

砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究

朱 伟¹, 秦建设^{1, 2}, 卢廷浩¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省建筑科学设计研究院, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 土压平衡式盾构施工中, 开挖面支护土压力控制是保证掘进顺利进行的关键, 利用能够考虑大变形的拉格朗日有限差分计算程序, 对砂土地层土压平衡式盾构施工中开挖面支护应力不足引起开挖面的变形及破坏问题进行了分析研究, 探讨了隧道开挖面变形及破坏问题, 为砂土地层中盾构开挖面控制压力的确定提供参考。

关键词: 盾构; 开挖面; 支护应力; 数值模拟

中图分类号: TU 43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)08-0897-06

作者简介: 朱 伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道盾构技术及环境工程研究。

Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand

ZHU Wei¹, QIN Jian-she^{1, 2}, LU Ting-hao¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Academy of Building Research and design, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The face stability control is a key operation during shield tunnel excavation. The study of supporting earth pressure in chamber takes a major role in the design of such kind of underground structures and many centrifugal-model tests have been carried out in recent years. A three dimensional fast Lagrangian differential finite element method which could reflect the large strain behavior of material was employed to simulate the deformation and failure of excavated face. Based on the numerical analysis, some insights were given and discussed.

Key words: shield; face stability; support earth pressure; numerical simulation

0 前 言

在城市市区内进行地铁、上下水管道、电力、通信、输气、共同沟以及地下道路的隧道工程中, 具有施工机械化程度高、对周围环境影响小, 施工快速等优势盾构施工技术近年来得到广泛应用^[1]。盾构施工对周围环境造成的影响与开挖面稳定程度密切相关, 施工中, 开挖面的稳定是通过压力舱的支护应力得以实现的, 开挖面支护应力过大将造成地表隆起破坏, 而压力过小, 容易导致地表沉陷甚至坍塌。在国内城市地铁隧道工程中, 由于开挖面支护应力不当造成的开挖面坍塌事故多次出现。

盾构隧道是典型的三维问题, 开挖面支护应力控制不当对周围地基产生的影响与支护应力大小、围岩条件及隧道几何状况等密切相关。同时, 土压力盾构施工中, 开挖面支护应力始终在一定范围波动, 而且其变幅大小与压力舱内土体塑性流动性密切相关, 这要求对土压式盾构开挖面稳定的研究不仅局限于极限状态下支护应力及破坏模式, 而且要求考虑支护应力波动值对周围地基产生的影响。

国内外学者通过物理模型试验对开挖面稳定问题

相关研究^[2~4]证明了砂土地层与粘土地层中开挖面破坏模式有所区别, 本文主要考虑砂土地层条件下开挖面稳定问题。

随着计算机技术及仿真技术的发展, 数值模拟计算可以模拟盾构法复杂的地下开挖施工过程^[5], 本文试图通过数值模拟计算来研究砂土隧道掘进中开挖面支护应力控制与开挖面稳定之间关系, 为盾构隧道开挖面支护应力控制提供建议。

1 围岩变形模拟计算方法

盾构隧道施工开挖面稳定研究主要包括不同地层条件下开挖面无支护或支护应力不够引起的开挖面坍塌破坏形式研究, 极限支护应力大小的确定及不同支护应力下盾构施工对周围地基产生的应力应变影响。

1.1 问题特殊性以及对数值计算的要求

正常盾构掘进过程中, 施工引起的地基变形量较少, 此时采用小变形分析理论是适宜的。本文主要研究盾构施工中开挖面支护应力控制不当所产生的开挖

收稿日期: 2004-10-14

面坍塌及地基过大变形问题,所以对数值模拟计算程序的要求首先能够反应岩土工程大变形问题^[6]。

1.2 计算方法基本原理

拉格朗日元方法遵循连续介质的假设,按时步积分求解,随着构形的变化不断更新坐标,允许介质有大变形,能够反应几何大变形问题。

通常的有限元数值模拟分析岩土工程中的破坏、失稳等问题时,经常采用把材料看成不连续介质的离散元。若当作连续介质进行分析往往会出现数学求解上的不稳定,而采用动态运动方程分析物体的平衡状态来分析连续介质的静力学问题可以避免上述现象。动态运动方程应用于连续介质的基本原理是计算荷载平衡方程被表示运动的动量平衡方程来代替,动量平衡方程所对应的解即为系统的静力解。

拉格朗日元方法遵循连续介质的假设,按时步积分求解,随着构形的变化不断更新坐标,允许介质有大变形,能够反应几何大变形问题,本文采用三维连续介质快速拉格朗日差分法^[7](FLAC3D)。

1.3 求解过程及本构关系

求解中将计算区域离散化,分成若干三维单元,单元之间由节点联结,节点平衡方程(运动方程)可以写成时间步长为 t 的有限差分形式。首先由节点的应力和外力(或速度)变化和时间步长利用虚功原理求节点不平衡力和速度,根据单元节点的速度变化和时段 t ,可求出单元之间的相对位移,进而求出单元应变,利用单元材料的本构关系即可以求出单元应力。在此基础上,求出单元之间的不平衡力,将不平衡力重新作用到节点上,再进行下一步的迭代过程,直到整个系统不平衡力足够小或节点位移趋于平衡为止。

莫尔-库仑破坏准则反应岩土材料的剪切破坏特性与实际破坏情况较为符合。本文计算中材料的破坏屈服采用莫尔-库仑剪切破坏准则,流动法则中应用不相关联的剪切屈服流动法则及相关联拉伸屈服流动法则。

2 数值模拟实例分析

土压式盾构隧道施工中,支护应力过大产生地表隆起给工程造成的危害相对较小,所以本文研究主要侧重于支护应力过小情况下对周围地基产生的影响。

2.1 计算实例

根据国内地铁盾构隧道土压式盾构法施工的一般情况,假定隧道开挖直径 D 为 6 m,隧道埋深 C 为 12 m。计算模型尺寸如下图 1 所示,除地表面为自由外,四周采用变形约束条件。计算中土体为莫尔-库仑材料,管片为 C50 钢筋混凝土弹性材料,厚度为 35 cm,

管片采用 LINER 结构单元模拟,材料参数如下表 1 所示。

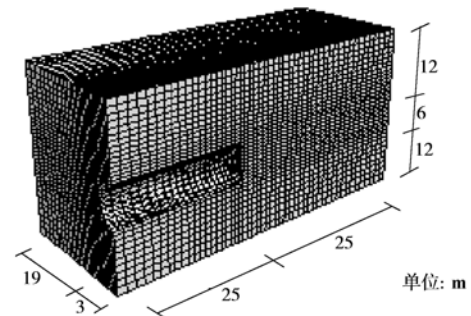


图 1 数值模拟计算模型示意图

Fig. 1 Sketch map for numerical simulation

表 1 计算材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料	密度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 (MPa)	泊松比	内摩擦角 ($^{\circ}$)	侧压力 系数
干砂	18	25	0.34	25	0.5
管片	24.5	3450	0.17	—	—

2.2 数值计算过程

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不同工况下开挖面支护应力变化对周围地基产生的影响,数值计算中,采取一次开挖到一定距离并施加支护结构后逐渐减小开挖面支护应力,研究周围土体压力应变与支护应力的关系。模拟过程如下:

(1) 建立原始砂土地层模型;

(2) 开挖隧道,并及时设置支护结构单元,同时在开挖面上施加大小与原始地层侧向静止土压力值相等的梯形支护作用力,迭代使模型达到平衡稳定状态;

(3) 开挖面支护应力以缓慢的速度逐渐减小,在此过程中追踪并记录开挖面前方土体的水平位移变化及感兴趣位置单元或节点的应力及变位情况;

(4) 当开挖面支护应力达到极限最小支护应力时,开挖面前方节点位移在支护应力变化很小的情况下急速发展,使得出现过大大变形,程序计算中止。

2.3 说明

数值计算中进行如下相关定义及处理。

(1) 为了描述方便,实际作用于开挖面的支护应力为梯形荷载,作者取隧道中心点支护应力值来代表开挖面支护应力大小,所以文中的开挖面支护应力统一指开挖面中心点施加的支护应力。

(2) 对于开挖面支护应力大小的衡量,引入支护应力比的概念:

$$\lambda = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中 σ_s 为开挖面中心点支护应力; σ_0 为隧道中心原始地层静止土压力。

(3) 结合压力舱尺寸及盾构一般掘进参数, 统一考虑滑动面往压力舱方向最大位移量达到 1 m 时作为开挖面破坏失稳的一个状态参考指标。

2.4 数值计算内容及结果

(1) 开挖面极限支护应力的确定

图 2 为支护应力比与开挖面中心点水平位移的关系曲线, 图 3 为支护应力与系统不平衡力关系曲线, 可以得到极限支护应力大小为 13.7 kPa (支护应力比为 0.1)。

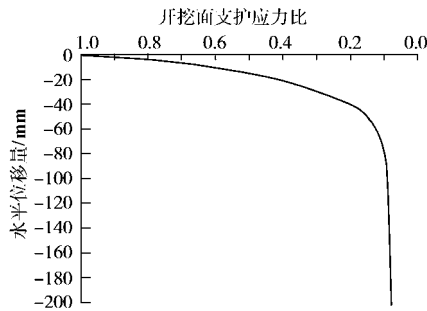


图 2 支护应力比与开挖面中心点水平位移关系

Fig. 2 The relation between support stress ration and horizontal displacement of face

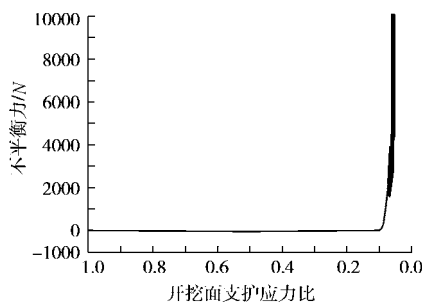


图 3 开挖面支护应力与系统不平衡力关系

Fig. 3 The relation between face support pressure and unbalance force

由图 2, 3 可知, 盾构隧道开挖面支护应力控制变化引起开挖面的变形与破坏表现为 3 个阶段, 第一阶段, 开挖面支护应力减小引起的开挖面变形较小; 第二阶段, 开挖面支护应力临近极限支护应力 (支护应力比 0.15 ~ 0.1), 此时支护应力的微略减小将导致开挖面发生显著的位移, 表现为变形对支护应力非常敏感; 第三个阶段, 开挖面支护应力低于临界值 (支护应力比小于 0.1), 开挖面发生破坏, 在支护应力不变的情况下变形还会继续发展。

(2) 支护应力大小对周围地基变位影响

与实际盾构掘进施工中的监测点布置相似, 通过关键部位点研究支护应力对隧道围岩变形的影响。

图 4 所示纵向地表沉降点为地表面沿着隧道中心纵向轴线上节点, 编号为 DZ0, DZ1, DZ2, DZ3, DZ4, DZ5, DZ6, DZ7, 其与开挖面的纵向距离及开

挖面发生破坏后纵向地表点沉降值如表 2 所示。

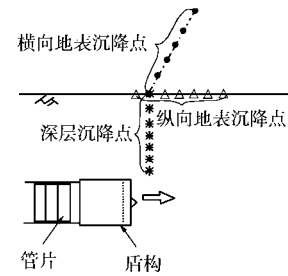


图 4 观察点位置示意图

Fig. 4 Schematic plan of observation points

表 2 开挖面失稳后纵向地表点沉降

点号	测点与开挖面纵向水平距离/m	沉降值/mm
DZ0	0	84.68
DZ1	1.34	109.6
DZ2	2.70	116.0
DZ3	4.20	100.4
DZ4	5.60	73.99
DZ5	7.10	47.69
DZ6	8.70	28.41
DZ7	10.3	16.03

由计算可知, 开挖面支护应力的减小将会引起地表前方一定距离产生沉降变形, 最大沉降发生在开挖面前方 3 m 左右。

为研究支护应力变化对地表横向沉降槽的影响, 记录开挖面前方 2.7 m (沉降量最大位置附近) 横断面地表点沉降量与开挖面支护应力关系, 不同支护应力下沉降曲线如图 5 所示。由图可见, 随着支护应力的减小, 地表点沉降量逐渐增大, 横向沉降槽形式符合 Peck^[8]建议的正态分布曲线。

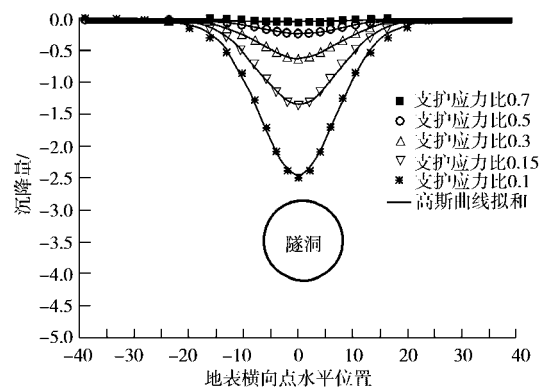


图 5 支护应力与地表沉降槽关系

Fig. 5 Influence of support pressure on transverse settlement trough

图 6 为开挖面失稳后深层测点沉降曲线, 由图可知, 开挖面支护应力不足引起地基沉降量在隧道顶部最大、地表最小。该工况下, 隧道顶部沉降量已经达到 500 mm, 而在地表表现仅为 100 mm, 沉降量的大

小与深度不成线性关系。

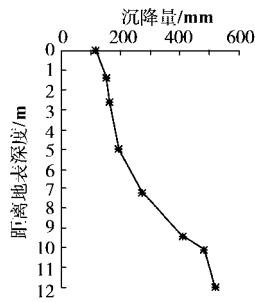


图 6 开挖面失稳后土体深层点沉降

Fig. 6 Subsurface settlements on face failure condition

(3) 开挖面破坏形式研究

开挖面破坏模式研究是确定防止开挖面破坏发生措施的前提, 隧道开挖面稳定分析对破坏模式的合理选定具有依赖型, 一定的开挖面破坏模式在一定程度上揭示了开挖面的变形破坏形态和机理, 反应了开挖面变形破坏的本质, 因而是稳定分析的基础。

开挖面失稳破坏后, 纵向沉降位移等值线如图 7 所示, 开挖面前方一定距离 (2.7 m) 横断面沉降等值线如图 8 所示。

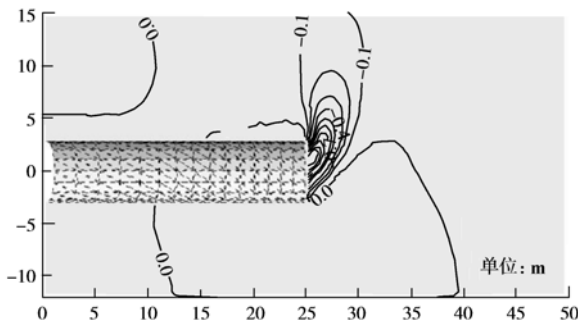


图 7 开挖面失稳后纵断面沉降等值线图

Fig. 7 Longitudinal surface settlement contour on face failure condition (unit: m)

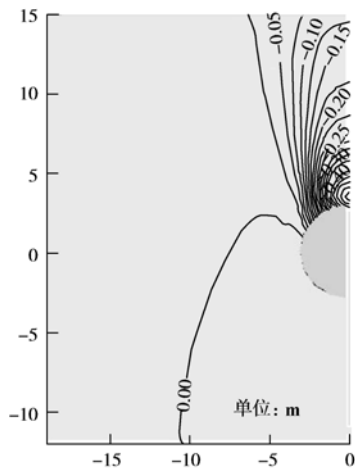


图 8 开挖面失稳后横断面沉降等值线

Fig. 8 Cross sectional settlement contour on face failure condition

由图 8 可知, 砂土地层开挖面破坏模式表现为在开挖面前方为楔形状, 在破坏区域顶部为烟囱状, 开挖面附近土体沉降量大于地表, 破坏由开挖面顶部向地表逐渐发展。

3 开挖面变形与破坏影响因素分析

盾构施工中, 隧道的直径及埋深大小, 开挖面地层条件等都对开挖面支护应力引起的开挖面变形与破坏问题产生一定的影响, 基于此原因, 笔者对隧道条件及土层参数进行相关敏感性分析。

3.1 隧道埋深的影响

在隧道直径 D 为 6 m 情况下, 研究上覆土层厚度 C 分别为 6, 9, 12, 18, 22 m 情况下支护应力减小引起开挖面附近土体变位情况。

不同埋深下, 开挖面支护应力比与开挖面中心点水平位移关系如图 9 所示, 结合支护应力比与系统不平衡力的变化, 可以得到不同埋深下的极限支护应力结果如表 3 所示。

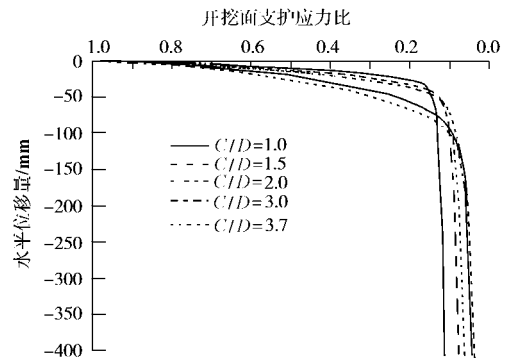


图 9 不同隧道埋深下支护应力比与开挖面中心点水平位移关系

Fig. 9 The relation between support stress and face horizontal displacement with

表 3 不同埋深下开挖面极限支护应力值

Table 3 Influence of tunnel depth on limiting support pressure

埋深/m	6	9	12	18	22
极限应力比	0.157	0.121	0.101	0.083	0.074
极限应力/kPa	12.7	13.1	13.7	15.6	16.7

根据上述所得最大地表沉降点都在开挖面 3 m 左右这一结果, 求得不同埋深条件下开挖面支护应力比与纵向地表点 DZ2 (开挖面前方 2.77 mm 位置) 沉降关系如图 10 所示。

不同埋深下开挖面失稳后开挖面前方 2.77 m 地表横向测点沉降及高斯曲线拟和结果如图 11 所示。

由上述计算, 可以得到以下认识:

- (1) 同样隧洞直径下, 随着埋深的增大, 开挖面

极限支护应力随埋深略有增加；

(2) 当开挖面支护应力比大于 0.15 时，无论埋深多大，开挖面可以满足稳定，同时，相同的支护应力比下，开挖面水平位移量随着埋深的增大而增大，当支护应力比小于 0.15 浅埋地层开挖面首先发生破坏。

(3) 由不同埋深下地表点沉降与开挖面支护应力比关系可知，当开挖面支护应力比可知控制在 0.15 ~ 1.0 之间时，应力释放引起的地表沉降较小，最大值不超过 4 mm，符合一般工程要求，当其值达到小于 0.15 时，开挖面失稳，其影响显著，所以可以建议其支护应力取值大于 0.15 施工中可以满足施工要求。

(4) 由图 11 横向地表沉降槽计算结果表明，随着埋深的增大，地表沉降量快速减小，但沉降槽曲线皆符合高斯曲线形式。

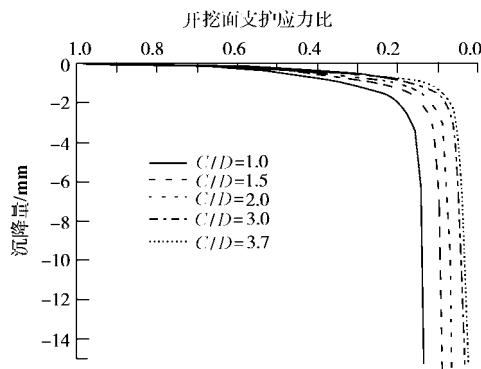


图 10 不同埋深地表点沉降与支护应力比关系

Fig. 10 The relation between support stress and subsidence with different values of tunnel depth

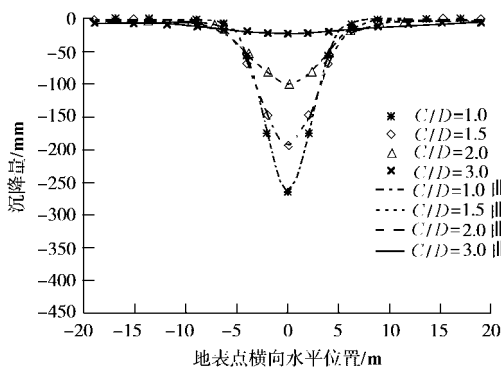


图 11 开挖面失稳后地表沉降槽曲线

Fig. 11 The transverse settlement troughs on face failure condition

3.2 隧道洞径对开挖面支护应力的影响

为研究隧道直径对开挖面支护应力控制的影响，计算了隧道中心埋深为 15 m 及 25 m 相同条件下，直径为 6、8 及 10 m 三种工况下开挖面支护应力变化与周围地基变位关系，开挖面极限支护应力与隧道直径关系如图 12 所示。

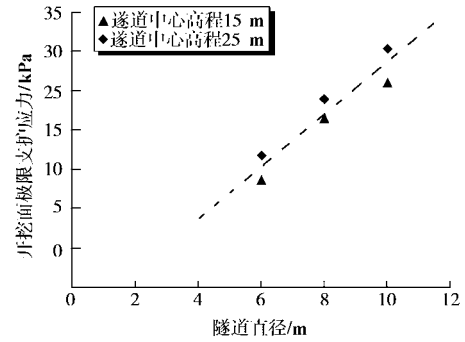


图 12 隧道直径与开挖面极限支护应力关系

Fig. 12 Influence of tunnel depth on limiting support pressure

由图 12 可知，同样的埋深条件下，随着隧洞直径的增大，开挖面极限支护应力呈线性增大。

在隧道中心埋深为 25 m，10 m 直径下，开挖面失稳后地表纵向测点位置及沉降量如下表 4 所示。由计算可以得到 10 m 洞径条件下地表纵向最大沉降发生在开挖面前方 5 m 左右，结合表 2 中 6 m 洞径研究结果可知，开挖面压力不足引起地表最大沉降点的位置与隧洞直径大小关系很大，与埋深关系不大，地表最大沉降点位置一般在开挖面前方半个洞径距离处。

表 4 10 m 直径开挖面失稳后纵向地表点沉降

Table 4 Longitudinal surface settlement curve on face failure

condition (D=10 m)		
点号	测点与开挖面纵向水平距离/m	沉降值/mm
D0	0	72.15
DZ1	1.6	80.43
DZ2	3.3	85.28
DZ3	4.9	85.55
DZ4	6.6	81.19
DZ5	8.3	73.45
DZ6	10.1	63.05
DZ7	11.9	51.09

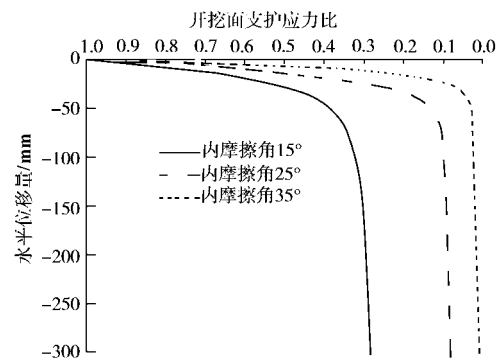


图 13 支护应力比与开挖面中心点水平位移关系

Fig. 13 The relation between support stress and face horizontal displacement

3.3 砂土内摩擦角的影响

砂土材料性质对开挖面稳定的影响研究主要侧重于内摩擦角的影响分析。在 3.1 节所述实例中取不同摩擦角砂土材料进行数值分析，不同摩擦角砂土中支护应力比与开挖面中心土体水平位移关系如图 13 所

示, 结合系统不平衡力可得不同内摩擦角砂土中开挖面极限支护应力及应力比如下表 5 所示。由计算可知, 同样的隧道条件下, 随着内摩擦角的增大, 开挖面极限支护应力减小。

表 5 不同内摩擦角下开挖面极限支护应力值
Table 5 Influence of soil friction angle on limiting support pressure

内摩擦角 /(°)	极限支护应力 /kPa	支护应力比
15	35.2	0.326
25	13.1	0.121
35	6.5	0.060

4 结 论

本文利用数值模拟计算对砂土地层盾构隧道中开挖面支护应力变化引起周围土体的变形及破坏问题进行了研究, 得到以下认识:

(1) 开挖面极限支护应力远小于土体原位静止土压力, 随着埋深的增大, 开挖面支护应力的设定可以不考虑过大的埋深影响。

(2) 盾构隧道开挖面失稳时开挖面附近破坏区域呈楔形状, 其上为烟囱状, 当埋深较大时, 开挖面破坏发展不到地表面, 由于土体拱作用的存在, 开挖面破坏表现为局部破坏。

(3) 同样的地层及埋深条件下, 随着隧道洞径的增大, 开挖面极限支护应力增大, 所以在考虑盾构隧道开挖面稳定问题时, 要顾及到隧道直径大小;

(4) 数值计算能够模拟复杂的施工过程, 能够考

虑更多的开挖面压力施加方式, 应用于盾构隧道开挖面稳定研究具有推广意义。

参考文献:

- [1] 尹旅超, 朱振宏, 李玉珍, 等译. 日本隧道盾构新技术[M]. 湖北: 华中理工大学出版社, 1999.
- [2] Mair R J, Taylor R N. Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment[J]. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997, 2353 - 2385.
- [3] 周小文, 濮家骊. 砂土中隧洞开挖引起的地面沉降试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 559 - 563.
- [4] Atkinson J H, Potts D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1997, 27(2): 203 - 215.
- [5] Stallebrass S E, Grant R J, Taylor R N. A finite element study of ground movements measured in centrifuge model tests of tunnels[A]. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground[C]. Rotterdam: Balkema, 1996.
- [6] 王来贵, 黄润秋, 张倬元. 岩石工程失稳破坏及其研究思路与方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 599 - 601.
- [7] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D: Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions - theory and background[M]. 2002.
- [8] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[A]. 7th Int Conf SMFE[C]. Mexico City, 1996, 225 - 290.
- [9] 于 宁, 朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 292 - 296.

殷建华教授荣获国际岩土力学计算方法与进展协会 2005 年度杰出贡献奖

2005 年 6 月 19 ~ 24 日, 第 11 届国际岩土力学计算方法与进展协会国际会议 (11th Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics - IACMAG) 在意大利历史名城都灵 (Turin) 隆重召开, 香港理工大学土木与结构工程系殷建华教授荣获“国际岩土力学计算方法与进展协会”(IACMAG) 2005 年度地区杰出贡献奖。该协会的主席德赛教授 (Professor CS Desai) 和第 11 届国际会议主席巴拉教授 (Professor G Barla) 向殷建华

教授颁发了该奖精美的证书和金色圆形奖牌。巴拉教授说: “给殷建华博士 2005 年度杰出贡献奖, 是表彰他在岩土力学领域发展和应用弹粘塑性本构模型、计算方法和开发新的试验设备三方面的杰出贡献”。IACMAG 是岩土力学计算方法与进展的国际性学术组织, 协会系列会议和杰出贡献奖评选每四年才举行一次。

(中国科学院武汉岩土力学研究所 孔令伟 供稿)