

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.378>



顺层岩质边坡锚杆拉剪作用力学性能

张爱社¹, 祝介旺¹, 高翠兰², 李文乐¹, 侯海波¹, 曹照法¹

1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东济南 250101

2. 山东建筑大学交通工程学院, 山东济南 250101

摘要: 锚杆能够显著增强顺层岩质边坡的稳定性。基于顺层边坡结构效应,应用锚杆加固顺层边坡的力学模型,根据结构力学理论和变形协调关系,建立拉剪作用下全长粘结型锚杆加固顺层边坡抗剪计算的理论分析方法。与相关试验数据进行了比较验证,结果表明顺层边坡锚固抗力模型计算结果与试验结果比较一致,验证了理论模型的合理性。讨论了锚杆倾角、锚杆直径、灌浆体强度、结构面内摩擦角、剪胀角等对加锚顺层岩体抗剪性能的影响。分析表明:锚杆锚固抗力模型能够较好地反映锚杆轴力及横向剪切力对顺层岩质边坡的抗剪作用。锚杆倾角越大,锚杆总的抗力呈减小趋势,而锚杆抗力随剪胀角增大而增加;当锚杆倾角等于内摩擦角时,锚杆抗力达到最大;锚杆抗力随锚杆直径增加而增大;当锚杆直径不变时,锚杆抗力随灌浆体抗压强度增大而有所减小。

关键词: 顺层边坡;全长粘结型锚杆;锚杆锚固;拉剪作用;抗剪承载力;岩土工程。

中图分类号: TU457;P642

文章编号: 1000-2383(2022)12-4574-09

收稿日期:2022-06-25

Mechanical Analysis of Rock Bolts under Action of Tension and Shearing in Bedding Rock Slopes

Zhang Aishe¹, Zhu Jiewang¹, Gao Cuilan², Li Wenle¹, Hou Haibo¹, Cao Zhaofa¹

1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

2. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: Bolting is one of the important methods to harness the bedding rock slopes. The stability of the rock can be strengthened by rock bolts. The mechanical model of bolted bedding rock slope is employed to analyse the behavior of the rock bolt. The force method approach and the deformation compatibility principles are used to model the contribution of the axial and shear bolt forces at the intersection between the bolt and the joint plane. The theoretical analyses of the shearing resistance for the fully grouted rock bolts in the bedding rock slope are evaluated in the action of axial and shear loads. Comparisons and validations were carried out between the shearing resistance mechanical model predictions and the experimental data. It is shown that the data of the both methods have a good agreement. The effects of bolt inclination, the length of shearing deformation, bolt diameter, the grout compressive strength, and the internal friction angle of the joint plane on the shear strength of the bolted bedding rocks are investigated in detail. The results show that the bolt shearing resistance model expresses the contribution of the axial force and shearing force of the bolts to the shear strength of the bedding rock slopes. The total resistance is reduced with the larger of the bolt inclination. With increasing of the dilation angle, the rock bolt resisting force increases. When the inclination of rock bolt equals to the friction angle, the bolt contribution to resist the rock movement is the maximum value. The greater the diameter of the bolts,

基金项目: 国家重点研发计划“强震区滑坡崩塌灾害防治技术方法研究”(No.2019YFC1509703)。

作者简介: 张爱社(1969—),男,博士,主要从事结构工程领域研究。ORCID:0000-0003-1071-531X。E-mail:asmith2011@163.com

引用格式: 张爱社,祝介旺,高翠兰,李文乐,侯海波,曹照法,2022.顺层岩质边坡锚杆拉剪作用力学性能.地球科学,47(12):4574-4582.

Citation: Zhang Aishe, Zhu Jiewang, Gao Cuilan, Li Wenle, Hou Haibo, Cao Zhaofa, 2022. Mechanical Analysis of Rock Bolts under Action of Tension and Shearing in Bedding Rock Slopes. *Earth Science*, 47(12): 4574-4582.

the larger the bolt resistance. The resistance of the rock bolt will have a little reduction with the increasing of the grout compressive strength for a certain diameter of the bolt.

Key words: bedding rock slope; fully grouted bolt; bolt anchoring; action of axial and shear load; shearing capacity; geotechnical engineering.

0 引言

顺层结构岩质边坡是工程中常见的边坡类型,此类边坡常常发生崩塌、滑移拉裂、滑移弯曲等形式的破坏,从而导致地质灾害的发生.对于边坡坡度大于岩层倾角,岩层间又有软弱结构面的坡体,其状态将更加不稳定(程良奎等,2001).为加固此类边坡,工程实践表明,最适宜采用的治理方法是使用锚杆进行加固(张乐文和汪稔,2002).全长粘结型锚杆具有显著的加固效果和良好的施工可操作性,被广泛应用于多种岩土加固工程领域.为此,国内外很多专家学者开展了关于岩体锚杆锚固理论与锚固机制的大量研究,并取得了富有成效的研究成果,也是地质工程的研究热点问题.

我国现行的建筑边坡工程技术规范(中华人民共和国国家标准,2014)中对于全长粘结型锚杆,只考虑锚杆的轴力作用,这对于软弱岩体或土体是合理的,但忽略了顺层岩体对锚杆具有横向约束作用,在设计方法上是不合理的(Ferrero, 1995; Li, 2010; Li *et al.*, 2014; 刘才华和李育宗, 2018).全长粘结型锚杆对加锚岩体沿结构面变形或滑动趋势具有抵抗作用.大量工程实例和试验结果表明,顺层岩体锚杆与纯受拉作用的锚杆在地质效应、力学机制与破坏模式等方面存在明显差别.锚杆破坏时呈现明显的拉剪或拉弯变形形态(图 1).锚固体对于顺层岩体锚杆的承载力,不仅要考虑轴力作用,还要考虑锚杆横向抗剪能力,即锚杆的抗力是由锚杆轴力和锚杆横向抗剪作用共同提供,锚杆受到拉力和剪力的联合作用(Liu and Li, 2017; 刘才华和李育宗, 2018; 周洪福等, 2021; Ranjbaria *et al.*, 2022).但关于顺层岩体锚杆在横向剪切作用下的锚固机制研究还不充分,至今还没有建立较完善的锚固理论体系.

目前考虑锚杆横向剪切效应的顺层岩体锚固机理的研究主要集中在试验研究方面.顺层岩体锚固试验主要是基于工程锚杆的大尺寸剪切试验和室内模拟试验.Spang and Egger(1990)通过现场试

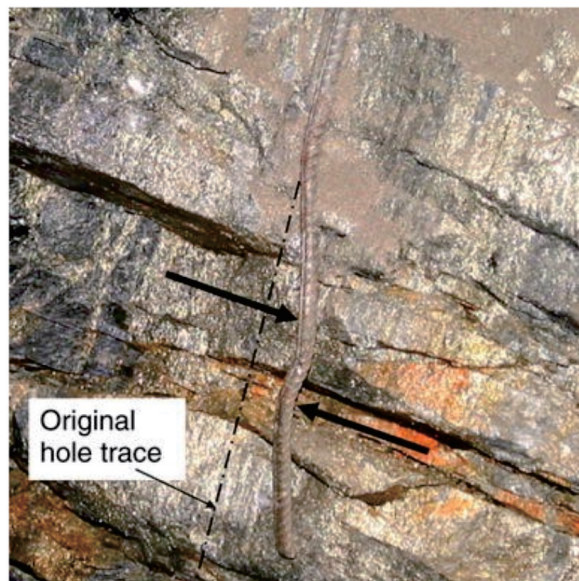


图 1 节理岩体锚杆拉剪破坏图

Fig.1 Photo of the rock bolt failure in jointed rock mass

验研究了结构岩体锚杆的受力作用形式,认为锚杆能够显著提高结构岩体的抗剪能力.Ferrero(1995)研究了岩石强度、锚杆类型以及锚固方式等对加锚岩体抗剪强度的影响.Grasselli(2005)开展 1:1 大比例尺锚固试验,研究锚杆安装角度对结构面抗剪性能的影响.Chen(2014)试验研究了加锚结构面岩体在拉力和剪力共同作用下,岩体的加固效果和锚杆的变形特征.王亮清等(2021)采用 Synfrac 软件和 3D 雕刻重构技术,通过试验研究了结构面粗糙度、法向应力等因素对锚固岩体剪切特性和锚杆抗剪作用的影响.国内外学者通过试验还研究了预应力锚杆对结构岩体锚固受力和破坏特征的影响(张治强等, 1999; Jalalifar *et al.*, 2006; 张伟和刘泉声, 2014; 唐朝晖等, 2021).此外,在结构岩体锚固理论方面也进行了一系列的研究.葛修润和刘建武(1988)研究了锚杆对结构面抗剪特性的影响,分析了锚杆的销钉效应,建立了加锚节理岩体抗剪强度公式.Jalalifar and Aziz(2010)分析了锚杆在剪切变形过程中所产生的塑性铰位置、两个塑性铰的距离及其影响因素.王中文和方建勤(2010)采用数值模

拟方法分析了锚固岩体结构面抗剪特性.王发玲等(2014)研究了全长黏结型锚杆加固顺层边坡的机制,并分析了结构面处锚杆轴力与剪力的关系.Ranjarnia *et al.*(2016)采用数值方法分析了预应力锚杆及布置形式在剪切变形段内的横向应力分布特征.李育宗和刘才华(2016)对锚杆在拉剪作用下的受力与变形演化规律,建立了锚杆在轴向拉力、横向剪力和岩体约束共同作用下的力学分析模型.由上述可知,通过对拉剪作用下节理岩体中锚杆的力学机制分析,可为工程应用提供一定借鉴,但由于影响因素众多,目前顺层岩体锚固理论还没有形成较统一的结论.

本文基于顺层边坡地质结构效应,应用加锚顺层边坡力学模型和结构力学原理,通过变形协调关系,建立拉剪作用下全长粘结型锚杆加固顺层边坡抗剪计算的理论分析方法.讨论了锚杆倾角、剪切变形段长度、锚杆直径、灌浆体强度、结构面内摩擦角等单因素和多因素对顺层岩体抗剪强度的影响.模型预测结果与试验数据吻合较好.

1 加锚顺层岩质边坡受力特性

不稳定岩体沿软弱结构弱面会发生错动或具有滑动趋势.锚杆的锚固作用能够显著提高顺层岩体的抗剪能力,改善岩体剪切变形特性.全长粘结式锚杆对顺层岩体抗剪性能的影响可归纳为以下3个方面(葛修润和刘建武,1988):

(1)结构面的相对位移将使得锚杆轴向拉力增加,而轴向拉力相对于边坡结构面的法向方向通过摩擦效应将为结构面提供抗剪承载力.

(2)锚杆轴力在平行于结构面方向的分量,将是顺层结构面抗剪能力的一个组成部分.

(3)粘结式锚杆可以借助于杆体本身的抗剪作用限制结构面的相对滑移,即锚杆对结构面抗剪性能的“销钉”作用.

顺层结构面用锚杆加固后,杆体依据自身的抗剪强度及刚度,能够有效控制软弱结构面的相对错动,从而提高了结构面的抗剪作用和粘聚力.为使锚杆与岩体之间有效传递荷载,可认为锚杆与围岩接触紧密.

2 顺层岩质边坡锚杆受力分析

2.1 锚杆横向变形段计算简图

采用全长粘结型锚杆加固顺层岩质边坡时,当剪切变形段发生相对位移时,锚杆受到周围岩体的挤压,在岩体结构面附近某一范围内锚杆发生轴向和弯曲变形,锚杆产生轴向力和横向剪切力.同时,结构面由于剪胀效应,在剪切荷载作用下,会同时产生剪切位移和法向位移.在横向剪切变形段范围内,锚杆在拉剪作用下所受轴力、应力及变形在结构面附近呈反对称分布(Grasselli, 2005;王发玲等, 2014;李育宗和刘才华, 2016),如图2所示.锚杆在岩体节理面附近范围内发生明显的弯曲变形,因此可以把全长粘结型锚杆在结构面附近的变形段视为两端固结梁模型.在剪切变形段内,锚杆受到岩体的挤压力分布非常复杂,影响因素很多,如锚杆强度、围岩体和灌浆体强度和刚度等,但为了简化计算,常对锚杆受到的挤压力假设为均匀分布(Ranjarnia *et al.*, 2016)或三角形分布(王发玲等, 2014),如图3所示,两者对分析锚杆的受力性质没有太大影响,本文选用挤压力呈三角形分布的形式(图3a).假设分布荷载最大值为 q_0 ,根据结构和荷载分布特点,取锚杆剪切变形段长度的1/2进行分析,可将图3a简化为图4所示的受弯构件计算简图.O点是锚杆与剪切面的交点,建立OXY坐标系,如图4所示.设O点截面所受轴力、剪力和弯矩分别为 X_1 、 X_2 和 X_3 .

2.2 锚杆结构分析

设锚杆O端的轴向位移、挠度和转角分别为 Δ_1 、 Δ_2 和 Δ_3 ,由结构力学法原理,可得如下平衡方程:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \Delta_{1q} = \Delta_1 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \Delta_{2q} = \Delta_2 \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3q} = \Delta_3 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\delta_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 表示沿 X_j 方向的单位力引起的沿 X_i 方向上的位移.考虑锚杆剪切变形的影响,采用结构力学方法可求得式(1)中的系数 δ_{ij} 以及由荷载引起的位移 Δ_{iq} ,如下式所示:

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{l}{EA} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l^3}{3EI} + \frac{kl}{GA} & \frac{l^2}{2EI} \\ 0 & \frac{l^2}{2EI} & \frac{l}{EA} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

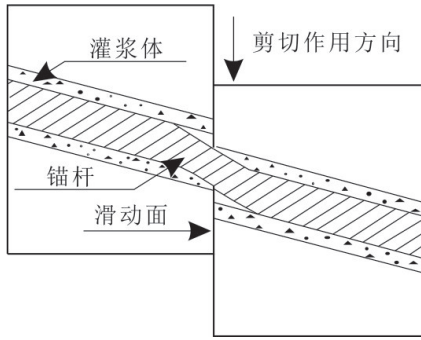


图 2 锚杆在岩体剪切作用下的反对称变形

Fig.2 Antisymmetric deflection for the rock bolt under shearing action

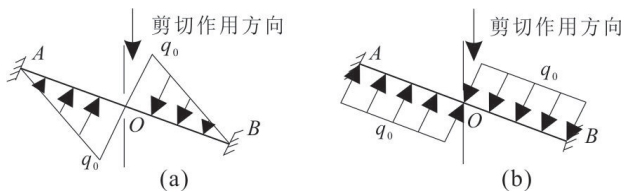


图 3 锚杆剪切变形段计算模型

Fig.3 Computing model of the bolt for the deflection length

a. 三角形分布荷载; b. 均匀分布荷载

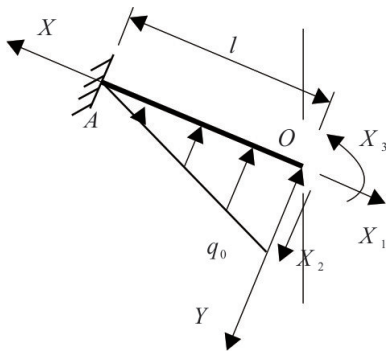


图 4 锚杆计算简图

Fig.4 Computing simplification of rock bolts

$$\Delta_{iq} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{kq_0 l^2}{3GA} + \frac{11q_0 l^4}{120} & \frac{q_0 l^3}{8EI} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

式(2)~(3)中: l 为锚杆横向变形段长度; A 为锚杆横截面面积; I 为锚杆截面惯性矩; E 为锚杆材料弹性模量; G 为锚杆剪切变形模量; k 为截面剪应力分布不均匀系数, 其值与截面形状有关, 对于圆形截面, $k=10/9$. 由结构受力和变形特性可知, O 点是锚杆横向剪切段反弯点, 此处弯矩 $X_3=0$.

将式(2)、式(3)带入式(1), 可得到 O 点截面受力与变形的关系, 进一步表示如下.

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \left[\left(\frac{l^3}{3EI} + \frac{kl}{GA} \right) X_2 + \left(\frac{11q_0 l^4}{120EI} + \frac{kq_0 l^2}{3GA} \right) \right] / \left(\frac{X_1 l}{EA} \right). \quad (4)$$

锚杆轴向变形和横向挠曲变形与岩体层面的法向位移和切向位移有关, 它们之间的关系如图 5 所示, 具体表达式如下.

$$\begin{cases} \Delta_1 = u \sin \alpha + v \cos \alpha \\ \Delta_2 = v \sin \alpha - u \cos \alpha \end{cases}, \quad (5)$$

式(5)中: α 为锚杆与竖直方向的夹角; u, v 分别表示岩体结构面法向和切向位移; Δ_1, Δ_2 分别表示锚杆 O 点的轴向和横向变形.

岩体结构面由于剪胀效应使得其法向和切向位移满足式(6)的要求(刘才华和李育宗, 2018).

$$u = v \tan \beta. \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \tan(\alpha - \beta). \quad (7)$$

根据式(4)和式(7), 可求得 X_1 和 X_2 的关系如下:

$$X_1 = \cot(\alpha - \beta) \left[\left(\frac{Al^2}{3I} + \frac{kE}{G} \right) X_2 + \left(\frac{11q_0 Al^3}{120I} + \frac{kq_0 El}{3G} \right) \right]. \quad (8)$$

李育宗和刘才华(2016)应用最小势能原理得到:

$$X_2 = -\frac{q_0 l}{3}. \quad (9)$$

至此, 式(8)中仍有两个未知数 l 和 q_0 , 因此无法得到 X_1 和 X_2 的值.

2.3 锚杆屈服条件和剪切变形段长度

当岩石和灌浆体较为坚硬时, 锚杆受到较强的侧向约束作用, 锚杆的横向抗剪效应更加突出, 结

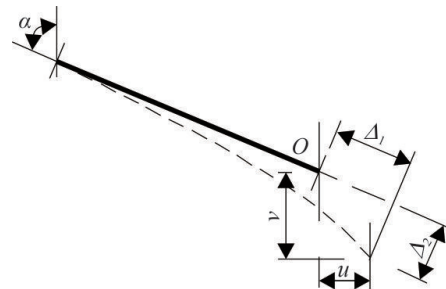


图 5 锚杆变形协调条件

Fig.5 Deformation compatibility conditions for the rock bolt

构面处锚杆上的反弯点(图 4 中的 O 点)所在截面弯矩为 0, 锚杆发生拉剪破坏, 如图 2 所示. 在轴力和剪力共同作用下, O 点截面首先达到屈服状态(Ferro, 1995). 结构面处锚杆发生屈服时的轴力 X_1 和剪力 X_2 分别记为 N_o 和 Q_o , 根据 Tresca 强度屈服准则, 得到:

$$Q_o = \frac{1}{2} \sqrt{(A_b f_y)^2 - N_o^2}, \quad (10)$$

式(10)中: A_b 、 f_y 分别是锚杆截面面积和锚杆屈服强度.

通过式(10)也可看出, 锚杆屈服时, 其上的轴力与横向剪切力相互影响, 两者不是相互独立的.

锚杆剪切变形段长度 l 是边坡锚固受力分析中的一个重要参数, 现有研究成果仍未给出准确的定量方法. 基于试验统计该值约为锚杆直径的 1~3 倍. Jalalifar and Aziz (2010) 研究指出剪切变形段长度 l 受到岩体强度和锚杆轴向力等的影响, 并给出了如下的建议值:

$$l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_b f_y - N_o}{f_c}}, \quad (11)$$

式(11)中: f_c 表示灌浆体单轴抗压强度设计值.

联立式(8)~式(11), 可得到下列关于剪切变形段长度 l 的关系式:

$$(A_b f_y - 4l^2 f_c)^2 \cdot \left(1 + \frac{4}{K^2} \tan^2(\alpha - \beta)\right) = (A_b f_y)^2. \quad (12)$$

其中: $K = 1 / \left(\frac{7A_b l^2}{120I}\right)$.

利用式(12)数值计算出横向剪切变形段长度 l 的值, 再分别回代式(8)~式(10), 锚杆上屈服截面上的轴力 N_o 、横向剪力 Q_o 和分布荷载集度 q_0 都可求出. 进一步代入式(1), 顺层结构面上锚杆的各个位移值也可求出.

2.4 顺层岩质边坡锚固抗力计算

锚杆对顺层岩质边坡的抗力 R 由锚杆的轴向力 N_o 和 O 点所在截面的横向剪切力 Q_o 来提供. 设轴力 N_o 和抗剪力 Q_o 对结构面抗力的贡献分别记为 R_N 和 R_Q , 如图 6 所示. 它们的表达式分别为:

$$R_N = N_o \cos \alpha + N_o \sin \alpha \tan \varphi, \quad (13)$$

$$R_Q = Q_o \sin \alpha - Q_o \cos \alpha \tan \varphi, \quad (14)$$

式(13)~(14)中: φ 是层面内摩擦角.

锚杆与滑移面的交接面屈服时, 由式(8)和式(9)可得:

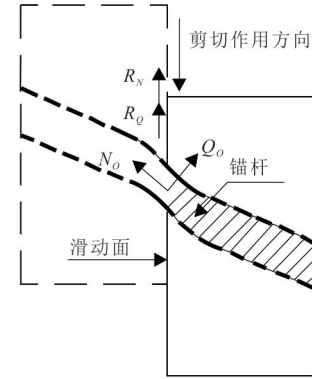


图 6 锚杆抗滑力

Fig.6 Force reaction in the bolt

$$\frac{Q_o}{N_o} = K \tan(\alpha - \beta). \quad (15)$$

由式(10)和式(15)联立, 得到:

$$N_o = \frac{1}{\sqrt{4K^2 \tan^2(\alpha - \beta) + 1}} A_b f_y, \quad (16)$$

$$Q_o = \frac{K \tan(\alpha - \beta)}{\sqrt{4K^2 \tan^2(\alpha - \beta) + 1}} A_b f_y. \quad (17)$$

因此, 当锚杆 O 点所在截面屈服时, 锚杆对滑移面总的抗力 R 计算表达式为:

$$R = R_N + R_Q = \frac{A_b f_y}{\sqrt{4K^2 \tan^2(\alpha - \beta) + 1}} \left[\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi + K \tan(\alpha - \beta) (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi) \right]. \quad (18)$$

由式(18)可以看出, 锚杆的抗力在形式上类似于拉杆模型, 但其计算受到很多参数的影响, 如结构面参数、周围岩体力学参数以及锚杆力学和设计参数等.

3 理论结果验证与分析

为验证结构模型的正确性, 对上述理论结果与已有的实验数据(Liu and Li, 2017)进行了比较分析. 试验参数如表 1 所示, 试验锚固角 α 分别取为 45° 、 60° 、 75° 和 90° , 对应的内摩擦角 φ 分别为 42.1° 、 38.7° 、 42.5° 和 36.4° . 剪胀角设为 5° , 试验结果与本文结构模型理论分析结果的对比见表 2, 同时图 7 给出了不同方法所得数据的变化趋势比较, 本文计算值与试验值的最大误差在 9% 以内.

从上述分析比较可以看出, 本文力学模型的计算结果与试验结果较为接近, 但比试验数据偏大,

表 1 试验材料参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 μ	屈服强度 $f_y(\text{MPa})$	抗压强度 $f_c(\text{MPa})$	直径 (mm)
锚杆	186.0	0.18	505	—	8
岩体	31.5	0.20	—	33.0	—
灌浆	13.0	0.15	—	45.5	—

表 2 锚杆抗力理论与试验结果对比

Table 2 Comparison of theoretical data with experimental results for rock bolt resistances

工况	试验值 (kN)	文献(Ranjbar- nia, 2022)(kN)	本文(kN)
$\alpha=45^\circ, \varphi=42.1^\circ$	30.4	29.1	31.8
$\alpha=60^\circ, \varphi=38.7^\circ$	27.6	26.3	28.7
$\alpha=75^\circ, \varphi=42.5^\circ$	25.6	23.1	26.7
$\alpha=90^\circ, \varphi=36.4^\circ$	13.7	13.3	14.9

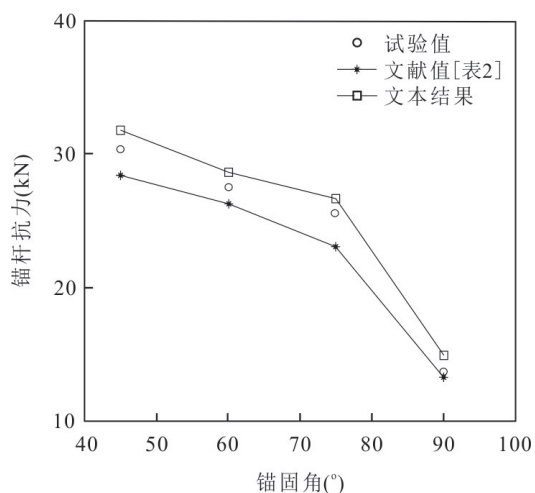


图 7 锚杆抗力值理论与试验结果变化曲线对比

Fig. 7 Comparison between theoretical and experimental data curves for rock bolts

原因是除了模型假设带来的误差外,材料的力学性能参数也会随着试验进程而不断发生变化.总的来看,本文的结构力学模型能够较合理地反映锚杆的锚固效果.

4 锚固参数影响讨论

顺层岩质边坡锚杆拉剪破坏是锚杆中所受轴力和剪切力共同作用的结果,锚杆倾角 α 、结构面剪胀角 β 、内摩擦角 φ 以及锚杆直径 D 、灌浆体和锚杆强度 f_c 、 f_y 等都会对锚杆轴向和剪切方向的抗力 N_o 、

Q_o 产生影响,进而影响锚杆抵抗滑移的能力.

4.1 锚杆倾角、结构面内摩擦角和剪胀角对锚杆抗力的影响

根据以上分析(刘才华和李育宗,2018;Ranjbarnia *et al.*, 2022),可以看出锚杆倾角 α 和剪胀角 β 是研究较多的两个参数,也是影响锚杆抗力贡献的主要因素.另外从式(13)、(14)可以看出,结构面内摩擦角 φ 也会对锚杆抗力产生重要影响.为讨论这些因素的影响,设定锚杆材料 $E=206 \text{ GPa}$, $G=79 \text{ GPa}$,锚杆直径 D 取 20 mm ,抗拉强度 $f_y=500 \text{ MPa}$, $l=60 \text{ mm}$.锚杆倾角 α 取值范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$,内摩擦角 φ 的取值范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$,剪胀角 β 分别取 0° 、 5° 和 10° .结构模型分析结果如图8所示.

从图8可以看出,在所有工况下,倾角对锚杆抗力的贡献都有显著影响.随着 α 的增加,锚杆抗力逐渐减小.当剪胀角为 0° 时,锚杆抗力随着锚杆倾角和内摩擦角的变化比较平缓(图8a).在相同内摩擦角和倾角情况下,剪胀角越大,锚杆倾角对抗力的影响越大,表现为影响面越陡(图8b和8c所示).内摩擦角越大,表示滑移接触面越粗糙,锚杆的抗力也越大(图8b,8c).从图8b、8c同样可以看出,随着剪胀角和内摩擦角的增大,锚杆抗力也逐渐增大,并且当锚杆倾角低于 60° 时,锚杆抗力变化较明显.

4.2 锚杆直径、倾角和灌浆体强度对锚杆抗力的影响

从上述理论分析过程可以看出,剪切变形段长度与灌浆体强度、锚杆直径等参数有关,可以通过式(12)数值计算求出,这里不再单独讨论剪切变形段长度的影响,因此只讨论锚杆直径 D 和灌浆体强度 f_c 对锚杆抗力 R 的影响.由式(18)可知,增加锚杆直径,锚杆抗力也会增加,但实际加固工程中,锚杆直径不能无限增加,只能在一定范围内选择.本文讨论的锚杆直径分别为 $D=8, 12$ 和 20 mm ,锚杆材料参数和倾角取值与4.1节相同,灌浆体抗压强度 $f_c=30 \sim 80 \text{ MPa}$,设定 $\varphi=40^\circ$, $\beta=5^\circ$.理论模型计算结果如图9所示.

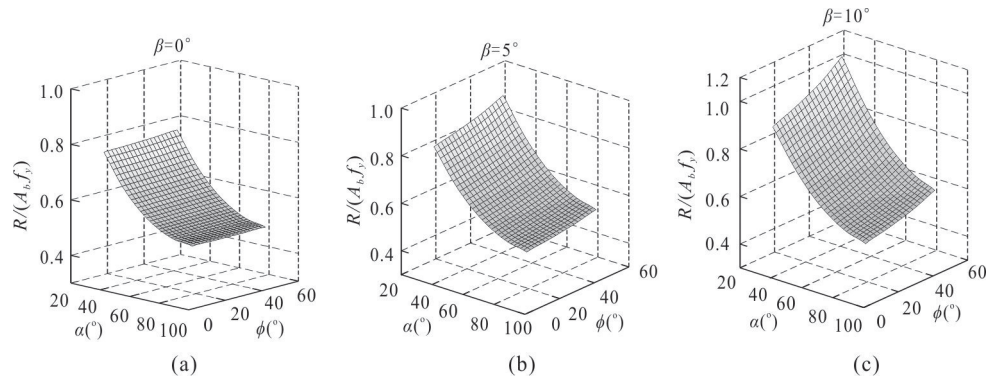


图 8 不同剪胀角下锚杆抗力与倾角和内摩擦角的变化关系

Fig.8 Relationships among the support force, the inclination, and the inner friction angle under different dilation angles

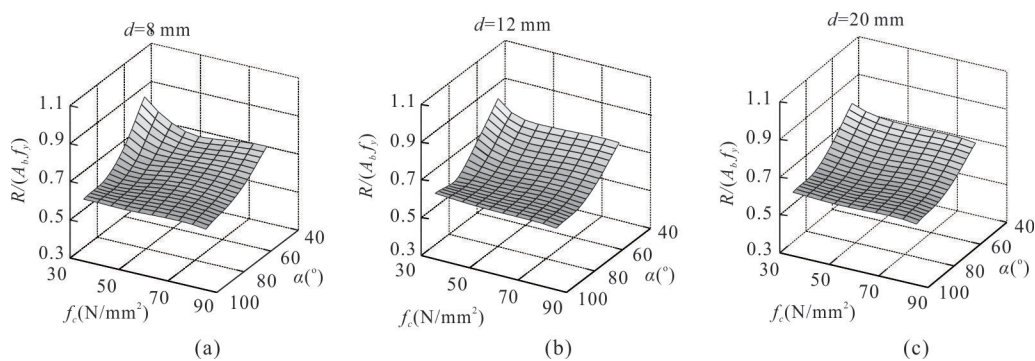


图 9 不同直径锚杆抗力与倾角和灌浆强度的变化关系

Fig.9 Relationships among the support force, the inclination, and the grout strength under different rock bolt diameters

由图 9 可知, 3 种不同直径锚杆对应的比值 $R/(A_b f_y)$ 相差不大, 说明锚杆对结构面的抗力与锚杆截面积成正比关系. 当灌浆体强度较小时 (如图 9 中 $f_c=30$ MPa), 锚杆直径越小, 比值 $R/(A_b f_y)$ 稍大 (如图 9a~9c 所示), 但随着 f_c 增加, $R/(A_b f_y)$ 越相近. 这说明灌浆体强度越大, 锚杆约束岩体的变形能力越强, 锚杆的“销钉效应”越明显, 但总的抗力贡献变化不大或略有下降. 这也说明锚杆的贡献与锚杆拉剪作用的组合有关. 当灌浆体强度一定时, 对于不同直径的锚杆, 其抗力均随着锚杆倾角的增大而减小 (见图 9a~9c). 总的来说, 当锚杆直径较小时 (如 $D=8$ mm; 图 9a), 比值 $R/(A_b f_y)$ 随着锚杆倾角和灌浆强度的变化比大直径锚杆 ($D=12$ mm 和 20 mm; 图 9b 和 9c) 的变化稍明显.

5 结论与讨论

根据顺层岩质边坡中剪切变形段锚杆和围岩受力和变形特征, 得到了锚杆的计算模型. 应用结构力学原理推导了锚杆轴力和抗剪力的计算公式, 从而建立了顺层边坡锚杆锚固的力学分析模型. 主

要结论如下:

(1) 锚杆加固顺层岩质边坡的锚杆抗力贡献由锚杆轴向力和横向剪切力组成. 结构面处两者的作用相互影响. 锚杆轴向力对抗力的贡献减小, 则剪切力对抗力的贡献就增大.

(2) 通过与已有试验结果对比, 验证了本文结构分析模型的合理性. 由于影响加锚节理面受力性能的因素众多, 目前节理岩体锚固理论体系还没有形成统一的认识. 本文模型可为节理岩体锚固设计力学分析提供重要参考.

(3) 在拉剪力综合作用下, 锚杆抗力与锚杆倾角、结构面和锚杆的几何与力学参数等因素有关. 锚杆倾角对结构面的受力影响比较显著. 随着倾角增大, 锚杆抗力逐渐减小. 锚杆抗力随结构面内摩擦角和剪胀角的增大而有所增加. 当锚杆直径一定时, 灌浆体抗压强度越大, 锚杆销钉作用越明显, 但结构抗力略有下降. 锚杆抗力随锚杆直径的增加而增大.

另外, 本文暂未考虑预应力、地震作用等因素的影响, 模型中的相关参数也需要试验数据的确

认,因此锚固节理岩体计算模型尚需完善,进而拓展该模型的应用范围。

References

- Chen, Y., 2014. Experimental Study and Stress Analysis of Rock Bolt Anchorage Performance. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5):428—437.
- Cheng, L.K., Fan, J.L., Han, J., et al., 2001. Rock and Soil Anchorage. China Architecture & Building Press, Beijing(in Chinese).
- Ferrero, A.M., 1995. The Shear Strength of Reinforced Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(6):595—605. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00002-x](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00002-x)
- Ge, X.R., Liu, J.W., 1988. Study on the Shear Resistance Behaviour of Bolted Rock Joints. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 10(1):8—19(in Chinese with English abstract).
- Grasselli, G., 2005. 3D Behaviour of Bolted Rock Joints: Experimental and Numerical Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(1): 13—24. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.06.003>
- Jalalifar, H., Aziz, N., 2010. Analytical Behaviour of Bolt-Joint Intersection under Lateral Loading Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(1):89—94. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0032-6>
- Jalalifar, H., Aziz, N., Hadi, M., 2006. The Effect of Surface Profile, Rock Strength and Pretension Load on Bending Behaviour of Fully Grouted Bolts. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(5):1203—1227. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1340-6>
- Li, C. C., 2010. Field Observations of Rock Bolts in High Stress Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(4): 491—496. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0067-8>
- Li, C.C., Stjern, G., Myrvang, A., 2014. A Review on the Performance of Conventional and Energy-Absorbing Rockbolts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4):315—327.
- Li, Y. Z., Liu, C. H., 2016. An Analytical Model of Jointed Rock Bolts under the Combination of Tensile and Shear Loads. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(12): 2471—2478. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.1085>(in Chinese with English abstract).
- Liu, C.H., Li, Y.Z., 2017. Analytical Study of the Mechanical Behavior of Fully Grouted Bolts in Bedding Rock Slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(9): 2413—2423. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1244-9>
- Liu, C.H., Li, Y.Z., 2018. Research Progress in Bolting Mechanism and Theories of Fully Grouted Bolts in Jointed Rock Masses. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(8):1856—1872(in Chinese with English abstract).
- Ranjbarnia, M., Oreste, P., Fahimifar, A., et al., 2016. Analytical Numerical Solution for Stress Distribution around Tunnel Reinforced by Radial Fully Grouted Rockbolts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(13): 1844—1862. <https://doi.org/10.1002/nag.2517>
- Ranjbarnia, M., Rashedi, M.M., Dias, D., 2022. Analytical and Numerical Simulations to Investigate Effective Parameters on Pre-Tensioned Rockbolt Behavior in Rock Slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(2):74. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02563-1>
- Spang, K., Egger, P., 1990. Action of Fully-Grouted Bolts in Jointed Rock and Factors of Influence. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23(3):201—229. <https://doi.org/10.1007/bf01022954>
- Tang, Z.H., Yu, X.L., Chai, B., et al., 2021. Energetic Criterion of Entering Acceleration in Progressive Failure Process of Bedding Rockslide: A Case Study for Shanshucao Landslide. *Earth Science*, 46(11):4033—4042(in Chinese with English abstract).
- The National Standards of People's Republic of China, 2014. Technical Code for Building Slope Engineering (GB50330-2013). China Architecture & Building Press, Beijing(in Chinese).
- Wang, F.L., Liu, C.H., Gong, Z., 2014. Mechanisms of Bolt Support for Bedding Rock Slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(7):1465—1470(in Chinese with English abstract).
- Wang, L.Q., Zhu, L.F., Zheng, L.B., et al., 2021. Shear Test of Bolted Joint Rock Masses Considering Joint Roughness. *China Journal of Highway and Transport*, 34(6): 38—47(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.W., Fang, J.Q., 2010. Numerical Analysis for the Shear Characteristic of Structure Plane Reinforced by Rock Bolt in Rock Mass. *Journal of China Coal Society*, 35(5):729—733(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.W., Wang, R., 2002. Research on Status Quo of Anchorage Theory of Rock and Soil. *Rock and Soil Mechanics*, 23(5):627—631(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Liu, Q.S., 2014. Analysis of Deformation Characteristics of Prestressed Anchor Bolt Based on Shear

Test. *Rock and Soil Mechanics*, 35(8): 2231–2240(in Chinese with English abstract).

Zhang, Z.Q., Zhang, G., Zhao, C.Y., et al., 1999. Experimental Study on Prestressly Anchoring Structure of Slope. *Journal of Northeastern University*, 20(5): 536–539(in Chinese with English abstract).

Zhou, H.F., Fu, W.X., Ye, F., et al., 2021. Study on Sliding-Shearing Deformation and Failure Mode of Rock Slope with Steep Weak Structural Plane. *Earth Science*, 46(4): 1437–1446(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

程良奎, 范景伦, 韩军, 等, 2001. 岩土锚固. 北京: 中国建筑工业出版社.

葛修润, 刘建武, 1988. 加锚节理面抗剪性能研究. *岩土工程学报*, 10(1): 8–19.

李育宗, 刘才华, 2016. 拉剪作用下节理岩体锚固力学分析模型. *岩石力学与工程学报*, 35(12): 2471–2478.

刘才华, 李育宗, 2018. 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. *岩石力学与工程学报*,

37(8): 1856–1872.

唐朝晖, 余小龙, 柴波, 等, 2021. 顺层岩质滑坡渐进破坏进入加速的能量学判据. *地球科学*, 46(11): 4033–4042.

王发玲, 刘才华, 龚哲, 2014. 顺层岩质边坡锚杆支护机制研究. *岩石力学与工程学报*, 33(7): 1465–1470.

王亮清, 朱林锋, 郑罗斌, 等, 2021. 考虑节理粗糙度的锚固节理岩体剪切试验. *中国公路学报*, 34(6): 38–47.

王中文, 方建勤, 2010. 岩体结构面锚固剪切特性的数值分析. *煤炭学报*, 35(5): 729–733.

张乐文, 汪稔, 2002. 岩土锚固理论研究之现状. *岩土力学*, 23(5): 627–631.

张伟, 刘泉声, 2014. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析. *岩土力学*, 35(8): 2231–2240.

张治强, 张国, 赵赤云, 等, 1999. 边坡预应力锚固结构的实验研究. *东北大学学报*, 20(5): 536–539.

中华人民共和国国家标准, 2014. 建筑边坡工程技术规范 (GB50330–2013). 北京: 中国建筑工业出版社.

周洪福, 符文熹, 叶飞, 等, 2021. 陡倾坡外弱面控制的斜坡滑移-剪损变形破坏模式. *地球科学*, 46(4): 1437–1446.