

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.046



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 多层土中盾构隧道开挖面主动破坏极限支护力

黄应州

(厦深铁路广东有限公司, 广东 深圳 518052)

**摘要:**合理设计开挖面主动破坏极限支护力是维持盾构隧道稳定性的关键,目前,大部分主动破坏极限支护力计算方法难以完全适用于复杂盾构隧道工程设计。基于楔形体计算模型,考虑土拱效应影响下的侧压力系数,引入盾构隧道开挖倾角和渗流作用等参数,建立适用于多层土中开挖面主动破坏极限支护力计算模型并推导出解析解;结合实际工程案例,对影响主动破坏极限支护力的土体和设计参数进行分析。结果表明:主动破坏极限支护力随施工深度、地下水水位高度、土体重度和开挖倾角的增大而显著增大,随内摩擦角和黏聚力的增加而非线性减小;采用考虑土拱效应影响的侧压力系数有利于减小主动破坏极限支护力设计值;考虑渗流作用后主动破坏极限支护力显著增加;土层的参数变化对主动破坏极限支护力影响显著。

**关键词:**盾构隧道;主动破坏极限支护力;土拱效应;成层土;渗流

中图分类号:U455.43 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0134-07

## Active failure limit support force of shield tunnel excavation face in multi-layer soil

HUANG Yingzhou

(Xiamen Shenzhen Railway Guangdong Co., Ltd, Shenzhen 518052, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Reasonably designing the active failure limit support force of the tunnel face is the key to maintaining the stability of the shield tunnel. At present, most of the limit support force calculation methods are not suitable for the complex shield tunnel engineering design. Based on the traditional wedge-shaped calculation model and considering the lateral pressure coefficient under the influence of soil arch effect, a calculation model for the active failure limit support force of the tunnel face in layered soil was established by introducing the excavation inclination angle and seepage effect. Combined with a practical engineering case, the soil and design parameters that affect the limit support force were analyzed. The results show that the limit support force of the tunnel face increases significantly with the increase of construction depth, groundwater level height, soil weight and excavation inclination angle, while decreases nonlinearly with the increase of internal friction angle and cohesion; When considering the lateral pressure coefficient under the influence of soil arching effect, the calculated value of the limit support force is reduced; The limit support force significantly increases after considering the effect of seepage; The parameter changes of different soil layers have a significant impact on the limit support force.

**Keywords:** shield tunnel; limit support force; soil arch effect; multi-layer soil; seepage

收稿日期:2024-04-28

基金项目:国家自然科学基金(52108300)

作者简介:黄应州(1980-),男,高级工程师,主要从事铁路工程研究,E-mail:fatjoe@163.com。

Received: 2024-04-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52108300)

Author brief: HUANG Yingzhou (1980-), senior engineering, main research interest: railway engineering construction, E-mail: fatjoe@163.com.

随着城市化的快速发展,对城市轨道交通的需求日益增加,合理开发利用地下空间成为解决交通需求的有效手段之一。相对于传统隧道施工方法,盾构隧道因高效、安全而被大量应用。在盾构隧道设计与施工中,维持开挖面的稳定性是确保施工安全的重要保障。在施工推进过程中,盾构机存在 3 种临界受力平衡状态,即开挖面支护力等于主动土压力、开挖面支护力等于静止土压力、开挖面支护力等于被动土压力<sup>[1]</sup>。当开挖面支护力小于主动土压力时,开挖面土体发生坍塌破坏,影响盾构隧道施工安全。因此,需精确计算维持盾构隧道掌子面稳定性的最小支护力的值(即主动破坏极限支护力的值),以提高盾构隧道施工过程中的稳定性与安全性。

目前,已有许多学者针对开挖面稳定性展开了研究。Jancsecz 等<sup>[2]</sup>基于 Horn<sup>[3]</sup>提出的楔形体计算模型,假设底层均匀,采用松动土压力理论<sup>[4]</sup>计算楔形体上部压力,推导出了估算主动破坏极限支护力的解析解。由于该计算模型不适用于计算复杂工况下的主动破坏极限支护力,许多学者在此模型基础上进行了修正。魏纲<sup>[5]</sup>结合离心机试验结果,将传统楔形体计算模型修正为梯形楔形体模型。雷明锋等<sup>[6]</sup>采用极限平衡分析法,在建立平衡方程时引入线路坡度角,推导出了迎坡条件下盾构隧道开挖面主动破坏极限支护力的解析解。朱建明等<sup>[7]</sup>进一步分析了土体特性和设计参数对滑动面倾角的影响,并提出了滑动面倾角确定方法。Anagnostou 等<sup>[8]</sup>通过对三维稳态下数值模拟计算结果的分析,提出了在特定水力边界条件下计算开挖面支撑压力的渗流方程。Lu 等<sup>[9]</sup>结合数值模拟方法和理论分析,提出了盾构隧道开挖面渗流场数学模型,将渗流作用考虑进主动破坏极限支护力的计算分析中。Perazzelli 等<sup>[10]</sup>基于该渗流方程,结合数值模拟计算方法,对渗流作用下的开挖面稳定性进行了研究。Huang 等<sup>[11]</sup>和乔金丽等<sup>[12]</sup>分别基于梯形楔形体模型和传统楔形体模型推导了考虑渗流的多层土盾构隧道开挖面主动破坏极限支护力的解析解。赵文等<sup>[13]</sup>基于离心试验结果,对传统楔形体破坏模型进行优化,进一步提高了主动破坏极限支护力的计算精度。赵红泽等<sup>[14]</sup>对现有关于主动破坏极限支护力的计算方法进行了总结比较,并分析了砂土重度、盾构开挖面直径和埋深等因素对主动破坏极限支护力的影响。

以上研究没有综合考虑各种影响因素,也没有考虑土拱效应对侧向土压力系数的影响。在传统楔形体计算模型基础上,建立了考虑土拱效应对松动土区域的影响、地下水渗流作用以及开挖倾斜角

度影响的多层土盾构隧道开挖面主动破坏模型,推导主动破坏极限支护力,基于实际工程案例,采用数值模拟方法验证模型的正确性,在此基础上,分析各变量对主动破坏极限支护力的影响规律。

### 1 开挖面稳定极限分析

Horn<sup>[3]</sup>于 1961 年提出了用于分析软质地层隧道开挖面稳定性的楔形体计算模型,如图 1 所示。该模型由隧道开挖面前的滑动楔形体  $X_1 \sim X_6$  及其上覆松动土体组成。图 1 中,  $H_b$  为楔形体顶部到地面的距离;  $D$  为隧道外直径;  $D_{eq}$  为楔形体等效边长 ( $D_{eq} = \sqrt{\pi} D/2$ )<sup>[10]</sup>;  $L$  为楔形体水平长度;  $P_v$  为上覆松动土压力;  $T_1$  和  $N_1$  分别为块体开挖面方向滑动面上的摩擦阻力及法向作用力;  $T_2$  和  $N_2$  分别为块体侧向滑动面上的摩擦阻力及法向作用力;  $G_1$  为土体自重;  $P$  为最小极限支护压力;  $\alpha$  为楔形体滑动倾角。根据极限平衡法,在假定破坏区域土体服从 Mohr Coulomb 破坏准则的前提下,结合上覆土层松动土压力计算方法,推导出维持开挖面稳定的最小极限支护压力。平衡方程如下:

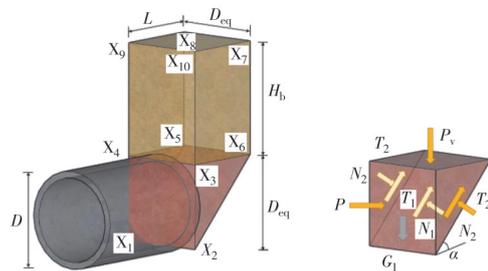


图 1 楔形体计算模型

Fig. 1 Wedge calculation model

水平力平衡方程

$$P + T_1 \cos \alpha + 2T_2 \cos \alpha = N_1 \sin \alpha \quad (1)$$

竖向力平衡方程

$$P_v + G_1 = T_1 \sin \alpha + 2T_2 \sin \alpha + N_1 \cos \alpha \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可求得开挖面最小支护压力计算公式

$$P = \tan(\alpha - \varphi)(P_v + G_1) - \left( \frac{cD_{eq}^2}{\sin \alpha} + 2T_2 \right) [\tan(\alpha - \varphi) \sin \alpha + \cos \alpha] \quad (3)$$

由式(3)虽可估算单一均质土层中盾构隧道水平向开挖所需的最小支护压力,但该计算公式并不适用于实际工程中复杂条件下开挖面最小支护压力的计算,因此,需要对该公式进行进一步修正。

#### 1.1 松动土压力修正

太沙基<sup>[4]</sup>提出的松动土压力计算方法(式(4))被广泛应用于盾构隧道衬砌竖向土压力计算。

$$\begin{cases} \sigma_v = \frac{D_{eq}L\gamma_s - 2(D_{eq} + L)c}{\lambda_1} \left( 1 - e^{\frac{\lambda_1 H_b}{D_{eq}L}} \right) + q_{gs} e^{\frac{\lambda_1 H_b}{D_{eq}L}} \\ \lambda_1 = 2(D_{eq} + L)K_0 \tan \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中： $c$ 为土体黏聚力； $\varphi$ 为土体内摩擦角； $K_0$ 为侧向土压力系数； $\gamma_s$ 为土体重度； $q_{gs}$ 为地面附加荷载（如地表堆载、建筑物自重等）。

松动土压力的计算方法对开挖面最小支护压力的影响很大，但传统的计算方法并未考虑土拱效应对静止土压力系数的影响以及渗流力的作用。有学者<sup>[4,11,15]</sup>发现，随着滑动面位置的变化，松散介质的静止土压力系数介于 0.5 到 1.0 之间。基于此研究，采用 Handy<sup>[16]</sup>主应力轴旋转理论，对松散介质的滑动面形状进行假设（如图 2 所示），推导了考虑土拱效应影响的静止土压力系数

$$K'_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\cos^2 \theta_s + K_a \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_s + K_a \cos^2 \theta} \quad (5)$$

式中： $\sigma_h$ 为土壤的水平应力； $\theta_s$ 为最大主应力方向与水平方向夹角； $K_a$ 为主动土压力系数。

基于太沙基松动土压力计算方法，通过对土层各个单元的竖向应力进行积分，获得破坏区宽度内的平均垂直土压力

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_v &= \frac{1}{B} \int_{B/2}^{B/2} (\sigma_1 \sin^2 \theta_s + \sigma_3 \cos^2 \theta_s) dx = \\ &\sigma_1 \left[ \frac{1}{3} (1 - K_a) \sin^2 \theta_0 + K_a \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\sigma_1$ 为土层单元最大主应力； $\sigma_3$ 为土层单元最小主应力； $\tau$ 为剪切应力； $B$ 为土层破坏区域宽度； $\theta_0 = \pi/4 + \varphi/2$ ，为最大主应力方向与水平方向的最大夹角。

通过受力分析，可以建立土层单元竖向力平衡方程

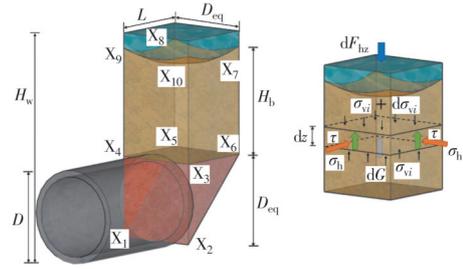
$$B \bar{\sigma}_v + B \gamma'_s dz = B(\bar{\sigma}_v + d\bar{\sigma}_v) + 2\tau dz \quad (7)$$

将式(5)、式(6)代入式(7)，可求得考虑土拱效应的侧向土压力系数

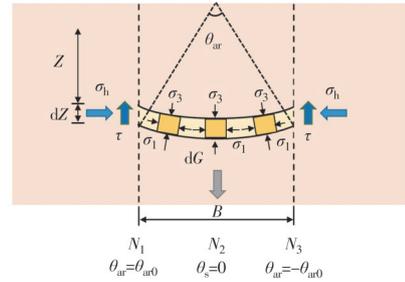
$$\begin{cases} H(x, y, z) = \left( 1 - \exp\left(-b \frac{x}{D}\right) \right) \left( H_w - \frac{D}{2} \right), & \text{楔形体中} \\ H(x, y, z) = \left( 1 - \exp\left(-b \frac{x}{D} + a \left( 1 - \frac{z}{D} \right) \right) \right) \left( H_w - \frac{D}{2} \right), & \text{松动土层中} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $H_w$ 为地下水水位高度； $a$ 为修正系数，取 3.5； $b$ 的值取决于隧道直径与地下水水位高度的比值。

求解方程(9)，可得到考虑土拱效应对侧向土压力系数的影响以及渗流力作用下的上覆松动土压力



(a) 修正后的楔形体计算模型



(b) 修正后的松动土压力计算模型

注： $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别为土体松动区域最大主应力； $\sigma_h$ 为水平应力； $\theta_{ar}$ 为 $\sigma_1$ 方向与水平方向之间的夹角； $M_1$ 、 $M_2$ 和 $M_3$ 分别为土体松动区域两侧和中心轴线的位置点。

图 2 松动土压力计算模型

Fig. 2 Calculation model of loosening earth pressure

$$K'_0 = \frac{\tan^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0 + \sin^2 \theta_0}{(\tan^2 \theta_0 - 1) \sin^2 \theta_0 / 3 + 1} \quad (8)$$

基于修正后的楔形体计算模型（如图 2(a)所示），考虑渗流和边界条件的控制方程为

$$\begin{aligned} D_{eq}L(\sigma_v + d\sigma_v) + D_{eq}L\gamma'_s dz &= D_{eq}L\sigma_v + \\ 2(c + K_0\sigma_v \tan \varphi)(D_{eq} + L)dz &- D_{eq}LdF_{hz} \quad (9) \\ \sigma_v|_{z=0} &= q_{gs} \end{aligned}$$

式中： $\gamma'_s$ 为土体浮重度； $F_{hz}$ 为土层垂直方向的渗流力（如式(10)所示）。

$$dF_{hz} = \gamma_w D_{eq} dz \int_0^L \frac{\partial H}{\partial z} dx \quad (10)$$

式中： $H$ 为盾构隧道开挖面前地下水水头差变化方程（如式(11)所示）<sup>[9]</sup>； $\gamma_w$ 为土层水重度。

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \frac{D_{eq}L\gamma'_s - 2(D_{eq} + L)c}{\lambda_1} \left( 1 - e^{\frac{\lambda_2 H_b}{D_{eq}L}} \right) + q_{gs} e^{\frac{\lambda_2 H_b}{D_{eq}L}} + \\ &\frac{a \frac{D_{eq}L}{2(D_{eq} + L)} \cos \varphi \left( 1 - e^{-\frac{aH_w}{D} - \frac{\lambda_2 H_w}{D_{eq}L}} \right) \left( 1 - e^{-b \cot \alpha} \right)}{b \cot \alpha \left( a \frac{D_{eq}L}{2(D_{eq} + L)} \cos \varphi + DK'_0 \sin \varphi \right)} \end{aligned}$$

$$\lambda_2 = 2(D_{eq} + L)K_0' \tan \varphi \quad (12)$$

1.2 考虑渗流作用的多层土中倾斜开挖最小极限支护压力计算

传统盾构隧道开挖面最小支护压力的计算方法仅适用于均质土层中的水平开挖工况, 而实际施工中常会出现多层土中倾斜开挖工况, 因此, 有必要对传统楔形体计算模型进行优化。如图 3 所示, 将松动土区域中上部土层的作用力看作是对下部土层的超载, 依次将土层间的相互作用力进行叠加, 在渗流作用下, 某一土层单元竖向受力平衡方程为

$$D_{eq} L(\sigma_{vn} + d\sigma_{vn}) + D_{eq} L \gamma'_s dz_n = D_{eq} L \sigma_{vn} + 2(c_i + K_{0n}' \sigma_{vn} \tan \varphi_n)(D_{eq} + L) dz_n - D_{eq} L dF_{hc} \quad (13)$$

$$\sigma_{vi}|_{z=H_b-z_n} = \sigma_{vn-1}$$

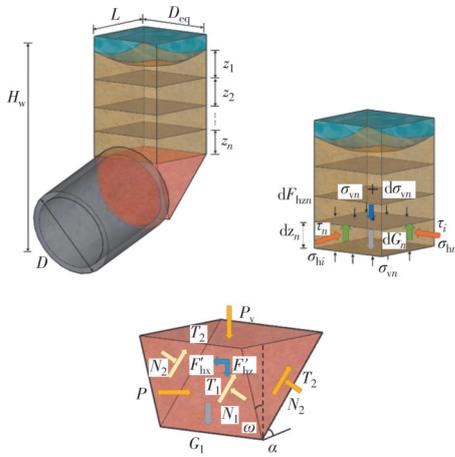


图 3 多层土中楔形体计算模型

Fig. 3 Wedge calculation model in rich water multilayer stratum

求解式 (13) 即可得到渗流作用下某一土层单元的垂直应力, 将所有土层的垂直应力叠加, 便可得到楔形体上部表面受到的垂直应力

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \sigma_{vn} \quad (14)$$

作用在楔形体顶部的垂直压力为

$$P_v = \sigma_v D_{eq} L = \sigma_v D_{eq}^2 \cos \omega (\cot \alpha + \tan \alpha) \quad (15)$$

式中:  $\omega$  为盾构隧道的纵向坡度角;  $\alpha$  为滑裂面倾角, 取值方法可参照文献 [6]。

楔形体的极限平衡方程为

$$P \cos \omega + T_1 \cos \alpha + 2T_2 \cos \alpha = N_1 \sin \alpha + F'_{hr} \quad (16)$$

$$P_v + G_1 + F'_{hc} = T_1 \sin \alpha + 2T_2 \sin \alpha + N_1 \cos \alpha + P \sin \omega$$

楔形体所受滑动摩擦力为

$$T_1 = cD_{eq}^2 \cos \omega / \sin \alpha + N_1 \tan \varphi$$

$$T_2 = D_{eq}^2 \left[ c + K_0 (2\sigma + D_{eq} \gamma'_s \cos \omega) \tan \varphi / 3 \right] \cdot (\cot \alpha + \tan \omega) \cos^2 \omega / (2 \tan \alpha) \quad (17)$$

楔形体土体重度为

$$G_1 = \gamma'_s D_{eq}^3 \cos^2 \omega (\cot \alpha + \tan \omega) / 2 \quad (18)$$

楔形体内部受到的水平和竖向渗流分量可通过 Gauss 理论求得, 其表达式为

$$F'_{hr} = \iiint_v \gamma_w \frac{\partial H(x, y, z)}{\partial x} dV \quad (19)$$

联立式 (15)~式 (19) 可求得开挖面最小支护压力, 其表达式为

$$P = \frac{\lambda_3 - \lambda_4 + F'_{hr}}{\cos \omega + \tan(\alpha - \varphi) \sin \omega}$$

$$\lambda_3 = \tan(\alpha - \varphi) (F_v + G_1 + F'_{hc})$$

$$\lambda_4 = \left( \frac{cD_{eq}^2 \cos \omega}{\sin \alpha} + 2T_2 \right) [\tan(\alpha - \varphi) \sin \alpha + \cos \alpha] \quad (20)$$

2 案例计算与分析

2.1 概况

维持盾构隧道开挖面稳定的最小极限支护压力受到地层特性 (地下水水位高度、土体重度、黏聚力、内摩擦角和侧向土压力系数) 和隧道开挖倾角及开挖深度的影响。为研究这些参数对主动破坏极限支护力的影响, 以广州地铁 3 号线某盾构区间为计算案例 [6] 进行参数分析。该工程采用土压平衡式盾构机进行双线开挖, 衬砌采用外直径为 6 m、厚度为 0.3 m 的钢筋混凝土预制管片。选取的隧道区间主要包含填土层、淤泥质土砂混合层、冲洪积层和强风化泥岩层 4 种地层, 各地层详细条件和土性参数见图 4。

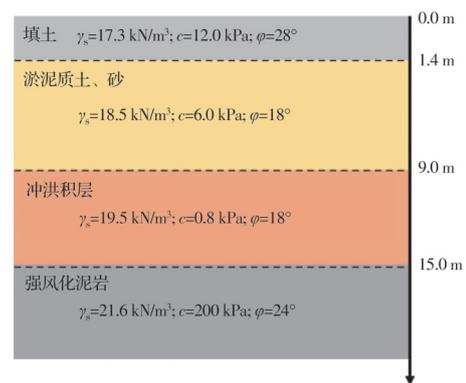


图 4 计算地层分布及材料参数

Fig. 4 The distribution and material parameters of the calculated layer

2.2 数值模拟验证

为验证推导出的主动破坏极限支护力解析解的可靠性, 采用 Plaxis3D 数值模拟软件对上述盾构隧道案例进行建模。利用模型的对称性对 1/2 地层和隧道进行分析。有限元网格划分如图 5 所示。土层模型总长为 10.0D, 宽为 5.0D, 模型底部距离隧

道中心  $5.0D$ 。土层模型上表面为自由约束,四面设置为法向约束,底部设置为固定约束。通过设置开挖面与土层的水头差来模拟隧道开挖过程中的渗流作用。

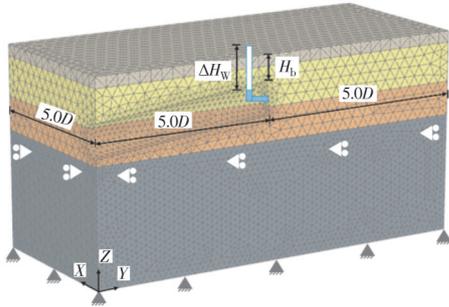


图 5 有限元网络

Fig. 5 Mesh of finite element model

开挖面主动破坏的模拟过程如下:

1) 建立原始地层模型并激活,进行初始地应力平衡计算;

2) 开挖土体并激活隧道模型,在隧道周围施加径向约束,并在隧道开挖面施加等于静止侧向土压力的面荷载(支护力),使模型达到平衡状态;

3) 逐渐减小施加在开挖面上的支护力,采用流固耦合计算方法进行计算,并在每个分析步骤中观察土体的应力和变形;

4) 当开挖面前土体处于主动极限状态时,支护力的轻微变化都会导致隧道开挖面前的土体位移迅速增加,通过不断迭代,减小支护力的值,即可求解开挖面前土体处于坍塌极限状态时对应的主动极限支护力。

图 6 为 9 种不同工况下推导出的解析解理论值与数值模拟结果的对比,两者之间误差较小,且表现出相同变化规律。采用数值模拟方法求解主动破坏极限支护力的平均时间,与理论方法相比,计算时间过长,可见,推导的主动破坏极限支护力的计算方法既满足设计要求,求解过程也简单适用。图 7 为数值模拟的主动破坏极限状态下土体位移变

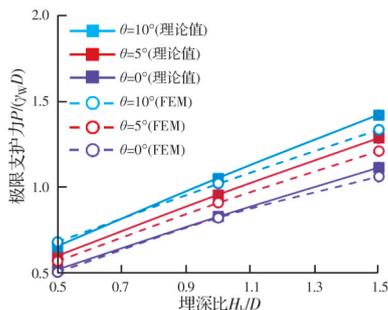
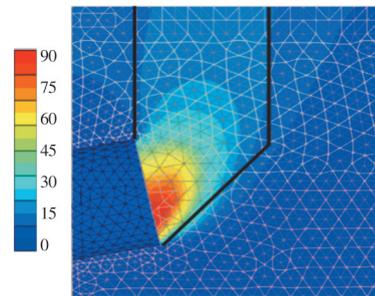


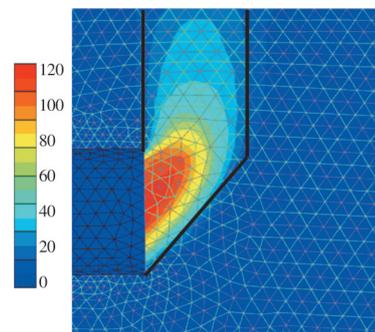
图 6 理论值与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between theoretical values and numerical simulation results

形云图,可以看出,开挖面前的滑动土体区域由楔形体和棱柱体组成。该破坏模式与多层土楔形体计算模型吻合,进一步验证了研究的合理性。



(a)  $\theta=10^\circ$



(b)  $\theta=0^\circ$

图 7 土体位移云图

Fig. 7 Soil displacement cloud map

### 3 参数分析

图 8~图 13 为各个变量对归一化主动破坏极限支护压力的影响。考虑地下水水位高度的影响时,采用考虑渗流作用的解析解具有更高的主动破坏极限支护力值,即计算结果更保守,可确保开挖面稳定。且随着埋深比的增加,主动破坏极限支护力明显增加,呈现出接近线性增长的趋势。图 9 为不同埋深比下归一化主动破坏极限支护压力随开挖倾角的变化。由图 9 可以看出,开挖倾角与主动破坏极限支护力呈正相关关系,当开挖倾角从  $0^\circ$  增加到  $10^\circ$  时,主动破坏极限支护力扩大到了约 1.3 倍。

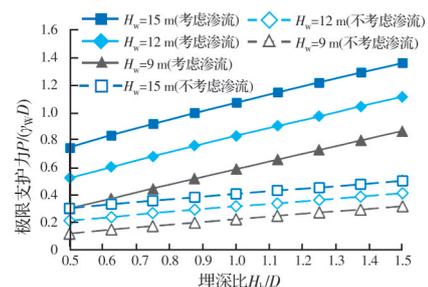


图 8 埋深比和 水位高度对主动破坏极限支护力的影响  
Fig. 8 The influence of burial depth ratio and water level height on the limit support force

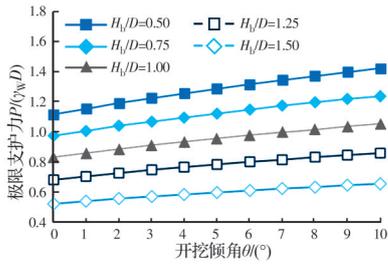


图 9 埋深比和开挖倾角对主动破坏极限支护力的影响  
 Fig. 9 The influence of burial depth ratio and excavation inclination angle on the active limit support force

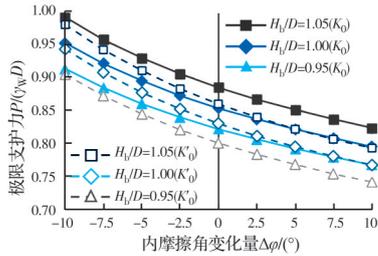


图 10 埋深比和侧向土压力系数对主动破坏极限支护力的影响  
 Fig. 10 The influence of burial depth ratio and Lateral earth pressure coefficient on the active limit support force

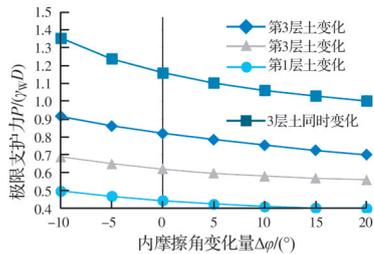


图 11 不同土层内摩擦角变化对主动破坏极限支护力的影响  
 Fig. 11 The influence of variation of internal friction angle in different soil layers on the active limit support force

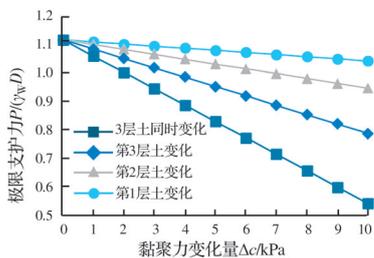


图 12 不同土层黏聚力变化对主动破坏极限支护力的影响  
 Fig. 12 The influence of variation of cohesion in different soil layers on the active limit support force

将不考虑土拱效应和考虑土拱效应影响的两种主动破坏极限支护力计算结果进行对比,如图 10 所示。考虑土拱效应影响后的主动破坏极限支护力有一定幅度的减小,且对内摩擦角的变化更敏感,即随着内摩擦角的增加下降趋势更明显。在研究内摩擦角、黏聚力和土体重度对主动破坏极限支

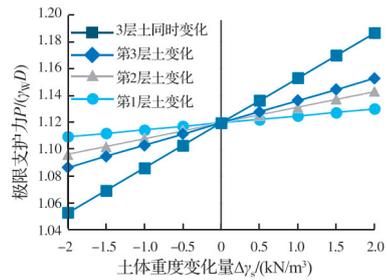


图 13 不同土层重度变化对主动破坏极限支护力的影响  
 Fig. 13 The influence of variation of soil weight in different soil layers on the active limit support force

护力的影响时,考虑了不同土层土性的影响,如图 11~图 13 所示。由于各土层厚度和特性存在差异,同一参数在不同土层内的变化对主动破坏极限支护力的影响程度均不同。随着内摩擦角和黏聚力的增加,主动破坏极限支护力呈非线性降低趋势。这是由于内摩擦和黏聚力的增加有利于提高土体自身稳定性,从而降低对主动破坏极限支护力的需求。此外,各土层重度和主动破坏极限支护力呈线性正相关关系。

由上述分析可知,松动土区域的土拱效应、地下水渗流作用及开挖倾斜角度均对主动破坏极限支护力有明显影响,在实际工程中应考虑以上因素。推导出的多层土主动破坏极限支护力的计算方法可考虑各层土的影响,具有实际应用价值。

### 4 结论

1) 基于传统楔形体计算模型,建立了考虑土拱效应影响下的侧压力系数、盾构隧道开挖倾角及渗流作用的多层土中盾构隧道开挖面主动破坏极限支护力计算模型并推导出解析解,基于工程案例,采用数值模拟计算方法对该模型和计算方法进行验证,结果表明,提出的计算模型和方法可靠度高,适用于实际工程设计与施工。

2) 结合盾构隧道工程案例,对影响主动破坏极限支护力的变量进行分析。结果表明,地下水水位高度、埋深比、开挖倾斜角度以及土体重度与主动破坏极限支护力呈正相关关系,而内摩擦角和黏聚力与主动破坏极限支护力呈负相关关系,且主动破坏极限支护力受土拱效应、渗流作用以及不同土层特性变化的影响明显。因此,在实际工程中,应充分考虑各因素的影响。

### 参考文献

[1] 张庆贺,王慎堂,严长征,等. 盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 857-861.

- ZHANG Q H, WANG S T, YAN C Z, et al. Tunneling methods through river (lake, sea) bed under shallow covering by shield [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 857-861. (in Chinese)
- [2] JANCSEK S, STEINER W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions [C]// *Conference Proceedings of Institute of Mining and Metallurgy and British Tunneling Society*. Boston, MA: Springer, 1994: 531-550.
- [3] HORN M. Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face [C]// *Proceedings of the Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry*. Hungarian: Budapest, 1961: 7-16.
- [4] KARL T. *Theoretical soil mechanics* [M]. New York: Wiley, 1943.
- [5] 魏纲. 顶管工程土与结构的性状及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- WEI G. Theoretical study on properties of soil and structure during pipe jacking construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [6] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 迎坡条件下盾构隧道开挖面极限支护力计算与分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(3): 488-492.
- LEI M F, PENG L M, SHI C H, et al. Calculation and analysis of limit support force of shield tunnel excavation face under facing-slope conditions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(3): 488-492. (in Chinese)
- [7] 朱建明, 林庆涛, 康瑶. 盾构法施工中楔形体模型滑裂面倾角的研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(Sup2): 327-332.
- ZHU J M, LIN Q T, KANG Y. Study on the inclination angle of sliding surface of wedge model in shield construction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup2): 327-332. (in Chinese)
- [8] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 165-173.
- [9] LU X L, ZHOU Y C, HUANG M S, et al. Computation of the minimum limit support pressure for the shield tunnel face stability under seepage condition [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 15(6): 849-863.
- [10] PERAZZELLI P, LEONE T, ANAGNOSTOU G. Tunnel face stability under seepage flow conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 459-469.
- [11] HUANG M S, LI Y S, SHI Z H, et al. Face stability analysis of shallow shield tunneling in layered ground under seepage flow [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 119: 104201.
- [12] 乔金丽, 张义同, 高健. 考虑渗流的多层土盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1497-1502.
- QIAO J L, ZHANG Y T, GAO J. Stability analysis of shield tunnel face in multilayer soil with seepage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1497-1502. (in Chinese)
- [13] 赵文, 程诚, 李慎刚, 等. 盾构开挖面楔形体支护压力模型分析及改进[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(8): 74-81, 90.
- ZHAO W, CHENG C, LI S G, et al. Analysis and improvement of wedge supporting pressure model of shield tunnel excavation face [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(8): 74-81, 90. (in Chinese)
- [14] 赵红泽, 郑群飞, 朱建明, 等. 楔形体模型的简化计算方法[J]. *现代隧道技术*, 2017, 54(1): 83-88.
- ZHAO H Z, ZHENG Q F, ZHU J M, et al. A simplified calculation method for the wedge model [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2017, 54(1): 83-88. (in Chinese)
- [15] LEE I M, LEE J S, NAM S W. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(6): 551-565.
- [16] HANDY R L. The arch in soil arching [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302-318.

(编辑 胡玲)