

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0514

考虑高边坡强卸荷的锚索锚固力耦合变化模型

陈拓, 陈国庆, 黄润秋, 刘明

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在岩质高边坡锚固工程建设中, 锚索的锚固力能否长期维持决定着边坡锚固工程的成败。因此, 研究锚索锚固力的时效变化规律至关重要。以不同地区的高边坡锚固工程为例, 讨论了高边坡强卸荷作用与工程初期锚固力快速损失的对应关系, 并分析了在强卸荷作用影响下的高边坡锚索前期锚固力损失差异机制。通过案例总结出锚索锚固力变化模型的建立需要考虑高边坡强卸荷作用对锚固力损失的影响, 基于锚固力损失与高边坡岩体时效变形的耦合效应, 将引入转化时间 K 的西原流变模型与模拟锚索体并联, 建立了锚索锚固力的耦合变化模型, 推导出锚索锚固力长期变化的理论方程。结合锦屏水电站左岸高边坡 LE1915 排水洞与 L2J 连接洞 K0+126 m 下游附近的锚固力实测数据与已有理论模型对比, 证明了新模型应用于开挖强卸荷的高边坡工程中的准确性, 比以往的耦合模型具有更广泛的适用范围, 不仅为高边坡锚固工程锚索锚固力的控制与补偿时间提供了理论依据和技术手段, 而且对锚索锚固力的变化异常预警和高边坡工程的长期安全运营有重要意义。

关键词: 锚固力变化; 强卸荷作用; 模型转化时间; 耦合效应

中图分类号: TU 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-4125-08

A model of anchorage force loss of anchor cable during high slope strong unloading

CHEN Tuo, CHEN Guo-qing, HUANG Run-qiu, LIU Ming

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: During construction of anchorages for a high rock slope, whether the anchorage force can be maintained is the key to the slope anchorage engineering, and thus it is essential to understand time-dependent variation mechanisms of the anchoring force. Firstly, we discussed the high slope anchorage engineering projects which had significant sustained loss of anchoring prestress, analyzed the occurrence mechanism of such rapid variation of the anchoring prestress, and found that it is inevitable to consider the effect of high slope strong unloading on the initial anchoring prestress loss process during the calculation. Then, based on an improved visco-elastoplastic model, a new model was established by introducing conversion time K and a prestressed anchor cable in parallel. Finally, through the anchored cable's prestress monitoring data of LE1915 drainage hole and L2J connect hole 0 + 126 m on the left bank of Jinping I hydropower station, the newly developed model is verified to be suitable to be applied in high slope anchorage engineering, and also confirm its accuracy and broad application by comparing with the original model. Not only the newly developed model provides theoretical guidance and technical means for the control and compensation of anchor cable's anchorage force, but also has an important significance to the long-term safe operation and early warning of high slope anchoring project.

Keyword: anchoring loss; unloading effect; secular distortion; coupling effect

1 引言

岩质高边坡是水电、矿山和交通等重大工程建设中的主要地质环境和工程承载体。在中国西南、西北等一些地区工程建设中的高边坡岩体, 受区域

构造作用或峡谷深切等因素的影响, 具有开挖后强卸荷的特点^[1]。目前, 预应力锚索已经成为该类高边坡加固的主要措施, 锚索锚固力长期变化规律成为边坡锚固工程关注的焦点, 锚索锚固力的长期损失可能会导致锚固工程的失效。

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41572283, No. 41521002, No. 41130745); 四川省杰出青年基金 (No. 2015JQ0020)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572283, 41521002, 41130745) and the Outstanding Youth Foundation of Sichuan Province, China (2015JQ0020).

第一作者简介: 陈拓, 男, 1996年生, 本科生, 主要从事岩土工程高边坡支护及锚固技术相关研究。E-mail: ctuo916@foxmail.com

通讯作者: 陈国庆, 男, 1982年生, 教授, 主要从事岩土工程与地质灾害防治研究。E-mail: chgq1982@126.com

国内外诸多学者对锚索锚固力的长期变化规律进行了大量研究,张发明等^[2]建立了锚索锚固力长期变化的经验预测模型;朱本珍等^[3]研究了锚索长期承载力性能与荷载补偿技术;马长乐等^[4]研究了不同锚索预应力下围岩应力分布特征和支护效果。丁多文等^[5]得出了单根锚索加固中自由段岩体受到预应力作用下产生蠕变的理论;高大水等^[6]对三峡工程船闸锚索有效锚固力变化和锚索耐久性进行了研究;李端友等^[7]对锚固预应力变化特征、趋势及群锚效应等进行了综合分析。

由于岩体蠕变和锚索的回缩变形是一致的,实际边坡岩体的时效变形会影响锚索锚固力的损失程度,即锚固力损失与边坡时效变形之间存在耦合效应。但目前针对该领域的研究依然较少,朱晗迓^[8]、叶惠飞^[9]、王清标^[10]、龚寒梅^[11]等研究了岩土体时效变形与锚固力损失的耦合变化模型,但目前已提出的耦合模型未考虑高边坡开挖初期的强卸荷作用,大都以广义开尔文理论或伯格理论为基础,采用黄黏砂土或路基边坡等算例验证模型。虽然证明了耦合理论的正确性,但应用于开挖强卸荷作用显著高边坡锚固工程时,计算结果误差较大。

因此,本文从高边坡强卸荷因素对锚固力损失的影响机制出发,基于岩土体时效变形与锚固力损失之间的耦合关系,建立了锚索锚固力的耦合变化模型,并推导出岩质高边坡锚固工程锚索锚固力长期变化的计算方程。最后结合锦屏水电工程实例,通过与已有理论模型计算的结果对比,验证了新模型的准确性和优越性,表明新模型考虑强卸荷因素后,能更准确地拟合高边坡锚索锚固力的长期变化,具有更广泛的适用性,对高边坡锚固工程的设计施工和长期安全运营有着重要意义。

2 强卸荷作用对锚固力前期损失的影响及作用机制分析

大量研究表明,锚索张拉后锚固力呈3个阶段变化:快速损失阶段、波动阶段、稳定阶段^[2,12-13]。外荷载作用下,岩体的时效变形是锚固力快速损失的主要原因,即锚索体和边坡岩体变形协调的平衡过程。

统计典型锚固工程的锚固力快速损失阶段的周期时发现,对于同一锚固工程的锚索体来说,监测锚索的部位不同、类型不同、吨位不同,锚索基本上都存在类似的预应力损失特征;在锚索锚固力快速损失的阶段,虽然锚固力的损失程度存在差异范围,但持续周期基本相同^[6-7,12-15](如表1所示)。

表1 锚固力快速损失阶段周期统计^[6-7,12-15]

Table 1 Statistics of rapid loss of prestress

锚固工程	锚固力快速损失周期/d	锚固力损失占总损失百分比/%	坡体岩性
锦屏水电站左岸高边坡	约 35	33.7~67.5	砂板岩为主,风化卸荷强烈。
三峡船闸高边坡	约 30	15.0~35.0	花岗岩为主,岩块坚硬性脆,构造裂隙发育。
凤凰谷水电站边坡	约 15	4.0~9.7	钙质泥岩为主,夹有粉砂质泥岩、钙质粉细砂岩。
某高速公路高边坡	约 10	15.0	灰岩、泥灰岩、泥岩互层,岩体破碎。
金丽温高速公路边坡	1~2	3.2~6.1	熔结凝灰岩为主,节理裂隙发育。

另外,不同锚固工程初期锚固力快速损失程度和持续时间差异较大。相比其他地区的锚固工程,卸荷作用更强烈的西南地区高边坡锚固工程的锚固力快速损失阶段持续时间更长,该阶段锚固力损失量占总损失量的比重更大(如图1所示)。

因此,分析工程初期不同高边坡锚索锚固力快速损失机制,需从高边坡开挖强卸荷因素和锚固力损失对应关系进行分析:

(1) 高边坡开挖往往伴随着强烈的卸荷作用,区域地应力场和坡体岩性共同决定开挖后卸荷作用的强弱。在我国西南和西北一些水利水电工程高边坡受构造因素或峡谷深切的影响,初始地应力较高,开挖后岩体内积存的弹性应变能快速释放,在坡表出现强烈的卸荷现象,产生一系列新的结构面或改造了原有结构面,并使坡表结构松弛。

(2) 强卸荷作用决定锚索锚固力快速损失阶段周期,开挖卸荷作用越强,该阶段持续时间越长。边坡开挖后锚索锚固力的施加与边坡卸荷松弛同步进行。强卸荷作用使坡体节理裂隙不断扩张,同时高吨位的锚固力挤压节理裂隙,使锚索体同步回缩变形、锚固力快速损失。当坡体卸荷作用减弱、岩体裂隙基本闭合时,锚索锚固力损失速率才减缓。

(3) 均质松散的岩质或土质边坡体锚固力快速损失阶段不明显或持续时间极短。由于该类边坡体内积存的弹性应变能较低,开挖后卸荷作用较弱,对边坡体的坡体结构影响较小,锚索锚固力快速损失的周期较短。

通过以上3点总结发现,高边坡的开挖卸荷作用越强,前期锚索锚固力快速损失的周期越长,该阶段锚固力损失占总损失的比重越大。因此,研究高边坡锚索锚固力长期损失规律,建立锚索锚固力的耦合变化模型时,不能忽略边坡开挖强卸荷因素

对锚固力损失的影响。

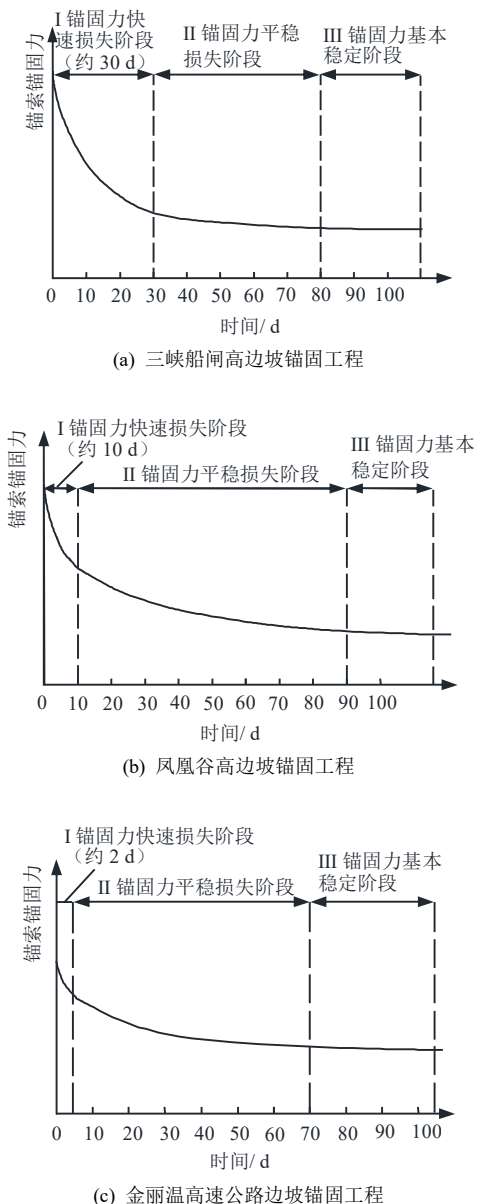


图 1 不同工程的锚索锚固力的典型变化趋势

Fig.1 Typical change trend of anchoring force of anchor cable for different slopes

3 锚固力损失和岩体时效变形耦合变化模型

3.1 锚固力耦合变化原理

预应力锚索支护使锚索和岩体形成一个整体。根据锚索的工作原理，锚索回缩变形与被加固岩土体的变形一致，即岩体发生变形，锚索锚固力必然产生相应的变化，二者的变化过程具有耦合效应。

前人在研究锚固力的耦合变化模型时，大多以广义开尔文体或伯格斯特体模拟岩土体，此类模型并未考虑强卸荷作用下高边坡岩体的时效变形特征，需使用更全面合理的岩体流变模型。

3.2 选择西原流变模型模拟岩土体

选择合适的流变模型，对岩石工程的长期稳定数值计算十分重要^[16]。陶波等^[17]通过三轴压缩蠕变试验得出西原模型比伯格斯特模型能更全面地反映岩石的时效变形特征。另外，王如宾等^[18]以西原模型模拟锦屏左岸坝肩高边坡岩体的时效变形特性，模型计算结果与试验数据趋势一致，结果较相符，西原模型结构如图 2 所示。

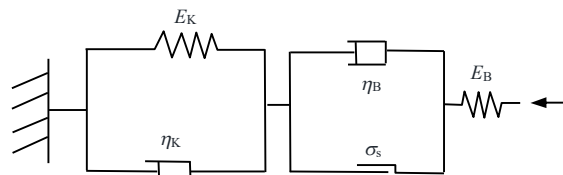


图 2 西原模型示意图

Fig.2 Elastic and visco-elastoplastic model

西原体由一个胡克体，一个开尔文体和一个理想黏塑性体串联而成。如下式所示：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\eta_K}{E_B} \sigma' + \left(1 + \frac{E_K}{E_B}\right) \sigma &= E_K \varepsilon + \eta_K \varepsilon', \quad \sigma < \sigma_s \\ \sigma'' + \left(\frac{E_K}{\eta_K} + \frac{E_K}{\eta_B} + \frac{E_B}{\eta_K}\right) \sigma' + \frac{E_B E_K}{\eta_K \eta_B} (\sigma - \sigma_s) &= \\ E_K \varepsilon'' + \frac{E_K E_B}{\eta_K}, \quad \sigma > \sigma_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： E_B 为瞬时弹性模量； E_K 为黏弹性模量； η_K 、 η_B 为黏滞系数； σ_s 为长期强度； σ' 、 σ'' 分别为应力的一阶导数和二阶导数； ε' 、 ε'' 分别为应变量的一阶导数和二阶导数。模型方程具有可根据应力水平进行转化的特性。当应力 σ 小于长期强度 σ_s 时，表现出稳定蠕变的特性，可用于模拟硬岩；当应力 σ 大于长期强度 σ_s 时，西原模型的性能类似伯格斯特方程，理想塑性体的性质充分体现出来，模型转化为不稳定蠕变的性质，可用于模拟软岩。

故选择可进行转化的西原模型模拟高边坡岩体时效变形特征更具有合理性。

3.3 引入模型转化时间 K

在实际工程中，比较应力 σ 和长期强度 σ_s 的相对大小，即确定西原模型转换条件十分困难。

因此，引入模型的转化时间 K ，即锚固力快速损失阶段的周期。把耦合变化模型的转化条件改为时间 t 和模型转化时间 K 的对应关系，即 $t < K$ 时，表示在岩体受强卸荷作用影响，岩体裂隙受锚固力压缩变形，表现出软岩特性，西原模型使用 $\sigma > \sigma_s$ 时的公式；当 $t > K$ 时，西原模型发生转化，岩体坡表

应力释放基本完成，岩体裂隙闭合，表现出硬岩特征，使用 $\sigma < \sigma_s$ 时的公式，其公式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'' + \left(\frac{E_K}{\eta_K} + \frac{E_K}{\eta_B} + \frac{E_B}{\eta_K} \right) \sigma' + \frac{E_B E_K}{\eta_K \eta_B} (\sigma - \sigma_s) = \\ E_K \varepsilon'' + \frac{E_K E_B}{E_K} \varepsilon', \quad t < K \\ \frac{\eta_K}{E_B} \sigma' + \left(1 + \frac{E_K}{E_B} \right) \sigma = E_K \varepsilon + \eta_K \varepsilon', \quad t > K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于工程前期锚固力快速损失阶段的周期在卸荷条件相似的区域基本相同， K 值可以通过现场锚索试验的方式，直接得出该区域的锚固力快速损失阶段的周期。也可以参考其他锚固工程的监测数据，通过工程地质的方法，类比出锚固力快速损失阶段的周期。

3.4 建立锚固力耦合变化模型

根据边坡时效变形和锚索锚固力损失之间的耦合变化关系，采用改进的西原流变模型模拟边坡体，弹簧模拟锚索，建立锚索锚固力耦合变化模型（如图 3 所示）。其中， E_M 为锚索体弹性模量。

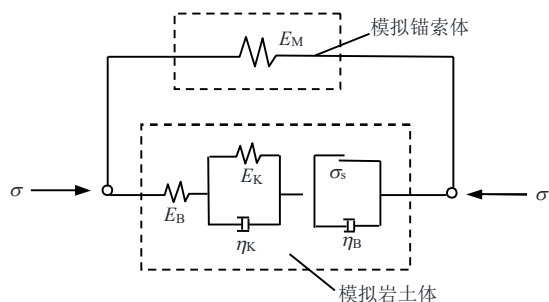


图 3 耦合变化模型示意图
Fig.3 Schematic of coupling model

假设锚索体自由段内的预应力均匀分布于岩体上，且锚索体与锚固范围内岩体形成整体受力，则图中模拟锚索体的弹性模量 E_M 可由下式获得：

$$E_M = E_0 \times \frac{A_s}{A_t} + E_B \quad (3)$$

式中： E_0 为锚索实际弹模； A_s 为锚索体面积； A_t 为锚固范围内岩体面积。

4 耦合作用下锚索锚固力长期变化的理论公式推导

根据岩体流变模型和弹簧的并联关系，可得耦合作用下模拟锚索体和岩体的应力-应变关系如下为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_Y = \varepsilon_M \\ \sigma = \sigma_Y + \sigma_M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： σ 为耦合变化模型总应力； ε 为耦合变化模型整体应变； σ_Y 、 ε_Y 为岩体应力应变变量； σ_M 、 ε_M 分别为锚索体应力应变变量。

联立方程组（4）得到：

$$\sigma_Y = \sigma - \sigma_M = \sigma - \varepsilon_M E_M = \sigma - \varepsilon E_M \quad (5)$$

将式(5)代入改变转化条件的西原模型方程(2)中，获得耦合变化模型的本构方程：

$$\left. \begin{aligned} \sigma + \frac{\eta_K}{E_K + E_B} \sigma' = \frac{E_B E_K + E_B E_M + E_S E_K}{E_K + E_B} \varepsilon + \\ \frac{E_B + E_M}{E_K + E_B} \eta_K \varepsilon', \quad t < K \\ \sigma'' - E_M \varepsilon'' + \left(\frac{E_B}{\eta_K} + \frac{E_B}{\eta_B} + \frac{E_K}{\eta_K} \right) (\sigma' - E_M \varepsilon') + \\ \frac{E_K E_B}{\eta_K \eta_B} (\sigma - E_M \varepsilon - \sigma_s) = E_B \varepsilon'' + \frac{E_K + E_B}{\eta_K} \varepsilon', \quad t > K \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

假设 ε_0 为锚索体初始应变变量，当 $\varepsilon = \text{const} = \varepsilon_0$ 时，耦合变化模型的本构方程式（6）可化为模型的应力松弛方程：

$$\left. \begin{aligned} C \sigma'' + D \sigma' + \sigma = E, \quad t < K \\ \sigma' + A \sigma = B \varepsilon_0, \quad t > K \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} A = \frac{E_K + E_B}{\eta_K}, \quad B = \frac{E_B E_K + E_B E_M + E_M E_K}{\eta_K} \\ C = \frac{\eta_K \eta_B}{E_K E_B}, \quad D = \frac{E_B \eta_B + E_B \eta_K + E_K \eta_B}{E_K E_B} \\ E = E_M \varepsilon_0 + \sigma_s \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

解微分方程（7）可得耦合变化模型的应力松弛方程：

$$\left. \begin{aligned} \sigma = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + E, \quad t < K \\ \sigma = N e^{-At} + \frac{B}{A} \varepsilon_0, \quad t > K \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{式中：} r_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4C}}{2C}, \quad r_2 = \frac{-D - \sqrt{D^2 - 4C}}{2C}.$$

N_1 、 C_1 、 C_2 为积分常数，由初始条件决定。

考虑初始条件，当锚索体初始应变加在被锚固体系统上的瞬间（ $t=0$ ）时，岩土体弹性变形，初始应变量为 ε_0 。且当 $t=0$ 时， $\sigma_0 = \varepsilon_0 (E_B + E_M)$ ，

$$\sigma' = - \left(\frac{E_B}{\eta_K} + \frac{E_B}{\eta_B} \right) \sigma_0$$

代入式 (9) 可得

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{E_B^2 \varepsilon_0}{E_B + E_K}, C_1 = \frac{\left(\frac{E_B}{\eta_K} + \frac{E_B}{\eta_B} \right) \sigma_0 + (\sigma_0) r_2}{(r_2 - r_1)} \\ C_2 &= \frac{\left(\frac{E_B}{\eta_K} + \frac{E_B}{\eta_B} \right) \sigma_0 + (\sigma_0) r_1}{(r_1 - r_2)} \end{aligned} \right\} (10)$$

公式 (8) 是基于锚索锚固力损失与边坡体时效变形耦合关系, 在锚索初始应变量为 ε_0 的条件下, 坡体介质材料上均布应力的长期变化计算方程。锚索锚固力的长期变化等于作用于坡体上的总应力变化之和, 即

$$F = \sigma \times A_t \quad (11)$$

式中: F 为锚索锚固力计算值; 为坡体介质材料上均布应力。

5 工程实例验证

5.1 工程概况

在锦屏一级水电站工程运行期间, 由于左岸边坡岩体变形具有明显的时间效应, 其锚固工程的长期稳定是工程正常运行过程中重点关心的问题。因此, 研究锚索锚固力的损失规律以及长期监测锦屏水电站锚固工程的锚固力变化, 对于锦屏一级水电站长期运营安全具有重要意义。该区域工程地质平面图及剖面图如图 4、5 所示。

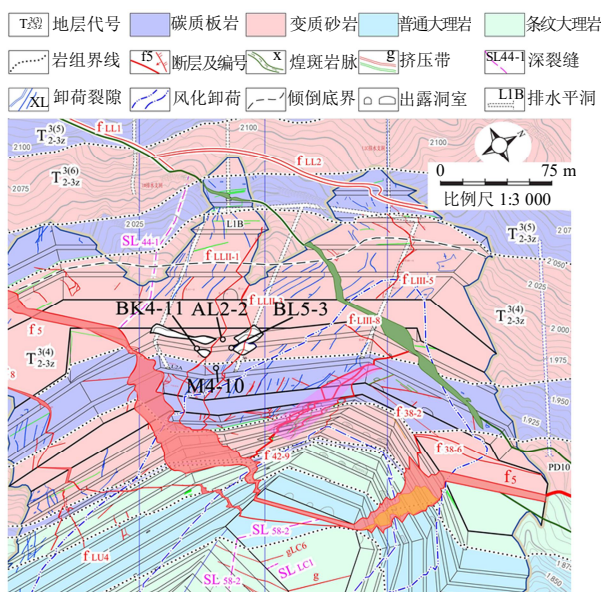


图 4 锦屏一级水电站左岸边坡工程地质平面图
Fig.4 Engineering geology plan for left bank slope of Jinping I hydropower station

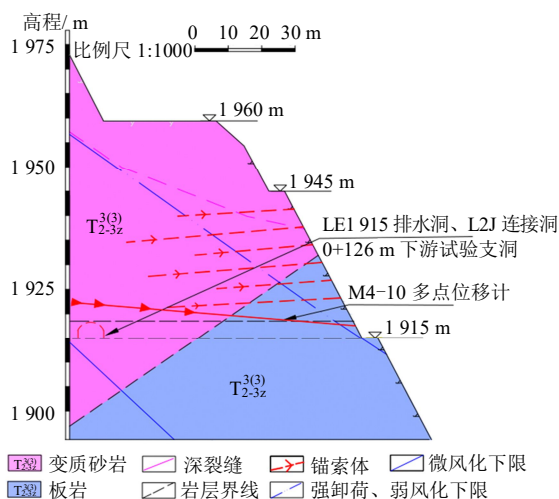


图 5 左岸边坡工程地质剖面图
Fig.5 Engineering geological profile of left bank slope

5.2 结合实测数据和将新模型和已有理论公式进行对比验证

该区域锚索设计吨位为 300 t, 间距设置为 5 m × 5 m, 长度为 60、80 m 交替, 矩形布置, 锚索方位角为北偏西 40°, 与水平方向的夹角为 5°, 锚索的弹性模量为 2.1 × 10⁵ MPa, 采用 Φ15.24 mm、抗拉强度为 1 860 MPa 的无黏结钢绞线, 钻孔直径为 165 mm。M4-10 为 4 点式多点位移计, 安装深度穿过主要断层, 能有效监测边坡块体变形情况。

将该区域内相邻的 BL5-3、BK4-11 和 AL2-2 这 3 个锚固力监测数据和 M4-10 多点位移计的监测数据进行对比, 如图 6 所示。

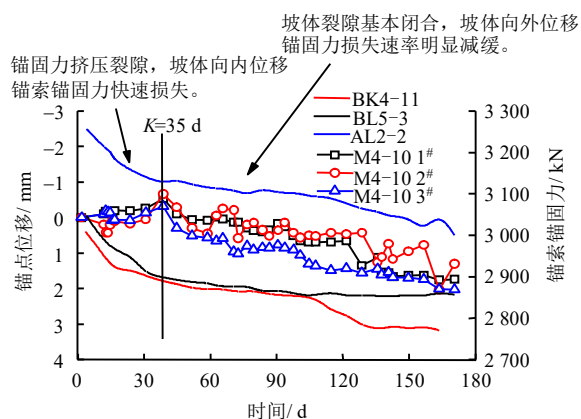


图 6 锚索锚固力损失和坡体变形的对比分析
Fig.6 Corresponding relations between creep anchorage force and slope

多点位移计监测数据显示, 不同深度的岩体变形程度不同, 但整体变形趋势相同, 并且坡体位移方向和锚索锚固力损失速率同时在 K 时刻附近改

变,符合锚索锚固力损失和坡体变形的耦合关系。

坡体位移和锚索锚固力的监测曲线特征共同反映出该区域强卸荷作用持续时长,得到耦合变化模型的转化时间 $K = 35$ d。

选取该区域锦屏一级水电站左岸边坡 LE1915 排水洞、L2J 连接洞 0+126 m 下游试验支洞岩体获取模型参数,如图 5 所示。该支洞内的岩性为 3(4) 中厚层砂岩夹板岩,镶嵌-块裂结构,主要发育第 1、4 组裂隙,微风化,工程岩体分级 IV_2 ,其新鲜岩体的物理力学如表 2 所示。

表 2 新鲜岩体的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of fresh rock mass

重度 (kN/m^3)	泊松比	弹性模量 (GPa)	黏聚力 (MPa)	摩擦 系数	软化 系数	声波速度 (m/s)
27	0.26	23	0.4	0.6	0.72	4 159

在支洞内采用现场刚性板中心孔法进行岩体压缩蠕变试验,得到加卸载下的实测位移-时间曲线特征,采用参数反演、曲线拟合的方法,对试点部位岩体的流变模型进行识别,确定岩体的长期模量,得到耦合变化模型的参数如表 3 所示。

表 3 锚固力耦合变化模型参数
Table 3 Parameters of coupling effect model

E_B (MPa)	E_K (MPa)	η_K (MPa/d)	η_B (MPa/d)	E_M (MPa)	A_t (mm^2)	ϵ_0
441	4 521	523 464	5 507 304	451.94	34 440	1×10^{-4}

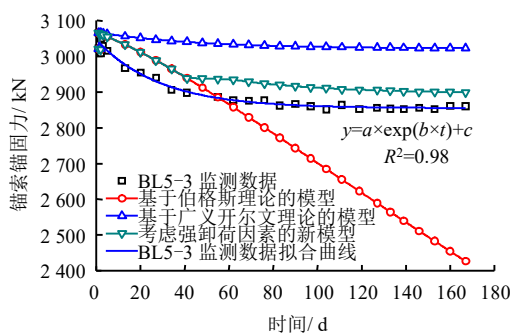
基于该区域 BL5-3、BK4-11 和 AL2-2 这 3 个锚固力监测点的监测数据,分别使用考虑强卸荷因素的新模型、已有的基于广义开尔文理论、伯格斯理论得到的模型公式进行计算分析,结果如图 7 所示。

由图 7 不同监测数据的对比分析可知,受到区域地应力和岩性影响,该地区卸荷现象明显,锚索锚固力快速损失阶段周期较长,锚固力在前期大量损失。基于广义开尔文理论和伯格斯理论的模型,只考虑边坡岩体和锚索参数,未考虑卸荷因素,计算结果准确性较低;与已有的理论模型相比,新模型的建立考虑边坡卸荷因素,通过引入模型转化时间 K ,模拟出强卸荷作用下的锚索锚固力损失特征,计算结果较准确,验证了新模型的准确性和优越性。

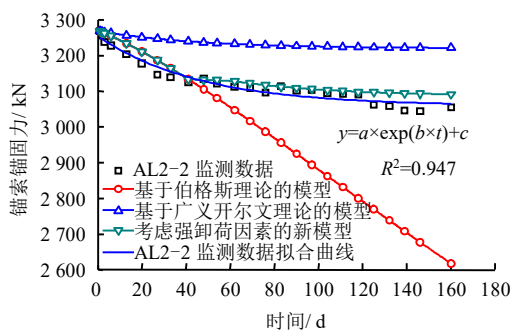
同时,新模型的计算结果也存在一定的误差。由于模型参数的取值是在常应力作用下得到的,而边坡工程开挖后,坡体应力不断调整,介质流变参

数也相应有所变化,使计算结果与实际的锚固力下降速率出现差异。

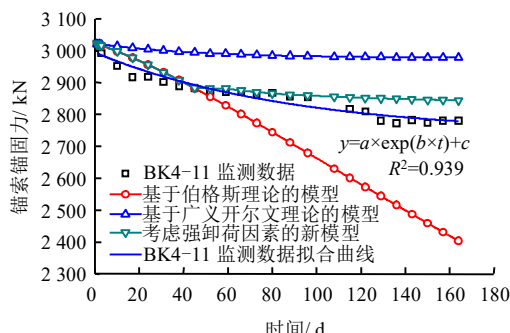
另外,前期锚索的施工质量和张拉锁定过程也会造成锚固力实际损失值增加。工程后期除降雨、温度的影响外,锦屏边坡工程分期分部位施工,周围施工爆破的冲击荷载和后续锚索的张拉的群锚效应,会使实际锚索的锚固力损失。



(a) BL5-3 锚固力监测点



(b) AL2-2 锚固力监测点



(c) BK4-11 锚固力监测点

图 7 锚固力实测数据与理论模型计算曲线比较图
Fig.7 Comparison between anchorage force monitored and calculated curves

6 结论

(1) 工程前期边坡卸荷作用对加速锚索锚固力损失的影响不可忽略。新模型引入转化时间为 K ,可模拟强卸荷作用下的锚索锚固力损失特征, K 值越大,模型计算的锚索锚固力在前期损失越多,最终稳定时越低。该参数由区域地应力和岩性特征等

卸荷条件决定, 在卸荷条件相似的区域基本不变。

(2) 通过工程实例, 证明了新模型适用于强卸荷作用的高边坡工程。但当遇到卸荷作用可忽略不计的边坡工程时, 模型参数 $K=0$, 即等同于基于广义开尔文理论的模型, 前人已验证其在土质和路基边坡工程的适用性。因此, 考虑强卸荷因素建立的锚固力耦合变化模型具有优越性和更广泛的适用性。

(3) 通过考虑强卸荷因素的锚索锚固力耦合变化模型推导出的锚固力长期变化方程, 不仅可对锚索锚固力时效损失进行预测, 判断锚索锚固力变化是否异常。还为高边坡锚固工程设计施工以及锚固力损失的补偿和控制技术提供了理论指导和技术手段, 对高边坡锚固工程的安全长期运营管理有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544.
HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.
- [2] 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
- [3] 朱本珍, 王建松, 郑静, 等. 锚索长期工作性能检测与荷载补偿技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 683—687.
ZHU Ben-zhen, WANG Jian-song, ZHENG Jing, et al. Study of anchor cable long-term performance testing and load compensation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 683—687.
- [4] 马长乐, 吴拥政, 何杰. 预应力损失对高预应力全锚索支护技术的影响[J]. 煤矿开采, 2012, 17(2): 61—72.
MA Chang-le, WU Yong-zheng, HE Jie. Influence of prestress lose on anchored cable supporting with high pre-stress[J]. **Coal Mining Technology**, 2012, 17(2): 61—72.
- [5] 丁多文, 白世伟, 罗国煜. 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 Duo-wen, BAI Shi-wei, LUO Guo-yu. Analysis of load losses of prestressed rock cable bolts[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1995, 3(1): 65—69.
- [6] 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, 2007, 20(5): 653—656.
GAO Da-shui, ZENG Yong. Monitoring analysis of prestress state of anchor cable of high slope of the TGP permanent shiplocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 20(5): 653—656.
- [7] 李端友, 汤平, 李亦明. 三峡永久船闸一期工程岩锚预应力监测[J]. 长江科学院院报, 2009, 17(1): 39—41.
LI Duan-you, TANG Ping, LI Yi-ming. Safety monitoring of rock anchor prestress during 1st stage construction of TGPs permanent lock[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, 17(1): 39—41.
- [8] 朱晗迓, 尚岳全, 陆锡铭, 等. 锚索预应力长期损失与坡体时效变形耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 464—467.
ZHU Han-ya, SHANG Yue-quan, LU Xi-ming, et al. Coupling analysis of long-term prestress loss and slope creep[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(4): 464—467.
- [9] 叶惠飞. 锚索预应力损失变化规律分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
YE Hui-fei. Study of the anchored cable's time-dependent prestress variation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [10] 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, (8): 18—22.
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, (8): 18—22.
- [11] 龚寒梅. 岩石力学损伤和流变本构模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
GONG Han-mei. A study on prestress loss of group anchor[D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2013.
- [12] 张永安, 李峰, 蒋欧. 泥岩高边坡锚索预应力变化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 26(增刊 2): 1879—1892.
ZHANG Yong-gan, LI Feng, JIANG Ou. Analysis of prestress variation of cable in mudstone high slope reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics**

- and Engineering**, 26(Supp.2): 1879—1892.
- [13] 龚成. 锦屏一级水电站左岸边坡岩体流变力学特性及施工期变形稳定性分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
GONG Cheng. Analysis on the creep mechanical properties of rock mass and the stability of slope at left spandrel groove of Jinping first stage hydropower station in construction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [14] 李晶. 雅砻江锦屏一级水电站左岸坝肩边坡支护效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
LI Jing. The effect of reinforcement study on the left abutment for Jinping 1st Hydropower Station of the Yalong river[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [15] 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): 3965—3970.
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): 3965—3970.
- [16] 韦立德, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 岩石黏弹塑性模型的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 583—586.
WEI Li-de, XU Wei-ya, ZHU Zhen-de, et al. Study on constitutive model of viscoelasto-plastic rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 583—586.
- [17] 陶波, 伍法权, 郭改梅, 等. 西原模型对岩石流变特性的适应性及其参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 3165—3171.
TAO Bo, WU Fa-quan, GUO Gai-mei, et al. Flexibility of viscoelasto-plastic Nishihara model to rheological characteristics of rock and solution of rheological parameter[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 3165—3171.
- [18] 王如宾, 徐卫亚, 孟永东, 等. 锦屏一级水电站左岸坝肩高边坡长期稳定性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33: 3105—3113.
WANG Ru-bin, XU Wei-ya, MENG Yong-dong, et al. Numerical analysis of long-term stability of left bank abutment high slope at Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33: 3105—3113.
- [19] 张俾元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [20] 夏雄. 桩锚结构设计理论及安全性评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
XIA Xiong. The designing theory and safety analysis of pile-anchor system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [21] 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 An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Model testing research on variation of tension force of anchor cable with time in reinforcement of soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 251—256.
- [22] 谢璨, 李树忱, 李术才, 等. 渗透作用下土体蠕变与锚索锚固力损失特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2313—2321.
XIE Can, LI Shu-chen, LI Shu-cai, et al. Study of anchorage force loss of anchor cable under seepage flow and soil creep[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2313—2321.
- [23] 邓建, 肖明, 谢冰冰. 预应力锚索受力特性与初始张拉吨位优化分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2359—2365.
DENG Jian, XIAO Ming, XIE Bing-bing. Analysis of mechanical characteristic and optimization of initial tensile tonnage of prestressed anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2359—2365.