

文章编号: 1000-4750(2010)11-0213-08

深海表层海泥模拟及地面力学特性研究

*李 力^{1,2}, 李庶林³

(1. 中南大学机电学院, 长沙 410083; 2. 深海矿产资源开发与利用国家重点实验室(筹), 长沙 410012; 3. 厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 361005)

摘 要: 深海表层海泥车辆地面力学特性是开发大洋矿产资源-多金属结核采矿车的理论基础。该文深入研究深海表层海泥样品和陆地二种膨润土的物理性质, 确定深海表层模拟海泥的原料, 分析深海表层海泥和模拟海泥的物理力学参数, 配制出具有极高含水量、极小内摩擦角、高液限、高塑性、大孔隙比、低强度和低重度等深海表层海泥特性的模拟海泥, 根据车辆地面力学理论, 开展多种平板在垂直方向上的海泥载荷-沉陷实验和不同节距、不同齿高、不同齿形和不同齿宽的履带齿板在水平力作用下的海泥剪切应力-位移实验, 深入分析实验数据, 国内首次提出基于 Bekker 理论和 Reece 理论的深海表层海泥的二种载荷与沉陷特性, 及深海表层海泥的剪切应力和位移特性, 深入分析我国多金属结核采矿车在深海表层海泥上行走时履带牵引力与打滑率特性, 为进一步开发海底采矿车提供了设计依据和理论。

关键词: 地面力学; 深海表层海泥; 实验; 载荷-沉陷特性; 剪切应力-位移特性

中图分类号: TU318; TU411.3 **文献标识码:** A

SIMULATION AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TERRAMECHANICS OF THE SURFACE SOIL ON DEEP-SEA BED

*LI Li^{1,2}, LI Shu-lin³

(1. College of Mechanical and Electromechanical Engineering, Central and South University, Changsha 410083, China;

2. National Key Laboratory of Development and Utilization of Deep-Sea Mineral Resource, Changsha 410012, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Characteristics of terramechanics of the surface soil on deep-sea bed are fundamental for the development of the miner of oceanic mineral resource-the polymetallic nodules on deep-sea floor. The physical properties of samples of the surface soil on deep-sea bed and two kinds of bentonite on land are lucubrated, and their properties are compared in details. Then the samples with similar physical properties to the surface soil on deep-sea is chosen to simulate the deep-sea soil. The paper analyzes the physical and mechanical parameters of both the surface soil on deep-sea bed and the simulating soil which is the bentonite-water mixture. With these parameters obtained, the simulating soil is made with high water rate, small inner friction angle, high liquid limit, high plastic exponent, big hole rate, low strength and low density. According to the terramechanics theory, experiments are carried out to characterize the pressure-sinkage relationship and the shear stress-shear displacement relationship. The experiment uses different flat plates at the vertical direction and track plates at the horizontal direction. The track plates have different teeth, pitch and height. Two expressions of the pressure-sinkage relationship are built based on Bekker theory and Reece theory respectively, as well as the shear stress-shear displacement relationship. Finally, the relationship between the driving force and slip rate of the

收稿日期: 2009-05-13; 修改日期: 2009-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50275152)

作者简介: *李 力(1963—), 女, 长沙人, 教授, 硕士, 从事海洋工程、机电一体化研究(E-mail: lilisu@vip.sina.com);

李庶林(1963—), 男, 厦门人, 教授, 博士, 从事岩土工程、地下结构研究(E-mail: shulin.li@163.com).

surface soil is given, which can be used to analyze the polymetallic nodules miner in China.

Key words: terramechanics; surface soil on deep-sea bed; experiment; characterization of pressure-sinkage; characterization of shear stress-shear displacement

在大洋 6000m 深海底的表层 0mm—250mm 内蕴藏着储量丰富、金属品位大大高于陆地矿的矿产资源——多金属结核。而且, 中国在太平洋 C-C 区拥有 7.5 万平方公里的多金属结核矿区。在我国多金属结核采矿系统中, 履带式采矿车将携带采矿头、破碎机、扬矿管、动力装置和电子仓等稳定地行走于海底表层海泥中。而决定海底采矿车是否能稳定行走底质深海表层海泥与陆地地面土壤完全不同。它具有极高含水量、极小内摩擦角、高液限、高塑性、大孔隙比、低强度和低重度等特性^[1]。因此, 海底采矿车在采矿行走过程中极易沉降和打滑, 常常无法正常行驶, 从而, 影响整个多金属结核采矿系统的成败。

为了评价和预测海底采矿车性能, 正确地设计可在深海底能稳定行走的采矿车, 深入研究深海表层海泥的车辆地面力学特性是十分重要的。但由于深海底的高压、无光、低温和腐蚀及海面上的风浪流等极端恶劣环境, 深海表层海泥的车辆地面力学性质的原位测试无法直接在深海底表面进行。目前, 我国开展的深海表层海泥研究的报道很少, 仅有的报道也只限于对深海表层海泥样品进行物理性质和简单的剪切力学性质测试^[2-3], 而且至今无深海表层海泥的车辆地面力学特性研究报导。在国际上, 已有专家开展了深海底表层海泥的车辆地面力学特性研究。韩国的 Sup Hong 采用不同齿形的履带齿板进行模拟海泥的水平剪切应力实验^[4], 研究了履带齿形对履带车机动性影响。德国 Schulte E 采用十字剪切板、环形剪切板和履带齿板进行模拟海泥沉降和剪切实验^[5], 获得了剪切应力-位移关系和济根大学履带车的牵引力。但是, 由于各国国家的多金属结核矿区底质特性和专家们所采用的模拟海泥原料不同, 故其车辆地面力学特性存在差别, 且有些参数不公开。因而, 开展我国深海底表层海泥的车辆地面力学特性研究是必要的, 可为我国多金属结核采矿车的开发提供理论依据。

而在深海表层海泥的车辆地面力学特性研究中, 其载荷-沉降特性和剪切应力-位移特性测试实验需要大量的深海表层海泥。目前我国主要利用箱式和柱状取样器能获得的深海底表层海泥样品量

很少, 无法满足实验所需量。因而, 有必要研究一种在物理力学性质方面类似于深海表层海泥的陆地模拟土, 来替代深海底表层海泥, 作为深海表层海泥的地面力学研究的实验用土。

1 模拟海泥研究

1.1 深海表层海泥

从1988年—2005年, 我国科考调查船对太平洋 C-C区中国多金属结核东、西矿区进行了多航次勘探, 通过箱式和柱状取样器获得了深海底表层海泥样品进行土工力学参数的测试^[2]。依据卡氏(Casagrande)塑性图将海底表层海泥样品划分类型, 分析液限塑性试验结果表明, 我国矿区海底表层海泥均分布在卡氏塑性图的MH区, 见图1, 属于粉质土或有机粘土^[2]。

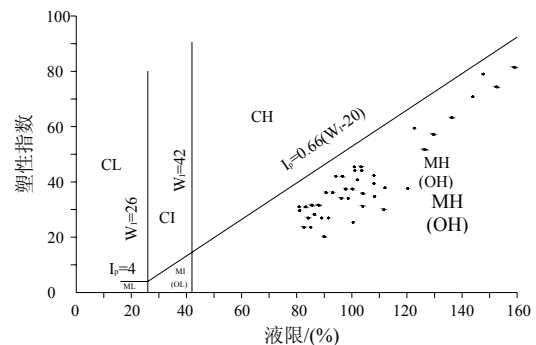


图1 海底沉积物卡氏塑性图

Fig.1 Casagrande plasticity of the sediment of seabed

由于深海表层海泥的陆源组分、沉积远洋微粒、矿物成岩和地理的不同, 矿区表层海泥的组分和粒径存在差别。我国多金属结核矿区的东、西矿区地形为丘陵。其类型分别为东区主要为棕黄色粉质土和西区主要为黄棕色粉质土, 其组分为伊利石、蒙脱石、绿泥石、高岭石、放射虫和硅藻等。东区棕黄色粉质土粒径成分为粉质土占53%, 粘土占38%, 西区黄棕色粉质土粒径成份为粉质土占74%, 粘土占21%^[3]。

1.2 模拟海泥原料

根据深海表层沉积物的形成特点、沉积特征及组分类型, 在充分分析陆地上现有土壤特性基础上, 选择了膨润土作为研究对象。膨润土一般为白色、淡黄, 因含铁量变化又呈浅灰等, 是以蒙脱石

为主要成分的粘土矿物，是一种相对较软的岩石，在地质年代中由天然火山灰蚀变而成。主要化学组分是二氧化硅(SiO₂)和三氧化二铝(Al₂O₃)及水，分子粒径为 10⁻¹¹m—10⁻⁹m，为纳米级。由于膨润土具有物理化学性强、结合水能力强等矿物特性，一般膨润土都具有良好的吸水性、膨胀性、触变性、粘结性、吸附性、增稠性、润滑性、稳定性等。尤其是膨润土吸水量大，能吸附 8 倍—15 倍于本体的水量，且和水、泥等细碎屑的混合物有可塑性、粘结性和触变性的特性。

调研目前膨润土市场，选定了二种膨润土作为研究对象。

1.3 海泥与模拟海泥粒径研究

1.3.1 海泥与模拟海泥粒径测试结果

采用集成了激光技术、传统光学、光电技术、现代电子和计算机技术的先进的粒度测试仪器 JL-1166 型激光粒度仪(如图 2 所示)分别对深海表层海泥样品土、膨润土 1 和膨润土 2 进行了粒径测量，分别获得了三者粒径-累积体积分布曲线和粒径-频度分布曲线^[6]，如图 3 和图 4 所示，三者粒度范围、平均粒径表、有效粒径 d_{10} 、连续粒径 d_{30} 、限定粒径 d_{60} 、比表面积，见表 1。

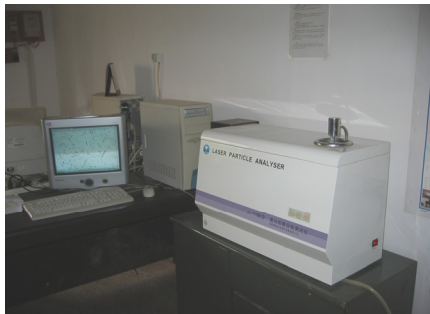


图 2 JL-1166 型激光粒度仪

Fig.2 Laser granulometry apparatus JL-1166

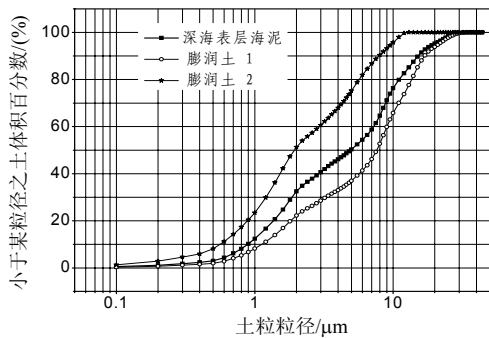


图 3 深海表层海泥、膨润土样 1 和膨润土样 2 粒径-累积体积分布曲线

Fig.3 The curves of the granule diameter-accumulated volume of the surface soil on deep-sea bed and two kinds of bentonite

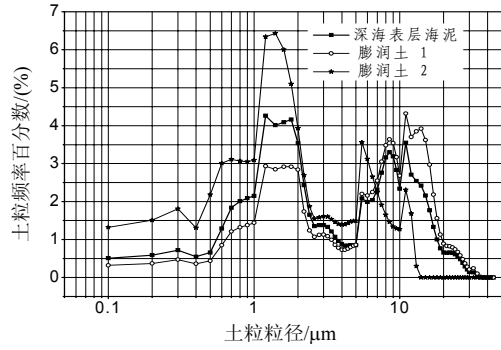


图 4 深海表层海泥、膨润土样 1 和膨润土样 2 粒径-频度分布曲线

Fig.4 The curves of the granule diameter- frequency of the surface soil on deep-sea bed and two kinds of bentonite

表 1 深海表层海泥、膨润土样 1 和膨润土样 2 的粒径特性
Table 1 The granule diameters of the surface soil on deep-sea bed and two kinds of bentonite

	粒径范围/ μm	平均粒径/ μm	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	连续粒径 $d_{30}/\mu\text{m}$	限定粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	比表面积 (cm^2/cm^3)
深海表层海泥	0.1—34	7.62	0.89	1.86	7.23	29155
膨润土 1	0.1—36	9.52	1.13	3.27	9.02	21565
膨润土 2	0.1—13	3.71	0.56	1.21	2.93	49965

1.3.2 颗粒级配

土粒大小对土壤的性质起着决定性作用。

分析图 3 可知，三者累积体积分布曲线均为连续，且其趋势基本一致，属于细颗粒，膨润土 1 与深海表层海泥的累积体积分布曲线比较接近。分析图 4 可知，三者频度分布曲线趋势基本一致，深海表层海泥和膨润土 1 的频度分布曲线趋势比较接近。

从表 1 的粒径范围、平均粒径可知，深海表层海泥和膨润土 1 的粒径范围和平均粒径基本一致，而膨润土 2 均小于上述二者。

1.3.3 不均匀系数和曲率系数

由表 1 中的有效粒径 d_{10} 、连续粒径 d_{30} 、限定粒径 d_{60} 、比表面积，经计算可得，三者不均匀系数和曲率系数，见表 2。

分析表 2 可知，深海表层海泥和膨润土 1 的不均匀系数基本一致，膨润土 2 的不均匀系数与上述二者有一定的差别；三者的曲率系数均小于 1，深海表层海泥最小。

综上所述，膨润土 1 在级配、密实程度、透水性等方面与深海表层海泥具有近似性和可比性，其相似程度高于配方模拟土 2。因此，本研究选用膨润土 1 作为模拟海泥原料。

表 2 深海表层海泥、膨润土样 1 和膨润土样 2 不均匀系数和曲率系数

Table 2 The asymmetrical coefficient and the curvature coefficient of the surface soil on deep-sea bed and two kinds of bentonite

	不均匀系数 $C_u = d_{60} / d_{10}^{[6]}$	曲率系数 $C_c = d_{30}^2 / d_{10} \times d_{60}^{[6]}$
深海表层海泥	8.1	0.54
膨润土 1	8.0	1
膨润土 2	5.23	0.88

2 深海表层海泥与模拟海泥物性力学参数研究

我国多金属结核矿区表层海泥分布为随海泥深度增加呈现流动状-流塑状-可塑状，表面 0mm—77mm 为生物扰动明显，呈流动状，表层 7mm—250mm 存在生物扰动虫孔，呈软塑状到可塑状^[7]。深海表层海泥的含水率、孔隙比随深度增加而减小，而湿密度随深度增加而增大。

根据我国采矿车的采矿方式，采矿头前部的吸矿石，履带式采矿车的行走履带齿将达到 200mm

深的海泥层。因此，200mm 深海泥层的物性力学参数是主要研究对象。

深海底表层 200mm 处海泥的含水率、湿密度、孔隙比、液限、塑限、内摩擦角、剪切强度的具体参数见表 3。

将深海表层海泥柱状样品进行分层测量剪切强度^[8]，获得了深海表层海泥剪切强度与深度关系图，见图 5。分析图 5 可知，深海表层海泥的剪切强度随深度增加而增大，深 200mm 处表层海泥剪切强度为约 6kPa。图 5 中三种曲线的差别是由于使用不同仪器产生的。

由此可知，深海表层海泥的物理力学性质具有高含水量、小内摩擦角、高塑性、高液限、大孔隙比、低重度、低强度的特点。

根据我国多金属结核矿区的地质条件，我国多金属结核采矿车要求通过剪切强度≥3kPa海底^[8]。

为了模拟深海表层海泥剪切强度，将膨润土 1 与三种不同水量的水充分混合后，获得 1 号、2 号和 3 号三种模拟海泥，经测试，其湿密度、孔隙比、液限、塑限和内摩擦角等物理力学指标见表 3。

表 3 深 200mm 的表层海泥和模拟海泥物理力学参数

Table3 The physical and mechanical parameters of the surface soil under 200mm deep-sea bed and the simulating soil

	含水量/(%)	湿密度/(g/cm ³)	孔隙比	液限/(%)	塑限/(%)	液性指数	塑性指数	内摩擦角/(°)	剪切强度/kPa
深200mm表层海泥 ^[2]	220	1.21-1.27	5.6-7.3	120-140	75-92	2.2-5.0	33-55	0-5.6	3-8
模拟海泥1号	121.3	1.40	3.2					0	3.6
模拟海泥2号	115.8	1.42	3.0	88.5%	25.0%	1.42	63.5	0	3.75
模拟海泥3号	104.4	1.43	2.8					0	4.05

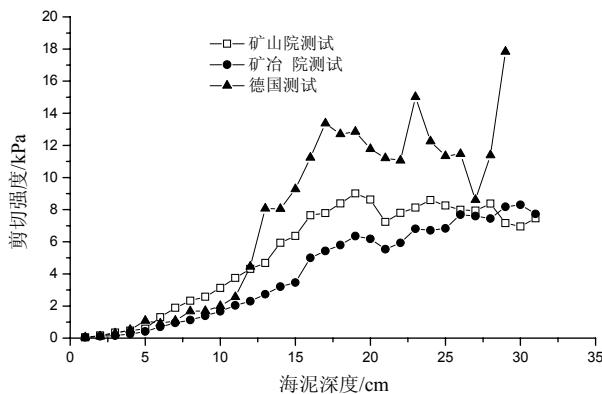


图 5 深海表层海泥的剪切强度与深度曲线

Fig.5 The curves of shear strength - depth of the surface soil on deep-sea bed

分析表 3 可知，模拟海泥的物理力学性质具有高含水量、高塑性、高液限、大孔隙比、低重度、小内摩擦角、低强度和土质软弱的特点，与深海底表层海泥的物理力学参数类似。在卡氏塑性图(图 1)中，模拟海泥位于 CH 区并接近于深海底表层

海泥 MH 区，属于粘土。

采用非线性最小平方原则，拟合表 3 中模拟海泥数据，获得模拟海泥含水率与剪切强度、孔隙比及湿密度下列关系式，见图 6。

$$\text{剪切强度 } \tau = 6.856 - 0.02652\omega \quad (1)$$

$$\text{孔隙比 } e = 0.411 + 0.023\omega \quad (2)$$

$$\text{湿密度 } \rho = 1.603 - 0.0016\omega \quad (3)$$

其中： τ /kPa 为剪切强度； e 为孔隙比； ρ 为湿密度； ω /(%) 为含水率。

设模拟海泥含水率为深 200mm 的深海表层海泥，则其含水率 $\omega=220\%$ ，孔隙比 $e=5.471$ ，湿密度 $\rho=1.251$ ，剪切强度 $\tau=1.02\text{kPa}$ 。分析可知，模拟海泥和深海表层海泥的孔隙比和湿密度相近，但模拟海泥剪切强度小，其主要原因是模拟海泥原料为粘土，而深海底表层海泥由粉质土和粘土组成。

根据车辆地面力学理论^[9]，土壤所提供的驱动力为：

$$F = b \int_0^l \tau dx \quad (4)$$

其中： F 为土壤驱动力； b 为履带宽； l 为履带接地长； τ 为土壤剪切强度； x 为接触点履带前端距离。

由式(4)可知，深海表层海泥的剪切强度是主要考虑的力学参数，是海泥首要模拟的参数。

综上所述，将膨润土1与水量的不同配比，即可获得用于车辆地面力学特性实验所需的具有不同剪切强度的模拟海泥。

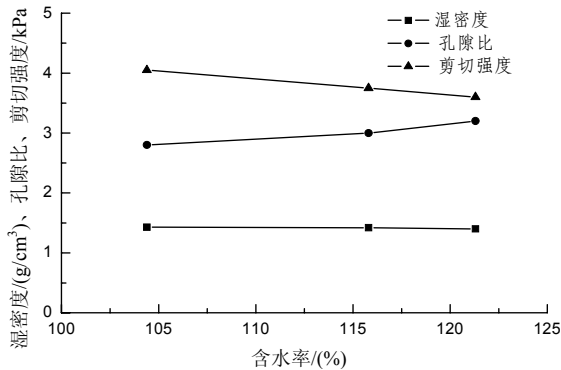


图6 模拟海泥含水率与剪切强度、孔隙比及湿密度

Fig.6 The curves of hydrous rate, shear strength, hole ratio and wet density of the simulating soil of seabed

3 海底表层海泥车辆地面力学特性研究

3.1 实验原理与装置

当地面车辆通过行走装置给地面一水平载荷，产生推力并且随之产生滑转。同时，车辆作用于地面的垂直载荷引起地面下陷并增加了行驶阻力。因此，对地面水平和垂直载荷-变形特性的测量对于评价和预测越野车辆性能是最为重要的。

采用 Bekker 提出来的载荷-沉陷实验和剪切应力-位移实验^[9]，根据国家土工试验方法标准^[6]，二者原理图分别见图7和图8，并且开发了海泥地面力学特性实验装置，如图9所示。

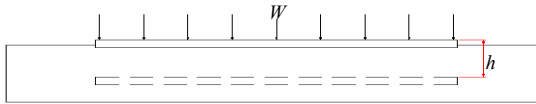


图7 载荷压力-沉陷实验原理图

Fig.7 The experiment principle of the pressure - sinkage

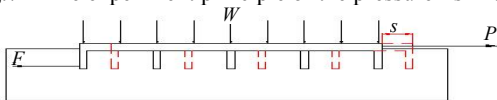


图8 剪切应力-位移实验原理图

Fig.8 The experiment principle of the shear stress- shear displacement

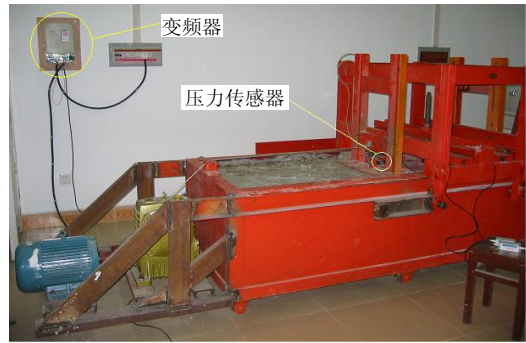


图9 海泥地面力学特性实验装置

Fig.9 The experiment device of terramechanics of seabed soil

载荷-沉陷实验原理为实验板平板在载荷 W 作用下，向下移动，实时测试实验平板压陷量 h 。载荷-沉陷实验采用的三种规格实验平板分别是长/宽为300/50、480/80和604/400。

剪切应力-位移实验原理为履带齿板在载荷 W ，施加外力 P ，使得履带齿板克服海泥阻力前移 s ，其中，履带齿为前、中、后三部分，实时测试中部履带齿板的位移 s 和海泥阻力 F 。剪切应力-位移实验采用由节距67mm、133mm和200mm，齿形为窄直齿、尖三角形齿和宽矩形齿，齿高为70mm和130mm，齿宽为200mm和600mm匹配的多种组合的履带齿。

3.2 载荷-沉陷特性研究

模拟海泥的粘聚力为 3.06kPa，含水率为 121.3%，湿密度为 1.40g/cm³，孔隙比为 3.2。经过三种规格平板沉陷实验，获得了模拟海泥的载荷-压陷实验数据，见图10。

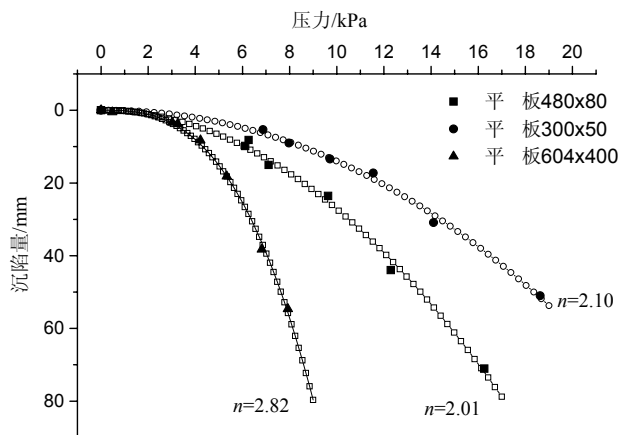


图10 模拟海泥的压力-沉陷曲线

Fig.10 The curves of the pressure- sinkage of the simulating soil of seabed

3.2.1 基于 Bekker 沉陷理论

对于均质土壤，Bekker 提出载荷-沉陷经验下式^[10]：

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (5)$$

式中： p 为接地比压； z 为沉陷； n 为变形指数； b 为矩形板宽度； k_c 和 k_ϕ 分别为内聚变形模量和摩擦变形模量，当指数 n 不同时，变形模量 k_c 和 k_f 不同。

在对数坐标系中，两个平板实验的载荷-沉陷方程可改写为：

$$\log p_1 = \log \left(\frac{k_c}{b_1} + k_\phi \right) + n \log z,$$

$$\log p_2 = \log \left(\frac{k_c}{b_2} + k_\phi \right) + n \log z.$$

在沉陷量为 $z=1$ 处，对于两个平板压力：

$$(p_1)_{z=1} = \frac{k_c}{b_1} + k_\phi = a_1,$$

$$(p_2)_{z=1} = \frac{k_c}{b_2} + k_\phi = a_2.$$

变形模量 k_c 和 k_ϕ 为：

$$k_\phi = \frac{a_2 b_2 - a_1 b_1}{b_2 - b_1}, \quad k_c = \frac{(a_1 - a_2) b_1 b_2}{b_2 - b_1}.$$

将实验数据绘制成压力和沉陷量对数图形，见图 11。线性拟合二实验曲线，并计算得： $n=0.463$ ， $k_c=21.067$ ， $k_\phi=0.066$ 。

模拟海泥 Bekker 载荷-沉陷关系为：

$$p = \left(\frac{21.067}{b} + 0.066 \right) z^{0.463} \quad (6)$$

由此可知，模拟海泥的摩擦变形模量对模拟海泥的沉陷量影响小，其压陷产生主要由内聚变形模量决定。

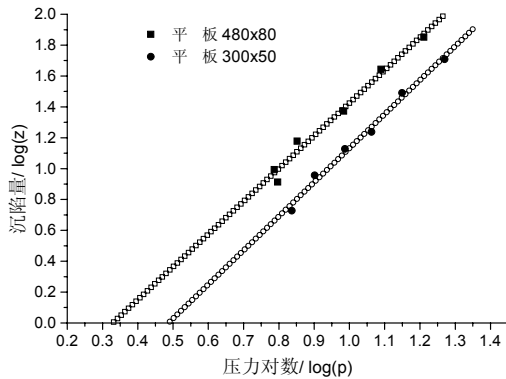


图 11 模拟海泥压力和沉陷量对数图形

Fig.11 The logarithm curves of the pressure –sinkage of the simulating soil of seabed

3.2.2 基于 Reece 沉陷理论

由于 Bekker 的载荷-沉陷式(5)为经验公式，其变形模量 k_c 和 k_ϕ 值根据指数 n 不同，且有可变量纲，

并与实验板宽度有关。

为了消除了宽度效应，对于垂直载荷-沉陷关系，Reece 提出下式^[10]：

$$p = (ck'_c + \gamma_s bk'_\phi) \left(\frac{z}{b} \right)^n \quad (7)$$

式中： p 为接地比压； z 为沉陷； k'_c 和 k'_ϕ 是内聚和摩擦变形模数； n 是变形指数； γ_s 是土壤容重； c 是内聚力； b 是载荷面短边。

将履带与模拟海泥相互作用的数据绘制成沉陷量/宽度与压力曲线，见图 12。

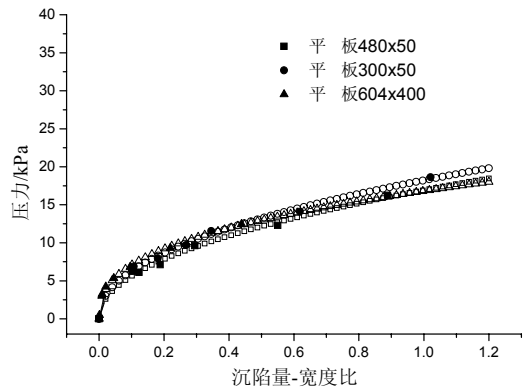


图 12 模拟海泥沉陷量/宽度与压力曲线

Fig.12 The curves of the pressure –ratio of the sinkage to teeth width of the simulating soil of seabed

分析图 12 可知，三种沉陷量/宽度与压力曲线基本吻合。

采用非线性最小平方原则，将各曲线进行非线性拟合，可得下式：

$$p = (17.487 + 0.0015b) \left(\frac{z}{b} \right)^{0.471} \quad (8)$$

则： $n=0.471$ ， $k'_c=5.715$ ， $k'_\phi=0.088$ 。

因此，模拟海泥的 Reece 载荷-沉陷关系为：

$$p = (5.715c + 0.088b\gamma_s) \left(\frac{z}{b} \right)^{0.471} \quad (9)$$

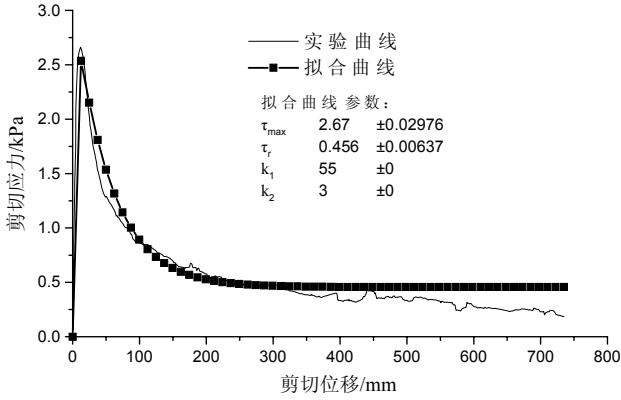
分析式(9)可知，模拟海泥的摩擦变形模量对模拟海泥的沉陷量影响小，其压陷产生主要由内聚变形模量决定，与 Bekker 公式性质类似。

3.3 剪切应力-位移特性研究

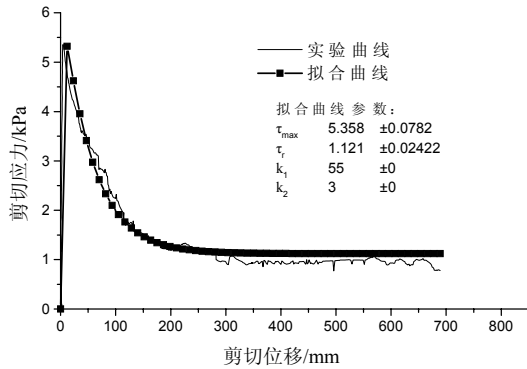
将不同齿形、不同节距、不同齿高和不同齿宽的多种履带齿板，在不同接地比压和不同剪切强度的模拟海泥上进行剪切-位移实验，测试剪切力、位移、法向力等数据，绘制成多种曲线，见图13。由于篇幅的限制，在此只列出部分曲线。

分析实验曲线可知，海泥的剪切应力与位移特

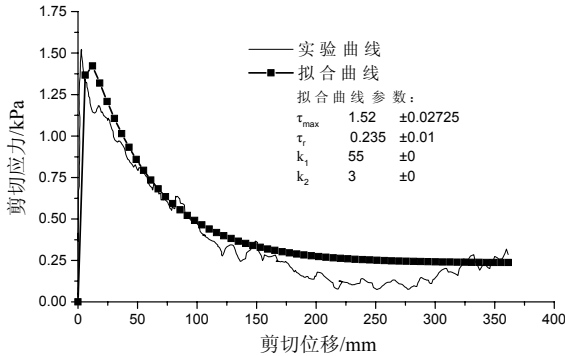
性为在力作用下海泥很快产生驼峰峰值，然后衰减至残余应力区，且残余应力值很小。说明，海泥为海底采矿车行走所能提供的附着力很小，海底采矿车在海底表面行走时极易打滑。



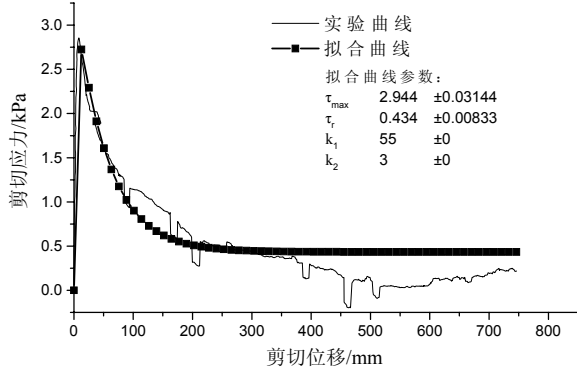
(a) 节距200/齿高70 mm/齿宽600/窄直齿



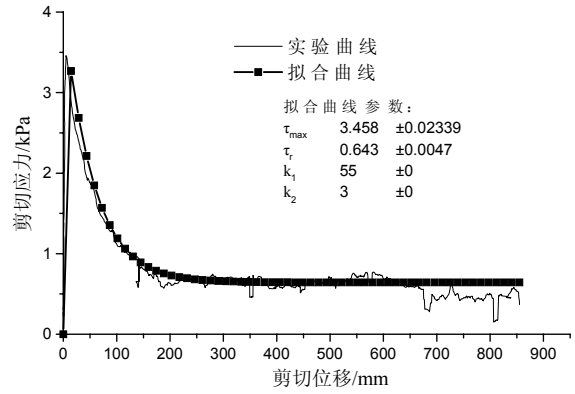
(b) 节距200/齿高130/齿宽200/窄直齿



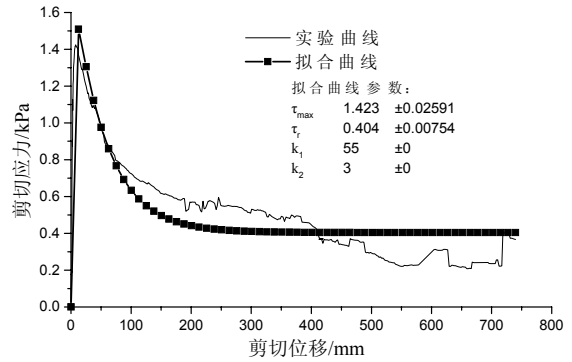
(c) 节距200/齿高130/齿宽600/尖三角形齿



(d) 节距133/齿高130/齿宽600/窄直齿



(e) 节距200/齿高130/齿宽600/宽矩形齿



(f) 节距67/齿高130/齿宽600/窄直齿

图 13 履带板剪切应力-位移曲线与拟合曲线
Fig.13 The fitting curves of the shear stress- shear displacement of the simulating soil of seabed

分析实验曲线可知，海泥的剪切应力与位移特性为在力作用下海泥很快产生驼峰峰值，然后衰减至残余应力区，且残余应力值很小。说明，海泥为海底采矿车行走所能提供的附着力很小，海底采矿车在海底表面行走时极易打滑。

采用非线性最小平方原则，经过对所有实验曲线进行拟合，获得模拟海泥的剪切应力与位移关系式：

$$\tau = \tau_{\max} \left(e^{-\frac{j}{k_1}} - e^{-\frac{j}{k_2}} \right) + \tau_r \left(1 - e^{-\frac{j}{k_2}} \right) \quad (10)$$

其中： τ 为水平剪切应力； j 为剪切位移； τ_{\max} 为最大剪切应力； τ_r 为残余剪切应力； e 为自然对数； $k_1=55$ ； $k_2=3$ 。

4 海泥牵引力分析

由式(10)得，单履带牵引力为：

$$F = b \int_0^l \left(\tau_{\max} \left(e^{-\frac{j}{55}} - e^{-\frac{j}{3}} \right) + \tau_r \left(1 - e^{-\frac{j}{3}} \right) \right) dx \quad (11)$$

式中： F 为单履带总牵引力； τ 为水平剪切应力； b 为履带宽度； l 为履带接地长； e 为自然对数； x 为接

触点履带前端距离; j 为接触点履带前端距离的剪切位移, 且 $j=ix$; i 为滑转率。

则采矿车总牵引力为:

$$F = \frac{2b}{i} \left[3(\tau_{\max} + \tau_r) e^{-\frac{l}{3}i} - 55\tau_{\max} e^{-\frac{l}{55}i} + 52\tau_{\max} - (3-li)\tau_r \right] \quad (12)$$

对于我国多金属结核采矿车而言, 其技术参数为单边履带宽 $b=1700\text{mm}$, 接地长 $l=5240\text{mm}$, 节距为 200mm , 齿高 130mm , 窄直齿^[8]。

当海泥剪切强度为 3.7kPa , 车接地比压为 11.9kPa , $\tau_{\max}=2.944\text{kPa}$, $\tau_r=0.434\text{kPa}$ 。

则采矿车的履带总牵引力为:

$$F = \frac{3.4}{i} (10.134e^{-1748i} - 162e^{-95i} + 2274i + 152) \quad (13)$$

将式(13)绘制成曲线, 见图14。

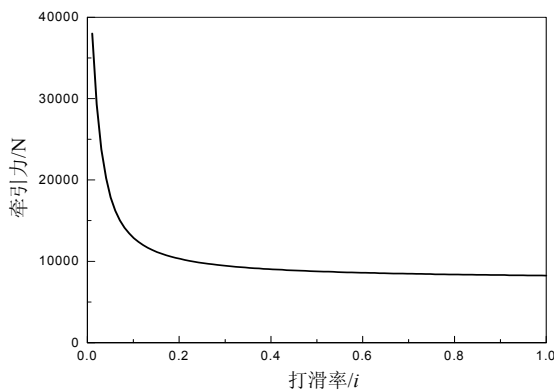


图14 采矿车总牵引力与打滑率曲线

Fig.14 The curves of the total tractive force of China seabed vehicle

分析图14可知, 当采矿车起动打滑率小时, 履带牵引力大, 当打滑率增加时, 履带牵引力急剧下降, 当打滑率大于15%时, 履带牵引力只有9000N。而根据库仑定律^[10], 海泥的最大牵引力为65900N。

由此说明, 海底采矿车一旦起动后, 海泥的牵引力将急剧下降, 牵引力减小约87%。这正是海底采矿车极易打滑和下陷的主要原因。

5 结论

本论文通过对比分析深海表层海泥样品和陆地二种膨润土的累积体积分布曲线和频度分布曲线等特性指标, 最终确定了膨润土之一作为模拟海泥原料。通过对比分析深海表层海泥和模拟海泥的物理力学参数, 将膨润土1与水的不同配比, 获得了具有高含水量、高塑性、高液限、大孔隙比、低

重度、小内摩擦角和低强度深海表层海泥特点的模拟海泥。根据车辆地面力学理论, 开展了多种平板在垂直方向上的海泥载荷-沉陷实验, 基于Bekker理论和Reece理论, 国内首次提出了二种深海表层海泥的载荷与沉陷关系。开展了不同节距、不同齿高、不同齿形和不同齿宽的履带齿板在水平力作用下的海泥剪切应力-位移实验, 国内首次提出了深海表层海泥的剪切应力和位移关系。研究获得了我国多金属结核采矿车的牵引力与打滑率关系式, 分析了海泥牵引力特性, 表明采矿车在深海表层海泥上起动后牵引力将下降了87%。

参考文献:

- [1] 英德比岑 A L. 深海沉积物物理及工程性质[M]. 北京: 海洋出版社, 1981.
Enderby A L. Deep-Sea sediments: physical mechanical properties [M]. Beijing: Ocean Press, 1981. (in Chinese)
- [2] 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, 2000, 22(1): 29-32.
Chen Xiaoling. The physical properties of surface sediments in oceanic polymetallic nodule [J]. Donghai Marine Science, 2000, 22(1): 29-32. (in Chinese)
- [3] 宋连清. 大洋多金属结核矿区沉积物土工性质[J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 47-54.
Song Lianqing. Geotechnical properties of oceanic polymetallic nodule sediments [J]. ACTA Oceanologica Science, 1999, 21(6): 47-54. (in Chinese)
- [4] Hong S, Choi J S. Experimental study on grouser shape effects on trafficability of extremely soft seabed [C]// International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the 4th ISOPE Ocean Mining Symposium. Szczecin Poland: ISOPE, 2001: 115-121.
- [5] Schulte E, Handschuh R, Schwarz W. Transferability of soil mechanical parameters to traction potential calculation of a tracked vehicle [C]// International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the 5th ISOPE Ocean Mining Symposium. Tsukuba Japan: ISOPE, 2003: 123-131.
- [6] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
GB/T 50123-1999, Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 中国大洋矿产资源研究开发协会. 中国大洋矿产资源勘查-DY95-8/9/10/11 航次调查报告[R]. 北京: 1999-2002.
China ocean mineral resources R&D association. The exploration report of DY95-8/9/10/11 navigation about China Ocean Mineral Resource [R]. Beijing: 1999-2002. (in Chinese)
- [8] Li Li, Zhong Jue. Research of China's pilot-miner in the mining system of poly-metallic nodule [C]//International Society of Offshore and Polar Engineers. Proceedings of the 5th ISOPE Ocean Mining Symposium. Hunan China: ISOPE, 2005: 124-134.
- [9] Bekker M G. Theory of land locomotion [M]. Michigan: Ann Arbor, University of Michigan Press, 1956.
- [10] Wong Y. Theory of ground vehicle [M]. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2001.