

DOI: 10.11779/CJGE2015S1017

考虑扰动影响修正 Duncan-Chang 模型的二次开发

朱剑锋¹, 徐日庆²

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为了更准确预测施工扰动状态下土体的变形和强度特性, 开发了考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 模型, 编写了通用有限元软件 ABAQUS 修正 Duncan-Chang 模型的用户子程序 (UMAT), 并通过干砂三轴试验对 UMAT 的可行性进行了验证。试验结果表明, 不同扰动度下的数值模拟值均接近于三轴试验值。因此, 对考虑扰动影响修正 Duncan-Chang 模型的二次开发是可行的, 可以在考虑施工扰动影响的岩土工程数值计算中推广应用。

关键词: 施工扰动; Duncan-Chang 模型; 有限元; ABAQUS; 二次开发

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0084-05

作者简介: 朱剑锋(1982-), 男, 讲师, 主要从事土的工程性质及本构理论研究。E-mail: zhujianfeng0811@163.com。

Secondary development of modified Duncan-Chang model considering disturbance

ZHU Jian-feng¹, XU Ri-qing²

(1. Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Research Center of Coastal Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The modified Duncan-Chang model considering disturbance is secondarily developed to predict the mechanical properties of soil under construction disturbance state more precisely. And the corresponding user subroutine UMAT of ABAQUS, which is a general-purpose finite element analysis system, is programmed. Moreover, the triaxial compressed tests on dry sands are carried out to prove the feasibility of the UMAT. The simulated results show that the predicted values of ABAQUS in which the developed UMAT subroutine has been used agree well with those of the triaxial tests at any disturbance state. Therefore, the secondary development of the modified Duncan-Chang model considering disturbance is feasible. Moreover, it can be widely used in the numerical calculation of geotechnical engineering.

Key words: construction disturbance; Duncan-Chang model; finite element method; ABAQUS; secondary development

0 引言

土木工程施工过程中, 不可避免会对周围土体产生扰动(如基坑开挖、盾构掘进等), 从而改变土体的变形和强度特性。倘若采用施工前的土体物理力学参数来预测施工过程中及以后的土体强度、变形等特性势必造成较大误差。Duncan-Chang 模型^[1]模型参数少、物理意义明确且能够反映土体应力-应变关系的非线性, 各种土的 Duncan-Chang 模型参数取值也积累了很多经验, 因此成为土的最为普及本构模型之一, 在岩土工程的数值计算中得到了广泛应用: 何昌荣等^[2]分别增减 Duncan-Chang 模型的 8 个参数, 用有限元法分析了对一个均质土坝的位移和应力水平的影响程度; 胡亚元等^[3]从 Duncan-Chang 模型和魏汝龙-Khosla-Wu 模型出发, 建立了排水固结法加固软弱地基的强度增长计算公式; 王立忠等^[4]考虑了土的结构的损伤, 引入损伤比的概念, 对邓肯-张模型进行了修

正; 陈育民等^[5]利用 VC++ 环境在 FLAC^{3D} 软件中实现了邓肯-张本构模型的二次开发; 何春保等^[6]对于给定的 $q-s$ 曲线, 用解析方法对土体 Duncan-Chang 模型参数进行反演分析; 曹文贵等^[7]根据实际地基变形的非线性变化特征, 提出了基于 Duncan-Chang 模型的地基沉降分析新方法。然而与大多数本构模型一样, 传统 Duncan-Chang 模型无法考虑土体的物理性质, 仅反映了土体力学状态, 因此一旦土体受到外界扰动, 其模型参数(如 K)会变化很大, 从而使得数值计算结果与实际相差较大^[2, 4]。于是笔者基于扰动状态概念

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178420, 51409142); 浙江省科技厅公益项目(2012C21058); 国家科技部星火计划项目(2014GA701039); 国家住建部软科学的研究项目(2013-K1-2); 浙江省教育厅(理)科研计划项目(Y201327602); 宁波市自然科学基金项目(2012A610160)

收稿日期: 2015-03-26

理论 (disturbed state concept, DSC) [8–10], 选用相对密实度 (D_r) 为扰动参量, 对传统 Duncan–Chang 模型中进行修正, 提出了考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型^[11]。

本构模型能够推广应用的关键在于能对其进行编程开发解决工程实际问题。作为一种在实际工程中广泛应用的大型通用有限元软件 ABAQUS, 其具有灵活和功能强大的二次开发平台, 于是笔者利用 Fortran 语言, 开发研制了考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型的用户子程序 UMAT, 并结合试验数据对其可行性进行了验证。

1 考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型

由于相对密实度 D_r 对砂土峰值强度和应力 – 应变曲线斜率影响显著, 于是, 笔者基于 Desai 的扰动状态概念理论^[8], 选取相对密实度 D_r 为扰动参量, 并分别称使 D_r 减小和增大的扰动为“正扰动”和“负扰动”, 建立如下所示扰动函数^[11]:

(1) 正扰动 ($D_r \leq D_{r0}$)

$$D = \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{D_{r0} - D_r}{D_r - D_{rmin}} \right) \quad (1a)$$

(2) 负扰动 ($D_r > D_{r0}$)

$$D = \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{D_{r0} - D_r}{D_{rmax} - D_r} \right) \quad (1b)$$

式中 D_r 为砂土当前相对密实度 ($0 \leq D_r \leq 1$); D_{r0} 为砂土初始相对密实度; D_{rmin} 为砂土最松散状态对应的相对密实度 (一般取为 0); D_{rmax} 为砂土最密实状态对应的相对密实度 (一般取为 1)。

模型计算公式为

(1) 正扰动

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{e^{dD_{r0}D} + \frac{R_{r0}\varepsilon_1}{K_0 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{n_0}}} + \frac{(M_0 - gD_{r0}D)\sigma_3}{(M_0 - gD_{r0}D)\sigma_3} \quad (2a)$$

(2) 负扰动

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{e^{d(1-D_{r0})D} + \frac{R_{r0}\varepsilon_1}{K_0 p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{n_0}}} + \frac{[M_0 - g(1-D_{r0})D]\sigma_3}{[M_0 - g(1-D_{r0})D]\sigma_3} \quad (2b)$$

式中 K_0 为初始状态的修正 Duncan–Chang 模型无因次试验参数; n_0 为初始状态的修正 Duncan–Chang 模型无因次试验参数; p_a 为标准大气压, 取 $p_a=0.101$ 3 MPa; M_0 为初始状态的修正 Duncan–Chang 模型无量纲的参数; R_{r0} 为初始状态的破坏比。

2 考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型的二次开发

目前, 基于 ABAQUS 软件的原始 Duncan–Chang 的用户材料子程序 (UMAT) 已被二次开发^[12–13]。然而, 上述两个子程序有如下缺陷:

(1) 文献[12]编写的 UMAT 采用始点刚度法 (基本增量法) 进行应力积分, 计算精度较差。

(2) 文献[13]编写的 UMAT 未对拉应力修正, 调用时有时会意外出错。

于是, 笔者针对二者 UMAT 的缺陷, 编写了考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型相应的用户子程序, 主要特征如下:

(1) 修正 Duncan–Chang 的材料参数组 PROPS 包括 12 个分量, 对应 12 个模型参数。

(2) 对拉应力进行修正: 当 $\sigma_3 < 0$ 时, 取 $\sigma_3=0$ 。

(3) 采用中点增量法进行应力积分。

根据 ABAQUS 的应力符号约定: $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$, 且压应力为负、拉应力为正。然而, 考虑到土体的抗拉强度很低, 于是岩土工程中通常假定压应力为正而拉应力为负, 且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。因此, 笔者在开发考虑扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型的 UMAT 时, 将根据岩土工程中的约定, 对换修正 Duncan–Chang 模型数学表达式中的大小主应力与符号。于是, 变换后的模型参数数学表达式为

$$E_{ID} = (1 - R_{ID} S_d)^2 E_{iD} \quad , \quad (3)$$

$$E_{iD} = K_D p_a \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right)^{n_D} \quad , \quad (4)$$

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{M_D(-\sigma_1)} \quad , \quad (5)$$

$$E_{urD} = K_{urD} p_a \left(\frac{-\sigma_1}{p_a} \right)^{n_D} \quad . \quad (6)$$

式中 E_{iD} 为考虑施工扰动影响的土体初始弹性模量; E_{ID} 为考虑施工扰动影响的土体切线弹性模量; E_{urD} 为考虑施工扰动影响的土体卸载弹性模量; R_{ID} 为考虑施工扰动影响的土体破坏比; S 为考虑施工扰动影响的应力水平; n_D 为考虑施工扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型的无因次试验参数; K_{urD} 为考虑施工扰动影响的卸载弹性系数, 且 $K_{urD}=A_{ur}K_D$, A_{ur} 为卸荷比, 可在[1.1, 1.3]内取值; K_D 为考虑施工扰动影响的修正 Duncan–Chang 模型无因次试验参数, 计算公式见下式 (7a)与(8a); M_D 为扰动过程中的修正 Duncan–Chang 模型的无因次试验参数, 计算公式见下式(7b)与(8b)。

(1) 正扰动

$$K_D = \frac{K_0}{e^{gD_r \tan(\pi D/2)}} , \quad (7a)$$

$$M_D = M_0 - hD_r \tan(\pi D/2) . \quad (7b)$$

(2) 负扰动

$$K_D = \frac{K_0}{e^{g(1-D_r) \tan(\pi D/2)}} , \quad (8a)$$

$$M_D = M_0 - h(1-D_r) \tan(\pi D/2) . \quad (8b)$$

式中 g 为试验常数, 与砂土类别有关; h 为试验常数, 与砂土类别有关。

根据式 (3) ~ (8) 修正 Duncan-Chang 模型的刚度系数矩阵的元素可全部确定, 相应的刚度系数矩阵 $[R]$ 为

$$[R] = \frac{E_D(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, ν 为土体的泊松比, 其他参数意义同前。

3 试验验证

3.1 三轴试验

鉴于修正 Duncan-Chang 本构模型是基于干砂三轴压缩试验建立的, 因此可以通过干砂常规三轴压缩试验检验开发的用户子程序的可行性。基于这一目的, 选用土样为福建厦门艾思欧标准砂厂生产的福建中级砂, 如图 1 所示, 其颗粒粒径主要集中在 0.25~1 mm, 基本物理参数见表 1。

试样为圆柱形, 高度 h 为 80 mm, 直径 d 为 39.1 mm。制样时, 分 5 层填筑, 各工况下每层填筑干砂质量见表 2。鉴于干砂制样难度较大, 因此试验共设计了如表 2 所示的 4 种工况。为获得修正 Duncan-Chang 模型的试验参数, 对于每种工况的干砂试样均开展了 100, 200, 300 kPa 3 种围压的三轴试验。试验仪器为南京电力自动化总厂生产的 SJ-1A 型应变控制式三轴仪, 试验类型为不固结不排水试验^[14], 剪切应变速率为 0.808 mm/min, 破坏标准按照峰值强度确定。

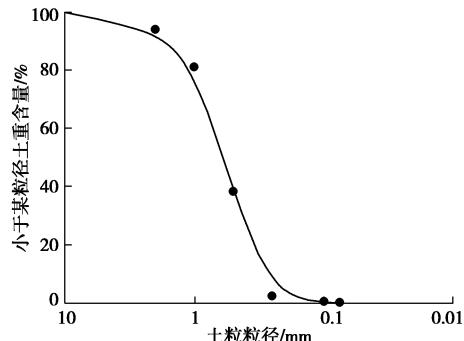


图 1 砂土颗粒级配分布曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of sands

表 1 砂土物理参数

Table 1 Physical indices of sand specimens

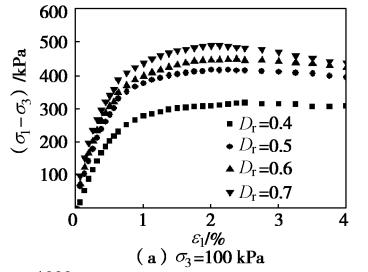
含水率 $w/\%$	比重 G_s	最大孔隙比 e_{\max}	最小孔隙比 e_{\min}	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
0.046	2.681	0.723	0.382	2.267	1.408

表 2 试验工况

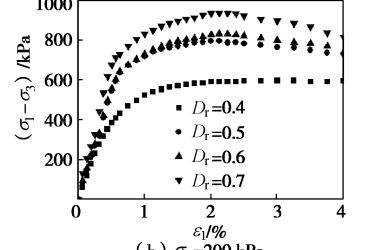
Table 2 Experimental cases for sands

工况	相对密实度 D_r	试样总质量 m/g	每层填筑质量 \bar{m}/g
1	0.4	162.338	32.468
2	0.5	165.892	33.178
3	0.6	169.607	33.921
4	0.7	173.481	34.696

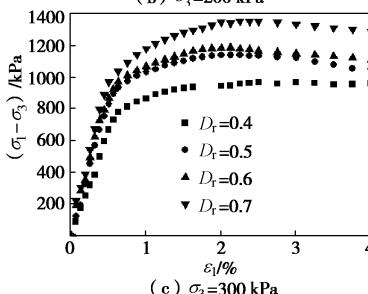
福建标准砂典型试验的应力 - 应变曲线如图 2 所示。



(a) $\sigma_3=100 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3=200 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_3=300 \text{ kPa}$

图 2 不同工况下的砂土应力 - 应变曲线

Fig. 2 Deviator stress-axial strain curves under different experimental conditions

3.2 数值模拟

现以图 2(c) 中相对密实度为 0.6 的试验数据为初始状态(其模型计算参数见下表 3), 其他密实度对应的砂土状态为扰动状态(相应的扰动度见下表 4), 分别开发基于始点刚度法^[11]和中点增量法的修正 Duncan-Chang 模型用户子程序, 结合 ABAQUS 软件来预测围压 $\sigma_3=200$ kPa 下的福建中级干砂在不同扰动状态下的应力 - 应变曲线, 并与试验数据进行对比, 见下图 4, 5。

表 3 修正 Duncan-Chang 模型计算参数

Table 3 Parameters of modified Duncan-Chang model

D_{r0}	\bar{R}_{r0}	K_0	n_0	M_0	d	g
0.6	0.838	1495.1	0.886	4.335	1.933	4.947

表 4 试验砂土的扰动度

Table 4 Disturbance degrees of test sands

D_r	D
0.4	0.295
0.5	0.126
0.6	0.000
0.7	-0.205

如图 3 所示: 与福建标准砂常规三轴试验相对应, 数值模拟时, 试样取同样大小的圆柱体($d=39.1$ mm, $h=80$ mm), 计算模型共划分 1620 个六面体单元, 加载速率为 0.808 mm/min, 试验类型为不固结不排水试验。

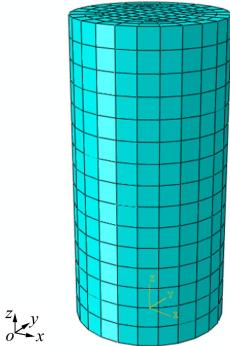


图 3 干砂三轴试样网格划分示意图

Fig. 3 Mesh division of dry sand triaxial specimens

非线性计算中, 刚度矩阵取决于应力状态, 因此在进行数值模拟时必须进行的自重应力场平衡, 图 4 和图 5 为加固压平衡后的自重应力场和位移场。

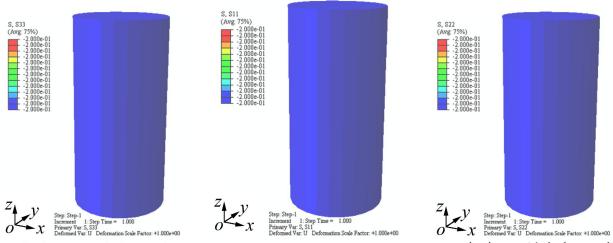


图 4 干砂三轴试样主应力云图(初始应力场平衡后)

Fig. 4 Principal stresses nephograms of dry sand triaxial specimens (after balance of initial stress field)

由上图 4 可知: 平衡后的自重应力场在 3 个方向的主应力均为 0.2 MPa ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=0.2$ MPa), 这与常规三轴试验加固压后的试样的应力状态 ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=0.2$ MPa) 是一致的。图 5 表明: 加固压后, 试样的最大竖向位移仅为 10^{-7} mm, 可以忽略不计。因此, 加固压后的自重应力场是平衡的。

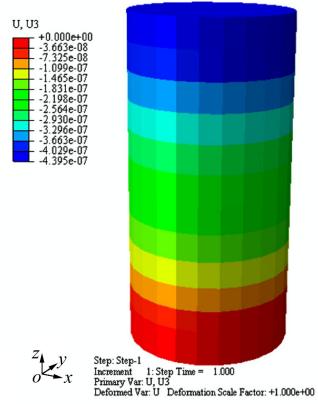


图 5 干砂三轴试样的竖向位移云图(初始应力场平衡后)

Fig. 5 Vertical displacement nephograms of dry sand triaxial specimens (after balance of initial stress field)

由于实际工程中土体的允许应变大多介于 0.01%~0.3%, 因此本文采用本文基于中点增量法的修正 Duncan-Chang 的 UMAT 对 0~2% 应变范围内的三轴试验结果进行模拟, 并与基于始点刚度法的预测结果进行了对比, 见图 6。

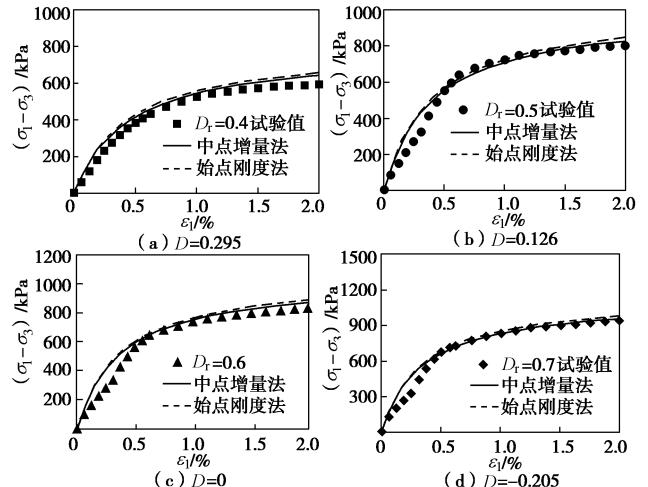


图 6 不同扰动度下有限元预测值与试验值

Fig. 6 Predicted and test results under different disturbance degrees

由图 6 可知, 在 0~2% 应变范围内:

(1) 基于始点刚度法和中点增量法的应力 - 应变预测值与试验值均比较接近。

(2) 基于中点增量法的预测值优于始点刚度法, 主要原因在于始点刚度法在数值计算中是根据每级增量步的初始应力来确定切线弹性模量, 而中点增量法是根据每级增量步的平均应力来确定切线弹性模量, 因此中点增量法的预测结果与试验值更接近。

(3) 任意扰动度下的数值模拟的应力-应变变化规律符合干砂的真实性状。因此, 编制的UMAT算法正确且具有较高的计算精度。

4 结语

土体受到扰动后, 其结构性受到了影响, 相应的物理力学指标会因此而改变。本文编制了考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 模型的用户材料子程序 UMAT, 将其嵌入到有限元分析软件 ABAQUS 中, 对干砂常规三轴试验进行了数值模拟, 结果表明有限元预测值与试验结果比较接近, 因此本文对考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 的二次开发是成功的, 且实现了 ABAQUS 软件在岩土工程中应用范围的有益扩展。另外, 笔者提出的考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 考虑的扰动因素(如未考虑扰动对泊松比的影响)不够全面, 在下一步的研究中有必要对其进行完善, 建立能涵盖较多扰动因素的本构模型。

参考文献:

- [1] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM5): 1629 – 1653.
- [2] 何昌荣, 杨桂芳. 邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 170 – 174. (HE Chang-rong, YANG Gui-fang. Effects of parameters of Duncan-Chang model on calculated results[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 170 – 174. (in Chinese))
- [3] 胡亚元, 陈云敏. 本构模型与软黏土强度增长的关系研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 731 – 735. (HU Ya-yuan, CHEN Yun-min. Research on correlation between soil model and shear strength gain in staged construction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(6): 731 – 735. (in Chinese))
- [4] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯-张模型[J]. 水利学报, 2004(1): 83 – 89. (WANG Li-zhong, ZHAO Zhi-yuan, LI Ling-ling. Non-linear elastic model considering soil structural damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 83 – 89. (in Chinese))
- [5] 陈育民, 刘汉龙. 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2123 – 2126. (CHEN Yu-min, LIU Han-long. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2123 – 2126. (in Chinese))
- [6] 何春保, 沈建华, 蔡健, 等. Duncan-Chang 非线性地基模型的反演分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 634 – 638. (HE Chun-bao, SHEN Jian-hua, CAI Jian, et al. Back analysis of Duncan-Chang nonlinear foundation model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 634 – 638. (in Chinese))
- [7] 曹文贵, 邓湘君, 张超. 基于 Duncan-Chang 模型的地基沉降分层总和分析方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 643 – 649. (CAO Wen-gui, DENG Xiang-jun, ZHANG Chao. Layerwise summation method for ground foundation settlement based on Duncan-Chang constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 643 – 649. (in Chinese))
- [8] DESAI C S. A consistent finite element technique for work softening behavior[C]/Proceeding of International Conference on Computer Methods in Nonlinear Mechanics. Austin, 1974.
- [9] ZHU Jian-feng, XU Ri-qing, LI Xin-rui, et al. Calculation of earth pressure based on disturbed state concept theory[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(4): 1240 – 1247.
- [10] 朱剑锋, 徐日庆, 王兴陈, 等. 考虑扰动影响砂土修正弹性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 193 – 201. (ZHU Jian-feng, XU Ri-qing, WANG Xing-chen, et al. An elasto-plastic model for sand considering disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 193 – 201. (in Chinese))
- [11] 徐日庆, 张俊, 朱剑锋, 等. 考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(1): 1 – 7. (XU Ri-qing, ZHANG Jun, ZHU Jian-feng, et al. Modified Duncan-Chang model considering disturbance[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(1): 1 – 7. (in Chinese))
- [12] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 60 – 67. (WANG Jin-chang, CHEN Ye-kai. Application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 60 – 67. (in Chinese))
- [13] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 146 – 158. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 146 – 158. (in Chinese))
- [14] SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)