

考虑抗剪性能的全长预应力锚杆支护力计算方法

陈志敏¹, 王洪¹, 李亚子², 龚军³, 李增印³

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 730070 兰州; 2. 中建八局轨道交通建设有限公司, 210046 南京; 3. 中铁隧道局集团有限公司, 511458 广州)

摘 要:为探明全长预应力锚杆对剪切滑移体的抗剪性能,基于剪切滑移理论提出了一种计算滑移体所需最小支护抗力的方法,推导了全长预应力锚杆的中性点位置和支护力计算方法,并应用于隧道案例中验证其合理性。研究表明:用滑移体面积和围岩等级计算滑移体所需最小抗力的方法相比于传统的方法计算简便、安全度高。在规定范围内:增大锚杆直径,中性点位置向锚杆尾部移动;增大预应力,中性点位置向锚杆端部移动,两者对锚杆中性点位置的影响不同,但均能使锚杆轴力和径向支护抗力成正比例关系增大。采用锚喷支护时锚杆所能提供的径向支护抗力很小,建议根据滑移面处剪力值设计锚杆参数,适当增大直径和预应力,提高抗剪性能的同时也能提高径向支护抗力。研究成果可为全长预应力锚杆的抗剪性能计算提供参考。

关键词:软岩隧道;剪切滑移理论;锚喷支护;中性点;支护抗力

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-4939(2025)05-1098-08

Calculation method of support force of full-length prestressed bolt considering shear performance

CHEN Zhimin¹, WANG Hong¹, LI Yazhi², GONG Jun³, LI Zengyin³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070 Lanzhou, China;

2. China Construction Eighth Bureau Rail Transit Construction Co., Ltd., 210046 Nanjing, China;

3. China Railway Tunnel Bureau Group Co., Ltd., 511458 Guangzhou, China)

Abstract: In order to find out the shear resistance of the full-length prestressed bolt to the shear-slip body, based on the shear-slip body theory, a method to calculate the minimum support resistance of the slip body was proposed, the neutral point position and supporting force calculation method was deduced, and the rationality of the method was verified. The results show that calculating the minimum resistance required, by using the slip body area and grade of the surrounding rock, is simpler and safer than the traditional method. The neutral point position of the full-length prestressed bolt is affected by the diameter and the prestress. Within the specified range: increasing the diameter of the bolt, the neutral point position moves to the bolt's tail; increasing the prestress of the bolt, the neutral point position moves to the bolt's head. Although they have different effects on the neutral point position of the bolt, both can increase the axial force

收稿日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12262018); 中央引导地方科技发展资金项目 (No. 22ZY1QA005)

通信作者: 王洪. E-mail: 1754664565@qq.com

引用格式: 陈志敏, 王洪, 李亚子, 等. 考虑抗剪性能的全长预应力锚杆支护力计算方法[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1098-1105.

CHEN Zhimin, WANG Hong, LI Yazhi, et al. Calculation method of support force of full-length prestressed bolt considering shear performance [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1098-1105.

and the radial support resistance proportionally. At the same time, because radial supporting resistance provided by the bolt is small when adopting the support by shotcrete-bolt, we suggest designing the bolt parameters according to the shear value at the sliding plane, and taking the bolt's shear performance into consideration. Increasing the diameter and prestress appropriately can improve not only the shear performance but also the radial support resistance. The research results can provide reference for the calculation of shear performance of full-length prestressed bolt.

Key words: soft rock tunnel; shear slip theory; shotcrete-bolt support; neutral point; support resistance

隧道施工时易发生喷射砼局部脱落、钢拱架弯折、二衬开裂等现象,特点为变形量大和变形速率快。解决隧道变形的关键点在于分析支护结构的力学效应,找到导致其失效的根本原因,在此基础上设计出更有效的支护方法。国内外有学者使用数值分析来说明支护体系的力学机理^[1-3],也有学者通过试验、监控测量等手段对软岩隧道支护构件进行测量,从而发现其内部受力变化特性和破坏机理^[4-6]。

LIU 等^[7]提出了剪切滑移理论,该理论可以用于隧道变形稳定性分析和支护结构强度评价方面的研究。目前,学者对剪切滑移理论已有较多研究。肖明清等^[8]基于剪切滑移理论提出了复合土层盾构隧道开挖时下部主动土压力的计算公式。王永甫等^[9]基于非关联流动法则推导了侧压力系数 $\lambda = 1$ 、 $\lambda \neq 1$ 时隧道水平破裂深度表达式和塑性剪切滑移线表达式。郭小龙等^[10]将剪切滑移理论用于高地应力隧道,提出高地应力隧道的剪切滑移破坏形式为层面剪切-层面拉伸-岩石剪切。以上研究基于剪切滑移线理论对隧道支护体系的支护抗力计算方法,围岩剪切滑移破坏形式和破裂深度等进行了讨论,这些成果对隧道支护结构的稳定性研究具有很大意义,但在实际工程中的应用略显不足。

在研究全长黏结式锚杆方面,FREEMAN^[11]首次分析了全长黏结式锚杆的应力分布情况,提出了中性点理论。在中性点处,锚杆轴力达到最大值,而剪应力则为0。此后,王明恕^[12]对全长锚固锚杆进行探讨,给出了中性点计算方法以及锚杆轴力计算方法。姚显春等^[13]基于中性点理论,将锚杆轴力视为一个集中力,通过 Mindlin 解导出了锚杆所承受的剪应力沿杆体分布情况,并得出全长黏结式锚杆的锚杆近端-中性点和中性点-锚杆远端的轴力分布积分表达式。可以发现,对于全长黏结锚杆的研究,通常忽略锚杆横向抗剪效应而仅将其当作纯受拉构件,这种“拉杆模型”适用于没有节理的岩土体。对于有节理的岩体,其变形特征、力学特性等均受节理

的影响,此时锚杆的“拉杆模型”则不再适用。对于有锚杆支护的不稳定岩体,锚杆杆体对岩块有较强的横向约束作用,锚杆的抗剪刚度足够大时可以阻止岩体沿着结构面发生滑动变形。因此,在讨论锚杆锚固强度时,需同时考虑锚杆轴向抗拉效应和横向抗剪效应。

学者对剪切滑移理论的研究主要集中于滑移体破坏机理和验算支护结构抗力是否合理,用剪切滑移理论设计全长预应力锚杆时,对抗剪性能缺少研究。

为研究全长预应力锚杆的抗剪性能,确定其作用机制,本研究基于剪切滑移破坏理论和中性点理论,确定了滑移线方程所适用岩土体的内摩擦角范围,提出了考虑抗剪性能的全长预应力锚杆的中性点计算公式和支护力计算方法,分析了影响预应力锚杆中性点的因素以及中性点变化对支护性能的影响程度,并应用到实际深埋隧道工程中,可为类似计算提供参考。

1 剪切滑移破坏理论与实践分析

圆形隧道开挖后,若竖向应力为最大主应力,隧道左右两侧会形成剪切滑移面,与主应力轨迹线成 $\alpha = \pi/4 - \varphi/2$ 的交角(α 为剪切滑移体破裂起始角, φ 为内摩擦角),最后在隧道左右两侧产生剪切滑移体,如图1所示;若水平应力为最大主应力,最后会在隧道上下两侧产生剪切滑移体。本研究前提条件为竖向应力为最大主应力。

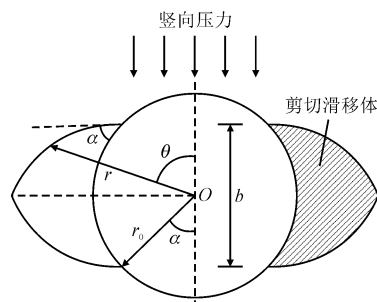


图1 隧道剪切滑移破坏模式

Fig. 1 Tunnel shear-slip failure mode

剪切滑移体一定位于塑性区内,其方程为一对数螺线,滑移线上的点的坐标为 (r,θ) ,极坐标表达式为^[14]

$$r = r_0 e^{[(\theta-\alpha)\tan\alpha]} \tag{1}$$

$$b = 2r_0 \cos\alpha \tag{2}$$

式中: r 为曲线的曲率半径; r_0 为隧道开挖半径; θ 为极角; α 为破裂起始角; b 为剪切滑移体起始点至隧道圆心的距离。

滑移体的最大曲率半径 $r = 1.5r_0 \sim 1.8r_0$ ^[14-15], 现对剪切滑移曲线方程(1)的适用范围进行计算, 其中 $\alpha = \pi/4 - \varphi/2$, 结果如表 1 所示。

根据 α 的确定公式及 r 的极坐标方程, $(\theta - \alpha) \cdot$

$\tan\alpha$ 的值应介于 0.4 ~ 0.6, 经代数计算 $\alpha \in (17.5^\circ, 30^\circ)$, $\varphi \in (30^\circ, 55^\circ)$, 可知滑移体的滑移曲线方程仅适用于 $\varphi = 30^\circ \sim 55^\circ$ 的岩土体。

表 1 剪切滑移方程适用范围

Tab. 1 Application range of shear slip equation

r/r_0	$\theta/$ ($^\circ$)	$(\theta - \alpha)\tan\alpha$	$\alpha/$ ($^\circ$)	$\varphi/$ ($^\circ$)
1.5	90	0.4	17.5	55
1.8	90	0.6	30	30

对我国部分复杂地质条件隧道支护结构变形破坏特征进行了调研分析, 结果如表 2 所示。

表 2 我国部分复杂地质条件隧道支护结构变形破坏特征

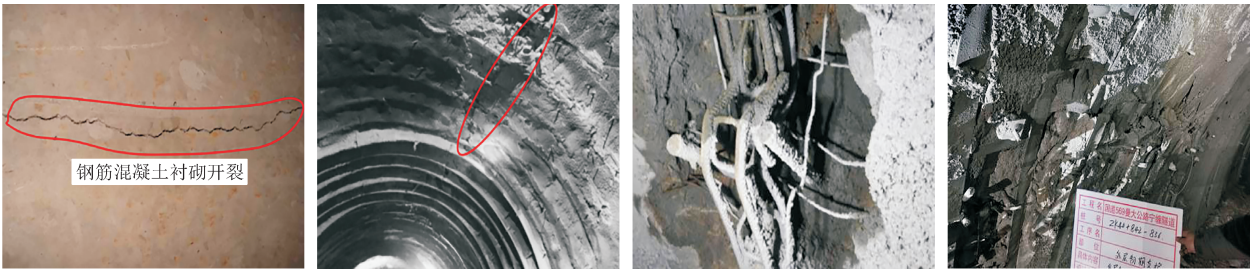
Tab. 2 Deformation and failure characteristics of tunnel support structures in some complex geological conditions in our country

隧道名称	最大 主应方向	最大 埋深/m	地层岩性	支护结构变形破坏特征	是否具有剪切 滑移破坏特征
新蜀河隧道 ^[15]	竖向	200	片岩	混凝土喷层不规则开裂、掉块, 钢拱架发生扭曲, 二衬开裂等。	是
某红黏土隧道 ^[16]	竖向	317	红黏土	侧墙衬砌结构开裂, 钢拱架变形。	
新城子隧道	水平	794	炭质板岩	二衬开裂、掉块, 部分区段衬砌严重破坏, 钢筋曲折等。	是
关角隧道	竖向	445	泥质片岩	两侧边墙挤出, 变形速率快、持续时间长, 底部隆起。	
毛羽山隧道	水平	700	薄层状板岩	混凝土喷层开裂, 钢拱架扭曲变形、断裂。	是
共和隧道 ^[17]	水平	1 000	砂质页岩	混凝土发生开裂、剥落和掉块, 钢拱架扭曲变形。	是
云屯堡隧道 ^[18]	水平	720	千枚岩	混凝土开裂、掉块, 钢拱架扭曲, 大面积初支侵限等。	是
杨家坪隧道	竖向	750	绢云千枚岩	混凝土产生压裂缝, 最终受压破坏发生掉块, 与钢架剥离。	是
阳山隧道 ^[19]	竖向	174	老黄土	初支变形严重, 钢拱架严重扭曲, 侵限范围较大。	是
宁缠隧道	水平	544	强风化砂岩	初期支护环、纵向开裂, 喷射砼局部脱落, 拱架变形严重。	是

我国部分复杂地质条件隧道支护结构破坏图如图 2 所示。

分析表 2 和图 2 可知, 不管浅埋还是深埋隧道, 喷射混凝土掉块, 钢拱架扭曲变形, 二衬开裂是常见的支护结构破坏形式, 分析其原因为: 围岩开挖后, 因应力释放引起围岩变形速率急速增大, 岩体会因存在应力差而产生剪切滑移效应, 此时仅有围岩本身提供的支护抗力抵抗围岩变形。施做初期支护后, 可将全长预应力锚杆视为悬吊构件与围岩紧密

接触, 此时可借助锚杆和围岩本身提供一定的抗剪能力, 由于初喷混凝土与钢拱架位于围岩表面, 围岩深处的潜在滑移面处的剪力全部由锚杆和围岩承担。随着隧道继续释放应力, 岩体会因应力差过大而产生剪切滑移体, 此时全长预应力锚杆不仅要发挥轴向抗拉作用, 还要发挥阻止岩体沿着剪切滑移面发生滑动变形的抗剪作用, 滑移面处锚杆所受剪力复杂, 不可忽略, 因此设计全长预应力锚杆时不仅要考虑轴向抗拉作用, 还要考虑横向抗剪性能。



(a) 新蜀河隧道^[15]—拱腰 (b) 云屯堡隧道^[18]—拱肩 (c) 阳山隧道^[19]—拱腰 (d) 宁缠隧道—拱腰

图 2 部分隧道支护结构破坏图

Fig. 2 Damage diagram of part of tunnel support structure

2 最小支护抗力计算优化方法

计算最小支护抗力 $P_{\min}$ 时,使用以下公式^[15,20]。

$$P_{\min} = P_b + P_s \quad (3)$$

式中: P_b 为平衡变形压力的支护抗力; P_s 为支撑围岩自重所需的抗力。

此方法在计算所需最小支护抗力时, P_b 和 P_s 的计算涉及到塑性区半径 R 和原岩应力 P_0 的计算及其他参数的确定,计算过程繁琐,现推导一种新的计算最小支护抗力的方法。

计算简图如图3所示,如果能求出剪切滑移面积 S_{BCD} ,则如同计算一般支挡结构物一样,就可利用土石体的破坏棱体算出其所受外力,取微面积 dA ,其高度可近似看作为弧长 ds , $ds = r d\theta$,可建立以下等式。

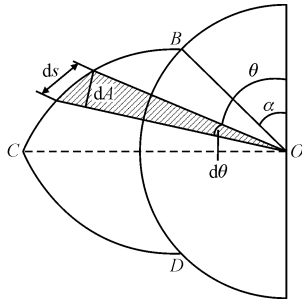


图3 滑移体面积计算简图

Fig.3 Schematic diagram for calculating the area of the slip body

$$dA = \frac{1}{2} r ds,$$

$$\begin{aligned} A &= \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} r ds = \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} r^2 d\theta \\ &= \frac{1}{4 \tan \alpha} [e^{(\pi-2\alpha)\tan \alpha} - 1] r_0^2 = k_0 r_0^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: A 为图形 BCO 的面积; k_0 为一近似系数,其余符号同前。

由前文可知, $\alpha \in (17.5^\circ, 30^\circ)$,将 α 代入式(4), k_0 结果如表3所示。

由表3可知, $\alpha \in (17.5^\circ, 30^\circ)$ 时, k_0 的值在0.97~1.02间变化,因此面积 A 可近似等于以 r_0 为边长的正方形的面积。可计算每一侧的楔形滑移体面积为

$$\begin{aligned} S_{BCD} &= 2 \left(A - \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{2}} r_0^2 d\theta \right) \\ &= \frac{1}{2} (4 + 2\alpha - \pi) r_0^2 \end{aligned} \quad (5)$$

表3 k_0 计算表

Tab.3 k_0 calculation table

$\varphi/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	$4 \tan \alpha$	$e^{(\pi-2\alpha)\tan \alpha} - 1$	k_0
30	30	2.309	2.351	1.018
35	27.5	2.082	2.113	1.015
40	25	1.865	1.881	1.008
45	22.5	1.657	1.654	0.998
50	20	1.456	1.434	0.985
55	17.5	1.261	1.221	0.968

将所求的每侧楔形滑移体面积乘岩土体的容重 γ 便可得到每延米的竖向力,再乘《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)^[21]中表D.0.1所规定的围岩水平力系数 k 即可求出所需最小支护抗力值 $P_{\min}$ 。

$$P_{\min} = k \cdot S \cdot \gamma \quad (6)$$

通过对比2种方法可知:①后者仅需知道围岩等级、围岩内摩擦角、隧道半径等基本参数便可计算所需最小抗力值,计算量大大减少;②通过后面的实例计算可知,两种方法计算结果非常接近,后者略大于前者,从设计支护结构角度来看,此结果能使支护结构安全度更高。

3 锚喷支护全长预应力锚杆受力分析

锚喷支护体系力学情况复杂,总支护抗力为混凝土喷层、钢拱架、围岩和锚杆支护抗力之和,剪切滑移体与支护体系受力关系如图4所示。混凝土喷层、钢拱架、围岩抗力具体计算方法参考文献[14]。

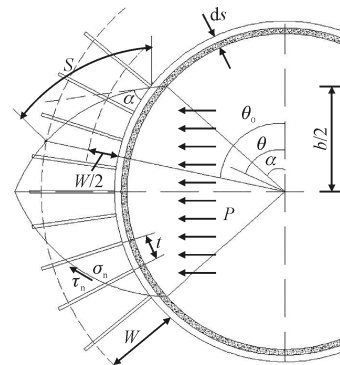


图4 滑移体与支护体系受力关系图

Fig.4 The force relationship between the sliding body and the support system

3.1 全长预应力锚杆中性点分析

在计算锚杆受力之前应初步设计锚杆的长度、直径。下面分别对有预应力和无预应力锚杆中性点进行计算与比较。

1) 当无预应力时, 锚杆中性点计算方法如下。

①塑性区

$$\rho = \frac{l}{\ln \frac{r_0 + l}{r_0}} \quad (7)$$

②弹塑性区

$$\rho = \frac{B_1 l}{B_1 \ln \frac{R}{r_0} + B_2 \ln \frac{r_0 + l}{R}} \quad (8)$$

式中: ρ 为中性点位置; l 为锚杆长度; B 为系数; 不同部位 B 有不同的表达式; 具体计算见文献[12], 塑性区和弹塑性区的 B 分别表示为 B_1 和 B_2 , R 为塑性区半径, 其余符号同前。

2) 当有预应力时, 锚杆初始受力状态如图5所示, 对锚杆进行受力分析。

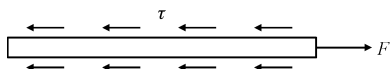


图5 锚杆杆体初始受力状态图

Fig. 5 Initial stress state diagram of bolt body

在文献[12]的基础上计算全长锚固预应力锚杆的中性点。

$$\int_{r_0}^{r_0+l} \tau U dr = \int_{r_0}^{r_0+l} UK(u_\rho - u_i) dr = F \quad (9)$$

式中: F 为锚杆预应力; U 为锚杆周长; u_i 为任意点处围岩径向位移; K 为围岩剪切比例系数, K_1 和 K_2 分别表示塑性区和弹塑性区。

对于塑性区和弹塑性区, 中性点的计算表达式不同。

①塑性区

$$\int_{r_0}^{r_0+l} U \tau dr = UK_1 B_1 \left(\frac{l}{\rho} - \ln \frac{r_0 + l}{r_0} \right) = F$$

可解得

$$\rho = \frac{UK_1 B_1 l}{F + UK_1 B_1 \ln \frac{r_0 + l}{r_0}} \quad (10)$$

②弹塑性区

$$\int_{r_0}^{r_0+l} U \tau dr = UK_1 B_1 \left(\frac{R - r_0}{\rho} - \ln \frac{R}{r_0} \right) + UK_2 B_2 \left(\frac{r_0 + l - R}{\rho} - \ln \frac{r_0 + l}{R} \right) = F$$

可解得

$$\rho = \frac{[UK_1 B_1 (R - r_0) + UK_2 B_2 (r_0 + l - R)]}{F + \left(UK_1 B_1 \ln \frac{R}{r_0} + UK_2 B_2 \ln \frac{r_0 + l}{R} \right)} \quad (11)$$

可将式(11)化简为

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\omega}{F + \psi}, \\ \omega &= UK_1 B_1 (R - r_0) + UK_2 B_2 (r_0 + l - R), \\ \psi &= UK_1 B_1 \ln \frac{R}{r_0} + UK_2 B_2 \ln \frac{r_0 + l}{R} \end{aligned} \quad (12)$$

由于式(12)中 K 、 B 、 R 、 r_0 均为常数, 锚杆长度 l 和直径 d 确定后, ω 和 ψ 均为常数, 可知 ρ 与 F 成反比例关系; 同理可知 ρ 与 d 成正比例关系。分析无预应力和有预应力全长锚固锚杆中性点计算公式可知: ①有预应力时, 随着预应力 F 的增大, 锚杆的中性点位置会向杆端移动, F 与 ρ 成反比例关系。②无预应力时, 中性点位置与锚杆直径无关; 有预应力时, 锚杆直径 d 增加, 中性点位置会向杆尾移动, 直径减小, 中性点位置会向杆端移动, 直径 d 与 ρ 成正比例关系。

3.2 锚杆轴力计算

任意剪切滑移面 r 处的锚杆轴力 N 为

$$\begin{aligned} N &= \int_{r_0}^r \tau U dx + F = \int_{r_0}^r K(u_r - u_{r_0}) U dx + F \\ &= UKB \left(\frac{r_0 - r}{\rho} + \ln \frac{r}{r_0} \right) + F \end{aligned} \quad (13)$$

3.3 锚杆提供的抗力值

锚杆提供的支护抗力 P'_m 为

$$P'_m = \frac{N}{e \cdot t} \quad (14)$$

式中: e 和 t 分别为锚杆纵向和横向间距; N 为锚杆轴力。

由于在 $\alpha \sim \theta_0$ 角度内的锚杆才能对滑移体有抗力作用, 且 P_m 是集中力, 现假定其是在剪切区高度 $b/2$ 上的均布力。

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{P'_m r_0 (\cos \alpha - \cos \theta_0)}{b/2} = \frac{P'_m r_0 (\cos \alpha - \cos \theta_0)}{r_0 \cos \alpha} \\ &= \frac{N (\cos \alpha - \cos \theta_0)}{e \cdot t \cos \alpha} \end{aligned} \quad (15)$$

分析式(10)~式(15)可知, 全长预应力锚杆的支护抗力受中性点位置影响, 从两方面讨论中性点位置变化对支护抗力的影响。第一, 锚杆直径增大, 中性点位置会向杆尾移动, 根据式(13)和式(15)可知轴力、支护抗力均会增大, 且轴力、支护抗力值与锚杆直径成正比例关系; 反之, 锚杆直径减小, 轴力和支护抗力均减小。第二, 预应力增大时, 虽然中性

点位置会朝杆端移动,但轴力会增大,支护抗力也会增大,且轴力、支护抗力值与预应力也成正比例关系;反之,锚杆预应力减小,轴力和支护抗力均减小。因此,增大锚杆直径、预应力均可提高锚杆支护抗力。锚杆直径范围宜取 20 ~ 28 mm,预应力不能大于锚杆的抗拉屈服极限,初始预加力宜为拉力设计值的 0.5 ~ 0.8 倍^[22],同时还必须满足 $\rho \geq r_0$ 。

3.4 锚杆抗剪力计算

剪切滑移体会与围岩之间发生相互错动,滑移面处锚杆除受轴力影响外,还受剪力影响,变形情况如图 6 所示。

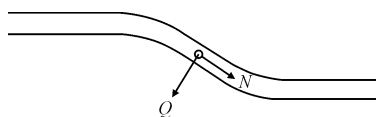


图 6 锚杆剪切变形图

Fig. 6 Shear deformation diagram of the bolt

锚杆的剪力 T 由锚杆剪切面上的轴向力 N 所提供的剪力与剪切面上所受剪力 Q 共同形成^[23],如式(16)所示。

$$T = N(\sin \beta \tan \varphi + \cos \beta) + Q(\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi) \quad (16)$$

式中: Q 为剪切面上所受剪力,表达式为 $Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(A_s f_y)^2 - N^2}$; β 为锚杆轴线方向与滑移面所夹锐角,根据剪切滑移体理论,可认为 $\beta = \pi/2 - \alpha$ 。

算出滑移面处轴力 N 与剪力 Q 之后,即可算出锚杆所受剪力,由切应力互等定理可算出锚杆横截面任一点所受切应力。

$$\tau_m = \frac{T}{A_m} \quad (17)$$

式中: τ_m 为锚杆横截面上的剪应力; A_m 为锚杆横截面积。

最后将所算拉应力与锚杆抗拉强度比较,拉力与抗拔力比较,切应力与锚杆抗剪强度比较,判断锚杆是否满足支护要求。

4 案例计算

油坊坪隧道半径为 5 m,围岩等级为 IV 级,围岩黏聚力 $c = 0.32$ MPa,内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$,密度 $\rho = 2.2$ g/cm³,泊松比 $\mu = 0.35$,锚杆位于塑性区内, $K = 5$ GPa,最大埋深 120 m,隧道支护情况如表 4 所示。

表 4 隧道支护情况

Tab. 4 Tunnel support situation

支护措施	支护参数
混凝土喷层	C30,喷层厚 22 cm
钢拱架	$\Phi 22$ 格栅钢拱架,间距 100 cm
锚杆	$\Phi 22$ 锚杆,长度 $l = 3$ m,间距 $s \times t = 100$ cm $\times$ 100 cm, $F = 60$ kN

隧道在掘进过程中,发生围岩大变形,侧墙内鼓,衬砌出现纵向张裂缝,混凝土喷层破裂,如图 7 所示^[20]。现对其进行破坏原因分析。

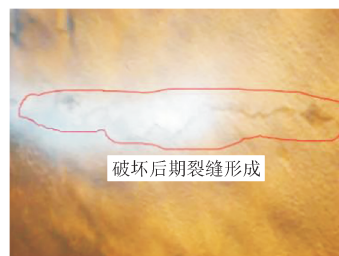


图 7 隧道支护结构破坏图

Fig. 7 Damage diagram of tunnel support structure

4.1 滑移体所需最小支护抗力 $P_{\min}$

已知 $\varphi = 40^\circ$, $r_0 = 5$ m,可算出 $\alpha = 25^\circ$, $b = 9.06$ m。

方法①

$$P_{\min} = P_b + P_0 = 0.745 + 0.648 = 1.393 \text{ MPa}$$

方法②

此隧道围岩为 IV 级,选最不利系数^[23] $k = 0.3$,得

$$S = \frac{1}{2}(4 + 2\alpha - \pi) \times 5^2 = 21.65 \text{ m}^2,$$

$$P_{\min} = 0.3 \times 21.65 \times 2.2 = 1.429 \text{ MPa}$$

4.2 支护结构抗力 P

经计算,剪切滑移面的平均倾角 $\Psi = 23^\circ$,锚杆拉力 $N = 104.8$ kN,计算初期支护及围岩提供的支护抗力如表 5 所示。

表 5 初支抗力值计算结果(单位:MPa)

Tab. 5 Results of initial anchorage value calculation(unit:MPa)

混凝土喷层	钢拱架	锚杆	围岩	总支护抗力
1.153	0.262	0.105	0.451	1.971

综上所述, $P = 1.971$ MPa $> P_{\min} = 1.429$ MPa,可见原隧道支护结构抗力值满足要求,但隧道初支却发生破坏,所以得从其他方面深入思考破坏原因。

4.3 计算其锚杆抗剪强度是否满足要求

已知: $\beta = \pi/2 - \alpha = 65^\circ$, $\varphi = 40^\circ$, $N = 104.8$ kN

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{(380 \times 360)^2 - 104.8^2} = 44 \text{ kN}$$

由式(15)计算得

$$T = 104.8 (\sin 65^\circ \tan 40^\circ + \cos 65^\circ) + 44 (\sin 65^\circ - \cos 65^\circ \tan 40^\circ) = 148.2 \text{ kN}$$

锚杆所受应力计算

$$\tau_m = \frac{T}{A_m} = \frac{4 \times 148.2}{3.14 \times 0.022^2} = 390.1 \text{ MPa},$$

$$\sigma_m = \frac{N}{A_m} = \frac{4 \times 104.8}{3.14 \times 0.022^2} = 275.8 \text{ MPa}$$

AZUAR 等^[24-25]通过试验发现锚杆对节理面的抗剪强度最大能达到锚杆极限抗拉强度的 80%, 则可取 $\sigma_t = 400 \text{ MPa}$, $\tau_t = 320 \text{ MPa}$ 。

$$\tau_m = 390.1 \text{ MPa} > \tau_t = 320 \text{ MPa},$$

$$\sigma_m = 275.8 \text{ MPa} < \sigma_t = 400 \text{ MPa}$$

由上式可见, 锚杆所受剪应力超过钢筋的抗剪强度, 可知锚杆会发生剪切破坏。

4.4 对比分析

将两文计算结果及破坏原因分析进行对比, 对比结果见表 6。

表 6 对比分析

Tab. 6 Comparative analysis

案例	$P_{\min}$ 计算方法	$P_{\min}/\text{MPa}$	破坏原因分析
文献[20]	①	1.393	施工扰动
本研究	②	1.429	锚杆抗剪力不足

在计算阻止滑移体发生滑移所需最小抗力时本研究使用方法②, 计算时涉及参数少、步骤简便, 且两个结果仅相差 2.5%。用本方法用于设计初支时, 由于计算出的所需抗力值稍大, 可使设计的初支安全度更高。

文献[20]分析隧道发生破坏是因为受到施工扰动影响, 未进行其他受力分析; 本研究通过计算发现原支护结构抗剪力不足是隧道发生破坏更深层次的原因。

4.5 改进优化

将锚杆直径增加到 25 mm, 则

$$\tau_m = \frac{4 \times 148.2}{3.14 \times 0.025^2} = 302.1 \text{ MPa} < \tau_t = 320 \text{ MPa}$$

只需将锚杆直径变为 25 mm, 锚杆剪切力会减小到 302.1 MPa, 抗剪能力提升 22.6%, 锚杆的抗剪性能符合要求。

5 结 论

1) 通过计算, 要满足滑移体最大曲率半径 $r = 1.5r_0 \sim 1.8r_0$, α 的值应介于 $17.5^\circ \sim 30^\circ$, 根据 α 与 φ 的关系可知滑移体的滑移曲线方程仅适用于 $\varphi = 30^\circ \sim 55^\circ$ 的岩土体。

2) 针对利用剪切滑移理论设计锚杆时缺乏考虑抗剪性能的问题, 提出了一种考虑抗剪性能的全长预应力锚杆支护力计算方法。根据滑移体滑移力和锚杆轴力, 确定滑移面处锚杆剪力, 用切应力互等定理计算锚杆剪切力, 将结果与锚杆抗剪性能进行对比判断是否满足支护要求。

3) 通过理论分析与实践得出用滑移体面积乘以岩土体容重 γ 再乘以围岩水平力系数 k 即可求出滑移体所需最小支护抗力, 此方法相比于传统的根据形变压力和松动圈围岩自重确定支护抗力的方法, 省略了原岩应力和松动圈半径的计算, 计算量大大减小。

4) 全长预应力锚杆支护性能受中性点位置影响, 应分 2 种情况讨论。第一, 直径增大, 中性点位置会向杆尾移动, 轴力、支护抗力均与直径成正比例关系增大, 反之则减小; 第二, 预应力增大, 虽然中性点位置会朝杆端移动, 但轴力、支护抗力均与预应力成正比例关系增大, 反之则减小。在规定范围内增大锚杆直径或预应力均可提高锚杆支护抗力。

5) 通过对隧道实例计算分析发现, 使用锚喷支护时, 锚杆提供的支护抗力值最小, 若仅由滑移体所需总抗力来设计锚杆直径, 不能保证锚杆抗剪性能满足要求, 建议根据滑移面处剪力值设计锚杆参数, 步骤为: 初设参数 $\Rightarrow$ 验算剪应力 $\Leftrightarrow$ 改变参数, 直到滑移面处剪应力小于锚杆抗剪强度。

参考文献:

- [1] 左双英, 付丽, 李豪逸, 等. 基于剪切滑移线理论的软岩连拱隧道喷锚支护数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(4): 44-51.
ZUO Shuangying, FU Li, LI Haoyi, et al. Numerical simulation of shotcrete-anchor support for duplex arch tunnel in soft rock based on shear-slip line theory[J]. Hazard control in tunnelling and underground engineering, 2020, 2(4): 44-51 (in Chinese).
- [2] BOBRYAKOV A P, REVUZHENKO A F. Experimental simulation of spiral slip lines on granular materials[J]. Journal of mining science, 2009, 45(2): 99-104.
- [3] GAO S M, CHEN J P, ZUO C Q, et al. Structure optimization for the support system in soft rock tunnel based on numerical analysis

- and field monitoring[J]. Geotechnical and geological engineering, 2016, 34(4):1089-1099.
- [4] 陈红军,刘新荣,杜立兵,等.浅埋层状岩体偏压隧道滑移破坏机理及判定方法[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):1733-1741.
- CHEN Hongjun, LIU Xinrong, DU Libing, et al. Sliding failure mechanism and its criterion of unsymmetrical loading shallow buried tunnel in layered rock mass[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(6):1733-1741 (in Chinese).
- [5] LIU X L, SUN F Y, KONG F L, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of anchor and shotcrete support system under axial pull-out action[J]. Geotechnical and geological engineering, 2022, 40(1):383-393.
- [6] GONG C Y, HE X Y, LI Y W, et al. Long-term field corrosion monitoring in supporting structures of China Xiamen Xiangnan Subsea Tunnel[J]. Acta metallurgica Sinica (English letters), 2017, 30(4):399-408.
- [7] LIU W P, WAN S F, FU M F. Limit support pressure on tunnel face at different construction line slopes by slip line method[J]. Tunneling and underground space technology, 2020, 106:103619.
- [8] 肖明清,封坤,李策,等.复合地层盾构隧道围岩压力计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1836-1847.
- XIAO Mingqing, FENG Kun, LI Ce, et al. A method for calculating the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(9):1836-1847 (in Chinese).
- [9] 王永甫,王成,唐晓松.基于非关联流动法则的圆形隧洞滑移线解答[J].应用数学和力学,2013,34(12):1285-1290.
- WANG Yongfu, WANG Cheng, TANG Xiaosong. Slip line solution for circular tunnels based on the non-associated flow rule[J]. Applied mathematics and mechanics, 2013, 34(12):1285-1290 (in Chinese).
- [10] 郭小龙,谭忠盛,李磊,等.高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J].土木工程学报,2017,50(增刊2):38-44.
- GUO Xiaolong, TAN Zhongsheng, LI Lei, et al. Deformation and failure mechanism of layered soft rock tunnel under high stress[J]. China civil engineering journal, 2017, 50(S2):38-44 (in Chinese).
- [11] FREEMAN T J. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. Tunnels & tunnelling international, 1978, 10(5):37-40.
- [12] 王明恕.全长锚固锚杆机理的探讨[J].煤炭学报,1983(1):40-47.
- WANG Mingshu. Mechanism of full-column rock bolt[J]. Journal of China Coal Society, 1983(1):40-47 (in Chinese).
- [13] 姚显春,李宁,陈蕴生.隧洞中全长粘结式锚杆的受力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13):2272-2276.
- YAO Xianchun, LI Ning, CHEN Yunsheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(13):2272-2276 (in Chinese).
- [14] 朱永全,宋玉香.隧道工程[M].北京:中国铁道出版社,2020.
- [15] 刘强.襄渝铁路二线挤压性炭质片岩隧道大变形成因与控制技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [16] 谢云鹏,陈秋南,汪祥国,等.基于改进山本法的浅埋隧道支护结构受力特性研究[J].应用力学学报,2023,40(5):1096-1105.
- XIE Yunpeng, CHEN Qiunan, WANG Xiangguo, et al. Study on mechanical characteristics of improved shallow tunnel supporting structure based on Yamamoto method[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1096-1105 (in Chinese).
- [17] 陈子全,何川,吴迪,等.高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J].西南交通大学学报,2018,53(6):1237-1244.
- CHEN Ziquan, HE Chuan, WU Di, et al. Study of large deformation classification criterion for layered soft rock tunnels under high geostress[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6):1237-1244 (in Chinese).
- [18] 钟友江,刘世杰,吴建和.双层初期支护在云屯堡隧道高地应力软岩洞段中的应用[J].隧道建设:中英文,2020,40(1):90-98.
- ZHONG Youjiang, LIU Shijie, WU Jianhe. Application of double primary support to high geostress soft rock section of Yuntunbao tunnel[J]. Tunnel construction, 2020, 40(1):90-98 (in Chinese).
- [19] 郭尚坤.深埋老黄土隧道大变形机理及对策研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [20] 谭显坤,左昌群,刘代国,等.软岩大变形隧道锚喷支护的力学效应及失效原因分析[J].科学技术与工程,2015,35(8):228-232.
- TAN Xiankun, ZUO Changqun, LIU Daiguo, et al. Analysis of bolt and shotcrete support in soft large-deformation tunnel[J]. Science technology and engineering, 2015, 35(8):228-232 (in Chinese).
- [21] 国家铁路局.铁路隧道设计规范:TB 10003—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [23] 刘才华,李育宗.考虑横向抗剪效应的节理岩体全长黏结型锚杆锚固机制研究及进展[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1856-1872.
- LIU Caihua, LI Yuzong. Research progress in bolting mechanism and theories of fully grouted bolts in jointed rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2018, 37(8):1856-1872 (in Chinese).
- [24] AZUAR J J. Stabilization of fissured rock masses by grouted steel bars[J]. Transport and Road Research Laboratory, 1977(73):56-83.
- [25] AZUAR M M, REUILLE D, HABIB, et al. Rock mass reinforcement by passive rebars[C]//4th ISRM Congress. Richardson, Texas, USA:OnePetro, 1979: ISRM-4CONGRESS-1979-003.

(编辑 张璐)