

基于弯道超高计算泥石流流速的探讨

蒋忠信

(铁道第二勘察设计院岩土工程公司,四川成都 610031)

【摘要】 泥石流流速是难以实测和准确推算的重要参数。在分析既有各类弯道超高计算公式的基础上,探讨适用于各类泥石流的弯道超高计算模式,进而改进基于弯道超高的粘性泥石流、稀性泥石流和泥流的流速计算公式,用实例加以验证。

【关键词】 泥石流;流速;弯道超高

【中图分类号】 P 642.23

Current Velocity Calculation of Debris Flow Based on Excess-Height in Bend

Jiang Zhongxin

(Geotechnic Engineering Co., The 2nd Railways survey and Design Institute, Chengdu Sichuan 610031 China)

【Abstract】 The current velocity is an important parameter of debris flow, and it is more difficulty to be measured and calculated. Based on analysis to every known calculating formulas of excess-height in bend, the calculating models of excess-height in bend to every debris flows are explored. Further, the formulas calculating current velocity of mudflow, dilute and viscous debris flows based on excess height in bend are improved, and are tested with real examples.

【Key Words】 debris flow; current velocity; excess-height in bend

1 泥石流流速确定问题

泥石流流速是泥石流的主要运动学参数和确定流量、冲击力、爬高及冲淤特征的基础,是泥石流治理工程设计的重要依据。然而,由于泥石流暴发的突然性和缺乏监测设备,能现场测定流速的机会极少,在泥石流勘察设计中,一般只能根据泥石流沟谷特征参数间接地推算泥石流流速。

由于泥石流是二相流或伪一相流,阻力特性复杂,建立泥石流流速的理论计算模式比较困难^{[1],①},至今尚主要采用经验公式推算泥石流流速^[2]。这些经验公式较多,主要以 M·Φ·斯里勃内依(苏)公式为基础,一般形式为 $v = (M/a)R^{2/3}I^\beta$, 其中水力坡度 I 的幂 β 和沟道糙率系数 M 因地域和泥石流类型而异,形成适用于不同地域和不同类型泥石流的众多经验公式。由于公式中沟道糙率系数 M 的取值带有强烈的人为经验性,计算的流速难免有较大误差。

因此,有条件时,通过形态勘测,依据泥石流沟道两岸的泥痕得出泥面的弯道超高值,进而根据弯道超高与流速的关系式来推算泥石流流速,是一条

新的途径^[3]。本文在归纳和探讨泥石流弯道超高计算模式的基础上,改进和总结基于弯道超高计算泥石流流速的方法。

2 泥石流弯道超高计算模式

2.1 既有弯道超高计算公式

流体的特性不同,其弯道超高的计算模式亦不同。以清水流计算模式为基础,对不同类型的泥石流,已推导出相应的弯道超高计算公式。

2.1.1 清水流弯道超高公式

根据离心力与横向力平衡,可推导清水流弯道超高计算公式

$$\Delta h = Bv^2 / (Rg) \quad (1)$$

式中: Δh ——弯道超高值;

B ——水流断面宽度;

v ——断面平均流速;

R ——沟道中心曲率半径;

g ——重力加速度。

2.1.2 稀性泥石流弯道超高公式

1) 日本水山高久等^②为解释烧岳上上冲沟泥石

基金项目: 铁道第二勘察设计院 2007 年业务建设项目(编号:2007-11)

作者简介: 蒋忠信, 1941 年生, 男, 汉族, 四川广安人, 教授级高级工程师, 从事灾害地质与岩土工程工作。E-mail: jiangzhongxin@vip.163.com

①沈寿长. 泥石流运动速度研究现状与展望[G]. 泥石流及洪水灾害防御国际学术讨论会论文集. 1991:87-91.

②水山高久. 上原信司(日). 河弯上泥石流的流态[G]. 泥石流译文集(三). 铁道部科学研究院西南研究所, 1985:72-79.

流和妙高原泥石流的弯道超高值远比清水流高的现象,进行了水槽实验。实验显示弯道超高值远比清水流高,故将清水流弯道超高值乘以大于1的系数 a 作为稀性泥石流弯道超高值:

$$\Delta h = aBv^2/(Rg) \quad (2)$$

a 与 R/B 有关,最高可达10。当 $R=100\text{cm}$ 、 $B=20\text{cm}$ 、 $R/B=5$ 时,有:

$$\Delta h = 1.65BJ^2/(Rg) \quad (3)$$

上述水山高久公式在国内相关文献中多表述为 $\Delta h = 2Bv^2/(Rg)$,即取 $a=2$,尚不够严谨。

2)王 韦^[4]根据颗粒流的运动方程^[5]和弯道泥面横比降动力平衡条件,推导出满足颗粒运动的水面超高理论公式:

$$h_{20}^{-2} - h_{10}^{-2} = a_2 \ln(R_2/R_1) \quad (4)$$

式中: h_{20} 、 h_{10} 分别为凹岸、凸岸的水深;

R_2 、 R_1 分别为凹岸、凸岸的曲率半径;

a_2 为积分常数, $a_2 = 2I_s^2/(gd^2)$; I_s 为床面纵坡 J 与固液相对密度的函数; d 为固相颗粒粒径。

在水面宽度较小,超高值相对于水深为小量时,式(4)可简化为:

$$\Delta h' = (v_s^2/g) \ln(R_2/R_1) \quad (5)$$

式中: v_s ——表面颗粒沿径向的平均流速。

在稀性泥石流(水石流)中,液相介质的速度比颗粒速度要大,其速度差以 U 表示,则稀性泥石流弯道超高公式为:

$$\Delta h = [(v_s + U)^2/g] \ln(R_2/R_1) \quad (6)$$

2.1.3 泥流弯道超高公式^[4]

泥流为伪一相流,王 韦根据伪一相泥流的运动方程^[5]和弯道泥面横比降动力平衡条件,推导出泥流弯道超高理论公式:

$$h_2^{-3} - h_1^{-3} = a_1 \ln(R_2/R_1) \quad (7)$$

式中: h_2 ——凹岸的泥深;

h_1 ——凸岸的泥深;

a_1 ——积分常数。

$a_1 = 3\gamma^2 J^2/(4g\eta^2)$,与泥石流的特性(流体重度 γ 、床面纵坡 J 、刚度系数 η)有关。

在泥面宽度较小,超高值相对于泥深为小量时,式(7)可简化为:

$$\Delta h = (v_B^2/g) \ln(R_2/R_1) \quad (8)$$

式中: v_B ——流核的平均流速。

2.1.4 粘性泥石流弯道超高公式

周必凡等^[6]引入流体内摩擦系数,根据离心力与横向力平衡,推导粘性泥石流弯道超高公式

$$\Delta h = B[v^2/(gR\cos\theta) + \tan\varphi] \quad (9)$$

王 韦^[4]推导出的粘性泥石流弯道超高公式则与清水流公式相同,仅流速采用流核的平均流速。

2.2 泥石流弯道超高计算模式探讨

泥石流是二相流或伪一相流,与清水流不同,其流体内的粘性和固相颗粒间摩擦碰撞离散切力^[5],使其运动阻力甚大,其弯道超高计算模式理应考虑粘性和粒间切力的影响。

研究表明,泥石流体的剪切强度仍符合库仑定律^[2],因此可借用粘聚力和内摩擦角来分别表征流体粘性和粒间切力的影响。据此,按照离心力与横向力平衡的思路,可推导出泥石流弯道超高公式。

单位长度泥石流体的离心力:

$$F_d = HB\gamma v^2/(Rg)$$

泥石流体离心力沿泥面的分力:

$$F_d' = F_d \cos\theta = HB\gamma v^2 \cos\theta/(Rg) \quad (10)$$

式中: H ——平均泥深;

γ ——泥石流体重度。

单位长度泥石流体的横向力 F_m 为横向剪切力 F_1 与内摩擦力 F_ϕ 、粘聚力 F_c 之差。

横向剪切力 $F_1 = HB\gamma \sin\theta$

内摩擦力 $F_\phi = HB\gamma \cos\theta \tan\varphi$

粘聚力 $F_c = cL = cB/\cos\theta$ (L 为泥面斜宽)

因此单位长度泥石流体横向力 F_m 为:

$$\begin{aligned} F_m &= F_1 - (F_\phi + F_c) \\ &= HB\gamma(\sin\theta - \cos\theta \tan\varphi) - Bc/\cos\theta \end{aligned} \quad (11)$$

式中: c ——泥石流体粘聚力。

当 $F_d' = F_m$ 时,泥面超高为最大值,由式(10)和式(11)得:

$$\tan\theta = v^2/(Rg) + \tan\varphi + c/(H\gamma \cos^2\theta)$$

由 $\Delta h = B \tan\theta$ 及上式,得:

$$\Delta h = B[v^2/(Rg) + \tan\varphi + c/(H\gamma \cos^2\theta)] \quad (12)$$

式(12)可为泥石流弯道超高计算的一般模式。

2.3 公式分析

1)粘性泥石流

上述各弯道超高公式都是基于清水流公式,按不同的技术路径在若干假定的基础上导出的。弯道超高值与泥石流体的剪切阻力有关,泥石流弯道超高公式应不同于清水流。

粘性泥石流体的粘度和颗粒间离散切力都较大,同时考虑这两方面阻力的式(12)首先适用于粘性泥石流。

式(9)在推导中未考虑流体的粘聚力,验证中显

示流速对超高的影响过大, 不尽符合实际。

2) 稀性泥石流

稀性泥石流流体的粘度小, 粘聚力可忽略, 即式(12)中 $c/(HY\cos^2\theta)$ 项为 0, 故其弯道超高式为:

$$\Delta h = B[v^2/(Rg) + \tan\varphi] \quad (13)$$

水山高久公式主要依据实验, 所得弯道超高值一般偏大。

3) 泥流

泥流流体的粒间离散切力可忽略, 即式(12)中 $\tan\varphi$ 项为 0, 故其弯道超高式可为

$$\Delta h = B[v^2/(Rg) + c/(HY\cos^2\theta)] \quad (14)$$

文献[4]中的泥流、粘性泥石流的超高式都采用的流核平均流速。流核的平均流速远大于断面平均流速, 不便于以计算流量、冲击力等参数。其稀性泥石流的超高式采用的表面流速, 也同样不便。

4) 清水流

清水流的粘性和粒间离散切力都可忽略, 即式(12)中 $\tan\varphi$ 、 $c/(HY\cos^2\theta)$ 两项均为 0, 故其弯道超高式为式(1):

$$\Delta h = Bv^2/(Rg)$$

3 基于弯道超高的泥石流流速计算

3.1 基于弯道超高的泥石流流速计算公式

据上述分析, 采用弯道超高公式(12)及其简化的式(13)、式(14)反推各类泥石流的断面平均流速较合适。

1) 粘性泥石流流速公式

由式(12)得

$$v^2 = (Rg)[\Delta h/B - \tan\varphi - c/(HY\cos^2\theta)]$$

因此, 粘性泥石流流速

$$v = \{Rg[\Delta h/B - \tan\varphi - c/(HY\cos^2\theta)]\}^{1/2} \quad (15)$$

2) 稀性泥石流流速公式

由式(15)中 $c=0$, 得稀性泥石流流速

$$v = [Rg(\Delta h/B - \tan\varphi)]^{1/2} \quad (16)$$

3) 泥流流速公式

由式(15)中 $\varphi=0$, 得泥流流速

$$v = \{Rg[\Delta h/B - c/(HY\cos^2\theta)]\}^{1/2} \quad (17)$$

3.2 公式讨论

1) 据式(1), 清水流流速式应为

$$v = (\Delta h \cdot g \cdot R/B)^{1/2} \quad (18)$$

与清水流不同, 泥石流流体存在粘性或和粒间离散切力, 式(15)为一般式, 式(16)、式(17)是其在特定条件下的简化。

2) 在相同超高条件下, 反算出的泥石流断面平均流速较清水流要小。分析式(15)一式(18)可见,

反算出的断面平均流速一般按清水流、泥流、稀性泥石流、粘性泥石流的顺序递减。

3) 文献[7]基于弯道两岸角速度相等的假设, 从动、势能量平衡原理出发, 推导出泥石流流速计算公式:

$$v = [(\Delta h \cdot g/2)(R_2 + R_1)/(R_2 - R_1)]^{1/2} \quad (19)$$

但注意到 $(R_2 + R_1) = 2R$, $(R_2 - R_1) = B$, 则式(19)可化为

$$v = [(\Delta h \cdot g/2)(2R/B)]^{1/2} = (\Delta h \cdot g \cdot R/B)^{1/2}$$

结果为式(18), 即与清水流公式相同。因此, 式(19)是否适用于泥石流, 尚存疑虑。

4) 上述泥石流流速式要利用流体的抗剪强度参数粘聚力、内摩擦角。由于这些参数尚难精确测定, 带来公式实用上的麻烦和偏差。目前, 可从以下途径估计泥石流体的抗剪强度参数: 一是采用经验值; 二是配制符合实际配比的流体进行力学试验, 用流体的剪切试验确定内摩擦角, 用静切力测定的浆体剪切强度近似地代表粘聚力; 三是采用基于流体配比的经验公式进行推算, 参见文献[8]。

3.3 实例验证

3.3.1 粘性泥石流水槽实验

游勇^[9]进行的粘性泥石流水槽实验, 模型沟道长 20 m, 矩形断面, 宽 50 cm, 定床, 纵坡 11%; 4 个弯道的半径分别为: 120 cm、140 cm、120 cm、130 cm; 流速为 275 cm/s、301 cm/s, 相应初始泥深为 5.0 cm、5.5 cm。以曲率半径 120 cm 的两处弯道为代表, 两种流速时测得超高值均分别为 50 cm (第 1 弯道)、45 cm (第 2 弯道); 凸岸泥深都几乎为 0。

据上, 实验所得计算参数如下:

1) 弯道超高取两处弯道的平均值

$$\Delta h = (0.5 + 0.45)/2 = 0.475, \text{ m}$$

2) 平均泥深 $H = (0.475 + 0)/2 + (0.05 + 0.055)/2 = 0.29, \text{ m}$

3) 水槽中心曲率半径 $R = 1.2 \text{ m}$

4) 水槽泥面宽度 $B = 0.5 \text{ m}$

5) 泥面斜度 $\theta = \tan^{-1}(0.475/0.5) = 43.5^\circ$

6) 流体的重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

7) 据相同重度流体的剪切试验, 内摩擦角 $\varphi = 4.5^\circ$, 粘聚力 $c = 0.088 \text{ kN/m}^2$ 。^[2]

据式(15), 得断面平均流速

$$v = \{1.2 \times 9.81 \times [0.475/0.5 - \tan 4.5^\circ - 0.088/(0.29 \times 20 \times \cos^2 43.5^\circ)]\}^{1/2} = 3.149, \text{ m/s.}$$

实测流速取平均值: $v = (2.75 + 3.01) = 2.88, \text{ m/s.}$ 计算值比实验值大 9.3%。

3.3.2 汶川磨子沟 2005-08-17 稀性泥石流

四川省汶川县磨子沟 2005 年 8 月 17 日暴发泥石流,流体重度约为 15 kN/m^3 ,属稀性泥石流^[7]。

勘测所得参数如下^[7]:

1) 弯道超高 $\Delta h = 0.5 \text{ m}$;

2) 凸岸曲率半径 10.3 m ,凹岸曲率半径 13.3 m ,故沟道中心曲率半径 $R = (10.3 + 13.3) / 2 = 11.8 \text{ m}$,

3) 泥面宽度 $B = 13.3 - 10.3 = 3 \text{ m}$

据经验,内摩擦系数 $\tan \varphi = 0.07$,则据式(16),算得断面平均流速

$$v = [11.8 \times 9.81 \times (0.5/3.0 - 0.07)]^{1/2} = 3.345 \text{ m/s}$$

据稀性泥石流经验公式 $v = (M/a) R_C^{2/3} I^{1/2}$ 计算流速。沟床纵比降 $I = 0.44$,水力半径 $R_C = 1.46$,并取糙率系数 $M = 6^{[7]}$, $a = 1.458$ 。则按经验公式所得流速 $v = 3.513 \text{ m/s}$ 。按式(16)计算的流速比按经验公式所得值小 4.8% 。

4 结论

1) 泥石流流体的粘性和粒间切力影响泥石流弯道超高,对其可分别采用粘聚力和内摩擦角来表征。因此泥石流弯道超高计算模式可用粘性泥石流的式(12)为代表,稀性泥石流、泥流、清水流的弯道超高计算式(13)、式(14)、式(1)分别是流体粘聚力为 0、流体内摩擦角为 0、流体的粘聚力和内摩擦角同时为 0 条件下的简化式。

2) 与弯道超高模式相应,基于弯道超高反推泥石流断面平均流速的公式,推荐采用粘性泥石流的式(15)为代表,在不考虑流体的粘聚力和内摩擦力时,分别简化为稀性泥石流的式(16)、泥流的式(17)、清水流的式(18)。在相同条件下,流速值按粘性泥石流、稀性泥石流、泥流、清水流的顺序递增。

3) 在上述推荐的泥石流流速计算公式中,要利用流体的粘聚力、内摩擦角甚至重度、平均泥深等参数。由于这些参数尚难精确测定,给公式带来计算偏差。但上述两个实例的偏差尚不到 10% ,表明公式仍可试用。同时,众多参数的待定限制了公式的实用性。公式的应用既要求弯道两岸留有泥痕,通过勘察可确定弯道超高值,还要求上述参数能通过试验或经验加以确定。

参 考 文 献

- [1] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 中国科学院山地灾害与环境研究所. 中国的泥石流[M]. 北京:商务印务馆,2000.
- [3] 何杰,陈宁生. 粘性泥石流弯道超高在流速计算中的应用[J]. 成都理工学院学报,2001,10(4):425-428.
- [4] 王韦. 泥石流排导槽弯曲段水面超高的估算[G]. 第四届全国泥石流学术讨论会论文集. 兰州:甘肃文化出版社,1994:377-383.
- [5] 沈寿长. 泥石流运动的阻力和流速[G]. 泥石流防治理论与实践. 成都:西南交通大学出版社,1991:21-32.
- [6] 周必凡,李德基,罗德富,等. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社,1991.
- [7] 丁明涛,陈宁生,韦方强,等. 弯道超高法在泥石流流速计算中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):147-149.
- [8] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [9] 游勇. 粘性泥石流弯道运动的实验研究[M]. 泥石流(4). 北京:科学出版社,1995:98-100.

收稿日期:2007-08-03