

边坡锚固工程中广义 Burgers 模型的应用研究

夏 雄

(常州大学 岩土工程研究所, 江苏 常州 213164)

摘 要: 流变是岩土材料的基本力学特性, 流变效应是影响边坡变形及稳定性的重要因素。边坡锚固工程中, 坡体介质应力调整和锚固力松弛直接影响加固坡体工程的稳定性, 对工程安全性起着制约作用。考虑到坡体蠕变影响与锚固应力松弛的相互作用, 结合工程实践, 采用弹簧和 Burgers 并联模型进行锚索加固坡体的耦合蠕变分析, 探讨其理论模型, 获得了蠕变耦合模型的黏弹性流变参数。流变模型与试验结果的比较, 显示了所建模型的正确性与合理性。

关 键 词: 边坡; 流变效应; 广义 Burgers 模型; 耦合

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

A generalized Burgers model of reinforced slope by anchorage

XIA Xiong

(Institute of Geotechnical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: Rheology is basic mechanical property of rock and soil media. For the slope, rheological property of rock and soil media is one of the important reasons for the large deformation and loss of stability. The time-dependent behavior of rock mass is one of the important factors, that influence the deformation and long-term stability of the slope. Based on coupling of long-term prestress loss of anchor tie and slope creep, a new improved Burgers model is built; and the theoretical function of long-term prestress variation is put forward. By comparison with the experiment result, which gets the viscoelastic rheological parameters of suggested model. The comparison between the rheological model and experimental result shows that the generalized Burgers model is right and reasonable.

Key words: slope; rheological effect; generalized Burgers model; coupling

1 引 言

在坡体桩锚结构加固系统中, 桩锚结构是保持边坡稳定性的支护措施, 而被加固坡体既作为施力介质又作为受力介质, 二者相互作用下会产生力学性能的调整。在其发展变化过程中, 坡体介质的外形和内在的工程水文地质特性都会随着时间不断地发生变化, 同时桩锚支护结构也会由于应力松弛产生支护应力的调整, 从而使得边坡的稳定程度随之改变, 某些条件下可能造成工程结构的破坏。

产生坡体稳定性的改变因素是多方面的。就岩土体本身而言, 边坡与时间有关的变形主要是由岩土体蠕变引起。同时桩锚支护力的调整也是关系到坡体稳定性的关键因素。因此, 桩锚结构与坡体的耦合一直是国内外岩土工程界关注的焦点^[1]。

岩土边坡的蠕变目前在国内外的研究尚少, 但因对岩石特性包括岩土体流变特性研究不够而导致

延误施工甚至工程失败的先例不胜枚举, 意大利瓦依昂 (Vajont) 库岸蠕滑破坏^[2]是其中之一。自 20 世纪 30 年代以来, 国内外在岩石流变特性研究方面已经取得了许多重要的研究成果, Zischinsky^[3]用流变学模型描述了高边坡的变形并指出岩石的蠕变在高边坡变形中起了重要作用。Broudbent 和 Ko^[4]发展了实验流变学。实验流变学成功地描述了实际流变效应并能用来控制边坡的自行破坏。Samtani 等^[5]提出了一个预测自然边坡蠕变运动的弹黏塑性模型, 并用有限元程序进行了计算。章德根, 剡公瑞^[6]采用弹—黏弹 / 黏塑性模型来描述岩石介质的时效特性, 计算了三峡岩体高边坡开挖后实际的流变性状。这些研究大多集中在岩石流变力学特性的试验研究、流变模型的建立及参数辨识、解析与数值方法研究等方面, 将成果真正应用于实际工程却为数不多。

前人试验研究与理论分析中^[7-9], 往往把锚固

收稿日期: 2010-03-02

基金项目: 江苏工业学院科研基金资助(No.ZMF08020054)。

作者简介: 夏雄, 男, 1972 年生, 工学博士, 副教授, 主要从事边坡大变形与环境岩土工程研究。E-mail: xiaxiong@jpu.edu.cn

力的损失和坡体的蠕变分开单独考虑,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。本文在考虑坡体蠕变影响,锚固应力松弛的基础上,着重考虑坡体蠕变与锚索结构松弛的流变耦合关系,探讨坡体加固工程中流变模型的识别,并通过工程应用进行验证。

2 工程问题

某工程位于京珠高速公路粤境北段,地层结构按成因可划分为 3 类:其一为表层为较厚的残坡积黏土层;其 2 为表层下的全~强风化软质岩层,主要是泥质砂岩、砂岩、泥岩及煤层;其 3 为弱风化层,仍是泥岩、砂岩,虽是弱风化,但是岩体强度较低,裂隙发育,稳定性差,如图 1 所示。该工点属中亚热带季风气候,温暖湿润,雨量充沛,春夏多雨,秋冬干旱少雨。

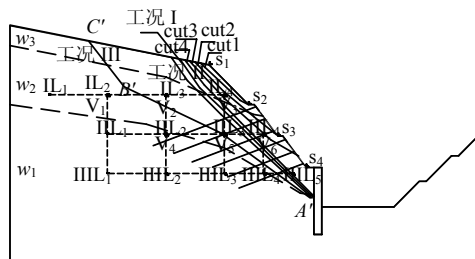


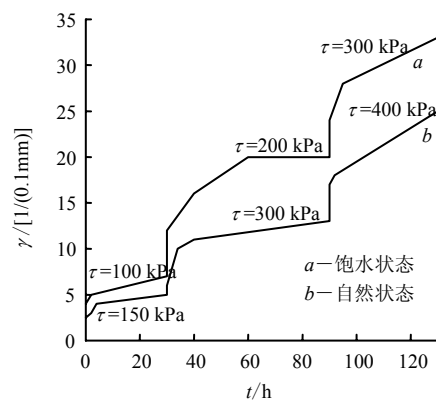
图 1 工程简图
Fig.1 Sketch of project

每级坡开挖完后,要进行喷浆护面、打孔、插锚索、注浆、安装地梁、张拉锚索并锁定和浇注抗滑桩等多项工序,完成这些工序要耗费 70~171 h。在这段时间内坡体因开挖二次应力作用会导致较大的蠕变变形。

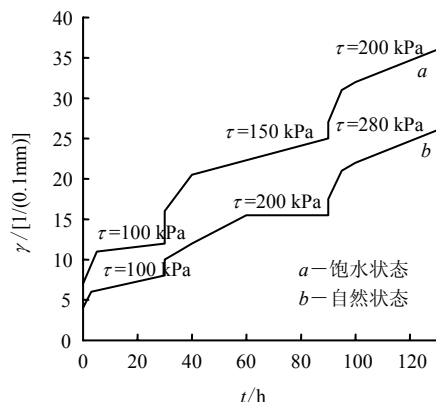
3 流变模型辨识

对坡体 3 类地层材料进行剪切蠕变试验,其试验结果如图 2 所示。

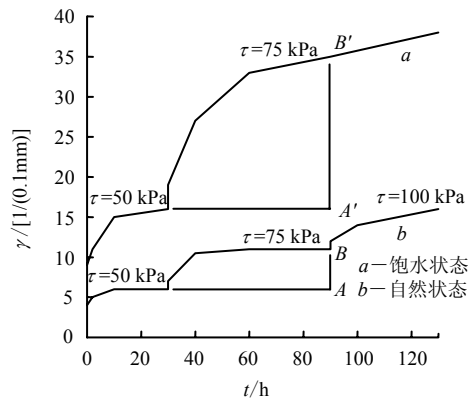
从图可知:材料在施加应力后立即产生的瞬时弹性应变,具有弹性特性;当剪应力保持为常数时,应变随时间而增加,说明材料具有黏性特性。注意到 Maxwell 模型的蠕变是与时间呈正比,其应变呈直线无止境地增加。因此,流变效应分析应含有 Maxwell 模型。从图中又能看出,曲线的敛散性与应力水平无关,因而又具有 Kelvin 型的蠕变特征。同时为了避免求解的困难,便于工程计算,可以不考虑塑性特征。综上所述,它应该是将 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联起来的 Burgers 复合黏弹性模型。其模型组合如图 3 所示。



(a) W_1 地层, 法向应力 $\sigma=200$ kPa

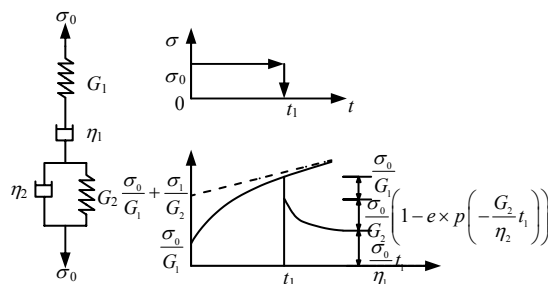


(b) W_2 地层, 法向应力 $\sigma=200$ kPa



(c) W_3 地层, 法向应力 $\sigma=200$ kPa

图 2 坡体材料的剪切蠕变试验结果
Fig.2 Creep curves of rock sample



(a) Burgers 模型 (b) 蠕变与卸荷曲线

图 3 柏格斯 (Burgers) 模型
Fig.3 Illustrations of Burgers model

比较图 2、3 可知, 该组合模型能较好地模拟岩土材料在低应力作用下的弹性变形、初始蠕变阶段的变形以及稳定蠕变阶段的变形, 具有较好的适应性。

Burgers 模型蠕变方程为^[10]

$$\gamma_t = \sigma_0 \left[\frac{1}{G_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{G_2} (1 - e^{-G_2 t / \eta_2}) \right] \quad (1)$$

式中: σ_0 、 γ_t 为岩土材料按照 Burgers 模型对应的应力和应变; G_1 、 G_2 、 η_1 、 η_2 为 Burgers 模型岩体的蠕变参数; t 为时间参数。

当考虑到边坡的蠕变和锚索预应力损失的耦合作用时, 对锚索可以采用弹簧进行模拟, 得到如图 4 耦合蠕变模型。

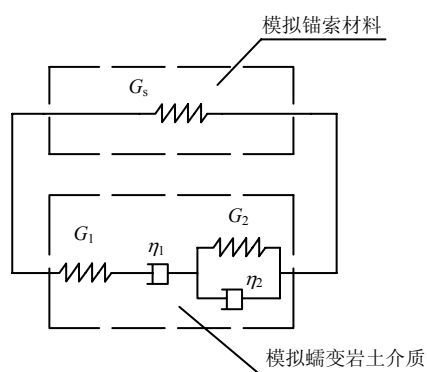


图 4 锚索与蠕变介质耦合模型

Fig.4 Improved Burgers constitutive model

式中: G_s 为锚索的等效弹性模量。其余参数同上。

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, 在分析时只考虑自由段的影响, 而把锚索的另一端定为固定端。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, $G_s = G_m A_s / A_r$ 。其中 G_m 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。

对于坡体, Burgers 模型本构关系为

$$\sigma_B + \left(\frac{\eta_2}{G_2} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1}{G_2} \right) \dot{\sigma}_B + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \ddot{\sigma}_B = \eta_1 \dot{\gamma}_B + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} \ddot{\gamma}_B \quad (2)$$

式中: σ_B 、 γ_B 为岩土体按照广义 Burgers 模型对应的应力和应变。

考虑到预应力锚索的本构关系为

$$\gamma_s = \frac{\sigma_s}{G_s} \quad (3)$$

锚索与岩土体的耦合作用遵循并联法则

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_B, \quad \gamma = \gamma_s + \gamma_B \quad (4)$$

式中: σ 、 γ 为锚索与岩体耦合的应力和应变; σ_s 、 γ_s 为锚索体的应力和应变。

考虑了锚索预应力损失与坡体介质材料蠕变耦合后, 耦合模型本构关系为

$$G_s \gamma_{s0} - G_s \gamma_B - G_s \left(\frac{\eta_2}{G_2} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1}{G_2} \right) \dot{\gamma}_B - G_s \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \ddot{\gamma}_B = \eta_1 \dot{\gamma}_B + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} \ddot{\gamma}_B \quad (5)$$

在此模型中, 通过对锚索弹簧单元施加初始应变 γ_{s0} 来模拟预应力加载。整理得

$$\omega \ddot{\gamma}_B + \xi \dot{\gamma}_B + G_s \gamma_B = G_s \gamma_{s0} \quad (6)$$

其中

$$\omega = \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} + G_s \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2}; \quad \xi = \eta_1 + G_s \left(\frac{\eta_2}{G_2} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1}{G_2} \right)$$

解微分方程知

$$\gamma_B = D_1 e^{\psi_1 t} + D_2 e^{\psi_2 t} + \gamma_{s0} \quad (7)$$

式中: $\begin{cases} \psi_1 \\ \psi_2 \end{cases} = \frac{-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 4\omega G_s}}{2\omega}$; D 为实常数, 必须通过初始条件代入求得。

4 流变参数确定

采用下式^[11]拟合每级荷载下的蠕变曲线

$$\gamma_t = A + Bt + C(1 - e^{-Dt}) \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为蠕变曲线参数。利用线性回归方法, 以每级荷载下蠕变曲线的起点作为原点, 以曲线上各点到蠕变曲线的起点引出的水平线之间的距离作为对应时刻的应变值, 将试验数据输入计算机进行线性回归, 可得出各级荷载作用下的 A 、 B 、 C 、 D 值。

以工况 III 作为算例分析的工况, 潜在滑面部分穿越 W_3 地层, 绝大部分落在 W_2 地层中, 按照滑面线区域范围作为加固区域, 换算到线路方向单位长度的锚索作用力就等于作用于坡体上的总的预应力之和。锚索体的弹性模量进行等效转化, $G_s = G_m$

A_s/A_r 。其中 G_m 为锚索体实际的弹性模量, A_s 为锚索体的面积, 对于该断面取 4 m^2 , A_r 为岩体的面积, 对于该断面取 680 m^2 。则锚索等效弹性模量 G_s 取 1235 MPa 。对锚索预应力初始值进行反分析拟合, 确定初始预应变 γ_{s0} 。

流变模型参数计算如下^[11]:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\sigma_0}{A} & \eta_1 &= \frac{\sigma_0}{B} \\ G_2 &= \frac{\sigma_0}{C} & \eta_2 &= \frac{\sigma_0}{CD} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其具体计算选取数值如表 1^[11]所示。

表 1 流变模型计算参数^[11]

锚索等效弹模 G_s/MPa	剪应力 τ/kPa	弹性模量 G_1/MPa	粘滞系数 $\eta_1/\text{MPa} \cdot \text{d}$	地层弹性模量 G_2/MPa	粘滞系数 $\eta_2/\text{MPa} \cdot \text{d}$
1 235	200	202	254	486	348

5 锚固坡体预测

考虑了锚索预应力损失与坡体介质材料蠕变耦合后, 在锚索初始应变条件下, 坡体介质材料上均布应力的变化式为

$$\sigma_B = 77.37\gamma_{s0}e^{-0.45t} + 96.23\gamma_{s0}e^{-2.12t} \quad (10)$$

根据锚索张拉吨位 705.6 kN , 由公式 $F = \sigma_s \times A_s = G_m \gamma_{s0} A_s L_0$, L_0 为锚索张拉段长度, 求出预应力锚索初始应变量 $\gamma_{s0} = 3.342 \times 10^{-5}$ 。

由此可知, 在锚索初始应变条件下, 考虑耦合的锚索应力任一时刻公式为

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_{s0} - C_1 e^{r_1 t} - C_2 e^{r_2 t} = \\ &\sigma_{s0} - 77.37\gamma_{s0}e^{-0.45t} - 96.23\gamma_{s0}e^{-2.12t} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: C_1 、 C_2 为实常数, 必须通过初始条件代入求得。可以计算得 $C_1 = 77.37\gamma_{s0} \text{ MPa}$, $C_2 = 96.23\gamma_{s0} \text{ MPa}$ 。

作为坡体与锚索耦合分析, 可以从宏观上认为, 在某一断面, 坡体上各锚索按照相同速率衰减, 由此可以给出锚索预应力的衰减预测曲线。锚索内力衰减值就等于作用于坡体上的总的预应力之和, 即 $F = \sigma_B \times A_r / N$ 。N 为断面锚索根数。由计算应力, 通过转化即可求得锚索的内力图如图 5 所示。可以看出, 模型计算符合常规锚索预应力随时间衰减变化 3 个阶段, 即预应力骤然降低阶段、调整平衡阶段和趋于稳定阶段^[11]。

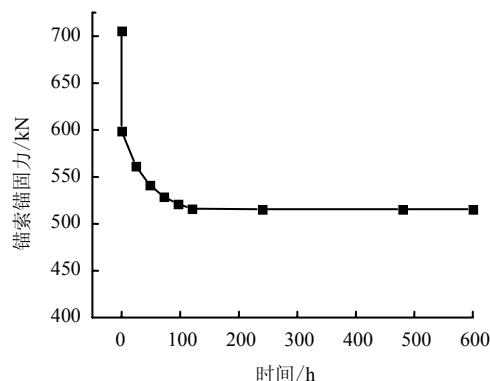


图 5 耦合模拟锚索预应力变化曲线

Fig.5 Trend of prestress variation by model calculation

同时, 根据模型分析, 可以计算得出坡体位移变化状况。其水平蠕变曲线如图 6 所示。

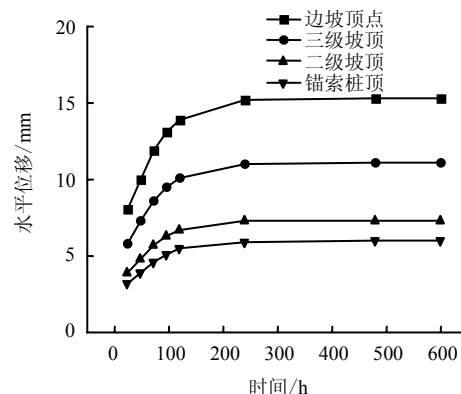


图 6 耦合坡体水平蠕变曲线

Fig.6 Calculation trend of slope displacement by coupled model

现场 2000 年 2 月至 8 月间边坡测试位移曲线如图 7^[12]所示, 其发展变化规律与模型预测结果比较一致, 说明其合理性。

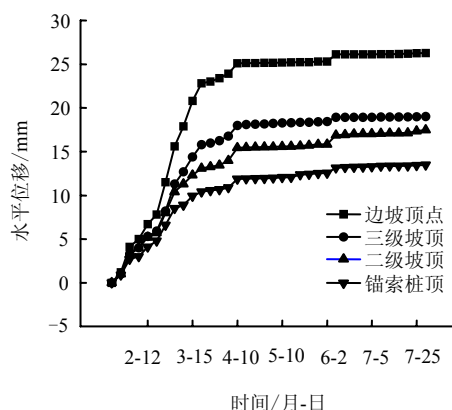


图 7 坡体水平位移监测曲线

Fig.7 Slope displacement-time curves

6 结 论

(1) 从工程算例分析可以看出: 锚索预应力变化基本符合常规锚索预应力随时间衰减变化规律, 坡体位移变化也与工程实测情况规律一致, 因此, 采用弹簧和 Burgers 并联模型进行耦合蠕变分析是合理的。

(2) 在实际试验过程中, 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。并且由于试验数据有限, 必然存在一定的误差。但理论分析曲线和模型试验数据规律比较接近, 同时理论分析和试验数据两者的下降速率相差不大, 几乎都是在 150 h 左右得到锚固数值的稳定, 因此, 能够验证耦合蠕变理论方法分析锚索预应力变化的正确性。

参 考 文 献

- [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, 27(6): 1081—1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 27(6): 1081—1106.
- [2] 王兰生. 意大利瓦依昂水库滑坡考察[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 145—148.
WANG Lan-sheng. Investigation to the Italy Vajont reservoir landslide[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2007, 18(3): 145—148.
- [3] ZISCHINSKY U. On the deformation of high slopes[C]//1st Cong. Int. Soc. of Rock Mech. Proc.. Lisbon: [s. n.], 1966.
- [4] BROADBENT C D, KO K C. Rheologic aspects of rock slope failures[C]//Stability of Rock Slopes.[S. l.]: [s. n.], 1971.
- [5] SAMTANI N C, DESAI C S, VULLIET L. A viscoplastic model for creep natural slopes[C]//Compute Methods and Advances in Geomechanics.[S. l.]: [s. n.], 1994.
- [6] 章德根, 剡公瑞. 岩体高边坡流变学性状有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 166—170.
ZHANG De-gen, YAN Gong-rui. Finite element analysis for rheological behavior of rock high slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 166—170.
- [7] 夏才初, 孙钧. 蠕变试验中流变模型辨识及参数确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(5): 498—503.
XIA Cai-chu, SUN Jun. Identification of rheological models and parameters estimation in creep test[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 1996, 24(5): 498—503.
- [8] 沈明荣, 朱银桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223—226.
SHEN Ming-rong, ZHU Yin-qiao. Test study on creep characteristics of regular teeth-shaped structure faces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 223—226.
- [9] 周火明, 徐平, 王复兴. 三峡永久船闸边坡现场岩体压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1882—1885.
ZHOU Huo-ming, XU Ping, WANG Fu-xing. In-situ compressive creep testing study on shiplock slope rockmass of TGP[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1882—1885.
- [10] 周德培, 毛坚强, 朱本珍. 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.
- [11] 夏雄. 桩锚结构设计理论及安全性评价[博士论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [12] 中铁建筑研究所. 京珠高速公路粤境北段高边坡工程效果评价报告[R]. 2009.