

DOI: 10.11779/CJGE20220309

基于修正椭球体理论的隧道松动区及松动土压力研究

方 焘¹, 梁 连¹, 陈其志²

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 浙江科技学院土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要: 隧道松动区的预测对松动土压力的计算至关重要。因此, 为了精确简便地预测不同地质特性和工况下隧道极限松动区, 首先从地层损失的角度对椭球体理论进行修正; 然后利用自主设计的试验装置并结合 PIV 技术对修正后的椭球体理论进行验证; 最后结合椭球体理论以及松动区内部土体主应力轴旋转对隧道松动土压力公式进行修正。研究表明: ①随着地层损失的产生、增大, 隧道上方地层流出区域和极限松动区域类似椭圆的形状并且其长短半轴均逐渐扩大; 通过对比可知修正后的椭球体理论较现有理论与试验结果更加吻合。②修正后的松动土压力公式综合考虑了松动滑移范围及土拱效应, 通过和相关文献的试验结果进行对比分析, 验证了修正后松动土压力计算公式的合理性, 因此该公式可用于砂性地层中隧道和管线上方的松动土压力计算。

关键词: 隧道工程; 椭球体理论; PIV 技术; 松动区; 土拱效应

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)06-1113-10

作者简介: 方 焘(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事基坑与隧道工程方面的教学与研究工作; E-mail: fangtaolq@163.com。

Loosening zone and earth pressure around tunnels based on modified ellipsoid theory

FANG Tao¹, LIANG Lian¹, CHEN Qizhi²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The prediction of loosening zone around tunnels is crucial for the calculation of loosening earth pressure. Therefore, in order to accurately and easily predict the limit loosening zone around tunnels under different geological characteristics and working conditions, the ellipsoid theory is firstly modified from the perspective of ground loss. Then, the modified ellipsoid theory is verified by using the self-designed test device and the PIV technique. Finally, the equation for the loosening earth pressure around tunnels is modified by combining the ellipsoid theory and the rotation of the principal stress axis of the soils inside the loosening zone. The study shows that: (1) With the generation and increase of ground loss, the ground outflow area and the limit loosening area above tunnels resemble the shape of an ellipse, and their long and short semi-axes are gradually expanded. The modified ellipsoid theory is more consistent with the experimental results than the existing theories through comparison. (2) The modified formula for the loosening earth pressure integrates the range of loosening zone and the soil arching effect, and the rationality of the modified formula for calculating the loosening earth pressure is verified by comparing with the experimental results in the related literatures. So the proposed formula can be used for the calculation of the loosening earth pressure around tunnels and pipelines in sandy strata.

Key words: tunnel engineering; ellipsoid theory; PIV technique; loosening zone; soil arching effect

0 引 言

隧道上覆土压力的预测对隧道结构的设计和施工具有重要意义。对于浅埋隧道其上方的竖向土压力可以直接采用全覆土柱法进行计算, 但是随着隧道埋深的增大, 地层内部产生土拱效应从而使隧道的实际松动土压力远小于全覆土重。因此, 很多学者针对土拱效应下的隧道松动土压力的计算进行了研究。

Terzaghi^[1]基于 Trapdoor 试验建立了土拱效应下松动土压力计算的解析模型。此后其推导的公式被广泛用于隧道、地下管线以及路堤桩桩间土压力的计算。但是 Terzaghi 公式中对于侧向土压力系数的取值以及地层的松动范围的确定仍然有待商榷。因此很多学者

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168048, 52008373)

收稿日期: 2022-03-21

对此展开研究以使得 Terzaghi 公式的适用性更加广阔。Handy^[2]从主应力轴旋转的角度提出拱迹线为小主应力的轨迹,并基于拱迹线为悬链线的情况推导了侧压力系数的解析公式。陈若曦等^[3]则基于主应力轴旋转提出拱迹线为大主应力拱迹线的情况来修正侧压力系数以及 Terzaghi 松动土压力计算公式。徐长节等^[4]基于圆弧、悬链线和抛物线 3 种不同形状的大主应力轨迹线,考虑隧道上方松动区内应力分布形式对松动土压力的影响,从而对 Terzaghi 松动土压力公式进行了修正。尽管目前针对隧道松动土压力的研究很多,但是大多数研究都是基于 Terzaghi 提出的破坏模式。而隧道松动区的破坏模式对松动土压力的计算至关重要。Terzaghi 根据试验结果提出了等沉面概念,其认为土拱效应仅存在于等沉面之下,等沉面之上的土体作为外荷载的一部分,但是其对于等沉面高度的确定只是凭经验给出,缺乏理论依据^[5]。因此,一些学者从隧道松动区破坏形状的角度出发对松动土压力进行修正。Gong 等^[6]利用椭球体理论来描述松动区的范围并推导了隧道上覆土压力计算公式,但是其计算结果较加瑞^[7]模型试验结果偏大。汪大海等^[8]则同时考虑松动区范围的变化以及在隧道开挖后主应力旋转角的分布特征来改进浅埋隧道上覆土压力的计算公式。朱孟龙等^[9]基于塔形滑移面计算模型,并考虑主应力旋转角的分布特征,推导出大主应力与水平面夹角的分布公式,以此来对松动土压力的计算公式进行修正。Shukla 等^[10]和陈国舟等^[11]分别假设松动区滑动面为斜直线和曲线,从而推导了松动区竖向应力的计算公式。陈其志等^[12]从模型试验的角度对土体松动土压力及松动区位移破坏形式进行研究。

王将等^[13]基于抛物线与斜直线滑裂面假设的研究虽然在一定程度上提高了计算的精度,但这两种形状假设缺少相应的理论和试验支撑。而椭球体理论作为比较成熟的理论可以根据地质的密实程度简便地确定隧道松动区的范围。宫全美虽然提出了用椭球体理论来表征隧道上方的土体破坏范围,但是其对于隧道上方的应力分布的假设不符合实际^[4]。与此同时,椭球体理论并没有考虑地层损失对地层沉降的影响。因此,本文首先考虑地层损失对土体松动滑移范围的影响来对椭球体理论进行修正,目的是使得椭球体理论可以对不同地质和工况下隧道松动区进行更为精确简便的预测;然后通过自主设计的试验装置并结合 PIV 技术对修正后的椭球体理论进行对比验证;最后基于修正后的椭球体理论并考虑主应力轴旋转对隧道松动土压力公式进行修正,以期相关的理论研究和工程实践提供借鉴和参考。

1 隧道上方地层的破坏模式

隧道的塌方受围岩的力学特性影响较大。在软弱地层中,隧道施工过程中经常发生局部塌方,然后向上逐步扩大发展直至达到新的平衡后,塌方停止。而在地层从开始塌方至最后稳定的过程中,受影响的土体分布区域即为隧道的极限松动范围。确定了隧道的极限松动区域也就确定了隧道支护结构的界限支护压力。另一方面,从实际工程和模型试验可知,随着土体的抗剪强度的增大,隧道上方的塌方影响的范围逐渐减小。尽管普氏基于“自然拱”概念提出隧道上方会形成一个抛物线的拱。但根据弹塑性理论可知,在以自重应力场为主的地层中,隧道施工过程中其上方土体先是部分坍塌,之后慢慢趋于稳定,稳定后的形状为立椭圆^[14]。EVANS^[15]和 LEE 等^[16]通过模型试验也证实了隧道上方土体的极限松动区近似为椭圆形。

1.1 椭球体理论

20 世纪 50 年代,马拉霍夫在米纳耶夫提出的放矿放出体形状为椭球体的概念之上系统论述了放矿椭球体理论。之后,中国学者在椭球体放矿理论的发展和完善中做了大量的工作,取得了很多成果,推动了椭球体理论在松散介质失稳和放出研究中的应用。

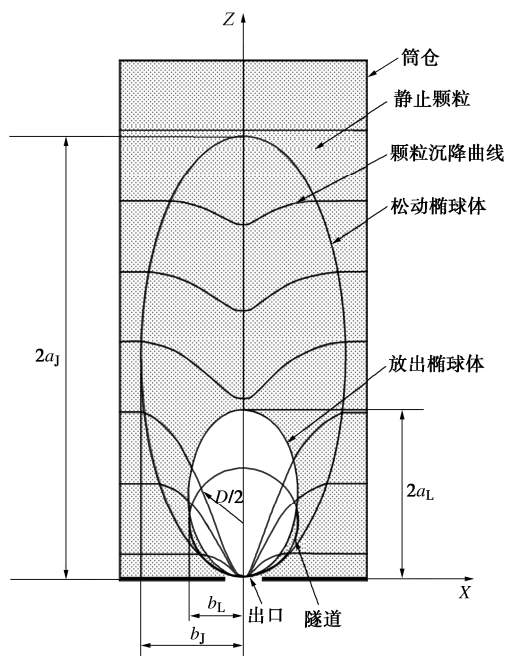


图 1 椭球体理论模型

Fig. 1 Model for ellipsoid theory

如图 1 所示,椭球体理论^[17]认为,在一个储放颗粒物质的贮仓中,其底部有一个开口,当开口打开时,颗粒会向外流出。在一定时间之后,仓内颗粒物质会

达到一个新的平衡。流出的颗粒物质会在仓内留下一个近似椭球体的空间, 被称为放出椭球体。与之相对应会有一个松动椭球体, 两个椭球体之间的颗粒物质只产生松动和位移, 不会从开口处流出。松动椭球体范围之外的颗粒物质会保持其原有状态不发生位移。

由椭圆的几何关系可知, 放出椭圆的第一偏心率为

$$e = \frac{\sqrt{a_L^2 - b_L^2}}{a_L} \quad (1)$$

式中: a_L , b_L 分别为放出椭圆的长半轴和短半轴, 在实际的工程中 e 值一般为 0.90~0.98。

对于一个体积确定为 Q_L 的放出椭球体, 必有一个与之相对应的体积为 Q_J 的松动椭球体。对于两个椭球体体积之间的关系, Janelid 等^[18]提出用松动系数 β 来表述并假设二者偏心率相等, 通过研究发现松动系数 β 一般为 1.066~1.100, 且

$$\beta = \frac{Q_J}{Q_L - Q_L} \quad (2)$$

1.2 隧道极限松动区的确定

武军等^[17]考虑颗粒物质只受到一个方向尺寸收缩的影响, 另一个方向无限长, 不产生收缩影响, 从而将三维问题转化为二维问题, 即极限松动区和流出松动区由椭球体转化为一个椭圆区域。

因此本文取隧道在纵向方向的单位长度为研究对象, 将其转化为二维问题, 故式 (2) 转化为

$$\beta = \frac{S_J}{S_J - S_L} \quad (3)$$

式中: S_J , S_L 分别为放出椭圆和松动椭圆的面积。

武军等^[17]假设放出椭圆的面积和隧道断面面积相等, 从而来确定隧道上方的极限松动区域。但实际上地层的破坏模式和地层损失率的大小密切相关^[19], 当地层损失率增大时, 地层坍塌受影响的范围也随之增大。因此在确定隧道上方地层的极限松动区时应将地层的损失率考虑进去。所以本文在武军等学者的基础之上考虑地层损失对椭圆松动区的影响, 假设放出椭圆的面积和隧道断面大小以及地层损失率具有如下关系:

$$\frac{\pi}{4} D^2 (1 + V_L)^2 = \pi a_L b_L \quad (4)$$

联合式 (1), (4) 得:

$$a_L = \frac{D(1 + V_L)}{2(1 - e^2)^{\frac{1}{4}}}, \quad (5)$$

$$b_L = \frac{D(1 + V_L)(1 - e^2)^{\frac{1}{4}}}{2} \quad (6)$$

松动椭圆区域的面积 S_J 为

$$S_J = \pi a_J b_J \quad (7)$$

式中: a_J , b_J 为松动椭圆的长半轴和短半轴。

由于松动椭圆和放出椭圆的偏心率相同, 故联立式 (1) ~ (7) 可得:

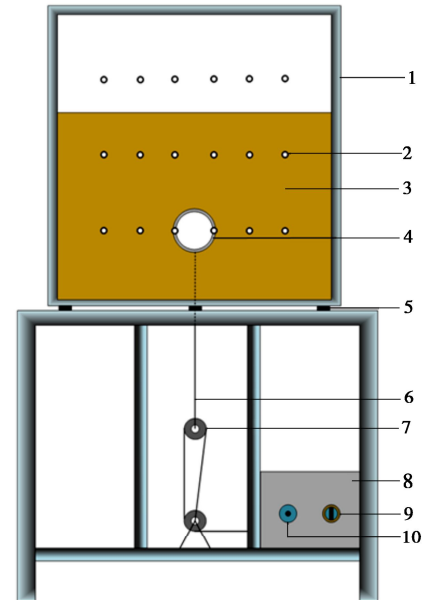
$$a_J = \frac{D\sqrt{\beta}(1 + V_L)}{2\sqrt{\beta - 1}(1 - e^2)^{\frac{1}{4}}}, \quad (8)$$

$$b_J = \frac{D\sqrt{\beta}(1 + V_L)(1 - e^2)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{\beta - 1}} \quad (9)$$

2 试验验证及结果分析

2.1 模型试验方案

为了验证本文提出的椭球体松动区数学模型的合理性, 自主设计了平面应变隧道模型试验系统, 该模型试验系统由模型试验架 (模型箱净空尺寸为长×宽×高=80 cm×20 cm×80 cm, 隧道模型为直径为 10 cm 钢管)、加载系统 (电机和滑轮组) 和监测系统 (GeoPIV 软件、LED 泛光灯、相机和计算机组成) 三部分组成, 详细的介绍可参考文献[20]。



1-模型框架 2-标定 3-填砂 4-隧道模型 5-橡胶垫
6-钢绞线 7-滑轮组 8-动力系统 9-开关旋钮 10-调速旋钮

图2 模型试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model test system

为减小试验过程中边界效应对试验结果的影响, 预先在模型箱两侧的钢板内侧粘贴光滑的丝光纸。由于丝光纸和钢化玻璃表面十分光滑, 故试验过程中土体和其摩擦可忽略不计。通过细钢绞线分别连接隧道

模型和电机,通过电机的牵引来使得隧道产生竖向沉降,以模拟施工和运营过程在其他因素影响下产生的地层损失,然后采用砂雨法填筑制样。最后调节电机转速为 0.5 r/min 使隧道以 0.131 mm/s 的速度缓慢沉降并采用 PIV 测量系统监测隧道上方地层的变形及破坏过程。



图 3 非接触式图像测量系统

Fig. 3 Non-contact image measurement system

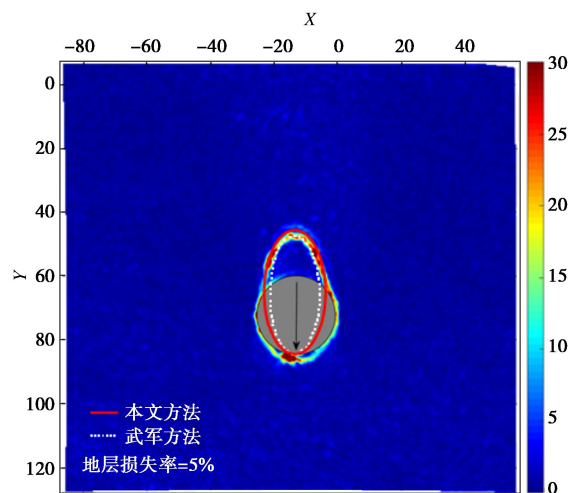
2.2 试验结果分析

(1) 放出椭球体试验结果分析

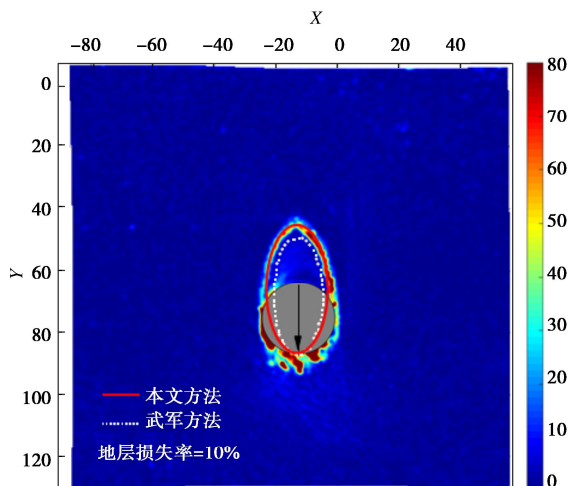
软土地区的地铁隧道在列车运营后容易产生沉降从而引起地层沉降等问题,如上海轨道交通一号线,人民广场站至新闻路站区间隧道,1995—1999 年监测最大累计沉降值超过 145 mm。因此,本文通过让隧道产生沉降使得上部土体和隧道之间产生空隙,从而使土体失去支护力向隧道区间内移动引起地层损失。地层损失率^[21]为隧道和上部土体之间产生的空隙和隧道断面的比值。隧道和上方地层产生的空隙可由隧道下沉的距离和隧道的尺寸计算得出,隧道的竖向位移可由 PIV 技术得出。

图 4 为不同地层损失率下地层的沉降剪切应变图。由图可知,在填砂密实度和埋深相同的情况下,由于隧道的下沉,其上方土体逐渐失去支护,土的抗剪强度逐渐发挥直至达到其最大值而发生剪切破坏。不同地层损失情况下,隧道上方土体的破坏模式总体上相同,大致呈现出一个立椭圆的形状。随着地层体积损失率的增大,隧道上方土体的剪切应变越大,椭圆剪切松动区也逐渐增大。刘俊等^[22]基于模型试验探究不同覆跨比下隧道的破坏模式也得出类似的结果。当地层损失率为 5%、10%和 15%时,椭圆松动区的长半轴分别为 1.57R、1.68R 和 1.74R (R 为隧道半径)。然后将试验结果和修正后椭球体理论以及武军提出的理论进行对比可知(图 4, 5),当地层损失率较小的情况下,武军公式能很好地预测土体放出椭圆的范围。

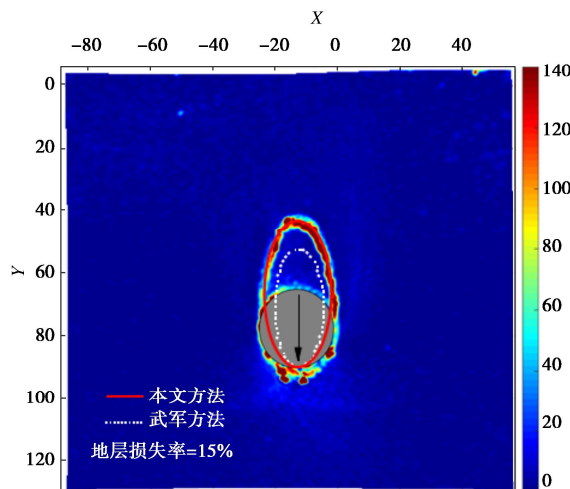
但随着地层损失率的增大,本文修正公式和试验结果更加吻合,更能反映不同地层损失率下放出椭圆的实际面积。



(a) $V_L=5\%$, $H/D=2.7$



(b) $V_L=10\%$, $H/D=2.7$



(c) $V_L=15\%$, $H/D=2.7$

单位: %

图 4 不同损失率下地层剪切应变

Fig. 4 Shear strains of strata at different loss rates

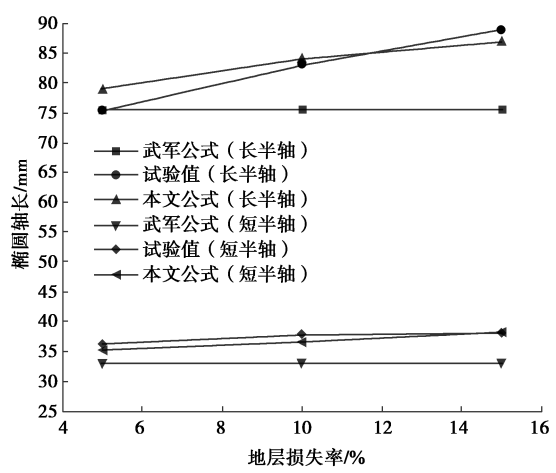
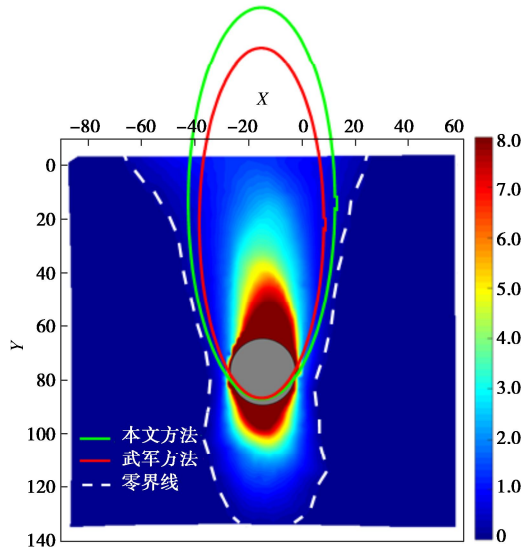
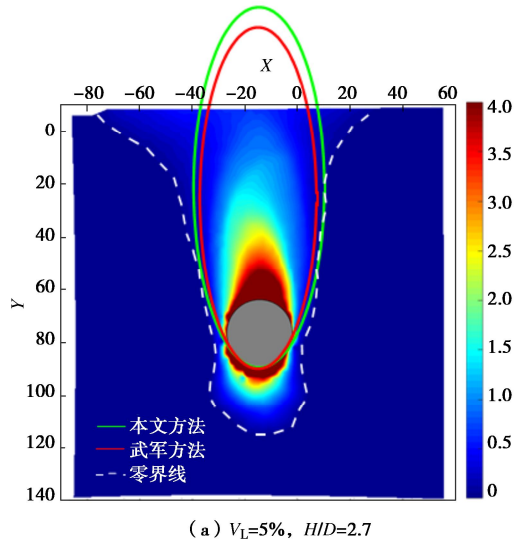


图 5 地层损失和长短半轴关系图

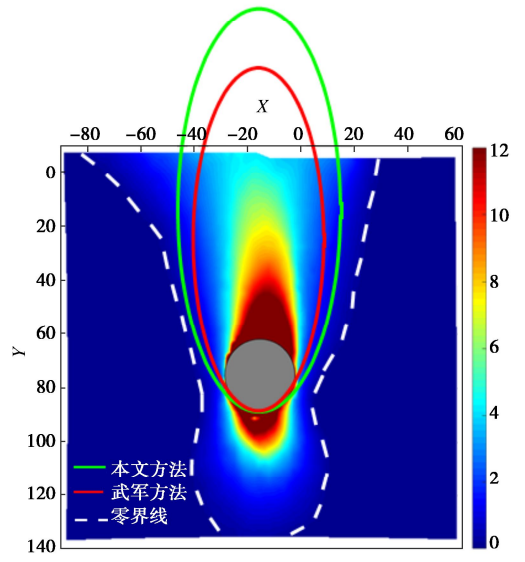
Fig. 5 Relationship between ground loss and long and short semi-axes

(2) 松动椭球体试验结果分析

椭球体理论认为, 松动椭球体和放出椭球体之间的土体部分只发生位移不会从出口流出且松动椭球体之外的土体部分保持静止。因此, 接下来本文通过地层的沉降位移图来对修正后的椭球体理论中的极限松动区进行验证。本文通过使隧道分别产生 4, 8, 12 mm 的沉降来使得隧道和上部土体产生间隙以模拟不同的地层损失。图 6 为不同地层损失率下土体的位移图。由图可知, 由于隧道产生沉降, 上部土体在重力作用下下沉, 随着地层损失率的增大, 地层的沉降和受扰动的范围都在逐渐增大, 地层受扰动的范围近似一个立椭圆的形状。另一方面, 在实际的工程中, 施工水平、土质条件和隧道轴线埋深都会引起地层损失率的增大或减小^[23]。因此, 在工程实践中考虑地层损失率的大小对确定土体的松动和滑移范围具有十分重要的意义。



(b) $V_L=10\%$, $HID=2.7$



(c) $V_L=15\%$, $HID=2.7$ 单位: mm

图 6 不同损失率下地层位移

Fig. 6 Ground displacements under different loss rates

根据图 6 的试验结果可知, 武军方法在地层损失率较小情况下和试验结果吻合较好, 但随着地层损失率的增大, 本文修正后的椭球体理论和试验结果则更加吻合, 更能反应不同地层损失情况下土体的实际松动滑移范围。与此同时, 由于本文所采用的 PIV 技术对土体位移监测的精度可达到 1.0 μm , 且本文通过探究松动椭球体的具体范围的最终目的是对隧道松动土压力的计算方法进行修正, 所以在地层位移零界点附近的土颗粒因其位移很小故对松动土压力的影响可以忽略不计。

3 松动土压力计算

自从 Terzaghi 基于 trapdoor 试验提出松动土压力的计算公式以来, 关于隧道上方土体滑移面的研究一

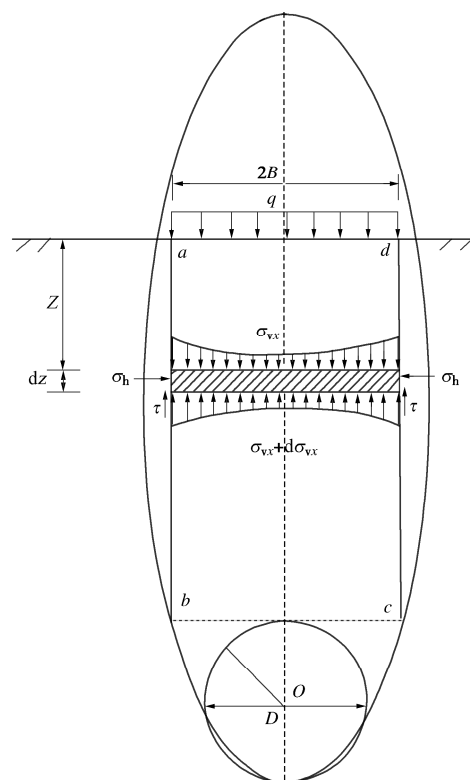
直是隧道工程中的热点。Chevalier 等^[24]基于活动门试验提出土体的滑动面为塔形, 朱孟龙等^[9]基于塔形滑动面提出了松动土压力的计算方法。SHUKLA 等^[10]则提出土体的滑移面为盆形。武军则提出隧道上方土体的坍塌和滑移类似于椭球体, 并基于椭球体理论对隧道松动土压力理论进行修正。本文则首先对椭球体理论进行修正, 然后结合修正后的椭球体理论以及松动区土体主应力轴旋转对 Terzaghi 松动土压力理论进行修正。

3.1 土压力公式推导

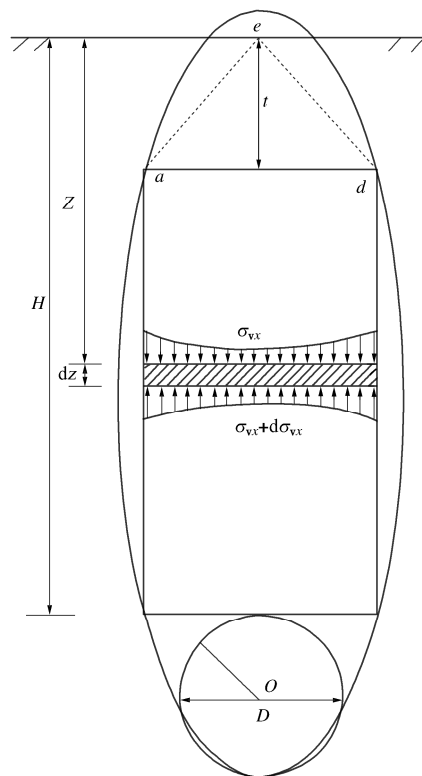
在 Terzaghi 所提出的松动土压力计算公式中侧压力系数取值为 1, 但是当土中产生土拱效应时, 其土压力系数并不是一个定值, 其值大小受到土体空间位置以及土拱效应的发挥程度的影响。加瑞^[7]通过模型试验得出不同位置处侧压力系数不同, 随着活动门的下移侧压力系数在中轴线的位置大于 1.0, 然后呈正态分布规律向两侧递减。崔蓬勃等^[25]认为在隧道开挖后, 拱顶位移随地层损失的发生而逐渐增大, 土拱效应逐渐产生, 中轴线处土单元的竖向应力和水平应力均减小, 但竖向应力的减小幅度远超水平应力减小幅度, 从而发生主应力旋转。因此, 基于修正椭球体理论, 建立如图 7 所示的松动土压力分析模型。为了描述土拱效应影响下土体的应力状态, 模型的基本假设: ①水平微分土条上的应力状态处于同一摩尔应力圆上; ②滑裂面处土体的内摩擦角 φ 充分发挥; ③松动区内土体达到 Mohr-Coulomb 极限平衡状态; ④土体均匀且各向同性; ⑤松动区内同一深度处任意位置土体主应力大小相等^[4], 从而对于不同位置处应力可以由大小主应力以及主应力旋转角来表示。Terzaghi 公式假设相同深度处竖向应力均匀分布, 而由大主应力迹线圆弧拱理论可知, 竖向应力自地层滑移处向隧道中轴线处逐渐递减^[4], 由此可以绘出松动滑移区土体内力分析图 (图 7)。图 7 (a) 中, $2B$ 为椭圆松动区计算宽度, Z 为隧道上覆土层厚度, q 为地面分布超载, H 为隧道埋深, σ_{vx} 和 σ_{hx} 为极限松动滑移区内部水平微分单元任一位置 x 处的竖向应力和水平应力, ψ 为该位置处大主应力方向和竖直方向的夹角, 当 $x \in [0, B]$ 时, $\psi \in [\theta, \pi/2]$ 。

李瑞林等^[26]将 Harrop-Williams^[27]的方法应用于大主应力拱后发现其拱迹线实际上是介于悬链线和圆弧线之间的曲线。徐长节等^[4]采用圆弧拱形、悬链线拱形和抛物线拱形的大主应力轨迹线进行计算所得应力分布之间的差异不大, 并推荐相关工程中采用圆弧形大主应力轨迹线假定进行计算。因此本文基于椭球

体理论假设图 8 中的大主应力迹线为圆弧, 则可以得到其半径 R_1 和 ψ 的表达式:



(a) $H \leq 2(a_j - D)$



(b) $2(a_j - D) \leq H$

图 7 改进的 Terzaghi 松动土压力分析模型

Fig. 7 Modified failure mechanism of Terzaghi for a tunnel

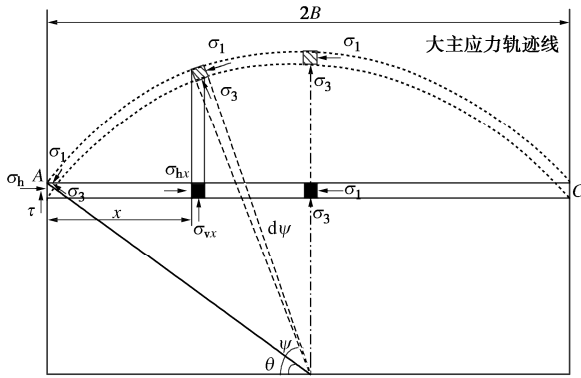


图8 松动区土体应力分析

Fig. 8 Stress analysis of soils in loosening zone

$$R_1 = \frac{B}{\cos \theta}, \quad (10)$$

$$\cos \psi = \frac{B-x}{B} \cos \theta. \quad (11)$$

根据图2中所建立的坐标系，由椭球体理论以及已知的坐标点可得滑动土体的计算宽度为

$$B = \sqrt{(1-e^2)(2a_1 - D)D}. \quad (12)$$

在滑裂面A点位置处的土体单元应力状态可以用图9中的摩尔应力圆来表示。通过图9中的几何关系可以得出：

$$\sigma_{ha} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta, \quad (13)$$

$$\sigma_{va} = \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \theta. \quad (14)$$

式(13), (14)得

$$K = \frac{\sigma_{ha}}{\sigma_{va}} = \frac{\cos^2 \theta + K_a \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + K_a \cos^2 \theta}. \quad (15)$$

式中： K 为土拱效应发挥后土中侧向土压力系数， $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ ； K_a 为主动土压力系数，

$$K_a = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (16)$$

同理，通过摩尔应力圆（图10）可得在松动区内部任一位置x处的竖向应力：

$$\sigma_{vx} = \sigma_1 (\sin^2 \psi + K_a \cos^2 \psi). \quad (17)$$

如图7所示，取一厚度为dz的水平微分单元作为研究对象，则在竖直方向上其受力平衡方程为

$$2B\gamma dz = 2Bd\bar{\sigma}_v + 2\tau dz, \quad (18)$$

$$\tau = K\sigma_v \tan \varphi. \quad (19)$$

式中： γ 为土体重度； $\bar{\sigma}_v$ 为水平微分单元所受平均竖向应力，

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\int_0^{2B} \sigma_{vx} dx}{2B} = \frac{\sigma_1}{B} \int_0^B (\sin^2 \psi + K_a \cos^2 \psi) dx, \quad (20)$$

$$dx = R \sin \psi d\psi. \quad (21)$$

联立式(18)~(20)并积分可得

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_1 \left[1 + \frac{1}{3} (K_a - 1) \cos^2 \theta \right]. \quad (22)$$

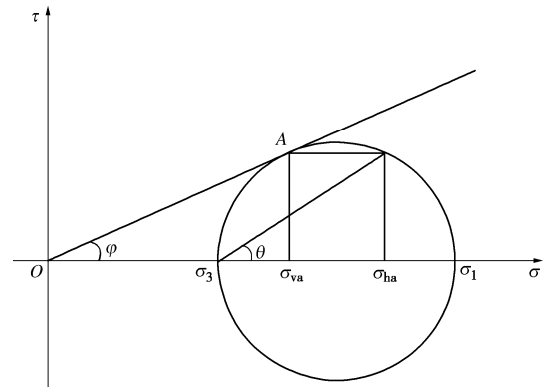


图9 滑裂面处土体摩尔应力圆

Fig. 9 Mohr's stress circle of soils on sliding interface

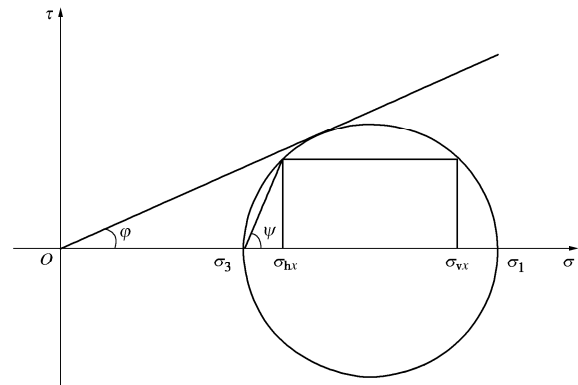


图10 松动区内部土体应力状态

Fig. 10 Stress states of soils in loosening zone

将水平微单元任意一位置处竖向应力 σ_{vx} 与平均竖向应力 $\bar{\sigma}_v$ 的比值 m 称为应力分布系数，用来反映隧道上方土体竖向压力在水平方向上的非线性变化特征。然后通过式(11), (17), (22)可得应力分布系数 m 为

$$m = \frac{\sigma_{vx}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{3 \cos \theta \left[1 + (K_a - 1) \left(\frac{B-x}{B} \right)^2 \cos^2 \theta \right]}{3 + (K_a - 1) \cos^2 \theta}. \quad (23)$$

假设地表超载为 q ，联立边界条件 $z=0$ ， $\sigma'_v = q$ 以及式(18), (19), (23)得

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma B}{mK \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{zmK \tan \varphi}{B}} \right) + q e^{-\frac{zmK \tan \varphi}{B}}. \quad (24)$$

假设隧道的埋深为 H ，地表没有外荷载，则式(24)转化为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma B}{mK \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{zmK \tan \varphi}{B}} \right). \quad (25)$$

(1) 当 $H \leq 2(a_1 - D)$ 时，即隧道的埋深小于椭

圆松动区的计算高度,因此可将 $Z=H$ 代入式 (25) 计算松动土压力。

(2) 当 $2(a_j - D) \leq H \leq 2a_j - D$ 时,将超过计算高度的椭圆部分 (图 7 (b)) 折算为超载 q_0 ,然后把 $Z = 2(a_j - D)$, $q = q_0$ 代入式 (24) 计算松动土压力。 q_0 的计算式为

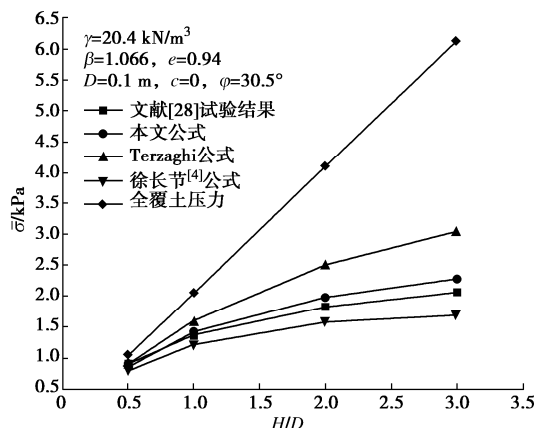
$$q_0 = \frac{1}{2} \gamma [H - 2(a_j - D)] \quad (26)$$

(3) 当 $2a_j - D \leq H$ 时,即隧道的埋深超过了地层的极限松动区的范围,土体极限松动区以外的部分对隧道松动土压力不产生影响,故将 $Z = 2(a_j - D)$, $q_0 = \frac{1}{2} \gamma D$ 代入式 (24) 计算松动土压力。

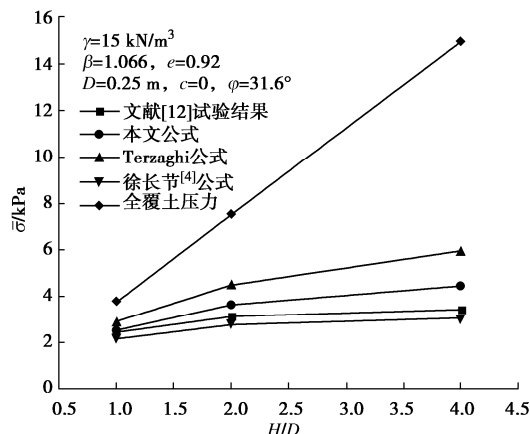
3.2 结果分析

目前基于地层拱理论的隧道上覆土压力计算研究中很少考虑滑移面范围受隧道埋深的影响^[21]。椭球体理论考虑了地层受影响范围和隧道埋深的关系,故本文基于修正后的椭球体理论分析土拱效应的影响,进而对隧道松动土压力公式进行修正。为了验证修正公式的合理性,本文分别选取 Shahin 等^[28]和陈其志等^[12]的模型试验结果来进行对比分析。由图 11 可知,随着隧道埋深的增大,土拱效应逐渐发挥,隧道上方土压力明显小于全覆土压力。另一方面,从太沙基公式、徐长节以及本文修正公式可以得出随着隧道埋深的增大,土拱效应愈来愈明显,隧道上方土压力逐渐趋向于一个定值。

与此同时也可以看出本文修正后的公式计算结果和 Shahin 和陈其志两位学者的试验结果比较接近。Terzaghi 松动土压力公式中侧土压力系数根据经验取值为 1 且没有考虑隧道上方土体破坏面和埋深的关系,导致其计算结果偏大。徐长节在 Terzaghi 公式的基础上对侧土压力系数进行了修正,但没有考虑隧道埋深对上方地层破坏范围的影响,导致其计算结果比试验结果小。



(a) 松动土压力值与文献[28]试验结果比较



(b) 松动土压力值与文献[12]试验结果比较

图 11 平均竖向压力与 H/D 的关系

Fig.11 Relationship between average vertical pressure and H/D

4 结 论

本文考虑地层损失对隧道上方土体沉降范围的影响从而对椭球体理论进行修正,然后基于椭球体理论及松动区内部土体主应力轴旋转对隧道松动土压力公式进行修正。通过对隧道极限松动区和松动土压力进行研究得出 3 点结论。

(1) 修正后的椭球体理论综合考虑隧道的尺寸、土体的松动系数以及地层损失率对隧道上方土体沉降的影响,可以精确简便地确定隧道上方地层受影响的范围。

(2) 通过自主设计的试验装置并结合 PIV 技术对修正后的椭球体理论进行验证得出:在土体密度和隧道尺寸相同情况下,随着地层损失的增大,地层受影响的范围随之增大,隧道的放出椭圆区域和极限松动区也随之增大。本文修正椭球体理论和试验结果更加吻合。

(3) 基于修正椭球体理论改进的隧道松动土压力计算公式,充分考虑了地层滑移变形范围以及土拱效应对隧道松动土压力的影响,其计算结果比 Terzaghi 公式和徐长节公式更加接近试验结果。可用于砂土地质条件下隧道、管线等结构上方的土压力计算。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 1943: 66-76.
- [2] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302-318.
- [3] 陈若曦, 朱 斌, 陈云敏, 等. 基于主应力轴旋转理论的修正 Terzaghi 松动土压力[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1402-1406. (CHEN Ruoxi, ZHU Bin, CHEN Yunmin, et al.

- Modified Terzaghi loosening earth pressure based on theory of main stress axes rotation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(5): 1402-1406. (in Chinese))
- [4] 徐长节, 梁禄钜, 陈其志, 等. 考虑松动区内应力分布形式的松动土压力研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(6): 1927-1934. (XU Changjie, LIANG Luju, CHEN Qizhi, et al. Research on loosening earth pressure considering the patterns of stress distribution in loosening zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(6): 1927-1934. (in Chinese))
- [5] 黎春林. 盾构隧道施工松动土压力计算方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(9): 1714-1720. (LI Chunlin. Method for calculating loosening earth pressure during construction of shield tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(9): 1714-1720. (in Chinese))
- [6] 宫全美, 张润来, 周顺华, 等. 基于颗粒椭球体理论的隧道松动土压力计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(1): 99-105. (GONG Q M, ZHANG R L, ZHOU S H, et al. Method for calculating loosening earth pressure around tunnels based on ellipsoid theory of particle flows[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(1): 99-105. (in Chinese))
- [7] 加 瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (JIA Rui. Study on Relaxation Effect of Vertical Soil Pressure for Shield Tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [8] 汪大海, 贺少辉, 刘夏冰, 等. 基于主应力旋转特征的浅埋隧道上覆土压力计算及不完全拱效应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, **38**(6): 1284-1296. (WANG Dahai, HE Shaohui, LIU Xiabing, et al. A modified method for determining the overburden pressure above shallow tunnels considering the distribution of the principal stress rotation and the partially mobilized arching effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, **38**(6): 1284-1296. (in Chinese))
- [9] 朱孟龙, 张庆文, 徐国林, 等. 考虑塔形滑移面的浅埋隧道松动土压力研究[J]. *应用力学学报*, 2020, **37**(5): 2197-2206, 2333. (ZHU Menglong, ZHANG Qingwen, XU Guolin, et al. Calculation of loose earth pressure in shallow tunnel considering soil arching effect[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, **37**(5): 2197-2206, 2333. (in Chinese))
- [10] SHUKLA S, SIVAKUGAN N. A simplified extension of the conventional theory of arching in soils[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **3**(3): 353-359.
- [11] 陈国舟, 周国庆. 考虑土拱效应的滑移面间竖向应力研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, **43**(3): 374-379. (CHEN Guozhou, ZHOU Guoqing. Study of vertical stress between slip planes considering soil arching effect[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, **43**(3): 374-379. (in Chinese))
- [12] 陈其志, 郭生根, 徐长节, 等. 砂土中松动土压力及松动区位移破坏形式的试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, **50**(1): 108-117. (CHEN Qizhi, GUO Shenggen, XU Changjie, et al. Trapdoor model tests on loosening earth pressure and failure mode of loosening zone in sand[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, **50**(1): 108-117. (in Chinese))
- [13] 王 将, 袁大军, 金大龙, 等. 基于非线性滑动面假设的盾构隧道松动土压力计算模型研究[J]. *铁道学报*, 2021, **43**(6): 165-172. (WANG Jiang, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Research on calculation model for loosening earth pressure of shield tunnel based on assumption of non-linear sliding surface[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, **43**(6): 165-172. (in Chinese))
- [14] 李世平, 吴振业. 岩石力学简明教程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 105-108. (LI Shiping, WU Zhenye. Introduction to Rock Mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996: 105-108. (in Chinese))
- [15] EVANS C H. An examination of arching in granular soils [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- [16] LEE C J, CHIANG K H, KUO C M. Ground movement and tunnel stability when tunneling in sand ground[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2004, **27**(7): 1021-1032.
- [17] 武 军, 廖少明, 张 迪. 基于颗粒流椭球体理论的隧道极限松动区与松动土压力[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(4): 714-721. (WU Jun, LIAO Shaoming, ZHANG Di. Loosening zone and earth pressure around tunnels in sandy soils based on ellipsoid theory of particle flows[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(4): 714-721. (in Chinese))
- [18] JANLID I, KVAPIL R. Sublevel caving[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1966, **3**(2): 129-132.
- [19] 房 倩, 杜建明, 王中举, 等. 盾构施工影响下砂土地层变形规律模型试验研究[J]. *中国公路学报*, 2021, **34**(5): 135-143, 214. (FANG Qian, DU Jianming, WANG Zhongju, et al. Model experimental study on stratum deformation of shield tunnelling in sand[J]. *China Journal of Highway and*

- Transport, 2021, **34**(5): 135-143, 214. (in Chinese))
- [20] 方 焘, 梁 连, 颜建伟. 不同埋深下盾构隧道施工引起的地层变形试验[J]. 长江科学院院报, 2023, **40**(3): 85-92. (FANG Tao, LIANG Lian, YAN Jianwei. Experimental study on stratum deformation caused by shield tunnelling under different buried depths[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, **40**(3):85-92. (in Chinese))
- [21] HU X Y, HE C, PENG Z Z, et al. Analysis of ground settlement induced by earth pressure balance shield tunneling in sandy soils with different water contents[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, **45**: 296-306.
- [22] 刘 俊, 刘新荣, 赖 勇, 等. 不同覆跨比下浅埋软弱隧道的破坏模式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(5): 1744-1751. (LIU Jun, LIU Xinrong, LAI Yong, et al. Failure mode of shallow-buried weak tunnel under different thickness-span ratios[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(5): 1744-1751. (in Chinese))
- [23] 魏 纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1354-1361. (WEI Gang. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1354-1361. (in Chinese))
- [24] CHEVALIER B, COMBE G, VILLARD P. Experimental and discrete element modeling studies of the trapdoor problem: influence of the macro-mechanical frictional parameters[J]. Acta Geotechnica, 2012, **7**(1):15-39.
- [25] 崔蓬勃, 朱永全, 刘 勇, 等. 考虑土拱发挥过程的非饱和砂土盾构隧道极限支护力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 873-881. (CUI Pengbo, ZHU Yongquan, LIU Yong, et al. Calculation of ultimate supporting forces of shield tunnels in unsaturated sandy soils considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 873-881. (in Chinese))
- [26] 李瑞林, 周国庆, 林 超, 等. 考虑土拱效应的滑移面间非极限状态土压力解答[J]. 岩土力学, 2017, **38**(11): 3145-3153. (LI Ruilin, ZHOU Guoqing, LIN Chao, et al. Solution of earth pressure between slip surfaces under non-limit state considering soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(11): 3145-3153. (in Chinese))
- [27] HARROP-WILLIAMS K. Arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(3): 415-419.
- [28] SHAHIN H M, NAKAI T, ZHANG F, et al. Model tests and numerical simulations on shallow circular tunneling ground movement and earth pressure due to circular tunneling[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai, 2008: 709-715.