



黏性泥沙淤积 固结特性

N I A N X I N G N I S H A Y U J I
G U J I E T E X I N G

谈广鸣 舒彩文 陈一明 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

014035877

TV142
03

黏性泥沙淤积 固结特性

谈广鸣 舒彩文 陈一明 等著



北航

C1723263



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV142
03

内 容 提 要

黏性泥沙淤积固结特性是河流泥沙工程中的重要研究内容之一。本书系统地介绍了黏性泥沙淤积固结特性、各项参数的变化规律及其在河工模型、数学模型中的应用,结合工程中的实际问题进行分析并给出了相关建议。专著内容注重理论结合实际,包含了作者多年从事黏性泥沙相关研究过程中的大量研究成果,以及国内外的主要最新研究成果。

全书共分十一章,第一章为黏性泥沙淤积固结理论基础;第二章为黏性泥沙淤积固结条件下的干密度特性;第三章为黏性泥沙淤积固结条件下的起动特性;第四章为黏性泥沙淤积固结条件下的冲刷基本特性;第五章为干密度、比降及淤积历时等因素对冲刷的影响;第六章为黏性泥沙淤后冲刷水沙参数变化过程;第七章为黏性泥沙成团运动特性;第八章为几类河床演变的机理揭示;第九章为动床冲刷模型设计若干问题;第十章为河流数值模拟参数的选取;第十一章为坝前泥沙压力计算的修正。

本书可供水利、航运等部门的科研及设计人员阅读,亦可供大专院校相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黏性泥沙淤积固结特性 / 谈广鸣等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-5170-1834-6

I. ①黏… II. ①谈… III. ①泥沙淤积—固结理论—
理论研究 IV. ①TV142

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第052366号

书 名	黏性泥沙淤积固结特性
作 者	谈广鸣 舒彩文 陈一明 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 13.75印张 262千字
版 次	2014年3月第1版 2014年3月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书根据我指导的 11 篇研究生学位论文（见附件）的内容归纳和提炼而成，主要由谈广鸣、舒彩文和陈一明编写，雷文韬编写了第十章第四节内容。确定这一选题是因为在十余年前的一次学术会议上，讨论到水库库尾河床淤高后，若炸掉大坝，库尾河床能否冲刷到建库前的高程？答案显然是否定的。因为含有黏性细颗粒的泥沙淤积后随着时间的推移具有固结特性，表现出淤积容易冲刷难的特点。

鉴于国内外对黏性泥沙淤积固结特性的研究较少，十余年来，在国家自然科学基金和教育部博士点基金的资助下，我有计划地安排一些研究生通过理论分析、实验研究和数值模拟等方法，对黏性泥沙淤积固结特性及其应用进行了系列探讨，得到了一些新的认识，特汇成此书，供相关水利和地学工作者参考。

当然，科学技术是逐步发展完善的，本书的内容还有许多不足之处，希望有兴趣的研究者将黏性泥沙的淤积固结特性继续完善。

书中引用了一些学者的观点和成果，尽量利用参考文献引证，如有不慎遗漏的，敬请谅解。

谈广鸣

2013 年 11 月

目 录

前言

第一篇 黏性泥沙淤积固结特性

第一章 黏性泥沙淤积固结理论基础.....	1
第一节 黏性泥沙的基本性质	1
第二节 黏性泥沙淤积固结机理	4
第三节 黏性泥沙沿程分选规律	8
第四节 本章小结	11
参考文献	12
第二章 黏性泥沙淤积固结条件下的干密度特性	13
第一节 颗粒形状对干密度变化的影响	13
第二节 淤积历时对干密度变化的影响	18
第三节 淤积厚度对干密度变化的影响	22
第四节 本章小结	23
参考文献	24

第二篇 黏性泥沙淤积固结条件下的起动冲刷特性

第三章 黏性泥沙淤积固结条件下的起动特性	25
第一节 黏性泥沙起动概述	25
第二节 黏性泥沙起动切应力试验	30
第三节 黏性泥沙起动切应力公式	39
第四节 有压管流与明渠流对黏性泥沙起动影响分析	51
第五节 本章小结	54

参考文献	54
第四章 黏性泥沙淤积固结条件下的冲刷基本特性	57
第一节 黏性泥沙冲刷概述	57
第二节 黏性泥沙冲刷率试验简介	60
第三节 淤积固结过程中的冲刷率问题	65
第四节 本章小结	69
参考文献	69
第五章 干密度、比降及淤积历时等因素对冲刷的影响	72
第一节 概化水槽试验	72
第二节 干密度对冲刷的影响	78
第三节 淤积历时对冲刷强度的影响	85
第四节 本章小结	92
参考文献	93
第六章 黏性泥沙淤后冲刷水沙参数变化过程	95
第一节 淤后冲刷试验结果的检验	95
第二节 水沙参数变化过程分析	96
第三节 本章小结	105
参考文献	106
第七章 黏性泥沙成团运动特性	107
第一节 黏性泥沙运动过程中的基本问题	107
第二节 黏性泥沙成团运动特性试验	108
第三节 试验结果分析	109
第四节 成团作用对黏性泥沙运动特性的影响	112
第五节 黏性泥沙成团起动后的状态转移	116
第六节 本章小结	118
参考文献	119

第三篇 黏性泥沙淤积固结特性的应用

第八章 几类河床演变的机理揭示	120
第一节 水库淤积物冲刷	120
第二节 高含沙水流揭河底冲刷	128
第三节 黏性河岸横向冲刷	132

第四节	河口黏性细泥沙冲刷	141
第五节	本章小结	147
参考文献		148
第九章	动床冲刷模型设计若干问题	151
第一节	细颗粒模型沙的固结起动问题	151
第二节	黏性淤积物动床冲刷模拟相似律问题	156
第三节	本章小结	161
参考文献		161
第十章	河流数值模拟参数的选取	163
第一节	黏性泥沙数学模型研究概述	163
第二节	河口一维非恒定流模型	168
第三节	挡潮闸下游河段冲淤数学模型参数选取及应用	177
第四节	黏性泥沙冲刷源项公式的改进	185
第五节	本章小结	194
参考文献		195
第十一章	坝前泥沙压力计算的修正	200
第一节	坝前泥沙压力概述	200
第二节	淤积固结条件下泥沙压力的变化	202
第三节	坝前泥沙压力变化对坝体的影响	208
第四节	本章小结	212
参考文献		212
附件: 11	篇研究生学位论文目录	214

第一篇 黏性泥沙淤积 固结特性

第一章 黏性泥沙淤积固结理论基础

第一节 黏性泥沙的基本性质

一、黏性泥沙的组成

自然界中的泥沙是岩石风化的产物，并随水流、重力、波浪等外力作用而冲刷、搬运、沉积。在河流泥沙中根据泥沙颗粒的大小，将泥沙分为沙、粉沙和黏粒三大类。一般黏性泥沙主要是由粉沙（ $d < 0.05\text{mm}$ ）和黏粒（ $d < 0.005\text{mm}$ ）组成，化学成分主要是铝或镁硅酸盐^[1]。黏性土则是由黏性泥沙颗粒为主组成的集合体。其中，伊利石、蒙脱石、高岭石和绿泥石又是最主要的黏土矿物。

随着泥沙颗粒的不同，泥沙运动特点有着质的区别。对于较粗泥沙而言，泥沙颗粒较大，泥沙以单颗粒运动为主，而对于较细泥沙而言，颗粒间存在着絮凝作用，泥沙颗粒之间容易形成絮团，而以絮团形式运动。所以黏性泥沙和非黏性泥沙的划分又以是否发生絮凝作为分界线。钱宁和万兆惠^[1]根据 Mignio 和黄河水利委员会水利科学研究所的工作，把发生絮凝的上限取为 0.01mm 。Meththa 和 Lee^[2] 认为黏性泥沙和非黏性泥沙的分界粒径可取为 0.02mm ，张德茹和梁志勇^[3] 则根据试验数据指出，对于天然沙，大于 0.03mm 的泥沙颗粒絮凝作用不明显。张志忠^[4] 对长江口细颗粒泥沙的研究进行了总结，建议把 0.032mm 作为划分粗颗粒与细颗粒两种不同性质泥沙的界限。

事实上影响絮凝现象的因素是很多的，水体中电解质浓度的高低，直接决定了絮凝现象是否明显。在河流中，由于水体中的含盐量低，粒径小于 0.01mm 的泥沙颗粒才发生很明显的絮凝现象；而在河口海岸地区，水体中含盐量较高，粒径为 0.03mm 的泥沙颗粒就可发生明显的絮凝现象。因此，对

于不同的水质和泥沙种类,絮凝的临界粒径可取为 $0.01\sim 0.03\text{mm}$,具体数值应由当地泥沙和水体环境条件而定。

同时在讨论非均匀泥沙的运动规律时,人们习惯于用泥沙的中值粒径来代表泥沙的特性。实际上在考虑非均匀沙的特性时,需要考虑泥沙整体中细颗粒的含量。具体到河流泥沙中,就是要考虑黏性细颗粒泥沙在泥沙群体中所占的比例。因为即使泥沙的中值粒径大于 0.03mm ,当泥沙群体中含有一定比例的细颗粒泥沙时,泥沙的沉降和在床面上的起动冲刷也更多地表现为细颗粒黏性泥沙的特征,而不是表现为中值粒径所代表的非黏性沙特征。这种现象说明,含有一定数量细颗粒黏性泥沙的混合沙也会发生絮凝,形成一定的结构,表现出与黏性泥沙相似的性质。因此,考虑实际环境下的非均匀沙运动特性时,应该把它作为非黏性沙还是黏性沙看待,不能只以其中值粒径作为依据,而必须根据泥沙是否运动形式不同,泥沙颗粒是否形成一定结构来判断。

由此可见,要想严格区分黏性泥沙与非黏性沙是比较困难的,在本书中所研究的黏性泥沙主要是指含有一定细颗粒泥沙,在天然水体中泥沙颗粒淤积固结后存在一个密实过程,并且淤积固结后在水流作用下难以起动和冲刷的细颗粒泥沙,因此,本书所定义的黏性泥沙范围是比较广泛的。

二、黏性泥沙的物理化学特性

黏性泥沙颗粒细,比表面积大,重量轻,颗粒表面存在一定的物理化学作用,有时甚至超过了颗粒自身的重力作用。所以黏性泥沙的物理化学作用常对它在水流作用下的起动、冲刷、输移、沉积有着十分重要的作用。

(一) 双电层及吸附水膜

黏性泥沙颗粒在含有电解质的水中会发生两种可能:一是电解质的离子中有一种离子能吸附在泥沙颗粒表面;二是泥沙颗粒表面的分子发生离解,把某种符号的离子释放到水中,而异号离子则留存在颗粒表面。不论哪种情况,都使泥沙颗粒表面带有一定符号的电荷。泥沙颗粒表面总是带有负电荷,由于电荷的静电吸引作用,异号离子分布在颗粒周围的水中,形成图 1-1 所示的双电层或反离子层^[1]。

颗粒表面的电荷不仅吸引异号离子,也吸引水分子。水分子是由位于等腰三角形底角的两个氢原子(H^+)和一个位于顶角的氧原子(O^{2-})所构成的偶极体。这样的偶极体可以为静电引力所吸引。在泥沙颗粒表面负电荷的作用之下,使靠近颗粒表面的水分子失去了自由活动的能力而整齐地、紧密地排列起来,这被称为黏结水。颗粒表面作用于黏结水的吸引力约 1 万个大气压。在这样大的压力下,黏结水的密度达到 $1.2\sim 2.4\text{g/cm}^3$ 。由这样紧密地挤压在一起的水分子组成的黏结水,在力学性质上与固体物质完全相同,具有极大的黏

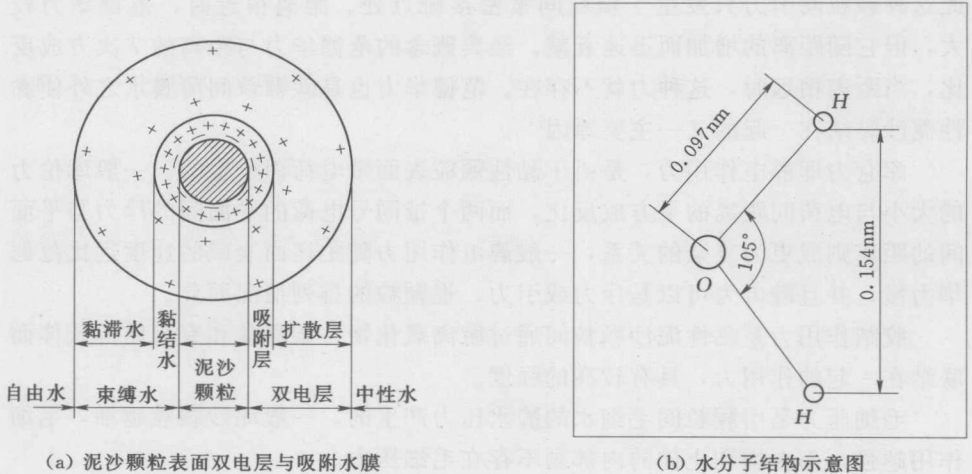


图 1-1 泥沙颗粒表面结构示意图

滞性、弹性和抗剪强度。它也没有传递静水压力的能力。围绕在黏结水外面的水分子虽然也受到静电引力场的作用，但距离颗粒表面的距离愈远，静电引力场的强度愈小，水分子所失去的自由活动的能力也愈少，而且排列得比较疏松，不整齐，仅有轻微的定向。这部分水被称为黏滞水。黏滞水的密度虽没有黏结水那么大，但仍大于普通液态水，为 $1.3 \sim 1.74 \text{ g/cm}^3$ ，也具有较高的黏滞性和抗剪强度，不能传递静水压力。黏结水和黏滞水统称为束缚水，两者的区别在于是否能在水力或电场作用下发生相对于泥沙颗粒表面的移动。束缚水外面的水分几乎不再受静电引力的作用，保持着原有自由活动的能力，称为自由水。黏结水和它所含的离子与颗粒表面组成了双电层的内层（吸附层），黏滞水和它所含的离子则组成了双电层的外层（扩散层）。

对于黏结水和黏滞水，其水分子部分地或全部地失去自由活动能力，在颗粒周围形成了一个水膜；此膜称为吸附水膜。吸附水膜是泥沙颗粒与水相互作用的产物，从力学性质上看，是固态相与液态相的过渡类型。吸附水膜的厚度主要取决于颗粒的矿物成分和水的化学成分，其厚度一般为 $0.1 \mu\text{m}$ 数量级。对于粗颗粒泥沙，水膜所占容积远小于泥沙的体积，作用不大；对于细颗粒泥沙，特别是粒径在 $1 \mu\text{m}$ 以下的泥沙来说，情况就不一样，当颗粒间薄膜水接触时同时也产生了黏结力，此时吸附水膜不但和泥沙颗粒不可分离，而且重要性超过了泥沙颗粒，这就是极细的泥沙颗粒的性质常因矿物组成和水中电解质的改变而有很大的不同的缘故。

（二）颗粒表面的主要作用力

范德华力是分子间的引力，力的作用范围很小，只有几个分子的距离，因

此这种颗粒间引力只发生于颗粒间紧密接触点处。距离很近时,范德华力较大,但它随距离的增加而迅速衰减。经典概念的范德华力与距离的7次方成反比,当距离稍远时,这种力就不存在。范德华力也是除颗粒间薄膜水之外使黏性泥沙黏结在一起的又一主要原因^[1]。

库仑力即静电作用力,是由于黏性颗粒表面带电荷而产生的。一般库仑力的大小与电荷间距离的平方成反比,而两个带同号电荷的平面间的斥力与平面间的距离则成更为复杂的关系,一般静电作用力随距离而衰减的速度远比范德华力慢,并且静电力可以是斥力或引力,视颗粒的排列情况而异。

胶结作用力是黏性泥沙颗粒间通过游离氧化物,碳酸盐和有机质等胶体而联结在一起的作用力,具有较高的强度。

毛细压力是由颗粒间毛细水的静水压力产生的,一般泥沙颗粒越细,毛细作用越强,而在饱和土体的内部则不存在毛细压力。

第二节 黏性泥沙淤积固结机理

黏性泥沙淤积到河床后,将逐渐固结压密,水分逐渐排出,并且这种淤积固结作用可延续很长时间,所以黏性泥沙的淤积固结特性会随淤积历时而变化。相应地,黏性泥沙淤积固结后具有的密度、黏结力、抗剪强度也将不同,它们抵抗水流冲刷的能力也将大不一样。

首先由于絮凝作用,黏性泥沙在淤积固结过程中将形成不同的团聚结构。开始细颗粒泥沙在沉积到底部时形成的淤积物是一个高度蜂窝状的结构,孔隙比很大,含水量很高,密度很低,如图1-2(a)所示,这样的淤积物具有很低的抗剪强度或黏结力。在自重或其他外力作用下,最脆弱的集合体与集合体之间的联结将首先破裂或变形,网状结构逐渐消失,淤积物成为以絮团集合体为基本单元的较为密实的平衡状态,这样的淤积物具有一定的密度和黏结力,如图1-2(b)所示。进一步固结时,絮团之间的联结将破坏,絮团集合体的形式不复存在,许多絮团重叠排列成层,但絮团之间还有孔隙,如图1-2(c)所示。如淤积物再进一步固结,使絮团间孔隙消失,整个淤积物的密度等于絮团的密度,淤积物成为颗粒密集排列的均匀结构,淤积物具有很高的密度和黏结力,如图1-2(d)所示。

另外,黏性泥沙在床面上淤积以后,具有初期干密度 γ'_0 ,或相应的初始孔隙比 e_0 ,初期含水量高,淤积物孔隙都被水所充满,所以从土力学的角度来看,黏性泥沙的淤积固结过程又属于饱和土的固结压密过程。土力学^[5-7]指出,土的压缩性主要有两个特点:一是土的压缩固结主要是由于孔隙体积减小而引起的,对于非饱和土,土是有固、液、气三相组成,而对于饱和土,土是

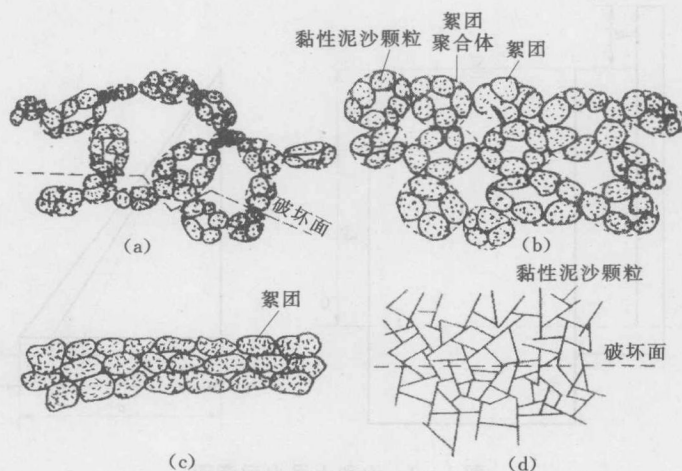


图 1-2 黏性泥沙在淤积固结过程中形成的不同结构

由固液两相组成的，在工程上一般的压力（100~600kPa）作用下，固体颗粒和水本身的压缩量非常微小，可不予考虑，所以在饱和土中水在压力作用下会沿着土中孔隙排出，从而引起土体体积减小而发生压缩；二是由于孔隙水的排出而引起土的压缩，对于饱和黏性土来说是需要时间的，这是由于黏性土的透水性很差，土中水沿着孔隙排出速度很慢。

当黏性泥沙淤积固结压密时，由于在横断面中既有孔隙水占的面积，也有土骨架粒间接触面积，因此应力分为两部分：一部分作用在孔隙水上，称为孔隙水压力；另一部分作用在淤积物土骨架粒间上，称为有效应力。前者的作用是排出孔隙水，后者压缩土骨架。孔隙水将向上排出时流动状态属于层流，服从达西定律。另外，土骨架所受压力 σ' 与变形之间的关系为最简单的线性压缩关系。忽略粒间接触面积占所研究平面的面积之比后，孔隙水压力 P 和土骨架应力之间满足：

$$\sigma = \sigma' + P \quad (1-1)$$

这就是土力学里面著名的有效应力原理。它表明当总压力 σ 保持不变时，孔隙水压力 P 与有效应力 σ' 可以相互转化；随着时间的增长， P 减小， σ' 增加。

考虑淤积物稳定向上渗流，绘制饱和土受力示意图，如图 1-3 所示。

韩其为对淤积物淤积固结过程和作用的受力分析进行了推导^[8]。如在截面 0—0 上，孔隙水压力为：

$$P = \gamma(h_1 + h_2 + h) \quad (1-2)$$

总压力为：

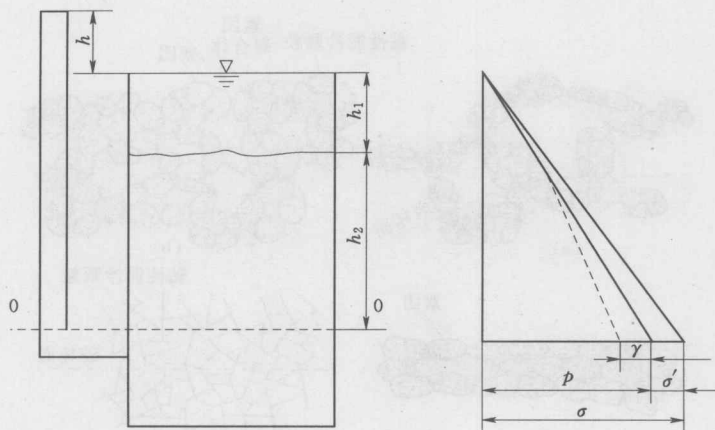


图 1-3 饱和土受力示意图

$$\sigma = \gamma h_1 + \gamma_m h_2 \quad (1-3)$$

式中: γ 为水的容重; γ_m 为淤积物的饱和容重。

将式 (1-2)、式 (1-3) 代入式 (1-1) 得土骨架有效应力:

$$\sigma' = (\gamma_m - \gamma)h_2 - \gamma h = \Delta h_2 - \gamma h = \Delta h_2 - u \quad (1-4)$$

此处:

$$\Delta = \gamma_m - \gamma$$

为淤积物的浮容重, 而:

$$u = \gamma h \quad (1-5)$$

为超静孔隙水压力。由式 (1-2) 看出, 当孔隙水静止, $P = P_0 = \gamma(h_1 + h_2)$, 可见只有超静水压力才使孔隙水发生渗透。

所以淤积物的淤积固结过程和作用可以归纳为以下几点: ①淤积物密实过程就是土骨架的压缩与孔隙水流出的过程; ②孔隙水的渗透仅决定于超静水压力 u , 与淤积物顶面以上水深无关; ③压实土骨架的有效应力, 为所考虑断面以上的单位面积淤积物浮重 Δh_2 和超静水压力之差, 同样不受淤积物顶面以上水深的影响; ④从超静水压力与有效应力之和为单位面积淤积物的浮重看出, 在淤积物刚下沉时, 可能 $\sigma' = 0$, 此时 $u = \Delta h_2$, 至最后, $u = 0$, $\sigma' = \Delta h_2$, 即全部浮重为土骨架承受, 压密也就终止。

再分析固结过程中土体内聚力的变化过程, 在固结过程中, 黏性泥沙内的水在不断地往外排出, 图 1-3 反映颗粒间的联结也慢慢受削弱或破坏, 颗粒相互之间也越来越紧簇, 导致干密度也越来越大, 按照现有研究成果, 土体内聚力 C 与土体含水量与黏性颗粒含量的比值 m 及干密度 γ' 满足如下关系式:

$$C = \begin{cases} < 5.0, & m \geq 1.33 \\ (-33m + 44) \times (3.75\gamma' - 4.32), & m < 1.33 \end{cases} \quad (1-6)$$

即在固结过程中,对于已淤积好的泥沙,黏性颗粒含量一定,随着含水量的减少, m 越来越小, γ' 越来越大(含水量的减少也导致 γ' 增大),故 C 越来越大,也就是说随着固结过程的延长,淤积物越来越难冲刷。

此外,从胶体化学角度看^[9,10],黏性细颗粒泥沙在水中形成的浑浊液是一种不稳定体系,它不断减少其颗粒表面自由能,从而达到稳定状态的趋向。减少表面自由能的主要方式是不断地聚集小颗粒成为大“颗粒”,乃至形成团块。固液两相体系中的固相微粒以聚集方式缩小其表面积,从而减小其表面自由能是自然界中相当普遍的现象。从黏性细颗粒浑水到各种有机物和无机物的胶体溶液,甚至到微小的水滴也是如此。例如,雾滴常常凝结成较大的水珠,就是为了减少其表面自由能。

而使浑浊液发生聚集或絮凝的微观动力是颗粒间范德华力形成的吸引势能,布朗热运动能和重力能。当黏性细颗粒粒径小到 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mm 数量级时,吸引势能对颗粒动力特性的影响比后两者高出 $2 \sim 3$ 个数量级^[11]。此外,阻碍聚集作用的是颗粒间双电层重叠引起的斥力势能。但是一般斥力势能仅当颗粒距离非常小时才构成阻碍聚集的势垒。同时从絮凝沉降到淤积物密实的过程,也是泥沙颗粒相对位置由高到低的过程,因而也是体系的重力势能和整体表面自由能分别趋于最小的过程。

所以宏观上黏性泥沙的淤积固结过程和作用就是使淤积物骨架压密和孔隙水流出,最终使淤积物形成一定的稳定结构,在这个过程中淤积物体积缩小,同时含沙量增加;微观上黏性泥沙的淤积固结过程和作用又是淤积物体系中物理化学作用过程。实际中黏性泥沙的淤积固结过程和作用是相当复杂的,首先淤积物形成的结构通常不是单一的结构,而是呈多种类型的综合结构,这些结构形式又受泥沙颗粒的级配和矿物组成、水环境条件等诸多因素的影响。故目前合理考虑黏性泥沙的淤积固结过程和作用还存在下述困难:缺乏淤积物一定结构和淤积物团粒间相互作用的力学关系的研究;一些影响因素还很难进行定量表达,在变化环境下更难确定物理化学作用的影响尺度和范围。

而通常认为黏性淤积物容重是黏性泥沙从絮凝、沉降到压密整个淤积固结过程的终极结果,能够综合反映淤积物淤积固结过程和作用的综合指标。因此在很多研究中根据淤积固结后淤积物容重的不同,将黏性泥沙淤积物分为浮泥($\rho_s < 1.2 \text{ t/m}^3$)、淤泥($\rho_s < 1.6 \text{ t/m}^3$)及固结黏土($\rho_s > 1.6 \text{ t/m}^3$),以此来研究黏性泥沙淤积固结后在其运动规律上的不同^[12]。

第三节 黏性泥沙沿程分选规律

挟沙水流沿河道的演进过程是水流能量的变化过程,沿程变化的水流能量与河床阻力相互作用,使河床的物质组成在不同位置表现出不同的组成特点,即河床物质组成沿程是变化的,对于一定范围内较稳定的河床,其物质组成的沿程分布是有规律的。王世强^[13]对天然冲积河流的床沙中数粒径的沿程分布规律有所研究,得出如下的变化规律:

$$D_x = D_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1-7)$$

式中: D_0 为上游起始断面的床沙中数粒径; D_x 为 x 断面的床沙中数粒径; x 为离起始断面的距离; α 为粒径沿程减细系数。

于淑云^[14]在王世强的基础上通过理论分析与实测数据统计、计算分析相结合的方法得出了红山水库床沙 D_{50} 的沿程分选规律。

河流上水利工程的兴建,改变了河流的自然形态,河流物质组成与沿程分布也随之改变,故其分选规律与天然河道存在差别,于淑云的研究也说明了这一问题。

为了进一步研究床沙沿程分选的规律,在试验水槽里面做了不同淤积方式(静水淤积和动水淤积)下,床沙的沿程分选规律,试验在图 1-4 所示的模型里面进行。试验沙为天然沙,级配见图 1-5,中径为 0.072mm,淤积方式均采用水库加沙并用高扬程潜水泵搅拌,之后通过水泵将挟沙水流送入水槽,使泥沙自然淤积,淤积过程流量控制在 $80\text{m}^3/\text{h}$,淤积时间为 1h,动水淤积时还需控制闸门开度为 3.00cm。

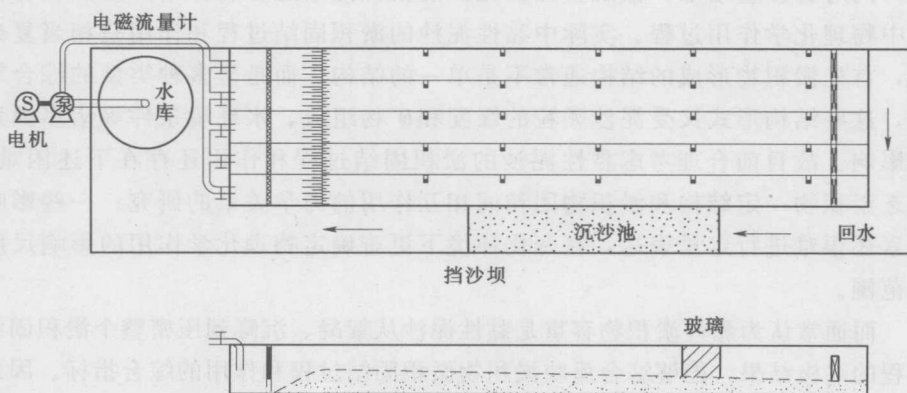


图 1-4 试验模型整体平面布局图

试验共完成 19 组,分别是动水固结 1d 5 组、动水固结 3d 5 组、动水固结

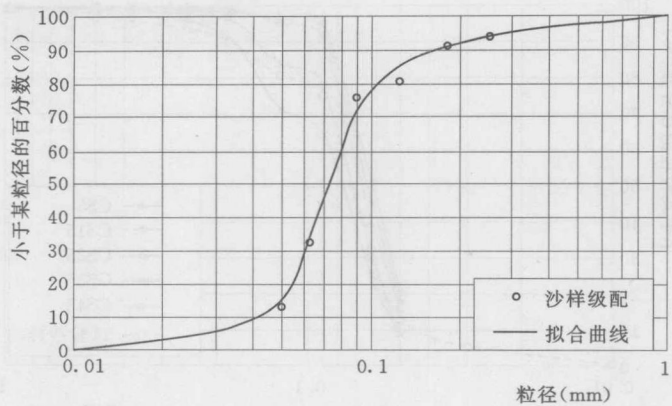


图 1-5 试验沙样粒配曲线

9d 6 组、静水固结 9d 1 组、动水固结 27d 1 组、动水固结 300d 1 组。按照试验要求的不同以及试验的实际情况（无法控制淤积后的原始比降相同），试验分两大部分：不同的淤积固结历时、不同初始比降以及相同历时下不同比降分别在相同的条件下对其进行冲刷。

试验测得的是一系列地形数据、断面流速数据、水位数据、水温数据等。

试验中每组在不同断面（CS5、CS15、CS25、CS35、CS43）取五个样本进行筛分分析，各断面到闸门的距离见表 1-1。

断面号	CS5	CS15	CS25	CS35	CS43
距闸门里程（cm）	70	220	370	520	565

对各种情况下的样本进行筛分，得出的试验结果如图 1-6～图 1-10 所示。

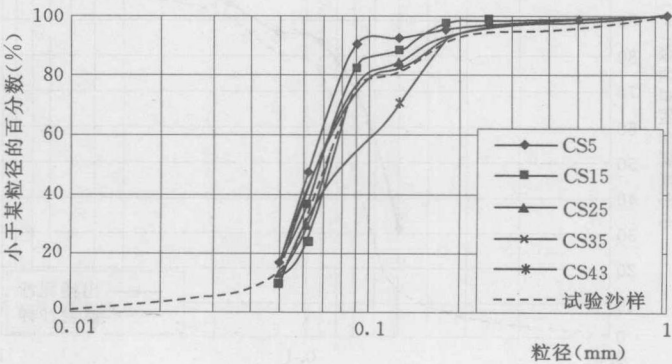


图 1-6 静水沿程分选规律

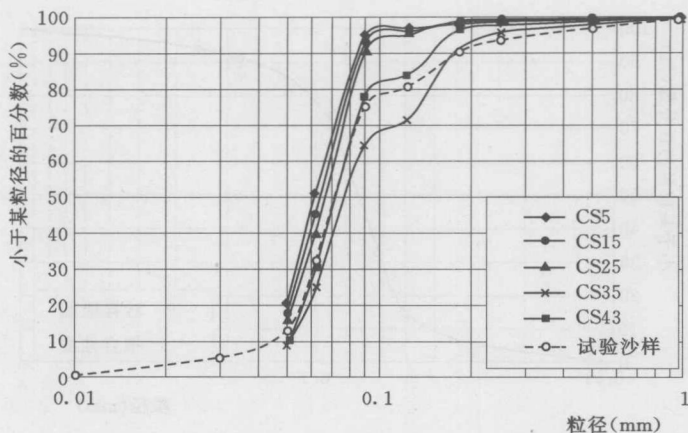


图 1-7 动水沿程分选规律

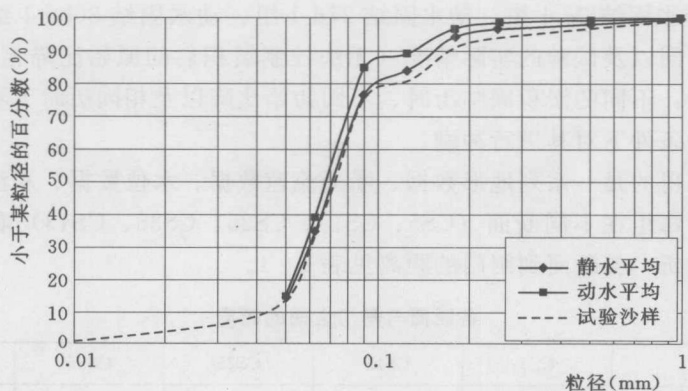


图 1-8 静水、动水平均粒径沿程分选比较

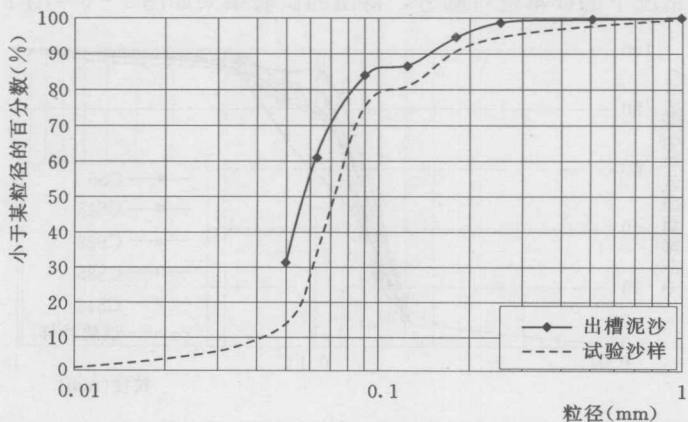


图 1-9 动水淤积出槽泥沙平均粒径与试验沙样比较