

# 锚固体应力分布规律的数值模拟分析

战玉宝<sup>1</sup>, 毕宣可<sup>2</sup>, 尤春安<sup>1</sup>, 芦兴利<sup>1</sup>, 孙 锋<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 土木与建筑学院, 青岛 266510; 2. 山东科技大学 泰安校区, 泰安 271019)

**摘 要:** 采用非线性有限元法, 分析了全长粘结式锚杆在荷载作用下剪应力的分布规律, 同时研究了被加固岩土体的性质对锚固体剪应力分布规律的影响。并将数值模拟的结果与理论计算以及试验结果进行了对比分析。分析表明, 锚固体剪应力的分布非常不均匀; 当荷载不大时, 锚杆所受的剪应力分布范围较小, 而最大剪应力数值较大; 随着荷载的加大, 剪应力的分布范围有向下扩展的趋势, 但扩展的速度比较慢; 锚固体所受的剪应力的分布与岩土体性质有密切的关系, 岩石越坚硬, 剪应力分布越集中, 最大剪应力的数值越大; 而岩土体越松软, 剪应力分布就越均匀, 最大剪应力的数值就越小。

**关 键 词:** 岩土工程; 锚固体; 应力分布; 数值模拟

**中图分类号:** TD353<sup>+</sup>.6

**文献标识码:** A

## Numerical simulation on stress distribution in anchorage body

ZHAN Yu-bao<sup>1</sup>, BI Xuan-ke<sup>2</sup>, YOU Chun-an<sup>1</sup>, LU Xing-li<sup>1</sup>, SUN Feng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China

2. Tai'an Campus, Shandong University of Science & Technology, Tai'an 271019, China)

**Abstract:** The shear stress distribution of the wholly grouted bolt is analyzed by using a nonlinear finite element method; also the strengthened rock-soil body's properties are researched, which influence the anchorage body's shear stress distribution. Afterwards, a contrastive analysis is done among numerical simulation result, theoretical calculation and experimental result; it indicates that the shear stress distribution in the anchorage body is uneven. Under the small load, the bolt's shear stress distribution range is small but the maximum shear stress is large; with the increase of load, its distribution range tends to expand downwards with a slow speed. The shear stress and its distribution have a close relationship to rock-soil body's properties: the stiffer the rock, the more concentrated the shear stress and the larger the maximum shear stress; on the contrary, the evenner the distribution and the smaller the maximum shear stress.

**Key words:** geotechnical engineering; anchorage body; stress distribution; numerical simulation

## 1 引 言

锚固支护, 能充分发挥岩土体能量, 改善岩土体不利的受力状态, 调动和提高岩土体的自身强度和自稳能力, 从而可大大减轻支护结构自重、节约工程材料、缩短工期, 因此, 已经得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。为了深入探讨锚杆的锚固机理, 近年来, 国内外许多学者进行了大量的数值模拟和试验研究<sup>[2-7]</sup>, 取得了不少成果。

毋庸讳言, 物理模型试验的弱点非常的明显, 如改变方案、调整参数困难, 试验研究难度大、费用高、有尺寸效应等等。当前数值模拟方法应用很广, 与试验方法相比有明显的优点: 成本低、时间

短、重复性高、灵活性强。尤其是能较好地模拟不同参数(物理、荷载参数等)条件下产生的力学效应。

本文采用非线性有限元方法, 分析了全长粘结式锚杆在荷载作用下沿锚固体长度方向的剪应力分布规律, 同时分析了岩土体与锚杆体弹性模量的比值对锚固体剪应力分布规律的影响。最后, 将数值模拟结果与理论分析及其试验研究的结果进行了对比分析。

## 2 有限元计算模型建立与边界条件

为了避免用杆单元模拟锚杆时锚杆仅能承受轴向力的缺点, 将锚杆及灌浆材料用实体单元进行

模拟。这样, 锚杆不但可以承受轴向力的作用, 而且可以承受径向力的作用, 能很好地模拟锚固体在与围岩共同变形中产生的体胀效应。本次分析符合轴对称问题的条件, 为了节省计算时间和分析的方便, 计算模型简化为轴对称问题。分析以锚固长度 1 m 为例, 锚杆直径为 24 mm, 钻孔直径为 30 mm。锚杆上方受集中拉拔力的作用。同时, 为了减少边界条件对计算结果的影响, 模型在  $X$  方向上的尺寸取为 2 m,  $Y$  方向的尺寸取 3 m。模型左、右两侧对  $X$  方向进行约束, 底面约束  $Y$  方向的位移。整个计算模型如图 1 所示。有限元网格划分如图 2 所示。

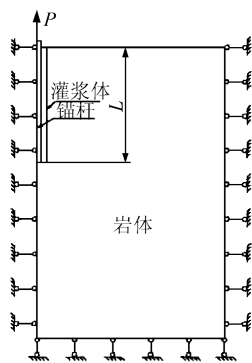


图 1 计算模型

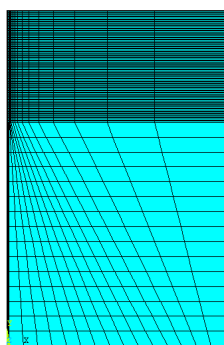


图 2 计算网格

Fig.1 Model of calculation Fig.2 Grid of calculation

### 3 锚固体的本构关系及计算参数

在金属材料中, 常用的屈服条件是 Treaca 屈服准则和 Mises 屈服准则, 但这些屈服条件不适合于岩土材料。这其中最主要的问题之一是岩土材料在塑性流动变形过程中会产生体胀现象, 而这些屈服条件不能反映这一特征。因此, 在岩土工程中最普遍采用的是 Coulomb 屈服准则。用主应力表示的 Coulomb 屈服条件为:

$$f_c(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi = 0 \quad (1)$$

式中  $c, \varphi$  为材料的粘结力和内摩擦角。

这里, 规定了主应力:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 如果不规定主应力的顺序, 则 Mohr-Coulomb 屈服条件的表达式较为复杂。

采用 Mohr-Coulomb 屈服准则时应该注意的: 通过试验发现, 大多数岩土材料并没有像采用与 Mohr-Coulomb 屈服条件非关联流动法则所得到的体胀结果那么大。尤其是在本问题中, 如果简单地采用这一屈服条件, 将会得到错误的结论。

Drucker-Prager 屈服条件又称广义的 Mises 屈服准则, 它在 Mises 屈服准则的基础上考虑了静水压

力的影响, 增加了一个静水压力的影响项:

$$F_c = 3\alpha\sigma_m + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

式中  $\sigma_m$  为静水压力, 即平均应力,  $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$  ( $i=1,2,3$ );  $J_2$  为应力偏张量第 2 不变量;  $\alpha, k$  为与材料性质有关的参数。

事实上, Drucker-Prager 屈服条件是修正的 Coulomb 屈服条件。如图 3 所示, 在主应力空间中 Drucker-Prager 屈服条件为一个圆锥面, 而 Coulomb 屈服条件在主应力空间中为六棱锥面。如果使 Drucker-Prager 屈服条件的圆锥面与 Coulomb 屈服条件的六棱锥面母线重合, 则可导出:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad k = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad (3)$$

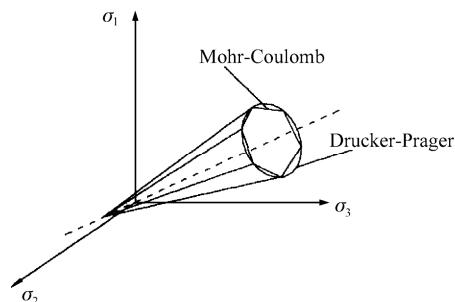


图 3 主应力空间中 Mohr-Coulomb 和 D-P 屈服面  
Fig.3 Mohr-Coulomb and D-P material yield surface in principal stress space

显然, Drucker-Prager 屈服条件和 Mohr-Coulomb 屈服条件有相同的性质, 采用与 Drucker-Prager 屈服条件非关联流动法则所得到的体胀结果要比实际情况大得多。分析式 (2) 可以看出, 塑性流动的体胀现象与  $\alpha$  值有关, 如果  $\alpha=0$ , 则 Drucker-Prager 屈服条件退化为 Mises 屈服条件, 没有体胀现象。为了能如实地反映实际的体胀性质, 将与  $\alpha$  有关的  $\varphi$  值变为  $\varphi_i$ , 将  $\varphi_i$  称为膨胀角。当膨胀角  $\varphi_i=0$  时, 材料不产生任何体胀; 当膨胀角  $\varphi_i$  与内摩擦角  $\varphi$  相同时, 材料产生的体胀最大。这样, 形式上将两参数的 Drucker-Prager 屈服条件模型变为三参数 ( $\varphi_i, \varphi, c$ ) 的塑性力学模型。本次分析中计算模型的具体力学参数见表 1。

### 4 数值计算结果分析

#### 4.1 不同荷载作用下剪应力的分布规律

图 4 是锚杆受 20 kN 拉拔力作用时锚固体应力分布的云图。图 5 是在各级荷载作用下, 剪应力在

表1 材料的力学参数  
Table1 Mechanical parameters of materials

|    | $E/\text{GPa}$ | $\mu$ | $c/\text{MPa}$ | $\varphi / (^{\circ})$ | $\varphi_i / (^{\circ})$ |
|----|----------------|-------|----------------|------------------------|--------------------------|
| 钢筋 | 210            | 0.30  |                |                        |                          |
| 砂浆 | 3              | 0.20  | 2              | 20                     | 10                       |
| 岩体 | 5              | 0.24  | 7              | 25                     | 15                       |

锚杆长度方向上的分布。分析两图不难得出以下认识：

(1) 在荷载不大时，在孔口周围锚杆所受的剪应力较小，但是孔口以下，剪应力就急剧地增大并达到最大值，杆体所受的剪应力从最大值以下，随着远离荷载端逐渐减小，达到锚杆的荷载远端时，剪应力为零。也就是说，锚杆所受的剪应力分布范围较小，但是最大剪应力的数值较大，应力集中明显；

(2) 从图 5 可以看出，剪应力的峰值随着荷载的加大而不断增大，但剪应力峰值的位置几乎不变。同时，随着荷载的增大，剪应力的分布深度也在不断向下扩展，但扩展的速度很慢。

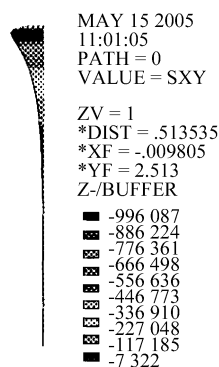


图4 沿锚杆长度方向的应力分布图  
Fig.4 Stress distribution along the anchor

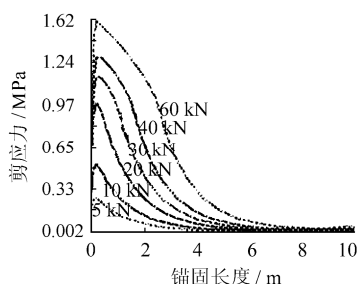


图5 不同荷载作用下剪应力分布情况  
Fig.5 Distribution of shear stress for anchor under different loads

(3) 就本模型而言，当拉拔力加大到 60 kN 时，锚杆的有效受力深度不超过 600 mm。也就是说，锚杆真正发挥作用的不过 600 mm，锚杆其他部

分还没有充分发挥作用。

#### 4.2 被加固岩土体性质对剪应力分布规律的影响

从图 6 可以看出， $E/E_a$  的比值直接影响到锚固体剪应力的分布。所以，研究  $E/E_a$  的数值对锚固体应力分布的影响，对掌握不同岩土体中锚杆剪应力分布规律有重要的意义。

本节中，仍取锚固长度为 1 m，岩石的弹性模量分别采用 2.1 GPa，4.2 GPa，8.4 GPa 即  $E/E_a$  分别为 0.01，0.02，0.04，其他材料的力学参数同表 1，荷载以 5 kN 为步长，逐级施加。

图 6 是  $E/E_a$  分别为 0.01、0.02、0.04 锚固体受 30 kN 拉拔荷载时，锚固体剪应力分布图，图 7 为最大剪应力与  $E/E_a$  的关系图。分析两图可以看出：

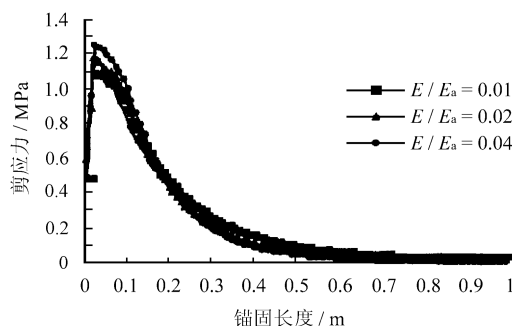


图6 剪应力与  $E/E_a$  的关系  
Fig.6 Relationship between shear stress and  $E/E_a$

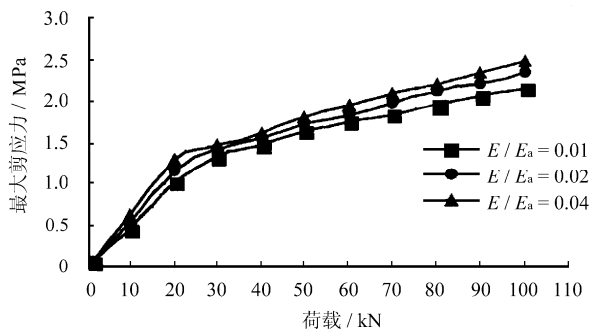


图7 最大剪应力与  $E/E_a$  的关系  
Fig.7 Relationship between peak shear stress and  $E/E_a$

(1)  $E/E_a$  的值越大，即岩石越坚硬，弹模越大，同一荷载水平下，最大剪应力越大；反之，最大剪应力越小；

(2)  $E/E_a$  的值越小，即岩石越松软，岩体的弹性模量就越小，剪应力分布范围越大、越均匀；

(3)  $E/E_a$  的值越大，剪应力的集中程度越大，即剪应力的作用范围越小。

总之，锚固体所受的剪应力的大小和分布与岩体性质有密切的关系。岩石越坚硬，剪应力分布越集中，最大剪应力的数值越大；岩体越松软，剪应

力分布就越均匀,最大剪应力的数值就越小。这些结论提示我们,在锚杆设计过程中,应该针对不同的岩体选择不同的锚固参数,从而达到优化锚杆设计参数的目的,使设计即安全又经济。

## 5 理论计算与试验结果比较

文[8]利用 Mindlin 问题的位移解导出全长粘结式锚杆受力的弹性解:

$$\tau = \frac{P}{\pi a} \left( \frac{1}{2} tz \right) \exp \left( -\frac{1}{2} tz^2 \right) \quad (4)$$

式中  $t = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)a^2} \left( \frac{E}{E_a} \right)$ 。E,  $\mu$  分别为岩

体的弹性模量和泊松比;  $E_a$  为锚杆杆体的弹性模量;  $a$  为锚杆杆体的半径;  $\tau$  为锚杆杆体所受的剪应力;  $P$  为锚杆端头所受的拉拔力。

文[9]通过在锚杆上贴应变片的方法测得了锚杆在各级荷载作用下沿杆的剪应力分布情况。

对比分析表明,剪应力沿锚杆的分布规律一致,只是在有限元计算中,由于网格划分的精度问题,使得在锚杆的端部剪应力的数值很难趋向于 0;在各级荷载作用下的剪应力分布规律也非常接近,而且当荷载不断增大时,剪应力的分布规律与发展趋势也是一样的;文[8]所得不同的  $E/E_a$  对剪应力分布的影响规律与本文所得结论也是一致的。

## 6 结 论

本文采用非线性有限元方法,将数值计算模型简化为轴对称问题,同时用实体单元代替杆单元来模拟锚杆,较好地实现了锚固体应力分布规律的数值模拟。通过对计算结果分析得出以下结论:

(1) 当荷载不大时,即在弹性状态下,全长粘结式锚杆所受的剪应力范围较小,而最大剪应力数值较大;

(2) 随着荷载的加大,剪应力的分布范围有向下扩展的趋势,但扩展的速度比较慢;

(3) 锚固体所受的剪应力的分布和分布与岩体性质有密切的关系。岩石越坚硬,剪应力分布越集中,最大剪应力的数值越大;岩体越松软,剪应力分布就越均匀,最大剪应力的数值就越小。

(4) 通过与理论计算及其试验研究成果的比较,数值模拟得出的剪应力的分布规律和前两者的结论一致。

## 参 考 文 献

[1] 朱合华,郑国平,刘庭金. 预应力锚固支护的数值模拟[J]. 西部探矿工程, 2003, 6: 17—19.  
[2] 朱焕春,吴海滨,赵海斌. 反复张拉荷载作用下锚杆工

作机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 662—665.

ZHU Huan-chun, WU Hai-bin, ZHAO Hai-bin. Experimental study on bolting mechanism under cyclic tensile load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 662—665.

[3] 朱焕春,荣冠,肖明,等. 张拉荷载下全长粘结锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379—384.

ZHU Huan-chun, RONG Guan, XIAO Ming, et al. Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 379—384.

[4] 丁秀丽,盛谦,韩军. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980—988.

DING Xiu-li, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 980—988.

[5] Makoto, Obata, Michio Inoue, Yoshiaki Goto. The failure mechanism and the pull-out strength of a ond-type anchor near a free edge[J]. **Mechanics of Materials**, 1998, 28: 113—122.

[6] A. Kılıc, E. Yasar, A.G. Celik. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2002, 17: 355—362.

[7] A. Kılıc, E. Yasar, C.D. Atis. Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully-grouted rock bolts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18: 1—6.

[8] 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.

YOU Chun-an. Mechanical analysis of wholly grouted anchor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 339—341.

[9] 尤春安,高明,张利民等. 锚固体应力分布的实验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 63—66.

You Chun'an, GAO Ming, ZHANG Li-min, et al. Experimental research on stress distribution in anchorage body[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(s): 63—66.

[10] 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 pretressed cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 925—928.