

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0050

自由段先注浆对预应力锚索抗拔试验结果影响研究

杨庆光, 柳雄, 刘杰, 何杰, 梁凌川, 陈斌

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:为了解决无法采用已注浆锚索进行抗拔试验问题,基于界面脱黏剪切模型,利用荷载传递和弹性变形理论,考虑锚索锚固段与自由段长度比 L_b/L_a 的影响,建立了采用自由段已注浆锚索抗拔试验结果评价锚索抗拔性能的方法。结果表明:自由段注浆对锚索抗拔力有较大幅度的提高,尤其是当界面剪切阶段由弹性向脱黏过渡时,提高比例快速增加,并在脱黏后逐渐趋于稳定。其次,锚索自由段与锚固段交界面处剪切位移和轴力最大,并向两端逐渐降低。随着拉拔力的提高,界面剪切位移和轴力都不断增大,同时向锚索两端的衰减速度也加快。此外,弹性阶段时剪应力曲线为山峰型,而脱黏阶段为马鞍型,并随抗拔力的提高,马鞍开口逐渐扩大。最后,锚固段与自由段长度比 L_b/L_a 对锚索极限抗拔力的影响较小,其极限抗拔力折减系数 γ_Q 取值介于0.81~0.83之间,且 $L_b/L_a=2.5$ 时, γ_Q 计算值仅比实测结果小6.02%,验证了本文方法的可行性。

关键词: 预应力锚索; 自由段先注浆; 界面脱黏; 抗拔特性; 荷载传递

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)10-3317-09

Influence of the pre-grouting in free segment on the pullout test of prestressed anchor cable

YANG Qing-guang, LIU Xiong, LIU Jie, HE Jie, LIANG Ling-chuan, CHEN Bin

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: To overcome the drawback that the ultimate pullout resistance of prestressed anchor cable cannot be directly obtained by the pullout test, this study proposes a pullout resistance performance evaluation method of pre-stressed anchor cable based on the pullout tests on prestressed anchor cable with pre-grouting in the free segment. Based on the interfacial debonding shear model and the theories of load transfer and elastic deformation, the length ratio of the anchor segment to the free segment was considered in the evaluation method. The results indicate that pre-grouting in free segment can significantly improve the pullout resistance capability of anchor cable. When the interfacial deformation behavior transfers from an elastic manner to debonding stage, the improvement of the pullout resistance will be more pronounced, which will tend to be stable after debonding. The shear displacement and axial force at the interface of the free segment and grouting segment is the highest. With increasing the pullout force, both the shear displacement and axial force increase but the increment declines to the two ends of anchor cable. The shear stress curve is one peak type in the elastic stage and then becomes a saddle type in the debonding stage. The opening of the saddle type curve becomes larger with the improvement of the pullout resistance. Finally, the length ratio of anchoring and free segment has insignificant effects to the ultimate pullout resistance. The reduction coefficient γ_Q of the ultimate pullout resistance of pre-grouting anchor cable is in the range from 0.81 to 0.83. The empirical method in paper is feasible due to the fact that merely 6.02% error is existed between the measured ultimate pullout resistance and calculation result when L_b/L_a is 2.5.

Keywords: prestressed anchor cable; pre-grouting in free segment; interfacial debonding; pullout resistance feature; load transfer

1 引言

锚索作为一种岩土体加固技术,由于能有效控制岩土体的变形及加固成本较低,已被广泛应用于

基坑、边坡等加固工程当中,特别是预应力锚索,在工程中应用尤为普遍。预应力是预应力锚索能够有效控制岩土体变形的关键,而预应力的取值与锚索极限抗拔力大小有直接的关系。因此,准确地确

收稿日期: 2020-01-14

修回日期: 2020-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51978260); 湖南省自然科学基金(No. 2020JJ6080, No. 2020JJ6007, No. 2019JJ60051)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978260) and the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ6080, 2020JJ6007, 2019JJ60051).

第一作者简介: 杨庆光,男,1979年生,博士,副教授,主要从事桩土相互作用理论等方面的教学与研究工作。E-mail: yqg1210@hut.edu.cn

定锚索极限抗拔力就成为预应力锚索支护工程设计和施工的关键环节,而锚索极限抗拔力,可以通过锚索现场抗拔试验来确定或验证。

尽管《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)^[1]明确规定锚索抗拔试验需在自由段注浆前完成,但是实际工程中经常出现如下4类自由段已注浆而需要确定锚索极限抗拔力的问题:①由于自由段范围土质条件差,为确保自由段不垮孔,需在成孔后一次性完成锚索全长灌浆情况;②锚索抗拔试验之后完成了自由段注浆,但要求补做抗拔试验情况,而此时已无自由段未注浆锚索可供试验情况;③对于既有预应力锚索,以及锚索上覆荷载等条件发生较大变化,需重新确定锚索极限抗拔力情况;④由于施工单位不规范操作,自由段先于抗拔试验完成注浆无法进行抗拔试验情况。因此,找到通过自由段已注浆锚索抗拔试验结果来评价自由段未注浆锚索抗拔性能的方法,对锚索现场抗拔试验具有重要意义。

如图1所示,对于抗拔试验先与自由段注浆(后注浆)和自由段注浆先于抗拔试验(前注浆)两种情况,锚索的受力存在较大差异。

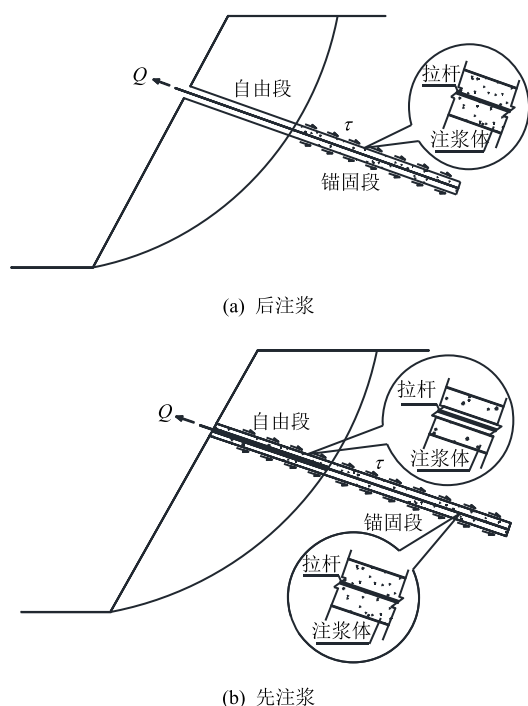


图1 锚索荷载传递简图

Fig.1 Schematic diagram of load transfer of anchor cable

在锚索实际承载中,由于自由段与滑动体为整体,其摩阻力为内力,此时锚索抗拔力全部由锚固段提供。在现场抗拔试验中,此时滑动体没有位移

趋势,自由段与土体剪应力属于外力,对锚索抗拔力产生影响。后注浆情况由于自由段尚未注浆,故自由段对锚索抗拔试验结果没有影响,而前注浆情况,锚索受拉时,钢绞线使锚固段出现向外位移,并间接使得自由段出现阻止锚索向外拔出的剪应力,分担了部分锚头的拉拔力,提高了锚索的抗拔力。因此,如果直接采用自由段已注浆锚索抗拔试验结果评价锚索抗拔性能,显然不合理,且会给工程造成安全隐患。

研究表明,锚杆(索)注浆体与岩土体界面剪切变形特性十分复杂,已有不少学者通过理论和试验的方法进行过相关的研究。Phillips^[2]给出了钢材与浆体结合应力计算公式,建立了锚固体幂函数剪应力模型。Farmer^[3]、黄明华^[4]、应志民^[5]等给出了锚杆锚固段侧阻力的指数形式。张季如等^[6]给出了锚固体侧阻力的双曲线剪应力模型。张培胜等^[7]采用复合指数-双曲线剪切模型,建立了锚固段界面剪应力分布解析解。Yang等^[8]采用分离式模型建立了基于混凝土基质的锚杆二界面分布函数理论。郭锐剑等^[9]基于界面黏结-软化-滑动力学本构模型假定,通过理论和试验验证了该模型的可行性。Ren等^[10]提出了锚固界面剪应力与剪切位移的三折线模型。尤春安等^[11]、蒋忠信^[12]采用相关理论建立了锚固体的剪切应力模型。尤志嘉等^[13]基于锚固体轴对称受力特征开发了一种土层锚固界面试验装置,结合二维数字散斑相关方法,获得随着荷载加大锚固体周边土体的位移场及应变场变化规律。张明义等^[14]用自制的大型直剪仪,开展了不同接触面粗糙度下黏性土与混凝土接触面剪切试验,在法向应力下接触面处土压力和孔隙水压力均稳定后再施加剪应力。王永洪等^[15]进行大型直剪试验待土样在法向应力下固结稳定后卸荷再施加剪应力,研究了不同前期固结压力下超固结黏性土与混凝土界面剪切特性。杨庆光等^[16]利用自行设计的装置进行了锚固体-土剪切试验,深入研究了法向压力、土样压实度和土样含水率等因素对锚固体-土接触面剪切特性的影响。

此外,刘晓明等^[17]考虑自由段的影响,采用荷载传递理论对锚杆变形和承载特性进行研究。吴曙光等^[18]针对拉压分散型锚索锚固机制进行了理论研究,得到了拉压分散型锚索内锚固段剪应力简化计算方法。田裕甲^[19]对拉压分散型锚索进行了破坏试验研究。程贤忠^[20]开展了拉压分散型锚索与普通拉力型锚索的抗拔试验,试验结果显示同等条件下拉压分散型锚索的极限承载力高于普通拉力型锚

索。吴学震等^[21]利用拉压分散型锚索的受力特点,在围岩加固中提出了拉压耦合大变形锚杆,在实际应用中其锚固效果明显优于传统锚杆。刘致彬等^[22]开展了拉力型及压力型锚索锚固体界面剪应力分布曲线的模型试验研究,运用叠加原理得到拉压分散型锚索锚固体界面剪应力分布曲线。尽管针对锚杆界面剪切特性,以及拉压复合情况下锚杆的抗拔性能开展了相关研究,但是,有针对性的考虑自由段注浆对锚索抗拔特性方面的影响及计算理论方面的研究鲜有报道。

因此,本文拟从锚索与土体界面荷载传递规律出发,考虑锚索脱黏的界面剪应力模型,建立考虑自由段注浆的锚索荷载传递方程,并研究锚索锚固段与自由段长度比对锚索极限抗拔力的影响,建立基于自由段先注浆锚索现场抗拔试验的锚索极限抗拔力确定方法,解决工程中不能采用自由段注浆锚索抗拔试验确定锚索极限抗拔力的工程难题。

2 界面剪切模型

根据已有的研究成果^[2-16],本文建议采用如图 2 所示的模型来描述锚索与岩土体之间的界面剪切关系。当界面剪切位移小于 w_1 ,剪应力随剪切位移增加按 k 斜率线性提高,即弹性剪切阶段;当界面剪切位移达到 w_1 ,锚索注浆体与土体界面出现松动滑移现象,即脱黏阶段,此时界面剪应力会出现一个突变现象,剪应力从极值 τ_1 降到 τ_2 ;如果剪切位移再继续增加,锚索脱黏范围将逐渐向远端发展,且脱黏范围内剪应力保持 τ_2 不变,而脱黏范围以外范围仍为弹性剪切阶段,且剪应力与剪切位移呈线性关系。

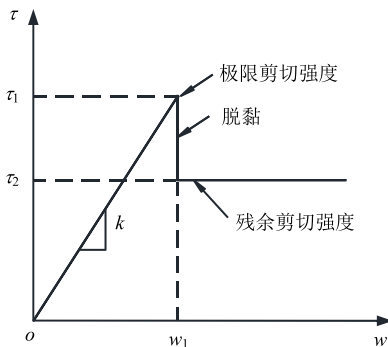


图 2 界面剪切模型

Fig.2 Interfacial shear model

根据图 2,锚索注浆体与岩土体界面剪切模型可以采用下式进行描述:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= kw & w < w_1 \\ \tau &= \tau_2 & w \geq w_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3 锚索荷载传递规律

3.1 锚固段荷载传递规律

锚索锚固系统由锚索、锚固段注浆体和岩土体共同组成。根据规范^[1]可知,锚固系统出现破坏首先出现在注浆体与岩土体界面,而不是钢筋与注浆体之间,因此,可以将钢筋和注浆体视为整体,并对模量进行加权的方法进行分析。首先,对锚固段杆件建立如图 3 所示坐标轴,选取 dx 段微元进行分析,并通过假设锚固体为弹性体,根据单元受力平衡条件和弹性变形理论,可得

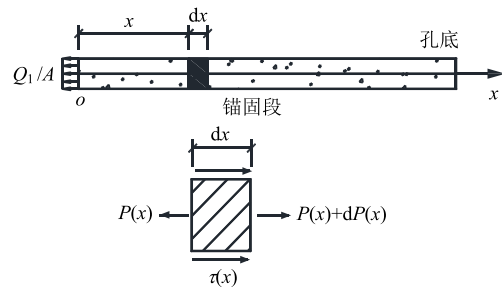


图 3 锚固段计算模型

Fig.3 Calculation model of anchoring segment

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw(x)}{dx} &= -\frac{P(x)}{AE_a} \\ \frac{dP(x)}{dx} + 2\pi r_0 \tau(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: r_0 为锚固体半径; E_a 为锚索与注浆体面积加权模量,可以采用 $E_a = (E_c A_c + E_g A_g) / A$ 计算获得,其中 E_c 和 A_c 分别为注浆体弹性模量和截面积, E_g 和 A_g 分别为锚索弹性模量和截面积; A 为锚固体截面积。

从而可以得到

$$\frac{d^2 w(x)}{dx^2} - \frac{2}{r_0 E_a} \tau(x) = 0 \quad (3)$$

3.1.1 弹性剪切阶段

当锚固段顶端与侧壁土体相对位移满足 $w_0 \leq w_1$ 时,此时锚固段与岩土体剪切变形属于弹性剪切阶段。由式 (1) 可知,此时剪应力与剪切位移满足 $\tau_1(x) = kw_1(x)$,从而得到锚固段位移通解为

$$w_1(x) = c_1 \exp(\beta_1 x) + c_2 \exp(\beta_2 x) \quad (4)$$

式中: $\beta_1 = \sqrt{2k/(r_0 E_a)}$; $\beta_2 = 1/\{AE_a \beta_1 [\exp(2\beta_1 L_{bc}) - 1]\}$, 其中 L_{bc} 为锚索临界锚固段长度, 可以根据黄明华等^[23]建议的方法进行估算, 当 $L_{bc} < L_b$ 时, L_{bc} 取值按估算值取, 当 $L_{bc} \geq L_b$ 时, 取 $L_{bc} = L_b$ 。

假设此时锚索锚固段轴力为 $P_1(x)$, 则满足如下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} P_1(x)|_{x=0} &= Q_1 \\ P_1(x)|_{x=L_{bc}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

联立式 (4)、(5), 可以得到锚固段位移、轴力和剪应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} w_1(x) &= Q_1 \beta_2 \gamma_1 \\ P_1(x) &= Q_1 AE_a \beta_1 \beta_2 \gamma_2 \\ \tau_1(x) &= k Q_1 \beta_2 \gamma_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: Q_1 为原点位置处锚固段抗拔力;

$\gamma_1 = \exp(2\beta_1 L_{bc} - \beta_1 x) + \exp(\beta_1 x)$;

$\gamma_2 = \exp(2\beta_1 L_{bc} - \beta_1 x) + \exp(\beta_1 x)$ 。

3.1.2 脱黏阶段

当锚固段顶端与侧壁土体相对位移满足 $w_0 > w_1$ 时, 此时锚固段处于脱黏阶段。假设 $w_2(x_1) = w_1$, 此时 x_1 点为脱黏分界点。当 $x_1 < L_{bc}$, 则 $0 \leq x \leq x_1$ 段属于脱黏段, 而 $x > x_1$ 段属于弹性段。当 $x_1 = L_{bc}$, 此时锚固段属于全脱黏状态。

对于脱黏段, 由式 (1)、(3) 可以得到

$$w_2(x) = \tau_2 x^2 / (r_0 E_a) + c_3 x + c_4 \quad (7)$$

此时锚固段顶端满足如下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} w_2(x)|_{x=0} &= w_0 \\ P_2(x)|_{x=0} &= Q_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

联立式 (7)、(8) 可以得到

$$\left. \begin{aligned} w_2(x) &= \tau_2 x^2 / (r_0 E_a) - Q_1 x / (AE_a) + w_0 \\ P_2(x) &= Q_1 - 2\pi r_0 \tau_2 x \\ \tau_2(x) &= \tau_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当锚固段为部分脱黏阶段, 通过式 (9), 可以得到脱黏分界点处锚索轴力为

$$P_2(x_1) = Q_1 - 2\pi r_0 \tau_2 x_1 \quad (10)$$

从而通过坐标变换, 可以得到锚固段弹性范围内位移、轴力和剪应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} w_3(x) &= (Q_1 - 2\pi r_0 \tau_2 x_1) \beta_3 \gamma_3 \\ P_3(x) &= (Q_1 - 2\pi r_0 \tau_2 x_1) AE_a \beta_1 \beta_3 \gamma_4 \\ \tau_3(x) &= k w_3(x) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $\beta_3 = 1/\{AE_a \beta_1 [\exp(2\beta_1 L'_b) - 1]\}$, L'_b 为锚固段进入脱黏阶段时未脱黏段长度, $L'_b = L_{bc} - x_1$; $\gamma_3 = \exp[2\beta_1 L'_b - \beta_1(x - x_1)] + \exp[\beta_1(x - x_1)]$; $\gamma_4 = \exp[2\beta_1 L'_b - \beta_1(x - x_1)] - \exp[\beta_1(x - x_1)]$ 。

对于部分脱黏情况, 根据脱黏段与弹性段连续条件, 有

$$w_2(x_1) = w_3(x_1) = w_1 \quad (12)$$

从而可以得到

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= 2\pi r_0 \tau_2 x_1 + w_1 AE_a \beta_1 \lambda_1 \\ w_0 &= w_1 - \tau_2 x_1^2 / (r_0 E_a) + Q_1 x_1 / (AE_a) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\lambda_1 = \exp(2\beta_1 L'_b - 1) / [\exp(2\beta_1 L'_b + 1)]$ 。

3.2 自由段荷载传递规律

对于预应力锚索, 当抗拔试验或锚索张拉完成后再进行自由段注浆, 自由段对于锚索极限抗拔力基本没有影响, 自由段浆体仅起到防腐和保护孔壁的作用。但是, 如果锚索自由段注浆在抗拔试验或张拉之前已经完成, 此时自由段的存在对于极限抗拔力的影响是不能忽略的。

除了自由段锚索与混凝土不直接接触外, 自由段在材料上与锚固段相同, 因此, 可以将自由段注浆体视为弹性杆件, 受轴向力作用, 故同理对自由段杆件建立坐标轴, 如图 4 所示。

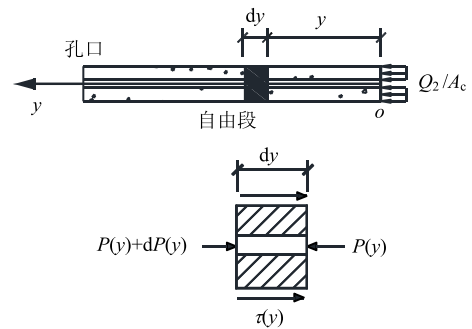


图 4 自由段计算模型

Fig.4 Calculation model of free segment

选取 dy 微元进行受力分析, 根据力的平衡条件和杆件弹性变形理论, 可以得到剪切位移的微分方程为

$$\frac{d^2 w(y)}{dy^2} - \frac{2}{r_0 E_a} \tau(y) = 0 \quad (14)$$

3.2.1 弹性剪切阶段

当坐标原点处界面剪切位移满足 $w_0 \leq w_1$ 条件时, 此时自由段处于弹性剪切阶段。此时坐标原点

位置处满足如下应力边界条件:

$$\left. \begin{aligned} P_1(y)|_{y=0} &= Q_2 \\ P_1(y)|_{y=L_{ac}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: L_{ac} 为锚索临界自由段长度, 可以根据黄明华等^[23]建议的方法进行估算, 当 $L_{ac} < L_a$ 时, L_{ac} 取值按估算值取, 当 $L_{ac} \geq L_a$ 时, 取 $L_{ac} = L_a$ 。

联立式 (1)、(14) 和 (15), 可以得到自由段位移、轴力和剪应力为

$$\left. \begin{aligned} w_1(y) &= Q_2 \beta_5 \gamma_5 \\ P_1(y) &= Q_2 A_c E_c \beta_4 \beta_5 \gamma_6 \\ \tau_1(y) &= k w_1(y) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: Q_2 为原点位置处自由段抗拔力; $\beta_4 = \sqrt{2k/(r_0 E_c)}$; $\beta_5 = 1/\{A_c E_c \beta_4 [\exp(2\beta_4 L_{ac}) - 1]\}$; $\gamma_5 = \exp(2\beta_4 L_{ac} - \beta_4 y) + \exp(\beta_5 y)$; $\gamma_6 = \exp(2\beta_4 L_{ac} - \beta_4 y) - \exp(\beta_5 y)$ 。

3.2.2 脱黏阶段

当坐标原点处界面剪切位移满足 $w_0 > w_1$ 时, 此时自由段处于脱黏阶段。假设 $w(y_1) = w_1$, 此时 y_1 点为脱黏分界点。当 $y_1 < L_{ac}$, 则 $0 \leq y \leq y_1$ 段属于脱黏段, 而 $y_1 < y < L_{ac}$ 段属于弹性剪切段。当 $y_1 = L_{ac}$, 此时自由段属于全脱黏状态。

对于脱黏段, 同理可以得到自由段剪切位移、轴力和剪应力为

$$\left. \begin{aligned} w_2(y) &= \tau_2 y^2 / (r_0 E_c) - Q_2 y / (A_c E_c) + w_0 \\ P_2(y) &= Q_2 - 2\pi r_0 \tau_2 y \\ \tau_2(y) &= \tau_2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

同理可以得到自由段弹性范围内位移、轴力和剪应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} w_3(y) &= (Q_2 - 2\pi r_0 \tau_2 y_1) \beta_6 \gamma_7 \\ P_3(y) &= (Q_2 - 2\pi r_0 \tau_2 y_1) A_c E_c \beta_4 \beta_6 \gamma_8 \\ \tau_3(y) &= k w_3(y) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: $\beta_6 = 1/\{A_c E_c \beta_4 [\exp(2\beta_4 L'_a) - 1]\}$, L'_a 为自由段进入脱黏阶段时未脱黏段长度, $L'_a = L_{ac} - y_1$; $\gamma_7 = \exp[(2\beta_4 L'_a - \beta_4(y - y_1)) + \exp[\beta_4(y - y_1)]]$; $\gamma_8 = \exp[(2\beta_4 L'_a - \beta_4(y - y_1)) - \exp[\beta_4(y - y_1)]]$ 。

对于锚固段部分脱黏情况, 根据脱黏段与弹性段连续条件, 有

$$w_2(y_1) = w_3(y_1) = w_1 \quad (19)$$

从而可以得到

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= 2\pi r_0 \tau_2 y_1 + w_1 A_c E_c \beta_4 \lambda_2 \\ w_0 &= w_1 - \tau_2 y_1^2 / (r_0 E_c) + Q_2 y_1 / (A_c E_c) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: $\lambda_2 = \exp(2\beta_4 L_{ac} - 1) / [\exp\{2\beta_4 L_{ac} + 1\}]$ 。

3.3 自由段前注浆对极限抗拔力影响

根据 3.1 节和 3.2 节的研究, 定义锚固极限抗拔力折减系数 γ_Q , 并通过下式计算:

$$\gamma_Q = Q_1 / (Q_1 + Q_2) \quad (21)$$

3.4 求解步骤

(1) 不考虑自由段情况: 此时有 $Q=Q_1$, 根据式 (6) 及 w_1 , 可以确定出现脱黏时的临界抗拔力 Q_1 。当抗拔力小于脱黏临界抗拔力, 利用式 (6) 可以确定弹性阶段锚固段的位移、轴力和剪应力。当抗拔力大于脱黏临界荷载, 给定 w_0 , 根据式 (13), 可以求出 x_1 和 Q_1 。最后, 将 x_1 和 Q_1 , 代入式 (9) 和式 (10), 从而可以确定部分脱黏阶段锚固段的位移、轴力和剪应力分布, 以及对应的 Q - w_0 关系曲线。

(2) 考虑自由段情况: 此时假设考虑自由段注浆时锚索抗拔力为 Q , 交界面处锚固段抗拔力 Q_1 , 自由段抗拔力 Q_2 。首先, 根据式 (16), 确定自由段脱黏临界抗拔力 Q_2 ; 然后通过步骤 (1), 先确定了锚固段的 Q_1 - w_0 关系曲线; 其次, 根据交界面上的位移协调关系, 当 w_0 小于 w_1 , 由式 (16) 确定自由段抗拔力 Q_2 及自由段位移、轴力和剪应力分布关系, 当 w_0 大于 w_1 , 根据式 (20), 得到自由段处于部分脱黏时自由段的剪切位移、轴力和剪应力的分布关系; 最后, 根据 $Q=Q_1+Q_2$ 的关系, 可以得到考虑自由段影响的 Q - w_0 关系曲线。

(3) 极限抗拔力折减: 根据式 (21), 可以计算锚固段与自由段长度比 (L_b/L_a) 确定情况下锚杆极限抗拔力折减系数 γ_Q , 并将计算结果与实测结果进行对比分析, 验证本文计算方法的可行性。此外, 可以通过改变锚固段与自由段长度比 (L_b/L_a) 比值, 分析 L_b/L_a 对折减系数 γ_Q 影响。

4 工程试验验证

4.1 工程概况

工程选取湖南株洲市天元区文艺复兴广场基坑工程, 基坑开挖 10 m 深, 设置 3 排锚索, 锚索采用 3 ϕ 15.2 钢绞线制作, 孔径 130 mm。3 排锚索距地面分别为 2.0、4.5、7.0 m。由勘察报告钻孔揭露地层为第四系上更新统素填土、粉质黏土和强风化粉质砂岩, 其中素填土平均厚度 6 m, 粉质黏土厚 8.0 m。锚索抗拔试验时分别选取了未自由段注浆的 3-12#和已自由段注浆的 3-15#锚索。根据基坑施工图可知, 3-12#和 3-15#锚索自由段均长 7 m, 锚固段长 17.5 m, 锚索全长均处于粉质黏土层中。根据勘

察报告及相关资料,有关计算参数如下:极限剪切力 $\tau_1=0.06$ kPa, $\tau_2=0.03$ kPa, $k=15$ MPa/m, $w_1=4$ mm。钢绞线弹性模量 $E_g=2.0\times 10^5$ MPa, 截面积 $A_g=5.5$ cm², 注浆体采用 M30 水泥砂浆, 弹性模量 $E_c=2.0\times 10^4$ MPa, 截面积 $A_c=127.2$ cm², 锚固段截面积 $A=132.7$ cm², 等效弹性模量 $E_a=2.7\times 10^4$ MPa。锚索设计抗拔承载力特征值 200 kN, 由规范^[12]确定抗拔试验最大加载量为 300 kN。抗拔试验采用分级加载法进行加载, 共分 8 级加载。由于锚索锚固段全长均处于粉质黏土层中, 根据黄明华等^[23]建议锚杆临界锚固长度计算方法, 锚杆锚固段临界锚固段长度 $L_{bc}=18.3$ m, 大于实际锚杆锚固段长度 17.5 m, 故取 $L_{bc}=L_b=17.5$ m。同理可以确定锚索自由段临界锚固长度 $L_{ac}=9.4$ m, 大于自由段长度 7 m, 故取 $L_{ac}=L_a=7$ m。

4.2 理论与试验结果对比分析

图 5 为锚索现场抗拔试验和按本文方法计算的抗拔力-位移曲线。由于现场抗拔试验是通过加载量控制法来测量锚索变形, 而本文理论计算法是以锚索剪切位移为基础, 反算锚索抗拔力, 因此, 从加载曲线对比发现, 后注浆情况理论曲线与计算曲线在后期存在有一定的偏差。但是, 正如本文所述, 本文基于先注浆情况反推后注浆情况锚索抗拔力, 因此, 以前注浆试验锚索加载极限值 300 kN 所对应位移量 9.52 mm 来确定后注浆情况下的锚索抗拔试验值为 263.7 kN, 而本文计算值为 252.8 kN, 误差为 4.13%, 误差在工程允许范围内。因此, 如果采用自由段注浆锚索抗拔试验确定锚索极限抗拔力, 其折减系数 γ_Q 取值为 0.88。

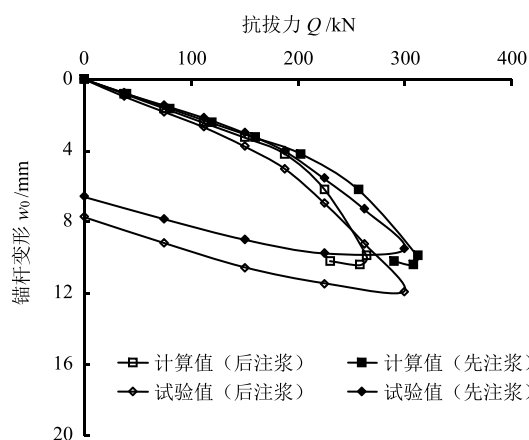


图 5 $Q-w_0$ 对比曲线

Fig.5 Comparison curves of $Q-w_0$

图 6 为锚索抗拔力提高百分比曲线, 由曲线可

知, 前注浆对锚索抗拔力有较明显的影响。当 w_0 值较小时, 界面剪切变形属于弹性阶段, 锚索抗拔力提高比例较小, 且随剪切位移提高基本保持不变; 当 w_0 达到脱黏启动位移量 w_1 值时, 自由段和锚固段将同步进入脱黏阶段, 此时界面剪切变形属于部分脱黏阶段, 锚索抗拔力提高百分比快速提高; 当 w_0 值继续增加, 锚索锚固段和自由段脱黏范围继续扩大, 此时界面剪应力对锚索抗拔力提高比例增速降低。

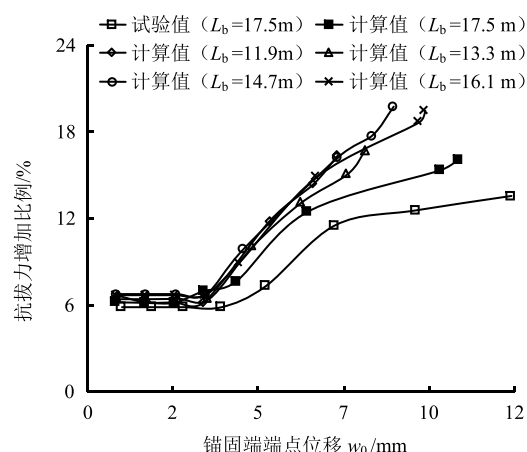


图 6 锚索抗拔力提高曲线

Fig.6 Improvements of the anchor cable pullout resistance

4.3 锚索剪切位移、轴力和剪应力分布规律

图 7 为考虑自由段注浆影响下锚索剪切位移分布曲线。通过计算发现, 当锚索 $Q_1=182.4$ kN 时, 锚固段顶端 $w_0=w_1=4$ mm, 此时锚索锚固段达到出现脱黏的临界点。随着锚索抗拔力 Q_1 值的提高, 锚索轴力和剪切位移均有不同幅度的提高。当 Q_1 值提高到 187.5 kN, 锚固段计算脱黏段长 0.42 m, 且随着 Q_1 的逐级提高, 脱黏段长度分别提高到 3.48、6.54、9.61 m, 而自由段对应的脱黏临界荷载 $Q_2=12.2$ kN, 与锚固段加载量相对应的自由段脱黏段长度分别为 0.33、1.68、2.60、3.43 m。此外, 从图 7 可以看出, 由于预应力锚索自由段与自由段注浆体间没有荷载传递, 所以自由段与锚固段交界面位置处的位移是相等的, 且向两端逐渐降低, 呈“山峰型”。

图 8 为考虑自由段注浆影响下锚索轴力分布曲线。由图可知, 随着孔口抗拔力的不断提高, 锚索剪切位移和轴力都不断提高, 且在交界面位置处, 自由段与锚固段轴力均最大, 并出现突变现象。此外, 从图中可以看出, 轴力向两端均逐渐降低, 而加载量越大, 位移衰减速度也相应越快。

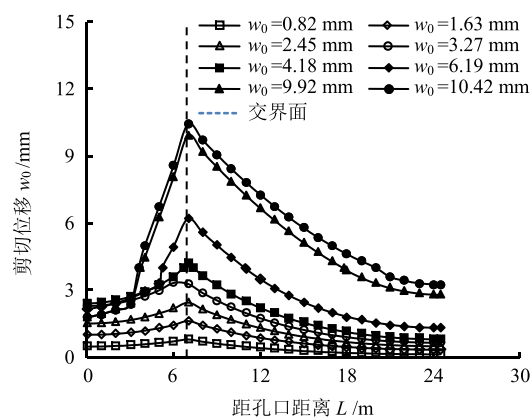


图 7 锚索剪切位移分布曲线

Fig.7 Shear displacement distribution curves of anchor cable

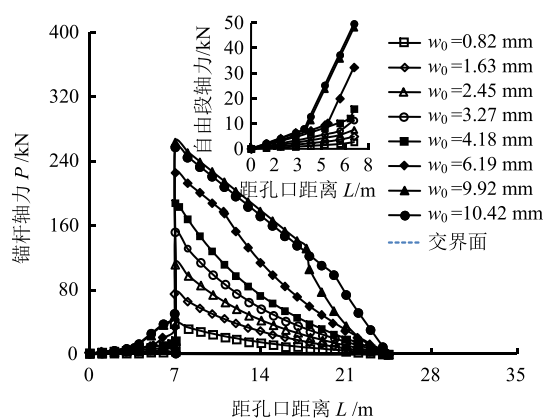


图 8 锚索轴力分布曲线

Fig.8 Axial force distribution curves of anchor cable

图 9 为考虑自由段注浆影响下锚索剪应力分布曲线。由图可知, 加载初期, 锚索处于弹性剪切变形阶段, 锚索剪应力呈现山峰型; 随着锚索剪切状态由弹性向脱黏段过渡, 自由段和锚固段同时进入脱黏阶段, 且随着孔口拉力的提高, 锚索脱黏段逐渐由交界面先锚索两端发展, 剪应力曲线由山峰型向马鞍形过渡, 且随着加载量提高, 马鞍开口逐渐变大。

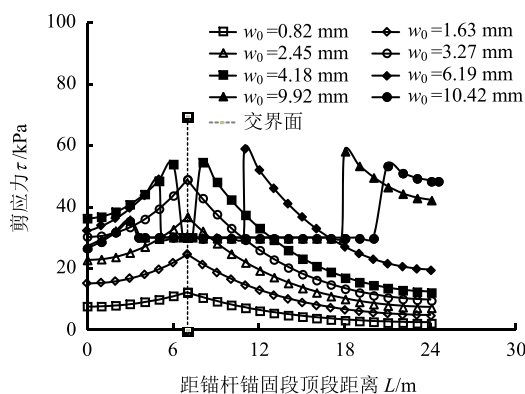


图 9 锚索剪应力分布曲线

Fig.9 Shear stress distribution curves of anchor cable

4.4 锚固段与自由段长度比极限抗拔力影响

图 10 为锚索自由段不变情况下, 改变锚固段长度, 通过本文计算方法获得的锚索抗拔力与剪切位移曲线。由计算结果可以看出, 孔口加载量较小, 锚索剪切位移属于弹性阶段, 此时是否考虑锚索自由段注浆以及锚索锚固段对锚索抗拔力的影响都比较小。但是, 当孔口加载量达到 160 kN 左右后, 锚索自由段注浆及锚固段长度对抗拔力 Q 的影响逐渐变大。当锚固段长度和 w_0 相同时, 先注浆结果均比后注浆偏大, 且加载量越大, 锚固段长度越长, 锚索抗拔力提高比例越高。

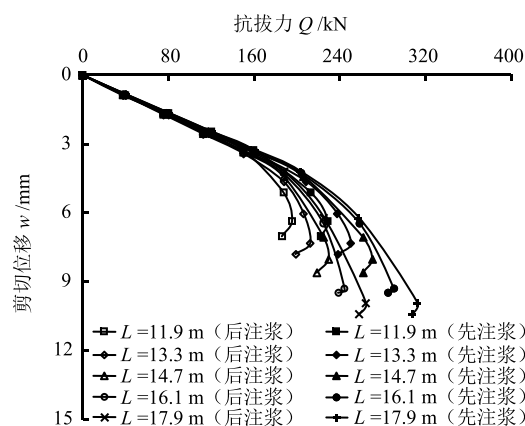
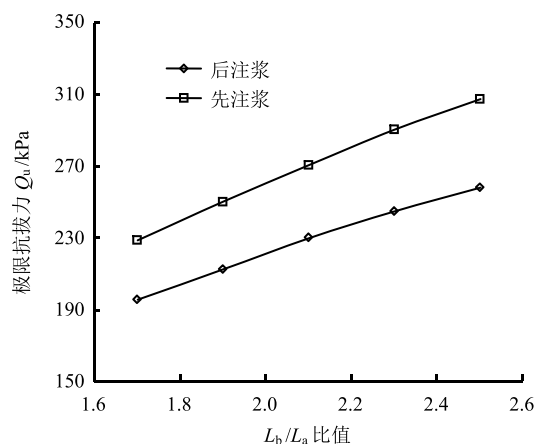
图 10 Q - w_0 计算对比曲线Fig.10 Calculated results of Q - w_0 curves

图 11 和图 12 分别为不同锚固段与自由段长度比 (L_b/L_a) 下, 先注浆锚索极限抗拔力对比曲线及极限抗拔力提高百分比曲线。由图 11 中可以看出, 先注浆锚索极限抗拔力相比后注浆锚索极限抗拔力均有不同程度的提高, 且随着长度比 L_b/L_a 的提高, 两种情况下锚索极限抗拔力基本上满足线性提高的规律。此外, 从图 12 中可以看出, 随着长度比 L_b/L_a 的提高, 前注浆相对后注浆锚索极限抗拔力提高比

图 11 L_b/L_a 与 Q_u 关系曲线Fig.11 Relationship between L_b/L_a and Q_u

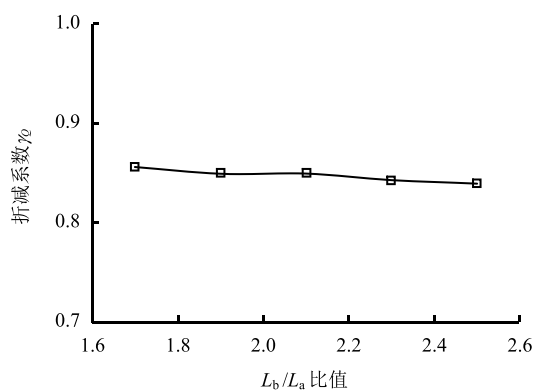


图 12 折减系数 γ_Q 与 L_b/L_a 关系曲线

Fig.12 Relationship between the reduction coefficient γ_Q and L_b/L_a

例基本持平,说明锚索长度比 L_b/L_a 对前后注浆情况下锚索极限抗拔力的影响较小,并因此确定极限抗拔力折减系数 γ_Q 取值范围为 0.83~0.81。当 $L_b/L_a = 2.5$, 实测结果计算 ($\gamma_Q = 0.88$) 比本文计算结果 ($\gamma_Q = 0.81$) 偏大 6.02%, 误差较小,符合工程精度要求,进一步验证了本文方法的可行性。

5 结 论

通过理论分析,并将理论计算结果同实测结果对比分析,得到如下结论:

(1) 基于界面脱黏剪切模型,通过荷载传递理论和弹性变形理论,建立了考虑自由段注浆影响的锚索界面剪切位移、锚索轴力和锚索界面剪应力计算公式,对比分析表明计算结果和试验结果吻合的较好。

(2) 在相同 w_0 位移情况下,自由段注浆对锚索抗拔力有较大幅度的提高。当界面剪切阶段向脱黏阶段过渡时,锚索抗拔力提高比例快速上升,并在脱黏段后趋于稳定。锚索自由段和锚固段界面剪应力是随加载量的提高由交界面逐渐向两端发展的,弹性剪切阶段,剪应力曲线为山峰型,但是随着脱黏段的出现,剪应力分布曲线由山峰型向马鞍形过渡,且随着加载量的提高,马鞍开口也逐渐扩大。

(3) 锚固段与自由段长度比 L_b/L_a 对锚索极限抗拔力的影响较小,极限抗拔力折减系数 γ_Q 取值范围为 0.83~0.81 之间。且 $L_b/L_a = 2.5$ 时,计算 γ_Q 取值仅比实测值偏小 6.02%,符合工程精度要求,进一步验证了本文方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] 重庆市设计院. GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工程出版社, 2013.
- [2] PHILLIPS S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock[R]. London: Cementation Research Ltd., 1970: 1-10.
- [3] FARMER I W, HOLMBERG A. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1975, 12(11): 681-686.
- [4] 黄明华, 周智, 欧进萍. 拉力型锚杆锚固段拉拔受力的非线性全历程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2190-2199.
HUANG Ming-hua, ZHOU Zhi, OU Jin-ping. Nonlinear full-range analysis of load transfer in fixed segment of tensile anchors[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(11): 2190-2199.
- [5] 应志民, 张洁, 尚岳全. 锚杆荷载-位移曲线的指数函数模型研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1331-1334.
YING Zhi-min, ZHANG Jie, SHANG Yue-quan. Index of load displacement curve of anchor rod on the[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1331-1334.
- [6] 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 Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 183-192.
- [7] 张培胜, 阴可. 拉力型锚杆锚固段传力机理的全过程分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 716-723.
ZHANG Pei-sheng, YIN Ke. The whole process of force transmission mechanism of tensile type anchor section analysis method[J]. **Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(4): 716-723.
- [8] YANG S T, WU Z M, HU X Z, et al. Theoretical analysis on pullout of anchor from anchor-mortar-concrete anchorage system[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2008, 75(5): 961-85.
- [9] 郭锐剑, 谌文武, 段建, 等. 考虑界面软化特性的土层锚杆拉拔受力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 254-260.
GUO Rui-jian, CHEN Wen-wu, DUAN Jian, et al.

- Analysis of pullout mechanical analysis of soil anchor based on softening behavior of interface[J]. **Journal of Central South University (Natural Science)**, 2012, 43(10): 254-260.
- [10] REN F F, YANG Z J, CHEN J F, et al. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model[J]. **Construction and Building Materials**, 2010, 24(3): 361-370.
- [11] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925-928. YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 925-928.
- [12] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 696-699. JIANG Zhong-xin. A Gauss curve model on shear stress along anchoring section of anchoring rope of extensional force type[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(6): 696-699.
- [13] 尤志嘉, 付厚利, 尤春安, 等. 土层锚固体应力传递机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 85-92. YOU Zhi-jia, FU Hou-li, YOU Chun-an, et al. Stress transfer mechanism of soil anchor body[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 85-92.
- [14] 张明义, 白晓宇, 高强, 等. 黏性土中桩-土界面受力机制室内试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2167-2174. ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, GAO Qiang, et al. Experimental study on interfacial bearing mechanism of piles in cohesive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2167-2174.
- [15] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 超孔隙水压力对低塑性黏性土桩土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 831-838, 871. WANG Yong-hong, ZHANG Ming-yi, LIU Jun-wei, et al. Influence of excess pore water pressure on shear strength of pile-soil interface in clayey soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(3): 831-838, 871.
- [16] 杨庆光, 梁凌川, 杨诒飞, 等. 填土中锚固体-土接触面剪切特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 235-239. YANG Qing-guang, LIANG Ling-chuan, YANG Yi-fei, et al. Shear characteristics of anchoring solid-soil interface in filled soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(Suppl. 2): 235-239.
- [17] 刘晓明, 张亮亮. 考虑自由段受荷的锚杆变形和承载特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 7-12. LIU Xiao-ming, ZHANG Liang-liang. Research on the deformation and bearing characteristics of anchor considering the load bearing of free section[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2012, 39(6): 7-12.
- [18] 吴曙光, 付红梅, 张岩岩. 拉压分散型锚索锚固机制及工程应用研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2155-2163. WU Shu-guang, FU Hong-mei, ZHANG Yan-yan. Study on anchorage mechanism and application of tension-compression dispersive anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 2155-2163.
- [19] 田裕甲. 压力分散型锚索与拉力型锚索的比较[J]. OVM 通讯, 2002(3): 32-40. TIAN Yu-jia. Comparison of pressure- dispersive anchor cable and tension anchor cable[J]. **OVM Communication**, 2002(3): 32-40.
- [20] 程贤忠. 拉压分散型锚索内锚固段受力机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. CHENG Xian-zhong. Study the anchoring stress mechanism of the tension-compression dispersed anchor cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [21] 吴学震, 王刚, 蒋宇静, 等. 拉压耦合大变形锚杆作用机制及其试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 139-147. WU Xue-zhen, WANG Gang, JIANG Yu-jing, et al. Mechanism of CTC-yield bolts and its experimental research[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(1): 139-147.
- [22] 刘致彬, 孙志恒, 孙金刚. 岩锚新的锚固方式及锚固体系的研究[J]. 水力发电, 1997(3): 48-61. LIU Zhi-bin, SUN Zhi-heng, SUN Jin-gang. Study on anchoring type and anchorage system of rock bolt[J]. **Water Power**, 1997(3): 48-61.
- [23] 黄明华, 赵明华, 陈昌富. 锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4033-4041. HUANG Ming-hua, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu. Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4033-4041.