

重力活塞取样器贯入模型研究

杜 星^{1,2}, 孙永福^{1,2*}, 宋玉鹏^{1,2}, 周其坤^{1,2}, 焦鹏飞^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266235)

摘 要:重力活塞取样器贯入深度研究对于取样效率的提高和仪器安全有着重要影响,根据取样海底沉积物类型及工程参数对取样器可贯入深度进行预判是研究的重点。基于重力活塞取样器结构,设计并制造了重量可调的重力取样器模型,增加了底质桶与支架等配套设施。按照控制变量法分别设计了针对取样器质量、贯入速度及沉积物类型的试验。试验结果表明,底质类型、取样器质量和贯入速度都可以对贯入深度产生不同程度的影响。在现有重力取样器贯入深度公式的基础上,根据本次试验得到的数据对其进行修正。改进后的公式计算结果与原来相比误差更小、更接近于真实取样数据。

关键词:重力取样;重力活塞取样器;能量守恒;贯入深度

中图分类号:P716

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)01-0088-10

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.008

重力活塞取样器是一种以自身重力为动力获取原状样的重要地质工具。自 1947 年 Kullenberg 型重力取样器^[1]设计方案提出以来,被广泛应用于深海超长原状样的采集^[2-3]、近岸沉积物样品的获取^[4]以及湖泊沉积物原状样的获取^[5]。近年来,由于天然气水合物的研究和发展,基于重力活塞取样器的保真原状样的获取^[6-8]成为了研究的热点。无论是深海、近岸还是湖泊沉积物的获取,如何提高取样效率、保证沉积物样品的连续、无扰动都是研究的重点。但由于取样时取样管长度与实际贯入深度不同,样管长度大于贯入深度可能导致取样管折断,小于贯入深度导致不能取得最大长度的连续原状样品^[9]。因此,在取样前对重力活塞取样器贯入深度进行预测对取样效率、质量的提高及取样器的保护具有重要意义。

Burans 对取样器释放距离与速度进行了分析^[10];Skinner 和 McCave 对取样器参数和取样深度进行了探讨^[11];Chen 等对取样器进行了系统的受力分析^[12];李民刚等建立了重力取样器贯入深度与取样器、沉积物各参数之间的函数关系^[13];臧启运等结合取样器应用实例分析了取样效率^[14];杜星等提出了重力活塞取样器贯入深度控制方程^[9]。贯入深度的预测取得了一定的进展,但海上重力取样难以获得准确贯入深度数据并且取样器可变参数条件单一,不利于贯入深度的计算和验证。重力取样器数值模型的研究亟需详细的实际贯入深度数据及取样器自身参数。

本文通过自行设计重力活塞取样器贯入系统,对重力取样器和沉积物进行控制变量分析,将取样器自身参数与贯入深度的关系进行了量化,并在现有重力活塞取样器计算公式的基础上结合本次取样数据对公式进行了修正和改进。

收稿日期:2017-04-12

资助项目:海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005);青岛海洋科学与技术国家实验室
鳌山科技创新计划项目——海底地质灾害监测预警与评估关键技术研究(2015ASKJ03);国家重点研发计划项目——水合物形
成与分解过程微观结构与宏观力学特性(2017YFC0307305)

作者简介:杜 星(1991-),男,辽宁大连人,助理工程师,硕士,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail:duxing@fio.org.cn

*** 通讯作者:**孙永福(1964-),男,山东潍坊人,研究员,博士,主要从事海洋工程地质、灾害地质方面研究. E-mail:sun Yongfu@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

1 重力取样贯入设备

试验设备仿照重力活塞取样器研制,可以模拟重力取样,主要由重力活塞取样器、底质桶以及三脚架三部分组成,示意图见图 1。底质桶为 2 个直径 580 mm、高 930 mm 的圆柱形铁桶,分别用来放置不同类型沉积物。三脚架由可拆卸和伸缩的钢管组成,顶部距地面约为 5 m,顶部配有一个定滑轮,用以连接绳索。取样器主要由配重仓、取样管、内衬管、活塞、刀头、配重块等组成。取样器自重 13 kg,每个配重块重 7 kg,共 6 个,详见图 2。试验中,可控制改变的参数有取样器质量和贯入初始速度(通过下落高度控制),试验时通过改变二者的大小可获得多组试验数据。

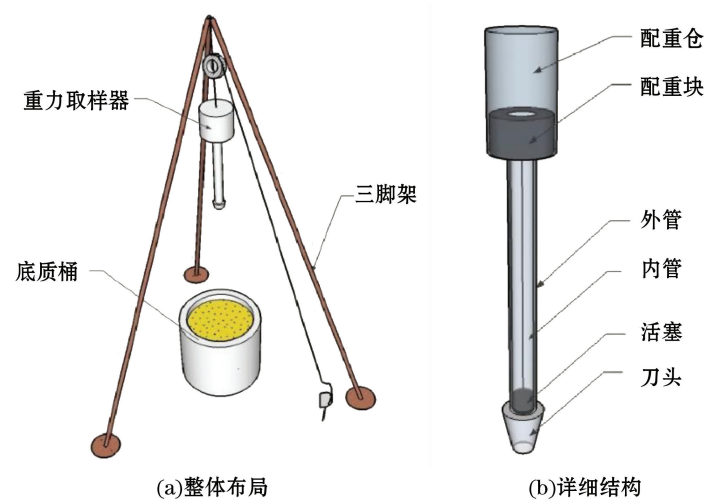


图 1 重力取样器贯入设备
Fig.1 Structures of gravity piston corer



图 2 重力取样器模型、配重块
Fig.2 Model of gravity piston corer and counterweight

2 贯入模型试验研究

2.1 沉积物

试验共使用 2 种沉积物,样品取自黄河水下三角洲区,粒径分布见表 1。按照《岩土工程规范》^[15]定名原则,S1 定名为细砂,S2 定名为粉土。2 种试验样品均具有较好的分选性,能够较好地代表细砂和粉土两种沉积物。从细砂到粉土体现了颗粒由粗到细的变化,能够反应不同粒径的沉积物对取样深度的影响。

表 1 试验土体粒径分布(%)
Table 1 Grain size distribution of soil samples used in experiments(%)

土样编号	粒级组分/mm				
	粗砂	中砂	细砂	粉粒	黏粒
	(0.5≤d<2.0)	(0.25≤d<0.5)	(0.075≤d<0.25)	(0.005≤d<0.075)	(d<0.005)
S1	0.1	1.1	98.6	0.1	0.1
S2	0	0.3	6.7	91.3	1.7

2.2 试验方法及步骤

使用自制的重力取样贯入设备及 2 种沉积物对重力取样器贯入深度进行探究。试验中可变因素为取样器质量、下落高度和底质类型,分别控制三者的变化,设计 3 组试验方案对取样器贯入深度及影响因素进行定量分析。

首先向底质桶内缓缓倒入沉积物和水,搅拌均匀后水面高过沉积物 20 cm 左右,静置 1 周左右待沉积物在自然条件下固结后进行试验。每进行一次贯入试验后,对沉积物进行重新搅拌和固结后再进行下一次试验。组装好支架和取样器,根据具体试验方案放置不同数量的配重块,将取样器拉起后,使用卷尺测量其距离沉积物表面的高度用以计算贯入速度,随后使其自由落体释放,贯入完全后测量取样器剩余长度即可算出贯入深度。

得出不同取样器参数和底质类型对应的贯入深度后,使用现有取样器贯入深度公式^[13]进行计算,可得出计算贯入深度值,将实际贯入数据与计算值进行比较可对公式进行修正和改进。3 组具体试验方案如下:

1)令取样器质量和下落高度不变,土质变化,可以获得在相同质量、速度条件下不同沉积物类型的贯入深度,有利于分析不同沉积物土工参数对贯入深度的影响,试验方案见表 2。

表 2 试验参数
Table 2 Parameters of experiments

序 号	质量/kg	下落高度/m	贯入速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	土质类型
1	20	0.4	2.80	细砂
	20	0.4	2.80	粉土
2	27	0.8	3.96	细砂
	27	0.8	3.96	粉土
3	34	1.2	4.85	细砂
	34	1.2	4.85	粉土
4	41	1.6	5.60	细砂
	41	1.6	5.60	粉土

2)令取样器质量和土质不变,下落高度变化,可以获得在相同质量及沉积物类型的条件下,不同贯入速度对取样器贯入深度的影响,试验方案见表 3。

表 3 试验参数
Table 3 Parameters of experiments

序 号	质量/kg	下落高度/m	贯入初速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	土质类型	序 号	质量/kg	下落高度/m	贯入初速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	土质类型
1	27	0.4	2.80	细砂	9	34	0.4	2.80	细砂
2	27	0.8	3.96	细砂	10	34	0.8	3.96	细砂
3	27	1.2	4.85	细砂	11	34	1.2	4.85	细砂
4	27	1.6	5.60	细砂	12	34	1.6	5.60	细砂
5	27	0.4	2.80	粉土	13	34	0.4	2.80	粉土
6	27	0.8	3.96	粉土	14	34	0.8	3.96	粉土
7	27	1.2	4.85	粉土	15	34	1.2	4.85	粉土
8	27	1.6	5.60	粉土	16	34	1.6	5.60	粉土

3)令取样器下落高度和土质不变,质量变化,可获得在相同贯入速度及沉积物类型的情况下,不同取样器质量对取样器贯入深度的影响,试验方案见表 4。

表 4 试验参数
Table 4 Parameters of experiments

序 号	m/kg	下落高度/m	贯入初速度 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	土质类型	序 号	m/kg	下落高度/m	贯入初速度 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	土质类型
1	20	1	4.43	粉土	9	20	1	4.43	细砂
2	27	1	4.43	粉土	10	27	1	4.43	细砂
3	34	1	4.43	粉土	11	34	1	4.43	细砂
4	41	1	4.43	粉土	12	41	1	4.43	细砂
5	48	1	4.43	粉土	13	48	1	4.43	细砂
6	55	1	4.43	粉土	14	55	1	4.43	细砂

3 结果及计算

3.1 试验结果

通过对上述方案进行试验,得到了 3 组试验数据。当取样器质量和贯入初速度相同沉积物不同时,贯入深度与沉积物的关系见图 3。4 组试验具体参数见表 2,随着取样器质量和贯入初速度的增加,贯入深度也越来越大,但在粉土中的贯入深度均大于在细砂中的贯入深度。这表明其他条件相同时,砂土对取样器产生的阻碍作用大于粉土。不同沉积物对取样器的阻碍作用均不相同,颗粒越大,沉积物与取样管壁的摩擦系数越大。一般来说沉积物对取样器的阻力:黏土<粉土<砂土。因此在进行取样时要先对底质类型进行调查,不同沉积物类型对贯入深度影响较大。

当取样器质量、沉积物相同时,贯入深度随着贯入速度的增加变化见图 4。在 4 种不同的参数条件下,随着贯入速度的增加,贯入深度均逐渐增大。这表明在其他条件不变的情况下,贯入速度越大,贯入深度越大。

当沉积物、取样器贯入初速度相同时,贯入深度随取样器质量的变化见图 5。在底质为粉土和细砂的条件下,随着取样器质量的增加,贯入深度均随之增大。这表明在其他条件不变的情况下,取样器质量越大,贯入深度越大。

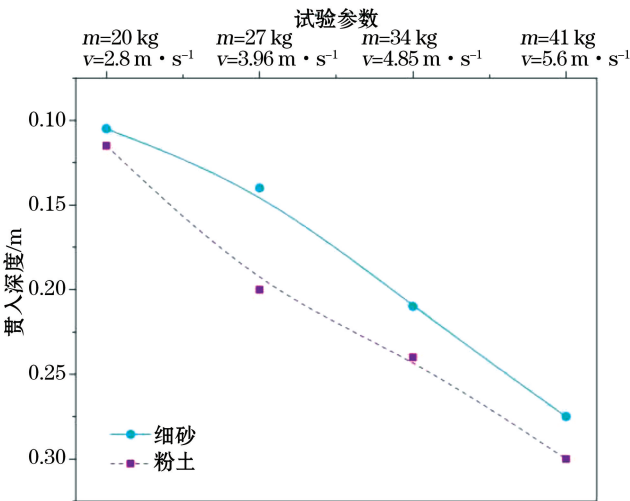


图 3 贯入深度随沉积物类型的变化
Fig.3 Penetration depths varies with sediment types

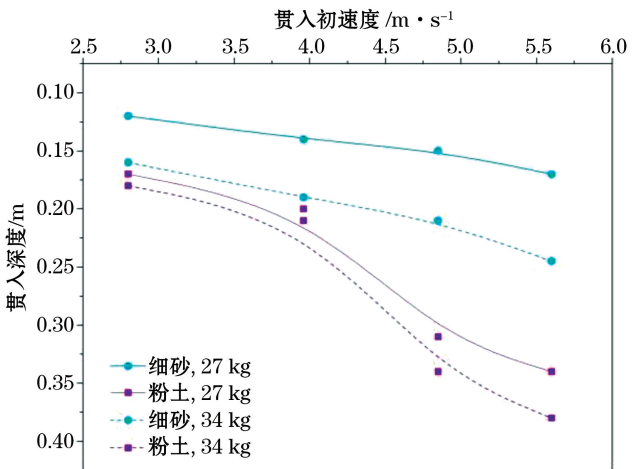


图 4 贯入深度随贯入速度的变化
Fig.4 Penetration depth svaries with penetrate speeds

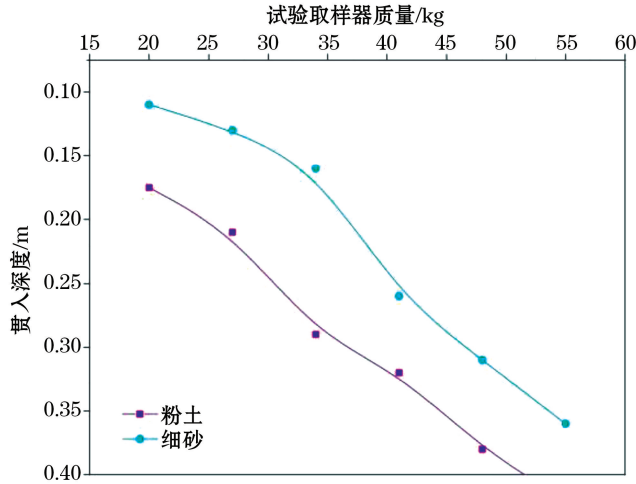


图5 贯入深度随取样器质量的变化

Fig.5 Penetration depths varies with corer weights

3.2 贯入深度计算

影响贯入深度的因素主要分为取样器参数和土质参数两大方面。取样器参数有取样器质量、体积、密度及形状；土质参数主要为土质类型、摩擦系数、土体密实程度等。取样器从接触海底沉积物至最终静止，受到向下的重力作用，以及受到向上的管壁摩擦力、浮力、拖曳力。另外，随着取样管内沉积物的增加，沉积物本身也会对取样器的贯入产生一定的阻力。因此在进行贯入深度计算时需要全面地对各种影响因素进行讨论。

李民刚等^[13]在计算取样器贯入深度时，考虑了动能、重力势能和管壁摩擦力做功，根据能量守恒关系式：

$$A - E_p - E_k = 0, \quad (1)$$

得到了重力取样器贯入深度表达式：

$$l = \frac{mg + \sqrt{(mg)^2 + \tau c m v^2 g}}{\tau c g}, \quad (2)$$

式中： A 为取样器克服外壁与沉积物摩擦阻力做功， E_p 为动力势能， E_k 为动能， l 为贯入深度， m 为取样器质量， g 为重力加速度， τ 为沉积物极限摩擦系数， c 为样管周长， v 为贯入初速度。

该方程基于能量守恒给出了贯入深度的解，但阻力方面只考虑了外壁摩擦力，没有考虑内壁摩擦力、浮力、水对取样器的拖曳力、沉积物密实度等因素。虽然取样管内壁既采用了摩擦系数小的 PVC 管又增加了可减小管内阻力的活塞，但仍无法保证取样管内部阻力为 0。因此内壁应该存在一定沉积物与管壁间的摩擦阻力，内壁与沉积物的摩擦系数应小于外壁。同时，活塞在取样时可对沉积物形成向上的拉力减小摩擦力。

本次试验中，由于取样器未处于水中因此不存在浮力、水对取样器的拖曳力等影响因素。从能量守恒的角度出发，考虑动能、重力势能、内外管壁摩擦做功，可得到表达式(3)，与表达式(1)相比增加了沉积物与取样管内壁摩擦损耗的能量。

$$E_p + E_k - W_i - W_o = 0, \quad (3)$$

式中： E_p 为重力势能， E_k 为动能， W_i 为内壁摩擦做功， W_o 为外壁摩擦做功。

从取样器接触沉积物开始至停止贯入，取样器重力势能和动能的变化分别为

$$E_p = mgl; \quad (4)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv_r^2 \quad (5)$$

式中: m 为取样器质量(kg), g 为重力加速度(N/m^3), l 为取样器贯入深度, v_r 为贯入初速度。

取样器内、外管壁与沉积物摩擦做功分别为

$$W_i = b\tau_i C_i g \int_0^l l dl = \frac{1}{2}b\tau_i C_i g l^2; \quad (6)$$

$$W_o = \tau_o C_o g \int_0^l l dl = \frac{1}{2}\tau_o C_o g l^2. \quad (7)$$

式中: b 为系数, 取 $0 \sim 1$ (b 越小活塞效率越高); τ_i 为内壁摩擦系数(kg/m^2); τ_o 为外壁摩擦系数(kg/m^2); C_i, C_o 分别为内外管周长(m)。

物体从静止自由下落时速度与下落距离关系:

$$v_t^2 = 2gh. \quad (8)$$

本次试验中受滑轮与绳子间摩擦阻力的影响, 实际下落速度为

$$v_r = a \cdot v_t, \quad (9)$$

式中: v_t 为理论贯入速度, a 为系数且 $0 < a < 1$ 。

结合式(3)~(9)得到:

$$mgl + \frac{1}{2}mv_r^2 - \frac{1}{2}b\tau_i C_i g l^2 - \frac{1}{2}\tau_o C_o g l^2 = 0, \quad (10)$$

整理得

$$l = \frac{mg + \sqrt{b\tau_i C_i m g v_r^2 + \tau_o C_o m g v_r^2 + m^2 g^2}}{b\tau_i C_i g + \tau_o C_o g}. \quad (11)$$

4 讨 论

以往重力取样器贯入深度计算使用数据多由海上取样获取^[13]。由于海上取样难度大、时间长、贯入深度无法准确测定, 故取样器参数及取样条件变化不明确, 不利于贯入深度的分析与计算。本文采取了重力活塞取样器模型贯入试验, 可方便地改变取样器自身条件并准确记录每一组试验条件参数和贯入深度, 获得较为完整的贯入过程数据, 丰富重力取样数值研究的资料。深海沉积物重力取样影响因素多种多样, 无论是设备自身效率、人员操作水平还是海上天气都会对取样器贯入深度造成影响。但取样器自身参数对贯入深度有决定性的影响, 同时能够定量地分析和改变。人员操作、海上天气等不确定因素无法定量地分析, 只能尽可能地保持规范和稳定。因此, 本文重点从取样器质量、沉积物类型及贯入速度三方面分析。

4.1 试验结果误差分析

试验中分别对沉积物类型、贯入初速度以及取样器质量与贯入深度进行了控制变量分析。试验与海上重力取样相比减少了贯入时海水阻力, 试验结果与实际相比可能略微偏大。本试验中取样管外径为 58 mm, 底质桶直径为 580 mm, 约为取样管外径的 10 倍。根据《建筑桩基技术规范》^[16] 规定, 为减少挤土效应带来的影响, 通常情况下桩距为 2~4 倍直径。因此贯入时可以忽略挤土效应带来的影响。文中试验得到贯入深度与实际海上取样深度相比, 减少了从接触沉积物到完全贯入时间段内的浮力、拖曳力, 但增加了滑轮端的摩擦力。另外, 文中取样器模型在材料及设计优化上与实际取样器有一定差距, 因此管壁与沉积物摩擦力相对增加, 沉积物贯入后产生的“桩效应”相对明显。

当重力取样器在海水中依靠自重下沉时, 首先速度随着下沉距离增大而增加。但由于下沉速度越大, 海水对取样器的阻力也更大, 故下沉一定深度后作用在取样器向下和向上的阻力达到一种平衡状态, 此时取样

器速度保持不变。研究表明,当重力取样器在海水中自由下落 6 m 左右时,即可到达最大速度,理论最大速度公式^[10]:

$$V^2 \cong \frac{2mg(\rho_c - \rho_w)}{\rho_c \rho_w C_D S}, \tag{12}$$

式中: ρ_c 为取样器密度; ρ_w 为海水密度; C_D 为海水对取样器阻力系数,取 1; S 为取样器最大水平截面积; m 为取样器质量; g 为重力加速度。

重力取样器最大下落速度与质量、材料密度、最大水平截面积有关。当材料、形状一定,只改变配重的情况下,相同质量对应着相同的最大速度。试验中取样器贯入初速度与其在海水中下落理论最大速度比较见图 6。取样器模型材质为钢,实际取样器配重可能使用密度更大的铅块。因此海上取样时,能达到的理论最大速度值应大于等于本取样器最大理论速度。试验获得的贯入初速度大部分小于理论上海水中达到的最大速度,只有 4 个点速度略大于理论速度,在一定程度上可以代表海上取样时取样器贯入速度。其中,取样器质量分别为 20, 27, 34, 41, 48 和 55 kg, 取样器最大截面积为 213.72 cm², 密度为 7 800 kg/m³。

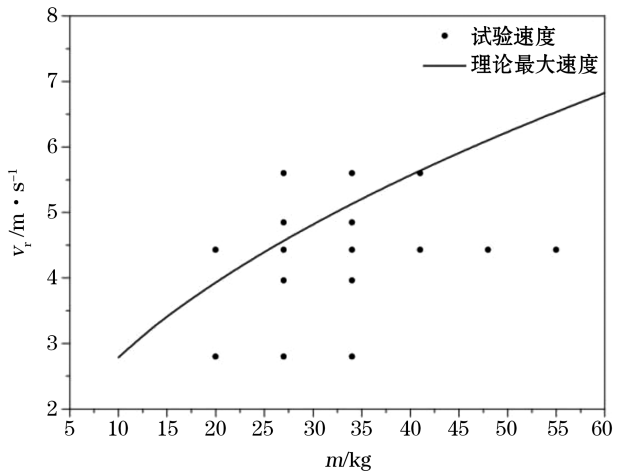


图 6 试验贯入初速度与计算贯入初速度比较

Fig.6 Comparison between test and calculating initial speeds

4.2 贯入深度计算

为检验文中改进后公式的准确性,使用本次试验贯入深度数据对原公式和改进后公式计算结果进行比较分析。首先将试验数据分为砂土和粉土两组,按照贯入深度从小到大进行排列,分别使用原公式(2)和改进后的公式(11)对本次试验数据进行计算,计算参数见表 5,计算结果见图 7 和图 8。

表 5 计算参数

Table 5 Parameters of calculation

沉积物类型	$\tau_o/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	$\tau_i/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	$\rho_c/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_w/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	a	b
粉土	1 500	1 300	7 800	1 025	0.8	1
砂土	2 000	1 500	7 800	1 025	0.8	1

从图 7、图 8 可知,公式计算得到的贯入深度与实际贯入深度相比均偏大,但整体变化趋势一致。两公式计算结果相比,改进后的公式比原公式更接近实际值。改进后公式计算结果与实际结果相比相差 10 cm 左右,已具有较高的精度。实际结果比计算结果偏小,表明除了公式中涉及到的阻力做功,贯入过程可能还存在碰撞做功、刀头切割做功等其他能量损耗,但由于数值偏小故暂时不予考虑。由于每个重力取样器材料、外形及设计等方面均有所不同,故所有贯入深度计算公式均与实际贯入深度有所偏差,通常情况下计算贯入深度大于实际贯入深度。

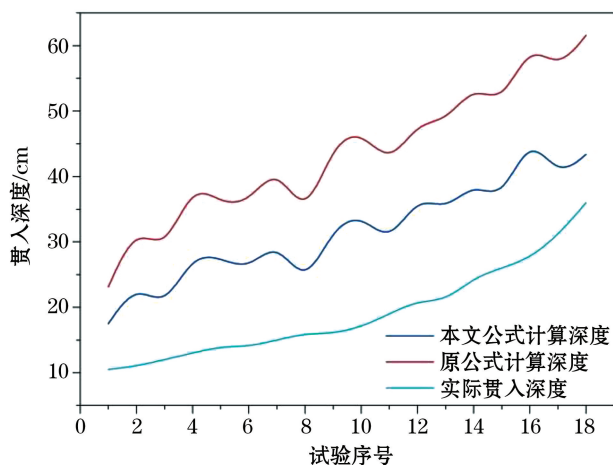


图7 砂土实际贯入深度与计算贯入深度比较

Fig.7 Penetration depth comparison between test and calculation in the case of sand

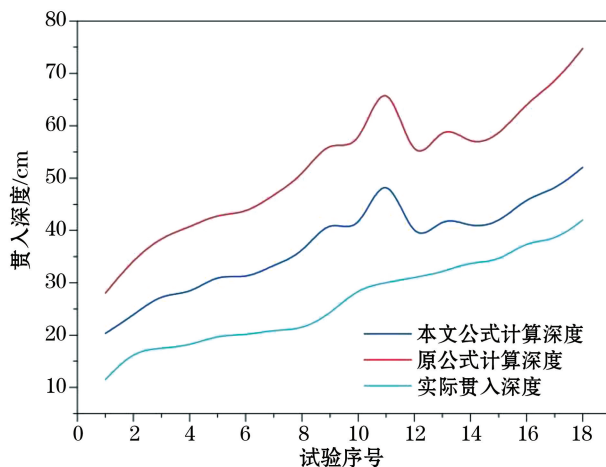


图8 粉土实际贯入深度与计算贯入深度比较

Fig.8 Penetration depth comparison between test and calculation in the case of silt

4.3 取样效率

重力活塞取样器贯入所受阻力主要有内外管壁摩擦力、刀头端阻力、水对取样器的拖曳力、浮力以及管内沉积物造成的阻力。增大取样器贯入时的动能是增加贯入深度的主要手段,方法有增加取样器质量与贯入初速度。美国伍兹霍尔海洋研究所研制的 Giant Piston Corer(GPC)、Long Coring、法国 IFRTP 研究所研制的 CALYPSO corer 等能够获得超长重力取样的取样器都是增大了自身质量,通常自重超过 10 t^[2],因此增加自身质量是获得更长样品的有效手段。另外,通过对取样器材料、形状进行优化可以增大贯入初速度。取样器密度越大,在相同质量的情况下有更小的体积,因此海水浮力、拖曳力等都会下降。虽然取样器质量越大贯入深度越大,但受操作空间和材料强度的限制,质量不能无限增加。从式(12)可知取样器最大截面积越小会拥有越大的贯入初速度。因此除了增加取样器质量,对其结构和形状进行优化也可以提高取样效率。将来可以从取样器形态设计及流体力学优化的角度分析,在质量不变的情况下通过形态优化增加贯入初速度以提高取样效率。

目前,除了重力取样样品的长度,取样质量也受到广泛的关注。受 Kullenberg 型重力活塞取样器结构设计的影响,样品可能产生“桩效应”,即取样管内的样品对取样产生阻力同时样品受到压缩;也可能在回收取样管时对管内样品产生拉伸作用。目前重力取样的样品有效率为 70%左右^[2],被压缩和拉伸的样品会对样品深度造成较大的误差。因此减小取样管内壁材料摩擦力、提高活塞工作效率、适当对取样器结构设计进行升级等措施可以提高取样质量。

5 结 论

本研究设计了一套重力活塞取样器模型,该模型可模拟重力取样器的工作。通过改变取样器的质量、贯入速度及沉积物底质类型,得到了一系列贯入深度数据。通过对取样条件和贯入深度进行分析,并结合试验数据对已有公式进行了改进,得到以下结论:

1)沉积物类型、取样器质量、贯入初速度对贯入深度均有明显的影响,其他条件相同时沉积物颗粒越细,取样深度越长;贯入初速度越大,取样深度越长;取样器质量越大,取样深度越长。

2)文中修正后公式可以较好地计算重力活塞取样器贯入深度,计算结果比实际贯入深度略大。

3)为提高重力取样器的取样效率和样品质量,应增加取样器质量、减小取样器体积、减小取样管与沉积物摩擦力、提高活塞工作效率及优化取样器外管和结构设计。

参考文献(References):

- [1] WISEMAN J D H. Piston core-sampler[J]. *Nature*, 1947, 160: 410.
- [2] ZHANG X, LUAN Z D, YAN J, et al. A review of development in deep-sea long coring system[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(12): 40-45. 张鑫, 栾振东, 阎军, 等. 深海沉积物超长取样系统研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(12): 40-45.
- [3] CHENG Z B, YANG G, WU Y H, et al. Application of long gravity piston corer in the Okhotsk Sea[J]. *Advance in Marine Science*, 2013, 31(4): 553-558. 程振波, 杨刚, 吴永华, 等. 长重力活塞取样器在鄂霍茨克海的应用[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(4): 553-558.
- [4] SANSONE F J, HOLLIBAUGH J T, VINK S M, et al. Diver-operated piston corer for near shore use[J]. *Estuaries and Coasts*, 1994, 17(3): 716-720.
- [5] ZOLITSCHKA B, FRANCUS P, OJALA A E K, et al. Varves in lake sediments-a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 117: 1-41.
- [6] ZHU H Y, LIU Q Y, WANG G R, et al. Research status and development of natural gas hydrate sampling device[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(6): 63-66. 朱海燕, 刘清友, 王国荣, 等. 天然气水合物取样装置的研究现状及进展[J]. *天然气工业*, 2009, 29(6): 63-66.
- [7] LUAN X W, YUE B J, OBZHIROV. Anotoly, sea floor topography of shallow gas hydrate area: data from Okhotsk Sea[J]. *Geoscience*, 2008, 22(3): 420-429. 栾锡武, 岳保静, Obzhirrov. 浅表层天然气水合物区的海底地形特征——以鄂霍茨克海为例[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 420-429.
- [8] CHEN J, FAN W, BINGHAM B, et al. A long gravity-piston corer developed for seafloor gas hydrate coring utilizing an in situ pressure-retained method[J]. *Energies*, 2013, 6(7): 3353-3372.
- [9] DU X, SUN Y F, HU G H, et al. Study of penetration depth of gravity piston corer[J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(3): 134-139. 杜星, 孙永福, 胡光海, 等. 重力活塞取样器贯入深度研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(3): 134-139.
- [10] BURNS R E. Free-fall behavior of small, light-weight gravity corers[J]. *Marine Geology*, 1966, 4(1): 1-9.
- [11] SKINNER L C, MCCAIVE I N. Analysis and modelling of gravity- and piston coring based on soil mechanics[J]. *Marine Geology*, 2003, 199(1-2): 181-204.
- [12] CHEN J W, FAN W, BINGHAM B, et al. A Long gravity-piston corer developed for seafloor gas hydrate coring utilizing an in situ pressure-retained method[J]. *Energies*, 2013, 6(7): 3353-3372.
- [13] LI M G, WANG T H, CHENG Z B, et al. Analysis influencing factors of deep-sea gravity piston corer penetration depth[J]. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science)*, 2013, 43(7): 94-98. 李民刚, 王廷和, 程振波, 等. 深海重力活塞取样器贯入深度影响因素分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(7): 94-98.
- [14] ZANG Q Y, HAN Y B, XU X S. Study on the coring technique with gravity piston corer[J]. *Ocean Technology*, 1999, 18(2): 56-61. 臧启运, 韩贻兵, 徐孝诗. 重力活塞取样器取样技术研究[J]. *海洋技术学报*, 1999, 18(2): 56-61.
- [15] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [16] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

Study of Penetration Depth From a Model of Gravity Piston Corer

DU Xing^{1,2}, SUN Yong-fu^{1,2}, SONG Yu-peng^{1,2}, ZHOU Qi-kun^{1,2}, JIAO Peng-fei^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Marine Geology and Environment Laboratory Process, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China*)

Abstract: Studying on gravity piston corer penetration depth has an important effect on improvement of efficiency and safety of equipment. Prediction of penetration depth, which based on seabed sediment type and engineering parameters, was the focus of this kind of study. According to the general structure of gravity piston corer, this study designed and manufactured a weight-changeable gravity corer, and added sediment barrels, trestle and other supporting facilities into the corer. According to control variable method, this study then designed a series of tests for different weights, penetration speeds and sediment types. Results showed that sediment type, weight and penetration speed all play different degrees of influences on penetration depths. Based on test data, we revised the existing gravity corer penetration formula a formula. The calculation results by using the revised formula have smaller error and were closer to the real sampling data relative to the original formula.

Key words: gravity sampling; gravity piston corer; energy conservation; penetration depth

Received: April 12, 2017