

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.015

丰满重建工程碾压混凝土坝越冬 结合面内外温差研究

陈波¹, 孟宪磊², 李洋波¹

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 河北丰宁抽水蓄能有限公司, 河北 丰宁 068350)

摘 要: 以丰满重建工程碾压混凝土坝为研究对象, 基于分布式光纤测量得到的温度监测数据, 对严寒地区碾压混凝土坝越冬长间歇施工条件下越冬保温后、寒潮期间、极大昼夜温差下三个方面的越冬结合面内外温差规律进行研究。研究结果表明: 严寒地区实现了在 -30°C 条件下大规模埋设分布式光纤测温的可能; 越冬结合面表面温度变化较为稳定且缓慢下降, 经越冬保温后其内外温差大大减小, 而寒潮期间和极大昼夜温差下的内外温差均增幅不大, 可见保温效果较好。研究成果可为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 严寒地区; 光纤埋设; 越冬结合面; 内外温差

中图分类号: TV642

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0085-06

Internal and External Temperature Difference of Overwintering Joint Surface in RCC Dams of Fengman Reconstruction Project

CHEN Bo¹, MENG Xianlei², LI Yangbo¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China;

2. HeBei FengNing Pumped Storage Co., Ltd., Fengning, Hebei 068350, China)

Abstract: In this paper, RCC dams of fengman reconstruction project is studied based on the obtained temperature monitoring data in severe cold region by distributed optical fiber measurement, the internal and external temperature difference of the overwintering joint surface is studied under the condition of RCC dams long intermission of overwintering layer in the severe cold region after overwintering insulation, during the cold wave and the extreme daily temperature difference. The result shows that the possibility of large-scale distributed optical fiber measurement is realized in the cold region under the condition of -30°C ; The surface temperature change of overwintering joint surface is stable which decreased slowly, the internal and external temperature difference is greatly reduced after overwintering insulation, while it is not very large between the cold wave and the extreme day and night temperature difference, so it proves that the heat preservation effect in this project is better.

Keywords: severe cold region; optical fiber buried; overwintering joint surface; internal and external temperature difference

碾压混凝土坝已在我国广泛应用, 对于在严寒地区修建的碾压混凝土重力坝, 由于冬季气温低, 年平均气温也较低, 气温年变化幅度很大, 而且冬季往往因气温太低而停工, 大量混凝土要在夏天浇筑^[1]。同时由于越冬长间歇式^[2]施工方式, 使得混凝土坝越冬结合面附近容易产生较大的内外温差, 从而在

上下游表面附近引起较大的拉应力集中, 并且在越冬结合面的顶面中间部位会引起较大的水平拉应力, 给混凝土坝的温度控制带来了较大困难。在观音阁水库大坝^[3]施工中虽然采取了相应的温控措施, 但由于越冬长间歇式施工方法, 加上冬季寒冷的气候条件, 入冬后越冬表面降温迅速, 形成较大的内

外温差,在上下游表面产生了水平裂缝。魏婷婷^[4]认为施工期在越冬结合面上设一条人工温度应力释放缝并对越冬层面进行保温措施,得到严寒地区高碾压混凝土重力坝由于越冬长间歇引起的混凝土开裂的一条解决途径,但上述研究大多采用仿真计算来得到严寒地区碾压混凝土大坝温度,而仿真计算的热力学参数及边界条件与实际情况存在一定的差异,导致仿真计算的高效性、可靠性与计算参数的粗糙性存在极大的冲突^[5]。而采用光纤测温测得数据更加真实,可以实时监测大坝内部和越冬层面的最高温度,对其越冬保温后、寒潮期间、极大昼夜温差下三个方面的越冬结合面内外温差规律进行研究,了解越冬结合面保温措施的效果情况。

1 工程概况

丰满水电站碾压混凝土重力坝坐落于吉林省境内的第二松花江干流上,水力资源丰富,处于严寒地区,气温变化较大,且寒潮频繁,每年 10 月份气温开始转入零度以下,来年 4 月份气温开始回升到零度以上,封冻期长达 6~7 个月。坝区多年平均气温 4.9℃,极端最高气温 36.6℃,极端最低气温 -40.2℃^[6]。

该工程主体部分采用碾压混凝土施工,不分纵缝、通仓浇筑,冬季采用越冬长间歇式,故丰满大坝温度应力时空分布规律与普通混凝土大坝不同,很难保证其不开裂。为了了解丰满新建碾压混凝土重力坝浇筑期和养护期的温度场和应力场的分布规律,为实际工程施工制定有效的温控措施,采用分布式光纤^[7]对其温度场进行实时在线监测。

2 基本资料

2.1 浇筑情况

本次测温选择在丰满碾压混凝土重力坝工程^[8] 33# 挡水坝段,大坝坝高 90 m,2016 年共浇筑十仓混凝土,每仓 3 m 高,其中,2016 年浇筑的第 1 仓位于基础强约束区,第 2 到第 5 仓位于基础弱约束区,第 6 仓到 10 仓为自由区,第 10 仓是为越冬期之前浇筑的最后一仓。本次只研究越冬结合面的越冬期内外温差规律。

2.2 光纤布置

在 2016 年浇筑完成越冬之前最后一仓(第十仓)后,将光纤沿 33# 挡水坝段越冬面布置,布置完成后用越冬保温被覆盖。根据施工现场情况和施工进度安排等因素,以及最大限度测量到关键位置温度,第十仓光纤在立面上,布置在中间位置,且避开

冷却水管,见图 1;在平面上,光纤在廊道处绕道,预留足够距离,避免因定位不准确导致光纤因钻孔破坏,见图 2。光纤布置完成后需对其进行越冬期保护,埋入混凝土部分,由于仓面已有保温措施,故无需其他措施;而对于光纤盘至出仓口段无法埋入路基底下,仍然暴露在空气中,故采用外包保温被的方法,维持外露光纤处于正常工作温度范围。由于严寒地区外界气温达到 -30℃,目前尚没有在这种温度下大规模埋设光纤进行测温的情况,故对于严寒地区分布式光纤第一次大规模埋设在 -30℃ 条件下进行测温是个极大的挑战。这也是文章的一点创新之处。

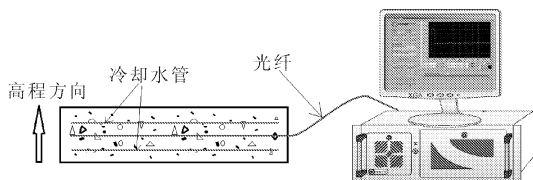


图 1 自由区第十仓面光纤立面布置图

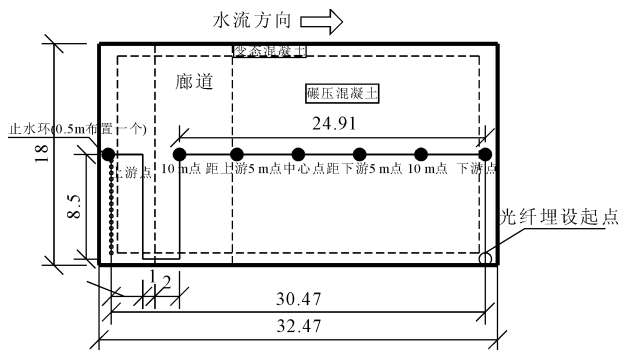


图 2 自由区第十仓面光纤平面布置图

经过一个越冬期后监测出不同区域越冬期的内外温差和混凝土内部的最高温度,达到混凝土坝的最高温度和内外温差等温控指标^[9]满足要求,通过本工程实践证明,分布式光纤能够大规模埋设在 -30℃ 条件下应用于严寒地区测温,很好的监测了严寒地区碾压混凝土坝的越冬期内外温差,并充分挖掘这些温度监测数据,研究出严寒地区碾压混凝土重力坝越冬结合面内外温差规律。

2.3 光纤定位及精度

2.3.1 光纤定位

光纤定位方法是基于光纤上标有长度刻度与 DTS 仪器的显示刻度之间的关系来确定光纤埋设位置在 DTS 上的时间刻度位置。由于 DTS 仪器中预留一定长度的光纤,需要提前校正 DTS 仪器上刻度与光纤标注刻度之间的关系,故本次工程在埋设光

纤前,采取水桶测温实验的方法来建立起光纤实际刻度与 DTS 仪器刻度之间的关系,即:

$$L_{D2} = L_{D1} + L_{g2} - L_{g2}$$

(1)

式中: L_{D2} 为实际埋在混凝土中光纤对应于 DTS 仪器中刻度的位置; L_{D1} 为这次水桶温度测试得到的 DTS 仪器中刻度位置; L_{g1} 为水桶温度测试得到的光纤标有刻度值; L_{g2} 为实际埋设到混凝土中的光纤标有刻度值。

因此,我们只需要记录光纤埋设时实际刻度在仓面各个角点等关键点处光纤的刻度值,仓面其余点采用插值计算方法推算,即可将仓面各点同光纤刻度对应起来。

因为光纤标出刻度值存在的误差,随着埋设光纤长度的增多,误差必然越来越大,因此在每一仓埋设后都要做水桶温度测试,以确保光纤定位的准确性。

2.3.2 光纤精度

采用水桶测温实验不仅能够进行光纤定位,还可以进行光纤测温精度的校正,将水桶中温度计的数值求取平均值即为光纤 10 m 范围的平均值,再与 DTS 仪器的温度刻度进行对比,校正 DTS 仪器的测温精度。同时水科院采用点式温度计对典型坝段的典型点进行了单独测量,通过提取光纤和点式温度计位置重合的点进行对比,结果见表 1。

表 1 测温数据对比表

时间	测温点 1/℃		相差 1 /℃	测温点 2/℃		相差 2 /℃
	光纤测温	水科院智能测温		光纤测温	水科院智能测温	
2016-06-16 09:47	22.475	23.06	0.585	21.925	22.31	0.385
2016-06-16 11:20	22.600	23.06	0.460	21.975	22.37	0.395
2016-06-16 12:28	23.425	23.12	-0.310	22.800	22.37	-0.430
2016-06-16 13:58	22.750	23.12	0.370	22.100	22.43	0.330
2016-06-16 14:58	22.575	23.18	0.605	21.925	22.43	0.505
2016-06-16 15:28	23.125	23.25	0.125	22.475	22.25	-0.225
2016-06-17 02:07	22.975	23.37	0.395	22.225	22.62	0.395
2016-06-17 06:37	23.850	23.31	-0.540	23.050	22.50	-0.550
2016-06-17 08:07	23.200	23.37	0.170	22.375	22.43	0.055
2016-06-17 10:37	23.125	23.31	0.185	22.250	22.37	0.120
2016-06-17 11:37	22.675	23.31	0.635	21.775	22.37	0.595
2016-06-17 13:01	23.325	23.31	-0.020	22.400	22.31	-0.090
2016-06-17 14:21	23.275	23.25	-0.020	22.325	22.31	-0.015
2016-06-18 11:01	22.900	23.00	0.100	21.675	21.87	0.195
2016-06-18 12:01	22.725	23.00	0.275	21.500	21.87	0.370
2016-06-18 13:21	22.125	23.00	0.875	20.875	21.81	0.935
2016-06-18 17:20	22.600	22.93	0.330	21.300	21.81	0.510
2016-06-18 18:20	22.550	22.93	0.380	21.225	21.81	0.585
2016-06-18 21:40	22.500	22.93	0.430	21.150	21.75	0.600
2016-06-19 10:40	23.050	22.87	-0.180	21.600	21.62	0.020
2016-06-19 14:40	22.300	22.87	0.570	20.850	21.56	0.710
2016-06-19 15:40	22.725	22.81	0.085	21.225	21.56	0.335
2016-06-19 19:00	22.350	22.81	0.460	20.875	21.56	0.685
2016-06-19 21:00	22.400	22.81	0.410	20.875	21.56	0.685
2016-06-19 22:00	22.475	22.81	0.335	20.975	21.50	0.525
2016-06-20 01:20	22.600	22.75	0.150	21.075	21.50	0.425
2016-06-20 03:40	22.600	22.75	0.150	21.025	21.43	0.405
2016-06-20 06:20	22.825	22.68	-0.150	21.225	21.31	0.085
2016-06-20 07:40	22.925	22.68	-0.250	21.300	21.31	0.010
2016-06-20 15:40	22.575	22.62	0.045	20.800	21.06	0.260
2016-06-20 19:40	22.025	22.56	0.535	20.200	21.00	0.800
2016-06-20 22:40	22.175	22.56	0.385	20.300	20.93	0.630

从表 1 中可以看出,同一测温位置,光纤测温和水科院智能测温数据最大相差 0.935℃,“测温点 1”平均相差 0.23℃,“测温点 2”平均相差 0.32℃。因此,分布式光纤的精确度得到验证。

2.4 内外温差控制标准的依据

内外温差是引起混凝土浇筑后初期表面裂缝^[10-11]的主要原因。未满 28 d 龄期混凝土的暴露表面,应根据温度应力计算分析采取保护措施。在遭遇寒潮、低温季节浇筑的混凝土表面均需进行表面保护。一般认为,在基岩约束范围以内,内外温差不宜大于 20℃~22℃;在其它部位不宜大于 23℃~25℃。

2.5 越冬前最后一仓的温度规律

2016 年浇筑的最后一仓的浇筑时间为 9 月 26 日 19 点 30 分左右,浇筑温度采用自然入仓,当时环境气温为 15.70℃,由于此仓位于自由区,同时为越冬期到来的最后一仓,因此提取此仓作为自由区典型仓面。现分别提取仓面中心点、距上游 5 m 点、距上游 10 m 点、上游点、距下游 5 m 点、距下游 10 m 点、下游点的温度过程线,见图 3。

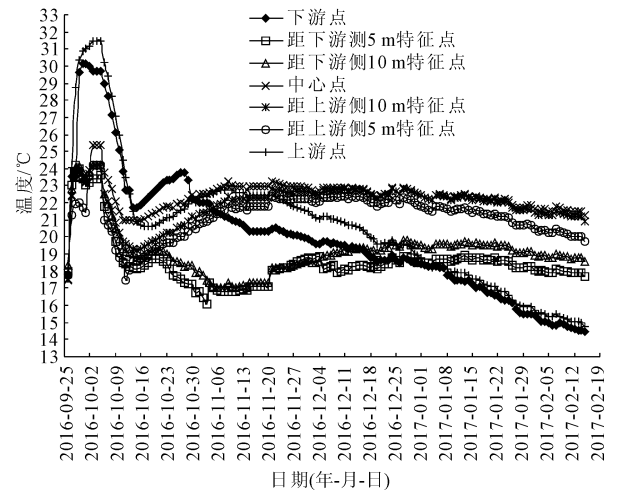


图 3 自由区第十仓面典型点温度过程线

从图 3 可以看出,上游点和下游点的混凝土采用变态混凝土材料,其水化热温升远大于碾压混凝土材料,同时上游点的温度大于下游点的温度,在 10 月中旬出现上游点温度低于下游点,这是由于在 10 月初开始进行越冬期的上下游保温,上下游保温不是同时进行,先进进行的是下游侧的保温所导致的。上下游点温差随着越冬保温措施采取后,差距越来越少,到次年 2 月份只有不到 1℃。

对于碾压混凝土区域,浇筑开始到经历第一个越冬期结束,中心点的温度是最高的,混凝土温度在

内部变化不大,在上下游侧 5 m 范围内变化剧烈,各特征点在越冬期温度都呈现降温趋势,对于上下游侧降温幅度较大,在进入越冬期后,上下游侧的降温幅度达到 5℃以上,对于内外温差,在进入越冬期后,可以看出内外温差呈现增大趋势,自由区第十仓进入越冬期后各特征点最大温差的情况,见表 2。从表 2 可以看到最大温差发生在中心点与下游点之间,最大温差为 7.00℃,上游侧的温差小于下游侧的温差,这是由于上游侧散热条件较下游侧差所致。

混凝土中心点温度在 2016 年 10 月 15 日到达最低温度,温度为 20.96℃。

表 2 自由区进入越冬期后各特征点最大温差

特征点	距中心特征点的最大温差/℃
中心点	0.00
距下游 10 m 特征点	5.96
距下游 5 m 特征点	6.43
下游点	7.00
距上游 10 m 特征点	1.69
距上游 5 m 特征点	2.97
上游点	6.58

3 越冬结合面的越冬期内外温差

3.1 越冬保温后越冬结合面的内外温差研究

丰满大坝在 2016 年 10 月初到 11 月 26 日对已建大坝的上下游和越冬面进行越冬保温,光纤铺设到 33# 挡水坝段的越冬面上,再用越冬面保温被盖上,用以监测保温措施的优劣。丰满大坝的越冬保温具体措施如下:大坝的越冬结合面采用两层 2 cm 厚的聚乙烯保温被加上 13 层 2 cm 厚棉被来保温,首先在越冬结合面铺设一层薄膜塑料(厚度为 0.6 mm),其次在上面铺设两层 2 cm 厚的聚乙烯保温被外加 2 cm 厚棉被共 13 层,然后在顶部铺设三防帆布一层;丰满碾压混凝土坝的上下游侧面采取 8 cm 厚 XPS 板进行保温,首先在越冬结合面铺设一层薄膜塑料(厚度为 0.6 mm),其次在其侧面部铺设 8 cm 厚 XPS 板,最后铺设一层三防帆布,等效放热系数不大于 29.79 kJ/(m²·d·℃);水平面与侧面相接的双向散热区加强越冬防护,首先在越冬面铺设一层塑料薄膜(厚度 0.6 mm),其次其侧面部铺设 16 cm 厚 XPS 板,然后再铺设三防帆布一层。

本次越冬保温涵盖整个坝段,包括越冬面和上下游侧,通过将光纤埋设在保温棉被下面得以监测保温效果。但是由于现场光纤布置情况复杂,部分仓面无法按照计划将光纤覆盖上中下游,会出现光

纤布置不到位或是裸露在保温被上等问题,而 33[#]挡水坝段没有出现上述问题,故本次整理的结果均采用 33[#]挡水坝段成果。

现提取越冬结合面上的上游、中间仓面、下游特征点(即距上游侧边缘 1 m 的中间点 33A,中心点 33B,距下游侧边缘 1 m 的中间点 33C)的温度进行保温效果的分析。越冬面特征点和室外气温对比图的情况,见图 4;提取的典型时段的典型点与室外气温以及越冬期来临之前最后一仓混凝土中心点温度的对比,见表 3。

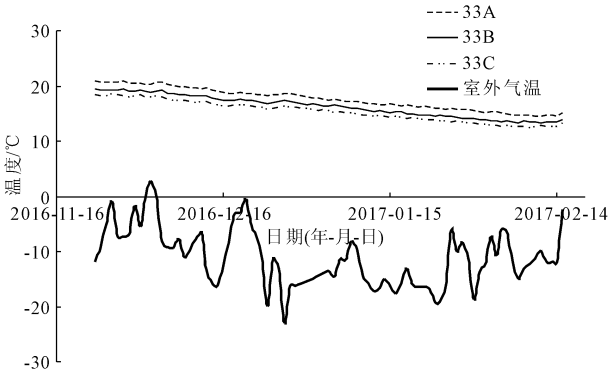


图 4 越冬面典型点与室外气温对比图

表 3 典型时刻越冬面典型点、室外温度、混凝土温度对比表

时间	越冬面上的光纤温度/℃			光纤平均温度/℃	室外温度/℃	混凝土中心温度/℃
	33A	33B	33C			
2016-11-23	20.94	19.43	18.36	19.58	-11.85	23.12
2016-12-03	20.33	18.96	18.12	19.14	2.82	22.63
2016-12-27	18.68	17.35	16.34	17.46	-23.08	22.86
2017-01-09	17.13	15.89	14.97	16.00	-9.60	22.24
2017-02-15	15.25	13.98	13.25	14.16	-2.28	21.31

从图 4 可以看出,保温棉内混凝土表面温度较平稳,室外昼夜温差几乎不影响保温棉内仓面表面的温度,随着时间的推移,保温棉内仓面表面温度略有降低,从 2016 年 11 月末的 18℃~21℃左右降为 15℃左右,降温幅度达到 3℃~6℃左右。这与混凝土水化热减缓以及保温棉在经过漫长的冬季,保温效果下降有关。但截至 2017 年 2 月,仓面表面温度依然超过 10℃,普遍在 14℃左右。混凝土内部最高温度约 21℃,内外温差不超过 7℃。

对于表 3,2016 年 11 月 23 日为越冬面保温铺设保温措施的第一天,2016 年 12 月 27 日为越冬期平均气温最冷的一天。从表 3 可以看出,保温措施可以很好的降低内外温差,对于 12 月 27 日来说,外界和混凝土中心温度的温差达到 45.94℃,由于保温措施使得越冬结合面和混凝土中心温度的内外温差为 5.4℃,大大减少了内外温差,可见保温效果较好。

从越冬结合面上的上游面、中间仓面、下游面的温度可以看出,仓面上游点的光纤温度是最高的,其次是中间仓面,最后是下游面。对于越冬结合面的各特征点的温度随着越冬期的时间延续,温度逐渐降低,截止到 2017 年 2 月 15 日,越冬结合面上平均温度和混凝土中心温度内外温差为 7.31℃。

3.2 寒潮期间的越冬结合面内外温差研究

气温骤降称为寒潮,其指日平均气温在几天内(2 d~6 d)下降剧烈(降幅大于 5℃)^[10-12]。混凝土

大坝在施工时,肯定要遇到寒潮引起的气温骤降,从而形成较大的温度应力,气温骤降所产生的拉压力超过混凝土的抗拉强度,从而形成各种裂缝^[13-15]。同时,丰满大坝在东北地区,冬季不施工,每年有 5 个月要停歇施工,长间歇期间遭遇寒潮气温骤降,这时在越冬结合面上出现裂缝的可能性很大。因此,研究越冬期期间寒潮对越冬结合面的影响就至关重要。

根据实测资料,可以得到越冬期的外界每天的平均气温变化曲线,见图 5,从图 5 中可以看出,2016 年 12 月 20 到 12 月 24 日外界每天平均气温骤降,下降幅度很大,很明显这是遭遇了寒潮。现提取这段时间的温度实测数据,得出 2016 年 12 月 20 到 12 月 24 日外界气温变化曲线,见图 6。

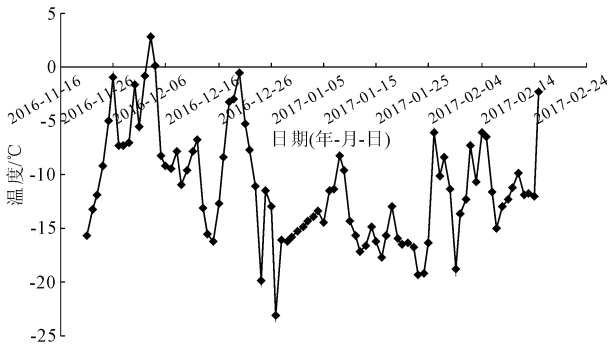


图 5 越冬期外界气温变化曲线

从图 6 可以看出,在 2016 年 12 月 20 日到 12 月 24 日期间,温度下降最大幅度为 33℃,温度下降剧

烈,特提取越冬结合面上各特征点和混凝土中心温度进行比较,见表 4。

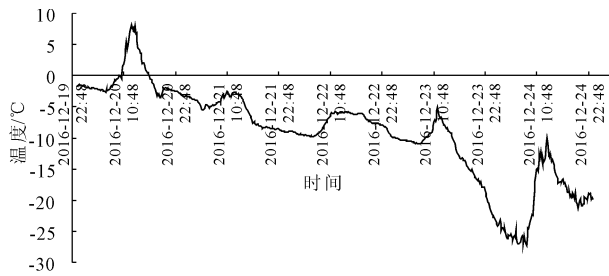


图 6 寒潮期间外界气温变化曲线

表 4 寒潮期间的内外温差

时间	越冬结合面上的光纤温度/℃			光纤平均温度/℃	混凝土中心温度/℃
	上游点	中间点	下游点		
2016-12-20	18.74	17.47	16.58	17.60	21.01
2016-12-21	18.61	17.35	16.37	17.44	21.12
2016-12-22	18.52	17.26	16.22	17.33	21.22
2016-12-23	18.41	17.10	16.11	17.21	21.20
2016-12-24	18.23	16.89	15.84	16.99	21.56

由表 4 可以看出,寒潮期间越冬结合面上的上游面、中间、下游面的温度都有下降,平均下降 0.61℃,温度下降趋势较慢,从侧面可以看出越冬结合面的保温效果较好。在寒潮期间,混凝土中心点温度与越冬结合面温度内外温差由 3.41℃增大到 4.57℃,增大 1.16℃,增幅不大。

3.3 极大昼夜温差下越冬结合面内外温差研究

由气温数据可知,2017 年 2 月 14 日这一天的昼夜温差达到最大,为 31℃,故选取这一天作为典型天,研究在这么大的昼夜温差下越冬结合面上混凝土,内部混凝土与气温之间的温度效应。现提取 2017 年 2 月 14 日这一天的光纤测温数据,得出外界气温,越冬结合面上中下游点和混凝土内部中心点温度变化曲线,见图 7。

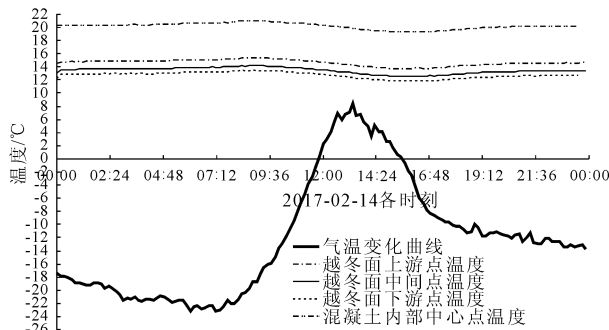


图 7 极大昼夜温差下的混凝土温度响应

由图 7 中可以看出,在如此大的昼夜温差下,越冬结合面上的混凝土表面温度变化幅度较小,整体

变幅不到 2℃,混凝土内部中心点温度变化幅度也不到 2℃,内外温差从 5.83℃增大到 7.15℃,增幅不大,从侧面可以看出越冬面表面保温效果较好。

4 结 论

(1) 分布式光纤可以大规模的埋设在 - 30℃ 条件下进行测温,丰满大坝重建工程实践结果表明测温效果很好,这为处于严寒地区的大坝混凝土大规模的埋设分布式光纤测温提供了实践依据。

(2) 越冬期期间,越冬结合面表面温度变化较为稳定且缓慢下降,经越冬保温后越冬结合面的内外温差大大减少,而寒潮期间和极大昼夜温差下的内外温差均增幅不大,由此可见越冬面保温效果较好。

参考文献:

[1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.

[2] 王成山.严寒地区碾压混凝土重力坝温度应力研究与温控防裂技术[D].大连:大连理工大学,2003.

[3] 淑 萍,胡 平,岳耀真.观音阁水库碾压混凝土大坝温度应力仿真计算研究[J].水力发电,1996(7):40-44.

[4] 魏婷婷.严寒地区碾压混凝土坝越冬层面温度应力控制仿真分析[D].西安:西安理工大学,2008.

[5] 黄耀英,周宜红.两种不同水管冷却热传导计算模型相关性探讨[J].长江科学院院报,2009,26(6):56-59.

[6] 李建华,张春生,王富强,等.严寒地区大坝混凝土降温速率研究[J].水利水电技术,2015,46(12):17-22,28.

[7] 宫经纬.水工准大体积混凝土分布式光纤温度监测与智能反馈研究[D].武汉:武汉大学,2013.

[8] 杨宪元,李洋波,黄达海,等.分布式光纤测温技术在水工混凝土中的应用[J].水电能源科学,2010,28(2):106-108,68.

[9] 混凝土重力坝设计规范:SL 319—2005[S].北京:中国水利水电出版社,2005.

[10] 潘家铮.水工建筑物的温度控制[M].北京:水利电力出版社,1990.

[11] 王从锋,黄达海,刘心庭.大体积混凝土表面保温程序的开发与应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2002,24(2):112-114.

[12] 陈立新,陈芝春.寒潮期间大体积混凝土保温研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2008,30(4):15-17.

[13] 吴红燕,李兴贵,曹学仁,等.大体积混凝土温度裂缝观测及分析[J].水利与建筑工程学报,2011,9(2):40-43,53.

[14] 王殿瑶.严寒地区碾压混凝土重力坝表面保温研究[D].宜昌:三峡大学,2015.

[15] 路 璐,李兴贵.大体积混凝土裂缝控制的研究与进展[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):146-150.