

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.011

新型 PS 模型沙特性研究

薛伟¹,雷雪婷²,俞冰³,吴苏舒⁴

(1. 南京水利科学研究院勘测设计院,江苏 南京 210029; 2. 长江航道规划设计研究院,湖北 武汉 430011;
3. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098; 4. 江苏省发展和改革委员会,江苏 南京 210013)

摘要: 为了解新型 PS 模型沙的特性,通过试验,对 PS 模型沙的物理特性、沉速及起动流速进行了研究。研究表明:PS 模型沙的颗粒形状、球度、三轴形状系数、密度及水下休止角都与原型沙相接近,可以采用张瑞瑾公式和唐存本公式的改进公式计算 PS 模型沙的沉速和起动流速。

关键词: PS 模型沙;几何特性;沉速;起动流速

中图分类号:TV149.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0659-05

Characteristics of novel artificial sediment (PS)

XUE Wei¹,LEI Xueting²,YU Bing³,WU Sushu⁴

(1. Survey and Design Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute,Nanjing 210029,China;
2. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute,Wuhan 430011,China;
3. College of Earth Sciences and Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China;
4. Jiangsu Development and Reform Commission,Nanjing 210013,China)

Abstract: In order to examine the property of a new type of PS model sand, tests were conducted to study the physical property, settling velocity, and incipient velocity of the PS model sand. The results show that the particle shape, sphericity, the three-axis coefficient, the volumetric weight, and the submerged angle of repose of the PS model sand were similar with those of the prototype. In addition, the settling velocity can be calculated by Zhang Ruijin's formula and the incipient velocity can be simulated by Tang Cunben's formula.

Key words: PS model sand; geometrical property; settling velocity; incipient velocity

目前,国内常采用木屑、煤、电木粉以及塑料沙等模型沙进行泥沙模型试验,运用这些模型沙成功地解决了许多基础理论及工程实践问题^[1-3]。但这些模型沙均存在一些不足:如木屑易腐烂变质,粒径较大时颗粒形状不好;而煤屑、电木粉由于其密度较大,为满足泥沙运动相似的要求,其粒径常变得较小而可能产生絮凝现象^[4-6];传统的塑料沙,由于颗粒形状常呈球状,造成用其塑造模型河床困难且水下床面也易坍塌而影响试验精度。长江科学院针对以往模型沙存在的不足,研制了亲水性树脂基复合模型沙,对其力学特性进行了研究,并应用于长江防洪实体模型中^[7-9]。但由于受模型沙密度固定的限制,如同时模拟推移质泥沙运动及悬移质泥沙运动,模型选沙就变得十分困难,有时在同一模型中不得不采用 2 种不同材料的模型沙。针对目前常用模型沙的缺点,新型 PS 模型沙凭借其密度及颜色可调,颗粒范围广,颗粒形态接近天然沙,物理、化学性能稳定等优点开始得到应用。本文针对新型 PS 模型沙,通过试验手段研究其颗粒形状、干密度、水下休止角、沉降速度及起动流速等特性。

1 新型 PS 模型沙基本特性

新型 PS 模型沙是以无色、无臭、无味的聚苯乙烯塑料为原料,经改性、破碎制作而成,具有伸缩率小、吸水性低、着色性及再生性好等优点,密度可根据需要调整,一般应用较多的为 1.15 g/cm³。

1.1 颗粒几何特性

1.1.1 颗粒形状

采用扫描技术,并经过光学软件处理,将0.1~0.7 mm天然沙及PS模型沙颗粒图形放大5~10倍,如图1所示。由图1可见,在颗粒粒径 $d<2\text{ mm}$ 时,PS模型沙的颗粒形状与天然沙非常接近,在 $d>2\text{ mm}$ 时,PS模型沙的颗粒略带棱角,但颗粒的长、中、短轴的比例基本与天然沙接近。

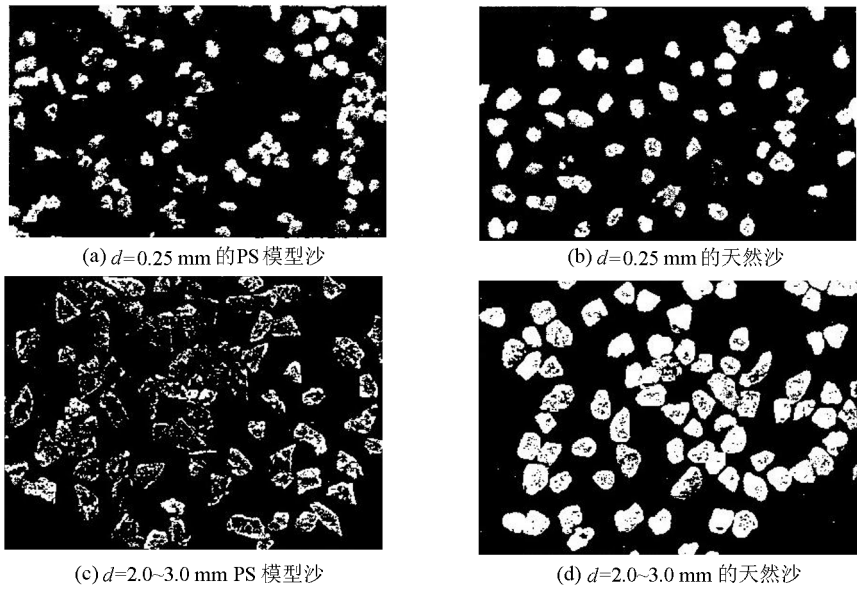


图1 PS模型沙颗粒形状与天然沙比较

Fig. 1 Comparison of particle shape of PS model sand and natural sand

1.1.2 球度系数

用游标卡尺和图像分析的手段,量取模型沙及天然沙颗粒的长、中、短轴,采用球度系数公式计算:

$$\varphi = \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \frac{c}{b}}$$

(1)

式中: a ——颗粒的长轴长度; b ——颗粒的中轴长度; c ——颗粒的短轴长度。计算结果见图2(a)。PS模型沙的球度系数在0.8~0.87,平均球度系数为0.84,而天然沙的平均球度系数为0.86,可见,PS模型沙颗粒形状与天然沙十分接近^[10]。

1.1.3 三轴形状系数

采用公式 $S_F = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$ 计算三轴形状系数 S_F ,结果见图2(b)。由图2(b)可知,PS模型沙的三轴系数为0.7~0.8,平均为0.75,与天然沙的三轴系数0.78比较接近。

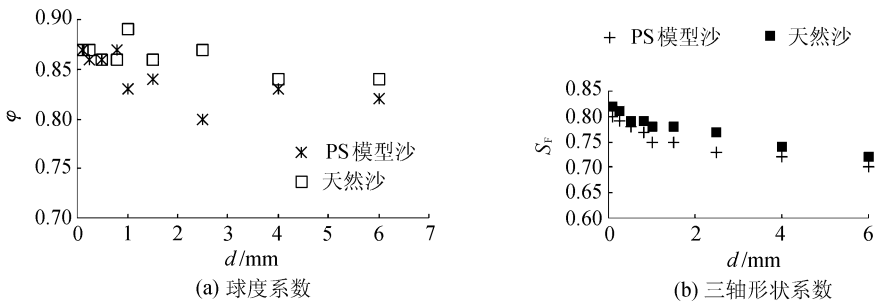


图2 PS模型沙与天然沙比较

Fig. 2 Comparison of sphericity coefficient and three-axis coefficient of PS model sand and natural sand

1.2 密度

对密度为 $\rho_s=1.15\text{ g/cm}^3$ 的PS模型沙取样分析表明:当颗粒粒径较小时,新型PS模型沙的干密度随着

颗粒粒径的增大而增大,在粒径为 0.1 mm 左右时,其干密度 $\rho_0=0.45 \sim 0.47 \text{ g/cm}^3$;随着粒径增大到 1.0 mm 左右,干密度达到最大, $\rho_0=0.65 \text{ g/cm}^3$ 左右;当粒径进一步加大,干密度有减小的趋势,粒径介于 1.0 ~ 7.0 mm 之间时, $\rho_0=0.65 \sim 0.60 \text{ g/cm}^3$ 。PS 模型沙干密度与粒径的关系如图 3 所示。

1.3 水上休止角及水下休止角

分别研究 $\rho_s=1.15 \text{ g/cm}^3$ 的模型沙水上休止角及水下休止角。试验时,在一个底盘直径为 20 cm 的圆盘上采用自然落淤法,将沙粒堆成圆锥,用水位测针测定圆锥高度,计算圆锥坡度,试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,PS 模型沙的休止角随着粒径的增加而增大。在粒径介于 0.1 ~ 1.0 mm 时,休止角随着粒径增大而迅速增大,水下休止角由 29.5°增大到 34.5°左右;粒径大于 1 mm 后,休止角随着粒径增大的趋势有所减缓,当粒径介于 1 ~ 6 mm 之间时,水下休止角由 34.5°增大为 39°。拟合 PS 模型沙休止角与粒径的关系可知,模型沙的水上休止角和水下休止角都与粒径呈幂函数关系,且相关系数 R^2 均大于 0.98。

具体拟合公式^[11]如下:
水上休止角:

$$\theta = 36.273d^{0.0471} \tag{2}$$

水下休止角:

$$\theta = 34.482d^{0.0692} \tag{3}$$

由图 4 可见,随着泥沙粒径的增大,水下休止角与水上休止角越发趋近,说明对大颗粒而言,水下休止角可近似采用水上休止角代替。

2 新型 PS 模型沙沉降速度研究

沉降试验在直径为 0.2 m、高 1.5 m 的沉降桶中进行,观察段设在水下 0.5 m 处,观察长度为 0.6 ~ 0.8 m。试验时,对大于 5 mm 的颗粒,采用量取颗粒长、中、短轴,并用几何平均计算其代表粒径,即:

$$d = \sqrt{abc} \tag{4}$$

图 5 为 PS 模型沙沉降速度计算值与实测值的比较。从图 5 可知:张瑞瑾公式计算沉降速度结果与实测泥沙沉降速度基本吻合,因而可以采用张瑞瑾公式计算 PS 模型沙的沉降速度:

$$\omega = \sqrt{\left(13.95 \frac{v}{d}\right)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}gd} - 13.95 \frac{v}{d} \tag{5}$$

式中: v ——水的运动黏滞性系数, cm^2/s ; ρ ——水的密度, g/cm^3 ; g ——重力加速度。

图 6 为 PS 模型沙沉降阻力系数 C_d 与沙粒雷诺数 R_e 的关系。其中所得阻力系数均采用如下公式计算:

$$C_d = \frac{4}{3} \frac{\Delta gd}{\omega^2} \tag{6}$$

其中 $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad R_e = \frac{\omega d}{\nu}$

图 6 中,在沙粒 $R_e < 0.5$ 时,沙粒沉降绕流 C_d 与沙粒 R_e 呈现线性关系;而当 $R_e > 300$ 时,沙粒沉降绕流 C_d 接近常数,其值约为 1.388。

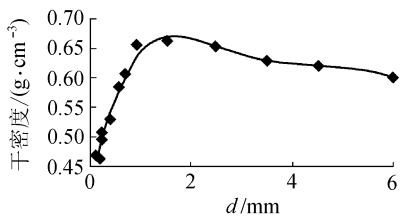


图 3 PS 模型沙干密度与粒径关系 ($\rho_s=1.15 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 3 Relationship between dry bulk density and particle size of PS model sand ($\rho_s=1.15 \text{ g/cm}^3$)

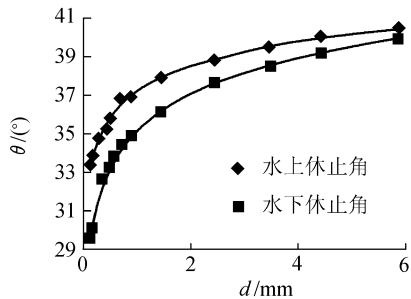


图 4 PS 模型沙水上及水下休止角比较

Fig. 4 Comparison of land-based angle of repose and submerged angle of repose of PS model sand

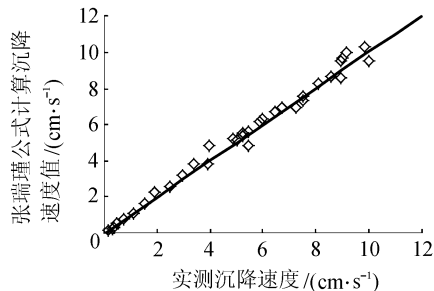


图 5 PS 模型沙沉降速度计算值与实测值比较
Fig. 5 Comparison of calculated and measured values of settling velocity of PS model sand

3 新型 PS 模型沙起动流速研究

3.1 试验设备及方法

试验在长 8 m、宽 0.2 m、高 0.3 m 的玻璃水槽中进行。试验段长 2 m,槽底坡约 1/10 000,槽底平均铺沙厚 5 cm,采用高精度流量计控制流量,观察不同水深时泥沙起动状态,并用 ADV 测量泥沙起动临界状态时的水流垂线平均流速。

3.2 试验沙样

试验采用 $\rho_s = 1.15 \text{ g/cm}^3$ 的模型沙 13 组,中值粒径为 0.1 ~ 7.0 mm; $\rho_s = 1.48 \text{ g/cm}^3$ 的模型沙 5 组,中值粒径为 1.0 ~ 7.0 mm。

3.3 试验结果

试验在 4 ~ 15 cm 左右水深情况下,观察泥沙起动状态。泥沙起动状态分为个别起动、少量起动、大量起动 3 个级别,具体观测要求与一般判断泥沙起动研究相同。根据唐存本^[12]泥沙起动公式,可以将 PS 模型沙的起动公式结构定义为

$$U_c = k_1 \frac{1}{m+1} \left(\frac{h}{d} \right)^m \sqrt{\Delta g d + \frac{k_2}{d}}$$
$$m = \frac{1}{4.7} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.06}$$

(7)

式中: U_c ——泥沙起动临界流速; h ——水深; m ——系数。经过对试验数据拟合可以得到不同条件下的 PS 模型沙的起动公式,具体如下:

个别起动:

$$U_c = 1.60 \frac{1}{m+1} \left(\frac{h}{d} \right)^m \sqrt{\Delta g d + \frac{0.05}{d}}$$

(8)

少量起动:

$$U_c = 1.85 \frac{1}{m+1} \left(\frac{h}{d} \right)^m \sqrt{\Delta g d + \frac{0.05}{d}}$$

(9)

大量起动:

$$U_c = 2.15 \frac{1}{m+1} \left(\frac{h}{d} \right)^m \sqrt{\Delta g d + \frac{0.05}{d}}$$

(10)

图 7 为根据式(7)~(9)计算所得泥沙起动流速与实测值之间的比较。由图可知,实测值与计算值均匀分布在 45°线两侧,证明计算结果与实测相吻合,因此式(8)~(10)可以用来计算 PS 模型沙的起动流速^[13]。

4 结 论

a. 原有木屑等传统模型沙均存在不同程度的缺陷,如易腐烂变质、粒径较大时颗粒形状不好等,因而需要新型的模型沙。

b. 通过对 PS 模型沙颗粒形状、球度及三轴形状系数、密度、水下休止角等性质研究可知,PS 模型沙与实际泥沙在物理特性方面基本一致。由 PS 模型沙沉降速度研究可知,PS 模型沙的沉降速度可由张瑞瑾公式计算,其沙粒沉降绕流 C_d 为 1.388;根据 PS 模型沙起动试验研究可知,PS 模型沙的起动流速计算公式可以采用唐存本公式的基本形式。

c. PS 模型沙相对以往的模型沙具有密度可调、颜色可调、颗粒范围广等优点,能够弥补传统模型沙在应用中的不足,但价格相对较贵。

参考文献:

[1] 张幸农. 常用模型沙及其特性综述[J]. 水利水运科学研究,1994(增刊1):41-45. (ZHANG Xingnong. Review of common model sands and their specific properties[J]. Hydro-Science,1994(Sup1):41-45. (in Chinese))

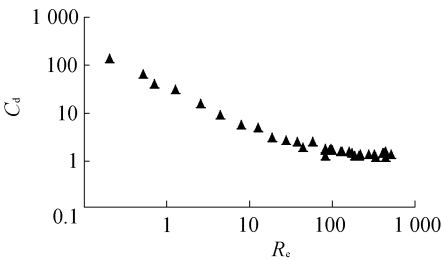


图 6 PS 模型沙沉降阻力系数与沙粒雷诺数关系
Fig. 6 Relationship between settlement drag coefficient and Reynolds number of PS model sand

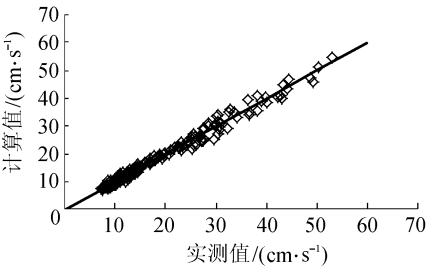


图 7 起动流速计算值与实测值比较
Fig. 7 Comparison of calculated and measured values of incipient velocity

- [2] 闵凤阳,姚仕明,黎礼刚. 模型沙特性研究进展[J]. 长江科学院院报,2011,28(2):79-86. (MIN Fengyang,YAO Shiming, LI Ligang. Advances in study on characteristics of model sand[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2011, 28(2):79-86. (in Chinese))
- [3] 胡春宏,王延贵,张燕菁. 河流泥沙模拟技术进展与展望[J]. 水文,2006,26(3):37-41. (HU Chunhong,WANG Yangui, ZHANG Yanjing. Development and prospects of simulating technology for river sedimentation[J]. Journal of China Hydrology, 2006,26(3):37-41. (in Chinese))
- [4] 师哲,龙超平,严军. 粉煤灰模型沙的试验研究[J]. 长江科学院院报,2000,17(3):14-18. (SHI Zhe, LONG Chaoping, YAN Jun. Investigation of flyash model sands[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2000,17(3):14-18. (in Chinese))
- [5] 严军,殷瑞兰. 粉煤灰固结起动特性[J]. 泥沙研究,2001(6):55-60. (YAN Jun,YIN Ruilan. Consolidation of fly ash starting characteristics[J]. Journal of Sediment Research,2001(6):55-60 (in Chinese))
- [6] 吴其保,章启兵,张波. 浅谈动床模型试验中的模型沙选择[J]. 治淮,2006(2):25-27.
- [7] 孙贵州,魏国远,汪明娜. 亲水性树脂基复合模型沙力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(1):4-15. (SUN Guizhou,WEI Guoyuan,WANG Mingna. Experimental research on physical characteristics of compound model sands made of hydrophilic resin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2007,24(1):4-15. (in Chinese))
- [8] 汪明娜,孙贵州,郑文燕. 新型塑料合成沙物理和运动特性试验研究[J]. 科技导报,2007(10):39-43. (WANG Mingna, SUN Guizhou,ZHENG Wenyan. Experimental research on physical and kinetic characteristics of the new compound sand made from plastic[J]. Science & Technology Review,2007(10):39-43. (in Chinese))
- [9] 朱代臣. 长江防洪实体模型阻力特性研究[D]. 武汉:长江科学院,2008.
- [10] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [11] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利出版社,1981.
- [12] 唐存本. 泥沙起动规律研究[J]. 水利学报. 1963(2):23-27. (TANG Cunben. Study on laws of incipient motion for sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1963(2):23-27. (in Chinese))
- [13] 王延贵,胡春宏,朱毕生. 模型沙起动流速公式的研究[J]. 水利学报,2007,38(5):518-523. (WANG Yangui, HU Chunhong, ZHU Bisheng. Study on formula of incipient velocity of sediment in model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(5):518-523. (in Chinese))