

剪切荷载作用下锚杆抗剪作用理论分析\*

陈文强<sup>1</sup>,赵致艺<sup>2</sup>,赵宇飞<sup>2</sup>

(1. 天津理工大学 管理学院,天津 300384;2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所,北京 1000482)

**摘 要:**为了分析剪切过程锚杆轴力和横向剪切力相对结构面换算的抗剪贡献影响程度,在经典梁理论的基础上,推导了锚杆抗剪力计算公式,并采用加锚结构面直剪试验验证了计算公式的可靠性。在此基础上,通过正交试验设计方法研究影响因素对锚杆轴力、横向剪切力相对结构面抗剪贡献的敏感程度。结果表明:锚杆抗剪理论计算与室内试验结果吻合较好;锚杆倾角是影响锚杆轴力相对结构面换算抗剪力的主要因素;锚杆需要一定变形才能调动起直径对轴力抗剪效应的影响;锚杆倾角是影响横向剪切力相对结构面换算抗剪力的最主要因素,围岩强度次之,剪切后期结构面剪胀系数的影响程度又大于围岩强度;直径对锚杆横向剪切力相对结构面换算抗剪力的影响程度最小。

**关键词:**锚杆;抗剪力;轴向力;横向剪切力;影响程度

中图分类号:TU45      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0650-07

Theoretical Analysis on Shear Resistance of Bolt under Shear Loading

Chen Wenqiang<sup>1</sup>,Zhao Zhiyi<sup>2</sup>,Zhao Yufei<sup>2</sup>

(1. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, P.R. China; 2. Geotechnical Engineering Department, China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R. China)

**Abstract:** According to the shear resistance of the bolted joint contributed by the axial force and transverse shear force, based on the classical beam theory, the formulas of shear strength of bolted joint are deduced. The reliability of theoretical solutions is verified by direct shear test with bolted structure. Influence extent and law of various factors on the shear resistance is performed based on the orthogonal design. The results show that the theoretical results is in good agreement with the test results; The bolt inclination is a major factor on the shear resistance of joint contributed by the axial force; A certain deformations of bolt can arose the effect of bolt diameter on shear resistance of joint contributed by the axial force; Among the factors on shear resistance of joint contributed by the transverse shear force, the bolt inclination first, and rock mass strength second, however, in the late period of shearing, the effect of dilatancy coefficient is larger than the effect of rock mass strength; The bolt diameter has least influence on the shear resistance of joint contributed by the transverse shear force.

**Keywords:** bolt; shear resistance; axial force; transverse shear force; influence extent

0 引言

锚杆可以有效制止岩体结构面的剪切滑动,因

而被广泛应用于隧道、高陡边坡以及大坝墩基等<sup>[1-3]</sup>。现阶段锚杆加固机理已经有了丰富的研究成果,一致认为锚杆直径、安装角、预应力大小、

\* 收稿日期:2017-11-26(修改稿)  
作者简介:陈文强(1986-),男,河北邯郸人,博士,讲师,主要从事岩土工程、工程管理等领域的教学与科研工作。  
E-mail:wenqiang205@163.com  
基金项目:国家自然科学基金(51409283)

结构面粗糙程度以及围岩类型对锚杆抗剪强度具有明显的影响效应<sup>[4-10]</sup>。在锚杆抗剪理论方面,葛修润等<sup>[11]</sup>估算了加锚结构面抗剪强度计算公式。Pellet 等<sup>[12]</sup>基于最小势能原理的变分法,建立了锚杆抗剪理论计算公式。陈文强等<sup>[13]</sup>在 Pellet 研究基础上考虑结构面剪胀性,通过理论计算分析了锚杆的轴向和横向抗剪作用。Jalalifar 等<sup>[14]</sup>考虑锚杆拉剪荷载作用,建立了锚固力学分析模型。

研究表明,剪切过程中锚杆对结构面的抗剪作用可归纳为两个方面<sup>[11-12]</sup>:①锚杆轴向力相对结构面换算的抗剪性能;②锚杆横向剪切力相对结构面换算的抗剪性能。现阶段影响因素对锚杆轴向和横向抗剪作用规律研究方面已开展了大量的工作,而关于各影响因素对锚杆轴力和横向剪切力相对结构面的抗剪贡献影响程度的研究还有待深化。

本文利用经典梁理论,考虑围岩的非线性作用及结构面的剪胀效应,推导了锚杆抗剪力计算公式。在室内模型试验的基础上,验证该计算公式的可靠性。依据正交试验设计方法,从锚杆轴力和横向剪切力的角度出发,分析整个剪切全过程中各影响因素的抗剪影响程度大小。

1 锚杆抗剪计算公式

1.1 锚杆弹性阶段剪切变形分析

结构面的剪切位移  $U_o$ 、结构面的剪胀产生的法向位移  $U_d$ ,分别引起锚杆的轴向变形  $u_o$ 和横向变形  $v_o$ ,并使锚杆产生相应的轴向力  $N_o$ 和横向剪切力  $Q_o$ ,如图 1 所示。由图 1 中  $U_o$ 、 $U_d$ 与  $u_o$ 和  $v_o$ 之间的几何关系,可以推导出锚杆倾角为任意角度时的  $u_o$ 和  $v_o$ 。

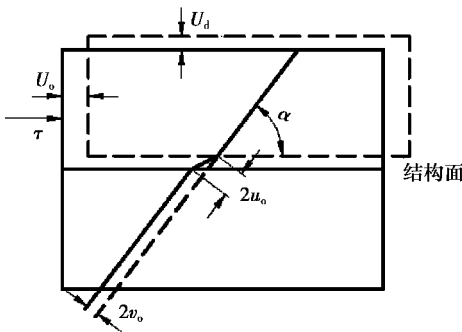


图 1 锚杆剪切变形示意图

Fig. 1 Diagram of bolt shear deformation

$$u_o = 0.5(U_o \cos \alpha + U_d \sin \alpha) \quad (1)$$

$$v_o = 0.5(U_o \sin \alpha - U_d \cos \alpha) \quad (2)$$

$$v_o/u_o = \tan \alpha \quad (3)$$

式中: $U_d$ 为结构面法向位移,其中  $U_d = U_o l$ ,  $l$  为结构面剪胀系数; $\alpha$  为锚杆安装角(如图 2)。

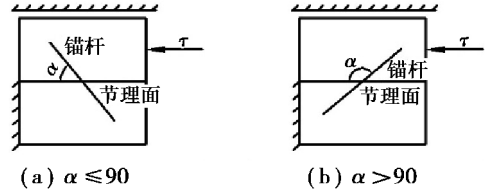


图 2 锚杆安装角示意图

Fig. 2 Diagram of bolt inclination

锚杆的横向变形将使受压一侧的岩体产生沿锚杆方向非均匀分布的反作用力,而且随着横向剪切位移的增大而逐渐增大,其力学模型如图 3(a)所示。为了建立锚杆轴力与横向剪切力理论关系,基于经典梁理论,对图 3(a)中锚杆  $OA$  段作力学简化,假设  $A$  点处锚杆弯矩最大点,且该点转角、挠度均为 0,如图 3(b)所示。图 3(b)中  $O$  点为锚杆与结构面交点,  $q_x$  为沿锚杆长度分布的受压侧反力集度,  $q_o$  为结构面位置处的锚杆反力集度值。假设  $q(x)$  为抛物线分布函数,见式(4)。对式(4)进行积分,分别得到剪力  $Q(x)$ 、弯矩  $M(x)$ ,见式(5)和式(6)。

$$q(x) = \frac{q_o}{L^2} x^2 \quad (4)$$

$$Q(x) = \frac{q_o}{3L^2} x^3 \quad (5)$$

$$M(x) = Q_o(L - x) - \frac{3q_o L^4 + q_o x^4 - 4q_o L^3 x}{12L^2} \quad (6)$$

式中: $L$  为锚杆潜在塑性铰距结构面的距离,  $L = \sqrt{\sigma_e \pi D^4 / 300 \sigma_e v_o}$ <sup>[14]</sup>,  $L$  随  $v_o$  变化,当  $v_o = 0$  时,结构面距锚杆潜在塑性铰的距离  $L$  无穷大,随着  $v_o$  增大,  $L$  逐渐减小;  $\sigma_e$  为锚杆屈服应力;  $\sigma_e$  为锚杆围岩强度;  $Q_o$  为结构面位置处锚杆横向剪切力,  $Q_o = Q(L) = q_o L / 3$ ; 当  $x = 0$  时,锚杆弯矩值最大,  $M_A = M(0) = Q_o L - q_o L^2 / 4 = q_o L^2 / 12$ 。

由式(6)可推导结构面一侧锚杆转角及挠度分布函数,见式(7)和式(8):

$$\varphi(x) = -\frac{Q_o(L-x)^2}{2EI} - \frac{q_o x^5 - 10q_o L^3 x^2 + 15q_o L^4 x}{60EI L^2} + \frac{Q_o L^2}{2EI} \quad (7)$$

它们之间的关系可以得到结构面位置处的锚杆轴力  $N_o$ 、横向剪切力  $Q_o$  和反力集度值  $q_o$ 。具体计算公式见式(12)~(14)：

$$N_o = \frac{EA_b u_o}{L} - \frac{LA_b}{4W} Q_o \tag{12}$$

$$Q_o = \frac{1260E^2 I^2 GA_b k - 60EIG^2 A_b^2 L^2}{(7GA_b L^2 + 45EIk)(21EIkL - GA_b L^3)} v_o \tag{13}$$

$$q_o = \frac{3780E^2 I^2 GA_b k - 180EIG^2 A_b^2 L^2}{(7GA_b L^2 + 45EIk)(21EIkL^2 - GA_b L^4)} v_o \tag{14}$$

在锚杆的变形过程中,会产生拉剪屈服和弯曲屈服两种形式:①屈服点位于结构面位置处,由锚杆上的轴力和横向剪切力联合作用导致;②屈服点位于锚杆的最大弯矩处,由弯矩导致的屈服。基于 Mises 屈服准则建立了拉剪屈服计算公式,见式(15)。弯曲屈服可由梁正应力计算公式计算节理面锚杆最大正应力,见式(16)。

$$\sigma_e = \sqrt{\left(\frac{N_{oe}}{A_b}\right)^2 + 3\left(\frac{Q_{oe}}{A_b}\right)^2} \tag{15}$$

$$\sigma_e = \frac{M_A}{W} + \frac{N_{oe}}{A_b} \tag{16}$$

式中: $N_{oe}$ 为屈服时结构面位置处锚杆轴力; $Q_{oe}$ 为屈服时结构面位置处锚杆横向剪切力。

### 1.2 锚杆塑性阶段剪切变形分析

锚杆剪切屈服后, $q_x$ 也迅速达到极限值  $p_u$ ,如图4所示。锚杆  $OA$  段在后续的变形阶段,具有类似桁架杆件的力学性质,即  $Q_o$  不变,而  $N_o$  逐渐增加,致使锚杆的伸长率逐渐增加,直至锚杆拉伸破坏,满足式(17)<sup>[6]</sup>。

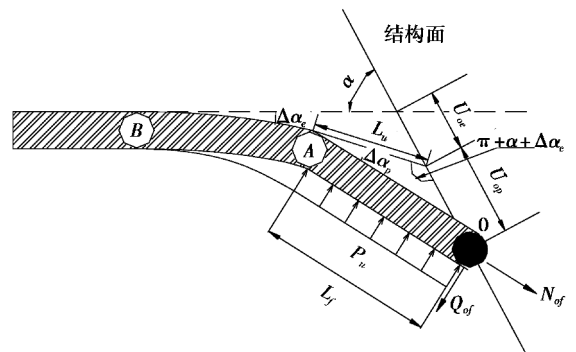
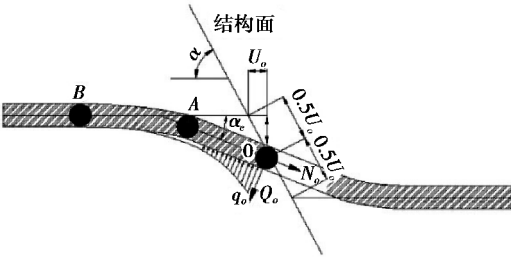
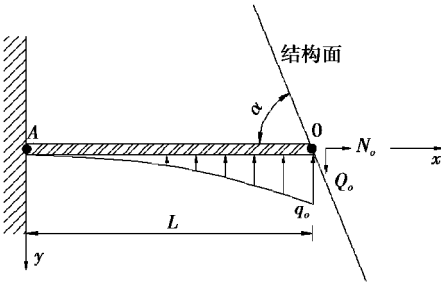


图 4 锚杆在塑性阶段的剪切变形

Fig. 4 Shear deformation of bolt under plastic conditions



(a) 锚杆变形分析



(b) 锚杆受力分析

图 3 锚杆在弹性阶段的剪切变形

Fig. 3 Shear deformation of bolt under elastic conditions

$$v(x) = \frac{Q_o (L-x)^3}{6EI} - \frac{q_o x^6 - 20q_o L^3 x^3 + 45q_o L^4 x^2}{360EIL^2} + \frac{Q_o L^2}{2EI} x - \frac{Q_o L^3}{6EI} \tag{8}$$

式中: $j(x)$ 、 $v(x)$ 为结构面一侧锚杆转角和挠度方程,当  $x=0$  时, $j(x)$  和  $v(x)$  都为 0,当  $x=L$  时, $j(L)$ 、 $v(L)$  表示结构面位置处锚杆转角及横向剪切位移; $I$  为锚杆截面惯性矩, $I=pD^4/64$ ;  $E$  为锚杆弹性模量。

结构面位置处锚杆轴向位移  $u_o$  为锚杆轴向力  $N_o$  和锚杆最大弯矩  $M_A$  产生的轴向变形,因此可推导出结构面位置处锚杆轴向位移  $u_o$ ,见式(9)。考虑锚杆横向剪切位移受剪切变形的影响<sup>[15]</sup>,由式(7)和式(8)得到结构面位置处锚杆横向剪切位移  $v_o$  及转角  $j_o$ ,见式(10)和式(11)。

$$u_o = \frac{L}{EA_b} N_o + \frac{M_A L}{EW} = \frac{L}{EA_b} N_o + \frac{L^2}{4EW} Q_o \tag{9}$$

$$v_o = \left(\frac{L^3}{3EI} + \frac{kL}{GA_b}\right) Q_o - \left(\frac{26L^4}{360EI} + \frac{kL^2}{12GA_b}\right) q_o \tag{10}$$

$$\varphi_o = \frac{L^2}{2EI} Q_o - \frac{L^3}{10EI} q_o \tag{11}$$

式中: $W=pD^3/32$ ;  $A_b=pD^2/4$ ;  $k=4/3$ 。

联合式(10)、式(11)及  $Q_o=Q(L)=q_o L/3$ ,由

$$Q_{of} = \frac{\pi D^2}{8} \sigma_{ec} \sqrt{1 - 16 \left( \frac{N_{of}}{\pi D^2 \sigma_{ec}} \right)^2} \quad (17)$$

式中: $N_{of}$ 为破坏时的锚杆轴力; $\sigma_{ec}$ 为破坏时的锚杆应力。

在图 4 中,利用正弦定理,有

$$\frac{\Delta U_{op}}{\sin \Delta \alpha_p} = \frac{L_u}{\sin(\alpha - \Delta \alpha_u - \Delta \alpha_p)} = \frac{L_f}{\sin(\pi - \alpha + \Delta \alpha_u)} \quad (18)$$

式中: $\Delta U_{op}$ 、 $L_u$ 、 $\Delta \alpha_u$ 分别为塑性阶段结构面剪切位移增量、结构面距塑性铰距离及锚杆倾角变化量, $\Delta \alpha_u$ 可忽略; $L_f$ 、 $\Delta \alpha_p$ 为剪切破坏时,结构面距塑性铰距离及锚杆倾角变化量。

$\Delta \alpha_p$ 、 $\Delta U_{op}$ 可由式(18)推导,分别见式(19)和式(20)。

$$\Delta \alpha_p = \cos^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha \left( 1 - \left( \frac{L_u}{L_f} \right)^2 \sin^2 \alpha \right)} \pm \frac{L_u}{L_f} \sin^2 \alpha}{1} \right] \quad (19)$$

$$\Delta U_{op} = \frac{L_u \sin \Delta \alpha_p}{\sin(\alpha - \Delta \alpha_p)} \quad (20)$$

1.3 锚杆抗剪力计算

锚杆抗剪力由两部分组成,分别是由锚杆轴力和横向剪切力相对于结构面换算得到,见式(21)、式(22)。式(23)即为锚杆抗剪力总表达式。

$$T_{bt} = N_0 \{ \sin \alpha \tan \varphi_b + \cos \alpha \} \quad (21)$$

$$T_{bd} = Q_0 \{ \sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi_b \} \quad (22)$$

$$T_b = N_0 \{ \sin \alpha \tan \varphi_b + \cos \alpha \} + Q_0 \{ \sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi_b \} \quad (23)$$

式中: $\varphi_b$ 为结构面基本摩擦角。

式(21)、式(22)及式(23)中,锚杆倾角 $\alpha$ 在塑性阶段应作相应的修正为:

$$\alpha_p = \alpha - \Delta \alpha_p \quad (24)$$

在计算锚杆的轴向力、横向剪切力及锚杆抗剪力时,采用 EXCEL 规划法进行求解,可以得到锚杆抗剪力随剪切位移变化的全过程曲线,如图 5 所示。

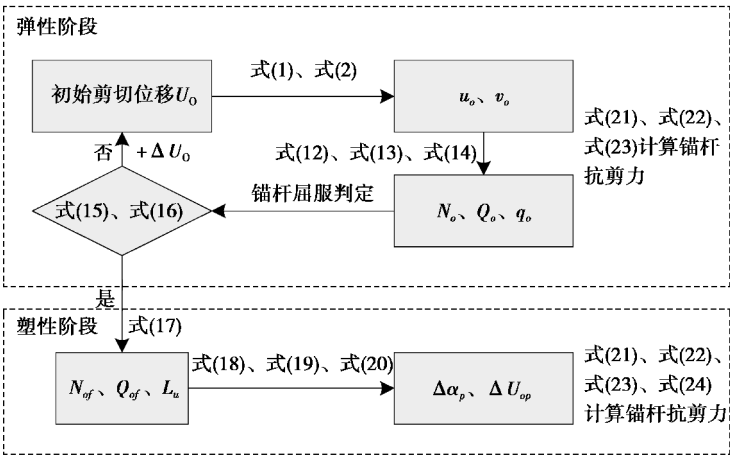


图 5 锚杆抗剪力计算过程

Fig. 5 Calculation process of shear resistance of bolt

2 锚杆抗剪分析

2.1 锚杆抗剪计算公式验证

采用加锚结构面直剪试验,验证锚杆力学模型的可靠性。试验模型采用 300 mm×300 mm×150 mm(长×宽×高)的试验模具,用直径 8 mm、长度为 260 mm 的铝合金棒作为试验锚杆。制备结构面光滑的混凝土试件,在试件中心预留锚孔,并放入锚

杆,在孔内灌入水泥砂浆,始终保证锚杆倾角为 90°。最后用夹具将锚杆两端锁定,制作完成的试验模型如图 6 所示。将试验模型放入直剪仪内,施加法向应力  $s_0$  为 0.7 MPa,剪切试验速率为 0.5 mm/min。基于锚杆抗剪力随剪切位移曲线弹性阶段性质及屈服点位置特点<sup>[10-11]</sup>,将剪切位移曲线弹性阶段拐点处所对应的剪切位移定义为试验锚杆屈服剪切位移。锚杆和试件的相关力学计算参数见表 1。



图 6 混凝土试件

Fig. 6 The concrete specimen

表 1 锚杆和混凝土试件力学参数

Table 1 Mechanical parameters of bolt and concrete specimen

参数	$E/\text{MPa}$	$G/\text{MPa}$	$s_e/\text{MPa}$	$s_c/\text{MPa}$	$c_j/\text{MPa}$	$f_b/(\text{°})$
数值	68 000	23 000	10	370	0	30

由结构面法向位移  $U_d$  与剪胀系数  $\lambda$  关系  $U_d = U_0 l$ , 结构面剪胀系数 1 根据锚杆屈服时结构面法向位移与剪切位移得到其值为 0.4, 并由 2.3 节中的抗剪强度计算程序, 可以得到锚杆抗剪力随剪切位移的变化关系曲线, 如图 7 所示。将计算结果与试验结果进行比较, 如表 2 所示。由理论计算结果发现, 锚杆屈服模式为弯曲屈服, 与试验结果比较吻合, 锚杆屈服后产生对称于节理面两个塑性铰, 如图 8 所示。

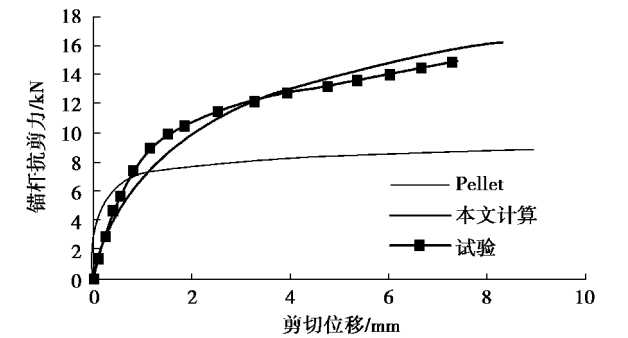


图 7 试验结果与理论计算结果比较

Fig. 7 Comparison of experiment and theoretical calculation results



图 8 锚杆屈服剪切变形图

Fig. 8 Shear deformation of bolt

从图 7 可以看出, 本文计算结果与试验结果比较吻合, 而 Pellet 理论计算结果与试验存在较大误差。

表 2 试验结果与计算结果比较

Table 2 Comparison of experiment and theoretical calculation results

类别	试验结果	本文计算	Pellet 计算	相对误差/%	
				本文与试验	Pellet 与试验
屈服抗剪力/kN	4.53	4.23	7.01	6.62	54.75
破坏抗剪力/kN	14.93	16.15	8.84	8.17	40.79
屈服剪切位移/mm	0.42	0.52	0.77	23.81	84.33
破坏剪切位移/mm	7.33	8.34	8.96	13.78	22.24

由表 2 发现, 本文计算结果与试验结果相比, 屈服抗剪力相对误差最小, 为 6.62%, 屈服剪切位移的相对误差最大, 为 23.81%; 而 Pellet 计算结果与试验结果相比, 破坏剪切位移相对误差最小, 为 22.24%, 屈服剪切位移相对误差最大, 为 84.33%。

可见, 本文抗剪计算误差远小于 Pellet 计算结果。这主要是由于 Pellet 忽略了围岩的非线性作用及结构面的剪胀效应, 降低了锚杆的轴力和横向剪切力发挥的抗剪效应, 导致其与试验结果之间产生了较大的偏差。由此, 锚杆的抗剪计算中必须要考虑围岩非线性作用以及结构面的剪胀效应, 本文提出的计算公式可行。

2.2 影响因素对锚杆抗剪敏感性分析

在结构面剪切过程中, 由于锚杆的轴向和横向变形不同, 导致锚杆轴力和横向剪切力相对结构面换算的抗剪力不同, 并且在剪切过程中这种分担规律会有所变化<sup>[13]</sup>。在已有的研究成果中发现<sup>[4-11]</sup>, 结构面剪胀系数、围岩强度、锚杆倾角、直径等均会影响锚杆对结构面的抗剪作用。因此, 有必要就各因素对锚杆抗剪力的影响规律进行详细的分析。本文采用正交试验, 对结构面剪胀系数、围岩强度、锚杆倾角、直径取 3 个水平, 如表 3 所示。



表3 正交试验设计表  
Table 3 Design of orthogonal test

试验号	$\alpha/(^{\circ})$	$s_c/\text{MPa}$	$l$	$D$
1	30	5	0	6
2	30	7	0.4	8
3	30	9	0.8	10
4	60	5	0.4	10
5	60	7	0.8	6
6	60	9	0	8
7	90	5	0.8	8
8	90	7	0	10
9	90	9	0.4	6

假设  $E_b=68\text{ GPa}$ ,  $s_{el}=370\text{ MPa}$ ,  $s_{ec}=370\text{ MPa}$ ,  $e_f=2\%$ ,  $f_b=30^{\circ}$ ,  $c=0\text{ MPa}$ , 运用 1.3 节中的锚杆抗剪理论计算模型来计算锚杆轴力相对结构面换算的抗剪力。图 9 中可看出在不同剪切位移下, 各影响因素对锚杆轴力相对结构面换算的抗剪力的影响程度。由图 9 可知:

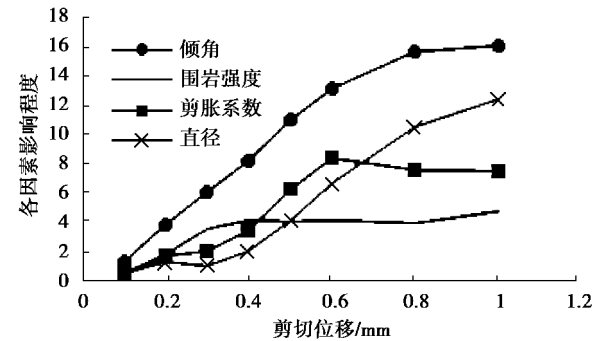


图9 锚杆轴力相对结构面换算的抗剪力随各因素影响程度  
Fig. 9 Influence extent of various factors on the shear resistance of joint contributed by the axial force

(1)在不同的剪切位移下,锚杆倾角是主要影响因素,其影响程度要远大于其他因素,所以锚杆轴力发挥的抗剪能力与锚杆倾角密切相关。但剪切后期锚杆倾角影响程度不再发生大幅变化,主要是由于锚杆轴向变形增大,岩块开始出现沿锚杆“导轨”滑动的现象<sup>[16]</sup>,削弱了锚杆倾角的影响。

(2)剪切位移小于 0.3 mm 时,锚杆直径的影响程度最小,但随后锚杆直径的影响程度呈现快速增长,并大于剪胀系数、围岩强度的影响程度,最后逐渐接近锚杆倾角的影响程度。这表明锚杆需要一定变形后才能调动起直径的抗剪效应。因此,在

剪切后期,结构面位置处增大锚杆直径可以更有效调动锚杆轴力发挥的抗剪效应,提高结构面的抗剪强度。

(3)结构面剪胀系数对锚杆轴力抗剪效应的影响程度也随剪切位移增大而增大,但剪切后期结构面剪胀系数的影响程度降低,究其原因,是因为随着剪切位移的增大,结构面经过较长距离磨损,将变得更为光滑,剪胀效应减小。

图 10 中可看出在不同剪切位移下,各影响因素对锚杆横向剪切力相对结构面换算的抗剪力的影响程度。由图 10 可知:

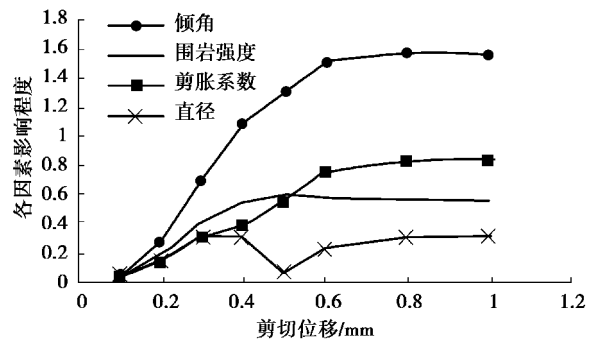


图10 锚杆横向剪切力相对结构面换算的抗剪力随各因素影响程度

Fig. 10 Influence extent of various factors on the shear resistance of joint contributed by the transverse shear force

(1)锚杆倾角是影响横向剪切力相对结构面换算抗剪力的最主要因素,围岩强度次之,当剪切位移大于 0.5 mm 时,剪胀系数的影响程度又大于围岩强度。这主要是由于剪切初期,锚杆作用范围较小,仅能调动锚杆周围小范围的岩体,而此时围岩强度的大小对锚杆横向剪切变形有较大影响,随着剪切位移增大,又会调动大范围岩体剪胀效应,因此剪切后期结构面剪胀系数的影响程度大于围岩强度。

(2)锚杆直径对锚杆横向剪切力相对结构面换算抗剪力的影响程度最小,并且从剪切初期到后期,锚杆直径的影响程度基本保持不变,由此判断通过增加锚杆直径不会改善锚杆横向剪切力提供的抗剪效应。

(3)在剪切后期,各因素对锚杆横向剪切力相对结构面换算抗剪力的影响程度基本保持不变,这是由于锚杆较大的横向变形,发生不同程度的近“S”形状,产生锚杆横向导轨效应,由此削弱了锚杆横向剪切变形。

### 3 结论

(1)在锚杆抗剪力计算中,考虑了锚杆受压侧岩体的非线性作用和结构面的剪胀效应,发现理论计算结果与室内试验结果的吻合程度较好。

(2)锚杆倾角是影响锚杆轴力相对结构面换算抗剪力的主要因素,在剪切后期围岩沿锚杆“导轨”滑动,削弱了锚杆倾角的影响程度。

(3)锚杆需要一定变形才能调动起直径对轴力抗剪效应的影响,在剪切后期结构面位置处增大锚杆直径可以更有效调动锚杆轴力发挥的抗剪效应。

(4)锚杆倾角是影响横向剪切力相对结构面换算抗剪力的最主要因素,围岩强度次之,剪切位移增大调动大范围岩体剪胀效应,剪切后期结构面剪胀系数的影响程度又大于围岩强度。

(5)直径对锚杆横向剪切力相对结构面换算抗剪力的影响程度最小,并且剪切初期到后期,锚杆直径的影响程度基本保持不变。

#### 参考文献(References)

- [1] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 327-631. (Zhang Lewen, Wang Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 327-631. (in Chinese))
- [2] 唐秋元, 赵尚毅, 郑颖人, 等. 岩质边坡锚杆设计计算方法分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1276-1280. (Tang Qiuyuan, Zhao Shangyi, Zheng Yingren, et al. Analysis of design and calculation method for the anchors in rock slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1276-1280. (in Chinese))
- [3] Bjurström S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted un-tensioned bolts[A]//Proceedings of the 3rd International Congress on Rock Mechanics [C]. Denver, 1974: 1194-1199.
- [4] Haas C J. Shear resistance of rock bolts [J]. AIME Transactions, 1976, 260(1): 32-41.
- [5] Dight P M. Improvements to the stability of rock walls in open pit mines [D]. Melbourne: Monash University, 1983.
- [6] Yoshinaka R, Sakaguchi S, Shimizu T, et al. Experimental study on the rock bolt reinforcement in discontinuous rocks[J]. Electronics & Communications in Japan, 1987, 133(113): 117-127.

- [7] Spang K, Egger P. Action of fully-grouted bolt in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990, 23(3): 201-229.
- [8] Ferrero A M. The shear strength of reinforced rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 590-600.
- [9] 张伟, 刘泉声. 节理岩体锚杆的综合变形分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1067-1074. (Zhang Wei, Liu Quansheng. Synthetical deformation analysis of anchor bolt in jointed rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1067-1074. (in Chinese))
- [10] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2231-2240. (Zhang Wei, Liu Quansheng. Analysis of deformation characteristics of prestressed anchor bolt based on shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2231-2240. (in Chinese))
- [11] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 8-19. (Ge Xiurun, Liu Jianwu. Study of the shear resistance behaviour of bolted rock joints [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8-19. (in Chinese))
- [12] Pellet F, Egger P. Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996, 29(2): 73-97.
- [13] 陈文强, 贾志欣, 赵宇飞, 等. 剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 143-148. (Chen Wenqiang, Jia Zhixin, Zhao Yufei, et al. Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 143-148. (in Chinese))
- [14] Jalalifar H, Aziz N. Analytical behaviour of bolt-joint intersection under lateral loading conditions[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2010, 43(1): 89-94.
- [15] 李华, 曾庆元. 关于考虑剪切变形的影响计算梁挠度方法的综述[J]. 工程力学, 1999(增): 141-145. (Li Hua, Zeng Qingyuan. A review of the beam deflection method considering shear deformation effects [J]. Engineering Mechanics, 1999(Supp.): 141-145. (in Chinese))
- [16] 宋宏伟. 非连续岩体中锚杆横向作用新研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(2): 161-164. (Song Hongwei. New study on transverse effect of rock bolts in discontinuous rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(2): 161-164. (in Chinese))