

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0599-05

基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究

司海宝^{1,2}, 蔡正银¹

(1.南京水利科学研究所 岩土工程研究所, 南京 210024; 2.安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: ABAQUS 作为一种强大的通用有限元分析程序, 具有很强的非线性计算功能和前、后处理能力。但标准 ABAQUS 程序中的土体本构模型, 没能反映土体的剪胀、软化与硬化、应力路径对变形的影响等, 因此, 有必要在 ABAQUS 中开发出更适用于土体特性的本构模型库。为拓展 ABAQUS 在岩土工程领域的计算能力, 利用二次开发工具 UMAT 数据接口, 开发出更适用于工程应用的土体本构模型库, 如邓肯模型、南水模型及状态相关的砂土模型, 不仅可以充分利用 ABAQUS 程序方便、快捷的前后处理和强大的非线性求解平台, 而且还可以完成更有针对性、更切合实际土体应力-应变有限元的数值计算, 为工程实践提供技术支持。从计算过程、模拟结果与试验结果比较来看, 二次开发模型库子程序运行稳定, 模拟结果正确、可靠。

关键词: 土体本构模型库; ABAQUS; 二次开发; 三轴试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Development of static constitutive model library for soils based on ABAQUS

SI Hai-bao^{1,2}, CAI Zheng-yin¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Architectural Engineering Department, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China)

Abstract: As a powerful universal finite element analysis program, ABAQUS possesses immense ability for nonlinear computing, pre-and-post-processing. But the constitutive model of soil adopted in standard ABAQUS is inadequate in terms of the inability of reflecting militancy of cohesive soil, strain-softening and hardening of sand as well as the impact of stress path on deformation, etc. So it became an emergency for new constitutive model library which is more suitable for soil to be added into ABAQUS. In order to enlarge the computing ability of ABAQUS in the area of geotechnical engineering, new constitutive model library such as Duncan-Chang model, NHRI model and Sand model which are more adaptive for engineering application were developed with the help of secondary development toolkit UMAT as well as data interface. In this way, the convenient pre-and-post-processing and powerful nonlinear solving platform were made full use of in the study, and that more pertinent and more realistic finite element calculation for the stress and strain in soil can be accomplished, which is able to provide technique support for engineering practice. A numerical example is given; and the results verify that the second development of constitutive model library is valid.

Key words: soil constitutive model library; ABAQUS; secondary development; soil triaxial compression tests

1 引言

在土木工程数值计算中, 因土体具有非线性和非弹性、塑性体积应变和剪胀性、塑性剪应变以及硬化和软化、应力路径对变形的影响等特性, 所以土工数值计算为高度非线性^[1]。ABAQUS 作为大型通用非线性有限元分析软件, 可以驾驭工程中各种复杂的线性和非线性问题的分析计算, 因而在土木工程计算中得到了广泛的应用^[2]。虽然 ABAQUS 原

程序有丰富的土体本构模型, 如剑桥模型、D-P 模型等, 但缺少能反映土体的剪胀、软化、应力路径对变形的影响等本构模型, 如参数简单实用而在国内工程界常用的 Duncan-Chang 本构模型^[3-4]、能反映土体软化的南水双屈服面模型^[5]、香港理工大学 Li-Dafalias^[6]提出的能反映砂土剪胀与软化的基于状态相关砂土本构模型等。

借助 ABAQUS 非线性计算平台, 建立更广泛土体本构模型库, 不仅克服了程序本身土体本构不

收稿日期: 2010-03-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目 (No. 50639050)。

第一作者简介: 司海宝, 男, 1976 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事土力学与工程的理论分析、数值计算等。E-mail: hbsi_hnnu@126.com

足的缺点,也拓展了 ABAQUS 的适应范围,缩短程序开发周期,极大降低了开发和维护的成本,是解决复杂土工数值分析的有效途径^[7-8]。徐远杰等^[9]完成了 Duncan-Chang 本构模型在 ABAQUS 中二次开发;岑威钧等^[10]完成了土石料本构模型二次开发。由此可见,基于 ABAQUS 的二次开发是目前土工数值模拟的发展趋势,因而有必要把目前岩土工程界常用的土体本构模型嵌入到 ABAQUS 原程序之中。

本文利用 ABAQUS 提供的二次开发用户子程序,编制了模型库接口程序,完成了土体本构模型库的开发研究。实际工程应用表明,程序运行稳定,模拟结果更接近实际工程。

2 用户子程序及算法

ABAQUS 主程序包括 42 个用户子程序接口和 13 个应用程序接口,可以定义边界条件、载荷条件、接触条件、材料特性及利用子程序与其他软件进行数据交换等。

用户材料子程序 (user-defined material mechanical behavior), 简称 umat, 通过与主求解程序的接口实现与 ABAQUS 的数据交流,在输入文件中,使用关键词*umat,表示自定义用户材料。在 umat 中,可以实现定义材料的本构关系,也可以应用依赖于解的状态变量及结合应用程序来定义场变量。

ABAQUS 计算程序与 umat 子程序之间是一个动态交互传递数据、协同工作的过程。umat 子程序作为计算主程序的一个接口,在单元积分点上调用,增量步开始时,计算程序通过接口进入子程序,单元积分点必要变量的初始值随即传递给子程序相应变量,umat 子程序计算单元积分点的雅克比矩阵,并更新应力张量和状态变量,最后将这些变量的更新值通过接口返回计算程序。

本文基于广义中心积分算法,通过平衡迭代保证应力状态始终位于当前屈服面,因而具有较高的计算精度和较快收敛速度^[11-13]。计算过程如下:

①平衡时刻 t , 主程序提供给子程序总应变 $\varepsilon(t)$ 和总应力 $\sigma(t)$, 同时自动生成一个时间增量 Δt 。

②abaqus 主程序提供一个总应变增量 $\Delta \varepsilon(t)$, 调用子程序,计算相应的应力增量 $\Delta \sigma(t)$ 、为非线性迭代求解过程,迭代收敛后更新应力(应变)张量 $\sigma(t + \Delta t) = \sigma(t) + \Delta \sigma(t)$ 。

③子程序将更新后的应力(应变)值返回给计算主程序,同时自动更新总的应变 $\varepsilon(t + \Delta t) =$

$\varepsilon(t) + \Delta \varepsilon(t)$ 。

④主程序进行迭代次数的检查,如超过限定的迭代次数,主程序自动减小时间增量并返回,重新迭代计算,然后主程序将 $\sigma(t + \Delta t)$ 代入系统平衡方程,进行平衡判断,若满足归一化系统平衡方程,结束本次迭代计算,进入下一步计算,否则,主程序放弃更新,重新回到增量步初始时刻的值,并进行本次增量步的下一步平衡迭代,直至满足系统平衡方程。

3 本构模型库

借助 ABAQUS 强大非线性计算能力,本文完成了目前国内常用土体本构模型库的开发,主要包括在国内岩土工程领域广泛采用的一些土体本构,如 Duncan-Chang 弹性非线性模型、南水弹塑性模型及基于状态相关的砂土本构模型。这些本构模型有的在实际工程中得到了广泛的应用,积累了丰富的实践经验,有的很好地反映相关土体的一些特征,如砂土的剪胀性等。

3.1 Duncan-Chang 本构模型

Duncan-Chang 等根据康纳 (Kondner) 的建议,将三轴剪切试验中当 σ_3 等于常数时的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系和 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 关系近似地用双曲线来表示为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{h\varepsilon_1}{1 - d\varepsilon_1} \quad (2)$$

在上述 2 个基本假定的基础上, Duncan-Chang E-B 模型的表达式为

$$\left. \begin{aligned} E_t &= \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \\ B_t &= \frac{dp}{d\varepsilon_v} = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \\ (\sigma_1 - \sigma_3)_f &= \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \\ R_f &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

卸荷和重复加载时的回弹模量采用下式表示:

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为剪应力极限值; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏剪应力; K_{ur} 为回弹模量指数,一般取 $K_{ur} = (1.5 \sim 3)K$, K 及 n 为切线

弹性模量与指数； K_b 、 m 分别为切线体积模量系数与指数，模型共有 8 个参数。

3.2 南水模型

南水模型的双屈服面方程为

$$f_1 = p^2 + r^2 q^2; f_2 = \frac{q^s}{p} \quad (5)$$

式中： r 、 s 为屈服面参数； p 、 q 为八面体正应力、八面体剪应力。采用正交流动法则^[8-9]，弹塑性应力-应变关系表达式为

$$\begin{aligned} \{\Delta \varepsilon\} &= [D]^{-1} \{\Delta \sigma\} + A_1 \Delta f_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} + A_2 \Delta f_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma_{ij}} \\ A_1 &= \frac{\eta \left(\frac{9}{E_t} - 3 \frac{\mu_t}{E_t} - \frac{3}{G_c} \right) + 2s \left(\frac{3\mu_t}{E_t} - \frac{1}{B_c} \right)}{4\sqrt{2}(1 + \sqrt{2}r^2\eta)(s + r^2\eta^2)} \\ A_2 &= \frac{\left(\frac{9}{E_t} - \frac{3\mu_t}{E_t} - \frac{3}{G_c} \right) - 2r^2\eta \left(\frac{3\mu_t}{E_t} - \frac{1}{B_c} \right)}{\sqrt{2}\eta^2(\sqrt{2}s - \eta)(s + r^2\eta^2)} \\ \begin{Bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_p \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{K} + 4p^2 A_1 + \frac{\tau^{2s}}{p^4} A_2 & 4r^2 p \tau A_1 - \frac{s \tau^{2s}}{p^3 \tau} A_2 \\ 4r^2 p \tau A_1 - \frac{s \tau^{2s}}{p^3 \tau} A_2 & \frac{1}{G} + \frac{2}{3} \left(4r^2 \tau^2 A_1 + \frac{s^2 \tau^{2s}}{p^2 \tau^2} A_2 \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dq \\ dp \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

理论假定三轴试验中的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线仍为双曲线，而 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 的关系曲线为抛物线，则相应参数表达形式为

$$\begin{aligned} E_t &= E_i(1 - R_f D_s)^2; B = \frac{E_w}{3(1 - 2\nu)} \\ G &= \frac{E_w}{2(1 + \nu)}; D_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \\ u_t &= 2C_d \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^d \frac{E_i R_f}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left(1 - \frac{D_s}{1 - D_s} \frac{1 - R_d}{R_d} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中： E_i 为初始模量； R_f 为破坏比； D_s 为应力水平； C_d 为 σ_3 等于一个标准大气压时的最大收缩体应变； n_d 为收缩体应变随 σ_3 增加而增加的幂指数； R_d 为发生最大收缩时的 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与偏应力的渐进值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 之比。南水模型包括 c 、 ϕ 、 $\Delta\phi$ 、 R_f 、 K 、 K_w 、 n 、 C_d 、 n_d 、 R_d 等 8 个材料参数。

3.3 状态相关砂土本构模型

李湘松^[6]认为，在 $q - p'$ 平面内砂土存在一条临界应力比线，它是一条通过坐标圆点的直线，其斜率 M 为临界应力比，并引入状态参量 ψ ，这样基于

状态相关砂土本构模型方程表达式为

$$\left. \begin{aligned} \psi &= e - \left[e_r - \lambda \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi \right]; D = D_0 \left(e^{m\nu} - \frac{\eta}{M} \right) \\ G &= G_0 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{pp_a}; K = G \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \\ K_p &= hG \left(\frac{M}{\eta} - e^{m\nu} \right); h = h_1 - h_2 e \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} dq \\ dp \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 3G & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \frac{h(L)}{K_p + 3G + K\eta D} \\ &\quad \begin{bmatrix} 9G^2 & -3KG\eta \\ 3KG\eta & -K^2\eta D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_p \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： D_0 、 m 为模型参数； K_p 为塑性模量； L 为塑性加载因子； $h(L)$ 为 Heaviside 方程，当 $L > 0$ 时， $h(L) = 1$ ，其他情况时， $h(L) = 0$ ； G 、 K 分别为弹性剪切模量和弹性体积模量； G_0 为材料参数； ν 为泊松比； M 土的临界应力比； e_r 为正应力等于 0 时土体对应的孔隙比； λ 临界状态线的斜率； ξ 试验率定参数； h_1 、 h_2 和 n 为模型参数；状态相关砂土模型就包括 G_0 、 ν 、 M 、 e_r 、 λ 、 ξ 、 D_0 、 m 、 h_1 、 h_2 、 n 等 11 个材料参数。

4 算例验证

4.1 模型试验参数

本文通过模拟三轴排水固结试验并与试验结果进行比较，旨在验证二次开发土体模型库子程序运行的稳定性和计算结果的可靠性。算例引自雅砻江水电站开展的大型三轴试验，试样标准为 $\phi 300 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ ，试样相对密度为 90% 的粗粒土，试验分为 3 级加载，加载围压分别为 500、1 000、2 000 kPa，首先使试样在围压下固结，然后排水剪切，剪切速率为 0.002 mm/min。经试验数据整理，Duncan 弹性非线性模型、南水双屈服面模型及状态相关砂土模型参数如表 1~3 所列。

4.2 结果比较分析

本次有限元数值计算完全模仿常规土工三轴排水固结试验过程。计算模型为 $\phi 300 \text{ mm}$ 、高 700 mm 的圆柱体，模型尺寸与试样一致，计算分为 500、1 000、2 000 kPa 3 级加载。计算过程分 3 步实现：首先对模型实现自重应力平衡，然后施加围压，最后施加轴向偏心载荷。计算重点考查施加偏心载荷的影响，所以第 3 步划分为 100 增量步进

行迭代计算, 计算结果如图 1~5 所示。

表 1 Duncan-Chang 本构模型试验参数
Table 1 Duncan-Chang model parameters

c /kPa	ϕ /($^{\circ}$)	R_f	K	n	K_b	m	K_{ur}
338.8	36.83	0.81	741.3	0.24	199.5	0.26	1 186

表 2 NHRI 本构模型试验参数
Table 2 NHRI model parameters

c /kPa	ϕ /($^{\circ}$)	$\Delta\phi$ /($^{\circ}$)	R_f	K	n	C_b	n_d	r_d	K_{ur}
0	56.25	12	0.7	540	0.3	0.01	0.6	0.66	864

表 3 砂土本构模型试验参数
Table 3 Sand model parameters

弹性参数			临界状态参数				状态相关参数			
G	μ	M	e_r	λ	ξ	m	D_0	n	h_1	h_2
22	0.05	1.75	0.512	0.025	0.7	1.28	0.61	1.1	2.60	2.55

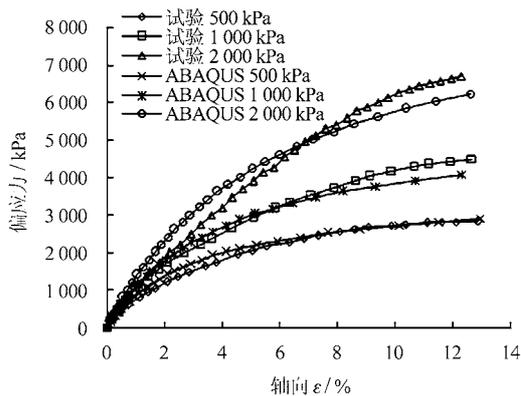


图 1 Duncan-Chang 偏应力与轴向应变模拟与试验结果
Fig.1 Duncan-Chang deviatoric stress and axial strain model and test result

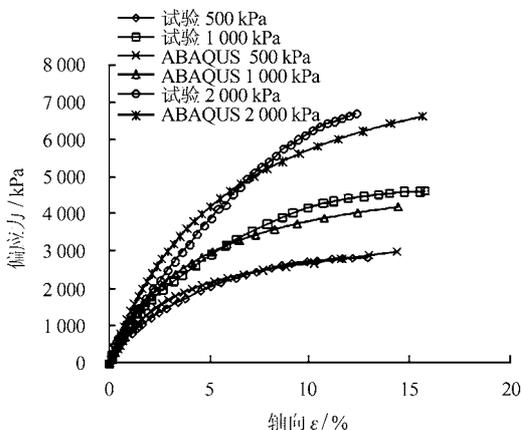


图 2 NHRI 偏应力与轴向应变模拟与试验结果
Fig.2 NHRI deviatoric stress and axial strain model and test results

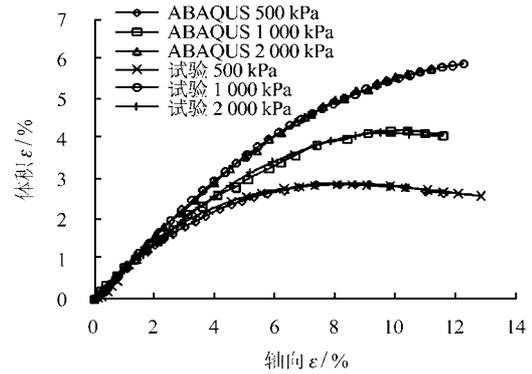


图 3 NHRI 体应变与轴向应变模拟与试验结果
Fig.3 NHRI volumetric strain and axial strain model and test results

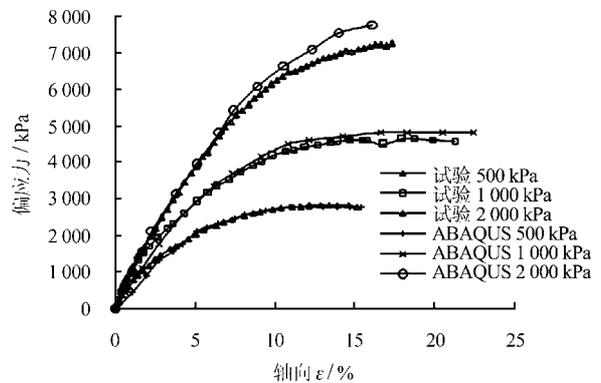


图 4 SAND 偏应力与轴向应变模拟与试验结果
Fig.4 SAND deviatoric stress and axial strain model and test results

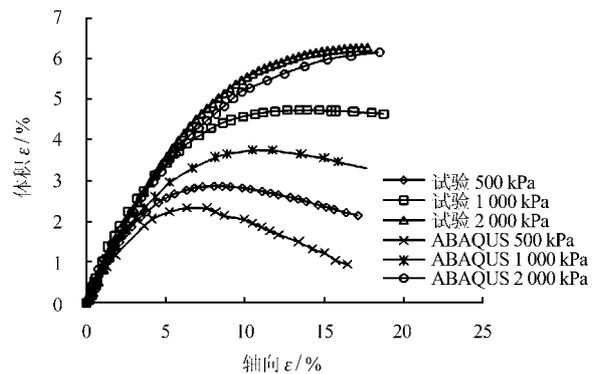


图 5 SAND 体应变与轴向应变模拟与试验结果
Fig.5 SAND volumetric strain and axial strain model and test results

从模拟过程、计算结果与试验结果比较看, 本文二次开发子程序运行稳定, 结果正确、可靠。图 1、2、4 显示, 拟合 $\sigma_a - \varepsilon_a$ 曲线时, 这 3 类模型模拟结果均较好, 共同点是在剪切初始阶段模拟值偏大而后阶段阶段偏小。由于 Duncan-Chang 模型为弹性非线性模型, 在偏应力与轴向应变平面上, 仅近似反映土体的非线性, 不能反映土体的剪胀性。图

3 的南水模型很好地反映了土体的非线性、剪胀性等特性, 与该粗粒土拟合程度较高。砂土模型虽很好地反映土体的软化特性, 但在拟合 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 中, 拟合程度较差, 见图 5。这也从一个侧面反映, 只有建立更广泛的土体本构模型库, 针对不同的土体采用不同的土体本构模型, 才能保证数值计算结果更真实、更可靠、更贴近实际工程。

5 结 论

(1) 在土木工程数值计算中, 土体本构的选取决定了整个计算过程的正确与否。建立广泛的土体本构模型库, 针对不同土体, 选用不同本构模型, 使得数值计算更具有针对性。

(2) 采用 FORTRAN 语言, 基于广义中心积分算法, 编写了 Duncan-Chang 模型、南水双屈服面模型和基于状态相关砂土模型子程序, 计算结果显示子程序具有较高的计算精度和较快收敛速度。

(3) ABAQUS 作为大型通用的非线性处理平台, 借助其强大的非线性计算和前后处理能力, 通过二次开发, 建立更广泛的土体本构模型, 不仅使得数值模拟结果更真实, 更贴近工程实际, 也减少了程序开发和维护的成本, 而且统一的计算处理平台, 使得计算结果更具有可比性、公正性和可信度, 这也是土木工程数值计算的发展方向之一。

参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 387—395.
- [2] Hibbitte Karlsson, Sorenson. ABAQUS/Standard user's manual[S]. U. S. A.: [s. n.], 2002.
- [3] SIMO J C, TAYLOR R L. Consistent tangent operator for rate-independent elastoplasticity[J]. **Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1985, 48: 101—118.
- [4] DUNCAN J M, ZHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, 1970, 96(SM5): 1629—1653.
- [5] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式[J]. 水利水运科学研究, 1986, (4): 1—14.
SHEN Zhu-jiang. A nonlinear dilatant stress-strain model for soils and rock materials[J]. **Hydro Science and Engineering**, 1986, (4): 1—14.
- [6] LI X S. A sand model with state-dependent dilatancy[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(4): 449—460.
- [7] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 范庆来, 栾茂田, 杨庆, 等. 修正剑桥模型的隐式积分算法在 ABAQUS 中的数值实施[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 269—273.
FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, YANG Qing, et al. Numerical implementation of implicit integration algorithm for modified Cam-clay model in ABAQUS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 269—273.
- [9] 徐远杰, 王观琪, 李健, 等. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1032—1036.
XU Yuan-jie, WANG Guan-qi, LI Jian, et al. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in ABAQUS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1032—1036.
- [10] 岑威钧, 朱岳明. 基于 ABAQUS 的土石料本构模型二次开发及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 78—81.
CEN Wei-jun, ZHU Yue-ming. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in ABAQUS[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2005, 25(6): 78—81.
- [11] CARTER J P, BOOKER J R, WROTH C P. A critical state soil model for cyclic loading[C]//Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads. London: John Wiley and Son, 1982: 219—252.
- [12] HSIEH H S, KAVAZANJIAN E, BORJA R I. Doublyyield-surface Cam-clay plasticity model I: Theory[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering**, 1990, 116(9): 1381—1401.
- [13] SHENG D, SLOAN S W, YU H S. Aspects of finite element implementation of critical state models[J]. **Computational Mechanics**, 2000, 26: 185—196.