

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.009

砂土三轴压缩和拉伸行为的分数阶塑性模型*

陈晨, 孙逸飞, 宋顺翔

(河海大学教育部岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 实际工程中的砂土等粗粒土往往不仅会受到压缩剪切作用, 还有可能受到拉伸剪切作用。但是, 目前所建立的分数阶塑性力学模型, 仅考虑了砂土的压缩剪切行为; 对于砂土的拉伸剪切行为, 还有待进一步验证。运用广义分数阶微分定义, 提出了一个修正的剪胀方程, 并基于此建立了一个可以描述砂土三轴压缩和拉伸行为的分数阶塑性力学模型。选取不同砂土的三轴压缩和拉伸试验数据, 对模型进行了验证, 结果表明, 模型可以合理的对砂土在压缩和拉伸条件下的应力应变行为进行预测。

关键词: 分数阶塑性力学; 三轴压缩; 三轴拉伸; 本构模型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0380-07

Fractional Order Plastic Model for Sand under Triaxial Compressive and Extensive Loads

CHEN Chen, SUN Yifei, SONG Shunxiang

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Granular soils such as sand are often subjected to compressive shearing as well as extensive shearing in practical engineering. However, existing fractional models only consider the triaxial compressive behavior of sand and further model verification for the triaxial extensive behavior of sand needs to be conducted. Thus, a modified stress-dilatancy equation by using general definition of the fractional derivatives is proposed. Then, a fractional order plasticity model for sand subjected to triaxial compression and extension is developed. To validate the proposed model, the results of a series of triaxial compressive and extensive tests on different sands are simulated, from which it is found that the proposed model can reasonably simulate the compressive and extensive stress-strain behavior of sand.

Keywords: fractional order plasticity; triaxial compression; triaxial extension; constitutive model

引言

砂土作为一种散粒体, 其排水和不排水变形和

强度依赖于自身的材料状态^[1]。在排水条件下, 砂土的强度常常会随着孔隙比的增加而增大; 松砂在受荷时常常表现出硬化行为, 而密砂在中低围压下常常表现出软化行为^[2]。在不排水条件下, 饱和松

* 收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-12-13

基金项目: 博士后基金面上项目(2017M621607)、中央高校基本科研业务费项目(2017B05214)资助

作者简介: 陈晨(1995-), 男, 硕士研究生。主要从事土的静动力学特性及本构模型研究。Email: 448930335@qq.com

通讯作者: 孙逸飞(1988-), 男, 副教授, 博士。主要从事土体本构理论研究。Email: sunny@hhu.edu.cn

砂在动荷载作用下,常常会丧失其原有强度而急剧液化^[3-5],从而危及上层建筑物的安全。因此,砂土的应力应变特性是复杂的,弄清砂土的应力应变本构行为对指导工程实践有重大意义。为此,许多学者^[1-7]对砂土的三轴压缩和拉伸力学性进行了详细研究,并建立了适应于砂土的本构模型。X. Li^[8]以及Y. F. Dafalias等^[6]考虑砂土剪胀对其材料状态的依赖性,基于K. Been等^[1]提出的状态参数建立了状态依赖的砂土本构模型。Y. Yao等^[9-13]考虑到砂土颗粒破碎引起的峰值摩擦角和状态转换角对应力的依赖特性,建立考虑颗粒破碎效应的临界状态土力学模型。可以发现,为了描述砂土等粗粒土的状态依赖的非关联流动,以上模型无一例外地将土体的状态参数引入塑性势函数的临界应力比系数(M_c)中;加载过程中状态参数发生改变,使得临界状态应力比(M_c)发生改变,从而改变了塑性势面的具体形状,使得因此得到的塑性流动方向在加载过程中发生改变。Y. Sun等^[14-17]通过分析粗粒土的三轴试验特性,提出了岩土材料的分数阶塑性力学模型。不同于传统塑性力学,分数阶塑性力学基于非局域性的分数阶微分算子,其在某一应力点的微分不仅与该点的应力状态有关,还与到达该点的加载历史相关。因此,通过对塑性势面(或者屈服面)进行分数阶求解,即可建立状态依赖的塑性力学本构模型。但是,目前所有的模型均基于土体的压缩试验得到,土体拉伸行为的分数阶塑性力学模型还有待进一步研究。

因此,本文尝试建立一个可以同时模拟粗粒土压缩和拉伸试验特性的分数阶塑性力学模型,推导适应于土体压缩和拉伸的广义分数阶塑性流动法则,并对不同初始状态砂土试验结果进行拟合,以验证模型。

1 基本定义

1.1 应力应变的定义

首先需要指出的是,本文的所有推导和讨论均是基于均一、各向同性材料;受压为正,受拉为负;所有应力均为有效应力。有效增量应力张量定义如下:

$$\dot{\sigma}' = [\dot{p}', \dot{q}]^T \quad (1)$$

式中, \dot{p}' 为平均有效主应力增量; \dot{q} 为偏应力增量,分

别定义为:

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (2)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (3)$$

式中, $\dot{\sigma}'_1$ 和 $\dot{\sigma}'_3$ 分别是第一和第三有效主应力增量。相应的增量主应变张量定义如下:

$$\dot{\epsilon} = [\dot{\epsilon}_v, \dot{\epsilon}_s]^T \quad (4)$$

式中, $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_3$ 分别是第一和第三主应变。增量主应变可以分解为弹性应变和塑性应变两部分,即 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p$ 。

1.2 广义分数阶微分

为了推导出同时适用于压缩和拉伸的分数阶模型,分别定义广义Caputo分数阶左微分和右微分^[18]为:

$${}_0D_{\sigma'}^{\alpha} f(\sigma') = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^{\sigma'} \frac{f^{(n)}(\chi) d\chi}{(\sigma' - \chi)^{\alpha+1-n}}, \quad \sigma' \geq 0 \quad (5)$$

$${}_0D_{\sigma'}^{\alpha} f(\sigma') = \frac{(-1)^n}{\Gamma(n-\alpha)} \int_{\sigma'}^0 \frac{f^{(n)}(\chi) d\chi}{(\chi - \sigma')^{\alpha+1-n}}, \quad \sigma' < 0 \quad (6)$$

式中, $D(= \partial^{\alpha}/\partial x^{\alpha})$ 为偏微分; $\alpha \in (n, n-1]$,为分数阶微分阶数,其中 n 为正整数; σ' 为加载应力;伽马函数 $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-\tau} \tau^{x-1} d\tau$; f 为修正剑桥函数^[19]:

$$f = (2p' - p'_0)^2 + \left(\frac{2q}{M_c}\right)^2 - p'^2_0 = 0 \quad (7)$$

式中, p'_0 为塑性势面与横坐标轴的交点。临界状态应力比定义为^[20]:

$$M_c = \frac{6 \sin \varphi_c}{3t - \sin \varphi_c} \quad (8)$$

式中, φ_c 为三轴压缩时的临界状态摩擦角;土体受压时, $t=+1$;土体受拉时, $t=-1$ 。

需要指出的是,在分数阶塑性力学^[21]中,塑性应变增量不再由 f 的一阶导数决定,而是依赖于 f 应力分数阶梯度律,即:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial^{\alpha} f(\sigma'_{ij})}{\partial \sigma'_{ij}} = d\lambda {}_0D_{\sigma'_{ij}}^{\alpha} f(\sigma'_{ij}) \quad (9)$$

式中, $d\lambda$ 为塑性乘子, $d\epsilon_{ij}^p$ 和 σ'_{ij} 分别为塑性应变增量矩阵以及应力矩阵; $i, j=1, 2, 3$ 。

这一定义使得模型可以考虑加载过程对剪胀(塑性流动)的影响。因为分数阶微分基于积分的定义形式,其在函数某一点的梯度,不仅与该点当前加载应力有关,还需积分区间,即加载过程相关。

2 分数阶剪胀方程

土体受荷发生塑性流动,其流动特性可以用剪胀方程来描述。由于分数阶微分对压缩和拉伸的不同定义,有必要推导出一个广义的分数阶剪胀方程,使其可以同时描述土体的压缩和拉伸流动特性。当试样受压时,将式(7)代入式(5),得到其压缩剪胀方程为:

$$d = \frac{{}_0D_{p'}^\alpha f(p')}{{}_0D_q^\alpha f(q)} = \frac{M_c^2 - (1 - \alpha/2)[\eta^2 + M_c^2]}{\eta^{2-\alpha}} \quad (10a)$$

式中, $p' \geq 0, q \geq 0, \eta = q/p' \geq 0$ 。

当土体受拉伸时,将式(7)代入式(6),得到其拉伸剪胀方程为:

$$d = \frac{{}_qD_0^\alpha f(p')}{{}_qD_0^\alpha f(q)} = -\frac{M_c^2 - (1 - \alpha/2)[\eta^2 + M_c^2]}{(-\eta)^{2-\alpha}} \quad (10b)$$

式中, $p' > 0, q < 0, \eta = q/p' < 0$ 。

图1为分数阶剪胀方程(10a)和(10b)所建立的剪胀比—应力比关系。由图1可知,当 $\eta > 0$ 时,分数阶剪胀曲线随着微分阶数 α 的增加而上移;当 $\eta < 0$ 时,分数阶剪胀曲线随着微分阶数 α 的增加而下移。进一步结合式(10a)和(10b),可得统一后的广义分数阶剪胀方程:

$$d = \frac{M_c^2 - (1 - \alpha/2)(\eta^2 + M_c^2)}{t|\eta|^{2-\alpha}} \quad (11)$$

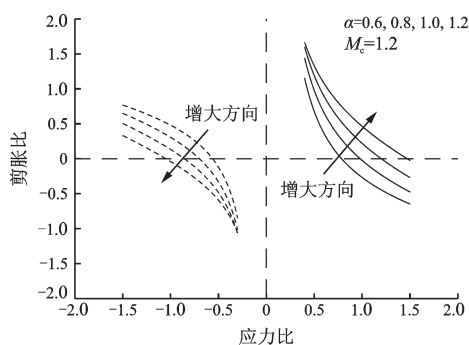


图1 分数阶剪胀方程

Fig.1 Fractional order stress-dilatancy equation

3 分数阶塑性力学模型

3.1 弹塑性应力应变关系

土体的总应变可以分解为弹性应变和塑性应变两部分,如下^[19]:

$$\dot{\epsilon} = (C^e + C^p) : \dot{\sigma}' \quad (12)$$

式中,弹性柔量可以定义为:

$$C^e = \begin{bmatrix} 1/K & \\ & 1/(3G) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,体积模量 K 定义为:

$$K = \frac{(2 + 2\nu)}{3(1 - 2\nu)} G \quad (14)$$

式中, ν 是泊松比; G 是剪切模量,定义为^[14]:

$$G = G_0 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} p_a \sqrt{\frac{p'}{p_a}} \quad (15)$$

式中, G_0 是弹性常数。此外,塑性柔量定义为:

$$C^p = \frac{1}{H} \mathbf{m}^T \mathbf{n} \quad (16)$$

式中, H 是硬化模量; \mathbf{m} 和 \mathbf{n} 分别是塑性流动方向和加载方向,其定义将在后面的本构模型部分给出。

3.2 塑性流动方向

根据陈生水等^[22],塑性流动方向定义为:

$$\mathbf{m} = [m_v, m_s]^T \quad (17)$$

式中,压缩相关(m_v)、剪切相关(m_s)塑性流动方向分别为:

$$m_v = t \frac{d}{\sqrt{1 + d^2}} \quad (18)$$

$$m_s = t \frac{1}{\sqrt{1 + d^2}} \quad (19)$$

为了可以反映受荷变形的状态依赖特性, Y. Sun等^[14-15]建议采用状态依赖的分数阶数,如下:

$$\alpha = e^{\Delta\psi} \quad (20)$$

式中, $\Delta > 0$, 为材料常数; ψ 为状态参数,可以定义为^[1]:

$$\psi = e - e_c \quad (21)$$

式中, e 为当前孔隙比; e_c 为临界状态孔隙比,定义为^[23]:

$$e_c = e_\Gamma - \lambda \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi \quad (22)$$

式中, e_Γ, λ 和 ξ 是 $e - p'$ 空间的临界状态参数。

3.3 加载方向

相应的加载方向可以定义为:

$$\mathbf{n} = [n_v, n_s]^T \quad (23)$$

式中,压缩相关(n_v)、剪切相关(n_s)的加载方向分别定义为:

$$n_v = t \frac{d_n}{\sqrt{1+d_n^2}} \quad (24)$$

$$n_s = t \frac{1}{\sqrt{1+d_n^2}} \quad (25)$$

式中, d_n 可以由下式确定:

$$d_n = \frac{\chi^2 M_c^2 - (1 - \alpha/2)(\eta^2 + \chi^2 M_c^2)}{t|\eta|^{2-\alpha}} \quad (26)$$

式中, χ 为材料常数,描述了土体在不排水条件下的应力路径特征。

3.4 硬化准则

硬化准则决定了土体的硬化特性,一个合适的硬化模量必须满足以下条件^[23]:(1)在剪切尚未开始时($\eta=0$), $H=+\infty$;(2)在临界状态和峰值应力点时, $H=0$ 。本文采用类似于 X. Li 等^[23]的硬化模量:

$$H = (h_1 - h_2 \psi) G \left(\frac{tM_p}{\eta} - e^{k\psi} \right) \quad (27)$$

式中, h_1 和 h_2 是材料常数,描述了硬化参数对材料状态的依赖;峰值应力比(M_p)定义为:

$$M_p = M_c e^{-k\psi} \quad (28)$$

式中, k 为材料常数,描述了特征峰值应力比对土体物质状态的依赖。由式(27)可知,硬化模量的大小受多重因素影响($e, e_0, \bar{p}', \psi, G$),满足 X. Li 等^[23]所指出的上述条件(1)和(2)。

4 模型验证

4.1 模型参数识别

所提出的模型含有11个参数,分别为: $\varphi_c, \lambda, e_r, \xi, \Delta, \chi, k, h_1, h_2, G_0$ 以及 ν ,均可以通过三轴试验获得。

φ_c, λ, e_r 和 ξ 为临界状态参数。 φ_c 可以通过临界状态线在 $p'-q$ 平面的斜率(M_c),得到:

$$\varphi_c = \arcsin \left(\frac{3M_c}{6 + M_c} \right) \quad (29)$$

此外,另外三个临界状态参数(λ, e_r, ξ)可以通过拟合 $e-p'$ 空间的临界状态点得到。

参数 Δ 将分数阶数 α 与状态参数 ψ 进行了关联,使得 α 不再是常数,而是随着材料状态变化,并进一步影响、决定土体的塑性流动特性。因此,可以由试样状态转换时的剪胀关系得到,即 $d=0$:

$$\Delta = \frac{1}{\psi_d} \ln \frac{2}{1 + (M_c/\eta_d)^2} \quad (30)$$

式中, ψ_d 和 η_d 分别是 ψ 和 η 在状态转换点的数值。

参数 χ 决定了土体在不排水加载时的应力路径形状,因此可以通过拟合土体在不排水条件下加载时候的应力路径得到。

参数 k 可以通过试样在峰值应力状态点的应力应变关系得到,即 $H=0$ 时:

$$k = \frac{1}{2\psi_p} \ln \frac{M_c}{\eta_p} \quad (31)$$

式中, ψ_p 和 η_p 分别是 ψ 和 η 在峰值应力点的数值。

参数 h_1 和 h_2 可以通过拟合土体受荷时 $\epsilon_1 - q$ 关系曲线获得。具体参见文献[15, 23],这里不再赘述。

还有两个弹性参数(G_0, ν),可以分别由下式确定^[14]:

$$G_0 = \frac{(1+e)G}{(2.97-e)^2 \sqrt{p'p_a}} \quad (32)$$

$$\nu \approx \left| \frac{3\epsilon_s - 2\epsilon_v}{6\epsilon_s + 2\epsilon_v} \right| \quad (33)$$

根据上述方法确定各砂土模型参数,见表1。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

材料	Toyoura 砂 ^[2]	Toyoura 砂 ^[24]	Hostun 砂 ^[4]	Fraser River 砂 ^[3]
G_0	125	125	95	120
ν	0.05	0.05	0.25	0.2
$\varphi_c(^{\circ})$	31.2	32.3	33.0	32.1
λ	0.019	0.02	0.35	0.02
e_r	0.934	0.73	1.18	0.915
ξ	0.7	0.7	0.1	0.7
χ	1.0	0.35	0.5	0.6
Δ	3.0	0.5	2.0	2.2
k	4.0	1.5	1.5	1.5
h_1	0.6	0.2	0.4	0.4
h_2	1.0	0.1	0.1	0.2

4.2 模型预测

选取几种不同初始状态的砂土在三轴压缩和拉伸条件下的试验数据进行拟合和对比,以验证所提出分数阶岩土塑性力学模型的合理性。图2~5分别为 Toyoura 砂^[2,24]、Hostun 砂^[4]和 Fraser River

砂^[3]的试验模拟。这些砂土的物理特性以及制样、试验方法可以分别从文献[2-4,24]中获知,这里不再赘述。图中散点是试验数据,连续线是模型预测。

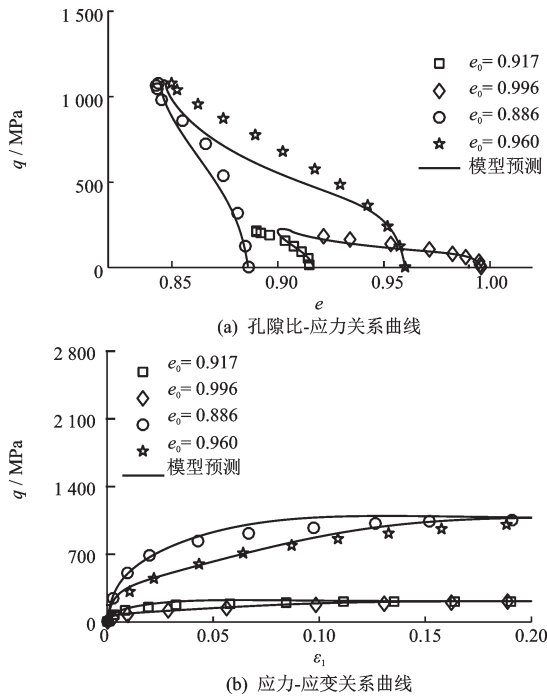


图2 Toyoura砂^[2]三轴压缩和拉伸行为的模型预测
Fig.2 Model predictions of the triaxial compressive behaviour of Toyoura sand^[2]

图2中孔隙比($e_0 = 0.917, 0.996, 0.886, 0.960$)对应围压分别为100、100、500和500 kPa。分析图2可知,所提模型可以合理地预测不同初始状态 Toyoura 砂土的三轴压缩特性。分析图3可见,所提模型也可以较好地对其三轴拉伸应力应变特性进行预测。

图4为不同初始围压(50、100、200和300 kPa)下、不同初始孔隙比的Hostun砂三轴压缩和拉伸试验值和模型预测值的对比。分析发现,所提模型可以对不同初始状态 Hostun 砂的三轴压缩和拉伸试验特性进行合理描述。具体说来,模型可以模拟试样在加载初期的应力不断增长,达到峰值,然后降低,向液化发展。

图5为不同初始围压(40、200、400、800和1200 kPa)下、不同初始孔隙比的Fraser River砂三轴压缩和拉伸试验的模型预测。对比分析可以发现:模型可以合理地预测试样在低围压下的有效应

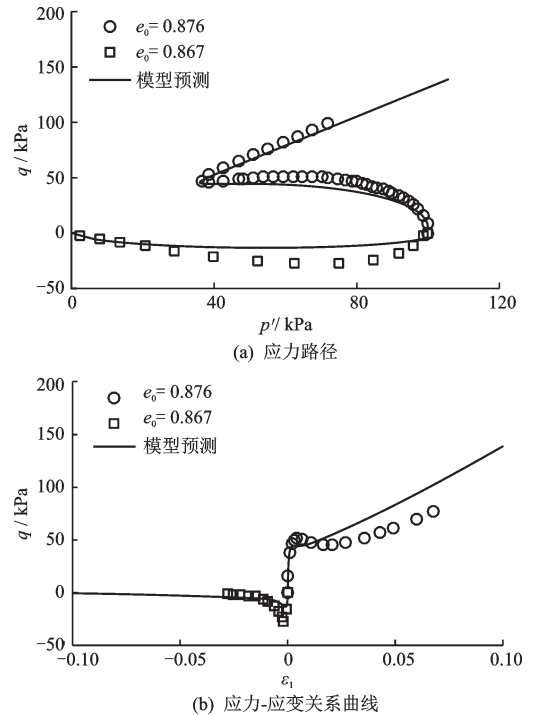


图3 Toyoura砂^[24]三轴压缩和拉伸行为的模型预测
Fig.3 Model predictions of the triaxial compressive and extensive behaviour of Toyoura sand^[24]

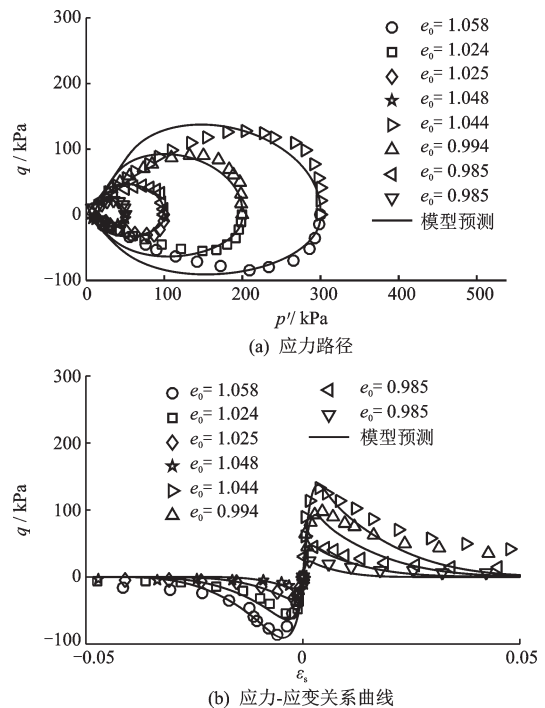


图4 Hostun砂^[4]三轴压缩和拉伸行为的模型预测
Fig.4 Model predictions of the triaxial compressive and extensive behaviour of Hostun sand^[4]

力不断减小、试样向液化发展的特性;以及高围压下偏应力增长和最终的稳态流动特性。从而,进一

步验证了所推导的广义分数阶剪胀方程对不同砂土塑性流动的良好适应性。

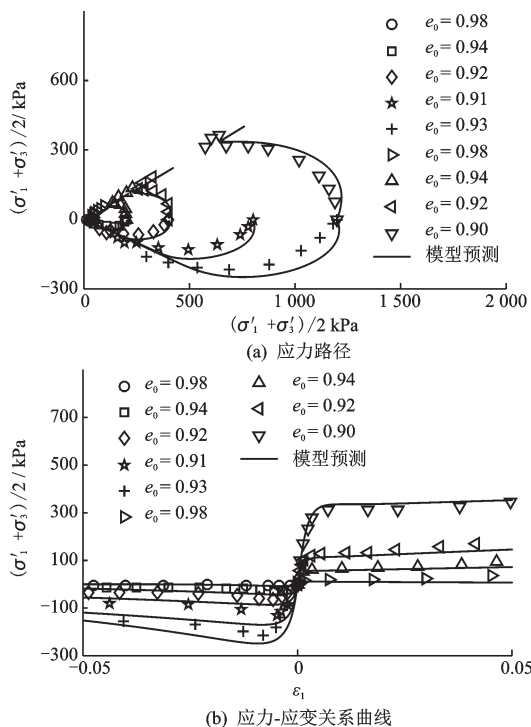


图5 Fraser River 砂^[3]三轴压缩和拉伸行为的模型预测
Fig.5 Model predictions of the triaxial compressive and extensive behaviour of Fraser River sand^[3]

5 结论

推导了一个同时适用于砂土压缩和拉伸加载条件下的分数阶塑性本构模型,使其可以对土体在三轴压缩和拉伸时的应力应变进行预测;为了验证所提模型,选择了几种不同砂土的三轴试验数据进行模拟。主要结论如下:

(1)所提出分数阶剪胀方程可以合理的描述砂土在压缩和拉伸时的塑性流动行为。

(2)所建立模型共有 11 个参数,均可以通过常规三轴试验获得。

(3)分析模型对不同砂土的三轴压缩和拉伸试验数据模拟结果发现,所建立模型可以较好地预测砂土在不同初始状态和加载条件下的应力应变特性。

(4)仅对静力作用下的砂土应力应变特性进行了建模,对于动力荷载作用下的分数阶塑性力学模型还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Been K, Jefferies M G. A state parameter for sands[J]. Géotechnique, 1985, 35(2):99-112.
- [2] Verdugo R, Ishihara K. The steady state of sandy soils [J]. Soils and Foundations, 1996, 36(2): 81-91.
- [3] Vaid Y P, Thomas J. Liquefaction and postliquefaction behavior of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(2):163-173.
- [4] Doanh T, Ibrahim E, Matiotti R. Undrained instability of very loose Hostun sand in triaxial compression and extension. Part I: experimental observations [J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 1997, 2(1): 47-70.
- [5] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1):1-50.
Zhang J M. New advances in basic theories of sand dynamics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 1-50. (in Chinese)
- [6] Dafalias Y F, Taiebat M. SANISAND-Z: zero elastic range sand plasticity model[J]. Géotechnique, 2016, 66(12):999-1013.
- [7] Been K, Jefferies M G. Stress dilatancy in very loose sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(5): 972-989.
- [8] Li X. A Sand model with state-dependent dilatancy[J]. Géotechnique, 2002, 52(3): 173-186.
- [9] Yao Y, Yamamoto H, Wang N D. Constitutive model considering sand crushing [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4):603-608.
- [10] Yao Y, Kong L, Zhou A, et al. Time-dependent unified hardening model: three-dimensional elastoviscoplastic constitutive model for clays[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 141(6):04014162.
- [11] Yao Y, Wang N. Transformed stress method for generalizing soil constitutive models[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(3): 614-629.
- [12] Yao Y, Kong Y. Extended UH Model: three-dimensional unified hardening model for anisotropic clays[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(7): 853-866.
- [13] Yao Y, Zhou A. Non-isothermal unified hardening model: a thermo-elasto-plastic model for clays[J]. Géotechnique, 2013, 63(15): 1328-1345.
- [14] Sun Y, Xiao Y. Fractional order plasticity model for

- granular soils subjected to monotonic triaxial compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 118-119, 224-234.
- [15] Sun Y, Shen Y. Constitutive model of granular soils using fractional order plastic flow rule[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(8): 04017025.
- [16] Sun Y, Xiao Y. Fractional order model for granular soils under drained cyclic loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, 41(4): 555-577.
- [17] Sun Y, Indraratna B, Carter J P, et al. Application of fractional calculus in modelling ballast deformation under cyclic loading [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 82: 16-30.
- [18] Podlubny I. Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications[M]. San Diego, California: Academic Press, 1998.
- [19] Schofield A, Wroth P. Critical state soil mechanics [M]. New York, USA: McGraw-Hill London, 1968.
- [20] Khalili N, Habte M A, Valliappan S. A bounding surface plasticity model for cyclic loading of granular soils [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(14): 1 939-1 960.
- [21] 孙逸飞, 高玉峰, 鞠雯. 分数阶塑性力学及其砂土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1 535-1 541.
- Sun Y F, Gao Y F, Ju W. Fractional plasticity and its application in constitutive modelling of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1 535-1 541. (in Chinese)
- [22] 陈生水, 傅中志, 韩华强, 等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1 489-1 495.
- Chen Sh Sh, Fu Zh Zh, Han H Q, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1 489-1 495. (in Chinese)
- [23] Li X, Dafalias Y. Dilatancy for cohesionless soils [J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 449-460.
- [24] Hyodo M, Tanimizu H, Yasufuku N, et al. Undrained cyclic and monotonic triaxial behavior of saturated loose sand[J]. Soils and Foundations, 1994, 35(2): 127-128.
- (本文责编:赵霞)



“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑征稿函

我国具有自然灾害种类多、强度大、区域广、易灾区高度重叠等特点。传统设计方法在进行结构设计时仅考虑单一灾害作用,忽略了多次、多种灾害间的耦合效应,这势必对基础设施安全性、区域城市韧性等带来极大隐患。因此,开展多种灾害间联合概率分布研究及结构抗多种灾害联合作用下的全寿命风险评估和设计方法研究,对提升我国工程结构的整体防灾减灾能力具有重要意义。

《防灾减灾工程学报》现针对工程结构在多灾害作用下存在的研究问题和难点,拟于2021年第1期出版“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑,欢迎从事相关科研工作的专家、学者踊跃投稿。

本次征文拟在以下3个领域进行:

- (1)多灾害耦合机理与荷载模型;
- (2)全寿命工程结构抗多灾分析及设计理论;
- (3)工程结构抗多灾性能提升关键技术研究。

本专辑稿件征集截止日期2020年11月15日,投稿邮箱:fzjzgcxb@vip.163.com,投稿时请注明“多灾作用下结构可靠性”专辑,编辑部联系电话:025-84285560,84285517。

《防灾减灾工程学报》编辑部