

压力型锚索锚固段的受力分析

Mechanical analysis on anchorage segment of pressure-type cable

尤春安

(山东科技大学, 山东 泰安 271019)

摘要: 根据压力型锚索锚固段受力状态, 导出了锚固段剪应力和轴力分布的理论解。在此基础上讨论了锚固体、岩土体及其界面的力学参数对剪应力和轴力分布的影响, 从而得出了一些有意义的结论, 为该类锚索设计和计算以及新型锚固技术的开发和应用提供了一种理论依据。

关键词: 预应力锚索; 锚固理论; 力学分析; 影响因素

中国分类号: TB 302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2004)06-0828-04

作者简介: 尤春安(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩体工程稳定性分析及加固理论和应用的教学和研究工作。

YOU Chun-an

(Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: Based on the mechanical conditions of the anchorage segment of the pressure-type cable, the solutions for distribution of the shear stress and the axial force in a pre-stressed cable are derived. The influences of the mechanical characteristics of the anchorage segment and their interface with the rock mass on the shear stress and the axial force are discussed. Some conclusions are obtained and provide a theoretical basis for designing and calculating of the pressure-type cable.

Key words: pre-stress cable; theory of anchorage; mechanical analysis; influencing factor

0 前言

随着科学技术的进步和发展, 岩土锚固技术和应用也正步入飞速发展阶段。尤其是近十几年来在工程建设大发展环境下, 对岩土工程提出了更高的要求, 促使了岩土锚固技术在发展过程出现较大的飞跃。在锚固段结构上, 近年来, 新材料、新工艺的出现, 已经由传统单一的拉力集中型发展成拉力分散型、压力集中型、压力分散型、拉压混合型等多种多样的锚固结构。伴随着锚固技术的进步, 岩土锚固理论的研究也在不断地深入。国内外对锚固理论的研究, 一般可分为锚固荷载传递机理和加固效应两大内容^[1]。在锚固荷载传递机理方面已有大量的成果, 这些工作主要是在实验和现场测试的基础上采用拟合的方法给出锚固段剪应力的分布规律, 如 Phillips^[2]根据实测资料将其表述为 $\tau_z = \tau_0 \exp(-A_z/d)$, 这里 d 为锚固体直径, τ_0 , A 为常数。也有许多学者采用了数值模拟方法探讨锚固段的应力分布规律^[3-4]。笔者^[5]利用 Mindlin 半空间问题的位移解和 Kelvin 无限空间的位移解, 分别导出了表面拉力型和内部拉力型锚固体的应力分布的弹性解。该结果得到许多引用和认可, 对分析锚固体的力学特征及影响因素、优化锚固参数有一定的意义, 为完善锚固理论起着积极的作用。作为进一步的工作, 本文从理论角度上导出了压力型锚索锚固段的应力分布规律, 并讨论了影响锚固段受力的主要因素, 为锚

固技术的开发和应用提供了一种理论依据。

1 压力型锚索锚固段应力分布基本解

1.1 基本假设

压力型锚索锚固段是由无黏结钢绞线、承载板以及将钢绞线固定在承载板上的挤压套组成, 在钻孔与锚索体注满锚固材料。钢绞线通过承载板压缩柱状的锚固体, 并将力传递到周围的岩土体。对单个承载板称之为压力集中型, 而多个承载板为压力分散型。典型的压力型锚索锚固段的结构如图 1 所示。

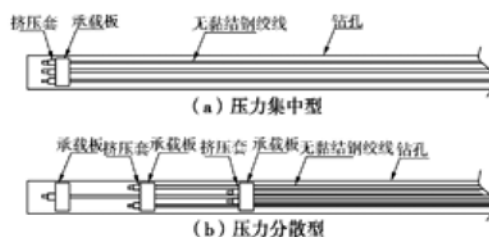


图 1 压力型锚索锚固段的结构图

Fig.1 Structure of anchorage segment in a pressure-type cable

首先考虑压力集中型锚固段的情况。沿锚固体轴线取一微段, 微段的受力如图 2 所示。图中 σ , τ 分别为围岩对微段作用的正应力和剪应力, σ_z 沿锚固体的轴向应力。为了分析方便, 作如下的假设: ①锚固体、围岩体为线性弹性材料; ②锚固体与岩体之间的

界面满足库仑准则;③锚固体截面上的应力 σ_z 为均匀分布。

1.2 基本方程

(1) 微段平衡方程:

$$\sigma_z \cdot \pi a^2 - (\sigma_z + d\sigma_z) \pi a^2 - \tau \cdot 2\pi a dz = 0, \quad (1)$$

得 $d\sigma_z + 2\tau dz = 0$ 。

(2) 锚固体与岩土体之间的界面上满足无黏力的库仑条件:

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

(3) 物理方程:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)]$$

根据假设3, 有: $\sigma_\theta = \sigma_r = \sigma$, 因此

$$\varepsilon_r = -\frac{1}{E} [\sigma(1-\mu) - \mu\sigma_z] \quad (3)$$

(4) 微段的几何方程:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \text{由式(3)可以看出, } \varepsilon_r = \text{const},$$

因此

$$u_r|_{r=a} = \varepsilon_r \cdot a \quad (4)$$

(5) 在锚固体与岩体之间的界面上,

$$\sigma = k \cdot u_r|_{r=a} \quad (5)$$

式中 k 可以由无穷平面中圆孔受均布内压 σ 作用的位移解获得

$$k = \frac{E'}{(1+\mu')a}$$

上述各式中, E , μ 为锚固体的弹模、泊松比; E' , μ' 为岩体的弹模、泊松比; a 为钻孔的半径; c , ϕ 为界面上的黏结力、内摩擦角。

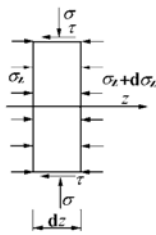


图2 锚固段微元体的受力

Fig. 2 Sketch of element in anchorage segment

1.3 锚固段剪应力和轴力分布的理论解

联立式(2)~(5), 可得

$$\sigma_z = t\tau \quad (6)$$

式中

$$t = \frac{1}{\mu \tan \varphi} \left[\frac{E}{ak} + (1-\mu) \right] = \frac{1}{\mu \tan \varphi} \left[(1+\mu') \frac{E}{E'} + (1-\mu) \right]$$

将式(6)代入式(1)并求解, 得

$$\tau = A \cdot \exp\left(-\frac{2}{at}z\right) \quad (7)$$

式中 A 为由边界条件确定的常数。这里, 当 $z=0$ 时, $\sigma_z = \frac{P}{\pi a^2}$ 代入式(6)和式(7), 得

$$\tau = \frac{P}{\pi a^2 t} \cdot \exp\left(-\frac{2}{at}z\right) \quad (8)$$

式中 P 为锚索的拉力。

对上式进行积分, 并注意 $N_{z=0} = P$, 即可获得沿锚固体的轴力分布:

$$N = P \exp\left(-\frac{2}{at}z\right) \quad (9)$$

式(8)和式(9)就是压力集中型锚索锚固段上的剪应力和轴力分布。这里应该注意的是, 式(8)的剪应力分布形式上正好与 Phillips^[2]所提出的经验公式一致, 但是两者有着本质的区别。Phillips 公式的初衷是用于表示拉力型锚固段的受力状态, 而且也没有表示出各力学参数的影响。

对于压力分散型可以对每一段的剪应力进行得了叠加获得

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi a^2 t} \exp\left[-\frac{2}{at}(z-z_{0i})\right] \text{num}(z-z_{0i}), \\ N &= \sum_{i=1}^n P_i \exp\left[-\frac{2}{at}(z-z_{0i})\right] \text{num}(z-z_{0i}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 z_{0i} 为第 i 段承载板的位置;

$$\text{num}(z-z_{0i}) = \begin{cases} 1 & z-z_{0i} \geq 0 \\ 0 & z-z_{0i} < 0 \end{cases}$$

2 压力型锚索锚固段的受力分析

在式(8)中, 假设 $P = 1000 \text{ kN}$, $\mu = \mu' = 0.3$, $\varphi = 30^\circ$, $a = 0.075 \text{ m}$, $E/E' = 2$, 则该锚固段的剪应力和轴力分布分别为

$$\tau = 2.98e^{-1.40z} \text{ MPa},$$

$$N = 1 \times 10^6 e^{-1.40z} \text{ N}.$$

图3和图4分别表示该锚固段的剪应力和轴力分布曲线。

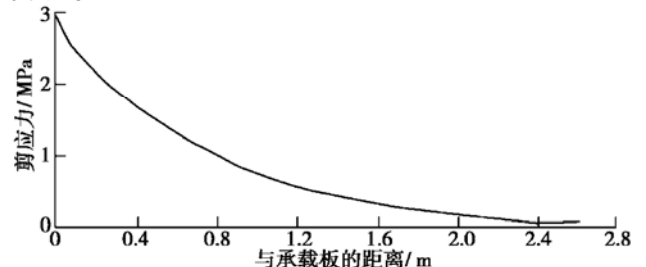


图3 锚固段剪应力分布曲线

Fig. 3 Distribution of shear stresses for a fixed part

分析图3和图4, 可以看出压力集中型锚索的锚固段的剪力和轴力有以下几个特点:

(1) 锚固段的剪应力和轴力具有相同形式的分布函数—幂函数。在承载板一端, 剪应力和轴力为最大,

但随着远离承载板,剪应力和轴力都急速下降并趋近于零。锚固段的剪应力主要分布在靠近承载板的一小部分范围内。

(2) 锚固段的剪应力和轴力的大小和分布主要取决于锚固力 P , 此外还与锚固体直径 ($2a$)、锚固体弹性模量 (E) 和泊松比 (μ)、岩土体的弹性模量 (E') 和泊松比 (μ')、以及锚固体和岩土体界面的摩擦角 (ϕ) 有关。

(3) 如果锚固段无限长,理论上锚固力 P 可以无限提高。这主要原因是将锚固体和岩土体假设为在弹性状态下工作,并且没有考虑锚固体和岩土体界面将出现的脱黏状态。这时的极限锚固力取决于承载板周围的锚固体、岩土体及其界面的强度。

(4) 承载板周围的锚固体的应力状态为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma &= \frac{P}{\pi a^2 t} \operatorname{ctg} \phi, \\ \sigma_z &= \frac{P}{\pi a^2}, \\ \tau_{rz} = \tau &= \frac{P}{\pi a^2 t}, \\ \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

因此,可以选用适当屈服条件或强度准则和界面模型对极限锚固力进行进一步的探讨研究。

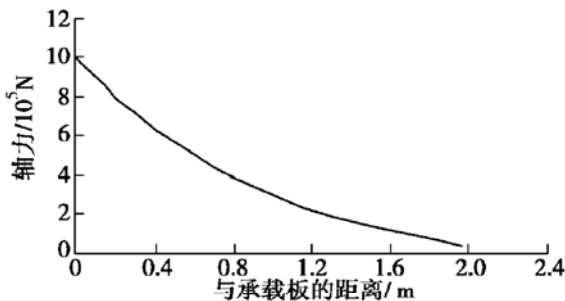


图 4 锚固段轴力分布曲线

Fig. 4 Distribution of axial forces for a fixed part

3 压力型锚索锚固段受力的影响因素

3.1 锚固段受力分布与 E/E' 的关系

分析式 (8) 可知,压力型锚索锚固段和岩土体弹性模量的比值 E/E' 对剪应力大小和分布有较大的影响。图 5 和图 6 是在前面假设的相同条件下,不同的 E/E' 引起锚固体上剪应力和轴力分布曲线的变化情况。从图中可以看出, E/E' 值越小,即岩土体弹性模量不变的条件下岩石越松软,弹性模量越小,则锚固体的最大剪应力值越小,锚固段上的剪应力分布越均匀;反之, E/E' 值越大,岩石越坚硬,弹性模量越大,则锚固体的最大剪应力值越大,锚固段上的剪应力分布越往承载板周围集中。

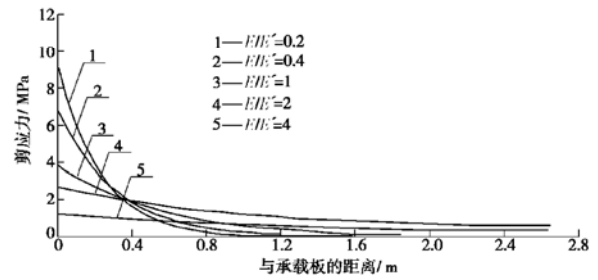


图 5 不同的 E/E' 值的剪应力分布曲线

Fig. 5 Distribution of shear stresses with different values of E/E'

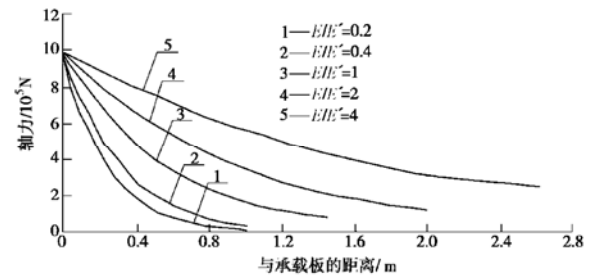


图 6 不同的 E/E' 值的轴力分布曲线

Fig. 6 Distribution of axial forces with different values of E/E'

3.2 锚固段受力分布与 ϕ 的关系

图 7 和图 8 是在前面假设的相同条件下,采用不同的锚固体和岩土体界面的摩擦角时,锚固体上剪应力和轴力分布曲线的变化情况。从图中可以看出,锚固体和岩土体界面的摩擦角对作用在锚固体上的剪应力大小和分布有一定的影响。该摩擦角越大,作用在锚固体上的最大剪应力就越大,锚固段上的剪应力分布越往承载板周围集中;反之,该摩擦角越小,则作用在锚固体的最大剪应力值越小,锚固段上的剪应力分布就越均匀。由于剪应力的变化,轴力的分布曲线也随之变。

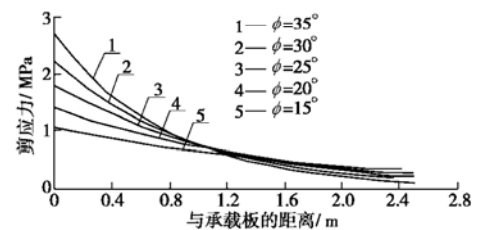


图 7 不同 ϕ 值的剪应力分布曲线

Fig. 7 Distribution of shear stresses with different values of ϕ

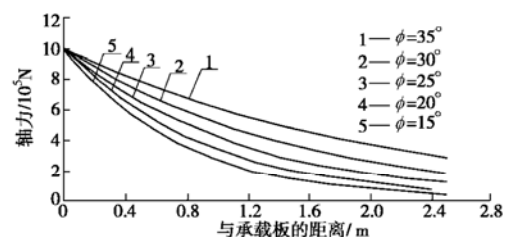


图 8 不同 ϕ 值的轴力分布曲线

Fig. 8 Distribution of axial forces with different values of ϕ

3.3 锚固段受力分布与 a 的关系

从式(8)可以直观地看出,作用在压力型锚索锚固段的剪应力与锚固体本身的半径 a 有密切的关系,在其他条件相同的情况下,锚固体半径越大,则锚固体的最大剪应力值越小,锚固段上的剪应力分布越平缓、均匀;反之,锚固体半径越小,则锚固体的最大剪应力值越大,锚固段上的剪应力分布越往承载板周围集中,有效剪应力作用的范围就越小。图9是在前面假设的相同条件下,对于不同的锚固体半径,锚固体上所受的剪应力的不同分布情况。图10是其相对应的锚固体轴力分布曲线的变化情况。

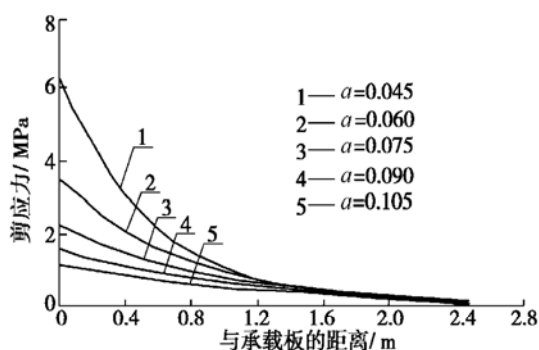


图9 不同 a 值的剪应力分布曲线

Fig. 9 Distribution of shear stresses with different values of a

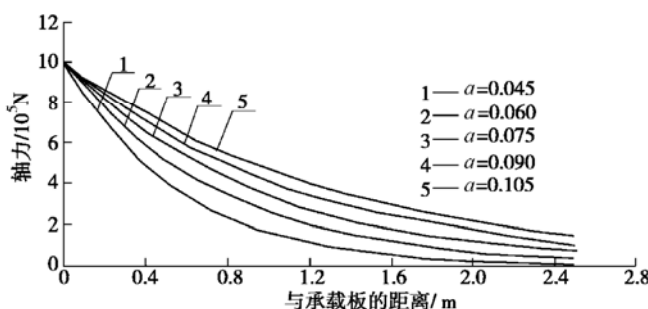


图10 不同 a 值的轴力分布曲线

Fig. 10 Distribution of axial forces with different values of a

4 结 语

(1)本文所导出的压力型锚索锚固段的受力理论解,对分析锚固体的力学特征及其影响因素有一定的意义,为该类锚索设计和计算以及新型锚固技术的开发和应用提供了一种理论依据。

(2)压力型锚索锚固段所受的剪应力与锚固力 P 成正比,即锚固力越大,锚固段所受的剪应力就越大,但剪应力的分布形式不变。此外,还受锚固体直径、锚固体弹模和泊松比、岩土体的弹模和泊松比、以及锚固体和岩土体界面的摩擦角的影响等因素的影响。尤其显著的是地质体的弹模,其值越高,最大剪应力就越大,分布越集中。

(3)压力型锚索锚固力的确定,不但要考虑锚固体与岩土体界面上的抗剪强度,而且必须考虑柱形锚固体自身的强度,特别是在松软的土层中。

(4)压力分散型的最大剪应力要比压力集中型小得多,剪应力分布也比后者均匀,因此锚索的受力条件要比后者好,但是由于压力分散型的各段自由段的不同,在施加预应力过程中或进入工作状态后,各段的受力容易出现不均匀的情况,在实际应用中应注意。

参考文献:

- [1] 张乐文,汪 稔.岩土锚固理论研究现状[J].岩土力学,2002,23(5):627-631.
- [2] 汉纳 T H.锚固技术在岩土工程中的应用[M].胡 定,等译.北京:中国建筑出版社,1986:1-12.
- [3] 高永涛,吴顺川,等.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.
- [4] 崔政权,李 宁.边坡工程—理论与实践最新发展[M].北京:中国水利水电出版社,1999.174-184.
- [5] 尤春安,全长粘结式锚杆的受力分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):339-341.

更 正

《岩土工程学报》2003年第6期第668页表1中最后一行第二列和第三列的数据104.97和91.72系作者笔误,分

别更正为91.72和104.97。特此更正,并向读者致歉!

(栾茂田)