

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1517-04

压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究

卢 黎, 张永兴, 吴曙光

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 根据 Kelvin 解, 推导了压力型锚杆锚固段的弹性黏结应力和正应力分布方程。在推导过程中, 考虑了三向应力状态对锚固段黏结应力的提高作用。经过与现场试验实测数据的对比分析, 验证了理论计算公式的可靠性。采用软质岩体条件下的参数, 对锚固段应力分布进行了计算, 总结了岩石条件下锚固段应力分布特点, 并分析了各种岩土参数变化对锚固段应力分布的影响, 为压力型锚杆的进一步理论研究和工程实践提供了基础。

关 键 词: 压力型锚杆; 锚固段; 黏结应力; 弹性分析

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Distribution of stresses on bonded length of compression type rock bolt

LU Li, ZHANG Yong-xing, WU Shu-guang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: According to the Kelvin's solution, considering three-dimensional stress state, the distribution formulas of normal stress and shear stress (that is, friction on the interface between the grout and the rock) along bonded length of compression type rock bolt are derived. Comparing with the in-situ experimental data, dependability of the formulas are proved. The stresses distribution along bonded length is analyzed with various parameters of soft rocks. This research offers a basis for the compression type rock bolts.

Key words: compression type rock bolt; bonded length; shear stress; elastic analysis

1 引 言

在过去的十多年中, 压力型锚杆技术在国内外都得到了快速的发展。这种锚杆相对于传统的拉力型锚杆有很多的优点, 被广泛地应用于永久性锚固工程中。压力型锚杆属于单孔单一锚固体体系 (SBSA) 的一种, 其构造和受力机制与传统拉力型锚杆完全不同, 它的杆体采用全长自由的无黏结预应力钢绞线或高强钢筋, 通过锚杆底端的承载板, 将拉力直接由钢绞线传至底端的承载板, 承载板对注浆体施加压力, 使注浆体与周围岩土体界面上产生黏结剪切抗力 (本文称黏结应力), 以此提供锚杆所需的承载力 (见图 1)。相比于传统拉力型锚杆, 压力型锚杆受荷时, 锚固段的注浆体受压, 不易开裂, 耐久性优于拉力型锚杆^[1]。同时由于周围岩土的约束, 压力型锚杆的锚固体处于三向受压状态, 锚固体与岩土体界面上的黏结应力将高于拉力型锚

杆。在岩质条件下, 由于锚杆破坏常由锚固体与岩体之间黏结破坏控制, 压力型锚杆的这个力学优点更加突出, 可以提供更大的单锚承载力^[2,3]。目前, 国内很多学者从理论和试验上积极探索这类锚杆的各种力学特性。文献[2]运用 Mindlin 解和有限元的基本理论得出了锚固段应力分布数值解, 文献[4]借用无穷平面中圆孔受均布内压作用的位移解得到锚固段的应力方程, 具有很好的理论价值。文献[5]在砂土中直接测量了锚固段应变情况, 得到了非常宝贵的试验数据。本文从弹性力学的 Kelvin 问题解出发, 推导的锚固段应力分布弹性解是在前人工作基础上对压力型锚杆锚固段弹性应力分布解析解的进一步探索。

2 锚固段应力分布弹性解

在许多工程中, 当潜在滑面位置较深时, 锚杆通常较长, 锚固段深埋地下, 又因为压力型锚杆从

收稿日期: 2006-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目批准号 (No. 50378096)。

作者简介: 卢黎, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事岩土锚固方面的研究。E-mail: lulicq@126.com

锚固段最深处开始受力,在这种情况下,岩土体表面边界对应力分布的影响很小^[6]。可以近似认为,此问题属于无限体内部一点受集中力作用的弹性问题,可以借用 Kelvin 模型的解答进行位移分析(图 2)。

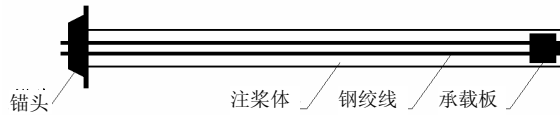


图 1 压力型锚杆构造示意图

Fig.1 The sketch of the compression rock bolt

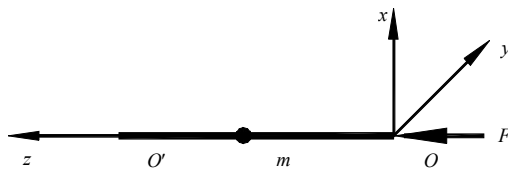


图 2 计算简图

Fig.2 The analytical sketch

根据 Kelvin 问题在 z 方向的位移解^[7]:

$$u_z = \frac{F}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{2(1-2\mu)}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} + \frac{z^2}{(\sqrt{x^2+y^2+z^2})^3} \right] \quad (1)$$

式中: G 为岩体剪切模量 (N/mm^2), $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$; E

为岩体弹性模量; μ 为岩体泊松比。

令锚固体与 z 轴重合, 则 $x = y = 0$, 在任一位置 z 处, 集中力 F 产生的位移为

$$u_z = \frac{F(1+\mu)}{2\pi E z} \quad (2)$$

设原点 O 为锚固体末端, O' 为锚固体始端, 其距离为 L , 黏结应力在 L 范围内分布。

因为岩体受到的黏结应力是由集中力 F 引起的。同时, 根据位移互等定理, 在 O 点的集中力引起的 m 点处的位移等于在 m 点处作用的集中力在 O 点引起的位移^[8]。

如果将 m 点处微段的黏结应力作为集中力 F' :

$$F' = \pi D \tau dz \quad (3)$$

式中: D 为锚固体直径 (mm), τ 为黏结应力 (MPa)。

该集中力在锚固段远端 O 点引起的位移可由 Kelvin 解表示。在黏结应力分布范围内积分, 可得 O 点的位移。在实际工程中, 因为三向应力状态作用, 黏结应力分布长度都不大, 在砂土中常小于 2 m ^[5], 在岩体中更是小得多^[2], 而设计的锚固段长度通常在 $5 \sim 10 \text{ m}$ 以上, 可以认为, 锚固段长度足够,

忽略 O' 点的位移。同时, 不考虑锚杆与岩体之间的相对滑动, 根据变形协调条件, 岩体的位移应等于锚杆的总缩短量。

根据三向虎克定律, 沿锚杆轴向的应变为

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_a} [\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)] \quad (4)$$

式中: ε_z 为锚固体的轴向应变; E_a 为锚固体的换算弹性模量 (Pa)。

假定锚固体截面上的正应力 σ_z 为均匀分布, 则有: $\sigma_\theta = \sigma_r = \sigma$ ^[2]。

根据库仑定律, 有:

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

综合式 (1) ~ (5), 可得变形协调方程:

$$\int_0^L \frac{1}{E_a} \left[\sigma_z - 2\mu \frac{\tau}{\tan \varphi} \right] dz = \int_0^L \frac{(1+\mu)}{2\pi E z} \pi D \tau dz \quad (6)$$

取锚固体任一微段进行受力分析, 易得力的平衡方程为

$$\sigma_z \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 - (\sigma_z + d\sigma_z) \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 - 2\tau D dz = 0 \quad (7)$$

整理后, 联立式 (6), 可得关于 $\sigma_z(z)$ 和 $\tau(z)$ 的一个积分微分方程组:

$$\frac{D}{2} d\sigma_z + 2\tau dz = 0 \quad (8)$$

$$\int_0^L \frac{1}{E_a} \left[\sigma_z - 2\mu \frac{\tau}{\tan \varphi} \right] dz = \int_0^L \frac{(1+\mu)}{2E z} D \tau dz \quad (9)$$

解上述方程组, 令:

$$A = \frac{D\mu}{2\tan \varphi}, B = \frac{(1+\mu)D^2 E_a}{8E} \quad (10)$$

注意到边界条件, 当 $z = 0$ 时, $\sigma_z = \frac{4F}{\pi D^2}$, 得到:

$$\sigma_z = \frac{4F}{\pi D^2} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Az+B}{B} \right) - \frac{z}{A} \right] \quad (11)$$

$$\tau = \frac{F}{\pi D} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Az+B}{B} \right) - \frac{z}{A} \right] \left(\frac{z}{Az+B} \right) \quad (12)$$

式 (11) 和式 (12) 即锚固段的正应力和黏结应力分布方程。应注意到这两个方程是在完全弹性条件下得到的解答, 并且锚杆的实际布置情况应与 Kelvin 问题的模型相似。

3 理论计算与试验数据的对比分析

文献[5]实测了压力型锚杆的锚固体轴向应变, 根据本文的结果, 由下式也可计算锚固体轴向应变:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_a} \left[\sigma_z - 2\mu \frac{\tau}{\tan \varphi} \right] \quad (13)$$

现将二者进行比较。计算参数如下: 内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$, $E_a/E = 650$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 锚杆直径 $D = 133 \text{ mm}$ 。将试验各测点值与理论计算值对比汇总于表1中。

表1 锚固体轴向应变值对比
Table 1 Comparing calculation value with test value of normal strain

与承载板距离 / m	应变值 / 10^{-6}			
	$F = 222.4 / \text{kN}$		$F = 166.8 / \text{kN}$	
	试验值	计算值	试验值	计算值
0.5	341.0	386.2	247.0	289.6
1.0	311.0	312.3	189.0	234.3
2.0	80.0	135.9	43.0	101.9
3.5	3.0	14.7	18.0	11.0

可以看出, 计算值比试验值总体上偏大一些, 但是数据基本吻合, 轴向应变的变化规律和趋势也是很吻合的。当然, 实地测量锚固体的轴向应变是很困难的, 试点的损耗大, 个别试点的测试值也可能具有较大的离散性。总体上看, 理论计算值反映了合理的规律, 与实测值基本相符。

4 岩质条件下的算例和分析

根据对压力分散型锚杆的相关研究报告^[2], 在岩石条件下压力型锚杆的优势可以得到充分发挥, 本算例以软质岩体为基础进行分析。

设锚杆钢绞线拉力 $F = 700 \text{ kN}$, 泊松比为 0.2, 内摩擦角为 35° , 锚杆直径为 150 mm , $E_a/E = 6$ 。

根据式(11)、式(12), 绘出沿杆长的正应力和黏结应力分布曲线如图3、图4所示。

由图3、图4可以看出, 压力型锚杆锚固段受力的几个特点:

(1) 在承载板处黏结应力等于0。实际上, 在集中力作用下, 锚固体末端与孔壁底端会脱开, 此末端处于临空状态, 其剪应力为0。根据剪应力互等定律, 与孔壁接触的锚固体表面黏结应力亦为0。

(2) 黏结应力从0开始, 迅速增大, 并很快到达峰值。本例中, 在距承载板 0.14 m 处, 黏结应力达到峰值 5.7 MPa 。这是在较软岩条件下得到的结果, 而目前的测试黏结应力的试验, 多为拉力型锚

杆, 对比拉力型试验, 这个黏结应力值偏大。因为压力型锚杆的锚固段处于三向应力状态, 正应力的存在将大大提高黏结应力的极限强度, 这正是压力型锚杆能充分调动岩土体强度的优点所在, 这种优点在岩质条件下更为显著。

(3) 经过最大值后, 随着与承载板距离的增大, 黏结应力逐渐减小, 并最终趋于0。这与已有的理论和试验结果分析是一致的。应注意到, 由于岩体能承受的峰值黏结应力较高, 黏结应力曲线下降较快, 本例在距承载板 0.7 m 左右时, 黏结应力就很小了。实际上, 这正是压力型锚杆的另一优点: 减小锚固段的长度, 节约了材料。根据文献[2]在软岩条件下的试验, 锚固体受压范围在 $0.9 \sim 1.2 \text{ m}$ 之间, 与本例结果较为接近。

正应力分布曲线同样体现了较好的规律, 将正应力乘以锚固体面积, 即得到锚固体轴力, 在承载板处, 轴力等于钢绞线的拉力, 以后逐渐减小。

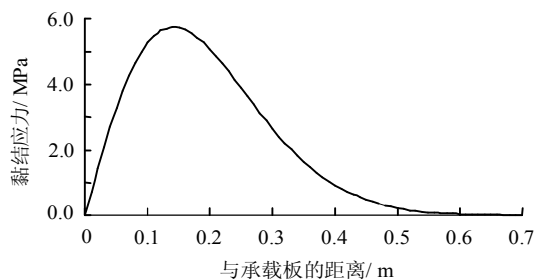


图3 锚固段黏结应力分布曲线
Fig.3 Distribution of shear stress on bonded length

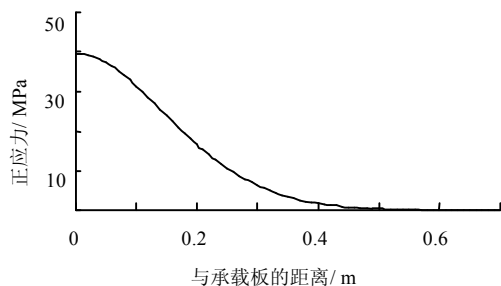


图4 锚固段正应力分布曲线
Fig.4 Distribution of normal stress on bonded length

5 相关岩土参数的影响分析

5.1 E_a/E 对锚固段应力分布的影响

E_a/E 是锚固体换算弹性模量与岩土体弹性模量的比, 该值越大, 表示相对于锚杆, 岩土体越松软; 该值越小, 表示相对于锚杆, 岩土体越坚硬。图5和图6是在不同的 E_a/E 值条件下分别计算的黏结应力和正应力变化规律。

从图5和图6不难看出, 当同样的锚杆处于不

同的岩土条件下时黏结应力的分布曲线有较大的差异。当岩土变得松软时,黏结应力峰值降低,分布均匀,曲线平滑,分布范围更大。相应的,锚固体正应力降低速度缓慢;而岩土体变得坚硬时,情况却正好相反。弹性模量对应力分布的影响是一个关键因素,因为不同的地质条件,弹性模量往往差别很大,因而应力分布的结果变化较大。

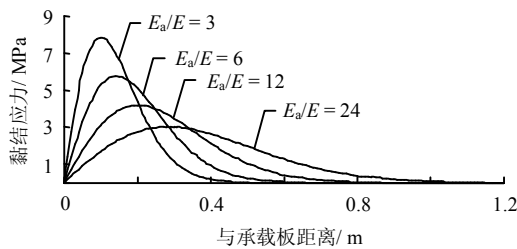


图5 不同的 E_a/E 值对黏结应力分布的影响
Fig.5 Principles of shear stress on various E_a/E

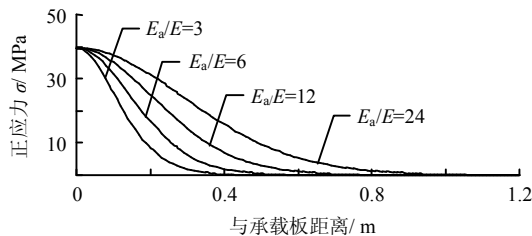


图6 不同的 E_a/E 值对正应力分布的影响
Fig.6 Principles of normal stress on various E_a/E

5.2 内摩擦角 φ 的影响

在常见的内摩擦角范围以内,分别计算黏结应力分布,结果如图7所示,当 φ 增大时,黏结应力峰值增大,分布范围相应变窄。应注意到,这种变化在 φ 大于 35° 以后,明显地有收敛的趋势,很快向最大值靠拢。

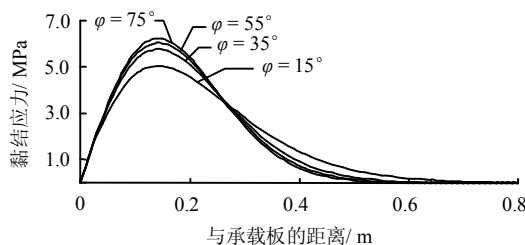


图7 不同的 φ 值对黏结应力分布的影响
Fig.7 Principles of shear stress on various φ

5.3 泊松比的影响

图8表示泊松比的变化对黏结应力的影响,这组曲线中,峰值由高到低分别表示 μ 为0.15, 0.2, 0.25, 0.3。很明显,泊松比在常规范范围内变化时,对黏结应力分布的影响很小。同样地,对正应力的分布影响也小(此处从略)。

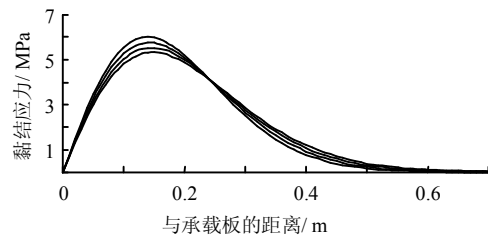


图8 不同的 μ 值对黏结应力分布的影响
Fig.8 Principles of shear stress on various μ

6 结 论

(1) 根据 Kelvin 问题的位移解,库仑定律等相关理论,推导了压力型锚杆锚固段的黏结应力和正应力分布的表达式。

(2) 通过与文献[5]现场测试的轴向应变值对比,表明理论计算值与实测值吻合较好。

(3) 通过对软岩条件下工程算例的分析,表明理论公式较好地反映了锚固段应力分布的客观规律。在锚固末端,黏结应力为0,随着 z 的增大,黏结应力迅速增大达到峰值,而后逐渐下降,最终趋于0。正应力由最大值平缓下降,最后趋于0。

(4) 分析了几个相关的岩土参数对应力分布的影响。其中,影响最大的是弹性模量比 E_a/E ;其次是内摩擦角;影响最小的是泊松比。

(5) 压力型锚杆的突出优势是锚固段处于三向受压应力状态,这种应力状态不但可以提高锚固体与围岩之间的黏结应力,而且可以防止锚固体开裂,提高锚杆的耐久性。

参 考 文 献

- [1] 韦勇生,吕兵,孔建华,等. OVM压力分散型锚索在大坝坝基加固工程中的应用[J]. 岩土锚固, 2003, (2): 28—32.
- [2] 张四平,候庆. 压力分散型锚杆剪应力分布与现场试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 41—47.
- [3] 张景成,田宝文,王忠义,等. 压力分散型预应力锚索抗拉拔破坏试验[J]. 勘察科学技术, 2004, (3): 12—17.
- [4] 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 of anchorage segment of pressure-type cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (6): 828—831.
- [5] 程良奎,范景伦,周彦清,等. 压力分散型(可拆芯式)锚杆的研究与应用[J]. 冶金工业部建筑研究总院院刊, 2000, (2): 1—8.
- [6] 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.
- [7] 杜庆华,余寿文,姚振汉. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 104—106.
- [8] 吴德伦. 结构力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994: 123—125.