

# 软黏土地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验研究<sup>\*</sup>

付亚雄<sup>1,2</sup>, 贺雷<sup>3</sup>, 马险峰<sup>4</sup>, 郑宏<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052;  
3. 中国电力科学研究院有限公司 输变电工程研究所, 北京 100055; 4. 同济大学 岩土及地下工程  
教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**针对软黏土地层中隧道开挖面稳定性开展离心模型试验, 由远程控制模型推进模拟隧道开挖面被动渐进破坏。通过数字图像处理分析技术对开挖面被动渐进破坏模式进行了探究, 结合相应数值模型对比, 分析了开挖面极限支护压力以及地表变形规律。研究结果表明: 在开挖面被动破坏状态下, 隧道仰拱处首先出现与水平方向近似成  $45^\circ + \varphi/2$  向上发展的滑动破裂带, 当其发展接近隧道拱顶时, 拱顶滑动破裂带形成, 两滑动破裂带呈漏斗状向上逐步发展至地表; 随着模型向前推进, 开挖面压力前期呈现线性快速增长趋势, 随后土压力增速逐步减小, 开挖面压力值最终趋于稳定, 分析确定软黏土地层开挖面被动破坏状态下的支护压力可控制在 1~1.9 倍的静止土压力; 开挖面被动破坏会引起前方地表产生隆起。

**关键词:** 软黏土; 盾构隧道; 开挖面稳定; 离心模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0387-07

## Centrifuge Model Tests on Face Stability of Shield Tunneling in Soft Clay

Fu Yaxiong<sup>1, 2</sup>, He Lei<sup>3</sup>, Ma Xianfeng<sup>4</sup>, Zheng Hong<sup>1</sup>

1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P.R. China; 2. China Electric Power Equipment and Technology Co., Ltd., Beijing 100052, P.R. China; 3. Power Transmission and Transformation Engineering Research Institute, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, P.R. China;  
4. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China)

**Abstract:** A centrifuge model test is conducted for stability analysis of tunnel face in soft clay by using remote control of the tunnel face model to simulate progressive passive failure of the tunnel face. Through the digital graphic processing technique, the progressive passive failure model of the tunnel face is depicted. In addition, combined with corresponding numerical simulation, the limit support pressure and laws of surface deformation are studied. The results show that: under the condition of the passive failure model of the tunnel face, the first slide fracture zone which makes an angle of  $45^\circ + \varphi/2$  to horizontal direction develops upward from the tunnel invert. When it draws near the tunnel vault, the second slide fracture zone develops from the tunnel vault, and the two slide fracture zones propagate in funnel-shape up to surface. As the tunnel face model moves forward, the monitoring pressure on the tunnel face increases linearly in earlier stage, then it grows slower, and finally approaches stable. The limit support pressure with passive failure model of the tunnel face in soft clay can be controlled in range 1~1.9 times of earth pressure at rest. The passive failure damage of tunnel face may cause ground heave.

**Keywords:** soft clay; shield tunnel; face stability; centrifuge model test

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-09-25(修改稿)

作者简介: 付亚雄(1991-), 男, 河北邢台人, 硕士生, 主要从事地下隧道工程方面的研究。

E-mail: gladxiongcame@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51538001); 国家 973 项目(2014CB047100)

## 0 引言

随着当前城市地铁以及市政工程的大规模建设,盾构施工广泛应用与地下隧道建设中。当盾构机掘进时,需要在前部开挖面上施加一定的支护压力以维持开挖面稳定<sup>[1]</sup>。支护压力控制不当会导致开挖面失稳破坏,影响周围管线的安全运行,甚至引起地表产生隆起或大面积沉降,邻近建构筑物开裂、倾斜,严重影响隧道施工安全<sup>[2]</sup>。因此,维持隧道开挖面稳定是盾构施工技术的关键。

国内外学者对隧道开挖面稳定进行了一系列的试验研究,主要以离心机试验和模型试验为主。Chambon 等<sup>[3]</sup>针对砂性土质隧道开挖面开展离心机试验,探究了开挖面最小极限支护压力,试验表明,砂土开挖面失稳呈烟囱状塌陷破坏模式;周小文等<sup>[4]</sup>通过离心机试验研究了不同埋深、含水率状态下的砂土隧道中开挖面支护压力与地层沉降的关系;Kamata 等<sup>[5]</sup>的离心机试验记录了砂土隧道开挖面由底部渐进向上发展的破坏模式;Oblozinsky 等<sup>[6]</sup>开展细粒砂土地层开挖面稳定离心试验,通过减小控制支护压力研究开挖面破坏区域;Kirsch<sup>[7]</sup>在 1g 条件下开展了小比例尺隧道开挖面模型试验,研究表明砂土开挖面的破坏区域可逐渐发展至地表;Idinger 等<sup>[8]</sup>对松散干砂土层开挖面稳定进行了小比例尺离心试验,结果表明当开挖面失稳时,破坏区域两侧滑动面近似平行发展,与水平方向夹角为  $45^\circ + \varphi/2$ ;Ahmed 等<sup>[9]</sup>采用透明砂土材料,对比研究了 4 种不同埋深比下作用变化支护压力时开挖面土体的变形,试验表明随着支护压力减小开挖面前部呈现烟囱状破坏模式;Chen 等<sup>[10]</sup>通过大比例尺模型试验对不同埋深下的干砂隧道开挖面稳定进行了研究,认为开挖面随着塌落拱发展,可分为局部破坏和整体破坏;Soranzo 等<sup>[11]</sup>用不饱和砂性土开展离心机试验,分析了饱和度对隧道开挖面稳定性影响规律;汤旅军等<sup>[12]</sup>通过 3 种不同埋深比的离心机试验对密实砂土地层开挖面稳定进行了研究,提出楔形体+棱柱体的开挖面破坏模式;吕玺琳等<sup>[13]</sup>对粉砂地层开挖面稳定进行了离心模型试验,探究了干粉砂与饱和粉砂的开挖面破坏特性和极限支护压力。

现有隧道开挖面模型试验主要针对砂土地层开展,且研究开挖面主动破坏较多。Mair 等<sup>[14]</sup>对

黏性土质隧道的开挖面离心模型试验表明,土体粘聚力使黏性土质隧道开挖面失稳破坏不同于砂性土隧道,因此有必要在黏土地层隧道中开展开挖面稳定性离心试验研究。

本文利用自主设计加工的离心模型试验装置,在离心条件下远程控制隧道开挖面推进,对软黏土地层隧道开挖面被动破坏模式和开挖面支护压力进行了探究。通过数字图像处理技术,分析了开挖面模型推进过程中前部土体的位移场变化,结合相应数值模拟对比研究了开挖面支护压力以及地表变形规律。

## 1 离心模型试验

### 1.1 离心试验原理

土工离心模型试验的基本原理是将模型尺寸缩小至原型的  $1/n$ ,由离心机高速旋转生成的高离心力场将模型上的体积力增大  $n$  倍,使模型与原型各相应点达到应力应变相同,变形相似的状态,从而能通过对离心机中模型状态的监测来预测原型的性状变化规律。由相似原理可得模型与原型各物理量的相似准则<sup>[15]</sup>,各物理量相似比见表 1。

表 1 离心模型中物理量相似比

Table 1 Similarity parameters of the centrifuge model

物理量	相似比 (模型/原型)	物理量	相似比 (模型/原型)
位移	$n$	质量	$n^3$
面积	$n^2$	密度	1
体积	$n^3$	时间	$n^2$
应力应变	1	弹性模量	1

### 1.2 试验设备

试验在上海同济大学岩土及地下工程重点实验室开展,采用 TLJ-150 复合型岩土离心试验机,其最大离心能力  $150\text{ g} \cdot \text{t}$ ,最大加速度  $200\text{ g}$ ,有效旋转半径为  $3.0\text{ m}$ ;土压传感器采用专业土工离心试验传感器,埋入土体后对内部应力场影响小,测量精度  $\pm 1\% \text{FS}$ 。

### 1.3 模型比率选择

根据试验目的和模型箱尺寸,并综合 TLJ-150 复合型岩土离心试验机的机械工作条件,确定试验模型比率为 50,即离心机稳定运转加速度为  $50\text{g}$ 。

1.4 模型准备

试验土箱采用厚 10 mm 的合金钢板焊接而成,外侧设置横向钢支撑与模型箱连接,防止离心机高速运转下钢板产生不利变形,钢板接缝处用防水胶密封。为便于观察土箱内部土体位移情况,在土箱正面采用厚 40 mm 的透明有机玻璃板固定,内腔尺寸为 520 mm×320 mm×660 mm(长×宽×高)。

根据试验土箱尺寸以及相似比率,隧道模型采用力学性能稳定的半圆筒型铝合金材料制作,并紧贴透明有机玻璃板面;在半圆筒隧道模型内设置厚 40 mm 的半圆金属块模拟掘进机,并在顶进面布置 2 个土压传感器,金属块通过金属杆与伺服电机相连,由远程开关控制金属块顶进,从而模拟开挖面连续向前推进;试验中为防止泥水进入隧道模型,在其外侧采用厚 6 mm 的乳胶膜包裹,由金属条将乳胶膜和防水条固定在有机玻璃和土箱钢板凹槽中,提高防水效果。隧道模型具体参数见表 2。

表 2 隧道模型参数

Table 2 Parameters of tunnel model				
参数	埋深/cm	内径/cm	长度/cm	管厚度/mm
隧道	24	6	15	2

1.5 试验过程

(1)试验土体采用取自现场的上海软土,经粉碎浸泡后,在搅拌机内抽真空搅拌得流塑状的重塑土,然后在自重和 20 kPa 压力下固结 10 天。

(2)在试验土箱内壁铺设聚四氟乙烯薄膜,以减小土体与内壁摩擦;箱底部铺设 30 mm 厚黄砂层并在其他侧板打孔粘贴透水石,模拟排水条件;有机玻璃板面上采用清洁液粘贴面条并撒黄砂层标记。根据试验规程,将初步固结的重塑土分层击实,铺设至试验土箱内指定高度。

(3)将模型箱装机后,根据试验工作条件布置土压传感器、激光位移计以及定点摄像系统。试验模型整体如图 1 所示,传感器位置具体分布如图 2 所示。

(4)使土体在 50g 离心场中排水固结,定期测定土层厚度和强度,要求固结度达到 95% 以上。试验间歇期使用塑料薄膜覆盖土体,固结达到要求后,采用 T-bar 测量土体力学性质,具体参数见表 3。



图 1 隧道开挖面离心试验模型  
Fig. 1 Centrifuge model of tunnel face

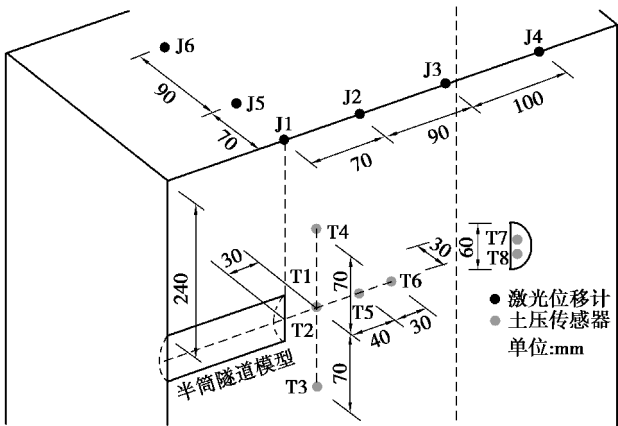


图 2 土压传感器和激光位移计分布图  
Fig. 2 Distribution schematic of EPTs and laser displacement sensors

表 3 试验土体参数

Table 3 Parameters of soft clay in test							
材料	饱和 重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	含水 率/%	塑性 指数	弹性 模量 /MPa	泊 松 比	粘聚力 /kPa	内摩 擦角 /(°)
软土	17.9	38.2	21.5	3	0.3	30	18

(5)试验土体达到固结要求后,在不停机状态下远程控制伺服电机推动金属杆,综合离心模型和伺服电机的工作条件,使开挖面以 8 mm/min 的速度连续向前推进 20 mm,由定点摄像的数码相机拍摄推进过程中开挖面前部土体的变形和破坏状态,并连续(1 次/s)记录土压传感器和激光位移计监测值。



## 2 试验结果分析

### 2.1 开挖面破坏模式分析

在模型推进过程中,由定点数码相机采集得到一组完整连续的图像分析序列,利用数字图像处理与分析技术对隧道开挖面前部土体变形进行分析,开挖面前部位移场云图如图 3 所示,其中横坐标、纵坐标和等值线彩带图的单位均为像素,像素与实际距离的换算关系为 1 像素对应 0.125 mm。

随着模型向前推进,开挖面前部土体由仰拱处开始出现滑动破裂带,与水平方向近似成  $45^\circ + \varphi/2$  逐步向上发展;当仰拱滑动破裂带发展到隧道拱顶时,拱顶滑动破裂带也开始发展,两滑动破裂带呈漏斗状逐步向上发展至地表。

利用数字图像处理技术进一步对比分析开挖面前方不同位置土体的位移变化规律,在模型开挖面前方 20 mm 处选取 3 组监测点,即隧道拱顶(T1~T9)、隧道轴线(M1~M9)和隧道仰拱(B1~B9),每组以等间距 12.5 mm 布置 9 个监测点,具体分布如图 4 所示。

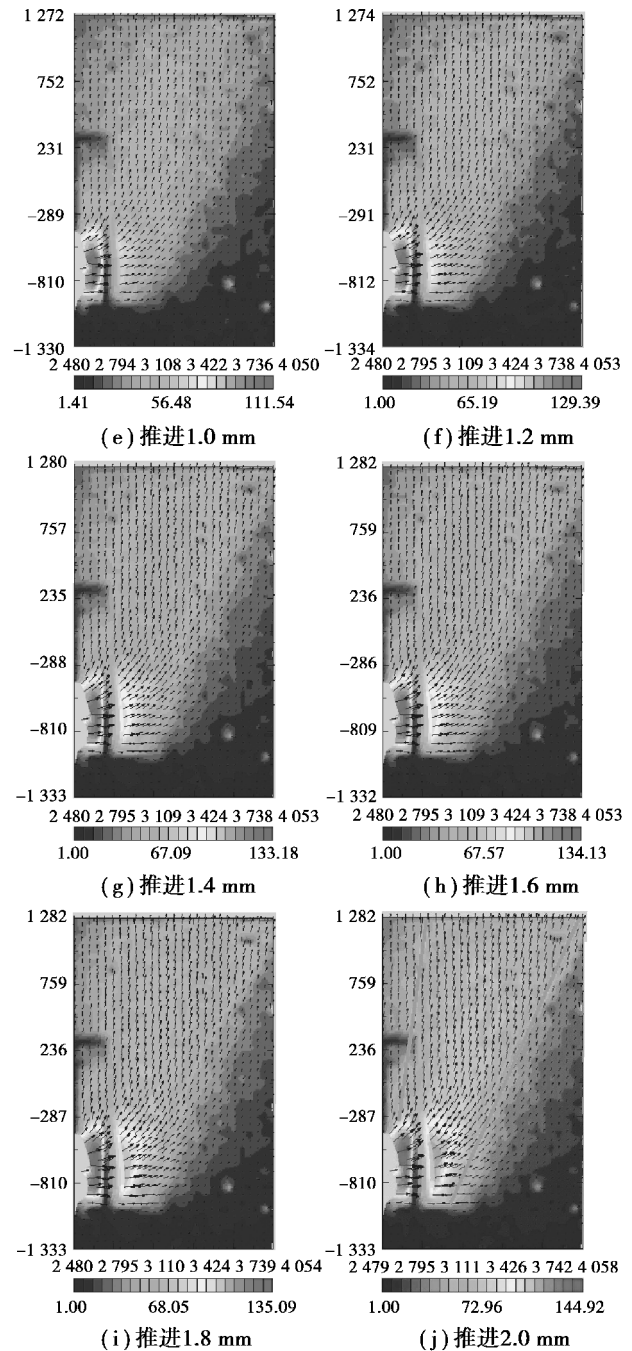
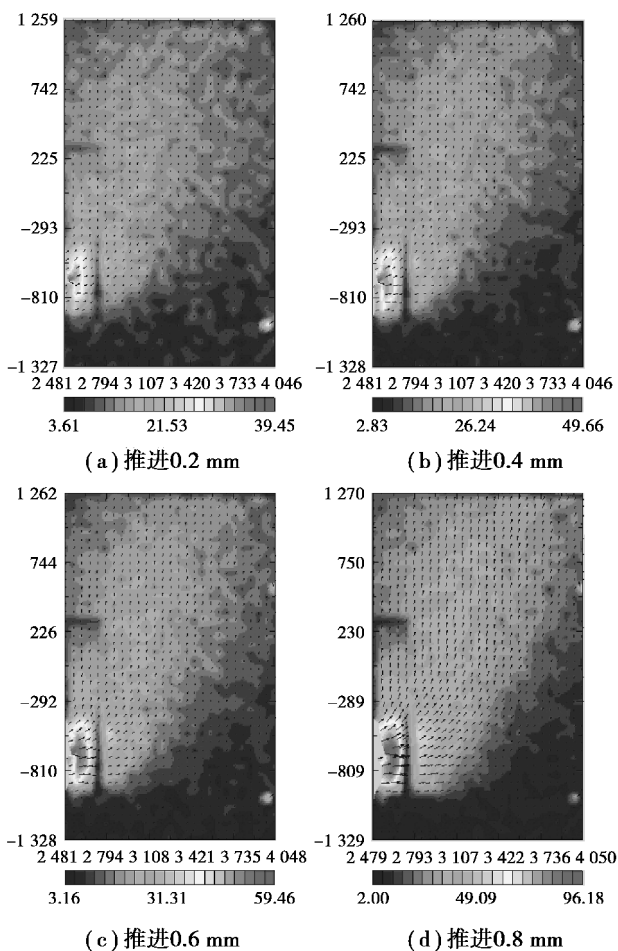


图 3 开挖面前部土体位移场云图

Fig. 3 Cloud pictures of soil displacement fields before tunnel excavation face

开挖面前部拱顶监测点位移如图 5 所示,模型推进前 4 mm 内,监测点位移变化较小;随着拱顶处滑动破裂带发展,推进 8~12 mm 阶段内监测点位移明显增大;当模型推进 12 mm 后,位移变化逐渐减慢并趋于稳定。在模型推进过程中,开挖面前方土体被压密,中部监测点 T4、T5 和 T6 的位移变化较大,距离开挖面较远的监测点位移则相对较小。

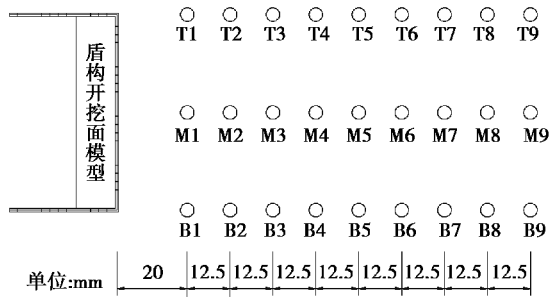


图4 开挖面前部监测点分布图

Fig. 4 Distribution schematic of monitors before tunnel excavation face

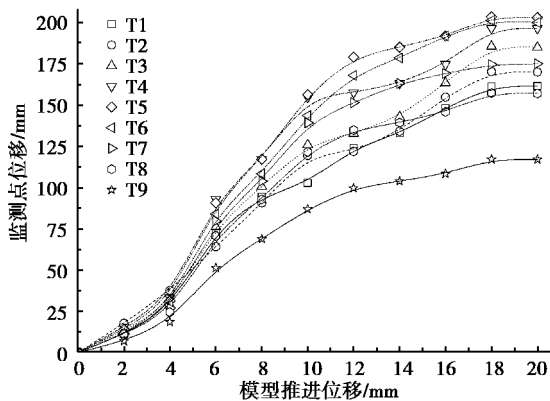


图5 开挖面前部拱顶监测点位移曲线

Fig. 5 Displacement curves of top monitoring points before tunnel excavation face

开挖面前部中轴线监测点位移如图6所示,随着模型向前推进,监测点位移不断增大,前期增长速度较快;当推进10 mm后,增幅逐渐减小;模型推进14 mm后位移趋于稳定。中部监测点M5、M6和M7的位移变化较明显,而距离开挖面较远的M8和M9的位移值较小,变化规律相近。开挖面前部中轴线监测点整体位移变化趋势与拱顶监测点位移变化相似。

开挖面前部仰拱监测点位移如图7所示,在模型推进过程中,各监测点位移持续增大;推进8 mm后位移增幅逐步降低;模型继续推进,仰拱滑动破裂带不断发展,在推进14 mm后监测点位移出现小幅增长并最终趋于稳定。仰拱滑动破裂带与水平方向成一定角度向上发展,因此,位于滑动破裂带下部的土体受推进扰动影响较小,监测点整体位移明显小于拱顶和轴线监测点位移,变化模式也不同于前两组。

## 2.2 开挖面被动支护压力分析

模型向前推进20 mm过程中开挖面土压力变

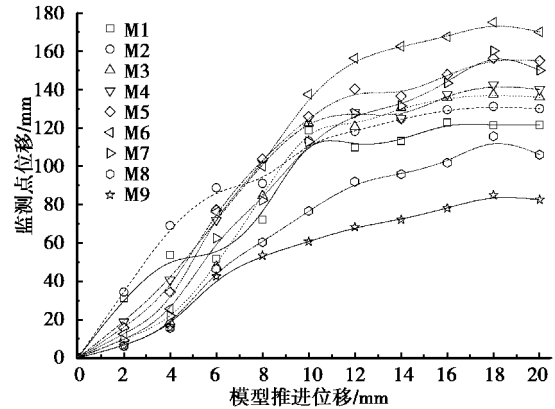


图6 开挖面前部轴线监测点位移曲线

Fig. 6 Displacement curves of middle monitoring points before tunnel excavation face

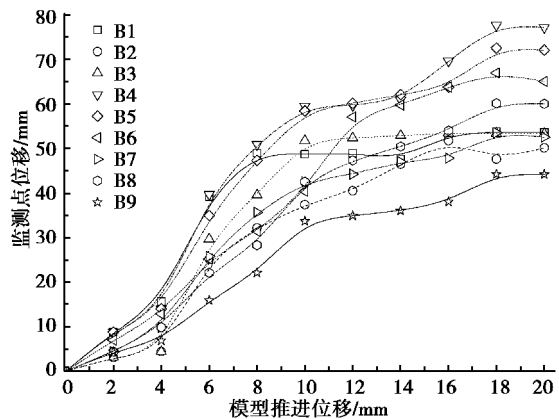


图7 开挖面前部仰拱监测点位移曲线

Fig. 7 Displacement curves of bottom monitoring points before tunnel excavation face

化如图8所示。随着模型逐步推进,布置在模型前部的土压传感器T7和T8监测值增大明显,在推进前4 mm内,土体受挤压,压力值近似呈线性增长;

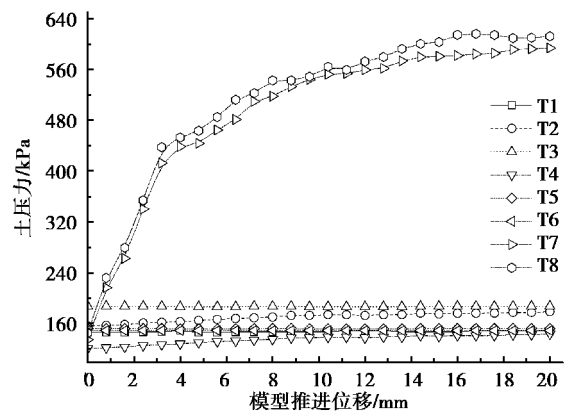


图8 土压力与推进位移关系曲线

Fig. 8 Relationships between earth pressure and advancing displacement

推进位移继续增大,土压力持续上升,但增速明显变小;当推进 14 mm 后,土压力基本保持稳定。模型前方的土压传感器 T2 和 T4 在推进前 8 mm 内缓慢上升,之后基本保持不变;位于隧道轴线的土压传感器 T5 和 T6 以及轴线内侧和下方的土压传感器 T1 和 T3 由于距离开挖面较远,其所在位置附近的土体在本组试验中所受影响较小,土压力并未发生明显变化。

利用 Abaqus 建立相应三维数值模型,与离心模型试验的开挖面土压力结果进行对比分析。土体模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,土质参数采用表 3 实测数据;根据离心模型试验和模型比率还原确定数值模型隧道直径为 3 m,覆土埋深为 12 m,边界除地表面为自由面外,其余均进行位移约束,模型网格划分如图 9 所示。

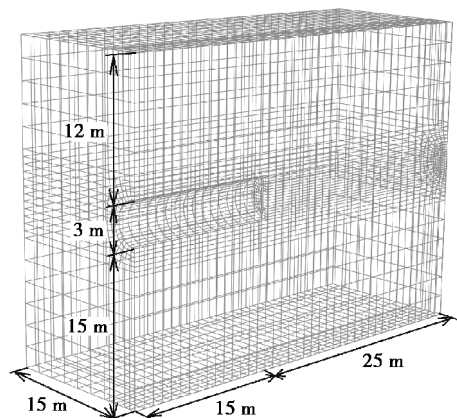


图 9 隧道开挖面数值模型

Fig. 9 Numerical simulation model for tunnel excavation face

模拟采用分段开挖形成开挖面,同时施加静止土压力做支护,然后逐步增大支护压力至开挖面被动土压力,引入支护压力比  $\lambda$  [16] 描述施加支护压力值,记录支护压力增大过程中开挖面最大位移变化。离心模型试验推进过程中开挖面压力取 T7 和 T8 监测的平均值,由模型比率等效还原推进位移值。数值模拟和离心模型试验的开挖面支护压力与最大位移关系如图 10 所示。随着支护压力不断增大,开挖面向土体方向的位移逐渐增大。数值模拟曲线近似线性变化,根据 Lee [17] 的双切线方式确定极限支护压力比近似为 2.27;离心模型试验曲线在  $\lambda = 1.9$  时出现突变,随着模型推进,开挖面压力出现明显变化,根据离心模型试验结果确定极限支护压力比近似为 1.9。被动破坏极限支护压力是维持开挖面稳定的支护压力上限值,为保证开挖面施工安全并考虑实际掘进机刀盘磨损影响,综合数值

模拟和离心模型试验结果,建议软黏土地层条件下被动压力支护比  $\lambda$  取 1.0~1.9 之间。

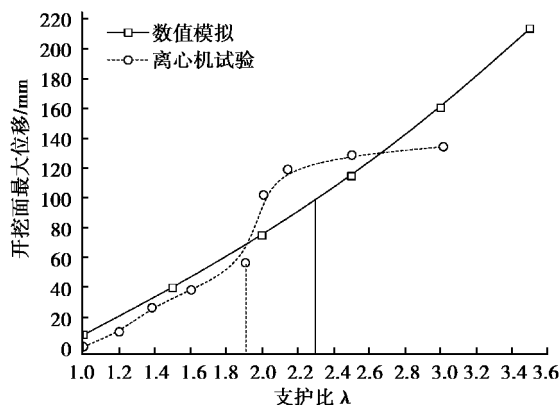


图 10 开挖面支护比与最大位移关系曲线

Fig. 10 Relationships between support pressure ratio and normal displacement of tunnel excavation face

### 2.3 地表位移变化

模型向前推进 20 mm 过程中,激光位移计的地表监测位移如图 11 所示。

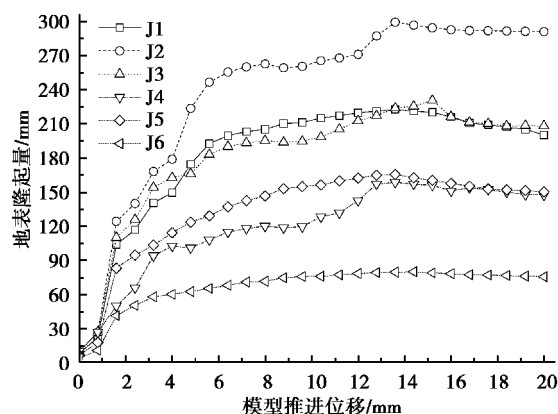


图 11 地表监测位移与推进位移关系曲线

Fig. 11 Relationships between ground monitoring displacement and advancing displacement

在初始推进的前 2 mm 内,地表隆起迅速;推进 2~8 mm 阶段,地表隆起量持续增加,但斜率与前一阶段相比较为缓和;模型继续推进,地表隆起速度明显减缓并趋于稳定,推进超过 14 mm 后,地表隆起值出现略微减小。

## 3 结论

通过开展软黏土地层中隧道开挖面稳定性离心模型试验,探究了隧道开挖面被动破坏模式,获得了连续完整的开挖面渐进破坏位移场云图,综合数值模拟,对比分析了开挖面极限支护压力以及地表变形规律,主要结论如下:



(1) 软黏土地层隧道开挖面发生被动破坏过程中,隧道仰拱处土体首先出现滑动破裂带,与水平方向近似成  $45^\circ + \varphi/2$  逐步向上发展,当仰拱滑动破裂带发展到隧道拱顶时,拱顶滑动破裂带逐步形成,两滑动破裂带呈漏斗状向上发展至地表,引起地表隆起变形。

(2) 在模型向前推进过程中,前期开挖面压力近似呈线性增长,随着推进位移增大,土压力持续上升但增速明显变小,最终压力值趋于稳定;综合分析确定开挖面被动破坏状态下,支护压力可控制在 1~1.9 倍的静止土压力。

#### 参考文献(References)

- [1] 韦良文, 张庆贺, 邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机理与应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 87-91. (Wei Liangwen, Zhang Qinghe, Deng Zhongyi. Research on mechanism and application of face stability in large slurry shield tunnelling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 87-91. (in Chinese))
- [2] Chen R P, Tang L J, Chen Y M. Stability control of underground construction [J]. Engineering sciences, 2010, 8(4): 31-36.
- [3] Chambon P, Corte J F. Shallow tunnels in cohesion-less soil: stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [4] 周小文, 濮家骝. 砂土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. (Zhou Xiaowen, Pu Jialiu. Centrifuge model test on ground settlement induced by tunneling in sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 559-563. (in Chinese))
- [5] Kamata H, Mashimo H. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2): 205-212.
- [6] Oblozinsky P, Kuwano J. Centrifuge experiments on stability of tunnel face [J]. Slovak Journal of Civil Engineering, 2004, 3: 23-29.
- [7] Kirsch A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. Acta Geotechnica, 2010, 5(1): 43-62.
- [8] Idinger G, Aklik P, Wu W, et al. Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel [J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(2): 105-117.
- [9] Ahmed M, Iskander M. Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1): 101-110.
- [10] Chen R P, Li J, Kong L G, et al. Experimental study on face instability of shield tunnel in sand [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 12-21.
- [11] Soranzo E, Wu W. Centrifuge test of face stability of shallow tunnels in unsaturated soil[A]//Poromechanics V: Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics [C]. Vienna, Austria, 2013: 1326-1335.
- [12] 汤旅军, 陈仁朋, 尹鑫晟, 等. 密实砂土地层盾构隧道开挖面失稳离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1830-1838. (Tang Lüjun, Chen Renpeng, Yin Xincheng, et al. Centrifugal model tests on face stability of shield tunnels in dense sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1830-1838. (in Chinese))
- [13] 吕玺琳, 周运才, 李冯缔. 粉砂地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3324-3328. (Lü Xilin, Zhou Yuncai, Li Fengdi. Centrifuge model test and numerical simulation of stability of excavation face of shield tunnel in silty sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3324-3328. (in Chinese))
- [14] Mair R J, Taylor R N. Bored tunneling in the urban environment[A]//Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Hamburg: A. A. Balkema Publishers, 1997: 2353-2385.
- [15] 包承钢, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1-4. (Bao Chenggang, Rao Xibao. Principle of the geotechnical centrifuge model test [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1-4. (in Chinese))
- [16] 秦建设, 虞兴福, 钟小春, 等. 黏土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增1): 511-515. (Qin Jianshe, Yu Xingfu, Zhong Xiaochun, et al. Numerical research on face movement and collapse of shield tunneling in silt ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.1): 511-512. (in Chinese))
- [17] Lee C J, Wu B R, Chen H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(2): 119-132.