

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0511-05

黏土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究

秦建设¹, 虞兴福², 钟小春³, 朱伟⁴

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 杭州 31003; 2. 浙江省建筑科学设计研究院有限公司, 杭州 310012;
3. 河海大学 土木工程学院, 南京 210098; 4. 河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 开挖面支护应力的控制是土压平衡式盾构施工成功的关键。利用能够考虑大变形破坏的拉格朗日有限差分计算程序, 对土压平衡式盾构在黏土地层施工中, 因开挖面支护压力控制不当引起的开挖面的变形及破坏问题进行计算分析, 探讨了开挖面变形及破坏模式, 分析了开挖引起的周围土体应力释放问题, 为黏土地层中盾构开挖面控制压力的确定提供参考。

关键词: 土压盾构; 黏土地层; 开挖面稳定; 支护应力; 应力释放

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Numerical research on face movement and collapse of shield tunneling in silt ground

QIN Jian-she¹, YU Xing-fu², ZHONG Xiao-chun³, ZHU Wei⁴

(1. Hangzhou Metro Co. Ltd. Hangzhou 310003, China; 2. Zhejiang Academy of Building Research & Design Co. Ltd., Hangzhou 310012, China;
3. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. College of Environmental Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The face support pressure control is a key operation during earth pressure balanced shield excavation. Three-dimensional fast Lagrangian differential finite element method can calculate the large strain of material, which is used to simulate the influence of face support pressure to face movement and collapse. Deformation and collapse pattern is discussed, and the soil stress release is analyzed due to shield excavation. Some useful results from numerical simulation are given for controlling face support pressure.

Key words: earth pressure balanced shield; silt soil; face stability; support pressure; stress release

1 引言

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、施工快速等优势的盾构施工技术近年来得到了广泛应用^[1]。盾构施工对周围环境造成的影响与开挖面的稳定密切相关, 在施工中, 开挖面的稳定是由压力舱的支护压力抵抗开挖面前方地层的土、水压力来实现的, 支护压力过大将造成地表隆起破坏; 而支护压力过小, 又容易导致地表沉陷甚至坍塌。国内外城市地铁隧道工程中, 由于开挖面支护压力控制不当造成的开挖面坍塌事故曾多次出现, 所以压力舱的支护压力必须控制在一定范围内, 才能保证对

周围环境的影响降到最低程度。

盾构隧道是典型的三维问题, 开挖面支护压力控制不当对周围地基产生的影响与支护压力大小、围岩条件及隧道几何状况等密切相关。同时, 在盾构施工中, 开挖面支护压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的相关研究^[2-4]证明了砂土地层与黏土地层中开挖面破坏模式有所区别, 本文主要考虑黏土地层条件下开挖面稳定问题。

随着计算机仿真技术的发展, 数值模拟计算可

以模拟复杂的盾构开挖施工过程^[5], 本文通过数值模拟计算来研究盾构在黏土地层中掘进时, 开挖面支护压力控制与开挖面稳定之间关系, 为盾构隧道施工中压力舱的支护压力控制提供建议。

2 数值模拟

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压力不够引起的开挖面坍塌破坏面形式研究、极限支护压力大小的确定及不同支护压力下盾构施工对周围地基产生的应力、应变影响。正常盾构掘进过程中, 施工引起的地基变形量都较小, 此时采用小变形分析理论是合理的。本文主要研究盾构施工中支护压力控制不当所产生的开挖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映岩土工程大变形问题。另外, 支护压力不足引起的坍塌属于破坏研究范畴, 必须选择一个能够模拟岩土体结构破坏及变形发展的数值计算方法^[6]。

2.1 大变形计算程序

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, 能够反映大变形问题。FLAC^{3D}^[7]使用离散模型方法、显式动态松弛方法和拉格朗日有限差分方法技术, 从而将连续介质的动态演化过程转化为离散节点的运动方程和离散单元的本构方程进行求解, 能够模拟岩土体及结构物在外力作用下达到屈服后所表现的特性, 能够精确地模拟塑性破坏及塑性流动。

2.2 数值模型本构方程

数值模拟计算中采用莫尔-库仑材料的本构模型和莫尔-库仑破坏准则来反映黏土材料的力学性质和剪切破坏特性。材料的屈服判断应用剪切屈服函数及不相关联流动法则, 同时破坏包络线采用满足相关联流动法则的拉伸屈服函数。

2.3 数值模拟方案设计

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压力变化对周围地基产生的影响, 故在数值计算中采取一次开挖到一定距离并施加管片支护结构后, 研究开挖面支护压力变化对周围地基的影响。模拟中通过在开挖面施加特定形式的支护压力, 并逐渐减小支护压力, 研究开挖面周围土体应力、应变与支护压力的关系, 模拟过程如下:

(1) 建立原始黏土地层模型, 施加边界条件, 在初始应力条件下使系统达到初始应力平衡条件,

模拟原始地层的应力状态;

(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矩形支护作用力, 使模型达到平衡稳定状态;

(3) 支护压力以非常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位移变化及监测点处单元或节点的应力及变位情况;

(4) 当开挖面支护压力达到最小极限支护应力时, 开挖面前方节点位移在支护应力变化很小的情况下快速发展, 直到出现过大大变形, 则认为开挖面已经坍塌, 中止程序计算。

3 建模与监测点布置

3.1 建模

计算中隧道开挖直径为 6 m, 埋深为 12 m, 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, LINER 结构单元能够反映土体与管片的接触作用, 黏土材料取值参照上海、杭州地区成因, 为三角洲相软土^[8], 材料参数见表 1。

表 1 材料参数
Table 1 Mechanical parameters of material

材料	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比	凝聚力/kPa	摩擦角/(°)
软黏土	17.9	2.85	0.2	6	18
管片	24.5	3450	0.17	/	/

计算模型如图 1 所示, 模型地表面为自由边界, 底部为固定边界条件, 四周为法向位移约束边界条件。

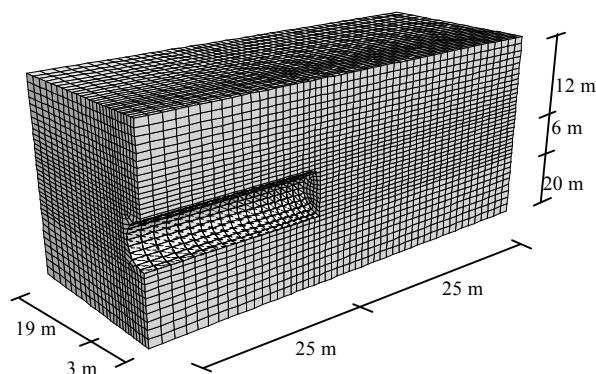


图 1 数值计算模型示意图
Fig.1 Sketch map of numerical simulation

3.2 监测点布置

盾构施工对周围环境影响主要侧重于周围地基变位情况, 尤其是地表沉降。与实际盾构掘进施工中的监测点布置相似, 笔者通过监测关键部位点沉

降低随支护压力变化的影响来研究,如图2所示。通过监测隧道开挖面附近周围土体单元应力随着开挖面支护应力减小的变化情况来研究支护应力不足引起地基应力释放问题,如图3所示。

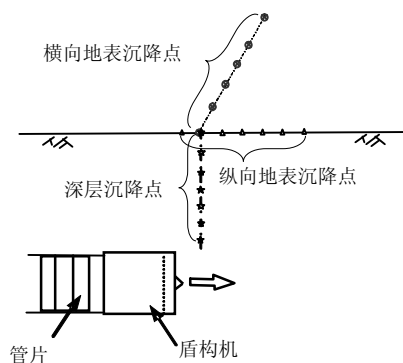


图2 位移测点位置示意图

Fig.2 Schematic plan of displacement observation points

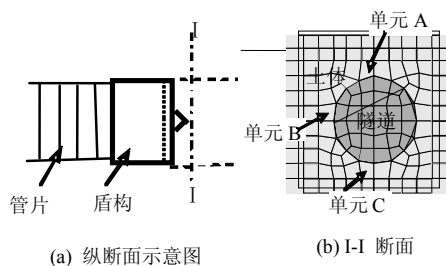


图3 应力测点位置示意图

Fig.3 Schematic plan of stress observation points

3.3 一些说明

(1) 实际作用于开挖面上的支护压力为梯形荷载,笔者取隧道中心点支护压力值来反映开挖面支护应力大小。

(2) 笔者提出支护应力比的概念来反映开挖面支护压力的大小。

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

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) 开挖面失稳后,土体将会往压力舱方向滑动,为方便对破坏后开挖面相关问题研究,结合盾构机压力舱的尺寸,笔者在统一考虑开挖面失稳后,提供一定超排土量作为开挖面破坏失稳后的一个状态参考指标。

(4) 为了研究开挖面支护应力比的变化对周围地基的影响,笔者在计算中通过相关位置的节点或单元信息来说明问题,文中的测点均指数值计算中的节点或单元。

4 黏土地层开挖面变形与破坏研究

4.1 开挖面极限支护应力的确定

开挖面支护压力不足引起围岩应力释放导致地基变形,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应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。开挖面支护应力变化与开挖面中心点朝向压力舱方向水平位移之间的关系如图4所示。计算结果表明,随着开挖面支护应力的逐渐减小,开挖面前方土体水平位移量逐渐增加,当支护应力下降到一定程度,开挖面水平位移量急剧增大,此时认为开挖面失去稳定,即可得到最小极限支护应力约为 10 kPa (支护应力比为 0.05)。

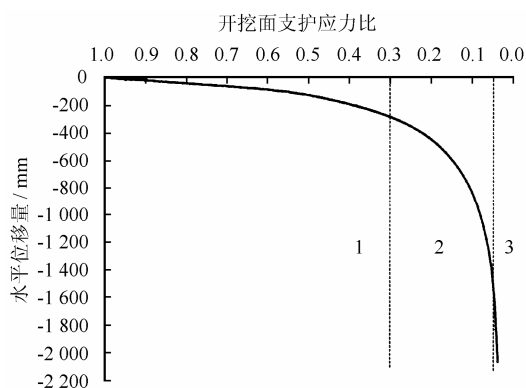


图4 支护应力比与开挖面中心点水平位移关系

Fig.4 The relation between support stress ratio and horizontal displacement of face

黏土开挖面前方土体的变形表现为3个阶段,第1阶段,开挖面支护应力满足保持开挖面稳定的要求(支护应力比为1~0.3),此时,支护应力减小变化引起开挖面的变形量增长较小;第2阶段,开挖面支护应力临近极限支护应力(支护应力比为0.3~0.05),此时,开挖面支护应力的微小变化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3个阶段,开挖面支护应力超过临界值(支护应力比小于0.05),开挖面发生失稳破坏,破坏在支护应力不变的情况下位移还会继续发展。

4.2 支护应力大小对周围地基变位影响

图2中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,编号由左向右依次为: 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。开挖面失稳后纵向地表沉降点沉降曲线如图5所示。支护应力变化引起的纵向地

表沉降曲线呈限类似横断面沉降槽型式的正态曲线分布,地表最大沉降位于开挖面前方 3 m 左右。

表 2 开挖面失稳后纵向地表点沉降值

Table 2 Longitudinal subsidence on face failure condition

点号	测点距开挖面纵向水平距离/ m	沉降值/ mm
DZ0	0	30.1
DZ1	1.34	33.8
DZ2	2.70	34.9
DZ3	4.20	35.1
DZ4	5.60	33.7
DZ5	7.10	29.8
DZ6	8.70	26.1
DZ7	10.3	21.9

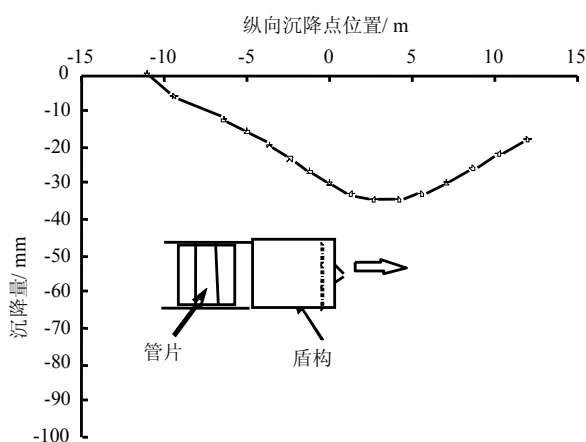


图 5 地表纵向沉降曲线

Fig.5 The surface longitudinal settlement curve

图 6 为开挖面支护应力比与纵向地表点沉降关系曲线,二者呈抛物线关系,地表沉降量随支护压力的变化与开挖面前方土体变化具有相似的规律,同样表现为 3 个阶段。

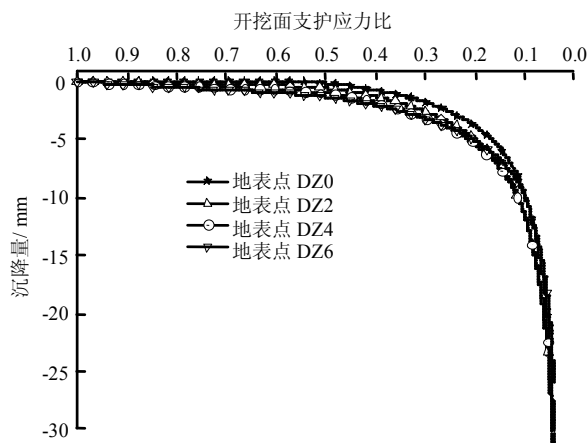


图 6 支护应力与纵向地表沉降点关系

Fig.6 The relationship of support pressures and longitudinal surface settlement points

4.3 开挖面破坏形式研究

软黏土地层开挖面失稳后隧道围岩纵断面位移矢量及等值线如图 7,开挖面前方一定距离 (2.7 m) 横断面位移矢量及等值线如图 8 所示。由图可知,软黏土地层开挖面破坏模式表现为一种近似的“鼓出型”,开挖面前方滑动体的倾角较小,而在开挖面上方其变形影响范围较大。同时,大变形计算表明,随着开挖面前方土体往压力舱内的位移,上部土体开始沉降的同时,下部土体出现较为明显的隆起,也对开挖面前方滑动体的倾角产生一定的影响。

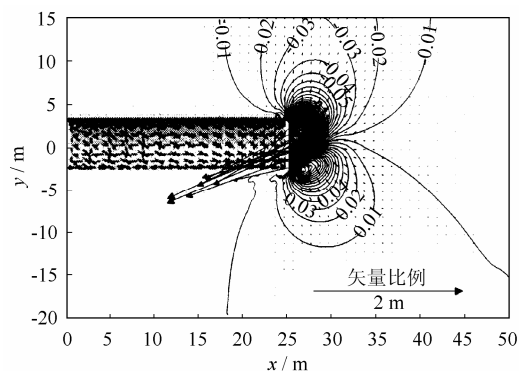


图 7 纵断面沉降等值线及位移矢量图 (单位: m)

Fig.7 Displacement contours and vectors of longitudinal section(unit: m)

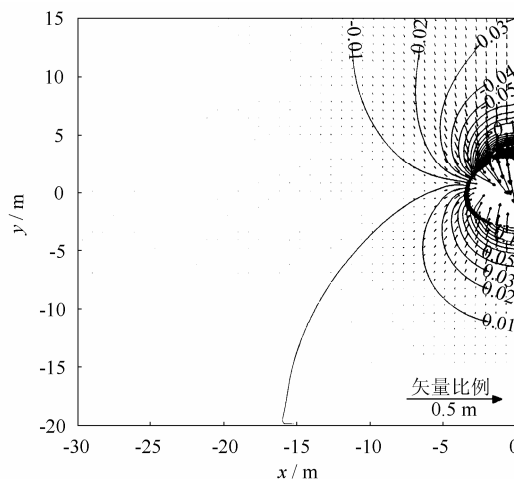


图 8 横断面沉降等值线及位移矢量 (单位: m)

Fig.8 Displacement contours and vectors of transverse section(unit: m)

4.4 开挖引起应力释放研究

在盾构开挖过程中将会对周围土体产生扰动,产生应力释放。对开挖引起的应力释放通常考虑为支护应力不足及盾尾壁后注浆引起的应力释放两部分,其中对开挖面支护应力小于原有地应力引起的应力释放通常在计算中通过设定某一假定的应力释放率来考虑^[9]。本文通过监测随开挖面支护应力的变化,开挖面附近土体单元的应力及应变的变化情

况,为研究因开挖引起的应力释放规律提供参考。图3所示的单元竖向应力及水平应力随开挖面支护应力比的变化情况如图9、图10所示。由图可知:

(1)随着开挖面支护应力的逐渐减小,开挖面周围土体的竖向应力变化与单元位置有关,在隧道顶部(测点A)及底部(测点C)表现为应力减小,而在隧道断面水平位置(测点B)表现为极限压力许可范围内应力增加,临近极限支护应力时,应力快速释放;

(2)在极限支护应力允许范围内,支护应力减小引起周围土体的应力释放在竖向和水平向不均等,竖向应力释放率大于水平向应力释放率;

(3)在极限支护应力范围内,由于开挖面支护应力不足引起的应力释放率一般在20%以内。

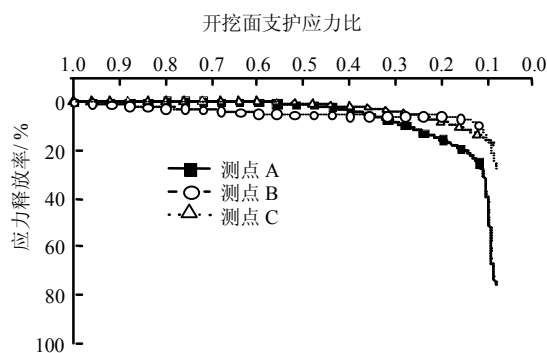


图9 水平向应力释放率与支护应力比关系

Fig.9 The relationship of horizontal stress release ratio and support stress ration

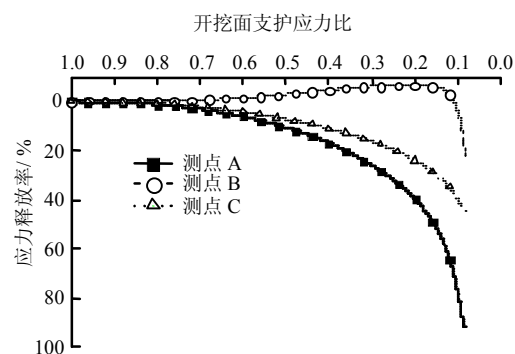


图10 竖向应力释放率与支护应力比关系

Fig.10 The relationship of vertical stress release ratio and support stress ration

5 结 论

利用数值模拟计算对盾构隧道中不同工况下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)盾构施工中开挖面极限支护应力远小于土体原位静止土压力。

(2)盾构隧道开挖面支护应力控制与隧道围岩

变形表现为3个阶段,第1阶段支护压力波动对土体变形影响不敏感阶段;第2阶段,开挖面支护应力敏感阶段;第3个阶段,支护压力失效阶段。

(3)黏土开挖面失稳表现为“鼓出型”,开挖面失稳影响区域较大。由于土拱作用的存在,开挖面破坏表现为局部破坏,使开挖面坍塌未发展到地表,此时单纯的地表沉降监测数据并不能反映这种情况。此时要结合出土量及支护压力等控制开挖面稳定。

(4)隧道开挖会引起周围地基应力释放,从而影响周围土体的应力状态,随着开挖面支护应力的减小,开挖面周围土体的应力释放情况在隧道环向各个不同位置表现为不同的释放率情况,该结果可对数值模拟计算中开挖面应力释放率的确定提供参考。

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[A]. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*[C]. Rotterdam: [s. n.], 1997. 2 353—2 385.
- [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]. *Geotechnique*, 1977. 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[M]. Rotterdam: Balkeman A A, 1996. 595—619.
- [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. Fast Lafrangain Analysis of Continua in 3 Dimensions—Theory and Background[M]. America: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.
- [8] 岩土工程手册编写委员会.岩土工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [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.