

预应力锚索受力特性与初始张拉吨位优化分析

邓建^{1,2}, 肖明^{1,2}, 谢冰冰^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于预应力锚索作用和锚固界面力学传递机制, 建立了锚固界面应力计算模型, 并提出了一种可以考虑锚固界面剪切滑移的锚索应力计算方法; 基于锚索预应力损失机制, 对造成预应力损失的各种因素进行了分析, 并给出了各种因素影响下的预应力损失计算方法; 基于锚索应力求解的基本理论, 同时考虑整个施工过程中的预应力损失量, 将洞室群开挖过程中锚索应力的变化量作为锚索初始张拉的安全余量, 提出了一种预应力锚索初始张拉吨位计算方法。并据此编制有限元计算程序, 以某水电站地下厂房洞室群为工程实例, 验证了该方法的合理性。

关键词: 地下洞室群; 预应力锚索; 受力特性; 锚固机制; 预应力损失; 初始张拉吨位

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 08-2359-07

Analysis of mechanical characteristic and optimization of initial tensile tonnage of prestressed anchor cable

DENG Jian^{1,2}, XIAO Ming^{1,2}, XIE Bing-bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Based on the role of prestressed anchor and the mechanical transmission mechanism of anchorage interface, an anchorage interface stress model is developed. Then an analytical method is proposed to calculate the anchorage stress by considering the shear slip of anchorage interface. On the basis of the prestress loss mechanism, various factors causing prestress loss are analyzed, and then a method for calculating prestress loss is developed under the influence of various factors. According to fundamental theory of the solution of stress distribution, a method is presented to estimate the initial tensile tonnage of the anchor cable. During the excavation of underground caverns, the stress increment is considered as safety margin of initial tension of the anchor cable, and the prestress loss can also be taken into account. From the above, a finite element calculation program is compiled, and a case study of an underground caverns shows that the proposed method is reasonable.

Keywords: underground caverns; prestressed anchor cable; mechanical characteristic; anchoring mechanism; prestress loss; initial tensile tonnage

1 引言

预应力锚索支护作为保证地下洞室群稳定的重要手段, 在地下工程中得到了广泛的应用^[1]。关于预应力锚索的受力特性分析^[2-3]也一直成为研究的热点。预应力锚固体体系由外锚头、自由段和锚固段组成, 预应力一方面通过外锚头作用于岩体表面; 另一方面通过锚固段与岩体之间的砂浆粘结作用于岩体, 使锚固岩体成为多种介质相互作用的复合体。

国内外学者做了大量的室内外试验^[4-5], 对锚固段剪力分布的定性结论^[6-7]已经比较清楚, 但理论研究, 特别是用理论方法来预测锚固段的剪力、轴力分布规律等还有待深入。

工程实际表明, 预应力锚索在施工过程中往往达不到理论预期的锚固效果, 锚索预应力受到多种因素影响损失严重, 大吨位预应力锚索有效锚固力的长期稳定性^[8]也引起工程界的广泛关注, 有学者针对锚索预应力影响因素^[9-10]、预应力变化预测模

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (No. 9125301); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51279136); 国家自然科学基金青年基金 (No. 51209164)。This work was supported by the Major Research Plan of National Natural Science Foundation of China (9125301), the National Natural Science Foundation of China (51279136) and the National Natural Science Foundation for Youth of China (51209164).

第一作者简介: 邓建, 男, 1989年生, 博士研究生, 主要从事地下洞室开挖与围岩稳定数值分析方面的研究工作。E-mail: xianyudj@126.com

型^[11-13]、以及软弱岩体中锚索预应力变化规律^[14-16]等进行了研究,对锚索预应力的损失机制有了一定的认识,但目前的研究多以试验研究和经验判断为主,而对于锚索预应力损失量计算方法以及将预应力损失与锚索应力求解和初始张拉吨位计算相结合等方面则少有研究。

预应力锚索有一个初始张拉吨位,在分层开挖过程中围岩逐步卸荷变形,锚索应力也随之增大。理想的情况是,当开挖完成时,锚索应力刚好达到指定的应力值。目前工程上大多通过工程经验来确定锚索的初始张拉吨位,也有学者通过反分析来求解锚索初始张拉系数的最优解^[17]。但对于预应力锚索初始张拉吨位的研究尚不能满足工程实践。因此,本文在研究预应力锚索受力特性的基础上,将洞室群开挖过程中锚索应力的变化量作为锚索张拉的安全余量,同时考虑施工过程中的预应力损失,提出了一种新的锚索初始张拉吨位分析方法。

2 预应力锚索受力特性分析

施加在锚索上的预应力通过埋设在稳定岩体中的锚固段传递给周围岩体,因此,锚固段是预应力锚索的主要受力部分。锚固段的变形分析可以采用荷载传递法进行,首先推求锚固体与围岩的相对位移值,得到锚固界面的剪应力,然后根据锚固段的剪力分布模式,利用边界条件求得锚固段的剪力和轴力分布规律。

2.1 基于变形协调的锚索受力分析

锚索自由段并未与围岩直接接触,只将锚索应力传至远端,故不需进行离散化处理,而锚固段与围岩相互作用,通过剪力作用传递荷载。将锚固体离散化,分为 n 段,每段的长度为 l_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$),将其中一段锚固体取出,如图1所示。

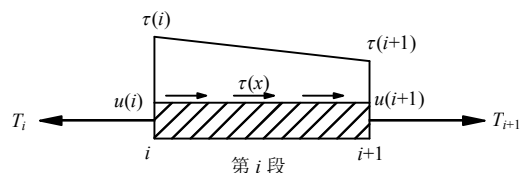


图1 锚固体位移与应力

Fig.1 Displacement and stress of an anchorage body

浆体与围岩界面的剪应力^[18]可表示为

$$\tau = \frac{G_m}{(D/2 + t) \ln(1 + 2t/D)} \Delta u = k \Delta u \quad (1)$$

式中： G_m 为浆体的剪切模量； t 为浆体环的厚度；

D 为钢筋索的直径； Δu 为浆体与围岩间的相对位移； k 为等效剪切刚度。

假定洞室各期开挖前锚索应力值为 T ,锚索端部所在单元的开挖释放荷载为 P ,这里引入开尔文问题预应力锚索锚固段位移分布弹性解,并将其作为锚固体的轴向位移:

$$u_z = \frac{T+P}{16\pi G_r(1-\mu)} \left[\frac{2(1-2\mu)}{R} + \frac{1}{R} + \frac{z^2}{R^3} \right] \quad (2)$$

式中： G_r 为岩体的剪切模量； μ 为岩体的泊松比； R 为锚索首端到锚固段计算点的直线距离； z 为锚索首端到锚固段计算点的轴向距离。计算时同时考虑该锚索周围锚索应力对锚固段位移的影响。

通过有限元计算可得到洞室开挖后计算点的围岩轴向位移值 u ,即可得相对位移值 $\Delta u = u - u_z$ 。

假定在每段锚固体单元上剪应力呈线性分布,则在每一段锚固体中,锚固体表面剪应力为

$$\tau_i(x) = \tau(i) + \frac{x}{l_i} [\tau(i+1) - \tau(i)] \quad (3)$$

则 i 节点处锚索的轴力为

$$T_i = \begin{cases} T_0 & i=1 \\ T_0 - \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{l_j} 2\pi r_b \tau_j(x) dx & 2 \leq i \leq n \end{cases} \quad (4)$$

式中： T_0 为锚索尾部的轴力,对于预应力锚索,即为初始预应力值,以此求得 T_n 即为锚索应力值 T ; r_b 为锚索半径; x 为第 j 段锚固体轴向深度上的计算点, $0 \leq x \leq l_j$; $\tau_j(x)$ 为该锚固段计算点 x 处的剪应力值。

2.2 考虑剪切滑移的锚索受力分析

在对锚固体与围岩接触界面进行数值模拟时,需要考虑界面的剪切滑移情况,采用两阶段线性函数描述锚固体与围岩接触界面上的剪应力-剪切位移关系,如图2所示。

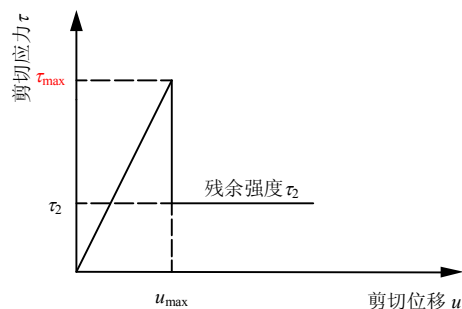


图2 锚固界面剪应力

Fig.2 Shear stress of the anchorage interface

第1阶段对应于协调变形阶段, 围岩与锚固体变形完全耦合, 接触界面上无滑移; 第2阶段对应于接触面上的残余强度, 此时围岩与锚固体变形解耦, 产生相对滑移。围岩与锚固体的接触界面上只有残余强度存在, 即

$$\left. \begin{aligned} \tau &= k\Delta u \quad (0 \leq \tau \leq \tau_{\max}) \\ \tau &= \tau_2 \quad (\tau > \tau_{\max}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当锚固界面剪应力超过浆体所能承受的最大剪应力时, 锚索与围岩产生滑移, 产生滑移段上的剪应力为残余强度 τ_2 , 其中最大剪应力为

$$\tau_{\max} = c_m + \sigma_m \tan \varphi_m \quad (6)$$

式中: c_m 为浆体的粘结强度; φ_m 为浆体的摩擦角; σ_m 为浆体的有效围压。

3 锚索预应力损失分析

锚索预应力损失一般包含两个部分: 一部分是锚索张拉锁定过程中, 在较短时间内由于锚索体系的回弹变形、张拉系统的摩擦阻力等造成的预应力损失; 另一部分则是预应力锚索在长期荷载作用下, 由于钢绞线应力松弛、锚固段岩体蠕变等造成的预应力损失。预应力损失量可表示为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (7)$$

式中: F 为总预应力损失量; F_1 为锚索系统引起的损失量; F_2 为张拉系统引起的损失量; F_3 为钢绞线松弛引起的损失量; F_4 为岩体蠕变引起的损失量。

(1) 锚索系统引起的预应力损失

锚索锁定后, 由于锚具的回弹变形引起部分预应力损失, 一般按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[14]规定计算, 预应力损失量 F_1 可表示为

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= A\sigma \\ \sigma &= \frac{\sum \Delta L}{L} E \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ΔL 为锚索系统的回弹值, 可按各厂家提供的资料选取; σ 为锚具承受的轴向应力; L 为锚索的有效长度; E 为钢绞线的弹性模量; A 为钢绞线的截面积。

(2) 张拉系统引起的预应力损失

工程监测结果表明, 由于张拉系统存在摩擦阻力, 锚索在张拉过程中千斤顶油压与测力计读数往往存在差异, 而锚索一般是以控制千斤顶油压表进行张拉的, 故应考虑张拉时引起的预应力损失量。张拉损失量 F_2 可以表示为

$$F_2 = N_1 - N_2 \quad (9)$$

式中: N_1 为千斤顶油压荷载; N_2 为测力计荷载读数。经验表明: 张拉系统的摩擦阻力引起的预应力损失在 2%~4% 之间, 即油压表所反映的张拉力比钢绞线实际荷载大 2%~4%。若设计张拉荷载是以油压表的读数为基础, 则设计张拉力应考虑张拉系统部分的应力损失。

(3) 钢绞线应力松弛引起的预应力损失

根据钢绞线自身材料特性, 在长度不变的情况下, 随时间增长会产生屈服而引起内部应力松弛, 即造成预应力损失。

工程经验表明: ①钢绞线预应力损失量一般在 5%~10% 之间, 且集中在锁定后初期, 24 h 后约损失 80%, 大约 20 d 后基本不再发展; ②预应力损失的大小, 与钢绞线张拉应力的大小有关, 张拉应力越大, 应力松弛损失就越大, 当施加的预应力大于钢材极限强度的 50% 时, 应力松弛会明显加大; ③锚索预应力损失值大小与钢绞线材料性能、材料直径、环境温度及地下水的影响也有关系。表 1 为常用钢绞线 1 000 h 的应力松弛率。

表 1 常用钢绞线应力松弛率

Table 1 Stress relaxation ratios of various steel strands

钢绞线类别	最大负荷的 70%	最大负荷的 80%
	/ %	/ %
ASTM416, 270 级, $\Phi 15.24$	2.5	3.5
GB5224, $\Phi 15.24$	2.5	4.5
普通钢绞线	8.0	12.0

预应力损失量 F_3 可表示为

$$F_3 = \alpha T_0 \quad (10)$$

式中: α 为应力松弛率; T_0 为锚索初始张拉吨位。

(4) 锚固段岩体蠕变引起的预应力损失

由于岩体的不连续性和各向异性, 岩体内部结构在应力作用下将产生随时间变化的塑性压缩或相对变位, 即产生蠕变。对于预应力锚固结构而言, 在预应力荷载的作用下, 岩体结构受压, 会产生一定的压缩变形, 其结果必然造成锚索预应力松弛, 应力降低。鉴于工程环境以及岩体条件的复杂性, 符合工程实际的蠕变模型以及符合岩体力学特性蠕变参数均难以获取, 本文假定由于岩体蠕变引起的预应力损失量由预应力荷载作用产生, 且预应力荷载作用下围岩与锚索协调变形, 并以此求得预应力锚索的长期预应力损失量, 计算步骤如下:

①选取开挖完毕的三维有限元模型,根据弹塑性损伤计算结果,对开挖后的岩体材料进行损伤软化处理;

②将预应力荷载转化为单元的节点荷载 F ,其中假定锚固段剪力均匀分布;

③进行三维有限元计算,得到预应力荷载作用下的岩体位移值 u ;

④假定锚索与岩体协调变形,计算锚索的应变 ε ,并以此求得预应力损失值。

预应力损失量 F_4 可表示为

$$F_4 = E\varepsilon \quad (11)$$

式中: E 为锚索弹性模量; ε 为预应力荷载作用下锚索的应变值。

4 预应力锚索初始张拉系数分析

进行锚索初始张拉吨位优化分析的目的在于防止因后期开挖围岩变形过大导致锚索超载,本文从洞室群分期开挖锚索应力增量的角度对锚索张拉吨位进行分析。锚索应力增量即为锚索施加后,从该期洞室群开挖直至开挖完毕的整个过程中锚索应力的变化量。

$$\Delta T_k = T_N - T_k \quad (12)$$

式中: ΔT_k 为锚索的应力增量; T_N 为开挖完毕的应力值; N 为总的开挖分期; T_k 为锚索第 k 期开挖支护计算时施加的应力值。

若对锚索在洞室群开挖过程以及开挖完毕后整个过程的预应力损失量加以考虑,锚索的应力变化量应表示为

$$\Delta T = \Delta T_k - F \quad (13)$$

记锚索的张拉系数为 β ,锚索设计吨位为 T_s ,则可定义张拉系数为

$$\beta = 1 - \frac{\Delta T}{T_s} \quad (14)$$

采用该张拉系数后,由于初始张拉吨位降低,锚索对围岩的应力场和刚度的贡献均会降低,故需对张拉系数进行调整,具体方法如下:

①采用初始吨位 $T_1 = T_s$ 进行有限元分析得到 T_{N1} ,进而求得初始张拉系数 β_1 ;

②采用张拉吨位 $T_2 = \beta_1 T_s$,计算得到 T_{N2} 和 β_2 ;

③按照上述方法重复计算,得到锚索开挖完毕的应力值 T_{Ni} 和张拉系数 β_i ;

$$\textcircled{4} \text{ 计算 } \left| \frac{T_{Ni} - T_s}{T_s} \right| \leq \delta \quad (15)$$

若满足,即可停止计算,得到初始张拉系数为 β_i ,一般重复计算2~3次即可得到稳定结果。

5 工程实例

5.1 工程概况

某水电站地下厂房洞室群包括主副厂房、主变室、尾水调压井等3大洞室及电站进水口、压力管道、机组尾水检修闸门室、尾水隧洞及其他相关辅助洞室。整个厂区洞室纵横交错,规模宏大,属大型地下洞室群。主副厂房开挖尺寸为228 m×30.3 m×76.5 m(长×宽×高);主变室开挖尺寸为153 m×18 m×30 m(长×宽×高);尾水调压井采用圆筒阻抗式,内径为26 m,高为73 m,阻抗孔直径为8.5 m。枢纽区地应力属中等略低地应力场,主要分布在-10~-15 MPa的范围内,岩体以II、III类围岩为主,主要为粗变质火山角砾岩、细变质火山角砾岩夹变质凝灰岩,岩体完整性较好。

5.2 计算模型和计算条件

建立了1#~4#4个机组段在内的三维有限元整体计算模型,包括主厂房、主变洞、尾闸室、调压井及进水洞、出水洞等洞室群,计算网格一共划分了335 046个8节点的等参单元,其中开挖单元59 370个,有限元整体网格模型如图3所示,分期开挖与锚索支护型式如图4所示。

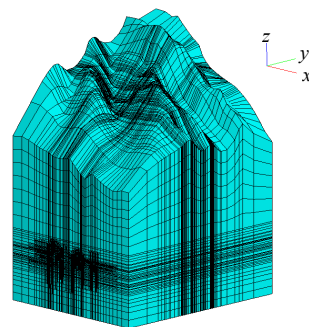


图3 洞室群有限元整体模型
Fig.3 FE model of underground caverns

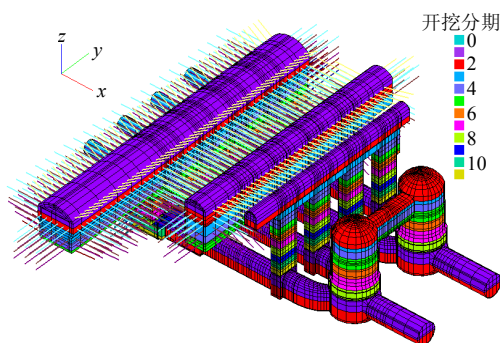


图4 开挖支护分期
Fig.4 Stages of excavation and support

初始地应力场通过实测地应力反演获得, 地应力属中等略低地应力。地下厂房区域岩体条件较好, 以 II、III 类围岩为主, 材料力学参数取值见表 2。

表 2 材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of materials

类别	变形模量 / GPa	泊松比	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	抗拉强度 / MPa	抗压强度 / MPa
围岩	14	0.24	1.3	50	1.2	54
钢筋	21	0.30			1 860.0	
浆体	3	0.32	0.5	40	0.3	10

计算工况: ①预应力锚索满张拉支护情况下地下厂房开挖过程模拟; ②初始张拉吨位优化后的地下厂房开挖过程模拟。

5.3 计算结果分析

5.3.1 预应力锚索锚固段受力分析

基于预应力锚索应力求解的基本理论, 通过有限元求解, 得到锚索锚固段剪力和轴力分布规律如图 5、6 所示。

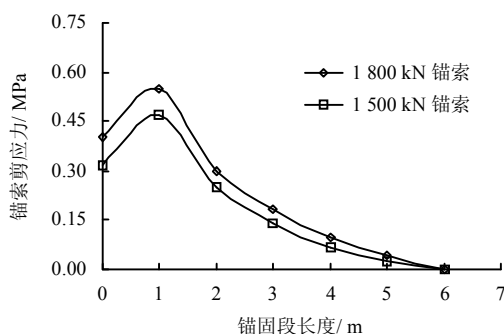


图 5 预应力锚索剪应力分布

Fig.5 Shear stress distributions of prestressed anchor cables

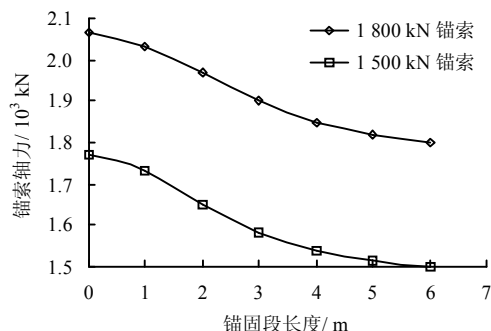


图 6 预应力锚索轴力分布

Fig.6 Axial force distributions of prestressed anchor cables

在预应力的作用下, 锚索通常受拉应力的作用, 张拉荷载由自由段传至锚固段, 通过与围岩的

相互作用进行转移。

从图 5 可以看出, 锚固段与岩体界面的剪应力沿深度方向先是增大, 至最大值后迅速减小。最大值在距锚固段始端约 1 m 处, 之后剪应力急剧变化, 5 m 以后则变化较为平缓。由此可以看出, 锚固段只有部分发挥了作用, 主要作用范围在自起始端以内约 4 m。从图 6 可以看出, 锚固段的始端轴向应力较大, 并呈现向末端逐步衰减的形式。

5.3.2 锚索预应力变化过程分析

为了及时关注锚索预应力变化过程, 该工程在主副厂房某断面布置了锚索测力计。以此断面为例, 分析整个地下厂房开挖过程中锚索应力的变化规律以及预应力损失情况。锚索应力变化曲线如图 7 所示。

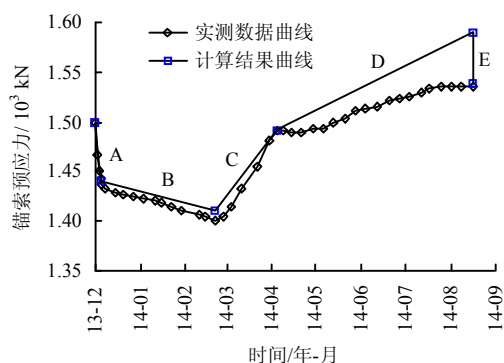


图 7 锚索应力变化曲线

Fig.7 Stress variation curves of the anchor cable

通过锚索预应力实测数据曲线可以看出 (见图 7), 锚索应力变化过程主要分为 4 个阶段: 第 1 阶段为预应力快速损失阶段, 主要包括由锚索系统以及张拉系统引起的预应力损失; 第 2 阶段为预应力缓慢损失阶段, 主要包括由钢绞线应力松弛等引起的预应力损失; 第 3 阶段为预应力快速增加阶段, 该阶段由于洞室群开挖卸荷, 导致锚索预应力快速增加; 第 4 阶段为预应力平稳变化阶段, 该阶段由洞室群后期开挖以及岩体蠕变引起预应力损失共同产生。不同工程由于地质条件的差异, 其锚索预应力损失的各阶段历时长短也不同。

在有限元计算中, 为了模拟随着洞室群分期开挖预应力锚索支护效应的调整变化过程, 根据本文提出的预应力损失计算方法, 考虑预应力损失阶段性特性, 将预应力损失离散化处理为开挖前、本期开挖以及后期开挖的情况, 并将其整合到有限元计算过程中, 得到考虑开挖过程预应力损失的锚索应力曲线 (见图 7), 该曲线与实测结果较为吻合, 主要分为 5 个阶段: A 阶段持续时间很短, 预应力

损失约 60 kN, 损失率约为 4%; B 阶段持续时间较长, 锁定 90 d 的损失量约为 40 kN, 损失率约为 3%; C 阶段洞室群开挖, 预应力增加约 100 kN; D 阶段洞室群后期开挖, 预应力变化缓慢, 增加约 75 kN; E 阶段为岩体蠕变引起的预应力损失, 损失量约为 30 kN, 损失率约为 2%。

从锚索预应力变化过程分析结果可知, 锚索预应力损失量约为 8%~10%, 其中, 前期(约锁定 90 d)预应力损失占总损失量 70%~80%, 由于工程地质条件较好, 由岩体蠕变产生的后期预应力损失量较小。

5.3.3 锚索初始张拉吨位优化分析

通过三维有限元计算, 得到预应力锚索的初始张拉系数如图 8 所示。为了论证锚索初始张拉吨位的合理性, 将计算求得的锚索初始张拉吨位作为初始条件, 进行数值计算, 得到厂房开挖完毕后洞周锚索应力值如图 9 所示。

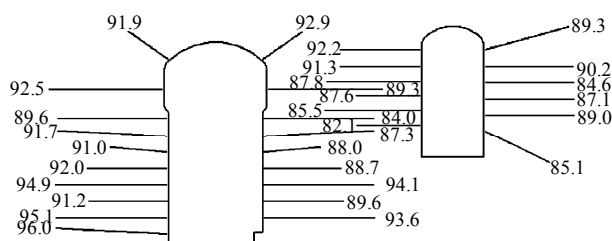


图 8 预应力锚索初始张拉系数(单位: %)
Fig.8 Initial tensile coefficients of prestressed anchor cables (unit: %)

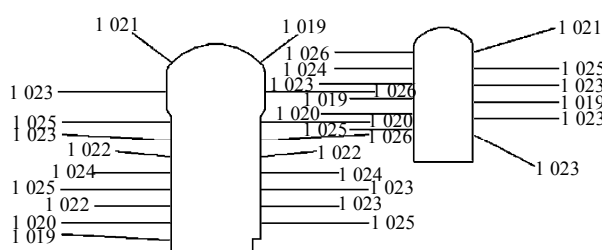


图 9 开挖完毕锚索应力值 (单位: MPa)
Fig.9 Stress of anchor cables after excavation (unit: MPa)

从图 8 可以看出, 由于地下厂房所处中等偏低地应力场, 且枢纽区地质条件较好, 锚索的初始张拉系数较大, 主要分布在 0.82~0.95 之间, 其中在主厂房与主变洞之间, 特别是母线洞部位, 锚索的初始张拉系数最小, 分布在 0.82~0.88 之间。

从图 9 可以看出, 采用图 7 所示的张拉系数进行有限元分析, 厂房开挖完毕, 锚索应力值在 1.015~1.025 MPa 之间, 这与锚索的张拉设计值

1.020 MPa 相近, 计算结果表明, 采用该张拉系数是可行的, 初始张拉系数计算方法基本合理。

6 结 论

(1) 预应力锚索通过锚固段与围岩的相互作用将荷载传至深部岩体, 锚固段的始端轴向应力较大, 并向末端逐步衰减的分布形式, 剪力先增大后减小, 且锚固段只在一定范围内发挥作用。

(2) 锚索预应力损失的主要影响因素为锚索体系、张拉系统、钢绞线应力松弛以及锚固段岩体蠕变, 提出了锚索预应力损失计算方法, 并结合工程实例计算了各种因素影响下的锚索预应力损失量, 与实测结果吻合较好。

(3) 将洞室开挖过程中锚索的应力增量作为初始张拉的安全余量, 同时考虑施工过程中的锚索预应力损失, 得到了锚索初始张拉吨位, 采用该初始张拉吨位进行分析计算, 得到开挖完毕锚索应力值, 其计算结果与锚索张拉设计值非常接近。

参 考 文 献

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12.
CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7-12.
- [2] YUE CAI, ESAKI TETSURO, JIANG YU-JING. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. *International of Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, (41): 1055-1067.
- [3] KILIC A, YASAR E, CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2002, 17: 355-362.
- [4] 尤春安, 高明, 张利民, 等. 锚固体应力分布的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 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(Supp.): 63-66.
- [5] 芮瑞, 夏元友, 顾金才, 等. 压力分散型锚索锚固段受力特性试验分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 919-921.
RUI Rui, XIA Yuan-you, GU Jin-cai, et al. Field test and mechanical analysis of anchorage segment of pressure-dispersion anchors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(5): 919-921.
- [6] 何思明, 田金昌, 周建庭. 胶结式预应力锚索锚固段荷

- 载传递特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 118—121.
- HE Si-ming, TIAN Jin-chang, ZHOU Jian-ting. Study on load transfer of bond prestressed anchor rope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 118—121.
- [7] 方勇, 何川. 全长黏结式锚杆与隧道围岩相互作用研究[J]. 工程力学, 2007, 24(6): 111—116.
- FANG Yong, HE Chuan. Study on the interaction of whole bonded rock bolt and tunnel surrounding rock[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(6): 111—116.
- [8] BRAHIM B, GERAND B. Five-year monitoring of load losses on prestressed cement-grouted rock anchors[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1991, 28(5): 668—677.
- [9] 张发明, 刘宁, 陈祖煜, 等. 影响大吨位预应力长锚索锚固力损失的因素分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 194—197.
- ZHANG Fa-ming, LIU Ning, CHEN Zu-yu, et al. Analysis of factors affecting load losses of high capacity and long rock anchors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 194—197.
- [10] 朱晗迺, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2756—2760.
- ZHU Han-ya, SUN Hong-yue, WANG Hui-bang, et al. Analysis of prestress state of cable applied to rock slope reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2756—2760.
- [11] 张发明, 赵维炳, 刘宁, 等. 预应力锚索锚固荷载的变化规律及预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 39—43.
- ZHANG Fa-ming, ZHAO Wei-bing, LIU Ning, et al. Long-term performance and load prediction model of prestressed cables[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(1): 39—43.
- [12] 周永江, 何思明, 杨雪莲. 预应力锚索的预应力损失机制研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1353—1356.
- ZHOU Yong-jiang, HE Si-ming, YANG Xue-lian. Study on prestress loss of anchor cables under long term loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1353—1356.
- [13] 王清标, 张聪, 王辉, 等. 预应力锚索锚固力损失与岩土体蠕变耦合效应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2150—2156.
- WANG Qing-biao, ZHANG Cong, WANG Hui, et al. Study of coupling effect between anchorage force loss of prestressed anchor cable and rock and soil creep[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2150—2156.
- [14] 张金龙, 徐卫亚, 徐飞, 等. 深卸荷变形拉裂岩体锚索预应力损失规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3966—3969.
- ZHANG Jin-long, XU Wei-ya, XU Fei, et al. Study on prestress loss law of anchor cables in deep unloading deformed ripped blocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3966—3969.
- [15] 陈沅江, 尹进, 胡毅夫. 软岩边坡锚索预应力定量损失规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1686—1689.
- CHEN Yuan-jiang, YIN Jin, HU Yi-fu. Research on prestress quantitative loss law of soft rock slope anchor cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1686—1689.
- [16] 刘波, 张功, 周浩亮, 等. 饱和粉细砂层锚索预应力变化规律监测分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 347—352.
- LIU Bo, ZHANG Gong, ZHOU Hao-liang, et al. Monitoring and analysis of variation of anchor prestress in saturated silty sand condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 347—352.
- [17] 陈俊涛, 刘钢, 肖明. 地下洞室预应力锚索合理张拉吨位快速反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 28(增刊 2): 3919—3921.
- CHEN Jun-tao, LIU Gang, XIAO Ming. Fast back analysis of reasonable tensile tonnage of prestressed anchor cable in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 28(Supp.2): 3919—3921.
- [18] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 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.
- [19] 中交公路规划设计院. JTGD62-2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTGD62-2012 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.