渤海湾北岸晚第四纪沉积物物理力学性质 及其对地面沉降的影响

秦雅飞',胥勤勉',姜洪涛²,方 成',袁桂邦',杨吉龙',

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2.南京大学地理与海洋学院,南京 210093)

摘 要:对渤海湾北岸晚第四纪沉积物进行详细的沉积学、年代学和物理力学性质分析研究发现,渤海湾北岸50 m 以浅自上而下分为九个单元,依次为第一海相层、滨海湖、末次冰消期湖沼、末次冰消期初期沼泽、盛冰期硬粘土、河 床、第二海相层、末次冰期间冰阶湖沼和末次冰期泛滥堆积。自然压缩固结引发的地面沉降与沉积物的含水率、孔 隙比、黏聚力和压缩系数等物理力学性质关系密切。第一海相层的各项指数均较高,其次为第二海相层和末次冰消 期的泛滥沉积,最小为盛冰期的硬粘土和末次冰期泛滥沉积。以孔隙比和压缩系数为指标,假设第一海相层压缩固 结到沉积环境相似的第二海相层,需要压缩固结196.2 cm;末次冰消期泛滥沉积压缩固结到沉积环境相似的末次冰 期泛滥沉积,需要压缩固结114 cm。30 m以浅地层的自然固结压缩速率最大为0.04 mm/a,远远小于目前的地面沉 降速率。

关键词:渤海湾北岸;晚第四纪沉积物;物理力学性质;地面沉降

中图分类号: P641.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4135(2014)02-0123-08

渤海湾沿岸是国家经济发展的战略地区,有多个 国家级和省级开发区,如天津滨海新区和河北曹妃甸 新区。沿海区域地面沉降导致地面标高损失,形成多 种地质环境灾害,如海水入侵、内涝和风暴潮等^[1],从 而影响区域社会经济发展。近年来,通过控制地下水 开采和回灌地下水,地面沉降明显降低^[2]。而随着沿 海区域城市化进程加快,土体压缩成为地面沉降的主 要原因^[3]。晚第四纪沉积物结构松散,是土体压缩的 主要层位^[4]。晚第四纪沉积物的形成及形成后表生 地质作用对工程地质性质 具有重要影响^[5],已有较 多研究探讨工程地质性质和沉积环境^[6]、沉积相^[7-9]、 沉积时代^[6]和岩相古地理^[10]之间的关系。

渤海湾北岸99~120 m以浅为晚第四纪的海相和陆相沉积物^[11,12],海陆作用模式深刻地影响了不同沉积物的工程地质性质^[13],使其具有不同的物理力学性质^[14,15],对地面沉降产生不同的影响。本文利用渤海湾北岸的两个深50 m钻孔,深入分析晚第四纪沉积物的沉积特征、物理和力学性质及对地面沉降的影响,并探讨晚第四纪沉积物可能潜在的沉降层,

以及沉降量。

1 地质概况

渤海湾北岸位于黄骅坳陷北部,主要断裂有西南庄断裂、柏各庄断裂和沙北断裂,高柳断裂为西南庄、柏各庄断裂的同向调节断裂^[16](图1)。黄骅坳陷新生代以来持续沉降,其厚度平均为6000余米,其中古近系厚3100 m,新近系厚2400 m,第四系厚400~500 m^[17,18]。

渤海湾北岸主要由不同时期的滦河三角洲和冲 积扇组成^[19-22],依据晚第四纪全球海平面变化形成的 三次海侵,研究区内晚第四纪地层包含三个高海面 时期的海相层、三个低海面时期的陆相层,以及海侵 沉积体系^[11,12,23]。

钻孔位于冀东油田高尚堡采油区,距海堤仅有 3 km,地貌上为高潮坪,属于滦河三角洲曹妃甸海湾 泻湖地貌体系^[23]。本海域潮汐形态系数为0.77,属 于不规则半日潮;其中曹妃甸平均高潮位为0.81 m, 平均低潮位为-0.73 m,平均潮差为1.54 m,潮流基

收稿日期:2014-01-25

资助项目:中国地质调查局项目:河北省1:5万南堡新生盐场等9幅区调项目(1212011120746);国家自然科学基金:苏锡 常地区第四系沉积物结构变化特征与地面沉降生命周期过程研究(41372265)

作者简介:秦雅飞(1983-),男,硕士,工程师,从事工程地质调查研究,Email:qinyafei1017@163.com。

本呈往复流运动,涨、落潮水流受地形控制明显,近 岸浅海区主流流向有顺岸或沿等深线方向运动的特 点^[24]。

2 研究方法

本次工作共实施两个钻孔HC1和HC2,孔深50 m,两孔相距40m,均采用旋转机械钻,岩芯管直径 108mm,岩芯采取率达90%。现场实施标准贯入试 验,上部间隔为2m,下部间隔为3~4m,两孔共33 次标准贯入试验。岩芯取出后原状土取样技术标准 (JGJ89-92)采集土工试验样品,间隔为2m,共取42 个样品,在河北省地矿局第五地质大队依据土工试 验方法标准(GB/T50123)测试。其余岩芯辟成两半, 依深度自上而下平摆照相,利用沉积物的颜色、粒度 和沉积构造等特征,宏观判别沉积物的沉积环境。 在40m以浅地层中的腐殖质聚集层和泥炭层中采集3 件¹⁴C样品,在青岛海洋地质研究所采用常规法测定, 所有年龄数据通过Calpal_HULU校正为日历年 Cal. aBP,结果见表1。

3 沉积特征

依据¹⁴C年龄和渤海湾沿岸晚第四纪地层特征^[23],划分HC1和HC2孔地层特征。HC1孔0~3.1 m 为回填土,3.1~22.0 m为MIS1阶段地层,22.0~ 32.0 m为MIS2阶段地层,32.0~47.3 m为MIS3阶 段地层,47.3~50.0 m为MIS4阶段地层。HC2孔 0~2.9 m为回填土,2.9~22.0 m为MIS1阶段地 层,22.0~33.0 m为MIS2阶段地层,33.0~47.0 m 为MIS3阶段地层,47.0~50.0 m为MIS4阶段地层 (图2、3)。

3.1 MIS1 阶段地层

该套地层从上至下可分为四个沉积单元,上部 (3.1/2.9~4.3 m)为亮黄棕色粉土,多交错层理和 透镜状层理,少量铁锰质结核,为高潮坪沉积;中部 (4.3~14.7/14.9 m)为黄灰色粉黏夹粉砂,具水平、 交错、波状和透镜状层理,含海相贝壳碎片,为海相 地层;下部(14.7/14.9~18.1/18.0 m)为暗灰色黏 土,夹少量粉土纹层、薄层,为滨海湖泊相,底部



图1 渤海湾北岸构造简图和钻孔位置

Fig.1 Tectonic map of the northern coast of Bohai Bay and the location of the drillholes ①昌黎-宁河断裂;②蓟运河断裂;③沧东断裂;④汉沽断裂;⑤黑沿子断裂;⑥西南庄断裂;⑦柏各庄断裂;⑧新 寨断裂;⑨李各庄断裂;⑪红房子断裂;⑪石臼坨3号断裂;⑫滦县-乐亭断裂;⑬沙北断裂;⑭高柳断裂

Table 1 List of ¹⁴ C ages from core HC1and HC2 in the northern coast of Bohai bay							
钻孔	采样深度	测年材料	¹⁴ C年龄/ a BP	日历年/Cal. a BP			
HC1-1	11.00 ~ 11.05	碳屑	7017 ± 225	7874 ± 207			
HC1-2	18.00 ~ 18.10	泥炭	8030 ± 110	8899 ± 171			
HC2	39.10 ~ 39.15	腐殖质泥	20500 ± 340	24431 ± 459			

表1 渤海湾北岸HC1和HC2孔沉积物¹℃年龄

(18.1/18.0~22.0 m)为灰黄色粉土、粉砂,顶部夹 少量泥炭层,泥炭日历年龄为8899±171 Cal a BP, 为新仙女木冷期之后,气候转暖,海平面上升过程中 形成的泛滥堆积。

3.2 MIS2 阶段地层

该套地层从上至下可分为三个沉积单元,上部 (22.0~25.9/25.5 m)灰黄色粉土、粉砂夹黏土,黏 土含腐殖质斑点,发育泥裂结构,为湖沼相。中部 (25.9/25.5~31.1/31.0 m)自上而下依次为黄灰色 黏土,多腐殖质斑点;灰黄色、灰黄色、浅淡黄色粉土, 为冰消期的洼地沼泽相沉积,反映了区域泛滥积水 的过程。下部(31.1/31.0~33.0 m)为黄棕色粉土, 多钙质结核和铁锰质结核,是末次盛冰期的硬黏土。

3.3 MIS3 阶段地层

该套地层可分为三个沉积单元,上部(33.0~ 37.0/38.0 m)黄棕色粉砂、粉细沙,为河床相冲积。 中部(37.0/38.0~44.5 m)为亮黄棕色黏土夹腐殖 质黏土和黄灰色粉黏,多波状、交错和透镜状层理, 含海相贝壳碎片,为第二海相层,顶部为砂坝泻湖 相,¹⁴C日历年龄为24431±459 Cal a BP。下部 (44.5~47.3/47.0 m)为灰黄色粉细砂和黏土,是冰 消期河流和沼泽相沉积。

3.4 MIS4 阶段地层

两个钻孔底部均为MIS4阶段地层,主要为灰黄 色粉土,为末次冰期中向间冰阶转化时期形成的泛 滥堆积。

4 物理力学性质

4.1 沉积物的物理性质

沉积物的物理性质指标主要包括含水量(w%)、 质量密度(ρ)、孔隙比(e)等,本文分析主要利用指标 数据见表2。

HC1 孔岩土含水量为 16.5% ~ 35.7%, 平均为 25%;22 m以浅为高值区;22~35 m为低值区,呈交错 下降趋势; 35~47 m为中值区。孔隙比为 0.498~1.013,平均为 0.746; 整体上来看 22 m以 前为高值区;22~47 m为低值区。

HC2 孔岩土含水量为 17.5% ~ 39.7%, 平均为 27.5%; 18 m以浅为高值区,平均为 31.3%; 18~50 m 为低值区,平均为 23.6%。空隙比为 0.5048~1.115, 平均为 0.79; 18 m以浅为高值区,平均 0.89; 18~ 50 m为低值区,平均为 0.69。 HC1、HC2孔岩土含水量、孔隙比整体上从浅向深 有比较明显的降低趋势,局部地层受岩土岩性及沉 积环境的影响,其值略有起伏。岩土的质量密度取 决于土粒的密度、孔隙体积的大小和空隙中水的质 量多少。岩土的这些基本物理性质主要用于计算土 体自重、分析岩土体的可压缩孔间。

4.2 沉积物的力学性质

沉积物的力学性质主要包括黏聚力(Cq)、内摩 擦角(Φq)、压缩系数(α_{0.1-0.2})和压缩模量(Es_{0.1-0.2}), 本文分析主要利用指标数据见表2。

HC1 孔岩土黏聚力(Cq)为5~35 kPa,平均为 22.8 kPa;內摩擦角(Φ q)为11~30.2°,平均为 14.8°;Cq在19 m以浅为高值区,19~33 m为低值 区,33~50 m为次高值区; Φ q在22 m以浅为低值 区,22~37为高值区,37~50 m为次低值区;Cq、 Φ q 具有似镜像的变化规律。压缩系数($\alpha_{0.1-0.2}$)为 0.19~0.65 MPa⁻¹,平均为0.36 MPa⁻¹,18 m以浅为 高值区,平均为0.45 MPa⁻¹;18~50 m为低值区,平均 为0.31 MPa⁻¹,但第二海相层略高为0.31~0.65 MPa⁻¹。压缩模量(Es_{0.1-0.2})为3~8.1 MPa,平均为 5.24 MPa;18 m以浅为低值区,平均为4.37 MPa; 18~50 m为高值区,平均为5.81 MPa,但第二海相层 略低,其值为3~5.4 MPa。

HC2 孔岩土黏聚力 Cq 为 4~39 kPa,平均为 25.7 kPa;内摩擦角 Φq 为 9.8~30.8°,平均为 16.4°;Cq在20 m以浅为高值区,20~25 m为低值 区,25~50 m值略高,变化幅度大;Φq和Cq具有似 镜像的变化规律。压缩系数 α_{0.1-0.2}为 0.22~0.62 MPa⁻¹,平均为 0.38 MPa⁻¹;压缩模量 Es_{0.1-0.2}为 3.4~ 7.6 MPa,平均为5.07 MPa;压缩系数17 m以浅为高 值区;17~50 m为低值区;压缩模量和压缩系数具镜 像变化规律。

HC1、HC2孔岩土黏聚力和压缩系数的值随深度 增加整体下降趋势,但黏聚力在40~45 m略有起 伏。内摩擦角和压缩模量的值随深度增加整体成上 升趋势,呈两端式,0~22 m(18 m)为低值区,22 m (18 m)~50 m为高值区。第一海相层的黏聚力和压 缩系数最大,其次为第二海相层和末次冰消期的泛 滥沉积,最小为盛冰期的硬粘土和末次冰消期初期 的沼泽,以及MIS4阶段的泛滥沉积。而内摩擦角和 压缩模量也在第一海相层呈现最小值。其压缩固结 引发地面沉降的潜力层依次为第一海相层、第二海 相层和末次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘土和沼泽, 以及MIS4阶段的泛滥沉积。

因在HC1、HC2孔中缺乏岩土先期固结压力的相 关实验数据,在此参考相邻钻孔XDK孔有关实验数据 来进行分析,实验数据见表3。数据表明在渤海湾北 岸50 m埋深范围内,地层岩土的自重应力大于其先 期固结压力,属于欠固结地层,也就是说土层在自重 应力下尚未完成固结,这种土层在同等应力条件下, 将会产生较大的压缩变形量,而其25.4~30.5 m以 浅的地层压密性更差,30.5 m以下地层压密性较好, 这也可以理解为浅部地层(第一海相层)具有更大的 压缩固结空间。 根据以上沉积物的物理力学性质综合分析可知,压缩固结引发地面沉降的潜力层依次为第一海相层、第二海相层和末次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘土和沼泽相沉积层,以及MIS4阶段的泛滥沉积。

5 沉积物固结压缩沉降估算

依据沉积物的物理力学性质,师长兴、高茂生分 别建立了干容重、空隙度和埋深之间的统计规律,估算 了黄河三角洲和下伏海相层自然固结的沉降量^[25,26]。 本次工作则将相似沉积环境的沉积物相对比,如第 一海相和第二海相层、末次冰消期泛滥沉积和MIS4 阶段的泛滥沉积。土体的压缩主要是由于孔隙中水

表2 渤海湾北岸HC1和HC2孔沉积物的物理力学参数

取样深 度(m)	含水量 ω(%)	质量密度 p (g/cm ³)	孔隙比e	黏聚力 C _q (kPa)	内摩擦角 φq(度)	压缩系数 α _{0.1-0.2} (1/MPa)	压缩模量 Es _{0.1-0.2} (MPa)
3.6	25.9	1.94	0.759	22.0	11.9	0.44	4.0
9.6	29	1.92	0.828	28.0	12.6	0.30	6.1
15.4	31.8	1.85	0.945	35.0	15.1	0.47	4.1
19.6	20.2	2.05	0.583	18.0	13.6	0.21	7.5
26.6	28.7	1.96	0.779	20.0	10.2	0.41	4.3
30.8	16.8	2.04	0.546	20.0	16.3	0.27	5.7
38.4	33.9	1.85	0.976	33.0	12.3	0.65	3.0
46.8	19.1	2.10	0.531	21.0	16.3	0.23	6.7
48.5	16.5	2.10	0.498	20.0	16.7	0.21	7.1
50	17.2	2.04	0.551	18.0	15.6	0.26	6.0
1.60	25.8	1.96	0.739	25.0	13.9	0.39	4.5
6.60	39.7	1.81	1.115	39.0	9.8	0.62	3.4
13.6	30.6	1.91	0.86	31.0	12.4	0.43	4.3
18.7	24.6	2.00	0.688	36.0	17.0	0.38	4.5
21.1	19.1	2.01	0.57	5.0	30.3	0.23	6.8
24.2	21.2	2.02	0.59	4.0	29.9	0.24	6.6
26.30	38.1	1.81	1.091	39.0	14.6	0.44	4.8
32.1	17.5	2.05	0.553	21.0	16.3	0.25	6.2
34.40	17.5	2.07	0.504	5.0	30.8	0.22	6.8
40.50	24.3	1.92	0.767	34.0	16.7	0.28	6.3
42.50	27.4	1.96	0.762	25.0	12.3	0.40	4.4

Table 2 Physical and mechanical parameters of HC1 and HC2 in the northern coast of Bohai bay

表3 XDK孔先期固结压力与自重压力参数

Table 3 Pre-consolidation pressure and self-weight stress parameters of XDK

深度(m)	先期固结压力P。(kPa)	自重应力P₀(kPa)	超固结比OCR	岩性
17.8	32.35	165.54	OCR=0.20 < 1	粉质粘土
25.4	63.09	261.62	OCR=0.24 < 1	粉质粘土
30.5	251.18	292.8	OCR=0.86 < 1	粉质粘土
38.6	398.1	428.46	OCR=0.93 < 1	粉质粘土
46.8	407.38	482.04	OCR=0.85 < 1	粉质粘土

分和气体被挤出,土粒相互移动靠拢,致使土的孔隙体积减小而引起,所以,土体的压缩主要表现在孔隙体积的变化。本文假设上部地层压缩固结到下部相似地层,以孔隙比为主要指标,计算需要压缩固结的程度,计算上部地层可能的固结沉降量。

第一海相层岩土的孔隙比统计值(e₁)为0.896, 第二海相层岩土的统计值(e₂)为0.787,由于第一海 相层与第二海相层相似的沉积环境和物质组成,在 此把e₂作为第一海相层地层压缩参考的目标值。压 缩固结造成体积变化所带来的地层厚度变化值 (Δh)计算公式如下:

$$\Delta h = h * (e_2 - e_1) \tag{1}$$

式中,h为目标地层的地层厚度。

第一海相层厚度为18.0 m,代入公式(1)计算可 得 Δ h=1.962 m,即第一海相层的压缩固结程度达到 第二海相层的固结程度时,其体积变化所带来的厚 度变化值为196.2 cm。

考虑到地层受压条件对地层岩土压缩的重要 性,在分析第一海相层固结速率的时候,计算公式 如下:

$$V = (m_1/m_2) * \Delta h/t$$
 (2)

式中,m₁为第一海相层等效上覆地层的单位重量;m₂为第二海相层等效上覆地层的单位重量,式中 只考虑自然沉积地层的影响,不包括人工建筑。

第二海相层上覆地层厚37.6 m,包括第一海相、 末次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘土和河床相沉积 层,其密度分别为1879、1979、1993、2005 kg/m³,厚度 分别为18.0、7.5、7.5和4.6 m,则单位面积荷载重量 为72 835 kg,第二海相层岩土密度为1940 kg/m³, 厚度为6.9 m,单位面积产生荷载重量为13 386 kg, 则第二海相层承受单位面积的等效载荷重量 m₂为 79 528 kg。第一海相层单位面积产生载荷重量为 33 822 kg,则其单位面积产生的等效载荷重量 m₁为 16 911 kg。以第二海相层沉积结束(24.4 ka)与第 一海相层沉积开始(8.8 ka)之间的时间差作为t,代 入公式(2),计算固结速率V=0.03 mm/a。

末次冰消期泛滥沉积层岩土的孔隙比为0.679, MIS4阶段的为0.527。末次冰消期泛滥沉积层厚度







1. 黏土; 2. 粉质黏土; 3. 粉土; 4. 粉砂; 5. 细砂; 6. 中砂; 7. 交错层理; 8. 水平层理; 9. 斜层理; 10. 透镜状层理11. 压扁状层理; 12. 波状层理; 13. 黏土夹粉砂纹层,水平层理; 14. 黏土夹粉砂纹层,交错层理; 15. 粉砂夹黏土纹层,水平层理; 16. 黏土与粉砂 互层; 17. 泥炭层; 18. 碳质碎屑; 19. 碳质斑点; 20. 钙质沉积; 21. 钙结核; 22. 铁锰质锈染及结核; 23. 生物潜穴; 24. 贝壳及碎片; 25. MIS分界线; 26. 沉积相分界线; MIS1阶段时代为0~11.7 ka; MIS2阶段时代为11.7~24.1 ka; MIS3阶段时代为 24.1~59.0 ka; MIS4阶段时代为59.0~73.9 ka

为7.5 m,代入公式(1),计算其厚度变化值为114 cm。MIS4阶段的泛滥沉积上覆地层厚44.5 m,包括 第一海相、末次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘土、河床 相沉积层和第二海相层,其密度分别为1879、1979、 1993、2005、1940 kg/m³,厚度分别为18、7.5、7.5、4.6 和6.9 m,则单位面积产生载荷重量为86 221 kg, MIS4阶段的泛滥沉积层密度为2 080 kg/m³,厚度为 6.5 m,单位面积产生荷载重量为13 520 kg,则该层 承受单位面积的等效载荷重量为92 981 kg。同理计 算末次冰消期沉积层承受的单位面积等效荷载重量为 41 243.3 kg。以MIS4阶段泛滥沉积结束(61.0 ka) 与末次冰消期泛滥沉积开始(11.7 ka)之间的时间差 作为t,代入公式(2),计算固结速率V=0.01 mm/a。

通过上述的统计估算可知,30 m以浅地层主要 包括的第一海相层和末次冰消期泛滥沉积层在只考 虑自然地层压缩的情况下,固结压缩量分别可达到 196.2 cm和114 cm,固结速率分别为0.03 mm/a和 0.01 mm/a。累积来看,30 m以浅地层的可固结压缩 量为310.2 cm,固结速率为0.04 mm/a。

现今研究区内地面沉降速率约为10 mm/a,最高 为40 mm/a^[27], 而30 m以浅地层作为主要的压缩固 结层,其自然压缩沉降速率远远小干地面沉降速 率。这可能有以下几个原因:1)第一海相层和末次 冰消期的泛滥沉积层作为主要的压缩固结沉降层, 其压缩固结沉降主要来自工程建设、浅部排水等人 类活动;2)现代海岸带浅层地下水位浅,土体处于饱 水状态,土体的渗透固结过程在自然状态下较为漫 长,但建设区的基坑排水会大大加快孔隙水的渗透, 促使孔隙水压力向有效压力的转移,所以浅部排水、 降水工程是上部地层固结沉降的主要原因;3)地面 沉降不仅来自浅部地层的固结压缩,还有来自深部 地层的固结压缩和地下水、油、气层的开采引起的沉 降,由于本文缺少第三海相层及以下地层的数据和 资料,没有考虑深部地层的固结压缩和地下水、油、 气层的开采影响,这也是估算值会小于实测的地面 沉降速率值的原因。



图3 HC2孔物理力学参数



1. 黏土; 2. 粉质黏土; 3. 粉土; 4. 粉砂; 5. 细砂; 6. 中砂; 7. 交错层理; 8. 水平层理; 9. 斜层理; 10. 透镜状层理11. 压扁状层理; 12. 波状层理; 13. 黏土夹粉砂纹层,水平层理; 14. 黏土夹粉砂纹层,交错层理; 15. 粉砂夹黏土纹层,水平层理; 16. 黏土与粉砂 互层; 17. 泥炭层; 18. 碳质碎屑; 19. 碳质斑点; 20. 钙质沉积; 21. 钙结核; 22. 铁锰质锈染及结核; 23. 生物潜穴; 24. 贝壳及碎片; 25. MIS 分界线; 26. 沉积相分界线; MIS1 阶段时代为 0~11.7 ka; MIS2 阶段时代为 11.7~24.1 ka; MIS3 阶段时代为 24.1~59.0 ka; MIS4 阶段时代为 59.0~73.9 ka

6 总结

HC1和HC2孔50m以浅地层包括第一海相层、末 次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘土、第二海相层和 MIS4阶段泛滥沉积,其地层层序反映了海平面变化 对沉积过程和沉积物类型的影响。

HC1、HC2孔含水率、孔隙比、黏聚力和压缩系数 等物理力学性质随深度增加整体上有下降趋势,第 一海相层的各项指数均较高,其次为第二海相层和 末次冰消期的泛滥沉积,最小的为盛冰期的硬粘土 和末次冰消期初期的沼泽,以及MIS4阶段的泛滥沉 积。压缩固结引发地面沉降的潜力依次为第一海相 层、第二海相层和末次冰消期泛滥沉积、盛冰期硬粘 土和沼泽,以及MIS4阶段的泛滥沉积。

对比分析第一海相和第二海相、末次冰消期泛 滥沉积和MIS4阶段泛滥沉积物的孔隙比和压缩系 数,假设第一海相层压缩固结到第二海相的压缩固 结程度,需要压缩固结196.2 cm,固结速率为0.03 mm/a;末次冰消期泛滥沉积压缩固结到MIS4阶段泛 滥沉积的压缩固结程度,则需要压缩固结114 cm,固 结速率为0.01 mm/a。自然固结速率远远小于现今 地面沉降的实测速率,说明30 m以浅地层作为现今 主要的压缩固结层,其自然条件下压缩固结带来的 地面沉降影响很小,地面沉降的主要诱因还是工程 建设、排水疏干和地下水、气、油开采等人类活动的 影响。

参考文献:

- [1]Huang Yu, Cheng Hualin. The impact of climate change on coastal geological disasters in southeastern China[J]. Natural Hzazrds, 2013, 1:377~390.
- [2]吴铁均, 崔小东, 牛修俊, 等. 天津市地面沉降研究及综合 治理[J]. 水文地质工程, 1998, 5:17-20.
- [3]许烨霜, 马磊, 沈水龙. 上海市城市化进程因其的地面沉 降因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1):578-582.
- [4]Comerci V, Capelletti S, Michetti A M, et al. Land subsidence and Late Glacial environmental evolution of the Comourban area (Northern Italy) [J]. Quaternary International, 2007, 173-174:67-86.
- [5]张宗祜. 第四纪地质研究在水文地质工程地质工作中的 意义. [J].海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(4):1-5.
- [6]郑志昌,陈俊仁,朱照宇.南海海底土体物理力学特征及 其地质环境初步研究[J].水文地质工程地质,2004,5: 50-53.
- [7]李树德,袁仁茂,吕红华,等.北京地区新近沉积土不同沉

积相的工程地质特性及其评价[J].北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(1):139-143.

- [8]李玉瑛, 毛凤军. 渤海南部油气开发区浅层工程地质特性 及其与沉积相的关系[J]. 海洋科学, 1998, 1:44-46.
- [9]Truong M. H., Nguyen V. L., Ta T. K. O., et al. Changes in late Pleistocene-Holocene sedimentary facies of the Mekong River Delta and the influence of sedimentary environment on geotechnical engineering properties[J]. Engineering Geology, 2011, 122:146-159
- [10]姜洪涛, 王富葆, 杨达源. 苏州市晚第四纪古地理与工程 地质条件研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1):82-86.
- [11]汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣.我国东部第四纪海侵地 层的初步研究[J]. 地质学报, 1981, 1:1~13.
- [12]李元芳,高善明,安凤桐.滦河三角洲地区第四纪海相地层 及其古地理意义的初步研究[J].海洋与湖沼, 1982, 13 (5):433~439.
- [13]Stanley D J, Warne A G, Dunbar J B. Eastern Mississippi delta: late Wisconsin unconformity, overlying transgressive facies, sea level and subsidence[J] *Engineering Geology*, 1996, 45: 359~381.
- [14]杨书遂, 盛立云. 渤海湾西岸滩海地区沉积相特征及其物理力学性质[J]. 水文地质工程地质, 2004, 3:93–95.
- [15]Yim W W S. Offshore Quaternary sediments and their engineering significance in Hong Kong[J]. *Engineering Geology*, 1994, 37: 31-50.
- [16]谭丽娟,田世澄.南堡凹陷第三纪构造特征及火山作用 [J].石油大学学报(自然科学版),2001,25(4):1-4.
- [17]河北省地质矿产局.河北省北京市天津市区域地质志 [M].北京:地质出版社,1989,590-616.
- [18]大港油田石油地质编写组.中国石油地质志(卷四):大港 油田分卷[M].北京:石油工业出版社,1993.
- [19]高善明.全新世滦河三角洲相和沉积模式[J]. 地理学报, 1981, 36(3):303~314.
- [20]高善明,李元芳,安凤桐,李凤新.滦河三角洲滨岸沙体的 形成和海岸线变迁[J].海洋学报, 1980, 2(4):102~114.
- [21]李从先,陈刚,王传广,张玉民.论滦河冲积扇—三角洲沉 积体系[J].石油学报,1984,5(4):27~36.
- [22]李从先, 陈刚, 王利. 滦河废弃三角洲和砂坝—泻湖沉积 体系[J].沉积学报, 1983, 1(2):60~72.
- [23] 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层 划分及地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85:1352–1367.
- [24]季荣耀,陆永军,左利钦.曹妃甸老龙沟潮汐通道拦门沙 演变机制[J].水科学进展,2011,22(5):645-652.
- [25]师长兴, 尤联元, 李炳元, 等. 黄河三角洲沉积物的自然 固结压实过程及其影响[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 175-181.
- [26]高茂生, 薛春汀, 叶思源, 等. 现代黄河三角洲沉积层压 实下沉的计算分析[J]. 海洋学报, 2010,32(5):34-40.
- [27]肖国强,韩冬梅,宋献方.环渤海湾典型地区地质灾害及 其监测预警系统构想[J].水文地质工程地质,2009,4: 121-125.

Physical and Mechanical Parameters of the Late Quaternary Sediments and Effect on Land Subsidence in the Northern Coast of Bohai Bay

QIN Ya-fei¹, XU Qin-mian¹, JIANG Hong-tao², FANG Cheng¹,

YUAN Gui-bang¹, YANG Ji-long¹,

(1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China;2. School of Geography and Ocean, Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

Abstracts: Based on the detail analysis of the sedimentology, chronology and physical and mechanical parameters of the Late Quaternary sediments, we find that above 50 m in the northern coast of the Bohai bay, there are 9 units from top to bottom, corresponding respectively to the first marine bed, littoral lacustrine facies, last deglaciation limnetic facies, last deglaciation swamp facies, last glacial maximum hard clay, channel facies. Land subsidence caused by the compression and consolidation of sediment under natural conditions is closely related to the physical and mechanical parameters such as water content, void ratio, cohesive force and compression factor. These indexes reach maximum in the first marine bed, followed by the second marine bed and the last deglaciation overflow sediments, the last glacial maximum hard clay and the last glaciation overflow sediments. Based on the void ratio and compression coefficient, two strata with similar sedimentary environment are contrastive analysis. Supposed that the first marine bed do compress to the second marine bed, the length of compression in the first marine bed will reach 196.2 cm. Similarly supposed that the last deglaciation overflow sediments do compress to the last glaciation overflow sediments, the length of compression in the first marine bed will reach 114 cm. The rate of natural compression of the layers above 30 m is 0.04 mm/a, much smaller than the present rate of land subsidence.

Key words: northern coast of the Bohai bay; Late Quaternary sediment; physical and mechanical parameter; land subsidence