

基于椭球体理论粘性土层隧道松动土压力研究

丁海滨^{1,2},喻义天^{1,2},梁禄矩³,孙洋^{4†},余辉⁵,何建国⁶,徐长节^{1,2}

[1. 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室(华东交通大学),江西南昌 330013;
2. 江西省地下空间技术开发工程研究中心(华东交通大学),江西南昌 330013;
3. 浙大城市学院,浙江杭州 310015;
4. 江西省交通科学研究院有限公司,江西南昌 330200;
5. 江西省交通投资集团有限责任公司赣州管理中心,江西赣州 341000;
6. 浙江交工集团股份有限公司,浙江杭州 310051]

摘要:准确预测隧道上覆土压力对隧道支护结构的设计和开挖方式的选择具有重要意义.Terzaghi 土拱效应理论是基于滑移面为垂直面这一假设建立的,但实际情况中由于受到地层扰动的影响,滑移面呈现出曲面形状.为研究粘性土层滑移面演化规律及松动土压力分布规律,首先,采用数值模拟软件计算隧道开挖后上覆土压力,并分析粘性土下土拱效应演化规律;其次,根据隧道拱的破裂面规律,从椭球体理论出发,并考虑粘性土层中主应力轨迹线为圆弧对Terzaghi松动土压力进行修正;最后,将理论计算结果与已有的实验数据及有限元计算结果进行对比,验证了本文公式在粘性土层中应用的合理性,并进一步研究了地层损失率 S_L 、内摩擦角 φ 、黏聚力 c 与隧道松动土压力的关系.研究结果表明:相较于无粘性土层,粘性土层滑移面的破坏程度更大,但两者滑移面变化规律基本一致.当隧道埋深比 $H/D \leq 1.5$,出现三角形状滑移面,随着隧道埋深的持续增大,地层逐渐向内形成剪切面,最终形成塔形状滑移面;松动区内侧土压力系数 K_s 在任意位置处都是不同的,且在Terzaghi建议的 1.0 上下浮动.对比浅埋隧道,深埋隧道的松动土压力受地层损失率 S_L 的影响更大.粘性土层隧道上覆荷载呈“半葫芦形”分布,表现为从拱顶附近向拱腰逐渐减小;同时,在内摩擦角 φ 较小的地层中,提高黏聚力 c 有利于减小隧道上覆土压力.

关键词:土拱效应;粘性土;椭球体理论;松动土压力;数值模拟

中图分类号:TU 93 **文献标志码:**A

Study on Loose Earth Pressure of Cohesive Soil Tunnel Based on Ellipsoid Theory

DING Haibin^{1,2}, YU Yitian^{1,2}, LIANG Luju³, SUN Yang^{4†}, YU Hui⁵, HE Jianguo⁶, XU Changjie^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure (East China Jiaotong University), Nanchang 330013, China;

* 收稿日期:2024-03-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009400),National Key R&D Program of China(2023YFC3009400);国家自然科学基金重点项目资助项目(52238009),Key Project of National Natural Science Foundation(52238009);江西省赣鄱俊才-青年人才项目(2023BCJ23069),Juncai Youth Talent Project in Ganpo-Jiangxi Province(2023BCJ23069);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2023-S492),Jiangxi Graduate Student Innovation Special Fund Project(YC2023-S492);江西省重点研发揭榜挂帅项目(20223BBG71018),The National Science Fund of Jiangxi Province(20223BBG71018)

作者简介: 丁海滨(1991—),男,江西鄱阳人,华东交通大学副教授,博士

† 通信联系人,E-mail: 2574544207@qq.com

2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province (East China Jiaotong University),
Nanchang 330013, China;
3. Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China;
4. Jiangxi Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330200, China;
5. Jiangxi Provincial Communications Investment Group Co., Ltd. Ganzhou Management Center, Ganzhou 341000, China;
6. Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China]

Abstract: Accurate prediction of overlying soil pressure is of great significance to the design of tunnel support structures and the selection of excavation methods. Terzaghi's theory of the soil arch effect is established based on the assumption that the slip plane is vertical, but in practice, the slip plane shows a curved shape due to the formation disturbance. To study the evolution law of slippage surface of cohesive soil layer and the distribution law of loose earth pressure, firstly, the overlying soil pressure after tunnel excavation is calculated by numerical simulation software, and the evolution law of the soil arch effect under cohesive soil is analyzed. Secondly, based on the fracture surface of the tunnel arch, the ellipsoid theory and the circular arc of the principal stress in the cohesive soil layer are used to correct the Terzaghi loose earth pressure. Finally, the theoretical calculation results are compared with the existing experimental data and the finite element calculation results to verify the rationality of the application of the formula in the cohesive soil layer, and to further study the relationship between formation loss rate S_L , internal friction angle φ , cohesion c , and tunnel loose earth pressure. The results show that the damage degree of slippage surface in the cohesive soil layer is greater than that in the non-cohesive soil layer. Still, the changes in slippage surface in the cohesive soil layer are the same. When the buried depth ratio of the tunnel is less than 1.5, a triangular slip plane appears. As the buried depth of the tunnel continues to increase, a shear plane is gradually formed inward, and a tower-shaped slip plane is finally formed. The lateral earth pressure coefficient K_v inside the loose zone is different at every location and fluctuates around 1.0, as suggested by Terzaghi. Compared with shallow buried tunnels, the loose earth pressure of deep buried tunnels is more affected by formation loss rate S_L . The overlying load of the tunnel in the cohesive soil layer is distributed in a "half gourd shape", which gradually decreases from near the vault to the arch waist. At the same time, in the formation with a small internal friction angle φ , increasing cohesion c is beneficial to reduce the overlying soil pressure of the tunnel.

Key words: soil arch effect; clayey soil; ellipsoid theory; loose earth pressure; numerical simulation

土拱效应在岩土工程中普遍存在。在隧道开挖过程中,由于围岩自身的受力特性,将产生应力重分配现象^[1]。围岩在应力大于其承载能力的情况下,会发生破坏并逐渐向内部扩展直至达到新的应力平衡,此时,围岩会形成一定的松动范围,被称为松动区^[2]。由于土颗粒之间的摩擦和粘结作用,在松动区内,颗粒间的相互作用会使围岩发生不均匀变形^[3-4],使土的应力向周围岩石传递,形成土拱效应^[5]。为此,许多学者对土拱效应下隧道的松动土压力开展了研究。

Terzaghi^[6]采用极限平衡理论推导了作用在trap-door上松动土压力计算式,证实了隧道上方存在土拱效应。在此之后,很多学者对土拱效应开展了更为丰富的研究,徐长节等^[7]基于Terzaghi松动土压力的解析模型,假设大主应力轨迹线为悬链线、抛物线和

圆弧3种形态,并通过比较得出圆弧拱形线更适用于工程。武军等^[8]在假定竖向应力沿水平方向为梯形分布的基础上,推导了隧道上覆土压力。Shukla等^[9]和陈国舟等^[10]分别假定滑移面为曲线和斜直线,推导了倾斜滑移面间竖向应力的计算式。周小文等^[11]使用自制的离心机进行物理模型试验,对隧道支护压力和地层位移之间的关系进行了探讨。在深埋隧道上覆土压力理论研究当中,滑移面的变化形式多种多样,包括三角形、平行四边形、抛物线等,而椭球体理论作为比较成熟的理论能够更好地描述隧道顶部压力变化以及地层变形等实际情况。例如,对于颗粒较细的土壤,颗粒间的作用力较大,顶部压力较大,隧道容易发生沉降等问题,而椭球体理论能够更好地解释这一现象。宫全美等^[12]基于颗粒椭球体

理论推导出受滑移面倾角影响的侧土压力系数以及隧道松动土压力计算方法。方焘等^[13]基于椭球体理论,从地层损失的角度,对隧道上覆土压力进行了修正。Xu等^[14]开展了渗流条件下土拱效应的模型试验研究。Liang等^[15]从试验及理论的角度,对土拱的演化过程进行了详细的分析,得出了隧道上覆土压力演化过程计算式。Handy^[16]从主应力偏转的角度出发,并假定拱迹线为悬链线,推导了侧土压力系数的表达式。

以往学者们对隧道上方松动土压力开展了详细的研究,取得了许多有指导意义的结果。然而,对于地层为粘性土的情况下,土拱效应的研究还很少,对于其上覆土压力变化情况尚未进行更加深入的研究。因此,本文首先采用数值模拟软件计算隧道开挖后上覆土压力,并分析粘性土下土拱效应演化规律;其次,根据隧道拱的破裂面规律,从椭球体理论出发,并考虑粘性土层中主应力轨迹线为圆弧对Terzaghi松动土压力进行修正;最后,将理论计算结果与有限元计算及相关文献试验结果进行对比,验证本文方法的准确性,并进一步讨论相关地层参数对松动土压力的影响。

1 圆形隧道数值分析

1.1 有限元模型建立

利用PLAXIS 2D建立二维有限元隧道模型。整个地层宽度为100 m,高度为100 m,隧道为直径12 m的圆形隧道,本构模型选用弹塑性莫尔-库仑模型,支护结构采用板单元模拟。隧道的布置情况如图1所示。

为模拟粘性土层地质条件,除黏聚力外,数值模

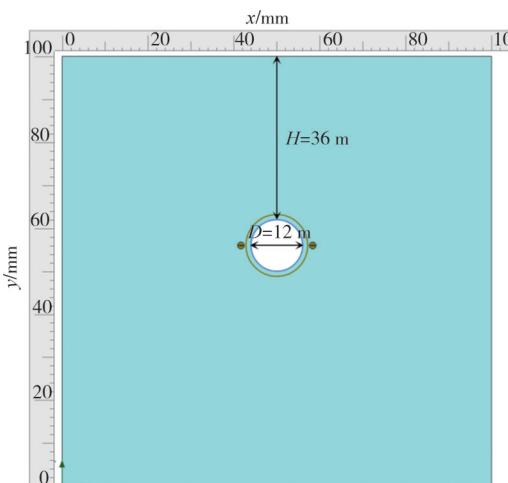


图1 隧道有限元模型

Fig.1 Tunnel finite element model

拟参数取值参考汪大海^[17]的方法,具体地层参数见表1。

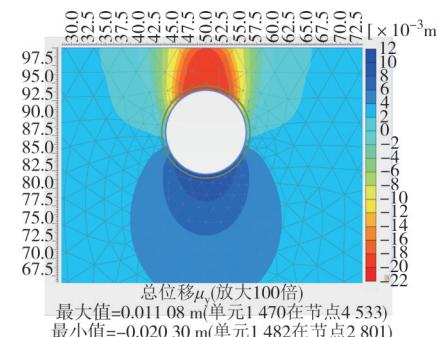
表1 数值计算隧道、岩体参数

Tab.1 Tunnel and rock mass parameter table

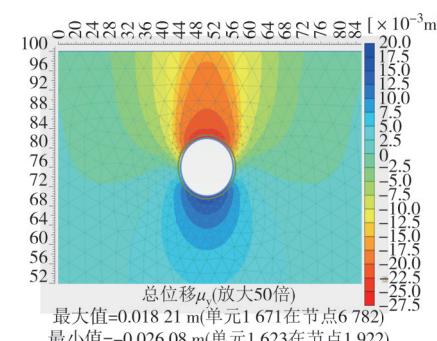
重度 γ (kN·m ⁻³)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c /kPa	剪胀角 Ψ (°)	直径 D /m
17	300	0.26	28.5	15	0	12.0

1.2 土拱效应及滑移角变化规律

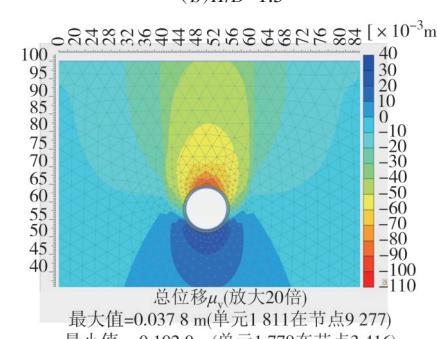
图2为不同埋深比粘性土层隧道上方土拱效应变化规律情况。由图2可知,在埋深比较小的情况下,松动区范围延伸至地表,由于无法形成“自然拱”,土体易发生坍塌;随着埋深的增大,土拱效应逐渐发挥,松动区范围并未达到地表。



(a) $H/D=0.5$



(b) $H/D=1.5$



(c) $H/D=3.0$

图2 不同隧道埋深比粘性土层位移云图

Fig.2 Displacement cloud map with cohesive soil layer of different tunnel buried depth ratio

由图3、图4可知,随着埋深比 H/D 的增大, β 角逐渐减小(β 角为隧道拱腰处滑移面切线方向与水平方向的夹角),并且滑移面界限呈现椭圆形轨迹线。当埋深比 $H/D \leq 1.5$,开始形成三角形状滑移面,并且随着隧道埋深的持续增大,地层逐渐向内形成剪切面,最终形成塔形状滑移面,如图3(c)所示。

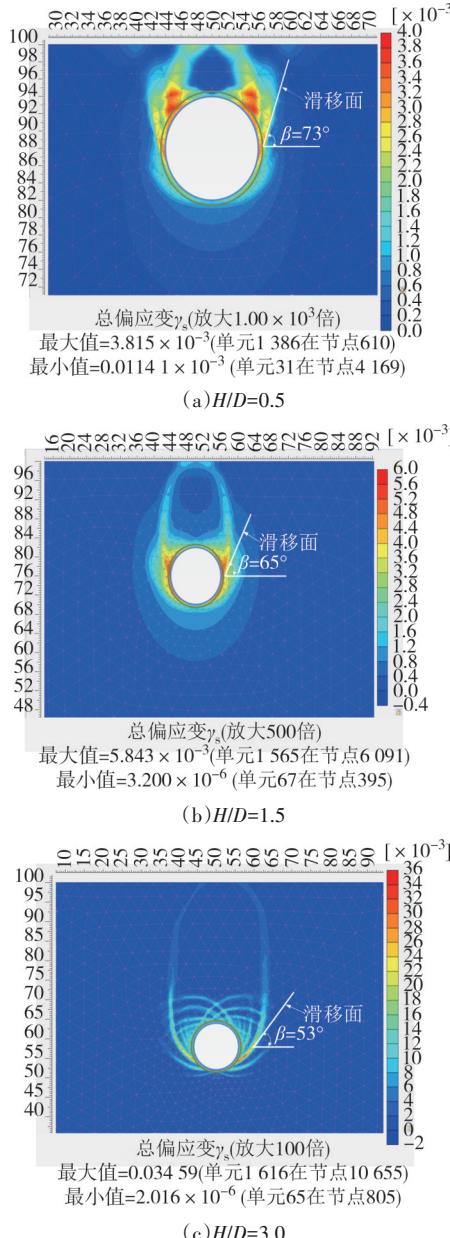


图3 不同埋深比粘性土层隧道上方滑移角变化图

Fig.3 Change of slip angle above the tunnel in cohesive soil layer with different buried depth ratio

从图3和图4的滑移面对比结果来看,粘性土层滑移面的破坏程度比无粘性土层大,原因为相同条件下,粘性土层的抗剪强度要大于无粘性土层,滑移面处的抗剪强度提高,使得土体更容易产生滑裂。

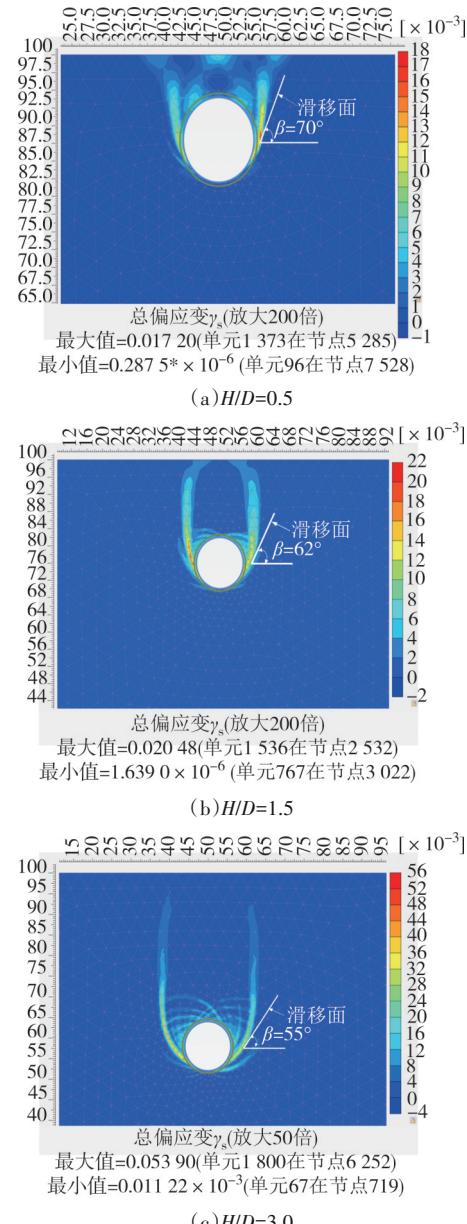


图4 不同埋深比无粘性土层隧道上方滑移角变化图

Fig.4 Change of slip angle above the tunnel in non-cohesive soil layer with different buried depth ratios

由图5可以看出,粘性土层与无粘性土层滑移角大小变化相差不大。当埋深比 $H/D=0.5$ 时,滑移角 β 趋近于 80° ,隧道上方土体的滑移面接近于垂直状态;当隧道埋深比 $H/D=1.5$ 时,滑移角 β 为 65° ,约等于Terzaghi假设的滑移角的大小 59.25° ($\beta=45^\circ+\varphi/2$),并且计算结果呈现的规律与方焘等^[18]试验结果吻合。

由图6可以看出,当隧道埋深比 $H/D \leq 1.0$ 时,隧道上覆土压力接近于全覆土压力,此时,土拱效应基本没有发挥,隧道上覆土压力可以通过全覆土柱法进行计算;当隧道埋深比 $1.0 < H/D < 2.5$ 时,隧道上覆

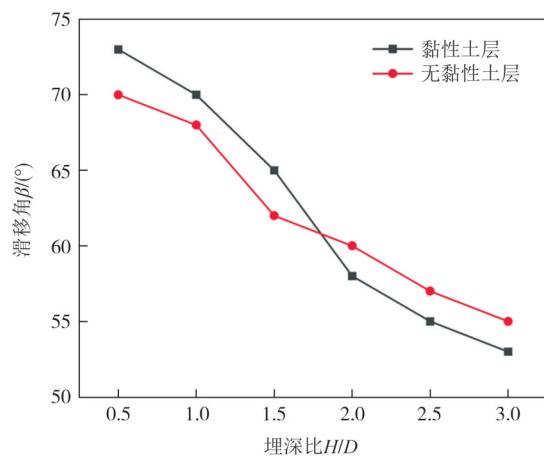


图 5 滑移角随埋深比变化情况

Fig.5 The slip angle changes with the buried depth ratio

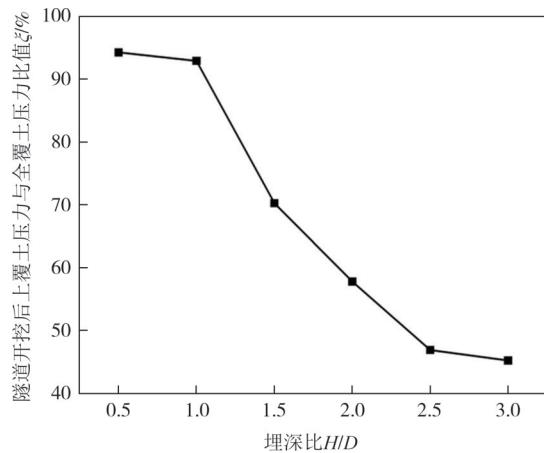


图 6 不同埋深比下隧道上覆土压力变化情况

Fig.6 Variation of overlying soil pressure under different buried depth ratio

土压力迅速减小,此时,土拱效应逐步发挥,全覆土柱法不再适用;当隧道埋深比 $H/D > 2.5$ 时,两者之比趋于稳定。

1.3 不同埋深比隧道应力分布

为便于分析松动区内应力与松动区外侧岩体应力的相对变化,将松动区内应力 σ_y 采用初始应力 $\sigma_{y(0)}$ 进行归一化处理,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,拱顶上的垂直应力在水平方向上表现为中部较小、两端较大的上凹型分布;越靠近隧道拱顶的位置,竖向应力减小越大。在松动区以外的岩体中,竖向应力大于初始应力,靠近滑移面的竖向应力上升幅度较大,原因为隧道开挖后,岩体内产生不均匀位移,松动区内岩体的应力传递给松动区外的岩体。另一方面,竖向应力与初始应力的比值随着隧道埋深的增大逐渐减小,在滑移面附近处的应力比峰值也逐渐减小。

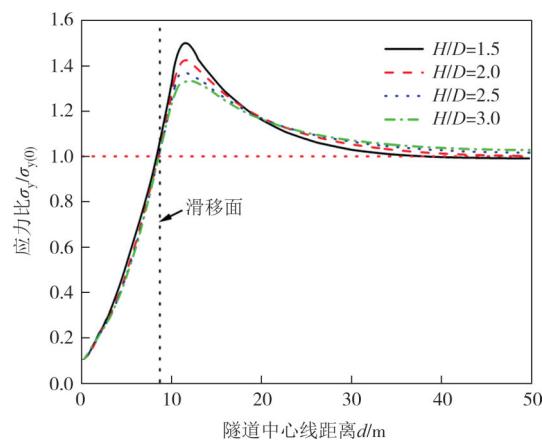


图 7 不同埋深比下竖向应力归一化后分布情况

Fig.7 Distribution of vertical stress after normalization under different buried depth ratio

2 椭球体理论

由数值模拟结果可以看出,隧道滑移面的轨迹形状与椭圆面极其相似,因此本文基于椭球体理论计算粘性土层上覆土压力.

椭球体理论^[8]指出,在存储颗粒物质的贮仓结构中,底部通常有一个开口,在重力的作用下,颗粒会从开口处溢出。经过一段时间,所有溢出的颗粒会留下一个近似椭球体形状的空间,被称为放出椭球体。同时,在放出椭球体与贮仓之间会形成松动椭球体,该区域内的颗粒会发生松动并产生位移,而不会从开口处溢出,在松动椭球体之外的颗粒不会受到任何影响。图 8 中, a_L, b_L 分别为放出椭球体的长半轴、短半轴; a_J, b_J 分别为松动椭球体的长半轴、短半轴; D 为隧道直径。

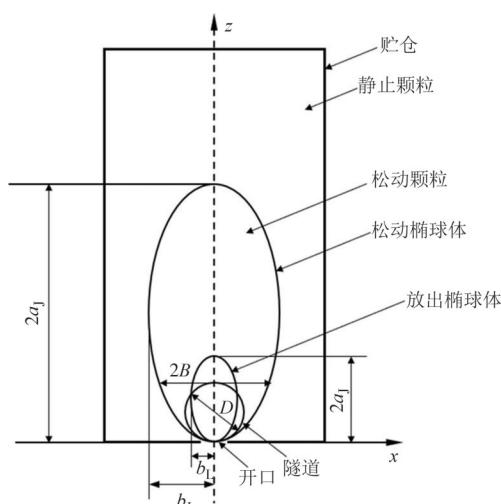


图 8 放出椭球体与松动椭球体

Fig.8 Release ellipsoids and loose ellipsoid

椭球的扁平度一般用偏心率 ε 来表示,放出椭球体偏心率 ε 的计算公式如式(1)所示:

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

偏心率 ε 在工程上通常取为0.90~0.98. V_L 和 V_J 分别代表放出椭球体和松动椭球体的体积,Janelid等^[19]用松动系数 β 来表述两个椭球体之间的关系,其计算公式为:

$$\beta = \frac{V_J}{V_J - V_L} \quad (2)$$

并根据试验结果假设放出椭球体和松动椭球体的偏心率相等,通过研究发现 β 在1.066~1.100范围内变化.

武军等^[8]将颗粒物质的尺寸收缩问题简化为一个方向的收缩,而另一个方向保持无限长,这样可以将三维问题转化为二维问题.在这种情况下,放出椭球体和松动椭球体将转化为一个椭圆区域,并假设该椭圆区域的面积与隧道开挖的面积相等.

$$\frac{\pi}{4}D^2 = \pi a_L b_L \quad (3)$$

联立式(1)和式(3)得:

$$a_L = \frac{D}{2}(1 - \varepsilon^2)^{-1/4} \quad (4)$$

$$b_L = \frac{D}{2}(1 - \varepsilon^2)^{1/4} \quad (5)$$

由于放出和松动椭球体的偏心率相等,联立式(1)~式(5)可得:

$$a_J = \frac{D}{2} \left(\frac{\beta}{\beta - 1} \right)^{1/2} (1 - \varepsilon^2)^{-1/4} \quad (6)$$

$$b_J = \frac{D}{2} \left(\frac{\beta}{\beta - 1} \right)^{1/2} (1 - \varepsilon^2)^{1/4} \quad (7)$$

3 粘性土修正松动土压力计算

3.1 模型假设

为了描述在土拱效应的作用下土体的受力状态,提出了以下模型假定:

- 1)滑移面处上的剪应力充分发挥,处于莫尔-库仑极限平衡状态;
- 2)松动区内同一深度处任意位置土体主应力大小相等;
- 3)土体均匀且各向同性;
- 4)松动土体内主应力轨迹线假定为圆弧形分布^[7],代替Terzaghi理论中的均匀分布假设.

3.2 粘性土松动土压力计算

松动区的宽度取隧道顶部的水平切线与松动椭球交点的间距,由标准椭圆方程并结合放出椭球体和松动椭球体偏心率相等的规定可得:

$$\begin{cases} \frac{z^2}{a_J^2} + \frac{x^2}{b_J^2} = 1, \\ \varepsilon = \frac{\sqrt{a_L^2 - b_L^2}}{a_L} = \frac{\sqrt{a_J^2 - b_J^2}}{a_J} \end{cases} \quad (8)$$

假设隧道圆刚好与松动椭球体在长轴 $z=a_J$ 处相内切,当 $z=a_J-D$ 时,对应隧道顶部水平切线位置,将其代入式(8)可推导出松动区域半宽 B 为:

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{b_J^2 - (1 - \varepsilon^2)(a_J - D)^2} = \\ &= \sqrt{(1 - \varepsilon^2)[b_J^2/(1 - \varepsilon^2) - (a_J - D)^2]} = \\ &= \sqrt{(1 - \varepsilon^2)[a_J^2 - (a_J - D)^2]} = \\ &= \sqrt{(1 - \varepsilon^2)(2a_J - D)D} \end{aligned} \quad (9)$$

徐长节等^[7]基于Terzaghi松动土压力的解析模型,假设主应力轨迹线为悬链线、抛物线和圆弧3种形态,并通过比较得出圆弧拱形线更适用于工程.因此,本文从椭球体理论出发,假定图9中的小主应力轨迹线为圆弧,可以得到其半径 R_1 和 ψ , ψ 为松动区任意位置处大主应力 σ_1 方向与水平方向的夹角.

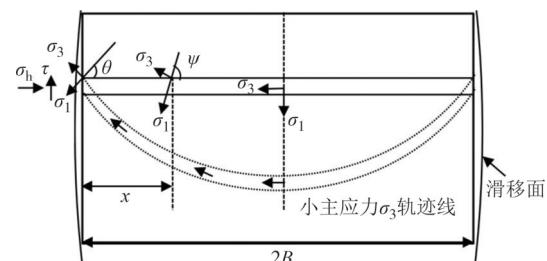


图9 松动土压力计算图

Fig.9 Calculation diagram of loose earth pressure

由几何相似比可得:

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

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

为方便计算,对粘性土,做如图10所示的坐标变换:

$$\begin{cases} \sigma^c = \sigma + c \cot \varphi \\ \tau^c = \tau \end{cases} \quad (12)$$

从Trapdoor试验^[6]可以看出,活动门是向下移动的,相当于土向墙推动距离,此时土体为主动土压

力,结合图 10 所示莫尔应力圆的几何关系得:

$$\sigma_{ha}^c = \sigma_i^c (\cos^2 \theta + K_a^c \sin^2 \theta) \quad (13)$$

$$\sigma_{va}^c = \sigma_i^c (\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta) \quad (14)$$

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

$$K_a^c = \frac{\sigma_i^c}{\sigma_{va}^c} = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (16)$$

式中: K^c 为滑移面处侧向土压力系数; K_a^c 为主动土压力系数; $\theta = 45^\circ - \varphi/2$; σ_{ha}^c 为滑移面处水平应力; σ_{va}^c 为滑移面处竖向应力.

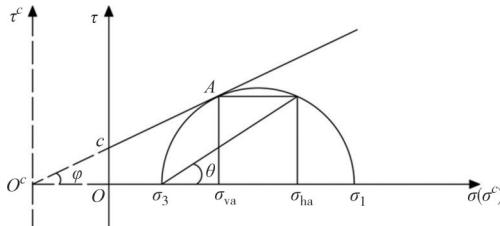


图 10 粘性土滑移面处土体莫尔应力圆
Fig.10 Molar stress circle of soil mass at shear plane of cohesive soil

同理,通过图 11 所示莫尔应力圆可得在松动区内部任意位置 x 处的水平应力 σ_{hx}^c 和竖向应力 σ_{vx}^c .

$$\sigma_{hx}^c = \sigma_i^c (\cos^2 \psi + K_a^c \sin^2 \psi) \quad (17)$$

$$\sigma_{vx}^c = \sigma_i^c (\sin^2 \psi + K_a^c \cos^2 \psi) \quad (18)$$

联立式(17)、式(18)可得任意位置 x 处侧土压力系数 K_x^c :

$$K_x^c = \frac{\sigma_{hx}^c}{\sigma_{vx}^c} = \frac{\cos^2 \psi + K_a^c \sin^2 \psi}{\sin^2 \psi + K_a^c \cos^2 \psi} \quad (19)$$

联立式(14)、式(18)可得:

$$\sigma_{vx}^c = \frac{(\sin^2 \psi + K_a^c \cos^2 \psi)}{(\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta)} \sigma_{va}^c \quad (20)$$

将坐标系变换回来,得到:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\int_0^{2B} \sigma_{vx}^c dx}{2B} - c \cot \varphi = \frac{\sigma_{va}^c}{B} \int_0^B \frac{(\sin^2 \psi + K_a^c \cos^2 \psi)}{(\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta)} dx - c \cot \varphi \quad (21)$$

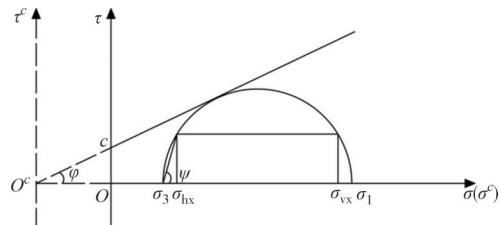


图 11 粘性土松动区内土体莫尔应力圆
Fig.11 Molar stress circle of soil mass in cohesive soil loose zone

对其进行积分,得到平均竖向应力:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{3 + (K_a^c - 1) \cos^2 \theta}{3(\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta)} \sigma_{va}^c - c \cot \varphi \quad (22)$$

令:

$$1/m = \frac{3 + (K_a^c - 1) \cos^2 \theta}{3(\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta)} \quad (23)$$

式中 m 是只随内摩擦角 φ 变化的函数,化简得:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\sigma_{va}^c}{m} - c \cot \varphi \quad (24)$$

对图 12 中的水平微分土条进行竖向受力平衡得:

$$2B\gamma dz = 2Bd\bar{\sigma}_v + 2K^c \sigma_{va}^c \tan \varphi dz \quad (25)$$

化简得:

$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} + \frac{mK^c \tan \varphi}{B} \bar{\sigma}_v + \frac{mcK^c}{B} - \gamma = 0 \quad (26)$$

解出微分方程:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{B\gamma - cmK^c}{mK^c \tan \varphi} + c_1 e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \quad (27)$$

联立式(12)、式(20)、式(24)可得松动区内任意一点竖向应力:

$$\sigma_{vx}^c = \frac{m(\sin^2 \psi + K_a^c \cos^2 \psi)}{(\sin^2 \theta + K_a^c \cos^2 \theta)} (\bar{\sigma}_v + c \cot \varphi) - c \cot \varphi \quad (28)$$

若地表荷载为 q , 联立边界条件 $z=0, \bar{\sigma}_v = q$ 得:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{B\gamma - cmK^c}{mK^c \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \right) + q e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \quad (29)$$

若地表无外荷载,联立边界条件 $z=0, \bar{\sigma}_v = 0$ 得:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{B\gamma - cmK^c}{mK^c \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \right) \quad (30)$$

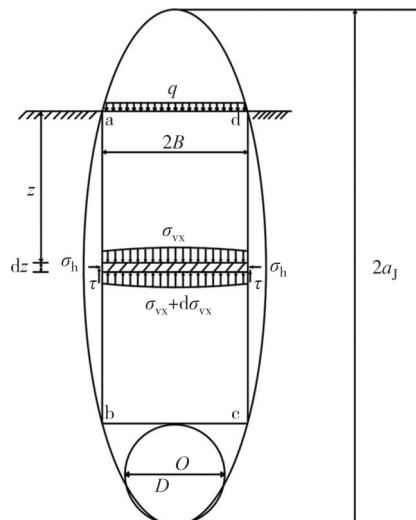


图 12 椭球体理论松动土压力计算模型

Fig.12 Ellipsoidal theory loose earth pressure calculation model

综上,可得到隧道上方整体平均竖向应力表达式:

$$\bar{\sigma}_v = \frac{B\gamma - cmK^c}{mK^c \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \right) + (q + \gamma H_1) e^{-\frac{mK^c z \tan \varphi}{B}} \quad (31)$$

地表相对于松动椭球体的位置关系如图13所示,其中计算方式分以下三种:

1)当 $H \leq 2(a_j - D)$ 时,即隧道的埋深小于椭圆松动区的计算高度且无外荷载 q ,可将 $z=H$ 代入式(30)计算松动土压力;有外荷载 q 则代入式(29)计算.

2)当 $2(a_j - D) \leq H \leq 2a_j - D$ 时,超过计算高度的椭圆部分高度 $H_1 = H - 2(a_j - D)$, $z = 2(a_j - D)$,代入式(31)计算.

3)当 $H \geq 2a_j - D$ 时,即隧道的埋深超过了地层的松动椭球体范围,根据椭球体理论,认为松动椭球体以外的土体对松动土压力无影响,则 $H_1 = D$, $z = 2(a_j - D)$,代入式(31)计算.

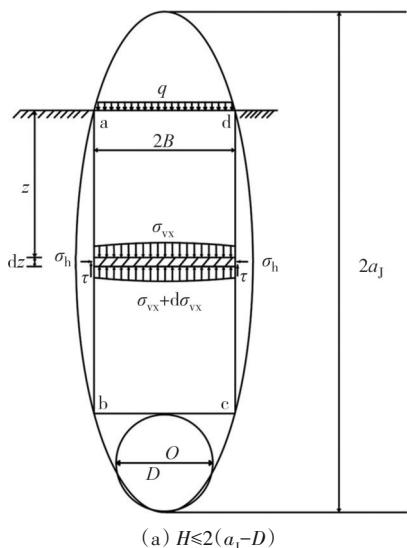
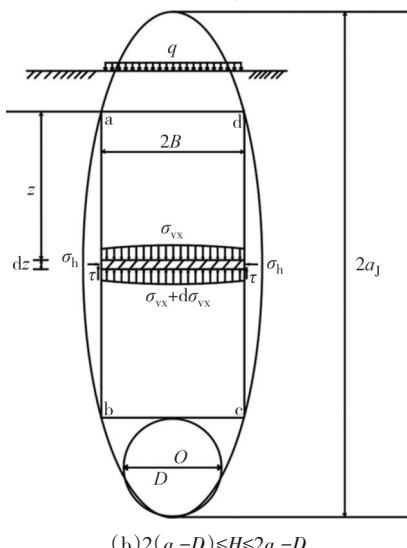
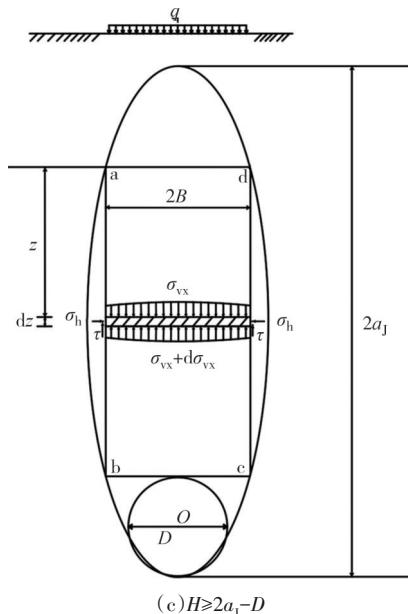
(a) $H \leq 2(a_j - D)$ (b) $2(a_j - D) < H \leq 2a_j - D$ 

图13 松动椭球体与地表相对位置变化图

Fig.13 Change of position of the loose ellipsoid relative to the surface

4 计算结果分析

4.1 对比分析

为验证本文所提理论方法的准确性,采用数值模拟及相关文献的试验结果进行对比。由图14可知,本文修正后的松动土压力与数值计算结果是非常接近的,且随着隧道埋深比的增大,松动土压力与初始应力相差越大,表明在土拱效应的作用下,隧道的实际土压力远小于全覆土重。

同时,本文用粘性土的修正公式与Terzaghi^[6]、徐长节等^[7]学者进行对比,发现后两者的计算结果都比较偏大,原因为Terzaghi经验性地认为侧压力系

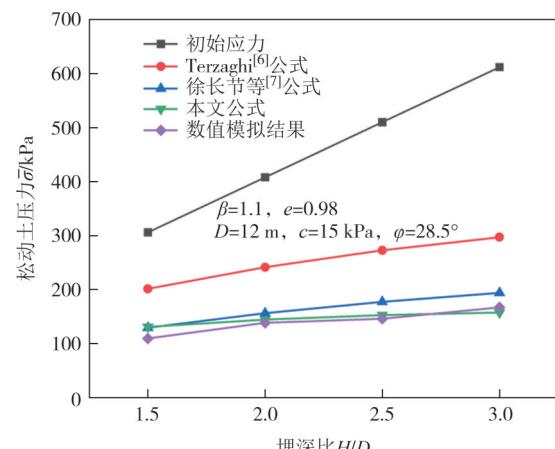
图14 粘性土松动土压力与 H/D 的关系图

Fig.14 Diagram of loose earth pressure and H/D in cohesive soil

数取值为1,而徐长节等未考虑滑移面的实际形状,认为是竖直面.

为方便本文公式与相关文献的试验结果进行比较,对竖向应力 σ_v 采用初始应力 $\sigma_{v(0)}$ 进行归一化处理.图15为无粘性土层下归一化后本文公式与相关文献的试验结果对比情况.由图可知,本文修正后的公式计算结果与陈其志等^[20]试验结果基本吻合,虽比Shahin等^[21]、Lee等^[22]的试验值小,比加瑞^[23]的试验值大,但相差很小,从而验证了本文公式应用在无粘性土层也是合理的.

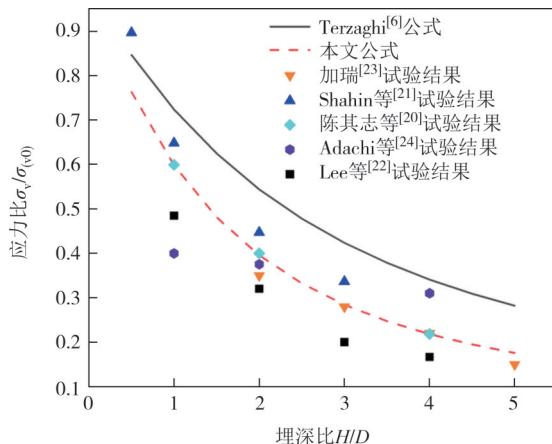


图15 不同埋深下竖向应力归一化后与文献试验结果比较

Fig.15 The normalized vertical stress under different buried depths compared with the experimental results in the literature

图16为侧压力系数在松动区内水平方向上关系图.由图可知,根据陈若曦等^[25]和宫全美等^[12]学者的计算结果,在松动区内水平方向上,无粘性土下侧压力系数 K_v 是不变的,而本文公式得出的侧压力系数 K_v 在水平方向上是逐渐减小的,且大小位于两位学者的计算值之间,表明松动区内任意位置处的侧压力系数 K_v 都是不同的.

4.2 地层损失率对松动土压力的影响

方焘等^[13]根据试验结果得出放出椭球体的面积和隧道断面面积以及地层损失率存在以下关系:

$$\frac{\pi}{4} D^2 (1 + S_L)^2 = \pi a_L b_L \quad (32)$$

式中: S_L 为地层损失率,由隧道与上方地层间形成的空隙与隧道横截面之比决定^[26].

由图17可知,松动土压力 σ_v 随着地层损失率 S_L 的增长呈现出较为明显的非线性特征,且随着地层位移的增长,覆土厚度从浅到深对应的松动土压効率依次是28.8%、34.8%、43.73%.由此可知,对比浅埋隧道,深埋隧道受到地层损失率的影响较

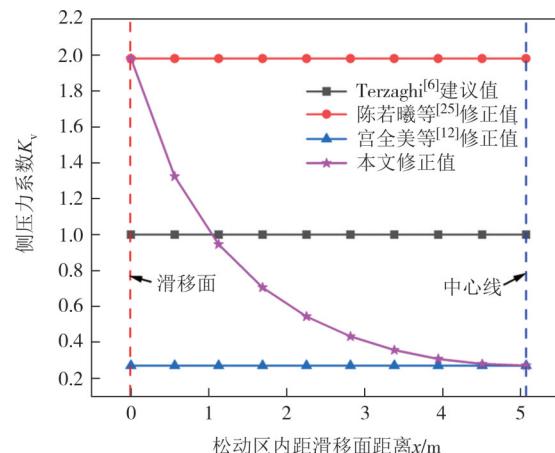


图16 侧压力系数在松动区内水平方向上关系图

Fig.16 Relationship diagram of lateral pressure coefficient in the loose zone in the horizontal direction

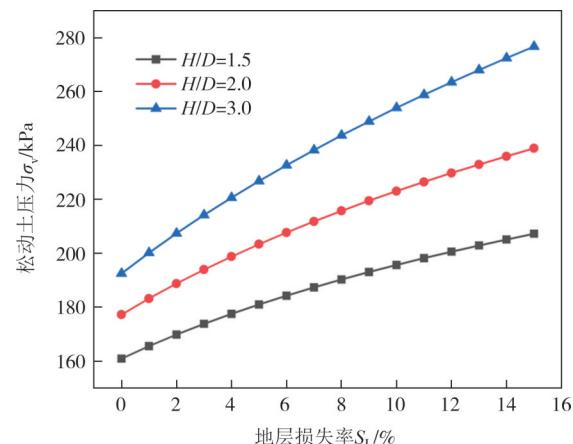


图17 不同地层损失率对松动土压力的关系图

Fig.17 Relationship diagram of different stratigraphic loss rates on loose earth pressure

为显著.

4.3 内摩擦角对松动土压力的影响

以隧道拱顶为起点,从左往右按顺时针方向每隔15°计算隧道上覆荷载.计算结果如图18所示.

由图18可知,不同内摩擦角下隧道上覆荷载呈“半葫芦形”分布,表现为从拱顶附近逐渐减小至拱腰.拱顶附近30°范围内,基本为均布荷载;随着内摩擦角的增大,分布形式更加明显,且上覆荷载也越来越小.

4.4 黏聚力对松动土压力影响分析

由图19可知,松动土压力随着黏聚力的增大逐渐减小,与数值计算结果趋势是一致的.在内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ 的地层中,黏聚力每增加15 kPa,松动土压力平均减少29.58 kPa;在内摩擦角 $\varphi=55^\circ$ 的地层中,黏聚力每增加15 kPa,松动土压力平均减少10.50 kPa.原因是提高黏聚力可以弥补地层内摩擦力的不足,

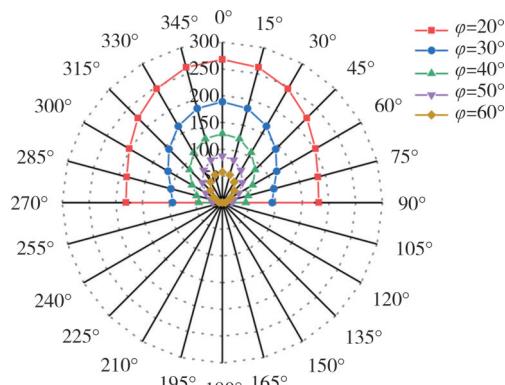


图18 不同内摩擦角下土体与衬砌间的松动土压力 σ_l/kPa
Fig.18 Loose earth pressure σ_l/kPa between soil and lining at different internal friction angles

增加了颗粒之间的相互吸附和黏合作用,使得土体整体的强度、抗剪切能力提高,则土拱效应的作用也增强了,导致松动土压力减小。从图19(a)(b)对比结果来看,内摩擦角较小的地层提高黏聚力更有利于减小隧道上覆土压力。

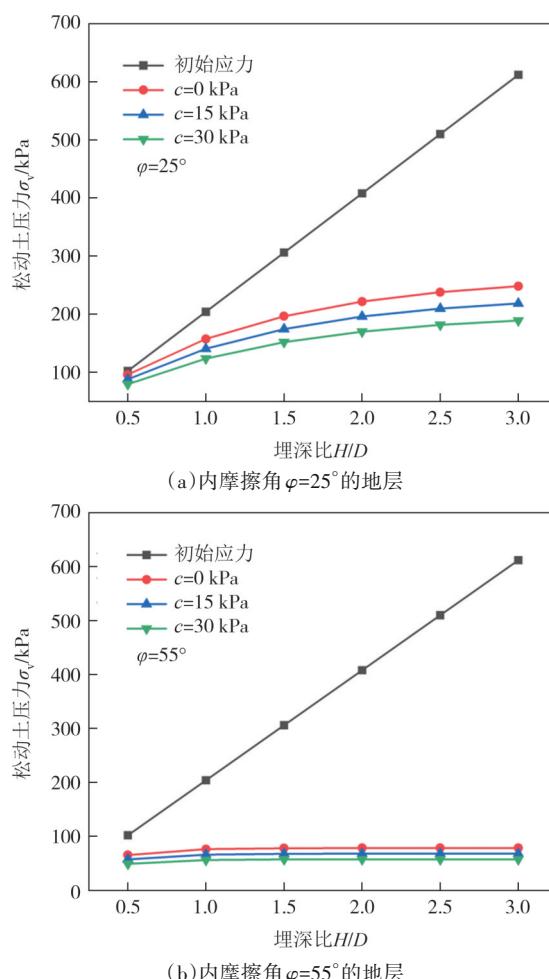


图19 不同黏聚力对松动土压力的影响
Fig.19 Influence of different cohesions on the loose earth pressure

5 结论

本文根据数值模拟的计算结果得出隧道滑移面形状与椭圆面极其相似,因此基于椭球体理论,引入黏聚力对松动土压力的影响,修正了Terzaghi松动土压力公式,并通过数值模拟和相关文献结果验证了本文修正解的可靠性和合理性,分析了有关参数对土压力的影响,得出了以下结论:

1)从数值模拟结果云图来看,相较于无粘性土层,粘性土层滑移面处的切应力更大,因此其破坏程度更大,但两者滑移面变化规律基本一致,即隧道埋深比 $H/D \leq 1.5$ 时,首先出现三角形状滑移面,随着隧道埋深的持续增大,地层逐渐向内形成剪切面,最终形成塔形状滑移面。

2)将数值模拟及相关文献的试验结果与本文公式进行对比,可以看出,由于本文充分考虑了椭球形滑移面以及粘性土下土拱效应对松动土压力的影响,因此,本文的公式计算结果与试验结果更为接近,并且本文的计算公式适用于粘性及无粘性土层的隧道开挖过程中土压力计算。

3)松动土压力与地层损失率 S_L 、内摩擦角 φ 、侧压力系数 K_s 、黏聚力 c 等相关,侧压力系数 K_s 在水平方向上是逐渐减小的。同时,隧道上覆荷载呈“半葫芦形”分布,表现为从拱顶附近逐渐减小至拱腰,随内摩擦角 φ 的增大,其分布形式更加明显,对比浅埋隧道,深埋隧道中的地层损失率 S_L 对松动土压力造成的影响更大。

4)在内摩擦角较小的地层中,提高黏聚力有利于减少隧道上覆土压力,并在施工中可以适当减小支护结构的强度,利于材料的节约。

参考文献

- [1] 台启民,张顶立,王剑晨,等.软弱破碎围岩高铁隧道压力拱演化规律分析[J].北京交通大学学报,2015,39(6):62-68.
TAI Q M, ZHANG D L, WANG J C, et al. Analysis on pressure arch evolution law of high-speed railway tunnel under unfavourable rock conditions [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(6):62-68. (in Chinese)
- [2] 白浪峰,徐前卫,田龙岗,等.软弱破碎连拱隧道松动区模型试验与分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3610-3618.
BAI L F, XU Q W, TIAN L G, et al. Model test and analysis of loose zone in soft and cracked surrounding rock of multi-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2013, 32(Sup.2): 3610–3618. (in Chinese)
- [3] CHEN C N, HUANG W Y, TSENG C T. Stress redistribution and ground arch development during tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 228–235.
- [4] 韩同春, 邱子义, 豆红强. 基于颗粒离散元的抗滑桩土拱效应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2715–2722.
- HAN T C, QIU Z Y, DOU H Q. Soil arching effect between anti-slide piles based on YADE discrete element method[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(8): 2715–2722. (in Chinese)
- [5] 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 J, LIN G J, TANG X, 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)
- [6] TERZAGHI K. *Theoretical soil mechanics* [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1943: 66–76.
- [7] 徐长节, 梁碌鉅, 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 C J, LIANG L J, CHEN Q Z, 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)
- [8] 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 J, LIAO S M, ZHANG D. 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)
- [9] 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.
- [10] 陈国舟, 周国庆. 考虑土拱效应的倾斜滑移面间竖向应力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2643–2648.
- CHEN G Z, ZHOU G Q. Study of vertical stress within inclined slip surfaces considering soil arching [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2643–2648. (in Chinese)
- [11] 周小文, 潘家骝, 包承钢. 砂土中隧洞开挖稳定机理及松动土压力研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 10–15.
- ZHOU X W, PU J L, BAO C G. Study on stability mechanism of tunnel excavation and loose earth pressure in sandy soil [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 1999, 16(4): 10–15. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 方焘, 梁连, 陈其志. 基于修正椭球体理论的隧道松动区及松动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(6): 1113–1122.
- FANG T, LIANG L, CHEN Q Z. Loosening zone and earth pressure around tunnels based on modified ellipsoid theory [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45 (6) : 1113–1122. (in Chinese)
- [14] XU C J, LIANG L J, CHEN Q Z, et al. Experimental study of soil arching effect under seepage condition [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(6): 2031–2044.
- [15] LIANG L J, XU C J, CHEN Q Z, et al. Experimental and theoretical investigations on evolution of soil–arching effect in 2D trapdoor problem [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(6): 06020007.
- [16] HANDY R L. The arch in soil Arching[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302–318.
- [17] 汪大海. 浅埋超大跨隧道地层成拱机理及围岩压力研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- WANG D H. Theoretical analysis of the arching effect for large tunnels with shallow overburden depth and the resulted rock load [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [18] 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 T, LIANG L, YAN J W. Experimental study on stratum deformation caused by shield tunnelling at different buried depths [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(3): 85–92. (in Chinese)
- [19] JANELID I, KVAPIL R. Sublevel caving [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1966, 3: 129–153.
- [20] 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 Q Z, GUO S G, XU C J, 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)
- [21] SHAHIN H, NAKAI T, KIKUMOTO M, et al. Ground movement and earth pressure due to circular tunneling: model tests and numerical simulations [M]//*Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [22] 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.
- [23] 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 R. Study on relaxation effect of vertical soil pressure for shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [24] ADACHI T, KIMURA M, KISHIDA K. Experimental study on the distribution of earth pressure and surface settlement through three-dimensional trapdoor tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(2/3): 171–183.
- [25] 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 R X, ZHU B, CHEN Y M, 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)
- [26] 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.