

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.007

王祚, 牟献友, 李春江, 等. 不同流量下环翼型防冲板结构优化试验[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 44-49. (WANG Zuo, MOU Xian-you, LI Chun-jiang, et al. Experimental studies on structure optimization of ring-wing scour plates under different discharges [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 44-49.)

不同流量下环翼型防冲板结构优化试验

王 祚, 牟献友, 李春江, 田剑浩

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为了研究不同流量条件下桥墩局部冲刷问题,在单片挡板基础上,增加防冲板数量形成了多级防冲结构。利用多元统计方法对防冲效果进行了主成分分析,认为最大冲坑深度最能体现试验效果,并以最大冲坑深度为指标进行试验分析。试验结果表明:在流量为 $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,增加防冲板数量并不能有效提升防冲效果;当流量增加到 $115 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,通过增加防冲板数量可在一定程度上提高桥墩的防冲能力,并且防冲效果随着防冲板间距的减小而增强,同时随着防冲板外径的增大而增强。但三级防冲板与二级防冲板防冲效果非常相近,第三级挡板对试验的结果影响甚微。因此,试验分析认为,在考虑不同流量条件下,环翼型防冲板最优防冲结构为两片防冲板,且防冲板外径为 180 mm ,间距取值为 15 mm 。

关键词: 桥墩;局部冲刷;流量;防冲指标;主成分分析;多级防冲结构

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)02-0044-06

桥梁水毁的重要原因就是桥墩冲刷^[1],而桥墩冲刷大多从局部冲刷开始发展。桥梁设计工作者在进行桥梁基础设计时,必须采取一些防护措施对桥墩周围的床面进行护底防护,以保证桥墩的安全与稳定^[2]。桥墩冲刷一般可以分为3类:自然演变引起的冲刷、一般冲刷和桥墩局部冲刷。由于桥墩阻流产生的水流冲击和涡流作用,在桥墩周围形成的局部河床变形称为桥墩局部冲刷^[3]。桥墩的存在会使行进水流在桥墩前的流速、流向发生急剧变化,形成下潜水流,产生漩涡,并传播和发展到下游,产生很大的床面切力,从而形成冲刷坑^[4]。近年来国内外研究成果表明传统桥墩局部防冲措施主要包括实体抗冲防护和减速不冲防护^[5]。相比于实体抗冲防护依靠加固桥墩周围床面被动地抵抗水流对于河床的冲刷,减速不冲防护则是通过改变桥墩结构降低下潜水流的影响,从而减小桥墩局部冲刷。基于上述考虑,本试验采用新型的环翼式桥墩主动改变桥墩周围的水流,以达到减弱冲刷的目的。其防冲的基本原理就是利用环翼型挡板阻挡下降水流,使下降水流向桥墩两侧分流,从而减小对桥墩的局部冲刷^[6]。

本文依据前期试验的研究成果,考虑不同流量的情形,在单片防冲板最佳位置、形状和大小的基础上,进一步优化了防冲结构,使其在大流量条件下具备更好的防冲效果。

1 试验装置与材料

试验装置主要包括独立供水循环系统、Vectrino 声学多普勒点式测速仪以及桥墩模型。循环流水装置为长 20 m ,宽 50 cm ,高 90 cm 的矩形敞口玻璃水槽,底坡坡降为 0.124% ,水槽上游进口段有流量调节阀和电磁流量计,同时,为确保水流平稳均匀地进入试验段,在进水管末端设置消能池。水槽中部有 5 m 长的试

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51369022);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2013MS0719)

作者简介: 王 祚(1987-),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事水工模型试验研究。

E-mail: wangzuoyff@sina.com 通信作者: 牟献友(E-mail: mouxianyou@163.com)

验段,桥墩模型埋置于试验段。为更好地展示桥墩局部冲刷现象,在试验段铺设 22 cm 厚的泥沙用以模拟河流真实的河床表面。每组试验开始前先将床面抹均匀,并放水浸泡 1 h,每次试验冲刷时间大于 2 h,直至冲坑达到稳定状态。水槽下游段设尾门,可以控制和调节水槽水深,最后在水槽出口处设置 1 m 长的沉沙池,避免试验沙进入地下蓄水池。

试验所用桥墩模型和环翼式防冲板由 PVC 管制成,桥墩模型直径 90 mm。装有环翼式防冲板的桥墩模型见图 1。为了模拟真实的水流与泥沙运动状态,试验选用了中值粒径为 0.48 mm 的动床床沙,床沙级配曲线见图 2。

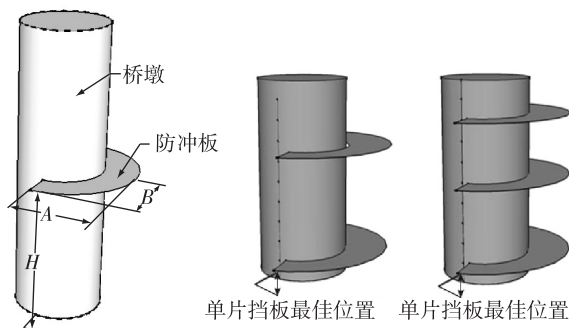


图 1 桥墩模型及防冲板结构示意图

Fig. 1 Model drawing of a bridge pier and impingement plates

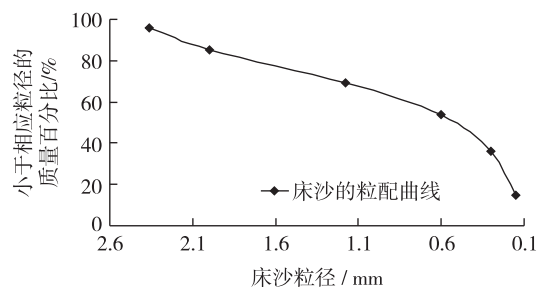


图 2 床沙级配曲线

Fig. 2 Grading curve of bed sand

2 试验过程

根据前期试验研究成果,单片挡板试验的最优工况组合为采用内径 90 mm,外径 180 mm 的半圆环状防冲板,并且挡板越靠近河床防冲效果越理想,最佳安装位置距河床的距离小于水深的 $1/3$ ^[7]。考虑到洪水是引起桥墩局部冲刷破坏的主要因素,环翼式防冲板最佳安装位置与河道水位相关,而在桥梁的寿命期内桥墩会经受多次洪水冲刷,历次洪水的水位都不相同,这就可能需要根据桥梁设计中采用的不同频率的洪水设置多个防冲板。因此,试验过程中选取了不同数量的防冲板,在单片挡板最佳形状,最佳尺寸和最佳位置的基础上增加防冲板的数量,在不同流量和水深条件下,分别进行单片、2 片和 3 片挡板的防冲试验。

根据单片挡板最佳安装位置,试验时单片挡板与河床的距离小于初始水深 H 的 $1/3$,即 $0.1H$,并在其上方增加挡板数量,分别形成两级和三级挡板的防冲结构(见图 1),并与无挡板和单片挡板的情况作比较。试验所用半圆环挡板内径均为 90 mm(同桥墩直径),外径分别为 140,160 和 180 mm,挡板间距取值范围依次为 $0.10H$, $0.15H$ 和 $0.20H$,其中 H 为初始水深,试验工况组合详见表 1。本次冲刷试验的流量取 75 和 $115 \text{ m}^3/\text{h}$,相应的水深分别为 150 和 180 mm,墩前行进水流流速分别为 0.27 和 0.35 m/s。根据挡板数量、挡板外径和挡板间距不同的工况组合,按照正交试验原则对不同流量条件下环翼型防冲板进行结构优化试验设计。

为了准确衡量试验结果,将最大冲坑深度、冲坑长度、冲坑宽度、墩前近底垂向流速、墩后泥沙推移距离以及泥沙堆积厚度作为判别防冲效果的量测指标^[7]。

由防冲板防冲原理可知,影响防冲板防冲效果的主要因素有防冲板安装位置、形状和尺寸^[8],由于第一级防冲板形状和尺寸均已确定,并且固定在最佳防冲位置,因而影响多级挡板结构防冲效果的主要因素为 2,3 级防冲板的尺寸及防冲板间距,因此将其作为本次试验的 3 个因素。各因素水平见表 2。

表 1 试验工况组合
Tab. 1 Experimental case combination

试验编号	试验变量			试验编号	试验变量		
	挡板数量	挡板外径/mm	挡板间距/mm		挡板数量	挡板外径/mm	挡板间距/mm
1	无	—	—	18~20	3	180/180/140	0.1H/0.15H/0.2H
2	1	180	—	21~23	3	180/160/180	0.1H/0.15H/0.2H
3~5	2	180/180	0.1H/0.15H/0.2H	24~26	3	180/160/160	0.1H/0.15H/0.2H
6~8	2	180/160	0.1H/0.15H/0.2H	27~29	3	180/160/140	0.1H/0.15H/0.2H
9~11	2	180/140	0.1H/0.15H/0.2H	30~32	3	180/140/180	0.1H/0.15H/0.2H
12~14	3	180/180/180	0.1H/0.15H/0.2H	33~35	3	180/140/160	0.1H/0.15H/0.2H
15~17	3	180/180/160	0.1H/0.15H/0.2H	36~38	3	180/140/140	0.1H/0.15H/0.2H

表 2 试验因素水平
Tab. 2 Experimental factor level

水平	试验因素			水平	试验因素		
	防冲板间 距/mm	第 2 级挡板面积 /mm ²	第 3 级挡板面积 /mm ²		防冲板间 距/mm	第 2 级挡板面积 /mm ²	第 3 级挡板面积 /mm ²
1	15	9 838	9 838	3	30	4 514	4 514
2	23	6 869	6 869				

注:半圆环面积 $S=1/2\pi(R^2-r^2)$, R 为大圆半径, r 为小圆半径。

3 防冲指标与试验结果分析

3.1 试验防冲指标主成分分析

由于判别防冲效果的指标数量众多,且具有一定的相关性,给分析带来了不便,因此,需要将多个指标化为少数不相关的综合指标作为判断防冲试验效果的依据。以流量为 115 m³/h 为例,对 6 种防冲效果判别指标进行主成分分析。

主成分分析是将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法,又称主分量分析^[9]。其基本思想是设法将原来众多具有一定相关性的指标(比如 P 个指标),重新组合成一组新的不相关的综合指标来代替原来的指标^[10]。信息的大小通常用离差平方和或方差来衡量。

防冲指标主成分分析过程如下:

(1) 首先将原始数据标准化,建立指标之间的相关系数矩阵 R (见表 3)。其中 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 分别对应指标最大冲坑深度、长度、宽度、墩前近底垂向流速、墩后泥沙推移距离以及泥沙堆积厚度。

(2) 公因子方差。主成分分析从原始变量中提取的 $X_1 \sim X_6$ 的公因子方差信息分别为 0.910, 0.757, 0.854, 0.812, 0.735, 0.643, 可以看出最大冲坑深度 X_1 最多,而墩后泥沙堆积厚度损失率最大。

(3) 特征值。方差大于 1 为主成分^[11],由表 4 可知,只取第 1 个为主成分,第 1 个特征值累计贡献率已达 78.514%,说明第 1 个主成分基本包含了全部指标具有的信息,并且第一主成分的方差是 4.711。

(4) 特征向量。取第 1 个特征值,并根据主成分荷载矩阵计算出相应的特征向量,特征向量为主成分荷载矩阵 $(0.954, 0.870, 0.924, 0.901, 0.857, 0.802)^T$ 除以主成分特征值算术平方根,即为 $(0.402\ 636, 0.367\ 183, 0.389\ 974, 0.380\ 267, 0.361\ 697, 0.338\ 484)^T$ 。

因而第一主成分的函数表达式为:

$$F_1=0.402\ 636X_1+0.367\ 183\ X_2+0.389\ 974\ X_3+0.380\ 267\ X_4+0.361\ 697\ X_5+0.338\ 484\ X_6$$

在第 1 主成分的函数表达式中,第 1,3,4 项指标的系数较大,这 3 个指标起主要作用,可以把第 1 主成分看成是最大冲坑深度、长度和墩前近底垂向流速所刻画的反映桥墩防冲效果的综合指标,而第 1 项指标与其他指标相比影响最大,因此可单独看成是最大冲坑深度的影响。

表 3 相关系数矩阵							表 4 特征值与方差贡献率			
Tab. 3 Correlation coefficient matrix							Tab. 4 Eigenvalues and variance contribution			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
X_1	1.000	0.784	0.988	0.981	0.668	0.608	1	4.711	78.514	78.514
X_2	0.784	1.000	0.690	0.655	0.840	0.663	2	0.946	15.773	94.287
X_3	0.988	0.690	1.000	0.998	0.607	0.580	3	0.316	5.260	99.547
X_4	0.981	0.655	0.998	1.000	0.563	0.541	4	0.025	0.417	99.964
X_5	0.668	0.840	0.607	0.563	1.000	0.928	5	0.002	0.029	99.993
X_6	0.608	0.663	0.580	0.541	0.928	1.000	6	0	0.007	100.000

3.2 试验结果分析

通过对 6 种防冲效果判别指标的主成分分析,可以科学而准确地选取指标对防冲试验的效果进行分析,从而更好地优化防冲结构。

在流量 $75\text{ m}^3/\text{h}$,初始水深 H 为 15 cm 时,以最大冲刷深度作为判别指标,试验结果如图 3(a) 所示。与第 1 组试验无挡板情况相比,第 2 组试验时,安装 1 片防冲板可以明显减少桥墩最大冲坑深度。其他各组试验,均是在单片挡板的基础上,在其上方增加挡板数量形成多级防冲结构。二级防冲结构其防冲效果较单片挡板总体上只是有微小的差异,并且不同的挡板间距与挡板大小对试验结果并无明显影响;而三级防冲结构的防冲效果较二级结构相比几乎没有变化。

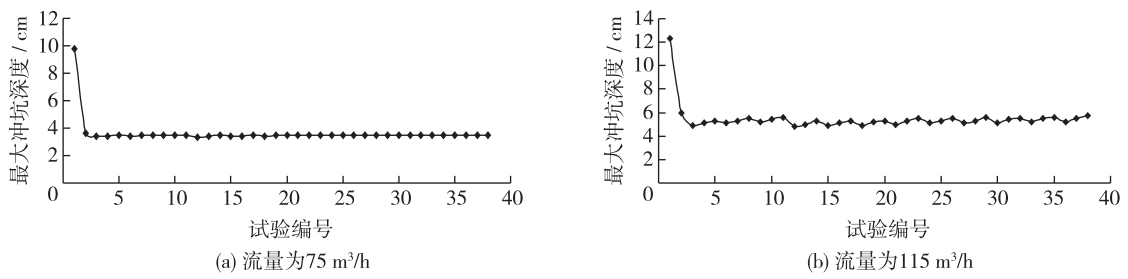


图 3 流量为 75 和 $115\text{ m}^3/\text{h}$ 时防冲效果
Fig. 3 Anti-scour effect graph at 75 and $115\text{ m}^3/\text{h}$

当流量增加到 $115\text{ m}^3/\text{h}$ 时(流量增大约 50%),水深由初始水深增加到 18 cm ,与第 1 组试验无挡板相比,第 2 组试验时,安装 1 片防冲板依旧可以显著地减少桥墩的最大冲坑深度,提高防冲效果。其他各组试验同样是在单片挡板的基础上,增加挡板个数而形成多级防冲结构。其中,多级防冲结构其防冲效果较单片挡板已有一定程度的提高(见图 3(b)),并且防冲效果随着防冲板间距的减小而增强(见图 4(a)),随着防冲板外径的增大而增强(见图 4(b));但从图 4 可见,流量增加后,图中两条曲线接近重合,三级防冲结构防冲效果较二级防冲结构相比依然非常接近,无显著变化,因此,第三级挡板大小对本试验结果影响甚微。

这是因为与无挡板相比,防冲板安装后,能有效阻挡墩前的下潜水流,使下降水流向桥墩两侧分流,减弱了垂向水流对河床的冲击^[12],使得冲坑深度减小了 63.3%;在流量为 $75\text{ m}^3/\text{h}$ 时,单片防冲板足以大幅削弱水流的冲击、达到了理想的防冲效果,固定于上方的二、三级挡板并不能起到决定性作用,效果甚微;但当流量增大约 50%以后,单片防冲板的防冲效果有所减弱,冲坑减小率下降为 51.2%,增加挡板数量后,各级防

冲板分层削弱了墩前下降水流的冲击作用,使冲坑减少率达到 60%左右。因而,在大流量条件下,多级防冲结构的防冲效果优于单片防冲板。

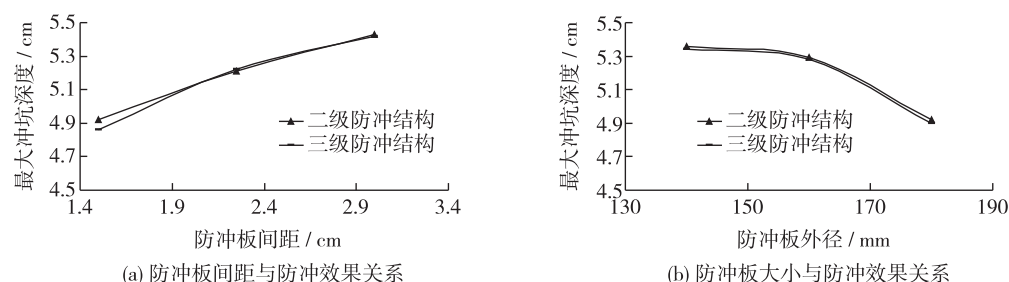


图 4 防冲板间距及尺寸与防冲效果关系

Fig. 4 Relationships between anti-scour plate spacings and sizes and anti-scour effect

4 结 语

综合分析以上试验结果,可以得出如下结论:

(1) 通过对最大冲坑深度、长度、宽度、墩前近底垂向流速、墩后泥沙推移距离以及泥沙堆积厚度 6 种判别防冲效果的指标进行主成分分析,最大冲坑深度与其他指标相比影响最大,因此可单独看成是最大冲坑深度的影响。

(2) 在流量为 $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,增加防冲板数量并不能有效提升防冲效果;当流量增加到 $115 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,在单片挡板的最佳形状、最佳尺寸和最佳位置的基础上,增加防冲板数量相比于单片防冲板可在一定程度上提高桥墩的防冲能力,并且防冲效果随着防冲板间距的减小而增强,同时随着防冲板外径的增大而增强。

(3) 多级防冲结构试验的最优工况组合为挡板外径取值 180 mm,挡板间距取值 15 mm,防冲板数量为 3 个,但考虑到三级防冲板与二级防冲板试验结果非常接近,第三级挡板大小对本试验结果影响甚微。

综上所述,考虑不同流量条件,并以最大冲坑深度作为防冲效果的判别指标,从节省材料、节约成本的角度出发,试验分析认为,优化后的防冲结构为配置两片防冲板,且防冲板外径为 180 mm,挡板间距取值为 15 mm。

参 考 文 献:

- [1] DEY S. Local scour at piers. Part I: A review of developments of research[J]. International Journal of Sediment Resource, 1997, 12(2): 23-46.
- [2] 房世龙,陈红,王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(4): 84-89. (FANG Shi-long, CHEN Hong, WANG Gang. Properties of protection engineering against local scouring around piers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(4): 84-89. (in Chinese))
- [3] 徐国平. 桥墩局部冲刷机理的探讨[D]. 西安:西安公路交通大学, 1989. (XU Guo-ping. Discussion on mechanism of local scouring around piers[D]. Xi'an: Xi'an Highway University, 1989. (in Chinese))
- [4] 文岑,赵世强. 多腹薄壁桥墩局部冲刷试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 1999, 18(2): 125-129. (WEN Cen, ZHAO Shi-qiang. Experimental investigation of local scour around a new type bridge pier[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1999, 18(2): 125-129. (in Chinese))
- [5] POSEY C J. Test of scour protection at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 110(12): 1173-1183.
- [6] 陈艳梅,牟献友,成兰艳,等. 环翼式桥墩挡板形状对垂向水力特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 33-39. (CHEN Yan-mei, MOU Xian-you, CHENG Lan-yan, et al. Impacts of baffle shape of the ring-wing bridge pier on vertical hydraulic characteristics[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 33-39. (in Chinese))

- [7] 成兰燕. 环翼式桥墩局部冲刷防护试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012. (CHENG Lan-yan. Experimental research on protection of ring-wing pier against local scour [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese))
- [8] 白佳乐. 环翼式桥墩局部冲刷防护数值模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. (BAI Jia-le. Numerical modeling research on protection of ring-wing pier against local scour [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [9] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999: 154-166. (YU Xiu-lin, REN Xue-song. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999: 154-166. (in Chinese))
- [10] 梅长林, 周家良. 实用统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 53-65. (MEI Chang-lin, ZHOU Jia-liang. Applied statistical methods [M]. Beijing: Science Press, 2002: 53-65. (in Chinese))
- [11] 曹银贵, 周伟, 王静, 等. 基于主成分分析与层次分析的三峡库区耕地集约利用对比[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 291-296. (CAO Yin-gui, ZHOU Wei, WANG Jing, et al. Comparative on regional cultivated land intensive use based on principal component analysis and analytic hierarchy process in Three Gorges reservoir area [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 291-296. (in Chinese))
- [12] 成兰艳, 牟献友. 环翼式桥墩局部冲刷防护试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 14-18. (CHENG Lan-yan, MOU Xian-you. Experimental research on protection of ring-wing pier against local scour [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 14-18. (in Chinese))

Experimental studies on structure optimization of ring-wing scour plates under different discharges

WANG Zuo, MOU Xian-you, LI Chun-jiang, TIAN Jian-hao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: To carry out studies of the local scour around the bridge piers under different discharges, a multi-level structure is formed by increasing anti-scouring plates in addition to a single anti-scouring plate. A principal component analysis is made of anti-scouring indexes by multivariate statistical methods. It has proved the maximum pit depths have a great reflection of experiment results. In addition, the experiment results are analysed using the maximum pit depths. The analysis results show that the anti-scouring effect can't be improved by increasing the anti-scouring plates at $75 \text{ m}^3/\text{h}$, but it can be increased at $115 \text{ m}^3/\text{h}$. Besides, the anti-scouring effect increases with decrease of the spacings between the anti-scouring plates, and enhances with increase of the outer diameters of the anti-scouring plates. However, the anti-scouring effect of three-level anti-scouring plates is similar to that of the two-level anti-scouring plates. The third-level anti-scouring plate has little effect on the experiment results. Therefore, under the conditions of different discharges, the optimal structure of the ring-wing anti-scouring plates will be two slices of the anti-scouring plates. The outer diameter of the anti-scouring plates is 180 mm, and the spacing between the anti-scouring plates is 15 mm.

Key words: bridge piers; local scour; different discharge; anti-scouring indexes; principal component analysis; multi-level anti-scouring structure