

描述黄河中下游河道横断面形态的新指标

孙赞盈, 曲少军, 苏运启, 杨 明

(黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要:描述河流横断面的窄深程度,无非是用来衡量它对过流能力和输沙能力的影响大小,及其在河流地貌方面的时空上的调整变化。回顾总结了以往描述横断面形态的常用指标,包括河相系数、宽深比,或湿周与平均水深的比值,指出这几种指标在描述黄河中下游河道时所存在的共同缺点:(1)缺乏物理意义;(2)不能真正代表断面的窄深程度;(3)明显的夸大了宽浅和窄深断面的差别。从表称流量的概念出发,作者认为,应该使用具有明确物理意义的等面积的表称流速来描述断面形态。如果用表称流速来衡量黄河下游河南和山东河道的断面形态的差别,就会发现,断面形态的不同,其对过流能力的影响不过 1:2,远不象河相系数和宽深比所描述的达到 1:6 甚至 1:11 那样的悬殊程度;黄河下游河道主槽“多来多排”的主要影响因素是表称流速。

关键词:表称流速;表称流量;横断面形态;糙率;多来多排;黄河下游

中图分类号:P33

文献标识码:A

黄河下游河南段河道断面宽浅、山东段河道断面窄深,断面形态明显不同;洪水期断面形态也随来水来沙条件的变化作出调整,清水冲刷使河槽进一步展宽、高含沙水流使河槽变得相对窄深,可见,河槽形态在时空上都是发生变化的。在描述河槽形态的窄深和宽浅程度时,常用河相系数、宽深比,或者湿周与平均水深的比值等指标,但这几种指标一般只适合某一类河流,难以反映黄河这样的河流的横断面形态;另外在实际计算时,有很大的任意性。针对上述问题,尹学良曾提出表称输沙率的概念,但我们认为,用表称流速的概念更明确、更简单,也更符合黄河这样的多泥沙冲积河流的特点。

1 以往采用的指标及其所存在的问题

描述横断面形态,最早采用的是宽深比,即水面宽 B 与平均水深 h 的比值,显然,用宽深比作为河槽形态的指标没有物理意义。后来,里奥普在研究水力几何形态时,根据很多实测资料,从水流连续的

原理出发,把水面宽 B 、平均水深 H 和断面平均流速 V 分别与流量建立关系。为了消除流量这个变量,用 $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 来代替宽深比。但用 $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 描述断面的窄深程度至少有两个缺陷:(1)因为水面宽和过流量之间没有必然的因果关系,将水面宽和过流量建立关系本身缺乏物理意义;(2) $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 是根据苏联的平原河流的资料分析得到的,即使从物理意义方面考虑,它也无法适用于其他河流,大多数天然河流的横断面形态是相对窄深的,河相系数存在的问题表现得不明显,但对于黄河这样的横断面十分宽浅的河流,问题就变得非常突出。图 1 是黄河花园口站水面宽和流量的关系图,可以看到当流量 $>1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 后,同一流量的水面宽变幅很大。无论流量大小,水面宽的下限约为 600 m,上限大到 3 000 m 以上,不仅花园口站是这样,夹河滩站也是这样。因为水面宽和流量间没有明显的物理意义,即使在它们之间建立回归关系,由于关系十分散乱,建立的关系也失去实用价值,据此进一步分析推导的结果,也没有实用意义。

收稿日期(Received date):2003-12-11;改回日期(Accepted):2004-03-05。

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(编号:50239040)资助。[Sustained by National Natural Science Foundation Fund and YRCC (Project No. 50239040)]

作者简介(Biography):孙赞盈,男,(1964-),黄河水利科学研究院高工,主要从事泥沙、河床演变、数学模型和水文泥沙数据库等方面的研究。[SUN Zanying(1964-), senior engineer in Yellow River Hydraulic Institute, working at sediment, evolution of river bed, mathematic model, hydraulic and sediment database developing, and so on.]

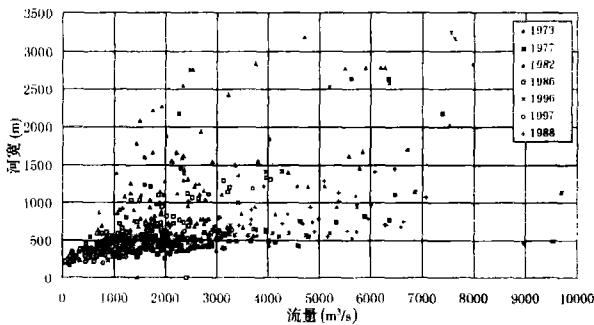
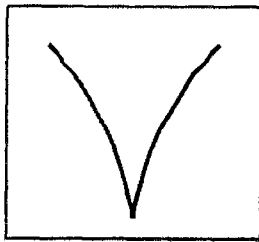
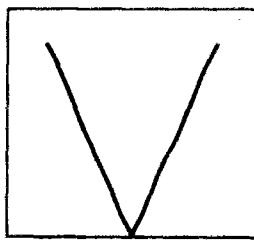
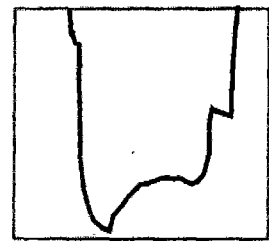


图1 黄河花园口站水面宽和流量的关系

Fig.1 Relationship between water surface width and discharge at Huayankou station

不仅 $\frac{B}{H}$ 和 $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 缺乏物理意义,在数学上也不合理。假设横断面用 $y = ax^{1/b}$ 来表达(y 代表水深, x 代表起点距),则河宽 B 时的面积 A 为 $A = \int_0^{ab^{1/b}} \left(\frac{y}{b}\right)^b dy$, 即 $A = \frac{a}{b+1} B^{1+1/b}$, 相应的平均水深为 $H = \frac{a}{b+1} B^{1/b}$, 河相系数可按式计算

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = \frac{b+1}{a} B^{1/2-1/b} \quad (1)$$

(1) $y = ax^{1/2}$ (2) $y = ax$ 

(3) 黄河天然河流横断面

图2 横断面形态比较

Fig.2 Comparison of cross-section morphology

2 表称流速

在说到如何描述河流的断面形态时,我们要提这样一个问题:为什么要描述横断面形态?描述横断面形态无非是为了衡量断面的调整对输水输沙能力的影响。

满宁公式是明渠紊流过流能力的半经验半理论公式,当水深和水面宽在数值上是一个数量级,或者如果水面宽比水深大得多但水深在横断面上分布大体上是均匀的,这时候可以将整个过流断面作为一个整体考虑,用下式计算断面的过流能力

$$Q = \sqrt{J} / n H^{5/3} B \quad (3)$$

因为只有在 $b=2$ 时才能保证 $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 为常数,因此河相系数 $\frac{\sqrt{B}}{H}$ 仅适合描述 $y = ax^{1/2}$ 的横断面,而 $y = ax^{1/2}$ 代表的是具有一个十分尖瘦的深槽的横断面(图2(1)),天然河流的绝大多数断面不是这样的^[2]。

如果用宽深比来反映横断面的窄深程度,有

$$\frac{B}{H} = \frac{b+1}{a} B^{1-1/b} \quad (2)$$

当 $b=1$ 时 $(1-1/b)=0$,这是一个用 $y = ax$ 所反映的横断面,它是一个V字形断面(图2(2)),这是山区河流横断面的特征,但黄河中下游河道的横断面(图2(3))很少具有这种特点。

如果用湿周和平均水深的比值来反映断面的窄深程度似乎会好些,其实不然。由于天然河流和渠道、管道不同,本质上都是宽浅的,这样,计算的湿周和河宽在数值上十分接近,因此用湿周和平均水深的比值来反映断面形态也不可取,如果用湿周和水力半径的比值,和用湿周和平均水深的比值在数值上也十分接近,上述问题同样存在。

然而,天然河流都是大尺度的、十分宽浅的,水深在横断面上的分布是很不均匀的(对于黄河下游游荡性河段尤其如此),和上述两种情形不同,断面的流量应该考虑水深分布不均匀的影响,尹学良早在1995年以前就注意到这个问题,提出了表称流量^[2](用 Q_H 表示)的概念,认为应该用表称流量反映水深对过流能力的影响,按下式计算

$$Q_H = \sum_{i=1}^{m-1} H_i^{5/3} B \quad (4)$$

式中 m 为横断面节点的个数, H_i 为相邻节点的平均水深,表称流量 Q_H 的单位是 $m^{8/3}$ 。实测的横断面数据由许多节点组成,节点之间的距离与水深不是一个数量级的情形并不少见。严格地讲,为充

分反映水深的影响,表称流量应按下式计算

$$Q_H = \int_0^B H^{5/3} dB$$

即

$$Q_H = \sum_{i=1}^{m-1} \begin{cases} \frac{L_{i+1} - L_i}{h_{i+1} - h_i} (h_{i+1}^{8/3} - h_i^{8/3}) & (h_i \neq h_{i+1} \text{ 时}) \\ h_i^{5/3} (L_{i+1} - L_i) & (h_i = h_{i+1} \text{ 时}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 L 为起点距, h 为水深, m 为节点的数目, i 为节点的序号。实际计算显示,用(4)式计算的结果总是比用(5)式计算偏小,说明按(5)式计算是必要的。

黄河下游游荡性河道的水文站的资料,有不少糙率比玻璃水槽的还小,就是由于资料整编方法不当所致,应该按 $Q = \frac{\sqrt{J}}{n} Q_H$ 而不是 $Q = \frac{\sqrt{J}}{n} B H_{cp}^{5/3}$ 来反算糙率(H_{cp} 为平均水深)。例如,花园口站 1977-08-05 T4:50-7:00 流量 6 470 m³/s 的测次,水文年鉴提供的糙率为 0.007,这在物理上是很难理解的。该测次的水面宽为 1 110 m,过水面积为 2 290 m²,平均水深 2.06 m,则 $BH_{cp}^{5/3}$ 为 3 711.2 m^{8/3},但按(5)式计算的表称流量为 4 975.4 m^{8/3},即 Q_H 比 $BH_{cp}^{5/3}$ 大 34%,则用 $Q = \frac{\sqrt{J}}{n} Q_H$ 反算的糙率是 0.007 的 1.34 倍,为 0.009 4,接近正常情况的糙率。可见,在资料整编时,考虑水深在横断面上的不均匀性是十分必要的。

断面的平均流速可按下式计算

$$V = \frac{\sqrt{J} Q_H}{n A} \quad (6)$$

表 1 不同方法等面积(2 000 m²)的主槽的河槽横断面形态指标比较

Table 1 Comparison of indicators of main channel cross-section morphology under equal cross-section area (2 000 m²) with different methods

项目	宽度 (m)	湿周 (m)	平均水深 (m)	河相系数	宽深比	湿周/ 平均水深	表称流量 (m ^{8/3})	表称流速 (m ^{2/3})
花园口	1 551	1 551	1.29	31	1 203	1 203	3 149	1.57
艾山	475	477	4.21	5	113	113	5 842	2.92
比值	3	3	0.31	6	11	11		1.86*

* 表称流速比值为艾山站比花园口站,因为河槽越宽浅,表称流速越小,与河相系数等相反。

从实用角度看,编写计算表称流速的计算机程序和计算横断面面积的程序差别很小,计算并不繁琐,但表称流速很实用。三门峡水库下泄清水期间,黄河下游游荡性河道发生很大变化,用宽深比或河相系数反映断面形态的变化,很容易得出“主槽展宽很大”的结论,若用等面积表称流速来反映,就会发

式中 A 为过水面积,其中的 $\frac{Q_H}{A}$ 是断面形态对断面流速作用的大小,我们称其为表称流速^[3],记为(单位:m^{2/3})

$$V_H = \frac{Q_H}{A} \quad (7)$$

计算表称流速和计算河相系数以及宽深比所用的资料一样,但表称流速具有明确的物理意义——它基于满宁公式,反映的是除比降和糙率之外的断面形态对流速贡献的大小。显然,等面积的表称流速越大,说明断面形态相对越窄深。

表 1 列出的是根据 1973 年汛后黄河花园口和艾山断面的主槽计算的各种横断面形态指标,包括河相系数、宽深比、湿周与平均水深的比,以及表称流速。计算用的都是根据主槽的等面积 2 000 m² 计算的(等面积的河相系数、宽深比、表称流量等这样计算:先计算断面的高程面积曲线,在曲线上查得某一面积的水位,再计算该水位的河相系数、宽深比和表称流量)。

比较表称流速的差别,可以看到,二者的比不过 2:1 上下,然而河相系数反映的比却是 6:1,宽深比、湿周与平均水深的比大于 10:1。可见,虽然花园口断面比艾山断面的主槽宽浅,但因断面形态不同引起的过流能力的差别并没有达到像河相系数和宽深比等指标所描述的那么大,也就是说,河相系数和宽深比等指标明显地夸大了断面形态的差别。在实际工作中,很少有人计算同面积的河相系数、宽深比,由于游荡性河道的断面十分宽浅,不同高程的水深差别不大,但断面宽度差别很大,如果不考虑用等面积,计算的不同断面的河相系数和宽深比的差别更大。

现,河槽虽然是展宽的,但幅度有限。三门峡水库清水对黄河下游河道的影响,应该概括为“在摆动中下切”才符合实际;黄河下游河道存在着“多来多排”(山东河道)和“多来多排多淤”(河南河道)的输沙特点,洪水期河南河道的主槽也是“多来多排”的,而小水期河槽总是淤积的,说明主槽的流速存在着某一

临界值。大于这个流速后,河槽就会成为一个“输沙通道”,呈现出“多来多排”的特点^[4],而与流速和来沙大小和组成关系不密切。例如,根据黄河下游河道的实测资料,如果流速大于 1.8 m/s 那么,细于 0.006 mm 的泥沙可“多来多排”,如果流速达到 2.4 m/s 左右,则全沙都会“多来多排”,这说明用表称流速而不用表称输沙率($\Sigma bh^{8/3}$)来描述横断面形态,更符合对输沙规律的认识,更有实用性。

3 结语

1. 河相系数、宽深比,以及湿周和平均水深的比值,缺乏物理意义,一般只适合描述特定河流的横断面,对于黄河中下游河道,上述指标就夸大了窄深和宽浅断面的差别,使用过程中有很大的任意性,因此,不应该用河相系数建立某些关系。

2. 计算表称流速和计算河相系数使用的实测资料是一样的(都是起点距和高程数据),但计算方法完全不同,表称流速具有明确的物理意义,适合描述天然河流的断面形态,可以据此进行进一步的理论分析,和建立定量关系。

3. 由于缺乏其他江河的资料,本文提出的指标还在不同气候带、不同地貌区的河道断面中进行应用时应作具体分析。

本文的英文由黄委会国科局薛云鹏和华北水利水电学院王晓宁翻译,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] L. B. Leopold, T. Maddock. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic (Geologic Survey Professional Paper 252), UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, WASHINGTON [L. B. 里奥普, T. 麦杜克. 钱宁译. 河槽的水力几何形态及其在地文学上的意义. 水利出版社, 1957.]
- [2] Yin Xueliang, The Lower Yellow River Property [M]. Beijing: China Water Conservancy Press. 1995. [尹学良. 黄河下游的河型 [M]. 北京: 中国水利出版社, 1995.]
- [3] Sun Zanying. The Study of the Influence of Narrowing the River on Flood Water Level in the Lower Yellow River [D]. Master's Degree Thesis, Xi'an University of Technology, 2003. [孙赞盈. 黄河下游河宽缩窄对洪水水位影响的研究 [D]. 学位论文. 2003.]
- [4] Qi Pu and Sun Zanying, Study on Sediment Long-period Regulating of Xiaolangdi Reservoir and the Harnessing in lower Yellow River [R]. Yellow River Hydraulic Institute. 2001. [齐璞, 孙赞盈. 小浪底水库泥沙多年调节与下游河道进一步治理研究 [R]. 黄河水利科学研究院. 2001.]

New Indicators to Characterize the Natural River Channel Cross-Section Shape

SUN Zanying, QU Shaojun, SU Yunqi, YANG Ming

(Yellow River Hydraulic Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The aim of characterizing the narrow to width degree of river cross-section is to judge its flow and sediment conveyance capacity as well as its temporal and special geo-morphological adjustment and changes. After analysis of the classical indicators used to describe river cross-section Shape, such as are fluvial facies coefficient, width to depth ratio, the ratio of wetted perimeter over average depth, the common drawbacks of the classical indicators were concluded as following: (1) lack of clear physical meaning; (2) difficult to represent the actual narrow to width degree of cross-section; (3) apparently overestimate the difference between broad and shallow cross-section with narrow and deep one. Derived from the concept of nominal discharge, it was pointed that it should use the nominal velocity of equivalent cross-section area, an indicator with clear physical meaning, to characterize the cross-section shape and morphology. It is found that the effect of river cross-section difference in Henan and Shandong on channel conveyance is less than 1:2, whose conveyance difference is not as sharp as 1:6 or 1:11 calculated by using fluvial facies coefficient or width to depth ratio correspondingly. And it is also found that the primary factor influence on the characteristics of Yellow River sediment conveying known as “the more sediment input and the more sediment output” in main channel is nominal velocity.

Key words: nominal velocity; nominal discharge; cross-section morphology; roughness coefficient; Low Yellow River