

杭州湾粉质土液化后强度及变形特性试验研究^①

吕小飞, 李 冬, 陈培雄, 陈小玲

(国家海洋局第二海洋研究所工程海洋学研究中心, 浙江 杭州 310012)

摘要:海洋粉质土因沉积环境的差异,在动应力作用下的液化特性与陆上粉土略有不同。以杭州湾原状粉质土为研究对象,进行特别设计的动三轴液化试验,研究粉质土液化后的强度和变形特性。研究表明:杭州湾粉质土液化后的应力-应变关系相似,应变与砂性土的变化规律相似,可分为低强度段和强度恢复段两阶段,振动频率、围压和前期最大轴向应变对液化后应力-应变都有影响。提出粉质土液化后二阶段本构模型能较好地反映粉质土液化后的应力-应变关系。

关键词:海洋粉质土;液化后变形;非零有效应力状态;零有效应力状态

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0857-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0857

Experimental Study of Post-liquefaction Strength and Deformation Behavior of Silt in the Hangzhou Bay

LV Xiao-fei, LI Dong, CHEN Pei-xiong, CHEN Xiao-ling

(Laboratory of Engineering Oceanography, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The liquefaction behavior of marine silty soil is different from that of sandy soil under dynamic loading conditions. The samples of insitu marine silty soil in the Hangzhou Bay were analyzed with a special dynamic triaxial liquefaction test, which could possibly clarify post-liquefaction strength and deformation behavior. The results showed that the shear strain of silty soil could be divided into two parts: nonzero effective stress state and zero effective stress state, and the deformation law of marine silty soil was similar to that of sandy soil and also the shear strain when the nonzero effective stress state or zero effective stress state was subject to vibration frequency, cell pressure, and ϵ_{max} . constitutive model on the post-liquefaction behavior of silty soil is proposed, which could express the post-liquefaction stress-strain response very well.

Key words: marine silty soil; post-liquefaction deformation; nonzero effective stress state; zero effective stress state

0 引言

自 1964 年日本新泻地震和美国阿拉斯加地震后,地震液化问题逐渐引起岩土工程界的重视^[1],并成为该领域长期研究的热点^[1],具有重大理论价值和实际意义。Seed 等^[2]在 1966 年提出了“初始液化”概念,即认为在不排水循环剪切试验中有效应力第一次达到零值时砂土所处的状态为初始液化,并

把砂土液化过程分为“初始液化前”和“初始液化后”两个阶段。从 20 世纪 60 年代开始至 80 年代,地震液化问题的研究主要关注砂土液化前,集中在液化的产生、液化机理、影响因素和液化的判别,取得了较大的成就。从 20 世纪 80 年代以来,国内外许多地震震害调查结果发现,因液化而导致的地基或建筑物破坏往往发生在地震结束后几分钟甚至几天

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助项目(JG200807)

作者简介: 吕小飞(1978—),男,浙江金华人,硕士,主要从事海洋土工程性质研究。E-mail: Lvxf@sio.org.cn。

后,因此液化问题研究的核心不是强度,而是变形,液化后地面大变形在1983年日本海地震后开始受到关注^[3]。但是液化后的变形问题是一个极其复杂且困难的问题,目前研究的成果仅仅是寻找一些对震陷和变形问题分析和预测的理论和方法^[4-7],然而预测结果和实际情况有差异或是方法不具备重复性^[8]。美国国家研究委员会地震工程委员会(1985年)认为这一问题离完满解决还有很远的距离。

粉砂、粉土等粉质土是一种地震液化土,在我国分布广泛。海洋粉质土是特殊沉积环境下沉积的地震液化土,其自由水含量高、振动易液化失水、地基承载力较低,是海洋工程(特别是海底管线工程)建设中经常遇到的土类。因此有必要研究海洋粉质土地震液化后的变形问题,以便为地震液化后变量预测提供一定依据。

1 试验方法

试验仪器采用美国GCTS公司研制的TRX-100型双向振动三轴仪。仪器由计算机控制部分、伺服控制单元、传感器单元、动力加载系统、三轴室及附属部分组成。仪器指标如下:试样尺寸包括4种,分别为实心样 $\phi 38\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 、 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、 $\phi 75\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 和 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$;振动频率最大为10 Hz;最大竖向荷载为50 kN;最大围压为1 MPa;最大反压一般小于围压;轴向最大变形为 $-50 \sim 50\text{ mm}$;振动波为正弦波或随机波。该仪器可在循环加载结束后立即施加轴向静加载,为模拟海洋粉质土液化后自重作用下产生的液化后变形过程,单调静加载的加载速率应保持较低的程度。整个试验加载过程见图1。

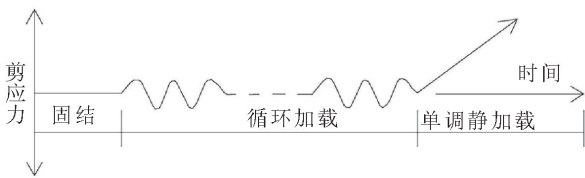


图1 粉土液化后大变形试验加载过程

Fig.1 Loading process of test on large post-liquefaction deformation of silty soil

本次试验土样取自杭州湾中部,共制成27个试验样品,样品尺寸均为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,分三组进行试验。考虑海洋土所受动力条件的特殊性,拟合地震作用和波浪作用下的振动情况,试验的振动频率分别采用0.2、0.5和1 Hz。0.2和0.5 Hz振动频率模拟波浪作用,1 Hz模拟地震作用。每组试样

的有效固结应力分别为25、50和75 kPa。以应力控制方式进行试验,当达到初始液化后($u = \sigma_{3c}$)继续加载,直至双幅轴向应变达到设定值 ϵ_{\max} 。

2 试验结果与分析

2.1 液化后强度和大大变形

循环荷载作用结束后,对试样施加单调静荷载以研究粉质土液化后的应力-应变关系。试验结果表明:各组试样液化后应力-应变关系的变化趋势是相似的,与文献^[4-7]中砂土的应力-应变关系相似。由于试样自身土强度较低,固结应力较小,在施加单调静荷载后试样的应力-应变关系表现出两阶段性。图2是液化后典型的应力-应变关系图。

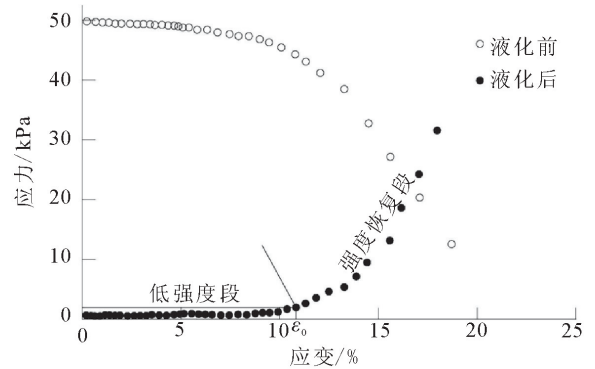


图2 粉质土液化后静加载的典型应力-应变关系 ($\sigma_{3c} = 50\text{ kPa}$, $f = 1\text{ Hz}$)

Fig.2 Typical stress-strain relationship of liquefied silty soil under static loading ($\sigma_{3c} = 50\text{ kPa}$, $f = 1\text{ Hz}$)

图2显示粉质土液化后应力-应变关系可分为低强度段和强度恢复段,与Shamoto^[4]、张建民^[9]根据应变产生时的有效应力状态将总应变 ϵ 分为零有效应力状态时的应变 ϵ_0 和非零有效应力状态时的应变 ϵ_d 两个分量相一致。因此可近似地认为循环加载后的静加载过程是初始液化之后某一应力循环内的压缩过程。低强度阶段处于单调静加载的初期,土强度几乎为零,应变对应力极其敏感,较小应力能产生较大的轴向应变 ϵ_0 ,孔隙水压力则基本保持在有效围压附近,此时砂土基本呈流体状,不能承受剪应力。此阶段即为Shamoto等^[4]所定义的砂土液化后应力-应变曲线中的低强度段,该阶段发生的应变称为低强度段轴向应变 ϵ_0 。出现这种现象与液化后土的再固结体变特性密切相关,再固结体变主要由部分可逆的体变分量和不可逆的体变分量组成^[6-10]。循环加载使土体有振密的趋势,从而使试样中的水处于一定的压缩状态,在液化后单调

加载时剪切作用使土体有体胀趋势,从而使这部分水从压缩状态释放出来,在此过程中水体逐渐从受压状态向自由状态转换,试样的有效应力不发生变化保持为零,而应变则大幅度增加,此时的轴向应变 ϵ_0 与可逆的体应变分量相对应^[7]。当轴向应变增大到一定值时,水体由压缩状态向自由状态转变,随着孔隙水压力不断降低,有效应力快速增加,强度逐渐得到恢复,土表现出剪胀特性^[10]。此阶段称为强度恢复段,发生的应变称为强度恢复段轴向应变 ϵ_d ,与不可逆的体变分量相对应。

2.2 大变形影响因素

在各向等压固结条件下,试验设计不同振动频率、围压和最大前期轴应变 ϵ_{max} 对杭州湾粉质土液化后静加载变形的影响。图 3 是各种参数下的应力-应变关系。

由图 3(a)、(b)可知,在相同围压固结下的试样,液化后的变形随循环荷载频率的增大而有所增强,而轴向应变略有减小;围压越大液化后变形越显著。图 3(c)给出了不同前期最大轴向应变 ϵ_{max} 下的应力-应变响应。曲线 1 和曲线 3 的试样在前期循环荷载下未达到初始液化,不存在零有效应力状态,其余曲线 2、4、5、6 的前期最大轴向应变 ϵ_{max} 逐渐增大,零有效应力状态下轴向应力 ϵ_0 也变大。但不管振动频率、围压和前期最大轴应变差异如何,粉质土液化后静加载的应力-应变都具有低强度段和强度恢复段的特点。

3 粉质土液化后二阶段本构模型

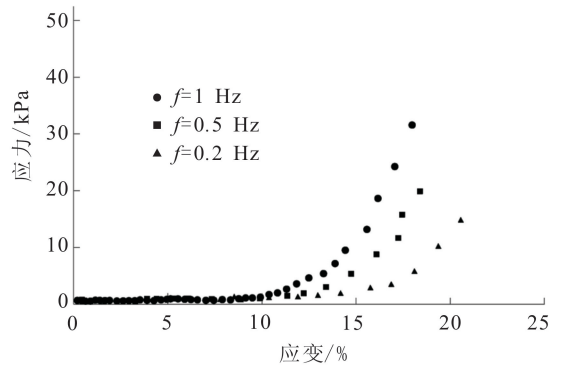
3.1 模型的建立

杭州湾粉质土液化后静加载的变形特性符合 Shamoto 等^[4]、张建民^[9]根据应变产生时的有效应力状态提出的总应变 ϵ 应分为零有效应力状态时的应变 ϵ_0 和非零有效应力状态时的应变 ϵ_d 两个分量,即:

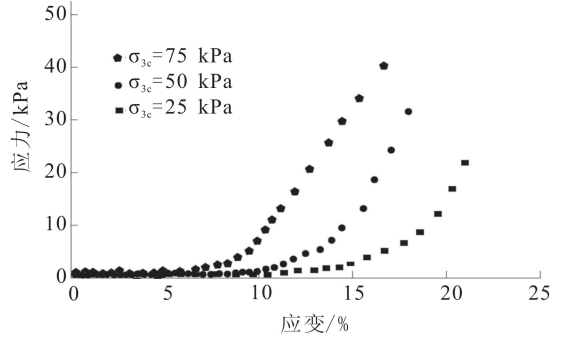
$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_d \quad (1)$$

零有效应力状态时的应变 ϵ_0 在液化后的总应变中处于主要地位,其大小与静加载应力无关,而与前期应力应变历史有关;非零有效应力状态时的应变 ϵ_d 则与静加载作用有关,而与前期应力应变历史无关^[6]。

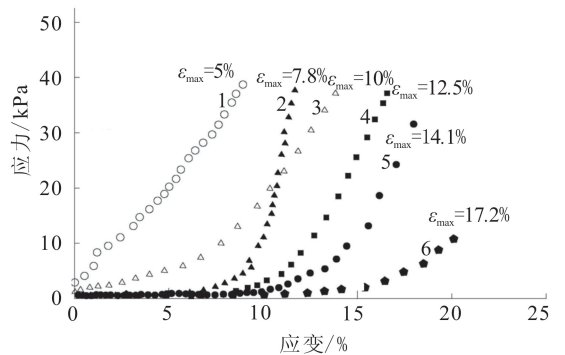
在低强度阶段,总应变绝大部分来自于零有效应力状态时的应变 ϵ_0 ,因此在该阶段 $\epsilon_d = 0, \epsilon = \epsilon_0$ 。王艳丽等^[7]提出 ϵ_0 是前期最大轴向应变 ϵ_{max} 的线性函数,用拟合公式来表达。以本文数据作 $\epsilon_0 - \epsilon_{max}$



(a) 振动频率 ($\sigma_{3c} = 50$ kPa)



(b) 围压 ($f = 1$ Hz)



(c) 前期最大轴向应变 ($f = 1$ Hz, $\sigma_{3c} = 50$ kPa)

图 3 粉质土应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relationship of silty soil

的相关图(图 4),得出

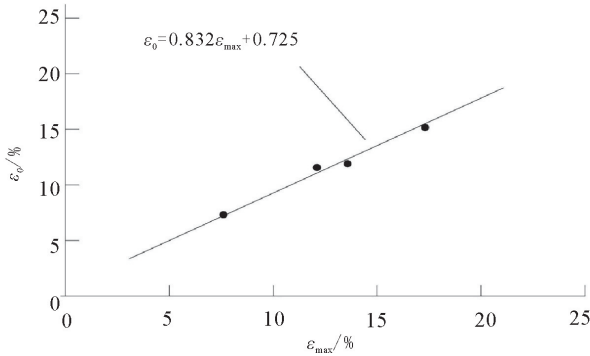
$$\epsilon_0 = 0.832\epsilon_{max} + 0.725 \quad (2)$$

需要注意的是,对于在土类不同、物性不同、试验条件差异的情况下,线性关系并不一定成立。

在强度恢复阶段,非零有效应力状态时的应变 ϵ_d 开始起作用,可用简洁的双曲线模型来表示。刘汉龙等^[5]给出了经过坐标变换后的双曲线表达式:

$$\epsilon_d = \frac{q}{G_i + \frac{q}{\epsilon_{ult}}} \quad (3)$$

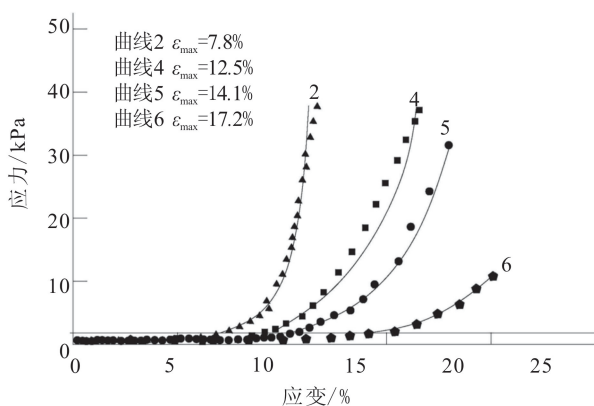
式中: ϵ_{ult} 为砂土液化后 $q - \epsilon_d$ 曲线上的应变渐近值; G_i 为砂土液化后 $q - \epsilon_d$ 曲线上应变为 ϵ_0 时的切线模量。因此,在强度恢复阶段的总应变 ϵ 为:

图4 粉质土 ϵ_0 - ϵ_{\max} 的相关图Fig.4 ϵ_0 - ϵ_{\max} relationship of silty soil

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_d = \frac{q}{G_i + \frac{q}{\epsilon_{ult}}} \quad (4)$$

3.2 模型验证

以曲线2、4、5、6的数据进行二阶段模型适应性的验证,结果见图5。由图5可知预测模型与试验数据能较好地重合,在强度恢复段二者的误差较小;在低强度段,模型值预测其零有效应力时的轴向应变 ϵ_0 ,因为试样在该阶段基本处于流体状态,几乎没有抗剪切能力,对极小的应力都能产生较大的变形,应力变化无法体现试样的快速变化,因此在某个极小的应力区间内可完成零有效应力状态的应变过程。王艳丽等^[5]给出了应力区间为0~5 kPa,认为在5 kPa时对应的轴向应变就是低强度段向强度恢复段过渡的临界点。在强度恢复段,随着变形的发展,剪胀作用使超静孔隙水压力下降,压缩水向自由水转变,有效应力增加,试样强度也逐渐得到恢复,应变发展与加载应力有关,其应力-应变关系适用试样液化前的应力-应变关系,因此该阶段可用双曲线模型进行拟合。双曲线模型只考虑强度恢复阶段的

图5 预测曲线与试验数据($f=1$ Hz, $\sigma_{3c}=50$ kPa)Fig.5 Test and predicted curves ($f=1$ Hz, $\sigma_{3c}=50$ kPa)

数据点,无需考虑试验数据的整体性,因此拟合的效果要高于文献[5]中的验证效果。因此,本文提出的二阶段本构模型对杭州湾粉质土液化后的变形特性有较好的适应性。

4 结语

通过室内动三轴试验研究杭州湾粉质土液化后的强度和大变形特性,初步探讨振动频率、围压、前期最大轴向应变对大变形特性的影响因素,提出杭州湾粉质土液化后的二阶段本构模型,模型验证较为吻合。由于粉质土液化后零有效应力状态时的应变处于主导地位,本文只考虑前期最大轴向应变的影响,其他振动频率、围压等参数对零有效应力状态时的应变的影响程度和量化还有待研究。

参考文献(References)

- [1] The Committee on Soil Dynamics of the Geotechnical Engineering Division. Definition of Terms Related to Liquefaction [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(GT9): 1197-1200.
- [2] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1966, 92(SM6): 105-134.
- [3] 刘慧珊,李鹏程,徐风萍. 地下生命线工程防御地震液化产生地面大位移的对策 [J]. 工程抗震, 1998, 12(4): 28-32.
LIU Hui-shan, LI Peng-cheng, XU Feng-ping. Countermeasures of Large Ground Displacement Induced by Underground Lifeline Engineering Defense Seismic Liquefaction [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1998, 12(4): 28-32. (in Chinese)
- [4] Shamoto Y, Zhang J M, Goto S. Mechanism of Large Post-liquefaction Deformation in Saturated Sand [J]. Soils and Foundations, 1997, 37(2): 71-80.
- [5] 刘汉龙,周云东,高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 142-146.
LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, GAO Yu-feng. Study on the Behavior of Large Ground Displacement of Sand due to Seismic Liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 142-146. (in Chinese)
- [6] 张建民,王刚. 砂土液化后大变形的机理 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 835-840.
ZHANG Jian-min, WANG Gang. Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation in Saturated Sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 835-840. (in Chinese)
- [7] 王艳丽,王勇. 饱和砂土液化后强度与变形特性的试验研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(6): 667-672.
WANG Yan-li, WANG Yong. Experimental Study on Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand after Liquefaction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 667-672. (in Chinese)

- [8] 赵成刚,尤昌龙.饱和砂土液化与稳态强度[J].土木工程学报, 2001,34(3):90-96.
ZHAO Cheng-gang, YOU Chang-long. Liquefaction and Steady State Strength [J]. China Civil Engineering Journal, 2001,34(3):90-96. (in Chinese)
- [9] Zhang J M. Prediction of Liquefaction-induced Residual Deformation[J].Shimizu Technical Research Bulletin 1996, 15:1-29.
- [10] 周云东.地震液化引起的地面大变形试验研究[D].南京:河海大学,2003.
ZHOU Yun-dong. Laboratory Study on Large Ground Deformation Induced by Earthquake Liquefaction [D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese)

(上接 856 页)

- [8] 陈建国,李前进,肖军华,等.提速列车荷载下铁路路基动力特性的研究[J].岩土力学,2009,30(7):1944-1950.
CHEN Jiang-guo, LI Qian-jin, XIAO Jun-hua, et al. Dynamic Response of Existing-railway Subgrade with Train Speed Increasing[J].Chinese Journal of Rock Mechanics, 2009, 30(7): 1944-1950. (in Chinese)
- [9] 董亮,赵成刚,蔡德钩,等.粘弹性一致人工边界及其在高速铁路路基中的应用[J].土木工程学报,2008,41(10):81-86.
DONG Liang, ZHAO Cheng-gan, JI De-gou, et al. Consistent Viscous-spring Artificial Boundary and Application in Subgrade of High-speed Railways [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 81-86. (in Chinese)
- [10] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
LIU Jing-bo, GU Ying, DU Yi-xin. Consistent Viscous-spring Artificial Boundary and Viscous-spring Boundary Element [J]. Journal of Rock Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075. (in Chinese)
- [11] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:科学出版社,2007: 393.
ZHAI Wan-ming. Vehicle-track Coupling Dynamics [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2007: 393. (in Chinese)
- [12] 刘成宇.土力学[M].北京:中国铁道出版社,2010:157.
LIU Cheng-yu. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 157. (in Chinese)