

DOI: 10.11779/CJGE201605005

考虑主应力偏转的土体浅埋隧道支护压力研究

汪丁建, 唐辉明*, 李长冬, 李 纯, 林成远

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 传统方法计算浅埋隧道支护压力时, 未考虑上覆土体主应力偏转过程, 与实际情况不符且计算结果不准确。为真实分析和计算浅埋隧道支护压力, 以砂土为研究对象, 首先概括浅埋隧道围岩破坏模式, 在此基础上分析隧道上覆土体主应力偏转过程和应力状态, 得到水平微分土层平均竖向压力与侧向压力和层间平均剪切力的定量关系, 进而建立水平微分土层受力平衡方程求解上覆土体竖向压力。最后以隧道侧面滑移土体为对象, 通过受力平衡方程求解获得支护压力表达式。新方法考虑了上覆土体主应力真实偏转过程, 较传统方法更符合实际, 研究结果表明: 距离隧道顶部中心线越远, 水平正应力与大主应力比值越小; 随着土体内摩擦角的增大, 竖直正应力与大主应力比值呈现先减小后增大的规律。与模型试验结果对比表明: 当隧道埋深较浅时, 新方法计算所得支护压力与模型试验结果高度吻合, 优于不考虑主应力偏转方法计算结果和半经验性的 Terzaghi 方法计算结果, 从而验证了该方法的有效性, 可为浅埋隧道支护设计提供一定理论依据。

关键词: 浅埋隧道; 土压力; 主应力偏转; 极限平衡法; 破坏过程

中图分类号: TU432; U452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)05-0804-07

作者简介: 汪丁建(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质与岩土工程方面的学习和研究工作。E-mail: djwang1991@foxmail.com。

Theoretical study on earth pressure on shallow tunnel considering principal stress rotation

WANG Ding-jian, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, LI Chun, LIN Cheng-yuan

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The traditional analytical methods for calculating the earth pressure on shallow tunnel are irrespective of the principal stress rotation, and do not reveal the real stress state of soils, and thus result in inaccurate values. A new quantitative method is proposed to acquire the earth pressure on shallow tunnel in sandy soil considering the principal stress rotation. The rotation process and the stress state are firstly analyzed based on the generalized collapse mode for surrounding soil. To obtain the vertical pressure on overlying soil, the equilibrium equation for the horizontal differential layer is established, considering the corresponding relationship among the lateral interlaminar stress, average interlaminar stress and average vertical stress. Eventually the earth pressure is derived by the equilibrium equation for the lateral soils of tunnel. The results show that the ratio of vertical to major principal stress decreases with the increase of the distance to center line, and it presents a decreasing-to-increasing trend with the increase of the internal friction angle. The values of earth pressure calculated by the proposed method fit well with the experimental results when the tunnel is shallow. The new method is even superior to the method irrespective of the principal stress rotation and Terzaghi's semi-empirical method. The accuracy of the proposed method is validated. It may provide a theoretical basis for the design of shallow tunnel.

Key words: shallow tunnel; earth pressure; principal stress rotation; limit equilibrium method; collapse process

0 引 言

隧道开挖后, 土体中形成一个自由变形空间, 引起土体应力重分布和变形, 并对支护衬砌产生压力。围岩压力和变形计算是隧道支护设计和施工的依据, 一直以来受到学者和工程人员的广泛关注^[1-3]。对于深埋隧道, 由于上覆土体较厚, 故可假设周围土体为半

无限体, 通过弹塑性理论计算由形变产生的围岩压力, 计算过程较方便。但对于浅埋隧道, 周围土体破坏模式不尽相同, 且受地面荷载的影响, 围岩变形和破坏

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB710606); 国家自然科学基金重点项目(41230637)

收稿日期: 2015-07-02

*通讯作者

分析颇为复杂,在不同的假设前提下围岩压力计算结果也相差甚远,值得进一步探讨。

目前,土体浅埋隧道支护压力解析计算方法主要分为两种,即弹塑性力学方法和极限平衡法。弹塑性力学方法方面,Atkinson等^[4]、Davis等^[5]、Yamamoto等^[6]、杨峰等^[7]、杨小礼等^[8]分别基于极限分析上限法、下限法分析了土体浅埋隧道稳定性问题,但由于极限分析方法计算过程较繁琐,故很难应用于实际工程^[9]。极限平衡法由于概念简单,计算过程简洁而广受青睐,谢家桢^[10]考虑了隧道上覆土体两侧夹制力作用,构建了倾斜地表条件下浅埋隧道破坏模式,利用极限平衡理论推导了围岩压力计算表达式;Terzaghi^[11]基于极限平衡理论,通过水平微分土层受力平衡方程推导了土体竖向压力的计算公式,但该公式中侧压力系数由经验得到,存在不足;Lee等^[12]改进了Terzaghi方法,通过对滑移面应力状态的分析,提出了侧压力系数的理论计算值;陈若曦等^[13]基于主应力轴旋转理论修正了Terzaghi松动土压力公式,建立了无黏性土和黏性土侧向土压力系数表达式进而计算上覆土层压力。程小虎^[9]基于Terzaghi提出的浅埋隧道破坏模式,考虑圆形隧道侧压力系数及洞身范围斜向滑裂面作用,根据极限平衡法建立了圆形隧道竖向支护压力的表达式。

尽管以上成果部分已被相关规范引用^[14-15],但值得注意的是,这些研究在分析上覆土体应力状态时,大多未考虑由于土体相对滑动导致的主应力偏转现象。事实上,对于天然状态下的土体,大、小主应力分别处于竖直和水平方向,随着隧道开挖引起的土体持续变形,主应力逐渐发生偏转,将对隧道支护压力产生重要影响。目前,关于土体不均匀变形引起的主应力偏转现象在挡土结构土压力计算中已被充分认识和研究^[16-18],但在隧道支护压力的计算中却鲜有报道^[13, 19]。

本文以砂土浅埋隧道为研究对象,首先概括了浅埋隧道围岩破坏模式,以此为基础阐述了隧道上覆土体主应力偏转过程。然后通过分析土体应力状态得到水平微分土层平均竖向压力与侧向压力和层间平均剪切力的定量关系,进而建立水平微分土层受力平衡方程求解上覆土体竖向压力。最后以隧道侧面滑移土体为对象,通过受力平衡方程求解获得支护压力表达式,并与模型试验和传统方法结果进行对比。

1 浅埋隧道支护压力计算

1.1 浅埋隧道围岩破坏模式

在完整的岩体或埋深较大的土体中开挖深埋隧道时,由于上覆岩(土)体形成塌落拱,使得应力向

周围地层传递,从而围岩比较稳定,支护压力比较小甚至不需要支护。但是,对于隧道埋深比较浅的土体,上覆土层厚度小于能够形成塌落拱所需的高度,故上覆土体破坏以整体向下滑移形式为主。国内外学者通过理论分析和试验观测先后提出了适用于不同工况的浅埋隧道围岩破坏模式。Atkinson等^[4]通过理论分析和模型试验研究指出,砂土隧道发生塑性破坏时,顶部土体发生局部三角锥式塌落,进而引起围岩失稳;Davis等^[5]利用极限分析方法,构造了黏土土浅埋隧道围岩的4种破坏模式,并分析了其破坏机制和围岩压力;周小文等^[20]以砂土为对象开展模型试验研究,结果表明浅埋隧道变形塌落由拱顶逐渐向上发展,并形成锯齿状剪切带;王明年等^[21]通过野外观测大量黄土浅埋隧道围岩变形归纳了浅埋隧道围岩破坏的两种形式,两侧土体和上覆土体均出现多个剪切面。以上研究表明,土体浅埋隧道围岩破坏可以概化为图1所示Terzaghi提出的模型^[11]:均质土层浅埋隧道,随着衬砌的变形,在上覆土体竖向压力作用下两侧土体沿 B_1C_1 和 B_2C_2 面发生变形滑移,进而引起上覆土体沿 A_1B_1 和 A_2B_2 面发生滑动,当衬砌变形达到一定程度时,隧道围岩沿上述滑动面发生剪切破坏。这种破坏模式也得到很多学者的认可,并在相关文献中报道^[7, 9, 12]。

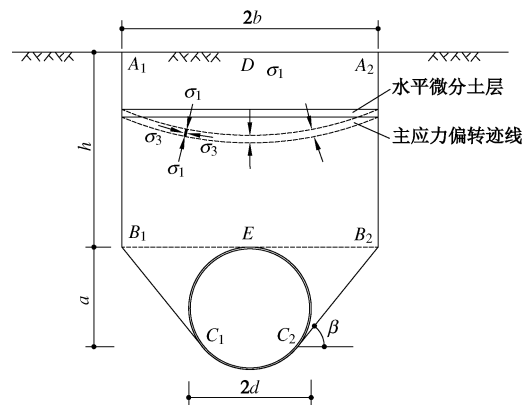


图1 土体浅埋隧道围岩破坏模式

Fig. 1 Collapse mode for surrounding soil of shallow tunnel

值得注意的是,以上研究在分析上覆土体 $A_1B_1B_2A_2$ 的受力时,没有考虑因 A_1B_1 和 A_2B_2 面剪切作用引起的主应力偏转。取一水平微分土层分析,如图1所示,初始状态下,当 $A_1B_1B_2A_2$ 未发生位移时,土体的大、小主应力分别呈竖直和水平方向;随着土体向下滑移,侧面剪切作用使得主应力发生偏转,且越靠近滑移面偏转角度越大;偏转迹线关于中心线DE对称,中心线上的土体主应力始终未偏转。

根据以上破坏模式,采用挡土结构土体土拱效应分析方法^[16-18],计算隧道支护压力。首先对模型做如

下假设: ①土体均匀, 为无黏性土, 天然重度为 γ , 内摩擦角为 φ , 不考虑地下水作用; ②隧道衬砌与周围土体接触面光滑, 不考虑衬砌对土体的切向力; ③假设主应力偏转迹线为关于隧道中心线对称的圆弧形; ④隧道半径为 r , 侧向土体滑裂面 B_1C_1 和 B_2C_2 倾角均为 $\beta = \varphi/2 + \pi/4$, 滑裂面竖向高度 $a = r(1 + \cos\beta)$, 上部滑移土体厚度 h , 宽度 $2b = 2r \cot(\beta/2)$ 。

1.2 上覆土体竖向压力和剪切力

(1) 应力状态分析

上覆土体 $A_1B_1B_2A_2$ 在两侧土体剪切力作用下, 主应力发生偏转, 且关于中心线 DE 对称, 可取左半土体 A_1B_1ED 为研究对象。假设小主应力迹线呈圆弧形, 圆心位于线段 ED 的延长线上, 下面分析其受力特点。

如图 2 所示, 取任意深度 z 处水平微分土层分析, 位于中心线 DE 附近的土体, 大、小主应力分别处于竖直和水平状态, 由于土体向下滑移, A_1B_1 面将产生剪切作用, 土体主应力由内向外逐渐发生偏转, 到 A_1B_1 面时, 偏转角达到最大。

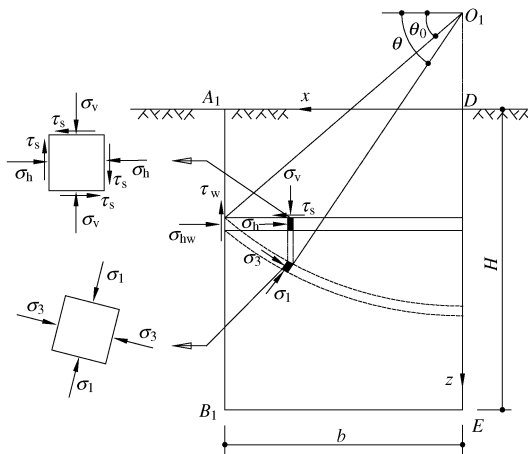


图 2 水平微分土层主应力偏转示意图

Fig. 2 Principal stress rotation of horizontal differential layer

土体微分单元体应力状态可在图 3 应力莫尔圆中表示。由图 3 几何关系, 可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_h}{\sigma_1} &= \cos^2 \theta + K_a \sin^2 \theta, \\ \frac{\sigma_v}{\sigma_1} &= \sin^2 \theta + K_a \cos^2 \theta, \\ \frac{\tau_s}{\sigma_1} &= (1 - K_a) \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 σ_h 和 σ_v 分别为水平正应力和竖直正应力; τ_s 为切应力; θ 为小主应力面与水平面夹角; K_a 为小、大主应力之比, $K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ 。

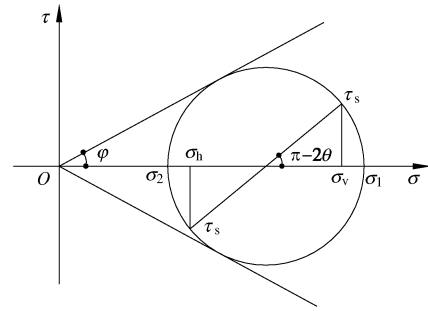


图 3 土体微分单元体莫尔应力圆与破坏包络线

Fig. 3 Mohr circle of stress and failure envelope
滑动面处, 同样满足式 (1) 关系, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{hw}}{\sigma_1} &= \cos^2 \theta_0 + K_a \sin^2 \theta_0, \\ \frac{\sigma_{vw}}{\sigma_1} &= \sin^2 \theta_0 + K_a \cos^2 \theta_0, \\ \frac{\tau_w}{\sigma_1} &= (1 - K_a) \sin \theta_0 \cos \theta_0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 σ_{hw} 和 σ_{vw} 分别为滑裂面处水平正应力和竖直正应力; τ_w 为滑裂面处切应力; θ_0 为滑裂面处小主应力面与水平面夹角。由几何关系求得

$$\theta_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

(2) 侧压力系数和层间剪切系数计算

侧压力系数和层间剪切系数的确定是水平微分土层受力平衡方程建立和求解的前提。侧压力系数定义为滑移面处土体水平正应力与平均竖向正应力之比, 层间剪切系数定义为土层间平均切向应力与平均竖向正应力之比。

作用于水平微分土层的总竖向力为

$$\begin{aligned} V &= \int_{\theta_0}^{\pi/2} \sigma_1 (\sin^2 \theta + K_a \cos^2 \theta) \cdot R \sin \theta d\theta \\ &= \sigma_1 R \left[\cos \theta_0 - \frac{1}{3} (1 - K_a) \cos^3 \theta_0 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

式中, R 为小主应力偏转迹线圆弧半径, $R = b / \cos \theta_0$, 那么, 平均竖向应力为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{V}{b} = \sigma_1 \left[1 - \frac{1}{3} (1 - K_a) \cos^3 \theta_0 \right] \quad (5)$$

作用于水平微分土层的总切向力为

$$\begin{aligned} T &= \int_{\theta_0}^{\pi/2} \sigma_1 (1 - K_a) \sin \theta \cos \theta \cdot R \sin \theta d\theta \\ &= \frac{1}{3} \sigma_1 R (1 - K_a) (1 - \sin^3 \theta_0), \end{aligned} \quad (6)$$

那么, 平均切向应力为

$$\bar{\tau}_s = \frac{T}{b} = \frac{1}{3} \sigma_1 (1 - K_a) (1 - \sin^3 \theta_0) / \cos \theta_0 \quad (7)$$

根据式 (2)、(5) 计算侧压力系数为

$$K_w = \frac{\sigma_{hw}}{\sigma_v} = \frac{3(\cos^2 \theta_0 + K_a \sin^2 \theta_0)}{3 - (1 - K_a) \cos^2 \theta_0} \quad (8)$$

根据式(5)、(7)计算层间剪切系数为

$$K_t = \frac{\bar{\tau}_s}{\sigma_v} = \frac{(1 - K_a)(1 - \sin^3 \theta_0)}{[3 - (1 - K_a) \cos^2 \theta_0] \cos \theta_0} \quad (9)$$

(3) 竖向压力和剪切力计算

如图4所示, 取任意深度 z 处水平微分土层进行受力分析, 水平微分土层上作用力及其数值为: 重力 $dG = \gamma b dz$, 上表面压力为 $b\bar{\sigma}_v$ 、剪切力为 $b\bar{\tau}_s$, 下表面压力为 $b(\bar{\sigma}_v + d\bar{\sigma}_v)$ 、剪切力为 $b\bar{\tau}_s + d\bar{\tau}_s$, 左侧滑裂面处正应力为 $\sigma_{hw} = K_w \bar{\sigma}_v dz$, 切应力为 $\tau_w = K_w \bar{\sigma}_v \tan \varphi dz$, 右侧中心线上正应力即小主应力, 无切应力作用。

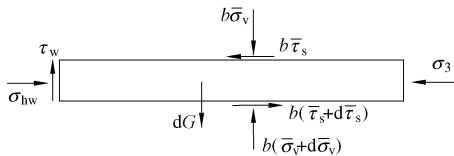


图4 水平微分土层受力示意图

Fig. 4 Forces on horizontal differential layer

水平土层竖直方向受力平衡方程为

$$\gamma b dz + b\bar{\sigma}_v - b(\bar{\sigma}_v + d\bar{\sigma}_v) - K_w \bar{\sigma}_v \tan \varphi dz = 0 \quad (10)$$

整理后得

$$\frac{d\bar{\sigma}_v}{dz} + \frac{K_w \tan \varphi}{b} \bar{\sigma}_v = \gamma \quad (11)$$

式(11)为一阶线性微分方程, 边界条件为: 当 $z=0$ 时, $\bar{\sigma}_v=0$ 。求解该微分方程, 可得 B_1E 面平均竖向压力 $\bar{\sigma}_v$ 为

$$\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma b}{K_w \tan \varphi} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_w \tan \varphi}{b} h\right) \right] \quad (12)$$

B_1E 面总竖向压力 N 为

$$N = b\bar{\sigma}_v = \frac{\gamma b^2}{K_w \tan \varphi} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_w \tan \varphi}{b} h\right) \right] \quad (13)$$

B_1E 面总剪切力 T 为

$$\begin{aligned} T &= b\bar{\tau}_s = K_t b\bar{\sigma}_v = K_t N \\ &= \frac{K_t \gamma b^2}{K_w \tan \varphi} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_w \tan \varphi}{b} h\right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)、(14)为 B_1E 面竖向压力和剪切力计算表达式, 将式(8)、(9)代入便可算得具体数值。

1.3 支护压力

以隧道侧面 B_1C_1E 土块体为研究对象(如图5所示), 受力包括重力 W , 接触面 B_1E 上的竖直压力 N 和剪切力 T , 滑动面 B_1C_1 上法向力 N_1 和切向力 T_1 , 衬砌竖向支护压力合力和侧向支护压力合力^[9]。若假设圆形隧道竖向支护压力为均布荷载 q , 侧向支护压

力为均布荷载 λq (λ 为侧向支护压力与竖向支护压力之比), 那么, 竖向和侧向支护压力的合力分别为 bq 和 $a\lambda q$ 。

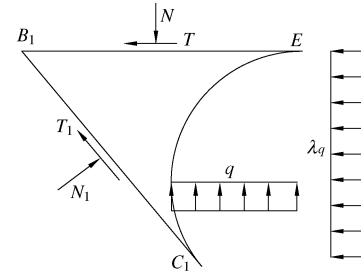


图5 隧道侧面土块体受力示意图

Fig. 5 Forces on lateral soil of tunnel

分别建立水平和竖直方向受力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} N_1 \sin \beta - T_1 \cos \beta - \lambda q a - T &= 0, \\ N_1 \cos \beta + T_1 \sin \beta + q r - N - W &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

求解式(15)可得竖向支护压力为

$$q = \frac{(N + W) \tan(\beta - \varphi) - T}{\lambda a + r \tan(\beta - \varphi)} \quad (16)$$

式中, N , T 可由式(13)、(14)计算得到, $W = \gamma r^2 [\cot(\beta/2) - (\pi - \beta)/2]$ 。

以上所述即考虑主应力偏转的浅埋隧道支护压力计算方法, 式(16)为具体表达式, 其中, 关于参数 λ 的确定方法及影响因素, 将在3.2节中讨论。

2 结果分析与验证

2.1 结果分析

Terzaghi最早提出用水平微分土层法计算浅埋隧道竖向压力, 但计算表达式中 K_w 取值是通过试验总结得来的经验值, 建议 K_w 取1.0, 这样显然没有理论依据, 存在诸多争议^[12-13]。Lee等^[12]同样采用Terzaghi模型, 并根据隧道滑裂面处土体应力状态给出了 K_w 的理论表达式, 相比而言前进一步, 但分析过程中未考虑主应力的偏转, 且导致 B_1E 面上无剪切力作用, 与事实不符。基于以上认识, 本文采用水平微分土层法分析受力情况时考虑了主应力偏转, 获得了 B_1E 面竖向压力和水平剪切力的理论表达式, 进而计算围岩支护压力。下面取一砂土浅埋隧道算例分析对比, 算例模型如图1所示, 基本参数为: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $c = 0 \text{ kPa}$, $r = 3 \text{ m}$, $\lambda = 1$ 。

(1) 竖直正应力与大主应力之比

设水平微分土层上任意一点到中心线 DE 的距离为 x , 由式(1)计算可得不同内摩擦角时水平微分土层不同位置处的竖直正应力与大主应力之比(已将横坐标转换为无量纲量), 如图6所示, 它反映了不同位置处主应力的偏转程度。由图6可见, 距离中心线越远, σ_v/σ_1 值越小, 原因在于受剪切力影响, 靠近滑

裂面过程中主应力偏转角逐渐增大,由图3应力莫尔圆关系可知其 σ_v/σ_1 值相应减小,即主应力偏转程度越大。此外, σ_v/σ_1 值随土体内摩擦角的增大呈现先减小后增大的规律,即当 $\varphi < 20^\circ$ 时, σ_v/σ_1 值与 φ 值呈负相关关系,当 $\varphi > 20^\circ$ 时, σ_v/σ_1 值与 φ 值呈正相关关系。产生该现象的原因在于:当 φ 较小时,土体自身强度低,因此两侧土体剪切力对主应力偏转呈“主控”作用,即内摩擦角越大则两侧剪切力越大,相应地主应力偏转程度越大;当 φ 较大时,土体自身强度对主应力偏转呈“主控”作用,即内摩擦角越大则土体自身抵抗变形的能力越大,相应地主应力偏转程度越小。

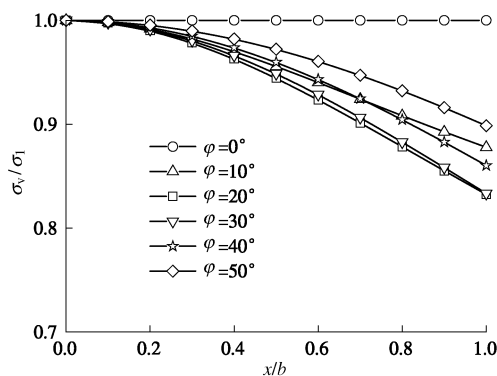


图6 水平微分土层 σ_v/σ_1 值随位置和土体内摩擦角变化规律

Fig. 6 Variation of σ_v/σ_1 with horizontal position and φ

(2) 支护压力变化规律

图7所示为本文方法和Lee方法(不考虑主应力偏转)计算所得支护压力 q 随隧道埋深 h 和内摩擦角 φ 的变化规律。由图7可见,隧道支护压力随埋深的增大逐渐增大,两者近似呈线性关系,这是由于隧道埋深较浅时,上覆土体不能形成塌落拱,滑移土体重力由衬砌支护力和两侧剪切力承担,所以土体重量越大,相应地支护力也越大。此外,相同埋深下,内摩擦角越大,两侧剪切力越大,支护压力就越小。采用Lee的方法(不考虑主应力偏转)计算竖向压力进而计算支护压力的结果表明,不考虑主应力偏转时,计算结果偏大。

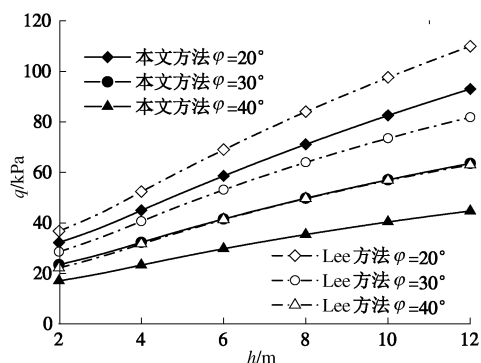


图7 不同内摩擦角时支护压力随隧道埋深变化规律

Fig. 7 Variation of earth pressure with φ and buried depth

2.2 模型试验对比

模型试验1: Lee等^[12]以石英砂为对象开展离心模型试验研究隧道临界支护压力与覆跨比(上覆土体厚度 h 与隧道直径 d 之比)的关系(试验模型图如图1所示)。试验模型参数为:砂土相对密度 $D_r=0.65$, $\gamma=15.35 \text{ kN/m}^3$, $c=0 \text{ kPa}$, $\varphi=38^\circ$, 隧道直径 $d=10 \text{ m}$, 由于试验采用橡皮囊内气体模拟隧道支护压力,隧道内气压各向相等,故 λ 取1^[9]。图8所示为本文方法计算值、Lee方法计算值、Terzaghi方法计算值与模型试验结果的对比。

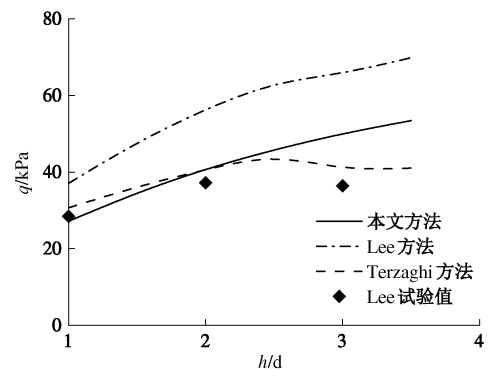


图8 不同方法计算结果与Lee模型试验^[12]结果对比

Fig. 8 Comparison between calculated values by different methods and Lee's model test results^[12]

模型试验2: 周小文等^[20]开展了砂土隧道支护压力的模型试验研究(试验模型图如图1所示),其中中砂模型参数为:中砂相对密度 $D_r=0.65$, $\gamma=17.21 \text{ kN/m}^3$, $c=0 \text{ kPa}$, $\varphi=38^\circ$, 隧道直径 $d=10 \text{ m}$, $\lambda=1$ 。图9所示为3种方法与模型试验结果的对比。

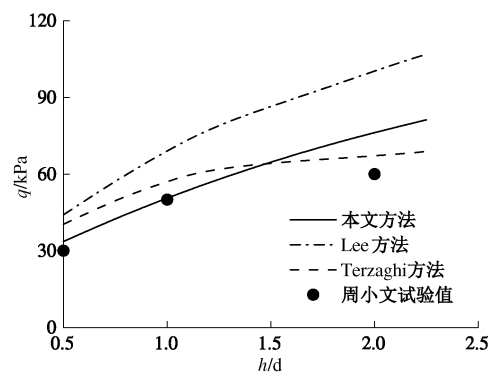


图9 不同方法计算结果与周小文模型试验^[19]结果对比

Fig. 9 Comparison between calculated values by different methods and Zhou's model test results^[19]

由图8,9可见,当隧道埋深较浅($h/d < 2$)时,本文方法计算值与模型试验结果吻合度较高,优于Terzaghi方法;若隧道埋深继续增大,本文方法计算结果相比于实际值偏大。原因在于,隧道埋深较浅时,上覆土体厚度不足以形成塌落拱,故而本文计算结果较准确;当上覆土体达到一定厚度时,由于土拱效应

的影响,土体破坏模式发生改变,导致实际支护压力较本文计算结果偏小。相比于 Terzaghi 方法的半经验性而言,本文提供了一个较为精确的理论计算模型。此外, Lee 方法没有考虑上覆土体的主应力偏转过程,计算结果明显偏大,在实际工程应用中值得商榷。通过与模型试验和传统理论模型计算结果的对比,进一步证明了本文方法的有效性。

3 讨 论

3.1 黏性土浅埋隧道支护压力计算

以上均是以无黏性土浅埋隧道为对象展开的研究,对于黏性土,由于其 Mohr-Coloumb 曲线不过原点,直接根据其莫尔应力圆计算 B_1E 面上竖向压力和剪切力,则过程比较复杂、困难。因此,可先将莫尔应力圆应力圆坐标系纵轴向左平移 $c \cot \varphi$ (c 为黏聚力),如图 10 所示,然后新的坐标系 $\tau'O'\sigma'$ 中运算求解,最后将计算结果转换为真实值即可。由于篇幅所限,本文不再演绎计算过程,只给出黏性土浅埋隧道支护压力 q_c 的计算表达式(仍采用图 1 模型),如下:

$$\left. \begin{aligned} q_c &= \frac{(N_c + W - c \sin \beta) \tan(\beta - \varphi) - T_c - c \cos \beta}{\lambda a + r \tan(\beta - \varphi)}, \\ N_c &= \frac{b}{\tan \varphi} \left(\frac{\gamma b}{K_w} - c \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{K_w \tan \varphi}{b} h \right) \right], \\ T_c &= \frac{K_t b}{\tan \varphi} \left(\frac{\gamma b}{K_w} - c \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{K_w \tan \varphi}{b} h \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中, N_c 和 T_c 分别为黏性土浅埋隧道 B_1E 面上竖向压力和剪切力,其他变量意义与第 2 节相同。

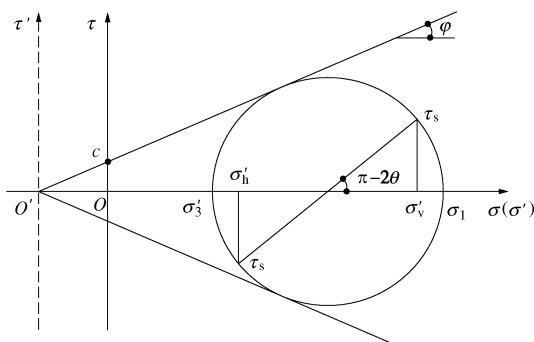


图 10 黏性土莫尔应力圆坐标系平移示意图

Fig. 10 Translation of axes for calculating earth pressure on cohesive soil

3.2 参数 λ 的影响因素

参数 λ 是衬砌水平方向支护压力与竖直方向支护压力之比,它是计算结果的重要因素,很多学者对其开展了大量实测和理论研究。研究表明, λ 的实测范围在 0.6~1.0 之间^[22],且与地层刚度和衬砌刚度均有

关^[23]。文献[9]给出了 λ 的计算表达式,在不考虑衬砌重力的情况下, λ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= K_0 + \frac{1 - K_0}{12(1 + \sqrt{2})(n + 0.045)}, \\ n &= \frac{EI}{K_n r^4}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中, n 为衬砌与地层刚度比, K_0 为土体静止侧压力系数, EI 为衬砌抗弯刚度, K_n 为地层弹性抗力系数。

由式(18)可知, λ 主要受衬砌刚度 EI 、地层弹性抗力系数 K_n 、土体静止侧压力系数 K_0 和隧道半径 r 影响,且与 EI 呈负相关关系,与 K_n 和 r 呈正相关关系。

4 结 论

本文深入分析了浅埋隧道土体破坏模式和应力状态,改进了浅埋隧道支护压力传统计算方法,在考虑上覆土体主应力偏转的基础上推导了砂土浅埋隧道支护压力计算表达式,并与模型试验和传统方法进行了对比。得到以下 3 点结论。

(1) 距离隧道顶部中心线越远,竖直正应力与大主应力比值越小,即主应力偏转程度越大;随着土体内摩擦角的增大,水平正应力与大主应力比值呈现先减小后增大的规律,即主应力偏转程度先增大后减小。

(2) 与模型试验和其它方法计算结果对比表明,当隧道埋深较浅时,本文方法计算值与模型试验结果高度吻合,优于不考虑主应力偏转的计算方法和半经验性的 Terzaghi 计算方法,故而验证了该方法的有效性。

(3) 本文方法可为砂土浅埋隧道支护设计提供一定理论依据,但关于黏性土浅埋隧道支护压力计算方法仍需进一步探讨。

参考文献:

- [1] 孙 钧, 侯学渊. 上海地区圆形隧道设计的理论和实践[J]. 土木工程学报, 1984, 17(3): 35 - 46. (SUN Jun, HOU Xue-yuan. Design theory and practice of circular tunnels in Shanghai area[J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(3): 35 - 46. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 邱陈瑜, 张 红, 等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 254 - 260. (ZHENG Ying-ren, QIU Chen-yu, ZHANG Hong, et al. Exploration of stability analysis methods of surrounding rocks in soil tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 254 - 260. (in Chinese))
- [3] 朱合华, 黄 锋, 徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,

- 29(6): 1113 - 1122. (ZHU He-hua, HUANG Feng, XU Qian-wei. Model test and numerical simulation for progressive failure of weak and fractured tunnel surrounding rock under different overburden depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1113 - 1122. (in Chinese))
- [4] ATKINSON J H, POTTS D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1977, 27(2): 203 - 215.
- [5] 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.
- [6] YAMAMOTO K, LYAMIN A V, WILSON D W, et al. Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4): 504 - 514.
- [7] 杨 峰, 阳军生. 浅埋隧道围岩压力确定的极限分析方法[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 179 - 184. (YANG Feng, YANG Jun-sheng. Limit analysis method for determination of earth pressure on shallow tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 179 - 184. (in Chinese))
- [8] YANG X, YANG Z, LI Y, et al. Upper bound solution for supporting pressure acting on shallow tunnel based on modified tangential technique[J]. Journal of Central South University, 2013, 20: 3676 - 3682.
- [9] 程小虎. 密实砂土及硬黏土中圆形隧道的竖向支护压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 857 - 864. (CHENG Xiao-hu. Earth pressure on circular tunnel in dense sand and hard clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 857 - 864. (in Chinese))
- [10] 谢家然. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报, 1964, 10(6): 58 - 70. (XIE Jia-xiu. Earth pressure on shallow burial tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1964, 10(6): 58 - 70. (in Chinese))
- [11] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943: 37 - 42.
- [12] LEE C J, CHIANG K H, KUO C M. Ground movement and tunnel stability when tunneling in sandy ground[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2004, 27(7): 1021 - 1032.
- [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. 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] GB50157-2013 地铁设计规范[S]. 2013. (GB50157-2013 Code for design of metro[S]. 2013. (in Chinese))
- [15] TB10003-2005, J449-2005 铁路隧道设计规范[S]. 2005. (TB10003-2005, J449-2005 Code for design on tunnel of railway[S]. 2005. (in Chinese))
- [16] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 643 - 653.
- [17] 应宏伟, 蒋 波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 717 - 722. (YING Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 717 - 722. (in Chinese))
- [18] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1064 - 1070. (TU Bing-xiong, JIA Jin-qing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from clayey backfill considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1064 - 1070. (in Chinese))
- [19] 蔺 港, 孔令刚, 詹良通, 等. 基于太沙基土拱效应考虑基质吸力影响的松动土压力计算模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2095 - 2104. (LIN Gang, KONG Ling-gang, ZHAN Liang-tong, et al[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 2095 - 2104. (in Chinese))
- [20] 周小文, 濮家骝, 包承纲. 隧洞拱冠砂土位移与破坏的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 32 - 36. (ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu, BAO Cheng-gang. A study of the movement and failure characteristics of sand mass above the crown of a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 32 - 36. (in Chinese))
- [21] 王明年, 郭 军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面黄土隧道深浅埋分界深度研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1157 - 1162. (WANG Ming-nian, GUO Jun, LUO Lu-sen, et al. Study of critical buried depth of large cross-section loess tunnel for high speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1157 - 1162. (in Chinese))
- [22] 林培源. 隧道侧向压力问题的探讨[J]. 土木工程学报, 1982, 15(1): 54 - 62. (LIN Pei-yuan. On the lateral pressure of tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 1982, 15(1): 54 - 62. (in Chinese))
- [23] 侯学渊. 隧道设计模型、理论与试验[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(3): 35 - 43. (HOU Xue-yuan. Design model, theory and test of tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(3): 35 - 43. (in Chinese))