

353080

成都工学院图书馆
基本馆藏

高等学校试用教科书

河 流 动 力 学

武汉水利电力学院河流动力学及河道整治教研组编著



中国工业出版社

512
13121;1

高等学校試用教科书



河 流 动 力 学

武汉水利电力学院河流动力学及河道整治教研組編著

中国工业出版社

-2
相
-2
-2
糙
受
深
劇
增
比
究
河
范
率
河
要
率
如
相
年。

本书是作为高等学校治河防洪工程专业及航道开发与整治专业的教学用书而编写的，也可作为有关科学技术人员的参考书。

本书除绪论外分为八章和四个附录。前四章阐述泥沙运动的基本规律，第五、六两章探讨河道演变问题，第七、八两章介绍河工模型试验问题。因次分析法、环流、水流平面图以及天然河流的糙率等问题分别纳入四个附录之中。

本书着重基本概念的解释，在一定程度上反映近代科学成果，对若干问题提出了作者的论点和分析的方法。

河 流 动 力 学

武汉水利电力学院河流动力学及河道整治教研组编著

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南街)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $18^{1/8}$ ·字数406,000

1961年12月北京第一版·1964年5月北京第三次印刷

印数3,291—5,014·定价(科五)2.10元

*

统一书号: K15165·1150(水电-177)

前 言

本书是作为高等学校治河防洪工程专业及航道开发与整治专业的教学用书而编写的。在编写过程中，特别着重基本概念的阐释，并注意体现理论与实践统一的观点。

本书除对若干问题提出了作者的论点和分析方法外，比较广泛地引用了国内外有关科学研究机关和学者的研究成果。在引用的地方，都作了说明。此外，一些符号及其下角说明，凡不是国际通用的，在本书中皆采用了汉语拼音字母。

在1958年以后，我们曾经编写了河流动力学讲义，在治河防洪工程专业两度试用。这次公开出版，又进行了全面改写的工作。为此，设立了由张瑞瑾(召集人)、谢鉴衡、陈文彪、王伟复、林树敏等组成的编写小组。本书的绪论，第一、二、三、四章及附录I、II、III由张瑞瑾执笔；第五、六、七章及附录IV由谢鉴衡执笔；第八章由陈文彪执笔；王伟复参加了第六、七两章的部分编写工作；刘百松参加了第三章中个别资料的分析工作。全书的图的绘制由林树敏负责，杨慧中、彭东泉等参加了部分的工作。全书的汇总、编辑由王伟复负责。张瑞瑾、谢鉴衡担任了校阅和定稿的工作。编写过程中的重要问题在教研组全体成员的会议上进行了讨论。付印之前，由学院组织了审查小组进行审查。

本书难免还存在着缺点，读者的指正和批评是我们衷心欢迎的。

作 者

1961年7月14日

目 录

前言	
绪论	4
§0-1 河流动力学的研究对象	4
§0-2 人类与江河作斗争的历史过程简述以及河流动力学的形成和发展	5
§0-3 学习河流动力学的方法	7
第一章 泥沙的特性	9
§1-1 泥沙的粒径和粒配曲线	9
§1-2 泥沙的密实重率和干容重	11
§1-3 泥沙的水力粗度	13
第二章 推移质运动	22
§2-1 泥沙的起动	22
§2-2 沙波运动	31
§2-3 推移质输沙率	40
第三章 悬移质运动	49
§3-1 概述	49
§3-2 悬移质中的冲泻质与床沙质	50
§3-3 水流挟沙力	52
§3-4 悬移质含沙量沿水深的分布	63
第四章 异重流	71
§4-1 概述	71
§4-2 蓄水库中因挟沙水流而形成的异重流	74
§4-3 异重流的力学基本关系式	76
§4-4 异重流的运动状态	80
§4-5 异重流的孔口出流	87
§4-6 异重流的混合现象	93
第五章 河道演变	97
§5-1 河道演变的基本概念	97
§5-2 河流的形成及其一般特性	102
§5-3 蜿蜒性河段	108
§5-4 微曲性河段	116
§5-5 游荡性河段	122
§5-6 浅滩	127
§5-7 河相关系	134
第六章 河床变形预测	146
§6-1 水库淤积和坝下游一般冲刷的描述	147
§6-2 水库淤积和坝下游一般冲刷的计算	151

§6-3	水庫淤積和壩下游一般冲刷略估	156
§6-4	河床細部变形計算	166
§6-5	壩下游局部冲刷計算	169
§6-6	床沙粗化計算	175
§6-7	桥渡建築物附近的河床变形計算	182
§6-8	防护建築物附近的局部冲刷計算	194
§6-9	河床平面变形和河型变化問題	198
第七章	河工模型試驗的理論基础	200
§7-1	河工模型試驗的种类及其应用范围	200
§7-2	相似理論的基本概念	200
§7-3	定床河工模型試驗	203
§7-4	比尺动床模型試驗	208
§7-5	自然河工模型試驗	217
§7-6	气流河工模型試驗	220
第八章	河工模型試驗的設備、制造及試驗工作	223
§8-1	試驗設備	223
§8-2	模型制造	229
§8-3	模型檢驗	232
§8-4	輔助試驗	234
§8-5	量測仪器	237
§8-6	試驗操作与資料整理及分析	244
附录 I	因次分析法則——π 定律	247
附录 II	环流	253
附录 III	水流平面图	263
附录 IV	天然河流的糙率	269

緒 論

§0-1 河流动力学的研究对象

人类为了发展生产和丰富自己的生活，从很早的时候起，便不断与江河进行斗争。在长期的斗争过程中，逐渐积累了这方面的系统的科学知识，首先是关于整治河道的工程技术方面的知识，其次是关于河流运动发展的基本规律的知识。前者属于治河工程学的范畴，后者属于河流动力学的范畴。

河流是水流与河床交互作用的产物。河水作用于河床，使河床发生变化；河床也反过来作用于水流，影响水流的结构。二者构成一个矛盾的统体，相互依存，相互影响，相互制约，永远处于变化和发展的过程中。

例如冲积平原中的蜿蜒性河段，常常从微弯转化为一般的弯曲；再转化为剧烈的弯曲；在条件适合的情况下，出现自然裁直；继而又转化为微弯。此后再重复上述过程，不过不是简单的重复，而是新的发展。

从上面这个例子可以看出，一条河流，不仅河水不断地运动着，发展着；河床也不断地运动着，发展着。只是相对来说，后者的运动、发展要比前者慢一些而已。如果只认为河水在运动，而把河床看成固定不变的东西，这是不正确的。在地貌学、河流动力学的文献中，有所谓“稳定”或“平衡”河道之说。读者应该明确，关于一条河流或一个河段的稳定或平衡，只能做相对的理解，绝对稳定或绝对平衡的河流或河段是自然界中不存在的。

河流的运动和发展，虽然也存在一些偶然性的因素，但主要是按着它本身固有的客观规律进行的。这种客观规律，不以人的意志为转移。不过，当我们了解并掌握了这些规律以后，就有可能运用这些规律对河流加以改造，使河流的运动、发展有利于生产，为社会造福。因此，为了很好地从事河道整治工作，对江河运动的发展规律作深入系统的研究，是完全必要的。河流动力学便是研究河道在自然状态下以及受人工建筑物控制以后在水流与河床相互作用的过程中运动发展的力学规律的科学。河流动力学所研究的基本矛盾是水流与河床之间的矛盾。这是读者在学习本书时，应当自始至终把握住的。

从河流动力学研究的一般问题看来，水流与河床这两个矛盾着的方面，水流往往居于主导地位。在河道演变过程中，水流是一个很活跃的因素。正因为如此，在研究河道演变的有关问题的时候，首先要弄清楚流性、流型^①。抓住了流性、流型，进一步分析河道演变发展的趋势，就比较容易。在从事河道整治的时候，也应当更多地着眼整治水流。水流整治好了，河床便有可能向着所要求的方向发展。作为治河工作者，明确这一点，无论在理论上，或者在实践上，都有很重要的意义。不过，我们对于这个问题，不可以作片面的理解。矛盾着的两方面，水流虽然往往居于主导地位，却不等于说，河床

^① 本书所指的“流性”一般指滞性流、紊流、急流、缓流、高速水流、普通水流等不同的水流属性；“流型”一般指的是流速分布状态等。

对水流不起作用。与此相反，河床并不是处于绝对被动的地位，它对水流的流性、流型以及变化发展经常起着作用。而且，在一定的条件下，矛盾的主导方面，也可能从河流转化到河床。例如长江在流经三峡的时候，显示出一系列的极为特殊的水流性状。在这种情况下，就不能不承认河床对水流起着决定性的支配作用，而成为矛盾的主要方面。正因为如此，作为治河工作者，不仅要掌握与水流有关的水文情况和水力学情况，对于与河床有关的地形、地貌、地质等方面的情况也应该有比较充分的了解，借以明确河床对水流的具体作用以及在发展过程中可能出现的作用。只有全面地掌握了矛盾着的两个方面的相互关系，并将它们放在适当的位置加以考虑、分析，才能有利于河道整治问题的恰当解决。

在水流与河床交互作用的过程中，许多情况下，泥沙运动起着纽带作用。换句话说，二者的交互作用，在许多情况下，要通过泥沙运动来达到和体现。例如，在一种情况下，通过泥沙的淤积，使河床抬高；在另一种情况下，通过泥沙的冲刷，使河床降低。事实上，泥沙有时是河床的组成部分，有时又可能是水流的组成部分；在运动过程中，从矛盾的一个方面转化到矛盾的另一个方面。泥沙运动在水流与河床相互关系中的这种纽带作用，使得关于泥沙运动的基本规律的研究成为河流动力学中的核心问题。

概括地说，河流动力学可以视为由两个主要部分所组成，即：泥沙运动基本规律部分和河道演变基本规律部分。这两个部分是紧密联系、相互渗透、不可割裂开来的。本书的第一至第四章，属于第一部分；第五和第六章属于第二部分。第七与第八章讲述研究这些规律的一种特殊方法——河工模型试验。此外，另将因次分析法、环流、水流平面图以及天然河流的糙率等特殊课题列为附录。

§0-2 人类与江河作斗争的历史过程简述以及 河流动力学的形成和发展

自然科学是关于生产斗争的科学。物质生产一方面向自然科学的形成和发展提出要求，另一方面又向自然科学的形成和发展提供材料和条件。因此，社会生产发展状态对于自然科学的发展起着决定的作用。河流动力学的形成和发展也不能离开这条普遍的规律，它与社会生产发展状态、人类与江河作斗争的历史过程是紧密联系着的。

在封建社会及其以前的时期中，社会生产以农业为主。广大农民群众，为了使农作物能够丰收，一方面要与洪水灾害和水土流失的现象进行斗争，另一方面要引水灌溉和排除渍涝。因此，这个长时期中的河道整治工作，大都以防洪为主，再加上水土保持、排涝和灌溉进水口附近的整治等。我国的史实以及印度、古埃及和古巴比伦的史实都说明了这一点。关于航运及其他方面的整治工程，在这一时期中也有一定的发展。我国的南北大运河，便是封建社会中的一个伟大的工程。不过，整个说来，当时的航运工程与防洪工程等比较起来，仍处于次要地位。

以商品生产为特点的资本主义社会出现以后，对于交通运输的要求较前大为提高。因此，在欧洲和美洲的资本主义国家中，以改善航道为主要目的的河道整治工作以及开凿人工运河的工作曾经盛极一时。关于防洪等方面的要求，也在整治过程中同时予以考虑。这时候，以力学等为前奏的近代自然科学兴起了，关于流体运动的一些基本规律被

揭发出来。通过实地观测、河工試驗等，使对河流运动的內在矛盾的深入分析逐渐成为可能。在这种条件下，治河工程学便以一門独立学科成长起来，同时，为河流动力学积累了一些零碎的知識。不过，在资产阶级的統治下，从事水利建設的目的，归根結底是为了增加資本家的利潤。而在資本家夺取利潤的竞争中，內部矛盾是复杂的，因此全面开发、綜合利用的观点不可能在治河工程中体现出来。博德尔水利樞紐是美帝国主义吹嘘备至的所謂“多目标开发”的工程。但是，在这个水利樞紐完工以后，左岸与右岸爭夺水权的問題更加尖銳化了；而且，哥罗拉多河在博德尔坝下游的河段不是改善了，而是更加恶化了。这种左右岸冲突、上下游脱节的严重情况的发生，是与腐朽的社会制度分不开的。

自从十月社会主义革命以后，世界上出现了社会主义国家，人类与江河作斗争的事业，在性质上、速度上、規模上都呈现出資本主义社会里所不可能有的崭新的局面。在社会主义国家里，江河是全民所有的重要資源之一。河道整治的目的，再也不是为了少数人的利潤，而是使河道演变尽可能地向有利的方向发展，从而使水利資源得到最科学、最有效的利用，以促进工业、农业、交通运输业的发展，丰富和提高广大人民的物質生活和文化生活。

按照社会主义制度的特点，河道整治必須也有可能从全流域着眼，上、中、下游統筹。必要的时候，还可以在几个流域以至全国范围内考虑水利資源的全面調配問題。在有关的规划和措施中，既要把防止水害的問題放到应有的重要地位，使广大人民生命财产的安全得到必要的保障，又要明确水是国家的宝贵資源之一，应该尽可能地予以利用；既要注意当前的要求和条件，又要照顾今后的发展。就治河工程的規模和速度說，也不是資本主义国家可以比較的。

由于河道整治工作在实践上突飞猛进，有关的科学理論也相应地飞跃发展，不仅治河工程学在水利資源綜合利用的原則下得到本质的变革和发展，河流动力学也以一門独立的学科在社会主义国家中首先出現。

河流动力学在自然科学中成为一个分枝以后，它的发展是很迅速的。不过，由于它的形成毕竟还只有三、四十年的历史，理論上还很不成熟，很不完整。实践中提出了大量的課題，还远不能凭借現有理論一一得到圓滿解决。这一門科学的进一步发展是必要的，也是必然的。

我国从很早的时候起，便在与江河作斗争中留下了輝煌的事迹。無論在防洪、灌溉、水土保持或开凿人工运河等方面，都作出了卓越的事业。关于黄河的治理，更是历尽千辛万苦，积累了十分宝贵的經驗。从治河原則說，在导流、分流、滯洪、束水攻沙等方面，曾經形成比較系統的观点；从技术措施說，在堤防、埝工、进占合龙等方面，也創造了許多弥足珍贵的經驗。

中华人民共和国成立以后，党和政府对治河事业十分重视。在正确的方針的指导下，十一年来，取得了前所未有的成績。从防止水害來說，各河流长达十余万公里的干支堤防經過了加高培厚、改綫延伸、消除隱患、防护險工等措施，提高了防洪标准，結合蓄洪、滯洪、分洪等一系列的工程，使洪水威胁大大減輕。北起松花江，南至珠江，解放后都曾受特大洪水考驗，取得了巨大的胜利。此外，在排除潰澇、控制水土流失等方面，也获得初步成果。从兴修水利來說，无数的小型水利工程和大量的中型水利工程以及成批

的大型水利工程結合在一起，使灌溉面积比解放前有了成倍地增加，同时迅速地促进了水力发电等事业的发展。航运工程方面，全国通航水道的长度較解放初期增加了一倍以上，对于南北大运河也正进行着疏浚和整治。关于黄河、永定河等大河流的系統整治，有的已經开始，有的正积极规划。随着治河事业的迅速发展，許多基本观测工作打下了比較巩固的基础；有关的科学研究工作也作出了一定的成績。尤其可贵的是：一支新型的河道整治和河流动力学方面的科学技术队伍正在逐漸形成。在党的领导下，这支成长壮大中的新型科学技术队伍，与广大劳动人民結合在一起，无疑地将在进一步开拓这方面的建設事业和科学事业中作出应有的贡献。

§0-3 学习河流动力学的方法

学习任何一門科学，都必须掌握正确的方法。学习河流动力学也是如此。

要学好河流动力学，首先要自觉地努力学会掌握理論与实际結合的原则。我們学习河流动力学的目的，是为了很好地对祖国的河流进行整治工作。从这个学习目标出发，我們就会自觉地經常留意祖国治河事业的成就、发展的趋势、存在的重大科学技术問題等等，同时也会提高我們学习的积极性和钻研精神。在学习过程中，要学会善于从实际出发，注意占有大量的实际資料，认真分析属于水流的和属于河床的具体情况，尊重广大羣众在治河工作中的經驗和創造，并尽可能地避免主观臆断。然而，从实际出发不等于停留于实际，应该逐漸学会通过对实际資料的全面深入的分析，进行理論概括，丰富和发展河流动力学的理論；并进而將理論用于实际中去，一方面推动实践，另一方面使理論經過实践的檢驗以后得到修正、补充和提高，使之成为进一步指导治河工作的更加完善的武器。明确学习的目的是为了实践；在学习过程中善于从实际出发；从实际上升到理論；再使理論回到实际中去——这便是我們在学习中应该遵循的道路。

其次，在学习过程中，要认真观察和分析河流运动过程中的矛盾現象，揭露客观存在着对立与統一的規律，坚持具体地分析具体情况的科学精神，避免籠統地对待問題。要学习全面深入地考察矛盾；学习区别主要矛盾和次要矛盾、矛盾的主要方面和次要方面以及它們的变化和发展。要努力摒弃形而上学的、片面的、机械的观点，使对立和統一的观点、联系和发展的观点逐漸在思想上扎下牢固的深根。

以为可以不通过长时期的艰苦鍛炼，便能够把辯証唯物主义的观点在自己的思想中树立起来，并正确地运用它去分析和說明科学問題是不现实的，因而是错误的；反之，由于这个科学观点不容易树立，便視為畏途，躊躇不前，也是错误的。

再次，学习河流动力学象学习其他任何一門科学一样，对前人和国外的成果，都必须坚持批判地继承和批判地吸收的原则。一方面应该认真地学习前人和国外积累下来的有关知識，虛心地继承和吸收其中对于我們有益的、属于科学真理的部分。对苏联和其他社会主义国家的成果，更应该认真地学习。对于资本主义国家在河流动力学中的好的成果，我們也要学习。对于青年同学來說，在继承和吸收中付出严肃的劳动，更是十分重要的。与此同时，也不可以把前人和外国的一切成果，都視為正确的、完美无缺的，当成不能打破、不能逾越的框框；或者不問具体条件如何，进行生搬硬套，做一个学习中的懶汉。与此相反，在学习过程中，应该逐漸学会掌握批判的武器。要明确官从与驕

傲自滿是科学道路中的两个不同性质的大敌。我們要鍛煉自己，逐漸学会善于与这两个大敌作斗争。

最后，我們还應該看到，十一年来祖国在治河事业中取得的成果是重大的，广大群众积累的經驗是丰富的。在毛泽东思想指导下，以这些成就作基础，再加上勤勤恳恳的、扎扎实实的科学劳动，完全應該也完全可能使河流动力学象其他各門科学一样，得到新的发展。如果考虑到河流动力学是一門新兴的科学，許多理論还很不成熟，而祖国在治河事业方面的任务又十分繁重，将不难理解，我們青年一代逐漸学会把批判地继承和吸收与新的探索和发展很好地結合起来，該有多么重要的意义。

上面所提到的几个問題，是学习中重要的問題，而不是全部問題。从上面的說明可以看出，客观世界的改造与主观世界的改造是紧密結合的。要学好河流动力学，为祖国的治河事业作出应有的貢獻，就必須走又紅又专的道路，热爱祖国，热爱专业，忠实于党，忠实于人民，努力树立辯証唯物主义的科学观点，养成严肃朴实的劳动态度。只有如此，才能更好地推动河流动力学的发展；也只有如此，才能更好地献身于祖国的偉大的治河事业。

第一章 泥沙的特性

我們通常把組成河床和随水流运动的小顆粒矿物质叫做泥沙。但是，在河流动力学的文献中，也常常給予泥沙以广义的涵义，除了小顆粒矿物质以外，还包括砾石和卵石等。

在研究泥沙随水流的运动状态以前，有必要先了解泥沙的几个重要的力学特性。

§1-1 泥沙的粒徑和粒配曲綫

粒徑是表示泥沙顆粒大小的一个量度。在表达泥沙顆粒大小的时候，我們遇到了两个困难，一个是泥沙顆粒的形状是不規則的；一个是泥沙常常是由大小不等的顆粒組成的。

为了克服泥沙顆粒在形状上的不規則性这个困难，我們采用等容粒徑(或球态粒徑)来表达泥沙顆粒的大小。所謂等容粒徑，就是容积与泥沙顆粒相等的球体的直徑。如某粒泥沙的容积为 V ，則这顆泥沙的等容粒徑 d 应为：

$$d = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (1-1)$$

泥沙的等容粒徑或球态粒徑通常被簡称为粒徑，它的因次为 $[L]$ ，工程中常用的单位为毫米。

要先把一粒粒的泥沙的容积 V 量出来，再去按方程式1-1去求它們的粒徑，显然是很麻煩的，也沒人这样去做。在实际工作中，常用篩析法、比重計法等去确定泥沙的粒徑。运用这些方法，求出来的粒徑，严格說来，并不能够如实地反映方程式1-1的要求。但是，这些方法在国际科学界中已經通用，因而这些方法得出的泥沙顆粒的相对大小仍然是具有普遍意义的。讀者應該懂得，任何一种量度都只能从相对的或比較的意义上去理解。

为了克服在一个沙样中所包含的泥沙顆粒粒徑不等的这个困难，我們采用粒配曲綫的表达方式。图1-1表示两种不同的沙样粒配曲綫。这种粒配曲綫通常都画在半对数坐标紙上，横坐标表达泥沙顆粒的粒徑，纵坐标表达在所考虑的沙样中粒徑小于横坐标上相应的某一粒徑的沙粒在总沙样中所占的重量百分比。例如，在曲綫I所表示的沙样中，粒徑小于0.115毫米的沙粒在整个沙样中所占的重量百分比为77%。

这样的粒配曲綫很清楚地告訴我們两个情况：一个是沙样的粒徑相对大小；另一个是沙样粒徑的均匀程度。落在粒配曲綫图右边的曲綫(曲綫II)显然代表粒徑較小的沙样，坡度較陡的曲綫(曲綫I)显然代表粒徑比較均匀的沙样。

除了从图中直接看出沙样的粒徑的相对大小以外，我們还可以根据粒配曲綫，采用粒徑的某种特征值去表达沙样粒徑的相对大小。常用的这种特征值有两个：一个叫中值粒徑 d_{50} ，它是在粒配曲綫上与纵坐标50%相应的粒徑，在图1-1的曲綫I与曲綫II上的

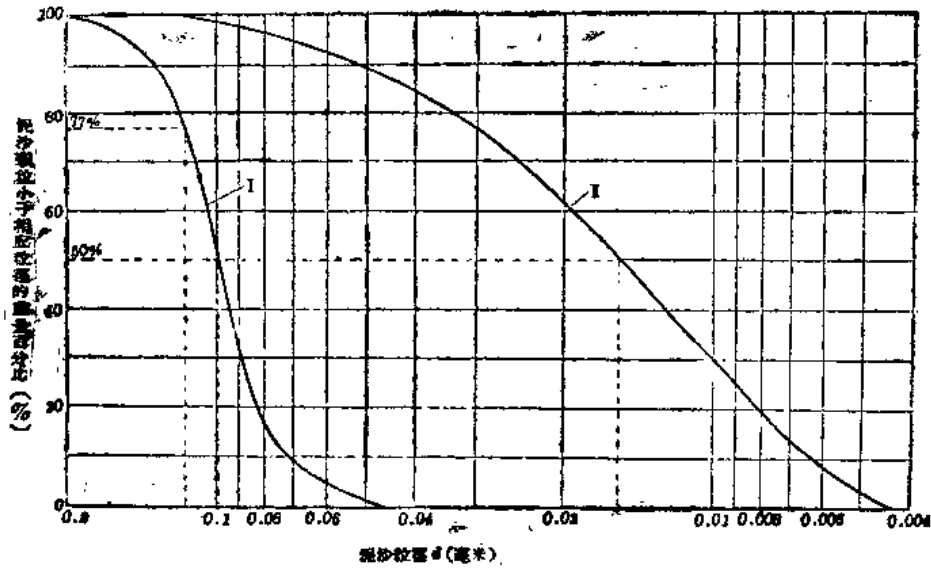


图1-1 泥沙的粒配曲线

中值粒径分别为0.099毫米及0.0155毫米。

另一个叫做平均粒径 d_p 。它的求法如下：

把一个沙样按粒径大小分成若干组，定出每组的上下极限粒径 d_{max} 与 d_{min} 以及这一组泥沙在整个沙样品中所占的重量百分比 P_i ，然后求出各组泥沙的平均粒径 d_i （ $= \frac{d_{max} + d_{min}}{2}$ ）^①，再用加权平均的方法求出整个沙样的平均粒径 d_p 。如令分组的数目为 n ，则沙样的平均粒径应为

$$d_p = \frac{\sum P_i d_i}{100} \quad (1-2)$$

对于同一个沙样，由于分组的方式和数目不同，得出来的平均粒径 d_p 的数值也不一定完全相同。无论是中值粒径或者是平均粒径，作为表达沙样的一般情况的特征值来说，都只具有相对的意义。

粒径的大小是泥沙的一个重要的特性。它不仅直接代表泥沙的颗粒粗细程度，而且与泥沙的许多其它特性紧密关联。例如：在同样的水流中，粒径不同的泥沙颗粒会表现出不同的运动状态；较粗的泥沙（ $d > 0.05 \sim 0.1$ 毫米）没有粘性，较细的泥沙（ $d < 0.005 \sim 0.01$ 毫米）具有粘性，而粘性泥沙与非粘性泥沙在同水流交互作用的过程中，会表现出不同的情况。一般说来较细的泥沙具有较大的空隙率和较小的干容重，较粗的泥沙则相反；细颗粒的泥沙（ $d < 0.005$ 毫米）多半是棱角峥嵘的，粗颗粒泥沙（ $d > 0.1$ 毫米）多半是失去棱角的；等等。因此，在面对一条具体的河流、渠道等对象的时候，我们往往有必要弄清楚组成河床或渠底的泥沙粒径以及水流携带的泥沙粒径是怎样的。

① d_i 也可以用下式求出： $d_i = \frac{1}{3} (d_{max} + d_{min} + \sqrt{d_{max} d_{min}})$ 。

分析一个沙样粒徑的工作是一項細致的工作，稍一不慎，就容易使所得結果失去应有的精度。而关于泥沙运动状态的各种論証和分析，往往涉及到泥沙粒徑的大小。如果泥沙粒徑的分析工作作得不精确，則有关的論証和分析將建立在不可靠的粒徑資料的基础上。这种情况自然是有害的，應該竭力避免。因此，在从事泥沙顆粒分析工作时，絕不能因为这项工作比較繁瑣而放松在工作中的严肃性和耐心。

在結束本节之前，附带指出一个問題：在天然河道中，往往是越向上游組成河流的泥沙以及水流携带的泥沙越是粗一些；越向下游越是細一些。造成这种现象的主要原因，應該歸結到河道上游和河道下游不同的水流情况。泥沙的沿程磨損，虽然也使泥沙的顆粒有所变細，但是不能把这个因素当作主要因素去解釋天然河道中泥沙沿流程变細的問題。在一条河流的某些特殊的河段中，也往往有反常的现象出現，即靠下游的河段的泥沙反而比靠上游的河段的泥沙粗一些。这种反常现象，可以用水流情况的变化去解釋，却不能用泥沙沿程磨損的論点去解釋。有些科学工作者，偏重泥沙沿程磨損的观点，并且根据这种观点，提出表达泥沙顆粒大小与运动距离之間的关系的数学公式。应当說，这种作法是值得商榷的，尤其是应用这样的公式去处理具体的問題，更是应当特別慎重的。

§1-2 泥沙的密实重率和干容重

泥沙的密实重率（也簡称重率） γ_s ，是泥沙各个顆粒实有的重量与泥沙各个顆粒实有的体积的比值。由于构成泥沙的岩石成分不同，泥沙的密实重率也常有所变化。不过一般說来，这个变化幅度不大，通常的变化范围为2,600公斤/米³至2,700公斤/米³。在討論一般問題的时候，我們常取 $\gamma_s = 2,650$ 公斤/米³。

泥沙顆粒在水流中运动的时候，运动状态往往和泥沙的重率 γ_s 和水的重率 γ 的相对数量有关。我們常采用重率系数 a 来代表这个相对数量，并令

$$a = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, \quad (1-3)$$

若以 ρ_s 及 ρ 分別代表泥沙的密实密度(或簡称密度)和水的密度，則

$$a = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}. \quad (1-4)$$

a 为无因次值，在討論一般問題的时候，常取 $a = 1.65$ 。

淤积泥沙的干容重 γ' 是沙样烘干后(100~105°C)的重量与原状沙样的整个体积(包括泥沙顆粒实体和空隙)的比值。与密实重率 γ_s 不同，淤积泥沙的干容重 γ' 的变化幅度是相当大的，实际观测中曾經得到淤积泥沙干容重 γ' 的最大数值超过1,700公斤/米³，最小数值低于300公斤/米³。在水利建設的許多实际問題中，例如水庫的淤积問題，正确估計淤积泥沙的干容重相当重要。但要做到这一点，却又是困难的。

从实际观测中，得知影响淤积泥沙干容重的主要因素有如下两个：

1. 泥沙的粒徑

泥沙的粒徑是影响淤积泥沙的干容重的首要因素。总的趋势是：粒徑較大的淤积泥沙的干容重要大一些，变化范围要小一些；反之，粒徑較小的淤积泥沙的干容重要小一

些，变化范围要大一些。

图 1-2 系根据我国官厅水庫、塘沽新港、大浦閘、射阳河擋潮閘、黄河河床、新洋河新淤尖閘等六处資料繪成的外包綫图。从該图可以看出：中值粒徑 d_{50} 为 0.05 毫米的淤积泥沙，它的干容重 γ' 的变化范围为 1,230 至 1,670 公斤/米³；而中值粒徑 d_{50} 为 0.005 毫米的淤积泥沙，它的干容重 γ' 的变化范围为 560 至 1,350 公斤/米³。后者的平均数远較前者为小，而变化幅度远較前者为大。

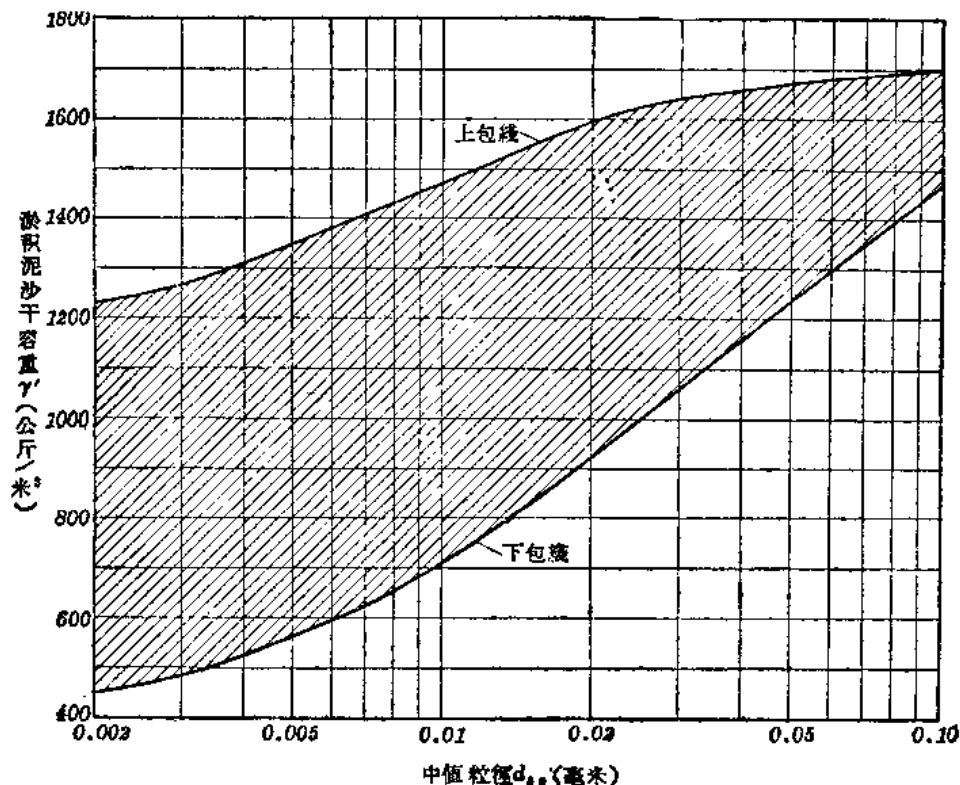


图 1-2 淤积泥沙干容重与中值粒徑的关系

較細的泥沙在沉淀的过程中，形成云雾状的胶結体，使淤积物的结构与蜂窩相类似，因而空隙率較大，干容重較小，同时具有較大的压缩性，故空隙率和干容重的变化幅度也較大。这种現象，对于較粗的泥沙来說，是根本沒有的（如雾状胶結沉淀）或比較微弱的（如沉淀后的压缩性）。

2. 淤积的深度

由于上层的淤积泥沙，会以一定的压力加于下层的淤积泥沙，使下层淤积泥沙发生压缩現象，因而淤积泥沙的干容重随淤积深度而变化；淤积深度越大，干容重也越大。

图 1-3 系根据官厅水庫实测資料繪成的。从該图中，除了可以看到淤积泥沙的干容重随淤积泥沙的深度增加而增大的明显趋势外；还可以看出，淤积深度越大，干容重的变化幅度越小。当淤积深度超过一定数值以后，干容重繼續增加的趋势应该逐渐变弱，而接近于某一个极限值。但是，由于图 1-3 所包括的淤积深度的上限較小，这种应有的趋势，在該图中看不出来。

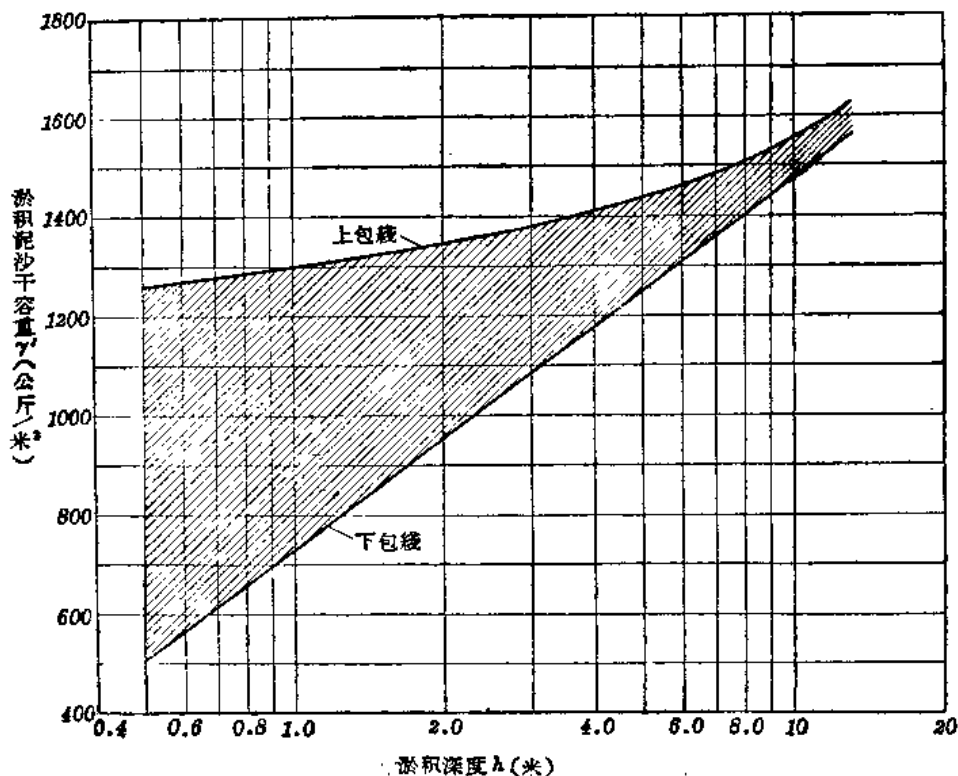


图 1-3 泥沙淤积干容重与淤积深度的关系

除上面的两个因素以外，淤积泥沙经历时间的久暂、有无机会露出水面在空气中暴露、排水情况如何、细颗粒的化学成分如何(影响沉淀过程中的胶结现象)等等，都对淤积泥沙的干容重有一定的影响。但是，在一般情况下，这些因素和上面两个因素比较起来，居于次要地位^①。

由于影响淤积泥沙干容重的因素比较复杂，到现在为止，实际观测资料还不够丰富，因此还不能为淤积泥沙干容重的确定找出一个合用的计算公式。虽然曾经有些科学工作者提出这样的计算公式^②，但它的普遍适用性不高。

§1-3 泥沙的水力粗度

因泥沙的重率大于水的重率，在水中的泥沙颗粒，将受重力作用而下沉。在开始自然下沉的一瞬间，初速为零，抗拒下沉的阻力也为零，这时只有有效重力起作用，泥沙颗粒的下沉会具有加速度。随着下沉速度的增大，抗拒下沉的阻力也将增大，终于会使下沉速度达到某一极限值。此时泥沙所受到的有效重力和阻力恰恰相等，泥沙颗粒的继续下沉将以等速的方式进行。在河流动力学中，把泥沙颗粒在静止的清水中下沉的时候

① 方宗岱、严学南：“水库淤积物干容重资料分析”，泥沙研究，第3卷，第3期，45~51页，1958年。

② “Density of Sediments Deposited in Reservoir”，Report 9, Hyd. Lab. University of Iowa.

所具有的上述极限速度，叫做泥沙的水力粗度 ω （也叫做泥沙的沉速），它的因次为 (L/T) ，常用的单位为厘米/秒。

水力粗度是泥沙的重要特性之一，在河流动力学研究的问题中，常常涉及到它。

实践证明泥沙颗粒在静水中下沉的时候，它的运动状态与雷诺数 $\omega d/\nu$ 有关，此处 ν 为水的运动粘滞性系数， d 及 ω 分别为泥沙颗粒的粒径与沉速。当雷诺数 $\omega d/\nu$ 较小时（约小于 $0.5 \sim 0.6$ ），泥沙颗粒基本上沿铅垂线下沉，附近的水几乎不发生紊流现象（图1-4），这时的运动状态属于滞性状态。在这种运动状态下，泥沙颗粒在下沉过程中所受到的水的阻力与水的动力粘滞性系数 μ 、泥沙粒径 d 及泥沙沉速 ω 三者相乘积的一次方 $\mu d \omega$ 成比例。当雷诺数 $\omega d/\nu$ 较大时（约大于 $1,000$ ），泥沙颗粒脱离铅垂线以极大的紊动状态下沉，附近的水产生强烈的绕动和涡动，这时的运动状态属于紊动状态（阻力平方区）。在这种运动状态下，泥沙颗粒在下沉的过程中所受到的水的阻力与水的动力粘滞性基本上无关，而与水的密度 ρ 的一次方以及泥沙的粒径 d 和沉速 ω 的二次方成比例——与 $\rho d^2 \omega^2$ 成比例。当雷诺数 $\omega d/\nu$ 介于 0.5 到 $1,000$ 之间时，泥沙颗粒的下沉处于过渡状态。必须明确的是，从前一种运动状态向后一种运动状态的过渡是逐渐完成的，不是突然完成的。这一点，已为实验结果所证实。至于泥沙颗粒在下沉过程中所受到的重力 G ，不论在怎样的运动状态下，都应该与有效重力 $g(\rho_s - \rho)$ 和泥沙粒径的三次方 d^3 的相乘积 $g(\rho_s - \rho)d^3$ 成比例，即

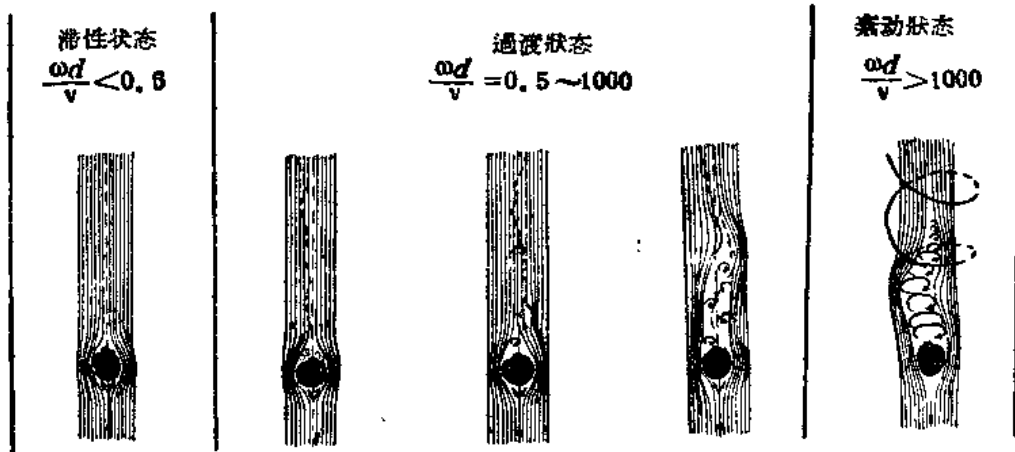


图1-4 泥沙颗粒在静水中下沉的运动状态示意图

$$G = k_1 g(\rho_s - \rho)d^3. \quad (1-5)$$

此处 k_1 为无因次的系数，可以叫做体积系数；如果泥沙为完整的球体，则 k_1 应为 $\pi/6$ 。

弄清楚了泥沙颗粒下沉过程中的运动状态以后，我们便有可能为这种运动状态写出比较合理的动力平衡方程式，并通过动力平衡方程式求得泥沙颗粒水力粗度的表达式。

就上述的过渡状态来说，下沉泥沙颗粒所受的阻力 W 为

$$W = k_2 \mu d \omega + k_3 \rho d^2 \omega^2, \quad (1-6)$$

此处 k_2 和 k_3 都系无因次的系数，与泥沙的形态有关。

当泥沙颗粒的沉速达到了极限值且呈等速运动的时候，应有

$$G = W, \quad (1-7)$$