

# 应用有限单元法探讨预应力岩锚的作用

张哈旭

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

**摘 要** 探讨了平面及空间非线性有限单元法在预应力锚索加固岩体的研究中的应用,在程序中采用双弹簧单元和空间弹簧单元来模拟锚索和胶结体之间的粘结—滑移特性.提出了“预锚附加应力场”的概念,研究了附加应力场的具体分布形态和影响因素,认为预锚加固作用的实质不仅仅在于提供直接平衡力,更在于加强岩体结构,并调整和改善岩体应力状态.

**关键词** 有限元 粘结单元 应力分布 预锚参数 稳定性

**中图号** TV223

本文对预应力锚索加固技术进行初步探讨:(a)分析非线性有限单元法在预锚加固计算中的应用特点,并编制出实用计算程序;(b)提出“预锚附加应力场”的概念,并分析其分布形态及各种预锚参数对它的影响;(c)初步探讨预锚附加应力场对岩体稳定性的影响机制.

## 1 非线性有限单元法的应用

### 1.1 预锚加固体系的结构特点

预锚加固体系是一个整体,它由预应力锚索、内锚头、外锚头及被加固岩体组成.内锚头有机械式和胶结式两种,本文主要讨论后者,并将胶结式内锚头和胶结段的锚索统称为内锚固段.预锚力一方面通过外锚头作用于岩体表面;另一方面通过胶结段锚索与胶结体之间的粘结作用传递到胶结体,再通过胶结体与岩体之间的粘结作用传递到岩体.

### 1.2 预应力锚索和被加固岩体

胶结段的锚索采用平面或空间杆单元来模拟,而自由段锚索的作用则简化为胶结段锚索顶部的集中力,外锚头的作用简化为岩体表面的集中力或分布力.在正常的工作条件下,锚索单元处于线弹性状态.至于岩体的“徐变”和锚索材料的“松弛”所引起的预应力损失,首先通过施工措施将其降低到最低限度内<sup>[1]</sup>,另一方面可采用文献[2]所述的方法来计算预应力损失,而使用阶段则可作为常值来考虑.

本文用等参单元来描述被加固的岩体,采用弹塑性模型来模拟岩体的非线性性质,并采用 Drucker-Prager 屈服准则.限于篇幅,弹塑性矩阵的推导,详见文献[3].

### 1.3 双弹簧单元和空间弹簧单元

粘结单元可用于模拟锚索和胶结体之间的粘结—滑移特性,它有空间位置而无几何体积,可以方便地插入锚索与胶结体之间.本文在平面分析中采用应用较广的双弹簧滑移粘结单元.这种单元在文献[4]中有详细叙述.在空间分析中作了新的尝试,即采用由三个两两正交的虚拟弹簧组成的“空间弹簧滑移粘结单元”,文中限于篇幅而略去其刚度矩阵的推导.

在刚度矩阵计算中采用了反映结合面  $\tau - s$  关系的 Nilson 公式:

$$\tau = 9.78 \times 10^2 s - 5.72 \times 10^4 s^2 + 8.35 \times 10^5 s^3$$

其中: $\tau$ ——粘结应力,  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ;  $s$ ——相对滑移值,  $\text{mm}$ . 该公式较适合于预锚体系.

### 1.4 有限元计算程序

本文编制的平面和空间非线性有限元分析程序,经验证是可靠的.以下的算例中将采用其中的平面有限

元程序.

2 预锚附加应力场及其影响因素

2.1 预锚附加应力场的概念

预锚加固技术与其他加固方法(包括非预应力锚固)最根本的区别在于 通过施加主动的预锚力,在岩体内部产生一个附加的应力场,从而使预锚体系积极地参与到整个岩体内部应力重分布的过程中. 在非线性问题中,应将这种‘附加’理解为预锚力作用下岩体内部应力状态的一种‘改变’.

2.2 预锚附加应力场的分布形态

选取多种参数条件下单根预应力锚索作用在岩体上的情形进行计算,实例 锚索总长度  $L=26.0\text{ m}$ ,岩体材料弹性模量  $E=20\text{ GPa}$ ,岩体材料泊松比  $\mu=0.22$ ,岩体材料凝聚力  $c=4.5\text{ MPa}$ ,岩体材料内摩擦角  $\varphi=50^\circ$ ,锚索材料弹性模量  $E_s=180.0\text{ GPa}$ ,锚索材料极限抗拉强度  $\sigma_b=1470\text{ MPa}$ ,锚索自由段长度  $L_1=20.0\text{ m}$ ,胶结式内锚固段长度  $L_m=6.0\text{ m}$ ,张拉锁定锚固力  $q_m=4\,000\text{ kN}$ ,实际张拉控制应力为  $\sigma_k=0.65\sigma_b=1\,040\text{ MPa}$ .

图 1,2 为有限元计算结果,分别反映了  $\sigma_1, \sigma_3$  沿水平和竖直方向的分布规律. 由本例及许多未列出的算例的计算结果,可归纳出单根锚索作用下预锚加固体系应力场的一些特点:

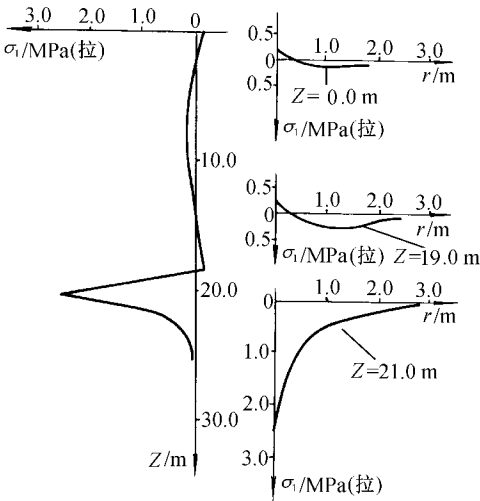


图 1 主应力  $\sigma_1$  分布曲线

Fig.1 Distribution curve of  $\sigma_1$

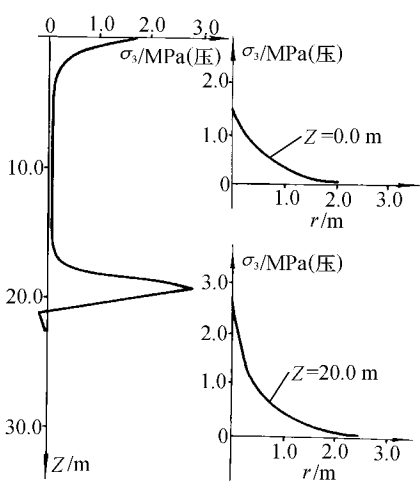


图 2 主应力  $\sigma_3$  分布曲线

Fig.2 Distribution curve of  $\sigma_3$

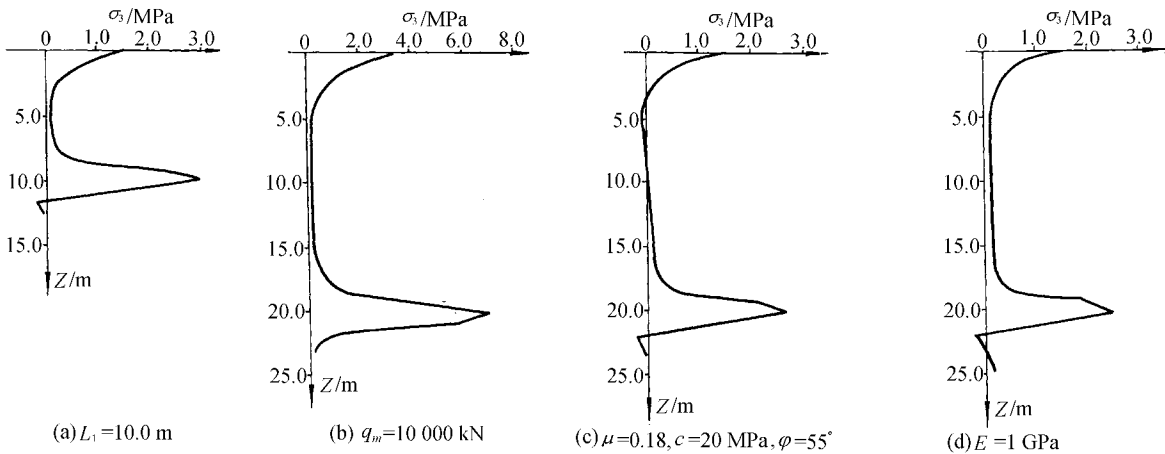


图 3 主压应力  $\sigma_3$  分布曲线

Fig.3 Distribution curve of  $\sigma_3$  for different kinds of parameters

a. 预应力锚固区的应力值及应力值的变化速度均以内、外锚头区为最大,且较大值主要集中在内、外锚头附近.因此,在预锚研究、设计和施工中,这一区域应重点考虑.

b. 较大应力主要集中于  $Z = 0 \sim 4\text{ m}$  和  $Z = 16 \sim 24\text{ m}$  的范围.

c. 应力在水平方向的影响范围主要在  $r = 2.5\text{ m}$  内.随着  $r$  增大,应力值迅速减小.在决定锚索间距、分析锚索之间的相互影响以及研究群锚整体效应时,应考虑这一因素.

d. 在内、外锚头之间,主应力绝对值最大的是  $\sigma_1$ ,为压应力,而出现拉应力的地方,拉应力值则相当小;在内锚头以下区域,主应力绝对值最大的是拉应力,其余两个主应力均为压应力.

e. 预锚加固虽然使应力场发生了明显改变,但最大主应力值均较小,而岩体强度较大,故不会发生挤压破坏或受拉破坏,亦无塑性区域出现.

### 2.3 各种预锚参数对应力场形态的影响

就多种预锚参数条件进行计算,结果如图3所示:

a. 其余条件不变而只改变锚索总长  $L$  (图3(a)),主要发生变化的是内锚固段附近较大应力的位置,这种改变与内锚固段的位置变化相对应.在决定锚索的埋深时应考虑这一影响.

b. 当预锚力相对较小,而岩体强度相对较大时,预锚力大小的改变对岩体内部应力场的影响是接近于线性的(图3(b)).应力绝对值发生明显变化的范围也随之改变,但这一范围与预锚力大小的比值则变化很小.在决定单孔锚固力大小和锚索间距时应考虑这一影响.

c. 当预锚力相对较大,而岩体强度相对较小时,预锚力大小的改变对岩体内部应力场的影响将呈现明显的非线性,应力分布曲线的形态将发生变化,应力集中区域可能会局部进入塑性状态.在设计中,特别是在决定布锚方式和单孔锚固力大小时应重视这一现象.

d. 当岩体强度相对较大时,岩体强度变化主要影响的是岩体自身的稳定性,而对预锚附加应力场的形态则影响不大(图3(c)).但是,当岩体强度相对较小,接近于塑性状态或进入塑性状态时,后一影响将变得非常明显.

e. 岩体弹性模量的变化对预锚附加应力场的形态有一定的影响,特别是对预锚力经内锚固段向岩体传递的规律有所影响.较小的弹性模量可以使得胶结段锚索与胶结体之间粘结应力的分布较为均匀,从而使预锚力的传递较为均匀(图3(d)).

## 3 预锚附加应力场对岩体稳定性的影响

### 3.1 预锚加固岩体的实质

岩体是否失稳或有失稳趋势,归根到底是由岩体自身的条件(包括岩体的结构特点和材料特性等)以及岩体内的应力状况所决定的,我们可以通过稳定性系数、稳定可靠度等指标来判定.而预锚加固的实质就在于通过预锚体系来加强岩体的结构,并通过预锚附加应力场来改善岩体内的应力状况,从而提高稳定性系数和稳定可靠度,保持岩体的稳定.

### 3.2 合理设计预锚加固体系

a. 通过稳定性分析,判断岩体是否有失稳的趋势并分析失稳的原因,初步确定预锚加固的总体方案,初步估算维持岩体整体稳定所需的总锚固力大小.

b. 选择锚索型式,初步确定锚索的布设范围、布设方向、单孔锚固力大小、布设位置(包括间距)和长度.

c. 调整锚索方向和单孔固力大小,初步确定其它预锚参数,例如内锚固段长度等.

d. 对加固后的岩体进行计算,分析其稳定性,找出不足之处.

e. 对初步的设计进行调整,达到安全、经济的目标.

### 3.3 实例分析

图4所示为一岩体边坡,在图示位置有一软弱夹层,并有竖直方向的张裂缝.尺寸和材料特性列于图中.经有限元分析得知,当张裂缝中无水压力时,岩体保持稳定.当张裂缝充水高度较大时,软弱夹层处发生破坏,并将导致岩体产生沿夹层面的滑动,造成整体失稳.

布置如图5所示的锚索群,单孔锚固力为4000 kN,胶结式内锚固段长度为6 m.计算表明,即使当张裂缝中充满水时,软弱夹层处也不会发生破坏,岩体能保持局部和整体稳定.

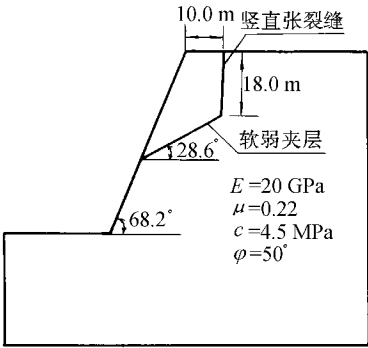


图 4 岩体边坡实例

Fig.4 Example for rock slide

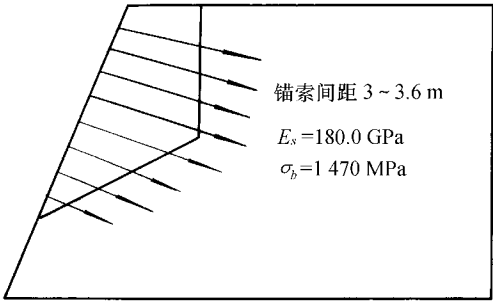


图 5 预锚加固岩体边坡锚索布置

Fig.5 Layout of anchorage cables for reinforcing rock slope

4 结 论

(a) 预锚技术的发展有赖于对预锚加固效应的深入研究,而预锚附加应力场则是研究的重点之一 ;(b) 有限单元法是研究预锚加固体系的有效方法之一 ;(c) 根据被加固岩体的内在和外在条件,确定总的预锚力、单孔预锚力以及其它各种预锚参数,这是预锚加固成败的关键,也是优化预锚设计的关键.

以下问题有待进一步研究 :(a) 定量分析各种预锚参数对预锚加固效应的影响 ;(b) 研究群锚加固的整体效应和群锚加固体系有限元计算的简化问题 ;(c) 进一步研究预锚加固体系改善岩体内部应力状态的机理,并将这些成果更好地应用于实际工程中岩体的稳定性分析和预锚加固的优化设计 ;(d) 加强对内、外锚头及其附近区域的分析,并探讨一些新的途径来提高加固效果.

参 考 文 献

1 中国岩土锚固工程协会. 岩土工程中的锚固技术. 北京 地震出版社,1992. 27 ~ 31

2 滕智明,罗福午,施岚青. 钢筋混凝土基本构件. 北京 清华大学出版社,1987. 357 ~ 367

3 龚尧南,王寿梅. 结构分析中的非线性有限元素法. 北京 北京航空学院出版社,1986. 116 ~ 119

4 沈聚敏,王传志,江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析. 北京 清华大学出版社,1993. 240 ~ 244

Study on Effect of Prestressed Anchored Steel Rope  
on the Rock with Finite Element Method

Zhang Hanxu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . ,Nanjing 210098)

**Abstract** Application of 3-D nonlinear finite element method to the study of reinforcing effect of prestressed anchored steel rope is discussed.3-D spring elements are used to describe the coherence and slide between steel rope and concrete. The concept of reinforcing additional stress is introduced,and the feature and influencing factors of the stresses are studied. It is concluded that the prestressed anchored steel rope system not only provides balance force but also reinforces rock structure and improves the state of stress.

**Key words** FEM ;cohesive element ;stress distribution ;parameter ;stability