

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.010

含贯通节理岩体锚固界面应力分布规律分析*

宋 洋¹, 王贺平², 常泳涛², 李永启²

(1. 辽宁工程技术大学建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 在拉拔条件下,对全长注浆锚杆在含贯通节理岩体中界面应力分布规律进行分析研究。修订了无节理岩体界面剪应力分布函数,确定了一定条件下修订系数的取值,定义了应力传递参数 C ,采用有限差分软件Flac^{3d}分析了其影响因子 c 、 φ 、 ψ 、 β 的影响作用。确定了主影响因子锚固角 β ,并且在修订公式中加入了锚固角 β 因子。分析了不同锚固角度下浆-岩界面剪应力的分布规律。结果表明,在带肋钢筋肋间处产生应力集中现象,注浆体起到了均化作用。在拉拔条件下含贯通节理岩体主要在锚端与节理面附近发生应力集中现象。上下部岩体浆-岩界面剪应力呈双曲线形式分布。浆-岩界面剪应力随着锚固角 β 减小,呈先减小后增大趋势。意味着当锚杆锚固角度在 60° 附近时,对岩体的锚固效果最好。

关键词: 贯通节理岩体; 界面剪应力; 锚固角度; 应力传递参数

中图分类号: U455.7⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0387-08

Analysis of Stress Distribution Law of Anchoring Interface of Rock Mass with Penetrating Joints

SONG Yang¹, WANG Heping², CHANG Yongtao², LI Yongqi²

(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Civil Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Considering the pullout conditions, the stress distribution law of the interface between the full-length grouted rock bolt and rock mass with penetrating joints is analyzed. The interface shear stress distribution function of rock mass without joints is modified. The value of the correction factor under certain conditions is determined. The stress transfer parameter C is defined and the finite difference software Flac^{3d} is used to analyze the influence of its influence factors c 、 φ 、 ψ 、 β . The main influence factor anchor angle β is determined and the anchoring angle factor β is added to the modified formula. The distribution of shear stress at the pulp-rock interface under different anchorage angles is analyzed. The results show that stress concentration occurs in the ribbed steel bars, and the grouting body plays a homogenization role. Under the pullout condition, the stress-concentrated phenomenon occurs mainly in the vicinity of the anchor end and the joint surface. The shear stress of the upper and lower rock mass at the slurry-rock interface follows the hyperbolic distribution. The shear stress of the slurry-rock interface decreases with the anchoring angle β and decreases first and then increases. It means that when the inclination of the anchor is around 60° , the anchoring effect on the rock mass is the best.

Keywords: through joint rock mass; interface shear stress; anchorage angle; stress transfer parameters

* 收稿日期:2018-06-16;修回日期:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(5150412,51174268)、辽宁省教育厅一般项目(LJYL057)资助

作者简介:宋 洋(1982-),男,副教授,博士。主要从事隧道与地下工程方面的研究。Email:lgdsongyang@163.com

引言

在地下工程中,随着隧道等工程开挖,产生了大量贯通的节理、裂隙等不连续结构面。岩体的不连续性也被逐渐体现出来^[1]。导致岩体的力学性质与受力状态发生改变。目前针对全长注浆黏结型锚杆在含节理面岩体内的加固机理的研究尚未完善。为此,国内外诸多专家对此进行了研究。

徐开山^[2]针对全长黏结锚杆进行拉拔状态下变形破坏分析得出了一种力学作用模型。Hariyadi等^[3]对静态拉拔荷载作用下锚杆的失效机理和强度进行了研究。H. Zhou等^[4]在中性点理论上建立了在地震荷载作用下,完全灌浆锚杆与围岩的联合作用力学模型。针对锚杆多屈服破坏条件,提出了一种新的全注浆锚杆数值模拟方法。C. C. Li^[5]在荷载传递理论的基础上分析得到了锚固体发生剪切滑移破坏时的相互作用规律。贺若兰等^[6]采用一种较为真实反应节理面性能的接触单元利用数值分析技术对全长黏结型锚杆进行了拉拔状态下全过程模拟分析。确定了土钉支护较为合理的长度范围。许万忠等^[7]对含节理裂隙模型进行力学分析与对比研究,提出了压力注浆对含节理裂隙岩体的抗剪性的影响。张永政等^[8]利用颗粒流软件PFC2D对不同粗糙度的岩体节理面进行了剪切实验模拟分析。从宏观与细观角度对不同节理面的粗糙度进行了破坏形态的分析研究。并针对JRC值和颗粒摩擦因数对锚固节理抗剪强度的影响进行了分析。腾俊洋等^[9]对节理岩体剪切性能影响进行分析研究得到了锚杆轴力分布规律。王平等^[10]对预制锚固单排裂隙试件进行单轴破断试验。提出了主控裂纹的概念,通过数值模拟软件得到了裂隙发展模式。M. Mohammadi等^[11]利用锚杆支护系数(RSF)的概念,在软弱互层岩体类型中进行了RMR系统的修正,该方法也证明了岩石锚固的重要性。Z. Q. Kang等^[12]对断裂岩体和边坡岩体锚固剪切试验进行了数值模拟分析。建立了联合裂隙岩体变形和稳定性评价的定量评价基础。

在实际工程中,岩体受拉破坏占据一定比例。例如深部岩体隧道拱顶一般由于岩体受拉而产生破坏。在破坏形式中界面剪应力分布大小及规律占据主要作用。以上研究中关于锚杆在含贯通节理面岩体受拉工况下界面间剪应力分布规律研究

尚不完善。因此,有必要开展拉拔工况条件下界面间剪应力分布规律研究。

1 力学模型的建立

1.1 理论公式修订

本文主要研究在单轴拉伸条件下,含贯通节理面岩体界面应力分布规律。锚杆采用高强度带肋钢筋,当拉拔荷载作用在较高强度的锚杆上时,由于钢筋强度较大,带肋钢筋与注浆体之间的锚固力普遍大于浆-岩界面锚固力。在整个岩体强度失效之前,锚-浆界面基本不发生破坏。根据以往研究可以得到,锚杆锚固作用失效的原因主要是浆-岩界面强度不够或沿节理面发生破坏。故本文主要研究贯通节理面与浆-岩之间的应力分布相互关系。根据局部理论^[13],采纳文献[14]力学模型的建立并对其进行修正。其力学计算简图如图1所示。

考虑含贯通节理面岩体上下部剪应力受节理面影响,分别修订上下部岩体浆-岩界面剪应力分布函数:

节理面上部岩体:

$$\tau(x) = K \frac{P}{2\pi r} \frac{\alpha \cosh[\alpha(l-x)]}{\sinh(\alpha l)} \quad (1)$$

式中, K 为修正系数; P 为单轴拉拔力,kN; α 为锚固系数; l 为锚杆长度,m; r 为锚固体半径,mm; x 为作用点距锚端距离,m。

节理面下部岩体:

$$\tau(x) = D \frac{P}{2\pi r} \frac{\alpha \cosh[\alpha(l-x)]}{\sinh(\alpha l)} \quad (2)$$

式中, D 为修正系数。

本文采用整体受力分析方法分析研究节理面

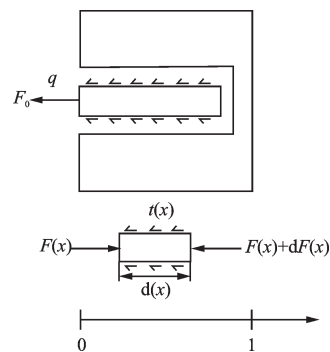


图1 全长黏结锚杆受力分析

Fig. 1 Stress analysis of full-length grouted bolt

处浆-岩界面剪应力与沿节理面产生剪切应力分布规则如图2所示,相互关系为:

$$T_2 = T_1 \cdot \cos\beta \quad (3)$$

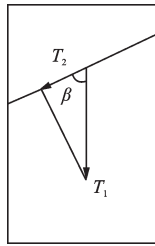


图2 整体受力分析

Fig. 2 Stress analysis of full-length grouted bolt

1.2 数值实验

1.2.1 计算假定

本文采用有限元软件Flac^{3d}进行数值模拟。依据实际情况,采用以下假定:

模型岩体为均质、连续、各项同性体,模型锚杆、注浆体均采用实体单元建立,视为弹性体材料。

为了更加真实的反应拉拔状态下锚杆的锚固效果,锚杆采用带肋钢筋实体单元模拟,锚-浆界面、浆-岩界面、节理面均采用接触面单元进行模拟。

1.2.2 实验模型及参数

取长宽高为(0.3×0.3×1.5)m的长方体模型为岩土体;注浆体半径为15 mm,带肋锚杆半径为10 mm。为了更好的显示出应力变化效果,节理面布置在距锚端0.1 m处。模型如图3所示。

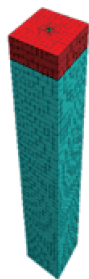


图3 三维数值模拟模型

Fig.3 Three dimensional numerical simulation model

本文采用 $r=10$ mm; $l=1.5$ m带肋钢筋;注浆体 $r=15$ mm; $P_0=3.1$ kN; $E_a=21$ GPa; $\beta=4$ 。具体材料参数参考见表1。

1.2.3 基本结果分析

如图4所示,轴力沿带肋锚杆呈非线性分布,主要分布在锚杆前端1/3处。细观带肋锚杆内部轴力

表1 数值实验材料参数

Table 1 Material parameters of numerical experiments

材料	$E/$ GPa	ν	$Tens/$ MPa	$\Psi/^\circ$	$C/$ MPa	$\varphi/^\circ$
围岩	11	0.29	0.2	15	4	20
注浆体	3	0.3			2	
带肋锚杆	220	0.2	1e14			

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; $Tens$ 为抗拉强度; Ψ 为剪胀角; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角

分布,其应力集中位于肋间。故锚浆破坏一般由肋间产生裂隙,随着拉拔力增大而发展。由于浆体包裹住带肋锚杆,起到了均化带肋钢筋应力的作用,提高了其作用效果。由于带肋钢筋与注浆体之间黏结程度较高,故本文主要研究浆-岩界面、贯通节理面的应力分布状况。

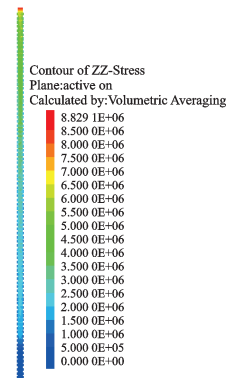


图4 带肋钢筋应力分布

Fig.4 Three dimensional stress distribution of ribbed steel bar

如图5所示,从 z 方向杆周土体位移观察: z 方向变形主要发生在锚端、节理面处,呈倒锥型分布。上下部杆周土变形不协调节理面剪应力通过节理面时产生了应力重分布现象,导致两次应力集中。

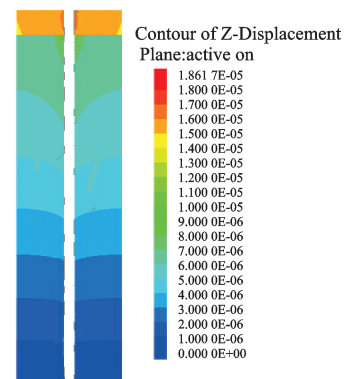


图5 杆周土变形

Fig.5 Soil deformation around the rod

2 影响因素分析

由于节理面的存在,对在其上下部岩体浆-岩界面的剪应力产生了一定影响。针对主要影响节理面性质的参数进行分析,以锚固角度 60° 为例,采用单一控制变量法进行分析研究。

2.1 节理面参数影响分析

本节分别对节理面参数中的黏聚力 c 、剪胀角 Ψ 、内摩擦角 φ 三个参数选取了两种数值进行了锚杆剪应力对比分析,其对比结果见表2~4。

通过对表2~4的分析可以得到:沿浆-岩界面的剪应力随着节理面趋于滑动破坏而减小,而节理面滑动侧摩阻力小于最大静侧摩阻力。充分说明浆-岩界面一部分剪应力是通过节理面传递的。也就意味着节理面的剪应力影响着浆-岩界面剪应力,是其组成部分。由此可见节理面的 c 、 φ 、 Ψ 的取值均对浆-岩界面具有一定的影响,但其影响程度较小。

2.2 影响因素锚固角度 β 分析

2.2.1 锚固角 90°

浆-岩界面的剪应力如图6所示,可以看出,在锚端处为第一应力集中。2号平台上其应力作用范围相对比两侧明显减小。说明在此处产生了应力集中现象。由2号平台到3号平台的应力差大于

相邻平台间的应力差。可以理解为轴力传递到节理面,导致了应力重分布效果。其中节理面起到了缓解阻隔作用。

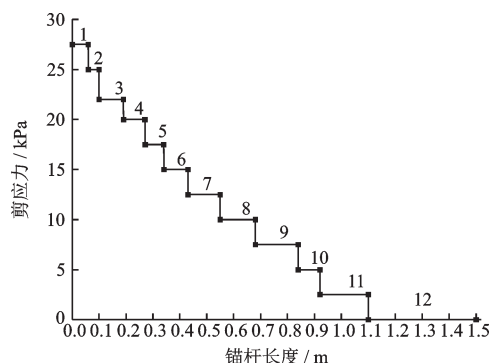


图6 90°锚固角下浆-岩界面剪应力梯形图

Fig.6 Ladder diagram of shear stress at 90° anchor angle at the slurry-rock interface

由图7、8分析得到锚杆周围的土 z 方向位移变化成阶梯状分布。平台1到平台3之间的位移差最大,其相差度较大。平台1位移为主要位移,平台2土体位移为次要位移。

可见,当节理面与锚杆呈 90° 时,岩体发生破坏主要由三部分组成。第一部分时锚端部分应力集中导致浆岩界面发生破坏,也是主要破坏。节理面处产生二次应力集中,故节理面处浆岩破坏与沿节理面破坏为次要破坏。在锚端剪应力峰值可以遵循公式(1)。

由于节理面存在,会对上部岩体剪应力分布产

表2 不同黏聚力下浆-岩界面剪应力值对比

锚固范围/m	0~0.056	0.056~0.11	0.11~0.19	0.19~0.49	0.49~0.89	0.89~1.1	1.1~1.5
$c=1e5$ Pa时界面剪应力	2.567 8	2.440 0	1.920 0	1.530 0	0.880 0	0.490 0	0
$c=0$ Pa时界面剪应力	2.567 5	2.437 5	1.917 5	1.527 5	0.877 5	0.487 5	0

表3 不同内摩擦角下浆-岩界面剪应力值对比

锚固范围/m	0~0.056	0.056~0.11	0.11~0.19	0.19~0.49	0.49~0.89	0.89~1.1	1.1~1.5
$\varphi=20^\circ$ 时界面剪应力	2.569 8	2.450 0	1.935 0	1.720 0	0.910 0	0.510 0	0
$\varphi=0^\circ$ 时界面剪应力	2.567 5	2.437 5	1.917 5	1.527 5	0.877 5	0.487 5	0

表4 不同剪胀角下浆-岩界面剪应力值对比

锚固范围/m	0~0.056	0.056~0.11	0.11~0.19	0.19~0.49	0.49~0.89	0.89~1.1	1.1~1.5
$\psi=20^\circ$ 时界面剪应力	2.570 1	2.452 5	2.050 0	1.800 0	1.010 0	0.560 0	0
$\psi=0^\circ$ 时界面剪应力	2.567 5	2.437 5	1.917 5	1.527 5	0.877 5	0.487 5	0

生一定的影响。经数据拟合得到修正数 K 取 0.23。

应力经过节理面,由于节理裂隙的存在导致岩体弹性模量等物理学参数降低,导致应力二次集中。综合考虑平台 2 到平台 3 的应力差,应力自节理面向下传递需设置一个应力传递参数 C 。

根据前文节理面处浆-岩界面剪应力与沿节理面产生剪切应力分布规则定义修正参数 $D = C \times (1 - \cos \beta)$,经数据拟合得到 D 取 0.28、 C 取 0.28。

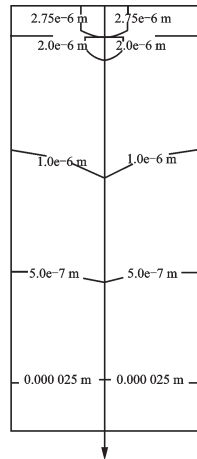


图 7 90°锚固角下锚固体界面土体位移

Fig. 7 Soil displacement at anchor interface at 90° anchoring angle

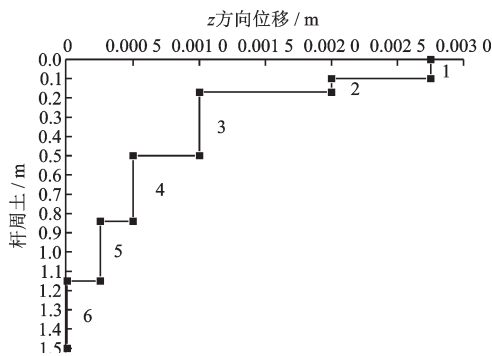


图 8 90°锚固角下锚固体界面土体位移

Fig.8 Soil displacement at anchor interface at 90° anchoring angle

由图 9 可见含结构面的剪应力在结构面附近出现了明显的应力集中,通过分析得到模拟值较为准确。增加了应力传递系数的公式后,在结构面两侧的曲线斜率有明显变化,高度符合结构面处应力集中现象导致的剪应力值。其传递趋势较为符合剪应力通过结构面的传递规律,其值较接近模拟数值。可以较为准确的表达剪应力在结构面处的传递规律。

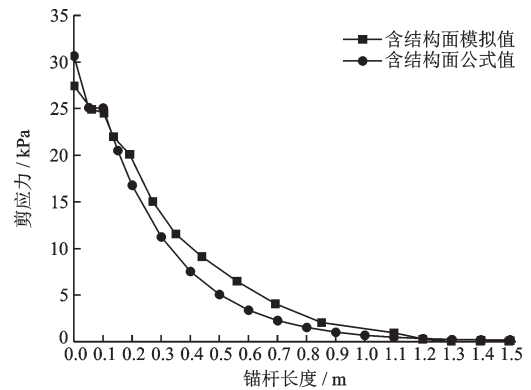


图 9 90°锚固角下浆-岩界面剪应力对比

Fig.9 Comparison of shear stress between slurry and rock interface at 90° anchoring angle

2.2.2 锚固角 60°

由图 10 可以观察到平台 1、平台 2 与平台 3 应力比较集中,平台 3 到平台 4 应力差较大。其位置在结构面处。且其应力台阶明显较 90°减少。由此可以推断 90°到 60°节理对界面剪应力影响明显。有一部分沿节理面分布。在裂隙处产生应力集中现象。

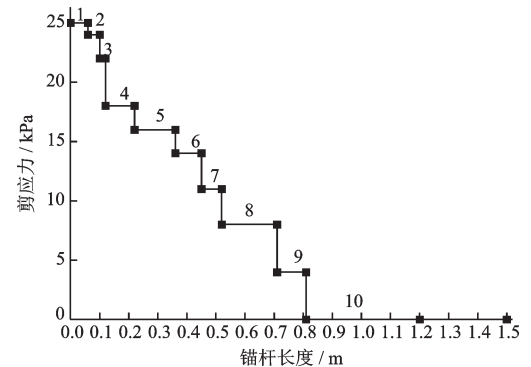


图 10 60°锚固角下浆-岩界面剪应力梯形图

Fig.10 Ladder diagram of shear stress at 60° anchoring angle

由图 11 可见,60°锚杆周围变形值与变形范围较 90°均呈减小趋势。在锚杆周围呈不对称分布,在结构面上,位移量沿右上方增加,且在注浆体周边位移最大。说明沿结构面发生了剪切破坏。总体来讲 60°锚固角相对 90°锚固角,有较好的锚固效果。

由于节理面与锚固体呈 60°夹角,经数据拟合得到修正系数 K 取 0.2。由公式(2)得到 $D = C(1 - \cos \beta)$,经数据拟合得到本例 D 取 0.25、 C 取 0.5。

由图 12 可见,依据公式所得曲线,在节理面处应力分布规律与模拟结果趋势相同,其分布值符合

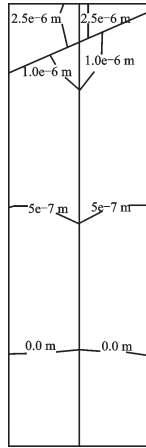


图 11 60°锚固角下锚固体界面土体位移

Fig. 11 Displacement of soil at anchor interface at 60° anchoring angle

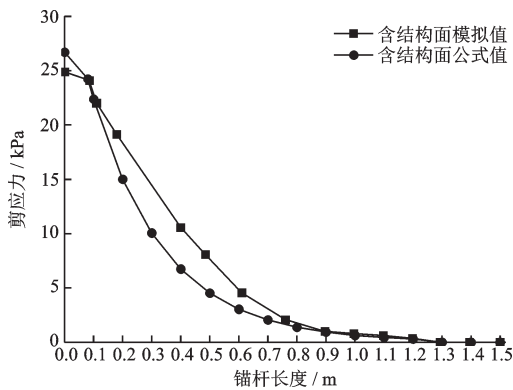


图 12 60°锚固角下浆-岩界面剪应力对比

Fig. 12 Comparison of shear stress at 60° anchor angle at slurry-rock interface

度较高。

2.2.3 锚固角 20°

由图 13、14 可知,在锚固角为 20°岩体中,应力集中主要还是发生在锚端与节理面处,其锚固体周围土体 z 方向变形在 90°到 60°锚固角之间。在节理面处剪切位移分布方式发生明显变化,不同于前者,说明随着锚固角度的减小,岩体破坏模式也发生了变化,更趋于沿界面发生剪切破坏。在节理面处剪应力与节理面处浆-岩界面剪应力比值依然符合前文理论推导结果

通过图 15 对比曲线可以得到,由于节理面与锚固体呈 20°夹角,经数据拟合得到修正系数 K 取 0.22。其中 $D = C(1 - \cos\beta)$,经数据拟合得到本例 D 取 0.26, C 取 4.26。公式值在节理面处应力值与模拟值高度相似,其变化趋势基本符合。可见应力

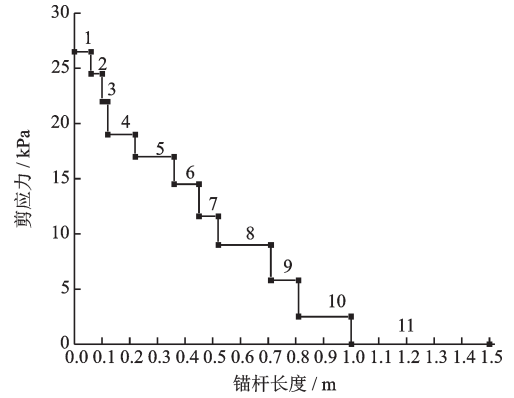


图 13 20°锚固角下浆-岩界面剪应力梯形图

Fig. 13 Ladder diagram of shear stress at 20° anchoring angle

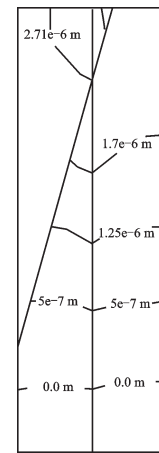


图 14 20°锚固角下锚固体界面土体位移

Fig. 14 Soil displacement at anchor interface at 20° anchoring angle

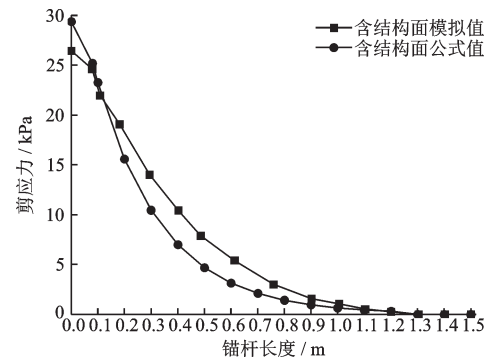


图 15 20°锚固角下浆-岩界面剪应力对比

Fig. 15 Comparison of shear stress between slurry and rock interface under 20° anchoring angle

传递参数 C 的取值主要影响因素是锚固角度的大小。锚固角当减小到一定值时,岩体破坏模式发生改变,对下部岩体应力分布产生的影响较大,继而对参数 C 影响较大。

3 曲线汇总分析

由图 16 汇总浆-岩接触面剪应力曲线可以得到,曲线均在锚端和节理面处产生应力集中现象。90°锚固角的应力值最大,其次为 20°,锚固角 60°最小。可见随着锚固角增大,界面剪应力值先减小再增大。符合文献[15]实验的研究结论。故本文的修正公式也具有一定借鉴意义。

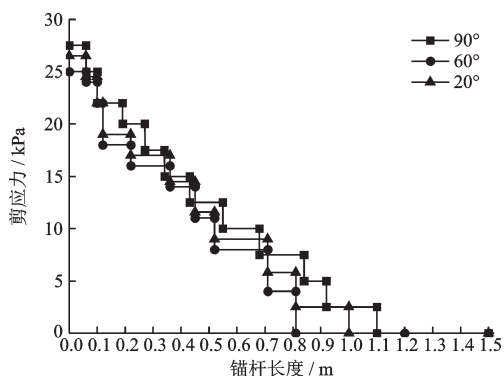


图 16 不同锚固角度浆-岩界面剪应力分布对比

Fig.16 Comparison of shear stress distribution in different anchorage Angle slurry-rock interface

4 结论

(1) 对含贯通节理岩体浆-岩界面剪应力分布公式进行了修订,确定了一定条件下的修订系数 K 、 D ,定义了应力传递系数 C 值,分析了影响参数 C 的主次要因子,研究得出节理面黏聚力、内摩擦角、剪胀角以及锚固角度(节理倾斜角度)均对参数 C 有影响。其中锚固角 β 的取值对参数 C 影响占据主要作用。修订系数 D 中加入了锚固角 β 对界面剪应力的作用。修订后的剪应力分布曲线呈双曲线分布,在锚端、节理处产生应力集中现象,曲线在节理面处斜率产生了一定改变。

(2) 带肋钢筋在肋间处产生应力集中现象,注浆体起到了均化作用。在拉拔条件下含贯通节理岩体主要在锚端与节理面附近发生应力集中现象。上下部岩体浆-岩界面剪应力呈双曲线形式分布。当锚固角为 90°时,界面主要受法向拉应力作用,此时界面黏聚力与锚杆强度起决定作用。当节理面小于 90°时,节理面产生了切向应力。切向应力分布符合整体力学受力分析结果。在一定程度上对浆-

岩界面剪应力起到了“缓解阻隔”作用。

(3) 浆-岩界面剪应力随着锚固角 β 减小,呈先减小后增大趋势。意味着当锚杆锚固角度在 60°附近,对岩体的锚固效果最好。

参考文献:

- [1] 刘泉声,雷广峰,彭星新.深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):312-332.
Liu Q Sh, Lei G F, Peng X X. Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):312-332. (in Chinese)
- [2] 徐开山.全长黏结系统拉拔变形与破坏机理研究[D].青岛:山东科技大学,2017.
Xu K Sh. Study on drawing deformation and failure mechanism of wholly grouted anchoring system [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [3] Hariyadi, Munemoto S, Sonoda Y. Experimental analysis of anchor bolt in concrete under the pull-out loading [J]. Procedia Engineering, 2017, 171:926-933.
- [4] Zhou H, Xiao M, Chen J T. Analysis of a numerical simulation method of fully grouted and anti-seismic support bolts in underground geotechnical engineering [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76:61-74.
- [5] Li C C. Analysis of inflatable rock bolts [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49 (1):273-289.
- [6] 贺若兰,张平,李宁,等.拉拔工况下全长黏结锚杆工作机理[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(2):401-407.
He R L, Zhang P, Li N, et al. Working mechanism of fully grouted bolt in pull out working state [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(2):401-407. (in Chinese)
- [7] 许万忠,曹平,高秉勋,等.节理裂隙边坡锚注加固力学模型与实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2740-2745.
Xu W Zh, Cao P, Gao B X, et al. Mechanics model and test of bolting grouting reinforcement of jointed cranny slope [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7):2740-2745. (in Chinese)
- [8] 张永政,王刚,马明,等.不同粗糙度下锚固节理破坏机理宏观研究[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(12):3373-3383.

- Zhang Y Zh, Wang G, Ma M, et al. Macro-micro study on failure mechanism of rock mass anchorage joints under different roughness[J], Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48 (12):3 373-3 383.(in Chinese)
- [9] 腾俊洋,张宇宁,唐建新,等.锚固方式对节理岩体剪切性能影响试验研究[J].岩土力学,2017,38(8):2 279-2 285.
Teng J Y, Zhang Y N, Tang J X, et al. Experimental study on shear behavior of jointed rock mass with anchorage mode[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (8):2 279-2 285.(in Chinese)
- [10] 王平,冯涛,朱永建,等.加锚预制裂隙类岩体锚固机制试验研究及其数值模拟[J].岩土力学,2016,37 (3):793-801.
Wang P, Feng T, Zhu Y J, et al. Experimental study and numerical simulation of anchoring mechanism of anchored rocklike material with prefabricated fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (3) : 793-801. (in Chinese)
- [11] Mohammadi M, Hossaini M F. Modification of rock mass rating system: interbedding of strong and weak rock layers[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(6):1 165-1 170.
- [12] Kang Z Q, Zhang X Y, Luo Z W, et al. Numerical simulation analysis on anchored shear test of the fractured rock and the slope rock mass [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 312:215-219.
- [13] 张季如,唐保付.锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J].岩土工程学报, 2002, 24(2): 183-192.
Zhang J R, Tang B F. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2):183-192. (in Chinese)
- [14] 朱训国.地下工程中注浆岩石锚杆锚固机理研究[D].大连:大连理工大学,2007.
Zhu X G. The reinforcement mechanics of fully grouted rock bolt in underground engineering [D]. Dalian: School of Dalian University of Technology, 2007.(in Chinese)
- [15] 李术才,张宁,吕爱钟,等.单轴拉伸条件下断续节理岩体锚固效应试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2011,30(8):1 579-1 586.
Li Sh C, Zhang N, Lyu A Zh, et al. Experimental study of anchoring effect of discontinuous jointed rock mass under uniaxial tension[J]. Chinese Journal of Rock-Mechanics and Engineering, 2011, 30(8) : 1 579-1 586. (in Chinese)

(本文责编:池营营)