

人工填筑黏性土起动冲刷特性试验

张 强^{1,2}, 王 寅^{1,2}, 陈春柏^{1,2}

(1. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099;
2. 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099)

摘要: 为了研究人工填筑黏性土起动和冲刷特性, 采用资料分析和试验相结合的方法, 研究人工填筑黏性土的起动冲刷特性。根据试验资料, 结合力学特性确定影响人工填筑黏性土起动冲刷的主要因素; 根据试验结果分析人工填筑黏性土起动切应力、冲刷率分别与各自的影响因素之间的对应关系, 提出了量纲和谐的起动切应力和冲刷率的公式, 运用多元线性回归方法确定了公式中的系数和指数, 并分析比较了人工填筑黏性土和黏性泥沙起动和冲刷特性。结果表明: 人工填筑黏性土的黏结力比自然淤积固结的黏性泥沙大得多, 较难起动和冲刷, 需要较大的水流切应力; 干密度对自然淤积黏性泥沙冲刷率影响比对人工填筑黏性土要大。

关键词: 人工填筑黏性土; 黏性泥沙; 起动切应力; 冲刷率; 干密度

中图分类号: TV142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2012)06-0075-04

Experiment on incipient motion and scour features of artificial filling clay//ZHANG Qiang^{1,2}, WANG Yin^{1,2}, CHEN Chunbai^{1,2} (1. College of Hydrodynamic and Ecology Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Key Laboratory of Water Resources and Water Environment of Jiangxi Province, Nanchang 330099, China)

Abstract: The combined method of data analysis and experiment is used to study the incipient motion and scour features of artificial filling clay. The main factors for the incipient motion and scour of the artificial filling clay are determined based on the experimental data and mechanical properties. According to the experimental results, the correlations between the incipient shear stress and scour rate of the artificial filling clay and their influencing factors are analyzed, and two dimensional formulas for the shear stress and scour rate are put forward. The multiple linear regression method is employed to determine their coefficients and exponents. The incipient motion and scour features of the artificial filling clay and natural cohesive sediment are analyzed and compared. The results indicate that the bond strength of the artificial filling clay is much greater than that of the natural cohesive sediment. Therefore, it's more difficult to start and be scoured, which needs a larger shear stress of water flows. The influence of the dry density on the scour rate of the natural cohesive sediment is larger that of the artificial filling clay.

Key words: artificial filling clay; cohesive sediment; incipient shear stress; scour rate; dry density

关于泥沙的起动和冲刷, 目前已有了很多研究成果, 近年来也有不少学者开始研究黏性土的起动冲刷, 但所涉及的研究对象多为黏性原状土或是水库、河床中淤积固结的黏性沙, 对人工填筑黏性土的研究很少。人工填筑黏性土的起动与散粒体泥沙的起动有着明显的不同, 对散粒体泥沙来说, 其起动一般以单个颗粒散体形式为起动单元, 而对于人工填筑黏性土来说, 由于颗粒间的黏结力作用, 其起动以成块或成团的形式进行。到目前为止, 还没有提出比较统一的对起动和冲刷机理的科学解释, 因此对人工填筑黏性土的起动冲刷研究具有十分重要的理论意义。

为了研究人工填筑黏性土起动冲刷特性, 本文采用试验方法研究人工填筑黏性土的起动冲刷特性, 并根据试验结果分析人工填筑黏性土起动切应力、冲刷率分别与各自影响因素之间的对应关系, 得出了无量纲的起动切应力和冲刷率的计算式。

1 试验装置

以往对泥沙基本运动规律进行试验研究时, 运用的试验装置主要是普通明渠水槽和环形水槽^[1-2]。在一般普通明渠水槽中控制试验条件比较困难, 而且普通明渠水槽流速不大, 对起动切应力较大的人

工填筑黏性土无法适用。试验采用封闭有机玻璃管道水槽作为人工填筑黏性土起动冲刷的试验装置,水槽断面为高 3 cm、宽 12 cm 的矩形,长 200 cm。试验时,试样放置在内径为 7 cm 的土样筒内,在土样筒的上下游各布置一个测压管,上下游测压管位置距土样筒中心距离均为 60 cm。土样筒下方的顶土装置为一橡胶活塞,在试验过程中,采用手动升降螺杆来控制橡胶活塞以调整试样在土样筒内的高度。流量由电磁流量计测出,管道最大平均流速为 3 m/s。试样装置见图 1。

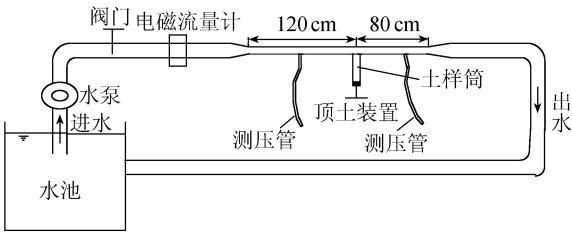


图 1 封闭有机玻璃管道水槽示意图

2 起动切应力试验

试验选取的人工填筑黏性土为人工碾压土,土样为黄色,黏性颗粒(指粒径小于 0.005 mm 的颗粒)质量分数为 15.32%,中值粒径为 0.05 mm,不均匀系数为 14.51,试验土样颗粒级配曲线见图 2。试验中观察土样在水流作用下的起动,并测量其相应流量,利用河流动力学、土力学等基本理论和方法对试验结果进行分析、归纳和总结。

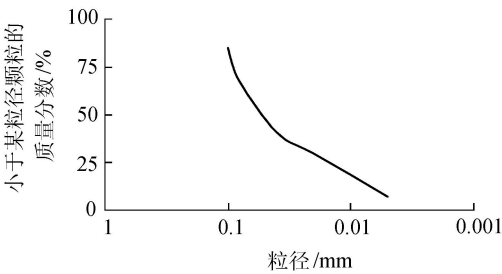


图 2 试验土样颗粒级配曲线

将土适当晒干、碾碎后置于干净的容器中,加入适量水搅拌均匀,使土样处于完全饱和状态,静置一段时间之后用质量为 32 kg 的碾压滚筒进行分层均匀碾压,并用试样盒取样。采用烘干法测量土样干密度,利用顶土装置将装有试验土样的试样盒顶入土样筒。先把土样存放于土样筒中,开动水泵并调节阀门控制流量,待水流充满整个玻璃水槽且矩形管道中流态稳定后再将土样推上使其表面暴露于矩形有压流管道底面。缓慢调节阀门,使管道中流速缓慢增大,观察试验土样起动情况。当试验土样达到起动标准时,记下管道中流量,即可通过计算得出

该土样的起动切应力。

人工碾压条件下,土体的起动切应力随着干密度的变化而变化。共完成 10 组起动切应力试验,测得的数据为干密度、含水量、起动流速等,如表 1 所示。

表 1 起动切应力试验结果

试验 编号	干密度/ (g · cm ⁻³)	含水量/ %	流量/ (m ³ · h ⁻¹)	流速/ (m · s ⁻¹)	切应力/ Pa
1-01	1.006	29.613	3.95	0.305	0.351
1-02	1.085	27.985	4.22	0.326	0.400
1-03	1.161	26.303	4.43	0.342	0.441
1-04	1.245	25.032	4.59	0.354	0.474
1-05	1.289	24.156	4.69	0.362	0.495
1-06	1.343	23.274	4.82	0.372	0.522
1-07	1.403	22.468	4.92	0.380	0.544
1-08	1.463	21.761	5.03	0.388	0.569
1-09	1.505	20.019	5.12	0.395	0.589
1-10	1.556	19.012	5.20	0.401	0.608

到目前为止,建立的泥沙起动平衡条件主要有水平方向力的平衡、铅直方向力的平衡和力矩的平衡 3 类,而力的平衡作为滑动平衡条件较合适,力矩的平衡作为滚动平衡条件较合适。土体微团的起动有与散体泥沙起动相类似的地方,故可以借鉴散体泥沙的起动平衡条件。临界起动切应力与干密度有关的经验公式^[3-5]可表示为

$$\tau_c = \varepsilon \rho_d^n \tag{1}$$

式中: τ_c 为土体起动切应力; ρ_d 为土体的干密度; ε 为系数,与黏结力系数、微团尺寸及阻力系数有关; n 为指数。

式(1)中量纲不和谐,为了建立量纲和谐的计算公式,同时考虑散体泥沙起动拖曳力公式形式^[3]和人工填筑黏性土起动主要影响因素,参照式(1),提出以下计算公式:

$$\tau_c = k \rho g R \left(\frac{\rho_d - \rho}{\rho} \right)^m \tag{2}$$

式中: k 为系数; ρ 为清水密度; g 为重力加速度; R 为水力半径; m 为指数。

对于计算公式中的系数和指数的求解,首先对公式(2)两边取对数,问题转化为对 n 个数据点的数据拟合,然后利用 SPSS 统计分析软件求出回归系数,最终得到人工填筑黏性土起动切应力计算公式为

$$\tau_c = 0.00508 \rho g R \left(\frac{\rho_d - \rho}{\rho} \right)^{0.120} \tag{3}$$

3 冲刷率试验

冲刷率试验仍然在原起动试验的水槽中进行,所采用的试验土样和起动切应力试验土样一致。本研究忽略水流中的挟沙量,只讨论清水时土体的冲刷率,重点分析冲刷率与水流指标、土体物理指标之间的关系。

将制备好的土样放入装置的土样筒中,利用顶

土装置将其顶入。启动水泵,调节流量,观察土体表面的起动情况,待土体开始起动之后固定流量进行观察,土样随水流的冲刷逐渐崩溃降低,当土样表面与水槽底部高差超过 3 mm 时,通过手动升降螺杆调整土样高度使其表面基本与水槽底部齐平,使土样筒所在断面流速不发生较大变化,确保试验精度。利用土样筒上的刻度读取土样冲刷高度 Δh ,并用秒表记录冲刷时间 Δt 。读取电磁流量计得到流量大小,除以矩形有压流水槽的横截面积即得流速,再根据有关公式即可算出水流切应力。

不同组次具有不同含水量的土样在不同流量条件下的冲刷率计算公式为

$$E = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

(4)

式中: E 为冲刷率,m/s; Δh 为冲刷高度,m; Δt 为冲刷时间,s。

试验需测量的数据有含水量、干密度、流量、冲刷率,结果见表 2。

考虑到切应力是影响土体冲刷的主要因素,许多研究者都通过现场或室内试验来确定冲刷率与水流切应力及临界起动切应力的关系式^[6-11],这类公式形式为

$$E = K \left(\frac{\tau}{\tau_0} - 1 \right)^p$$

(5)

式中: K 为一个复杂的系数,表示土的抗冲性能; τ 为水流切应力; τ_0 为发生冲刷时的床面切应力; p 为指数。

式(5)将土的抗冲性能用一个复杂的系数来表示,未明确影响土的抗冲性能的主要参数。根据表 2 可知,随着土样的干密度逐渐增加,冲刷率迅速减小,因此在建立人工填筑黏性土冲刷率计算公式时必须考虑到干密度对冲刷率的影响。参照公式(5),提出量纲和谐的计算公式:

$$E = l \sqrt{gR} \left(\frac{\rho_d - \rho}{\rho} \right)^q \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^s$$

(6)

式中: l 为系数; q,s 为指数。

利用 SPSS 统计分析软件求出式(6)中的系数和指数,得到人工填筑黏性土冲刷率计算公式为

$$E = 0.000\,028\,6 \sqrt{gR} \left(\frac{\rho_d - \rho}{\rho} \right)^{-0.071} \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^{1.067}$$

(7)

4 人工填筑黏性土和自然淤积黏性泥沙起 动冲刷对比分析

人工填筑黏性土和黏性泥沙起动冲刷有很大的差别,王军等^[5,12]曾做过黏性泥沙的起动冲刷试验。

表 2 冲刷率试验结果

试验编号	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水量/%	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	流速/ (m·s ⁻¹)	水流 切应力/Pa	起动 切应力/Pa	冲刷率/ (mm·s ⁻¹)
2-01	1.161	26.303	7.940	0.613	1.418	0.441	0.025
			8.593	0.663	1.660	0.441	0.038
			10.576	0.816	2.515	0.441	0.056
			12.793	0.987	3.680	0.441	0.082
2-02	1.225	25.032	7.980	0.616	1.432	0.474	0.022
			8.678	0.670	1.693	0.474	0.034
			10.518	0.812	2.488	0.474	0.052
			12.852	0.992	3.714	0.474	0.080
2-03	1.289	24.156	8.030	0.620	1.450	0.495	0.020
			8.610	0.664	1.667	0.495	0.032
			10.756	0.830	2.601	0.495	0.050
			12.822	0.989	3.697	0.495	0.076
2-04	1.343	23.274	8.100	0.625	1.475	0.522	0.018
			8.704	0.672	1.704	0.522	0.029
			10.720	0.827	2.584	0.522	0.047
			12.816	0.989	3.694	0.522	0.072
2-05	1.403	22.468	8.120	0.627	1.483	0.544	0.016
			8.721	0.673	1.710	0.544	0.027
			10.828	0.835	2.636	0.544	0.046
			12.864	0.993	3.721	0.544	0.068
2-06	1.463	21.761	8.130	0.627	1.486	0.569	0.014
			8.764	0.676	1.727	0.569	0.026
			10.878	0.839	2.661	0.569	0.043
			12.912	0.996	3.749	0.569	0.065
2-07	1.495	20.019	8.220	0.634	1.519	0.589	0.013
			8.807	0.680	1.744	0.589	0.024
			10.936	0.844	2.689	0.589	0.041
			12.959	1.000	3.776	0.589	0.063

图 3 为文献[5]试验采用的长江细颗粒泥沙沙样级配曲线,中值粒径为 0.05 mm。

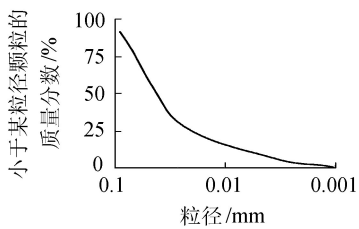


图 3 长江细颗粒泥沙沙样级配曲线

表 3 为长江细颗粒泥沙淤积固结过程中起动切应力试验结果^[5]和本文公式计算结果的比较。从表 3 可以看出,式(3)计算结果普遍比试验结果大,说明人工填筑黏性土的黏结力比淤积固结的黏性泥沙大得多,较难起动;随着干密度的增大,人工填筑黏性土和黏性泥沙的起动切应力都增大。

表 3 黏性泥沙起动切应力试验结果和本文公式计算结果的比较

淤积 时间/d	干密度/ (g·cm ⁻³)	起动切应力/Pa	
		试验结果	式(3)计算结果
1	1.172	0.188	0.484
2	1.218	0.195	0.498
5	1.224	0.204	0.499
10	1.229	0.265	0.501
20	1.235	0.284	0.502
30	1.236	0.318	0.502
60	1.236	0.345	0.502
90	1.241	0.389	0.504
120	1.241	0.413	0.504

人工填筑黏性土和黏性泥沙冲刷有很大的差别。表 4 为长江细颗粒泥沙淤积固结过程中黏性泥沙冲刷率试验结果^[5]和本文公式计算结果的比较。从表 4 可以看出,干密度对黏性泥沙冲刷率影响比较明显,在干密度一定的情况下,式(7)计算结果普遍比试验结果小,说明人工填筑黏性土较难冲刷,需要较大的水流切应力;随着干密度的增大,人工填筑黏性土和黏性泥沙的冲刷率都减小,两者规律一致,但式(7)在不同密度下的计算结果差别不是很明显。

5 结 论

- a. 确定了影响人工填筑黏性土起动冲刷的主要因素,提出了量纲和谐的起动切应力和冲刷率的计算公式,运用多元线性回归方法确定了公式中的系数和指数。
- b. 人工填筑黏性土起动切应力随着土体干密度增大而增大,人工填筑黏性土冲刷率随着水流切应力增大而增大,随着干密度增大而减小。
- c. 人工填筑黏性土的黏结力比自然淤积固结的黏性泥沙大得多,较难起动和冲刷,需要较大的水

表 4 黏性泥沙冲刷率试验结果和本文公式计算结果的比较

淤积 时间/d	干密度/ (g·cm ⁻³)	起动切 应力/Pa	冲刷率/(mm·s ⁻¹)	
			试验结果	式(7)计算结果
5	1.231	0.36	0.021 4	0.000 00
		0.54	0.063 1	0.000 71
		0.74	0.177 8	0.004 94
		1.23	0.436 5	0.016 24
10	1.239	0.36	0.017 8	0.000 00
		0.54	0.051 3	0.000 67
		0.74	0.131 8	0.004 86
		1.23	0.323 6	0.016 08
15	1.252	0.36	0.012 6	0.000 00
		0.54	0.027 5	0.000 61
		0.74	0.060 3	0.004 75
		1.23	0.199 5	0.015 85
30	1.269	0.36	0.009 3	0.000 00
		0.54	0.021 4	0.000 52
		0.74	0.053 7	0.004 60
		1.23	0.109 6	0.015 55
60	1.283	0.36	0.008 7	0.000 00
		0.54	0.019 1	0.000 46
		0.74	0.041 7	0.004 49
		1.23	0.085 1	0.015 33

流切应力。干密度对自然淤积黏性泥沙冲刷率的影响比对人工填筑黏性土要大。

参考文献:

[1] RAVENS T M,GSCHWEND P M. Flume measurements of sediment erodibility in Boston harbor[J]. Journal of Hydraulic Ennineerinn, 1999, 125(10): 998-1005.

[2] 曹叔尤,杜国翰. 黏性土冲淤的试验研究[J]. 泥沙研究, 1986(4): 73-82.

[3] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.

[4] 舒彩文,王军,谈广鸣. 干容重对黏性淤积物起动和冲刷的影响[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(1):25-28.

[5] 王军. 淤积固结条件下黏性泥沙起动与冲刷问题初步研究[D]. 武汉:武汉大学, 2007.

[6] 常利营,陈群. 接触冲刷研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(2): 79-82.

[7] 吕平,谈广鸣,王军. 黏性泥沙淤后起动流速试验研究[J]. 中国农村水利水电,2008(2):56-58.

[8] 刘杰. 无黏性土层之间渗流接触冲刷机理试验研究[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):27-30.

[9] 杨剑. 复杂条件下黏性土主动土压力解析解[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(4):380-386.

[10] 洪大林,缪国斌,申霞,等. 黏性原状土起动流速试验研究[J]. 人民长江,2012,43(2):39-42.

[11] 田琦,白玉川. 河口淤泥的起动及冲刷规律[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(3):276-281.

[12] 王军,谈广鸣,舒彩文. 淤积固结条件下黏性细泥沙起动冲刷研究综述[J]. 泥沙研究, 2008(3):75-80.

(收稿日期:2012-08-21 编辑:熊水斌)