

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.05029

# 黄河三角洲沉积物超固结特征及其成因

杨秀娟, 贾永刚, 刘红军, 单红仙

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100)

**摘要:**以室内固结试验为基础, 从含水量、孔隙比、粒度成分、前期固结压力等方面对黄河三角洲沉积物的固结状态进行了研究, 发现黄河三角洲地区沉积物垂向上呈现超固结-正常固结-欠固结的趋势, 6 m 以上沉积物处于超固结状态, 这是土体粒度成分和沉积环境的影响等因素共同作用形成的。土体胶结方式的不同和波浪等动力因素的影响深度的不同决定了超固结特征沿深度非均匀化。

**关键词:**沉积物; 超固结; 胶结; 黄河三角洲

**中图分类号:** P 731.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2009)05-0029-06

超固结土在世界各地普遍存在, 在工程实践中也经常遇到, 而目前国内外对其研究尚处于初步阶段, 基本理论也均是从正常固结土的理论衍生出来的。1964 年, Crawford<sup>[1]</sup>对正常固结土做压缩流变试验得出了不同固结时间的  $e-\log p$  曲线; 1972 年 Bjerrum<sup>[2]</sup>对其做了发挥, 得出了等时的  $e-\log p$  曲线, 并利用它对似超固结状态进行了解释; 此后顾小芸<sup>[3]</sup>应用综合判断方法确定了海洋土的先期固结压力, 确定出土体的固结状态; 1994 年邹越强<sup>[4]</sup>、姚海林等<sup>[5]</sup>提出了推求前期固结压力的逐步逼近法, 进而判断土的固结状态; 马时冬<sup>[6]</sup>深入分析了次固结引起的似超固结土的性状, 指出存在一种“超越现象”, Yasuhara K<sup>[7]</sup>也提到了类似的现象。

黄河三角洲沉积物主要由物理力学性质非常特殊的粉质土组成。过去学者对黄河三角洲沉积物的研究主要集中在工程性质和液化特性方面<sup>[8-11]</sup>, 在土体固结方面主要集中在软土研究上。冯秀丽等人<sup>[12-13]</sup>研究了现代黄河口沉积环境和沉积物工程性质的关系, 发现硬壳层的存在; 吴建政等<sup>[14]</sup>指出黄河三角洲地区为粉土-软土地层结构; 常瑞芳等<sup>[15]</sup>指出呈欠固结状态的土构成了水下不稳定基底; 师长兴等人<sup>[16]</sup>研究了黄河三角洲沉积物的自然压实固结过程, 认为固结量和速率与上覆沉积物重量成反比; 贾永刚等<sup>[17]</sup>运用现场试验方法揭示了黄河口沉积物在波浪作用下的次生改造引起的固结非均匀现象; 刘媛媛等<sup>[18]</sup>发现黄河三角洲潮滩表层沉积物

处于超固结状态并且强度沿深度方向呈现非均匀变化; 单红仙等<sup>[19]</sup>分析了黄河三角洲物源和河口环境对土体固结的作用, 认为黄河三角洲土体的超固结状态是由土体中  $\text{CaCO}_3$  晶体形成水稳定性钙质胶结形成的。

本文根据在黄河三角洲开展的工作, 以室内固结试验为基础, 从含水量、孔隙比、粒度成分、前期固结压力等方面对黄河三角洲沉积物的固结状态进行了研究。

## 1 样品采集与试验

本文试验选在黄河三角洲的大王北、广利港、刁口和新滩。这 4 个研究区分别位于黄河三角洲的西北部、北部、东部和东南部, 基本涵盖了 1855 年以来不同时期的黄河三角洲沉积体(图 1)。其中大王北沉积体系是黄河 1904—1929 年由大王入海形成的, 1929—1934 年间形成广利港沉积体系, 刁口沉积形成于 1964—1976 年, 新滩沉积是黄河自 1976 年以后入海沉积形成的。在四区分别布置 1 个约 20 m 深的探孔, 每隔 50 cm 取样, 共采取 50 cm 原状样 71 个, 并取扰动样进行室内颗分试验。

室内试验按照土工实验方法标准进行。其中颗分采用筛分和比重瓶法, 筛分粒级取 2、0.25、0.125、0.075 mm, 比重计法分别测定 0.5、1、2、5、15、30、60、120、1 440 min 对应的悬浊液比重, 而后对所得的实验数据进行分类分析, 得到测试样品的粒度成分。另外利用全自动中压固结仪在室内进行了固结压缩实验, 成果由计算机自动绘制可以得到土体的前期固结压力等数据。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40172088, 40472137)

作者简介: 杨秀娟(1981—), 女, 博士生, 主要从事环境地质研究。

收稿日期: 2008-12-18; 改回日期: 2009-03-20。 周立君编辑

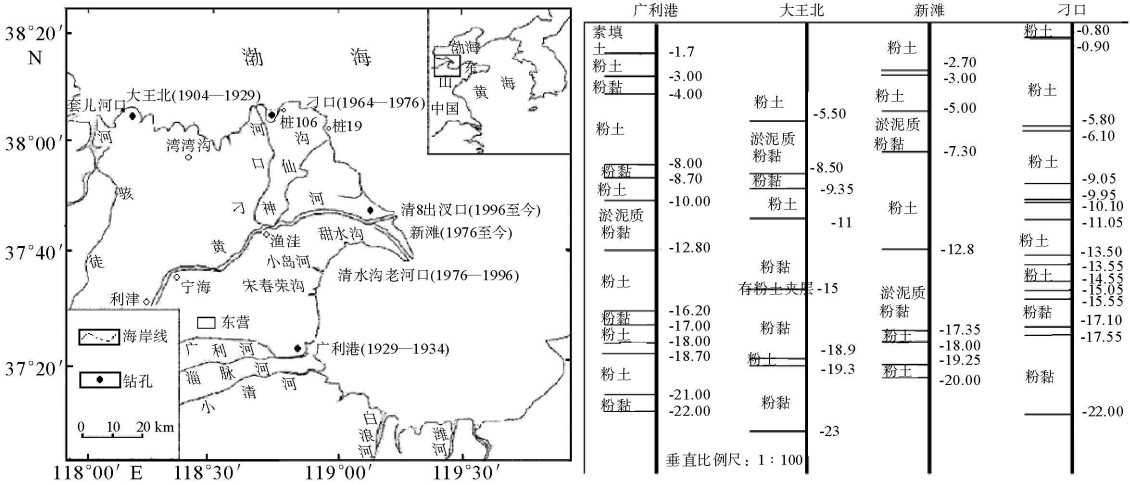


图 1 研究区位置及钻孔柱状图

Fig. 1 Location of the research area and drill holes

2 沉积物物理力学性质及其固结状态

2.1 土样的物理性质

沉积物由于其本身重量的影响所导致的压密作用是众所周知的, 沉积物的物理力学性质将随埋深的变化而变化, 如同一成因的土, 能够反映其结构状态的密实度、孔隙比和含水量与埋深之间存在比例关系<sup>[12]</sup>。图 2 给出了 4 个研究区沉积物的基本物理力学指标纵深方向的变化曲线。

2.1.1 土样含水量沿深度变化

大王北地区 0~6 m 深度土体含水量在 20%~27%之间, 而 6 m 以下土体的含水量在 30%~45%之间, 接近软土; 广利港地区含水量呈现周期性变化趋势, 0~6、13~20 m 范围内土体的含水量较低, 基本在 20%~28%之间, 中间 7~12 m 含水量在 30%~40%之间; 刁口地区 0~15 m 深度土体的含水量在 23%~30%之间, 下部土体的含水量在 30%~40%之间, 与大王北地区含水量的变化趋势相似; 新滩地区 0~12 m 深度范围内土体的含水量为 23%~30%, 12 m 深度以下, 土体的含水量较大, 基本位于 30%~40%之间。

2.1.2 土样孔隙比沿深度变化

大王北地区在 0~6 m 土体的孔隙比位于 0.6~0.8 之间, 为中压缩性土, 6 m 以下土体的孔隙比基本大于 0.8, 多数超过 1.0, 为高压压缩性土; 广利港地区孔隙比的变化趋势与含水量相似, 0~6

和 13~20 m 深度土体的孔隙比在 0.6~0.8 之间, 有极少夹层土的孔隙比低于 0.6, 7~12 m 深度土的孔隙比在 0.8~1.0 之间, 总体变化较小; 刁口地区土体孔隙比变化较小, 基本在 0.6~1.0 之间, 为中压缩性土, 其中 12 m 以上土体的孔隙比基本低于 0.8; 新滩地区 12 m 以上土体的孔隙比同样在 0.6~0.8 之间, 说明土体的密实性较好, 而 12 m 以下则约为 1.0, 土体孔隙较多, 土质较为疏松。

结合以上可以看出, 4 个研究区 0~6 m 深度土体的含水量较小, 孔隙比较低, 土体较密实, 为低压缩性土, 下部土层含水量较大, 土质较为疏松, 为中高压压缩性土。

2.1.3 土样黏粒含量沿深度变化

土中砂粒的含量普遍低于 4%, 主要以黏粒和粉粒为主, 其中粉粒占主导地位, 最高达到 94.89%, 黏粒含量有较大起伏, 在 3.0%~68.5%之间。大王北地区 0~6 m 土体黏粒含量在 7%~15%之间, 粉粒占主导地位, 6 m 以下土体的黏粒含量在 30%~60%之间, 为粉质黏土或黏土。广利港地区土层划分基本与含水量的划分一致, 0~6 m 和 13~20 m 深度土体的黏粒含量在 10%~20%之间, 粉粒占主导, 7~12 m 黏粒含量较高, 为粉质黏土; 刁口地区 6 m 以上土体的黏粒含量低于 15%, 粉粒占主导, 6 m 以下土体的黏粒含量普遍大于 15%; 新滩地区与刁口地区的变化趋势一致, 6 m 以上土体的黏粒含量较低, 6 m 以下深度土体基本为粉质黏土和黏土。

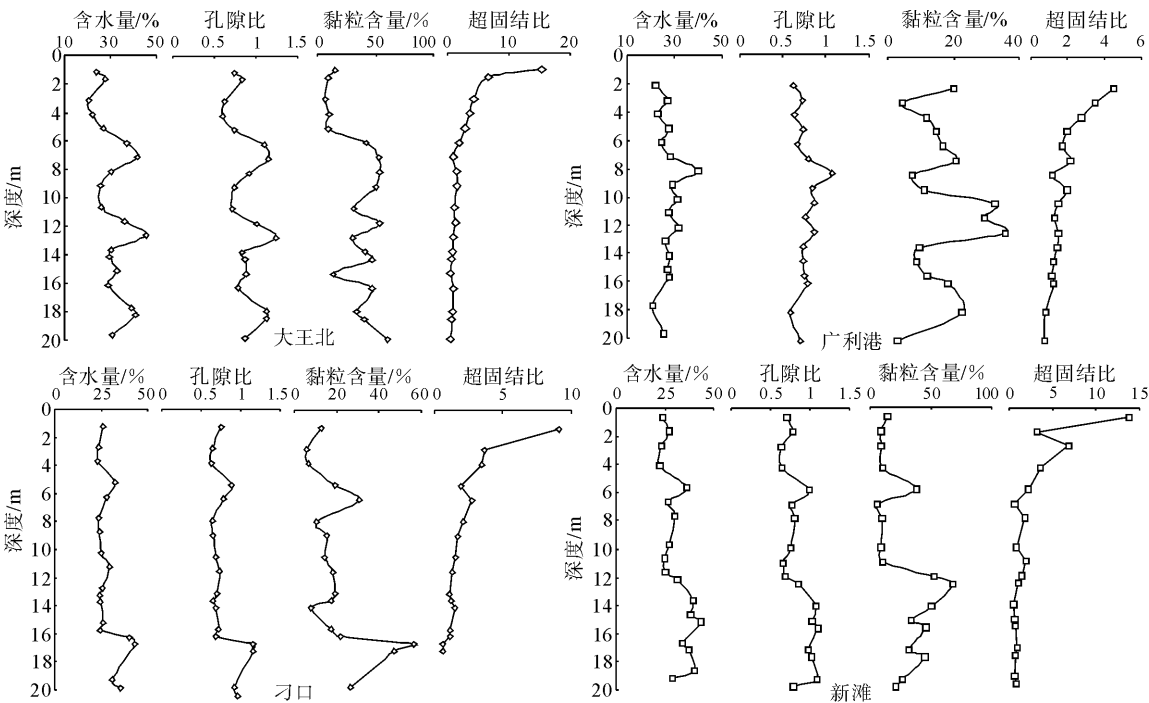


图 2 黄河三角洲沉积物物性指标

Fig. 2 Physical and mechanical indexes of soils in different areas of the Yellow River delta

2.2 土样的力学性质

2.2.1 土样前期固结压力沿深度变化

前期固结压力是指土层在地质历史上所曾经承受过的上覆土层自重压力或其他作用力, 并在该力作用下, 土体已固结稳定的最大压力。

从表 1 可知, 各研究区前期固结压力沿深度方向变化不均匀, 各研究区有较大差异。大王北地区硬层分布在 0~6 m 深度内, 前期固结压力平均在 140 kPa 左右, 往下土体前期固结压力减小, 变化较为均匀; 广利港地区硬层分布在 0~6 m 和 9~20 m 内, 前期固结压力变化不大; 刁口地区 15 m 以上土体的前期固结压力变化不大, 以下土体的前期固结压力较小; 新滩地区土体的前期固结压力变化较大, 在 40~207 kPa 之间, 表层硬层在 0~6 m, 该深度以内土体的前期固结压力变化不大, 第二层出现在 10~12 m, 第三层位于 16~20 m。

2.2.2 土体超固结比沿深度变化

图 2 中给出了 4 个探孔土体的超固结比(OCR)随深度的变化情况。各研究区超固结比沿深度方向显示了王清等<sup>[20]</sup>所述的超固结比由上而下逐渐减小的趋势, 表层 0~6 m 超固结程度较大, 尤其是大王北地区, 新滩次之, 刁口和广利港超固结程度接近, 6 m 以下超固结比较小, 出现欠固结土体。总体来看, 四研究区土体随深度的增加呈现超固结-正常

固结-欠固结的变化趋势。从各研究区的土层分布情况来看(图 1), 呈欠固结状态的土层基本为含水量较大、比较疏松的淤泥质黏土或粉质黏土, 这种土体的渗透性较差, 在上覆荷载的作用下排水固结的速度较慢。

3 黄河三角洲沉积物超固结成因分析

超固结的形成是与各种因素相关的。室内粒度分析试验的结果显示土体中的粉粒和黏粒含量较高, 并且在超固结状态的土中黏粒含量极高, 土体接近正常固结时, 其粉粒含量降低, 黏粒含量升高, 而欠固结土中黏粒含量较高, 说明土体的固结状态与土体中黏粒含量有较大的关系。

黄河三角洲快速沉积物处于特殊的河口环境, 携带高浓度泥沙的河水遇到高盐度的海水, 水动力条件的改变致使大量粗颗粒的粉粒沉积下来, 由于土体孔隙溶液中的离子浓度增加, 导致扁平状黏土矿物表面双电层变薄, 减小了粒间斥力, 同时相对来说又增加了粒间吸引力, 黏粒絮凝体主要以“边-面”和“边-边”连结方式聚集成较大的颗粒沉积, 这样的沉积物颗粒虽然大部分以散粒结构为主, 但是颗粒之间存在凝聚黏粒的接触连接和较强水胶连接<sup>[21]</sup>。图 3 中黄河三角洲沉积物的微结构照片显示, 上层土体以粉粒为主, 颗粒孔隙中为高盐度海

表 1 黄河三角洲土体的固结状态

Table 1 Consolidation state of soils in the Yellow River delta

编号	埋深/ m	Po/ kPa	Pc/ kPa	定名	编号	埋深/ m	Po/ kPa	Pc/ kPa	定名
w b2-1	0.5~0.7	9.6	138.1	粉土	glg2-1	2.1~2.3	41.7	120	粉土
dwb2-3	1.5~1.7	27.8	146.1	粉土	glg2-2	3.0~3.5	57.5	124.7	粉土
dwb2-5	3.0~3.5	59.6	143.8	粉土	glg2-4	4.0~4.5	78.8	114.9	粉土
dwb2-6	4.1~4.6	81.9	155.9	粉土	glg2-6	5.0~5.5	95.4	99.1	粉土
dwb2-8	5.2~5.7	99.6	151.1	粉土	glg2-8	6.0~6.5	117.4	99.6	粉土
dwb2-10	6.2~6.7	110.2	112.4	粉黏	glg2-10	7.0~7.5	131.3	141.9	粉土
dwb2-12	7.2~7.7	124.0	62	粉黏	glg2-12	8.0~8.5	140.2	87.1	粉黏
dwb2-14	8.2~8.7	152.2	112.6	淤粉黏	glg2-14	9.0~9.5	166.8	163.7	粉土
dwb2-16	9.2~9.7	177.6	131.6	粉黏	glg2-16	10.3~10.5	189.9	140.3	粉黏
dwb2-18	10.4~10.6	201.9	110.1	粉黏	glg2-18	11.3~11.5	215.8	126.7	粉黏
dwb2-20	11.4~11.6	204.2	134.7	粉黏	glg2-20	12.3~12.5	228	160.6	粉黏
dwb2-23	12.4~12.6	209.1	111.3	粉黏	glg2-22	13.0~13.5	248.6	166.5	粉土
dwb2-25	13.4~13.6	251.5	102	粉黏	glg2-24	14.3~14.5	260	154.3	砂粉
dwb2-27	14.1~14.6	259.3	85.9	粉黏	glg2-25	14.8~15.0	281.6	142.8	粉土
dwb2-29	15.1~15.6	276.1	70.7	粉土	glg2-27	15.8~16.0	297.5	169.2	粉土
dwb2-31	16.4~16.6	308.9	139.2	粉黏	glg2-31	17.8~18.0	357.9	118.7	粉土
dwb2-33	17.4~17.6	300.9	122.1	淤粉黏	glg2-34	19.3~19.8	372.5	121.5	粉土
dk2-1	0.5~0.7	9.0	82.9	粉土	xt2-1	0.5~0.7	9.6	124.2	粉土
dk2-5	2.5~3.0	50.3	140.6	粉土	xt2-2	1.75~1.95	33.0	76.3	粉土
dk2-7	3.55~4.05	70.5	139.7	粉土	xt2-4	2.5~3.0	49.5	207	粉土
dk2-10	4.85~5.35	89.2	95.3	粉土	xt2-6	4.0~4.5	78.7	150.8	粉土
dk2-12	5.95~6.45	112.3	158.3	粉土	xt2-9	5.5~6.0	94.6	124.1	粉黏
dk2-14	7.65~8.15	151.4	145.2	粉土	xt2-11	6.8~7.0	129.3	40.9	粉黏
dk2-16	8.75~9.25	172.2	133.9	粉土	xt2-13	7.5~8.0	140.8	125.4	粉土
dk2-18	10.1~10.6	197.8	136.4	粉土	xt2-17	9.5~10.0	180.0	71.1	粉土
dk2-21	11.5~12.0	221.7	129	粉土	xt2-19	10.5~11.0	205.8	184.7	粉土
dk2-23	12.5~13.0	244.1	118.5	粉土	xt2-21	11.5~12.0	223.7	151.3	粉土
dk2-24	13.1~13.3	257.6	137.5	粉黏	xt2-22	12.0~12.5	222.3	124.7	粉土
dk2-25	13.5~13.7	263.0	172.8	粉黏	xt2-24	13.3~13.5	233.0	56.6	粉黏
dk2-28	15.0~15.2	288.5	147.6	粉黏	xt2-26	14.3~14.5	253.8	84.7	粉黏
dk2-29	15.5~15.7	302.2	147.6	粉土	xt2-27	14.8~15.0	253.0	90.4	淤粉黏
dk2-30	16.0~16.2	291.4	82.8	淤粉黏	xt2-30	16.3~16.5	294.9	135.1	泥黏土
dk2-31	16.8~17.0	298.9	83.6	粉黏	xt2-31	16.8~17.0	299.9	110.7	淤粉黏
dk2-35	19.0~19.2	348.3		淤粉黏	xt2-35	18.8~19.0	328.4	103.0	粉黏
dk2-36	19.5~19.7	351.5		粉黏	xt2-36	19.3~19.5	362.6	143.1	粉黏

注: 表中土样编号中字母为地区名首字母缩写, dwb 为大王北研究区, glg 为广利港研究区, dk 为刁口研究区, xt 为新滩研究区。

水,颗粒间易形成非水稳定盐晶连接。该种连接方式获得的强度较快,结构强度也较大,而随深度增加,粉粒含量降低黏粒含量增加,土粒之间的胶结方式由盐类胶结转换为黏质胶结,这种胶结方式具有塑性性质,其胶结强度取决于黏土吸附的水量,结构强度较小<sup>[23]</sup>。因此,黄河三角洲沉积物上层土体呈现超固结状态,而下层黏粒含量较高,其含水量较高呈饱和状态,又处于形成初期,为欠固结状态。

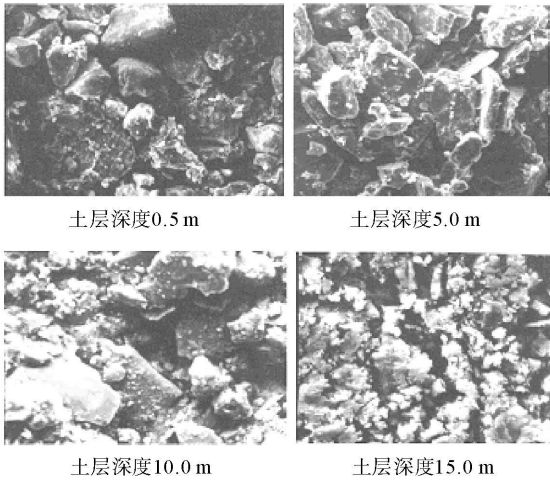


图 3 黄河三角洲沉积物微结构照片(实际放大 500 倍)  
Fig. 3 Photos of micro-structures of sediments (500 times)

由于黄河三角洲沉积物的特殊性和河口地区复杂的水动力条件,黄河三角洲快速沉积物承受海水周期性淹没,波浪和潮波将力直接作用于海床土体上,使海床表层沉积物的应力场、位移场、孔隙水压力发生改变,而且改变沉积物的固结状态。在波浪作用下土体遭受类似动力排水固结过程,使土体中的孔隙水压力升高,有效应力降低,形成拟超固结现象<sup>[23]</sup>。孟庆山等<sup>[24]</sup>通过应力路径的研究发现原状土经过动力排水固结之后在剪切过程中表现出一定的超固结土的性状,而重塑土则具有了明显的超固结特性。在波浪荷载长期作用下,超静孔压反复累积与消散,使土体产生类似的动力排水固结过程。大的波浪作用使一定深度的土体超孔压的累积超过上覆有效自重应力,产生液化现象,土体发生动力排水固结,土体的似前期固结压力提高;小风浪逐渐积累的动力作用,一方面使黄河三角洲快速堆积的沉积物被压密,另一方面使土颗粒之间的相对位置更加稳定,颗粒定向角优化,从而导致土体的似前期固结压力和结构强度提高,形成硬层。这是导致黄河三角洲沉积物产生超固结状态和超固结沿深度非均匀化的主要因素。

## 4 结论

(1)黄河三角洲地区沉积物沿深度方向呈现超固结-正常固结-欠固结的趋势,6 m 以上沉积物处于超固结状态。

(2)黄河三角洲沉积物固结状态是由土体粒度成分和沉积环境的影响等因素共同作用形成的。

(3)土体胶结方式不同和波浪等动力因素的影响

响深度的不同决定了超固结特征沿深度非均匀化。

## 参考文献(References)

- [1] Crawford C.B. Interpretation of consolidation tests [J]. J Soil Mech. Found. Div., ASCE, 1964, 90(5): 87-102.
- [2] Bjerrum L. Embankments on soft ground [C] // Proc. Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures. ASCE, 1972; 1-54.
- [3] 顾小芸. 海洋土先期固结压力的综合判定方法 [C] // 第五届全国土力学及基础工程学术会议论文. 1987; 682-685. [G U Xi-aoyun. Synthetically determinate methods of pre-consolidation pressure of marine soils [C] // The Fifth of Chinese Soil and Foundation Engeneering Conference Essay, 1987; 682-685.]
- [4] 邹越强, 王建斌, 邵孟新. 推求先期固结压力的逐步逼近法 [J]. 岩土力学, 1994, 16(3): 48-61. [ZOU Yueqiang, WANG Jian-bin, SHAO Mengxin. Ascertainning preconsolidation pressure by iteration [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 16(3): 48-61.]
- [5] 姚海林, 马时冬, 卢应发. 正常固结土与超固结土的一些特性及其应力历史的确定 [J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 38-45. [YAO Hailin, MA Shidong, LU Yingfa. Some properties of nomal-ly-consolidated soils and overconsolidated soils and determina-tion of its stress history [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(3): 38-45.]
- [6] 马时冬. 拟似超固结粘土的应力-应变-强度特性 [J]. 岩土工程学报, 1987(1): 53-60. [MA Shidong. The characteristics of the over-consolidated clay's stress-strength [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987(1): 53-60.]
- [7] Yasuhara K. Postcyclic undrained strength for cohesive soils [J]. Jr. of Geotech. Eng. ASCE, 1994, 120(11): 1961-1979.
- [8] Butterfield R. A natural compression law for soils [J]. Geotechnique, 1979, 29(4): 469-480.
- [9] Sridharan A, Abraham B M, Jose B T. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure [J]. Geotechnique, 1991, 41(2): 263-271.
- [10] Onitsuka K, Hong Z, Hara Y, et al. Interpretation of odom-eter test data for natural clays [J]. Soils and Foundations, 1995, 35(3): 61-70.
- [11] 李广雪, 庄克琳, 姜玉池. 黄河三角洲沉积物的工程不稳定性 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 21-26. [LI Guan-gxue, ZHUANG Kelin, JIANG Yuchi. Engineering instabili-ty of the deposition bodies in the Yellow River delta [J]. Ma-rine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(2): 21-26.]
- [12] 冯秀丽, 沈渭铨, 杨荣民, 等. 现代黄河水下三角洲软土沉积物工程地质性质 [J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(增刊): 132-194. [FENG Xiuli, SHEN Weiquan, YANG Rongmin, et al. The geotechnical characteristics of mud sediment in the mod-ern subaqueous Huanghe delta [J]. Journal of Ocean Univer-sity of Qingdao, 1994, 24(Sup.): 132-194.]
- [13] 冯秀丽, 林霖, 庄振业, 等. 现代黄河水下三角洲全新世以来土层层岩土工程参数与沉积环境之间的关系 [J]. 海岸工程, 1999, 18(4): 1-7. [FENG Xiuli, LIN Lin, ZHUANG Zhenye, et

- al. The relationship between geotechnical parameters and sedimentary environment of soil layers since Holocene in modern Huanghe subaqueous delta[ J]. *Coast Engineering*, 1999, 18(4): 1-7.]
- [ 14] 吴建政. 山东全新世滨海软土与工程地质灾害的研究[ J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(3): 43-54. [ WU Jianzheng. Study on Shandong Holocene littoral soft soil and its engineering geological hazard[ J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1995, 15(3): 43-54.]
- [ 15] 常瑞芳, 陈樟榕, 陈卫民, 等. 老黄河口水下三角洲前缘底坡不稳定地形的近期演变及控制因素[ J]. *青岛海洋大学学报*, 2000, 1: 159-164. [ CHANG Ruifang, CHEN Zhangrong, CHEN Weimin, et al. The recent evolution and controlling factors of unstable seabed topography of the old Yellow River subaqueous delta[ J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2000, 30(1): 159-164.]
- [ 16] 师长兴, 尤联元, 李炳元, 等. 黄河三角洲沉积物的自然压实过程及其影响[ J]. *地理科学*, 2003, 4: 175-181. [ SHI Changxing, YOU Lianyuan, LI Bingyuan, et al. Natural consolidation of deposits and its consequences at the Yellow River delta[ J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(2): 175-181.]
- [ 17] 贾永刚, 霍素霞, 许国辉, 等. 黄河水下三角洲沉积物强度变化原位测试研究[ J]. *岩土力学*, 2004, 25(6): 876-881. [ JIA Yonggang, HUO Suxia, XU Guohui, et al. Intensity variation of sediments due to wave loading on subaqueous delta of Yellow River[ J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 876-881.]
- [ 18] 刘媛媛. 黄河三角洲表层沉积物固结非均匀性研究[ D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. [ LIU Yuanyuan. Research of Heterogeneity Consolidation Mechanics of Subsurface Sediment on the Subaqueous Delta of Yellow River, China[ D]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2004.]
- [ 19] 单红仙, 张建民, 贾永刚, 等. 黄河口快速沉积海床土固结过程研究[ J]. *岩石力学与过程学报*, 2006, 25(8): 1676-1682. [ SHAN Hongxian, ZHANG Jianmin, JIA Yonggang, et al. Consolidation process study of rapidly deposited seabed soils at Yellow River estuary[ J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1676-1682.]
- [ 20] 王清, 陈剑平, 蒋惠忠. 先期固结压力理论的新认识[ J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(1): 59-63. [ WANG Qing, CHEN Jianping, JIANG Huizhong. The new knowledge in theory of preconsolidation pressure[ J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1996, 26(1): 59-63.]
- [ 21] Gao G R. Micro fabric features composition and microstructure classification of marine soils in China[ C] // ASTM STP-923. Chaney R C, Ed. ASTM Philadelphia, 1986: 178-195.
- [ 22] 高国瑞. 中国海相沉积土微结构和工程性质研究[ J]. *中国科学 B 辑*, 1984, 14(9): 849-856. [ GAO Guorui. The microstructure and the physical mechanics of the marine soil in China[ J]. *Science in China (Series B)*, 1984, 14(9): 849-856.]
- [ 23] 王淑云, 楼志刚. 海洋粉质粘土在波浪荷载作用下的不排水抗剪强度衰化特性[ J]. *海洋工程*, 2000, 18(1): 38-43. [ WANG Shuyun, LOU Zhigang. Marine silty clay loads in the wave of the undrained shear strength characteristics of failure[ J]. *Marine Engineering*, 2000, 18(1): 38-43.]
- [ 24] 孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 动力固结后饱和软土三轴剪切性状的试验研究[ J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(22): 4025-4029. [ MENG Qingshan, WANG Ren, LIU Guanshi. Experimental study on behavior of triaxial shear test of saturated soft clay treating with dynamic consolidation[ J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4025-4029.]

## RESEARCH ON CONSOLIDATION CHARACTERISTICS AND ORIGIN OF THE YELLOW RIVER ESTUARY SEDIMENTS

YANG Xiujuan, JIA Yonggang, LIU Hongjun, SHAN Hongxian

(The Geo-Environment Engineering Department, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on the results of indoor consolidation tests, we analyzed moisture content, porosity ratio, grain size, compression modulus and  $P_c$  of the Yellow River soil, and concluded that the soil is in normal consolidation at 6 m depth, and above this critical depth the soil is over-consolidated while beneath it the soil is under-consolidated. And analysis also indicates that formation of the over-consolidation state is attributable to the influence of the cementation effect and sedimentary environment. And the difference in cementation and in impacted depths of the waves decided over-consolidation inhomogeneity at different depths.

**Key words:** sediments; over-consolidation; cementation; Yellow River estuary