

严寒地区大体积混凝土低温施工措施综述

金毅勤¹, 竹怀水², 黄达海¹

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 黄河勘察规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:详述了我国东北、西北、西藏等严寒地区在低温环境中进行骨料准备、混凝土运输、混凝土浇筑、混凝土养护时采取的具体施工措施,介绍了前苏联和北美一些国家的大体积混凝土冬季施工方法。工程实践表明,合理选择温控标准,严格控制热量损失,使用暖棚法与综合蓄热法相结合的浇筑方法,采用新型材料加强混凝土表面养护等施工措施可以使在低温环境中施工的混凝土较好地发育,保证施工质量达到设计标准。

关键词:严寒地区;大体积混凝土;低温施工措施;暖棚法;蓄热法

中图分类号:TV544⁺.91 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0089-06

Review on construction measures for mass concrete in low temperature in cold regions//JIN Yimeng¹, ZHU Huaishui², HUANG Dahai¹ (1. School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Specific construction measures in low temperature for water conservancy and hydropower projects in the cold regions of Northeast China, Northwest China and China's Tibet are introduced, such as aggregate preparation, concrete transportation, concrete pouring and concrete curing. The winter construction methods for mass concrete in the former Soviet Union and some countries in North America are also involved. The engineering practices show that the following construction measures can make the concrete in low temperature satisfactorily grow and the construction quality achieves the design criteria: rational selection of temperature control standards, severe restriction of heat loss, combined grouting procedures of tent heating method and comprehensive thermos method, and utilization of new materials to strengthen the surface curing of concrete.

Key words: cold region; mass concrete; construction measure in low temperature; tent heating method; thermos method

目前国内大型水利水电工程建设如火如荼,混凝土作为水利枢纽工程的最重要材料,其性能与施工工艺亦在不断发展^[1]。截至 2001 年,我国仅碾压混凝土重力坝就有 42 座建成并投入使用^[2]。然而,随着我国大型水利资源开发的重心不断向云南、四川、西藏等高海拔、严寒地区转移,低气温、强辐射、大温差、稀氧气等地区环境特点给混凝土的冬季施工带来巨大的挑战。因此有必要总结国内外严寒地区已建工程的混凝土低温施工措施,以便在严寒地区进行混凝土低温施工时,可以保证混凝土较好地发育,达到工程设计标准。

1 混凝土冬季施工概况

自 20 世纪 30 年代后,国外大体积混凝土的冬季施工普遍存在。前苏联一直倡导全年施工,因而积累了丰富的混凝土低温施工经验^[3]。欧美国家

也于 1930 年以后设立了针对大体积混凝土冬季施工措施的研究机构,这些国家也具有较高的混凝土低温施工技术水平。第二次世界大战之后,在气候寒冷的日本北海道地区有 18 座大坝进行过冬季施工,其中桂泽坝更是全部在冬季完成^[4]。

我国水工混凝土冬季施工始于 1949 年丰满水电站的修复与改建工程^[5-6],之后在东北的拉古哨、桓仁水电站以及西北的李家峡、积石峡、青铜峡、公伯峡、八盘峡等水电站建设中均在冬季进行了施工^[7-12]。其中 20 世纪 60 年代建设的白山水电站,在最低-35℃的条件下共施工 6 个冬季,年冬季混凝土浇筑量达 84.7 万 m³,占年混凝土浇筑量的 33%^[13]。随着混凝土低温施工技术水平的不断提高,西藏满拉水利枢纽工程、金河水电站、直孔水电站等几个工程的实践,也为正在建设的西藏藏木、党恩水电站提供了宝贵的经验^[14]。

我国早期水利工程的混凝土冬季低温施工多采用“停工处理”,如太平湾、红山水电站均没有安排冬季施工。随着低温施工技术水平的进步,加之水电工程施工工期紧,工序复杂,局部工程必须在冬季枯水季节完成,因此我国在 1949 年建国初期先后在东北地区的红石、桓仁等水电站建设中尝试冬季施工,但由于施工经验不足,加之当时一切以进度为目标等历史原因,一些坝体受到了非常严重的冻害损伤。由此可见在高寒地区冬季施工过程中,控制大体积混凝土浇筑温度,防止混凝土早期受冻,对保证工程建设质量尤为重要。

2 混凝土冬季冻害机理

混凝土冬季施工产生裂缝的主要原因是混凝土内外温差和新浇混凝土的早期受冻。混凝土中自由水受冻形成的冰晶会直接影响混凝土的强度发展及耐久性^[15]。美国华盛顿大学的 Mc Neese 研究发现,混凝土遭受冻害后的强度损失取决于其受冻前的养护时间;如果浇筑温度为 4℃,浇筑后立即受冻,受冻温度虽然只有-4℃,但强度损失却很大;如果浇筑温度提升至 24℃,并且受冻前经过 6 h 凝结硬化,则强度损失将会很小^[16-17]。前苏联钢筋混凝土科学研究所研究显示新浇混凝土在养护 72 h 之前受冻,混凝土强度损失较大^[18]。我国在桓仁水电站施工工地进行了 210 组的受冻对比试验^[12,19],结果表明混凝土受冻的强度损失取决于混凝土浇筑温度、养护时间与养护方法等几方面的因素。

国内现行水工规范推荐使用成熟度、容许临界应力等方法估算混凝土早期强度。英国学者 Saul^[20]将温度与时间的乘积定义为成熟度,他认为一定配合比的混凝土,不管其温度与时间如何组合,只要成熟度相等,其强度也是相等的;1953 年,瑞典 Bergstrom 根据 Saul 的定义,对一系列混凝土抗压强度试验结果进行了归纳^[21];1956 年,Plowman 又利用等效龄期概念对成熟度法进行了优化^[22]。在各国成熟度研究的基础上,考虑工程应用的方便性,我国混凝土施工规范^[23-25]建议采用的成熟度计算公式为

$$f_{cu} = ae^{-\frac{b}{N}} \quad (1)$$

$$N = \sum (T + 15)t \quad (2)$$

式中: f_{cu} 为混凝土抗压强度,MPa,当采用综合蓄热法时, f_{cu} 需乘以调整系数 0.8; a 、 b 为参数; N 为混凝土成熟度, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$; T 为某时间段内混凝土的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为混凝土温度为 T 时的持续时间,h。

3 国内大体积混凝土低温施工措施

我国在东北地区的桓仁、白山、红石、观音阁、白石等水电站最早进行大体积混凝土低温环境施工^[4],由于积累了大量的混凝土冬季施工技术经验,其中暖棚法、蓄热法等混凝土冬季施工技术被相应的水电行业规范所借鉴,并被其他工程广泛采用。随后我国西北、西藏等地也逐步开始尝试大体积混凝土冬季施工。水电行业规范对混凝土低温季节施工有明确的规定,但在实施过程中各地区的具体措施亦有所不同。下面仅针对我国东北、西北、西藏等严寒地区,以骨料准备、混凝土运输、混凝土浇筑、混凝土养护为序,对严寒地区混凝土施工措施进行简要分析。

3.1 骨料准备

为保证混凝土浇筑温度符合设计标准,需要严格控制新拌混凝土的出机温度。在混凝土冬季施工中,采用热水拌和混凝土通常是最直接、最经济的手段。但是当采用热水拌和依旧不能满足出机温度要求时,则需要直接加热混凝土骨料。丰满水电站拌和水温度为 70~80℃,同时采用蒸汽排管加热混凝土骨料,并在混凝土拌和前根据温度计算确定所需的加热机型号及数量。为减少混凝土拌和过程中的热量损失,在混凝土搅拌机外部加设草袋、水泥袋等保温材料。白山水电站混凝土骨料加热分为两个阶段:第一阶段是在预热仓内预热,预热仓用混凝土挡墙围成,外表面用木丝板保温,仓内预制蒸汽排管;第二阶段是在拌和楼储料仓中加热,在第一阶段中没有达到预热要求的混凝土骨料被送入储料仓中继续加热^[4]。

合理的骨料储存和先进的加热机械可以大幅减少因加热骨料而带来的附加费用,冬季施工的骨料储备通常会计算用量的 1.5 倍。在早期冬季施工中,一般选用蒸汽排管加热骨料,但这会使骨料含水量增加从而影响混凝土水灰比。近年来,骨料加热机械不断进步,如拉西瓦水电站就采用热风机风热混凝土骨料。

3.2 混凝土运输

混凝土从出机至完成浇筑,要经过水平、竖直两种运输路径。在运输过程中,如不采用保温措施便会损失大量混凝土热量,甚至造成混凝土早期受冻。丰满水电站在运输车外围包裹草袋,控制运输温度损失 2~3℃。白山水电站用门机和缆机直接吊混凝土入仓,减少倒运次数;用麻袋布做成两层的建筑用毛毡围裹混凝土罐进行保温;将混凝土泵置于保温棚内进行保温;运送混凝土的皮带必须设置在廊

道内,廊道温度不得低于 0℃。拉西瓦水电站水平运输车的侧面采用橡塑海绵保温,顶口安装滑动保温布袋,确保运输过程中温度损失在 1℃以内;垂直运输车的四周采用橡塑海绵保温,温度损失低于 1℃^[26]。西藏吉前水电站对其运输车周围采用双层高发泡塑料板保温,外封黑铁皮固定,车顶部安装可移式高发泡聚乙烯泡沫塑料保温被,设置可靠的防风装置,避免新鲜混凝土表面受冻,同时对自卸汽车尾气装置和通道进行改造,利用尾气对车厢底板加热,以减少混凝土从出机口到浇筑仓面之间的热量损失,混凝土的温度损失控制在 3℃以内^[27]。

3.3 混凝土浇筑

根据施工原理的不同,目前我国混凝土冬季浇筑施工方法大致分为 3 类^[28]:

- a. 提高混凝土养护温度,使混凝土在正温条件下硬化。施工方法有暖棚法、电加热法、蒸汽法,适用于环境温度为-25~0℃的情况。
- b. 冬季冷法施工,添加防冻剂使混凝土在负温条件下硬化。典型的施工方法是负温养护法,适用于环境温度在-15℃以下的情况。
- c. 提高混凝土入模温度,对混凝土进行蓄热保温;或者通过使用外加剂使混凝土在受冻前达到临界抗压强度。该类方法在混凝土低温施工中较为常见,具体分为蓄热法、综合蓄热法、广义综合蓄热法,其适用环境温度分别处于-5℃、-15℃、-25℃以下的情况。

暖棚法是较为常用的混凝土冬季施工方法,适用于混凝土工程比较集中的区域;电加热法包括电极法、电热毯法等,应用于大坝表面一些连续不规则的区域。东北早期混凝土施工多采用暖棚法,混凝土浇筑温度为 10~13℃,棚内温度 8℃;拉西瓦水电站在 12 月至次年 1 月采用综合蓄热法施工(同时满足暖棚法施工要求),在其他时间采用蓄热法施工^[29];新疆吉林台水电站和西藏吉前、金河水电站均采用暖棚法施工,浇筑温度分别为 8.9℃与 7℃^[30-31];西藏直孔水电站采用暖棚法与蓄热法相结合的方法,取得了令人满意的效果^[32]。

使用暖棚法会使施工区域具有较好的施工环境,但是搭设暖棚费工费时,搭装与拆卸较为复杂。因此对于近几年在冬期施工的水利工程,大多采用蓄热法与综合蓄热法浇筑混凝土。拉西瓦水电站的外加剂采用高效减水剂和引气剂联掺^[29],同时对混凝土的配合比进行优化,采用“两低三掺”的方法,即采用较低的水胶比和用水量,掺入优质 I 级粉煤灰、缓凝高效减水剂和引气剂,有效降低了混凝土温升,提高了混凝土的抗裂、耐久和抗冻性能以及极限

拉伸值。对比拉西瓦水电站混凝土施工措施的暖棚法,可以发现暖棚法较蓄热法具有升温快、温度稳定等优点,但投入设备多,造价偏高;蓄热法养护方案经济简便,可操作性强。实践证明,蓄热法和暖棚法在混凝土养护温度和混凝土强度增长方面均达到了预期目的,混凝土表面无开裂,养护效果好。

3.4 混凝土养护

混凝土养护是混凝土施工中重要的环节,对于低温环境来说更是如此。混凝土冬季施工要采用边浇筑、边覆盖的原则,尽量避免混凝土早期受冻的可能,并且在混凝土拆模时,大坝边角部位的保护也需要经过周密的计划。早期混凝土的表面保温多用草席、木丝板、棉被等材料^[6],随着保温材料的不断进步,目前水利工程常见的表面保温材料有挤塑式聚苯乙烯隔热保温板(XPS板)与聚氨酯喷涂材料^[33-35]。新疆石门子工程就采用了聚氨酯这种新型材料,其在保温、保湿和经济性方面均优于传统的保温材料,可满足西北地区大坝保温、隔热和保湿要求,防止大坝因温度梯度及干缩等变化而产生裂缝。新疆喀腊塑克重力碾压坝^[35-36]的临时保温是铺设 1 层厚 0.6 mm 的塑料薄膜,再铺设两层 2 cm 厚的聚乙烯保温被,之后铺设 13 层 2 cm 厚的棉被,顶部用三帆布包裹,并在保温被周边及越冬层以下 2.6 m 范围喷涂 10 cm 厚的聚氨酯硬质泡沫。永久保温采用聚氨酯和 XPS 板等材料,其中越冬层以下 2.5 m 范围内采用“聚氨酯防渗涂层(2 mm)、粘贴 XPS 板(10 cm)、回填坡积物”的保温防渗结构,下游面采用“粘贴 XPS 板(10 mm)、外涂防裂聚合物砂浆、耐碱网格布”的保温防渗结构。

吴艳等^[37]针对新疆喀腊塑克重力碾压坝工程的不同保温材料进行了相应的试验研究,保温材料对比结果为:①XPS 板的保温效果良好,但是具有高温加速聚苯乙烯等有机材料老化及保温措施对施工环境要求较高等缺点;②聚氨酯是一种具有防水、保温一体化功能的新型材料,在水的浸泡下聚氨酯硬质泡沫保温材料不会脱落,但发泡聚氨酯喷涂成型速度快,不易喷得非常平整,仅适于大面积喷涂,不适宜大坝表面跟进保温。总之,从保温效果来说,聚氨酯保温效果优于 XPS 板,但其保温施工工艺(喷涂表面的平整度)很难控制。

4 国外大体积混凝土冬季施工措施

4.1 前苏联大体积混凝土冬季施工措施

前苏联大部分地区气候寒冷,年均气温有半年以上是冬季,所以一直提倡全年施工^[4,39]。早在 1929—1932 年建设德聂泊水电站时,冬季混凝土施

工量就占总混凝土施工量的 16% 左右。该工程几乎所有的混凝土冬季施工都是在暖棚内完成的,仅仅在最后一年冬季,以试验的方式用蓄热法浇筑混凝土。此后在古比雪夫水利枢纽^[40]、斯大林格勒水利枢纽、科霍夫水电站以及卡姆河水电站的冬季施工中,当天气不至严寒且无风的条件下,对无金属预埋件的混凝土采用露天蓄热法浇筑。当外界气温低于-10℃时,在帐篷内浇筑混凝土,并在暖棚内养护2~3 d,且对混凝土表面进行覆盖。

在 1956 年施工的布赫塔明斯克水电站要求不论什么时候浇筑的混凝土都不可以在冬季拆模。该工程采用了蓄热法,提高了浇筑温度,在约束区的混凝土开裂问题没有得到有效解决,之后采用活动暖棚的方法,才使得浇筑温度有所降低。在 1958—1959 年修建的布拉兹克水电站施工中,只有在外界温度低于-40℃时才停止混凝土浇筑,该工程规定自 10 月 1 日至次年 4 月末不得拆模,但是在施工过程中依旧产生了大量裂缝。20 世纪六七十年代,在西伯利亚地区兴建的马马康斯克、布尔塔明斯克、布拉茨克、克拉斯诺雅尔斯克、乌尔契-伊里姆及结雅河等水电站,都进行了混凝土冬季施工。

前苏联要求水利工程混凝土骨料需采用合理的料堆形式。在冬季来临以前进行筛洗和堆存,有利于骨料脱水,同时加强排水工作,使骨料含水量减少。拌和混凝土时使用加热水和加热骨料的方法。骨料的加热分为两个阶段,具体方法与白山水电站相似。前苏联部分水电站混凝土冬季浇筑采用的施工方法见表 1。

表 1 前苏联部分水电站混凝土冬季浇筑施工方法		
电 站	建坝时间	施工方法
德聂泊水电站	1929—1932 年	暖棚法最后一个冬季试验蓄热法
斯维尔水电站	1929—1933 年	暖棚法、露天中的蓄热法
高尔基水电站	1948—1956 年	电热法和蓄热法的联用
古比雪夫水电站	1953—1956 年	暖棚法、电极加热法、蓄热法
布拉兹克水电站	1958—1959 年	露天电极加热法、暖棚法

4.2 北美混凝土冬季施工措施

美国混凝土学会 (ACI) 设有冷天施工委员会,制定了大体积混凝土冷天施工规范^[41-45]。近年来,西方国家的建筑材料工业,特别是水泥工业以及塑料工业都有了迅速的发展,为冬季施工提供了坚实的物质基础。它们可以供应活性很好的早强水泥,能够生产性能较好的早强剂、活性剂,此外还可以提供大量加筋塑料薄膜和保温毯等廉价的保温覆盖材料,这使得北美地区的混凝土冬季施工较为方便。美国及其他欧洲国家对添加防冻剂在负温条件下养护的混凝土进行了一定的研究,认为添加防冻剂在

负温条件下养护的混凝土可以达到相应的规定强度,并且施工费用大幅减少。

美、加两国也广泛采用暖棚保温措施的施工方法。随着塑料工业的迅速发展,采用暖棚的工程范围正在日益扩大。目前美、加两国已普遍使用塑料暖棚,还成功地采用了不少充气暖棚。采用暖棚保温,棚内温度可达 20℃,正适合混凝土养护的要求,工人劳动的环境亦较为舒适。充气暖棚是利用塑料薄膜作为屋面和维护结构,其边缘用钢索拉住,在室内不断充气,使薄膜产生一定的刚度。用热风机加热骨料以及给暖棚等供热,是许多欧美国家越来越通行的冬季施工方法,经验证明这是一种很有成效的方法。

5 允许受冻临界强度及免冻成熟度值对比

为保证混凝土不会早期受冻,各国规范对低温混凝土的允许受冻临界强度和免冻成熟度值均具有明确的规定,见表 2。我国规范中给出的允许受冻临界强度是根据国内外实际工程经验与相应的试验研究,结合我国大体积混凝土实际施工水平给出的。

表 2 部分国家混凝土允许受冻临界强度与免冻成熟度值对比

国 家	允许受冻临界强度/ MPa	免冻成熟度/ (℃·h)
瑞 典	3.0~5.0	1110
美 国	3.5	
丹 麦	3.5	840
日 本	6.0	
芬 兰	4.0~8.5	1350
荷 兰		1330
挪 威	4.0~8.5	1110
加拿大	7.0~10.0	2240
前苏联		1800
中 国	5.0	1800

由表 2 可以看出,各国规范规定的允许受冻临界强度和免冻成熟度值各不相同,表明允许受冻临界强度并不是一成不变的,随着施工技术的发展和施工经验的积累,在参考规范的基础上并结合试验数据可以对该数值进行优化。

6 结 语

工程实践表明,在做好混凝土材料准备、温度损失控制、混凝土养护保温等工作的前提下,严寒地区大体积混凝土低温施工可以达到设计标准。在骨料准备、混凝土拌和、混凝土运输到混凝土浇筑养护的全过程中,均需要采取严格的保温措施,尽量减少混凝土入仓前的温度损失。暖棚法具有良好的施工环境,但费工费时。可参巴拉西瓦水电站的施工经验,

采用综合蓄热法可以取得良好的混凝土养护效果。需要根据具体的施工情况选择合理的混凝土养护材料,XPS板与聚氨酯等新型材料需要针对铺设位置的不同灵活应用。

参考文献:

[1] 梅塔,蒙特罗.混凝土:微观结构、性能和材料[M]. 覃维祖,王栋民,丁健彤,等,译.北京:中国电力出版社,2008.

[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] 比揚諾夫 Г Φ.水工建设中混凝土冬季施工[J].水力发电,1958(20):21-27. (BIYANOV Г Φ. The concreting of hydraulic construction in winter[J]. Water Power,1958(20):21-27. (in Chinese))

[4] 李东升.混凝土冬季施工[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

[5] 刘玉山.大体积混凝土冬季施工[M].北京:水利电力出版社,1993.

[6] 赵建军.丰满水电站大坝混凝土质量病害分析[J].建筑科学,2010(31):61-64. (ZHAO Jianjun. Disease analysis for the concrete quality of Hydroelectric dams in Fengman[J]. Building Science,2010(31):61-64. (in Chinese))

[7] 曾宪富.桓仁大坝裂缝分析及处理[J].大坝与安全,1996,37(3):56-61. (ZENG Xianfu. Fracture analysis and processing for Henren Dams[J]. Dam & Safety,1996,37(3):56-61. (in Chinese))

[8] 钱宁,薛振江.李家峡水电站主坝混凝土裂缝及缺陷处理[J].西北水电,2000(4):29-31. (QIAN Ning, XUE Zhenjiang. Crack and deficit treatment of dam concrete for Lijiaxia Hydropower Station[J]. Northwest Water Power,2000(4):29-31. (in Chinese))

[9] 王小莉.积石峡水电站趾板砼施工技术与管理[J].建筑与工程,2010(19):350. (WANG Xiaoli. Construction technology and measures of plinth concrete in Jishixia Hydropower Station[J]. Science & Technology Information,2010(19):350. (in Chinese))

[10] 王飞.混凝土面板堆石坝施工质量控制[J].建筑与工程,2011(5):248-251. (WANG Fei. Construction quality control of concrete face rockfill dam [J]. Science & Technology Information,2011(5):248-251. (in Chinese))

[11] 吴子平,吴中如.青铜峡大坝电站坝段变形性状及裂缝物理成因分析[J].大坝观测与土工测试,2001,25(1):25-27. (WU Ziping, WU Zhongru. Analysis on deformation behavior and physical genetics of cracks in Qingtongxia Powerhouse Blocks[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests,2001,25(1):25-27. (in Chinese))

[12] 黄传庚,吴琴凤.公伯峡水电站厂房混凝土冬季施工温度控制[J].葛洲坝集团科技,2005(1):1-3. (HUANG

Chuangeng, WU Qinfeng. Temperature control of concrete construction in winter of Gongboxia Hydropower Station's workshop[J]. Gezhouba Group Science & Technology,2005(1):1-3. (in Chinese))

[13] 曾宪典.西北水利水电工程施工[J].西北水电,2000(3):41-46. (ZING Xiandian. Construction techniques for water and hydropwer projects in Northwest China[J]. Northwest Water Power,2000(3):41-46. (in Chinese))

[14] 马学强.西藏高海拔地区水利水电施工的若干问题[C]//李菊根.2008中国水力发电论文集.北京:中国电力出版社,2008:175-179.

[15] 李中华.负温混凝土冻害的损伤研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.

[16] 许尔领.低温对现浇混凝土的影响[J].低温建筑技术,1992(2):48-49. (XU Erling. The influence of low temperature on cast-in-place concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology,1992(2):48-49. (in Chinese))

[17] 华东水利学院.水工设计手册[M].北京:水利电力出版社,1987.

[18] 米罗诺夫 C A.混凝土冬季施工理论与方法[M].项玉璞,崔林中,王利华,等,译.北京:中国建筑工业出版社,1982.

[19] 李东升.桓仁水电站支墩坝的负温灌浆[J].水力发电,1985(9):30-33. (LI Dongsheng. Grouting in negative temperature for buttress of Hengren Hydropower Station [J]. Water Power,1985(9):30-33. (in Chinese))

[20] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure[J]. Magazine of Concrete Research,1952,6(2):128-140.

[21] NAIK T R. Maturity of concretes: its application and limitations[M]. [S. l.]:CANMET,1992.

[22] CARINO N J, LEW H S. The mature method: from theory to application, proceedings of the 2001 structures congress & exposition, American, May 21-23, 2001 [C]. Washington D. C. :[s. n.],2001.

[23] JGJ 104—1997 建筑工程冬季施工规程[S].

[24] GB 50496—2009 大体积混凝土施工规范[S].

[25] DL/T 5144—2001 水工混凝土施工规范[S].

[26] 王裕彪,李琪,韩志虎.拉西瓦水电站高薄拱坝混凝土施工温控措施[J].水利发电,2007,33(11):63-65. (WANG Yubiao, LI Qi, HAN Zhihu. Concrete temperature control of the double curvature arch dam for Laxiwa Hydropower Station[J]. Water Power,2007,33(11):63-65. (in Chinese))

[27] 高华峰,张志山.西藏吉前水电站冬季混凝土施工技术[J].葛洲坝集团科技,2009(3):7-9. (GAO Huafeng, ZHANG Zhishan. Concreting technology in winter of Jiqian Hydropower Station in Tibet[J]. Gezhouba Group Science & Technology,2009(3):7-9. (in Chinese))

[28] 胡小舟,王兴利.高寒地区混凝土冬季施工技术[J].电力建设,2008,29(10):72-74. (HU Xiaozhou, WANG

- Xingli. Winter concrete construction technique in frigid areas[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(10): 72-74. (in Chinese))
- [29] 王裕彪,李其.拉西瓦水电站双曲拱坝砼施工温度控制[J].水利水电施工,2007(3):60-61. (WANG Yuhu, LI Qi. Concrete temperature control of Laxiwa Hydropower Station dome dam costruction [J]. Construction of Hydraulic Engineering, 2007(3): 60-61. (in Chinese))
- [30] 黄成,王石连.吉林台一级水电站低温季节混凝土施工[J].水力发电,2006,32(6):37-39. (HUANG Cheng, WANG Shilian. Concrete construction in lower temperature season at Jilintai I Hydropower Station[J]. Water Power, 2006, 32(6): 37-39. (in Chinese))
- [31] 王立东.低温季节混凝土工程施工要点研究[J].水利水电技术,2004,35(增刊1):8-11. (WANG Lidong. Key point considerations for concrete construction in periods of low temperature [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(Sup1): 8-11. (in Chinese))
- [32] 尼玛旦增.直孔水电站大坝混凝土浇筑施工[J].水力发电,2008,34(5):71-72. (NIMA Danzeng. Concrete pouring construction of the dam for Zhikong Hydropower Station [J]. Water Power, 2008, 34(5): 71-72. (in Chinese))
- [33] 刘光廷,谢树南,李鹏辉,等.高寒强震弱基上的石门子碾压混凝土拱坝[C]//中国水利发电工程学会.2001年度全国碾压混凝土技术交流会论文集.成都:[s. n.],2001:114-119.
- [34] 李鹏辉,杜彬,刘光廷,等.石门子碾压混凝土拱坝采用聚氨酯硬质泡沫保温保湿的效果分析[J].水利水电技术,2002,33(6):37-38. (LI Penghui, DU Bin, LIU Guangting, et al. Analysis for the heat insulation and wet keeping effect of rigid polyurethane foam applied in Shimenzi RCC arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(6): 37-38. (in Chinese))
- [35] 王志臣.新疆严寒地区某碾压混凝土重力坝监理质量控制[J].水利建设与管理,2010,30(2):42-46. (WANG Zhichen. Supervision quality control for one roller-compacted concrete gravity dam in cold region of Xinjiang [J]. Water Resources Development & Management, 2010, 30(2): 42-46. (in Chinese))
- [36] 曹海,夏世法,林锋,等.浅谈某严寒地区碾压混凝土坝施工质量控制[J].南水北调与水利科技,2010,8(3):149-152. (CAO Hai, XIA Shifa, LIN Feng, et al. The preliminary study of quality control for the construction of RCC dams in cold and dry region [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 149-152. (in Chinese))
- [37] 吴艳,周富强,沈志刚,等.干旱、严寒地区混凝土大坝保温材料研究[J].新疆水利,2008(6):3-7. (WU Yan, ZHOU Fuqiang, SHEN Zhigang, et al. Study of thermal insulation material for concrete dam in dry and cold region [J]. Xinjiang Water Resources, 2008(6): 3-7. (in Chinese))
- [38] 张铁骑,陈杰.高寒地区大体积混凝土的特殊施工措施研究[J].湖南水利水电,2010(6):48-51. (ZHANG Tieji, CHEN Jie. Study of special construction measures of mass concrete construction in paramos [J]. Hunan Hydro & Power, 2010(6): 48-51. (in Chinese))
- [39] 涂逢祥.欧美国家混凝土冷天施工[M].北京:中国建筑工业出版社,1980.
- [40] 拉津 H B. 古比雪夫水电站建设中混凝土和钢筋混凝土的施工[J].人民长江,1955(6):39-42. (RATZIN H B. The construction of concrete and reinforced concrete of Kuibyshev Hydropower Station [J]. Yangtze River, 1955(6): 39-42. (in Chinese))
- [41] HAVERS J A, MORGAN R M. Literature survey of cold weather construction practices[M]. New Hampshire: Army cold regions research and engineering laboratory, 1972.
- [42] MUSTARD J N. Winter curing of concrete as related to the new Canadian Standard [J]. Behavior of Concrete under Temperature Extremes, 1974, 39: 59-78.
- [43] Rilem Winter Construction Committee. Rilem recommendation for winter concreting [J]. Buiietin da la Rilem, 1963(21): 71-75.
- [44] ACI 211.1—1991 Standard Practice for Mass Concrete [S].
- [45] ACI 306R—1988 Recommended Practice for Winter Concreting Methods [S].

(收稿日期:2012-08-09 编辑:周红梅)

