

## 基于串联流变模型的锚拉力松弛分析方法

邓 益, 肖世国

**Analysis method for relaxation effect of prestressed anchor cable tension based on a series rheological model**

DENG Yi and XIAO Shiguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208062>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

#### 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

#### 黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119-128

#### 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172

#### 基于数值计算的测斜仪监测误差分析

Error analysis of an inclinometer based on numerical analysis

赵振宇 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 157-161

#### 高强大变形屈服锚索承载特性室内试验研究

Laboratory test on the mechanical behavior of high-strength and large-deformation yield anchor cable

杨栋, 王全成, 姜昭群 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 79-86



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208062

邓益, 肖世国. 基于串联流变模型的锚拉力松弛分析方法 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 68-79.

DENG Yi, XIAO Shiguo. Analysis method for relaxation effect of prestressed anchor cable tension based on a series rheological model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 68-79.

## 基于串联流变模型的锚拉力松弛分析方法

邓 益<sup>1</sup>, 肖世国<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 加固坡体的预应力锚索结构存在锚索拉力随时间松弛问题, 为了合理预测分析锚索拉力松弛, 基于锚索-边坡体系中滑床、锚索、滑体、坡面抑制构件之间的相互作用与锚固系统受力、变形基本机理, 建立了一种采用虎克体模拟锚索或坡面抑制构件、开尔文体模拟滑床、开尔文体或广义开尔文体模拟土质或岩质滑体的锚索-滑床-滑体-坡面抑制件的四体串联式流变模型, 推导了锚索拉力松弛的计算方程。实例分析表明: 所提出模型的锚索拉力松弛计算值与试验或实测结果的误差小于既有模型的计算误差, 计算得到的锚索拉力松弛收敛值的最大计算误差约为 11%, 松弛历时的最大误差约为 10%; 锚索拉力松弛率随锚索的直径和弹性模量的增大呈线性增大, 随锚孔间距、滑床和滑体的滞后弹性模量与黏滞系数 (尤其初期阶段) 的增大呈非线性减弱, 而滑床和滑体的瞬时弹性模量、坡面抑制构件的弹性模量均对锚索松弛效应影响很小。所建立的方法可用于定量评估预测预应力锚索加固坡体的锚拉力松弛效应, 进而可用于分析锚固边坡长期稳定性。

**关键词:** 边坡; 预应力锚索; 锚索拉力; 松弛效应; 串联流变模型

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0068-12

## Analysis method for relaxation effect of prestressed anchor cable tension based on a series rheological model

DENG Yi<sup>1</sup>, XIAO Shiguo<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Anchor cable tension relaxation with time is a typical problem in the prestressed anchor cable structure used to reinforce slopes. In order to reasonably predict the tension relaxation of anchor cable, based on the interaction among the stable layer, anchor cable, slide mass and constraint components on the slope face in the anchor cable-slope system and the basic loading and deformation mechanism of the anchorage system, a four-body series rheological model composed of anchor cable, slide bed, slide body, and constraint components is established, in which the anchor cable and constraint components are simulated with Hooke body, the slide mass is simulated with Kelvin body or generalized Kelvin body, and the stable layer is simulated with generalized Kelvin body. The calculation equation of the anchor cable tension relaxation is accordingly derived. Some examples show

收稿日期: 2022-08-22; 修订日期: 2022-11-28

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2020-A-01); 国家自然科学基金项目(51578466)

第一作者: 邓益(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡工程研究。E-mail: [1427091785@qq.com](mailto:1427091785@qq.com)

通讯作者: 肖世国(1973-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事边坡稳定性与支挡结构研究。E-mail: [xiaoshiguo@swjtu.cn](mailto:xiaoshiguo@swjtu.cn)

that the error between the proposed value of cable tension relaxation and the observed results is smaller than those using the existing calculation methods. The maximum error of cable tension relaxation convergence value using the proposed method is about 11%, and the maximum error of the relaxation duration is about 10%. The relaxation rate of the anchor cable tension increases linearly with the diameter and elastic modulus of the anchor cable, and decreases nonlinearly with the increasing anchor hole spacing, the hysteresis elastic modulus and the viscosity coefficient (particularly in the initial stage) of the stable layer and slide mass. The instantaneous elastic modulus of the stable layer and the slide mass as well as the elastic modulus of the constraint components have little effect on the tension relaxation of the anchor cable. The proposed method can be used to quantitatively evaluate the anchor tension relaxation of slopes reinforced with prestressed anchor cables in practical engineering, which naturally allows to analyze the long-term stability of the anchored slopes.

**Keywords:** slope; prestressed anchor cable; anchor tension; relaxation effect; series rheological model

预应力锚索结构是工程边坡或滑坡的一种有效加固措施<sup>[1-4]</sup>,其锚索的拉力存在随时间松弛衰减的现象<sup>[5-7]</sup>,锚索拉力的损失程度直接影响着预应力锚索结构加固效果和所加固边坡的长期稳定性。

已有很多学者对这一问题进行了研究。丁多文等<sup>[8]</sup>基于广义 Kelvin 体(K 体),即 K 体与 Hooke 体(H 体)的串联模型,分析了预应力锚索加固岩体的锚拉力随时间变化规律;Shi 等<sup>[9]</sup>将模拟锚索的 H 体与模拟锚固段地层的 K-H 体并联,与模拟坡面框架梁的 K 体串联组成并-串联模型,并基于现场试验,建立了预应力锚索的预应力损失计算方法;陈安敏等<sup>[10]</sup>通过室内模型试验模拟了软岩在锚索拉力作用下的蠕变作用并讨论了锚索拉力随时间的变化规律;杨栋等<sup>[11]</sup>通过锚索单根屈服套室试验获得了 3 种稳定输出恒阻的屈服套,并基于室内张拉试验和极限承载试验发现增加了屈服套装置的锚索的吨位和行程有了较大提升;李涛等<sup>[12]</sup>基于室内模型试验研究了不同含水率下锚索拉力的损失规律,并建立了由 H 体和 Bingham 模型并联组成的耦合模型;李安润等<sup>[13]</sup>采用三轴压缩蠕变试验发现在不同含水率下,水-岩作用对软岩的各蠕变阶段均有不利的影响,并在 Burgers 模型基础上进行改进,提出了水-岩作用劣化的损伤蠕变本构模型;郭长宝等<sup>[14]</sup>通过在不同围压下的岩石三轴压缩和三轴蠕变试验,得到了岩石力学参数和蠕变力学特征,在西原模型的基础上结合试验测试建立了新的蠕变模型;陈沅江等<sup>[15]</sup>、朱晗迺等<sup>[16]</sup>、王清标等<sup>[17]</sup>分别基于模拟锚固段地层流变力学性质的 K-H 体和模拟锚索的 H 体组成的并联模型,对锚索拉力松弛与岩土体流变力学性质之间的耦合作用进行了理论分析;邓东平等<sup>[18]</sup>将锚索等效成 H 体和 K-H 体 2 种模式,岩土体等效为  $H+nK(n \leq 3)$  体,建立了锚索和岩体并联的耦

合模型;高大水等<sup>[19]</sup>对三峡大坝永久船闸高边坡锚索拉力变化监测值进行了整理和分析,总结出此工程中预应力锚索拉力损失的规律;王军等<sup>[20]</sup>采用 H 体模拟锚索体, K-H 体模拟岩土体,并添加 Mohr-Coulomb 剪切塑性元件模拟土体的加速蠕变特性,建立了能够反映预应力锚索结构蠕变三阶段变形特征的塑性加速元件串-并联模型;徐毅青等<sup>[21]</sup>采用 H 体模拟锚索体, H-K 体模拟岩土体,建立了 H-K、H-2K2 种锚索体与岩土体耦合的并联模型;冯忠居等<sup>[22]</sup>基于广义胡克定律、松弛率时程响应方程与采用 H 体并联的西原体模型<sup>[23]</sup>,建立了考虑 3 种要素的并联模型,推导出了三因素损失理论计算方程;陈拓等<sup>[24]</sup>基于改进的西原流变模型模拟边坡岩土体和 H 体模拟锚索体,建立了锚固段岩土体和锚索体组成的并联模型。王国富等<sup>[25]</sup>将锚索体等效为黏弹性体,采用 K-H 体模拟锚固段岩土体,建立了一种新的锚索体与锚固段岩土体组成的并联模型。

上述研究均认为在岩土体蠕变和锚索松弛的耦合作用中,岩土体和锚索的变形是相等的,因而所建立的耦合模型均为并联模型;实际上,从整体力学作用来看,锚索和岩土体虽然所受作用力大小相等,但两者变形并不相等。肖世国等<sup>[26]</sup>采用模拟锚索、锚固段岩土体流变力学性质的 H 体、H-K 体组成的串联模型,推导出了锚拉力松弛方程。以往这 2 类模型均没有考虑锚索自由段岩土体的流变特性引起的锚拉力损失,导致理论计算值和实测值有时相差较大。董旭光等<sup>[27]</sup>将锚索自由段与滑体用 H|K 并联模型模拟、锚索锚固段与滑床用 H-K 串联模型模拟,锚固段与自由段串联组成的并-串联模型反映预应力锚索拉力变化与岩土蠕变的关系;该模型将作为弹性体(H 体)的锚索分为了自由段锚索和锚固段锚索,且认为自由段锚

索与锚固段锚索所受作用力、变形均不相等,这又与实际锚固工程中锚索受力作用和变形特征有矛盾之处。

综合而言,以往所建立的理论模型能够在一定程度上反映锚拉力随时间的变化规律,但这些模型并没有完全体现实际的锚固边坡中锚索与自由段滑体和锚固段地层岩土体的相互作用机制,且大多都没有考虑坡面抑制构件的影响。因此,本文从预应力锚索加固边坡的锚固系统受力及变形基本机理出发,全面考虑锚索、锚固段地层、自由段滑体、坡面抑制构件这 4 个要素,将其体现于同一耦合分析模型中,建立反映“锚索-锚固段地层-自由段滑体-坡面抑制构件”式锚固系统中锚索拉力松弛的四体串联流变分析模型。基于此模型推导出锚索拉力松弛的理论计算公式,与已有的试验和理论模型进行对比,验证本文所提出模型的合理性,并进一步分析本模型中各主要参数对锚索拉力松弛效应的影响特征。

### 1 分析模型

#### 1.1 锚固系统受力及变形基本机理

预应力锚索是一种主要承受拉力的杆状构件,通过钻孔及注浆体将钢绞线固定于锚固段稳定地层(滑床)中,在被加固体表面对钢绞线(锚索)张拉产生预应力,从而达到使被加固体稳定和限制其变形的目的。在实际的预应力锚索加固边坡所形成的加固系统中,主要包括 4 个组成部分:锚索、锚固段稳定地层(滑床)、自由段所在的滑体以及坡面抑制构件(如地梁、垫墩等)。从预应力锚索结构加固边坡的整体力学作用效果来看,对锚索所施加的张拉力( $P$ )使锚固段产生轴向位移,从而引起锚固段侧表面(锚固体与滑床接触界面)摩擦力,如图 1(a)所示。由锚固段轴向静力平衡可知,此侧摩擦阻力的合力即等于锚索拉力,该摩擦阻力的反作用力则作用于滑床,从而引起滑床产生相应的位移。锚索拉力引起滑床移动对潜在滑体产生一定的挤压而使潜在滑体产生位移,从而对坡面抑制件继续产生挤压,进一步引起坡面抑制件的位移。这样,对于锚固体-边坡体系,相当于在锚索拉力作用下,引起了锚索、滑床、潜在滑体和坡面抑制件的渐次位移及其间挤压协调性,如图 1(b)所示(虚线表示移动后)。由于边坡岩土体(包括滑床和滑体)自身具有流变属性,在预应力锚索的拉力作用下,岩土体发生蠕变,其位移与蠕变特性有关,因而使锚索拉力与该蠕变特性相关联,而锚索材料自身又有松弛特性,于是两者相互影响,使得锚索拉力的松弛和

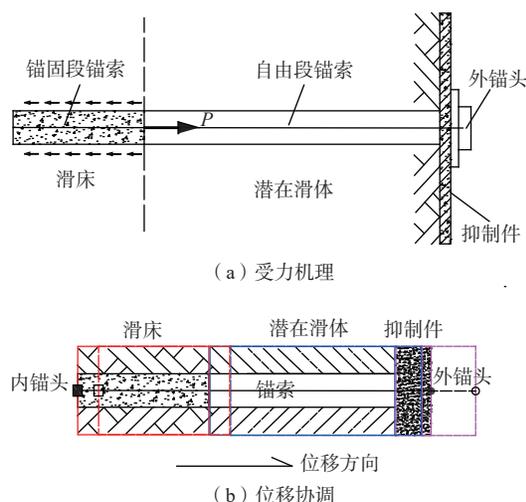


图 1 边坡锚固系统受力机理与位移协调示意图

Fig. 1 Sketch map of loading mechanism and displacement compatibility of the anchorage system used to reinforce slopes

岩土体的蠕变存在耦合作用关系。

#### 1.2 模型建立

对于预应力锚索加固边坡系统,根据岩土体及锚固结构的一般流变特征<sup>[23]</sup>,锚固段地层常采用通用开尔文体(K-H体)模拟;对于滑体为较完整岩体、类土质地层的情况,可以分别采用K-H体、K体模拟;锚索及其坡面抑制构件均可采用H体模拟。因此,根据上述锚固结构与边坡岩土体的相互作用特征以及锚固系统变形基本机理,可建立如图 2 所示的锚固结构-边坡

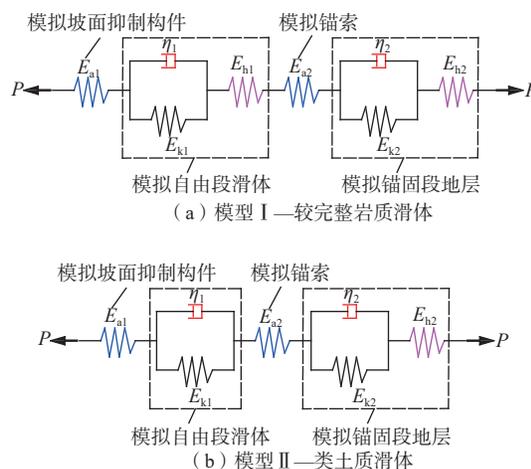


图 2 锚索结构-边坡体系的整体串联流变模型

Fig. 2 General series rheological model for prestressed anchor cable-slope system

注:  $E_{a1}$ 、 $E_{a2}$  分别为坡面抑制构件、锚索的弹性模量;  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  分别为自由段滑体和锚固段地层岩土体的瞬时弹性模量,反映了其在外力作用下的瞬时弹性效应;  $E_{k1}$ 、 $E_{k2}$  分别为自由段滑体和锚固段地层的滞后弹性模量,反映了其在外力作用下的滞后弹性效应;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为自由段滑体和锚固段地层的黏滞系数;  $P$  为锚索拉力。

坡体系的整体串联式流变模型。其中,模型 I、II 分别针对滑体为较完整岩体、类土质地层的情况。

## 2 公式推导

考虑到实际工程中锚索间距一般远大于锚孔直径,故忽略群锚效应。同时,本文主要针对实践中常见的非全长粘结型锚索,为简化分析,假设砂浆性质与锚固段滑床围岩相同,且不考虑砂浆的蠕变与外部其他环境因素的影响。根据图 2 所示的分析模型 I 和 II,在天然工况下,可分别建立锚索拉力( $P$ )和模型总拉应变( $\varepsilon$ )之间的关系。

### 2.1 模型 I—较完整岩质滑体

由图 2(a)所示的分析模型,可得出  $P$  和  $\varepsilon$  之间的关系表达式为:

$$\frac{P}{A_{a1}E_{a1}} + \frac{P}{A_{r1}(E_{k1} + D\eta_1)} + \frac{P}{A_{r1}E_{h1}} + \frac{P}{A_{a2}E_{a2}} + \frac{P}{A_{r2}(E_{k2} + D\eta_2)} + \frac{P}{A_{r2}E_{h2}} = \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $A_{a1}$ ——单孔锚索坡面抑制件的等效横截面积/ $\text{m}^2$ , 记作  $A_{a1} = A_s d/a$ , 其中  $A_s$  是抑制件的实际截面积/ $\text{m}^2$ ,  $d$  是锚孔间距/ $\text{m}$ ,  $a$  是抑制件的截面宽度/ $\text{m}$ ;

$A_{a2}$ ——单孔锚索截面积/ $\text{m}^2$ ;

$A_{r1}$ ——单孔锚索的有效作用范围/ $\text{m}^2$ , 可视为相邻锚索“中-中”间距的范围;

$A_{r2}$ ——单孔锚索对岩体有效影响范围的面积/ $\text{m}^2$ , 其影响范围可视为圆形区域且该圆形区域的直径可取为锚孔中心间距;

$D$ ——与偏微分相关的计算符号, 记作  $D = \partial/\partial t$ 。

对于松弛问题,有  $\varepsilon$  为常量,即  $D\varepsilon = 0$ 。对式(1)两侧同乘以  $A_{a1}A_{a2}A_{r1}A_{r2}E_{a1}E_{a2}E_{h1}E_{h2}E_{k1}E_{k2}$ , 再经通分后可化简为:

$$k_1 P'' + k_2 P' + k_3 P = k_4 \varepsilon \quad (2)$$

其中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  均为系数, 分别可表示为:

$$k_1 = \eta_1 \eta_2 \left( A_{a1} A_{r1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r2} E_{a1} E_{a2} E_{h2} + A_{a2} A_{r1} A_{r2} E_{a2} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r1} E_{a1} E_{a2} E_{h1} \right);$$

$$k_2 = \left( A_{a1} A_{r1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r2} E_{a1} E_{a2} E_{h2} + A_{a2} A_{r1} A_{r2} E_{a2} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r1} E_{a1} E_{a2} E_{h1} \right) (E_{k1} \eta_2 + E_{k2} \eta_1) + A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} E_{h2} (A_{r1} \eta_1 + A_{r2} \eta_2);$$

$$k_3 = E_{k1} E_{k2} \left( A_{a1} A_{r1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r2} E_{a1} E_{a2} E_{h2} + A_{a2} A_{r1} A_{r2} E_{a2} E_{h1} E_{h2} + A_{a1} A_{a2} A_{r1} E_{a1} E_{a2} E_{h1} \right) + A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} E_{h2} (A_{r1} E_{k1} + A_{r2} E_{k2});$$

$$k_4 = A_{a1} A_{a2} A_{r1} A_{r2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} E_{h2} E_{k1} E_{k2}。$$

求解式(2)所示的微分方程, 可得:

$$P(t) = b_1 \varepsilon + b_2 e^{n_1 t} + b_3 e^{n_2 t} \quad (3)$$

式中:  $t$ ——时间/ $\text{h}$ ;

$n_1$ 、 $n_2$ ——方程  $k_1 n^2 + k_2 n + k_3 = 0$  的 2 个实根;

$b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ ——积分常数, 其中  $b_1 = k_4/k_3$ 。

由锚索拉力初始条件  $P(0) = P_0$ , 式(3)可表达为:

$$P(t) = \frac{k_4}{k_3} \varepsilon + \left( P_0 - \frac{k_4}{k_3} \varepsilon - C_1 \right) e^{n_1 t} + C_1 e^{n_2 t} \quad (4)$$

其中,  $C_1$  为任意常数, 可根据典型时刻锚拉力监测值确定。

由于  $\varepsilon$  等于初始应变, 可根据图 2(a)由锚拉初始状态确定, 即:

$$\varepsilon = \frac{P_0}{A_{a1}E_{a1}} + \frac{P_0}{A_{r1}E_{h1}} + \frac{P_0}{A_{a2}E_{a2}} + \frac{P_0}{A_{r2}E_{h2}} \quad (5)$$

### 2.2 模型 II—类土质滑体

由图 2(b)所示的分析模型, 可得出  $P$  和  $\varepsilon$  之间的关系表达式为:

$$\frac{P}{A_{a1}E_{a1}} + \frac{P}{A_{r1}(E_{k1} + D\eta_1)} + \frac{P}{A_{a2}E_{a2}} + \frac{P}{A_{r2}E_{h2}} + \frac{P}{A_{r2}(E_{k2} + D\eta_2)} = \varepsilon \quad (6)$$

式(6)两侧同乘  $A_{a1}A_{a2}A_{r1}A_{r2}E_{a1}E_{a2}E_{h1}E_{h2}E_{k1}E_{k2}$ , 可化简得:

$$\lambda_1 P'' + \lambda_2 P' + \lambda_3 P = \lambda_4 \varepsilon \quad (7)$$

其中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  均为系数, 可分别表示为:

$$\lambda_1 = A_{r1} \eta_1 \eta_2 (A_{a1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} + A_{a2} A_{r2} E_{a2} E_{h1} + A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2});$$

$$\lambda_2 = A_{r1} (E_{k1} \eta_2 + E_{k2} \eta_1) \left( A_{a1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} + A_{a2} A_{r2} E_{a2} E_{h1} + A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} \right) +$$

$$A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} (A_{r1} \eta_1 + A_{r2} \eta_2);$$

$$\lambda_3 = A_{r1} E_{k1} E_{k2} \left( A_{a1} A_{r2} E_{a1} E_{h1} + A_{a2} A_{r2} E_{a2} E_{h1} + A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} \right) +$$

$$A_{a1} A_{a2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} (A_{r1} E_{k1} + A_{r2} E_{k2});$$

$$\lambda_4 = A_{a1} A_{a2} A_{r1} A_{r2} E_{a1} E_{a2} E_{h1} E_{k1} E_{k2}。$$

求解式(7)所示的微分方程, 可得:

$$P(t) = d_1 \varepsilon + d_2 e^{r_1 t} + d_3 e^{r_2 t} \quad (8)$$

式中:  $r_1$ 、 $r_2$ ——方程  $\lambda_1 r^2 + \lambda_2 r + \lambda_3 = 0$  的 2 个实根;

$d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ——积分常数, 其中  $d_1 = \lambda_4/\lambda_3$ 。

由锚索拉力初始条件  $P(0) = P_0$ , 式(8)可表达为:

$$P(t) = \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \varepsilon + \left( P_0 - \frac{\lambda_4}{\lambda_3} \varepsilon - C_2 \right) e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} \quad (9)$$

其中,  $C_2$  为任意常数, 可根据典型时刻锚拉力监测值确定。

初始应变  $\varepsilon$  可根据图 2(b) 由锚拉初始状态确定, 即:

$$\varepsilon = \frac{P_0}{A_{a1}E_{a1}} + \frac{P_0}{A_{a2}E_{a2}} + \frac{P_0}{A_{r2}E_r} \quad (10)$$

由此, 可根据式(4)、式(9)分别确定模型 I 和 II 的锚索拉力随时间的松弛变化规律。

对于实际存在一系列锚索拉力监测值的情况, 为了更加合理地确定式(4)、式(9)中的常数  $C_1$  和  $C_2$ , 可根据不同时刻  $t_i$  所监测的锚索拉力  $P_i$ , 求解出一系列  $C_1$  或  $C_2$  值, 再分别将相应的计算曲线与实测曲线进行比较, 二者相关系数最高时的  $C_1$  或  $C_2$  值即为所求的该常数值。

### 3 试验验证

#### 3.1 室内模型试验

以陈安敏等<sup>[10]</sup>的室内模型试验(图 3)为实例, 其模型岩体尺寸为 80 cm×80 cm×80 cm, 均布 4 根锚索。锚索模拟材料用  $\phi 6$  mm×2 mm 的铜管, 抗拉承载力为 1 080 N, 铜管的弹性模量为  $1.32 \times 10^5$  MPa; 模型岩体采用黄黏砂土材料模拟, 含水率为 15%, 内摩擦角为 19°, 重度为 20 kN/m<sup>3</sup>。锚索的自由段、锚固段长度分别为 35, 25 cm。锚索垫墩弹性模量取  $2.04 \times 10^4$  MPa。根据其试验结果<sup>[10]</sup>, 可用 K 体描述黄黏砂土, 其蠕变参数反演结果见表 1。

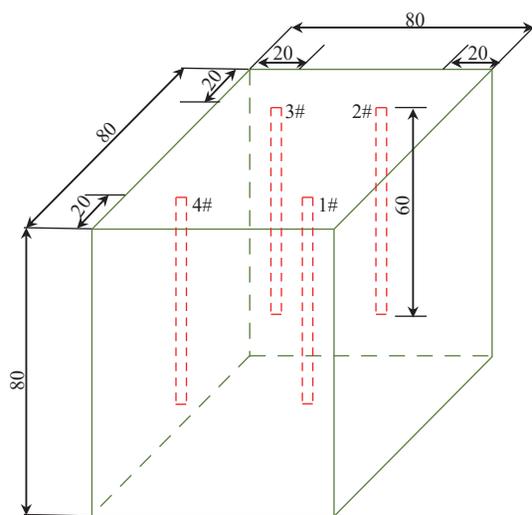


图 3 模型布置示意图(单位: cm)<sup>[10]</sup>  
Fig. 3 Model layout diagram (unit: cm)<sup>[10]</sup>

以初始拉力为 54, 83 N 的 2#、3# 锚索为例进行计算, 取表 1 中的平均值代入计算, 由于试验模型的锚

表 1 模型岩体的流变参数

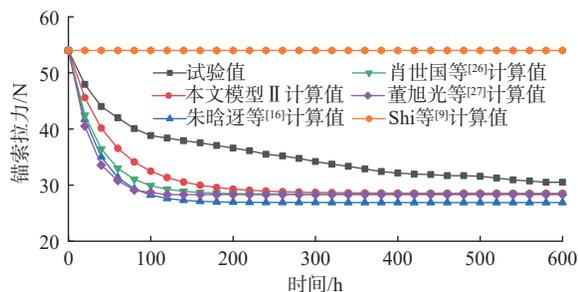
Table 1 Rheological parameters of model rock mass		
组号	$E_k$ /MPa	$\eta$ /(MPa·h <sup>-1</sup> )
2	9.187	582.101
3	9.340	597.862
平均值	9.264	589.982

索自由段和锚固段“围岩”均为黄黏砂土, 故  $E_{k1}=E_{k2}=E_k$ ,  $\eta_1=\eta_2=\eta$ 。对于 2#、3# 锚索,  $t=20$  h 时具有相对最优计算值, 可分别确定出常数  $C_2$  为 8.656 N 和 22.591 N。将这些参数代入式(9), 可得 2#、3# 的锚索拉力表达式分别为:

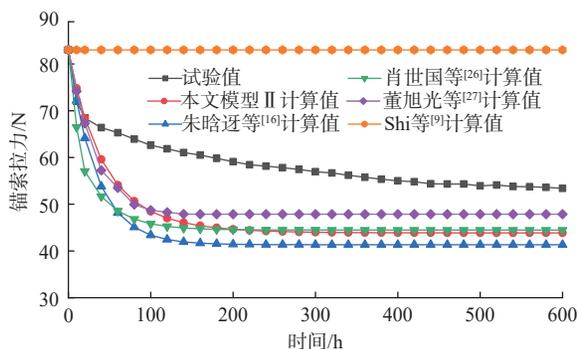
$$P(t) = 28.538 + 16.806e^{-0.0157t} + 8.656e^{-0.0297t} \quad (11)$$

$$P(t) = 43.864 + 16.545e^{-0.0157t} + 22.591e^{-0.0297t} \quad (12)$$

锚索拉力试验值与不同方法计算值对比如图 4 所示。可见, 对于 2# 锚索, 本文方法得到的锚索松弛后拉力收敛值与试验结果的误差约为 6%。若定义锚索拉力松弛率为  $\delta(t)=1-P(t)/P_0$  ( $P_0$  为锚索拉力初始值), 则锚索拉力松弛率的本法计算值约为 47%, 而试验值约为 44%, 二者吻合较好, 且与朱晗迺等<sup>[16]</sup>、肖世国等<sup>[26]</sup>、董旭光等<sup>[27]</sup>的计算结果也较为接近, 但与 Shi 等<sup>[9]</sup>的计算结果存在显著差异。Shi 等<sup>[9]</sup>的锚索拉力松弛率几乎没有变化, 这是因为其模型适用于边坡岩体是较



(a) 2# 模型锚索



(b) 3# 模型锚索

图 4 室内模型试验锚索拉力实测与计算值对比

Fig. 4 Comparison of the measured and calculated values of anchor cable tension in laboratory model test

为完整且坚硬的条件,而本室内试验的“模型岩体”为黄黏砂土。

### 3.2 现场测试

#### (1) 较完整岩质高边坡

陈沅江等<sup>[15]</sup>对湖南西部常张高速公路K123边坡工程中预应力锚索拉力进行了现场监测,边坡岩层以风化泥质页岩为主,在边坡支护中取了2根预应力锚索作为试验锚索,张拉吨位为600 kN,其中锚索体长25~30 m,锚索由4根高强度低松弛无黏结钢绞线组成,极限抗拉强度1 860 MPa,直径15.24 mm,锚孔直径110 mm,锚索弹性模量195 GPa,锚孔间距4 m,框架梁截面尺寸0.4 m×0.5 m,框架梁的弹性模量 $3.0 \times 10^4$  MPa。测点布置如图5所示。

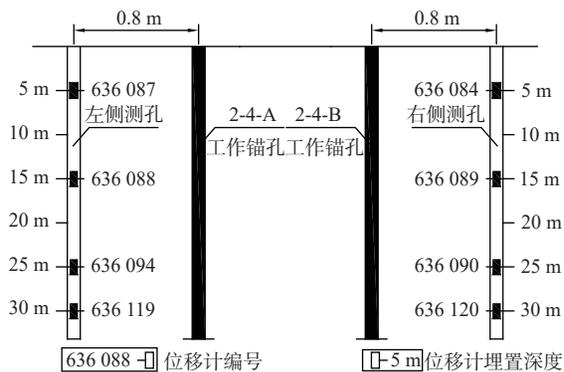


图5 现场多点位移计布设示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 5 Layout diagram of multi-point displacement meters<sup>[15]</sup>

根据边坡岩体蠕变试验结果,陈沅江等<sup>[15]</sup>给出了锚固段岩体的K-H体参数,即:H体弹性模量、K体弹性模量、黏滞系数分别为15 790 MPa、46 MPa、657 MPa/d。由于坡体整体为页岩岩质边坡,可视为锚索自由段所在滑体与锚固段岩体的流变性质近似相同,均可取此试验值。

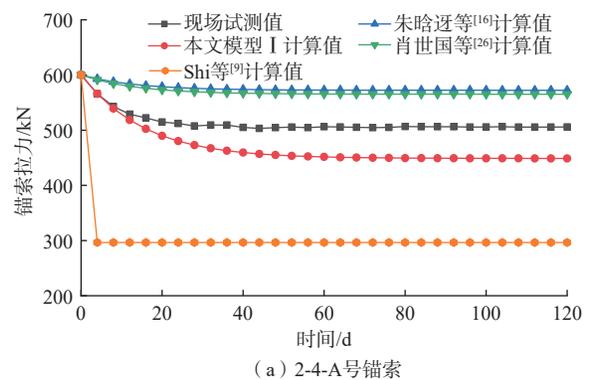
取 $t = 4$  d时(计算值相对最优)的锚索拉力监测值,可算得锚索2-4-A、2-4-B相应的计算常数 $C_1$ 分别为-41.312, -37.871 kN。把相关参数代入式(4)可得锚拉力的表达式分别为:

$$P(t) = 448.797 + 192.515e^{-0.0700t} - 41.312e^{-0.0936t} \quad (13)$$

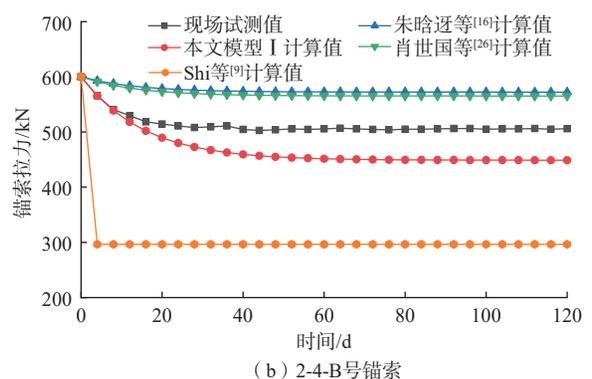
$$P(t) = 448.792 + 189.079e^{-0.0700t} - 37.871e^{-0.0936t} \quad (14)$$

图6给出了现场实测值与不同方法计算值的对比。可见,本文模型整体上呈现出的锚索拉力变化规律更接近于试验值,锚拉力初期迅速下降、中期下降速率变缓、后期逐渐趋于稳定,其中初期第0~18天锚拉力损失104.27 kN,约占锚拉力稳定后总损失量的69%。本文方法相对现场实测得到的锚索拉

力收敛值的误差为11%,计算与实测锚索拉力松弛率分别约为25.2%、15.3%,本法计算误差相对较小。朱晗迺等<sup>[16]</sup>、肖世国等<sup>[26]</sup>和Shi等<sup>[9]</sup>计算的锚索拉力松弛率分别为4.6%、5.8%和50.6%,与实测结果的误差相对较大;而董旭光等<sup>[27]</sup>的计算锚索拉力松弛率为35.3%,与现场实测值差异也较显著,且其锚索拉力曲线异常(甚至出现负值)。导致这种现象的原因是其模型适用于岩土体瞬时弹性模量相对较小和较为软弱或较为破碎的边坡,但本例边坡岩体较为完整,瞬时弹性模量相对黏滞弹性模量较大,导致其计算结果相对实测值误差较大。



(a) 2-4-A号锚索



(b) 2-4-B号锚索

图6 完整岩质高边坡锚索拉力实测与计算值对比

Fig. 6 Comparison of the measured and calculated values of cable tension of intact rock high slope

#### (2) 碎裂岩质高边坡

朱晗迺等<sup>[16]</sup>对采用预应力锚索框架梁加固的金丽温高速公路K81高边坡的锚索拉力进行了监测。该边坡潜在滑体呈碎裂状态,松动变形迹象明显。边坡区出露的地层为上侏罗统熔结凝灰岩,岩性单一。锚索张拉吨位为850 kN,锚索由6根高强度低松弛无黏结钢绞线组成,极限抗拉强度为1 860 MPa,直径15.24 mm,锚孔直径为110 mm,锚索弹性模量取195 GPa,锚孔间距横向为4 m,纵向为6 m。钢筋混凝土

框架梁截面尺寸为横梁 0.45 m×0.45 m, 纵梁为 0.60 m×0.45 m, 其弹性模量为 30 GPa。

这里以长度约为 22.5 m 的 BZ16-23 号锚索为例, 朱哈迺等<sup>[16]</sup>根据 K-H 模型的蠕变公式, 通过对现场位移及锚拉力监测数据反分析, 得到了边坡滑体的 H 体弹性模量为 60 MPa、K 体弹性模量为 46 MPa、黏滞系数为 657 MPa/d。对于较为完整的滑床岩体, 借鉴相关室内三轴蠕变试验结果<sup>[28]</sup>, 其 K-H 体流变参数取为: H 体弹性模量 550 MPa、K 体弹性模量 4 680 MPa、黏滞系数 734 400 MPa/d。当取  $t=13$  h 时计算值相对最优, 可算得常数  $C_1=106.397$  kN。由此, 将相关参数代入式(4)中得到 BZ16-23 锚索的拉力随时间变化的表达式为

$$P(t) = 753.434 - 9.831e^{-0.0064t} + 106.397e^{-0.0788t} \quad (15)$$

锚索拉力的现场实测值与不同方法计算值的对比如图 7 所示。可见, 本文计算结果与实测值、朱哈迺等<sup>[16]</sup>计算结果都相当接近, 可以很好地模拟锚索拉力随时间衰减的规律。对于本例, 锚索拉力初期迅速下降, 中期缓慢递减, 后期逐渐收敛于稳定值, 其中初期第 0~14 天锚拉力损失 70.26 kN, 约占锚拉力稳定收敛后总损失量的 72%; 本文模型计算值和现场实测值的锚索拉力收敛值误差小于 0.1%。现场实测的锚索拉力松弛率约为 11.5%, 朱哈迺等<sup>[16]</sup>的并联模型、肖世国等<sup>[26]</sup>的串联模型、董旭光等<sup>[27]</sup>的考虑滑体的并-串联模型、Shi 等<sup>[9]</sup>的考虑框架梁的并-串联模型计算得到的锚索拉力松弛率分别为 11.8%、13.7%、10.5%、0.5%, 与实测值的误差分别为 0.3%、2.6%、1.1%、12.5%。因此, 本文方法计算结果相对更符合实测值。

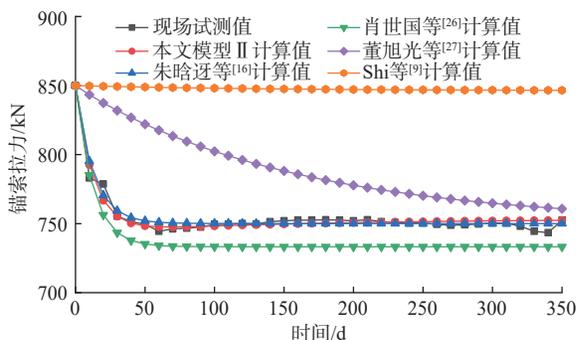


图 7 较破碎岩质高边坡锚索拉力实测与理论计算对比

Fig. 7 Comparison of the measured and theoretical calculation of anchor cable tension in a high slope with broken rock

表 2 给出了试验得到的上述各例的锚索拉力松弛历时(锚索张拉锁定后达到拉力稳定状态的经历时

表 2 锚索拉力松弛历时及本法计算误差

Table 2 Relaxation duration of anchor tension and proposed calculation errors

锚索编号	锚拉力初始值/kN	松弛历时/d	确定方法	本法误差/%
2#	0.054	5.1	试验值	9.8
		5.6	本文值	
3#	0.083	5.2	试验值	9.6
		5.7	本文值	
2-4-A	600	52	试验值	7.7
		56	本文值	
2-4-B	600	50	试验值	8.0
		54	本文值	
BZ16-23	850	62	试验值	3.2
		60	本文值	

长)及本文方法的计算误差。可见, 本法计算的最大误差仅约为 9.8%, 具有较好的合理性。

(3) 堆积层高边坡

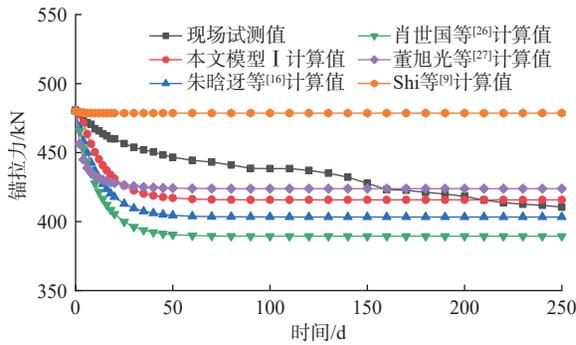
四川省汶川至马尔康高速公路 K93+940—K94+145 左侧堆积层高边坡, 采用预应力锚索框架加固。由工程地质测绘及钻探揭露, 其堆积层主要为块石、碎石和角砾构成的半成岩, 基岩由深灰色千枚岩为主, 夹薄层状石英砂岩。取其中的 2 根预应力锚索 A1H 和 C1H 作为现场测试锚索, 张拉吨位分别为 480, 620 kN, 其锚索长度为 60 m, 锚索由 6 根高强度低松弛无黏结钢绞线组成, 极限抗拉强度 1 860 MPa, 弹性模量 195 GPa, 直径 15.24 mm; 锚孔直径 110 mm, 锚孔间距横向 4 m、纵向 5 m。钢筋混凝土框架梁截面尺寸为 0.50 m×0.50 m, 其弹性模量为 30 GPa。

根据蠕变试验, 得到可描述该边坡堆积层流变特性的 K-H 模型参数为:  $E_{h1}=60$  MPa、 $E_{k1}=46$  MPa、 $\eta_1=657$  MPa/d; 坡体滑床岩体的 K-H 体模型参数为:  $E_{h2}=480$  MPa、 $E_{k2}=6 580$  MPa、 $\eta_2=1 483$  MPa/d。采用本文算法, 当取  $t=10$  d 时计算值相对最优, 可算得两锚索的计算常数  $C_1$  分别为 -13.146, -18.804 kN。由此, 将相关参数代入式(4)中可得锚拉力随时间变化的表达式为:

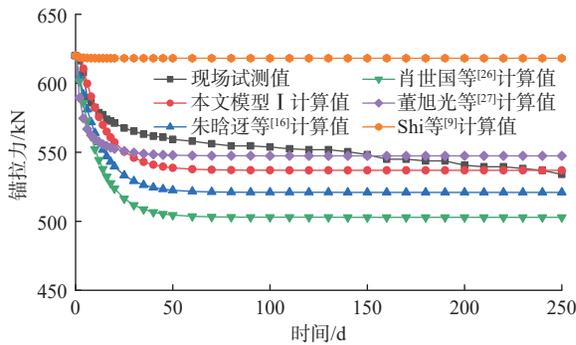
$$P(t) = 415.698 + 77.448e^{-0.0807t} - 13.146e^{-4.4440t} \quad (16)$$

$$P(t) = 536.943 + 101.861e^{-0.0807t} - 18.804e^{-4.4440t} \quad (17)$$

锚索拉力的现场实测值与不同方法计算值的对比如图 8 所示。可见, 本文计算结果与现场实测值相当接近, 可以很好地模拟锚索拉力随时间衰减的规律。以图 8(a)为例, 本文模型计算值和现场实测值的锚索拉力收敛值误差约为 1.3%。现场实测的锚索拉力松弛率约为 14.6%, 朱哈迺等<sup>[16]</sup>的并联模型、肖世



(a) A1H号锚索



(b) C1H号锚索

图 8 某堆积层高边坡锚索拉力实测与理论计算对比

Fig. 8 Comparison between the measured and theoretical calculation of anchor cable tension in a high accumulation slope

国等<sup>[26]</sup>的串联模型、董旭光等<sup>[27]</sup>的考虑滑体的并-串联模型、Shi等<sup>[9]</sup>的考虑框架梁的并-串联模型计算得到的锚索拉力松弛率分别为16%、18.9%、11.7%、0.3%，与实测值的误差分别为1.7%、5.1%、3.3%、16.6%。因此，本文方法计算结果相对更贴近实测值，相对误差更小。

#### 4 参数讨论

由式(4)、式(9)可见，锚索直径、锚孔间距、锚索弹性模量、锚固段地层与自由段滑体的流变参数、坡面抑制构件的弹性模量等因素均对锚索拉力松弛有影响。下面以第3.2节中实例(1)的相关参数作为基本参数，基于本文分析模型采用控制变量法具体讨论这些因素对锚索拉力松弛率的影响特征。

##### 4.1 锚索直径

图9为锚索直径对锚索拉力松弛率的影响曲线。可见，锚索直径为9.5~17.8 mm时，锚索拉力松弛率随锚索直径线性增大，且随着时间的增长松弛率的变化速率也愈大，同时锚拉力达到稳定状态的时间也随之延长。

##### 4.2 锚孔间距与锚索弹性模量

图10、图11分别给出了锚孔间距、锚索弹性模量

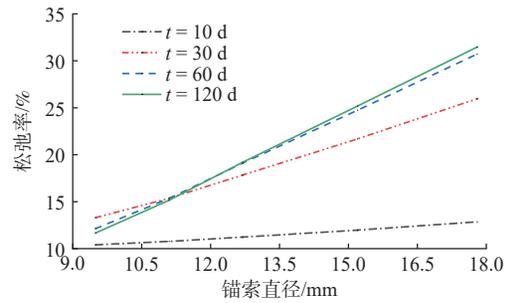


图 9 锚索拉力松弛率随锚索直径变化曲线

Fig. 9 Variation of anchor tension relaxation rate with the diameter

对锚索拉力松弛率的影响曲线。可见，随着锚孔间距(1~7 m)的增大，锚索的松弛率呈显著非线性减弱，锚拉力达到稳定状态的时间也随之缩短；而随着锚索弹性模量的增大(160~220 GPa)，锚索的松弛率呈线性增强，锚拉力达到稳定状态的时间也随之延长。

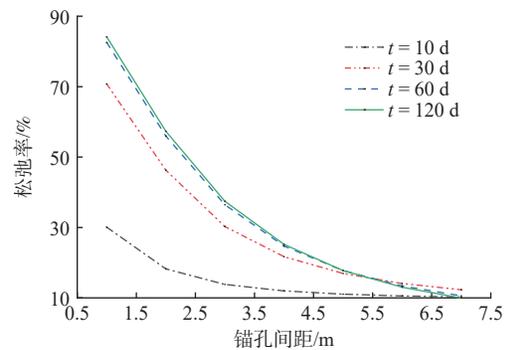


图 10 锚索拉力松弛率随锚孔间距变化曲线

Fig. 10 Variation of anchor tension relaxation rate with anchor hole spacing

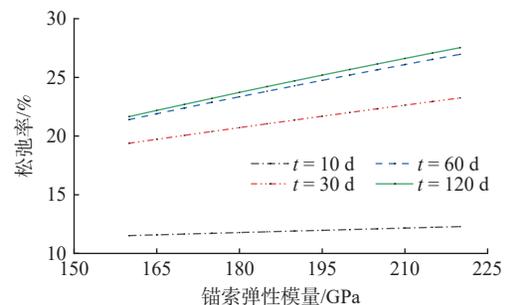


图 11 锚索拉力松弛率随锚索弹性模量变化曲线

Fig. 11 Variation of anchor tension relaxation rate with the elastic modulus

##### 4.3 锚固段地层的流变参数

图12(a)是锚固段地层的H体弹性模量对锚索拉力松弛率的影响曲线。可见，随着H体弹性模量由8~24 GPa增大，锚索拉力松弛率基本不变。

图12(b)是锚固段地层的K体弹性模量对锚索

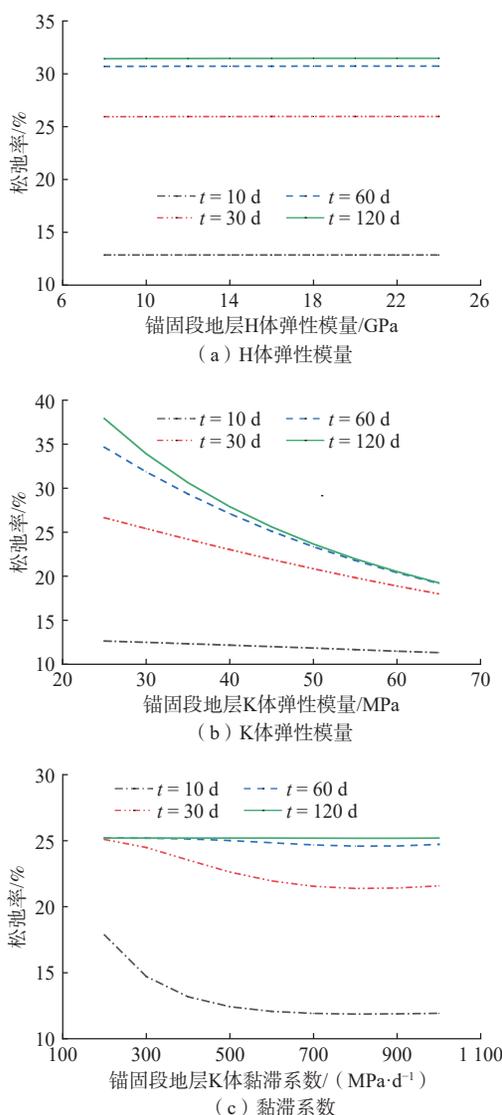


图 12 锚索拉力松弛率随锚固段地层流变参数变化曲线  
Fig. 12 Variation of anchor tension relaxation rate with rheological parameters of a stable layer

拉力松弛率的影响曲线。可见,随着 K 体弹性模量由 25 ~ 65 MPa 增大,锚索拉力松弛率整体呈非线性减弱,且随着时间的增长锚拉力松弛率变化速率愈大,同时锚拉力达到稳定状态的时间也愈短。

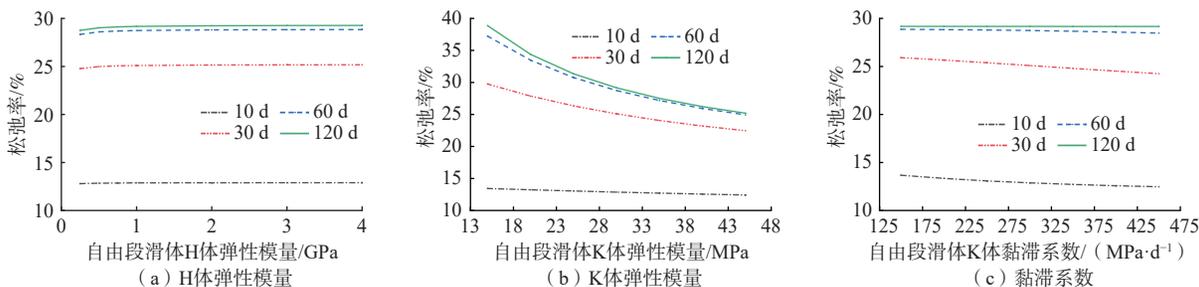


图 14 锚索拉力松弛率随自由段滑体流变参数变化曲线

Fig. 14 Variation of anchor tension relaxation rate with rheological parameters of potential slide mass

图 12(c)是锚固段地层的黏滞系数对锚索拉力松弛率的影响曲线。可见,随着黏滞系数由 150 ~ 950 MPa/d 增大,在初期阶段锚索拉力松弛率呈较显著的非线性减弱,经过较长历时后,锚索拉力松弛率不再受黏滞系数影响。

#### 4.4 坡面抑制构件的弹性模量

图 13 为坡面抑制构件的弹性模量对锚索拉力松弛率的影响曲线。可见,当坡面抑制构件的混凝土材料为 C20 ~ C40(弹性模量为 25.5 ~ 32.5 GPa)时,随着坡面抑制构件弹性模量的增大,其对锚索拉力松弛率几乎没有影响。

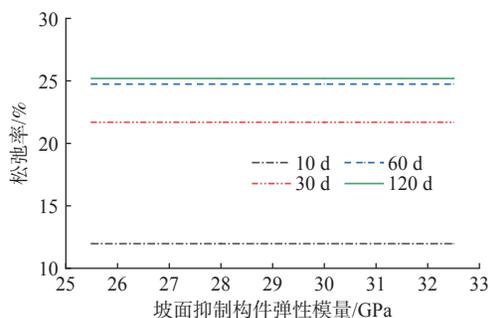


图 13 锚索拉力松弛率随坡面抑制件弹性模量变化曲线  
Fig. 13 Curve of cable tension relaxation rate vs elastic modulus of slope restraint

#### 4.5 自由段滑体的流变参数

这里以  $E_{a1}=1$  GPa 为例,以  $E_{h1}=1$  GPa、 $E_{k1}=30$  MPa 和  $\eta_1=300$  MPa/d 为自由段滑体流变参数的基本值进行讨论。

图 14 给出了锚索拉力松弛率随着自由段滑体流变参数的变化特征。可见,随着自由段滑体的 H 体弹性模量由 0.25 ~ 4.00 GPa 增大,锚索拉力松弛率几乎不产生变化;随着自由段滑体的 K 体弹性模量由 15 ~ 45 MPa 增大,锚索拉力松弛率呈非线性减弱,且随着时间的增长锚拉力松弛率变化速率愈大;随着自由段滑体的黏滞系数由 150 ~ 450 MPa/d 增大,锚索拉力松弛率呈非线性减弱,且随着时间的增长锚拉力松弛率

变化速率愈小,经过较长历时后,锚索松弛效应不再受黏滞系数影响。

## 5 结论

(1)对于加固边坡的预应力锚索的拉力松弛问题,根据锚固结构-边坡体系中锚固段地层、锚索、自由段滑体、坡面抑制构件之间的相互作用特征与锚固系统受力、变形基本机理,可采用2种不同的H体模拟锚索、坡面抑制构件,采用K体或K-H体模拟自由段滑体,采用K-H体模拟锚固段地层,建立“锚固段地层-锚索-自由段滑体-坡面抑制构件”式锚固系统的四体串联流变模型,以此推导出锚索拉力松弛方程,可以预测锚索拉力随时间的变化规律。

(2)本文方法所计算的锚索拉力随时间松弛特征表现为:初期迅速下降、中期下降速率渐缓和后期收敛于稳定状态,与室内模型试验和现场实测所呈现的规律基本一致;本文方法计算得到的锚索拉力初期(张拉锁定后15 d左右)松弛率占锚索拉力总松弛率的70%左右,锚索拉力松弛收敛值及松弛历时的最大计算误差分别约为11%、10%。

(3)锚索拉力松弛率随锚索的直径和弹性模量的增大呈线性增大,随锚孔间距、锚固段地层和自由段滑体的滞后弹性模量的增大呈非线性减弱;在初期阶段,锚索拉力松弛率随锚固段地层和自由段滑体的黏滞系数的增大呈非线性减弱,但随时间增长锚索松弛率逐渐不再受影响;锚固段地层和自由段滑体的瞬时弹性模量、坡面抑制构件的弹性模量均对锚索拉力松弛率影响很小。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 肖世国,周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 250 - 253. [ XIAO Shiguo, ZHOU Depei. Internal force calculating method of prestressed-cable beam-on-foundation for high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 250 - 253. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 付晓,冀文有,张建经,等. 锚索框架梁加固平面滑动型边坡地震动力响应[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1709 - 1719. [ FU Xiao, JI Wenyu, ZHANG Jianjing, et al. Seismic response for plane sliding of slope reinforced by anchor-chain-framed ground beams through shaking table test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1709 - 1719. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] YAN Minjia, XIA Yuanyou, LIU Tingting, et al. Limit analysis under seismic conditions of a slope reinforced with prestressed anchor cables[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 226 - 233.
- [ 4 ] YANG Guanghua, ZHONG Zhihui, ZHANG Yucheng, et al. Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(4): 411 - 420.
- [ 5 ] 雷军,肖世国. 考虑滑体中锚拉力扩散效应的锚固边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1724 - 1730. [ LEI Jun, XIAO Shiguo. Stability analysis method for anchored slopes considering stress dispersion effect in sliding mass due to anchor tensile forces[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1724 - 1730. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 曾宪明,陈肇元,王靖涛,等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2235 - 2242. [ ZENG Xianming, CHEN Zhaoyuan, WANG Jingtao, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2235 - 2242. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 付晓,张建经,周立荣. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462 - 470. [ FU Xiao, ZHANG Jianjing, ZHOU Lirong. Shaking table test of seismic response of slope reinforced by combination of anti-slide piles and multi-frame foundation beam with anchor cable[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 462 - 470. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 丁多文,白世伟,罗国焜. 预应力锚索加固岩体的应力损失分析[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 65 - 69. [ DING Duowen, BAI Shiwei, LUO Guoyu. Analysis on the load losses of prestressed rock cable bolts[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 65 - 69. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] SHI Keyou, WU Xiaoping, LIU Ze, et al. Coupled calculation model for anchoring force loss in a slope reinforced by a frame beam and anchor cables[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105245.
- [ 10 ] 陈安敏,顾金才,沈俊,等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 251 - 256. [ CHEN Anmin, GU Jincai, SHEN Jun, et al. Model testing research on the variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 251 – 256. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 杨栋, 王全成, 姜昭群. 高强大变形屈服锚索承载特性室内试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 79 – 86. [ YANG Dong, WANG Quancheng, JIANG Zhaoqun. Laboratory test on the mechanical behavior of high-strength and large-deformation yield anchor cable[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 79 – 86. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 李涛, 蔡海波, 刘波, 等. 膨胀土地层锚索预应力损失与流变耦合模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 147 – 155. [ LI Tao, CAI Haibo, LIU Bo, et al. Study on prestress loss and rheological coupling model of anchor cables in expansive soil layers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 147 – 155. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 李安润, 邓辉, 王红娟, 等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 106 – 113. [ LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 106 – 113. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 郭长宝, 王磊, 李任杰, 等. 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 54 – 64. [ GUO Changbao, WANG Lei, LI Renjie, et al. Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 54 – 64. (in Chinese with English abstract) ]
- [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): 1685 – 1691. [ CHEN Yuanjiang, YIN Jin, HU Yifu. Research on prestress quantitative loss law of soft rock slope anchor cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1685 – 1691. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 朱哈迓, 尚岳全, 陆锡铭, 等. 锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(4): 464 – 467. [ ZHU Hanya, SHANG Yuequan, LU Ximing, et al. Coupling analysis of long-term prestress loss and slope creep[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(4): 464 – 467. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 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 Qingbiao, 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 邓东平, 李亮. 锚索预应力长期损失与岩土体蠕变耦合模型研究 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(8): 65 – 71. [ DENG Dongping, LI Liang. Coupled model for the long-term pre-stress loss of anchor cable and geotechnical creep[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(8): 65 – 71. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 高大水, 曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(5): 653 – 656. [ GAO Dashui, ZENG Yong. Monitoring analysis on prestress state of anchor cable of high slope of the tgp permanent shiplocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 653 – 656. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 王军, 曹平, 林杭. 锚土界面位移特征及其蠕变损伤耦合效应研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(2): 289 – 295. [ WANG Jun, CAO Ping, LIN Hang. Characteristic of displacement on the interface between bolt and soil and damage transfer based on the coupling effect of creep and damage[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(2): 289 – 295. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 徐毅青, 邓绍玉, 葛琦. 锚索预应力初期与长期损失的预测模型研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1663 – 1669. [ XU Yiqing, DENG Shaoyu, GE Qi. Prediction models for short-term and long-term pre-stress loss of anchor cable[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1663 – 1669. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 冯忠居, 江冠, 赵瑞欣, 等. 基于多因素耦合效应的锚索预应力长期损失研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2215 – 2224. [ FENG Zhongju, JIANG Guan, ZHAO Ruixin, et al. Study on pre-stress long term loss of anchor cable considering coupled multiple factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2215 – 2224. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 周德培, 朱本珍, 毛坚强. 流变力学原理及其在岩土工程中的应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995: 29 – 31. [ ZHOU Depei, ZHU Benzhen, MAO Jianqiang. Rheological mechanics principle and its application in geotechnical engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995: 29 – 31. (in

- Chinese) ]
- [24] 陈拓,陈国庆,黄润秋,等.考虑高边坡强卸荷的锚索锚固力耦合变化模型[J].*岩土力学*,2018,39(11):4125-4132. [CHEN Tuo, CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, et al. A model of anchorage force loss of anchor cable during high slope strong unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4125-4132. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 王国富,李强,路林海,等.考虑锚索松弛特性的预应力损失计算模型研究[J].*地下空间与工程学报*,2017,13(6):1585-1591. [WANG Guofu, LI Qiang, LU Linhai, et al. A coupled model research of anchor prestress loss considering the relaxation characteristics of anchor[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(6): 1585-1591. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 肖世国,曹顺利,赵琳智.加固岩体的预应力锚索拉力松弛分析模型[J].*北京工业大学学报*,2020,46(8):940-947. [XIAO Shiguo, CAO Shunli, ZHAO Linzhi. Analysis model for relaxation effect of pulling force of prestressed anchor cables used in reinforcing rock mass[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(8): 940-947. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 董旭光,马子涵,李峥,等.锚固力损失与岩土体时效变形耦合模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(6):1093-1102. [DONG Xuguang, MA Zihan, LI Zheng, et al. Study on coupling model of anchorage force loss and time-dependent deformation of rock-soil mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(6): 1093-1102. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 李习平,阳军生,王立川,等.三联隧道凝灰岩流变试验及其本构模型研究[J].*铁道科学与工程学报*,2015,12(1):137-144. [LI Xiping, YANG Junsheng, WANG Lichuan, et al. Research on rheological tests and constitutive models of tuff in trigeminy tunnels[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(1): 137-144. (in Chinese with English abstract) ]

编辑:刘真真