文章编号：1000－7598－(2008) 08－2221－06

ADINA 有限元软件中材料本构的二次开发

熊玉春[1]，房营光[2]

（1. 广东省建筑科学研究院，广州 510500；2. 华南理工大学 土木工程系，广州 510640）

摘 要：美国 ADINA R&D 公司开发的软件产品 ADINA 经过 20 多年的商业开发，目前已成为全球最重要的非线性求解软件，尤其对结构非线性、流-固耦合等复杂问题的求解具有强大优势，被认为是非线性有限元发展方向的先导。然而，任何商业化的有限元软件都不可能满足客户的所有要求，例如，ADINA 软件中没有岩土工程领域常用的 Duncan-Chang 模型。以土工数值分析中广泛应用的 Duncan-Chang E-B 模型为例，介绍在 ADINA 软件中进行材料本构二次开发的方法，给出了开发过程，通过对 3 个常规三轴压缩模型的数值模拟验证程序的可靠性。结果表明，基于 ADINA 开发的材料本构模型具有计算速度快、精度高和前后处理快捷方便的优点。另外，验证结果也表明该软件具有超强的非线性求解能力和可靠的求解结果。

关 键 词：ADINA；非线性；Duncan-Chang E-B 模型；二次开发

中图分类号：TU 43 **文献标识码：**A

Secondary development of material constitutive model in ADINA software

XIONG Yu-chun[1], FANG Ying-guang[2]

(1. Guangdong Provincial Academy of Architecture Science, Guangzhou 510500, China;
2. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: ADINA software, which is developed by ADINA R&D inc., has become the most important nonlinear finite element analysis software after more than 20 years of commercial development. It is considered to be the forerunner of the nonlinear finite element development and has powerful advantage in solving the complex structure nonlinearity and fluid-structure interaction problems. However, it is impossible for any commercial FEM software to meet all customers requirements; for example, there is no Duncan-Chang constitutive model in ADINA commonly used in geotechnical engineering. Taking Duncan-Chang E-B constitutive model as an example, the methods of conducting secondary development of material constitutive model and the development process are described. Then the Subroutine Cuser3 is verified by simulating three conventional triaxial compression models. Results show that material constitutive model developed in ADINA has advantages of fast convergence, high precision and convenient preprocessing-postprocessing. Results also show that ADINA has powerful nonlinear solution ability and reliable simulating results.

Key words: ADINA; nonlinearity; Duncan-Chang E-B constitutive model; secondary development

1 引 言

ADINA[1]（Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis）软件是在 Bathe K. J.博士的带领下，由其研究小组共同开发的动力非线性有限元软件。它具有求解线性问题的能力，还具有分析非线性问题的强大功能，包括求解结构以及涉及结构场之外的多场耦合问题。增量方法是数值求解非线性物理问题本质的方法，对非线性物理问题，计算解逼近真实解的过程是通过控制增量步逐步实现的，所谓增量步通常是指载荷增量步或时间增量步。ADINA 正是基于自动动态增量分析的非线性有限元软件。所谓自动动态增量，是指当用户给定的时间步/荷载步太大以致迭代计算出现不收敛时，它能自动划分荷载步增量以使计算结果收敛。

ADINA 以其深厚的理论基础与强大的非线性分析能力和完全的流-固耦合功能，在工程界、科学研究等领域得到广泛应用。由于 ADINA 在我国的市场开发起步较晚、可供人们交流学习的资料较少，这在一定程度上影响了它在我国的普及和发展。特别是对于处于科学研究前沿的用户来说，由于科学研究的创新性和前瞻性，几乎所有商业化软

收稿日期：2007-06-20
作者简介：熊玉春，男，1974 年生，博士，工程师，主要从事土动力学与地基基础研究。E-mail: xyuchun@163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

件包括 ADINA，都不可能完全满足所有工程问题、科研课题和所有用户的需求。岩土是一种极其复杂的工程材料，随土性、排水条件等不同，其力学性状也千差万别，因此就必须基于该软件的分析平台，对 ADINA 软件的功能进行扩充以实现不同用户的不同需求、解决具体的工程问题，这属于基于 ADINA 软件的二次开发问题[2]。

本文以岩土工程中广泛应用的 Duncan-Chang E-B 模型[3]为例，介绍 ADINA 的二次开发过程，并指出了开发过程中应注意的问题，整个过程力求思路清晰、步骤明确，以期对从事 ADINA 二次开发的用户能有所裨益。

2 用户子程序

ADINA 为用户提供了丰富的二次开发功能，允许用户方便地定义各种用户功能，常见的诸如材料本构算法、材料破坏准则、接触摩擦形式、断裂力学判据和开裂扩展规律、用户边界条件/荷载等等。ADINA8.1 的开发环境为 Compaq Visual Fortran 6.6A，开发时通过 ADINA 提供的 Makefile 文件自动链接各个*.f 文件生成动态链接库文件，针对不同求解器的开发，提供不同的 Makefile 文件，包括：ADINA 模块：adusr.dll；ADINA-T 模块：atusr.dll；ADINA-F 模块：afusr.dll；ADINA-FSI 模块：adfusr.dll；ADINA-TMC 模块：adtusr.dll。ADINA 二次开发过程如下：

（1）备份 C:\Program Files\ADINA\ADINA System 8.1\bin 目录下的 dll 文件。

（2）修改 C:\Program Files\ADINA\ADINA System 8.1\usrdll 目录下的 Fortran 源文件为用户材料本构源文件。ADINA 提供了两种本构示例的 Fortran 源文件，一类是 Ovl3*.f 文件，用于 2D 模型单元的本构；一类是 Ovl4*.f 文件，用于 3D 模型单元的本构。

（3）编辑 Makefile 文件，修改其中的参数：

MAT2D_OBJ = ovl30u_usr.obj

MAT2D_OBJ = ovl40u_usr.obj

其中：usr 为用户选用或定义的文件名。

（4）编译生成新的 dll 文件，编译过程如下：

cd c:\program files\Microsoft Visual Studio\df98\bin

cd c:\program files\ ADINA\ ADINA system 8.1\usrdll

（5）nmake /f Makefile.<usr>，其中 <usr> 替换为用户要编译的 dll 链接库文件。

（6）将用户生成的 dll 文件拷贝到 bin 目录下。

编译、调试通过后就可以进行计算分析，此时在 ADINA AUI 界面中采用 User-Supplied 模式，输入用户模型参数，其中 CTI 数组用于存储温度无关的材料常数；CTD 数组用于存储温度相关的材料常数；LGTH1 为用户使用的实型变量 ARRAY 的长度；LGTH2 为用户使用的整型变量 IARRAY 的长度。这些参数与 ADINA 子程序中的变量一一对应，用于材料本构的计算。

ADINA 为方便用户进行材料本构的二次开发，采用 FORTRAN 语言接口方式，提供了 20 多个用户子程序即 SUBROUTINE CUSER2（开发二维本构）和 SUBROUTINE CUSER3（开发三维本构）。材料本构关系须按照 FORTRAN 语言的算法来编写并嵌入 SUBROUTINE CUSER2 或 SUBROUTINE CUSER3 子程序中。以本文用到的 SUBROUTINE CUSER3 子程序为例，每一个 3D 单元的应力积分点通过整型变量 *KEY*，来控制在不同阶段调用该子程序完成下面 4 类操作：

（1）当 *KEY*=1 时，在进行分析时被调用一次。这一步主要是对积分点的变量进行初始化，在整个数据输入阶段只被执行一次。ADINA 自动将数组 STRAIN，STRESS，ARRAY 和 IARRAY 等初始化为 0。如果 ARRAY 和 IARRAY 数组初始值不为 0，则用户在编译时须将其设置为所需的初始值。

（2）当 *KEY*=2 时，被每一个荷载步/时间步的每一个子步调用。这一步主要是在求解平衡方程获得节点位移以及节点位移求出后的应力计算阶段被调用来进行单元应力积分点的应力计算。单元每一应力积分点的应力计算按照嵌入 SUBROUTINE CUSER3 中的用户代码来执行。除进行应力计算外，如果用户使用 ARRAY 和 IARRAY 来存储历史相关变量，则 *KEY*=2 时，用户须更新 ARRAY 和 IARRAY 数组。

（3）当 *KEY*=3 时，被调用来计算新的切线系数矩阵。这一步是计算本构矩阵 *D* 用以估算切线系数矩阵，此时传递给 SUBROUTINE CUSER3 子程序的变量值是 *KEY*=2 程序段最后一个子步的计算值。因此这些变量在该阶段不再计算、更新。

（4）当 *KEY*=4 时，被调用来输出应力计算阶段的单元响应。同样该阶段不进行应力计算，也不对任何变量进行更新，只按照用户代码制定的格式输出用户需要的单元结果。

ADINA 中材料的变形描述有 3 种：（1）材料非线性（MNO），适用于无穷小位移和应变；（2）完全拉格朗日（TL），适用于位移和旋转变形可能比

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较大，而位移视材料特性可以是大位移也可以是小位移的情况；（3）更新拉格朗日（ULH），适用于大应变分析。ADINA 约定剪应变分量 ε_{ij} 采用工程剪应变 γ_{ij} 的形式，在材料弹塑性分析中，当需要由剪应变求剪应力或由剪应力求剪应变时，需要把工程剪应变转换为 Cauchy 剪应变或把 Cauchy 剪应变转换为工程剪应变来存储。

另外，在应用用户材料进行有限元分析时，需要用户设定温度荷载，当用户材料不涉及温度效应时，可将温度荷载设定为 0。

3　本构模型的数学表达式

在 ADINA 中应力应变的正负号规定与土力学不同，ADINA 规定以拉应力为正，压应力为负；应变以拉伸为正，压缩为负。相应地，土力学中大主应力 σ_1 为 ADINA 中最小主应力 $-\sigma_3$，而小主应力 σ_3 为 ADINA 中最大主应力 $-\sigma_1$。因此，编程开发时应改写本构模型[4]的数学表达式，使之符合 ADINA 约定的数学表达式。

Duncan-Chang E-B 模型中切线弹性模量 E_t 的数学表达式为

$$E_t = E_i(1-R_f S)^2 \tag{1}$$

式中：E_i 为初始弹性模量；S 为应力水平；R_f 为破坏比，其定义分别为

$$\left.\begin{aligned} &E_i = kp_a\left[\frac{-\sigma_1}{p_a}\right]^m;\quad S=\frac{(1-\sin\varphi)(\sigma_1-\sigma_3)}{2c\cos\varphi-2\sigma_1\sin\varphi};\\ &R_f=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)_f}{(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：k、m 为试验确定的参数；φ 为内摩擦角；c 为土的黏聚力；p_a 为标准大气压力。

切线体积模量 B_t 的数学表达式为

$$B_t = k_b p_a\left[\frac{-\sigma_1}{p_a}\right]^m \tag{3}$$

式中：k_b 为试验确定的参数。

考虑到粗粒料的内摩擦角 φ 会随围压的变化而变化，摩尔包线往往不是直线，故采用下式来计算内摩擦角：

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi\lg\left[\frac{-\sigma_1}{p_a}\right] \tag{4}$$

式中：φ_0 为围压等于一个标准大气压时的内摩擦角；$\Delta\varphi$ 为反映内摩擦角 φ 随围压 σ_3 增大而减小的参数。

计算中，如果输入参数 $\Delta\varphi=0$，则不考虑围压对内摩擦角的影响。

在卸荷、再加荷情况下，应力-应变关系接近直线，这时的弹性模量 E_{ur} 仅取决于周围压力，而与主应力差无关，形式如下：

$$E_{ur} = k_{ur}p_a\left[\frac{-\sigma_1}{p_a}\right]^n \tag{5}$$

式中：k_{ur}、n 为试验确定的参数。

加载函数的选择是变弹性模型中的一个难题，Duncan 等[5, 6]经过多年探索，于 1984 年提出加载函数：

$$f_1 = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{(\sigma_1-\sigma_3)_f}\left[\frac{-\sigma_1}{p_a}\right]^{1/4} \tag{6}$$

当 f_1 大于历史上最大值 f_{1max} 时，视为加载，否则视为卸载或再加载。由于卸荷模量与加荷模量之比达 2 个数量级以上，常引起迭代过程的不稳定，具体计算时采用下面经验方法：当 $f_1 \geqslant f_{1max}$，切线弹性模量按式（1）计算；当 $f_1 \leqslant 0.75f_{1max}$，切线弹性模量按式（5）计算；当 $f_{1max} > f_1 > 0.75f_{1max}$，切线弹性模量按下式线性内插法计算：

$$E = E_t + (E_{ur}-E_t)\frac{f_{1max}-f_1}{0.25f_{1max}} \tag{7}$$

由式（1）~（7）即可确定 Duncan-Chang E-B 模型本构矩阵中的所有元素。在有限元分析中，单元的增量应力-应变关系可用矩阵形式表示为

$$\{\Delta\boldsymbol{\sigma}\} = [\boldsymbol{D}]\{\Delta\boldsymbol{\varepsilon}\} \tag{8}$$

式中：$[\boldsymbol{D}]$ 为单元切线系数矩阵。

根据 ADINA 应力、应变分量的约定，对于三维问题，存储应力的数组 STRESS 与 Cauchy 应力各分量的关系为（存储应变的数组 STRAIN 与 Cauchy 应变的关系与此类似，故不再列出）：STRESS(1) $=\sigma_{xx}$；STRESS(2) $=\sigma_{yy}$；STRESS(3) $=\sigma_{zz}$；STRESS(4) $=\sigma_{xy}$；STRESS(5) $=\sigma_{xz}$；STRESS(6) $=\sigma_{yz}$。

对于 Duncan-Chang E-B 三维模型问题，本构系数矩阵为

$$[\boldsymbol{D}] = \begin{bmatrix} d_{II} & d_{IJ} & d_{IJ} & 0 & 0 & 0\\ d_{IJ} & d_{II} & d_{IJ} & 0 & 0 & 0\\ d_{IJ} & d_{IJ} & d_{II} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & d_{JJ} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{JJ} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{JJ} \end{bmatrix} \tag{9}$$

对于二维平面应变问题，存储应力的数组 STRESS 与 Cauchy 应力各分量的关系与三维情况不

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同：STRESS(1)$=\sigma_{yy}$；STRESS(2)$=\sigma_{zz}$；STRESS(3)$=\tau_{yz}$；STRESS(4)$=\sigma_{xx}$。

对于平面应变问题，本构系数矩阵为

$$[\boldsymbol{D}]=\begin{bmatrix} d_{\text{II}} & d_{\text{IJ}} & 0 & d_{\text{IJ}} \\ d_{\text{IJ}} & d_{\text{II}} & 0 & d_{\text{IJ}} \\ 0 & 0 & d_{\text{JJ}} & 0 \\ d_{\text{IJ}} & d_{\text{IJ}} & 0 & d_{\text{II}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式（9），（10）中系数矩阵的各非 0 元素分别为

$$\left.\begin{aligned} d_{\text{II}} &= \frac{3B(3B+E)}{9B-E};\ d_{\text{IJ}} = \frac{3B(3B-E)}{9B-E}; \\ d_{\text{JJ}} &= \frac{3BE}{9B-E} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

ADINA 中子步应变增量用数组 *DEPS*（不包括子步热应变增量（存储于数组 DEPST 中）。若为弹塑性分析，则 DEPS 数组中包括子步塑性应变增量；若本构系数矩阵采用弹性系数矩阵，则在 *KEY*=2 进行应力积分时，应从数组 DEPS 中减去所有的子步非弹性应变增量）表示，若子步应力增量用 DS 数组表示（DS 数组中的应力各分量与数组 STRESS 的各分量对应），并把数组 DEPS 和 DS 视为向量，且向量各分量等于对应的数组元素，则增量应力-应变关系为

$$\{\boldsymbol{DS}\}=[\boldsymbol{D}]\{DEPS\} \tag{12}$$

即为 ADINA 计算单元应力积分点每一子步应力增量时的增量应力-应变形式。

4 Duncan-Chang E-B 模型程序概要

一个完整的 ADINA 材料本构用户子程序除了第一节介绍的由关键字 *KEY* 控制的 4 个程序模块外，还包括变量声明（包括数组的维数和大小）和变量说明以及在 *KEY*=2 时将数组 CTI 和 CTD 中的值赋值给相关变量。下面针对 Duncan-Chang E-B 模型介绍本文主要的编程过程：

（1）对数组 ARRAY 和 IARRAY 初始化，将数组 CTI 中的材料参数赋值给相关变量；

（2）根据当前子步起始时的单元积分点的应力，计算主应力，并判别大小主应力计算主应力差。在计算主应力时可调用 ADINA 的子程序 XJ123（三维）或 XJ123（二维）由应力分量计算出应力张量不变量，然后求解一元三次方程解出主应力。

（3）计算当前子步的应力水平并进而计算切线弹性模量、卸荷弹性模量和切线体积模量。

（4）计算加载函数并与最大值进行比较，根据加卸载准则确定子步的切线弹性模量和体积模量。

（5）由切线弹性模量和体积模量计算当前子步的系数矩阵。

（6）根据子步应变增量计算当前子步的应力增量，并更新应力数组 STRESS。

（7）进行单元破坏（拉伸破坏或剪切破坏，取决于用户确定的破坏准则）判别与应力修正。

以上除（1）中数组 ARRAY 和 IARRAY 的初始化在 *KEY*=1 程序模块完成外，其余都是在 *KEY*=2 模块进行的。

（8）根据当前荷载步最后一个子步的应力状态重新计算系数矩阵用以求解下一荷载步的分析。该部分内容是在 *KEY*=3 程序模块进行的。

5 程序的验证

本文开发完成了 Duncan-Chang E-B 模型的 SUBROUTINE CUSER3 子程序，经编译调试通过后计算了若干模型问题，以测试 ADINA 的非线性计算能力和精度。模型计算参数取自文献[7]，见表 1，取$\Delta\varphi=0$。有限元计算模拟常规三轴试验的加载过程。加载方式、模型尺寸与常规三轴试验一致。有限元计算模型如图 1 所示，共有 2 640 个单元和 3 133 个节点，按 Gauss 积分法计算单元积分。

表 1 Duncan-Chang E-B 模型参数

Table 1 Parameters for Duncan-Chang E-B model

c /kPa	φ_0 /（°）	k /kPa	k_{ur} /kPa	n	R_{f}	k_{b} /kPa	m
0.006	42.421	215.5	231.1	0.92	0.613	151.01	0.075

表 2、图 2 和图 3 分别给出了围压为 200 kPa、最大主应力差为 600 kPa、采用不同荷载步数时轴向应变ε_{a}的数值解和 Duncan-Chang E-B 模型理论解及试样轴向位移应力云图。由表 2 和图 3 可知，在低荷载水平时，ADINA 的数值模拟结果与模型理论解的误差较小，并且随着荷载步的增加，数值模拟结果越趋近于理论值，即荷载步数增大，模拟的精度越高，可见模拟结果与理论值具有很好的一致性。

表 2 不同荷载步的计算结果与理论值的比较

Table 2 Results of different load steps and theoretical values

加载步	主应力差 /kPa						
/步	0	100	200	300	400	500	600
30	0.0	0.252	0.544	0.886	1.288	1.761	2.304
60	0.0	0.260	0.566	0.924	1.345	1.846	2.451
120	0.0	0.263	0.571	0.933	1.379	1.922	2.548
理论值	0.0	0.265	0.575	0.941	1.390	1.940	2.640

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

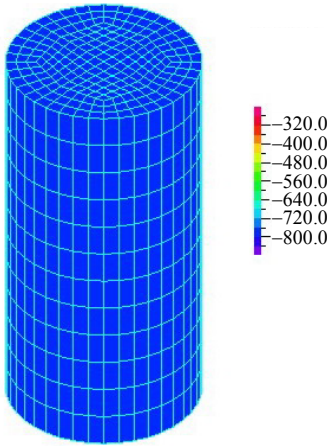


图 1　有限元计算模型及轴向应力（单位：kPa）
Fig.1　Finite element calculation model and axial stress (unit: kPa)

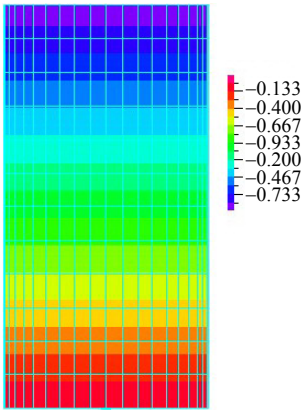


图 2　三轴试样轴向位移（单位：mm）
Fig.2　Axial displacement of the triaxial Specimen (unit: mm)

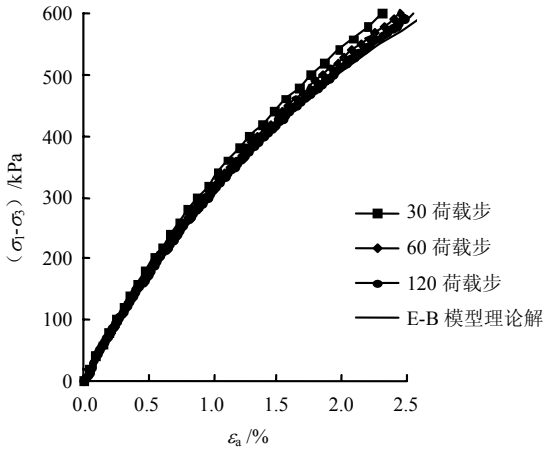


图 3　不同荷载步时的（σ_1-σ_3）-ε_a 曲线
Fig.3　The (σ_1-σ_3)-ε_a curves of different load steps

图 4 为采用相同模型参数，在围压和最大主应力差分别等于 100 kPa 和 300 kPa，200 kPa 和 600 kPa，300 kPa 和 900 kPa，且荷载步数分别为 30，60，90 步条件下，根据二次开发的程序计算的数值结果即 A_1、A_2 和 A_3 曲线和 Duncan-Chang E-B 模型的理论解（即 E_1、E_2 和 E_3 曲线，其中下标 1~3 分别表示围压为 100，200，300 kPa 的固结状态）。可见在不同围压下，基于 ADINA 开发的非线性有限元程序对 Duncan-Chang E-B 模型都有很好的模拟能力。

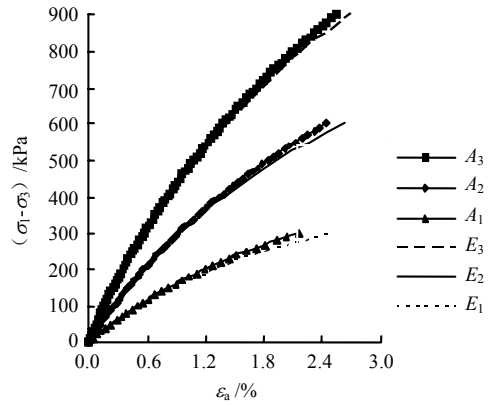


图 4　不同围压时的（σ_1-σ_3）-ε_a 曲线
Fig.4　The (σ_1-σ_3)-ε_a curves of different confining pressures

图 5 为由二次开发的程序对加载、卸载的模拟结果。采用的模型参数与上文相同，围压和最大主应力差分别为 200 kPa 和 600 kPa，荷载步数为 60 步。由图 5 可知，加载到主应力差为 360 kPa 时沿直线卸载，卸载后再加载时应力轨迹为曲线，这是由于模型在卸载时采用常模量，而在加载时根据应力水平采用变模量的缘故。图 5 亦表明，基于 ADINA 开发的 Duncan-Chang 模型对于加卸载情况也有很强的模拟能力。

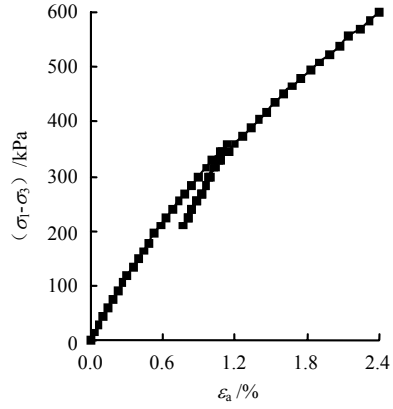


图 5　加卸载时的（σ_1-σ_3）-ε_a 曲线
Fig.5　The (σ_1-σ_3)-ε_a curves of loading and unloading

6　结　语

通过对非线性 Duncan-Chang E-B 模型的开发与程序测试表明，在 ADINA 中进行用户材料本构

下转第 2240 页

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

stability of slope[J]. **West China Exploration Engineering**, 2005, (6): 213－214.

[2] 栾茂田，黎勇，杨庆. 非连续变形计算力学模型在岩体边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19（3）：289－294.
LUAN Mao-tian, LI Yong, YANG Qing. Discontinuous deformation computational mechanics model and its application to stability analysis of rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 289－294.

[3] 陈昌彦，王思敬，沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. 岩土工程学报，2001，23（2）：157－161.
CHEN Chang-yan, WANG Si-jing, SHEN Xiao-ke. Predicting models to estimate stability of rock slope based on artificial neural network[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 157－161.

[4] 卢才金，胡厚田，徐建平，等. 改进的 BP 网络在岩质边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，1999，18（3）：303－307.
LU Cai-jin, HU Hou-tian, XU Jian-ping, et al. Application of improved back-propagation network to the evaluation of railway rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 303－307.

[5] KOHONEN T. Self-organized formation of topologically correct feature maps[J]. **Biological Cybernetics**, 1982, 43: 39－69.

[6] KOHONEN T. Self-organizing Maps(2nd edition)[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.

[7] 吕小平，胡厚田. 铁路边坡稳定性预测系统的研究[J]. 铁道学报，1993，15（1）：94－102.
LÜ Xiao-ping, HU Hou-tian. A stability analysis for railway slopes[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1993, 15(1): 94－102.

[8] 《岩土工程手册》编委会. 岩土工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1994.

上接第 2225 页

的二次开发是可行的，ADINA 具有很强的非线性求解能力。本文给出的基于 ADINA 有限元软件的本构二次开发思路和方法，可为在 ADINA 中开发其他材料本构模型及其他用户子程序提供借鉴和参考。ADINA 有限元软件的二次开发，有助于将这一先进的非线性分析软件进行改进和功能扩充，从而满足不同的用户需求，推动该软件在科学研究和实际工程中的广泛应用。

参 考 文 献

[1] BATHE K J. ADINA/ADINAT 使用手册[M]. 赵兴华译. 北京：机械工业出版社，1986.

[2] 汪仁和，李栋伟，王秀喜. 改进的西原模型及其在 ADINA 程序中的实现[J]. 岩土力学，2006，27（11）：1 954－1 958.
WANG Ren-he, LI Dong-wei, WANG Xiu-xi. Improved Nishihara model and realization in ADINA FEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1 954－1 958.

[3] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, 1970, 96(SM5): 1 629－1 653.

[4] 钱家欢，殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京：中国水利电力出版社，1993.

[5] 陈火红，尹伟奇，薛小香. MSC.Marc 二次开发指南[M]. 北京：科学出版社，2004.

[6] 朱百里，沈珠江. 计算土力学[M]. 上海：上海科学技术出版社，1990.

[7] 冯卫星，常邵东，胡万毅. 北京细砂土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，1999，18（3）：327－330.
FENG Wei-xing, CHANG Shao-dong, HU Wan-yi. Experimental study on parameters of Duncan-Chang model for Beijing fine sandy soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 327－330.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net