

# 结构性软土动力损伤的刚度弱化特征与强度效应

曹 勇<sup>1</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 杨爱武<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 天津城市建设学院土木工程学院, 天津 300384)

**摘 要:** 天然黏土的结构性在外部荷载作用下会发生损伤, 尤其在动态荷载下其损伤更明显, 结构损伤必然引起土体力学性质的变化。主要研究了天津海积结构性软土在循环加载过程中力学性质的改变, 对经历不同循环加载作用后的软土分别开展了共振柱试验和先动后静试验。共振柱试验结果表明软土的刚度在循环加载初期衰减速率较快, 之后刚度衰减速率放缓, 先动后静试验结果得到软土强度衰减规律与刚度衰减规律表现相同。从结构损伤角度对上述衰减规律进行分析, 并讨论了软土动态损伤过程中刚度与强度比值的变化规律, 得到软土在结构损伤过程中刚度的衰减程度要大于强度的衰减程度。

**关键词:** 结构性黏土; 循环荷载; 动态损伤; 共振柱

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0236-05

**作者简介:** 曹 勇(1985-), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: caoyong10000@163.com。

## Characteristics of stiffness degradation and strength effect of dynamic damage of structured soft soils

CAO Yong<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, YANG Ai-wu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences Wuhan 430071, China; 2. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** The structure of natural clay will tend to be damaged under the external load, and its mechanical characteristics will change, especially under the condition of dynamic load. The mechanical change of Tianjin marine deposited structured soft soils subjected to cyclic loading is investigated. The resonant column tests and post-cyclic monotonic tests on the soft soils which experience different cyclic loadings are performed. The resonant column test results show that the degradation rate of stiffness is from quick to slow with the development of structural damage. The revelation of the strength degradation law is similar to that of the stiffness degradation law. This degradation law is analyzed from the structural damage view, and the ratio of stiffness to strength of soft soils under the damage process is discussed. A conclusion is drawn that the degradation degree of stiffness is larger than that of strength.

**Key words:** structured clay; cyclic loading; dynamic damage; resonant column

## 0 引 言

黏土的结构性对其物理力学性质有重要影响, 但其结构性大多较脆弱, 易受外部因素影响发生损伤而劣化其工程性能。迄今对结构性黏土的力学特性研究已有丰富积累, 系统研究了土体结构性对其力学性质的影响以及在荷载作用下的结构损伤演化过程。龚晓南等<sup>[1]</sup>深入分析了结构性黏土在结构屈服前后力学性状的差异性特征, 沈珠江<sup>[2]</sup>早在 1993 年就提出考虑土结构损伤的本构模型, 包括有复合体模型和堆砌体模型; 姚志华等<sup>[3]</sup>分析了结构损伤对膨胀土屈服特性的影响, 罗爱忠等<sup>[4]</sup>则以综合结构势为基础的应力比结构性参数, 探讨了黄土的损伤演化规律。但如何选取

科学合理的损伤变量, 进而能有效反映软土结构性的损伤演化规律尚未取得共识, 应该说还处于不断深入探索阶段。

软土在循环作用下会产生累积塑性变形, 这一累积变形可反映软土结构的损伤<sup>[5-6]</sup>, 而经过动载后的软土力学特性也已受到重视。Ansal 等<sup>[7]</sup>通过试验得到经过循环荷载后土的强度衰减跟动载引起的累积应变有关, 当累积应变小于门槛循环剪应变时, 土体强度几乎没有衰减; 当累积应变小于临界剪应变比大于门槛

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2011CDA124)

收稿日期: 2013-06-07

剪应变比时, 黏土结构发生损伤, 强度开始出现有限度的衰减; 当累积应变大于临界剪应变比时, 黏土结构完全损伤, 强度开始出现大幅度衰减。Moses 等<sup>[8]</sup>对海积结构性土分别进行了静力与动力学试验, 发现经过循环荷载振动后的软土再进行静三轴试验, 其应力应变曲线会表现出明显的脆性。王淑云等<sup>[9-10]</sup>通过归一化分析, 认为土体经过循环荷载后产生的轴向应变与孔压决定了其静不排水抗剪强度, 还得出海洋粉质黏土重塑样比原状样的强度在经历相同循环荷载后的衰减程度更大的结论。蒋敏敏等<sup>[11]</sup>认为经历循环荷载后的海相软黏土具有超固结土的性质, 土样静不排水强度会随不同循环荷载产生的孔压比的不同表现出弱化或增强现象。黄茂松等<sup>[12]</sup>通过引入动偏应力水平参数, 考虑不同影响因素下, 描述经循环荷载作用后土体刚度与不排水强度的衰减特性。郑刚等<sup>[13]</sup>研究了原状土与重塑土经循环荷载作用后的强度发展规律, 得出原状样的不排水抗剪强度与振后轴向应变有关, 重塑土强度变化较小。但目前对结构性软土因动力损伤引起的刚度弱化与强度衰减是否具有同步一致性及其关联性还关注不足, 值得深究。

本文以天津海积结构性软土为研究对象, 以动三轴试验、不同动力损伤阶段软土的共振柱试验与静力三轴试验, 研究结构性软土在循环荷载作用下的动力损伤刚度弱化与强度效应及其关联性特征。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验土样取自天津滨海新区临港工业区, 取样深度为 12.0 m, 采用薄壁取土器取样, 其灵敏度为 3.3, 表明该海积原状软土具有中等结构性, 具体物理力学性质指标见表 1。

表 1 海底软土基本特性

Table 1 Basic properties of marine soft clay

重度	比重	含水率	孔隙比	灵敏度	液限	塑性	凝聚力	内摩
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$G_s$	$w/\%$	$e$	$S$	$w_l/\%$	指数 $I_p$	$c_{cu}/\text{kPa}$	擦角
18.0	2.72	39.8	1.110	3.3	54.4	26.3	20.4	16.4

1.2 试验内容

分别对海积原状软土进行三轴剪切试验、动三轴试验、共振柱试验以及先动后静试验。共振柱试验主要量测经历不同次数循环荷载振动后的软土, 用于揭示结构损伤对软土刚度的弱化影响规律; 先动后静三轴剪切试验则用于量测历经不同次数循环荷载振动后软土的抗剪强度变化, 以期反映软土动力结构损伤的强度效应。

共振柱试验设备采用 GZZ—10 型共振柱试验仪, 通过轴向振动共振方法测定土的动模量。动三轴试验设备采用的是美国 GCTS 公司生产的动态空心圆柱扭剪仪, 该套系统加载由伺服系统自动生成, 系统可自动生成方形波, 三角形波及正弦波, 振动次数最大可达十万次以上, 最大频率 20 Hz, 满足试验要求。本次试验采用正弦波加载, 振动幅值 50 kPa, 频率 1 Hz, 围压 100 kPa。

2 结构性软土的三轴剪切特征

2.1 静力应力应变特征

图 1、2 分别为原状软土与重塑土的三轴剪切试验结果, 可以看出, 原状软土在小围压下应力应变曲线有明显软化, 在高围压下应力应变关系转为硬化型; 而重塑土的应力应变曲线均表现为硬化, 其差异性是由原状土具有结构性所导致。在围压小于结构屈服压力条件下, 原状软土的结构性基本保持完整, 在加载后期由于结构屈服发生了刚度软化现象; 在围压大于结构屈服压力条件下, 软土的结构发生了损伤破坏, 其性状表现为压硬性; 重塑土的强度则依赖于围压水平的高低。

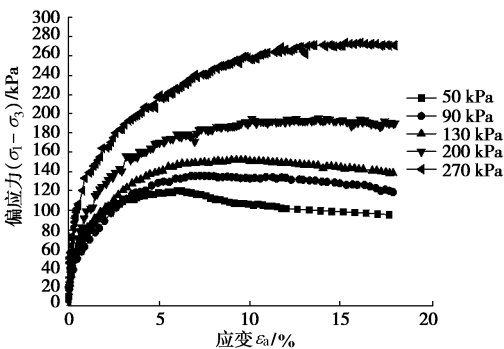


图 1 原状软土三轴应力 - 应变关系

Fig. 1 Triaxial test results of undisturbed soils

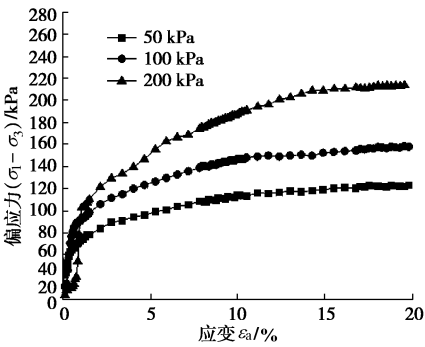


图 2 重塑软土三轴应力 - 应变关系

Fig. 2 Triaxial test results of reconstituted soils

图 3 为原状土与重塑土不排水抗剪强度包络线, 从中可以看出, 原状土的强度包线在围压等于结构屈

服强度附近有明显的转折，即在不同的围压区间具有不同的强度。当围压小于屈服应力时，结构强度保持完好，其黏聚力较大，内摩擦角较小；当围压大于屈服应力时，黏聚力较小而内摩擦角较大，这些都是因原状土发生结构屈服后的力学性质渐趋向于重塑土所致。

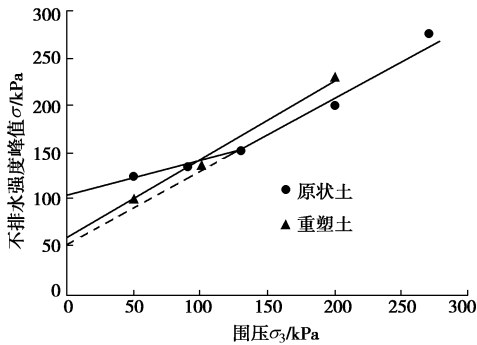


图 3 原状土与重塑土不排水抗剪强度包络线

Fig. 3 Envelope curves of undrained shear strength between undisturbed and reconstituted soils

2.2 循环荷载下的变形特征

动三轴试验加载采用正弦波形加载，频率为 1 Hz，幅值 50 kPa，其动应力应变曲线见图 4。可见，滞回曲线在加载初期所包含的面积较小，随着振次的增加，面积缓慢增大，逐渐向应变轴偏转；当累积塑性应变超过 2.0%后，滞回曲线面积逐渐扩大，往应变轴偏转的角度也相应加大。引起上述现象最根本的原因是在加载初期，原状土的结构由完整状态开始发生损伤，动应力应变关系由弹性状态逐渐进入弹塑性变形阶段，表现出滞回曲线的面积和往应变轴偏转的角度逐渐增大；随着振动次数的增加，软土累积塑性应变逐渐增大，动应力应变关系由弹塑性变形状态进入流塑状态，表现出滞回曲线包围的面积迅速增大和偏转速度加快。

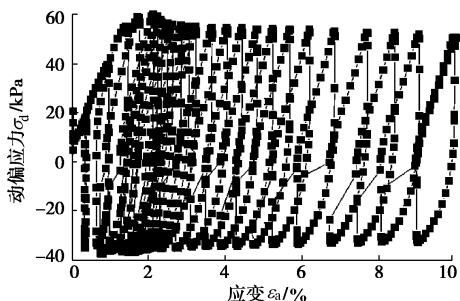


图 4 动应力 - 应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curves

图 5 是软土在循环荷载下轴向累积应变与振动次数的关系，从图 5 中可以看出，在加载初期，轴向累积应变增长速度较快，但这一快速增长仅只在前面十

几圈以内；当加载循环次数超过一定值时，其累积应变增长模式发生转折改变，此后呈现出近似稳定持续增长，累积应变不断增大；而当加载循环次数超过 500 次后，累积应变增长速率开始变快而最终会引起土体破坏，该变化规律与图 4 的滞回曲线演化特征基本相吻合。

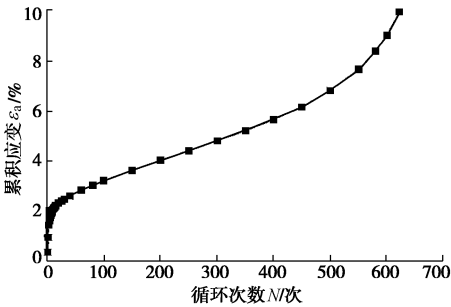


图 5 轴向应变与循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between axial strain and cyclic number

3 结构性软土不同动力损伤程度的刚度软化特征

从软土变形破坏过程的机制出发，可以把在循环荷载作用下软土的累积塑性应变增长过程归咎为其结构动态损伤程度所致，处于动载作用下的不同累积塑性应变就可以反映是其不同损伤阶段，通过对历经不同损伤阶段的软土进行共振柱试验，从而揭示软土在动载作用下的刚度软化过程。

图 6 为软土历经不同累积应变后的共振柱试验结果，可以看出，结构性软土的动剪切模量随动力损伤程度的增大而减小，且历经动力损伤越大的软土，其动剪切模量随其剪切应变的增大而衰减幅度越小，即共振柱试验的剪切模量与剪切应变关系较平缓。

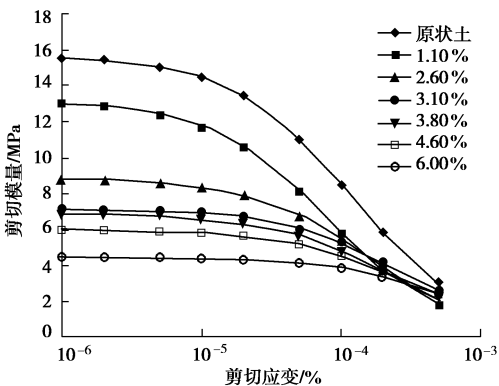


图 6 共振柱试验获得的剪切模量与剪切应变关系

Fig. 6 Relationship between shear modulus and strain derived from resonant column tests

图 7 为根据图 6 试验结果获得的不同累积应变下软土通过共振柱试验得到的最大剪切模量衰减性状，

呈现明显的折线变化规律,其转折点在累积应变 3.1% 左右。在转折点以前,软土刚度衰减速率较快,说明软土在结构损伤较小时其脆性特征明显,结构性对刚度有重要影响,结构稍有损伤就能表现出较大的模量衰减;在转折点以后,软土的剪切模量随着累积应变增长的衰减速率放缓,说明当软土结构性损伤到一定程度后,其结构性对刚度的影响逐渐减小。

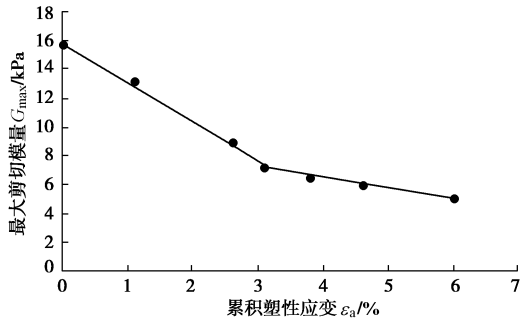


图 7 最大剪切模量随累积应变的衰减规律

Fig. 7 Degradation law of maximum shear modulus with accumulated strain

#### 4 结构性软土动力损伤的强度效应

为了反映动力损伤对软土强度的影响,在 GCTS 扭剪仪上进行了先动后静剪切试验,即先在循环荷载作用下,针对累积应变分别达到 0.7%, 1.1%, 2.8%, 3.2%, 4.4% 与 6.2% 后,进行静三轴三轴不排水剪切试验,试验结果见图 8。

从图 8 可以看出,经历过动载作用后的软土应力应变曲线的峰值强度也随着累积应变的增大而减小,即动力损伤对软土的强度同样具有弱化影响。

图 9 为软土在不同累积应变下的静强度峰值变化规律,可以看出,峰值强度的变化规律也可用一条折线段表示,转折点在 3.2% 左右。在转折点以前峰值强度衰减速率较快,转折点以后峰值强度衰减速率放慢。通过类比图 7, 9 的变化规律,可以初步认为,结构性软土因动力损伤引起的刚度弱化与强度衰减具有同步一致性。

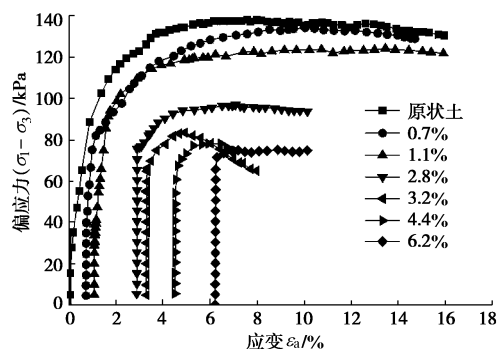


图 8 先动后静试验的应力应变关系( $\sigma_3=100$  kPa)

Fig. 8 Stress-strain relationship of post-cyclic monotonic tests ( $\sigma_3=100$  kPa)

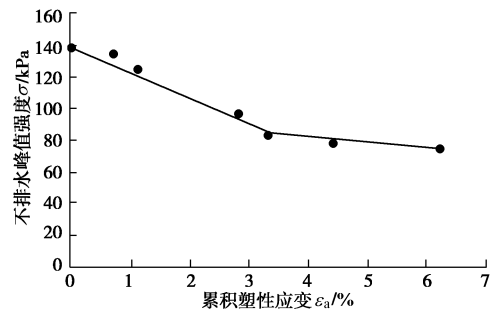


图 9 不排水峰值强度与累积塑性应变的关系

Fig. 9 Relationship between undrained peak value and dynamic accumulated plastic strain

#### 5 软土刚度与强度的关联性

既然结构性软土因动力损伤引起的刚度弱化与强度衰减特征具有同步一致性,为了论证其衰减速率的快慢与关联性,采用共振柱试验和先动后静试验得出的最大剪切模量随累积应变的衰减规律(见图 7)与不排水峰值强度与累积塑性应变的关系(见图 9),整理得出处在不同损伤阶段的土样,其最大刚度  $G_{max}$  与不排水峰值强度  $S_u$  的比值与累积应变的关系如图 10 所示。由于共振柱试验和先动后静试验的轴向应变没有完全一一对应,为了求得在同一累积塑性应变下软土的最大刚度与不排水峰值强度比值,采用差值法处理获取。

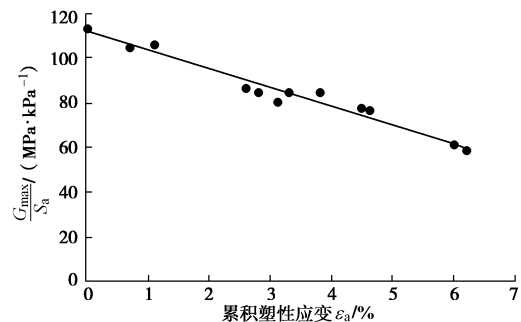


图 10  $G_{max}/S_u$  随着累积塑性应变的变化规律

Fig. 10 Variation law of  $G_{max}/S_u$  with accumulated plastic strain

图 10 反映出了软土在不同累积应变下  $G_{max}/S_u$  的变化规律。从图中可以看出,  $G_{max}/S_u$  随着软土累积塑性应变的增大而呈现出线性减小的关系,线性相关程度较高。这说明随着软土在循环荷载作用下结构损伤的逐渐增大,软土刚度的衰减程度比强度衰减程度更大。这一规律与文献 [14] 针对不同黏性土,总结出的动剪切模量与不排水强度随动剪应变的变化规律具有一定的相似性,也为在实际工程应用中,通过量测结构性软土的波速变化规律间接获取其抗剪强度变化性状提供了一种潜在途径。

## 6 结 论

本文选取天津滨海新区海积原状软土作为研究对象,通过三轴剪切试验、动三轴试验、先动后静试验以及共振柱试验表现出软土的动态损伤以及对强度效应的影响,得出以下3点结论。

(1)天津地区软土具有明显的结构性,当围压小于结构屈服强度时,软土的不排水强度主要由结构强度决定,当围压大于结构屈服强度时则由围压决定。

(2)对处于不同动力损伤阶段的软土进行共振柱试验和先动后静试验,得出软土在结构损伤初期刚度衰减较快,但随着结构损伤的加剧,软土刚度衰减速率放缓;软土历经循环荷载下的强度衰减与刚度变化规律相同且具有同步一致性。

(3)通过分析  $G_{\max}/S_u$  与软土累积塑性应变的变化规律,得到  $G_{\max}/S_u$  随累积塑性应变的增大呈线性减小的趋势,说明软土刚度的衰减程度比强度衰减程度大。

### 参考文献:

- [1] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等.黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J].水利学报,2000,10(10):43-47. (GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, XIANG Ke-xiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. Journal of Hydraulic, 2000, 10(10): 43-47. (in Chinese))
- [2] 沈珠江.结构性黏土的弹塑性损伤模型[J].岩土工程学报,1993,15(3):21-28. (SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 21-28. (in Chinese))
- [3] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.结构损伤对膨胀土屈服特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(7):1503-1512. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1503-1512. (in Chinese))
- [4] 罗爱忠,劭生俊.结构性黄土损伤演化规律试验研究[J].太原理工大学学报,2011,42(1):79-82. (LUO Ai-zhong, SHAO Sheng-jun. Study on structural damage of structural loess[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(1): 79-82. (in Chinese))
- [5] 张勇,孔令伟,郭爱国,等.循环荷载下饱和软黏土的累积塑性应变试验研究[J].岩土力学,2009,30(6):1542-1548. (ZHANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1542-1548. (in Chinese))
- [6] 张勇,孔令伟,李雄威.循环荷载下饱和软黏土的动骨干曲线模型研究[J].岩土力学,2010,31(6):1699-1704. (ZHANG Yong, KONG Ling-wei, LI Xiong-wei. Dynamic backbone curve model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1699-1704. (in Chinese))
- [7] ANSAL A, IYISAN R, YÖLDÖRÖM H. The cyclic behavior of soils and effects of geotechnical factors in microzonation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 445-452.
- [8] MOSES G G, RAO S N, RAO P N. Undrained strength behavior of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading[J]. Ocean Engineering, 2003, 30: 1765-1789.
- [9] 王淑云,鲁晓兵,赵京,等.粉质黏土周期荷载后的不排水强度衰减特性[J].岩土力学,2009,30(10):2991-2995. (WANG Shu-yun, LU Xiao-bing, ZHAO Jing, WANG Ai-lan. Post-cyclic loading undrained strength degradation characteristics of silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2991-2995. (in Chinese))
- [10] 王淑云,楼志刚.原状和重塑海洋黏土经历动载后的静强度衰减[J].岩土力学,2000,21(1):20-23,27. (WANG Shu-yun, Lou Zhi-gang. 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. (in Chinese))
- [11] 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(增刊2):204-207. (JIANG Min-min, CAI Zheng-yin, CAO Pei, et al. Effects of cyclic loading on mechanical properties of silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 204-207. (in Chinese))
- [12] 黄茂松,李帅.长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度刚度的弱化特性[J].岩土工程学报,2010,32(10):1491-1498. (HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1491-1498. (in Chinese))
- [13] 郑刚,霍海峰,雷华阳.循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):401-408. (ZHENG Gang, HUO Hai-feng, LEI Hua-yang. Undrained strength characteristics of saturated undisturbed and remolded silty clay after cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 401-408. (in Chinese))
- [14] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011. (XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)