

压力分散型预应力锚杆的力学机理研究

贾金青¹, 涂兵雄¹, 王海涛^{1,2}, 孟刚¹, 姚大立¹

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连交通大学土木与安全工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 通过对压力分散型预应力锚杆锚固段的受力分析, 推导出了该类型锚杆的剪应力和轴力分布的解析解。在此基础上, 对比了压力分散型锚杆与压力集中型锚杆的受力性能, 结果表明, 压力分散型锚杆的剪应力和轴力都大幅下降, 避免了应力集中。讨论了岩土体的力学参数和预应力对剪应力和轴力的影响, 结果表明, 岩土体弹性模量和内摩擦角越大, 则剪应力峰值越高, 轴力衰减越快, 且剪应力和轴力分布越集中; 预应力越大, 则剪应力和轴力越大; 黏聚力越大, 则剪应力有所增大而轴力有所减小, 但影响不大。

关键词: 压力分散型; 预应力锚杆; 力学分析; 有效锚固长度

中图分类号: U455.71

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)09-1320-06

作者简介: 贾金青(1962-), 男, 河北沧州人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和结构工程方面的研究工作。E-mail: keyknown@163.net。

Mechanical behaviors of pressure-dispersive prestressed anchor

JIA Jin-qing¹, TU Bing-xiong¹, WANG Hai-tao^{1,2}, MENG Gang¹, YAO Da-li¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116023, China)

Abstract: Through the mechanical analysis of the anchorage segment of the pressure-dispersive prestressed anchor, the analytic solutions for the distribution of the shear stress and the axial force in the anchor are derived. Based on the developed analytical solutions, the stressed properties of the pressure-dispersive prestressed anchor and the pressure-concentrative prestressed anchor are compared. The results show that the shear stress and axial force of the pressure-dispersive prestressed anchor greatly decrease, and the phenomenon of stress-concentration is avoided. The influences of the mechanical characteristics of the rock mass and the prestress on the shear stress and axial force are discussed. It is shown that the greater the elastic modulus and internal friction angle of rock mass, the greater the maximum of shear stress and the faster the decrease of axial force; the greater the prestress, the greater the shear stress and axial force; and the greater the cohesion, the greater the shear stress and the smaller the axial force, but there is little effect.

Key words: pressure-dispersion; prestressed anchor; mechanical analysis; effective anchorage length

0 引言

随着国民经济建设和科学技术的进步, 岩土锚固技术也得到了飞速发展并广泛应用于深基坑^[1]、高边坡^[2]、地下工程^[3]等诸多领域。在岩土工程快速发展的环境下, 工程界对岩土锚固这一技术有了更高的要求, 锚固结构也得到了多种型式的发展, 如拉力集中型、拉力分散型、压力集中型、压力分散型等, 促使了许多学者对该技术进行试验和理论研究^[4-5]。目前, 国内外对锚固理论的研究主要集中在锚固荷载的传递机理和对锚杆周围岩土体的加固效应方面^[6], 并且已经取得了大量的成果。但是这些成果大多都是针对拉力型锚杆的研究, 对压力型锚杆的锚固机理和试

验研究相对比较欠缺, 同时即使对压力型锚杆进行研究, 也作了太多的假设条件, 忽略了过多的因素影响。而压力型预应力锚杆由于其独特的工艺结构, 将预应力通过无黏结钢绞线传递给承载体, 使得锚杆锚固体在全长范围内受压, 注浆体不易开裂腐蚀; 压力分散型预应力锚杆通过多级承载体共同作用, 受力合理, 避免了应力集中, 大大提高了锚杆的承载力, 被广泛应用于高边坡等永久性锚固工程和侧摩阻力较低的岩土体工程中。但目前对压力分散型预应力锚杆的研究尚不多见, 因此本文在前人^[5]的基础上, 通过考虑岩

土体黏聚力以及多级承载体的影响,对压力分散型预应力锚杆的荷载传递机理进行了系统分析,并研究了岩土体黏聚力、内摩擦角、弹性模量等诸多因素对压力分散型预应力锚杆的影响,为压力分散型预应力锚杆的设计和应用提供了一定的理论依据。

1 荷载传递公式推导

1.1 基本假设

压力分散型预应力锚杆是在锚固体中设置多个承载体,各个承载体通过无黏结预应力钢绞线将预应力分散到锚固体的不同部位,从而避免应力集中。为了研究压力分散型预应力锚杆的荷载传递机理,首先分析单个承载体的荷载传递情况。以承载体为坐标原点建立一维直角坐标系,如图1所示,并沿锚固体轴线方向取一微段进行受力分析,如图2所示。

为方便计算分析,对锚杆作如下假设:

- (1) 锚固体和周围岩土体均为线弹性材料。
- (2) 锚固体与岩土体交界面上满足库仑准则。
- (3) 锚固体截面上的轴向应力均匀分布。
- (4) 不考虑各个承载体之间的相互影响。

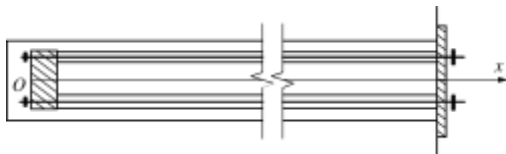


图1 压力型锚杆坐标示意图

Fig. 1 Coordinate sketch of a pressure-style anchor

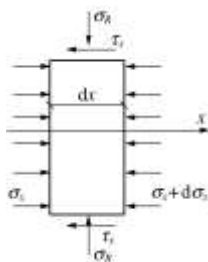


图2 锚固段微元体受力图

Fig. 2 Sketch of micro-element in anchorage segment

1.2 解析方程推导

依据图2建立微元体的平衡微分方程:

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot \pi R^2 + \tau_x \cdot 2\pi R \cdot dx - \sigma_x \cdot \pi R^2 = 0,$$

得 $Rd\sigma_x + 2\tau_x dx = 0$ 。(1)

式中 σ_x 为锚固体截面上的正应力; R 为锚固体半径; τ_x 为锚固体与岩土体交界面上的剪应力。

在锚固体与岩土体交界面上满足库仑准则有

$$\tau_x = \sigma_R \tan \varphi + c \quad (2)$$

式中 σ_R 为锚固体与岩土体交界面上的正应力; φ 为

岩土体内摩擦角; c 为岩土体黏聚力。

由弹性力学空间问题柱坐标下的物理方程^[7]有

$$\varepsilon_\rho = \frac{1}{E} [\sigma_\rho - \mu(\sigma_\varphi + \sigma_x)] \quad (3)$$

根据第3条假设有 $\sigma_\varphi = \sigma_\rho = \sigma_R$ 代入式(3)有

$$\varepsilon_\rho = \frac{\mu_c \sigma_x - (1 - \mu_c) \sigma_R}{E_c} \quad (4)$$

式中 ε_ρ 为锚固体径向应变; μ_c 为锚固体泊松比; E_c 为锚固体弹性模量。

根据弹性力学中无穷平面上圆孔受均布内压力 σ_R 作用,有径向位移:

$$u_\rho = \frac{(1 + \mu) R^2 \sigma_R}{E \rho} \quad (5)$$

在锚固体与土体交界面上即 $\rho = R$ 处,由式(4)和式(5)得

$$\int_0^R \frac{\mu_c \sigma_x - (1 - \mu_c) \sigma_R}{E_c} \cdot d\rho = \frac{(1 + \mu_s) R \sigma_R}{E_s},$$

$$\text{即} \quad \sigma_R = \frac{E_s \mu_c}{E_s (1 - \mu_c) + E_c (1 + \mu_s)} \cdot \sigma_x \quad (6)$$

将式(6)和式(2)代入式(1)有

$$R \cdot d\sigma_x + 2(c + k\sigma_x) dx = 0 \quad (7)$$

代入边界条件 $x = 0, \sigma_x = \sigma_0 = \frac{P}{\pi R^2}$ 解得

$$\sigma_x = \left(\frac{P}{\pi R^2} + \frac{c}{k} \right) \cdot \exp\left(-\frac{2k}{R} x\right) - \frac{c}{k} \quad (8)$$

式中 $k = \frac{E_s \mu_c \tan \varphi}{E_s (1 - \mu_c) + E_c (1 + \mu_s)}$, P 为对承载体施加的预应力。

联立式(2)、(6)、(8)有

$$\tau = (k\sigma_0 + c) \cdot \exp(-2kx/R) \quad (9)$$

由式(8)得锚固体的轴力

$$N = \left(P + \frac{c\pi R^2}{k} \right) \cdot \exp\left(-\frac{2kx}{R}\right) - \frac{c\pi R^2}{k} \quad (10)$$

式(9)和式(10)分别为压力型锚杆单个承载体下锚固体的剪应力和轴力分布。可以看出,两个公式里面都完整地包含了岩土体黏聚力、内摩擦角、弹性模量和泊松比以及锚固体的弹性模量、泊松比、半径和预应力对锚固体所受剪应力和轴力的影响。与文献[5]求解的结果相比,由于考虑了岩土体黏聚力的影响,式(9)的剪应力表达式中多出了分量 $c \cdot \exp(-2kx/R)$,式(10)的锚固体轴力表达式中多出了分量 $\frac{c\pi R^2}{k} \cdot \left[\exp\left(-\frac{2kx}{R}\right) - 1 \right]$ 。从解析结果上可以看出,考虑岩土体的黏聚力后,锚固体受到的剪应力变大,而轴力变小。当黏聚力 $c = 0$ 时,结果与文献[5]完全一致。

1.3 压力分散型预应力锚杆的荷载传递

一些学者的研究成果^[8-9]表明,锚杆中的锚固体长度存在一个临界锚固长度,当锚杆体长度超过临界锚固长度后,超出的长度对锚杆极限承载力的提高不起作用。文献[10~12]分别在实际工程中观测到了临界锚固长度现象。文献[9]还指出锚杆存在一个有效锚固长度,即某一荷载作用下实际发挥作用的锚固体长度,其值与外荷载有关。从式(10)可以看出,考虑岩土体的黏聚力,在预应力 P 一定的情况下,存在一个有效锚固长度 l_e 使得锚固体的轴力为零,此时超出有效锚固长度范围的锚固体轴力应按零考虑。当预应力增大时,有效锚固长度会相应变大;有效锚固长度的极限值即为临界锚固长度。

令式(10)等于零,可得有效锚固长度:

$$l_e = \frac{R}{2k} \ln \frac{kP + c\pi R^2}{c\pi R^2} \quad (11)$$

对于压力分散型预应力锚杆,根据第4条假设,不考虑各个承载体之间的相互影响,所以,压力分散型预应力锚杆可以通过对各个承载体作用下的剪应力和轴力叠加得到

$$\tau = \sum_{i=1}^n \alpha \left(\frac{kP_i}{\pi R^2} + c \right) \cdot \exp \left[\frac{-2k(x-l_i)}{R} \right] \quad (12)$$

$$N = \sum_{i=1}^n \alpha \left(P_i + \frac{c\pi R^2}{k} \right) \cdot \exp \left[\frac{-2k(x-l_i)}{R} \right] - \frac{n c \pi R^2}{k} \quad (13)$$

式中 n 为承载体总个数; l_i 为第 i 个承载体的坐标; α 为修正系数,当 $l_i \leq x \leq l_i + l_e$ 时取 1.0,当 $x > l_i + l_e$ 取 0; P_i 为对第 i 个承载体施加的预应力。

2 压力集中型预应力锚杆的受力分析

为研究压力型锚杆中锚固体受到的剪应力和轴力分布情况,选取典型的岩土体和锚固体参数进行分析,具体参数见表1。

表1 岩土体和锚固体参数

Table 1 Parameters of rock mass and anchorage segment					
名称	泊松比	弹性模量 /MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /kPa	半径/m
岩土体	0.35	2000	20	40	0.075
锚固体	0.25	20000			

其中锚杆预应力取 1000 kN,锚固段长度取 12 m。图3和图4分别给出了由本文推导的公式和文献[5]推导的公式计算得到的锚固体上剪应力和轴力沿锚固体长度方向的分布。

从图3和图4可以看出压力型预应力锚杆的锚固体受到的剪应力和轴力分布形式基本相同,在承载体

处剪应力和轴力最大,并沿锚固体长度方向呈指数衰减;考虑岩土体黏聚力的影响后,得到锚固体上的剪应力要比文献[5]不考虑黏聚力影响的结果要大,但沿锚固体长度方向越来越接近,而得到的轴力要小,且沿锚固体长度方向越来越小;在一定的预应力作用下,锚固体上的轴力并不能在长度方向无限传递,会因剪应力的作用在一定长度处衰减为零,该长度为特定预应力作用下锚固体的有效锚固长度,图4中的有效锚固长度约为 13.5 m。

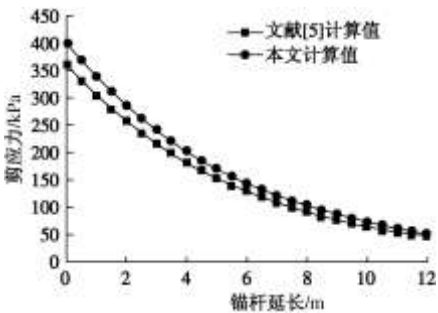


图3 锚固体的剪应力分布曲线

Fig. 3 Distribution of shear stresses in anchorage segment

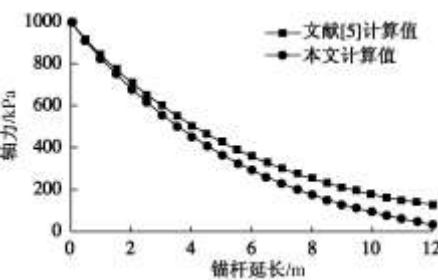


图4 锚固体的轴力分布曲线

Fig. 4 Distribution of axial forces in anchorage segment

3 压力分散型预应力锚杆的受力分析

对压力分散型锚杆设置3个承载体(锚杆末端为坐标原点),承载体间距为4 m,锚固段总长12 m,单个承载体预应力取200 kN;压力集中型锚杆预应力取600 kN。其它参数按表1选取,得到分散型和集中型预应力锚杆的剪应力和轴力对比分布图如图5和图6所示。

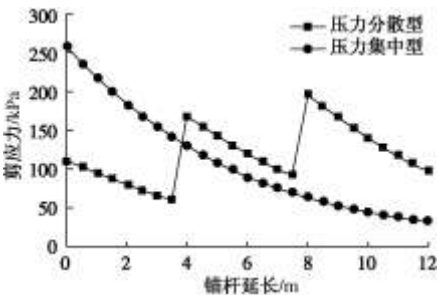


图5 锚固体剪应力分布曲线

Fig. 5 Distribution of shear stresses in anchorage segment

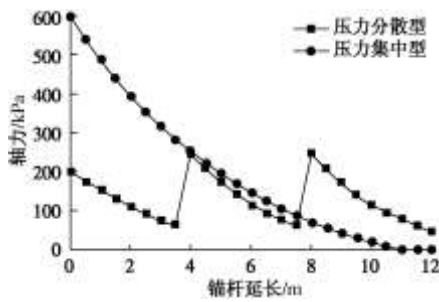


图6 锚固体轴力分布曲线

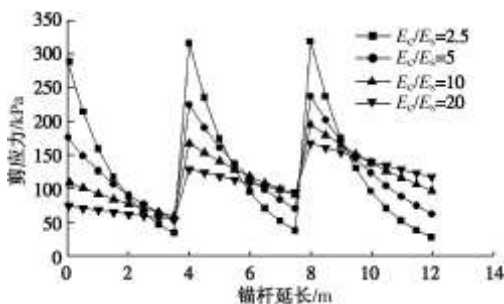
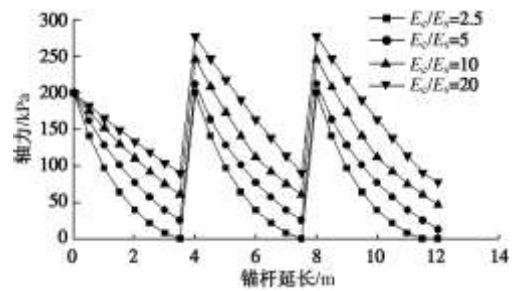
Fig. 6 Distribution of axial forces in anchorage segment

从图5中可以看出,在锚杆端部,压力分散型锚杆的剪应力约只有集中型的43.7%,并且在约4 m范围内的剪应力要远远小于集中型锚杆,避免了集中型锚杆由于剪应力过度集中而引起的锚固体和岩土体界面发生渐进性脱黏破坏^[13];另外,压力分散型锚杆的剪应力在锚杆全长范围内分布更加均匀,受力更加合理,且充分发挥了锚固体与岩土体之间的抗剪强度。在图6中,轴力的分布与剪应力分布的趋势大体相同,由于设置3个分散型承载体,分散型锚杆端部的轴向压力只有集中型的约1/3,这也避免了压力集中型锚杆在端部被压碎,且3个承载体使锚杆内部轴力分布更加均匀,受力性能远远优于压力集中型锚杆。

4 主要参数影响分析

4.1 锚固体与岩土体相对弹性模量的影响

根据压力分散型预应力锚杆的剪力表达式(12)和轴力表达式(13),在前面假设相同的条件下,对比分析了不同的锚固体和岩土体的弹性模量比值下锚固体剪应力和轴力的分布规律,如图7和图8所示。从图中可以看出, E_c/E_s 越大,即岩土体弹性模量越小,则锚固体的最大剪应力越小,有效锚固长度越大,且锚固段范围内的剪应力和轴力分布相对更加均匀,充分发挥了岩土体的抗剪强度。反之, E_c/E_s 越小,岩土体弹性模量越大,有效锚固长度越小,锚固体的剪应力和轴力分布越集中,当 $E_c/E_s = 2.5$ 时,剪应力和轴力的分布主要集中距离承载体约3.5 m范围内的锚固体上。

图7 不同 E_c/E_s 下的剪应力分布曲线Fig. 7 Distribution of shear stresses with different values of E_c/E_s 图8 不同 E_c/E_s 下的轴力分布曲线Fig. 8 Distribution of axial forces with different values of E_c/E_s

4.2 岩土体黏聚力的影响

图9和图10分别是在不同岩土体黏聚力下得到的剪应力和轴力分布曲线。从图中可以看出,在黏聚力从10 kPa增加到50 kPa的过程中,3个承载体处的峰值剪应力平均增加约8%,16%,32%,增幅比较均匀,约黏聚力每增加10 kPa,峰值剪应力增加8%。相反,轴力平均下降约5.5%,10%,19%,降幅比较均匀,约黏聚力每增加10 kPa,轴力下降4.5%

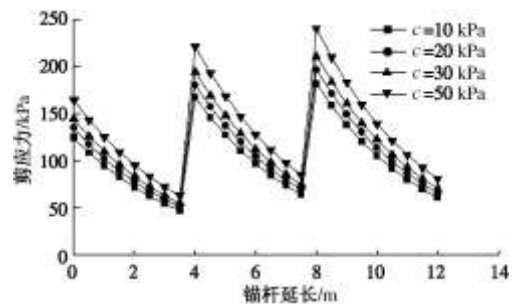


图9 不同黏聚力下的剪应力分布曲线

Fig. 9 Distribution of shear stresses with different cohesions

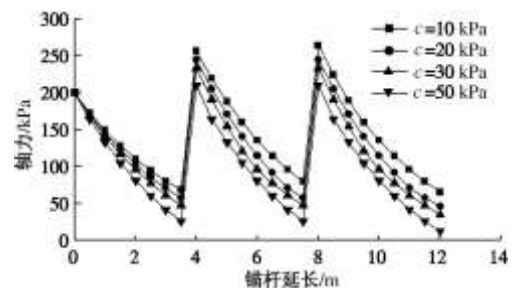


图10 不同黏聚力下的轴力分布曲线

Fig. 10 Distribution of axial forces with different cohesions

4.3 岩土体内摩擦角的影响

图11和图12分别是在不同岩土体内摩擦角的情况下得到的剪应力和轴力分布曲线。从图中可以看出,岩土体内摩擦角越小,有效锚固长度越大,承载体处的峰值剪应力越小,锚固体上的轴力衰减越缓慢,剪应力和轴力分布相对越均匀。反之,岩土体内摩擦角

越大,有效锚固长度越小,剪应力峰值越大,轴力衰减越快,且都主要集中分布在距离承载体较近范围内的锚固体上。当 $\varphi=50^\circ$,剪应力和轴力主要集中分布在距离承载体约 3.5 m 范围内的锚固体上。

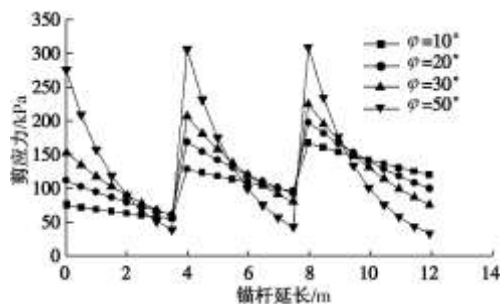


图 11 不同内摩擦角下的剪应力分布曲线

Fig. 11 Distribution of shear stresses with different internal friction angles

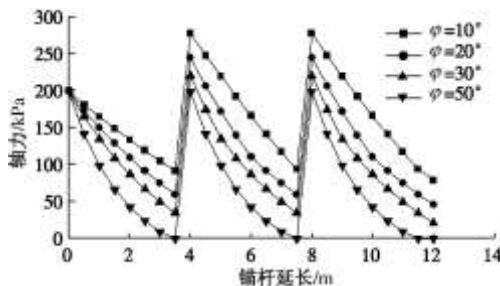


图 12 不同内摩擦角下的轴力分布曲线

Fig. 12 Distribution of axial forces with different internal friction angles

4.4 锚杆预应力的影响

图 13 和图 14 分别是在不同的预应力值下得到的剪应力和轴力分布曲线。从图中可以看出,预应力较小时,剪应力和轴力的峰值都比较小,且分布比较均匀,但是有效锚固长度小。当预应力变大时,轴力通过锚固体向更深处传递,有效锚固长度变大,同时锚固体受到的剪应力和轴力相应增大,但增幅比较均匀。

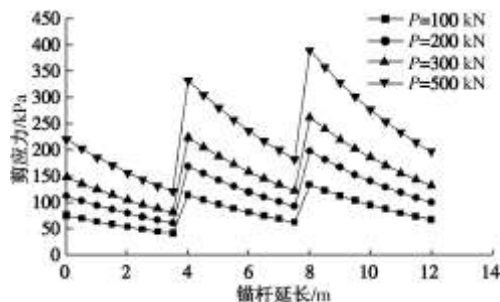


图 13 不同预应力力下的剪应力力分布曲线

Fig. 13 Distribution of shear stresses with different prestresses

5 结 论

(1) 本文所推导出的压力分散型预应力锚杆的受

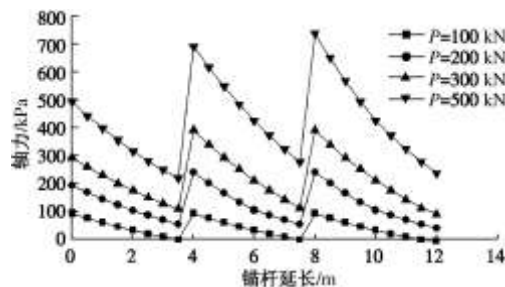


图 14 不同预应力下的轴力分布曲线

Fig. 14 Distribution of axial forces with different prestresses

力传递公式解析解,综合考虑了岩土体和锚杆主要参数的影响,尤其是岩土体黏聚力、内摩擦角以及岩土体和锚杆的弹性模量与泊松比的影响。该解对于压力型预应力锚杆工程的设计有一定的指导作用。

(2) 压力分散型预应力锚杆与集中型锚杆相比,受到的剪应力和轴力相对都比较均匀,都充分发挥了锚固段内岩土体的抗剪强度和锚固体的抗压强度,受力更合理,大大缓解了锚固体中的应力集中现象,可避免锚固体出现渐进性脱黏破坏和局部被压碎。

(3) 压力分散型预应力锚杆受到的剪应力和轴力分布主要与岩土体的弹性模量及泊松比,岩土体的黏聚力和内摩擦角以及施加的预应力等因素有关。岩土体弹性模量和内摩擦角越大,有效锚固长度越小,峰值剪应力越大,轴力衰减越快,剪应力和轴力的分布越集中;预应力越大,剪应力和轴力越大,但整体分布形式基本相同;岩土体黏聚力越大,锚固体受到的剪应力越大,轴力越小,但是影响较小。

(4) 压力分散型锚杆的锚固长度以及各承载体间距的确定,要综合考虑岩土体的弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角以及施加的预应力的影响。对于一定的岩土体和指定的预应力,锚杆的锚固段长度不宜超过有效锚固长度,且不应超过临界锚固长度。

(5) 压力分散型预应力锚杆由于各个承载体的自由段长度不同,为使各个承载体均匀受力,在施加预应力的过程中需严格按照位移补偿张拉的方法施加预应力,在实际工程中应注意。

参考文献:

- [1] 贾金青,郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 11(27): 1257 - 1261. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 11(27): 1257 - 1261. (in

- Chinese))
- [2] 张发明, 刘汉龙, 赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学, 2000, **21**(2): 177 - 179. (ZHANG Fa-ming, LIU Han-long, ZHAO Wei-bing. Design practice of reinforcing rock slope with prestressed cables[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(2): 177 - 179. (in Chinese))
- [3] 贾金青, 宋二祥. 滨海大型地下工程抗浮锚杆的设计与试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(6): 699 - 771. (JIA Jin-qing, SONG Er-xiang. The design and test on anti-floating anchorage of large substructure in coastal region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 699 - 771. (in Chinese))
- [4] 陈国周, 贾金青. 锚杆与土体界面渐进破坏的解析解[J]. 岩石力学, 2007, **28**(增刊): 321 - 326. (CHEN Guo-zhou, JIA Jin-qing. Analytical solution for progressive failure of interface between anchor and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 321 - 326. (in Chinese))
- [5] 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 828 - 831. (YOU Chun-an. Mechanical analysis on anchorage segment of pressure-type cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 828 - 831. (in Chinese))
- [6] 高永涛, 吴顺川, 孙金海. 预应力锚杆锚固段应力分布规律及应用[J]. 北京科技大学学报, 2002, **24**(4): 387 - 390. (GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, SHUN Jin-hai. Application of the pre-stress bolt stress distribution principle[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, **24**(4): 387 - 390. (in Chinese))
- [7] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (XU Zhi-lun. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 张乐文. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩石力学, 2002, **23**(5): 627 - 631. (ZHANG Le-wen. Research on status of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 627 - 631. (in Chinese))
- [9] 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. Analytical calculations of critical anchorage length of bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1134 - 1138. (in Chinese))
- [10] EVANGELISTA A, SAPIO G. Behaviour of ground anchors in stiff clays[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 39 - 47.
- [11] OSTERMAYER H, SCHEELE F. Research on ground anchors in noncohesive soils[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 92 - 97.
- [12] 陈广峰, 米海珠. 黄土地层中锚杆受力性能试验分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, **29**(1): 116 - 119. (CHEN Guang-feng, MI Hai-zhu. Experimental analysis of anchor's stress performance in collapsible loess layer[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, **29**(1): 116 - 119. (in Chinese))
- [13] 何思明, 李新坡. 预应力锚杆作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1876 - 1880. (HE Si-ming, LI Xin-po. Study on mechanism of prestressed anchor bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1876 - 1880. (in Chinese))