

复杂边界条件下桥墩冲刷的试验研究

赵嘉恒, 张耀哲, 李敏

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 本文阐述了弯道中的流速分布, 进而求得了弯道中的一般冲刷, 通过对弯道中的斜交桥水流偏转角以及过水断面宽度的求解, 初步求得了河湾中斜交桥的一般冲刷的计算结果, 并且通过折减系数将一般冲刷与局部冲刷联系起来, 推得了在只有表面流速与水位情况下的弯道中斜交桥的冲刷深度计算公式, 结合延河水工模型实验资料, 验证了冲刷的折减系数, 计算结果与实际吻合较好。

关键词: 弯道; 斜交桥; 桥墩; 冲刷深度

中图分类号: TV149

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2013)01-0014-06

铁路或公路建设中线路在河谷中穿行, 由于线路平、竖曲线参数的限制, 使得桥梁墩台轴线常常以斜交形式穿越不同曲率不同河床比降的河流弯道, 与常规的正交顺直河流相比, 该类桥梁墩台所处的河床水流边界条件为各种副流相互影响的复杂系统, 桥墩冲刷等相关水力设计参数的分析有诸多不确定性, 给工程设计带来许多困难。对于复杂边界条件下桥梁墩台的冲刷问题, 已有的研究成果有: 田伟平等^[1]对弯道环流与沿河路基冲刷进行的试验研究, 建立了沿河湾凹岸路基的最大冲刷深度计算公式; 李付军等^[2]推导出圆柱形墩斜交桥桥下水流流向偏转角度的计算公式。季日臣等^[3]通过水工模型试验, 对于采用圆形桥墩、河槽没有路堤压缩的河段进行了模拟, 分析了斜交桥的最大壅水值随斜交角度、跨度、墩径、宽深比的变化趋势, 揭示了斜交桥壅水值变化的内在规律, 并对斜交桥的壅水计算进行了理论探讨, 给出桥前壅水的计算公式; 杨帆^[4]针对特定河湾下不同角度的斜交桥运用数值模拟的方法对河湾中斜交桥下的水流流场进行了模拟, 揭示了河湾对斜交桥下的水流偏转角的影响的规律。这方面尽管取得了不少成果, 但是这些理论以及试验研究都是基于某一方面的边界条件作为研究对象来研究的, 而弯道与斜交桥同时存在的却少有涉及, 因此弯道中斜交桥的桥墩冲刷问题仍未很好解决, 本项研究主要以缓变弯道中的斜交桥的桥墩冲刷为研究对象, 通过概化模式的理论分析和比尺模型的试验观测为手段开展工作, 力求得到一个比较可靠的弯道中斜交桥的冲刷深度计算公式。

1 弯道水流的一般冲刷规律

弯曲型河道的挟沙水流运动有其自身的特点, 由于弯道的存在致使水流发生弯曲, 表层较清的水流向凹岸, 造成凹岸冲刷; 从凹岸向下转向凸岸的底层流携带大量泥沙, 导致凸岸淤积。这种作用致使主流不断向下游凹岸偏移, 成为引起河道演变的一个重要因素^[5]。而现有的关于弯道垂线流速分布的公式有至少 15 种之多, 李志威等^[6]通过弯道水槽及模型资料的对比验证得出张洪武公式的精度和可靠性为最高, 张红武等^[7]分析弯道环流的横向流速分布得到横向流速分布的指数通用公式, 并假定纵向流速分布为以下形式: $\frac{u}{U} = \frac{8}{7}\zeta^{1/7}$, 其中 u 表示纵向流速; U 是垂线平均流速; $\zeta = h/h_0$, h 为自河床到计算

收稿日期: 2012-04-21

作者简介: 赵嘉恒 (1987-) 男, 河南获嘉人, 硕士研究生, 主要从事河流动力学方面研究。E-mail: zhaojiaheng728@126.com

通讯作者: 张耀哲。E-mail: zhangyaozhe28@tom.com

位置处水深, h_0 为此位置处的总水深。

而关于弯道水流的一般冲刷 Langbein 和 Leopold^[8] 提出正弦派生曲线的理论, 推得的一般冲刷后对应的水深表达式为

$$h_y = \lambda \frac{Q}{V} \left(1 + \frac{z}{R_{co}} \cos \frac{2\pi x}{L} \right)^{c_1 \tan \varepsilon} \quad (1)$$

式中 x 为沿河流中心线的距离; L 为一个波长的弯道长度; z 以弯道中心线为起点, 沿 R 向的坐标; R_{co} 是弯顶处的曲率半径; c_1 为常数, Engelund 对明渠水流进行试验得出 $c_1 = 7$, 对环形水槽中的 Couette 流动, 得出 $c_1 = 21$ ^[9], 而 ε 表示泥沙动摩擦角。 λ 为引入参数, 为一不大于 1 的正数, 根据罗索夫斯基实验资料^[10] 对比分析近似取值在 0.75 ~ 0.80 之间。

而已有的河湾冲刷实验表明^[11-13], 弯道段河流从弯顶开始, 河床冲刷急剧增大, 其中河湾中心角在 40°、60°、90° 三种情况, 其最大冲刷深度均发生在河湾出口断面附近, 而 120° 时, 最大冲刷深度发生在与进口断面成 90° 的位置, 于是可以将正弦派生曲线的理论进一步的修改, 在中心角不大于 90° 时, 用出口位置代替弯顶位置, 将弯道近似看作以出口断面为中心线的对称弯道, 运用正弦派生曲线的理论求其水深, 而如果中心角大于 90° 时, 都看作中心角为 180° 情况进行计算, 这种算法更加合理且更贴近实际资料。

2 顺直河流斜交桥冲刷的一般规律

通常将河流的天然冲刷和桥渡压缩冲刷统称为桥渡的一般冲刷, 已经有众多专家学者针对一般冲刷提出了不同的计算公式, 针对不同的河流地质情况, 铁路工程水文勘测设计规范(TB10017-99) 中的 64-1 式^[14] 计算值更为贴近实际资料, 而由于桥墩的阻碍作用, 水流绕桥墩对墩周围产生的马蹄形冲坑成为桥墩的局部冲刷, 在此, 运用桩墩冲刷 65-1 修订后公式^[14] 求解其桥墩周围局部冲刷。

对于斜交桥, 根据李付军等^[2] 的理论分析, 定义水流发生偏转后的合速度与圆周向速度的夹角为 β , α 为斜交角, 其二者的关系有

$$\tan \beta = f \frac{1 - 2C^2}{1 + 2C^2} \tan \alpha \quad (2)$$

其中 C 为挤压比, 表达式为 $C = 2r_0/K$, 压缩比为 $M = (L - 2r_0)/K$, 则 $C + M = 1$, $f = f_r/f_\theta$, 在此取值为 1, 其中 r_0 为桥墩半径, K 为两桥墩之间的距离。

3 弯道中斜交桥的冲刷机理及概化计算模式

由于弯道和斜交桥的共同作用, 其冲淤效果互相影响, 因而弯道中的斜交桥的冲刷必将是更为复杂的一个冲刷系统, 定义 h_{qd} 为斜交桥桥墩发生局部冲刷后的对应水深, 进一步分析该复杂边界条件的冲刷机理, 由于当弯道中心角趋于零时, 该复杂系统为顺直斜交桥, 而当弯道曲率半径无限大时, 也可以近似看作顺直河流中的斜交桥处理, 当桥墩轴线与河岸夹角趋于零时, 该复杂系统概化为普通河流的弯道局部冲刷问题, 将其互相影响的影响系数假设出来可以概化得到桥墩处的水深与弯道一般冲刷及桥渡局部冲刷的关系式

$$h_{qd} = \mu h_y + \eta h_b \quad (3)$$

定义 h_{qz} 为弯道中斜交桥两桥墩之间的一般冲刷的水深, 其表达式可以写成

$$h_{qz} = \mu h_{zy} \quad (4)$$

其中 h_y 为弯道计算一般冲刷后的水深; h_b 为桥墩顺直河流中的计算局部冲刷深度; h_{zy} 为桥墩之间在顺直河流中的计算一般冲刷深度; μ 为一般冲刷影响因子; η 为局部冲刷影响因子; 由此得到弯道中桥墩周围冲刷的计算值。

由于弯道中桥墩的局部冲刷与一般冲刷的关系由弯道半径 R , 中心角 θ 与斜交角 α 有关, 其中斜交角为斜交桥轴线的法线与来流方向的斜交角度, 可以认为 $\mu = f_1(R, \theta, \alpha)$, $\eta = f_2(R, \theta, \alpha)$ 。结合试验

观测和所能收集到的资料^[15], μ, η 在给定曲率半径时与圆心角的关系密切, 进一步对文献 [15] 的中心角为 70° 的河湾中正交桥梁冲刷资料进行分析, 可以近似得到影响因子的表达式

$$\mu = 1 + \frac{\cos\alpha\sin\theta}{1.43} \quad \eta = 1 - \frac{\cos\alpha\sin\theta}{1.86} \quad (5)$$

计算过程如表 1。

表 1 冲深计算表
Table 1 Calculation of erosion depth

单位: m
unit: m

墩号	6	7	8	9	10	11	12
一般冲刷后水深	5.00	5.00	5.00	6.00	7.00	7.00	7.65
局部冲刷深度计算值	12.10	12.10	12.10	14.98	17.18	17.18	17.63
计算所得冲刷水深	14.27	14.27	14.27	17.36	20.10	20.10	21.40
实测冲刷后水深	14.30	14.30	14.30	17.10	19.90	19.90	20.55

则弯道中的斜交桥的局部冲刷对应的水深的表达式可以表示为

$$h_{qd} = \lambda \frac{Q}{V} \left(1 + \frac{\cos\alpha\sin\theta}{1.43} \right) \left(1 + \frac{z}{R_{co}} \cos \frac{2\pi x}{L} \right)^{e_1 \tan \alpha} + \left(1 - \frac{\cos\alpha\sin\theta}{1.86} \right) h_b \quad (6)$$

各个参数意义与之前所述一样, 顺直河流中桥墩局部冲刷深度 h_b 按照规范 65-1 表达式计算, 其中计算过程中涉及的一般冲刷的深度皆按式 (1) 求解。而桥墩中间一般冲刷对应的计算水深可以表示为

$$h_{qz} = \left(1 + \frac{\cos\alpha\sin\theta}{1.43} \right) h_{zy} \quad (7)$$

式中各个参数按照规范中桥渡一般冲刷计算 64-1 式取值, 而其中的 D 为桥孔净跨, 其计算方法与顺直河道中的斜交桥还有很大的不同。利用平均流速的概念简化计算过程来求解斜交桥下过水断面的宽度, 根据张红武的流速公式取径向平均流速为 0。弯道中水流流向的平面几何关系如图 1 所示, 将与斜交桥平行且过弯道的曲率半径的圆心直线作为 x 轴, 以圆周圆心为原点做坐标系, 入弯位置用其与凸岸交点过圆心的连线和 x 轴的夹角 γ 与斜交桥所在弦的圆心距 d 表示, 其中 $d = r_i \sin\gamma$ β 为水流的斜交角, β 为水流受桥墩扰动影响以后的偏转角, r_a 为凹岸曲率半径, r_i 为凸岸曲率半径。则水流与斜交桥的交角 α 可表示为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{r_i}{r} \sin\gamma\right) \quad (8)$$

于是得到 α 为未受桥墩扰动作用的来流的流速方向。根据式 (2) 可以得到水流受桥墩扰动影响以后的 β 的余弦。

$$\cos\beta = \cos\arctan\left\{ f \frac{1 - 2C^2}{1 + 2C^2} \tan\left[\arcsin\left(\frac{r_i}{r} \sin\gamma\right) \right] \right\} \quad (9)$$

而桥墩中间的水流的过水宽度为

$$D = b \cos\beta_1 + \sum_{n=2}^{N-1} [B \cos\beta_n - 2r_0] + b_N \cos\beta_N - 2r_0 \quad (10)$$

其中 n 为位于河湾中的桥墩从凸岸到凹岸的桥墩的编号, b 为河湾中第一个桥墩中心距斜交桥与河岸的交点的距离, b_N 为河湾中第 N 个桥墩中心距斜交桥与河岸的交点的距离; 两桥墩的跨度表示为 B , 桥墩半径为 r_0 。

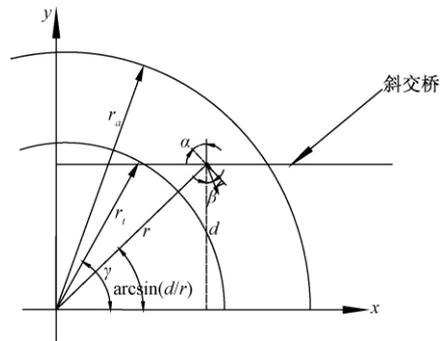


图 1 斜交桥与弯道中心的相对位置

Fig. 1 Relative position of skew bridge and bend

4 模型设计及试验结果分析

运用包西铁路桥延河庙沟段河道裁弯取直模型试验的实测资料,对提出的概化计算方法进行验证。此河段河床系黄土夹砂卵石组成,原型平均粒径为 11mm,铁路桥桩基础为嵌岩桩,左、右岸堤防基础也均坐落于基岩上,桥址处基岩高程按 916.00m 模拟。50 年一遇流量为 $5\,571\text{m}^3/\text{s}$, 20 年一遇流量为 $4\,057\text{m}^3/\text{s}$, 10 年一遇流量为 $2\,998\text{m}^3/\text{s}$, 包西铁路桥设计选用的 200 年一遇洪水流量为 $8\,600\text{m}^3/\text{s}$ 。河湾中心角为 37.65° , 中心线半径为 524.65m, 由于弯道中斜交桥每一部分与弯道的斜交角都不相同, 进而利用斜交桥与弯道相交段的中点处的斜交角作为斜交桥的斜交角, 此模型弯道中斜交桥的斜交角为 54.063° , 在斜交桥与弯道相交的部分, 布置 7 个观测断面以用来观察弯道与斜交桥共同作用下的水流流速与水位, 并在斜交桥周围布置观测点观测桥墩上游来流流速, 如图 2 所示。由于该工程是河道裁弯取直工程, 铁路桥梁位置已经固定, 且不能改动, 试验段采用了有机玻璃控制河床宽度, 控制河段水面平均宽度 150m, 以相应的河段平均比降 $J = 0.0027$, 河床糙率 $n = 0.029$, 经计算其对应的各个工况下的水流弗汝德数均小于 1, 均为缓流, 为满足铁路桥墩台基础等相关跨河建筑物有足够的几何尺度, 本次模型试验要求的模型几何比尺为 1:80。

根据庙沟实验数据, 弯道中心角为 37.65° , 将其近似看做一个以弯道出口为弯顶的对称圆弧, 中心角为 75.3° 对其进行求解。一个波长的弯道长度 $L = 1\,386.36\text{m}$ 结合 J. S. Bridge 实验所得数据^[16] 以及 Engelund 的实验^[17], 采用 $\varepsilon = 21.8^\circ$, $\rho_1 = 7$ 时数据与实测资料拟合情况良好。由于试验中 50 年及以上洪水会发生洪水漫滩现象, 其水流不再集中于模型主河道, 因而选择较小的两次洪水进行数据分析。根据已知几何参数数据和测得的流速与水位高程数据, 运用式 (1) 可以求得河湾各处水深, 于是可以得到断面与斜交桥相交处的水深数据。

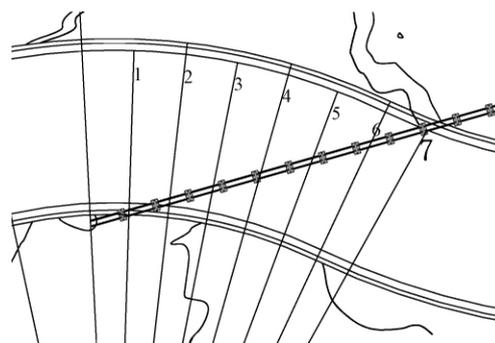


图 2 模型断面布置图

Fig. 2 Model section layout

表 2 各个断面与斜交桥相交处的对应水深
Tabel 2 Water depth at crossings of skew bridge and bend

单位: m
unit: m

流量 / (m^3/s)	各断面编号的冲刷水深						
	1	2	3	4	5	6	7
2 998	4.08	4.23	4.44	4.93	5.64	6.88	8.22
4 057	4.81	5.12	5.47	6.18	7.29	9.16	11.38

由表 2, 以斜交桥与弯道相交处为坐标原点, 通过插值可得到桥梁每一处对应的弯道的一般冲刷后水深值, 并将斜交桥下每一处对应的水深称之为此处的位置水深。根据桥址处的几何关系, 将参数代入式 (10) 得到桥墩中间的桥孔净宽: $D = 128.15\text{m}$, 将弯道一般冲刷后的计算水深作为桥墩中间一般冲刷前的初始水深, 运用式 64-1 来求桥墩之间的一般冲刷的深度对应的水深, 其中参数取单宽流量集中系数 $A = 1.8$, 平均粒径为 $d_0 = 11\text{mm}$, 桥孔净长 $D = 128.15\text{m}$, 由之前求得的位置水深, 根据正弦派生曲线的理论反推过水断面中心线位置水深, 进而求得平均水深。于是就可以得到桥墩中间一般冲刷后的水深 h_p , 乘以一般冲刷的折减系数 μ , 按式 (5) 计算 $\mu = 1.25$, 根据实验测得的对应水位值, 减去水深可得到一般冲刷后的床面高程, 以水面以下水深代表冲刷深度, 求得冲刷深度如表 3 所示。

表3 桥墩之间一般冲刷深度
Tabel 3 General erosion depth between piers

单位: m
unit: m

流量/(m ³ /s)	墩中间各编号对应的冲刷水深							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2 998 实测	6.76	6.95	6.95	7.65	8.53	9.33	10.49	12.19
2 998 计算	6.49	6.67	7.05	7.63	8.38	9.27	10.31	11.45
4 057 实测	8.04	8.28	8.75	9.59	10.36	11.47	12.84	基岩
4 057 计算	7.77	8.00	8.46	9.16	10.05	11.13	12.37	13.73

表中基岩代表冲刷达到基岩,其它数据与实测冲刷资料拟合良好。

对于局部冲刷的求解由于在10年一遇的洪水条件下,水面高度刚好在承台底面以下,按照桩群的局部冲刷来计算,利用65-1修订后公式求得各个桥墩处的局部冲刷深度,墩形系数按照文献[14]来取。由于在20年以上的洪水条件下,水面高度已经漫过承台底面,承台底面相对高度在 $0 \leq h_c/h \leq 1$ 如图3所示,属于混合型局部冲刷不仅包括桩群的冲刷还有实体桥墩(墩与承台)的冲刷,按规范中针对这一桥墩的墩形系数表取值得到其冲刷深度。

桥址前的一般冲刷后的水深按表1插值得到并且乘以折减系数1.25,而桥墩的局部冲刷计算值乘以局部冲刷折减系数计算取值0.81,利用插值法得到其墩前对应的水位高程(忽略冲高),进而得到局部冲刷深度。

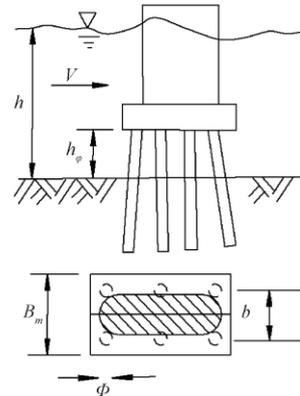


图3 桩群桥墩模型示意
Fig. 3 Pile group type pier

表4 桥墩局部冲刷深度
Table 4 Erosion depth of local scour

单位: m
unit: m

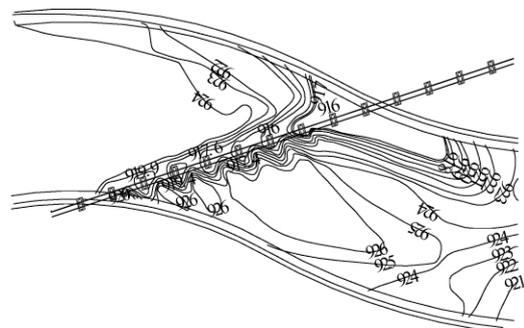
不同的流量工况/(m ³ /s)	不同编号桥墩对应的冲刷后地形								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 998 实际	9.41	9.60	9.70	10.80	11.30	11.65	基岩	基岩	基岩
2 998 计算	9.32	9.47	9.86	10.28	11.08	11.53	12.44	13.25	14.12
4 057 实际	10.47	10.52	10.95	12.54	12.64	基岩	基岩	基岩	基岩
4 057 计算	10.81	11.25	11.61	12.20	12.95	13.88	14.96	16.32	18.03

其局部冲刷的计算值与理论值也是相差不大的,求得的概化计算模式所得理论计算冲深和实际拟合比较良好,其计算结果对于桥墩安全的预测计算提供了一定的理论支持。

由于水流流过斜交桥以后过水断面宽度增大而流速减小,从而泥沙发生沉降,在桥墩下游产生淤积,而在凹岸,弯道的冲刷作用明显,冲坑朝着下游方向延伸一段距离,于是产生如图4所示的冲刷地形。

5 结语

通过开展弯道中斜交桥冲刷的概化模型试验,初步阐述了弯道中的水流流速分布,运用正弦派生曲线的理论求得河湾中没有斜交桥存在时的一般冲刷水流深度,并用规范中的一般冲刷与局部冲刷公式求得桥下的一般冲刷与局部冲刷,通过一般冲刷折减系数与局部冲刷折减系数将弯道中一般冲刷与局部冲刷对应的水深关系给出了初步拟合公式,揭示了在弯道中影响一般冲刷与局部冲刷的互相影响程度的因子,弯道中心角和斜交桥斜交角,并给予了



实际试验的验证,拟合结果较为满意。但是由于实际工程中边界条件的复杂性以及此方面理论研究的匮乏,想要真正从理论上解释其互相的影响很困难,且如果要透彻研究要弯道中的斜交桥的冲刷规律也需要大量的试验提供支持,由于试验条件的限制,本文并没有系统地进行边界条件逐渐变化的对比试验,所以有关折减系数的准确性并没有得到很严谨的验证。

参考文献:

- [1] 田伟平,李惠萍,高冬光. 弯道环流与沿河路基冲刷试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(3): 94-97.
- [2] 李付军,张佰战,林桂宾. 斜交桥下水流流向偏转角度的理论分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 634-637.
- [3] 季日臣,刘志强,张多平. 山区斜交桥渡水流特性的分析[J]. 甘肃科学学报, 1999, 11(4): 31-34.
- [4] 杨帆. 河湾处斜交桥下水流流场研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- [5] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [6] 李志威,方春明,邵佳. 弯道环流流速公式的验证与比较[J]. 泥沙研究, 2011(5): 73-80.
- [7] 张红武,吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
- [8] Langbein, W. B., L. B. Leopold. River meanders-theory of minimum variance[J], U. S. Geological Survey Prof. Paper, 1966, No. 422-H: 15.
- [9] Engelund, F.. Experiments in curved alluvial channel[J]. Hydrodyn. and Hydraulic Engrg., 1974, 34: 31-36.
- [10] 罗索夫斯基(尹学良译). 弯道水流的研究[J]. 泥沙研究, 1958, 3(1): 83-95.
- [11] Noh, M. A., Townsend, R. D.. Shear-stress distribution in stable channel bends [J]. J. Hydr. Div., ASCE, 1979, 105(10): 1233-1245.
- [12] 山区公路路基排水和水毁防治技术课题组. 弯道水流特性和河床冲刷的研究[R]. 西安:西安公路交通大学,陕西省公路局, 1995.
- [13] 曾庆华. 关于弯道的底沙运动问题[J]. 泥沙研究, 1982(3): 59-65.
- [14] 铁道部第三勘测设计院. 铁路工程水文勘测设计规范(TB10017-99) [S]. 北京:中国铁道出版社, 1999.
- [15] 许政,梁斌. 杭州市九堡大桥桥墩局部冲刷试验研究[J]. 浙江水利科技, 2010(4): 13-17.
- [16] Bridge, J. S.. Flow, bed topography, grain size and sedimentary structure in open channel bends: A three-dimensional model [J]. Earth Surface Processes, 1977(2): 401-416.
- [17] Engelund, F.. Flow and bed topography in channel bends[J]. J. Hydr. Div., ASCE, 1974, 100: 1631-1648.

Experimental study of piers scour in complex boundary condition

ZHAO Jia-heng, ZHANG Yao-zhe, LI Min

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This paper aims to study the skew bridge in a bend river, describes the velocity distribution in the bend, and gets the general erosion in the bend. Then the preliminary computational results of general erosion by solving deflection angle of the flow and the width of the river are obtained. General erosion and local scour are connected by using the reduction coefficient and a calculation formula is acquired when the surface flow velocity and water level are the only parameters to be used. Using the data of Yanhe River experiment the scour reduction coefficient is verified. The results are in good agreement with field data.

Key words: corners; skew bridge; bridge pier; scour depth