

文章编号:1000-7598-(2002)01-0001-05

并行遗传算法对硅藻软岩本构关系的求解

李邵军¹, 冯夏庭¹, 廖红建²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘 要: 利用并行遗传算法, 基于不同条件下软岩三轴压缩实验的实验数据, 对正常固结领域和超固结领域硅藻软岩的本构关系进行了拟合, 建立了一种新的考虑时间效应的应力-应变-时间本构模型。预测结果分析表明, 所建模型很好地反映了硅藻软岩的本构关系, 从而验证了该模型并行遗传算法解的合理性和可行性。研究成果在地下空间的利用和开发中具有良好的应用前景, 对介于岩石和土之间复杂软岩材料力学特性研究的进一步发展具有重要的参考价值。

关 键 词: 并行; 遗传算法; 本构关系

中图分类号: TU 45 文献标识码: A

Creating constitutive model of diatomaceous soft rock using parallel genetic algorithm

LI Shao-jun¹, FENG Xia-ting¹, LIAO Hong-jian²

(1. Key Laboratory of Rock Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: On the basis of experimental data of triaxial compression in different conditions, a stress-strain-time constitutive model was created through the learning procedure by using genetic algorithm which ran in the parallel computing environment. The predicted results which were obtained through the created model indicate that this model is well in accord with the constitutive model of diatomaceous soft rock. This method, which creates a constitutive model by using genetic algorithm, has a vigorous foreground in the rock and soil mechanics. It provides a new approach for the further research of constitutive models.

Key words: parallel; genetic algorithm; constitutive model

1 前 言

岩石应力-应变关系是进行岩石力学数值计算的基础, 近年来, 越来越多的数值解析法已应用于土木工程的设计中。但是, 由于受地层构成的复杂性、土或岩石本身复杂的力学特性(如非线性、弹粘塑性、剪胀性和各向异性等)的影响, 任何一种本构关系模型都难以对各种土或岩石材料的应力-应变关系做出真实的描述, 数值计算的结果与工程实际差别较大的现象时有发生。如何寻求一种能更加准确描述土或岩石本构关系的方法, 使之更切合材料的变形特性、更接近于工程实际要求, 在国内外已越来越成为众多专家学者关注的热点之一。

本文在实验研究的基础上^[1], 对硅藻的残骸物及粘土堆积形成的饱和硅藻软岩的应力-应变关系, 考

虑时间效应的影响, 利用并行遗传算法建立了一种新的应力-应变-时间本构模型, 以此来描述软岩的应变软化特性。并与实验结果进行对比, 从而探讨该模型遗传算法解的合理性和可行性。

2 本构模型的建立

2.1 基本的应力-应变本构关系

实验结果表明, 在固结不排水三轴压缩实验下, 硅藻软岩的应力-应变关系呈应变硬化-软化型。以前期固结压力 $\sigma_c = 1.5 \text{ MPa}$ 为界, 当 $\sigma_c \geq 1.5 \text{ MPa}$ 时为正常固结领域, 应变软化程度较低, 峰值强度后偏应力逐渐减少; 当 $\sigma_c < 1.5 \text{ MPa}$ 时为超固结领域, 峰值强度后应变软化突然发生, 软化幅度陡峭, 随后, 偏应力随应变的增大几乎为一定值, 即残留强度。这样的

收稿日期 2001-04-03

基金项目 国家自然科学基金资助项目(编号:10072073)、湖北省科委基金项目。

作者简介 李邵军, 男, 1974 年生, 硕士, 主要从事岩土力学并行计算及智能岩石力学研究。

力学特性对于蠕变特性较强的软岩来说,研究时间效应对应变软化的影响具有重要的意义。

岩土材料的增量型应力-应变关系,即有效应力增量和应变增量间的增量本构关系可以表示为如下的矩阵形式:

$$\begin{Bmatrix} dv \\ d\varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dp' \\ dq \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 dv 为体积应变增量; $d\varepsilon$ 为剪应变增量; dp' 为平均有效应力增量; dq 为偏应力增量。系数 $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$ 根据剑桥模型屈服面函数 F 和相关联流功法则 ($F=Q$) 得出如下关系表达式:

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \left[1 + \ln \left(\frac{p'}{p_0} \right) \right] + \frac{1}{K} \\ C_{12} &= \frac{\chi}{Mp'} \\ C_{21} &= C_{12} \\ C_{22} &= \frac{\chi}{M^2 p' [1 + \ln(p'/p_0)]} + \frac{1}{3G} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $\chi = \frac{\lambda - k}{1 + e_0}$, $M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'}$

式中 φ' 为有效内摩擦角; M 为 p', q 平面上临界状态线的斜率; e_0 为初始孔隙比; λ 为压缩系数; k 为膨胀系数; p' 为平均有效应力; p_0 为固结后的平均有效应力; K 为体积变形模量; G 为剪切弹性模量。

2.2 应力-应变-时间本构关系

由于软岩的力学特性和超固结粘土相近,可以应用剑桥模型进行探讨。在式(1)中加入有关时间的参数 C_{13}, C_{23} , 于是得出如下的增量型应力-应变-时间本构方程^[1]:

$$\begin{Bmatrix} dv \\ d\varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} \\ C'_{21} & C'_{22} & C'_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dp' \\ dq \\ dt \end{Bmatrix} \quad (3)$$

在土力学中,对固结不排水三轴实验,体应变增量为零,即 $dv=0$,故我们只考虑剪应变增量 $d\varepsilon$ 。对于式(3),剪应变增量 $d\varepsilon$ 可表示为:

$$\{d\varepsilon\} = [C'_{21} \quad C'_{22} \quad C'_{23}] \begin{Bmatrix} dp' \\ dq \\ dt \end{Bmatrix} \quad (4)$$

以剑桥模型系数为基础,考虑到 C_{23} 是与时间有关的系数,我们设定式(4)中各参数表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} C'_{21} &= m \frac{\chi'}{Mp' \times 10^{-1}} \\ C'_{22} &= n \frac{\chi'}{M^2 p' \times 10^{-1} [1 + \ln(p'/p_0)]} G \\ C'_{23} &= b \frac{d\varepsilon}{t} \quad \chi' = \frac{\lambda - k}{1 + ce_0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 m, n, b, c 为遗传算法的待定系数,其它参数含义同式(2)。

为寻求剪切应变随时间的变化规律,我们对硅藻软岩进行了不同固结压力下的应力控制式固结不排水三轴蠕变实验。实验结果表明轴向应变随时间的对数坐标成线性增加,根据这一变化规律,我们得出如下关系表达式:

$$\varepsilon = a \log t + \beta \quad (6)$$

式中 a, β 为待定系数,由遗传算法获得。

联立式(4)~(6),可得:

$$d\varepsilon = \frac{a}{4.605 b} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{9.21}{a} (C'_{21} dp' + C'_{22} dq)} \right] \quad (7)$$

于是即可利用式(5)和式(7)通过遗传算法确定考虑时间效应的应力-应变关系。其中,需要利用遗传算法确定的参数有 a, b, m, n, c , 其它参数可由实验数据得到。

3 应力应变曲线拟合及预测分析

3.1 试验概况

本试验结合日本石川县能登半岛端部株州市区的开发,由当地第三纪中新世后期硅藻泥岩层中采取试样进行研究。圆柱形试件直径为 5 cm,高为 10 cm。

试验是在中容量(最大围压 4.9 MPa)的三轴仪上进行的,分别进行了等向固结实验、固结不排水三轴压缩实验以及蠕变实验。

对式(7)中包含的参数,由实验结果及遗传算法确定。其中基本参数为: $\lambda = 0.642, k = 0.071, v = 0.397, M = 1.75$ 其它实验参数如表 1 所示。

表 1 应力-应变-时间本构模型实验参数
Table 1 Parameters and cases used to determine the strain-stress-time constitutive model

固结压力 σ_c/MPa	e_0	应变速率 $\dot{\varepsilon}_s/\% \cdot \text{min}^{-1}$	$W/\%$	$\rho/\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$
0.1	2.77	0.175	123.15	1.311
0.5	2.75	0.175	143.84	1.335
0.75	2.74	0.175	124.26	1.288
1.0	2.70	0.175	126.4	1.325
1.5	2.63	0.175	128.87	1.317
2.0	2.54	0.525	114.22	1.35
2.5	2.38	0.175	112.53	1.394
3.0	2.14	0.175	100.96	1.392
3.5	2.05	0.175	97.2	1.422

3.2 遗传算法的参数控制

用于对本构关系进行建模的遗传算法^[2],其进化

过程由如下参数控制：

- (1) 群体规模 $N_p = 1\ 400$
- (2) 预设进化代数 $N_g = 10$
- (3) 均匀交叉概率 $P_c = 0.95$
- (4) 均匀变异概率 $P_m = 0.02$
- (5) 倒置变异概率 $P_i = 0.2$
- (6) 代间隙 $G = 100\%$
- (7) 采用比例选择方法,并将每一代的最佳个体保留到下一代

(8) 初始随机数种子 $S = 2\ 000$

(9) 待定参数的取值范围 $0 \leq a \leq 10$ $0 \leq m, n$
 $b \leq 100$ $0 \leq c \leq 10$ 。

3.3 并行计算方案

遗传算法的进化过程主要由两个参数控制：(1) 进化群体规模 $N_p = 1\ 400$ ；(2) 最大进化代数 $N_g = 10$ 。程序流程可简单地表示为图 1 所示的形式^[2]。

并行环境 (RsmVPC)^[4,5] 建立在局域网上的 1 台 Winsows98 (Pentium III 466) 和 6 台 WindowsNT4.0 (其中 3 台 Pentium III 600, 3 台 Pentium III 733) 配置的 PC 机群上, 并程序采用主从式模型 (Master-Slave), 运用 Visual C++6.0 编制, 由 1 个可视化主界面控制程序和 7 台节点机上的 7 个子进程组成。

对上述问题设计并行计算方案时, 我们主要考虑

两方面的因素：一是计算过程中的通信开销, 二是各节点机具有的不同计算能力对负载平衡的影响。为尽可能地减少通信开销, 我们在虚拟机上把粗粒度任务 (个体的适应值计算) 进行了并行, 同时考虑到并行虚拟机由不同计算速度的节点机组成, 为尽可能保证系统的负载平衡, 对各节点机上的任务合理分配情况见图 2。

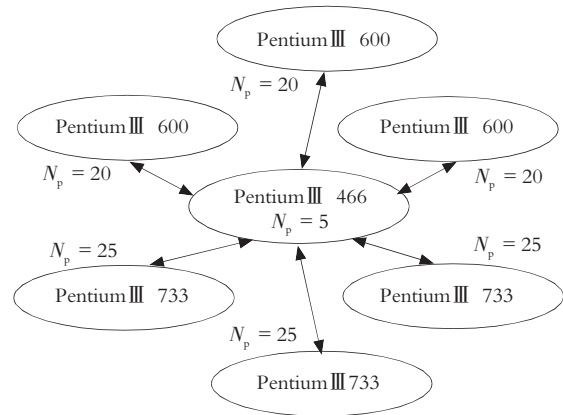


图 2 遗传进化任务分配图 (N_p 为个体数)

Fig.2 The tasks' assignment for hosts

并行计算^[3]开始时, 节点机获得被分配数据后开始计算, 待完成所分配的个体计算任务, 把计算结果返回主进程, 主控进程完成数据分析后再次为各节点机发送计算任务, 这样反复循环直至任务结束。值得指出的是, 每循环通信一次, 将完成 140 个个体的计算, 而每代将进行 10 次循环。

3.4 本构关系曲线拟合

由于固结不排水三轴压缩实验下硅藻软岩的应力-应变关系呈应变硬化-软化型, 在探讨其本构关系时我们提出以峰值强度 q_p 为界, 对破坏前后分别考虑的方法, 以使本构关系更切合于材料本身的变形特性。

我们取硅藻软岩超固结样本 ($\sigma_c = 0.1\text{ MPa}$, 见表 1) 的实验数据进行曲线拟合。通过并行遗传算法对给定样本的学习, 最后得到遗传算法确定的参数组 a, b, m, n, c , 表 2 给出了参数进化的详细过程。

由表 2 可见, 对于偏应力峰值前, 遗传算法从第 7 代开始, 最佳适应值稳定地收敛到一定值 0.017 746 6, 而对于偏应力峰值后, 遗传算法从第 2 代开始, 最佳适应值便收敛到了一定值 0.046 275 6。所以, 进化过程经过 10 代而结束。遗传算法最终确定了本构模型的待定参数, 结果见式 (8), 拟合曲线如图 3 所示。

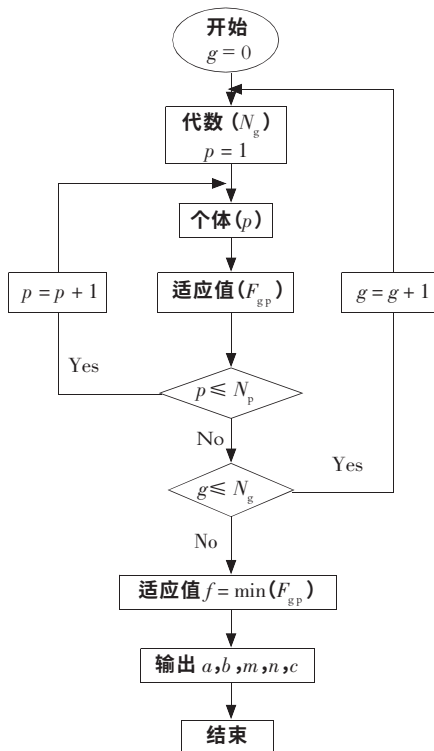


图 1 遗传进化参数程序流程图

Fig.1 The diagram for evolutionary of constitutive

表 2 参数的进化过程表
Table 2 The evolving procedure for parameters

	代数	最佳个体	最佳适应值	a	m	n	b	c
偏 应 力 峰 值 前	0	532	2.491 37	5.122 07	1.953 13	4.366 52	1.064 45	7.211 91
	1	979	0.095 348 5	0.019 53	0	0	5.009 77	0
	2	732	0.022 104	0.019 53	0.019 53	0	0.097 65	5
	3	18	0.021 096 3	0.019 53	0.019 53	0	0.097 65	0
	4	923	0.017 977 1	0.156 25	0.039 06	0	0.673 83	0.312 5
	5	991	0.017 977 1	0.156 25	0.039 06	0	0.673 83	0.312 5
	6	986	0.017 977 1	0.156 25	0.039 06	0	0.673 83	0.312 5
	7	910	0.017 746 6	1.25	0.039 06	0	5.322 27	0.004 88
	8	70	0.017 746 6	1.25	0.039 06	0	5.322 27	0.004 88
	9	962	0.017 746 6	1.25	0.039 06	0	5.322 27	0.004 88
偏 应 力 峰 值 后	10	191	0.017 746 6	1.25	0.039 06	0	5.322 27	0.004 88
	0	249	0.078 641 4	1.137 69	0.019 53	1.240 23	2.402 34	1.889 64
	1	521	0.064 865 4	2.387 69	0.019 53	1.044 92	3.330 07	6.889 64
	2	423	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	3	340	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	4	145	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	5	36	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	6	181	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	7	34	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	8	361	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	9	694	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76
	10	641	0.046 275 6	1.137 69	0	0.927 73	1.855 46	1.884 76

$$\left. \begin{aligned} a &= 1.137\ 69, \quad b = 1.855\ 46, \quad m = 0, \\ n &= 0.927\ 73, c = 1.884\ 76 \quad (q \geq q_{\max}) \\ a &= 1.25, \quad b = 5.322\ 27, \quad m = 0.039\ 06, \\ n &= 0, c = 0.004\ 88 \quad (q > q_{\max}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

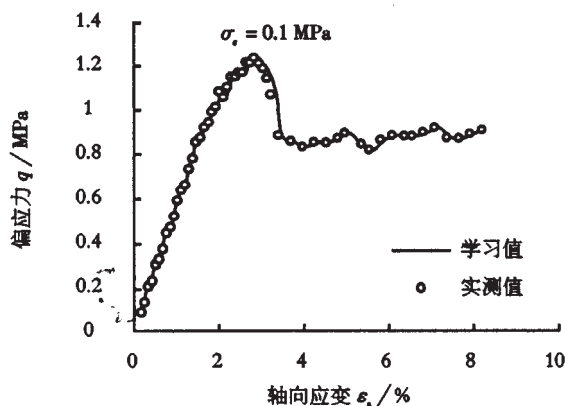


图 3 拟合曲线图($\dot{\varepsilon}_1 = 0.175\ \%/\text{min}$)

Fig.3 Learned results of constitutive model for the specimen $\dot{\varepsilon}_1 = 0.175\ \%/\text{min}$, $\sigma_c = 0.1\ \text{MPa}$

由图 3 可见,以峰值强度 q_p 为界进行分段拟合的曲线很好地反映硅藻软岩的应力-应变关系,平均拟合误差仅为 2.49%。因此,对于硅藻软岩材料应力-应变本构关系的研究,以峰值强度 q_p 为界进行分段考虑是合理的。

3.5 本构关系预测

为测试遗传算法确定的本构模型对新样本的预测效果,利用式(8)所示的本构模型参数,结合表 1 所示的基本实验数据,对硅藻软岩正常固结和超固结完整样本在不同围压下的各种情况进行了预测,预测结果如图 4、图 5 所示。

从图中可以清楚地看到,预测的趋势与实验结果结果是一致的,而且预测精度较高,预测的可靠性令人满意。因此,应用遗传算法对软岩本构关系通过实

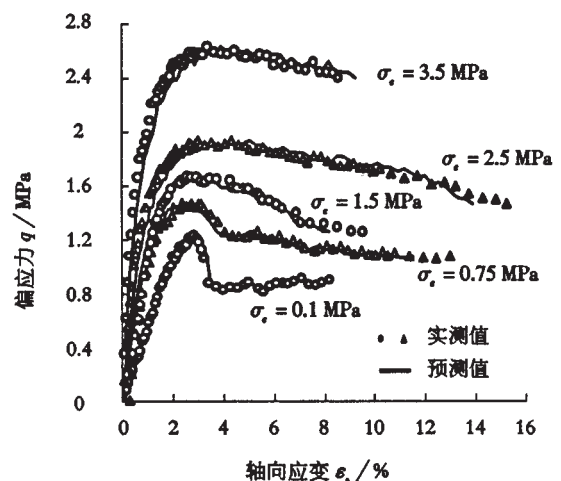


图 4 预测结果与实测结果对比图($\dot{\varepsilon}_1 = 0.175\ \%/\text{min}$)

Fig.4 The comparison between predictions and measurements

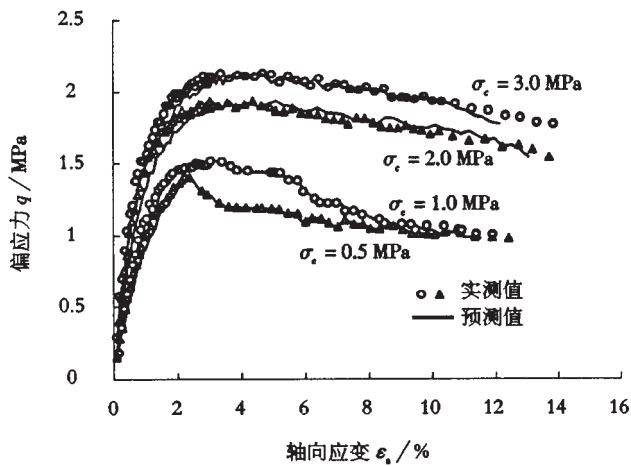


图 5 预测结果与实测结果对比图($\dot{\epsilon}_a = 0.175\%/\text{min}$ 对应 $\sigma_c = 0.5, 1.0, 3.0\text{ MPa}$, $\dot{\epsilon}_a = 0.525\%/\text{min}$ 对应 $\sigma_c = 2.0\text{ MPa}$)
Fig.5 The comparison between predictions and measurements

验数据进行学习和拟合,把获得的理想的应力-应变-时间本构模型遗传参数 a, b, m, n, c 用之于未知样本的预测,可以代替传统的弹塑性本构关系的数值解,为岩石力学数值方法向着快速、准确、智能化目标迈进提供了一条新的途径。

4 结 论

(1) 对软岩材料本构关系的研究,可以考虑以峰值强度为界对破坏前后进行分段研究。

(2) 本文提出的基于剑桥模型及并行遗传算法建立的增量形应力-应变-时间本构关系,很好地反映了硅藻软岩在正常固结领域和超固结领域的本构特性,得到的学习及预测结果和实验结果几乎一致。

(3) 用并行遗传算法为材料本构关系建模,为求解土或岩石等材料的弹塑性本构模型提供了一条新的思路,文中所建本构关系模型具有较强的应用推广价值。

参 考 文 献

- [1] 廖红建. 岩土类材料的静动强度及本构关系的研究[博士学位报告 R]. 西安:西安交通大学, 1998, 13-30.
- [2] 陈国良,王煦法,庄镇泉等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1999, 195-237.
- [3] 陈国良. 并行计算——结构·算法·编程[M]. 北京:高等教育出版社,1999. 332-352.
- [4] Alexandre Alves, WPVM: Parallel Computing for the People[A]. HPCN'95, High Performance Computing and Networking Conference[C]. Italy: Milan, 1995.
- [5] Xiating Feng, Shaojun Li, Youliang Zhang. Visual parallel computing of Intelligent Rock and Soil mechanics[A]. The 2001 IRSM sponsored International Symposium and 2nd Asian Rock Mechanics Symposium [C]. Beijing: Blakema, 2001.



武汉岩土所开放实验室被中国科学院批准为院重点实验室

2002 年 1 月 4 日,我所岩土力学实验室被中国科学院正式批准为院岩土力学重点实验室。岩土力学重点实验室是中国科学院开展岩土力学应用基础研究的综合性研究机构,经过多年的积累和发展,形成了计算与智能岩石力学、环境岩石力学、特殊土土力学三个主要学科方向。目前,重点室不仅有一支优秀的科研队伍,而且拥有功能齐全的岩土力学试验设备。热诚欢迎国内外的专家、学者来岩土力学重点实验室指导工作、访问、讲学和作客座研究。

(焦玉勇供稿)