

水库淤积平衡坡降的分析*

梁栖蓉 黄煜龄

(河流研究所)

摘 要 根据冲积性河道和水库淤积后稳定河床形态的形成原理基本相似的规律,通过大量冲积性河道及水库等实测资料,对平衡坡降进行了分析研究,提出了比较简便的、符合实际的平衡坡降计算公式。

关键词 平衡坡降;冲积性河道;河道形态;纵剖面

0 前 言

水库修建后,经过大量泥沙的淤积,直至淤积最后终止,库区河道便进入了相对平衡状态。河床纵剖面将有一个稳定的坡降,即为平衡坡降。水库淤积后平衡坡降的大小,对水库淤积量的大小、有效库容的保留、回水位的抬高等问题,均将产生较大影响。因此水库淤积后,平衡坡降的估算,对水库泥沙淤积计算有着重要意义。通过对已有水库平衡坡降计算公式及存在问题的分析,和对冲积性河道及水库实测资料分析的基础上,进一步对平衡坡降的计算方法进行了研究,从而找出比较符合实际的通用的计算公式。

1 河流平衡坡降的形成

1.1 冲积性河道平衡坡降

冲积性河道在长期的运动过程中,通过水流和泥沙、水流和河床的相互作用,以冲淤变化的方式,经反复自动调整后,水流及水流的挟沙能力与河床基本适应,河道形态处于相对平衡状态,河床也形成了相对平衡的纵坡降,即平衡坡降。影响河床平衡坡降的因素较多,但主要与来水来沙及河床边界条件有关。不同来水来沙条件及不同河床边界的河道,河床的平衡坡降则不同。在天然河流中来水来沙随时间不断变化,年内及年际的变化更大,因此河床呈现出时而冲、时而淤,以冲淤交替的方式不停地调整河床形态。主要为调整河床坡降,适应其来水来沙的变化,以维持河床相对平衡。

1.2 水库淤积后的平衡坡降

当天然河流上修建水库后,破坏了河道与来水来沙相对平衡状态,使河道的侵蚀基面发生较大变化,库区河道则将发生激烈的冲淤,河道演变的结果,将是在新的侵蚀基面下达到新的平衡。修建水库后,库区河道由于水深增加,坡降变缓,流速迅速减小,水流挟沙能力大大降低。因此库区泥沙大量落淤,使过水面积减小,流速不断增大,悬移质泥沙淤积速度也

* 韩其为高级工程师曾对本项工作作过指导。

随之减慢,直至河道形态与来水来沙相适应。当库区形成新的冲积河道后,冲淤便进入相对平衡状态。

水库淤积平衡后,所塑造的稳定河床形态演变过程与冲积河道相类似,都是由于来水来沙与河床不相适应,通过冲淤变化,不断调整河床形态,使之形成与来水来沙相平衡的河道。因此,在计算水库淤积平衡坡降时,往往参照冲积河道平衡坡降计算公式。

2 常用的水库淤积平衡坡降计算公式

水库淤积后平衡坡降的计算公式种类较多,但一般常用的公式为通过联解水流阻力公式、水流连续公式、挟沙能力公式、河相关系公式而求得的平衡坡降公式。该公式基于水库淤积达到相对平衡时,库区河道均应满足上述公式。

(1) 联立求解后的平衡坡降公式

$$J_K = \frac{n^2 s^{\frac{0.73}{m}} \omega^{0.73} g^{0.73} \zeta^{0.4}}{K^{\frac{0.73}{m}} Q^{0.2}} \quad (1)$$

平衡水深公式:

$$H_K = \frac{K^{\frac{1}{10m}} Q^{0.3}}{\zeta^{0.6} s^{\frac{1}{10m}} \omega^{0.1} g^{0.1}} \quad (2)$$

平衡河宽公式

$$B_K = \zeta_i^2 H_i^2 \quad (3)$$

(2) $B < B_K$ 时的平衡坡降公式

当河槽天然河宽小于平衡后的稳定河宽,即 $B < B_K$ 时,则平衡坡降计算公式为

$$J_K = \frac{n^2 B^{0.5} s^{\frac{0.83}{m}} \omega^{0.83} g^{0.83}}{K^{\frac{0.83}{m}} Q^{0.5}} \quad (4)$$

上述公式中, n 为糙率; H 为水深; Q 为流量; B 为河宽; s 为水流挟沙能力; K 为挟沙力公式系数; m 为挟沙力公式指数; g 为重力加速度; ω 为泥沙颗粒静水沉速; ζ 为河相系数。

当河段的水力因素已知,挟沙力公式及河相系数确定之后,则可用(1)至(4)式计算出水库淤积平衡后河床形态,即平衡坡降,平衡水深及平衡河宽。

(3) 以往的平衡坡降公式存在的问题

上述水库淤积平衡坡降公式,虽有一定理论基础,但影响水库淤积因素十分复杂,在计算过程中对某些问题的处理仍有不足之处,以及仍需利用某些根据实测资料得出的经验关系。其中主要问题有以下两点:

① 水流挟沙力公式有多种形式,需要选择适合本河段的公式,同时仍需有实测资料验证。如无实测挟沙力资料,计算结果的可靠性则受到影响。

② 计算中需考虑床沙质和冲泻质的划分,但其划分没有固定界限,不同的河流床沙质与冲泻质的分界粒径则不同。即使同一条河流但不同河段,因沿程水力因素的变化,其分界粒径也不相同。所以由于划分分界粒径的不同,其计算结果也会不同,对于平衡坡降计算结果的正确性会受到影响。

3 冲积性河道平衡坡降公式的建立

针对已有平衡坡降公式所存在的问题，试图通过对冲积性河道实测资料的分析，寻求全沙的通用的计算平衡坡降的公式。

3.1 实测基本资料的搜集

- 实测资料汇总如表 1。从表 1 中表明了基本资料具备了以下几个特点：
- (1) 实测资料范围广。在搜集实测资料的过程中考虑了实测资料的区域性，搜集的资料有北方的多沙河流黄河、永定河，南方的少沙河流长江及其支流汉江。
 - (2) 实测资料齐全，具有一定代表性。搜集的资料中，有河道资料、水库资料、渠道及试验室水槽的资料。河道资料，均为河流中下游冲积性河道实测资料。
 - (3) 所搜集的实测资料均系按照平衡坡降公式所要求的，具有冲淤平衡条件下的实测资料。
 - (4) 实测资料经过了系统整理分析和计算。实际坡降资料中，黄河、长江均为水面坡降；官厅水库和陈垓输沙渠道及试验水槽均为实测床面坡降；实际糙率及河相系数为实测资料计算值。数据的整理，有年平均、月平均和时段平均值，及其单次值。
 - (5) 搜集的实测资料中，流量、含沙量及坡降值变化范围大，从表 1 可以看出，实测流量资料最大值为 47 000m³/s，最小值仅为 0.001 3m³/s；含沙量最大值为 165kg/m³，最小值仅为 0.08kg/m³；坡降最大值为 200‰，最小值为 0.17‰。

表 1 实测基本资料最大最小值统计表

河 名	河 段 名 称	流 量 (m³/s)		含 沙 量 (kg/m³)		坡 降 (‰)	
		最 小	最 大	最 小	最 大	最 小	最 大
黄 河	花园口~高村	280	5 790	2.3	82	1.84	1.94
黄 河	洛口~利津	280	5 640	1.0	75	0.84	0.96
黄 河	高村~艾山	480	2 760	15.0	52	1.15	1.35
黄 河	艾山~利津	1010	3 350	14.0	46	0.98	1.05
黄 河	陈垓输沙渠	8.7	33.4	3.5	40	0.87	2.4
长 江	沙市~新厂	3 160	33 500	0.1	2.4	0.39	0.5
长 江	螺山~汉口	4 730	41 400	0.27	1.2	0.19	0.24
长 江	汉口~九江	5 320	47 200	0.09	1.2	0.17	0.27
汉 江	碾盘山~新城	192	8 470	0.08	6.7	0.73	0.96
永定河	官厅水库	6.5	259	0.57	97	1.10	4.5
水 槽	明渠水力输送(B.C 克诺罗兹试验资料)	0.001 3	0.094	3.0	165	10.00	200

3.2 公式的建立

从式(1)可以看出，当 K 、 m 为常数，可建立如下关系式：

$$\frac{J_K Q^{0.2}}{n^2 \zeta^{0.4} \omega^{0.73}} = f(s)$$

令:

$$M = \frac{J_K Q^{0.2}}{n^2 \zeta^{0.4} \omega^{0.73}}$$

用实际资料点绘 $M \sim s$ 的关系, 如图 1。

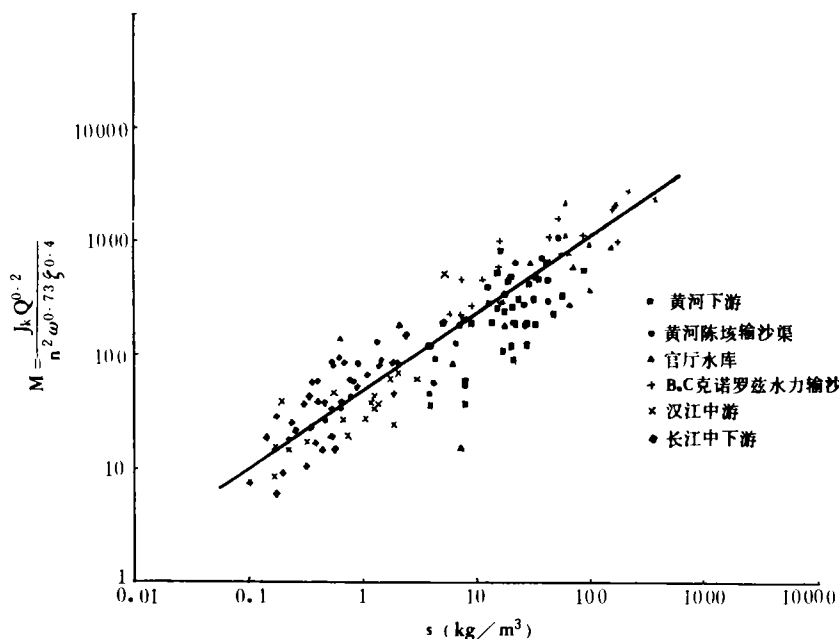


图 1 $\frac{J_K Q^{0.2}}{n^2 \zeta^{0.4} \omega^{0.73}} \sim s$ 关系

从图 1 可看出, 不同河流、不同河段, 不论水库、渠道或水槽资料所点绘的点子, 均能集中一起形成一条带状, 点子虽有些分散, 但规律明显, 在一定程度上反映了客观规律。

1) 当河道比较开阔, 天然河宽大于平衡后稳定河宽, 即 $B > B_K$ 时, 从图 1 求得

$$M = \frac{J_K Q^{0.2}}{n^2 \zeta^{0.4} \omega^{0.73}} = 47.3 s^{0.678}$$

解出 J_K 得

$$J_K = 47.3 \frac{n^2 s^{0.678} \omega^{0.73} \zeta^{0.4}}{Q^{0.2}} \quad (5)$$

(5)式即为所求的平衡坡降计算公式。

当平衡坡降已知时, 联立水流阻力公式、水流连续公式和河相关系式, 即可求得平衡后的水深及河宽。

$$\text{平衡水深} \quad H_K = \left(\frac{nQ}{\zeta^2 J_K^{0.5}} \right)^{\frac{3}{11}} \quad (6)$$

$$\text{平衡河宽} \quad B_K = \zeta_K^2 H_K^2 \quad (7)$$

2) 当河道比较狭窄, 天然河宽小于平衡后稳定河宽, 即 $B < B_K$ 时, 其公式推求如下:

(1) 挟沙能力公式指数 m 及系数 K 的推求

由公式(1)整理后得到

$$J_K = \frac{g^{0.73}}{K^{\frac{0.73}{m}}} \cdot \frac{n^2 s^{\frac{0.73}{m}} \omega^{0.73} \zeta^{0.4}}{Q^{0.2}} \quad (8)$$

比较式(8)与式(5), 当 $\frac{0.73}{m} = 0.678$, 即 $m = 1.077$ 时可得到: $\frac{g^{0.73}}{K^{\frac{0.73}{m}}} = \frac{9.81^{0.73}}{K^{0.678}} = 47.3$

即 $K = \left(\frac{9.81^{0.73}}{47.3}\right)^{\frac{1}{0.678}} = 0.039575$

(2) 平衡坡降公式推求

将求得的 m 、 K 值代入式(4)整理后, 则有

$$J_K = \frac{9.81^{0.83}}{(0.039575)^{0.77}} \cdot \frac{n^2 B^{0.5} s^{0.77} \omega^{0.83}}{Q^{0.5}}, J_K = 80 \frac{n^2 B^{0.5} s^{0.77} \omega^{0.83}}{Q^{0.5}} \quad (9)$$

公式(9)即为所求。

当河道两岸不可冲, 且比较窄深时, 上述河相关系即不存在, 此时可直接联解水流连续公式和水流阻力公式, 得到平衡水深公式

$$H_K = \left(\frac{nQ}{BJ_K^{0.5}}\right)^{\frac{3}{5}} \quad (10)$$

3.3 公式的特点

以上所求公式(5)至(10)是建立在大量实测资料的基础上, 其特点是:

(1) 公式利用大量实际资料所求, 通用性较强。

(2) 公式中水流挟沙力的指数和系数是在式(1)的基础上, 根据大量实际资料反求得出, 其实用性较强。

(3) 公式为全沙资料所求, 不需要再划分冲泻质与床沙质分界粒径, 避免了悬沙组成与床沙不相应时, 给分界粒径的划分带来的困难。

4 平衡坡降公式验证

对于所建立的平衡坡降公式是否与实际相符, 仍需对其公式的合理性进行验证。为检验公式的正确性, 对冲积性河道及一些水库进行了验证, 见表 2。

4.1 验证的基本资料

根据平衡坡降公式的性质, 选择了冲积河道及已冲淤平衡的水库进行验证。其验证河段及水库为长江及汉江中下游河段, 黄河的下游河段, 以及丹江口、青铜峡、三门峡及官厅水库。为了使实际资料更有代表性, 流量及坡降资料选用两种情况, 多年平均值和多年汛期平均值。对于较小的山区性河流, 汛期流量将起主要造床作用。实际坡降, 黄河及长江采用多年水面平均坡降。水库是由实测纵剖面资料确定的。

4.2 验证结果

从表 2 中可以看出验证的结果, 由平衡坡降公式计算值 $J_{计}$ 与实际坡降值 $J_{实}$, 除九江~汉口河段外, 其余均较接近。其误差最大为 30%, 最小误差仅为 1%, 平均正负误差仅为 10%左右, 累计误差也仅 15%左右。从图 2 中也可以看出计算值与实际值平均情况更为接近, 大部分点子分布在 45°线附近。汉江~九江河段验证结果不够理想的原因是, 该河段为典型分汊河道, 资料代表性较差。对于这类河段, 在计算中, 应考虑其分汊影响。在河道冲淤变

表 2 平衡坡降计算值与实测值比较表

河 名	河 段	流 量 (m ³ /s)		$J_{计}$ (‰)	$J_{实}$ (‰)
		Q_{cp}			
长 江	杨家脑~陈家湾	Q_{cp}	12 780	0. 53	0. 47
	杨家脑~陈家湾	$Q_{汛}$	19 490	0. 55	0. 54
	沙市~新厂	Q_{cp}	12 960	0. 50	0. 43
	沙市~新厂	$Q_{汛}$	19 930	0. 40	0. 43
	螺山~汉口	Q_{cp}	20 700	0. 184	0. 204
	螺山~汉口	$Q_{汛}$	30 900	0. 153	0. 22
	汉口~九江	Q_{cp}	22 900	0. 116	0. 212
	汉口~九江	$Q_{汛}$	33 500	0. 111	0. 22
汉 江	丹江口水库	Q_{cp}	1 145	1. 34	1. 26
	丹江口水库	$Q_{汛}$	2 015	1. 24	
	碾盘山~新城	Q_{cp}	1 489	1. 10	0. 86
	碾盘山~新城	$Q_{汛}$	2 277	0. 95	0. 83
黄 河	青铜峡水库	Q_{cp}	1 020	2. 32	2. 20
	三门峡水库	Q_{cp}	1 460	2. 18	2. 20
	三门峡水库	$Q_{汛}$	2 480	2. 22	
	高村~艾山	Q_{cp}	1 545	1. 09	1. 24
	高村~艾山	$Q_{汛}$	2 759	1. 04	
	艾山~利津	Q_{cp}	1 553	0. 96	1. 01
	艾山~利津	$Q_{汛}$	2 795	0. 97	
永定河	官厅水库	Q_{cp}	45	7. 30	8. 00
	官厅水库	$Q_{汛}$	59	9. 20	

化剧烈，影响河道演变因素十分复杂的情况下，其验证结果能达到这样的程度，足以说明所建立的平衡坡降公式(5)具有较强的通用性和实用性。目前该公式已应用于水库泥沙淤积计算，包括三峡、葛洲坝及丹江口等大型水库的淤积计算。

5 结 语

水库淤积后平衡坡降的计算，在水库淤积计算中比较重要，它的正确与否，将会对水库淤积产生一定影响。同时又会影响设计部门对水库的规划设计。因此针对已有平衡坡降计算公式所存在的问题，利用大量冲积河道及水库的实测资
(下转第 74 页)

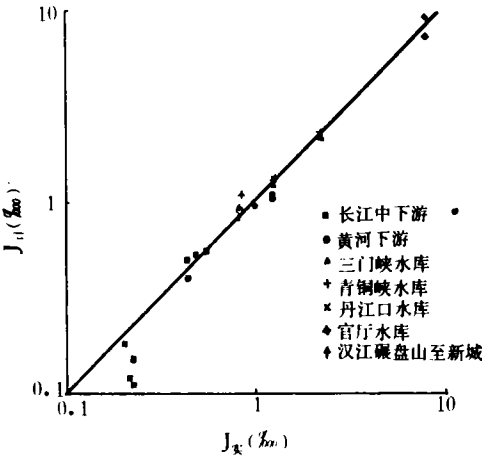


图 2 平衡坡降计算值与实测值

Influence of Border Property on Concrete Abrasion Resistance

Wang Shuyin

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract In this paper, using composite material theory, concrete is described as a two-phase composite material which consists of uniform phase and nonuniform phase. Based on the abrasion resistance of mortar, content and size of aggregate and interfacial properties of mortar-aggregate, a new constitutive model of abraded concrete is proposed under a circumstance of suspended sediment. Some conclusions are presented by numerical analysis that shows a good agreement with the experiment results of the abrasion test.

Keywords concrete; abrasion resistance; border property; constitutive model

(上接第 61 页)

料, 对平衡坡降公式进行了分析, 建立了使用简便通用性较强的计算公式, 并对河道及水库的实际情况进行了验证, 其验证结果与实际情况比较接近。该公式已应用于水库淤积计算中。

参 考 文 献

- 1 中国水利学会泥沙专业委员会主编. 泥沙手册, 1992. 4
- 2 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学, 1980. 12
- 3 长江流域规划办公室外国实习生培训队. 水库淤积与观测, 1971. 8

Study on Equilibrium Slope of Reservoir Sedimentation

Liang Xirong, Huang Yuling

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, 430010)

Abstract Based on a law that is similar basically to that of an alluvial channel and reservoir sedimentation in forming a steady and ultimate bed form, this paper studies the equilibrium slope by means of a large amount of field data of alluvial channels and reservoirs, and proposes a simple and applicable calculation formula of the equilibrium slope.

Keywords equilibrium slope; alluvial channel; bed form; bed profile