

文章编号:1001-4179(2012)02-0039-04

黏性原状土起动流速试验研究

洪大林¹, 缪国斌², 申霞¹, 谢瑞¹, 姬昌辉¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029)

摘要:针对黏性原状土难以被水流起动、冲刷的特点,设计了专门的封闭矩形管道,使水流的平均流速完全满足黏性原状土起动、冲刷的要求。在水槽满足起动冲刷要求的前提下,采用粒子测速系统(PIV)对管道断面流速分布进行了测量,分析论证了管道的阻力规律,并比较了有压管道与开敞水槽试验结果。分析结果认为,在水流流速不是太大时,有压管道的阻力规律符合对数律。在通过试验取得垂线流速分布的情况下,可以利用对数流速分布公式计算摩阻流速,进而计算边界水流切应力,再根据谢才公式,可将起应力换算成相应河道的起动冲刷切应力。

关键词:黏性原状土起动; 矩形管道; 试验方法; 摩阻流速

中图法分类号: TV14 文献标志码: A

以前人们在研究泥沙起动问题时,一般都在开敞的明渠水槽中进行,与实际河道的自由表面是一致的,其流速分布也都符合相同的规律,因此实验室中获得的成果,可以方便地将其外推至大水深的情况。但由于开敞水槽水流强度较弱,一般不能满足黏性原状土起动冲刷试验的要求,较好的方法是采用可以产生较大流速的封闭矩形管道,但这种方法本身也带来了一些新的问题,如管道内水流的流速分布问题,管道内压力对起动冲刷的影响问题,管道水力摩阻的计算方法问题等等。这些问题不解决,就无法对试验资料进行分析,也就得不到相应的结果。因此,本文在试验的基础上,分析研究了矩形管道内的流速分布、压力的影响、水力摩阻的计算方法等。

1 试验方法

为了产生较大的流速,选择封闭的矩形管道进行试验是比较可行的方法, J. L. Briaud (2001) 等在进行土壤冲刷试验前,使用了一种简称为 EFA 的装置,试验时将所取的土样(松散的或黏性原状土)放置在

矩形管道下方的圆柱形筒中,表层高出水槽表面 1 mm,测量这 1 mm 的土层被冲刷的历时,即可得到冲刷率^[1-2]。这个试验并没有得出土壤冲刷率与原状土土力学因子(土壤性质参数)之间的关系,而只是建立了桥墩冲刷率与时间的关系。这似乎不能用来解决类似的问题,但其方法是可以借鉴的,特别是其试验方法。中科院力学所 1998 年也曾有类似的试验装置^[3],南科院对这类试验装置进行了大幅度改进,使水槽能够取得较大的水流条件,满足各类土质抗冲能力试验的要求。

原状土起动试验装置见图 1。试验前将土样布置在水槽底部的圆筒内,并与水槽底部保持齐平,土样的下部是升降顶土装置。

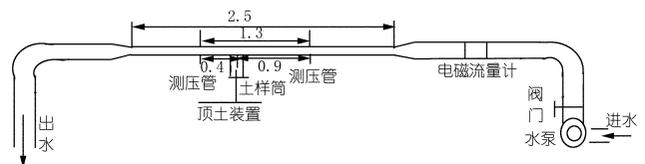


图 1 矩形管道示意(单位:m)

收稿日期:2011-08-10

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2007733)

作者简介:洪大林,男,教授级高级工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail:dlhong@nhri.cn

矩形管断面尺寸为 3 cm × 15 cm, 有效段长度 2 m, 土样放置在距进口 1.5 m、距出口 1.0 m 的位置, 在土样上游 0.9 m、下游 0.4 m 各布置一测压管, 测量上下游测压管水头差。管道平均流速最大可达 12 m/s。

考虑到有压矩形管道内压力的存在, 选择部分土样在矩形管和明渠水槽中平行进行试验, 以论证有压管道压力的存在对起动的影 响。

明渠水槽长 14 m、宽 50 cm, 试验前在其底部制造一长 10 m, 底坡为 5‰ 的斜坡, 在试验观察段置留一直径 10 cm 的圆坑, 用于放置土样。试验中测量土样起动时的水深、流量、中垂线流速分布。

2 流速分布测量

J. Nikuradse 曾对矩形管道的流速分布作过一些研究, 对充分发展的紊流, 矩形管内任一截面上沿流动方向的速度表现为: 在壁面上, $U_{y=0} = 0$; 在中心线上, $U_{y=h} = U_{max}$, 达最大值^[3-4]。

由于 J. Nikuradse 并没有得到矩形管道中水流的阻力计算公式, 因此尚需针对特定的矩形管道进行试验测量。

根据封闭矩形管道的水流特点, 选择采用粒子图像测速系统测量管道流速分布, 并在此基础上分析其水力特性。

粒子图像测速系统工作原理为: 激光器产生的光束经柱面镜散射后变成光片, 平行照射流场内部的一个平面, 位于该平面上的示踪粒子反射的光线经光学镜头聚焦后通过成像阵列形成图像, 分析图像可得出平面上的流速分布^[5-7]。

测量流体表面的流速时, 可以在自然光照条件下进行, 而对流体内部的二维流场测量时, 必须使用辅助片光源照明, 图 2 为测量流场内部流速的测验示意图。

考虑到管道测速的特殊性, 在矩形管的侧壁开一小孔, 将广角摄像头装入其中, 激光发生器产生的片光通过测量断面, 利用水中塑料粒子在激光照射下产生的轨迹, 取粒子的曝光时间为 1/50 s, 可以确定在该时间内粒子的运动距离, 由此可得到截面上各点的流速。

根据流速的不同, 试验共分 6 组进行, 其流速区间为 0.30 ~ 1.36 m/s。各组试验结果见图 3。

3 摩阻流速计算方法

根据普朗特 - 卡门的研究成果, 当 3×10^3

$< Re < 10^7$ 时, 试验段内的平均流速与床面切应力之间的关系应满足普朗特 - 卡门方管紊流的通用摩阻律公式^[8]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log \left[\frac{UR \sqrt{\lambda}}{\nu} \right] - 0.8 \quad (1)$$

式中, 摩阻系数为 $\lambda = \frac{8\tau}{\rho U^2}$, ρ 为水的密度; ν 为水的运动黏滞系数; U 为方管平均流速; R 为水力半径, $R = \frac{A}{\chi}$, A 为面积, $A = a \times b$, a 、 b 分别为矩形管道的高和宽, $\chi = 2(a + b)$ 为湿周。在摩阻系数确定的情况下, 可利用公式 $\lambda = \frac{8\tau}{\rho U^2}$ 计算得到切应力。

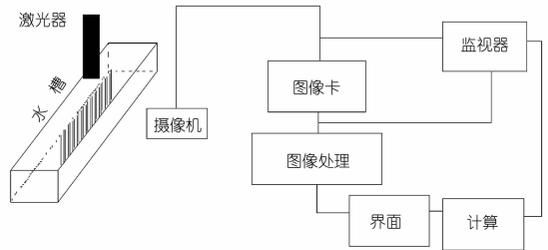


图 2 流场测量示意

另外, 由于矩形管中垂线实测流速分布符合对数

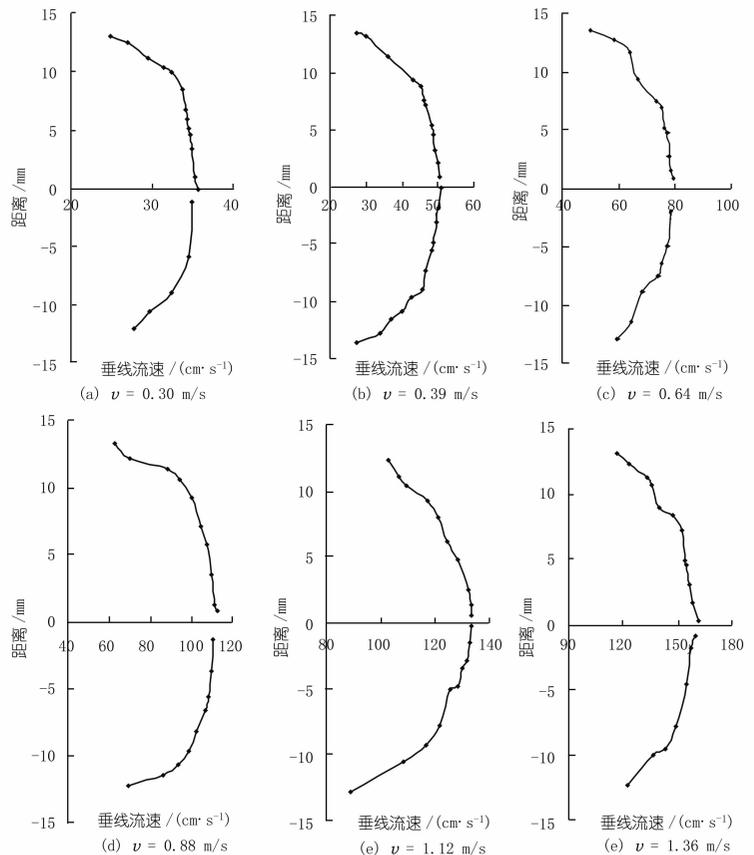


图 3 矩形管道中实测垂线流速分布

流速分布公式^[9],可以利用该公式计算其摩阻流速,进而得到切应力。

对于充分光滑的有机玻璃矩形管道(3 m × 15 cm),当管道中水流平均流速小于 10 m/s 时,雷诺数 $Re < 1.25 \times 10^5$,如取管道的粗糙高度 $\Delta = 0.01 \text{ mm}$,则属于光滑管区的上限雷诺数 $Re = 316(\frac{1}{2\Delta})^{0.85} = 3.12 \times 10^6$,显然,管道中可能产生的水流雷诺数小于上限雷诺数。因此,可以采用光滑区的流速分布公式来计算摩阻流速^[4]。

$$\frac{u}{U_*} = 5.75 \lg 9.05 \frac{U_* y}{v} = 5.75 \lg \frac{y U_*}{v} + 5.5 \quad (2)$$

已知垂线上两点 y_1, y_2 的流速为 u_1, u_2 ,则由(2)式得

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\lg 9.05 \frac{U_* y_1}{v}}{\lg 9.05 \frac{U_* y_2}{v}} = \frac{\lg U_* + a}{\lg U_* + b} \quad (3)$$

式中, $a = \lg \frac{9.05 y_1}{v}, b = \lg \frac{9.05 y_2}{v}$ 。

由(3)式可得

$$\lg U_* = \frac{u_2 a - u_1 b}{u_1 - u_2} \quad (4)$$

另外,摩阻流速尚可根据上、下游水头差计算,方法如下^[10]:

$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{l} R = \gamma \frac{\Delta Z}{l} R = \gamma R J = \rho U_*^2 \quad (5)$$

式中, J 为水力坡度; ΔZ 为上、下游测压管水头差; l 为两测压管间距, R 为水力半径, A 为断面面积, x 为湿周。

$$U_* = \sqrt{g R J} \quad (6)$$

根据式(1)~(3)可计算壁面的摩阻流速,结果见表 1。

表 1 实测和计算摩阻流速对比

组次	断面平均 $U /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	计算 $U_{*ch} /$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测 $U_{*sc} /$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.30	1.94	1.68
2	0.39	2.76	2.38
3	0.64	3.85	3.36
4	0.88	4.88	4.85
5	1.12	5.68	5.82
6	1.36	6.83	6.80

注: U_{*ch} 为(3)式计算结果, U_{*sc} 为上下游水头差的结果。

图 4 为断面平均流速 U 与计算的摩阻流速 U_{*ch} 的关系;图 5 为计算 U_{*ch} 与实测 U_{*sc} 的相关关系。由图 4,5 可见,断面平均流速 U 与 U_{*ch} 之间具有良好的关

系,而两种方法得出的摩阻流速 U_{*ch} 与 U_{*sc} 之间也具有良好的相关关系,即可有计算 $U_{*ch} \approx$ 实测 U_{*sc} 。根据这一关系,可以直接通过上下游水头差得到大流速区摩阻流速 U_{*sc} 。

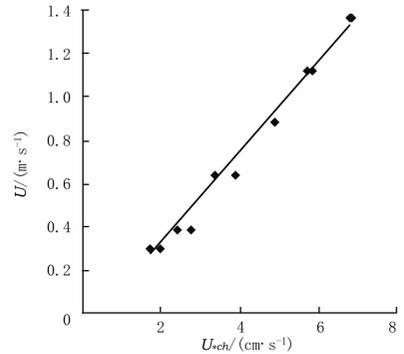


图 4 矩形管道断面平均流速与摩阻流速的关系

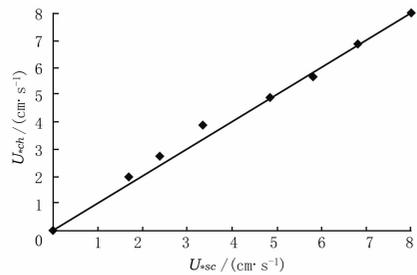


图 5 矩形管道中计算摩阻流速与实测摩阻流速的关系

4 压力对起动的影响

考虑到矩形管为有压水流,与明渠水流存在一定的差别,其对起动的影响如何,需经过试验判断。

选择 5 个抗冲性能较差的土样同时在矩形管和明渠水槽中进行起动试验,并测量明渠水槽中垂线流速分布,结果见表 2。

表 2 明渠水槽流速分布及其摩阻流速对比

土样号	明渠 $U_{*mq} /$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	矩形管 $U_{*sc} /$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
1	2.14	2.17	-1.40
2	3.05	2.88	5.57
3	3.03	2.91	3.96
4	3.94	3.76	4.57
5	3.18	3.21	-0.94

假定明渠底部壁面为糙壁,则明渠摩阻流速的计算方法为^[9]

$$\frac{u}{U_*} = 5.75 \lg 30.2 \frac{y}{k_s} = 5.75 \lg \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (7)$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\lg 30.2 \frac{y_1}{k_s}}{\lg 30.2 \frac{y_2}{k_s}} \quad (8)$$

由(8)式解出 k_s , 再由(7)式得到 U_* 。

将表2中明渠水槽起动摩阻流速 U_{*mq} 与矩形管起动摩阻流速 U_{*sc} 点绘关系如图6所示, 可见其点据都集中在 45° 线附近, 即 $U_{*mq} \approx U_{*sc}$ 。因此, 可以认为当管道流速较小时, 由于其中的压力较小, 压力对土样起动的的作用尚未得到体现, 由此得到的管道中土的临界起动摩阻流速 U_{*sc} 具有较好的代表性。而对起动流速较大的土样来说, 缺乏对比试验论证, 但可根据上述原则近似确定。

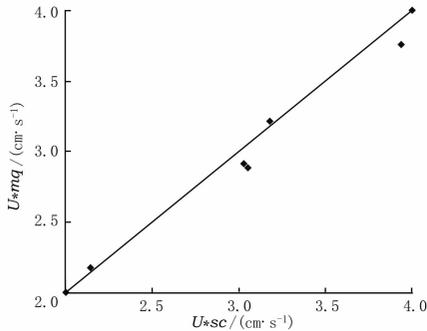


图6 明渠摩阻流速与水槽摩阻流速之间的关系

5 结论

黏性土的起动流速一般较大, 在通常的明渠水槽中无法实现, 采用封闭的矩形管道来进行试验, 在流速不是太大的情况下, 其结果与明渠水槽中的试验结果基本一致, 采用封闭矩形水槽进行黏性土起动、冲刷试

验, 其结果具有较好的代表性。受测量手段的限制, 试验仅针对流速小于 1.36 m/s 的情况进行了研究, 今后在条件允许的情况下尚需进一步研究大流速下阻力规律。

参考文献:

- [1] Briaud J L, Ting F C K. Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions[J]. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127(2): 105 - 113.
- [2] Briaud J L, Chen H C. Multiflood and Multilayer Method for Scour Rate Prediction at Bridge Piers[J]. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127(2): 114 - 125.
- [3] Nikuradse J. Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen[M]. Berlin: VDI, Verl, 1926.
- [4] Nikuradse, J., Gesetzmässigkeit der turbulenten Strömung in glatten Röhren[J]. Forsch. Arb. Ing. - Wes., 1932(356).
- [5] 唐洪武. 复杂水流模拟问题及图像测速的研究[D]. 南京: 河海大学, 1996.
- [6] 茅泽育. 数字粒子图像处理技术及其在明渠交汇试验研究中流速测量的应用[J]. 水利学报, 2003, (6)
- [7] 孙鹤泉. 二维流场测量技术: PIV[J]. 研究与开发, 2004, (6).
- [8] L. 普朗特. 流体力学概论(中译本)[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [9] 张远君. 流体力学大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [10] H. Schlichting. 边界层理论(中译本)[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

(编辑: 常汉生)

Experiment method of incipient motion of cohesive undisturbed soil

HONG Dalin¹, MIAO Guobin², SHEN Xia¹, XIE Rui¹, JI Changhui¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Water Source Limited Liability Company of ERP of SNWD, Nanjing 210029, China)

Abstract: Incipient velocity and scouring velocity of cohesive undisturbed soil are usually higher. In the incipient experiment, because the higher velocity is hard to attain in open flume, an appropriate method should be developed. In the light of the incipient velocity and scouring characteristics of cohesive undisturbed soil, a close rectangular pipe is designed and by which the velocity fully meet the experiment requirement of cohesive undisturbed soil incipient motion and scouring. PIV is used to measure section flow velocity distribution for analyzing the resistance law of conduit. The experiment results of pressure pipe and open flume are compared. The results show that the resistance law of pressure conduit obeys logarithmic distribution if flow velocity is not too large. By the measured vertical velocity distribution, the incipient scouring shear stress is calculated using the logarithmic formula of velocity distribution and Chezy formula.

Key words: incipient motion of cohesive undisturbed soil; rectangular pipe; experiment method; friction velocity