

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.12.005

砂土静动力液化特性的数值模拟

谢亦红, 尹祖超, 李亮, 蔡鹏

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了研究砂土的静动力液化特性, 揭示砂土液化的发生机制, 通过离散元方法, 采用能够描述岩土工程材料的力学特性简化的 Hertz 非线性接触本构模型和能消除边界对数值模拟结果影响的周期边界, 设置不同摩擦系数制备了不同密实度的松散砂土试样。对松散砂土数值试样在静动力加载条件下开展了一系列三轴不排水试验模拟, 研究松散砂土静态液化和动力液化微观力学特性。探明砂土颗粒微观量演化规律, 建立其与宏观力学响应的内在联系, 从而进一步分析松砂液化的细观力学机制。试验结果表明: 三维离散元数值方法成功模拟了砂土静动力液化现象, 室内试验中松砂的“初始液化”和低围压下松砂也可能发生剪胀等现象均可以在数值模拟中实现。试样微观量的演化是砂土宏观响应的内在原因。在单调加载条件下, 试样发生液化后, 其组构的模量达到稳定值 0.62, 组构张量方向与加载方向一致, 配位数稳定值 3.2。在动力加载条件下, 试样在受拉侧发生破坏, 液化时微观量中组构张量模量为 0.59 小于静态液化的值 0.62, 而配位数的值为 3.4 大于静态液化的值 3.2。

关键词: 道路工程; 微观量; 离散元; 砂土; 单调荷载; 循环荷载

中图分类号: U414; TU441

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)12-0033-07

Numerical Simulation of Static and Dynamic Liquefaction of Sand

XIE Yi-hong, YIN Zu-chao, LI Liang, CAI Peng

(Yangtze River Survey Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan Hubei 430010, China)

Abstract: In order to study the static and dynamic liquefaction characteristics of sand, reveal the mechanism of sand liquefaction, through the discrete element method, the simplified Hertz nonlinear contact constitutive model that can describe the mechanical properties of geotechnical materials and the periodic boundary that can eliminate the influence of boundary on numerical simulation result are used to prepare the loose sand samples with different densities and different friction coefficients. A series of triaxial undrained test simulations are carried out on the numerical samples of loose sand under static and dynamic loading conditions to study the static and dynamic liquefaction micromechanical properties of the loose sand. The evolution rule of the microscopic quantity of the sand particles is explored, and its internal connection with the macro-mechanical response is established, thereby the meso-mechanical mechanism of the liquefaction of the loose sand is analyzed. The test result shows that (1) The 3D discrete element numerical method successfully simulated the phenomenon of static and dynamic liquefaction of sand. The “initial liquefaction” of the loose sand in laboratory test and the possible dilatancy of the loose sand under low confining pressure can all be realized in numerical simulation. (2) The evolution of the microscopic quantity of the samples is the inherent reason for the macroscopic response of the sand. (3) Under monotonic loading condition, the fabric modulus of the liquefied samples reach a stable value of 0.62, the fabric tensor direction is consistent with the loading direction, and the coordination number has a stable value of 3.2. (4) All samples fail on the extension side

收稿日期: 2019-11-05

基金项目: 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目 (CX2016Z38)

作者简介: 谢亦红 (1992-), 男, 江西宁都人, 硕士研究生. (1501740992@qq.com)

under cyclic loading condition, the fabric tensor modulus during liquefaction is 0.59 which is smaller than the static liquefaction value of 0.62, and the coordination number value is 3.4 which is greater than the static liquefaction value of 3.2.

Key words: road engineering; microscopic quantity; discrete element; sand; monotonic loading; cyclic loading

0 引言

砂土作为土木工程、交通运输和水利工程等领域中常用的建筑材料,其力学特性是工程建筑基础研究的重点,也是土力学研究的热点。砂土液化是指在外荷载作用下,饱和砂土由于孔隙水压力升高而引起剪切强度丧失和有效应力降低,最终导致砂土表现出类似于流体特征的一种现象。近年来,由降雨入渗和地震引发的静动力液化而导致的滑坡、泥石流等地质灾害和长期交通荷载作用下的路基累积变形等问题日益受到人们的关注^[1-4]。对松砂的静动力液化行为也开展了大量室内试验工作,包括三轴剪切试验^[5-6]和循环三轴试验^[7-8],在砂土液化的宏观力学机制方面等取得了可喜的成果。但是砂土是离散的介质,松砂的静动力液化行为非常复杂,基于室内试验获得的宏观力学响应通常是唯象的,不能从本质上揭示砂土液化的发生机制。

随着计算机技术的发展,由 Cundall 和 Strack^[9]提出并逐步发展起来的离散元(DEM)数值方法,可以在获得颗粒材料宏观响应的同时追踪颗粒的微观组构演化。PFC(Particle Flow Code)作为不断完善发展的离散元程序,广泛应用于砂土等颗粒材料的宏微观力学行为研究。周健等^[10]通过开展 PFC 2D 常体积循环双轴试验,对循环荷载作用下砂土的液化现象进行了模拟。Yang 和 Dai^[11]利用 DEM 方法开展了一系列双轴剪切试验的数值模拟,指出砂土的不稳定行为是土体颗粒在等体积剪切过程中重新排布的结果。Guo 和 Zhao^[12]研究了砂土在剪切过程中的各向异性演化规律及临界状态力学行为。史旦达等^[13]研究了初始组构对砂土液化的细观机理,指出砂土的液化过程是一个组构各向异性的演化过程。目前,对砂土液化的细观机理研究大多是基于二维离散元数值试验,亟需在三维条件下开展进一步数值研究。另一方面,为进一步揭示液化现象的发生机制,探讨砂土静动力液化的内在关联,有必要对砂土静动力液化现象进行数值模拟。

基于此,利用三维离散元方法,分别在静动力加载条件下,对松散砂土数值试样进行三轴不排水剪切试验模拟,研究松散砂土静动力液化的宏微观力学特性。数值模拟试验表明松砂试样在静动力荷载作用下均会发生液化现象,是砂土颗粒微量量演化的结果。数值试验结果为砂土液化的细观机理研究提供了强有力的数值试验依据,丰富了震陷、泥石流等液化失稳灾变的分析方法。

1 试样制备与模拟方案

离散元方法的力学原理是基于牛顿第二定律和颗粒间的接触法则,通过显示的方法来求解颗粒的位移,实现对颗粒材料的力学模拟^[14]。采用能够描述岩土工程材料的力学特性简化的 Hertz 非线性接触本构模型和能消除边界对数值模拟结果影响的周期边界。其材料的细观参数如表 1 所示。颗粒几何特性和颗粒级配对砂土的力学特性具有重要的影响。为了克服计算数值上的困难,试样采用球形颗粒,试样级配曲线的粒径范围为 0.1~0.4 mm 之间,可以代表被学者广泛采用的试验砂枫丹白露砂的级配曲线。首先在一个正方体放入小球,通过设置摩擦系数来得到不同密实度的试样。试样固结采用各向等向固结。图 1 是固结结束之后的松砂试样。数值试验中通过控制试样的体积不变来实现不排水条件。循环加载采用等应力幅的加载方式进行。单调荷载作用下和循环荷载作用下的数值模拟试验方案如表 2 和 3 所示。

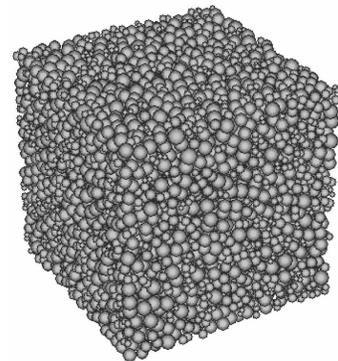


图 1 数值试样

Fig. 1 Numerical sample

表 1 颗粒流数值模拟参数

Tab. 1 Numerical simulation parameters of particle flow

颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/ GPa	泊松 比	颗粒摩擦 系数	阻尼 比	应变加载 速率/ s^{-1}	不平衡 力比
2.65×10^6	10	0.22	0.5	0.4	0.2	0.01

表 2 单调荷载作用下数值模拟试验方案

Tab. 2 Numerical simulation test scheme under monotonic loading

孔隙比 e	围压/kPa	ID
0.698	75	P75 - M
0.699	100	P100 - M
0.699	120	P120 - M
0.699	150	P150 - M

表 3 循环荷载作用下数值模拟试验方案

Tab. 3 Numerical simulation test scheme under cyclic loading

孔隙比	围压/kPa	幅值/kPa	应力比 CSR	ID
0.698	75	30	0.2	P75 - C4
0.699	100	30	0.15	P100 - C3
0.699	120	30	0.125	P120 - C25
0.699	150	30	0.1	P150 - C2

2 数值模拟结果及分析

2.1 宏观力学响应

在常体积条件下单调荷载和循环荷载作用过程中侧向有效围压的变化反映了试样内超孔隙水压力的变化情况。在三维状态分析中, 平均正应力 p 定义为 $p = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ 、剪应力 q 定义为 $q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2]}$ 和孔隙水压力定义为 $u = \sigma_{z0} - \sigma_{zz}$, 其中 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 x, y, z 方向的正应力。

不排水单调加载条件下松砂宏观响应如图 2 所示, 包括 75, 100, 120 kPa 和 150 kPa 等 4 种围压。从图 2 (a) 可以看出, 在加载初期, 偏应力迅速上升直至峰值, 此时试样变形极小 ($\varepsilon_a < 0.5\%$)。而后, 随着轴向应变不断累积, 偏应力逐渐减小至接近于 0, 试样完全丧失强度。值得注意的是, 砂土作为一种压硬性材料, 其强度将随围压的增大而增大; 数值试验结果也揭示了这一性质, P150 - M 试样峰值强度最大, 约为 72 kPa。另一方面, 峰值强度所对应的应变也与围压有关; 一般地, 围压越大, 峰值强度所对应的轴向应变越大, 也即应变软化发生得越迟。图 2 (b) 所示为试样有效应力路径, 由图可知, 在不排水加载过程中, 120 kPa 和 150 kPa 围

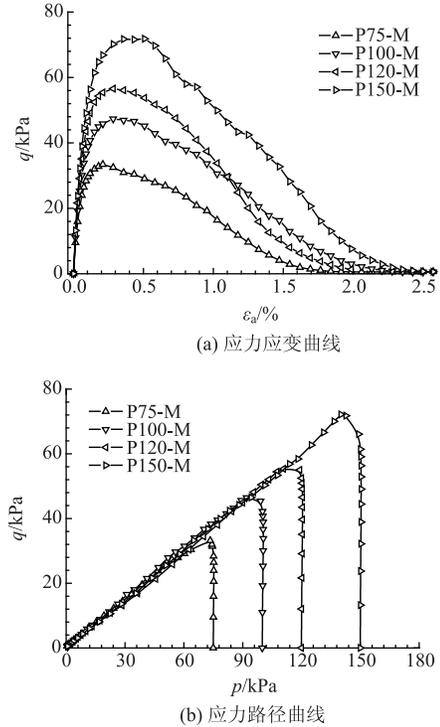


图 2 单调荷载作用下试样宏观响应

Fig. 2 Macro response of samples under monotonic loading

压下的两组试样, 由于孔隙水压力的不断累积, 有效平均正应力不断减小, 试样发生剪缩; 最终有效应力和偏应力均趋近于 0, 这表明土体不具有任何抗剪切的能力, 即试样发生初始静态液化^[15]。而对于 75, 100 kPa 围压下的试样, 有效平均正应力先增大后减少, 试样发生先剪胀后剪缩现象, 这表明松砂在低围压下会出现密砂的剪胀特性。室内试验表明, 静态液化在松砂中较为常见^[5], 本数值试验结果较好地模拟了室内试验中松砂的液化现象和松砂在低围压下的剪胀性。

两组典型不排水动力试验结果 (P100 - C2 和 P100 - C3) 如图 3、4 所示。循环荷载作用下孔隙水压力累积速度逐渐加快 (图 3 (a)、4 (a)), 最后急剧上升至初始围压; 同时有效应力逐渐减小至 0, 试样最终液化 (图 3 (b)、4 (b))。由图 3 (c)、4 (c) 可知, 试样初始变形极小, 轴向应变没有明显的循环效应和累积效应; 而当临近液化时, 应变急剧发展, 试样从受拉侧瞬间破坏, 完全丧失强度。进一步地, 图 3 所示 P100 - C3 试样在第 6 个加载周期发生液化, 而图 4 所示 P100 - C2 试样在第 77 个振次才发生液化, 这说明当循环荷载幅值保持不变时, 初始围压越大, 砂土抗液化能力越强。P100 - C4 和 P100 - C25 组试验也呈现出类似规律, 限于篇幅, 试验结果不在文中描述。Sze 等^[8]利用不同制样

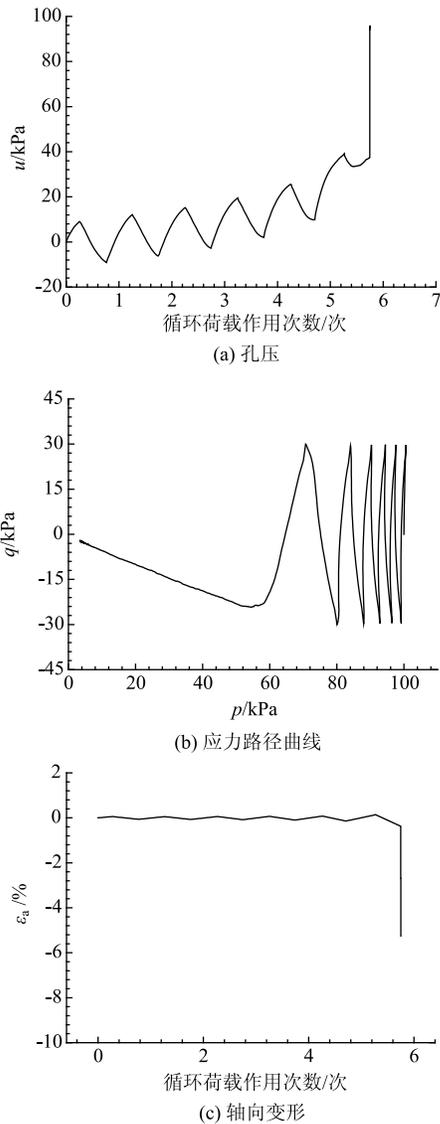


图3 循环荷载作用下试样 P100 - C3 宏观响应

Fig. 3 Macro response of sample P100 - C3 under cyclic loading

方法获得了不同密实度和围压下的砂土试样,开展了一系列循环荷载试验。试验结果表明试样初始围压越大,试样越不容易发生液化现象。本试验的数值结果与 Sze 等^[8]的室内试验结果一致,三维离散元数值模拟可以模拟砂土的动力液化特性。

图5给出了试样液化时的破坏振次 N_f 与循环应力比 CSR 之间的关系,其中 CSR 为动剪应力 ($q/2$) 与初始围压之比。可以看到,随着循环应力比的减小,试样破坏所需振次 N_f 将逐渐增大,这与曹久亭^[16]等人进行的常围压室内单元体试验结果相一致。需要指出的是,本次试验中砂土抗液化能力不仅与循环应力比有关,还需考虑试样围压的影响。根据临界状态土力学理论^[17],砂土的“松散”程度

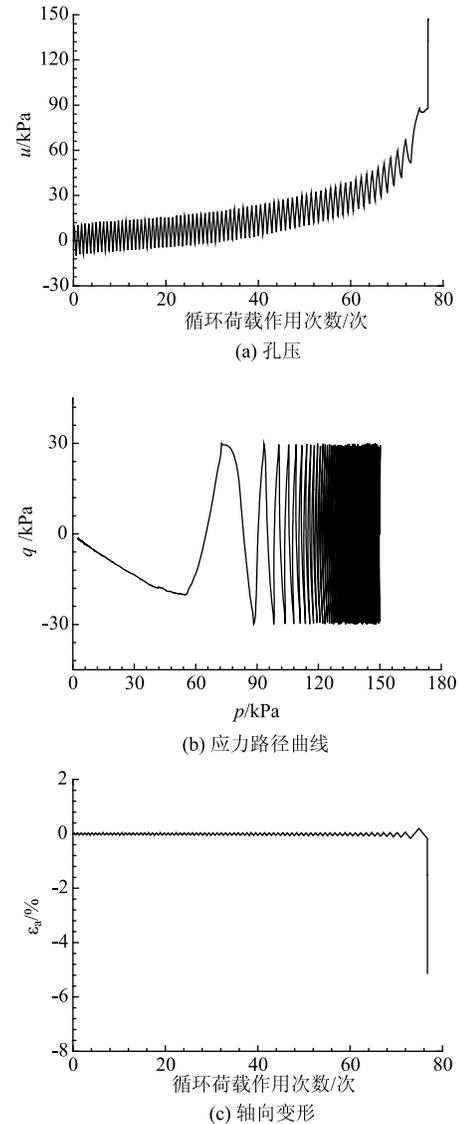


图4 循环荷载作用下试样 P100 - C2 宏观响应

Fig. 4 Macro response of sample P100 - C2 under cyclic loading

不只由试样相对密实度决定,还受围压水平的影响。一般而言,围压越大,试样相对“越松”,因此当循环应力比相同时其动强度越低,更易发生液化。

2.2 微观力学特性

砂土颗粒的微观力学特性通常用接触法向、接触力、颗粒方向、配位数等微观量进行描述。通常采用组构张量对接触法向进行分析,其可以反映材料的各向异性程度。组构张量 \mathbf{G} 可表示为:

$$\mathbf{G} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} w(\mathbf{m}^k) \mathbf{m}^k \otimes \mathbf{m}^k. \quad (1)$$

其偏量部分 \mathbf{F} 表示为:

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{G}}{\text{tr}(\mathbf{G})/3} - \mathbf{1}. \quad (2)$$

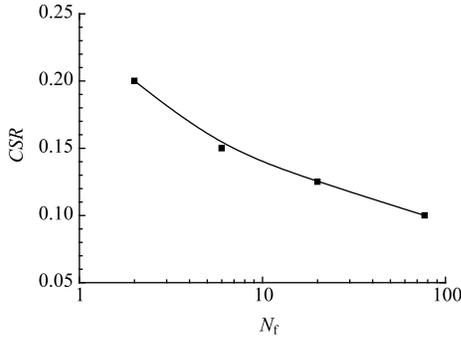


图 5 试样破坏振次和循环应力比关系

Fig. 5 Relationship between number of vibrations and cyclic stress ratio

其中 $w(m^k)$ 为权重因子。组构偏张量 F 通过方向 n_F 和模量 F 两部分描述, 组构张量的特性可以表述为:

$$F = Fn_F, F = \sqrt{F:F}, n_F \cdot n_F = 1, trn_F = 0. \quad (3)$$

而组构张量的方向 n_F 可用洛德角 θ_F 来描述, 两者间的关系为:

$$\cos 3\theta_F = \sqrt{6}trn_F^3. \quad (4)$$

其中 $0^\circ \leq \theta_F \leq 60^\circ$, 三轴压缩试验中 $\theta_F = 0^\circ$, 而三轴拉伸试验中 $\theta_F = 60^\circ$ 。

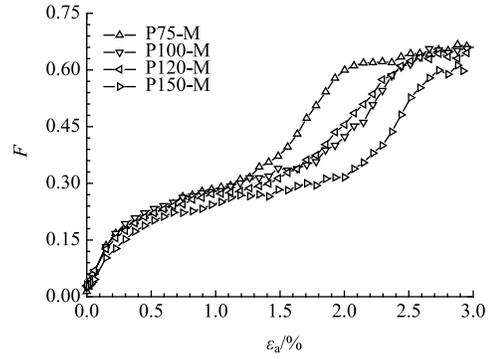
配位数是指单个颗粒所含有接触的数目。通常采用平均配位数 Z 来表征其接触形态, 即:

$$Z = \frac{2N_C}{N_B}, \quad (5)$$

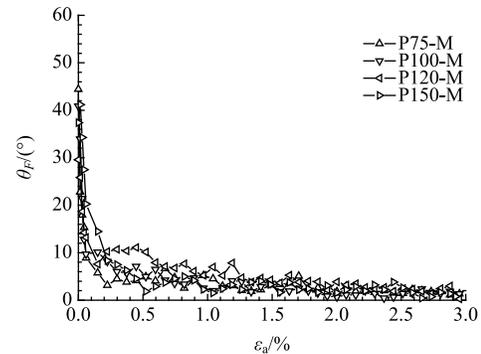
式中 N_C 和 N_B 为总的接触数和颗粒数。

不排水单调加载条件下松砂微观响应如图 6 所示。从图 6 (a) 可以看出, 所有的试样液化之后, 其组构的模量都达到稳定值, 约为 0.62, 与围压无关。Guo 和 Zhao^[12] 也得到相同的结果。由图 6 (b) 可知, 组构张量的方向 θ_F 在剪切开始阶段随轴应变迅速减小, 在 $\varepsilon_a > 1\%$ 后, 趋于稳定值 0° , 即组构张量方向与加载方向一致。从图 6 (c) 可以看出, 试样在剪切过程中, 配位数不断下降, 直至液化之后稳定在 3.2。试样的配位数与颗粒材料内部结构的稳定性直接相关。由摩擦球形颗粒构成的三维试样, 大于等于 4 的配位数是保证系统处于稳定状态的必要条件^[18]。当偏应力达到峰值之时, 配位数就减少到 4 以下, 试样处于不稳定状态。

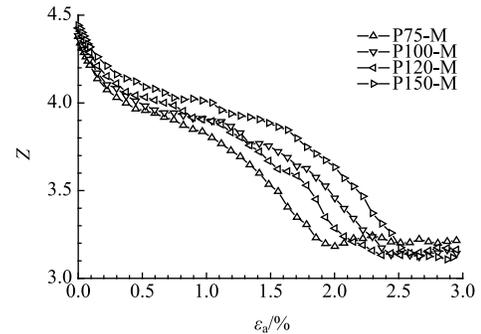
两组典型不排水动力试验微观响应 (P100 - C2 和 P100 - C3) 如图 7、图 8 所示。由图 7 (a)、图 8 (a) 可知, 试样的初始组构模量很小, 各向异性很弱, 而临近液化时, 组构的模量演化加快, 直至达到稳定值 0.59, 比静态液化时的稳定值小。由



(a) 组构张量模量随应变变化



(b) 组构张量方向随应变变化



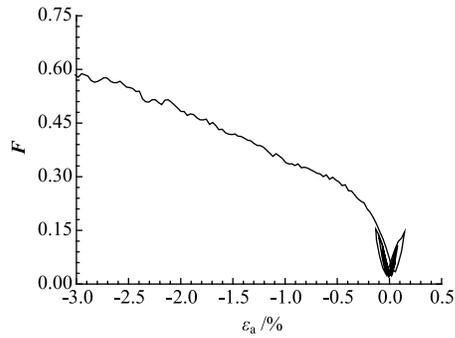
(c) 配位数随应变变化

图 6 单调荷载作用下试样微观响应

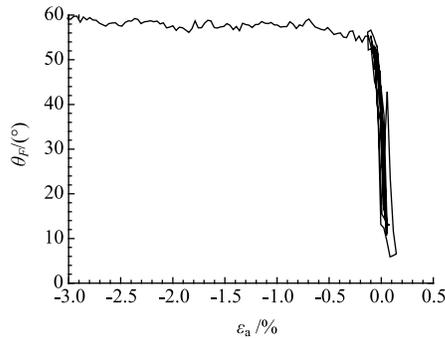
Fig. 6 Micro response of samples under monotonic loading
图 7 (b)、图 8 (b) 可知, 组构方向 θ_F 随着加载方向的变化而不断变化, 出现循环效应, 当临近液化时, 组构的方向 θ_F 趋近于 60° , 也表明试样在受拉侧破坏。周建等^[10] 研究表明组构的方向变化要滞后于应力方向的变化。循环荷载作用下配位数 (图 7 (c)、8 (c)), 最后急剧下降至 3.4, 比静态液化时的值大。

3 结论

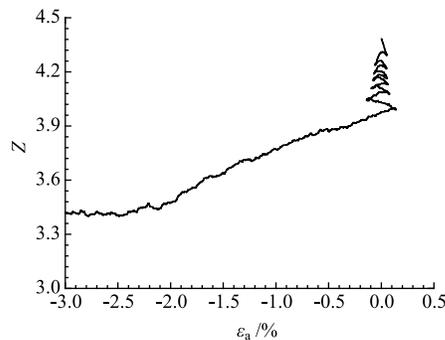
通过利用三维离散元软件, 对松散砂土数值试样进行三轴不排水剪切试验模拟, 在得到砂土静动力液化特性的同时, 对加载过程中试样内部组构和



(a) 组构张量模量随应变变化



(b) 组构张量方向随应变变化



(c) 配位数随应变变化

图 7 循环荷载作用下试样 P100 - C3 微观响应

Fig. 7 Micro response of sample P100 - C2 under cyclic loading

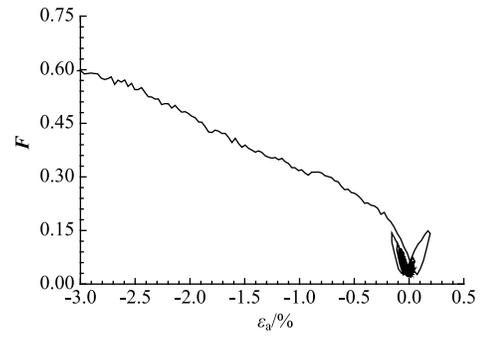
配位数的变化进行了分析,并初步探讨了砂土液化的微观力学机制。得到的主要结论有:

(1) 三维离散元数值模拟可以很好的模拟松砂的静动力液化现象,室内试验中松砂的“初始液化”和低围压下松砂也可能发生剪胀等现象均可以在数值模拟中实现。

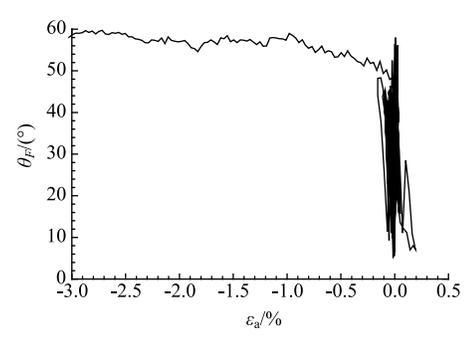
(2) 砂土颗粒的组构张量和配位数的演化规律在宏观上的体现就是砂土的宏观力学特性。

(3) 在动力加载条件下,砂土是在受拉侧发生破坏,破坏时其微观参量组构张量模量比静态液化时的稳定值小,而配位数比静态液化时的值大。

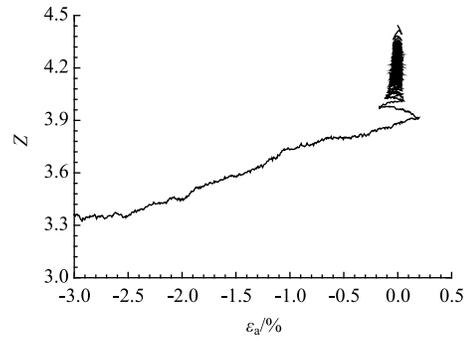
本研究仅对松砂的静动力液化现象进行了三维离散元模拟和分析,可以增加不同密实度的砂土进



(a) 组构张量模量随应变变化



(b) 组构张量方向随应变变化



(c) 配位数随应变变化

图 8 循环荷载作用下试样 P100 - C2 微观响应

Fig. 8 Micro response of sample P100 - C2 under cyclic loading

行数值模拟分析,进一步分析砂土动力循环液化的微观机理。

参考文献:

References:

- [1] 陈俊,张东,黄晓明. 离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
CHEN Jun, ZHANG Dong, HUANG Xiao-ming. Application of Particle Flow Code in Road Engineering [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [2] 袁晓铭,曹振中. 汶川大地震液化的特点及带来的新问题[J]. 世界地震工程,2011,27(1):1-8.

- YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Features and new aspects of liquefaction in the Wenchuan Earthquake [J]. *World Earthquake Engineering*, 2011, 27 (1): 1-8.
- [3] 张宏博, 黄茂松, 宋修广. 循环荷载作用下粉砂土路基累积变形试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2009, 26 (9): 6-12.
- ZHANG Hong-bo, HUANG Mao-song, SONG Xiu-guang. Experimental Study on Cumulative Deformation of Silty Sand Roadbed under Repeated Loading [J]. *Journal Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26 (9): 6-12.
- [4] 刘传正. 深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27 (1): 1-5.
- LIU Chuan-zheng. Genetic Mechanism of Landslide Tragedy Happened in Hong'ao Dumping Place in Shenzhen, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27 (1): 1-5.
- [5] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 南京砂强度特征与静态液化现象分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29 (6): 1461-1465, 1470.
- ZHU Jian-qun, KONG Ling-wei, ZHONG Fang-jie. Analysis of Strength Characteristics of Nanjing Sand and Mechanism of Static Liquefaction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29 (6): 1461-1465, 1470.
- [6] 董全杨, 蔡袁强, 王军, 等. 松散砂土不稳定性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33 (3): 623-630.
- DONG Quan-yang, CAI Yuan-qiang, WANG Jun, et al. Experimental Study of Instability of Loose Sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (3): 623-630.
- [7] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLIDIS T. Strain Accumulation in Sand due to Cyclic Loading: Drained Triaxial Tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25 (12): 967-979.
- [8] SZE H Y, YANG J. Failure Modes of Sand in Undrained Cyclic Loading: Impact of Sample Preparation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 140 (1): 152-169.
- [9] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies [J]. *Geotechnique*, 1979, 29 (1): 47-65.
- [10] 周健, 杨永香, 刘洋, 等. 循环荷载下砂土液化特性颗粒流数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2009, 30 (4): 1083-1088.
- ZHOU Jian, YANG Yong-xiang, LIU Yang, et al. Numerical Modeling of Sand Liquefaction Behavior under Cyclic Loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (4): 1083-1088.
- [11] YANG J, DAI B B. Is the Quasi-steady State a Real Behaviour? A Micromechanical Perspective [J]. *Géotechnique*, 2011, 61 (2): 175-183.
- [12] GUO N, ZHAO J. The Signature of Shear-induced Anisotropy in Granular Media [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 47: 1-15.
- [13] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 初始组构影响砂土液化势的细观数值模拟 [J]. *水利学报*, 2011, 42 (7): 766-774.
- SHI Dan-da, ZHOU Jian, LIU Wen-bai, et al. Discrete Element Modeling on the Effect of Initial Fabric on Liquefaction Potential of Sands [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42 (7): 766-774.
- [14] O'SULLIVAN C. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective [M]. London: Spon Press, 2011.
- [15] ISHIHARA K. Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes [J]. *Géotechnique*, 1993, 43 (3): 351-415.
- [16] 曹久亭, 孙阳光, 黄思杰. 初始孔隙比对饱和砂土动力特性影响研究 [J]. *三峡大学学报: 自然科学版*, 2014, 36 (2): 68-71.
- CAO Jiu-ting, SUN Yang-guang, HUANG Si-jie. Study of Impact of Initial Void Ratio on Dynamic Behavior of Saturated Sands [J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Science Edition*, 2014, 36 (2): 68-71.
- [17] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for Cohesionless Soils [J]. *Géotechnique*, 2015, 50 (4): 449-460.
- [18] EDWARDS S F. The Equations of Stress in a Granular Material [J]. *Physica-Statistical Mechanics & Its Applications*, 1998, 249 (1): 226-231.