辽河三角洲沉积物工程地质特征分析

姜建新[1], 丁喜桂[2, 3], 冯秀丽[1], 姜　波[1], 滕　珊[1], 田动会[1], 王晓明[1]

(1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 基于小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的钻孔资料, 分析了 4 条河流附近的沉积物组成以及工程地质特征。结果表明, 辽河三角洲地区沉积物为粉土、黏土和砂土为主, 在小凌河地区 14 m 以下地层出现了厚度达 16 m 的砾石层; 辽河三角洲小凌河和大凌河地区浅部地层有一层超过 1 m 的淤泥层, 工程性质较差, 除淤泥层外, 其他地层含水量一般不超过 30%, 以中低压缩性土为主; 辽河三角洲地区的承载力特征随着深度的增加而增大; 在桩径为 1 200 mm, 壁厚 24.0 mm 的钢管桩情况下, 辽河三角洲地区 30 m 深度处地层单桩极限承载力的最大值均可达到 9 000 kN, 但在淤泥层、粉质黏土和黏土层的承载力出现急剧减少的现象, 在工程建设中应根据实际情况选择合适的持力层。研究成果对该地区的陆地工程建设和防灾减灾具有重要的指导意义。

关键词: 辽河三角洲; 沉积物; 工程地质特征; 单桩极限承载力

中图分类号: P642.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)03-0001-10

DOI: 10.11759/hykx20170117005

辽河三角洲是我国四大河口三角洲之一, 位于辽宁省西南部辽河平原南端, 由辽河、大辽河、大凌河等冲积平原组成, 主要包括盘锦市、锦州市和营口的一部分。辽河三角洲地区区位优势独特, 油气资源丰富, 战略地位重要, 工程建设较多, 同时辽河三角洲地区存在众多的古河道[1], 有必要对辽河三角洲陆域沉积物特征及工程地质条件进行系统的调查与分析。近些年许多学者对辽河三角洲进行了调查和研究工作, 取得了大批有价值的成果, 何宝林[2]、鲍永恩[3]、宋云香[4]等对辽东湾浅海区的沉积特征和潮滩动态进行了研究; 符文侠等[5]对辽东湾滨下动力地貌特征进行了研究; 苏园园等[6]建立了辽东湾水体吸收系数的区域性半分析算法, 王智等[7]对辽东湾西部地区大型底栖动物群落结构与多样性进行了研究。但是这些成果主要集中于沉积物特征、沉积动力机制、环境演化以及生物多样性等方面, 对于辽河三角洲陆域沉积物的工程地质特征的研究相对较少。本文基于小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的钻孔资料, 分析 4 条河流附近的沉积物组成以及工程地质特征, 进而系统比较辽河三角洲陆域沉积物工程地质差异特征, 以期对该区域陆地工程的建设、油气资源的开发等提供基础资料和参考。

1　研究区概况与研究方法

辽河是辽宁省第一大河, 位于渤海辽东湾的东北部。辽河三角洲范围东起盖州市大清河口, 西至锦州市小凌河口, 地理位置为 121°25′~122°55′E, 40°40′~41°25′N, 总面积约 4 000 hm^2。辽河三角洲地处中纬度地带, 地跨中温带和暖温带, 属于半湿润季风性气候。年平均气温为 8.4℃, 风速和风向变化较小, 年平均风速为 4.3 m/s。辽东湾海区的主要灾害性天气为热带气旋与台风、寒潮和暴雨等。本区地貌类型为辽河下游冲积平原, 地势低洼平坦, 海拔 1.3~4.0 m, 坡降为 1/200000 到 1/25000, 河道稳定, 多有苇塘沼泽和潮间带滩涂[8]。本文选取分布于小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的工程地质钻孔资料进行分析(钻孔位置见图 1)。

研究所用样品为“辽河三角洲海岸带综合地质调查与监测”项目所获得的 20 口工程地质钻, 平均长度为 30 m, 该样品分布于辽东湾沿岸及小凌河、

收稿日期: 2017-01-17; 修回日期: 2017-04-08

基金项目: 中国地质调查局项目(GZH201200503)

[Foundation: China Geological Survey, No. GZH201200503]

作者简介: 姜建新(1992-), 男, 山东潍坊人, 在读硕士, 主要从事第四纪沉积与环境变迁研究工作, E-mail: 997087661@qq.com; 冯秀丽(1962-), 通信作者, 女, 教授, 主要从事海洋工程环境研究工作, E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

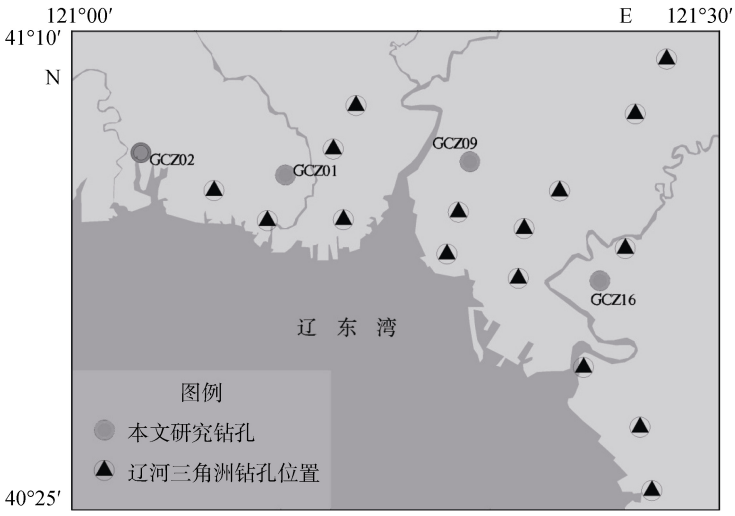

图 1　辽河三角洲钻孔位置图

Fig. 1　Drilling locations in Liaohe delta

大凌河、双台子河、大辽河附近。本文以河流分布为依据，选取位于小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的 GCZ02、GCZ01、GCZ09、GCZ16 钻孔进行分析，为方便描述研究区不同沉积单元的工程性质，主要选择以下指标分析：粒度特征包括各粒级的含量、粒径等；物理性质指标包括沉积物的天然含水量、液限、塑限、液性指数及塑性指数等；力学性质指标主要是沉积物的不固结不排水抗剪强度、压缩性指标等。其中粒度实验使用 Malvern3000 激光粒度仪在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成；土的工程性质指标在中国海洋大学土工试验室测定，液塑限指标用锥式液限仪测定，土的抗剪强度使用应变控制式直剪仪测定，土的压缩性使用压缩仪和静三轴测定。实验标准参考《土工实验规程》SL237-1999。参照《海洋调查规范：第 11 部分·海洋工程地质调查》对土样进行分类和定名。

2　结果

2.1　沉积物特征

本次研究钻孔厚度均为 30 m 左右，因此钻孔地层为全新世以来形成的地层，全新世以来辽河三角洲地区仅经历了盘山海侵[9]，本文主要通过岩性、粒度指标来分析辽河三角洲地区沉积物特征的差异，根据辽河三角洲地区 4 个钻孔的土工试验资料，本文对小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的沉积物及工程地质特征进行分析。

从沉积物组分图以及沉积物类型分层柱状图可以看出，该区域沉积物主要为粉土、黏土、粉砂-细砂-中砂和砾石，在 GCZ02 和 GCZ16 钻孔中出现了砾石。在 GCZ01 钻孔中，在中部和底部出现了两层砂质层，其余层位为粉土-粉质黏土-黏土，颜色为灰色-灰褐色-褐色；GCZ02 钻孔上部粒度较细，为粉土、粉质黏土、黏土和粉砂层，14 m 深度以下粒度较粗，出现了厚度达 16 m 的砾石层，颜色为褐色-灰褐色，该钻孔靠近西部丘陵地区，物源供应充足，砾石层中夹杂着两薄层粉质黏土层，颜色为黄褐色，为沉积过程中砾石物源供应不足而形成的；GCZ09 钻孔以细砂和粉砂为主，上部为粉土和粉质黏土，除表层土外，其余土层颜色均为灰色，沉积物类型以海相沉积为主；GCZ16 钻孔沉积物颜色以灰色为主，出现了层位较厚的粉质黏土层，上部出现了一薄层砾石层，砾石层的出现为东部丘陵地区物源供应所致。GCZ09 与 GCZ16 钻孔位于双台子河口地区，该地区位于盘山凹陷中部，因此两钻孔海相沉积物厚度较大。

研究区 4 个钻孔的沉积物类型差异较大，总体上具有自西向东变细的趋势，表明辽河三角洲地区物源供应差异较大，辽河三角洲小凌河和大凌河地区有来自丘陵山地充足的物源供应，沉积物以砾石和粉砂为主，中东部地区物源以细粒沉积物为主，主要为黏土、粉土和粉砂为主，大辽河地区上部地层出现了砾石层，该砾石层可能来自东部丘陵地区，表明辽河三角洲丘陵山地为辽河三角洲地区沉积物主要的物质来源。辽河三角洲沉积物颜色以灰色和

褐色为主，小凌河和大凌河地区 16 m 以下地层以褐色为主，且粒度较粗，以砾石和粉砂为主，说明该层位为河流相，随着海平面的逐渐升高，形成了灰色的粉土和黏土沉积；双台子河和大辽河地区沉积物均为灰色，该钻孔位于盘山凹陷中部，地势较低，最先接受海侵，该区域 30 m 以浅地层均为海相沉积。盘山海侵结束以后，在辽河三角洲上部形成了薄层的粉土与粉质黏土的陆相沉积。

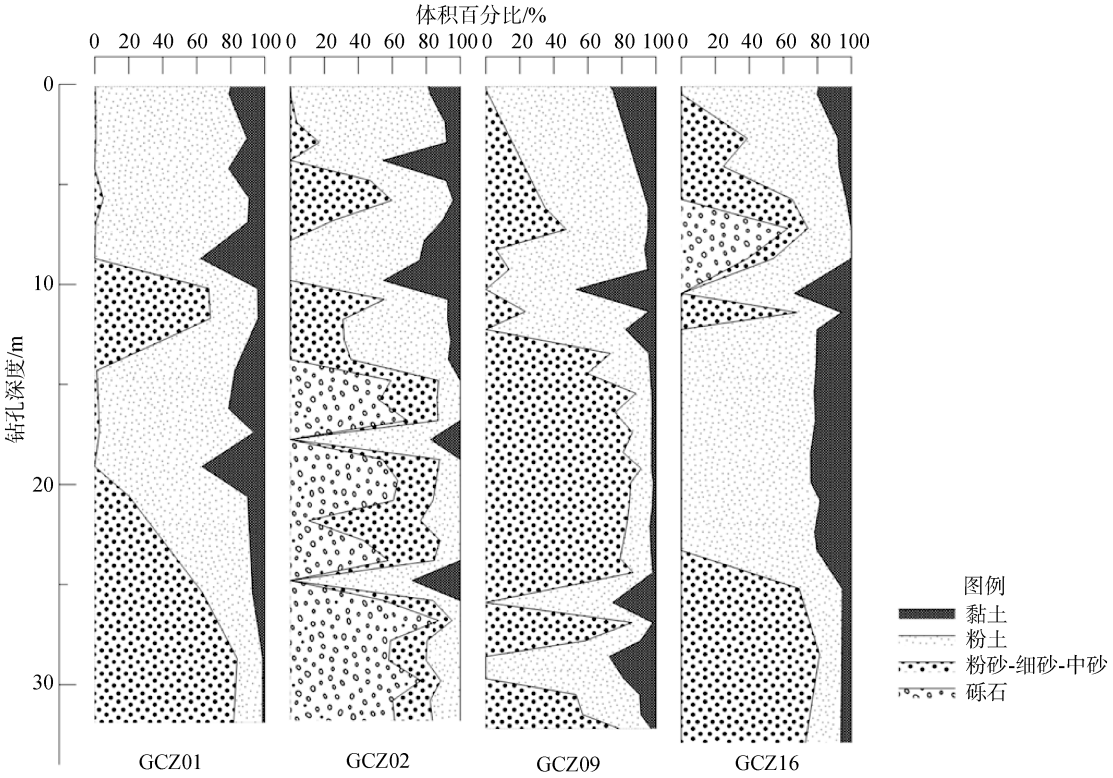

图 2　研究区钻孔沉积物组分图

Fig. 2　Drilling sediment composition in the study area

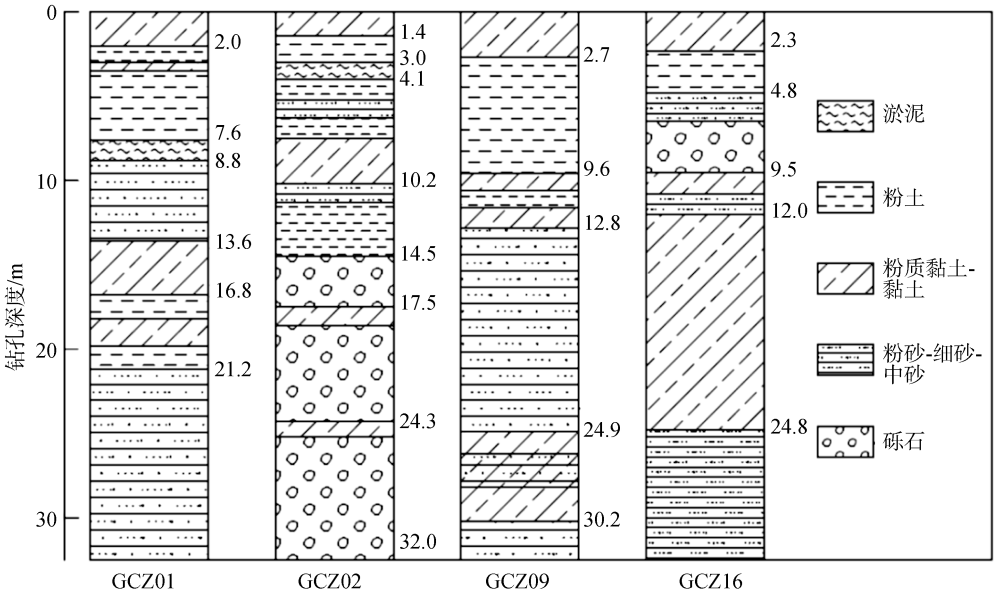

图 3　研究区钻孔沉积物类型分层柱状图

Fig. 3　Histogram of hierarchical drilling sediment type in the study area

2.2 工程地质特征

本区柱状样的岩性存在较大的变化，各个钻孔沉积物层位变化较大，为了研究各个钻孔的工程地质特征及辽河三角洲的工程地质特征的差异性，本文根据土的分类将 4 个钻孔沉积物进行分层，根据100个分段样品的物理力学性质测试结果，分土类统计物理力学性质指标，给出各钻孔及各类土的指标范围及平均值(表 1 至表 8)，以便综合评价其工程地质特征。

表 1 GCZ01 的各类土的基本物理性质
Tab. 1 Physical properties of GCZ01

土类	深度/m	含水率/%		液限/%		塑限/%		液性指数	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	21.8~22.6	22.2	29.4~30.6	30.0	17.0~17.8	17.4	0.38~0.39	0.39
粉土-粉质黏土	0.6~7.6	21.2~29.4	25.0	27.6~29.7	29.0	16.5~22.1	20.0	0.15~1.00	0.47
淤泥质黏土	7.6~8.8	45.6	45.6	42.8	42.8	22.2	22.2	1.14	1.14
粉砂	8.8~13.0	19.4	19.4	—	—	—	—	—	—
粉土-黏质粉土-黏土	13.0~23.0	19.5~28.0	22.9	24.6~41.2	29.2	13.8~21.0	17.3	0.33~0.85	0.49
粉砂-中砂	23.0~32.0	—	—	—	—	—	—	—	—

注：—表示该层指标不存在或未测量，下同

表 2 GCZ01 的各类土的土力学性质
Tab. 2 Mechanical properties of GCZ01

土类	深度/m	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)		压缩系数/MPa^{-1}	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	—	—	—	—	—	—
粉土-粉质黏土	0.6~7.6	14.0~19.0	16.0	22.5~29.8	27.1	0.083~0.386	0.190
淤泥质黏土	7.6~8.8	10.0	10.0	1.0	1.0	0.902	0.902
粉砂	8.8~13.0	5.0	5.0	35.5	35.5	0.124	0.124
粉土-黏质粉土-黏土	13.0~23.0	12.0~32.0	20.0	15.0~29.0	22.7	0.167~0.367	0.274
粉砂-中砂	23.0~32.0	—	—	—	—	—	—

表 3 GCZ02 的各类土的基本物理性质
Tab. 3 Physical properties of GCZ02

土类	深度/m	含水率/%		液限/%		塑限/%		液性指数	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	17.4~21.8	19.6	27.0~28.7	27.9	15.8~16.9	16.4	0.14~0.42	0.28
粉土	0.6~3.0	21.6~23.2	22.4	28.0~28.5	28.3	19.1~20.4	19.8	0.28~0.35	0.32
淤泥	3.0~4.1	53.9	53.9	50	50	25.7	25.7	1.16	1.16
粉土	4.1~5.6	20.2	20.2	27.4	27.4	20.1	20.1	0.01	0.01
粉砂	5.6~6.5	—	—	—	—	—	—	—	—
粉土-黏质粉土-黏土	6.5~10.5	24.3~47.8	34.7	28.5~49.7	35.5	15.6~25.6	20.5	0.42~1.37	0.92
粉砂	10.5~11.2	—	—	—	—	—	—	—	—
粉土	11.2~14.5	20.6~28.8	24.9	26.8~28.8	27.7	18.4~20.2	19.2	0.26~1.14	0.67
圆砾	14.5~17.4	—	—	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	17.4~18.0	29.3	29.3	26.2	26.2	15.1	15.1	1.28	1.28
中砂-砾砂-圆砾	18.0~24.5	—	—	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	24.5~25.0	29.2	29.2	36.4	36.4	20.2	20.2	0.56	0.56
圆砾	25.0~31.9	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4　GCZ02 的各类土的土力学性质
Tab. 4　Mechanical properties of GCZ02

土类	深度/m	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)		压缩系数/MPa^{-1}	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	—	—	—	—	—	—
粉土	0.6~3.0	—	—	—	—	0.149	0.149
淤泥	3.0~4.1	9.0	9.0	16.5	16.5	—	—
粉土	4.1~5.6	—	—	—	—	0.093	0.093
粉砂	5.6~6.5	—	—	—	—	—	—
粉土-黏质粉土-黏土	6.5~10.5	9.0~11.0	10.0	4.0~17.0	10.5	0.464~1.228	0.749
粉砂	10.5~11.2	—	—	—	—	—	—
粉土	11.2~14.5	—	—	—	—	—	—
圆砾	14.5~17.4	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	17.4~18.0	—	—	—	—	—	—
中砂-砾砂-圆砾	18.0~24.5	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	24.5~25.0	—	—	—	—	0.232	0.232
圆砾	25.0~31.9	—	—	—	—	—	—

表 5　GCZ09 的物理力学性质
Tab. 5　Physical properties of GCZ09

土类	深度/m	含水率/%		液限/%		塑限/%		液性指数	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.4	22.8~24.0	23.4	31.8~34.6	33.2	17.0~19.1	18.1	0.24~0.47	0.36
粉土-粉质黏土-黏土	0.4~12.8	23.0~38.9	26.0	22.2~50.9	31.0	13.1~26.0	19.7	0.29~1.29	0.55
粉砂-细砂	12.8~25.0	14.9~21.2	18.7	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	25.0~26.1	27.6	27.6	30.8	30.8	16.1	16.1	0.78	0.78
粉砂-细砂	26.1~28.0	—	—	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	28.0~29.7	26.4~27.7	27.1	27.2~36.0	31.6	15.4~20.2	17.8	0.39~1.04	0.72

表 6　GCZ09 的各类土的土力学性质
Tab. 6　Mechanical properties of GCZ09

土类	深度/m	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)		压缩系数/MPa^{-1}	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.4	—	—	—	—	—	—
粉土-粉质黏土-黏土	0.4~12.8	11.0~28.0	16.4	5.0~30.0	22.9	0.099~0.5820.209	0.209
粉砂-细砂	12.8~25.0	3.0~5.0	4.0	33.5~37.5	36.0	0.089~0.151	0.109
粉质黏土	25.0~26.1	22.0	22.0	15.5	15.5	0.294	0.294
粉砂-细砂	26.1~28.0	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	28.0~29.7	22.0~28.0	25.0	20.0~21.0	20.5	0.340~0.408	0.374

GCZ01 钻孔主要划分为粉质黏土、粉土-粉质黏土、淤泥质黏土、粉砂、粉土-黏质粉土-黏土、粉砂-中砂 6 个工程地质层，本钻孔 7.6~8.8 m 深度处存在淤泥质黏土层，该淤泥质黏土层含水量最高，为 45.6%，其余层位的含水量不超过 30%，位于 19.4%~28.0%。含水量越高，表明土中的黏粒含量越高，深度愈大，则土的含水量也越低。

决定黏性土工程性状的主要因素是它的软硬程度，评价指标主要包括液限(W_L)、塑限(W_P)、塑性指数(I_P)和液性指数(I_L)，砂土类不具有可塑性。本钻孔粉土以及黏土层的液限介于 29.0%~30.0%，塑限介于 17.3%~20.0%，液性指数介于 0.39~0.49。淤泥质黏土层的液限、塑限和液性指数分别为 42.8%、22.2%、1.14。从液塑限上可以看出，本钻孔淤泥质

黏土层的为流塑状态的土，工程性质较差，其余层位可塑性相差不大，为可塑状态的土。

表 7　GCZ16 的物理力学性质
Tab. 7　Physical properties of GCZ16

土类	深度/m	含水率/%		液限/%		塑限/%		液性指数	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	23.7~26.7	25.2	24.6~24.8	24.7	12.4~12.6	12.5	0.91~1.18	1.05
粉土	0.6~5.0	23.7~24.2	24.0	27.3~28.4	27.9	20.0~20.6	20.3	0.46~0.51	0.49
粉砂-砾砂-圆砾	5.0~9.5	—	—	—	—	—	—	—	—
黏土	9.5~11.0	34.0	34.0	38.9	38.9	20.2	20.2	0.74	0.74
粉砂	11.0~11.8	—	—	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	11.8~24.5	18.9~30.1	24.5	28.2~34.3	30.4	15.1~21.2	17.4	0.18~0.96	0.55
粉砂	24.5~33.0	—	—	—	—	—	—	—	—

表 8　GCZ16 的各类土的土力学性质
Tab. 8　Mechanical properties of GCZ16

土类	深度/m	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)		压缩系数/MPa^{-1}	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均
粉质黏土	0~0.6	—	—	—	—	—	—
粉土	0.6~5.0	—	—	—	—	—	—
粉砂-砾砂-圆砾	5.0~9.5	—	—	—	—	—	—
黏土	9.5~11.0	21.0	21.0	3.0	3.0	0.650	0.650
粉砂	11.0~11.8	—	—	—	—	—	—
粉质黏土	11.8~24.5	13.0~19.0	16.5	10.0~23.5	17.9	0.262~0.374	0.321
粉砂	24.5~33.0	—	—	—	—	—	—

通过室内剪切和压缩实验，获得各层土的抗剪强度和压缩性指标。本区粉土-粉质黏土、淤泥质黏土、粉砂、粉土-黏质粉土-黏土内聚力的平均值为16.0、10.0、5.0、20.0 kPa，内摩擦角的平均值为27.1°、1.0°、35.5°、22.7°，压缩系数的平均值为0.190、0.902、0.124、0.274 MPa^{-1}。从力学性质可以看出，该钻孔淤泥质黏土内聚力和内摩擦角较小，表明其抗剪强度低，压缩系数较大，为高压缩性性土，是由于含水量较高的缘故，其余层位的力学性质指标相差不大，以低压缩性土为主，抗剪强度较大。

GCZ02 钻孔主要划分为粉质黏土、粉土、淤泥、粉土、粉砂、粉土-黏质粉土-黏土、粉砂、粉土、圆砾、粉质黏土、中砂-砂砾-圆砾、粉质黏土、圆砾等13 个工程地质层。本钻孔 3.0~4.1m 深度处也出现了一层淤泥层，该淤泥层的物理力学性质指标与GCZ01 钻孔的淤泥质黏土层的物理力学性质指标相差不大，表明两层位的力学性质相近。粉土层和黏土层含水率较低，位于19.6%~34.7%；除淤泥质黏土液性指数为1.16外，本钻孔17. m深度处出现了液性指数为 1.28 的粉质黏土层，表明该层土处于流塑状态，工程性质较差。本钻孔压缩性自上向下为 0.149、0.093、0.749、0.232 MPa^{-1}，表明该钻孔主要为低压缩性土，并在 6~10 m 的深度范围内出现了高压缩性土层。本钻孔 14 m 以下地层出现了大量的砾石层，该砾石层经历了长时间的压缩与固结，工程性质较好。

GCZ09 钻孔主要划分为粉质黏土、粉土-黏质粉土-黏土、粉砂-细砂、粉质黏土、粉砂-细砂、粉质黏土等 6 个工程地质层。本钻孔各层物理力学性质指标较为接近，含水率平均值均不超过 30%，介于18.7%~27.6%；本钻孔各层液限、塑限、液性指数的平均值位于 30.8%~33.2%、16.1%~19.7%、0.36~0.78，本钻孔各层内摩擦角较大，位于 15.5°~36.0°，压缩系数位于 0.151~0.374 MPa^{-1}，为中低压缩性土。

GCZ16 钻孔主要划分为粉质黏土、粉土、粉砂-砾砂-圆砾、黏土、粉砂、粉质黏土、粉砂等 7 个工程地质层。本钻孔各层物理力学性质指标也较为接近，含水率平均值均介于24.0%~34.0%；本钻孔各层液限、塑限、液性指数的平均值位于 24.7%~ 38.9%、12.5%~20.3%、0.49~0.7，本钻孔各层压缩系数位于

0.321~0.650 MPa^{-1}，为中高压缩性土。

土的压缩系数越大，表明上部建筑物更容易发生沉降，内聚力和内摩擦角越大，则土体对外载荷所产生的剪应力的抵抗力越大。从 4 个钻孔的物理力学性质表中可以看出，GCZ01、GCZ02 钻孔各出现了一层淤泥层，该淤泥层的含水率高，孔隙比大，内聚力和内摩擦角较小，压缩系数较大，为流塑状态的土，该淤泥层的工程性质较差，不适宜作为工程建设的持力层。GCZ01、GCZ02 钻孔的其他层位以及 GCZ09、GCZ16 钻孔的各个层位含水率大部分都不超过 30%，孔隙比相差不大，以中低压缩性土为主，在 GCZ02 钻孔中淤泥层外的层位中出现了一层为流塑状态的粉质黏土层，GCZ02 和 GCZ16 钻孔中出现了高压缩性的黏土层。

2.3 地基承载力指标

为了评价辽河三角洲地区的工程地质特征，分析辽河三角洲地区地基承载力的纵向变化以及差异，本文根据桩基进行地基承载力分析，选取桩径为 1 200 mm，壁厚 24.0 mm 的钢管桩进行桩基分析，根据《海上平台入级规范》对 GCZ01 钻孔各土层在不同插桩深度下的单桩极限承载力进行计算分析。

(1) 计算公式选取

根据《海上平台入级规范》中规定：受压桩的极限承载力 Q_d 可用下式计算：

$$Q_d=Q_f+Q_p=\lambda_s\Sigma f_i A_{si}+\lambda_p q A_p$$

式中，Q_f—桩侧摩阻力，kN；Q_p—总的桩端阻力(应不大于土地承载力)，kN；f_i—第 i 层土的单位面积侧摩阻力，kPa；A_{si}—第 i 层中土的桩侧面积，m^2；q—单位面积桩端阻力，kPa；A_p—桩端面积，m^2；λ_p、λ_s—桩端闭塞效应系数和侧阻挤土效应系数。

(2) 地基承载力分析

通过上述公式计算各个钻孔不同插桩深度下的单桩极限承载力结果见图 4 所示，从图中可以看出，在桩径为 1 200 mm，壁厚 24.0 mm 的钢管桩的条件下，4 个钻孔的单桩极限承载力的最大值均超过了 9 000 kN(因 GCZ02 钻孔 14 m 地层以下为砾石层，上述公式并不适用于砾石层的计算，但是砾石层的单桩极限承载力的值比其它钻孔同深度处更高)，4 个钻孔的单桩极限承载力随着深度的增加而增大，但是均出现了单桩极限承载力急剧减少的现象，根据地层划分发现，单桩极限承载力出现急剧减少的地层均为淤泥层、粉质黏土层和黏土层，可见黏土层的工程性质较差，单桩极限承载力值也较低。

4 个钻孔的单桩极限承载力随深度变化图表明，小凌河、大凌河、双台子河、大辽河地区的工程地质特征存在差异性，小凌河、大凌河和双台子河地区浅部地层地基承载力较小，10 m 以上地层均不超过 2 000 kN，大辽河地区在 9 m 附近的地层地基承载力可达到 3 000 kN，小凌河和大凌河地区 10~13 m 深度范围内是一个较好的工程持力层，地基承载力可超过 5 000 kN，双台子河地区 13~28 m 范围内是一个良好的工程持力层，地基承载力值可达到 8 000 kN，大辽河地区 13~24 m 范围内承载力值较小，不超过 2 000 kN，4 个地区 30 m 附近承载力均较大，因此在工程建设过程中，要根据实际情况，选择合适的持力层。

3 讨论与分析

从沉积物的物理力学性质指标以及地基承载力指标可以看出，辽河三角洲地区的工程性质特征存在较大的差异性。小凌河和大凌河地区的浅部地层存在一层厚度超过 1 m 的淤泥层，造成了小凌河和大凌河地区该地层含水率较大，压缩系数较小，地基承载力值较低，工程性质较差，而双台子河和大辽河地区同深度地层处工程性质较好；除淤泥层外，本地区其他地层的含水率一般不超过 30%。从压缩性上可以看出，本地区地层以中低压缩性土为主，说明本地区地层经历了缓慢的沉积，沉积物固结充分；除淤泥层为高压缩性土外，小凌河地区和大辽河地区 10 m 深度处均出现了一层高压缩性土的黏土层，表明本层在沉积时，沉积速度较快，其相应的单桩极限承载力也较低，以该层作为建筑持力层容易引起建筑物较大的沉降。4 个钻孔的单桩极限承载力均随着深度的增加而增加，30 m 深度处单桩极限承载力值均超过了 9 000 kN，小凌河和大凌河地区的钻孔因为淤泥层的出现在浅部地层出现了地基承载力的急剧减少，各个地层的地基承载力在随着深度增加的过程中，均出现了部分层为减少的现象，根据沉积物组成可以发现，单桩极限承载力值较小的地层均为黏土层。

沉积物的物理力学性质指标以及地基承载力指标表明，造成辽河三角洲地区物理力学性质以及地基承载力差异的原因是沉积物类型的不同。从工程性质指标以及沉积物类型的分布可以看出，砂性土的工程性质相对较好，其单桩极限承载力较大，黏性土的工

程性质较差，其单桩极限承载力也较小，因辽河三角洲地区土的类型对土的工程性质具有重要影响。

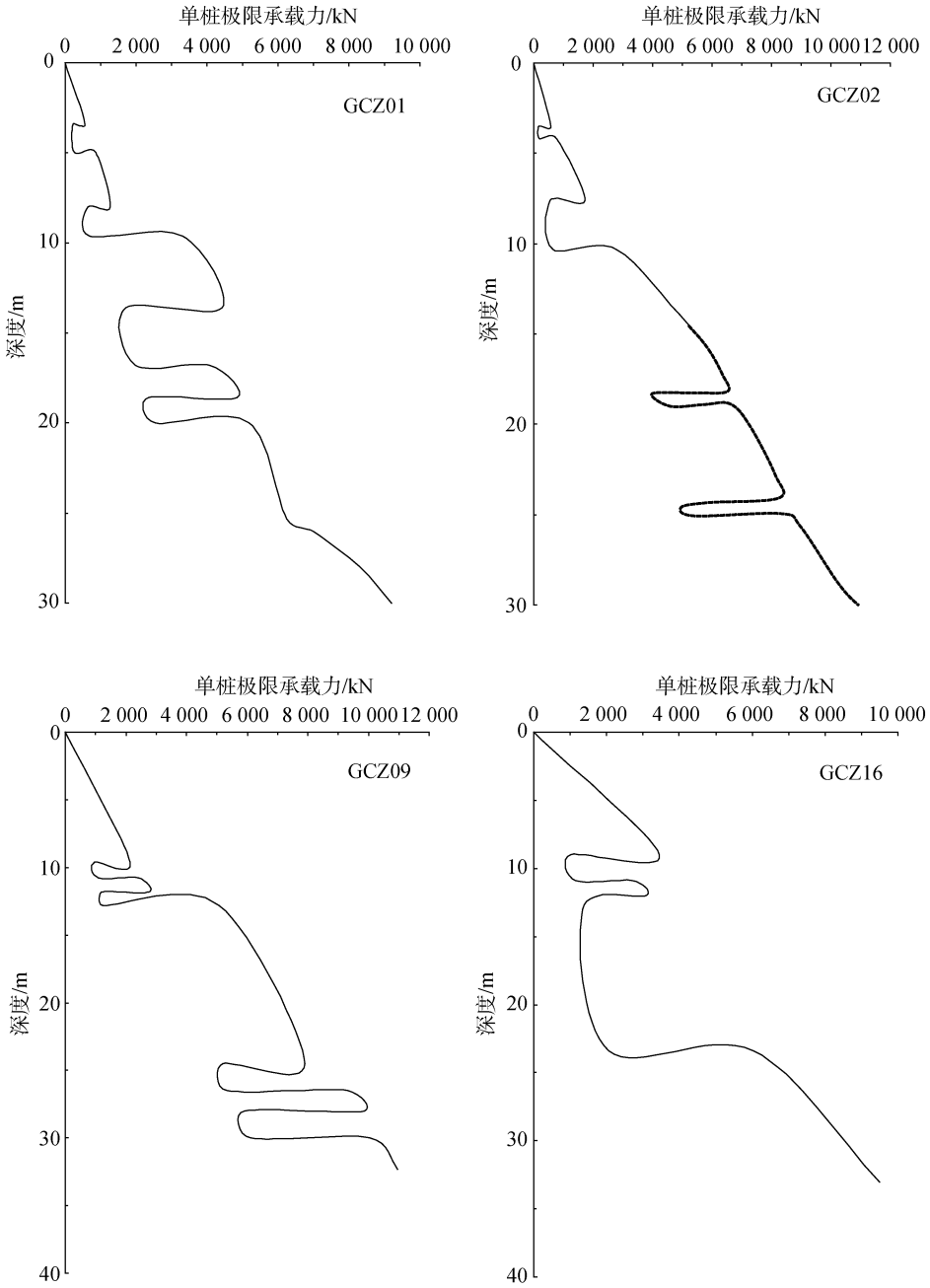

图 4　钻孔轴向单桩极限承载力随深度变化

Fig. 4　Ultimate bearing capacity of a single pile with drilling depth variation

4　结论

本文基于小凌河、大凌河、双台子河、大辽河附近的钻孔资料，通过分析 4 条河流附近的沉积物组成以及工程地质特征，结果表明:

1) 辽河三角洲地区沉积物类型复杂，主要有黏土、淤泥质黏土、淤泥、粉质黏土、粉土、粉砂、细砂、中砂、砾砂、圆砾等，以粉土、黏土和砂土为主，在小凌河地区 14 m 以下深度处出现了厚度达 16 m 的砾石层。辽河三角洲地区沉积物粒度特征具有自西向东变细的趋势，双台子河和大辽河地区位于盘山凹陷中部，30 m 以浅地层均为海相沉积层。

2) 辽河三角洲地区物理力学性质特征整体较好，含水量大部分不超过 30%，以中低压缩性土为主；

小凌河和大凌河地区钻孔均有一层厚度不足 1 m 的淤泥层，而大辽河和双台子河地区的钻孔没有出现淤泥层，表明辽河三角洲西部地区存在一层淤泥层沉积，淤泥层的存在导致了工程性质的差异，在辽河三角洲西部地区进行工程建设的过程中要充分考虑淤泥层的影响。

3) 单桩极限承载力的计算结果表明，该区域单桩极限承载力值在随着深度增加而不断增大，在 30 m 地层处最大值均可达到 9 000 kN，但是淤泥层、粉质黏土层、黏土层的单桩极限承载力值会出现急剧减少的现象，在工程建设中应该结合实际情况，选择合理的持力层，避开淤泥层、粉质黏土层、黏土层。

参考文献:

[1] 林美华. 大凌河—辽河海底谷系的研究[J]. 海洋科学, 1983, 2: 18-21.
Lin Meihua. A preliminary study on submarine valley system Daling-Liaohe[J]. Marine Sciences, 1983, 2: 18-21.

[2] 何宝林, 刘国贤. 辽东湾北部浅海区现代沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 7-15.
He Baolin, Liu Guoxian. Modern sedimentation features of north shallow region of the Liaodong Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(2): 7-15.

[3] 鲍永恩, 黄水光. 辽河口海口沉积特征及潮滩动态预测[J]. 沉积学报, 1993, 11(2): 108-115.
Bao Yong'en, Huang Shuiguang. Sedimentary features of Liaohe Estuary and the evolution of dynamics of the tidal bank[J]. Acta Sedimentologica Sincia, 1993, 11(2): 108-115.

[4] 宋云香, 战秀文, 王玉广. 辽东湾北部河口区现代沉积特征[J]. 海洋学报, 1997, 19(5): 145-149.
Song Yunxiang, Zhan Xiuwen, Wang Yuguang. Modern sedimentation features of north estuary region of the Liaodong bay[J]. Acta Oceanologica Sincia, 1997, 19(5): 145-149.

[5] 符文侠, 李光天, 何宝林, 等. 辽东湾潮滩及滨下动力地貌特征[J]. 海洋学报, 1993, 15(1): 71-83.
Fu Wenxia, Li Guangtian, He Baolin, et al. Dynamic geomorphology of tidal flat and waterfront of the Liaodong Bay[J]. Acta Oceanologica Sincia, 1993, 15(1): 71-83.

[6] 苏园园, 丘仲锋, 张艳萍. 辽东湾水体吸收系数区域性半分析反演算法[J]. 海洋科学, 2015, 39(4): 73-82.
Su Yuanyuan, Qiu Zhongfeng, Zhang Yanping. A regional semi-analytical algorithm to retrieve absorption coefficients in the Liaodong Bay[J]. Marine Sciences, 2015, 39(04): 73-82.

[7] 王智, 曲方圆, 隋吉星, 等. 夏季辽东湾西部海域大型底栖动物群落结构与多样性[J]. 海洋科学, 2016, 40(1): 40-47.
Wang Zhi, Qu Fangyuan, Sui Jixing, et al. Community structure and diversity of macrobenthos in the western waters of Liaodong Bay during summer[J]. Marine Sciences, 2016, 40(1): 40-47.

[8] 陈则实. 中国海湾志(第十四分册: 重要河口)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 432-450.
Chen Zeshi. Gulf of China (Important estuarine)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 432-450.

[9] 袁红明. 辽河三角洲 ZK2 孔晚更新世以来的沉积记录及全新世海侵期古气候研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
Yuan Hongming. The sedimentary records of Hole ZK2 in Liaohe River Delta since late Pleistocene and the paleoclimate during Holocene transgression[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2015.

Analysis of the Liaohe Delta sediment engineering geological characteristics in the Liaohe River

JIANG Jian-xin[1], DING Xi-gui[2, 3], FENG Xiu-li[1], JIANG Bo[1], TENG Shan[1], TIAN Dong-hui[1], WANG Xiao-ming[1]

(1.Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 17, 2017
Key words: the Liaohe Delta; sediment; engineering geological characteristics; ultimate bearing capacity of single pile

Abstract: In this paper, the sediment components and engineering geological characteristics around the Xiaolinghe River, the Dalinghe River, the Shuangtaizihe River, and the Daliaohe River are analyzed. The results show that silt, clay, and sand are the main sediments in the Liaohe River Delta area, and there is a 16-m-thick gravel layer 14 m below the strata of the Xiaolinghe River region. The Xiaolinghe River and the Dalinghe River areas each have a silt layer >1 m thick in their shallow strata, as well as poor engineering properties. Excluding the silt layer, the water contents of the other layers are generally not >30%, mainly in the low and medium compressible soil. Subgrade bearing capacity in the Liaohe River Delta increases with depth when the pile diameter and wall thickness are 1 200 mm and 24.0 mm, respectively. The maximum ultimate bearing capacity of a pile at 30 m depth can reach 9 000 kN, but the bearing capacities in the silt layer, silty clay, and clay layers are sharply reduced, so the appropriate bearing layer according to the actual situation should be selected. The research results are highly significant in guiding land construction and disaster prevention and mitigation.

(本文编辑：刘珊珊)