

考虑锚索松弛特性的预应力损失计算模型研究^{*}

王国富^{1,2}, 李强¹, 路林海¹, 曹正龙¹, 王渭明²

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 济南, 250101; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:基于等效应变原理, 考虑耦合效应与锚索松弛特性, 将锚索自身与周围介质代以松弛组合元件、广义开尔文组合元件, 提出了一种新的预应力蠕变损失计算模型, 并推导了其特征方程(本构方程、蠕变方程、松弛方程), 阐述了锚固力损失与围岩变形之间的计算关系; 在材料参数已知的情况下, 对比应力应变新模型计算结果与试验测试数据可知: ①随着锚索张拉控制应力的不断提高, 锚索应变测试初值和终值不断增大, 呈正相关; ②应变测试曲线基本遵循“幂函数”趋势, 表现为初期加速增长, 后趋于平稳增长, 最后保持基本水平; ③蠕变计算新模型较原耦合模型更贴近相似试验测试结果, 且应力与应变变化规律相符; 研究成果为锚索预应力工程的设计、施工提供了理论支撑和借鉴参考。

关键词: 预应力损失; 松弛特性; 蠕变模型; 相似试验

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)06-1585-07

A Coupled Model Research of Anchor Prestress Loss Considering the Relaxation Characteristics of Anchor

Wang Guofu^{1,2}, Li Qiang^{1*}, Lu Linhai¹, Cao Zhenglong¹, Wang Weiming²

(1. Jinan Railway Group Ltd. Ji'nan 250101, P.R.China; 2. Shandong University of Science and Technology, College of Civil and Architectural Engineering, Qingdao, Shandong 266590, P.R.China)

Abstract: Basing on the principle of equivalent strain, taking into account the coupling effect and relaxation properties, anchor and the surrounding rock were respectively simulated by relaxation model and the general Kelvin, so a new creep coupling model, which could describe the interaction relationship between the prestressed anchor and rock creep deformation, was proposed. And the corresponding constitutive equations, creep equation, relaxation equation were deduced, which could theoretically explain the computing relationship of the prestressed loss and rock creep deformation. On the base of existing similar model test, Comparison of anchor strain test data and the calculation results shows that: with the continuous increasing of tension stress, the initial and final measurement values of anchor were rising. Strain measurement curve basically followed the "exponential" form. With time lasting after locking, the performance showed a initial accelerated growth, then a stabilized growth, a final basic level. New creep calculation model than the original coupled model, was closer to the results of similar test. And the variation of stress was consistent with the strain variation. Research provides a theoretical basis and technical support for the future design and construction of long-term forecasting prestressed anchors.

Keywords: prestress loss; relaxation model; creep model; similar test

* 收稿日期: 2017-09-03(修改稿)

作者简介: 王国富(1964-), 男, 山东威海人, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程、结构工程相关理论与技术的研究工作。E-mail: metro_jinan@126.com

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014EEQ028); 山东省墙材革新与建筑节能科研开发项目([2014]QG第009号); 住房城乡建设部科学技术项目(2016-K4-053); 山东省住房和城乡建设厅新型墙体材料专项基金(FW-20161001:A7); 国家自然科学基金(41472280)

0 引言

随着我国经济的不断发展和施工水平的迅速提升,高耸建筑地下空间的开发也应势而起。地质条件的复杂性、锚固机理的模糊性、理论研究的阶段性给深基坑桩锚支护体系的安全性能带来了严峻的挑战^[1-2]。这是由于现有蠕变理论计算模型未能对围岩蠕变与锚固力损失之间相互作用关系进行准确描述,导致工程人员在锚索张拉过程中对蠕变损失估算过高或不足,给锚固工程的安全性、耐久性带来较大的安全隐患。因此,继续推进锚索预应力损失的理论研究,促进形成理论研究成熟、区域特色鲜明的工程体系,是今后预应力工程发展的趋势。

近年来,国内外诸多学者依托锚索工程、预应力工程开展了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果^[3-4]。但其研究基础或忽略了围岩变形和预应力损失之间耦合效应^[5-7],或忽视了锚索自身材料松弛特性(将锚索简化为一弹性体)^[8-10]对长期预应力的影响,其计算工况均与实际存在一定差异性。而在某些工况下,特殊的地质水文条件和锚索施工条件下,锚索自身松弛特性是锚索长期预应力能否保持在设计水平的关键因素。因此,在围岩变形与预应力损失进行耦合基础上,同时考虑锚索自身材料松弛属性,推进锚索工程、预应力工程的理论研究,可更加真实反映预应力损失过程,从而实现长期预应力的准确预测。

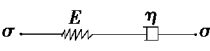
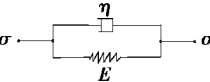
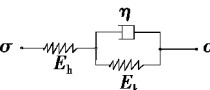
为了更深入、更清晰地研究和了解围岩蠕变对锚索预应力损失的变化规律,同时考虑围岩变形与预应力损失之间耦合效应与锚索自身材料松弛属性,将锚索自身与周围介质代以松弛组合元件、广义开尔文组合元件,提出一种新的预应力损失计算模型,推导其特征方程(本构方程、蠕变方程、松弛方程),从理论上阐述锚固力损失与围岩变形之间的计算关系。在材料参数已知的情况下,基于已有相似试验数据和现有耦合模型计算结果,对比发现可知:新模型计算结果能够更好地反映、评价锚索的轴力和应变变化规律,更接近于试验测试结果,研究成果为锚索预应力工程的设计、施工提供了理论支撑和借鉴参考。

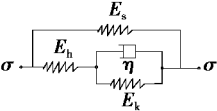
1 蠕变计算新模型

1.1 蠕变模型研究现状

诸多研究成果表明:不同的岩土体具有不同的黏弹属性,不同的黏弹属性应由不同的元件(或组合元件)模型模拟。总结前人研究成果,现阶段用以描述预应力损失计算模型有:Maxwell 体、Kelvin 体、广义 Kelvin 体、现有耦合模型(锚索为弹性体),具体如表 1 所示。但其均忽视了锚索自身的松弛特性^[11](将锚索简化为一弹性元件),未能真实反映锚索松弛特性对长期预应力的锚索松弛对锚索长期预应力的影响,适用范围具有一定的局限性。

表 1 常见复合流变模型
Table 1 Common complex rheological models

| 类型 | 元件组成 | 模型示意图 | 本构方程 | 模型特点 |
|-------------|---------------------|---|---|--|
| Maxwell 体 | 由 H 体和 N 体串联而成 |  | $\dot{\varepsilon}_M = \frac{\dot{\sigma}_M}{E_M} + \frac{\sigma_M}{\eta_M}$ | 该模型可以描述岩土体匀速蠕变的现象,亦可描述应力匀速衰减的松弛现象,又被称为松弛模型,适合描述材料蠕变的第二阶段。 |
| Kelvin 体 | 由 H 体和 N 体并联而成 |  | $\sigma_k = \eta_k \dot{\varepsilon}_k + E_k \varepsilon_k$ | 该模型无应力松弛现象,无瞬时弹性应变,无黏性流动,故只适合描述岩土体的蠕变第一阶段,不能反映瞬时应力松弛现象和弹性变形现象。 |
| 广义 Kelvin 体 | 由 Kelvin 体和 H 体串联而成 |  | $\frac{\eta_k}{E_h + E_k} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_h E_k}{E_h + E_k} \varepsilon + \frac{\eta_k E_h}{E_h + E_k} \dot{\varepsilon}$ | 该模型可描述岩土体不同阶段弹粘塑性特征,反映蠕变的第一和第二阶段,是现有理论中比较理想反映蠕变效应的复合流变模型,在坡体中得到广泛实践,但其忽略了锚固体与岩土体的耦合效应,与现场工况存在较大差别。 |

| 续表 1 | | | | |
|--------|----------------|---|---|---|
| 类型 | 元件组成 | 模型示意图 | 本构方程 | 模型特点 |
| 现有耦合模型 | 由广义开尔文体和H体并联而成 |  | $\frac{\eta_k}{E_h + E_k} \dot{\sigma} + \sigma = \eta_k \frac{E_h + E_M}{E_h + E_k} \dot{\varepsilon} + \frac{E_h E_k + E_h E_M + E_M E_k}{E_h + E_k} \varepsilon$ | 该模型考虑了岩土体与锚索的耦合效应,将锚索简化为一个弹性元件,一定程度上可以描述锚索随岩土体蠕变与锚索的耦合效应,但其忽略了锚索自身也具有一定的弹粘塑性属性,因此,其无法解释锚索自身松弛现象,适用范围具有一定的局限性。 |

1.2 蠕变计算新模型的提出

1.2.1 基本假定

- 预应力工程蠕变损失新计算模型基本假定:
- (1)模型对锚索或围岩介质的模拟仅考虑力学特性上的相似,忽略其他局部细节上的不同。
 - (2)预应力水平由锚索自身应变与围岩蠕变变形引起,忽略温度、人为等因素对预应力损失的影响。
 - (3)锚索、围岩均为连续各向同性,部分围岩及锚索属性的劣化不影响整体其黏弹性物理参数。

1.2.2 蠕变计算新模型

基于等效应变原理,考虑耦合效应与锚索松弛特性,将锚索自身与周围介质代以松弛组合元件、广义广义开尔文组合元件,提出了一种新的预应力蠕变损失计算模型,如图1所示。该模型可更加真实地描述围岩变形中弹性瞬时弹性变形、弹性后效过程,更符合实际情况。

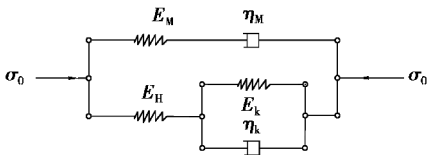


图1 蠕变耦合新模型
Fig.1 Coupled creep new model

图中 E_M 、 η_M 为锚索的等效弹性、粘性模量, E_h 、 E_k 、 η_k 则表示为岩土体等效的弹性、粘性参数。

2 基本方程推导

2.1 本构方程

已知围岩(General Kelvin 体)本构方程为:

$$\frac{\eta_k}{E_h + E_k} \dot{\sigma} + \sigma = \frac{E_h E_k}{E_h + E_k} \varepsilon + \frac{\eta_k E_h}{E_h + E_k} \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

考虑到静力平衡条件:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_M + \sigma_k \\ \varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_k \end{cases} \quad (2)$$

推导蠕变计算新模型的本构方程为:

$$A \ddot{\sigma} + B \dot{\sigma} + \sigma = C \ddot{\varepsilon} + D \dot{\varepsilon} + E \varepsilon \quad (3)$$

式中: $A = \frac{\eta_k \eta_M}{(E_k + E_h) E_M}$; $B = \frac{\eta_k E_M + \eta_M E_h + \eta_M E_k}{(E_k + E_h) E_M}$;
 $C = \frac{\eta_k \eta_M E_H + \eta_k \eta_M E_M}{(E_h + E_k) E_M}$; $E = \frac{E_h E_k}{E_h + E_k}$;
 $D = \frac{\eta_k E_h E_M + \eta_M E_h E_k + \eta_M E_M E_h + \eta_M E_M E_k}{(E_h + E_k) E_M}$ 。

2.2 蠕变方程

当 $\sigma = \sigma_c = \text{const}$ 时,式(3)可化为:

$$\sigma_c = C \ddot{\varepsilon} + D \dot{\varepsilon} + E \varepsilon \quad (4)$$

式中: C, D, E 含义同上。可以看出:式(4)为一元二次非齐次线性微分方程,通解为齐次微分方程的通解加一个特解;显然: $\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E}$,即为式(4)一个特解;则应变可表示为:

$$\varepsilon = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \frac{\sigma_c}{E} \quad (5)$$

式中: $r_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4EC}}{2C}$; $r_2 = \frac{-D - \sqrt{D^2 - 4EC}}{2C}$; C_1 、 C_2 应由初始条件确定,即预应力施加瞬间($t = 0$),围岩瞬时变形表示为 $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_h + E_M}$ 。相关文献[11]表明:锚索轴力的变化历经弹性、塑性、粘塑性三个阶段;假定 $0 \sim t_1$ 为弹性阶段,则当测得 $t = t_1$ 时的锚索应变时,即可求得 $t = 0 \sim t_1$ 时间内的某一时刻的导数值,进而求得 C_1 、 C_2 。假定在 $t = \tau$ 时,导数为 $\dot{\varepsilon}_{t=\tau} = \alpha$,则 C_1 、 C_2 可表示为:

$$C_1 = \frac{\sigma_c r_2 (E_h + E_M - E) \exp(r_2 \tau) + \alpha E (E_h + E_M)}{E (E_h + E_M) [r_1 \exp(r_1 \tau) - r_2 \exp(r_2 \tau)]};$$
$$C_2 = \frac{\sigma_c r_1 (E - E_h - E_M) \exp(r_1 \tau) - \alpha E (E_h + E_M)}{E (E_h + E_M) [r_1 \exp(r_1 \tau) - r_2 \exp(r_2 \tau)]};$$

式(5)即为耦合效应计算模型的蠕变方程。

若考虑 $t=t_1$ 时卸载($\sigma=0$),则本构方程为:

$$C\ddot{\varepsilon} + D\dot{\varepsilon} + E\varepsilon = 0 \tag{6}$$

在 $t=\tau$ 时的应变通解可表示为:

$$\varepsilon_{t=\tau} = C_3e^{r_1(\tau-t_1)} + C_4e^{r_2(\tau-t_1)} \tag{7}$$

式中: $r_1、r_2$ 同上, $C_3、C_4$ 可依据上述方法求解,假定当 $t_1 < t' < t_2$ 时, $\varepsilon_{t=t'} = \beta$,则 $C_3、C_4$ 可表示为:

$$C_3 = \frac{\varepsilon_c' \exp[r_2(\tau - t_1)] - \beta}{\exp[r_2(\tau - t_1)] - r_1 \exp[r_1(\tau - t_1)]};$$

$$C_4 = \frac{\beta - r_1 \varepsilon_c' \exp[r_1(\tau - t_1)]}{\exp[r_2(\tau - t_1)] - r_1 \exp[r_1(\tau - t_1)]};$$

当 $t=t_1$ 时,应变变量可表示为: $\varepsilon_{t=t_1} = \varepsilon_c'$,则卸载

后瞬时弹性恢复变形量为 $\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_h + E_M}$,历时 $t=\tau$

时的变形可表示为 $\varepsilon_{t=\tau}$,则卸载后残余变形为:

$$\varepsilon_{t=\tau} = \varepsilon_c' - \varepsilon_0 - \varepsilon_{t=\tau} \tag{8}$$

$$\varepsilon_{t=\tau} = C_1e^{r_1t_1} + C_2e^{r_2t_1} + \frac{\sigma_c}{E} - \frac{\sigma_c}{E_h + E_M} -$$

$$C_3e^{r_1(\tau-t_1)} - C_4e^{r_2(\tau-t_1)} \tag{9}$$

上式即为卸载后的变形计算公式。当 $t \rightarrow \infty$ 时,对式(9)进行求极限,其值为 $\varepsilon =$

$\varepsilon_c \frac{E_h E_h + E_k E_M + E_h E_M}{E_h E_k (E_h + E_M)}$,据此可预测卸载后的残余变形量的大小。

2.3 松弛方程

当 $\varepsilon = \varepsilon_c = \text{const}$,本构方程可化为:

$$A\ddot{\sigma} + B\dot{\sigma} + \sigma = E\varepsilon_c \tag{10}$$

式中: $A、B、E$ 含义同上,通解为:

$$\sigma = C_5e^{r_3t} + C_6e^{r_4t} + \varepsilon_c E \tag{11}$$

式中: $r_3 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A}; r_4 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A};$

$C_5、C_6$ 可据初始条件求解;假设初始预应力施加的瞬间($t=0$)弹性变形 ε_c 瞬间完成,且不考虑预应力的损失,则 $\sigma = \varepsilon_c (E_h + E_M)$,假定 $t < \tau < t_3$ 时, ε 导数为 $\dot{\varepsilon}_{t=\tau} = \gamma$,则 $C_5、C_6$ 分别为:

$$C_5 = \frac{\gamma - \varepsilon_c r_4 (E_h + E_M - E) \exp(r_4 \tau)}{r_3 \exp(r_3 \tau) - r_4 \exp(r_4 \tau)};$$

$$C_6 = \frac{\varepsilon_c r_3 (E_h + E_M - E) \exp(r_3 \tau) - \gamma}{r_3 \exp(r_3 \tau) - r_4 \exp(r_4 \tau)};$$

式(11)为蠕变耦合新模型的松弛方程。当初始应变已知时,可利用上式对锚索长期预应力进行

合理预测;假定锚索轴力在围岩内均匀分布,则长期预应力水平可表示为:

$$F(t) = \sigma(t) A_r \tag{12}$$

预应力损失量的大小可表示为:

$$\Delta F = \Delta \sigma n A_s \tag{13}$$

式中: $F(t)$ 为预应力损失量; A_r 为锚索体等效截面积; ΔF 为预应力损失量; n 为钢绞线束的数量; A_s 为单根钢绞线截面积。

3 耦合新模型试验验证

3.1 试验简化模型

为了验证该模型的可靠性,依托陈安敏等^[11]、王清标等^[9]在验证预应力损失与围岩变形之间关系的理论与试验基础之上,建立新的试验模型如图2所示。在锚索和岩土体参数一致时,通过对比新旧元件模型理论计算结果,研究新元件模型的适用性。用于试验的岩土体参数取值如表2所示。

表 2 黄黏砂土材料物理力学参数^[9-11]

Table 2 Physical and mechanical parameters of yellow sandy soil

| 含水率/% | 重度/(kN·m ⁻³) | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa | 变形模量/MPa | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|-------|--------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| 16.5 | 20 | 0.04 | 0.15 | 20.66 | 11 | 19 |

3.2 新模型计算参数的确定

以陈安敏等^[11]相似模型试验为依据,以3#锚索蠕变变形计算公式为例进行反算,求得模型参数为: $E_h = 9.36 \text{ MPa}$, $E_k = 7.72 \text{ MPa}$, $\eta_k = 1.689 \times 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{h}$,而锚索模型计算参数的确定依据工程实际中钢绞线数据结合相关文献^[11-14]等计算确定: $E_M = 1.32 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\eta_M = 7.20 \times 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{h}$ 。

3.3 计算结果分析

在已有锚索相似试验和蠕变模型^[15-16]的基础之上,通过对比蠕变耦合新模型理论计算数据可知;蠕变耦合新模型理论计算结果能够更好地反映蠕变试验的趋势,更接近与试验测试组数据,验证了耦合新模型的合理性、可行性及优势所在。

由图3可知:①随着锚索张拉控制应力的不断提高,锚索应变测试初值和终值均不断增大,大致呈现正相关关系;②相似试验测试曲线基本遵循“幂函数”形式,随着锁定后历时的不断延长,表现为初期加速增长,后趋于平稳增长,最后保持基本水平;③假定围岩为均质连续介质,则锚索应变表现为耦合新计算模型较原耦合模型(将锚索简化

为一弹性元件),更贴近相似试验测试结果,从而阐述了蠕变计算新模型的优势所在。

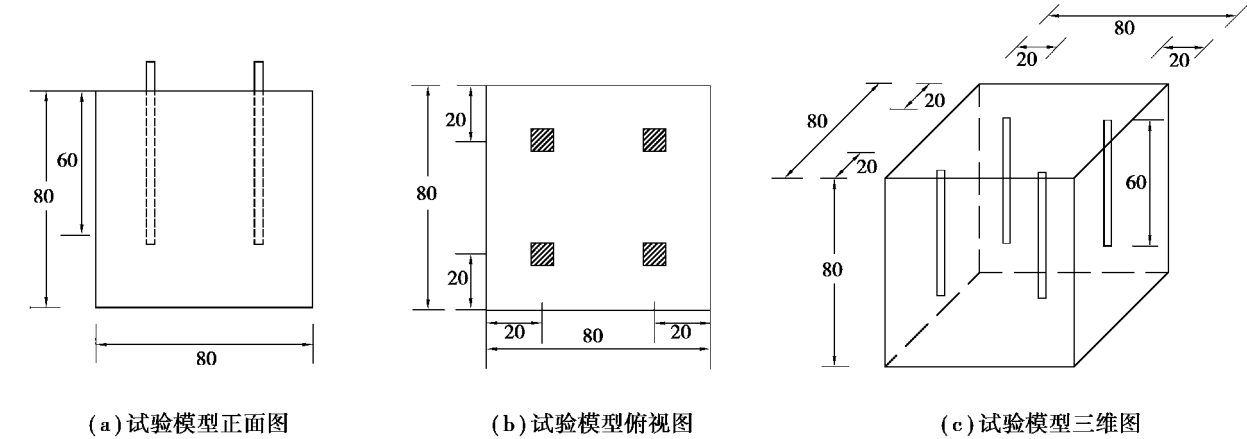


图2 试验模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of test model

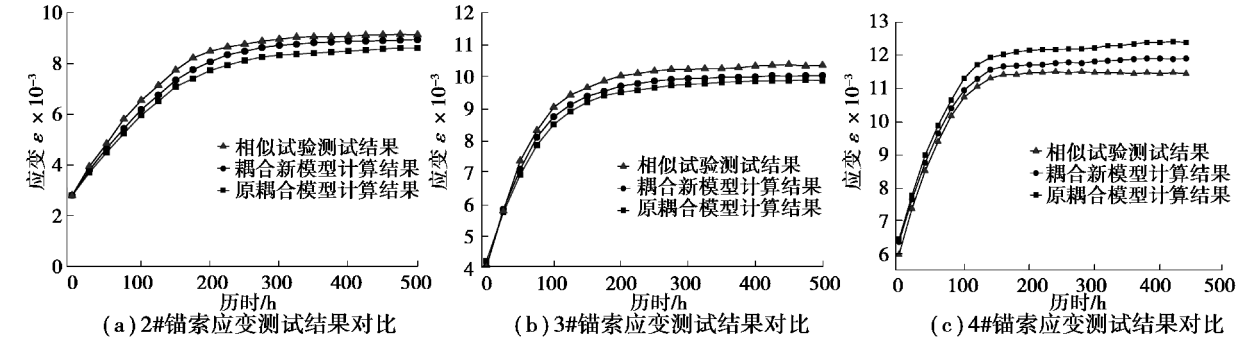


图3 锚索应变测试结果对比曲线

Fig.3 Comparison of anchor strain test results

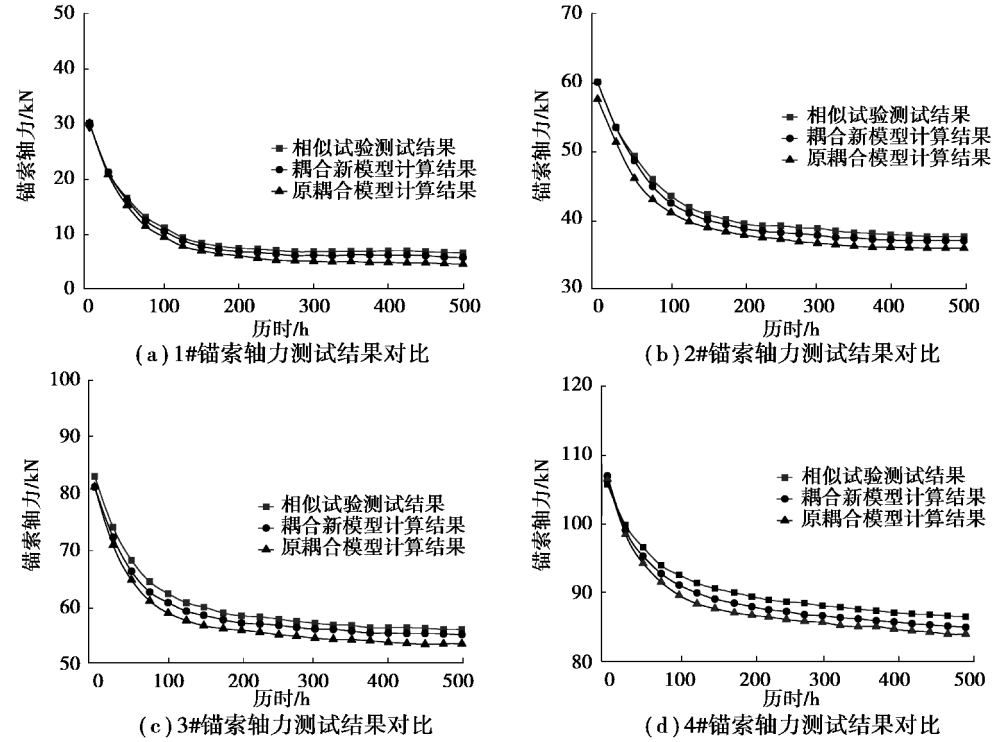


图4 锚索轴力测试结果对比曲线

Fig.4 Comparison of anchor axial force test results

由图 4 可知:①4 根锚索在不同张拉控制应力下,变化趋势基本相似,大致呈现“反幂函数”的形式,与应变变化规律相对应,随着时间的增长,锚索轴力变化主要历经 3 个变化阶段(初期迅速减小,中期平稳变化,后期基本不变);②随着锚索张拉控制应力的增长,锚索初期和后期轴力变化量不断增大,与图 3 所示应变变化规律相符;③假定围岩内锚索应力均匀分布,则锚索蠕变新模型计算结果较原耦合计算模型的计算结果更贴近试验测试数据。

表 3 新旧耦合模型理论计算和试验结果对比

| Table 3 Comparison of anchors between theoretical value and the measured value | | | | | | |
|--|-----------|-----------------|------------------|--------|----------|--------|
| 锚索 序号 | 数据分析 | 蠕变曲线 | | | 松弛曲线 | |
| | | 瞬时变形/ 10^{-3} | 稳定变形值/ 10^{-3} | 稳定时间/h | 稳定轴力/MPa | 稳定时间/h |
| 锚索 1 | 试验数据 | — | — | — | 8.12 | 405 |
| | 新模型理论计算数据 | 0.71 | 7.32 | 201 | 8.42 | 415 |
| 锚索 2 | 试验数据 | 2.73 | 9.28 | 225 | 31.65 | 425 |
| | 新模型理论计算数据 | 2.65 | 9.33 | 216 | 31.77 | 423 |
| 锚索 3 | 试验数据 | 4.67 | 10.34 | 248 | 59.20 | 448 |
| | 新模型理论计算数据 | 4.65 | 10.34 | 232 | 59.32 | 447 |
| 锚索 4 | 试验数据 | 6.21 | 11.32 | 245 | 86.65 | 435 |
| | 新模型理论计算数据 | 6.25 | 11.36 | 230 | 86.78 | 447 |

4 结论

通过对围岩蠕变引起预应力损失计算模型进行深入研究,并结合相似模型试验进行了实践分析,得出主要结论如下:

- (1)耦合效应、松弛特性是研究围岩蠕变对长期预应力影响的关键因素;既有计算模型或忽略了围岩变形和预应力损失之间耦合效应,或忽视了锚索自身材料松弛特性(将锚索简化为一弹性体)对长期预应力的影响,其计算工况均与实际存在一定差异。
- (2)基于等效应变原理,将锚索与围岩介质代以松弛组合元件、广义开尔文组合元件,提出了一种新的预应力蠕变损失计算模型,并推导了其特征方程(本构方程、蠕变方程、松弛方程),阐述了锚固力损失与围岩变形之间的计算关系,为推进预应力损失的理论研究提供了新的思路。
- (3)基于相似模型试验,将蠕变新模型、原耦合模型、试验数据对比分析其应力应变关系曲线可知:随着锚索张拉控制应力的不断提高,锚索应变测试初值和终值均不断增大,大致呈现正相关关

表 3 展示了 4 根试验锚索张拉后应变与轴力测试数据与理论计算结果,可以看出:①锚索轴力与瞬时应变呈正相关,随着张拉轴力的线性增加,应变亦呈线性增加趋势;②从稳定时间上看,蠕变变形、松弛效应稳定时间分别为 240 h、480 h,即锚索蠕变在张拉锁定后 10 d 内已基本完成,变形基本稳定,钢绞线松弛主要发生在锁定后 20 d 内,之后轴力基本不变;③新模型计算结果可用于蠕变应变、松弛后轴力的预测,误差可控制在 8%之内,该部分预测偏差可通过调整安全系数来消除。

系;应变测试曲线基本遵循“幂函数”形式,随着锁定后历时的不断延长,表现为初期加速增长,后趋于平稳增长,最后保持基本水平;蠕变计算新模型较原耦合模型,更贴近相似试验测试结果,相关应力的变化趋势与应变变化规律相符。

- (4)该模型的主要优势是同时考虑了耦合效应和松弛特性,可对围岩蠕变引起的预应力损失可进行合理的预测;当围岩蠕变越显著(软弱破碎)、锚索松弛越明显(钢绞线松弛率越大)时,该模型对锚索长期预应力的损失估算优势越明显。

参考文献(References)

[1] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106. (Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106. (in Chinese))

[2] 江权,陈建林,冯夏庭,等.大型地下洞室对穿预应力锚索失效形式与耦合模型[J].岩土力学,2013,34(8):2271-2278. (Jiang Quan, Chen Jianlin, Feng

- Xiating, et al. Failure format and interactive mechanism of prestressed thru-anchor cable in a large underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2271-2278. (in Chinese))
- [3] 徐明,张琴,唐树名,等.锚索失效对边坡稳定性影响的数值研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(5): 865-869. (Xu Ming, Zhang Qin, Tang Shuming, et al. Numerical tests on effect of anchor rope invalidation on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(5): 865-869. (in Chinese))
- [4] 李英勇,张顶立,张宏博,等.边坡加固中预应力锚索失效机制与失效效应研究[J].岩土力学,2010,32(1): 144-150. (Li Yingyong, Zhang Dingli, Zhang Hongbo, et al. Research on failure mechanism and effects of prestressed anchor cables for reinforcing slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(1): 144-150. (in Chinese))
- [5] 王渭明,曹正龙,王刚刚,等.厚冲积层锚索预应力损失研究[J].岩土工程学报,2014,36(9): 1607-1673. (Wang Weiming, Cao Zhenglong, Wang Ganggang, et al. Prestress loss of anchor cables in thick alluvial clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1607-1673. (in Chinese))
- [6] 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 on the load losses of prestressed rock cable bolts[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 65-69. (in Chinese))
- [7] 朱晗迓,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))
- [8] 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))
- [9] 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): 2150-2162. (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): 2150-2162. (in Chinese))
- [10] 赖杰,郑颖人,方玉树,等.预应力锚索支护边坡地震作用下动力响应研究[J].2011,7(增2): 1768-1773. (LaiJie, Zheng Yingren, Ye Fangshu, et al. Analysis on dynamic performance of slope supported with prestressed anchorage cable under earthquake[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(增2): 1768-1773. (in Chinese))
- [11] 陈安敏,顾金才,沈俊,等.软岩加固中锚索张拉盾尾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))
- [12] 李英勇,王梦恕,张顶立,等.锚索预应力变化影响因素及模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增1): 3140-3146. (Li Yingyong, Wang Mengshu, Zhang Dingli, et al. Study on influential factors and model for variation of anchor cable prestress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup.1): 3140-3146. (in Chinese))
- [13] 韩光,朱训国,王大国.锚索预应力损失的影响因素分析及其补偿措施[J].辽宁工程技术大学,2008,27(2): 176-179. (Han Guang, Zhu Xunguo, Wang Daguo. Analysis of factors affecting prestressing loss in prestressing cable anchor and compensative measures [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2008, 27(2): 176-179. (in Chinese))
- [14] 周永江,何思明,杨雪莲.预应力锚索的预应力损失机理研究[J].岩土力学,2006,27(8): 1353-1356. (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): 1353-1356. (in Chinese))
- [15] 唐梦雄.基坑工程预应力锚索锚固力实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6): 1158-1163. (Tang Mengxiong. Test study on anchorage force of prestressed anchor cables for foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1158-1163. (in Chinese))
- [16] 何思明,王全才.预应力锚索作用机理研究中的几个问题[J].地下空间工程学报,2006,2(1): 160-165. (He Siming, Wang Quancai. Problems of the study on mechanism of anchor cable [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 160-165. (in Chinese))