

文章编号: 1000-7598(2013)11-3091-05

人工冻土黏弹塑性本构参数反分析研究

袁文华

(1. 安徽理工大学 教育部“矿山地下工程”研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 通过大量的人工冻结黏土蠕变试验研究, 获得在高偏应力下人工冻结黏土具有显著的蠕变特性: 当应力水平较低时, 人工冻土发生黏弹性蠕变特性; 当应力水平较高时, 人工冻土发生黏塑性蠕变特性。因此, 以西原模型为基础, 增加一个黏弹性元件项和用抛物线屈服函数代替塑性屈服项, 构建了高应力下抛物线型黏弹塑性蠕变本构模型。改进的西原模型可以较好地描述人工冻土剪切蠕变特性。基于小生境技术的遗传算法和人工冻土黏弹塑性模型有限元理论, 在 FEPG (有限元程序生成器) 自动生成平台上研发了位移反分析程序。利用现场实测数据对深井冻结井筒开挖过程进行了位移反分析, 获得了与试验相一致的冻土本构力学模型参数, 数值分析结果与实测数据之间的误差在 6% 以内, 反演结果验证了模型的可行性。冻结井筒开挖过程的位移反分析获得的人工冻土本构模型参数, 能反映冻结壁施工过程和有效冻结范围内冻土本构参数平均值, 因而具有广泛的代表性, 对冻结壁应力场、位移场和稳定性预测具有重要工程意义。

关键词: 遗传算法; 位移反分析; 人工冻土; 黏弹塑性本构模型; FEPG

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

Back analysis of viscoelasto-plastic constitutive parameters of artificial frozen soil

YUAN Wen-hua

(1. Research Center of Mining Underground Engineering, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: By lots of creep test researches, artificial frozen clay shows an obvious creep behavior under high deviatoric stress. When artificial frozen clay in low stress level, a viscoelastic creep deformation presents. While in high stress level, viscoplastic creep deformation presents. On the basis of Nishihara model, parabolic viscoelasto-plastic creep constitutive model is constructed by adding a viscoelastic element and parabolic yield function instead of plastic yield. The modified Nishihara model can describe the shear creep characteristics of artificial frozen soil well. Based on niche technology, genetic algorithm and viscoelasto-plastic theory, the model of viscoelasto-plastic displacement back analysis for artificial frozen soil has been set up by finite element program generator (FEPG). With the measured data, displacement back analysis is conducted during the excavation of deep freezing shaft. And the obtained parameters of mechanical model for frozen soil agree with the test results. The deviation between numerical calculation results and measured data is less than 6%; so the inversion results verify the feasibility of the model. The constitutive model parameters, which obtained by displacement back analysis for artificial frozen soil, can reflect the average of frozen wall construction process and effective freezing range. So it has wide representation and important engineering significance for frozen wall stress field, displacement field and stability prediction.

Key words: genetic algorithm; displacement back analysis; artificial frozen soil; viscoelasto-plastic constitutive model; FEPG

1 引言

人工冻土本构模型参数是深井冻结壁设计、计算和施工的重要资料, 冻结壁在形成过程中受不均匀瞬态温度场和水分迁移场的影响, 冻结壁的强度

和厚度是随时间变化的。因此, 仅通过室内试验获得的参数受试件尺寸效应和施工过程的影响, 测试结果不具代表性。冻结井筒开挖过程的位移反分析获得的人工冻土本构模型参数, 能反映冻结壁施工过程和有效冻结范围内冻土本构参数平均值, 因而

收稿日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41271071); 中国博士后科学基金(No. 2013M531496)。

作者简介: 袁文华, 男, 1969 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学研究工作。E-mail: ahsrme@163.com

具有广泛的代表性,对冻结壁应力场、位移场和稳定性预测具有重要工程意义。

近年来,国内外学者在岩土工程位移反分析中已经获得了大量的研究成果。朱合华等^[1-2]基于隧道和深基坑等监测数据,应用位移反分析法较为精确地预测后续施工引起的位移,从而为调整后续施工方案提供依据。丁德馨等^[3]对地下工程弹塑性位移反分析遗传算法进行研究,应用遗传算法原理建立了弹塑性位移反分析方法,克服了用常规的数学优化方法求解发生局部极小而无法继续寻优的问题。刘耀儒等^[4]引入小生境技术和自适应杂交变异概率方法,基于并行有限元程序,给出了适合推求拱坝和地质力学参数的位移反分析并行遗传算法,并编制了相应的程序。刘杰等^[5]针对地下巷道弹性位移反分析的 Gauss-Newton-Marquit 方法提出了改进措施,将随机有限元中常用的直接求偏导数方法引入地下巷道弹性位移反分析中,代替了 Gauss-Newton-Marquit 方法中求偏导数常用的差分法,从而大大提高了算法的效率,使反分析结果的可靠性和精度有所提高。Maulik、Tseng 等^[6-8]基于共享机制的小生境遗传算法运用到分裂式层次聚类算法中,并用粗糙集的思想来定义遗传算法的适应度函数,该算法成果也应用到岩土工程位移反分析中。

位移反分析法广泛应用到隧道工程、深基坑工程和水利水电岩土工程等领域,但在深井人工冻结壁采用位移反分析确定人工冻土本构模型参数还尚未报道。本文针对深井冻结壁开挖过程位移反分析展开研究,获得人工冻土黏弹塑性本构模型参数。

2 高应力状态下冻土蠕变本构模型及反分析

2.1 人工冻土蠕变模型

大量的试验研究表明^[9-12],人工冻土具有显著的蠕变力学特性。李栋伟等^[13]通过冻土高围压下的三轴蠕变和三轴剪切试验研究,获得了当偏应力水平高于某一临界值时,蠕变等时应力-应变曲线和蠕变强度包络线均有一拐点,拐点对应的应力状态可以认为是材料的屈服点。当到屈服应力后,人工冻土等时应力-应变关系和典型蠕变包络线呈抛物线分布。提出了抛物线人工冻土黏弹性蠕变本构模型。

基于抛物线型屈服面人工冻土本构模型能很好描述第3阶段(加速蠕变阶段),但黏弹蠕变仍有一定误差,为了解决前2个阶段试验值和模拟值不吻合现象,获得了改进的抛物线型人工冻土蠕变数学

模型^[13-14],用元件模型表示,如图1所示。

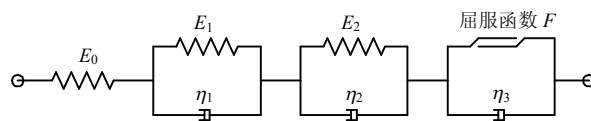


图1 人工冻土蠕变本构模型

Fig.1 Creep constitutive model of artificial frozen soil

(1)当冻土微元未达到屈服极限,即应力 $F \leq 0$ 时,有

$$\{\varepsilon\} = \left[\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-E_1 t / \eta_1}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-E_2 t / \eta_2}) \right] \times \{\sigma\} \quad (1)$$

(2)当冻土微元达到屈服极限时,即应力 $F > 0$ 时,有

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-E_1 t / \eta_1}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-E_2 t / \eta_2}) \right\} \times \{\sigma\} + \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{t}{\eta_3} \times \{\sigma\} \quad (2)$$

式中: $\{\varepsilon\}$ 为应变分量; $\{\sigma\}$ 为应力分量; E_0 、 E_1 为材料的弹性模量 (MPa); E_2 为黏弹性模量 (MPa); η_1 、 η_2 为材料的黏滞系数 (MPa·min); η_3 为塑性黏滞系数 (MPa·min); t 为作用的时间 (min); F 为抛物线型屈服函数^[14],其表达式为

$$F = \sqrt{3J_2} - c - \tan \varphi \cdot \sigma_m + \frac{\tan \varphi}{2p_m} \sigma_m^2 \quad (3)$$

式中: c 为冻土的黏聚力 (MPa); φ 为冻土的内摩擦角 ($^\circ$); p_m 为冻土剪切强度到达最大值时的平均法向应力 (MPa); σ_m 、 J_2 分别为第一应力不变量和第二偏应力不变量。

式(1)、(2)为抛物线型屈服面黏弹塑性本构方程。将人工冻结壁视为连续介质,根据固体力学、流变力学和有限元相关原理获得人工冻土黏弹塑性柔度矩阵和黏塑性柔度矩阵为^[13,15]

$$[C_t^e] = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $[C_t^e]$ 为黏弹性柔度矩阵; μ 为泊松比。

$$[C_i^p]^n = \left\{ \frac{\partial \varepsilon^p}{\partial \sigma} \right\} = \frac{\Delta t}{\eta_2} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T + F \frac{\partial^2 F}{\partial \sigma^2} \right\} \quad (5)$$

式中: $[C_i^p]$ 为黏塑性柔度矩阵; ε^p 为塑性应变; n 为时间步。

2.2 基于小生境技术位移反分析方法

采用实测位移反演黏弹塑性本构参数时, 一般的数学模式可以表示为由黏弹塑性位移法基本方程和附加条件组成。采用有限元位移法求解黏弹塑性力学位移法基本方程, 可以化为求解节点位移的整体有限元支配方程, 引入黏弹塑性柔度矩阵, 构成总体方程为^[16]

$$\{u_{ij}\} = [C][B]\{\sigma_{ij}^0\} \quad (6)$$

式中: $\{u_{ij}\}$ 为节点位移; $\{\sigma_{ij}^0\}$ 为标准化应力; $[C]$ 为柔度矩阵; $[B]$ 为有限元计算矩阵。在计算过程中要根据屈服准则式 (3) 判断该单元是否屈服, 若没有屈服柔度矩阵 $[C]$ 采用黏弹性柔度矩阵 $[C_i^e]$; 若屈服就采用黏塑性柔度矩阵 $[C_i^p]$ 进行有限元求解。

在有限元划分网格时, 要求测点位移与网格的某一个节点重合, 才能进行同一点的位移计算和实测位移比较, 此时, 附加条件数学表达式如下^[16]:

$$\{u_i(t)\} = \{u_{mj}(t)\} \quad (7)$$

$$S(x_i, x_j) = \begin{cases} 1 - \frac{d_1(x_i, x_j)}{\sigma_1} & \text{当 } d_1(x_i, x_j) < \sigma_1, d_2(x_i, x_j) \geq \sigma_2 \\ 1 - \frac{d_2(x_i, x_j)}{\sigma_2} & \text{当 } d_1(x_i, x_j) \geq \sigma_1, d_2(x_i, x_j) < \sigma_2 \\ 1 - \frac{d_1(x_i, x_j)d_2(x_i, x_j)}{\sigma_1\sigma_2} & \text{当 } d_1(x_i, x_j) < \sigma_1, d_2(x_i, x_j) < \sigma_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_1 和 σ_2 为小生境半径。

参数 X 的适应度函数定义如下:

$$f(X) = \begin{cases} \text{Supp}(X) & \text{当 } \subset x_i, S(X, x_j) = 0 \\ \sum_{j=1}^m S(X, x_j) & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: X 为反分析参数, 如弹性模量、黏滞系数等。

遗传算法使用遗传算子作用于群体中, 进行选择、交叉、变操作, 从而得到新一代群体。遗传算子决定了遗传算法的搜索能力及收敛性^[7-8]。

3 工程算例分析

基于 FEPM 有限元平台研发的黏弹塑性有限元参数反分析程序, 对某煤矿冻结井筒的开挖过程进行数值反演。该井筒冻结深度为 700 m, 井筒内径为 6.5 m, 冻结壁设计厚度为 9 m。有限元计算模型的上边界为力的边界, 施加上覆表土的自重; 右边

式中: $\{u_i(t)\} = \{u_1(t) u_2(t) \dots u_n(t)\}^T$ 为外荷载作用下通过有限元获得的计算位移值; $\{u_{mj}(t)\} = \{u_{1m}(t) u_{2m}(t) \dots u_{nm}(t)\}^T$ 为外荷载作用下实测位移值。

考虑到有限元模型的简化造成计算误差和现场实测误差, 因此, 人工冻结壁反问题的数学模型表达式为

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \min \{u_i(t) - u_j(t)\}^T \{u_i(t) - u_j(t)\} \\ \{u\} &= [C][B]\{\sigma^0\} \\ a_i &\leq q_i \leq b_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: a_i 、 b_i 为反演参数的取值范围; q_i 为反演参数。

采用小生境技术提高了优化搜索效率^[6, 17], 解决了基于简单遗传算法早熟的现象。分别定义 $d_1(x_i, y_j)$ 、 $d_2(x_i, y_j)$ 如下:

$$d_1(x_i, y_j) = \|u_i(t) - u_j(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n [u_{ik}(t) - u_{jk}(t)]^2} \quad (9)$$

$$d_2(x_i, y_j) = |f(x_i) - f(x_j)| \quad (10)$$

式中: $d_1(x_i, y_j)$ 为测点冻结壁位移和有限元模拟位移距离; $d_2(x_i, y_j)$ 为适用度距离。

此时, 定义共享函数如下:

界按照重液理论公式计算施加侧向压力; 根据对称性取 1/4 计算模型, 前、后边界为对称边界约束其中一个方向的切向位移, 对埋深 -670~-672.4 m 段高冻结壁开挖和支护进行数值模拟。开挖过程中在井帮设置测点, 测点布置和有限元模型对应如表 1 所示。

表 1 测点位置和有限元节点对应关系
Table 1 Measured points and the corresponding finite element model number

测点位置 (距地面) /m	测点编号	有限元节点号	坐标
-670.3	1	5 260	(3.25, 0, 2.1)
-670.9	2	6 542	(3.25, 0, 1.5)
-671.2	3	9 002	(3.25, 0, 1.2)

模拟工程实际掘进段高 (2.4 m) 和每个掘进段高的施工总时间 (20 h) 的工程实际情况, 在数值计算中, 取一个施工步为 0.6 m, 则每个段高分 4

个施工步完成,每个开挖时间步为 4 h,混凝土外层井壁支护时间 4 h。

表 2 为工程算例的反分析结果,从表中可以获得:蠕变本构参数的反演误差在 6%以内,相关系

数达到 0.975 6,其值接近 1.0,表明本构参数反分析结果与工程实际情况相关程度较大,因此,抛物线型屈服面黏弹塑性本构模型分析冻结壁的实际受力过程是正确的。

表 2 抛物线型变本构计算参数
Table 2 Frozen soil parameters of parabolic yield-surface

反演参数	E_0/MPa	E_1/MPa	$\eta_1/(\text{MPa} \cdot \text{min})$	$\eta_2/(10^3 \text{MPa} \cdot \text{min})$	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	p_m/MPa
真值	240.00	368.00	4 210.00	5 800.00	4.30	24.00	10.30
反演值	231.64	389.56	4 210.88	6 012.51	4.51	23.15	10.54
误差/%	3.48	5.86	0.02	3.66	4.88	3.54	2.33

图 2 为井帮位移有限元计算结果,冻结壁沿井帮的位移变化规律和我国人工冻土典型蠕变曲线相似,暴露段内冻结壁蠕变位移沿暴露段分布都是中、下部略大于上部,曲线呈鱼肚形分布。为了研究井筒开挖过程中冻结壁的蠕变位移,处理计算结果时扣除重力场引起的初始位移,计算位移与实测位移的比较见图 3,从图中可以看出,参数反分析结果与真实值之间的差异:测点 1、3 几乎完全吻合,测点 2 吻合性稍差,但最大偏离不超过 3 mm,最大误差为 5.89%。

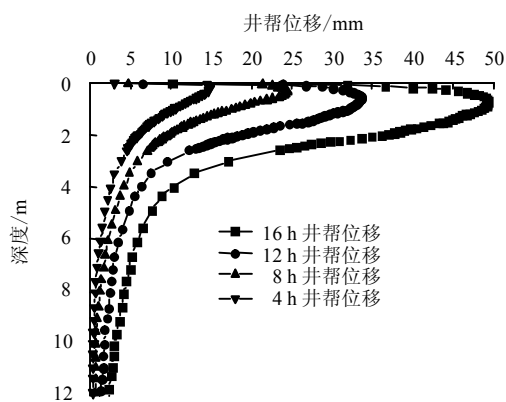


图 2 计算井帮位移分布

Fig.2 Displacement curves of shaft-wall

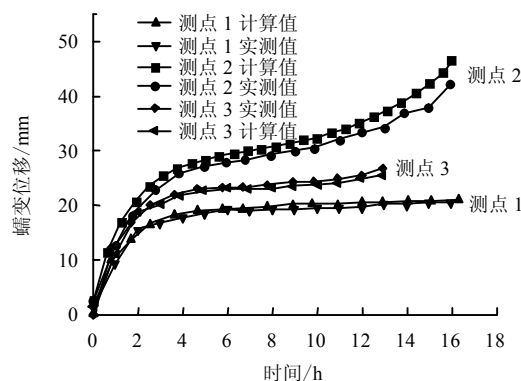


图 3 实测位移和计算位移比较

Fig.3 Comparison between calculated and measured displacements

4 结 论

(1) 引入小生境技术有效地解决了遗传算法的早熟问题。冻结壁位移实测位移和数值模拟结果基本一致,最大偏离不超过 3 mm,误差在 6%以内,表明采用改进的遗传算法对深井冻结壁位移反分析是可行的。

(2) 建立了基于小生境技术的遗传算法的深井冻结工程非线性位移反分析方法,并研发了有限元反分析计算程序,为大型地下冻结工程本构参数反分析提供了平台,对冻土结构物长期稳定性预测具有十分重要的工程意义。

参 考 文 献

- [1] 朱合华, 张晨明, 王建秀, 等. 龙山双连拱隧道动态位移反分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 67—73.
ZHU He-hua, ZHANG Chen-ming, WANG Jian-xiu, et al. Dynamic displacement back analysis and prediction of Longshan two-arcade twin tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 67—73.
- [2] 朱合华, 杨林德, 桥本正. 深基坑工程动态施工反分析与变形预报[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 33—38.
ZHU He-hua, YANG Lin-de, Hashimoto Tadashi. Back analysis of construction of deep excavation and deformation prediction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(4): 33—38.
- [3] 丁德馨, 张志军, 孙钧. 弹塑性位移反分析的遗传算法研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 1—5.
DING De-xin, ZHANG Zhi-jun, SUN Jun. The genetic-algorithm-based approach to back analysis of displacement parameters of elasto-plastic model for rock

- mass[J]. **Engineering Mechanics**, 2003, 20(6): 1—5.
- [4] 刘耀儒, 杨强, 刘福深, 等. 基于并行改进遗传算法的拱坝位移反分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(9): 1542—1545.
- LIU Yao-ru, YANG Qiang, LIU Fu-shen, et al. Inverse analyses of arch dam displacements using improved parallel genetic algorithm[J]. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, 2006, 46(9): 1542—1545.
- [5] 刘杰, 王媛, 刘宁. 地下巷道弹性位移反分析中改进的 Gauss-Newton-Marquit 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 599—603.
- LIU Jie, WANG Yuan, LIU Ning. Improved Gauss-Newton-Marquit method for back analysis of elastic displacement for underground tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 599—603.
- [6] MAULIK U, BANDYOPADHYAY S. Genetic algorithm-based clustering technique[J]. **Pattern Recognition**, 2000, 33(9): 1455—1465.
- [7] TSENG L Y, YANG S B. A genetic approach to the automatic clustering problem[J]. **Pattern Recognition**, 2007, 34(2): 415—424.
- [8] TSENG L Y, YANG S B. A genetic clustering algorithm for data with non-spherical-shape clusters[J]. **Pattern Recognition**, 2008, 33(7): 1251—1259.
- [9] 何平, 程国栋, 朱元林. 冻土黏弹塑损伤耦合本构理论[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(增刊 1): 34—39.
- [10] CHAMBERLAIN E J, GROVES E, PERHAM R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J]. **Geotechnique**, 1972, 22(3): 469—483.
- [11] SAYLES F H. Triaxial constant strain rate tests and triaxial creep tests on frozen Ottawa sand[C]//Proceedings of 2nd International Permafrost Conference. Russia : Yakutsk, 1973: 384—391.
- [12] ZHU Yuan-lin, HE Ping, ZHANG Jia-yi, et al. Triaxial creep model of frozen soil under dynamic loading[J]. **Progress in Natural Science**, 1997, 7(4): 465—468.
- [13] 李栋伟, 汪仁和, 赵颜辉, 等. 抛物线型屈服面人工冻土蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1943—1948.
- LI Dong-wei, WANG Ren-he, ZHAO Yan-hui, et al. Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1943—1948.
- [14] 马巍. 围压作用下冻土的强度与变形分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2000.
- [15] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [16] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 岩土工程位移反分析的遗传算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 979—982.
- WANG Deng-gang, LIU Ying-xi, LI Shou-ju. Genetic algorithms for inverse analysis of displacements in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 979—982.
- [17] 杨光军, 王丽丽. 基于小生境遗传算法的连续属性关联规则挖掘[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(5): 184—186.
- YANG Guang-jun, WANG Li-li. Association rules mining from data with continuous attributes based on niche genetic algorithm[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2008, 44(5): 184—186.