

82-87

河流水草沉降特性的试验研究*

唐造造 方铨 喻国良

(四川联合大学,成都,610065)

TV 142 i P 343.1

提 要 本文结合水电工程水草问题,对河流水草的沉降特性进行了系统的试验研究。通过以发菜为模拟材料的柔性物体沉降试验,对水草沉降形态、时均特性、特征长度、 $C_d - Re_L$ 关系、群体沉降、边界影响等问题进行了探讨。

关键词 河流水草 柔性物体 沉降特性 试验

1 前 言

由于暴雨冲蚀、岸坡边滩坍塌等原因进入河道的水草,在与泥沙联合作用时,常常造成电站进水口拦污栅的堵塞,使机组被迫降低负荷运行甚至停机检修,带来巨大损失。这一问题在我国许多河流上均存在,尤以黄河上游及西南地区为严重^[1]。如黄河盐锅峡电站,仅1964年8月12日一次水草堵塞引发的事故,使3[#]机拦污栅被压垮,造成停机600多h,损失电量2000万kW·h^[2]。一些火力发电厂冷却水取水建筑物水草堵塞问题亦相当严重。由于区域电网中火电担负的功能,一旦水草堵塞引发事故,所造成的损失,更是无法估量。

作为水电工程运行中的重大问题,沙草堵塞拦污栅问题已逐渐为人们所重视。然而,要研究水草输运分布规律并服务生产实际,必须先取得水草沉速方面的资料。水草种类繁多,形状跟球体和泥沙相差很大,单根水草在一个方向的尺寸比另两向大得多,呈细长状,且柔性、韧性较好,运动时会发生变形,已无法应用现有球体或泥沙沉速公式。目前对水草沉降特性的研究尚属空白,因而有必要进行专门研究。

2 水草沉降试验

2.1 试验材料

作为模拟水草的试验材料,应体现水草的物性特点,如具有柔性、形状近似等。根据原成都科技大学水科所泥沙室的经验,决定选用浸泡后的发菜模拟水草。

经浸泡的发菜能较好地满足比重上的要求,且能达到在沿水深分布上相似。据我们实测,浸泡12h的发菜比重为1.026,与重庆李家沱河段取样实测的水草泡后比重0.95~1.05及实测天然情况下拦污栅截的水草比重1.05~1.13比较接近。另外,浸泡后的发菜具有很好的柔性,截面基本呈圆形,部分发菜还有叉枝或叶片,与实际水草比较近似。其直径在0.2~1.2mm之间,有一定的变幅,有利于模拟多种尺寸的水草运动。

2.2 试验原理

由于水草比重大于水的比重,放入水中后,即在重力作用下下沉。随着沉降速度的增大,水流阻力也随之增大。在浮重和水流阻力的相互作用下,水草在沉降筒中的沉降要经历以下三个阶段:

2.2.1 加速段 沉降初期,沉降速度较小,重力大于阻力,由此产生的不平衡作用力

① * 本文系高等学校博士学科点专项科研基金资助项目研究成果。

使之加速沉降。随着下沉速度的增加,水流阻力逐渐增大。当水流阻力增大到与浮重相等时,加速段就宣告结束。

2.2.2 匀速段 水流阻力与浮重等值后水草等速沉降。此时的沉降速度就是水草的沉速。

2.2.3 阻尼段 由于沉降筒长度有限,水草在落至筒底附近时受筒底及其沉积物的阻尼作用而减速,直至在筒底沉积。

根据水草以沉速沉降时水流阻力与浮重相等的特性,即可推出柔性水草沉降的阻力系数表达式。以发菜为例。浸泡后的发菜截面呈圆形,设其直径为 d ,长度为 L 。试验表明,由于发菜具有柔性,平直投放水中的发菜并非平直下沉,而往往以弯曲的形态或一定的倾角下沉,这样,发菜迎水面积应为 $A = dL'$,其中 L' 为发菜在水平面上的投影(曲线)长度。

沉降发菜以沉速 ω 等速下沉时,发菜浮重 W 与阻力 F 大小相等:

$$W = F \quad (1)$$

把 $W = (\gamma_w - \gamma)\pi d^2 L/4$ 及 $F = C_d A \rho \omega^2/2$ 代入上式,化简后得到:

$$C_d = \frac{\pi g \gamma_w - \gamma}{2} \frac{L}{\gamma} \frac{d}{L'} \frac{1}{\omega^2} \quad (2)$$

式中 γ_w ——发菜容重;

γ, ρ ——水的容重、密度。

若令 $s = L'/L$,则 s 是发菜(水草)的不同运动状态表现出来的一种性质,我们可定义 s 为发菜(水草)的特征变形系数(包括柔性变形和运动状态变形)。 s 与水草的柔度、自然形态和细长度等有关,在试验中由沉降形态近似确定。在式(2)中引入 s 后,得到

$$C_d = \frac{\pi g \gamma_w - \gamma}{2} \frac{d}{\gamma} \frac{1}{\omega^2 s} \quad (3)$$

测得试验发菜的容重、几何尺寸后,只要设法测出沉速 ω , C_d 即可求出。

2.3 试验方法

沉降试验在自制的圆柱形有机玻璃沉降筒内进行。沉降筒内径21.6cm,高度121cm。

沿筒壁附刻度标尺。

试验按传统方法进行。试验前先测定试验材料的容重。试验时测出试验物体的几何尺寸(发菜为长度和直径)。将其放入沉降筒中,观察并记录其沉降形态,并用电子秒表测出其在两个特定断面(间距已知)间的沉降时间,据此算出试验发菜的平均沉速。由试验时的水温查得水的运动粘滞系数 ν 值,再结合试验材料的容重、几何尺寸等,计算出沉降阻力系数 C_d 及雷诺数 Re ,据此可点绘双对数 C_d-Re 曲线。

3 试验结果及其分析

3.1 柔性物体的沉降形态。

试验表明,单根发菜沉降时有以下五种形态:

3.1.1 平直沉降 沉降过程中保持水平的方位沿垂直线下沉。

3.1.2 平移沉降 发菜偏离投放点的垂线位置,在水平方向移动,且平移的方向不断发生改变。

3.1.3 倾斜沉降 水平投放水中的发菜经短距离调整后,维持一与水平面倾斜的方位,向下沉降。

3.1.4 旋转沉降 发菜在沉降过程中,在水平方向打转。

3.1.5 翻滚沉降 沉降时上下翻滚,迎水面积发生显著变化,沉降路径呈波浪形(沿某中心垂线有所摆动)。

在上述五种沉降形态中,平移、倾斜、旋转出现的机率较多。平直沉降仅在小长度、小雷诺数($Re_L < 5$)时发生,翻滚通常发生于沉降之初,多系弯曲和较粗的发菜。发菜的实际沉降表现为不同形态的组合,较常见的有:

- 平直+旋转;
- 平直+平移+旋转;
- 平移+倾斜+旋转;
- 倾斜+旋转+翻滚。

其中前三种组合较稳定,第四种不稳定。

发菜的沉降形态与其浸泡后的自然特性及雷诺数关系密切。在小长度、低雷诺数时,发菜能稳定地平直下沉,沉降路径基本上为一垂直线,此时属层流沉降。随着长度和雷诺数的增大,发菜在沉降过程中发生倾斜,并旋转下沉。雷诺数愈大,发菜弯曲愈甚,旋转加剧,下沉路径呈螺旋形,此时为紊流沉降。当长度更大(试验中 $L > 6\text{cm}$)而直径较小时,发菜入水后常交织成束,旋转下沉,但能保持稳定的沉降方位。

为了对沉降引起的尾迹漩涡进行观察,试验中采用了在墨水中浸泡发菜的办法。试验表明尾迹或水流分离是从发菜接近上缘处开始的,在两端面及形态突变处,尤为明显,尾迹或水流分离情况与沉降速度有关:垂线下沉时,尾迹向正后方分离;平移时尾迹分离方向与竖直面成一交角。

发菜的沉降方位具有明显的趋向性。试验表明,单根发菜沉降时倾向于取得阻力较大的方位,其长轴方向大致与沉降方向垂直。将发菜水平放入水中后,发菜经短距离调整,或平移滑动或翻滚,直至调整到一个阻力较大的方位,此后,其沉降方位便基本不发生变化,即便是竖直放入的发菜,亦能较快地调整到其稳定方位:水平或接近水平。在试验发菜长度下限情况下,这种现象依然存在。用矩形截面的橡胶条进行试验时,再次观察到了这一现象,此表明,以阻力较大的方位下沉是细长型柔性物体沉降的重要特性。

物体沉降时受水下重力和水流阻力作用,它们的相对消长变化导致了不同的沉降形态。由于发菜长度大及外形上的不均匀性,各部位的下沉速度并不相同,相应的迎水面积亦存在一定的差异,于是各部位承受的水流阻力也不相同;这些力若能与浮重平衡(合力及合力矩均为零),则发菜匀速不旋转下沉。但在多数情况下,这两种力并不平衡。以沉速沉降时尽管合力为零,合力矩却不为零,

其分量在水平面和竖直面内均存在,但以水平面内为主。于是,发菜在竖直面内发生倾斜,在水平面内发生旋转。发菜旋转产生的环量与沉降运动综合作用,产生一个垂直于运动方向(水平面内)的马格努斯(Magnus)力,使发菜沉降出现水平滑移。如果垂直面内的运动稳定下来(垂直面内力矩变为零)后,水平面内力矩依然存在,则发菜能稳定地旋转下沉。若垂直面和水平面内的力矩同时存在,则表现为既旋转又翻滚的沉降形态。

综合上述,细长型柔性物体沉降时通常会发生弯曲等形态上的改变,并有平直、平移、倾斜、旋转和翻滚五种基本沉降形态,沉降时趋向于取得阻力较大的稳定方位。

3.2 柔性物体沉降的时均特性

为研究发菜沉降的时均结构,进行了一系列沉降历时线的量测。图1是典型对照组发菜的沉降历时线。可看出,两段发菜的沉降历时线非常接近于直线。表明,发菜长时段的平均沉速确实比较稳定。但初始段的实测点据跟上述直线段略有偏离,反映出加速段及发菜投放的较大影响。因此,沉速测量时,扣除初始段后,即可保证必要的精度。

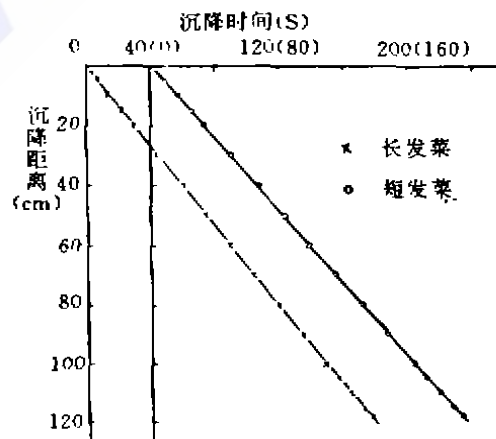


图1 发菜沉降历时线

3.3 特征长度的选取

在研究物体沉降特性时,雷诺数为一重要参数,应确定能反映被研究对象几何特征

和运动特征的某个长度为其特征长度。对圆柱体来说,几何特征量为直径 d 和长度 L 。作者曾根据第一阶段试验资料的处理结果,在双对数纸上点绘了 C_d-Re_d 和 C_d-Re_L 试验点据。结果表明:以 d 为特征长度时, Re_d 变化范围很小,而且点群关系散乱;以 L 为特征长度时,点群分布的规律性较明显,且 Re_L 覆盖范

围较广(这一点可从图 2 中可看出)。因此,选用长度 L 作为特征长度,能较好地反映水草的沉降特性。

3.4 柔性物体沉降的 C_d-Re_L 关系

经大量试验,得到柔性物体(发菜)沉降 C_d-Re_L 关系如图 2 所示。

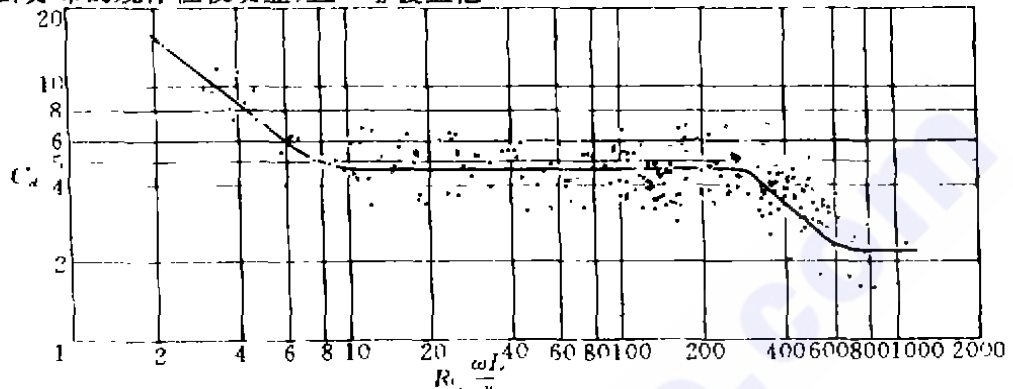


图 2 圆柱形柔性物体沉降 C_d-Re_L 关系

C_d 值反映柔性物体沉降时的总阻力,包括摩擦阻力和压差阻力两部分。前者是水流粘性直接作用的结果,后者则由压力分布的不对称造成^[3]。这两种阻力在一般情况下同时存在,各自所占比例则取决于绕流情况。将柔性物体 C_d-Re_L 关系与球体 C_d-Re_L 曲线对照后不难看出,本试验点据覆盖了过渡区、压差阻力区、压差阻力-紊流分离过渡区,并涉及部分紊流分离区。各区范围如下:

3.4.1 过渡 I 区(层流-紊流过渡区)

$Re_L < 10$ 。总阻力由摩擦阻力和压差阻力两部分组成,两者比例相当。

3.4.2 压差阻力区 $10 < Re_L < 300$ 。总阻力中摩擦阻力所占比例减小,压差阻力起主要作用,阻力系数大致为一常数。

3.4.3 过渡 II 区(压差阻力-紊流分离过渡区) $300 < Re_L < 800$ 。压差阻力仍居支配地位。此时柔性物体边界出现紊流边界层。由于紊流边界层抵抗分离的能力强,分离点逐渐后移,压差阻力随之减小,阻力系数逐渐降低。

3.4.4 紊流分离区 $Re_L > 800$ 。此时分

离点后移到一较稳定的位置,阻力系数再度稳定在一个较低的数值上。

进一步对照后可知,发菜沉降各区的分界雷诺数都降低了,这可能与发菜比重小及其柔性、形状、尺寸有关。另外,球体压差阻力区到紊流分离区的转变是突然的,而发菜的这一过程是平缓的。造成这种差异的原因可能在于:出现紊流边界层后,球体的分离点后移是全方位进行的,对发菜这类圆柱体来说,分离点只能从柱体两侧后移,其速度较球体慢。因此,发菜 C_d-Re_L 曲线在此区平缓下降。试验中,发菜长度范围是 $0.1 \sim 14.5\text{cm}$, L/d 为 $2.4 \sim 380$ 。实际河流水草 L/d 值不可能达到 200 以上,而只有 $L < 0.2\text{cm}$ 时,才会有 $Re_L < 10$,由此可断定天然水草沉降不会落入层流区和过渡 I 区。

3.5 柔性物体 C_d-Re_L 曲线的拟合。

在试验所得柔性物体 C_d-Re_L 曲线基础上,分段对曲线进行拟合,根据曲线各分段近似线的特点,确定拟合函数类型为

$$C_d = k/Re_L^m$$

其中 k, m 为常数。

经适线、选点计算,确定柔性物体(发菜)沉降的 C_d-Re_L 曲线各区拟合函数如下式:

$$C_d = \begin{cases} 26.058/Re_L^{0.749} & Re_L < 10 \\ 4.6 & 10 < Re_L < 300 \\ 1169.347/Re_L^{0.977} & 300 < Re_L < 800 \\ 2.2 & Re_L > 800 \end{cases} \quad (5)$$

拟合结果如图 3 所示。

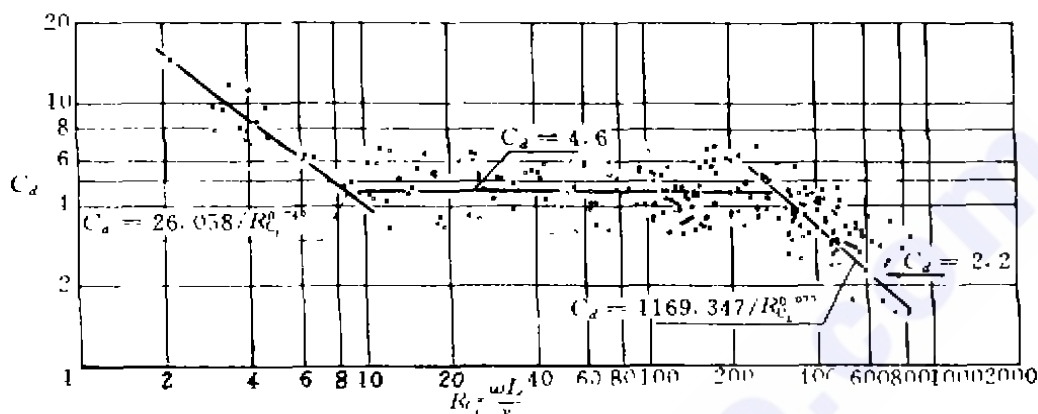


图 3 柔性物体 C_d-Re_L 曲线拟合函数图

3.6 柔性物体沉降的相互影响

试验表明,当发菜数量屈指可数且互不交叉(接触)时,其相互影响可忽略不计。当少量分散发菜在沉降过程中发生接触时,其整体沉速要较其中的最慢者大,但不一定比最快者大,其值大致在最细与最粗的单根发菜的沉速之间,由长度较大的发菜组成的群体发菜,沉降速度显著增大,在数值上显著大于群体中最大的单根沉降速度。由短发菜组成的群体,沉降时易分散成股,各股分别下沉。但小股的沉降速度也比单根大,沉降也更稳定。位于群体正后方的散体发菜,当间距在一倍发菜群体尺寸范围内时,其沉降受到群体的强烈影响,运动不稳定,以令人吃惊的速度下沉,加入群体并随之共同下沉。若距离超过一倍群体尺寸范围,即不再受其影响,究其原因,可能系群体下沉时,水流分离造成的漩涡影响约在一倍群体几何尺度范围内所致。群体发菜的沉降特性是表现为单一形状不规则物体的沉降。但由于水草长度不同,群体水草的组合方式也存在差异,团状水草可以分散

成股,甚至成散体沉降,而散体与成股水草也可能重新组合,呈群体沉降。

3.7 边界情况对沉降的影响

试验中发菜长度较大,有的达到沉降筒内径的量级。为探求边界对柔性物体沉降的影响,用同样的发菜在不同内径的沉降筒(大筒内径 21.6cm,小筒 7.8cm)中进行对比试验。试验表明,发菜在不同内径沉降筒中的沉降形态基本相同,当 $D/L > 10$ (D 为筒内径) 时,发菜在不同筒中的沉速差别很小。当 $2 < D/L < 10$ 时,沉速差别亦较小。 $D/L < 2$ 时,不同筒沉速差异较明显,此时大筒内的沉降速度比小筒约大 5%,反映出小筒边壁的较大阻滞作用。这些情况表明,当 $D/L > 2$ 时,边界影响较小,只有 $D/L < 2$ 时,边界的阻尼作用才表现得较为明显。

4 结 语

本文通过河流水草沉降特性的试验研究,得到了如下结论:

1. 细长圆柱形柔性物体沉降的 C_d-Re_L 关系曲线与球体 C_d-Re_d 曲线相似, 存在过渡区、压差阻力区、压差阻力-紊流分离过渡区及紊流分离区等几个流区。柔性水草具有较大的沉降阻力系数, 从压差阻力区到紊流分离区过渡平缓。

2. 细长型柔性物体沉降时会发生弯曲等形态上的改变, 并有平直、平移、倾斜、旋转及翻滚五种基本形态。它们在沉降时趋向于取得阻力较大的方位, 其长轴大致与沉降方向垂直。

3. 交叉成团柔性物体构成的群体的沉降特性是表现为单一形状不规则物体的沉降, 其沉速较组成群体的单个物体大。

4. $D/L > 2$ 时, 柔性物体沉降的边界影响较小。只有 $D/L < 2$ 时, 沉降筒的边壁效应

才表现得较为明显。

由于国内外对河流水草问题研究甚少, 可供本文借鉴的经验和资料十分缺乏。这里进行的只是很初步的前期探索性工作, 试验结果也尚未尽如人意, 更多的工作还有待以后进一步深入。鉴于我国水草问题比较突出, 建议在水草问题较严重地区的水文测站, 增设与水草有关的测验项目, 同时建立相应测验规范和要求, 为国家建设服务。

参 考 文 献

- 1 钱宁·戴定忠·中国河流泥沙问题及其研究概况·河流泥沙国际学术讨论会议文集, 第1卷, 光华出版社, 1981年, 3~18
- 2 洮河水草问题查勘小组·关于黄河刘家峡水电站水草问题及拦草排草措施查勘报告·1968年6月
- 3 翟荣祖主编·工程流体力学·纺织工业出版社, 1987年
(收稿日期, 19940425)

Test and Research on Settlement Feature of waterweeds in River

Tang Zaozao Fang Duo Yu Gouliang
(Sichuan United University)

Abstract In the light of waterweeds problems in hydropower project, test and research of settlement feature of waterweeds in river is systematically carried out. Based on settlement test for soft substance like hairgrass, settlement form, time uniform characteristics, characteristic length, c_d-Re_L relationship, colony settlement, boundary influence are studied.

Key Words river waterweeds, soft substance, settlement features.

(上接第50页)

Study on Engineering Properties of Core Impervious Material at Pubugou Hydroelectric Project

Lei Zehong
(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

Abstract Core impervious material at Pubugou hydroelectric Project is coarse graded gravel soil. Engineering application experiment is lacked in China, so various schemes for improving the material engineering properties were studied in laboratory. Tested by site roller compaction, rejecting method is used to adjust gradation. This method not only meet the needs of the project, but also can simplify construction program, short construction period, cut down expenses and gain obvious economic benefit.

Key Words Pubugou hydroelectric project, coarse-graded gravel soil, engineering properties of impervious material, roller compaction test.