

张岩,耿济世,毛磊,等.珠江三角洲海相沉积软土压缩和剪切变形特性试验研究[J].地震工程学报,2018,40(4):745-751.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.745

ZHANG Yan, GENG Jishi, MAO Lei, et al. Compression and Shear Deformation Properties of Marine Soft Soil Deposits in the Pearl River Delta[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(4): 745-751. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.745

珠江三角洲海相沉积软土压缩和 剪切变形特性试验研究

张 岩^{1,2}, 耿济世³, 毛 磊^{1,2}, 刘芙荣⁴

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049; 2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210049;
3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 为了研究近代海相沉积软土的变形特征, 本文对珠江三角洲河口地区的全新世海相沉积的软土进行了室内单轴压缩与不同围压下作用下的三轴固结不排水(CU)、不固结不排水(UU)的剪切试验。试验结果表明: 原状土和重塑土样的孔隙比随压力的增大而下降, 且与加压方式有密切关系, 加压幅度越小, 土的扰动破坏越小; 原状土样固结系数随着压力增加而递减, 整体近似符合指数函数分布, 重塑土样固结系数随着压力增加逐渐增大, 整体近似符合线性函数分布。在相同的固结压力下, 原状土样的强度低于重塑土样的强度。土样的应力应变曲线为应变硬化型, 且围压对重塑土的影响小于原状土。

关键词: 软土; 结构性; 单向压缩; 三轴剪切

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0745-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.745

Compression and Shear Deformation Properties of Marine Soft Soil Deposits in the Pearl River Delta

ZHANG Yan^{1,2}, GENG Jishi³, MAO Lei^{1,2}, LIU Furong⁴

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, Jiangsu, China;

2. Key laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210049, Jiangsu, China;

3. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

4. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd, Tianjin 300222, China)

Abstract: In this work, Holocene-era soft soil deposits in the Pearl River Delta were sampled. The differences in the compression and shear deformation properties of undisturbed and reconstituted soils were determined through uniaxial compression tests, consolidated-undrained triaxial tests, and unconsolidated-undrained triaxial tests. Comparing the compression curves of undisturbed and reconstituted samples revealed that the void ratio of the two soils decreases as pressure increases and is closely related to compression method. The consolidation coefficient of the

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 中国地质调查项目(1212011220005)江苏省地勘基金项目(苏国土资函[2014]842号)

第一作者简介: 张 岩(1987—), 女, 硕士, 主要从事水文地质工程地质环境地质工作。E-mail: zhangyan6193@sina.com。

通信作者: 耿济世(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质方向学习。E-mail: gengjishi@cumt.edu.cn。

undisturbed soil sample decreases exponentially as pressure increases, whereas that of the reconstituted soil sample increases linearly with pressure. The results of the triaxial shear test showed that under the same consolidation pressure, the strength of undisturbed samples is lower than that of reconstituted samples. The stress-strain curves of soil samples reflect the occurrence of strain hardening. The influence of confining pressure on the reconstituted soil sample is smaller than that on the undisturbed soil sample.

Keywords: soft soil; structural property; uniaxial compression; triaxial shear

0 引言

我国沿海地区广泛分布有厚度为几米至几十米的全新世海相沉积软土层,主要为淤泥、粉砂质淤泥以及黏土层^[1-5]。该地区的许多大型工程(如机场、高速公路等)均以软土作为地基,在工程建设中常因软土的含水量高、压缩性大、透水性差,承载力低,埋藏深厚,且稳定性差等不良性质导致地基失稳和沉降问题出现^[6-9]。许多研究表明,软土的工程性质主要取决于其微观结构和变化规律^[10-15]。刘恩龙等^[16]从土样制备、土工特性分析、微观变形机理和数学模型方面对结构性软土进行了综述性分析;王国欣等^[17]详细介绍了土体的结构性本构模型的研究现状,并分析了这些模型在应用中存在的问题。王立中等^[18]、陈晓平等^[19]通过室内试验的手段探讨了软土结构性的宏观特征及其对土体力学性能的影响。Schmertmann^[20],王军等^[21]认为加载比对原状土样的压缩曲线有一定影响。Hong 等^[22]根据

Ariake 黏土原状样和重塑样的不排水剪试验,得出原状土样的剪切强度低于重塑土样。土体的强度与结构性密切相关,在土工实践中研究软土结构性对其力学性质的影响是非常重要的。

本文以珠江三角洲河口地区的全新世海相沉积的软土为研究对象,开展了包括单向压缩,固结不排水(CU)和不固结不排水(UU)剪切试验,分析了软土结构性对其强度及变形的影响,为软土的沉降变形计算提供依据。

1 试验土样

本试验软土取自珠江三角洲河口地区某施工场地深 10 m 左右,该土样呈灰褐色,饱和,流塑-软塑状,局部夹砂斑,属高压缩性软土。重塑样则是将现场取来的该原状土充分混合均匀后制备而成。土样的物理性质指标如表 1 所示。表 1 中的结构屈服应力由 Casagrande 经验作图法^[23]确定。

表 1 试验土体的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of soil samples						
取样深度/m	含水率/%	孔隙比 e	天然密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	结构屈服应力/kPa
10	27.5	1.342	1.71	52.4	26.2	63

2 压缩试验

2.1 试验内容

为研究结构性对软土的压缩变形特性的影响情况,对原状土样和重塑土样分别进行单向压缩试验,土样内径为 61.8 mm,高度为 20 mm。试验仪

器采用南京土壤仪器厂的 WG 型固结仪。试验在单向排水的条件下采用三种不同的加载方案逐级加荷。方案 1 为按照土工试验规程的方式加载,共 7 级;方案 2 为按照建筑荷载的方式加载,共 10 级;方案 3 为按照高速公路的加载方式加载,共 16 级,见表 2。

表 2 加载方案及荷载等级

Table 2 Loading schemes and load grades	
方案	荷载等级/kPa
1	12.5—25—50—100—200—400—800
2	25—50—100—200—300—400—500—600—700—800
3	50—100—150—200—250—300—350—400—450—500—550—600—650—700—750—800

2.2 试验分析

在单向荷载作用下,原状土和重塑土样的孔隙

比随压力的增大而逐渐减小(图 1)。在加载初期,土样结构基本保持完好,变形较小,土样尚处于弹性

变形状态;随着压力不断增大,土样由弹性变形转为塑性变形,当固结压力大于结构屈服应力时,进入陡降阶段,接触不稳定的土粒发生位移,伴有结构塌陷,贯通的排水通道形成,孔隙体积减少得很快,所以在陡降阶段,表现为变形量突然增大,变形速率也随着塑性区的不断开展在不断增加;进一步压缩,土体结构基本被破坏,原状土样压缩曲线趋于重塑土样,说明此时,原状土样的变形性状接近重塑土样,孔隙体积减小速率大幅下降。而重塑土由于无结构强度,所以压缩过程中, $e-\lg p$ 压缩曲线没有反映结构强度的平缓阶段,而基本为一直线[图 1(b)]。另外,重塑土压缩曲线位于原状土压缩曲线的下方,表示同一压力作用下,重塑土的孔隙比小于原状土,即重塑土的变形量较大。但随着荷载增大,原状土和重塑土的孔隙比逐渐趋于一致。

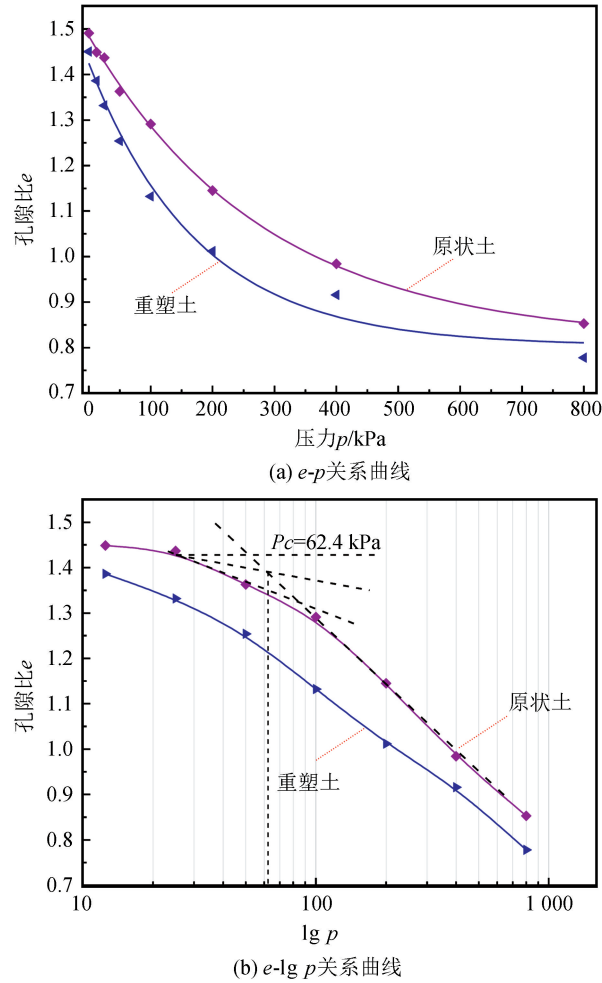


图 1 原状土样和重塑土样的单向压缩试验曲线
Fig.1 Uniaxial compression test curves of undisturbed and remolded specimens

不同加载条件下,原状土和重塑土样的孔隙比

与压力的关系曲线见图 2~3 所示。由图 2、3 可知,同一土样不同的加载方式得到的单向压缩曲线有所不同。在三种加载方式条件下测得的原状土样的 $e-\lg p$ 曲线都可分为三个阶段:平缓阶段、孔隙比陡变阶段和孔隙比变化与重塑土变化趋于一致阶段。在同一压力作用下得到的土样孔隙比,则是加载方式 2 最大,加载方式 1 次之,加载方式 3 最小。由此可知,加载幅度越小,对土体的扰动越小,土体的孔隙比变化越小,越能更好的保证试验结果的准确性。因此,在试验条件的允许下,应尽量减小加载幅度。

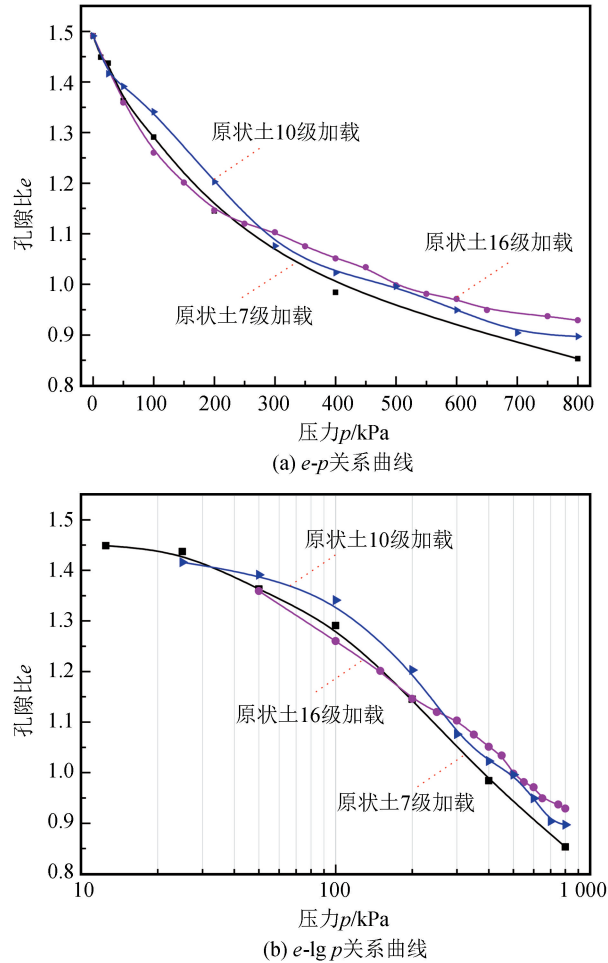


图 2 不同加载条件下原状土样的单向压缩曲线
Fig.2 Uniaxial compression curves of undisturbed specimens under different loading conditions

图 4 所示为不同试验荷载下原状土和重塑土样的固结系数变化情况。由图 4 可知,原状土固结系数的整体趋势是随着压力的增加逐渐递减,在屈服压力之前,固结系数有较大波动,之后逐渐趋于平稳,整体上近似符合指数函数分布,但相关性不高。重塑土固结系数与固结压力之间线性相关性系数超

过 0.98,其拟合曲线公式为 $C_v = 5 \times 10^{-6} p + 0.0011$ 。而且加载初期原状土固结系数大约为重塑土的 7~8 倍,随着固结压力增加,两者差距不断减小。

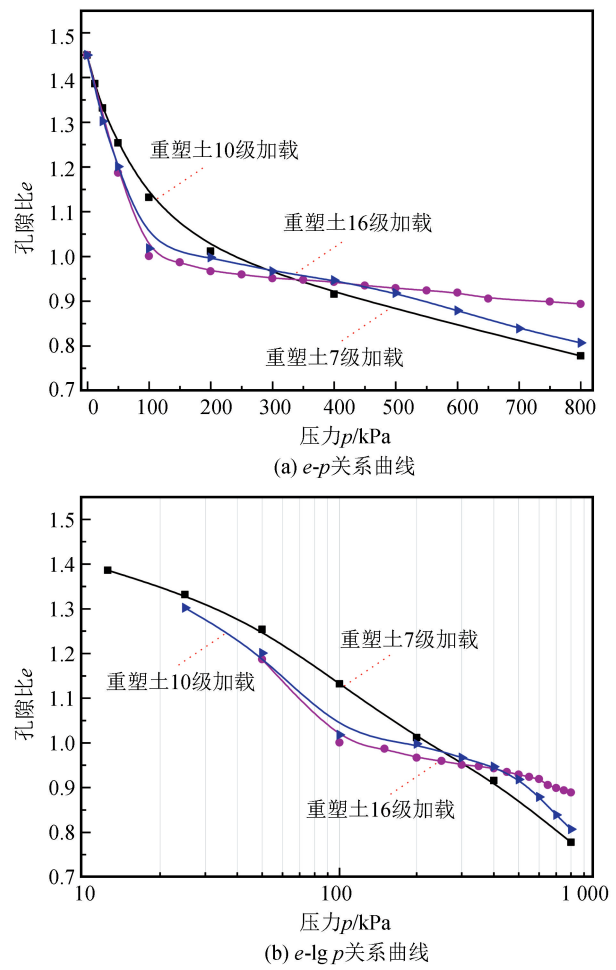


图 3 不同加载条件下重塑土样的单向压缩曲线
Fig.3 Uniaxial compression curves of remolded specimens under different loading conditions

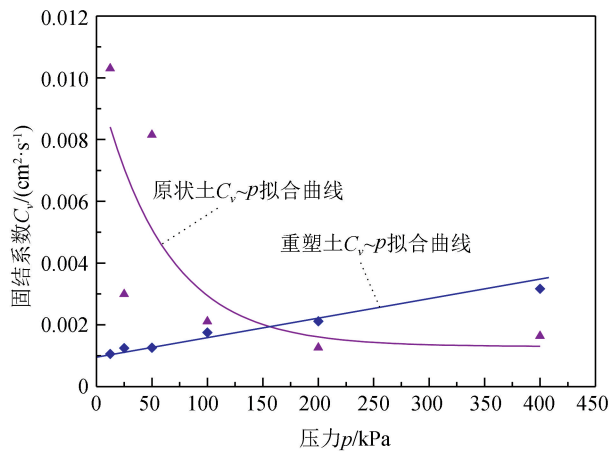


图 4 淤泥质粘土固结系数曲线
Fig.4 Consolidation coefficient curves of muddy clay

3 三轴剪切试验

3.1 试验内容

为研究结构性对土的应力应变曲线的影响,对珠江三角洲原状土和重塑土样分别进行不同围压下的三轴固结不排水(CU)、不固结不排水(UU)的剪切试验。两种剪试验中,剪切速率均设定为 0.08 mm/min。

3.2 试验分析

图 5 为原状土和重塑土在固结不排水条件下偏差应力与轴向应变曲线。从图中可以得出:

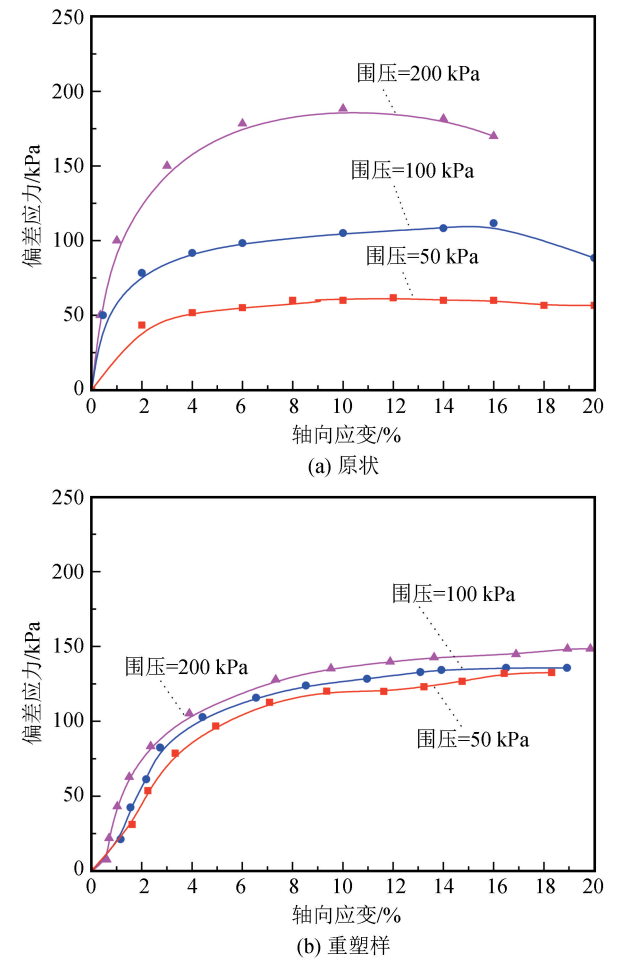


图 5 原状样和重塑样的偏差应力-应变曲线 (不排水剪切)

Fig.5 Deviatoric stress-strain curves of undisturbed and remolded specimens (Consolidated-undrained test)

(1) 偏差应力随着轴向应变的增加而增大,且增长速率逐渐减小。在应变较低时,偏差应力迅速增大,应力应变呈线性关系,土体处于弹性变形状态。

(2) 剪切应力大于结构屈服应力时,原状土和

重塑土样的应力-应变曲线属于应变硬化型,与已有的正常固结土的力学性质类似。

(3) 随着围压的增大,在同一轴向应变处的偏差应力越大,破坏时的偏差应力也越大。由此可见围压越大,土体的抗剪强度越大。

这种现象的主要原因是原状土体在沉积过程所具有的结构强度可以承受一部分轴向应力,所以加载初始阶段,当轴向应力较小时,呈可恢复的弹性变形,且原状土的曲线斜率比重塑土大。当轴向应力达到屈服应力时,此时原状土体性质接近重塑土,结构遭到破坏,呈不可恢复的塑形状态,随塑形变形的增加,所能承受的荷载基本稳定或有所下降,土体可认为已被破坏。

图 6 为原状样和重塑样在不固结不排水条件下的偏差应力与轴向应变关系曲线。由图可知:当轴向应变较低时,偏差应力随应变的增加而增加,土样

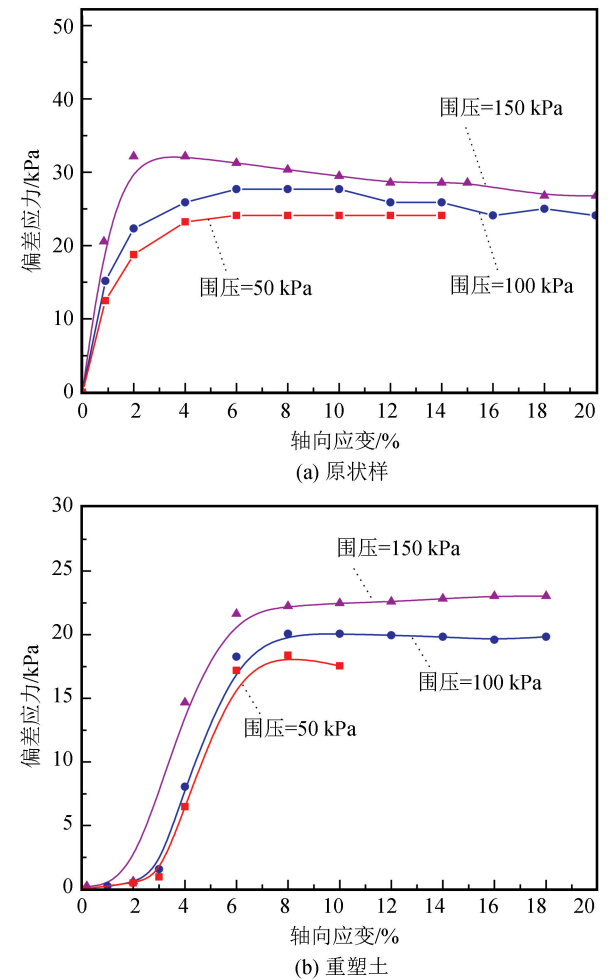


图 6 原状样和重塑样的偏差应力-应变曲线 (不固结不排水剪切)

Fig.6 Deviatoric stress-strain curves of undisturbed and remolded specimens (Unconsolidated-undrained test)

呈弹性变形。随轴向应变增大,曲线出现峰值,之后有所下降,整体上表现为应变软化型。而且,由 UU 试验得到的 3 种围压曲线的偏差应力值相差不大,这与固结不排水试验的主应力差值有较大区别。而重塑样曲线呈“S”型,初始加载阶段,偏差应力变化较小,当轴向应变达到 1%~2%,主应力差和轴向应变呈线性关系,当轴向应变达到 7.5%左右,曲线上升速率明显下降,进入缓慢上升阶段。并且围压对其影响不大,整体上呈应变硬。

图 7 为原状土样和重塑土样的固结不排水 (CU) 抗剪强度曲线。从图中可以看出,原状土样与重塑土样的总应力强度包络线有明显不同。在低围压下,原状土样的斜率较小,即结构强度保持完好,其内摩擦角小而黏聚力较大,在高围压下,内摩擦角增大而黏聚力减小。强度包线有明显拐点,且斜率由小变大。而对于重塑土,围压的改变对于土体的总应力指标影响很小,总应力强度包线近乎直线。当围压大于土体的结构屈服压力时,结构性土体的结构在试样剪切前就已发生破坏,因而原状土的有效应力强度包线逐渐趋于重塑土。

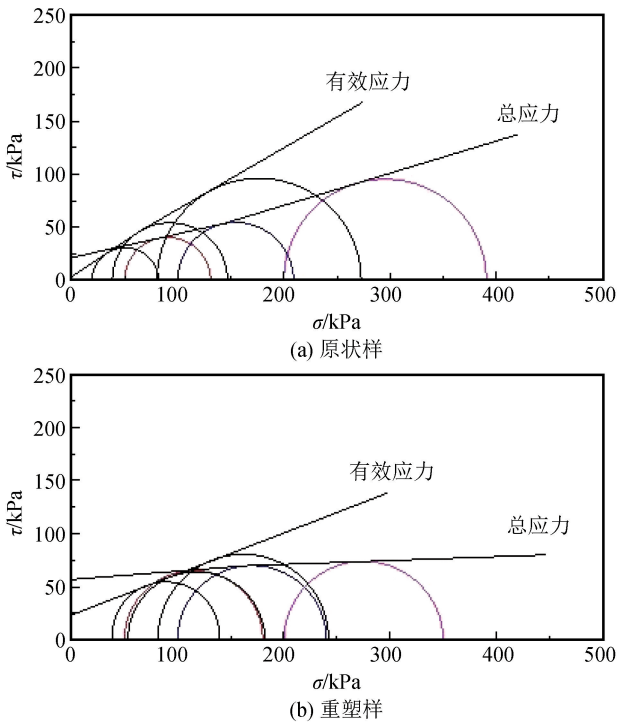


图 7 原状样和重塑样 CU 试验结果
Fig.7 CU test result of undisturbed and remolded specimens

图 8 为原状土样和重塑土样的不固结不排水 (UU) 抗剪强度曲线,由图可见,总应力抗剪强度包

络线几乎呈一水平线,即土样的内摩擦角趋近于零,只有黏聚力存在,其总应力极限摩尔圆能够做多个,而有效应力圆只能做一个。这是因为试验过程不能排水,轴向应力的增加主要由孔隙水承担,所以,土的颗粒骨架基本不变形,有效应力不变,增加的荷载只能使孔隙水压力不断增加,而孔隙水压力是各向均等的,故总应力极限摩尔圆的半径相等,它们的公切线即为一条水平线。

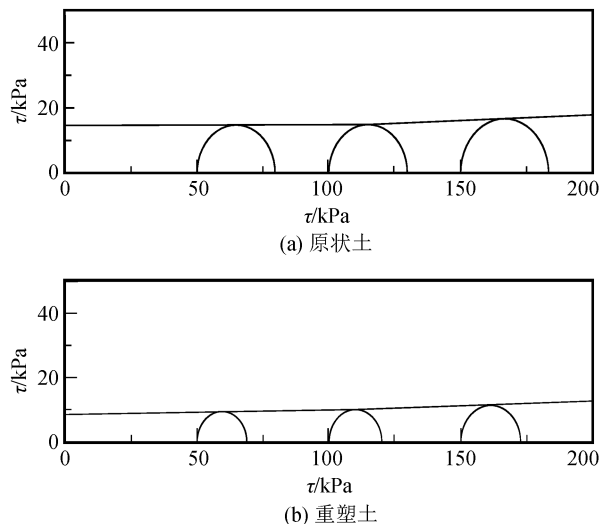


图8 原状样和重塑样 UU 试验结果

Fig.8 UU test result of undisturbed and remolded specimens

4 结论

通过对原状土和重塑土进行单向压缩和三轴剪切实验,分析了不同加载方式及剪切条件下软土压缩特性的影响规律,得出以下结论:

(1) 原状土样的 e - $\lg p$ 压缩曲线有明显拐点,可分为三段,即平缓阶段、孔隙比陡变阶段和孔隙比变化与重塑土变化趋于一致阶段,而重塑土样的 e - $\lg p$ 压缩曲线基本为一直线。

(2) 原状土样固结系数随着压力增加逐渐递减,整体近似符合指数函数分布,重塑土样固结系数随压力增加逐渐增大,整体近似符合线性函数分布。同一土样在不同加载方式下得到的单向压缩曲线略有不同,加压幅度越小,对土的扰动越小。

(3) 当轴向应变较小时,偏差应力随轴向应变增加而逐渐增大,原状土样的增长速率较重塑土样明显;土样的应力应变曲线为应变硬化型;围压对重塑土样的影响小于原状土样。

(4) 原状土样的 CU 强度包络线在低围压下,斜率较小,高围压下,斜率增大,对于重塑土,由于围压对其影响较小,所以强度包线很平缓;原状土样和重塑土样的 UU 强度包络线区别不大,几乎呈一水平线,即土样的内摩擦角趋近于零,只有黏聚力存在。

参考文献(References)

- [1] 黄镇国,李平日,张仲英,等.珠江三角洲形成发育演变[M].广州:广州科普出版社,1982.
HUANG Zhengguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Development and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Popular Science Press in Guangzhou, 1982.
- [2] 黄文熙.土的工程性质[M].北京:水利电力出版社,1983.
HUANG Wenxi. The Engineering Properties of Soil[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Publishing House, 1983.
- [3] 李玲玲.结构性软土的性状研究及其应用[D].杭州:浙江大学,2007.
LI Lingling. Behavior of Structured Clay and Its Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [4] 沈珠江.土体结构性的数学模型:21 世纪土力学的核心问题[J].岩土工程学报,1996,18(1):95-97.
SHEN Zhujiang. Mathematical Model of Soil Structure: The Core Issue of Soil Mechanics in Twenty-first Century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97.
- [5] 胡瑞林,李向全.21 世纪工程地质学生长点:土体微结构力学[J].水文地质工程地质,1999,26(4):5-8.
HU Ruilin, LI Xiangquan. Twenty-first Century Engineering Geology Student Long Point: Soil Microstructure Mechanics [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 5-8.
- [6] 张旷成,丘建金.深圳地区岩土工程的理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
ZHANG Kuangcheng, QIU Jianjin. Theory and Practice of Geotechnical Engineering in Shenzhen Area[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [7] 张长生,张伯友,江辉煌.深圳湾浅海相淤泥固结变形特性研究[J].水文地质工程地质,2005,32(3):35-37.
ZHANG Changsheng, ZHANG Boyou, JIANG Huihuang. On Consolidation Deformation Properties of Neritic Facies Silt at Shenzhen Bay [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(3): 35-37.
- [8] 房后国,刘娉慧,袁志刚.海积软土固结过程中微观结构变化特征分析[J].水文地质工程地质,2007,34(2):49-56.
FANG Houguo, LIU Pinghui, YUAN Zhigang. Analysis on Characteristics of Microstructure Change During Marine Soft Soil Consolidation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(2): 49-56.
- [9] 柳文涛,曹得占,李惠,等.深圳海相沉积软土蠕变特性的试验

- 研究[J].工业建筑,2011,41(7):74-77,81.
- LIU Wentao, CAO Dezhan, LI Hui, et al. Experimental Study on Creep Behavior of Marine Clay in Shenzhen[J]. Industrial Construction, 2011, 41(7): 74-77, 81.
- [10] 施斌.黏性土微观结构研究回顾与展望[J].工程地质学报(英文版), 1996, 4(1): 39-44.
- SHI Bin. Review and Prospect on the Microstructure of Clayey Soil[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(1): 39-44.
- [11] 陈嘉鸥, 叶斌, 郭素杰. 珠江三角洲黏性土微结构与工程性质初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 132-136.
- CHEN Jiaou, YE Bin, GUO Sujie. Primary Exploration on Engineering Properties of Soft Ground Microstructure in Zhujiang Delta[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 132-136.
- [12] 张敏江, 张丽萍. 结构性软土微观结构参数及结构性蠕变模型[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(2): 177-180.
- ZHANG Minjiang, ZHANG Liping. The Study on the Microstructure Parameters and Rheological Constitutive Relations of Structural Soft Soils[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006, 22(2): 177-180.
- [13] 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 148-153.
- WANG Qing, WANG Fengyan, XIAO Shufang. A Quantitative Study of the Microstructure Characteristics of Soil and Its Application to the Engineering[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2): 148-153.
- [14] 李向全, 胡瑞林, 张莉. 软土固结过程中的微结构变化特征[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 147-152.
- LI Xiangquan, HU Ruilin, ZHANG Li. The Variation of Microstructure During Soft Soil Solidification[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 147-152.
- [15] 胡瑞林, 官国琳, 李向东, 等. 黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- HU Ruilin, GUAN Guolin, LI Xiangdong, et al. Quantitative Model of Cohesive Soil Microstructure and Its Engineering Geological Characteristics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [16] 刘恩龙, 沈珠江, 范文. 结构性黏土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 1-8.
- LIU Enlong, SHEN Zhujiang, FAN Wen. Advance in Researches on Structured Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (Supp): 1-8.
- [17] 王国欣, 肖树芳. 土结构性本构模型研究现状综述[J]. 工程地质学报(英文版), 2006, 14(5): 620-626.
- WANG Guoxin, XIAO Shufang. Review on Current Situation of Soil Structural Constitutive Models[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 620-626.
- [18] 王立忠, 丁利, 陈云敏, 等. 结构性软土压缩特性研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 46-53.
- WANG Lizhong, DING Li, CHEN Yunmin, et al. Study on Compressibility of Structured Soft Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 46-53.
- [19] 陈晓平, 曾玲玲, 吕晶, 等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3223-3228.
- CHEN Xiaoping, ZENG Lingling, LÜ Jing, et al. Experimental Study of Mechanical Behavior of Structured Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3223-3228.
- [20] SCHMERTMANN J H. The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay[J]. Transport ASCE, 1955, 120: 1201-1227
- [21] 王军, 高玉峰. 加荷比对结构性软土沉降特性的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2614-2618.
- WANG Jun, GAO Yufeng. Effect of Loading Ratio to Structured Soft Clay Settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2614-2618.
- [22] HONG Z S, SONG Y, LIU S L, et al. Comparison in Undrained Shear Strength Between Undisturbed and Remolded Ariake Clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(2): 272-275.
- [23] CASAGRANDE A. The Determination of Pre-consolidation Load and Its Practical Significance[C]//Proc. of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, 1936: 60-68.