

# 潍坊中南部平原地区粉土强度特性试验研究

邢国起<sup>1,2</sup>, 肖洪天<sup>1</sup>, 李大勇<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 山东省岩土与结构工程重点实验室, 山东 青岛 266590;  
2. 潍坊学院 建筑工程学院, 山东 潍坊 261061)

**摘要:** 以潍坊中南部地区可作为高层基础持力层的粉土作为研究对象, 通过室内试验, 获得粉土颗粒级配曲线、粉土试样的基本物理力学特性指标, 以及不同含水率和压实度条件下粉土试样的轴向变形与偏应力。对试验结果分析发现, 粉土试样颗粒级配较好, 能够达到较高的压实度; 根据小于最优含水率时不同含水率条件下的屈服应力, 确定了粉土层应变硬化与软化的临界点位置, 认为含水率、压实度及围压是影响抗剪强度的主要因素; 最终获得了小于最优含水率时区域性粉土剪切极限状态线拟合方程, 并发现极限状态线的斜率  $M(s)$  及其在偏应力轴上的截距  $U(s)$  均为与含水率无关的常数。

**关键词:** 粉土; 含水率; 压实度; 屈服应力; 极限状态线

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0054-05

## Research on Silt Intensity in the Plain Area of South-central Weifang

XING Guoqi<sup>1,2</sup>, XIAO Hongtian<sup>1</sup>, LI Dayong<sup>1</sup>

(1. Shandong Province Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;  
2. College of architectural engineering, Weifang University, Weifang 261061, China)

**Abstract:** The silt in the plain area of south-central Weifang can be used as the bearing stratum of the foundation for high-rise buildings. Laboratory experiments were conducted to obtain the grading curve of silt, physical properties of silt, and the axial deformation and deviatoric stress of silt under different moisture contents and degrees of compaction. The test results showed that the silt has a good grading to reach a relatively high degree of compaction. According to the yield stress under different water contents which were less than the optimal water content, the critical point of strain hardening and softening was determined. Water content, degree of compaction, and confining pressure were the main influence factors of the shear strength. The fitting equation of shear limit state for the regional silt was obtained when the water content was less than the optimal water content, and  $M(s)$  (slope) and  $U(s)$  (intercept) were all constants which were independent of water content.

**Key words:** silt; water content; degree of compaction; yield stress; line of limit state

地质勘探表明, 潍坊地区地表下大约 2 m 左右分布着厚度较大的粉土层, 其中北部地区粉土属于黄河三角洲成因, 为高含盐粉土<sup>[1]</sup>, 不少学者对其进行了理化性质<sup>[2-5]</sup>以及动力学与静力力学性质的研究<sup>[6-12]</sup>, 为该粉土层的工程利用奠定了基础; 而潍坊中南部地区粉土属于冲洪积平原成因, 与北部地区粉土层在物理力学性质上相差较大: 北部地区由于靠近沿海, 粉土层属于饱和粉土, 土中存在自由水, 极易振动液化失水, 地基承载力较低, 不能作为基础持力层; 而中南部地区的粉土则是在水力作用下经长途搬运、沉积

而形成的第四纪松散河流堆积物, 位于地下水位以上(地下水位大约位于地表下 10 mm 左右, 粉土层厚度大约 8 m 左右), 属于非饱和粉土。工程实践中发现在外力作用下该粉土层构成的基坑侧壁位移较小, 由此判断中南部粉土层具有较高的强度, 可作为高层基础持力层。不过查阅相关文献资料, 尚未发现对该粉土性质的研究。因此本文以该区域某深基坑选取的粉土为研究对象, 分析了影响粉土强度特性的因素, 为进一步建立该地区粉土的实用本构关系方程奠定了基础。

收稿日期: 2013-09-16 修回日期: 2014-02-19 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379118)

作者简介: 邢国起(1977-), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要从事区域性粉土及基坑支护技术研究。E-mail: xgq1105@163.com

通讯作者: 肖洪天(1964-), 男, 河北孟村人, 教授, 博士, 主要从事岩石力学数值方法研究。E-mail: xiaohongtian@sina.com

## 1 粉土基本物理性能

### 1.1 试验土样

试验采用的土样采集于潍坊中南部某深基坑 7 m 深处粉土。粉土试样 X 衍射试验及能谱分析表明,其矿物成分以  $\alpha$  石英为主,含有少量姜石及铁质氧化物等,主要化学成分为 C、O、Si、Al、Fe 等,试样平均含盐量为 0.098%,属于非盐渍类粉土。

### 1.2 土样颗粒级配

按照土工试验方法标准(GB/T 50123 1999)<sup>[13]</sup>中的筛析法( $d \geq 0.075$  mm)与密度计法( $d < 0.075$  mm)进行粉土颗粒级配试验,结果显示:粒径位于 0.005~0.075 mm 之间的粉粒含量平均超过 70%,粒径小于 0.005 mm 的粉粒含量平均不超过 9%,粒径大于 0.075 mm 的粉粒含量平均不超过 30%。由土样颗粒级配曲线(图 1)得到的不均匀系数平均值为 7.6,因此土样属于级配较好粉土,能够得到较大的压实系数。

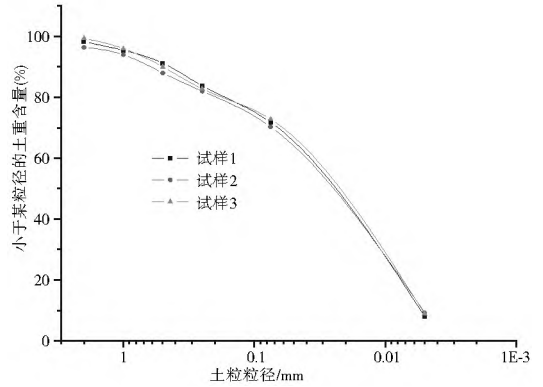


图 1 粉土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of silt

### 1.3 原状粉土基本物理指标

对潍坊中南部地区某深基坑开挖前进行了钻孔取样,孔深 15.00~35.00 m。岩土勘察表明,粉土呈黄褐色,稍湿,密实度为中密—密实状态,干强度及韧性低。通过对原状粉土进行常规物理性质试验,得到粉土的基本物理指标见表 1。

表 1 粉土基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of silt

物理指标	含水量 $\omega$ (%)	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ (%)	塑限 $W_p$ (%)	塑性指数 $I_p$	压缩系数 $a_{1-2}$ / MPa	压缩模量 $E_{s1-2}$ / MPa	标贯实测 击数 $N$ / 击
统计数 $n$	45	45	45	45	45	45	44	44	35
范围小值	12.6	17.1	0.540	50	16.2	5.9	0.10	4.30	7
范围大值	19.9	20.0	0.827	87	21.5	9.6	0.38	16.31	15
平均值 $\mu$	17.3	18.5	0.669	70	18.4	7.5	0.21	8.93	11.1
标准差 $\sigma$	1.9	0.7	0.064	8	1.1	0.8	0.08	3.24	2.1
变异系数 $\delta$	0.11	0.04	0.10	0.12	0.06	0.10	0.37	0.36	0.19
标准值 $f_k$									10.5

## 2 粉土强度

### 2.1 试验设备

试验设备采用 TSZ 30-2.0 型应变控制式三轴仪,全自动数据采集。按照土工试验标准规定,粉土试样的直径为 39.1 mm 和高度为 80 mm。粉土试样剪切速率按照 UU 试验要求采用 0.399 3 mm/min。

### 2.2 试验方案

由于原状粉土难以获取,很易受到扰动,粉土试样制样费时费力,难度较大。本次试验选取了深基坑 7 m 深度处的粉土,将其风干后得到了风干状态粉土试样。测得风干状态下粉土试样的天然含水率为 3.7%。本次试验选用的含水率分别为 3.7%、11%、13%、15% 及 17%,粉土试验的压实度选用 80%、90% 及 95%,分别进行 100 kPa、200 kPa、300 kPa 及 400 kPa 围压下的三轴剪切试验。粉土原状土样采用碾压、烘干、过筛等步骤,按照文献[14]介绍的方法以及土工试验方法标准(GB/T 50123 1999)进行击实制样。

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 围压对变形与强度的影响

图 2 给出了压实度  $K = 90%$ ,含水率  $\omega = 3.7\%$ 、13%、15% 及 17% 时粉土试样在不同围压下的轴向变形( $\epsilon_1$ )与偏

应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )关系曲线。从图 2 中可以看出风干状态下( $\omega = 3.7\%$ )的粉土试样呈现应变软化现象;随着含水率的增大( $\omega = 13\%$ 、15% 及 17%)各围压下的应力应变曲线呈现应变硬化状态。由此可以总结如下规律,一定含水率条件下,存在着一个特定的屈服应力值,当围压大于该屈服应力值时,应力应变曲线呈现硬化现象;当围压低于该含水率条件下的屈服应力时,应力应变关系呈现软化现象。通过本试验得到不同含水率条件下的屈服应力值分别为  $\omega = 3.7\%$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_s = 400$  kPa;  $\omega = 13\%$ 、15%、17%,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_s = 100$  kPa。分析其他压实度( $K = 80\%$ 、95%)和含水率条件下的应力-应变曲线,也得到类似的规律。据此可初步计算出不同含水率时粉土持力层的应变硬化与软化分界点的位置。例如,压实度  $K = 90%$ ,含水率  $\omega = 13%$  时粉土层的硬化与软化分界点的位置位于地表下  $h = (\sigma_1 - \sigma_3)_s / \gamma = 6$  m 左右。

#### 2.3.2 含水率对变形与强度的影响

图 3 给出了压实度  $K = 90%$ ,  $\sigma_3 = 200$  kPa、400 kPa 时,不同含水率条件下轴向变形与偏应力之间的关系曲线。从图 3 中可以看出:低围压时( $\sigma_3 = 200$  kPa),风干状态下的粉土试样呈现应变软化现象;随着含水率的增大,逐渐趋向应变硬化现象;高围压时( $\sigma_3 = 400$  kPa),风干状态下的粉土试样应变软化现象弱化,同一围压时随着含水率增大,抗剪强度减小。

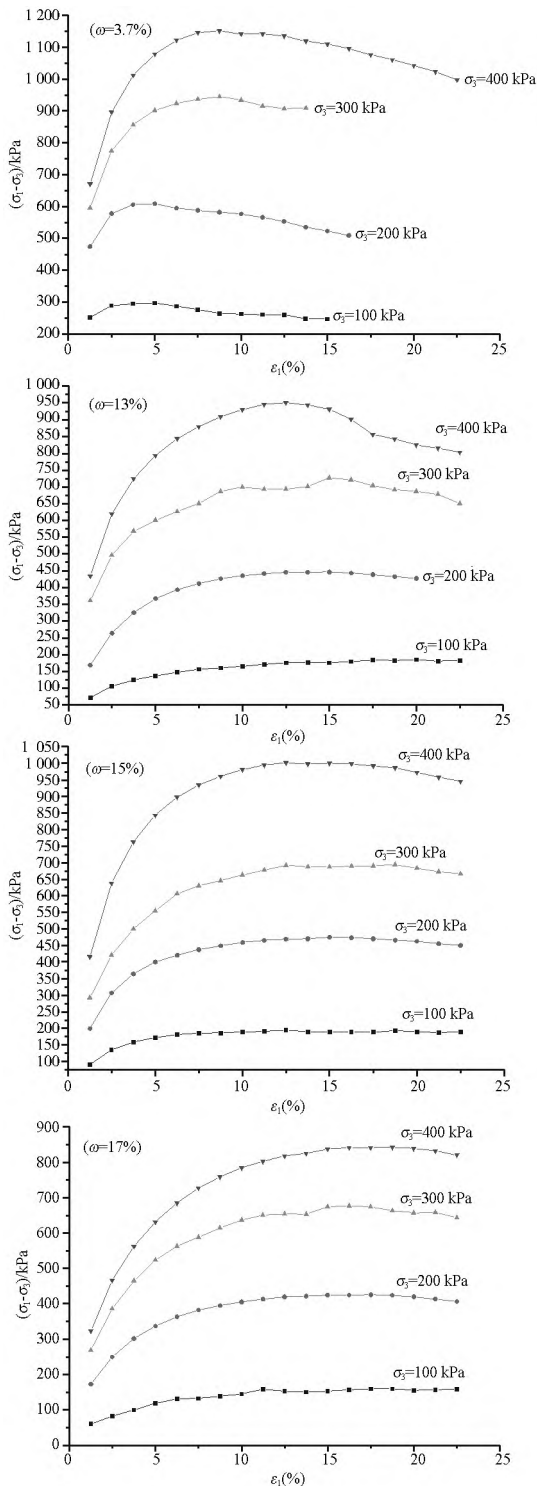


图 2 压实度 90% 时围压对粉土应力-应变关系影响  
Fig. 2 The influence of confining pressure on stress-strain of silt when degree of compaction is 90%

从土样颗粒级配试验中可以看出粉土细粒径含量较多, 因此即使压实度较大, 由于细小颗粒之间形成的空隙缺乏黏粒填充, 压实后细颗粒之间仍然存在较多的空隙与气体, 造成粉土试样最大干密度相对其他砂土与黏土来说较小。粉土颗粒之间的联结作用主要是由胶结作用与静电引力引起的, 毛细水联结也起到一定的作用。粉土中的黏粒含量较少, 所产生的固化内聚力也较小, 当含水率低时, 粉土不易保持原状, 很容易破碎; 随着含水率增大, 由毛细水引起的联结力呈现减弱态势, 加上粉土颗粒级配未达到良好状态, 势必

造成颗粒之间的摩阻力较小。

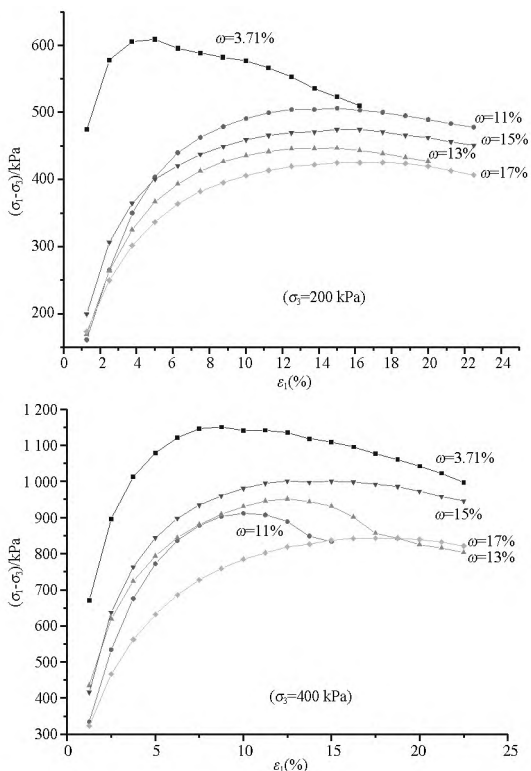


图 3 压实度 90% 时含水率对粉土应力-应变关系影响  
Fig. 3 The influence of water content on stress-strain of silt when degree of compaction is 90%

### 2.3.3 压实度对变形与强度的影响

图 4、图 5 给出了含水率  $\omega = 3.7\%$ 、 $17\%$  时,  $\sigma_3 = 200$  kPa、400 kPa 时, 不同压实度下轴向变形与偏应力之间的关

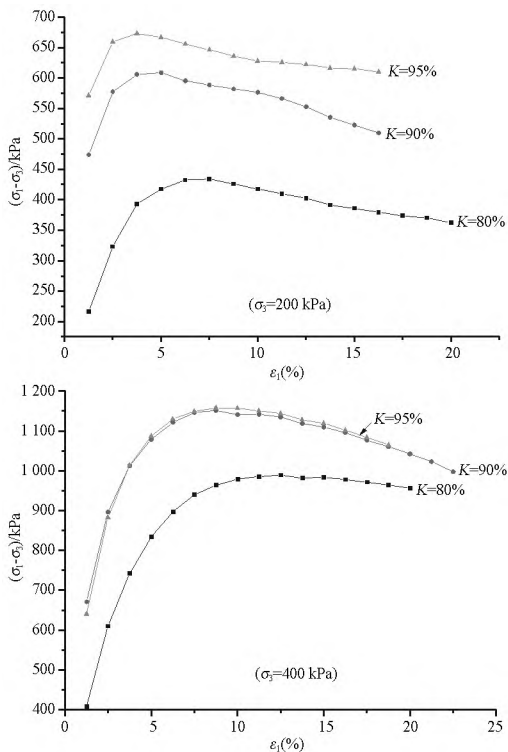


图 4 含水率 3.7% 时压实度对粉土应力-应变关系影响  
Fig. 4 The influence of degree of compaction on stress-strain of silt when water content is 3.7%

系曲线。由图 4 可以看出,低围压作用下应变曲线呈现软化现象,且随着压实系数的增大,抗剪强度值增大。高围压作用下应变曲线呈现应变硬化现象,围压大于 400 kPa 时,压实系数的增大对抗剪强度影响不大。含水率为  $\omega=17\%$  (图 5),低围压时压实系数越大,抗剪强度增大幅度较大;随着围压的增大,压实系数对粉土试样的抗剪强度影响越来越小。通过试验可以发现,含水率增大将使得粉土试样在较大围压作用下的应力-应变关系服从双曲线形式。

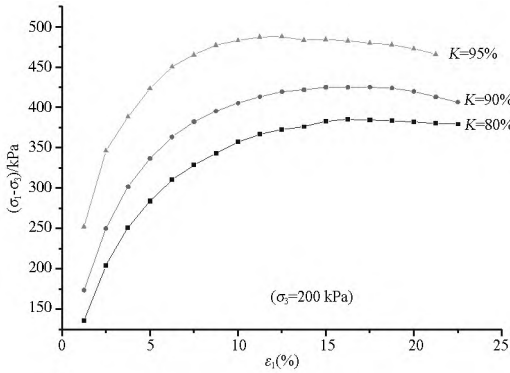


图 5 含水率 17% 时压实度对粉土应力-应变关系影响  
Fig. 5 The influence of degree of compaction on stress strain of silt when water content is 17%

### 3 粉土试样屈服特性

文献[15]研究得到非饱和土在  $q-p$  平面上的极限状态线函数关系式为:

$$q = M(s)p + \mu(s) \quad (1)$$

式中:  $M(s)$  和  $\mu(s)$  分别为极限状态线的斜率和  $q$  轴上的截距,两者都与吸力有关。

图 6 为压实度为 90% 时 400 kPa 围压时不同含水率时的极限状态线。由图 6 可知,不同含水率时的极限状态线为直线,并且  $M(s)$  是与含水率无关的常数,该结论与文献[15]得出的  $M(s)$  与吸力无关且为常数的结论一致,本次试验得到的  $M(s) = 3.0$ 。极限状态线在偏应力轴上的截距  $\mu(s)$  表示的是含水率对强度的贡献。本次试验由于进行的是粉土的剪切试验,试验采用的含水率小于粉土试样最优含水率 ( $\omega = 19.3\%$ ),即含水率位于最优含水率的左侧,可以看出截距  $\mu(s)$  也是常数。因此,粉土试样的极限状态线拟合方程为:

$$q = 3.0p - 1200.3 \quad (2)$$

由该拟合方程得到  $\mu(s) = 149.7$  kPa。

对粉土而言,除了以上  $q-p$  平面内的屈服,还存在  $q-\omega$ 、

$p-\omega$  平面内的屈服。图 7、图 8 分别给出了围压对粉土试样在  $q-\omega$ 、 $p-\omega$  平面内破坏时屈服轨迹的影响。由此可以得出,粉土试样的含水率位于最优含水率左侧时,随着含水率的增大,围压小于 400 kPa 时粉土试样破坏屈服时的平均应力  $p$  与偏应力  $q$  均呈减小趋势;围压较大时,含水率的增大使得粉土试样破坏屈服的平均应力  $p$  与偏应力  $q$  呈先减小后增大再减小的趋势。

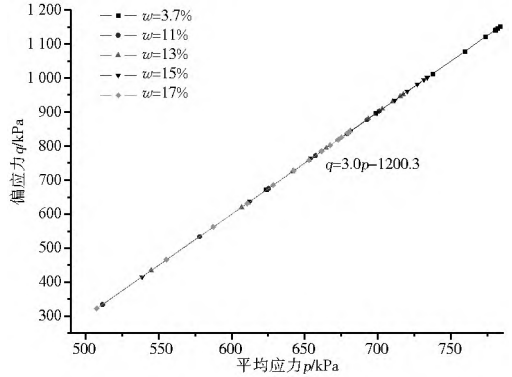


图 6 含水率影响下的  $q-p$  平面内的屈服轨迹  
Fig. 6 The yield locus of  $q-p$  plane under the influence of water content

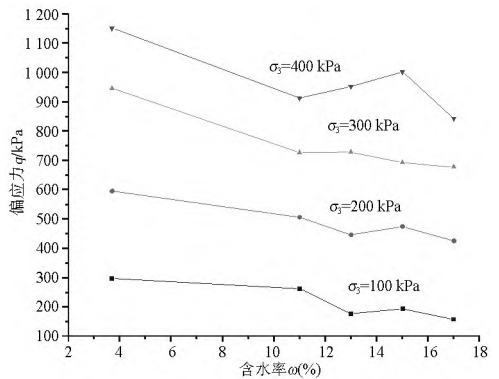


图 7 围压影响下的  $q-\omega$  平面内的屈服轨迹  
Fig. 7 The yield locus of  $q-\omega$  plane under the influence of confining pressure

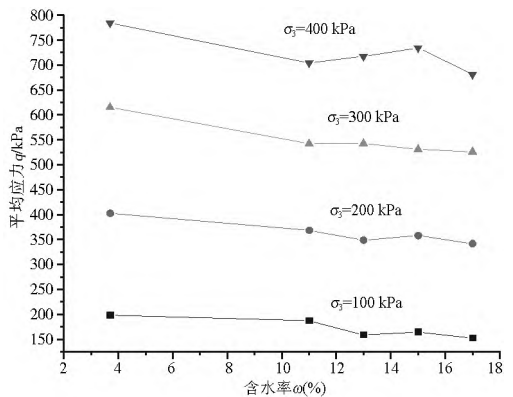


图 8 围压影响下的  $p-\omega$  平面内破坏内的屈服轨迹  
Fig. 8 The yield locus of  $p-\omega$  plane under the influence of confining pressure

### 4 结论

(1) 通过对潍坊中南部地区粉土试样进行颗粒级配试

验,得到土样颗粒级配曲线的不均匀系数平均值为7.6,属于级配较好粉土,试验证实能够得到较大的压实系数。

(2) 粉土试样在不同含水率时存在着一个屈服应力值,当围压大于该屈服应力值时,应力应变曲线呈现硬化现象,当围压低于该含水率条件下的屈服应力时,应力应变关系呈现软化现象。

(3) 粉土试样在低围压剪切时( $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, 200 \text{ kPa}$ ),风干状态下的粉土试样呈现应变软化现象,随着含水率的增大,逐渐趋向应变硬化现象。高围压剪切时( $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}, 400 \text{ kPa}$ ),风干状态下的粉土试样应变软化现象弱化,同一围压时随着含水率增大,抗剪强度减小。

(4) 粉土试样在低围压剪切时应力-应变曲线呈软化现象,随着压实系数的增大,抗剪强度增大。高围压剪切时应力-应变曲线呈应变硬化现象,围压大于400 kPa时,压实系数的增大对抗剪强度影响不大。

(5) 粉土试样在不同含水率时的极限状态线为直线,并且 $M(s)$ 是与含水率无关的常数。由于试验含水率小于粉土试样最优含水率( $\omega = 19.3\%$ ),也即含水率位于最优含水率的左侧,截距 $\mu(s)$ 随含水率不发生变化也为常数。

#### 参考文献(References):

- [1] 符策简. 高含盐粉土的力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊): 193-197. (FU Cejian. Experimental Study of Mechanical Properties of Saline Silty[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.): 193-197. (in Chinese))
- [2] 王俊超, 贾永刚, 史文君, 等. 差异水动力导致黄河河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 177-183. (WANG Junchao, JIA Yonggang, SHI Wenjun, et al. Case Study on the Fractal Characteristic Variations of Silty Soil Microstructure Due to Differential Hydrodynamics in the Yellow River Estuarine Area [J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(2): 177-183. (in Chinese))
- [3] 郭秀军, 张志阔, 贾永刚, 等. 黄河河口饱和粉土的电性特征及其工程地质应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 593-598. (GUO Xiujun, ZHANG Zhikuo, JIA Yonggang, et al. Electrical Resistivity Feature of Saturated Silty Soil in Yellow River Estuarine Area And Its Engineering Geology Application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 593-598. (in Chinese))
- [4] 王小花, 刘红军, 贾永刚. 黄河河口粉质土矿物成分特征及对水动力条件响应的研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(2): 42-46. (WANG Xiaohua, LIU Hongjun, JIA Yonggang. The Research on The Mineral Characteristics of Sediment and the Response to the Hydrodynamic Conditions of the Tidal Flat at the Northern Yellow River Delta [J]. Marine Sciences, 2008, 32(2): 42-46. (in Chinese))
- [5] Milda Kairyte and Rodney L. Stevens. Quantitative Provenance of Silty and Clay Within Sandy Deposits of the Lithuanian Coastal Zone. Marine Geology, 2008.
- [6] 杨占宝. 黄河三角洲地震地质特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003. (YANG Zhanbao. The Research of Seismogeological Characteristics of the Yellow River Delta [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003. (in Chinese))
- [7] 马德翠, 单红仙, 周其健. 黄河三角洲粉质土的动模量和阻尼比试验研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 353-360. (MA Dehui, SHAN Hongxian, ZHOU Qijian. Experimental Study on Shear Modulus and Damping Ratio Characteristics of Silty Soil in the Delta of Yellow River [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 353-360. (in Chinese))
- [8] 贾永刚, 史文君, 单红仙, 等. 黄河河口土强度丧失与恢复过程现场振动试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 20(3): 351-358. (JIA Yonggang, SHI Wenjun, SHAN Hongxian, et al. In situ Test Study on Silty Strength's Loss and Recovery Due to Vibration Load in the Yellow River Mouth [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 20(3): 351-358. (in Chinese))
- [9] 刘茜, 郑西来, 刘红军等. 黄河三角洲粉土液化的试验研究[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 161-166. (LIU Qian, ZHENG Xilai, LIU Hongjun, et al. Experimental Studies on Liquefaction Behavior of Silty in The Huanghe River Delta [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(2): 161-166. (in Chinese))
- [10] 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499. (SUN Yongfu, DONG Lipei, SONG Yupeng. Analysis of Characteristics and Formation of Disturbed Soil on Subaqueous Delta of Yellow River [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499. (in Chinese))
- [11] 贾永刚, 栾海晶, 许国辉, 等. 振动导致黄河河口粉质土性质与起动流速的变化[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1123-1128. (JIA Yonggang, LUAN Haijing, XU Guohui, et al. Changes in Geotechnical Properties of Silty and Its Critical Erosion Threshold in Yellow River Estuary: Influence of Vibrating Load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1123-1128. (in Chinese))
- [12] 徐东升, 汪稔, 孟庆山等. 黄河三角洲粉土原位力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 409-416. (XU Dongsheng, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Experimental Research on In situ Mechanical Properties of Silty in Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 409-416. (in Chinese))
- [13] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. (GB/T 50123-1999, Standard for Soil Test Method [S]. (in Chinese))
- [14] 杨少丽. 改进的室内粉土制样技术[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 379-380. (YANG Shaoli. Improved Preparing Technique of Silty Sample [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 379-380. (in Chinese))
- [15] Wheeler S J, Sivakumar V. An Elastoplastic Critical State Framework for Unsaturated Soil [J]. Geotechnique, 1995, 45(1).