

DOI: 10.11779/CJGE2022S2022

隧道无支撑长度对开挖面稳定性影响的离心模型试验

牛豪爽, 翁效林*, 胡继波, 侯乐乐

(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: 考虑了隧道开挖过程中无支撑长度的影响, 结合机械手系统开发了一整套离心试验装置。通过开展不同无支撑长度下 C/D 、内摩擦角的离心试验, 研究了在考虑无支撑长度下不同土质开挖面支护力变化规律及失稳模式机理, 提出了应考虑无支撑长度上方土体的双块失稳体。结果显示, 在考虑无支撑的条件下, 土体的失稳由无支撑上方土体和开挖面前方土体两部分组成, 且两部分不是同时发生失稳, 打破了传统对于开挖面失稳的认知; 随着 C/D 的增大, 土体的失稳由开始的两部分组成逐渐转变为一部分组成, 且支护力也逐渐减小; 无支撑长度与开挖面支护力呈线性增加, 同时缩短了土体进入失稳阶段的时间; 随着内摩擦角的增大, 极限支护力逐渐减小并趋于稳定值, 但并未对失稳模式产生影响。

关键词: 隧道; 离心试验; 无支撑长度; 开挖面支护力; 失稳模式

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0101-06

作者简介: 翁效林(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道开挖面稳定性分析。E-mail: wengxl2000@126.com。

Centrifugal model tests on influences of unsupported length of tunnels on stability of excavation face

NIU Hao-shuang, WENG Xiao-lin, HU Ji-bo, HOU Le-le

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Considering the influences of unsupported length during the process of tunnel excavation, a complete set of centrifugal test device is developed combined with the manipulator system. Based on the centrifugal tests on C/D and internal friction angle under different unsupported lengths, the variation laws of support force and the mechanism of instability mode of different soil excavation faces under the consideration of unsupported length are studied, and the double-block instability body above the unsupported length should be considered. The results show that considering the unsupported condition, the instability of soil is composed of the soil above the unsupported part and the soil in front of the excavation face, and the two parts do not lose stability at the same time, which breaks the traditional understanding of the instability of the excavation face. With the increase of C/D , the instability of soil gradually changes from two parts to one part, and the support force also decreases. The length of unsupported part increases linearly with the support force of excavation face, and shortens the time for soil to enter the instability stage. With the increase of the internal friction angle, the ultimate support force gradually decreases and tends to a stable value, but has no effects on the instability mode.

Key words: tunnel; centrifugal test; unsupported length; support force of excavation face; instability mode

0 引言

采用盾构法或浅埋暗挖法开挖隧道时, 不可避免地会对周围土体产生扰动, 并可能因为没有足够的支护力而导致隧道开挖面的坍塌失稳^[1]。在传统的隧道施工中, 隧道面和支护结构之间总有一段无支撑的跨度, 它只能在开挖完成后安装支撑, 而且无支撑的长度 L 同时影响着隧道开挖面和无支撑跨度的稳定性, 对隧道的开挖支护方法和时间成本也有很大的影响^[2]。

国内外学者通过试验及理论分析等方法对开挖面稳定性进行了一系列研究。目前理论研究主要是极限

平衡法和极限分析法。Horn^[3]通过极限平衡法, 提出隧道开挖面的失稳是由上方的简仓和下方的楔形体组成, Anagnostou 等^[1]提出无支撑跨度的影响, 结合 Horn^[3]所提出的模型进行稳定性分析, Anagnostou 等^[4]考虑了锚杆加固下的失稳模式, 并结合数值分析提出隧道开挖面稳定性的锚杆设计图。Paternesi 等^[5]对比了加固与未加固隧道开挖面的稳定性, 基于极限平衡

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277151)

收稿日期: 2022-12-01

*通信作者: (E-mail:wengxl2000@126.com)

法得到更加接近的结果。Zhang 等^[6]同时考虑了水平拱和锚杆支护的效应，并基于极限平衡和强度折减法进行稳定性分析。一些学者通过改进楔形体模型得到了很多成果^[7-9]，但都是假定失稳面为一平面，这显然与试验的结果不符^[10-12]。Murayama 等^[13]提出滑动面为对数螺旋函数的二维极限平衡模型，但由于忽略了侧摩擦力，模型结果比较保守。Krause^[14]对比了二维和三维极限平衡模型，发现采用半球形模型计算得到的开挖面支护力与实际更贴近。后来许多学者^[15-17]将计算模型推广到三维空间，但都忽略了无支撑长度对开挖面失稳的影响。

基于经典塑性理论建立的极限分析法也是一种常用的理论方法，Davis 等^[18]推导了平面应变假设下隧道面稳定性分析的上限和下限解，Leca 等^[19]通过构造圆锥体组成特定的机动场或应力场，获得摩擦土的下限解析解，随后 Mollon 等^[20]利用离散化技术生成一种基于旋转破坏的三维破坏面，该模型后来经过修改，适用于各向异性土体^[21]、多层土体^[22]和非圆形开挖隧道^[23]，然而这些模型都没有考虑无支撑长度对开挖面稳定性的影响。

试验研究也是一种可靠的方法，Chambon^[24]开展了砂土地层中开挖面失稳离心模型试验，研究发现开挖面极限支护力受土体密度及隧道埋深比 C/D 影响较小（ C 为隧道埋深， D 为隧道直径。），Takano 等^[25]通过 $1 g$ 小比尺模型试验，采用 X-Ray 技术发现失稳区在纵断面上的边界为一对数螺旋线，Kirsch^[26]采用 PIV 获得了失稳过程中隧道对称面上土体位移场，发现土的密度对破坏区的形状有明显的影响。为了揭示隧道面和不同圆形长度的无支撑跨度的破坏行为，Lee 等^[27]进行了小型模型试验，结果表明，如果隧道面最初是稳定的，那么隧道面的稳定性与圆形长度无关，但过大的圆形长度可能导致隧道面和无支撑跨度的失稳。

为了进一步再现隧道开挖实际工况，并对比加固与未支撑下的开挖面稳定性影响机制，同时为现有理论研究提供试验数据参考，因此有必要进行一系列试验来研究这个问题，本文通过多组离心试验，研究了不同密度土、 C/D 及无支撑长度对开挖面失稳的影响，对比了不同无支撑长度下的支护力变化规律，并结合支护力变化分析失稳模式的变化。

1 离心模型试验

本试验在长安大学 TLJ-3 离心机上进行，最大容量 60 gt，旋转半径 2 m，最大离心加速度 $200g$ ^[28]，其中机械手系统由机械手主机和电气系统构成。机械手

主机包括机械手和模型箱，见图 1。机械手可以实现四轴联动，各方向都由独立的电机驱动，依靠 X 、 Y 、 Z 轴直线机构和 C 轴旋转机构实现机械手四轴精确定位。机械手作为位移控制装置，能够以指定的速率进行四轴联动，直线速率为 $0.001\sim10$ mm/s，旋转速率为 $0.01\sim1.0$ rad/s。

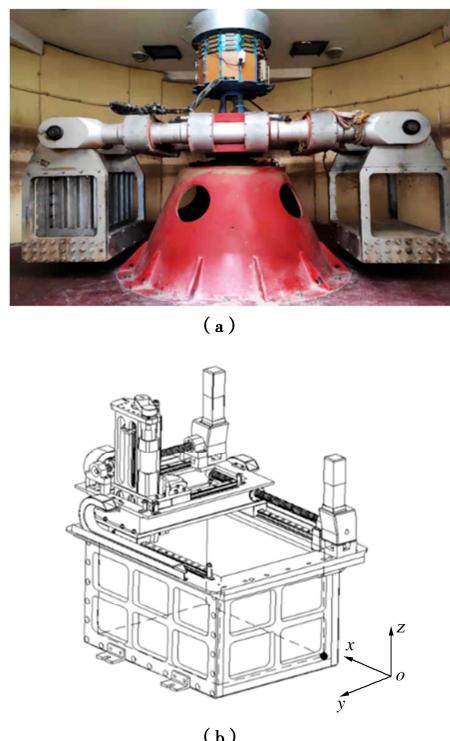


图 1 长安大学土工离心机和机械手系统

Fig. 1 Geotechnical centrifuge of Chang'an University and manipulator system

离心机机械手系统一般用来模拟结构、荷载变化而引起的稳定性问题，提供力学分析与施工设计所需的数据，近年来多用于基坑分层开挖、支护、锚固以及触探等一系列动作，也可以作为移动拍照、录取数据的平台。如图 2 为机械手在研究隧道开挖面稳定性中的首次应用，机械手的四轴终端（法兰）通过自制装置与开挖面后撤测力计铰接，中间螺纹口连接 FBG，通过测力计的积压或拉伸来使得 FBG 的传输光缆将数据传到外部电脑。

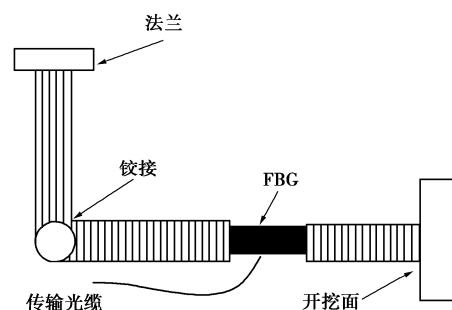


图 2 机械手模拟后撤装置

Fig. 2 Manipulator simulation fallback device

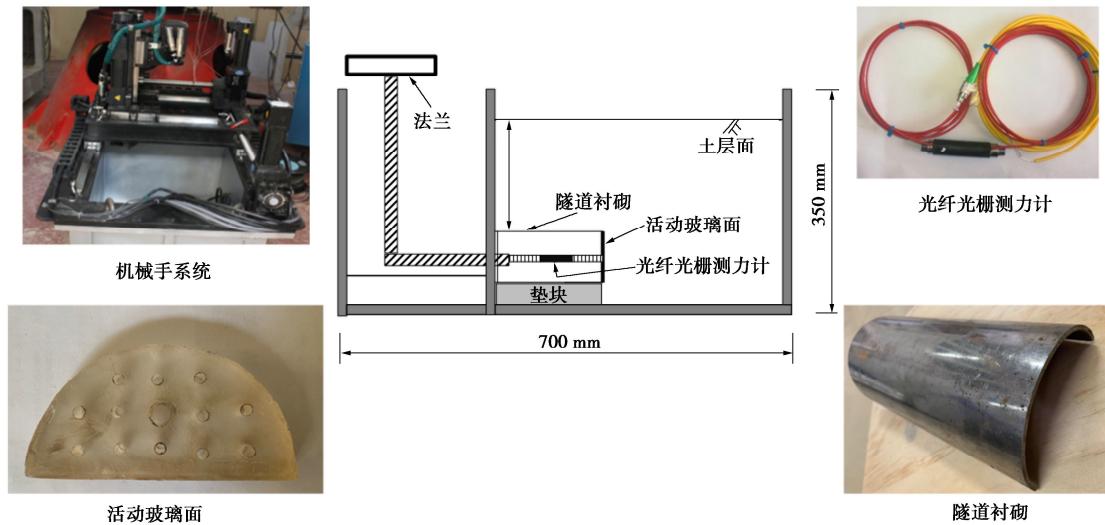


图 3 隧道开挖面失稳离心试验模型箱

Fig. 3 Centrifugal test model box for instability of excavation face of tunnel

在以往的隧道开挖面稳定性研究中, 离心试验的模拟一般采用后撤位移法来探究开挖面失稳模式以及测得的极限支护力, 而传统的开挖面后撤多以步进机或改造装置完成, 与离心机的匹配度以及精确度很难把握, 所得到的数据也不理想, 本文首次开发利用机械手完成开挖面后撤, 且利用其精准的控制以及光纤光栅(FBG)高灵敏度的测量方式来研究, 从而实现开挖面从失稳到破坏的全过程。

1.1 相似比例

为保证与实际模型的力学行为相似, 缩尺模型必须遵循相似规律已得到学者们的认可^[29], 同时应满足质量守恒定律、相似材料的应力应变定律及动力学方程^[30]。

1.2 试验装置

如图3为离心试验模型箱示意图, 箱内尺寸为700 mm×400 mm×350 mm(长×宽×高)。模型箱正面为高强度透明玻璃, 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。因为隧道具有对称性, 为合理观测位移及变形, 隧道模型由横截面为“D”的钢板制成, 隧道内径为100 mm, 并设置了一个0.3D(300 mm)厚的可移动玻璃板来约束和支撑隧道面, 活动玻璃板的移动可以根据试验需求由机械手完成, 传力杆用来连接机械手和活动玻璃板, 中间嵌入一个光纤光栅测力计用于测量开挖面前方土体应力变化, FBG通过无线传输到外部电脑, 克服了离心试验有线传输的困难^[31]。活动玻璃板与隧道壳之间用凡士林涂抹, 填补空隙防止土颗粒进入, 同时可以减少摩擦力, 在不加土的情况下空转模型箱, 使得试验条件与离心条件一致, 在100g条件下获得开挖面后撤所受摩擦力, 通过此标定法可得到开挖面后撤摩擦力平均值为16 N。

1.3 试验材料

土层材料用的是西安渭河河沙和本地黏土, 通过按照不同比例调配出3种不同内摩擦角的土体, 内摩擦角分别为25.2°, 28.7°, 32.5°, 土层采用分层填压, 每层控制在20 mm。由于不考虑隧道衬砌的变形和受力, 衬砌材料为高强度钢板, 不再计算刚度关系。活动玻璃板厚度0.3D, 可以模拟最大无支撑长度为0.3D, 模拟示意图如图4所示。

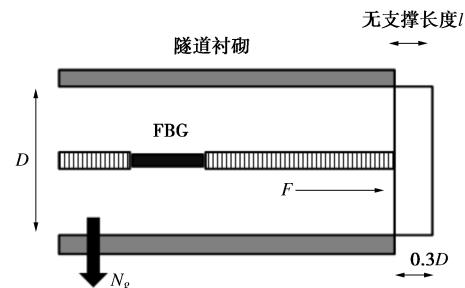


图 4 隧道无支撑长度示意图

Fig.4 Schematic diagram of unsupported length of tunnel

1.4 试验处理

在1g条件下完成土层填筑和无支撑长度的预设, 离心加速度设计为100g(隧道原型为10 m), 模型箱调入离心机后, 启动离心加速, 待加速度稳定后, 通过机械手控制开挖面后撤来使得前方土体失稳, 并实时通过FBG监测开挖面上支护力的大小, 以获得后撤距离(时间)-力-失稳模式的关系。FBG可以通过换算公式直接测得所在开挖面上的支护力^[31], 其具有灵敏度高、适应性强等特点。

2 结果分析

采用位移后撤式的分析方式来得到开挖面极限支护力^[24], 从而进行分析, 因数据量较大, 数据处理只

选取前期有效变化阶段, 后续稳定阶段不再处理。

2.1 无支撑长度 L 的影响

如图 5 所示, 横坐标为开挖面后撤距离, 根据机械手速率也可换算为时间, 纵坐标为 FBG 测得的开挖面极限支护力。随着无支撑长度的增加, 极限支护力明显增加, P 的大小分别为 31.1, 32.2, 33.5, 34.5 kPa, 依次增加了 3.5%, 4.0%, 3.0%。

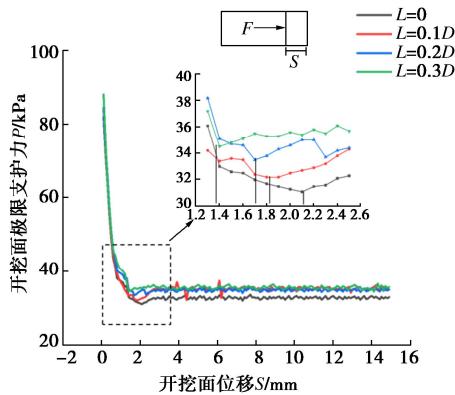


图 5 不同无支撑长度下不惑之年面位移与极限支护力关系
($C/D=1.5$, $\varphi=32.5^\circ$)

Fig. 5 Relationship between displacement of excavation face and ultimate support force under different unsupported lengths

如图 6 所示, 同种工况条件下, 无支撑长度与隧道开挖面支护力呈线性增大, 这也为后续量化无支撑长度设计计算提供基础。开挖面整个失稳过程用支护力描述依旧是迅速下降-缓慢回弹-趋于稳定 3 个阶段^[28]。

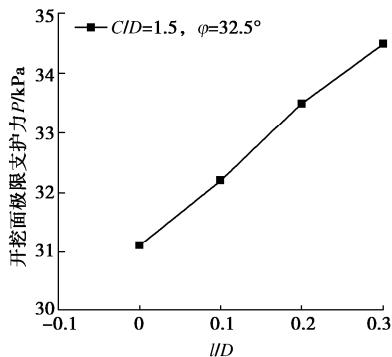


图 6 无支撑长度-极限支护力关系

Fig. 6 Relationship between of ultimate support force and unsupported lengths

但是可以看出, 无支撑长度的增加, 加速了失稳的发展, 使得土体更快地完成失稳第一阶段, 而随着无支撑长度的继续增大, 这个时间会被极速缩短。 P 的增加很大一部分为无支撑上部的少量土体坍塌, 少部分为上部土体的坍塌蔓延带动周围松动土体, 而从增加的量来判断, 无支撑上部土体并未完全失稳, 而是少部分松动土体的失稳, 这也符合^[27]中所提到的, 对于 C/D 达到一定值后, 已经稳定的土体受无支撑长

度的影响较小, 但过大的无支撑长度, 将会使得上部土体和隧道前方土体发生失稳。对于隧道开挖, 合理的支护时间非常重要, 有过长的无支撑长度作业时, 应缩短支护时间, 适当加大支护设计力。

2.2 C/D 在无支撑长度下的影响

很多学者已经在 C/D 对隧道支护力的影响上做了大量研究, 但是并未考虑无支撑长度的影响, 在传统的数值分析或者试验中, 认为隧道是开挖即支护的, 但实际施工中并非这样, 那么它的失稳也会有不一样的模式。如图 7 所示, 随着 C/D 的增加, 开挖面支护力也不断增加, 在 C/D 为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 时 P 分别为 25.5, 31.8, 34.5, 35.2 kPa。增加了 24.7%, 8.5%, 2%。

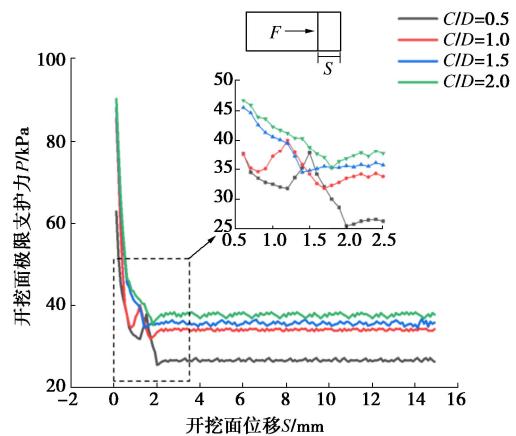


图 7 不同 C/D 下开挖面位移与极限支护力关系 ($L=0.3D$, $\varphi=32.5^\circ$)

Fig. 7 Relationship between displacement of excavation face and ultimate support force under different C/D

这也与传统的试验结果趋势接近, 但是从图中放大的关系图可以看出, 在 C/D 为 0.5, 1.0 时, 开挖面整个失稳过程有两个极限值出现, 与先前的三阶段出现一个极限值不同。分析原因不难发现, 在土体未达到稳定的条件下, 开挖面的后撤引起土体的失稳, 而失稳的范围分为两部分, 一部分为无支撑长度上方土体的失稳, 另一部分为开挖面前方土体的失稳, 进一步证明了在考虑无支撑长度的条件下, 开挖面前方的土体失稳是分为两部分的, 同时两部分的失稳也不是同时完成, 当 C/D 为 1.5, 2.0 时, 整个失稳过程又回归到先前所说, 失稳部分仅存在于开挖面前方的土体。总的来说, 在同一种土质中, 当 C/D 过小时, 开挖面的失稳主要为无支撑长度上方土体的失稳和前方土体失稳两部分组成, 随着 C/D 的逐渐增大, 失稳区域由两部分逐渐转为前方土体一部分, 这也对失稳区域进行重新的定位, 对于上方土体失稳条件的具体界定还有待进一步探究。如图 8 所示, 当 $C/D=1.5$, $L=0.3D$ 时土体失稳前后的对比, 此时仅开挖面前方土体发生失稳。

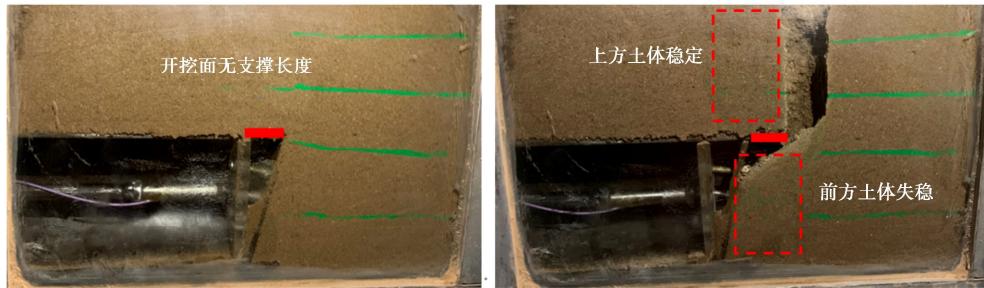


图 8 隧道失稳前后对比

Fig. 8 Comparison before and after tunnel instability

2.3 不同内摩擦角在无支撑长度下的影响

如图 9 所示, 在 φ 为 25.2° , 28.7° , 32.5° 时, P 分别为 41.2 , 38.4 , 34.5 kPa, 依次减小了 6.8% , 10.2% 。可以看出, 随着内摩擦角的增大, 极限支护力不断减小, 由于试验条件有限, 没有进一步增大内摩擦角进行试验, 但从支护力变化趋势可以看出, 在无支撑条件下, 内摩擦角的变化并没有改变土体失稳模式, 随着内摩擦角的继续增大, 开挖面极限支护力也将趋于稳定值^[2], 且不作为影响开挖面支护力及失稳模式的因素, 因为随着内摩擦角的增大, 其土体内部土拱效应发挥显著, 土体的开挖自稳能力逐渐增强, 也就意味着无支撑长度上方土体保持稳定状态, 而前方土体因为土拱效应的发展, 使得失稳区域逐渐减小即支护力逐渐降低。

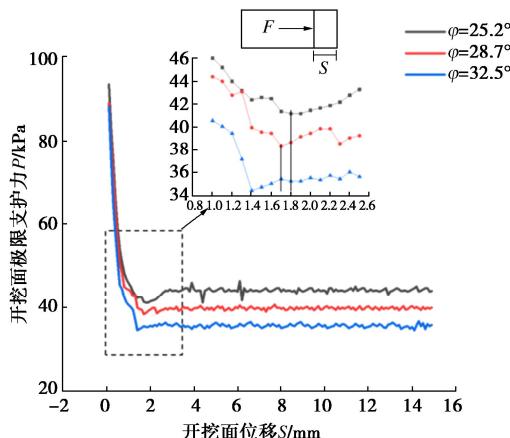


图 9 不同内摩擦角下开挖面位移与极限支护力关系 ($C/D=1.5$, $L=0.3D$)

Fig. 9 Relationship between displacement of excavation face and ultimate support force under different internal friction angle

3 结 论

通过开展无支撑长度对开挖面稳定性影响的离心模型试验, 对比不同无支撑长度及无支撑下不同内摩擦角、不同 C/D 土体的支护力大小及失稳模式, 分析了这些因素对于开挖面支护力的影响趋势和失稳模式的影响范围, 可以得到 4 点结论。

(1) 在考虑无支撑的条件下, 土体的失稳由无支撑上方土体和开挖面前方土体两部分组成, 且两部分不是同时发生失稳。

(2) 在 C/D 为 0.5 , 1.0 时, 土体的失稳由两部分组成, 随着 C/D 的增大, 无支撑长度上方土体逐渐趋于稳定, 且支护力也逐渐减小。

(3) 随着无支撑长度的增加, 开挖面支护力呈线性增加, 同时缩短了土体进入失稳阶段的时间, 也为隧道支护提供时效依据。

(4) 考虑无支撑的条件下, 随着内摩擦角的增大, 极限支护力逐渐减小并趋于稳定值, 但并未对失稳模式产生影响。

参考文献:

- [1] ANAGNOSTOU G, PERAZZELLI P. The stability of a tunnel face with a free span and a non-uniform support[J]. Geotechnik, 2013, **36**(1): 40 – 50.
- [2] ZHANG X, WANG M, LI J, et al. Safety factor analysis of a tunnel face with an unsupported span in cohesive-frictional soils[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **117**: 103221.
- [3] HORN N. Horizontal earth pressure on the vertical surfaces of the tunnel tubes[C]// National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry, Budapest, 1961: 7 – 16.
- [4] ANAGNOSTOU G, PERAZZELLI P. Analysis method and design charts for bolt reinforcement of the tunnel face in cohesive-frictional soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **47**: 162 – 181.
- [5] PATERNESI A, SCHWEIGER H F, SCARPELLI G. Numerical analyses of stability and deformation behavior of reinforced and unreinforced tunnel faces[J]. Computers & Geotechnics, 2017, **88**: 256 – 266.
- [6] ZHANG X, WANG M N, WANG Z L, et al. Stability analysis model for a tunnel face reinforced with bolts and an umbrella arch in cohesive-frictional soils[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **124**: 103635.
- [7] ANAGNOSTOU G, et al. Face stability conditions with

- earth-pressure-balanced shields[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, **11**(2): 165 – 173.
- [8] BROERE W. *Tunnel Face Stability & New CPT Applications*[M]. Delft: Delft University Press, 2001.
- [9] ANAGNOSTOU G. The contribution of horizontal arching to tunnel face stability[J]. *Geotechnik*, 2012, **35**(1): 34 – 44.
- [10] 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**(增刊 1): 225 – 229. (CHEN Ren-peng, YIN Xin-sheng, TANG LU-jun, et al. Centrifugal model tests of tunneling face failure under seepage flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S1): 225 – 229. (in Chinese))
- [11] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2010, **5**(1): 43 – 62.
- [12] MESSERLI J, PIMENTEL E, ANAGNOSTOU G. Experimental study into tunnel face collapse in sand[C]// *Physical Modelling in Geotechnics*. Zurich, 2010.
- [13] MURAYAMA S, ENDO M, HASHIBA T, et al. Geotechnical for the excavating performance of the shield machines[C]// *The 21 st annual lecture in meeting of Japan Society of Civil Engineers*, 1966.
- [14] KRAUSE T. *Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erdgestützter ortsbrust*[D]. Brunswick: Technical University Carolo-Wilhelmina, 1987.
- [15] LIU X Y. Dual-failure-mechanism model for face stability analysis of shield tunneling in sands[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **85**: 196 – 208.
- [16] ZAMORA H Y, FARFÁN A D, ASSIS A, et al. Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **92**: 103062.
- [17] ZHANG C P, HAN K H, ZHANG D L. Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive-frictional soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, **50**: 345 – 357.
- [18] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J, et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 397 – 416.
- [19] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(4): 581 – 606.
- [20] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, **35**(12): 1363 – 1388.
- [21] PAN Q J, DIAS D. Face stability analysis for a shield-driven tunnel in anisotropic and nonhomogeneous soils by the kinematical approach[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, **16**(3): 04015076.
- [22] IBRAHIM E, et al. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, **49**: 18 – 34.
- [23] PAN Q J, DIAS D. Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, **62**: 96 – 102.
- [24] CHAMBON P, CORTÉ J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(7): 1148 – 1165.
- [25] TAKANO D, OTANI J, NAGATANI H, et al. Application of X-ray CT on boundary value problems in geotechnical engineering: research on tunnel face failure[C]// *Geo Congress 2006*. Atlanta, 2006.
- [26] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2010, **5**(1): 43 – 62.
- [27] LEE Y Z, SCHUBERT W. Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, **23**(3): 221 – 231.
- [28] 牛豪爽, 翁效林, 余航飞, 等. 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[J]. *土木工程学报*, 2020, **53**(增刊 1): 99 – 104, 118. (NIU Hao-shuang, WENG Xiao-lin, YU Hang-fei, et al. Centrifugal test study on instability mode of shield tunnel excavation face in silty sand stratum under seepage[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, **53**(S1): 99 – 104, 118. (in Chinese))
- [29] TAYLOR R N. *Geotechnical Centrifuge Technology*[M]. Abingdon: Taylor & Francis, 1988.
- [30] 杜延龄, 韩连兵. *土工离心模型试验技术*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (DU Yan-ling, HAN Lian-bing. *Centrifugal Model Test Technology of Geotechnical Engineering*[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [31] WENG Xiao-lin, HAO Hao. Stress monitoring for anchor rods system in subway tunnel using fbg technology[J]. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2015: 1 – 7.