

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.03039

西沙海槽东部海底浅表层土工程地质特性及水合物细粒土力学性质试验

刘文涛¹, 石要红¹, 张旭辉², 曾宁烽¹, 杨江平¹, 何海军¹

(1. 国土资源部 海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要:利用2012年在西沙海槽东部海域获得的25个重力柱状样的土工试验分析,以及以南海北部陆坡区浅表层土为试验介质的含水合物细粒土的力学特性模拟试验结果,对西沙海槽东部海域浅表层土的工程地质特性和含水合物细粒土的力学特性进行了综合分析。结果显示西沙海槽东部海域浅表层土土质类型单一,主要为高液限粉土,粉砂含量较高,黏粒含量次之,砂粒含量极少。通过差异显著性检验,陆坡斜坡及北槽坡区与槽底平原和南槽坡区浅表层土的工程地质特性差异显著,而垂向上各区浅表层土的工程特性无显著性差异,整体为一高含水率、高塑性、高压缩性和低抗剪强度的软弱高液限粉土层。以细粒土为试验介质,不同水合物饱和度土的土力学特性有较大差异。低饱和度的土表现为两次塑性破坏,而高饱和度的土仅表现为一次塑性破坏。水合物细粒土的黏聚力随饱和度的增加呈现先增加后降低的趋势,内摩擦角随饱和度的变化不明显。

关键词:浅表层土;工程地质特性;水合物细粒土;力学试验;西沙海槽

中图分类号:P736.22

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)03-0039-09

我国南海陆坡和陆隆区拥有丰富的天然气水合物矿藏,海底水合物未来将是我国重要的战略资源。2007年在南海神狐海域取得可燃冰实物样品,为进一步实施海域水合物钻探开发奠定了基础。然而,海底水合物开采面临着诸如海底滑坡、地层变形、沉降等一系列工程地质问题。由海底水合物分解造成的海底滑坡是海底水合物钻探、开发过程中面临的主要问题。研究确定大陆坡的海底土力学性质及其地质环境,是防止地质灾害事件发生,减少海洋开发风险,避免经济损失和人员伤亡的技术关键^[1]。查明海域水合物资源区海底土的工程地质特性,是研究水合物区海底稳定性的重要前期工作,可为海底滑坡模拟提供必要的基础资料。我国南海陆坡区海底沉积物工程地质特性研究较少^[1-3],报道的资料也不多。南海北部西沙海槽天然气水合物存在面积大,是一个有利的天然气水合物远景区。本文利用2012年在西沙海槽东部海域获得的25个重力柱状样并结合由南海北部陆坡浅表层土合成的四氢呋喃水合物细粒土的模拟试验结果,从沉积环境、物理力学性质以及指标间的相关性等多个方面对研究区

浅表层土的工程地质特性进行综合分析。

1 区域概况

西沙海槽海域位于南海北部陆坡区,近EW走向,处于新生代被动大陆边缘型沉积盆地,沉积了巨厚的浅海相、海陆交互相碎屑沉积。研究区位于西沙海槽东部(图1),西沙海台以北海域,水深范围400~2500m,包括了陆坡斜坡、槽底平原以及南北槽坡等地貌单元^[4]。陆坡斜坡位于北部,呈北东向延伸,斜坡面单一平整,地貌类型单一,主要为堆积型斜坡。该区在地形上与北槽坡为连续过渡,界线不明显。北槽坡的宽度范围大致为槽底坡折线至1200m等深线,其宽度变化很小,平均宽度约43.8km。槽底平原内地形非常平坦,与两侧海底相对高差为500~1000m。南槽坡则较为复杂,上部界线不是非常明显,其宽度变化较大,从东部的约10km到西部增加至约60km。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2012年3—4月,广州海洋地质调查局HY4-2012-02航次,在西沙海域获取25个站位的重力柱

基金项目:中国地质调查局配套科研项目

作者简介:刘文涛(1985—),男,工程师,硕士,从事海洋环境地质与工程地质调查与研究,E-mail:lwt@hydz.cn

收稿日期:2013-06-21;改回日期:2014-01-14. 张光威编辑

状样,样品长度为 107~305 cm。根据重力柱状样长度将其分为 2~5 节,每节长约 50 cm。试验测试项目包括颗粒分析、天然含水率、天然密度、土粒比重、孔隙比、液限含水率、塑限含水率、液性指数、塑性指数、压缩系数、压缩模量、直接快剪、三轴 UU、CU、固结系数,并根据土体稳定性模拟评价的需要,测定了样品的静止侧压力系数、泊松比、弹性模量和渗透系数。样品测试由广东省物料实验检测中心完成。

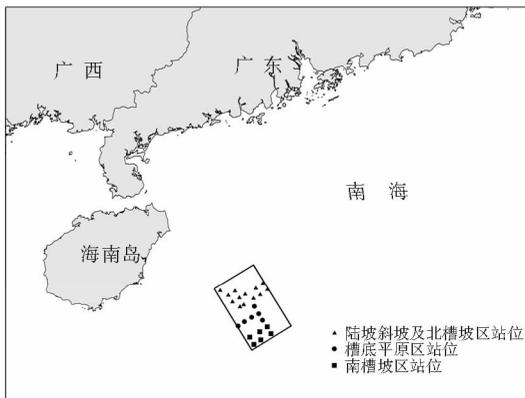


图 1 研究区位置及取样站位示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling stations

土工试验方法按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999)和《土工试验规程》(SL237-1999)进行,土的定名采用《土的工程分类标准》(GB/T50145-2007),含水率测定采用两次平行测定法,天然密度采用环刀法,界限含水率采用液塑限联合测定法,固结试验采取《土工试验规程》(SL237-015-1999)快速试验法,抗剪强度采用直接快剪试验法(轴压分级:12.5、25、50、100、150、200 kPa 不等),不固结不排水(UU)试验和固结不排水(CU)试验。颗粒组成分析测定到粒径小于 0.005 mm,采用筛析法和密度计法联合试验。渗透试验采用变水头试验方法。

含水合物土的合成与分解的力学试验由中科院力学所完成。利用南海北部陆坡区浅表层土,合成不同饱和度四氢呋喃水合物细粒土,并测试了不同围压下样品的力学性质。合成温度控制在 0~2℃。实验装置为中科院力学所自行研制的水合物土合成与力学性质测试一体化实验装置:本套装置以水合物土的低温控制、合成、围压加载、轴向剪切、低温测量 5 个模块一体化为特点,保证样品合成后在不受扰动的前提下进行力学特性测试实验。

2.2 分析及数据处理方法

土的物理力学指标在垂向和水平方向上都存在着变异性^[5]。这种变异性由多种因素造成。其中土本身内在的变异性是最主要的原因,其次由于取样、试验误差等多种随机因素也可造成。通过概率统计的方法可有效降低随机因素对土的特性带来的影响,评价其工程地质特性。

根据研究区地貌特点将研究区分为陆坡斜坡及北槽坡区、槽底平原区以及南槽坡区 3 个统计单元。并根据分样的特点,垂向上对 0~75 cm(1 层)、75~150 cm(2 层)、150~225 cm(3 层)、225~305 cm(4 层)等 4 个深度区间进行了统计,以分析其垂向变化特征。土工数据统计分析前,首先采用 Grubbs 准则对试验数据进行了检验,舍弃异常数据。并对试验数据的自相关性进行了检验。检验结果显示,样品的自相关距离小于取样间距,认为样品试验数据相互独立。统计结果见表 1 和表 2。

3 工程地质特性

3.1 土质类型与粒度特征

3.1.1 表层土质类型及分布

研究区表层土质类型单一。研究区内表层土全部为高液限粉土(MH)。粒度组成以粉粒为主,黏粒次之,砂粒极少。

表层砂含量为 0.7%~8.1%。砂粒含量由两侧槽坡向槽底平原逐渐降低。在研究区的北侧及南部一小部分砂含量相对较高,在 5% 以上;在槽底平原区砂含量较低,在 4% 以下,且东侧高于西侧(图 2a)。粉粒含量为 51.2%~79.7%。在研究区北侧粉粒含量呈带状分布,与等深线的走向基本一致(图 2b),含量为 58%~79.7%,并由西北向东南逐渐降低。槽底平原区粉粒含量较均一,变化不大,含量为 51.2%~58%。南槽坡区粉粒含量亦较低,但相比槽底平原区有所增加,东北部略高于西南部。黏粒含量为 18.4%~46.6%。其分布特征与粉粒含量相似,变化趋势正好相反(图 2c),反映出两者高度的相关性。

3.1.2 浅表层土质类型及分布

研究区浅表层土土质类型较为单一。试验结果显示,区域内 0~3 m 样品总体为高液限粉土(MH),少量为高液限黏土(CH),仅在研究区南槽坡区的 XS14 站位 150~190 cm 处为粉土质砂。各区土的粒度组成统计特征见表 1。

表 1 西沙海槽东部不同区域粒组含量统计

Table 1 Statistical summary of grain-size data in different areas

区域	统计特征值	砂粒			粉粒	黏粒	中值粒径 d_{50}	土质类型 (统计个数)
		2~ 0.5mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.075 mm	0.075~ 0.005 mm	<0.005 mm		
陆坡斜坡与 北槽坡	平均值	0.38	1.85	2.14	62.66	32.70	0.010	MH(41),CH(4)
	标准差	0.284	1.494	1.216	6.50	6.64	0.003	
	变异系数	0.746	0.808	0.568	0.10	0.20	0.33	
	统计量	41	43	45	45	45	45	
槽底平原	平均值	0.1	0.51	0.96	58.96	39.10	0.007	MH(21),CH(2)
	标准差	0	0.294	0.5	4.28	4.10	0.001	
	变异系数	0	0.571	0.52	0.07	0.10	0.15	
	统计量	14	21	20	23	23	22	
南槽坡	平均值	0.29	1.49	2.06	56.99	37.88	0.010	MH(24)
	标准差	0.21	0.88	0.68	3.67	3.70	0.001	
	变异系数	0.75	0.59	0.33	0.06	0.10	0.12	
	统计量	20	21	21	24	24	22	
全区	平均值	0.32	1.17	1.83	59.44	35.65	0.010	MH(86),CH(6)
	标准差	0.28	0.80	0.98	4.51	6.12	0.003	
	变异系数	0.88	0.68	0.54	0.08	0.17	0.30	
	统计量	80	81	88	88	92	90	

注:粉土质砂(1个样品)为特殊值,未进行统计。

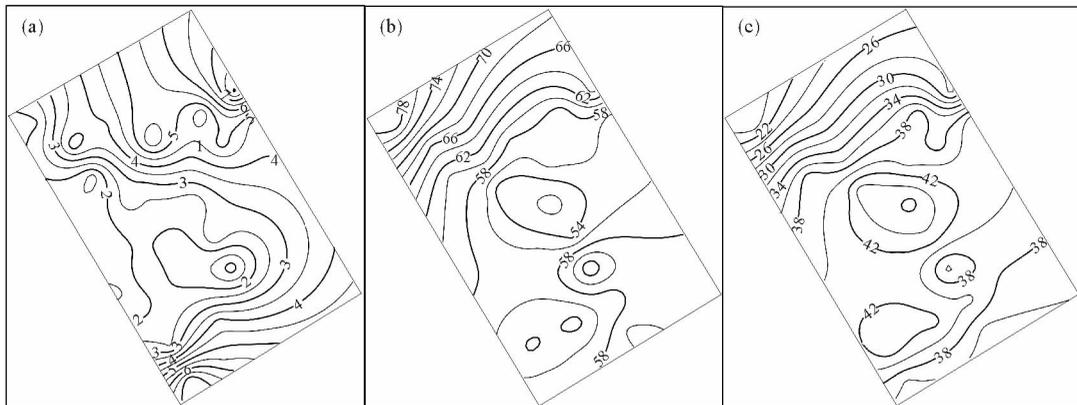


图 2 研究区表层各粒组含量(%)分布

(a)砂粒含量分布;(b)粉粒含量分布;(c)黏粒含量分布

Fig. 2 Isoline map of grain components of surface soil in study area

(a)sand content; (b) silt content; (c) clay content

研究区浅表层土粒度组成受地形控制显著。粉粒含量以北部陆坡斜坡及北槽坡区最大,平均含量为 62.66%,向南减小,南槽坡区粉粒含量平均为 56.99%,全区平均含量为 59.44%。黏粒含量以槽底平原区最多,平均为 39.1%,全区为 35.65%。砂

粒含量较少,以槽底平原区最低,平均仅为 1.57%,两侧槽坡区有所增加。

根据相关性分析,研究区内粉粒与黏粒呈高度负相关,相关系数达-0.842(图 3)。砂与粉粒和黏粒均呈微弱相关,且相关系数在 0.05 水平上不显

表2 西沙海槽东部海底浅表层土物理力学指标统计

Table 2 Statistical summary of geotechnical properties of seabed soil in study area

区域	统计特征值	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	液性指数 /%	含水量 /%	天然密度 / (g/cm^3)	饱和度 /%	孔隙比	压缩系数 / MPa^{-1}	压缩模量 /MPa	直接快剪		CU		渗透系数 $(\times 10^{-7} cm/s)$	弹性模量 /MPa	泊松比	土质类型 (统计个数)					
												c/kPa	$\phi/(\circ)$	c/kPa	$\phi/(\circ)$									
陆坡斜 坡及北 槽坡	1层	82.59	43.57	39.01	1.58	108.14	1.42	2.73	97.57	3.01	2.98	1.31	2.75	5.15	2.43	3.1	3.25	14.54	1	27.2	3.49	38.78	0.31	MH(13),CH(1)
	2层	79.52	39.74	39.78	1.48	99.19	1.44	2.74	96.57	2.81	2.63	1.56	3.25	5.97	1.75	1.27	3.17	12.8	1.5	24.03	4.07	37.06	0.33	MH(12),CH(2)
	3层	76.78	40.16	36.62	1.61	98.09	1.44	2.73	97.91	2.74	2.64	1.42	3.4	7.06	3	1.87	3.67	13.6	1.89	24.64	4.2	36.33	0.33	MH(11),CH(1)
	4层	81.96	43.18	38.78	1.33	95.3	1.46	2.74	97.4	2.67	2.28	1.64	2.75	5.4	2	1.45	4	15.68	1.5	27.43	2.38	31.91	0.35	MH(5)
	平均值	80.01	41.43	38.6	1.53	101.2	1.44	2.73	97.32	2.84	2.7	1.52	2.91	6.03	2.36	1.78	3.44	13.96	1.62	25.53	3.75	36.84	0.33	
槽底 平原	标准差	10.4	6.607	6.9	0.31	18.74	0.066	0.03	1.788	0.5	0.81	0.354	1.84	2.17	1.41	1.1	1.25	2.092	0.64	3.351	1.31	9.924	0.025	MH(41),CH(4)
	变异系数	0.13	0.159	0.18	0.2	0.185	0.046	0.01	0.018	0.18	0.3	0.234	0.63	0.36	0.6	0.62	0.36	0.15	0.39	0.131	0.35	0.269	0.077	
	1层	85.08	44.52	40.57	1.74	114.25	1.4	2.74	98.17	3.19	2.9	1.45	3.5	5.28	2.5	1.58	4	13.77	2	25.9	2.9	38.56	0.33	MH(6)
	2层	88.09	46.58	41.51	1.8	119.73	1.36	2.73	96.11	3.39	3.49	1.29	2.75	5.23	1.5	1.54	3.43	12.97	1.71	24.69	5.07	37.88	0.35	MH(8),CH(1)
	3层	83.68	46.23	37.45	1.74	111.86	1.41	2.74	96.63	3.15	3.37	1.2	3	4.48	2	1.28	3.25	10.78	2	20	3.78	42.2	0.35	MH(7),CH(1)
平均值	85.77	44.84	39.9	1.76	115.6	1.39	2.74	96.83	3.26	3.3	1.31	3.38	4.95	1.89	1.56	3.5	12.51	2	23.76	3.99	39.67	0.35		
南槽坡	标准差	8.926	7.706	5.09	0.37	19.58	0.063	0.02	2.57	0.55	0.79	0.166	2.36	2.05	0.83	0.79	1.45	1.468	1.04	3.466	1.74	7.889	0.032	MH(21),CH(2)
	变异系数	0.104	0.172	0.13	0.21	0.169	0.045	0.01	0.027	0.17	0.24	0.127	0.7	0.41	0.44	0.51	0.42	0.117	0.52	0.146	0.43	0.199	0.089	
	1层	92.28	47.52	44.77	1.67	124.28	1.38	2.72	97.33	3.41	3.14	1.43	3.4	4.56	3.5	3.2	2.33	14.57	1.33	26.7	3.38	25.76	0.33	MH(6)
	2层	98.01	50.9	43.49	1.88	132.34	1.34	2.74	97.5	3.71	3.7	1.32	1.63	6.11	1.5	2.45	4.25	12.75	3	24.28	4.7	41.09	0.38	MH(10)
	3层	101.68	51.46	52.5	1.42	121.92	1.38	2.74	97.8	3.41	3.36	1.33	2.6	5.3	1	0.55	4.5	12.65	2	25.05	5.1	46.1	0.33	MH(5)
平均值	82.33	46.4	35.93	1.79	109.8	1.4	2.73	95.67	3.1	3.57	1.16	2	9.3	1	3.3	5	12.7	3.5	22.35	2.91	30.78	0.34	MH(3)	
全区	标准差	93.88	49.61	44.3	1.72	124.4	1.37	2.73	97.29	3.48	3.47	1.33	2.11	5.84	1.86	1.73	3.91	13.22	1.78	24.73	3.94	37.34	0.35	
	变异系数	0.107	0.129	0.16	0.24	0.136	0.033	0.01	0.026	0.13	0.21	0.156	0.59	0.42	0.65	0.68	0.5	0.096	0.38	0.115	0.47	0.302	0.128	
	1层	85.07	44.68	40.4	1.64	110.9	1.41	2.73	97.11	3.11	3.05	1.39	2.83	5.76	2.08	1.69	3.56	13.43	1.76	24.89	3.86	37.8	0.34	
	2层	11.42	7.972	6.89	0.37	20.84	0.067	0.02	2.304	0.57	0.85	0.243	1.9	2.24	1.1	0.99	1.46	1.874	0.78	3.309	1.56	9.558	0.036	MH(86),CH(6)
	3层	0.134	0.178	0.17	0.22	0.188	0.047	0.01	0.024	0.18	0.28	0.175	0.67	0.39	0.53	0.58	0.41	0.14	0.44	0.133	0.40	0.253	0.106	

注: c :黏聚力; ϕ :内摩擦角; c' :有效黏聚力; ϕ' :有效内摩擦角。

著。研究区内粉粒与黏粒变化的一致性,反映出可能受控于同一物源或水动力环境,而砂粒来源可能与粉粒和黏粒不同。

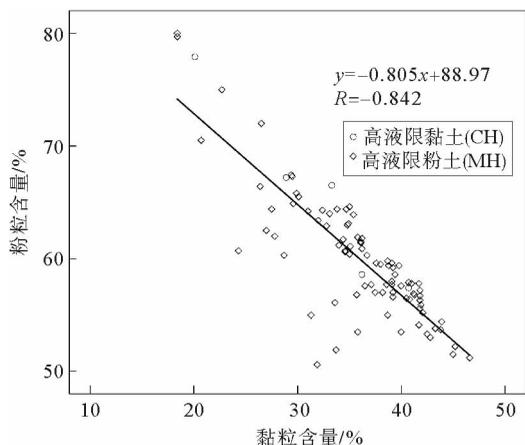


图 3 粉粒含量与黏粒含量间散点图

Fig. 3 Relationship between contents of silt and clay

3.2 浅表层土物理力学特征

3.2.1 稠度特征

土的稠度特征由液限、塑限、塑性指数以及液性指数表征。区域内塑性指数变化不大,各区平均值为 38.6~44.3,平均为 40.4(表 2),反映出区域内黏土矿物组成基本一致,具有较高的可塑性。研究表明,该区伊利石含量较高,为 59%~64%,高岭石、蒙脱石、绿泥石含量接近,平均为 12%~16%^[6]。塑性指数具有由北向南逐渐增大的统计趋势。研究区土的液性指数普遍大于 1,波动范围在 0.85~2.44 之间,各区平均值介于 1.53~1.76 之间。槽底平原液性指数大于两侧槽坡区。在垂向上南槽坡区浅层土液性指数波动较大,而槽底平原区基本一致。由于研究区海底土塑性指数大,具有较

高的可塑性,弱结合水含量可能比较高,在天然状态下,虽然液性指数大于 1,但样品并未完全表现为流塑状态,而是具有一定外形和强度。

3.2.2 天然状态指标

土的天然状态由含水率、天然密度、孔隙比等指标表征。研究区浅表层土的含水率、饱和度和孔隙比高,天然密度低。各区平均含水率为 101.2%~124.4%,平均值为 110.9%;饱和度为 96.83%~97.32%,平均为 97.11%;天然密度为 1.37~1.44 g/cm³,平均为 1.41 g/cm³;孔隙比为 2.84~3.48,平均为 3.11(表 2)。“天然密度”、“土粒密度”和“饱和度”的变异性非常小,变异系数 0.01~0.046,而“含水率”和“孔隙比”的变异性相对增高,介于 0.13~0.185。

天然状态指标具有较好的统计规律性。含水率和孔隙比由北向南逐渐增大,而天然密度则呈现北高南低的趋势(图 4),饱和度表现为槽底平原低而两侧槽坡区大的统计趋势。含水率、孔隙比、天然密度之间具有高度的相关性,相关系数大于 0.8。饱和度和土粒比重与其他 4 个指标仅呈低度相关或微弱相关。

3.2.3 透水性

土的透水性用土的渗透系数 k_v 表示,其物理意义为当水力梯度等于 1 时的渗透速度。土的渗透性是土体稳定性模拟中关注的重要特征之一。研究区土的渗透系数极低,各区平均值为 $3.75 \times 10^{-7} \sim 3.99 \times 10^{-7}$ cm/s,平均为 3.86×10^{-7} cm/s(表 2),北部陆坡及北槽坡区渗透系数最小。渗透系数的变异性较大,变异系数为 0.35~0.47。从垂向上看,各区渗透系数呈现两头低、中间高。

土的渗透性与其粒度组成、孔隙的微结构特征等有直接的联系。该区渗透系数与其他物理指标的相关性均较低,相关系数绝对值基本小于 0.3。

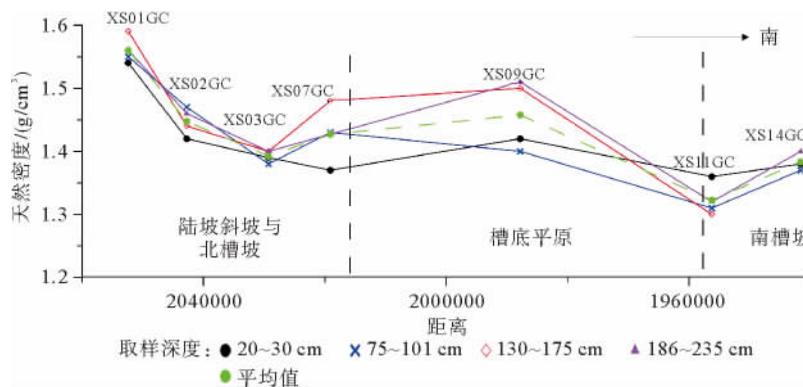


图 4 西沙海槽东部浅表层土天然密度变化

Fig. 4 Density variation of seabed soil in study areas

3.2.4 压缩性

土的压缩性是土体在荷重作用下产生的变形特征,一般可由压缩系数和压缩模量表征。研究区内浅表层土的压缩系数为 $2.7 \sim 3.47 \text{ MPa}^{-1}$,属于高压缩性土,变异系数平均为 0.28(表 2)。区域上北槽坡的压缩性要低于槽底平原和南槽坡。垂向上,陆坡斜坡及北槽坡和南槽坡区浅表层土的压缩性随深度增加略有降低,而槽底平原却表现出相反的趋势。

3.2.5 抗剪强度

土的抗剪强度由土的黏聚力和内摩擦角计算得出。土的抗剪强度试验有多种方法,具有各自的优缺点,适用于不同条件下的工程评价。此次共采用了 4 种试验方法,分别是直接快剪、三轴 UU(总应力法)、三轴 CU(总应力法)以及三轴 CU(有效应力法)。

研究区内直接快剪和三轴 UU 试验所得到的黏聚力和内摩擦角近似,黏聚力的平均值分别为 2.83 和 2.08 kPa,内摩擦角的平均值分别为 5.76° 和 1.69° (表 2)。三轴 CU(总应力法和有效应力法)试验所获得的内摩擦角要普遍远高于另外两种方法所获得的值,其平均值分别为 13.43° 和 24.89° ,其黏聚力的平均值分别为 3.56 和 1.76 kPa。抗剪强度指标的变异性较高,其中直接快剪的黏聚力变异性最高,三轴 CU 试验的内摩擦角的变异性较低。

经相关性检验,研究区浅表层土的压缩系数、压缩模量与物理指标的相关性普遍较好,相关系数显著,而抗剪强度指标与物理指标间基本显示不出相关性。

3.3 含水合物细粒土力学特性

在水合物土合成与力学性质一体化实验装置

上,以南海北部陆坡区域浅表层土为实验介质,合成了不同水合物饱和度(0(含水率 30%)、5%(含水率 28%)、15%(含水率 24%)、25%(含水率 20%)、35%(含水率 16%)、45%(含水率 12%)、65.5%(含水率 3.5%)、75%(含水率 10%)、100%(含水率 0))的水合物土。并在不同围压条件下,对含水合物土分解前后的力学性质进行了测试。

这里需要特别指出:水合物饱和度 0~65.5% 时,含流体(一定配比的四氢呋喃与水溶液)量均为 30%,饱和度为 75% 和 100% 情况,样品制备前样品被流体完全饱和。两种方式均通过调整四氢呋喃液体的量来控制水合物饱和度。

在不同围压和水合物含量的条件下,低饱和度($<50\%$)水合物细粒土的应力应变曲线均表现为先上升后平稳,再上升再平稳的二次塑性过程,这与高饱和度的(65.5%~100%)水合物应力应变曲线仅表现为先上升后平稳的一次塑性过程明显不同(图 5)。在控制最大应变为 15% 时,试样破坏形式为纵向压裂或侧向隆起的形式。在水合物饱和度低于 50% 时,应力应变呈现两级弹性阶段,可能是由于试样首先由欠固结状态压实,这一阶段主要由骨架受力;然后水合物逐渐与骨架共同受力,呈现第二阶段的弹塑性变形。

图 6 给出了不同水合物条件下的土的黏聚力值。水合物的存在使土的抗剪强度显著增大,与自然状态下浅表层细粒土的黏聚力相比,其值增加几十倍。从图中可以看出,水合物饱和度低于 15% 时,黏聚力低于不含水合物(含水率 30%)的土的黏聚力;水合物饱和度为 25%~65.5% 时,黏聚力高于土本身的黏聚力;水合物饱和度高于 75%,土的黏聚力低于土本身的黏聚力。含水合物细粒土的黏聚力随水合物饱和度的增加呈现先增大后降低的趋势。

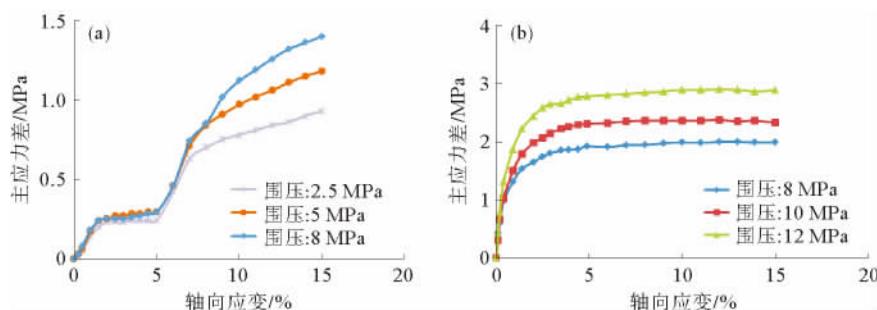


图 5 不同水合物饱和度土的应力应变曲线

(a) 水合物饱和度 15%; (b) 水合物饱和度 75%

Fig. 5 Stress-strain curves of soil with various gas-hydrate saturation

(a) gas-hydrate saturation 15%; (b) gas-hydrate saturation 75%

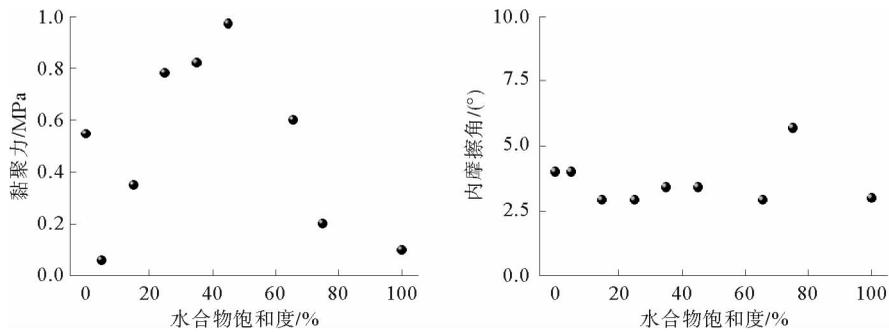


图 6 抗剪强度指标随水合物饱和度变化

Fig. 6 Variations of shear strength indexes with gas-hydrate saturations

势。在水合物饱和度为 5%~45% 时,黏聚力随饱和度而增加。可能是由于水合物饱和度低时,水合物包裹在土的土颗粒上,对黏聚力贡献不大;水合物饱和度较高时,水合物分布在孔隙空间中,填充了孔隙,使得颗粒之间的胶结性增强;水合物饱和度很高时,水合物的形成使得黏土颗粒间在膨胀作用下分离,使得原来的黏结失效,从而使得黏聚力再次下降。内摩擦角随饱和度的变化不明显,一般为 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 。

4 讨论

4.1 沉积环境与工程地质特性分区

本文根据地形地貌和取样间距,分别对研究区分区域和分深度对各指标进行了统计分析。各分组土的工程特性是否存在显著性差异,可通过对均值的差异显著性检验来进行探讨^[7]。对于大子样(超过 30)均值的差异显著性检验可采用 Z 检验,对于方差相等的小子样(小于 30)均值的差异显著性检验可采用 t 检验^[8]。

在显著性水平 $\alpha = 0.05$,对划分区间的差异显著性进行检验,检验结果显示,陆坡斜坡及北槽坡区与槽底平原和南槽坡区浅表层土物理力学特性差异显著,槽底平原与南槽坡区仅塑性指数和砂粒含量差异显著,其他指标差异不显著。各区垂向上土层物理力学特性差异均不显著。

土的工程特性宏观上受控于其沉积环境^[2]。Yang 等^[9]利用高分辨的沉积物磁性研究,在研究区建立了浅表层沉积物的年代地层框架。研究区浅表层土为晚更新世以来沉积的半深海沉积物,沉积速率平均为 $6.06\sim 9.69\text{ cm/ka}$ ^[10]。南海北部晚更新世以来沉积环境经历了多次海平面升降旋回,最大海平面波动为 $131\sim 142\text{ m}$ ^[11-13]。南部的槽底平原与南槽坡区水深较深,海平面波动对其半深海沉积

环境影响较小,而北部更靠近陆地,且水深相对较浅,海平面波动对其沉积环境、物质来源影响较大,造成了研究区不同区域土的工程特性差异显著。垂向上,沉积物沉降后正常而缓慢地固结,表现为各项物理力学指标如天然密度、含水率、压缩系数等在垂向上均无显著性变化。

4.2 回归分析

回归分析是一种处理两个随机变量之间相关关系的数学方法。以前水合物调查区开展的海洋地质调查,未专门进行海底土的工程地质特性研究,利用已有资料(粒度、含水率、密度),通过建立回归方程,可以对已研究区的土的工程特性进行初步分析。

通过相关性分析可以看出,土的物理指标间相关性较好,从散点图上显示呈线性相关,而力学指标与物理指标的相关性较差。本文对指标间进行了一元或多元线性回归分析,回归结果见表 3。

粉砂是本区浅表层土主要的粒组成分。它与其他物理指标间均能建立起较好的回归方程。反映出土的物性受粒度的控制作用,而粉砂含量是主要控制因素。土的物理特性与其力学特性存在着内在的联系。但是通过相关性检验,研究区土的物理指标与力学指标的相关性较差。反映出土的力学特性更多地与土的微观结构特征、矿物成分以及应力历史等多种因素有关,而用土的宏观物理属性较难描述。

5 结论

(1) 研究区浅表层土质类型单一,全区总体为高液限粉土,以粉粒为主,黏粒次之,砂粒极少。土的液性指数和塑性指数均高,可塑性强。土的含水率、孔隙比高,呈饱和状态,天然密度低,在 $1.29\sim 1.59\text{ g/cm}^3$ 之间,变异性小。透水性极低,平均为 $3.86\times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。土的压缩性高,压缩系数 $1.22\sim$

表3 物理力学指标间回归结果

Table 3 Results of regression analysis between physical and mechanical properties

因变量	自变量	回归方程	R^2	线性显著性
w_L	w	$w_L = 0.386w + 42.277$	0.496	显著
	w, c_Y	$w_L = 0.249w - 0.715 c_Y + 100.59$	0.568	显著
w_p	w_L	$w_p = 0.562w_L - 3.107$	0.647	显著
	w, c_Y	$w_p = 0.19w - 0.358 c_Y + 45.157$	0.496	显著
w	c_Y	$w = -2.431 c_Y + 257.344$	0.467	显著
	c_T	$w = 2.241 c_T + 30.998$	0.433	显著
	e	$w = 36.144e - 1.560$	0.974	显著
	ρ	$w = -279.927\rho + 505.209$	0.800	显著
ρ	c_Y	$\rho = 0.008 c_Y + 0.911$	0.527	显著
	d_{50}	$\rho = 14.807d_{50} + 1.275$	0.428	显著
e	c_Y, c_T	$e = -0.044 c_Y + 0.027 c_T + 4.824$	0.507	显著
a_{1-2}	e	$a_{1-2} = 1.295e - 0.977$	0.743	显著

注: w_L :液限含水率; w_p :塑限含水率; w :含水率; ρ :天然密度; e :孔隙比; a_{1-2} :压缩系数; c_Y :粉粒含量; c_T :黏粒含量。

5.39, 为高压缩性土; 抗剪强度较低, 其黏聚力平均值为 1.76~3.56 kPa。区域上各物理力学指标表现出很好的统计规律性, 反映出不同区域沉积环境的差异性。

(2) 研究区浅层土的粉粒与黏粒含量的相关性以及含水率、孔隙比和天然密度三者之间的相关性极好; 渗透系数与其他物理指标的相关性较差; 物理指标与力学指标间的相关性普遍较差, 但与压缩系数等个别指标的相关性较好。

(3) 由均值差异显著性检验, 西沙海域陆坡斜坡及北槽坡区与槽底平原和南槽坡区物理力学特性存在显著差异, 槽底平原与南槽坡区仅塑性指数和砂粒含量差异显著, 其他指标差异不显著。各区垂向上土层物理力学特性差异均不显著。

(4) 不同水合物饱和度在不同围压下的土力学特性三轴实验测试表明: 低饱和度应力应变呈现两级弹塑性阶段; 黏聚力值随饱和度的增加先增大后降低, 内摩擦角变化不明显。

参考文献 (References)

- [1] 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(4): 50-53. [ZHENG Zhichang, CHEN Junren, ZHU Zhaoyu. Physical and mechanical characteristics of seabed soils and its geological environment in South China Sea[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(4): 50-53.]
- [2] 牛作民. 南海海底细粒土的工程地质性质基本特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992, 12(1): 15-25. [NIU Zuomin. Engineering geological properties of fine soil in the seafloor of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1992, 12(1): 15-25.]
- [3] 卢博. 东沙群岛海域沉积物及其物理学性质的研究[J]. 海洋学报, 1996, 18(6): 82-89. [LU Bo. Study on sediment and its properties in Dongsha Islands[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 18(6): 82-89.]
- [4] 刘方兰, 吴庐山. 西沙海槽海域地形地貌特征及成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 7-14. [LIU Fanglan, WU Lushan. Topographic and morphologic characteristics and genesis analysis of Xisha Trough Sea Area in the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(3): 7-14.]
- [5] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989: 1-12. [GAO Dazhao. Principles of the Reliability of Soil Mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989: 1-12.]
- [6] 张晓飞, 陈坚, 徐勇航, 等. 南海北部西侧海域粘土矿物的含量分布特征及来源分析[J]. 台湾海峡, 2012, 31(2): 268-276. [ZHANG Xiaofei, CHEN Jian, XU Yonghang, et al. Distribution characteristics and source analysis of clay minerals contents in surface sediments of the northwestern South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(2): 268-276.]
- [7] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 62-70. [Editorial Committee of Engineering Geology Manual. Engineering Geology Manual (III)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 62-70.]
- [8] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 82-96. [WANG Rongxin. Mathematical Statistics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986: 82-96.]
- [9] Yang X Q, Friedrich H, Wu H Y, et al. Geomagnetic pal-

- eointensity dating of South China Sea sediments for the last 130 kyr[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284: 258-266.
- [10] 蔡观强,彭学超,陈鸿君,等.南海西沙海槽 83PC 柱状沉积物组成特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 77-84. [CAI Guanqiang, PENG Xuechao, CHEN Hongjun, et al. The component characteristics and paleoenvironmental significances for sediments in core 83PC from the Xisha trough, South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 77-84.]
- [11] 陈欣树,包砾彦,陈俊仁,等.珠江口外陆架晚第四纪最低海面的发现[J]. *热带海洋*, 1990, 9(4): 73-77. [CHEN Xinshu, BAO Liyan, CHEN Junren, et al. Discovery of lowest sea level in late quaternary at the continental shelf off Pearl River mouth[J]. *Tropic Oceanology*, 1990, 9(4): 73-77.]
- [12] 朱袁智,王有强,赵焕庭,等.南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁成岩作用与海平面变化关系[J]. *热带海洋*, 1994, 13(2): 1-8. [ZHU Yuanchi, WANG Youqiang, ZHAO Huanting, et al. The relationship between diagenesis of Quaternary coral reef of Yongshu reef in Nansha islands and sea level changes[J]. *Tropic Oceanology*, 1994, 13(2): 1-8.]
- [13] 姚衍桃,Jan Harff, Michael Meyer,等.南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2009, 39(6): 753-762. [YAO Yantao, Jan Harff, Michael Meyer, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. *Science in China Series: D-Earth Science*, 2009, 39(6): 753-762.]

GEOTECHNICAL FEATURES OF THE SEABED SOILS IN THE EAST OF XISHA TROUGH AND THE MECHANICAL PROPERTIES OF GAS HYDRATE-BEARING FINE DEPOSITS

LIU Wentao¹, SHI Yaohong¹, ZHANG Xuhui², ZENG Ningfeng¹, YANG Jiangping¹, HE Haijun¹

(1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to define the geotechnical features of the seabed soil and the mechanical properties of the hydrate-bearing fine deposits, soil testing was carried out for the gravity cores recovered from the east of the Xisha trough in 2012 in addition to the mechanical experiments of tetrahydrofuran (THF) hydrate in the fine deposits taking from the northern slope of the South China Sea. Results show that the seabed soil of the investigation area is simply composed of elastic silt (MH). There are significant differences in geotechnical features of the seabed soil among the northern slope of the continent, the northern slope of the trough, the trough plain and the southern slope of the trough. The fine soil with different hydrate saturation is also very different in geotechnical features. The soil with low hydrate saturation has twice of plastic failure, while the soil with high hydrate saturation has only once. As the hydrate saturation increases, the cohesion of hydrate-bearing fine soil increases first, then decreases. However, the angle of internal friction doesn't change distinctly.

Key words: seabed soil; geotechnical features; gas hydrate fine soil; mechanical experiment; Xisha trough