

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0887

南海北部陆坡软黏土动力应变-孔压特性试验

年廷凯^{1,2,3}, 焦厚滨¹, 范 宁¹, 郭兴森¹, 贾永刚³

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 针对南海北部陆坡原状软黏土, 开展了不同偏压固结比 K_c 和循环应力比 CSR 条件下的动三轴试验, 探究了动荷载作用下试样的残余动应变、残余动孔压与循环振次的变化规律; 综合考虑试验过程中残余动应变和残余动孔压的关联性, 提出了基于动应变-孔压模式的动三轴试验破坏标准, 并采用微观电镜扫描 (SEM) 图像揭示其作用机制。研究表明: 在给定 K_c 条件下, CSR 值不同, 残余动应变随循环振次的发展趋势呈现出显著差异性, 而残余动孔压随循环振次的变化规律基本一致; 随着 K_c 的增加, CSR 临界值逐步增大, 相应的最终残余动应变逐渐减小, 而残余动应变-动孔压曲线也表现出相似特征; 将传统的应变值破坏标准扩展至由应变-孔压曲线拐点控制的破坏区间, 可以有效界定破坏振次并描述试样的完整破坏过程, 揭示动荷载条件下试样内在的有效应力-应变-孔压互馈机制。上述研究成果将为南海北部陆坡软黏土软化-孔压模型的建立、海洋地质灾害评价与预测、海洋工程基础设计提供可靠参考。

关 键 词: 南海北部陆坡; 动三轴试验; 残余动孔压; 残余动应变; 破坏标准

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1564-10

Experiment on dynamic strain-pore pressure of soft clay in the northern slope of South China Sea

NIAN Ting-kai^{1,2,3}, JIAO Hou-bin¹, FAN Ning¹, GUO Xing-sen¹, JIA Yong-gang³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Referring to the original soft clay in the northern slope of South China Sea, the dynamic triaxial tests were carried out under different conditions of consolidation ratio K_c and cyclic stress ratio CSR . The development rule of the residual dynamic strain, residual pore water pressure and the relationship between them were discussed. Considering the correlation between residual strain and residual pore pressure in the test process, the failure standard of dynamic triaxial test based on strain-pore pressure mode was proposed. The mechanism of mutual feed and its interaction mechanism were revealed by the scanning electron microscopy (SEM) technique. The research results indicate that under the condition of designated K_c and different CSR , the development trends of the residual dynamic strain and cyclic vibration frequency curves show a significant difference, while the change laws of the residual dynamic pore pressure and cyclic vibration frequency curve are basically the same. With the increase of K_c , the critical value of CSR gradually increases, while the final residual dynamic strain gradually decreases. The similar characteristics of changing law can also be found from the curve representing the relationship between residual dynamic strain and residual pore pressure. Furthermore, the conventional failure standard based on strain value is extended to the failure region controlled by the inflection point of the strain-pore pressure curve, which can effectively define the failure vibration frequency and completely describe the whole failure process of the specimen, even reveal the inherent mutual feedback mechanism among effective stress, strain and pore pressure. Research results from this study can provide reliable reference for the establishment of dynamic softening model in soft clay, the

收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51579032, No. U1765107, No. 41427803); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLGDUEK1307); 山东省海洋环境地质工程重点实验室基金资助项目 (No. MEGE1603)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51579032, U1765107, 41427803), the State Key Laboratory of Geomechanics and Underground Engineering (SKLGDUEK1307) and the Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering (MEGE1603).

第一作者简介: 年廷凯, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土力学与能源岩土工程、工程地质灾害与地震岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: tknian@dlut.edu.cn

evaluation and prediction of marine geological hazards, and the foundation design of ocean engineering in the northern slope of South China Sea.

Keywords: northern slope of South China Sea; dynamic triaxial test; residual dynamic strain; residual pore pressure; failure standard

1 引言

随着“一带一路”国家战略的实施，南海能源开发和岛礁建设的步伐加快。然而，海洋环境复杂多变，由地震、波浪流等极端条件产生的动力荷载极易改变海底软弱土的力学行为^[1-3]，从而诱发海底土体失稳，给海洋基础设施运营和工程建设带来巨大威胁。因此，加强南海地区软黏土的动力学特性研究，已经成为一项极其紧迫的任务。

针对软黏土的动力学特性，国内外学者开展了基于交通、波浪和地震等荷载作用下的动三轴试验研究，取得了不少创新性成果。如 Seed 等^[4]通过相关动三轴试验，发现动荷载条件、固结条件和循环振次是软土动力变形的主要影响因素；黄茂松等^[5]基于饱和软黏土的不排水动三轴试验，提出了不同影响因素下饱和软黏土的循环累积变形特性；栾茂田等^[6]开展了非均等固结条件下试样轴向-扭转双向耦合循环剪切试验，探讨了初始大主应力方向角、循环剪切荷载分量比及循环应力水平对饱和黏土孔压与强度特性的影响；王军等^[7]通过对杭州饱和软黏土进行应力控制的循环三轴试验，研究了循环荷载作用下超固结软黏土的软化特性与孔压发展规律及两者之间的关系；陈颖平等^[8]采用杭州萧山原状和重塑软黏土进行动力荷载试验，探究了应变破坏标准的选用对土体动强度的影响。上述研究工作，主要关注模拟陆上和浅海原状饱和软黏土的动力特性，而对真实的深海原状饱和软黏土的研究较少；在动三轴试验破坏标准的选用上，仍以应变控制破坏标准为主，且破坏标准的应变幅值选取不统一，未有效地反映土体的真实破坏情况，也未考虑孔隙水压力对试样动力学特性的重要影响，尤其是对南海软黏土的研究则更少，仅有的文献^[9-10]也主要以海底沉积物的基本力学特性研究为主，尚缺乏南海原状软黏土的动力学特性及破坏标准方面的深入研究。

本文针对南海北部陆坡原状软黏土开展了系列

不排水循环动三轴试验，所用土样通过 2016 年南海东北部及吕宋海峡共享航次获得，分别取自南海珠江海谷陆坡 (S8-2)、珠江海谷陆坡与东沙陆坡交界处 (S7A-3)、台湾浅滩陆坡 (D2-1) 3 个站位^[11]，所取土样为海床表层 0~2 m 范围内的浅层沉积物，取样水深均超过 1 000 m，见图 1；以此研究不同动荷载和固结比条件下软黏土残余动应变、残余动孔压的发展规律及其相关性，结合电镜扫描微观图像，提出南海软黏土动三轴试验的破坏标准，并揭示动荷载条件下试样内在的有效应力-应变-孔压传递与互馈机制。

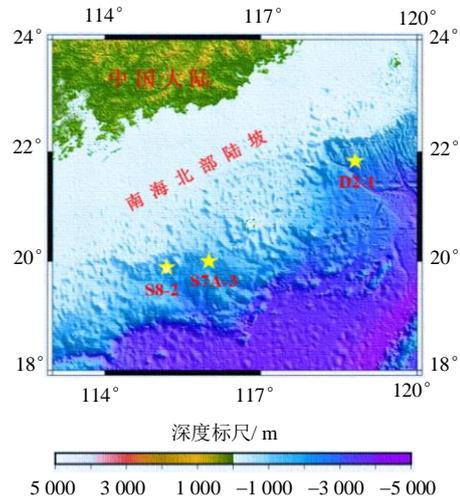


图 1 各站位地理坐标图 Fig.1 Geographical map of each station

2 动三轴试验概况

2.1 基本物理力学特性

通过对表 1 中南海北部陆坡 3 个站位土样的基本物理力学参数进行对比，可以发现各站位参数阈值相近，而 S7A-3 位于陆架边缘大型滑坡带内，滑坡灾害频发（白云大型海底滑坡^[12]即发生在此处），地质条件较为复杂，故以该站位土样为例进行相关试验。

表 1 各站位土样物理性质指标 Table 1 Physical property indexes of soil samples at each station

站位	土粒相对密度 G_s	塑限 w_p / %	液限 w_L / %	塑性指数 I_p	黏粒含量 / %	压缩系数 α_v / MPa^{-1}	不排水强度 $S_{u,0}$ / kPa	灵敏度 S_t
S8-2	2.46~2.68	29.92~33.50	57.81~68.71	26.76~29.78	15.60~38.85	2.020~2.792	2.16~5.96	7.00~20.66
S7A-3	2.69~2.74	26.49~37.50	51.31~65.01	21.88~31.42	22.69~41.43	1.888~3.217	6.48~13.48	8.55~22.51
D2-1	2.43~2.70	23.96~29.44	46.03~55.98	23.00~32.35	8.83~44.68	1.986~2.283	6.60~12.31	10.53~17.97

将 S7A-3 站位 2 m 原状土柱样，分为上、中、下三段 (S-1、S-2 和 S-3)，由颗分测试可得颗粒级配曲线如图 2 所示。SEM 和 XRD 分析结果显示，土样中离子组成按含量高低依次是 Si、Al、Ca、Fe、K、Na、Mg，化合物以 SiO₂、Al₂O₃ 和 CaCO₃ 等为主；粉粒矿物以石英、方解石和云母为主，其中石英含量较高；而黏粒矿物以绿泥石、高岭石和伊利石为主，其中绿泥石含量较高。

此外，通过室内土工试验，获得土样的基本物理力学参数见表 2，其中初始不排水强度 $S_{u,0}$ 和灵敏度 S_t 通过全流动贯入试验获得。结合图 2，确定该站位土样为高液限黏土，且南海该站位软黏土与天津^[13]、宁波^[14]、舟山^[15]等地区的湖相或海相软黏土相比，各参数有明显差异；其中天然含水率、液限、塑性指数、孔隙比、压缩系数均远高于上述地区土样，含水率、孔隙比、压缩系数更是高达两倍以上，足以说明南海土的特殊性。

2.2 饱和软黏土动三轴试验

采用 CKC 全数字闭环控制气动式反复加载动三轴仪 (图 3(a))，进行可控制应力-应变速率的循环加载三轴试验以及排水或不排水条件下的既定应力路径三轴试验。该试验系统可同时或分别控制轴向荷载和侧向荷载，可满足等向和非等向固结条件下动三轴试验要求。

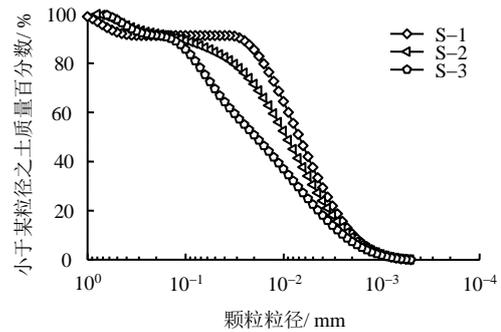
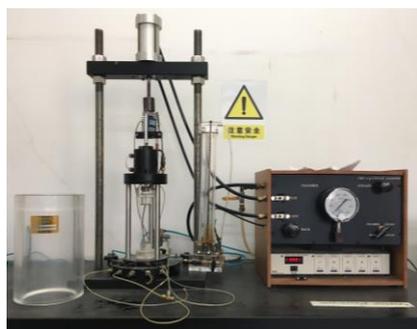


图 2 级配曲线图
Fig.2 Grading curves

表 2 土样基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical properties of soil samples

地区	编号或所在地	密度 ρ / (g/cm ³)	含水率 w / %	相对密度 G_s	塑限 w_p / %	液限 w_L / %	塑性指数 I_p	孔隙比 e_0	饱和度 S_r / %	压缩系数 α_c / MPa ⁻¹	强度 $S_{u,0}$ / kPa	灵敏度 S_t
南海北部	S-1	1.354	121.04	2.62	24.43	55.85	31.42	3.326	>98	3.217	8.55	7.78
	S-2	1.402	104.96	2.51	24.15	46.03	21.88	2.667	>98	2.791	10.61	10.40
	S-3	1.448	93.53	2.43	27.32	53.46	26.14	2.307	>98	1.888	12.20	11.47
其他地区	天津 ^[13]	1.816	42.80	2.71	20.20	38.00	17.80	1.180	>95	0.920	/	/
	宁波 ^[14]	1.765	45.50	/	21.20	36.50	15.40	1.290	>97	0.972	/	/
	舟山 ^[15]	1.835	45.25	2.70	23.34	45.83	22.49	1.114	>98	0.780	/	/



(a) CKC 全数字闭环控制气动式反复加载动三轴仪



(b) 试验前



(c) 试验后

图 3 动三轴仪及试验过程

Fig.3 Dynamic triaxial apparatus and test procedure

2.2.1 试样制备

采用三轴分样器，将直径为 10 cm 的原状土样平均分成 3 瓣，按照标准的制样方法^[16]，切削成 39.1 mm × 80.0 mm 的圆柱形试样。将制好的原状试样放入真空饱和缸中抽气饱和和不小于 24 h，直至其

孔隙水压力系数 B 超过 98%。将饱和试样按操作流程装入 CKC 加载腔内进行试验 (图 3(b)、3(c))。

2.2.2 试验方法与试验方案

由于试验土样为南海北部陆坡原状软黏土，取样深度超过水下 1 000 m，渗透性较低，因此采用

不排水条件进行动三轴试验，试验固结围压 $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$ ，固结时间 $t = 24 \text{ h}$ ，采用等幅半正弦循环加载波形，加载频率 $f = 0.5 \text{ Hz}$ ，试验结束条件为振动 2 000 次或应变达到 25%。考虑偏压固结与等压固结不同情况，通常将循环应力比定义为

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} = 3\sigma_d / [2(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (1)$$

式中： σ_d 为循环动应力； σ_c 为平均固结压力； σ_1 为轴向固结压力； σ_3 为侧向固结压力。

为了体现 CSR 及固结条件对试验结果的影响，将动荷载峰值设定为一个递增的过程，但由于试验中真实动荷载与设定值相比有一定波动，故取实测动荷载峰值，计算得到真实循环应力比，如表 3 所示；而偏压固结比 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3$ 根据试验情况分别选取 1.0、1.25 和 1.40 三种情况；考虑 $K_c = 1.50$ 时，试样固结应变超过破坏标准，故采用 $K_c = 1.40$ 。本次共进行 3 组 9 个试样的动三轴试验，具体的试验方案见表 3。

表 3 试验方案
Table 3 Test schemes

组号	编号	固结比 K_c	循环应力比 CSR
1	S-1-1, S-1-2, S-1-3	1.00	0.347, 0.367, 0.387
2	S-2-1, S-2-2, S-2-3	1.25	0.372, 0.394, 0.412
3	S-3-1, S-3-2, S-3-3	1.40	0.426, 0.435, 0.477

3 试验结果分析

动三轴试验中，通常将循环动应力作用前后试样的高度差与试样最初高度之比称为残余动应变，即动应力解除后土体残留的应变定义为残余动应变。将循环动应力为 0 时的应变和孔压称为残余动应变 ε_d 与残余动孔压 u_d 。按照表 3 方案进行试验，结合试验结果分别绘制残余动应变 ε_d 、残余动孔压 u_d 与循环振次 N 的关系曲线（图 4、5），并探讨二者与循环振次 N 的相互关系及变化规律，进而建立残余动应变-残余动孔压的关联性曲线。

3.1 残余动应变结果与分析

图 4 显示试样在不同固结比 K_c 及不同循环应力比 CSR 条件下残余动应变 ε_d 与循环振次 N 的关系曲线。总体上，对于给定的 K_c 和 CSR， ε_d 随着 N 的增加而增大；当 K_c 和 N 一定时， ε_d 随着 CSR 的增加而增大，总体上增长幅度加大。在给定 K_c 条件下，随着 CSR 增加，残余动应变 ε_d -循环振次 N 曲线的发展趋势表现为平缓型、渐陡型和陡增型 3 种型式，在平缓型与渐陡型之间均存在一个 CSR 临界值^[15]来区分残余动应变的发展趋势；当 CSR 小于临

界值时， ε_d - N 曲线属于平缓型，循环加载 2 000 次后， ε_d 稳定在很低的水平，且试样完好；当 CSR 大于临界值时， ε_d - N 曲线在有限振次内急剧增加，曲线表现为渐陡型或陡增型，试样剪胀破坏。

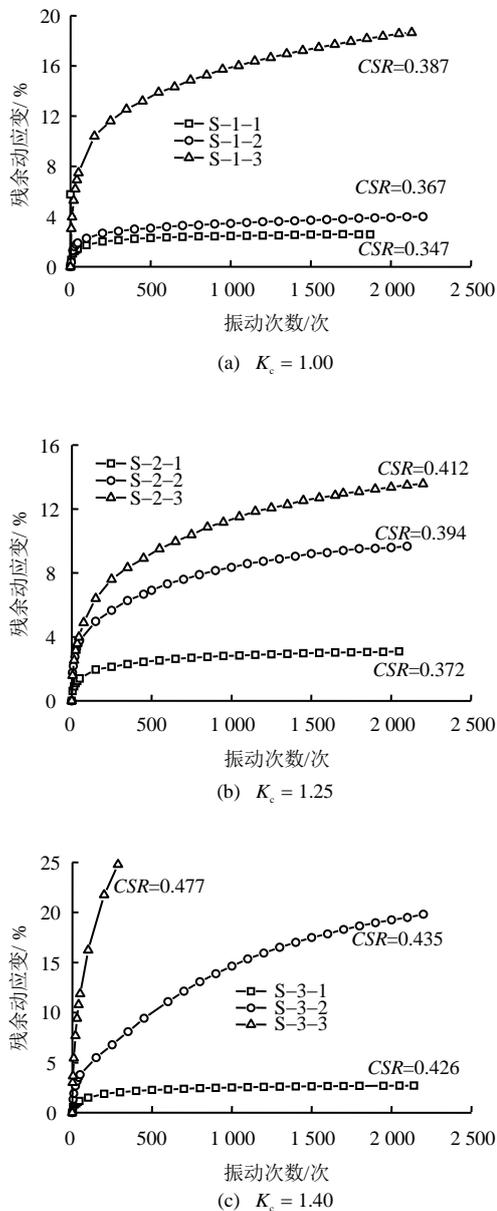


图 4 不同 K_c 和 CSR 条件下的残余动应变
Fig.4 Residual dynamic strain under various K_c and CSR

如图 4(a)中 CSR = 0.367 时，残余动应变 ε_d -循环振次 N 曲线从最初 100 次加载下的快速增长，转变为缓慢增长，最终 ε_d 趋近于 4%；图 4(b)中 CSR = 0.372 与图 4(c)中 CSR = 0.426 时，曲线发展规律与上述一致，最终 ε_d 趋近于 3%；而当 CSR 超过临界值后，残余动应变快速增长，直至试样破坏。在不同 K_c 条件下，对比图 4(a)、4(b)和 4(c)中平缓型与渐陡型曲线的 CSR 区间，可知临界 CSR 随着 K_c 的增加而增大。

3.2 残余动孔压结果与分析

图 5 为不同固结比 K_c 和不同循环应力比 CSR 条件下试样的残余动孔压 u_d 随循环振次 N 的变化规律。分析可见, 当给定 K_c 和 N 时, u_d 随着 CSR 的增加而增大; 当给定 K_c 和 CSR 时, 在加载初期 u_d 随振次 N 的增加而迅速增长, 而后曲线趋于平缓; 当 CSR 不同时, u_d-N 曲线的发展趋势并未随 CSR 的增加而体现差异性, 这与 ϵ_d-N 发展规律不同。

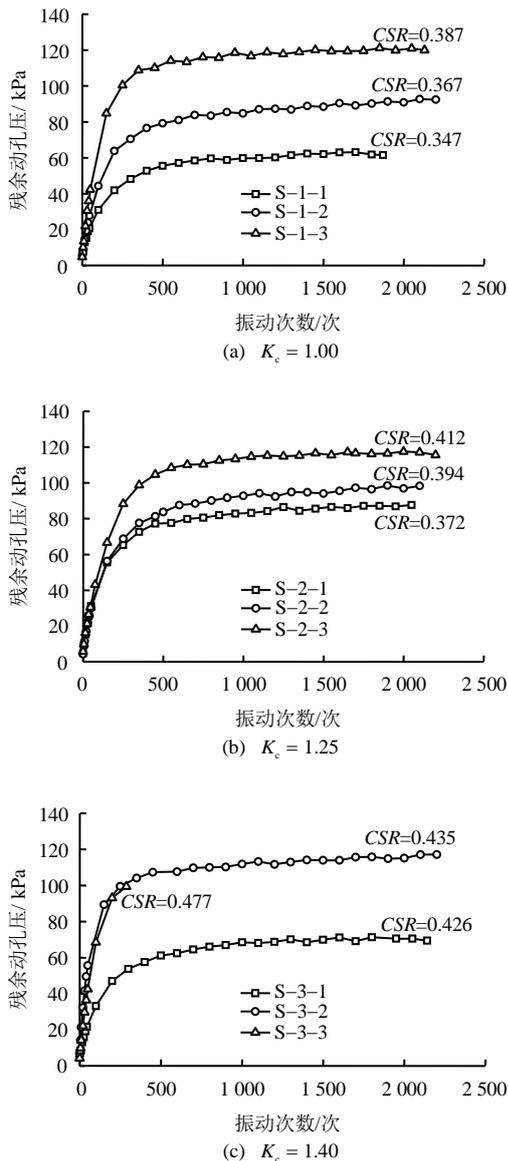


图 5 不同 K_c 和 CSR 条件下残余动孔压

Fig.5 Residual pore pressure under various K_c and CSR

在不同固结比 K_c 条件下, u_d 曲线均先快速上升, 在循环加载 500 次以内出现拐点, 且达到拐点所需振次 N 随 CSR 的增加而递增, u_d 最终稳定值与 CSR (亦即动荷载) 正相关; 同时, 围压决定 u_d 峰值, u_d 峰值总体上稳定在 120 kPa 左右, 远未达到 150 kPa 的试验围压。此外, 图 5(c)中 $CSR = 0.435$

和 0.477 时, 孔压曲线出现部分重叠, 推测是由于 CSR 为 0.477 时轴向动载过大, 应变迅速增大至孔压尚未表现出真实值 (孔压发展的滞后性), 试样便迅速崩塌破坏。

上述结果表明, 对于软黏土的不排水动三轴试验, 动荷载作用下残余动孔压的发展趋势体现了试样内部颗粒结构及孔隙形态的演化过程。虽然动孔压的发展具有滞后性, 但与试样的动力变形依然紧密联系且相互影响, 而动孔压又是有效应力法分析饱和土体动力稳定性的关键^[6], 不容忽视。传统上以某一应变值作为动三轴试验破坏标准, 往往忽略了孔隙水压力的影响, 故应综合考虑有效应力-应变-孔压之间的互馈机制, 以建立完善的动三轴试验破坏标准。

3.3 残余动应变与残余动孔压相关分析

图 6 所示为试样在不同固结比 K_c 、不同循环应力比 CSR 条件下, 残余动孔压 u_d 与残余动应变 ϵ_d 的关联曲线。在给定 K_c 条件下, 随着 CSR 递增, ϵ_d-u_d 曲线发展为平缓型和陡增型两种情况, 这与 ϵ_d-N 曲线的发展趋势相似, 藉此也可以初判出 CSR 的临界值。当 CSR 小于临界值时, ϵ_d-u_d 曲线基本可划分为初始和破坏累积两个阶段, 如图 6(b) $CSR=0.372$ 所示曲线, ϵ_d 最终稳定在 4% 左右, u_d 低于 100 kPa, 试样完好; 当 CSR 大于临界值时, ϵ_d-u_d 曲线可划分为初始、破坏累积和完全破坏 3 个阶段, 与 CSR 小于临界值时表现不同, 如图 6(b) $CSR=0.412$ 所示曲线, u_d 在累积到 100 kPa 以后, 增长趋势放缓, 最终稳定在 120 kPa 左右, 而 ϵ_d 则持续增长, 直至试样破坏。

究其原因, 由于试验土样为南海深海原状土, 土样本身结构性较强, 当 CSR 小于临界值时, 在持续低幅值加载下, 孔压迅速增长并稳定, 总应力不变, 有效应力相应降低并趋于稳定, 使土样内部颗粒簇间胶结较薄弱处产生破损, 骨架结构小范围内变形却并未崩坏, 故试样产生了较小的轴向变形并趋于稳定; 而当 CSR 大于临界值时, 连续高幅值加载导致孔压剧烈增长至极值后稳定, 而总应力较高, 有效应力迅速降低, 土体强度相应降低, 随着循环加载, 试样内部团粒进一步挤压破坏, 直至土体内部胶结体完全破坏, 而大孔隙因颗粒堵塞兼并隔离为均匀小孔隙后, 骨架结构崩塌, 试样产生较大轴向变形最终破坏。

4 动应变-孔压模式动三轴破坏标准

三轴试验常用破坏标准有: 极限平衡标准、液

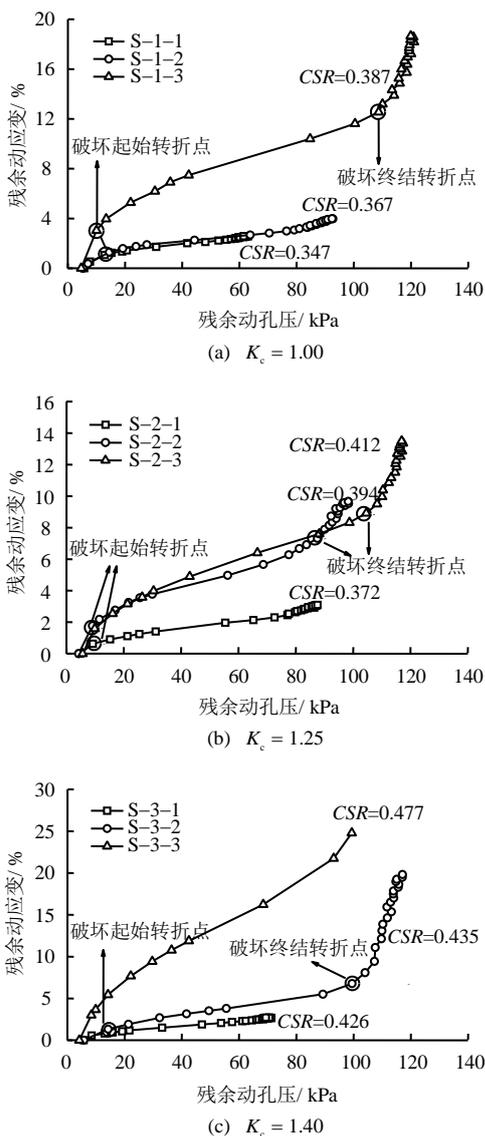


图 6 不同 K_c 和 CSR 条件下残余动应变与动孔压分布
Fig.6 Curves of residual dynamic strain and pore pressure under different K_c and CSR

化标准、应变标准^[17]。采用应变值作为判别试样破坏标准时，仅以某一循环次数下的应变值作为破坏点，应变幅值选取不统一，且忽视了动荷载作用下动孔压对试样的影响，无法真实地反映土体实际的破坏情况。而通过残余动应变与残余动孔压的关联性分析确定试样的破坏过程，能更准确地体现试样内部的复杂演化过程。

4.1 应变破坏标准

前人在饱和软土动三轴试验中，常从轴向动应变 2.5%~10.0%^[8, 18]之间选取破坏标准。若以应变值作为试验的破坏标准，结合试验结果分别选 ϵ_d 为 3.0%、5.0%作为试样破坏控制点。

图 7 是 K_c 分别为 1.00、1.25 和 1.40 3 种不同偏压固结比时，试样破坏振次 N_f 随 CSR 的发展曲线，其中 $\epsilon_d=3.0\%$ 、 $\epsilon_d=5.0\%$ 分别表示破坏应变为 3.0%

和 5.0%时的破坏振次变化曲线。据图中曲线可见，在相同偏压固结比 K_c 下， N_f 随 CSR 的增加而逐渐减少，随应变破坏值的提高而增加；相同应变破坏标准下，试样的 $CSR-N_f$ 趋势线随着固结比 K_c 的增加而升高。分析认为，在动荷载作用下，试样内部颗粒结构在动孔隙水压力的反复冲击及动力效应的循环作用下不断受损，所以土体的强度随着振动次数 N 的增加而不断衰减；此外，随着 K_c 的增加，固结后试样内部颗粒结构更加密实，试样黏聚力和骨架强度相应提高，从而增加了试样抵抗动荷载的能力，使 $CSR-N_f$ 趋势线随 K_c 的增加而上升。

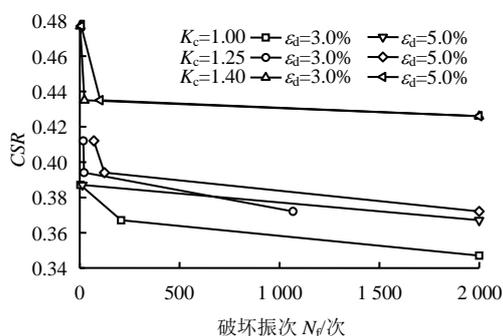


图 7 不同 K_c 时试样破坏振次 N_f 随 CSR 变化曲线
Fig.7 Curves of failure vibration frequency N_f with CSR under different K_c

表 4 中 $N_f > 2000$ 次时，表示超过 2000 次振动后试样仍未达到破坏应变点，说明其所对应的 CSR 小于临界值。据表可知，临界 CSR 随着 K_c 的增加而增大，所取应变破坏点不同也会导致临界 CSR 不同。以 $K_c = 1.00$ 为例，若选 3%应变值为破坏点，土样 CSR 临界值在 0.347~0.367 之间；若选 5%应变破坏点，则土样 CSR 临界值在 0.367~0.387 之间；由于软黏土的本构关系远比砂土要复杂，在对饱和

表 4 不同 K_c 时试样破坏标准与破坏振次

Table 4 Failure standard and failure vibration frequency of specimens with different K_c

编号	K_c	CSR	破坏振次/次	
			$\epsilon_d=3.0\%$	$\epsilon_d=5.0\%$
S-1-1	1.00	0.347	>2000	>2000
S-1-2	1.00	0.367	207.5	>2000
S-1-3	1.00	0.387	3.4	14
S-2-1	1.25	0.372	1067.5	>2000
S-2-2	1.25	0.394	21.4	124
S-2-3	1.25	0.412	17.5	3
S-3-1	1.40	0.426	>2000	>2000
S-3-2	1.40	0.435	23.5	103
S-3-3	1.40	0.477	2.7	7.6

软黏土软化-孔压模型的研究中,选用不同的应变值破坏标准,会得到不同的 CSR 临界值,从而改变孔压比与循环振次比等相关参数的取值。因此,以不统一的固定应变值作为破坏标准,会使试验结果分析产生差异性。

4.2 动应变-孔压曲线拐点破坏标准

为了避免仅采用应变破坏标准所产生的差异性,综合考虑残余动应变与残余动孔压及其所对应的振动次数的关系,对循环动荷载下试样破坏的完整过程进行分析。

结合表 5 和图 6 可知,当 CSR 小于临界值时,在动荷载作用下残余动应变 ε_d -残余动孔压 u_d 发展趋势只存在破坏起始点一个拐点,在 5~10 次振动循环后, ε_d-u_d 曲线迅速达到破坏起始点,而后 ε_d-u_d 曲线持续缓慢累积,并最终稳定在较小的值域内,直至振动超过 2 000 次,试样仍未发生显著破坏;当 CSR 大于临界值时, ε_d-u_d 曲线存在破坏起始点与破坏终结点两个拐点, ε_d-u_d 曲线在振动循环 5 次以内即达到破坏起始点,之后 ε_d-u_d 曲线持续累积,并在有限振次内达到破坏终结点。在给定 K_c 条件下,随着 CSR 的增加,达到破坏终结点所需的破坏振次 N_f 逐渐减少;在 CSR 大于临界值的试验组中,随着 K_c 的增加,试样的应变破坏区间逐步降低,但达到破坏终结点的 N_f 并未体现出规律性。需要指出的是 $K_c = 1.40$ 时, $CSR=0.477$ 的取值

表 5 不同 CSR 下残余动应变-残余动孔压与循环振次关系
Table 5 Relationships between residual dynamic strain-pore pressure and cyclic vibration frequency under different CSR

编号	偏压固结比 K_c	CSR	破坏阶段 (两拐点)	$\varepsilon_d / \%$	u_d / kPa	$N/\text{次}$
S-1-1	1.00	0.347	起点	0.894	10.57	10
			终点	2.573	61.52	1 871
S-1-2	1.00	0.367	起点	1.023	11.02	10
			终点	3.987	92.39	2 200
S-1-3	1.00	0.387	起点	3.039	10.07	5
			终点	12.171	105.98	300
S-2-1	1.25	0.372	起点	0.624	9.23	5
			终点	3.097	87.58	2 100
S-2-2	1.25	0.394	起点	1.768	9.11	5
			终点	7.318	87.53	600
S-2-3	1.25	0.412	起点	1.589	9.90	5
			终点	9.500	108.33	550
S-3-1	1.40	0.426	起点	0.552	8.50	5
			终点	2.693	70.92	2 000
S-3-2	1.40	0.435	起点	1.427	14.26	5
			终点	7.435	102.96	300
S-3-3	1.40	0.477	起点	3.663	9.90	5
			终点	19.461	85.23	150

远超 CSR 临界值,试验结果差异明显,推测是 CSR 过高及原状土样自身差异影响了试验结果;同时,所取土样基本物理力学性质随取样深度的增加而变化(表 2),这些差异都会对动三轴试验中 ε_d-u_d 曲线的发展规律产生一定影响。

通过上述分析,综合考虑有效应力-应变-孔压互馈机制,提出基于应变-孔压模式的动三轴试验破坏标准,即由破坏起始点与破坏终结点两个拐点控制的破坏区间。如表 5 所示,当 $K_c = 1.00$ 、 $CSR = 0.387$ 时,破坏区间内 ε_d 为 3.039%~12.171%、 u_d 为 10.07~105.98 kPa、 N_f 为 5~100 次,以此破坏区间作为试验的破坏标准,可以准确地得到破坏起、终点及完整过程的 ε_d 、 u_d 及相应的 N_f ,其中破坏起始点所对应的相关参数可以满足模型的安全性考虑,破坏区间内对应的相关参数可以用于探究破坏的发展过程,而破坏终结点对应的相关参数可用于模拟极限破坏状态。

4.3 破坏机制的微观结构分析

在动三轴试验中,应变-孔压的发展规律和相互作用对整个破坏区间的界定起到不可忽视的作用,而研究试验过程中试样内部颗粒结构、孔隙形态的变化过程,有助于分析 ε_d-u_d 的发展趋势。对原状样及剪切样进行电镜扫描(SEM),从试验前后颗粒及孔隙的微观结构特征^[19-20]对破坏情况进行分析。

如图 8 所示土样微观结构电镜照片,是由美国 FEI 公司生产的 NOVA NanoSEM450 场发射扫描电镜拍摄所得。由于试验土样含水率很高,接近两倍液限,为避免失水对试样结构的破坏,采用真空冷冻干燥法,将试样冻干,并制成观察样片,在 3 000 倍下进行电镜扫描。由原状样 SEM(图 8(a))可以看到边界明显的颗粒簇和大孔隙,颗粒间接触方式多为边-边、边-面的形式,土样骨架结构明显且海洋生物残骸较多;试验剪切样 SEM(图 8(b)、8(c))中,颗粒簇和孔隙的边界模糊,土颗粒更加密实,大孔隙被挤压变小,数量也明显减少,颗粒间接触方式多为面-面的形式,土样骨架结构模糊;随着循环应力比的增加,土颗粒嵌挤更紧密,大孔隙消失,小孔隙增多,且均匀地分布在截面上,颗粒簇和孔隙的边界更加模糊,骨架结构逐渐崩坏。

使用 Image pro plus 图像处理软件,对试验前后的 SEM 图片进行二值化处理得到图 8(d)、图 8(e)和图 8(f),其中黑色部分为土颗粒,白色部分为孔隙。通过二值化图可以看到剪切样的孔隙形态大小与原状样明显不同,测量其颗粒、孔隙数据,可以

得到原状样的孔隙与颗粒面积比为 0.308, 经过不同 CSR 的循环剪切试验后, 面积比分别变为 0.151、0.130, 可以发现面积比呈明显降低趋势, 孔隙面积明显减小, 颗粒面积显著变大。分析可知, 随着 CSR 的增加, 循环动荷载使大孔隙先被土颗粒堵塞、隔离为中小孔隙, 然后中小孔隙进一步兼并、生长为小孔隙, 孔隙面积逐步减小; 土体颗粒簇被碾碎、

挤压均匀, 土体面积显著增加。颗粒、孔隙的兼并生长过程就是试样受荷载作用应变累积增加的过程, 并与有效应力减小、孔压升高的趋势保持一致, 这也从微观角度反映了残余动应变与残余动孔压在试样破坏过程中的内在联系, 揭示了基于有效应力-应变-孔压传递与互馈机制的应变-孔压模式破坏标准的作用机制。

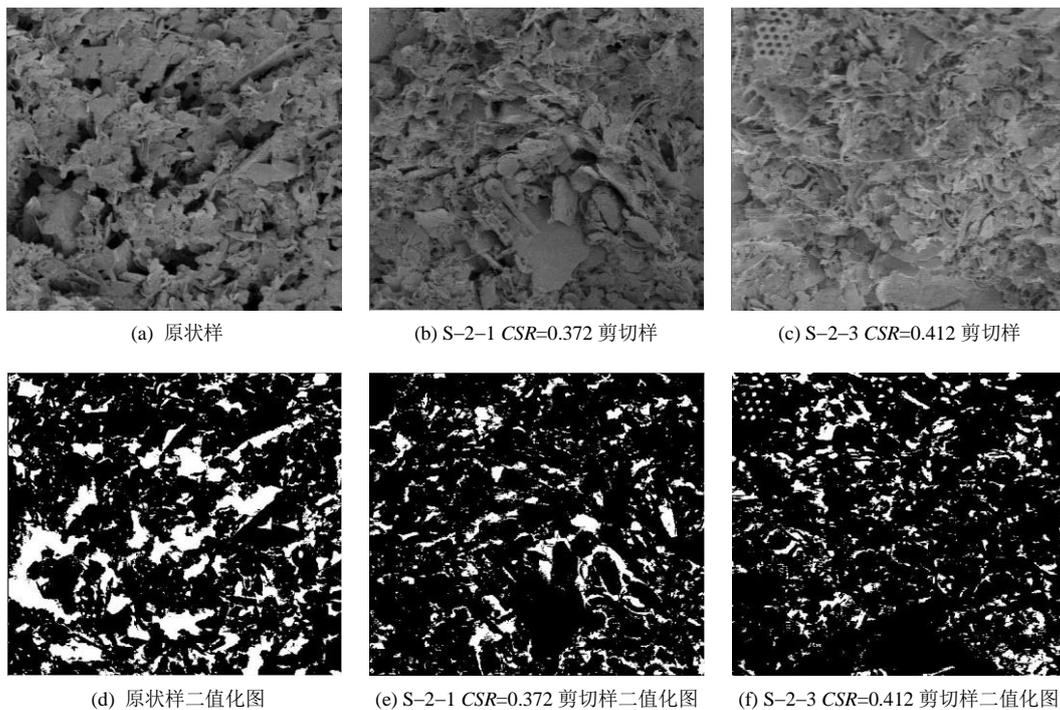


图 8 $K_c=1.25$ 时不同 CSR 下原状样和剪切样 SEM 与二值化

Fig.8 SEM and binary pictures of undisturbed samples and shear samples under different CSR in $K_c=1.25$

5 结 论

(1) 动三轴试验结果表明, 不同 CSR 下残余动应变-循环振次关系曲线的发展趋势呈现明显的差异性, 而残余动孔压-循环振次关系曲线的变化规律基本一致; 随着 K_c 的增加, CSR 临界值逐步增大, 相应的最终残余动应变逐渐减小, 而残余动应变-残余动孔压曲线图也呈现出相似特征。

(2) SEM 微观图像显示, 试验前后土样面积比明显呈下降趋势, 颗粒、孔隙的兼并生长过程就是试样受荷载作用应变累积增加的过程, 并与有效应力减小、孔压升高的趋势保持一致, 这从微观角度揭示了残余动应变与残余动孔压在试样破坏过程中的内在联系。

(3) 提出基于动应变-孔压模式的动三轴试验破坏标准, 即以破坏起始点与破坏终结点两拐点来界定破坏区间; 提取两拐点处动应变、动孔压和破坏振次等相关参数, 从而为饱和软黏土软化-孔压模

型参数的确定提供参考。

致谢: 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员会共享航次计划 (航次编号: NORC2015-05) 的资助, 航次由中国海洋大学“东方红 2 号”科考船实施。鲁双、霍沿东、王学伍等参加了样品的室内试验, 朱超祁、王振豪等参加了样品的采集和运输, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] WANG YUKE, GAO YUFENG, GUO LIN, et al. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129:191-202.
- [2] 刘功勋. 复杂应力条件下饱和海洋土剪切特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
LIU Gong-xun. Study on shear behaviors of marine soils under complex stress conditions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [3] LIU B, JENG D S, YE G L, et al. Laboratory study for

- pore pressures in sandy deposit under wave loading[J]. **Ocean Engineering**, 2015, 106: 207—219.
- [4] SEED H B, CHAN, C K. Clay strength under earthquake loading conditions[J]. **Journal of the Japanese Society of Irrigation Drainage & Rural Engineering**, 1966, 92(SM2): 53—78.
- [5] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 27(7): 891—895. HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 27(7): 891—895.
- [6] 栾茂田, 刘功勋, 郭莹, 等. 复杂应力条件下原状饱和海洋黏土孔压与强度特性[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(1): 151—158. LUAN Mao-tian, LIU Gong-xun, GUO Ying, et al. Characteristics of pore water pressure and strength of undisturbed saturated marine clay under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 32(1): 151—158.
- [7] 王军, 蔡袁强, 李校兵. 循环荷载作用下超固结软黏土软化-孔压模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3217—3222. WANG Jun, CAI Yuan-qiang, LI Xiao-bing. Cyclic softening-pore pressure generation model for overconsolidated clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3217—3222.
- [8] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 26(9): 1065—1071. CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 26(9): 1065—1071.
- [9] 年廷凯, 范宁, 焦厚滨, 等. 南海北部陆坡软黏土全流动强度试验研究[J/OL]. 岩土工程学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170620.1636.002.html>. NIAN Ting-kai, FAN Ning, JIAO Hong-bin, et al. Full-flow strength tests on soft clay in northern slope of South China Sea[J/OL]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170620.1636.002.html>.
- [10] 朱超祁, 贾永刚, 张民生, 等. 南海北部陆坡表层沉积物强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 863—870. ZHU Chao-qi, JIA Yong-gang, ZHANG Min-sheng, et al. Surface sediment strength in bed-slope of northern South China Sea[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(5): 863—870.
- [11] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 70—79. WANG Hai-rong, WANG Ying-min, QIU Yan, et al. Geomorphology and its control of deep-water slope of the margin of the South China Sea[J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 2008, 30(2): 70—79.
- [12] 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 69—77. SUN Yun-bao, WU Shi-guo, WANG Zhi-jun, et al. The geometry and deformation characteristics of Baiyun submarine landslide[J]. **Marine Geology & Quaternary Geology**, 2008, 28(6): 69—77.
- [13] 姜岩, 雷华阳, 郑刚, 等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3075—3080. JIANG Yan, LEI Hua-yang, ZHENG Gang, et al. Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3075—3080.
- [14] 叶俊能, 陈斌. 海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 55—60. YE Jun-neng, CHEN Bin. Dynamic strength and pore pressure property of marine deposit soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 55—60.
- [15] 汪明元, 单治钢, 王亚军, 等. 应变控制下舟山岱山海相软土动弹性模量及阻尼比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 35(7): 1503—1512. WANG Ming-yuan, SHAN Zhi-gang, WANG Ya-jun, et al. Dynamic elastic moduli and damping ratios of marine sediments at Zhoushan Daishan based on dynamic triaxial tests under strain control[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 35(7): 1503—1512.
- [16] 南京水利科学研究所. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: Ministry of water resources of the People's Republic of China, 1999.
- [17] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute. Handbook of geotechnical test techniques[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.