

锚索预应力变化影响因素及模型研究

李英勇^{1, 2}, 王梦恕¹, 张顶立¹, 张思峰³

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 山东省交通厅公路局, 山东 济南 250002; 3. 山东建筑大学, 山东 济南 250101)

摘要: 岩土体在预应力锚索作用下的压缩变形、锚索自身松弛、周围环境条件的变化等都能引起预应力的变动或损失, 这种变化对加固效果和岩土体的稳定性具有十分重要的影响。在综合分析锚索预应力阶段变化特点的基础上, 将影响锚索预应力变化的因素归结为可补救、长期作用和周期波动三类, 并分别进行了定量和定性分析。根据岩土材料蠕变特性和金属材料松弛特性, 采用四参数组合模型反映其相互作用影响。通过实际工程现场长期监测数据, 验证了模型的合理性, 并建立了考虑波动因素的预应力长期变化峰值预测公式, 以用于分析预应力锚固工程的长期稳定性。

关键词: 边坡工程; 锚索; 预应力变化; 影响因素; 预测模型

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 3140 - 07

STUDY ON INFLUENTIAL FACTORS AND MODEL FOR VARIATION OF ANCHOR CABLE PRESTRESS

LI Yingyong^{1, 2}, WANG Mengshu¹, ZHANG Dingli¹, ZHANG Sifeng³

(1. *Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*; 2. *Highway Bureau of Communication Department of Shandong Province, Jinan, Shandong 250002, China*; 3. *Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China*)

Abstract: Although the anchor cable is widely used in the geotechnical projects, the prestress variation rules of the anchor cables are still not clear, especially the prestress loss when being locked and lasting of prestress variation of cable in cracked rock are interesting issues. Based on the in-situ monitoring results and analysis of a slope reinforcing case, the prestress loss under being locked, and short-term as well as long-term prestress variation rules are studied. The influence of multi-factor on the anchor cable prestress state is discussed. These factors include the relaxation of the anchor cable, the compression of surrounding rock, the environment change of surrounding rock, and so on. The short-term and the long-term prestress losses are both nonlinear, which can be divided into three stages: remedial loss, long-term loss and periodic variation. The former factors include the friction between anchor cables and surrounding rock, deformation of anchorage system, uneven stress distribution, excavation of the next step slope, the impact action, the effect of group cables, most of which found in the construction term can be retrieved by tensioning again. The long-term prestress loss can be caused by the compression of surrounding rock and relaxation of the anchor cable, which shows the notable interaction effect. Influential factors of the periodic variation include rainfall and temperature change and the variation amplitude is not small and it can return to the former condition. As for the long-term prestress loss of the anchor cable that is triggered by the creep of the materials, a new mechanical model is established and the forecast equation is derived, which presents the interaction of the compression and relaxation. By means of the mechanical parameters and monitoring data of the

收稿日期: 2008 - 02 - 19; **修回日期:** 2008 - 03 - 16

作者简介: 李英勇(1970 -), 男, 1992 年毕业于东南大学路桥专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程及技术推广方面的研究工作。E-mail: leeyyong@163.com

practical engineering, the stability of the prestress anchorage engineering can be analyzed.

Key words: slope engineering; anchor cable; prestress variation; influential factors; forecast model

1 引言

预应力锚固技术由于可以充分发挥岩土自身能量和自稳能力, 大大减轻加固结构体自重和节约工程材料, 提高施工过程的安全性和时效性, 从而在岩土工程的各个领域得到了广泛应用。预应力锚索通过对被加固岩土体施加作用力, 提高岩土体的稳定性, 其加固效果的技术关键在于预应力参数及后期损失程度。锚索预应力受岩土体蠕变、钢绞线松弛、降雨、温度及施工质量的影响往往会发生一定的损失和变化。损失程度的大小不仅影响锚索的加固效果和耐久性, 同时也关系到工程的稳定性和安全性。目前, 对保持设计预期预应力的常用办法是进行一定程度的超张拉, 利用超张拉值弥补预应力损失。如果对损失值估计过低, 则超张拉不足, 达不到理想的锚固效果; 反之, 如果对损失值估计过高, 将在后期使用过程中严重影响锚索的耐久性, 造成索体破坏, 并且使岩体表面承受过高的持续压应力, 对工程锚固效果产生不利影响。因此, 合理确定锚索预应力的损失和变化对锚固效果评价和指导工程设计具有重要意义。国内外诸多学者^[1~7]对影响锚索预应力损失的因素进行了研究, 总结出一些锚索预应力的变化规律^[8, 9], 并提出了相应的计算公式^[10, 11]。但以往的研究中没有研究波动变化因素的影响, 没有反映预应力损失与岩土体蠕变的相互作用。

从一高速公路边坡预应力锚索监测资料出发, 本文对影响锚索预应力变化的因素进行了较为全面的分析和评价, 建立了长期预应力变化峰值的预测模型, 可为预应力锚固工程的预警和后期加固处理提供指导。

2 锚索预应力变化规律

锚索预应力值的变化规律, 因锚固介质不同而存在差异, 根据锚索测力计的长期观测结果, 可总结出锚索预应力的变化规律基本遵循一个共同的变化趋势。一般来说, 锚索预应力变化发展一般均包

括预应力骤降反弹、紊乱变化和平缓过渡 3 个阶段 (见图 1)。

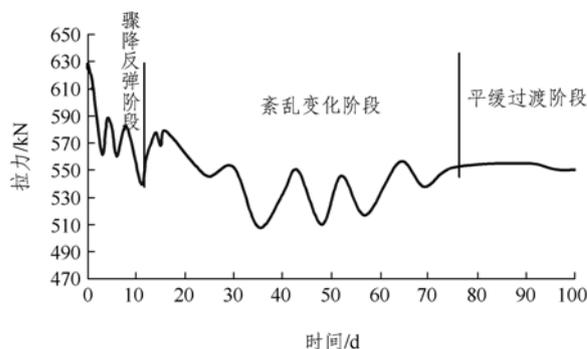


图 1 典型锚索预应力变化曲线图

Fig.1 Typical curve of anchor cable prestress variation

2.1 预应力骤降反弹阶段

由监测资料可知, 锚索张拉完成后预应力值呈迅速减小趋势, 一般张拉锁定 1~2 周后开始反弹, 该阶段历时较短。其原因主要是锚具受力变形调整、锚索间应力调整及岩土体压密等。

2.2 预应力紊乱变化阶段

锚索在施工爆破、下部坡体开挖、相邻锚索张拉、温度等因素的共同作用下, 预应力时增时减, 范围随影响因素的剧烈程度而变化。紊乱变化阶段持续时间较长。

2.3 预应力平缓过渡阶段

在经历了一个或几个紊乱变化阶段后, 锚索预应力值便趋于平缓变化。在该阶段中, 软弱岩体的流变现象比较显著, 使预应力变化略呈减小趋势, 同时岩土体内部处于应力调整过程。锚索预应力的变化过程, 也是加固效应的变化过程, 最终将处于主动加固和被动加固的平衡中。

根据监测分析结果, 为便于锚索预应力变化的模拟和模型的建立, 将预应力损失分为可补救的预应力损失、长期持续的预应力变化和波动预应力变化 3 个方面分别探讨。

3 可补救的预应力损失

3.1 锚索同孔壁的摩擦损失

设钢绞线与岩土体内壁相贴，并取微段钢绞线 dl (如图 2 所示)为研究对象。 N 为预张作用力， dF_1 为摩擦阻力损失， $d\theta$ 为微段钢绞线处与孔壁的偏角。若钢绞线与孔壁间的摩擦因数为 μ ，由于 $d\theta \approx 0$ ，则 $\cos(d\theta/2) = 1$ ， $\sin(d\theta/2) = d\theta/2$ ，由此可得 $dF_1 = -dN \approx \mu Nd\theta$ 。

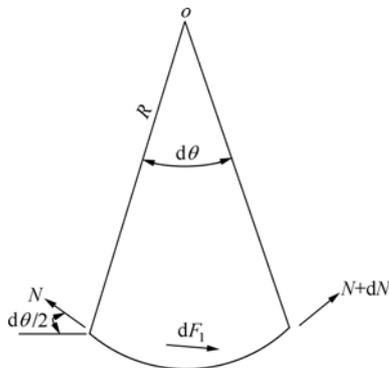


图 2 预应力摩擦损失图

Fig.2 Schematic diagram of prestress friction loss

小浪底工程实测资料^[12]表明，采用无黏结预应力筋时，预应力钢筋在充满油质的聚乙烯套管中的摩擦因数为 0.032，而采用有黏结预应力筋时，孔道的摩擦因数为 0.35。我国规范规定钻孔偏斜率不大于 1/30，而锚索孔的实际轴线为一根不规则的空间曲线^[13]。若采用摩擦因数为 0.1，锚索自由段长 $L = 20$ m 时，假设每 1 m 钻孔进尺都存在 1% 倾斜，当张拉力为 850 kN，则引起的摩擦阻力为 $F = \int dF_1 L = L \int_0^{0.02} \mu Nd\theta = 34$ kN，占张拉力的 4%，可见孔道摩擦阻力造成的预应力损失是不可忽略的。

3.2 锚具变形、钢索回缩引起的预应力损失

当张拉结束并进行锚固时，锚具将受到巨大的压力，使锚具夹片回缩，锚具、夹片引起的预应力损失可用下式计算：

$$P = A \sum \frac{\Delta L}{L} E_y \quad (1)$$

式中： P 为预应力损失值(kN)； ΔL 为锚具、夹片的变形回缩量(m)； E_y 为钢绞线的弹性模量； A 为钢绞线的截面积(m²)。

济南某高速公路边坡采用 $5 \times 7 \phi 5$ mm($\phi 15.24$ mm, 1 860 MPa)的高强度低松弛钢绞线； $A = 5 \times 140$ mm²；OVM 型锚具；锚索弹性模量的材料试验结果为 200 GPa；锚索自由段长度分别为 21, 26, 31 m，由式(1)计算的锚索预应力损失值分别为 48.0, 38.8,

32.5 kN。

3.3 锚索应力不均匀分布的影响

预应力锚索张拉过程中，油压千斤顶与锚索测力计存在一定的差值。究其原因，是张拉稳定时间较短，锚索在张拉过程中未能得到充分拉伸，预应力存在应力集中现象，未能沿全长均匀分布，后期锚索松弛现象严重，预应力损失较大。

3.4 边坡开挖的影响

济南某高速公路边坡锚索预应力变化受开挖影响的现场监测结果见图 3(ML2, ML5, ML7 为锚索编号)，12 月 25 日后下级边坡开挖速度较快，导致上级边坡产生下滑的趋势，下滑力增大，锚索所承受的应力迅速升高。25 日后，由于后续边坡已基本开挖完毕，故锚索应力又呈平稳变化趋势。由边坡开挖引起的预应力变化具有明显时效性，随着施工期的结束，预应力变化将逐渐减弱。

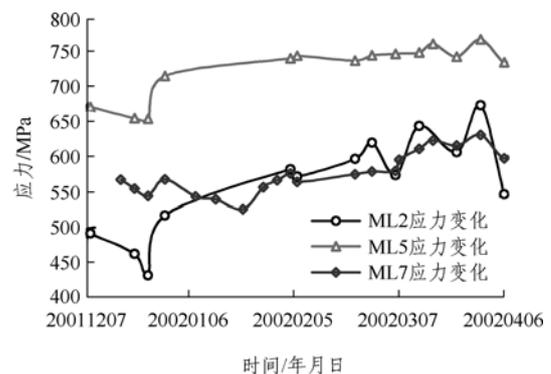


图 3 施工对锚索预应力的影响

Fig.3 Influence of construction on anchor cables prestress

3.5 冲击力的影响

爆破、重型机械和地震力发生的冲击也会对锚索预应力变化产生影响。在锚固区没有松动的情况下，冲击力使预应力增高。这是由于爆破振动产生的惯性力增加了岩土体下滑力，并且降低了结构面的力学强度，从而使应力增长。当爆破产生在锚固段附近时可能使预应力减小，且该损失量较长期静荷载作用引起的预应力损失量要大的多。

以上预应力损失可通过施工工艺方面的措施予以弥补，如尽可能保证钻孔平直，锚索的对中支架符合设计要求，使两级张拉荷载之间有一个较长时间的稳定阶段和保证最后一级荷载达到最高值的稳定时间等。在封锚前，可根据计算和现场监测的预应力损失数据，对预应力锚索进行补张和调整。

4 长期持续的预应力变化

4.1 岩土体压缩变形的影响

恒定的荷载作用下, 多数岩土体表现出不同程度的徐变特征^[14]。徐变持续的时间随岩石单轴抗压强度的降低而增加, 同时还受所施加预应力大小的影响。

预应力锚索现场监测数据表明, 岩土体在荷载作用下的压缩变形是预应力损失的主要因素之一, 锚索预应力损失速率随时间的推移而减缓, 最终达到相对平衡状态。对预应力锚索而言, 徐变主要发生在应力集中区, 即岩土体在受压情况下产生变形而更加密实, 天然结构面上会产生额外的压缩, 锚索预应力因此降低。

4.2 锚索的松弛

锚索在预张作用下发生变形, 处于长期受拉状态时会产生松弛损失, 使预应力减小。它是预应力锚索产生预应力损失的另一主要影响因素。研究结果^[15]表明, 不同型号类型钢绞线的松弛损失值不同, 但具有以下共同特性:

(1) 钢绞线的应力松弛值与张拉荷载的大小有密切关系, 长期受荷锚索预应力松弛损失量通常为 5%~10%, 当施加的应力超过钢丝强度 50% 时, 应力松弛会显著增加。

(2) 松弛损失值与材料性能、材料直径和环境温度等有关, 超张拉比一次张拉的松弛损失要小。

4.3 群锚效应

单根锚索加固时的影响区半径表达式^[16]为

$$R = K \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \frac{E_r}{E_y} \left(\frac{L-Z}{L} \right)^n \quad (2)$$

式中: σ_0 为影响区边界处的应力, E_r 为岩体的弹性模量, Z 为锚索体至所研究剖面的距离。

在施工过程中, 加锚顺序一般采用扩展型。若锚索间距比影响区半径小的较多, 已经张拉的锚索受相邻锚索张拉压力波重叠的影响, 在坡体强度得到提高的同时, 使已张拉锚索的预应力发生损失。在济南某高速公路边坡群锚效应现场试验中发现, 同一锚索的加载、卸载对间距为 7 m 的相邻锚索预应力变化数值和作用反应时间相差较大, 完全卸载引起相邻锚索的预应力变化为 12.3%, 并在较短时

间内完成。重新加载仅为卸载影响数值的 32%, 且反应时间较长。

5 预应力波动变化的影响因素

5.1 降雨入渗对预应力的影响

降雨量及降雨历时对锚索预应力具有显著影响, 特别是在岩土体裂隙较为发育的部位。根据济南某高速公路边坡现场监测结果, 见图 4(图中 M2~M8 为锚索编号), 降雨入渗对锚索预应力的影响过程可划分为三个阶段: 一是锚索预应力减小阶段, 此阶段数值减少较少, 可忽略不计; 二是锚索预应力迅速增加阶段。降雨后, 随着裂隙水的不断渗入, 岩土体的 c , φ 值降低, 自身抵抗下滑的能力降低, 坡体产生位移趋势, 锚索预应力也随之增大。在较短的时间内, 锚索预应力增加的最大值 $\Delta P_{r,max}$ 可达 5%~15%; 三是锚索预应力回复阶段。随着裂隙水逐渐消散, 坡体在预应力作用下重新达到新的平衡状态, 锚索预应力又基本回到降雨前水平, 此阶段历时较长。

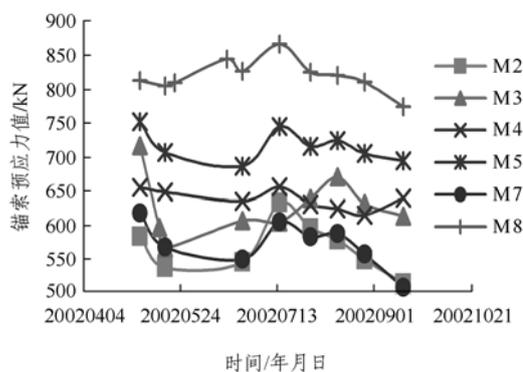


图 4 雨季锚索预应力的变化规律

Fig.4 Prestress variation of cables during rain

由以上机制分析和现场监测可知, 坡体降雨后将受到较大循环荷载的作用, 不利于坡体的稳定性, 同时这种循环荷载影响锚索体和锚固端处的耐久性。

5.2 温度变化对预应力影响

温度影响主要反映在坡体变形导致锚索预应力的变化。根据现场实测结果, 一般岩土体温度升高会引起预应力增加, 降温预应力减小。由于岩土体膨胀系数较小, 温度变化引起的预应力变化值较小, 且预应力变化滞后于环境温度的变化, 二者没有直

接的对应关系。预应力随温度的变化曲线基本呈闭合状态，见图5。

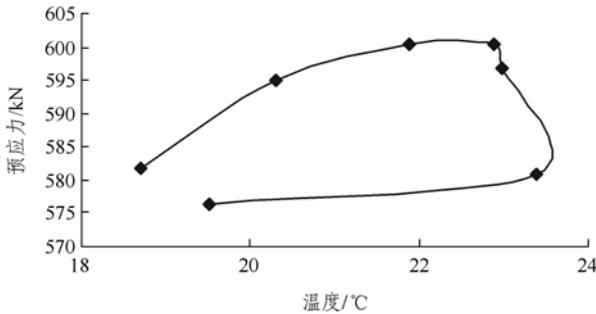


图5 锚索预应力随温度变化曲线

Fig.5 Variation curve of cables prestress vs. temperature

温度变化引起的预应力变化可采用下式计算：

$$\Delta P_{T_{max}} = \int_0^L \int_0^{T-T_0} (C - \alpha) E_y dL dT A / L \quad (3)$$

式中： α 为钢索的线膨胀系数； C 为岩土体的线平均膨胀系数； T 为温度(°C)，随深度而变化； T_0 为基准温度(°C)。

6 锚索预应力变化模型的建立

6.1 建立锚索预应力变化模型的考虑

根据流变力学，在组合模型中 Kelvin 模型可以描述岩土体的蠕变性质，Burgers 模型可以描述金属蠕变曲线前两个阶段特性^[17]。根据组合模型反映出的特性，在考虑以下因素后构建锚索预应力变化模型：

(1) 对预应力锚索的模拟只考虑其力学效应上的相似，忽略其结构细节对受力的影响。

(2) 锚索预应力变化的阶段特点与岩体蠕变过程具有一定的对应关系，岩体蠕变只认为是锚索拉力作用结果，不考虑岩体自重和其他环境应力的影响。

(3) 岩土体蠕变使预应力损失，同时松弛等造成的预应力损失也将使岩体蠕变速度发生变化，即岩体蠕变和预应力之间存在着相互影响。

(4) 假设岩土体为均匀连续介质，其结构面及其他影响通过调整岩土体弹性模量处理。

6.2 锚索预应力损失模型的建立及表达式推导

在对已有流变组合模型分析的基础上，综合各模型所能反映的介质性质和假设条件，将 Maxwell 模型和 Kelvin 模型并联成组合模型，用以建立反映

岩土体蠕变与预应力松弛之间具有相互作用特点的预应力损失模型，如图6所示。

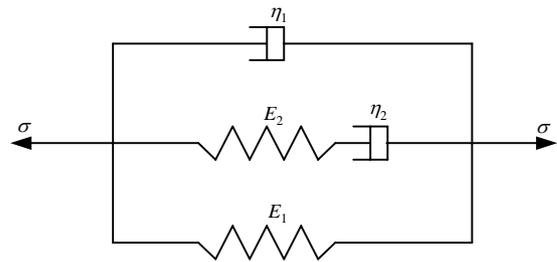


图6 预应力损失模型

Fig.6 Model of prestress loss

(1) 四参数模型的推导及验证

根据预应力损失模型，其具体表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \varepsilon \\ \sigma_3 &= \eta_1 \dot{\varepsilon} \\ \sigma_2 + \frac{\eta_2}{E_2} \dot{\sigma}_2 &= \eta_2 \dot{\varepsilon} \\ \sigma &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\sigma + \frac{\eta_2}{E_2} \dot{\sigma} = E_1 \varepsilon + \left(\eta_1 + \eta_2 + \frac{E_1 \eta_2}{E_2} \right) \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_2 \eta_1}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (5)$$

令 $\varepsilon = \varepsilon_0 H(t)$ ，代入本构方程，并进行 Laplace 变换及逆变换后可得

$$\sigma(t) = \eta_1 \varepsilon_0 \delta(t) + E_1 \varepsilon_0 + \varepsilon_0 (E_2 - E_1 + E_1 \eta_1 / \eta_2) e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \quad (6)$$

因为 $t \neq 0$ 时， $\delta(t) = 0$ ，所以有

$$P = A \left[E_1 \varepsilon_0 + \varepsilon_0 (E_2 - E_1 + E_1 \eta_1 / \eta_2) e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right] \quad (7)$$

式中： P 为锚索拉力值， A 为锚索截面积。

笔者采用工程实际钢绞线数据和参考有关研究结果^[18](如表1所示)，计算的锚索预应力变化规律趋势如图7所示。

表1 蠕变模型参数^[18]

Table 1 Parameters of creep model used in calculation^[18]

E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	ε_0	A /mm ²
1.20×10^5	2.00×10^5	2.13×10^5	7.20×10^5	4.90×10^{-3}	700

以上变化趋势与济南某高速公路边坡锚索预应力实际监测数据趋势非常吻合，实际监测预应力变化趋势见图8。

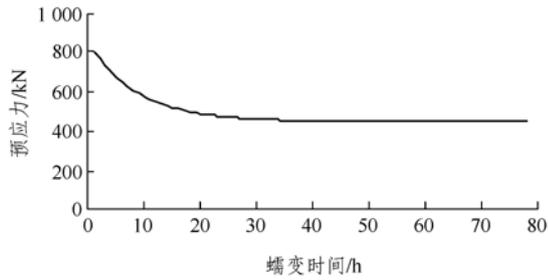


图 7 由模型计算的预应力变化趋势

Fig.7 Trend of prestress variation by model calculation

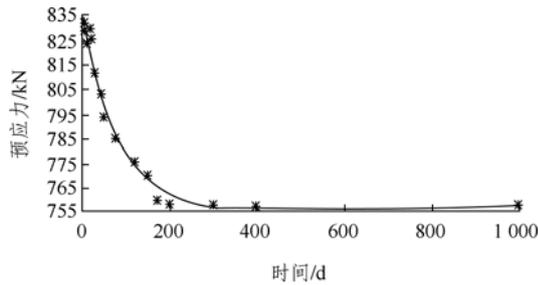


图 8 实际监测的预应力变化趋势

Fig.8 Trend of prestress variation by monitoring

(2) 对波动影响因素的考虑

通过前面分析可知, 预应力波动的主要影响因素为降雨和温度变化。预应力随温度升降的变化呈滞后于温度的近似闭合曲线。雨后预应力的变化先减少, 后迅速增加, 然后缓慢调整恢复。根据实际工程现场监测结果, 可取 $\Delta P_{T \max} = 50 \text{ kN}$, $\Delta P_{r \max} = 55 \text{ kN}$ 。

研究锚索预应力变化的目的是确定其不同时期预应力变化过程的峰值, 通过结合预应力锚索耐久性分析, 以判断预应力锚索的安全性。因此对每个时期锚索预应力变化峰值可分别进行预测, 即

$$P(t) = A \left[E_1 \varepsilon_0 + \varepsilon_0 (E_2 - E_1 + E_1 \eta_1 / \eta_2) e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right] + \Delta P_{T \max} \tag{8}$$

$$P(t) = A \left[E_1 \varepsilon_0 + \varepsilon_0 (E_2 - E_1 + E_1 \eta_1 / \eta_2) e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right] + \Delta P_{T \max} + \Delta P_{r \max} \tag{9}$$

若岩土体层间紧密闭合受降雨影响较小时, 取式(8); 若岩土体破碎松散, 受降雨影响明显, 需考虑全部波动因素时, 则取式(9)。

7 结 论

(1) 锚索预应力变化的共同特点是自张拉初期

开始, 均包括预应力骤降反弹、紊乱变化和平缓过渡的三个典型阶段。

(2) 在分析锚索预应力变化的各影响因素后, 可将这些因素造成的预应力变化分为可补救的预应力损失、长期作用的预应力变化、波动变化三个方面。

(3) 岩土体压缩变形与锚索松弛之间、相邻锚索之间存在相互影响, 需通过优化设计尽可能减少由此造成的预应力损失, 并且在预测模型中要反映出相互作用特征。

(4) 预应力波动的主要影响因素为降雨和温度变化。预应力随温度升降呈滞后于温度变化的近似闭合曲线特点。

(5) 本文提出的预应力变化模型可通过实际工程监测和试验确定相关参数, 从而建立每个具体工程的锚索预应力变化模型, 对预应力锚索的预警、耐久性分析和岩土体稳定性控制起到有力的帮助作用。

参考文献(References):

[1] 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): 2 756 - 2 760.(ZHU Hanyu, SUN Hongyue, WANG Huibang, et al. Analysis of prestress state of cable applied to rock slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 756 - 2 760.(in Chinese))

[2] 任丽芳, 周敏娟, 穆 兰. 边坡加固锚索预应力损失的探讨[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2006, 5(1): 59 - 62.(REN Lifang, ZHOU Minjuan, MU Lan. Study on prestress loss of cable applied to slope reinforcement[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2006, 5(1): 59 - 62.(in Chinese))

[3] 苏学贵, 李彦斌, 孟秀生. 锚索预应力损失影响因素分析[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(增1): 87 - 90.(SU Xuegui, LI Yanbin, MENG Xiusheng. Analysis of factors affecting prestress loss in prestressed cable anchor[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(Supp.1): 87 - 90.(in Chinese))

[4] 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 Faming, LIU Ning, CHEN Zuyu, 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.(in Chinese))

- [5] DAI F C, LEE C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2001, 59(3/4): 253 - 266.
- [6] 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.
- [7] LITTLEJOHN G S. Long-term performance of high capacity rock anchors at Devonport[J]. *Ground Engineering*, 1979, 12(7): 25 - 33.
- [8] 李 宁, 张 平, 李国玉. 岩质边坡预应力锚固的设计原则与方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2 972 - 2 976.(LI Ning, ZHANG Ping, LI Guoyu. Discussion on design principle and method of prestressed cable for support of rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2 972 - 2 976.(in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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 Faming, ZHAO Weibing, 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.(in Chinese))
- [11] 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 Duowen, BAI Shiwei, LUO Guoyu. Analysis of load losses of prestressed rock cable bolts[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, 3(1): 65 - 69.(in Chinese))
- [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): 127 - 130.(ZHOU Yongjiang, HE Siming, YANG Xuelian. Study on prestress loss of anchor cables under long-term loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 127 - 130.(in Chinese))
- [13] 曾宪明, 陈肇元, 王靖涛. 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): 2 235 - 2 242.(ZENG Xianming, CHEN Zhaoyuan, WANG Jingtao. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242.(in Chinese))
- [14] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.(ZHOU Weiyuan. *Advanced rock mechanics*[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.(in Chinese))
- [15] 朱焕春, 吴海滨, 赵海斌. 反复张拉荷载作用下锚杆工作机制试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 662 - 665.(ZHU Huanchun, WU Haibin, ZHAO Haibin. Experimental study on bolting mechanism under cyclic tensile load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 662 - 665.(in Chinese))
- [16] 黄福德, 赵彦辉, 李 宁. 预应力锚固机制数值仿真分析研究[J]. *西北水电*, 1996, (1): 8 - 17.(HUANG Defu, ZHAO Yanhui, LI Ning. Analysis of prestress anchorage mechanism by numerical simulation[J]. *Northwest Hydroelectricity*, 1996, (1): 8 - 17.(in Chinese))
- [17] 杨挺青. 弹黏性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.(YANG Tingqing. *Theory of viscoelasticity*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [18] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 软弱围岩蠕变损伤机制及合理支护时间的反演分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 793 - 796.(WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. Creep damage mechanism and back analysis of optimum support time for soften rockmass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 793 - 796.(in Chinese))