

DOI: 10.11779/CJGE201701008

基于颗粒椭球体理论的隧道松动土压力计算方法

宫全美¹, 张润来¹, 周顺华¹, 唐黎明¹, 韩高孝²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于颗粒椭球体理论认为隧道上部松动区滑动面为椭圆形, 据此推导出受滑动面倾角影响的侧土压力系数计算方法; 在椭圆形松动区内竖向荷载沿水平向呈梯形分布, 推导出隧道松动土压力计算方法。结果表明: 当埋深低于极限椭圆高度时, 松动区域为地面线以下的极限椭圆区域; 当埋深达到极限椭圆高度时, 松动区为整个极限椭圆, 松动土压力不再增加。滑动面侧土压力系数是变化的, 与滑动面倾角和土的摩擦角有关, 随着内摩擦角增大而减小, 随着滑动面倾角增大而增大。取值范围为0.2~0.8, 介于主动土压力系数和Krynine侧土压力系数之间。本模型计算结果与实测数据较为吻合, 可以用于隧道设计和施工中。

关键词: 松动土压力; 隧道; 椭球体; 侧土压力系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)01-0099-07

作者简介: 宫全美(1967-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事铁道工程、线路动力学相关研究。E-mail: gongqm@tongji.edu.cn。

Method for calculating loosening earth pressure around tunnels based on ellipsoid theory of particle flows

GONG Quan-mei¹, ZHANG Run-lai¹, ZHOU Shun-hua¹, TANG Li-ming¹, HAN Gao-xiao²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the ellipsoid theory of particle flows, that is, an ellipse sliding face is presented in the loosening zone at upper part of tunnels, a method is deduced to calculate the lateral earth pressure coefficient related to the inclination of sliding face. Besides, the method for calculating the loosening earth pressure is proposed in consideration of horizontal trapezium distribution of vertical loads in the loosening zone. The results show that the loosening zone behaves at the part of the limit ellipse under the ground line with the burial depth less than the height of the limit ellipse and a whole ellipse with the burial depth reaching the height of the limit ellipse, in which the earth pressure gets the maximum value. The lateral earth pressure coefficient is variable, and it has a positive correlation with sliding surface inclination, however, it has a negative correlation with friction angle. Usually, it values from 0.2 to 0.8 and ranges from the active coefficient to the Krynine coefficient. The proposed results are more close to the existing test data and model test data, and they can be used in the design and construction of tunnels.

Key words: loosening earth pressure; tunnel; ellipsoid; lateral earth pressure coefficient

0 引言

目前隧道所受竖向土压力的计算方法主要有简化计算方法、考虑地层与隧道结构相互作用的方法和基于现场量测及模型试验的方法, 简化计算方法求解简单、实用性强, 在工程设计中得到广泛应用。根据埋深和土性的差异, 简化计算方法主要有全覆土柱法、普氏理论法、太沙基松动土压力法、谢家侬法、规范法等; 当隧道埋深较浅或者土质较软时, 常采用全覆土柱法; 当隧道埋深较大或土质较硬时发生土拱效应, 常采用普氏理论法或太沙基松动土压力法, 其中太沙

基法在岩土工程界影响最大使用最广。

但 Terzaghi^[1]通过活动门试验及水平层析法建立松动土压力理论时所采用的一些假设与实际有一定的差异, 国内外诸多学者对其进行了修正, 可归纳为以下4点: ①Terzaghi假定滑动面为垂直面, Evans等^[2]和 Tien Heisen-Jen等^[3]根据大量模型试验观测的结果得出滑动面并非为垂直面, 而是曲面形态。周小文等^[4]

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472247)

收稿日期: 2015-10-22

根据离心试验得出滑动面为隧道两侧向外倾斜小角度至地面。Shukla 等^[5]假定滑动面为与竖直方向成一固定夹角,但是没有明确给出倾斜角是如何产生以及如何确定。陈国舟等^[6]假定滑动面为抛物线型,并引入滑动面系数 m 进行松动土压力推导。②Terzaghi 松动区域宽度取 $2B = 2R \cot(\pi/8 + \varphi/4)$,该取值没有经过试验和现场实测试验验证;加瑞^[7]根据挡板下落试验和颗粒流模拟结果认为滑动土体宽度取隧道直径。武军等^[8]在假定滑动面为垂直面的基础上根据颗粒椭球体理论得到修正滑动区宽度。③Terzaghi 假定竖向应力沿水平向均匀分布,而实际由于拱效应的存在,隧道轴线上方的竖向应力要小于滑动面上的竖向应力;周小文等^[4]假定竖向应力沿水平向呈梯形分布计算得到的松动土压力与离心试验相比吻合较好。④Terzaghi 松动土压力中侧土压力系数根据经验取值为 1,此时与实测较为接近,但并没有给出取值的理论依据;Maston 等^[9]以地下管道设计为背景,根据竖向、水平为主应力方向建议取朗肯主动土压力系数 K_a ;Jaky 等^[10]取土压力系数为静止土压力系数;Krynine 等^[11]用莫尔应力圆分析滑动面微元体受力得到侧土压力系数 K_k ;Handy 等^[12]将土拱形状描述为悬链线的形式,得到侧土压力系数;陈若曦等^[13]基于主应力轴旋转理论修正侧土压力系数,得到侧土压力系数大于 1,在隧道中线上方侧土压力系数更大;黎春林等^[14]根据盾构隧道土拱发挥程度提出修正的侧土压力系数方法。

可以得知,文献[9~14]是在假定滑动面为垂直面的情况下得到侧土压力系数;文献[5, 6]虽然考虑了滑动面斜线或者曲线形态,但和文献[9~14]一样在取值上为一固定值,没有考虑滑动面在不同倾角处侧土压力系数的变化,同时在竖向应力水平方向上均匀分布。文献[8]虽然在竖向应力水平方向上考虑不均匀分布,但其推导时滑动面采用垂直面形式并且侧土压力系数取值与 Krynine 相同。

鉴于上述隧道松动土压力计算方法的不足,本文尝试结合颗粒物质椭球体理论,推导出滑动面为椭圆形时侧土压力系数的计算公式,分析了滑动面倾角取值对侧土压力系数的影响;基于上述侧土压力系数计算方法,并认为滑动区内部竖向应力沿水平向呈梯形分布,推导出松动土压力计算公式,并将计算结果与其他相关研究的实测数据进行对比,验证了该模型的合理性。

1 椭球体理论

1952 年前苏联学者 TM 马拉霍夫发表《崩落矿块的放矿》,形成了椭球体放矿理论体系。该理论最早应

用在煤矿和冶金领域,主要探究了颗粒尺寸的大小、放矿口宽度等因素对散体流动的边界形状影响^[15]。如图 1 所示,颗粒性物质存储在贮藏仓里,在仓底有一个开口,颗粒在重力作用下流出,所有流出的颗粒都是从一个近似椭球体中流出去的,称之为流出椭球体,与流出椭球体相对应的有一个极限椭球体,在这两个椭球体间区域颗粒发生松动并产生位移,在极限椭球体外部区域颗粒将保持静止。

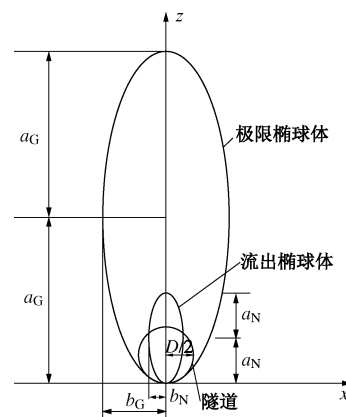


图 1 流出椭球体和极限椭球体

Fig. 1 Ellipsoid of motion and limit ellipsoid

用 ε 表示流出椭球体的偏心率,如式(1)所示,工程实际 ε 在 0.90~0.98 之间变化,最常见的 ε 取 0.92~0.96 之间。用 E_N 表示流出椭球体体积,用 E_G 表示极限椭球体体积,假定两椭球体偏心率一样,如式(2)所示定义松动系数 β 来表示两椭球体体积之间的关系,发现 β 在 1.066~1.100 之间变化^[16]。在图 1 中, a_N 为流出椭球体长轴, b_N 为流出椭球体短轴, a_G 为极限椭球体长轴, b_G 为极限椭球体短轴, D 为隧道直径。

$$\varepsilon = (1 - b_N/a_N)^{1/2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{E_G}{E_G - E_N} \quad (2)$$

如图 2 所示,在活动门试验中脱落板下移时,顶部发生变形范围 cd 大于脱落板宽度 ab ,滑动面表现为曲面形式;太沙基将滑动面简化处理为垂直面,然后推导出松动土压力。由此可知,滑动面形态并非是垂直面形态,曲线形滑动面更加符合实际情况;根据大量模型试验^[2-3]中滑动面的形态,可知椭球体理论应用于滑动面形态分析中具有一定适应性。

武军等^[8]分析了颗粒椭球体理论在砂土地层隧道极限支护压力计算的可行性,探讨了参数 ε , β 的敏感程度。将放出口转换成线形只受一个方向影响,从而三维问题转化为二维,椭球体转化为椭圆区,令虚拟流出椭圆的面积与隧道开挖面积相等。隧道松动区边界则为极限椭圆。当支护压力由正常支护逐渐减小到临界支护力时,松动区域逐步扩大至极限椭圆。根

据力的相互作用, 此临界支护力就是所求的松动土压力。

$$\frac{\pi}{4}D^2 = \pi a_N b_N, \quad (3)$$

联合式 (1) ~ (3) 可以求得

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

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

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

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

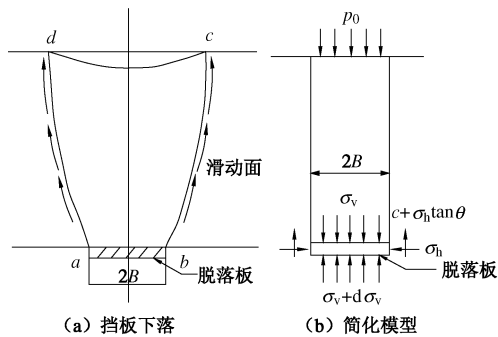


图 2 挡板脱落试验与简化模型

Fig. 2 Trap-door experiment and simplified model

2 松动土压力修正计算模型

本文认为滑动面为极限椭圆, 在极限椭圆与流出椭圆内为松动区域; 在滑动面上认为土体达到抗剪强度, 并据此推导出侧土压力系数与滑动面倾角之间关系; 根据椭圆方程得到滑动区宽度; 在竖向应力水平方向上考虑不均匀性, 采用梯形分布模式; 具体介绍如下所示。

2.1 滑动面形式

滑动面与水平面夹角是变化的, 用 θ 表示, θ 受到极限椭圆形状的影响, 即 ε , β 的影响, 偏心率 ε 不仅与土颗粒粒径有关, 还与颗粒形状、颗粒表面摩擦性能、黏粒含量等有关, 也即土性的影响。除此之外, 可以看出 θ 随深度 Z 变化而变化, θ 与隧道埋深比 H/D 也相关。为了方便计算, 作以下讨论。

如图 3 (a) 所示, 当埋深达到极限椭圆高度时, 定义此时埋深比为临界埋深比; 联立式 (6)、(8) 可以得出临界埋深比的取值只与 ε , β 有关, 如式 (9) 所示, 针对一般砂性土 ε , β 的取值范围临界埋深比大约在 4~5 倍。如图 3 (b) 所示, 当埋深低于极限椭圆高度时, 松动区域为地面线以下的极限椭圆区域。

当埋深超出极限椭圆区高度时, 松动区域为整个极限椭圆区, 松动土压力不再继续增大, 这 and 实际工程情况是相符合的。

$$\left(\frac{H}{D}\right)' = \frac{2a_G - D}{D}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{H}{D}\right)' = \left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)^{\frac{1}{2}}(1-\varepsilon^2)^{-\frac{1}{4}} - 1. \quad (9)$$

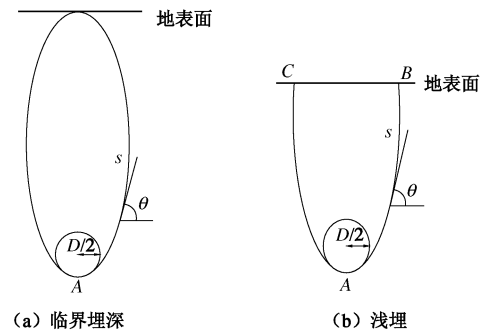


图 3 椭圆形滑动面形式

Fig. 3 Patterns of ellipse sliding surface

2.2 滑动区域宽度

当隧道顶部水平线与隧道相切, 与极限椭球体相交两点, 则该两点距离为滑动区域宽度。由椭圆方程可以得出滑动区域宽度近似值 $2B$:

$$2B = 2\sqrt{(1-\varepsilon^2)(2a_G - D)D}. \quad (10)$$

2.3 竖向应力水平向不均匀分布

太沙基假定竖向应力沿水平方向均匀分布, 实际上在隧道中线上方的竖向应力要小于滑动面上的竖向应力。如图 4 (a) 所示, 当隧道没有开挖时 (或活动门试验中挡板没有下移), 竖向应力沿水平方向上均匀分布; 当隧道开挖时上方发生土体不均匀位移 (或活动门试验中挡板下移), 从而产生土拱效应如图 4 (b) 所示, 在隧道正上方竖向应力减小, 荷载转移到两边土体中, 两边土体主应力发生旋转并且受力状态达到极限状态产生滑动面。由于竖向总荷载量不变, 因此隧道正上方竖向荷载小于 γH , 滑动面上竖向荷载大于 γH 。

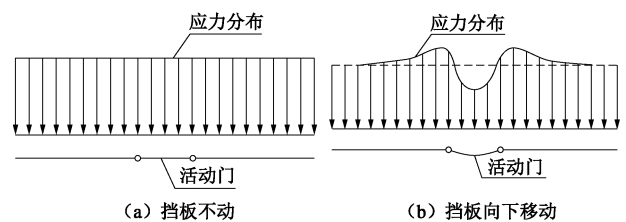


图 4 活动门试验竖向荷载沿水平向分布^[17]

Fig. 4 Vertical load distribution in horizontal direction in trap-door experiment

为了考虑这种竖向应力水平方向上的不均匀性,如图5所示,假设竖向应力水平向服从梯形分布,滑动面上竖向应力为中轴线上 m 倍,

$$\sigma_v = m\sigma_z, \quad (11)$$

即 m 的取值可以通过试验测得。文献[8]也指出这种竖向应力水平向分布不均匀性,并根据试验和经验给出 m 值取值范围为3.256~3.745。

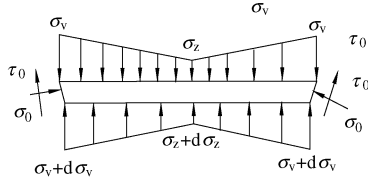


图5 松动区内竖向荷载梯形分布

Fig. 5 Trapezium distribution of vertical load in loosening zone

2.4 侧土压力系数推导

本文考虑滑动面上土体单元已达到极限应力状态,如图6(a)所示,滑动面与水平面夹角 θ ,滑动面上正应力设为 σ_0 ,切应力设为 τ_0 ;滑动面与垂直面的夹角为 $90^\circ - \theta$,设 σ_h 与 σ_0 在莫尔圆上的夹角为 λ ,如图6(b)所示,则

$$\lambda = 180^\circ - 2\theta. \quad (12)$$

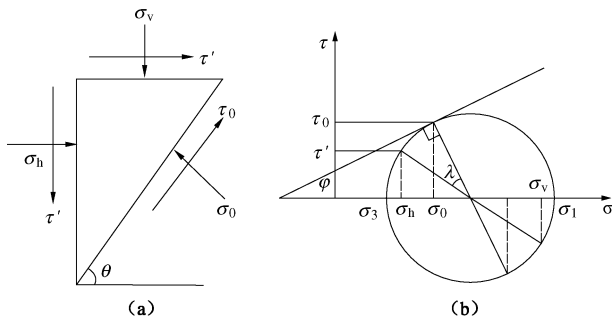


图6 滑动面上土体莫尔应力圆

Fig. 6 Mohr stress circle for soil in sliding face

小主应力 σ_3 与水平向夹角为 $45^\circ - \varphi/2 - \lambda/2$,化简后可以表示为 $\theta - (45^\circ + \varphi/2)$,可以看出 θ 的取值范围为从 $45^\circ + \varphi/2$ 到 90° 。当 θ 等于 90° 时,即滑动面为垂直面,此时 λ 等于 0° ,即 σ_h 等于 σ_0 ;当 θ 等于 $45^\circ + \varphi/2$ 时,可以得到 $\lambda = 90^\circ - \varphi/2$,此时 σ_h 就是小主应力。 R 为莫尔圆半径,由莫尔圆上几何关系可以得到

$$\sigma_v - \sigma_h = \sigma_v(1 - K), \quad (13)$$

$$R = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \times \frac{1}{\cos(90^\circ - \varphi - \lambda)}, \quad (14)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} - R \sin \varphi, \quad (15)$$

$$\tau_0 = R \times \sin(90^\circ - \lambda). \quad (16)$$

联立式(13)~(16)可以解出用竖向应力 σ_v 和

侧土压力系数 K 表达的滑动面上正应力和切应力

$$\tau_0 = \frac{\sigma_v(1 - K) \cos \varphi}{2 \sin(\varphi + \lambda)}, \quad (17)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v(1 + K)}{2} - \frac{\sigma_v(1 - K) \sin \varphi}{2 \sin(\varphi + \lambda)}. \quad (18)$$

由于滑动面上土体达到破坏状态,根据莫尔库仑土体抗剪强度 $\tau_0 = c + \sigma_0 \tan \varphi$,可以得到

$$\left[1 + \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \lambda)} + \frac{\cos \varphi}{\sin(\varphi + \lambda) \tan \varphi} \right] K = \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \lambda)} + \frac{\cos \varphi}{\sin(\varphi + \lambda) \tan \varphi} - 1 - \frac{2c}{\sigma_v \tan \varphi}, \quad (19)$$

令 $r = \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \lambda)}$, $s = \frac{\cos \varphi}{\sin(\varphi + \lambda) \tan \varphi}$,代入式(19),对 K 进行化简得

$$K = 1 - \frac{2(\sigma_v \tan \varphi + c)}{(r + s + 1)\sigma_v \tan \varphi}. \quad (20)$$

可以看出侧土压力系数 K 是土体黏聚力 c 、滑动面倾角 θ 、摩擦角 φ 和竖向应力 σ_v 的函数。

当土体为砂土时,即 $c=0$ 时,

$$K = 1 - \frac{2}{(r + s + 1)}, \quad (21)$$

将 r , s 和 λ 代入式(21),化简得到

$$K = \frac{1 - \sin(2\theta - \varphi) \sin \varphi}{1 + \sin(2\theta - \varphi) \sin \varphi}. \quad (22)$$

可知,对于无黏性土,侧土压力系数 K 仅与滑动面倾角 θ 、摩擦角 φ 相关。

2.5 松动土压力推导

将式(20)代入式(17)、(18)中,消除侧土压力系数 K 得到

$$\sigma_0 = \frac{s\sigma_v}{(r + s + 1)} - \frac{(r + 1)c}{(r + s + 1) \tan \varphi}, \quad (23)$$

$$\tau_0 = \frac{s(\sigma_v \tan \varphi + c)}{(r + s + 1)}. \quad (24)$$

根据水平层竖向受力的平衡可以得到

$$2B\gamma dz = B(\sigma_z + d\sigma_z + \sigma_v + d\sigma_v) - \left(B + \frac{dz}{\tan \theta} \right) (\sigma_z + \sigma_v) + \left(2\sigma_0 \frac{dz}{\sin \theta} \right) \cos \theta + \left(2\tau_0 \frac{dz}{\sin \theta} \right) \sin \theta. \quad (25)$$

将式(11)、(23)、(24)代入式(25)中,并令

$$Q = \frac{m + 1}{2}, \quad (26)$$

$$N = \frac{1}{\tan \varphi} \left[\frac{ms(\tan \varphi + \cot \theta)}{(r + s + 1)} - \frac{Q}{\tan \theta} \right], \quad (27)$$

将 Q , N 代入,对平衡方程进行简化得

$$B\gamma dz = BQd\sigma_z + \tan \varphi N\sigma_z dz + Ncdz. \quad (28)$$

在方程(28)求解中,由于滑动面上不同位置倾

角不同, 即含有 θ 的变量 N 是与 z 相关的, 因此不能直接解出微分方程。

为了考虑整个滑动面位置的倾角同时又能简化计算便于运用, 用式 (29) 定义一个等效倾角 θ' 来代入式 (28) 中进行计算。曲线 S 为弧 AB , 曲线积分下限为隧道底部 A 点, 上限为地表面与极限椭圆交点 B 。 θ 为曲线 AB 上任意一点的倾角。可以看出隧道埋深不同, 所取得的曲线 S 长度不同, 积分上限也不同, 当隧道埋深达到极限椭圆区域高度时, 由椭圆对称性关系可以得到 $\theta = 90^\circ$ 。

$$\theta' = \arccos \left(\frac{\int_A^B \cos \theta dl}{\int_A^B dl} \right) \quad (29)$$

取 $\varepsilon = 0.92$, $\beta = 1.08$ 时为例, 对式 (29) 进行计算, 得到不同的埋深比与 θ 之间的关系如图 7 所示。当隧道埋深比越大, 倾角越大, 滑动面整体越接近垂直滑动面; 当覆跨比较小时, 等效倾角较小。等效倾角与覆跨比相关, 不同于 Shukla 简化为一固定倾角的斜面, 符合实际情况。

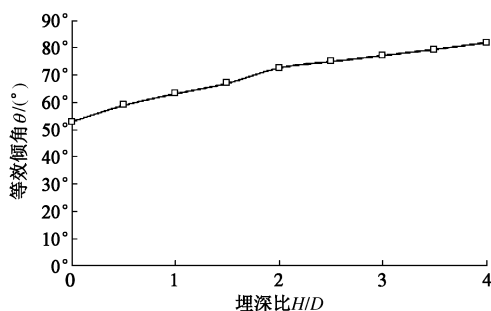


图 7 等效倾角与埋深比的关系

Fig. 7 Relationship between burial depth and equivalent inclination

将 $z = 0$, 取 $\sigma_z = p_0$ 和式 (29) 代入式 (28) 计算得

$$\sigma_z = \frac{(B\gamma - Nc/Q)(1 - e^{-\frac{N \tan \phi \cdot z}{QB}}) + \frac{P_0}{Q} e^{-\frac{N \tan \phi \cdot z}{QB}}}{N \tan \phi} \quad (30)$$

对于无黏性土, 地面荷载为 0 时, 式 (30) 简化为

$$\sigma_z = \frac{B\gamma}{N \tan \phi} (1 - e^{-\frac{N \tan \phi \cdot z}{QB}}) \quad (31)$$

N 与滑动面倾角 θ 、摩擦角 ϕ 相关, θ 与 ε , β 和埋深比 H/D 有关; Q 与 m 相关。相较于太沙基松动土压力公式, 上述计算方法考虑了颗粒椭球体理论的滑动面形式和竖向应力水平向不均匀性。其次, 在推导过程中, 侧土压力系数 K 是土体黏聚力 c 、滑动面倾角 θ 、摩擦角 ϕ 和竖向应力 σ_z 的函数, 而不是一个定值。

上述方法可直接计算埋深小于临界埋深的浅埋隧道松动土压力。临界埋深计算方法见式 (8)、(9)。对于深埋隧道, 极限椭圆上部区域没有剪应力发生, 此

区域可以看作均布荷载 P_0 , 这样深埋隧道便简化为均布荷载作用于地面的临界埋深隧道, 据此可以计算深埋隧道松动土压力。

3 结果分析

3.1 侧土压力系数 K 取值分析

根据式 (20) 可知对于黏性土而言, 滑动面上的侧土压力系数是复杂的、取值也是变化的。侧土压力系数 K 除了与黏聚力和摩擦角有关之外, 还与滑动面倾角和滑动面的竖向应力有关。由于埋深不同, 滑动面的倾角和竖向应力也不同, 因此隧道不同埋深处的侧土压力系数也不同。为了对本文计算方法的侧土压力系数比较分析, 以下就砂性土中侧土压力系数取值 (即式 (22)) 与其他已有研究数据取值进行比较。

Maston 建议取朗肯主动土压力系数 K_a 如式 (32); Krynine 建议侧土压力系数 K_k 如式 (33)。本文侧土压力系数计算方法中, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 取得最大值, 且 $K = K_k$ 。此外, 由 (22) 式可知当 $\sin(2\theta - \phi)$ 为 1 时, 即 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ 时, 侧土压力系数取得最小值, 即主动土压力系数 K_a 。因此可以认为 Krynine、Maston 侧土压力系数都是本文计算方法的一种取值情况。即侧土压力系数是变化的, 如式 (34) 所示, 取值介于主动土压力系数和 Krynine 侧土压力系数之间。

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (32)$$

$$K_k = \frac{\cos^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad (33)$$

$$K_a \leq K = \frac{1 - \sin(2\theta - \phi) \sin \phi}{1 + \sin(2\theta - \phi) \sin \phi} \leq K_k \quad (34)$$

如图 8 所示, 当 θ 不变时, 侧土压力系数随内摩擦角增大而减小。如图 9 所示, 当内摩擦角不变时, 侧土压力系数随着滑动面倾角 θ 的增大而增大。侧土压力系数取值范围在 0.2~0.8 区域内, 小于太沙基建议值 1。

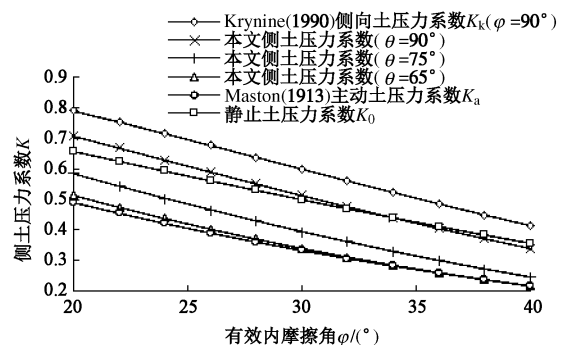


图 8 侧土压力系数随土体有效内摩擦角的变化

Fig. 8 Relationship between lateral earth pressure coefficient and effective internal friction angle of soil

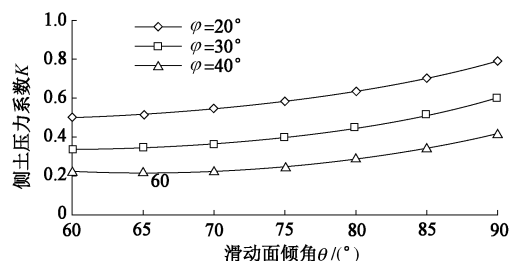


图9 侧土压力系数随滑动面倾角的变化

Fig. 9 Relationship between lateral earth pressure coefficient and inclination of sliding surface

3.2 松动土压力分析

图 10 所示为无黏性土地层不同隧道埋深情况下松动土压力大小。Krynine 和太沙基松动土压力计算都大于实测值；太沙基虽然侧土压力系数取值偏大，但是没有考虑竖向力水平方向的不均匀性，在滑动面附近竖向力取值偏小，综合起来滑动面的剪应力偏小，因此松动土压力计算偏大；Krynine 是在太沙基上修正，侧土压力系数取值合理，因此松动土压力计算比太沙基松动土压力更大。本文计算方法中，侧土压力系数取值考虑了滑动面倾角和竖向应力水平向梯形分布， m 取 3.3~3.7 时，计算结果很接近实测数据；隧道临界埋深比约为 4，当隧道埋深接近临界埋深时，松动土压力收敛不再增加；当埋深继续增大时，需采用深埋模式进行计算。

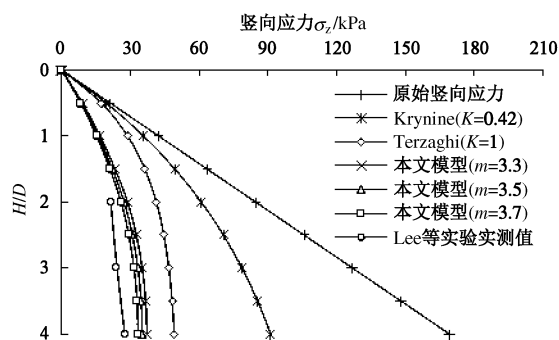


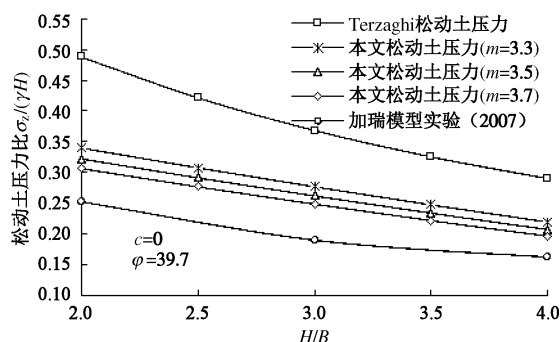
图10 松动土压力计算值与实测值比较

Fig. 10 Comparison between calculated loosening earth pressures and test data by Lee Chung-jung^[18]

图 11 所示为本文计算方法与加瑞^[7]Trapdoor 模型试验数据的对比，由图中松动土压力比与 H/B 的关系可以知，实测松动土压力比为 0.25~0.18，本文计算方法比太沙基方法更加接近实测数据，可以减少计算误差。

通过上述分析，可以发现本文计算方法虽然在滑动面上侧土压力系数小于 1，但是在滑动面附近竖向应力大于隧道中心线上竖向应力，滑动面对于松动区域的向上锚制作用依然大于太沙基方法，更接近实测值和模型试验值。椭圆形滑动面和竖向应力水平向梯

形分布比太沙基模型更加能够反映真实的应力分布状态。

图11 松动土压力计算值与加瑞模型试验^[7]结果比较Fig. 11 Comparison between calculated loosening earth pressures and results of model experiment by Jia Rui^[7]

4 结 论

本文结合颗粒椭球体理论推导出滑动面为椭圆形时侧土压力系数的计算公式，分析了滑动面倾角取值对侧土压力系数的影响；基于上述侧土压力系数计算方法，推导出松动推压力计算公式。

(1) 隧道上部松动区滑动面可认为是椭圆曲线，当埋深低于极限椭圆高度时，松动区域为地面线以下的极限椭圆区域；当埋深达到极限椭圆高度时，松动区为整个极限椭圆。

(2) 给出滑动面处侧土压力系数计算公式。侧土压力系数随内摩擦角增大而减小，随着滑动面倾角 θ 的增大而增大。取值范围在 0.2~0.8，介于主动土压力系数和 Krynine 侧土压力系数之间。

(3) 本文计算方法中侧土压力系数较小，但在滑动面处竖向应力较大，因此滑动面向上的摩擦力并没有减小；本方法计算结果比太沙基理论更加接近实测数据，可以用于隧道设计和施工中。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [2] EVANS C H. An examination of arching in granular soils[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- [3] TIEN Heisen-Jen. A literature study of the arching effect [D]. Taipei: Taiwan University, 1990: 123 - 125.
- [4] 周小文, 濮家骝, 包承纲. 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(4): 10 - 15. (ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu, BAO Cheng-gang. Study on stability mechanism and relaxed soil pressure in sandy soil during excavation[J]. Journal of Yangtze River Scientific

- Research Institute, 1999(4): 10 - 15. (in Chinese))
- [5] SHUKLA S K, GAURAV, SIVAKUGAN N. A simplified extension of the conventional theory of arching in soils[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **3**(3): 353 - 359.
- [6] 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(9): 2643 - 2648. (CHEN Guo-zhou, ZHOU Guo-qing. Study of vertical stress between slip planes considering soil arching effect[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013(9): 2643 - 2648. (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] 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 Shao-ming, 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))
- [9] MARSTON A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments[R]. Iowa: Iowa Engineering Experiment Station, 1930.
- [10] JAKY J. Pressure in soils[C]// Proceedings Second International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Rotterdam, 1936.
- [11] KRYNINE D P. Discussion of "stability and stiffness of cellular cofferdams," by Karl Terzaghi[J]. Transactions, ASCE, 1945, **110**: 1175 - 1178.
- [12] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 317.
- [13] 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 Ruo-xi, ZHU Bin, CHEN Yun-min, 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))
- [14] 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 Chun-lin. Method for calculating loosening earth pressure during construction of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1714 - 1720. (in Chinese))
- [15] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. 3rd ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005: 454 - 463.
- [16] KVAPIL R. Sublevel caving. SME mining engineering handbook [M]. 2nd ed. New York: Soc Min Engrs, AIME, 1992: 1789-1814.
- [17] BJERRUM L, P M Frimann Clausen, DUNCAN J M. Earth pressures on flexible structures—a state-of-the-art report[C]// Proceedings Fifth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Madrid, :169 - 196.
- [18] LEE Chung-Jung, CHIANG Kuo-Hui, KUO Chia-Ming. Ground movement and tunnel stability when tunneling in sand ground[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2004, **27**(7): 1021 - 1032.