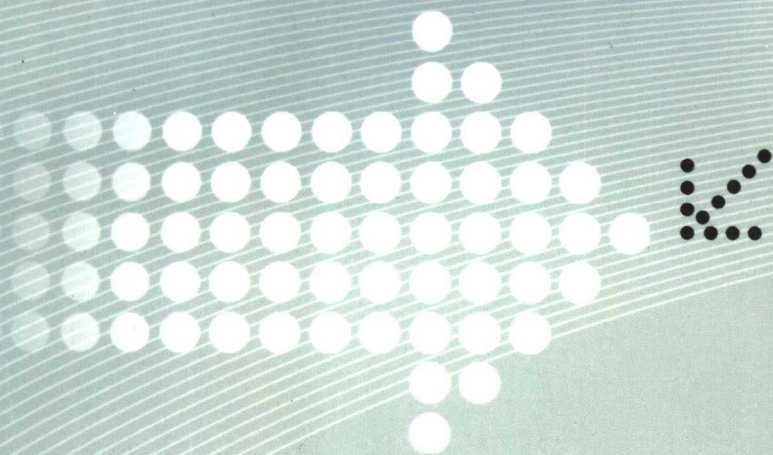


洪大林 缪国斌 著
邓东升 张亚中

粘性土起动及其在工程中的应用



河海大学出版社

粘性土起动 —— 及其 —— 在工程中的应用

洪大林 缪国斌 著
邓东升 张亚中

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

粘性土起动及其在工程中的应用/洪大林等著. —南京:河海大学出版社, 2005. 11

ISBN 7-5630-2146-9

I. 粘... II. 洪... III. 粘性土结构 IV. TU411.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 141054 号

书 名/粘性土起动及其在工程中的应用

书 号/ISBN 7-5630-2146-9/TV·264

责任编辑/陈玉国

封面设计/杭永鸿

出 版/河海大学出版社

地 址/南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话/(025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

印 刷/南京玉河印刷厂

开 本/850 毫米×1168 毫米 1/32 7.75 印张 250 千字

版 次/2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

定 价/20.00 元

本书内容为江苏省自然科学基金项目
《粘性土冲刷特性试验研究》(K1999170)的
总结与拓展。

本书的出版得到南京水利科学研究院
出版基金的资助,谨表致谢!

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 总结与回顾	3
2.1 国外研究成果介绍	3
2.2 国内研究成果介绍	22
第三章 土的物理力学特性	29
3.1 概 述	29
3.2 土的组成	29
3.2.1 土的固体颗粒	30
3.2.2 土中水	34
3.2.3 土中气	37
3.2.4 土的结构与构造	37
3.3 土的三相比例指标	39
3.3.1 实测指标	40
3.3.2 计算指标	41
3.3.3 土的实测指标与计算指标间的关系	43
3.4 土的物理特征	45
3.4.1 无粘性土的密实度	45
3.4.2 粘性土的稠度和可塑性	47
3.4.3 粘性土的灵敏度	51
3.5 应力历史对土压缩性的影响	52
3.6 土的抗剪强度	57
3.6.1 土体抗剪强度的库仑定律	57

• 2 • 粘性土起动及其在工程中的应用

3.6.2 饱和土的特性	60
3.6.3 影响抗剪强度的因素	63
3.7 土体的极限平衡状态和条件	66
3.7.1 土中一点的应力状态	66
3.7.2 土的极限平衡条件	68
3.8 土的固结	71
3.8.1 概 述	71
3.8.2 粘性土的固结特性	71
3.9 土的抗剪强度指标的测定	77
3.9.1 直接剪切试验	77
3.9.2 三轴剪切试验	79
3.9.3 无侧限抗压强度试验	82
3.9.4 十字板剪切试验	83
3.10 无粘性土的抗剪强度	85
3.11 饱和粘性土的抗剪强度	86
3.11.1 应力历史对饱和粘性土抗剪强度的影响	86
3.11.2 排水条件对饱和粘性土抗剪强度的影响	88
第四章 粘性原状土起动机理及微观结构模式构建	94
4.1 粘性土起动的影响因素分析	94
4.2 粘性原状土起动机理分析	96
4.3 粘性原状土起动的微观结构模式	97
4.4 起动模式的建立	101
4.5 起动的判别标准	103
4.6 起动现象的一般描述	105
4.7 小 结	106
第五章 粘性土起动试验方法	107
5.1 试验装置设计	107
5.2 圆管的水力特性	108

5.3 试验量测仪器 PIV 工作原理与系统结构	113
5.4 矩形管道的水力特性	114
5.4.1 切应力的计算	114
5.4.2 试验结果及其分析	116
5.4.3 压力对起动临界条件的影响	118
5.5 原状土取样及应注意的问题	122
5.6 土样特性	123
5.7 小 结	130
第六章 粘性原状土起动临界切应力与物理力学指标的关系	131
6.1 起动切应力与物理力学指标的关系	131
6.1.1 起动切应力与抗剪强度的关系	131
6.1.2 起动切应力与含水量的关系	138
6.1.3 起动切应力与粘性土中值粒径 d_{50} 的关系	142
6.1.4 起动切应力与 d_{75}/d_{25} 之间的关系	144
6.1.5 起动切应力与粘性土含量的关系	146
6.2 粘性土冲刷试验研究	148
6.2.1 试验概况	148
6.2.2 粘性土冲刷率的确定	148
6.3 小 结	153
第七章 粘性土起动在工程中的应用	154
7.1 河段概况	154
7.2 桥区原状土取样	155
7.2.1 取样点的布置	155
7.2.2 工程地质钻探概况	157
7.2.3 取样代表性分析	157
7.2.4 土样物理、力学指标	163
7.3 原状土起动试验	166

• 4 • 粘性土起动及其在工程中的应用

7.3.1 起动摩阻流速的计算	166
7.3.2 天然起动流速的计算	169
7.3.3 起动流速沿深度方向的分布	173
7.4 起动切应力与凝聚力、含水量的关系	178
7.5 原状土冲刷率	179
7.6 原状土抗冲能力对河床稳定性的影响分析	202
7.7 小 结	204
第八章 粘性土起动在模型设计中的应用	206
8.1 新开挖河道动床模型设计思路及方法	206
8.1.1 设计思路	206
8.1.2 模型沙的选择	206
8.1.3 输沙率比尺及冲淤时间比尺确定	207
8.2 泰州引江河河道工程基本特征	207
8.2.1 河道工程概况	207
8.2.2 工程地质	210
8.2.3 长江水文泥沙特征	213
8.2.4 新通扬运河水位特征	216
8.2.5 泰州引江河河道特征	217
8.2.6 原状土取样及代表性评价	218
8.3 原状土起动试验	220
8.4 泰州引江河动床模型设计	221
8.4.1 动床冲刷模型遵循的比尺关系	221
8.4.2 模型沙的选择及有关比尺确定	222
8.5 小 结	226
第九章 主要结论与展望	227
9.1 主要结论	227
9.2 展 望	228
参考文献	230

第一章

绪 论

粘性土的冲刷特性主要指粘性土的起动和冲刷,起动是河道边界粘性土从静止到运动的临界状态;冲刷则是指在起动状态发生以后,床面出现凹凸不平的冲坑,它是随水流强度的增大而增大的,它与边界的物质组成和水流的强度、水流作用时间有关。

对新开挖的河道来说,其边界很多是由粘性物质组成,在输水或行洪过程中,往往伴随着河道床面的冲刷,这种现象在平原河道泄水建筑物的上下游表现得尤为突出,许多情况下由于对土体的抗冲性能估计不足,造成闸下严重冲刷,甚至影响水工建筑物本身的稳定。为了避免这种现象的发生,应在设计施工过程中,对建筑物附近土体的抗冲性能有充分的了解。在裁弯取直工程河道设计时,往往会出现一种相反的情况,即充分利用河道边界土质的可冲性,首先根据边界土质资料设计较小的断面和可能的稳定断面,利用水流的自然冲刷力,拓宽、刷深河道,当断面处于冲淤平衡状态时,即达到设计要求的断面形态。因此,河道边界土体的可冲性,在水利工程建设中,既有不利的方面,又有有利的方面,只要我们掌握其规律并正确应用,是完全可以为我们所利用的。

过去人们曾采用重塑土进行试验,尽管可以较为方便地得出一些具有规律性的成果,但由于重塑土本身的性质与原状土之间存在很大的差别,而其中一些性质是无法恢复的,因此分别采用重塑土和原状土进行试验,其成果之间存在的差别应该是很大的,但到目前为止尚无人对此做细致的对比论证工作,只是不同学者之间由于所采用的试验土样不同,有的采用原状土,有的采用重塑土,有的采用野外现场测量资料,也就是说,各人资料的来源不同,所分析得出的公式存在形式和本质的差别,其计算结果也自然会

• 2 • 粘性土起动及其在工程中的应用

千差万别,成果的可用性也就不言而喻。本文的意图主要是针对原状土而言,而没有讨论重塑土,也不对二者的差别进行比较。

诸如此类,都要求我们去做一项工作,即进行粘性原状土冲刷特性的研究,尽管国内外学者进行过一些探索性研究,某些技术规范也有诸如土体不冲流速的表格可查,但这些都尚停留在局部的、经验的范围内,实际应用中仍然需要进行实地调查和适时修正。况且从理论上来说,截止目前为止,也没有提出比较统一的模式 and 对其起动或冲刷机理提出较为科学合理的解释。因此,进行这方面的研究是很有必要的,具有理论价值和工程实际意义。

第二章

总结与回顾

侵蚀过程是水流与河道边界相互作用的综合结果,水流边界上泥沙颗粒的搬运的能力主要取决于这些颗粒的物理性能和水流参数,是一种由多种过程相互作用的复杂现象。粘性土的起动和冲刷,国内外学者都有不同程度的研究,为了更好地了解目前在该领域的研究进展,将其研究成果作简要的介绍很有必要。

2.1 国外研究成果介绍

早在 16 世纪,我国就开始研究泥沙运动,尔后,意大利、法国、美国、俄罗斯等国家也开始进行泥沙运动规律的研究。从 19 世纪开始,人们在进行河道冲刷等问题的研究时,就关注粘性土的冲刷特性,并进行了许多研究,其中许多研究成果具有一定的意义。

1816 年, Dubuat L. G.^[1]发表了被认为是预报冲刷过程的第一部论著——《水力学原理》。他认为,作用在河底粘土颗粒上的力 F_x 与环绕该颗粒的底部水流有关,且与流速的平方和颗粒截面面积成正比,即

$$F_x = \alpha \gamma \frac{\pi d^2}{4} \frac{U_d^2}{2g} \quad (2-1)$$

式中: U_d ——作用于颗粒上的作用流速;

d ——泥沙粒径;

γ ——水的重率;

α ——系数;

g ——重力加速度。

而与之相抗衡的力 T_x 可用颗粒在水中的重量和颗粒上下层

• 4 • 粘性土起动及其在工程中的应用

之间的摩擦系数 f_{TP} 来表示

$$T_x = (\gamma_s - \gamma) \frac{\pi d^3}{6} f_{TP} \quad (2-2)$$

取 T_x 与 F_x 相等, 且取 $f_{TP} = \text{常数}$, $\gamma = 1$, Dubuat L. G. 得出不冲流速公式为

$$v_0 = A_1 \sqrt{\gamma_s - 1} \sqrt{gd} \quad (2-3)$$

式中: γ_s ——泥沙重率;

A_1 ——系数。

此外, Dubuat L. G. 还得到了几种粘性土的临界冲刷流速(表 2-1)。

表 2-1 几种土的临界冲刷流速

土 的 种 类	临界流速(m/s)
陶 土	0.082~0.107
粗 沙	0.213~0.335
豆粒大小的砾石	0.335~0.472

1916 年, Etcheverry B. A. ^[2] 发表了关于不同类型河床的不冲流速(表 2-2)的文章。

表 2-2 各类土不冲流速表

土 的 种 类	最大平均流速 (m/s)	水深 $H=0.914 \sim 3.048$ m 和 $\tau_c = 1.054$ N/m ² 计算的最大平均剪应力
亚 粘 土	0.762~0.838	3.35~3.83
火山灰土	0.838~0.914	3.83~5.27
硬亚粘土	0.914~1.1434	6.23~6.70
硬 粘 土	1.220~1.524	11.49~11.97
硬夹沙层	1.829~2.439	27.30~31.61
坚硬岩石	3.048~4.572	71.83~110.14

19 世纪以来, Kennedy J. F. [3] 针对河槽冲刷, 提出了“规则理论”。他根据印度博里—多阿卜总渠和配水网渠道的 30 多个稳定河段的观测资料, 得到经验关系式如下

$$U_0 = \alpha H^\beta \quad (2-4)$$

式中: U_0 ——水流平均不冲流速(m/s);

H ——水深(m);

α 和 β ——经验系数; 原先 Kennedy 建议取 $\alpha=0.84$, $\beta=0.64$, 之后校正为 $\alpha=0.67\sim0.23$, $\beta=0.52\sim0.64$ 。

Gilbert K. G. [4] 对泥沙运动规律的研究作出了很大的贡献。1914 年他发表了经典的专著《泥沙的水力输送》, 描述了泥沙运动机理、底部形态和泥沙运动的其他特性, 在研究泥沙运动的同时, Gilbert K. G. 还利用 Dubuat L. G. 的资料, 建议塑性粘土的允许(不冲)流速取为 $0.08\sim0.11$ m/s。

对于非粘性土和粘性土, 根据其类别和水流输移泥沙的饱和度, Fortier S. 和 Scobey F. C. [5] 完成了大量冲刷预报结果的总结工作, 并提出了水流允许(不冲)流速的建议值。直至今日, 美国和其他许多国家在确定水流允许(不冲)流速时, 还在利用 Fortier S. 和 Scobey F. C. 等人的资料, 只不过这些资料尚不够完善, 必须审核后再运用。

美国土木工程师协会灌溉水力学专业委员会为了收集最大允许流速的资料, 向当时知名的水利工程师寄送了调查表, 后根据返回的资料分析, 得出了委员会建议用于计算的最大允许流速^[6](表 2-3)。

表 2-3 最大允许流速

土 的 种 类	最大流速(m/s)	土 的 种 类	最大流速(m/s)
冲积性淤泥	0.610~0.838	粘土页岩	0.762~2.133
细沙亚粘土	0.457~0.914	重亚粘土	0.914
硬(坚固)粘土	0.762~1.524		

委员会在建议书中考虑了底、悬沙的存在以及冲刷河底土质的时效后指出,抗冲刷强度随着底部材料的“老化”而增加。表2-4列出了“老化”粘土的允许流速。

表 2-4 老化后粘土的允许流速

土 的 种 类	粘土的允许流速(m/s)		
	净 水	粘 土	非粘性淤泥
硬亚粘土	0.762	1.067	0.686
硬 粘 土	1.143	1.524	0.914
冲积性胶质泥沙	1.143	1.524	0.914
充填淤泥的鹅卵石	1.219	1.676	1.524

前苏联当时制定的规范,根据土的类别,同时考虑粘性土的密度参数。在那时的规范中,允许流速值比美国规范中的稍大一些。但在这些规范中,都没有考虑表示抗冲刷强度的主要物理力学性能指标。Замарин^[7]是指出粘性土允许(不冲)流速的确定必须考虑其结构性能的首批人员之一。他在《渠道中水流的输送能力与允许流速》专著中,详细论述了他的建议及其应用情况,表2-5为其部分研究成果。其中 v_c 为起动流速, τ_c 为起动切应力。可见随孔隙度 e 的减小,即密度的增大,其起动切应力呈增大趋势,而粘土类型不同其起动切应力也有一定的差别。

表 2-5 粘性土允许流速

粘性材料类别	孔 隙 率 e							
	2.0 v_c	1.2 τ_c	1.2 v_c	0.6 以下 τ_c	0.6 v_c	0.3 τ_c	0.3 v_c	0.2 以下 τ_c
瘦粘土	0.45	1.92	0.90	7.52	1.30	15.66	1.80	30.17
重粘壤土	0.40	1.48	0.85	6.75	1.25	14.61	1.70	26.82
粘 土	0.35	1.15	0.80	5.94	1.20	13.46	1.65	25.38
不可塑粘土	0.32	1.05	0.70	4.60	1.05	10.25	1.35	16.76

备注: 流速单位为 m/s, 切应力单位为 N/m²。

在解决工程实际问题时,确定粘性土的允许(不冲)流速无疑是非常重要的,因此,世界各国都在进行野外和试验室研究。

美国灌溉研究中心^[8]所进行的野外研究,认为粘土的临界起动切应力与颗粒平均尺寸之间的关系不大,但随着塑性指数的增加而增加,当有植被覆盖时,土的抗冲刷强度增大。植被使临界推移力增加到 57.47 N/m²。

Flaxman E. N.^[9]根据野外研究资料确定,粘性土的临界推移力为 9.58~28.73 N/m²。

Sundborg A.^[10](1956)在其早期研究成果中论述了粘性土的冲刷过程,并指出临界流速随着颗粒尺寸的减小而增大。他还认为临界流速是内聚力的函数,但没有提出其数值的计算方法。

Sundborg A. 提出阻止颗粒掀动的凝聚力与标准土壤试验中测定的泥沙抗剪强度成比例,其作用方向与流体力相反,得到水平床面上粘性泥沙起动临界切应力 τ_c 的关系

$$\tau_c = \frac{c_1 a_1}{c_2 a_2} (\gamma_s - \gamma) d \tan \varphi + c_3 \tau_f \quad (2-5)$$

式中: τ_f ——泥沙的抗剪强度;

c_3 ——常数;

φ ——泥沙水下休止角;

$c_1 = \frac{V}{d_s^3}$ ——颗粒体积系数;

d ——颗粒几何粒径;

V ——颗粒体积;

c_2 ——临界拖曳力系数;

$\frac{c_1 a_1}{c_2 a_2}$ ——综合系数。

在 20 世纪 50 年代的试验室研究中,Ф. Н. Хальфин^[11]的研究值得重视,他在水槽中研究了非扰动粘性土(粘性原状土)试样。指出抗冲刷强度随着塑限的提高而增大,他是第一个采用塑限这

一土力学指标的学者。

Dunn J. S. ^[12]曾在科罗拉多、内布拉斯加、怀俄明州的粘性渠道中测定了从沙到粘土的 τ_c 值。其试验装置包括一个水箱,水箱中有一个淹没在水中的喷水嘴,垂直向下正对着下面的试样,在喷嘴冲蚀的区域($6.452 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)上进行流体力测定。表 2-6 为 Dunn J. S. 获得的粘性土临界切应力值和其他资料。

表 2-6 Dunn J. S. 观测的河渠泥沙临界切应力资料

编号	颗粒几何 平均粒径 $d_{50}(\text{mm})$	几何 均方 差 σ_k	淤泥和 粘土的 百分数	塑性 指数 I_p	淤泥的抗剪强度 $S_v(\text{N/m}^2)$		临界起动切应力 $\tau_c(\text{N/m}^2)$	
					最小	最大	最小	最大
1	0.022	6.08	69.0	11.1	3 687.4	7 997.4	22.99	23.47
2	0.072	6.00	35.0	0.0	12 594.8	24 902.2	8.62	15.80
3a	0.328	—	12.5	—	4 597.3	6 608.7	2.73	3.02
3b	0.319	—	18.0	—	4 597.3	5 650.9	2.73	3.97
3c	0.308	—	26.0	—	5 267.8	5 267.8	5.27	5.75
3d	0.250	—	44.0	—	6 129.8	6 704.4	6.70	7.18
4	0.078	3.25	41.0	0.0	3 591.7	11 158.1	9.10	13.41
5	0.081	2.79	31.0	0.0	4 884.7	11 637.0	5.27	7.18
6	0.038	3.25	46.0	2.5	8 284.8	11 589.1	14.37	15.80
7	0.016	4.83	78.0	8.8	5 028.3	11 972.2	14.37	21.55
8	0.015	4.66	81.0	13.3	6 560.7	7 805.9	19.16	19.63
9	0.020	3.48	56.0	3.5	4 788.9	14 366.7	9.10	15.32
10	0.014	3.48	88.0	11.2	6 896.0	8 955.2	20.59	22.99
11	0.014	3.05	95.0	15.6	6 560.8	6 848.1	22.99	23.47
12	0.139	1.57	10.0	0.0	2 059.2	7 422.8	2.538	2.54
13	0.173	1.29	5.0	0.0	4 549.4	5 267.8	2.06	1.58

Dunn J. S. 用专门仪器测量了被跌冲水流冲刷过的试样冲刷坑深度,并由此来确定土的抗冲刷强度。根据试验研究,他得出结论认为,抗冲刷强度与粒径级配(粒度小于 0.06 mm 的百分比含量)、塑性指数和土的抗剪强度之间存在关系,抗剪强度指标是在天然条件下用叶轮确定的。

Dunn J. S. 在关于粘性土渠道抗冲刷强度的论著中提出了“冲刷时粘性土的抗冲刷能力与内聚力存在关系”的观点。

试验的土样首先通过 2 mm 正方孔筛,烘干并在孔隙的板块间压实到饱和状态。每种土样做了两个或两个以上预先进行过不同压实程度的试样测定。测定结果表明泥沙具有 S_v 和 τ_c 的最大和最小值,压实范围为 1 197.22~1 436.67 N/m²。

当塑性指数在 5~16 之间时,得到

$$\tau_c = 0.048(S_v + 180)\tan(30 + 1.73I_p) \quad (2-6)$$

$$\text{或} \quad \tau_c = 0.02 + \frac{S_v \tan \varphi}{1000} + 0.18 \tan \varphi \quad (2-7)$$

式中: S_v ——十字板抗剪强度(N/m²);

φ ——摩擦角, $\tan$ 中的数值以度计;

φ ——临界剪切力和十字板抗剪强度的线形相关的斜率;

I_p ——土的塑性指数;

τ_c ——临界起动切应力,与小于 0.06 mm 土壤百分比、塑性指数、粒径分布相关。

从 Dunn J. S. 所进行的试验来看,他所用的土样,其粒径都普遍较粗,最细的其中值粒径也仅为 0.014 mm,而粘性土的中值粒径一般都小于该值。另外,试验中所采用的土样都是扰动土,而非原状土。

在上式(2-6)中,对散体沙而言, $S_v = 0$, 取 $I_p = 10$, $\tan 47.3^\circ \approx 1$, 这时, $\tau_c \approx 0.02$ N/m², 也就是说,对无粘性的散体沙,其临界最小起动切应力为 0.02 N/m² (实际上,对很稀淤泥来说,由于