文章编号:1672-3031(2017)02-0141-07

大型堆石混凝土试块特性对比试验研究

秦根泉[1,2], 梁必珠[1,2], 蒋水华[3]
(1. 江西省水利规划设计研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水工结构技术研究中心, 江西 南昌 330029;
3. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 堆石混凝土技术是基于自密实混凝土技术发展起来的一种新型大体积混凝土施工技术, 其块石料源通常具有一定的不确定性, 故对其进行现场试验是该技术成功应用的重要保证。本文论述了浯溪口水利枢纽工程中分别采用基础开挖岩石和当地鹅卵石作为堆石体浇筑大型堆石混凝土试块, 并对其进行强度、渗透和碳化等特性试验和温升监测过程。通过试块的浇筑质量及抗压强度、渗透系数、弹性模量、碳化深度和内部温升等多项指标对比分析了两种堆石混凝土试块特性, 并论证了将开挖岩石作为堆石混凝土堆石料的可行性。

关键词: 堆石混凝土; 浯溪口水利枢纽; 大试块试验; 混凝土指标; 内部温升
中图分类号: TV641.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.iwhr.2017.02.010

1 研究背景

堆石混凝土技术是基于自密实混凝土技术发展起来的一种新型大体积混凝土施工技术, 它由粒径较大的堆石块和具有高流动性的自密实混凝土组成, 该技术具有施工速度快、造价低和温控简单等优点。堆石混凝土技术自2003年由清华大学水利水电工程系金峰等[1]提出以来, 十几年来针对专用自密实混凝土的充填性、堆石混凝土综合力学性能、热力学性能、绝热温升规律和抗渗性能等展开了一系列专项的室内试验研究和工程实践验证。如安雪晖等[2]设计并实施了自密实混凝土充填堆石体试验, 初步验证了堆石混凝土的性能, 为这种新型混凝土施工方式打下了基础。黄绵松等[3]通过浇筑带有施工冷热缝的大型堆石混凝土试块, 并切割取样, 通过试验得出堆石混凝土轴心抗压强度高于其浇筑所使用的自密实混凝土强度, 堆石混凝土的抗渗标号可满足水工大坝混凝土的要求。石建军等[4]通过自密实混凝土充填堆石体试验, 研究了自密实混凝土在堆石体的流动和密实情况, 表明自密实混凝土充填堆石体技术可行, 试验达到了预期效果。徐俊等[5]通过在相同条件下, 使用ANSYS的APDL语言编写程序命令流模拟浇筑普通混凝土和堆石混凝土大体积混凝土的温度场, 对比其所产生的温度场分布的云图, 验证了堆石混凝土内部水化热产生的较少, 对大体积混凝土裂缝控制更加有效。

本文依托浯溪口水利枢纽工程开展堆石混凝土大型试块试验, 对选用堆石混凝土堆石料的具体要求及注意事项进行论述, 通过监测试块内部温升过程进一步验证堆石混凝土技术的温控优势, 以期对堆石混凝土技术进行一次比较全面的性能检测, 促进该技术的推广应用。

2 堆石混凝土技术

2.1 堆石混凝土构造 堆石混凝土(Rock-Filled Concrete, 简称RFC)是利用自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)的抗分离性能好以及自流动性的特点, 在粒径较大的块石内随机充

收稿日期: 2016-06-03
基金项目: 江西省水利厅科技成果重点推广计划项目(TG201205); 江西省水利厅科技项目(KT201533)
作者简介: 秦根泉(1977-), 男, 江西南昌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工设计研究。E-mail: qingenquan@163.com

填自密实混凝土而形成的混凝土堆石体。它具有水泥用量少、水化温升小、综合成本低、施工速度快、良好的体积稳定性和层间抗剪能力强等优点[6]。堆石混凝土构成如图1所示。

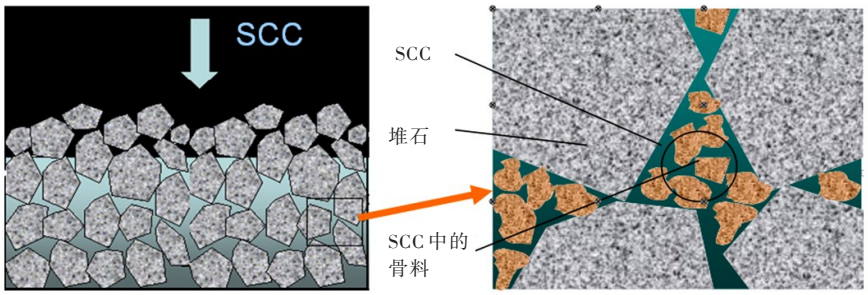


图1　专用自密实混凝土充填堆石体形成堆石混凝土

2.2　堆石混凝土技术施工方式　堆石混凝土技术目前已发展有普通型堆石混凝土和抛石型堆石混土两种主要施工方式[6]，普通型堆石混凝土是将堆石先入仓，然后浇筑自密实混凝土SCC；抛石型堆石混土是利用自密实混凝土的缓冲作用，先浇筑高抗分离的自密实混凝土，后抛入堆石，形成完整、密实的混凝土。

2.3　堆石混凝土技术原材料要求　堆石混凝土技术所需要的原材料与常规混凝土基本一致，结合其自身特点仍有以下特殊要求[6]：(1)水泥。堆石混凝土宜选用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥，可使用矿渣硅酸盐水泥、火山灰硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥；不宜使用铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥以及早强型水泥。(2)掺和料。专用自密实混凝土的掺合料包括粉煤灰、矿渣粉和硅粉等活性掺合料，也可以使用石粉等惰性掺合料。一般粉煤灰的使用较为普遍，粉煤灰原则上应满足2级灰的标准。(3)细骨料。自密实混凝土细骨料宜选用中砂或中粗砂。细砂和粗砂亦可用于配制自密实混凝土，但是细砂的使用易导致外加剂用量的增加，成本提高，所配制的自密实混凝土黏性较大，黏性较低时易发生泌浆、分离等问题；粗砂的使用易导致粉体用量较高，成本增加，故自密实混凝土最好选用中砂或中粗砂。(4)粗骨料。粗骨料宜选用4.75～20 mm连续级配的碎(卵)石，或4.75～10 mm和10～20 mm两个单粒级配碎(卵)石，石子的孔隙率应低于40 %。粗骨料最大粒径不超过20 mm，针片状颗粒含量不超过8 %。(5)外加剂。在堆石混凝土施工中，对专用自密实混凝土的工作性能要求很高，不仅要具有卓越的流动性、抗离析性和强充填性，而且要保持较长时间的自密实性能。在水利工程中，由于胶凝材料的地区差异性较大，须针对工程选用的水泥、粉煤灰等胶凝材料进行专用外加剂配方设计，确保其能够满足相应要求。(6)堆石料。堆石混凝土所用的堆石料应满足新鲜、完整、质地坚硬、不得有剥落层和裂纹的要求。在普通型堆石混凝土施工中，堆石料的粒径原则上大于300 mm；抛石型堆石混凝土施工时则不需要对堆石料的粒径进行特殊要求。

3　实例工程概况

浯溪口水利枢纽工程[7]位于昌江干流中游，地处江西省景德镇市浮梁县境内，是昌江上的控制性工程。工程规模为大(2)型，工程等别为Ⅱ等。水库正常蓄水位56.00 m，死水位45.00 m，防洪限制水位50.00 m，设计洪水位62.30 m(P = 1 %)，校核洪水位64.30 m(P = 0.05 %)。水库总库容为4.747亿m^3，调节库容1.33亿m^3，电站装机容量32 MW。枢纽总体布置沿轴线从左至右依次为：左岸碾压混凝土非溢流坝段(长163.72 m)、表孔溢流坝段(5孔、长78.00 m)、低孔溢流坝段(6孔、长108.00 m)、河床式厂房坝段(2台大机组、1台小机组，长43.10 m)和右岸碾压混凝土非溢流坝段(含安装间坝段，长105.80 m)，坝轴线长498.62 m，最大坝高46.80 m。

根据堆石混凝土技术的特点，在浯溪口水利枢纽工程导流明渠纵向围堰、厂房尾水挡墙等大体积混凝土部位采用了堆石混凝土施工工艺，为简化施工工序和争取工期节点发挥了重要作用。图2给出了浯溪口水利枢纽工程下游总体形象图，其中应用了堆石混凝土技术的工程部位如图2所示。



图2　工程下游总体形象图

4　大型堆石混凝土试块试验

4.1　大型试块制作　根据工程所在地块石料的可能来源，堆石混凝土堆石料选用大坝基础开挖岩石和河滩收集的鹅卵石两种材料进行对比。岩石开挖料岩性为千枚状板岩夹变质砂岩，要求选用未风化的新鲜岩石，块径为300～800 mm，因岩石属板岩，开采的石块片理较发育，形状以扁平块状居多，如图3所示。鹅卵石料在当地河滩零星分布，以砂岩为主，石岩含量高，硬度大，块径偏小，为50～350 mm，未经筛选料有一定级配性，如图4所示。



图3　开挖岩石堆石料



图4　鹅卵石堆石料

从上述对块石料的描述可知，本工程可供选择块石料源对比堆石混凝土的块石料要求条件均不十分理想。其中，岩石开挖料块石片理较发育，块体扁平状居多，在块石体之间容易大面对大面，不利于自密实混凝土在缝隙间流动充填。鹅卵石料块径偏小，并且含有一定量的小个体，自然堆积形成的堆石体空隙率和空隙规模太小，不利于自密实混凝土的充填胶结。为查明以上两种料源浇筑堆石混凝土的质量，在现场分别采用每种堆石料各浇筑一个试块进行试验检测，试块尺寸为2.0 m×2.0 m×2.0 m。试块的制作过程如下：试场浇筑模板采用钢模，钢模缝隙用止水带封闭，以防止自密实混凝土泌浆流失。模板架立完成后，先用反铲将堆石料入仓，仓位高度为2.0 m，不分层。堆石料入仓后，利用混凝土罐车将拌合楼拌制的自密实混凝土运送到浇筑场地，用反铲从试块仓面顶部下放自密实混凝土，自密实混凝土通过自身流动性下渗填充堆石料间的空隙。两个试块采用同批次拌制的自密实混凝土同时浇筑，均依照实际施工工艺浇筑形成，基本能反映和模拟现场实际施工情况。试块混凝土设计指标为C_{28}15W4，经配合比设计和现场试验所确定的自密实混凝土配合比参数见表1。

表1　每立方米自密实混凝土配合比参数

设计参数	水泥/kg	石粉/kg	水/kg	砂/kg	石子/kg	外加剂/kg	扩展度/mm	V漏斗/s
C_{28}15W4	235	303	160	885	595	6.4	655	18.1

4.2　大型试块整体及芯样外观评价　从浇筑的大试块拆模后的质量外观情况可知：开挖岩石料试块的外观平整、光洁、密实性较好，见图5。鹅卵石料试块表面存在大量空洞，见图6。出现这种现象

说明自密实混凝土在开挖岩石料中的流动性、连通性好于鹅卵石料试块。



图5　开挖岩石料试块



图6　鹅卵石料试块

开挖岩石料试块共取了4个芯样，芯样总体胶结情况较好，见图7。但是在扁平、尖角形的块石料附近有缝隙和脱空现象，见图8。同时，在泥土没有冲洗干净的大面，黏结强度非常低，可以轻易用手掰开，见图9。从取芯情况可以看出，采用开挖岩石料作为堆石体的堆石混凝土，应该对块石的形状进行适当控制，尽量避免使用过于扁平和有尖角的石料，同时需要及时对块石冲洗干净，以保证浇筑的堆石混凝土密实性和黏结强度。



图7　芯样测量



图8　扁平块石脱空缝隙



图9　冲洗不合格低强结合面

鹅卵石料试样取芯过程中，因当地鹅卵石中石英含量高，硬度大，取芯钻进难度比块石料大很多，同时根据取出的芯样情况，已能基本判定试块质量不合格。因此现场只取了2个芯样，见图10。鹅卵石料试块芯样可以看出在鹅卵石之间存在较多空洞，并存在自密实混凝土泌浆现象，见图11。泌浆产生的胶结物呈泡沫状，强度非常低。产生此现象的原因为当地鹅卵石块径较小，且大小不一，堆填后，空隙宽度小，且连通性不好，造成浇筑的混凝土容易形成空洞，自密实混凝土会产生泌浆现象。从外观质量及取芯情况可以得出，当地鹅卵石料浇筑的堆石混凝土试块质量难以达到合格标准。



图10　鹅卵石料试块取芯



图11　鹅卵石料试块泌浆物

4.3　室内试验分析　室内检测试验委托江西省水利厅基本建设工程质量检测中心站完成，室内试验项目分为抗压强度、渗透系数、弹性模量和碳化深度[8]。试验试样以模拟实际施工工艺浇筑的大试块芯样按照要求切割磨制加工而成，芯样的选取充分考虑了堆石料、自密实混凝土及两者之间填充和胶结程度三方面的因素，因而基本能代表堆石混凝土真实的物理特性。其中因鹅卵石料大试块外观

质量已判定为不合要求，且只取了2组芯样，在室内检测试验中只进行了抗压强度和SCC碳化深度检测，而对拟选用的岩石开挖料芯样进行了全部项目检验，检测结果见表2。

表2　堆石混凝土各项指标检测结果

堆石料类型	设计指标	抗压强度/MPa	弹性模型/GPa	渗透系数/(cm/s)	SCC碳化深度/mm
岩石开挖料	$C_{28}15W4$	34.0	27.8	4.01×10^{-8}	8
鹅卵石料	$C_{28}15W4$	27.0			8

从表2结果可以看出，2种大试块取芯试样的抗压强度均满足设计要求，岩石开挖料的试块抗压强度大于鹅卵石料的试块强度。这表明堆石混凝土芯样的抗压强度主要取决于堆石料和自密实混凝土的黏结强度，鹅卵石料因表面光滑，故与自密实混凝土的黏结强度小于岩石开挖料和自密实混凝土的黏结强度。另外，堆石混凝土弹性模量试验检测结果为27.8 GPa，满足规范中对C20混凝土的相应要求[9]；堆石混凝土渗透系数试验结果为4.01×10^{-8} cm/s，达到了防渗混凝土的指标要求。从试验结果可知，以开挖岩石料浇筑的堆石混凝土试块的混凝土各项指标均达到了设计要求。其中，抗压强度指标安全裕度较大。虽然堆石混凝土试样的抗渗性能试验值达到了防渗混凝土的指标值，但从大试块钻取的内部芯样外观质量分析，大块径的块石本身存在细小裂隙，以及自密实混凝土填充不够充分形成的块石间缝隙，这些都有可能形成渗透通道。因此，采用堆石混凝土施工挡水建筑物，很有必要在临水面设一层常态混凝土或纯自密实混凝土防渗层。

专用自密实混凝土是堆石混凝土的胶结填充成分，需要有很好的抗分离性能和自流动性[10]，因此在配合比中水泥用量较常规混凝土高出很多，且添加了多种专用外加剂。本文试验首次对专用自密实混凝土进行了碳化深度检测。主要检测设备为CCB-70混凝土碳化试验箱，试验环境二氧化碳浓度为20 %±3 %；温度20 ℃±5 ℃；湿度为70 %±5 %。试块碳化深度试验结果为8 mm(28 d)，参照常规混凝土经试验修正后计算的碳化深度7.1 ~ 26.6 mm(30 d)[11]，可以得出试样的碳化过程较为缓慢，属于较浅的碳化深度。因此，用该专用自密实混凝土浇筑的堆石混凝土以及不易振捣的钢筋混凝土结构，不会因碳化加剧而降低建筑物的耐久性。

4.4　温升监测　为监测堆石混凝土水化温升值，在现场浇筑的两个堆石混凝土试块中心位置各埋设1支温度计，监测混凝土内部温升，监测时间为2014年9月18日至2014年11月5日，历时48 d，试块内部温度基本达到稳定。监测所得的堆石混凝土试块内部温度增长曲线见图12、图13。

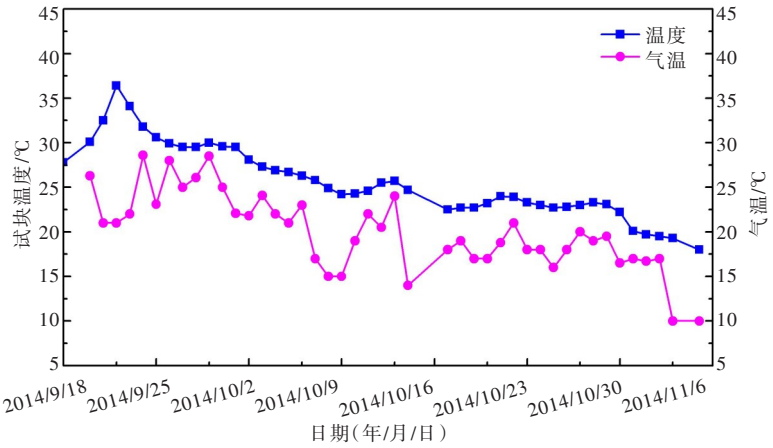


图12　块石试块温度与气温对比

从图12、图13可以看出，块石料堆石混凝土试块内部最高温度为36.35 ℃，水化温升值为10.05 ℃，内外最大温差为2014年9月22日测得的15.35 ℃；鹅卵石料堆石混凝土试块内部最高温度为31.25 ℃，水化温升值为4.95 ℃，内外最大温差为2014年9月22日测得的10.25 ℃。两试块的温升值和内外温差均满足规范要求。同时发现，鹅卵石堆石混凝土试块的温升值小于块石堆石混凝土试块的主要原因是：所用鹅卵石个体小，且大小不一，堆积后内部空隙率小于块石料的堆积体，浇筑

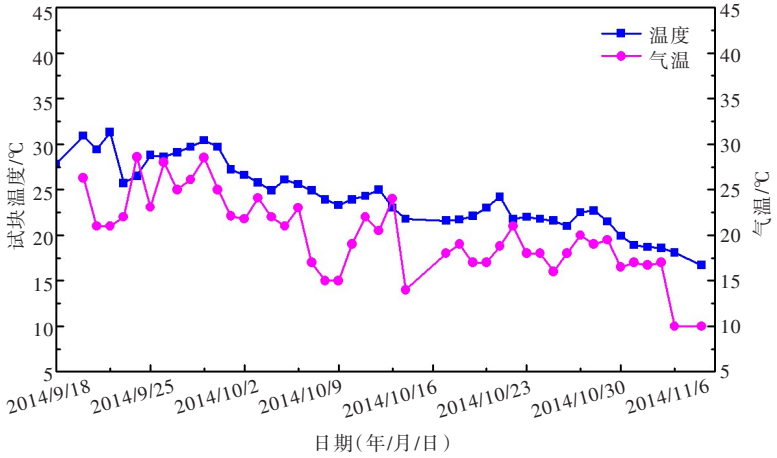


图 13　鹅卵石试块温度与气温对比

试块所用的自密石混凝土工程量更少，所以绝对温升小于块石料堆石混凝土试块。虽然鹅卵石料堆石混凝土内部温升值更小，但如前所述，其浇筑质量难以保证，因此在本工程明渠纵向围堰、厂房尾水挡墙等部位未采用鹅卵石料作为堆石混凝土堆石料。

5　结语

本文介绍了浯溪口水利枢纽工程分别采用基础开挖岩石和当地河滩收集的鹅卵石作为堆石混凝土堆石体浇筑大型试块的试验研究过程，主要结论如下：(1)通过试验查明了堆石料块径、体型及冲洗不合格对堆石混凝土浇筑质量所带来的不利影响；通过钻孔取芯和进行室内试验对比了不同块石料试块的混凝土性能。其中，鹅卵石料试块因堆石体块径偏小，自密石混凝土在堆石体空隙间流动性不好，造成试块质量不合格；开挖岩石料除要求对块石料体形适当控制并重视块石冲洗干净外，试块的各项混凝土检测指标均达到或超过设计要求。根据试验结果最终选择基础开挖岩石作为堆石混凝土堆石料。(2)经过对专用自密实混凝土的碳化深度检验得出其28d碳化深度为8 mm，与常规混凝土属同一水平，证明用该专用自密实混凝土浇筑的堆石混凝土和不易振捣的钢筋混凝土，不会因碳化加剧而降低混凝土建筑物的耐久性。(3)经在大型试块内埋设的温度计跟踪监测数据显示，堆石混凝土内因块石含量的增加，内部温升值明显降低，试验结果突显了堆石混凝土的温控优势。(4)虽然本文对堆石混凝土大试块试验进行了比较全面的检测分析，但未从施工工艺方面对堆石混凝土堆石体的要求进行研究。例如，块径超大对入仓起吊设备功率的要求和对运送块石机械容积率的影响，这类问题会直接影响到堆石混凝土技术应用的合理性和经济性，有待后期根据工程具体情况进行有针对性的研究。

参　考　文　献：

[1] 金峰，安雪晖．普通堆石混凝土大坝施工方法[P]．中国专利申请号ZL 200710100315.3．
[2] 安雪晖，金峰，石建军．自密实混凝土充填堆石体试验研究[J]．混凝土，2005(1)：3-6．
[3] 黄绵松，周虎，安雪晖，等．堆石混凝土综合性能的试验研究[J]．建筑材料学报，2008，11(2)：206-211．
[4] 石建军，张志恒，金峰，等．自密实混凝土充填堆石体的试验[J]．南华大学学报：自然科学版，2005，19(1)：38-40．
[5] 徐俊，江昔平．堆石混凝土在大体积混凝土中的温度场分析[J]．混凝土，2013(7)：33-36．
[6] 堆石混凝土技术白皮书[M]．北京：北京华实水木科技有限公司，2011．
[7] 梁必诀，陈长久．堆石混凝土在导墙部位的应用[J]．水利水电技术，2014，45(7)：57-59．
[8] SL352-2006 水工混凝土试验规程[S]．北京：中国水利水电出版社，2006．

[9]　SL191-2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2008.
[10]　CECS 203-2006，自密实混凝土应用技术规程[S]. 北京：中国计划出版社，2006.
[11]　蒋利学，张誉. 混凝土碳化深度的计算与试验研究[J]. 混凝土，1996(4)：12-17.

Comparative experimental investigation on the properties of large rock-filled concrete test blocks

QIN Genquan[1,2], LIANG Bijue[1,2], JIANG Shuihua[3]
(1. *Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning Design and Research Institute*, *Nanchang* 330029, *China*;
2. *Jiangxi Provincia Water Conservancy Engineering Structure Technology Research Center*, *Nanchang* 330029, *China*;
3. *School of Civil Engineering and Architecture*, *Nanchang University*, *Nanchang* 330031, *China*)

Abstract: Rock-filled concrete is a new technology for mass concrete that is developed on the basis of the self-compacting concrete. However, there exist certain uncertainties in the stone sources of rock-fill concrete. Pouring test in the engineering field to investigate the properties of large rock-filled concrete is an important prerequisite for the successful application of this technology, This paper aims to perform a comparative experimental investigation on the properties of large rock-filled concrete test blocks, which are poured by using excavated rocks and local collected pebbles at Wuxikou hydro-junction project site as rock-fills, respectively. The properties of large rock-filled concrete test blocks are studied and compared systematically through the concrete indexes, including compressive strength, permeability coefficient, elastic modulus and carbonization depth of the test block. The superiority and feasibility of taking excavated rocks as the stone sources of rock-fills are verified.

Keywords: Rock-filled concrete; Wuxikou hydro-junction project; large test block; Concrete indexes; Internal temperature rise

（责任编辑：王冰伟）

（上接第 140 页）

Heat budget of tributary bay in Three Gorges Reservoir: a case study of Zhuyi River

ZHAO Xiaojie[1], CHENG Yao[1,2], HUANG Weijian[3], WANG Yuchun[2], DANG Chenghua[1]
(1. *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*;
2. *Department of Water Environment*, *IWHR*, *Beijing* 100038, *China*; 3. *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*)

Abstract: In order to better understand the heat budget of tributary bay in reservoir, spatial-temporal distribution of water temperature structure, water surface heat fluxes and heat transports by advection are analyzed in this paper, based on the measured water temperature, meteorological data, and shortwave radiation data which are downloaded from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Results show that (1) water surface temperature of Zhuyi Bay ranges from 12.0 ℃ to 31.6 ℃, and bottom temperature ranges from 11.8 ℃ to 27.8 ℃. (2) Influenced by the interaction between the main stream and the tributary, there is temperature difference in water surface along the tributary bay, and the net heat flux at the confluence of the main stream and tributary ranges from −63.02 W/m^2 to 128.81 W/m^2, in the middle reaches of tributary it ranges from −62.01 W/m^2 to 116.14 W/m^2, and in the upstream of tributary bay it ranges from −59.31 W/m^2 to 78.04 W/m^2. (3) The heat transports by advection correlate with the fluctuation of water level. (4) The heat transports by advection is the main factor of the changes of water heat content in the tributary.

Keywords: Three Gorges Reservoir; tributary; water temperature structure; net heat flux; heat transports by advection

（责任编辑：杨　虹）