

DOI: 10.11779/CJGE2019S2033

# 饱和圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性物理模型试验

吕玺琳<sup>1,2</sup>, 曾盛<sup>2</sup>, 王远鹏<sup>2</sup>, 马少坤<sup>3,4</sup>, 黄茂松<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 广西大学工程防灾与结构安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 通过开展3组饱和圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性物理模型试验, 研究了不同埋深条件下开挖面支护压力不足导致的渐进失稳破坏过程。通过分析大颗粒土滑移松动—裂隙出现—裂隙闭合过程表明, 开挖面破坏过程中土体存在变形滞后效应, 且该效应随隧道埋深变浅而减弱。对开挖面变形进行PIV精细化图像分析, 得到其破坏模式类似于楔形体加筒仓体结构, 楔形体倾角约为 $45^\circ + \varphi/2$ 。筒仓区土体松动由于存在滞后效应, 可能导致开挖面破坏表现出突发现象。为准确预测极限支护压力, 将传统楔形体模型改进为宽体楔形体模型, 预测结果与试验结果符合较好。

**关键词:** 盾构隧道; 圆砾土; 开挖面稳定性; 物理模型试验

中图分类号: TU441; TU94 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0129-04

**作者简介:** 吕玺琳(1981—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博导, 主要从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: xilinlu@tongji.edu.cn。

## Physical model tests on stability of shield tunnel face in saturated gravel stratum

LÜ Xi-lin<sup>1,2</sup>, ZENG Sheng<sup>2</sup>, WANG Yuan-peng<sup>2</sup>, MA Shao-kun<sup>3,4</sup>, HUANG Mao-song<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To detect the stability of tunnel face with different depth in saturated gravel stratum, three reduced scale model tests were conducted, and the progressive failure process under insufficient support pressure was explored. According to the particle analysis, loosens of particle contact and the initiation and closure of crack were investigated, the results indicate that delayed deformation occurs and it can be weakened by decreasing the tunnel depth. Based on the PIV analysis, the failure mode of tunnel face is obtained, it shows a combination mode of a sliding wedge and an overlying silo, and the inclination of sliding wedge is about  $45^\circ + \varphi/2$ . Due to the delayed deformation of soil in silo, a sudden collapse mode of tunnel face may occur. In order to produce a precise prediction of limit support pressure, a modified wedge model is proposed, and the obtained results compare well with test results.

**Key words:** shield tunnel; gravel soil; tunnel face stability; physical model test

## 0 引言

中国大部分城市正在兴建地铁, 穿越地层趋于复杂化, 如华南、西南地区圆砾地层等。圆砾粒径大, 易导致地层变形滞后, 影响盾构隧道的安全施工。

圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性问题已引起工程界和学术界关注。He等<sup>[1]</sup>开展了砂砾石地层双隧道物理模型试验, 并基于离散元分析了双隧道中土拱效应及影响范围。江英超等<sup>[2]</sup>基于离散元模拟分析了地下水、地面荷载等外因对圆砾土沉降滞后效应的影响。圆砾易发挥土拱效应, 环境影响反映敏感, 因此圆砾地层中盾构隧道开挖面稳定及变形控制难度大<sup>[3]</sup>。当

开挖面支护压力较小时, 开挖面前方土体松弛, 附近形成空洞, 空洞坍塌时可能导致地层突然变形<sup>[4]</sup>, 引发安全事故。有必要研究富水圆砾土变形突发诱因, 从而建立变形滞后预测方法。以往数值模拟研究结果<sup>[2]</sup>表明, 当支护压力到达某一值后, 地层松动区由开挖面正前方向上发展, 形成楔形体破坏模式<sup>[5]</sup>。圆砾地层的楔形体破坏区滑移面为曲线, 与砂土存在差异,

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200); 国家自然科学基金重点项目(51738010); 国家自然科学基金面上项目(51678166); 上海市浦江人才计划项目(17PJD040)

**收稿日期:** 2019-04-30

更接近黏土情形。

为研究圆砾地层盾构隧道开挖面破坏模式及变形滞后效应,本文基于物理模型试验,开展盾构隧道开挖面破坏过程研究。获得开挖面支护压力演化规律和土体破坏模式,并进一步分析隧道埋深对圆砾土变形滞后效应的影响,建立圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性分析方法。

## 1 开挖面破坏过程试验方案及过程

### 1.1 试验装置

圆砾地层盾构隧道开挖面物理模型试验的缩尺比例为1:100。如图1(a)所示,模型试验装置包含隧道模型、电机、水循环系统、传感器。为观测土体变形,按对称面制作一半隧道模型。模型箱正面为钢化玻璃,其余部分为刚性厚铝板。试验区内部尺寸长、宽、高分别为1000,500,1080mm;盾构机模型由直径150mm的半圆盘和固定环壁组成。机组的刚性杆连接到开挖面背侧,在水平向拉动开挖面。隧道内部安装水平位移传感器,开挖面中央设置土压力盒。在模型箱正面安置高精度相机采集图像,基于粒子图像测速技术(PIV)分析位移场及破坏模式。

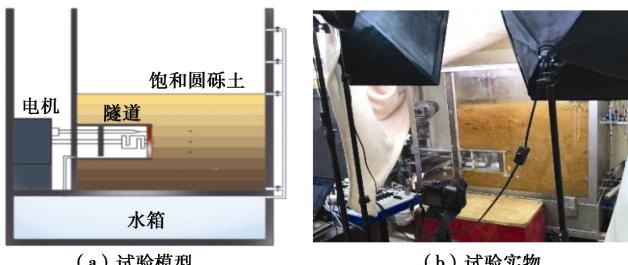


图1 圆砾地层盾构开挖物理模型试验

Fig. 1 Scaled tunnel model apparatus for saturated gravel stratum

### 1.2 试验材料及试验步骤

天然圆砾土样取自广西南宁地铁某施工现场,土样饱和重度 $\gamma=21\text{ kN/m}^3$ 。为防止大颗粒造成严重堵塞,剔除粒径大于40mm的砾石后颗粒级配如图2所示。圆砾土内摩擦角较大( $\varphi=45^\circ$ )<sup>[6]</sup>,自稳定性较强;含有一定量黏粒,土样渗透系数较低。

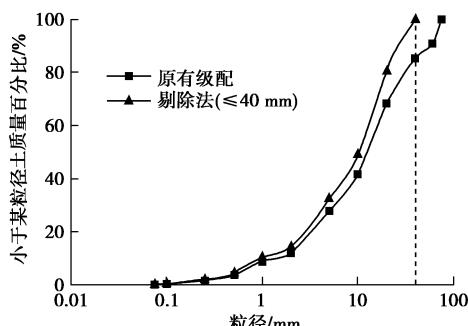


图2 圆砾土颗粒累计级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves

考虑隧道埋深的影响设置3组试验,上覆地层厚度C和盾构直径D的比值C/D分别为0.5,1.0,2.0。试验过程为:清空模型箱,保持开挖面及测量装置清洁,获取空载数据,清零校准;分层压实预先饱和的土样至指定高度,每层厚15cm;土样填装完成后开启水阀门继续饱和,并静置1h确保饱和状态。架设相机和照明设备,等待测量装置进入稳态,启动电机开始试验(图1)。为保持土体处于准静态状态,控制开挖面以0.025mm/min的速度向背离土体方向移动。试验过程中,数据采集仪及相机固定时间间隔采集数据,开挖面水平位移到达15mm时结束试验。

## 2 模型试验结果分析

### 2.1 支护压力变化过程

开挖面支护压力演化曲线如图3所示,演变过程分3个阶段:第一阶段,开挖面位移较小(位移 $\delta/D$ 小于1.5%),支护压力比随变形线性陡降至0.25左右;第二阶段,支护压力比先略微下降至最小值,之后反弹,曲线近似弧状;第三阶段支护压力基本恒定,达到极限状态。支护压力比波动是土压力盒附近大颗粒圆砾错动引发应力突变导致的。

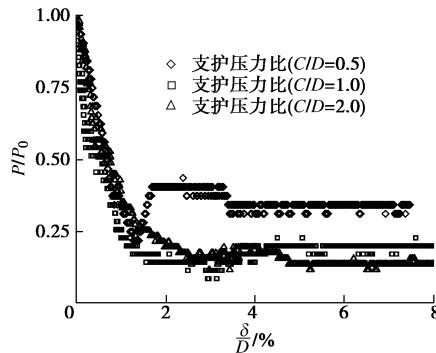


图3 开挖面支护压力比随位移变化过程

Fig. 3 Supprot pressure ratio versus displacement of tunnel face

当埋深比 $C/D=0.5$ 时,支护压力比下降至20%后回弹至40%; $C/D=1.0$ 时,支护压力比达到12%后微回升至20%。隧道埋深增加需开挖面变形更大才能导致应力回弹,且回弹量小。 $C/D=2.0$ 试验中,支护压力回弹对应的开挖面位移只略微增加,即埋深比达到一定值后,支护压力回弹所需位移不发生明显变化。 $C/D=0.5$ 和 $2.0$ 两组试验中有应力先增后减的现象,是由于大尺寸圆砾局部应力集中导致力突增所致,因此实际的极限支护压力应取后段稳定值。

### 2.2 土体松动区及变形滞后现象

基于PIV技术处理埋深比 $C/D=1.0$ 试验的图片序列获得位移场分布,其包线如图4红色虚线所示。开挖面位移较小时,正前方土体变形,松动区自下而上逐步延伸;局部有裂隙产生,之后上覆土坍塌将其闭

合, 对应松动区向上发展, 最终形成楔形状松动区。当  $\delta$  达到 9 mm 时, 开挖面顶部出现空洞区, 此区域土体与开挖面脱开。裂隙发展到开挖面顶部表明楔形体区内土体已完成松动—裂隙出现—裂隙闭合过程, 已完全松动。由于开挖面后退距离不足, 楔形体与上覆土层之间间隙不够, 大尺寸圆砾粒间锁固形成土拱, 限制粒间滑移, 因此上覆土基本没有变形。

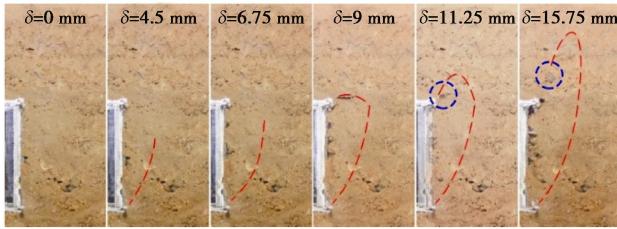


图 4  $C/D=1.0$  时土体破坏区发展情况

Fig. 4 Evolution of failure zone when  $C/D=1.0$

开挖面进一步变形 ( $\delta \geq 11.25$  mm), 楔形体区内颗粒滑移引起排列重分布, 原有裂隙闭合, 在更高点位置产生新裂隙。同一高度上的土体, 越靠近开挖面越易产生裂隙, 而远端土体接近流塑状态, 裂隙不易产生。原位于开挖面顶部的空隙上移 (图 4 虚线圆), 上覆土中松动区向地表扩张, 最终形成筒仓破坏区。整体破坏模式为楔形体+筒仓体形式, 接近传统楔形体模型。松动期间, 不断有小型土拱的形成和坍塌, 松动区呈现非连续滑动。坍塌—生成过程需要一定时间才能完成, 延缓了上覆土的变形, 导致变形滞后效应。

隧道埋深比  $C/D=0.5$  时, 试验初期变形模式与其它试验结果类似, 但破坏区向上发展得更早 (图 5)。失稳破坏过程中, 会有松动—裂隙出现—裂隙闭合现象。上覆土早期基本没有位移, 土拱效应部分发挥。开挖面继续变形, 已有土拱逐步坍塌; 上覆土层厚度不足导致不能产生新的拱结构, 松动区迅速扩展至地表, 筒仓区全部坍塌, 最终形成“倒喇叭”状破坏区。

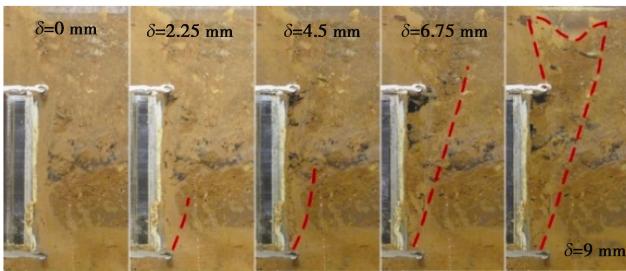


图 5  $C/D=0.5$  时土体破坏区延伸到地表

Fig. 5 Extension of failure zone to earth surface when  $C/D=0.5$

### 2.3 开挖面破坏模式

基于 PIV 技术获得圆砾地层开挖面邻近土体高变形区域如图 6 所示。试验  $C/D=0.5$  中, 试验早期, 开挖面邻近土体已松动, 但变形较小; 开挖面进一步变形, 松动区水平扩张, 同时向上发展, 最终在  $\delta/D=6\%$

时到达地表。为分析破坏模式, 将高变形区抽象成几何体, 得到破坏模式为下部楔形体加上部漏斗的形式。 $C/D=1.0$  和  $2.0$  试验中, 开挖面变形早期, 松动区形状与  $C/D=0.5$  时一致, 当  $\delta$  达到  $6\%D$  时仍不能观测到松动区向上扩展, 上覆土保持紧密状态, 松动区向上发展极为缓慢, 但最终破坏模式仍为楔形体形。

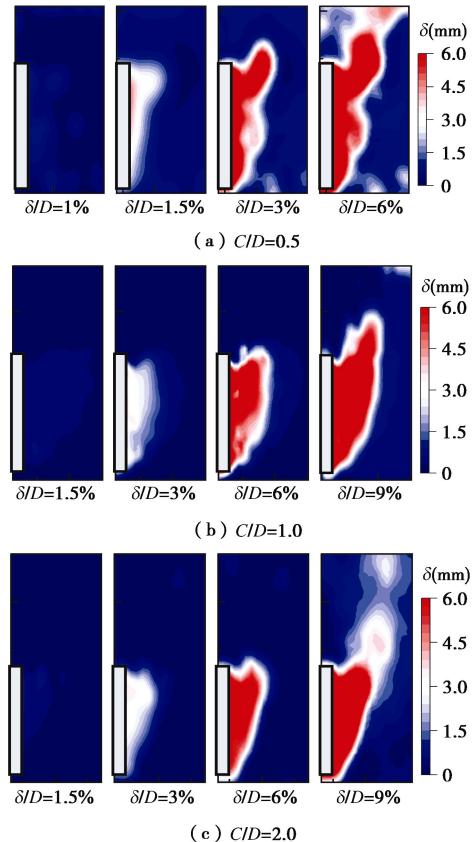


图 6 开挖土体位移场分布

Fig. 6 Displacement fields of tunnel face

### 3 极限支护压力分析

楔形体模型基于力学平衡条件建立, 所需参数少, 计算简便, 在工程中应用广泛。由于圆砾土存在变形滞后效应, 上覆土拱形成与破坏过程要在较大开挖面变形时才能稳定, 实际盾构工程会极力避免这种情况。因此, 分析开挖面变形较小, 即只有楔形体区土体松动时的破坏模式比较实用。在圆砾土中, 颗粒摩擦角较大, 粒间锁固效应强烈, 尺寸较小的土拱也能为上覆土提供足够的支撑力, 因此中前期上覆土基本没有变形。基于楔形体模型假定分析楔形体倾角约  $67^\circ$ , 该值与理论倾角  $45^\circ + \varphi/2$  接近, 埋深比对其影响较小。基于破坏区形状分析, 松动区楔形体高度略小于隧道直径, 此时可将原有楔形体缩小, 松动区中较高的位置视为筒仓结构, 组成楔形体模型。传统楔形体模型计算时, 一般将楔形体正面形状抽象成正方形<sup>[7]</sup>。对于圆砾土地层, 试验结果表明采用矩形更合适, 其

中宽高比  $D/B=0.83$ , 此时楔形体变宽, 同时筒仓体也变宽, 土拱效应增强, 变形区高度缩小。宽体楔形体模型与传统楔形体模型开挖面支护压力预测结果如图 8 所示, 宽体开挖面模型预测结果更准确。当  $C/D=0.5$  时, 由于筒仓区上覆土已坍塌, 支护压力快速达到极限值, 故试验值高于预测值。

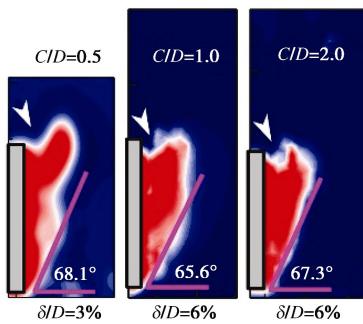


图 7 开挖面位移 9 mm 时楔形体倾角

Fig. 7 Inclination angles of wedge when  $\delta=9 \text{ mm}$

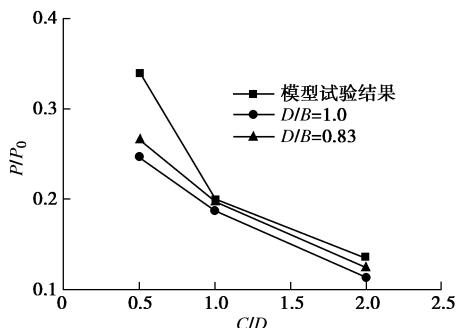


图 8 理论结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between theoretical results and experiments

## 4 结 论

通过开展盾构隧道开挖面物理模型试验, 研究了饱和圆砾地层开挖面支护压力变化及地层变形过程, 并基于 PIV 技术分析了土体破坏模式。结论如下:

(1) 圆砾地层盾构开挖面支护压力随开挖面水平变形的增大而减小。支护压力比先线性陡降, 之后轻微回弹, 最终到达极限状态。

(2) 开挖面变形时, 正前方地层松动形成楔形体松动区。由于圆砾间有较强粒间锁固效应形成大量拱结构, 土体变形时发生局部松动—裂隙出现—裂隙闭合的过程。裂隙生成和重闭合之间存在时间间隙, 从而延缓上覆土松动过程, 导致变形滞后效应, 同时延缓上覆土筒仓体破坏区的形成。

(3) 圆砾地层中开挖面破坏模式为楔体加筒仓结构, 类似传统楔形体模型。土体成拱效应导致开挖面破坏早期只有楔形体区域土体松动, 采用宽体楔形体模型预测极限支护压力更合理。

## 参考文献:

- [1] HE C, FENG K, FANG Y, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2012, 13(11): 858 – 869.
- [2] 江英超, 方 勇, 何 川, 等. 砂卵石地层盾构施工滞后沉降形成的细观研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 171 – 177. (JIANG Ying-chao, FANG Yong, HE Chuan, et al. Study on delayed settlement formation induced by shield tunneling in sandy cobble strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1) : 171 – 177. (in Chinese))
- [3] 谢雄耀, 王 强, 刘 欢, 等. 富水圆砾地层盾构下穿火车站股道沉降控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 3960 – 3970. (XIE Xiong-yao, WANG Qiang, LIU Huan, et al. Settlement control study of shield tunnelling crossing railway station in round gravel strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 3960 – 3970. (in Chinese)).
- [4] 王明年, 魏龙海, 路军富, 等. 成都地铁卵石层中盾构施工开挖面稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 99 – 105. (WANG Ming-nian, WEI Long-hai, LU Jun-fu, et al. Study of face stability of cobble-soil shield tunnelling at Chengdu metro[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 99 – 105. (in Chinese))
- [5] 吕玺琳, 李冯缔, 黄茂松, 等. 三维盾构隧道开挖面极限支护压力数值及理论解[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40(10): 1469 – 1473. (LÜ Xi-lin, LI Feng-di, HUANG Mao-song, et al. Three-dimensional numerical and analytical solutions of limit support pressure at shield tunnel face[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(10): 1469 – 1473. (in Chinese))
- [6] 唐开顺, 谢雄耀, 杨 磊. 圆砾土大型三轴试验力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 580 – 585. (TANG Kai-shun, XIE Xiong-yao, YANG Lei. Research on mechanical characteristics of gravel soil based on large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 580 – 585. (in Chinese))
- [7] LÜ X L, ZHOU Y C, HUANG M S, et al. Experimental study of the face stability of shield tunnel in sands under seepage condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 195 – 205.

(责编: 黄贤沙)