

锚索预应力长期损失与坡体蠕变耦合分析

Coupling analysis of long-term prestress loss and slope creep

朱哈迓¹, 尚岳全¹, 陆锡铭², 汪会帮²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州, 310027; 2. 金丽温高速公路建设指挥部, 浙江 金华 321022)

摘 要: 锚索长期预应力的保持是锚固工程中的关键之一, 考虑锚索预应力变化和边坡蠕变的耦合作用, 建立新的模型并进行理论推导, 得出了在耦合作用下锚索长期有效预应力的变化公式, 与已有的试验结果以及有限元分析结果对比分析, 验证了模型的正确性, 并通过具体的工程实例给出了其应用。

关键词: 边坡锚固; 预应力锚索; 长期损失; 蠕变

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)04-0464-04

作者简介: 朱哈迓 (1977-), 男, 江苏宜兴人, 博士研究生, 主要从事工程地质方面的研究

ZHU Han-ya¹, SHANG Yue-quan¹, LU Xi-ming², WANG Hui-bang²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Jinliwen Expressway Headquarters, Jinhua 321022, China)

Abstract: Based on coupling of long-term prestress loss of anchor tie and slope creep, a new mode is built and the theoretical function of long-term prestress variation is put forward. By comparison with the experiment result and FEM result, the suggested model is proved to be applicable.

Key words: reinforcement of slope with anchor tie; prestressed anchor tie; long-term prestress loss; creep

0 引 言

在锚固工程中, 锚索长期有效预应力是关系到锚固工程成败的关键之一, 预应力随时间变化的规律一直是国内外岩土锚固工程界关注的焦点。目前对于三峡大坝船闸高边坡锚索的有效预应力, 高大水等^[1]以及李端友等^[2]对其监测结果进行了报道, 总结出此工程中锚索预应力变化的一些规律。另外对于其它工程中锚索预应力变化监测, 也已有相关文献^[3,4]进行了报道。但是在实际工程中, 由于工程地质条件以及锚索布置情况相差很大, 锚索预应力变化离散性很大, 目前还未见系统的研究。

张发明等^[5]通过对锚固工程中常采用的大吨位长锚索预应力变化规律的分析, 其主要从定性的角度总结了锚索锚索预应力的变化规律, 得出了不同影响因素对锚索预应力变化的影响效应。

丁多文等^[6]从理论上分析了预应力锚索加固岩体的长期应力损失, 把预应力损失主要分为自由段岩体的预应力损失和锚固段岩体的预应力损失。根据广义 Kelvin 粘弹性模型本构关系进行分析, 确定了自由段锚索随时间产生的预应力变化规律。其在理论分析中, 把锚索预应力的损失和坡体的蠕变量分开单独考虑, 把锚索等效成不变的力作用在坡体介质上, 通过计算坡体介质的蠕变量来得到锚索的回缩量, 从而计算出锚索预应力的损失。

在实际工程中, 由于坡体的蠕变和锚索的回缩变形是一致的, 在坡体发生蠕变过程中, 锚索的内力也在不断地降低, 导致坡体内部应力水平在不断地下降, 对于锚固工程中经常碰到的软弱岩体、破碎岩体以及土质坡体, 其蠕变量都相对较大, 导致坡体内部的预应力下降较大, 如果计算时仍然采用初始应力来计算, 则导致计算结果偏差较大, 必须考虑锚索预应力变化与坡体介质材料之间的耦合效应。

本文着重考虑了两者之间的耦合关系, 对此建立了理论模型, 推导出其锚索预应力长期变化的理论公式, 通过与已有文献中介绍的试验结果^[7], 以及有限元模拟分析结果进行比较分析, 验证了其公式的正确性, 最后结合具体工程实例给出了其应用。

1 锚索预应力损失与坡体蠕变耦合分析

1.1 计算模型

岩体的蠕变性质主要是由于岩石具有粘性。岩体虽然不是流体, 但也具有粘性性质, 生产实践证明了一点。岩体是一种力学性质十分复杂的介质, 它可以表现出弹性、塑性的变形特征, 也可能表现出蠕变的变形特征。然而这些变形特征并非某一种岩石固有的特性, 而是与岩石受力状态和赋存条件有关的性态。

对于边坡岩体,采用广义 Kelvin 模型,其工程实践和试验分析都表明和实际情况比较符合,具有较好的适用性^[7,8]。其计算模型如图 1。

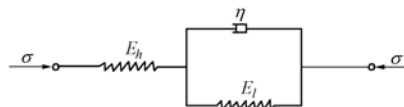


图 1 广义 Kelvin 模型示意图

Fig. 1 General Kelvin model

当考虑到边坡的蠕变和锚索预应力损失的耦合作用时,对图 1 考虑锚索作用,对锚索用弹簧来进行模拟,把锚索与坡体介质并联起来,得到其耦合模型为图 2。其中 E'_s 为锚索的等效弹性模量。对于均质岩体,假设在锚索体自由段长度内锚索体的预应力为均匀分布在坡体上,则对锚索体的弹性模量进行等效转化, $E'_s = E_s \times A_s / A_r$ 。其中 E_s 为锚索体实际的弹性模量, A_s 为锚索体的面积, A_r 为岩体的面积。在此模型中,通过对锚索弹簧单元施加初始应变 ξ' 来模拟预应力加载。考虑到锚索施加初始应变后,由于锚索与岩体之间必须满足变形协调与内力平衡,当边坡的变形随着时间而增加的同时,锚索内的预应力也相应随之降低,最终达到稳定。

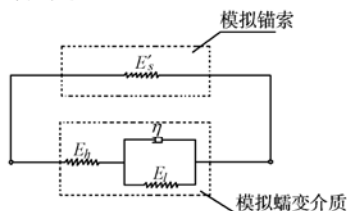


图 2 锚索与蠕变介质耦合模型

Fig. 2 Coupling model of anchor tie and slope

1.2 理论推导

对于坡体,其广义 Kelvin 模型本构关系为

$$\sigma + \frac{\eta}{E_l + E_h} \dot{\sigma} = \frac{E_l \times E_h}{E_l + E_h} \xi + \frac{\eta E_h}{E_l + E_h} \dot{\xi}, \quad (1)$$

式中 σ , ξ 为岩体的应力和应变; E_l , E_h , η 为岩体的蠕变参数。

又考虑到锚索体和岩体的耦合,则有

$$\xi = \xi' - \frac{\sigma}{E'_s}, \quad (2)$$

式中 ξ' 为锚索的初始应变, E'_s 为锚索的等效弹性模量。

代入式(1),可得

$$\sigma + \frac{\eta}{E_l + E_h} \dot{\sigma} = \frac{E_l \times E_h}{E_l + E_h} \left(\xi' - \frac{\sigma}{E'_s} \right) + \frac{\eta E_h}{(E_l + E_h) \times E'_s} \dot{\sigma},$$

简化为 $\dot{\sigma} + A\sigma = B$, (3)

式中

$$A = \frac{Es' \times El + Es' \times Eh + El \times Eh}{\eta Es' + \eta Eh},$$

$$B = \frac{El \times Eh \times Es'}{\eta Es' + \eta Eh} \xi'.$$

对于公式(3),其解为

$$\sigma = C e^{-At} + \frac{B}{A}, \quad (4)$$

式中 C 为实常数,必须通过初始条件代入求得。

当锚索体初始应变加在系统上,岩体的弹性变形完成的时候,其岩体的应力和应变分别为 σ_0 和 ξ_0 。其有

$$\begin{cases} \sigma_0 = Es'(\xi' - \xi_0) \\ \sigma_0 = Eh\xi_0 \end{cases}, \quad (5)$$

解得

$$\sigma_0 = \frac{EhEs'\xi'}{Es' + Eh}. \quad (6)$$

把 $t=0$ 时 $\sigma=\sigma_0$ 代入公式(4),可以解得

$$C = \sigma_0 - \frac{B}{A}, \text{ 所以}$$

$$\sigma = \left(\sigma_0 - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A} = \sigma_0 e^{-At} + \frac{B}{A} (1 - e^{-At}), \quad (7)$$

把 A , B , σ_0 , 代入式(4)、(5)得

$$\sigma = C_1 e^{-C_2 t} + C_3 (1 - e^{-C_2 t}), \quad (8)$$

其中

$$C_1 = \frac{EhEs'\xi'}{Es' + Eh},$$

$$C_2 = \frac{Es'El + Es'Eh + ElEh}{\eta Es' + \eta Eh},$$

$$C_3 = \frac{ElEhEs'\xi'}{Es'El + Es'Eh + ElEh}.$$

式(8)即为考虑了锚索预应力损失与坡体介质材料蠕变耦合后,在锚索初始应变量为 ξ' 的条件下,坡体介质材料上均布应力的变化式。锚索内力就等于作用于坡体上的总的预应力之和,即 $F = \sigma \times A_r$ 。

1.3 理论分析与试验结果及有限元计算分析对比

(1) 试验介绍

陈安敏等^[7]根据一定的相似比例做了软岩锚索加固预应力变化的模型试验,模型尺寸为 80 cm×80 cm,模拟锚索长度为 60 cm,其中内锚固段长为 25cm,自由段长为 35 cm,外锚头留有 14 cm。模型的结构尺寸如图 3 所示。在布置锚索的部位用 $\Phi 8$ 的钢杆垂直插入介质内形成一个锚索孔,通过其中心孔向内锚固段部位注浆。注浆质量通过注射器压力和注浆量来控制。模型制好后及时地送入烘房,以保证模型的环境温度在 25℃ 左右,在外部通过压力环对锚索的有效预应力进行了监测,其模型预应力变化曲线见图 4。

同时为了了解其坡体介质的蠕变特性,用 $\Phi 5 \times 10$ cm 黄粘砂土试件作了 4 组蠕变试验。加压方式采用砧

码恒压系统, 试件的恒温恒湿条件与试验模型相同。试件的变形用千分表测量, 观测时间间隔开始大体上为加载后 0, 0.5, 1, 1.5, 2 h, ..., 以后逐步加长时间间隔, 试验最长时间为 450 h, 得到的边坡蠕变曲线方程为

$$\xi(t) = \sigma_0 [106.81 + 129.55(1 - e^{-0.0127t})] \times 10^{-3}, \quad (9)$$

式中 σ_0 为作用在介质材料上的均匀压力。

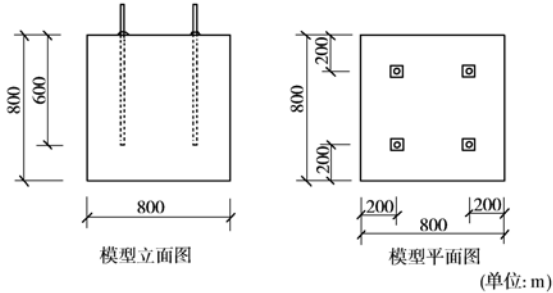


图 3 试验模型

Fig. 3 Experiment model

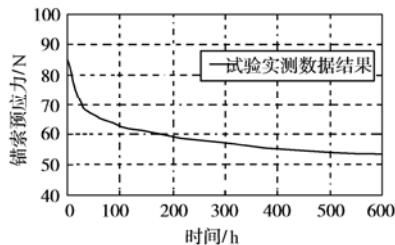


图 4 模型试验预应力变化曲线

Fig. 4 Prestress variation curve obtained from experiment

通过材性试验给出了模拟软岩的单轴压缩蠕变曲线, 并运用广义 Kelvin 串联粘弹性模型来描述其蠕变性质, 给出了介质的压缩蠕变方程, 拟合较好。

(2) 有限元分析

有限元建模分析同样选取陈安敏等的模型试验, 针对三峡船闸高边坡中锚索有效预应力的监测结果表明^[1], 锚索预应力损失主要与群锚效应、锚墩头混凝土及墩下岩体的蠕变有关, 而钢绞线松弛及深部岩体蠕变影响均较小。而在实际工程中, 锚固端一般都为完整岩体, 相对于自由段而言岩性都比较好, 压缩量较小, 对锚索预应力损失的量值影响也相对很小, 因此在分析时只有考虑了自由段的影响, 而把锚索的另一端即定为固定端。

在建模时, 对于材料, 体积参数均选取和模型试验相同, 并针对此选择合适的单元, 划分网格进行计算, 在锚索的初始应变作用下, 其锚索有效预应力和时间的关系曲线如图 5。

(3) 理论分析

取陈安敏等所做的试验结果作为算例, 通过其介质材料的蠕变公式可以算出蠕变介质材料的各参数为: $Eh = 9.362 \text{ MPa}$, $El = 7.719 \text{ MPa}$, $\eta = 607.795$

MPa/h 。当初始应变为 $\xi' = 9.53 \times 10^{-5}$, 可以计算得 $C_1 = 614.663 \text{ Pa}$, $C_2 = 0.023312 \text{ h}^{-1}$, $C_3 = 334.862 \text{ Pa}$ 。

然后计算出介质材料上的均布压应力, 通过转化即可求得锚索的内力图。

其计算结果如图 6。

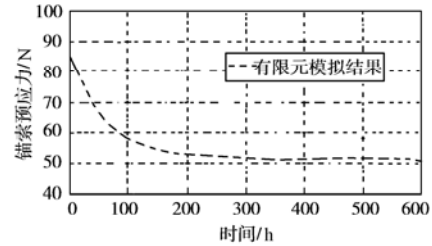


图 5 有限元模拟预应力变化曲线

Fig. 5 FEM Result

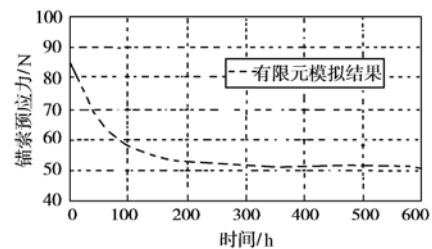


图 6 理论分析预应力变化曲线

Fig. 6 Theoretical analysis result

(4) 有限元分析, 理论分析和试验结果比较分析
有限元分析结果、理论分析结果以及模型试验结果比较如图 7。

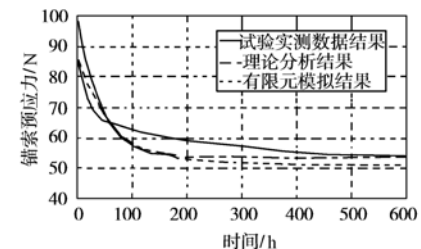


图 7 预应力变化曲线比较

Fig. 7 Comparison of the results

从图中可以看出, 理论分析曲线和有限元分析结果与试验实测数据都比较接近, 其中三者的最终稳定值分别为: 理论分析结果为 53.6 N, 有限元分析结果为 51.1 N, 而试验监测数据结果为 53.8 N, 三者相差很小, 验证了有限元分析和理论分析方法的正确性。

另外, 理论分析和有限元分析两者的下降速率相差不大, 但是均要大于试验的结果, 其原因在进行理论分析的时候, 其中所得出的蠕变参数是在常应力作用下得到的, 而实际在试验过程中, 介质材料上的应力是在不断降低的, 因此其中的蠕变参数也相应有所调整, 使得试验过程中的预应力下降速率降低。

另外, 当对锚索施加初应变时, 理论分析结果表

明锚索的初始内力要大于有限元结果,以及试验结果,这是因为,为了保持有限元计算结果和理论分析结果的一致性,其中选择的参数是介质材料的弹性模量,而没有选择变形模量,同时在理论分析中也没有考虑到泊松比的影响,因此在初始弹性压缩的时候,理论分析情况下,压缩量相对较小,使得锚索内力相对较大。但是到蠕变结束的时候,两者已经相对比较接近了。

2 金丽温高速公路高边坡典型锚索长期监测数据及反分析

图8为金丽温高速公路K81高边坡典型锚索预应力实测曲线,以及采用上述分析方法得到的模拟分析结果,图中实线为实测变化曲线,从图中可以看出,其锚索预应力长期变化基本符合负指数降低规律,对于岩体采用广义 Kelvin 模型,通过对锚墩在预应力张拉过程中的位移监测数据进行有限元反分析,得其弹性模量为 $Eh=60\text{ MPa}$,再对锚索预应力实测数据进行反分析拟和,得到其坡体介质材料的另外两个蠕变参数,其中 $EI=46\text{ MPa}$, $\eta=657\text{ MPa/d}$ 。

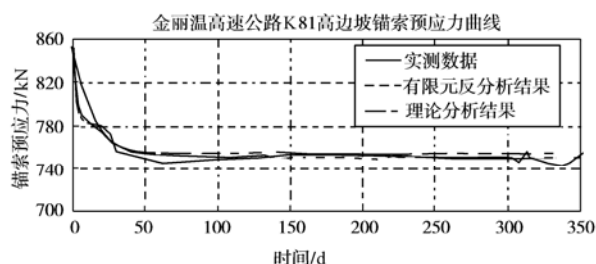


图8 高边坡典型锚索预应力实测长期变化曲线及模拟分析

Fig. 8 Typical prestress variation curve of anchor tie in high slope and its simulation

因此,其坡体介质材料的蠕变公式为

$$\xi(t) = \sigma_0 [16.67 + 21.74(1 - e^{-0.07t})] \times 10^{-3} \quad (10)$$

图8中虚线和点划线分别为有限元拟和结果,以及理论分析拟和结果,从曲线比较分析中可以看出,在锚索监测初期,由于其受钢绞线回缩,施工影响,混凝土压缩徐变,以及天气等因素的影响,其锚索实测下降速度要大于拟和结果,但是在后期则基本稳定,同时受到一些因素的干扰,例如天气,温度,以及地下水位等,会出现小量的波动。

从以上分析可以看出,通过对锚索预应力长期损

失的反分析,对岩体的蠕变特性进行初步的了解,可以供类似的工程参考。

3 结 论

通过与已有的试验结果以及有限元分析结果进行比较,说明把锚索预应力变化和坡体蠕变进行耦合考虑的模型是正确的,对此进行推导求得的锚索预应力长期变化公式是适用的。

借助于此公式,在工程实践以及科研中,可以对目前已有的预应力长期监测数据进行整理,分析其坡体介质的蠕变参数。也可以通过对已有坡体介质材料的蠕变参数分析,对锚索长期预应力变化进行估算,从而对实际工程中的锚索预应力监测数据进行分析评价,对工程中的异常情况作出判断。

由于目前对于锚索预应力的监测数据还是比较少,建议在工程实践中积累更多的锚索预应力实测数据,通过和坡体介质材料的蠕变参数一起分析评价,对锚固工程中的长期预应力变化建立系统的数据库,供科研与工程实践应用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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, 2000, 17(1): 39-41.
- [3] Brahim Benmokrane, Gerand Ballivy. Five-year monitoring of load losses on prestressed cement-grouted anchors [J]. Canadian Geotechnique Journal, 1991, 28(5): 668-677.
- [4] 张宏博,李英勇,宋修广. 边坡锚固工程中锚索预应力的变化研究[J]. 山东大学学报, 2002, (12): 574-577.
- [5] 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, (4): 194-197.
- [6] 丁多文,白世伟. 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: 65-69.
- [7] 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, (2): 251-256.
- [8] 周德培,朱本真,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.