文章编号:1672-3031(2021)03-0350-06

一种有压流下细颗粒泥沙起动试验方法

李华勇[1], 陈远中[2], 陈 槐[3]
(1. 江西省港航建设投资集团有限公司, 江西 南昌 330008; 2. 深圳市公明供水调蓄工程管理处, 广东 深圳 518036;
3. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 本文提出了一种有压流下细颗粒泥沙起动时刻定量判别与起动流速测量的方法。结合可升降水塔、钢化玻璃封闭槽道、粒子图像测速系统等, 本文开发出压力可调的泥沙起动试验系统, 其中水塔用以改变水压, 激光用以照亮泥沙颗粒, 高速相机用以实时捕捉起动过程。泥沙起动后会散射激光, 导致图片灰度急剧升高, 依此特征推求起动时刻, 并计算起动流速。采用三峡库区原型细颗粒泥沙进行大水压下泥沙起动试验, 并与已有起动流速统一公式进行对比。本文试验结果与唐存本1963和窦国仁1999公式的差异较小, 受制于试验条件和样本数量的不足, 此阶段还无法对各家公式进行优劣比较。今后将开展更多组次不同工况的试验, 以期能提出有压流下的泥沙起动流速统一公式并实际应用。

关键词: 有压流; 槽道; 细颗粒; 泥沙起动; 激光; 高速相机
中图分类号: TV142 **文献标识码**: A **doi**: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200095

1 研究背景

泥沙起动是河床演变的基本问题, 与河床、海床等的冲淤演变和桥墩、堤防等临水或水下建筑物的冲刷稳定性密切相关[1-2]。尽管前人关于泥沙起动做了大量试验研究, 但受制于试验条件, 水深都较小, 关于水深对泥沙起动的影响还有待研究。

虽然窦国仁[3]论文中提出的统一公式与实测资料符合较好, 但是他的石英丝试验的最大水深只是90 cm, 引用的国内外试验数据的水深也一般在15 cm左右, 而且公式中的一些系数仅在假定H/Ha(水深/大气水柱压力)<<1时才成立, 所以他的公式是否适用于大水深泥沙起动是有待检验的。万兆惠等[4]对现有起动流速公式的组成结构进行了分析, 指出水深是通过水压力来影响起动流速的, 虽然起动流速计算式中的黏结力项各家认识不统一, 但黏结力都通过压力表现出来, 只要弄清水压力对起动的影响, 就可知道水深对起动的影响; 并在一个水压力可以调节的专用设备上用三种泥沙进行了试验, 结果表明对较粗的散粒体泥沙, 水压力对起动流速没有影响; 对黏性细颗粒泥沙, 随着水压力的增大, 起动流速明显增大; 最后提出应着重研究大水压力下的泥沙起动。分析前人的泥沙起动统一公式[5-9], 如金得春[10]所述, "水深对泥沙起动影响反映在两个方面: 一是与沙粒构成相对糙率, 反映阻力的影响; 二是反映在薄膜水压力上。而开展大水深起动试验研究是将公式正确应用于天然条件的关键。"

张瑞瑾等[11]认为: "当前关于泥沙起动的绝大多数实测资料, 都是在试验室中取得的, 水深未超过1 m, 大多数在30 cm以内。在水深不足1 m的实测资料的基础上, 所得到的计算起动流速的公式, 是否适用于水深达到数米以致数十米的天然河流, 是值得怀疑的。只有在水深较大的天然河流中取得大量的精度较高的实测资料以后, 这个问题才能解决。而且粒径小于0.1 mm的泥沙起动流速

收稿日期: 2020-06-24; 网络首发时间: 2021-04-21
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210420.1006.003.html
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407803); 国家自然科学基金青年项目(51609146)
作者简介: 李华勇(1970-), 高级工程师, 主要从事水利水电工程方面的研究。E-mail: lihuayong_jxgh@163.com
通讯作者: 陈槐(1987-), 高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学方面的研究。E-mail: chenhuai@nhri.cn

的实测资料还是很不够。对于这类泥沙的黏结性问题、压实程度的影响问题以及与此相联系的单颗粒起动或片状起动的问题，研究得还是太少。”

国外关于水深对泥沙起动影响的文献如下。一些作者认为相对水深(水深与泥沙粒径比值)对泥沙起动影响很小或几乎没有影响[12-13]；但另一些作者的水槽试验发现相对水深对泥沙起动的影响很大，尤其是水深较小的急流条件[14]。Mehta等[15]、Buffington等[16]认为Shields曲线上数据点的散乱是因为没有考虑水深的影响。Mohtar等[17]总结认为，虽然Shields及一些作者用试验证实了Shields曲线的有效性，但都是建立在倾斜的水深较小的均匀恒定槽道流试验上，未在大水深条件下进行验证。

由上可以看出，进行大水深条件下的泥沙起动试验是十分必要的，尤其是对粒径较小的黏性沙，研究结果将更好的应用于解决水深较大的天然河流、水库、湖泊、海洋的泥沙问题。

2　试验装置

水深由水压力体现，故开发大水压力的试验系统，水压力从0到12 m可调，进行三峡库区泥沙的起动试验研究，探讨不同水压力下各种泥沙起动的相似性。大水压封闭槽道系统主要由三部分组成：可升降水塔，封闭水槽试验段以及蓄水池，总体布置图1所示。水泵向水塔供水后，通过供水管向试验平台供应需要的流量，剩余部分水流从溢流堰溢流以保证水头平稳。调节3个阀门的开度，得出不同的水压力和流量组合。其中，可升降水塔高度最高可达12 m，水塔采用卷扬机控制其高度。连接水塔的三根管依次为进水管，出水管和溢流管，水塔内设有一个80 cm高的薄壁堰，当溢流堰溢流时即可保证水头稳定。试验段采用钢化玻璃制作，长2 m，过水横截面为矩形(高24 cm×宽25 cm)；试验段下方设置有一凹腔(长180 cm×宽20 cm×高4 cm)，用以填装试验沙样。

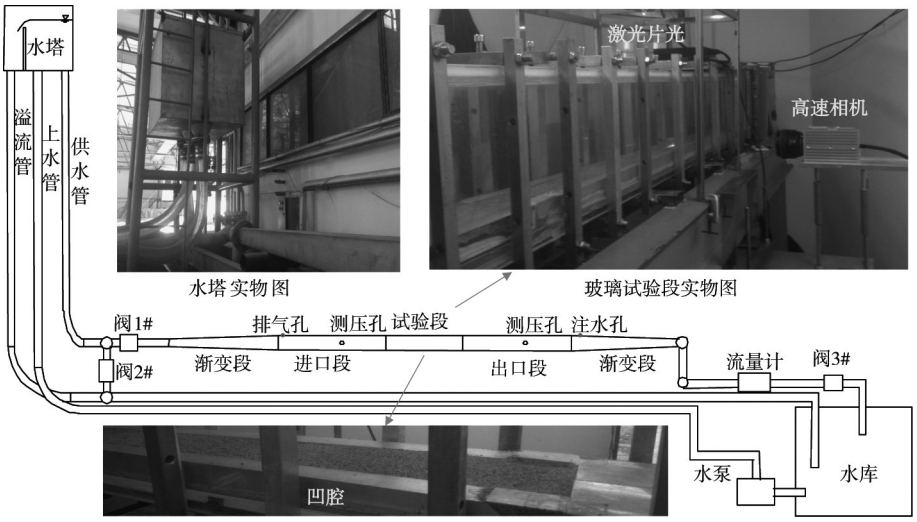


图1　大水压封闭槽道泥沙起动测量系统

泥沙起动测量设备如图2所示，利用激光(8W Nd-YAG)片光照射测量平面，面内液相的示踪粒子及固相的泥沙颗粒被照亮，利用高速摄像机(NR3-S3)拍摄两相流场图片。该系统可以实时捕捉水沙两相的流速及位置信息，并且最高的采样频率可以达到3000Hz，能够在高时间及空间分辨率下捕捉泥沙起动瞬间的两相信息。

由于高速相机主要用来测量床面附近的水沙两相流场信息，不能测量压力方腔内的平均流速，故用电磁流量计(见图1，其采样频率为5 Hz)测量起动流量，推求平均流速。

结合水沙两相及流量测量系统，整个泥沙起动过程中的局部精细及平均流速都被捕捉并存储，为后续计算奠定基础。

3　试验沙样与试验步骤

试验的细颗粒黏性沙为三峡库区的原型沙，经过从野外采集并运输到试验室时，已经固结成硬泥块。在试验前，先将泥沙样本在水中浸泡一周，使其充分的吸水瓦解；检查浸泡后的沙样，对存留的小土块进行碾碎再浸泡。将泥浆进行充分搅拌，静止2～3天后，取上部没有小颗粒土团的泥沙作为试验样本。

利用激光衍射粒度分析仪LA-920分析了样本泥沙的粒级组成，其中LA-920依据全量程米氏散射(Mie)理论，能够精确地测定0.02～2000 μm范围内的粒径分布，检测结果如图3所示。

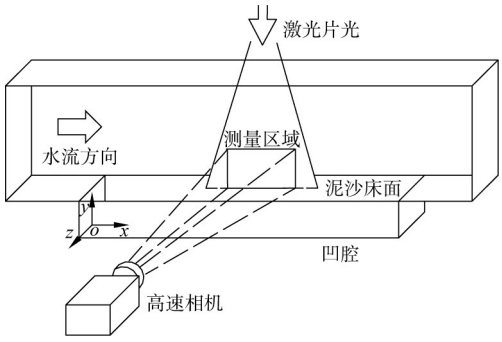


图2　泥沙起动测量示意图

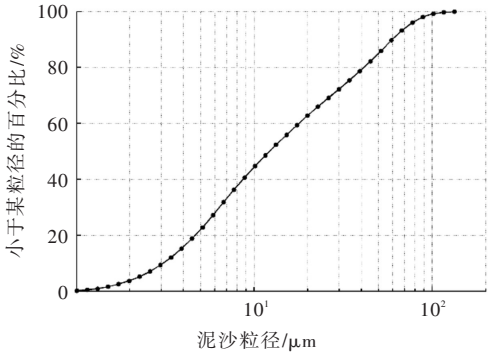


图3　试验泥沙级配曲线

由颗分结果可知，试验泥沙的中值粒径为12 μm，平均粒径为23 μm，按《中国制土壤颗粒分级及地质分类表》属于粉砂(5～50 μm)，偏粗粉砂(10～50 μm)；按美国地球物理学会对泥沙的分类则属于细粉砂(8～32 μm)，具有弱黏性。

大水压封闭槽道泥沙起动测量系统的试验步骤为：(1)将水塔升至需要的高度；(2)通过加沙口，向试验段凹腔内加入黏性沙；(3)关闭阀门2#和3#，利用下游渐变段的注水孔，向槽道中缓慢得注满清水(保证凹腔内的泥沙没有运动)，同时打开上游进口段的排气孔排除多余气体；(4)打开水泵，将蓄水池中的水注入水塔，并保证溢流管溢流；(5)在蓄水池中撒入一定浓度的示踪粒子(约3 g/m^3)，打开激光器调节至足够的亮度，既要满足相机进光量的需求，又不能使得床面产生严重的反光。(6)调节相机参数，使其满足当前流量条件的计算需求，以最高频率和最小曝光时间(100 μs)连续拍摄水沙两相图片；(7)记录流量和压力数据。

试验过程需要注意的是：(1)向凹腔内加沙比较繁琐，需要用量杯将沙样从进出口段的两个加沙孔倒入试验段的凹腔内，直至泥沙从凹腔内溢出。为使沙样充分的混合均匀，应用耙子在凹腔内来回搅拌。用刮板从凹腔上游侧缓慢匀速的刮至下游侧，使黏沙床面平整并保持与槽道床面在同一高程。用小铲将凹腔下游多余的沙样回收并利用，再用抹布将黏在玻璃边壁及凹腔上下游的泥沙抹净。(2)由于大水压槽道的水泵流量太大，会破坏刚铺平的床面，而改用自来水管对槽道进行缓慢注水，以防止泥沙起动。(3)当试验段内注满水时，根据试验目的设计泥沙固结时间。

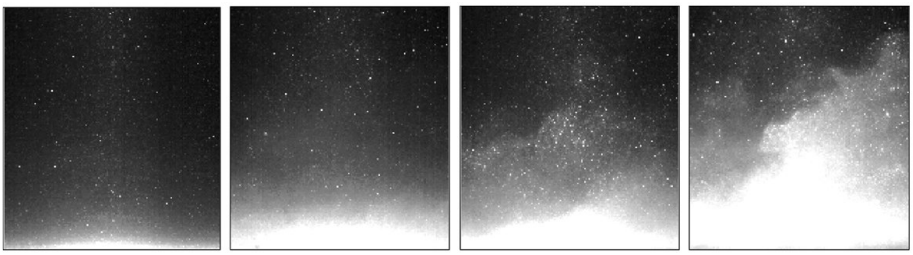
4　试验结果分析

大水压下泥沙起动过程如下。在流量较小时，表面上有极少的一部分颗粒在缓慢运动，随着时间的延续，当流速达到一定的程度后，泥面出现一条条很细的冲沟，同时也出现一些小的冲坑，但最终的破坏形态，按照固结的时间长短分为两种：(1)当凹腔内泥沙为无压固结且固结时间较短时，泥沙间的黏性力较弱，起动后床面淤泥呈高低不平的条沟形状；(2)当凹腔内的泥沙为有压固结且固结时间较长时，泥沙间的黏性力较大，起动后床面被撕裂，淤泥被成层、成片掀起，起动后床面坑

坑洼洼。

由于本文主要介绍大水压泥沙起动测量方法，并不涉及压力与固结时间对泥沙起动流速的影响，下面仅介绍一组试验工况。该组试验条件为，泥沙铺平后，无压固结3天，试验压力水头为5.5 m。试验前设置好所有的设备参数，在恒定水压下，将出口阀门缓慢匀速的打开，拟以5 m^3/h为一个梯级（对应2.3 cm/s为一个梯级），每个梯级下保持6 min左右，不断增大流量直至泥沙起动，这里的泥沙起动对应《河流动力学基础》[18]一书中泥沙大量起动的形态。

激光光片沿垂面进行照射，当泥沙起动后，由于较大颗粒的絮团或者高密度的细颗粒泥沙会发生散射，反映到图片上就存在着大面积的白色区域，见图4，由此信息可判别泥沙起动。随着流量的增大，泥沙起动强度逐渐变大，反映在图片中就是白色的区域越来越多。



（a）平整床面　（b）微微泛起　（c）局部扬起　（d）大量扬起

图4　高速相机拍摄的粘性沙起动图（图中只显示近床面区域，即0–0.44倍槽高部分）

定义参数“面积比”为图片中白色区域的面积与整个图片的面积比（白色区域提取可采用二值化Otsu大津算法），用此参数随时间的变化捕捉泥沙起动。图5给出了本次试验中面积比随时间的变化，同时给出了对应的压力水头和平均流速。图中实线为压力水头，为使水压范围也显示在[0，1]区间内，图中水压数值除以了10；虚线为流速，由于阀门开关是非线性的，流量控制难以保证每次都一致，但总体来说，每次的增速都控制在2 cm/s左右，每个阶梯保持时间也在6 min左右；双划线是面积比。

由图4可知，整个试验中水压保持得比较稳定，基本维持在5.5 m范围，略微出现下降趋势。在0～0.9 h内，流量较小，面积比始终为很小的数值；随着流量的继续增大，面积比在0.97 h处稍微有所增大，并在1.13 h处突然增大，出现像狄拉克函数的图像，之后急速下降并在某一范围内波动，波动大约维持了0.4 h，此阶段面积比的数值远大于最初阶段。如果把面积比出现最大数值的时刻定义为泥沙起动，那么此5.5m水深无压固结工况下的非均匀沙起动流速为0.31 m/s。

按以上实验步骤重复进行另外七次试验，总共得到八组起动流速，各组试验结果见表1。统计可知，样本均值为0.33 m/s，标准差为0.03 m/s。

前人在泥沙起动流速统一公式方面进行了大量研究，收集到七家代表性的计算公式（窦国仁1960[3]，张瑞瑾1961[9]，唐存本1963[8]，沙玉清1965[5]，韩其为1982[5]，窦国仁1999[6]，张红武、卜海磊2011[5]）。图6给出了这些起动流速公式在水深5.5m、泥沙粒径为1 μm～1 mm条件下的计算值。由于各家公式的起动标准（比如，窦国仁1960和1999公式为少量动，唐存本1963公式为呈烟雾状扬动，沙玉清1965公式从着底运动变为不着底运动或不动的临界流速，韩其为1982公式为相对输沙率等）、验证资料和适用条件存在差异，所以在此不去讨论各公式间的差异，但总体上来说曲线簇较为分散。

表1　泥沙起动流速试验结果

组次	1	2	3	4	5	6	7	8
流速(m/s)	0.31	0.35	0.29	0.34	0.30	0.36	0.37	0.28

在《河流动力学基础》[18]一书中指出：对于非均匀沙一般求出其概率密度分布，取某一概率的粒径作为该级流量的临界起动粒径；对于少量起动条件，建议采用累计概率为96%的粒径作为临界起动粒径，与窦国仁少量起动条件97.7%的概率相近。

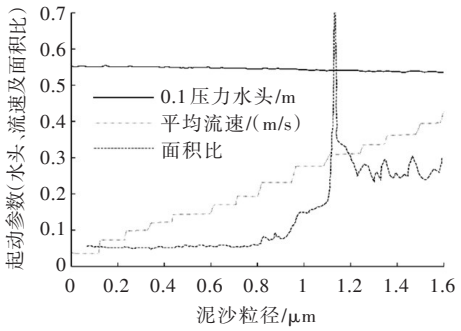


图5　大水压力下泥沙起动实测结果

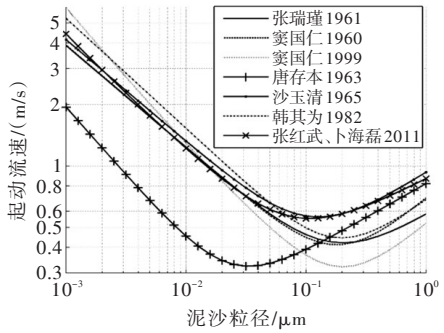


图6　各种泥沙起动流速公式对比

本试验中沙样的累计概率为96%的粒径为0.08 mm，利用此临界粒径，计算各家起动公式的流速值，并将结果与试验结果均值进行对比，见表2。

表2　起动流速公式与实验值的对比

公式	窦国仁1960	张瑞瑾1961	唐存本1963	沙玉清1965	韩其为1982	窦国仁1999	张洪武、卜海磊2011
起动流速/(m/s)	0.48	0.49	0.37	0.59	0.54	0.4	0.56
相对偏差	45%	48%	12%	79%	64%	21%	70%

注：相对偏差=(公式值-实验值)/实验值×100%。

由表2可知，唐存本1963和窦国仁1999公式与本试验结果差异较小，窦国仁1960及张瑞瑾1961公式与试验结果差异小于50%，其他3个公式差异大于60%。由于试验样本数量有限，而且各公式的试验条件和起动标准也与本试验不尽相同，所以并不能判断各公式的优劣。此外，试验中有压流下的起动流速都比明流起动公式计算值小，可能原因是：相对于明渠流动，有压流受到边壁条件的影响，其内流体被束窄在较小的空间内，在相同的动力条件下，有压流的水流结构发展的更为充分，所以导致泥沙起动的流速相对较小。

5　结论

天然河流、水库、湖海中水深一般都在数十米，而现有起动流速的统一公式，基本都是建立在水深较小的假定之上，且用于率定公式参数的实测数据的水深也基本处于1 m以内，所以亟需进行大水压下的泥沙起动试验。

本文介绍了一种有压流下细颗粒泥沙起动时刻定量判别与起动流速测量的方法。由于无法建造水深10 m左右的大型明渠，只能用封闭槽道提供水压，通过设计可升降水塔用以改变水压大小，利用粒子图像测速系统的激光片光照亮泥沙起动区域，利用高速相机拍摄起动图片，利用电磁流量计实时记录流量。由于细颗粒泥沙极易悬浮，当其起动后会对激光片光造成散射，反映在图片中会出现大量的白色区域，利用这个特点，我们可以精确定位起动时刻，从而推求起动流速。利用Otsu大津算法对图片进行二值化，提取出白色区域与整个图片的比例(即面积比)，通过提取面积比突然增大的时刻，用电磁流量计数据推求此刻的槽道平均流速，即泥沙起动流速。

采用三峡库区原型细颗粒泥沙，在5.5 m大水压下进行了8组无固结泥沙起动试验，泥沙起动现象为大量起动，并将结果与已有文献中七家泥沙起动流速统一公式进行对比。本文结果与唐存本1963和窦国仁1999公式的差异较小(10%～20%)，与窦国仁1960及张瑞瑾1961公式差异小于50%，但与其他3家公式差异大于60%，差异可能是由封闭槽道流和自由表面流的不同特点造成的。且由于试验样本数量有限，各公式的试验条件和起动标准也与本试验不尽相同，所以目前并不能判断各公式的优劣。

今后将进行多组不同粒径、泥沙不均匀性、水压及固结状态的试验，以期能对现有公式进行率定统一，提出有压流下的泥沙起动流速公式，并详细研究在封闭槽道有压流条件下得出的起动公式，在明渠等自由表面流下的适用性和改进措施。

参 考 文 献：

[1] 周志德 . 浅谈泥沙研究的困难[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2009，7(1)：33-36 .

[2] 韩其为，胡春宏 . 50年来泥沙研究所主要研究进展[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2008(3)：170-182 .

[3] 窦国仁 . 论泥沙起动流速[J] . 水利学报，1960(4)：44-60 .

[4] 万兆惠，宋天成，何青 . 水压力对细颗粒泥沙起动流速影响的试验研究[J] . 泥沙研究，1990(4)：62-69 .

[5] 张红武 . 泥沙起动流速的统一公式[J] . 水利学报，2012，43(12)：1387-1396 .

[6] 窦国仁 . 再论泥沙起动流速[J] . 泥沙研究，1999(6)：1-9 .

[7] 韩其为，何明民 . 泥沙起动规律及起动流速[M] . 北京：科学出版社，1999 .

[8] 唐存本 . 泥沙起动规律[J] . 水利学报，1963(2)：1-12 .

[9] 张瑞瑾，谢鉴衡，陈文彪 . 河流动力学[M] . 北京：中国工业出版社，1961 .

[10] 金德春 . 关于泥沙的起动问题[J] . 泥沙研究，1991(2)：79-83 .

[11] 张瑞瑾，谢鉴衡，陈文彪 . 河流动力学[M] . 武汉：武汉大学出版社，2007 .

[12] YALIN M S . Mechanics of Sediment Transport[M] . USA，Oxford：Pergamon press，1977 .

[13] GESSLER J . Beginning and ceasing of sediment motion[J] . River Mechanics，1971(1)：1-7 .

[14] SHVIDCHENKO A B，PENDER G . Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments[J] . Water Resources Research，2000，36(2)：619-628 .

[15] MEHTA A J，LEE S C . Problems in linking the threshold condition for the transport of cohesionless and cohesive sediment grain[J] . Journal of Coastal Research，1994，10(1)：170-177 .

[16] BUFFINGTON J M，MONTGOMERY D R . A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies，with special reference to gravel-bedded rivers[J] . Water Resources Research，1997，33(8)：1993-2029 .

[17] MOHTAR W，MUNRO R J . Threshold criteria for incipient sediment motion on an inclined bedform in the presence of oscillating-grid turbulence[J] . Physics of Fluids，2013，25(151031) .

[18] 王兴奎，邵学军，李丹勋 . 河流动力学基础[M] . 北京：清华大学出版社，2002 .

Method for measuring the incipient velocity of fine-grained sediment in pressure flow

LI Huayong[1]，CHEN Yuanzhong[2]，CHEN Huai[3]

(1. *Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co.，LTD，Nanchang* 330008，*China*；
2. *Gongming Water Supply and Storage Project Management Office in Shenzhen City，Shenzhen* 518036，*China*；
3. *State Key Laboratory of Hydrology，Water Resources and Hydraulic Engineering，Nanjing Hydraulic Research Institute，Nanjing* 210029，*China*)

Abstract：A method for measuring the incipient velocity of fine-grained sediment under pressure flow is introduced in this study. A water tower，a closed channel and a particle image velocimetry system were combined to carry out the experiment. The tower was used to change the water pressure，and the laser sheet was used to illuminate the sand bed while a high-speed camera was employed to capture pictures about the incipient motion. As sediment particles scattered the laser sheet when they suspended，the gray level of the pictures changed dramatically，and this critical feature can be used to infer the incipient velocity. Fine sediment that originated from the Three Gorges Reservoir was used as test sample，and measuring results were compared with published formulas. The difference between incipient velocities in this study and those of Tang Cunben 1963 and Dou Guoren 1999 formulas is small. Due to the difference of experimental conditions and the lack of sample population，it is impossible to make a comprehensive comparison among each published formula at this stage. In the future，more tests will be carried out under different conditions in order to put forward a practical unified formula for estimating sediment incipient velocity under pressure flow.

Keywords：pressure flow；closed channel；fine-grained sediment；incipient motion；laser sheet；high-speed camera

(责任编辑：祁 伟)