

DOI: 10.11779/CJGE2023S10026

基于临界状态理论的海相含细粒土砂液化特性试验研究

蔡世兴, 唐译*, 关云飞

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 采用饱和海相含细粒土砂开展固结不排水三轴剪切试验和轴向-扭转耦合循环剪切试验, 基于临界状态理论, 研究砂土状态参数与其液化特性的关系。研究结果表明: 对于海相含细粒土砂, 其临界孔隙比和归一化有效平均正应力具有很高的线性相关性; 轴向-扭转耦合不排水循环剪切试验结果显示, 循环应力比 CRR 相同时, 状态参数 ψ 越大, 液化振次 N_L 越小, 根据研究结果提出砂土液化振次 N_L 的计算公式, N_L 与 ψ 很好的满足指数函数关系。

关键词: 含细粒土砂; 轴向-扭转耦合循环剪切试验; 临界状态; 液化; 循环应力比

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0063-04

作者简介: 蔡世兴(1996—), 男, 陕西商洛人, 主要从事土动力学等方面的研究。E-mail:caisx2414@163.com。

Experimental study on liquefaction characteristics of marine fine-grained sand based on critical state theory

CAI Shixing, TANG Yi, GUAN Yunfei

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The consolidated undrained triaxial shear tests and coupled axial-torsional cyclic shear tests are conducted using the marine fine-grained sand to study the correlation between the critical state parameter and the liquefaction characteristics based on the critical state theory. The test results show a linear correlation between the critical void ratio and the normalized effective normal stress. The results of the coupled axial-torsional cyclic shear tests show that the cycle number for liquefaction, N_L , decreases with the increasing state parameter, ψ , for a certain cyclic resistance ratio. Finally, an exponential function for expressing the relationship between N_L and ψ is proposed.

Key words: fine-grained sand; coupled axial-torsional cyclic shear test; critical state; liquefaction; cyclic resistance ratio

0 引言

全球气候变化导致海平面上升与海洋动力条件改变, 极大提高了强潮大浪与地震等灾害的发生频率, 严重威胁沿海水工建筑物的安全。在地震等动力荷载的作用下, 沿海砂土地基易发生液化破坏, 即饱和砂土在地震荷载或者波浪循环荷载剪切应力作用下, 产生超静孔隙水压力导致有效应力迅速减小, 表现为类似液体的性质^[1-4]。砂土地基液化会对沿海水工建筑物的稳定带来巨大威胁, 如海上平台、防波堤等在地震过程中发生破坏。因此, 亟需对海相砂土动力学特性开展研究。

国内外学者已针对砂土在动力荷载作用下的液化特性开展了大量研究。Seed 等^[4]采用提出的动孔压应力模型预测孔隙水压力发展及描述砂土液化特性; Green 等^[5]提出动孔压的能量模型描述动孔隙水压力与耗散能量之间的关系; Ni 等^[2]指出了第一个加载循环累计的孔隙水压力与砂土抗液化能力的关系。由此可见, 学者们均在探索砂土液化的有效预测方法。孔

隙比 e 和相对密实度 D_r 常用于描述洁净砂土的抗液化性能, 但由于细颗粒会显著影响砂土单调和循环荷载下的不排水特性, 使得在使用 e 和 D_r 描述含细粒土砂液化特性时出现差异较大的结论^[3]。临界状态土力学(CSSM)提供了一个描述砂土物理力学特性的模型框架。Qadimi 等^[6]证实了可将临界状态参数应用于砂土循环荷载下的力学特性研究中。Jefferies 等^[7]将临界状态参数和砂土抗液化性能联系起来。对于含细粒土砂, 关于液化特性与其临界状态之间关系的研究也取得一些进展^[8-9]。Porcino 等^[9]对细颗粒含量范围在 0~40% 的砂土试样进行不排水三轴剪切和循环三轴剪切试验, 结果表明仅需通过确定含细粒土砂的临界状态线, 即可使修正后状态参数与抗液化强度建立联系。但是已有研究多是针对实验室配置的含细粒砂土试样开展动三轴试验, 试验用土的物理力学特性与天然沉积含

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600700)

收稿日期: 2023-07-06

*通信作者(E-mail: ytang@nhri.cn)

细粒土砂存在差异,且模拟的应力状态与实际作用于地基土层的地震等动力荷载不完全相符,影响研究成果在实际工程应用中的参考价值。

本文针对海相沉积含细粒土砂,模拟试样在地震荷载下的真实应力状态,开展固结不排水三轴剪切试验和轴向-扭转耦合循环剪切试验,并基于临界状态力学理论,系统分析临界状态参数与含细粒土砂的液化特性之间的关系。

1 试验材料与方法

1.1 试验仪器

固结不排水三轴试验在全自动三轴仪上完成,用于确定海相含细粒土砂的临界状态线。为更加真实模拟地震荷载作用下地基土层的应力状态,本文采用GDS空心圆柱扭剪仪开展循环剪切试验,图1为空心圆柱试样的应力状态,试样高度 $H=200\text{ mm}$,内、外半径分别为 $r_i=30\text{ mm}$ 、 $r_o=50\text{ mm}$,壁厚20 mm。该仪器可同时独立控制轴力 W 、扭矩 M_T 、内围压 p_i 和外围压 p_o 的动态加载,并在土样薄壁单元上产生4个应力分量轴向应力(轴向应力 σ_z ,剪应力 $\tau_{z\theta}$,径向应力 σ_r 和环向应力 σ_θ)^[10]。试验过程中轴向动应力(σ_d)和扭转动应力(τ_d)保持 $\sigma_d=2\tau_d$,相位差为0°,对应土体单元中的正应力分量差($\sigma_z-\sigma_\theta$)/2和水平剪应力 $\tau_{z\theta}$ 同步增长,且其对应的应力路径在 $\tau_{z\theta}-(\sigma_z-\sigma_\theta)/2$ 应力坐标系中为45°倾斜的直线,更加符合实际地震荷载作用下水工建筑物地基土层的应力状态。

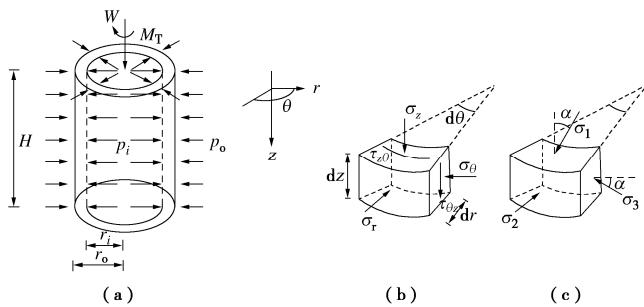


图1 空心圆柱试样的应力状态

Fig. 1 Stress states of hollow cylinder sample

1.2 试验土样与试样制备

试验所用土样取自洋山港近海,取土深度为10~45 m,烘干土样中明显可见白色NaCl结晶,试验土样的颗粒级配曲线如图2所示,依据《土工试验方法标准:GB/T50123—2019》相关规定,该土料被定名为含细粒土砂(SF)。土样相对质量密度 $G_s=2.71$,平均粒径 $D_{50}=0.28\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=3.75$,曲率系数 $C_c=0.03$,最大孔隙比 $e_{max}=1.398$,最小孔隙比 $e_{min}=0.633$,细粒含量 $F_c=7.33\%$ 。

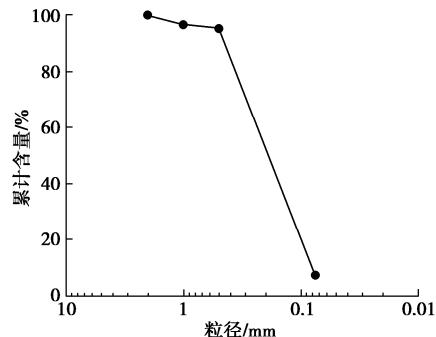


图2 土样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve

三轴剪切试验与空心圆柱扭剪试验均采用落砂法制备土样,称取所需土样,并均分成5等份,分层装入承膜筒中并压实至相应厚度,层与层之间进行刨毛处理,以保证试样均匀性。干燥试样制备完成后,首先从试样底部通入2 hCO₂以置换土体中的空气;然后从试样底部通入无气水,直至试样顶部出口无气泡排出;最后进行反压饱和,当试样孔压系数 B 值达到0.96以上时,认为试样已经达到饱和状态。

1.3 试验方案

为研究海相含细粒土砂状态参数与其液化特性之间的关系,需要先确定临界状态线,本文采用固结不排水三轴试验,三轴试验的具体参数如表1所示。

表1 三轴试验参数

Table 1 Triaxial test parameters

试验 编号	初始有效平均 应力 p'_0	固结后 e_{cs}	临界状态有效平 均应力 P'_{cs}
CU1	100	1.051	124
CU2	100	0.980	325
CU3	200	0.964	438
CU4	400	0.942	580

针对所选用含细粒土砂进行轴向-扭转双向耦合动荷载下的不排水空心圆柱循环剪切试验。空心圆柱扭剪试验方案如表2所示,试验方案中控制初始有效平均应力 p'_0 和循环应力比CRR两个变量,得到相应的轴向动应力和扭转动应力,土样固结后孔隙比即为不排水剪的临界孔隙比,液化振次 N_L 为土样发生液化破坏所需的振动次数。试验过程中均采用应力控制加载,循环轴向和扭剪应力采用周期简谐波,振动频率为0.1 Hz。循环应力比CRR和动强度 τ_f 由下式定义:

$$CRR = \tau_f / p'_0 , \quad (1)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{2}\right)^2 + \tau_d^2} . \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力; p'_0 为初始有效平均应力; σ_d 、 τ_d 分别为轴向动应力和扭转动应力。

2 试验结果与分析

2.1 海相含细粒土砂临界状态线确定

表 2 空心圆柱循环扭剪试验参数

Table 2 Parameters of hollow cylinder torsional tests

试验 编号	p'_0	固结 后 e_{cs}	τ_d	CRR	N_L	ψ
HCA1	100	0.984	7.5	0.106	40	-0.166
HCA2	100	0.988	10.0	0.141	14	-0.163
HCA3	100	0.994	12.5	0.177	3	-0.162
HCA4	200	0.969	15.0	0.106	98	-0.215
HCA5	200	0.978	20.0	0.141	25	-0.206
HCA6	200	0.975	25.0	0.177	5	-0.209
HCA7	300	0.958	22.5	0.106	220	-0.258
HCA8	300	0.963	30.0	0.141	39	-0.254
HCA9	300	0.959	37.5	0.177	11	-0.258

临界状态是指砂土在剪切过程中达到的极限状态, 应力不变的情况下, 塑性变形无限发展, 土样体积和孔隙水压力基本保持不变。临界状态线 (CSL) 是 $e-\ln p'$ 平面临界状态点的轨迹, 砂土 CSL 的位置与制样方法、初始状态、应力历史、剪切速率、应力路径及排水条件无关, 但受细粒含量显著影响^[8]。Li 等^[11] 和 Cai^[12] 将有效应力进行归一化, 给出了在 $e-(p'/p_a)^\xi$ 平面 CSL 的表达式:

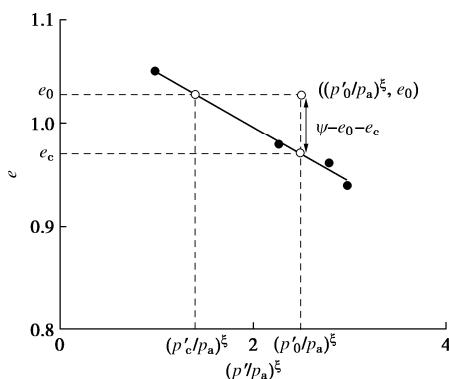
$$e_c = e_\Gamma - \lambda_c \left(\frac{p'_c}{p_a} \right)^\xi \quad (3)$$

式中: p_a 为大气压力; e_Γ 为 $p'=0$ 时对应的孔隙比; λ_c 为临界状态线的斜率; ξ 为率定系数, 取 0.7^[12]。

基于临界状态理论, 状态参数 ψ 是指当前状态下的孔隙比 e_0 和当前应力状态的临界孔隙比 e_c 的差值:

$$\psi = e_0 - e_c = e - \left[e_\Gamma - \lambda_c \left(\frac{p'_c}{p_a} \right)^\xi \right] \quad (4)$$

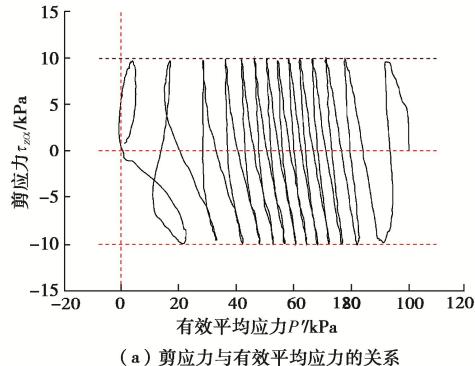
根据三轴剪切试验结果得出海相含细粒土砂的临界状态线如图 3 所示, 其中 $e_\Gamma = 1.103$, $\lambda_c = 0.053$ 。从图 3 中可以看出含细粒土砂在 $e-(p'/p_a)^\xi$ 平面呈现出很好的线性关系。

图 3 海相含细粒土砂在 $e-(p'/p_a)^\xi$ 平面内的临界状态线Fig. 3 CSL of marine fine-grained sand on $e-(p'/p_a)^\xi$ plane

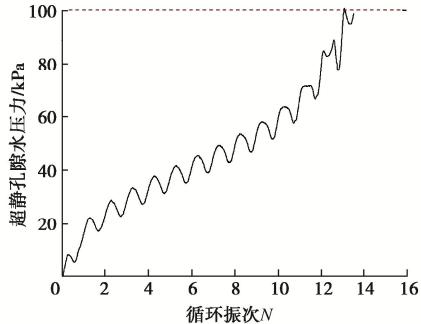
2.2 典型不排水循环扭剪试验

图 4 为海相含细粒土砂不排水循环扭剪试验 (HCA2) 的结果。由图 4 (b) 可以看出孔隙水压力的变化呈现典型的三段式^[2], 在开始的几个循环, 孔

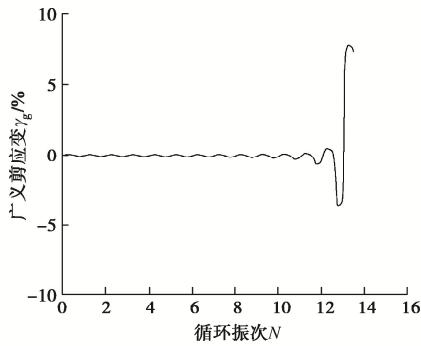
隙水压力快速增加, 并在随后的循环中以较低速率稳定增长, 最后孔隙水压力快速上升直至液化。平均有效应力与剪应力的关系曲线变化规律与孔压变化相对应, 在 50~80 kPa 曲线较密集, 两侧较疏松, 见图 4 (a)。从图 4 (c), 4 (d) 中可以看出剪应变在刚开始的加载中几乎为零, 直至孔隙水压力增大到 80 kPa 左右, 剪应变和孔隙水压力开始迅速增大, 平均有效应力迅速减小为零, 土样几乎丧失所有的强度, 发生



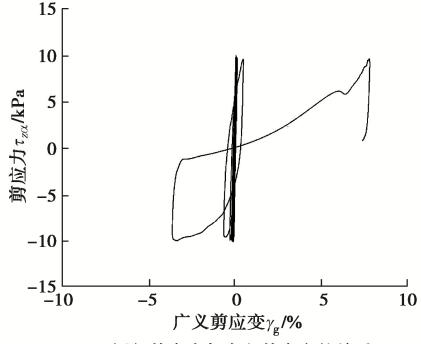
(a) 剪应力与有效平均应力的关系



(b) 超静孔隙水压力与循环振次的关系



(c) 广义剪应变与循环振次的关系



(d) 剪应力与广义剪应变的关系

图 4 砂土典型循环扭剪试验结果

Fig. 4 Results of typical hollow cylinder torsional shear tests

液化破坏。初始液化后土样变形迅速持续发展，最终发生流动液化。

2.3 状态参数与液化特性

土样的循环应力比 CRR 及其液化时的动应力循环次数 N_L 通常是描述砂土液化特性的重要参数，同时其液化特性与土样固结后所处的状态密切相关^[8]。因此，可基于临界状态土力学理论，通过临界状态参数对砂土的液化特性进行描述，建立海相砂土的液化振次 N_L 和其对应的状态参数之间的关系。图 5 展示了不同 CRR 下土样发生液化时对应的动应力循环次数 N_L 与状态参数 ψ 的关系，可以看出两者较好的满足如下的指数函数关系：

$$N_L = a \exp(b\psi) \quad . \quad (5)$$

式中： a , b 为拟合参数。

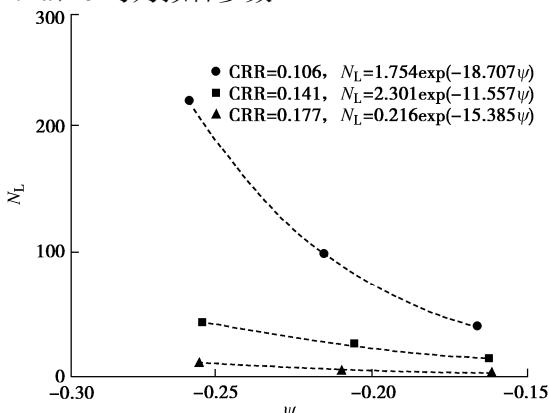


图 5 液化循环次数 N_L 与状态参数 ψ 关系曲线

Fig. 5 Curves of N_L and ψ

本文所有空心圆柱扭剪试验土样状态参数 ψ 均小于 0，位于临界状态线的下方，土样较为密实，循环应力比 CRR 相同时，状态参数 ψ 越大，发生液化破坏所需要的振动次数越小。

3 结 论

通过对海相含细粒土砂开展一系列固结不排水三轴剪切和循环扭剪试验，基于临界状态理论，研究了含细粒土砂临界状态参数与之间的关系。得到 2 点结论。

(1) 海相含细粒土砂的临界状态在 $e - (p'/p_a)^{\xi}$ 平面内呈线性关系。

(2) 轴向-扭转耦合不排水循环剪切试验结果显示，液化振次 N_L 与临界状态参数 ψ 很好的满足指数函数关系。循环应力比 CRR 相同时，状态参数 ψ 越大，土样发生液化破坏所需振动次数 N_L 越小。

参 考 文 献：

- [1] XU C S, FENG C Q, DU X L, et al. Study on liquefaction mechanism of saturated sand considering stress

- redistribution[J]. Engineering Geology, 2020, **264**: 105302.
- [2] NI X Q, ZHANG Z, YE B, et al. Unique relation between pore water pressure generated at the first loading cycle and liquefaction resistance[J]. Engineering Geology, 2022, **296**: 106476.
- [3] 左康乐, 顾晓强. 不同粒径下含细颗粒砂土液化特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(7): 1461-1470. (ZUO Kangle, GU Xiaoqiang. Experimental study on liquefaction characteristics of sand with fines under different particle size ratios[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(7): 1461-1470. (in Chinese))
- [4] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. The Generation and Dissipation of Pore Water Pressures During Soil Liquefaction[M]. Berkeley: College of Engineering, University of California, Berkeley. 1975.
- [5] GREEN R A, MITCHELL J K, POLITO C P. An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils[C]// Proceedings of the John Booker Memorial Symposium, Sidney Australia. Rotterdam: A A Balkema Publishers. 2000.
- [6] QADIMI A, COOP M R. The undrained cyclic behaviour of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2007, **57**(9): 739-750.
- [7] JEFFERIES M, BEEN K. Soil liquefaction: a critical state approach[M]. Boca Raton: CRC press, 2015.
- [8] QADIMI A, MOHAMMADI A. Evaluation of state indices in predicting the cyclic and monotonic strength of sands with different fines contents[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **66**: 443-458.
- [9] PORCINO D D, TRIANTAFYLLOD T, WICHTMANN T, et al. Using different state parameters for characterizing undrained static and cyclic behavior of sand with non-plastic fines[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, **159**: 107318.
- [10] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, **33**(4): 355-383.
- [11] LI X S, CAI Z Y. Effects of low-number vibration cycles on dynamic properties of dry sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(11): 979-987.
- [12] CAI Z. A Comprehensive Study of State-Dependent Dilatancy And its Application in Shear Band Formation Analysis[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2001.