

铁道部科学研究院

论文集

铁道桥梁及隧道专辑

3
1980

目 录

弯曲水流桥渡冲刷特点及计算方法.....	(1)
低频大位移测震仪研制中的若干问题.....	(21)
15M _n VN钢在铁路桥梁上的应用.....	(35)
岩体声波探测技术在铁路工程中的应用.....	(44)
论爆破技术在铁道露天土石方施工中的作用.....	(59)
矾土水泥混凝土性能与应用的研究.....	(67)
青藏铁路察尔汗盐湖及超盐渍土区段建筑材料防蚀研究.....	(90)
硫铝酸盐早强水泥负温下硬化性能的研究	(113)
青藏高原多年冻土地区桥梁灌注混凝土的研究	(129)
桥墩局部冲刷墩形系数	(140)

弯曲水流桥渡冲刷特点及计算方法

铁道部科学研究院铁建所 阙 泽 康 纂 材

文中所用主要符号表

- B ——弯曲水流的宽度；
 R ——弯曲水流中心线的弯曲半径；
 R_o ——弯曲水流凹岸线的弯曲半径；
 R_i ——弯曲水流凸岸线的弯曲半径；
 R_b ——桥墩所在位置的弯曲半径；
 θ ——弯曲水流的中心角；
 $\angle\theta$ ——弯曲水流中任一横断面到进口断面的角度；
 m ——弯曲水流凹岸边坡系数；
 b ——桥墩宽度；
 d_s ——泥沙平均粒径；
 Q ——流量；
 H_m (或 h_m)——弯曲水流上游直段横断面平均水深；
 h_p ——上游直段冲刷深度 (自原始的平均床面算起)；
 H_p ——上游直段冲刷后水深 (自水面算起)；
 H'_{pc} ——弯曲水流凹岸深槽水深；
 h_{pc} ——弯曲水流凹岸深槽最大冲刷深度；
 h'_{pc} ——弯曲水流凹岸深槽处自原始 (平均) 床面向下冲刷的深度；
 H_{pc} ——弯曲水流凹岸深槽最大冲刷水深；
 h_b (或 h_b)——顺直水流中桥墩周围局部冲刷平衡深度；
 h'_{bc} ——弯曲水流深槽中桥墩周围局部冲刷深度；
 h_{bc} ——弯曲水流深槽中桥墩周围局部冲刷平衡深度；
 h_c ——弯曲水流深槽墩周最大总冲刷深度；
 H_c ——弯曲水流深槽墩周最大总冲刷水深；
 H_v ——水位；
 ψ ——弯曲水流中桥墩总冲刷深度折减系数；
 ψ_h ——弯曲水流凹岸深槽最大水深的水深系数；
 $\Delta\psi_h$ ——弯曲水流凹岸深槽纵断面水深折减系数；
 V_m ——弯曲水流上游直段断面平均流速；
 V_o ——顺直水流中河床泥沙起动流速；
 V ——垂线平均流速；
 V'_{co} ——弯曲水流中墩周局部冲刷起冲流速；

- V_0' ——顺直水流中墩周局部冲刷起冲流速;
 Z_c ——弯曲水流凹岸深槽最大水深断面桥墩周围最低河床标高;
 Z'_c ——弯曲水流不同位置上可能出现的墩周最低河床标高;
 Z_m ——原始平均床面标高;
 K_1 ——公式(6)中的系数;
 n_1 ——公式(6)中的指数;
 t ——试验历时。

一、弯曲水流的基本特点

河湾处的水流与顺直河段水流的基本差别在于：前者在边界条件的限制下流线是弯曲的，后者则基本上是直线的。沿曲线运动的水流质点受到离心力的作用产生径向分速。使水流质点向河湾的外侧运动。离心力与曲线上质点的纵向流速——垂直径向的切线流速的二次方成正比。河道内垂线上的纵向流速，因河底的阻力作用，从自由水面向河底逐渐减小。因此河湾处自由水面上水流质点受到的离心力最大，沿垂线向河底逐渐减小；径向分速也是上大下小，具有梯度。受离心力作用的水流质点，碰到河湾凹岸壁面，升高局部水面并迫使水流质点折向河底，进而推动凹岸底部水流流向凸岸，形成断面上的横向环流。

沿河湾向下游运动的水流质点同时受到横向环流的作用，最终形成沿螺旋形迹线运动的螺旋流。

河湾内流速和压力分布的调整，水面超高、泥沙运动和河床变形都和离心力的大小、断面环流的强度及螺旋流的运动情况密切相关。

断面上除横向环流外，还有受边界影响的局部水流[1]，这二者均属于次生流[2]。

二、顺直水流桥渡冲刷计算简述

在顺直水流中，桥渡冲刷——桥渡建筑物范围内的河床下降——有三个组成部分：

(1) 河床的天然冲刷。即不修建桥渡时河床固有的冲刷变化。又可分为单向下切和周期性冲淤变化。山区或山前区正在发育成长的河段，下游控制水位下降产生溯源性冲刷河段，坝下游清水冲刷河段，皆可产生单向下切的天然冲刷。建桥时要通过调查分析及试验研究来确定冲刷可能达到的最低标高。边滩下移；洪水时河床冲刷，枯水时回淤；在若干连续的丰水年河床逐渐刷深，在连续的若干枯水年河床又逐渐回淤；自由河湾向下游发展及弯曲水流的截弯取直；或处在交替下泄清水和浑水的水库下游，皆可能产生周期性的河床冲淤变化。建桥时关心的也是可能达到的最低河底标高。不论是单向下切或周期性的冲淤变形，在断面的变化上，既有可能呈均匀的与水深成比例的冲深，更多的还是不均匀的集中冲刷。前者出现在稳定性河段，后者则是不稳定河段上断面冲刷的主要特点。

(2) 桥渡压缩水流产生的压缩冲刷。狭义的桥渡一般冲刷常指的就是这种压缩冲刷。广义来说，桥渡一般冲刷则包括河床的天然冲刷和压缩冲刷。目前我国制定的桥渡一般冲刷计算公式，由于使用的是已成桥渡的观测资料，因此计算结果除压缩冲刷外，还包括了一部份边滩下移和枯洪水冲淤变化的天然冲刷。公式的特点是能反映河流多变的不均匀的集中冲刷[18]。

(3) 桥墩周围的局部冲刷。决定顺直水流中桥墩周围局部冲刷的主要因素是：桥墩的尺寸和形状，水流的斜交角度，河床土质及水流条件。

在决定桥墩台埋深的冲刷计算中，目前通行的办法是先计算可能的最大一般冲刷，用一般冲刷后的水流条件计算桥墩周围可能的最大局部冲刷，然后将二者叠加给出桥墩台的最大冲刷深度。亦即最低冲刷标高。这种计算方法有其实用之处，但也有不尽完善和不切实际之处。

三、弯曲水流桥渡冲刷的特点

3.1. 弯曲水流河床一般冲刷

横向环流和螺旋流是弯曲水流水流结构的最主要特点。在环流的作用下，水流不断冲刷凹岸河床，冲起的泥沙随着底部水流移向偏下游的凸岸，並有一部份堆积于凸岸，逐渐形成一个斜三角形河床断面。

图1是天然弯曲水流实测河床断面。图2是试验室弯曲水流实测河床断面。图3(a)和图3(b)是试验室弯曲水流冲刷过程和冲刷平衡后的河床平面形态。

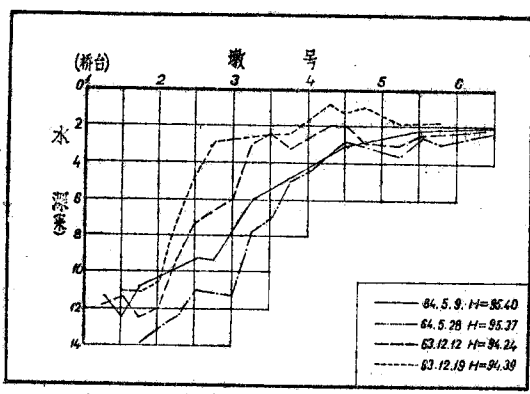


图1. 天然弯曲水流实测河床断面

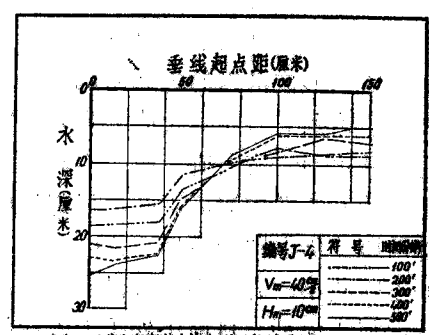
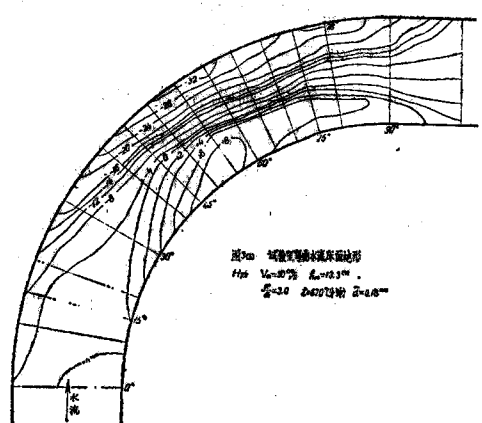
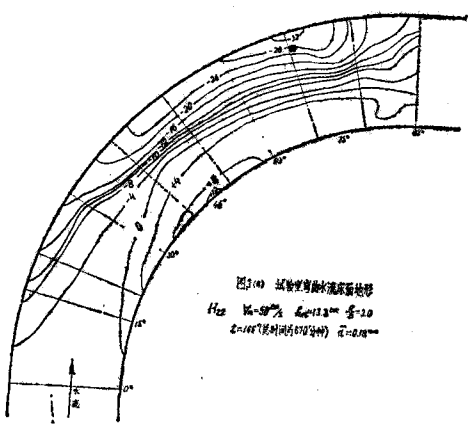


图2. 试验室弯曲水流实测河床断面 ($R/B=5$)



由这些资料可以看出：(a)弯曲水流在冲刷达到平衡时，在凹岸侧形成大面积新月形深槽，最深部位在弯顶偏下游一带。(b)在冲刷开始时，冲刷较深部位出现在凹岸下游出口附近。随着冲刷时间的持续，冲刷最深部位由出口附近逐渐上移，直到冲刷达到平衡时的最终位置和形态。前一特点已为大量的天然实测资料所证实。后一特点是通过试验得知的。

试验室的资料还表明，随着水深对河宽比值的增大，弯曲水流床面达到冲刷平衡所需要的时间愈长。另外由天然资料还得知，弯曲水流平面外形，即弯曲半径 R 及中心角 θ 和水流条件有一定关系。一般地说， R 有随流量的增加而增大之势；随着 R 增大，深槽最大水深有相对减小之势。

3.2. 弯曲水流桥墩局部冲刷

洪水通过桥渡时，在河槽中，当河床发生一般冲刷时，桥墩台周围的局部冲刷也同时发生，并不是一般冲刷完成之后才在桥墩周围发生局部冲刷。随着水位的上升，流速增大，垂线单宽流量增加，河床发生一般冲刷，桥下河床标高不断下降。达到洪峰时，水位不再上升，简单说流量和流速也不增加了（实际情况要比这复杂）。这时由于流速仍然很大，河床一般冲刷仍在进行。随着一般冲刷的进行，河床断面扩大，流速减小。当流速减小到冲止流速时一般冲刷也就不再增大了；但这时河床上的泥沙运动可能还是很剧烈的，只是河床标高不再下降了。这就是桥渡一般冲刷发生发展和停止的简单过程。在这一过程中墩台周围的局部冲刷可能有下列五种情况：(a)，随着一般冲刷的增大，墩台周围的局部冲刷也不断增大。河床标高下降所达到的最低值，是二者共同不断增大皆达到其可能最大值的最后结果。(b)，当一般冲刷达到其最大值时，墩周局部冲刷仍在不断发展增大，直到局部冲刷也达到其可能最大值而形成最终的最低河底标高。(c)，在一般冲刷尚未发展至其最大值时，墩周的局部冲刷已达到其可能最大值。此后河床标高的下降仅因一般冲刷的增大而下降，局部冲刷仍保持其已达到的最大值不变。(d)，冲刷开始时，局部冲刷较快地发展到最大值。此后随着一般冲刷的发展河床下降，局部冲刷则有所减小，但直到河床不再下降时，此一减小后的局部冲刷值仍保留到最后。(e)，和(d)种情况基本相同，只是随着一般冲刷的发展局部冲刷不断减小，直到很小或没有；此后最低床面标高的下降都是一般冲刷的作用了。究竟天然情况属于何种，目前仍处于无人探讨状态。当前的桥渡冲刷计算方法，适用于前三种情况。对后两种情况不能适应。但后两种情况，在一定的水流条件下，特别是在断面上的冲刷是极不均匀的集中冲刷时，是确实存在的了。而这种不均匀的集中冲刷既是弯曲水流的基本特点，又是游荡性和变迁性河流河床变形的基本特点，这些类型的河流在我国大量存在。因此揭示这些自然现象，探讨其变化规律，进一步找出其计算方法，是非常必要的。

图4是天然实测的桥渡一般冲刷发展对墩周局部冲刷的影响。由图4(a)、图4(b)和图4(c)可以看出，傍岸集中冲刷充分发展处桥墩周围的局部冲刷很小或没有。决定桥下河床最低点标高的主要因素是傍岸集中冲刷。由图4(e)可以看出，河中集中冲刷充分发展处，墩周的局部冲刷也很小，决定桥下河床最低标高的主要因素也是集中冲刷。由图4(a)和图4(b)还可以看出，一般冲刷较小时，墩周的局部冲刷较大，反之则局部冲刷较小。图4(c)中的8号墩，属于一般冲刷不小，局部冲刷较大的情况。但都不是最低标高点。

图5和图6是天然实测资料，图中也表明傍岸集中冲刷充分发展时，墩周局部冲刷很小的情况。

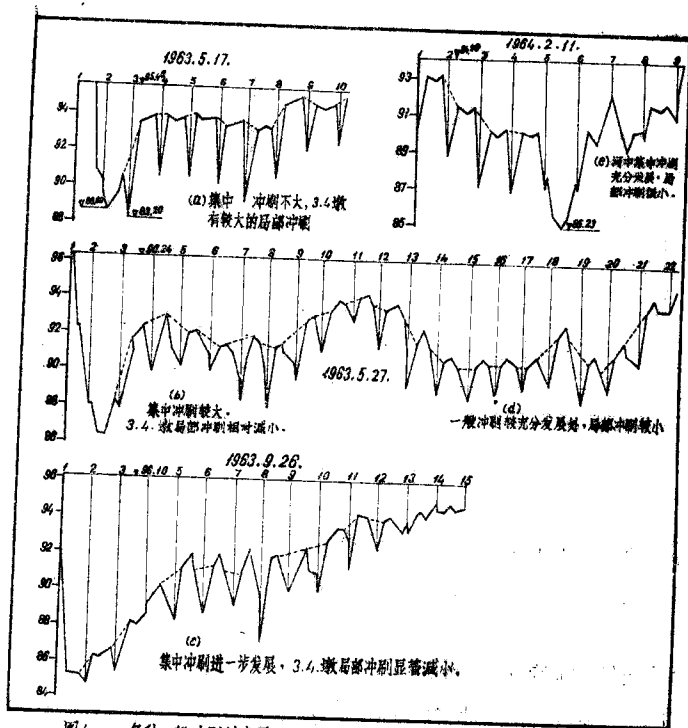


图4. 各种一般冲刷的发展, 对桥墩局部冲刷的影响(新桥)

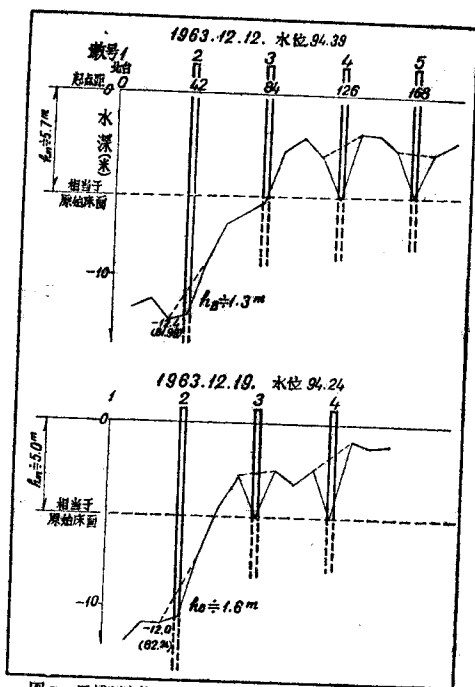


图5 天然河流集中冲刷和墩周局部冲刷的关系

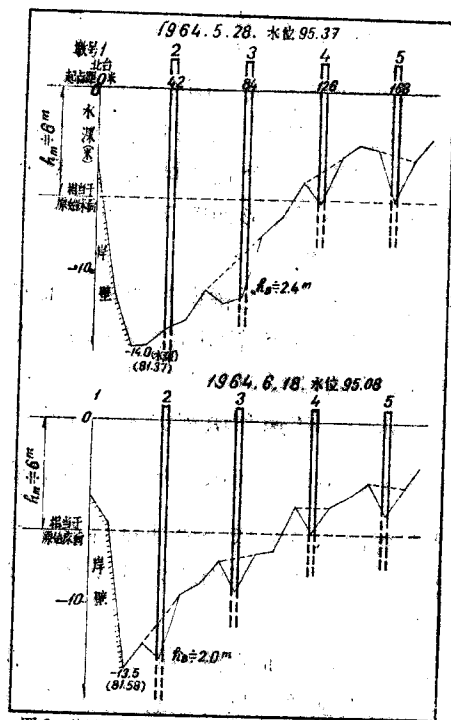
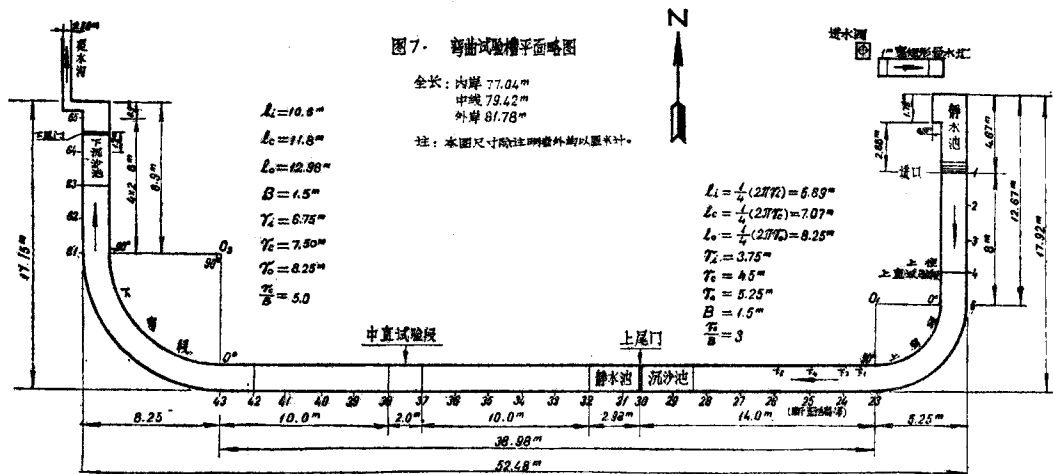


图6. 某桥历史上最严重的两次集中冲刷及墩周局部冲刷

图4、图5和图6中的傍岸集中冲刷, 皆是弯曲水流的螺旋流在弯道凹岸形成的河床局部冲刷。在这种情况下的墩周局部冲刷很小或没有。另外, 在图5和图6中的4号墩和5号



墩, 虽也有一定的局部冲刷, 但冲刷坑的最低标高都在相当于原始的平均床面之上, 这是弯曲水流凸岸处桥墩局部冲刷的特点。

3.3. 弯曲水流桥墩局部冲刷的试验研究

在 1973—1975 年, 曾结合某桥墩冲刷防护试验, 进行了弯曲水流桥墩冲刷的试验研究。矩形断面试验水槽宽 1.5 米, 由 $\frac{R}{B} = 3.0$ 和 $\frac{R}{B} = 5.0$ 的两个串连在一起的弯道组成。两个弯道的中心角皆为 90° 。为便于比较, 在第一个弯曲段的上游和两个弯曲段的中间, 布置了两个直线试验段。整个试验水槽全长约 80 米。其平面外形如图 7 所示。试验沙为平均粒径 0.18 毫米的天然沙。

试验主要内容为: 无桥墩时弯道河床变形 (一般冲刷) 试验; 桥墩在弯道不同位置上墩周局部冲刷试验; 墩周局部冲刷随时间发展过程试验; 墩周局部冲刷深度与水深、流速和墩宽关系的试验; 以及改变 $\frac{R}{B}$ 的试验。其中弯道河床变形试验的结果如图 3 所示, 并已在弯曲水流河床一般冲刷特点一节中结合天然资料作了简要说明。下面将对其它各组试验结果作一简单介绍。

(1) 桥墩在弯曲水流不同位置的冲刷特点。

图 8 是这组试验结果的汇总。图中给出五个断面——弯道进口上游 10 厘米、 30° 、 60° 、 75° 和 90° 断面; 以及每个断面上五个垂线——离凹岸壁面 25、50、75、100 和 125 厘米位置上, 桥墩局部冲刷的试验结果。由此图可见, 在弯道进口处, 墩周

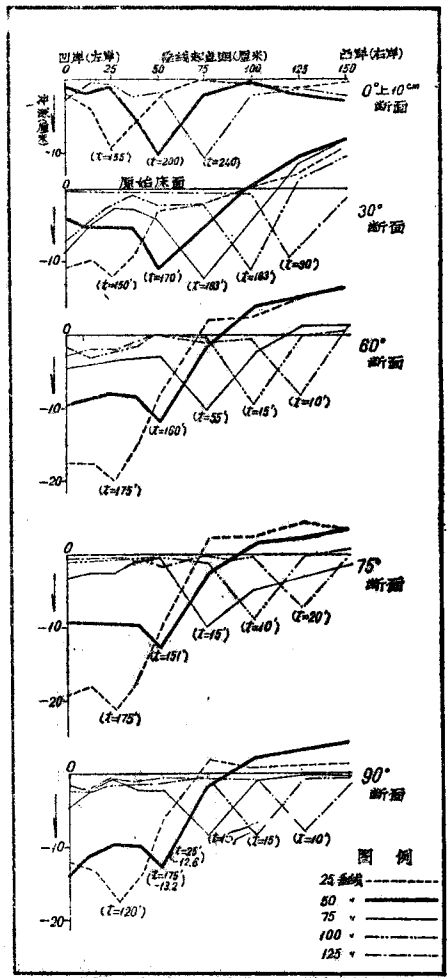


图 8. 桥墩在弯曲水流中不同位置的冲刷深度断面图 (括号内数字为达到此深度的时间, 分钟)

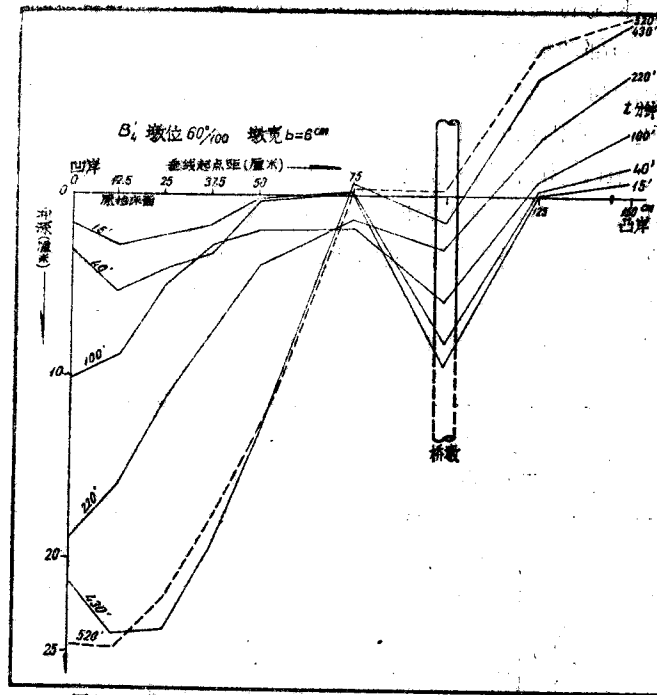


图9(a). 弯曲水流凸岸侧桥墩周围冲淤变化过程

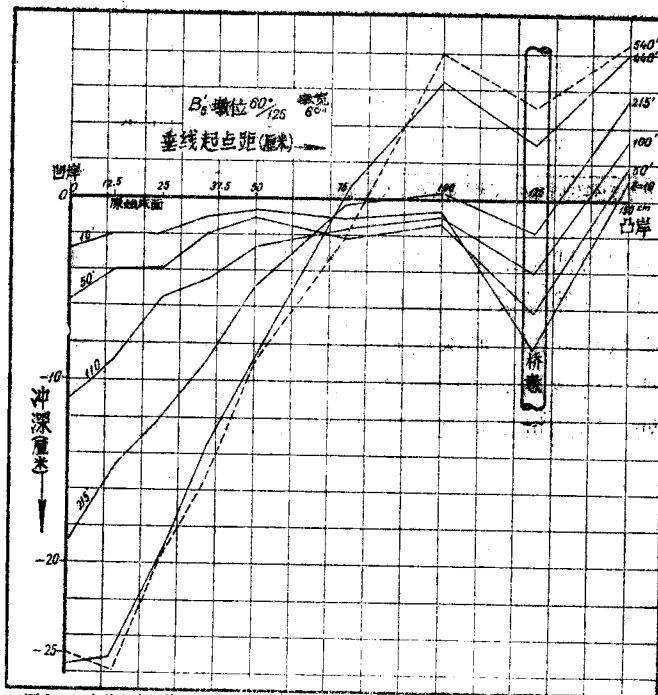


图9(b). 弯曲水流凸岸侧桥墩周围冲淤变化过程

局部冲刷完全是顺直水流的局部冲刷。 60° 和 75° 断面上的桥墩局部冲刷和天然弯曲水流中受傍岸环流控制的桥墩局部冲刷特点一样，决定最低河底标高的主要因素是环流造成的傍岸集中冲刷。 30° 断面上的特点是介于上二者之间。 90° 断面则表明，虽然在河道几何特点上已是弯道出口，但弯道环流仍很强烈，傍岸集中冲刷仍占主要地位，但其强烈成度逊于 60° 和 75° 断面的最大强度。图9为桥墩在弯道 60° 断面100和125厘米垂线（凸岸侧）的墩周局部冲刷发展过程。由图9可见，在冲刷开始时，凸岸侧墩周局部冲刷很大，但因凸岸侧的不断淤积，不仅河床面抬高，且墩周局部冲刷也迅速减小。最后虽也留有一不大的局部冲刷坑，但坑底标高已在平均床面以上。

图10 为凹岸测深槽中墩周局部冲刷的发展过程。

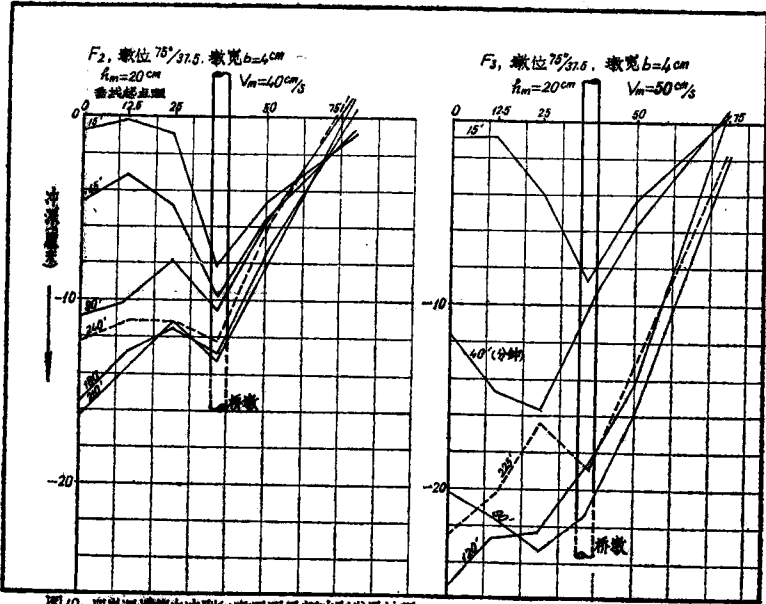


图10. 凹岸深槽中冲刷桥墩周局部冲刷发展过程

将图8、图9和图10的试验结果和图4、图5及图6的天然实测结果对照，可以看出二者极其相似，揭示了同一自然现象的规律性。

(2) 凹岸深槽中墩周局部冲刷深度和水深、流速及墩宽的关系。

虽然弯道凹岸深槽中桥墩局部冲刷的深度不大，甚至没有。但这里是全弯道中桥墩周围最低河床标高所在之处。因此仍要研究此处可能出现的墩周局部冲刷深度，以确保安全。

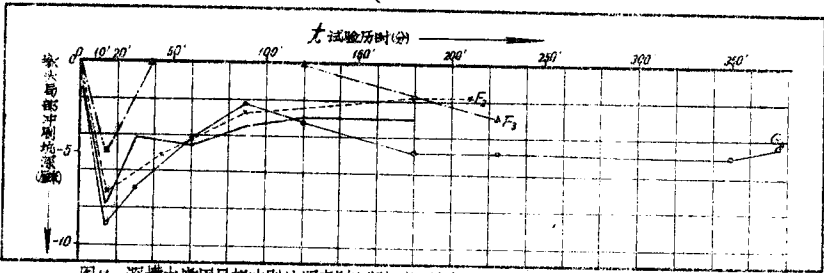


图11. 深槽中墩周局部冲刷坑深度随试验时间的变化过程

图11是此处墩周局部冲刷深度随试验历时的变化过程。图12是此处墩周局部冲刷深度和
水深（上游直段的平均水深）的关系（试验墩宽为6厘米）。在 10~40 厘米的试验水深
（ $\frac{h_m}{B} = 0.0667 \sim 0.267$ ）范围内，看不出水深有明显的影

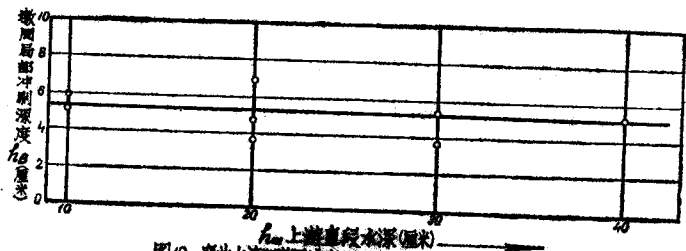


图12. 弯道凹岸深槽墩周局部冲刷和试验水深的关系

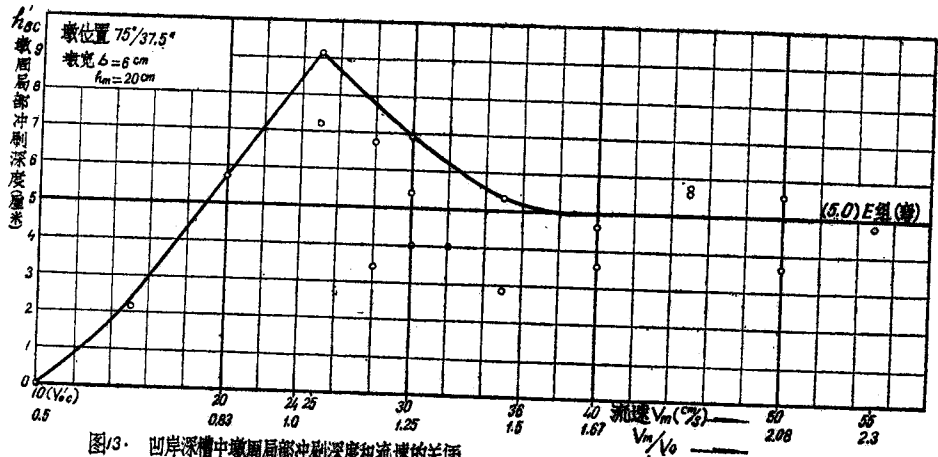


图13. 凹岸深槽中墩周局部冲刷深度和流速的关系

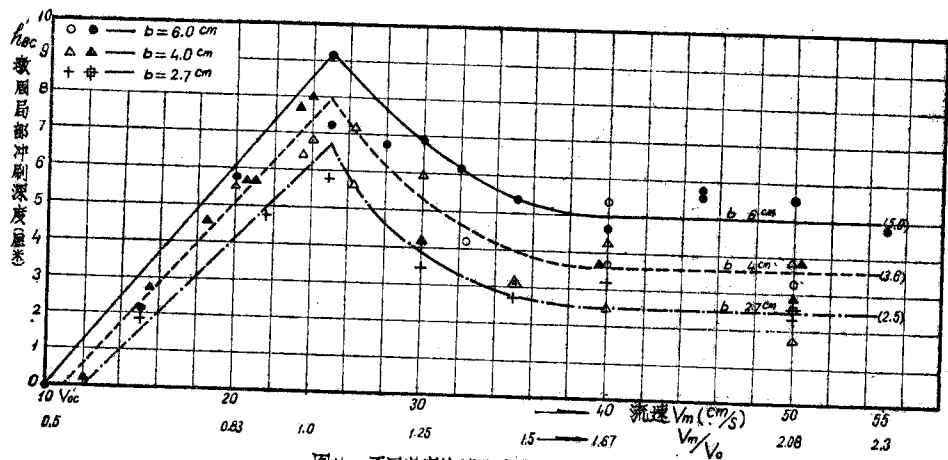


图14. 不同墩宽的试验结果

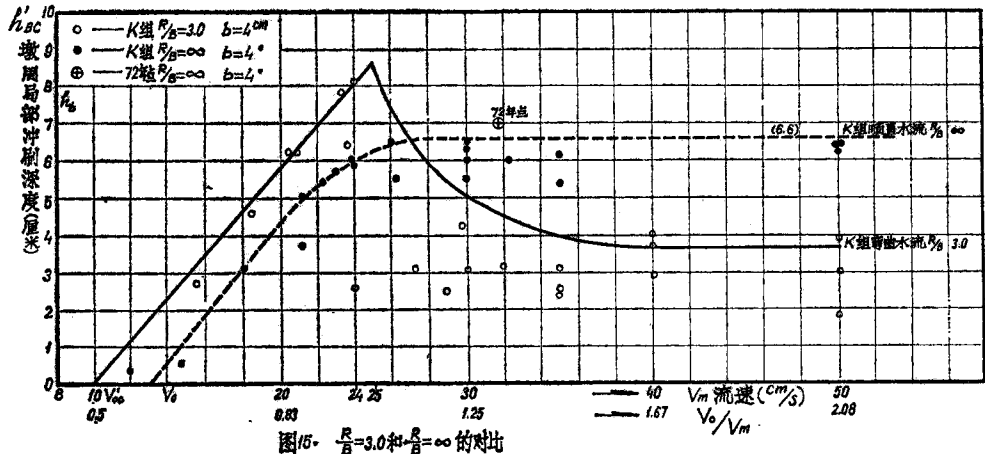
图13和图14为此处墩周局部冲刷深度与流速及桥墩宽度的关系。图中 h_m 、 V_m 和 V_0 为上游直段的平均水深，平均水流速和河床泥沙起动流速。 b 为试验墩宽。 V'_{0c} 为此处墩周起冲流速。 h'_{bc} 为 弯道凹岸深槽处墩周局部冲刷深度。这两组试验都是在 $\frac{R}{B} = 3.0$ 的弯

曲试验段进行的。由这二图可见：(a) $V_m > V'_{oc}$ 后，随着 V_m 增大， h'_{bc} 迅速增大。(b) $V_m = V_o$ 时， h'_{bc} 达到其最大值。(c) $V_m > V_o$ 后， h'_{bc} 又迅速减小。这是由于：螺旋流的底部流速推移大量泥沙填补了墩周局部冲刷坑；横向的底部流速斜切墩头旋辊，冲散和削弱旋辊的冲刷强度；以及一旦跨中河床低于墩周河床时，环流底部流速的向上分量，起着抵消墩头向下水流的作用。上述这三种作用，都将使墩周局部冲刷减小。(d) 当 V_m 更大（约为 $V_m \geq 1.5V_o$ ）时减小局部冲刷的作用与墩头向下水流的冲刷作用渐趋平衡， h'_{bc} 的减小趋势终止，但围绕一常量上下还有波动。这一常量定为弯曲水流桥墩局部冲刷平衡冲刷深度 h_{bc} 。墩宽愈大， h'_{bc} 和 h_{bc} 皆愈大。

附带说明一下。在弯曲水流中，由于断面上和垂线上流速分布的改组。在弯曲的不同位置，床面上的剪力分布是不同的[4][5]。因此弯曲不同位置处床面泥沙起动时对应的上游直段平均流速 V_m 是不同的。弯顶附近床面泥沙起动时对应的 V_m 值比直段同样泥沙的起动流速 V_o 要小。这次试验和资料分析用的 V_o 都是顺直水流中泥沙的起动流速。

(3) 改变 $\frac{R}{B}$ 的试验结果。

图15和图16分别是 $\frac{R}{B} = 3.0$ 和 $\frac{R}{B} = 5.0$ 同直线水流 ($\frac{R}{B} = \infty$)，墩周局部冲刷试验结果的对比。图中 h_b 为直线水流墩周局部冲刷深度， V_o' 为直线水流中墩头起冲流速，其它符号意义同前。图中表明：(a) $V_m < V_o$ 时， h'_{bc} 和 h'_b 皆随流速增大而迅速增大；但 $V'_{oc} < V_o'$ ，且同一流速时 $h'_{bc} > h'_b$ 。这表明，在无泥沙补给的情况，弯曲水流和直线水流中局部冲刷的共性是主要的。但由于弯曲水流底部流速大于直线段底部流速因此同样的 V_m ， $h'_{bc} > h'_b$ ，显示了二者的差异——个性。(b) V_m 超过起动流速 V_o 的初期。这里十分清楚地显示出二者的特性——差异占主导地位。在直线水流中，河床上泥沙运动强度不大，不足以补充旋辊由墩周局部冲刷坑内带走的泥沙， h_b 仍呈缓慢增加。与此相反，弯曲水流



中，在螺旋流的作用下，凹岸深槽内的泥沙输送量很大，超过水流自墩周冲刷坑内所带走的泥沙，因此 h'_{bc} 迅速下降。二者在这里交叉而过，出现 $h'_b > h'_{bc}$ 。(c) 在 $V_m \gg V_o$ 时，不论在弯曲水流中或直线水流中都显示出，补充到冲刷坑的泥沙量与水流自坑中带出的泥沙量逐渐达到平衡。 h'_{bc} 和 h'_c 分别趋近于各自的一个常量——平衡冲刷深度。这表明

二者的共性又占主导。但因水流结构不同,所产生的影响不同,留下了明显的 $h_{bc} < h_b^*$ 的差异。

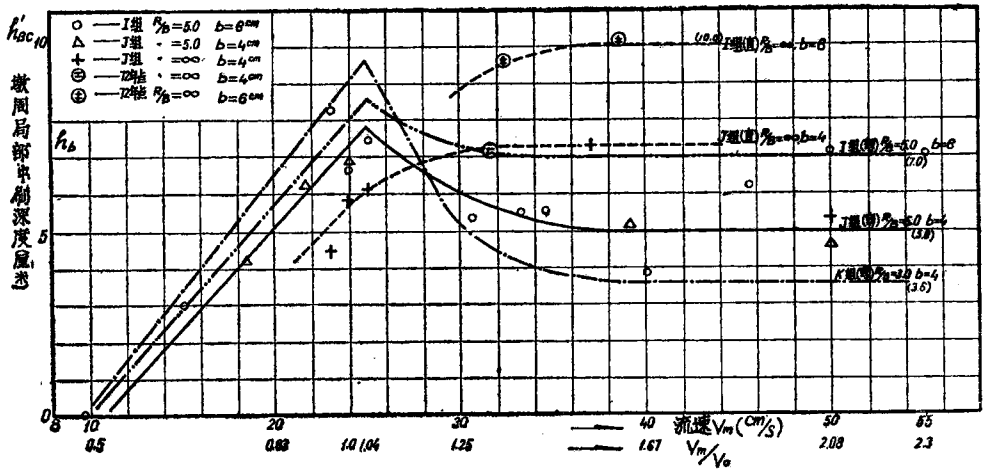


图16 $\frac{R}{B}=5.0$ 和 $\frac{R}{B}=0.5$ 的对比

由这二图中还可看出,弯曲水流墩周局部冲刷的平衡冲刷深度 h_{bc} 随 $\frac{R}{B}$ 的增加而增大。直到 $\frac{R}{B} = \infty$ (直线水流时), h_{bc} 也就增大到等于直线水流的局部冲刷的平衡冲刷深度 h_b 。二者通过 $\frac{R}{B}$ 的关系得到了统一。

通过上述天然资料和试验资料的分析,可以看出弯曲水流桥渡冲刷的基本特点。不论是傍岸环流集中冲刷为主的桥下一般冲刷,或是桥墩周围的局部冲刷,以及这两种冲刷的组合,都和顺直水流中的情况有很大的差别。

四、弯曲水流桥渡冲刷的计算

断面上的横向环流和由它与纵向水流组成的螺旋式水流运动是一种比较稳定的水流结构。由这种水流塑造的河床形态也是比较稳定的和规律性较为明显的。在这种河段上设置桥渡,桥渡冲刷计算和护基护岸工程最关心的是:(a)凹岸侧深槽最大水深——集中冲刷深度,和深槽的纵断面形态。(b)深槽内可能出现的墩头局部冲刷深度和弯道内不同位置上可能出现的墩周最低标高。(c)凹岸深槽内纵向流速分布。(d)凹岸纵向水面线形态(或全弯道水面形态)。这里仅就前两个问题,根据这次试验资料,整理出一个初步结果。

4.1.凹岸侧深槽最大水深 H_{pc} 计算公式

弯曲水流泥沙运动和床面变形皆属三元空间问题。目前尚难直接由理论推导给出 H_{pc} 的计算公式。虽然也有一些文献,试图用理论分析方法探讨河床变形的计算方法,但也很难获得可供实用的计算公式〔6〕~〔10〕。因此,这里将以试验资料为依据,用无因次组合量的分析方法〔9〕〔11〕,整理这批试验资料,以便给出可供实用的较为简便的计算公式和方法。

用 h'_{pc} 为凹岸深槽处自原始平均床面向下冲刷的深度; h_m 为平均床面以上的水深 (这里为上游直线段平均水深)。则有凹岸深槽水深 $H'_{pc} = h'_{pc} + h_m$ 。根据弯道水流运动和河床变形特点可写出:

$$h'_{pc} = f(h_m, V_m, V_o, B, R, \theta, \Delta\theta, m) \quad (1)$$

式中符号意义可查阅文前所附符号表。将上式组成习见的无因次参数的关系式:

$$\frac{h'_{pc}}{h_m} = f\left(\frac{V_m}{V_o}, \frac{R}{B}, \frac{B}{h_m}, \frac{\Delta\theta}{\theta}, m\right) \quad (2)$$

在这次试验中, $\theta = 90^\circ$, $m = 0$ (直立边壁)。

根据上式, 点绘了 $\frac{R}{B} = 3.0$ 的 $\frac{h'_{pc}}{h_m} = f\left(\frac{V_m}{V_o}, \frac{B}{h_m}\right)$, $\frac{R}{B} = 5.0$ 的 $\frac{h'_{pc}}{h_m} = f\left(\frac{V_m}{V_o}, \frac{\Delta\theta}{\theta}\right)$ 和 $\frac{R}{B} = 3.0$ 的 $\frac{h'_{pc}}{h_m} = f\left(\frac{V_m}{V_o}, \frac{\Delta\theta}{\theta}\right)$ 三组三变量关系图。见图

17、图18和图19。由此三图可见: 当 $\frac{V_m}{V_o} > 1.7 \sim 1.9$ 以后, $\frac{h'_{pc}}{h_m}$ 趋近一常量。显示出当流速接近或超过2倍泥沙起动流速后, 输砂逐渐达到平衡凹岸深槽集中冲刷深度趋向于不再随流速而增大, 达到弯道平衡冲刷深度。对不同的 $\frac{B}{h_m}$, $\frac{R}{B}$ 和 $\frac{\Delta\theta}{\theta}$, 这常量是变化的。对每一具体弯道, 不同 $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ 的各个断面上, 皆有一 h'_{pc} 。所有这些 h'_{pc} 连在一起, 构成自弯道进口到出口, 凹岸深槽河床的纵断面。在这纵断面中有一最深点, 该点的深度即为弯道凹岸深槽最大冲刷深度 h_{pc} , 与其相应的水深即为弯道凹岸深槽最大水深 H_{pc} 。也就是 $H_{pc} = h_{pc} + h_m$ 。

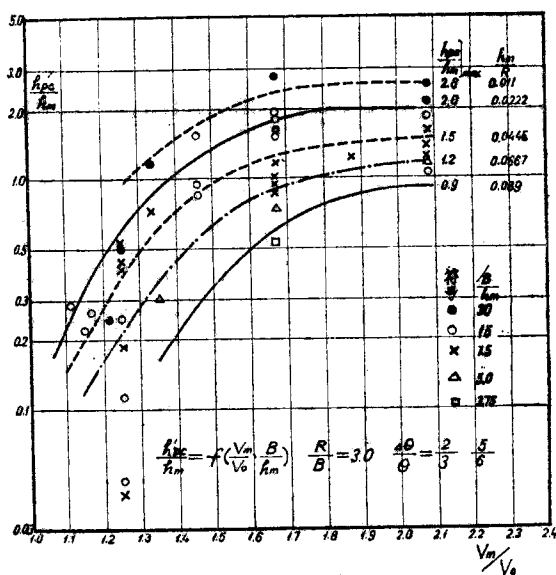


图17. 弯道凹岸深槽冲刷深度和流速及水深的关系

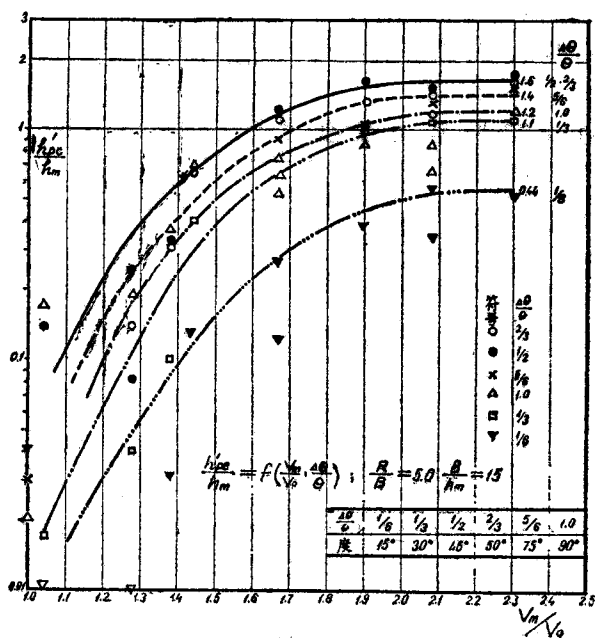


图18: 弯道凹岸深槽冲刷深度和流速及断面位置的关係(1)

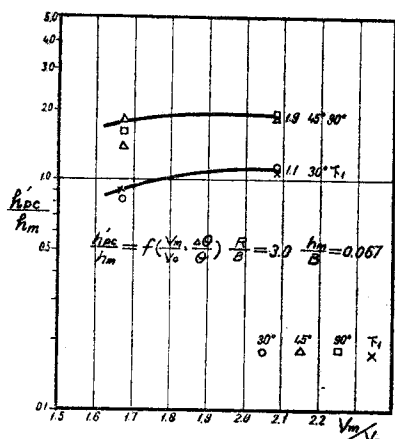


图19: 凹岸深槽冲刷深度和流速及断面位置的关係(2)

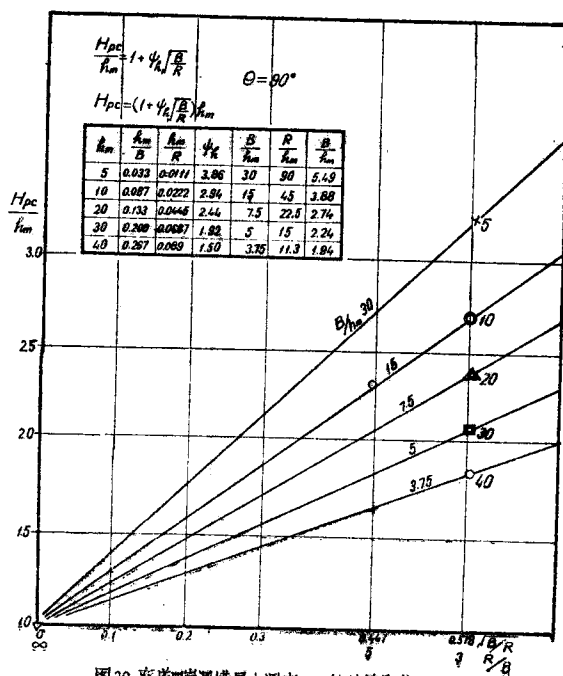


图20: 弯道凹岸深槽最大深度 H_{pc} 的计算公式

表 1 是这次试验所得的凹岸深槽最大冲深 $\frac{h_{pc}}{h_m}$ 和最大水深 $\frac{H_{pc}}{h_m}$ 值的汇总表。

凹岸深槽最大深度试验资料汇总表

表1

号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	19
$\frac{R}{B}$	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	∞	∞
$\frac{B}{R}$	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0
$\Delta\theta$	60°	60°	60°	75°	75°	75°	75°	75°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	0°	上控
$\frac{h_{pc}}{h_m}$	2.0	1.5	1.2	2.6	2.0	1.5	1.2	0.9	0.44	1.1	1.6	1.6	1.5	1.2	0.25	0.23
$\frac{H_{pc}}{h_m}$	2.78	2.41	2.10	3.24	2.76	2.41	2.10	1.88	—	—	2.34	2.34	—	—	1.0	1.0

根据这次试验资料点绘的 $\frac{H_{pc}}{h_m} = f\left(\sqrt{\frac{B}{R}}, \frac{B}{h_m}\right)$ 的三变量关系如图20所示。由图

20可写出弯道凹岸深槽最大水深 H_{pc} 的计算公式为：

$$\frac{H_{pc}}{h_m} = 1 + \psi_h \sqrt{\frac{B}{R}} \quad (3)$$

或

$$H_{pc} = \left(1 + \psi_h \sqrt{\frac{B}{R}}\right) h_m \quad (4)$$

式中 ψ_h 为水深系数。图21为水深系数 $\psi_h = f\left(\sqrt{\frac{B}{h_m}}\right)$ 的关系。由图得：

$$\psi_h = \left(\frac{1}{2} + 0.62 \sqrt{\frac{B}{h_m}}\right) \quad (5)$$

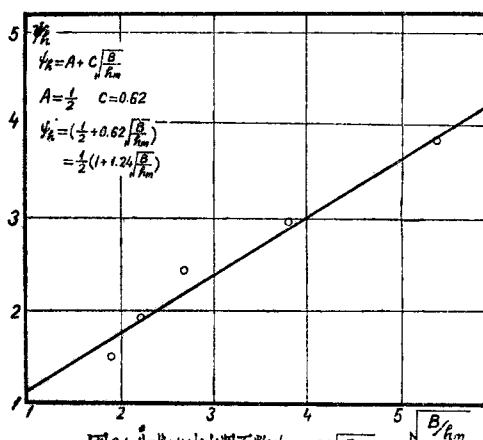


图21·公式(4)中水深系数 $\psi_h = f\left(\sqrt{\frac{B}{h_m}}\right)$

