



# 类均匀碎石密铺糙率试验研究

许光祥<sup>1,2</sup>, 刘添宇<sup>1</sup>, 牟小玉<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 以往河工模型多采用卵石加糙, 结合目前江河卵石禁采的生态环境保护前提和碎石加糙具有获取方便和糙率较大的特点, 进行碎石阻力研究。采用统计分析的方法得到类均匀碎石颗粒的样本单元质量和多类碎石的平均等容粒径, 进行床面密铺碎石、水泥砂浆壁面的明槽均匀流试验, 采用河床、河岸阻力的水力半径分割法, 分割出床面碎石糙率, 从而得出类均匀碎石密铺糙率  $n_s$  与平均等容粒径  $\bar{d}_v$  的关系。结果表明, 提出的四级类均匀碎石颗粒的样本单元质量为 1~2 kg, 可根据颗粒大小取值;  $n_s = 0.0139 \bar{d}_v^{1/6}$ 。

**关键词:** 类均匀碎石; 糙率; 密铺; 等容粒径; 样本单元质量; 水力半径分割法

中图分类号: TV 133; U 652.2<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0037-05

## Experimental study on densification roughness of homogeneous gravel

XU Guang-xiang<sup>1,2</sup>, LIU Tian-yu<sup>1</sup>, MOU Xiao-yu<sup>1</sup>

(1.School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The pebble is often used in river model in the past. In view of the ecological environment protection of pebble prohibition and the characteristics of easy access and high roughness of gravel, we study the resistance of gravel. We obtain the representative element weight of homogeneous gravel particles and the average constant volume particle size of multiple types of gravel by statistical analysis method, carry out the experiment of the steady flow in open channel with the dense bed gravel and cement slurry wall, apply the river bed and bank resistance of hydraulic radius segmentation method, segment the bed rock surface roughness, and obtain the relationship of class evenly spread gravel dense roughness  $n_s$  and average constant volume size  $\bar{d}_v$ . The results show that the representative element weight of four-grades homogeneous gravel is 1 kg to 2 kg, and the value can be determined according to the particle size;  $n_s = 0.0139 \bar{d}_v^{1/6}$ .

**Keywords:** homogeneous gravel; roughness; densification; isometric particle diameter; representative element weight; hydraulic radius segmentation method

河工、水工模型是研究水利、航道、治河等涉河工程问题时的重要手段, 曾解决了三峡、长江口深水航道等重大工程的许多技术难题<sup>[1-2]</sup>。重力和阻力相似是河工模型的关键相似准则, 在几何和输入输出相似下, 重力相似条件也能满足, 而阻力相似则还需要通过床面加糙(试糙)来达到<sup>[3]</sup>。

河工模型主要有间距颗粒(主要是梅花形)和无间距颗粒(密排)加糙两种方式, 材料主要是砂砾和卵石<sup>[4-5]</sup>。对于砂砾或卵石密排加糙, 目前用得较多的主要有:

张有龄公式<sup>[6]</sup>:

$$n = 0.0166 d^{1/6} \quad (1)$$

天科所公式<sup>[7]</sup>:

收稿日期: 2020-04-11

作者简介: 许光祥(1966—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流动力学、航道整治等方面研究。

$$n=0.013\ 8d^{1/6}\tag{2}$$

式中： $n$  为断面综合糙率； $d$  为粒径 (mm)，通常为筛分粒径。糙率均与粒径的 1/6 次方成正比，其中张有龄公式主要适用于砂砾，粒径范围为 0.13 ~ 3.00 mm；天科所公式主要适用于卵石，粒径范围为 4.3 ~ 26.4 mm。

目前众多的土木工程需要大量的混凝土，市面上作为混凝土集料的碎石颗粒大量涌现，这为河工模型加糙提供了便利条件。同时，在生态优先、绿色发展、卵石禁采的大环境下，应用碎石加糙则更加便利。与卵石加糙相比，碎石加糙还具有如下优势：

1) 容易获取，使用方便。目前市面上有大量的碎石颗粒销售，且经过初步筛分，具有多种粒径。不仅避免了卵石筛分的麻烦，还可减少大量颗粒偏大或偏小的弃料。特别是在试糙过程中颗粒大小不合适，更换颗粒更为方便。

2) 糙率相对较大。由于碎石有棱角，阻力较卵石大，有利于山区河道以及变态模型的加糙。

鉴于碎石可为河工模型加糙带来极大方便，而目前碎石加糙鲜见研究成果。因此，本文开展碎石密铺加糙的阻力试验研究，可为河工模型试验提供参考。

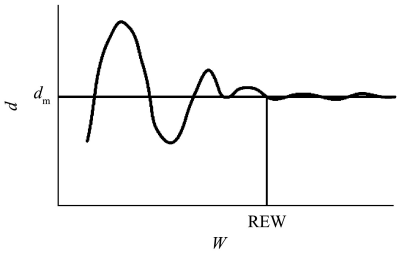
1 碎石颗粒统计

1.1 类均匀碎石颗粒

目前碎石颗粒主要有 6 种类型，市面上称之为“石粉”“鱼米石”“瓜米石”“01 石”“12 石”“13 石”，每种类型都经过了初步筛分。鉴于各类颗粒的上、下筛孔具有一定范围，其粒径不是绝对均匀，颗粒越大，粒径变化范围也越大，但又控制在一定范围，级配很窄，故本文称之为“类均匀”。

1.2 样本单元质量

样本单元质量 (REW) 是指有这么一个最小质量，其统计的各参数 (如孔隙率、密度、平均等容粒径等) 已基本不随质量的增大而发生改变，如图 1 所示。



注： $d_m$  为算术平均粒径。

图 1 样本单元质量

以平均等容粒径  $\bar{d}_v$  的统计为例，确定样本单元质量的步骤为：

- 1) 从少到多成倍称取多种质量的碎石颗粒，如  $W_i = 0.02、0.05、0.1、0.2、\cdots、6.4\text{ kg}$  等，形成一系列样本，样本总数为  $m$ ，即  $i = 1 \sim m$ 。
- 2) 采用量筒测出各样本的体积  $V_i$ ，并记录各样本的颗粒总数  $N_i$ 。
- 3) 通过公式计算出每个样本单颗粒的平均等容粒径：

$$\bar{d}_{v_i} = \left( \frac{6 V_i}{\pi N_i} \right)^{1/3}\tag{3}$$

- 4) 取相邻两个样本间的相对偏差  $\varepsilon_i = \left| \frac{\bar{d}_{v_i} - \bar{d}_{v_{i-1}}}{\bar{d}_{v_i}} \right|$ ，如均有  $\varepsilon_{i-m} < \varepsilon_0$  ( $\varepsilon_0$  为允许偏差)，则可认为  $W_i$  为样本单元质量。

4 种颗粒平均等容粒径的相对偏差  $\varepsilon_i$  随样本质量的变化见图 2。可以看出，当样本质量  $W = 0.4\text{ kg}$  时，偏差达到  $\varepsilon < 5\%$ ； $W = 0.8\text{ kg}$  时，偏差基本满足  $\varepsilon < 2\%$ ； $W = 1.6\text{ kg}$  时，偏差基本达到  $\varepsilon < 1\%$ 。由此可见，碎石颗粒的样本单元质量 REW 为 1 ~ 2 kg，颗粒小者可取低值，颗粒大者可取高值。

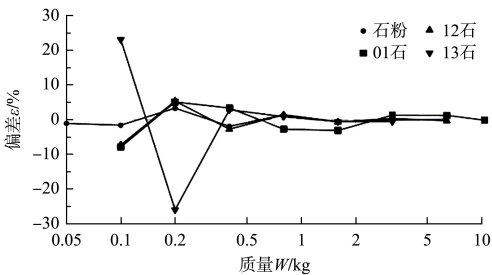


图 2 平均等容粒径偏差随样本质量的变化

### 1.3 颗粒平均等容粒径

根据统计, 4 种颗粒的平均等容粒径  $\bar{d}_v$  见表 1。

表 1 碎石颗粒平均等容粒径		
种类	编号	$\bar{d}_v/\text{mm}$
石粉	SF	3.43
01 石	S01	8.13
12 石	S12	12.90
13 石	S13	28.60

## 2 试验设计

### 2.1 试验布置

试验采用长 20 m、宽 1 m、高 0.7 m 水槽, 具体布置如图 3 所示。首先将水槽床面和壁面进行水泥砂浆铺面, 槽底坡降 1.5‰。每间隔 2 m 布设 1 对水尺, 共设 10 对(20 把), 横向位置分别位于距左、右岸 0.25 m 处。

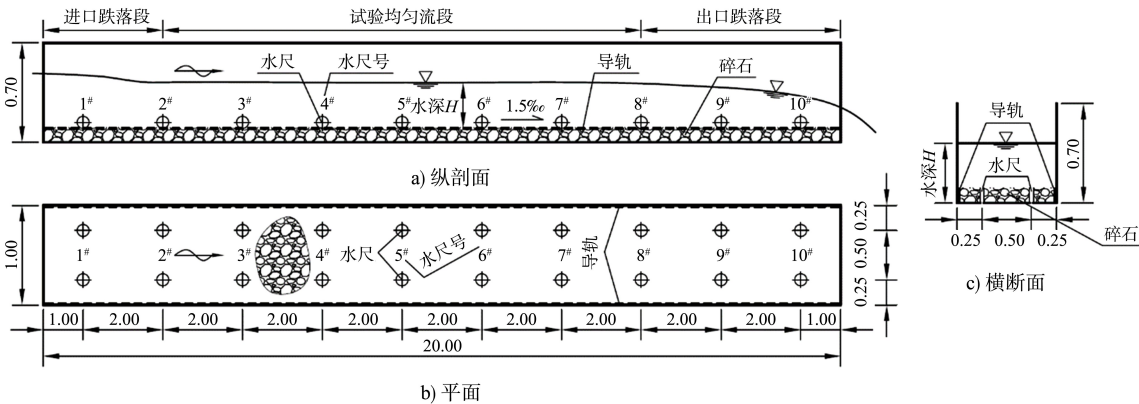


图 3 水槽试验布置 (单位: m)

### 2.2 试验控制

进口流量由矩形薄壁堰控制, 堰后水流经前池进入水槽。出口水位采用不受尾门控制的自由跌落(图 3), 目的是在水槽中上段能自动形成一定长度的均匀流<sup>[8]</sup>。沿程水位采用测针读取, 精度可达到 0.1 mm。为了准确控制河床底坡, 紧贴两岸设置角钢导轨, 导轨顶高由高精度经纬仪严格控制高程。

每隔 2 m(水尺位置)进行高程复核, 将导轨顶部坡度严格控制为 1.5‰。导轨顶部约高于河床 10 cm, 作为碎石铺设层。将约 10 cm 厚的碎石密集铺设在河床上, 再用方木直尺沿导轨刮制平整, 便可准确控制碎石床面的沿程坡度<sup>[9]</sup>。

### 2.3 试验工况

试验工况按均匀设计, 总计 5 个流量(15、20、40、60、80 L/s)、4 种碎石颗粒(表 1)共 20 个工况。

## 3 碎石糙率

### 3.1 断面综合糙率

试验发现, 2<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>水尺间的 12 m 槽段, 各级

流量基本都能形成均匀流(图 3)。根据施测的均匀流段水深, 应用谢才-曼宁公式, 便可推算断面综合糙率<sup>[10]</sup>:

$$n = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{v} \tag{4}$$

式中:  $n$  为断面综合糙率;  $R$  为水力半径(m), 其值为  $BH/(B+2H)$ , 其中  $B$  为水槽宽度(m),  $H$  为均匀流段水深(m);  $J$  为比降, 取 1.5‰;  $v$  为断面平均流速(m/s), 其值为  $Q/(BH)$ , 其中  $Q$  为流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

根据各级试验流量施测的均匀流段水深, 获得的断面综合糙率见表 2 和图 4。

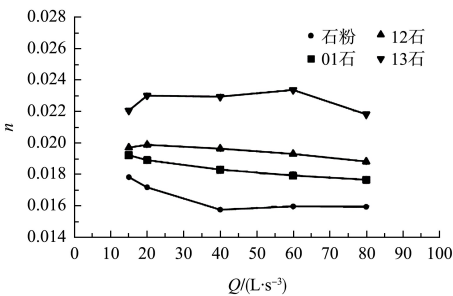


图 4 断面综合糙率随流量的变化

表 2 断面综合糙率

流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	断面综合糙率 $n$				均匀流段平均水深 $H/m$			
	石粉	01 石	12 石	13 石	石粉	01 石	12 石	13 石
	$\bar{d}_v = 3.43 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 8.13 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 12.90 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 28.60 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 3.43 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 8.13 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 12.90 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 28.60 \text{ mm}$
15	0.017 82	0.019 68	0.019 70	0.022 05	0.052 6	0.055 9	0.056 0	0.060 1
20	0.017 17	0.018 42	0.019 88	0.023 00	0.061 5	0.064 3	0.067 4	0.073 9
40	0.015 75	0.018 29	0.019 63	0.022 94	0.090 3	0.099 4	0.104 0	0.115 0
60	0.015 96	0.017 92	0.019 29	0.023 36	0.118 2	0.127 5	0.133 8	0.151 8
80	0.015 93	0.017 65	0.018 81	0.021 82	0.142 6	0.152 5	0.159 1	0.175 6
平均值	0.016 53	0.018 39	0.019 46	0.022 63	-	-	-	-

可以看出，综合糙率随流量有一定变化，总体上变化规律是随流量增大，糙率有所减小。这是因为水槽壁面铺设碎石颗粒难度较大，试验时壁面仍为水泥砂浆抹面，由于壁面糙率明显小于床面，所以随着水深增加，断面糙率会存在一定的减小趋势。同时，由于水面波动等原因，水位测量也存在一定误差。不过变化幅度并不大，相对偏差绝大多数控制在 4% 以内，最大不超过 8%；均方差最大仅 0.000 821，离差系数最大不到 0.05。

3.2 床面碎石糙率

由于水槽壁面采用的是没有碎石的水泥砂浆抹面，断面综合糙率  $n$  不能完全代表床面碎石糙率，需要将床面碎石糙率从断面综合糙率中分割出来<sup>[11-12]</sup>。目前断面综合糙率的分割方法主要有水力半径分割法、能坡分割法<sup>[13]</sup>和加权平均法等，根据相关研究，水力半径分割法的理论分析和实例计算相对最合理<sup>[14-15]</sup>，因此本文采用水力半径分割法进行床面糙率的分割。

由水力半径分割法的计算公式，可得到床面碎石糙率的计算公式为：

$$n_b = \left( \frac{n^{3/2} \chi - n_w^{3/2} \chi_w}{\chi_b} \right)^{2/3} \tag{5}$$

式中： $\chi$  为断面湿周 (m)，其值为  $B+2H$ ； $n_b$  为水槽床面糙率，即碎石糙率； $\chi_b$  为床面湿周 (m)，其值为  $B$ ； $n_w$  为水槽壁面糙率，即水泥砂浆抹面糙率； $\chi_w$  为壁面湿周 (m)，其值为  $2H$ 。

水泥砂浆抹面的糙率一般取 0.010 ~ 0.013。本文通过进行床面和壁面均为水泥砂浆抹面的糙率试验，得到  $Q$  为 15 ~ 80 L/s 时，糙率为 0.011 30 ~ 0.011 74，平均值为 0.011 50，与相关文献基本一

致，因此本文壁面糙率  $n_w$  取 0.011 50。

通过式 (5) 计算出的床面碎石糙率见表 3 和图 5。可以看出，碎石糙率随流量仍有一定变化，但变化幅度明显小于综合糙率，且变化幅度较小，相对偏差绝大多数控制在 3% 以内，最大不超过 7%；均方差最大仅 0.001 04，离差系数最大仅 0.042。最后采用各级流量的平均值作为碎石糙率的最终取值。

表 3 床面碎石糙率

流量 / ( $L \cdot s^{-1}$ )	$n_b$			
	石粉	01 石	12 石	13 石
	$\bar{d}_v = 3.43 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 8.13 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 12.90 \text{ mm}$	$\bar{d}_v = 28.60 \text{ mm}$
15	0.018 40	0.019 97	0.020 50	0.023 14
20	0.017 80	0.019 75	0.020 86	0.024 45
40	0.016 46	0.019 49	0.021 10	0.025 15
60	0.016 92	0.019 37	0.021 11	0.026 36
80	0.017 08	0.019 32	0.020 83	0.024 87
平均值	0.017 33	0.019 58	0.020 88	0.024 79

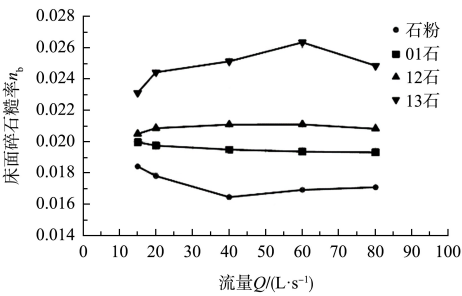


图 5 床面碎石糙率随流量的变化

3.3 糙率变化规律

为了不与床面碎石糙率  $n_b$  混淆，将碎石糙率表示符号改为  $n_s$ 。从图 6 可见，碎石糙率  $n_s$  随粒径的增大呈现 1/6 次方的幂指数递增，与式 (1)、(2) 等已有研究成果一致。其表达式为：

$$n_s=0.013\ 9\ \bar{d}_v^{1/6}\tag{6}$$

式中： $n_s$ 为碎石糙率； $\bar{d}_v$ 为类均匀碎石的平均等容粒径（mm），试验粒径范围为 3.43~28.6 mm。

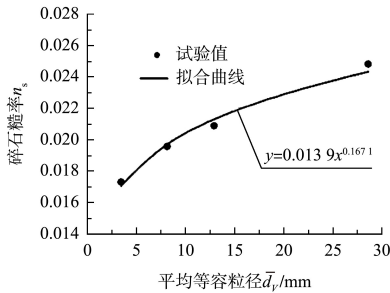


图 6 碎石糙率随粒径的变化规律

式(6)的试验粒径范围与式(2)差异不大，其系数 0.013 9 仅比式(2)的系数 0.013 8 稍大，表明在相同粒径下糙率差异不明显，未能体现出碎石糙率比卵石大的特点。其原因主要有：

1) 粒径的表示方法不同。式(6)采用的是等容粒径，而式(2)采用的是筛分粒径，二者在数值上一般存在差异。

2) 颗粒的均匀程度不同。式(6)适用于类均匀碎石颗粒，颗粒级配虽然较窄，但仍具有一定的不均匀性，较小颗粒具有填充孔隙作用，会在一定程度上减小整体糙率；而式(2)主要适用于均匀卵石颗粒。

本文主要针对实用性和方便性，直接采用了市面上购买的碎石颗粒，即未做进一步筛分的类均匀颗粒。这也提出，下一步有必要研究均匀碎石颗粒的糙率。

4 结语

1) 与卵石加糙相比，碎石加糙具有容易获取、使用方便和糙率相对较大的特点，在给河工模型加糙带来极大方便的同时，也有利于山区河道以及变态模型的加糙，研究十分必要。

2) 通过系列的统计分析，提出四级类均匀碎石颗粒的样本单元质量  $REW = 1 \sim 2\text{ kg}$ ，颗粒小者可取低值，颗粒大者可取高值。

3) 通过均匀流水槽试验，采用明渠均匀流公式计算断面综合糙率，应用水力半径分割法将床

面糙率从断面综合糙率中分割，从而得出类均匀碎石颗粒密铺糙率  $n_s$  与其平均等容粒径  $\bar{d}_v$  的关系，即  $n_s=0.013\ 9\ \bar{d}_v^{1/6}$ 。

参考文献：

[1] 水利部科技教育司, 交通部三峡工程航运领导小组办公室.长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集[M].武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.

[2] 虞邦义.河工模型相似理论和自动测控技术的研究及其应用[D].南京: 河海大学, 2003.

[3] 惠遇甲, 王贵仙.河工模型试验[M].北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[4] 黄伦超, 许光祥.水工与河工模型试验[M].郑州: 黄河水利出版社, 2008.

[5] 卢汉才, 杜宗伟.梅花形糙率的确定[C]//南京水利科学研究所.泥沙模型试验技术经验交流会泥沙模型报告汇编.南京: [出版者不详], 1978: 258-264.

[6] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京: 水利电力出版社, 1998.

[7] CHANG Y L.Laboratory investigation of flume traction and transportation[J].Transactions of the American society of civil engineers, 1939, 104( 1): 1246-1284.

[8] 程勇, 刘焕芳, 李强.山溪卵石性河床流速分布规律试验研究[J].水电能源科学, 2018, 36( 3): 110-112.

[9] 马健, 孙东坡, 曹卫平, 等.概化弯道段潮汐模型系统设计与制作[J].海洋工程, 2009, 27( 2): 104-109.

[10] 孙东坡, 丁新求.水力学[M].郑州: 黄河水利出版社, 2009.

[11] CHENG N S.Resistance Coefficients for artificial and natural coarse-bed channels: alternative approach for large scale roughness[J].Journal of hydraulic engineering, 2015, 141( 2): 325.

[12] 李甲振, 郭永鑫, 甘明生, 等.河工模型试验加糙方法综述[J].南水北调与水利科技, 2017, 15( 4): 129-135.

[13] 钱宁, 万兆惠.泥沙运动力学[M].北京: 科学出版社, 1983.

[14] 许光祥.综合阻力与河床及河岸阻力关系的处理方法与阻力方程组解的存在关系[J].水利学报, 1996( 7): 31-36.

[15] 钟亮.河道形态阻力分形特征研究[D].重庆: 重庆交通大学, 2011.