



循环动力荷载下长江口某航道 地基土强度弱化试验研究

龚永康¹, 唐 译²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210000)

摘要: 长江口某航道地基土普遍为深厚软黏土, 在波浪循环荷载作用下易发生强度弱化, 对水工建筑物的安全稳定造成影响。针对长江口该航道3个典型区段地基软黏土, 开展静三轴试验及循环荷载作用下的动三轴试验, 研究了地基土在实际波浪荷载作用下的强度和变形弱化特性。试验结果表明: 波浪循环荷载对长江口该航道原状地基土的强度及变形特性影响显著, 强度和变形参数存在明显的弱化现象, 地基土不排水剪切试验最大偏应力降低9%~20%, 动弹性模量降低5%~14%, 不排水剪割线模量 $E_{u,1\%}$ 最多降低36%, 水工建筑物运行过程中需考虑地基土弱化的影响。通过对比发现, 地基土的固结处理可显著提高强度、减小变形, 并降低循环荷载作用对强度弱化的影响, 提升水工建筑物地基承载能力。研究成果可为长江口该航道水工建筑物的设计建造和运行阶段韧性提升提供参考和依据。

关键词: 长江口; 软黏土; 波浪循环荷载; 强度弱化; 动三轴试验

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0241-07

Experimental study on weakening strength of foundation soil in a certain channel of the Yangtze River Estuary under cyclic dynamic loads

GONG Yongkang¹, TANG Yi²

(1. CCCC Shanghai Navigation Survey and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: The foundation soil in a certain channel of the Yangtze River Estuary is generally deep soft clay, which is prone to strength weakening under wave cyclic loadings, affecting the safety and stability of hydraulic structures. Static triaxial tests and dynamic triaxial tests under cyclic loading are conducted for three typical sections of soft clay in the channel of the Yangtze River Estuary. The strength and deformation weakening characteristics of the foundation soil under actual wave loadings are studied. The experimental results show that wave cyclic loadings have a significant impact on the strength and deformation characteristics of the undisturbed foundation soil in the channel of the Yangtze River Estuary. There is a clear weakening phenomenon in the strength and deformation parameters, The maximum deviatoric stress of the foundation soil in the undrained shear test decreases by 9% to 20%, the dynamic elastic modulus decreases by 5% to 14%, and the undrained shear line modulus $E_{u,1\%}$ decreases by up to 36%. The influence of foundation soil weakening needs to be considered during the operation of hydraulic structures. Through comparison, it is found that the consolidation process of foundation soil can significantly improve strength, reduce deformation, and reduce the impact of cyclic loading on strength weakening, thereby enhancing the bearing capacity of hydraulic structures' foundations. The research results can provide reference and basis for the design, construction, and resilience improvement of hydraulic structures in the channel of the Yangtze River Estuary.

Keywords: Yangtze River Estuary; soft clay; wave cyclic loading; strength weakening; dynamic triaxial test

收稿日期: 2025-04-28 录用日期: 2025-07-07

作者简介: 龚永康(1983—), 男, 高级工程师, 注册岩土工程师, 从事岩土工程勘测研究工作。

长江口某航道是长江口航道体系的重要组成部分,船舶流量约占进出长江口航道船舶流量的70%以上,加快该航道的开发步伐是提升长江口航道总体过船能力和服务水平、优化长江口通航格局的需要。该航道治理工程区域地基土普遍为厚度达20~25 m的软黏土,地基土处于流塑状态,抗剪强度小、承载力低,且该区域水深浪大,波高可达6 m以上,对水工建筑物的建造和运维带来极大的困难。

波浪等循环荷载通过水工建筑物结构传递到地基土中,循环荷载作用下砂土地基易发生孔压上升和液化,而软黏土的强度和变形模量则会出现一定程度的弱化。国内外学者采用试验和理论等方法对软黏土在循环荷载下的弱化特性及机理开展了研究,建立了平均累积孔压^[1]、循环周数^[2]等与弱化指数的关系模型,揭示了循环应力幅值比、固结应力、循环周数等对土体应力-应变和孔压发展的影响规律^[3-6]。上述研究均有利于加强对循环荷载下软土弱化特性的认识,为岩土工程设计和施工提供有益参考,但实际工程中遇到的软黏土力学性质与荷载条件往往较为特殊,已有研究成果通常不能直接应用,需开展进一步试验研究。闫澍旺等^[7-8]针对天津港软黏土与长江口深水航道地基软黏土^[9-10]开展了动三轴试验,考虑实际工程中水工建筑物重力与波浪荷载共同作用下地基土体的应力状态,发现波浪循环荷载作用后软黏土的强度与原状土相比发生大幅度衰减,且强度衰减与有效固结压力、静应力和动应力的大小均存在一定关系,试验成果验证了软黏土

弱化对水工建筑物安全稳定的影响以及地基排水加固对抵抗动荷载的有效性。

长江口该航道地质和波浪条件十分复杂特殊^[11],与长江口深水航道相比,地基土表层缺失土体物理力学性质指标较好的粉砂层,普遍为含水率高、承载力低的软黏土层,在整治工程中拟采用适用于软基大浪的桶式基础防波堤等新型结构。波浪循环荷载下软黏土地基的弱化将对整治水工建筑物的安全稳定带来进一步威胁,因此,本文针对长江口该航道原状土样开展试验研究,揭示典型区段地基土在新型水工建筑物结构重力荷载与实际波浪荷载共同作用下力学指标的衰减,旨在为地基土强度和变形指标参数取值以及地基稳定性分析提供依据,为提升水工建筑物的全生命周期韧性提供支撑。

1 试验土样与试验方案

1.1 土样和仪器

本文试验土样为长江口某航道整治水工建筑物基础底部一定深度处的原状土样,在拟建造水工建筑物实际位置的3个典型区段分别进行钻孔,并采用敞口薄壁取土器现场取样,取完样后用腊封法封闭取土器顶端,防止水分蒸发,并将试样放在专用取样箱中封闭运回实验室。

依据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[12],对原状地基土的天然含水率、密度、比重、液限等基本物理指标进行了测定,试验结果见表1。由此可见,地基土的天然含水率达到50%以上,土体液限高,塑性指数较大,表现出软黏土的特征。

表1 长江口某航道地基土原状土样基本物理性质

Tab. 1 Physical properties of undisturbed foundation soil samples of a certain channel in the Yangtze River Estuary

取样段	土样编号	取样深度/m	含水率/%	比重	密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数
第1段	S1	9.5~10.0	52.5	2.75	1.64	55.4	26.3	29.1
第2段	S2	9.5~10.0	54.7	2.74	1.67	55.1	24.6	30.5
第3段	S3-1	7.5~8.0	54.3	2.74	1.65	52.6	29.2	23.4
	S3-2	11.5~12.0	51.2	2.76	1.72	60.5	31.1	29.4

本文开展的静三轴试验和动三轴试验均采用英国 GDS 公司的静动力三轴试验仪, 见图 1。该仪器通过压力室底座施加轴向荷载和位移, 可对试验过程中的轴向荷载和位移进行精确量测, 轴向荷载传感器精度为 0.1% FS, 位移量测精度为 0.07% FS。



图 1 静动力三轴试验仪

Fig. 1 Static and dynamic triaxial test apparatus

1.2 试验方案和试验过程

动三轴试验与静三轴试验采用取自同一位置和深度的土样, 便于开展对比研究。静动力试验均包括固结不排水 (CU) 试验和不固结不排水 (UU) 试验, 从而分别模拟经地基处理 (固结) 与未经处理的地基土在不排水状态下的剪切特性, 试验依据

GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》制备原状土样, 剪切速率为 0.1%/min, 静三轴试验方案见表 2。

表 2 地基土静三轴试验方案

Tab. 2 Static triaxial tests scheme on foundation soil

取样段	试验组号	土样编号	取样深度/m	试验类型
第 1 段	SUU1	S1	9.5~10.0	UU
	SCU1	S1	9.5~10.0	CU
第 2 段	SUU2	S2	9.5~10.0	UU
	SCU2	S2	9.5~10.0	CU
第 3 段	SUU3	S3-1	7.5~8.0	UU
	SUU4	S3-2	11.5~12.0	UU

动三轴试验步骤主要包括 3 步: 1) 静荷载施加。依据取样深度对土样施加围压, 根据试验要求决定是否进行固结。然后对土样施加轴向静荷载, 模拟水工建筑物自重力在对应深度对地基土的作用。当目标轴向静荷载下土样静应变稳定时, 完成静荷载施加阶段。2) 循环荷载施加。沿土样轴向施加一定大小的正弦波形式的循环荷载。依据取样段波浪荷载现场实测值, 循环荷载值为通过计算得出传递到地基土相应深度的波浪荷载, 循环荷载振动次数为 1 000 次, 振动频率为 0.15 Hz。3) 不排水剪切。在循环荷载施加结束后, 立即对土样开展不排水三轴剪切试验, 剪切速率为 0.1%/min, 当轴向总应变达到 10% 时终止试验。动三轴试验方案见表 3。

表 3 地基原状土样动三轴试验方案

Tab. 3 Dynamic triaxial tests scheme for undisturbed foundation soil

取样段	试验组号	土样编号	取样深度/m	围压/kPa	静应力/kPa	循环荷载/kPa	试验类型
第 1 段	DUU1	S1	9.5~10.0	55	21.4	4.2	UU
	DCU1	S1	9.5~10.0	55	21.4	4.2	CU
第 2 段	DUU2	S2	9.5~10.0	53	20.9	6.8	UU
	DCU2	S2	9.5~10.0	53	20.9	6.8	CU
第 3 段	DUU3	S3-1	7.5~8.0	40	17.4	5.9	UU
	DUU4	S3-2	11.5~12.0	60	15.7	5.3	UU

1.3 软黏土弱化表征参数

循环荷载下软黏土强度与变形的弱化特性主要通过强度弱化指数 ψ 、动弹性模量弱化指数 δ 和归一化的不排水剪割线模量 E_u 这 3 个参数进行表征。

ψ 为动三轴试验的轴向累计最大偏应力与静三轴试验最大偏应力的比值, 用于描述软黏土经历波浪循环荷载作用后剪切强度的弱化程度。

δ 为第 N 周循环荷载下的动弹性模量 ($E_{cy,N}$)

与第 10 周循环荷载下的动弹性模量 ($E_{cy,10}$) 的比值:

$$\delta = \frac{E_{cy,N}}{E_{cy,10}} \quad (1)$$

式中: $E_{cy,N}$ 为轴向循环应力幅值 σ_{cy} 和第 N 周轴向循环应变幅值 $\varepsilon_{cy,N}$ 的比值。

$$E_{cy,N} = \frac{\sigma_{cy}}{\varepsilon_{cy,N}} \quad (2)$$

轴向循环应力幅值和轴向循环应变幅值的定义见图 2。定义了 σ_{cy} 和 $\varepsilon_{cy,N}$ 的取值方法, 则 δ 也可通过下式计算:

$$\delta = \frac{\varepsilon_{cy,10}}{\varepsilon_{cy,N}} \quad (3)$$

该指数可用于分析软黏土在循环荷载作用下轴向变形特性的变化规律。

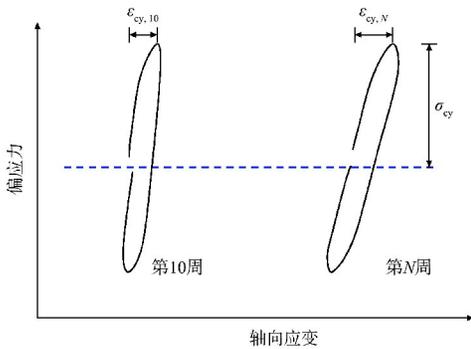


图 2 轴向循环应力幅值和轴向循环应变幅值的定义
Fig. 2 Definition of axial cyclic stress amplitude and axial cyclic strain amplitude

E_u 为应力-应变曲线上的割线斜率, 用于度量土体变形特性的参数。 E_u 可通过下式计算:

$$E_u = \frac{q - q_0}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: q 为偏应力; q_0 为初始偏应力; ε 为轴向应变。

水工建筑物在稳定状态下地基土变形一般较小, 因此采用轴向应变为 1% 时对应的割线模量 $E_{u,1\%}$, 分析地基土在受循环荷载作用前后的变形特性。以原状土样的不排水剪割线模量 $E_{u,1\%}$ 为基数, 归一化经循环荷载作用后土样的 $E_{u,1\%}$ 值, 用于分析循环荷载后不排水剪割线模量的折减。

2 试验结果与分析

2.1 静三轴试验结果

长江口该航道地基土静三轴试验轴向应变 ε 与偏应力 q 的关系曲线见图 3。可以发现, 不同取样位置的地基土 UU 强度略有不同, 最大偏应力为 31.8~38.9 kPa; 同一位置土样 CU 试验得到的最大偏应力显著大于 UU 试验, 达到 61.2~71.8 kPa。

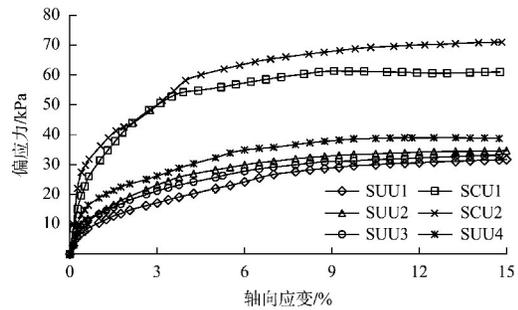


图 3 静三轴试验轴向应变与偏应力关系曲线
Fig. 3 Relationship curve between axial strain and deviatoric stress in static triaxial tests

2.2 动三轴试验结果

2.2.1 循环荷载下轴向应变特征

动三轴试验过程中, 在循环荷载作用过程中, 土样应力-应变关系表现为一系列的滞回圈, 且滞回圈随着循环次数的增加逐渐向右移动, 见图 4, 轴向应变不断发展, 即发生应变软化现象。

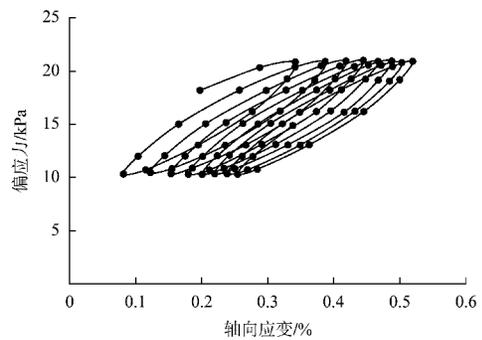


图 4 循环荷载作用过程中典型轴向应变与偏应力关系 (DUU4)
Fig. 4 Relationship between typical axial strain and deviatoric stress during cyclic loading process (DUU4)

2.2.2 应力应变关系

动三轴试验土样在静荷载施加、循环荷载施加和不排水剪切 3 个阶段偏应力和轴向应变关系曲线见图 5。在静荷载施加阶段, 轴向应变随着静

荷载的施加逐渐增大; 在循环荷载作用阶段, 轴向荷载随着循环次数的增加而进一步发展; 在不排水剪切阶段, 偏应力随着轴向应变的增大而增大直至土样发生剪切破坏。

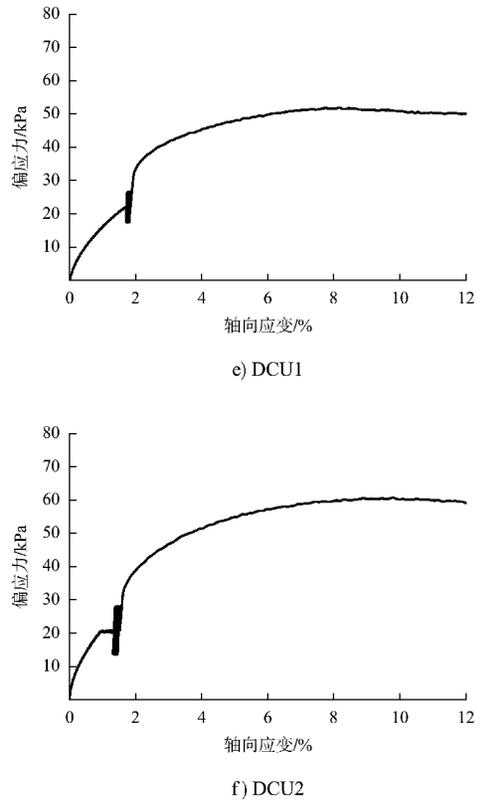
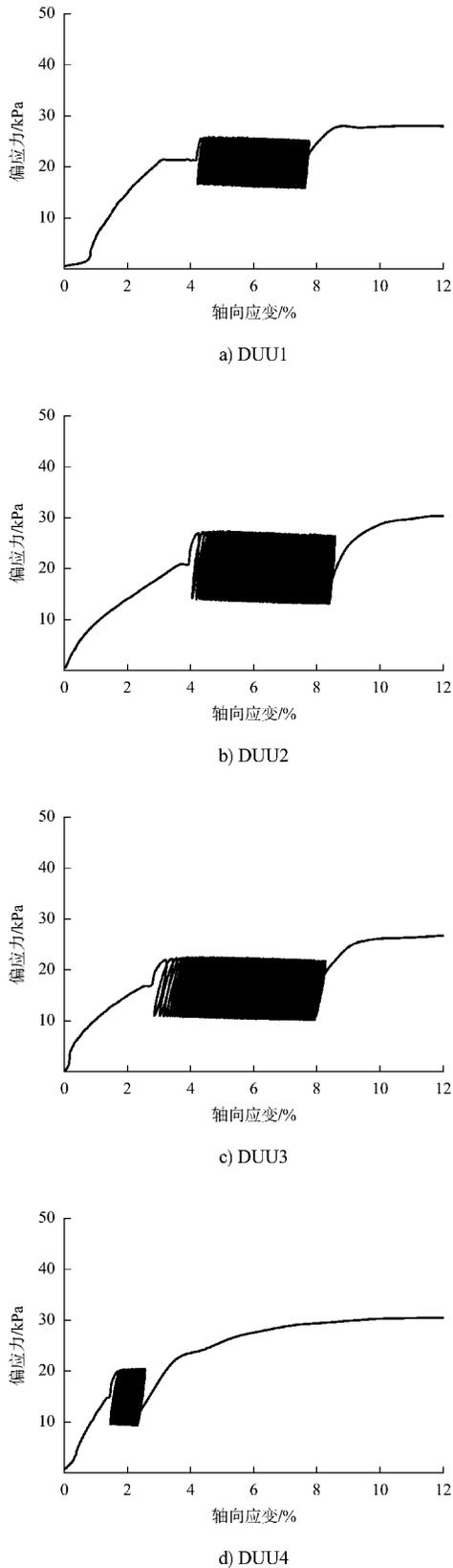


图 5 动三轴试验轴向应变与偏应力关系曲线
Fig. 5 Relationship curve between axial strain and deviatoric stress in dynamic triaxial test

通过对比取自同一位置处土样在固结和未固结条件下的动三轴试验结果, 可以发现在轴向静荷载施加阶段, 土样在固结后产生的轴向变形显著减小; 更为明显的是, 在相同的循环荷载作用下, 固结后土体的轴向应变几乎未发生变化, 仅增大了不到 0.2%, 说明抵御循环荷载下塑性变形的能力显著提升; 在不排水剪切阶段, 试验 DCU1 和 DCU2 中固结土样发生剪切破坏时的累计最大偏应力分别达到 51.9 和 60.4 kPa, 对比试验 DUU1 和 DUU2 中未固结土样的 27.9 和 30.6 kPa, 分别提高了 86.1% 和 97.4%。因此, 适当的地基加固措施可以显著提升地基土的强度和承载能力, 减小在静动力荷载作用下的变形。

2.3 软黏土弱化特性分析

2.3.1 强度弱化指数

将动三轴试验与静三轴试验结果进行对比, 土样 S1、S2、S3-1 和 S3-2 在未固结条件下经历循环荷载作用后, 最大偏应力分别从 31.8、34.6、

33.2 和 38.2 kPa 下降到 27.9、30.6、26.9 和 30.5 kPa, ψ 分别为 0.87、0.88、0.81 和 0.80; 土样 S1 和 S2 在固结条件下经历循环荷载作用后, 最大偏应力分别从 61.2 和 71.8 kPa 下降到 55.4 和 64.4 kPa, ψ 分别为 0.91 和 0.90。计算结果见表 4。可以发现, 长江口该航道地基土在波浪循环荷载作用后, 不排水抗剪强度均出现了不同程度的弱化, ψ 约为 0.8~0.9, 在固结条件下, ψ 值略有减小。

表 4 地基原状土样强度及变形参数弱化计算结果
Tab. 4 Calculation results of weakening of strength and deformation parameters of undisturbed foundation soil

取样段	试验组号	土样编号	试验类型	δ	ψ	$E_{u,1\%}$
第 1 段	DUU1	S1	UU	0.89	0.87	0.64
	DCU1	S1	CU	0.93	0.91	0.92
第 2 段	DUU2	S2	UU	0.89	0.88	0.86
	DCU2	S2	CU	0.95	0.90	0.98
第 3 段	DUU3	S3-1	UU	0.86	0.81	0.78
	DUU4	S3-2	UU	0.89	0.80	0.73

静、动力三轴试验结果显示, 长江口该航道地基软黏土在波浪荷载作用下强度折减特性与长江口深水航道地基土类似, 不固结条件下强度折减 13%~20%, 小于长江口深水航道地基土的 34%~40%; 经地基处理后强度弱化程度有所减小, 抵抗循环荷载的能力显著提升, 与长江口深水航道地基土软化试验结果规律一致。

2.3.2 动弹性模量弱化指数

通过式(3)计算得到动弹性模量弱化指数 δ 随循环振次 N 的变化过程, 见图 6。可以看出, 在循环荷载施加过程中, δ 均随 N 的增加而减小, 尤其在循环振次小于 200 次时, δ 的减小趋势较为明显, 而后减小幅度逐渐降低。对于未固结土样, 在经历 1 000 次循环荷载作用后, δ 为 0.86~0.89; 而相同土样在固结后, δ 值增大至 0.93~0.95。试验结果表明, 在循环荷载的不断作用过程中, 土体抵抗荷载方向变形的能力逐渐降低, 降低幅度逐渐减小, 而土体固结可在一定程度提升循环荷载作用下土体抵抗变形的能力, 这与长江口深水航道地基土软化试验结果相符。

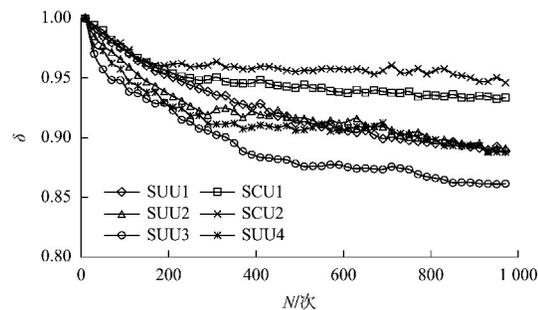


图 6 动弹性模量弱化指数随循环振次变化曲线
Fig. 6 Variation curve of weakening index of dynamic elastic modulus with cyclic vibration times

2.3.3 割线模量弱化特征

通过式(4)计算归一化不排水剪割线模量 $E_{u,1\%}$ 并整理结果。可以看出, 经循环荷载作用后, 未经固结地基土的不排水剪割线模量较原状土发生较大程度的减小, 归一化 $E_{u,1\%}$ 值为 0.64~0.86, 表明地基土在达到相同变形程度时所能承受的荷载明显减小, 而经固结后土体的 $E_{u,1\%}$ 值为 0.92~0.98, 表明固结土体在波浪循环荷载作用后变形特性变化较小。

3 结论

1) 长江口该航道地基土天然含水率达 50% 以上, 土体液限高, 塑性指数较大, 表现出软黏土的特征。静三轴试验结果表明, 3 个典型区段原状地基土 UU 试验最大偏应力为 31.8~38.9 kPa; 同一位置土样 CU 试验得到的最大偏应力显著提升, 达到 61.2~71.8 kPa。

2) 波浪循环荷载对长江口该航道地基土的强度及变形特性均有较为显著的影响, 地基土动弹性模量随着循环荷载周数的增加而减小 5%~14%; 循环荷载作用下累计最大偏应力降低 9%~20%; 不排水剪割线模量 $E_{u,1\%}$ 降低最长达 36%。在长江口该航道水工建筑物设计和施工时应考虑地基土弱化的影响。

3) 地基土经固结后强度显著增大, 循环荷载作用下的轴向累积应变显著减小, 动模量弱化指数和强度弱化指数均大幅降低, 归一化 $E_{u,1\%}$ 值明

显增大。固结过程可较为显著地改善地基土强度,降低波浪循环荷载带来的强度和变形指标弱化的影响,在有条件的情况下建议进行排水固结地基处理。

参考文献:

- [1] 王淑云,楼志刚.原状和重塑海洋粘土经历动荷载后的静强度衰减[J].岩土力学,2000,21(1):20-23,27.
WANG S Y, LOU Z G. The degradation of undrained shear strength of undisturbed and remolded marine clay after cyclic loading[J]. Rock and soil mechanics, 2000, 21(1): 20-23, 27.
- [2] 周建,龚晓南.循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J].土木工程学报,2000,33(5):75-78,82.
ZHOU J, GONG X N. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China civil engineering journal, 2000, 33(5): 75-78, 82.
- [3] 蒋敏敏,蔡正银,肖昭然.动荷载后黏性土静力性质研究进展[J].水运工程,2013(6):166-169.
JIANG M M, CAI Z Y, XIAO Z R. Review of recent advances of post cyclic behavior for cohesive soils[J]. Port & waterway engineering, 2013(6): 166-169.
- [4] 蒋敏敏,蔡正银,曹培,等.循环荷载对粉质黏土力学性质的影响[J].岩土力学,2009,30(S2):204-207.
JIANG M M, CAI Z Y, CAO P, et al. Effects of cyclic loading on mechanical properties of slity clay[J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(S2): 204-207.
- [5] HYDE A F, HIGUCHI T, YASUHARA K. Postcyclic recompression, stiffness, and consolidated cyclic strength of silt[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2007, 133(4): 416-423.
- [6] WIJEWICKREME D, SANIN M V. Postcyclic reconsolidation strains in low-plastic Fraser River silt due to dissipation of excess pore-water pressures[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(10): 1347-1357.
- [7] 闫澍旺,封晓伟.天津港软黏土强度循环弱化试验研究及应用[J].天津大学学报,2010,43(11):943-948.
YAN S W, FENG X W. Test on strength cyclic softening of Tianjin Harbor soft clay and its application[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(11): 943-948.
- [8] 闫澍旺,封晓伟,田俊峰.循环荷载下滨海软黏土孔压发展规律及强度弱化特性[J].中国港湾建设,2010(S1):86-89.
YAN S W, FENG X W, TIAN J F. Pore pressure development law and strength weakening characteristics of coastal soft clay under cyclic loading [J]. China harbour engineering, 2010(S1): 86-89.
- [9] 闫澍旺,熊志福,范期锦,等.长江口深水航道治理工程地基土动三轴试验研究综述[J].水运工程,2006(S2):148-152,158.
YAN S W, XIONG Z F, FAN Q J, et al. Summary of dynamic triaxial test research on foundation soil of Yangtze River estuary deepwater channel regulation project[J]. Port & waterway engineering, 2006(S2): 148-152, 158.
- [10] 闫澍旺,朱红霞,钟骏扬.长江口深水航道治理二期工程地基土弱化特性的试验分析[J].中国港湾建设,2003(6):1-2,14.
YAN S W, ZHU H X, ZHONG J Y. Testing and analysis of characteristics of weakened foundation soil in phase II of deep waterway regulation project in Changjiang River Estuary [J]. China harbour engineering, 2003(6): 1-2, 14.
- [11] 李文正.长江口南槽航道治理方案展望[J].水运工程,2017(6):118-125.
LI W Z. Research prospect of the south passage navigation channel regulation in the Yangtze Estuary[J]. Port & waterway engineering, 2017(6): 118-125.
- [12] 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.

(本文编辑 赵娟)