

高等学校试用教材

桥 渡 设 计

西南交通大学 尚久驷编

中 国 铁 道 出 版 社

高等学校试用教材

桥 渡 设 计

西南交通大学 尚久驹编

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 0 年 • 北 京

内 容 简 介

本书根据铁道部1974年拟定的桥渡设计教学大纲编写而成。全书共分七章。书中扼要地介绍了河流的一般知识；根据现代水文计算理论，结合我国的自然特点，系统地介绍了铁路桥渡勘测设计的基本知识及水文计算方法；对桥头引线和导治结构也进行了简明的阐述。书中列有实例，以便读者应用。

本书系大专院校桥梁专业试用教材，也可供工程技术人员参考。

高等学校试用教材

桥 渡 设 计

西南交通大学 尚久驷编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：11.5 字数：285千

1980年3月第1版 1980年3月第1次印刷

印数：0001—5,500册

统一书号：15043·6216 定价：1.20元

目 录

前 言	1
第一章 河道水流和泥沙	1
第一节 河流的补给和水情	1
第二节 河道水流特性	1
第三节 河流泥沙	1
第四节 沙波	1
第五节 河流输沙	23
第六节 河床演变概念	26
第七节 描述河段一般特征的几个名词	26
第八节 河段分类及其演变	30
第二章 频率和频率曲线	37
第一节 机率(概率)与频率的基本概念	38
第二节 统计参数	46
第三节 理论频率曲线	55
第四节 抽样误差	63
第五节 相关分析	65
第三章 设计流量和设计水位	72
第一节 关于特大洪水	72
第二节 有若干年洪峰流量资料时推求设计流量	76
第三节 在缺乏洪峰流量资料的条件下推求设计流量	85
第四节 形态勘测	90
第五节 设计水位	97
第六节 可能最大暴雨简介	99
第四章 孔径和墩台基础埋深	108
第一节 建桥后河道的变化	109
第二节 设计流速	111
第三节 孔径计算	112
第四节 冲刷计算	116
第五节 墩台基础埋深	128
第六节 算例	128
第五章 桥头引线标高和导治建筑物	138
第一节 桥下净空	138
第二节 桥头路肩标高	146
第三节 算例	146
第四节 桥渡导治建筑物	147
第六章 桥位	157
第一节 选择桥渡线路的基本原则	157
第二节 桥位选择	157
第三节 实例	158
第四节 几种特殊情况下的桥位问题	161
第七章 桥渡设计应用举例	164

前 言

大地上布满了河流。兴修交通线路，遇河就要架桥。要架桥，就得了解河流；只是在对河流有一基本认识的条件下，我们才能够比较正确地选择桥位、决定桥孔长度、规定基础埋深、布置桥面高程，并且在遇有需要时设置必要的导治结构。这些，就是本书所要阐述的主要内容。

由于地区、气候、地形、地貌及地质条件不同，河流的特性很不一样，在特大洪水和凌汛时的情况，有时很难掌握。如若我们对于桥渡设计的理论理解得比较片面，调查研究不够，考虑不周，那就很难正确地处理上述各问题。对于情况复杂的河流，也会由于所掌握的资料有限，使我们所作出的处理难以完全正确。因此，在每年洪水和流冰季节，既有的桥时常会遇到一些水害事故，例如：由于洪水的主溜直冲某些桥墩，桥墩被冲坏；或由于飘浮物或冰凌堵塞桥孔，钢梁结构被冲坏；或由于河滩路堤阻水过多，路堤和锥形填土被冲坍，桥台基础被淘空；或由于桥孔宣泄不畅，壅水将上游的工厂、房舍、良田淹没，使人民的生命和财产蒙受很大损失，等等。在特殊情况下，也可能由于河流忽然发生天然改道，或由于泥石流突然暴发，使既有桥报废。在所有上述事故中，不仅是桥渡本身遭受直接损失，而且由于线路停运使国家在政治和经济等方面所蒙受的间接损失往往更是惊人的。所以，从保证线路安全畅通的需要出发，铁路工作人员应该对于桥渡设计的重要性有所认识。

就《桥渡设计》课的内容讲，它涉及到陆地水文、工程水文、河床演变和河道整治等各个方面。但按照桥梁专业现行教学计划，上述各方面并没有列入课程设置；又数理统计一课，目前在桥梁专业内还只是列作选修。因此，为了学习本课程的需要，本书对所有这些方面的基本理论作了扼要阐述。

本书对于大河桥渡设计计算中的各项基本内容都进行了论述，对于目前所存在的问题和发展方向也作了简要介绍。为了阐明如何系统运用所学知识，解决桥渡设计问题，本书在最后编入了两个实例。

本书初稿曾在西南交通大学桥梁专业的教学中试用多次。在编写期间，曾经收到成都工学院，上海铁道学院，铁道部第二、第三、第四勘测设计院和郑州铁路局等单位关于本书初稿的宝贵意见。铁道部第二勘测设计院科学研究所陈光曦同志和铁道部科学研究院西南研究所沈寿长同志，曾经对初稿进行了仔细地审阅，并且提出很多重要建议。本书定稿前，又承铁道部第二勘测设计院、铁道部科学研究院西南研究所及北方交通大学等单位派代表参加评审。对于上述各单位和个人，谨表示衷心感谢。

本书在编写中得到了西南交通大学钱冬生教授的指导，并由钱教授主审定稿，插图工作主要由胡梅枝同志担任，在此一并致谢。

尚久驹

一九七九年四月于西南交通大学

第一章 河道水流和泥沙

第一节 河流的补给和水情

一、河水补给

河水的补给是多种多样的，我国大多数河流的水来自降雨。雨水降到地面后，经过植物截留、土壤下渗以及填洼等水量损失后，在重力的作用下，由高处向低处流，在地面形成径流，在山谷中形成溪涧沟壑。越向下流水流逐步汇集形成小溪、大河、大江，最后，流入海洋（也有流入内陆湖泊，或渗入地下的）。

除来自降雨之外，河水也可以来自融雪和融冰。还可以来自地下水。图 1—1 (a) 表示后一情况。若河床地层和含水层相通，在河水水位下降时（如图 1—1 (a) 所示水位②情况），地下水水位相对于河水水位为高，地下水就流入河槽，补给河水。但在河床内涨水时（如图 1—1 (a) 所示水位①情况），河水水位高于地下水水位，河水又会流进含水层内。

另外，在岩溶地区，地下水十分活跃，地下暗河与地面河流的河水互相补给，水情极为复杂，应该引起注意。

二、河流的水情

河流的水位每年总的涨落情况，叫水情。

由于河水补给不一样，它们的水情也不一样。根据水情，河流可分为间歇性河流和常年有水河流。按河流的补给，常年有水的河流还可分为：雨水型河流，融雪型河流，融冰型河流和混合型河流，如图 1—2 所示。

在图 1—2 内，其纵坐标为水位，横坐标为月份。曲线最高点为全年洪水水位最高点，

称为洪峰。雨水型河流的洪峰在雨季发生；融雪型河流的洪峰多发生在春季；融冰型河流的洪峰多发生在夏季；混合型洪峰每年发生在多雨兼融冰或融雪季节。从水情图，可以看到河流当年洪峰的大小，发生的时间以及洪峰涨落速度和持续时间。水情图上的曲线在洪水时期

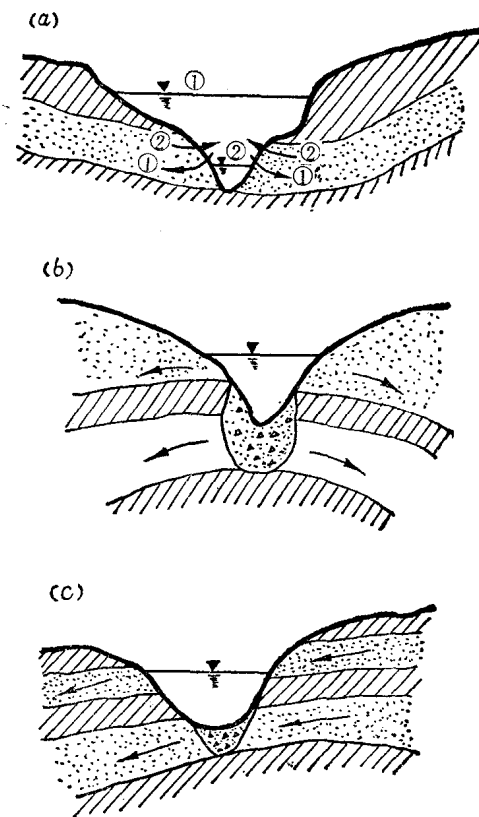


图 1—1 地下水补给河水

(a) ——地下水与河水互相补给情况；

(b) ——亏水河谷，河水补给地下水；

(c) ——交流河谷，地下水补给河水。同时，河水又补给地下水。

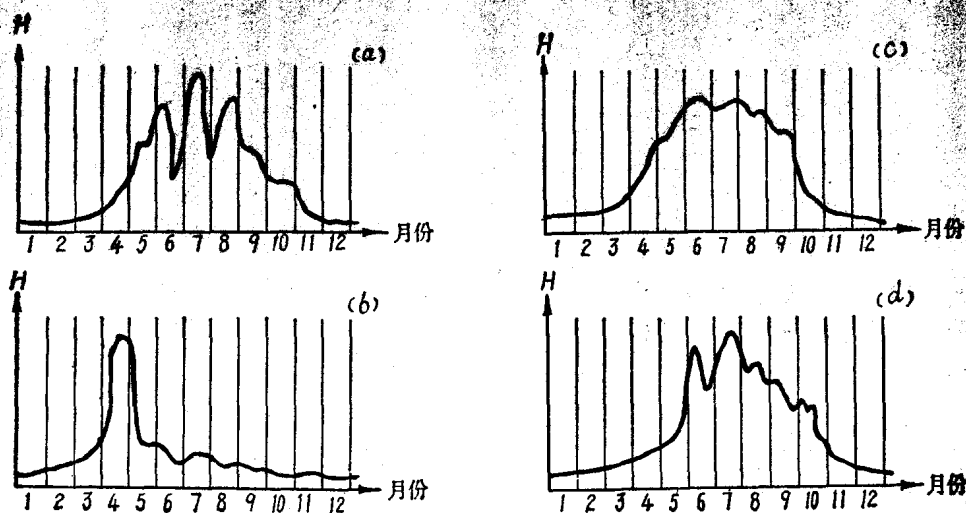


图 1—2 不同补给的河流
(a) ——雨水型; (b) ——融雪型; (c) ——融冰型; (d) ——混合型。

的那一段, 也叫做洪峰过程线。

因为河道演变是水流与泥沙相互作用的结果, 所以水情的变化直接反映了河道中的水流情况。因此, 河流水情是我们研究河道演变时所应该重视的问题。而在进行桥渡施工组织设计时, 也要考虑水情, 才能安排水上施工进度, 修建施工便桥和布置两岸场地。

第二节 河道水流特性

一、水流内部结构

当研究水流运动时, 由于研究角度不同, 往往将水流运动分为一般运动和内部运动。一般运动系指水流总体的平均现象。内部运动则系指其各部分小水体的运动现象。今简介如下。

(一) 水流的一般运动

我们曾在水力学中, 将渠道水流当做一个整体, 研究它的运动特征。例如, 均匀流所常用的下列曼宁公式, 就是对过水断面平均水流而言的:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (1-1)$$

式中 v ——全断面平均流速 (系指一段时间内的平均值) 它又叫做时均流速, 是整个水体在纵向沿着渠道运动的流速 (米/秒);

I ——水面比降;

R ——水力半径, $R = (\text{过水断面面积}) \div (\text{湿周})$ (米);

n ——粗糙系数。

当水面比降与渠底比降相等时, 水体作均匀流动, 称为均匀流。当两者比降不等时, 沿程过水断面不等, 水体的沿程流速也不等, 那就成为非均匀流。如果流量不随时间变化, 那叫稳定流。若随时间变化, 即为不稳定流。这儿所讲的均匀流和非均匀流, 稳定流和不稳定

流，都是将水流当做一个整体来考虑的。

(二) 水流的内部运动

在测流工作中，我们可以得到如图 1—11 所示的垂线流速分布图，以及如图 1—10 所示的断面流速分布图。为什么流速分布从河底到水面逐渐加大？从河岸到河心逐渐加大？一般河道水流都携带泥沙，泥沙在水流中怎样运动？为什么较细的泥沙可以在水中悬浮？而较粗的泥沙却不能这样？为什么河道会发生变形？

要解答这些问题，就必须研究水流内部运动，研究在整个水体中各个小水体的运动状态。

当我们仔细观测水流中的某一点的水的运动时，可以发觉：在一定方向内，流速是随时而变化的；而在不同方向内，流速更是不同。可以说，在水流之内，其各点的瞬时流速是因时因地而变的。这一现象就叫作水流的紊动现象。具有紊动现象的水流就叫紊流。

在某些情况下，水流内部会发生螺旋形运动。把这种运动的轨迹投影到横断面上，它将成一环状，所以，螺旋流有时也被称为环流。由于它的运动方向与水体的一般运动方向不一致，也称之为副流。在螺旋流中，其瞬时流速也是因时因地而异的，因而也是紊动的。

另外，若河床的纵剖面内有一突起，或在其平面内有一横向插入物，则在水流越过它们之后，往往会形成漩涡。它也是一种副流。

水流的内部运动，可以按上述三种，分别进行介绍如下。

1. 紊流

天然河道中的水流一般都是紊流。河道泥沙运动、流速分布、含沙量在垂线上的分布等等，都与水流的紊动有着密切地关系。水流的紊动现象十分复杂，在明渠中探索紊流，目前还只限于均匀流的情况。

(1) 紊流流速的脉动

紊流的基本结构，就是无数个运动着的小涡体（也有人称它为小漩涡）。涡体的转速则主要取决于其所在地点的流速梯度。在河床附近，因为流速梯度大，涡体的转速就大；而在水面附近，流速梯度小，涡体转速也就小。涡体的位置和形态都是随时间变化的，而且涡体内各点的速度大小和方向也各不相同。当这些参差不齐的涡体，相继通过紊流中某一定点时，该点的瞬时流速 u' 就相应地随着变化，流速随时间的这种变化现象叫做流速的脉动。

图 1—3 表示某河在同一条垂线上，河底附近和水面附近两点流速脉动实测成果（图中上下两条线分别是在水面附近和河底附近的两点的实测值）。从图中可见，这两点的脉动情况不同。在脉动之中，流速是围绕着一个平均值在变化。在一个较长的时间 T 内，流速平均值可用公式 1—2 计算

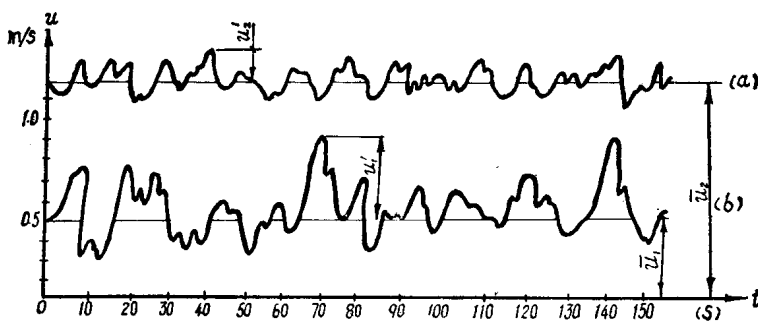


图 1—3 某河的流速脉动情况
(a) ——水面附近点；(b) ——河底附近点。

$$\bar{u} = \frac{\int_0^T u dt}{T} \quad (1-2)$$

式中 $\bar{u}$ ——时均流速 (米/秒) ;

T ——计算时均流速所取用的时段 (秒) ;

u ——瞬时流速, 可以用公式 1-3 表示

$$u = \bar{u} \pm u' \quad (1-3)$$

其中 u' ——为脉动增量, 可为正值, 也可以为负值。

若 u 代表 X 轴方向的流速分量, 另用 v 和 w 分别代表 Y 和 Z 轴方向的流速分量。仿式 (1-3), 当有:

$$\left. \begin{aligned} v &= \bar{v} \pm v' \\ w &= \bar{w} \pm w' \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

若是明渠均匀流, 因为只在其纵向 (即 X 轴) 具有时均流速, 所以, $\bar{v} = 0$, $\bar{w} = 0$; 于是, 在 Y 和 Z 方向内, 瞬时流速等于脉动增量, 即 $v = v'$, $w = w'$ 。

同理, 在紊流中某一点的压力, 也有脉动。用式表示为:

$$p = \bar{p} \pm p' \quad (1-5)$$

(2) 脉动强度

我们常用脉动强度来比较脉动增量的大小。这需先将各瞬时的脉动增量平方, 再取其平均值。而后开方所得的 σ_u' 、 σ_v' 、 σ_w' 就被称为脉动强度。它的单位仍然是和速度的单位相同。它们的算式如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_u' &= \sqrt{\overline{u'^2}} \\ \sigma_v' &= \sqrt{\overline{v'^2}} \\ \sigma_w' &= \sqrt{\overline{w'^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

也可以用 σ_u'/u_* 及 σ_v'/v_* 表达相对脉动强度, 其中, $u_* = \sqrt{gHI}$, 称为摩擦流速或切速。式 (1-6) 的脉动强度也可以写成

$$\left. \begin{aligned} \sigma_u' &= \sqrt{\overline{u'^2}} = \sqrt{\overline{(u - \bar{u})^2}} = \sqrt{\frac{\Sigma(u - \bar{u})^2}{n}} \\ \sigma_v' &= \sqrt{\overline{v'^2}} = \sqrt{\overline{(v - \bar{v})^2}} = \sqrt{\frac{\Sigma(v - \bar{v})^2}{n}} \\ \sigma_w' &= \sqrt{\overline{w'^2}} = \sqrt{\overline{(w - \bar{w})^2}} = \sqrt{\frac{\Sigma(w - \bar{w})^2}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

在含沙水流中, 含沙量的大小对相对脉动强度有影响。目前已经开始对含沙水流以及弯道水流的脉动问题进行研究。

从大量实测资料看到, 在河底附近, 最大脉动流速可以超过其平均流速达一倍还多。脉动增量 u' 与其出现的频率 (如图 1-4) 符合于高斯正态分布规律 (关于频率的概念, 详见第三章)。

(3) 紊动涡体的大小

根据流速脉动的观测成果，用统计方法，可以分析出涡体的大小（具体方法从略）。也可以用特殊的摄影方法，直观地看出涡体大小。

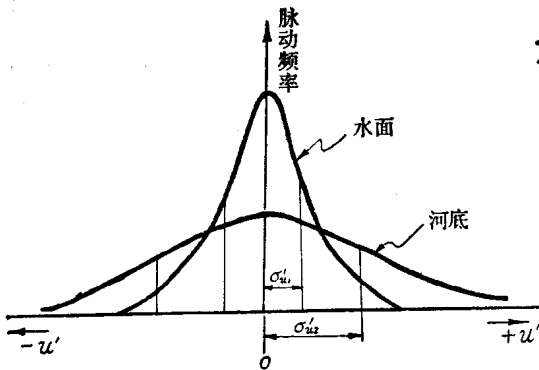


图 1—4 不同高程上的流速脉动频率分布

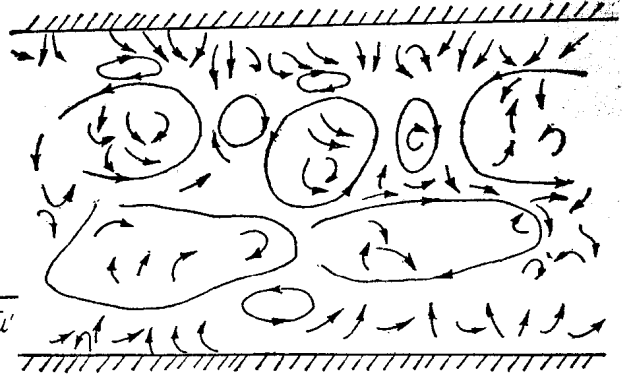


图 1—5 管流中紊动示意（流向是从左向右）

图 1—5 是管流中的紊动涡体示意图。这是通过摄影方法得到的。明渠水流的表面情况与图 1—5 相似。当观察者的移动速度与水流平均流速相同时，可以看到，在水流中有大大小小的涡体。靠近管壁部分，因为那里的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 比较大，切力也大（在水力学中，因层流的粘滞性而产生的粘滞切力 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ ；在紊流中，除粘滞切力外，还有紊动切力，总的切力 $= \mu \frac{du}{dy} - \rho \overline{u'v'}$ ）。就把流体撕裂成许多小涡体（有的小涡体向管心运动）。在管的中心部分则有大涡体。在大小涡体之间还有中级涡体。根据实测的瞬时流速资料统计分析，又通过对涡体运动观测证实，建立了这样的概念：在动能的分布方面，大涡体只占有全部动能的 20% 左右；而中级涡体数目既多，具有的能量也比较多；小涡体则由于流体的粘滞作用，其动能将迅速消耗。在各级涡体之间，能量将发生互相交换。大涡体好象是蓄能的仓库，中级涡体则传递能量给小涡体，小涡体通过粘滞作用，使水流的能量转化为热能而消失。

（4）紊动的发生

有三种情况可以发生紊动：一是当流体流过固体表面，固体或边界是静止的，而流体是运动着的，靠近边界部分的流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 较大，因而产生涡体，再传播到明渠或管流的中心部分，如图 1—6（a）所示；其二是两种不同速度的流体相接触，一个比较快，一个比较慢，在接触面上形成了流速梯度，因而也产生涡体；其三是发生在固体边界有突出部分或有球体在流体中运动时，在突出部分的下游或球体的背水面，也会发生涡体，如图 1—6（b）所示。一般明渠水流及管流的紊动，属于第一种，它又称为墙壁的紊动。有人做过这样的实验，在光壁水渠的一段底壁上开有小孔，将近壁层吸掉，此时，可以看到此段渠底不产生涡

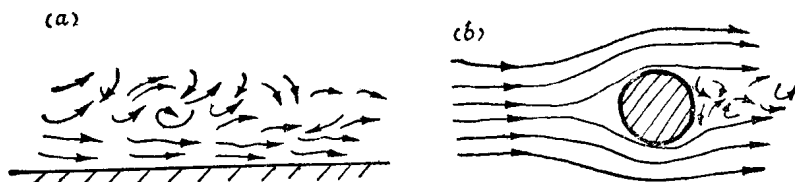


图 1—6 发生涡体示意

体，这就证明了紊动产生于河底的设想，因为近壁层流层的存在，在层流层内及其外面的速度相差很大，交界面不稳定，遇到任何一种扰动，平整的界面就会呈波状起伏，如图1—7所示。流线比较密的部分流速加大，流线分散的部分流速减小。按伯诺里理论，当流速小时，压力增大；流速大时，压力减小。这样，界面内外存在着压力差，压差使流线扭曲，如图1—7（b）所示，直至界面破碎，如图1—7（c）所示，形成涡体（漩涡）。涡体具有角速度和水平速度的水体。这两种速度的合成就使涡体上升，传播到整个水体中去。近壁处的水情是复杂的，河底附近的泥沙运动主要受其影响，但此情况至今尚未搞清楚。不过，显而易见的是，涡体能量越大，转动就越快，相对的水流脉动强度和向上的脉动分速也越大，挟动泥沙的能力也越大。我们可以利用水流断面各点处脉动强度的实测资料，来探索水流的内部结构和水流的挟沙能力。

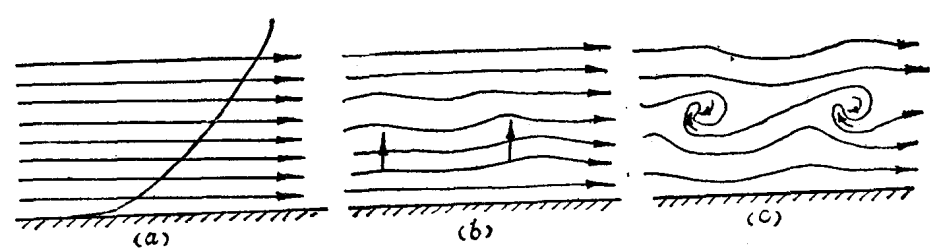


图1—7 近壁层流层涡体产生示意
(a) —— 完全层流；(b) —— 略有扰动；(c) —— 扰动加强，产生涡体。

2. 螺旋流

在天然河道中，流速常常表现为一种顺着主流方向，并呈螺旋形的前进运动，称为螺旋流。最显著的螺旋流，发生在河弯中（将在本节之三介绍）。在顺直河段里，由于流量变化，也将出现成对的螺旋流（这将在本节之二介绍）。

3. 漩涡

在天然河道以及水工建筑物突出部分的附近，都要发生漩涡。漩涡又叫摩擦副流。这是因为主流部分水流流速比较快，而在突起部分后面的水流运动比较慢，流速有差异，两部分水流发生摩擦，因而形成漩涡。相对于主流而言，漩涡也属于副流。它们的旋转轴可以具有不同方向。例如，图1—8（a）所示为竖轴漩涡，图1—8（b）所示为横轴漩涡。此外，还有斜轴漩涡。

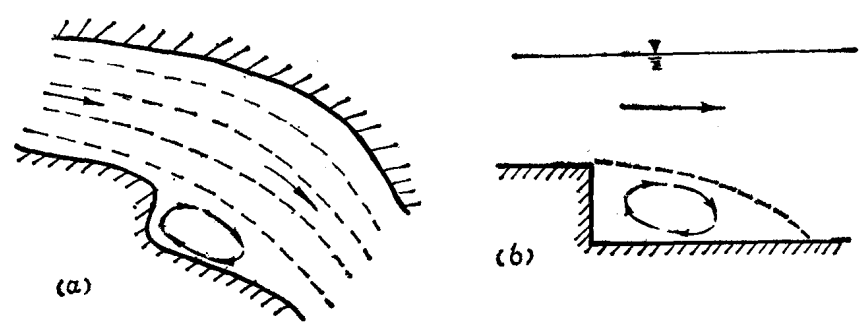


图1—8 漩涡示意
(a) —— 竖轴漩涡；(b) —— 横轴漩涡。

二、直道水流

在横断面为规则矩形的渠道内，断面内的流速分布大致如图 1—9 所示。当水流为均匀流时，一般采用谢才公式计算其流速。

$$v = C\sqrt{RI} \quad (1-8)$$

式中 v ——断面平均流速（米/秒）；

C ——谢才系数；

R ——水力半径（米）；

I ——水流比降。

它和式（1—1）曼宁公式的关系是： $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ 。

但天然河道的水流断面多为非规则形，其断面内的流速分布如图 1—10 所示。其平均流

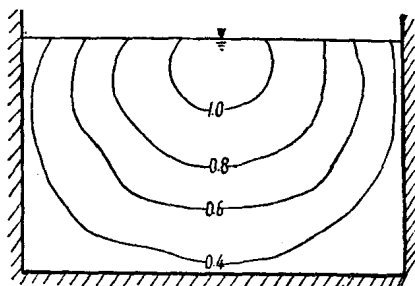


图 1—9 矩形规则河道流速分布

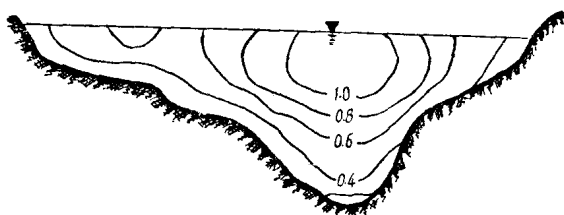


图 1—10 天然河流断面流速分布

速一般仍近似地借用谢才公式去计算（有必要时，可通过测验，制定该河断所特有的流速公式）。至于垂线流速分布，在同一过水断面上，由于垂线所在位置不同流速分布亦不同，一般如图 1—11 所示。

需要指出：谢才公式只是适用于稳定均匀流。天然河流只有在上游来水量不变，沿程无其它水流汇入时，才可视为稳定流，只有当河道过水断面形态、大小及糙率等，沿河较为均匀时，稳定流才表现为均匀流。但是这两个条件一般只能近似地满足。因此，天然河道引用谢才公式，只能取得近似的结果。

当洪水来到时，由于河床中洪水波的传播，其流量 Q 和水位 H 关系，流速 v 和水位 H 关系，在涨水过程和落水过程中将不是一条单一曲线。如图 1—12 所示，这两条曲线都是呈逆时

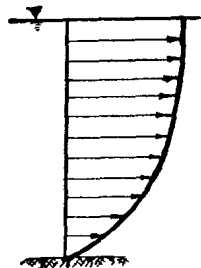


图 1—11 垂线流速分布示意

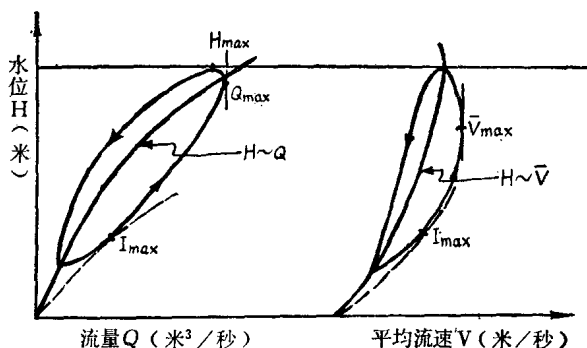


图 1—12 $H \sim Q$, $H \sim v$ 曲线

针的绳套形。造成这一特点的原因，除流量不稳定之外，还受沙波的影响（那将在本章第四节之五介绍），受冲淤变化的影响。我们从图1—12中可以明显地看到各特征值出现的次序是：最大比降、最大流速、最大流量，最后才是最高水位。水面比降在涨水时陡、落水时缓，这是它和稳定流之间的一个明显的区别。

现以顺直河段为例，说明涨水和落水对河床演变的影响。

涨水时，由于洪水波在河心传播较快，河心水位高于两岸水位，水面发生横向比降。在水流横断面内，形成一对螺旋流：表层水流由河心指向两岸，底层水流由岸边指向河心，在河底形成汇集水流，如图1—13所示。这样，在同一垂线上，其表层与底层水流方向就不一致，这现象是叫“垂线水流分离”。河床在这样一对螺旋流的作用下，两岸将发生冲刷，河底则容易淤积。与此相反，当洪水后水位下落时，河心水位低于两岸边水位，水面横向坡度与涨水时反向，在河床内形成与涨水时方向相反的一对螺旋流，如图1—14所示，其表层水流由河岸指向河心，底层水流由河心指向河岸，在河底形成分散水流。此时，两岸将发生淤积，而河底将受冲刷。

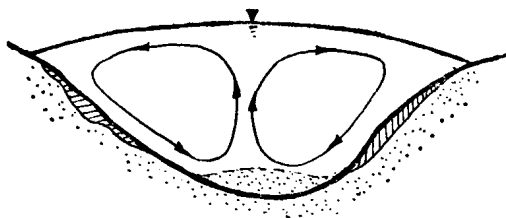


图1—13 涨水时产生河底汇集水流

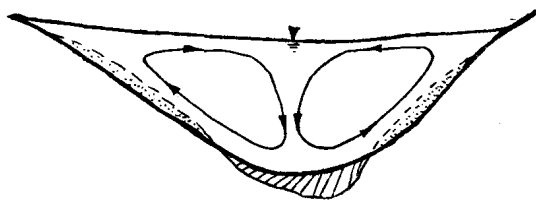


图1—14 落水时产生河底分散水流

三、河弯水流

1. 河弯水流现象

在弯曲河道中，水流受弯曲河床的限制，在离心力的影响下，水面倾斜，产生横向比降，形成螺旋流，如图1—15所示。

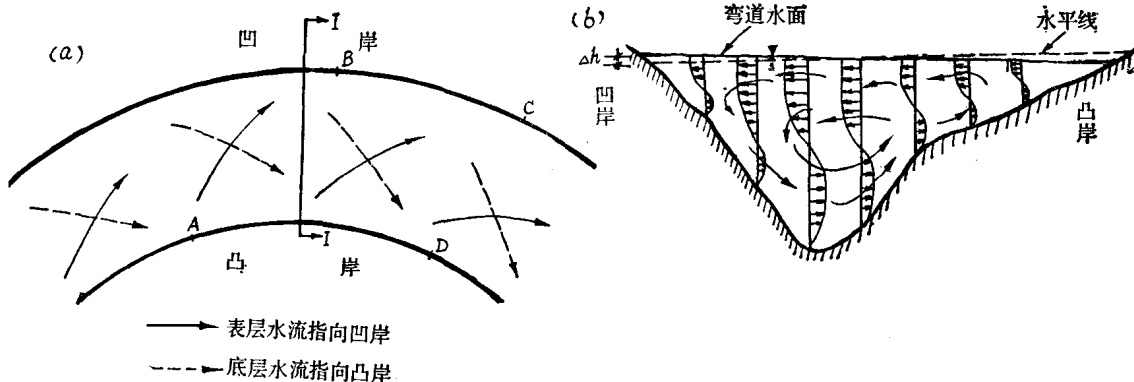


图1—15 河弯示意图

(a) —— 河弯螺旋流平面图； (b) —— I—I断面流速分布图。

在弯曲河段内，凸岸水面低，凹岸水面高，垂线水流分离，表层水流指向凹岸，底层水流指向凸岸，水流在河道中螺旋前进，形成横向环流（简称环流）。

如果图 1—15 所示河弯的相对曲率半径减小到一定程度（相对曲率半径为 r/B ，其中， r = 河弯曲率半径， B = 河弯处的河宽），在凸岸 D 处，河底水流虽然上升到水面，但不会紧靠凸岸，这也叫做分离现象，该处水流混乱，有漩涡，只是在经过相当距离以后，水流才能逐渐平稳地沿着河床运动。如果 r/B 较大，所说的分离现象就不会发生。如果河流挟沙，在 D 点附近，泥沙将会淤积，形成边滩。

在凹岸河弯的前半部点 B 之上游，也常有不很大的漩涡，此段河岸受冲刷。冲刷的泥沙被带到下游对岸（ D 点附近河段）淤积下来。底沙运动的方向是与底流方向一致的，因此，河弯泥沙运动是从凹岸移到凸岸。

2. 河弯水流的横向比降

在河弯处，水面在横向是倾斜的。凹岸高于凸岸，如图 1—15 所示。是向心力使得水流由直线运动变为曲线运动，和向心力平衡的则是水流的惯性力——离心力。根据物理学，有

$$F = \rho \frac{u^2}{r} \quad (1-9)$$

式中 F ——单位水体的离心力；

ρ ——水体的密度；

r ——曲线的曲率半径；

u ——作曲线运动的水体的切向速度。

如图 1—16 所示，我们从河弯中取水柱来进行分析（水柱截面为 1×1 单位面积）。水柱受力图如图 1—16 (b) 所示。 P_1 、 P_2 为水柱两侧水压力， T 为底部摩擦力， F 为离心力。假设此环流为二元恒定流，则可写出水柱的横向平衡方程式：

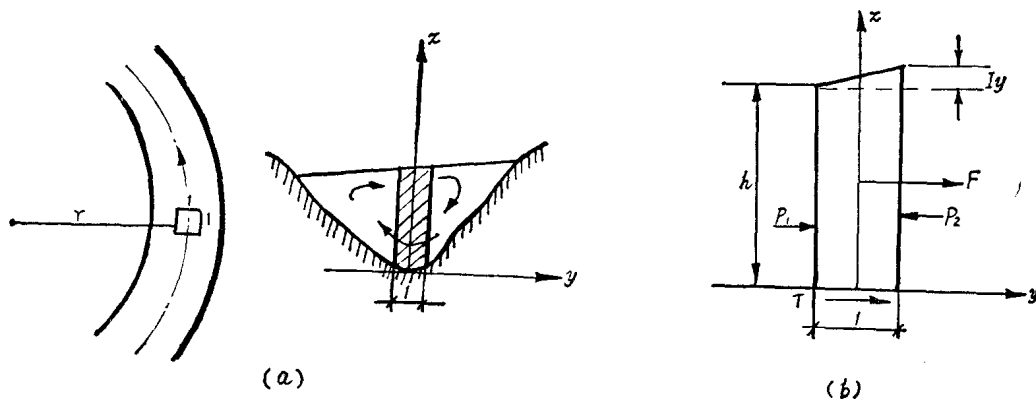


图 1—16
(a) ——平面及过水断面图；(b) ——水柱受力示意图。

$$P_1 - P_2 + F + T = 0 \quad (1-10)$$

又，离心力是

$$F = \int_0^h \rho \frac{u^2}{r} dz$$

式中 r ——水柱所在处河弯的曲率半径；

ρ ——水的密度；

u ——水柱所在处的作曲线运动的水体的切向速度；

$\rho \frac{u^2}{r}$ ——单位水体的离心力；

h ——水柱的平均高，即水深。

设：

$$\alpha_0 = \frac{\frac{1}{h} \int_0^h u^2 dz}{\bar{u}^2}$$

α_0 称为流速分布系数， $\bar{u}$ 为水柱所在垂线的垂线平均流速。则

$$F = \rho \frac{\alpha_0 h \bar{u}^2}{r}$$

又，水压力 P_2 和 P_1 可分别用以下二式计算：

$$P_2 = \frac{\rho g}{2} \left(h + \frac{1}{2} I_v \right)^2$$

$$P_1 = \frac{\rho g}{2} \left(h - \frac{1}{2} I_v \right)^2$$

水柱两侧静水压力差（即向心力）：

$$\begin{aligned} \Delta P = P_1 - P_2 &= \frac{\rho g}{2} \left(h - \frac{1}{2} I_v \right)^2 - \frac{\rho g}{2} \left(h + \frac{1}{2} I_v \right)^2 \\ &= -\rho g h I_v \end{aligned}$$

略去河底摩阻力 T ，则式（1—10）为

$$\rho \frac{\alpha_0 h \bar{u}^2}{r} - \rho g h I_v = 0 \quad (1-11)$$

所以

$$I_v = \alpha_0 \frac{\bar{u}^2}{gr}$$

又，

$$I_v = \frac{dh}{dr}$$

$$\frac{dh}{dr} = \alpha \frac{\bar{u}^2}{gr}$$

积分，得水面高程 Z

$$Z = Z_{\min} + \int_{r_1}^r \alpha_0 \frac{\bar{u}^2}{gr} dr \quad (1-12)$$

式中 $Z_{\min}$ ——内岸（凸岸）水面高程；

r_1 ——凸岸曲率半径；

r ——所求点的曲率半径。

由于在断面上各垂线的平均流速 $\bar{u}$ 不相同，断面的水面线应该是一条曲线。该曲线可通过式（1—12）积分求得。

横断面的平均比降 $\bar{I}_v$ 为

$$\bar{I}_v = \alpha_0 \frac{v^2}{gr} \quad (1-13)$$

式中 v ——断面平均流速；

r ——平均曲率半径。

内外两岸的水面差为

$$\Delta h = \alpha_0 \frac{v^2}{gr} B \quad (1-14)$$

式中 B ——河宽；

其他符号意义同式 (1-13)。

在河弯顶点，水面横向比降最大，左右两岸水位差也最大。在它的上下游，横向比降渐渐减少，直至恢复水平。

3. 环流的形成

目前有两种解说法，第一种是用一点的向心力与离心力不平衡来说明，第二种是假设总的向心力与离心力平衡，而在某点上不平衡来说明。

第一种解说是：在图 1-16 中的水柱上，作用在右边各点的向心力都是 $\rho g I_v$ ，从水面到河底都一样。但在水柱的不同高度上，切向流速（即纵向流速）并不相同，表面的流速大，沿垂线向河底渐渐减小；也就是说，各不同水深处的 u 不同。平衡条件是要求离心力与向心力平衡，对于本解说讲，这也就是要求从水面到河底离心力要相等。根据离心力的公式 $F = \rho \frac{u^2}{r}$ 可知，随着 u 的变化， r 应该发生变化。于是，从水面到河底， r 应逐渐变小，以致表面水流与河底水流方向不同，表流 r_1 大于底流的 r_2 ，所以表流指向凹岸，底流指向凸岸。由于水流是连续运动的，表流就沿着凹岸向下运动，转变为河底水流，而河底水流则沿凸岸向上运动变为表面水流。这就形成了环流。

第二种解说是：承认在垂线上各点的离心力不等于向心力，并假设水柱各点的水体都是以相同的曲率半径在曲线上运动。所以，表面水流的离心力大于向心力，其水体由凸岸指向凹岸；而河底水流离心力小于向心力，其水流就由凹岸指向凸岸。于是，这便形成了环流。因为这后一说法比较简单，目前还有人使用。

由于水流有连续性，上下游互相关连，所以，水流进入弯曲河段以前，环流就开始形成，只是较为微弱。在进入弯道后，环流沿程逐渐增强；在弯道顶点偏下游处，环流强度达到最大；随后又沿程减弱。在水流出弯道之后，环流仍然能维持一段距离，才逐渐消失。

弯道上的离心力是环流生存的条件。弯道半径的大小，直接影响到环流流速的大小，所以在相同的断面平均流速和相同的平均水深条件下，弯道半径愈小，环流愈强，弯道半径愈大，环流愈弱。

第三节 河流泥沙

河流泥沙是指组成河床和随着水流运动的所有固态物质。它包括：小颗粒泥和沙、砾石、卵石、大漂石。

泥沙的来源：有些是由于流域地面受到侵蚀，被冲蚀的土壤和砾石随着地面径流汇集到河流中；有些是由于河床本身的冲刷，包括河岸崩坍及河底冲深。前者称为流域冲刷，后者称为河道冲刷。另外，在河流的下游入海处，受潮流影响，潮流也会将海域泥沙带进河道。

黄河的泥沙，大部分是由于流域中的黄土地区冲刷形成的。它是世界上有名的多沙河流，其多年年平均输沙量多达 15.9 亿吨。长江的泥沙也是由于流域冲刷所形成，它的年输沙

量为4.86亿吨。

流域冲刷与流域上的降水情况、流域特征、地面坡度、植被及土壤等有关，是一个复杂的问题，这里，我们只能简单地介绍河道泥沙运动的一些基本知识。

一、泥沙的分类

(一) 根据粒径大小，泥沙可以分为：顽石、漂石、卵石、砾石、粗砂和细砂等级（这种分法大致是和土壤力学中的分类相似）。

河流中的卵石和砾石并不是球形。一般为了计算方便，可采用平均粒径 d_0 ，这里的 d_0 是用以表示某一指定颗粒本身三向尺度的平均值。例如，河流中的砾石大都是椭圆体，设其长度为 a ，宽度为 b ，厚度为 c ，则 $d_0 = \frac{a+b+c}{3}$ 。若用 d 表示与该粒泥沙等容积的球体直径，则 $d = \sqrt[3]{abc}$ 。根据实际资料，曾得下例：

$$\frac{a}{d_0} : \frac{b}{d_0} : \frac{c}{d_0} = 1.32 : 0.99 : 0.68,$$

及

$$\frac{a}{d} : \frac{b}{d} : \frac{c}{d} = 1.39 : 1.05 : 0.72.$$

由此得：

$$\frac{d_0}{d} = 1.055$$

可以看出， d 与 d_0 相差甚微；而中轴粒径（即 b 的尺度）也可以代表该颗粒的大小。对于较细的泥沙，其平均粒径都是从过筛分析，或比重计分析得来的，只具有相对的意义。

(二) 根据河道中运动形式，泥沙往往被分为推移质（又称为底沙）及悬移质（又叫悬沙）。前者在靠近河底处运动，在水文测验中是用底沙采样器采取，后者在水中悬浮运动，当用悬沙采样器去采取。它们在水中情况如图 1—17 所示。

在床面上，底沙随着水流作滚动、滑动和跳跃，其运动是间歇的；而悬沙在水中随水流的运动则是连续的。

从河底到水面，在不同的高度上，泥沙运动的形式各不相同。而在底沙和悬沙之间，以及它们和河床泥沙之间，还存在着不断交换的现象。这使含沙量在垂线上的分布，呈现为一条连续曲线（见图 1—33（c））。当泥沙较细，水流紊动较强时，泥沙在垂线上的分布比较均匀；当粒径较粗，或水流紊动较弱时，泥沙在垂线上的分布，将集中在靠近河底附近处。

因此，根据泥沙运动形式所进行的泥沙分类，它并不是绝对的。对于某一具体粒径的泥沙而言，当它随着水流悬移运动时，即为悬移质；当它在另一个时候，例如在水流速度减低时，它沉降到床面，不时地作滚动、滑动或跳跃运动，它就成为推移质；若它在沉降到床面后，不再参加运动，那它就成为河床的组成部分了。

(三) 就其是否组成河床进行分类，泥沙还可以分为床沙质和冲泻质。前者指组成床沙

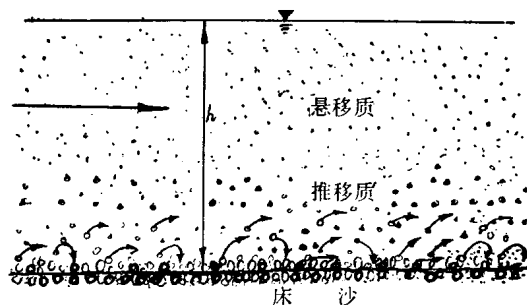


图 1—17 河道中运动的泥沙