

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.013

考虑主应力偏转的隧道松动土压力计算方法

黎春林

(铜陵学院建筑工程学院,安徽 铜陵 244061)

摘要:为研究主应力偏转对隧道松动土压力的影响,基于大主应力拱迹线,针对实际工程中常见的塔式(三角形)滑裂面和盆式滑裂面两种情况下的侧压力系数分别进行了分析,提出了考虑主应力偏转角度的侧压力系数计算公式,并根据处于极限平衡状态土体微单元的受力平衡,推导了隧道拱顶松动土压力计算公式。与太沙基松动土压力计算公式相比,提出的松动土压力计算公式中删除了影响因素较多且难以准确取值的土体侧压力系数,代之以对松动土压力影响较大、与工程施工及土质参数密切相关的主应力偏转角度;对于黏性土,相比现有的松动土压力计算方法,该公式不需要进行坐标平移或者采用迭代法计算侧压力系数,提高了计算效率和精度。案例分析结果表明,该公式要显著优于太沙基松动土压力计算公式,其计算值与试验值吻合较好。

关键词:松动土压力;主应力偏转;大主应力拱;侧压力系数;隧道

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)02-0107-08

Calculation method of tunnel relaxed soil pressure considering deflection of principal stress

LI Chunlin

(Institute of Civil and Architectural Engineering, Tongling University, Tongling 244061, China)

Abstract: To study the influence of the principal stress rotation on the relaxed soil pressure of tunnels, based on the trajectory of the major principal stress arches, the lateral pressure coefficients under the tower-shaped (triangular) and basin-shaped sliding failure surfaces were analyzed for common project scenarios in actual engineering projects. The lateral pressure coefficient calculation formulas considering the principal stress rotation angle were proposed. According to the force balance of the soil micro-element in the limit equilibrium state, the calculation formula of the relaxed soil pressure at the tunnel crown was derived. Compared with the relaxed soil pressure calculation formula of Terzaghi, the proposed formula for calculating relaxed soil pressure does not contain the soil lateral pressure coefficient, which has multiple influencing factors and tends to be challenging to accurately calculate, and instead substitutes it with the principal stress rotation angle which has a significant impact on the relaxed soil pressure and is closely related to the engineering construction and soil properties. This is especially true for cohesive soils when compared to existing formulas. For relaxed soil pressure, the proposed formula does not require using iterative methods and coordinate translation to calculate the lateral pressure coefficient, thereby improving computational efficiency and accuracy. The case study results demonstrate that the algorithm presented in this paper is significantly superior to Terzaghi's approach, with estimated values aligning well with experimental measurements.

Key words: relaxed soil pressure; principal stress deflection; main stress arch; lateral pressure coefficient; tunnel

在隧道工程施工中,因应力扰动,隧道周围土体主应力大小和方向都会发生改变,在扰动土体中存在土拱效应,最大主应力迹线呈环状围绕在隧道周边,隧道拱顶荷载沿此拱形环线连续地传递到隧道两侧稳定介质中。当隧道埋深较大、围岩稳定性较好时在隧道周边形成有效的压力拱;而当隧道埋深较小、围岩稳定性较差时虽不能形成有效的压力拱,但土拱效应也能部分发挥作用,其对隧道支护力的影响也不容忽视。

隧道围岩压力拱实质是隧道开挖后因应力重分布,主应力方向偏转,最大主应力流在隧道周边形成一个环状体^[1]。主应力的偏转角度直接影响着土体侧压力系数的大小,也影响着土体滑裂面的位置,对松动土压力

基金项目:安徽省自然科学基金项目(1808085ME162);安徽省高校学科(专业)拔尖人才学术资助项目(gxbjZD2022068);铜陵学院2020年度校学术带头人科研项目(2020tlxyxs19)

作者简介:黎春林(1971—),男,教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:lichunlin111@126.com

引用本文:黎春林.考虑主应力偏转的隧道松动土压力计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):107-114.

LI Chunlin. Calculation method of tunnel relaxed soil pressure considering deflection of principal stress[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 107-114.

的准确计算有非常大的影响。因此,主应力的偏转角度是影响松动土压力计算准确性的一个非常重要的参数。

太沙基通过砂土活动门模型试验测得了活动门上方土体中侧向应力系数(K)值^[2],试验结果表明 K 值大小不仅与计算点位置相关,还与土拱效应的发挥程度相关,在土拱效应发挥区域 K 值大于1。为简化分析,太沙基在推导松动土压力计算公式时将 K 值统一取为1,没有考虑主应力偏转对 K 值的影响^[3]。太沙基将 K 值取为1弱化了土拱效应的作用,这个简化使得太沙基松动土压力计算值偏大。

Handy^[4]认为土拱是小主应力拱,并假定小主应力迹线为悬链线以求取土体侧压力系数。这一假定并不合理,根据土拱受力特点,土拱应是大主应力拱。Handy假定是主应力偏转方向判断错误的结果,这使得土体侧向土压力系数计算值偏小,而松动土压力计算值偏大。

陈若曦等^[5]研究了主应力偏转对侧压力系数的影响,徐长节等^[6]则引入平均松动土压力和大主应力轨迹线形状系数概念,基于圆弧、抛物线和椭圆3种形状大主应力轨迹线对太沙基土压力理论公式进行了修正,并做了非常有意义的研究,但他们没有进一步研究主应力偏转角度和侧压力系数的关系。

赖丰文等^[7]基于主应力偏转提出了浅层地基土拱效应部分发挥时竖向应力的计算公式,认为在滑裂面处主应力偏转角度最大,但此观点值得商榷:如果不考虑构造应力和土体超固结情况,初始应力场是自重应力场,最大主应力垂直向下;当土拱形成后,隧道拱顶处最大主应力方向水平,其主应力偏转角度为 90° ,因此隧道拱顶主应力偏转角度最大。

本文针对现有理论的不足,重点研究主应力偏转角度对侧压力系数的影响,进而对隧道拱顶松动土压力计算公式进行推导,并对主应力偏转角度的取值进行探讨。

1 隧道施工主应力偏转规律

在以自重地应力场为初始应力场的岩土体中,隧道开挖前因重力方向垂直向下,如果不考虑超固结土体,土体大、小主应力方向分别在垂直和水平方向。隧道开挖后主应力方向偏转,土体自动发挥其抗压强度大而抗拉和抗弯强度小的特性,在隧道周边大应力偏转形成一个环形压力拱轨迹线,原来沿竖向传递的荷载变为沿拱形迹线传递到隧道周边的稳定土体中。取隧道水平中心轴线以上部分岩土体进行分析,其大、小主应力迹线如图1所示。

图1显示,隧道拱顶围岩中的大主应力轨迹线形状与离隧道距离的远近有关,由近到远轨迹线形状逐渐由圆弧向椭圆弧过渡,离隧道越远,椭圆离心率越大,椭圆形状越扁。不同位置的土体主应力方向偏转角度不同,在隧道顶部正上方最大主应力方向偏转至水平方向(主应力方向偏转 90°);而在隧道两侧腰部,土体主应力方向不变,即偏转角度为 0° 。

2 隧道拱顶滑裂面形状

国内外学者对土拱效应滑裂面的形状有不同的假定, Terzaghi^[2]将滑裂面假定为垂面, Papamichos等^[8]和 Santichaianant^[9]认为滑裂面为塔型, Shukla等^[10]假定滑裂面为盆型, Bierbaumer^[11]假定滑移面为三角形, 申政等^[12]通过数值分析得出当隧道埋深较浅时滑裂面为盆型。其实土体滑移面的形状受地质条件、隧道埋深、土体颗粒级配和土拱效应发挥程度等多种因素影响,这些因素实质上是影响主应力偏转角度(α),进而对滑裂面形状产生影响。如图2所示,根据摩尔库伦理论,滑裂面与最大主应力面成

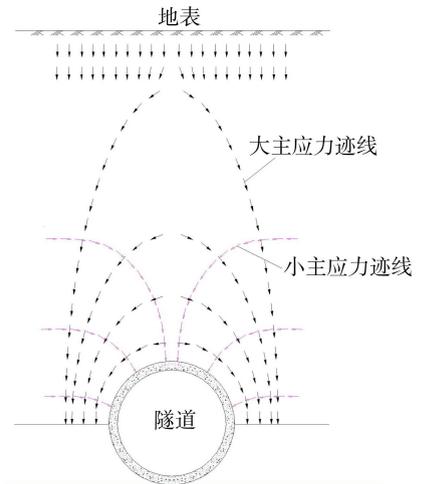


图1 隧道开挖后拱顶及拱腰大小主应力迹线
Fig.1 Principal stress trajectory patterns at the crown and body of the arch after tunnel excavation

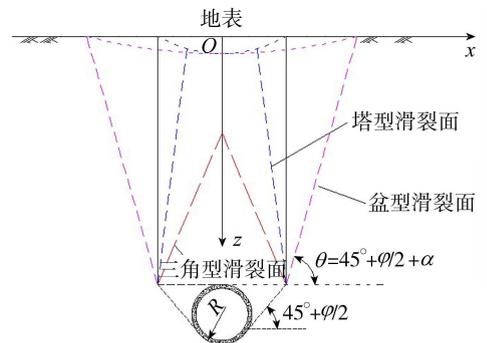


图2 滑裂面形状
Fig.2 Shape of slip surface

式(11)中因存在待求的 σ_v, K 为非显性解,但可以在求解松动土压力 σ_v 时直接将式(11)代入微分方程,通过消元来求解。

3.2 塔型(三角型)滑裂面

当主应力偏转角度 $\alpha > 45^\circ$ 时,土体侧向应力大于垂直方向应力,应力偏转如图 4 所示,则此时滑裂面为塔型(三角型),滑裂面与水平面夹角(锐角) $\theta = 180^\circ - (45^\circ + \varphi/2 + \alpha)$ 。由图 4 有:

$$\sigma_h = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (12)$$

$$\sigma_h - \sigma_v = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos(180^\circ - 2\alpha) = -(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (13)$$

同盆型滑裂面 K 值推导过程,可得到塔型(三角型)滑裂面无黏性土和黏性土 K 值计算公式和盆型完全一样,即分别用式(7)和式(11)计算,这里不再赘述。

3.3 侧压力系数与主应力偏转角度关系分析

由式(11)可知,当主应力偏转角度 $\alpha < 45^\circ$ 、侧压力系数 $K < 1$ 时,土中垂直应力大于水平应力;随着 α 逐渐增大,土中水平应力逐渐增大,垂直应力逐渐减小,相应地 K 逐渐增大。从式(11)还可以得出当 $\alpha < 45^\circ$ 时土体黏聚力会减小侧压力系数的结论。

当 $\alpha > 45^\circ$ 时,由图 4 可以看出,此时土中水平应力大于垂直应力, $K > 1$, 由式(11)可知当 $\alpha > 45^\circ$ 时土体黏聚力会增大侧压力系数。

当 $\alpha = 45^\circ$ 时, K 与土质参数无关,恒等于 1。太沙基松动土压力公式(以下简称“太沙基公式”)中取 $K = 1$ 实际就是 $\alpha = 45^\circ$ 这一特殊情况。

对于无黏性土,当 $\alpha = 0^\circ$,即水平应力和垂直应力分别为最小、最大主应力时,式(11)简化为 $K = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)$,即主动土压力系数 K_a ;当 $\alpha = 90^\circ$,即水平应力和垂直应力分别为最大、最小主应力时,则式(11)简化为 $K = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$,即被动土压力系数 K_p 。

影响主应力偏转角度 α 的因素很多,除了土质参数和隧道埋深外,还与计算点的位置和土拱效应的发挥程度有关。对于无黏性土,其大小变化范围为 $K_a \sim K_p$,土体内摩擦角越小, K 的变化范围越小,当内摩擦角为 0° 时, K 值恒为 1,此时土颗粒间无摩擦力,不能完成力的传递和转移,土拱效应不能发挥。

对于黏性土, K 值计算公式中存在待求的松动土压力 σ_v ,以往学者一般采用迭代法计算^[5],比较烦琐,本文直接将 K 值计算公式(式(11))代入微分方程求解,得出 σ_v 的显性计算式,使计算过程更加简洁直观,详见下文分析。

4 考虑主应力偏转的松动土压力计算

如前所述,隧道拱顶滑裂面的形状受多种因素影响,埋深、地质条件及拱顶位移的不同,其滑裂面形状也不同。但不管土体真实的滑裂面形状如何,滑裂面上的法向应力和切向应力在垂直方向的投影必然和微单元自重应力及土体间松动土压力平衡。且根据前文的推导,盆式和塔式(三角形)滑裂面形状的侧压力系数计算式统一。基于此两点,本文微单元受力模型采用图 5 所示的简化模型进行分析,滑裂面自隧道两侧切线方向沿着与水平方向呈 $45^\circ + \varphi/2$ 角度向上延伸至隧道拱顶,随后再竖直向上延伸至地表。图 5 中, H 为地表到隧道拱顶的距离, h 为计算单元土体埋深, $2B$ 为滑动带宽度, γ 为土体容重, dW 为单元体自重。

根据微单元体竖向受力平衡,有:

$$2\sigma_v B + 2\gamma B dh = 2\sigma_v K dh \tan \varphi + 2cdh + 2B(\sigma_v + d\sigma_v) \quad (14)$$

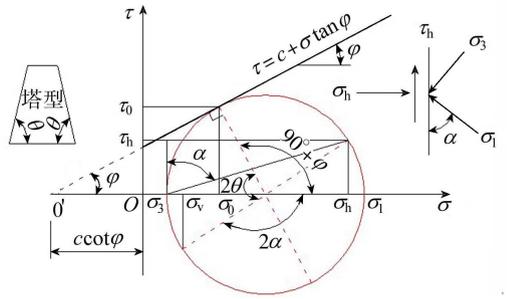


图 4 主应力偏转角度大于 45° 时摩尔极限应力圆
Fig. 4 Mohr's Limit Stress Circle when the rotation angle of principal stress is greater than 45°

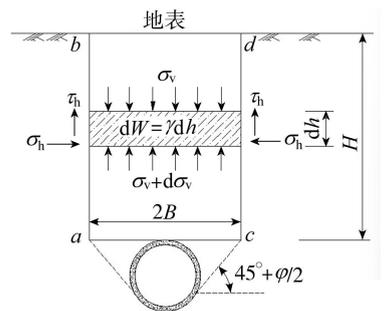


图 5 隧道拱顶松动土压力计算模型
Fig. 5 Calculation model of relaxed earth pressure on tunnel vault

化简得:

$$d\sigma_v = [\gamma - (\sigma_v K \tan \varphi + c) / B] dh \tag{15}$$

将式(11) 代入式(15), 并令 $\sigma_v K \tan \varphi + c = M\sigma_v + N$, 则式(15) 简化为

$$\frac{d\sigma_v}{dh} + \frac{M}{B}\sigma_v = \gamma - \frac{N}{B} \tag{16}$$

其中
$$M = \tan \varphi \frac{\cos \varphi + \sin \varphi \tan \varphi - \cos 2\alpha \tan \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \tan \varphi + \cos 2\alpha \tan \varphi} \quad N = c - \frac{2c \cos 2\alpha \tan \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \tan \varphi + \cos 2\alpha \tan \varphi}$$

式中: M 为与土体内摩擦角相关的函数; N 为内摩擦角和黏聚力的函数, 对于砂性土, 当黏聚力为 0 时, N 取 0。

求解微分方程并利用地表边界条件 $\sigma_v|_{h=0} = q$, 得:

$$\sigma_v = \frac{B\gamma - N}{M} \left(1 - e^{-\frac{Mh}{B}} \right) + qe^{-\frac{Mh}{B}} \tag{17}$$

本文提出的松动土压力计算公式(式(17), 以下简称“本文公式”)与太沙基公式主要不同点在于考虑了应力偏转和侧压力系数取值的不同, 太沙基公式没有考虑应力偏转, 并将侧压力系数恒取为 1。式(17)考虑了主应力偏转, 侧压力系数是主应力偏转角度的函数, 并将侧压力系数分解成参数 M 和 N 来体现。

通过对式(17)和太沙基公式的比较, 可以看到若以 M 代替 $K \tan \varphi$ 、以 N 代替 c , 则本文公式与太沙基公式完全一致。

式(17)将太沙基公式中难以确定的侧压力系数换成了参数 M 和 N , 而 M 和 N 都是主应力偏转角度 α 的函数。对于黏性土, 现有理论需要进行坐标平移^[6]或者采用迭代法^[13]计算侧压力系数, 求解复杂, 而式(17)中所有参数都是抗剪强度指标 c 、 φ 和主应力偏转角度 α 的显性函数, 使用起来非常方便, 因考虑了直接反映土拱效应发挥情况的主应力偏转角度, 其结果更加合理。

5 主应力偏转角度影响分析及取值

以隧道外径 $D=6\text{m}$ 、隧道拱顶埋深 $H=30\text{m}$ 、土体黏聚力 $c=10\text{kPa}$ 、土体容重 $\gamma=19\text{kN/m}^3$ 、内摩擦角 $\varphi=10^\circ$ 、 20° 、 30° 的隧道为算例分析主应力偏转角度的影响及取值。

5.1 主应力偏转角度对参数 M 和 N 的影响

主应力偏转角度 α 对 M 和 N 的影响如图 6 和图 7 所示。参数 M 和 N 都是 α 的函数, 其中 M 影响着松动土压力随埋深变化曲线的形状, 反映了土体内摩擦角对土拱效应的影响; 而 N 则影响着松动土压力的平均水平, 主要反映土体黏聚力对土拱效应的影响。

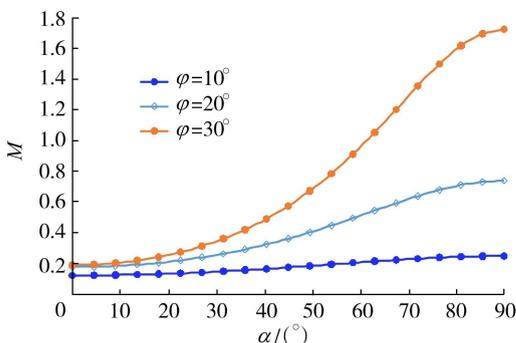


图 6 主应力偏转角度对 M 的影响

Fig. 6 Influence of rotation angle of principal stress on parameter M

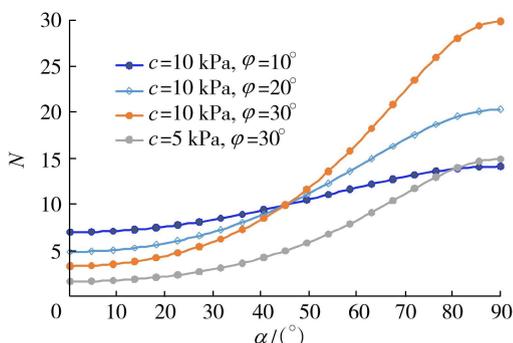


图 7 主应力偏转角度对 N 的影响

Fig. 7 Influence of rotation angle of principal stress on parameter N

图 6 表明, 随 α 的增大, M 逐渐增大, M 增大的速率与内摩擦角关系很大, 内摩擦角越大, M 值随 α 增大而增长得越快, 即曲线越陡; 而 M 越大, 土拱效应发挥越充分。

图 7 表明, 随 α 的增大, N 也逐渐增大。 N 增大的速率与内摩擦角关系密切, 内摩擦角越大, 曲线越陡, N 随 α 增长的速率越快。除了内摩擦角, 黏聚力对 N 也有非常大的影响, 黏聚力不但影响曲线形状, 而且影响曲线在坐标系中的纵向位置。黏聚力越大, N 越大, 其随 α 变化的速率也越快。

5.2 主应力偏转角度对侧压力系数的影响

不同土体黏聚力和内摩擦角时主应力偏转角度 α 对侧压力系数 K 的影响如图 8 所示。考虑到土体应力状态对侧压力系数也有影响,将计算点位置取为地面以下 20 m 处,即距离隧道拱顶垂直距离 10 m 处。

计算结果表明,随 α 的增大, K 逐渐增大, K 与 α 变化率和内摩擦角密切相关,内摩擦角越大, K 随 α 的增大而增长的速率越快,特别是当 $\alpha > 45^\circ$ (即水平应力大于垂直应力)时影响明显,相同 α 时内摩擦角大的土体比内摩擦角小的土体 K 值大得多。例如:当 $\alpha = 90^\circ$ 时,内摩擦角为 30° 的土体侧压力系数是内摩擦角为 20° 土体的 2 倍。黏聚力对 K 值也有较大影响,黏聚力越大, K 随 α 增大的速率越快。当 $\alpha = 45^\circ$ 时, K 恒等于 1。

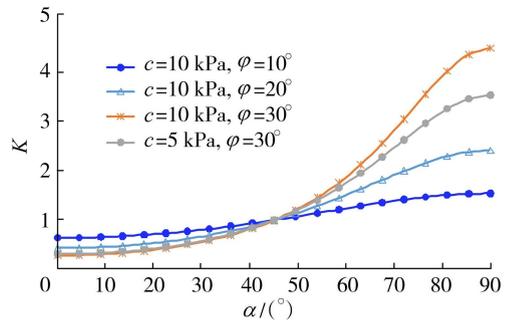


图 8 主应力偏转角度对 K 的影响

Fig. 8 Influence of rotation angle of principal stress on lateral pressure coefficient K

5.3 主应力偏转角度对松动土压力的影响

主应力偏转角度 α 对松动土压力 σ_v 的影响如图 9 所示。图 9 计算结果表明,随着 α 的增大, σ_v 逐渐减小;而内摩擦角越大, σ_v 也越小,这一点和太沙基公式一致。和太沙基公式计算结果对比,无论土体内摩擦角如何取值,本文公式在 $\alpha = 45^\circ$ 时和太沙基公式计算结果一致,其原因是当 $\alpha = 45^\circ$ 时, $K = 1$,正好和太沙基公式对侧压力系数的假定相同,这也进一步反映了本文公式的正确性,太沙基公式可以认为是本文公式在 $\alpha = 45^\circ$ 时的一个特例。

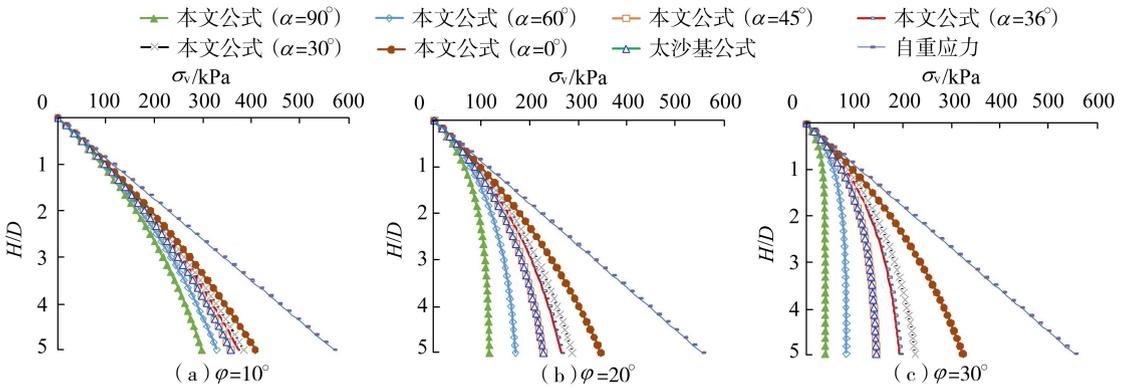


图 9 不同主应力偏转角度下的松动土压力计算结果

Fig. 9 Calculated values of relaxed earth pressure under different principal stress rotation angles

5.4 主应力偏转角度合理取值讨论

主应力偏转角度 α 是影响松动土压力大小的一个非常重要的参数,要准确计算松动土压力,其合理取值非常关键。许多学者对 α 的取值进行了研究,但分歧较大,耿哲等^[13]基于大主应力拱认为 $45^\circ - \varphi/2 < \alpha < 135^\circ - \varphi/2$,张晓清^[14]和张孟喜等^[15]基于小主应力拱认为 $0^\circ < \alpha < 45^\circ + \varphi/2$,而林庆涛^[16]基于大主应力拱认为 $45^\circ - \varphi/2 < \alpha < 90^\circ$ 。

实际上,主应力偏转角度值受到设计、施工、土质条件等多种因素影响,特别是与土拱效应的发挥程度密切相关,土拱效应发挥越充分,主应力偏转角度越大,拱顶松动土压力越小。在实际工程中,土拱效应充分发挥、土体处于极限平衡这一状态有更重要的工程意义,本文基于这一状态确定主应力偏转角度。

如图 10 所示,当土拱为大主应力拱、土体处于极限平衡状态时,根据图 10 中几何关系分析,可得滑裂面上土体主应力偏转角度 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 。

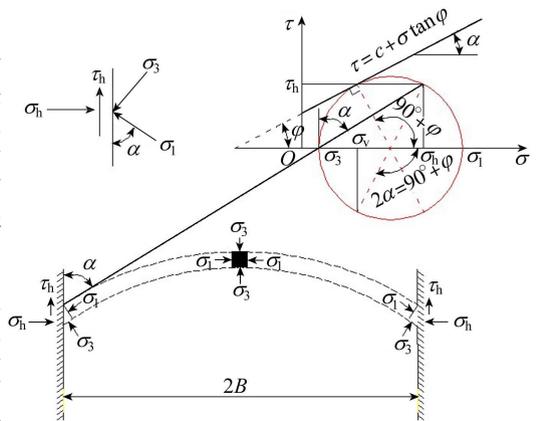


图 10 主应力偏转角度取值分析模型

Fig. 10 Analysis model of rotation angle value for principal stress

6 合理性验证与分析

为验证本文公式的合理性,将本文公式和太沙基公式计算值与文献[17]试验结果进行对比,结果如图11所示。文献[17]试验采用干砂,容重为 14.72 kN/m^3 ,内摩擦角为 36° ,隧道直径为 0.15 m 。

由图11可见,与太沙基公式计算值相比,本文公式计算值更接近试验值,但与试验值相比还是略微偏大,其原因是干砂在试验过程中难免会吸取大气中水分而存在微弱黏聚力($0\sim 0.5\text{ kPa}$)^[18-19],因此一般试验值与理论值相比偏小。当取黏聚力为 0.2 kPa 时,本文公式计算值与文献[17]试验值吻合很好。

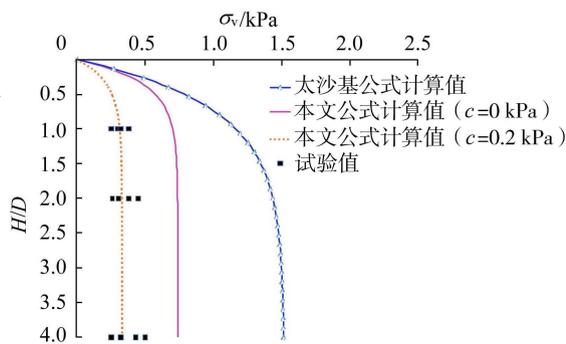


图11 松动土压力计算值和试验值比较

Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental relaxed soil pressure values

7 结语

本文基于土拱大主应力拱迹线,推导了工程中常见的盆式和塔式(三角形)滑裂面形状的侧压力系数计算统一公式,结果表明侧压力系数不仅与土质参数及地层应力相关,还与主应力偏转角度相关。主应力偏转角度越大,侧压力系数越大;内摩擦角和黏聚力越大,主应力偏转角度对侧压力系数的影响越明显。

本文还进一步研究了主应力偏转对松动土压力的影响,并对太沙基土压力理论进行了修正。太沙基公式是本文公式在不考虑主应力偏转且假定侧压力系数为1情况下的一个特例,但这两个假定不会同时成立,因为侧压力系数为1则主应力偏转角度为 45° 。本文公式与太沙基公式最明显的不同在于引入了影响松动土压力的两个非常关键的参数 M 、 N ,这两个参数都是主应力偏转角度的函数,其中参数 M 主要受土体内摩擦角和主应力偏转角度影响,其决定了土拱效应发挥及松动土压力随埋深的变化规律; N 受土体内摩擦角、黏聚力和主应力偏转角度三者影响,其主要决定着松动土压力最终趋于稳定时的土压力大小。

本文研究结果的精确性取决于主应力偏转角度的正确取值,而主应力偏转角度与土拱效应的发挥程度密切相关,土拱效应发挥越充分,则主应力偏转角度越大,拱顶松动土压力越小。本文仅讨论了当土拱效应充分发挥、土体处于极限平衡状态下的主应力偏转角度计算方法,后期还需就土拱效应发挥程度和主应力偏转角度的内在关系作进一步研究。

参考文献:

- [1] 俞波,王呼佳. 压力拱理论与隧道埋深划分方法研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- [2] TERZAGHI K V. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: Harvard University,1936:307-311.
- [3] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York:John Wiley and Sons,1943:66-76.
- [4] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1985,111(3):302-318.
- [5] 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))
- [6] 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 Lujū, 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))
- [7] 赖丰文,陈福全,万梁龙. 考虑不完全土拱效应的浅层地基竖向应力计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2546-2554. (LAI Fengwen, CHEN Fuquan, WAN Lianglong. Vertical stress calculation of shallow foundations based on partially developed soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2546-2554. (in Chinese))
- [8] PAPAMICHOS E, VARDOULAKIS I, HEIL L K. Overburden modeling above a compacting reservoir using a trap door apparatus [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(1/2): 69-74.
- [9] SANTICHAIANANT K. Centrifuge modeling and analysis of active trapdoor in sand[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2002.
- [10] SHUKLA S K, SIVAKUGAN G, 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] BIERBAUMER A. Die dimensionierung des tunnelmauerwerks[M]. Leipzig: Engelmann, 1913.
- [12] 申政, 闵凡路, 柏煜新, 等. 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):158-166. (SHEN Zheng, MIN Fanlu, BAI Yuxin, et al. Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel excavation face in sandy soil layer[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1):158-166. (in Chinese))
- [13] 耿哲, 袁大军, 金大龙, 等. 考虑松动区渐进破坏的隧道松动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8):1754-1762. (GENG Zhe, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Loose earth pressure of tunnels considering progressive failure of loosen zone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8):1754-1762. (in Chinese))
- [14] 张晓清. 深埋盾构隧道开挖面失稳机制及土压力分布模式研究[D]. 上海: 上海大学, 2018
- [15] 张孟喜, 戴治恒, 张晓清, 等. 考虑主应力轴偏转的深埋盾构隧道开挖面主动极限支护压力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11):2366-2376. (ZHANG Mengxi, DAI Zhiheng, ZHANG Xiaoqing, et al. A calculation method of active limit support pressure for deep shield tunnels considering principal stress axis rotation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11):2366-2376. (in Chinese))
- [16] 林庆涛. 空间土拱效应原理的研究与应用[D]. 北京: 北方工业大学, 2016
- [17] 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.
- [18] 黎春林. 盾构开挖面三维曲面体破坏模型及支护力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8):2092-2102. (LI Chunlin. Curved solid failure model and calculation method of supporting pressure for shield tunnel excavation face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8):2092-2102. (in Chinese))
- [19] CHEN R P, TANG L J, YIN X S, et al. An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(5):683-692.

(收稿日期:2024-04-16 编辑:熊水斌)

(上接第18页)

- [18] 姚斯洋, 林妙丽, 陈诚, 等. 拟建鄱阳湖水利枢纽对湖区水环境容量的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1):200-207. (YAO Siyang, LIN Miaoli, CHEN Cheng, et al. Impact of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project on water environment capacity in lake district[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):200-207. (in Chinese))
- [19] MONTANARI M, HOSTACHE R, MATGEN P, et al. Calibration and sequential updating of a coupled hydrologic-hydraulic model using remote sensing-derived water stages[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(3):367-380.
- [20] DE ARRUDA GOMES M M, DE MELO VERÇOSA L F, CIRILO J A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation[J]. Natural Hazards, 2021, 108(3):3121-3157.
- [21] 邓成, 夏军, 余敦先, 等. 基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8):912-921. (DENG Cheng, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban waterlogging simulation in a typical area in Shenzhen based on hydrological-hydrodynamic coupling model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8):912-921. (in Chinese))
- [22] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3):11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3):11-19. (in Chinese))
- [23] 李致家, 姚成, 章玉霞, 等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2):25-34. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Yuxia, et al. Study on Grid-Based Xin'anjiang Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2):25-34. (in Chinese))
- [24] 胡庆云, 王船海. 圣维南方程组4点线性隐格式的稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4):397-401. (HU Qingyun, WANG Chuanhai. Stability analysis of four-point linear implicit scheme of Saint-Venant equations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(4):397-401. (in Chinese))
- [25] 邹长军, 尹勇, 李海江, 等. 偏微分方程数值计算在虚拟现实中的应用与研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(8):164-169. (ZOU Changjun, YIN Yong, LI Haijiang, et al. Application and research of numerical calculation of partial differential equations in virtual reality[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(8):164-169. (in Chinese))
- [26] 王建群, 张显扬, 卢志华. 秦淮河流域数字水文模型及其应用[J]. 水利学报, 2004, 35(4):42-47. (WANG Jianqun, ZHANG Xianyang, LU Zhihua. Digital hydrological model of Qinhuai River Basin and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4):42-47. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-17 编辑:刘晓艳)