

沿海地区典型吹填土物化特征的对比*

宋晶¹, 汤连生¹, 王清², 张鹏³

- (1. 中山大学地球科学与地质工程学院//广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026;
3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510032)

摘要: 吹淤造陆工程的物源差异是影响工程处理难易程度的主要原因之一。针对沿海地区类型多样的吹填土, 从粒度成分、矿物成分、物理化学性质等方面做比较分析。根据试验结果, 发现大亚湾某吹填工程现场与其他地区具有相似的物质组成和环境条件, 土样颗粒相对细小, 粒度组成以黏粒组为主, 因此在物理性质中表现出塑性指数大, 阳离子交换量大、有机质含量高、在塑性图内位于高液限黏土区的特殊性质; 另外, 受海湾区域内复杂的沉积物分布影响, 不同地区吹填土的矿物变化规律不明显; 而化学成分中易溶盐含量高, 以钠离子和氯离子为主要化学成分, 导致土体的微观结构单元体形成一定的胶结作用, 造成土体物理化学性质不稳定。

关键词: 吹填土; 粒度成分; 矿物成分; 物理化学性质

中图分类号: TV14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)06-0106-06

Analysis on Physical and Mechanical Properties of Some Typical Dredger Fill in Costal Regions

SONG Jing¹, TANG Liangsheng¹, ZHANG Peng²

- (1. School of Earth Sciences and Geological Engineering// Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Construction Engineering College, Jilin University, Changchun 130026, China;
3. CCCC-FHDI Engineering co., Ltd., China, Guangzhou 510032, China)

Abstract: Materials of reclaiming land is one of the main factors effecting on consolidation efficiency which can be decreased by fine particles. The characteristics of the granule and mineral compositions, physical and chemical properties of dredger fills from various coastal areas were obtained by experiments. It was shown that the dredger fill from the Daya Bay engineering field is similar to that from other areas, which have many fine particles in compositions. The Daya Bay dredger fill is characterized by high plastic index, high cation exchange capacity (CEC), and high organic matter content. Furthermore, it was concluded that the Daya Bay dredger fill is one kind of high liquid clay with the same as that in some other high clay content areas. Besides these, minerals in different dredger fills were not obviously different due to the complex environment of sediment distribution in bay areas. The cementation effect of the fills with high content of sodium and chloride ions in various coastal areas results in unstable chemical and physical

* 收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20120171110031); 广东省自然科学基金资助项目(S2012040007331); 广东高校优秀青年创新人才培养资助项目(2012LYM_0007); 中山大学青年教师培育资助项目(13lgy63)

作者简介: 宋晶(1982年生), 女; **研究方向:** 工程设计、地基处理和微观力学分析; **通讯作者:** 王清; E-mail: wangqing@jlu.edu.cn

properties of the soils.

Key words: dredger fill; granule composition; mineral composition; physical and chemical characteristics; microstructure

吹淤造陆方法是一种变废为利的地基处理方式。它利用海积软土或淤泥作为围海造陆的基础物源,既清理了海港码头的淤泥,疏浚了航道,保护了环境^[1-3],又降低了运输物源砂料的工程造价,提高地基处理效率,满足了工期需要^[4]。这些以淤泥为主的超软土地基加固是目前地基处理的热点之一^[5-6]。

但是,其中海积软土或吹填淤泥具有特殊的工程地质性质,即含水率高、压缩性大、有机质含量高、黏粒含量高等特性。针对该土质特征,科研工作者进行了全面深入研究。彭涛等^[7]对吹填淤泥进行研究,分析吹填土自重沉积固结后的孔隙特征。刘莹等^[8]进行模型试验和快速结壳试验,结果表明,随着泥浆稠度增加,沉降速率减小,沉积后的泥浆容重增加。杨爱武、杜冬菊等^[9]探讨了天津地区吹填土特征,进行吹填土改良加固。之后,杨静、张中琼等^[10-11]在此基础上研究不同静置时间、不同水土比试样的固结特征,并研究不同深度和不同距离条件下的监测指标,分析孔隙水压力、有效应力和沉降量等变化特征。

但是,针对高黏性吹填土而言,实际施工过程中,常常由于不同地区土体差异导致土体工程地质性质差别很大^[12]。在工程建设过程中发现,长时间地晾晒吹填土,虽然固结效果好,但是会耗费大量工期。另外该土质可能导致排水体四周淤堵,排水效率降低的问题,因此有必要深入研究高黏性吹填土基本性质,才能针对性地缓解排水体四周淤堵状况。

由于吹填土是经过水力吹填形成的填土,是吹淤造陆的物源材料。因此,吹填土工程地质性质与所吹填的泥砂来源、吹填时的水利条件等因素密切相关^[13]。本研究取用渤海沿岸的大连、曹妃甸、天津和黄骅四个地方的吹填土进行测试、分析。同时借鉴黄海沿岸的青岛、连云港,及东海沿岸的福建、广东等省区的吹填土研究结果^[14-15],对比分析不同地区吹填土工程地质性质。

1 不同地区吹填土成分特征

1.1 粒度成分

粒度成分测定方法参照规范要求,采用乙种密度计测试^[16]。测试之前土样易溶盐含量大于5%

时,需要洗盐后继续进行试验。

为了定量分析土体中颗粒组成情况,通常用等效的球体直径表示颗粒大小^[17]。结合《地质矿产部土工试验规程》中土的分类标准,按照粒径大小将工程地质性质相似的土粒归类,粒组划分为漂石、卵石、砾粒、砂粒、粉粒、黏粒。由于本次研究的吹填土主要是细粒土,颗粒大小组成中“漂石粒、卵石粒、砾粒”组的颗粒含量微小,因此仅就“砂粒、粉粒、黏粒”三个粒组进行粒度组成分析,并根据国土资源部分类标准对土定名,见表1。

从表1可见,取自曹妃甸、黄骅和青岛的吹填土,无论是否添加分散剂,其对应颗粒分布类似,说明这两个地区的吹填土颗粒组成受分散剂影响很小。而取自大连、天津和大亚湾的吹填土,添加分散剂后颗粒分布与不加分散剂的颗粒分布相比较,发现添加分散剂后,粉粒组含量减少,黏粒组含量增加,可见大连、天津和大亚湾地区的吹填土颗粒受分散剂影响很大。

表1 不同地区吹填土粒度成分表¹⁾

Table 1 Granule composition of different coastal regions		各粒组的质量分数 $w/\%$		
取样地点	测试方法	砂粒组	粉粒组	黏粒组
		>0.075 mm	$0.075 \sim$ 0.005 mm	<0.005 mm
大连	a	2.32	67.25	30.42
	b	0.77	38.91	<u>60.32</u>
曹妃甸	a	2.30	76.78	20.92
	b	2.35	70.40	27.25
天津	a	1.80	93.70	4.50
	b	1.50	32.60	<u>65.90</u>
黄骅	a	39.82	60.13	0.05
	b	37.76	60.10	2.14
青岛	a	47.39	52.61	0
	b	45.14	54.86	0
连云港	a	27.30	72.70	0
	b	14.95	30.15	<u>54.9</u>
福州	a	25.6	41.0	34.5
	b	26.3	34.4	39.3
大亚湾	a	3.40	83.9	12.7
	b	2.60	35.2	<u>62.2</u>

1) a表示不加分散剂; b表示加分散剂

由于分散剂主要是将集合体颗粒分散,并还原为细小颗粒,所以一般认为土体中具有絮凝作用的黏粒,大量地团聚在一起,被视为大颗粒,称为“假粉粒”。但实际上,土体加分散剂以后,“假粉粒”分散还原为黏粒,所以黏粒含量增多、“假粉粒”含量减少。因此,渤海湾地区的大连、天津吹填土颗粒分布发生了明显地差异性变化。连云港和大亚湾地区也具有相似的性质。

表 2 不同地区吹填土矿物成分统计表¹⁾

Table 2 Mineral composition of different coastal regions

取样地点	矿物组成 $w_B/\%$										
	次生矿物中的黏土矿物				原生矿物						
	高岭石	伊利石	绿泥石	伊蒙混层	石英	碱性长石	斜长石	角闪石	石盐	方解石	白云石
K	I	Ch	I/S	Q	fs	Pl	Am	Hal	Cc	Do	
大连	5	8	4	31	25	8	14	1	4	—	—
曹妃甸	9	12		5	44	9	14	—	—	3	4
天津	6	21	6	14	24	5	6	—	5	13	—
黄骅	6	7		3	32	15	26	—	—	9	2
青岛	1	4	1	6	50	16	20	1	—	—	1
连云港	5	10	6	18	31	6	8	—	—	16	—
福州	5	26	6	5	45	7	6	—	—	—	—
大亚湾	6	20	6	10	35	4	5	—	—	5	9

1) “—”表示数据缺失或不可测

整体而言,由于 X 射线衍射分析测试的矿物主要为结晶矿物,而对于土体中无定形、非晶体没有进行定量测试,因此测试结果中以原生矿物为主,石英含量最高;次生矿物含量次之,黏土矿物含量变化较大,其中伊利石含量较高。

另外,大连、天津、连云港、福州和大亚湾的吹填土中石英含量相对较少,黏土矿物含量明显较多,这和粒度成分中黏粒组含量较大的规律吻合。

黏粒组的矿物成分多以黏土矿物为主,因此黏土矿物的性质特征也成为土体工程地质性质的重要影响因素。黏土矿物中的伊利石亲水性强、透水性差、压缩性高、抗剪强度低,因此作为高黏性吹填土研究对象,大连、天津等地区的高黏性吹填土也具有这一系列基本性质^[15]。

1.3 化学成分

吹填土中液体的化学成分可以用提取液进行测试^[17]。用一定量的某种溶剂以规定的标准方法和时间,使土中的可溶盐溶解,过滤后分析滤液的化学成分,包括易溶盐总量、8 大离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) 含量、提取液的酸碱度 (pH 值) 等。

1.2 矿物成分

测定了不同地区吹填土矿物成分^[10-12,14-15],见表 2,其中取样地点按从北至南的顺序排列。由于沿海地区海湾分布广泛,水动力条件变化剧烈,海湾沉积物矿物分布复杂,造成各矿物变化规律不明显。

吹填土固结过程中基本不存在气相状态,因此不研究气体相化学成分。具体测试结果及使用的测试方法见表 3。

从表 3 中看出,黄骅和青岛地区各项化学指标含量均较低,其中较低的易溶盐含量导致土粒间的胶结作用相对较弱,土体的活动性较弱,属于中等亲水性土体。

相反地,大连、天津、连云港几处高黏性吹填土的化学性质指标相对最高,其中阳离子交换容量比较大,将使土体表现出较强的活动性和亲水性;有机质含量较大,导致土体表现出孔隙比大、压缩性高的特征;易溶盐含量中,尤其以钠离子和氯离子为主要的化学成分,使处于松散状态的土的结构单元体或结构单元体内部具有一定的胶结作用,但易溶盐随水的流动产生变化,因此造成土体物理化学性质不稳定,降低了土体的力学性质。

2 不同地区吹填土的物理性质

物理性质是三相物质在质量与体积间的相互比例关系和固液两相相互作用表现出来的性质,即基本物理性质和水理性质^[18-19]。依据土工试验规范,

对不同地区吹填土的密实程度、干湿状况、稠度与塑性做相关测试，结果见表 4。

黄骅和青岛吹填土属于粉土，塑限含水率和塑

性指数等稠度指标不易提取。试验过程中，黄骅吹填土用手捻摸时的感觉粗糙，无黏滞感，不黏着物体，所以液限含水率也未提取。

表 3 不同地区吹填土化学成分表¹⁾

Table 3 Chemical composition of different coastal regions

化学成分 $w/\%$	测试方法	取样地点							
		大连	曹妃甸	天津	黄骅	青岛	连云港	大亚湾	
固相	CEC / (mmol · kg ⁻¹)	193.85	102.24	144.12	0.43	38.9	155.1	145.6	
	有机质	1.94	1.51	1.49	0.52	0.33	1.89	2.39	
	易溶盐总量	2.88	1.82	4.66	1.03	0.01	0.21	0.42	
	K ⁺	0.10	0.10	0.07	0.08	—	0.03	0.02	
	Na ⁺	1.55	0.92	1.46	0.44	—	0.58	0.69	
液相	Ca ²⁺	0.03	0.02	0.11	0.02	—	0.007	0.009	
	Mg ²⁺	0.06	0.03	0.06	0.02	—	0.001	0.006	
	SO ₄ ²⁻	0.15	0.23	0.35	0.13	—	0.03	0.25	
	Cl ⁻	1.42	0.88	2.57	0.50	—	0.25	1.92	
	SO ₃ ²⁻	0	0	0	0	—	0	0	
	HCO ₃ ⁻	0.02	0.01	0.02	0.01	—	0.004	0.01	
	pH 值	7.76	7.78	8.26	7.62	—	6.00	7.80	

1) “—” 表示数据缺失或不可测

表 4 不同地区吹填土物理性质指标综合成果表

Table 4 Physical characteristics of different coastal regions

取样地点	$\rho_s / (g \cdot cm^{-3})$	$w_L / \%$	$w_p / \%$	I_p	$w / \%$ ²⁾	$A = I_p / w$	根据塑性图定名
大连	2.57	51.8	30.9	20.9	48.3	0.43	高液限黏土
天津	2.74	43.5	23.8	19.7	48.0	0.41	高液限黏土
曹妃甸	2.60	35.20	22.10	13.10	17.10	0.77	中液限黏土
黄骅	2.61	29.7	—	—	—	—	—
青岛	2.70	27.5	—	—	—	—	—
连云港	2.72	50.9	29.05	21.85	28.8	0.76	高液限黏土
大亚湾	2.76	58.5	31.4	27.2	37.6	0.46	高液限黏

1) “—” 表示数据缺失或不可测；2) <0.002 mm 粒度的胶粒含量

从表 4 可以看出，所测吹填土的塑性指数普遍较高。其中活动性指数反映土的塑性与黏粒含量和黏土矿物亲水性关系，黏粒含量多、蒙脱石含量高时黏性土活动性较强，反之较弱。曹妃甸和连云港地区吹填土活动性指数 $0.75 < A \leq 1.5$ 范围内，黏性土属于正常范围，这两种土易溶盐含量相对大连、天津吹填土易溶盐含量较低，且黏土矿物成分中以伊利石为主，因此黏性土活动性中等，为正常活动性。

值得注意的是，大连、天津两地黏性土活动性指数 $A < 0.75$ ，数值较低，两者的黏土矿物中以伊利石为主，黏粒含量高，理论上讲活动性不应该较低，但测试结果中，这两种土同时出现了这种结

果。分析后发现这是由于液塑限试验过程中土样易溶盐含量高，强烈的胶结作用造成。也就是说高含盐量导致高黏性吹填土的胶结作用强，所以反映出黏粒活动性偏低的特征。

另外，对于细粒土而言，单纯依靠粒度成分为土体定名，不能准确反映吹填土工程地质性质。采用塑性指数和液限联合法将土体分类，有一定的参考价值，因此试用塑性图分析不同地区的吹填土。

根据表 4 中不同地区吹填土物理力学性质指标，绘制塑性图。土工规范中使用的塑性图是分析国外碟式液限仪所测得的液限值，本次试验采用锥式液限仪，故采用塑性图的参考处理方法如下^[20]，确定 A 线 $I_p = 0.66 (w_L - 20)$ ，B 线为 $w_L = 42\%$ ，

并增划 C 线方程式为 $w_L = 26\%$ 。其中, I_p 表示塑性指数; w_L 表示液限含水率; 结果见图 1。

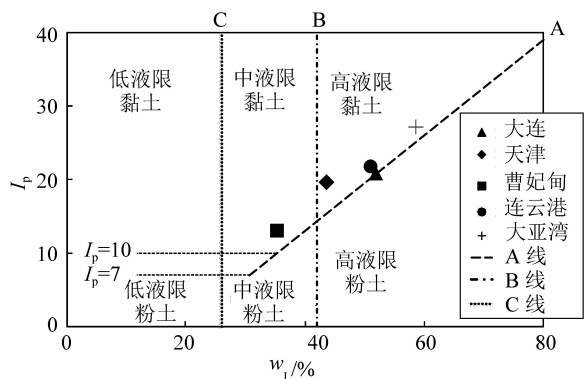


图 1 塑性分布图

Fig. 1 Relation of plastic index and liquid index

天津、连云港与大亚湾地区吹填土均属于高液限黏土, 天津地区吹填土位于高液限黏土与高液限粉土的交界区, 曹妃甸地区吹填土属于中液限黏土。天津、连云港和大亚湾地区的粒度成分、矿物成分、化学成分以及基本物理力学性质等指标都非常相近, 由此判断大亚湾工程区分布于高液限黏土区, 同样也具有相似的工程地质性质。同时, 室内力学试验结果显示, 大亚湾地区吹填土固结快剪的抗剪强度指标较低, 内聚力平均值为 3.3 kPa, 内摩擦角 10° , 与以上沿海各地区吹填土具有类似力学强度低的特征。

由此可见, 根据塑性图划分的高液限黏土能够更直观、简洁的反映高黏性土的基本特征, 因此, 综合成分分析和物理性质分析, 也将具备以上性质的吹填土定名为高黏性吹填土。

3 分析与讨论

根据前人研究发现, 我国沿海沉积物划分为三种主要类型: 泥质沉积、砂质沉积和混合沉积^[21]。其中, 渤海湾地区大陆架底质类型多为泥质沉积, 受河口冲击和沿岸流的影响较大。因为吹填土取样地点均位于海边, 沿岸水动力条件剧烈, 海湾沉积物矿物分布复杂, 造成粒度成分和矿物成分规律不明显。

从粒度成分和矿物成分特征上看, 研究区内吹填土类型多样, 如重黏土、粉土、轻黏土、粉质亚黏土等。黏粒含量和黏土矿物分布与地理位置关系不大。同时, 海湾沉积物矿物分布复杂造成矿物变化规律不明显, 黏粒组的矿物成分多以黏土矿物为主^[22], 黏土矿物的性质特征也成为土体工程地质

性质的重要影响因素。

另外, 由于大连、曹妃甸、天津和黄骅都位于渤海湾, 属于渤海湾沿岸流系统, 盐度分布趋势是湾中高于近岸, 分别为 $29\text{‰} \sim 31\text{‰}$ 和 $23\text{‰} \sim 29\text{‰}$, 但紧邻岸滩一带, 受沿岸盐田排卤的影响, 盐度高达 33‰ , 盐度的年变差为 8‰ 。而大亚湾地区水体由于受人类活动影响, 包括沿岸居民和工业废水的排放, 在过去 20 多年间水体营养盐状况发生了很大变化, 大亚湾海域营养盐含量较前期调查略有上升^[23-25]。因此大亚湾地区吹填土与天津等地吹填土的盐分影响具有相似特征。高黏性吹填土就是对易溶盐含量低于 0.5% 的细粒土通过密度计法测定粒度成分, 其中加分散剂的黏粒组含量占土体的质量百分比大于 60%, 同时在塑性图位于高液限黏土区。如果易溶盐含量高于 0.5%, 细粒土中易溶盐对土颗粒产生胶结作用, 此时建议参照规范中的方法进行洗盐, 然后进行粒度成分分析。

从化学成分来看, 大连、天津、连云港、大亚湾地区高黏性吹填土的化学性质指标相对最高, 阳离子交换容量比较大, 使土体表现出较强的活动性和亲水性; 同时, 有机质含量较大, 导致土体表现出孔隙比大、压缩性高的特征; 易溶盐含量较高, 尤其以钠离子和氯离子为主要化学成分, 使处于松散状态的土的结构单元体或结构单元体内部具有一定的胶结作用, 但易溶盐随水的流动产生变化, 同时盐分、有机质含量的变化造成黏土颗粒结合强度发生改变, 因此会造成土体物理化学性质不稳定, 降低土体力学性质。

另外, 对于细粒土而言, 单纯依靠粒度成分作为土体定名, 不能准确反映吹填土的工程地质性质, 联合使用塑性指数和液限 (塑性图) 得到的结果更准确。通过采用塑性分布图为土体定名, 可以直观反映土体性质。大连、天津、连云港地区吹填土均属于高液限黏土, 曹妃甸地区吹填土属于中液限黏土。

综上所述, 可见高黏性吹填土本身具有吹填土“三高两低”的工程地质性质, 即高含水率、高孔隙比、高压缩性、低渗透性和低强度特征。同时, 根据室内测试分析, 发现它还具备高黏粒含量、高塑性指数、高液限含水率的特征。另外, 高黏性吹填土中含盐量较大时, 会影响土体活动性指数。借鉴易溶盐试验洗盐的方法, 建议高黏性吹填土做液塑限指数时, 进行洗盐步骤。这样, 吹填土在固结后随着盐分的流失, 土体性质的分析结果可能更加真实有效。

4 结 论

根据以上研究,可以得到如下结论:

1) 渤海湾地区的土样颗粒相对较细小,粒度组成以黏粒组为主;

2) 从粒度成分和矿物成分特征上看,研究区内吹填土类型多样,如重黏土、粉土、轻黏土、粉质亚黏土等;

3) 取样地区矿物成分变化规律不明显,但黏土矿物含量高的地区,伊利石矿物含量也较多,影响土体的工程地质性质;

4) 从化学成分来看,吹填土的化学成分特征值也同样与黏粒含量密切相关,尤其是易溶盐含量直接影响土体胶结性质,导致大连、天津大亚湾等地的高黏性吹填土工程地质性质不稳定,固结排水过程中容易造成淤堵问题,有必要进行快速有效的排水固结作用;

5) 文中采用的大亚湾吹填土数据为正在进行施工的区域,因此建议其工程加固方案参照天津、大连、连云港等相似地区,以便大大提高加固效率。

参考文献:

[1] HORPIBULSUK S, MIURA N, KOGA H, et al. Analysis and strength development in deep mixing: a field study[J]. *Ground Improvement*, 2004, 8(2): 59-68.

[2] WEI Guoa, JIAN Chua, SHUWANG Yanb. Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(3): 277-284.

[3] LI Fen, HAN Jie, LIN Cheng. Effect of scour on the behavior of laterally loaded single piles in marine clay[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2013, 31(3): 271-289.

[4] 王清, 肖树芳. 海积软土的工程地质研究现状[J]. *世界地质*, 2000, 19(3): 253-257.

[5] 房后国, 刘娉慧, 肖树芳, 等. 海积软土排水固结机理分析[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2005, 35(2): 207-212, 217.

[6] 张成良, 洪振舜, 邓永锋. 淤泥吹填处理及其研究进展[J]. *路基工程*, 2007, 47(1): 12-14.

[7] 彭涛, 武威, 黄少康, 等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. *工程勘察*, 1999, 27(5): 1-5.

[8] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(4): 518-521, 528.

[9] 杨爱武, 杜冬菊, 赵瑞斌, 等. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1823-1827.

[10] 杨静. 高黏粒含量吹填土加固过程中结构强度的模拟试验研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2008.

[11] 张中琼. 高黏粒含量吹填土快速加固的室内模拟试验研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2008.

[12] 宋晶, 王清, 夏玉斌, 等. 真空预压处理高黏粒吹填土物化指标[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(5): 1476-1480.

[13] 刘建炎, 李景林, 吴春勇, 等. 吹填砂土地基的不同加固方法效果评价[J]. *世界地质*, 2006, 25(1): 81-85.

[14] 刘莹, 王清, 肖树芳. 不同地区吹填土基本性质对比研究[J]. *岩土工程技术*, 2003, 17(4): 197-200.

[15] 谢海澜, 王清, 李萍, 等. 生石灰和水泥混合处理吹填土的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2003, 13(1): 49-53.

[16] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[17] QUACOIE Ishmael, NOSRATI Ataollah, SKINNER William. Agglomeration behaviour and product structure of clay and oxide minerals[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 98: 40-50.

[18] 唐大雄, 王清, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[19] 刘锡清. 中国大陆架的沉积物分区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(1): 13-24.

[20] MUSSO G, ROMERO E, DELLA VECCHIA, G. Double-structure effects on the chemo-hydro-mechanical behaviour of a compacted active clay[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(3): 206-220.

[21] 中国科学院海洋研究所地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.

[22] PILLAI R J, ROBINSON R G, BOOMINATHAN A. Effect of microfabric on undrained static and cyclic behavior of kaolin clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(4): 421-429.

[23] 王朝晖, 杨宇峰, 宋淑华, 等. 大亚湾海域营养盐的季节变化及微表层对营养盐的富集作用[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(2): 307-315.

[24] WANG Z, ZHAO J, ZHANG Y, et al. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea[J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, 21: 1268-1275.

[25] WEINBERGER M G, BETTAREL Y, CATTANEO R, et al. Viral ecology of organic and inorganic particles in aquatic systems: avenues for further research[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2009, 57: 321-341.