



丁坝及淹没丁坝冲刷公式研究*

马兴华, 周海

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 针对整治建筑物冲刷问题, 依托长江南京以下 12.5 m 深水航道治理一期工程, 研究探讨了普遍冲刷和淹没丁坝冲刷的冲刷规律、主要影响因素、冲刷机理。基于河流动力学基础理论, 分别推导了基于起动流速、起动切应力的冲刷深度半经验半理论公式, 经非淹没丁坝冲刷实例和淹没丁坝冲刷数模成果验证和率定, 效果良好, 适用于非淹没丁坝和淹没丁坝冲刷深度计算, 从冲刷计算原理看, 同样适用于顺坝及护岸冲刷深度计算。对其中有关冲刷深度半经验半理论公式的主要研究成果进行了系统总结。

关键词: 整治建筑物冲刷; 丁坝冲刷; 护岸冲刷; 普遍冲刷; 冲刷公式

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0126-08

Calculation formulae for spur dike and submerged spur dike

MA Xing-hua, ZHOU Hai

(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Based on the implementation of the 12.5 m deep-water channel regulation project (phase I) in the Changjiang river downstream of Nanjing, this paper focuses on the scouring issues of applied regulation structures, studies the regularity, main influence factors and mechanism of general scour as well as scouring around the submerged spur dike, and respectively deduces in line with the fundamental theory of river dynamics the semi-empirical and semi-theoretical formulas for calculation of scouring depth resulting from initial flow velocity and initial shear stress. Based on practical examples of scouring occurred around non-submerged spur dike and the results of numerical scouring modeling for submerged spur dike, these formulas are verified and calibrated with good effects, and they are not only applicable to the calculation of scouring depth around the non-submerged and submerged spur dikes, but also suitable for the calculation of scouring depth developed at longitudinal dike and revetment in view of the fundamental theory of river dynamics. This paper makes a systematic summary of the major study results related to the semi-empirical and semi-theoretical formulas for calculation of scouring depth.

Keywords: scouring at regulation structure; spur dike scouring; revetment scour; general scour; scouring formulae

整治建筑物冲刷关系到整治建筑物安全, 是整治建筑物建设需要考虑的重要问题。长期以来, 国内外水利水运工程界通过工程实践、室内试验和理论分析, 对整治建筑物冲刷深度开展了持续的研究, 基于不同的工程条件, 研究得到了众多

整治建筑物冲刷经验公式和半经验半理论公式, 内容涵盖顺坝及平顺护岸冲刷、丁坝冲刷、锁坝冲刷等^[1-3]。但整治建筑物冲刷问题十分复杂, 准确预测整治建筑物的冲刷深度仍然是困扰工程界的一大难题。

收稿日期: 2014-07-08

*基金项目: 西部交通建设科技项目 (2013328J17500)

作者简介: 马兴华 (1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事航道整治研究。

为解决整治建筑物冲刷深度问题, 2012年以来, 上海航道勘察设计研究院依托长江南京以下12.5 m深水航道治理一期工程开展了专题研究^[4-5], 研究揭示了普遍冲刷和淹没丁坝冲刷的冲刷规律、主要影响因素、冲刷机理; 并基于河流动力学基础理论, 分别推导了基于起动流速、起动切应力的冲刷深度半经验半理论公式, 公式及参数经黄河下游非淹没丁坝冲刷实例和淹没丁坝冲刷数模成果验证和率定^[5], 效果良好, 适用于非淹没丁坝和淹没丁坝冲刷深度计算, 从冲刷计算原理看, 同样适用于顺坝及护岸冲刷深度计算。对其中有关冲刷深度半经验半理论公式的主要研究成果进行了系统总结。

1 丁坝及淹没丁坝冲刷深度半经验半理论公式推导^[5]

1.1 推导思路

首先, 鉴于单向恒定流清水条件下冲刷影响因素较少, 理论相对成熟, 考虑以单向恒定流清水条件下冲刷后流速、切应力接近于起动流速、起动切应力为原则, 建立冲刷深度计算公式, 不考虑来沙(悬沙、底沙)补充。

其次, 考虑到实际冲刷的作用时间、来沙等因素与单向恒定流清水条件下冲刷有所差异, 采用系数对两者差异进行修正, 得到适用于实际冲刷的冲刷深度计算公式。设计水文条件属于重现期性质, 持续时间相对较短, 另外大流速情况下往往有较大数量的来沙补充, 因此实际冲刷小于清水条件下的冲刷。

1.2 基于起动流速的冲刷深度公式推导

1.2.1 砂性土起动流速计算公式

1) 均匀流条件下。

适用于砂性土的起动流速公式有沙漠夫公式、刚恰洛夫公式等。鉴于沙漠夫公式较为简洁、精度符合要求, 且采用指数分布、便于公式推导, 起动流速按沙漠夫公式计算。

$$U_c = \alpha \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{h}{d} \right)^m \quad (1)$$

式中: 系数 $\alpha = 1.144$; 指数 $m = 1/6$ 。实际工程条件与实验室有所不同, 将 α 、 m 作为待定系数处理。

2) 近似均匀流条件下。

丁坝头部水流、顶冲点水流受整治建筑物影响后, 水流结构发生改变, 属于近似均匀流, 基本符合对数律、指数律分布, 见图1。在垂线平均流速相同情况下, 近似均匀流的河床泥沙起动流速比均匀流要小。

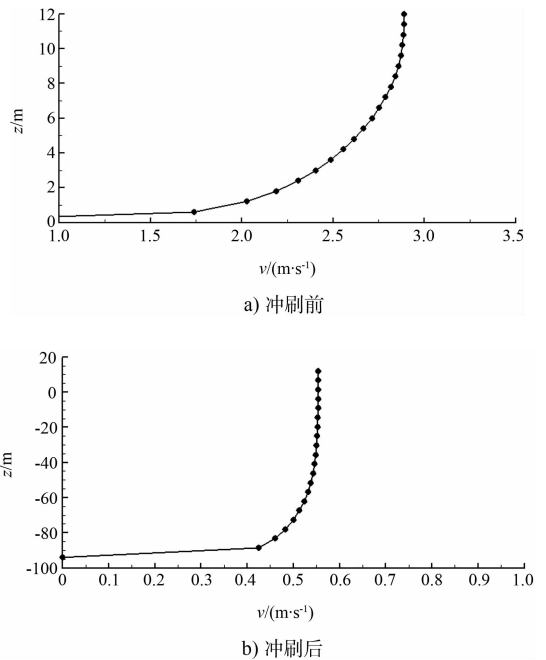


图1 丁坝头垂向流速分布

1998年中科院力学研究所^[6]在长江口深水航道治理工程中采用三维ADV系统对丁坝头周围主要控制点的速度进行测量, 结果表明, 在强涡区的近底部及其他区域的边界层内, 速度剖面基本满足对数律分布。

因此, 考虑流态修正系数 K_c , 得到砂性土通用起动流速公式:

$$U_c = \alpha K_c \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{h}{d} \right)^m \quad (2)$$

式中: U_c 为起动流速 (m/s), 取垂线平均流速; ρ_s 为泥沙密度 (kg/m^3); ρ 为水的密度 (kg/m^3); g 为重力加速度; h 为水深 (m); d 为泥沙中值粒径 (m); K_c 为流态修正系数, 对于均匀流取 1,

对于近似均匀流 ≤ 1 ，通过数模率定确定。

1.2.2 砂性土不冲流速计算公式

允许不冲流速指水力半径为 1 m 时的允许不冲流速，砂性土不冲流速计算公式如下：

$$U_{c,h=1} = \alpha \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{1}{d}\right)^m \quad (3)$$

由式(2)、(3)转换得到任意水深、均匀流及近似均匀流条件下的不冲流速计算公式：

$$U_c = K_c U_{c,h=1} h^m \quad (4)$$

1.2.3 砂性土冲刷深度公式推导

1) 工程实践表明，由于大范围冲刷后的引流效应或局部冲刷后的引流效应，冲刷后单宽流量一般大于等于冲刷前单宽流量，因此冲刷深度计算不能单纯考虑冲刷前的单宽流量，还需要考察冲刷后单宽流量，为此对冲刷前后单宽流量建立关系式：

$$K_q h_1 v_1 = h_2 v_2 \quad (5)$$

式中： h_1 、 v_1 为冲刷前水深(m)和冲刷前垂线平均流速(m/s)，取余排外边缘处的水深和垂线平均流速，采用二维水流数模计算； h_2 、 v_2 为冲刷基本稳定后的水深(m)和垂线平均流速(m/s)； K_q 为冲刷后单宽流量增加系数，等于冲刷基本稳定后单宽流量/冲刷前单宽流量。

2) 根据冲刷基本稳定后垂线平均流速与不冲流速基本相同的原理，并考虑实际冲刷情况下的不冲流速与单向恒定流清水冲刷条件下不冲流速的差异，得下式：

$$v_2 = K_f U_c = K_f K_c U_{c,h=1} h_2^m \quad (6)$$

式中： K_f 为不冲流速修正系数，其值等于实际冲刷情况下不冲流速/单向恒定流清水冲刷条件下不冲流速，设计水文条件持续时间长、大流速情况下来沙少、计算冲刷结果需要偏安全时可取 1，设计水文条件持续时间短、大流速情况下来沙多时可取 1~1.5，具体取值需要根据实测资料验证。

3) 联立式(5)和式(6)，整理后，得冲刷后水深和冲刷深度计算公式：

$$h_2 = \left(\frac{K_q h_1 v_1}{K_f K_c U_{c,h=1}}\right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (7)$$

$$h_s = \left(\frac{K_q h_1 v_1}{K_f K_c U_{c,h=1}}\right)^{\frac{1}{m+1}} - h_1 \quad (8)$$

$$K_q = K_{q1} K_{q2} \quad (9)$$

$$K_{q2} = \frac{q_s}{h_1 v_1} \quad (10)$$

式中： h_s 为冲刷深度(m)，自原床面起算； m 为指数，根据冲刷成果率定取 1/6； α 为系数，根据冲刷成果率定取 1.4； K_c 为流态修正系数，见下文； K_{q1} 为设计来流单宽流量不变情况下，因局部冲刷产生小范围引流效应，导致的局部单宽流量增加系数，见下文； K_{q2} 为设计使用年限内，因河势变化(如水道摆动)或大范围冲刷产生引流效应，导致的整体来流单宽流量增加系数； q_s 为设计使用年限内预测最大单宽流量，当不存在显著的河势变化(如水道摆动)和大范围冲刷引起的引流效应时， $K_{q2} = 1$ 。

4) K_c 、 K_{q1} 计算。

①淹没丁坝头部附近 K_{q1} 经验公式。

K_{q1} 与冲刷前坝高水深比、冲刷前流速/冲刷后流速、有效坝长/水深、坝头纵坡坡度系数有关。根据数模研究^[4]分析发现：淹没丁坝坝头冲刷坑引流效应与坝高水深比有关，坝高水深比由 0.2 提高到 0.75，引流效应越来越大，坝高水深比为 0 (仅有丁坝状护滩、无堤身高度) 时，仍存在相当的引流效应；淹没丁坝坝头冲刷坑引流效应还与(坝头流速/起动流速 - 1) 有关，坝头流速/起动流速 = 1 时，床面不冲刷，无引流效应，坝头流速/起动流速越大时，床面冲刷越大，引流效应越大。据此经量纲分析，建立计算式如下，系数采用冲刷成果率定确定。

$$K_{q1} = 1 + \left(0.26 + 0.13 \cdot \frac{P}{h_1}\right) \sqrt{\frac{v_1 - U'_c}{U'_c}} K_L K_M \quad (11)$$

$$K_L = \left(0.06 \cdot \frac{L \sin \theta}{h_1}\right)^{0.025} \left(\frac{\theta}{90}\right)^3 \quad (12)$$

$$K_M = 1.25 e^{-0.04M} \quad (13)$$

式中： K_L 为与丁坝长度有关的修正系数； K_M 为与坝头纵坡坡度有关的修正系数； P 为坝高(m)； L 为丁坝长度(顶高程低于计算水位的部分)；

θ 为丁坝轴线与水流交角 ($^\circ$); M 为坝头纵坡坡度系数; U'_c 为采用式 (4)、 $K_c = 1$ 计算 (水深 $h =$ 冲刷前水深 + 均匀流条件下的普遍冲刷深度, 即按式(7)、 $K_c = 1$ 、 $K_q = 1$ 计算得到的 h_2) 的不冲流速; 其余同前。

②丁坝头部附近 K_c 经验公式。

K_c 与冲刷前坝高水深比、冲刷前流速/冲刷后流速、有效坝长/水深、丁坝角度及坝头纵坡坡度

系数有关。根据数模^[4]揭示的冲刷规律, 经量纲分析, 建立丁坝头部附近 K_c 计算式, 系数采用冲刷成果率定确定。

$$K_c = 1 - \left(0.091 + 0.0455 \cdot \frac{P}{h_1} \right) \sqrt{\frac{v_1 - U'_c}{U'_c}} K_L K_M \quad (14)$$

式中参数同前。

③其余情况见表 1。

表 1 适用条件、 K_c 、 K_{qt} 取值

所在水域	冲刷部位	水流性质	冲刷类别	K_{qt}	K_c
径流河段、潮汐河段的顺直微弯河段, 往复流为主的海域, 顺直微弯的海岸	河道内	主流 (属于均匀流)	普遍冲刷	1.0	1.0
	非淹没顺坝及平顺护岸	沿堤流 (属于均匀流)	普遍冲刷		
	淹没顺坝	沿堤流 (属于均匀流)	普遍冲刷		
	丁坝头局部冲刷范围以外	主流 (属于均匀流)	普遍冲刷		
	非淹没丁坝头部附近	主流 + 全部丁坝绕流 (属于近似均匀流)	局部冲刷 (含普遍冲刷)		冲刷前后丁坝侧水流始终绕过丁坝头部下泄, 水流数模计算时已考虑丁坝效应, 因此坝头局部冲刷后导致的引流效应较小, 可取 1.0 式(12) ~ (14)
	淹没丁坝头部附近	主流 + 部分丁坝绕流 (属于近似均匀流)	局部冲刷 (含普遍冲刷)	式(11) ~ (13)	

注: “非淹没”、“淹没”采用计算流速相应的计算水位衡量, 若计算水位高于堤坝顶则为非淹没堤坝 (本文中非淹没丁坝称为丁坝), 否则为淹没堤坝。

1.2.4 黏性土冲刷深度公式

根据冲刷机理, 式(7)和式(8)同样适用于黏性土床面的冲刷深度计算, 但 $U_{c,h=1}$ 需要采用黏性土 1 m 水深的允许不冲流速替代。黏性土的起动流速公式有窦国仁公式^[7]、杨美卿公式^[8]、沙玉清公式、张瑞瑾公式、唐存本公式等。

$$\frac{U}{u_*} = K_c \beta \left(\frac{R}{K_s} \right)^m \quad (16)$$

对于宽水体, $R = h$, h 为水深。

由式(16)转换得到摩阻流速计算公式:

$$u_* = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{1}{\beta} U \left(\frac{K_s}{h} \right)^m \quad (17)$$

因 $U = U_c$ 时 $u_* = u_{*c}$, 将式(2)代入式(17), 得砂性土起动摩阻流速计算公式:

1.3 基于起动切应力的冲刷深度公式推导^[5]

1.3.1 砂性土起动摩阻流速计算公式

对于均匀流, 采用曼宁-斯特里克勒公式:

$$u_{*c} = \alpha \cdot \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{K_s}{d} \right)^m \quad (18)$$

式中: U 为垂线平均流速 (m/s); 指数 $m = 1/6$; $\beta = 7.68$; u_* 为摩阻流速 (m/s); R 为水力半径 (m); K_s 为床面糙率高度 (m)。

1.3.2 砂性土冲刷深度公式推导

1) 根据式 (5), 转换得:

$$h_2 = K_q h_1 v_1 / v_2 \quad (19)$$

根据式(16), 得:

$$v_1 = K_c \beta u_{*1} \left(\frac{h_1}{K_s} \right)^m \quad (20)$$

考虑到实际工程条件与实验室有所不同, m 、 β 作为待定系统处理。

$$v_2 = K_c \beta u_{*2} \left(\frac{h_2}{K_s} \right)^m \quad (21)$$

同样考虑流态修正系数 K_c , 得到均匀流、近似均匀流条件下通用流速分布公式:

2) 根据冲刷基本稳定后水流摩阻流速与床沙

起动摩阻流速一致的原则，并考虑实际冲刷情况下的起动摩阻流速与单向恒定流清水冲刷条件下起动摩阻的差异，得：

$$u_{*2} = K_f u_{*c} \tag{22}$$

令 $u'_{*1} = u_{*1} K_c$ ，则得：

$$u'_{*1} = \frac{1}{\beta} v_1 \left(\frac{K_s}{h_1} \right)^m \tag{23}$$

$$u_{*1} = u'_{*1} / K_c \tag{24}$$

3) 将式(20)、(21)、(22)、(24)代入式(19)，得：

$$h_2 = K_q h_1 \cdot \frac{1}{K_f} \cdot \frac{\beta u'_{*1} \left(\frac{h_1}{K_s} \right)^m}{K_c \beta u_{*c} \left(\frac{h_2}{K_s} \right)^m} \tag{25}$$

进一步整理后，得到基于起动摩阻流速的冲刷后水深和冲刷深度计算公式：

$$h_2 = h_1 \left(\frac{K_q}{K_f K_c} \cdot \frac{u'_{*1}}{u_{*c}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \tag{26}$$

$$h_s = h_1 \left[\left(\frac{K_q}{K_f K_c} \cdot \frac{u'_{*1}}{u_{*c}} \right)^{\frac{1}{m+1}} - 1 \right] \tag{27}$$

4) 因 $\tau = \rho u_{*}^2$ ，转换得到基于起动切应力的冲刷后水深和冲刷深度计算公式：

$$h_2 = h_1 \left(\frac{K_q}{K_f K_c} \cdot \frac{\tau'_1}{\tau_c} \right)^{\frac{1}{2m+2}} \tag{28}$$

$$h_s = h_1 \left[\left(\frac{K_q}{K_f K_c} \cdot \frac{\tau'_1}{\tau_c} \right)^{\frac{1}{2m+2}} - 1 \right] \tag{29}$$

$$\tau'_1 = \rho u_{*1}^2 \tag{30}$$

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 \tag{31}$$

式中： u'_{*1} 、 τ'_1 分别为冲刷前摩阻流速（m/s）和切应力（Pa），宜采用三维水流数模计算确定，对于顺直微弯河道、岸段，可采用二维水流数模计算确定冲刷前垂线平均流速 v_1 ，再分别按式(23)和式(30)计算； u_{*c} 、 τ_c 分别为起动摩阻流速（m/s）和起动切应力（Pa）； β 为系数，根据冲刷成果率定取 8.7； K_s 为床面糙率高度， $d < 0.5$ mm 时为 1.0 mm， $0.5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm}$ 时为 $2d^{0.71}$ ； ρ 为水的密度（ kg/m^3 ）； K_f 为起动摩阻流速修正系

数，其值等于实际冲刷情况下起动摩阻流速/单向恒定流清水冲刷条件下起动摩阻流速，可参照基于起动流速的 K_f ； K_c 为流态修正系数，见下文； K_q 为冲刷后单宽流量增加系数，按式(9)、(10)计算； K_{q1} 为设计来流单宽流量不变情况下，因局部冲刷产生小范围引流效应，导致的局部单宽流量增加系数，见下文。

5) K_c 、 K_{q1} 计算。

①淹没丁坝头部附近 K_{q1} 经验公式。

参照式(11)，建立淹没丁坝头部附近 K_{q1} 计算式如下，系数采用冲刷成果率定确定。

$$K_{q1} = 1 + \left(0.26 + 0.13 \frac{P}{h_1} \right) \sqrt{\frac{u'_{*1} h_1^m - u_{*c} h_2^m}{u_{*c} h_2^m}} K_L K_M \tag{32}$$

式中： h'_2 为均匀流条件下的冲刷深度（m），按式(26)、 $K_c = 1$ 、 $K_q = 1$ 计算得到。其余同前。

②丁坝头部附近 K_c 经验公式。

参照式(14)建立丁坝头部附近 K_c 计算式，系数采用冲刷成果率定确定。

$$K_c = 1 - \left(0.091 + 0.0455 \cdot \frac{P}{h_1} \right) \sqrt{\frac{u'_{*1} h_1^m - u_{*c} h_2^m}{u_{*c} h_2^m}} K_L K_M \tag{33}$$

式中参数同前。

③其余情况按表 1。

1.3.3 黏性土冲刷深度公式

根据冲刷机理，式(26)~(29)同样适用于黏性土床面的冲刷深度计算，但 u_{*c} 需要采用黏性土起动摩阻流速替代。

2 公式验证、评价和适用条件^[5]

2.1 采用黄河下游柳园口非淹没丁坝实测冲刷数据^[3]验证

该实例处于单向径流河段，河床土质全部为粉细沙。基于起动流速的半经验半理论公式的验证见表 2。

表 2 采用黄河下游柳园口非淹没丁坝实测冲刷数据^[3]验证和参数率定

		工程条件				实际		基于起动流速的半经验半理论公式						
河宽 B/m	坝头纵坡 坡度系数 M	坝长 L/m	坝轴线与 水流交角 $\theta/(^\circ)$	冲刷前 水深 h_1/m	冲刷前行 进流速 $U_0/(m \cdot s^{-1})$	冲刷 深度 $h_{s实}/m$	$h_{s11}/h_{s实}$	$h_{s12}/h_{s实}$	$K_f = 1$ 时 冲刷深度 h_{s11}/m	$K_f = 1.4$ 时 冲刷深度 h_{s12}/m	允许不冲 流速 $U_{c,h=1}/$ $(m \cdot s^{-1})$	冲刷前坝头 附近流速 $v_1/(m \cdot s^{-1})$	流态修 正系 数 K_c	
860	1.67	70	25	1.33	2.363	6.35	1.12	0.78	7.1	5.0	0.31	2.73	0.99	
760	1.43	90	30	1.33	2.538	7.75	1.09	0.78	8.5	6.0	0.31	3.21	0.99	
681	1.43	131	29	1.33	2.625	6.15	1.60	1.14	9.8	7.0	0.31	3.73	0.99	
560	1.25	50	28	1.33	2.538	4.25	1.86	1.31	7.9	5.6	0.31	3.02	0.99	
488	1.25	28	31	1.33	2.538	3.45	2.18	1.54	7.5	5.3	0.31	2.88	0.99	
417	1.43	107	30	1.33	2.888	7.55	1.59	1.15	12.0	8.7	0.31	4.56	0.98	
365	2.00	95	27	1.33	2.888	7.55	1.54	1.11	11.6	8.4	0.31	4.42	0.99	
553	1.67	128	40	1.33	2.713	11.05	1.11	0.80	12.3	8.9	0.31	4.53	0.96	
569	1.43	109	32	1.97	2.450	8.69	1.52	1.08	13.2	9.4	0.31	3.57	0.98	
518	2.00	98	25	1.97	2.450	9.99	1.21	0.86	12.1	8.6	0.31	3.33	0.99	
598	1.67	128	30	1.97	2.625	11.89	1.20	0.86	14.3	10.2	0.31	3.89	0.99	
955	1.67	80	30	2.18	3.063	12.00	1.20	0.85	14.4	10.3	0.31	3.64	0.99	
905	1.43	80	33	2.18	3.587	12.58	1.38	0.99	17.3	12.5	0.31	4.36	0.98	
890	1.43	140	32	2.18	3.325	13.90	1.31	0.94	18.2	13.1	0.31	4.57	0.98	
785	1.25	55	34	2.18	3.413	13.90	1.15	0.82	16.0	11.4	0.31	4.01	0.98	
752	1.25	32	32	2.18	3.325	8.50	1.70	1.21	14.5	10.3	0.31	3.66	0.98	
730	1.43	105	27	2.18	2.625	11.00	1.22	0.87	13.5	9.5	0.31	3.40	0.99	
640	2.00	105	25	2.18	3.413	13.90	1.27	0.91	17.6	12.7	0.31	4.48	0.99	
570	1.67	130	31	2.18	2.975	11.20	1.62	1.17	18.2	13.1	0.31	4.55	0.98	
715	1.43	105	47	1.83	2.625	8.05	1.75	1.26	14.1	10.1	0.31	3.89	0.94	
625	2.00	100	48	1.83	2.363	11.05	1.19	0.85	13.2	9.4	0.31	3.63	0.94	
625	1.67	125	46	1.83	2.188	12.05	1.08	0.77	13.1	9.3	0.31	3.60	0.95	
981	1.67	81	35	1.63	2.450	9.85	0.95	0.67	9.3	6.6	0.31	2.97	0.98	
891	1.43	91	43	1.63	2.538	10.35	1.04	0.74	10.7	7.6	0.31	3.33	0.96	
770	1.43	130	35	1.63	2.625	11.35	1.05	0.75	11.9	8.5	0.31	3.77	0.98	
770	1.25	55	30	1.63	2.625	5.05	1.87	1.32	9.5	6.7	0.31	3.05	0.99	
761	1.25	11	36	1.63	2.625	4.05	2.09	1.46	8.5	5.9	0.31	2.73	0.98	
725	1.43	100	28	1.63	2.363	6.15	1.54	1.09	9.5	6.7	0.31	3.05	0.99	
680	2.00	105	22	1.63	2.450	4.35	2.19	1.55	9.5	6.7	0.31	3.09	0.99	
628	1.67	128	40	1.63	2.625	5.65	2.37	1.71	13.4	9.6	0.31	4.17	0.96	
831	1.67	81	27	2.07	2.975	10.59	1.27	0.90	13.5	9.6	0.31	3.57	0.99	
831	1.43	91	28	2.07	2.450	9.19	1.24	0.87	11.4	8.0	0.31	3.02	0.99	
735	1.43	135	29	2.07	2.188	10.59	1.10	0.78	11.7	8.2	0.31	3.06	0.99	
728	1.25	58	29	2.07	1.925	5.09	1.66	1.14	8.4	5.8	0.31	2.26	0.99	
723	1.25	23	36	2.07	2.013	3.29	2.48	1.70	8.2	5.6	0.31	2.18	0.98	
710	1.43	110	23	2.07	2.800	8.19	1.64	1.17	13.4	9.6	0.31	3.56	0.99	
655	2.00	105	33	2.07	2.713	10.19	1.42	1.02	14.5	10.4	0.31	3.78	0.98	
630	1.67	130	35	2.07	2.625	13.79	1.13	0.81	15.6	11.2	0.31	4.02	0.98	
570	1.67	120	75	1.89	1.925	14.40	1.19	0.86	17.2	12.4	0.31	3.69	0.77	
536	1.43	136	60	1.89	2.100	15.40	1.10	0.80	17.0	12.2	0.31	4.18	0.88	
平均比例							1.46	1.04						
最大比例							2.48	1.71						
最小比例							0.95	0.67						

注: 1. 河床全部为粉细沙, $d=0.15 \text{ mm}$; $v_1 = \left(1 + 4.8 \frac{L_D}{B}\right) U_0^{[1]}$ 。

2. 冲刷后单宽流量增加系数 $K_q=1$, 指数 $m=1/6$ 。

由表2可知,当 $K_f=1$ (清水冲刷)时,计算冲深/实际冲深的平均比例为1.46,最大比例为2.48,最小比例为0.95;当 $K_f=1.4$ 时,计算冲深/实际冲深的平均比例为1.04,最大比例为1.71,最小比例为0.67,两者的相关系数均为0.83,说明高度相关,且离散性较小。

这说明:1)按清水冲刷计算的冲深总体比实际冲深偏大40%, $K_f=1.4$ 时的计算冲深比实际冲深略大,较为吻合,其原因分析:①清

水冲刷不考虑泥沙补充,而实际冲刷时有泥沙补充,导致实际冲刷小于清水条件下的冲刷;②计算冲深是单向恒定流长时间冲刷稳定后的数据,而实际冲刷的持续时间相对较短,也导致实际冲刷小于计算冲深。2)本研究公式离散性较小。

2.2 采用淹没丁坝 Fluent 数模计算成果^[4]验证

分别对基于起动流速和基于起动切应力的半经验半理论公式进行验证,结果见表3。

表3 采用淹没丁坝 Fluent 三维水流泥沙数模计算成果^[4]验证和参数率定

计算工况	计算条件					Fluent 数模计算					基于起动流速公式				基于起动切应力公式				
	坝高 P/m	冲刷 前水 深 h_1/m	坝头 纵坡 系数 M	坝长 L/m	坝头纵 坡脚处 $0.6h$ 流 速/ $(m \cdot s^{-1})$	冲刷前坝 头附近流 速 $v_1/$ $(m \cdot s^{-1})$	冲刷前 行进流 速/ $(m \cdot s^{-1})$	冲刷 后流 量/冲 刷前 流量	冲刷 深度 $h_{s数}/m$	$h_{s计}/$ $h_{s数}$	冲刷 深度 h_s/m	允许不 冲流速 $U_{c,h=1}/$ $(m \cdot s^{-1})$	流态 修正 系数 K_c	冲刷后 单宽流 量增加 系数 K_{q1}	$h_{s计}/$ $h_{s数}$	冲刷 深度 h_s/m	冲刷 前切 应力 τ'_1/ Pa	流态 修正 系数 K_c	冲刷后 单宽流 量增加 系数 K_{q1}
3-1	6	12	5	200	3.0	2.65	2.45	1.55	91.0	0.93	85	0.31	0.79	1.59	0.97	88	4.1	0.78	1.62
3-2	6	12	5	200	2.5	2.18	2.05	1.50	70.0	0.96	67	0.31	0.81	1.55	0.96	68	2.7	0.80	1.56
3-3	6	12	5	200	2.0	1.80	1.65	1.40	51.0	1.01	51	0.31	0.83	1.49	1.02	52	1.9	0.83	1.50
3-4	6	12	5	200	1.5	1.35	1.30	1.35	33.4	1.01	34	0.31	0.86	1.41	1.02	34	1.1	0.86	1.41
3-5	6	8	5	200	2.5	2.30	1.85	1.57	52.2	1.08	56	0.31	0.77	1.66	1.09	57	3.5	0.77	1.67
3-6	6	8	5	200	1.5	1.45	1.15	1.56	29.6	0.99	29	0.31	0.83	1.50	1.00	30	1.4	0.82	1.50
3-7	6	12	3	200	2.5	2.18	2.05	1.63	76.8	0.92	70	0.31	0.79	1.60	0.92	71	2.7	0.79	1.61
3-8	3	15	5	200	2.5	2.39	2.35	1.39	88.8	0.94	84	0.31	0.83	1.50	0.95	84	3.1	0.82	1.50
3-9	9	12	5	200	2.5	2.30	1.85	1.64	82.2	0.93	77	0.31	0.78	1.63	0.94	77	3.1	0.78	1.63
3-10	6	12	5	400	2.5	2.20	2.05	1.53	72.0	0.95	69	0.31	0.80	1.57	0.96	69	2.8	0.80	1.57
3-11	0	12	5	400	2.5	2.05	2.05	1.42	61.0	0.90	55	0.31	0.85	1.43	0.91	55	2.4	0.85	1.44
3-12	6	12	5	200	2.5	2.30	2.05	1.28	10.0	1.08	11	0.96	0.92	1.23	1.08	11	3.1	0.92	1.23
平均比例										0.98				0.98					
最大比例										1.08				1.09					
最小比例										0.90				0.91					

注:1. 工况3-1~3-11为粉细沙, $d_{50}=0.15\text{ mm}$,工况3-12为粉质黏土, $U_{c,h=1}=0.96\text{ m/s}$;

2. 不冲流速修正系数 $K_f=1$,冲刷后整体来流单宽流量增加系数 $K_{q2}=1$,指数 $m=1/6$ 。

根据表3可知:1)2套公式冲刷深度的结果与 Fluent 数模基本一致:冲刷深度平均偏差为2%,最大偏差不超过10%,相关系数为0.99;2)2套公式冲刷深度的相关数据与 Fluent 数模基本一致:冲刷后允许不冲流速与 Fluent 计算的冲刷后垂线平均流速基本一致,冲刷前切应力基本一致, K_{q1} 与 Fluent 数模计算的冲刷后流量/冲刷前流量基本

一致。

2.3 公式评价

本次研究提出的2套公式是基于河流动力学基础理论推导出来的,计算结果与非淹没丁坝冲刷实例验证较好。在清水冲刷条件下,2套公式的冲刷深度计算结果及相应的关联数据与 Fluent 三维水流泥沙数模^[4]计算验证良好,说明用于研究

清水冲刷问题是合理可行的。在考虑实际冲刷与单向恒定流清水冲刷在有效作用时间、来沙方面的差异, 采用不冲流速修正系数 K_f 修正后可适用于实际冲刷的计算。

2.4 适用条件和范围

1) 床面土质: 均质的砂性土、粉土、黏性土。

2) 水域、冲刷部位、水流性质及冲刷类别见表1, 对于其他情况可参照使用。适用于无余排和有余排情况。需要说明的是, 本文限于资料缺乏, 没有给出顺坝及护岸的冲刷资料验证, 尽管如此, 由于该公式是基于河流动力学基础理论(起动流速和起动切应力)推导得到的, 从冲刷计算原理看, 该公式同样适用于顺坝及护岸冲刷深度计算。

3) 水流参数标准: 采用整治工程实施后遭遇设计水文条件下的冲刷前水深和流速参数, 式(8)流速参数为垂线平均流速(不采用工程实施前的行进流速换算成坝头流速的方法), 式(27)、(29)流速参数为摩阻流速或床面切应力。

3 结语

1) 依托长江南京以下12.5 m深水航道治理一期工程的专题研究, 在研究探讨冲刷规律、主要影响因素和冲刷机理的基础上, 以单向恒定流清水条件下冲刷后流速、切应力接近于起动流速、起动切应力为原则, 建立冲刷深度计算公式, 再采用系数对实际冲刷条件与单向恒定流的差异进行修正, 分别推导得到了基于起动流速、起动切应力的冲刷深度半经验半理论公式。

2) 采用黄河下游柳园口非淹没丁坝40例实测冲刷数据对基于起动流速冲刷公式及参数进行了验证, 结果表明, 按清水冲刷计算($K_f = 1.0$)的冲深总体比实际冲深偏大40%, $K_f = 1.4$ 时的计算冲深总体比实际冲深略大, 较为吻合, 计算

冲深和实测冲深的相关系数为0.83, 说明高度相关, 且离散性较小。

3) 采用淹没丁坝Fluent数模计算冲刷数据对2套冲刷公式及参数进行了验证, 结果表明, 在清水冲刷条件下, 2套公式的冲刷深度计算结果及相应的关联数据与Fluent三维水流泥沙数模^[4]计算验证良好, 最大偏差不超过10%, 相关系数为0.99。

4) 2套公式适用条件: 均质的砂性土、粉土、黏性土, 丁坝及淹没丁坝, 无余排和有余排情况的冲刷深度计算。从冲刷计算原理看, 同样适用于顺坝及护岸冲刷深度计算。

参考文献:

- [1] GB 50286—2013 堤防工程设计规范[S].
- [2] Lim Siow-Yong. Equilibrium clear-water scour around an abutment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(3): 237-243.
- [3] Zhang Baishan, Ma Jiye, Wei Zhilin. Local scour depth around spurs in the lower Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2002(3): 244-249.
- [4] 熊志强, 马兴华. 潮汐河段护底软体排外冲刷数值模拟研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2014.
- [5] 周海, 马兴华. 潮汐河段护底软体排结构稳定性及余排计算研究[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2014.
- [6] 呼和熬德. 丁坝及分流口潜堤概化模型三维涡系及平面流场实验研究[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1998.
- [7] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(12): 1-9.
- [8] 杨美卿. 淤泥的起动公式[J]. 水动力学研究与进展, 1996(2): 58-64.