

DOI: 10.11779/CJGE2019S1032

考虑注浆压力影响锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型

陈昌富^{1, 2}, 朱世民^{1, 2}, 高傑^{1, 2}, 温永凯^{1, 2}, 毛凤山^{1, 2}

(1. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 锚-土界面剪切蠕变特性直接关系到锚杆支护系统的长期锚固性能, 而工程锚杆施工中通常采用的压力注浆对锚固体-土体界面蠕变特性有重要影响。为研究不同注浆压力下的锚-土界面剪切蠕变特性, 本文利用自主研制的压力注浆装置制作了不同注浆压力下的锚杆微元体试样, 利用自行设计制作的锚-土界面剪切蠕变特性测试系统对试样进行分级加载, 获得了不同注浆压力下的锚-土界面剪切蠕变全过程曲线, 利用“陈氏加载法”将蠕变全过程曲线转化为分别加载蠕变曲线, 并采用等时曲线法获得不同注浆压力下的锚-土界面长期抗剪强度。为提高建模精度, 提出了将蠕变试验曲线经对数转换后来建立蠕变模型的方法, 并引入 Kriging 法, 建立了考虑注浆压力影响的锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型。通过所建模型的预测结果与试验结果对比分析发现, 本文方法建立的锚-土界面剪切蠕变模型, 其拟合和预测精度均很高。

关键词: 锚-土界面; 蠕变; 注浆压力; Kriging 方法; 对数转换

中图分类号: TU411.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0125-04

作者简介: 陈昌富(1963—), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 主要从事边坡工程、岩土工程支护和地基处理等方面的研究工作。E-mail: cfchen@163.com。

Kriging method-based creep model for anchor-soil interface considering grouting pressure

CHEN Chang-fu^{1, 2}, ZHU Shi-min^{1, 2}, GAO Jie^{1, 2}, WEN Yong-kai^{1, 2}, MAO Feng-shan^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The long-term work performance of anchored systems depends on the shear creep behavior of anchor-soil interface. The technology of pressure grouting used in the construction of anchored systems is recognized to influence the creep behavior of anchor-soil interface greatly. A specially apparatus with capability of applying different grouting pressures is designed to investigate the impact of grouting pressures for the anchor-soil interface. The element-anchor specimens with different grouting pressures are made by using this apparatus. The time-history curves of pullout displacement are obtained in applying multi-stage loading to those prepared specimens by a specially designed creep pullout device. Chen's method is adopted to transform those individual time-history curves of pullout displacement into a group of creep curves with varying loading stresses for each anchor specimen equivalently. Using the isochronal curve method the long-term shear strengths of anchor-soil interface are derived for the specimens with different grouting pressures. Aiming to improve the modelling precision, the creep curves with natural time coordinate are rebuilt to logarithmic time coordinates. The Kriging creep model for anchor-soil interface accounting for grouting pressure is established based on the Kriging method. Comparison between the predicted and the measured results for creep response validates that the proposed creep model has high precision in the fitting and prediction.

Key words: anchor-soil interface; creep; grouting pressure; Kriging method; logarithmic transformation

0 引言

锚固技术在岩土工程支护和加固中广泛应用, 而锚固体与岩土体界面抗剪强度决定了锚固系统的锚固能力, 尤其是锚-土界面的剪切蠕变特性将直接影响到工程锚杆的长期锚固性能。为此, 国内外诸多学者^[1-4]研究了锚-土界面的蠕变特性及长期强度, 提出了相应

的元件^[1]或经验蠕变模型^[2-4]。现有蠕变模型可考虑单因素(比如剪应力水平)的影响, 但由于考虑多因素影响会使建模变得非常复杂, 目前尚未见有同时考虑注浆压力、剪应力水平等多因素影响的锚-土界面剪切

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572298)

收稿日期: 2019-04-29

蠕变模型。而研究结果表明^[5], 压力注浆可显著提高锚杆的锚固能力。因此, 研究注浆压力对锚-土界面剪切蠕变性能的影响具有重要的理论和工程实际意义。

由于 Kriging 插值法^[6]为复杂工程的建模提供了强有力的工具, 并已在岩土工程中得到应用^[7~8], 因此, 本文尝试采用 Kriging 插值法建立考虑注浆压力影响的锚-土界面剪切蠕变模型。

本文首先利用自主研制的压力注浆装置制作不同注浆压力下的锚杆微元体试样, 并开展分级加载蠕变试验; 然后对获得的蠕变试验数据进行预处理, 引入 Kriging 法, 选取部分预处理后的不同注浆压力、不同剪应力水平的蠕变试验曲线来建立蠕变模型; 最后, 利用建立的 Kriging 蠕变模型对未参与回归建模的蠕变试验曲线进行预测, 以验证所建模型的预测效果。

1 不同注浆压力下锚-土界面蠕变试验

1.1 试验方法

(1) 试验材料。试验所用红黏土取自湖南省某高速公路施工现场, 其主要物理力学参数为: 液限 w_L 为 36.8%, 塑限 w_p 为 20.9%、塑性指数 I_p 为 15.9, 颗粒相对密度 d_s 为 2.687、最大干密度 ρ_{max} 为 1.72 g/cm³、黏聚力 c 为 38.7 kPa, 内摩擦角 ϕ 为 24.5°。制作锚固体所用注浆材料为掺有 1% 缓凝剂的水泥砂浆, 其配比为: 水: 砂: 水泥 = 0.45 : 1 : 1。所用水泥为 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥。

(2) 土坯制作。采用文献[2~4]的方法和装置, 先配置含水率为 0.22 的土料, 再分层按相同的击实功能进行击实, 最终形成直径为 22 cm、高度为 10 cm 的圆柱状土坯, 土坯中锚孔直径为 3.8 cm。

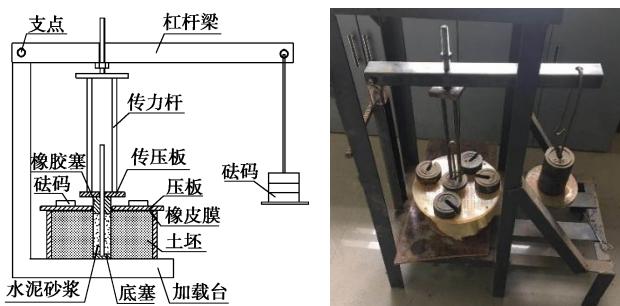


图 1 压力注浆装置

Fig. 1 Pressure-grouting device

(3) 试样制作。先将 $\phi 8$ 螺纹钢筋置于土坯中预留的锚孔中央; 再将配好的水泥砂浆灌入锚孔并振捣密实; 然后利用自制的静压注浆装置(图 1)对 3 组土坯锚孔中的水泥砂浆分别施加 0, 0.07 MPa 和 0.13 MPa 的压力, 加压时间为 20 min, 由此制作模拟静压注浆的锚杆单元体试样。注浆压力 p 可通过砝码重量、

杠杆比和锚孔尺寸等参数计算得到。此外, 为防止水泥砂浆外渗, 试样顶面放置橡皮膜, 锚孔底部放置橡胶塞。

(4) 试样养护及蠕变试验。试样密封养护 28 d 后, 再利用文献[2~4]的蠕变加载装置进行分级加载, 可测得锚-土界面分级加载全过程曲线。其中蠕变稳定标准为连续 24 h 内的剪切位移增量小于 0.01 mm。

1.2 试验结果

对测得的锚-土界面分级加载全过程曲线采用“陈氏加载法”^[9]处理, 得分别加载蠕变曲线如图 2。

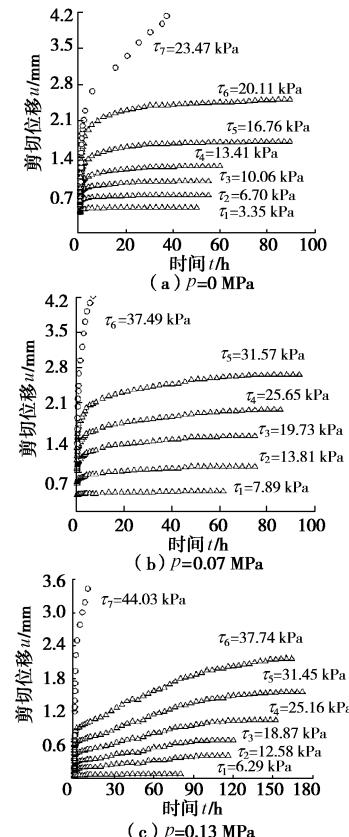


图 2 分别加载界面剪切蠕变曲线

Fig. 2 Shear creep curves obtained by Chen's method

根据等时曲线法确定出不同注浆压力下的锚-土界面长期抗剪强度 τ_∞ ^[2~4]如表 1 所示。

表 1 不同注浆压力下锚-土界面长期抗剪强度

Fig. 1 Long-term shear strengths of anchors-soil interface under different grouting pressure

注浆压力 p/MPa	长期抗剪强度 τ_∞/kPa	有压注浆下 τ_∞ 增长率 /%
0	16.76	—
0.07	31.57	88.4
0.13	37.74	125.2

由图 2 和表 1 可知, 注浆压力可显著提高锚-土界面的剪切性能和长期抗剪强度 τ_∞ , 注浆压力 p 从 0 增大至 0.07, 0.13 MPa, 锚-土界面的长期抗剪强度 τ_∞ 分别增长了 88.4% 和 125.2%。

2 Kriging 插值法基本原理

Kriging 插值法是一种利用已知样本点线性加权获得未知位置处的函数值并通过对加权系数插值得到变量空间内任一点函数值的一种无偏估计方法:

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i , \quad (1)$$

式中, λ 为加权系数, y_i 为样本点观测值。

根据无偏估计与方差最小原理, 有

$$E(\hat{y}(x_i) - y(x_i)) = 0 , \quad (2)$$

$$D[\hat{y}(x_0) - y(x_0)] = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) , \quad (3)$$

式中, $\gamma(x_i, x_j)$ 为相关函数。

将式(1)代入式(2), 可得

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 . \quad (4)$$

为便于计算加权系数 λ , 将未知函数看作是高斯随机过程, 并引入拉格朗日算子 φ , 由此可得

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \varphi = \gamma(x_0, x_i) \quad (i=1, 2, \dots, n) . \quad (5)$$

求得加权系数 λ 后, 即可利用式(1)求得指定位置的响应估计值。

3 考虑注浆压力影响的锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型

锚-土界面剪切蠕变可分为衰减和加速蠕变两个阶段。本文仅对衰减蠕变阶段建模。

3.1 模型的建立

在其他因素相同前提下, 锚-土界面剪切蠕变位移 u 将与注浆压力 p 、剪应力水平 τ 及蠕变时间 t 有关, 可采用如下的函数表示:

$$u = f(p, \tau, t) . \quad (6)$$

因此, 本文模型的输入变量为注浆压力 p 、剪应力水平 τ 及蠕变时间 t , 输出变量为蠕变剪切位移 u 。

研究表明^[10], 若局部样本点的变化率较大, 则 Kriging 模型的训练将存在失真, 进而影响模型的拟合和预测效果。由图 2 可知, 锚-土界面剪切蠕变曲线具有高度的非线性特征, 过渡蠕变阶段所对应的蠕变速率变化较大, 而进入稳态蠕变阶段后, 蠕变速率变小并渐趋于稳定。由此可知, 采用 Kriging 法建立锚-土界面剪切蠕变模型时, 若不对蠕变数据进行预处理而直接建模, 则所建模型的精度较差。

为此, 拟对蠕变试验数据进行预处理, 然后再根据预处理后的蠕变试验结果建立 Kriging 蠕变模型,

具体步骤如下:

(1) 对蠕变试验数据进行预处理。将蠕变时间 t 作如下的对数变换:

$$t' = \ln(t + a) , \quad (7)$$

式中, t' 为预处理后的对数蠕变时间, a 为大于 0 的常数, 其取值对建模精度影响不大, 为简化之见, 取 $a=e$ 。

(2) 模型训练。蠕变试验数据预处理后, 输入变量 t 变为对数蠕变时间 t' 。采用预处理后的不同注浆压力 p 、不同剪应力水平 τ 下的部分锚-土界面剪切蠕变试验结果进行模型训练。

(3) 将获得的各蠕变拟合曲线(对数蠕变时间 t' -剪切位移 u 曲线)作逆变换, 可得通常情况下的蠕变拟合曲线(即时间 t -剪切位移 u 曲线)如图 3 中实线。

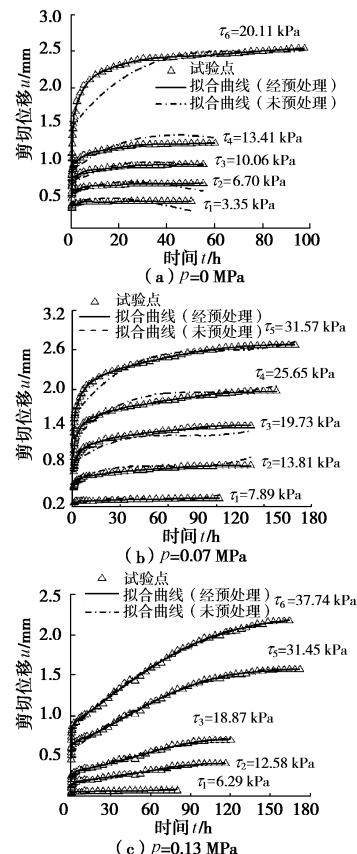


图 3 蠕变曲线拟合效果对比

Fig. 3 Comparison of fitting results of original/pretreated creep data

(4) 拟合效果对比分析。为说明蠕变数据预处理对提高模型精度上的优越性, 直接利用原始的蠕变数据对 Kriging 模型进行训练, 得相应蠕变拟合曲线如图 3 中点划线所示。

由图 3 可知, 利用预处理后的蠕变数据建立的 Kriging 蠕变模型的拟合效果明显优于利用原始数据建立的 Kriging 蠕变模型, 即使是蠕变曲线急剧上升

的起始段以及过渡段也能被很好地刻画出来。

3.2 蠕变模型的预测效果及精度分析

为对比分析分别采用经过和不经过预处理蠕变数据所建的 Kriging 蠕变模型对锚-土界面蠕变曲线的预测效果, 将蠕变模型对未参与模型训练的不同注浆压力的蠕变曲线($p=0, 0.13 \text{ MPa}$)进行预测, 结果如图 4 所示。

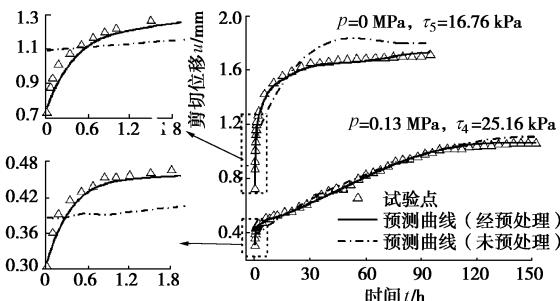


图 4 蠕变预测效果对比

Fig. 4 Comparison of predicted results of original/pretreated creep data

通过对上述两种情况建立的 Kriging 蠕变模型拟合和预测的误差分析可得: 利用预处理的蠕变数据建立的 Kriging 蠕变模型拟合及预测的均方根误差最大为 0.0178, 而利用原始的蠕变数据建立的 Kriging 蠕变模型均方根误差最大为 0.2097, 两者相差 10 倍。此外, 前者最大相对误差为 9.60%, 而后者达 81.12%, 且相对误差均高于 10%。由此可知, 利用 Kriging 方法建立锚-土界面剪切蠕变模型时, 对蠕变数据进行预处理将显著提高建模精度, 尤其是在蠕变初期和过渡段(如图 3、图 4)。

4 结 论

(1) 基于杠杆加载原理研制了锚杆微元体试样的压力注浆装置, 并开展了 3 组不同注浆压力的锚-土界面剪切分级加载蠕变试验, 获得了蠕变全过程曲线。

(2) 利用等时曲线法获得不同注浆压力下的锚-土界面长期抗剪强度, 结果表明: 随着注浆压力的提高, 锚-土界面长期抗剪强度显著增大。

(3) 基于预处理的蠕变试验数据, 建立了能够综合考虑注浆压力和剪应力水平的锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型, 结果表明, 对蠕变试验数据进行预处理, 可较好地克服 Kriging 方法的缺陷, 提高模型拟合和预测的精度。

参考文献:

[1] 许宏发, 卢红标, 钱七虎. 土层灌浆锚杆的蠕变损伤特性

- 研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 61 - 63. (XU Hong-fa, LU Hong-biao, QIAN Qi-hu. Creep damage effects of pulling grouting anchor in soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 61 - 63. (in Chinese))
- [2] 陈昌富, 刘俊斌, 徐优林, 等. 锚-土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1762 - 1768. (CHEN Chang-fu, LIU Jun-bin, XU You-lin, et al. Tests on shearing creep of anchor-soil interface and its empirical model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1762 - 1768. (in Chinese))
- [3] 高傑, 朱世民, 陈昌富. 基于 RBF 神经网络的红黏土-锚固体界面蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 122 - 126. (GAO Jie, ZHU Shi-min, CHEN Chang-fu. RBF neural net-work based creep model of red clay-anchor interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 122 - 126. (in Chinese))
- [4] 高傑. 红黏土土层锚杆蠕变特性试验及理论研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018. (GAO Jie. Study of creep characteristic and theory for grouted anchor in red clay[D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese))
- [5] YIN J H, ZHOU W H. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(9): 1198 - 1209.
- [6] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119 - 139.
- [7] ZHANG J, HUANG H W, PHOON K K. Application of the kriging-based response surface method to the system reliability of soil slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 651 - 655.
- [8] TAMARA A B, SOUBRA A H, JAWAD T. Kriging-based reliability analysis of strip footings resting on spatially varying soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(10): 04018071.
- [9] TAN T K, KANG W F. Locked in stresses, creep and dilatancy of rocks, and constitutive equations[J]. Rock Mechanics, 1980, 13(1): 5 - 22.
- [10] CHUNG H S, ALONSO J J. Using gradients to construct cokriging approximation models for high-dimensional de-sign optimization problems[R]. AIAA 2002-0317, 2002.

(责编: 孙振远)