

渗流作用下粉砂地层中盾构隧道 开挖面失稳模式离心试验研究

牛豪爽 翁效林 余航飞 胡继波

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安 710061)

摘要: 为研究渗流情况下开挖面支护力变化规律及失稳破坏模式, 开发一整套离心模型渗流试验装置。通过开展不同内摩擦角干土和不同水头压力饱和土的试验, 研究了不同土质开挖面支护力变化规律和前方土体渐进破坏机理, 分析了同一种土渗流力对开挖面支护力及失稳响应机制的影响。结果显示, 随着开挖面后撤位移 S 的增大, 开挖面支护力 P 分为迅速下降 ($S < 1.5D\%$)、到达极限支护力 P_{lim} 后缓慢回弹 ($1.5D\% \leq S \leq 3D\%$)、逐渐趋于稳定值 ($3D\% < S$) 3 个阶段; 开挖面支护力随着内摩擦角的增大而较小, 随着水头压力的增大呈线性增大; 土体失稳模式与土体内摩擦角有关, 是一个由局部破坏到整体破坏的渐进过程, 不同内摩擦角土体在土拱迭代过程中响应时间不同, 渗流力加剧了土拱迭代速度和破坏力度, 验证了渗流力具有各向异性。

关键词: 盾构隧道; 离心试验; 开挖面稳定性; 开挖面支护力; 破坏模式

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2020)S1-0099-07

Centrifugal test study on instability mode of shield tunnel excavation face in silty sand stratum under seepage

Niu Haoshuang Weng Xiaolin Yu Hangfei Hu Jibo

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the law of support force change and failure mode of excavation face under seepage, a set of centrifugal model seepage test device was developed. Based on the tests of dry soil with different internal friction angle and saturated soil with different head pressure, the change rule of support force and progressive failure mechanism of soil in front of excavation face of different soil are studied, and the influence of the same soil seepage force on support force and instability response mechanism of excavation face is analyzed. The results show that with the increase of the displacement S , the supporting force P is divided into three stages: the rapid decline ($S < 1.5D\%$), the slow rebound after reaching the ultimate supporting force P_{lim} ($1.5D\% \leq S \leq 3D\%$) and the steady value ($3D\% < S$). The support force of excavation face is smaller with the increase of internal friction angle, and increases linearly with the increase of head pressure; The instability mode of soil mass is a gradual process from local failure to global failure related to the internal friction angle of soil mass, soils with different internal friction angles have different response times during iteration of soil arch and seepage force exacerbates soil arch iteration speed and destruction. Finally, it is verified that the seepage force is anisotropic.

Keywords: shield tunnel; centrifugal test; face stability; support force of excavation face; failure mechanism

E-mail: 2017221069@chd.edu.cn

引 言

随着城市化进程的不断推进, 城市人口逐渐增

加, 土地资源日益紧缺, 交通拥堵逐渐成为困扰城市发展的最大难题。在此背景下, 许多城市开始大规模兴建地下轨道交通来缓解地面交通所承受的巨大压力, 土压平衡盾构机被广泛应用于城市地铁隧道建设中^[1]。盾构隧道开挖面的稳定主要靠调节土仓压力来维持, 但在穿江过河隧道工程中, 地下水与土仓之间的高水压差会产生很强的渗流力, 并作

基金项目: 国家自然科学基金(U1934213)

作者简介: 牛豪爽, 博士研究生

通讯作者: 翁效林, 博士, 副教授

收稿日期: 2020-06-15

用在开挖面上。若开挖面失稳,则会引起严重的经济损失及人员伤亡,因此保持开挖面稳定性是盾构隧道施工的关键所在^[2]。

国内外学者通过不同的研究方法对开挖面稳定性进行了一系列的理论和试验研究。Horn^[3]最早通过极限平衡法提出隧道开挖面前方坍塌土体为一楔形体和其上部的筒仓组成,概念化模型为后续极限平衡法模型的研究奠定了基础。Murayama^[4]最早建立二维极限平衡模型,提出滑动破坏面为对数螺旋函数,但此模型由于忽略滑动侧摩擦力,计算结果较为保守。研究相对较早的极限分析法^[5-8],模型解析过程繁琐,近年来许多学者在此基础上发展了更为简单直观的楔形体计算模型,并取得了不错的成果^[9-11]。Leca 等^[7]构造了三维隧道开挖面失稳破坏机制,并基于提出的破坏模式和极限分析上限方法,分析了隧道开挖面稳定性。Anagnostou 等^[12]假设渗流是各向同性并构建了经典的“楔形体-棱柱”极限平衡模型,为计算稳态渗流工况下极限支护力提供理论依据。Broere^[13]在此基础上把土体进行分层,然后考虑稳态渗流对地基的影响。徐明^[14]将三维数值模拟结果与楔形体模型进行对比,指出后者在分析超大直径盾构开挖面稳定性的局限性。雷明锋等^[15]进一步考虑迎坡条件下隧道开挖面稳定性,建立开挖面极限支护力计算模型。吕玺琳等^[16]以 Terzaghi 地基承载力破坏模式为基础,构造新的极限分析模型,求解出开挖面极限支护力的上限解。

试验研究方面,Adkinson 等^[17]通过离心模型试验研究了浅埋隧道在砂土及黏土层中的极限支护力规律。Mair^[18]通过离心模型试验,对比了砂土和黏土地层中开挖面破坏机理的差别。Chambon^[19]以均质砂土为模拟介质,研究了不同埋深下的开挖面破坏模式。陈仁朋等^[20]通过失稳离心试验,得到了极限有效支护力与水头压力之间呈线性关系。吕玺琳等^[21]通过模型试验,研究了不同埋深条件下开挖面极失稳的破坏过程,并将传统楔形体模型改进为宽体楔形体模型。李君^[22]通过大型模型试验,结合开挖面前方土体应力状态,揭示了土拱消散过程及开挖面失稳形式。宋锦虎等^[23]考虑地下水对开挖面的影响,对比了干沙与饱和沙土拱形成的过程。

因土体应力水平决定了其自身的力学特性,而 1g 模型试验的应力水平较小,其试验结果与实际工程仍然具有一定差距^[24],因此使用土工离心机探究开挖面支护力变为一种可靠手段,目前鲜有人在离心试验基础上探究渗流对开挖面失稳模式的影响,

有必要进行一系列试验来解决这个问题。

本文通过 5 组离心模型试验,研究了 3 种不同内摩擦角土质开挖面支护力及失稳变化模式,揭示了不同内摩擦角土在失稳过程中的响应规律。对比分析了渗流情况下同一土质开挖面支护力变化情况,讨论了渗流力在失稳过程中发挥的作用,为盾构隧道施工开挖面支护力调控提供理论依据。

1 离心模型试验设计

1.1 试验装置

本试验在长安大学大型土工离心机 TLJ-3 离心机上进行,最大容量 60 g·t,旋转半径 2 m,最大离心加速度 200 g^[25],见图 1。

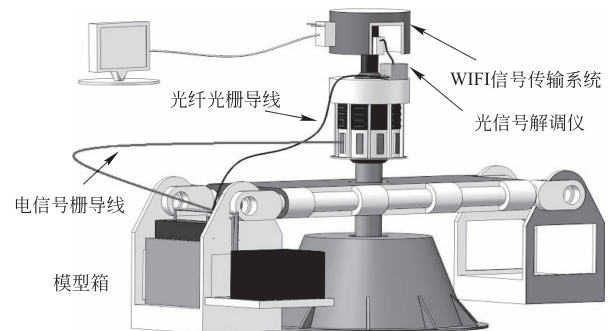


图 1 长安大学土工离心机试验装置
Fig 1 Test equipment of geocentrifuge
in Chang'an University

图 2 为渗流条件下盾构隧道开挖面稳定性离心试验装置的示意图。整个试验装置由模型箱、底部储水箱、盾构隧道模型(透水开挖面,高强度钢盾壳)、支撑垫块、水位控制孔、应力测量元件 FBG(光纤光栅)、位移控制机器装置、传力加载杆等组成,模型箱内尺寸为 0.7m×0.4m×0.5m(长×宽×高)。模型箱正侧为高强度透明玻璃,便于观察隧道开挖面失稳后的变形特性,其余 3 侧以及底板为高强度钢板。盾构模型主要由盾壳、透水开挖玻璃面板、FBG 元件及控制位移的步进机装置。水位控制也是本装置的重要组成部分,用水泵将底部储水箱内的水泵入模型箱内,通过水位控制孔来保持水位的不变,溢出的水重新流入水箱。电机组和传力加载杆可以实现盾构开挖面的位移变化,FBG 能在离心机转动时,将盾构开挖面上支护力的数据通过无线传输传到外部电脑主机。因隧道具有对称性,为合理观测位移及变形,制作 1/2 隧道模型即横截面为“D”的盾壳,盾壳内径为 100mm。

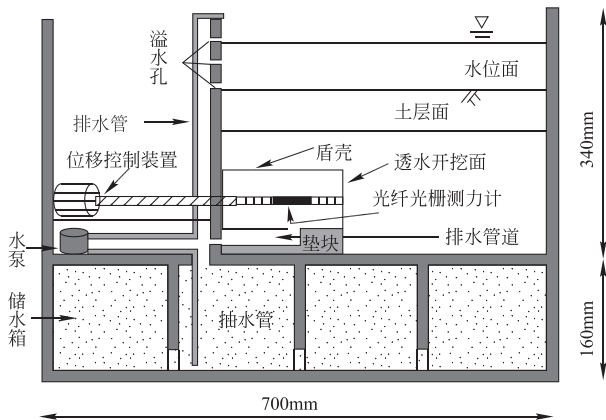


图 2 盾构隧道开挖面失稳离心试验模型箱

Fig 2 Centrifugal test model box for stability of shield tunnel excavation face

1.2 试验方案及步骤

针对不同内摩擦角地层影响设置了 5 组对比试验工况如表 1, 其中 H_w 为开挖面中心点水头压力, 隧道上覆土层厚度 C 与隧道直径 D 的比值 $C/D=1$ 保持不变, 三种不同土质分别由陕西渭河河沙和西安本地黏土按照 3:7、1:1、7:3 配比拌和而成, 通过直剪试验得知三种土质内摩擦角分别为 25° 、 28° 、 32° 。隧道原型直径为 5m, 模型缩尺为 100mm, 离心加速度设计为 50g。整个试验通过编程位移控制装置, 控制盾构模型透水开挖面后撤, 采用模型前方土体的失稳, 来模拟渗流条件下盾构开挖面前方土体失稳破坏情形, 并通过 FBG 测出开挖面上支护力的大小, 分析支护力在不同条件下的变化规律及失稳机制。试验主要过程如下:

表 1 离心模型试验工况

Table1 Conditions of centrifuge model tests

试验组号	沙土:黏土	含水情况	内摩擦角 φ	H_w/D
1	3:7	干燥	25°	0
2	1:1	干燥	28°	0
3	7:3	干燥	32°	0
4	1:1	饱和	28°	1.5
5	1:1	饱和	28°	2

(1) 将加土后的模型箱装置整体放入离心机吊篮, 打开电泵向模型箱内注水至水位到达溢流孔;

(2) 离心加速度由 0 逐步提高到 50g 并稳定 10min, 此阶段通过位移控制装置保持开挖面位置不变;

(3) 支护力稳定后, 位移控制装置以一定速率逐渐后撤开挖面, 当开挖面水平位移 $S < 5\text{mm}$ 时, 控制开挖面后撤速度 $v = 0.1\text{mm}/\text{min}$; 当 $5\text{mm} < S < 10\text{mm}$ 时, 调整 $v = 0.2\text{mm}/\text{min}$; 当 $10\text{mm} < S < 15\text{mm}$ 时, $v = 0.4\text{mm}/\text{min}$; 当 $S = 15\text{mm}$ 时, $v = 0$;

(4) 离心加速度由 50g 逐渐减少至 0, 将模型装置吊出离心机吊篮。在试验过程中, 开挖面的后撤位移由位移控制装置编程盒来监测, 而开挖面上的支护力由镶嵌在加载杆上的 FBG 进行实时监测。

1.3 试验方案及步骤

为防止土颗粒在高加速度和渗流下流入隧道体内, 在开挖面与盾构隧道壁之间涂抹凡士林, 以起到填充缝隙的作用。同时盾构隧道与有机玻璃板、支座等接触的地方用玻璃胶粘结, 目的是起到防水作用。该举措虽然能够防止土颗粒进入隧道体内, 但会导致试验过程中, 因隧道后撤而产生一定的摩擦力且不可忽视, 尤其对于 FBG(光纤光栅)这种高灵敏度元件, 会影响开挖面支护力数据的准确性。采用 Idinger 等^[26]提出的方法, 在不加土和水情况下空转模型箱, 离心条件与试验条件保持一致, 在 50g 条件下获得开挖面后撤所受摩擦力, 通过此标定法可得开挖面后撤摩擦力平均值为 7N。需要指出的是, 本试验中开挖面后撤摩擦力明显小于陈仁朋^[20]的试验结果, 其主要原因是此处开挖面为高强度玻璃且填充材料为凡士林, 起到润滑效果。

2 试验结果分析

在光纤上用紫外线刻写光栅, 10mm 的光纤光栅包含了 10000 个在纤芯中规则分布的微小反射镜面, 温度、应变等物理量的变化导致栅距呈线性变化, 光栅反射波长随栅距变化而线性变化。FBG 可以通过换算公式直接测得所在开挖面上的支护力, 具有灵敏度高、适应性强等特点, 换算公式如下:

$$F = g \times K_p \times [(P - P_0)] - K_T \times [(T - T_0)] \quad (1)$$

$$P = (8F) / (\pi D^2) \quad (2)$$

式中: g 为重力系数, $g = 9.8\text{kN}/\text{g}$; K_p 为传感器应变与波长的比值, $K_p = 11866.3885\text{g}/\text{nm}$; K_T 为传感器温度/波长系数值, $K_T = 0.0235\text{nm}/^\circ\text{C}$, 常数; P 是应变测量时的波长, nm; P_0 是应变测试时的初始波长, nm; T 是 P 值测量时的环境温度, $^\circ\text{C}$; T_0 是 P_0 值测量时的环境温度, $^\circ\text{C}$; D 为隧道直径, 即 100mm。

2.1 支护压力变化过程

离心试验隧道开挖面支护压力变化规律如图 3 所示, 整个演化过程可分为 3 个阶段: 第一阶段为位移较小时 ($S < 1.5D\%$), 支护压力随着开挖面位移的增大极速下降, 所绘图线的斜率逐渐变小, 主要原因是随着开挖面的后撤, 部分坍塌土体在周围力的作用下重新平衡, 不再随着下方土体滑动。第二阶段为开挖面位移在 $1.5D\% \sim 3D\%$ 之间, 此阶段随着隧

道开挖面后撤位移的增大, 开挖面支护力达到极限状态, 之后开挖面支护力缓慢上升, 在图形上表现为圆弧状。由图 3 可以看出, 不同内摩擦角的土体在达到极限状态的位移点位置也不同, 当 $\varphi = 25^\circ$ 时, 开挖面位移 $S = 1.9D\%$ 时土体达到极限承载状态; 同样的, 当 $\varphi = 28^\circ$ 和 32° , 开挖面位移分别在 $1.7D\%$ 和 $1.5D\%$ 时土体达到极限承载状态。分析可知, 沙土流动性较黏土好, 当沙土所占比例升高, 土体黏聚力逐渐降低, 在开挖面后撤时土体变形“反应”时间变长, 但在渗流工况下, 如 $H_w = 1.5D$ 和 $2D$ 时, 在渗流力的作用下, 会加速土体流动速度, 缩短土体变形时间, 同工况下水位差越大, 达到极限点时间越短。支护力回弹的原因主要是后撤位移的增大, 使得坍塌上方土体在达到极限状态后变形产生滞后现象。同时可以看出, 不同土体在回弹时间上也有所差异, 当 $\varphi = 25^\circ$ 时, 所需时间最长, 约为 7min, $\varphi = 32^\circ$ 时, 时间最短, 约为 3min。因此在支护力回弹时间上, 渗流没有发挥主要作用。第三阶段为开挖面位移大于 $3D\%$ 时, 随着位移的增大开挖面支护力逐渐趋于稳定值, 此阶段即可判断土体已经失稳。

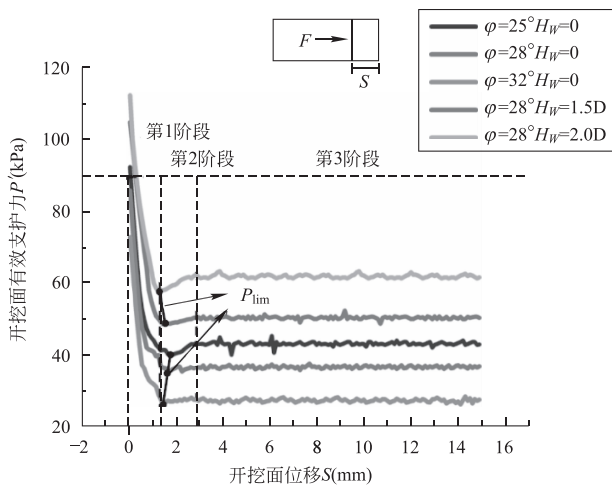


图 3 开挖面极限支护力-位移关系曲线

Fig 3 Relationships between ultimate support force pressure and tunneling face displacement

2.2 干燥土体开挖面失稳离心模型试验

如图 4 所示, 在同等埋深比 $C/D = 1$ 下, 隧道内摩擦角的增大, 开挖面支护力明显减小, 三种土体极限支护力分别为 40.2kPa 、 35.4kPa 和 26.1kPa 。对比图 5 开挖面土体失稳破坏模式可以看出, 不同土质的失稳模式也不同。随着开挖面位移的增大, 其前方土体发生变形, 这部分土体上方土颗粒沿垂直方向产生松动, 直接导致土体垂直向土压力迅速减小, 而水平土压力迅速增大, 表现为水平向土体更

加密实。此时土拱效应发挥作用, 初步形成土拱。引入侧压力系数 $K = \text{水平土压力} / \text{竖向土压力}$, 当 $K > 1$, 即水平向土压力大于竖向土压力时, 土体受力方向发生转变, 产生主应力轴发生旋转的现象。随着开挖面继续后撤, 隧道前方上部区域 K 值逐渐变大达到最大值, 此时土拱效应发挥到极值, 开挖面支护力取得最小值 P_{\min} 为试验所得极限支护力, 即图 3 中曲线的最低点。开挖面前方土体存在局部剪切破坏区域, 但此时土体处于极限平衡状态。当开挖面继续后撤, K 值由峰值逐渐减小, 局部剪切破坏区域发展为剪切滑动区, 滑动面初步形成并向上延伸, 导致原有土拱破坏, 土拱上方土体塌落并最终形成局部失稳破坏, 此时开挖面支护力逐渐上升, 也就是前文提到的第二阶段中的回弹。土拱继续向上移动, 迭代新的土拱并最终发挥承载作用。如图 5(a), 由于土质的不同, 当水平土压力与竖向土压力达到平衡, 新的土拱足以承受上部松动土体荷载, 土拱则完成了整个延伸过程, 最终止于局部失稳状态。

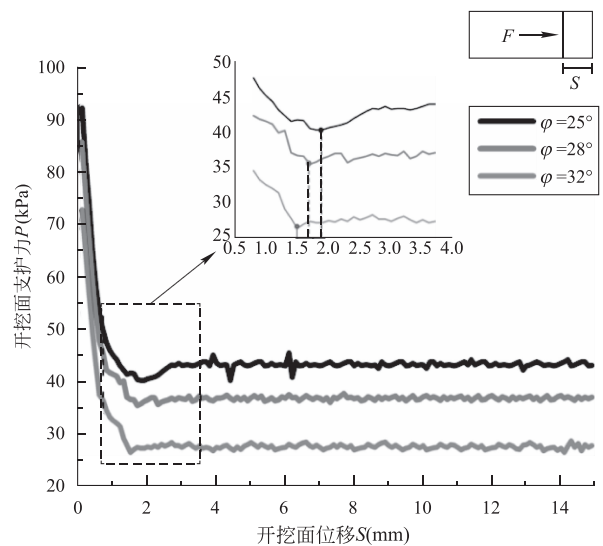


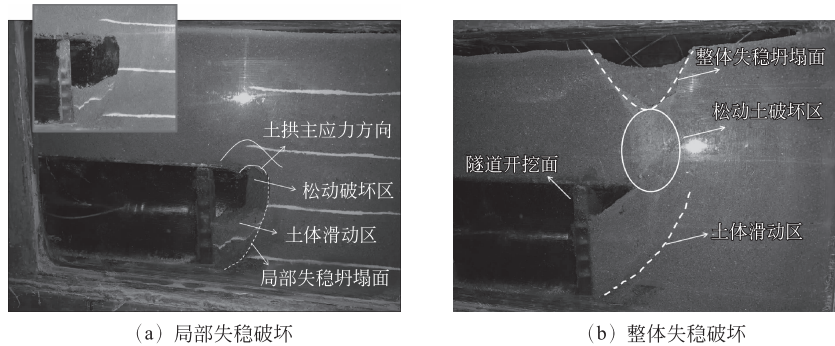
图 4 不同内摩擦角土质支护力-位移关系曲线

Fig 4 Relationships between support force pressure and tunneling face displacement with different internal friction angle

不断的土拱迭代使得接近地表的土体产生松动, 地表有微小沉降, 此时松动土体特别敏感。当开挖面继续后撤, 松动土体会随着土拱的迭代而坍塌, 继而使得地表大幅沉降, 土体产生整体失稳破坏。如图 5 (b) 所示。在这个过程中, 土拱效应沿隧道上方由底向顶发挥作用, 并随着失稳滑动面的拓展破坏。之后产生松动土区, 依次循环, 最终发展至地表, 土拱效应逐渐失效, 开挖面支护力趋于一个稳定值, 也就是

前文提到的第三阶段。地表沉降形似漏斗、烟囱等，

这主要与土质、 C/D 、水文状况等相关^[25]。



(a) 局部失稳破坏

(b) 整体失稳破坏

图 5 开挖面土体失稳破坏模式

Fig 5 Failure mode of excavation face

2.3 饱和土体开挖面失稳离心模型试验

由图 6 不同水头压力下极限支护力-位移关系曲线图可以看出，当 $H_w = 1.5D$ 时，极限有效支护力 $P'_{lim} = 48.7\text{kPa}$ ，比干燥情况下增大了 37.6%；当 $H_w = 2D$ 时，极限有效支护力 $P'_{lim} = 57.8\text{kPa}$ ，比干燥情况下增大了 63.3%，比 $H_w = 1.5D$ 工况下增大了 18.7%。通过数据拟合得出，极限有效支护力随着水头压力的增大而线性增大。

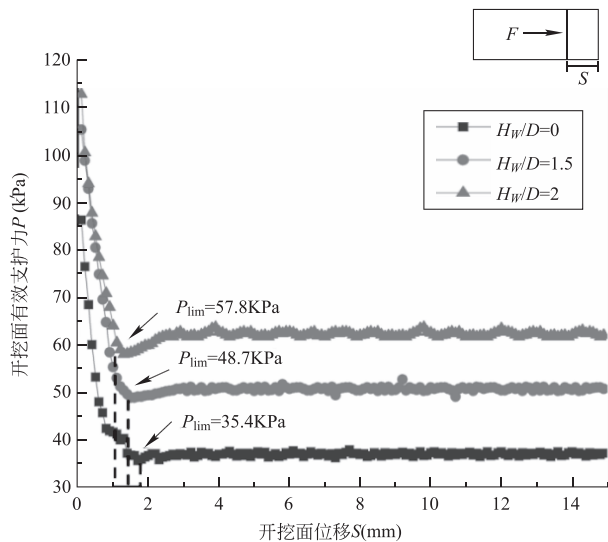


图 6 不同水头压力下极限支护力-位移关系曲线

Fig6 Relationships between ultimate support force pressure and tunneling face displacement with different head pressure

由图 7 渗流情况下开挖面土体整体失稳破坏图可得，土体发生了整体失稳破坏，地表呈现烟囱状。对比图 5(a) 不难发现，在渗流力作用下，土体的变形被加速，使得坍塌体宽度拓展，体积更大，由底部延伸至地表，加剧了土拱迭代速度以及破坏力度。在理论计算和数值模拟中，为方便计算常常把渗流系数看作为各向同性的，而通过本文试验结果图对

比可以看出，沿着隧道坍塌区域内土体的渗流力要明显大于破坏面以外的渗流力，同时靠近隧道面的渗流力要明显大于远离隧道面的渗流力。不难看出，若开挖面继续后撤，在渗流力的作用下，原本受力平衡的土颗粒会被携带到下方，使得烟囱状不断变宽，最终导致隧道体内充满土体。这也是盾构失稳过程中，应在何时及时加大开挖面支护力，制止坍塌进一步发展，防止发生涌水涌泥现象的关键所在。

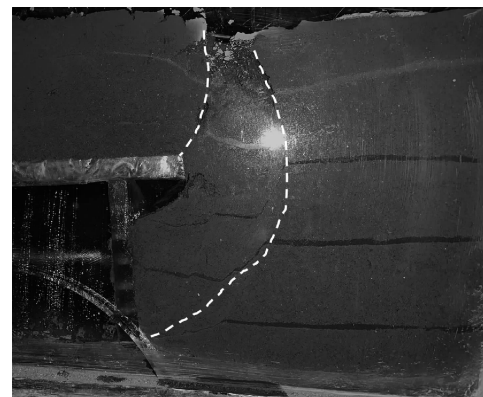


图 7 渗流情况下开挖面土体整体失稳破坏

Fig 7 Soil body instability and failure under excavation

3 结 论

通过开展盾构隧道开挖面失稳离心模型试验，通过对比 3 种不同内摩擦角土开挖面支护力大小及失稳形态，分析渗流力对失稳过程的影响及土拱效应的发挥，可以得到以下结论：

(1) 开挖面失稳过程可分为 3 个阶段，第一阶段 ($S < 1.5D\%$)，随着 S 增大， P 极速下降；第二阶段 ($1.5D\% \leq S \leq 3D\%$)，随着 S 增大，开挖面支护力达到极限状态即 P_{lim} ，之后 P 缓慢上升，在图形上表现

为圆弧状；第三阶段($3D\% < S$)，随着 S 继续增大， P 逐渐趋近于稳定值。

(2) 隧道开挖面前方土体失稳模式与土体内摩擦角有关，是一个由局部破坏到整体破坏的渐进过程，不同内摩擦角土体在土拱迭代过程中响应速度有所不同。

(3) 在渗流力的作用下，同一种土质支护力随着水头压力的增大而线性增大，同时加剧了土拱迭代速度和破坏力度，验证了渗流力具有各向异性。

参 考 文 献

- [1] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 盾构法隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 112-116 (Huang Zhengrong, Zhu Wei, Liang Jinghua, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 112-116 (in Chinese))
- [2] 潘建立. 隧道掘进地层应力释放对开挖面稳定影响数值研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增1): 275-278 (Pan Jianli. Numerical study on effects of ground stress release on face stability during tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 275-278 (in Chinese))
- [3] 王俊, 林国进, 唐协, 等. 砂土地层盾构隧道稳定性三维离散元研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 312-321 (Wang Jun, Lin Guojin, Tang Xie, et al. Face stability analysis of shield tunnel in sandy ground using 3D DEM [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 312-321 (in Chinese))
- [4] Zhang X, Wang M N, Li J W, et al. Safety factor analysis of a tunnel face with an unsupported span in cohesive-frictional soils [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103221
- [5] Broms B B, Bennermark H. Stability of clay at vertical opening [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(1): 71-94
- [6] Attewell P B, Boden J B. Development of stability ratios for tunnels driven in clay [J]. Tunnels and Tunneling, 1971, 3(3): 195-198
- [7] Leca E, Dormieux L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material [J]. Geotechnique, 1990, 40(4): 581-606
- [8] Lee I M, Nam S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16: 31-40
- [9] Jancsecz S, Steiner W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions [J]. Tunnelling, 1994, 94: 531-550
- [10] Anagnostou G, Kovari K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 165-174
- [11] Mollon G, Dias D, Soubra A H. Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 215-229
- [12] Anagnostou G, Kovári K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 165-173
- [13] Broere W. Face stability calculation for a slurry shield in heterogeneous soft soils [C] // Proceedings of the World Tunnel Congress 98 on Tunnels and Metropolises. Sao Paulo: Balkema Rotterdam Press, 1998
- [14] 徐明, 邹文浩, 刘瑶. 超大直径泥水盾构在砂土中的开挖面稳定性分析 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 174-181 (Xu Ming, Zou Wenhao, Liu Yao. Face stability of large slurry shield-driven tunnel in sands [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 174-181 (in Chinese))
- [15] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 迎坡条件下盾构隧道开挖面极限支护力计算与分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 488-492 (Lei Mingfeng, Peng Limin, Shi Chenghua, et al. Calculation and analysis of limit support force of shield tunnel excavation face under facing-slope conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 488-492 (in Chinese))
- [16] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57-62 (Lv Xilin, Wang Haoran, Huang Maosong. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57-62 (in Chinese))
- [17] Atkinson J H, Potts D M. Subsidence above shallow tunnels in soft ground [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(4): 307-325
- [18] Mair R J. Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1979
- [19] Chambon P, Corté J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165
- [20] 陈仁朋, 尹鑫晟, 汤旅军, 等. 考虑渗流条件下开挖面失稳离心试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增1): 225-229 (Chen Rempeng, Yin Xinseng, Tang Lvjun, et al. Centrifugal model tests of tunneling face failure under seepage flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 225-229 (in Chinese))
- [21] 吕玺琳, 曾盛, 王远鹏, 等. 饱和圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性物理模型试验 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增2): 129-132 (Lv Xilin, Zeng Sheng, Wang Yuanpeng, et al. Physical model tests on stability of shield tunnel face in saturated gravel stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 129-132 (in Chinese))
- [22] 李君, 陈仁朋, 孔令刚. 干砂地层中盾构开挖面失稳模式及土拱效应试验研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 142-148 (Li Jun, Chen Rempeng, Kong Linggang. Model test study of the failure mechanism of shallow tunnels in dry sands [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 142-148 (in Chinese))

(下转第 118 页)

- [J].铁道工程学报, 2012(10): 63-69 (Zhang Peng. Research on mechanical property of segment of shield tunnel during construction with Three-dimensional numerical simulation[J].Journal of Railway Engineering Society, 2012(10): 63-69 (in Chinese))
- [8] 邵生俊, 邓国华.原状黄土的结构强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J].土木工程学报, 2008, 41(11): 93-98 (Shao Shengjun, Deng Guohua.The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 93-98 (in Chinese))
- [9] 郭华伟.黄土深埋大直径盾构隧道围岩压力及管片力学性能研究[D].西安: 长安大学, 2019 (Guo Huawei. Study on surrounding rock pressure and mechanical properties of the segments of loess deep-buried large-diameter shield tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese))
- [10] 邓国华.真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[D].西安: 西安理工大学, 2009 (Deng Guohua. Research on structural parameter of loess and structure constitutive relations under true tri-axial condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009 (in Chinese))
- [11] 封坤, 何川, 夏松林.大断面盾构隧道结构横向刚度有效率的原型试验研究[J].岩土工程学报, 2011, 33(11): 1750-1758 (Feng Kun, He Chuan, Xia Songlin. Prototype tests on effective bending rigidity ratios of segmental lining structure for shield tunnel with large cross-section [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1750-1758 (in Chinese))
- [12] Mollon G, Dias D, Soubra A H. Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements [J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(2): 181-199
- [13] 王敏强, 陈胜宏.盾构推进隧道结构三维非线性有限元仿真[J].岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 228-232 (Wang Mingqiang, Chen Shenghong. 3-Dimensional non-linear finite element simulation of tunnel structure for moving-forward shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 228-232 (in Chinese))

向 亮(1985—),男,硕士,高级工程师。主要从事隧道与地下工程方面的研究。

王 飞(1983—),男,硕士,高级工程师。主要从事隧道与地下工程方面的研究。

靳宝成(1976—),男,学士,高级工程师。主要从事隧道与地下工程方面的研究。

王 斌(1995—),男,硕士研究生。主要从事隧道与地下工程方面的研究。

田崇明(1994—),男,博士研究生。主要从事隧道结晶病害和混凝土材料方面的研究。

欧阳奥辉(1995—),男,硕士研究生。主要从事隧道与地下工程方面的研究。

(上接第 104 页)

- [23] 宋锦虎, 缪林昌, 胡斌, 等.地下水对盾构开挖面上方土拱效应影响的试验研究[J].土木工程学报, 2014, 47(2): 109-120 (Song Jinhu, Miao Linchang, Hu Bin, et al. Experimental study on influence of ground water on the soil arching above the tunnelling face [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 109-120 (in Chinese))
- [24] Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology [M]. London: Blackie Academic & Professional, 2005
- [25] Weng X L, Sun Y F, Yan B H, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of tunnel face stability considering longitudinal slope angle and steady state seepage in soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 101: 103406
- [26] 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

牛豪爽(1994—),男,博士研究生。主要从事盾构隧道开挖面稳定性方面的研究。

翁效林(1980—),男,博士,副教授。主要从事盾构隧道监测、盾构隧道开挖面稳定性方面的研究。

余航飞(1996—),男,硕士研究生。主要从事盾构隧道开挖面稳定性试验方面的研究。

胡继波(1995—),男,硕士研究生。主要从事盾构隧道开挖面稳定性理论方面的研究。