

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2021.12.016

饱和尾粉砂边界面模型在 FLAC^{3D} 中的开发

周梦缘, 袁槐岑, 张建新

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 由于岩土材料的复杂性, FLAC^{3D} 软件自带的本构模型不能满足实际数值分析的全部要求。利用 FLAC^{3D} 预留的 UMD 接口, 在 C++ 的编译环境下实现了一种基于临界状态模型 CASM 边界面模型的开发。介绍了边界面模型的基本组成, 给出了开发的关键步骤。并基于三轴试验结果, 利用该模型对饱和尾粉砂静/动力学特性进行了分析, 论证了该模型对饱和尾粉砂的适用性。

关键词: FLAC^{3D}; 饱和尾粉砂; 边界面模型; 静/动力学特性

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)12-0109-06

Development of Saturated Tailings Silt Boundary Surface Model in FLAC^{3D}

ZHOU Mengyuan, YUAN Huaicen, ZHANG Jianxin

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Due to the complexity of geotechnical materials, the constitutive model of FLAC^{3D} software can not meet all the requirements of practical numerical analysis. Using UMD interface reserved by FLAC^{3D}, a boundary surface model based on critical state model CASM is developed in C++ compilation environment. The basic composition of the boundary surface model is introduced, and the key development steps are given. Based on the triaxial test results, the static/dynamic characteristics of saturated tailings silt were analyzed by using the model, and the applicability of the model to the saturated tailings silt was demonstrated.

Key words: FLAC^{3D}; saturated tailings silt; boundary surface model; static/dynamic characteristics

尾矿库一般是指用堤坝拦截谷口, 或围地构成用于储存金属矿山或非金属矿山工业废渣的场所。我国很多尾矿库采用上游筑坝法建造, 且位于地震高烈度区。由于排水系统的不完善, 尾矿库的主要组成部分尾砂通常处于饱和状态。由于地震作用饱和尾砂将受到循环荷载作用, 易发生液化, 进而引起尾矿库的破坏, 威胁下游人民的生命财产安全。近年来, 随着我国经济与采矿技术的发展, 尾矿库呈现向细粒筑坝与高堆尾矿坝发展, 危险程度加大。针

对于此, 学者对尾粉砂做了许多研究: 陈存礼等^[1]通过应力式循环三轴试验, 对固结比、围压、干密度和循环应力比对饱和尾粉砂动孔压演化规律的影响进行了研究; 张修照等^[2]用极限平衡理论推导了尾矿等压固结和偏压固结条件下的临界孔隙水压力方程, 从理论上阐释了试验结果所揭示的动孔压演化规律; 崔旋等^[3]对内蒙古某尾矿库尾粉砂进行动强度试验, 研究了围压、相对密实度及固结比对动荷载作用下尾粉砂中孔隙水压力发展特性的影响。在研

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0804600)

Fund: Supported by National Key Research and Development Plan of the 13th Five-Year Plan(2017YFC0804600)

作者简介: 周梦缘(1997—), 男, 硕士, 主要从事尾矿坝的动力稳定性研究。

引用格式: 周梦缘, 袁槐岑, 张建新. 饱和尾粉砂边界面模型在 FLAC^{3D} 中的开发[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 109-114.

ZHOU Mengyuan, YUAN Huaicen, ZHANG Jianxin. Development of Saturated Tailings Silt Boundary Surface Model in FLAC^{3D} [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(12): 109-114.

究尾矿砂力学特性时,合适本构关系选择显得尤为重要,因此研究循环荷载作用下的不排水饱和尾粉砂弹塑性本构模型有着巨大的实际意义。

在分析岩土工程问题时,最为常见的本构模型是线弹性模型,但这种模型由于忽略了应力路径与剪胀性的影响尚不能较大幅度地真实反映土体内部孔隙水压的增长和变形的积累等土体的真实动力特性。为了解决更加复杂的土体问题,20 世纪七八十年代,DAFALIAS^[4-5]以临界状态土力学的理论知识为基石,将状态参数成功融入弹塑性公式中,结合岩土工程界已建立和理解的概念和数据,建立了边界面理论模型。边界面理论模型是一种应力比可控、临界状态兼容的模型。其优点是物理状态明确,模型参数易确定,且一组材料参数可以适应于显著不同的应力和密度的土体。边界面模型最早被 DAFALIAS 用于黏性土的研究,后续的国内外研究者对边界面模型进行了数值研究,取得了一定成果。例如:BARDET^[6]将边界面理论从黏性土扩展到了砂土;WANG 等^[7]建立了砂土液化后剪切变形的统一塑性模型;YU 等^[8]建立了同时适用于黏土和砂土循环加载的塑性模型;KAN 等^[9]基于已有的实验结果和理论进展,提出了一种新的砂土本构模型的公式和数值算法,该模型特别考虑了大液化后剪切变形的循环特性和累积。董建勋等^[10]建立了具有体现密实砂土应变软化现象和在循环加载过程中最大应力记忆功能的边界面塑性模型;高源等^[11]将适用于饱和砂土循环加载动力分析的显示算法流程成功加入到 ABAQUS 中;费康等^[12]将没有纯弹性区的单椭圆边界面模型添加到 ABAQUS 中,详细介绍了利用 UMAT 子程序在 ABAQUS 中开发了边界面模型的具体过程;雷小芹等^[13]利用 FLAC^{3D} 程序实现了一种基于修正剑桥模型的简化边界面模型的开发,通过三轴加卸载试验、不排水静三轴试验、不排水动三轴试验等几种数值试验与修正剑桥模型进行了对比研究。

本文介绍了一种简单统一的边界面塑性模型。该边界面模型是基于 YU^[14]开发的统一临界状态模型 CASM 结合边界面塑性理论而形成。模型边界面采用了考虑洛德角的修正后的椭圆形式,使用了 ROWE^[15]提出的剪胀函数,来表达砂土的剪胀性,在硬化准则中考虑了加载历史对边界面的影响。基于三轴试验结果,通过不排水静、动三轴数值试验,验证了该边界面模型对饱和尾粉砂的适用性。

1 边界面模型在 FLAC^{3D} 中的实现与说明

1.1 变量说明

使用张量标记法, σ_{ij} 为应力张量, ϵ_{ij} 为应变张量,球应力 $p = \sigma_{ij}/3$,偏应力张量 $S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$,广义剪应力 $q = \sqrt{3/2 S_{ij}:S_{ij}}$,偏应变张量 $e_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}e_{ij}/3$,广义剪应变 $\epsilon_s = \sqrt{2/3 e_{ij}:e_{ij}}$,弹性应变增加量 $d\epsilon_{ij}^e$ 与塑性应变增量 $d\epsilon_{ij}^p$ 组成了总应变增量 $d\epsilon_{ij}$ 。

$$d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij} \quad (1)$$

1.2 弹性部分

根据广义虎克定律,将弹性应变分解为弹性体积应变增量与偏应变增量:

$$d\epsilon_{ij}^e = d\epsilon_{ij}^e \delta_{ij} + d\epsilon_{ij}^e = \frac{dp}{3K} \delta_{ij} + \frac{ds_{ij}}{2G} \quad (2)$$

式中, K 为体积模量; G 为剪切模量,土的弹性剪切模量和体积模量采用式(3)。

$$K = \frac{(1+e)p'}{\kappa}; G = \frac{3(1-2\mu)K}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

式中, p' 为平均有效压应力; e 为孔隙比; κ 为材料膨胀系数; μ 为恒定泊松比。

1.3 塑性部分

1.3.1 临界状态方程

边界面形式采用考虑洛德角的影响,修正后的椭圆形式^[16],边界面方程表达式为:

$$f = \left(\frac{\bar{p} - \bar{p}_c}{R - 1} \right)^2 + \frac{\bar{q}}{[M_c g(\theta)]^2} - \bar{p}_c^2 = 0 \quad (4)$$

式中, f 为临界状态方程; θ 为洛德角; $\bar{p}_c$ 为影响椭圆半轴长短的模型内变量参数; R 为影响边界面形状参数; $(\bar{p}, \bar{q})$ 为对应应力点 (p, q) 的像应力点; $g(\theta)$ ^[17] 为考虑到第三主应力的影响,反映土体实际受力状态的差值函数。

$$\bar{q} = \sqrt{(3/2) \bar{S}_{ij} : \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

$$g(\theta) = \frac{2M_c}{M_e + M_e - (M_e - M_c) \cos(3\theta)} \quad (6)$$

式中, $\bar{S}_{ij}$ 为像应力点对应的偏应力张量; M_e 是轴对称拉伸应力状态线斜率; M_c 是轴对称压缩应力状态的临界状态线斜率。

1.3.2 映射法则

采用 DAFALIAS^[5]提出的径向映射法则从投影中心引出直线,交加载面为 (p, q) ,交边界面于点 $(\bar{p}, \bar{q})$, $(\bar{p}, \bar{q})$ 为当前应力点的像点,如图 1 所示。

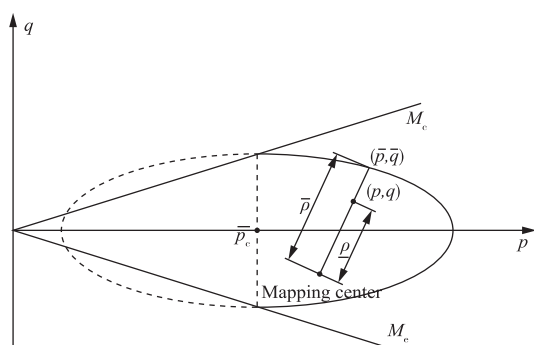


图 1 边界面映射方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of boundary surface mapping rules

1.3.3 流动法则

为表达砂土的剪胀性,须引入流动法则,流动法则必须能体现并确定砂土塑性应变增量。文中采用 Rowe 提出的剪胀函数 D 的形式, D 的取值与应力比 $\eta = q/p$ 、砂土密度、应力有关。本文采用的 D 的表达式为:

$$D = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_q^p} = \frac{d_0}{M_c g(\theta)} (M^d \sqrt{\frac{\bar{\rho}}{\rho}} - \eta) \quad (7)$$

式中, ρ 为当前应力点到映射中心点的直线距离, $\bar{\rho}$ 为像点到映射中心的直线距离; ϵ_v^p 为塑性体应变, ϵ_q^p 为塑性偏应变; d_0 为模型常数。 M^d 为剪胀应力比(砂土由收缩转变为膨胀的临界应力比),其表达式为:

$$M^d = M_c g(\theta) \exp(m\psi) \quad (8)$$

式中, m 为模型参数; ψ 为表达砂土的松密程度的状态参数,其表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= e - e_c \\ e_c &= e_r - \lambda \left(\frac{p}{p_{at}} \right)^\xi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, e_c 为土体临界孔隙比; p 为土体当前所受围压; p_{at} 为标准大气压的大小; e_r 、 λ 、 ξ 由临界状态拟合 $e - \ln p'$ 曲线获得。

1.3.4 塑性模量

由边界一致条件 $dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial p_c} d\bar{p}_c = 0$ 得:

$$\bar{K}_p = \frac{2}{3} \frac{Gh}{\sqrt{S_{ij}} : S_{ij}} (M^p - \eta) \left[2\bar{p}_c + 2 \frac{\bar{p} - \bar{p}_c}{(R-1)} \right] \frac{1}{g} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2}{3} \frac{Gh}{\sqrt{S_{ij}} : S_{ij}} (M^p \frac{\bar{p}}{\rho} - \eta) \left[2\bar{p}_c + 2 \frac{\bar{p} - \bar{p}_c}{(R-1)} \right] \frac{1}{g} \quad (11)$$

式中: K_p 为应力点在边界面内的塑性模量; $\bar{K}_p$ 为应力点在边界面上的塑性模量; g 为 $\frac{\partial F}{\partial \sigma}$ 的模。

M^p 为峰值应力比,其表达式为:

$$M^p = M_c g(\theta) \exp(-n\psi) \quad (12)$$

式中, n 为模型参数。

1.3.5 硬化准则

为表达砂土材料在循环荷载作用下到达屈服后,屈服标准的改变,需考虑正向加载或是反向加载阶段应力达到边界时,边界面的扩大。边界面的大小中心随着 $\bar{p}_c$ 而变化。这导致了边界面的硬化。内部变量变化规律为:

$$d\bar{p}_c = \frac{Gh}{q} (M^p - \eta) \sqrt{\frac{2}{3}} d\epsilon_{ij}^e : d\epsilon_{ij}^e \quad (13)$$

式中, h 为硬化参数。

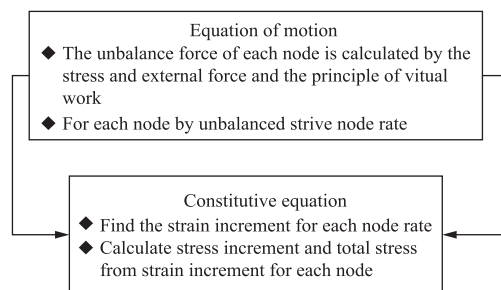
$$h = \frac{b_0}{|\eta - \eta_{in}|} b_0 = G_0 h_0 (1 - e) \left(\frac{P}{p_{at}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中, η_{in} 为 η 的初始值, h_0 为模型参数; G_0 为材料常数。

1.4 边界面模型在 FLAC^{3D}中的实现

1.4.1 边界面模型开发关键步骤

要实现用户定义的本构模型,用户可以通过 C++ 语言开发动态链接库(.dll 文件),进而通过 FLAC^{3D} 调用自定义的本构模型。FLAC^{3D} 软件采用拉格朗日有限差分分析,能够有效简便模拟许多复杂的岩土体工程问题。软件采用了混合离散方法来模拟岩土体的屈服或流动,采用显示动态方法求解一系列问题,能够有效保证数值计算的精度。图 2 展示了 FLAC^{3D} 的显示积分循环,主要内容为:对每个离散化的单元节点根据虚功原理求解不平衡力,进而得到节点速率;根据用户选用的本构方程依据每个节点的速率求解应变增量,进而求得单元体应力增量与总应力。

图 2 FLAC^{3D} 显式积分循环Fig. 2 Explicit integral loop of FLAC^{3D}

1.4.2 边界面塑性模型应力更新流程

在 FLAC^{3D} 中一个显示计算循环为一个时步。将任一增量步 $[t_x, t_{x+1}]$ 与其对应的应变增量 $\Delta\epsilon$, 定义为“伪时间 $T(0 < T < 1)$ ”。 l 代表子增量步数,

假设每一个子增量步 $\Delta \varepsilon_l$ 都有对应的“伪时间”增量步 ΔT_l 。FLAC^{3D} 边界面塑性模型的应力更新流程图如图 3 所示(初始时 $T = 0$, $l = 1$ 和 $\Delta T_l = 1$)。

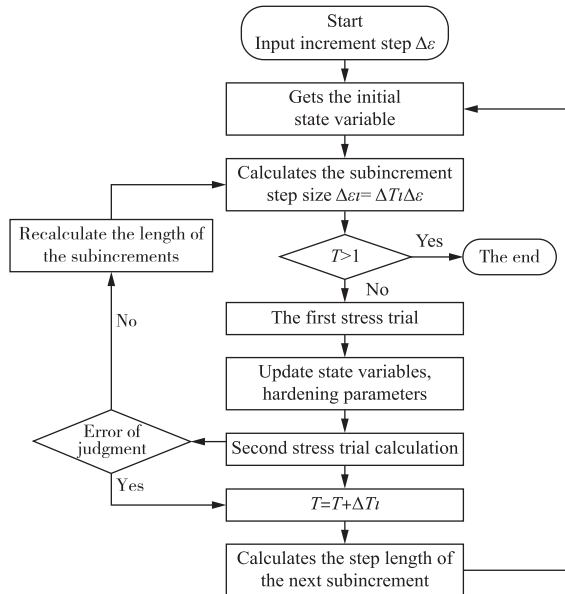


图 3 边界面塑性模型应力更新流程图

Fig. 3 Flow chart of stress updating of plastic boundary surface model

2 模型验证

为验证本文提出边界面模型的合理性,采用西南地区某铁尾矿库尾粉砂为试验样本,对饱和尾粉砂进行了不排水动/静三轴的数值模拟试验,验证模型开发的准确性。

2.1 模型参数的选取

本模型具有 5 种不同类型的参数。 e_r 、 λ 、 ξ 为临界状态参数, κ 、 u 、 G_0 为弹性参数, m 、 d_0 为剪胀参数, n 、 h_0 为硬化参数, R 为形状参数。所选取的尾粉砂平均粒径 d_{50} 为 0.143 mm, 不均匀系数 C_u 值为 8.04, 曲率系数 C_c 值为 2.13。所选取的材料参数见表 1。

表 1 中, M_e 、 M_c 可以通过临界状态拟合 $q - p'$ 曲线获得; e_r 、 λ 、 ξ 可以通过临界状态拟合 $e - \ln p'$ 曲线获得; κ 为加卸载回弹曲线 $1 + e - \ln p'$ 曲线的斜率; u 可通过单轴固结仪法获得; G_0 通过三轴扭转试验获得; m 反映土体由剪缩到剪胀的过渡状态应力比的大小, n 为压缩时峰值应力比的大小, d_0 控制体应变的大小, m 、 n 、 d_0 的取值可通过室内常规三轴试验获得; R 为 1.7 控制边界面的形状。

表 1 材料参数表

Table 1 Material parameter

Critical state parameter					Elastic parameter			Dilatancy parameter		The hardening parameter		Shape parameter
M_c	M_e	e_r	λ	ξ	κ	u	G_0	m	d_0	n	h_0	R
1.25	-0.87	0.872	0.019	0.1	0.001	0.32	360	1.9	0.6	2.1	1.3	1.7

2.2 不排水静三轴模拟

计算模型为参照真实试验建立的直径为 61.8 mm、高度为 125 mm 的圆柱体, 使用六面体单元, 共划分单元 4 000 个, 3 940 个节点数, 具体计算模型见图 4。具体试验步骤为: 将模型固定在底面, 通过控制其轴向变形, 控制其加载过程, 将轴向应变达到 20% 作为模型破坏标准; 调整模型初始固结应力, 保持初始固结应力比为 1, 对饱和尾粉砂分别进行围压为 0.3、0.6 和 0.9 MPa, 不排水静三轴模拟。模拟结果与试验数据对比如图 5~6 所示。

由图 5~6 可知, 模拟关系曲线与试验结果较为一致。模拟关系曲线成功体现出尾粉砂应变软化的特性。同时体现出尾粉砂在不同围压下偏应力随轴向应变与孔隙水压力随轴向应变的关系。不同围压下尾粉砂偏应力与轴向应变的关系为: 曲线峰值应力随着围压的增大而增大, 尾粉砂抗剪强度随着围

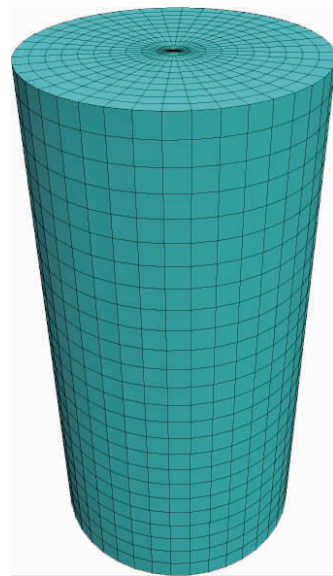
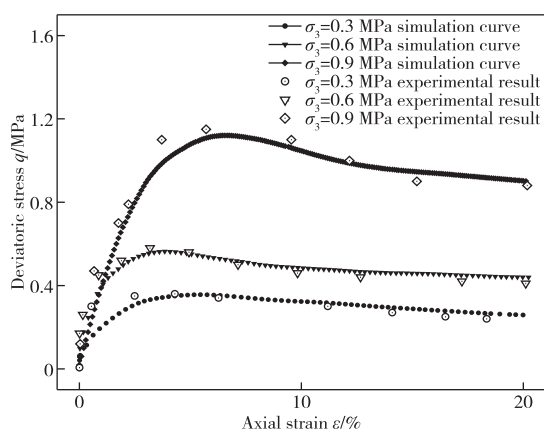
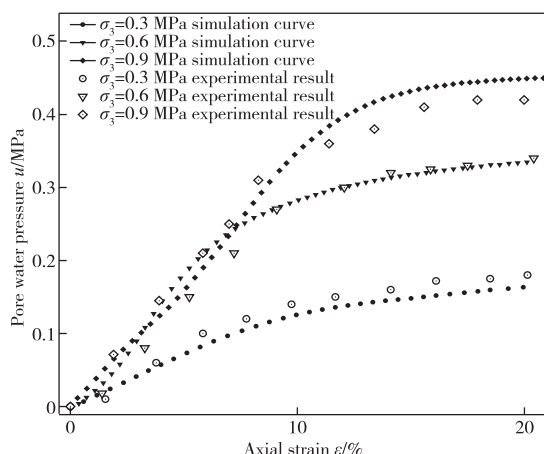


图 4 FLAC^{3D} 计算模型

Fig. 4 Computational models in FLAC^{3D}

图 5 饱和尾粉砂固结不排水 $q-\varepsilon$ 关系曲线Fig. 5 Undrained $q-\varepsilon$ curve of consolidation of saturated tailings silt图 6 饱和尾粉砂固结不排水 $u-\varepsilon$ 关系曲线Fig. 6 Undrained $u-\varepsilon$ curve of consolidation of saturated tailings silt

压的增大而增大;不同围压下尾粉砂孔隙水压力随轴向应变的关系为:随着围压的增大,尾粉砂孔隙水压力上升的速率越快,随着围压的增大,曲线孔隙水压力峰值也随之增大。通过三组不同围压下的数值模拟与试验结果对比,验证了该界面模型对饱和尾粉砂在静力荷载作用下的应力应变特性及孔隙水压发展规律的模拟能力。

2.3 不排水动三轴模拟

计算模型参照真实试验建立,与上一节相同。具体试验步骤为:将模型固定于底面,设置动荷载为 1 Hz 的正弦波,动剪应力比 CSR 取值为 $\sigma_d/\sigma_1 + \sigma_3$;将轴向应变达到 15% 作为模型试验终止标准;保持初始固结应力比为 1,动剪应力比 CSR 为 0.1,对饱和尾粉砂分别进行围压为 0.3、0.6、0.9 和 1.2 MPa 的不排水动三轴数值模拟。

由图 7 可知,模拟关系曲线与试验结果较为一

致。模拟关系曲线成功体现出在保持 CSR 不变时,不同围压下尾粉砂孔隙水压力随加载次数的发展规律。规律主要体现在:尾粉砂孔压随着振次的增加发展逐渐趋于稳定;尾粉砂界限孔压比随着围压的增大而增大。

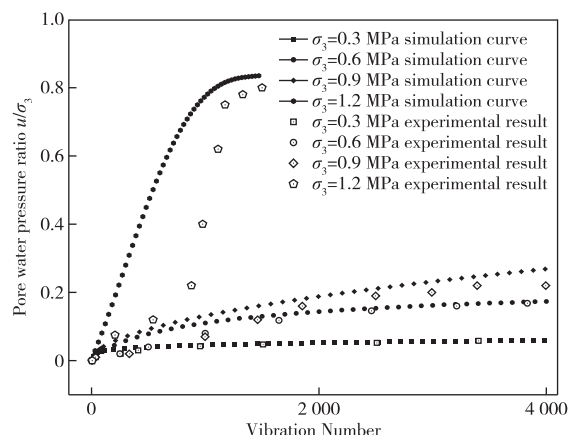


图 7 孔压-振次的关系曲线

Fig. 7 Stress-axial strain curve of deviatoric stress

由图 8 可知,尾粉砂在受到单向循环荷载作用时,应力-应变曲线表现为一系列封闭滞回圈。循环

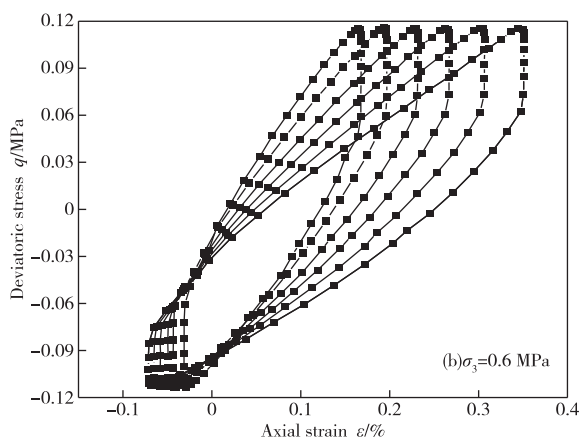
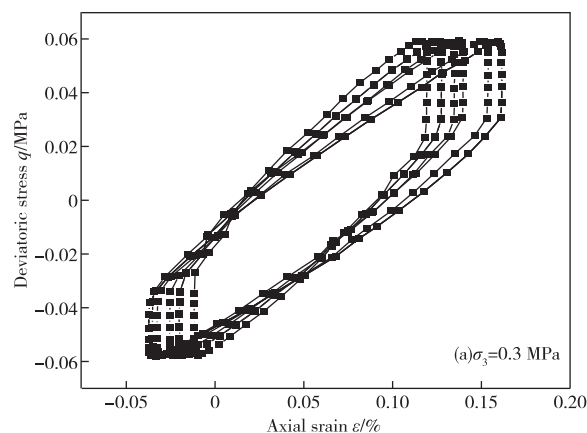


图 8 偏应力-轴向应变关系曲线

Fig. 8 Relation curve of deviatoric stress and axial strain

初期滞回圈斜率较大,随着循环周次的增加,滞回圈斜率逐渐变小且逐渐向右倾斜,同时滞回圈向右倾斜的过程中逐渐被拉长。表现为尾粉砂逐渐向压缩变形发展且发展逐渐变慢,当围压越大时这种现象越明显。

由以上结论验证了该边界模型对饱和尾粉砂受到循环荷载作用时孔隙水压累积规律及变形特性的模拟能力。

3 结论

一种基于临界状态模型 CASM 结合边界面塑性理论的边界面塑性模型,利用 FLAC^{3D} 提供的二次开发平台,成功在 FLAC^{3D} 中进行了实现。对饱和尾粉砂进行了一系列的动/静三轴模拟,得出:

1)该边界面模型可以较好地反映出饱和尾粉砂在不排水条件下静力荷载作用时的应变软化现象,同时表达出饱和尾粉砂在不同围压下偏应力随轴向应变与孔隙水压力随轴向应变的关系。体现出边界面模型对饱和尾粉砂静力学性质具有良好的模拟能力。

2)该边界面模型能够较好体现出饱和尾粉砂在固结不排水条件下单向循环荷载作用时的孔压累积规律与变形特性。

3)成功为边界面模型拓宽了用途,为研究饱和尾粉砂的力学性质提供了新手段,进而为尾矿坝设计提供依据。

参考文献:

- [1] 陈存礼,何军芳,胡再强,等. 动荷作用下饱和尾矿砂的孔压和残余应变演化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4034-4039.
CHEN Cunli, HE Junfang, HU Zaiqiang, et al. Development characteristics of pore water pressure and residual deformation of tailings under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4034-4039.
- [2] 张修照,巫尚蔚,张超,等. 不同固结条件下尾矿动孔压演化规律[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 815-822.
ZHANG Xiuzhao, WU Shangwei, ZHANG Chao, et al. Dynamic pore-water pressure evolution of tailings under different consolidation conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 815-822.
- [3] 崔旋,季晓檬,张宇,等. 饱和尾粉砂动孔隙水压力发展特性试验研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 101-107.
- CUI Xuan, JI Xiaomeng, ZHANG Yu, et al. Experimental study on dynamic pore water pressure development characteristics of saturated silty tailings[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(11): 101-107.
- [4] DAFALIAS Y F. On cyclic and anisotropic plasticity: (1) A general model including material behavior under stress reversals; (2) Anisotropic hardening for initially orthotropic materials [D]. Berkeley: University of California, 1975.
- [5] DAFALIAS Y F. Bounding surface plasticity. I: Mathematical foundation and hypoplasticity[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(9): 966-987.
- [6] BARDET J P. Bounding surface plasticity model for sands [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1986, 112(11): 1198-1217.
- [7] WANG R, ZHANG J M, WANG G. A unified plasticity model for large post-liquefaction shear deformation of sand [J]. Computers and Geotechnics, 2014.
- [8] YU H S, KHONG C, WANG J. A unified plasticity model for cyclic behaviour of clay and sand [J]. Mechanics Research Communications, 2007, 34(2): 97-114.
- [9] KAN M E, TAIEBAT H A, KHALILI N. Simplified mapping rule for bounding surface simulation of complex loading paths in granular materials [J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 14(2): 239-253.
- [10] 董建勋,刘海笑,李洲. 适用于砂土循环加载分析的边界面塑性模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 684-692.
DONG Jianxun, LIU Haixiao, LI Zhou. A bounding surface plasticity model of sand for cyclic loading analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 684-692.
- [11] 高源,刘海笑,李洲. 适用于饱和砂土循环动力分析边界面塑性模型的显式积分算法[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3951-3958.
GAO Yuan, LIU Haixiao, LI Zhou. An explicit integration algorithm of the bounding-surface plasticity model for saturated sand under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3951-3958.
- [12] 费康,刘汉龙. 边界面模型在 ABAQUS 的开发应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(5): 447-451.

(下转第 121 页, Continued to P121)