

三峡水利枢纽工程 应用基础研究

第二卷

三峡水利枢纽工程几个关键问题应用基础研究项目办公室 选编

地质出版社

PDG

国家自然科学基金委员会 联合资助重大项目
中国长江三峡工程开发总公司

三峡水利枢纽工程应用基础研究

第 二 卷

APPLIED BASIC RESEARCH OF THREE GORGES PROJECT

VOLUME 2

三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究
项目办公室 选编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

三峡水利枢纽工程应用基础研究 第2卷/三峡水利
枢纽工程几个关键问题应用基础研究项目办公室选编.
-北京:地质出版社,1997.12

ISBN 7-116-02495-6

I. 三... II. 三... III. 三峡-水利枢纽-水利工程-科
技成果-汇编 N. TV632.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25578 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:揭德尔 陈军中 赵俊磊

责任校对:田建茹

*

北京理工大学印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:29 字数:678 千字

1997 年 12 月北京第一版·1997 年 12 月北京第一次印刷

印数:1—300 册 定价:75.00 元

ISBN 7-116-02495-6

T·41

顾 问 林秉南

主 编 高季章

副主编 李雪焓 苏锦星

责任编辑 揭德尔 陈军中 赵俊磊

封面设计 赵一东

出版说明

三峡水利枢纽是治理长江的战略工程,具有防洪、发电、航运等巨大综合效益。无论是工程的总体规模,还是某些单项工程都是国内外罕见的。围绕三峡工程建设,国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司组织了“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”。研究内容包括水库泥沙问题、世界上最大的船闸及通航可靠性的问题、船闸开挖时的岩石高边坡稳定问题、巨型工程的原材料问题以及现代化施工管理、安全监测及反馈设计问题等。本书收录了本项研究的部分优秀成果,其中有些已应用于三峡工程,并受到好评。本书也可作为有关专业科技工作者的参考书。

前 言

1997年元月在北京举行了本项目的中期检查交流会。本论文集收入了本次会议上提交的成果共50篇。

继1995年9月在宜昌举行成果交流会之后,由于承担项目人员的努力和所在单位的支持,1996年又是一个成果丰收年。在这次检查交流会上共提出约90份论文。其中有许多可喜的进展,部分成果已被中国长江三峡开发总公司采纳。根据这次交流会的要求,项目办公室编辑出版了这部论文集,全面反映了本阶段所取得的进展。这些成果包括以下内容。

在工程泥沙问题方面,研究了泥沙起动,宽级配推移质输沙特性及输沙率,淤积物干容重变化,非均匀沙水流挟沙力,河床粗化现象,泥沙输移方程中恢复饱和系数等。这些都是些泥沙运动力学中的前沿问题。

对通航建筑物,研究了泄洪对通航条件的影响,船闸输水系统,建筑物运行过程的仿真,运行可靠性的分析和船模技术在三峡通航建筑物中的应用等关键问题。

三峡船闸开挖后形成了岩石高边坡。要求对最终边坡变形作出可靠的预报,然后在此基础上提出增强措施的建议。为此进行了大量研究,提出了多篇报告。其中在学术上有所突破的有:岩石长期强度的试验研究,刚体平稳 Sarma 法的改进,降雨暂态孔隙压力,锚杆加固围岩效应,岩体三维裂隙网络、流形元法及施工开挖爆破荷载分析等。关于闸室最大位移,经比较,讨论了5个单位的8项成果后,一致同意最大值在60mm以下。

由于三峡建设需用大量水泥和混凝土,对这一问题开展了大量研究。一年来又取得了长足的进展。既在理论方面有创新,也直接为三峡的混凝土设计提出了宝贵的依据。对大坝掺优质粉煤灰的最优掺量,提出了一个合理的范围;对大坝内部混凝土选用中热还是低热水泥,提出了一个合理的意见。对抗冲磨混凝土的设计,指出了不宜只根据高强度的要求来选定抗压标号,而应将抗磨度也作为设计指标之一。已据此完成了抗压强度为70MPa的抗冲磨混凝土的设计,并研制了相适应的外加剂。

在水工建筑物安全监测与反馈设计方面,针对三峡主要水工建筑物安全监测与反馈设计中的关键技术,全面地开展了总体设计、一次仪表(变形、裂缝和应力传感器)的研究和选型、二次仪表的选型、信息分析以及反馈和系统软件框架等研究和开发工作。仪器研制是本课题研究的重要内容之一。

林秉南

(中国科学院院士)

1997年9月

目 录

第一课题 三峡工程泥沙问题研究

- 不平衡悬移质运动恢复饱和系数的理论研究 周建军 林秉南 (3)
- 粗细化过程中的非均匀沙起动流速
..... 刘兴年 曹叔龙 方 铎 陈远信 樊崇良 黄 尔 (18)
- 粘性细颗粒泥沙淤积物起动条件的研究 杨铁笠 黎青松 万兆惠 (25)
- 非均匀沙分组水流挟沙力研究 杨国录 刘建军 (34)
- 淤积物的密实及干容重的变化 韩其为 何明民 (44)
- 从裁弯后荆江断面形态调整看三峡水库修建后横断面变化 韩其为 何明民 (53)
- 三峡水利枢纽电厂防沙措施研究 潘庆荣 魏国远 郭 炜 (66)

第二课题 通航建筑物应用基础研究

- 三峡工程引航道防淤清淤措施初步研究 潘庆荣 郭 炜 魏国远 (75)
- 长江三峡工程枢纽泄洪对上游引航道通航水流条件的影响 饶冠生 刘力中 (85)
- 枢纽泄洪及船闸充泄水引航道内往复波流对通航水流条件的影响及改善措施研究
..... 王秉哲 朱光裕 (96)
- 三峡永久船闸阀门段廊道体型水力特性研究
..... 李 云 陈泰春 张瑞凯 黄 岳 须清华 (112)
- 船闸输水阀门非恒定流减压试验方法初步探讨
..... 胡亚安 姜树海 凌国增 郑楚佩 张瑞凯 (118)
- 航道航行条件评价方法探讨 宣国祥 张瑞凯 宗慕伟 杨朝东 (125)
- 船舶通过三峡船闸的有关水力学问题研究 黄 岳 宣国祥 张瑞凯 宗慕伟 (132)
- 三峡工程通航建筑物布置研究的通航船模相似性问题分析 蔡汝哲 (140)
- 三峡通航船队 1:100 船模操纵性能率定试验及浅水操纵性能试验研究 蔡汝哲 (145)
- 三峡工程船闸和升船机上游航道船模试验研究 蔡汝哲 (154)
- 三峡永久船闸输水反向弧形阀流激振动问题研究
..... 谢省宗 李世琴 吴一红 徐国藩 (166)

第三课题 三峡船闸高边坡若干基础理论研究

- 分形体力学分析及其在三峡船闸高边坡岩体工程中的应用研究
..... 张子新 孙 钧 (177)
- 三峡船闸高边坡岩体的细观损伤及长期稳定研究 孙 钧 凌建明 (186)
- 三峡工程船闸第一闸首的三维弹粘塑性有限元分析 陈胜宏 熊文林 (193)
- 锚杆群对船闸边坡节理岩体加固作用的块体模型试验研究 朱维申 任伟中 (200)

三峡船闸高边坡稳定性损伤流变模型初步分析

.....	朱维中	邱祥波	张玉军	李术才	(208)
三峡船闸高边坡岩体渗流及稳定分析	周维垣	刘公瑞	肖洪天		(217)
论裂隙岩体中排水孔幕的优势方向	龚铁生	陈平	张有天		(228)
三峡船闸区花岗岩三轴卸荷应力-应变全过程特性的试验研究	陶履彬	夏才初	何之民		(235)
边坡岩体结构的三维失稳趋势及其稳定性分析	张菊明	王思敬	杜永廉		(242)
岩体三维网络模拟技术及其在三峡工程中的应用研究	邹爱清	周大明			(253)
岩质高边坡施工开挖爆破荷载分析计算模型的研究	张楚汉	王光纶	金峰	徐艳杰	任允涛 (260)
三峡船闸高边坡岩体抗剪强度指标的综合研究	陈祖煜	汪小刚	何传永	贾志欣	(270)

第四课题 三峡工程原材料研究

三峡大坝混凝土亚微结构与宏观性能研究

.....	陈益民	嵇琳	范家骏	林震	(279)
三峡大坝基础处理用灌浆水泥的改性和初步应用试验研究	谢克生	王武祥	马晓辉	陈建国	(288)
氧化镁膨胀源和微膨胀型水泥	楼宗汉	叶青	王宇清	沈锦林	(296)
三峡工程抗冲磨高性能混凝土研究阶段报告	林宝玉	张远曙	李亚杰		(304)
高速挟沙水流对混凝土冲磨破坏机理研究			李亚杰		(315)
熟料、矿渣、粉煤灰三元体系胶材和混凝土的性能研究	吴超寰	王仲华	黄维佳		(323)
高掺量粉煤灰常态混凝土的长期性能研究	蔡跃波	林宝玉	单国良	蒋陈霞	(333)
三峡工程抗磨蚀硅粉钢纤维混凝土性能试验研究	张远曙	杨松玲	陈万桂		(342)

第五课题 三峡主要水工建筑物安全监测与反馈设计

自动监测仪器的卡尔曼滤波分析	华锡生	岳东杰	华炯		(349)
GYC-500型光电遥测垂线坐标仪工程样机的研制	徐友仁	杨健生	唐洪武	王淑云	(358)
混凝土坝裂缝监测的光纤传感技术	刘浩吾	杨朝晖			(371)
变形监测数学模型中温度分量和时效分量因子集的分析确定	李民	黄铭	薛桂玉	何金平	(381)
用粘弹性理论拟定混凝土坝变形一级监控指标	吴中如	阳武	顾冲时		(389)
用三维粘弹塑性理论拟定大坝变形二、三级监控指标	顾冲时	吴中如	阳武		(395)
评价三峡水工建筑物监测性态的体系和方法研究	李珍照	薛桂玉	李民	何金平	张淑丽 (403)
Fortran语言下的菜单环境和源程序生成技术	阎继军	陈重华	张进平		(415)
坝体位移场分布模型的数据处理和显示	张进平	陈重华			(424)
基岩渗流场反分析			李雪春		(430)
概论水工结构分析中三维几何造型和网格离散方法	陈重华	李雪春	黎利兵		(442)
三峡工程安全监测系统信息网络优化研究	王德厚	李镇惠			(450)

第一课题

三峡工程泥沙问题研究

不平衡悬移质运动恢复饱和系数的理论研究

周建军 林秉南

(清华大学水利水电工程系)

摘 要: 本文系统介绍了作者关于不平衡悬移质泥沙运动恢复饱和系数的理论研究成果。首先,作者讨论了不平衡条件下悬移质泥沙运动的床面边界条件,根据不平衡条件下水槽试验资料分析,得出冲刷和淤积条件下河床表面的边界条件的合理提法,利用前人关于立面二维输沙恢复平衡过程的理论解,在一定的近似条件下得到矩形断面的泥沙恢复饱和系数的计算公式。这一公式可以直接应用于平面二维泥沙数学模型。对于这一公式,作者利用了大量的水槽和原型资料进行了验证。在此基础上,通过对河道流管的侧向积分,得到了适用于天然河道的一维恢复饱和系数的计算公式,并且同时给出了河道一维冲淤计算的断面修正方法。

本文的恢复饱和系数直接从理论公式给出,消除了泥沙数学模型中不必要的待定参数,可提高模型预报的可靠性和适用范围。从理论上将平面二维与河道一维的恢复饱和系数的计算统一起来,同时又合理地反映出断面形态等因素对河道一维恢复饱和系数的影响。本文的结果也从理论上解释了韩其为等人的经验恢复饱和系数在一定条件下的合理性。

一、前 言

在我国,以不平衡输沙模式为基础的泥沙数学模型的应用性研究与发展已经有 20 多年的历史,先后出现了许多具有实用价值的一维和平面二维模型。泥沙数学模型在我国的葛洲坝、三峡等重大水利工程的泥沙研究中发挥了重要的作用。

不平衡输沙模式最早是由窦国仁(1963)提出^[1]的。在矩形均匀断面形态的条件下,不平衡输沙具有如下的方程形式:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} = -\alpha \frac{\omega}{h} (s - \Phi) \quad (1)$$

其中, x 是河道长度方向坐标; t 是时间变量; s 是垂线平均含沙浓度; u 是垂线平均流速; h 是垂线水深; α 是泥沙恢复饱和系数(窦国仁在原文中将 α 称作泥沙沉降机率); Φ 是垂线水流挟沙能力; ω 是泥沙沉降速度。韩其为等(1980)^[2]将方程(1)进一步扩展应用于天然河道方程^①:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} = -\alpha \frac{\omega}{H} (S - \Phi) \quad (2)$$

其中, S 是断面平均含沙浓度; U 是断面平均流速; H 是河道断面平均水深; α 是综合泥沙恢复饱和系数; Φ 是断面平均挟沙能力。韩其为等建立的不平衡输沙模型,通过大量的实际资

① 韩其为等的原文中不包括时间变化项,这一项对河口地区的计算有很大的作用。

料的对比验证,取得了较好的成果。

但是,目前数学模型中还存在许多问题。其中,最主要的问题是关于恢复饱和系数的确定方法,许多数学模型所使用的恢复饱和系数都是经验性的,这对数学模型的推广和进一步发展都具有不利的影晌。冀国仁认为 α 是泥沙的沉降概率,是一个介于0和1的数,并且不必区分泥沙的冲刷和淤积状态。然而,由此计算出的清水冲刷恢复饱和过程与水槽试验资料相差较大(侯晖昌^[3])。韩其为等人的模型则是通过实际资料作率定计算,得到适用于长江及其支流河道的综合恢复饱和系数,其具体取值方法是: $\alpha=0.25$ (水库及河道淤积)及 $\alpha=1.0$ (水库冲刷); α =临底含沙浓度与平均含沙浓度的比值(坝下清水冲刷)^[2]。韩其为等的方法虽反映了河道冲刷或淤积长时间过程的综合影响,但其适用范围很有限。特别是对于其它类型的河流,恢复饱和系数实际上是一未知参数。另一方面,林秉南和沈学汶^[4]通过直接积分泥沙运动的三维对流扩散方程也得到类似方程(1)的平面二维不平衡输沙方程,而其中关于恢复饱和系数却推荐采用临底含沙浓度与垂线平均含沙浓度的比值, α 是恒大于1的变数。

对于河道一维的问题,在天然资料比较多的条件下,采用韩其为的率定方法是比较可靠的。但是,许多实际的问题很难找到大量的资料可供系数率定,仍然照搬韩其为的经验系数则可能影响计算结果的准确性。特别是目前许多平面二维泥沙数学模型仍然采用韩其为的一维经验系数,更是没有理论和实际依据的。

关于恢复饱和系数,学术界存在很大的争议,其计算方法对于数学模型的计算精度或准确度影响很大。因此,从理论上分析和研究恢复饱和系数的变化关系,对进一步提高泥沙数学模型的精度,促进数学模型的发展都是非常必要的。

不过,本文的研究成果仅适用于含沙量相对较小的情况。对高含沙的黄河等情况, α 的变化除受水流大量漫滩而大幅度减小之外,由于河流中冲泻质含量的增加,大大降低了泥沙的沉降速度。在计算中沉降速度指标不能随泥沙浓度而变化的情况下,也间接地要求降低恢复饱和系数的数值。关于这一点,作者在文中仅作简单的讨论,有关黄河高含沙情况的问题,还需另作深入的研究。

二、不平衡条件下的河床表面条件

建立不平衡输沙基本方程的最简单方法就是直接取河道水柱建立质量平衡关系。但是,由这一方法得到的基本方程不能反映水体内部的泥沙分布及冲淤情况,其系数只能是未知的。为了从理论上探讨恢复饱和系数的确定方法,合理的办法就是从泥沙三维对流扩散方程出发,直接推导二维或一维的不平衡输沙基本方程,见林秉南和沈学汶^[4]、周建军^[5]的研究。然而,直接积分三维对流扩散方程在很大程度上依赖于河床表面条件的选取。到目前为止,床面边界条件的选取有三种方法,即直接床面交换通量 E 、床面泥沙浓度 c_s 或浓度梯度 (α/c_s) ,三类边界条件分别表示为:

$$(c + \frac{\partial c}{\partial z}) \Big|_{z=s_b+s} = E \quad (3)$$

$$c \Big|_{z=s_b+s} = c_s \quad (4)$$

$$\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=s_b+s} = -\omega c_s \quad (5)$$

其中, c 是三维空间的泥沙浓度; z 是高程方向的坐标; c_s 是对应于平衡输沙条件下的临底泥沙浓度; z_b 是河床表面高程; a 是临底某一特征高度。关于通量边界条件, Van Rijn^[6] 进行过研究。但是, 由于目前很难直接给出通量函数 E 的具体表达式, 使用起来不太方便。同时, 边界条件(3)在平衡条件下不能单独成立。因此, 关于边界条件(3)尚待进一步研究。边界条件(4)和(5)目前被广泛采用。在平衡条件下, 由于任何水深处的交换通量为 0, (4)和(5)是完全等价的。在不平衡条件下, 二者存在很大的差别。

根据三维对流扩散方程的二阶微分性质, 垂线方向只需要两个边界条件。由于自由水面的边界条件在任何情况下都是需要的, 因此, 在床面的边界条件必须在(4)和(5)中选择。根据对不平衡状态下床面附近泥沙浓度分布性质的分析, 作者提出下面两条边界条件的引论:

引论 1: 在冲刷(或次饱和)条件下, 床面附近的浓度梯度是不断变化的, 不能以临底浓度梯度作为边界条件。

泥沙从次饱和状态向饱和状态的恢复过程是底部浓度向水体上部的不断扩散的过程, 浓度梯度的调整是实现扩散的必要保证。关于这一点, 还可以从图 1 所示的水槽清水冲刷的示意中得到说明。根据大量的实验研究, 在清水冲刷的过程中, 底部浓度恢复可以远快于平均浓度的恢复过程。因此, 浓度的恢复实际上是沿程浓度分布函数的不断从“瘦”变“胖”的过程, 底部浓度梯度是不断变化的, 不存在与水流条件成单一关系的浓度梯度。

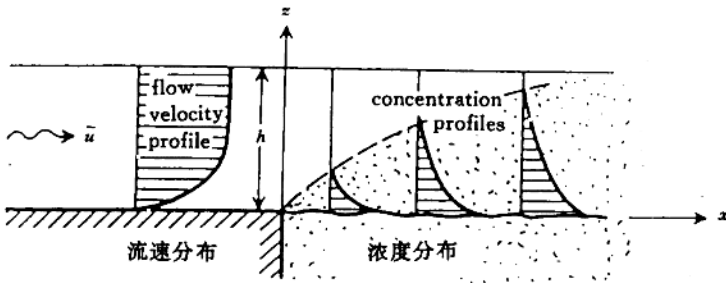


图 1 清水冲刷过程中泥沙浓度恢复示意图

引论 2: 在淤积(或超饱和)的条件下, 床面附近的浓度是依赖于垂线平均浓度的, 不能以临底浓度作为边界条件。

对于一种给定的水流条件, 上游来沙的浓度可以是任意的(比如在水槽淤积试验中, 上游可以任意加沙), 而底部泥沙浓度随水流中的平均泥沙浓度的变化而变化。因此, 不存在与水流条件呈单一关系的底部浓度。

上述引论表明(4)和(5)在什么条件下不能作为临底边界条件。然而, 对选择什么条件作为临底边界条件, 目前还没有充分的把握。可以肯定的是, (4)和(5)中的任何一个都不能单独作为不平衡输沙的底部边界条件, 所选取的条件必须和泥沙冲刷和淤积状态有关。

图 2 是 Van Rijn(1985)^[7] 和张启舜(1962)^[8] 关于清水冲刷的水槽试验资料。可见, 在泥沙相对比较均匀的条件下, 冲刷过程的浓度分布最突出的特征就是底部泥沙浓度基本上保持为常数。考虑到过程对平衡状态的渐近性质, 有理由假设: 清水冲刷过程中底部泥沙浓度为常数, 或者更一般说, 条件(4)是次饱和条件下的临底边界条件。对于不均匀泥沙, 由于床面泥沙的粗化等复杂因素的影响, 这一条件很难直接从水槽(更不可能从原型)资料中反映出来。图 3 是张启舜的另一组沙的试验结果(第 10 组), 由于不均匀沙经过了 6.5h 的分选,

平均浓度和底部浓度都随距离的变化而变化。然而,这一组试验作为不均匀条件下的典型资料,在后面的验证计算中却能很好地模拟出来。验证的结果将表明,在不均匀沙次饱和的条件下,分组均匀沙仍然满足底部浓度为常数的假定。

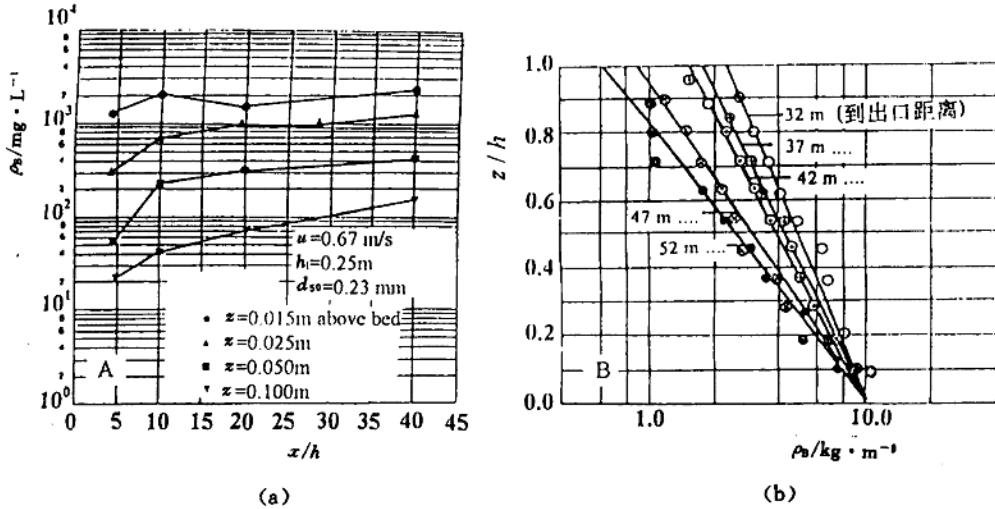


图2 证明均匀泥沙在冲刷过程中底部浓度沿程保持为常数的试验资料
 (a) Van Rijn(1985)的水槽试验资料,其中“ \circ ”为 $z=0.015\text{m}$ 的浓度;
 (b)张启舜试验 Run13 的浓度沿程及沿垂线分布情况

对于淤积过程,首先可以分析图4所示的 Dobbins (1944) 的实验结果^[9]。Dobbins 的实验是在圆筒中进行的。开始时,圆筒中的搅拌器以比较高的速度旋转而带动筒中水体运动和泥沙悬浮;当浓度分布基本稳定后,从筒的侧壁吸取水样,测量浓度的垂线分布,得到图4中 $t=0$ 时的情况。然后突然停止(图4a)或放慢(图4b)搅拌器的转动速度,圆筒中的泥沙呈现淤积的趋势,试验中不断测量浓度的垂线分布,浓度是随时间不断减小的,而底部附近的浓度分布线在 $t>0$ 后基本上是平行的,表明底部浓度梯度很快达到某一不变值。特别是图4a的情况,由于搅拌器停止旋转,相当于水流挟沙能力为0。这时 $c_s=0$,由条件(5)有 $\frac{\partial c}{\partial z}|_{z=z_b} = 0$,与试验资料是完全吻合的。因此,可以有理由假定:淤积过程中,底部浓度的梯度为常数,或者说,条件(5)是超饱和过程的临底边界条件。这一结论还可以通过图5的资料进一步

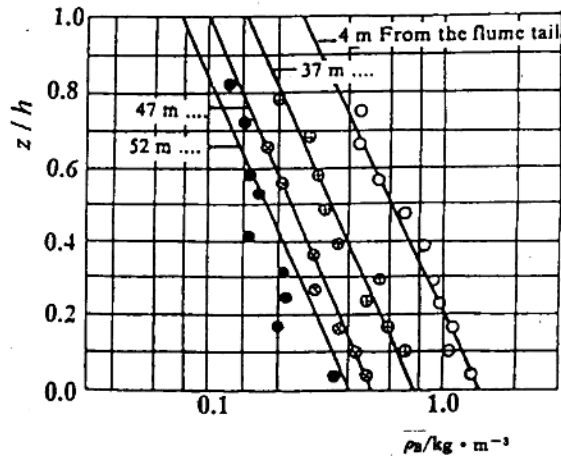


图3 张启舜的不均匀沙冲刷试验
 (Run10, $t=390\text{min}$ 的浓度沿程变化情况)

证明。图 5 是朱鹏程和彭润泽在北旺庄原型沉沙池的观测资料^[10]。尽管沉沙池内的泥沙浓度(包括底部浓度)沿程不断减小,但是,床面附近的浓度梯度却基本保持常数。

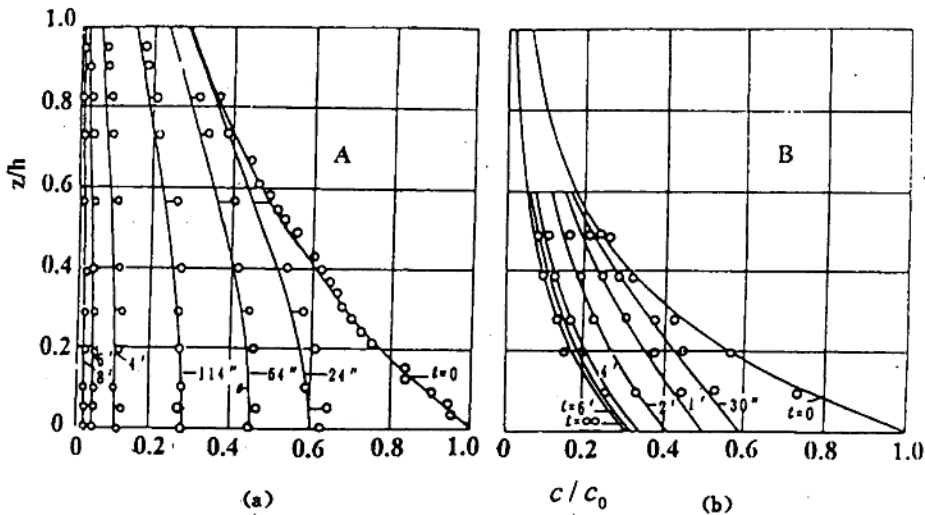


图 4 Dobbins(1944)的沉降试验资料——表明淤积时底部浓度梯度为常数
(a) 搅拌器停止转动; (b) 搅拌器放慢转动速度

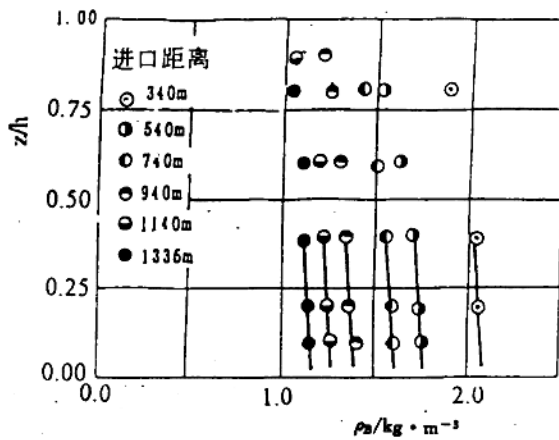


图 5 朱鹏程和彭润泽在北旺庄沉沙池量测的淤积时的泥沙分布表
明淤积时底部泥沙浓度梯度为常数

理论分析和有限的试验资料表明,条件(4)和条件(5)可以分别作为冲刷和淤积条件下泥沙垂线浓度分布的临界边界条件。这一条件的明确,为理想条件(均匀沙,矩形断面)下不平衡输沙的恢复饱和系数的理论分析奠定了基础。

三、理想条件下的恢复饱和系数

1. 恢复饱和系数的推导

根据前面的分析,对均匀沙在均匀水深的条件下,可有三维不平衡输沙方程,定解条件如下(为简便计,忽略了浓度在平面上的扩散项):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z}(\omega c + \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (6a)$$

$$(\omega c + \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}) \Big|_{z=x_0+h} = 0 \quad (\text{水面零通量条件}) \quad (6b)$$

$$c|_{z=x_0} = c_s (\text{冲刷时}) \text{ 或 } \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=x_0} = -\frac{\omega}{\epsilon_s} c_s (\text{淤积时}) \quad (6c)$$

其中, c_s 是平衡输沙条件下的临界泥沙浓度。垂向泥沙扩散系数按 Lane 和 Kalinske 的方法取垂线平均值:

$$\epsilon_s = \frac{1}{6} k u_* h \quad (7)$$

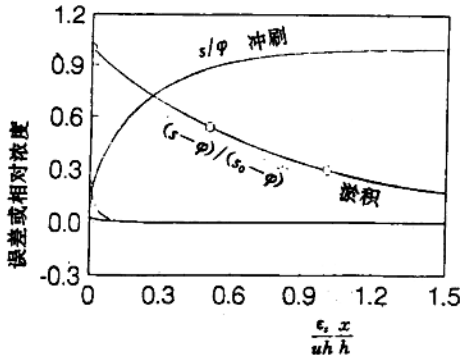
其中, k 是 kánnán 常数; u_* 是水流摩阻流速。周建军(1990)^[5]直接对定解条件(6)针对水深方向的微分算子进行求解和垂向平均,在假定的不平衡垂线浓度分布剖面的条件下,得到了不平衡输沙方程(1)和恢复饱和系数的近似计算公式。但是,这一结果与假定的浓度剖面函数关系较大。周建军和林秉南(1995)^[11]利用张启舜(1980)^[12]和侯晖昌等^[3]关于立面二维情况下恒定不平衡输沙问题的分析解,推求出恢复饱和系数。下面介绍这一结果。

在方程(6a)中如忽略时间变化项和关于 y 方向的对流项,则对应于冲刷和淤积条件(4)和(5)分别存在分析解,分析解是关于变量 x 和 z 的无穷级数。对无穷级数沿水深求平均后,得到垂线平均浓度沿程变化的级数解分别为(见钱宁和万兆惠^[13]):

$$s = \Phi \left[1 - \frac{R}{1 - e^{-R}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4\beta_i^2 e^{-\lambda_i^2 \frac{x^2}{4\alpha h}}}{\lambda_i (2\lambda_i + R)} \right] \quad (\text{冲刷时}) \quad (8)$$

$$s = \Phi + (s_0 - \Phi) \frac{R}{1 - e^{-R}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2R^2 \beta_i^2 e^{-\lambda_i^2 \frac{x^2}{4\alpha h}}}{\lambda_i^2 (\lambda_i + R)} \quad (\text{淤积时}) \quad (9)$$

其中, $R = \omega h / \epsilon_s = 6\omega / k u_*$, $\lambda_i = \beta_i^2 + R^2/4$, β_i 分别是下列方程的第 i 个正实根:



$$\tan(\beta) = -\frac{\beta}{R} \quad (\text{冲刷时}) \quad (10)$$

$$2\text{ctg}(\beta) = \frac{2\beta}{R} - \frac{R}{2\beta} \quad (\text{淤积时}) \quad (11)$$

图6是冲刷和淤积情况下,级数(8)和(9)只取第一项所产生的误差。可见,只有在上游进口附近有一定的误差,离开进口一定距离后,就基本没有误差。级数(8)和(9)的收敛速度非常快,一般保留一项就可以达到相当高的精度。将保留一项的级数(8)和(9)分别代入忽略时间导数项的方程(1)则可以得到冲刷和淤积条件下的恢复饱和系数表达式均为:

图6 级数(8)和(9)仅取一项产生的相关误差

$$\text{淤积时误差} = (s^{[1]} - s^{[\infty]}) / (s_0 - \Phi)$$

$$\text{冲刷时误差} = (s^{[1]} - s^{[\infty]}) / \Phi$$

$s^{[1]}$ 和 $s^{[\infty]}$ 分别是级数取1项和无穷项

由(8)或(9)计算的泥沙浓度

$$\alpha = \frac{R}{4} + \frac{\beta_1^2}{R} \quad (12)$$

由于冲刷和淤积时参数 β_1 是分别由公式(10)和(11)计算的,所以,冲刷和淤积的恢复饱和系数是完全不同的。图7是由公式12给出的恢复饱和系数与参数 R 的关系。在理想条件下,冲刷和淤积的恢复饱和系数均大于1。冲刷时, α 更大,且随 R 的变化幅度更大;淤积时, α 略大于1,其变化幅度也很小。对均匀沙而言,相同水力条件下冲刷的恢复距离远小于淤积时。图中也同时给出了文献[5]的结果,二者在变化趋势和数量上基本一致。

2. 水槽资料验证

为了检验公式(12)或图7的恢复饱和系数的正确性,作者引用了 Van Rijn^[7]、张启舜^[8]和朱鹏程与彭润泽^[10]的水槽和原型资料,对均匀沙和不均匀沙在基本恒定的水流条件下进行了验证。除张启舜的第10组是非均匀沙试验,需要利用数学模型计算外,其它所有的验证都是利用试验或原型量测的泥沙浓度恢复过程与比较,根据过程的拟合程度判断恢复饱和系数的正确与否:

$$s = \varphi + (s_0 - \varphi)e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (13)$$

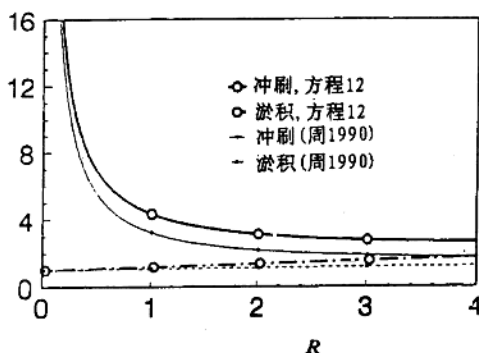


图7 理想条件下恢复饱和系数随参数 $R=6\omega/ku_s$ 的变化情况

Van Rijn 的试验是在 Delft 水力学实验室的长 110m, 宽 3m 的大型水槽中进行的。为了节约流量, 试验时将水槽用隔板缩窄, 有效试验宽度为 1.55m。水槽的布置情况如图 8 所示。试验模拟清水冲刷的情况, 有效铺沙长度为 60m。采用 $d_{50}=0.2\text{mm}$ 的泥沙, 泥沙的级配比较均匀, 级配曲线如图 9 所示。Van Rijn 的试验一共进行了 7 组, 另外加上一级 30m 短水槽试验资料, 共计 8 组。试验的流速界于 1.0~2.5m/s。计算中, 平均流速、水深和泥沙沉降速度由试验资料给出, 挟沙能力计算采用 Van Rijn^[7] 提供的临底浓度公式和

Lane-Kalinske 垂线分布公式积分计算得出。各组试验的平均浓度恢复饱和过程和计算结果的比较如图 10 所示。计算与试验资料基本符合。

本文中引用了张启舜的第 10 和 13 两组试验资料^[8]。其中, 第 13 组是比较均匀的泥沙, 而第 10 组相对不均匀, 两组沙样的级配曲线如图 11 所示。试验是在水利水电科学研究院河渠所(现泥沙所)的长 60m, 宽 0.5m 的玻璃水槽内进行的。第 13 组的试验与计算结果的比较见图 10 的最后一幅小图, 计算与试验结果是吻合的。第 10 组是不均匀沙的情况, 验证不能直接用公式(13)比较, 本文是用文献[11]的数学模型对简单一维情况进行计算而验证的。试验中, 水槽的流量、水深和坡降分别为 31.9L/s, 0.133m 和 0.122%。初始时水槽底铺垫图 11 的沙样(2)所示的不均匀沙, 然后引入清水进行冲刷, 试验持续 6.5h。试验结束时, 床沙已出现明显的粗化和分选, 沿程泥沙浓度较初始时减少了许多。计算时, 将床沙平均分成 5 组, 各组泥沙的平均粒径分别为 $d_s=0.054, 0.073, 0.097, 0.154$ 和 0.26mm 。图 12 分别给出了试验时间 $t=10\text{min}$ 和 $t=390\text{min}$ 时的泥沙浓度和床沙中径 d_{50} 的沿程分布, 无论泥沙浓度的变化过程还是床沙粗化过程的计算和试验结果都相当一致。这一验证结果还表明, 尽