DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0405
MU Yanhu, ZHU Xinyi, YUE Pan, et al. Monitoring investigation on winter freezing-thawing of dam core wall soils in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 756 -763. [穆彦虎, 朱忻怡, 岳攀, 等. 寒区大坝心墙土料冬季冻融与防控监测[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 756 -763.]

寒区大坝心墙土料冬季冻融与防控监测

穆彦虎[1], 朱忻怡[2], 岳 攀[3], 王新斌[1], 任秀玲[1,4], 张振宇[1,4], 俞祁浩[1]
(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 雅砻江流域水电开发有限公司 两河口建设管理局, 四川 成都 610051; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 两河口水电站是雅砻江干流规划开发中的中游控制性龙头电站, 大坝为 300 米级砾石土心墙堆石坝。由于地处川西高原气候区, 冬季气候寒冷干燥, 大坝心墙土料填筑过程中面临着冻融问题的困扰。基于一个完整冬季的现场监测, 系统分析了这一寒区大坝心墙建筑过程中砾石土、接触黏土土料温度变化规律、冻融特征与影响因素以及现有保温措施防冻效果。结果表明, 无保温措施条件下, 砾石土、接触黏土均出现了负温冻结现象, 其中砾石土最大冻结深度达 20 cm, 接触黏土达 14 cm, 土料冻结持续时间不超过 1 个昼夜, 为短时冻土。土料降温冻结过程以与外界大气对流换热过程为主, 受气温、风速条件影响显著, 波动范围较大, 而升温融化过程以太阳辐射增温过程为主, 与有效辐射起始时间密切相关, 因此波动范围较小。监测期内, 采用三布两膜保温材料覆盖可有效防止心墙土料冻结的发生, 有、无保温材料覆盖条件下浅层土料最低温度可相差约 5 ℃。结合监测结果和现场实际, 建议将现有心墙防渗土料半幅填筑方式转换为全幅填筑, 并研发轻质、憎水保温材料及其快速收放机械设备, 以提高填筑作业进度、强化防冻效果。系统完整的现场实测结果, 可为未来寒区水电大坝建设提供基础数据和参考。

关键词: 冻融特征; 保温材料; 防渗土料; 心墙; 寒区大坝
中图分类号: TV641.4$^+$1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0756-08

0 引言

两河口水电站是雅砻江干流规划开发中的中游控制性龙头电站, 投资总额超过 600 亿元人民币, 是我国自建国以来在藏区修筑的最大基础设施。该级电站大坝为砾石土心墙堆石坝, 最大坝高为 295 m, 是国内第二、世界第三高土石坝, 其施工难度在世界范围内首屈一指。由于地处川西高原气候区, 平均海拔接近 3 000 m, 冬季日照时间短, 气候寒冷、干燥, 极端最低气温可达 -15.9 ℃, 大坝心墙防渗土料填筑过程中面临着严峻的冬季土料冻融问题。考虑到雨季对大坝心墙填筑进度的严重影响, 掌握冬季土料温度变化规律、有效开展土料冻融防控、确保心墙在冬季的高效、有序填筑, 对于两河口水电站的顺利和按期建设至关重要。

针对冻融作用对在建水电大坝的不利影响, 目前的研究主要集中在混凝土碾压坝、混凝土面板堆石坝的冬季施工和冻融防控方面, 这方面国内外已有大量的工程实践和成功经验可供参考[1-5]。针对这一问题, 中国水电发电工程学会于 2013 年在新疆专门召开了高寒地区混凝土面板堆石坝建设研讨会。然而, 针对堆石坝心墙防渗土料在冬季施工过程中面临的冻融与防控问题, 目前可供参考的工程实践和相关研究文献相对较少, 缺乏系统完整的现场监测数据的参考[6-7]。冬季负温条件下, 土料的冻结对冬季施工的影响主要体现在两个方面: 首先, 土料冻结后, 其物理力学性质与融土差异显著, 强度、变形模量等可增加 1 ~2 个数量级, 同时

收稿日期: 2018-01-15; **修订日期:** 2018-03-23
基金项目: 雅砻江流域水电开发有限公司科研试验项目(LHKA-G20160*); 国家自然科学基金项目(41690144)资助
作者简介: 穆彦虎(1985 -), 男, 新疆昌吉人, 副研究员, 2012 年中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: muyanhu@lzb.ac.cn
通信作者: 俞祁浩, E-mail: yuqh@lzb.ac.cn.

受土质类型、温度、含水(冰)量的影响，尤其温度的影响显著[8-10]。因此冻结以后，土料压实性能变差，且温度越低，压实性能越差。大伙房、清河坝心墙施工经验表明，在填筑碾压过程中为了达到设计干密度，冻结土料所需的击实功往往是正常融土的2~3倍，所需的碾压遍数大幅增加，碾压过程相当困难[11]。其次，冻融作为一种强风化作用，可显著改变土体的物理力学性质[12-16]。对于填筑碾压完毕的土料，如经历反复冻融作用，可导致其孔隙结构与孔隙率的改变，压实度降低，渗透性增加，尤其对于高压实度土体而言其渗透率的增加目前普遍认为在1~2个数量级[17-25]。因此，我国《碾压式土石坝施工规范》[26]与小浪底大坝施工技术规范中明确要求，除堆石料和过渡料外，其他任一区土料在填筑过程中均不能出现冻结或在填筑面冻结时进行填筑，必须保证心墙土料和处理好的基础不受冻结。对于已经冻结的土料必须清除或移开使其融化后，重新调整至规定含水量并重新填筑和压实，要求十分严格。

冻融作用对于水电工程的不利影响广泛存在于高纬度、高海拔等严寒地区。就我国而言，包括东北、华北、西北以及西藏、四川西北部等多年冻土和季节冻土区水电工程均面临着冻融作用的不利影响。本文结合两河口水电站大坝建设，首次系统开展了寒区水电大坝心墙冬季填筑施工过程中有、无保温材料覆盖条件下的防渗土料冻融过程的现场监测，并结合现场多要素气象条件监测，对土料的冻融特征及影响因素进行了系统分析研究。研究结果对于两河口水电站心墙的顺利填筑和工期控制具有重要的意义，同时可为未来寒区水电堆石坝的建设提供关键数据参考。

1　工程概况与监测方法

1.1　工程概况

两河口水电站地处青藏高原东侧边缘地带，属川西高原气候区，干、湿季节分明，每年10月至次年4月为干季，气候寒冷而干燥，5月至10月为雨季，气候湿润、降雨集中。气象资料显示，坝址区年平均气温为10.9 ℃，极端最高温度为35.9 ℃，极端最低气温为-15.9 ℃，冬季11月中旬至次年2月中旬平均气温低于5 ℃，1月平均气温1.4 ℃。不利的气象条件导致两河口大坝心墙填筑施工可利用天数大大减少，影响大坝的整体上升和工程施工总进度计划，同时影响到心墙的填筑质量。因此，必须采取有效的冬、雨季施工措施，以解决气候条件制约施工进度、影响施工质量的难题，尤其是冬季。

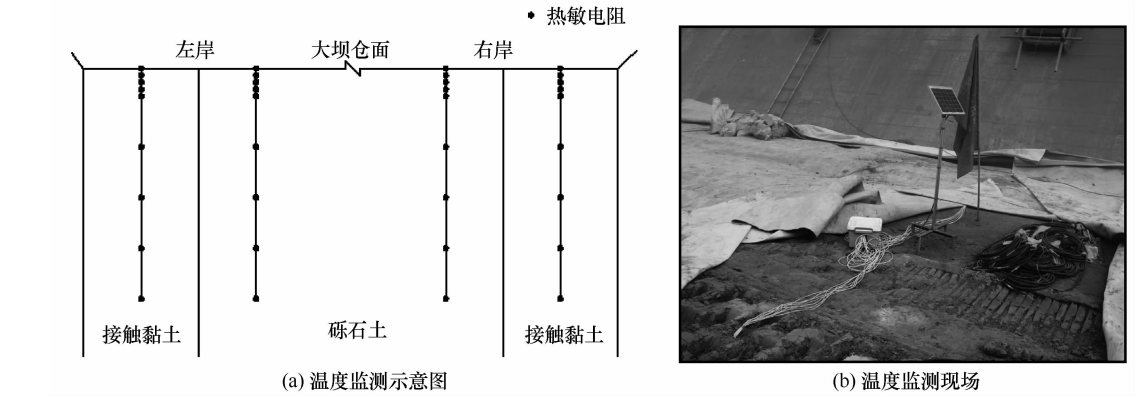
两河口砾石土心墙堆石坝坝顶高程为2 875 m，河床部位心墙建基高程为2 580 m，最大坝高为295 m。心墙防渗体顶宽为6 m，顶部高程为2 874 m，心墙两岸岸坡基岩表面设1 m厚混凝土盖板，盖板与心墙连接处铺设水平厚度为4 m的接触性黏土。心墙砾石土设计填筑量为441.14×10^4 m^3，接触黏土填筑量为$17.96\times10^4 m^3$，其中冬季时段土料填筑量为$121.98\times10^4 m^3$，接近总填筑量的30%。在目前填筑高程条件下，心墙沿河流方向长度约为130 m，宽度约为110 m，整个仓面填筑面积约为$1.43\times10^4 m^2$。

防渗土料中，接触黏土为含砾低液限黏土，其填筑含水率为16.8%，干密度为1.81 g·cm^{-3}，对应压实度为101.7%。砾石土为料场土体按要求比例掺砾石后上坝，其填筑含水率为8.1%，干密度为2.2 g·cm^{-3}，对应压实度为99.7%。

1.2　土料冬季冻融监测方法

为掌握工程施工、局地条件下两河口水电站心墙土料冻融规律及主要影响因素，为心墙土料冬季冻融防控、施工组织安排提供依据，冻土工程国家重点实验室研究团队开展了包括坝址区局地条件下的多要素气象条件监测，有、无保温材料覆盖条件下心墙接触黏土、砾石土土料冻融规律监测，具体方法如下。

针对局地条件下的坝址区气象条件，在坝址区架设有多要素小型科学气象站一台，监测要素包括空气温湿度、总辐射、净辐射、气压、风速、风向等。针对有、无覆盖条件下的心墙土料冻融监测规律，采用冻土工程国家重点实验室研制的高精度热敏电阻(量程为-50~30 ℃，测量精度为±0.05 ℃)进行不同深度土料温度的实时监测。热敏电阻温度探头埋深及现场照片如图1所示。结合两河口地区最大冻结深度及温度探头自身尺寸，从仓面表层至12 cm深度范围内埋设4组温度探头，间距为3 cm，12 cm深度以下至100 cm范围内埋设4组温度探头，间距为22 cm。土料温度监测频率为10 min/次，监测数据由数据采集仪(CR6，CR300，美国Compell公司生产)实时记录存储。



(a) 温度监测示意图 (b) 温度监测现场

图 1 心墙土料温度监测示意图及测温现场

Fig. 1 Schematic diagram of core wall soil temperature monitoring (a) and photo showing the temperature monitoring site (b)

2 心墙土料冻融规律及冻结特征

2.1 心墙区环境气象条件

图 2 给出了心墙区 2016/2017 年冬季气象实时监测结果。可以看出，监测期间气温最低值为 −5.7 ℃，最高值为 23.3 ℃，平均值约为 5.7 ℃。自 2016 年 11 月 22 日至 2017 年 2 月 22 日共计 3 个月的冬季里，气温出现负温的天数为 65 天，即约 2/3 的天数里气温出现了负温。其中，一个昼夜中负温最长持续时间约为 12 h。结合大坝所在雅江县年平均气温 11 ℃及心墙区冬季气温监测结果，按照徐学祖等[27]对季节冻土、瞬时冻土年平均气温的区划指标来看，两河口地区具备发育季节冻土的条件。从整个冬季的日平均气温变化规律看，气温日均值在 0.9 ~ 14.4 ℃范围内波动，自 12 月进入冬季后，随着冬季的深入气温日均值不断降低，至 1 月上、中旬达到最小值，随后开始缓慢回升。因此，从土料冻融防控角度来看，12 月上旬至 2 月上旬是冬季低温防控的重点，这一阶段内气温出现负温天数的频率超过 80%。

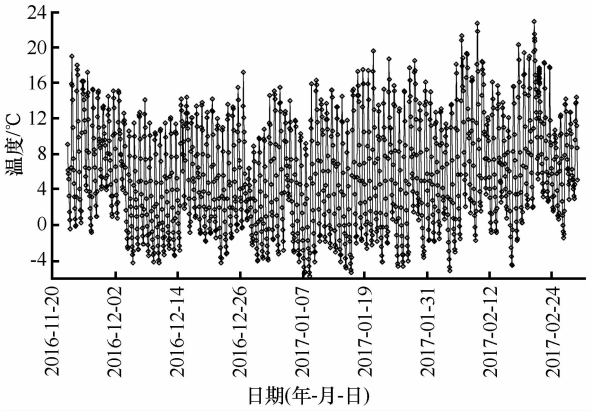


图 2 心墙区气温变化

Fig. 2 Variation of air temperature at core wall region

风速也是影响土料温度的关键因素，同时会对填筑表层土料的含水率控制造成一定的影响。在小浪底大坝防渗土料的填筑过程中，明确提出气温在 0 ℃以下而风速超过 10 m · s^{-1}时，停止施工。图 3 给出了心墙区风速监测结果，可以看出，整个冬季心墙区风速最大为 15.4 m · s^{-1}，平均值约为 2 m · s^{-1}。整个 12 月、1 月心墙区基本无 10 m · s^{-1}以上大风出现，自 2 月开始，10 m · s^{-1}大风出现频率逐渐增加。从风速日变化过程来看，夜间风速明显较小，而日间风速相对较大，且主要出现在午后(14:00)。这一风速的日变化过程与心墙土料的降温过程密切相关。

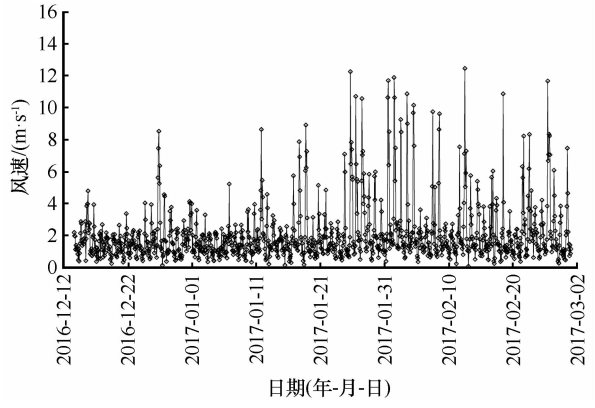


图 3 心墙区风速变化

Fig. 3 Variation of wind speed at core wall region

2.2 心墙砾石土冻融规律

图 4 给出了心墙区砾石土在无保温材料覆盖条件下表层(0.5 cm 附近)土体温度随时间变化过程。可以看出，监测期内砾石土均出线了不同程度的负温现象，最低温度可达 −4.9 ℃。结合现场判断，

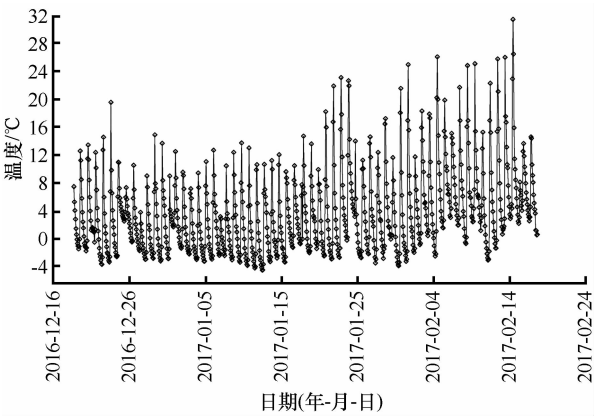


图 4　无保温材料覆盖时砾石土表层温度变化

Fig. 4　Variation of surface temperature of gravel soil without thermal insulation

表层砾石土土体呈块状、强胶结状态且肉眼可见裂隙、孔隙冰晶的存在(图 5)，因此可以判定表层土体已经发生冻结。

图 6 以 12 月 21 日 12:00 至 22 日 12:00 为例给出了心墙砾石土在无覆盖条件下的地温包络线。可以看出，自凌晨表层土体开始冻结，随时间推移冻结深度进一步增加，最大冻结深度约为 10 cm。从地温包络线上可以看出，砾石土冻结持续时间不超过一个昼夜，为典型的短时冻土，即存在时间为数小时至数天的冻土。从整个冬季的监测统计结果来看，心墙砾石土在无覆盖条件下冻结持续时间平均约为 11.5 h。从土温日较差沿深度方向的分布来看，其日较差为 0 ℃的深度约为 50 ~ 60 cm，这一

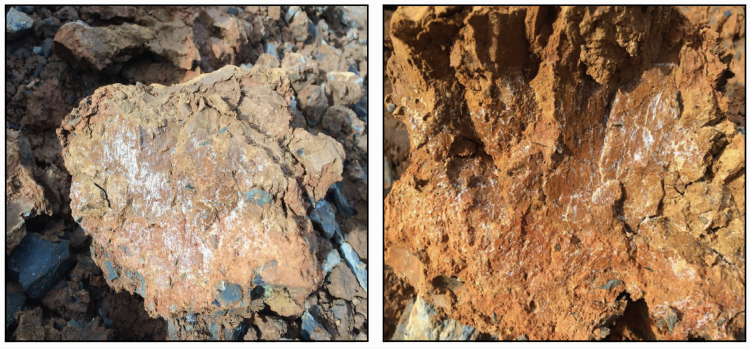


图 5　无保温材料覆盖时心墙区砾石土冻结照片

Fig. 5　Photos showing the frozen gravel soil without thermal insulation at core wall region

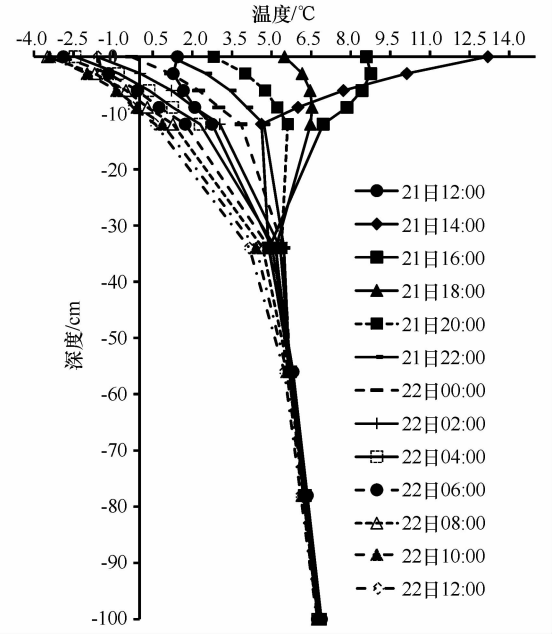


图 6　无保温材料覆盖时砾石土的地温包络线(2016-12-21 至 2016-12-22)

Fig. 6　The ground temperature profiles of gravel soil without thermal insulation from 21 to 22 December, 2016

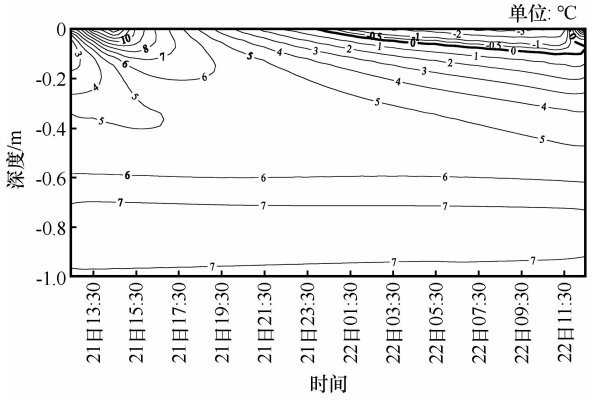


图 7　无保温材料覆盖时砾石土的地温过程曲线(2016-12-21 至 2016-12-22)

Fig. 7　The ground temperature isotherms of gravel soil without thermal insulation from 21 to 22 December, 2016

量值即为土体温度受外界环境气象条件影响深度。从土料温度过程曲线(图 7)可以看出，心墙区浅层土料的冻融过程为典型的单向冻结、双向融化过程，且均以自上而下为主。

2.3　土料冻结特征

基于冬季的现场监测结果，针对土料整体冻融

特征，包括冻结起始和结束时间、冻结深度等指标进行了统计分析。结果表明，砾石土、接触黏土的冻结起始时间波动范围较大，而冻结结束时间相对较为稳定，波动范围很小。砾石土冻结起始时间最早为 21:20，最晚为 09:30，波动范围接近 12 h。而冻结结束时间最早为 10:00，最晚为 13:56，波动范围仅为 4 h。冻结起始时间与心墙区整个冬季日平均气温表现出良好的相关性，即自 12 月开始，冻结起始时间不断提前，至 1 月上、中旬达到最早，随后随着气温日平均值的回升，冻结起始时间不断推迟。

冻结起始时间的剧烈变化与结束时间的相对稳定，与心墙区环境气象条件的变化规律及土体升温、降温过程的主要驱动因素有关。就冻结起始时间而言，土体降温冻结过程主要以与外界空气的对流换热为主，因此受当日午后气温、风速的影响十分显著，尤其两河口地区下午时段风速相对较大（图 4），因此这一过程中气温、风速的相对剧烈变化导致了冻结起始时间的剧烈变化。而冻结结束时间，即土体的升温融化过程主要以太阳辐射增温过程为主。两河口地区冬季天气基本以晴天为主，太阳辐射非常稳定，现场监测结果表明，太阳总辐射最大值基本维持在 600 $W \cdot m^{-2}$，有效辐射时间从 08:30 开始，整个冬季基本无明显波动，因此土料的冻结结束时间相对稳定，基本发生在有效辐射起始时间后 2 h 内。相较于砾石土，接触黏土冻结起始时间略晚、冻结结束时间略早，差值基本在 1 h，因此其冻结持续时间较砾石土短，差值约为 2 h。这些差异与两种土体的热物理性质差异有关。

从冻结深度来看，心墙砾石土在无保温材料覆盖条件下，最大冻结深度接近 20 cm，整个冬季的平均值接近 10 cm，且与气温日平均值在整个冬季的变化规律密切相关。自 12 月开始，冻结深度不断增加，至 1 月上、中旬达到最大，随后随着气温日均值的回升而不断减小。接触黏土的冻结深度最大约 14 cm，整个冬季的平均值约 6 cm，只有砾石土的约 60%，整个冬季的时间变化规律与砾石土相同。

3 心墙土料防冻措施效果

目前，两河口大坝心墙冬季土料防冻主要采用保温材料覆盖的方式，所采用的保温材料为三布两膜，即三层机织布加两层土工膜，室内导热系数测定该保温材料的导热系数在 0.06 ~ 0.07 $W \cdot m^{-1} \cdot ℃^{-1}$之间。冬季心墙采用半幅填筑的方式进行，其中未填筑半幅区在填筑半幅区施工过程中始终采用三布两膜覆盖，而填筑半幅区在夜间进行保温材料覆盖停止施工，日间揭开进行土料填筑作业。

现场监测开展了有、无保温材料覆盖条件下土料温度监测对比。结果表明，整个监测期间，在三布两膜保温材料覆盖条件下，心墙土料均无负温冻结现象的发生（图 8）。2017 年 1 月 25 日出现的负温现象是由现场施工人员将保温材料揭开所导致。因此，采用三布两膜保温材料覆盖的方式，可以有效防止填筑碾压完毕的土料出现负温冻结现象。但是，就施工组织而言，由于保温材料外侧机织布的吸水性，导致其在使用过程中夜间吸（凝结）水增重，摊铺和收卷困难。目前，保温材料的夜间摊铺、日间揭开过程主要以人力为主，费时费力。因此，在该保温材料的基础上，研发轻质、憎水且保温效果良好的保温材料以及快速收放机械设备对于心墙冬季高效填筑和施工组织具有重要的意义。

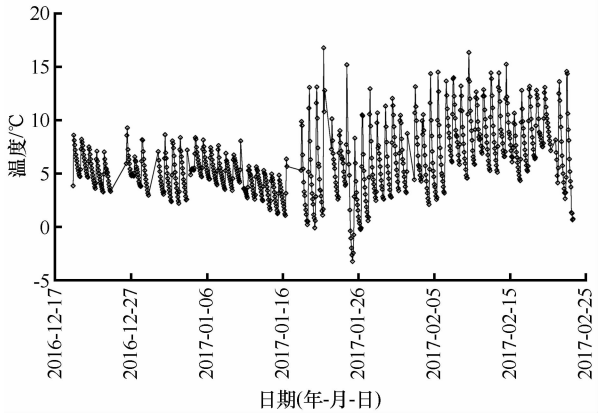


图 8 有保温材料覆盖时砾石土表层温度变化

Fig. 8 Variation of surface temperature of gravel soil with thermal insulation

图 9 给出了未填筑半幅区心墙接触黏土在无覆盖条件下 12 cm 深度土体温度随时间变化规律，其中数据连续段为填筑半幅区的一个填筑周期，而间隔段为本幅段的填筑周期。目前，半幅填筑的周期约为一周，可以看出，在另外一幅填筑过程中，未填筑半幅区土料处于整体降温过程，即新填筑碾压土料在填筑完毕等待另一幅填筑作业过程中始终处于一个热量损失过程，由此导致其抵抗下一个周期填筑土料冻结的能力在不断减弱。因此，建议心墙防渗土料在填筑过程中可考虑全幅施工，以避免等待过程中的热量损失。这与小浪底大坝防渗土料冬

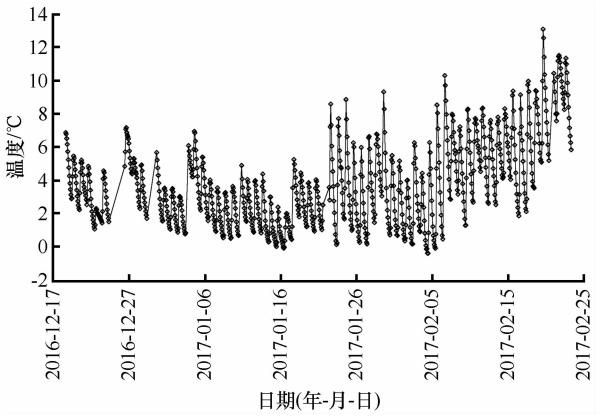


图 9　无保温材料覆盖时未填筑半幅区心墙接触黏土 12 cm 深度处地温变化

Fig. 9　Variation of ground temperature of core wall contact clay at the depth of 12 cm without thermal insulation in the unfilled-half area

季施工中提出的快铺、快压、快检施工组织要求是一致的。

4　结论

寒区水电大坝冬季施工面临土料冻融问题的困扰，这一问题不仅严重影响到大坝的顺利填筑和工期控制，同时威胁到工程施工质量。随着我国水电站建设向大江、大河上游的转移，海拔的不断增加、气温的不断降低，将导致这一问题更加突出。本文结合两河口水电站大坝建设，系统开展了寒区大坝心墙冬季施工过程中防渗土料温度的变化规律现场监测。结合监测结果，初步分析了一个完整冬季周期内土料的冻融特征、主要影响因素及保温材料防控效果。

现场监测结果表明，两河口地区冬季浅层土体冻结持续时间不超过 1 个昼夜，属于短时冻土。在不采取保温措施条件下，砾石土、接触黏土土料在冬季均出现了负温冻结现象，其中砾石土冻结深度最大可达 20 cm，接触黏土最大冻结深度可达 14 cm。冻结后的土料有肉眼可见裂隙、孔隙冰晶。土料冻结过程为典型的单向冻结、双向融化过程，融化过程以自上而下融化为主。土料冻结起始时间波动范围较大，而冻结结束时间相对稳定，这与土料温度变化的主要驱动因素有关。土料降温冻结过程主要以与外界大气对流换热为主，因此受过程中气温、风速条件影响显著。而土料升温融化过程主要以太阳辐射增温为主，主要受太阳辐射条件影响。砾石土、接触黏土冻结特征的差异主要受土料热容、导热系数等热物理参数的影响。

监测周期内，在良好搭接的条件下，三布两膜保温材料可有效防止心墙防渗土料的冻结。表层土料最低温度与无保温材料覆盖条件下可相差 5 ℃左右。实际使用过程中，保温材料的吸水增重使得人工收放过程费时费力，因此有必要在保持保温效果的基础上，研发轻质、憎水保温材料及快速收放机械设备，以加快保温材料的收放，利于施工组织的安排。同时，建议大坝心墙防渗土料的施工由目前半幅施工转换为全幅施工，做到快铺、快压、快检，以减小施工周期内已填筑土料的热量损失，增强其下一个施工周期中抵抗冻结的能力。

参考文献(References)：

[1] Du Zhida, Guan Jiaru. Temperature control measures and crack treatment in Guanyinge dam construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995(9): 46 – 50. [杜志达, 关佳茹. 观音阁水库大坝施工中的温控措施及裂缝处理[J]. 水利水电技术, 1995(9): 46 – 50.]

[2] Liu Hongrong, Zhou Ping. Construction of sand and gravel dam of concrete facing in high-elevation areas in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1996(8): 68 – 74. [刘宏荣, 周平. 国内海拔最高的混凝土面板砂砾石坝施工[J]. 水利水电技术, 1996(8): 68 – 74.]

[3] Wu Yani, Wang Rongjing. On temperature control measures of Tashir rolling concrete dam in Mongolia in winter[J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2013(4): 32 – 34. [吴亚妮, 王荣晶. 蒙古国泰西尔碾压混凝土大坝冬季施工温控措施[J]. 企业科技与发展, 2013(4): 32 – 34.]

[4] Zhu Chunxiang, Qu Jingtao, Li Qinsheng. Construction quality and schedule controlling of Lianhua dam in winter[J]. Water Power, 1998(10): 17 – 19. [朱纯祥, 曲景涛, 李秦生. 莲花水电站大坝冬季施工质量、进度控制[J]. 水力发电, 1998(10): 17 – 19.]

[5] Hao Changfu, Hua Hongliang, Xi Xiangjun, et al. Construction of the RCC dam for Longshou hydropower station[J]. Water Power, 2001(10): 29 – 30. [郝长福, 花红亮, 奚向军, 等. 龙首水电站碾压混凝土大坝施工[J]. 水力发电, 2001(10): 29 – 30.]

[6] Wang Quan, Zhou Yiwen. Construction management and technology for dam of Jilintai-I hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013(4): 116 – 120. [王泉, 周怡文. 新疆吉林台一级水电站大坝施工管理及施工技术[J]. 水利水电技术, 2013(4): 116 – 120.]

[7] Que Pilin. Construction of gravel core wall of Shuiniujia dam in winter[J]. Water Resources and Hydropower Construction, 1996(8): 68 – 74. [阙丕林. 水牛家电站大坝碎石土心墙冬季施工研究[J]. 水利水电施工, 1996(8): 68 – 74.]

[8] Wu Ziwang, Ma Wei. Strength and creep of frozen soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. [吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.]

[9] Ma Wei, Wang Dayan. Frozen soil mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]

[10] Lai Yuanming, Xu Xiangtian, Dong Yuanhong, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87:

6 – 18.

[11] Wang Bi, Wang Qifeng, Zhou Jun. Construction of anti-seepage materials of Xiaolangdi dam in winter[J]. Northwest Water Power, 1999(4): 36 – 39. [王碧, 王其峰, 周俊. 小浪底大坝防渗土料的冬季施工[J]. 西北水电, 1999(4): 36 – 39.]

[12] Qi Jilin, Vermeer P A, Cheng Guodong. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties[J]. Permafrost and Periglacial Process, 2006, 17(3): 245 – 252.

[13] Zheng Yun, Ma Wei, Bing Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 132 – 137. [郑郧, 马巍, 邴慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与定量研究方法[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 132 – 137.]

[14] Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922 – 927. [倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922 – 927.]

[15] Cui Honghuan, Liu Jiankun, Zhang Liqun, et al. Research on damage mechanics of modified-soil in cold regions subgrade coupling action of freeze-thaw and load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1183 – 1188. [崔宏环, 刘建坤, 张立群, 等. 寒区路基改良土冻融循环与荷载耦合作用下损伤力学研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1183 – 1188.]

[16] Li Li, Zhang Kun, Zhang Qinglong, et al. Experimental study on the loess strength degradation characteristics under the action of dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1142 – 1149. [李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1142 – 1149.]

[17] Chamberlain E J, Gow A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/2/3/4): 73 – 92.

[18] Zimmie T F, La Plante C. The effect of freeze-thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil[C]// Proceedings of the 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference. Pennsylvania, PA, USA: Drexel University, 1990: 580 – 593.

[19] Benson C H, Othman M A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(2): 276 – 294.

[20] Kim W H, Daniel D E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(7): 1083 – 1097.

[21] Eigenbrod K D. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeability of soft fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 529 – 537.

[22] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471 – 477.

[23] Wang Dayan, Ma Wei, Niu Yonghong, et al. Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48: 34 – 43.

[24] Mu Yanhu, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Quantitative analysis of impacts of freeze-thaw cycles upon microstructure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1919 – 1925. [穆彦虎, 马巍, 李国玉, 等. 冻融循环对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919 – 1925.]

[25] Zheng Yun, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Analysis of soil structures and the mechanisms under action of freezing and thawing cycles[C]// Proceeding of 16th International Conference on Cold Regions Engineering. Salt Lake City, UT, USA: ASCE, 2015: 25 – 33.

[26] Specifications for rolled earth-rock fill dam construction: DL/T 5129 – 2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013. [碾压式土石坝施工规范: DL/T 5129 – 2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.]

[27] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 9 – 12. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 9 – 12.]

Monitoring investigation on winter freezing-thawing of dam core wall soils in cold regions

MU Yanhu[1], ZHU Xinyi[2], YUE Pan[3], WANG Xinbin[1],
REN Xiuling[1,4], ZHANG Zhenyu[1,4], YU Qihao[1]

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Lianghekou Construction Administration, Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lianghekou Hydropower Station is a control leading station in the middle reaches of the Yalong River. The dam of the station is a 300-m-high rock-fill dam constructed with gravel soil core wall. Because of the dry and cold climate in winter, filling of anti-seepage soil material is always affected by freezing-thawing. In this paper, based on monitored temperature of one winter in 2016/2017, the freezing-thawing characteristics and influence factors of gravel soil and clay soil and the effect of thermal insulation method were analyzed. The results showed that shallow gravel soil and clay soil without thermal insulation all experienced freezing during the monitored winter, but the freezing duration was less than 24 hours. The maximum freezing depth of gravel soil and clay soil could reach 20 and 14 cm, respectively. The freezing process of the soil was controlled by heat convection with ambient air, thus was heavily influenced by wind speed. The thawing process was controlled by heat radiation, thus the beginning of the thawing was closely related to the time of sun rise. During the monitoring period, coverage of thermal insulation material would effectively prevent freezing of the soil; the difference of the minimum temperature of soil was as much as 5 ℃ between the soils with and without thermal insulations. From the monitoring results and field conditions, one can see that light and hydrophobic thermal insulation materials are needed, as well as quick package machine for thermal insulation materials. Also, it is considered that whole surface filling of the dam core will be better than half surface filling. The monitored data in this paper will be useful for dam construction in cold regions in the future.

Key words: freezing-thawing characteristics; thermal insulation; anti-seepage soils; core wall; cold region dam

（本文编辑：武俊杰）