

水沙条件对护岸工程损毁影响的试验研究*

徐 敏^{1,2}

(1. 武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对新水沙条件下航道整治建筑物损毁问题, 以护岸工程为例, 采用概化水槽试验, 模拟研究不同水动力强度以及不同挟沙饱和度下护岸工程的冲淤特性。试验结果表明: 随着断面平均流速与泥沙起动流速比值(U/U_c)的增大, 护岸工程前沿冲刷呈指数形式增大; 随着水流含沙量与水流挟沙力比值(S/S_*)的增大, 护岸工程前沿冲刷呈对数形式减小。当 $U/U_c > 3$ 或 $S/S_* < 40\%$ 时, 护岸前沿冲刷范围及冲刷深度均快速增大。因此, 当 $U/U_c > 3$ 或 $S/S_* < 40\%$ 时, 应加强对整治建筑物周边水流流速年际和年内变化的监测。研究结果可为航道整治工程设计及航道整治建筑物维护工作提供技术支撑。

关键词: 护岸工程; 水沙条件; 冲刷范围; 冲刷深度; 水槽试验

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0123-06

Experimental study on damage of revetment works under different water and sediment conditions

XU Min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
 2. Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430040, China)

Abstract: In view of the damage of the waterway regulation structure under the new water-sediment condition, we take revetment works as example to simulate the erosion and siltation characteristics of the revetment works under different hydrodynamic strength and different sediment saturation by the generalized flume experiment. The test results show that with the increase of the ratio of mean velocity in section to the incipient velocity of sediment (U/U_c), the frontal erosion of the revetment works increase exponentially. With the increase of the ratio of sediment concentration to sediment carrying capacity (S/S_*), the frontal erosion of the revetment works decrease in a logarithmic manner. When $U/U_c > 3$ or $S/S_* < 40\%$, the scouring range and scouring depth of the revetment front increase rapidly. Based on this, when $U/U_c > 3$ or $S/S_* < 40\%$, the monitoring of the interannual and intraannual changes in the surrounding works' flow velocity should be strengthened. The research results can provide a technical support for the design of waterway regulation engineering and the maintenance work of waterway regulation structures.

Keywords: revetment works; water and sediment condition; scouring range; scouring depth; flume experiment

长江干线航道是长江流域东西交通主动脉, 素有“黄金水道”之称, 是沿江综合立体交通走廊的主骨架。随着长江干线航道系统治理不断加快, 航道整治建筑物越来越多。截至2020年4月,

交付使用的已有524处。其中, 护岸工程有效守护了河道与航道边界条件, 诸多学者专家也对其开展了大量研究。不同护岸形式下水动力特性是研究的重点方向, 例如植被生长周期^[1]、护岸形

收稿日期: 2020-04-10

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402307)

作者简介: 徐敏(1987—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为河床演变及航道治理。

式等^[2]对水力糙率的影响；不同护岸形式^[3]、不同植被^[4]条件下流速分布和紊动强度的变化。同时，亦有不少学者对护岸的发展趋势^[5-6]、新型护坡的可行性^[7]及模拟技术^[8]进行探讨，分析评价生态护岸的工程效应以及新型砌块式生态护坡的生态效益^[9-11]，对护岸抗水力冲刷性也有相关研究^[12]。目前，护岸工程在长江整治工程中得到了广泛的应用^[13]，然而，在设计中如何根据护岸工程的损毁特点和机理增强其可靠度和稳定性，依据护岸工程损毁程度与航道水深改善效果进一步确定维修分级标准的研究较少。本文采用概化水槽试验，模拟研究不同水沙条件下护岸工程的损毁机理，以期为航道整治工程设计、航道整治建筑物维护等提供支撑。

1 试验概况

为满足航道整治建筑物构件制作和精度控制、构件附近局部水动力特性与原型相似，要求整治建筑物模型设计比尺不能过小。鉴于目前航道整治中应用较为广泛的建筑物构件如软体排压载块、透水框架、散抛块石等实体结构尺寸一般较小，模型设计比尺一般不宜小于 1:60。因此，从几何相似、水流运动相似、泥沙运动相似、泥沙休止角相似、守护工程建筑物相似等方面综合考虑，采用密度为 1.05 t/m³的合成沙为模型沙，各比例尺见表 1。

表 1 试验比尺

几何比尺	流速比尺	流量比尺	粒径比尺	起动流速
$\lambda_1 = \lambda_h$	λ_u	λ_q	λ_d	比尺 λ_{ue}
1:50.00	1:7.07	1:17 677.67	1:0.264	1:7.070

根据典型航道整治护岸工程建筑物结构及材料，原型软体排的混凝土尺寸选为 0.4 m×0.25 m×0.1 m(长×宽×厚)的 D 型体，每块质量为 24 kg、密度 2.4 t/m³，利用系结条进行纵横向系结；排体长 50 m、宽 15 m，其间系混凝土块 3 000 块；压载的块石粒径约 0.36 m。按照 JTS/T 231—2018《内河航道整治建筑物模拟技术规程》，考虑几何相似、质量相似和变形相似等选用模型材料，混

凝土块采用尺寸为 8 mm×5 mm×1.8 mm(长×宽×厚)、密度为 2.7 t/m³的铝片模拟；排体采用超薄纯棉透水布料模拟，排体长 1 m、宽 0.3 m，其间使用环氧树脂粘上 3 000 块铝片(即在棉布上每 1 cm²的方格中心处，粘贴面积为 0.4 cm²的铝片)；并采用粒径为 7 mm 左右的石子抛投压载。模型采用 D 型排和抛石压载材料见图 1。

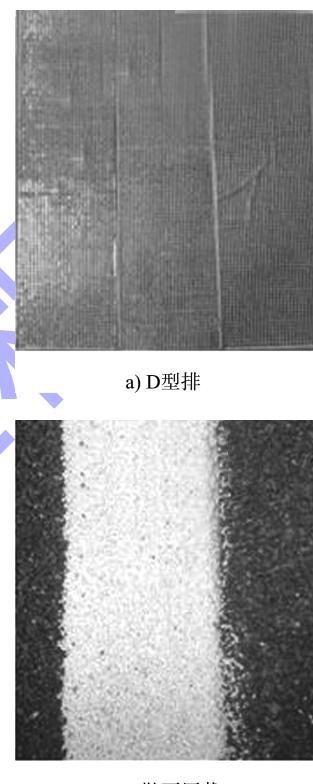


图 1 护岸整治建筑物模拟材料

模型试验在武汉大学综合试验大厅进行，试验水槽的尺寸为 14.60 m×1.86 m×0.80 m(长×宽×深)，进口设 4 m 过渡段，出口设 3.6 m 过渡段，中间试验段 7.0 m，床面铺模型沙。因原型河道护岸工程岸坡坡度在 1:3~1:2 范围内，水槽试验选取的岸坡坡度为 1:2.5，用砾石铺建，坡脚前沿处铺设长 5 m，宽 30 cm 的软体排，上面进行抛石压载。纵向 Y 轴起点为软体排上游端，典型横断面取 Y=250 cm(CS250)处断面，横向 X 轴起点为水槽右侧边壁，典型纵剖面取 X=40 cm 处断面，测量横断面间距设定为 25 cm，同一横断面上测点间距为 10 cm。图 2 为试验水槽。

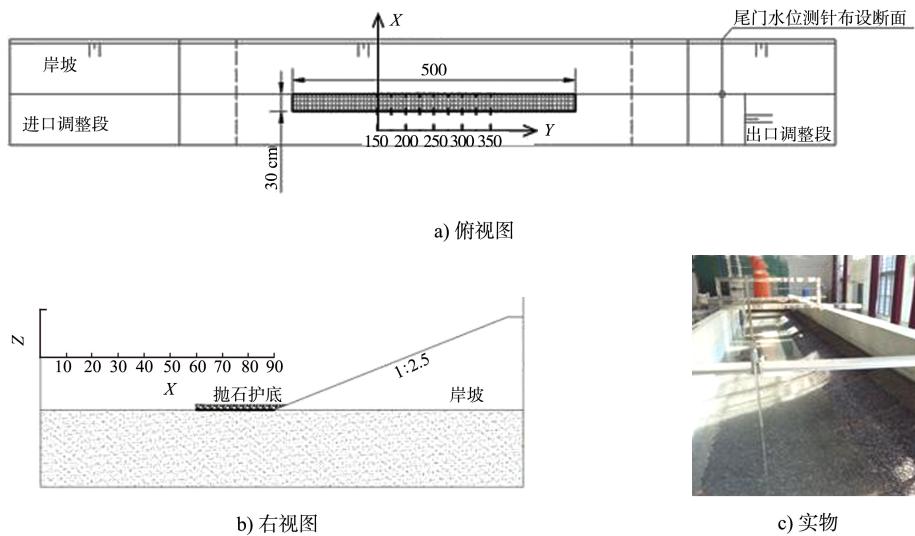


图2 试验水槽 (尺寸: cm)

2 来流条件对护岸工程附近河床冲刷的影响

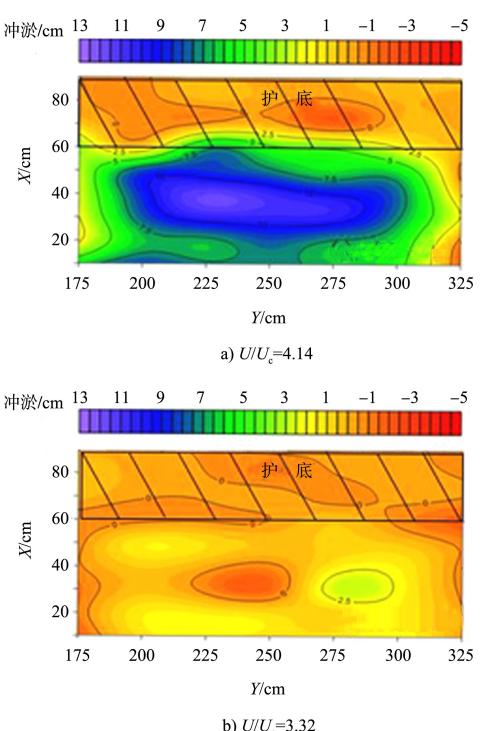
设计不同的进口流量与尾门水位,采用沙莫夫公式计算试验铺设的模型沙起动流速,得到模型试验中断面平均流速 U 与泥沙起动流速 U_c 不同

的比值,以反映不同的泥沙起动力条件(表2)。试验组护底带间距为1.4 m,开展清水试验,进口水流含沙量为0, U/U_c 的变化范围为2.45~5.11,即断面平均流速达到床面泥沙起动流速的2~5倍。

表2 不同水流条件的试验工况

试验组次	水深/cm	流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	模型沙起动 流速 U_c /($cm \cdot s^{-1}$)	模型平均流速 U /($cm \cdot s^{-1}$)	平均流速与起动 流速比值 U/U_c	原型平均 流速/($m \cdot s^{-1}$)
A1	28	100	5.59	28.57	5.11	2.02
A2	24	65	5.45	22.57	4.14	1.60
A3	18	35	5.20	17.28	3.32	1.22
A4	12	15	4.86	11.90	2.45	0.84

图3给出不同水流条件下护岸工程附近河床冲刷范围的变化。从图3可以看出:对于临近岸坡坡脚前区域(横向起点距 X 为60~90 cm),由于护底排对河床的守护作用以及临近岸坡处水流流速分布较小,各工况试验条件下河床冲淤变化不大,即使在泥沙起动力条件很强时($U/U_c = 4.14$),该区域的冲刷深度仍基本为0;对于离岸坡坡脚相对较远的主流区域(X 为10~60 cm),河床冲刷范围随着 U/U_c 的增大而扩大;当泥沙起动力条件较弱时($U/U_c = 2.45$),冲刷范围仅限于上游护底带附近的局部范围;随着泥沙起动力条件增强($U/U_c = 3.32$),冲刷范围扩大至2条护底带之间的全部范围,但深度不大;当起动力条件很强时($U/U_c = 4.14$),2条护底带之间区域发生了显著的冲刷。



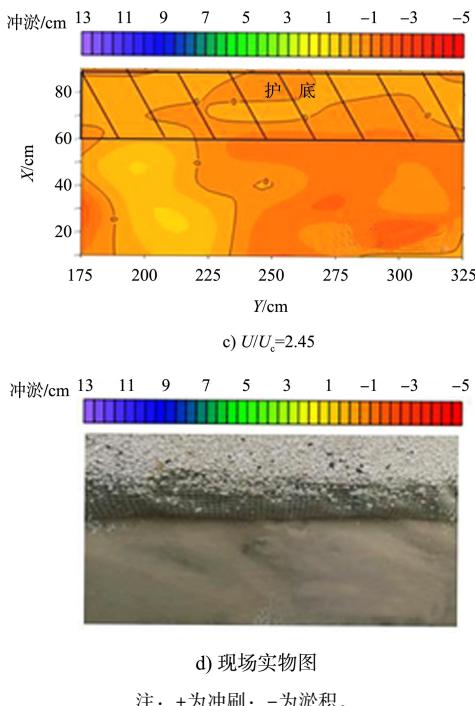


图 3 不同水流条件下冲淤变化

图 4 分别给出不同来水条件下 $Y=250$ cm 横断面和 $X=40$ cm 纵剖面冲淤幅度的变化。从图 4 可以看出, 不论是横断面还是纵剖面, 随着泥沙起动动力条件的增强, 冲刷深度均呈增加的趋势。从横断面的冲淤变化看, 各工况下护底排守护区域, 除了边缘处 ($60\sim70$ cm) 存在小于 1.0 cm 的河床冲刷, 其余部位变化不大; 未守护区域横断面的冲淤强度随 U/U_c 增大而增强, 当泥沙起动动力条件较弱时河床变形幅度为 2.0 cm, 当泥沙起动动力条件较强时河床冲刷深度达到了 11 cm。从纵剖面的冲淤变化看, 冲刷深度沿程逐渐减小, 最大冲刷深度部位更易出现在上游护底带附近, 例如当泥沙起动动力条件 $U/U_c=4.14$ 时, 最大冲刷深度出现在与上游护底带距离为 0.5 m、与下游护底带距离为 1.0 m 的地方。

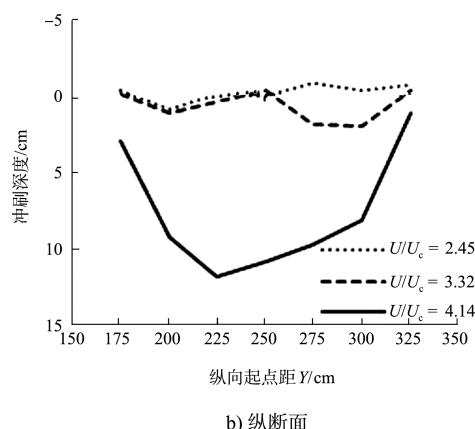
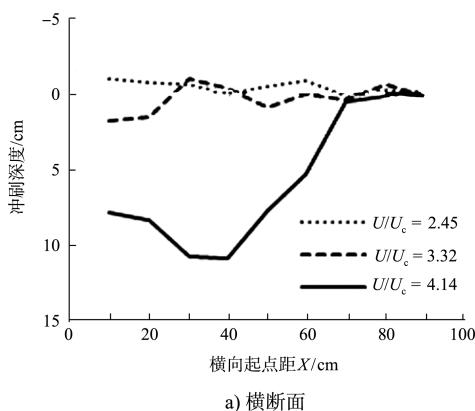


图 4 不同水流条件下河床冲淤变化

3 来沙条件对护岸工程附近河床冲刷的影响

参考三峡水库蓄水前后坝下游床沙质含沙量的实际情形, 设计试验进口水流含沙量 S 分别为 0 、 0.56 、 0.99 和 2.54 kg/m³, 分别反映清水冲刷、显著不饱和、不饱和以及饱和输沙情况下的冲刷, B 组护底带间距为 0.9 m(表 3)。

表 3 不同来沙条件的试验工况

试验组次	进口流量/ (L·s ⁻¹)	控制水深/ cm	S/S_*	进口水流含沙量/ S/(kg·m ⁻³)
B2-1	65	24	0	0
B2-2	65	24	0.22	0.56
B2-3	65	24	0.39	0.99
B2-4	65	24	1.00	2.54

图 5 给出不同来沙条件下护岸工程附近河床冲刷范围的变化。从图 5 可以看出: 对于护底排守护区域 ($横向起点距 X$ 为 $60\sim90$ cm), 在各工况试验条件下河床冲刷幅度不大, 甚至在来水含沙量较大时 ($S=2.54$ kg/m³) 出现大面积淤积。对于未守护区域 (X 为 $10\sim60$ cm), 随着来水含沙量由大减小, 水流不饱和度增大, 该区域河床的冲刷范围也逐渐扩大。当含沙量较大时 ($S/S_*=1$), 冲刷范围仅限于 X 为 $10\sim30$ cm, 且冲刷深度较小; 随着含沙量的减小 ($S/S_*=0.39$), 冲刷范围扩大至整个主槽区域 (X 为 $10\sim60$ cm), 但冲刷深度增幅不大; 当含沙量进一步减小 ($S/S_*=0.22$), 主槽区域 (X 为 $10\sim60$ cm) 内冲刷深度明显增大; 当来水为清水时, 2 条护底带之间区域河床冲刷十分显著。

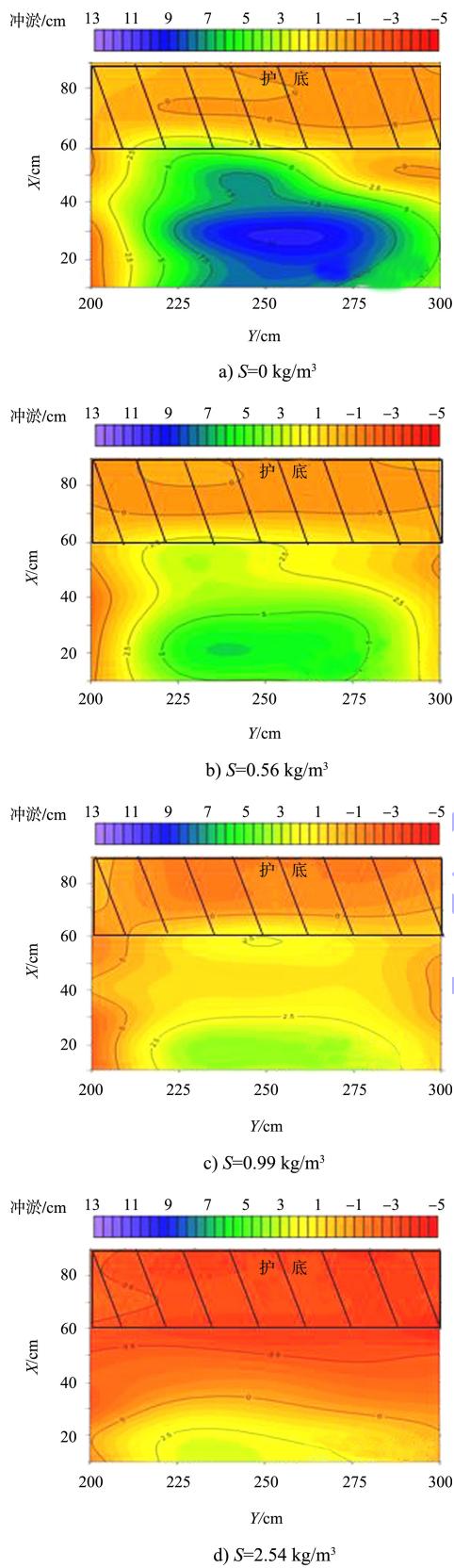
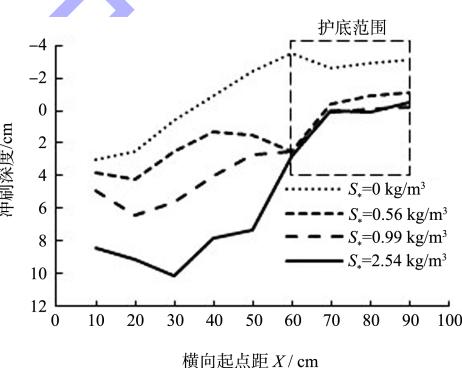


图 5 不同来沙条件下冲淤变化

图 6 给出不同来沙条件下 $Y=250$ cm 横断面冲淤幅度的变化。由图 6 可见: 近岸坡护底带区域

(除了边缘处, X 为 70~90 cm) 因流速分布相对较小, 不同含沙量下均有一定程度的淤积, 且淤积高度随含沙量的减小而减小。随着来水含沙量的减小, 距离岸坡脚较远的主流区域(X 为 10~60 cm) 冲刷加剧, 床面高程不断降低, 护底排边缘处(X 为 60~70 cm) 软体排坍塌下垂, 其上压载砾石滑落。例如, 当 $S/S_* = 1$ 时, 护底排边缘处淤积厚度达到 3 cm, 而当 S/S_* 减小至 0.39 时, 护底排边缘处冲刷深度达到 3 cm。从纵向冲淤看, 不同来沙条件下观测到的最大冲刷坑位置大多位于 $Y=225$ cm 与 $Y=250$ cm 之间, 这主要是由于靠近上游护底带区域水流淘刷能力更大所造成的。

图 6 不同来沙条件下 $Y=250$ cm 断面地形冲淤变化

4 对航道整治建筑物维护的启示

从图 7a) 可以看出, 护岸工程前沿河床冲刷深度随 U/U_c 呈指数增大: 当 $U/U_c < 3$ 时, 河床冲刷深度随 U/U_c 的增大而缓慢增加, 试验范围内的冲刷深度不超过 2 cm。这是因为, 当水流流速开始大于泥沙起动流速时, 床面少量泥沙颗粒将开始起动; 随着流速的增加, 更多的泥沙颗粒将被水流携带移向下游, 冲刷开始发展。当 $U/U_c > 3$ 时, 河床冲刷幅度大幅增加, U/U_c 从 3.0 增加到 4.0, 增幅为 33%, 而冲刷深度增加了近 5 倍。

从图 7b) 可以看出: 当 $S/S_* > 0.39$ 时, 水流挟沙饱和度较高, 对河床冲刷能力有限, 河床冲刷幅度不大, 且两护底带间最大冲刷深度随含沙量减小而缓慢增大。当 S/S_* 由 1.00 减至 0.39 时, 最大冲刷深度仅由 3.0 cm 增至 4.2 cm, 加深了 1.2 cm; 当 $S/S_* < 0.39$ 时, 水流饱和度较小, 对河床冲刷能力较强, 河床最大冲刷深度随含沙量

减小而迅速增大；当 S/S_* 由 0.39 减至 0.22 时，最大冲刷深度由 4.2 cm 增至 6.4 cm，加深了 2.2 cm；当 S/S_* 由 0.22 减至 0 时，最大冲刷深度加深了 3.7 cm。

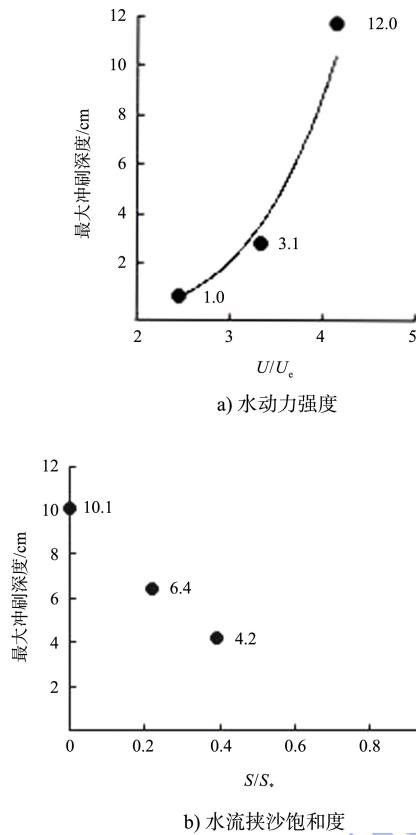


图 7 不同水沙条件下的最大冲刷深度

显然，水沙条件变化对河床冲刷的影响是非常显著的。航道整治建筑物设计过程中，通常已经对现状条件下建筑物周边的流速进行了充分的考虑。然而，在建筑物建成并发挥作用以后，随着河床的冲淤调整，建筑物周边的局部河势可能发生调整，从而流速也发生变化。当建筑物周边流速增加时，建筑物周边河床的冲刷会进一步加强，对于护岸工程如此，对丁坝或者护滩带也是如此。因此，在航道整治建筑物运行过程中应加强观测，即监测整治建筑物不同水期的水流流速变化，年内当水流流速达到起动流速的 2 倍时就会发生冲刷，如果达到 3 倍，会出现显著冲刷，这时对建筑物的监测须进一步加强；年际间如果同流量建筑物周边的流速也呈现增加，则也要加强对建筑物稳定性的观测分析。另外，三峡水库

等大型水电枢纽蓄水运用后，长江中下游水流不饱和，在今后的航道工程初步设计阶段，应充分考虑含沙量持续减少对建筑物稳定性的影响，当来水含沙量 S 小于饱和含沙量 S_* 的 40% 时，航道建筑物附近会出现显著的冲刷，应加强对航道整治建筑物运行状态及水沙动力环境要素的动态监测。

5 结论

1) 河床的冲刷范围及冲刷深度随 U/U_c 呈指数增大：当 U/U_c 达到 2 时，河床出现冲刷；随着水动力条件的增强，当 U/U_c 达到 3 时，就会出现显著冲刷。可以以此为依据，加强对整治建筑物运行状态，即附近水沙环境要素的动态监测。

2) 河床的冲刷范围及冲刷深度随水流含沙量的减小而增大：当 $S/S_* > 40\%$ 时，含沙量的变化对护岸前沿河床冲刷的影响不大；当 $S/S_* < 40\%$ 时，护岸前沿河段存在明显的冲刷，且冲刷范围及冲刷深度随含沙量的减小而快速增大，此时应加强对建筑物变形监测。

参考文献：

- [1] 张玮, 钟春欣, 应翰海. 草皮护坡水力糙率实验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 483-489.
- [2] 李仟, 曾玉红. 梯形河道护岸糙率及水流时均与紊动特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 61-66.
- [3] 刘丰阳, 刘林双, 王家生, 等. 荆江河段不同植被生态护坡的水流试验及应用[J]. 水运工程, 2018(9): 9-14.
- [4] YAO S M, YUE H Y, LI L G. Analysis on current situation and development trend of ecological revetment works in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Procedia engineering, 2012, 28: 307-313.
- [5] YAO S M, YUE H Y. Development trend of eco-revetment works in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. China water resources, 2012(6): 18-21.
- [6] 何旭升, 逢勇, 鲁一晖, 等. 净水型护岸技术的探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 659-666.
- [7] 刘晓菲, 王平义, 杨成渝. X 型系混凝土块软体排模拟技术[J]. 水运工程, 2011(2): 102-107.