

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.070



全长粘结锚杆锚-浆界面应力的分布规律

宋洋^a, 王贺平^b, 许怀玉^b, 张维东^b

(辽宁工程技术大学 a. 建筑与交通学院; b. 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:在局部变形理论基础上,对全长粘结型锚杆锚-浆界面破坏类型的锚固机理进行分析研究。将注浆体与围岩视为相对位移为零的稳定体,通过确定其主要影响系数 r 、 k_s 分析得到锚-浆界面的剪应力与轴向荷载的双曲线应力分布形式。通过Flac 3D数值模拟技术和实验算例对其进行对比分析,证明其合理性。定义虚拟系数 T 用来描述锚杆与注浆体界面材料性质,并对其影响参数进行分析,发现锚杆长度在一定范围内可以增强锚固效果,但过度增加锚杆长度对杆体剪应力与轴向荷载影响较小;随着锚杆半径增大,锚浆界面剪应力峰值呈非线性减小,作用的范围增加,为避免产生应力集中现象,应避免使用半径较小的锚杆;虚拟系数 T 可以描述锚浆界面的相差度, T 值增大,锚浆界面的剪应力增大,作用的均匀度及轴向荷载作用范围降低明显,可通过取合适的 T 值使锚固效果最佳。 T 值对锚杆锚固机制的影响较为明显。

关键词:双曲线模型;全长粘结型锚杆;虚拟系数;锚固

中图分类号:U455 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)04-0044-07

Analysis of stress distribution patten along the anchor-slurry interface of full-length bond anchor

Song Yang^a, Wang Heping^b, Xu Huaiyu^b, Zhang Weidong^b

(a. College of Architecture and Transportation; b. Civil Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract:Based on the local deformation theory, the anchorage mechanism of anchor-grout interface failure type is analyzed and studied. The grouting body and surrounding rock mass regarded as a whole with zero relative displacement. The stress distribution of the shear stress and axial load on anchor-grout interface is obtained by determining its main influential coefficient (r and k_s). Via the comparison between the numerical simulations by Flac 3D and the experimental results, the rationality of this method was verified. A virtual coefficient T is used to describe the interface properties of the bolt and the grouting body and its influence is analyzed. The results show that the anchoring effect can be enhanced by increasing the length of the anchor in a certain range. However, excessive increase of the bolt length has marginal effect on shear stress and axial load. With increase of the anchor radius, the shear stress peak of the anchor surface is non-

收稿日期:2019-01-05

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

作者简介:宋洋(1982-),男,博士,副教授,主要从事隧道与地下工程研究,E-mail:1195609486@qq.com。

Received:2019-01-05

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 5150412,51174268); Liaoning Education Department General Project(No. LJYL057)

Author brief:Song Yang(1982-),PhD,associate professor,main research interests: tunnel and underground engineering, E-mail:1195609486@qq.com.

linearly reduced and range of action is increased. To avoid stress concentration, the anchor rod with small radius should be avoided. The virtual coefficient T can reveal the difference degree of anchor grouting interface. With the increase of T , the shear stress on the anchor grouting interface increases, while the homogeneous degree of the stress and the action length of the axial load reduce. By taking appropriate T value the anchoring effect is best. The effect of T value on the anchoring mechanism of bolt is significant.

Keywords: hyperbolic model; full-length bonded bolt; virtual coefficient; anchorin

在隧道、基坑等锚杆支护工程中,主要有两种锚杆类型:一是部分粘结式锚杆,二是全长粘结式锚杆;相比之下,全长粘结式锚杆具有以下优点^[1]:全长粘结锚杆提高了破碎岩体的粘聚力和内摩擦角,形成了支护共同体,加强了锚固范围内岩层整体性;在一致的工况下,全长粘结锚固式锚杆的强度储存能力是部分粘结锚杆的数倍,抗剪切破坏能力也优于部分粘结型锚杆,增强了锚杆系统的作用效果;全长粘结式锚杆锚固范围大,锚固范围内每一点都具有支护力,增强了锚固效果。注浆锚杆的破坏形式^[2]一般分为4种:1)锚杆破断;2)锚杆与灌浆体界面破坏;3)注浆体与岩土体界面破坏;4)复合破坏。每种锚固破坏形式和机理都具有不同的影响因素。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。Zhou等^[4]在中性点理论基础上,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。Kim等^[5]、Tremblay等^[6]、Chalie^[7]在荷载传递理论的基础上,分析得到杆体与注浆体的粘结力在最初力传导期间发挥主要作用,当粘结力被克服时,杆体与注浆体之间产生相对位移,发生剪切滑移破坏,界面之间的摩擦阻力占主导作用。利用客观可测物理量与数值模拟技术相结合进行分析研究,可以获得模型内部状态全局的变形破坏过程。McVay等^[8]通过有限元模拟技术对粘结型锚杆在拉拔工况下进行模拟,得到了与实验结果具有高度一致性的结果。模拟结果表明,锚-浆界面先发生破坏,随着荷载增加,基体表面形成隆起,不断膨胀增大直到锚固系统破坏。并没有构建全长粘结型锚杆锚-浆界面破坏应力-应变相互关系模型。

目前,在工程中经常通过经验与理论公式相结合的方式对锚杆设计施工。对于锚杆与注浆体之间的应力传导分布、锚固机理研究还有很多有待完善的地方。本文通过建立锚杆与注浆体相互作用关系模型,结合数值模拟技术,研究拉拔荷载下对全长

注浆粘结型锚杆的锚-浆破坏类型,基于局部变形理论,进行了锚固机理的研究与分析。

1 力学模型的建立

当拉拔荷载作用在较高强度的锚杆上时,若注浆浆体与岩石界面的相对粘结度高于锚杆与注浆体界面,此时,锚固系统先于锚杆与注浆体界面产生破坏。根据局部理论^[9],采纳文献[10]力学模型的建立与公式推导,并将公式中 r 的定义由锚固体半径改为锚杆半径。将岩体与注浆体看成相对变形量为零的整体,称为稳定体。假定稳定体与锚杆的相互剪切作用产生了线性的相对滑移,其力学计算简图如图1所示。

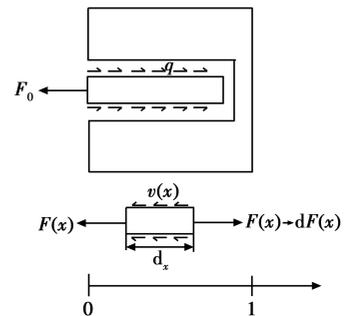


图1 全长粘结锚杆受力分析

Fig. 1 Stress analysis of full-length adhesive bolt

则距离锚头位置为 x 处的剪力集度^[9]为

$$q = -k_s v(x) \quad (1)$$

式中: $v(x)$ 为 x 点处的微段锚杆与稳定体的相对剪切位移; q 为单位长度锚杆上的剪力集度,kN/mm; k_s 为综合切向刚度系数,GPa,同时

$$q = 2\pi r \tau(x) \quad (2)$$

式中: r 为锚杆的半径; $\tau(x)$ 为距离锚头 x 位置处锚杆和稳定体界面上的剪应力。联立式(1)、式(2)可得

$$\tau(x) = -\frac{k_s}{2\pi r} v(x) \quad (3)$$

相对位移 $v(x)$ 在与距 o 点 x 处锚杆的轴向应变的关系式为式(4)。

$$\epsilon(x) = \frac{dv(x)}{dx} = \frac{F(x)}{E_1 A_1} \quad (4)$$

式中: $\epsilon(x)$ 为距离锚头为 x 位置处锚杆的轴向应变; A_1 为锚杆的横截面积; E_1 为锚杆的弹性模量。

根据锚杆微段的受力平衡可得

$$dF(x) = -2\pi r \tau(x) dx \quad (5)$$

由式(5)可得

$$\frac{dF(x)}{dx} = -2\pi r \tau(x) \quad (6)$$

联立式(3)、式(6),可得

$$\frac{dF(x)}{dx} = k_s v(x) \quad (7)$$

式(4)、(7)联立,移项,对其二次求导,可得

$$\frac{d^2 F^2}{dx^2} - \frac{k_s}{E_1 A_1} F(x) = 0 \quad (8)$$

令 $\alpha^2 = \frac{k_s}{E_1 A_1}$,可得

$$\epsilon_x - \alpha^2 \epsilon_x = 0 \quad (9)$$

解得

$$\epsilon_x = c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x} \quad (10)$$

将边界条件带入

$$\text{当 } x=0 \text{ 时: } \epsilon_x = \epsilon_0 = \frac{F_0}{E_1 A_1} \quad (11)$$

$$\text{当 } x=l \text{ 时: } \epsilon_x = 0 \quad (12)$$

将式(11)、式(12)带入式(10),得

$$c_1 = \frac{\epsilon_0}{1 - e^{2\alpha l}} \quad c_2 = \frac{\epsilon_0}{1 - e^{-2\alpha l}}$$

将 c_1 、 c_2 带入式(10),得

$$\epsilon_x = \epsilon_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} - e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} = \epsilon_0 \frac{\sinh[\alpha(l-x)]}{\sinh(\alpha l)} \quad (13)$$

将应变公式带入式(13),可得

$$\tau(x) = \frac{F_0}{2\pi r} \frac{\alpha \cos h[\alpha(l-x)]}{\sinh(\alpha l)} \quad (14)$$

$$F(x) = F_0 \frac{\sinh h[\alpha(l-x)]}{\sinh h(\alpha l)} \quad (15)$$

$$q(x) = \alpha F_0 \frac{\cos h[\alpha(l-x)]}{\sinh h(\alpha l)} \quad (16)$$

2 数值实验

2.1 算例验证

假定 $k_1 = 1.0$ GPa,锚杆半径 $r = 10$ mm,锚杆弹性模量 $E_1 = 210$ GPa,锚杆长度 1.5 m, $F_0 = 180$ kN。经计算 $\alpha = 3.8$ 。

$$\tau(x) = 10.9 \frac{\cos h[3.8(1.5-x)]}{\sinh h(5.7)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sinh h[3.8(1.5-x)]}{\sinh h(5.7)}$$

为了深入研究锚杆基于锚-浆破坏的锚固机理,对锚杆在拉拔工况下进行数值模拟,分析在拉拔力作用下锚杆与注浆体界面的受力情况。

2.2 数值模拟

2.2.1 计算假定 采用有限元软件 Flac 3D 进行数值模拟。依据上文算例,采用了以下假定:

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

假设注浆体与围岩不发生剪切破坏,视为整体,保证在拉拔工况下锚杆与注浆体发生相对位移。

为了更好地模拟拉拔工况下锚杆与注浆体界面剪切作用,采用接触面单元进行模拟。

2.2.2 计算模型 将高为1 m、宽1 m、高1.5 m的长方体模型视为岩土体;对半径 r 为10 mm、长1.5 m的实体单元锚杆进行分析。对于锚杆与注浆体之间的锚固、破坏,采用接触面单元来达到真实的目的。具体材料参数参考算例即可。计算模型如图2;接触面单元如图3;数值模拟结果如图4、图5;计算结果如图6、图7。

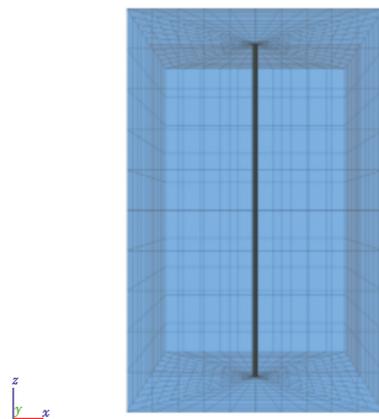


图2 三维数值模拟模型

Fig. 2 3d numerical simulation model

3 计算结果及分析

3.1 基本参数分析

文献[10]研究了在软岩地质条件下基于锚固体局部变形理论的锚固机理,着重研究了基于全长粘结型锚杆锚-浆破坏类型的锚固机理。把注浆体与围岩视为相对变形可以忽略的稳定体。基于锚杆与稳定体界面的相对滑移与剪切作用,式(14)中 r 采用锚杆半径。 k_s 关系到公式的准确性,其物理意义是单位长度上的物质界面产生单位位移所需剪应



图 3 接触面模型

Fig. 3 Contact surface model

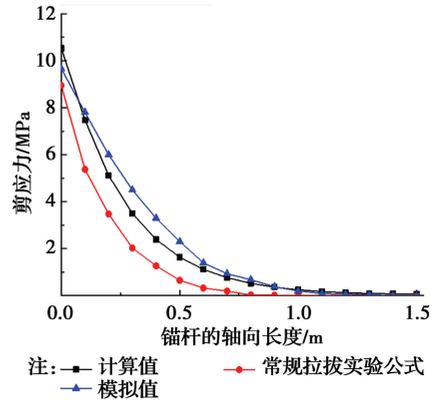


图 6 锚杆界面轴向剪应力分布曲线

Fig. 6 Shear stress distribution curve of bolt interface

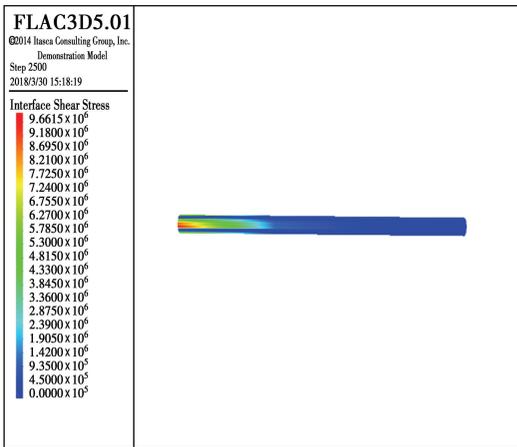


图 4 锚杆界面剪应力分布

Fig. 4 Distribution of shear stress of bolt interface

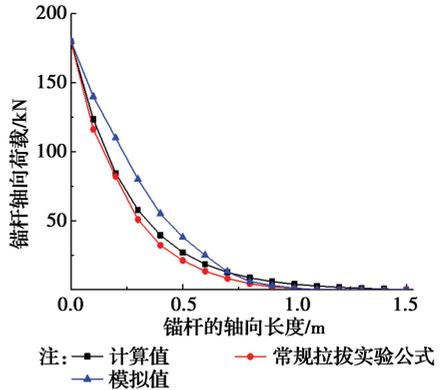


图 7 锚杆界面轴向荷载分布曲线

Fig. 7 Axial load distribution curve of bolt interface

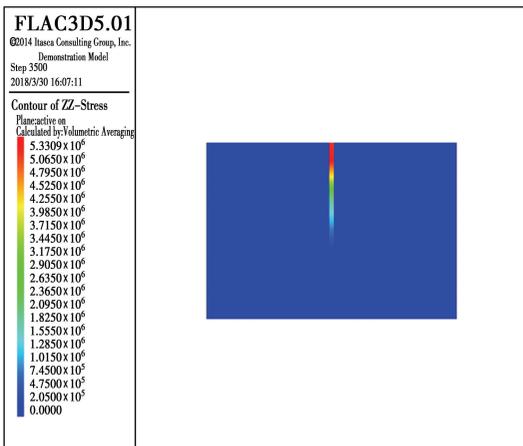


图 5 锚杆轴向荷载分布

Fig. 5 Distribution of bolt axial load

结论,本文主要研究锚-浆界面的相对滑移。由于锚杆的弹性模量远大于注浆体,故视锚杆为刚体,注浆体与围岩为共同变形的稳定体。即 $k_s = k_1$, k_1 为注浆体剪切刚度系数。根据图 6、图 7 可知,计算值研究的是锚杆的锚-浆破坏,在公式中使用参数 r 代表锚杆半径。在常规锚杆拉拔实验公式^[12]中, r 代表锚杆与注浆体共同形成的锚固体半径,其值一定大于锚杆半径。通过对注浆锚杆受力分析可知,在拉拔工况下,拉拔力首先作用于锚杆体上,剪应力首先产生在锚杆与注浆体的界面上,随后传播列注浆体与岩体界面上。由于两个界面的截面积并不相等,所以,其应力分布不同,故计算值剪应力略大于常规拉拔实验公式的计算值。利用数值模拟技术,根据算例的基本参数进行建模分析,得到的曲线与计算值进行对比。如图 6、图 7 所示,经对比可以得出,三者的计算值均符合锚杆应力应变曲线规律。锚杆界面的应力分布呈非线性、非均匀分布,在锚杆距离端头长度 1/3 的锚固范围内,承担了约 90% 的应力。

力。日本学者尾高英雄^[11]则认为,在锚固体与岩石界面发生变形时, k_s 包括两部分,即由注浆体变形引起的部分和岩土变形引起的部分。并认为对于岩石锚杆,岩石与注浆体的弹性模量相差度较大,把岩体当作绝对刚体,变形主要由注浆体产生。根据以上

3.2 影响因素分析

基于锚杆的锚-浆破坏,锚固效果主要由锚杆与注浆体之间的相互作用力承担。锚杆轴力与界面剪应力大小与分布范围代表着锚杆传递到围岩的支护反力与支护范围,是锚杆锚固效果的直观表达。根据式(12)、式(13)可以得出,影响锚杆锚固效果的变量为 α 、 r 、 l 。

3.2.1 锚杆长度的影响 通过改变锚杆长度,分别取1.0、1.5、2.0 m进行分析,其他参数同上,得到不同长度下锚杆体界面剪应力、轴向荷载分布函数。

$l=1.0$ m:

$$\tau(x) = 10.9 \frac{\cos h[3.8(1.0-x)]}{\sin h(3.8)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[3.8(1.0-x)]}{\sin h(3.8)}$$

$l=1.5$ m:

$$\tau(x) = 10.9 \frac{\cos h[3.8(1.5-x)]}{\sin h(5.7)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[3.8(1.5-x)]}{\sin h(5.7)}$$

$l=2.0$ m:

$$\tau(x) = 10.9 \frac{\cos h[3.8(2.0-x)]}{\sin h(7.6)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[3.8(2.0-x)]}{\sin h(7.6)}$$

分析图8、图9可知:锚杆尾部存在一定的剪应力,可以通过适当增长锚杆长度达到增强锚固效果的作用。锚杆长度在一定范围内可以起到增强锚固效果的作用,但超过一定范围后,增加锚杆长度不会影响锚杆剪应力与轴向荷载的大小和分布方式的变化。

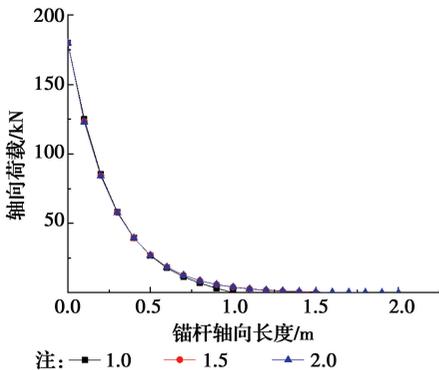


图8 锚杆轴向剪应力分布曲线

Fig. 8 Axial shear stress distribution curve of bolt

3.2.2 锚杆半径的影响 通过改变锚杆半径,取 $r=20$ 、 30 、 40 mm,其他参数同上,得到不同半径下锚

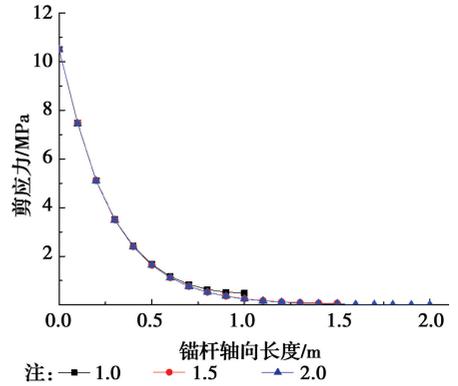


图9 轴向荷载分布曲线

Fig. 9 Axial load distribution curve

杆界面剪应力、轴向荷载分布函数。

$r=20$ mm:

$$\tau(x) = 2.72 \frac{\cos h[1.9(1.5-x)]}{\sin h(2.85)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[1.9(1.5-x)]}{\sin h(2.85)}$$

$r=30$ mm:

$$\tau(x) = 1.24 \frac{\cos h[1.3(1.5-x)]}{\sin h(1.95)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[1.3(1.5-x)]}{\sin h(1.95)}$$

$r=40$ mm:

$$\tau(x) = 0.7 \frac{\cos h[0.97(1.5-x)]}{\sin h(1.455)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h[0.97(1.5-x)]}{\sin h(1.455)}$$

如图10所示,增大锚杆半径,界面剪应力随之减小,作用范围范围随之增大。结合图11所示,锚杆轴力分布均匀度也随之增大。结果表明增大锚杆半径可以增强锚固力作用范围,降低应力集中现象。在实际工程中应避免使用半径较小的锚杆。

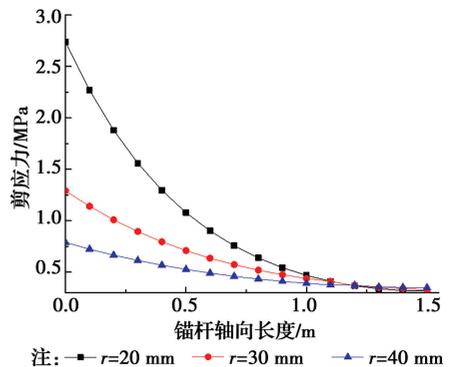


图10 杆轴向剪应力分布曲线

Fig. 10 Axial shear stress distribution curve

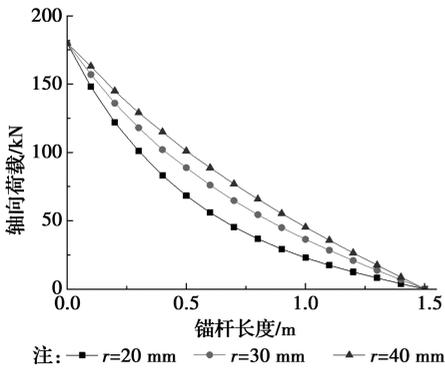


图 11 轴向荷载分布曲线

Fig. 11 Axial load distribution curve

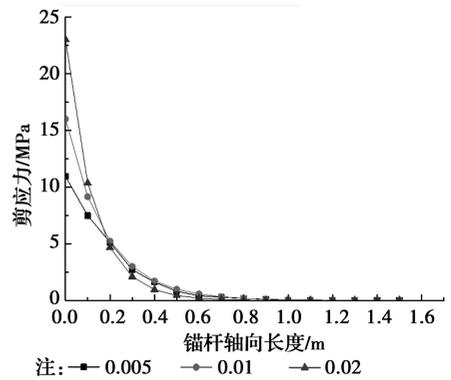


图 12 轴向剪应力分布曲线

Fig. 12 Axial shear stress distribution curve

3.2.3 系数的影响 通过上文可知 $\alpha^2 = k_s/E_1 A_1$ ，通过改变值进行分析，在截面积 A_1 不变的情况下，转化成对 k_s/E_1 比值的分析。 k_s/E_1 定义为表示界面材料性质的虚拟系数 T ，锚杆与注浆体强度相差越大，其 T 值越小，受双向数值影响变化。保持 A_1 数值不变的情况下，取 $T=0.005$ 、 $T=0.01$ 、 $T=0.02$ 进行分析对比。其他参数同上，得到在不同虚拟系数 T 值基础上的锚杆体界面剪应力、轴向荷载分布函数。

$T=0.005$:

$$\tau(x) = 10.9 \frac{\cos h [3.8(1.5-x)]}{\sin h (5.7)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h [3.8(1.5-x)]}{\sin h (5.7)}$$

$T=0.01$:

$$\tau(x) = 16 \frac{\cos h [5.6(1.5-x)]}{\sin h (8.4)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h [5.6(1.5-x)]}{\sin h (8.4)}$$

$T=0.02$:

$$\tau(x) = 23 \frac{\cos h [8(1.5-x)]}{\sin h (12)}$$

$$F(x) = 180 \frac{\sin h [8(1.5-x)]}{\sin h (12)}$$

分析图 12、图 13 可知：通过定义虚拟系数 T ，根据 T 取值大小不同，其剪应力、轴向荷载大小和分布方式不同。随着 T 值增加，锚杆轴向剪应力峰值增大，分布范围减小，其轴向荷载峰值强度没有变，但均匀度缩小。这说明，当两种材料强度不接近时，应力比较集中，荷载作用传递不均匀。但 T 值得界面数值同时影响着锚杆的极限抗拔力。可以通过适当降低 T 值来降低应力集中现象，增大轴向荷载作用的均匀度，以达到最佳锚固效果。

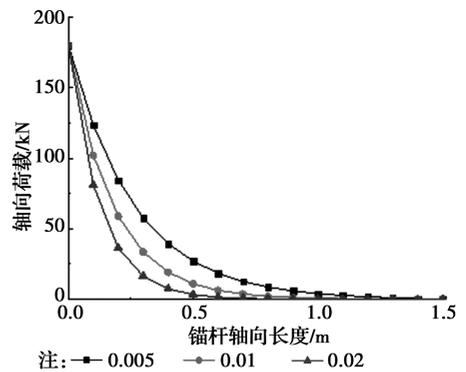


图 13 向荷载分布曲线

Fig. 13 Curve of load distribution

4 结论

基于锚-浆破坏类型，分析得出影响锚固效果的数值表达式，并分析验证了相关参数的准确性及影响规律，具体结论如下：

1) 通过实验公式计算和 Flac 3D 数值模拟技术的对比，确定了选取的 r 及 k_s 参数的准确性；通过相关问题的分析计算，获得全长注浆锚杆锚-浆界面双曲线类型的剪应力和轴向荷载公式。结果表明，界面剪应力峰值处于锚杆端部，整体呈非均匀分布，在锚杆距离端头长度 1/3 的锚固范围内，承载了 90% 以上的剪切作用。

2) 通过对影响参数的分析可以得到，在一定范围内，增加锚杆的长度可以增加界面剪应力的分布范围，起到增强锚固效果的作用；但过度增加锚杆长度对锚杆剪应力与轴向荷载的大小和分布方式影响不大。

3) 随着锚杆体半径的增大，锚杆界面的剪应力峰值呈非线性倍增大，作用均匀度减小，轴向荷载的峰值没发生变化，但作用均匀度增大，锚杆受力分布均匀；在轴向拉力较大的情况下应避免使用半径较小的锚杆。

4) 通过定义界面材料性质虚拟参数 T ，可以描述锚杆与注浆体强度相差度，杆体与注浆体强度相

差越大,其 T 值越小,其值受双向数值影响变化;随着 T 值的增大,锚杆的剪应力峰值增大,作用均匀度减小, T 轴向荷载的作用范围减小 $1/3$;同时,影响 T 值的双向数值也影响着锚杆的最大抗拔力,可见 T 值对锚固效果影响非常明显,可以通过取适当的 T 值达到最佳的锚固效果。

参考文献:

- [1] 陆士良,付国彬,汤雷,等. 采动巷道岩体变形与锚杆锚固力变化规律[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(3): 201-203.
LU S L, FU G B, TANG L, et al. Regularity of deformation of rocks around roadway under mining influence and change of rockbolt resistance [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28 (3): 201-203. (in Chinese)
- [2] 徐开山. 全长粘结锚固系统拉拔变形与破坏机理研究[D]. 山东青岛: 山东科技大学, 2017.
XU K S. Study on drawing deformation and failure mechanism of wholly grouted anchoring system [D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [3] HARIYADI S, MUNEMOTO Y, 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] KIM T S, SIM B K, LEE K S, et al. The effect of pressurized grouting on pullout resistance and the group effect of compression ground anchor [J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2010, 26(6): 5-19.
- [6] TREMBLAY P, LACEY J RW, LECONTE R. The impact of grain orientation and pebble surface roughness on the bond strength of simulated anchor ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 96 (3): 36-44.
- [7] CHARLIE L. Analysis of inflatable rock bolts [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49 (1): 273-289.
- [8] MCVAY M, C, COOK RA. Pull out simulation of post-installed chemically-installed anchors [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 122(9): 1016-1024.
- [9] 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)
- [10] 杨庆,朱训国,栾茂田,等. 全长注浆岩石锚杆双曲线模型的建立及锚固效应的参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 692-698.
YANG Q, ZHU X G, LUAN M T, et al. Development of hyperbolic model for fully grouting rock bolt and parameters analysis for anchoring effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 692-698. (in Chinese)
- [11] ODA H, ZHANG M L, SKIMAYANMA M. Study of load-dispersive anchorage and shear stress in surrounding soils [C]//Proceeding of International Conference on Application and Development of Rock-soil Anchoring Technology, 1997.
- [12] 朱训国. 地下工程中注浆岩石锚杆锚固机理研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2007.
ZHU X G. The reinforcement mechanics of fully grouted rock bolt in underground engineering [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 刘世锋. 预应力锚索在何群峡段危岩体整治工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (Sup2): 2734-2737.
LIU S F. Application of prestressed anchor cable to control engineering of unstable rockmasses in hequnxia experimental section [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Sup2): 2734-2737. (in Chinese)
- [4] 晏勤,李树忱,谢臻,等. 锚杆加固作用下圆形隧道复合岩体围岩特征曲线解析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3021-3027.
YAN Q, LI S C, XIE C, et al. Analytical solution for ground characteristic curve of composite rock mass reinforced by bolts in circular tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (12): 3021-3027. (in Chinese)
- [15] 郝登云,崔千里,何杰,等. 锚杆锚索支护巷道层状顶板变形特征及离层监测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42 (Sup1): 43-50.
HAO D Y, CUI Q L, HE J, et al. Deformation characteristics and separation monitoring of layered roof roadway supported with bolts and cables [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42 (Sup1): 43-50. (in Chinese)
- [16] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 深埋隧道软弱围岩渐进性破坏及其锚固效应试验与模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 617-625.
XU Q W, CHENG P P, ZHU H H, et al. Experimental and numerical studies on progressive failure characteristics of weak surrounding rock mass of tunnel and its anchoring effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 617-625. (in Chinese)