

文章编号: 1000-4874(2000)01-0082-07

粘性泥沙起动流速的探讨

张兰丁

(南京水利科学研究院水工研究所, 南京 210029)

摘 要: 本文结合琅琊山抽水蓄能电站下库库区原状土起动流速试验, 对以往所采用的粘性泥沙起动流速公式进行了讨论。根据近年来明渠均匀紊流的理论研究与试验研究成果, 对粘性泥沙的起动机理及起动流速的确定提出了一个设想, 并给出了固结粘土的起动流速公式。本文还指出, 粘性泥沙的起动, 除水流方面的影响外, 粘性泥沙的组成及结构也是影响其起动的重要因素。因此, 借鉴土力学、粘土矿物学等相关学科的研究成果将有助于此类工程问题的解决。

关 键 词: 粘性泥沙; 脉动应力; 起动流速

中图分类号: TV 142

文献标识码: A

1 前言

文献 [1] 于 60 年代初在总结国内外泥沙起动研究成果的基础上, 对泥沙起动规律提出了新的理论, 三十多年来众多学者对泥沙的起动作了大量的研究。总体上看, 对于无粘性泥沙在考虑水流的时均作用方面已有了相对较为成熟的计算公式, 但对于粘性泥沙由于其粒间作用力难以确定, 在定量分析方面不如无粘性泥沙成熟。这主要是由于粘性泥沙的起动除水流方面的影响因素外, 其本身的结构及组成也是重要的影响因素, 而这些又都与它所含的矿物成分及粘粒的微观结构有关。粘性矿物种类很多, 粘粒又极其微小, 粘土矿物学本身还处在一个不甚成熟的阶段, 还无法说明粘土的矿物组成及其微观结构对其力学性能的影响如何, 因此就出现了各种用来确定粘性泥沙粒间作用力的方法。90 年代以来, 我国已有一些学者将粘土矿物学粘粒微观结构研究的成果引用到粘性泥沙的絮凝现象研究中, 说明粘土矿物学开始步入水利工程科学。

2 粘性泥沙起动流速研究的回顾

关于粘性泥沙起动流速的公式主要有两类: 一类以粘土的抗剪强度指标为主要参数, 用粘土的凝聚力 C 反映粘土的抗冲能力, 具有代表性的有苏联学者米尔兹胡拉瓦建立的公式:

$$[V] = (\lg 8 \frac{h}{d}) \sqrt{(\frac{2m}{2 \cdot 6n}) [(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)gd + 1.25C^H \frac{K}{\rho_w}]} \quad (1)$$

收稿日期: 1999-01-27

作者简介: 张兰丁(1954~), 女, 高级工程师, 学士。

[V]: 起动流速;

h : 水深;

d : 粘性土团粒直径;

m : 对 I、II、III 级建筑物分别取 1.3、1.4、1.6;

n : 考虑水流近底流速脉动影响系数, $n = 1 + [0.3 + (v^2/gd^3)]^{1/3}$;

ρ_s : 泥沙密度;

ρ_w : 水的密度;

ν : 水的运动粘滞系数;

C^H : 抗裂疲劳强度, $C^H = 0.035C_o$; C_o : 土的凝聚力;

K : 安全系数。

以上仅给出了各系数取法的简化形式, 由此看来 (1) 式较为繁杂。窦国仁、唐存本从考虑粘性泥沙颗粒间存在粘结力出发提出了无粘性泥沙及新淤积粘性沙的起动流速公式, 使研究问题较为精细化, 主要公式有^{[1][2]}:

$$\frac{U_c^2}{gD} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} (6.25 + 41.6 \frac{h}{h_a}) + (111 + 740 \frac{h}{h_a}) \frac{h_a \delta}{D^2} \quad (2)$$

式中 U_c : 起动流速;

h_a : 用水柱高度表示的大气压力;

γ : 泥沙的容重;

δ : 水分子厚度;

D : 粒径。

$$U_c = \left(\frac{h}{D}\right)^{1/m} \frac{m}{m+1} \left[3.2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD + \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_{b0}}\right)^{10} \frac{C}{\rho D} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $m = 4.7 (h/D)^{0.06}$, 水槽试验资料; $m = 6$, 天然河道;

γ_b : 不稳定容重; γ_{b0} : 稳定容重;

$C = 2.9 \times 10^{-4} \text{ g/cm}$ (C 不是土力学抗剪强度指标)。

(2), (3) 式与试验及实测资料均较为吻合。我国二位学者的公式没有采用土力学抗剪强度指标凝聚力 C 来反映粒间作用力, 这一点与钱宁思想是一致的^[3]。式 (1) 中的凝聚力在运用时通常通过土工直剪试验获得, 土样受力状况如图 1 所示^[5]。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C$$

式中: $\sigma = P/A$; φ : 粘土的内摩擦角; C : 粘土的凝聚力; τ : 剪切破裂面上土的剪应力, 即土的抗剪强度。

由图 1 可以看出在这种试验情况下土体的受力状况与土体在遭受水流冲刷时的受力状况有所不同, 这样得出的凝聚力用来代表粘土在遭受水流冲刷时的粒间作用力, 有一定误差。但在新的测试手段研究出来以前, 工程界将仍然会采用这种方法。

公式 (1) 的主要缺点是过于繁琐, 使用不便。我国学者通过测量交叉石英丝之间薄膜水的粘结力^[1]及直接由起动流速试验来确定粒间作用力^[2], 则要先进一些。由此而产生了一个问

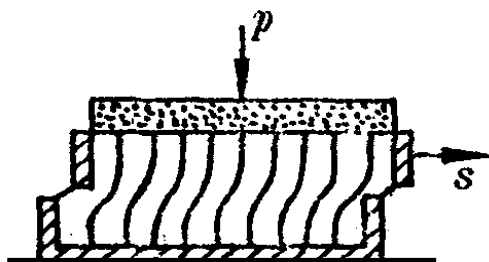


图 1

题,上述两个公式的出发点完全不同,但又都以试验资料作为依据,而且又都可用来解决工程实际问题,因此我们能否这样解释“经验公式不一定要完全反映事物的物理本质,但也可以应用”。那么,如果我们能够真正反映事物的物理本质是不是更好一些呢?对于粘性泥沙起动这样一个充满着不确定因素的研究对象我们是否应当另辟捷径,或者采用一种完全不同的研究思路来补充我们过去的概念。基于这种考虑,笔者将流体力学、土力学、粘土矿物学三门学科结合起来对粘性泥沙的起动机理提出了一个设想。

3 粘性泥沙的起动机理探讨

探讨粘性泥沙的起动机理应从两方面着手: 水流对粘性泥沙起动的作力; 粘性泥沙的组成及其结构。以往仅从水流对粘性泥沙起动所产生的力学现象出发来研究是不够的,如果我们对粘性泥沙的宏观结构与微观现象之间的联系缺乏了解,那么我们所得出的结论就不能真正反映粘性泥沙起动的真实物理背景,虽然也可得出一些经验公式,但这种公式具有局限性,难以做深一步的研究。近年来土力学及粘土矿物学有了一定发展,这就使得我们有可能引用这两门学科已经成熟的研究成果来重新认识粘性泥沙起动的物理背景。从而使得这个问题的研究能够再前进一步。

以往在考虑泥沙起动问题时着眼点在水流的时均作用方面,认为水流会产生起动拖曳力。对于散粒体泥沙由于颗粒间粘接力微弱,重力起主要作用,因此起动流速与泥沙直径的 $1/2$ 次方成正比,但对于粘性泥沙由于粘粒间存在粒间作用力,起动流速在某一临界粒径以下反而与粘性直径的 $1/2$ 次方成反比,从而在泥沙起动研究中形成了两个分支。近年来,由于紊流理论及试验研究的发展,对水流的微观结构研究有了一定的进展,因此有必要对过去用来解释泥沙起动现象的总流分析法加以修正,笔者希望对粘性泥沙起动机理提出的设想能够将上述二者的泥沙起动问题统一起来。

3.1 粘性泥沙的形成及其结构

粘性泥沙是母岩化学风化的产物属次生矿物,主要由蒙脱石、高岭石、伊利石及绿泥石组成。其颗粒极其微小,一般小于 0.005mm ,因此其比表面积较大。比表面积越大,表面能越大,重力作用相对减小。粘粒间存在着分子键、化学键,又由于其表面带有静电荷而存在离子—静电力。离子—静电力形成结合水膜,结合水的吸持力较大,它使粘粒与粘粒紧密的联系在一起,因此在宏观上粘性泥沙很少像无粘性泥沙那样呈现单独的颗粒状,而是以胶团或团聚体的形式存在。至于它们之间的联接及大小则又与粘性泥沙最初形成方式有关(见图2)。粘土胶质学认为很难区分粘粒的大小,粘土颗粒在粘土胶质学中被描述为胶团。胶团的大小由接近于小的结晶构造的单位胞开始,直到大到粘土矿物结晶的集合体(巨大胶团)。胶团表面带有阳离子、阴离子,具有两性胶质的性质。细小粘粒的悬浮液以稳定不沉降为多,但在湖泊中(咸水湖的情况更为复杂一些),由于温度、振荡等原因颗粒(胶团)与颗粒之间接触次数增加发生絮凝,体积逐渐变大,于是导致沉降,这就是粘土胶质学提出的胶团假设。絮团的骨架形式不同,沉积方式也不同。

而絮团的骨架形式又与粘粒的矿物组成及微观结构有关。其他因素,如发生絮凝时外界的物理、化学因素等也会对絮团的形成产生影响。因此,影响粘性泥沙结构形成的因素是多种多样的而又十分复杂的。所以我们在研究粘性泥沙起动问题时必须对“粒径”这个概念有个正确的认识,所谓“粘粒”在宏观上实际是不存在的,对于新淤积的粘性泥沙,粒径代表的是胶团的尺度,对于具有一定固结历时的粘性泥沙(粘土),粒径指的是团聚体的大小。在起动流速研究中我们可将粘性泥沙按照其密度分为浮泥、淤泥($\rho_s < 1.6\text{g/cm}^3$)及固结粘土($\rho_s > 1.6\text{g/cm}^3$)。

cm^3), 以此来区分粘性泥沙在宏观结构上的不同, 在目前应当说还是一个可行的方法。

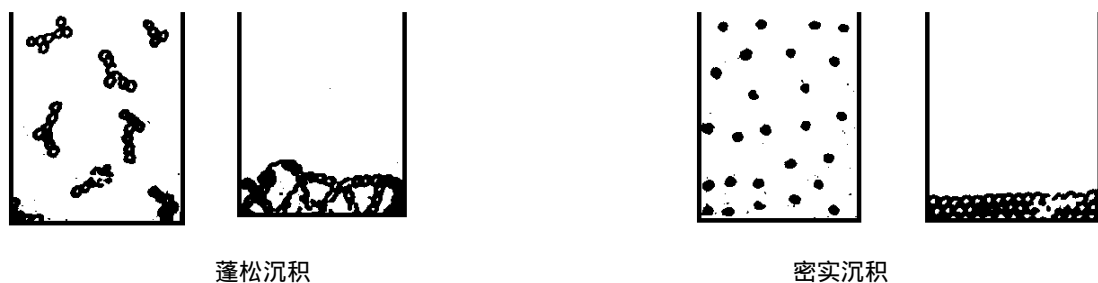


图 2

3.2 粘性泥沙起动机理的探讨

长期浸没在水下的土是饱和土, 饱和土是二相土, 土中的有效孔隙含有水并且与外界的水是连通的。因此在研究泥沙起动时应将土中水(孔隙水)与土外水联系起来, 土外水的运动状态会影响到土中水在土体内的压力分布。土体中的孔隙主要有三种: 无效孔隙, 孔径 $d < 0.001\text{mm}$, 为结合水所充满; 毛细孔隙, 孔径 $0.001 < d < 0.1\text{mm}$, 具有毛细作用; 非毛细孔隙, 孔径 $d > 0.1\text{mm}$, 粘性泥沙在遭受水流冲刷时真正对起动起作用的是后两种孔隙。当外荷载即水流所产生的动水压力和脉动应力 $(P + P')$ 传递到土体孔隙中产生附加孔隙水压力, 胶团或团聚体所受到的有效应力 $\sigma = -\gamma_w(h + h')$ (式中负号表示方向向上) 足以克服胶团或团聚体的自重及相互之间的咬合力时, 粘性泥沙开始起动, 因此影响粘性泥沙起动的主要因素是土外水所产生的脉动应力, 脉动应力有不断振动和掀起的作用, 瞬间脉压可能较大。在脉动应力的作用下, 胶团或团聚体间的结合会逐渐松弛, 而二者之间的咬合一旦被破坏, 就会浮起被水流挟带而去。可以设想土中水的流动可以用孔隙介质的蠕变方程描述, 平均速度为

$$V_z = -K \frac{\partial(p/\gamma_w + h)}{\partial t}$$

式中 K 为渗透系数, $K = 0.91 \times 10^{-5} \sim 0.91 \times 10^{-9} \text{m/s}$

由上式可见渗透速度 V_z 十分微小, 相比之下土外水的流速则要大多, 因此土外水与土内水之间在粘性泥沙起动之前始终存在着流速差, 从而胶团或团聚体一直会受到升力的作用。现有研究表明, 泥沙表面的凹凸不平会使水流形成一系列相互作用的离散漩涡, 这会使得泥沙上、下表面的形状阻力系数相差很大, 有促使泥沙上浮的作用, 同时还会使水流的脉动作用增大。因此粘性泥沙起动水流方面的定量指标可用水流的近底时均流速所产生的动水压差 h 及近底脉动应力 h' 来确定, h 及 h' 可表示为下述二式:

$$h = \varphi_1 \frac{\bar{U}_c^2}{2g} \quad (4)$$

$$h' = \varphi_2 \frac{U_c^2}{2g} \quad (5)$$

式中, \bar{U}_c : 时均近底流速; U_c : 近底脉动流速; φ : 综合系数, 与水流、壁面粗糙度及粘性泥沙宏观结构有关, 可通过试验确定。(4)、(5)二式的定性描述还可以从紊流力学的角度来予以进一步说明, 水流脉动的连续性方程及运动方程见(6)、(7)式:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial r} + \overline{U_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_i U_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{U_i + U_i}) U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

对 (7) 式向 x_i 求导:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial r} + \overline{U_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \overline{U_j} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \overline{U_i U_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \overline{U_i U_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i U_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \overline{U_i U_i}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial \overline{U_i U_i}}{\partial x_i \partial x_j},$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial (\overline{U_i U_i} - 2\overline{U_i U_i} - U_i U_i)}{\partial x_i \partial x_j} \quad (9)$$

从 (9) 式可知, 脉动压力与脉动流速 U_i 及时均流速 $\overline{U_i}$ 有关。

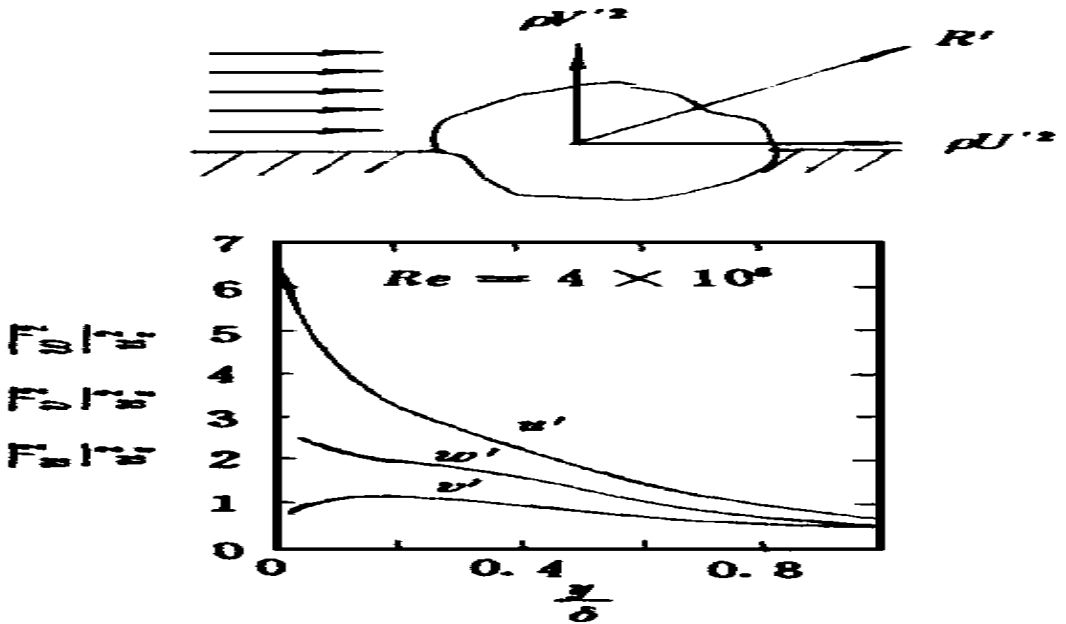


图 3

目前关于明渠紊流的水力特性已开展了一些试验研究, 文献 [7] 给出当佛氏数 $Fr < 0.7$, 断面平均流速 $V_x < 0.5 \text{ m/s}$, 水深 $h < 0.05 \text{ m}$ 时, 光滑壁面附近最大紊流度 $N = 14\%$, 文献 [8] 给出在 $Fr > 1.0$, $V_x = 3.44 \text{ m/s}$, $h = 0.05 \text{ m}$, 近底附近最大紊流度约为 20% , 由此可见, 水流的脉动作用是不可忽视的。图 3^[9] 给出了紊流边界层光滑壁面上脉动流速分布情况, 根据图 3 的试验结果, 作用于壁面凸体上的合力为

$$R = \sqrt{(\rho U^2)^2 + (\rho V^2)^2} = \sqrt{\rho^2 [(7U^2)^2 + (0.8U^2)^2]} = 7.05 \rho U^2 = 7.1 \rho U^2 \quad (10)$$

由此可见水流的脉动作用是相当可观的。以上结果是根据紊流边界层光滑壁面上的脉动

流速分布得出的。对于粗糙壁面则水流的脉动作用还会增加。由于水流对粗糙壁面的脉动作用研究尚不够充分, 因此还不能给出定量指标。涉及到泥沙起动问题的研究一般为粗糙壁面, 因此在泥沙起动流速机理研究中应当进行这方面的研究。目前确定脉动应力的方法有两种, 一种是用传感器直接量测, 另一种是通过测量脉动流速及摩阻流速 U_* 来确定。两种方法都存在一定的缺陷。第一种方法涉及到传感器制作及量测仪器是否过关, 第二种方法除脉动流速量测上与第一种方法有同样问题外, U_* 的确定也存在一定误差。因此脉动应力的量测正处于发展阶段, 从而使得与此有关的试验研究处于一种能够说明一些问题, 但还不能准确定量的状况。尽管如此, 研究水流的脉动作用对泥沙起动的影响仍然是很有意义的。

3.3 固结粘土起动流速公式

鉴于目前对明渠紊流粗糙壁面的水力特性还缺乏系统的试验资料, 笔者根据琅琊山抽水蓄能电站下库库区原状土起动流速试验, 通过团聚体粘聚力参数 C 间接的反映了水流的动力作用, (起动流速试验结果已发表于文献 [10]), 并且提出了固结粘土起动流速公式:

$$U_c = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s'}\right)^5 \left(\frac{C}{\rho D}\right)^{1/2} \quad (11)$$

式中: $\rho_s = 1.6 \text{ g/cm}^3$; ρ_s' 为粘土天然湿密度; $\rho_s' > 1.6 \text{ g/cm}^3$ 为固结粘土; $C = 1.2 \text{ g/cm}$, C 不是土力学抗剪强度指标, 由试验得出, 反映团聚体间咬合力; ρ , 水的密度; $D = 2.0 \text{ mm}$, D 表征团聚体的当量直径, 是一个平均值。计算与实测结果的误差在 13% 以内, 说明式 (11) 可用以估算该库区固结粘土的起动流速。

4 结语

本文在回顾、分析前人在粘性泥沙起动流速研究的基础上, 提出了确定粘性泥沙起动流速的设想, 认为除考虑水流的时均作用外, 还应考虑水流的脉动作用。以往所提出的用以计算粘性泥沙 (细颗粒泥沙) 起动流速公式只能用于浮泥及淤泥。对于固结粘土, 由于粘性泥沙的物理、化学性质的变化不能直接引用。本文通过试验给出了固结粘土起动流速公式虽然形式简单运用方便, 但仍属经验公式, 有待进一步地完善。由于粘性泥沙的结构对粘性泥沙的起动有较大的影响, 因此有必要开展粘性泥沙微观结构与宏观力学特性之间联系的研究。

参 考 文 献

- [1] 窦国仁 泥沙起动理论[R] 南京水利科学研究所, 1963
- [2] 唐存本 泥沙的起动规律[R] 南京水利科学研究所, 1961
- [3] 钱宁, 万兆惠 泥沙运动力学[M] 北京: 科学出版社, 1983
- [4] 张长高 水动力学[M] 北京: 高等教育出版社, 1993
- [5] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾 土力学[M] 北京: 清华大学出版社, 1994, 4
- [6] 须藤俊男 粘土矿物[M] 北京: 科学出版社, 1959, 2
- [7] 董曾南, 丁元 明渠均匀紊流水力特性试验研究[R] 清华大学水利工程系, 1988, 6
- [8] 陈兴植, 宋传琳, 董曾南 光滑溢流坝面水流紊动特性试验研究[R] 清华大学水利工程系, 1988
- [9] [美] J. W. 戴莱, D. R. P. 哈里曼著, 郭子中, 陈玉璞等译 流体力学[M] 华东水利学院
- [10] 张兰丁 固结粘土起动流速的探讨[J] 水动力学研究与进展, 1998 年增刊

Study on Starting Velocity of Cohesive Sediment

ZHANG L an-ding

(N anjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029)

Abstract In this paper, the formulas of starting velocity on cohesive sedimentation are discussed, combined with experiments of natural cohesive sedimentation in Lang-ya Mountain Pumped Storage Power Station. Based on the research results of the theory and the test about turbulence in open channel, author proposes an assumption concerning the starting mechanism and starting velocity of cohesive sediment and gives a formula to determine the starting velocity of compact clay. The paper also points out that the fluctuating stress of flow is a main factor on the starting of sedimentation. And the component and the structure of cohesive sediment are also affecting factors to the starting. Consequently, by means of modern results of soil mechanics, clay mineralogy and fluid mechanics to investigate this kind of problem is available for engineering.

Key words: cohesive sedimentation; fluctuating stress; starting velocity.