

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220724004

基于粒间接触关系的饱和砂土液化特性研究*

周恩全¹, 姚缘¹, 王龙², 卜春尧³, 伊思航¹

(1. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 为了研究饱和砂土的液化机理, 通过等体积加载的方式建立了循环荷载下饱和砂土动力响应的颗粒流计算模型, 研究了饱和砂土在不同围压和加载幅值下的动力响应, 探讨了颗粒间力链的发展特性, 并从 Shannon 熵、Boltzmann 熵以及 Clausius 熵的基本关系入手, 建立基于粒间接触力链的饱和砂土颗粒熵计算方法, 分析了颗粒熵发展特性。结果表明: 饱和砂土初始总力链主要受围压的影响, 围压越大, 初始总力链越多; 循环荷载下饱和砂土颗粒间力链总数逐渐降低, 且强力链持续向中、弱力链转换; 循环荷载下饱和砂土颗粒熵表现出先升高后降低的二阶段特性, 围压和加载幅值对颗粒熵峰值无明显影响, 各工况的颗粒熵峰值均为 0.92; 定义颗粒熵峰值为相变颗粒熵, 相变颗粒熵时的饱和砂土表现出固液临界态的力学特征, 指示了饱和砂土由固态向往返液化状态转变的临界点。

关键词: 饱和砂土; 液化; 力链; 颗粒熵

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0450-09

Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Based on Inter-particle Contact

ZHOU Enquan¹, YAO Yuan¹, WANG Long², BU Chunyao³, YI Sihang¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the liquefaction mechanism of saturated sand, a particle flow calculation model was developed to investigate its dynamic response under cyclic loading using isochoric loading. The study examined the dynamic response of saturated sand under different confining pressures and loading amplitudes, exploring the development characteristics of inter-particle force chains. Using the basic relationships of Shannon entropy, Boltzmann entropy, and Clausius entropy, a method for calculating particle entropy in saturated sand was established based on inter-particle force chains. The development characteristics of particle entropy in saturated sand were analyzed. The results showed that the total number of initial force chains in saturated sand was primarily influenced by confining pressure and

* 收稿日期: 2022-07-24; 修回日期: 2022-09-17

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20210479)、南京市交通运输科技项目(2022)资助

作者简介: 周恩全(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事土动力学及环境岩土方面的研究工作。

E-mail: enquan1986@126.com

increased with higher pressure. Under cyclic loading, the total number of force chains between saturated sand particles gradually decreased, with strong force chains transitioning to medium and weak force chains. The particle entropy of saturated sand exhibited a two-phase characteristic, initially increasing and then decreasing. Confining pressure and loading amplitude had no significant effect on the particle entropy peak value, which was 0.92 under different cases. The peak value of particle entropy was defined as the phase-change particle entropy. The saturated sand with phase-change particle entropy showed mechanical characteristics at the solid-liquid critical state, indicating the transition of saturated sand from a solid state to a cyclic liquefaction state.

Keywords: saturated sand; liquefaction; force chain; particle entropy

0 引言

饱和土体的液化是地震破坏的一个重要原因^[1]。一直以来,普遍的研究方法是基于连续介质力学理论,从宏观角度研究饱和砂土的液化特性。然而土体作为典型的离散材料,直接研究宏观力学特性的做法忽视了土颗粒间的相互作用,不利于探究土体液化的根本机制,在求解土体液化过程中所表现出的非连续、非线性及大变形问题时也难以得到精确解答。

因此,越来越多学者利用离散元(Discrete Element Method, DEM)技术,从细观层面来研究饱和土体的液化特性。刘洋^[2]、X. Huang^[3]、谢亦红^[4]和徐华德^[5]等学者利用DEM方法探讨了力链、组构张量、配位数等细观结构参数对饱和砂土液化性能的影响。T. Morimoto等^[6]和M. Zhang等^[7]分析了颗粒形状、初始各向异性等细观结构参数对饱和砂土液化性能的影响。张伏光等^[8]分析了饱和砂土的液化势与其粒间胶结、接触形态等细观参数的相关性。然而,目前的研究仍然局限于直接利用接触力等细观参数来探讨饱和砂土的细观力学特性。实际上从热力学角度来看,饱和土体液化过程中表现出的宏观力学特征由以下两种尺度的物理特征所决定:第一种尺度为微观层面的分子运动,其表现为土颗粒由于热胀冷缩、挤压等导致的自身变形特征;第二种尺度为细观层面的颗粒之间运动,其表现为土颗粒由于转动、压实、破碎等导致的颗粒孔隙的变化。对于第一种尺度,需要由“熵”入手描述微观层面物理变化,鉴于现阶段常温条件下的土力学研究不考虑温度场的影响,又考虑到现阶段的土

力学理论研究并未涉及颗粒本身的变形特点,因此可以忽略此类熵的变化。因此合理地第二种尺度,即细观层面颗粒间的运动描述显得尤为重要。

本文首先依托PFC(Particle Flow Code)软件建立循环荷载下饱和砂土液化计算模型,探讨饱和砂土宏观液化规律及颗粒间力链发展特性,然后基于热力学理论提出描述砂土细观接触状态的颗粒熵理论框架,建立基于粒间接触力链的颗粒熵计算方法,最后基于统计力学方法得到液化过程中的颗粒熵变化规律,以此揭示饱和砂土的液化机理。

1 PFC计算模型

1.1 颗粒生成及模型建立

以室内动三轴试验为原型^[9],利用PFC^{3D}程序建立循环加载下饱和砂土的液化计算模型,基本过程为:由程序语言定义尺寸不一的圆形球体为砂土颗粒,定义上下两个平面墙体和一个圆筒状侧面墙体;通过限制三部分墙体严格静止,先将颗粒绝对空间坐标系的三轴位置坐标同时缩小,再释放颗粒约束,使颗粒在固定空间内自由碰撞,完成初始试样的装载和建立。原型中的南京细砂包含较多细小颗粒,故基于颗粒半径扩大法,以单个较大半径颗粒代替一群半径较小的颗粒,使其在等效体积下孔隙保持不变,在一定程度上使试样的力学特性变得平滑且提高计算效率^[10],图1为原型及本文模型的颗粒级配曲线。生成的圆柱形试样高为80 mm,直径为39.1 mm。

根据室内试验^[9]及学者的研究^[5-6],对试验参数进行了标定^[10],综合确定本次模拟制样中的细观参数,见表1。

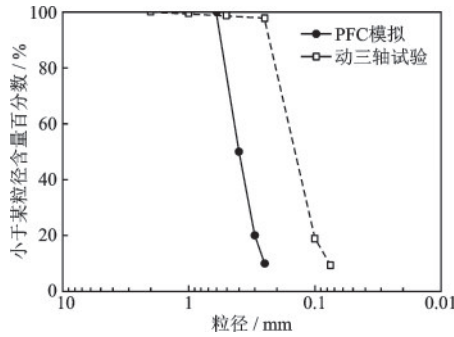


图1 PFC模拟砂样的颗粒级配

Fig.1 Particle grading curves of sand sample in PFC simulation

表1 模拟试样的微观参数

Table 1 Microscopic parameters of simulated samples

参数	颗粒刚度/ ($N \cdot m^{-1}$)	刚度比	摩擦 系数	孔隙率	土粒 比重
取值	1×10^7	1	0.25	0.2	2.70

1.2 加载过程

通过控制三部分墙体对试样施加围压及动载,以控制试样总体积不变方式模拟饱和砂土在不排水条件下的循环动力特征,即通过径向加载与轴向加载所产生的体积增量(或减量)相等来实现。具体地,以轴向循环加载为主要条件,侧向墙体的径向运动为从属地位,通过同一时间依附轴向位移产生协调的径向位移。轴向循环加载直接对上下墙体施加位移得以实现。径向运动的实现需将径向曲面墙体拆解为数个宽度极短的碎片,通过径向碎片的平移运动实现径向墙体的整体运动。

以孔压比的发展判定液化过程,将孔压比发展为1的时刻定义为初始液化状态,孔压 u 由有效应力原理获取,即:

$$u = \sigma'_c - \sigma_{\text{rstress}} \quad (1)$$

式中, σ'_c 为围压,kPa; σ_{rstress} 为径向墙体所受应力,kPa。

本文模拟工况见表2,围压分别为100、150、200 kPa,应变幅值分别为0.8%、1.1%、1.4%,通过1 Hz等应变正弦波实现应变加载。

表2 试验工况

Table 2 Test cases

编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
围压/kPa	100	100	100	150	150	150	200	200	200
应变/%	0.8	1.1	1.4	0.8	1.1	1.4	0.8	1.1	1.4

2 饱和砂土的液化及力链发展特性

图2和图3分别给出了工况P2、P4、P6、P8模拟得到的应力-应变滞回曲线及孔压比时程曲线,数值模拟的结果表现出与动三轴试验一致的规律性:

(1)随着循环加载的进行,试样剪应力-剪应变滞回曲线的斜率逐渐减小,孔压比振动上升,有效应力逐渐降低,表现出逐渐软化的特征,直至达到初始液化,有效应力降为零。

(2)围压越大或加载幅值越低,试样的抗液化强度越高,达到初始液化所需的振动次数越多。

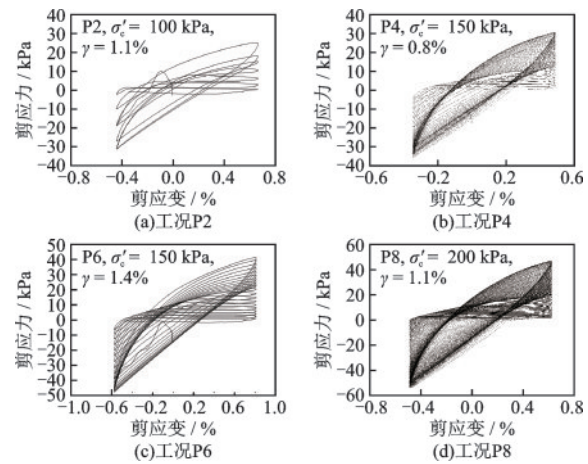


图2 工况P2、P4、P6、P8的应力-应变滞回曲线

Fig.2 Stress-strain hysteresis curves for cases P2, P4, P6 and P8

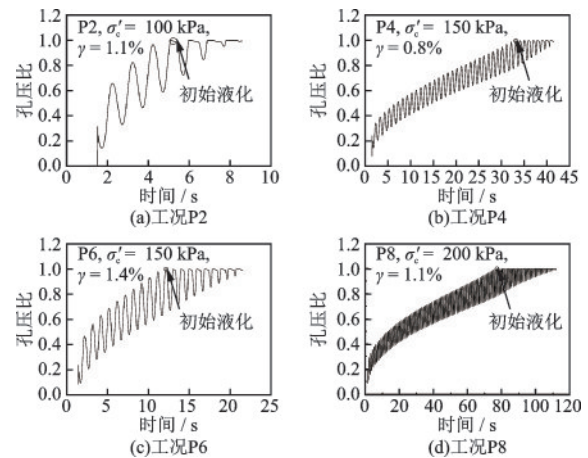


图3 工况P2、P4、P6、P8的孔压比时程曲线

Fig.3 Pore pressure ratio-time history curves for cases P2, P4, P6 and P8

对于砂样而言,单个颗粒以力的形式分布于试样中,一组颗粒所形成的力以力链形式分布整个试

样系统,由力链所形成的受力骨架提供整个试样的承载能力。当力链越强时分配于该部分的荷载越大,反之则越少或不受力,当力链强度为零时颗粒之间不存在相互作用,即颗粒间无接触,理论上不会提供承载能力,不会形成能量耗散,因此不参与统计。饱和砂土液化过程中力链特征分析主要从力链总数和力链强弱两个角度展开。首先,用程序语言直接读取加载过程中试样的接触力链数量及各接触力链的强度;然后,以10为底用指数幂逐级放大的形式划分力链的划分空间,运用选择语句将颗粒间力链划分为1 000 N以上(强)、100~1 000 N(中)、10~100 N(弱)、0~10 N(微)等4个力链区间;最后,统计出试样的总力链数量及4个力链区间的力链数量,该过程从初次加载直至初始液化。图4为饱和砂土液化过程中总力链数量情况,可得如下结论:

(1)加载前的初始力链总数与加载应变幅值无关,与围压呈现正相关关系,围压越高,初始力链总数越多,也反映出试样的抗液化强度越高。

(2)随着加载的发展,试样的颗粒间力链总数呈现出先增加后急剧减少的趋势。这主要是因为加载初期,颗粒会出现一定程度的重新排列导致颗粒接触更加充分和力链总数的增大;随着加载的继续,颗粒间的有效应力逐渐减少,意味着颗粒骨架的承载能力降低,在细观层面上表现为颗粒间接触程度的逐渐减小,当颗粒间脱离接触便导致其间不再存有力学关系,即表现为力链数目的减少,宏观上表现出饱和砂土有效应力和承载力逐渐降低,逐渐趋向于初始液化。

(3)液化过程中力链数量的发展受围压和应变幅值的影响,围压越小或者应变幅值越大时力链数目减少的越迅速,这与试样的抗液化强度特性是一致的。

实际上,饱和砂土液化过程中不同强度等级的力链发展特征是有一定差异的,图5给出了工况P2、P4、P6、P8中4个力链区间内力链数量的变化规律,可以发现不同工况的力链数量发展特征呈现出一致性:

(1)1 000 N以上的强力链数量迅速减小,直至初始液化时力链数量接近于0。

(2)100~1 000 N中力链和10~100 N弱力链数量整体呈现出逐渐增大的发展趋势,直到初始液化

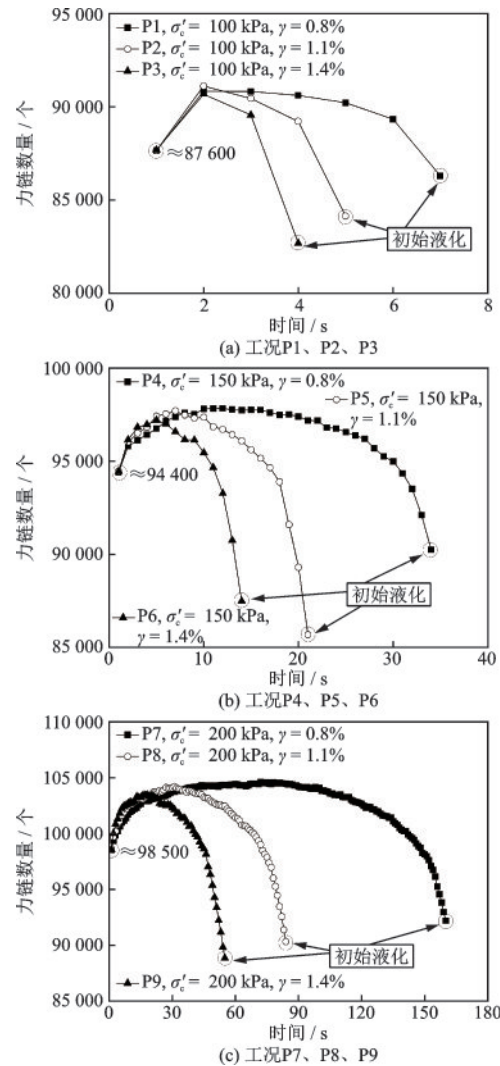


图4 工况P1~P9力链总数的发展特征

Fig.4 Development of total number of force chains for cases P1~P9

发生时该区间的力链数量占力链接触总数的主体。

(3)0~10 N的微力链数目几乎未发生变化,从加载开始直至初始液化始终处于较低水平,力链数量接近于0。

实际上,有效应力在颗粒之间的传递表现为各级力链之间的相互演变,反映了饱和砂土在循环荷载作用下的力学响应机制:加载前期饱和砂土仍处在高有效应力状态,颗粒之间的接触以1 000 N以上的力链为主;随着加载进行,1 000 N以上力链数量逐渐减少,转化为较低的100~1 000 N和10~100 N的力链,表明颗粒间接触强度略微减少,直接反映了土体中有效应力的部分丧失,但整体仍具有一定承载性能;当临近液化时,有效应力迅速减少,表现为1 000 N以上的力链数量迅速降低以及

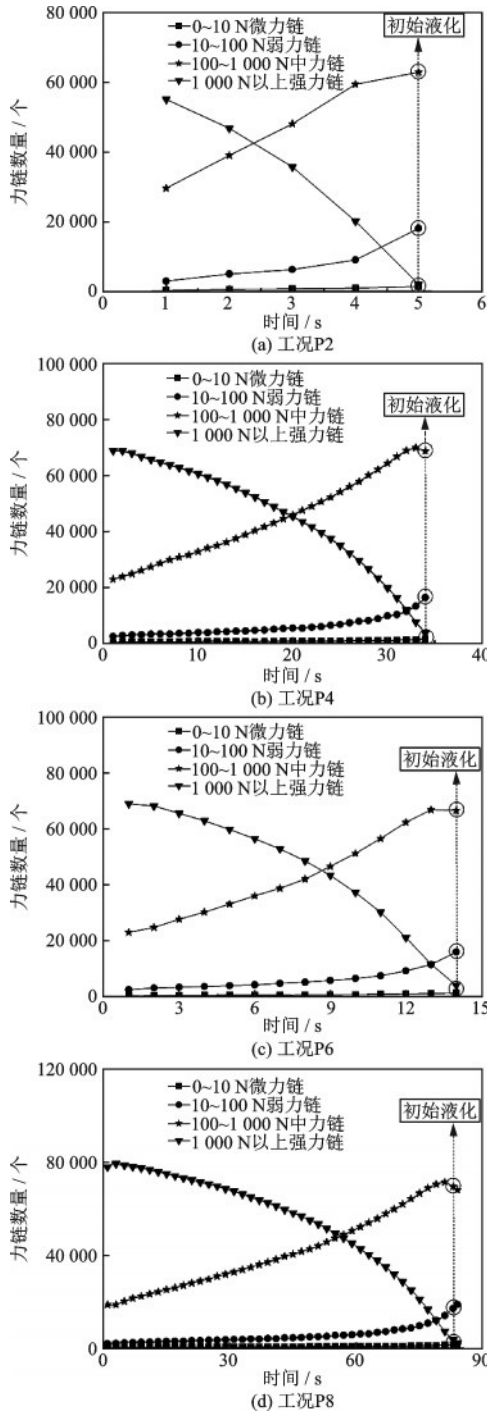


图5 工况P2、P4、P6、P8中各级力链发展规律

Fig.5 Development patterns of force chains for cases P2, P4, P6 and P8

100~1 000 N的力链数量的略微降低,而10~100 N的力链增加量远不及前两者降低数量之和,反映了土体结构已经出现结构性的有效应力损失,部分土骨架已不能以力链的形式承担荷载;当初始液化发生时,1 000 N以上力链彻底消失,反映了土体承载力的彻底失效,此时对应于有效应力为0的情况。

3 颗粒熵与液化机理分析

3.1 Shannon熵、Boltzmann熵及Clausius熵的对等关系

信息论创始人Shannon利用概率模型对信息系统内部的混乱程度进行描述,以 Ω 表达系统内部可能发生的事件数量,以信息熵^[11]表达系统的混乱程度,则自由系统的Shannon熵表达式为:

$$\eta = -\sum p_i \ln p_i \quad (2)$$

式中, p_i 为系统内某一具体事件发生的概率。在自由系统中所有事件发生概率均相等,式(2)进一步转换为:

$$\eta = -\ln p = \ln \frac{1}{p} = \ln \Omega \quad (3)$$

Boltzmann在研究热力学微观粒子时,以微观尺度的熵表征宏观的热力学物理现象,建立了Boltzmann公式^[12]:

$$\eta = k \ln \Omega \quad (4)$$

式中, k 为Boltzmann常量。

比较式(3)和式(4)可见,若不计Boltzmann常量 k ,则Shannon熵与Boltzmann熵表达式完全一致,且均为表征系统内部参数分布状态的物理量。

在热力学框架下,决定粒子性质的微观状态的度量 Ω 由位置状态 Ω_1 与速度状态 Ω_2 共同决定。概率分布下微观粒子的位置信息可以表示为:

$$\ln \Omega_1 = N \ln V + \ln \alpha \quad (5)$$

式中, Ω_1 为所有可能存在的位置状态数量; V 为系统的空间体积; N 为微观粒子总数; α 为比例常数。

对微观粒子系统的速度状态分析由两个步骤完成,先分析位于特定速度区间内的分子数目,再考虑所选取分子的速度分布。

考虑到单个微观粒子质量为 m 且绝对温度为 θ 的理想状态条件,从Maxwell-Boltzmann速度分布律出发,即:

$$n = \Delta \lambda N \left(\frac{m}{2\pi k \theta} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m x^2}{2k \theta}} \quad (6)$$

式中, n 为局域速度空间内的颗粒数目; $\Delta \lambda = 4\pi x^2 \Delta x$ 为单位相格空间; x 为随机速度变量的取值。

不同于位置空间的有限划分,速度空间的分布无限,因此,决定微观粒子状态的速度分布函数为:

$$\Omega_2 = \frac{N!}{n_1!n_2!\cdots n_i!} \quad (7)$$

式中, Ω_2 为所有可能存在的速度状态数量。进一步根据斯特林公式, 结合公式(6)和(7)可得任意速度划分 x_i 状态下基于概率分布的微观粒子运动信息表达式:

$$\ln \Omega_2 = \frac{3}{2} N \ln \theta - N \ln \Delta \lambda - \frac{3}{2} N \ln \left(\frac{m}{2k\pi} \right) + \frac{1}{k\theta} \sum n_i \frac{mx_i^2}{2} \quad (8)$$

进一步根据独立概率乘法原理, 以乘积的形式将相互独立的粒子微观状态 Ω 分解为位置状态信息 Ω_1 与速度状态信息 Ω_2 , 并代入 Boltzmann 熵的表达式, 即:

$$\eta = kN \ln V + \frac{3}{2} kN \ln \theta + \left[\frac{1}{\theta} \sum n_i \frac{mx_i^2}{2} + k \ln \alpha - Nk \ln (\Delta \lambda) - \frac{3}{2} Nk \ln \left(\frac{m}{2k\pi} \right) \right] \quad (9)$$

至此, 绝大多数物质的分子热运动可以从微观角度的 Boltzmann 熵与宏观物理特征建立联系。

进一步地, 以分子热运动中最具代表性的气体分子为研究对象, 此时从理想气体方程及其推论入手, 即:

$$\left. \begin{aligned} PV &= R\theta = Nk\theta \\ \frac{1}{2} mx_i^2 &= \frac{3}{2} k\theta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, P 为压强; R 为普适气体常量。此时式(9)进一步改写为微分表达式:

$$d\eta = R \frac{1}{V} dV + \frac{3}{2} R \frac{1}{\theta} d\theta \quad (11)$$

由于到此时所研究的对象是理想气体, 因此在等体积变形的过程, 可直接代入气体物质的等体积比热容为:

$$C_v = \frac{3}{2} R \quad (12)$$

因此式(11)变形可得:

$$\theta d\eta = PdV + C_v d\theta \quad (13)$$

将式(13)代入热力学第一定律并化简得 Clausius 熵表达式:

$$d\eta = \frac{\delta Q}{\theta} \quad (14)$$

由此发现, 从分子热运动中最具特征性的气体运动角度可以得出 Boltzmann 熵与 Clausius 熵的严格相等。

3.2 基于粒间接触力链的颗粒熵实现路径

通过上述分析可以发现, Clausius 熵, Boltzmann 熵以及 Shannon 熵均是对系统混乱特征的度量且具有一定的对等关系, Clausius 熵适用于表述宏观能量的不可逆过程, Boltzmann 熵揭示了微观领域的混乱程度与宏观领域的不可逆过程是相互对应的, Shannon 熵在数学含义上与 Boltzmann 熵保持一致, 都是对混乱程度的度量, 其目的是对抽象领域进行描述。

无论是连续材料或是离散材料, 当加卸载发生时, 能量的耗散是引发系统内部熵值变化的内因。对于微观粒子而言, 能量耗散表现为系统内部粒子团的相互碰撞, 对于土体颗粒而言, 能量耗散表现为土颗粒间的相互作用。

考虑到细观层面的颗粒运动与微观层面的粒子运动差异性与相似性共存, 因此对于土颗粒间相互作用的探究将从以下方面入手:

(1) 根据现有的 Boltzmann 熵与 Clausius 熵在微观与宏观尺度下具有等效对应性, 可以合理地假定在介于微观量与宏观量之间的细观尺度下也具有等效性, 能够以细观尺度下的统计特征描述宏观物理特性, 基于此提出细观层面的颗粒熵表达系统的混乱程度。

(2) 根据 PFC 运算的力-位移法则及运动法则, 颗粒间力与位置状态具有唯一对应关系, 力与速度状态具有唯一对应关系, 因此在考虑系统自由空间的位置状态 Ω_1 与速度状态 Ω_2 时可以仅选取力状态即力链作为度量颗粒熵的特征值。

(3) 由于系统内部力状态的所有可能性未知, 因此从 Shannon 熵入手, 划分力链状态的样本空间, 运用实际测量力链值进行统计力学度量, 进而求得颗粒熵。

3.3 饱和砂土的颗粒熵发展特性

从 Shannon 熵、Boltzmann 熵与 Clausius 熵的对等关系入手, 基于 1 000 N 以上, 100~1 000 N, 10~100 N, 0~10 N 等 4 个力链样本空间, 由统计力学方法, 可得到不同试样系统的颗粒熵计算公式为:

$$\eta = - \sum p_{fc,i} \ln p_{fc,i} \quad (15)$$

式中, $p_{fc,i}$ 为某一力链划分区间内力链数目占总力链数的比例。

图 6 为工况 P1~P9 的颗粒熵及孔压比的发展曲线, 可以得到如下结果:

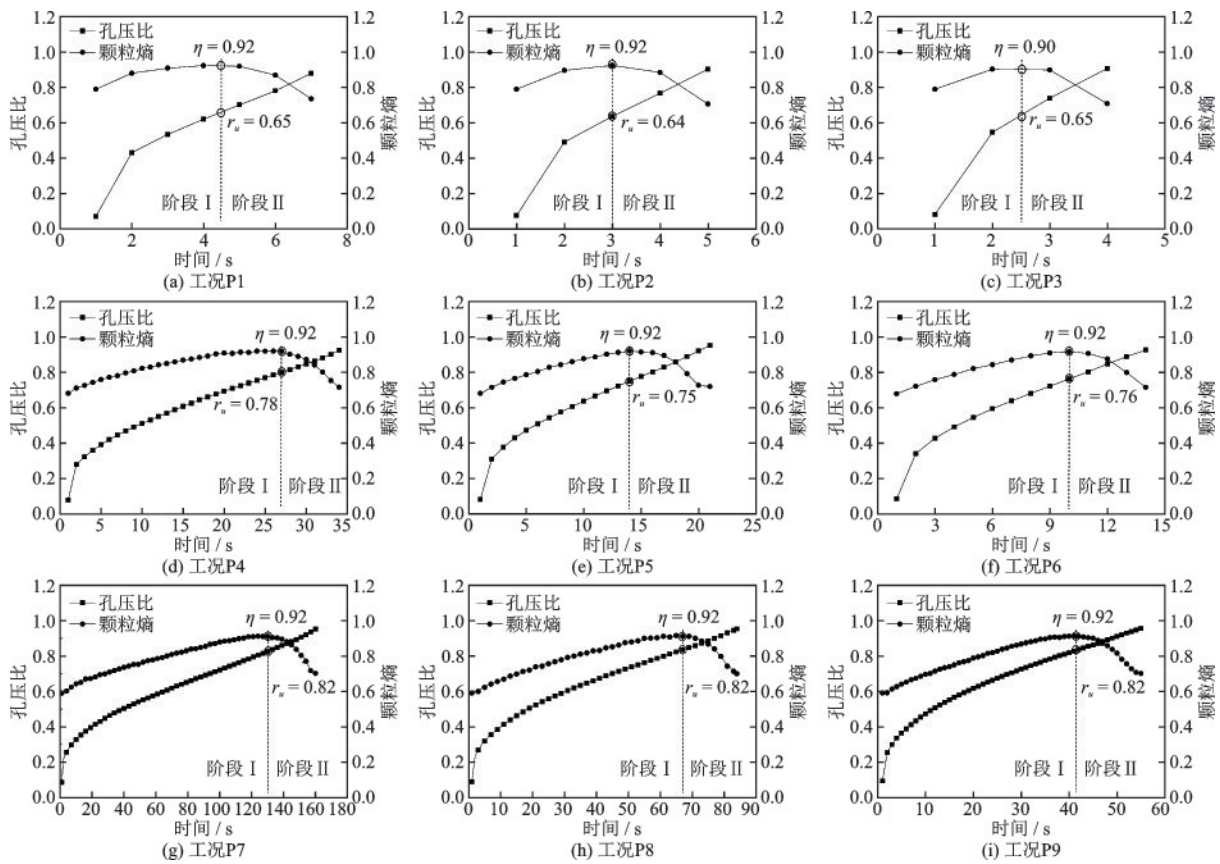


图6 工况P1~P9孔压比和颗粒熵时程曲线

Fig.6 Time history curves of pore pressure ratio and particle entropy for cases P1~P9

(1)循环荷载作用下饱和砂土的颗粒熵发展可以明确划分为缓慢增长的阶段I和迅速降低的阶段II。

(2)不同工况下颗粒熵峰值趋于一致,均为0.92左右;不同工况下颗粒熵峰值所对应的临界孔压比有一定的差异,围压相同时,不同加载幅值下临界孔压比基本一致。围压100、150、200 kPa时颗粒熵峰值所对应的临界孔压比分别为0.64~0.65、0.75~0.78、0.82。

3.4 基于颗粒熵的饱和砂土液化机理

颗粒熵在液化过程中所呈现出的先增大后降低的发展特征,主要是由颗粒之间不同量级的力链互相转变造成的,而正是在液化过程不同阶段颗粒之间相互碰撞摩擦等运动形式的激烈程度表现不同,从而导致力链在不同量级中的相互变化。

颗粒熵作为表达颗粒间相对运动激烈程度的物理量,其值越大表明饱和砂土内颗粒之间的运动碰撞越激烈,系统越紊乱。因此,综合考虑图6中颗粒熵和孔压比的发展规律,可以将饱和砂土的液化

过程划分为三节点二阶段,如图7所示。同时依据图5所示各级力链的发展规律,将三节点二阶段所对应的力链特征表示在图7中,那么饱和砂土的液化机理可以做如下解释:

阶段I,从节点A(加载开始)到节点B(颗粒熵峰值):颗粒熵缓慢增长直到峰值,孔压比逐渐升高。该阶段初期颗粒间的接触以1 000 N以上的强

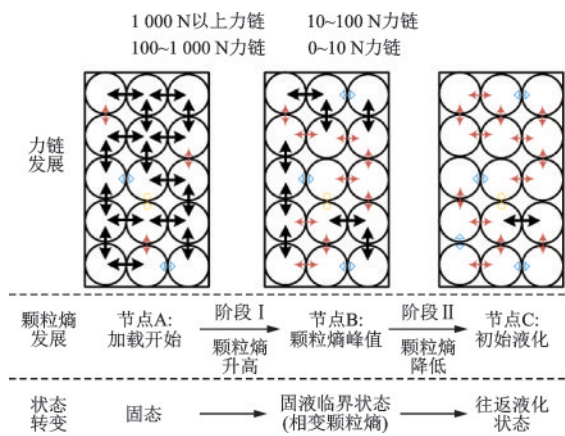


图7 基于颗粒熵的饱和砂土液化机制

Fig.7 Liquefaction mechanism of saturated sand based on particle entropy

力链为主,中、弱力链数量相对较少,此时颗粒熵相对较低,表明颗粒之间的运动相对稳定,系统较为有序。随着加载,1 000 N以上的强力链数量逐渐减小,逐渐转变为中、弱力链,因此中、弱力链的数量逐渐增大,直到颗粒熵峰值,表明颗粒之间的运动变得激烈无序,系统变得紊乱。

阶段Ⅱ,从节点B(颗粒熵峰值)到节点C(初始液化):颗粒熵从峰值逐渐降低,孔压比继续升高直至接近1,有效应力降至0。该阶段,1 000 N以上的强力链持续减小直至接近0,此时系统中颗粒的接触以中、弱力链为主,甚至部分颗粒间的接触消失,而颗粒熵数值逐渐处于较低数值,表明系统再次变得稳定有序,颗粒之间的运动更加稳定。

换言之,颗粒熵可以有效判定试样系统的稳定性:

在节点A,即加载开始,颗粒熵较低,试样系统处于一个稳定的状态,此时试样表现出完全固态的力学特征。

在节点C,即初始液化,颗粒熵同样较低,试样系统同样处于一个稳定的状态,但此时的稳定状态指的是,试样表现出往返液化状态的力学特征。

在节点B,即颗粒熵峰值时,试样系统处于一个最紊乱的状态,此时的试样表现出固液临界态的力学特征,实际上这里的颗粒熵峰值即为相变颗粒熵,指示了饱和砂土由固态向往返液化状态的转变。不难发现,各工况中的相变颗粒熵均为0.92,围压和加载应变幅值对相变颗粒熵无明显影响。

当然,我们进一步可以指明:阶段Ⅰ表明试样从固态逐渐向固液临界态转变,但试样总体上仍以固态特性为主;阶段Ⅱ表明试样从固液临界态向往返液化状态转变,但试样总体上表现出液态特性为主。

针对研究结果所表现出不同工况下相变颗粒熵一致的现象,可做如下解释:在细观上颗粒间的强接触力链逐渐丧失或向中/弱力链转变,当强力链演变到一定程度,强力链占比很小时,颗粒间能够形成的联结变得有限,具体表征为颗粒熵达到峰值0.92,此时土体变成一种大部分颗粒无接触或中/弱接触的状态,宏观上表现为土体由固态向往返液化状态转变。即,饱和砂土的往返液化状态是由颗粒间的接触力链或颗粒熵所决定,这一点在每次特定试验条件下完全由强力链丧失程度及其向中/弱力链的转换程度所决定,尽管围压和加载应变幅值

会影响力链及颗粒熵的发展,但对相变颗粒熵无影响。

4 结 论

利用PFC软件,基于热力学原理研究了循环荷载下饱和砂土的颗粒熵发展特性,得到以下结论:

(1)随着饱和砂土的有效应力逐渐降低,颗粒间力链总数逐渐降低;根据力链强弱划分为强、中、弱、微4个力链区间,在液化过程中强力链逐渐向中、弱力链转变直至彻底丧失。

(2)从Shannon熵、Boltzmann熵以及Clausius熵的基本关系入手,建立了基于细观粒间接触力链的颗粒熵实现路径,用以表征砂土系统宏观物理状态。

(3)循环荷载下饱和砂土的颗粒熵具有明显的二阶段特性,基于颗粒熵的发展轨迹揭示了饱和砂土液化机制。

(4)根据颗粒熵的物理意义,将颗粒熵峰值时刻定义为饱和砂土固液状态转变的相变颗粒熵,各工况的相变颗粒熵均为0.92,围压和循环应变对相变颗粒熵无影响。

参 考 文 献:

- [1] 陈国兴,吴琪,孙苏豫,等.土壤地震液化评价方法研究进展[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):677-733.
Chen G X, Wu Q, Sun S Y, et al. Advances in soil liquefaction triggering procedures during earthquakes: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 677-733. (in Chinese)
- [2] 刘洋,周健,吴顺川.循环荷载下砂土变形的细观数值模拟Ⅰ:松砂试验结果[J].岩土工程学报,2007,29(7):1035-1041.
Liu Y, Zhou J, Wu S C. Micro-numerical simulation of cyclic biaxial test I: results of loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1035-1041. (in Chinese)
- [3] Huang X, Hanley K, Zhang Z X, et al. Structural degradation of sands during cyclic liquefaction: Insight from DEM simulations[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 114: 1-10.
- [4] 谢亦红,尹祖超,李亮,等.砂土静动力液化特性的

- 数值模拟[J]. 公路交通科技, 2020, 37(12): 33-39.
- Xie Y H, Yin Z C, Li L, et al. Numerical simulation of static and dynamic liquefaction of sand [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(12): 33-39. (in Chinese)
- [5] 徐华德. 典型海运散矿的关键物性参数对液化影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- Xu H D. Research on the influence of key physical parameters of typical marine bulk ore on liquefaction [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [6] Morimoto T, Otsubo M, Koseki J. Microscopic investigation into liquefaction resistance of pre-sheared sand: Effects of particle shape and initial anisotropy [J]. Soils and Foundations, 2021, 61:335-351.
- [7] Zhang M, Yang Y M, Zhang H W, et al. Macro- and micro-mechanical investigations on liquefaction behaviour of granular material under bi-directional simple shear [J]. Granular Matter, 2021, 23(4): 1-18.
- [8] 张伏光, 聂卓琛, 陈孟飞, 等. 不排水循环荷载条件下胶结砂土宏观力学性质离散元模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 3(3): 456-464.
- Zhang F G, Nie Z C, Chen M F, et al. DEM analysis of macro- and micro-mechanical behaviors of cemented sand subjected to undrained cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 3(3): 456-464. (in Chinese)
- [9] 王志华, 周恩全, 陈国兴, 等. 循环荷载下饱和砂土固-液相变特征 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1604-1610.
- Wang Z H, Zhou E Q, Chen G X, et al. Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sand under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1604-1610. (in Chinese)
- [10] 卜春尧. 循环荷载下饱和砂土流动性的细观调查[D]. 南京: 南京工业大学, 2016.
- Bu C Y. Microscopic investigation on flowability of saturated sands under cyclic loadings [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2016. (in Chinese)
- [11] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [12] Kerson H. Introduction to Statistical Physics [M]. [S. l.]: CRC Press, 2011.

(本文编辑: 赵霞)



(上接第 441 页)

- [17] Mohamed M H A, Horoshenkov K V. Airborne acoustic method to determine the volumetric water content of unsaturated sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1872-1882.
- [18] Horoshenkov K V, Mohamed M H A. Sound propagation in presence of a partly-saturated porous soil [C] // Euronoise 2006. Tampere, Finland: [s.n.], 2006: 1-6.
- [19] Horoshenkov K V, Mohamed M H A. Experimental investigation of the effects of water saturation on the acoustic admittance of sandy soils [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(4): 1910-1921.
- [20] 严明康. 含水率对砂土似黏聚力的影响及工程应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- Yan M K. Study on the influence of water content on sand cohesion and its engineering application [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [21] 白琴琴, 李新生, 严明康, 等. 含水率对非饱和砂土似黏聚力影响试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(7): 195-199.
- Bai Q Q, Li X S, Yan M K, et al. Experimental study on the effect of water content on the quasi cohesion of unsaturated sand [J]. Science, Technology and Engineering, 2019, 19(7): 195-199. (in Chinese)