

马天忠,安子申,周 勇,等. 拉力型锚杆合理锚固长度分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(5):43-51.

MA Tian-zhong,AN Zi-shen,ZHOU Yong,et al. Analysis on reasonable anchor length of tensile anchor[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2022,42(5):43-51.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.05.005

## 拉力型锚杆合理锚固长度分析

马天忠<sup>1,2,3</sup>,安子申<sup>1,2,3</sup>,周 勇<sup>1</sup>,王正振<sup>1,2,3</sup>,苏天涛<sup>1,2,3</sup>,高 虹<sup>1,2,3</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050)

**摘 要:**针对锚固系统的主要结构往往埋置于岩体内部,现有关于锚固段长度的计算公式过于繁琐,且岩土工程从业人员多采用经验法进行设计和施工的问题,采用理论推导与实际工程相结合的方法,从锚杆微元体的受力分析入手,给出锚固段微元体受力平衡方程,得到锚杆极限抗拔承载力的计算公式,并以此为基础推导出改进后的锚杆合理锚固长度计算公式。结合现行规范,给出拉力型锚杆合理锚固长度的有效变化范围;通过改变锚杆入射角的大小,结合锚杆内力几何关系分布图,推导得出锚杆倾角变化后的锚固段长度计算修正方法。探究锚杆杆体直径的变化规律,给出其合理的变化范围,并基于兰州市某实际边坡工程,验证该公式计算的锚固段合理锚固长度取值范围的合理性。研究表明:在同一支护结构中,入射角大的锚杆通常其锚固长度也有所增大,验证了提出的锚杆倾角变化后锚固段长度计算修正方法的合理性;得出影响锚杆抗拔能力的因素主要有界面抗剪强度参数、锚固段长度、钻孔直径等,但必须在一定范围内提高其数值,才可以有效提升支护体系的支护能力。

**关键词:**道路工程;边坡工程;锚固系统;锚固长度;锚杆倾角;杆体直径

**中图分类号:**U417.116

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-8879(2022)05-0043-09

## Analysis on reasonable anchor length of tensile anchor

MA Tian-zhong<sup>1,2,3</sup>, AN Zi-shen<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Yong<sup>1</sup>, WANG Zheng-zhen<sup>1,2,3</sup>,  
SU Tian-tao<sup>1,2,3</sup>, GAO Hong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;  
2. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Aiming at the main structure of the anchoring system was often embedded in the rock mass, and the existing calculation formula for the length of the anchoring section is too complicated, and the geotechnical engineering practitioners mostly use the empirical method for design and construction. The method of combining theoretical derivation and practical engineering was adopted and started with the force analysis of the anchor rod micro-element. The force

收稿日期:2022-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52068048);甘肃省自然科学基金项目(21JR11RM052,1308RJZA140);

甘肃省住房和城乡建设厅建设科技项目(JK2022-03)

作者简介:马天忠(1979-),男,甘肃靖远人,副教授,工学博士,E-mail:matz0914@163.com。

通讯作者:苏天涛(1989-),男,甘肃兰州人,工学博士研究生,E-mail:sutt5008@163.com。

balance equation of the micro-element of the anchoring section was given and the formula of the ultimate pull-out bearing capacity of the anchor was obtained. Based on this, the improved formula for calculating the reasonable anchorage length of the bolt was derived. Combined with the current specification, the effective variation range of the reasonable anchoring length of the tension anchor was given. By changing the size of the incident angle of the bolt, the geometric relationship distribution diagram of the internal force of the bolt was combined. After deducing the change of the inclination angle of the anchor rod, the correction method of the length calculation of the anchoring section was obtained. After exploring the variation law of the diameter of the bolt body, the reasonable variation range was given. And based on an actual slope project in Lanzhou City, the rationality of the reasonable anchorage length range of the anchorage section calculated by this formula was verified. The results show that in the same supporting structure, the anchoring length of the anchor rod with a large incident angle is usually increased, which verifies the rationality of the proposed anchoring length correction method after the anchor rod inclination angle changes. It is concluded that the main factors affecting the pullout resistance of the bolt are the interface shear strength parameters, the length of the anchoring section, the diameter of the borehole, etc., but the values must be increased within a certain range to effectively improve the supporting capacity of the supporting system. 3 tabs, 8 figs, 21 refs.

**Key words:** road engineering; slope engineering; anchoring system; anchoring length; anchor rod inclination; rod diameter

## 0 引 言

随着岩土锚固技术的不断发展,锚固体系在边坡支护工程中的应用越来越广泛。锚杆作为锚固体系中重要的组成部分,其锚固段的有效长度对支护效果至关重要,关于锚杆的有效锚固长度研究成果较多<sup>[1-3]</sup>,而拉力型注浆锚杆则是岩土施工中使用最为普遍的一类锚杆<sup>[4]</sup>,其剪切滑移性能和锚固长度成为学界研究的热点。学者们对界面剪切滑移性能进行了大量研究,在试验中发现注浆锚杆的剪切滑移性能与钢筋从混凝土中拔出以及混凝土桩从地面中拔出的情况类似<sup>[5-6]</sup>,且锚杆与锚固体界面的破坏先于锚固体与岩石界面<sup>[7-9]</sup>。

为了计算锚杆锚固长度的合理取值并研究锚固长度对整个支护体系的影响程度,国内外学者进行了大量研究。Hobst 等指出了锚固长度是影响预应力锚杆锚固能力的重要因素<sup>[10]</sup>。周辉等将锚杆内锚固段长度与杆体总长度之比定义为内锚固段长度系数,以此研究不同锚固长度对支护结构的影响<sup>[11]</sup>。以上研究均指出,锚固能力主要受锚固长度的影响,但并未给出锚固长度的具体理论计算方法,也未给出锚固长度在不同设计参数下取值的依据。张友葩等根据在同一拉拔力作用下,预应力锚杆锚固段的切向位移越小锚杆的承载性能越好这一特

性,给出了特定预应力数值下对应的锚固段长度<sup>[12]</sup>,为今后的锚固段选取提供经验依据。Ehsani 等通过大量拉力型锚杆的拉拔试验数据拟合与分析得到一般条件下的锚固长度计算公式<sup>[13]</sup>。Cosenza 等通过对不同锚杆锚固界面黏结剪切滑移曲线模型的研究,推导出不同围岩参数条件下锚杆锚固长度的计算方法<sup>[14]</sup>。Richard 等通过现场试验发现在锚杆拉拔过程中,锚杆和锚固体之间存在剪切滑移的现象<sup>[15-16]</sup>。以上学者通过现场试验与理论推导相结合的方法,给出了特定参数情况下锚固段长度的计算方法,但并未给出实际岩土施工过程中支护设计参数变化后锚固长度的优化方法。程良奎等从锚杆和杆体之间的这种剪切滑移现象入手,根据预应力锚杆内荷载传递规律提出临界锚固长度的概念<sup>[17]</sup>。黄明华等基于锚固界面的一种非线性剪切滑移模型,建立了锚杆临界锚固长度的计算方法<sup>[18]</sup>。冯申铨等采用“安全系数后置法”提出有效锚固长度这一概念,并给出了确定有效锚固长度的方法<sup>[19]</sup>。张雄等考虑了界面黏结强度,提出了改进后的锚杆有效锚固长度的计算公式<sup>[20]</sup>。以上学者从临界锚固长度入手给出了有效锚固长度的概念,但并未给出有效锚固长度的变化范围。

综上所述,现有锚固长度计算方法并没有给出在同一边坡支护工程中,锚杆设计参数发生变化后,

锚固长度的计算方法以及锚固长度和杆体钢筋直径可变化的有效范围。

针对以上问题,本文在总结目前锚杆合理锚固长度研究现状的基础上,详细分析了锚杆设计参数改变后的锚杆合理锚固长度的确定方法,改进现有的计算方法,并给出在锚杆倾角不同时合理锚固长度的修正系数,最后分析并总结了提高锚杆抗拔能力切实可行的方法,以期今后的边坡支护设计提供参考。

## 1 拉力型锚杆临界锚固长度的确定

### 1.1 锚杆临界锚固长度问题的提出

近年来,锚固系统已广泛应用于支护结构的设计当中,而锚杆作为锚固支护体系中主要的受力构件,因其受力的复杂性,要想得到锚杆锚固力的大小十分困难,通常需要通过拉拔试验测得锚杆的锚固能力。对于黏结型锚固体锚杆的抗拔承载力,一般采用下式计算

$$R = f_{mg} \pi D L_a \quad (1)$$

式中: $R$ 为锚杆的抗拔承载力; $f_{mg}$ 为锚固段注浆体与地层间的黏结强度; $D$ 为锚固体直径; $L_a$ 为锚固体长度。

式(1)表明,锚杆的抗拔承载力与锚固段长度的增加成正比例函数关系,即锚固段越长,锚杆的抗拔承载力越大。据此中国多数边坡支护设计软件均参照传统公式计算锚杆锚固段长度,导致普遍存在锚杆锚固段长度达到 15.0 m 以上。但国内外大量有关锚杆荷载传递的试验研究与理论分析已证实,如图 1 所示,锚杆的锚固能力并不会随着锚固段的增大而无限增大,相反,锚固段越短,反而锚杆的平均黏结强度越高,即有效发挥土体抗剪能力的锚固段长度存在一个临界值。

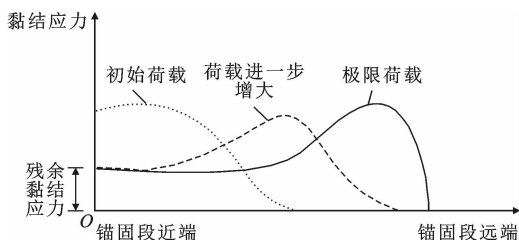


图 1 荷载集中型锚杆沿锚固段全长的黏结应力分布

Fig. 1 Bonding stress distributions of load-concentrated anchors along entire length of anchoring section

所以,若设计的锚固长度超出合理值,锚杆将不能得到充分利用;反之结构质量将得不到保证,合理锚固长度对保证质量,节约成本有显著意义。

### 1.2 拉力型锚杆临界锚固长度的计算模型

为了较为准确地分析锚固段的受力情况,取锚固段中长度为  $dz$  的微元体进行受力情况分析<sup>[21]</sup>,见图 2。

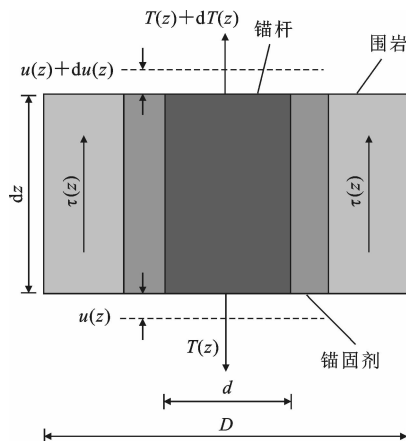


图 2 微元体受力计算分析

Fig. 2 Force calculation analysis of micro-element

根据受力平衡,有

$$dT(z) + U\tau(z)dz = 0 \quad (2)$$

式中: $U$ 为锚固体周长; $T(z)$ 为锚杆沿杆长方向的轴力; $\tau(z)$ 为坐标  $z$  处复合体剪应力。

假设锚杆一直处于弹性状态,则

$$T(z) = EA\epsilon(z) = -EA \frac{du(z)}{dz} \quad (3)$$

式中: $E$ 为弹性模量; $A$ 为截面惯性矩; $EA$ 为锚杆抗拉刚度; $\epsilon(z)$ 为锚杆沿轴向应变; $u(z)$ 为坐标  $z$  处复合体的轴向位移。

由以上两式可得

$$\frac{du(z)}{dz} = \frac{4T(z)}{\pi D^2 E_a} \quad (4)$$

$$\frac{dT(z)}{dz} = \pi D \tau(z) \quad (5)$$

$$E_a = \frac{E_m (D^2 - d^2) + E_s d^2}{D^2} \quad (6)$$

式中: $E_a$ 为复合弹性模量; $E_m$ 为锚固剂弹性模量; $E_s$ 为锚杆拉伸弹性模量; $D$ 为钻孔直径; $d$ 为杆体直径。

联立式(4)和式(5)解得

$$\frac{d^2 u(z)}{dz^2} = \frac{4\tau(z)}{DE_a} \quad (7)$$

在锚固层处于弹性状态时,采用三阶段线性函数描述的剪应力与剪切位移的关系

$$\tau(z) = K_1 u \quad (8)$$

式中: $K_1$ 为锚固层界面剪切刚度; $u$ 为锚固体在张拉荷载作用下的位移。

将式(8)代入式(7),得到

$$\frac{d^2 u(z)}{dz^2} = \frac{4K_1 u}{DE_a} \quad (9)$$

令  $\beta = (4K_1/(DE_a))^{1/2}$ , 解二阶微分方程

$$u(z) = C_1 \cosh(\beta z) + C_2 \sinh(\beta z) \quad (10)$$

式中:  $C_1$  和  $C_2$  分别为微分方程通解的不定参数。

由边界条件:  $T|_{z=0} = T$  和  $T|_{z=L_b} = 0$  与式(4)得

$$T(z) = \frac{\sinh[\beta(L_b - z)]}{\sinh(\beta L_b)} \quad (11)$$

式中:  $L_b$  为临界锚固长度;  $T$  为轴力。

同理可得, 锚固体与围岩界面剪应力分布计算公式为

$$\tau(z) = \frac{\beta T \cosh[\beta(L_b - z)]}{\pi D \sinh(\beta L_b)} \quad (12)$$

一般认为锚杆的极限抗拔力  $T_e$  为当锚固层处于弹塑性临界状态时, 锚杆所对应的抗拔力。此时锚固段始端  $z=0$  处侧阻力刚好达到界面极限黏结强度  $\tau_1$ , 于是令  $\tau(z) = \tau_1$ , 则有

$$T_e = \frac{\pi D \tau_1}{\beta} \tanh(\beta L_b) \quad (13)$$

此时所对应的锚固长度  $L_b$  即为拉力型锚杆的临界锚固长度。

由式(13)可知:

(1) 双曲函数  $\tanh(\beta L_b)$  的值直接影响锚杆极限抗拔力的大小, 而通过双曲函数  $\tanh(x)$  的函数图(图3)可知, 当  $x \geq 2$  时, 函数值几乎保持不变, 即当  $\beta L_b \geq 2$  时, 总有  $\tanh(\beta L_b) \approx 1$ , 而以往计算中  $\beta L_b$  的取值并不固定, 显然  $\beta L_b$  的取值不同, 会导致后续计算结果的不同, 所以有必要给出合理的  $\beta L_b$  取值。

(2) 针对某具体工程在同一围岩条件下,  $\pi D \tau_1 / \beta$  的值为定值, 这使得计算所得的该工程所有锚杆的合理锚固长度均为同一数值, 但由于施工场地周边环境的复杂性, 锚杆的倾斜角度等并不完全一致, 采用同一  $\pi D \tau_1 / \beta$  的值计算所得的锚固长度并不适用。

通过以上分析可知, 有必要计算分析最合理的  $\beta L_b$  取值, 同时给出一个修正系数来优化倾角不同时, 合理锚固长度的大小。

## 2 拉力型锚杆合理锚固长度的分析

### 2.1 锚杆合理锚固长度的确定

合理锚固长度是指在工作状态下临界锚固长度中主要受力的那一段, 因此在保证锚杆能够提供足够抗拔力的前提下, 合理锚固长度  $L_c$  一般短于临界

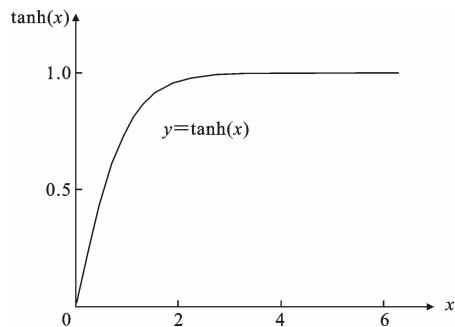


图3 函数  $\tanh(x)$

Fig. 3 Function  $\tanh(x)$

锚固长度  $L_b$ , 即  $L_c \leq L_b$ , 从而可得

$$L_c = \epsilon L_b \quad 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (14)$$

式中:  $\epsilon$  为 0~1 的任意常数。

同时, 由第 2.2 节分析可知, 式(13)中若  $T_e$  为锚杆极限抗拔力, 则有

$$\tanh(\beta L_b) = 1 \quad (15)$$

令  $\beta L_b = \delta$ , 将  $\beta = (4K_1/(DE_a))^{1/2}$  代入, 解得

$$L_b = \frac{\delta}{\beta} = \frac{\delta}{2\sqrt{\frac{E_a D}{K_1}}} \quad (16)$$

通过锚杆临界锚固长度的定义, 可以知道此时的  $\delta$  值为让双曲函数取得极值 1 的最小值, 由函数分析可得此时  $\delta = 3.5$ 。

所以式(16)可改写为

$$L_b = 1.75 \sqrt{\frac{E_a D}{K_1}} \quad (17)$$

综上可得

$$L_c = \epsilon L_b = \epsilon 1.75 \sqrt{\frac{E_a D}{K_1}} \quad 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (18)$$

其中,  $\epsilon$  的取值由实际锚杆的锁定拉力和锚杆的极限抗拔力共同决定。由《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS22:2005)可知, 预应力锚杆的锁定拉力值宜为锚杆拉力设计值的 75%~90%, 再由图3可知,  $\tanh 1 = 0.75$ ,  $\tanh 1.75 = 0.9$ , 所以  $1/3.5 \leq \epsilon \leq 1.75/3.5$ , 综上, 式(18)可优化为

$$L_c = \epsilon 1.75 \sqrt{\frac{E_a D}{K_1}} \quad 0.3 \leq \epsilon \leq 0.5 \quad (19)$$

上式给出的锚杆锚固段长度的范围可为今后边坡支护设计时提供参考依据, 即设计所得的锚固段长度在式(19)中参数一定的情况下, 必须落在此时所得出的范围内, 否则会造成不必要的浪费。

### 2.2 锚杆倾角对锚杆合理锚固长度的影响分析

锚杆倾角的确定是支护结构设计的重要内容, 首先从受力的角度考虑, 锚杆倾角越小, 则水平分力越大、越稳定; 另一方面锚杆要求锚固在稳定土层

中,以提高其承载力和注浆的质量,而一般稳定土层较深,这就要求倾角宜大些,因此一般综合考虑所有因素才可确定锚杆的倾角。目前,绝大多数锚杆设计中锚杆的倾角选  $15^\circ$ ,但在实际工程中,往往由于支护场地周边环境的复杂性,锚杆倾角并不完全相同。为了分析方便,先假设相邻2根锚杆的水平分力一样,所以为了在水平方向有相同大小的分力,就要求倾角大的锚杆轴力要大一些,简化的几何简图如图4所示。

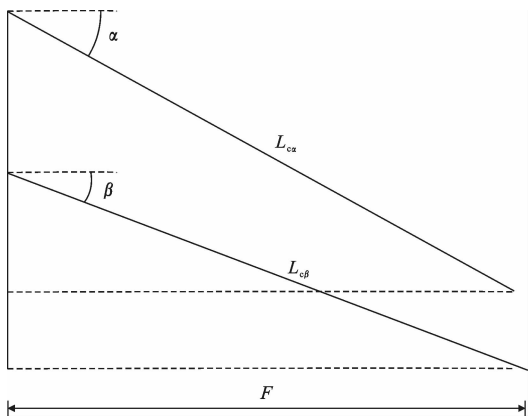


图4 几何计算简图

Fig. 4 Geometric calculation diagram

锚杆倾角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ , 对应的锚固长度分别为  $L_{\alpha}$  和  $L_{\beta}$ , 且  $\alpha > \beta$ 。为使得2根锚杆有相同的水平分力  $F$ , 假设上部锚杆的轴力为  $T_1$ , 下部锚杆的轴力为  $T_2$ , 则由几何关系得

$$T_1 = T_2 \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (20)$$

由上文分析可知,在锚杆的有效锚固长度内,锚杆锚固段注浆体与岩层间的黏结应力大致均匀分布,那么长度的比值则可简化为力的比值,即

$$L_{\alpha} = L_{\beta} \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (21)$$

而目前绝大多数锚杆设计中,锚杆倾角为  $15^\circ$ , 又有  $\cos 15^\circ = 0.96$ , 所以式(21)可以改写为

$$L_{\alpha} = 0.96 L_{\beta} \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (22)$$

当同一边坡支护工程中,锚杆倾角变化时,可采用上式来优化锚固段长度。

### 2.3 杆体钢筋 $d$ 取值分析

通过上述分析可知在边坡支护工程中,锚杆的锚固段长度并不是越长越好,而是当锚固长度处于某一合理范围内时,才可以给整个支护体系提供足够的锚固能力。下文通过选取杆体钢筋直径  $d$  (另一影响锚固力大小的物理量),探究其影响规律。

杆体直径  $d$  的选取会影响钻孔直径  $D$  的大小,进而改变锚固能力的大小,也就是说  $D$  随着  $d$  的改变而改变,就式(13)而言,钻孔直径  $D$  的大小与锚杆的抗拔能力成正比例关系,而要采用较大的  $D$  往往也会选取与之相应的较大的  $d$ , 这也造成了设计人员为了方便与快捷,在确定杆体钢筋型号后,往往选取较大直径的钢筋作为锚杆的杆体材料,确保整个支护体系的安全与稳定。

但是显然锚杆杆体直径的大小并不是越大越好,有必要给出合理的范围,在控制锚固长度之前就确定杆体直径  $d$  的大小,从而为后续的设计提供便捷。

目前,在锚杆设计时,锚杆杆体钢筋截面面积的计算通常采用下式控制

$$A_s \geq \frac{K_t N_t}{f_{yk}} \quad (23)$$

式中:  $A_s$  为钢筋截面面积;  $K_t$  为锚杆杆体的抗拉安全系数;  $N_t$  为锚杆的轴向拉力设计值;  $f_{yk}$  为钢筋抗拉强度的标准值。

其中钢筋截面面积  $A_s$  可以用  $\pi(d/2)^2$  代替,从而将式(23)改写为

$$\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \geq \frac{K_t N_t}{f_{yk}} \quad (24)$$

将式中  $d$  看为未知量,解方程得

$$d \geq 2 \sqrt{\frac{K_t N_t}{\pi f_{yk}}} \quad (25)$$

则式(25)为杆体直径  $d$  取值范围的最小值。

同时式(13)取得最大值时,  $\tanh(\beta L_b) = 1$ , 则式(13)可简化为

$$T_e = \frac{\pi D \tau_1}{\beta} \quad (26)$$

此时对应的  $D$  即为钻孔直径的最大值,而与这个  $D$  匹配的杆体直径  $d$  即杆体直径取值范围的最大值。

假设最佳孔径比  $D/d$  为  $\theta$ , 则

$$D = \theta d \quad (27)$$

将式(27)代入式(26),把  $d$  视为未知数,解得

$$d = \frac{T_e \beta}{\pi \theta \tau_1} \quad (28)$$

则式(28)为  $d$  取值范围的最大值。综合以上分析,  $d$  的取值范围为

$$2 \sqrt{\frac{K_t N_t}{\pi f_{yk}}} \leq d \leq \frac{T_e \beta}{\pi \theta \tau_1} \quad (29)$$

在锚杆设计的过程中,应用本文公式,不仅可以确定杆体钢筋取值范围的最小值,保证整个支

护体系的稳定,达到对边坡的支护效果;同时可以通过杆体钢筋取值范围的最大值,控制整个施工过程的成本,避免造成不必要的浪费。

2.4 影响锚杆抗拔能力的因素分析

通过上述分析可知,锚杆的抗拔力与锚杆的锚固长度有直接的关系,即在一定范围内增加锚杆的锚固段长度,可以有效提高锚杆的抗拔力,进而增大整个锚固体系的安全储备。

同时,通过式(13)与 $\beta=(4K_1/(DE_a))^{1/2}$ 可知,锚杆的抗拔能力和钻孔直径 $D$ ,界面黏结强度 $\tau_1$ 与剪切刚度 $K_1$ 有关。但在实际工程中, $\tau_1$ 和 $K_1$ 主要与围岩和注浆材料性质有关,围岩和注浆体不一样,相应的就会导致界面的剪切刚度不同。而钻孔直径 $D$ 则是由锚杆钢筋直径以及施工现场岩层性质共同决定的。通常在同一边坡支护工程中,锚杆锚固段抗剪强度参数 $\tau_1$ 与 $K_1$ 虽然不易测得,但却是一定的,需要通过拉拔试验的数据来计算该数值。而钻孔直径 $D$ 则可以根据具体工程设计其大小,因此,提高钻孔直径可以增大锚杆的抗拔能力。但是孔径太大,锚固层厚度过厚,则会使得锚固材料和外界接触面积增大,收缩加大,进一步降低二者之间的黏结强度,最终导致滑移增大。所以必须确定合理的孔径比 $\theta$ ,确保在一定范围内增大钻孔直径 $D$ 来提高锚杆的抗拔能力。

综上所述,为了提高边坡支护中,锚固体系的安全储备,往往需要从以下几方面入手:①选取注浆材料与杆体和岩体抗剪强度参数大的岩层设置锚杆,提升锚杆和注浆体、注浆体与岩体的黏结能力,从而增加锚杆的抗拔能力;②在一定范围内增大锚杆锚固段的长度(锚固段长度小于临界锚固长度),通过增大锚杆的极限承载力来提高其抗拔能力;③在合理孔径比范围内增大钻孔直径与杆体钢筋直径,使锚杆的轴力分布更均匀以提高其抗拔能力。

3 工程案例

为了验证本文理论公式[式(19)与式(22)]的合理性,选取兰州市某实际边坡工程进行相关计算数据的验证与对比。该边坡工程剖面示意如图5所示。该边坡工程采用预应力锚杆体系支护,在该剖面处设有3排锚杆,锚杆倾角从上至下依次为25°、15°和15°,同时坡底位置处有一条公路,在该边坡支护工程坡顶一侧,有一既有建筑物,且建筑物底有2根管道组成的管廊设施,若采用常规设计中15°的锚杆入射角设计,会大大增加该边坡工程的施工风

险,并且影响既有建筑物的安全性,所以为了避开建筑物底的管廊设施,降低施工过程中可能遇到的潜在风险,综合考虑以上因素,该边坡上部锚杆的倾角较下部其余2排锚杆的角度增大10°,由15°变为25°。

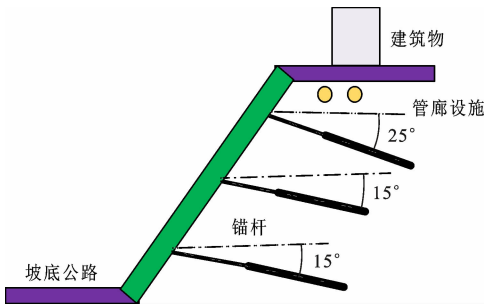


图5 边坡示意  
Fig. 5 Slope Schematic

首先,为了验证本文公式的合理性,将选取的该边坡工程第2排锚杆的各参数代入该式并与实际锚固段长度进行对比,对比计算结果见表1。

表1  $L_c$  取值分析  
Tab. 1  $L_c$  value analysis

参数	$(\frac{E_a D}{K_1})^{1/2}$	$L_b/m$	$L_c/m$		实际锚固长度/m
			$\epsilon=0.3$	$\epsilon=0.5$	
参数值	5.63	9.85	2.96	4.92	4.5

由表1可知,当 $\delta$ 取3.5时通过式(18)计算所得的锚固长度有效变化范围2.96~4.92 m,而本工程实际经过岩土专业人员与相关软件设计后,第2排锚杆锚固段长度最终采用4.5 m,很明显该取值包含于本边坡工程采用式(18)计算所得的锚固段有效变化范围内,且4.5 m与锚固段有效范围右端点4.92 m相差仅为0.42 m,产生这种现象的原因是因为在实际锚杆安装过程中,通常在进行锚杆拉拔时,会将锚杆极限拉拔力的90%作为锁定拉力,图6可以直观地表示此关系,图中AC段即为该边坡工程锚杆锚固段的有效变化范围,B点即为本工程选取的锚固段安装长度。

基于该边坡工程实例的具体分析,图7给出了一般情况下锚杆锚固段长度变化范围的示意。在锚固段长度的有效变化范围内,缩短锚固段长度可以降低锚杆的锚固能力,同理,在此范围内增大锚固段长度,可以有效提高锚杆的锚固能力,此范围对应的两端点的坐标值,为式(18)中 $\epsilon=0.3$ 与 $\epsilon=0.5$ 分别对应的计算有效锚固长度 $L_c$ 的数值(图6中A点与C点),而若实际工程中采用“未达到支护效果”范围内所对应的锚固段数值,锚杆本身并不能起

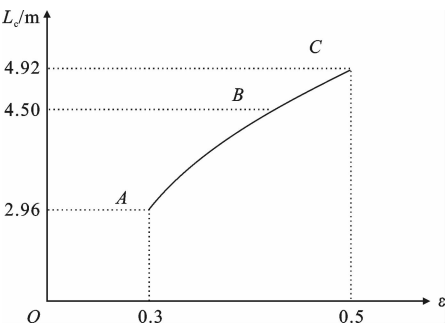


图 6 锚固长度对比  
Fig. 6 Anchor length comparison

到设计所需的支护效果,会增加工程的施工风险。反之,若实际工程中选用“无效变化”范围内的锚固段长度取值,其所能达到的支护效果始终为 $\epsilon=0.5$ 所对应的锚固长度 $L_c$ 。所发挥的支护能力,并不会随着锚固段长度的增大而增大。若某具体工程,实际所需的锚固能力超出此时 $L_c$ 所能提供的锚固能力,需采用其他方式来提高支护体系的支护效果,而不是单纯的增大锚杆的锚固段长度。

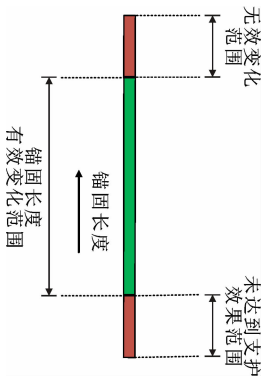


图 7 锚固长度变化范围  
Fig. 7 Variation ranges of anchorage length

式(18)的理论研究成果一方面能用以验证今后边坡支护设计中,采用锚固系统支护体系设计时岩土专业人员所选取的锚杆锚固段长度是否落在该工程锚固段有效变化范围内;另一方面可以避免设计所得锚固段长度不足而导致的支护体系失稳,同时可以有效规避设计人员为了提高支护效果,在将锚固段长度增加到 $\epsilon=0.5$ 所对应的最大边界值后,继续增加锚固段长度而造成施工成本增大的现象发生。

为了验证式(22),结合本边坡工程的具体参数,从上向下 3 排锚杆的入射角度分别为 $\alpha=25^\circ$ , $\beta=15^\circ$ , $\gamma=15^\circ$ ,根据设计要求,计算该工程当锚杆入射角度 $\beta=15^\circ$ 时所对应锚固段长度为 4.5 m,再由式(22)计算锚杆入射角变为 $25^\circ$ 后所对应的锚固段长

度 $L_{ca}=4.8$  m,与该工程实际第 1 排锚杆锚固长度 5.0 m 非常接近,见表 2。

表 2 首排锚杆锚固长度		
Tab. 2 Anchorage length of first row anchor		
数据来源	实际设计	式(22)结果
首排锚杆锚固长度取值	5.0	4.8

同时采用岩土设计软件计算该边坡工程第 1 排锚杆与第 2 排锚杆的水平内力标准值和设计值,见表 3。

表 3 锚杆水平内力计算		
Tab. 3 Calculation of horizontal internal force of bolt		
锚杆位置	内力标准值	内力设计值
首排锚杆	273.39	355.40
第 2 排锚杆	248.54	339.02

在式(22)的理论推导过程中,已假设同剖面内上下 2 根锚杆的水平分力一样,但实际通过计算发现,锚杆倾角为 $25^\circ$ 的第 1 排锚杆,其锚杆水平分力比锚杆倾角为 $15^\circ$ 的第 2 排锚杆要略大,所以按式(22)计算所得锚杆倾角为 $25^\circ$ 时对应的锚杆锚固段长度较实际设计值偏小,这也进而证明理论分析的合理性。

至此,验证了本文所推导得到理论公式[式(19)与式(22)]的合理性,通过对具体工程案例的分析,更直观地证明了锚固段长度的增大并不会无限制的增强整个支护体系的支护能力,只有在某一特定范围内增加其大小,才能提高锚杆的抗拔能力,本文给出了相对全面的确定锚固段长度的步骤:

- (1)现场勘测和试验得到设计所需的基本参数;
- (2)计算得出 $L_b=1.75(E_aD/K_1)^{1/2}$ ;
- (3)给定锚固段有效长度的取值范围 $L_c(\epsilon=0.3)\sim L_c(\epsilon=0.5)$ ;
- (4)采用设计软件或其他计算方法得到锚固段长度 $L_c$ ;
- (5)比较第 4 步与第 3 步所得锚固段长度 $L_c$ 的大小;
- (6)若第 4 步所得长度落在 $L_c(\epsilon=0.3)\sim L_c(\epsilon=0.5)$ 的范围内,则采用此锚固段长度作为最终施工过程所安装锚杆的锚固段长度;
- (7)第 4 步所得长度未落在 $L_c(\epsilon=0.3)\sim L_c(\epsilon=0.5)$ 的范围内,则需采用其他方法来增大整个体系的锚固能力。

图 8 可以更加直观地表示拉力型锚杆锚固段长度的设计流程。



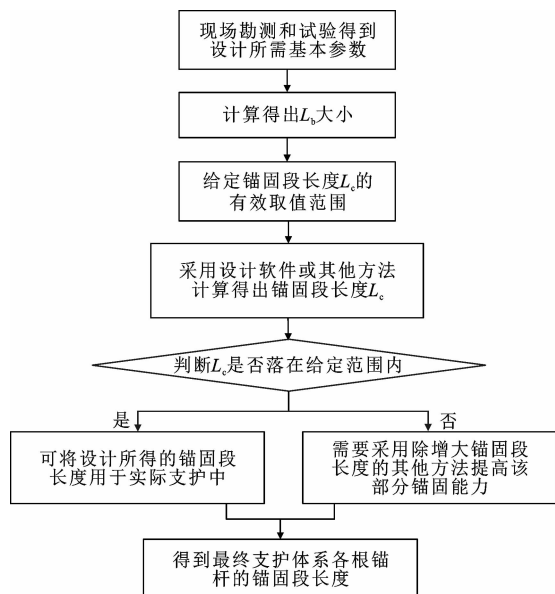


图8 锚固长度设计流程

Fig. 8 Design processes of anchorage length

## 4 结 语

(1)有关锚杆锚固长度合理取值的研究尤为重要,本文给出算式  $L_c = \epsilon 1.75 (E_a D / K_1)^{1/2}$ , 其中  $0.3 \leq \epsilon \leq 0.5$ , 一方面可以较准确计算锚杆的锚固段长度,提高锚杆正常工作状态下的利用率,另一方面给出了锚固长度的有效变化范围与无效变化范围,为今后设计与施工过程中成本和周期控制起到了一定的参考价值。后续可在此基础上研究其余支护结构设计参数是否存在相同规律。同一支护设计中的锚杆倾角并不完全相同,通常倾角大的锚杆锚固长度有所增大,可用算式  $L_{ca} = 0.96 L_{c\beta} (1/\cos(\alpha))$  来计算锚杆倾角增大时的锚固长度,为设计与施工提供一定参考的依据。

(2)锚固系统中锚杆的杆体钢筋与锚固长度同样,与锚杆的抗拔能力不是单纯的正比例关系,而是存在一定范围,只有在该范围内变化时,才能提高锚杆的抗拔能力。影响锚杆抗拔能力的因素主要有界面抗剪强度参数、锚固段长度、钻孔直径 3 个,通常人为可以改变的是后 2 个因素,但必须在一定范围内提高其数值,本文通过计算分析,最终给出了可以改变其数值大小的范围。

(3)通过本文的研究,最终给出了一般情况下确定锚杆锚固段长度的步骤和方法。但本文并未计算得出锚杆的合理孔径比,后续可从此方面开展研究。

## 参考文献:

### References:

- [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] KAISER P K, CAI M. Design of rock support system under rockburst condition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(3): 215-227.
- [3] AKISANYA A R, IVANOVIC A. Debonding along the fixed anchor length of a ground anchorage[J]. Engineering Structures, 2014, 74: 23-31.
- [4] XU S, HOU P, CAI M. An experiment study on a novel self-swelling anchorage bolt[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4855-4862.
- [5] WU Q, CHEN L, SHEN B, et al. Experimental investigation on rockbolt performance under the tension load[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(1): 4605-4618.
- [6] ZOU J F, ZHANG P H. Analytical model of fully grouted bolts in pull-out tests and in situ rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 113: 278-294.
- [7] MARTIN L B, TIJANI M, HADJ-HASSEN F, et al. Assessment of the bolt-grout interface behavior of fully grouted rock bolts from laboratory experiments under axial loads[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 63: 50-61.
- [8] LI C C, STJERN G, MYRVANG A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 6(4): 315-327.
- [9] FENG B, WANG X, WU Z. Evaluation and prediction of carbon fiber-reinforced polymer cable anchorage for large capacity[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(8): 1952-1964.
- [10] HOBST L, ZAJIC J. Anchoring in rock and soil[M]. New York: Elsevier, 1983.
- [11] 周辉,徐荣超,张传庆,等. 预应力锚杆内锚固段长度效应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2688-2694.



- ZHOU Hui, XU Rong-chao, ZHANG Chuan-qing, et al. Study on length effect of anchorage section in prestressed anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2688-2694.
- [12] 张友葩, 高永涛, 吴顺川. 预应力锚杆锚固段长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 12(6): 980-986.
- ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan. Study on the length of anchoring section of prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 12(6): 980-986.
- [13] EHSANI M, SAADATMANESH H, TAO S. Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3): 247-254.
- [14] COSENZA E, MANFREDI G. development length of FRP straight rears[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(7): 493-504.
- [15] RICHARD G, HRISTOPHE A, SIMON R. Experimental and numerical analysis of in situ pull-out tests on rock bolts in claystones[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, 25: 1-24.
- [16] THENEVIN I, BLANCO-MARTIN L, HADJ-HASSEN F, et al. Laboratory pull-out tests on fully grouted rock bolts and cable bolts: Results and lessons learned[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(5): 843-855.
- [17] 程良奎, 李象范. 岩土锚固土钉喷射混凝土原理设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- CHENG Liang-kui, LI Xiang-fan. Principle design and application of shotcrete with rock and soil anchorage [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [18] 黄明华, 李嘉成, 赵明华. 岩体离层作用下锚杆受力特性全历程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2177-2184.
- HUANG Ming-hua, LI Jia-cheng, ZHAO Ming-hua. Full-course analysis of the force characteristics of bolts under the action of rock mass separation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2177-2184.
- [19] 冯申铎, 付文光, 李鑫权. 深基坑预应力锚杆合理锚固长度的研讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增1): 192-197.
- FENG Shen-duo, FU Wen-guang, LI Xin-quan. Discussion on reasonable anchoring length of prestressed anchor in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 192-197.
- [20] 张雄, 陈胜宏. 预应力锚索锚固段荷载传递解析算法[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1667-1675.
- ZHANG Xiong, CHEN Sheng-hong. Analytical algorithm for load transfer in anchor section of prestressed anchor cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1667-1675.
- [21] 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): 3106-3112, 3172.
- LI Huai-zhen, LI Xue-hua. Study on reasonable anchoring length of bolt based on interface slip and debonding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3106-3112, 3172.