

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0475

锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算

黄明华, 赵明华, 陈昌富

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 基于锚固界面的一种非线性剪切滑移模型, 采用荷载传递方法分析了锚固长度对锚杆受力特性的影响, 建立了锚杆临界锚固长度的计算方法, 并通过工程案例检验其可行性。结果表明: 锚固长度较小时, 锚杆荷载-位移曲线为承载力较小的单峰曲线; 随着锚固长度的增加, 逐渐衍生出一个平缓变化区段; 锚固长度越小, 界面剪应力分布越均匀, 但整体承载力也越小; 随着锚固长度增加, 界面剪应力分布的不均匀特征逐渐明显, 整体承载力也随之提高; 锚固长度超过一定取值时, 锚固界面软化荷载、抗拔荷载以及整体承载力均趋于定值, 与锚固长度无关; 计算得到的临界锚固长度与工程实际的锚固长度具有较好的一致性, 验证了方法的可行性。

关 键 词: 岩土工程; 锚杆; 临界锚固长度; 荷载传递方法; 非线性界面模型

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)11-4033-10

Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation

HUANG Ming-hua, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Aiming at the influence of anchorage length on stress conditions in bolt as well as the calculation method for its critical value, a nonlinear stress-slipping model of anchorage interface was introduced to develop shear stress, axial force and displacement solutions of bolts using load transfer method. The influence of anchorage length on stress conditions in bolt, mainly including load-displacement relationship, shear stress distribution as well as softening load and ultimate bearing capacity, was discussed. The calculation method for critical anchorage length was proposed and verified by the engineering applications. The results indicate that the load-displacement relationships of bolts with small anchorage length perform as unimodal curves with low bearing capacities. A slowness changing of the segment aroused accompanying with the increasing of anchorage length. Shear stress distributes uniformly along bolts with small anchorage length and the bearing capacity is very small. The non-uniform characteristics occur with the anchorage length increase and the bearing capacity also increases. The softening loads, ultimate bearing capacities and the bearing capacities of bolts approximate toward constant values after the anchorage length reaches critical value. The calculation results of the critical anchorage lengths show good agreement with the actual values in engineering cases for bearing tests, thus this proposed method is feasible and effective.

Keywords: geotechnical engineering; bolts; critical anchorage length; load transfer method; nonlinear interfacial model

1 引 言

锚固技术是岩土工程领域的重要分支, 是一种将锚固杆件埋入地层以充分调用与提高岩土介质自身强度和稳定性的技术, 已在公路交通、隧道支护以及建筑基础等工程中得到了广泛应用^[1]。该技术

核心和关键内容之一是锚固长度的确定, 其是否合理, 直接关系着工程的安全、造价和成败。锚杆的临界锚固长度是指其在一定岩土介质中的极限锚固长度, 超过该长度, 其承载力尚有一定的潜力可以发挥, 但超过该长度, 则超出部分没有作用^[2-3]。

为合理确定锚杆的实际锚固长度, 数十年来国

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51508180, No. 41572298); 中国博士后科学基金项目 (No. 2015M570677); 中央高校基本科研业务费。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51508180, 41572298), the China Postdoctoral Science Foundation (2015M570677) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

第一作者简介: 黄明华, 男, 1983年生, 博士, 助理教授, 主要从事岩土锚固作用机制方面的研究工作。E-mail: hmh666@163.com

内外学者围绕锚固长度对锚杆受力特性的影响及其临界值计算问题展开了相关研究。在试验研究方面, Fujita 等^[4]总结 30 例锚杆试验结果, 指出砂土中锚杆的锚固长度取 6~7 m 为最优。程良奎等^[5]基于拉力型锚杆应变实测结果分析指出, 黏结应力沿锚固段呈不均匀分布, 主要集中在锚固段前端一定范围内。张福明等^[6]对黄土中锚杆受力特性与临界锚固长度进行了试验研究, 指出剪应力峰值和零值的空间距离可判断为临界锚固长度。白晓宇等^[7]基于光纤光栅传感技术获得了 GFRP 抗浮锚杆沿锚固深度的轴力和界面剪应力分布, 并探讨了锚杆轴力的荷载深度和界面剪应力的影响范围。付世雄等^[8]通过基安达矿巷道锚杆的拉拔试验, 测定了锚杆的临界锚固长度, 并分析了锚固长度对锚杆受力的影响。杨校辉等^[9]借助西宁火车站大型深基坑工程, 对不同拉力作用下和施工过程中锚杆的轴力进行试验测试, 提出了基于基坑潜在滑移面确定临界锚固长度的方法。Li 等^[10]将 20 mm 直径钢筋浇筑于 3 种不同强度条件下的水泥砂浆中, 通过拉拔试验获得了该锚杆临界锚固长度与砂浆强度的线性关系。

上述试验研究直接揭示和验证了临界锚固长度存在的实质现象, 并得到了一些确定临界锚固长度经验方法和公式, 但缺乏理论研究的普适性。在这方面, 曹国金等^[11]基于 Mindlin 问题位移解, 提出了不同岩体中拉力型锚杆锚固长度的确定方法。张洁等^[12]基于理想弹塑性模型, 采用荷载传递方法分析了锚固长度与极限承载力的关系, 推导了锚杆临界锚固长度的解析算式。赵明华等^[13]结合轴向 Winkler 地基模型, 引入桩-土荷载传递的剪切位移模式, 推导了锚杆临界锚固长度的计算公式, 并对其主要因素进行了分析。龙照等^[14]采用倒三角形分布近似锚固界面的剪应力, 并根据锚固界面的位移协调原理, 推导出了锚杆临界锚固长度的一种简化计算公式。李怀珍等^[15]基于锚固体-围岩界面滑移脱黏模式, 分析了合理锚固长度的影响因素和设计流程。上述研究成果为计算锚杆的临界锚固长度和合理确定实际锚固长度提供了一定的理论参考。但不足的是, 上述研究均假定锚固界面处于线弹性黏结阶段, 局限于弹性范围的分析, 对锚杆受力过程中的非线性特征、剪应力变化与极限承载力的发挥研究尚未透彻。由锚杆临界锚固长度的定义可知, 确定其大小的关键在于获得锚杆的极限承载力。Zheng^[16]和 Ma^[17]等基于锚杆受力特性的全历程分析, 探讨了锚固界面剪应力、承载能力与其弹/塑性变形之间的关系, 指出一定长度的锚固界面在其产

生局部塑性变形后所能提供的承载能力最大, 并分析了锚固长度对其承载力的影响。但二者均没有给出锚杆临界锚固长度的计算方法, 且都采用三折线模型对剪应力-剪切位移关系进行简化, 没有合理地反映锚固界面剪切作用的非线性特性。

鉴于此, 笔者^[18]基于锚杆的荷载-位移关系, 探索建立了锚固界面剪应力-剪切位移关系的一种非线性模型, 并结合工程实例对锚杆受力特性进行了全历程分析。在此基础上, 本文进一步分析锚固长度对锚杆受力特性的影响, 建立锚杆临界锚固长度的计算方法, 并通过工程实例分析进行验证, 以期锚杆实际锚固长度的确定提供理论参考。

2 非线性界面与受力分析模型

2.1 非线性界面剪切滑移模型

荷载传递法是分析锚杆锚固段受力特性的一种行之有效的方法, 其关键在于确定一个能够有效反映锚固界面剪应力与剪切位移关系的数学模型, 即剪切滑移模型。考虑锚固界面剪切作用的非线性特征, 笔者^[18]基于锚杆荷载-位移曲线, 建立了锚固界面剪切滑移的一种非线性模型:

$$\tau = \frac{9P_{\text{umax}}^2}{EAU} [\exp(-9u) - \exp(-29u)] \quad (1)$$

式中: τ 和 u 分别为锚固界面的剪应力和剪切位移; P_{umax} 为锚杆的最大极限承载力 (即极限抗拔荷载), 是锚杆锚固段足够长时能够承受的最大张拉荷载; 9 为描述张拉荷载随着张拉端位移增大而变化的衰减因子。研究锚杆杆体与注浆体界面 (第一界面) 受力特性时, 式中 E 、 U 、 A 分别为锚杆杆体的弹性模量、截面周长和面积; 研究注浆体与岩土体界面 (第二界面) 受力特性时, 式中 E 、 U 、 A 则分别为锚固体的复合弹性模量、截面周长和面积。这里, P_{umax} 和 9 综合反映了锚固界面剪应力发挥的强弱, 其取值与锚固界面物理力学性质、粗糙程度等因素相关。实际工程中, 二者可以通过张拉试验的荷载-位移实测数据拟合确定, 也可以根据锚固界面的物理力学参数理论计算确定^[18-19]:

$$P_{\text{umax}} = 4\tau_u U \sqrt{EA/K}, \quad 9 = K/(4\tau_u U) \quad (2)$$

式中: K 和 τ_u 分别为锚固界面的综合剪切刚度系数和剪切强度。式 (1) 两侧对 u 同时求一次导数得到

$$\frac{\partial \tau}{\partial u} = \frac{9^2 P_{\text{umax}}^2}{EAU} [2\exp(-29u) - \exp(-9u)] \quad (3)$$

令 $\partial \tau / \partial u = 0$, 得到 $9u = \ln 2$ 。此时, 锚固界面

剪应力取得最大值。

如图 1 所示, 该模型采用单一曲线刻画了锚固界面从弹性黏结阶段发展至塑性变形和滑移阶段的全程受力特性: ①弹性黏结阶段 ($gu \leq \ln 2$), 界面剪应力随着剪切位移的增大而非线性增加至峰值; ②塑性变形和滑移阶段 ($gu > \ln 2$), 剪应力达到峰值后, 界面将产生明显的塑性变形直至整体滑移失效, 此时剪应力随着剪切位移的增加而逐渐减小。基于荷载传递法, 本文采用该非线性界面剪切滑移模型对锚杆临界锚固长度展开研究。

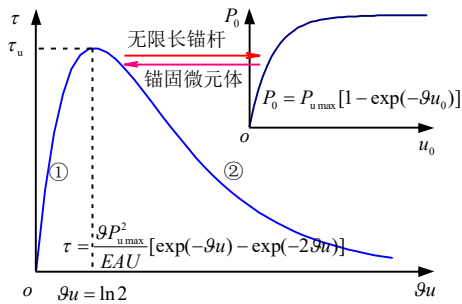


图 1 非线性界面剪切滑移模型

Fig.1 Nonlinear interfacial stress-slipping model

2.2 张拉荷载作用下锚杆受力分析模型

图 2 为张拉荷载作用下岩土体中锚杆的受力分析模型。锚杆锚固段长度为 L_a , 张拉荷载作用下, 锚杆首先通过第一界面的砂浆握裹力、机械咬合力等作用, 将张拉荷载传递至注浆体中; 然后, 再通过第二界面的初始黏聚力、摩擦力等作用将张拉荷载传至岩土体中。张拉过程中, 第一、二界面均可能因自身剪切强度不足, 而产生剪切滑移失效。沿锚杆轴向取微段 dx (考虑第一界面失效时, dx 为锚杆杆体微段; 考虑第二界面失效时, dx 则为锚固体微段) 进行受力分析。

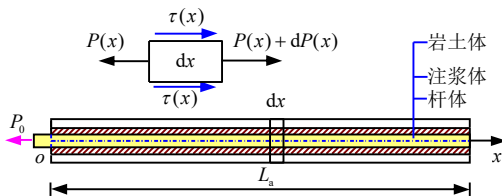


图 2 张拉荷载作用下锚杆受力分析模型

Fig.2 Mechanical analysis model of bolts under tensile load

微段 dx 所受界面剪应力为 $\tau(x)$, 轴力增量为 $dP(x)$, 并假设其材料属性符合胡克定律, 则根据受力平衡条件以及物理和几何方程得到

$$dP(x) + U \cdot \tau(x) dx = 0 \quad (4)$$

$$P(x) = EA\varepsilon(x) = -EA \frac{du(x)}{dx} \quad (5)$$

式(5)两侧同时求一次导数, 并将其代入式(4)中, 得到锚杆荷载传递的基本方程:

$$\frac{d^2u(x)}{dx^2} - \frac{U}{EA} \cdot \tau(x) = 0 \quad (6)$$

将式(1)代入上式, 得到锚杆的荷载传递微分方程:

$$\frac{d^2u(x)}{dx^2} = \frac{9P_{u\max}^2}{EAU} \cdot \{\exp[-gu(x)] - \exp[-2gu(x)]\} \quad (7)$$

求解上述非线性微分方程, 得到锚杆轴向位移、轴力和界面剪应力之解为

$$u(x) = \frac{1}{9} \ln \frac{c_2^2 \phi(x) + 4c_2 + 4(1 - c_1^2) / \phi(x)}{4c_1^2 c_2} \quad (8)$$

$$P(x) = P_{u\max} \cdot \frac{c_1 c_2^2 \phi(x) - 4c_1(1 - c_1^2) / \phi(x)}{c_2^2 \phi(x) + 4c_2 + 4(1 - c_1^2) / \phi(x)} \quad (9)$$

$$\tau(x) = 16\tau_u c_1^2 c_2 \left\{ c_2^2 \phi(x) + 4(1 - c_1^2) [c_2 + 1 / \phi(x)] \right\} / \left[c_2^2 \phi(x) + 4c_2 + 4(1 - c_1^2) / \phi(x) \right]^2 \quad (10)$$

式中: $\phi(x)$ 、 β 、 τ_u 以及待定系数 c_1 和 c_2 分别为

$$\phi(x) = \exp[c_1 \beta (L_a - x)] \quad (11)$$

$$\beta = 9P_{u\max} / (EA), \tau_u = 9P_{u\max}^2 / (4EAU) \quad (12)$$

$$c_1 = \sqrt{(P_L / P_{u\max})^2 - [1 - \exp(-gu_L)]^2} + 1 \quad (13)$$

$$c_2 = \frac{2(1 - c_1^2) \cdot \exp(-gu_L)}{c_1^2 - \exp(-gu_L) - c_1 P_L / P_{u\max}} \quad (14)$$

式中: P_L 和 u_L 分别为锚杆远端的轴向荷载和位移。令 $x=0$, 由式(8)、(9), 分别得到锚杆张拉端的轴向位移 u_0 和轴向荷载 P_0 。当已知 L_a 时, u_0 和 P_0 均可视为 P_L 和 u_L 的函数, 即

$$u_0(u_L, P_L) = \frac{1}{9} \ln \frac{c_2^2 \phi_0 + 4c_2 + 4(1 - c_1^2) / \phi_0}{4c_1^2 c_2} \quad (15)$$

$$P_0(u_L, P_L) = P_{u\max} \cdot \frac{c_1 c_2^2 \phi_0 - 4c_1(1 - c_1^2) / \phi_0}{c_2^2 \phi_0 + 4c_2 + 4(1 - c_1^2) / \phi_0} \quad (16)$$

式中: $\phi_0 = \exp(c_1 \beta L_a)$ 。

3 锚固长度对锚杆受力特性影响分析

为建立锚杆临界锚固长度的计算方法,本文首先研究锚固长度对锚杆受力特性的影响。为使得分析更具普适性,这里采用无量纲锚固长度 βL_a 进行计算和讨论。锚杆临界锚固长度的确定旨在充分挖掘锚固界面的承载潜力,因此,分析过程中应不考虑锚杆远端因承载板设置或锚固体增大引起的承载效应,即计算过程中应假定远端轴向荷载 $P_L = 0$ 。

3.1 对锚杆荷载-位移曲线的影响

取 $\beta L_a = 1 \rightarrow 12$, 逐渐增加锚杆远端的轴向位移 u_L , 根据式 (15)、(16) 计算得到不同锚固长度下锚杆张拉端的荷载-位移曲线,如图 3 所示。可以看出,锚固长度对锚杆荷载-位移曲线的影响较大,其形式随着锚固长度改变而有所区别。当 βL_a 较小时,锚杆荷载-位移曲线为一条单峰曲线,且峰值荷载(锚杆极限承载力)较小,此时随着轴向位移的增加,端部张拉荷载呈现先增大至峰值后逐渐衰减至 0 的特征。随着 βL_a 的增大,锚杆荷载-位移曲线峰值荷载逐渐增大,并趋近于锚杆的最大极限承载力(即 $P_0/P_{umax} \rightarrow 1$);此时,锚杆荷载-位移曲线逐渐衍生出一个与位移轴近似平行的平缓区段,即轴向荷载随着轴向位移的增加具备一个缓慢增大、再平缓下降的稳定失效过程,意味着锚杆具备很好的延性特征。以 $\beta L_a = 12$ 时的荷载-位移曲线为例,对其特征阶段进行分析:

(1) 完全弹性黏结阶段即 OA 段:轴向位移很小 ($\beta u_0 < \ln 2$) 时,由式 (1) 可知,张拉端锚固界面的剪应力小于其剪切强度,此时整个界面都处于弹性黏结状态,张拉荷载与轴向位移成近似线性关系。

(2) 塑性变形产生阶段即 AB 段:当 $\beta u_0 = \ln 2$ 时,张拉端锚固界面的剪应力达到其剪切强度,开始产生塑性变形;此阶段,锚固界面塑性变形很小,轴向荷载随着轴向位移的增加仍有较大程度的提高,但二者之间的非线性关系逐渐明显。这里,将锚固界面开始产生塑性变形即界面软化时所对应的张拉荷载大小称之为软化荷载,记为 P_s 。

(3) 塑性区域发展阶段即 BC 段:轴向荷载稍有增加时,锚固界面将有较大塑性变形且塑性区域不断发展,锚杆轴向位移有明显增加,该阶段张拉荷载逐渐达到荷载-位移曲线的峰值,其大小称之为抗拔荷载即锚杆的极限承载力,记为 P_u 。

(4) 初始滑移阶段即 CD 段:轴向荷载达到 P_u 后,锚固界面塑性区域逐渐发展至远端,以致其产

生明显的轴向位移即开始产生滑移,该阶段轴向荷载随着轴向位移的增加稍有下降,由于锚固界面远端塑性变形很小,其整体上仍能提供较大的承载力。

(5) 滑移扩展阶段即 DE 段:锚固界面塑性变形继续发展,锚杆滑移量持续增加,以致锚固界面提供的承载力快速下降;此时,锚杆产生较大的回缩变形,以致锚杆张拉端轴向位移有所减小。

(6) 滑移失效阶段即 EF 段:锚杆整体滑移继续增加,轴向荷载变得很小,以致被整体拔出失效。

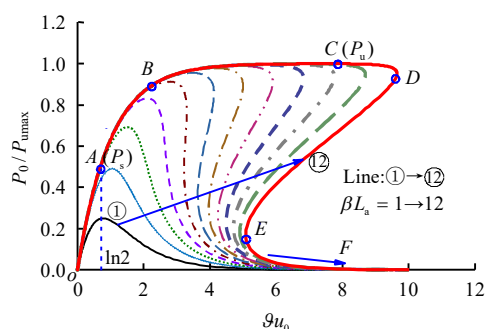


图 3 不同锚固长度下锚杆的荷载-位移曲线
Fig.3 Load-displacement curves of bolts with different anchorage lengths

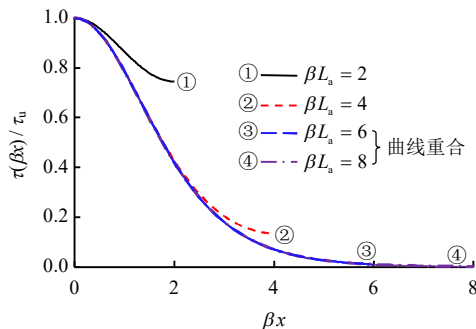
3.2 对锚固界面剪应力分布的影响

上述分析给出了锚杆荷载-位移曲线演变历程中的两个特征荷载,即软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u ,二者分别为锚固界面处于完全弹性黏结阶段和塑性区域发展阶段的临界荷载。借鉴工程设计中极限状态的概念,这里将轴向荷载达到 P_s 时的临界状态,称之为锚固界面的正常使用极限状态,此时锚固界面尚未产生影响正常使用或耐久性的塑性变形;而将轴向荷载达到 P_u 时的临界状态,称之为锚固界面的承载能力极限状态,此时锚固界面发挥了其最大承载潜能。为分析锚固长度对其剪应力分布的影响,取 $\beta L_a = 2, 4, 6, 8$, 计算得到上述两个极限状态下锚固界面的剪应力分布曲线,如图 4 所示。可以看出,锚固长度对两个特定状态下锚固界面的剪应力分布特性具有较为明显的影响:

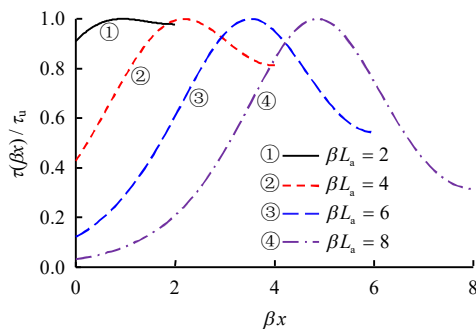
(1) 当锚固界面处于正常使用极限状态时,锚固长度越小(如 $\beta L_a = 2$),其界面剪应力分布越均匀,即锚固界面近端和远端的剪应力差值越小,意味着此时整个锚固范围内的承载潜力均得到了充分发挥;随着锚固长度的增加(如 $\beta L_a = 4$),其界面剪应力分布将逐渐呈现不均匀的特征,锚固界面近端剪应力已经达到剪切强度,但远端剪应力仍然很小,意味着此时锚固界面近端的承载潜力得到了充分发挥,但远端锚固界面的承载潜力发挥程度很小;

特别是, 锚固长度超过一定取值时, 界面剪应力分布将不再受锚固长度大小的影响, 如图 4(a) 中剪应力分布曲线在 βL_a 为 6、8 时已经完全重合, 意味着此时整个锚固界面承载潜力的发挥程度与锚固长度无关。

(2) 当锚固界面处于承载能力极限状态时, 锚固长度越小 (如 $\beta L_a = 2$), 其界面剪应力分布也是越均匀, 整个锚固界面承载潜力的发挥程度较为一致; 随着锚固长度的增加 (如 $\beta L_a = 4$), 其界面剪应力分布变得明显的不均匀, 近端锚固界面由于产生了塑性变形, 剪应力有所降低即承载能力下降, 而远端锚固界面的承载潜力得到了更为充分的发挥; 当锚固长度超过一定取值 (如 $\beta L_a = 6、8$) 时, 近端锚固界面由于产生的塑性变形很大, 剪应力变得很小, 即承载能力很小, 此时锚杆的承载能力主要由远端锚固界面的剪应力提供, 但锚固长度对其整体承载能力大小 (即剪应力分布曲线与横坐标所围成的面积) 的影响很小或可以忽略, 这一点从上文锚杆荷载-位移曲线的峰值变化也可以看出。



(a) 正常使用极限状态



(b) 承载能力极限状态

图 4 不同锚固长度下锚杆界面剪应力分布曲线

Fig.4 Shear stress distributions along bolts with different anchorage lengths

3.3 对后 1/3 锚固界面承载力的影响

已有研究表明, 锚固界面处于完全弹性黏结阶段时, 锚杆的承载力主要由前 2/3 锚固界面提供,

后 1/3 锚固界面的作用很小^[1, 12]。参照文献[12], 这里进一步分析锚固长度对后 1/3 锚固界面承载力的影响。图 5 给出了处于正常使用极限状态和承载能力极限状态时, 后 1/3 锚固界面承载力大小的变化曲线。可以看出, 当锚固长度较小 (如 $\beta L_a \leq 2$) 时, 后 1/3 锚固界面对整体承载力的贡献在 1/3 左右, 即此时锚固界面剪应力分布较为均匀, 各区段承载贡献一致; 锚固界面处于正常使用极限状态时, 后 1/3 锚固界面对整体承载力的贡献 (曲线①) 随着锚固长度的增加逐渐减小, 并趋近于 0, 当 $\beta L_a = 5.5$ 时, 其贡献已经降低至 5% 以下; 当锚固界面处于承载能力极限状态时, 后 1/3 锚固界面对整体承载力的贡献 (曲线②) 则随着锚固长度的增加稍有增大, 幅度在 5% 左右。可见, 锚固长度达到一定值时, 后 1/3 锚固界面对保证锚杆的抗拔荷载 P_u 作用较大, 对维持其软化荷载 P_s 则没有作用。

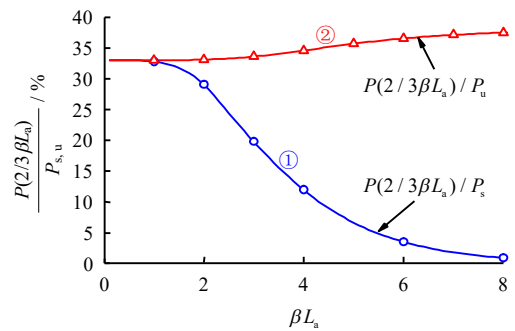


图 5 后 1/3 锚固界面承载力大小变化曲线

Fig.5 Bearing capacity of the last third anchorage length

3.4 对软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u 的影响

利用锚杆远端的轴向荷载条件 (即 $P_L = 0$) 以及张拉端轴向荷载表达式 (式 (16)), 可将锚杆的软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u 分别表示为

$$P_s = P_0(u_L^s, 0), P_u = P_0(u_L^u, 0) \quad (17)$$

式中: u_L^s 、 u_L^u 分别为锚固界面产生软化、张拉荷载达到峰值时锚杆远端的轴向位移。由软化荷载 P_s 的定义 (即 $g u_0 = \ln 2$) 及式 (15) 可知, u_L^s 满足方程:

$$g u_0(u_L^s, 0) - \ln 2 = 0 \quad (18)$$

类似地, 由抗拔荷载 P_u 的定义及式 (16) 可知, u_L^u 满足方程:

$$\left. \frac{\partial P_0(u_L, 0)}{\partial u_L} \right|_{u_L = u_L^u} = 0 \quad (19)$$

由式 (11) ~ (16) 可知, 上述两式分别为 u_L^s

和 u_L^u 的非线性代数方程, 没有解析解。具体分析时, 需要借助于二分法、牛顿迭代法等数值方法计算 u_L^s 和 u_L^u 的大小; 之后, 将 u_L^s 和 u_L^u 的值代入式 (17) 中, 计算锚杆的软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u 。根据上述方法, 图 6 计算给出 P_s 和 P_u 随锚固长度的变化曲线。可以看出, 锚固长度很小 (如 $\beta L_a \leq 2$) 时, P_s 和 P_u 与 βL_a 均成近似线性关系, 且二者之间的差值很小, 意味着此时锚固界面只要产生塑性变形, 则将发生滑移破坏阶段; 随着锚固长度的增大, P_s 和 P_u 均成非线性增加, 且二者之间的差异逐渐明显, 即在前端或局部锚固界面产生塑性变形后, 锚固界面的整体承载潜力得到了更进一步的发挥; 当锚固长度超过一定取值后, P_s 和 P_u 分别趋近于 $1/2P_{u\max}$ 和 $P_{u\max}$, 此时继续增加锚固长度对二者取值没有影响。

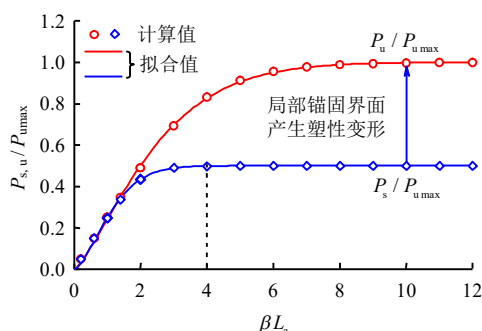


图 6 P_s 和 P_u 与锚固长度的关系

Fig.6 Relationships between P_s (P_u) and anchorage length

4 锚杆临界锚固长度计算方法

上述分析表明, 锚固界面不管是处于正常使用极限状态, 还是处于承载力极限状态, 当锚固长度较小时, 其界面剪应力分布相对均匀, 近似满足工程设计中剪应力均匀分布的假定; 当锚固长度较大时, 其界面剪应力则呈现明显的不均匀分布, 不再符合剪应力均匀分布的假定。特别是, 两个临界状态下, 锚固界面均存在一个长度极限或临界值。锚固长度小于该值时, 整个锚固界面的承载潜力没有得到充分发挥; 锚固长度超过该值时, 继续增加锚固长度并不能提高其总体承载能力。因此, 工程设计中不能简单地依据平均剪应力的概念, 通过按比例增加锚固长度的方法来满足提高设计锚固荷载的需求, 应充分考虑锚杆临界锚固长度的问题。鉴于此, 在上述分析的基础上, 本文进一步建立锚杆临界锚固长度的计算方法。

3.4 节中给出了锚杆软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u 的计算方法, 并对其与锚固长度的关系进行了分析。

由于 u_L^s 和 u_L^u 没有解析解, 以致 P_s 、 P_u 与锚固长度之间均不存在解析关系, 即不能给出锚杆临界锚固长度的解析表达式。这里, 为获得锚杆临界锚固长度的解析表达式, 根据图 6 中锚杆软化荷载 P_s 和抗拔荷载 P_u 的无量纲变化特征, 本文采用指数类函数对二者的计算结果进行拟合:

$$\lambda_1 = 2P_s / P_{u\max} = 1 - \exp[-\kappa_1(\beta L_a)^{\kappa_2}] \quad (20)$$

$$\lambda_2 = P_u / P_{u\max} = 1 - \exp[-\kappa_3(\beta L_a)^{\kappa_4}] \quad (21)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为锚固界面承载能力的发挥系数; κ_1 、 κ_2 、 κ_3 、 κ_4 为拟合参数。拟合结果为

$$\lambda_1 = 1 - \exp[-0.69(\beta L_a)^{1.56}] \quad (22)$$

$$\lambda_2 = 1 - \exp[-0.28(\beta L_a)^{1.33}] \quad (23)$$

从图 6 中可以看出, 上述两式拟合结果与计算值吻合得很好。当 λ_1 和 λ_2 接近于 1 时, 可以认为锚杆锚固长度达到临界值, 此时继续增加锚固长度所带来的承载力贡献可以忽略不计。由式 (22)、(23) 计算得到锚固界面处于正常使用极限状态和承载力极限状态时的临界锚固长度计算表达式:

$$L_a^c = \frac{1}{\beta} \left(1.45 \ln \frac{1}{1 - \lambda_1} \right)^{0.64} \quad (24)$$

$$L_a^u = \frac{1}{\beta} \left(3.57 \ln \frac{1}{1 - \lambda_2} \right)^{0.75} \quad (25)$$

式中: L_a^c 和 L_a^u 分别为锚固界面处于正常使用极限状态和承载力极限状态时的临界锚固长度。对于一些重要工程的永久性锚杆, 不允许出现塑性变形即要求锚固界面处于完全弹性黏结阶段时, 按式 (24) 计算锚杆的临界锚固长度, 且其锚固荷载应小于软化荷载 P_s ; 对于一般性工程或临时性锚杆, 允许锚固界面产生局部塑性变形以获得更大承载力时, 则按式 (25) 计算锚杆的临界锚固长度, 且其锚固荷载应小于抗拔荷载 P_u 。同时, 由式 (12) 可知, β 与锚杆或锚固体的截面面积和弹性模量等因素有关, 实际工程中锚杆既可能发生第一界面失效, 也可能发生第二界面失效。因此, 确定锚杆临界锚固长度时, 需要分别按第一、二界面的锚固参数进行临界锚固长度计算, 分别记为 $L_{a,1}^c$ 和 $L_{a,2}^c$ 、 $L_{a,1}^u$ 和 $L_{a,2}^u$, 并取

$$L_a^c = \min(L_{a,1}^c, L_{a,2}^c) \text{ 和 } L_a^u = \min(L_{a,1}^u, L_{a,2}^u) \quad (26)$$

作为两个极限状态下锚杆的临界锚固长度。在此基础上,设计锚杆的锚固荷载。作为示例,表 1 给出了 λ_1 和 λ_2 一定取值下,锚杆的无量纲临界锚固长度值,当 $\lambda_1 = 0.999$ 时,本文计算的 βL_a^c 与文献[12] 基于理想弹塑性模型得到的理论临界锚固长度值基本一致,本文结果稍大,即考虑锚固界面剪切作用非线性特征后,其临界锚固长度有所增加,意味着相同锚固参数条件下,锚固界面的承载能力也更大。

表 1 锚杆无量纲临界锚固长度

Table 1 Dimensionless critical anchorage length of bolts

$\lambda_1 = \lambda_2$	βL_a^c	βL_a^u
0.999	4.37	11.06
0.995	3.69	9.07
0.990	3.37	8.16
0.950	2.56	5.91

5 工程实例分析

5.1 工程实例 (I)

张季如等^[20]对某工程深基坑支护锚杆进行了现场抗拔试验研究,选取其中的 M1、M2 和 M3 这 3 根锚杆试验结果进行分析。锚杆锚固地层为硬塑黏土层,钻孔孔径为 130 mm,设置倾角为 15° ,杆体为 $3\phi 25$ mm 螺纹钢筋,杆体弹性模量为 200 GPa,沿杆体轴向间隔 1.0~1.5 m 设置隔离支撑环,锚杆自由段长度为 5.5 m,锚固段长度为 17.5 m,锚固体的等效弹性模量为 40 GPa。根据实测的荷载-位移曲线,并扣除自由段伸长量,图 7 给出了该工程锚杆锚固段的荷载-位移曲线,采用指数曲线模型:

$$P_0 = P_{u\max} [1 - \exp(-9u_0)] \quad (27)$$

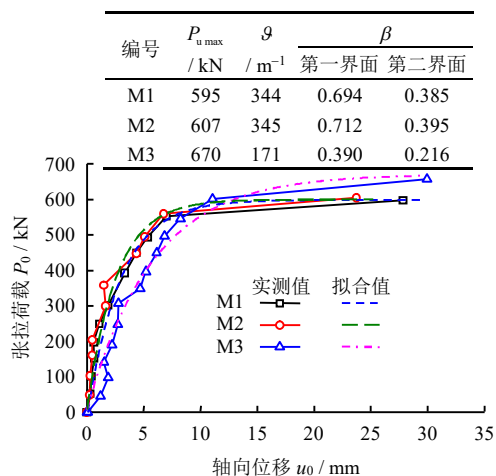


图 7 工程实例 (I) 锚杆荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of bolts in case I

对其进行拟合,得到 3 根锚杆的极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 分别为 595、607 和 607 kN,衰减因子 g 分别为 344、345 和 171 m⁻¹。分别取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.990$ 和 0.999,根据式 (12)、(24)~(26) 得到 3 根锚杆的无量纲参数 β 、临界锚固长度 L_a^c 和 L_a^u ,如图 7 和表 2 所示。这里计算得到的 β 值较文献[20]大,原因在于这里得到的是荷载-位移曲线初始切线刚度条件下的 β 值,而文献[20]得到的是荷载-位移曲线均值刚度条件下的 β 值,因此二者取值存在明显差异。

表 2 实际锚固长度与锚杆临界锚固长度对比

Table 2 Comparison between actual and critical anchorage lengths of bolts

锚杆编号	实际锚固长度 / m	L_a^c / m		L_a^u / m	
		0.990	0.999	0.990	0.999
M1	17.5	4.9	6.3	11.8	15.9
M2	17.5	4.7	6.1	11.5	15.5
M3	17.5	8.7	11.2	21.0	28.4
CaseII	3.0	0.9	1.1	2.1	2.9
CaseIII	1.0	0.5	0.6	1.1	1.5

从图 7 和表 2 可以看出,当 λ_2 取 0.999 时,锚杆 M1 和 M2 的临界锚固长度 L_a^u 分别为 15.9 和 15.5 m,比实际锚固长度的 17.5 m 稍小,即实际锚固长度已经超过承载能力极限状态条件下锚杆的临界锚固长度 L_a^u ,此时锚杆在张拉过程中能够发挥锚固界面极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 的 99.9% 以上。对于 M3 锚杆, λ_2 取 0.999 和 0.990 时,其临界锚固长度 L_a^u 分别为 28.4 和 21.0 m,均比实际锚固长度 17.5 m 要大,即实际锚固长度仍小于上述承载能力发挥系数下的临界锚固长度 L_a^u ,此时锚杆在张拉过程中发挥的承载力在其极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 的 99% 以下。结合图 7 的荷载-位移曲线和文献[20]可知,由于 M3 锚杆接触间隙存在不完全闭合的现象,以致其界面综合剪切刚度系数较小即荷载-位移曲线的初始斜率比 M1 和 M2 锚杆小。由式 (12)、(25) 可知,界面综合剪切刚度系数较小时,锚杆达到相同承载能力发挥系数时的临界锚固长度也越大。因此,相同条件下 M3 锚杆的临界锚固长度比 M1 和 M2 锚杆要大。同时,可以看出,当工程设计中不允许锚固界面出现塑性变形时,3 根锚杆的临界锚固长度 L_a^c 要小于极限承载能力状态下的临界锚固长度 L_a^u ,但此时锚固界面所发挥的承载力也要小很多。

5.2 工程实例 (II 和 III)

刘波等^[21]对一山区基础工程锚杆展开了现场张拉试验研究,锚固钢筋直径为 42 mm,弹性模量

为 210 GPa, 锚固长度为 3.0 m, 钻孔孔径为 150 mm, 锚固材料为细石混凝土, 弹性模量为 26 GPa, 实测荷载-位移曲线如图 8 中 Case II 所示。荣冠等^[22]对螺纹钢锚杆进行了拉拔试验, 锚杆直径为 32 mm, 弹性模量为 210 GPa, 锚固长度为 1 m, 锚杆直接浇筑在混凝土中(只涉及第一界面的失效), 实测荷载-位移曲线如图 8 中 Case III 所示。采用式 (27) 拟合图 8 中的荷载-位移曲线, 得到两根锚杆的极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 分别为 348、308 kN, 衰减因子 ρ 分别为 3 037、3 870 m^{-1} 。取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.990$ 和 0.999, 根据式 (12)、(24) ~ (26) 得到两根锚杆的无量纲参数 β 、临界锚固长度 L_a^c 和 L_a^u , 如图 8 和表 2 所示。可以看出, 当 λ_2 取 0.999 时, 锚杆 Case II 的临界锚固长度 L_a^u 为 2.9 m, 比实际锚固长度的 3.0 m 稍小, 意味着 3.0 m 的锚固长度能够发挥其极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 的 99.9% 以上, 超过承载力极限状态条件下锚杆的临界锚固长度 L_a^u 。当 $\lambda_2 = 0.99$ 时, 锚杆 Case III 的临界锚固长度 $L_a^u = 1.1$ m, 比实际锚固长度的 1.0 m 稍大, 意味着 1.0 m 长的锚固界面能够发挥的承载力在其极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 的 99% 以下, 同时, 要发挥其极限抗拔荷载 $P_{u\max}$ 的 99.9% 以上, 锚杆的锚固长度需增加至 1.5 m。同时, 当锚固界面不允许产生塑性变形时, 两根锚杆的临界锚固长度 L_a^c 均比 L_a^u 要小, 但此时锚固界面所发挥的承载力也要小。

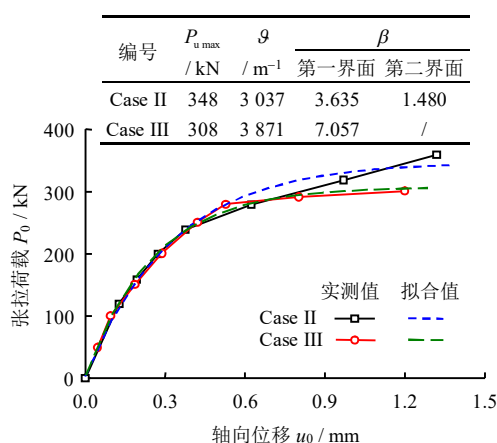


图 8 工程实例 (II 和 III) 锚杆荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves of bolts in case II and III

上述分析表明, 本文建立的计算方法可以有效地得到锚杆的临界锚固长度取值。同时, 工程设计中由于耐久性考虑, 不允许锚固界面产生塑性变形时, 可以按其处于正常使用极限状态下的临界锚固长度进行计算, 临界锚固长度较小, 但允许的承载力较小; 当工程设计中需获得更大的承载力时, 可

以按锚固界面产生局部塑性变形的承载力极限状态进行控制设计时, 所需的临界锚固长度要较大。

6 结 论

(1) 基于一种非线性剪切滑移模型分析了锚固长度对锚杆受力特性的影响。锚固长度较小时, 锚杆荷载-位移曲线为承载力较小的单峰曲线; 随着锚固长度的增加, 其逐渐演变为包括完全弹性黏结、塑性变形产生、塑性区域发展、初始滑移、滑移扩展和滑移失效 6 个特征阶段, 并具有一个与位移轴近似平行的平缓区段和平稳失效过程的特性曲线。

(2) 根据锚杆荷载-位移曲线的两个特征荷载即软化荷载和抗拔荷载, 锚固界面的临界状态可以划分为正常使用极限状态和承载力极限状态; 两个临界状态下, 锚固长度越小, 界面剪应力分布越均匀, 但其整体承载力也越小; 随着锚固长度增加, 界面剪应力分布的不均匀特征逐渐明显, 其整体承载力也随之提高; 锚固长度超过一定取值时, 锚固界面整体承载力的大小与锚固长度无关。

(3) 建立了锚杆临界锚固长度的计算方法, 并通过工程实例分析, 验证了本文方法的有效性。工程设计中, 根据是否允许锚固界面产生塑性变形, 可以按照正常使用极限状态和承载力极限状态进行临界锚固长度计算和承载力控制设计。同时, 临界锚固长度计算的关键在于锚固界面剪切滑移模型及其参数选取, 因此, 在建立计算方法的基础上, 探索不同岩土介质环境下锚固界面参数的选取, 仍是今后的重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668—682.
CHENG Liang-kui, ZHANG Pei-wen, WANG Fan. Several mechanical conceptions for anchored structures in rock and soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 668—682.
- [2] 曾宪明, 赵林, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度与判别方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 404—409.
ZENG Xian-ming, ZHAO Lin, LI Shi-ming, et al. Critical rod anchorage length and discrimination method of anchorage type structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(Supp.): 404—409.
- [3] 曾宪明, 林大路, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,

- 28(增刊 2): 3609—3625.
- ZENG Xian-ming, LIN Da-lu, LI Shi-min, et al. Comprehensive research of critical anchorage length problem of rod of anchorage structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 668—682.
- [4] FUJITA K, UEDA K, KUSABUKA M. A simplified method of predicting load-displacement relationship of ground anchors[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 58—62.
- [5] 程良奎, 胡建林. 土层锚杆的几个力学问题[C]//岩土工程中的锚固技术. 北京: 人民交通出版社, 1996: 1—6.
- CHENG Liang-kui, HU Jian-lin. Several mechanism problems of soil nail[C]//Anchor Techniques of Rock and Soil Engineering. Beijing: China Communication Press, 1996: 1—6.
- [6] 张福明, 梁仕发, 林大路, 等. 土中锚杆临界锚固长度的试验研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(5): 97—100.
- ZHANG Fu-ming, LIANG Shi-fa, LIN Da-lu, et al. Test of critical anchorage length of anchored bolt for soil[J]. **Coal Mining Technology**, 2015, 20(5): 97—100.
- [7] 白晓宇, 张明义, 匡政, 等. 光纤光栅传感技术在 GFRP 抗浮锚杆现场拉拔试验中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 1—9.
- BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, KUANG Zheng, et al. Application of fiber grating sensing technology in pull-out test on glass fiber reinforced polymer anti-floating anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 1—9.
- [8] 付世雄, 郇志强, 岳炜. 基于锚杆拉拔的临界锚固长度测试研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(11): 46—49.
- FU Shi-xiong, GAO Zhi-qiang, YUE Wei. Research on critical anchorage length test based on anchor pull-out[J]. **Coal Technology**, 2016, 35(11): 46—49.
- [9] 杨校辉, 朱彦鹏, 郭楠, 等. 软岩深基坑预应力锚杆承载特性与滑移面确定试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 4287—4298.
- YANG Xiao-hui, ZHU Yan-pen, GUO Nan, et al. Experimental research on bearing behavior of prestressed anchor and determination of slip surface in deep excavation of weak rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.2): 4287—4298.
- [10] LI C C, GUNNAR K, ARE H H. Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 59: 16—23.
- [11] 曹国金, 姜弘道, 熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1141—1145.
- CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao, XIONG Hong-mei. Calculation method of support length for stretched bolts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1141—1145.
- [12] 张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆临界锚固长度解析计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1134—1138.
- ZHANG Jie, SHANG Yue-quan, YE Bin. Analytic calculations of critical anchorage length of bolts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1134—1138.
- [13] 赵明华, 刘峻龙, 龙照. 锚杆变形分析与临界锚固长度计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 17—21.
- ZHAO Ming-hua, LIU Jun-long, LONG Zhao. Deformation analysis of bolt and calculation of critical anchorage length[J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2008, 25(3): 17—21.
- [14] 龙照, 赵明华, 张恩祥, 等. 锚杆临界锚固长度简化计算方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2991—2994.
- LONG Zhao, ZHAO Ming-hua, ZHANG En-xiang, et al. A simplified method for calculating critical anchorage length of bolt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2991—2994.
- [15] 李怀珍, 李学华. 基于界面滑移脱黏的锚杆合理锚固长度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3107—3112.
- LI Huai-zhen, LI Xue-hua. Determination of rational anchorage length of bolt based on slip-debonding failure mode of interface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3107—3112.
- [16] ZHENG J J, DAI J G. Analytical solution for the full-range pull-out behavior of FRP ground anchors[J]. **Construction & Building Materials**, 2014, 58(10): 129—137.
- [17] MA S Q, ZHAO Z Y, NIE W, et al. A numerical model of fully grouted bolts considering the tri-linear shear bond-slip model[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 54: 73—80.