

魏定邦, 杨强, 夏建新. 深海沉积物抗剪强度影响因素及其变化规律[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(8): 28-33.

深海沉积物抗剪强度影响因素及其变化规律

魏定邦, 杨强, 夏建新*

(中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083)

摘要:深海沉积物土工力学特性是研发深海海底作业装备的依据。利用现有的深海土工力学原位测量数据和取样分析的成果,采用回归分析方法,得到了沉积物物化组成等参数与抗剪强度的相关关系。研究表明:深海沉积物以粉质土、有机黏土为主,具有高含水率、大孔隙比、低密度等特征;随着埋藏深度的增加,深海沉积物的含水率和孔隙比逐渐减少,湿密度与抗剪强度则呈增大趋势;物理参数与抗剪强度之间有良好的相关关系,含水率、密度及孔隙比与抗剪强度的相关性明显,其中,密度与抗剪强度成正比,而含水率、孔隙比与抗剪强度成反比;以含水率、密度和孔隙比为自变量的多变量回归分析方程能更好地表达沉积物物理特性与抗剪强度的相关关系。

关键词:深海沉积物;物理参数;回归分析;抗剪强度;影响因素

中图分类号:P642.3;P752

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.161

0 引言

深海沉积物作为海洋工程的载体,是当今海洋工程研究的重点之一^[1],其力学特性对于海底工程建设和资源开发具有重要影响,其中,抗剪强度是深海沉积物力学特性的重要指标^[2-4]。在深海多金属结核开采系统设计时,必须掌握海底沉积物的抗剪强度指标,如采集车行走的牵引力与沉积物抗剪强度密切相关^[5-7]。然而,由于深海极端的环境条件,获取原位监测数据非常困难,同时,由于监测设备技术不成熟,导致数据误差较大。

深海沉积物的抗剪强度受海底沉积物的底质类型、取样深度、物质组成、天然含水率、孔隙比、密度等多种因素的影响^[8-10]。宋连清^[11]总结归纳了大洋多金属结核区的沉积物类型及沉积物土工性质并对土的承载力进行了计算,主要考虑取样深度、密度及黏聚力的影响;王树仁等^[12]利用箱式取

样和多管取样的方法,得到了大洋 C-C 区中国矿区沉积物抗剪强度与取样深度的相关关系;吴鸿云等^[13]基于十字板剪切和浅层静力触探试验,获得西矿区抗剪强度与取样深度的相关关系,并提出了抗剪强度与贯入阻力的回归经验公式;朱坤杰等^[14-15]认为深海沉积物含水率、密度、孔隙比与抗剪强度之间具有良好的相关性,并与大洋沉积物物理力学性质参数进行了对比;于彦江等^[16]通过对西太平洋深海沉积物的研究,发现沉积物物理力学性质和沉积物类型表现出良好的一致性。目前,对于深海沉积物抗剪强度的研究以单个海区为主,数据变化规律差异较大,缺少系统的分析。

本文在原位监测数据和样品物性参数分析的基础上,分析了深海沉积物抗剪强度的影响因素,探讨了不同影响因素与抗剪强度的相关关系,以期建立抗剪强度的计算公式,为海洋工程设计提供依据。

1 数据来源及分析方法

监测数据来自多个航次的海上原位监测和样品分析,取样位置分别在西太平洋马里亚纳海沟南部和大洋多金属结核矿区。马里亚纳海沟北部以麦哲伦海山群为界,南部以加洛林海山群为界,地势相对平缓,构造类型多为 NW-SE 向。大洋多金属结核矿区位于东北太平洋海盆,位于克拉里昂断

收稿日期: 2020-10-14

资助项目: 山东联合基金重点支持项目“深海多金属结核采集车关键技术研究”(U1906234);国家自然科学基金重点项目“深海矿石资源固液两相流体提升系统的基础科学与关键技术”(51339008)

作者简介: 魏定邦(1994-),男,在读博士,主要从事深海矿产资源开发技术方面的研究工作. E-mail: weidingbang@cugb.edu.cn

* 通讯作者: 夏建新(1969-),男,博士,教授,主要从事深海矿产资源开发技术方面的研究工作. E-mail: jxxia@vip.sina.com

裂带以南、莱恩海山链以东、克利帕顿断裂带以北、东太平洋海隆以西, 区内基底主要为大洋玄武岩, 是东北太平洋海隆扩张的产物^[17]。

利用 2 个海域的深海沉积物物理性质测试资料, 通过 MATLAB 语言统计分析软件, 对不同取样区域深海沉积物物理参数与抗剪强度进行相关性分析, 同时, 得到含水率、密度和孔隙比与抗剪强度之间的经验公式。

2 沉积物抗剪强度及其影响因素

2.1 沉积物抗剪强度的影响因素

深海沉积物的抗剪强度影响因素有底质类型、取样深度、物质组成、天然含水率、孔隙比、密度等。

可依据卡氏塑性图划分沉积物样品类型^[18]。多年来的液塑限实验结果表明, 研究区的沉积物均分布在卡氏塑性图的 MH 区, 属于有机黏土或粉质土。土的液限为 120%~140%, 土的塑性指数为 35~55, 表明具有高液限和高塑性的特点^[11]。塑性指数与黏粒含量成正比, 塑性指数越大, 沉积物颗粒粒径越小, 比表面积愈大。因黏土颗粒细小、比表面积大、黏性高等特点使其含量成为影响深海沉

积物物理特性的重要因子。此外, 有机黏土粒径一般为 0.005~0.05 mm, 粉土粒径 < 0.005 mm^[19], 黏土矿物组合类型为伊利石-蒙脱石-高岭石-绿泥石型^[20], 其伊利石与蒙脱石具有比表面积大、亲水性强等特点, 其特性在一定程度上影响了深海沉积物的物理力学性质。

不同黏粒含量的沉积物, 天然含水率相差很大。粉土的黏粒含量 > 45%, 其含水率高, 平均值为 253.5%; 黏土的黏粒含量 > 25%, 含水率低, 平均值为 187.6%, 由此可知, 含水率与黏粒含量成正比。密度可以综合反映土的物质组成和结构特征^[21], 有机黏土与粉质土的平均密度分别为 13.15、10.71, 可以看出黏粒含量越高, 密度则越低; 海底沉积物的孔隙比与其结构、颗粒大小、排列和密实程度有关^[22], 另外, 沉积物的孔隙比还与含水率相关。研究区沉积物粉质土类型的孔隙比大, 均值为 6.8, 有机黏土的孔隙比小, 均值为 4.82, 可见含水率越高, 粒径越细, 孔隙比越大, 反之则低。

2.2 沉积物抗剪强度

根据文献数据^[11,14], 分站位统计了物理参数及抗剪强度值, 给出了不同海区站位深海沉积物的数值及指标(见表 1)。

表 1 深海沉积物的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of deep sea sediments

采样位置	沉积物类型	水深/m	含水率/%		湿密度/(g·cm ⁻³)		孔隙比		抗剪强度/kPa	
			范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
西太平洋马里亚纳海沟南部 ^[14]	有机黏土	6 471	182.7~329.9	225.20	1.19~1.29	1.26	4.7~7.6	5.45	2.0~8.0	5.52
大洋多金属结核矿区东区东部丘陵 ^[11]	淡黄色粉土质土	1 734	251.3~270.0	260.65	1.22~1.25	1.23	6.7~7.3	7.00	4.8~6.5	5.65
大洋多金属结核矿区东区东部海岭裂谷 ^[11]	淡黄色粉土质土、灰黑色粉土质土	1 737	243.3~272.0	257.65	1.21~1.27	1.24	6.6~7.4	7.00	5.3~6.3	5.50
大洋多金属结核矿区东区东部海山丘陵 ^[11]	淡黄色粉土质土、褐色粉土质土	1 779	248.0~257.0	252.50	1.22~1.25	1.23	6.6~6.9	6.75	4.0~13.0	8.50
大洋多金属结核矿区东区南部丘陵 ^[11]	淡黄色粉土质土、褐色粉土质土	1 820	230.0~257.0	243.50	1.20~1.25	1.22	6.1~7.1	6.60	4.2~7.1	5.65
大洋多金属结核矿区西区北部丘陵 ^[11]	浅棕色粉土质土、褐色粉土质土	2 356	243.0~250.0	246.50	1.23~1.26	1.25	6.4~6.6	6.50	4.9~6.4	5.65
大洋多金属结核矿区西区中部丘陵 ^[11]	棕褐色粉土质土、浅棕色粉土质土、褐色粉土质土	2 395	265.0~271.0	268.00	1.21~1.27	1.25	6.9~7.3	7.10	5.1~5.4	5.25
大洋多金属结核矿区西区南部丘陵 ^[11]	浅棕色粉土质土、褐色粉土质土	2 464	233.7~250.0	245.85	1.22~1.25	1.23	6.3~7.0	6.65	5.1~5.5	5.30

从图 1a 可知, 西太平洋马里亚纳海沟南部含水率为 182.7%~329.9%, 平均 225.2%; 大洋多金属结核矿区含水率为 270.0%~208.0%, 平均 243.5%, 远大于西太平洋马里亚纳海沟南部的平均值。两个海区的含水率总体走势一致, 即都具有高含水率,

且随埋藏深度的增加, 含水率逐渐降低。另外, 与近海沉积物的含水率相比^[23-24], 研究区域的含水率远高于近海沉积物的含水率, 具备大洋沉积物高含水率的特点^[11]。

从图 1b 可知, 西太平洋马里亚纳海沟南沉积物

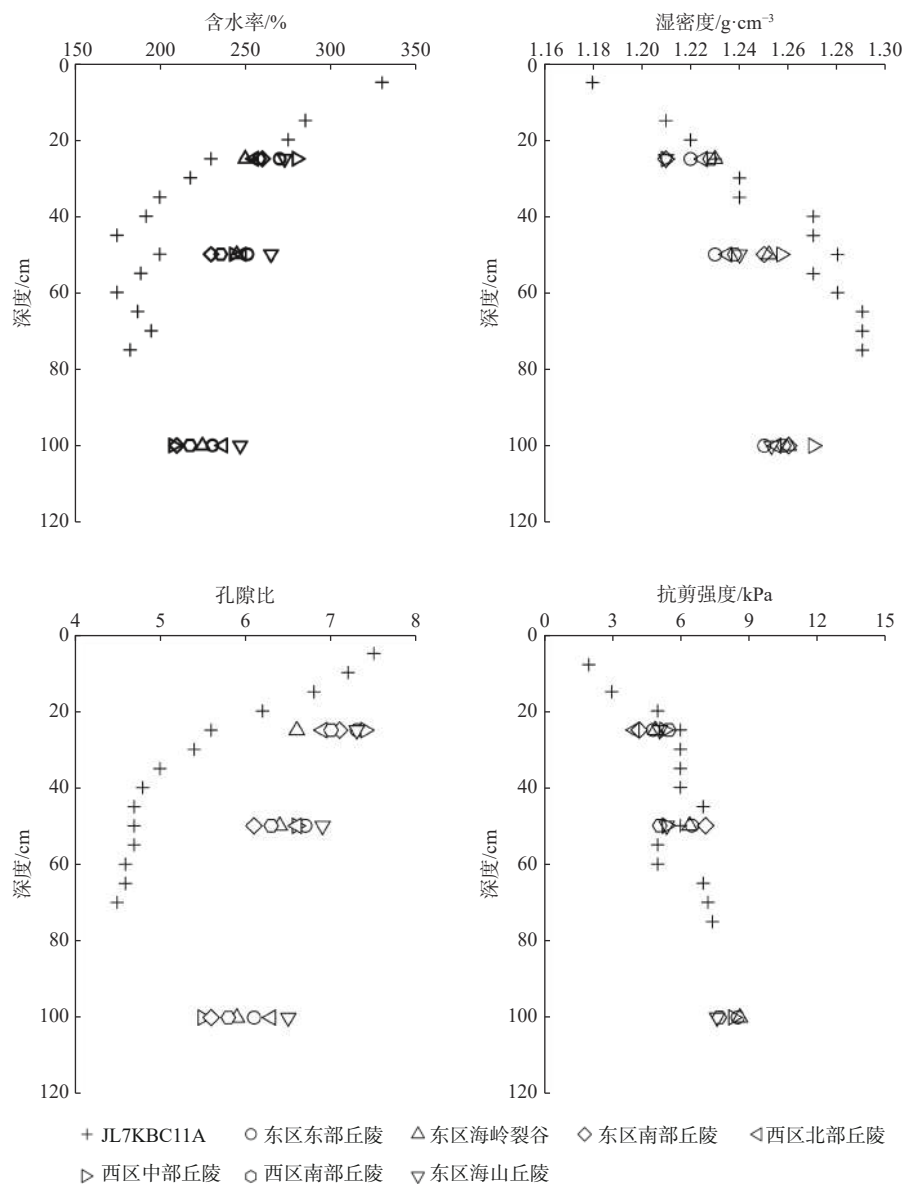


图1 物性参数随深度变化图

Fig.1 Variation of physical parameters with depth

密度为 $1.19 \sim 1.29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 大洋多金属结核矿区沉积物湿密度为 $1.20 \sim 1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。2个海区的密度总体走势一致: 随埋藏深度的增加, 含水率逐渐降低。另外, 与近海沉积物的密度值 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 相比^[23-24], 研究区域的密度值远远小于近海沉积物的密度值, 具备大洋沉积物低密度的特点^[11]。

从图 1c 可知, 西太平洋马里亚纳海沟南部沉积物孔隙比为 $4.7 \sim 7.6$, 平均 5.45 ; 大洋多金属结核矿区沉积物孔隙比为 $7.4 \sim 5.6$, 平均 6.52 。孔隙比数值随埋藏深度的增加而逐渐减小。

从图 1d 可知, 西太平洋马里亚纳海沟南部沉积物抗剪强度为 $2.0 \sim 8.0 \text{ kPa}$, 平均为 5.52 kPa 。大洋多金属结核矿区沉积物抗剪强度介于 $15.5 \sim$

4.0 kPa , 平均为 7.3 kPa 。抗剪强度随深度变化明显, 浅层较弱, 随深度的增加而增大, 大致呈线性关系。

3 沉积物抗剪强度与物性参数的相关性

3.1 沉积物抗剪强度与物性参数拟合线

图 2、3、4 分别为含水率、湿密度和孔隙比与抗剪强度的相关性拟合线, 从中可以发现, 深海沉积物的密度与抗剪强度之间存在明显的线性正相关, 即随着深海沉积物密度的不断增加, 沉积物的抗剪强度值呈明显的升高趋势。而含水率越小, 抗剪强度越高, 二者呈负相关。此外, 深海沉积物的孔隙比与抗剪强度之间也存在着明显的线性负相

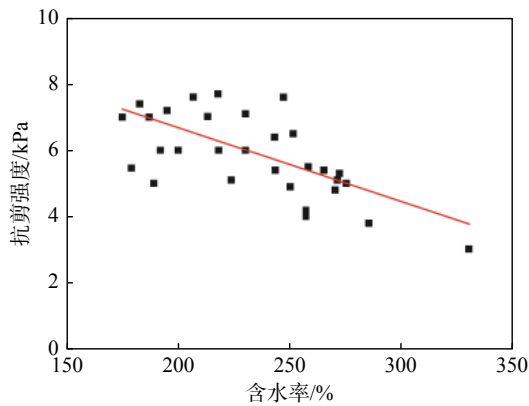


图 2 抗剪强度与含水率的关系
Fig.2 Relationship between shear strength and moisture content

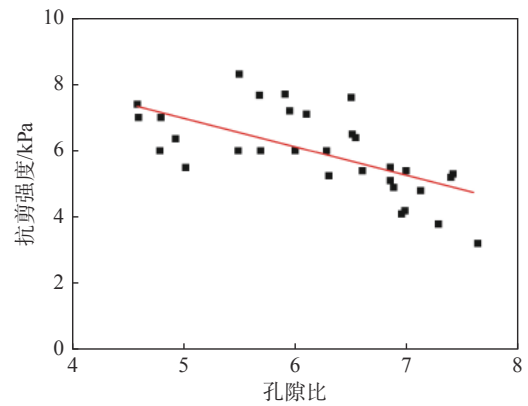


图 4 抗剪强度与孔隙比的关系
Fig.4 Relationship between shear strength and void ratio

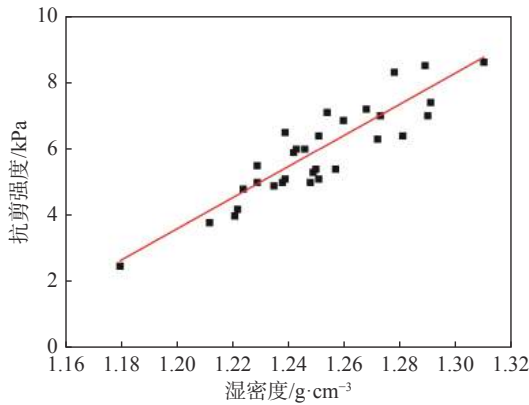


图 3 抗剪强度与湿密度的关系
Fig.3 Relationship between shear strength and wet density

关, 表现为随着孔隙比的增加, 海底沉积物的抗剪强度值呈明显降低的趋势, 其原因是抗剪强度在很大程度上是由沉积物的孔隙结构决定, 孔隙比越大, 沉积物越松散, 则抗剪强度越低。

3.2 沉积物抗剪强度计算式

表 2 为根据大洋不同取样区域的深海沉积物土工性质的研究结果, 提出了 8 个站位中每个的取

样深度(h)、天然含水率(ω)、密度(ρ)、孔隙比(e)与抗剪强度(τ)之间的线性关系式。

实际深海中, 沉积物物理特性与抗剪强度的关系并不是简单的单相关, 抗剪强度是深海沉积物各种物理特性的综合反映, 因此有必要对深海沉积物物理性质与抗剪强度进行多参数相关分析。从沉积物的物理参数的意义来看, 天然含水率、密度、孔隙比综合反映了其物质组成和结构特征, 也可以反映取样深度的动态变化。

选取深海沉积物天然含水率、密度、孔隙比作为自变量, 抗剪强度作为因变量, 进行多变量回归分析, 得到经验公式:

$$\tau = \alpha\omega + \beta\rho + \theta e + K \quad (1)$$

式中: ω 为天然含水率, %;
 ρ 为密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;
 e 为孔隙比。

利用原位测量数据对不同土质类别系数进行修正, 对于有机黏土, $\alpha=-0.0078$ 、 $\beta=35.4213$ 、 $\theta=0.0536$ 、 $K=-37.0952$; 对于粉土, $\alpha=0.0249$ 、 $\beta=27.2538$ 、 $\theta=-2.2130$ 、 $K=-19.5580$ 。由公式(1)计算所得数值与原位数据相关性较好, 相关系数 R^2 分别为 0.9153、

表 2 抗剪强度随取样深度、天然含水率、密度、孔隙比而变化的预估计算方程

Table 2 Prediction equation of shear strength with sampling depth, natural water content, density and void ratio

站位	取样区域	单因子线性拟合关系式			
1	西太平洋马里亚纳海沟南部	$\tau=2.52+0.1h$	$\tau=14.66-0.04\omega$	$\tau=-64.566+56.159\rho$	$\tau=14.471-1.582e$
2	大洋多金属结核矿区东区东部丘陵	$\tau=4.015+0.046h$	$\tau=136.83-23.584\omega$	$\tau=-366.073+148.364\rho$	$\tau=45.755-20.614e$
3	大洋多金属结核矿区东区东部海岭裂谷	$\tau=4.045+0.4h$	$\tau=17.926-0.48\omega$	$\tau=-47.396+4.321\rho$	$\tau=17.012-1.643e$
4	大洋多金属结核矿区东区东部海山丘陵	$\tau=3.857+0.114h$	$\tau=130.302-0.485\omega$	$\tau=-350.857+29.286\rho$	$\tau=120.333-16.667e$
5	大洋多金属结核矿区东区南部丘陵	$\tau=0.774+0.144h$	$\tau=61.292-0.226\omega$	$\tau=-83.525+7.25\rho$	$\tau=51.894-6.871e$
6	大洋多金属结核矿区西区北部丘陵	$\tau=4.026+0.046h$	$\tau=40.831-0.143\omega$	$\tau=-138.514+11.643\rho$	$\tau=38.86-5.115e$
7	大洋多金属结核矿区西区中部丘陵	$\tau=4.189+0.033h$	$\tau=10.219-0.019\omega$	$\tau=-9.338+1.192\rho$	$\tau=9.679-0.625e$
8	大洋多金属结核矿区西区南部丘陵	$\tau=4.192+0.034h$	$\tau=6.193-0.003\omega$	$\tau=-6.9+\rho$	$\tau=6.193-0.119e$

0.8236。

结合公式(1)和上述文献的实测值,计算各底质类型的抗剪强度,得到的计算值与实测值见图5,可以看出实测值与计算值吻合较好。

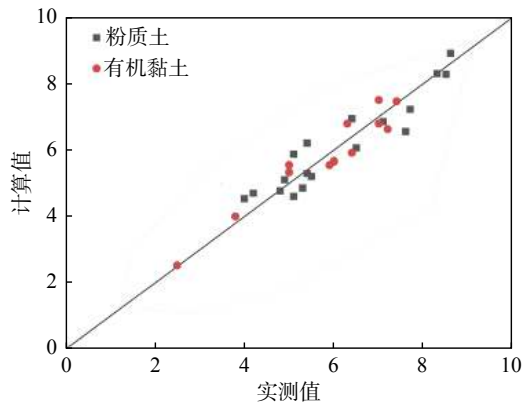


图5 实测值与计算值比较

Fig.5 Comparison of measured and calculated values

根据经验公式计算的抗剪强度为计算值 τ^* ,试验值 τ 与计算值 τ^* 相对误差按公式 $|(\tau^*-\tau)|/\tau$ 确定,相对误差平均值只有7.279%。因此,利用MATLAB语言统计分析软件总结出的经验公式应用到多金属结核矿区的实际项目中产生的误差基本可以满足采矿机设计的要求。

4 结论

(1)研究区的深海沉积物类型主要为有机黏土和粉质土2大类。物理特征总体表现为含水率高、密度低、孔隙比大等特征,具有远洋沉积物的特性。

(2)通过对本区深海沉积物物理性质与抗剪强度单变量相关性分析得出,沉积物抗剪强度与取样深度、天然含水率、密度和孔隙比具有很好的相关性,其中,取样深度、密度与抗剪强度成正比,而含水率、孔隙比与抗剪强度成反比。因此,一方面,可以用取样深度、天然含水率、密度和孔隙比预测深海沉积物的抗剪强度;另一方面,也可以通过测量沉积物抗剪强度,反映深海沉积物的某些物理性质。

(3)选取深海沉积物天然含水率、密度与孔隙比作为自变量,与沉积物抗剪强度进行多变量回归分析,得经验方程。结果显示,就研究海域来讲,沉积物天然含水率、密度与孔隙比能较好的预测抗剪强度,该经验公式应用到其他海域的误差能否满足采矿机设计要求还待进一步检验。

参考文献:

- [1] 程净净,傅命佐,孟祥梅,等.南黄海中部沉积物物理性质与压缩波速相关性分析[J].中国海洋大学学报,2011,41(S1):331-336.
- [2] 王凯,吴建政,安永宁,等.渤海湾北部表层沉积物的物理力学性质[J].海洋地质前沿,2010,27(1):14-18.
- [3] 李力,李庶林.深海表层海泥模拟及地面力学特性研究[J].工程力学,2010,27(11):213-220.
- [4] LIU J Z, CHEN X G, ZHU Z D. Investigation of scour effect on tensile capacity of suction caissons considering stress history of sand[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(9): 1044-1056.
- [5] 周知进,王贵满.海底沉积物剪切强度的试验研究[J].湖南科技大学(自然科学版),2005,20(2):15-18.
- [6] 李力,吕敬科.基于颗粒流理论的深海沉积物剪切特性模拟研究[J].矿冶工程,2017,37(6):1-6.
- [7] 李力,孟艺敏.基于颗粒流理论的深海沉积物土力学特性[J].船舶工程,2020,42(6):119-125.
- [8] 黄文胜.土的抗剪强度试验成果与其它指标的关系及影响因素分析[J].西北水电,2020,30(3):82-85.
- [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):151-156.
- [10] RESHMA K V, AMUDHA K, JANARTHANAN C, et al. Experimental study on sinkage and breakout forces for soft soil[C]/Underwater Technology. IEEE, Chennai, 2015: 1-5.
- [11] 宋连清.大洋多金属结核矿区沉积物土工性质[J].海洋学报(中文版),1999,21(6):47-54.
- [12] 王树仁,阳宁,王贵满.太平洋C-C中国矿区深海沉积物的强度特性研究[J].矿冶工程,2000,20(3):21-24.
- [13] 吴鸿云,陈新明,高宇清,等.西矿区深海稀软底质剪切强度和贯入阻力原位测试[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1801-1806.
- [14] 朱坤杰,何树平,陈芳,等.马里亚纳海沟南部海域沉积物的工程地质特性及其成因[J].地质学刊,2015,39(2):251-256.
- [15] 朱坤杰,王金莲,邓希光.中-西太平洋海盆浅层沉积物的物理力学性质初探[J].土工基础,2015,29(3):149-152.
- [16] 于彦江,段隆臣,王海峰,等.西太平洋深海沉积物的物理力学性质初探[J].矿冶工程,2016,36(5):1-4.
- [17] 曹德凯.东太平洋CC区与东马里亚纳海盆多金属结核特征对比及控矿要素研究[D].青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2017.
- [18] 张克恭,刘松玉.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:35-36.
- [19] 陈小玲.大洋多金属结核矿区表层沉积物的物理性质[J].东海海洋,2004,22(1):28-33.
- [20] 李炜.水力计算手册[M].北京:中国水利水电出版社,2006:13-14.
- [21] 宋召军,张志珣,余继峰,等.南黄海表层沉积物中黏土矿物分布及物源分析[J].山东科技大学学报,2008,27(3):1-4.
- [22] 唐大熊.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1987:10-26.
- [23] SUNG S P, NHAT-PHI D, SUENG W J. Numerical simulation of water content dependent undrained shear strength of clays[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(5): 1-12.
- [24] 魏巍.南海中沙天然气水合物资源远景区海底沉积物的物理力学性质研究[J].海岸工程,2006,25(3):33-38.

FACTORS INFLUENCING SHEAR STRENGTH OF DEEP SEA SEDIMENT AND ITS VARIATION LAW

WEI Dingbang, YANG Qiang, XIA Jianxin*

(School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the existing in-situ measurement data and the results of sampling analysis, the correlation between sediment physicochemical composition and shear strength was identified by using regression analysis method. The results show that the deep-sea sediments are mainly composed of silty soil and organic clay, which are characterized by high water content, large pore ratio and low density. In addition, the water content and pore ratio of deep-sea sediment gradually decrease with the increase of burial depth, while the wet density and shear strength increase. There is a good correlation between physical parameters and shear strength, water content, density, pore ratio and shear strength. The correlation of shear strength is obvious, in which the density is proportional to the shear strength, while the water content and pore ratio are inversely proportional to the shear strength; the multivariable regression analysis equation with water content, density and pore ratio as independent variables can better express the correlation between physical properties of sediment and shear strength.

Key words: deep sea sediment; regression analysis; physical parameters; shear strength; influence factors