

皖江区域马鞍山段砂土邓肯-张模型参数试验验证

司海宝^{1,3},殷俊²,李会¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院,安徽马鞍山243032;2. 马鞍山市花山区房屋管理服务中心,安徽马鞍山243032;3. 南京水利科学研究院,江苏南京210024)

摘要:皖江区域是我国经济发展迅速、基础设施全面推进的中部区域。在基础建设中寻求简捷而贴近实际的计算方法成为设计计算关键环节。邓肯-张双曲线本构模型能较好反映土体非线性特征,概念清晰,易于理解,在工程界中得到了广泛应用。文中选取皖江区域马鞍山段典型砂土层取样试验,分析土体抗剪强度和变形特征,率定邓肯-张模型计算参数。在编制邓肯-张双曲线非线性土体本构模型有限元计算程序基础上,开展砂样土体自重应力平衡、等压固结和轴向应变剪切破坏过程有限元数值计算验证。结果表明:邓肯-张模型参数正确,可为采用有限单元法分析皖江区域砂土地基沉降及稳定性提供依据。

关键词:皖江区域砂土;邓肯-张模型;三轴试验;数值计算

中图分类号:TU 411.01 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2019.02.010

Study on Parameters of Duncan-Chang Model for the Sand in Ma'an shan District of Wanjiang Area

SI Haibao^{1,3}, YIN Jun², LI Hui¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'an shan 243032, China; 2. Housing Management service Center of Huashan District, Ma'an shan 243032, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The infrastructure construction is progressing comprehensively owing to economic prosperity in Ma'an shan district of Wanjiang area. The seeking of calculation methods close to engineering practices with simple parameters has become key links in design. The Duncan-Chang constitutive model is widely used in engineering on account of its clear concept and simple calculation procedure. The samples in typical sand layers are selected in Ma'an shan district of Wanjiang area. The shear strength and deformation characteristics of the sand are studied. The calculation parameters of Duncan-Chang model are offered through laboratory test. The finite element program of Duncan-Chang constitutive model is developed. Numerical calculation of the sand is carried out for three stages of self-weight stress equilibrium, isostatic consolidation and axial strain shear failure based on Duncan-Chang model. Researches show that: the parameters of Duncan-Chang model are correct, and it can be used to analyze the settlement and stability of sand foundation in Wanjiang Area by finite element method.

Key words: Wanjiang Area sand; Duncan-Chang model; triaxial test; numerical calculation

皖江区域位于我国人口密集、经济发展迅速的中部地区,随着港口、铁路等基础设施建设推进,寻求方法简单,贴近实际的计算方法成为工程设计、计算的关键。土体本构模型选取是开展工程分析、设计和计算重要环节。邓肯-张双曲非线性本构模型因参数相对简单、物理意义明确,易于理解,广泛应用于工程实际分析之中,且在土工试验、数值计算方面积累了丰富的经验。室内土工试验方面,孙谷雨^[1]通过冻结状态下三轴剪

收稿日期:2018-09-21

基金项目:土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金(YK9150020);安徽省教育厅重点基金项目(KJ2014A030)

作者简介:司海宝(1974—),男,安徽安庆人,博士,副教授,主要研究方向为土体基本性质。

切试验,率定考虑温度、围压影响粉质黏土邓肯-张本构模型参数。桑毅彩^[2]针对三峡库区典型风化砂开展试验研究,率定该区域风化砂土邓肯-张模型参数。胡亚元^[3]将聚乙烯醇短纤维和水泥一起掺入淤泥中,分析纤维对邓肯-张模型参数的影响。高江平^[4]开展原状黄土的室内三轴试验,率定原状黄土邓肯张模型计算参数。王忠艳^[5]通过常规的三轴试验得到不同粒径的砂土对邓肯-张模型参数 a, b 的影响。冯卫星^[6]通过常规的三轴试验得到了北京地区细砂土的邓肯-张模型参数。数值计算方面,费康^[7]利用 UMAT 子程序,在 ABAQUS 中开发了邓肯非线性弹性模型,丰富了 ABAQUS 软件的材料库。江守燕^[8]基于 ABAQUS 平台并利用 UMAT 子程开发了邓肯-张 ($E-B$) 和 ($E-v$) 模型子程序。张欣^[9]以 ABAQUS 的用户子程序 UMAT 为基础,开发了邓肯-张模型接口程序。徐远杰^[10]完成了邓肯-张本构模型在 ABAQUS 中的开发,并完成了两个典型常规三轴压缩模型问题数值测试。论文针对皖江区域砂土特点,开展固结排水三轴试验研究,率定邓肯-张 ($E-B$) 模型计算参数,通过数值计算验证模型参数的可靠性,为皖江区域砂土的工程设计计算提供依据。

1 皖江区域砂土特性

1.1 土样物理性质

三轴试验的砂土试样来源于皖江区域马鞍山市长江江边砂土层,将试样在水中煮沸冷却风干,根据《土工试验规程》^[11]开展比重、颗粒分析、相对密实度试验测定,每组均开展三组平行试验分析。砂土试样颗粒粒径大于 0.5 mm 的颗粒质量超过总质量的 50%,细粒含量小于 5%,不均匀系数 $C_u = 4.82$,曲率系数 $C_c = 1.14$,因而砂土试样级配不良,颗粒级配曲线如图 1。试验测定砂土的平均比重约为 2.615,控制试样相对密度为 90%,所得的干密度为 1.587 g/cm^3 开展试验分析,砂土物理参数如表 1。

1.2 试验方案

采用南京土壤仪器厂 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪,试样截面直径 39.1 mm,高 80 mm。基于 100, 300, 500, 700 kPa 四级围压加载,开展饱和砂土固结排水试验,每组试验不少于 3 次平行数据。

由试样干密度和相对密实度称取所需烘干净化后砂土,将试样等质量分为 4 份装入,接触面刮擦后,再装另一层,并用击锤轻压使其紧密接触,以免试样分层。待试样装入压力室后,采用水头饱和法进行饱和,施加 20 kPa 围压,同时提高试样底部量管水面,降低连接试样顶部固结排水管水面,使两管水头差维持在 1 m 左右。打开量管阀、孔隙压力阀和排水阀,让水自下而上通过试样,直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内水量相等为止。

三轴剪切试验采用恒定应变速率加载,剪切速率为 0.036 mm/min 。当载荷达到峰值或稳定后,继续增加 5% 的应变值后终止试验。如果应力值一直增加,则轴向应变达到 20% 为标准终止试验。试验终止后砂土试样外形对称,呈腰鼓状,试样呈现侧向膨胀破坏,如图 2。

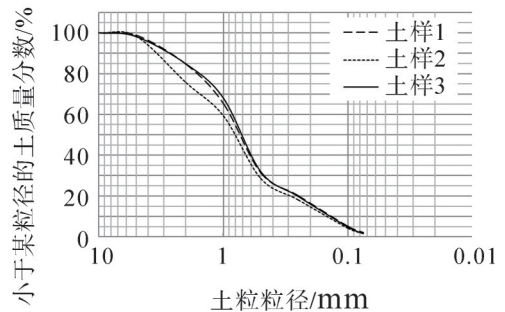


图1 砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Sandparticle gradation curve

表1 砂土的最大最小干密度及控制干密度

Tab. 1 Physical parameters of sand

最大干密度/(g/cm^3)	最小干密度/(g/cm^3)	C_u	C_c
1.6	1.479	4.82	1.14



图2 三轴试验砂土试件破坏

Fig. 2 Failure pattern of sand specimen in triaxial test

2 试验结果

图3为砂土试样三轴试验偏应力与轴向应变曲线。从图中可以看出,试样的应力-应变曲线变化趋势相似,均呈现为应变硬化特征。随着偏应力增大,轴向应变逐渐增大,当轴向应变继续增大时,偏应力趋于稳定。在试验中,当试样的主应力差无峰值时,选取 $\varepsilon_1 = 15\%$ 时的主应力差为破坏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 即抗剪强度; 当其主应力差出现峰值时选取峰值作为试样的抗剪强度,不同围压下试样破坏应力值见表2。根据破坏应力数据,在 $\tau - \sigma$ 应力平面上绘制试样应力摩尔圆和强度包线,见图4,率定试样的抗剪强度指标,内摩擦角 $\varphi = 36.76^\circ$ 。

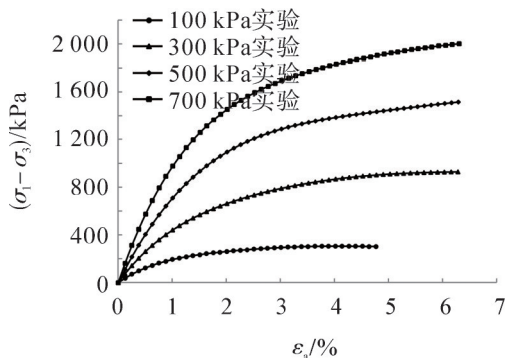


图3 不同围压下的主应力差与轴向应变曲线

Fig. 3 Stress deviator and axial strain curves under confining pressures

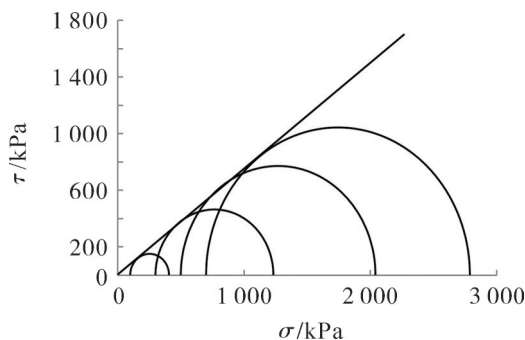


图4 砂土应力莫尔圆

Fig. 4 Mohr's stress circle of sand

3 邓肯-张模型参数确定

邓肯-张模型基于三轴试验得出应力应变曲线,确定试样的弹性模量和体积模量,从而计算得出模型相关计算参数^[12]。Kondner根据大量土样的三轴试验的应力-应变曲线提出双曲线表达式

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

式中: a 为初始切线模量; b 为主应力差渐进值; ε_a 为轴向应变。对于常规三轴压缩试验,有 $\varepsilon_a = \varepsilon_1$, σ_1 为轴向压力(kPa), σ_3 为固结压力(kPa), σ_1 轴向应变。将式(1)改写为

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_a \quad (2)$$

即将应力-应变曲线纵轴改为 $\frac{\varepsilon_a}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$, 则双曲线转换成直线,如图5。

根据文献[13],认为传统求取直线截距和斜率的方法在低应力水平和高应力水平时与试验点偏离,建议采用如下计算公式率定参数 a 和 b , 表达式为

表2 砂土不同围压下的破坏应力值

Tab. 2 Failure stress of sand under confining pressures

σ_3 /kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /kPa	σ_1 /kPa
100	306.28	406.28
300	931.12	1 231.12
500	1 541.91	2 041.91
700	2 089.28	2 789.28

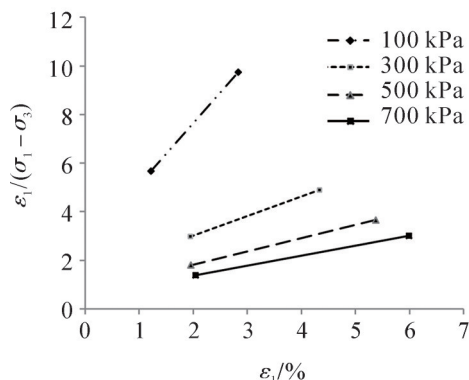


图5 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 关系线

Fig. 5 Relation line between $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ and ε_1

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \frac{2}{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%} - \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_3}[(\varepsilon_1)_{95\%} - (\varepsilon_1)_{70\%}]} \\ b &= \frac{\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{95\%} - \left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3}\right)_{70\%}}{(\varepsilon_1)_{95\%} - (\varepsilon_1)_{70\%}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中:下标 70%和 95%表示 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 对应 70%和 95%两个应力水平的相关数据; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 表示土样试件 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线峰值强度。当土样试件 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线存在峰值时,则 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_{峰}$, 当土样试件 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 曲线不存在峰值时, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{峰} = (\sigma\sigma_1 - \sigma_3)_{\varepsilon_a = 15\%}$ 。

在三轴剪切试验过程中,当土体应变超过了屈服应变,土中应力超过了土体的抗剪强度,土体就发生了塑性破坏。邓肯-张模型通过引入破坏比 R_f 来判别土体的当前状态,破坏比 R_f 表示为

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u} \quad (4)$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 表示当 $\varepsilon_a \rightarrow \infty$ 时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的极限值。试验过程中当 ε_a 达到一定值后土样发生破坏,所以偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 总小于 $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$, R_f 总小于 1,相关参数见表 3。

表 3 砂土的 E_i 和 R_f 值

Tab. 3 E_i and R_f values of sandy soils

σ_3/kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\text{kPa}$	a	E_i/kPa	b	$(\sigma_1 - \sigma_3)_u/\text{kPa}$	R_f	平均
100	306.3	2.612 7	38 274.6	2.515 6	397.5	0.770 5	0.803 2
300	931.1	1.421 8	70 333.4	0.802 4	1 246.3	0.747 1	
500	1 541.9	0.750 9	133 173.5	0.543 0	1 841.6	0.837 3	
700	2 089.3	0.558 0	179 211.5	0.410 6	2 435.5	0.857 9	

1963年简布(Janbu)建议,土体的初始切线弹性模量 E_i 可以表示为围压的函数,即

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \quad (5)$$

式中: K 、 n 为初始切线模量参数; p_a 为单位大气压,取标准大气压 103.3 kPa。

绘制 $\lg(E_i/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线,并对曲线进行线性拟合,如图 6。

由图 6 率定直线斜率 n 及纵轴截距 $\lg K$, 计算出参数 $K = 351.95$, $n = 0.79$ 。

邓肯-张等认为,体积应变 ε_v 与轴向应变 ε_a 亦符合双曲线关系,在同一围压 σ_3 下,体积模量近似为一常量,将体积模量 B_i 表示成围压的函数,体积模量选取应力水平为 70%所对应数据计算, B_i 表示为

$$B_i = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^m \quad (6)$$

式中: K_b , m 为体积模量参数。

对于不同的围压,体积模量也不同,绘出 $\lg(B_i/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ 之间的曲线,并对其进行线性拟合,如图 7。

从图中可率定 $K_b = 584.55$, $m = 0.071 8$ 。至此皖江区域砂土的邓肯-张 ($E-B$) 模型全部参数率定,如表 4。

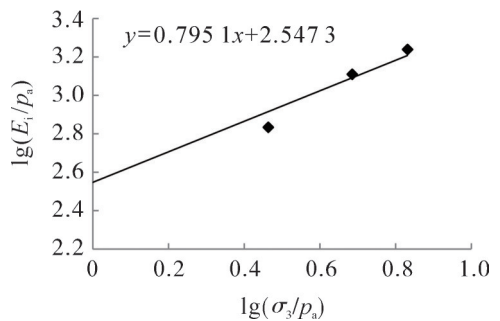


图 6 $\lg(E_i/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ 曲线

Fig. 6 $\lg(E_i/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ curve

表 4 邓肯-张 ($E-B$) 模型参数

Tab. 4 Duncan-Chang ($E-B$) model parameters

参数	$\varphi/(\circ)$	R_f	K	n	K_b	m
数值	36.76	0.803	351.95	0.795	584.55	0.072

4 邓肯-张模型数值计算

为了验证针对皖江区域砂土邓肯-张 ($E-B$) 模型参数的合理性,分析该模型在皖江区域工程计算的可靠性,文中利用二次开发工具 UMAT 数据接口开发的邓肯-张 ($E-B$) 模型子程序来模拟三轴试验的加载过程^[4],计算常规三轴压缩试验过程,将结果与试验数据进行比对分析,以指导实际工程应用。

计算模型直径为 39.1 mm,高度为 80 mm 的圆柱体,模型划分为 3 887 个节点,795 个六面体实体单元,模拟在 100, 300, 500, 700 kPa 不同围压作用下砂土的变形。数值计算分三步进行:

- 1) 自重应力平衡模拟土体在自重应力作用下固结变形过程,消除土体自重应力作用下变形,使得节点只受到重力作用而无变形,实现土体的自重应力平衡;
- 2) 围压固结与试验时施加相同大小固结围压,模拟土样在该围压作用下固结;
- 3) 剪切试验数值计算亦采用恒定应变加载,在顶部自由端施加 20% 位移载荷,划分 500 个增量步进行迭代计算,模拟剪切应变速率为 0.036 mm/min 土体剪切变形过程。

位移边界约束设置为底面中心节点 O 点进行三方向全约束 ($u_x=0, u_y=0, u_z=0$),底面其它节点为铅直方向约束 ($u_z=0$)。侧面土体节点在自重应力平衡阶段为水平方向约束 ($u_x=0, u_y=0$),在围压固结和剪切破坏阶段为自由边界,顶部为自由边界。所有边界均为自由排水条件,即所有边界孔隙水压力为 0,由此模拟土样排水固结过程。模型边界条件见图 8。

图 9 为三轴试验数值计算和试验结果比较。从图中可以看出数值模拟得到的应力应变曲线与试验曲线整体吻合较好,随着轴向变形增大,轴向偏应力也逐渐增大,并趋向于稳定,较好地反映了土体的非线性,说明利用三轴试验率定的皖江区域砂土邓肯-张模型参数能够较好地反映土体的基本特征。应当指出当围压较小时,如 100、300、500 kPa 时数值计算曲线与试验曲线吻合程度较高,随着围压增加到 700 kPa,数值计算数据大于试验数据,这可能由于试验过程中在较大应力条件下砂土颗粒容易破碎,而邓肯-张土体本构模型则未予体现。

5 结 论

针对皖江区域马鞍山段砂土地层特点,选取代表性区域砂土层取样,开展室内试验和有限单元法数值计算,得到如下结论:

- 1) 采用室内三轴试验,根据偏应力、体应变与轴应变关系曲线、摩尔强度曲线、 $\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ 与 ε_1 关系曲线、切线模量与 σ_3 关系曲线等曲线,率定皖江区域砂土的邓肯-张 ($E-B$) 模型有限元计算参数。

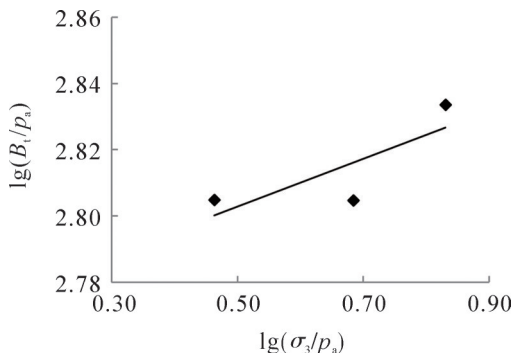


图 7 $\lg(B_1/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ 曲线
Fig. 7 $\lg(B_1/p_a) \sim \lg(\sigma_3/p_a)$ curve

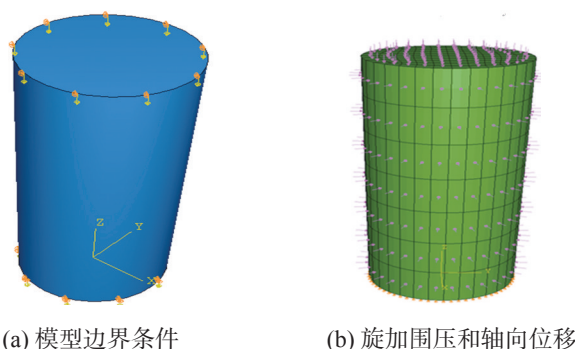


图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation model

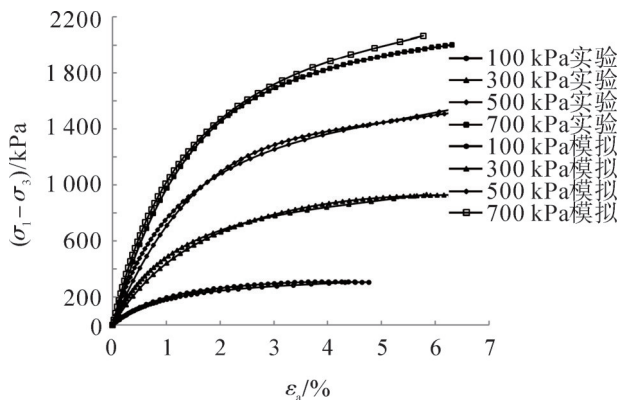


图 9 有限元模拟与试验结果比较

Fig. 9 Comparison of finite element simulation and test results

2) 编制了邓肯-张 ($E-B$) 本构模型有限元计算程序, 数值计算应力应变曲线与室内试验应力应变曲线吻合较好。随着轴向变形增大, 轴向偏应力也逐渐增大, 并趋向于稳定, 较好地反映了土体的非线性, 需要指出的是在较大应力条件下砂土颗粒容易破碎, 而邓肯-张土体本构模型则未予体现。

参考文献:

- [1] 孙谷雨, 杨平, 刘贯荣. 南京地区冻结粉质黏土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):2989-2995.
- [2] 桑毅彩, 李士平. 三峡风化砂邓肯-张模型参数试验研究[J]. 温建筑技术, 2014(6):99-101.
- [3] 胡亚元, 余启致, 张超杰, 等. 纤维加筋淤泥固化土的邓肯-张模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8):1500-1508.
- [4] 高江平, 李芳. 黄土邓肯张模型有限元计算参数的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2):10-13.
- [5] 王忠艳, 于远忠, 李广才, 等. 砂土不同粒径对邓肯-张双曲线模型参数的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(4):140-142.
- [6] 冯卫星, 常绍东, 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(3):327-330.
- [7] 费康, 刘汉龙. ABAQUS的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):881-890.
- [8] 江守燕, 谢庆明, 杜成斌. 基于ABAQUS平台的邓肯-张 ($E-B$) 和 ($E-v$) 模型程序开发[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1):61-65.
- [9] 张欣, 丁秀丽, 李术才. ABAQUS有限元分析软件中 Duncan-Chang 模型的二次开发[J]. 长江科学院院报, 2005(4):45-47.
- [10] 徐远杰, 王观琪, 李健. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7):1032-1036.
- [11] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程:SL237—1999[S]. 北京:中国水利水电出版社出版, 1999.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社出版, 1995:54-60.
- [13] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社出版, 1999:224-233.
- [14] 司海宝, 蔡正银. 基于ABAQUS建立土体本构模型库的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):599-603.

责任编辑:丁吉海