

雒亿平, 史 盛, 言志信. 抗拔荷载作用下锚固体与岩土体界面剪切作用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 58-64. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0143

Luo Yiping, Shi Sheng, Yan Zhixin. Shear interaction of the anchorage body and rock and soil interface under the action of uplift load [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 58-64. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0143

抗拔荷载作用下锚固体与岩土体界面剪切作用

雒亿平^{1,2}, 史 盛^{1,3}, 言志信¹

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 国家电网 甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 为了加深对锚固机理的研究, 通过建立锚杆在受到拉拔荷载作用下锚固体界面侧阻力产生软化的数学模型, 分析了锚固体与周围土体界面分别处于弹性状态、塑性状态、部分进入滑移状态、全部进入滑移状态 4 个阶段锚杆的轴力、位移和锚固界面剪应力, 推导了锚杆产生松动的临界荷载、拉拔荷载与松动长度的关系及锚杆极限抗拔荷载的理论公式。结果表明, 当锚杆在受到拉拔作用后滑移破坏首先在端部产生, 然后荷载向锚杆里端传递, 致使锚固体进一步破坏; 根据拉拔荷载与锚杆松动长度之间的关系, 当锚固体界面的侧阻力大于临界滑移的侧阻力时, 在拉拔荷载作用下锚杆表现为渐进性破坏, 当锚固体界面的侧阻力小于临界滑移的侧阻力时, 则为突发性破坏。

关键词: 锚杆; 抗拔荷载; 锚固体; 岩土体界面; 临界松动荷载; 极限承载力

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)01-0058-07

Shear interaction of anchorage body and rock and soil interface under the action of uplift load

LUO Yi-ping^{1,2}, SHI Sheng^{1,3}, YAN Zhi-xin¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. The Research Institute of Economics and Technology of Gansu Province Electric Power Company State Grid Corporation of China, Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to improve the mechanism study of anchorage, according to the established mathematical model on the interface of the anchoring and surrounding soil turning into softening when under the load of pullout, to analysis the displacement and axial force of anchor when the soil close to the interface of the anchoring body was in the elastic state, the plastic state and slip state. The theoretical formula for the critical loose pullout load of soil anchors and an inherent relationship formula between anchor pullout load and loose length are derived and at last deduced the ultimate pullout load. The results show that the first failure position was at the anchor head and then transmitted to the remote end of anchor system, which further aggravates the deterioration of interior anchor. According to the relationship between loose length and pullout, when the interfacial resistance is greater than the critical lateral side slip resistance, the anchor showed progressive destruction, and on the contrary, the anchor showed sudden destruction. Finally, the theoretical calculations and the actual test results were compared to verify the correctness of the

收稿日期: 2014-02-10 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372307); 国家电网公司科技资助项目(KJ[2013]12)

作者简介: 雒亿平(1984—), 男, 甘肃天水人, 工程师, 博士研究生。通讯作者: 言志信(1961—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士生导师, 博士后。Tel: 0931-8632418, E-mail: yzx10@163.com

theoretical methods.

Key words: anchor; uplift load; anchorage body; rock and soil interface; critical loose load; ultimate capacity

锚杆在工程中是一种固定于岩土体中的受拉构件,其工作原理是一端与工程结构连接,另一端运用水泥砂浆固定,将外部传来的拉拔荷载通过杆体传到深层稳定的岩土体中。影响抗拔锚杆发挥作用的主要因素为锚固界面侧阻力的大小及其分布,它决定锚杆的极限抗拔力。锚杆锚固的影响因素繁多且复杂,使锚杆锚固及其破坏机理的分析十分困难。迄今为止,已有众多学者对这方面进行了研究。文献[1-5]采用理论方法研究了抗拔锚杆的剪应力分布。段建等^[6-7]将锚固体界面假设为黏滑本构模型来研究锚杆的位移及轴力。Xiao^[7], Benmokrane B^[8], Randolph M F^[9]等运用弹塑性模型分析了锚杆的锚固机理。战玉宝等^[10]采用数值模拟方法研究了锚固体的力学效应。由于锚杆在受到一定拉拔荷载作用时,锚固体界面侧阻力会产生软化^[11-12]。现有文献对侧阻力的软化直接简化成为锚固体界面与周围土体的残余剪切强度,此时将侧阻力近似看成定值,这种简化与实际情况有较大差别。

笔者通过建立侧阻力产生软化的数学模型,分析了锚杆在受到拉拔荷载后锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)处于弹性状态、塑性状态、部分进入滑移状态、全部进入滑移状态 4 个阶段。研究了锚固松动的临界荷载、拉拔荷载与松动长度的关系及锚固极限荷载的理论解。

1 砂浆-岩土界面侧阻力模型的建立

竖向抗拔锚杆在受到向上的拉拔力作用时,锚固体与周围土体共同抵抗向上的力而在它们之间的界面上产生侧阻力,由于侧阻力的发挥是由锚固体上端向底端逐渐发挥的,所以不同深度处阻力是不同的。侧阻力最先达到极限值的部位是锚固体上端,当上拔力的作用超过侧阻力极限值时,锚固体与周围土体界面亦即砂浆-岩土界面将软化,从而部分进入滑移状态。随着拉拔荷载的继续增大,锚固体与周围土体界面亦即砂浆-岩土界面软化会向锚固底部发展,直至锚固体与周围土体界面全部进入滑移状态,锚固将产生破坏。锚固体与周围土体界面在不同拉拔荷载作用下的侧阻力是不同的,其数学模型如图 1 所示。 $\tau_s = \tau_0 + f_z \tau_0$ 为弹性阶段时某一深度的阻力值, f 为强度系数。侧阻力 τ 分为 3 个阶段:当荷载较小时,锚固体与周围土体协同作用和变形,共同承载力的作用,处于弹性状态,侧阻力与位移呈线性关系;随着荷载增大,当侧阻力超过极限值 τ_u 时,锚固体与周围土体界面的黏结进入塑性状态;继续拉拔,锚固体与周围土体的位移超过塑性段的界限位移时,锚固体与周围土体界面将部分进入

滑移段,直到全部进入滑移状态。锚固体与周围土体界面侧阻力的定量关系可用函数表示为

$$\tau_s = \begin{cases} \lambda_1 s & (s \leq s_{u1}) \\ \lambda_1 s_{u1} + \lambda_2 (s - s_{u1}) & (s_{u1} < s < s_{u2}) \\ \beta \lambda_1 s_{u1} + \lambda_3 (s - s_{u2}) & (s \geq s_{u2}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 τ_s 为锚固体与周围土体界面侧阻力; s 为锚固体对相邻土体的位移; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为锚固体与周围土体界面分别处于弹性状态和塑性状态和滑移状态时的剪切刚度系数; s_{u1} 为弹性阶段与塑性阶段的界限位移; s_{u2} 为塑性阶段与滑移阶段的界限位移; β 为强度系数,取 0.45。

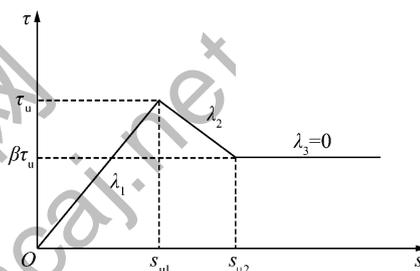


图 1 锚固体侧阻力的数学模型

Fig. 1 Constitutive model of anchorage side resistance

2 岩土中锚杆锚固的力学分析

在分析土锚杆锚固机理时,可将锚固系统看成两部分组成,即一部分是锚杆和锚固剂(砂浆体或注浆体)组成的整体亦即锚固体,另一部分是锚固体周围的土体。同时可将锚固系统近似看成微型桩来研究^[13]。锚杆在受到拉拔荷载作用过程中,砂浆-岩土界面将会处于弹性状态、塑性状态、部分土体进入滑移状态和全部进入滑移状态 4 个阶段。

2.1 处于弹性状态的锚固体与周围岩土体界面

当锚杆端部作用的拉拔力较小时,锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)将处于弹性阶段,如图 2(a)所示。

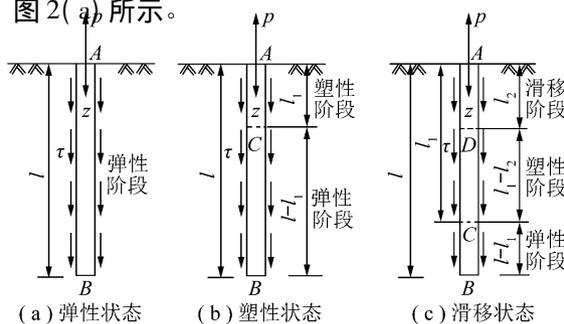


图 2 砂浆与岩土体的相互作用

Fig. 2 Interaction between mortar and rock and soil mass

在锚固段上取微段 dz 作为研究对象 根据锚固段上任一单元体的静力平衡条件可得

$$\frac{dp(z)}{dz} + U\tau(z) = 0 \quad (2)$$

根据锚固体轴力 $p(z)$ 与变形的关系得

$$p(z) = -\frac{ds}{dz}E_pA_p \quad (3)$$

式中 U 为锚固体的周长; A_p 、 E_p 为锚固体的截面面积及弹性模量; $\tau(z)$ 为锚固体与周围土体之间的侧阻力 其计算见式(1)。

将式(3)代入式(2)得

$$\frac{d^2s}{dz^2} = \frac{U}{E_pA_p}\tau(z) \quad (4)$$

由于锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)处于弹性状态 所以 $\tau(z) = \lambda_1 s$ 故有

$$\frac{d^2s}{dz^2} = \frac{\lambda_1 U}{E_pA_p}s \quad (5)$$

求解微分方程(5)可得

$$s(z) = C_1 \exp(\mu_1 z) + C_2 \exp(-\mu_1 z) \quad (6)$$

式中 $\mu_1 = \sqrt{\lambda_1 U / (E_p A_p)}$; C_1 、 C_2 为待定常数。

将式(6)代入式(3)得

$$p(z) = \mu_1 E_p A_p [C_2 \exp(-\mu_1 z) - C_1 \exp(\mu_1 z)] \quad (7)$$

锚固体轴力的边界条件为: $p(z)|_{z=0} = p$ $p(z)|_{z=l} = 0$ (l 为锚杆全长) 则计算出锚固体位移和轴力的表达式为

$$s(z) = \frac{p [\exp(\mu_1 z) + \exp(2\mu_1 l - \mu_1 z)]}{\mu_1 E_p A_p [\exp(2\mu_1 l) - 1]} \quad (8)$$

$$\tau(z) = \frac{\lambda_1 p [\exp(\mu_1 z) + \exp(2\mu_1 l - \mu_1 z)]}{\mu_1 E_p A_p [\exp(2\mu_1 l) - 1]} \quad (9)$$

$$s(z) = \cosh[\mu_2(l_1 - z)]s_c + \frac{\sinh[\mu_2(l_1 - z)]}{(\mu_2 E_p A_p)} p_c + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \left\{ \tau_0 \{1 - \cosh[\mu_2(l_1 - z)]\} + f \sinh[\mu_2(l_1 - z)] / \mu_2 + z - l_1 \cosh[\mu_2(l_1 - z)] \right\} \quad (14)$$

$$\tau(z) = s_{ui}(\lambda_1 - \lambda_2) + \lambda_2 \cosh[\mu_2(l_1 - z)]s_c + \lambda_2 \left\{ \frac{\sinh[\mu_2(l_1 - z)]}{(\mu_2 E_p A_p)} p_c + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \left\{ \tau_0 \{1 - \cosh[\mu_2(l_1 - z)]\} + f \sinh[\mu_2(l_1 - z)] / \mu_2 + z - l_1 \cosh[\mu_2(l_1 - z)] \right\} \right\} \quad (15)$$

$$p(z) = E_p A_p \mu_2 \sinh[\mu_2(l_1 - z)]s_c + \cosh[\mu_2(l_1 - z)]p_c + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \left\{ -\tau_0 E_p A_p \mu_2 \sinh[\mu_2(l_1 - z)] + f E_p A_p \{ \cosh[\mu_2(l_1 - z)] - l_1 \mu_2 \sinh[\mu_2(l_1 - z)] - 1 \} \right\} \quad (16)$$

其中 $\mu_2 = \sqrt{\lambda_2 U / (E_p A_p)}$ 。根据式(12)得

$$s_c = \cosh[\mu_1(l - l_1)]s_B + \left\{ \frac{\sinh[\mu_1(l - l_1)]}{(\mu_1 E_p A_p)} \right\} p_B \quad (17)$$

$$p_c = \mu_1 E_p A_p \sinh[\mu_1(l - l_1)]s_B + \cosh[\mu_1(l - l_1)]p_B \quad (18)$$

2.3 部分进入滑移状态的锚固体与岩土体界面

作用于锚杆上端的拉拔力进一步增大时,当 $s > s_{2u}$ 时,锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)部分进入滑移阶段,但是并没有全部滑移,随着锚固体相对周围土体位移的增大,侧阻力仍然在增加,如图 2(c) 所示。

$$p(z) = \frac{p [\exp(2\mu_1 l - \mu_1 z) - \exp(\mu_1 z)]}{\exp(2\mu_1 l) - 1} \quad (10)$$

根据图 2 及式(8) (10) 有

$$\begin{cases} s_B = s(z)|_{z=l} = \frac{2p \exp(\mu_1 l)}{\mu_1 E_p A_p [\exp(2\mu_1 l) - 1]} \\ p_B = p(z)|_{z=l} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将锚杆位移边界条件 $s(z)|_{z=l} = -s_B$, 轴力边界

条件 $E_p A_p \frac{ds}{dz}|_{z=l} = p_B$ 代入式(5)得

$$\begin{cases} s_A = s(z)|_{z=0} = \cosh(\mu_1 l) s_B + \left[\frac{\sinh(\mu_1 l)}{\mu_1 E_p A_p} \right] p_B \\ p_A = p(z)|_{z=0} = \mu_1 E_p A_p \sinh(\mu_1 l) s_B + \cosh(\mu_1 l) p_B \end{cases} \quad (12)$$

2.2 处于塑性状态的锚固体与周围岩土体界面

随着拉拔力的继续增大,当 $s > s_{ui}$ 时,锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)由浅入深的进入塑性状态,如图 2(b) 所示。

假设临界面 C 的位移及轴力为 s_c 和 p_c 取锚固体微元 dz 为研究对象,则根据静力平衡及边界条件

$$\begin{cases} E_p A_p \frac{d^2s}{dz^2} - [\lambda_1 s_{ui} + \lambda_2 (s - s_{ui})] U = 0 \\ E_p A_p \frac{ds}{dz}|_{z=l_1} = p_c \\ s(z)|_{z=l_1} = -s_c \end{cases} \quad (13)$$

求解微分方程(13)得

设临界滑移段截面 D 的位移及轴力为 s_D 和 p_D , 取微段 dz 进行分析, 则根据静力平衡及边界条件

$$\begin{cases} E_p A_p \frac{d^2 s}{dz^2} - [\beta \lambda_1 s_{u1} + \lambda_3 (s - s_{u2})] U = 0 \\ E_p A_p \frac{ds}{dz} \Big|_{z=l_2} = p_D \\ s(z) \Big|_{z=l_2} = -s_D \end{cases} \quad (19)$$

对微分方程(19) 求解得

$$s(z) = \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] s_D + \left\{ \frac{\sinh [\mu_3 (l_2 - z)]}{\mu_3 E_p A_p} \right\} p_D + C \{ \tau_0 \{ 1 - \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] \} + f \{ \sinh [\mu_3 (l_2 - z)] / \mu_3 + z - l_2 \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] \} \} \quad (20)$$

$$\tau(z) = \beta \lambda_1 s_{u1} - \lambda_3 s_{u2} + \lambda_3 \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] s_D + \lambda_3 \left\{ \frac{\sinh [\mu_3 (l_2 - z)]}{\mu_3 E_p A_p} \right\} p_D + C \lambda_3 \{ \tau_0 \{ 1 - \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] \} + f \{ \sinh [\mu_3 (l_2 - z)] / \mu_3 + z - l_2 \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] \} \} \quad (21)$$

$$p(z) = E_p A_p \mu_3 \sinh [\mu_3 (l_2 - z)] s_D + \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] p_D + C \{ -\tau_0 E_p A_p \mu_3 \sinh [\mu_3 (l_2 - z)] + f E_p A_p \{ \cosh [\mu_3 (l_2 - z)] - l_2 \mu_3 \sinh [\mu_3 (l_2 - z)] - 1 \} \} \quad (22)$$

式中 $\mu_3 = \sqrt{\frac{\lambda_3 U}{E_p A_p}}$; $C = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{\beta - 1}{\lambda_2} - \frac{\beta}{\lambda_3}$ 。

类似于锚固体与周围土体界面处于塑性状态时的位移和轴力的表达式(17) 和(18) 得出

$$s_D = \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] s_C + \left\{ \frac{\sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)]}{(\mu_2 E_p A_p)} \right\} p_C + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \times \{ \tau_0 \{ 1 - \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \} + f \{ \sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] / \mu_2 + l_2 - l_1 \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \} \} \quad (23)$$

$$p_D = \mu_2 E_p A_p \sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] s_C + \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] p_C + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \times \{ -\tau_0 E_p A_p \mu_2 \sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] + f E_p A_p \{ \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] - l_1 \mu_2 \sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] - 1 \} \} \quad (24)$$

根据式(11) 及(18) 将式(24) 代入式(22) 可得锚杆临界松动时的拉拔荷载为

$$p_0 = \left\{ E_p A_p \mu_3 \cosh a \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} [\tau_0 (1 - \cosh b) + f \{ \sinh b / \mu_2 + l_2 - l_1 \cosh b \}] + \cosh a \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} [-\tau_0 E_p A_p \times \mu_2 \sinh b + f E_p A_p (\cosh b - l_1 \mu_2 \sinh b - 1)] - C \tau_0 E_p A_p \mu_3 \sinh a + C f E_p A_p (\cosh a - l_2 \mu_3 \sinh a - 1) \right\} / \left[1 - \frac{2 \cosh c \exp(\mu_1 l)}{\exp(2\mu_1 l) - 1} \left(\frac{\mu_3}{\mu_1} \sinh a \cosh b + \frac{\mu_2}{\mu_1} \cosh a \sinh b + \frac{\mu_3}{\mu_2} \sinh a \sinh b + \cosh a \cosh b \right) \right] \quad (25)$$

式中 $a = \mu_3 l_2$; $b = \mu_2 (l_1 - l_2)$; $c = \mu_1 (l - l_1)$ 。

由于锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面) 部分进入滑移阶段后, 锚固段位移 $s > s_{u2}$, 则在临界滑移面上有

$$s_D = s_{u2} \quad (26)$$

根据图 1 的几何关系可以得出

$$s_{u2} = \frac{(\tau_0 + fl_2) [\lambda_2 + \lambda_1 (\beta - 1)]}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (27)$$

根据式(23) 和(27) 相等可以推出拉拔荷载 p 与滑移段长度 l_2 之间的关系为

$$p = \frac{(\tau_0 + fl_2) [\lambda_2 + \lambda_1 (\beta - 1)]}{\lambda_1 \lambda_2} - \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) \tau_0 \{ (1 - \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \} + f \{ \sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] / \mu_2 - l_2 - l_1 \cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \}}{\lambda_1 \lambda_2} \Big/ \left\{ \frac{2 \exp(\mu_1 l)}{E_p A_p \exp [(2\mu_1 l) - 1]} \times \left[\frac{\cosh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \cosh [\mu_1 (l - l_1)]}{\mu_1} + \frac{\sinh [\mu_2 (l_1 - l_2)] \sinh [\mu_1 (l - l_1)]}{\mu_2} \right] \right\} \quad (28)$$

3 理论模型中参数的确定

基于以上的理论推导,得出锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)的剪应力、位移、锚杆轴力和相应的荷载-位移的关系,需要输入的参数包括能够反映锚固体抗拔特性的刚度系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和界面的侧阻力 τ_s ,以及锚杆在抗拔过程中的临界位移 s_{u1} 和 s_{u2} 。这一系列参数可以通过现场锚杆抗拔试

验的资料进行反分析而得到,而且是最准确的。

为了验证本文所提出理论解的正确性,通过一个试验结果对其进行验证分析。为了说明理论推导的合理性和正确性,选取王贤能等^[14]的锚杆抗拔试验结果进行对比分析。试验中锚固体直径为180 mm,锚杆长为10 m,锚筋采用2根 $\phi 32$ 螺纹钢,钢筋弹性模量为210 GPa,截面面积为1609 mm²,试验数据见表1。

表1 锚杆抗拔试验实测数据

Table 1 Measured data of anchor pullout tests

p/kN	70	210	350	420	490	560	595	630	665
s/mm	0.6	2.19	4.86	6.82	8.85	20.55	23.82	29.24	46.03

根据表1的结果,可以绘出抗拔锚杆的 $p-s$ 关系,如图3所示。由图可知,抗拔锚杆的荷载位移曲线可分为4个阶段,即弹性阶段、塑性阶段、滑移阶段、破坏阶段。还可以看出,自拉拔至A点为弹性阶段,即A点对应于塑性阶段的起点,AB段对应于塑性阶段,即B点对应于滑移阶段的始点,BC段对应于部分滑移阶段,即C点对应于最大抗拔力,亦即锚固自此全部进入滑移状态,直至破坏。通过图中的2个重要阶段的标志点A(490, 8.85)和B(630, 29.24)对模型中的未知参数进行确定。

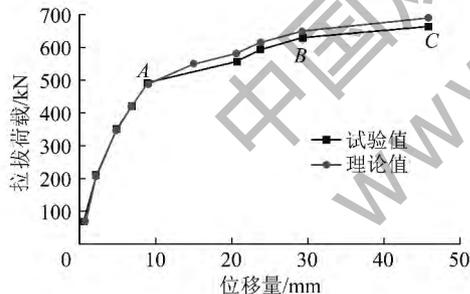


图3 抗拔锚杆的 $p-s$ 关系

Fig. 3 $p-s$ relationship of anchor

由于自拉拔施加开始到A点这一段属于弹性阶段,而A对应的是塑性阶段的开始。根据图1可知 $s_{u1} = 8.85$ mm, $s_{u2} = 29.24$ mm。根据式(11)和(12)可得

$$\frac{P_A}{s_A} = \mu_1 E_p A_p \tanh(\mu_1 l) \quad (29)$$

当锚杆足够长时,由于 $\lim_{l \rightarrow \infty} \tanh(\mu_1 l) = 1$,则式(29)收敛于

$$P_A = s_A \sqrt{\frac{\tau_u U E_p A_p}{s_{u1}}} \quad (30)$$

将A点参数代入式(30)可得

$$\tau_u = \frac{P_A^2}{s_A U E_p A_p} \quad (31)$$

将A(490, 8.85)代入式(31)得 $\tau_u = 1.42$ MPa。

计算中将 $s_{u1} = 8.85$ mm, $s_{u2} = 29.24$ mm, $\tau_u = 1.42$ MPa代入式(11), (12), (23), (24), (28)可获得抗拔锚杆的荷载-位移理论曲线。从图3中可以看出,理论计算结果与试验结果基本吻合,说明了理论推导的合理性。

4 轴应力及界面剪应力和位移的分析

根据反算得出的参数,代入式(8)~(10), (14)~(16), (20)~(22)可以计算出锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)处于不同状态所对应的位移、界面处的剪应力和轴力。计算中参数选取锚杆孔径为100 mm,锚杆的设计长度为5 m,采用螺纹钢,抗拔强度为300 MPa,采用水泥砂浆锚固, $E_p = 27$ GPa。土层弹性模量为30 MPa,泊松比为0.3,黏聚力为36 kPa,摩擦角为26°。在锚杆端部作用拉拔力 p ,分析锚杆的拉拔和破坏机理。

根据式(18)和(23),代入上述参数得出砂浆-岩土界面进入临界塑性和临界滑移的拉拔荷载为102 kN和145 kN。本文计算了拉拔荷载为80, 98, 120, 148, 207 kN情况下锚固体位移、界面剪应力和轴力的分布规律。如图4~6所示。在锚固体端部作用拉拔力时,从锚固体端部由浅入深轴力及位移都在减小,且随着拉拔荷载的增大,锚杆轴力及位移

都相应地增大。当 $p < 102 \text{ kN}$ 时, 位移衰减大体呈线性关系, 由于界面临界塑性状态对应的荷载为 102 kN , 而 $p > 102 \text{ kN}$ 时, 位移衰减呈非线性状态。当拉拔力超过 145 kN 时界面部分进入滑移状态, 此时锚固体的滑动破坏首先在端部产生。当拉拔荷载为 207 kN 时, 根据式 (28) 计算得出锚固体松动长度为 $l_2 = 1.58 \text{ m}$, 此时轴力相比于弹塑性状态下拉拔荷载作用时高出 11% 左右, 锚固体位移比弹塑性状态下拉拔荷载作用时高出 5.2% 左右, 且衰减更慢, 说明锚固上端部分松动后荷载往里端传递, 导致锚固体进一步破坏。

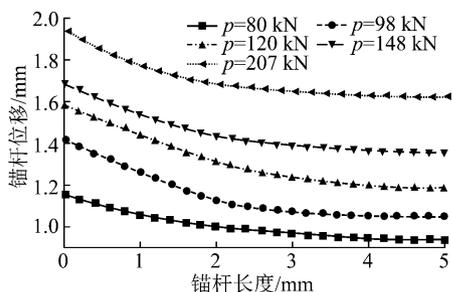


图 4 锚杆位移分布

Fig. 4 Displacement curves of anchorage segments

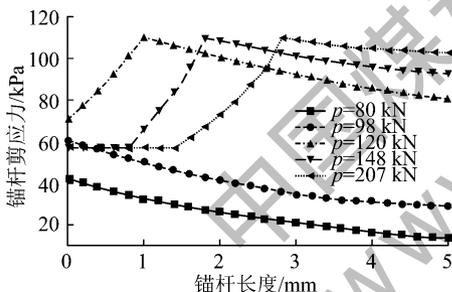


图 5 砂浆-岩土界面剪应力分布

Fig. 5 Shear stress curves of anchor

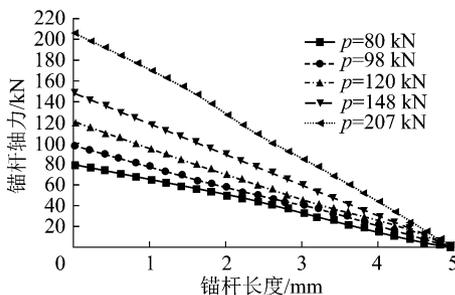


图 6 锚杆轴力分布

Fig. 6 Axial force curves of anchorage segments

总之, 当 $p < 102 \text{ kN}$ 时, 由于抗拔力小于锚固体进入临界塑性状态的值, 所以锚固体与周围土体界

面(砂浆-岩土界面)的剪应力在顶端最大, 向里端逐渐减小。当 $102 \text{ kN} < p < 145 \text{ kN}$ 时, 锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)进入塑性状态, 锚固体顶端部分界面的剪应力较小, 沿锚杆轴向往锚固体底端剪应力逐渐增大, 直至锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)处于弹性状态的区域, 自此处继续往锚固体底端, 界面上剪应力又随沿锚杆轴向逐渐减小。当 $p > 145 \text{ kN}$ 时, 锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)部分进入滑移阶段, 当在 148 kN 的拉拔荷载作用下, 松动长度达到 1 m , 处于塑性状态的长度为 0.7 m , 其余部分处于弹性状态, 当 $p = 207 \text{ kN}$ 时, 松动长度达到 1.58 m , 塑性状态的长度为 1.42 m 。其余部分仍处于弹性状态, 其剪应力的变化规律与前述弹性、塑性状态的类似。

根据式 (28) 锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)部分进入滑移阶段后不同侧阻力条件下拉拔荷载与锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)松动长度之间的关系如图 7 所示。由图 1 知, 锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)进入临界滑移时的侧阻为 29.3 kPa 。分析了 τ_s 为 $53, 38, 21, 16 \text{ kPa}$ 下拉拔力与滑移长度之间的关系。当 τ_s 为 $53, 38 \text{ kPa}$, 大于 29.3 kPa 时, 计算得出锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)的极限抗拔力为 $182.3, 163.7 \text{ kN}$, 均大于临界滑移荷载 145 kN 。从图 7 中可以看出所对应为上升的曲线形式, 说明锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)进入部分滑移阶段后, 即使锚杆的拉拔荷载超过临界松动荷载, 锚杆仍然可以继续承载, 其破坏特征表现为渐进性。而当 $\tau_s < 29.3 \text{ kPa}$ 时所对应的曲线为下降形式, 当拉拔力达到极限荷载后锚杆再无继续承载能力, 其破坏具有突发性。

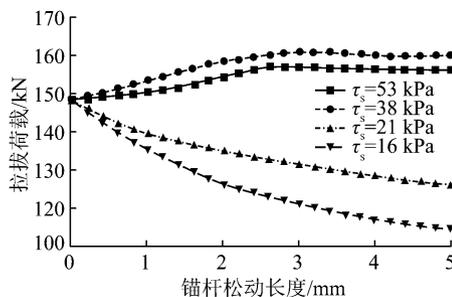


图 7 拉拔荷载与松动长度的关系

Fig. 7 Relation between pullout force and loose length

5 结 论

(1) 通过建立锚固体在受到拉拔力作用下砂浆-岩土界面产生软化的数学模型,根据锚固段的平衡及连续条件建立了微分方程,推导了锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)产生松动的临界荷载、拉拔荷载与松动长度的关系及锚杆极限抗拔荷载的理论公式。

(2) 当有拉拔力作用于锚固体端部时,从锚固体上端由浅入深其轴力及位移都在减小,且随着拉拔荷载的增大,轴力及位移都相应地增大。当拉拔荷载超过临界滑移值时锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)部分进入滑移状态,滑动破坏首先在锚固体端部界面发生,随着荷载的进一步增大,破坏向锚固体底端发展。

(3) 当锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)上的侧阻力大于临界滑移的侧阻力时,根据拉拔荷载和锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)的松动长度之间的关系,则在拉拔力作用下锚固表现为渐进性的破坏,当锚固体与周围土体界面(砂浆-岩土界面)的侧阻力小于临界滑移的侧阻力时,则破坏表现为突发性。

参考文献:

- [1] 魏新江,张世民,危伟.全长黏结式锚杆抗拔力计算公式的探讨[J].岩土工程学报,2006,28(7):902-905.
Wei Xinjiang,Zhang Shimin,Wei Wei. Discussion of formula of pullout resistance for fully grouted anchor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(7):902-905.
- [2] 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 Jiru,Tang Baofu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(2):183-192.
- [3] 何思明,田金昌,周建庭.胶结式预应力锚索锚固段荷载传递特性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):117-121.
He Siming,Tian Jinchang,Zhou Jianting. Study on load transfer of bond prestressed anchor rope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(1):117-121.
- [4] Yang S T,Wu Z M,Hu X Z,et al. Theoretical analysis on pullout of anchor from anchor-mortar-concrete anchorage system [J]. Eng. Fract. Mech. 2008,75(5):961-85.
- [5] 段建,言志信,郭锐剑,等.土层锚杆拉拔界面松动破坏分析[J].岩土工程学报,2012,34(5):936-941.
- [6] Duan Jian,Yan Zhixin,Guo Ruijian,et al. Failure analysis of soil anchors induced by loose interface under pullout load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(5):936-941.
- [7] 段建,言志信,郭锐剑,等.土层缺陷锚杆锚固特性与参数影响分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):3209-3215.
Duan Jian,Yan Zhixin,Guo Ruijian,et al. Analysis of anchorage characteristics and parameter influence of soil imperfect anchor [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2012,43(8):3209-3215.
- [8] Xiao Shujun,Chen Changfu. Mechanical mechanism analysis of tension type anchor based on shear displacement method [J]. Journal of Central South University of Technology,2008,15(1):106-111.
- [9] Benmokrane B,Chennouf A,Mitri H S. Laboratory evaluation of cement based grouts and grouted rock anchors [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.,1995,32(7):633-642.
- [10] Randolph M F,Wroth C P. An analysis of vertical deformation of pile groups [J]. Géotechnique,1979,29(4):157-166.
- [11] 战玉宝,毕宣可,尤春安.预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J].土木工程学报,2007,40(6):49-53.
Zhan Yubao,Bi Xuanke,You Chun'an. Analysis of factors influencing the stress distribution in prestressed cables [J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(6):49-53.
- [12] 张忠苗.桩基工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
Zhang Zhongmiao. Pile foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007.
- [13] 高盟,高广运,杨成斌,等.层状地基群桩沉降计算的剪切位移解析算法[J].岩土力学,2010,31(4):1072-1077.
Gao Meng,Gao Guangyun,Yang Chengbin,et al. Analytical solution for settlement of group piles in layered ground based on shear displacement method [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(4):1072-1077.
- [14] Mylonakis G,Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil [J]. Géotechnique,1998,48(1):55-71.
- [15] 王贤能,叶蓉,周逢君.土层抗浮锚杆试验破坏标准选取的建议[J].地质灾害与环境保护,2001,12(3):73-78.
Wang Xianneng,Ye Rong,Zhou Fengjun. Proposals for the selection of failure criteria in soil float-resisting anchor rod test [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2001,12(3):73-78.
- [16] 郑卫锋,刘利民,刘义,等.输电线路复合式锚杆基础现场试验研究[J].建筑科学,2012,28(7):56-58.
Zheng Weifeng,Liu Limin,Liu Yi,et al. Experiment research of composite anchor foundation in transmission line [J]. Building Science,2012,28(7):56-58.