

高预应力让压锚杆数值模拟方法研究

连传杰¹, 韦立德², 王 阁³

(1. 山东科技大学资源与土木工程系, 山东 泰安 271019; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 捷马(济宁)矿山支护设备制造有限公司, 山东 济宁 272023)

摘 要: 建议了一种考虑高预应力让压锚杆锚芯与岩石间剪切破坏作用的三维锚杆计算模型, 并开发了相应的有限元程序。由于采用 2 节点三维杆件单元和 4 节点三维锚杆单元模拟高预应力让压锚杆, 使得所建议的模拟方法适用范围更加广泛, 可以用于锚索模拟、一般锚杆模拟和抗滑桩等桩结构模拟, 且能够很好地模拟高预应力让压锚杆的力学特性。

关键词: 预应力让压锚杆; 有限元法; 锚杆模拟

中图分类号: TU32

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1437-07

作者简介: 连传杰(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事井巷支护与特殊开采技术研究。E-mail: cjliansdust@163.com。

Development of 3D numerical simulating methods for high prestressed yield bolts

LIAN Chuan-jie¹, WEI Li-de², WANG Ge³

(1. Department of Resource & Civil Engineering, Shandong University of Science & Technology, Taian 271019, China; 2. Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Jennmar (Jining) Mine Roof Support Products Co., Ltd., Jining 272023, China)

Abstract: A 3D simulation model considering the shear deformation between the high pre-stressed yield bolts and the rock was suggested, and the corresponding program of the finite element method was developed. Due to simulating bolts with the 2-noded member elements and the 4-noded bolt elements, the proposed method could be used for the simulation of anchorage cables, general bolts and piles. And it could simulate the mechanical properties of the high prestressed yield bolts well.

Key words: prestressed yield bolt; finite element method; simulation of bolt

0 引 言

锚杆作为一种支撑结构已广泛应用于隧道支护、路基加固和边坡稳定等岩土工程中。由于岩土工程面临的地质条件复杂多变(三维、非均质、不连续性), 现场量测难度大, 多年来对岩土锚固技术方法的研究已取得了很大进展, 但在理论数值分析方面还有待深入探讨^[1-4]。

高预应力让压锚杆是美国捷马公司的一种新型锚杆产品, 以能让压和施加高预应力著称, 现已在我国一些深部煤矿巷道支护中得到成功应用。目前, 对高预应力让压锚杆与围岩之间共同作用的数值模拟主要采用商用软件进行模拟计算, 计算中尚不能很好体现该种锚杆的让压特征。本文建议了一种能体现该种锚杆让压特征的三维锚杆计算模型, 并开发了相应的有限元程序, 运用该方法对加锚岩体试验进行了数值计算, 讨论了该三维锚杆单元的适用性。

1 高预应力让压锚杆的工作性能

高预应力让压锚杆是针对深井、软岩和动压影响等大变形巷道而设计的一种可延伸锚杆, 其结构组成如图 1。

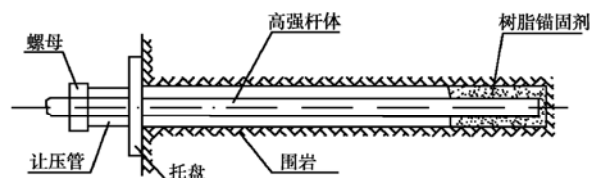


图 1 高预应力让压锚杆结构图

Fig. 1 The structure of the high prestressed yield bolts

与普通锚杆相比, 高预应力让压锚杆和一般的非全程黏结锚杆相似, 都包含有黏结段和自由段, 其主要不同点是在螺母与托盘之间增加了一个让压管, 从

而具有让压性能和大延伸量的工作特性。

2 三维锚杆单元理论

对处于黏结段的锚杆体,其空间形式可看作一轴对称结构,锚芯处于轴心位置,周围为灌浆(树脂),灌浆体与岩体相连。对自由段的锚杆体,其空间形式也可看作一轴对称结构,锚芯处于轴心位置,周围为灌浆,该灌浆体可视为刚度和强度都为 0 的特殊材料,该材料与岩体相连。这样处理力学模型基本上是等效的,以方便进行数值模拟。

本文三维锚杆锚固作用模拟由 2 节点三维杆件单元和 4 节点三维锚杆单元组成^[1]。2 节点杆件单元和以往相似,除了能够承受轴向应力外,还能够承受横向剪切应力。定义 4 节点三维锚杆单元如图 2,其中结点 1, 2 为灌浆外半径上的两角点,结点 3, 4 为锚芯两 endpoints。在生成有限元网格时,结点 3, 4 与代表岩体的实体单元相连,如图 3。由于锚杆的直径相对于所分析问题的尺寸小得多,因此可认为结点 3, 4 的坐标与结点 1, 2 的坐标相同,以减少数据输入工作量。但在形成单元刚度矩阵时仍用锚杆的实际尺寸。2 节点杆件单元的 2 节点和结点 1, 2 的节点号重合。

考虑到锚杆具有轴向性质的特点,锚杆单元将先在局部坐标系 x', y', z' 中讨论,通过适当的坐标变换,再建立整体坐标系中的有限元方程。

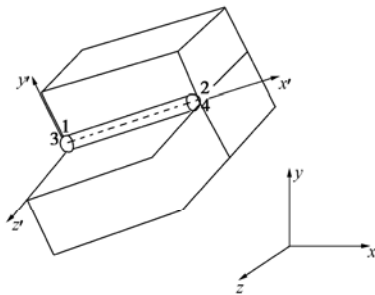


图 2 四节点三维锚杆单元

Fig. 2 The 4-noded element

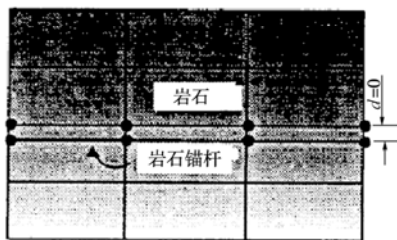


图 3 锚杆单元与岩体相连

Fig. 3 Linking of the bolt and the rock

定义 2 节点杆件单元在整体坐标系中的结点位移

矢量 $\{a\}^e$ 和结点力矢量 $\{F\}^e$ 分别为

$$\{a\}^e = \{u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2\}^T,$$

$$\{F\}^e = \{X_1 \quad Y_1 \quad Z_1 \quad X_2 \quad Y_2 \quad Z_2\}^T.$$

定义 4 节点三维锚杆单元在整体坐标系中的结点位移矢量 $\{a\}^e$ 和结点力矢量 $\{F\}^e$ 分别为

$$\{a\}^e = \{u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad w_3 \quad u_4 \quad v_4 \quad w_4\}^T,$$

$$\{F\}^e = \{x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad z_2 \quad x_3 \quad y_3 \quad z_3 \quad x_4 \quad y_4 \quad z_4\}^T.$$

2.1 基本假设

本文锚杆和一般全程黏结锚杆相似,在锚杆单元中,本文采用了和雷晓燕等类似的基本假定:①锚芯的轴向位移沿锚杆方向成线性分布,沿径线方向位移为常数;②锚芯与岩石之间材料(或灌浆)的轴向位移沿锚杆方向成线性分布、沿径线方向则取空间轴对称问题的解析解;③轴向应力主要由锚芯承担;④锚芯和岩石间的径向相对位移为 0,径向的法向应力无穷大;⑤切向剪应力主要与锚芯和岩石间的轴向相对位移有关;⑥横向剪应力主要与锚杆的侧向位移有关,如图 4。沿轴线方向,引入插值函数

$$N_1 = \frac{1-\xi}{2}, \quad N_2 = \frac{1+\xi}{2}, \quad (1)$$

其中, $-1 \leq \xi = \frac{x'-l/2}{l/2} \leq 1$, l 为单元的长度。

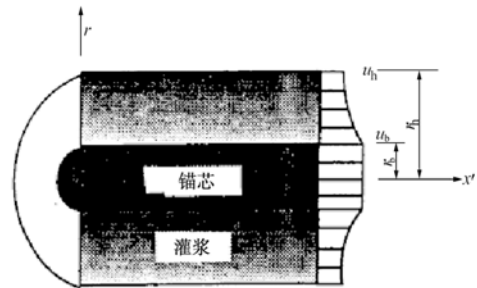


图 4 锚芯与岩石之间材料中轴向位移沿径线方向分布

Fig. 4 The distribution of radial displacement in the axial direction between rock and bolts

单元中任一点的位移分量可通过插值函数用结点位移向量表示成

$$\{u' \quad v' \quad w'\}^T = N a^e, \quad (2)$$

对 2 节点杆件单元

$$N = \begin{Bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

对 4 节点三维锚杆单元上的锚芯

$$N = \begin{Bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \quad (4a)$$

对 4 节点三维锚杆单元上的灌浆

$$N = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 \end{Bmatrix}, \quad (4b)$$

岩石与锚芯间材料轴向位移的解析表达式具体见文献 [1, 2]。

2.2 应变与应力

根据基本假设, 锚杆单元中只有 6 个主要应变分量, 它们分别是锚芯中由轴向位移引起的轴向应变 ε'_b , 岩石与锚芯间材料中由相对切向位移引起的切向剪应变 γ'_g , 岩石与锚芯间材料和锚芯之间的相对法向位移 ε'_y 和 ε'_z , 以及由侧向位移引起的沿局部坐标 y' 和 z' 的横向剪应变 $\gamma'_{y'}$ 和 $\gamma'_{z'}$, 用矢量的形式可将单元应变表示如下:

对 2 节点杆件单元

$$\varepsilon'^e = \begin{Bmatrix} \varepsilon'_b \\ \gamma'_{y'} \\ \gamma'_{z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u'}{\partial x'} \\ \frac{\partial v'}{\partial x'} \\ \frac{\partial w'}{\partial x'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u'_2 - u'_1}{l} \\ \frac{v'_2 - v'_1}{l} \\ \frac{w'_2 - w'_1}{l} \end{Bmatrix} = Ba'^e$$

$$= \begin{Bmatrix} -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{l} & 0 & 0 & \frac{1}{l} \end{Bmatrix} a'^e, \quad (5)$$

对 4 节点三维锚杆单元

$$\varepsilon'^e = \begin{Bmatrix} \gamma'_g \\ \varepsilon'_{y'} \\ \varepsilon'_{z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u'}{\partial r} \\ v'_h - v'_b \\ w'_h - w'_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{u'_h - u'_b}{r \ln(r_h/r_b)} \\ v'_h - v'_b \\ w'_h - w'_b \end{Bmatrix} = Ba'^e$$

$$= \begin{Bmatrix} \frac{-N_1}{r \ln(r_h/r_b)} & 0 & 0 & \frac{-N_2}{r \ln(r_h/r_b)} & 0 & 0 & \frac{N_1}{r \ln(r_h/r_b)} & 0 & 0 & \frac{N_2}{r \ln(r_h/r_b)} & 0 & 0 \\ 0 & -N_1 & 0 & 0 & -N_2 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 \\ 0 & 0 & -N_1 & 0 & 0 & -N_2 & 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 \end{Bmatrix} a'^e. \quad (6)$$

应力分量可由锚杆的本构方程直接得到

$$\{\sigma'\}^e = [D]\{\varepsilon'\}^e, \quad (7)$$

对 2 节点杆件单元

$$\begin{Bmatrix} \sigma'_b \\ \tau'_{y'} \\ \tau'_{z'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_b \\ G_b \\ G_b \end{bmatrix} \{\varepsilon'\}^e, \quad (8)$$

对 4 节点三维锚杆单元

$$\begin{Bmatrix} \tau'_g \\ \sigma'_{y'y'} \\ \sigma'_{z'z'} \end{Bmatrix}^e = \begin{bmatrix} G_g \\ E_x \\ E_x \end{bmatrix} \{\varepsilon'\}^e. \quad (9)$$

式中 σ'_b 为锚芯中的轴向正应力; τ'_g 为岩石与锚芯间材料中的切向剪应力; $\tau'_{y'}$, $\tau'_{z'}$ 为锚杆中分别沿局部坐标 y' 和 z' 方向的横向剪应力; $\sigma'_{y'y'}$, $\sigma'_{z'z'}$ 为灌浆中分别沿局部坐标 y' 和 z' 方向的正应力; E_b 为锚芯的弹性模量, G_b 为岩石与锚芯间材料的剪切模量, G_g 为锚芯的横向剪切模量, E_x 是为了模拟岩石与锚芯间材料和锚芯之间的相对法向位移基本为 0 而设置的一个极大数值。

2.3 单元刚度矩阵

由虚功方程或变分原理容易得到有限元刚度矩阵的一般形式为

$$[k]^e = \int_{\Omega} [B]^T [D] [B] d\Omega. \quad (10)$$

在锚杆单元中, 局部坐标系下 2 节点杆件单元单元刚度矩阵为

$$[k]^e = \int_0^l \int_0^{2\pi} [B]^T [D] [B] r dr d\theta dx' = \pi l \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] r dr d\xi$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\pi r_b^2 E_b}{L} & 0 & 0 & -\frac{\pi r_b^2 E_b}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 & 0 & -\frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 & 0 & -\frac{\pi r_b^2 G_b}{L} \\ -\frac{\pi r_b^2 E_b}{L} & 0 & 0 & \frac{\pi r_b^2 E_b}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 & 0 & \frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\pi r_b^2 G_b}{L} & 0 & 0 & \frac{\pi r_b^2 G_b}{L} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

局部坐标系下 4 节点三维锚杆单元单元刚度矩阵

为

$$[k]^e = \int_0^l \int_{r_b}^{r_h} \int_0^{2\pi} [B]^T [D] [B] r dr d\theta dx' = \pi l \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] r dr d\xi = \pi L \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 2A & 0 & 0 & A & 0 & 0 & -2A & 0 & 0 & -A & 0 & 0 \\ 0 & 2B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & -2B & 0 & 0 & -B & 0 \\ 0 & 0 & 2B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & -2B & 0 & 0 & -B \\ A & 0 & 0 & 2A & 0 & 0 & -A & 0 & 0 & -2A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 & 2B & 0 & 0 & -B & 0 & 0 & -2B & 0 \\ 0 & 0 & B & 0 & 0 & 2B & 0 & 0 & -B & 0 & 0 & -2B \\ -2A & 0 & 0 & -A & 0 & 0 & 2A & 0 & 0 & A & 0 & 0 \\ 0 & -2B & 0 & 0 & -B & 0 & 0 & 2B & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & -2B & 0 & 0 & -B & 0 & 0 & 2B & 0 & 0 & B \\ -A & 0 & 0 & -2A & 0 & 0 & A & 0 & 0 & 2A & 0 & 0 \\ 0 & -B & 0 & 0 & -2B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & 2B & 0 \\ 0 & 0 & -B & 0 & 0 & -2B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & 2B \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中 $A = \frac{G_g}{3 \ln(r_h/r_b)}$, $B = \frac{E_x(r_h^2 - r_b^2)}{6}$ 。式中, r_h 是灌浆体外半径。

在锚杆单元中, 局部坐标系下单元荷载向量为

$$[F']^e = \int_{\Omega} [B]^T \{\sigma'\}^e d\Omega \quad (13)$$

上述单元刚度矩阵是在局部坐标系中建立的, 在形成有限元方程之前, 还必须将其转换到整体坐标系中, 这个转换关系为

$$[k]^e = [\alpha]^T [k']^e [\alpha] \quad (14)$$

其中, $[k]^e$ 为整体坐标系中的单元刚度矩阵, $[\alpha]$ 为坐标转换矩阵。

整体坐标系中的荷载向量也可通过转换矩阵由局部坐标系中的荷载向量求得

$$\{F\}^e = [\alpha]^T \{F'\}^e \quad (15)$$

一旦获得了单元刚度矩阵和荷载向量, 就可用标准的有限元集成方法将其迭加到有限元方程的总刚度矩阵和总荷载向量中。

数值计算时, 采用初始刚度矩阵迭代法解非线性方程组^[5]。

3 本构关系

3.1 锚杆的切向剪切性质

锚杆中锚芯与岩石与锚芯间材料、岩石与锚芯间材料与岩体的交界面上均存在着切向相对位移, 由此而引起岩石与锚芯间材料中与锚杆平行方向上的剪应力。随着切向相对位移的增大, 锚杆将逐渐接近破坏状态。由切向剪应力引起的锚杆破坏可发生在岩石与锚芯间材料中、岩体中、岩石与锚芯间材料与锚芯的交界面或岩体与岩石与锚芯间材料的接触面上, 其中尤以发生在岩体与岩石与锚芯间材料接触面上的破坏形式最为多见。锚杆的切向剪切强度与黏性系数、摩擦角及嵌入程度有关。随着切向位移的增加, 黏性系数和嵌入影响逐渐减小, 摩擦作用成为主要因素。这里采用如下的折线本构关系 (见图 5):

$$\tau'_g = \begin{cases} G_g \gamma'_g, & |\gamma'_g| \leq \tau_{gp}/G_g, \\ \tau_p + G'_g(\gamma'_g - (\gamma'_g/|\gamma'_g|)\tau_{gp}/G_g), & |\gamma'_g| > \tau_{gp}/G_g. \end{cases} \quad (16)$$

式中 τ_{gp} 是屈服剪应力; G'_g 是剪应力超过屈服剪应力后的剪切模量, 计算中取为相对于 G_g 非常小的一个数则相当于理想弹塑性模型。高预应力让压锚杆锚固剂采用了以上的本构关系。

3.2 锚芯的本构关系

一般锚杆和高预应力让压锚杆的锚固段中锚芯轴向应力和应变采用如下折线本构关系

$$\sigma'_b = \begin{cases} E_b \varepsilon'_b, & 0 \leq \varepsilon'_b \leq \sigma_{cp}/E_b, \\ \sigma_{cp} + E'_b(\varepsilon'_b - \sigma_{cp}/E_b), & \varepsilon'_b > \sigma_{cp}/E_b, \\ E_b \varepsilon'_b, & -\sigma_{dp}/E_b \leq \varepsilon'_b < 0, \\ -\sigma_{dp} + E'_b(\varepsilon'_b + \sigma_{dp}/E_b), & \varepsilon'_b < -\sigma_{dp}/E_b. \end{cases} \quad (17)$$

式中 σ_{cp} 是抗压屈服应力; σ_{dp} 是抗拉屈服应力; E'_b 是轴向应力超过屈服应力后的弹性模量, 计算中取为相对非常小的一个数则相当于理想弹塑性模型。

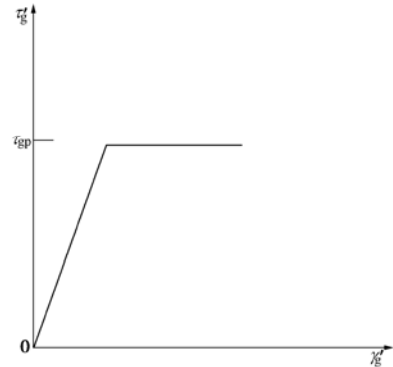


图 5 高预应力让压锚杆锚固剂剪应力 - 剪应变模型曲线

Fig. 5 Shear stress-shear strain model of the adhesive of the high prestress yield bolts

高预应力让压锚杆的应力 - 应变曲线共分为 4 个阶段 (图 6)。4 个阶段对应了围岩不同的变形特点。

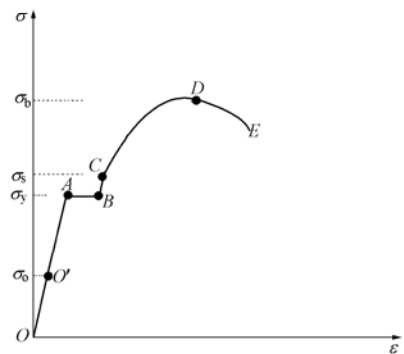


图 6 高预应力让压锚杆应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of the high pre-stressed yield bolts

(1) OA 和 BC 阶段: 锚杆受力处于弹性变形阶段, 其受力符合虎克体模型规则, 但两阶段杆体受力不同。

(2) AB 阶段: 此阶段让压管开始起作用, 杆体受力只有很小的变化, 巷道围岩在这一恒定阻力下缓慢变形, 让压管逐渐被压扁, 锚杆长度相对伸长。当让压管被完全压扁时, 锚杆杆体应力 - 应变关系对应于 B 点。该阶段钢构件处于让压滑动变形阶段, 类似圣维南体模型规则, 从理论上应力是一个常量。

(3) CD 阶段: 也被称作弹塑性阶段, 此阶段杆

体既有弹性变形, 又有塑性变形, 当应力值超过屈服应力之后, 随着应力的增大, 曲线成下凹状, 明显地表现出应变增大(软化)的现象。对于钢材来说, 塑性变形很小, 它所表现的是脆性破坏的特征。

(4) DE 阶段: 此阶段表现出杆体的脆性破坏特征, 杆体受力超过了它的屈服极限, 致使锚杆的锚固力迅速下降, 锚固失效。

图中的 O' 点为锚杆的安装应力。安装应力是指安装锚杆时通过紧固螺母使锚杆对围岩施加的径向锚固力。安装应力对围岩施加围压, 将围岩由单向、双向受力状态转化为双向、三向受力状态, 提高围岩的稳定性。预应力对控制巷道的早期变形, 充分发挥巷道围岩的自承载能力具有非常明显的作用。

高预应力让压锚杆锚芯轴向应力和应变关系采用多线段本构关系(拉应力和拉应变关系见图 7)模拟

$$\sigma'_b = \begin{cases} E_b \varepsilon'_b, & 0 \leq \varepsilon'_b \leq \sigma_{cp}/E_b, \\ \sigma_{cp} + E'_b(\varepsilon'_b - \sigma_{cp}/E_b), & \varepsilon'_b > \sigma_{cp}/E_b, \\ E_b \varepsilon'_b, & -\sigma_{rp}/E_b \leq \varepsilon'_b < 0, \\ -\sigma_{rp} + E'_r(\varepsilon'_b + \sigma_{rp}/E_b), & -\varepsilon_r - \sigma_{rp}/E_b \leq \varepsilon'_b < -\sigma_{rp}/E_b, \\ -E'_r \varepsilon_r + E_b(\varepsilon_r + \varepsilon_b), & -\varepsilon_r - (\sigma_{dp} - E'_r \varepsilon_r)/E_b \leq \varepsilon'_b < -\varepsilon_r - \sigma_{rp}/E_b, \\ -\sigma_{dp} + E'_b(\varepsilon'_b + \varepsilon_r + (\sigma_{dp} - E'_r \varepsilon_r)/E_b), & \varepsilon'_b < -\varepsilon_r - (\sigma_{dp} - E'_r \varepsilon_r)/E_b. \end{cases} \quad (18)$$

式中 σ_{rp} 是让压应力; E'_r 是让压阶段的弹性模量, 计算中取为相对于 E_b 非常小的一个数; ε_r 是让压应变, $\varepsilon_r = L_r/L_{fi}$, L_{fi} 是高预应力让压锚杆中自由段的长度, L_r 是让压距离, 当锚固段很短且自由段长度不好确定时可近似取自由段长度为成根锚杆长度; E'_b 是轴向应力超过屈服应力后的弹性模量, 计算中取为相对于 E_b 非常小的一个数则相当于理想弹塑性模型。显然, 当 $\varepsilon_r = 0$ 时锚杆受拉应力状态下锚杆应力应变状态和式(17)结果一致。

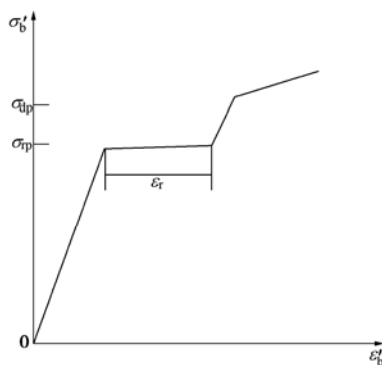


图 7 高预应力让压锚杆轴向应力 - 应变模型曲线

Fig. 7 Axial stress-strain model of the high prestressed yield bolts

锚杆中锚芯横向剪应力和剪应变关系采用如下的双折线本构关系模拟

$$\tau'_b = \begin{cases} G_b \gamma'_b, & |\gamma'_b| \leq \tau_{bp}/G_b, \\ \tau_{bp} + G'_b(\gamma'_b - (\gamma'_b/|\gamma'_b|)\tau_{bp}/G_b), & |\gamma'_b| > \tau_{bp}/G_b. \end{cases} \quad (19)$$

式中 τ'_b 是锚芯横向剪应力; τ_{bp} 是屈服剪应力; G'_b 是剪应力超过屈服剪应力后的剪切模量, 计算中取为相对于 G_b 非常小的一个数则相当于理想弹塑性模型。

因高强锚杆杆体材料很脆, 屈服剪应力和剪应力强度重合, 剪应力达到屈服剪应力就会折断。所以高预应力让压锚杆中锚芯横向剪应力和剪应变关系采用如下的本构关系(图 8)模拟

$$\tau'_b = \begin{cases} G_b \gamma'_b, & |\gamma'_b| \leq \tau_{bp}/G_b, \\ 0, & |\gamma'_b| > \tau_{bp}/G_b. \end{cases} \quad (20)$$

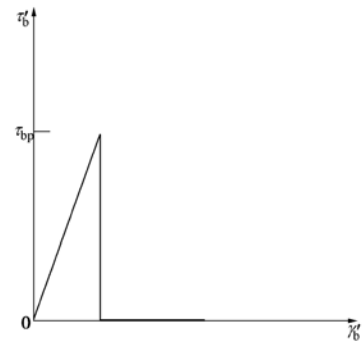
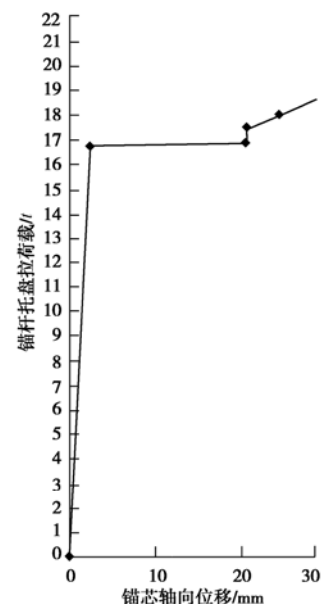


图 8 高预应力让压锚杆横向剪应力 - 剪应变模型曲线

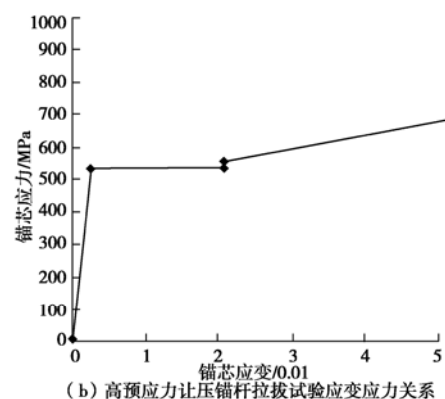
Fig. 8 Transverse shear stress-strain model of the high prestress yield bolts

4 高预应力让压锚杆锚芯本构关系建立实例

某一高预应力让压锚杆的荷载和位移关系曲线如图 9。锚杆长 1 m, 半径 10 mm。在锚杆接近屈服前, 锚杆迅速承受载荷, 达到 16.8 t 时, 让压管开始启动让压而锚杆仍然在弹性变形阶段。锚杆的屈服荷载是 17.5 t, 高预应力让压锚杆让压距离为 18 mm。



(a) 高预应力让压锚杆拉拔试验荷载位移关系



(b) 高预应力让压锚杆拉拔试验应力应变关系

图 9 高预应力让压锚杆受拉应力应变关系曲线

Fig. 9 The stress-strain curve of high prestressed yield bolts under tension

为了验证作者所建议的锚杆锚芯本构关系的合理性, 在这里讨论高预应力让压锚杆拉拔试验的锚芯的本构关系的确定。在这里荷载作用在托盘上和锚杆杆端上。可建立如式 (18) 所示简单的锚芯本构关系, 应力应变曲线见图 9, 参数确定如下:

$E_b = 21000 \text{ MPa}, E'_b = 4200 \text{ MPa}, E'_r = 0.00001 \text{ MPa}, \varepsilon_r = L_r / L_{fr} = 0.018/1 = 0.018, \sigma_{dp} = \sigma_{cp} = 17.5 \times 0.01 / (0.01 \times 0.01 \times \pi) = 557.32 \text{ MPa}, \sigma_{rp} = 16.8 \times 0.01 / (0.01 \times 0.01 \times \pi) = 535.03 \text{ MPa}.$

5 高预应力让压锚杆拉拔试验数值模拟

笔者按照以上计算方法研制成有限元程序。以下计算方法适用性验证内容。

为了确保锚杆性能符合设计要求, 在捷马实验室中对某型号高预应力让压锚杆和一般锚杆进行了综合拉拔试验, 锚杆的荷载和位移关系曲线如图 10。锚杆长 1 m, 半径 10 mm。无让压管锚杆迅速达到其屈服载荷,而允许变形仅为 8 mm; 让压锚杆在接近锚杆屈服前迅速承受载荷, 达到 16.8 t 时, 让压管开始启动让压而锚杆仍然在弹性变形阶段。两锚杆的屈服荷载都是 17.5 t, 高预应力让压锚杆让压距离为 18 mm。

为了验证笔者所建议的锚杆模拟方法和所编写程序的合理性, 在这里讨论高预应力让压锚杆拉拔试验的数值模拟。所用锚杆和上面做综合拉拔试验所用高预应力让压锚杆一样, 长为 1 m, 锚杆的性质见表 1, 让压点为 16.8 t, 屈服荷载为 17.5 t。计算中, 一端固

定, 在托盘上施加拉力, 将锚杆离散成 1 个 2 节点杆件单元。计算结果和试验结果比较于图 10, 趋势基本一致, 由于锚杆刚度很大, 而试验机不是刚性试验机而刚度有限, 试验中位移包括了一部分试验机本身位移, 数值模拟结果和试验结果有些出入。从图中可看出本文模型能够模拟让压锚杆轴向荷载和位移关系。

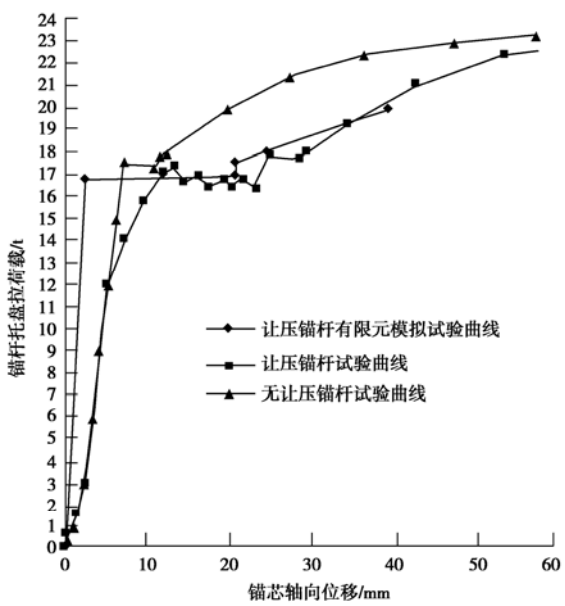


图 10 锚杆拉拔试验有限元模拟结果与实验结果对比

Fig. 10 The comparison between FEM simulating results and test results

6 采用高预应力让压锚杆加固岩体的数值模拟实验

为检验本文计算模型, 下面讨论高预应力让压锚杆锚固岩体实验计算实例。图 11 表示一立方块岩体, 岩体的边长为 1 m, 高 2 m, 锚杆穿到岩体中心, 外荷载作用在锚芯的顶端。锚芯、锚固剂和岩体的性质见表 1, 让压点为 16.8 t, 屈服荷载为 17.5 t, 让压应变 0.02。假设岩体为各向同性的弹性体。计算中, 将岩体划分成 216 个 8 节点等参元, 锚杆离散成 12 个锚杆单元 (2 节点杆件单元和 4 节点单元各 6 个)。做拉拔实验时拉力作用在托盘上。计算结果见图 12~13。

表 1 高预应力让压锚杆和岩体的材料性质

Table 1 Material properties of the high prestress yield bolts and rock

项目	弹性模量 (GN·m ⁻²)	泊松比	剪切模量 (GN·m ⁻²)	剪切屈服 力/(GN·m ⁻²)	屈服后剪切模量 (10 ⁻¹⁰ N·m ⁻²)	半径 /mm	让压阶段模 量/(N·m ⁻²)	拉伸屈服后模 量/(GN·m ⁻²)
锚芯	210	0.3	80.77	196587.2		10	10000	4.2
黏合剂	20	0.2	8.33	54422.0	0.1	13		
锚杆和岩体间材 料 (空隙)			0.00833	0	0.1	13		
岩体	15	0.2	6.25					

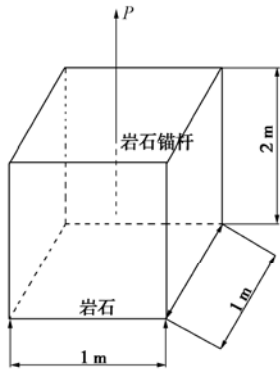


图 11 锚固岩体试验

Fig. 11 Test of the anchored rock

图 12 和图 13 分别表示荷载为 8 t 时岩体中锚杆拉拔数值实验锚芯轴向力分布和岩体中锚杆拉拔数值实验荷载和位移关系。锚芯轴向力分布、锚杆杆顶荷载和位移关系符合高预应力让压锚杆承载一般规律。

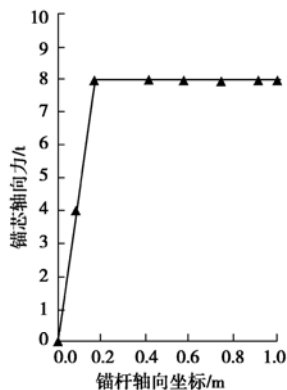


图 12 岩体中锚杆拉拔数值实验锚杆轴向力分布

Fig. 12 Axial force distribution for the bolt drawing test

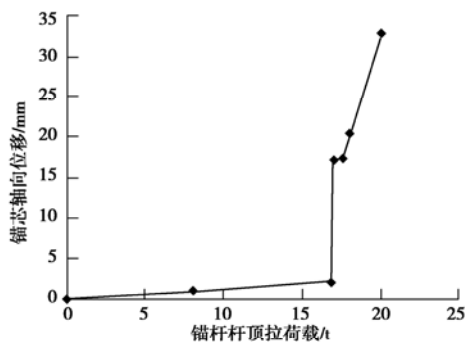


图 13 锚杆托盘荷载位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curve of the bolt salver

7 结 论

在有关文献的基础上, 本文建议了一种考虑高预应力让压锚杆锚芯与灌浆间剪切破坏作用的三维锚杆计算模型, 开发了相应有限元程序, 并进行了数值仿真实验研究。和前人比较, 本文的主要工作如下:

(1) 该模型更容易实现程序设计, 克服了在计算横向剪应力时只考虑灌浆的侧向位移而没有计及锚芯侧向位移影响所造成的总刚度矩阵奇异。本文建议采用人们比较熟悉的接触单元一样的处理办法, 易于为人们所接受。

(2) 本文模型在使用上更方便。由于在模拟锚杆侧向剪应力时采用了单独的一个单元来模拟, 这样模拟锚杆侧向剪应力时采用的单元内径尺寸可以不和 2 节点单元尺寸一致, 使用方便, 比如 2 节点单元可用来模拟全根锚杆, 而 4 节点单元可用来模拟灌浆的侧向位移, 用来模拟锚杆和岩体接触面的相对剪切位移。

(3) 在模拟锚索或非全程黏结锚杆的自由段时, 只可用 2 节点单元模拟而不用 4 节点单元, 从而使用上更方便。

(4) 本文计算模型能够模拟高预应力让压锚杆的让压特征, 从而能更好地模拟该锚杆与围岩的相互作用过程。

(5) 数值仿真实验计算表明, 本文计算方法和计算结果合理, 能够胜任高预应力让压锚杆与围岩相互作用过程的模拟工作。

参考文献:

- [1] 雷晓燕. 岩土工程数值计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. (LEI Xiao-yan. Numerical computation in rock and soil engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [2] 雷晓燕. 三维锚杆单元理论及其应用[J]. 工程力学, 1996, 13(2): 50 - 59. (LEI Xiao-yan. Formulation and application of 3D anchor bolt elements[J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(2): 50 - 59. (in Chinese))
- [3] 李 梅. 三维锚杆的数值模拟方法[J]. 福州大学学报, 2003, 31(5): 588 - 592. (LI Mei. The numerical simulating methods of the 3-D bolt[J]. Journal of Fuzhou University, 2003, 31(5): 588 - 592. (in Chinese))
- [4] 中国岩土锚固工程协会. 岩土工程中的锚固技术[M]. 北京: 地震出版社, 1992. (The Association for Anchoring in Rock and Soil Engineering of China. Anchor technique in rock and soil engineering[M]. Beijing: Seisuc Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [5] 王淑云, 方 保, 王如云. 数值分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996. (WANG Shu-yun, FANG Bao, WANG Ru-yun. Numerical computation method[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1996. (in Chinese))