

DOI: 10.11779/CJGE20230807

# 海洋软黏土不排水循环强度的触变性试验研究

吴琪<sup>1</sup>, 吉东伟<sup>1</sup>, 肖兴<sup>1</sup>, 朱升冬<sup>1,2</sup>, 陈国兴<sup>\*1</sup>

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 福建永福电力设计股份有限公司, 福建 福州 350108)

**摘要:** 以长江入海口海域软黏土为研究对象, 开展了系列不固结不排水循环三轴试验, 研究了静置时间  $T$ 、含水率  $w$  及塑性指数  $I_p$  对重塑海洋软黏土不排水触变循环强度的影响。试验结果表明: 以双幅轴向应变  $\varepsilon_{ad} = 5\%$  为重塑海洋软黏土试样的失效判据, 破坏振次为 15 的循环强度  $CRR_{15}$  随  $T$  的增加而增大,  $T = 14$  d,  $CRR_{15}$  的增长速度最快,  $T > 28$  d 时  $CRR_{15}$  增加略有上升或趋于稳定。前期扰动或循环荷载的施加会导致软黏土触变性减弱, 软黏土的触变循环强度比  $A_d$  明显小于静剪强度比  $A_s$ 。  $A_d$  随  $I_p$  的增加先增大后降低, 随  $w$  的增加而增大, 随归一化含水率  $w/w_L$  的增加先增大后减小, 当  $w/w_L = 0.76$  时,  $A_d$  达到最大值。开展平行工况的无侧限抗压强度试验, 提出以循环轴应力幅值  $\sigma_d$  与 2 倍无侧限抗压强度  $q_u$  之比  $\sigma_d/2q_u$  表征循环应力水平, 发现  $\sigma_d/2q_u$  与不同  $w$  及  $T$  的试样达到  $\varepsilon_{ad} = 5\%$  所需的破坏振次  $N_f$  存在唯一性关系, 且  $\sigma_d/2q_u$  随  $N_f$  的增大呈幂函数减小。

**关键词:** 重塑海洋软黏土; 循环强度; 含水率; 塑性指数; 触变循环强度比

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)12-2513-08

**作者简介:** 吴琪(1991—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事海洋岩土动力特性研究。E-mail: qw09061801@163.com。

## Experimental study on undrained thixotropic cyclic resistance characteristics of marine soft clay

WU Qi<sup>1</sup>, JI Dongwei<sup>1</sup>, XIAO Xing<sup>1</sup>, ZHU Shengdong<sup>1,2</sup>, CHEN Guoxing<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Fujian Yongfu Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** A series of unconsolidated undrained cyclic triaxial tests are carried out on the marine soft clay in the estuary of Yangtze River. The effects of age  $T$ , water content  $w$  and plasticity index  $I_p$  on the thixotropic cyclic resistance of the remolded marine soft clay are investigated. The test results show that the cyclic resistance  $CRR_{15}$  for 15 cycles of the remodeled marine soft clay increases with  $T$  when the failure criterion is defined as the double-amplitude axial strain  $\varepsilon_{ad} = 5\%$ , and the fastest growth rate of  $CRR_{15}$  is observed when  $T = 14$  d, and the  $CRR_{15}$  increases slightly and tends to be stable when  $T > 28$  d. The thixotropy of soft clay is weakened by early disturbance or cyclic loading, and the thixotropic cyclic resistance ratio  $A_d$  is obviously smaller than the static shear strength ratio  $A_s$ .  $A_d$  first increases and then decreases with the increasing  $I_p$ , but increases with the increase of  $w$ .  $A_d$  first increases and then decreases with the increase of the normalized water content  $w/w_L$ , an increase in the normalized water content  $w/w_L$  causes  $A_d$  to first increase and then decrease, and it reaches the maximum value when  $w/w_L = 0.76$ . The unconfined compressive strength tests under parallel test conditions are carried out, and the cyclic stress level is characterized by the ratio of the cyclic axial stress amplitude  $\sigma_d$  to 2 times the unconfined compressive strength  $q_u$ ,  $\sigma_d/2q_u$ , and it is found that  $\sigma_d/2q_u$  is uniquely related to the failure cycle  $N_f$  required for the specimen to reach  $\varepsilon_{ad} = 5\%$ , and  $\sigma_d/2q_u$  decreases as a power function with the increase of  $N_f$ .

**Key words:** marine soft clay; cyclic resistance; water content; plasticity index; thixotropic cycle resistance ratio

## 0 引言

随着中国“海洋强国”战略的提出, 海洋工程在沿海地区蓬勃发展。软黏土广泛分布于近海软质海床, 在波浪、风暴潮、海啸及地震等动力荷载作用下呈现

显著循环软化特性。同时, 海洋工程基础的贯入会使

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52378346, 51978334)

收稿日期: 2023-08-21

\*通信作者 (E-mail: gxc6307@163.com)

软黏土受到扰动甚至达到重塑状态，降低其强度。然而，随着重塑黏土静置时间的增长，其力学强度会逐渐恢复，这一现象定义为黏土的触变性<sup>[1-2]</sup>。海洋基础工程设计若忽略触变性对黏土的循环强度的贡献，则会造成成本不经济。因此，研究一定时间内软黏土触变后的循环强度具有重要的实际工程意义。

国内外学者对黏土静力学特性的触变性进行了大量研究，并取得了丰硕的成果。Mitchell<sup>[3]</sup>引入触变静剪强度比  $A_s$ （一定静置时间后的静剪强度与刚重塑零时静剪强度的比值）来量化黏土发生触变后的静剪强度的恢复能力。研究表明，塑性指数  $I_p$  和含水率  $w$  是黏土  $A_s$  的重要影响因素。Yang 等<sup>[4]</sup>对前人研究进行总结，发现  $A_s$  大致随  $I_p$  的增加而增大。Ren 等<sup>[5]</sup>通过落锥试验发现黄海和东海海域软黏土的  $A_s$  会先随着  $I_p$  的增大而增加，但当  $I_p$  超过 40 后， $A_s$  与  $I_p$  之间并未呈现明显的相关性。Shahriar 等<sup>[6]</sup>通过落锥试验以及十字板剪切试验发现，当孟加拉国黏土的  $w$  接近 0.55 倍液限含水率  $w_L$  时，其静剪强度恢复可以忽略不计，而当  $w$  接近 0.75 $w_L$  时， $A_s$  可达到最大值。Mitchell<sup>[3]</sup>发现试样的  $w$  为 (0.56 ~ 0.75)  $w_L$  时，其  $A_s$  最高。Skempton 等<sup>[7]</sup>指出当  $w$  接近其塑限  $w_p$  时，土体几乎没有触变性。Seng 等<sup>[8]</sup>对 3 种日本陆域黏土进行弯曲元试验，将不同  $w$  的试样分别静置 24 h 后，测定其相应的最大剪切模量  $G_{max}$ ，发现当  $w$  接近  $w_L$  时， $G_{max}$  最大，表现出明显的触变性。Yang 等<sup>[9]</sup>通过单剪联合弯曲元试验研究发现，重塑海洋软黏土的再固结剪切强度和  $G_{max}$  与  $T$  无关。杨爱武等<sup>[10]</sup>采用便携式十字板剪切仪研究了天津软黏土的触变性，分析了  $w$ 、矿粉含量、pH 值对试样触变强度恢复的影响，从而建立了三者与  $A_s$  之间的关系模型。王文孟等<sup>[11]</sup>研究了干密度  $\rho_d$ ， $w$ ，含盐量  $c$  对宁夏黄土的触变性的影响，指出  $c$  对黄土触变影响较大。张目极等<sup>[12]</sup>分析了  $w$ ，孔隙比  $e$  以及灵敏度  $S_T$  对湛江结构性黏土触变性的影响，试验结果表明： $w$  和  $S_T$  的增大、及  $e$  的减小均会引起湛江结构性黏土  $A_s$  的增强，且  $w$  对  $A_s$  的影响最为显著。

部分学者从微观角度解释了土体触变机理。Jacobsson 等<sup>[13]</sup>发现触变的发生主要是颗粒间的重定位作用。Ren 等<sup>[14]</sup>利用扫描电镜观察触变过程中黏土的微观结构变化，发现微观结构变化主要表现在颗粒直径、颗粒方向以及颗粒间孔隙的变化，并提出定量描述和分析黏土触变性过程中的微观结构演化的概率熵。张先伟等<sup>[15]</sup>利用扫描电镜与压汞试验开展了湛江黏土的触变性微观特性研究，发现土体结构由初始分散向絮凝发展，孔隙逐步均匀分布发展。王巍<sup>[16]</sup>采用 X 射线衍射试验、扫描电子显微镜联合 X 射线能力色散谱试验、压汞试验、核磁共振试验系统研究湛江结

构性黏土的微观触变特性，发现在触变初期，重塑土微观结构表现为松散的絮凝结构，随  $T$  的增加，微观结构转变为团聚状絮凝结构。现有的研究成果为软黏土触变性的深入研究奠定了学术基础。

综上所述，国内外学者对黏土触变性的研究，主要集中在静力特性及微观机理分析层面，但在实际海域工程中，土体通常会遭受波浪、地震等的动力循环荷载，因此考虑循环荷载作用下土体的触变性意义重大。然而，对于循环荷载作用下海洋软黏土的触变性研究仍然处于初步探索阶段。因此，本文通过循环三轴试验，以  $T$ ， $w$  及  $I_p$  为影响因素研究重塑海洋软黏土循环强度的触变性，引入循环偏应力比  $\sigma_d/2q_u$  作为表征重塑海洋软黏土的循环强度的新指标，为长江入海口地区海洋岩土工程建设提供理论依据及参考。

# 1 试验方案

## 1.1 试验材料与试样制备

试验土样取自长江入海口启东段近海海域，其  $I_p$  较大，比表面积较大，颗粒粒径较小。对试样依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[17]</sup>测试其基本物理指标，结果汇总于表 1。根据原状土测得的  $I_p$  和  $w$  作为本文试验重塑试样的基本物理指标。重塑步骤如下：①将原状土烘干、碾碎，过筛(筛孔为 0.25 mm)；②称取预定质量的土(保持干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup>)，按指定  $w$  加入相应质量的水，并搅拌均匀直至成均匀土膏状；③将配好的均匀土膏分八次装入标准三轴试样饱和模具内，保持每层的击实次数一致、高度一致；④将制备的直径为 50 mm，高度为 100 mm 的圆柱试样包裹保鲜膜，储存于恒温恒湿的环境中(湿度稳定在 98%，温度恒定在 20℃)分别静置养护 0，7，14，28，60 d。试验前分层检查养护后试样的含水率，与初始含水率差值  $\Delta w_0$  不超过 1.5%方可开展试验。

表 1 海洋软黏土的基本物理性能指标

Table 1 Basic physical properties of marine soft clay							
编号	$w$ / %	$\Delta w_0$ / %	$\rho$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	$G_s$	$w_L$ / %	$w_p$ / %	$I_p$
1	45	-0.5~0.3	1.68	2.72	50.0	24.6	25.4
2	45	1.0~1.4	1.81	2.69	60.1	25.1	35.0
3	45	0.2~0.5	2.14	2.68	70.6	26.3	44.3
4	40	0.0~0.3	2.03	2.71	57.8	23.6	35.2
5	35	0.75~1.2	1.77	2.70	64.8	29.2	35.6

## 1.2 试验仪器与试验方案

试验通过 GDS 公司研制的伺服电机控制的循环三轴仪完成，该试验仪器由计算机系统、试验数据采集系统、测量系统以及加载系统组成，其技术参数详见文献[18]。

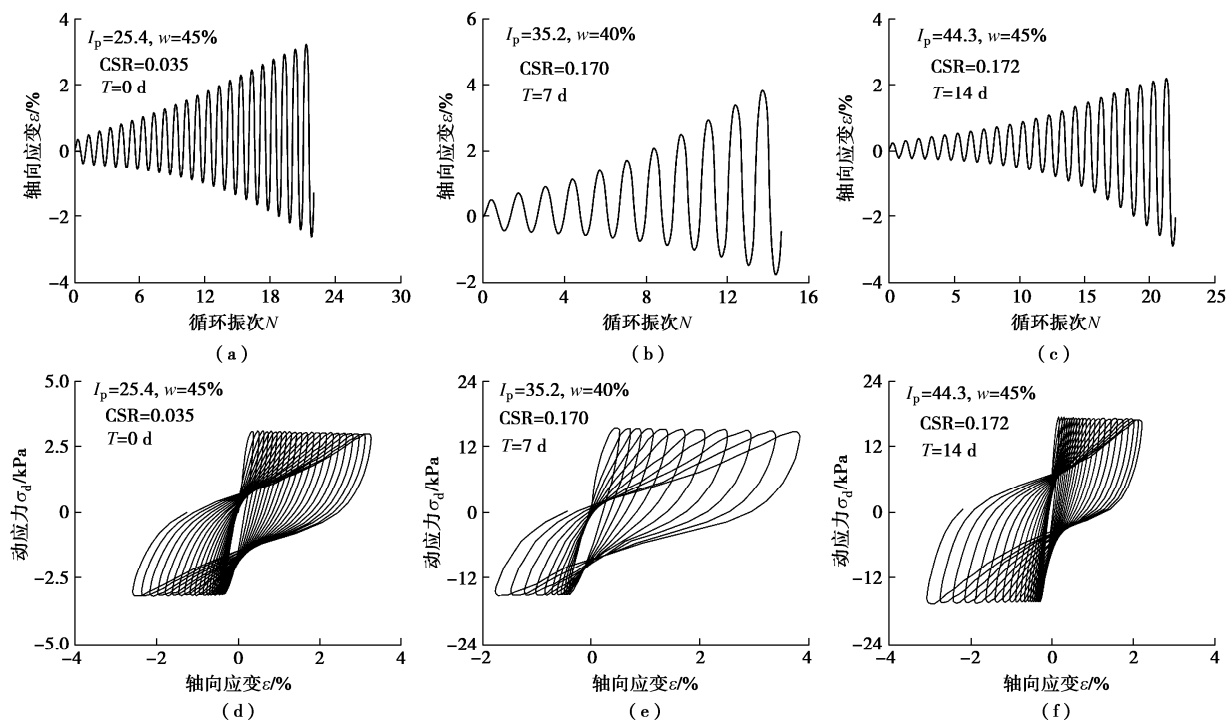


图 1 不同  $T$  下海洋软黏土不排水循环三轴试验典型试验结果

Fig. 1 Typical results of undrained cyclic triaxial tests for marine soft clay at different  $T$

Yang 等<sup>[9]</sup>通过静单剪联合弯曲元试验研究了固结围压对不同  $T$  下土体剪切强度及  $G_{\max}$  的影响,发现当有效固结围压大于 14 kPa 时,重塑土体不再呈现剪切强度或  $G_{\max}$  触变恢复,也即,固结效应会抵消由触变效应带来的强度增益。因此,为研究重塑海洋软黏土不排水循环强度的触变特性,统一采用不固结不排水的循环三轴试验,且为了避免初始有效围压  $\sigma'_{3c}$  过大对触变效应的影响,选用  $\sigma'_{3c}$  为 50 kPa。试验加载波形为正弦波,加载频率为 0.1 Hz,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 循环三轴试验工况

Table 2 Cases of cyclic triaxial tests

含水率 $w/\%$	塑性指 数 $I_p$	循环应力比CSR	静置时间 $T/\text{d}$
25.4		0.030, 0.035, 0.040	0
		0.032, 0.037, 0.042	7
		0.033, 0.038, 0.044	14
		0.035, 0.041, 0.047	28
		0.037, 0.043, 0.049	60
	45	0.080, 0.090, 0.111	0
		0.095, 0.107, 0.131	7
		0.102, 0.115, 0.141	14
		0.111, 0.125, 0.152	28
		0.120, 0.135, 0.165	60
40	35.0	0.140, 0.150, 0.160	0
		0.148, 0.158, 0.169	7
		0.155, 0.166, 0.177	14
		0.165, 0.177, 0.189	28
		0.172, 0.185, 0.197	60
	44.3	0.130, 0.140, 0.170	0,7,14,28,60
		0.200, 0.250, 0.300	0,7,14,28,60

循环应力比 CSR 定义为

$$CSR = \frac{\sigma_d}{(2\sigma'_{3c})} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_d$  为轴向动应力。

2 试验结果分析

图 1 给出了具有不同  $T, w, I_p$  的 3 个试样的典型试验结果。由图 1 可知,不同试验工况下试样呈现出循环强度的触变恢复特性。当  $T = 0$  时,触变效应尚未发生,循环强度相对较低; $T = 7$  d 时,是发生触变效应的早期阶段,土颗粒发生大量的重新排列组合; $T = 14$  d 时,试样在经历一段时间后的触变效应后,其循环强度触变恢复特性显著。此外,随着循环振次  $N$  的增加,双幅轴向应变  $\varepsilon_{ad}$  不断增大,滞回曲线逐渐向应变增大的方向倾斜,倾斜角度也随着增大,表现出循环软化特征。本文选取  $\varepsilon_{ad} = 5\%$  作为循环破坏标准。

2.1 静置时间  $T$  对循环强度的影响

图 2 给出了所有工况的循环强度曲线。可以看出随着 CSR 的增大,试样达到破坏所需的破坏振次  $N_f$  逐渐减小,试样更容易发生破坏;当 CSR 相同时,试样的  $T$  越大,试样越难破坏,即试样循环强度随  $T$  的增加而增大。海洋软黏土在不同的  $T$  下达到循环破坏标准所需的 CSR 介于 0.03~0.3,且与  $I_p$  和  $w$  相关。循环强度  $CRR_{15}$  定义为在  $N_f = 15$  下土体达到循环破坏标准所需的 CSR<sup>[19-20]</sup>。

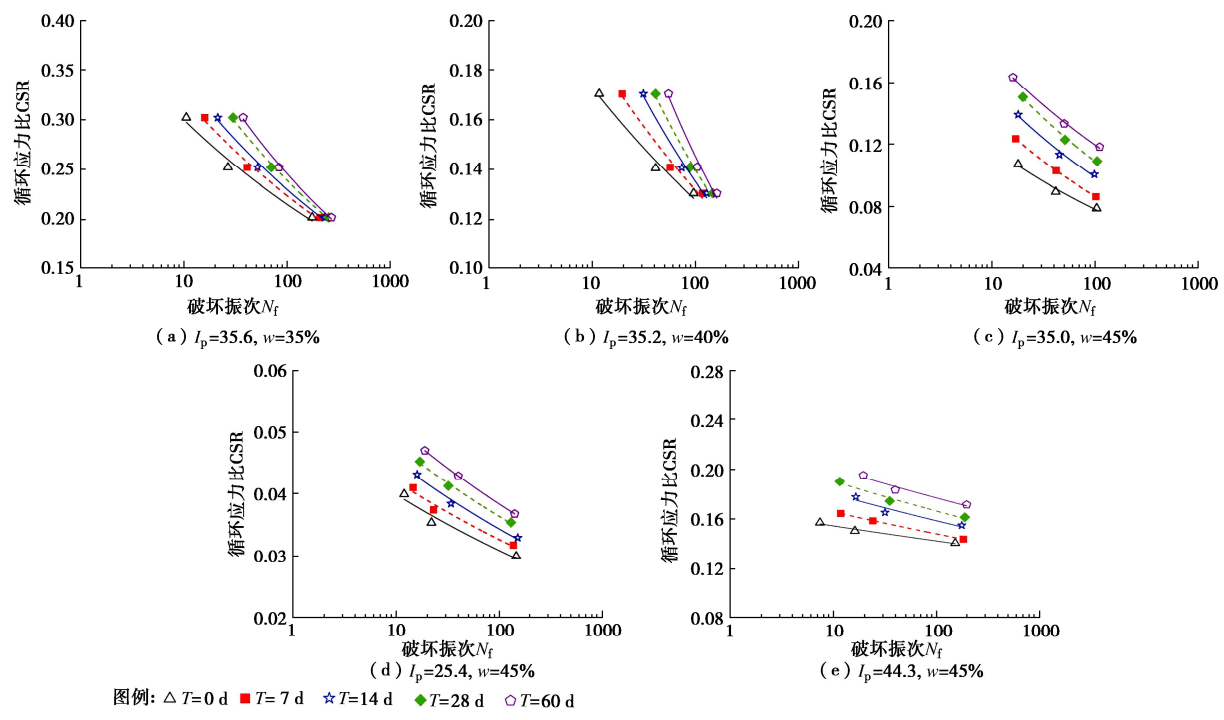


图 2 重塑海洋软黏土循环强度曲线

Fig. 2 Curves of cyclic resistance of remolded marine soft clay

图 3 为重塑海洋软黏土  $CRR_{15}$  与  $T$  的关系曲线。可以发现：不同  $I_p$  和  $w$  的重塑海洋软黏土均表现出循环强度的触变恢复特性， $CRR_{15}$  均随  $T$  的增加而增大， $T=14\text{ d}$ ， $CRR_{15}$  的增长速度最快， $T>28\text{ d}$  时， $CRR_{15}$  增加略有上升或趋于稳定。 $I_p$  越小或  $w$  越大时， $CRR_{15}$  越低，且触变性也越不明显。当  $I_p=25$  且  $w=45\%$  时，试样相对较软，其  $CRR_{15}$  最低，触变性最弱。总体而言，试样在恒温恒湿的静置条件下，土颗粒和水分子及阴阳离子会重新排列组合，使得分散的土颗粒相互靠近逐渐形成一种新的絮凝结构。随着  $T$  的增加，形成的絮凝结构进一步增强，从而导致土体强度提高。在试样静置的前期，能够参与组合排列的颗粒和水分子及阴阳离子有很多，经过一段时间的静置后，颗粒排列趋于稳定，能够参与重新排列的成分变少，从而导致触变强度增加缓慢，最终趋于稳定状态。

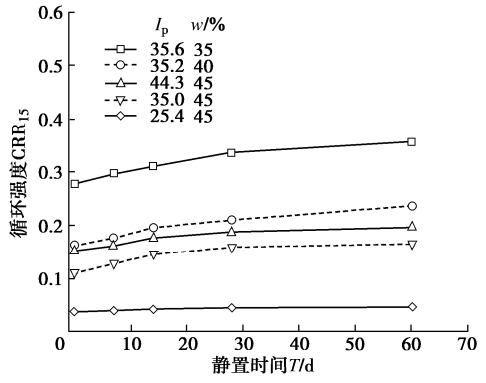


图 3 重塑海洋软黏土  $CRR_{15}$  与  $T$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $CRR_{15}$  and  $T$  of remodeled marine soft clay

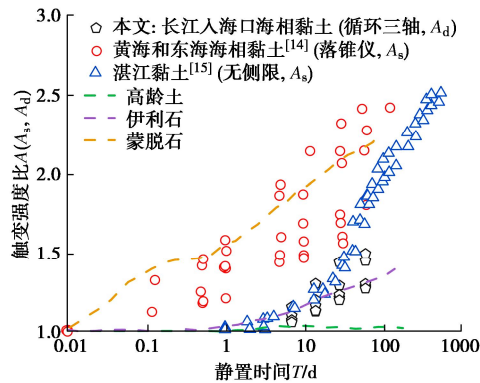
为便于进一步分析循环荷载作用下土体的触变性，本文定义触变循环强度比  $A_d$ ：

$$A_d = \frac{CRR_{15,t}}{CRR_{15,0}} \quad (2)$$

式中： $CRR_{15,t}$  为  $T=t$  时海域软黏土的  $CRR_{15}$ ； $CRR_{15,0}$  为  $T=0$  时（未发生触变效应）海域软黏土的  $CRR_{15}$ 。

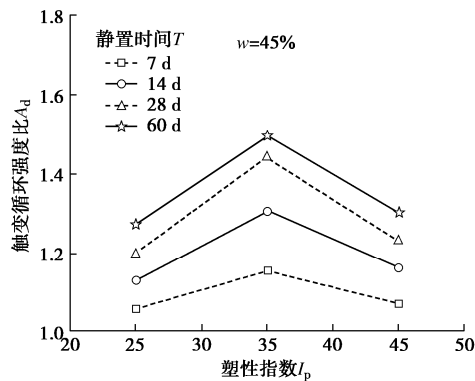
图 4 给出长江入海口海域软黏土、其他地区黏性土以及纯矿物黏土（高岭土、伊利石和蒙脱石<sup>[7]</sup>）的触变强度比  $A$  随  $T$  的变化规律。可以看到，土样的  $A$  随  $T$  逐渐增大，长江入海口海域软黏土的  $A_d$  随  $T$  的变化规律与湛江黏土的  $A_s$  随  $T$  的变化规律相似，但整体上，湛江黏土的  $A_s$  增长速度明显大于长江入海口海洋软黏土。结果显示长江入海口海洋软黏土在静置 60 d 后土体的循环强度是其扰动后的 1.5 倍，而湛江黏土静置 500 d 土体剪切强度达到扰动时的 2.58 倍。一般认为，软黏土的触变是一个长期持续的过程<sup>[21]</sup>。

从图 4 还可以发现，采用循环三轴试验获得的长江入海口海域软黏土  $A_d$ ，相较湛江黏土、黄海、东海海域软黏土的  $A_s$  要小。原因在于当采用落锥仪试验或无侧限抗压强度试验研究土体触变强度比  $A$  时，两种试验方法对试样的扰动较小，不会破坏由触变形成的新结构；对于循环三轴试验，由于装样前期扰动或循环荷载的施加，使得触变效应相较静力试验要弱得多；另外由于海洋软黏土的复杂性及较强的区域性导致其基本物理属性不同，不同黏土对应的触变强度比有较大差别。

图4 不同  $T$  的触变强度比变化曲线Fig. 4 Variation of thixotropic strength ratio at different  $T$ 

## 2.2 塑性指数 $I_p$ 对循环强度的影响

$I_p$  是黏性土重要的基本物理指标。图5为  $w = 45\%$  时, 不同  $T$  下重塑海洋软黏土的  $A_d$  与  $I_p$  的关系曲线。

图5 不同  $T$  下重塑海洋软黏土  $A_d$  与  $I_p$  的关系Fig. 5 Relationship between  $A_d$  and  $I_p$  of remodeled marine soft clay

由图5可知, 当  $w$  为定值时, 重塑海洋软黏土在  $T$  分别为7, 14, 28, 60 d 的  $A_d$  均随  $I_p$  的增加先增大后降低。这与Ren等<sup>[14]</sup>试验所得的  $I_p$  对重塑海洋软黏土触变静剪强度比  $A_s$  影响规律一致。对于特定的海洋软黏土, 当  $w$  相同,  $I_p$  较小或较大时, 在触变过程中, 颗粒间受到的吸力较为强烈或非常薄弱, 导致土颗粒自发产生的重新排列受到极大的限制, 较难形成新的结构, 因此  $A_d$  比较低。而当  $I_p$  较为适中时, 土颗粒更易产生相对运动并形成新的结构, 从而更易形成新的絮凝结构, 从而导致  $A_d$  增大。

## 2.3 含水率 $w$ 对循环强度的影响

图6为  $I_p \approx 35$  的重塑海洋软黏土在不同  $T$  下的  $A_d$  和  $w$  的关系曲线。可以发现, 在7, 14, 28, 60 d 内重塑海洋软黏土的  $A_d$  随着  $w$  的增加而增大,  $T = 28$  d 时, 试样  $w$  从35%增加到40%,  $A_d$  增量为0.08; 当  $w$  从40%增加到45%时,  $A_d$  增量为0.15。从以上分析可以看出, 在试验  $w$  范围内,  $I_p$  相近时,  $w$  值越高, 重塑海洋软黏

土的  $A_d$  越大。这是因为当  $w$  较小时, 土颗粒之间的主要以强结合水为主, 土颗粒间自由水较少, 颗粒间接触稳定, 颗粒与颗粒之间吸力较大, 颗粒发生重新排列的能力弱, 触变循环强度比较小; 当  $w$  增加时, 颗粒间自由水增多, 自由水夹带细颗粒填充孔隙, 使得颗粒间的黏结在触变时间效应的作用下变得更加密实, 因此重塑海洋软黏土的  $A_d$  增大。

由上可知,  $w$  和  $I_p$  都会对重塑海洋软黏土的触变特性产生一定的影响, 但是由于土的表面积和矿物成分的不同, 其吸附结合水的能力不一样。当  $w$  相同时, 对于  $I_p$  较高的试样, 水的形态可能全是结合水; 而对于  $I_p$  较低的试样, 则可能相当部分已经是自由水。仅研究单一的  $w$  或  $I_p$  对  $A_d$  的影响, 并不能很好的说明重塑海洋软黏土的触变性能。因此, 引入归一化含水率  $w/w_L$ ,  $w/w_L$  能够综合反应土的软硬程度。

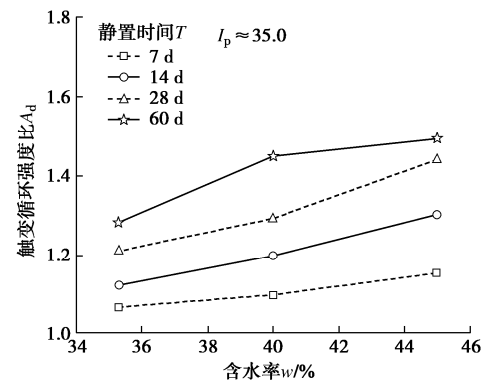
图6 不同  $T$  下重塑海洋软黏土  $A_d$  与  $w$  的关系Fig. 6 Relationship between  $A_d$  and  $w$  of remodeled marine soft clay

图7为不同  $T$  下重塑海洋软黏土的  $A_d$  和  $w/w_L$  的关系曲线。由图可知, 对于  $T$  为7, 14, 28, 60 d 的试样, 当  $w/w_L \approx 0.76$  时,  $A_d$  最高, 当  $w/w_L < 0.76$  时,  $A_d$  随  $w/w_L$  的增加而增大; 当  $w/w_L > 0.76$  时,  $A_d$  则会减小。这与 Mitchell 等<sup>[3]</sup>和齐明鑫<sup>[22]</sup>的试验得到的  $w/w_L$  对重塑海洋软黏土的  $A_s$  影响规律一致。

值得注意的是, 当  $w = 45\%$  且  $I_p = 25$  时,  $w/w_L \approx 0.95$ , 此时试样的  $w$  接近  $w_L$ , 结合图3, 7 可知, 在触变时间效应的作用下, 重塑海洋软黏土只能表现出微弱的触变性。产生这些现象的主要原因是: 当  $w/w_L$  较小时, 土体颗粒之间存在较少的自由水, 土颗粒周围的结合水膜较薄, 所受电场的作用很大, 其特性接近于固体, 使得土颗粒自发产生的颗粒排列受到极大的限制, 从而导致土颗粒间较难形成新的胶结或絮凝结构, 因此触变强度恢复能力较低; 当  $w/w_L \approx 0.76$  时, 颗粒间自由水增多, 在触变过程中, 自由水在颗粒孔隙流动, 夹带黏土颗粒填充孔隙, 且黏土周围双电层

厚度适中，颗粒之间的距离相对合适，颗粒间自发产生的运动、颗粒的重新排列受到较小的限制，从而更容易形成一种新的絮凝结构，因此，触变强度恢复特性也就越强。当  $w/w_L$  较大时，土颗粒附近双电层厚度变大，颗粒之间存在大量的自由水，使得颗粒之间距离变大，从而颗粒间吸力非常微弱，因此触变效应也就相对较弱。 $w/w_L$  能够很好的综合反应  $w$  和  $I_p$  对  $A_d$  的影响，表明  $w/w_L$  和重塑海洋软黏土触变特性之间有良好的关联性。

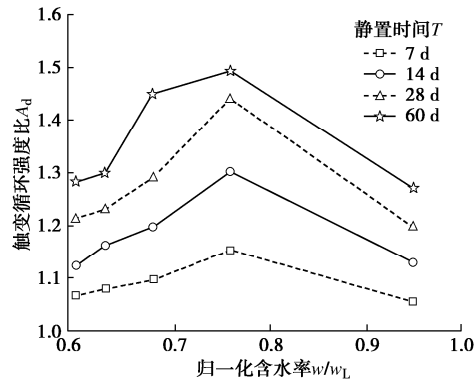


图 7 不同  $T$  下重塑海洋软黏土的  $A_d$  和  $w/w_L$  的关系曲线  
Fig. 7 Relationship between  $A_d$  and  $w/w_L$  of remodeled clay

### 3 基于无侧限抗压强度的循环强度统一评价方法

因触变性所形成的土体结构非常微弱，在外力的扰动下，这种土体结构非常容易遭到破坏，考虑到无侧限抗压强度试验因其对试样扰动较小且具备室内室外都可随时操作等优点，可以直观地反应土体在时间效应下的触变性，许多学者利用无侧限抗压强度试验来研究土体的触变性<sup>[23]</sup>。本文依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[17]</sup>开展无侧限抗压强度试验，试验数据详见表 3。其中无侧限抗压强度  $q_u$  取值标准为当土样属于脆性破坏时取峰值强度，当试样属于塑性破坏时取应变为 15%时对应的强度。图 8 为与循环三轴试验相同条件下的无侧限抗压强度  $q_u$  与  $T$  的关系曲线，由图 8 可知， $q_u$  随  $T$  的变化与  $CRR_{15}$  随  $T$  的变化趋势基本一致，表现为前期强度增加快，后期强度增加缓慢。

表 3 不同  $T$  下重塑海洋软黏土 的无侧限抗压强度

Table 3 Unconfined compressive strengths of remodeled marine soft clay						
$I_p$	$w/\%$	无侧限抗压强度 $q_u/\text{kPa}$				
		0 d	7 d	14 d	28 d	60 d
25.4	45	1.216	1.288	1.337	1.437	1.493
35.0	45	2.164	2.578	2.772	3.000	3.25
35.2	40	2.845	3.22	3.526	3.696	3.915
35.6	35	5.374	5.544	5.958	6.395	6.521
44.3	45	3.891	4.110	4.234	4.593	4.789

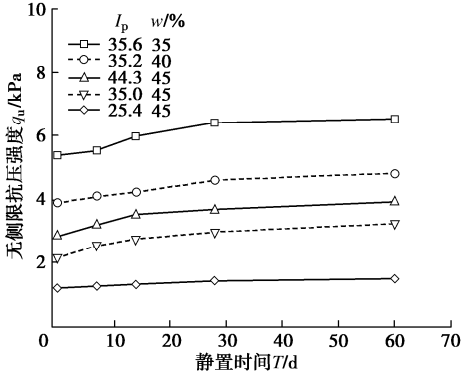


图 8 重塑海洋软黏土的  $q_u$  与  $T$  的关系

Fig. 8 Relationship between  $q_u$  and  $T$  of remodeled marine soft clay

图 9 给出了由  $q_u$  得到的  $A_s$  与  $T$  的关系曲线，由图可知， $A_s$  随  $T$  的增加而增大，整体趋势和  $A_d$  随  $T$  的变化规律一致。在相同的  $T$  下， $I_p=35.4$ ， $w=45\%$  ( $0.76w_L$ ) 的重塑海洋软黏土  $A_s$  最大，表现出较强的触变特性； $I_p=25.4$ ， $w=45\%$  ( $0.95w_L$ ) 的重塑海洋软黏土  $A_s$  最低，表现出较弱的触变性。整体规律与  $A_d$  随  $w/w_L$  的变化相似。

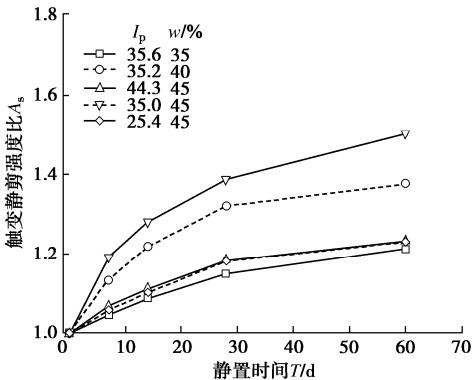


图 9 重塑海洋软黏土的  $A_s$  与  $T$  的关系

Fig. 9 Relationship between  $A_s$  and  $T$  of remodeled marine soft clay

由图 2 可知，对于不同  $I_p$ ， $w$  及  $T$  的重塑海洋软黏土循环强度，CSR 并不能将其进行归一化描述。Hirao 等<sup>[24]</sup>曾对陆域软黏土进行一系列循环三轴试验，提出静剪强度与循环应力幅值  $\sigma_d$  之间具有正相关性。据此，为建立触变效应下重塑海洋软黏土循环强度的统一评价方法，本文引入强度修正循环应力比  $\sigma_d/2q_u$  作为表征动、静应力状态下重塑海洋软黏土的循环强度的新指标。

图 10 绘制了不同  $I_p$  下的  $\sigma_d/2q_u$  与引起  $\varepsilon_{ad} = 5\%$  所需的破坏振次  $N_f$  之间的关系。可以看出，当  $I_p$  相同时，具有不同  $w$  和  $T$  的海洋软黏土的  $\sigma_d/2q_u$  与  $N_f$  之间存在单一性关系，且两者之间服从负幂函数关系：

$$\frac{\sigma_d}{2q_u} = C(N_f)^{-d} \quad (3)$$



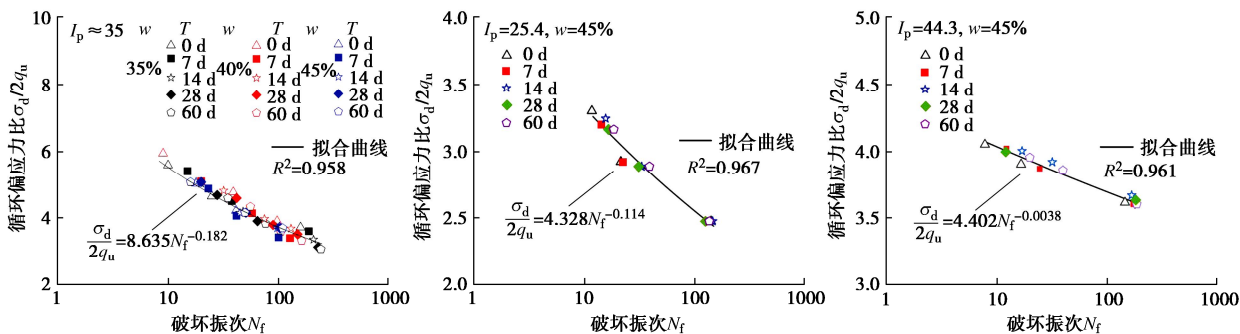


图 10 不同塑性指数  $I_p$  下重塑海洋软黏土的归一化循环强度曲线

Fig. 10 Curves of normalized cyclic resistance of remodeled marine soft clay with different  $I_p$

式中:  $q_u$  为同试验条件下的无侧限抗压强度;  $C, d$  为与土性质相关的经验参数。模型与试验数据之间的拟合程度较高, 离散性较小, 表明以  $\sigma_d/2q_u$  为循环应力水平指标可以统一表征不同  $w$  及  $T$  对海洋软黏土循环强度触变性。

4 结 论

以长江入海口海域软黏土为研究对象, 开展了系列平行的不固结不排水循环三轴试验和无侧限抗压强度试验, 得到3点结论。

(1) 具有不同  $w$  和  $I_p$  的重塑海洋软黏土均呈现出触变性, 其  $CRR_{15}$  随  $T$  的增加而增大。  $T = 14$  d,  $CRR_{15}$  的增长速度最快,  $T > 28$  d 时  $CRR_{15}$  增加略有上升或趋于稳定,  $I_p$  越小或  $w$  越大时,  $CRR_{15}$  越低, 且触变性也越弱。

(2)  $w$  和  $I_p$  是影响土体触变性的重要参数。触变循环强度比  $A_d$  随  $I_p$  的增加先增大后降低; 随  $w$  的增加而增大; 随归一化含水率  $w/w_L$  的增加先增大后减小。当  $w/w_L = 0.76$  时,  $A_d$  达到最大值。  $w, I_p$  及  $w/w_L$  对海洋软黏土  $A_d$  的影响规律与已有学者发现的  $w, I_p$  及  $w/w_L$  对触变静剪强度比  $A_s$  的影响规律一致, 但海洋软黏土的  $A_d$  明显小于  $A_s$ 。

(3) 提出以循环轴应力幅值  $\sigma_d$  与 2 倍无侧限抗压强度  $q_u$  之比  $\sigma_d/2q_u$  表征循环应力水平。当  $I_p$  一定时,  $\sigma_d/2q_u$  与  $N_f$  存在唯一性关系, 且  $\sigma_d/2q_u$  随  $N_f$  的增大呈幂函数减小。循环应力水平指标  $\sigma_d/2q_u$  可以统一表征不同  $w$  及  $T$  对海洋软黏土循环强度触变性。

参考文献:

[1] KUL'CHITSKII G B. Thixotropy of soils of the Middle Ob region and its consideration when constructing pile foundations[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975, 12(3): 168-170.  
[2] ROMANOV S V, ROMANOV D A. Procedure for impressing reinforced-concrete piles into leader holes using soil

thixotropy[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997, 34(1): 22-24.  
[3] MITCHELL J K. Fundamental aspects of thixotropy in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1960, 86(3): 19-52.  
[4] YANG S L, ANDERSEN K H. Thixotropy of marine clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, 39(2): 331-339.  
[5] REN Y B, YANG S L, ANDERSEN K H, et al. Thixotropy of soft clay: a review[J]. Engineering Geology, 2021, 287: 106097.  
[6] SHAHRIAR A R, ABEDIN M Z, JADID R. Thixotropic aging and its effect on 1-D compression behavior of soft reconstituted clays[J]. Applied Clay Science, 2018, 153: 217-227.  
[7] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Géotechnique, 1952, 3(1): 30-53.  
[8] SENG S, TANAKA H. Properties of very soft clays: a study of thixotropic hardening and behavior under low consolidation pressure[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 335-345.  
[9] YANG S L, REN Y B, ANDERSEN K H. Effects of thixotropy and reconsolidation on the undrained shear characteristics of remoulded marine clays[J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109888.  
[10] 杨爱武, 杨少朋, 张 静, 等. 天津软黏土触变特性研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1528-1534. (YANG Aiwu, YANG Shaopeng, ZHANG Jing, et al. Study on thixotropic properties of Tianjin soft clay[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1528-1534. (in Chinese))  
[11] 王文孟, 郭少春, 崔自治. 可溶盐对黄土触变性的作用效应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3385-3388, 3395. (WANG Wenmeng, GUO Shaochun, CUI Zizhi. Study of effect of soluble salt on loess thixotropy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3385-3388, 3395. (in Chinese))  
[12] 张目极, 殷建风, 王 巍, 等. 湛江组结构性黏土物理力

- 学特性对其触变性的影响[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(4): 1240-1246. (ZHANG Muji, YIN Jianfeng, WANG Wei, et al. Influence of physico-mechanical parameters of structural clay in Zhanjiang Group on its thixotropy[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(4): 1240-1246. (in Chinese))
- [13] JACOBSSON A, PUSCH R. Thixotropic action in remoulded quick clay[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin De L'Association Internationale De Géologie De L'Ingénieur, 1972, **5**(1): 105-110.
- [14] REN Y B, YANG S L, ZHANG S X, et al. Experimental study of the thixotropic strength recovery and microstructural evolution of marine clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, **148**(8): 04022059.
- [15] 张先伟, 孔令伟, 李 峻, 等. 黏土触变过程中强度恢复的微观机理[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1407-1413. (ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, LI Jun, et al. Microscopic mechanism of strength increase of clay during thixotropic process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1407-1413. (in Chinese))
- [16] 王 巍. 湛江组结构性黏土触变机理研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019. (WANG Wei. Study on Thixotropic Mechanism of Structural Clay in Zhanjiang Formation[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [17] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [18] 马维嘉, 陈国兴, 李 磊, 等. 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 981-988. (MA Weijia, CHEN Guoxing, LI Lei, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 981-988. (in Chinese))
- [19] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (XIE Dingyi. Soil Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [20] 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, 1975.
- [21] ZHANG X W, KONG L W, YANG A W, et al. Thixotropic mechanism of clay: a microstructural investigation[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(1): 23-35.
- [22] 齐明鑫. 基于深度学习下的重塑土触变固结研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022. (QI Mingxin. Study on Thixotropic Consolidation of Remodeled Soil Based on Deep Learning[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [23] 卢瑞娜, 梁仁旺, 巩天真. 灵敏性粉土的压缩及触变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, **18**(1): 227-235. (LU Ruina, LIANG Renwang, GONG Tianzhen. Study on compression and thixotropy properties of sensitive silt[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, **18**(1): 227-235. (in Chinese))
- [24] HIRAO K, YASUHARA K. Cyclic strength of underconsolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(4): 180-186.