

文章编号: 1000-5641(2009)03-0146-07

黄河三角洲粉质土前期固结压力的探讨^{*}

杨秀娟, 贾永刚, 刘红军

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 通过对黄河三角洲海港地区粉质土的室内实验,从物质组成、结构形态和沉积环境的角度阐述了黄河三角洲粉质土前期固结压力的特性,并探讨其含义.通过试验发现,作为一种性质较为特殊的区域性土,黄河三角洲地区广泛存在的粉质土的前期固结压力所表现出的规律与传统的土力学理论并不相符.经分析认为,黄河三角洲粉质土的前期固结压力主要受土的成因、结构和成分的制约,上覆压力的影响甚微.

关键词: 黄河三角洲; 粉质土; 前期固结压力; 压缩曲线; 结构强度

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A

Study on pre-consolidation pressure of silt in the Yellow River Delta

YANG Xiu-juan, JIA Yong-gang, LIU Hong-jun

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China,
Qingdao Shandong 266100, China)

Abstract: By indoor experiments about the silt in the Yellow River Delta, the characteristics of the silt's pre-consolidation pressure were studied from points of soil genesis, structure and component, and sedimentary environment. The studies show that, the silt in the Yellow River Delta, as a special regional soil, has a different trend of the pre-consolidation from the traditional theory. And the pre-consolidation of silt is most constrained by soil genesis, structure and component, and is affected by the overlying pressure in little degree.

Key words: Yellow River Delta; silt; pre-consolidation pressure; compression curve; structural strength

0 引 言

前期固结压力(P_c),或者称为前期压缩力,是指土体在历史上曾经受到的最大压力,是土力学学科在研究土的压缩与地基沉降的过程中提出的.前期固结压力的推求方法大致有Casagrande方法^[1]、薛迈脱曼方法^[2]、布麦斯脱方法、三笠法和交点法等^[3].其中,Casagrande方法最简单,也是目前常用的一种方法,这种方法是利用 $e-\log p$ 曲线曲率突变点来推求前期固结压力的.

收稿日期:2008-11

基金项目:国家自然科学基金(40472137)

第一作者:杨秀娟,女,博士研究生,主要从事海洋地质研究. E-mail: yliny@163.com.

^{*} 2008年河口海岸科学全国博士生学术论坛资助

前期固结压力的理论含义是土力学效应的宏观反映,用来说明土的应力历史,是指在该压力下土曾经压缩稳定,从而达到该压力下相应的密实度和固结程度. 土体中的自重应力由土体的上覆土重引起,并具有随深度线性增加的规律性. 因而土力学中认为前期固结压力一般由土体的自重应力引起,土的固结程度取决于土体历史上曾经有过的埋深,土的固结性应随深度增加而增强^[4]. 事实上,绝大多数正常沉积的土都遵循这一基本规律,不仅前期固结压力来自上覆土体自重,而且土的压密、固结与前期固结压力之间对应关系呈现出良好的一致性. 然而对于快速沉积的黄河三角洲粉质土这一区域性特殊土,土的前期固结压力并不是随埋深的增加而增大,而且其前期固结压力也不能说明土的应力历史.

本文通过对黄河三角洲刁口地区粉质土的室内实验,从物质组成、结构形态和沉积环境的角度阐述了黄河三角洲粉质土前期固结压力的特性,并探讨其含义.

1 土样的压缩特性及其前期固结压力

1855 年 6 月黄河在河南兰阳铜瓦厢决口从此黄河注入渤海,在山东北部形成了现代黄河三角洲. 现代黄河三角洲陆上部分以垦利县宁海为顶点,南至淄脉沟,西至徒骇河,至 1984 年形成面积约 5 212 km² 的三角洲平原. 黄河自 1855 年改由山东入海以来,由于缺乏人为的控制常呈漫流的态势,在此过程中逐渐形成稳定的流路. 黄河至今共发生七次改道,形成八期流路^[5]. 本文在黄河刁口潮滩取深 12 m 的钻孔(见图 1),在不同深度处进行标准贯入试验,并每隔 50 cm 取样进行室内常规土工测试,其物理性质及状态指标见表 1.

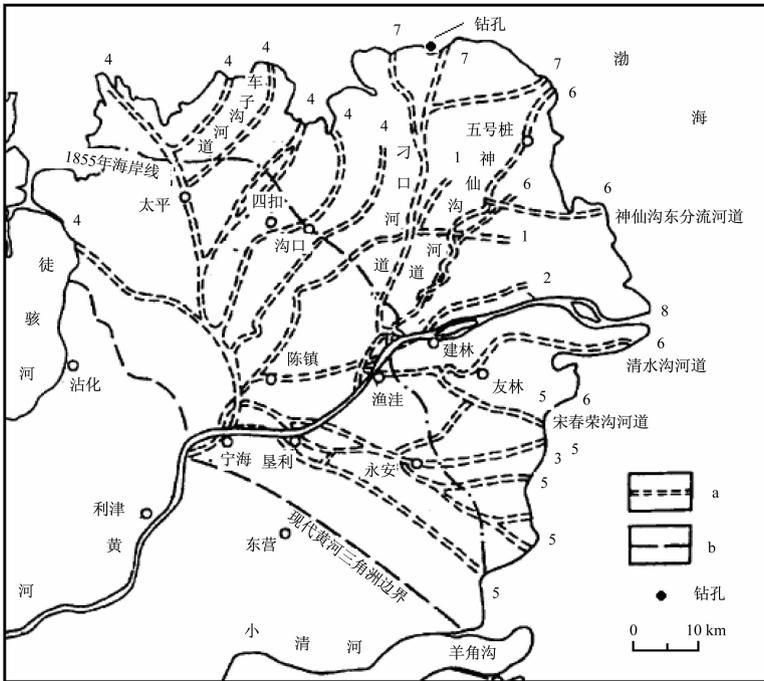


图 1 研究点位置及黄河各时期流路图(图中海岸线系 1984 年的海岸线)

Fig. 1 Location of the research area and the flow of the Yellow River

注: a 废弃河道; b 现代黄河三角洲边界; 1 1855 - 1889 年;

2 1889 - 1897 年; 3 1897 - 1904 年; 4 1904 - 1929 年;

5 1929 - 1934 年; 6 1934 - 1938 年和 1947 - 1964 年; 7 1964 - 1976 年; 8 1979 年 - 现在

表 1 粉质土的物理性质及状态指标

Tab. 1 Physical property and state indices of the silt

土样编号	取样深度/m	含水率/%	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	饱和度/%	粘粒含量/%	液限/%	塑限/%	标贯击数(N)
1	0.5~0.7	26.1	1.94	0.755	93	32.98	30.0	21.3	5
2	2.5~3.0	23.8	2.03	0.641	100	10.56	25.4	17.4	8
3	3.5~4.0	23.3	2.09	0.634	100	9.64	28.4	19.7	11
4	4.8~5.3	28.2	1.94	0.784	97	26.28	29.6	20.4	7
5	5.9~6.4	32.5	1.93	0.881	100	35.36	30.1	21.3	7
6	7.6~8.1	23.6	2.04	0.639	100	12.25	25.2	15.4	8
7	8.7~9.2	24.3	2.04	0.654	100	19.10	29.5	20.9	8.5
8	10.1~10.6	25.3	2.02	0.684	100	17.75	28.9	19.6	9.5
9	11.5~12.0	29.4	2.02	0.730	109	22.71	27.0	18.4	10

试验按照土工实验方法标准进行. 利用全自动中压固结仪在室内进行了固结压缩实验, 其固结压力序列为 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800 和 1 200 kPa, 可以得到土体的前期固结压力等数据, 得出土的 $e-\log p$ 固结压缩曲线见图 2.

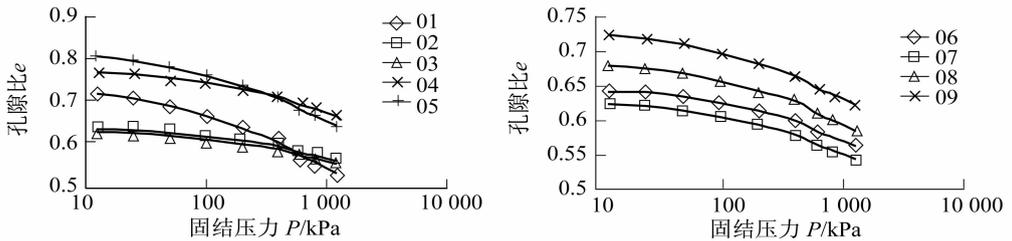


图 2 土样的 $e-\log p$ 固结压缩曲线

Fig. 2 $e-\log p$ compression curves of the silt

虽然目前多采用传统的 Casagrande 方法确定前期固结压力, 但是由图 2 可以看出, $e-\log p$ 压缩曲线的最大曲率点很难确定, 而且屈服后阶段的直线段特征并不明显, 人为误差很大. 因此, 采用传统的 Casagrande 方法来确定前期固结压力容易失真. 双对数法最早是由 Butterfield 提出的^[6]. Onitsuka 和 Hong^[7]通过大量的试验验证了双对数法的有效性. 如图 3 所示, 采用 $\ln(1+e)-\log p$ 双对数法, 天然沉积土的压缩曲线可以由双直线很好的表示. 表 2 中给出了由双对数法确定的黄河三角洲粉质土的前期固结压力 P_c 及超固结比 OCR.

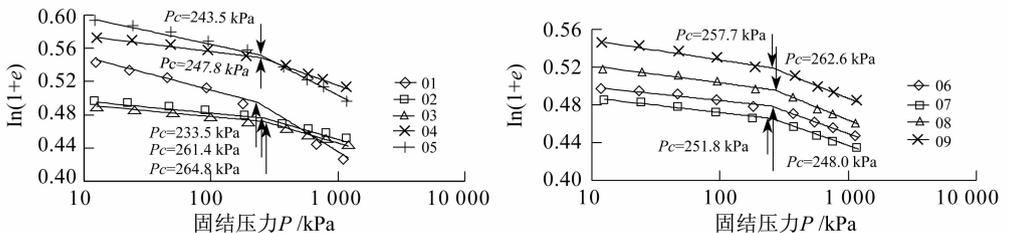


图 3 土样的 $\ln(1+e)-\log p$ 双对数固结压缩曲线

Fig. 3 $\ln(1+e)-\log p$ compression curves of the silt

众所周知,土样的抗剪强度与其前期固结压力和超固结比有关. Mesri 和 Ali^[8]建立了超固结比 OCR 和不排水抗剪强度 C_u 之间的关系式,发现不排水抗剪强度与超固结比和前期固结压力呈正相关关系. Terzaghi 建立了不排水抗剪强度和标贯击数 N 之间的关系式, C_u 为 $(6 \sim 6.5) N^{[9]}$. 根据土性,本文取 $C_u = 6 N$. 对正常固结土而言,土样的不排水抗剪强度 C_u 与天然上覆压力 P_o 之比接近 0.25^[10],大于 0.25 土体为超固结,小于 0.25 土处于欠固结状态. 表 2 中同时列出了黄河三角洲地区粉质土的不排水抗剪强度与上覆土压力之比. 可以看出,所取土样的前期固结压力均大于上覆土压力 P_o ,超固结比 $OCR > 1.0$,并且土样的不排水抗剪强度 C_u 与天然上覆压力 P_o 之比均大于 0.25,说明所取土样呈现超固结特征. 另外随着埋深的增加,土体的前期固结压力变化不大,超固结比 OCR 逐渐减小.

如果粉质土的前期固结压力仅仅是自重应力引起的,那么粉质土应该在自重作用下排水固结. 随着埋深的增加,密实度递增,强度和前期固结压力增大,压缩性减小. 然而事实上,黄河三角洲粉质土的这些特性正好相反. 从表 2 可以知道,黄河三角洲粉质土的前期固结压力主要不是来自上覆土体自重,其原因有以下两点. 一是土体的前期固结压力较大,超过了上覆土体自重的数倍;二是随着深度的增加自重应力增加,但是前期固结压力并不是逐渐增大亦不是逐渐减小的,而是呈现了一种持平状态,说明引起前期固结压力的因素具有与深度无关的规律,必定是由非自重压力因素引起的. 这是受到土结构性影响的天然沉积土的主要特征之一^[11]. 由此说明,粉质土压缩曲线的拐点值是粉土结构强度的反映,与传统定义中的从应力历史角度出发的前期固结压力有着本质区别. 由应力历史引起的固结仅仅是物理压缩过程,而粉质土的结构强度是在其形成历史过程中形成的,是由土体本身物质结构决定的. 固结压缩曲线的拐点所代表的意义是土样在某一级荷载下达到屈服破坏. 对粉质土而言,此时破坏的是其内部结构连接. 因此可以将前期固结压力定义为结构屈服强度.

表 2 粉质土的前期固结压力及超固结比

Tab. 2 Pre-consolidation and over-consolidation ratio of silt

土样编号	取样深度 h/m	上覆土层压力 P_o/kPa	前期固结压力 P_c/kPa	超固结比 OCR	C_u/kPa	C_u/P_o
1	0.5~0.7	9.0	233.5	25.94	30	3.333
2	2.5~3.0	50.3	261.4	5.20	48	0.954
3	3.5~4.0	70.5	264.8	3.76	66	0.936
4	4.8~5.3	89.2	247.8	2.78	42	0.471
5	5.9~6.4	112.3	243.5	2.17	42	0.374
6	7.6~8.1	151.4	248.0	1.64	48	0.317
7	8.7~9.2	172.2	251.8	1.46	51	0.296
8	10.1~10.6	197.8	262.6	1.33	57	0.288
9	11.5~12.0	221.7	257.7	1.16	60	0.271

2 黄河三角洲粉质土前期固结压力分析

黄河三角洲粉质土是黄河携带巨量泥沙在弱潮陆相河口快速沉积形成的,是一种区域性的特殊土. 其表现出来的特殊力学性质的根源就在于其物质成分以及沉积环境.

2.1 粉质土的物质成分与前期固结压力

天然土多种多样,由于组成成分和沉积条件不同,原状土呈现不同程度的结构性^[12]. 天

然结构的影响首先为 Terzaghi 所认识,并被 Skempton^[13]所证实. 沉积物中不同的粘土矿物及其含量都影响其结构强度,尤其是存在膨胀性粘土矿物时,膨胀和收缩会导致土的结构性的消失和减少. 研究表明,以低活性的高岭石为主的矿物组合,形成的微结构类型多是稳定性的;反之,以高活动性的蒙脱石为主的矿物组合,形成较不稳定型微结构^[14]. 黄河三角洲沉积物物源大部分来自于黄土高原,由黄河搬运至此. 黄河中游地区第四系黄土矿物成分以石英、长石为主,因此三角洲沉积物矿物成分基本承袭了上述特征,主要为石英、长石、方解石和白云石. 碎屑矿物的含量占 75.8%,存在钙质胶结. 部分粘土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石^[16]. 粘土矿物含量占 24.2%,当粘土矿物含量高时,土体的强度就低,压缩变形量就大,浸水后容易软化. 粘土矿物中蒙脱石的膨胀性最大,其次为伊利石. 虽然蒙脱石的成分含量小,但伊利石的含量却达 13.67%,说明土体有一定的膨胀性和结构性.

黄河三角洲沉积物主要粒度成分为细砂粒、粉粒和粘粒. 细砂粒含量较少,一般低于 5%,粉粒含量占主体,有些高达 90%,粘粒在 10%左右^[17]. 表 1 中粘粒数据显示,该地区粘粒含量偏高,少部分的粘粒和粉粒结合,形成具有一定抗水性的假粉粒,具有一定团聚度. 扫描电镜照片(见图 4)表明,黄河三角洲粉质土中粘粒和粉粒以半分散半絮凝状态居多,部分土颗粒呈分散状,部分颗粒呈絮凝体形式存在. 在粉质土微结构中,除存在絮凝结构的片状基本单元体以外,还明显存在较大的粒状颗粒,且片状单元体粘贴在粒状颗粒的表面和粒状颗粒之间的接触面上,可起一定的联结作用:黄河三角洲粉土的架空结构具有一定的相对稳定性,在较低的应力水平下,孔隙不会发生过大变形,基本能保持稳定状态,具有一定的结构强度,但由于结构单元之间缺乏非常稳定的胶结连接,其结构强度并不大;在较高的应力作用下会使大、中孔隙失稳,颗粒重新排列,产生不可恢复的突然变形,呈现出结构性土的典型压缩变形特征. 由此可见,黄河三角洲粉土具有一定的结构强度是由其物质组成、孔隙结构与土颗粒间的连接方式所引起的.

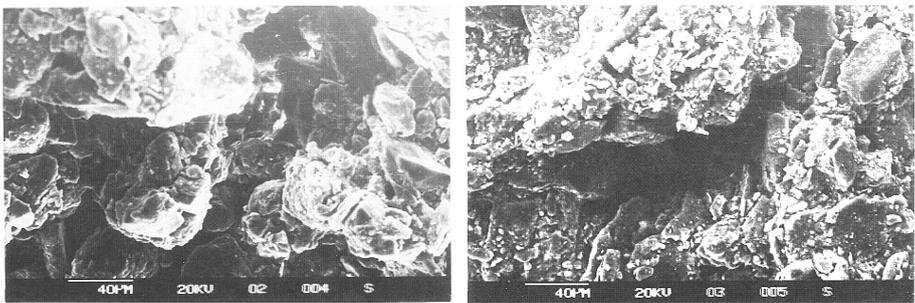


图 4 黄河三角洲粉质土原状样的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photos of undisturbed structures of the silt in the Yellow River Delta

2.2 粉质土的沉积环境与前期固结压力

根据上一节的分析,黄河三角洲粉质土的组成成分以及结构状态使粉土具有了较高的结构强度,这种结构强度的表现形式就是前期固结压力. 至于前期固结压力为什么会沿深度持平,这主要是和粉质土的沉积环境有关.

黄河是举世闻名的多泥沙河流,刁口叶瓣形成时期每年输送到河口的泥沙有 10.6 亿 t 左右^[5]. 丰富的物源物质在入海口及附近海区海洋动力和河流径流的共同作用下,迅速堆积

形成突出的砂嘴以及生长迅速的三角洲堆积体^[18].表1中数据显示,黄河三角洲粉质土的密度、含水量、孔隙比等沿深度并无较大变化,这与土的快速堆积过程直接相关^[19].快速堆积的粉质土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,而沉积速率较低的粘土颗粒在富含有机质和碳酸盐的海洋水环境中逐渐形成了高孔隙的格架.沉积过程中,由于土体孔隙溶液中的离子浓度增加,土中水的性质和成分发生变化,导致扁平状粘土矿物表面双电层变薄,粘粒絮凝体主要以“边-面”和“边-边”方式连结聚集成较大的颗粒沉积,这样的颗粒之间以粘粒接触连接和水胶连接为主,这种连接方式在较短的时间内获得结构强度,但是结构强度不大.同时颗粒孔隙中存在高盐度海水,颗粒间易于形成非水稳定盐晶连接,该连接方式获得的强度较快,结构强度也较大,在饱和或溶液浓度变稀时易消失^[20].在胶结作用中,对黄河三角洲粉质土结构性影响最大的是土体中含有大量的碳酸钙,高盐度的孔隙水中的碳酸钙的溶解度要比在淡水中大很多,为颗粒间碳酸钙晶体生长提供物质基础,形成与结构性黄土类似的水稳定性钙质胶结,这种胶结方式形成的强度高,形成的时间要慢很多.

黄河三角洲粉质土快速堆积,底部土体快速形成粘粒接触连接和水胶连接具有一定的结构强度,由于土中孔隙水较难排除,随着时间的推移,早期沉积的土中的海水离子和沉积物相互融合作用,其连接方式逐渐由结构强度较高并且比较稳定的盐晶胶结和钙质胶结替代,强度逐渐增强.而上层沉积土遭受反复淹没,形成结构强度较大的盐晶连接,并且钙质胶结持续发展,使得黄河三角洲粉质土的前期固结压力随深度变化较小.

3 结论与建议

(1) 采用 $\ln(1+e)-\log p$ 双对数法推求黄河三角洲粉质土的前期固结压力,相对于传统的 Casagrande 方法来说,有更简洁、更准确的优点.

(2) 粉质土的前期固结压力是在沉积过程中形成的,其真正的含义是粉质土微观结构强度的宏观反应,并不完全是上覆压力历史的记载.因此可以将黄河三角洲粉质土固结压缩曲线突变点定义为结构屈服强度.

(3) 黄河三角洲粉质土是一种区域性很强的特殊土,由它引起的一些概念上的新认识的合理性,还有待进一步的研究.

[参 考 文 献]

- [1] CASAGRANDE A. The structure of clay and its importance in foundation engineering [J]. J Boston Soc Civ Engrs, 1932, 19(4):168-209.
- [2] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay [J]. Trans ASCE, 1955, 120:1201-1227.
- [3] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报,1998,20(1): 100-112.
SHEN Z J. Engineering properties of soft soils and design of soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1):110-112.
- [4] JAMES K, MITCHELL. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞译. 南京: 南京工学院出版社,1988.
JAMES K, MITCHELL. Soil Geotechnical Engineering Analysis Principles [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1988.
- [5] 成国栋,薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社,1997,36-40.
CHENG G D, XUE C T. Sedimentary Geology of the Yellow River Delta [M]. Beijing: Geological Press, 1997: 36-40.

- [6] BUTTERFIELD R. A nature compression law for soils [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 469-480.
- [7] HONG Z, ONITSUKA K. A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance [J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(2): 211-222.
- [8] MESRI G, ALI S. Undrained shear strength of glacial clay over-consolidated by desiccation[J]. *Geotechnique*, 1999, 49: 181-198.
- [9] TERZAGHI C. Compressibility and elasticity of artesian aquifers[J]. *Economic Geology*. 1929. 24(2): 211-213.
- [10] WOOD D M. *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*[M]. UK: Cambridge University Press, 1990; 486.
- [11] HONG Z S, LIU S Y, YU X J. On destruct ration of structured soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25 (5):684-687.
- [12] 龚晓南,熊传祥,项可祥,等. 粘土结构性对力学性质的影响及形成原因分析[J]. *水利学报*, 2000(10): 43-47.
GONG X N, XIONG C X, XIANG K X, et al. Analysis of the causes and effects about the clay's structure for the mechanical properties [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(10):43-47.
- [13] SKEMPTON A W. Notes on the compressibility of clays [J]. *Q J Geol Soc*, 1944, 100: 119-135.
- [14] 姚环. 粘性土微观结构与力学性质关系的研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 1995, 8(4): 113-118.
YAO H. Researches on relation between microstructure and mechanical property of the cohesive soil[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 1995, 8(4): 113-118.
- [15] 范德江,杨作升,郭志刚. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21 (4):7-12.
FAN D J. YANG Z S. GUO Z G. Clay minerals and geochemidtry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4):7-12.
- [16] 李安龙. 近代黄河水下三角洲底坡土体的差异侵蚀及土工特性[J]. *中国海洋大学学报*, 2001, 31(3):425-440.
LI A L. The differential erosion and geotechnical properties of the slope soil on the modern Huanghe subaqueous Delta[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2001, 31(3):425-440.
- [17] 王小花. 黄河三角洲饱和地基土地震液化判别综合方法研究[D]. 山东青岛:中国海洋大学, 2006.
WANG X H. Research on method of earthquake liquefaction estimation of saturated soil in Yellow River delta[D]. Qingdao Shandong: Ocean University of China, 2006.
- [18] 贾永刚,单红仙. 黄河口海底斜坡不稳定性调查研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(1): 1-5.
JIA Y G. SHAN H X. Investigation and study of slope instability of sub-aqueous delta of modern Yellow River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 1-5.
- [19] 吴燕开,刘松玉,洪振舜,土层工程性质与其沉积环境关系分析研究[J], *工程地质学报*, 2004, 12(3):263-267.
WU Y K. LIU S Y. HONG Z S. The relationship between the geotechnical properties and the deposited environment for the soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(3): 263-267.
- [20] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J], *岩土工程学报*, 1982, 4(1): 34-45.
LI Z Q. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(1): 34-45.