

文章编号:1673-9469(2024)03-0059-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.03.008

海洋典型粘性土触变强度恢复特性试验研究

李书兆¹,付殿福¹,张晖¹,申辰¹,刘润²,李天亮^{2*},李成凤²

(1. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心,北京 100028;

2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要: 针对我国南海不同区域的海洋粘土,采用落锥试验研究了土体重塑不同时间后的触变恢复特性,分析了土体强度在含水率、塑性指数、灵敏度等多种因素影响下的恢复规律。研究表明:我国南海不同海域粘土均表现出明显的触变恢复特性,且这一特性受土体多种物理因素影响显著;要格外关注灵敏度较高的土体,避免因安装初期加载过度导致破坏;在含水率 $w = 30.2\% \sim 43.8\%$ 、塑性指数 $I_p = 10.2\% \sim 19.7\%$ 、液性指数 $I_L = 0.56 \sim 1.17$ 、灵敏度 $S_l = 4 \sim 7.9$ 这一区间内,土体恢复特性随含水率、塑性指数、液性指数和灵敏度的增大分别呈增大、增大、增大和减小的趋势;土体扰动 3 h, 1、3、10、30、60 d 时,平均恢复到其原状土强度的 20.0%、22.4%、25.1%、28.6%、32.6%、35.9%。

关键词: 触变性;强度;落锥试验;海洋粘土;灵敏度

中图分类号:TU447

文献标识码:A

Experimental Study on Recovery Characteristics of Thixotropic Strength of Typical Marine Clayey Soil

LI Shuzhao¹, FU Dianfu¹, ZHANG Hui¹, SHEN Chen¹, LIU Run², LI Tianliang^{2*}, LI Chengfeng²

(1. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The thixotropic recovery characteristics of marine clay in different regions of the South China Sea after remolding at different times were studied using a falling cone test. The recovery law of soil strength under the influence of water content, plasticity index, sensitivity and other factors is analyzed. The results show that the clays in different areas of the South China Sea exhibit obvious thixotropic recovery characteristics, which are significantly affected by various physical factors. Pay special attention to soil with high sensitivity to avoid damage caused by excessive loading during the initial installation period. In the range of water content $w = 30.2\% - 43.8\%$, plasticity index $I_p = 10.2\% - 19.7\%$, liquid index $I_L = 0.56 - 1.17$, and sensitivity $S_l = 4 - 7.9$, the soil recovery characteristics increase, increase, and decrease with the increase of water content, plasticity index, liquid index, and sensitivity, respectively. When the soil mass is disturbed for 3 hours, 1 day, 3 days, 10 days, 30 days, and 60 days, it recovers to 20.0%, 22.4%, 25.1%, 28.6%, 32.6%, and 35.9% of the original soil strength on average.

Key words: thixotropy; strength; falling cone test; marine clay; sensitivity

收稿日期:2023-07-10

基金项目:国家重点研发项目(2022YFB2603000);中海油有限公司科研项目(CNOOC-YXKJ-SHENHAI-2021-01)

作者简介:李书兆(1974-),女,河北邢台人,博士,高级工程师,研究方向:海洋岩土工程。

* 通信作者:李天亮(1994-),男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究方向:岩土力学。

土的触变性是指土体在外力作用下结构遭到破坏,导致其强度迅速降低,当外力停止后,在恒定的温度、含水率、体积等条件下,土体结构随时间逐渐恢复,在宏观上表现为土体强度随时间增长的过程^[1]。在海上基础设计中,基础安装如打桩或筒型基础沉贯后,均会对周围土体产生扰动,导致基础持力层及周遭土体强度下降,若在这一时段对基础施加较大荷载,将会严重威胁到基础正常服役^[2]。因此,明确土体触变特性,科学地预估土体扰动后强度随时间的恢复情况,成为基础安全承载的关键。

目前国内外学者针对土体触变性开展了大量的研究。Skempton等^[3]在1952年首先发现土体的触变性受含水率影响显著。之后,Mitchell^[1]从微观上解释了土体触变性受含水率影响的原因。当土体的含水率低于塑限时,土体仍具有触变性,其不排水抗剪强度仍然可以恢复^[4]。粘土中的矿物组成同样是影响土体触变性的重要因素,天然粘土的触变性很可能强烈地依赖于它们的矿物组成。高岭土几乎不具有触变性,伊利石触变强度随时间变化适度增加,而膨润土的强度在很短时间内迅速增加,一年后仍继续增强^[3]。此外,土体中盐分含量对触变性的影响也受到了大量学者的关注。Lu等^[5]发现,采用淡水制备的土样在相同触变时间后其触变强度比要稍微高于盐水制备的样品。Perret等^[6]发现土样的触变强度比随着含盐量的增加逐渐减小。Abdou等^[7]发现不含有或者低浓度易溶盐的土样能够表现出触变性,而高浓度易溶盐的土样几乎没有触变性。尽管上述工作极大地推动了粘土触变性的研究,但目前针对海洋粘土开展的研究相对较少^[8-12],针对中国南海区域粘土开展的触变性研究更为少见,这在一定程度上限制了中国南海区域海上基础的设计与发展。

目前,开展土体触变性试验的测试方法主要有落锥法^[13-15]、十字板剪切^[16]、无侧限压缩^[17]、直剪试验^[18]、环剪试验^[19],其中十字板剪切和落锥法的应用最为广泛。有研究者认为,十字板剪切试验中,叶片插入土体这一过程会对土体产生扰动,进而导致土体中由触变产生的结构恢复遭到破坏。因此,落锥法被作为触变性试验的推荐方法^[20]。

综上所述,本文通过落锥法开展触变试验,探

究不同触变时间下南海原状粘土的触变恢复特性,以期给出中国南海区域结构物基础在安装初期承载力设计所需的土体结构强度恢复下限与上限,这些针对南海粘土触变恢复特性的研究将为该区域海洋建筑物设计提供直接依据,也为其他类似工程地质区域提供借鉴。

1 触变性与触变试验

1.1 粘土的触变性

土体触变性现象如图1所示。在未扰动的情况下,土体强度为初始强度 $S_{u,0}$,即原状土强度。经过重塑后,土体强度会发生一定程度的下降,变为重塑强度 $S_{u,rem}$ 。在恒定的含水率和体积等条件下,土体经过触变,其强度较重塑强度 $S_{u,rem}$ 发生一定程度的增长,此时土体的强度变为 $S_{u,t}$ 。值得关注的是,土体强度经触变恢复后,不是所有的土体均能恢复到初始强度值。而在海上基础安装过程结束后,土体短期恢复程度对于基础承载力预估具有重要的意义,本文针对南海土样开展触变性试验研究,将土体重塑后经触变恢复的强度 $S_{u,t}$ 与初始强度 $S_{u,0}$ 的比值定义为恢复比 $x\%$,用来分析土体在不同触变时间下的恢复程度。

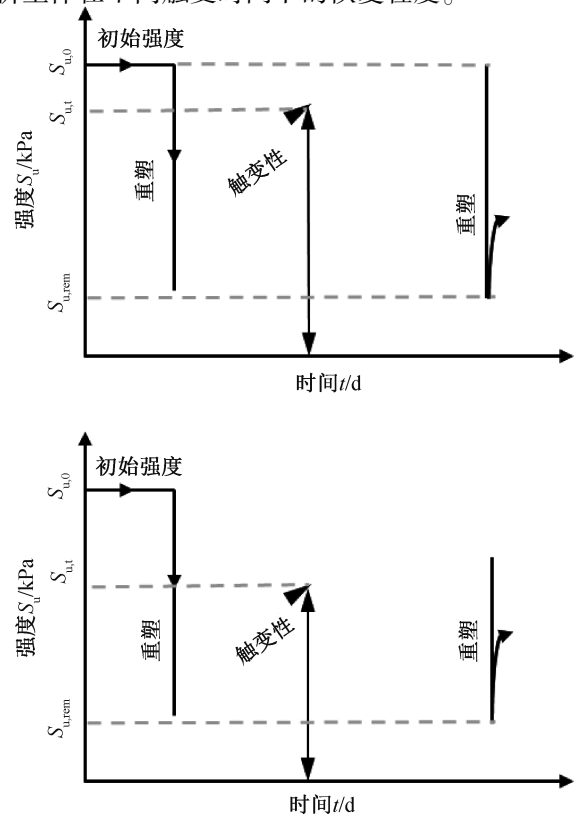


图1 土体触变性示意图^[3]

Fig. 1 Schematic diagram of soil thixotropy

表1 南海原状土参数

Tab.1 Parameters of undisturbed soil in the South China Sea

序号	土样编号	土体深度/m	天然含水率 $w/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L	灵敏度 S_t	OCR
1	SCS-A1	1.45	32.0	14.2	1.12	4.9	11.0
2	SCS-A2	7.55	34.1	14.6	0.82	5.5	4.6
3	SCS-A3	9.50	33.3	13.0	0.90	4.8	4.0
4	SCS-A4	12.65	33.4	13.7	0.83	5.3	3.6
5	SCS-A5	14.65	30.2	11.4	0.75	4.8	3.2
6	SCS-A6	18.55	34.8	14.3	0.77	6.0	2.8
7	SCS-B1	3.65	33.4	13.3	0.94	5.3	10.6
8	SCS-B2	5.25	32.2	13.2	0.75	6.8	8.3
9	SCS-B3	5.55	33.1	11.6	0.98	5.5	8.0
10	SCS-B4	6.30	35.6	15.1	0.90	6.4	7.1
11	SCS-B5	8.55	33.3	14.4	0.73	6.7	6.1
12	SCS-B6	12.30	37.9	16.7	0.86	6.8	5.2
13	SCS-B7	17.40	35.0	13.8	0.60	6.7	4.2
14	SCS-B8	17.70	35.3	14.7	0.95	6.1	4.2
15	SCS-B9	19.60	31.0	15.4	0.64	7.0	3.6
16	SCS-B10	33.25	35.7	10.2	0.91	5.9	2.6
17	SCS-B11	42.75	33.2	12.0	0.56	5.6	2.4
18	SCS-B12	46.75	32.0	11.2	1.17	7.8	2.4
19	SCS-C1	6.95	43.8	18.3	1.08	7.9	2.7
20	SCS-C2	14.30	36.8	14.9	0.77	4.6	1.8
21	SCS-C3	11.45	42.4	19.7	0.72	4.0	2.1
22	SCS-C4	15.50	37.7	19.0	0.85	5.2	1.7
23	SCS-C5	16.55	37.5	16.1	0.93	4.4	1.8
24	SCS-C6	30.30	34.0	12.0	0.80	5.6	1.2

1.2 试验土体

试验土样采用南海北部区域3个深水油田平台场址钻孔取样得到的原状土。为了分析典型物性参数对土体触变恢复特性的影响,选取不同含水率 w 、塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、灵敏度 S_t 以及不同超固结比 (Overconsolidated Ratio, OCR) 的土体开展试验。根据南海北部区域土体的典型物性参数分布范围,选择 $w = 30.2\% \sim 43.8\%$ 、 $I_p = 10.2\% \sim 19.7\%$ 、 $I_L = 0.56 \sim 1.17$ 、 $S_t = 4 \sim 7.9$ 、 $OCR = 1.2 \sim 11$ 这一区间内的24个原状土样开展试验,试验用土的主要物理力学性质参数如表1所示。

1.3 试验仪器及方法

落锥试验采用挪威 Geonor 岩土仪器公司生产 (型号 G-200) 的落锥仪,见图2。落锥仪共有400、100、60和10g四个落锥,测试土体不排水抗剪强度范围为0.1~250 kPa。土体强度 S_u 与锥体下落深度密切相关,强度 S_u 计算公式如下:

$$S_u = K \frac{m \cdot g}{h^2} \quad (1)$$

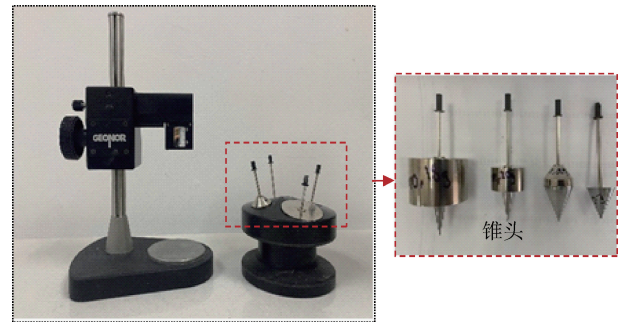


图2 落锥仪

Fig. 2 Falling cone instrument

式中: K 为锥头相关系数,与锥体质量及锥头表面粗糙程度有关; m 为锥头质量, g ; h 为锥入深度,cm。

首先测试原状土的不排水抗剪强度 S_u 。随后,将土体完全扰动至重塑状态,装入直径80 cm,高50 cm的容器中,控制土体的密度和含水率与原状土保持一致,尽可能避免因密度和含水率变化对触变试验结果造成的影响。在容器外部连接处做防水处理,将其放入塑料袋中进行密封,置于恒温恒湿箱中储存,储存温度和湿度参照文献[8]的

经验设置为 20 ℃ 和 95%。最后,测试土样在不同触变时间后的不排水抗剪强度 S_u 。落锥试验参照挪威试验标准^[21]进行。触变时间设定为 0、3 h、1、3、10、30、60 d。

在每次触变试验结束后,分别对完成测试的土体进行了含水率测定,发现土体含水率与原状土含水率差值最大约 0.8%,故本次试验的储存方式有效避免了土体中水分在长时间储存下的损失,保证了试验结果的有效性。

2 触变特性影响因素分析

为了分析影响土体触变强度恢复的因素,以下分别对表 1 中具有不同 I_p 、 I_L 、 S_t 、 w 以及不同 OCR 的土体进行触变强度恢复比 $x\%$ 分析。

2.1 灵敏度的影响

为评价土体强度恢复程度受不同条件的影响,图 3 给出了典型恢复时间下土体恢复比 $x\%$ 受灵敏度影响的变化规律,同时,根据恢复比 $x\%$ 与灵敏度的关系给出了不同触变时间下灵敏度影响触变恢复比的推荐趋势线。

由图 3 可知,各恢复时间下,恢复比随灵敏度变化的数据均具有一定的离散性,但二者之间的关系近似呈线性变化,整体规律呈现为恢复比 $x\%$ 随灵敏度的增大而减小。其原因是土体灵敏度越大,土体重塑后强度相较于原状土的强度越小,其恢复到原始强度可能越困难。因此,在海上基础安装结束后,要对基础持力层的土体灵敏度进行关注,避免因强度恢复慢而加载过度导致工程事故。

2.2 塑性指数的影响

图 4 给出了不同塑性指数土样的恢复比试验结果,并给出了塑性指数影响触变恢复比的推荐趋势线。

分析图 4 发现,在本文的塑性指数范围内,恢复比随塑性指数的增大而增大,并给出了塑性指数 $I_p = 10.2\% \sim 19.7\%$ 之间恢复比与塑性指数关系的推荐趋势线。Yang 等^[8]通过研究 15 个海域粘土的触变强度比与塑性指数的关系发现,塑性指数 $I_p = 18\% \sim 40\%$ 时,土体触变强度比随塑性指数增大而增大,其中触变强度比为土体重塑后某一时刻的不排水抗剪强度与重塑后立即测得的抗剪

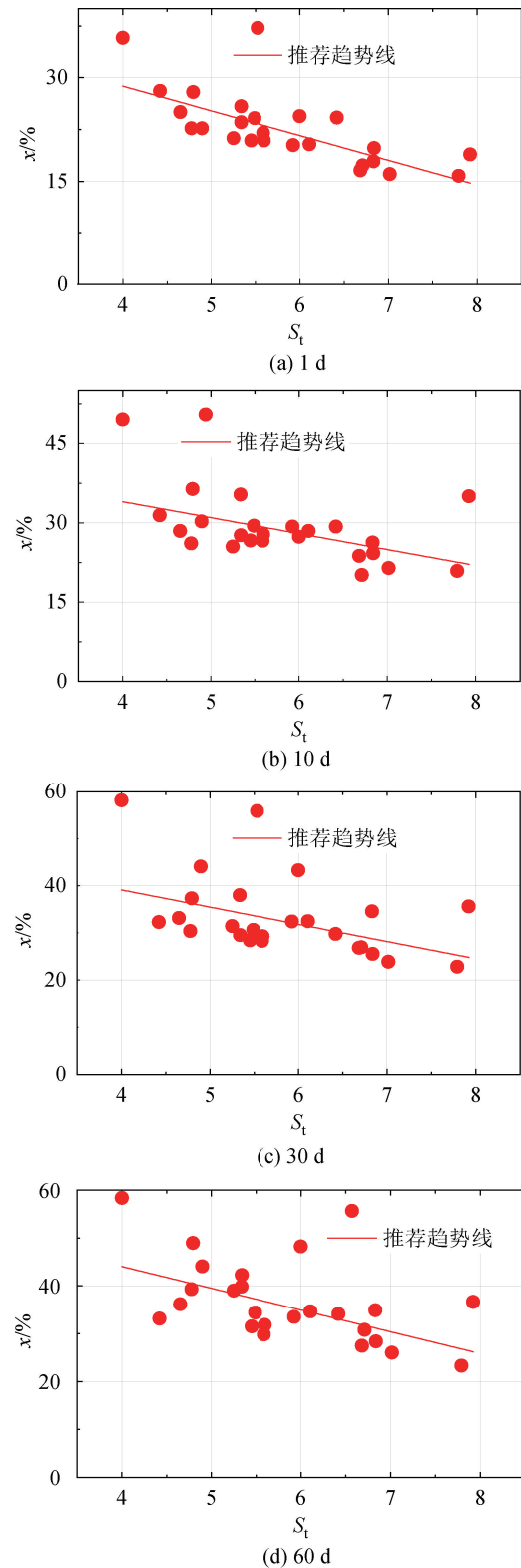


图 3 恢复比与灵敏度的关系

Fig. 3 Relation between recovery ratio and sensitivity

强度比值,即图 1 中 $S_{u,t}$ 与 $S_{u,rem}$ 的比值,这也说明塑性指数越高,土体的触变恢复特性越显著。说明南海粘土塑性指数影响触变恢复比规律与其他海域一致。

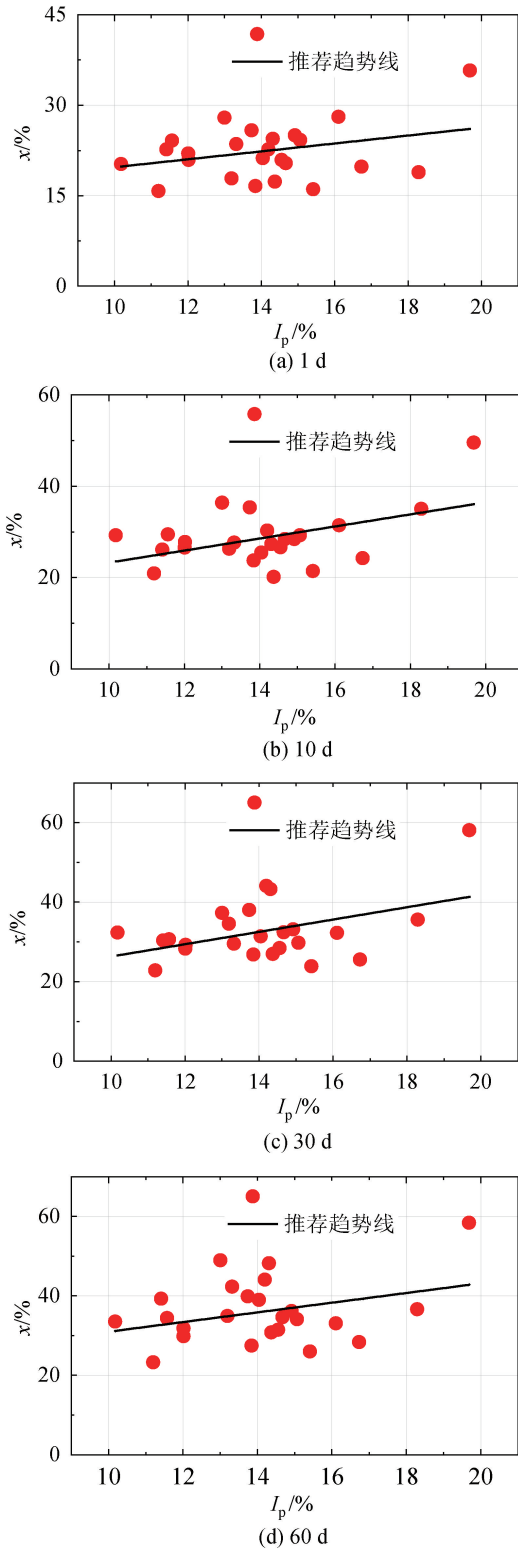


图 4 恢复比与塑性指数的关系

Fig. 4 Relation between recovery ratio and plasticity index

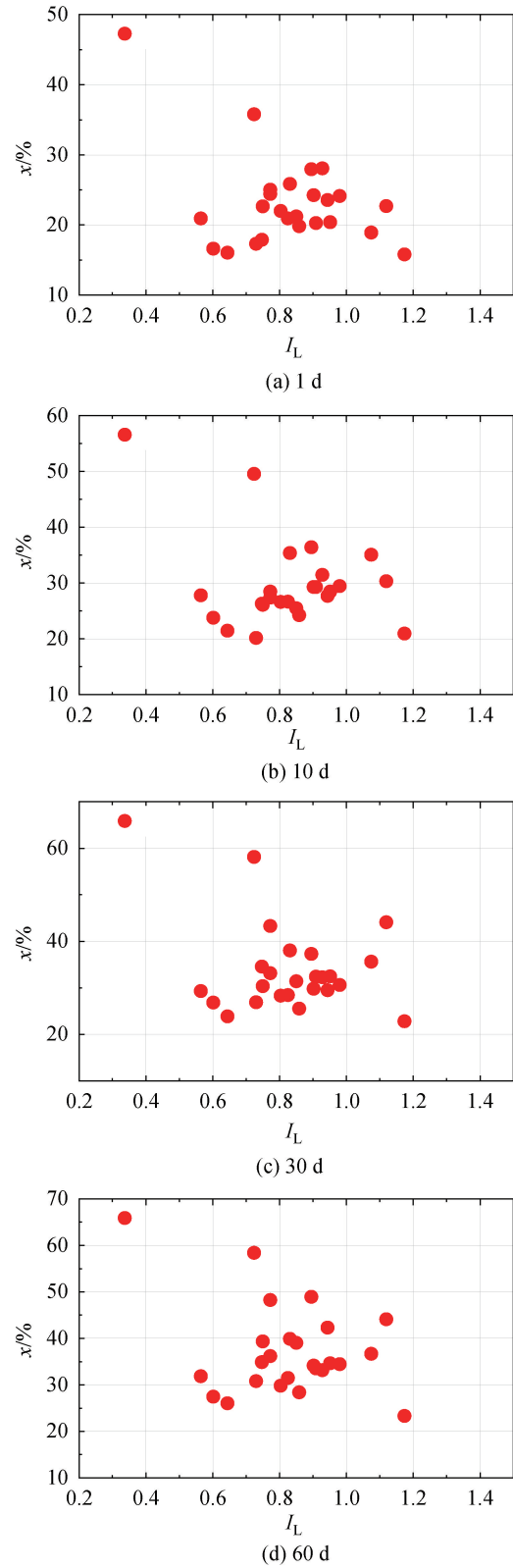


图 5 恢复比与液性指数的关系

Fig. 5 Relation between recovery ratio and fluid index

2.3 液性指数的影响

图 5 给出了不同触变时间时恢复比与液性指数的关系。

液性指数为土体含水率和塑限的差值与塑性

指数的比值。由图 5 可知,恢复比与液性指数的关系存在离散,整体呈现随液性指数增长而恢复比增大的趋势。

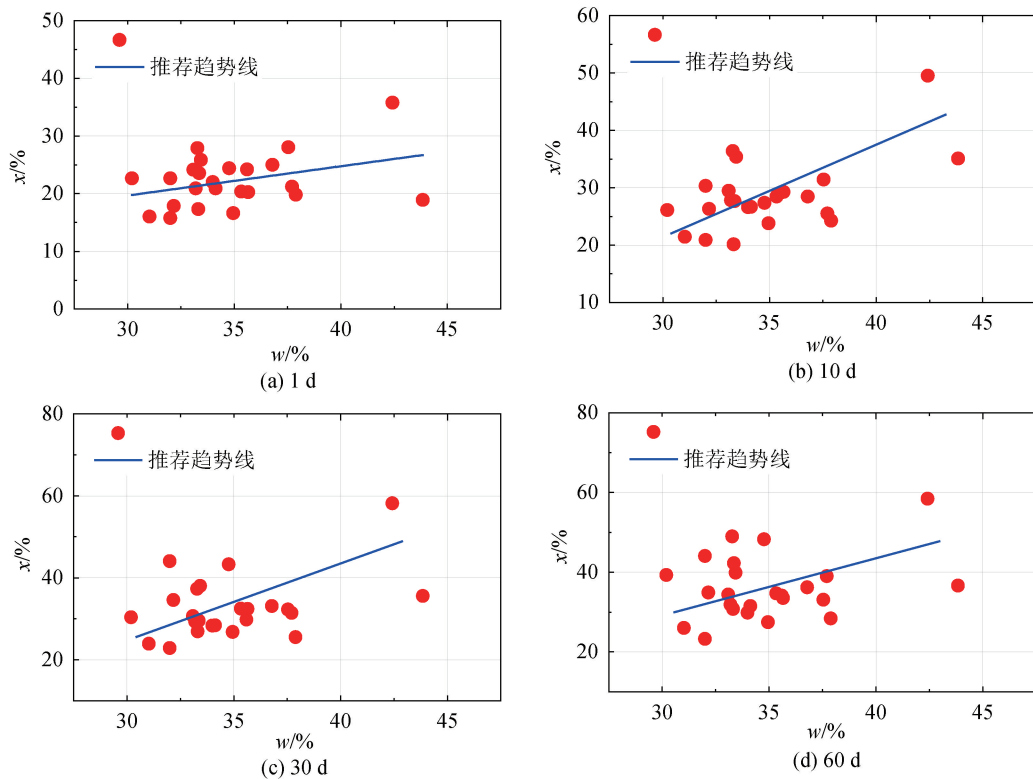


图6 恢复比和含水率的关系

Fig. 6 Relation between recovery ratio and water content

2.4 含水率的影响

图6给出了恢复比 $x\%$ 与含水率在触变发生1、10、30和60 d时的对应关系。

由图6可知,土体恢复比随含水率的增大而增大,含水率越大,土体的强度恢复越明显。Chan^[22]针对两种海洋粘土的触变恢复的研究中发现,含水率大的土体,其触变性长期处于活跃状态。故在海上基础安装结束后,要根据持力层土体的含水率变化对承载力随时间的变化进行合理预估,若含水率处于本文给出的下限附近,承载力应进行保守估计,承载力估计的下限值在后文中进行介绍。

2.5 OCR的影响

不同OCR土体扰动后0 h~60 d的强度相较于原状土的恢复比 $x\%$ 如图7所示。

由图7可知,南海土在扰动后3 h~60 d的强度相较于原状土的恢复程度显示,OCR在1~4之间的土体恢复速度较快,OCR>4的土体强度恢复较慢,但并不随OCR的增加而降低。Yang等^[8]在2016年针对15个海域粘土的研究显示OCR与土体恢复比没有明显的相关性,认为OCR与土体先期固结压力有关,当土体被完全重塑后,土体恢复

程度不再受先期固结压力的影响。因此,南海土OCR影响土体恢复的试验结果与针对其他区域土体的已有研究结果存在一定差异性,这可能与原状土的变量较多有关。如原状土中含水率、塑性指数、灵敏度等均不相同,可能OCR在众多影响因素中占比较小,没有表现出明显的影响规律,建议在今后的研究中采用控制变量法对OCR的影响做进一步研究。

3 触变强度恢复比随时间的变化规律

汇总3个场址所有土样的恢复比随时间的变化规律,如图8所示。

由图8可知,土体强度恢复程度随时间的增长而增大。在触变初期,土体强度恢复速度较快,随着时间的增长,强度恢复速率逐渐减慢。土体强度恢复程度在3 h、1、3、10、30和60 d的下限分别为14.4%、15.8%、15.9%、20.1%、22.8%、23.3%;土体强度恢复程度在3 h~60 d的上限分别为34.8%、35.8%、44.0%、49.5%、58.1%、58.4%,土样在3 h~60 d内强度恢复的平均值分别为20.2%、22.2%、25.0%、28.6%、32.7%、36.1%。上述数值在基础安装后进行承载时,可作为参考。

为了更好地描述二者之间的关系,给出恢复

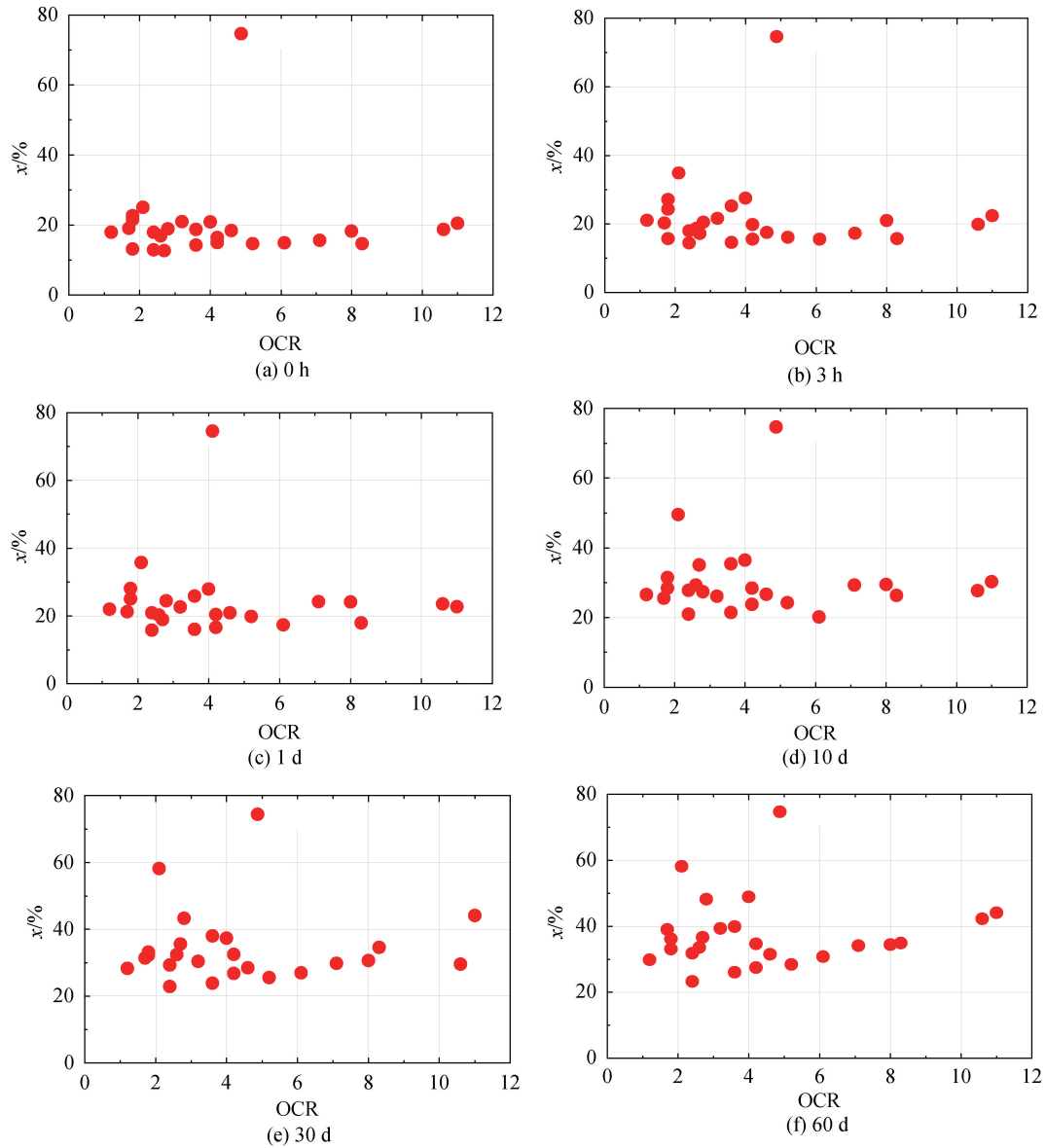


图 7 恢复比与 OCR 的关系

Fig. 7 Relationship between recovery ratio and OCR

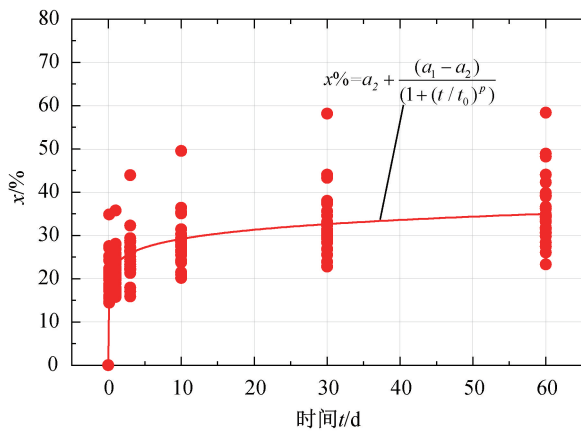


图 8 恢复比与时间的关系

Fig. 8 Relationship between recovery ratio and time

比 $x\%$ 随时间变化的关系式:

$$x\% = a_2 + \frac{(a_1 - a_2)}{(1 + (t/t_0)^p)} \quad (2)$$

式中: t 为触变时间, a_1 、 a_2 、 t_0 和 p 为恢复比曲线相关的经验参数, 分别为 0.001、3.56、 3.8×10^{10} 和 0.1。基于该公式预测, 南海粘土在 100 d 时恢复比较 60 d 增长约 3%, 故需要重点关注结构安装初期土体强度恢复对承载力的影响。

4 结论

1) 我国南海不同海域的粘土均表现出明显的触变恢复特性, 且这一特性受灵敏度、塑性指数、液性指数、含水率、OCR 等土体多种物理因素影

响,其中灵敏度影响尤其显著,要格外关注灵敏度较高的土体,避免安装初期加载过度的风险。

2)在含水率 $w = 30.2\% \sim 43.8\%$ 、塑性指数 $I_p = 10.2\% \sim 19.7\%$ 、液性指数 $I_L = 0.56 \sim 1.17$ 、灵敏度 $S_i = 4 \sim 7.9$ 这一区间内,土体恢复特性随含水率、塑性指数、液性指数和灵敏度的增大分别呈增大、增大、增大和减小的趋势;OCR 在 1~4 之间的南海土土体恢复速度较快,OCR>4 的土体强度恢复较慢,但并不随 OCR 的增加而降低。

3)南海粘土强度恢复特性随时间增长逐渐减弱,土体扰动 3 h,1、3、10、30 和 60 d 时,平均恢复到其原状土强度的 20.0%、22.4%、25.1%、28.6%、32.6%、35.9%。在 60 d 时强度最大可到原状土强度的 58.1%,最小仅占原状土强度的 23.3%,因此在基础承载设计时建议重点关注恢复比的下限。

4)提出了描述南海粘土触变恢复特性的推荐趋势线,可为海洋工程设计提供参考,但仍需更多的试验数据作进一步的验证。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K. Fundamental aspects of thixotropy in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1960, 86(3): 19-52.
- [2] 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.
- [3] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Géotechnique, 1952, 3(1): 30-53.
- [4] UTOMO W H, DEXTER A R. Age hardening of agricultural top soils[J]. J. Soil Sci, 1981, 32(3): 335-350.
- [5] LU N Z, SUHAYDA J N, PRIOR D B, et al. Sediment thixotropy and submarine mass movement[J]. Huanghe Delta, Geo-Marine Letters, 1991, 2(11): 5-9.
- [6] PERRET D, LOCAT J, MARTIGNONI P. Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada[J]. Engineering Geology, 1996, 43(1): 31-44.
- [7] ABDOU M I, AHMED H, EL-SAYED. A study on the thixotropy of Egyptian bentonite suspensions[J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(19): 1980-1991.
- [8] YANG S L, ANDERSEN K H. Thixotropy of marine clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 39(2): 332-338.
- [9] 任玉宾,杨庆,王胤,等.典型深海软黏土触变特性与微观结构探究[J].工程地质学报,2021,29(5): 8-10.
- [10] 汤斌,姚正,亢佳帅.扰动程度对湛江组结构性黏土触变性的影响[J].科学技术与工程,2021,21(21): 9059-9066.
- [11] 王传杰,汤斌.上覆压力对湛江组结构性黏土触变性的影响机制[J].科学技术与工程,2023,23(04): 1650-1657.
- [12] 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(08): 1407-1413.
- [13] JEONG S W, LOCAT J, LEROUEIL S. The effects of salinity and shear history on the rheological characteristics of illite-rich and Na-montmorillonite-rich clays[J]. Clays and Clay Minerals, 2012, 60(2): 108-120.
- [14] PARK D S, KUTTER B L, DEJONG J T. Effects of thixotropy and cement content on the sensitivity of soft remolded clay[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 91-98.
- [15] 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(1): 217-227.
- [16] SUTHAKER N N, SCOTT J D. Thixotropic strength measurement of oil sand fine tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 974-984.
- [17] YALCIN A S, MCINTOSH R. Some rheological parameters of clays and their thixotropic behavior[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1961, 39(2): 76-80.
- [18] ALEJANDRO, RINALDI, VICTOR, et al. Time dependent stress-strain behavior of bentonite slurries; effect of thixotropy[J]. Powder Technology An International Journal on the Science & Technology of Wet and Dry Particulate Systems, 2016, 291(2): 311-321.
- [19] HU W, XU Q, WANG G, et al. Shear resistance variations in experimentally sheared mudstone granules: A possible shear-thinning and thixotropic mechanism[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(21): 11-18.
- [20] REN Y, YANG S, ANDERSEN K H, et al. Thixotropy of soft clay: A review[J]. Engineering Geology, 2021, 287(19): 1-11.
- [21] Norway Standards Association. Geotechnical investigation and testing-laboratory testing of soil-part 6: Fall cone test: NS-EN ISO 17892-6:2017[S]. Oslo: Standards Norway Association, 2017.
- [22] CHAN C M. Strength recovery of remolded dredged marine clay: Thixotropic hardening vs. induced cementation[J]. Electron. J. Geotech. Eng, 2015, 20(13): 5847-5858.

(责任编辑 王利君)