

循环荷载作用下桩周土体强度弱化特性试验研究^①

刘晓强^{1,2}, 赵楠³, 夏开文¹, 杨燕华²

(1.天津大学建工学院,天津 300072; 2.交通运输部天津水运工程科学研究所,天津 300456;
3.上海水利工程设计研究院有限公司,上海 200062)

摘要:软黏土地基在循环周期荷载的连续作用下不会发生液化现象,但是随着循环荷载的周期、振幅、应力的不断增加,土体的有效强度会不断降低,从而引起土体破坏。特别是桩结构在工作期间除了要承受竖向的荷载外,还将受到波浪、冰荷载以及船的撞击荷载。这些荷载一般都具有往复作用的性质,这种往复荷载作用期间会使桩周土体产生疲劳效应,土体结构发生破坏,引起桩周土体的弱化。通过室内动三轴模拟天津码头区域桩周土承受的静(结构荷载)、动(波浪荷载)组合作用,对振动前后桩周土体的强度弱化情况进行研究,试验获得该区域桩周土体在周期荷载作用下,土体土体强度的变化关系。同时提出一个相对较简单且符合试验规律的天津地区桩周土的强度弱化公式,为该地区土体弱化的评估提供参考依据。

关键词:强度弱化; 应力组合; 弱化规律; 循环荷载

中图分类号: TU411; TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0987-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0987

Test and Study on Strength Weakening Behavior of Soil around a Pile under Cyclic Loading

LIU Xiao-qiang^{1,2}, ZHAO Nan³, XIA Kai-wen¹, YANG Yan-hua²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

3. Shanghai Water Engineer Design & Research Institute CO. Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: Liquefaction does not occur in a soft foundation under the action of wave cyclic loading; however, increases in period, amplitude and stress decrease the effective strength of soil. As a result, soil foundations lose bearing capacity. In addition to vertical load, a wharf structure also bears loads of waves, ice, and ship impact. Because these loads are generally cyclic, the soil around a pile will experience a fatigue effect. As a result of cyclic loading, the soil will incur structural damage and weakening. In this study, we use indoor dynamic triaxial testing to simulate the combined stress of cycle wave loading and vertical loading, and we apply these loads to the soil of Tianjin port to study the relationship among soil strength, combined stress, and soil depth. The laws of soil under combined stress loads at various depths are then obtained by the dynamic tri-axial test research. Moreover, a simple formula to determine soil strength weakening is presented to provide scientific data for further evaluation of the soil strength weakening in engineering applications.

Key words: strength weakening; stress combination; weakening law; cyclic loading

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 天津市自然科学基金青年项目(No.13JCQNJC07800); 国家自然科学基金(No.51209112)

作者简介: 刘晓强(1983—), 男, 辽宁绥中人, 博士, 助理研究员, 主要从事土的动力学特征及软土地基处理研究工作。

E-mail: tks_@163.com

0 引言

随着我国近海城市的快速发展,港口码头建设不断增加,大直径混凝土管桩在天津港等码头得到了广泛应用。混凝土管桩除了承受上部结构自重荷载及使用荷载外,还要受到海水波浪往复荷载的作用。波浪循环荷载往复作用于桩体泥面以上区域,继而桩身对周围土体造成往复的挤压,最终导致桩周一定深度范围内的土体产生疲劳效应,土体弱化会在一定程度上影响基桩的竖向承载能力。

目前国内外关于循环周期荷载作用下软黏土的特性研究相对较多。Seed^[1]早在 1966 年就已经开始研究地震条件下黏性的强度特性,这也是所查文献中最早开展关于循环荷载作用下黏性土抗剪强度特性的研究。Andersen 等^[2]对德勒门(Drammen)黏土进行了系统而广泛的研究,分析了试验方式、剪应力幅值、超固结比等因素的影响;Azzouz^[3]指出正常固结黏土的不排水循环三轴试验中,试样有效应力在起始的几个循环内迅速降低,随着循环剪切的进行,有效应力路径不断趋近破坏线,当与破坏线相交时土样破坏,这一破坏线与由静三轴试验所得结果基本一致。国内方面:闫澍旺等^[4-6]指出波浪荷载往复作用下,当土体的强度小于波浪引起的动剪应力时,土体的结构性遭到充分的破坏,土体的强度迅速地减小到其残余强度;王建华^[7]则通过动三轴试验研究了海洋软土的循环弱化黏弹性本构关系,在此基础上提出了软土地地基稳定性的定量分析方法。周建^[8]也指出饱和软黏土在周期荷载连续作用下将发生应变软化,而不发生液化。综上所述,国内外学者在周期荷载作用下软黏膜黏土的特性研究取得了一定的经验和试验数据,但前人的研究成果重点考虑了动应力大小和循环次数的影响^[9-10],而针对破坏过程中初始偏应力对土体的影响,以及静、动应力组合与土体强度的量化关系的研究还比较少。

以天津某码头桩周土为研究对象,通过室内动三轴试验,考虑实际工程中的应力路径加载,考虑不同的初始静应力(考虑结构荷载因素),动应力、固结应力等组合,通过归一化分析不同动、静应力组合下桩周土振后抗剪强度弱化规律,以期为分析循环荷载下天津桩周土强度弱化特性问题提供可靠的试验数据。

1 试验土样及试验过程

1.1 试验土样及试验仪器

土样取自天津港某码头原状土,其基本参数见

表 1 所示。

表 1 土的物理性质指标

Table 1 The physico—mechanical parameters of soils				
土样编号	取土深度 h/m	含水率 $w/\%$	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e
1	2.0~2.5	60.4	17.0	1.565
2	4.0~4.5	51.4	17.3	1.444
3	6.0~6.5	57.7	16.7	1.590
4	8.0~8.5	46.6	17.5	1.292
5	10.0~11.0	44.7	17.8	1.253
6	12.0~14.0	39.1	18.1	1.089
7	20.0~30.0	27.1	18.6	0.923

1.2 试验仪器及试验过程

循环动三轴试验使用英国进口的动态循环剪切设备,该套设备可实时监控整个试验过程,高速采集并储存数据,具有精度高、结果可靠等优点。波浪和冰对桩周土的动荷载效应与地震的作用不同,其主要表现在波浪和冰动应力的强度要远小于地震引起的动应力。其次,波浪和冰动荷载的作用时间要远大于地震的作用时间。基于以上的特点,模拟波浪和冰荷载的频率采用 0.15 Hz,加载不同动载幅值振动 1 000 次,随后对经过动载振动后的土样进行静三轴试验测试振动后土样强度的损失程度。

试验用的土样在现场取样、运输和实验室制备过程中,土体内部结构会受到不同程度破坏。为了能够使得试验中土样的尽量恢复原始的应力状态,先将土样置于压力室中固结一段时间,固结时间通常为 24 小时。固结完毕之后再施加轴向静荷载和相应动荷载,固结压力大小应符土样原位受力状态,在自重应力下进行等向固结,固结压力:

$$\sigma_c = \frac{(\sigma_z + 2\sigma_h)}{3} = \frac{(1 + 2k_o)}{3}\gamma z \tag{1}$$

式中: σ_z 、 σ_h 为地基自重应力引起的上覆压力和侧向压力; σ_c 为土体固结压力; k_o 为地基土侧向压力系数; γ 为土样的天然重度; z 为覆土深度。

试验过程中分别通过剪切试验得到荷载作用前和作用后的土体抗剪强度,对比相同土样在相同固结条件下土体剪切前后的强度值,即可得到该种应力条件下土样受动荷载作用后的强度弱化程度。

2 试验数据结果

循环荷载作用下饱和软黏土的应力—应变关系表现为一系列滞回圈,并且随着循环次数的增加,滞回圈向右移动的同时逐渐向应变方向倾斜,即发生应变软化现象,从而导致土体不排水抗剪强度的降低。该土样在动应力的作用下动应力—应变曲线如

图 1 所示。

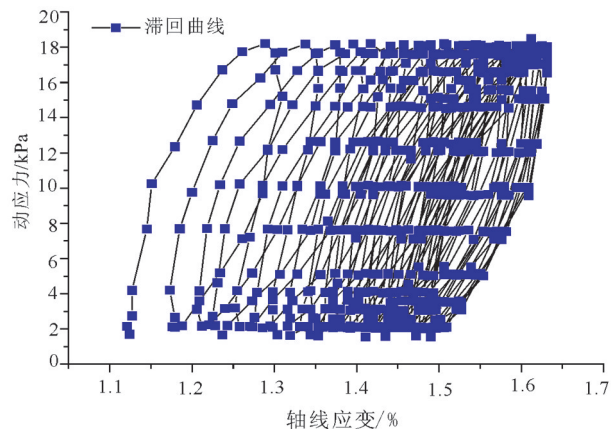


图 1 动应力-应变曲线

Fig.1 The curves of dynamic stress-strain relationship

该组原状土样静三轴试验结果与相应土样施加完动荷载之后的静三轴试验结果的对比图见图 2。

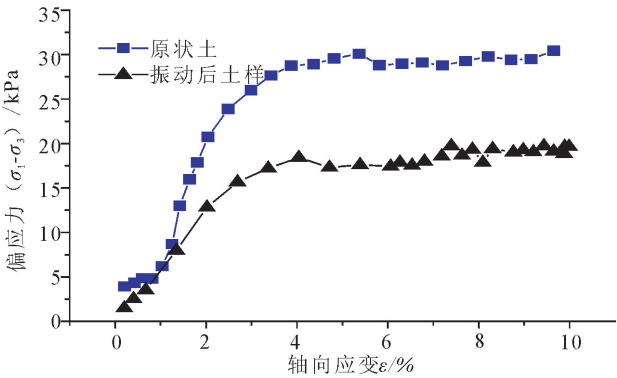


图 2 原状土与振动后土样静三轴应力-应变曲线

Fig.2 The curves of static triaxial stress-strain relationship of undisturbed soil and soil after vibrating

表 2 部分振动后土样强度变化

Table 1 The strength variation of some soils after vibrating

土样 编号	固结应力 σ_c/kPa	静应力 σ_j/kPa	动应力 σ_d/kPa	振后强度 C_u/kPa	强度弱 化程度
2-1	25	15	5	8.5	0.76
2-2	25	15	8	8.1	0.62
2-3	25	15	8	8.4	0.62
2-4	25	15	10	5.8	0.58
2-5	25	15	12	8.9	0.54
2-6	25	15	15	3.8	0.38

由图 2 及表 2 可知,强度固结压力(即自重应力 σ_3)对土样抗剪强度存在明显的影响作用。当固结压力一定时,不同的静载和循环动荷载组合都会导致软黏土的抗剪强度折减值变化。静偏应力相同,动荷载越大弱化程度越大;动荷载相同,静偏应力越

大弱化程度也越大。因此,波浪循环荷载(海冰荷载)作用下软黏土的抗剪强度弱化程度可由某一地基土单元相应的 σ_j 、 σ_d 、 σ_c 荷载组合根据图 3 确定。

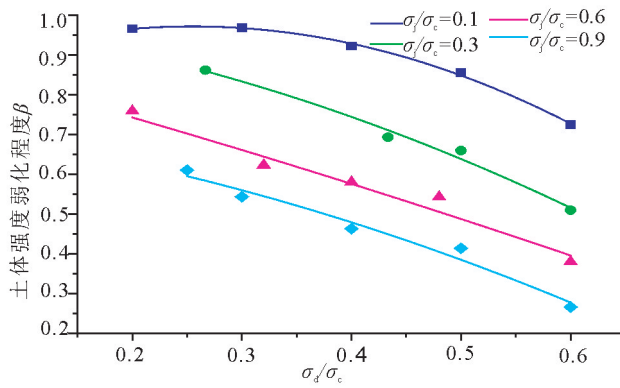


图 3 不同应力组合工况下土体的弱化程度

Fig.3 Different weakening degrees of soil under different stress combinations

图 3 为土体弱化程度 β 与 σ_j 、 σ_d 、 σ_c 关系曲线。其中,土体弱化程度 β 的计算公式为:

$$\beta = \tau_{fs} / \tau_{fd} \tag{2}$$

式中, τ_{fs} 为土样原始静三轴强度; τ_{fd} 为土样振动后的静三轴强度。

由三轴试验数据,利用 oringin 数据处理软件得到试验中土体弱化度 β 与土体应力 σ_d 、 σ_j 以及土体深度之间的关系式:

$$\beta = (-1.569\ 3R_j + 0.662\ 6)R_d^2 + (1.668\ 9R_j - 1.724\ 1)R_d + (0.954\ 6 - 0.191\ 1R_j) \tag{3}$$

其中, $R_j = \sigma_j / \sigma_c$, $R_d = \sigma_d / \sigma_c$; σ_d 为剪切面上动剪应力幅值; σ_c 为土体所受侧向压力; σ_j 为土体承受静压力; z 为覆土深度; γ 为土体重量。

当侧压力系数取 0.5 时,带入式(1)可得循环荷载作用下不同应力组合,不同深度土体强度弱化值:

$$\beta = 0.45 - 5.265\sigma_j\sigma_d(\gamma_z)^3 + (1.485\sigma_d^2 + 3.735\sigma_j\sigma_d)(\gamma_z)^2 - (0.285\sigma_j + 2.58\sigma_d)\gamma_z \tag{4}$$

通过式(4)可以计算出考虑结构物自重引起的静荷载与波浪或冰循环荷载引起的动荷载的共同作用下不同深度土体强度的损失程度,为评估该地区土体在波浪和冰等动荷载作用下的桩周土的弱化程度提供参考依据。

地基中的土体同时承受着结构物自重、土体自重和波浪循环荷载的作用,因此,当研究地基土体的承载力时,需要对特定土体自重应力下结构物静荷载 σ_j 与循环动荷载 σ_d 共同作用时土体的破坏与强度特点进行分析。循环荷载下的土体弱化强度可以

用来描述静荷载与循环荷载作用下土的强度弱化规律。特定固结应力下,土的循环弱化程度与静偏应力 σ_j 和循环应力 σ_d 的组合有关。由于通常情况下 σ_d/σ_c 比值较小,若循环荷载的作用时间太短则达不到预想结果,这时可以把循环动荷载 σ_d 等价于静荷载 σ_j 。但如果循环荷载作用次数继续增加,则 σ_d 的特性就得到充分体现,并与静荷载 σ_j 完全不同。同时,动荷载对土体的稳定性已起到了决定性的作用,这种效果最终导致了地基土体抗剪强度弱化。

3 结论

通过动三轴低频、高振次、多振幅的加载方式模拟波浪荷载作用下,考虑桩体自重条件下,桩周土土体力学指标变化情况,并配合静三轴试验对振动前后土体的强度进行测试得到以下结论:

(1) 通过对天津滨海地区的桩周土进行振动三轴和静三轴试验,得到特定固结应力下,土的循环弱化程度与土体深度以及土体所承受动、静应力组合有关,当循环荷载作用次数不断增加,则循环动荷载对土体的稳定性起到决定性的作用,此时循环荷载的作用效果必须予以考虑,这种效果可能最终导致了地基土体抗剪强度弱化。对评估该地区土体在波浪和冰等动荷载作用下的地基土承载力的弱化程度具有重要的实际意义。

(2) 通过静、动三轴试验综合分析天津滨海区域桩周土的动力特性,结合试验动力特性结果,提出了一个相对较简单且符合试验规律的天津地区桩周土的强度弱化公式,为该区域土体强度弱化规律的研究提供了一定的实验依据和可供判别参考土体弱化程度的依据。

参考文献(References)

- [1] Seed H B, Idriss I M. Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [2] Andersen K H, Kleven A, Heien D. Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures[J]. ASCE, 1988, 114(GT5): 517-539.

- [3] Azzouz A S, Malek A M, Baligh M M. Cyclic Behavior of Clays in Undrained Simple Shear[J]. J Geotech Engrg, 1989, 115(5): 637-657.
- [4] 冯军, 闫澍旺. 长江口软粘土在波浪循环荷载作用下的弱化分析[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(1): 18-21.
FEING Jun, YAN Shu-wang. Degradation of Soft Clay in the Entrance to Sea of the Changjiang River Under Wave Cycle Loading[J]. China Offshore Platform, 2005, 20(1): 18-21. (in Chinese)
- [5] 张德文, 张建民. 桩基础抗震性能的简易评价方法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 69-83.
ZHANG De-wen, ZHANG Jian-min. Simplified Method for Evaluating Seismic Performance of Pile Foundation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 69-83. (in Chinese)
- [6] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1618-1624.
LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral Response Deformation Method for Seismic Analysis of Underground Structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1618-1624. (in Chinese)
- [7] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(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, 28(7): 891-895. (in Chinese)
- [8] 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 Jian, GONG Xiao-nan. Study on Strain Soften in Saturated Soft Clay under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75-78, 82. (in Chinese)
- [9] 邓津, 王兰民, 张振中, 等. 我国黄土的微结构类型与震陷区域划分[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 664-670.
DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong, et al. The China Loess Microstructure Types and Its Seismic Subsidence Zones Divided[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 664-670. (in Chinese)
- [10] 张建民, 宋飞. 考虑填土侧向变形的地震土压力计算方法[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 9-20.
ZHANG Jian-min, SONG Fei. Evaluation of Seismic Earth Pressure Considering Lateral Deformation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 9-20. (in Chinese)