



波浪循环荷载作用下滨海软土水平向动力特性试验研究

郝斌¹, 赵玉成¹, 刘珍岩², 李占岭², 卢二岩²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院; 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,

石家庄 050043; 2. 河北电力勘测设计研究院, 石家庄 050031)

摘要:为研究海上风电桩基在波浪荷载作用下,产生水平向循环荷载对桩基周围土体动力特性的影响,以唐山地区滨海软土为研究对象,通过室内动三轴试验,研究不同围压、动应力幅值和振动次数条件下对软土水平向动力特性的影响。结果表明:软土水平向动强度随围压增加而增加,随振动次数增加而减小;动应力幅值增大,破坏振次减小;水平向动应变 ϵ_d 随振动次数增加变大,且动应力幅值越大,增速越明显,变化规律遵循 Monismith 模型;动应力幅值改变时,软土水平向动模量变化明显,当围压减小,动弹性模量减小;曹妃甸软土水平向间具有明显的结构性,不同围压条件下,随动应力幅值增加动阻尼比均表现增大趋势。

关键词:滨海软土;循环荷载;水平向动力特性;动三轴试验

中图分类号: TU411.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)01-0116-06

Experimental analysis on horizontal dynamic characteristics of coastal soft soil under wave-induced cyclic loading

Hao Bin¹, Zhao Yucheng¹, Liu Zhenyan², Li Zhanling², Lu Eryan²

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safty Control,

Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China;

2. Hebei Electric Power Design & Research Institute, Shijiazhuang 050031, P. R. China)

Abstract: A series of dynamic triaxle test on soft soil in Tangshan Binhai area was carried out to understand the horizontal dynamic characteristics of the soil around the offshore wind power pile foundation under wave load. The influence of confining pressure, dynamic stress amplitude and vibration frequency on horizontal dynamic characteristics of soft soil were studied. The results show that the horizontal dynamic strength of soft soil increases with the increase of confining pressure increases, and decreases with the increase of vibration. When the dynamic stress amplitude increases, the vibration times decreases. The horizontal dynamic strain ϵ_d increases with the increase of vibration frequency, and the larger the dynamic stress amplitude is, the more significant the growth is. The change agrees well with that of the Monismith model. The change of the horizontal dynamic modulus of soft soil is significantly influenced by the dynamic stress amplitude. When confining pressure decreases, dynamic modulus decreases. The Caofeidian soft soil

收稿日期: 2015-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(50878134); 河北省自然科学基金(E20090000904)

作者简介: 郝斌(1990-), 男, 主要从事土动力学研究, (E-mail) lan_zhi_meng@163.com。

Received: 2015-10-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50878134); Hebei Provincial Natural Science Foundation(No. E20090000904)

Author brief: Hao Bin (1990-), main research interest: soil dynamics, (E-mail) lan_zhi_meng@163.com.

has distinct structural horizontal dynamic characteristics. Under different confining pressures, the damping ratio shows an increasing trend when dynamic stress amplitude increases.

Keywords: coastal soft soil; cyclic loading; horizontal dynamic characteristics; dynamic triaxial test

风电产业迅速发展,受陆地条件制约,地广人稀的海岸滩涂和海上风电产业得到重视,海上风电场建设步入发展的快车道,但沿海地区广泛分布着工程性质较差的软土。风电设施建成后桩基周围土体受到常见的动力循环荷载——波浪荷载^[1]长期作用,在波浪荷载作用下土体产生的累积变形、强度及稳定性问题成为众多学者关注的重点^[2]。波浪荷载作为一种作用时间长、振动较为规则的循环荷载,需考虑循环效应对桩基周围土体动力特性的影响。应用GDS室内动三轴试验系统研究波浪荷载作用下软土水平向的动力特性。

对于海上风电建设的研究,最为核心的是桩基及周围土体在波浪长期循环荷载作用下分析土体动力特性变化规律和运用 P - Y 曲线^[3]研究桩基侧向位移。近年来,关于循环动荷载桩的研究受到关注,Basack^[4]通过建立波浪产生的水平向循环荷载对于土体强度和刚度的衰减函数模型,应用于桩基承载力分析,提出基于该地区波浪循环荷载作用下软土动力特性的桩基设计参考;Basak^[5]在软土地基上进行了一系列室内试验,研究海洋中波浪荷载作用下软土地基中桩基周围水平向循环荷载对桩基承载力影响,以桩的变形为研究重点,缺少波浪产生的水平向循环荷载次数、动应力幅值及频率变化对土体动力特性深入的分析;Banerjee等^[6]通过室内动三轴试验获得波浪水平向循环荷载作用下软土刚度衰减模型,应用ABAQUS有效模拟复杂桩-土系统进一步了解桩基周围土体动力特性对桩的影响。中国众多学者对饱和软土在交通循环荷载及地震循环荷载作用下产生的动力特性进行了大量试验与学术研究,形成了相对完备的理论^[7-10],而对于土体在波浪循环荷载长期作用下水平向动力特性的研究较少涉及。曾向军等^[7]以洞庭湖区沉积软土为研究对象,应用动三轴试验,研究不同动应力幅值、振动频率和围压下湖湘软土在竖向荷载作用时动力特性,表明轴向累积应变受动应力幅值、围压及振动频率影响呈稳定型增长,动孔隙水压受动应力幅值影响;张向东等^[8]以营口软土为研究对象,通过动三轴试验研究竖向荷载作用下动力特性变化及由此导致的地基承载力不足等问题,试验结果表明营口地区软土具

有明显的结构性,其动应变-振次曲线和动骨干曲线存在转折点;曹勇等^[9]对海积结构软土动力特性与变形特征进行分析,在3种波形循环荷载作用下考虑振动次数、幅值及频率的影响,并类比不同循环荷载波形下软土刚度软化过程,得出软化指数随振动次数变化规律;曹洋等^[10]以杭州某工地基坑结构性软粘土为研究对象,应用空心圆柱扭剪仪,进行不同循环应力比和不同频率下的主应力轴旋转循环剪切试验,模拟波浪荷载作用下原状软粘土孔隙水压累积、模量衰减等动力特性,确立土体应变破坏标准及土体强度变化规律;郭玉树等^[11]应用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移,针对砂性土壤进行室内循环三轴试验,得到塑性应变增量推求土壤割线衰减刚度,导入三维有限元数值模型计算可得桩身在循环侧向力下的位移;蔡袁强等^[12]以萧山正常固结饱和软粘土为研究对象,进行竖向应力控制的循环三轴试验,表明初始偏应力对动弹模量及阻尼比有较大影响,在试验数据的基础上建立了萧山地区饱和软粘土刚度软化规律经验拟合公式。

笔者针对波浪循环荷载作用下桩基周围土体,以唐山地区曹妃甸周边软粘土为研究对象进行水平向动三轴试验,研究不同围压、密度和动应力幅值条件下软土的水平向动强度和动模量变化,分析围压、动应力幅值和振动次数对软土动强度、动变形、动模量和动阻尼比特性的影响,将试验结果与现有的研究成果进行对比分析,总结唐山地区滨海软土在波浪荷载作用下引起的软土水平向累积应变规律和动力特性,获得唐山地区滨海软土工程性质。

1 唐山滨海地区软土水平向动三轴试验

1.1 动三轴试验系统与土样制备

试验应用GDS-DYNTTS电机控制的动三轴试验系统,可对直径39.1 mm,高度80 mm的三轴试样进行试验。

试样取自唐山地区曹妃甸周边的软粘土,对原状土样进行常规室内土工试验,得到软土的基本物理力学指标,见表1。

表 1 唐山滨海地区软土基本参数

Table 1 Basic parameters of Tangshan coastal soft soil

土样编号	天然含水量/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
YZ-1	38.6	1.83	1.06	34.6	21.9	7	4.6	2.4
YZ-2	36.6	1.83	1.02	31.0	19.6	9	16.8	3.6
YZ-3	37.4	1.82	1.04	33.0	21.1	6	7.2	3.5
YZ-4	34.1	1.77	1.05	28.7	18.6	14	6.4	3.1

1.2 动三轴试验方案

对原状土样水平向取样,制备 12 个原状试验土样,采用 GDS 动三轴系统,进行软土水平向动力特性研究。试验方案见表 2,不同围压反映不同埋深。试验前充分饱和试样,应用 GDS 动三轴系统中 B-Check 模块对土样进行检测,饱和度均达到 97% 以上。试验固结比取 $K_c=1.0$,振动频率为 $f=1\text{ Hz}$ (每组循环采集 10 个点),采用全幅应变=5% 作为原状土样破坏标准。

表 2 动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test scheme

土样分类	天然密度/(g·cm ⁻³)	围压/kPa	土样编号	动应力幅值/kPa
YZ-1	1.83	50	YZ-11	80
			YZ-12	120
			YZ-13	160
YZ-2	1.83	100	YZ-21	80
			YZ-22	120
			YZ-23	160
YZ-3	1.82	150	YZ-31	100
			YZ-32	200
			YZ-33	250
YZ-4	1.77	450	YZ-41	200
			YZ-42	300
			YZ-43	400

2 试验结果分析与数据处理

2.1 软土水平向动强度特性分析

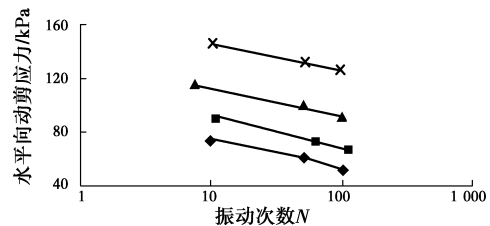
根据 ϵ_d 达到 5% 时作为土样破坏标准,绘制出软土水平向抗剪强度 τ_d 和破坏振次 N_f 的关系曲线,即 $\tau_d - \lg N$ 曲线,研究长期循环荷载作用下软土水平向抗剪强度变化规律。

图 1 所示为相同固结比、振动频率时不同围压和动应力幅值条件下唐山滨海地区软土水平向的动

剪强度曲线。表明曹妃甸软土水平向动剪应力随振动次数增加而减小,对试验数据进行拟合分析,二者关系可用负幂次函数表示

$$\tau_d = aN^{-b} \quad (1)$$

即曹妃甸软土水平向动强度特性与张向东等^[8]得到的营口软土动强度特性中动剪应力-振动次数函数关系一致。式(1)中 τ_d 为水平向动剪应力; N 为振动次数; a 和 b 为试验条件下相关参数。



注: ● YZ-4 ■ YZ-3 ▲ YZ-2 × YZ-1

图 1 水平向动剪应力-振动次数曲线

Fig. 1 Horizontal dynamic shear stress-vibration times curve

由图 1 可知,软土水平向动抗剪强度随围压增加而增大,原因在于软土颗粒之间孔隙随围压增大而被挤密。此外,围压大小影响土颗粒之间相互作用,随围压减小,土颗粒间相互作用减弱,动荷载对土体破坏增强,土体抗剪强度降低。

进行拟合分析得表 3,拟合度均达 0.99 以上。随 a 值降低,动剪应力降低;随 b 值增大,动剪应力减小。为合理评价循环荷载对软土水平向动强度影响,需进一步考虑不同固结比、振动频率及初始偏应力条件下对水平向动剪应力的影响。

表 3 动强度曲线拟合参数

Table 3 Fitting parameters of dynamic strength curve

土样编号	a	b	R^2
YZ-1	168.94	0.064	0.997 8
YZ-2	136.10	0.085	0.999 5
YZ-3	122.95	0.127	0.998 4
YZ-4	104.91	0.142	0.993 0

2.2 软土水平向累积动应变特性分析

图2为不同围压条件下滨海地区的软土水平向累积动应变与振动次数关系曲线。

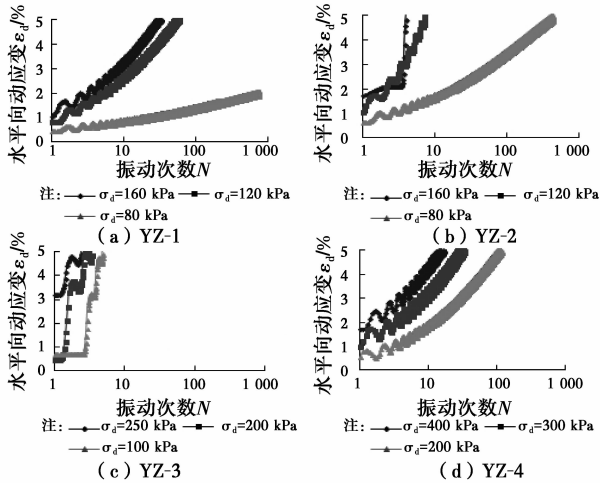


图2 水平向动应变与振动次数关系曲线

Fig. 2 Horizontal dynamic strain and vibration times relation curve

当动应力较小时,对于应变模型的研究,许多学者结合试验数据拟合得到的关系曲线,提出了相关经验公式,如Lentz^[13]的对数关系式、Monismith等^[14]的指数关系式等。模型中应用最为广泛的为Monismith指数模型,即

$$\epsilon_a = aN^b \quad (2)$$

式中:ε_a为轴向应变;N为循环振动次数;a为相关试验条件下土体变形参数;b为土的性质参数;对数数据进行回归分析,拟合参数值见表4。

表4 水平向累积应变模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters of horizontal accumulated strain model

试样编号	a	b	R ²
YZ-11	0.508 8	0.208 6	0.944 1
YZ-12	0.950 5	0.416 8	0.951 0
YZ-13	1.286 8	0.401 4	0.981 6
YZ-21	0.889 5	0.290 8	0.971 4
YZ-22	1.358 4	0.644 8	0.973 6
YZ-33	2.997 2	0.655 1	0.908 6
YZ-41	1.873 7	0.359 4	0.970 6
YZ-42	1.241 2	0.412 1	0.951 3
YZ-43	0.697 2	0.427 5	0.964 0

注:土样 YZ-23、YZ-31、YZ-32 试验数据离散性较大已剔除。

分析图2表明:随着N的增大,呈增大趋势,与

式(2)的表达式一致,通过对比魏星等^[15]在交通荷载作用下公路软土地基长期沉降计算建立的残余变形模型,得出曹妃甸软土水平向动应变模型与Monismith指数模型一致。

2.3 软土水平向动模量特性分析

图3为不同围压、动应力幅值条件下曹妃甸软土动弹性模量与动应变关系曲线。

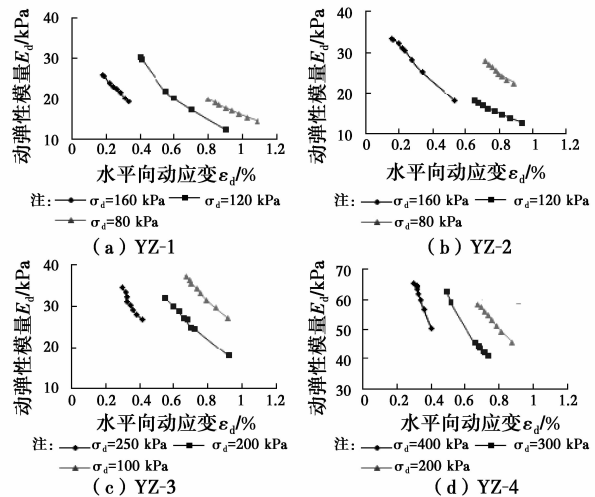


图3 动弹性模量-水平向动应变曲线

Fig. 3 Dynamic modulus and horizontal strain curve

由于土的应力-应变关系具有明显的非线性特征,在周期荷载作用下应变幅值与应力的关系可近似作为双曲线,即

$$\sigma_b = \frac{\epsilon_d}{a + b \cdot \epsilon_d} \quad (3)$$

对试验数据进行回归分析,式中σ_d为动应力;ε_d为动应变;拟合参数a、b数值,见表5。

表5 动模量曲线拟合参数

Table 5 Fitting parameters of dynamic modulus curves

试样编号	a	b	R ²	E _{dmax}	G _{dmax}
YZ-11	0.002 9	0.084 1	0.992 5	350	116.7
YZ-12	0.002 4	0.086 6	0.997 6	412	137.3
YZ-13	0.001 9	0.063 0	0.999 0	530	176.7
YZ-21	0.007 9	0.058 1	0.974 0	126	42.0
YZ-22	0.006 5	0.081 2	0.998 8	155	51.7
YZ-23	0.005 3	0.051 4	0.997 2	188	62.7
YZ-31	0.006 3	0.075 1	0.952 4	160	53.3
YZ-32	0.005 1	0.059 8	0.977 6	195	65.0
YZ-33	0.004 0	0.040 4	0.9977	250	83.3
YZ-41	0.002 9	0.045 0	0.953 6	342	114.0
YZ-42	0.002 5	0.039 6	0.993 1	396	132.0
YZ-43	0.002 2	0.036 4	0.973 8	463	154.3

图 3 表明曹妃甸软土水平向动弹性模量受动应变及围压影响显著。动应变增加,水平向动弹性模量减小;围压减小,水平向动弹性模量随之减小。不同围压条件下,随动应力幅值增加,动应变增大,动弹性模量整体趋势减小,在于动应力幅值的增加对土体结构破坏加强,使土体水平向动应变增大。

2.4 软土水平向动阻尼比特性分析

图 4 为不同试验条件下曹妃甸软土动阻尼比试验曲线。动三轴试验测定的动阻尼比 λ_d 表征为每振动一周中土体能量的耗散,定义为实际阻尼系数 C 与临界阻尼系数 C_{cr} 之比

$$\lambda_d = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (4)$$

式中: ΔW 为一个周期内损耗的能量; W 作用的总能量。

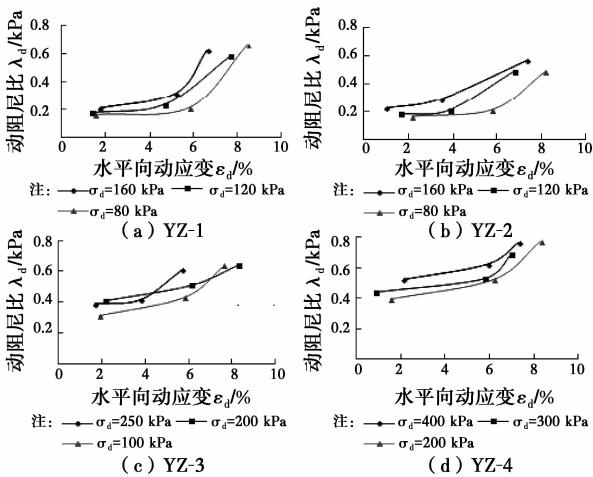


图 4 动阻尼比-动应变曲线

Fig. 4 Dynamic damping ratio and dynamic strain curve

图 4(a)、(b)、(c)表明当围压取值范围在 50~150 kPa 时,曹妃甸软土水平向动阻尼比介于 0.2~0.6 之间,随动应力幅值增大而减小。由图 4(d)可知,围压 450 kPa 时,阻尼比介于 0.3~0.8 之间,可知随围压大幅度增加阻尼比数值增大,动阻尼比增大即荷载作用过程中软土能量的损耗增加。围压增大时,软土颗粒之间的联结作用加强,对波浪循环荷载振动形式形成更大干扰,其振幅随作用时间的增长而衰减,且衰减越快,阻尼越大。不同围压条件下,动应力幅值的增加,动阻尼比均表现为增大趋势。

2.5 波浪荷载大小的变化分析

综合研究表征波浪荷载的动荷因素:动荷波形、动荷频率、动荷幅值,可获得动弹性模量随波浪循环荷载变化规律。如图 5 所示。

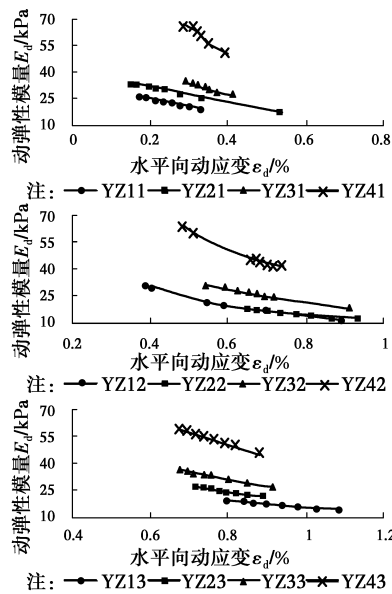


图 5 波浪荷载大小对动弹性模量影响

Fig. 5 Effect of wave load on dynamic modulus

图 5 表明随波浪荷载大小的改变对不同围压、密度条件下软土的动弹性模量影响显著。分析由表 5 得到的最大弹性模量 E_{dmax} 和最大剪切弹性模量 G_{dmax} 表明,随波浪荷载改变,不同围压条件下,随波浪荷载振幅增大, E_{dmax} 呈增大趋势。

3 结论

1)曹妃甸软土水平向动强度随围压的增加而增大,随振动次数增加而减小。当动应力幅值减小,破坏振次增加。波浪循环动荷载长期作用下,动荷载频率成为影响软土动强度的主要因素,为更合理评价软土水平动力特性,需进一步考虑不同固结比、振动频率等因素的影响。

2)曹妃甸软土的水平向动应变随振动次数增加而增大。初始阶段,动应变增速较小随后逐渐增大,直至土体发生破坏;受动应力幅值影响,幅值越大增速越明显。对试验数据进行回归拟合分析,该地区软土水平向累积变形规律适用于 Monismith 指数模型。

3)曹妃甸软土水平向动弹性模量受动应力幅值的影响。随动应力幅值增大,水平向动应变增大,动弹性模量减小;随围压减小,动弹性模量随之减小。对试验数据进行回归拟合分析,水平向动弹性模量变化可近似表示为双曲线模型。

4)阻尼比 λ_d 与动应变关系曲线表明曹妃甸软土水平向具有显著的结构性,围压较大时(450 kPa)随土颗粒挤密孔隙减小,土颗粒间联结作用增强,能量消耗增加,阻尼比较大。随围压减小,软土水平向

间作用力减小,阻尼比降低。不同围压条件下,随动应力幅值的增加,阻尼比均表现增大的趋势。

5)综合分析不同波浪荷载形式作用下,土体 E_{dmax} 和 G_{dmax} 受波浪荷载的变化影响显著,随波浪荷载增大, E_{dmax} 和 G_{dmax} 呈增大趋势。

参考文献:

[1] 葛川,何炎平,叶宇,等. 海上风电场的发展、构成和基础形式[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(6): 31-35.
Ge C, He Y P, Ye Y, et al. Development composing and foundation of offshore windfarm [J]. China Offshore Platform, 2008, 23(6): 31-35. (in Chinese)

[2] 毕雪梅,赵瑞斌,曲国胜. 循环荷载下天津吹填土动应力应变关系研究[J]. 工程勘察, 2014(1): 1-5.
Bi X M, Zhao R B, Qu G S. Experimental study on dynamic stress-strain relation of reclaimed soil in Tianjin subjected to cyclic loads [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014 (1): 1-5. (in Chinese)

[3] 胡安峰,张光建,贾玉帅,等. 刚度衰减模型在大直径桩累积侧向位移分析中的应用[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014, 48(4): 721-726.
Hu A F, Zhang G J, Jia Y S, et al. Application of degradation stiffness model in analysis of cumulative lateral displacement of monopile foundation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(4): 721-726. (in Chinese)

[4] Basack S. Design recommendations for pile subjected to cyclic load [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2013, 33(4): 356-360.

[5] Basack S. Response of vertical pile group subjected to horizontal cyclic load in soft clay [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2010(7): 91-103.

[6] Banerjee S, Shirole O N. Numerical analysis of piles under cyclic lateral load [J]. Indian Geotechnical Journal, 2014, 44(4): 436-448.

[7] 曾向军,邓宗伟,高乾丰,等. 循环荷载下湖相软土动力特性研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 109-114.
Zeng X J, Deng Z W, Gao Q F, et al. Study of dynamic characteristics of lacustrine soft soil under cyclic loading [J]. Industrial Construction, 2015, 45 (3): 109-114. (in Chinese)

[8] 张向东,刘家顺,张虎伟. 循环荷载作用下软土动力特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(5): 1-7.
Zhang X D, Liu J S, Zhang H W. Experimental study on dynamic characteristic of soft soil under cyclic loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(5): 1-7. (in

Chinese)

[9] 曹勇,孔令伟,杨爱武. 海积结构性软土动力性状的循环荷载波形效应与刚度软化特征[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 583-589.
Cao Y, Kong L W, Yang A W. Waveform effect of cyclic loading of dynamic character and stiffness degradation characteristics of marine deposited natural soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 583-589. (in Chinese)

[10] 曹洋,周建,严佳佳. 原状软黏土主应力轴动态旋转试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(3): 902-909.
Cao Y, Zhou J, Yan J J. Dynamic principal stress rotation test on intact soft clay [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45 (3): 902-909. (in Chinese)

[11] 郭玉树,阿克慕斯·马丁,阿布达雷赫曼·哈里. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1729-1734.
Kuo Y S, Achmus M, Abdel-Rahman K. Estimation of lateral deformation of monopile foundations by use of cyclic triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1729-1734. (in Chinese)

[12] 蔡袁强,王军,徐长节. 初始偏应力作用对萧山软粘土动弹模量与阻尼影响试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2291-2302.
Cai Y Q, Wang J, Xu C J. Experimental study on dynamic elastic and damping ratio of Xiaoshan saturated soft clay considering initial deviator stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (11): 2291-2302. (in Chinese)

[13] Lentz R W. Permanent deformation of a cohesionless subgrade material under cyclic loading [D]. East Lansing: Michigan State University, 1979.

[14] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subsoil due to repeated loading [J]. Transportation Research Record, 1975, (537): 1-17.

[15] 魏星,黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3342-3346.
Wei X, Huang M S. A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (11): 3342-3346. (in Chinese)