.
- [9] Sloan S W, Assadi A. Stability of shallow tunnels in soft ground[C]//Predictive Soil Mechanics. London: Thomas Telford House, 1993: 644-663.

(责任编辑 陈广仁)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主, 同时刊登阶段性最新科研成果报告, 以及国内外重大科技新闻, 快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文, 要求学术价值显著、实验数据完整、具有原创性和创造性, 同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰, 并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。