

# 砂土地层盾构开挖面极限最小支护压力

刘宇<sup>1</sup>, 唐春安<sup>2</sup>, 谢欣<sup>1</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁大连 116024)

**摘 要:** 盾构施工过程中开挖面支护压力控制不当有可能导致周边管线破裂、建筑物倾斜等严重的风险事故. 基于 Flac<sup>3D</sup> 数值模型及极限平衡模型研究了砂土地层中不同埋深比 ( $C/D$ ) 及土层内摩擦角对开挖面失稳模式和极限最小支护压力的影响机制. 通过对比分析两种方法, 得出现有极限平衡模型由于无法反映开挖面失稳过程中侧压力系数随开挖面位移和埋深动态变化过程, 因而与实际极限支护压力存在较大差异. 该研究为砂土地层工程实践提供重要的理论依据.

**关 键 词:** 开挖面稳定性; 埋深比; 极限支护压力; Flac<sup>3D</sup>; 极限平衡理论

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)03-0433-04

## Minimum Supporting Pressure of Shield Tunnel Face in Sandy Grand

LIU Yu<sup>1</sup>, TANG Chun-an<sup>2</sup>, XIE Xin<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: LIU Yu, E-mail: liuyuhs@126.com)

**Abstract:** In the procedure of shield construction, the inappropriate controlling of support pressure on the tunnel face may cause risk of accident, such as the nearby pipeline rupture and the incline of existing buildings. The influence of different buried depth ratio ( $C/D$ ), internal friction angle on the instability mode of excavation face and the limit minimum support pressure was investigated on the basis of the Flac<sup>3D</sup> numerical model and limit equilibrium model. According to the comparison between the two different analysis methods, there is obvious difference between the support pressure predicted by the limit equilibrium model and the actual support pressure, which is caused by the fact that the limit equilibrium model cannot reflect the procedure that the coefficient of lateral pressure changes with the displacement of tunnel face and dynamic depth change. The research may provide great theoretical evidence to the engineering practice in the solid stratum.

**Key words:** tunnel face stability; buried depth ratio; limit support pressure; Flac<sup>3D</sup>; limit equilibrium method

由于盾构隧道施工技术具有对周边环境影响小、机械化程度高及施工速度快等优点被广泛应用到城市地铁开挖工程. 然而盾构隧道的开挖面支护压力大小的设定直接影响到地层移动及地表沉降, 尤其穿过地面既有建筑物及地下管线等复杂环境时对开挖面支护压力的要求非常严格. 开挖面支护压力过小易导致地表沉降过大, 甚至是

塌陷; 反之, 支护压力过大则导致地表隆起破坏<sup>[1-2]</sup>. 目前, 泥水平衡盾构和土压平衡盾构开挖面均采用预先设定泥水或土压支护压力以保证开挖面稳定性.

隧道开挖面的最小支护压力往往受到多重因素的影响, 如覆跨比、土体重度、内摩擦角、黏聚力、地下水位等. 目前国内外很多学者运用极限平

衡分析、极限分析和模型试验针对开挖面极限支护压力作了大量研究. Leca 等<sup>[3]</sup>采用极限分析法研究了圆形隧道开挖面的极限支护压力. Anagnostou 等<sup>[4-5]</sup>基于筒仓理论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支护压力. Atkinson 等<sup>[6]</sup>运用极限分析法对砂土地层圆形隧道极限支护压力进行研究,并推导出了相应的计算公式. 魏纲等<sup>[7]</sup>采用三维极限平衡法研究了隧道开挖面极限支护压力.

本文基于极限平衡法及 Flac<sup>3D</sup>数值模型研究了砂土地层盾构开挖面的失稳模式及极限最小支护压力,并对比分析两种计算结果. 揭示了现有极限平衡法理论模型中计算上覆土压力存在的缺陷及预测极限支护压力的误差.

# 1 数值计算模型及模拟方案

## 1.1 数值计算方案

文中基于 Flac<sup>3D</sup>软件建立了数值计算模型用于研究开挖面极限支护压力,计算模型中设定侧压力系数值为静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin\varphi$ . 实

表 1 数值模拟方案		
Table 1 The scheme of numerical simulation		
方案编号	覆跨比 $C/D$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
1	0.5	20
2	0.5	25
3	0.5	30
4	0.5	35
5	0.5	40
6	1.0	20
7	1.0	25
8	1.0	30
9	1.0	35
10	1.0	40
11	2.0	20
12	2.0	25
13	2.0	30
14	2.0	35
15	2.0	40
16	4.0	20
17	4.0	25
18	4.0	30
19	4.0	35
20	4.0	40

际工程中开挖面的支护压力应为梯形荷载,因此文中采用隧道开挖面中心点处的压应力 $\sigma_h$ 代表开挖面支护压力大小.

对于开挖面支护压力大小的表示,引入支护压力比的概念<sup>[8]</sup>:

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_t}.$$

式中: $\sigma_h$  为开挖面中心点支护应力; $\sigma_t$  为隧道中心原始地层静止土压力.

## 1.2 数值计算模型

在数值模型中,采用的隧道直径为 6 m,管片厚度为 0.35 m. 模型具体尺寸如图 1 所示,模型中除了地表为自由边界以外,模型四周及底部边界均为法向约束. 土体采用摩尔库伦屈服准则,材料参数如表 2 所示. 数值模拟过程可以分为如下几个步骤:

1) 建立三维数值计算模型,设定初始土体静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin\varphi$ ,并计算初始地应力.

2) 由于本文研究重点是隧道开挖面的极限最小支护压力,因此进行数值模拟时一次开挖至 12 m,并设置盾构管片. 同时在开挖面施加与原始地层侧向静止土压力值相等的梯形支护压力.

3) 不断减少开挖面的支护压力,并对开挖面中心点的水平位移进行监测. 通过开挖面中心点水平位移随着开挖面的支护压力的变化曲线确定极限最小支护压力,即支护压力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.

表 2 材料力学参数					
Table 2 Mechanical parameters					
材料名称	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	静止土压力系数 $K_0$
土层	20	0.35	18.5	20~40	$1 - \sin\varphi$
管片	30 000	0.25	25	—	—

## 1.3 数值计算结果分析

不同埋深比下开挖面失稳时的位移云图,见图 2. 可以看出砂土地层中盾构开挖面的破坏模式基本与三维楔体模型一致;开挖面前方为楔形状,滑动块顶部为烟囱状. 开挖面的破坏发展由开挖面顶部向地表发展,而且随着埋深的增大,砂土的成拱效应有效限制了地层的移动,使得地表最大沉降也显著减少,这说明随着埋深的增加,开挖面的破坏更难以延伸至地表面. 该趋势与 VERMEER 等<sup>[9]</sup>的离心模型试验结果相一致.

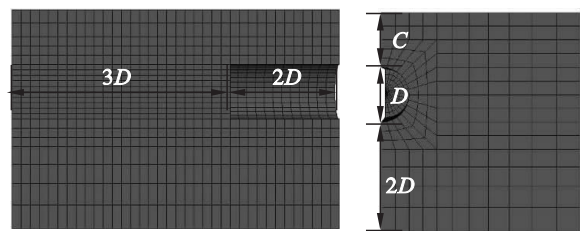


图1 数值模型示意图 ( $C/D=1.0$ )  
Fig. 1 The three dimensional numerical model ( $C/D=1.0$ )

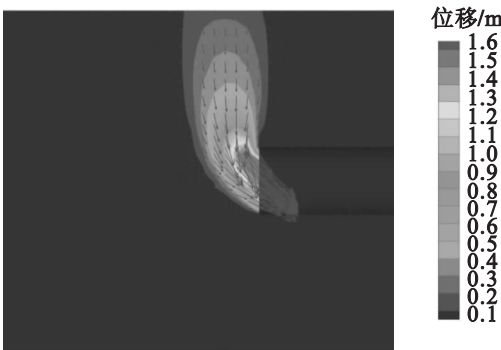


图2 开挖面失稳时位移云图 ( $C/D=2.0, \varphi=35^\circ$ )  
Fig. 2 Displacement contour of tunnel face

图3为土层不同内摩擦角下支护应力比与开挖面中心点水平位移的关系曲线( $D=6\text{ m}, C/D=0.5$ ).秦建设<sup>[8]</sup>将开挖面的变形与破坏分为3个阶段:第一阶段中当支护压力比减小时开挖面发生微小的变形;随着支护压力比的不断减小开挖面将发生显著的位移为第二阶段;第三阶段中支护压力减少至极限最小支护压力时开挖面变形将无限增大,数值模型不能收敛.

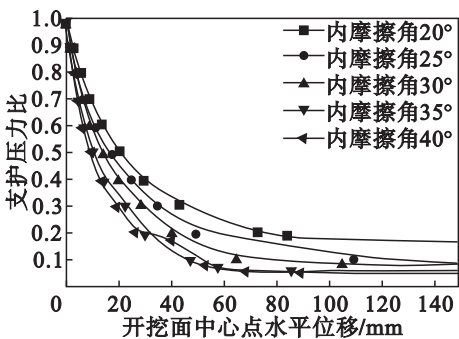


图3 不同内摩擦角下的极限支护压力 ( $C/D=0.5$ )  
Fig. 3 Limit supporting pressure at different friction angles of soil

由图4可以看出埋深比( $C/D$ )不变的情况下,极限支护压力比 $\lambda$ 随着内摩擦角的增大不断减小,当内摩擦角增大至某个值(约 $35^\circ$ )时,极限支护压力比的减小不再显著,表明此时已形成“土拱效应”.

数值模型计算得到的极限支护压力与内摩擦角的关系曲线见图5. 极限支护压力随着内摩擦

角的增大而减小,随着埋深的增大而增大. 当土层内摩擦角较小时,埋深( $C$ )对极限支护压力的影响较为显著;内摩擦角为 $20^\circ$ 时极限支护压力由 $C/D=4.0$ 时的最大值 $59.783\text{ kPa}$ 逐渐减小至 $C/D=0.5$ 时的 $19.706\text{ kPa}$ . 当土层内摩擦角足够大时,砂土的成拱效应致使破坏面不能延伸至地表,因此埋深比的增大不会引起极限支护压力的增大. 图5表明,土层内摩擦角为 $40^\circ$ 时,极限支护压力值随着埋深的变化不明显,表明土层成拱效应起到限制地层移动的作用<sup>[9-11]</sup>.

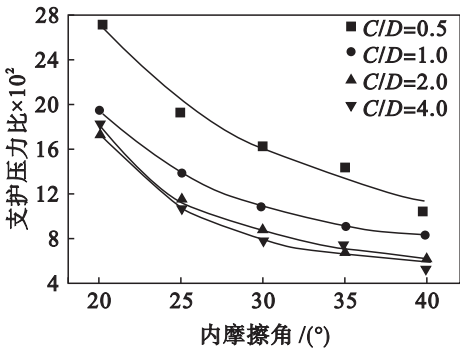


图4 内摩擦角对极限支护压力比的影响  
Fig. 4 The effect of the friction angle on limit supporting pressure ratio

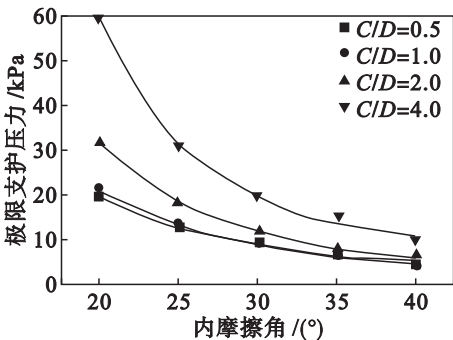


图5 埋深比对极限支护压力的影响  
Fig. 5 The effect of buried depth ratio on limit supporting pressure

## 2 数值模型与极限平衡模型结果对比

采用文献[7]的三维楔体模型分别计算了埋深比( $C/D$ )为 $0.5, 1.0, 2.0$ 及 $4.0$ 三种工况,计算结果见图6. 可以看出内摩擦角较小时随着埋深比的增大,开挖面极限最小支护压力也逐渐增大;但是埋深比大于 $2.0$ 时极限支护压力数值基本趋于稳定. 当埋深比( $C/D$ )= $0.5, \varphi=20^\circ$ 时,极限平衡解为 $15.21\text{ kPa}$ ,数值解则为 $19.94\text{ kPa}$ ,相对误差为 $23.7\%$ ;埋深比( $C/D$ )增加至 $4.0$ 时,极限平衡解及数值解分别为 $19.86, 59.783\text{ kPa}$ ,相

对误差达到 66.7% . 可见,埋深比越大极限平衡模型计算误差则越大,计算结果偏于不安全,运用该模型预测开挖面最小极限支护压力时应充分意识到这一点. 实际上,滑动块体的侧压力系数并非常量,而是随着开挖面的位移而动态变化,这也是极限平衡模型计算结果误差较大的主要原因.

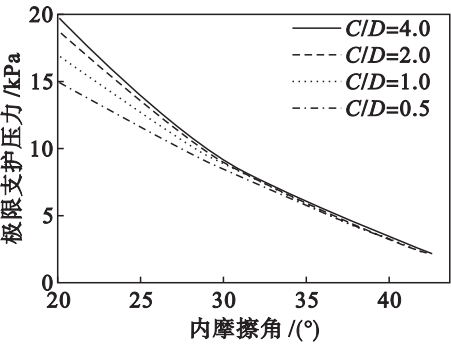


图 6 三维梯形楔体模型计算结果  
Fig. 6 The computed results of wedge model

3 结 论

1) 随着土层内摩擦角的增大,极限最小支护压力逐渐减小;埋深比的增加使支护压力比  $\lambda$  逐渐减小,但是极限最小支护压力却逐渐增大. 由于砂土的成拱效应,极限支护压力值远小于其静止土压力,并且埋深比增大到一定值时开挖面破坏区域不会延伸至地表.

2) 极限平衡模型得到的计算结果主要依赖于侧压力系数  $K_0$  的取值;而侧压力系数并非常量,其大小随着滑动块体的位移和土层深度而变化. 因此,利用极限平衡模型计算出的极限最小支护压力随着埋深比的增大其误差也逐渐增大;计算结果偏不安全.

参考文献:

[ 1 ] 吕玺琳,王浩然,黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究

究[ J ]. 岩土工程学报,2011,33(1):57-62.  
(Lyu Xi-lin, Wang Hao-ran, Huang Mao-song. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(1):57-62. )  
[ 2 ] Seung H K, Fulvio T. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-drained case [ J ]. Tunnelling and Underground Space Technology,2010,25:526-542.  
[ 3 ] Leca E, Dormieux L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional materials[ J ]. Geotechnique,1990,40(4):581-606.  
[ 4 ] Anagnostou G, Kovar K. The face stability of slurry -shield-driven tunnel [ J ]. Tunnelling and Underground Space Technology,1994,9(2):165-174.  
[ 5 ] Anagnostou G, Kovar K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields [ J ]. Tunnelling and Underground Space Technology,1996,11(2):165-173.  
[ 6 ] Atkinson J, Potts D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil [ J ]. Geotechnique,1977,27(2):203-215.  
[ 7 ] 魏纲,贺峰. 砂性土中顶管开挖面最小支护压力的计算 [ J ]. 地下空间与工程学报,2007,3(5):903-908.  
(Wei Gang, He Feng. Calculation of minimum support pressure acting on shield face during pipe jacking in sandy soil [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2007,3(5):903-908. )  
[ 8 ] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[ D ]. 南京: 河海大学,2005.  
(Qin Jian-she. Study on face deformation and collapse of earth pressure shield tunnel [ D ]. Nanjing: Hehai University, 2005. )  
[ 9 ] Vermeer P A, Ruse N, Marcher T. Tunnel heading stability in drained ground[ J ]. Felsbau,2002,20(8):8-18.  
[ 10 ] Mahmoud A, Magued I. Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models [ J ]. Tunnelling and Underground Space Technology,2012,27:101-110.  
[ 11 ] Wolfgang F, Julian K, Ansgar K, et al. Uncertainty modeling and sensitivity analysis of tunnel face stability [ J ]. Structural Safety,2010,32:402-410.