

基于 CLoE 亚塑性模型的密砂循环荷载下力学行为模拟

陈 龙, 楚锡华, 徐远杰

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 亚塑性模型为模拟颗粒材料的非线性力学行为提供了一条新途径, 特别是 CLoE 亚塑性模型在模拟应变局部化时具有一定的优势。然而该模型在模拟小幅应力-应变循环时表现出一定的锯齿效应。为了克服该效应, 基于颗粒间应变张量的概念发展了修正的 CLoE 亚塑性模型以正确模拟循环荷载下密砂的力学行为。此外, 为保证单调荷载作用下修正模型与原模型预测结果的一致性, 改进了颗粒间应变率及颗粒间最大应变的定义。数值算例表明: (1) 修正模型保留了克服锯齿效应的优点。(2) 修正模型能够反映不同振幅条件下的卸载刚度。(3) 在大振幅循环条件下, 滞回圈的面积随着循环次数增加而增大。(4) 修正模型能够保证单调加载条件下所得结果与原模型的一致性。(5) 修正模型可以反映材料的疲劳破坏机制。

关 键 词: 循环荷载; CLoE 亚塑性模型; 锯齿效应; 颗粒间应变

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)06-1598-08

Modelling behavior of dense sand subjected to cyclic loading based on CLoE hypoplastic model

CHEN Long, CHU Xi-Hua, XU Yuan-Jie

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The theory of hypoplasticity provides an effective mean for modeling the nonlinear behavior of granular materials. In particular the CLoE hypoplastic model has salient advantages in modeling the strain localization problems. In simulating the cyclic stress-strain loops with small amplitude, however, the hypoplastic model shows the ratcheting effect. To resolve this issue, the intergranular strain tensor is incorporated into the CLoE hypoplastic model so that it can effectively describe the behavior of dense sand under cyclic loading. In addition, to reserve the consistency of the modified model in describing the sand behavior under monotonic loading conditions, the definitions of intergranular strain rate and the maximum intergranular strain are improved. The numerical results show that (1) the modified model reserves the advantage of overcoming ratcheting effect; (2) the modified model can account for the unloading stiffness of different cyclic amplitudes; (3) for large cyclic amplitudes, the area of the cyclic loop increases with cyclic number; (4) the consistency of the modified CLoE model and CLoE model can also be guaranteed under the same monotonous loading condition; (5) the modified model well represents the mechanism of the fatigue-induced failure of materials.

Keywords: cyclic load; CLoE hypoplastic model; ratcheting effect; intergranular strain

1 引 言

由于具有易于获得、透水性好、强度高、抗震动等特点, 密砂被广泛应用于修筑铁路、高速公路的地基。在车辆循环荷载作用下, 作为地基的砂土将产生显著变形, 对工程稳定性、安全性产生不利影响。为准确预测砂土在循环荷载作用下的变形特

性, 在过去的几十年里, 许多学者针对公路、铁路地基受车辆循环荷载作用进行了深入研究。从受力状态分析, 作为地基的密砂, 一般在一定围压下受到轴向荷载的作用, 其应力状态与压缩-拉伸试验条件下的砂土类似。为此, 本文将基于三轴数值试验, 应用准静态方法研究密砂在循环荷载作用下的力学行为。

收稿日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.10802060, No.11172216); 国家重点基础研究发展计划 (No.2010CB731502)。

第一作者简介: 陈龙, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程及颗粒材料数值仿真方面的研究工作。E-mail: 110439633@qq.com

通讯作者: 楚锡华, 男, 1977 年生, 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事颗粒材料力学及计算力学方面的研究工作。E-mail: chuxh@whu.edu.cn

本文尝试基于 CLoE 亚塑性模型模拟循环荷载下密砂的力学行为。亚塑性模型为 Chambon^[1]、Kolymbas^[2]等发展起来的一类新的本构理论。该理论以连续介质力学为基础,以张量函数为运算工具,扬弃了传统塑性力学中总应变分解为弹性应变和塑性应变、屈服准则、硬化规律、塑性势等概念,直接建立应力率与应变率之间的张量函数表达式。依据发展途径的不同,亚塑性模型可分为 K 型^[1]和 CLoE 型^[2]两种。然而,无论是 K 型还是 CLoE 模型在模拟循环荷载时均存在一定的困难,如出现锯齿效应^[3],即在循环荷载中,每次加、卸载如果具有与上次相同的应变率,那么其应力率不变,这与实际情况不符。为克服上述缺点, Niemunis^[3]针对 K 型亚塑性模型,提出了引入颗粒间应变张量 $\mathbf{h}$ 来考虑循环荷载所引起的应变历史累积效应。对于 K 型亚塑性模型, Niemunis 提出的模型能够很好地克服模型中存在的锯齿效应,能够反映循环荷载条件下,密砂的非线性压硬性特点,具有能够记录加载历史的状态量。并且在 Niemunis 修正的亚塑性中,引入了类似弹塑性模型加、卸载的判断,使得亚塑性模型在循环荷载条件下卸载时能够反映一定的卸载刚度。之后,许多学者在 Niemunis 工作的基础上对 K 型亚塑性模型中的 Gudehus-Bauer^[1,4]模型进行了大量的研究工作。2007 年熊保林^[5]将 Niemunis 的理论引入到 Wu-Bauer 亚塑性模型。Reyes^[6]和 Tazan^[7]等分别将 Niemunis 理论引入到地震工程和风电基础工程的计算中。近几年, Tejchman^[8-10]和 Salciarini^[11]等又将微极理论引入到 Niemunis 所提出的理论中。然而,基于 CLoE 模型的循环荷载模拟却较少,考虑到 CLoE 模型在模拟颗粒材料时具有一定优势^[12],本文尝试将 Niemunis 提出的理论引入到 CLoE 亚塑性模型中,以克服在模拟循环荷载时所产生的锯齿效应。并对原有理论进行一些修改,使修改后的模型在单调荷载作用下的响应与原 CLoE 亚塑性模型保持一致。

2 基于 Niemunis 理论的 CLoE 亚塑性模型

2.1 Niemunis 理论

无论是 K 型还是 CLoE 亚塑性模型,其基本框架均为

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{L} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{N} \|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\| \quad (1)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为线性算子; $\mathbf{N}$ 为非线性算子; $\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\| = \sqrt{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \sqrt{\varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}}$ 为应变率张量 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 的 Euclidean 范数。也可以写成如下形式:

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{M} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为切向刚度矩阵。为了克服亚塑性在计算循环荷载条件下的锯齿效应等问题, Niemunis^[3]将 $\mathbf{M}$ 修改为(小变形条件下变形率 $\mathbf{D}$ 和应变率 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 相同): 当 $\bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} > 0$, $\bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} \leq 0$, $\mathbf{M}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} &= [\rho^x m_T + (1 - \rho^x) m_R] \mathbf{L} + \rho^x (1 - m_T) \mathbf{L} : \bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{h}} + \\ &\quad \rho^x \mathbf{N} \otimes \bar{\mathbf{h}} \\ \mathbf{M} &= [\rho^x m_T + (1 - \rho^x) m_R] \mathbf{L} + \rho^x (m_R - m_T) \mathbf{L} : \bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{h}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: m_T 、 m_R 、 R 、 β_r 、 χ 为材料常数; $\bar{\mathbf{h}}$ 为张量 $\mathbf{h}$ 的单位方向张量, $\bar{\mathbf{h}} = \mathbf{h} / \|\mathbf{h}\|$, 张量 $\mathbf{h}$ 为颗粒间应变, $\rho = \|\mathbf{h}\| / R$, 颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 的率 $\dot{\mathbf{h}}$ 按下式更新:

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{cases} (\mathbf{I} - \bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{h}} \rho^{\beta_r}) : \mathbf{D} & \text{当 } \bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} > 0 \\ \mathbf{D} & \text{当 } \bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于张量 $\mathbf{D}$ 和张量 $\bar{\mathbf{h}}$ 须满足以下条件:

当 $\mathbf{D} \sim \bar{\mathbf{h}}$

$$\bar{\mathbf{h}} \otimes \bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} = \mathbf{D}, \bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} = \|\mathbf{D}\| \quad (5)$$

当 $\mathbf{D} \perp \bar{\mathbf{h}}$

$$\bar{\mathbf{h}} : \mathbf{D} = 0 \quad (6)$$

式(5)、(6)为 Niemunis 修改模型能够满足单调加载时所得结果与其对应原模型一致的必要条件。然而,基于 Niemunis 理论,只有一维或固结两种特殊单调加载情况才能使得其预测结果与初始模型相一致。这是因为: ①对于一维情况: 只有 1 个加载方向,因而不存在围压,根据未修正模型的特点,其应变率 $\mathbf{D}$ 和颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 的方向一直相同,所以 G-B 模型在引入 Niemunis 理论后,在这种条件下表现出很好的一致性。②对于固结试验情况: 模型处于静水压力状态,其应变率 $\mathbf{D}$ 和颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 的方向一直相同。

然而对于非一维情况,由于存在围压,会出现与一维固结不同的情况。在初始施加围压时,应变率 $\mathbf{D}$ 和颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 的方向相同,而在施加垂直向荷载时应变率 $\mathbf{D}$ 为垂直方向,而颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 则一定不为垂直方向,这时就出现一个问题,即无法保证颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 方向与应变率 $\mathbf{D}$ 方向一致(见图 1)。

所以,除上述一维及固结试验情况以外,一般情况无法保证颗粒间应变 $\mathbf{h}$ 方向与应变率 $\mathbf{D}$ 方向一致。这也就使得在 K 型或者 CLoE 型亚塑性模型引入 Niemunis 的理论后,无法满足在单调加载时与对应原模型计算结果一致,其数值算例见图 2~6。为此将在以下内容中结合 CLoE 亚塑性模型分析论证如何克服该缺陷。

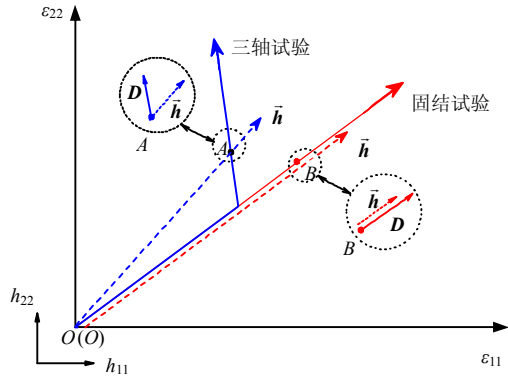


图 1 不同加载路径下颗粒间应变和应变率方向
Fig.1 Intergranular strain and direction of strain rate under different loading paths

2.2 CLoE 亚塑性模型

CLoE 是 Consistency、Localization、Explicit 3 个名词的缩写，这也是它的 3 个特点。其基本框架为式 (1)，张量 L 和 N 为仅考虑 σ 状态变量的函数，通过三轴应力状态路径响应插值得到。插值过程需要用到极限面、一致性条件及基本应力状态的相关概念^[1]。

对于三轴压缩试验，CLoE 亚塑性模型所采用的分析曲线如图 2、3 所示。

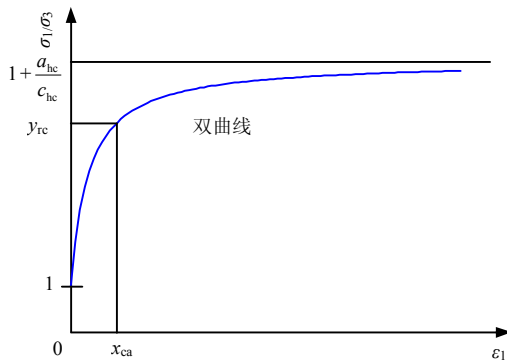


图 2 三轴压缩试验轴向应变-轴向应力/围向应力拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of axial strain vs. deviatoric/axial stress of triaxial compression test

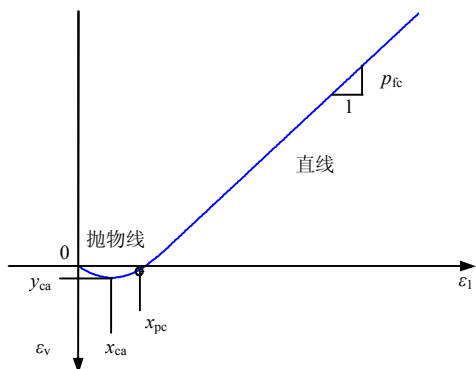


图 3 三轴压缩试验轴向应变-体积应变拟合曲线
Fig.3 Fitting curve of axial strain vs. volumetric strain of

triaxial compression test

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 1 + \frac{a_{hc}\varepsilon_1}{c_{hc}\varepsilon_1 + 1} \quad (7)$$

当 $\varepsilon_1 < x_{pc}$

$$\varepsilon_v = a_{pc}\varepsilon_1^2 + b_{pc}\varepsilon_1 \quad (8)$$

当 $\varepsilon_1 > x_{pc}$

$$\varepsilon_v = p_{fc}(\varepsilon_1 - x_{pc}) \quad (9)$$

CLoE 亚塑性模型中三轴拉伸试验结果所采用的分析曲线见图 4。

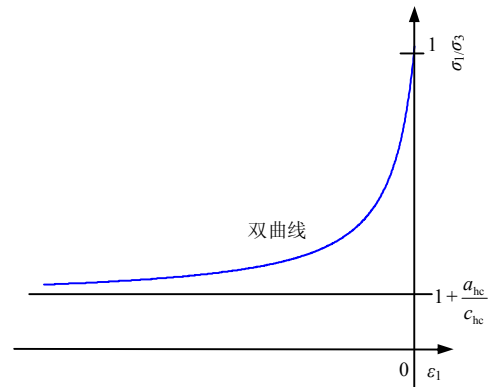


图 4 三轴拉伸试验轴向应变-轴向应力/围向应力拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of axial strain vs. deviatoric/axial stress of triaxial extension test

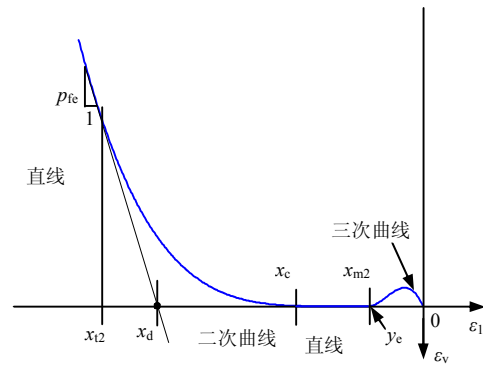


图 5 三轴拉伸试验轴向应变-体积应变拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of axial strain vs. volumetric strain of triaxial extension test

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 1 + \frac{a_{he}\varepsilon_1}{c_{he}\varepsilon_1 + 1} \quad (10)$$

当 $x_{m2} < \varepsilon_1 < 0$

$$\varepsilon_v = a_1\varepsilon_1^3 + b_1\varepsilon_1^2 + c_1\varepsilon_1 \quad (11)$$

当 $x_c < \varepsilon_1 < x_{m2}$

$$\varepsilon_v = y_e \quad (12)$$

当 $x_{t2} < \varepsilon_1 < x_c$

$$\varepsilon_v = a_b(\varepsilon_1 - x_c)^4 + c_b \quad (13)$$

当 $\varepsilon_1 < x_{t2}$

$$\varepsilon_v = -p_{fe}(\varepsilon_1 - x_d) \quad (14)$$

式(8)~(14)中的符号 a_{pc} 、 a_{hc} 、 p_{fc} 、 p_{fe} 、 x_{pc} 、 x_{m2} 、 x_{t2} 等为插值参数,具体可参看文献[1]。

2.3 修正的 CLoE 亚塑性模型

研究表明^[13-15],无论是石英砂还是钙质砂都不会在低于 800 kPa 条件下出现破碎现象。被运用于铁路、高速公路地基下的密砂一般具有一定的围压,这种具有围压的状态应该被认为是密砂的初始状态,而不是一开始的无应力初始状态。那么由于静水压力所导致的可能产生的颗粒间应变 $\bar{h}$ 应该被抹去。

根据密砂存在的上述特点,将 Niemunis 理论引入 CLoE 亚塑性模型后,对 Niemunis 提出的模型做出如下修正:①对于仅加围压,即偏应力很小情况下,认为颗粒间应变 $\dot{\bar{h}}=0$;②将参数 ρ 计算方法修改为: $\rho=\|\bar{h}\|/\alpha\|\bar{h}_{\max}\|$,其中 α 为材料常数, $\|\bar{h}_{\max}\|$ 为历史上颗粒间应变模的最大值。

无论是那种加载路径条件下,修正模型可以满足:变形率 $\mathbf{D}$ 与颗粒间应变率方向相同,所以 $\bar{\mathbf{h}}\otimes\bar{\mathbf{h}}:\mathbf{D}=\mathbf{D}$, $\bar{\mathbf{h}}:\mathbf{D}=\|\mathbf{D}\|$ 。此时,在加载时可以退化到原 CLoE 亚塑性模型的形式,也就能保证与原模型计算的一致性。

3 数值验证

基于 ABAQUS 开发相应子程序^[16],研究了 hostun 密砂在微小、大振幅循环荷载下的力学响应。计算中,hostun 密砂的计算参数如表 1 所示^[17]:

表 1 Hostun 密砂计算参数
Table 1 The parameters of CLoE for Hostun sands

获取参数途径	参数	取值
三轴压缩试验	a_{hc}	445.537
	c_{hc}	92.282
	a_{pc}	-26.593
	b_{pc}	0.495
	p_{fc}	-0.68
	x_{pc}	0.022
	a_{he}	495.848
三轴拉伸试验	c_{he}	-592.579
	a_1	56 313.629
	b_1	218.497
	c_1	0.212
	x_{m2}	-0.001 94
	x_c	-0.002 43
	a_{bi}	-98 611.434
	c_{bi}	0.004 31
	x_{t2}	-0.012 1
	p_{fe}	0.36
静水压力试验	λ_c	1 200.0
	λ_{co}	37.405
	λ_{ex}	692.980
准静水压力状态	M_{co}	1.225
	m_{ex}	0.00
极限面	a_{s1}	0.617
	b_{s1}	-0.823
	n_{s1}	-0.20
剪切刚度参数	omcis	0.36
考虑循环荷载参数	m_R	5.0
	m_T	2.0
	β_t	0.50

χ	6.0
α	1.0

由于锯齿效应在应力-应变曲线图中反映最明显,因此,大部分图表为偏应力-应变曲线,以反映修正模型对锯齿效应的克服效果。所有算例中,均只给最后一个荷载步的应力-应变图。

3.1 三轴数值试验

在进行复杂有限元计算之前,须对修正的 CLoE 模型的可靠性进行验证。本文选用三轴试验验证其可靠性,这是由于三轴试验是单调荷载下比较有代表性的加载路径,该加载路径与 CLoE 模型的构造理论所要求的加载路径相一致,因此,可以用来检验本构模型的可靠性。选取了 2 种基本应力路径:三轴压缩应力和三轴拉伸应力路径。

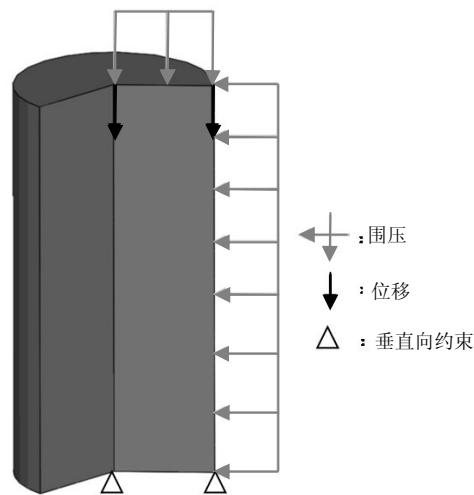


图 6 单个 4 节点轴对称单元 CAX4 模拟三轴试验
Fig.6 Axisymmetric 4-noded element CAX4 for FE simulations of triaxial tests

根据上述条件,采用单个单元的三轴压缩(拉伸)试验有限元模拟,在 ABAQUS 中编写了基于 CLoE 亚塑性模型的 UMAT 子程序。选用一个轴对称 4 节点单元 CAX4 模拟,单元尺寸为 25 mm×100 mm,在底部施加垂直向约束,如图 6 所示。第 1 步模拟施加静水压力 300 kPa 使模型固结,第 2 步在模型顶部施加垂直向位移,使模型垂直向应变达到 25%或直至材料破坏。

各个不同模型在三轴试验中给出的应力-应变曲线如图 7~10 所示。可以看到无论是在三轴压缩、拉伸试验下,试验曲线、CLoE 模型和修正模型所得出的结果非常接近。而 Niemunis 模型计算出的曲线相差很大,无法保证在三轴压缩这种基本单调应力状态下结果的正确性。并且在三轴拉伸试验下,

Niemunis 模型在轴向荷载较小时便无法计算收敛。

无论是三轴压缩、三轴拉伸数值算例, 直接将 Niemunis 理论引入 CLoE 模型则与试验结果存在较大差别, 而修正模型与 CLoE 原模型、试验数据拟合结果基本一致。这说明将 Niemunis 模型引入 CLoE 亚塑性模型后, 通过方法的修改, 能够很好地克服该理论模型与原 CLoE 亚塑性模型在计算单调荷载不一致的缺点。

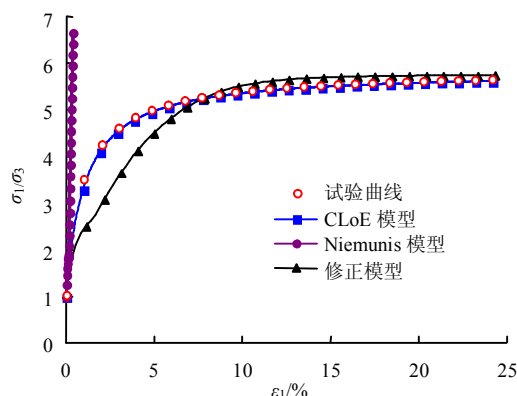


图 7 三轴压缩试验轴向应变-轴向应力/围向应力曲线
Fig.7 Curves of axial strain vs. deviatoric/axial stress of triaxial compression test

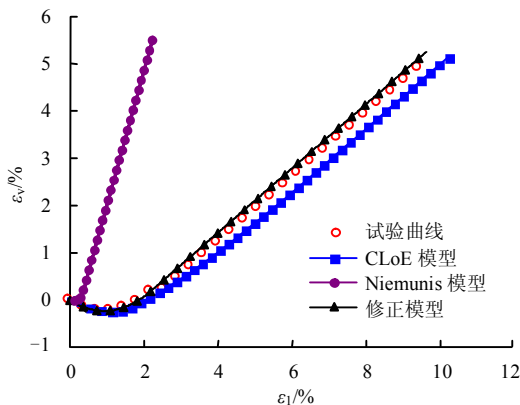


图 8 三轴压缩试验轴向应变-体积应变曲线
Fig.8 Curves of axial strain vs. volumetric strain of triaxial compression test

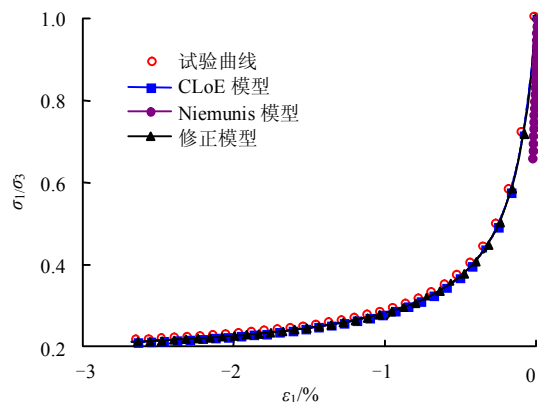


图 9 三轴拉伸试验轴向应变-轴向应力/围向应力曲线
Fig.9 Curves of axial strain vs. deviatoric/axial stress of triaxial extension test

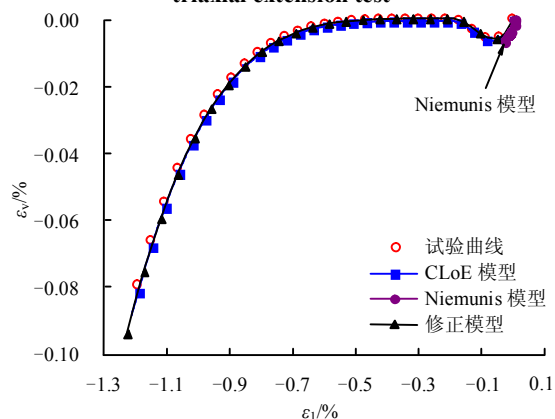


图 10 三轴拉伸试验轴向应变-体积应变曲线
Fig.10 Curves of axial strain vs. volumetric strain of triaxial extension test

3.2 不同振幅循环计算

Niemunis 提出该理论时, 假设应变只在很小振幅范围内循环。然而, 很多学者将该理论运用于 Gudehus-Bauer 亚塑性模型时, 也能在一定程度上反映中、大振幅在循环荷载下颗粒材料的响应。所以, 将 Niemunis 理论引入 CLoE 亚塑性模型中时, 也计算了不同振幅循环荷载条件下密砂的响应, 以验证模型的适应性。

3.2.1 微小振幅循环

微小振幅循环计算条件为第 1 步施加围压 300 kPa, 第 2 步施加循环荷载, 循环荷载范围为 -40~40 kPa, 循环次数为 20 次。

图 11(a)为 CLoE 模型计算的结果, 前 20 次循环形成的应力-应变曲线形状基本一致, 计算结果具有明显的锯齿效应。

图 11(b)为修正模型计算结果, 第 1 次循环卸载部分和第 2 次循环加载部分形成滞回圈, 可以看出, 改进后的模型能反映一定的卸载刚度, 克服了 CLoE 模型的锯齿效应。

修正模型中的轴向颗粒间应变 h_1 及轴向应变 ε_1 如图 12、13 所示。循环起初两个变量振幅较大, 后面趋于平稳一致, 这与 Niemunis 理论上得出的轴向颗粒间应变 h_1 及轴向应变 ε_1 的演化规律一致。

由于研究背景为密实砂地基受车辆循环荷载作用, 为了考察密实砂在此种情况下模型是否能够反映疲劳破坏现象, 研究了微小振幅高周期循环条件下的数值算例。微小振幅高周期循环计算条件为第 1 步施加围压 300 kPa, 第 2 步施加循环荷载, 循环荷载范围为 -20~20 kPa, 循环次数为 400 次。

Niemunis 提出的理论最重要是为了克服亚塑

性模型中的锯齿效应, 这可以在宏观上反映为达到一定的应力、应变水平需要更多的循环次数。图 14 为轴向应变 ε_1 随循环次数变化曲线, 横坐标采用对数表示。随着循环荷载的施加, 2 种模型的轴向应

变 ε_1 是不断增加的, 而修正模型增加速度更慢一些, 在达到一定循环次数后, 修正模型产生的轴向应变 ε_1 更小一些, 这也能反映修正模型克服了锯齿效应。

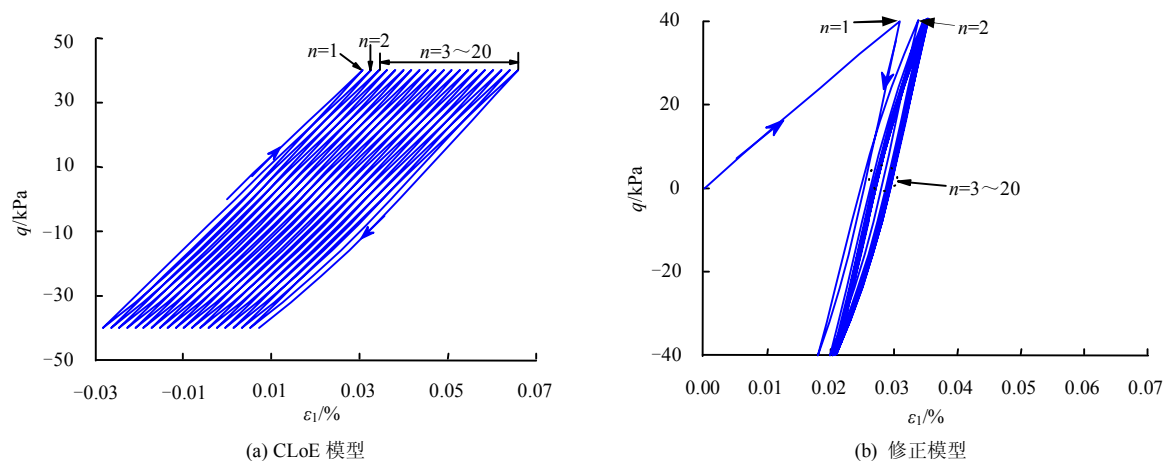


图 11 微小振幅循环下轴向应变-偏应力曲线

Fig.11 Curves of axial strain-deviatoric/axial stress under low amplitude

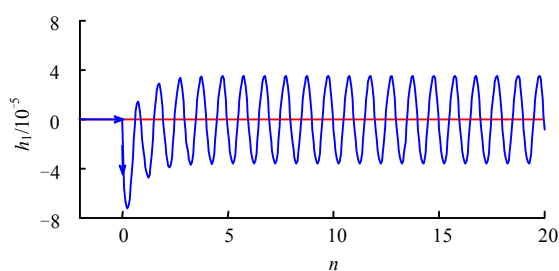


图 12 轴向颗粒间应变随 20 次循环次数变化曲线

Fig.12 Curve of axial intergranular strain developed over 20 cycles

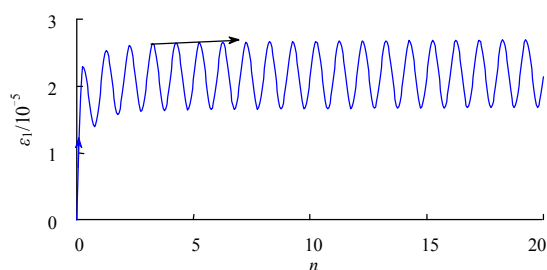


图 13 轴向应变随 20 次循环次数变化曲线

Fig.13 Curve of axial strain developed over 20 cycles

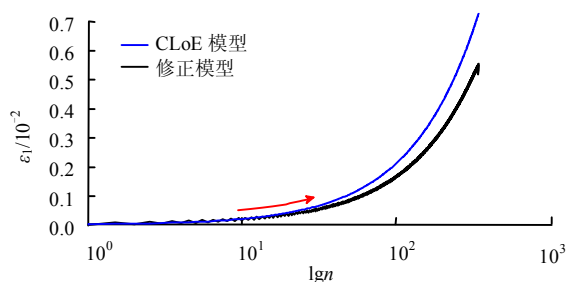


图 14 轴向应变随 400 次循环次数变化曲线

Fig.14 Curves of axial strain developed over 400 cycles

可以看出, 修正模型与 CLoE 模型在前 10 次循环中, 轴向应变 ε_1 和轴向应力 σ_1 结果相差较小。图 15 为修正模型轴向应力 σ_1 随循环次数的变化曲线, 修正模型能够反映材料的疲劳破坏机制, 在接近 300 次循环时, 材料出现非常明显的软化现象。伴随着疲劳破坏的发生, 各个方向的颗粒间应变也陡然增大, 如图 16 所示。

对比 CLoE 模型与修正模型结果, 这种由于高循环次数而产生的疲劳破坏只发生在改进后的模型中, 这说明这个疲劳破坏机制不仅仅是由 CLoE 模型引起的。根据对比颗粒间应变 h 、轴向应变 ε_1 、轴向应力 σ_1 随循环次数的变化情况, 可以看出, 这种疲劳破坏是一个积累的过程: 首先, 随着循环次数增加, 轴向应变 ε_1 、轴向应力 σ_1 产生一定的历史累积; 而后, 在达到一定程度后 (约 150 次), 颗粒间应变 h 各个方向分量均发生较明显变化, 与 Niemunis 所提出的仍然在一个范围内波动明显不同; 最后, 由于颗粒间应变 h 各个方向分量变化加剧后, 反过来又加剧了应力、应变的变化, 最终使得材料疲劳破坏。

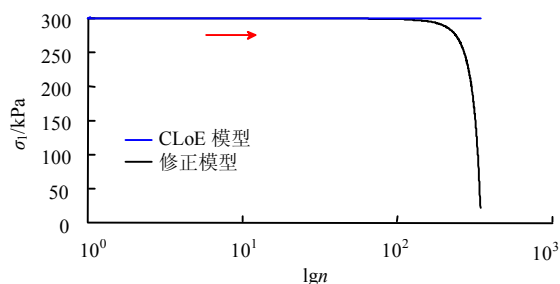
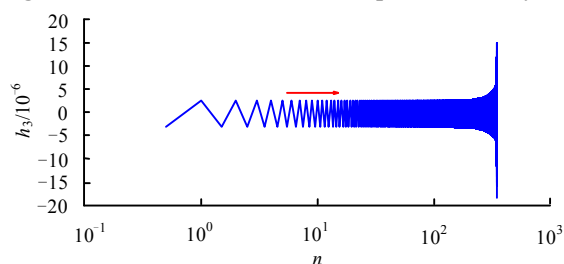
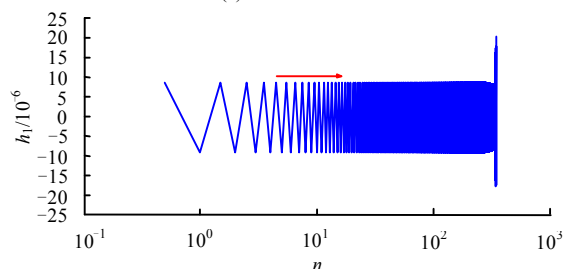


图 15 轴向应力随 400 次循环次数变化曲线

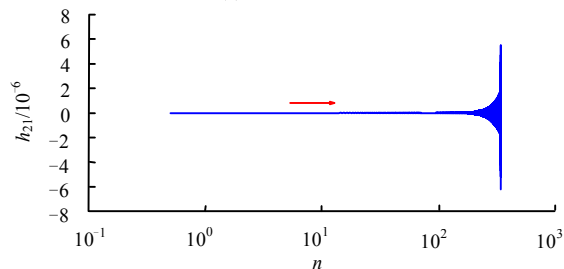
Fig.15 Curves of axial stress developed over 400 cycles



(a) 围向颗粒间应变



(b) 轴向颗粒间应变



(c) 剪切颗粒间应变

图 16 修正模型颗粒间应变随 400 次循环变化曲线

Fig.16 Curves of intergranular strain developed over 400 cycles of modified model

3.2.2 大振幅循环

大振幅循环计算条件为第 1 步施加围压 400 kPa, 第 2 步施加循环荷载, 循环荷载范围为 0~360 kPa, 循环次数为 5 次, 试验结果如图 17 所示。

图 17(a)为 CLoE 模型结果。可以看出, 大振幅情况下, 模型计算出的偏应力-轴向应变曲线与微小振幅相同, 每次循环的图形相似, 具有锯齿效应。

图 17(b)为修正模型结果。计算结果中, 第 2 次与第 3 次循环加载出现很小滞回圈。随着循环次数增加, 滞回圈面积也逐渐增大, 应力-应变曲线表现出更强的非线性。这说明, 无论是微小、大振幅

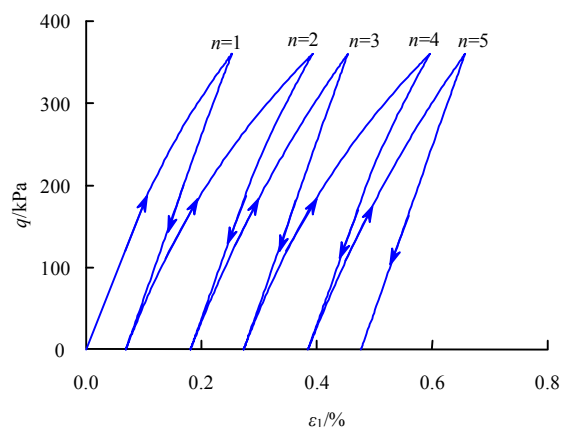
循环, 模型都能够反映颗粒材料的卸载刚度, 克服了锯齿效应。

4 结 论

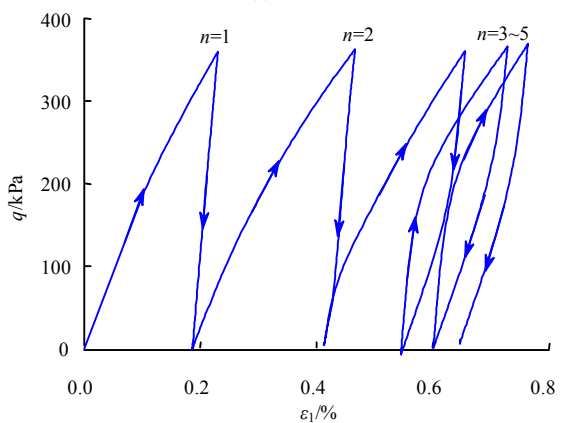
(1) 修正模型在保留了 Niemunis 理论克服锯齿效应的优点的同时, 能正确反映微小、大振幅中颗粒材料的卸载刚度, 在大振幅循环中模型能够正确模拟滞回圈。

(2) 修正模型较原 CLoE 亚塑性模型达到一定的应力、应变水平需要更多的循环次数。

(3) 修正模型可以反映材料的疲劳破坏机制。



(a) CLoE 模型



(b) 修正模型

图 17 大振幅循环下轴向应变-偏应力曲线

Fig.17 Curves of axial strain-deviatoric/axial stress under large amplitude

参 考 文 献

- [1] CHAMBON R, DESRUES J, HAMMAD W. CLoE, a new rate-type constitutive model for geomaterials theoretical basis and implementation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1994, 18(4): 253-278.
- [2] KOLYMBAS D. A novel constitutive law for

- soils[C]//Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Material: Theory and Applications. Tucson: Elsevier, 1987: 1—8.
- [3] NIEMUNIS A. Extended hypoplastic model for soils[D]. Bochum: Ruhr-University, 2003.
- [4] BAUER E. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(1):13—26.
- [5] 熊保林. 无粘性土亚塑性本构模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [6] REYES D, MAREK RODRIGUEZ, LIZCANO A. A hypoplastic model for site response analysis[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(1): 173—184.
- [7] TASAN H, RACKWITZ F, SAVIDIS S. Pore water pressure accumulation due to cyclic horizontally loaded monopiles with large diameters[J]. **Bautechnik**, 2010, 87(8): 449—461.
- [8] TEJCHMAN J, BAUER E. Effect of cyclic shearing on shear localization in granular bodies[J]. **Granular Matter**, 2004, 5(4): 201—212.
- [9] TEJCHMAN J, BAUER E. Modeling of a cyclic plane strain compression-extension test in granular bodies within a polar hypoplasticity[J]. **Granular Matter**, 2005, 7(4): 227—242.
- [10] TEJCHMAN J, BAUER E. FE-modeling of shear resistance degradation in granular materials during cyclic shearing under CNS condition[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(1—2):249—263.
- [11] SALCIARINI, TAMAGNINI C. A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads[J]. **Acta Geotechnica**, 2009, 3(4): 163—176.
- [12] 陈龙, 楚锡华, 张明龙, 等. 基于 CLoE 与 Gudehus-Bauer 亚塑性模型的颗粒材料应变局部化对比研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(11): 3306—3314.
- CHEN Long, CHU Xi-hua, ZAHNG Ming-long, et al. A comparison analysis of strain localization of granular materials based on CLoE and Gudehus-Bauer hypoplastic model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(11): 3306—3314.
- [13] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(5): 505—510.
- LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 505—510.
- [14] 黄文竞. 高应力条件下天然石英砂的颗粒破碎机理[J]. **中国水运(学术版)**, 2007, 7(5): 28—30.
- HUANG Wen-jing. Under high stress condition natural quartz sand pellet kill mechanism[J]. **China Water Transport (Academic Version)**, 2007, 7(5): 28—29.
- [15] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(18): 3327—3331.
- ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3327—3331.
- [16] 楚锡华, 徐远杰, 张明龙, 等. 基于 ABAQUS 的颗粒材料亚塑性模型的数值实现及探讨[J]. **岩土力学**, 2009, 30(增刊 1): 215—224.
- CHU Xi-hua, XU Yuan-jie, ZHANG Ming-long, et al. Numerical implementations and discussion on hypoplastic model for granular materials based on ABAQUS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suppl.1): 215—224.
- [17] LEONI M. Implementation and use of constitutive models in geomechanics: Analysis of shallow footings on sand[D]. Parma, Italy: University of Parma, 2005.

上接第 1597 页

- [17] 彭瑞东, 武志德, 周宏伟. 层状盐岩中裂纹扩展规律的细观实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增刊): 3953—3959.
- PENG Rui-dong, WU Zhi-de, ZHOU Hong-wei. Meso-experimental investigation on crack evolution in bedded salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.): 3953—3959.
- [18] 李建胜, 王东, 康天合. 基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J]. **岩土工程学报**, 2010, 32(11): 1703—1708.
- LI Jian-sheng, WANG Dong, KANG Tian-he. Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1703—1708.
- [19] 彭瑞东, 杨彦从, 鞠杨. 基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算[J]. **科学通报**, 2011, 56(26): 2256—2266.
- PENG Run-dong, YANG Yan-cong, JU Yang.

- Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2011, 56(26): 2256—2266.
- [20] SONG Y Q, RYU S, SEN P N. Determining multiple length scales in rocks[J]. **Nature**, 2000, 406(6792): 178—181.
- [21] 谢和平. 岩土介质分形孔隙和分形粒子[J]. 力学进展, 1993, 23(2): 145—164.
- XIE He-ping. Fractal pores and fractal particles of rock and soil materials[J]. **Advances in Mechanics**, 1993, 23(2): 145—164.