

高等学校试用教材

水 力 学

下 册

天津大学水力学及水文学教研室 编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教材

水 力 学

下 册

天津大学水力学及水文学教研室编

人 民 教 育 出 版 社

内 容 介 绍

本书是根据一九七八年一月教育部委托召开的高等学校工科基础课水力学教材会议讨论的《水力学》(港口与航道专业)教材的编写大纲编写的。全书分上、下二册出版。上册内容包括:绪论,水静力学,水动力学基础,液体运动的水流阻力及水头损失,有压管道、孔口及管嘴的恒定流,船闸输水系统的水力计算,河渠水流等。下册内容包括:水流中泥沙运动的基本原理,堰、闸出流及上下游水流衔接和消能,地下水渗流,波浪理论基础,相似理论及水力模型试验。本书各章均选编了一定数量的习题和例题,并附有水力学计算中的常用图表。本书适用于港口航道专业,也适用于海洋石油建筑专业,并可供有关专业工程技术人员参考。

高等学校试用教材

水 力 学

下 册

天津大学水力学及水文学教研室编

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

通 县 满 庄 装 订 厂 装 订

*

开本 850×1168 1/32 印张 11.625 插页 1 字数 280,000

1980年10月第1版 1982年2月第2次印刷

印数 5,501—9,000

书号 15012·0284 定价 1.20 元

目 录

第七章	水流中泥沙运动的基本原理	1
§ 7-1	概述	1
§ 7-2	泥沙的特性	2
§ 7-3	泥沙运动的形式	8
§ 7-4	泥沙的起动	11
§ 7-5	沙浪运动	23
§ 7-6	推移质运动	26
§ 7-7	悬移质运动	31
第八章	堰、闸出流及下游水流的衔接和消能	45
§ 8-1	堰流	45
§ 8-2	闸孔出流	76
§ 8-3	水工建筑物下游水流的衔接和消能	88
第九章	地下水渗流	110
§ 9-1	概述	110
§ 9-2	渗流特征和渗流的基本定律	113
§ 9-3	地下水的均匀流和非均匀渐变流	117
§ 9-4	土坝的渗流计算	127
§ 9-5	渗流场问题的理论基础	135
§ 9-6	井的渗流	142
§ 9-7	渗流问题的解析法(精确解法)	152
§ 9-8	渗流问题的近似解法	168
§ 9-9	水电比拟法	182
§ 9-10	非均质土壤和各向异性土壤中的渗流	190
第十章	波浪理论基础	196
§ 10-1	概述	196
§ 10-2	拉格朗日形式的液体连续性方程和理想液体的运动方程	199

§ 10-3	势波 概念	204
§ 10-4	波高微小的进行波	209
§ 10-5	波的叠加	224
§ 10-6	有限振幅的势波	228
§ 10-7	有限振幅的摆线波	251
§ 10-8	波浪的破碎现象及破碎水深(临界水深)	268
§ 10-9	有限振幅的立波	274
§ 10-10	作用在直墙上波浪力的计算	283
§ 10-11	作用在孤立构筑物上的波压力	289
第十一章	相似原理及水力模型试验	334
§ 11-1	概述	334
§ 11-2	相似的基本概念	335
§ 11-3	动力相似的基本准则——牛顿相似定律	337
§ 11-4	在各种力作用下的相似准则	338
§ 11-5	水动力现象的相似	340
§ 11-6	量纲(因次)分析及 π 定理	343
§ 11-7	水力模型试验	349
附录 I	工程单位制与国际单位制的换算关系	367
附录 II	建筑物下游出水河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图(见插页)	

第七章 水流中泥沙运动 的基本原理

§ 7-1 概 述

在河渠水流中,常常伴有泥沙运动。河流泥沙主要来自流域,通过地表冲蚀、沟壑冲刷,巨量的土壤进入小溪山涧,再汇集于江河之中。我国河流含沙量很大,例如黄河陕县站多年平均含沙量约为 36.9 公斤/米³*, 其多年平均输沙量竟达 15.7 亿吨。如此巨大的含沙量是造成几千年来黄河泛滥成灾的主要原因。我国另一条大河——长江,年平均含沙量在宜昌站约为 1.18 公斤/米³,与黄河相比,可算为清水河道,但由于长江水量丰沛,宜昌站的多年平均输沙量仍达 5.2 亿吨之多,从而使沿河湖泊淤积严重、航槽变迁,河口泥沙的淤积更严重地威胁着上海港的应用。由此可见,由于泥沙问题处理不当将给国民经济和人民生活带来危害。但是事物总是一分为二的,水流挟带泥沙在国民经济上也产生了一系列积极的作用,例如泥沙可作为工程建筑材料,在引水淤灌、改良土壤中,泥沙都可发挥积极兴利的作用。

长期以来,人类为了开发水利资源、防洪以及工农业生产的用水,兴建了许多水利枢纽;为了保证航道的通行无阻,进行了大量的治河工程,还修筑了许多港口、码头。这些水利工程都在国民经济建设中发挥了重大的作用。

但是在天然河流及海湾中,长期以来,水流与河床及海湾已经

* 系工程制单位(本章均采用此单位),关于工程制单位与国际制单位的换算关系见附录 I。

取得了相对的平衡和稳定,而兴修了水利工程之后,就破坏了这一平衡,就会使水流与河床(或海岸)重新调整,取得新的平衡。例如,兴建水库会引起水库的淤积和下游河床的冲刷;整治航道会引起河床的演变;修筑港口、码头会引起回淤等。总之,在调整过程中将产生一系列复杂的挟沙水流运动过程。前面各章已详细地介绍了水流运动方面的规律,本章仅就明渠水流中的泥沙运动基本规律作一扼要介绍,为今后进一步学习水流和河床运动发展的规律打下基础。

明渠水流中的泥沙运动是两相流体运动,比之清水(一相流体)运动更为复杂,但并不是不可掌握的,远在 2000 年前,我国劳动人民就成功地建成了取水防沙工程——都江堰。到今天我们已初步驯服了黄河这条千年来危害人民的害河,在黄河上修建了一系列发电、防洪、灌溉、引水工程,证明广大劳动人民在长期与泥沙的斗争中已经认识和掌握了部分泥沙运动的规律。但同时也应该承认,生产中所遇到的许许多多泥沙问题,我们现在的认识水平还不能完全解决。因此,我们的任务应当是,从实践中及时总结经验,力求较为全面和深入地掌握水流中的泥沙运动规律,尽可能地减轻或避免其消极有害的一面,充分发挥它的积极兴利作用。

§ 7-2 泥沙的特性

研究泥沙运动,必须首先了解泥沙的基本特性。泥沙的特性可以分为几何特性、重力特性及水力特性。

一、泥沙的几何特性

泥沙的几何特性系指泥沙颗粒的形状、大小等。泥沙颗粒的形状并非都是球体,有长的、扁的,尤其是细颗粒泥沙的形状很不规则,多棱多角。但为了简化理论分析,通常不考虑泥沙颗粒的形状因素,而只采用一个表示大小的线性尺度叫做“颗粒直径”来代

表泥沙颗粒的几何特征。所谓颗粒直径[又简称粒径,符号为“ d ”,单位为毫米(mm)或厘米(cm)],一般实际上系指筛分法所用筛的孔径的大小,具有这一粒径的泥沙颗粒刚刚能通过这个孔径。显然,吻合于这一个孔径的颗粒是可以有各式各样的形状的,而其中只有真正的球状颗粒才具有这个名符其实的“直径”。由于标准筛最小的孔径是 0.625mm,对于 $d < 0.625\text{mm}$ 的泥沙颗粒则要用泥沙颗粒在静水中均匀沉降的速度来测定粒径,这样测定的粒径又称“沉降粒径”,它与前面用筛分法定义的粒径是有所区别的。所谓“沉降粒径”系指在同一液体中,与泥沙颗粒比重相同并具有同一沉降速度的圆球直径。

粒径的大小,是泥沙的一个重要特性,一方面它代表了颗粒的粗细程度,反映了不同的物理力学作用;另一方面,当颗粒很细时,还反映了物理化学作用。如对粗颗粒泥沙($d > 0.1\text{mm}$),一般都呈散粒体状,在静水中下沉,粒径越大,沉速越大,属一般物理力学问题;但是当颗粒很细时($d < 0.05 \sim 0.01\text{mm}$),则具有粘性,由于泥沙表面面积增大,产生了物理化学反应而形成了絮凝结构,泥沙不再以单个散粒体下沉,而是以集体形式下沉,在一般挟沙水流中,虽然粒径变细了,但因成团下沉,反而加大了沉速。

水流和河床中的泥沙,并不是大小均一的,而有大有小,由许多大小不等的颗粒组成,通常用泥沙的粒配(或级配)曲线来表示,如图 7-1。

从粒配曲线可以看出粒径的相对大小和均匀程度,在研究泥沙运动规律中,可以把一定级配的泥沙按其大小不同分别处理,而通常多采用粒配曲线中的某一特征粒径来综合反映泥沙运动的特性,常用的特征粒径有中值粒径 d_{50} ,它是在粒配曲线上纵坐标为 50% 处所相应的粒径,表示粒径小于或大于 d_{50} 的泥沙重量各占沙样总重量的一半,如图 7-1 中的 d_{50} 分别为 0.099mm 和 0.0155

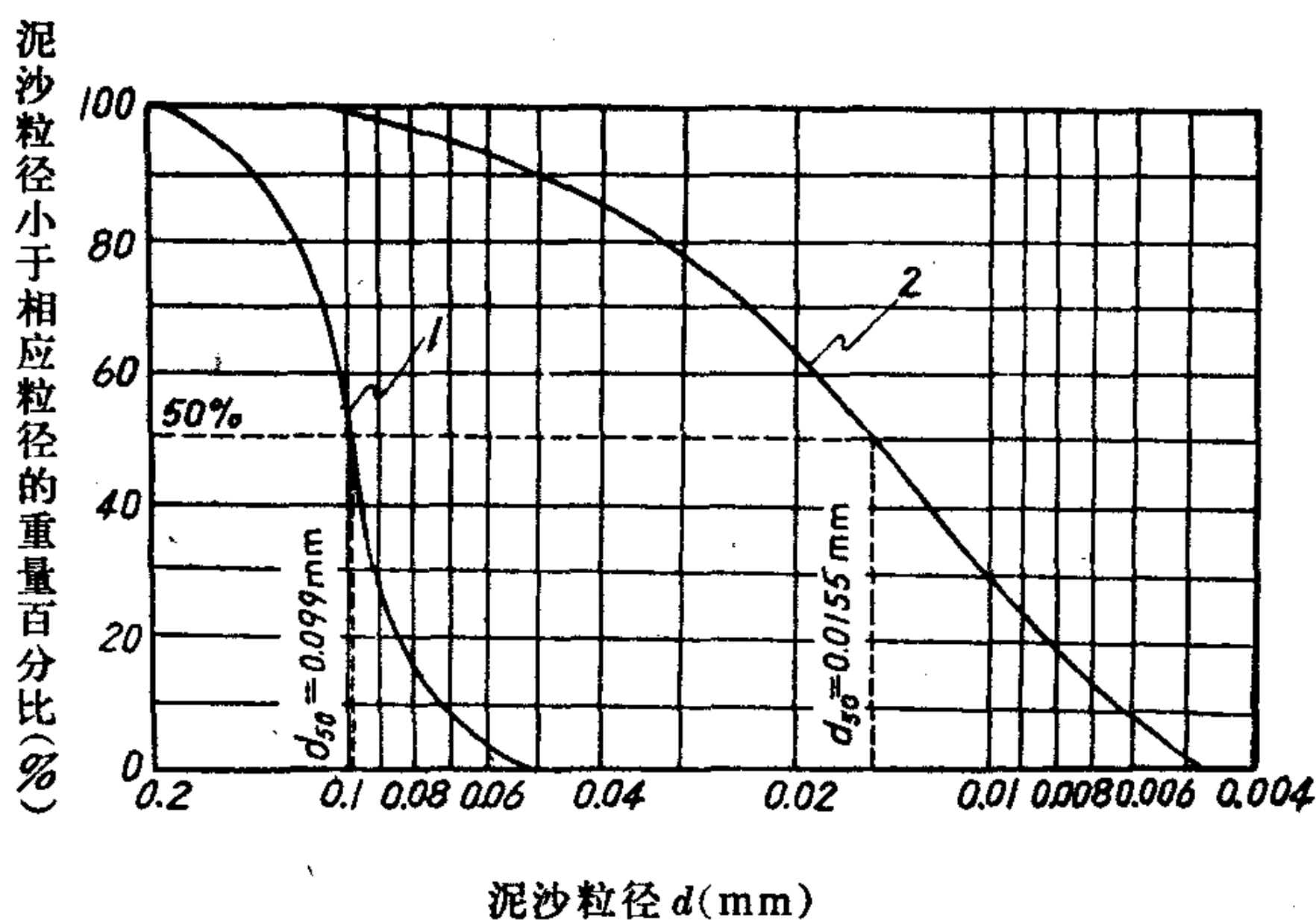


图 7-1

mm。此外也有用算术平均粒径的，符号为 d_m 。平均方法各有不同，如以下所采用的加权平均方法，即将沙样按粒径大小分成若干组，则整体沙样的平均粒径为

$$d_m = \frac{\sum \Delta p_i d_i}{100} \quad (7-1)$$

式中： Δp_i 为粒径为 d_i 级的沙粒重量，占整体沙样总重量的百分数；

d_i 为每组泥沙的上、下限粒径的平均值。

$$d_i = \frac{1}{2} (d_{\max} + d_{\min})$$

或
$$d_i = \frac{1}{3} (d_{\max} + d_{\min} + \sqrt{d_{\max} d_{\min}})$$

二、泥沙的重力特性

重力特性就是单位体积内泥沙的重量，简称容重，常用符号为 γ_s ，工程单位为吨/米³(t/m³)或公斤/米³(kg/m³)。由于构成泥沙的岩石成分不同，泥沙的容重 γ_s 也不尽相同，但一般变化不大，可考虑为一常数，在生产实践中常取 $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$ 。

三、泥沙的水力特性

水力特性就是泥沙在静水中的均匀沉降速度,叫做水力粗度,也叫沉速,符号为 ω ,单位为 cm/s 。水力粗度 ω 反映泥沙颗粒在水中运动的综合特性,是标志泥沙运动特征的一个重要物理量,也是泥沙运动最简单、最基本的规律。

泥沙颗粒在静水中下沉,颗粒周围的水流绕流状态和颗粒所受阻力特性与第三章中提到的球体的绕流情况类似。实践证明,泥沙颗粒的沉降规律,在不同流态下是不同的,下面将分别加以讨论。

1. 层流状态:当沙粒雷诺数 $\text{Re} = \frac{\omega d}{\nu} < 0.5$ 左右,为层流状态。这时泥沙下沉所受阻力可用第三章中的斯托克斯公式来计算,即

$$F = 3\mu\pi\omega d \quad (7-2)$$

式中: F 为阻力;

μ 为液体动力粘滞系数;

d 为泥沙颗粒直径;

ω 为沉降速度。

将上式改写为一般阻力公式的表达形式

$$F = C_D \frac{\pi d^2}{4} \gamma \frac{\omega^2}{2g} \quad (7-3)$$

在层流状态下,阻力系数 C_D 与沙粒雷诺数 Re 成反比,可按式(3-89)计算,即

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (7-4)$$

粒径为 d 的泥沙在水中的重量为 W

$$W = \frac{\pi}{6} d^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (7-5)$$

式中: γ_s 和 γ 为泥沙和水的容重。

泥沙颗粒在下沉开始时,重力大于阻力,泥沙呈加速运动,而水流对泥沙的阻力也不断加大,经过一定距离,当阻力和重力相等($F=W$),泥沙即以匀速运动向下沉降,这时的泥沙下沉速度叫做沉速 ω 。联立式(7-2)和(7-5),可得层流状态的沉速公式为

$$\omega = \frac{g}{18\nu} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) d^2 \quad (7-6)$$

注意:当 $d > 0.076\text{mm}$ 时,司托克斯公式定律不能适用。

2. 紊流状态:当沙粒雷诺数 $Re > 1000$ 左右,为紊流状态,这时泥沙颗粒表面的粘性阻力与水流分离后所产生的形状阻力相比,可以忽略不计,且阻力系数与雷诺数无关,保持一个常数。当泥沙颗粒作匀速运动时,则 $W=F$,联解式(7-3)和(7-5)可以得到紊流状态沉速公式为

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d} \quad (7-7)$$

3. 过渡状态:雷诺数 $Re = 0.5 \sim 1000$,这时惯性力与粘滞力都不能忽略不计,要进行严格的数理分析就比较困难,只有借助于经验或半经验公式。我国沙玉清、窦国仁及武汉水电学院曾给出过有关的公式,都可以引用。

下面将沙玉清的泥沙粒径与沉速关系列于表7-1中,以便应用。

表 7-1 泥沙粒径与沉速关系表*

流区	粒径 $d(\text{mm})$	沉降速度 $\omega (\text{mm/s})$		
		$t=0^\circ\text{C}$	$t=10^\circ\text{C}$	$t=20^\circ\text{C}$
层 流 区	0.001	0.000379	0.000514	0.000667
	0.002	0.00152	0.00206	0.00267
	0.005	0.00946	0.0129	0.0167
	0.010	0.0379	0.0514	0.0667
	0.020	0.152	0.206	0.267
	0.050	0.946	1.29	1.67

* 摘自沙玉清,《泥沙运动学引论》,1965年。

续表

流区	粒径 $d(\text{mm})$	沉降速度 $\omega (\text{mm/s})$		
		$t = 0^{\circ}\text{C}$	$t = 10^{\circ}\text{C}$	$t = 20^{\circ}\text{C}$
过渡区	0.10	3.70	4.97	6.12
	0.20	12.3	15.30	17.90
	0.40	32.9	38.7	43.40
	0.60	54.3	62.6	69.2
	0.80	75.0	85.5	93.7
	1.0	95.2	107.0	117.0
	1.5	143	160	172
	2.0	190	205	205
紊流区	$d(\text{mm})$	$\omega(\text{mm/s})$	$d(\text{mm})$	$\omega(\text{mm/s})$
	2.5	229	7.0	383
	3.0	251	8.0	409
	3.5	271	9.0	435
	4.0	290	10.0	458
	5.0	324	15.0	561
	6.0	355	20.0	648

必须指出, 这里所提到的沉速计算公式和表 7-1 所列数值, 只是单个颗粒在清水中的自由沉降速度。实践表明, 水中含盐或泥沙时, 含盐量和含沙量都对沉速有影响。含盐量对泥沙沉速的影响主要表现在两方面。一方面是, 含盐量增大了盐水的密度和粘滞系数, 因而减小了泥沙的沉降速度; 另一方面, 盐水可以促使微细颗粒泥沙发生絮凝作用, 因而增大了细颗粒泥沙的沉降速度。在含沙浓度不大时, 泥沙颗粒在沉降过程中彼此影响很小, 可以视为自由沉降, 但是当含沙浓度较大时, 一方面由于浑水的密度和粘滞系数加大; 另一方面由于颗粒在沉降过程中互相影响, 使得沉降阻力增大, 沉降速度减小, 这样的沉降过程通常称为制约沉降, 其沉降速度称为制约沉降速度。试验说明, 制约沉降速度与含沙浓度有关, 含沙浓度愈大, 制约沉降速度愈小。

最后还应指出,这里谈的沉速是指静水中的沉速,至于它与动水中沉速的关系如何?则是当前正待进一步研究的问题。

§ 7-3 泥沙运动的形式

河流中运动着的泥沙,根据其运移状态及物理性质的不同,可分做推移质和悬移质两大类。

一、推移质与悬移质

1. 推移质与悬移质在运动状态上的不同

由于组成河床泥沙的粒径大小不同,它在河床上所处的位置以及水流的情况不同,在运动形式上就有沿床面滚动、滑动和跳跃前进等各种形式。这种在河底附近运动,而前进速度远远小于水流速度的泥沙称为推移质。其中滚动和滑动形式在运动中与河床保持接触又可称为接触质,为量并不很多;而以跳跃形式前进的泥沙,称为跃移质,是推移质的主要形式。

当流速超过一定数值,水流紊动加强,充满了大小不同的漩涡,当漩涡的尺寸比泥沙粒径为大,且漩涡的向上分速超过泥沙的沉速,这时泥沙在跳跃升起过程中,将被漩涡带离床面悬起进入主流区。这种悬浮在水流中,与水流基本上以同样速度前进的泥沙称为悬移质。

当流速继续增加,被悬起的泥沙也就愈多,可见推移质和悬移质之间并没有明显的界限。另外,从河底到水面,泥沙的运动是连续的,而且推移质和悬移质之间,悬移质、推移质与河床之间又都存在着不同的交换,也说明了这一点。但是由于推移质泥沙和悬移质泥沙的运动机理不同,将泥沙运动划分成推移质和悬移质还是很有必要的。

值得注意的是,当流速超过某一限度后,河床表层以下的泥沙,将作剪切运动,泥沙成层的移运或滚动,称为层移质。爱因斯

坦(H. A. Einstein)、钱宁、拜格诺(R. A. Bagnald) 在高流速试验条件下, 先后发现了层移质的存在。拜格诺通过试验首先提出了层移质在作剪切运动时, 在与剪切运动垂直的方向上将产生一个离散力, 支持推移质重量的正是这一离散力。

2. 推移质与悬移质在物理本质上的区别

(1) 运动规律的不同: 推移质与悬移质所遵循的物理规律是不同的, 推移质运动规律取决于泥沙跳离床面时的受力情况。而悬移质运动规律既与床面受力情况有关, 又与水流悬浮作用有关, 详见 § 7-6、§ 7-7。

(2) 能量来源的不同: 挟沙水流的能量主要由三部分组成, 一为水流的势能; 一为水流的紊动动能; 还有泥沙颗粒的势能。推移质运动直接消耗水流的能量, 水流中所损失掉的这部分能量又转化为颗粒的动能, 推移质含沙量愈大, 水流消耗的能量也愈大, 也就是水流承受的阻力愈大。而悬移质运动所需要的能量并不直接取自水流, 而是取自紊动动能, 紊动动能是水流势能转换为热能过程中的一种过渡形式, 是水流已经消耗掉了的能量的一部分, 因此有些学者认为, 对一般挟沙水流, 悬移质的存在并不增加水流的能量损失和阻力。

(3) 对河床作用的不同: 悬移质泥沙的重量是由漩涡动量在垂直方向上产生的力所支持, 悬移质的存在增加了水流的单位容重, 加大了水流的静水压力, 并一直可传递到河床颗粒孔隙间的水体。推移质在运动过程中, 颗粒不断碰撞, 颗粒相互间的动量交换产生相应的剪力, 在剪切运动垂直方向上有一离散力作用, 它支持了推移质的重量, 离散力通过颗粒, 最后传递到河床, 使河床受到一个向下的压力, 从而加大了河床的稳定性。

二、床沙质与冲泻质

河流中运动着的泥沙都来自流域土壤的冲刷, 但在进入河道

以后,水流所挟带的粗颗粒泥沙和河床中的泥沙经常发生交换,进入河段的这部分粗颗粒泥沙可以认为直接来自上游河段的河床,因此称为床沙质,床沙质虽只占输沙的一小部分,但是组成床沙的主体。细颗粒泥沙在进入河道以后,绝大部分常能一泻千里,一小部分沉降变成床沙,称为冲泻质。冲泻质占输沙的大部分,而在床沙中为量不多。值得注意的是床沙质和冲泻质中都包括有推移质和悬移质。山区河流中床沙往往由石块、大卵石组成,只有在特大洪水时才可能发生运动。而冲泻质的运动就相当于在固定河床上的泥沙运动,冲泻质的含量将随流域条件而异,可以处于不饱和状态。也就是说,在同一水流条件下,可以有不同的输沙率(单位时间通过河床断面的泥沙数量叫做输沙率),输沙率的大小将随上游含沙量而异。平原河流的床沙一般由砂或粉砂组成,细粉砂及粘土则为冲泻质。在正常水流条件下,河床也是可动的,对含沙量小的河流,床沙质输沙率主要取决于水流条件,而对多沙河流,床沙质输沙率则与水流条件和上游来沙量多少都有关。

为什么要把河流中的泥沙划分为床沙质和冲泻质?这是因为冲泻质输沙率主要决定于上游来沙量的多寡,那末用统计方法,依赖实测资料或经验关系即可确定输沙率。而床沙质输沙率主要决定于水流条件,可以通过力学关系建立挟沙能力公式来计算床沙质输沙率。因此在使用挟沙能力公式时要特别注意,一般由水槽试验获得的挟沙能力公式,由于试验条件的关系,通常只是床沙质的挟沙能力公式,不能用来计算通过天然河道的全部沙量。同样,从河流实测中得到的挟沙能力经验关系也不能用来计算流域条件极不相同的另一河道的输沙能力。

另外,从生产实践角度出发,在分析河床演变问题时,主要研究床沙质,这是因为粗颗粒泥沙容易下沉到床面参与造床作用。而冲泻质颗粒较细,多悬浮于水中而不下沉,参与河床演变的机会较

少。而在分析水库淤积的问题中,起主要作用的往往不是床沙质而是冲泻质,这是因为进入水库的泥沙,水流流速突然降低,虽然粗细泥沙颗粒都将先后落淤,但因冲泻质为河流输沙的主体,对水库寿命长短起主导作用。

那么,进一步的问题是如何区分冲泻质和床沙质?

一般根据河床泥沙粒配曲线来划分,将其中小于百分之十(或百分之五)以下的细颗粒泥沙划为冲泻质,其余的百分之九十(或百分之九十五)的较粗的泥沙划为床沙质,当床沙的粒配曲线在纵坐标 $<10\%$ 的范围内,有比较明显的拐点,也可取与这拐点相应的床沙粒径来区分床沙质与冲泻质。这两种区分方式都没有足够的道理,但生产实践中多采用之。

§ 7-4 泥沙的起动

天然河道的河床,除了少数岩石河床外,一般都由沙、淤泥、粘土等组成;山区河流的河床则多由卵石、砾石组成。这些组成河床的泥沙颗粒在不同的水流条件下,将由静止状态而进入运动状态,决定这一临界状态的水流条件称为泥沙的起动条件。泥沙起动条件的研究,在理论上,它是研究泥沙运动的前提;在实践上,是稳定渠道设计和河道治理中的一个重要依据。因此,弄清泥沙的起动条件是十分必要的。有关泥沙起动问题,国内外科学工作者曾作了大量的工作,对均匀沙和非粘性土的起动条件研究较多,也比较成熟。目前的研究多集中在不均匀沙及粘性土的起动条件。

停止在河床上的泥沙颗粒受到许多力的作用,如图

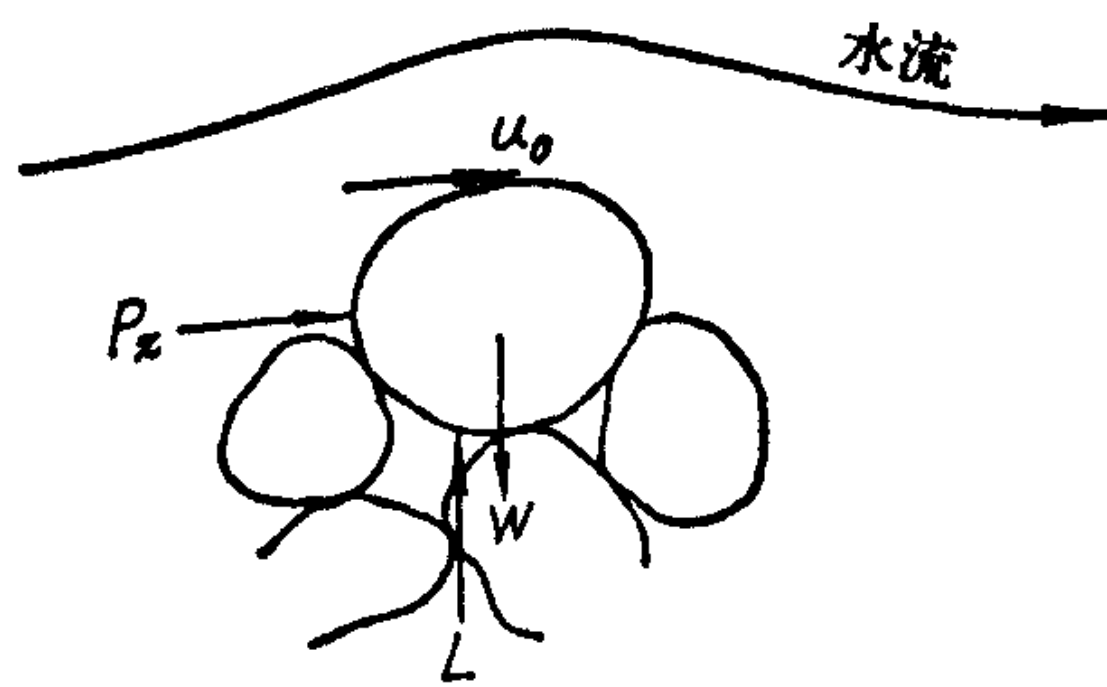


图 7-2

7-2, 当这些作用力(或作用力所引起的力矩)失去平衡时, 泥沙就起动了。

床面泥沙颗粒可能承受以下各种作用力:

(1) 重力——泥沙颗粒在水下的重量 W

$$W = (\gamma_s - \gamma) \alpha_1 d^3 \quad (7-8)$$

式中: α_1 为一系数

(2) 推移力(拖曳力)——水流在经过泥沙颗粒时, 发生绕流, 产生绕流阻力, 即推移力 P_x , 它对床面颗粒泥沙有推移作用。根据第三章中关于绕流阻力的讨论, 推移力 P_x 可表示为

$$P_x = C_D \frac{\pi d^2}{4} \gamma \frac{u_0^2}{2g} \quad (7-9)$$

式中: C_D 为阻力系数, $C_D = f_1 \left(\frac{u_* d}{\nu} \right)$;

u_0 为颗粒高度处的床面流速。

由于水流流速有脉动, P_x 也有脉动。

(3) 上举力——水流对床面不但有推移力的作用, 而且还有把颗粒举起的上举力的作用。这是因为在颗粒下面有缝隙, 水流对泥沙颗粒的不对称绕流和水流的竖向脉动而产生的。根据理论分析, 上举力 L 也可用与式(7-9)同样的关系式来表示, 即

$$L = C_L \frac{\pi d^2}{4} \gamma \frac{u_0^2}{2g} \quad (7-10)$$

式中: C_L 为上举力系数。

(4) 粘结力——对一般粗颗粒泥沙, 粘结力很小, 可以忽略不计。对细颗粒泥沙, 随着泥沙颗粒的减小, 粘结力则逐渐加强, 特别是粘土的粘结力就更大。通常所说的粘土中的粘结力是由许多不同性质的物理化学作用(如分子力、离子力、吸附力等)而引起的。根据对粘土的分析和试验研究证明, 影响粘结力的主要因素有土质结构、矿物组成、有机物质种类及其含量、抗水性能、密度、