

浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究

黄正荣^{1,3}, 朱伟^{1,2}, 梁精华¹, 秦建设¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 苏州交通设计研究院, 江苏 苏州 215000)

摘要: 盾构法隧道施工中, 通过在开挖面施加与原始地应力相等的支护压力来预防开挖引起地层变位较大或开挖面失稳, 但是由于地层条件和施工等因素的影响, 使得开挖面支护压力的设定和控制较为困难, 通过数值模拟分析了支护压力与开挖面变形及稳定系数的关系, 对于施工中保持开挖面稳定有一定的指导意义。

关键词: 开挖面; 稳定; 数值解; 安全系数

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-2005-05

作者简介: 黄正荣(1975-), 男, 江苏射阳人, 博士, 主要从事盾构隧道数值模拟计算方面的研究。

Study on limit supporting pressure and stabilization of excavation face for shallow shield tunnels in sand

HUANG Zheng-rong^{1,3}, ZHU Wei^{1,2}, LIANG Jing-hua¹, Qin Jian-she¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Suzhou Design & Research Institute of Communication, Suzhou 215000, China)

Abstract: During construction of shield tunnel, support pressure was usually applied to prevent large displacement of soil or collapse of excavated surface. However, the design and control of appropriate supporting pressure were difficult for the large variation of soil conditions and uncertainties in actual filed construction. Supporting pressure and deformation and stabilization of excavation surface were studied by use of numerical simulation. It could provide some guidance to the stabilization of excavation face of shield tunnels.

Key words: excavation face; stabilization; numerical solution; safety factor

0 引言

随着我国经济的发展和综合国力的提高, 大中城市地下空间开发的高潮即将到来, 地下工程的发展速度加快。盾构法作为一种成熟的施工技术, 应用越来越广泛, 在建的北京、上海、广州、深圳、南京、天津等城市地铁隧道工程中都应用了相对经济的土压平衡式盾构施工技术。随着国内盾构施工市场的扩大, 盾构施工的土层条件及掘进环境等更为复杂多样, 国内的盾构施工中出现了许多问题, 其中较为突出的是施工对周围地基造成的过大影响^[1-2]。特别由于隧道使用线路上的因素限制, 使得有时隧道所处位置的上覆土层较浅。如越江隧道, 城市地铁隧道施工中穿越河道及湖底等。盾构机穿越浅覆土层时容易引发各种工程事故, 目前广泛采用的闭胸式盾构施工中, 开挖面支护压力控制是通过加气、加泥水或开挖面切削的渣土自身在压力舱内作用抵抗开挖面的土、水压力以保持开挖面的稳定, 同时控制开挖面变形和地基沉降。相对于开挖面土、水压力, 压力舱支护压力较小时, 会出现地基沉降甚至坍塌, 支护压力较大时, 则会出

现地表隆起。合理的确定开挖面支护压力是盾构掘进施工中一项关键技术, 开挖面支护压力大小的控制应该保证不至于压力过低发生开挖面坍塌, 同时又不能压力过大而发生隆起破坏, 因此目前开挖面支护压力研究中很大部分研究侧重于开挖面极限支护压力的确定。极限支护压力的确定是盾构实际掘进过程中开挖面支护压力大小选择与控制的依据, 即开挖面实际支护压力大小应控制在最小与最大极限支护压力之间。本文开挖面极限支护压力的研究主要侧重于最小极限支护压力的确定, 同时从安全的角度来考虑开挖面坍塌的安全系数。随着计算机技术的发展, 数值模拟计算可以模拟盾构法复杂的地下开挖施工过程^[3]。本文采用数值模拟方法, 研究地下水位和土层参数对开挖面极限支护压力和稳定安全系数的影响, 综合考虑极限支护压力和安全系数, 给出合理的开挖面支护压力, 得出了一些有用的结论, 对盾构法隧道施工中合理的确定支护压力的大小具有一定的指导作用。

1 数值模拟方法及过程

1.1 强度折减法基本原理

Duncan^[4]指出边坡安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时,对土的剪切强度进行折减的程度。通过逐步减小抗剪强度指标,将 c 、 φ 值同时除以折减系数 F_{sr} ,得到一组新的强度指标 c' 、 φ' 进行有限元计算分析,反复计算直至边坡达到临界破坏状态,此时采用的强度指标与原岩土体具有的强度指标之比为该边坡的安全系数 F_s ,即

$$c' = c / F_{sr} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan(\varphi / F_{sr})) \quad (2)$$

赵尚毅、郑颖人等^[5]通过比较毕肖普法和强度折减法的安全系数定义,认为两者安全系数具有相同的物理意义,强度折减法在本质上与传统方法是一致的。强度折减法的思路清晰,原理简单,但存在一个问题:如何在不断降低岩土体强度参数的过程中判断是否达到临界破坏状态,这是有限元、有限差分计算中经常遇到的一个比较棘手的问题,引起了众多研究者的兴趣。目前边坡稳定强度折减法数值分析中判断边坡失稳破坏的标准通常有:迭代求解的不收敛性、广义剪应变贯通、塑性区的范围及其连通状态、边坡内某点的位移与折减系数的关系曲线等。本文采用开挖面中心点水平位移增量与强度折减系数增量的关系曲线来确定安全系数,当水平位移增量与强度折减系数增量之比 $\Delta\delta/\Delta F_{sr}$ 急剧变化时,则认为开挖面处于临界破坏状态,此时的强度折减系数即为开挖面的安全系数。

1.2 数值模拟过程

由于实际作用于开挖面的支护压力为梯形荷载,为了方便说明,取隧道中心点支护压力值来代表开挖面支护压力大小,所以文中的开挖面支护压力统一指开挖面中心点施加的支护压力,对于开挖面支护压力大小的衡量,引入支护压力比^[6]

$$\lambda = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (3)$$

式中, σ_s 为开挖面中心支护压力, σ_0 为隧道中心原始地层水平静止土压力。

盾构开挖是一个逐渐推进的过程,考虑到本文分析的重点是开挖面极限支护压力及开挖面稳定研究,故数值计算中采取一次开挖到一定距离(取10 m)并施加支护结构。开挖面极限支护压力研究的模拟过程如下:

(1) 建立原始地层模型。

(2) 一次性开挖隧道10 m,并及时设置衬砌管片(用壳单元来模拟管片),同时在开挖面上施加与原始地层侧向静止土压力值相等的梯形支护作用力。

(3) 开挖面支护压力以缓慢的速度逐渐减小,作出支护压力比与开挖面中心点水平位移的曲线,随着支护压力比的减小开挖面中心点的水平位移逐渐增大,当支护压力比变化很小而开挖面中心点的水平位移急剧增大时,认为此时的支护压力比即为最小极限支护压力比,由于此时出现过大大变形,程序中止计算。

研究开挖面稳定安全系数时,前两步同上,不同的是第三步,具体方法为:

(3) 开挖面上作用一定的支护压力,即此时的支护压力比为定值,通过逐步减小土体抗剪强度指标,将 c 、 φ 值同时除以折减系数 F_{sr} ,作出折减系数与开挖面中心点水平位移的曲线,随着折减系数的增大开挖面中心点的水平位移逐渐增大,当折减系数变化很小而开挖面中心点的水平位移急剧增大时,由于出现过大大变形,程序中止计算,此时的折减系数即为开挖面稳定的安全系数。通过计算不同支护压力比下的开挖面稳定的安全系数即可以确定不同的支护压力比与开挖面稳定的安全系数之间的关系。

2 算例的参数取值及相关计算说明

根据国内地铁盾构隧道施工的一般情况。假定隧道开挖直径 D 为8 m,隧道埋深 C 为6 m,地下水位 H_w (地下水位到地面的距离)为2 m。计算模型尺寸及网格划分如图1所示,模型除地面为自由面外,四周采用变形约束条件。由于莫尔-库仑准则反应岩土材料的剪切破坏特性与实际情况较为吻合,本文计算中土体材料的破坏屈服采用莫尔-库仑剪切破坏准则;管片为C50钢筋混凝土弹性材料,厚度为35 cm,管片采用壳单元来模拟。材料参数取值如表1所示。

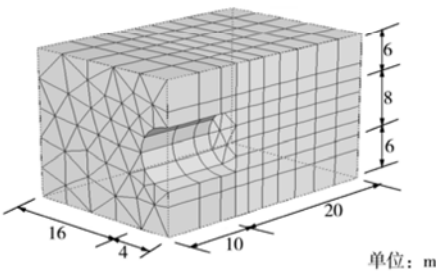


图1 隧道开挖几何模型

Fig. 1 Geometric model of tunnel excavation

表1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料 单位	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /MPa	泊松 比	粘聚 力/kPa	内摩 擦角 /($^\circ$)
土	17(20)	28	0.3	1.0	30

盾构施工所引起的地表沉降,目前大多用施工经验配合Peck^[7]所提出的正态分布曲线进行分析,其公

式为

$$\delta(x) = \delta_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) = \frac{vA}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right), \quad (4)$$

式中, δ 为沉降量, v 为地层损失率, i 为沉降槽宽度系数, x 为沉降点与隧道中心距离。

Peck通过对大量隧道施工引起的地面沉降实测数据的分析, 提出隧道开挖后引起的地面沉降是在不排水条件下发生的, 沉降槽体积应该等于地层损失的体积, 地层损失率为单位长度地层损失占单位长度盾构体积的百分比, 其取值与地质条件和施工条件密切相关。对于粘性土中的土压平衡盾构隧道, 地层损失率的取值范围一般为0.5%~2%^[8-9]。陈俊宏^[10]等人统计了台北盾构隧道施工地层损失率, 见表2。本计算过程中考虑地层损失率为1%。

表 2 台北盆地盾构隧道施工地层损失率

Table 2 Ground loss of shield tunnel construction of Taipei				
地质分区	地层损失率/%			
	直线段		曲线段	
	断面数	平均值	断面数	平均值
T1	17	0.70	4	1.23
T2	21	0.64	11	1.42
TK2	3	0.70		
K1	34	0.66		
H1	6	0.76	3	0.41
YH	13	0.89		
B1	19	0.86	7	0.84
B2	62	0.63		
C	5	1.42	2	1.37
合计	180	0.71	27	1.13

3 开挖面极限支护压力和稳定安全系数的确定

开挖面支护压力不足引起围岩应力释放导致地基变位, 首先是开挖面附近土体单元发生往盾构机压力舱内的水平位移, 通过计算开挖面支护压力变化与开挖面中心点向压力舱方向水平位移之间的关系研究开挖面极限支护应力, 如图 2 所示。计算结果表明(此处不考虑地下水), 随着开挖面支护压力的逐渐减小, 开挖面前方土体水平位移量逐渐增加, 当支护压力下降到一定程度, 开挖面水平位移量急剧增大(在图中表现为曲线的斜率接近 0 时), 此时认为开挖面失去稳定, 即可得到最小极限支护压力约为 13.77 kPa(支护压力比为 0.162)。应用分析边坡稳定安全系数的强度折减法来分析开挖面稳定的安全系数, 图 3 为开挖面中心点水平位移与强度折减系数(安全系数)的关系曲线, 随着安全系数的增加, 开挖面中心点的位移增大, 当位移发生突变时(在图中表现为曲线的斜率接近 0 时), 开挖面失稳, 此时的强度折减系数即为开挖面稳定的安全系数, 约为 4.35, 表明在侧向静止土

压力作用下, 开挖面的安全系数较大, 不会发生失稳破坏。图 4 为求极限支护压力开挖面失稳后位移变形云图, 从图中可以看出求极限支护压力时的开挖面失稳模式。图 5 为求开挖面稳定安全系数失稳后位移变形云图, 可以看出此时开挖面失稳模式。

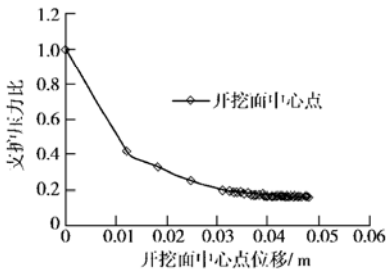


图 2 开挖面中心点位移与支护压力比关系

Fig. 2 Relation between displacement and limit supporting ratio

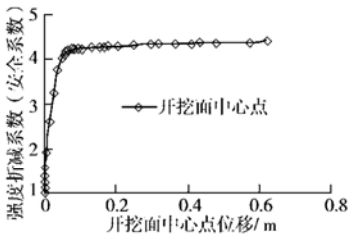


图 3 开挖面中心点位移与安全系数关系

Fig. 3 Relation between displacement and safety factor

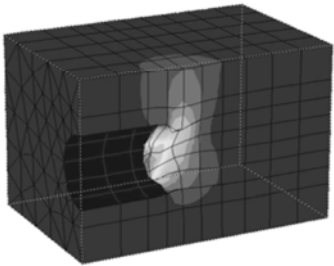


图 4 计算极限支护压力失稳位移

Fig. 4 Collapsing displacement at limit supporting pressure

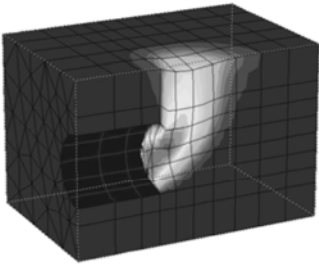


图 5 计算安全系数失稳位移

Fig. 5 Collapsing displacement in calculating safety factor

4 开挖面极限支护压力和稳定安全系数的影响因素分析

盾构施工中, 隧道所在土层参数及地下水位等都对开挖面极限支护压力和稳定安全系数产生一定的影

响,即使对于相同的地层参数和地下水位,不同的支护压力比所对应的稳定安全系数也是不一样的,本文对影响隧道开挖面极限支护压力和稳定安全系数的影响因素进行计算分析。

4.1 内摩擦角的影响

砂土土层参数主要为内摩擦角,为了研究土层内摩擦角对土体极限支护压力大小的影响,本文主要对内摩擦角进行参数敏感性分析(此处不考虑地下水)。不同内摩擦角土中支护压力比与开挖面中心土体水平位移关系如图6所示。从图中可以看出,随着内摩擦角的增大,开挖面极限支护压力比减小,内摩擦角20°时开挖面极限支护压力为0.243;30°时支护压力比为0.162;35°时极限支护压力比为0.151。开挖面极限支护压力也随着内摩擦角的增大而减小,不同内摩擦角对应的极限支护压力如表3所示。

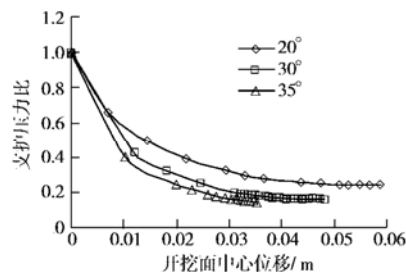


图 6 开挖面中心点位移与支护压力比关系

Fig. 6 Relation between displacement and limiting support ratio

表 3 不同内摩擦角支护压力比与极限支护压力

Table 3 Limit supporting pressure with different soil frictions

内摩擦角/(°)	极限支护压力比	极限支护压力/kPa
20	0.243	27.18
30	0.162	13.77
35	0.151	10.95

4.2 地下水位的影响

为了研究地下水位对开挖面极限支护压力的影响,取隧道计算直径 D 为8 m,上覆土层厚度 C 为6 m,地下水位 H_w 为2、4、6 m时开挖面极限支护压力比的变化如图7所示。从图中可以看出,不同的地下水位对支护压力比的影响较大,对开挖面极限支护压力的影响也较大。随着 H_w 的增大,即地下水位的降低,开挖面极限支护压力比减小,极限支护压力也减小。没有地下水时,开挖面极限支护压力远小于土体原位静止土压力;有地下水时,开挖面极限支护压力较没有地下水时要大的多,开挖面极限支护压力的大小和地下水位有着密切的关系,可以认为此时开挖面支护压力主要是为了平衡作用在开挖面上的水压力。表4为不同地下水位所对应的开挖面极限支护压力比与极限支护压力。从表中也可以看出,随着地下水位的降低,开挖面极限支护压力也在减小。

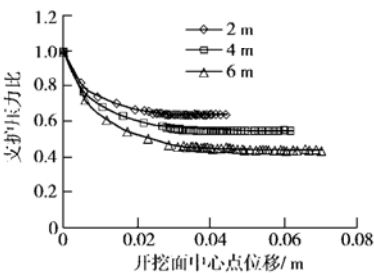


图 7 开挖面中心点位移与支护压力比关系

Fig. 7 Relation between displacement and limiting support ratio

表 4 不同地下水位与极限支护压力

Table 4 Limit supporting pressure under different ground water levels

地下水位 H_w /m	极限支护压力比	极限支护压力/kPa
2	0.634	86.86
4	0.544	67.46
6	0.445	49.40

4.3 不同支护压力比与安全系数的关系

为了研究不同支护压力与开挖面稳定安全系数的关系,应用强度折减法计算隧道直径 D 为8 m,上覆土层厚度 C 为6 m,地下水位 H_w 为2 m和没有地下水时不同开挖面支护压力比时的稳定安全系数。图8为地下水位为2 m时开挖面支护压力比为1、0.9、0.8时的强度折减系数(即安全系数)分别为4.62、3.35、2.39。表5为地下水位为2 m和没有地下水时不同开挖面支护压力比时的稳定安全系数。从表中可以看出,不考虑地下水时,开挖面极限支护压力比为0.162,而开挖面支护压力比为0.2时对应的稳定安全系数为1.13,当取极限支护压力时,开挖面稳定安全系数接近于1。对于地下水位 H_w 为2 m时,开挖面极限支护压力比为0.634,而开挖面支护压力比为0.65时,开挖面稳定安全系数为1.15,当取极限支护压力时,同样开挖面稳定安全系数接近于1。考虑稳定安全系数 $F_s \geq 1.2$,则实际施工中,开挖面支护压力比至少应取极限支护压力比的1.1~1.2倍。

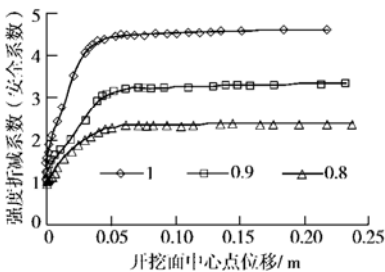


图 8 不同支护压力比下强度折减系数

Fig. 8 Safety factor with different support pressure ratios

5 结 语

(1) 没有地下水时,开挖面极限支护压力远小于

土体原位静止土压力。

表 5 不同支护压力比时开挖面稳定安全系数

Table 5 Safety factor with different support pressure ratios

开挖面稳定安全系数与支护压力比			
地下水位 H_w			
无地下水		地下水位 2 m	
支护压力比	安全系数	支护压力比	安全系数
1.0	4.38	1.00	4.62
0.8	3.30	0.90	3.35
0.6	2.48	0.80	2.39
0.4	1.81	0.70	1.58
0.2	1.13	0.65	1.15

(2) 有地下水时, 开挖面极限支护压力较没有地下水时要大的多, 开挖面极限支护压力的大小和地下水位有着密切的关系, 可以认为此时开挖面支护压力主要是为了平衡作用在开挖面上的水压力。

(3) 随着砂土内摩擦角的增大, 开挖面极限支护压力比减小, 开挖面极限支护压力也减小。

(4) 对于极限支护压力或极限支护压力比来说, 开挖面稳定安全系数较小, 故实际施工中, 开挖面支护压力至少应取极限支护压力的1.1~1.2倍。

参考文献:

[1] 孙 均. 地下工程活动的环境土工学问题[J]. 地下工程与隧道, 1999(3):2 - 6.(SUN Jun. Research on environmental soil engineering works during underground construction activities in ubran area[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3):2 - 6.)

[2] 孙 均. 地下工程活动的环境土工学问题[J]. 地下工程与隧道, 1999(4):7 - 9.(SUN Jun. Research on environmental soil engineering works during underground construction activities in ubran area[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(4):7 - 9.)

[3] STALLEBRASS S E, GRANT R J, TAYLOR R N. A Finite element study of ground movements measured in centrifuge model tests of tunnels[C]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema:

Rotterdam, 1996.

[4] DUNCAN J M. State of the art:Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996,122(7):577 - 596.

[5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 王敬林. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002,24(3):333 - 336.(ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, WANG Jing-lin. Anlysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(3): 333 - 336.)

[6] 朱 伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2005,27(8): 897 - 902.(ZHU Wei, QIN Jian-she, LU Ting-hao. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(8):897 - 902.)

[7] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1969:225 - 290.

[8] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clay[J]. Geotechnique, 43(2):315 - 320.

[9] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored tunnelling in the urban environment[C]// Proc 14th ICSMFE. Rotterdam: Balkema, 1998:2353 - 2385.

[10] 陈俊宏, 段绍纬, 黄南辉. 台北捷运盾构施工引起沉陷探讨[C]//海峡两岸岩土工程技术交流研讨会城市地下工程与环境保护—台湾卷.2002:273 - 282.(CHEN Jun-hong, DUAN Shao-wei, HUANG Nan-hui. Discuss on subsidence by shield tunnel construction at Jieyun of Taipei[C]// The Two Sides of the Taiwan Straits Communication Forum on Soil Engineer Technical Underground Construction of City and Environmental Protection-Taiwan Volume. 2002:273 - 282.)