

穿河管道冲刷公式分类及适用性分析

伯彦萍, 安美运, 张春雷, 黄澄, 赵松波

(贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 本文对河流演变规律和穿河管道冲刷机理进行了分析, 并指出了目前工程上常用冲刷公式的局限性。本文在研究冲刷机理的基础上, 通过对现有的一般冲刷和局部冲刷公式进行总结分析, 根据不同河形对国内外冲刷公式进行归纳整理, 得到了非粘性土河床不同河形一般冲刷深度公式的适用条件, 以及局部冲刷情况下非粘性土河床和粘性土河床的冲刷公式的适用条件。研究成果可为工程设计中算管道埋设深度选用计算公式提供一定的参考依据。

关键词: 穿河管道; 河形; 冲刷公式

中图分类号: TV135

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2021) 12—0130—03

1 引言

管道运输作为一种长距离运输工具, 越来越普遍地运用在输送气体、液体等领域, 给人们的生活带来了极大的便利。由于管道运输距离一般较长, 所以在运输过程中经常会遇到需要穿江过河的情况, 这就需要架设管线桥或者河底穿越, 目前工程上采用最多的仍然是河底穿越的形式。穿河管道需要埋设在河底的一定深度才能保障运输安全, 但由于国内外均没有专门适用于计算穿河管道冲刷深度的规范公式, 所以目前我国在计算其埋设深度时普遍采用桥渡冲刷公式。穿河管道的埋设深度至关重要, 如果埋设过浅管道易受冲刷而暴露, 甚至悬空, 管道在水压力等多方面因素影响下易泄露造成安全隐患; 如果埋设过深则施工成本增加, 甚至可能造成管道无法穿越。

2 穿河管道冲刷机理分析

2.1 河流分类与演变规律

河床在演变过程中平面摆动的情况对于管道埋设有着不可忽视的影响。根据国内外学者研究表明, 根据河床的平面形态及演变规律可以将天然河流划分成不同类型, 根据不同河形分类可以进一步对其共同特征进行研究, 研究成果可为穿河管道选取穿越位置和计算埋设深度提供一定的理论依据。目前, 对于河形的研究主要有以下几类: 钱宁等将河流分为游荡型、分汉型、弯曲型和顺直型; 武汉水利电力学院将河流分为游荡型、分汉型和顺直微曲型; 方宗岱将河流分为摆动型、江心洲型和弯曲型; Leopold 等将河流分为辫状型、弯曲型和顺直型; Kypaeb 等将河流分为自由弯曲型、分汉型和单股型; K,N,Pocnhckm 等将河流分为游荡型、弯曲型和

周期增宽型。

从稳定性出发, 天然河流也可以分为两类: 稳定型河流和不稳定型河流。游荡型和弯曲型就属于典型的不稳定型河流, 这类河流在进行埋管设计时应特殊考虑。游荡型河流的不稳定性有的不仅体现在河床不稳定, 还有一部分河流河岸也不稳定, 这就造成河流纵向坡陡、横向宽深比较大的问题, 在进行埋管设计要综合多年数据资料全面分析。弯曲型河流的河床和河岸相对游荡型河流一般来说河流的形态是不变的, 但在河形发育过程中具有迂回曲折和蜿蜒蠕动的特征。

2.2 穿河管道常见形式

穿河管道主要的施工方法有: 沟埋铺设法、盾构法、顶管法、定向钻穿越法等。国内外最常采用的方法是沟埋铺设法, 因为相较于其他方法具有稳定性好、安全系数高的优点。从管道穿越的水平投影上可以将其分为直线式和曲线式两大类, 具体见表 1。

表 1 管道穿越形式分类表

穿越形式分类		适用范围
直线式	单管	施工简便, 适用于河床形态稳定、水流流速不大的河流。
	双管	
	管束	
曲线式	悬链式	适用于河岸滩陡峭、水流湍急的河流。
	蛇曲式	适用于不稳定的淤泥或者砂质河床上的小口径管道。

2.3 穿河管道冲刷机理

当河床地层坚硬且稳定时, 穿河管道一般可以直接铺设; 当河床地层泥沙较多且冲淤剧烈时, 穿河管道一般埋设在河床下。穿河埋设的管道如果埋设深度不够, 在水流的持续冲刷下河床以下埋设部位会逐渐暴露出来, 或因河流的平面演变会使边滩的纵向部位管道受到冲刷。

河床的特性影响冲刷的形成和发展, 一般来说非粘

性土的抗冲刷能力要低于粘性土，故非粘性土河床冲刷更剧烈。我国在计算穿河管道冲刷深度时参考的主要是桥梁墩台、河床、河岸等公式。桥梁墩台冲刷公式根据冲刷形成机理将其分为：河床自然演变冲刷、桥下断面一般冲刷、墩台局部冲刷，在计算过程中虽然将其分类、分步计算，但实际上这三种冲刷的形成过程是复杂且持续的。

3 冲刷公式分析

3.1 埋深计算

根据前面的分析可以得知，河道河床冲淤过程十分复杂，目前国内外没有专门适用于计算穿河管道冲刷深度的规范公式。在计算管道埋深时多采用桥渡附近的冲刷公式，通常称为（64-1）式：

$$h = \left[\frac{A \frac{Q}{L} \left(\frac{h_m}{h_0} \right)^{5/3}}{E d^{1/6}} \right]^{3/5} \quad (1)$$

式中：Q——计算时采用的设计流量（造床流量）， m^3/s ；

L——平滩水位时的河面宽度，m；

A——单宽流量集中系数，按下式计算。

（64-1）式是铁道科学院在实测和模型试验的基础上建立的，计算依据的是桥梁压缩水流引起水、沙运动变化。该公式是目前应用最广泛的，但仍有以下三点局限性：①只适用于河床有底沙运动的非粘性土河流；②只能反映洪水过程中洪峰式瞬时冲淤大小，不能反映出整个过程冲淤变化；③未考虑河床形态对冲淤变化的影响。

3.2 一般冲刷计算

3.2.1 非粘性土河床一般冲刷计算

3.2.1.1 64-1 修正式

$$h_p = \left(\frac{A_d \frac{Q_2}{\mu B_{cf}}}{E d^{1/6}} \right)^{3/5} \left(\frac{h_{cm}}{h_{cq}} \right) \quad (2)$$

64-1 修正式是根据冲止流速建立的，适用于单式断面的桥下全部为河床或复式断面的桥下河床部分。该公式中有泥沙平均粒径这一参数，故需有准确的地质勘探资料才能保证计算结果可靠性，应找大颗粒密集部位

取样，如桥址附近陡峭处、边滩交界处或深泓中。

3.2.1.2 64-2 简化式

$$h_p = 1.04 \left(A_d \frac{Q_2}{Q_c} \right)^{0.90} \left(\frac{B_c}{(1-\lambda)\mu B_{cg}} \right)^{0.66} h_{cm} \quad (3)$$

64-2 简化式是根据输沙平衡关系建立的，适用于沙质（非粘性土）河床且桥下全部为河床或桥下河床部分。该公式的计算原理是：当上游来沙量小于水流挟沙能力时河床产生冲刷；当上游来沙量等于水流挟沙能力时达到输沙平衡状态，河床冲刷随即停止，一般冲刷达到最大值。

3.2.1.3 包尔达可夫公式

$$h_p = Ph = \frac{W_{\text{供}}}{W_{\text{供}}} h \quad (4)$$

包尔达可夫公式假定在有底沙运动的河流上，但只适用于平原及山区稳定河段。包式公式未考虑河床土质、水流集中冲刷等因素，认为冲刷与水深成正比，这与一些容易发生集中冲刷的河流所表现出的冲刷规律是相违背的。该公式结构过于简单、适用性较窄，不常用于一般冲刷计算。

根据对以上公式计算原理和适用性进行分析整理，归纳出非粘性土河床一般冲刷公式适用条件，详见表 2。

表 2 非粘性土河床一般冲刷公式适用条件表

河段分类	适用公式
平原稳定河段	64-2 简化式
平原次稳定河段	64-1 修正式、64-2 简化式
平原游荡型河段	64-1 修正式
山区稳定河段	64-1 修正式、64-2 简化式
山区变迁河段	64-1 修正式

根据表 2 可以看出虽然 64-1 修正式比较常用，但作为经验公式上在使用时需要注意以下几点：

（1）64-1 修正式不适于高含沙水流条件；

（2）使用 64-1 修正式时需注意边界条件的选取，计算断面和河床颗粒直径是影响计算较大的两个因素。在浅水、粗颗粒河床组成条件下计算结果偏大；在深水、细颗粒河床组成条件下则偏小。

（3）使用 64-1 修正式计算一般冲刷最大冲深时，若计算结果出现负值，则说明虽然部分或大部分垂线平均流速降低到该垂线的冲止流速了，但一般冲刷没有达到最大。

3.2.2 粘性土河床一般冲刷计算

粘性土颗粒很细，一般平均粒径小于 0.05mm。粘性土颗粒通过在其表面形成很薄且结合紧密的薄膜水使得颗粒之间具有一定的粘性力。对于粘性土河床冲刷通

常采用如下公式:

$$h_p = \left[\frac{A_d \frac{Q_2}{\mu B_{cj}} \left(\frac{h_{cm}}{h_{cj}} \right)^{\frac{5}{3}}}{0.33 \left(\frac{1}{I_L} \right)} \right]^{\frac{5}{8}} \quad (5)$$

适用范围: $I_L = 0.16 \sim 0.19$ 。

3.3 局部冲刷计算

3.3.1 非粘性土河床局部冲刷深度计算

3.3.1.1 经验公式

早期非粘性土河床局部冲刷经验公式主要有由美国水力工程通报 (HEC-18) 推荐公式早期的经验公式、由印度河流实测资料建立的 Lacey 公式和由模型试验资料建立 Jain.s.c 公式等。这些公式虽然说有一定针对性,但难以推广的原因是结构比较简单,考虑也不够全面。后期非粘性土河床局部冲刷经验公式虽然考虑的因素比较全面,但其参数、系数要根据具体情况而定,也难以大范围推广。

3.3.1.2 半经验半理论公式

在早期研究成果中大部分有关冲刷的公式是半经验半理论公式,在实际应用和研究中常采用的就是这类公式。半经验半理论公式常以理论为基础加以假定进行推导得来的,其优点是考虑因素比较全面,采用的系数一般通过试验或实测资料来确定。其中,65-2 式、65-1 修正式就是现在广泛应用于我国诸多非粘性土河床局部冲刷计算的,这两个公式均经过大量试验和实测数据验证,结果相对比较准确。

65-2 公式:

$$\text{当 } V \leq V_0, \quad h_b = K_\varepsilon K_{\eta 2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right) \quad (6)$$

$$\text{当 } V > V_0, \quad h_b = K_\varepsilon K_{\eta 2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right)^{\eta_2} \quad (7)$$

$$K_{\eta 2} = \frac{0.0023}{d^{2.2}} + 0.375 d^{-0.24} \quad (8)$$

65-1 修正式:

$$\text{当 } V \leq V_0, \quad h_b = K_\varepsilon K_{\eta 1} B_1^{0.6} (V - V'_0) \quad (9)$$

$$\text{当 } V > V_0, \quad h_b = K_\varepsilon K_{\eta 1} B_1^{0.6} (V_0 - V'_0) \left(\frac{V - V'_0}{V_0 - V'_0} \right)^{\eta_1} \quad (10)$$

3.3.2 粘性土河床桥墩局部冲刷

目前,国内外有关于粘性土河床一般冲刷和局部冲刷的研究成果都比较少,通常都是采用液性指数作为粘

性土抗冲能力指标进行计算。粘性土河床桥墩局部冲刷常用的以下两个公式均是针对顺直水流的,认为弯曲水流局部冲刷很小或没有,公式如下:

(1) 前苏联规范公式:

$$h_B = \frac{6.2 \beta h}{\left(\frac{V_0}{\omega} \right)^\beta} \left(2 \frac{V}{V_0} - 1 \right)^{0.75} K_1 K_a \quad (11)$$

(2) 我国规范公式:

$$\text{当 } \frac{h_p}{B_1} \geq 2.5 \text{ 时, } h_b = 0.83 K_\varepsilon B_1^{0.6} I_L^{1.25} V \quad (12)$$

$$\text{当 } \frac{h_p}{B_1} < 2.5 \text{ 时, } h_b = 0.55 K_\varepsilon B_1^{0.6} h_p^{0.1} I_L^{1.0} V \quad (13)$$

4 结语

穿河管道的埋深是一个重要的理论和工程问题,其有效合理的预测可以更好地进行工程设计,减少因冲刷暴露河底管道的安全风险。通过本文对冲刷公式的研究可以看出,根据河床形态和演变规律可以将河流划分成若干类型,不同类型的河流冲刷特性有区别,这对于研究管道埋设来说具有重要意义。鉴于目前对于穿河管道的埋深没有规范计算公式,因此,应进一步加强对于穿河冲刷机理和冲刷过程的研究,探索出专门适用于穿河管道埋深的冲刷公式。

参考文献:

- [1] 黄金池等. 水流冲刷与管道埋设 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1998.
- [2] 郝瑞森. 穿越河流的管道埋深设计 [J]. 区域供热, 2003(05):39-41.
- [3] 薛小华. 桥墩冲刷的试验研究 [D]. 武汉大学, 2005.
- [4] 来向华, 叶银灿, 韦雁机, 苟铮慷, 傅晓明. 杭州湾海底管道冲刷自埋演化过程初步研究 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(02):65-71.
- [5] 梁森栋, 张永良. 大桥复合桥墩局部冲刷深度的计算分析 [J]. 水利学报, 2011, 42(11):1334-1340.
- [6] 唐万金, 王吉祥, 杨鸣. 某穿越长江输油管道工程中河床冲刷深度计算 [J]. 人民长江, 2013, 44(06):59-61.
- [7] 王凤莲, 熊海荣, 叶宏平, 马坤明. 海底管道冲刷预测分析 [J]. 石油和化工设备, 2015, 18(08):5-9.
- [8] 白路遥, 李亮亮, 马云宾, 张修和, 李钊. 穿河管道河床冲刷的改进计算模型及应用 [J]. 人民黄河, 2015, 37(04):55-57+61.

基金项目: 贵州省水利厅科研项目 (KT202011)。