

DOI: 10.11779/CJGE2018S2005

初始浓度对南海珊瑚泥沉积浊液面沉速特性影响 试验研究

沈 扬¹, 冯照雁¹, 刘汉龙^{2, 1}, 王钦城¹, 李 安¹

(1. 河海大学岩土力学与教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

摘要: 珊瑚泥是由细粒珊瑚碎屑组成的钙质软泥, 在南海岛礁的吹填地基中因颗粒分选以夹层形式分布。在整个吹填场地形成过程中, 珊瑚泥的沉积特性会对吹填后形成岛礁的地基稳定性产生一定影响。因此, 从影响地基稳定性最初阶段的吹填沉积特性出发, 探求初始浓度对珊瑚泥浊液面沉速特性影响。利用扫描电镜观察絮凝体尺寸, 根据 Stokes 定律推得浊液面在等速沉积阶段的理论沉速, 并与颗粒组成相近的海相沉积土和同塑性指数的芜湖粉质黏土的沉积特性展开对比分析。试验结果表明: 三种土浊液面出现的高度随初始浓度减小而减小; 在等速沉积阶段, 浊液面沉速随初始浓度增大而减小, 其变化逐渐减缓并趋于稳定。区别在于, 珊瑚泥浊液面出现时间最早, 其沉速远高于其他两种土, 等速沉积阶段所用时间仅为其他两种土的 1/3, 且初始浓度对珊瑚泥等速沉积时间的影响最为明显。最后推导得到了初始浓度与浊液面沉速关系公式, 这对于南海海域吹填施工及地基的安全稳定具有一定的现实意义。

关键词: 南海珊瑚泥; 地基稳定性; 浊液面; 沉速; 初始浓度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0022-05

作者简介: 沈 扬(1980-), 男, 浙江杭州人, 博士, 教授, 博导, 主要从事土体静动力学特性和本构理论研究。E-mail: shenyang1998@163.com。

Experimental study on effects of initial concentration on settling velocity characteristics of turbid surface of South China Sea coral mud

SHEN Yang¹, FENG Zhao-yan¹, LIU Han-long^{2, 1}, WANG Qin-cheng¹, LI An¹

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The coral mud is the calcareous ooze composed of fine-grained coral debris, which is distributed in the form of sandwich by particle sorting. During the formation process of an entire filling site, the sedimentary characteristics of the coral mud will have influences on the foundation stability after the filling. Therefore, from the sedimentary characteristics at the initial stage for the stability of the foundation, the effect of the initial concentration on the surface velocity of coral mud turbid surface is explored. The size of flocculation is observed by using the scanning electron microscope (SEM). The theoretical sedimentation velocity of the turbid surface at the constant velocity sedimentation stage is deduced according to the Stokes formula. Through the sedimentation tests on the coral mud, marine sedimentary soil with similar particle composition and Wuhu silty clay with the similar plastic index, the sedimentary characteristics of the three sediments are compared and analyzed. The results show that the height of turbid surface decreases with the decrease of the initial concentration during the sedimentary processes of three kinds of soil. At the constant velocity sedimentation stage, the settling velocity of turbid surface decreases with the increasing initial concentration, and the change is gradually mitigated and stabilized. The difference is that the settling velocity of coral muddy surface appears at the earliest time, and its sedimentation rate is much higher than that of the other two kinds of soil. The time at the constant velocity sedimentation stage is only 1/3 of that of the other two kinds of soil, and the initial concentration has the most obvious effect on the constant velocity sedimentation time of coral mud. Finally, the relationship between the initial concentration and the turbid surface is obtained. It is of a practical significance for the construction of dredge fill and safety and stability of foundation in South China Sea.

Key words: South China Sea coral mud; foundation stability; turbid surface; settling velocity; initial concentration

0 引言

珊瑚泥是由细粒珊瑚碎屑组成的钙质软泥, 其碳酸钙含量高达 90%以上。近年来, 随着“一带一路”倡议的加快推进, 加之南海独特的地理位置和国防建设意义, 国家逐渐加强了对珊瑚礁以及海洋资源的开发利用^[1], 并在南海开展大规模吹填造岛工程。在吹填沉降中, 由于颗粒自然分选, 珊瑚泥往往以夹层形式分布。在吹填过程中, 若不重视沉积特性, 吹填岛礁地基的稳定性包括整体强度和变形特性均会受到影响。

浊液面的形成是泥水沉积过程的一个主要特征^[2], 确定浊液面的形成机理与其沉速特性对于研究南海珊瑚泥的沉积特性具有重要意义。而浊液面的形成与其沉速受多因素影响, 其中最主要的影响因素是初始浓度。刘莹等^[3]探究了不同土水比的试样沉降过程中泥面沉速、重度及孔隙比等物理性质指标随时间变化的关系。郭帅杰等^[4]认为淤泥初始浓度是淤泥群体沉速和最终沉积稳定高度预测的重要影响因素, 但不唯一。Richardson 等^[5]和 Felice 等^[6]考虑了淤泥悬浊液沉降影响因素, 建立了基于单颗粒沉速修正的 Richardson-Zaki 公式。Imai^[7]研究了初始浓度对泥砂沉速的影响, 并建立了沉速与初始浓度及单颗粒沉速之间的关系。虽然国内外学者对此做出了比较详细的研究, 但珊瑚泥独特的物理化学性质使得这些研究结果并不能完全应用于珊瑚泥。

因此, 本文通过对吹填地基形成过程的首要环节——吹填沉降过程中南海珊瑚泥的沉积特性开展试验研究, 通过与其他两种土对比, 揭示珊瑚泥独特的沉积特性, 推导出初始浓度与浊液面沉速的关系公式, 以更好地为南海吹填工程的设计与施工服务。

1 试验材料的基本性质

本试验所用珊瑚泥取自南海某海域, 对比土为东海的海相沉积土^[8]和芜湖粉质黏土。试验材料均为粉末状松散颗粒, 且珊瑚泥未胶结。3 种土基本物理性质指标如表 1 所示。

表 1 3 种土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of three kinds of soil

试样	颗粒 相对 密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	颗粒组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
南海珊瑚泥	2.77	33.8	23.0	11	1.7	62.3	36.0
海相沉积土	2.66	46.5	17.8	29	0.0	64.0	36.0
芜湖粉质黏土	2.71	30.4	19.0	11	0.0	75.0	25.0

从表 1 中可以看出, 南海珊瑚泥与海相沉积土的粉粒、黏粒含量近似相等, 与芜湖粉质黏土的塑性指数相同, 故选取这两种土与珊瑚泥的沉积特性对比具有可比性。

通过电子显微镜 (SEM) 试验得到自然干燥松散状态下南海珊瑚泥和其他两种土的电子显微镜照片如图 1。采用激光粒度分析仪进行颗粒分析试验, 3 种土的颗粒曲线如图 2 所示。

通过图 1 和图 2 的试验结果分析可知, 珊瑚泥颗粒形态以条状、针状为主, 颗粒团聚形成团粒。而海相沉积土和芜湖粉质黏土的颗粒大多呈片状, 且粒径大多比珊瑚泥大, 极细小的土碎片堆叠成不规则的云朵状团粒, 团粒大小不均匀。

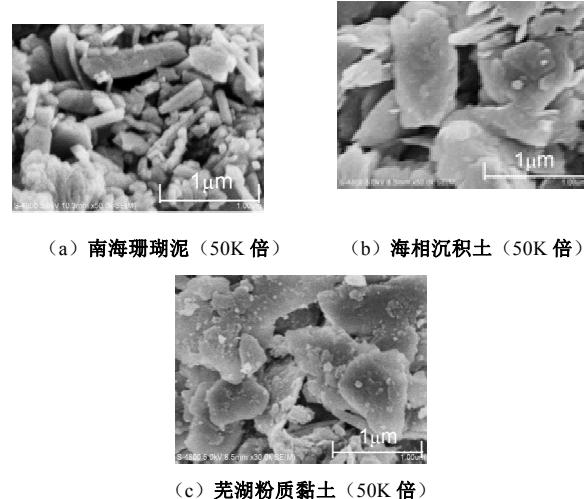


图 1 3 种土不同放大倍数颗粒微观形态

Fig. 1 SEM results of micro-morphology of particles of three kinds of soil under different magnifications

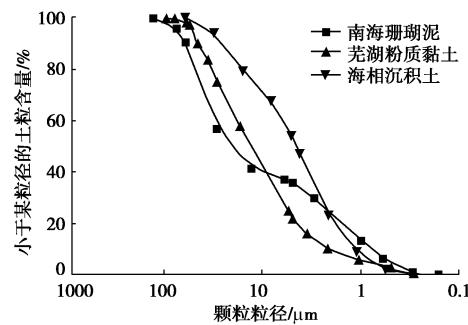


图 2 3 种土的粒径分布累积曲线

Fig. 2 Cumulative-size distribution curves of three kinds of soil

2 絮凝体尺寸及单絮凝体沉速计算

为研究不同初始浓度的泥土沉积过程中絮凝体尺寸及单絮凝体沉速特性, 经过预实验, 发现初始浓度在 100~300 g/L 的 3 种土均可形成清晰稳定的浊液面。选取 5 组具有代表性的初始浓度分别为 120, 150, 200, 250, 300 g/L 的 3 种土进行沉降试验, 并用同样

的方式对不同浓度的3种土的絮凝体尺寸进行取样观测。沉降试验选用量筒规格为1000 mL, 起始沉降高度为31.2 cm。试验中当量筒中形成较为清晰稳定的清浊液分界面时, 用移液管在量筒的浊液面下分别抽取0.5 mL溶液, 处理后用环境扫描电镜观察, 3种土的絮凝体扫描电镜照片见图3。

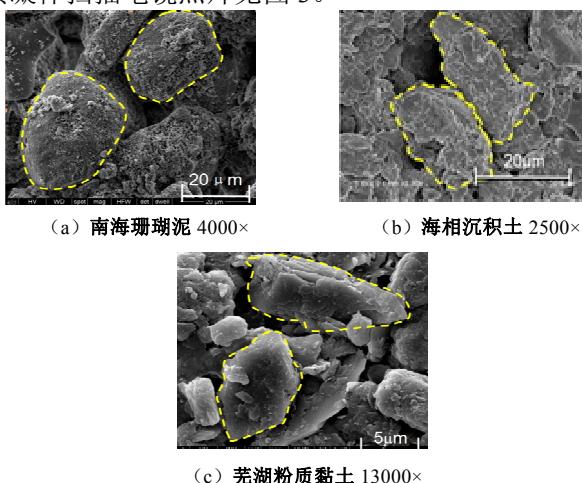


图3 3种土的絮凝体扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images of flocculation of three kinds of soil

通过观察, 珊瑚泥的絮凝体形态明显区别于其他两种土, 其颗粒团聚较为密实, 絮凝体呈球形, 其他两种土的絮凝体长短轴区分明显, 多是由黏土片状小颗粒搭接成纺锤形。初始浓度对于所形成的絮凝体尺寸没有明显的影响, 对于絮凝单颗粒粒径, 南海珊瑚泥多数集中在20~50 μm, 海相沉积土大多在16~20 μm, 芜湖粉质黏土大多集中在7~15 μm。典型絮凝单颗粒粒径, 珊瑚泥约为 $d_A=35 \mu\text{m}$, 海相沉积土约为 $d_B=17.5 \mu\text{m}$, 芜湖粉质黏土约为 $d_C=12.5 \mu\text{m}$ 。Stokes定律一般适用于在2~200 μm范围内的颗粒粒径, 因此单絮凝体的沉降速度可用Stokes定律计算^[9]:

$$v_0 = \frac{(G_s - G_{w,4}) \rho_{w,4} g}{1800 \times 10^4 \eta} d_0^2 \quad (1)$$

式中 v_0 为颗粒在水溶液中的下沉速度(cm/s); G_s , $G_{w,4}$ 为土粒比重和4℃时水的比重; $\rho_{w,4}$ 为4℃时水的密度, 取1.0 g/cm³; g 为重力加速度, 取981 cm/s²; d_0 为颗粒粒径(mm); η 为水的动力黏滞系数, 10^{-6} kPa·s。

取单絮凝的典型粒径作为代表粒径, 得到基于Stokes定律求解的浊液面理论沉降速度为: 南海珊瑚泥 $v_{0A}=0.11944 \text{ cm/s}$, 海相沉积土 $v_{0B}=0.02771 \text{ cm/s}$, 芜湖粉质黏土 $v_{0C}=0.01472 \text{ cm/s}$ 。

3 沉积试验方案及结果分析

3.1 量筒沉积试验方案

经过预试验, 将珊瑚泥和其他两种土的沉积试验初始浓度设置为: 120, 150, 200, 250, 300 g/L。量筒试验分组进行, 每组进行同一浓度的3个平行试验,

分别对珊瑚泥和其他两种土根据以上初始浓度进行15组沉积试验(见图4)。在试样沉积过程中, 观察试样的沉积规律, 并记录试样浊液面形成的初始高度及其随时间变化关系, 取每组平行试验的平均值计入最终结果。



图4 不同初始浓度试验土沉降过程照片

Fig. 4 Images of soil settlement in different initial concentration tests

3.2 沉积试验结果分析

(1) 初始浓度对浊液面形成的影响规律

3种土浊液面高度随时间的变化关系如图5所示。

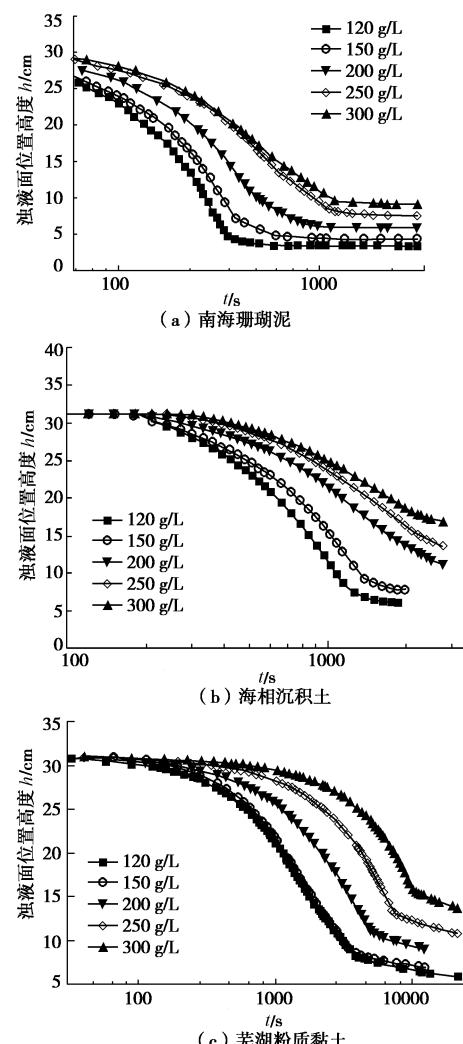


图5 不同初始浓度浊液面沉降对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of turbid liquid subsidence with different initial concentrations

观察可知, 3 种土初始浓度在 120~300 g/L 范围内, 试样沉积过程均可出现清晰可辨的浊液面, 且浊液面出现的高度随初始浓度的减小而降低。这是因为试样初始浓度较低时, 沉降初始阶段试样颗粒间距相对较大, 初级絮凝体结构接触几率较小, 絮凝体结构间不能建立有效的连接并搭接形成更高等级絮团。最初表现为分散沉降过程, 在颗粒沉降一段时间浑浊液达到一定浓度时才会发生絮凝。

对于南海珊瑚泥, 初始浓度在 120~300 g/L 范围内, 浊液面出现的时间明显早于其他两种土, 且浊液面下降迅速。这是由于珊瑚泥具有碳酸钙含量高的特点, 碳酸钙的胶结作用使珊瑚泥小颗粒迅速胶结成较大的絮凝体团粒, 发生絮凝, 产生清晰可辨的浊液面。

(2) 初始浓度对浊液面沉速的影响规律

不同初始浓度的南海珊瑚泥和其他两种土的沉降速度随时间的变化如图 6 所示。

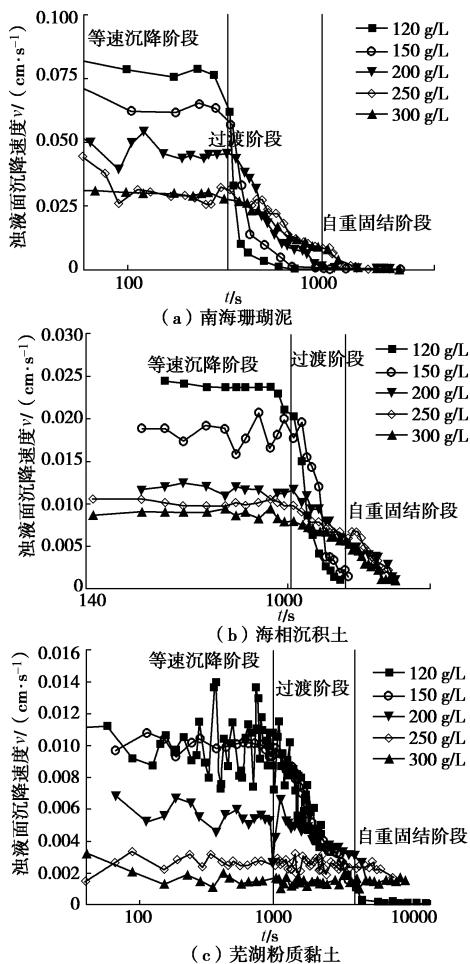


图 6 不同初始浓度浊液面沉速随时间变化对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of variation of settling velocity of turbid surface with different initial concentrations with time

由图 6 可知, 3 种土的沉积试验, 均可分为 3 个阶段: 等速沉积阶段, 过渡阶段和自重固结阶段。对于南海珊瑚泥, 等速沉积阶段所用时间约为 300 s, 海相沉积土和芜湖粉质黏土等速沉积阶段基本均在

1000 s 左右完成; 珊瑚泥等速沉积阶段所用时间仅约为其他两种土的 1/3。

同时, 对于两种对比土, 不同初始浓度的泥浆在沉积过程中完成等速沉积阶段的时间基本一致, 而对于珊瑚泥, 初始浓度越小, 等速沉积阶段完成的时间越短, 说明在珊瑚泥吹填过程中降低初始浓度能够缩短沉积时间。

由图 7 可知, 相同浓度下, 珊瑚泥的沉降速率远大于其他两种土, 这是珊瑚泥区别于其他两种土沉积过程的特殊性质, 主要原因有以下两点: 一是由于珊瑚泥矿物成分以及微观结构的特殊性, 导致珊瑚泥絮凝体间、絮凝体内以及颗粒间的孔隙大, 渗透性高; 二是因为珊瑚泥具有碳酸钙含量高的特点, 众多珊瑚泥小颗粒在碳酸钙的胶结作用下更容易凝聚成团, 形成大粒径絮凝体, 由 Stokes 定律可以发现, 沉速与粒径的平方成正比。这两种原因共同引起珊瑚泥浊液面沉速远远高于其他两种土。

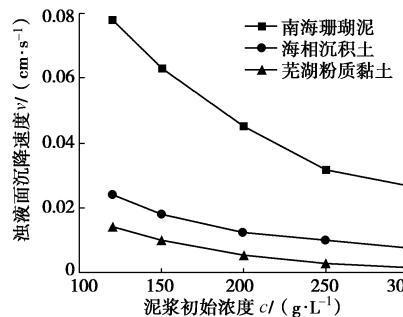


图 7 3 种土等速沉积阶段浊液面沉速与初始浓度关系曲线

Fig. 7 Curves of relationship between settling velocity of turbid surface and initial concentration at constant velocity sedimentation stage

从图 7 还可发现, 一定浓度范围内的南海珊瑚泥泥浆和其他两种土泥浆, 浊液面的实际沉降速度随着泥浆初始浓度的增大而逐渐减缓, 且理论沉速高于试验结果。这是因为絮团之间的相互碰撞和絮团之间水流变化都使得其沉降速度变缓。当体积浓度较低时, 絮凝体几乎不存在相互碰撞, 分散沉降; 随着泥浆溶液体积浓度的增大, 絮凝体之间相互作用以及水流变化越来越明显, 使得沉速减缓, 但这种影响会随着泥浆浓度增大而逐渐减小。

(3) 初始浓度与浊液面沉速关系公式

若将图 7 用双对数坐标描绘, 发现其具有明显的线性关系, 如图 8 所示。

根据图 8 线性拟合得到等速沉积阶段浊液面沉速与初始浓度关系公式:

$$\lg v = A \lg c + B \quad , \quad (2)$$

式中, c 为试验泥浆初始浓度 (g/L), v 为试验泥浆浊液面等速沉积阶段下沉速度 (cm/s)。

式(2)中 A 、 B 随试验泥浆的不同而变化。通过对试验结果的拟合, 可得: 对于珊瑚泥, $A=-1.196$, $B=1.338$ ($R^2=0.995$); 对于海相沉积土, $A=-1.190$, $B=0.848$ ($R^2=0.998$); 对于芜湖粉质黏土, $A=-2.253$, $B=2.875$ ($R^2=0.993$)。可见, 式(2)均可较好地拟合泥浆等速沉积阶段浊液面沉速与初始浓度之间的关系, 具有很好的适用性。可通过已有试验结果推求其他初始浓度的浊液面沉速, 并为实际工程提供参考。

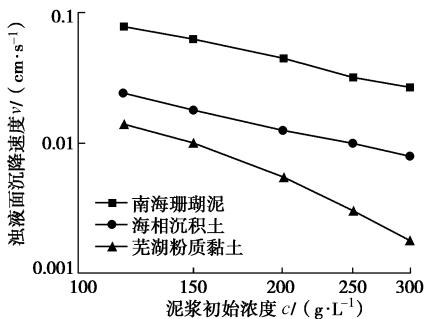


图 8 双对数坐标下泥土等速沉积阶段浊液面沉速与初始浓度关系

Fig. 8 Relationship between settling velocity of turbid surface and initial concentration at constant velocity sedimentation stage under double logarithmic coordinates

另外, 将公式(1)计算得到的浊液面理论沉速带入公式(2), 并假设 v_0 对应的初始浓度为 c_0 , 则有

$$\lg v_0 = A \lg c_0 + B \quad (3)$$

由式(3)解得理论初始浓度 $c_{0A}=77.7$ g/L, $c_{0B}=105.4$ g/L, $c_{0C}=122.9$ g/L。计算结果表明当初始浓度小于等于计算所得的理论初始浓度时, 泥土沉积过程不受外部因素干预, 泥土颗粒自由沉降, 絮凝体间的相互作用和水流变化很小, 可以忽略, 泥土的沉积过程可视为分散沉降过程, 不会形成清晰明显的浊液面。

4 结 论

(1) 本文试验条件下, 初始浓度在 120~300 g/L 范围内的南海珊瑚泥泥浆和其他两种土泥浆, 试样沉积过程均出现清晰可辨的浊液面, 且浊液面出现的高度随初始浓度的减小而减小。

(2) 在等速沉积阶段, 相同浓度下的南海珊瑚泥浊液面的沉速远远高于其他两种土的浊液面沉速, 且等速沉积阶段所用时间仅约为其他两种土的 1/3。三种泥浆浊液面沉速均随初始浓度的增大而减小, 且减小的速率越来越趋于缓慢。初始浓度对其他两种土的沉积时间基本没有影响, 而对于珊瑚泥, 初始浓度越小沉积时间越短, 说明珊瑚泥在吹填过程中降低浓度能够缩短沉积时间。

(3) 通过试验得到了初始浓度与等速沉积阶段浊液面沉速的关系公式, 该公式具有很好的适用性, 可通过已有试验结果推求其他初始浓度的浊液面沉速, 能够清楚地揭示初始浓度对珊瑚泥等速沉积阶段浊液面的沉速特性的影响, 并由该公式解得了基于 Stokes 公式的不产生浊液面的理论初始浓度, 对进一步研究珊瑚泥沉积过程有较为重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] 袁征, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 87~93. (YUAN Zheng, YU Ke-fu, WANG Ying-hui, et al. Research progress on engineering geological characteristics of coral reef[J]. Tropical Geography, 2016, 36(1): 87~93. (in Chinese))
- [2] 高湘. 黄河高浊度水沉淀规律研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004. (GAO Xiang. Study on the law of high turbidity water in Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004. (in Chinese))
- [3] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 518~528. (LIU Ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Experimental study on indoor simulation of filling soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 518~528. (in Chinese))
- [4] 郭帅杰, 张福海, 游波, 等. 泥浆浊液面沉速特性分析试验研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 48~51. (GUO Shuai-jie, ZHANG Fu-hai, YOU Bo, et al. Experimental study on analysis of settling velocity characteristics of mud turbid surface[J]. Yellow River, 2011, 33(7): 48~51. (in Chinese))
- [5] RICHARDSON J F, ZAKI W N. Sedimentation and fluidisation part I[J]. Institution of Chemical Engineers, 1954, 32(19).
- [6] FELICE R D. Liquid suspensions of single and binary component solid particles: an overview[J]. China Particuology, 2007, 5(5): 312~320.
- [7] IMAI G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 7~20.
- [8] SHEN Y, ZHU Y, GE D, et al. Effects of initial concentration on flocculation size and settling velocity of marine hydraulic fill clay[J]. Thalassas An International Journal of Marine Sciences, 2016, 32(2): 117~122.
- [9] 詹正义. 颗粒的群体沉降特性[J]. 泥沙研究, 1996, 31(2): 50~55. (ZHAN Zheng-yi. Particle settlement characteristics of particles[J]. Sediment Research, 1996, 31(2): 50~55. (in Chinese))