

长江苏通公路大桥区原状淤泥质亚粘土起动试验研究

洪大林^{1,2}, 张思和², 高正荣², 唐存本²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 在河道中, 受水压力和土体本身压力的作用, 淤积物的密度增大, 物理力学特性发生了很大的变化, 如采用公式计算起动流速, 则出现较大的偏差。针对实际工程中经常遇到的淤泥质亚粘土的起动流速问题进行了试验研究, 研究在特制的矩形管道中进行。通过试验得到了起动临界状态下的摩阻流速, 利用天然河道的阻力关系将摩阻流速换算到天然情况, 并以河道稳定性为比较目标, 与河道水流动力条件进行比较, 验证了试验研究结果的合理性和有效性, 这为解决河道边界淤积物的起动临界条件问题提供了一种新的思路和方法, 因此无论从研究方法上还是解决实际工程问题都具有一定的创新意义。

关键词: 淤泥质亚粘土; 原状土; 摩阻流速; 起动流速; 试验研究; 长江

中图分类号: TV 142.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2003)03-345-05

对于粘性土的起动, 国内外已有一些研究, 但大都针对粘性重塑土而言, 而并非粘性原状土。我国学者张瑞瑾^[1]、沙玉清^[2]、窦国仁^[3]、唐存本^[4]等在 20 世纪 60 年代对粘性细颗粒泥沙起动进行了大量研究, 取得了适合于细颗粒泥沙、淤泥、新淤粘性土等的起动流速公式。近年来, 粘性原状土起动条件日益受到人们的重视, 实验结果表明^[5-7], 现有的公式已不能用来计算粘性原状土起动流速, 其中重要的原因是起动形式发生了变化。从某种程度上来说, 粘性细颗粒泥沙以单颗粒起动为主, 而粘性原状土起动则是以微团为主, 其起动机理、形式、过程、结果都与细颗粒泥沙或新淤土的起动有着本质的差别, 迫切需要对粘性原状土的起动临界条件重新界定, 以寻求一种比较客观、实用的计算方法, 但由于粘性原状土起动与诸多因素有关^[8-15] (如凝聚力、摩擦角、含水量、塑性指数、离散度等土的物理、力学指标), 至今仍没有一个较好的公式可用, 尚须大量的基础试验研究工作, 才能在此基础上合理确定计算公式。本文正是考虑了目前粘性原状土起动研究中存在的问题, 从水槽试验结果出发, 通过对所在河段河床稳定性分析, 为合理确定粘性原状土起动流速提供一种较为新颖的方法。

由于重塑土与原状土^[16]土力学特性存在差别, 原状土在受到破坏以后, 部分特性可以得到恢复, 但某些特性难以恢复, 因此采用原状土进行试验, 可保持试验土样的客观性和试验结果的真实性。

苏通长江公路大桥位于南通河段徐六泾节点处, 1958 年以来, 该河段主深槽南侧边坡稳定, 由于大桥南主墩位于该边坡上, 桥墩周围流场的变化, 导致局部区域流速增大, 桥墩周围出现局部冲刷坑, 影响桥梁的稳定性。因此有必要对主桥墩上下游及其周围土质抗冲性能进行试验研究, 确定其合理的设计参数。

1 原状土取样及物理力学指标

原状土取样时应充分考虑土样的代表性及其合理性。实际取样时在南北主桥墩的周围及其上、下游布置了 11 个取样孔, 其中北主桥墩 2 孔, 南主桥墩 9 孔, 其中 7 孔为淤泥质亚粘土层, 主要集中在南主桥墩的上下游

收稿日期: 2002 12 12; 修订日期: 2003 02 20

作者简介: 洪大林(1963-), 男, 江苏高淳人, 南京水利科学研究院高级工程师, 博士研究生, 主要从事河流动力学及河道整治方面的研究。

及其周围,本文仅针对淤泥质亚粘土进行研究。各土样的物理、力学指标见表1。

表1 土样物理及力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil sample

土样号	含水量 / %	密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比	饱和度 / %	塑性 指数	液性 指数	内聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	中值粒径 / mm
Zk4-2	37.2	1.72	1.056	86	17.3	0.76	13	4.6	0.007
Zk6-3	47.4	1.70	1.376	94	18.1	1.33	11	2.9	0.007
Zk7-3	35.4	1.74	1.120	86	12.9	1.03	12	4.2	0.012
Zk8-2	40.0	1.79	1.120	97	16.3	1.09	27	7.2	0.007
Zk9-3	37.6	1.82	1.050	97	11.3	1.42	22	10.4	0.010
Zk10-2	38.2	1.74	1.160	90	14.9	1.05	18	9.6	0.011
Zk11-2	37.0	1.74	1.130	88	17.9	0.73	—	—	0.007

2 试验概况

原状土起动试验在特制的矩形管道中进行,水槽示意图见图1。试验时保持土样表面与管道底平面齐平,以保证作用于土样水流条件的一致性。

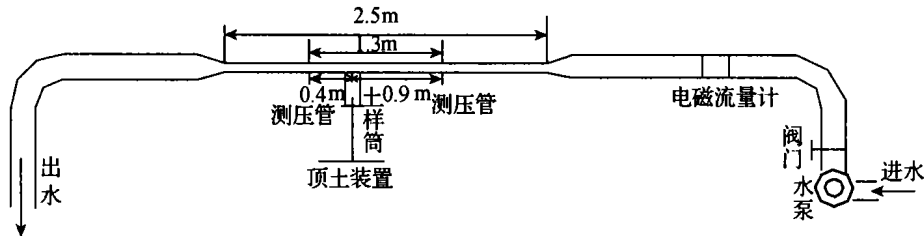


图1 矩形管水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular pipe

矩形管道为高3cm×宽15cm,有效长度2m,土样置于距进口1.5m、距出口1.0m处,上游0.9m、下游0.4m各布置一测压管,测量测压管水头差,流量由直读式电磁流量计读出,管道最大平均流速为12m/s。

3 原状土起动试验

3.1 起动判别标准^[6]

根据粘性土起动的特点,考虑到采用仪器判断的局限性,仍然采用目测的方法来判断是否起动,虽然有一定的视觉误差,但只要试验人员之间的认识达成统一,试验过程中注意观察,其偏差范围是有限的。另外,这种方法简单,且可充分考虑受冲刷床面上的全部情况。

为了对起动状况有一个整体的了解,试验前进行了探索性试验。发现粘性土起动时,仍然可以分成三种标准:①个别动。土样平整表面个别微团处于运动状态,具有间隙性和随机性;②少量动。土样表面出现凹凸不平,在平整的床面或在凸起的部位,微团运动不连续,而在凹坑内则出现少量雾状物,一般具有连续性、间隙性和随机性;③普遍动。在平整床面及凸起的表面有大量的微团出现,基本呈现出连续运动,特别是在冲刷坑内,出现大量雾状物,土样崩溃明显。

3.2 起动现象的一般描述

淤泥质亚粘土在起动过程中,在水流的冲击下,土样的表面一般先形成细微的裂纹,裂纹的出现则意味着薄弱环节的形成,随着时间的推移,裂纹不断的发展、展宽,就会出现大小不等的微团运动,甚至出现大块崛

起，在土样表面形成大大小小的冲刷坑，而细部水流条件发生了调整，冲刷坑中的颗粒更容易起动，平整面上的微团也以片状形式运动，并在其它部位再形成裂纹，从而导致其它部位的崩溃。但也不是所有的土样起动时都会出现这样的情况，当土样的抗剪强度较大时，出现裂纹的机会相对较少。因此，裂纹的出现是起动的充分条件，但不是必要条件。

3.3 摩阻流速计算

H. Schlichting^[17]对充分发展的紊流，得到作用于管道壁面的切应力与作用水柱两端面的压力差的关系为

$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{l} R \quad (1)$$

$$p_1 - p_2 = \gamma \Delta Z \quad (2)$$

则
$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot R = \gamma \frac{\Delta Z}{l} R = \gamma R J = \rho U_*^2 \quad (3)$$

式中 $J = \frac{\Delta Z}{l}$ ， J 为水力坡度； $R = \frac{A}{\chi}$ ， R 为水力半径； A 为断面面积； χ 为湿周； ΔZ 为上、下游测压管水头差； l 为两测压管间距。

$$U_* = \sqrt{gRJ} \quad (4)$$

7 种淤泥质亚粘土起动摩阻流速试验结果见表 2。

3.4 天然起动流速计算

研究表明^[18]，土质相同的情况下，试验室条件下起动 U_{*c} 与天然条件下起动 U_{*c} 是一致的。对河渠二元均匀流来说，谢才系数 C 与垂线平均流速 U 及摩阻流速的关系为

$$\frac{U}{U_{*c}} = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (5)$$

表 3 天然起动流速计算表

Table 3 Calculation of threshold velocity for the natural river

土样号	位置/m	水深/m	$C/(m^{0.5} \cdot s^{-1})$	天然起动流速 $l/(m \cdot s^{-1})$
Zk4-2	-21.30	25.60	68.67	2.65
Zk6-3	-12.10	16.40	63.76	2.24
Zk7-3	-20.30	24.60	68.22	2.13
Zk8-2	-21.75	26.05	68.87	1.96
Zk9-3	-17.55	21.85	66.88	2.49
Zk10-2	-22.65	26.95	69.26	1.97
Zk11-2	-25.40	29.70	70.39	2.02

表 2 试验室条件下的起动摩阻流速

Table 2 Frictional velocity at critical condition

土样号	位置/m	水头差/cm	比降 $J/\%$	$R \cdot C / (cm \cdot s^{-1})$
Zk4-2	-21.30	9.9	0.076	9.66
Zk6-3	-12.10	8.2	0.063	8.79
Zk7-3	-20.30	6.5	0.050	7.83
Zk8-2	-21.75	5.4	0.042	7.13
Zk9-3	-17.55	9.2	0.071	9.31
Zk10-2	-22.65	5.4	0.042	7.13
Zk11-2	-25.40	5.5	0.042	7.20

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (6)$$

由于 $R \approx H$ ，则 $C = \frac{1}{n} H^{1/6} \quad (7)$

式中 U 为垂线平均流速； U_{*c} 为原状土起动摩阻流速； g 为重力加速度。

根据有关资料计算，该河段实际糙率可取为 $n = 0.020$ ，水深以最高通航水位 4.3 m 计算(下同)。计算结果见表 3。

4 与其它公式的比较

表 4 列出了张瑞瑾、沙玉清、窦国仁、唐存本等公式的计算结果。

唐存本公式中考虑了容重 σ 的影响，且有 $\sigma_0 = 1.60 t/m^3$ ，对粘性原状土，一般都有 $\sigma \geq \sigma_0$ ，这是造成偏大的主要原因。沙玉清公式中考虑了孔隙率 ε 的影响，孔隙率增大，起动流速大幅度减小。张瑞瑾公式也明显偏小，窦国仁公式计算结果与本文计算结果较为接近，但最大偏差也在 20% 左右。可见粘性土成团起动与泥沙

的单颗粒起动存在较大差别^[7]。

表 4 与其它起动流速公式计算结果的比较

Table 4 Comparison of threshold velocity between the experimental results and calculated results by other formula

土样号	D_{50}/mm	水深/m	式(5)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$U_{CR}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_{CS}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_{CD}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_{CZ}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
Zk4- 2	0.007	25.60	2.65	3.08	0.89	2.55	1.42
Zk6- 3	0.007	16.40	2.24	2.70	0.35	2.44	1.34
Zk7- 3	0.012	24.60	2.13	2.27	0.59	1.86	1.72
Zk8- 2	0.007	26.05	1.96	3.77	0.76	2.55	1.43
Zk9- 3	0.010	21.85	2.49	3.14	0.74	2.04	1.58
Zk10- 2	0.011	26.95	1.97	2.45	0.57	1.97	1.69
Zk11- 2	0.007	29.70	2.02	3.35	0.76	2.58	1.45

注: U_{CR} 、 U_{CS} 、 U_{CD} 、 U_{CZ} 分别为唐存本、沙玉清、窦国仁、张瑞瑾公式计算的起动流速。

5 与河道动力因素的比较

从历年实测资料来看,位于主深槽南侧的平均落潮流速远小于 2.20 m/s,只有在洪水期大潮落潮时才会出现 2.0 m/s 左右的流速,其历时仅为全年的 1/30~1/40。这说明近期主槽南边坡基本处于稳定而略有冲刷的状态,与桥区水流及地质情况是符合的。

根据天生港、杨林同时潮位计算,洪水期大潮落急状态的水面比降为 0.025‰,此时落潮流动力是影响河床冲淤变化的主要因素,由此计算水流作用于床面的摩阻流速(表 5)。从河道水流平均动力条件与平均起动临界条件比较来看,床面总体上处于稳定状态。其中 ZK4、ZK6、ZK7、ZK9 水流动力条件均小于起动摩阻流速,ZK8、ZK10、ZK11 孔的动力条件较起动摩阻流速稍大,因此 ZK4、ZK6、ZK7、ZK9 孔河床表面处于稳定状态,ZK8、ZK10、

表 5 起动临界条件与河道动力条件对比

Table 5 Comparison of critical condition and starting and dynamic conditions of the river

土样号	水深/m	起动 $U_{*c}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	河道 $U_{*r}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	比值	状态
ZK4- 2	25.60	9.66	7.60	1.27	稳定
ZK6- 3	16.40	8.79	6.08	1.45	稳定
ZK7- 3	24.60	7.83	7.44	1.05	稳定
ZK8- 2	26.05	7.13	7.66	0.93	不稳定
ZK9- 3	21.85	9.31	7.02	1.33	稳定
ZK10- 2	26.95	7.13	7.79	0.92	不稳定
ZK11- 2	29.70	7.20	8.18	0.88	不稳定
平均		8.15	7.40	1.10	稳定

ZK11 孔河床表面则处于冲淤变化状态,床面上局部区域又是处在动态冲淤变化之中。

因此,从河道动力条件与河床淤泥质亚粘土起动摩阻流速的对比来看,试验得出的结果是基本合理、可靠的,可作为设计部门及其它研究的科学依据。

6 结 语

(1) 现有的细颗粒泥沙或新淤土起动流速计算公式不适用于原状淤泥质亚粘土,在目前情况下仍然只能采用原状土进行试验,才能得到较为客观起动临界条件。

(2) 采用矩形管水槽研究原状淤泥质亚粘土的起动,这在方法上与传统的研究方法有所区别。

(3) 从切应力的角度来研究原状土的起动,在起动流速的计算过程中存在一些问题,本文在这方面进行了一定的尝试,并通过与床面稳定性相比较,验证了试验结果的合理性,也为今后的试验研究开辟了新途径。

参考文献:

- [1] 张瑞瑾. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981. 49- 52.
- [2] 沙玉清. 泥沙运动的基本规律——开动流速[J]. 泥沙研究, 1956, 4: 14- 25.
- [3] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960, (4): 44- 59.

- [4] 唐存本. 泥沙起动的规律[J]. 水利学报, 1963, (2): 1- 12.
- [5] 洪大林, 等. 松性土新开挖河道动床冲刷模型设计方法[J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 59- 63.
- [6] 洪大林, 张思和. 天然原状土起动试验研究[R]. 南京水利科学研究所, 2000. 21- 23.
- [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. 200- 212.
- [8] Sundborg A. The river Klareilven study of piuvial processes- Geografist[J]. Annaler, Stokholm, 1956, 38(2- 3): 125- 316.
- [9] Dunn J S. Tractive resistance of cohesive channels[J]. J Soil Mech and Foundation Division, ASCE, 1959, 85: 1- 24.
- [10] Smerdon E T, Beasley R P. Tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive[J]. Soils Res Bull No 715, Agri Exp Sta, Univ Missouri, 1959.
- [11] Ц Е Мирцхуава. Основы физики и механически эрзии русел[J]. Ленинград Гидрометеоздат, 1988.
- [12] Partheniades E. Erosion and Deposition of Cohesive Soils[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1965, 91(HY1): 105- 139.
- [13] Grissinger E H, Asmussen L E. Discussion of “Channel Stability in Undisturbed Cohesive Soils” by E M Flaxman[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1963, 89(Hy6 Proc, Paper 3708): 259- 264.
- [14] Martin T R. Discussion of “Experiments on the Sour Resistance of Cohesive Sediments” [J]. Journal of Geophysical Union, Washington D C, 1941, 262- 284.
- [15] Alchaeffl A G. Discussion of “Erosion and Deposition of Cohesive Soils,” by E Partheniades[J]. Journal of the hydraulics Division, ASCE, State University of Iowa, Iowa City, Iowa, 1953, 91(34): 77- 88.
- [16] 天津大学. 土力学与地基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983. 18.
- [17] H. 史里希廷. 边界层理论(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 672- 673.
- [18] 张书农. 河流动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988. 45.

Experimental research on threshold velocity of undisturbed and muddy loam in the area of Sutong bridge on the Yangtze River

HONG Da lin^{1,2}, ZHANG Si he², GAO Zheng-rong², TANG Curr ben²

(1. College of Water Conservancy & Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The density of deposit in rivers increases under the action of water pressure and soil pressure, which results in large changes on the physical and mechanical properties of the soil. A large difference occurs when the threshold velocity is calculated by the empirical fomula. So, in this paper, the experiments on the threshold velocity for muddy loam are studied in special rectangular pipes. From the experiments, the frictional velocity is obtained at the critical condition. Changed into the velocity for the natural river by resistance relationship and compared with the flow dynamic conditions of the river, it can be proved that the experimental results are effective and reasonable, providing a new method to solve the critical condition for the threshold velocity of deposit in rivers.

Key words: muddy loam; undisturbed soil; frictional velocity; threshold velocity; experimental research; Yangtze River