

轻骨料混凝土在寒区渠道衬砌中的应用

董伟¹, 申向东¹, 郭克贞², 田德龙², 俞婷婷¹, 何静¹

(1. 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;

2. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为研究浮石轻骨料混凝土作为渠道衬砌材料的可行性,采用天然浮石、砂、水泥、水以及工业废料粉煤灰制作浮石轻骨料混凝土渠道衬砌板,与无衬砌渠道及普通混凝土衬砌渠道进行渠床基土温度的比较;同时,利用图像处理软件对比分析普通混凝土截面与浮石轻骨料混凝土截面的形貌特征。结果表明:浮石轻骨料混凝土衬砌可以有效减缓基土与外界的热交换速度,使基土在整个冻结期温度变化缓慢,基土冻结延迟或不发生冻结;在引气剂用量相同的情况下,浮石轻骨料混凝土可见封闭孔的数量在整个截面所占面积比例远大于普通骨料混凝土。

关键词:浮石;轻骨料混凝土;普通混凝土;渠道;衬砌

中图分类号:TV431⁺.9

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2016)02-0074-05

Application of lightweight aggregate concrete to canal lining in cold regions//DONG Wei¹, SHEN Xiangdong¹, GUO Kezhen², TIAN Delong², YU Tingting¹, HE Jing¹ (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of using pumice lightweight aggregate concrete as channel lining material, a canal lining board of pumice lightweight aggregate concrete was produced using natural pumice, sand, cement, water, and industrial waste fly ash. The foundation soil temperatures of an unlined canal, a normal concrete-lined canal, and a pumice lightweight aggregate concrete-lined canal were compared. Meanwhile, the morphology characteristics of the normal concrete cross-section and the pumice lightweight aggregate concrete cross-section were compared using image-processing software. The results indicate that the pumice lightweight aggregate concrete lining can effectively slow down the rate of heat exchange between the foundation soil and surrounding environment, inducing that the foundation soil temperature changes slowly throughout the freezing period and foundation soil congelation delays or does not occur. The proportion of the area of visible closed holes of pumice lightweight aggregate concrete to the whole cross-section area is far greater than that of normal concrete in the case of the same amount of air-entraining agent.

Key words: pumice; lightweight aggregate concrete; normal concrete; canal; lining

我国农业灌溉用水量比例已从20世纪70年代的80%左右降到目前的60%左右,且仍有下降趋势,其主要原因之一是渠系水利用率比较低。渠道衬砌防渗是减少渠道输水损失的有效途径,渠道衬砌的材料主要包括刚性衬砌、膜料衬砌、土料衬砌等。在众多衬砌形式中,又以刚性衬砌(尤其是混凝土渠道衬砌)占主导地位。我国北方大部分地区属于季节性冻土地区,冬季气温低,由于设计、施工、管理、维护等方面的因素,部分渠道出现裂缝、错位、滑塌、鼓起、剥落等各种冻胀破坏现象^[1-4]。这些普

遍存在的冻害现象严重影响渠道的正常供水,如何防治这些渠道的冻胀破坏成为一个亟待解决的工程问题。

浮石是一种无机非金属材料,其特点是质轻易碎、硬度适中、吸水率大、保温隔热性能好、强度高、耐酸碱、耐腐蚀,且无污染、无放射性等,是理想的天然、绿色、环保材料^[5-6]。浮石轻骨料混凝土是由浮石、砂、掺合料、水泥和水按一定配合比拌和而成。轻骨料混凝土在建筑领域中的应用较为广泛,美国、挪威、日本等国对于轻骨料混凝土的研究较早,并将

基金项目:国家自然科学基金(51569021);高等学校博士学科点专项科研基金(20121515110002);内蒙古自治区自然科技计划应用与研究开发项目(20130425)

作者简介:董伟(1987—),男,博士研究生,主要从事水工新材料研究。E-mail: dw617@126.com

通信作者:申向东(1955—),男,教授,主要从事结构工程与环境力学研究。E-mail: ndsxd@163.com

其应用到桥梁、房屋、公路、铁路等领域。我国对轻骨料混凝土的研究起步较晚,在 20 世纪七八十年代进入快速发展期,主要应用在混凝土墙面板、砌块、桥梁、房屋及耐火内衬中^[7-8]。

基于浮石轻骨料混凝土自身特点以及多年室内试验成果,拟将其应用到严寒地区水利渠道衬砌工程中,将浮石轻骨料混凝土与普通骨料混凝土作为渠道衬砌材料,对比研究不同方案下渠底基土(土体深度 0~1 000 mm)在整个冻结期温度的变化情况,并通过图像处理软件分析两种骨料混凝土截面中骨料与孔的数量及孔的分布情况,以便为寒区渠道防渗提供一种新型衬砌材料。

1 原材料与试验方案

1.1 试验原材料

a. 水泥:采用蒙西 P·O42.5R 水泥,初凝和终凝时间分别为 180 min 和 395 min,28 d 抗压强度为 51.9 MPa,抗折强度为 8.4 MPa,其余性能符合 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求。

b. 粉煤灰:采用呼和浩特金桥电厂生产的 I 级粉煤灰,主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃。

c. 粗骨料:采用内蒙古乌兰察布市生产的天然浮石,堆积密度为 710 kg/m³,表观密度为 1 330 kg/m³,1 h 吸水率为 9.8%,筒压强度为 2.12 MPa,本试验采用浮石粒径为 5~20 mm。

d. 保温板:采用内蒙古巴彦淖尔市磴口县民族玻纤制品厂生产的保温板,表观密度为 20.9 kg/m³,导热系数为 0.037 W/(m·K),其余性能满足 GB/T 10801.1—2002《绝热用模塑聚苯乙烯泡沫塑料》II 类标准。

e. 细骨料:II 区中砂的细度模数为 2.87,堆积密度为 1 650 kg/m³,表观密度为 2 620 kg/m³,含泥量为 2.1%,含水率为 2.2%。

f. 减水剂:采用 UFN-5 型高效减水剂,以 β-萘酸钠甲醛高缩聚物为主要成分。

g. 引气剂:采用 MKL-CR III 型混凝土引气剂,以非离子型树脂表面活性剂为主要成分。

h. 水:普通自来水。

1.2 试验方案及配合比

试验在内蒙古巴彦淖尔市河套灌区农渠上进

行。试验包括 3 个处理方案:方案 1 为裸渠(无衬砌);方案 2 为普通骨料混凝土渠道衬砌(在已有衬砌渠道上进行试验);方案 3 为浮石轻骨料混凝土渠道衬砌,衬砌断面结构形式见图 1。坡板两侧及底板下部分别埋置不同深度的温度传感器,地温线布置如图 2 所示。试验所用混凝土配合比及其相关指标见表 1。



图 1 渠道衬砌断面

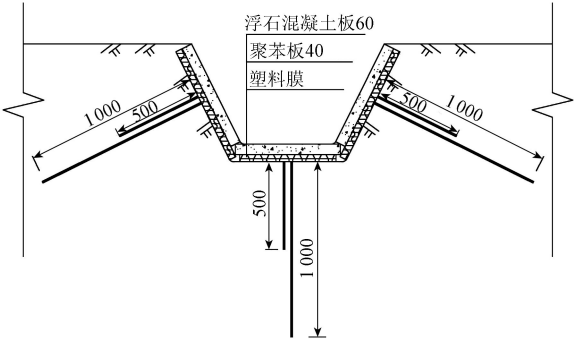


图 2 地温线布置示意图(单位:mm)

2 试验结果及分析

2.1 渠底基土温度变化及特征

图 3 为 3 种方案下不同深度(0~1 000 mm)基土温度在整个冻结期的变化规律。图 3 表明:不同深度的地温变化幅度均为方案 3>方案 2>方案 1,基土表层(0~500 mm)受气温变化影响较大,尤其是阳面受阳光的直射作用,变幅较明显;中下层(500~1 000 mm)受气温变化影响较小,变化平缓。12 月到 2 月上旬各层间基土地温逐渐降低至最低,2 月上旬进入融化期,各层基土地温随时间逐渐升高。由图 3(a)(b)(c)可知:3 种方案渠床基土温度变化规律类似,即地温在冻结期内呈抛物线变化。方案 3 中 500~1 000 mm 基土在整个冻结期间都没有出现负温,方案 2 和方案 1 中 500 mm 基土 1 月都出现

表 1 不同骨料混凝土配合比及其相关指标

类 别	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)						强度/ MPa	干表观密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
	水泥	粉煤灰	河砂	粗骨料	水	外加剂			
普通骨料	304	76	670	1 130	180	3.8	32.4	2 445	1.58 ^[9]
浮石轻骨料	304	76	832	665	230	3.8	27.1	1 890	0.408 ^[10]

注:混凝土强度为现场坡板及底板多次回弹试验的回弹强度平均值。

负温,方案1发生在1月中旬,方案2发生在1月下旬。这主要是由于混凝土板及保温板的隔热作用有效地减缓了基土与外界的热交换速度,使基土在整个冻结期温度变化缓慢,基土冻结延迟或不发生冻结^[11-12]。方案3轻骨料混凝土提升基土温度的作用最为显著,最低温度为-0.8℃,而方案2和方案1的最低温度分别为-3.3℃和-3.9℃,方案3比方案1与方案2分别提高了2.5℃和3.1℃。

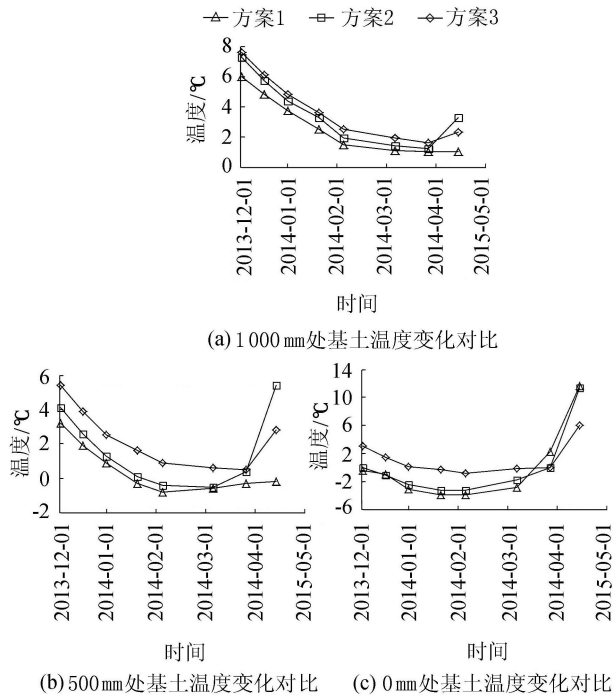


图3 3种方案0~1000 mm深度渠底基土温度分布

2.2 浮石轻骨料混凝土与普通骨料混凝土对比

2.2.1 浮石轻骨料与普通骨料混凝土截面比较

将浮石轻骨料混凝土与普通骨料混凝土分别按照上述配合比制作 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件,对比浮石轻骨料与普通粗骨料混凝土的形貌特征(图4和图5),并应用图像处理软件

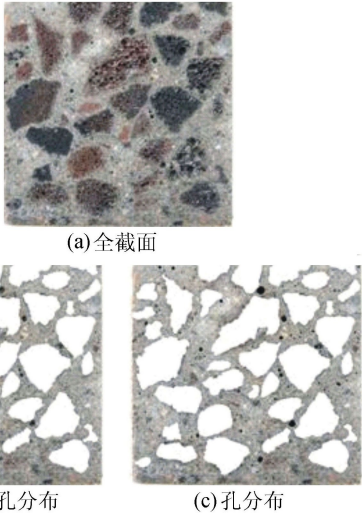


图4 浮石轻骨料混凝土截面

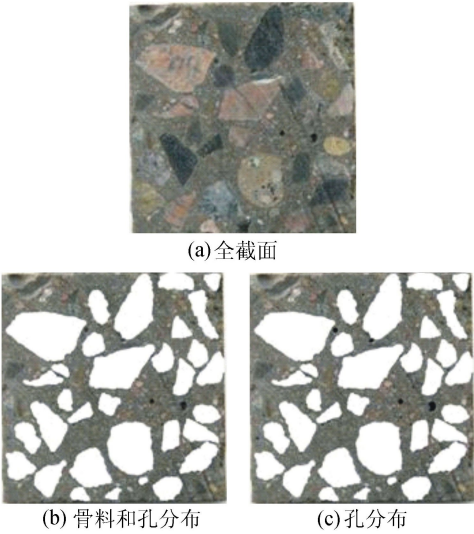


图5 普通骨料混凝土截面

Photoshop 进行定量化对比。

用 Photoshop 的魔棒和羽化半径工具测量整个截面骨料及水泥基材料表面可知封闭孔在整个截面所占面积,测量结果如表2、表3所示。

表2 不同骨料混凝土粗骨料测量结果						PPI
类别	编号	面积	周长	圆度	高度	宽度
普通骨料	1	330 866	2 689. 145	0. 574 954	924	558
	2	102 772	1 497. 460	0. 575 929	264	510
	32	104 162	1 351. 442	0. 716 678	342	424
浮石轻骨料	1	161 453	1 745. 702	0. 665 757	434	496
	2	184 553	2 006. 755	0. 575 894	598	510
	33	24 418	682. 658	0. 658 434	156	234

表3 不同粗骨料混凝土可见孔测量结果						PPI
类别	编号	面积	周长	圆度	高度	宽度
普通骨料	1	560	88. 183	0. 904 942	24	28
	2	500	86. 526	0. 839 223	22	28
	103	578	92. 962	0. 840 480	28	28
浮石轻骨料	1	1 158	133. 053	0. 821 985	40	40
	2	1 476	150. 710	0. 816 598	46	44
	136	320	69. 991	0. 820 863	22	19

由表2可知:普通骨料与浮石的面积分别占总面积的38.37%、39.66%,与配合比计算中粗骨料所占体积大致相同。表3对比了两种骨料混凝土可见孔的数量及大小,结果表明:普通骨料混凝土与浮石轻骨料混凝土砂浆基体中可见封闭孔的数量分别为103个和136个(分别占总面积的2.22%和3.28%)。形成这种现象的主要原因与浮石轻骨料的吸水特性有关,本试验采用未预湿轻骨料,在拌和过程中,大量的水分被浮石吸收。水泥水化过程中固体体积增加,当水泥石的初始结构形成之后,浮石所吸收的水分通过毛细管传输,促进了水泥石水

化反应,水泥基材料水化完全后砂浆中形成了分布均匀的孔隙(图4(c))。普通骨料混凝土中为混凝土提供二次反应的水存在于水泥石当中,这些水可能形成较大的水滴,水泥石凝结硬化后形成较大的孔洞(图5(c))^[13]。轻骨料混凝土中可见孔的数量及所占截面面积的比例均大于普通骨料混凝土。文献[14]通过浮石替代不同比例的普通粗骨料,研究100次冻融循环作用下质量损失率、强度损失率及相对动弹性模量的变化规律,结果表明:质量损失率、强度损失率随着浮石替代率的增大而减小,相对动弹性模量随着浮石替代率的增大而增大。其宏观表现为:浮石轻骨料混凝土的抗冻性能优于普通骨料混凝土,由此预测轻骨料混凝土作为渠道衬砌材料具有更好的服役寿命。

2.2.2 浮石骨料与普通骨料混凝土性能比较

通过国内外文献及室内长期试验结果^[5-6,14-17]对比浮石轻骨料混凝土与普通骨料混凝土的特性:

a. 经济效益:普通石料价格为60~75元/m³,浮石轻骨料价格为30~35元/m³。由以上分析可知,粗骨料在混凝土中用量大致相同,因而在其他材料用量相同的情况下,将浮石作为粗骨料可降低10%~20%的成本。

b. 变形协调作用:普通骨料中石子与砂浆的弹性模量相差悬殊,变形协调能力差;轻骨料内部有很多大小、形状不一的孔洞,与砂浆之间的弹性模量相差较小,因此收缩和徐变较大,其值约为普通混凝土的1~1.5倍,极限变形大于普通混凝土。混凝土冻融过程中,浮石轻骨料与砂浆之间有较好的变形协调能力,二者作为一个整体共同抵抗冻融时产生的拉压变形。

c. 耐久性:骨料与砂浆的界面过渡区是影响混凝土抗冻耐久性的主要因素之一,由图4、图5可以看出,浮石轻骨料-浆体界面比普通石子-浆体界面区黏结更为牢固:一是因为浮石裸露的比表面积大于普通骨料;二是因为浮石孔本身具有吸水 and 供水的“微泵”作用,浮石被砂浆包裹,提高了密实度,从而使得混凝土结构具备了较好的抗渗性能。同时,混凝土冻胀时,浮石内、外部孔隙对水结冰产生的膨胀变形起缓冲作用,提高了混凝土的抗冻性能,从而进一步提高了混凝土渠道衬砌板的服役寿命。

d. 导热系数:轻骨料混凝土的导热系数一般比普通混凝土低1/2~1/3,因为浮石混凝土结构是一种非匀质多孔结构,浮石内部大量孔隙使得混凝土的热阻值增大,在低温作用下,温度由表到里的传输速度大大减缓,从而提升了材料的保温隔热作用,降

低了渠道基土的冻结深度,减小了渠道基土的冻胀力与冻胀变形。

3 结 语

我国北方地区渠道防渗衬砌材料以普通骨料混凝土为主,但这种衬砌形式会消耗大量的水泥和砂石材料,既不经济又不环保,在季节性冻土地区混凝土衬砌渠道的冻胀破坏已经严重影响渠道的运行能力,清理和翻修又消耗大量的人力、物力、财力。所以,环境友好型渠道衬砌新材料成为渠道衬砌材料的一个发展方向。浮石轻骨料混凝土作为一种新型材料,具有经济效益好、自重小、抗冻耐久性好、导热系数低等特点。通过浮石轻骨料混凝土与普通骨料混凝土渠道衬砌的对比,发现浮石混凝土可以显著提高渠床基土温度,渠床基土延迟冻结或不发生冻结,从而缓解了基土的冻胀变形,减小了衬砌板与基土之间的位移。浮石轻骨料混凝土作为一种新型环保衬砌新材料,将会在渠道、护坡、护岸等水利工程中得到更大的发展和更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 张茹,王正中.季节性冻土地区衬砌渠道冻胀防治技术研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):236-240. (ZHANG Ru, WANG Zhengzhong. The progress of the research on the prevention and cure of the irrigation channel frozen injury in the seasonal frozen soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25 (3):236-240. (in Chinese))
- [2] 张晨笛,何武全,张希栋,等.季节性冻土地区渠道防渗防冻胀新材料及应用[J].水资源与水工程学报,2011,22(3):145-148. (ZHANG Chendi, HE Wuquan, ZHANG Xidong, et al. New materials and their application for canal anti-seepage and anti-frost heave in seasonal soil frozen areas[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22 (3): 145-148. (in Chinese))
- [3] 廖云,刘建军,陈少峰.混凝土渠道冻胀破坏机制与抗冻技术研究进展[J].岩土力学,2008,29(增刊1):211-214. (LIAO Yun, LIU Jianjun, CHEN Shaofeng. Research progress of damage mechanism of frost heave and anti-frost technique of concrete canal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1):211-214. (in Chinese))
- [4] 申向东,张玉佩,王丽萍.混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J].农业工程学报,2012,28(16):80-85. (SHEN Xiangdong, ZHANG Yupei, WANG Liping. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16):80-85. (in Chinese))

- [5] 吕兴军. 浮石混凝土技术试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [6] 王海龙. 轻骨料混凝土早期力学性能与抗冻性能的试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.
- [7] HOLM T A, BREMNER T W. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments [M]. Washington, D. C. : US Army Corps of Engineers, 2000.
- [8] 霍俊芳. 轻骨料混凝土的研究现状与发展[J]. 建筑技术, 2009, 40(4):363-365. (HUO Junfang. Status quo and development of research on lightweight aggregate concrete[J]. Construction Technology, 2009, 40(4):363-365. (in Chinese))
- [9] 安鹏, 邢义川, 张爱军. 基于部分保温法的渠道保温板厚度计算与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):54-62. (AN Peng, XING Yichuan, ZHANG Aijun. Thickness calculation and numerical simulation of insulation board for canal using partial insulation method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17):54-62. (in Chinese))
- [10] 孙婧, 麻建锁, 蔡焕琴, 等. 利用玉米秸秆制备浮石复合混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2013(7):138-140. (SUN Jing, MA Jiansuo, CAI Huanqin, et al. Experimental study on preparation of pumice composite concrete using corn straw[J]. Concrete, 2013(7):138-140. (in Chinese))
- [11] 银英姿, 申向东, 步丰湖, 等. 冻土区渠道保温防冻措施对比研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(4):209-213. (YIN Yingzi, SHEN Xiangdong, BU Fenghu, et al. Comparative study on channel frost heave and Insulation measures for permafrost region[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2010, 31(4):209-213. (in Chinese))
- [12] 程满金, 申利刚, 步丰湖, 等. 聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5):22-27. (CHENG Manjin, SHEN Ligang, BU Fenghu, et al. Application of polystyrene insulation board used for anti-frost in Lining Channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5):22-27. (in Chinese))
- [13] 汪世刚. 浅谈混凝土孔结构[J]. 商品混凝土, 2013(8):61-62. (WANG Shigang. The pore structure of concrete[J]. Ready-mixed Concrete, 2013(8):61-62. (in Chinese))
- [14] 储建军. 浮石混合骨料混凝土抗冻性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2011.
- [15] 牛建刚, 林红. 轻骨料混凝土的发展与研究展望[J]. 城市建筑, 2012(13):108-109. (NIU Jiangang, LIN Hong. The development of lightweight aggregate concrete and research prospects[J]. Urbanism and Architecture, 2012(13):108-109. (in Chinese))
- [16] 张海燕, 杜应吉, 张金凯. 我国混凝土防渗渠道问题分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(6):52-54. (ZHANG Haiyan, DU Yingji, ZHANG Jinkai. Some problems on seepage control of concrete channels [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(6):52-54. (in Chinese))
- [17] 唐军务, 张琦彬, 雷霜如, 等. 轻骨料混凝土梁弯曲性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3):269-273. (TANG Junwu, ZHANG Qibin, LEI Shuangru, et al. Experimental research on flexural behaviors of lightweight concrete beams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3):269-273. (in Chinese))

(收稿日期:2015-01-08 编辑:骆超)

(上接第9页)

- [10] WINTERWERP J C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(9):1339-1360.
- [11] NI Jinren, MENG Xiaogang. Forces on particles and their effects on vertical sediment sorting in solid-liquid two-phase flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2001, 16(2):128-138.
- [12] 金文, 王道增. PIV 直接测量泥沙沉速试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(1):19-23. (JIN Wen, WANG Daozeng. Direct settling velocity detection of sediment using PIV [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(1):19-23. (in Chinese))
- [13] LUO Liancong, QIN Boqiang, GAO Guang, et al. Sediment properties and dynamics in the Taihu Lake, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2006, 21(4):312-320.
- [14] 王筱. 非均匀细沙的沉速及水流挟沙力试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.
- [15] 陈曦. 长江口细颗粒泥沙静水沉降试验研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
- [16] FATHI-MOGHADAM M, ARMAN A, EMAMGHOLIZADEH S, et al. Settling properties of cohesive sediments in lakes and reservoirs[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2011, 137(4):204-209.
- [17] 吴华林, 沈焕庭, 李中伟. 泥沙颗粒沉降变加速运动研究[J]. 海洋工程, 2000, 18(1):44-49. (WU Hualin, SHEN Huanting, LI Zhongwei. Acceleration motion of sediment particles in settlement process [J]. Ocean Engineering, 2000, 18(1):44-49. (in Chinese))
- [18] 王昌杰. 河流动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.

(收稿日期:2015-01-26 编辑:郑孝宇)