

渤海西部海底沉积物土工学性质的研究*

秦蕴珊 徐善民 李凡 赵士金

(中国科学院海洋研究所)

近廿年来,随着海底石油开发事业的迅速发展,为解决海上钻探及钻井平台的稳定性,输油管道和海底电缆的铺设以及某些军事设施和生产建设中提出的许多实际问题,海底沉积物的力学与土工学性质的研究也有了迅速的发展。同时,通过沉积物的力学和土工学性质的研究,特别是它们在沉积地层中各种变化的详细测定,有助于研究和认识沉积-成岩作用的某些机制问题,所以,海底沉积物的力学和土工学性质的研究,不仅在工程上有重要的现实意义,而且对发展沉积学的基础理论也有不容忽视的价值。

1966年,我所与大港油田(原石油部641厂)等兄弟单位共同协作,对渤海西部海底沉积物的土工学性质及工程地质条件,进行了较为详细的调查研究。

海上工作期间,使用我所调查船“金星”轮,用单船抛四个锚以固定船位,使船体左右摆动的位移最大不超过1m,用工程钻钻取原状土,所取岩芯基本未受扰动。室内分析主要根据水电部出版的《土工实验操作规程》进行。工作区水深为15—29m,共15个钻孔(其中2号钻孔重覆取样),各钻孔的具体位置与进尺分别示于图1和表1。

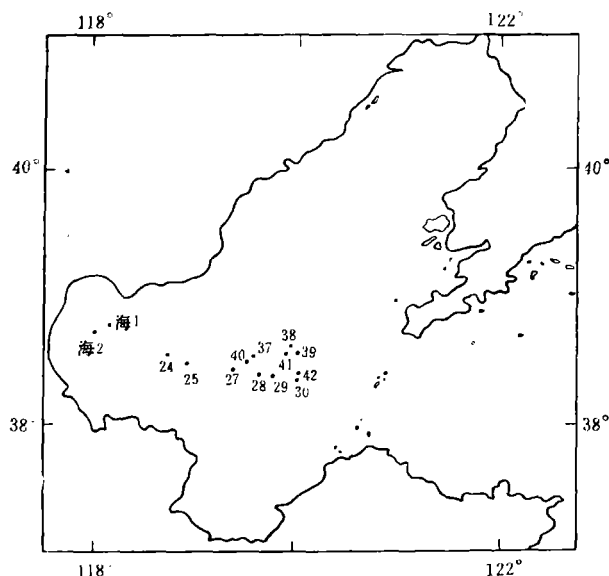


图1 钻孔位置图

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第858号。

参加室内分析的还有栾作峰、李永植、徐文强、杨惠兰等同志,图件由李清、蒋孟荣、严理同志绘制,特此致谢。

收稿日期:1981年12月26日。

表 1 各钻孔取样深度表

钻 孔 号	钻 孔 水 深 (m)	岩 芯 长 度 (m)	见 砂 层 深 度 (m)
24	21.5	18.0	11.4
25	23.0	15.3	5.5
27	25.0	17.5	13.5
28	26.0	12.2	11.6
29	27.0	16.5	9.3
30	27.0	20.0	4.4
37	29.0	11.0	6.0
38	27.0	14.0	7.3
39	27.0	17.5	16.3
40	27.0	17.4	11.0
41	27.5	17.5	9.7
42	27.0	17.1	11.0
海-1	15.0	16.7	10.7
海-2	15.0	15.8	10.7

1. 岩芯沉积物类型及其分布

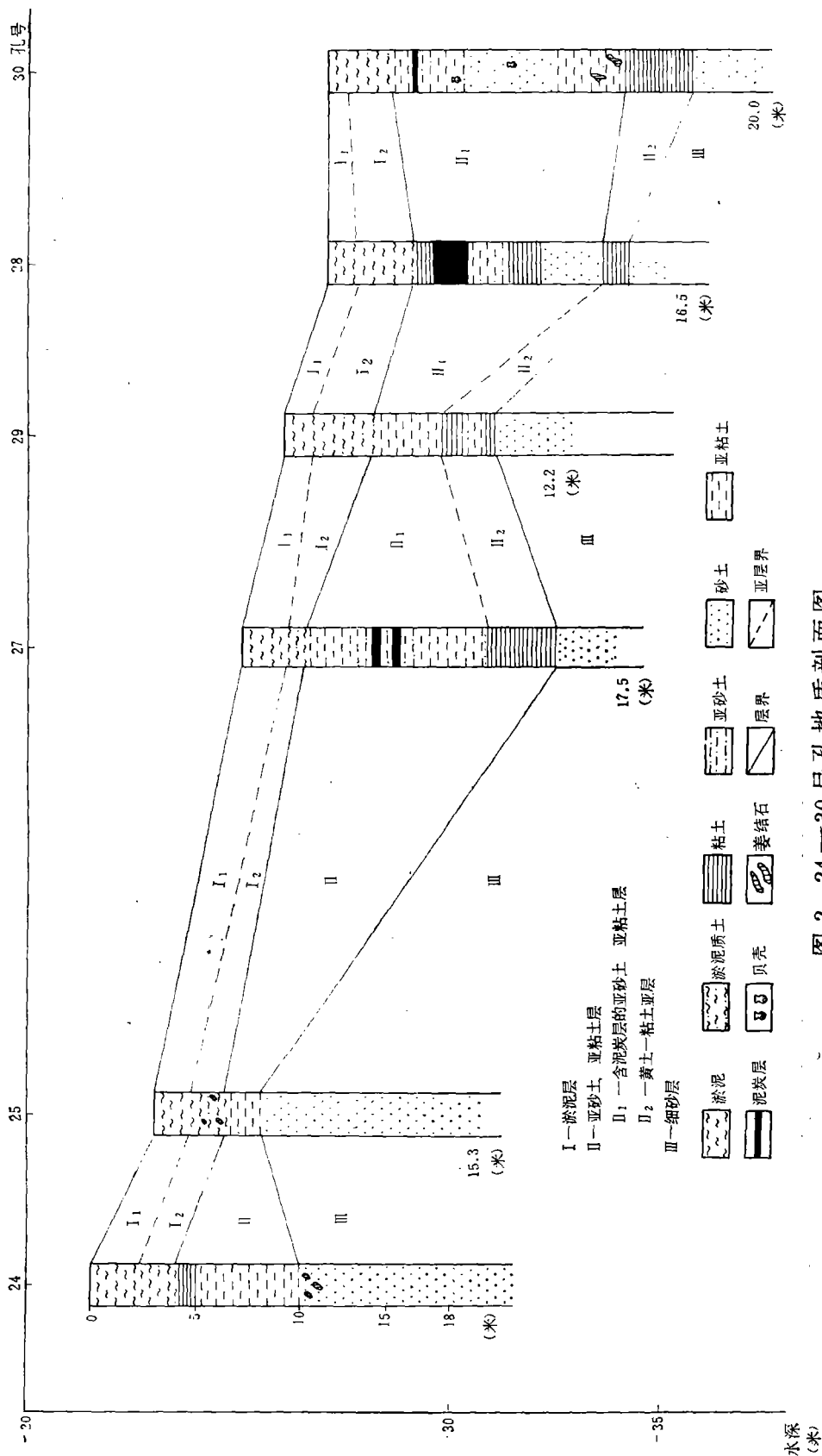
本文中沉积物分类是按工程上常用的以塑性指数为基础的分类方法,其指数 $w_n > 17$ 称粘土; $w_n = 7-17$ 称亚粘土; $w_n = 1-7$ 称亚砂土; $w_n < 1$ 称砂土。此外,根据现代海洋沉积物长期在海水作用下的特点,我们又将含水量饱和及过饱和并且大于液限,孔隙比 > 1 ,灵敏度高,呈半流动状态的那一部分粘土称为淤泥。

上述各类沉积物在岩芯中的垂向变化各不相同,从工程的角度上看,大致可分为三层(图 2),上部为淤泥层(或称软土层),中部为粘土-亚粘土-亚砂土互层,下部为砂层。其厚度及其出现的深度,随钻孔位置的不同而异。图 2 绘出了自渤海湾口中部向东延伸的沉积剖面。从图中可知,底部砂层出现的最小深度只有 5m 左右(位于渤海湾口的 25 号钻孔),最大深度达 17m(位于渤海中部的 30 号钻孔)。从表 1 列出的底部砂层出现深度可以看出,其致密砂层的埋藏深度一般不超过 12m。

2. 岩芯中沉积物的物理性质及其指标

由于沉积物中固相、液相及气相之间比例的不同,表现出其物理性质及指标亦各异。沉积物的主要物理性质包括比重、容重、含水量、孔隙比、塑性指数、透水性以及粘性土的稠度、粘着性等。测量结果表明,现代海洋沉积物物理性质一般具有含水量高、容重小、孔隙比大的基本特征,这些特点又因沉积类型的不同而有所差异。就其平均值而言,淤泥的含水量最高(53.7%),容重最小($1.68\text{g}/\text{cm}^3$),孔隙比最大(1.545)。砂土则相反,其含水量最低(23.6%),容重最大($2.05\text{g}/\text{cm}^3$),孔隙比最小(0.606)。亚粘土及亚砂土则表现出过渡的性质。表 2 中列出了调查区各类沉积物物理性质指标的变化范围及其平均值。

粒度成分对于沉积物物理性质指标的影响是十分明显的。从图 3 中可以明显地看出:沉积物含水量随着沉积物中 $< 0.05\text{mm}$ 颗粒含量的增加而增加(图 3a),而容重则随其含量的增加而减小(图 3b)。



1 : 20000.

表 2 渤海岩芯沉积物物理性质指标

物性指标 沉积类型	天 然 含水量 $W(\%)$	天 然 湿容重 $r(\text{g}/\text{cm}^3)$	天 然 孔隙比 e	塑性指数 w_p	流 限 w_l	塑 限 w_p	稠 度 B	粘 着 性 (g/cm^2)	
								铁 块	混 凝 土
淤 泥	37.4	1.57	1.001	10.7	41.2	17.7	1.09	16.4	4.4
	72.3	1.88	1.930	25.3	69.0	41.6	2.40	17.9	16.4
	(53.7)	(1.68)	(1.545)	(17.2)	(41.2)	(23.6)	(1.4)	(16.7)	(9.9)
粘 土	21.0	1.57	0.696	17.3	22.5	11.4	0.25	7.0	1.5
	70.9	2.07	1.805	24.8	52.8	28.0	2.20	20.0	16.4
	(45.9)	(1.81)	(1.248)	(22.3)	(46.6)	(24.6)	(1.03)	(15.9)	(6.7)
亚 粘 土	21.6	1.70	0.518	7.1	19.1	15.8	0.42	2.1	0.2
	60.0	2.14	1.560	16.9	39.9	24.9	2.40	19.9	15.6
	(39.3)	(1.95)	(0.932)	(12.2)	(31.1)	(19.9)	(1.29)	(14.0)	(5.7)
亚 砂 土	20.6	1.91	0.705	3.9	22.1	21.0	0.18	7.8	2.6
	30.8	2.01	0.780	6.5	27.4	18.9	3.4	9.8	5.2
	(26.0)	(1.97)	(0.770)	(5.6)	(24.8)	(20.6)	(1.66)	(9.2)	(5.1)
砂 土	20.8	1.98	0.534	—	—	—	—	0.7	0.6
	31.0	2.16	0.661						
	(23.6)	(2.05)	(0.601)						

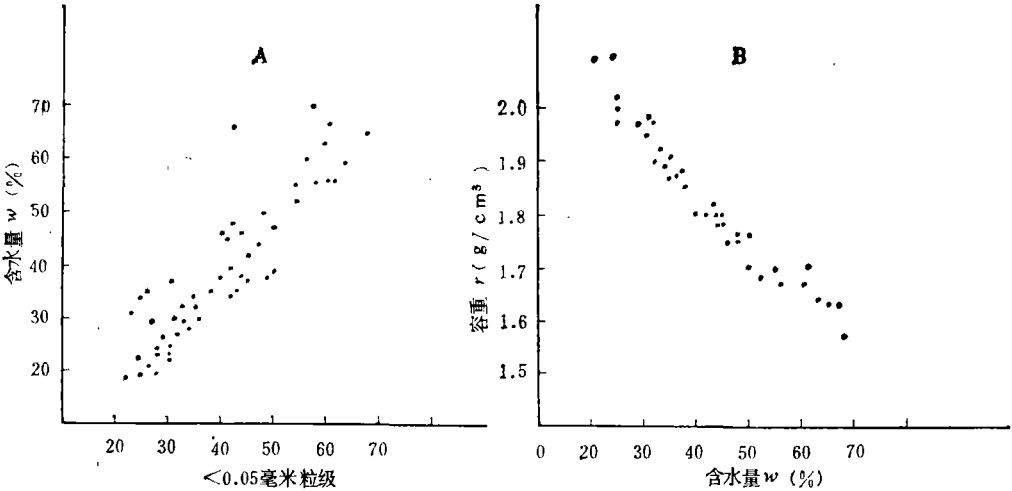


图 3 含水量与粒径 $< 0.05\text{mm}$ 和容重变化关系图

沉积物的粘着性除受粒度成分控制外,还与含水量有关,即当含水量为 30—70% 时,其粘着性随含水量的增大而增大,在含水量小于 30% 或大于 70% 的条件下,粘着性则明显降低,其数值变小¹⁾。

应当指出,同一沉积类型由于它所处层位的深度不同,其物理性指标也表现出明显的差异(如表 3 所示)。

1) 山东海洋学院地质系海洋地质教研室,1978。海洋沉积学(上册)。

表 3 渤海岩芯沉积物不同层位主要物理力学性指标 (平均值)

物理力学性指标 层 位	天然含水量 $w(\%)$			天然湿容重 $r(g/cm^3)$			天然孔隙比 (e)		
	粘 土	亚粘土	亚砂土	粘 土	亚粘土	亚砂土	粘 土	亚粘土	亚砂土
表 (0.5—3.0m)	50.5	41.6	29.9	1.74	1.83	1.98	1.341	1.099	0.748
中 (3.0—8.0m)	37.8	37.5	25.4	1.84	1.93	1.98	1.053	0.878	0.713
下 (8.0m 以下)	27.6	22.4	20.1	2.02	2.03	1.98	0.761	0.644	0.661

物理力学性指标 层 位	压 缩 系 数 (α)			凝 聚 力 (C)			内 摩 擦 角 (φ)		
	粘 土	亚粘土	亚砂土	粘 土	亚粘土	亚砂土	粘 土	亚粘土	亚砂土
表 (0.5—3.0m)	0.416	0.306	0.105	0.05	0.07	—	15.3	10.1	—
中 (3.0—8.0m)	0.218	0.095	0.029	0.08	0.10	0.15	15.1	22.4	29.6
下 (8.0m 以下)	0.027	0.019	0.011	0.29	0.20	0.15	25.3	31.5	43.5

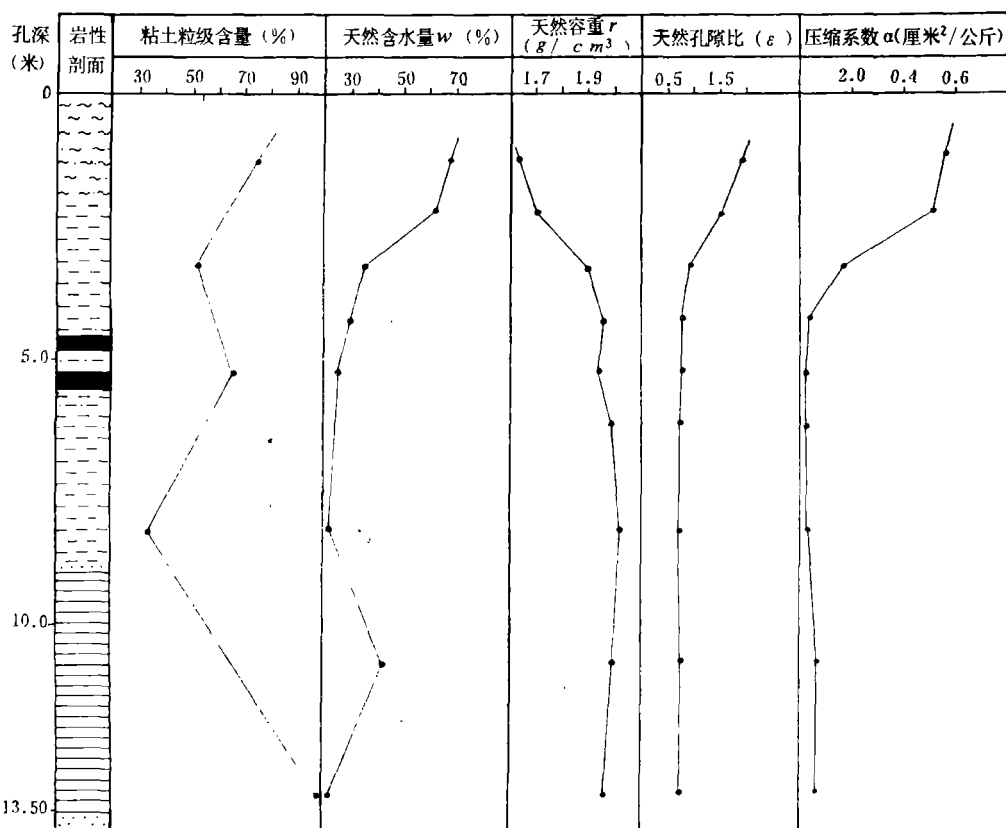


图 4 27 号岩芯主要物理力学性质垂向变化

由表 3 看出：8m 以下粘土沉积物的含水量与孔隙比与 0.5—3.0m 的值相比几乎少一倍，其湿容重却大出约 14%。亚粘土和亚砂土等都有类似的现象。

由于沉积物粒度成分及其他因素的变化，使岩芯沉积物的物理性质指标自上而下也

表现出明显的变化。图4综合绘出了27孔岩芯沉积物的粒度成分及其他物理性质随深度变化的趋势。需要指出的是,3m以下沉积物的粘土粒级含量虽有较大的变化,但其容重、孔隙比的波动幅度却很小。

3. 沉积物力学性质及其指标

沉积物的力学性质是指它们在外力作用下的变形及其抵抗外力破坏的能力,主要指沉积物在荷载作用下的压缩性及抗剪强度,后者用凝聚力及内摩擦角表示。现将调查区各类沉积物的力学性质指标列于表4。

表4 渤海岩芯沉积物的力学性指标

沉积类型	力学性指标	压缩系数 α	凝聚力 C	内摩擦角 φ	灵敏度 st
淤泥		0.608—0.155 (0.361)	0.16—0.02 (0.06)	23.3—2.5 (11.9)	5.8—2.1 (3.3)
粘土		0.608—0.022 (0.272)	0.60—0.03 (0.23)	34.0—2.5 (16.5)	—
亚粘土		0.493—0.009 (0.144)	0.31—0.02 (0.11)	40.5—5.3 (22.9)	—
亚砂土		0.175—0.005 (0.082)	0.10	35.0—19.5 (26.6)	—
砂土		0.007—0.006 (0.007)	0.08—0.03 (0.01)	42.5—25.5 (37.6)	—

从表4可以看出,粘土的压缩性、凝聚力最大,内摩擦角最小。砂土则相反,其压缩性、凝聚力最小,内摩擦角最大。亚粘土和亚砂土介于两者之间。但是淤泥却有其特殊的性质:其压缩性高于一般的粘土,而凝聚力却小于粘土。

工程上往往根据压缩系数(α)的大小,将沉积物分为三类: $\alpha > 0.05$ 称为高压缩性土, $\alpha = 0.05—0.01$ 称中压缩性土, $\alpha < 0.01$ 称低压缩性土^[3]。从表4可知,调查区内的淤泥、粘土及大部分亚粘土为高压缩性土,部分亚粘土和亚砂土皆为中压缩性土,砂为低压缩性土。

沉积物的压缩性大小与其原始密度和结构等因素有关。根据冯国栋等人的研究,密实砂的压缩性远小于疏松砂,其压缩系数基本上随土壤的原始密度的增大而减小^[2]。密实砂多为低压缩性土,压缩系数小,有利于水下建筑物的稳定。土壤的原始结构对于压缩性的影响是十分明显的。若不能保持土样的原状,原始结构受到破坏,则会大大歪曲沉积物原有的压缩性质。

沉积物的抗剪强度 τ 可视为内摩阻系数 f 和粘聚力 C 的函数,即 $\tau = Pf + C$ 。式中 P 为法向压力, f, C 为一系列因素的函数,其中特别以沉积物的紧密度和含水量的影响最为明显。据实测结果表明,粘土的抗剪强度随其含水量的增加而变小,当含水量达到缩限时其值最大。砂的凝聚力极小, C 值可忽略不计,故其抗剪强度只是内摩擦系数的函数。测量表明,沉积物的内摩擦角随沉积物粒度成分变粗而增加,受湿度的影响很小(一般小于2度)。

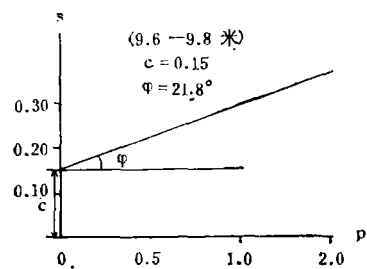
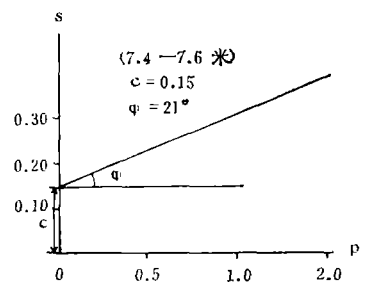
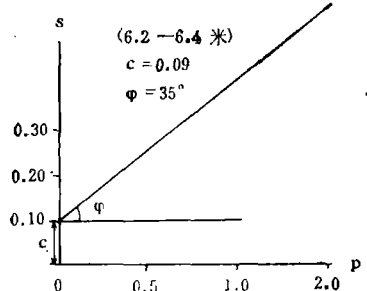
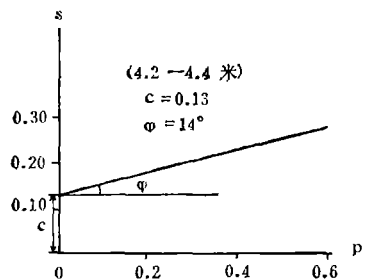
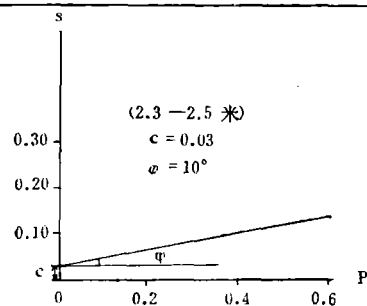
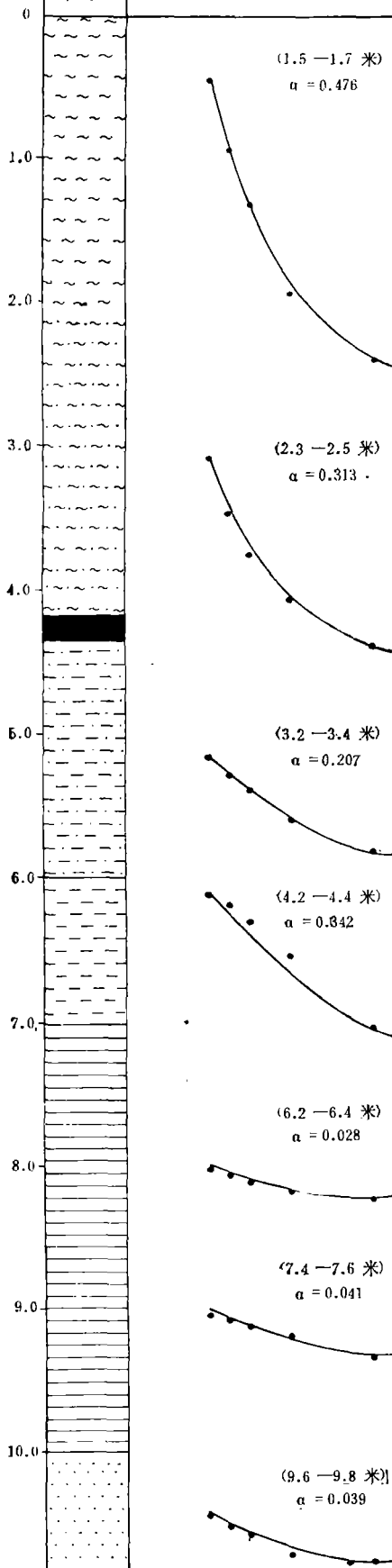
沉积物的压缩系数和抗剪强度随沉积类型及其在岩芯中出现的层位不同而变化,本

孔深
(米)

岩性
柱状

压缩曲线

抗剪强度 (库伦线)



文绘出了沉积物岩芯的压缩系数及抗剪强度的垂向变化(图5),并可看出,2—4m处沉积物的压缩系数 α 值迅速减少,曲线急剧变化;4m以下 α 值则基本趋于稳定,曲线变化平缓。显然这与底层沉积物密度变化幅度较小的趋势是一致的。应当指出,影响沉积物力学性质的因素是十分复杂的,除了沉积物的密度、结构外,粒度成分及颗粒形态、矿物成分、法向压力大小以及沉积物生成历史等因素对其力学性质指标都有不同程度的影响。目前合理地确定沉积物的抗剪强度尚有困难。试验数据只作近似指标参考。

4. 沉积物岩芯工程性质简述

如上所述,根据沉积物的工程性质,可将调查区之沉积物岩芯分为三层(见图2),现综合各层沉积物之物理力学性质,对其工程性质简述如下:

淤泥层(或软土层) 厚度2—4m。其中可分两个亚层,(1)淤泥,厚度1—2m,位于岩芯的上部,其表面直接与海水接触;(2)淤泥质土层,位于淤泥层之下,厚度1—2m。其主要性质如下:

(1) 孔隙比高,压缩性大。从表4中可以看出,该层的压缩系数 α 为0.361—0.260cm²/kg,最高可达0.608,属高压缩性土,反映在工程上,即在荷载作用下沉降量大,压缩模量为10—50kg/cm²。抗剪强度低,灵敏度中等至高, S_t 值平均为3.3,容重可采用1.78g/cm³,承载力小。

(2) 塑性指数高,透水性低,含水量高,天然含水量达50%左右,最高可达72.3%,不利于地基的压实。

此外,此层土还表现出高的粘着性,蠕变性和触变性,以及沉积层内部结构,构造分布不均匀,因此,在荷载作用下有可能产生不均匀沉降等现象。

总之,从该层沉积物之物理力学性质等条件看出,它们作为水下建筑的地基是不利的。特别是岩芯上部半流动状态的淤泥层,在水下施工时应作适当的处理。

粘土-亚粘土-亚砂土互层 位于I层下部,厚度2—13m。其中由于各亚层的厚度不等,故表现出不同的工程性质。概言之,其孔隙比、压缩系数及含水量较上层小,属于中、高压缩性土,塑性指数一般为10—20,抗剪强度较高, C 值平均为0.15kg/cm²,内摩擦角 φ 平均为24°,此层的物理力学性质较上层为好。

砂层 位于粘土-亚粘土-亚砂土互层之下,厚度不详。其粒度成分主要为极细砂和细砂,分选好而纯净。该层为密实砂, $\varepsilon < 0.7$,压缩性最小, α 值平均 < 0.06 ,标准贯入击数(N)30—40次,其最大值可达150次(例如27号孔13m以下之密实砂)。承载力大, φ 值大于39°。此层的物理力学性质对于建筑物的稳定性较为有利。

综上所述,通过对渤海西部海底沉积物土工学性质的研究,我们初步得到以下结论:

1. 调查区内,现代海洋沉积物岩芯物理性质的特点是含水量高,容重小,孔隙比大。沉积物物理性质的变化主要受其粒度成分和含水量大小的影响。当粒度成分相同时,含水量大小是影响其他物理性质变化的主要因素。

2. 岩芯的力学性质及其变化将受岩芯的物理性质和原始结构的影响。特别是岩芯表层受海水长期作用的淤泥,具有压缩性大、抗剪强度低及蠕变性高等特点,使建筑物沉降时间长,对建筑物的稳定性不利。

3. 调查区内根据沉积物的物理力学性质可分三层: 淤泥层(或软土层),粘土-亚粘

土-亚砂土互层及砂层。就其工程性质而言,上层最差,中层次之,底层最好。

4. 在上述松软的海底沉积物上进行施工,除了复杂的海洋水文、气象、地质等因素外,对于沉积物的物理力学性质等也需要进行全面的调查研究,否则将会造成巨大的损失。如果事先能对它们进行系统深入的研究,则可能避其不利,达到令人满意的结果。例如巍然屹立在波涛翻滚的渤海中的石油钻井平台,其桩脚即是穿透上部之软土层和泥砂互层,立于 10—20m 以下的底部密实砂层中,基本上保证了平台的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 安徽水利电力学院, 1958。土力学地基与基础。中国工业出版社, 67 页。
- [2] 冯国栋, 1964。土力学地基与基础。中国工业出版社, 28—33 页。

STUDY ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SEDIMENT CORES IN WESTERN BOHAI SEA*

Qin Yunshan (Y. S. Chin) Xu Shanmin Li Fan and Zhao Shijin

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Fifteen long sediment cores lifted from water depth of 15 to 29 m in western Bohai Sea were geotechnically analyzed. All samples were undisturbed. Sediment cores were not kept under refrigeration because there was only a short time from their collection and analysis. The cores ranged in length from 11—20 m.

The geotechnical investigation was part of a general geological study performed by the Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao.

Some geotechnical properties of cores were measured and analyzed in laboratory, they are water content, bulk density, natural void ratio, plastic index, plastic limit, shearing strength, sensitivity, compressibility and so forth.

Sediment types of the cores can be classified into three different groups from top downward the cores, depending on the different geotechnical properties of the sediments.

1. Group of soft mud

This group ranged in thickness from 2—4 m. The group may be geotechnically characterized by its high water content, void ratio and high compressibility. Its shearing strength, permeability and bearing capability were lower than other two groups. Therefore, this group is not suitable for engineering construction.

The sediment of the group might have been accumulated by discharges derived from the Huanghe River.

2. Group of interbedding of subclayey, subsandy and sandy soils

This group appeared below the first group, ranging in thickness from 2—13 m. It was characterized geotechnically by its intermediate form between the first and third groups.

3. Sand group

Submerged depth of this group was about 5—17 m under the sea floor. Its thickness was not known in detail.

The group mainly consists of fine or very fine sand. The geotechnical properties of the group show low compressibility and high bearing capability. Therefore, the group provides a good foundation for engineering construction.

*Contribution No. 858 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.