

结合粒径分布测量的悬移质泥沙沉降速度试验探究

张天予¹, 李茜², 冯镜洁¹, 文典², 李然¹,
袁雨亮¹, 王振华¹, 黄杰山¹

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:泥沙沉降速度的确定对于水体中泥沙输运与时空分布规律的研究至关重要。笔者理论分析了均匀泥沙颗粒在水中沉降初期的非匀速沉降过程。在现有泥沙沉降试验的基础上,开展了泥沙颗粒级配测量的工作,提出了一种可将泥沙沉速与粒径建立起对应关系的改进试验方法,该方法考虑了不同组分泥沙共存条件下作用对沉速的影响,将0.01~0.06 mm 粒径尺度的悬移质泥沙在水中的沉速与粒径建立起较好的指数型函数($\omega = 0.0105e^{0.1031D}$)关系,相比理论计算值和传统试验方法更加精确。笔者的研究成果对于天然河流中拆坝后河道演变、泥沙沉降过程等方面的研究工作具有重要的理论价值和工程意义。

关键词:悬移质;粒径分布;沉速

中图分类号:P332.5;TV149

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2023)增2-0001-08

Experimental Study on Suspended Load Settling Velocity in Water Combined with the Measurement of Particle Size Distribution

ZHANG Tianyu¹, LI Qian², FENG Jingjie¹, WEN Dian², LI Ran¹,
YUAN Yuliang¹, WANG Zhenhua¹, HUANG Jieshan¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065;
2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: The determination of settling velocity is very important for the study of sediment transport and spatiotemporal distribution in water. In this paper, the non-uniform settling process of uniform sediment particles in the initial stage of settling is theoretically analyzed. On the basis of the existing settling test, the measurement of sediment particle size gradation has been done, and an improved experiment method is proposed to establish a corresponding relation between settling velocity and particle size. This method considers the influence of interactions on settling velocity under the coexistence of different components of sediment and establish a good exponential function relation $\omega = 0.0105e^{0.1031D}$ between the settling velocity and particle size 0.01-0.06 mm of suspended sediment in water, which is more accurate than theoretical calculation values and traditional test method. The research results in this paper have important theoretical value and engineering significance for the research on river channel evolution and settling process after dam removal in natural rivers.

Key words: Suspended load; Particle size distribution; Settling velocity

0 引言

水体中悬移质泥沙的沉降速度直接关系到水体中泥沙含量时空分布与河床演变过程,也是泥沙模拟研究中非常重要的关键参数^[1]。几十年来,很多学者对此进行过相关研究。

现阶段,较为常见的泥沙沉降速度推算方法大致有经验公式法,以及底部抽管法、重复深度吸管法^[2]等试验方法。许春阳等人^[3]总结了细颗粒泥沙制约沉降速度的影响因素(水体浮力、黏性、回流等)和主要计算方法(Richardson-Zaki公式及其修正公式、组合式沉降公式等),詹咏等人^[4]认为单颗粒泥沙沉降处于层流区时,沉速的计算

收稿日期:2023-03-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52039006),国家自然科学基金长江水科学研究联合基金资助(U2240212)

可采用简化后的 Stokes 公式。万远扬等人^[5]通过试验认为单颗粒泥沙粒径是影响泥沙沉速的重要因子,且泥沙粒径越大,沉降速度越快。为了应用方便,Zigrang^[6]、Turton^[7]、Hallermeier^[8]等人将颗粒沉速和粒径转化为无量纲的和,各自通过实验建立起不同形式的一关系式,且计算值相对偏差较小。Cheng^[9]、张瑞瑾^[10]等人在球体颗粒在静水中沉降规律的研究基础上,探究了天然泥沙颗粒沉速规律,建立起天然泥沙沉速与粒径的一关系。Leussen^[11]等人对河口悬浮细颗粒泥沙沉降速度的变异性进行了定量分析。此外,陈曦^[12]、吴宇帆^[13]等人还对长江口黏性细颗粒泥沙在絮凝作用下的沉降速度开展了实验研究,Khelifa^[14]等人提出了预测絮凝体沉降速度的新模型。Goldstein^[15]等人提出了利用机器学习的方法来预测泥沙沉降速度。

综合分析表明,关于泥沙颗粒沉速一粒径的关系已有较多成熟的研究。该文在此基础上,尝试将泥沙颗粒沉速一粒径的关系探究,结合传统的泥沙静水沉降试验开展新方法的探索。

实际天然河流中泥沙粒径存在分布,传统的静水沉降试验中没有考虑粒径分布对泥沙沉降速度计算的影响,也没有将沉速对应于具体的颗粒粒径。此文结合静水沉降试验与马尔文粒径分析方法,探讨了静水沉降过程中不同时刻泥沙粒径分布变化,并分析研究了粒径分布变化对沉速的影响,将泥沙颗粒粒径大小与沉降速度建立起对应关系,为天然河流中泥沙沉降以及河道演变的数学模型研究提供基础数据和理论依据^[16]。

1 泥沙沉降过程分析

首先,对于在水中沉降的单个泥沙颗粒进行受力分析。天然泥沙在静水中沉降,介质处于层流状态时,颗粒的形状对沉速的影响很小,为方便计算,将泥沙颗粒等同为规则球体来进行受力分析^[17],泥沙颗粒受力分析图见图1。

球体颗粒在水中的重量可以表示为

$$W = G - F_{\text{浮}} = \frac{\pi D^3}{6} (\rho_s - \rho) g \quad (1)$$

式中 G 为球体所受重力; $F_{\text{浮}}$ 为球体所受浮力; D 为球体颗粒的直径; ρ_s 为球体颗粒的密度; ρ 为液体的密度; g 为重力加速度。

物体沉降时所受的阻力是绕流阻力,它是由

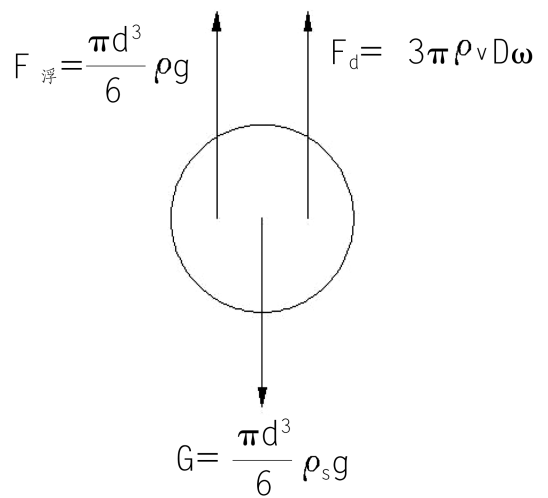


图1 泥沙颗粒受力分析图

表面阻力和形状阻力两部分组成。表面阻力是由液体的黏滞性和流速梯度产生的切向作用力;形状阻力是因边界层的分离,物体后部产生旋涡,使该区域内压力为负值,阻止物体向前运动,它的大小取决于物体的形状和流速^[18]。在静水沉降试验当中,泥沙在沉降柱中作层流沉降运动。球体作层流沉降时,流线紧贴球体,因此仅受表面阻力的作用。

斯托克斯曾将纳维-斯托克斯方程积分,得到球体作层流沉降时所受到的阻力为

$$F_d = 3\pi\rho\nu D\omega \quad (2)$$

式中 ρ 为液体的密度; ν 为液体运动黏度; ω 为沉降速度; D 为球体颗粒的直径。

泥沙颗粒在静水中的沉降过程分为加速沉降阶段和匀速沉降阶段^[19],泥沙沉降过程示意图见图2。最初一段时间内受到重力的作用而加速下沉;但加速以后,液体对泥沙的阻力增大,经过一段距离后,重力与阻力平衡,泥沙颗粒就作匀速沉降,此时物体的运动速度,称为物体在静止液体中的沉速。

球体在加速过程中,受力分析为

$$\frac{\pi D^3}{6} (\rho_s - \rho) g - 3\pi\rho\nu D\omega = \frac{\pi D^3}{6} \rho_s a \quad (3)$$

化简得到加速度

$$a = \frac{D^2 (\rho_s - \rho) g - 18\rho\nu\omega}{D^2 \rho_s} \quad (4)$$

通过式(4)可知,加速度随着速度的增大而减小,且呈线性相关关系。

泥沙颗粒作匀速运动时,所受到的重力与阻

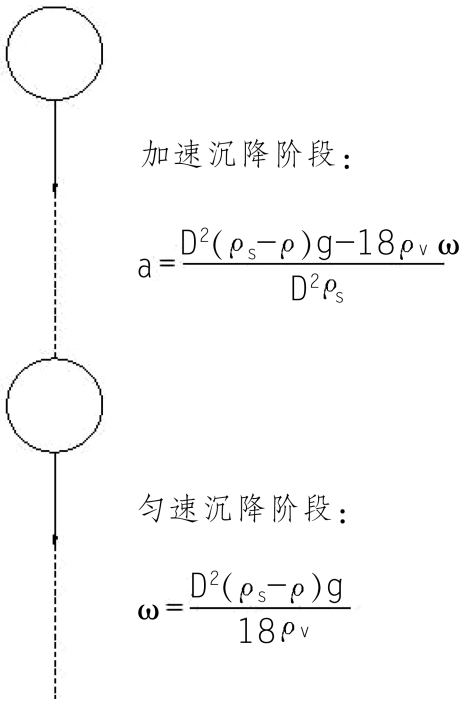


图 2 泥沙沉降过程示意图

力相等,即加速度 $a=0$,此时

$$\omega = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} \quad (5)$$

如此,便得到了匀速沉降速度与颗粒粒径的关系,匀速沉降速度与颗粒粒径的平方成正比^[20]。

得到沉速与粒径的关系后,对泥沙达到匀速沉降速度所需要的时间和高度进行公式推导,深入探究其非匀速沉降过程。

1.1 沉速与时间关系

由式(4)可知,加速度随着速度的变化而变化,可推导速度与时间的关系。

①初速度:

$$\omega_0 = 0 \text{ m/s} \quad (6)$$

②加速度:

$$a = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g - 18\rho_v \omega}{D^2 \rho_s} \quad (7)$$

③加速度一般表达式:

$$a = \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

联立式(7)、(8)有

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{18\rho_v \omega}{D^2 \rho_s} = \frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho_s} \quad (9)$$

此微分方程的通解为

$$\omega = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} + C \cdot e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}} \quad (10)$$

当时 $t=0, \omega=0$,代入式(10)求解得常数

$$C = -\frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} \quad (11)$$

由此,可得特定粒径泥沙颗粒沉降速度与沉降时间的关系式为

$$\omega = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} (1 - e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}}) \quad (12)$$

1.2 沉速与高度关系

由式(12)可知,速度随着时间的变化而变化,可推导高度与时间的关系。

①初始高度:

$$h_0 = 0 \text{ m} \quad (13)$$

②速度:

$$\omega = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} (1 - e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}}) \quad (14)$$

③速度一般表达式:

$$\omega = \frac{dh}{dt} \quad (15)$$

联立式(14)、(15)有

$$\frac{dh}{dt} = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} (1 - e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}}) \quad (16)$$

此微分方程的通解为

$$h = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} t + \frac{D^4 \rho_s (\rho_s - \rho)g}{324 \rho^2 v^2} \cdot e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}} + C_1 \quad (17)$$

当时 $t=0$ 时, $h=0$,代入式(17)求解得常数

$$C_1 = -\frac{D^4 \rho_s (\rho_s - \rho)g}{324 \rho^2 v^2} \quad (18)$$

由此,可得特定粒径泥沙沉降高度与沉降时间的关系式为

$$h = \frac{D^2(\rho_s - \rho)g}{18\rho_v} t + \frac{D^4 \rho_s (\rho_s - \rho)g}{324 \rho^2 v^2} (e^{\frac{-18\rho_v t}{D^2 \rho_s}} - 1) \quad (19)$$

至此,笔者在理论上求解得知了泥沙达到匀速沉降速度所需要的时间和高度,以及不同粒径的泥沙所对应的匀速沉降速度。按照公式推导, $t \rightarrow \infty$ 时,才可达到最大泥沙沉速,故认为泥沙的沉速达到理论最大沉速的 90% 后即可满足匀速沉降。对式(12)和式(19)中的常数物理量 $\rho_s, \rho, g,$

v 进行测量,通过计算,得到不同尺度粒径颗粒达到 90%理论最大沉速所需时间和高度,不同粒径

尺度泥沙颗粒达到 90%理论最大沉速所需时间和高度见表 1。

表 1 不同粒径尺度泥沙颗粒达到 90%理论最大沉速所需时间和高度

泥沙颗粒粒径尺度 /mm	颗粒雷诺数 $Re (Re = \frac{\omega D}{\nu})$	达到 90%理论最大沉速所需时间/s	达到 90%理论最大沉速所需高度/mm
0.01	0.000 746	0.000 03	1.36×10^{-6}
0.1	0.745 78	0.003	1.36×10^{-2}
1	745.779 5	0.3	136

由此可见,泥沙粒径是影响泥沙非匀速沉降过程的关键因素。当泥沙粒径越大,非匀速沉降过程就相应越长。这是由于泥沙颗粒粒径越大,与水体接触面积越大,因而受水体粘滞性所带来摩擦力的影响越大,导致泥沙颗粒达到稳定匀速需要更长的时间和距离^[21]。

由于该试验所用悬移质泥沙颗粒粒径较小(均包含在 0.001~0.400 mm 的范围内),沉降速度可在极短时间($t \rightarrow 0$)内达到稳定匀速,故可认为在此粒径尺度下,泥沙全程匀速沉降,非匀速沉降阶段可忽略不计。且根据颗粒雷诺数的理论计算结果,实验所用细沙的颗粒雷诺数基本都小于 0.5,可认为颗粒在静水沉降过程中属于层流沉降。

2 泥沙沉降过程试验研究

在理论分析和公式推导的基础上,开展改进后的泥沙沉降试验,并对理论计算结果进行验证和修正。

2.1 试验装置与材料

2.1.1 试验装置

泥沙沉降试验装置的主体是自由沉降试验装置,以下均简称为“沉降柱”,沉降柱试验装置见图 3。单个柱体的直径为 100 mm,高度为 2 m,容积为 15.7 L。柱体侧面共有 6 个不同高度的取水口,用以取水样测定浊度和含沙量。水箱内部的螺旋搅拌桨用以搅拌水体,使得试验初始时泥沙在垂向上混合均匀分布。泥沙沉降试验装置示意图见图 4。

2.1.2 试验材料

试验所用天然河沙的密度为 $2\ 390.3\ \text{kg/m}^3$,粒径范围大致为 $1\sim 400\ \mu\text{m}$,粒径组成呈显著的正态分布,中值粒径为 $17.171\ \mu\text{m}$,试验用沙颗粒级配见图 5。

2.2 试验方法与仪器



图 3 沉降柱试验装置

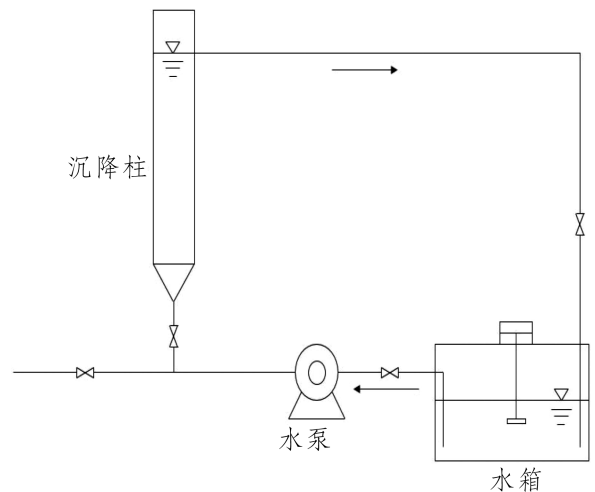


图 4 泥沙沉降试验装置示意图

泥沙中值粒径对应的沉速是数学模型中的一个重要参数,下面对比分享两种泥沙沉降试验方法在计算该值时的差异。

2.2.1 基于泥沙剩余率的传统试验

泥沙沉降试验计算中值粒径对应沉速的传统方法如下:首先设定泥沙沉降的时间梯度,根据不同取样时刻取样口距液面的高度与沉降历时的比

值(式 20),得到该取样时刻对应的平均沉速,建立沉速与泥沙剩余率(取样浓度/初始浓度)的关

系,剩余率 50%时的沉降速度即为悬移质颗粒中值粒径对应的沉速^[22]。

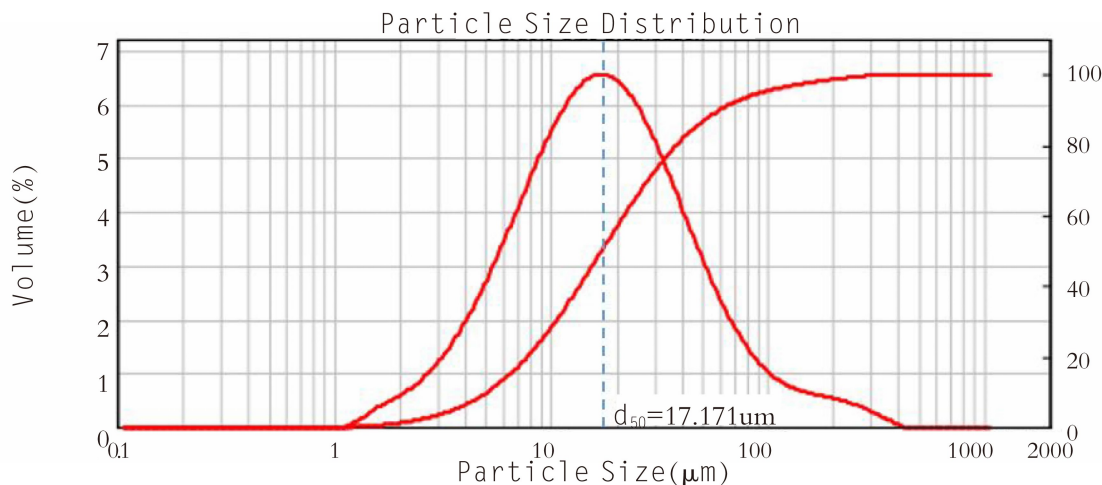


图 5 试验用沙颗粒级配

$$\omega_i = \frac{h_i}{t_i} \quad (20)$$

式中 h_i 为第 i 次取样水深值, mm, 下标 i 为正整数; $h_i = (h_{i,b} + h_{i,a}, h_{i,b})$ 为第 i 次采集含沙水样前采样处与液面之间的距离, mm, 下标 i 为正整数, $h_{i,a}$ 为第 i 次采集含沙水样后采样处与液面之间的距离, mm, 下标 i 为正整数; t_i 为第 i 次取样时刻, s; ω_i 为第 i 次取样对应的沉降速度, mm/s。

由于泥沙悬移质溶液中浊度和含沙量呈较好的正相关关系,可用浊度仪测量泥沙浊度来替代泥沙含沙量以表征水样中泥沙悬浮物浓度。哈希 2100Q 浊度仪见图 6。



图 6 哈希 2100Q 浊度仪

故此,泥沙悬浮物去除率的计算公式如下:

$$E_i = [1 - (ZD)_i / (ZD)_0] \times 100\% \quad (21)$$

式中 E_i 为悬浮物去除率, %; $(ZD)_i$ 为浊度, NTU; $(ZD)_0$ 初始浊度, NTU。

悬浮物剩余率为 50% 即对应去除率为 50%, 通过已建立的沉速与泥沙剩余率的关系计算出悬浮物剩余率为 50% 时对应的沉降速度。这一泥沙沉降试验方法未考虑试验过程中泥沙粒径变化对沉速计算结果的影响, 因此粗略认为试验得到的沉降速度对应的粒径为泥沙中值粒径。

2.2.2 基于泥沙粒径分布的改进试验

在试验方案方面,拟进行如下改进:

泥沙的主要调查指标包括水体含沙量和悬移质泥沙颗粒级配。在每个采样时间采集 300 mL 水样,利用浊度仪测量其浊度,通过真空抽滤装置过滤出泥沙,烘干称重后计算出水体含沙量;并利用马尔文激光粒度仪测量不同时刻水样中滤出泥沙的颗粒级配组成,马尔文激光粒度仪见图 7。改进试验方法流程见图 8。

测量不同时刻水样中的泥沙粒径级配,主要是为探求该时刻水样中泥沙粒径的最大值。因为各水样中颗粒的最大粒径难以被精确测量,所以选取 d_{90} 对应的泥沙粒径大小代表此时刻所取水样中泥沙粒径的最大值,且认为该粒径泥沙颗粒在此时刻刚好从液面完全沉降于取水口液面以下,从而建立起泥沙颗粒沉速与粒径的关系,并测得悬移质泥沙的中值粒径,代入关系式中求得中值粒径对应的沉速。

3 沉速试验结果及对比分析



图7 马尔文激光粒度仪

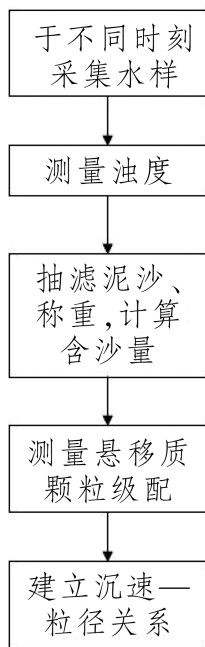


图8 改进实验方法流程

3.1 试验结果

(1) 采用以悬浮物剩余率推算沉速的传统试验方法, 首先测量浊度与含沙量, 结果验证了含沙量与浊度呈较好的正相关关系, 含沙量与浊度关系见图9, 由于浊度测量方便快捷, 故方可以浊度替代含沙量表征水样中泥沙悬浮物浓度。根据测量结果, 确定沉速与悬浮物剩余率(取样浓度/初始浓度)的关系, 沉速与悬浮物剩余率关系见图10, 从而可以得到悬浮物剩余率为50%时对应的沉降速度为0.085 mm/s。

(2) 考虑泥沙粒径分布改进后方法试验结果。

不同时刻泥沙粒径分布见图11, 反映了不同时刻水样中泥沙悬浮物颗粒的粒径分布情况。可

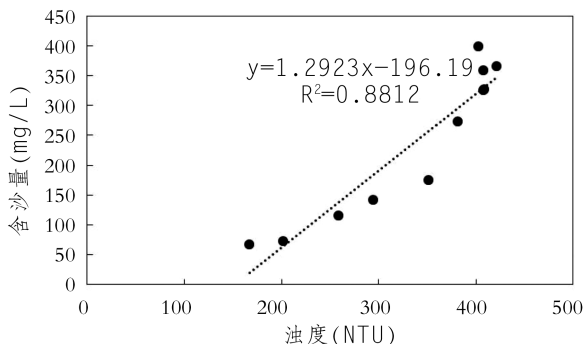


图9 含沙量与浊度关系

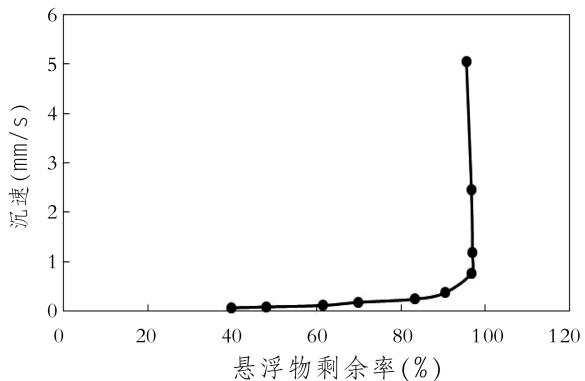


图10 沉速与悬浮物剩余率关系

以看出, 随着沉降时间的推移, 所取水样中粒径组成范围整体变小, 中值粒径变小, 且中值粒径颗粒所占的体积比变大。在沉降时间为0 min(可代表试验所用泥沙粒径分布)的水样中, 测得泥沙中值粒径 $d_{50} = 17.171 \mu\text{m}$, 代入试验测量拟合曲线公式后得到的对应沉速为0.062 mm/s, 改进试验方法泥沙沉速与粒径关系见图12。

3.2 对比分析

根据两种方法试验结果, 结合理论公式推导进行分析。泥沙颗粒沉速与粒径的关系的试验测量与理论推导结果对比见图13。

改进试验方法中, 试验拟合结果为指数函数, 与理论推导所得抛物线函数的总体趋势较为相似, 沉速随着粒径的增大而增大, 且增加速度越来越快。试验用沙颗粒级配见图5, 泥沙中值粒径 $d_{50} = 17.171 \mu\text{m}$, 代入试验测量拟合曲线公式后得到的对应沉速为0.062 mm/s, 代入理论推导公式中得到的对应沉速为0.221 mm/s。结果存在较大差异的主要可能原因是理论公式推导存在假设和简化, 即默认液体介质处于层流状态, 并将泥沙颗粒等同于规则球体进行计算。改进后方法的试验结果在一定程度上可对理论计算结果进行

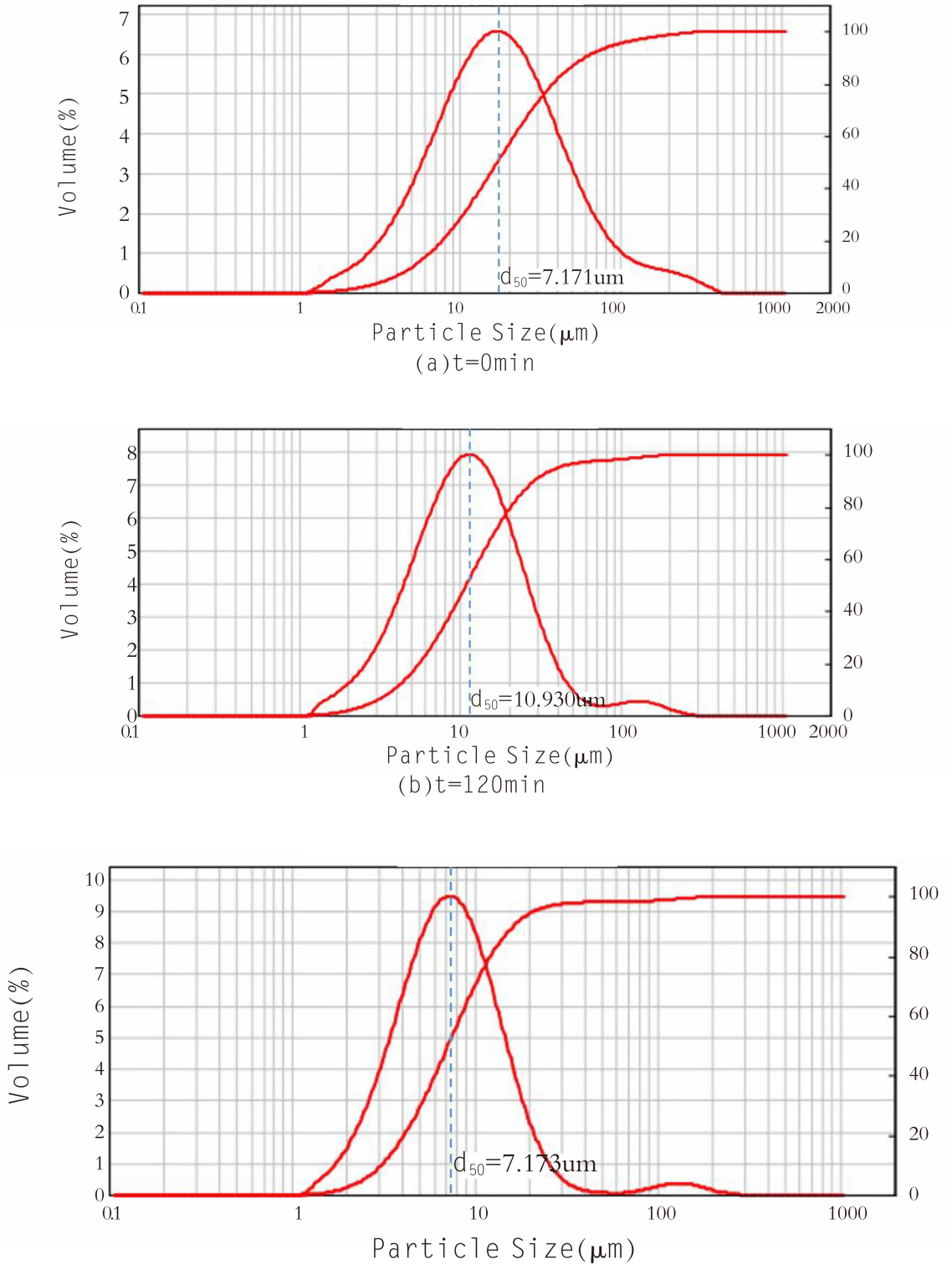


图 11 不同时刻泥沙粒径分布

验证和修正,更加真实准确地反映泥沙颗粒沉降与粒径之间的关系。

此外,改进试验方法与传统试验方法的计算结果也存在一定差异。试验方法改进前中值粒径

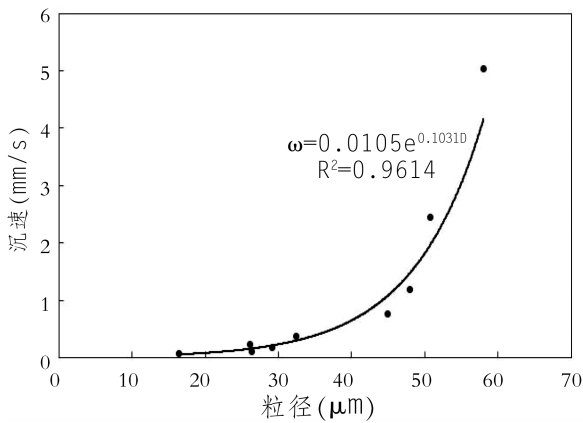


图12 改进试验方法泥沙沉速与粒径关系

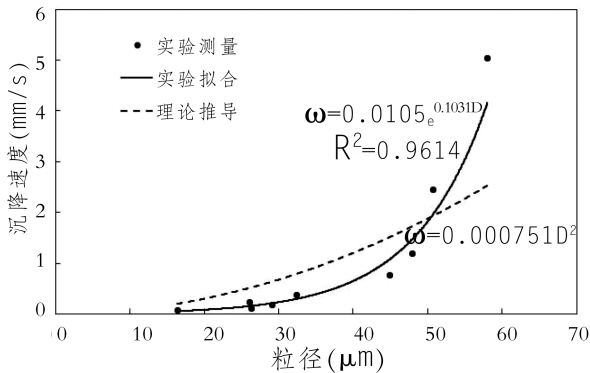


图13 试验、理论对比结果

对应的沉速为 0.085 mm/s,改进后为 0.062 mm/s,二者相差 27%。传统试验方法采用泥沙悬浮物剩余率为 50%时对应的沉速,此方法存在一定程度的近似和简化,由于泥沙中不同粒径组成的含量并不均匀,悬浮物剩余率 50%时对应的粒径并非接近真实的中值粒径。而在改进后的方法中,关于泥沙沉速的研究考虑了粒径分布,建立起沉速与粒径的曲线关系,使得沉速和粒径两变量的对应关系更加严谨,结果更加真实精确。

4 结论与展望

4.1 结论

在完成上述研究工作的过程中,取得了如下成果:

(1)笔者关注了泥沙沉降试验中前期泥沙的非匀速沉降过程,并通过公式推导对不同粒径尺度泥沙颗粒的非匀速沉降过程(沉降速度、沉降高度与沉降时间的关系)进行分析,为开展沉速试验中沉速的计算提供方法依据。

(2)笔者提出一种考虑沉降过程中粒径分布影响的泥沙静水沉降试验改进方法。改进后的方

法将沉降过程中泥沙颗粒沉降速度与粒径大小建立了定量关系,并根据试验结果对泥沙颗粒沉降的理论速度公式进行验证和修正。为天然河流中泥沙沉降以及河道演变的数学模型研究提供基础数据和理论依据。

4.2 展望

完成上述工作的同时,在相关研究中尚存在一些不足和需要完善之处:

(1)对于泥沙非匀速沉降过程的探究,由于单个悬移质泥沙颗粒体积较小,难以通过试验精准捕捉其非匀速沉降过程并对理论推导进行验证,存在一定忽略和假设。若试验条件允许,后期可继续开展有关单颗粒静水沉降的试验探究。

(2)笔者试验中所用悬移质河沙粒径范围为 0.001~0.400 mm,后期可对不同尺度粒径组成的河沙补充开展更为广泛全面的泥沙沉降试验,探究其沉降规律并对此文试验成果进行验证和完善。

参考文献:

- [1] 周赤建. 河流悬移质泥沙运动模拟方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
- [2] 郜国明, 郭选英, 曾芹, 等. 非均匀颗粒群体沉速试验方法的分析[J]. 泥沙研究, 2000(3): 68-71.
- [3] 许春阳, 罗雯, 陈永平, 等. 细颗粒泥沙制约沉降速度计算方法综述[J]. 泥沙研究, 2022, 47(1): 73-80.
- [4] 詹咏, 王惠明, 曾小为. 泥沙沉降速度研究进展及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2001, 32(2): 23-24.
- [5] 万远扬, 吴华林, 顾峰峰. 长江口细颗粒泥沙沉降速度室内试验研究[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 98-101.
- [6] Zigrang D J, Sylvester N D. An explicit equation for particle settling velocities in solid - liquid systems[J]. AIChE Journal, 1981, 27(6): 1043-1044.
- [7] Turton R, Clark N N. An explicit relationship to predict spherical particle terminal velocity[J]. Powder Technology, 1987, 53(2): 127-129.
- [8] Hallermeier R J. Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains[J]. Sedimentology, 2010, 28(6): 859-865.
- [9] Cheng, Nian-Sheng. Simplified Settling Velocity Formula for Sediment Particle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 149-152.
- [10] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [11] Leussen W V. The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary[J]. Journal of Sea Research, 1999, 41(1-2): 109-118.

(下转第 14 页)

立杆稳定性均满足规范要求。同时由于整个洞身坡比为10%，采用其它类型脚手架进行支模，就需要在所有的立杆底部使用大量的三角木或混凝土垫块进行水平处理后，才能使用配套的立杆底座确保架体基础的稳定。而CUOLOCK-S高强度碗扣式脚手架配套的可调节角度活动托座就完美的解决了上述难题，施工过程中，仅在洞身轴线方向的整排立杆下铺设通长的8 cm×5 cm(宽×高)方木，将托座放置在方木上并用铁钉固定、并利用普通脚手架钢管将纵向整排立杆下的托座通长连在一起；同时用普通扣件式脚手架钢管打设底座斜撑，确保了整个架体基础的抗滑稳定。斜底板可调角度活动托座基础固定示意图见图11。

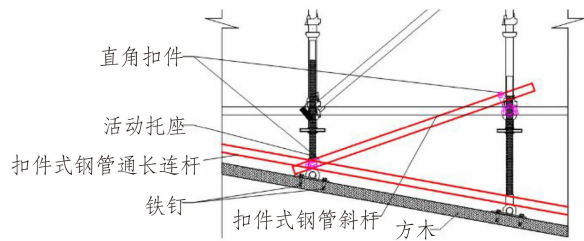


图11 斜底板可调角度活动托座基础固定示意图

4 结 语

(上接第8页)

- [12] 陈曦. 长江口细颗粒泥沙静水沉降试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [13] 吴宇帆. 长江河口细颗粒泥沙沉降速度研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [14] Khelifa A, Hill P S. Models for effective density and settling velocity of flocs[J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44(3):390-401.
- [15] Goldstein E B, Coco G. A machine learning approach for the prediction of settling velocity[J]. Water Resources Research, 2014, 50(4):3595-3601.
- [16] 汤立群. 河流及流域泥沙数学模型的研究与应用[D]. 南京: 河海大学.
- [17] 李世森, 张睿. 泥沙颗粒沿水深方向的受力研究[J]. 港工技术, 2016, 53(2):6-12.
- [18] Nakamura I, Watanabe T, Furukawa H. 3939 Discovery Process in Fluid Mechanics: Boundary Layer Theory[J]. The proceedings of the JSME annual meeting, 2006(7): 159-160
- [19] 俞亚南, 叶培伦. 蓄泥库泥沙群体静水沉降速度研究[J]. 水利学报, 2001, 32(10):19-24.
- [20] Stokes, Gabriel G. Mathematical and Physical Papers; On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums[J]. 2009:1-10.

抽水蓄能电站许多现浇混凝土结构尺寸和荷载大、支模工况复杂多变,与工民建的标准层板梁柱结构施工大相径庭。新型的CUOLOCK-S高强度碗扣式脚手架,在宁海抽水蓄能电站超危大工程结构支模体系中成功应用,与其优良的材料品质、先进的产品锻造工艺以及针对特殊部位的复杂形体和施工工况做出的巧妙独特的设计密不可分。在安全生产形势日益严峻的今天,希望涌现出更多、更好、更安全的新材料新产品为国内抽水蓄能电站建设的安全生产保驾护航。

参考文献:

- [1] 于海洋. 建筑施工碗扣式钢管脚手架安全技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范, JGJ 130-2011 [S].
- [3] 建筑施工碗扣式钢管脚手架安全技术规范, JGJ 166-2016 [S].
- [4] 水利水电工程施工安全管理导则, SL 721-2015 [S].
- [5] 电力建设工程施工安全管理导则, NB-T 10096 [S].

作者简介:

刘杰(1984-),男,安徽舒城县人,高级工程师,工学士,从事抽水蓄能电站施工技术与质量管理工作。

(责任编辑:廖益斌)

- [21] 许华军. 探究水对物体摩擦力的影响[J]. 速读旬刊, 2014(12):161-162.
- [22] Liang L, Deng Y, Li R, et al. Modeling of sediment transport in a saltwater lake with supplemental sandy freshwater[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(25):24975-24991.

作者简介:

张天予(1998-),男,河北石家庄人,在读硕士研究生,研究方向为环境与生态水力学;

李茜(1993-),女,四川广安人,工程师,硕士,从事水电工程环境保护及水生态保护设计工作;

冯镜洁(1986-),女,重庆人,研究员,博士,研究方向为环境与生态水力学;

文典(1984-),男,四川广安人,正高级工程师,硕士,从事生态环境保护设计工作;

李然(1968-),女,河北石家庄人,研究员,博士,研究方向为环境与生态水力学;

袁雨亮(1996-),男,山西大同人,在读博士研究生,研究方向为环境与生态水力学;

王振华(1995-),男,河北张家口人,在读博士研究生,研究方向为环境与生态水力学;

黄杰山(1998-),男,重庆人,在读硕士研究生,研究方向为环境与生态水力学。

(责任编辑:廖益斌)