

文章编号:1005-9865(2021)06-0090-09

南海北部深水区表层沉积物 工程性质的统计特征分析

刘剑涛¹, 师玉敏^{2,3}, 王俊勤⁴, 朱友生¹, 李畅飞^{2,3}, 漆文刚^{2,3}, 高福平^{2,3}

(1. 中海油田服务股份有限公司物探事业部, 天津 300459; 2. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049; 4. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要: 针对从中国南海北部海域某深水区采集的表层沉积物柱状样, 进行了沉积物微观结构的扫描电镜测试、矿物成分的 X 射线衍射试验以及物理和力学性质的统计学分析。结果表明, 该深水区海底表层沉积物通常为有机质软黏土, 具有高含水率、低密度、高孔隙比、高液限、高可塑性、低强度等典型特征。统计分析和假设检验表明, 沉积物的物理和力学指标均呈现变异性, 且后者普遍高于前者。相对密度、含水率、液塑限和塑性指数服从正态分布; 容重、碳酸盐含量、不排水抗剪强度、灵敏度接近假设检验结果, 近似服从正态分布。研究结果可为深水海底工程结构设计的海床土性参数取值提供参考。

关键词: 深海沉积物; 南海北部; 微观结构; 物理力学特性; 统计特征

中图分类号: P736.2 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2021.06.010

Statistical characteristics analyses on engineering properties of surface sediments in the deep-water of northern South China Sea

LIU Jiantao¹, SHI Yumin^{2,3}, WANG Junqin⁴, ZHU Yousheng¹, LI Changfei^{2,3}, QI Wengang^{2,3}, GAO Fuping^{2,3}

(1. Geophysical Services Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China; 2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China National Offshore Oil Company (CNOOC) Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The microstructure and mineral composition of the samples of surface sediments from a deep-water field in the northern South China Sea are investigated via SEM and XRD; meanwhile, statistical analyses are performed on the physical and mechanical properties of the sediments. It is found that the surface sediments are generally soft organic clay, characterized by high water content, low density, high void ratio, high liquid limit, high plasticity, low strength, etc. Moreover, the properties of such deep-sea sediments exhibit an inherent variability. Statistical analyses and hypothesis testing indicate that the variability of mechanical properties is usually more pronounced than that of physical properties. The specific gravity, natural water content, plastic and liquid limit, and plasticity index basically obey normal distributions, while the unit weight, carbonate content, undrained shear strength and sensitivity match well with hypothesis testing results, approximately following normal distributions. The present results on the statistical features of deep-sea sediments may provide a reference for geotechnical design of subsea structures in deep waters.

Keywords: deep-sea sediments; northern South China Sea; microstructure; physical and mechanical properties; statistical characteristics

收稿日期: 2020-10-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(11825205); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB22030000)

作者简介: 刘剑涛(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事海洋工程地质勘察、海底结构物与土体相互作用研究。E-mail: liujt3@cosl.com.cn

通信作者: 高福平(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋土力学、流固耦合力学研究。E-mail: fpgao@imech.ac.cn

中国南海是我国四大海区中面积最大、最深、自然资源最丰富的海区,其海底地层中蕴藏着巨大的油气矿产资源。海洋平台、海底管道等工程结构安装于海床上,其安全性直接受海底沉积物的物理和力学特性影响;而沉积物的性质与其沉积环境、物质组成以及微观结构等因素密切相关^[1-3]。全球海底沉积物的厚度分布具有不均匀性,最大厚度可达 10 km^[4],其中陆源碎屑、火山碎屑、自生沉积、生物沉积等是主要的物质来源^[1]。

海底沉积物的物理和力学特性是海洋岩土工程设计参数取值的依据。目前,针对我国海底沉积物性质的研究主要集中于辽东湾、黄河口、南黄海、东海部分区域、台湾近岸以及南海北部浅海海域等^[5-8],常见的沉积物类型为传统石英砂、钙质砂以及粉质黏土等。近年来,面向深海资源开发需求,已开展了特定深水区海底沉积物的现场取样和室内试验以及原位测试分析。深水特殊的沉积环境使得海底沉积物具有不同于近海浅水区沉积物的工程性质^[2, 9-15]。例如,墨西哥湾北部海域(水深约 1 300 m)^[15]、南海东北部陆坡区(水深约 1 200 m)^[12]、南海西部海盆(水深超过 2 000 m)^[11]等海底表层沉积物的前期研究表明,深水沉积物多为细颗粒多孔介质,通常具有高孔隙比和低强度的特点。海底沉积物具有天然变异性,不同海域沉积物性质的量化特征值及波动范围通常具有过大的离散性。概率论与数理统计方法提供了获得差异性群体广泛特征的有效途径^[16],统计单元体内需要具有相同的地貌特征、地质年代及沉积环境^[17],沉积物的性质应基本接近。当所获取的海底沉积物样品数量相对较少时^[11-12],则不足以支持对其物理和力学性质统计特征的定量研究。

鉴于深海极端环境对海底现场取样及勘探测试等带来的技术挑战,目前对我国南海深水海底沉积物的物理和力学特性的科学认识尚不够清晰。深入探究其典型统计特征对于深水海底工程结构可靠度设计的海床参数取值具有重要意义。根据数理统计理论,样本数据应是随机地选自同一统计单元体,且在空间上相隔一定距离以保证样本数据的独立性和代表性。对中国南海琼东南盆地北部海域 21 个典型站位的表层沉积物柱状样品开展了微观结构、矿物成分、相对密度、天然含水量、天然密度、孔隙比、液塑限等物理指标,以及不排水抗剪强度、灵敏度、超固结比等力学指标的测试,并对试验结果进行了统计学分析。

1 研究区域概况及样品信息

研究区域位于中国南海琼东南盆地北部海域。采用大型活塞式重力取样器(jumbo piston corer,简称 JPC)重力活塞取样法获取了 20 个典型站位(编号:No.12~No.41,见表 1)的海底表层沉积物柱状样品。表 1 给出柱状样品的相对位置坐标、水深和长度等信息。现场取样位置的水深范围为 500~1 200 m;各站位分布于 14 km×14 km 的准矩形海域,相对位置如图 1 所示。此外,采用钻孔取样技术在 1 400 m 水深处获取了站位(编号:No.42)的深层沉积物样品,取样深度为 82.0 m。根据 AMS¹⁴C 测年和浅地层剖面资料,研究区域具有相同地貌特征、地质年代及成因类型,因此将其作为一个统计单元。

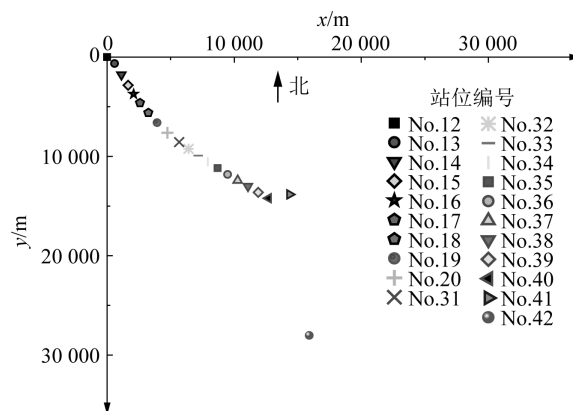


图 1 南海北部深水区表层沉积物取样站位相对位置

Fig. 1 Relative positions of sampling stations of the surface sediments in the deep-water of northern South China Sea (SCS)

表 1 南海北部某深水区表层沉积物柱状样品的相对位置坐标、水深和长度

Tab. 1 Relative position coordinate, water depth and length of columnar samples of the surface sediments in the deep-water of northern SCS

站位编号	相对位置(x,y) /(m,m)	水深 /m	样品长度 /m	站位编号	相对位置(x,y) /(m,m)	水深 /m	样品长度 /m
No.12	(0,0)	507.0	4.90	No.33	(7 169,9 919)	998.8	5.10
No.13	(582,649)	564.0	5.00	No.34	(7 920,10 555)	1 032.0	4.90
No.14	(1 129,1 769)	627.0	5.10	No.35	(8 696,11 189)	1051.0	5.00
No.15	(1 645,2 830)	687.0	5.10	No.36	(9 478,11 821)	1 078.0	4.80
No.16	(2 087,3 737)	728.5	5.00	No.37	(10 282,12 417)	1 102.0	4.50
No.17	(2 581,4 608)	766.0	5.00	No.38	(11 089,13 016)	1 120.4	4.10
No.18	(3 244,5 620)	830.0	5.20	No.39	(11 896,13 620)	1140.4	5.00
No.19	(3 929,6 603)	869.0	5.10	No.40	(12 700,14 218)	1 159.5	5.00
No.20	(4 742,7 629)	900.0	5.20	No.41	(14 361,13 832)	1196.5	4.30
No.31	(5 668,8 551)	936.0	5.10	No.42	(15 913,28 036)	1 400.0	82.00
No.32	(6 401,9 238)	962.0	5.10				

2 研究方法

对采集的柱状样品进行分割,针对各分段样品依次进行了室内土工试验测试,包括扫描电子显微镜(SEM)试验,X射线衍射(XRD)试验,颗粒分析试验,相对密度、含水率、容重、液塑限等物理性质试验,固结试验,十字板剪切试验和落锥试验等。试验标准参考《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)^[18]。

1) SEM 和 XRD 试验方法

选取典型样品,通过冷场发射扫描电子显微镜(日本电子(JEOL)JSM6700F)观察其微观结构和形貌。由于深海表层沉积物原状样含水量高,为防止试样在干燥过程中收缩变化破坏原始结构,采用低温冷冻真空升华干燥法制备样品。测试过程中放大倍数为 500~10 000 倍。

采用日本理学公司生产的 X 射线粉末衍射仪测定沉积物的矿物组成,试验参照我国石油天然气行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2010)进行。

2) 物理和力学指标试验方法

研究区域样品主要为细粒土,分别采用密度计法测定颗粒分布;比重瓶法测量相对密度;室内烘干法测定含水率,烘干温度保持在 75°C,防止温度过高破坏样品中的有机质;环刀法测定天然密度和容重;依据相对密度、含水率和密度试验计算孔隙比;GYS-2 数显式土壤液塑限联合测定仪测定液塑限,并计算液塑性指数;压力法测定碳酸盐含量。

采用 GZQ 型三联固结仪开展固结试验,其中压力等级分别为 10 kPa、20 kPa、40 kPa、80 kPa、160 kPa、320 kPa、640 kPa、1 280 kPa、2 560 kPa;分别采用 GEOTEST 手动十字板剪切仪(torvane)、WF1730 型室内电动十字板剪切仪(lab vane)、VJT0808 电子数显落锥仪(fall cone)开展剪切试验,测试沉积物的不排水抗剪强度和灵敏度。

3) 试验结果的统计分析方法

针对沉积物物理和力学性质的测试结果,统计获取各指标的变化范围、变异性、概率分布类型。表征土体变异性的数字特征有均值 μ 、标准差 σ 。采用参数无偏估计统计相应的标准差。变异系数 $cov = \sigma/\mu$,表征相对于均值的平均偏离程度。在岩土工程可靠度理论中,土性参数概率分布类型的选取对可靠度分析影响显著。采用 K-S 检验方法对试验观测数据进行概率分布假设性检验。首先建立统计假设 H_0 ,检验每一个试验点上的样本分布函数和假设分布函数之间的偏差,在一定的显著水平条件下(通常取 0.05)根据 P 值检验假设能否被接受。

3 深海表层沉积物的微观结构、矿物成分

站位编号 No.34 样品的 SEM 测试结果如图 2 所示,表层沉积物颗粒形态展示为片状和凝块状;排列方

式呈絮凝或叠片状结构;絮凝结构之间的孔隙表现为宏观孔隙,小于颗粒尺寸;多种粒间接触形式共存,如“边—边”、“边—面”、“面—面”接触。深海沉积远离大陆影响,具有明显不同于近岸沉积物的特征,可观察到大量微生物残骸。生源沉积是深水区具有特色和代表性的沉积物类型:钙质生物主要包含有孔虫、颗石藻、翼足类以及少量介形虫类;硅质生物主要包含硅藻和放射虫等。可见,随着水深的增加及相应海洋环境的变化,生物沉积(浮游和底栖动植物的遗骸及碎片等)逐渐占据主导地位,从而使得深海沉积物中含有大量的自生有机质。

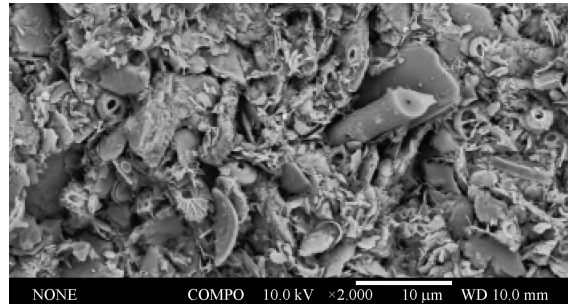


图 2 中国南海北部某深水区海底沉积物微观结构的扫描电镜照片(站位编号:No. 34)

Fig. 2 Scanning electron micrograph of the microstructure of deep-water sediments in the northern South China Sea (the sampling station number: No. 34)

XRD 测试结果如表 2 所示,沉积物的主要矿物组成为黏土矿物,含量约为 42%~50%;而黏土矿物以伊蒙混层和伊利石为主,其中伊蒙混层所占比重约为 60%~80%;此外,还含有少量的高岭石和绿泥石。这些黏土矿物通常带有负电荷,与水混合后会呈现一定可塑性。

表 2 沉积物矿物组成

Tab. 2 Mineral compositions of the sediments

站位编号	矿物含量/(%)				黏土矿物相对含量/(%)			
	石英	斜长石	方解石	黏土矿物	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
No.12	24.9	8.7	9.4	44.3	64	21	6	9
No.13	32.9	6.9	10.4	49.8	61	22	11	6
No.14	33.4	5.4	16.2	45.0	72	17	—	11
No.15	37.8	8.1	11.8	42.3	66	17	9	8
No.34	26.1	4.7	26.1	43.1	82	12	3	3

站位编号 No.34 样品的沉积物颗粒级配曲线如图 3 所示。可以看出,不同深度的沉积物级配曲线连续,粒径大小分布范围 0.001~0.1 mm,中值粒径 d_{50} 为 0.05~0.09 mm。颗粒组分以粉粒为主(0.075~0.005 mm),黏粒次之(0.005~0.002 mm),少量胶粒(<0.002 mm)。可见该研究区域为细颗粒的黏性土。

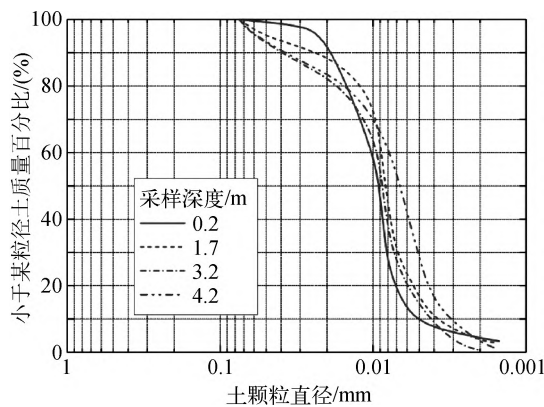


图 3 沉积物的颗粒级配曲线(站位编号:No. 34)

Fig. 3 Particle size distribution curves of the sediments (the sampling station number: No. 34)

以上述 21 个典型站位的沉积物柱状样为统计单元,测试并分析了样本主要物理指标的变化范围、均值、标准差、变异系数 cov 、概率分布类型等,结果如表 3、图 4 和图 5 所示:

1) 沉积物的相对密度 G_s :变化范围为 2.68~2.76,统计均值为 2.72;其值取决于沉积物中的矿物成分^[19];变异系数为 0.73%,可见其变异性较小。

2) 天然含水率 w :在接近床面处最高,随土样深度增加而下降,波动范围为 51%~133%;均值为 91.7%,大于均值液限(78.3%,图 4(e));这表明沉积物含水率较高,呈流塑态。

3) 天然容重 γ :介于 13.0~17.0 kN/m^3 之间,均值为 14.6 kN/m^3 。

4) 孔隙比 e :沿土样深度显著降低,介于 1.4~3.6 之间,均值为 2.5。超过 90%的数据均大于 2.0,可见沉积物孔隙较大、结构疏松。

5) 塑限 w_p 和液限 w_L :变化范围分别为 21.3%~58.0%、43.5%~105.0%,均值分别为 34.5%、78.3%。

6) 塑性指数 I_p 和液性指数 I_L :变化范围分别为 14.9%~66.0%、0.7~2.9,均值分别为 43.1%、1.4。结合 XRD 测试结果和颗粒级配曲线,可见沉积物颗粒比表面积较大,黏土矿物含量较多,为高塑性黏土。

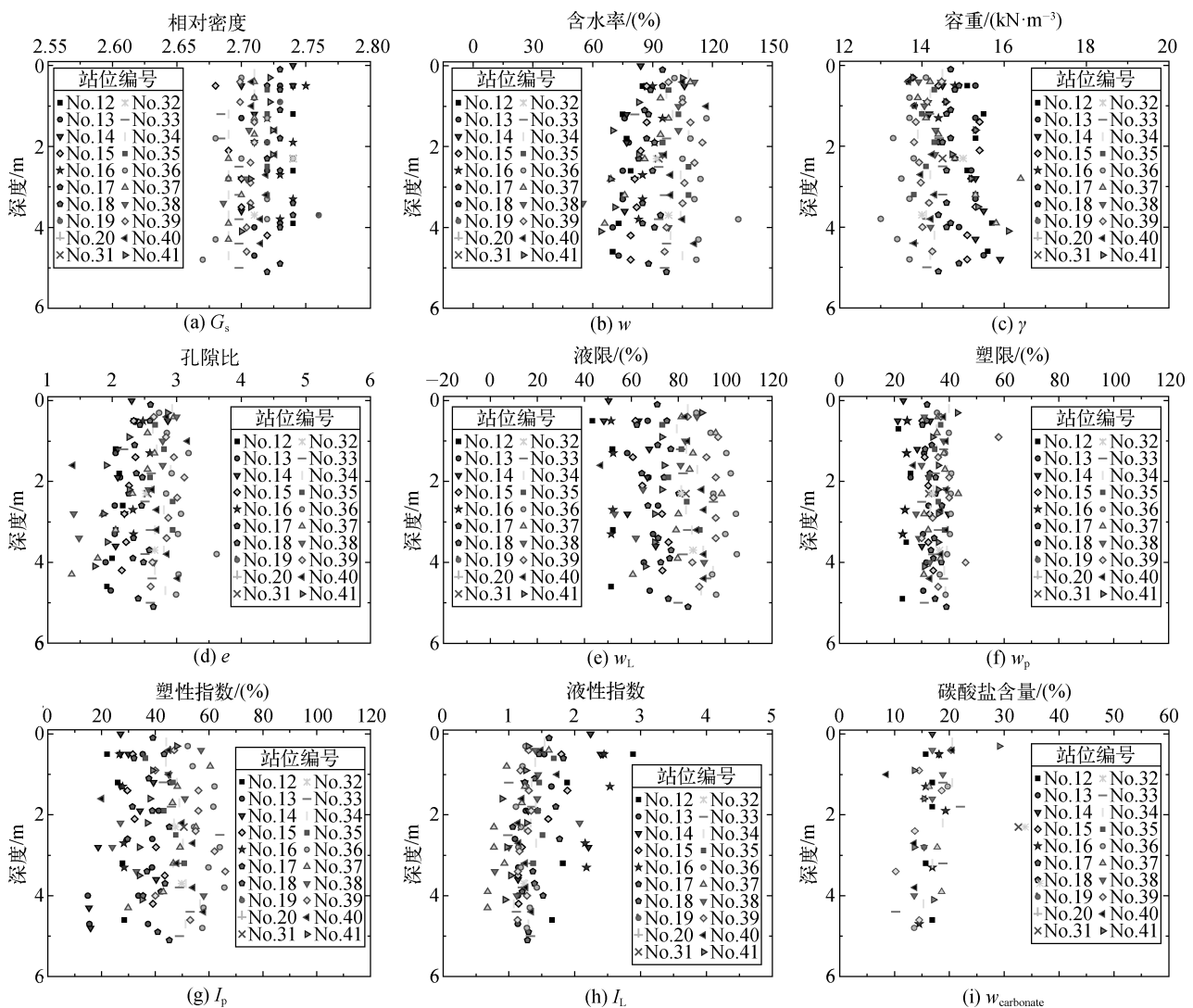


图 4 表层沉积物物理指标的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of physical indexes of surface sediments

对比其他海域沉积物的试验结果^[11-14],文中研究区域沉积物天然含水率、孔隙比均高于近海区域,低于超深水区域;而容重的规律则相反。结合图 2 的微观结构形态,可以看出该区域表层沉积物具有高孔隙比、高含水量、低密度的特点。三者的变异系数分别为 13.8%、5.0%、15.2% (见表 3),属于低变异性水平 ($cov < 25%$)^[16]。

表 3 表层沉积物土性指标的统计特征
Tab. 3 Statistical characteristics of soil properties of surface sediments

土性指标	样本容量	分布范围	均值	中位数	标准差	变异系数/(%)	
相对密度	139	2.68~2.76	2.72	2.72	0.020	0.73	
天然含水率/(%)	150	51.0~133.0	91.7	94.0	13.7	13.8	
容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	154	13.0~17.0	14.6	14.4	0.73	5.0	
孔隙比	143	1.4~3.6	2.5	2.6	0.38	15.2	
液限/(%)	143	43.5~105.0	78.3	80.3	13.2	16.9	
塑限/(%)	143	21.3~58.0	34.5	34.9	4.9	14.2	
塑性指数/(%)	143	14.9~66.0	43.1	44.9	11.1	25.8	
液性指数	143	0.7~2.9	1.4	1.3	0.36	25.7	
不排水抗剪强度/ kPa	torvane	196	1.0~13.2	5.8	5.6	2.4	41.4
	lab vane	147	1.6~13.7	5.8	5.2	2.8	48.3
	fall cone	134	0.6~13.8	5.3	5.0	3.1	58.5
	lab vane	143	1.1~3.3	1.8	1.7	0.52	28.8
灵敏度	fall cone	129	1.1~4.4	2.6	2.6	0.75	28.7
	lab vane	77	1.1~81.6	42.8	43.4	23.4	54.7
超固结比	UU	75	5.6~81.8	44.3	44.8	22.4	50.1
	oedometer	12	2.9~78.8	39.6	44.4	27.5	69.4

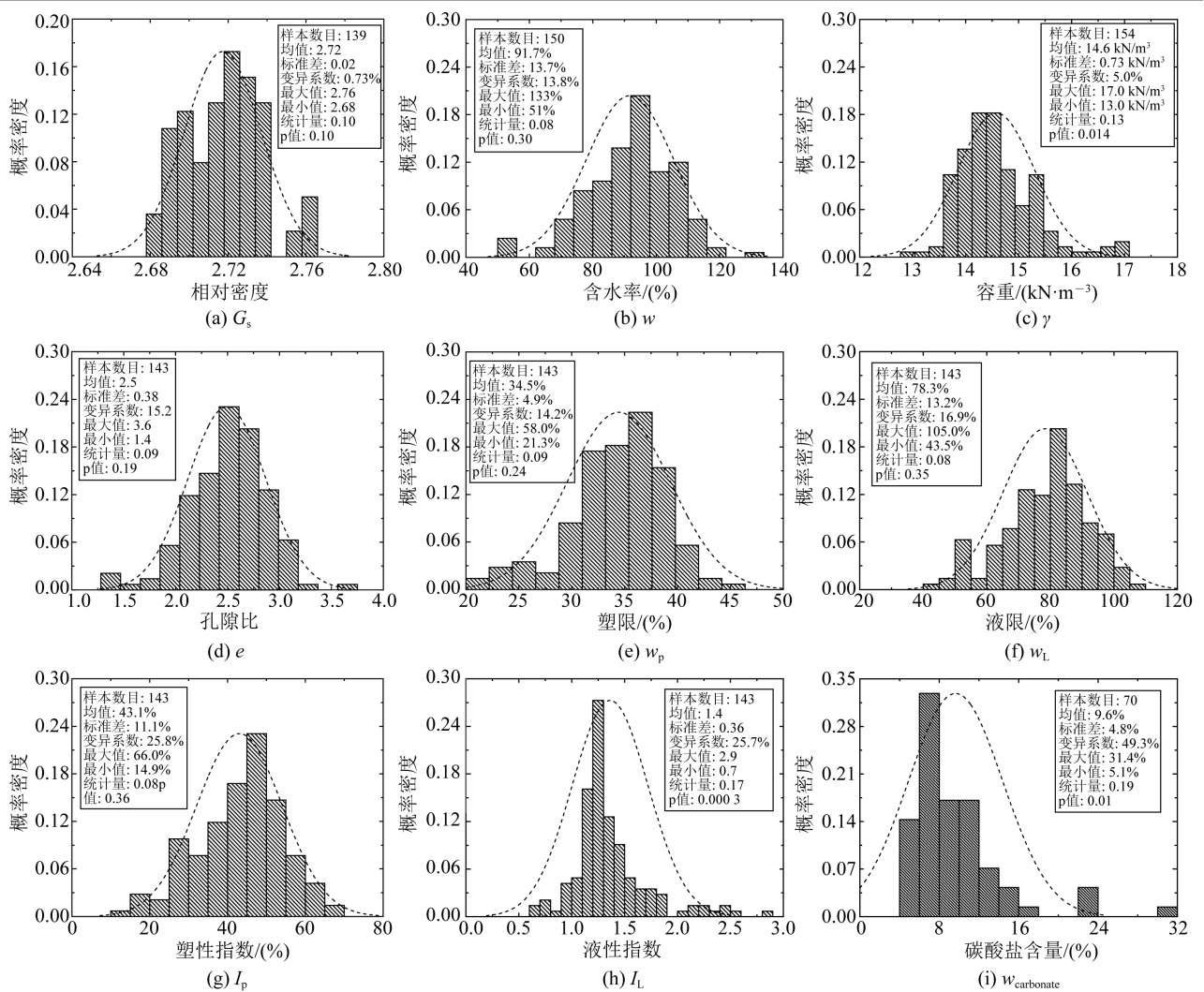


图 5 表层沉积物物理指标的概率密度

Fig. 5 Probability density of physical indexes of surface sediments

鉴于性质相差甚远的沉积物可能具有相近的塑性指数值,图 6 给出了塑性图^[19]。当液限 $w_L \geq 50\%$, 塑性指数 $I_p \geq 7$ 且 $I_p \geq 0.73(w_L - 20)$ 时,则为高液限黏土。可见,表层沉积物多属于高液限黏土,少部分为高液限粉土。此外,塑限、液限、塑性指数和液性指数的变异系数分别为 14.2%、16.9%、25.8%、25.7% (见表 3),近似为中低变异性水平 ($25\% < cov < 40\%$)^[16]。

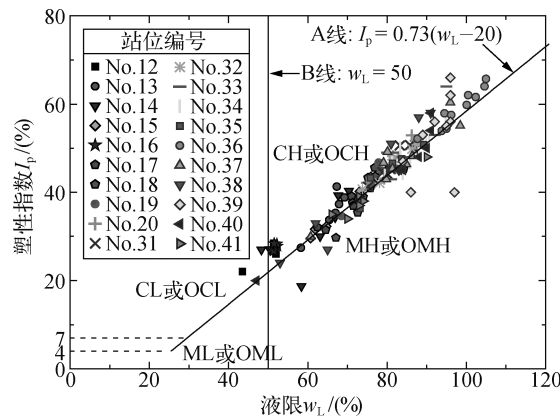


图 6 表层沉积物的塑性(CH、CL:高、低液限黏土;MH、ML:高、低液限粉土;O代表含有有机质)

Fig. 6 Plasticity chart of surface sediments (CH, CL: clay with high or low liquid limit; MH, ML: silt with high or low liquid limit; O means the organism is contained)

7) 碳酸盐含量 $w_{\text{carbonate}}$:介于 8.5%~37.6%之间,均值为 20.8%,这与张富元等^[1]基于南海东部海域水深为 330~2 000 m 的测试结果(均值为 18.89%)基本相当;变异系数约 49% (见图 5(i)),为高变异性 ($cov > 40\%$)。研究表明^[3],含碳酸盐的沉积物并不能压实到像非碳酸盐沉积物那样低的孔隙比,碳酸盐的胶结作用和絮凝结构会使得沉积物具有较高的孔隙率和液性指数。由于目前并没有标准的确定方法,该研究区域是否存在胶结物尚有待深入探究。图 5 给出了各指标的直方图,可直观反映其概率分布规律。常见的土性指标可采用中心极限分布(正态或对数正态分布)模拟^[16, 20-21];当变异系数不超过 30%且无显著偏度时,二者区别并不明显^[21]。假设服从正态分布,采用 Kolmogorov-Smirnov 方法进行假设检验。当检验概率 p 值小于显著水平 α (取为 0.05)时,该参数拒绝正态分布的假设,反之假设被接受。检验结果表明:相对密度、天然含水率、液塑限、塑性指数服从正态分布;容重、碳酸盐含量接近假设检验结果,近似正态分布;液性指数与假设检验结果相差较大,不符合正态分布。

4 深海表层沉积物的力学性质

图 7 给出了手动十字板、室内(电动)十字板、落锥仪 3 种试验方法所测得的不排水抗剪强度 s_u 的剖面特征。海床泥面附近(1.0 m 以内)强度约为 1.0~5.0 kPa;由于上覆压力增加、含水量减小,沉积物强度沿土样深度逐渐增大。编号为 No.12~No.41 的 20 个站位全部数据变化范围为 0.6~13.8 kPa,统计均值为 5.5 kPa,符合典型深海表层沉积物低强度的特点。

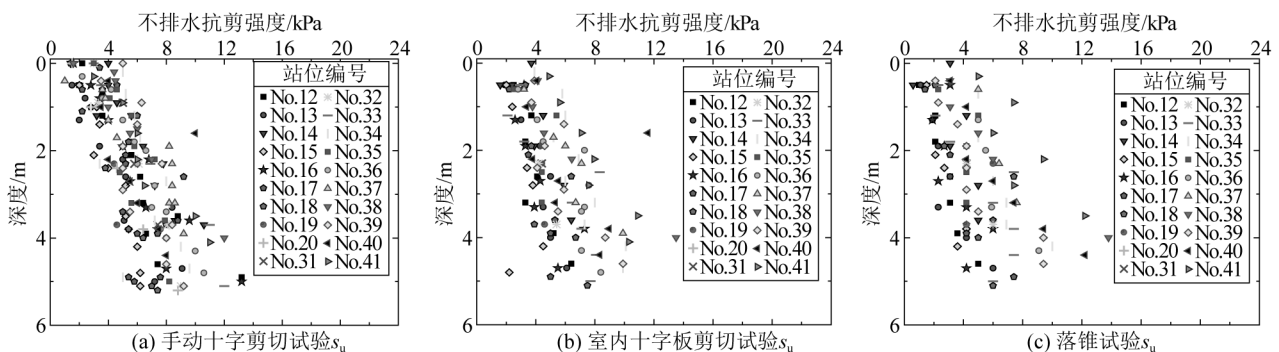


图 7 采用不同试验方法得到的不排水抗剪强度垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution of undrained shear strength obtained by different tests

灵敏度 S_t 反映了沉积物的触变性;当沉积物受到扰动时,絮凝结构破坏,导致抗剪强度迅速下降。如图 8(a)和(b)所示,灵敏度波动较大,介于 1.1~4.4 之间,均值为 2.2。可见,该研究区域沉积物非高灵敏度土体,这与其沉积速度、絮凝体的数量及其在基质中的排列紧密程度直接相关。图 9 给出了超固结比 OCR 沿土样深度的典型剖面(No.42 站位),该站位的取样深度为 82.0 m。沉积厚度 10 m 范围内沉积物处于超固结状态,超固结比高达 5 以上。这主要归因于海洋侵蚀、波流载荷作用导致的卸荷状态或碳酸盐的胶结作用使土颗粒化学键结合力增强等因素^[22]。随着深度的增加,超固结比逐渐降低为 1。当深度超出 30 m 时,沉积物则转为欠固结状态,这可能是由于沉积物的快速沉积作用,或者有机质分解和化学作用所产生的气体增大了孔隙压力,使得沉积物尚未完全固结稳定。

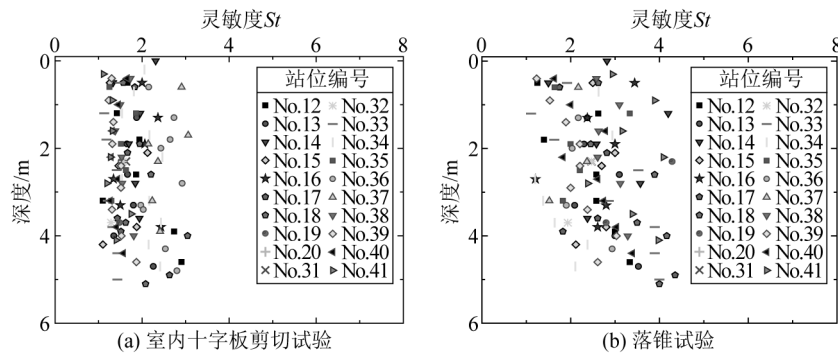


图 8 采用不同试验方法得到的灵敏度垂向分布
Fig. 8 Vertical distributions of sensitivity obtained by different tests

此外,样本统计显示(见图 10),不排水抗剪强度、灵敏度、超固结比的变异系数分别约为 43.6%、33.9%、85.8%,属于中高变异性水平。可见,力学指标的变异性普遍高于物理指标,当采用概率分析方法进行海底结构设计时须考虑指标变异性的影响。值得注意的是,超固结比由于样本数量过少,其变异性的可靠性仍需进一步研究校核。从图 7 和图 8 中还可以看出,同一柱状样品,不同试验方法的测试结果存在一定的差别(见表 3)。经统计分析,手动十字板抗剪强度、室内十字板抗剪强度、落锥仪灵敏度均服从正态分布;落锥仪抗剪强度、室内十字板灵敏度、超固结比存在明显峰值和偏度,与检验结果相差较大,不符合正态分布假设。

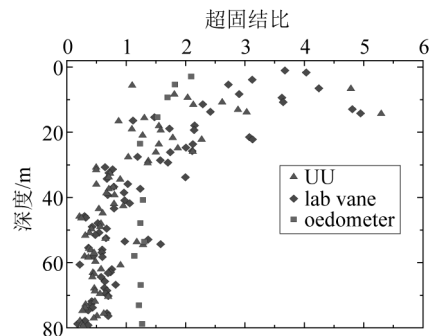


图 9 超固结比的垂向分布(站位编号:No.42)
Fig. 9 Vertical distributions of overconsolidation ratio (the sampling station number: No.42)

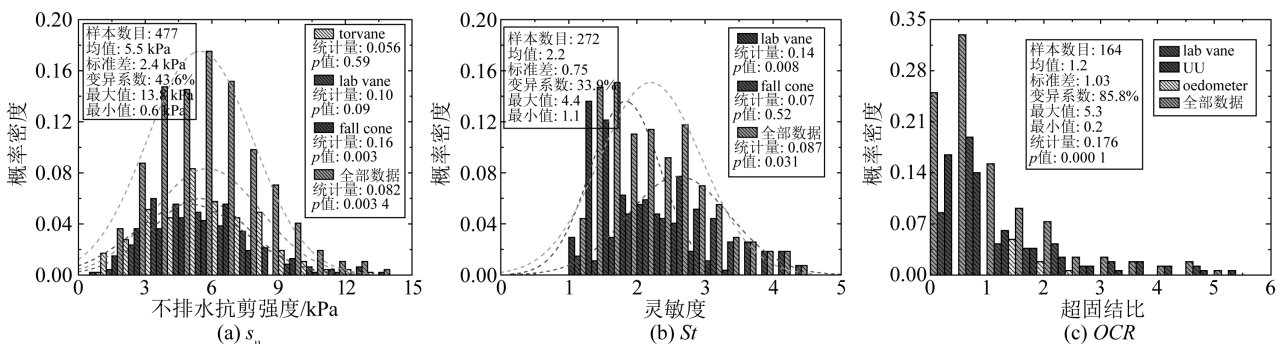


图 10 表层沉积物力学指标的直方图
Fig. 10 Histograms of mechanical indexes of surface sediments

5 结 语

针对中国南海北部某深水海域(水深 500~1 200 m)表层沉积物的宏微观性质进行了统计分析,主要结论如下:

1) 深海表层沉积物类型多为软黏土,微观呈现多孔隙的絮凝结构,黏土矿物成分以伊蒙混层为主,宏观上具有高含水率、低密度、高液限、高可塑性、高孔隙比、低强度等典型特征。

2) 深海表层沉积物的物理和力学指标存在不同的变异性。相对密度的变异性较小,可忽略不计;碳酸盐含量为高变异性;其它物理指标均为低变异性,其中衍生指标(液塑性指数)变异系数最大;力学指标变异性普遍高于前者,为中高变异性。

3) 统计分析和假设检验表明,该深水区域沉积物相对密度、含水率、液塑限、塑性指数符合正态分布;容重、碳酸盐含量、不排水抗剪强度、灵敏度接近假设检验结果,近似正态分布;不同试验方法所得力学指标统计结果存在一定的差异。

值得注意的是,以上结论是基于南海北部某特定深水区数量有限的沉积物样品测试结果分析得到的,以期南海深水海底工程结构基础设计的土性参数取值提供参考。

参考文献:

- [1] 张富元,章伟艳,张霄宇,等. 深海沉积物分类与命名[M]. 北京:海洋出版社,2013. (ZHANG Fuyuan, ZHANG Weiyan, ZHANG Xiaoyu, et al. Classification and nomenclature for deep-sea sediment[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013. (in Chinese))
- [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 Geological & Quaternary Geology, 1992, 12(1): 15-25. (in Chinese))
- [3] INDERBITZEN L. Deep-sea sediments: Physical and mechanical properties[M]. New York: Springer US, 1974.
- [4] STRAUME E O, GAINA C, MEDVEDEV S, et al. GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's oceans[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2019, 20(4): 1756-1772.
- [5] 徐元芹. 中国近海典型区域粘性土工程地质特征的差异性及其成因研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012. (XU Yuanqin. Study on the differences and geneses of geotechnical properties of cohesive soil in typical offshore areas of China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese))
- [6] 卢博,李赶先,黄韶健,等. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究[J]. 海洋工程, 2004, 22(3): 48-55. (LU Bo, LI Ganxian, HUANG Shaojian, et al. A study on physical properties of sediments on continental shelf seabed of the northern South China Sea[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(3): 48-55. (in Chinese))
- [7] 卢博,李赶先,孙东怀,等. 中国东南近海海底沉积物声学物理性质及其相关关系[J]. 热带海洋学报, 2006(2): 12-17. (LU Bo, LI Ganxian, SUN Donghuai, et al. A study on physical properties of sediments on continental shelf seabed of the northern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006(2): 12-17. (in Chinese))
- [8] 李国刚. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报(中文版), 1990(4): 470-479. (LI Guogang. The composition of clay minerals in surface sediments offshore China, distribution and geological significance[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990(4): 470-479. (in Chinese))
- [9] 戴旭,单仁亮,孔祥松,等. 马里亚纳海沟表层沉积物物理性质与微观结构初探[J]. 海洋工程, 2019, 37(2): 150-156. (DAI Xu, SHAN Renliang, KONG Xiangsong, et al. Preliminary study on physical properties and microstructure of deep-sea sediments from Marianas Trench[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(2): 150-156. (in Chinese))
- [10] 任玉宾,王胤,杨庆. 典型深海软黏土全流动循环软化特性与微观结构探究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1562-1568. (REN Yubin, WANG Yin, YANG Qing. Research on the full-flow cyclic degradation and micro-structure of the representative deep-sea soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1562-1568. (in Chinese))
- [11] 任玉宾,朱兴运,周令新,等. 南海西部海盆深海沉积物物理性质初探[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(10): 14-20. (REN Yubin, ZHU Xingyun, ZHOU Lingxin, et al. Preliminary study on physical properties of deep-sea sediments in the Western Basin of South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 14-20. (in Chinese))

(下转第 151 页)

Chinese))

- [18] ZHU Y, LUO X, DUAN M, et al. Installation technology of deepwater vertical collet connector[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 524-527: 1465-1470.
- [19] 郝静华. 弹性夹头自动定心装置与夹紧力的计算分析[J]. *工具技术*, 2010, 44(11): 83-85. (HAO Jinghua. Automatic centering device of elastic chuck and calculation analysis of clamping force[J]. *Tool Technology*, 2010, 44(11): 83-85. (in Chinese))
- [20] 于慧春, 殷勇, 李欣. 回归正交试验设计原理浅析[J]. *知识文库*, 2020(4): 203-204. (YU Huichun, YIN Yong, LI Xin. Analysis on the design principles of regression orthogonal experiments[J]. *Knowledge Library*, 2020(4): 203-204. (in Chinese))
- [21] Total Materia[EB/OL]. [2020-08-10]. <https://search.totalmateria.com/Search/QuickSearch>.
- [22] 仇丽霞, 凌建春, 寇林元. 正交试验设计最优条件选择的三种优化分析方法比较[J]. *中国卫生统计*, 2008(2): 154-157. (QIU Lixia, LING Jianchun, KOU Linyuan. Comparison of three optimization analysis methods for the selection of optimal conditions in orthogonal experiment design[J]. *China Health Statistics*, 2008(2): 154-157. (in Chinese))
- [23] ZHAI Wei, YANG Bo, LI Maodong, et al. Modify hitec molten salt and its properties tests by orthogonal experiment[C]// *Proceedings of 2015 2nd International Workshop on Materials Engineerings and Computer Sciences*. 2015: iwmeccs-15. 2015. 52.

~~~~~  
(上接第98页)

- [12] 蒋明镜, 李志远, 黄贺鹏, 等. 南海软土微观结构与力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(S2): 17-20. (JIANG Mingjing, LI Zhiyuan, HUANG Hepeng, et al. Experimental study on microstructure and mechanical properties of seabed soft soil from South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S2): 17-20. (in Chinese))
- [13] LEE J Y, KIM G Y, LEE C, et al. Characterization of deep sea sediments from the continental margin off Costa Rica[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 13-21.
- [14] BRANDES H G. Geotechnical characteristics of deep-sea sediments from the North Atlantic and North Pacific Oceans[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(7): 835-848.
- [15] WINTERS W J, DUGAN B, COLLETT T S. Physical properties of sediments from Keathley Canyon and Atwater Valley, JIP Gulf of Mexico gas hydrate drilling program[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 896-905.
- [16] PHOON K K, RETIEF J V. Reliability of geotechnical structures in ISO2394[M]. London: Taylor & Francis Group, 2016.
- [17] 夏银飞, 吴代华, 文建华. 珠江三角洲软土物理力学指标统计分析[J]. *公路交通科技*, 2008(1): 47-50. (XIA Yinfei, WU Daihua, WEN Jianhua. Statistical analysis of physical and mechanical indexes of soft soil in Zhujiang Delta[J]. *Journal of Highway and Transport Research and Development*, 2008(1): 47-50. (in Chinese))
- [18] GB/T50123—2019, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (GB/T50123—2019, Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [19] 赵成刚, 白冰. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017. (ZHAO Chenggang, BAI Bing. Fundamentals of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017. (in Chinese))
- [20] 张璐璐, 张洁, 徐耀, 等. 岩土工程可靠度理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011. (ZHANG Lulu, ZHANG Jie, XU Yao, et al. Reliability theory in geotechnical engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011. (in Chinese))
- [21] 张继周. 区域性软土土性参数随机场模型与随机固结沉降的研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2010. (ZHANG Jizhou. Research and application of random field model of Regional soft soil parameters and stochastic consolidation settlement[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [22] 朱而勤. 近代海洋地质学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991. (ZHU Erqin. An introduction to marine geology[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1991. (in Chinese))