

泥沙起动规律

及起动流速

韩其为 何明民 著



科学出版社

内 容 简 介

本书是泥沙起动方面的专著,对泥沙起动规律及起动流速在理论上做了较全面、较深入的研究,在机理揭示、规律的表述和计算公式方面均取得了相当进展,引进了不少新的概念,介绍了新的研究成果,较全面地搜集了具有各种代表性的泥沙试验和野外测验资料,并对研究结果进行了检验,还强调了在工程泥沙中的应用。

本书可供从事泥沙工作的科技工作者、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

泥沙起动规律及起动流速/韩其为、何明民著. -北京:科学出版社, 1999

ISBN 7-03-007446-7

I. 泥… II. 韩… III. ①泥沙运动-规律-研究②泥沙运动-初速度-研究 N, N14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 08791 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1999 年 10 月第一次印刷 印张: 7 $\frac{1}{2}$

印数: 1—1 200 字数: 192 000

定价: 11.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

泥沙起动规律及起动流速

韩其为 何明民 著

科学出版社

1999

内 容 简 介

本书是泥沙起动方面的专著,对泥沙起动规律及起动流速在理论上做了较全面、较深入的研究,在机理揭示、规律的表述和计算公式方面均取得了相当进展,引进了不少新的概念,介绍了新的研究成果,较全面地搜集了具有各种代表性的泥沙试验和野外测验资料,并对研究结果进行了检验,还强调了在工程泥沙中的应用。

本书可供从事泥沙工作的科技工作者、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

泥沙起动规律及起动流速/韩其为、何明民著. -北京:科学出版社, 1999

ISBN 7-03-007446-7

I. 泥… II. 韩… III. ①泥沙运动-规律-研究②泥沙运动-初速度-研究 N, N14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 08791 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1999 年 10 月第一次印刷 印张: 7 $\frac{3}{8}$

印数: 1—1 200 字数: 192 000

定价: 11.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前 言

泥沙起动即不同粗细泥沙的开始运动,其水力条件(流速、水深等)的研究是泥沙运动力学与河床演变的重要内容之一,在工程上得到广泛应用。水利方面的水库排沙、河床演变、渠道稳定、抛石截流和护岸,以及其它方面的航道治理、桥梁冲刷、水环境保护等与泥沙起动均有密切的关切。从学科上看泥沙起动是泥沙运动的起始环节,也是泥沙运动力学的基础之一。泥沙运动的一些基本问题,如推移质输沙率、悬移质挟沙能力等与其有不可分割的联系。因此泥沙起动方面的研究进展对泥沙运动理论有一定推动作用,而泥沙运动其它方面的研究也能促使起动研究的深入。从实质看,泥沙起动事实上也是一种低输沙率状态,也应服从低输沙率规律。从这个角度着眼,可以更确切理解泥沙起动的概念,它实际上是某一种输沙率(尽管很低的输沙率)下的状态。可见,如果有一个理论基础好、符合实际的低输沙率公式,则相当于提供了一系列的起动流速关系(公式)。

泥沙起动的最早研究可以追溯到17世纪。如果从给出起动流速基本合理的框架并且得到水利界的一定认同看,似应从Эри(1834)开始;在本世纪20~40年代,由于水利工程的需要,对起动流速(或起动切应力)进行了颇多的研究,特别是大量的水槽试验。我国参加这一研究行列的起步较晚,其中何之泰的试验(1934)可能是最早的。由于我国泥沙多,工程泥沙问题复杂,在50年代以后,一部分泥沙研究工作者和水利工程师持续进行了研究,其总体成就已属于国际先进水平,其中相当一部分内容已处于国际领先水平。目前仍然居先进地位的有50~60年代对细颗粒受力情况及粗细泥沙起动流速统一规律的理论,80~90年代对泥沙起动统计规律、起动标准的研究以及非均匀沙分组起动流速的

研究等。另有一些内容如泥沙起动机理的揭示、暴露度对起动影响和卵石起动特性及起动流速等，我国研究得颇为深入，并取得了相当进展。此外，我国研究者为了使理论得到进一步检验，增加成果的使用价值，对天然河道的起动资料注意搜集、分析，积累了相当一部分宝贵数据。

正因为泥沙起动问题在工程和理论上均有重要意义，多年来我们陆续参加了这方面的研究，并取得一定成果，现以专著形式编写成此书。本书共分六章，主要介绍泥沙起动的力学分析及统计规律、推移质输沙率及泥沙起动标准、均匀沙起动流速资料分析及其验证、非均匀沙起动流速资料分析及其验证和细颗粒成团起动研究。

本书部分内容系国家自然科学基金委员会与中国长江三峡开发总公司联合资助的重大项目的成果（项目编号为 59493600）。

本书是泥沙起动方面的专著，在编写过程中力求做到机理阐述清晰、思路明确、理论分析和推导严谨、实际资料检验充分。由于已有的成果和我们的水平限制，不足和缺点在所难免，请予以指正。

目 录

前言

第一章	泥沙起动研究概述	1
1-1	引言	1
1-2	沙、砾起动研究	3
1-3	细颗粒起动研究	9
1-4	卵石起动研究	18
1-5	非均匀沙起动研究	20
1-6	泥沙起动的随机性及统计规律	32
第二章	泥沙起动的力学分析及统计规律	38
2-1	粘着力与薄膜水附加压力	38
2-2	床沙和淤积物干容重的确定	49
2-3	颗粒的瞬时起动流速	59
2-4	影响起动偶然性的随机变量及起动的统计规律	64
第三章	推移质低输沙率及泥沙起动标准	82
3-1	推移质低输沙率	82
3-2	泥沙起动基本标准选择	104
3-3	沙、泥起动标准	109
3-4	卵石和宽级配床沙起动标准	112
3-5	有关起动标准的讨论	116
第四章	均匀沙起动流速资料分析及验证	125
4-1	水槽试验资料分析和验证	125
4-2	河道测量资料验证	145
第五章	非均匀沙起动流速资料分析及验证	159
5-1	卵石形状对瞬时起动流速的影响	160
5-2	卵石起动状态的野外试验及对理论的检验	165
5-3	卵石分组起动流速的野外资料检验	175
5-4	非均匀沙分组起动流速的检验	179

5-5	非均匀沙综合起动流速	183
5-6	分组起动流速公式的讨论	185
5-7	非均匀沙起动时的分选	196
第六章	细颗粒泥沙成团起动及其起动流速的研究.....	200
6-1	细颗粒成团起动的瞬时起动底速	201
6-2	多颗成团起动瞬时底速与单颗的对比	205
6-3	片状土块起动时临界水深及起动速度	208
6-4	片状土块起动时平均流速与单颗的对比	211
6-5	成团起动流速的验证	212
参考文献		222

第一章 泥沙起动研究概述

1-1 引言

水流底部床面上的泥沙开始运动称为起动,相应的水流泥沙条件称为起动条件。当泥沙颗粒的粒径、密度等已知时,泥沙开始运动的流速和水深称为起动时的流速和水深。由于流速影响大,习惯上将水深作为参数,而将泥沙起动的流速条件称为起动流速。由于作用在泥沙颗粒上的流速是水流底部速度,而在实用上多换算为平均流速(沿水深的平均流速),故起动流速应泛指这两种流速。在本书中“起动流速”除泛指外,还包括沿水深以平均流速表示的起动流速;为了区别,对于以底部流速表示的起动流速,将予以明确注明。

表示泥沙起动条件除起动流速和水深外,尚有另外两种指标。其中在欧美应用较多的是起动拖曳力,即泥沙开始运动时床面底部水流的切应力

$$\tau_c = \rho u_{*,c}^2 = \rho g H J = \gamma H J \quad (1-1-1)$$

其中 ρ 为水的密度, g 为重力加速度, γ 为水的容重, H 为水深, J 为能坡,一般可用水面坡降代替。 τ_c 与起动流速 V_c (以垂线平均流速表示的起动流速)的换算关系为

$$V_c = C_0 u_{*,c} = C_0 \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (1-1-2)$$

此处 $C_0 = \frac{H_0^{\frac{1}{6}}}{n \sqrt{g}}$ 为无因次 Chezy 系数,它与 Chezy 系数 C 的关系

为 $C_0 = \frac{C}{\sqrt{g}}$,而 n 为 Manning 糙率。另一种起动条件的表示是起动功率,它为

$$W_c = \gamma H J V_c = \tau_c V_c = \gamma q_c J \quad (1-1-3)$$

起动功率表示单位宽度、单位长度的水体在单位时间内所损失的势能。这种表示使用很少。除特殊场合引进起动拖曳力外,本书将只采用起动流速的表示。

泥沙起动条件的研究,实际上是研究泥沙颗粒直径、密度以及颗粒间密实程度、形状与水深、流速之间的关系。当然,要彻底研究清楚它们之间的关系,不仅限于这几个物理量,还必须深入到泥沙起动的本质,因而必须研究三个方面的问题。第一,床面上泥沙所受到的各种作用力、颗粒位置(暴露于床面的情况)对其中一些力的影响、作用力的平衡条件、流速脉动与作用力和起动的关系,颗粒密实程度对作用力和起动的影响等。第二,泥沙起动的精确含意,泥沙起动时有无输沙率?它们是否服从输沙率的一般规律?输沙率与起动流速关系如何?第三,泥沙起动具有一定的随机性,它是怎样的随机过程?其中哪些是随机变量?这些随机变量的统计规律如何?它们与起动流速输沙率的关系等怎么样?第一方面是泥沙起动的基本内容;第二方面是深入揭示泥沙起动机理所必须的,同时涉及到泥沙起动的一个关键问题——起动标准;第三方面可以阐述泥沙起动的偶然现象及它们与必然现象的联系,从而能深刻理解其机理。正如下面将要指出的,所有这些方面的研究,综合起来就是起动规律的研究,只有这些研究才能深入到泥沙起动的本质。已有的研究大都限于第一方面,其它两方面仅个别文献有所涉及,甚至第一方面的问题也有不少空白。考虑到起动规律的重要性,作者多年来进行了较全面和深入的研究,现将其成果编写成本书,希望能为读者提供一本这方面的专著。

起动规律及起动流速的研究,是泥沙运动、河床演变最基本的内容之一,因此有很高的学术价值。在工程泥沙方面,包括水库变动回水区冲淤、坝下游河道冲刷、河床变形、护岸工程、渠道稳定性以及物理模型试验、数学模型计算等,起动流速也都是必须的工具和参数。因此起动规律及起动流速研究无论在理论上和实际应用方面均具有很大意义。

本章以下各节将对以往研究情况予以扼要概述。

1-2 沙、砾起动研究

起动流速最早的研究是针对沙、砾石等可以忽略粘着力及薄膜水附加压力的较粗颗粒进行的。起动流速的概念看来最早是由 Бромсон(1753)和 Эри(1834)引进的^[1]。其中 Эри 考虑到水流正面推力与流速的平方成正比,给出了起动流速与颗粒直径方根成正比,或者颗粒重量与起动流速的六次方成正比的关系式。后者被称为六次方定律,在河流学中曾被长期引用^[2]。需要指出的是,他得到的关系尽管在机理方面揭示不够,但是在定性上基本概括了非粘性泥沙,包括粗、中沙、砾石、卵石起动的主要实质。后来的研究注意到底部颗粒的绕流不对称,引进了上举力。在泥沙运动中最早提出上举力存在并给出其表达式的是 Лосневский(1925)^[3],他根据卵石试验证实水流对床面泥沙的上举力与河底流速的平方成正比;加上后来的一些研究,较粗颗粒起动的机理基本被揭露出来。以后的研究主要是正面推力与上举力的数值以及它们之间的关系、它们的阻力系数 C_x 与 C_y 的差别等^[4~7]。其中根据 Дементьев 对充分发展紊流单个圆柱体(长为 $3/2D$, D 为圆柱直径)在光滑床面的试验,当离床面高程 $y=2/3D$ 时, $C_x \approx 0.47$, $C_y \approx 0.1$ ^[4]。为简单起见,后来的研究一般取 $C_x=0.4$, $C_y=1/4C_x=0.1$ 。值得注意的是,当离开床面距离 $y \geq 1.2 \sim 1.5D$ 以后, $C_y=0$, 即上举力消失。Einstein 建议的上举力系数为 $C_y=0.168$ ^[6]。而李桢儒等对光滑床面单颗球体的试验结果表明,当雷诺数 $Re = \frac{u_b}{\nu} > 2 \times 10^3$ 时,在 $y=D/2$ 处 $C_x=0.78$, $C_y=0.18$, 两者之比 C_x/C_y 也接近 0.4 ^[7]。需要强调的是,到目前为止,大多数研究起动流速理论关系的文献对于 C_x 与 C_y 往往并不采用上述一些试验数据,而是将其综合成一个待定的系数,由起动流速试验数据反求。

泥沙起动流速研究除理论关系外,还特别重视起动流速的室

内研究,以期揭示其机理和可靠地确定待定系数。其中较有代表性的有 Gilbert^[8]、Schaffernak^[9]、Вейканов^[10]、Kramer^[11]、何之泰^[12]、美国水道试验站 (USWES)^[13]、Shields^[14]、Meyer-Peter^[15]、侯穆堂^[16]、李保如^[17]、窦国仁^[18]等。鉴于室内水槽试验的水深太小,有一些研究者曾设法收集过一些天然河道资料,如 Шамов^[19]、武汉水力电力学院河流泥沙工程学教研室^[20]、华国祥^[21]、Fahnestoch^[22]、Helley^[23]、秦荣昱^[24]、张启卫^[25]等的资料。尽管天然资料在起动判别时相对困难一些,但这些能反映实际河流现象的资料是很难得的。

综上所述,对于中粗沙和小砾石起动流速的研究,到目前为止,受力情况及作用力的表达式已经清楚。于是,此处及以下为表示明确起见,取颗粒为球体,并且暂不考虑颗粒之间相互遮挡的面积或颗粒暴露度。作用在颗粒上的正面推力 F_x (也即拖曳力 F_0) 一般为

$$F_x = \rho \frac{C_x V_b^2}{2} \frac{\pi}{4} D^2 = \tau_b \frac{\pi}{4} D^2 = F_0 \quad (1-2-1)$$

其中 ρ 为流体密度, C_x 为正面推力系数, V_b 为底部流速, D 为颗粒直径, τ_b 为底部水流切应力,可表为

$$\tau_b = \rho u_*^2 = \gamma H J \quad (1-2-2)$$

u_* 为摩阻流速。作用在颗粒上的升力一般为

$$F_y = \rho \frac{C_y V_b^2}{2} \frac{\pi}{4} D^2 = K_1 F_x \quad (1-2-3)$$

其中 C_y 为推力系数, K_1 为升力对正面推力之比。而颗粒的水下重量为

$$G' = \frac{\pi}{6} (\gamma_s - \gamma) D^3 \quad (1-2-4)$$

其中 γ_s 、 γ 分别为颗粒和水的容重。不同作者考虑这些力的平衡条件分别为

$$F_x = f G' \quad (1-2-5)$$

$$F_x = f (G' - F_y) \quad (1-2-6)$$

$$F_y = G' \quad (1-2-7)$$

$$F_x L_x = f(G' - F_y) L_f \quad (1-2-8)$$

$$F_x L_x + F_y L_y = G' L_g \quad (1-2-9)$$

上述各式中 f 为摩擦系数, L_x 、 L_y 、 L_g 、 L_f 分别为正面推力、升力、重力及摩擦力的力臂。从理论上讲, 这些平衡条件所反映的起动的难易是不一样的。第一, 条件(1-2-6)较之条件(1-2-5)更容易到达起动, 这是因为

$$fG' > f(G' - F_y) \quad (1-2-10)$$

也就是说, 如果按条件(1-2-5)满足了起动, 按条件(1-2-6)也必然满足; 反之, 却不一定。第二, 条件(1-2-7)曾被 Einstein(1950)^[6] 采用, 后来 Великанов(1955)^[26]、Yalin(1972)^[27]、Gessler(1966)^[28] 等进行仿效。从理论上讲只考虑升力作用下的起动平衡条件(1-2-7)是不全面的, 但是 Yalin 曾证明, 对于一种情况(这种情况对于床面的较细颗粒有可能接近满足)式(1-2-7)就是泥沙起动的平衡条件。但是对于一般情况, 显然式(1-2-7)与(1-2-6)得到的泥沙起动条件的差别为

$$G' > G' - \frac{F_x}{f} \quad (1-2-11)$$

即条件(1-2-6)较之条件(1-2-7)容易起动。第三, 条件(1-2-8)与条件(1-2-9)实际是一致的。但是条件(1-2-8)中的摩擦力臂 L_f 难以确定, 比较式(1-2-8)、(1-2-9)可得到

$$L_f = \frac{G' L_g - F_y L_g}{f(G' - F_y)} \quad (1-2-12)$$

即式(1-2-8)可转化为式(1-2-9)。第四, 综上所述, 考虑到容易起动的条件是反映作用力较全面的条件, 因此式(1-2-5)及式(1-2-6)的滑动平衡条件中, 以式(1-2-6)作为滑动平衡条件较正确, 而式(1-2-9)则为滚动平衡条件。然而由于这些平衡条件中待定常数多, 只能由实际起动速度资料决定, 因此无论采用何种平衡条件得到的起动流速公式在实际上并不一定有很大差别。但是从概念上看, 进行上述澄清是需要的。

至于起动条件中的作用在颗粒上的水流底部流速的作用点,

一般取离床面的高程为 $0.5D \sim 1D$ 。而底部流速 V_b 则大多由对数流速分布或指数流速分布得到,或直接从动力流速 u_* 与 V_b 的关系求出。不同的流速分布与不同的作用点自然得出不同的 V_b ,但是由于待定系数的选择,可以减少以至消除这种差别对起动流速的影响。

正如已经指出的,已有的泥沙起动研究,多数最终均落实到起动流速公式。至目前为止,所提出的无粘性颗粒的起动流速公式已在 100 个左右,甚至更多。其中有的公式可以用于不同粒径,自然也能应用于沙和砾石,但是有代表性的或流传较广的,也仅有十余个。其中在我国有沙玉清(1956)^[29]、窦国仁(1960,1962)^[18,3]、张瑞瑾(1960)^[30]、唐存本(1963)^[31]以及韩其为(1982)^[32]等公式。在国外有经过补充和修正的 Shields 曲线^[14,33]、Meyer-Peter(1948)^[15]、Gessler(1971)^[34]、Ackers-White(1973)^[35]等起动切应力公式,以及 Шамов(1952)^[19]、Гончанов(1962)^[36]、Левин(1957)^[37]、Кнороз(1958)^[38]、杨志达(Yang)(1973)^[39]等公式。

关于以时均速度表示的泥沙起动的不确定性,也有文献初步涉及。本来这个问题对于各种粒径均存在,但是已有的研究中联系到实际资料的多限于沙和砾石。到目前为止,建立泥沙起动平衡条件时绝大部分成果没有考虑水流速度(包括底部速度)的随机(脉动)特性,没有区分瞬时速度与时均速度,起动速度均以时均速度表示,从而引进了不确定性。表现在该流速下总是有一些泥沙在动,有一些不动。究竟动多少才算起动,就涉及到一个标准。可见以瞬时速度(实际速度)表示的起动流速,是根据临界条件得到的,是确定的;而以时均速度表示的起动流速则是不确定的。事实上对以时均流速表示的起动流速的不确定性,有的研究者提出了质疑,有的研究者希望补充定义使其明确化。例如 Einstein(1950)的推移质输沙率公式^[6],就没有包含时均起动流速,只是在起动概率中引进了瞬时起动速度作为积分限。以后 Великанов(1955)^[26]、窦国仁(1963)^[40]、Paintal(1971)^[41]在起动概率等计算中均如此。韩其为(1978)^[42]、何明民(1982)^[43]由泥沙运动随机模型建立的公式仍

然这样。而且韩其为、何明民在验证推移质输沙率公式时引用的实际低输沙率资料,能包含已有的各种起动流速试验的相应输沙率。在补充定义使(时均)起动流速明确化方面,有 Kramer(1935)^[44]提出的静止、弱动、中动和普动等四种起动级别,实际上后三种才能作为起动标准,窦国仁(1963)^[40]提出的三种起动概率并称为个别动、少量动、大量动的起动标准, Taylor(1971)^[45]提出的输沙强度标准, Yalin(1972)^[27]提出的相对起动强度标准, 韩其为(1978)^[32,46]对起动标准做了较为深入研究并对低输沙率做了专门试验^[47],提出了相对输沙率标准。Kramer 的标准仅具有定性意义。Taylor 的输沙强度实际上证实了 Shields 起动切应力图中的起动流速试验资料范围内仍存在输沙率,但没有得出哪种标准恰当,所以没有得到应用。窦国仁的起动概率标准具有理论意义,但未与输沙率联系起来,在实际中难以掌握。韩其为提出的标准不仅在机理上研究较深入,并且容易在实际中掌握,但缺乏对各种标准的对比研究,也未被广泛采用。

泥沙在床面位置对起动流速的影响,这是各种粒径特别是沙砾、卵石起动中的一般问题,也在一些成果中提到。Einstein(1950)^[6]曾提出了用隐蔽系数考虑颗粒之间的隐蔽作用,以修正上举力等,从而可以修正起动流速。Paintal(1971)^[41]提出以起动颗粒与前后两个颗粒与平均床面的高差(可称为暴露度)来衡量颗粒之间的相互隐蔽(图 1-1),并在作用力表达式中用此暴露度修正。韩其为(1965)^[46]引进了相对暴露度(图 2-13),进行了暴露度对起动流速影响的试验,从理论上导出了它对起动流速的作用,并

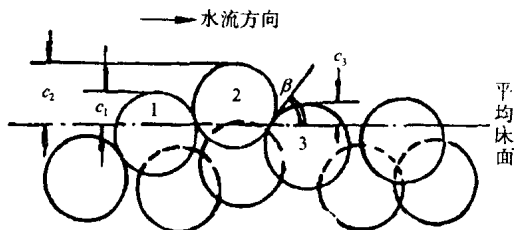


图 1-1

且暴露度作为一个参数,直接包含在起动流速公式中^[32,42,46],而不是通过系数校正来反映其作用。刘兴年等(1986)^[48]按 Paintal 暴露度的概念做了进一步研究,并且通过试验测量了暴露度的数值及其对起动流速影响。需要特别强调的是床面位置的影响对于非均匀沙具有更重要的意义。如何将均匀沙的某些结果推广到非均匀沙,就要涉及到暴露度,对此下面还要专门叙述。

综上所述,在沙砾起动流速研究中,其机理已较为清楚,数量关系也较为可靠,但是也有尚待研究的问题。其中最关键的是由于时均起动流速的不确定性,有必要引进明确的起动标准。这方面值得进一步研究的内容可概括如下。第一,从机理看泥沙起动阶段是否存在某些表示起动程度的连续变化的参数?选择何种参数作为起动标准较恰当?是输沙强度还是起动概率或是起动强度或是相对输沙率?只有表示起动程度的定量指标,才能据此提出起动标准。第二,上述起动程度的定量指标在理论上的关系如何?能否相互转换?第三,哪种指标表示起动程度和作为起动标准既有理论根据,又在试验中便于掌握,也即在应用时对于所采用的起动标准有一个明确的起动程度的概念;例如是否可采用起动时床面多少泥沙在动、多少不动或输沙率大小的量值等作为起动标准?

然而要回答上述起动标准三方面的内容,局限于起动临界条件、起动流速是不够的,必须要研究低强度下泥沙运动,即推移质低输沙率规律,这是沙砾起动研究中的重要问题。因为低输沙率和相应的有关参数的变化规律才是基本的。时均起动流速只具有约定意义,它只对应一定输沙率或相应的其它参数。可以肯定地说,有了低输沙率关系,不要时均起动流速公式仍然能解决各种泥沙问题,这一点正如 Einstein 输沙率公式初步表明的^[6]。当然采用这种方法没有引用起动流速简单,但含义更明确。这方面需要研究的内容有下述几点:第一,低输沙率的理论关系如何?这种理论关系必须深刻的揭示起动机理,考虑各种全面因素,包容各种参数如起动概率、起动强度等。第二,这个理论关系必须解释泥沙不同起动程度的统一规律和包括现有的起动流速试验的各种范围,它将明

确揭示时均起动流速不是输沙率的零点,而只具有约定意义。第三,这样的低输沙率关系不仅使选择起动标准具有理论根据,而且在实际中又便于掌握;此外,还有可能提供低强度泥沙运动的新的理论,并丰富泥沙运动力学。

1-3 细颗粒起动研究

早期起动流速试验,基本限于粒径接近或大于 $0.5\sim 1\text{mm}$ 的颗粒,故未能发现粗细泥沙起动流速的不同实质。唯一例外的是 Великанов(1931)^[10]利用试验资料得到

$$\frac{V_c^2}{g} = 15D + 6 \quad (1-3-1)$$

即起动流速的下限为 0.243m/s 。此式中 g 为重力加速度, D 为粒径,有关单位以“ $\text{mm}\cdot\text{s}$ ”计,由于在他的试验资料中最细颗粒仍为 0.1mm ,因而此式仅指出了起动流速存在下限,并未反映出细颗粒起动流速随粒径减小而增加的特性。尽管如此,此式指出了沙砾起动流速 V_c 与粒径的平方根成正比并非是普遍规律,也就是否定了 $D\rightarrow 0$ 时, $V_c\rightarrow 0$,这一点是正确的。

Hjulström(1935)^[49]根据试验资料给出了起动流速与粒径的关系,得到当 $D=0.2\sim 0.3\text{mm}$ 时,起动流速具有极小值,然后随着粒径的减小而增加。这较 Великанов 的结果进了一步。需要指出的是 Hjulström 的经验曲线包含的粒径范围很广,从 $0.001\sim 100\text{mm}$,而且给出的“冲刷”速度的数值相当于水深至少在 1m 以上,与后来的研究大体相近。

细颗粒泥沙难以起动的解释,经历了一个推测与争论阶段。其中主要有两类看法。一类认为细颗粒受近底层流子层的影响,另一种认为受细颗粒间的粘着力及薄膜水附加下压力的影响。到目前为止,后一类的解释已占明显优势。认为细颗粒泥沙受底部层流子层影响的看法有 Shields(1936)^[14]、Егйазаров(1948)^[50]、Левин(1957)^[37]、Кнороз(1958)^[38]、李保如(1959)^[17]、华国祥(1965)^[21]