

推移质输沙量的计算及其应用

周济福

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 基于推移质输沙率与水流动力条件之间的关系, 提出了一种计算年平均推移质输沙量时, 代表性水流动力条件的选择方法, 同时将断面分为若干子断面进行计算, 可以解决推移质沿断面不均匀输移的计算困难, 计算过程中还考虑了推移质级配的逐时变化. 所提出的计算方法应用于黄河青铜峡水库, 计算了年平均推移质量, 结果与实测淤积量符合很好.

关键词 推移质, 输沙量, 水流动力, 推移质级配

1 前言

水利工程建设中, 往往需要估计年平均推移质输沙量. 推移质泥沙在水库中淤积引起的“翘尾巴”现象, 将扩大淹没和浸没面积, 对工农业生产不利; 还将影响航运、码头的正常运转^[1]. 推移质测验十分困难, 且推移质测验资料受各种条件的限制往往难以应用. 目前, 采用推移质输沙率公式来计算推移质输沙量是推移质设计的一个重要途径. 推移质运动是水与泥沙相互作用而引起的泥沙运动的一种特殊形式, 它包括泥沙的滚动、滑移和跳跃等三种模式. 推移质输沙率公式表达了推移质输移的数量与水流动力条件之间的函数关系, 其形式有多种, 因水流动力条件的不同标志方式而异. 1879年, 法国的P. Duboys第一次提出推移质输沙率 g_b 是水流动力 τ 与床沙起动切应力 τ_c 差值的函数^[1]

$$g_b = \psi \tau (\tau - \tau_c)$$

式中, ψ 为表征泥沙输移的特征系数. 另一类研究从推移质的运动速度 u_s , 及其滚动、滑移和跳跃前进的厚度 T_s , 得到推移质输沙率

$$g_b = \gamma_s u_s m_s T_s$$

其中, γ_s 为泥沙的比重, m_s 为动密实系数. 利用指数形式的流速分布廓线, 可以导出推移质运动速度 u_s 与平均流速 V 和泥沙起动流速 V_0 差值的关系, 进而可得到推移质输沙率与平均流速的关系, 例如沙莫夫公式

$$g_b = K D^{2/3} (V - V_0) \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \left(\frac{d}{h} \right)^{1/4} \quad (1)$$

式中 h 为平均水深; d 为推移质平均粒径; $V_0 = \frac{1}{1.2} V_c$ 为止动流速; K 为系数; D 为非均匀沙中最粗一组的平均粒径. 当 $V < V_0$ 时, $g_b = 0$.

工程设计中常用流速形式的单宽推移质输沙率公式计算多年平均的推移质输沙量, 计算中需解决两个关键问题: 一是代表性的水流动力条件; 二是推移质沿横断面的不均匀输移. 黄河盐锅峡、青铜峡水电站的设计曾分别采用多年平均流量和几个流量级推算年平均推移质量^[3]. 从式(1)可见, 推移质输沙率与流速的四次方成正比, 因此采用多年平均流量或多年平均的流量系列所得到的年平均推移质量很可能偏小, 不利于工程的安全. 对于推移质横向不均匀输移的问题, 若采用断面平均量进行计算, 则需确定推移质输移的平均宽度, 目前还只能结合实地勘察进行略估, 精度较差.

鉴于此, 本文根据式(1)的关系提出以流量的四次方的统计平均值为准, 选取计算推移质量的代表性水流动力条件. 与此同时, 为模拟推移质输移的横向不均匀性, 适当地将基本计算断面分为若干个子断面, 认为各子断面的推移质输移强度不同, 分别求解各子断面的推移质输沙率, 全断面的推移质输沙率为子断面输沙率之和. 该方法应用于黄河青铜峡水利枢纽, 所得到的年平均推移质量与实测淤积资料基本吻合.

2 选取代表性水流动力条件的准则

水利工程中, 常常需要确定代表性水流动力条件进行各项设计, 最常用的方法是以多年平均流量为准, 来选择能够代表长期平均水动力条件的水流系列. 然而对于推移质设计来讲, 因其输移率与流速的四次方成正比[见式(1)], 即

$$g_b \propto V^4 \propto Q^4$$

这里 Q 为流量. 可见, 大流量时的推移质量比小流量时的推移质量成指数倍地增加, 如以多年平均流量为准则选择的水流系列进行计算, 所得推移质量较实际

本文于1999-10-28收到.

的推移质量偏小，不能代表多年推移质输移的情况。因此本文提出，以多年的 Q^4 的均值为准则，选择水流代表系列进行年平均推移质量计算。

3 计算方法

流速是水文站的基本测验项目，以流速表示的推移质输沙率公式在工程设计中便于采用。其中沙莫夫公式 (1) 应用较为普遍，式中 D 可取为推移质 D_{90} ， $K = 2.5$ 。推移质输沙量 G 可由单宽推移质输沙率求得

$$G = g_b \cdot B \cdot T \quad (2)$$

式中， B 为推移质输移宽度， T 为流量历时。天然河道横断面常呈“V”型，沿横向水深和流速并非均匀分布，一般中央较深处流速较大，两侧较浅处流速较小。因 $g_b \propto V^4$ ，流速的微小变化可以大大影响推移质输沙率，所以推移质不可能沿整个河宽均匀输移，其输移宽度依水流动力条件的变化而改变。若以断面平均流速计算 g_b ，则确定 B 所带来的误差难以估计。为此，将断面沿横向分为若干子断面，计算过程中自动判断各子断面是否有推移质输移。

设子断面数为 m ，子断面宽、深分别为 B_i 、 H_i 。当流量为 Q ，水位为 z 时，若水面比降 J 、糙率 n 沿横向不变，则子断面流速为

$$V_i = \frac{QH_i^{2/3}}{\sum_{i=1}^m B_i H_i^{5/3}} \quad (3)$$

假定河床级配不沿横向变化，则历时为 T 的某一流量 Q 所输移的推移质量 G 可计算如下 ($i = 1, 2, \dots, m$)：

1) 最大起动粒径 $d_{\max i}$

由沙莫夫起动流速公式 $V_c = 4.6d^{1/3}h^{1/6}$ 得

$$d_{\max i} = \frac{V_i^3}{97.336\sqrt{H_i}}$$

2) 推移质级配 (D_i^j, P_i^j)

由河床质级配曲线 (d^j, p^j)，可求出与 $d_{\max i}$ 相应的沙重百分数 $p_{\max i}$ ，河床质级配中小于 $d_{\max i}$ 的部分即为推移质。将 $p_{\max i}$ 换算成 100，小于 $d_{\max i}$ 的节点 (d^j, p^j) 换算成 (D_i^j, P_i^j)，($j = 1, 2, \dots, k$) 即为推移质级配。

3) 推移质平均粒径 \bar{D}_i 及 D_{90i}, V_{0i}

$$\bar{D}_i = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{k-1} (P_i^{j+1} - P_i^j)(D_i^{j+1} + D_i^j)/2$$

$$V_{0i} = \frac{1}{1.2} V_{ci} = 3.83 \bar{D}_i^{1/3} H_i^{1/6}$$

D_{90i} 可由推移质级配曲线求得。

4) 子断面推移质量

$$G_i = g_{bi} \cdot B_i \cdot T =$$

$$2.5 D_{90i}^{2/3} (V_i - V_{0i}) \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^3 \left(\frac{D_i}{H_i} \right)^{1/4} \cdot B_i \cdot T$$

$$\text{全断面推移质量 } G = \sum_{i=1}^m G_i$$

对于某一流量过程，常将其处理成若干流量级的阶梯曲线，其所输移的推移质量 G_t 为各级流量下的推移质量 G 之和。

由子断面推移质量 G_i 及其级配 (D_i^j, P_i^j)，可得全断面某粒径级的推移质量

$$G^j = \sum_{i=1}^m G_i (P_i^{j+1} - P_i^j) / 100$$

各级流量下的 G^j 之和为整个流量过程所输移的各粒径级的推移质量 G_t^j ，则该流量过程所输移的推移质量级配为

$$P^j = \frac{G_t^j}{G_t} \times 100$$

4 计算方法的应用

年平均推移质量是工程设计所关心的基本数据。将上述计算方法应用于黄河青铜峡水电站，计算了年平均入库推移质量。青铜峡水库的入库站为下河沿水文站，其上游 14 km 处为规划中的大柳树水库的坝址。由于下河沿水文站无可信的河床质级配资料，我们将基本计算断面上移至大柳树水库的入库控制站——安宁渡水文站。

按前述代表性水流动力条件的选择方法，从安宁渡站 1954 年~1986 年水流系列中选取代表年。首先统计出每年月平均流量四次方的平均值 $\left(\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} Q_j^4 \right)$ ，其 33 年的均值为 8.47×10^{12} ，1984 年月平均流量四次方的平均值 7.32×10^{12} 与之最为接近 (如表 1)。因此选取 1984 年流量过程为代表年，该流量过程在 1954 年~1986 年系列中出现的频率约为 39.4%。

计算所采用的基本资料为：

1) 河床质级配：在大柳树水库的规划设计阶段，曾于安宁渡水文站附近进行河床质采样，最大粒径为 102 mm，中值粒径为 30 mm。

2) 基本计算断面：1984 年安宁渡站汛前实测断面。

表 1 安宁渡站历年流量统计表

年份	1954	1955	1956	1957	1958	1959
Q 平均	1010	1380	694	827	1170	1000
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	5.06	15.7	0.98	2.32	10.7	6.04
年份	1960	1961	1962	1963	1964	1965
Q 平均	885	1250	952	1190	1440	890
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	3.30	9.92	3.19	13.2	23.1	2.22
年份	1966	1967	1968	1969	1970	
Q 平均	1100	1660	1280	696	814	
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	12.5	46.2	11.0	0.47	1.02	
Q 年份	1971	1972	1973	1974	1975	1976
平均	914	947	865	872	1310	1310
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	3.83	3.22	1.03	0.86	10.4	14.0
Q 年份	1977	1978	1979	1980	1981	1982
平均	855	950	1050	820	1280	1120
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	0.88	5.70	6.93	0.94	28.9	3.60
Q 年份	1983	1984	1985	1986		
平均	1330	1110	1090	922		
Q ⁴ 平均 (×10 ¹²)	15.6	7.32	6.25	3.09		

3) 水位 - 流量关系: 根据安宁渡站 1984 年洪水水文要素摘录表, 点绘水位 - 流量关系, 因其绳套性质, 计算时视为涨水期和落水期两条关系线。

4) 流量过程: 采用安宁渡站 1984 年日平均流量过程, 相应于水位 - 流量关系, 将整个流量过程分为涨水期和落水期两条过程线分别进行计算。

由以上资料, 得年平均推移质量为 $G_t = 71.43 \times 10^4 t$, 其中涨水期 $44.82 \times 10^4 t$, 占总量的 63%, 落水期 $26.61 \times 10^4 t$, 占总量的 37%。

1970 年 5 月 ~ 1980 年 5 月曾在黄河青铜峡水利枢纽进行过较全面的淤积测验, 测验项目包括汛期前后的断面、淤积物干容重和级配等。对这 10 年的实测淤积资料进行统计分析, 得到 10 年间青铜峡水利枢纽的推移质淤积总量约为 $708.8 \times 10^4 t$, 年平均推移质量为 $70.88 \times 10^4 t$ 。

原水利电力部西北勘测设计院的梁宗南^[4]曾从泥沙扬动的观点出发, 建立推悬分界粒径与水力要素的关系, 并据此求出青铜峡水利枢纽的年平均推移质量为 $76 \times 10^4 t$, 我们统计的实测结果与之非常接近。

以上可见, 年平均推移质量的计算值与实测值非常接近, 表明本文所提出的方法是可行的。

5 结 语

本文从分析推移质输沙率与水流动力之间的关系

入手, 认为以年平均流量为准则选取代表年的传统方法所给出的年平均推移质量偏小。因此提出一种选取代表年的新准则, 据此选取的代表年的出现频率小于 50%。与此同时, 针对天然河道流速沿横断面不均匀分布的特点, 将断面分为若干较为规则的子断面进行计算, 可以有效地模拟推移质沿横向的不均匀输移。计算过程中还考虑了河床质为非均匀沙时, 推移质级配的逐时变化。最后, 将所提出的计算方法应用于黄河青铜峡水库, 计算年平均推移质量, 与实测结果符合很好, 说明本文的计算方法是行之有效的。

参 考 文 献

- 1 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学. 北京: 水利出版社, 1982
- 2 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1986
- 3 水利电力部水利水电规划设计总院. 水电站泥沙问题总结汇编, 1988
- 4 梁宗南. 青铜峡水库入库推移质量的估算. 水利电力部西北勘测设计院研究报告, 1985

A METHOD FOR ESTIMATING ANNUAL AMOUNT OF BED LOAD

ZHOU Jifu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A new method is proposed to estimate annual amount of bed load, in which the typical hydrological year of discharge series is selected based on the relationship between the bed load rate and hydraulic factors. The lateral non-uniform bed load transport along the cross section is accounted for by dividing the basic section into certain number of sub-sections in which the bed load rate is calculated in terms of local velocities. In addition, the time-variation of size grading of bed load is taking into consideration. Finally, the method is applied to the Qingtongxia Reservoir. The estimated annual bed load amount agrees well with that observed.

Key words bed load, annual bed load amount, typical hydrological year, size grading of bed load