

文章编号: 1008-2786-(2019)3-462-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000438

管道穿越山地河段冲刷深度计算方法的比较研究

江海洋¹, 王淑英¹, 许泽星², 王协康^{2*}

(1. 浙江省水文管理中心, 杭州 310009; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 管道穿越山区河流河段的埋深设计是工程安全与经济造价的重要问题。当前河床冲刷计算方法众多, 而不同计算方法的比较研究较少。本文以常用的一般冲刷、局部冲刷经验公式及非恒定数值模拟技术为基础, 分析了某管道穿越河段冲刷特性。结果表明: 非恒定流数值模拟方法能较全面反映穿越区域最大冲刷深度的演化过程, 规范建议的一般冲刷 64-1 修正式与局部冲刷 65-2 式计算的最大冲刷程度与数值模拟结果较为吻合, 而局部冲刷 65-1 式冲刷稍偏小, 堤坝局部冲刷式计算偏差较大。

关键词: 管道穿越; 一般冲刷; 局部冲刷; 非恒定数值模拟

中图分类号: TV143+.3

文献标志码: A

山地区域河流发育丰富, 高山峡谷区边坡陡峻。随着山地国民经济的快速发展, 穿越山地河段的石油、天然气、电力等管道输运工程建设日益增多, 科学合理的埋深设计是工程经济与管道安全的重要保证。实际工程中, 常有埋深保护不足而导致管道水毁的灾害^[1-3]。因此, 穿越区域冲刷过程及其最大冲深计算是当前穿越河段工程的关键问题。然而, 油气管道穿越设计中仍无普遍统一的穿越河段河床冲刷计算标准, 实际工程中常采用铁路、公路与水利工程相关规范的方法^[4-5]。例如, 基于水流运动和河床泥沙抗冲特性, 秦毅等^[6]探讨了高含沙河流管道冲刷问题, 程尊兰等^[7]提出了山区河段水毁路基冲刷深度保护的计算方法, Dey 等^[8]分析床面切应力变化, 探讨了清水冲刷的管线布置问题, 宿星等^[9]利用桥渡与堤防冲刷公式分析了管线的埋深问题。Zhao Ming^[10]和史英标等^[11]从数值模拟角度, 分别探讨了海床振动管道的冲刷和钱江通道河

段的最大冲刷。Yang Lipeng^[12]基于室内概化试验探讨了海床管线的冲刷。梁光川等^[13]结合山区季节性河流洪水冲刷特性, 探讨了管道水毁河段的设计施工方法。孙志忠等^[14]和王仁超等^[15]以实际调查为基础, 探讨了管道河沟冲刷下切的水毁危害及泥石流运动对管道输运线路的破坏影响。张乃丰等^[16]根据极限冲深方法, 探讨了电力管道穿越的防洪管理。上述研究者基于现场调查、室内试验、数值模拟及经验性公式, 对管线冲刷开展了系列研究, 不同研究者针对管线埋深问题采用的冲刷计算方法仍存在较大的不同。

管道穿越区域冲刷过程及其可能的最大冲深, 直接关系到水下管道埋置深度, 也关系到工程的安全与经济造价, 因此, 冲刷深度计算方法的选择是一项十分慎重的工作。由于当前河床冲刷计算方法较多, 其建立机理与影响因素相差较大, 而不同计算方法的比较研究尚显不足。为此, 本研究以某管道穿

收稿日期 (Received date): 2019-05-07; 改回日期 (Accepted date): 2019-06-17

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41771543; 51579163)。[National Natural Science Foundation of China (41771543; 51579163)]

作者简介 (Biography): 江海洋 (1975-), 男, 江苏海安人, 主要研究方向: 水文与水资源。[JIANG Haiyang (1975-), male, born in Haian, Jiangsu Province, research on hydrology and water resource] E-mail: zjjianghy@zjwater.gov.cn.

* 通讯作者 (Corresponding author): 王协康 (1970-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 水力学及河流动力学。[WANG Xiekang (1970-), male, Ph. D., professor, specialized in hydraulics and river dynamics] E-mail: wangxiekang@163.com.

越河段为例,针对管道埋深冲刷常用的几种方法,系统比较分析不同方法对最大冲刷深度计算的影响,为管道穿越区域冲刷研究提供技术支持。

1 某管道穿越河段特性

某管道穿越区域位于跨桥上游附近,拟穿越处河床宽约 600.00 m,河段整体顺直,河床底部形态为 U 型,两侧河堤已修建人工砌石衬砌护坡,河堤宽度约为 33.00 m,河堤高出河床约 8.00 m。河床质为薄层卵石和下伏强风化泥质粉砂岩,床沙平均粒径约 18.00 mm。

2 冲刷深度计算经验公式

管道穿越河道时,河床在水流作用下的冲刷过程及其最大冲深常决定管道及穿越河段工程的埋设深度。当前河流冲刷深度计算的公式较多,在油气管道穿越河道工程中冲刷深度常采用行业标准推荐的 64-1 修正式、国家标准冲刷深度计算式等。此外,由于穿越区域有座桥,为此,采用桥台冲刷计算该区域的冲刷情况,采用的经验计算公式包括如下:

(1) 一般冲刷深度计算式(64-1 修正式)^[4]

$$h_p = \left(\frac{A_d Q_2}{\mu B_{cj}} \left(\frac{h_{cm}}{h_{cq}} \right)^{5/3} \right)^{0.6} \frac{1}{ED^{1/6}}, H = h_p - h_{cq} \quad (1)$$

式中, h_p 为一般冲刷后的水深; A_d 为单宽集中修正系数; Q_2 为河槽的设计过流流量; μ 为河槽水流侧向压缩修正系数; B_{cj} 为桥下河槽断面过水净宽; h_{cm} 为河槽断面最大水深; h_{cq} 为桥下河槽断面平均水深; E 为与汛期含沙量相关的系数; D 为床沙平均粒径; H 为一般冲刷深度。

(2) 局部冲刷深度计算(国家标准附录顺坝和平顺护岸冲刷深度计算式)^[5]

$$h_B = h_p + (V_{cp}/V_{\text{允}})^{0.25} - 1 \quad (2)$$

式中, h_B 为局部冲刷深度; V_{cp} 为平均速度; $V_{\text{允}}$ 为河床允许不冲流速。

由于穿越区域有桥墩的情况,其局部冲刷也可用下式计算,即

(3) 局部冲刷计算(65-2 式)^[4]

$$\text{当 } V \leq V_0 \quad h_B = K_\xi K_{\eta_2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right)$$

$$\text{当 } V > V_0 \quad h_B = K_\xi K_{\eta_2} B_1^{0.6} h_p^{0.15} \left(\frac{V - V'_0}{V_0} \right)^{n_2}$$

$$V_0 = 0.28(\bar{d} + 0.7)^{0.5}, V'_0 = 0.12(\bar{d} + 0.7)^{0.55}$$

(3)

式中, h_B 为桥墩局部冲刷大小; K_ξ 为墩形修正系数; B_1 为桥墩计算宽度值; K_{η_2} 为河床物质影响系数; V 为一般冲刷后墩前水流行进流速; V_0 为河床泥沙起动速度; V'_0 为墩前泥沙起冲速度; \bar{d} 为床沙平均粒径; n_2 为指数。

(4) 局部冲刷计算(65-1 修正式)^[4]

$$\text{当 } V \leq V_0 \quad h_B = K_\xi K_{\eta_1} B_1^{0.6} h_p^{0.15} (V - V'_0)$$

$$\text{当 } V > V_0 \quad h_B = K_\xi K_{\eta_1} B_1^{0.6} (V - V'_0) \left(\frac{V - V'_0}{V_0 - V'_0} \right)^{n_1}$$

(4)

式中, K_{η_1} 为河床颗粒影响系数; n_1 为指数。

3 冲刷深度数值模拟计算方法

3.1 数学模型方程

采用非恒定二维水沙数学模型,用于模拟穿越区域的水流运动和河床冲淤特性等。水流方程由水流连续性方程和水流沿 x 方向的动量方程及水流沿 y 方向的动量方程所组成。

水流连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

x, y 向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} \\ + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = \gamma_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} \\ + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = \gamma_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: t 为时间,单位 s; n 为曼宁系数; x, y 为直角坐标系方向值,单位 m; u, v 为 x, y 方向的水流速度,单位 m/s; z, h 为 $(x, (1 - \varepsilon) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \Delta S_e y)$ 处水位与水深,单位 m; $g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$ 为 x, y 方向的水流阻力; γ_t 为紊动粘性系数。

河床变形方程:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \Delta S_e \quad (8)$$

式中: q_x 为 x 方向输沙率; q_y 为 y 方向输沙率; ε 为床沙孔隙率大小; t 为时间; (x, y) 为直角坐标; ΔS_e 为由于河岸侵蚀带来的侧向泥沙量, 本模拟河段受堤防工程保护, 暂取为 0 值。

推移质输沙率采用梅叶彼德公式计算, 具体表达式为:

$$q_B = \varphi B \sqrt{(s - 1) g d_m^{3/2}}, \varphi_B = 8(\theta' - \theta_{cr})^{3/2},$$

$$s = \rho_s / \rho \quad (9)$$

$$\theta_{cr} = \xi \cdot 0.047 \quad (10)$$

q_B 为无量纲单宽输沙率公式, θ_{cr} 为无量纲起动切应力, ξ 为修正系数, d_m 为床沙平均粒径(m)。

3.2 计算范围及参数

采用的地形资料为 1:2000 地形图。考虑上游来流与下游支流及出口水文过程条件, 二维模型计算区域长约 19 km, 图 1(a) 所示, 其计算网格为三角形自适应网格, 穿越位置区域加密, 共 16496 个计算单元, 局部区域及计算网格如图 1(b)、图 1(c) 所示。由于穿越区域多年水面宽度超过 200 m, 根据国家规定^[18], 需采用百年一遇设防标准。以实

测典型洪水采用洪峰同倍比放大获得百年一遇洪水过程, 其中上游来流实测洪水流历时为 1973-6-19 20:00 至 1973-6-29 8:00, 穿越位置百年洪水峰量为 9230 m³/s, 而支流来流历时 1998-7-22 22:00 至 1998-7-26, 模型采用的时间步长为 1 s, 计算总历时 734 400 s。图 2 为上游来流、支流来流及出口断面水文过程及水位流量关系曲线。

4 计算结果比较分析

建立的水沙数学模型已应用于河道冲刷计算, 表明采用梅叶-彼得输沙率公式可较好分析河床冲刷深度的变化^[17]。图 3 为穿越位置百年一遇洪水过程洪峰流量时刻的流速分布和河床冲淤变化, 表明该时刻管道穿越位置的冲刷计算为 2.60 m, 其他时刻的水流运动及冲刷特性统计如表 1、表 2 所示。基于洪峰流量值时的水流特征值, 利用经验冲刷公式计算冲刷深度成果见表 3。由表 1 可知, 穿越区域的冲刷深度, 在随着洪水过程出现逐渐递增的趋势, 并一直保持至洪峰流量的峰值后期, 而后再趋于稳定, 考虑附加安全值, 本研究穿越管道洪水最大冲刷深度最大为 3.70 m。结合表 3 的不同经验公式

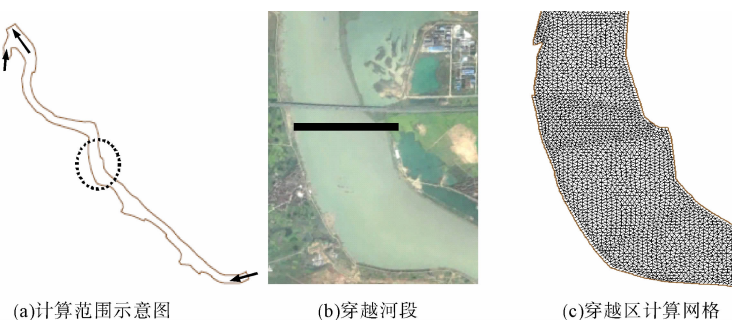


图 1 管线穿越位置及计算网格

Fig. 1 Location of pipeline crossing and calculation grid in river reach

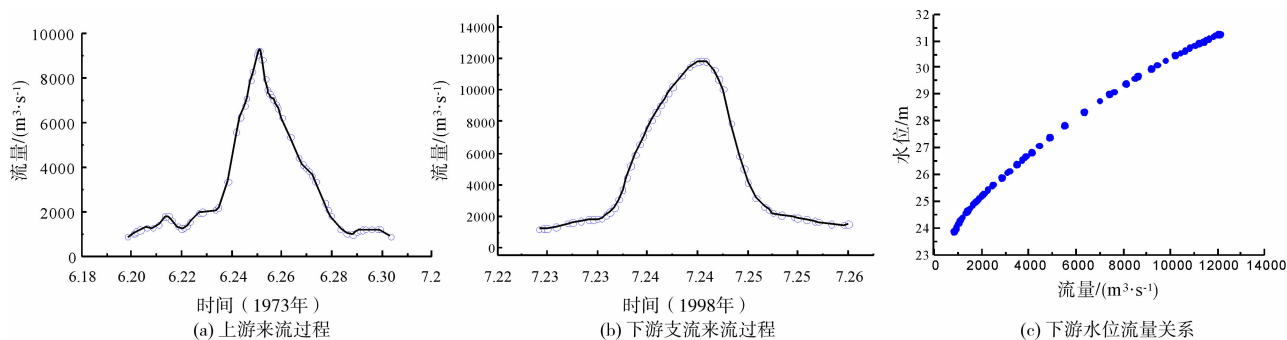


图 2 计算区域水文过程

Fig. 2 Hydrological processes of numerical simulation in river reach

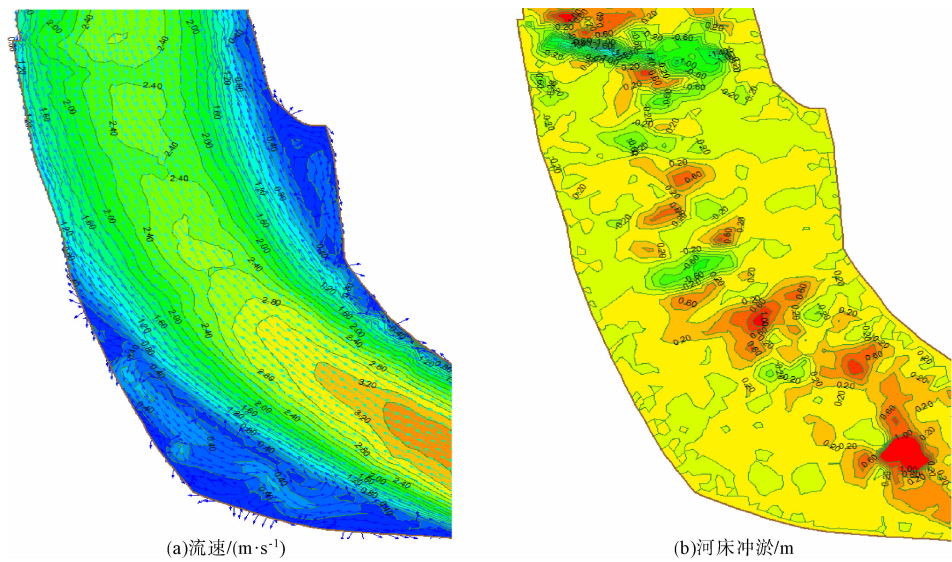


图 3 $Q = 9230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速和河床冲淤变化

Fig. 3 Distribution of velocity filed and riverbed deformation during $Q = 9230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

表 1 穿越区域冲刷数值模拟成果

Tab. 1 Numerical simulation of riverbed scour depth

洪水过程流量值 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	洪水模拟过程 时间/s	冲刷计 算值/m	安全值 /m	最大冲刷 深度/m
2025	288000	1. 70	1. 00	2. 70
4460	360000	2. 00	1. 00	3. 00
6620	399600	2. 20	1. 00	3. 20
8270	432000	2. 45	1. 00	3. 45
9230 (百年一遇洪峰)	457200	2. 60	1. 00	3. 60
7700	478800	2. 67	1. 00	3. 67
6310	529200	2. 70	1. 00	3. 70
5440	558000	2. 67	1. 00	3. 67
4510	586800	2. 65	1. 00	3. 65
3840	622800	2. 60	1. 00	3. 60
2070	691200	2. 50	1. 00	3. 50
1230	734400	2. 50	1. 00	3. 50

表 2 穿越区域在洪峰流量时的水流特征值

Tab. 2 Flow properties of flood peak in crossing zone

洪峰流量值 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	穿越区域水流特性模拟成果			
	最大流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	平均流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最大水深 /m	平均水深 /m
9230	2. 44	2. 10	10. 20	8. 79

计算结果可得,一般冲刷 64 - 1 修正式与局部冲刷 65 - 2 式能较好反映穿越区域的最大冲刷程度,而局部冲刷 65 - 1 式冲刷稍偏小,堤坝局部冲刷式计算偏差较大。

5 结语

基于管道穿越区域特性,选取河床一般冲刷、桥墩与堤坝局部冲刷经验计算公式及平面二维水沙运动数值模拟方法,探讨了某邻桥管道穿越河段区域

表 3 穿越区域经验公式计算的冲刷深度比较

Tab. 3 Comparison of scour depth among different empirical formula in crossing zone

序号	经验公式	冲刷深度计算		安全值 /m	最大冲刷 深度/m	备注
		一般冲刷深度/m	局部冲刷深度/m			
1	一般冲刷(64 - 1 修正式)	0. 95				$E = 0. 46$
2	局部冲刷(国家标准附录顺坝及平顺护岸冲刷公式)	0. 95	1. 02	1. 00	2. 97	平均粒径 $d = 18 \text{ mm}$
3	局部冲刷(65 - 2 式)	0. 95	1. 75	1. 00	3. 70	
4	局部冲刷(65 - 1 修正式)	0. 95	1. 53	1. 00	3. 48	

最大冲刷深度,结果表明:

(1)利用规范建议的一般冲刷 64-1 修正式与局部冲刷 65-2 式能较好反映穿越区域的最大冲刷程度,而局部冲刷 65-1 式冲刷稍偏小,堤坝局部冲刷式计算偏差较大。

(2)基于非恒定流数值模拟,采用梅叶-彼德推移质输沙率,能较全面反映穿越区域最大冲刷深度的演化过程,峰现流量后期出现最大冲刷深度。

参考文献 (References)

- [1] 黄金池,孟国忠. 管道过河工程水毁灾害分析[J]. 泥沙研究, 1998(2):42-49. [HUANG Jinchi, MENG Guozhong. Analysis on flood damage of crossing river pipeline project [J]. Journal of Sediment Research, 1998(2):42-49]
- [2] 马克锋,孙新军. 涩宁兰输气管线黄土高原段的水毁灾害与防治[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(2):80-83. [MA Kefeng, SUN Xinjun. Water hazards and their countermeasures for the oil transporting pipelines in loess plateau of Sebei-Xining-Lanzhou[J]. Journal of Gansu Sciences, 2005, 17(2):80-83]
- [3] 李亮亮,邓清禄,余伟,等. 长输油气管道河沟段水毁危害特征与防护结构[J]. 油气储运, 2012, 31(12):945-949. [LI Liangliang, DENG Qinglu, YU Wei, et al. The water damage hazard characteristics of long-distance oil and gas pipelines in river sections and protective structures[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(12):945-949]
- [4] JTG C30-2002. 公路工程水文勘测设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2002. [JTG C30-2002. Specification for Hydrological Survey and Design of Highway Engineering [S]. Beijing: People's Transport Press, 2002]
- [5] GB50286-98. 堤防工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1998. [[5] GB50286-98. Code for Design of Embankment Engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 1998]
- [6] 秦毅,钱善琪,王冰怀,等. 高含沙河流管道穿越冲深设计与计算[J]. 油气储运, 2001, 20(4):23-27. [QIN Yi, QIAN Shanqi, WANG Binhuai, et al. Approach to design scouring depth for pipeline works through full-loaded river [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(4):23-27]
- [7] 程尊兰,游勇,吴积善. 川藏公路尼洋河下游宽浅游荡型河段水毁路基防护试点工程. 山地学报, 2004, 22(4):472-476. [CHENG Zunlan, YOU Yong, WU Jishan. Prevention works of roadbed water-damage along meandering channels in Tibet—A case study in Sichun-Tibet highway in the lower Niyang river [J]. Mountain Research, 2004, 22(4):472-476]
- [8] DEYS, SINGH N P. Clear-water scour depth below underwater pipelines[J]. Journal of Hydro-Environmental Research, 2007, 2(1):157-162.
- [9] 宿星,杨涛,郭定一,等. 输气管道穿河段水工保护工程埋深问题探讨[J]. 甘肃科学学报, 2008, 20(4):78-81. [SU Xing, YANG Tao, GUO Dingyi, et al. Discussion on depth of foundation to hydraulic protection project [J]. Journal of Gansu Sciences, 2008, 20(4):78-81]
- [10] ZHAO Ming, CHENG Liang. Numerical investigation of local scour below a vibrating pipeline under steady currents [J]. Coastal Engineering, 2010(57):397-406.
- [11] 史英标,柳崇敏,曹颖,等. 钱江通道段河床最大冲刷深度的综合分析[J]. 泥沙研究, 2011(4):51-58. [SHI Yingbiao, LIU Chongmin, CAO Ying, et al. Study of scour depth in river reach of qianjiang tunnel across qiantang estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2011(4):51-58]
- [12] YANG Lipeng, SHI Bing, GUO Yakun, et al. Calculation and experiment on scour depth for submarine pipeline with a spoiler [J]. Ocean Engineering, 2012(55):191-198.
- [13] 梁光川,华兰. 山区季节性河流水毁露管段整治措施[J]. 管道技术与设备. 2014(2):31-32. [LIANG Guangchuan, HUA Lan. Remediation measures for exposed pipeline caused by mountainous seasonal flood [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2014(2):31-32]
- [14] 孙志忠,张满银,谢荣,等. 长输管道河沟道水毁危害探析[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(3):56-61. [SUN Zhizhong, ZHANG Manyin, XIE Rong, et al. Research on waterlogging hazards of long-distance pipeline [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2015, 17(3):56-61]
- [15] 王仁超,孔纪名,崔云. 西南山区长输油气管道坡面泥石流成灾特征与防治——以云南昆明水节箐高位溃决型泥石流为例[J]. 山地学报, 2018, 36(5):813-820. [WANG Renchao, KONG Jiming, CUI Yun. Characteristics and countermeasures of slope debris flow in Kunming of Yunnan Province of China [J]. Mountain Research, 2018, 36(5):813-820]
- [16] 张乃丰,李倩玉. 电力管道穿越河道的防洪影响评价分析[J]. 中国水运, 2018, 18(3):184-185. [ZHANG Naifeng, LI Qianyu. Evaluation and analysis of flood control impact of power pipeline crossing river [J]. China Water Transport, 2018, 18(3):184-185]
- [17] 赵小娥,陈春燕,王协康,等. 溃堤洪水及冲刷坑的平面二维数值模拟[G]//中国水利学会 2013 学术年会论文集——S3 防汛抗旱减灾. 北京:中国水利水电出版社, 2013:1163-1167. [ZHAO Xiao'e, CHEN Chunyan, WANG Xiekang, et al. 2-D numerical simulation of dike-break flood and scour pit [G]// S3 Flood Control, Drought Relief and Disaster Reduction, 2013 CHES annual conference. Beijing: China Waterpower Press, 2013:1163-1167]
- [18] GB50423-2007. 油气输送管道穿越工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2007. [GB50423-2007. Code for Design of Oil and Gas Pipeline Crossing Engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2007]

Comparative Study on Calculation Methods of Scour Depth over Riverbed Traversed by Pipeline

JIANG Haiyang¹, WANG Shuying¹, XU Zexing², WANG Xiekang^{2*}

(1. Hydrological Management Center, Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is quite common that a crossing pipeline was built in a hydraulic project in mountain river. The damages of pipeline engineering due to riverbed scouring at crossing zone occur frequently, which brings about serious aftermath. Riverbed scour mainly are controlled by water velocity and bed materials in river and accordingly empirical formulas considering velocity parameter were proposed and used in practice. However empirical formula to estimate the pipeline scouring has limitation and cannot be applied to all silario. Less work had been done regarding the comparison of different scour depth calculation. And noticeably, a disadvantage of these empirical formula is that they cannot describe the scour process of river bed, in particular, for the unsteady flood process with variable velocity. This paper took a crossing pipeline as an example, and then an unsteady 2D flow-sediment numerical model with a Meiye-peter bedload transport rate was used to simulate the process of riverbed scour depth by a typical flood, and it demonstrated the changes of riverbed scour depth at the typical pipeline crossing zone by means of several empirical formulas stipulated by codes. The changes of velocity field and scour depth during the whole flood process at pipeline crossing zone were obtained through numerical simulation and the maximum scour depth was determined in the later stage of flood peak. The empirical scouring depth by several formulas could be calculated according to flow velocity and bed material diameter. The results showed that the calculating values of scour depth by the revised formula 64-1 and 65-2 were consistent well with that of the numerical simulation. However, there were median and larger errors by means of equation 65-1 and the dike-dam scour formula. The numerical simulation method introduced by this research can fully interpret the evolution process of scouring depth across a region, and has an important technical support for better understanding of pipeline scouring problem.

Key words: pipeline crossing; general scour; local scour; unsteady numerical simulation