

泥沙粒径对其均匀系数分布影响的试验研究

周家俞¹ 尹崇清¹ 段金曦² 吴门伍³

(1. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073; 3. 珠江水利委员会 科学研究所, 广东 广州 510611)

摘要:在挟沙水流中,泥沙颗粒的运动是随机的。对于不同的点,泥沙组成是不一样的,即泥沙颗粒组成具有不同均匀程度,它的非均匀系数 φ 沿垂向存在一定规律性。通过水槽试验,分别对3种粒径泥沙颗粒探求泥沙组成的非均匀系数沿水深方向的规律。试验表明:对于粗颗粒试验泥沙,其非均匀系数随水深的增加而增大;中、细颗粒试验泥沙,非均匀系数随水深的增加而减小,但二者的减小梯度存在差异。

关键词:颗粒粒径; 水深; 非均匀系数; 挟沙水流

中图分类号: TV14 **文献标识码:** A

1 概述

泥沙颗粒粒径大小分布是挟沙水流研究中的一个重要内容,而颗粒组成(这里是指狭义上的粗细沙含量)的均匀程度也是一个不可忽视的重要研究内容。在天然河流中,水流具有脉动特性,床面上泥沙颗粒的受力也是完全随机的,所以泥沙颗粒起动、悬浮等就具有双重随机性。而泥沙组成的均匀程度也是指定位置泥沙颗粒粗细的一个侧面指标,颗粒组成均匀与否,无论对于数学模型计算还是物理模型研究都有很重要的影响。目前对于泥沙颗粒非均匀系数在垂向上的分布规律研究得还很少,孟晓刚^[1]、倪晋仁^[2]、曲铁众^[3]等研究者从力学角度、颗粒之间的相互作用以及在不同泥沙浓度的条件下,对泥沙颗粒分选模型和机理进行了一系列的探讨。众所周知,颗粒粒径分布是“上细下粗”型,但这并不能反映泥沙组成的均匀程度,事实上不同中值粒径的泥沙颗粒所反映出来的泥沙组成均匀程度并不一样。本文主要利用试验方法,研究不同中值粒径泥沙颗粒大小对非均匀系数 φ ($\varphi = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$) 沿垂向的分布规律。

2 试验及试验参数

试验在宽、高各0.5 m,长为33 m的可变底坡的玻璃水槽中进行,试验中控制床面有一定程度的泥沙淤积,使得悬移质泥沙与床沙有交换,可以随机分选泥沙颗粒大小。试验同时保证水流为二维均匀流,宽深比 $B/H \leq 4$,且上下游控制水深差不超过2 mm。

试验中分别采用中值粒径 d_{50} 为0.064,0.02,0.056 mm的天然非均匀沙,级配曲线见图1。

流量采用电磁流量计测控,泥沙浓度采用取样烘干称重方

法测量,选用粒径计法和移液管法对颗粒级配进行分析,然后进行非均匀系数的计算。

试验在不同浓度、不同水流组合条件下进行,水面比降均为1‰。对于某种中值粒径的粒径泥沙,通过改变泥沙浓度和水流条件以及水槽尾门来控制流速,保证床面上有一定程度的淤积,测量垂线不同点的泥沙浓度并分析泥沙颗粒组成。

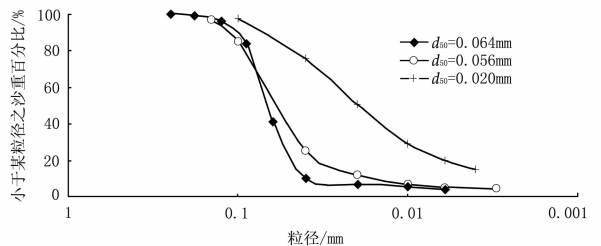


图1 试验用沙级配曲线

试验组次系列,试验参数见表1所示。

3 试验资料整理分析

3.1 中值粒径为0.064 mm泥沙对 φ 的影响

图2(a)显示了中值粒径为0.064 mm的泥沙颗粒在不同水力条件下的非均匀系数 φ 在垂向上的分布情况。分别观测了0423、0429及0504等测次在7种试验条件下(不同试验条件下,泥沙浓度和水力条件均存在差异),各观测位置的泥沙颗粒组成及非均匀系数的分布情况。从图2(a)中可以看出:不同水力条件和泥沙浓度情况下,非均匀系数 φ 均随水深的增大而增大,即越是靠近水面,泥沙组成越不均匀,由宽级配泥沙颗粒组成,而在床面附近泥沙颗粒组成则相反。同时,在近底区非均匀系

收稿日期:2009-05-28

基金项目:国家重点基础研究发展规划973项目(2003CB415205);国家自然科学基金项目(50479036);湖北省创新群体基金项目(2003ABA195);博士点基金项目资助(20020486017)

作者简介:周家俞,男,重庆交通大学西南水运工程科学研究所,助理研究员。

数变化不是很明显,在主流区变化较为剧烈。从整体来看,非均匀系数 φ 最大值达到了 3.9,但是不同测次的系数 φ 并不一样,主要原因是受泥沙浓度和水流条件的影响。如 0423、0507 二测次流量 Q 和水深 H 均相同,即所谓水力条件相同,而泥沙浓度分别为 0.82 kg/m^3 和 2.3 kg/m^3 ,由于泥沙浓度增大,使得处于扩散区的泥沙组成变得更加不均匀,非均匀系数 φ 的梯度有所增加;而 0504 和 0507 测次的泥沙浓度均为 2.3 kg/m^3 ,水流雷诺数 Re 分别是 3.15×10^4 和 4.42×10^4 ,泥沙组成大小差异在水流扩散区变化较为明显,对非均匀系数 φ 的梯度产生了影响。尽管如此,泥沙浓度和水力条件的差异基本不会改变非均匀系数 φ 在水深方向上的变化规律。

表 1 挟沙水流的试验参数

系列	粒径 $d_{50}/$ mm	流量 $Q/$ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	水深 $h/$ cm	温度 $T/$ $^{\circ}\text{C}$	雷诺数 $Re/10^{-4}$	浓度 $S/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩阻流速 $U_* / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
0423	0.064	31.5	11.3	25.0	4.837	0.82	3.328
0427	0.064	50.00	13.6	22.0	6.746	0.91	3.650
0429	0.064	22.63	11.1	23.5	3.377	0.77	3.298
0504	0.064	22.64	11.1	20.3~20.5	3.151	2.30	3.298
0507	0.064	31.53	11.3	21.0	4.418	2.30	3.328
0511	0.064	40.25	13.2	23.0~23.5	5.550	2.41	3.596
0520	0.064	22.60	11.1	22.0	3.260	1.62	3.298
0524	0.064	31.51	11.3	23.0~24.0	4.676	2.44	3.328
0527	0.064	40.22	13.2	24.0	5.740	3.03	3.596
0816-1	0.02	19.50	10.4	28.0	3.283	1.46	3.192
0816-2	0.02	26.30	10.7	28.5	4.440	1.71	3.238
0819	0.02	14.65	10.5	27.5~28.0	2.460	1.06	3.208
0921	0.0145	22.60	11.1	28.0	3.730	1.60	3.298
01017-1	0.015	24.70	10.8	21.0	3.500	1.24	3.253
01017-2	0.015	35.80	11.9	22.0	5.050	1.24	3.415
0908	0.056	28.70	11.5	27.0	4.580	5.61	3.357
0910	0.056	31.50	11.2	27.0	5.070	3.94	3.310
0913-2	0.056	28.60	11.5	29.0	4.770	2.47	3.357
0915	0.056	50.15	13.9	27.0	7.510	4.90	3.690
0917	0.056	31.40	11.1	28.0	5.180	4.42	3.298
0919-2	0.056	40.10	11.1	28.5	6.690	1.86	3.298
0920	0.056	31.51	11.1	29.0	5.310	1.70	3.298

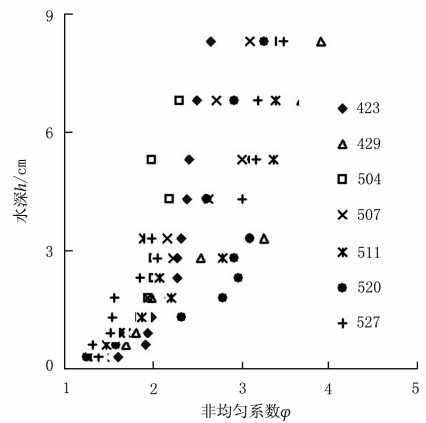
3.2 中值粒径为 0.02 mm 泥沙对 φ 的影响

图 2(b) 显示了中径为 0.02 mm 的泥沙颗粒在不同水力条件下的非均匀系数 φ 在垂向上分布情况。图中是采用中径较细的泥沙进行观测的,其原因在于图中所示的各个测次,泥沙浓度变化相对较小,均在 $1.0 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ 间变化,其非均匀系数 φ 集中在 $1.5 \sim 2.5$ 间,变化范围较小,主要是由于试验颗粒组成较细,在上层水体中受水流紊动较弱,分布相对均匀,碰撞机率相当,非均匀系数较小,沿垂向梯度变化小。而靠近床面近底区则相反,水流紊动相对较强,颗粒间碰撞机会大,自然组成较宽级配泥沙。

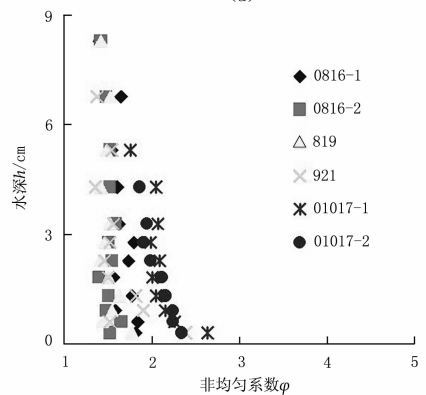
3.3 中值粒径为 0.056 mm 泥沙对 φ 的影响

图 3 是中值粒径为 0.056 mm 泥沙颗粒在不同水力条件下的非均匀系数 φ 在垂向的分布情况。从图 3 可以看出:非均匀系数 φ 随水深增加而递减,在各种水力条件和泥沙浓度情况下,非均匀系数均在水面位置相对集中,在近底区相对分散(存在差异)。这种现象与前述中值粒径为 0.064 mm 泥沙颗粒非均匀系数分布规律相反。非均匀系数 φ 沿垂向呈减小的趋势,梯度较中值粒径 0.02 mm 泥沙的大,同样与粗颗粒沿垂向分布规

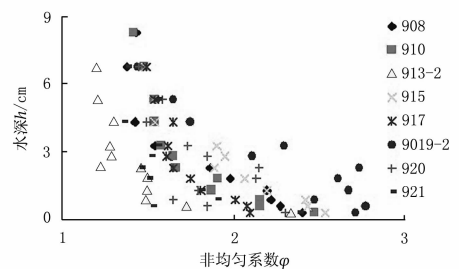
律相反。主要表现为:泥沙颗粒组成在近壁区相对不均匀,非均匀系数 φ 接近于 3.0,而在水流扩散区, φ 值减小到 1.5 左右。当然,不同测次的 φ 值变化有所不同,其原因同样是由于水流条件和泥沙条件的差异所造成。



(a)



(b)

图 2 非均匀系数 φ 沿水深方向上的分布图 3 非均匀系数 φ 沿垂向分布规律

4 分布机理分析

泥沙颗粒悬浮是水流紊动扩散和颗粒重力双重作用叠加的结果。颗粒悬浮则是水流紊动扩散占据主导地位,颗粒下沉则是重力作用占据主导位置。就以上 3 种中值粒径的泥沙而言,其悬浮原因是多方面的,可能与泥沙浓度、水流条件以及泥沙颗粒大小及均匀程度有关。但是就非均匀系数 φ 的变化趋势而言,试验泥沙颗粒大小起绝对主导作用。

对 d_{50} 为 0.064 mm 的泥沙来说,由于水流的紊动扩散,大部分中小颗粒被起动悬浮而离开床面。采用 d_{50} 作为该点泥沙颗粒大小的指标,各水层处的泥沙中值粒径在沿垂向方向上是递减的,颗粒越小越易悬浮。在试验水流条件下,这些颗粒不能下沉至床面,只能在水流中浮游前进,再加上床面泥沙浓度较

大,颗粒与颗粒之间的碰撞比较剧烈,这样床面上泥沙就比较均匀,离开床面的颗粒比较多,故系数 φ 均呈随水深的增大而增大的规律。

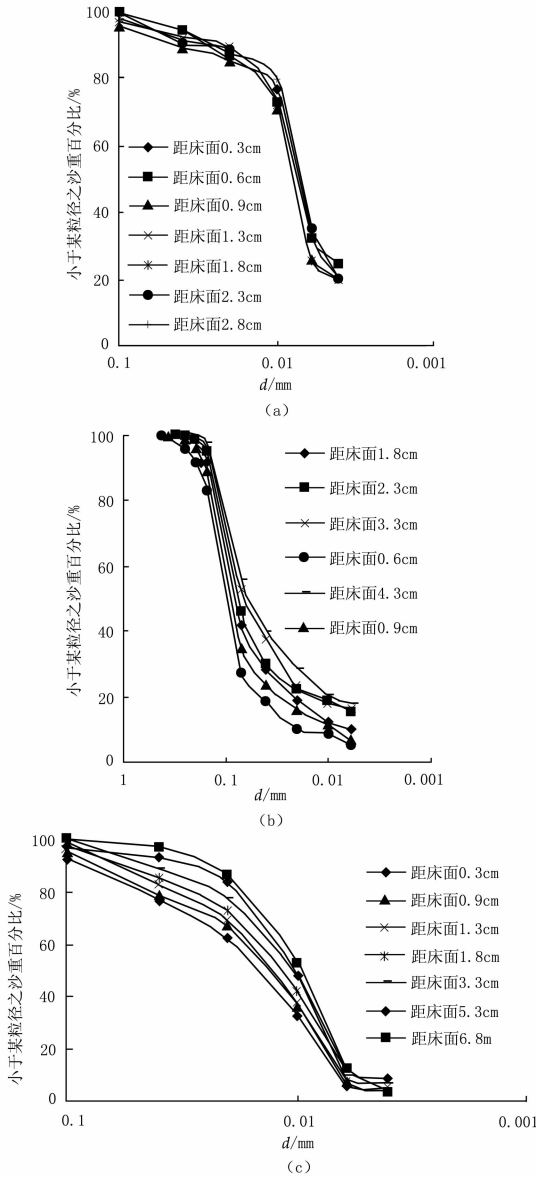


图 4 泥沙颗粒粒径分选结果

对于细颗粒这种规律就明显得多,试验中观测到水流中泥沙颗粒浓度沿垂线方向上几乎均匀分布,这样也影响了水流紊动情况,各水层间的水流紊动情况变化不是很大,因此各水层之间的颗粒交换也不太强烈,基本保持原有的泥沙颗粒组成情况,也就是说非均匀系数在整个垂线方向上变化大。

而对于中值粒径 0.056 mm 与中值粒径 0.064 mm 的泥沙,非均匀系数沿垂向方向上分布则相反。图 4 是 3 组泥沙级配曲线簇的比较。图 4(b) (泥沙中值粒径 0.064 mm) 粒径分级 (或者对非均匀系数贡献最大) 主要发生在粒径 0.1 mm 以下部分,而图 4(c) 的泥沙也是主要发生在这一区间 (0.1 mm 以下),二者可以相互衔接。这说明:在该水流条件下,水流只能悬浮起,或者是对这一区间 0.1 mm 以下的颗粒粒径比较敏感。因此,在这样大小的颗粒区间中,颗粒所占比例变化不大,非均匀系数也相对较稳定。

再者由于粗细泥沙的悬浮指标不同,它们在水流中的位置不同,细颗粒泥沙将位于水流上部,粗颗粒则位于水流下部,接近底部边壁,因而,粗颗粒有更多的机会与边壁碰撞、摩擦,对水流的干扰较粗颗粒大。

5 结论

在适当的宽深比水槽中产生二维均匀水流,泥沙与水流相互掺混,颗粒随水流一起运动,相互作用,相互影响。泥沙颗粒受水流紊动扩散和自身重力作用的双重影响,使得泥沙颗粒大小在水中沿水深方向上分布不均,其组成也存在差异。

(1) 对于较粗颗粒试验泥沙来说,颗粒分选明显,其非均匀系数随水深的增加而增大,主流区较为明显。

(2) 对于中、细颗粒试验泥沙,中颗粒泥沙分选相对明显,细颗粒泥沙分选相对较差,非均匀系数保持比较稳定,二者非均匀系数则随水深的增加而减小,但二者递减梯度有明显差异。

参考文献:

- [1] 孟晓刚,倪晋仁. 固液两相流中颗粒受力及其对垂向分选的影响. 水利学报,2002,(9):6-13.
- [2] 倪晋仁,曲轶众. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选模型. 水动力学研究与进展,2003,(5):349-354.
- [3] 曲轶众,倪晋仁,孟晓刚. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选机理. 水动力学研究与进展,2003,(7):483-488.
- [4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学. 北京:中国水利水电出版社,1998.

(编辑:常汉生)

(上接第 72 页)

失。极限状态时,梁 BM1, BM2 的刚度相对梁 B0 刚度的提高幅度分别为 282% ,270% 。

5 结论

(1) 采用碳纤维布修补加固后,可以提高有切口(裂缝)梁的受弯承载力。

(2) 混凝土梁强度达到设计强度,卸载后加固与混凝土梁强度达到设计强度后,不卸载加固,极限荷载比较接近,说明卸载对极限承载力的影响不大。因此,实践中碳纤维加固不需要将构件卸载,直接加固即可。

(3) 碳纤维布修补加固切口梁的挠度较未修补加固梁小,梁的曲率也变小,这说明碳纤维布加固在提高了梁刚度的同时,

降低了梁的延性。

(4) 修补加固使梁的裂缝形态发生改变,裂缝间距普遍减小,并随外力的增大而更加细密,最后发生剪压破坏或碳纤维布与混凝土之间的剥离破坏,说明碳纤维布修补加固对混凝土的裂缝展开有明显的制约作用。

参考文献:

- [1] 吴志平,杨林德. 外贴碳纤维增强材料加固混凝土梁的抗弯设计. 地下空间与工程学报,2005,(2).
- [2] 王荣国,代成琴,刘文博等. CFRP 加固混凝土梁抗弯极限承载力的计算分析. 哈尔滨工业大学学报,2002,(3).
- [3] 王文炜,赵国藩. 玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究. 大连理工大学学报,2003,(6).
- [4] 王文炜,赵国藩. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算. 工程力学,2004,(4).

(编辑:刘忠清)