

# 十一 寒冷地区碾压混凝土筑坝技术

## 1 调研背景概述

20 世纪 60、70 年代<sup>[1]</sup>，世界各国的坝工专家开始研究混凝土筑坝新工艺，经过近 10 年的研究、应用，形成了以美国柳溪坝和日本岛地川坝为代表的碾压混凝土筑坝新工艺。我国开展碾压混凝土筑坝研究始于 1978 年，分别在四川龚嘴、四川铜街子、福建沙溪口等水电站工程和福建厦门机场跑道等进行了一系列试验研究。1986 年建成了我国第一座全碾压混凝土坝—福建坑口坝(坝高 57m)<sup>[2]</sup>。形成了具有中国碾压混凝土技术特色—高掺、薄层、通仓连续碾压的施工工艺，大大推动了碾压混凝土筑坝技术的发展。

世界上已完成的碾压混凝土坝数量<sup>[2]</sup>从 1990 年底的 65 座增至 1994 年底的 136 座、1998 年的 218 座、2002 年的 263 座、2006 年的 323 座，再加上正在兴建的 61 座，总计有 384 座已完成或正在施工的碾压混凝土坝。这些碾压混凝土坝大部分位于亚洲，特别是中国。目前，世界上第一座高于 200m 的碾压混凝土坝(中国龙滩)已经竣工，今后数年内，还有 2~3 座同等高度的碾压混凝土坝将完建。

这些坝的修建，在碾压混凝土坝的结构设计、温度控制、混凝土材料、施工方法与工艺、施工机具等方面积累了丰富的经验，并取得一批新技术成果和理论研究成果，各国也形成了整套的各具特色的碾压混凝土筑坝技术。已完建的工程经过多年运行考验，绝大部分坝体工程质量良好，运行正常。但对于在寒冷地区修建碾压混凝土坝，由于其独特的气候特点和碾压混凝土大坝本身的特点，仍然存在众多难题。从美国、俄罗斯、日本、我国东北及西北地区修建的寒冷地区碾压混凝土坝来看，这些问题主要集中在结构设计、温度控制、施工方法与工艺等方面。

根据我国《水工混凝土结构设计规范》(SL/T 191-96)及《水工混凝土抗冻设计规范》(SL211-98)的有关规定，最冷月平均气温低于 $-10^{\circ}\text{C}$ 为严寒地区，最冷月份在 $-10^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$ 为寒冷地区，最冷月份月平均气温高于 $-3^{\circ}\text{C}$ 为温和地区。

在寒冷及严寒地区，往往冬季漫长，极端最低气温在 $-30^{\circ}\text{C}$ 以下，在这些地区修建混凝土坝，一般冬季要停浇越冬，如由于工期限制，必须在冬季施工，则在材料配比、温度控制、施工方法等方面采取独特的措施。

在结构设计方面，不透水性和稳定性是大坝安全的两个重要因素，在寒冷地区修建碾压混凝土

土坝，需要对其进行特别的结构设计。另外，为了减小温度应力的影响，有些大坝(如我国的白石重力坝和石门子拱坝)在结构上进行了设置诱导缝的设计研究。

在材料配比方面，一方面为了减少温度裂缝，需采用低发热量水泥，另一方面，因寒冷地区存在严重的冻融破坏现象，需要提高混凝土的抗冻标号。同时，为了防止浇筑的混凝土在早期受冻，需要掺加一定量的防冻减水剂。

在温度控制方面，在寒冷地区，年平均气温低，大坝的稳定温度较低，防止基础贯穿性裂缝难度大；冬季寒冷且持续时间长，气温年内变幅大、昼夜温差大且寒潮频繁，在冬季坝面附近混凝土内外温差较大，防止坝面裂缝难度也较大。同时碾压混凝土坝采取通仓浇筑、不分纵缝以及越冬长间歇式的施工方法，使其具有独特的温度应力时空分布规律<sup>[4]</sup>，更增加了碾压混凝土温控与防裂难度。早期在严寒地区修建的碾压混凝土坝裂缝比较严重。目前，严寒地区碾压混凝土重力坝温度应力与温控防裂已成为一个新的研究课题。

在施工方面，寒冷地区修建碾压混凝土坝主要集中在混凝土防冻和养护方面。

本报告从上述几个方面着手，主要通过资料查询的方式，跟踪调研美国、俄罗斯、日本和国内严寒地区碾压混凝土坝的筑坝技术，了解其工程建设情况，总结最新的技术进展。

国外关于寒冷地区碾压混凝土筑坝技术的资料比较匮乏，调研资料的主要来源是国内外期刊、国际会议公开发表的论文、国内的出国考察报告等。

## 2 必要性及意义

随着碾压混凝土技术的发展，我国在北方寒冷和严寒地区修建碾压混凝土坝方兴未艾，2001年以前，这些碾压混凝土坝主要分布在东北地区，如观音阁（辽宁，1995，82m，金包银防渗）、温泉堡（河北，1995，74.5m，碾压混凝土防渗）、桃林口（河北，1998，74.5m，金包银防渗）、松月（延吉，1999，31m，金包银防渗）、满台城（延吉，2001，37m，金包银防渗）、和龙（延吉，2002，30m，金包银防渗）、白石（辽宁，2001，50.3m，金包银防渗）等，均为碾压混凝土重力坝。

这些早期修建的严寒和寒冷地区的碾压混凝土坝，都存在不同程度的问题，比较突出的是温控防裂问题。工程经验和理论研究都表明，严寒地区碾压混凝土重力坝具有代表性的温度裂缝主要包括<sup>[5]</sup>：(1)上、下游坝面的劈头裂缝；(2)强约束区长间歇顶面(包括越冬面)的纵向裂缝；(3)永久底孔、导流底孔四周的环形裂缝；(4)溢流坝反弧段的纵向裂缝；(5)越冬层面附近上、下游侧水平施工缝的开裂。在上述5种裂缝中，上、下游坝面的劈头裂缝属于横缝、这种裂缝的危害

是既破坏了坝体的整体性，又破坏了坝体的防渗性。第(2)、(3)、(4)的3种裂缝均属纵缝，其中底孔环形裂缝和反弧段裂缝位于高速水流过水断面上，很可能发展成深层或贯穿性裂缝，危害严重。第(5)种裂缝属于水平缝，其上、下游侧可分别沿着坝轴线方向贯穿于整个越冬层面，破坏坝体的防渗结构，影响坝体的整体稳定性。

2001年以后，我国修建的碾压混凝土坝主要集中在西北地区，如龙首（甘肃，2001，81m，碾压混凝土防渗）、石门子（新疆，2002，110m，碾压混凝土防渗）、特克斯山口（新疆，2008年，51m已完成）、喀拉塑克（新疆，在建，121.5m，碾压混凝土防渗）、冲乎儿（新疆，在建，50m，碾压混凝土防渗）等。

另外，东北地区的丰满老坝重建方案中也选定了碾压混凝土重力坝型，计划于2011年开工建设。

为了总结严寒和寒冷地区碾压混凝土的筑坝经验，借鉴国际先进的筑坝技术，推动我国在严寒地区碾压混凝土的筑坝水平，对严寒地区碾压混凝土筑坝技术进行本调研是非常必要的。

### 3 严寒地区碾压混凝土坝建设概况

#### 3.1 美国的上静水（Upper Stillwater）坝

##### 3.1.1 简介

美国早期修建的上静水（Upper Stillwater）坝座落在犹他州东北部的温塔山脉的岩溪上，在盐湖城东南约200km处(见图3.1-1图在何处?)。上静水坝为碾压混凝土重力坝，混凝土总方量120万 $m^3$ ，其中碾压混凝土量112万 $m^3$ 。大坝坝址区冬季最低气温可达 $-35^{\circ}C$ 以下，坝高91m，坝顶长820m，没有设横缝，只在上游面常态混凝土设诱导缝。大坝上游面垂直，下游面上部23m的坡比为0.32:1(H:V)，下部坡比0.60:1(H:V)。

##### 3.1.2 设计

上静水坝为碾压混凝土直线型重力坝，上下游坝面采用了滑模法施工。坝顶宽9.1m，基础最大宽度55m。碾压混凝土摊铺层厚400mm，碾压后300mm，摊铺层从坝肩到坝肩是连续的，不设收缩缝。

上静水坝的碾压混凝土试验分两个阶段进行：第一阶段为大规模的试验室试验<sup>[6]</sup>，检验拟用配合比混凝土的物理性能，包括拉压强度、弹性模量、热学性能、温升、密度、渗透性、抗冻

性和干缩等。通过试验，确定了碾压混凝土的最低要求为：1 年龄期的抗压强度 20.5MPa、抗拉强度 1.25MPa、抗剪强度：粘聚力  $C=1.25\text{MPa}$ ；内摩擦角  $\varphi=45^\circ$ ；密度： $2325\text{kg/m}^3$ 。

第二阶段是试验段浇筑，目的是检验实验室确定的初步配合比以及拟用的施工设备，特别是用于浇筑坝体上、下游坝面的滑模机具、用于水平与垂直定位的激光器。层间结合和温升也是试验段中试验的重要内容。

初步配合比设计试验是按照 ACI（美国混凝土协会）207 委员会提出的报告“碾压混凝土”进行的。一开始设计配合比拌合物的工作性差，无法接受。接着进行了第二次配合比试验，经验证比较成功。

随后又进行了试验段浇筑，通过在试验段试拌使用和 28d 钻取芯样数据重新验证了配合比。试验段芯样的抗压强度测定结果表明，碾压混凝土的抗压强度接近或者超过了 20.5MPa 的要求值，但芯样的层间结合效果比预计的稍差。通过对无粘结低强度芯样的观察发现，浇筑层厚度偏差最大为 130mm，层底部有空隙，层面有污染。

此后又进行了最终配合比试拌调整，试验结果显示所有配比的碾压混凝土 1 年龄期的抗压强度都能达到 20.5MPa 要求。28d 龄期的强度仅为 1 年龄期强度的 25%~40%，但在 28d 之后强度增长超出预先的想象，这与在胶凝材料中掺入了大量的粉煤灰有关。

采用计算程序对碾压混凝土坝的温度特性进行了二维模拟，模拟程序考虑了碾压混凝土分层施工方式，同时还考虑了气温和太阳辐射以及水化热。绝热温升为  $19^\circ\text{C}$ 。模拟采用的浇筑温度为  $10^\circ\text{C}$ 。坝址区的年平均气温为  $2.2^\circ\text{C}$ 。由于凉爽气候环境的散热作用，模拟分析预计最高温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

### 3.1.3 施工

由于坝址温度变化很大，承包商只能利用夏季的 5 个月时间进行施工。而且，规定的碾压混凝土最高浇筑温度为  $10^\circ\text{C}$ ，这意味着在大部分施工期内，只能靠晚上 16h 浇筑碾压混凝土。但是在 1986 年大坝主施工期内，碾压混凝土浇筑只能在 5 月 12 日到 9 月 23 日之间进行，即只有 4.5 个月的时间。即使在这么短的时间，温度变化达到  $-8^\circ\text{C}\sim 33^\circ\text{C}$  的情况下，承包商仍然浇筑了约 54 万  $\text{m}^3$  的混凝土。

坝体上、下游坝面由相互连锁的面板组成，采用带侧模的滑模浇筑（面板主要利用 8h 白班浇筑）。每次摊铺垂直方向上浇筑面板 600mm，4h 之后方可贴滑模面板浇筑碾压混凝土。滑模每次提升，可浇筑两层 300mm 厚碾压混凝土。碾压混凝土由 2 个容量  $3\text{m}^3$  的配料器配料，用 2 个

6m<sup>3</sup>的斜鼓形搅拌机或2个3m<sup>3</sup>的双轴搅拌机拌合。由皮带输送机将混凝土拌合物从拌合厂运送到大坝，通过2个“象鼻”输送管卸到位于仓面的35t后卸式卡车上。卡车加装有铺料箱，一次完成碾压混凝土的卸料和摊铺，再用激光制导推土机做最后平整，然后由一辆10t双筒振动碾碾压6~8遍，大约每天浇筑一层。滑模浇筑的上、下游坝面用作表面抗冻层，不要求具有防渗功能。

### 3.1.4 运行

大坝在4个断面上安装了大量观测仪器，监测参数包括基础扬压力和变形、温度、变位和渗漏。监

初期蓄水过程中，发现坝基的硅质粘土岩层的变形超出设计预期，测斜仪显示该层有明显的位移。在蓄水过程中，大坝向下游方向的最大位移为10mm。坝基渗压计显示这一区域的压力高于预计值，而其下游的渗压计状态正常，与预计相符。自水库开始蓄水以来，每逢冬季放空，春季蓄水，其间只观测到有非常微小的位移。

坝体未设置横缝或诱导缝，因为每个冬季都放空水库，所以工程完工后即使大坝出现裂缝，也可修补密封。在一次寒潮中，坝体出现了16条裂缝<sup>[8]</sup>，平均间距35m，库水通过贯穿裂缝漏到了下游面<sup>[7]</sup>。其中最大的裂缝是由温度收缩和基础位移两方面原因造成的，通过该缝的最大漏量60L/s。对该裂缝进行了灌浆，使渗漏量减少到可接受的范围内。若不计算竖向裂缝渗漏，坝体的平均渗漏量不超过0.65L/s。

## 3.2 日本的忠别坝

### 3.2.1 简介

忠别坝位于北海道旭川西南22km的石狩川水系的忠别川上，其功能为防洪、灌溉、供水及发电。坝址所在地区气候四季分明，冬寒夏暖，特别是冬季时间很长，积雪期达4个月之久。忠别枢纽的挡水坝为混凝土坝段和土石心墙坝组成的混和坝型，其透视图见图3-1。

混凝土坝高86m，坝顶长290m，混凝土方量100.7万m<sup>3</sup>，整个忠别枢纽工程于1977年开工，2006年竣工。

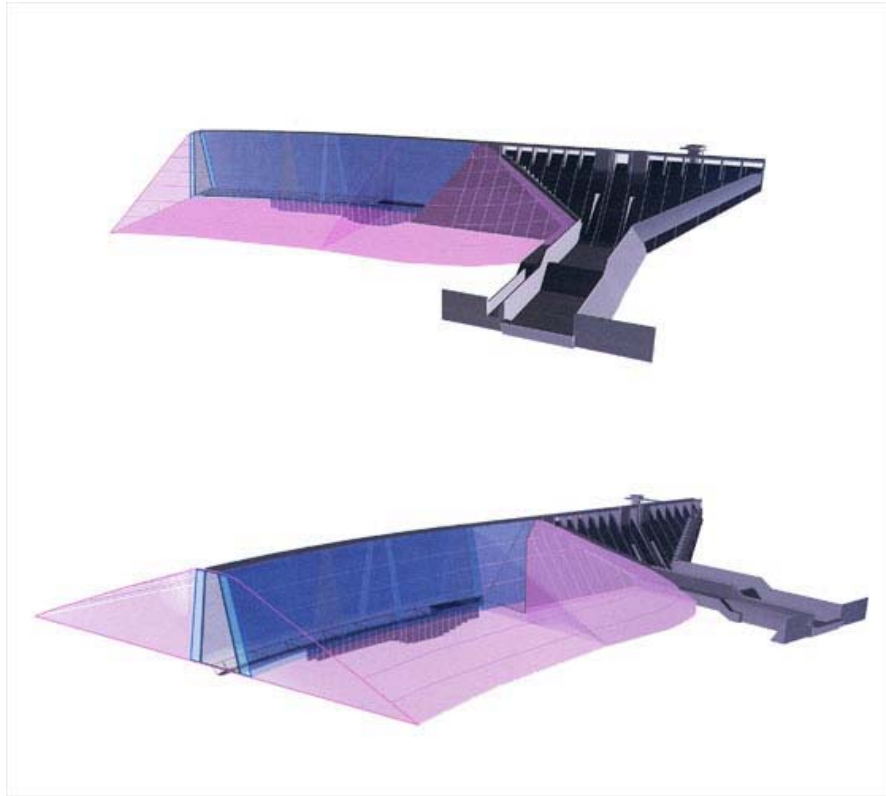


图 3-1 日本忠别坝透视图

### 3.2.2 设计

为适应寒冷地区的要求，忠别坝对混凝土粗骨料（5~150mm）依据（JISA1122）标准测定其稳定性，采用硫酸钠溶液浸泡处理，其质量损失不得大于 10%，且 40%以下的骨料的吸水率不得超过 3%。

胶凝材料：采用 70%的中热硅酸盐水泥掺 30%的粉煤灰，使混凝土单位体积内水泥用量减少，使得混凝土在硬化过程中的发热量降低。

外加剂：采用 AE 型减水剂（缓凝型）。用以降低混凝土单方用水量，提高混凝土的强度，改善施工和易性。

为满足大坝上下游面混凝土的抗渗性、抗冻性、抗磨蚀性和耐久性的要求，以及大坝内部碾压混凝土强度的要求，忠别坝采用的混凝土配合比如表 3-1 所示。

表 3-1 忠别坝混凝土配合比

使用部位	粗骨料粒径 (mm)	水胶比 W/ (C+F)	砂率 (%)	单位混凝土中材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	胶凝材料	砂	粗骨料	外加剂
上下游面	150	43.2	24	95	220	499	1575	0.55
RCD 部位	150	63.2	28	76	120	632	1625	0.33

对混凝土采用冻融试验，依据（JISA11）标准，经过 300 次冻融循环后，其动弹模损失不得超过 60%。

### 3.2.3 施工

忠别坝的混凝土坝段采用 RCD 工法施工，其施工流程见图 3-2。

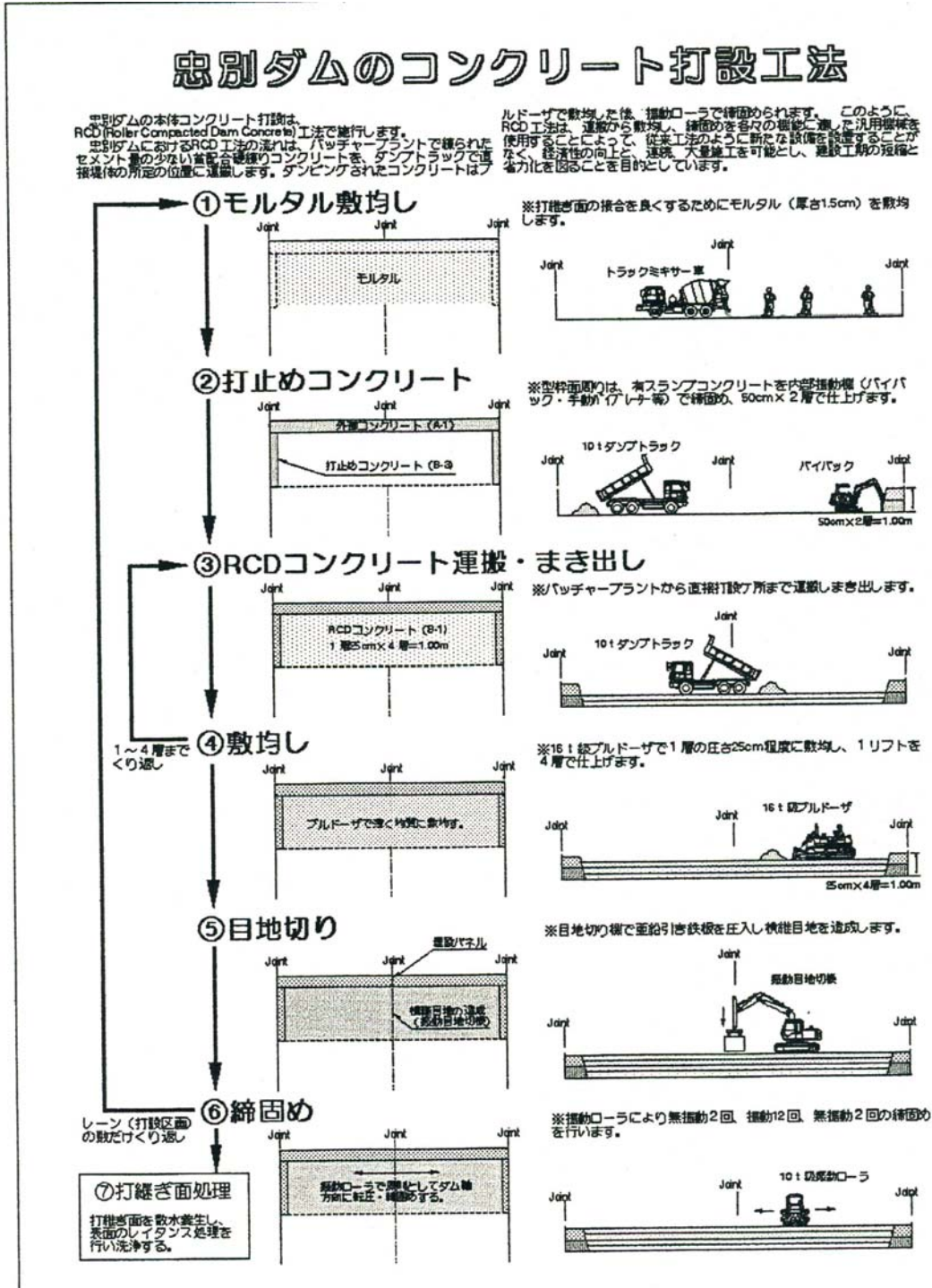


图 3-2

(1) 砂浆铺填：首先在间歇层面上铺填砂浆，砂浆等级应比混凝土高一级，其厚度为 1.5cm。

(2) 仓面上下游面常态混凝土浇筑：首先架立模板，然后分两次浇筑，每层 0.5m 厚，两层为一个单元，厚度 1m。

(3) 碾压混凝土运输入仓预压：采用 10t 自卸汽车将混凝土拌合物运输至仓面。

(4) 混凝土摊铺与预压：采用 16t 推土机将混凝土拌和物均匀摊铺成 25cm 厚一层，并进行预碾压。一层完成后，再摊铺下一层，每 4 层为 1 个单元，厚度达到 1m。在基础部位和约束区，层厚应取 0.7m。

(5) 切缝：当铺层厚度达到 1m 时，按照设计要求的缝间距进行切缝处理。

(6) 碾压：采用 10t 振动碾，先静碾两遍，再振动碾压 12 遍，最后再静碾两遍。

(7) 养护：养护 3~5d 后，进行下一层的填筑。

雨天停止施工，如果在施工过程中降雨，对于常态混凝土，当降雨量超过 4mm/h；RCD 混凝土超过 2mm/h 时，必须停止施工。

忠别坝 RCD 混凝土最高填筑强度为 2000m<sup>3</sup>/d，平均为 900~1000 m<sup>3</sup>/d。

#### 3.2.4 温度控制

忠别坝很注意施工期的温度控制，规定日平均气温在 4℃ 以上，混凝土的温度在 5℃ 以上时可以正常施工，日平均气温在 25℃ 时属高温期，即停止混凝土施工，并对大坝上下游表面和施工作业面的混凝土进行洒水降温养护。该坝采用河水进行降温，当地的河水温度不超过 17℃。低温时期对混凝土坝的表面进行覆盖，以防止温度的降低。

冬季保温的方法：冬季受混凝土内部和外部温度的影响，在混凝土表层形成温度差，当产生拉应力超过允许值时，会出现裂缝，为此对混凝土坝的上下游面及施工作业面（越冬层面）上均进行保温。具体通过温控计算确定表层温度的允许范围。要求当冬季气温在 -30℃ 时，混凝土表面达到 0~7℃，依此标准对保温方案进行选择。保温层由 3 层组成：紧靠混凝土表面为加热层，其上为保温绝热层，最上层是防风防雨层（见照片 3-1、3-2）。如果在保温层上还需施工作业，如灌浆等，则在防雨层上再铺填 45cm 的砂子，以防止保温层遭到破坏。春天继续施工时，首先对混凝土越冬面测温，当温度低于 4℃ 时，则通过加热层进行升温。





照片 3-1



照片 3-2

施工时的防寒标准为：1) 当混凝土的温度能够保证在  $5^{\circ}\text{C}$  以上，日平均气温在  $4^{\circ}\text{C}$  以上时，可以正常施工；2) 对于混凝土温度达到  $5^{\circ}\text{C}$  以上，且其抗压强度达到  $5\text{N}/\text{mm}^2$  时，采用保温养护；3) 当混凝土抗压强度为  $5\text{N}/\text{mm}^2$ ，连续两天气温在  $0^{\circ}\text{C}$  以上，采取加温、保温措施；4)  $0^{\circ}\text{C}$  以下停止施工。该坝的防寒标准中既要考虑气温，也要考虑混凝土的初期抗压强度。在基础层施工时采用了暖棚法施工，以加快施工进度，延长有效作业时间。

对于先浇层采用自然散热，间歇时间一般为 3 天。



照片 3-3

### 3.3 日本的玉川(Tamagawa)坝

#### 3.3.1 简介

玉川大坝位于日本 Tohoku 地区的 Omono 河上。坝高 100m，1987 年建成，为 RCD 重力坝，混凝土方量 115 万  $m^3$ 。通过此坝的建设，使日本 RCD 工法得到完善。玉川大坝位于寒冷地区，积雪可达 2m 以上，气温可降至  $-15^{\circ}C$ ，施工过程中每年有 5 个月的时间停浇越冬，为了节省投资，选用了 RCD 法施工<sup>[9]</sup>。



图 3-2 玉川大坝

### 3.3.2 施工

玉川坝施工需要重点解决快速施工和大升程的问题。该坝的混凝土拌合楼位于坝顶部位，混凝土拌合后由中转车辆装到沿倾斜钢轨行走的料斗车，然后运至施工高程的储料站，再由 20t 的自卸汽车运至仓面。斜面运输系统包括两辆料斗车和两套钢轨系统，轨道的最大高差可达 94.5m，料斗车的最大行进速度可达 150m/min，高峰期每小时可运送混凝土 270m<sup>3</sup>。

玉川坝的施工实践表明：与缆机或起重机等传统浇筑方式相比，斜坡运输系统在运输能力、操作的安全性、简易性等各方面都具有一定优势。因此，日本后续的一些筑坝工程多借鉴了这种施工方式。



图 3-3 斜坡运输系统

为了提高施工速度并减少浇筑层面的数量，在玉川坝选用了较厚的碾压层，随之也带来了碾压不密实的风险。玉川坝采用 1m 厚的碾压层，首先把 1m 厚碾压层分成 4 层进行摊铺，然后采用振动碾对 1m 厚的碾压层进行碾压。为进一步控制碾压后的 RCD 的质量，对混凝土的密度采用插入式同位素放射仪进行现场测定。上述措施避免了 1m 厚的碾压层碾压不密实现象。

在 RCD 施工法中采用的薄层摊铺、整层碾压方式跟 RCC 施工方式有很大的区别，在 RCC

施工中一般采用整层进行摊铺碾压的方式。采用较厚的浇筑层可减少薄弱层面的数量。

在玉川坝采用 1m 厚浇筑层以后，开发出更大功率的振动碾用于 RCD 的施工。

基于玉川坝是日本采用 RCD 施工法建造的第一个高坝，对大坝的温控进行了大量的的监测和研究工作。为了减少水泥的用量，采用了最大粒径 150mm 的骨料<sup>[10]</sup>，并且限制胶结材料的含量在 130kg/m<sup>3</sup> 以内。大坝混凝土采用了中热水泥并掺了 30% 的粉煤灰。表 3.3-1 为玉川坝的配合比。

表 3-2 玉川坝的配合比

项 目	含 量
最大骨料粒径	150mm
水	95kg/m <sup>3</sup>
水泥	91kg/m <sup>3</sup>
粉煤灰	39kg/m <sup>3</sup>
砂骨比	30%
细骨料	657kg/m <sup>3</sup>
粗骨料	1444kg/m <sup>3</sup>
引气剂	1.50%

由于采用了 RCD 施工法，玉川坝得以在 26 个月内完工(不包括越冬间歇期)，较之采用常态混凝土浇筑缩短工期 5~7 个月。

### 3.3.3 运行

玉川碾压混凝土坝于 1987 年建成。该坝的上下游产生了程度不同的垂直向裂缝，连续几年发生了越冬层面水平施工缝的开裂<sup>[4]</sup>。

## 3.4 俄罗斯基柳伊水电站大坝（RCD 坝设计及施工特点??）

基柳伊水电站位于阿穆尔州的结雅区结雅河右岸支流基柳伊河上，距特格达（距我国黑河市约 320km）火车站不远。大坝为碾压混凝土重力坝，坝高 104m，坝顶长 710m，水库总库容为 6.7 亿 m<sup>3</sup>，有效库容 3.2 亿 m<sup>3</sup>。水电站总装机容量为 46.2 万 kW，年平均发电量 11.46kW·h（单位不对??）。工程以发电为主，兼顾防洪和灌溉等综合效益。1991 年动工，1993 年截流，1995 年第一台机组发电。工程总开挖量 120 万 m<sup>3</sup>，其中软土开挖量 30 万 m<sup>3</sup>，松散岩石开挖量 60 万 m<sup>3</sup>，完整岩石开挖量 30 万 m<sup>3</sup>。填方 2 万 m<sup>3</sup>。混凝土和钢筋混凝土浇筑量为 198 万 m<sup>3</sup>，其中碾压混凝土浇筑量 90 万 m<sup>3</sup>。水泥灌浆进尺 3.6 万 m。金属结构和设备安装 2.22 万 t。施工高峰人数达 5000 人。总工期 7 年。工程总投资 9.9 亿美元。

水利枢纽所在地区属温带季风气候，冬季晴朗寒冷，夏季雨量充沛，年降水量 525~700mm。每当季节交替时，天气较为干燥。年平均温度约-4℃，极端最低气温为 1 月份的-55℃，极端最高气温为 6 月份的 36℃。通常 10 月下旬开始封冻，历时 160~202 天，最大冰层厚度为 1.86m。枢纽建筑物的地基基岩温度为 2~3℃。坝址区多年平均流量 190m<sup>3</sup>/s，万年一遇洪峰流量 9203m<sup>3</sup>/s，千年一遇洪峰流量 6930m<sup>3</sup>/s，百年一遇洪峰流量 5220m<sup>3</sup>/s。坝址区地震烈度 7~8 度。

大坝横剖面为三角形，如图 3.4-1 和图 3.4-2。坝体内部为水泥用量较少的碾压混凝土，上、下游面为振捣密实的混凝土外壳，外壳起隔热和防渗作用，即 RCD。

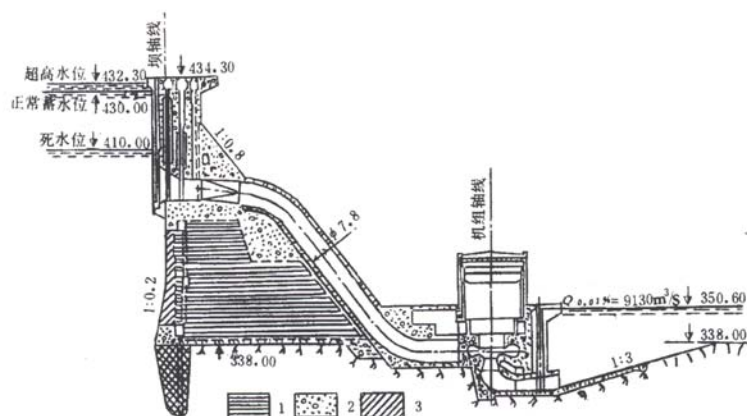


图 1 水电站厂房坝段：

1——碾压混凝土 2——普通捣实混凝土 3——分层捣实混凝土

图 3-4-1 基柳伊水电站厂房坝段剖面

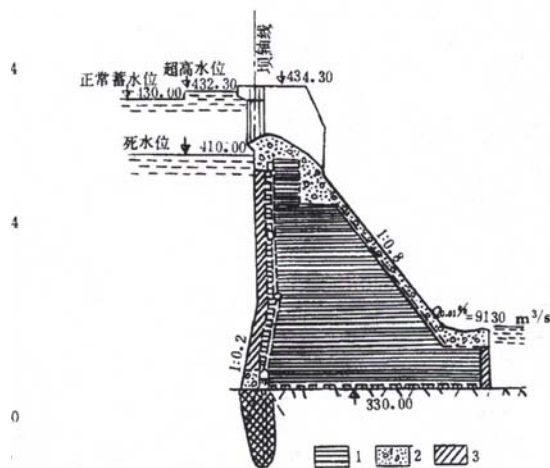


图 2 溢流坝剖面

1——碾压混凝土 2——普通捣实混凝土  
3——分层捣实混凝土

图 3-4-2 基柳伊水电站溢流坝段剖面

### 3.5 俄罗斯布列亚水电站大坝（RCD 坝设计及施工特点??）

布列亚水电站位于俄阿穆尔州的布列亚河（бурая 河，黑龙江支流，该工程距我国黑河市约 200km）上，是苏联解体后俄罗斯建设的最大的水电站。坝址区年平均温度为-3.8℃，最低气温-58℃，最高气温 41℃，年降水量 710~870 mm。

混凝土重力坝最大坝高 139m，坝顶长 765m。坝体混凝土为 351 万 m<sup>3</sup>，到第 1 台机组发电时必须完成 171 万 m<sup>3</sup>。大坝由溢流坝段和非溢流坝段组成，采用右岸坝后式厂房。溢流坝段前沿长 180m，布置在河床左侧，最大下泄流量为 11700m<sup>3</sup>/s。枢纽布置见图 3-5-1，溢流坝剖面见图 3-5-2。坝体外部（包括上、下游面和基岩接触区的基础混凝土）采用常规的振捣混凝土，内部为干硬性碾压混凝土，即 RCD。施工时因种种原因，坝体混凝土采用了碾压与振捣相结合的方法施工，保证了在资金短缺和建材（特别是水泥和钢筋）供应不及时情况下受损较小。

该电站建设的前期准备始于 1976 年，1982 年原苏联政府正式拨款开工建设，1993 年水电站的建设完全陷入停顿，1999 年由俄统一电力公司投资 70 亿卢布（当时 1 美元约合 20 多卢布）恢复了电站的建设。

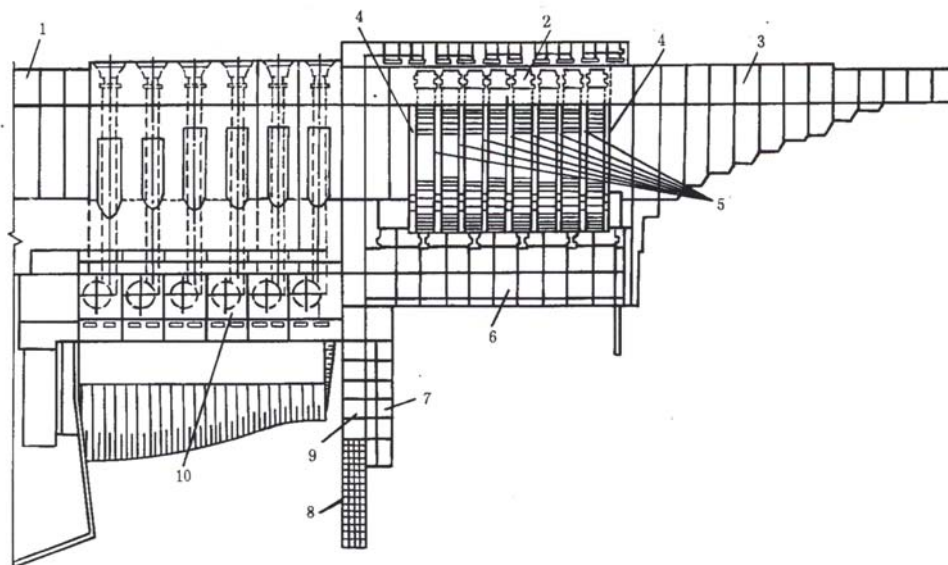


图 1 水利枢纽平面图

1——右岸非溢流坝 2——表面溢洪道 3——左岸非溢流坝 4——表面溢洪道边墙 5——溢洪道隔墙 6——导流泄水管的混凝土支撑 7——隔墩旁的纵向混凝土支撑和木笼混凝土基础 8——木笼 9——隔墩 10——水电站厂房

图 3-5-1 布列亚水电站枢纽布置

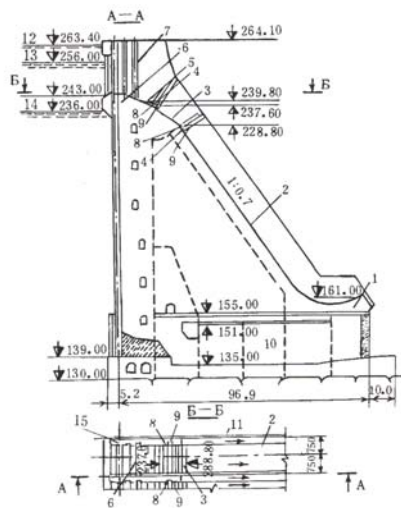


图 2 溢流坝剖面图

- 1—挑流鼻坎 2—溢流面直线段 3—直线嵌板
- 4—台阶和通气装置 5—直线段 6—溢流堰首部
- 7—主闸门槽 8—转向装置 9—门槽和通气装置
- 10—深泄水管, 水库蓄水期和枢纽机组临时运行工作
- 11—坝段间温度伸缩缝 12—非常水位
- 13—正常高水位 13—死水位 15—坝轴线

图 3-5-2 布列亚水电站溢流坝段剖面

### 3.6 蒙古 taishir 大坝[11]

#### 3.6.1 简介

蒙古泰西尔水电站工程位于蒙古首都乌兰巴托以西大约 1050km 处的戈壁阿尔泰和扎布汗省交界的扎布可汗河乌兰布姆峡谷上。极端寒冷的冬季和炎热的夏天是该地区大气候的特点。年平均气温为 0°C，极端气温值为 1 月份的-51°C，7 月份 39°C，昼夜温差大。区域的年降水量仅为 200mm。主要风向为西北风和北风，4、5 月份风沙大且频繁。大坝为碾压混凝土坝，河床以上坝体总高 50m，坝顶长约 190m，大坝混凝土体积约 20 万 m<sup>3</sup>，库容约 9.3 亿 m<sup>3</sup>。宽 75m 带有台阶状泄槽的无闸门溢洪道位于坝体中部，厂房为坝后式，额定总装机容量 11MW，包括 3 台 3.45MW 和 1 台 650kW 混流式水轮发电机组。

#### 3.6.2 设计

大坝坝顶宽度 5.00m，挡水坝段顶部高程 1708.00m，溢流坝段顶部高程 1704.00m；大坝上游面 1668.00m 高程以上为竖直面，以下进水塔左侧为 1:0.85 的斜坡面、右侧为竖直面；大坝下游面设计为台阶状，平均坡度为 1:0.725，每个台阶的宽度为 0.73m、高度为 1.00m。

坝体大体积混凝土为准三级配碾压混凝土(MSA=51mm),90d龄期的设计抗压强度为6MPa, Vebe 时间控制在15~30s, 通过掺加足够的石粉(每m<sup>3</sup>碾压混凝土掺加146kg人工石粉)和外加剂以降低水泥的用量(75kg/m<sup>3</sup>)和改善混凝土的性能。

值得注意的是:该大坝混凝土配比中无任何防渗指标要求。大坝防渗由单排灌浆防渗帷幕和坝面防渗膜两部分组成,帷幕灌浆施工在紧靠大坝上游面浇筑的灌浆平台上进行,最大入岩深度35m。坝面防渗膜底端锚固在灌浆平台上,顶端锚固在RCC上部的常态混凝土(0.4m厚)上,进水塔和溢流坝部位的防渗膜锚固在相应的常态混凝土上。安装防渗膜进行坝体防渗,从根本上解决了在高寒地区混凝土防渗的技术难题,是一项大胆的技术创新,防渗体系的布置参见图3-6。

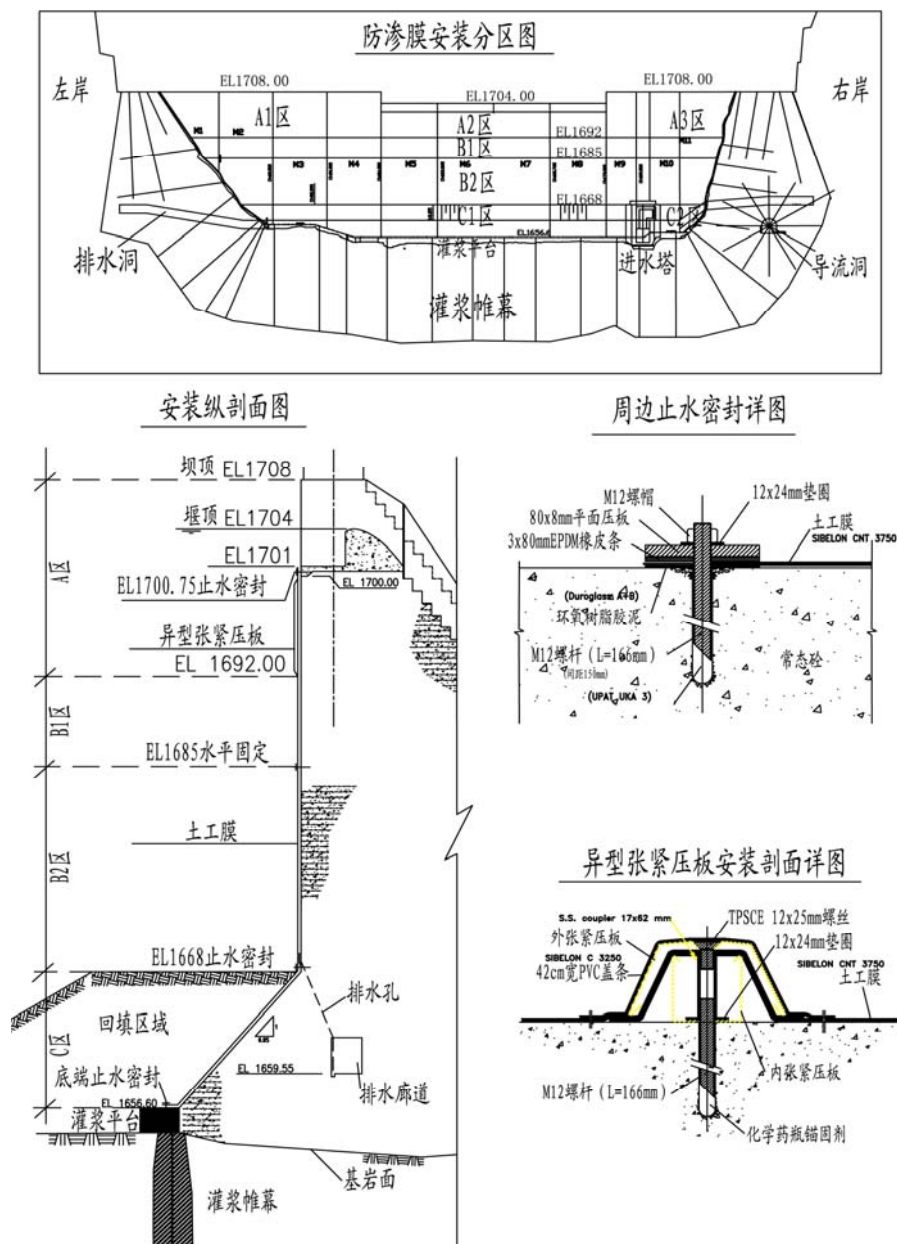


图 3-6 蒙古泰西尔大坝防渗设计



坝体防渗薄膜使用柔性聚氯乙烯 (PVC) 材料与具有热粘、非纺织、针穿聚脂土工布相粘结, 有足够的柔性; 在高达 40°C 的温度下, 可以进行现场焊接; 能够抵抗紫外线的侵袭; 在坝内潮湿的碱性环境下, 能够抗侵蚀, 也能够抵御有机物和细菌生长的恶化; 外露薄膜的 PVC 的最小厚度为 2.5mm, 内部衬垫薄膜的 PVC 的最小厚度为 1.6mm。

防渗膜安装施工自 2007 年 6 月 11 日开始, 2007 年 9 月 1 日竣工。采用防渗膜进行坝体防渗, 改变了水工建筑物的防渗研究思路, 是应用和推广先进施工技术和新材料的积极举措。表明可以通过研究应用优质的防渗膜等材料满足水工建筑物的抗渗要求, 而不再是单纯通过研究改进混凝土等材料本身的防渗性能来满足构筑物的抗渗指标。

泰西尔 RCC 坝防渗膜的安装比较理想地解决了坝体的防渗问题, 截止 2007 年冬季库水位上升稳定至 1677.10m (达到最高蓄水位的 45%), 坝后没有发现任何渗漏。采取此种方案, 简化了 RCC 施工, 节约了大量水泥, 降低了大体积混凝土的水化热温升, 取消了坝缝止水的安装, 不需要对坝体施工过程中出现的冷缝、裂缝进行处理, 使大坝混凝土实现了快速浇筑, 既加快了施工进度, 又降低了施工成本, 达到了快速、经济和美观的目的。

### 3.7 美国的新埃尔默托马斯坝、彼得森坝和圣克鲁斯坝[12]

本节仅述及这 3 座坝建设过程中与寒冷天气施工有关的问题。

新埃尔默托马斯坝是位于俄克拉何马州劳顿附近的威奇托山野生动物保护区的碾压混凝土坝。该坝取代位于紧挨其上游应报废的一座土石坝, 于 1993 年竣工。碾压混凝土浇筑工程量为 2.9 万 m<sup>3</sup>。1993 年 1 月 7 日开工, 2 月 27 日完成。为了保持近乎连续浇筑的施工进度 (这对取得浇筑层层间的良好粘合很重要), 允许承包商在气温低于 4°C 的条件下浇筑碾压混凝土, 但采取了特殊的预防措施来监测气温和碾压混凝土的温度, 以保证现场碾压混凝土获得适当的保护和养护。浇筑碾压混凝土期间测得的日最低气温为 -2°C ~ 13°C。碾压混凝土的现场温度是 6°C ~ 13°C。因严寒和恶劣的天气, 浇筑作业停工 6 次。承包商工作通常每天两班, 每班 10 h, 停工 4 h, 用来进行维修和移动模板。停止浇筑的时间通常是安排在一天最冷的上午 3~7 点钟。碾压混凝土的设计配合比不变: 混凝土含 89 kg/m<sup>3</sup> II 型水泥和 89 kg/m<sup>3</sup> F 级粉煤灰。碾压混凝土用保温毡覆盖, 这一方法为保护碾压混凝土提供了一种合适的手段。仅有一次在碾压过的浇筑层表面发生冰冻, 12 h 后浇筑层表面仍基本上是未硬化料, 用高压水和气把这层厚约 25 mm 未水化的碾压混凝土冲掉, 在浇筑上一层之前, 该浇筑层表面按冷缝进行了处理。在竣工 10 个月后, 坝体取直径 150 mm 的芯样进行实验室密度和强度测试。测试结果显示, 最低抗压强度高于 20 700 kPa, 超过 56d 设

计强度 13 800 kPa。肉眼观察芯样只发现碾压混凝土浇筑块中出现很少几条可察觉的接缝,表明浇筑层层间粘合良好。

彼得森坝位于科罗拉多州北部高山区(海拔 3 050 m),用以取代在相同位置一座有缺陷的土坝。1995 年 9 月 23 日至 11 月 9 日共浇筑碾压混凝土 7 100m<sup>3</sup>。由于寒冷和下雪天气,碾压混凝土浇筑曾停工 5 次。原定每天两班作业,后改为一个长时班,早晨 5 点钟开始,首先移去保温覆盖层,再用热水把碾压混凝土表层冲掉。承包商把拌和水加热到约 49℃。当气温降到零度以下时,不用粉煤灰,只用水泥。设计的胶结料 II 型水泥用量 145 kg/m<sup>3</sup>、F 级粉煤灰用量 48 kg/m<sup>3</sup>。用水泥代替粉煤灰可增加水化热,并获得较高的早期强度。当时的日气温为-18℃~17℃。碾压混凝土表面的实测温度,从用保温毡覆盖前的 4℃升到晚间被覆盖几小时后的 22℃。碾压混凝土的浇筑温度通常是 4℃。日班完工后,立即用保温毡覆盖浇筑层表面渡夜,碾压混凝土表面的温度在几小时后一般可升到 21℃。每晚对保温毡下的碾压混凝土表面进行连续的温度观测。坝体竣工后,在坝体钻了 3 个 NX 层尺寸的钻孔安装测压计。所取芯样显示碾压混凝土浇筑层层间粘结良好,浇筑层接缝难以辨别。由于碾压混凝土骨料的最大粒径是 64 mm, NX 芯样(直径 54 mm)不适合进行抗压强度试验。

圣克鲁斯坝是爱斯帕尼奥拉附近现有的一座混凝土拱坝,业主和运行者为美国垦务局。该坝需增加碾压混凝土下游扶壁,以承担设计地震和设计洪水荷载,也为下游面的冻融损坏提供防护。改造工程于 1990 年 6 月完成。碾压混凝土扶壁部分是在 1989 年 12 月浇筑的,当时气温在零度以下。该月的日平均气温为 4℃,夜间气温零度以下。在严寒条件下浇筑碾压混凝土的预防措施是使用 93℃的热水拌和,用保温毡覆盖已压实的浇筑层。临浇筑前碾压混凝土的温度约 7℃,覆盖保温下的碾压混凝土温度始终保持约 9℃。碾压混凝土浇筑曾停工几次,因当时的气温低于-7℃,防止已压实的碾压混凝土表面结冰已不可能。骨料堆也出现了问题,当时气温降到零下,骨料堆结冰,加热骨料堆无效,碾压混凝土生产被迫停止。在施工时浇筑了碾压混凝土圆柱体试件,在坝上钻取了芯样,并进行了抗压强度试验。实验只报告了圆柱体的强度,1 a 龄期的强度为 30 483 kPa,超过 1 a 龄期的设计强度 20 690 kPa。未见有芯样的强度的报告,所以不知坝体碾压混凝土的实际强度。尽管从满足设计强度的观点,该坝在寒冷天气施工方法的有效性未能用芯样数据证明,但这一实例对寒冷天气浇筑碾压混凝土的施工和防护仍有借鉴价值。

### 3.8 中国寒冷地区建坝情况

迄今为止,我国在严寒及寒冷地区已建和在建的碾压混凝土坝共有 14 座:观音阁、温泉堡、桃林口、松月、阎王鼻子、玉石、满台城、和龙、白石、龙首、石门子、特克斯山口 RCC 重力

坝、喀腊塑克、冲乎儿渗，除龙首和石门子为拱坝外，其余均为碾压混凝土重力坝。

### 3.8.1 观音阁大坝

辽宁观音阁碾压混凝土坝是我国在北方严寒地区修建的第一座碾压混凝土高坝<sup>[13]</sup>，是我国首次引入日本的 RCD 技术而修建的大型水利工程，也是当时世界上规模最大，碾压混凝土方量最多的工程。最大坝高 82m，混凝土体积 197 万 m<sup>3</sup>，其中碾压混凝土 124 万 m<sup>3</sup>，占总体积的 62.9%。碾压混凝土设计指标为 90d 龄期抗压强度 15MPa，抗渗 0.2MPa，抗冻 50 次，其配比及施工方法为典型的 RCD 筑坝技术。采用“金包银”结构，浇筑层厚 75cm，层间铺设砂浆，层间间歇 3~5d，低胶凝材料 (C+F=130kg/m<sup>3</sup>)，水泥 91kg/m<sup>3</sup>，粉煤灰占 30%。主体工程大坝混凝土于 1990 年 5 月开始浇筑，1995 年完建。施工过程中，大坝设计允许浇筑温度为：在 0-0.2L 为 13.3℃，在 0.2L-0.4L 为 21.1℃。越冬保温防护标准为混凝土表面放热系数：≤1.197-2.0kJ/(m<sup>2</sup>·h·℃)，春秋季节防寒潮保温标准为：≤4.2kJ/(m<sup>2</sup>·h·℃)。工程实施过程中，观音阁大坝参照日本玉川坝的经验，确定混凝土出机口温度不大于 20℃，浇筑温度不大于 22℃。强约束区坝体混凝土最高温度限制为 30℃以内，弱约束区混凝土最高温度限制为 35℃以内。主要防裂措施包括用 4℃冷水拌合混凝土，4℃冷水喷淋粗骨料。严格的越冬保温和防寒潮保温，上游面和侧立面用 5cm 厚聚苯乙烯泡沫塑料板，其他部位为 2-3 层草垫及毡布保温。

### 3.8.2 桃林口大坝

河北桃林口碾压混凝土重力坝是继观音阁之后北方寒冷地区修建的又一座大型碾压混凝土重力坝<sup>[14]</sup>，最大坝高 74.5m，混凝土体积 128.62 万 m<sup>3</sup>，其中碾压混凝土 58.54 万 m<sup>3</sup>，占总体积的 45.5%。碾压混凝土设计指标为 90d 龄期抗压强度 15MPa，抗渗 0.2MPa，抗冻 50 次，采用“金包银”结构，浇筑层厚 30cm，连续上升，胶凝材料 (C+F=155kg/m<sup>3</sup>)，水泥 70kg/m<sup>3</sup>，粉煤灰占 45.2%。主体工程大坝混凝土于 1994 年 12 月开始浇筑，1998 年完建。该坝设计碾压混凝土允许拉应力 1.02MPa，采用 4℃冰水拌合混凝土并在上游面设置 10cm 厚聚苯乙烯板进行保温。

### 3.8.3 白石大坝

辽宁已建的另一座碾压混凝土坝为白石碾压混凝土坝<sup>[15]</sup>，最大坝高 50.3m，混凝土体积 57.5 万 m<sup>3</sup>，其中碾压混凝土 17.1 万 m<sup>3</sup>，占总体积的 29.7%。碾压混凝土设计指标为 90d 龄期抗压强度 15MPa，抗渗 0.2MPa，抗冻 50 次，大坝采用采用“金包银”结构，浇筑层厚 75cm，层间铺设砂浆，层间间歇 3~5d。低胶凝材料 (C+F=176kg/m<sup>3</sup>)，水泥 72kg/m<sup>3</sup>，粉煤灰占 59%。主体工

程大坝混凝土于 1996 年 9 月开始浇筑, 2000 年完建。大坝施工过程中, 采用 4℃冰水拌合混凝土, 风冷粗骨料。冷水机组容量为  $4.61 \times 10^5 \text{kJ/h}$ , 冷风机组容量为  $3.14 \times 10^5 \text{kJ/h}$ 。每年 4-10 月为施工期, 4 月和 10 月下旬自然温度拌合, 不需要降温。5 月上旬和 10 月上旬只采用冷却水拌合混凝土, 5 月下旬~9 月采用冷水及风冷粗骨料拌合混凝土。1997 年夏季实测风冷粗骨料混凝土出机温度为: 未风冷时为 18℃, 风冷 2h 为 14.3℃, 风冷 3h 为 12℃, 相应搅拌强度为  $54 \text{m}^3/\text{h}$ , 制冷效果是理想的。1997 年 5 月中旬~10 月上旬采用风冷粗骨料生产混凝土 12 万  $\text{m}^3$ 。风冷骨料与自然骨料生产的混凝土相比, 降温效果是很显著的, 最大降温幅度可达 7.8℃。鉴于越冬层面附近混凝土上下层温差及内外温差在坝体上下游面产生较大的铅直拉应力, 在越冬层面附近混凝土层间抗拉强度低于本体抗拉强度, 极易引起越冬层面附近水平施工缝的开裂, 尤其是上游产生水平缝, 其危害更严重。对此, 白石坝除采取严格的温控措施外, 还尝试在越冬层面附近的上下游侧预留缝, 以期达到应力释放和重分布, 严格防止上游面产生水平缝的目的。

#### 3.8.4 汾河二库大坝

山西汾河二库碾压混凝土重力坝, 最大坝高 88m, 混凝土体积 44.8 万  $\text{m}^3$ , 其中碾压混凝土 36.2 万  $\text{m}^3$ , 占总体积的 80.8%。大坝采用全断面碾压混凝土型式, 上游面采用二级配富胶材碾压混凝土防渗层厚 4.0m, 下游面采用二级配富胶材碾压混凝土防护层 2.5m。浇筑层厚 25~30cm, 连续上升至 2.1m 停歇, 停歇层间铺设砂浆。工程设计指标为 90d 龄期抗压强度 10MPa, 抗渗 0.4MPa, 抗冻 50 次。碾压混凝土配合比中, 胶凝材料 ( $C+F=150 \text{kg}/\text{m}^3$ ), 水泥  $57 \text{kg}/\text{m}^3$ , 粉煤灰占 62.0%。主体工程大坝混凝土于 1997 年 8 月开始浇筑, 1999 年 3 月完建。该坝由于其碾压混凝土中胶凝材料少 (水泥 57, 粉煤灰 93), 降低了混凝土的绝热温升, 从而简化了温控措施, 防寒潮采用 5cm 厚苯板保温, 越冬面采用 10cm 厚苯板保温。

#### 3.8.5 喀腊塑克大坝

2000 年以前, 我国在寒冷地区修建的碾压混凝土坝主要分布在东北地区, 2000 年以后, 西北地区开始兴建碾压混凝土坝, 2005 年以后达到高潮, 新疆地区在 2006 以后在建的碾压混凝土重力坝有 3 座, 分别是特克斯山口、喀腊塑克和冲乎儿大坝。

##### (1) 简介

新疆地区喀腊塑克大坝<sup>[16]</sup>最大坝高 121.50m, 枢纽由碾压混凝土重力坝、溢流表孔、泄洪中孔、放水底孔、发电引水系统、电站厂房和副坝组成, 主坝全长 1570.00m。溢流坝段、中孔坝段及底孔坝段布置在主河床左侧, 共布置 4 个表孔, 每孔净宽 12.00m; 1 孔泄洪中孔, 坝段宽

15.00m；放空底孔布置 1 孔，坝段宽 15.00m；闸井后直接接高压管道，采用 1 洞 4 机的布置方案，发电引水洞为有压圆洞，洞线总长 457.0m。喀腊塑克大坝碾压混凝土方量约 283 万  $m^3$ ，大坝于 2007 年 4 月开工，每年可施工期为 4 月份~10 月份，2009 年 10 月份完成主坝体的浇筑。大坝地处高寒地区，当地冬季寒冷且历时较长，曾观测到的极端最低气温为  $-49.8^{\circ}C$ ，最大积雪深度达 70cm，多年平均气温为  $2.7^{\circ}C$ ，12 月、1 月、2 月多年月平均气温在  $-20^{\circ}C$  以下。另外，本地区寒潮频繁，降温幅度大，以往 40 多年的气温统计资料表明：1~12 月份每月平均寒潮侵袭次数在 1.46 次~2.86 次，每次寒潮平均降温幅度在  $-8.71^{\circ}C$ ~ $-14.72^{\circ}C$  之间，历时 2~5 天。历史上曾观测到的极端寒潮情况发生在 1976 年 12 月 20 日~12 月 24 日，5 天内日平均气温从  $-10^{\circ}C$  降到  $-41.4^{\circ}C$ 。

### （2）配合比设计

大坝的配合比设计充分考虑了严寒干燥地区的特点，重点针对抗冻和抗渗、抗裂性能，采用低水泥用量、低水胶比、严格按抗冻等级控制含气量的技术方案，确保了抗冻、抗渗和极拉指标。使施工配合比拌制的混凝土拌合物及其硬化混凝土的性能满足设计要求的和易性、VC 值、含气量、抗压、抗渗、抗冻、变形性能、热学性能等性能指标。

### （3）大坝施工

大坝碾压混凝土施工采用全断面通仓浇筑方法，上游为二级配防渗区，坝体为三级配碾压混凝土，根据仓面面积的大小采用平层铺筑法施工或斜层铺筑法施工，分层碾压，连续上升，1 个升层一般厚 3.0m，边、廊道周边采用变态混凝土浇筑。大坝碾压混凝土浇筑主要采用两种尺寸的悬臂翻升钢模板：大坝上、下游直立面和闸墩、导墙直立面板尺寸为  $3.00m \times 3.00m$ ，大坝下游 1:0.75 斜坡面模板尺寸为  $1.50m \times 1.50m$ 。

大坝浇筑配置 4 座合计生产能力为常态混凝土  $1040m^3/h$ 、碾压混凝土  $820m^3/h$ 、制冷混凝土  $660m^3/h$  的拌合楼群，可满足常态混凝土和制冷混凝土的高峰月浇筑强度要求。采用自卸汽车直接入仓布料。

每一浇筑升层的层面冷缝采用高压水枪冲毛，局部辅以人工凿毛，清除混凝土表面乳皮灰浆。碾压混凝土摊铺前，层面在洁净和潮湿状态下先铺 2.0~3.0cm 厚的砂浆。摊铺采用美国进口的 650K 卡斯和 SD13S 平仓机进行，平仓厚度 34~36cm，压实厚度 30cm。为了减少骨料分离和骨料集中，每个碾压层进行 2 次摊铺，第 1 次摊铺厚 17cm 左右，第 2 次摊铺后层厚 34~36cm，摊铺完成后采用 BW202AD 振动碾碾压，先无振 2 遍，再有振 6 遍，最后再无振 2 遍，使层面达到泛浆，以利于层间结合。坝体上游迎水面防渗区碾压混凝土热升层层间按要求铺洒水泥粉煤灰

净浆。仓内模板周边、阴角、廊道周边、有钢筋和止水等部位采用加浆法使碾压混凝土成为变态混凝土，按常态混凝土振捣作业方法振捣密实，并尽可能用 BW75S 小型振动碾进行碾压。碾压混凝土从拌合加水至碾压完毕，要求在 2h 内完成，不允许入仓或平仓后的碾压混凝土拌合物长时间暴露。连续上升铺筑的碾压混凝土层间允许间隔时间控制在 6~8h 内，且最长不允许超出混凝土初凝时间。碾压后仓面要求有微浆泛出，并经核子密度仪检测其压实度达到要求，否则进行补碾，如仍不合格，则将该部位混凝土挖除，重新回填碾压混凝土，至合格为止。要求仓面质控人员根据现场碾压作业和气候的实际情况，及时与拌合楼质控人员联系，对 VC 值进行动态控制。

大坝仓面面积不超过 5000m<sup>2</sup> 的按平层铺料平仓碾压方式施工，超过 5000m<sup>2</sup> 的按斜层碾压方式施工，为防止斜层碾压施工时坡脚（15cm 左右）处骨料被振动碾压碎形成质量缺陷，施工中用小型装载机或人工铲除坡脚混凝土料、预铺水平垫层的办法，并控制振动碾不能行驶到老混凝土面上。

混凝土碾压完成经检验合格后，采用 NPFQ-1 型切缝机按设计位置进行切缝处理，切缝宽度 10~12mm，深度不小于 20cm，缝内按设计要求采用双层彩条布进行充填，采用先碾后切缝再骑缝补碾的顺序成缝。

针对坝址区多风风大、干燥、蒸发强烈的气候特点，机口 VC 值一般控制在 1~3s，碾压时的 VC 值控制在 5~8s。现场作业时根据不同的气温、风速、日照情况对碾压混凝土机口 VC 值进行动态微调，以保证仓面碾压时的工作度需要。

层间间隔时间控制：因坝址区碾压混凝土施工时失水剧烈，为保证碾压混凝土的可碾性和层间结合质量，规定层间间隔时间一般控制在 4h 以内，并做到快速入仓、快速铺筑、快速碾压、快速覆盖，这一措施很好地提高了层间结合质量。

失水补偿方式和办法：该工程碾压混凝土失水补偿的指导思路一是从提高浇筑仓面周边空气湿度的角度出发，结合混凝土养护采用河水或制冷水喷淋养护方式，以提高浇筑仓面的空气湿度，减少蒸发；二是浇筑仓面采用固定喷雾和移动式喷雾相结合的喷雾方式，解决大仓面失水补偿需要；三是松摊混凝土失水补偿由喷雾设备完成，碾压后面层失水补偿由喷雾设备和振动碾压补水共同完成。

#### （4）温度控制

混凝土运输车全部采用液压翻升防晒板技术，减少了混凝土运输环节的混凝土温度回升。混凝土入仓后，及时平仓，及时碾压，严禁混凝土卸料平仓后长时间不碾压。在混凝土初凝前尽快覆盖下一层混凝土，减少外界温度倒灌。

仓面小气候制造和保温覆盖：在坝体浇筑仓外增设喷淋（雾）系统，降低大坝浇筑仓面周边的温度，提高湿度。仓面采用固定式远程喷雾机和高压水移动式喷雾，根据每个仓面的大小配置4~6把手持式喷枪进行喷冷水雾，以降低仓面温度，提高湿度，减少水分蒸发，防止混凝土表面失水，改善碾压混凝土层间结合性能，提高混凝土质量。收仓仓面和暂停仓面及时覆盖保温被，以降低混凝土表面水分蒸发。

在约束区、坝体度汛缺口部位和5~9月的施工部位埋设冷却水管。冷却水管采用管径32mm、抗压强度 $\geq 0.35\text{MPa}$ 、导热系数 $K \geq 1.67\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 、在1h内承受12MPa的环向应力不破坏、不渗漏、纵向回缩率 $\leq 3\%$ 的HDPE高密度聚乙烯塑料冷却管。

冷却水管长度控制在250m左右，水管排间距 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}\sim 1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 。根据气温情况在上层混凝土完成后1~2d内开始通水冷却，通水水温为河水温度（6~8月采用 $10\sim 12^\circ\text{C}$ 制冷水），通水历时15~20d。为防止水管冷却时与混凝土浇筑块温度相差过大和冷却速度过快而产生裂缝，初期通水冷却温差按 $15\sim 18^\circ\text{C}$ 控制，后期水管冷却温差为 $20\sim 22^\circ\text{C}$ ，混凝土日降温速度控制在每天 $0.5\sim 1.0^\circ\text{C}$ 范围内。

大坝坝面永久保温：上游面采用“聚氨酯防渗涂层（厚2mm）+粘贴XPS板（厚10cm+防腐面漆）”的保温防渗结构型式。大坝下游面采用“粘贴XPS板（厚10cm）+外涂防裂聚合物砂浆+耐碱网格布”的保温结构型式。

大坝越冬面临时保温：首先在越冬面铺设1层塑料薄膜（厚0.6mm），然后在其上铺设2层2cm厚的聚乙烯保温被，再在上面铺设13层2cm厚棉被，最后在顶部铺设1层三防帆布。为加强保温及防止侧面进风，在越冬面上下游侧用砂袋垒1.0m高、0.8m宽的防风墙，在保温被周边及越冬面以下2.6m范围内喷涂10cm厚聚氨酯硬质泡沫，其中越冬面以下2.0m，越冬面以上0.6m。

## 4 发展新动向和关注点

### 4.1 温控与防裂

寒冷地区冬季寒冷而漫长，多年平均气温一般多在 $10^\circ\text{C}$ 以下。许多地区夏季最高气温在 $20^\circ\text{C}$ 以上，冬季最低气温在 $-10^\circ\text{C}$ 以下。气温年内变幅大、昼夜温差大且寒潮频繁。同时，碾压混凝土坝采取快速浇筑、通仓浇筑、不分纵缝以及越冬长间歇式的施工方法，使其具有独特的温度应力时空分布规律。

从各国的工程实践来看，寒冷地区修建的碾压混凝土坝出现了众多裂缝。如美国早期修建的上静水（Upper Stillwater）坝，冬季最低气温达 $-35^\circ\text{C}$ 以下，坝高91m，碾压混凝土量 $112\text{万}\text{m}^3$ ，

没有设横缝，只在上游面常态混凝土设诱导缝。在蓄水前发现 12 条从上游贯通至下游的裂缝，间距约 75m。

位于日本州岛北部秋田县的玉川碾压混凝土坝，坝高 100m。在施工过程中，对温控进行了详细的设计，但该坝的上下游产生了程度不同的垂直向裂缝，连续几年发生了越冬层面水平施工缝的开裂。

我国东北的观音阁大坝，尽管在施工中重视了混凝土温控与防裂，并采取了较严格的温控防裂措施，但在诸多因素的综合作用下，施工期大坝混凝土中仍然产生了一些程度不同的裂缝<sup>[4]</sup>。按照裂缝所处的不同部位，可大致划分为以下 7 类：1) 发生在 1990 年度坝体基础混凝土中，主要分布在混凝土顶面；2) 发生在 13<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>底孔坝段高程 201.75m~202.00m 混凝土上的水平裂缝；3) 发生在 7<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>、29<sup>#</sup>坝段侧立面上的竖向裂缝；4) 发生在 18<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>、24<sup>#</sup>坝段倒流底孔内的环向裂缝；5) 发生在 15<sup>#</sup>、18<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>、24<sup>#</sup>、27<sup>#</sup>坝段溢流面反弧段附近平行坝轴线的纵向裂缝。以上第 2 类至第 5 类裂缝均发生在 1991 年度坝体混凝土中。6) 1992 年发生在 13<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>坝段内部的环形裂缝；7) 发生在大坝混凝土年度结合面附近上下游面的水平裂缝。上述裂缝以第 7 类最为严重，该类裂缝主要集中在 1992~1993 年及 1993~1994 年度结合面附近，高程分别在 209.25m、218.25m 和 235.25m 的 3 个层面附近。裂缝长度几乎达到整个坝段，累计长度达 1000 余 m，深度为 3.0~6.0m，宽度多为 0.5~1.2mm，最宽达 2.0mm。

桃林口大坝工程于 1992 年 10 月开工，1998 年底竣工。2000 年 9~12 月检测时在上游发现 45 条裂缝<sup>[13]</sup>，最大缝宽 2.5mm。裂缝基本为竖直缝，分布在坝段宽度的 1/3 或 1/2 处，表面较宽的裂缝基本贯穿了上游的常态混凝土防渗层。

综上所述，在寒冷地区修建碾压混凝土坝，其防裂的难度很大，究其原因，主要由以下几个方面导致：年平均气温低导致坝体稳定温度较低，而夏季浇筑的混凝土最高温度又比较高，从而导致大坝基础温差很大，控制基础贯穿性裂缝的难度很大；全年寒潮频繁，冬季寒冷，导致控制混凝土上下游表面的内外温差难度较大，极易在上下游面引起表面裂缝，进而发展成为劈头裂缝；因天气寒冷，可施工期很短，每年有几个月甚至大半年的时间停浇越冬，长间歇导致上下层温差较大，防止越冬面附近混凝土裂缝难度很大。

这些特点使寒冷地区碾压混凝土坝的温控防裂成为一个必须面对的重要研究课题，该课题虽然早已得到世界各国的重视，但总体上来看，其温控防裂效果仍然不佳，需要对其做进一步的深入研究。

## 4.2 大坝诱导缝的设计

修筑碾压混凝土坝，为简化施工程序，加快施工进度，一般工程都偏向于采取尽量不设或者



少设永久性横缝的设计思想。但在寒冷地区浇筑碾压混凝土坝,由于其独特的温度应力变化规律,往往在越冬间歇面、溢流坝段的反弧段、拱坝的坝肩、拱冠等部位会产生较大的温度应力,为了消减这些部位的温度应力,简化整个大坝的温控措施,可考虑设置诱导缝的方式。诱导缝的设置目的是使不可避免的混凝土表面裂缝按照设计者的意图在诱导缝部位产生,且在设计时已事先在诱导缝布置好了止水设施。因此诱导缝的设计(包括缝的形式、诱导缝的设置部位和诱导缝的设置等)成为碾压混凝土坝设计中的一个重点。

### 4.3 碾压混凝土的防渗设计

碾压混凝土坝问世之初,曾出现过如下两种情况。柳溪坝和上静水坝为典型实例。

柳溪坝采用低胶凝材料筑坝,水化热温升较低,坝体混凝土弹性模量也较低,碾压混凝土坝的优点是充分发挥了碾压混凝土筑坝节省胶凝材料用量,简化温控措施,不分横缝,使用修筑土石坝的大规模机械化施工技术,达到快速建造大坝的目的。该坝虽然出现的裂缝较少,但无专门的防渗设施,碾压混凝土的层缝面成为主要渗漏通道,导致渗漏量很大。

上静水坝采用高胶凝材料筑坝,确实可以解决层缝面渗漏问题,但由于弹模高,水化热温升高,不设横缝,坝体出现了一些劈头裂缝,这些裂缝成为主要的渗漏通道,渗漏量亦较大。

工程界针对上述典型实例得到的教训,研究了如下应对措施<sup>[17]</sup>:加大混凝土中的胶凝材料用量,并对层缝面采取处理措施;为防止坝体发生裂缝,采用坝体人工分缝(包括诱导缝)、冷却骨料、仓面喷雾、布设水管通水冷却、表面保温等降温措施。但即使如此,仍未免除坝体裂缝的困扰。

目前世界上绝大多数碾压混凝土所用的胶凝材料用量仍属富胶凝材料范围,在寒冷地区,为使坝体满足抗渗指标和抗冻指标,采取加大胶凝材料用量,这必然会使混凝土许多物理力学参数严重超标,不仅造成了材料方面的浪费,而且导致大坝温控防裂的难度增加,容易产生裂缝,甚至是贯穿性的裂缝。国内外众多的工程实践表明寒冷地区碾压混凝土的防裂确实是一个难点。

在这种情况下,有些学者建议应尽可能将坝体混凝土中的胶凝材料用量降下来,而防渗功能由专门的防渗结构来承担,即体现功能分开的原则。蒙古的泰西尔水电站大坝就采用了这种设计思想,该大坝混凝土配比中无任何防渗指标要求,大坝防渗由单排灌浆防渗帷幕和坝面防渗膜两部分组成。这种新的设计理念值得进一步关注。

### 4.4 碾压混凝土施工

美国 ACI306 把寒冷天气定义为:连续 3d 以上室外日平均气温低于 5℃的天气,且在这 3d

期间任何 12h 时段内气温不得一直在 10℃ 以上。

在寒冷天气下施工的碾压混凝土坝，国外可参考的资料主要是一些浇筑方量较少碾压混凝土坝，如新埃尔默托马斯坝，彼得森坝和圣克鲁斯坝<sup>[11]</sup>。根据这些坝冬季碾压混凝土的施工经验，碾压混凝土施工主要关注在寒冷天气下大坝混凝土浇筑后的防冻和养护方面。

在寒冷天气下施工，混凝土极易受冻，主要是混凝土内的自由水结冰而引起的<sup>[11][18]</sup>，当温度降至 0℃ 时，除混凝土表层一部分水结冰之外，其内部水尚处于流态。但低温对于水硬性胶结材料的凝结和硬化具有明显的减缓作用，当温度继续下降至 -3℃ 时，混凝土中的自由水完全结冰，水泥的水化作用停止，混凝土即受冻。

混凝土受冻后，尚未充分凝结的各种矿物颗粒被冰层隔离，不能相互结合，因水泥是不能与冰进行水化作用的，此时混凝土实质上就变成了冰、水泥、砂子和石子等独立存在的固相混合物。混凝土受冻破坏的另一个原因是，冰比水的体积增长 9%，由此而产生的冻胀力常常大于水泥硬化时的初期强度，可以使混凝土发生不同程度的冻胀破坏。由于冻胀，破坏了水泥与砂石之间的粘结力，降低了混凝土强度。

国外已有资料表明<sup>[19]</sup>，在 -10℃ 以下时，混凝土的水化作用和强度增长都会停止；在 4℃ 以上拌合和浇筑混凝土，如果采取适当的防护和养护，是可以达到预定的长期强度的；在 -10℃ 至 4℃ 之间浇筑的混凝土，其长期强度显著减小，最多可达 50%，视实际养护温度确定。在低龄期经受短暂冻结的混凝土，若随后采取有利的养护和保护，可使混凝土恢复到原有的设计强度。另外，冰在融化后会形成空隙，也降低了混凝土的密实性与耐久性。

在寒冷天气条件下浇筑碾压混凝土的另一个考虑是可提高相邻浇筑层间的粘结强度<sup>[11]</sup>。美国垦务局和波特兰水泥协会共同进行的研究显示，最影响碾压混凝土相邻浇筑层粘结的接缝条件是接缝的龄期，浇筑上一层越快，则粘结的质量越好，这是因为下一层的表面仍然是塑性的。为了获得浇筑层层间的良好粘合以及减少处理层间冷缝所需费用，一般尽可能近乎连续地浇筑碾压混凝土。如果在寒冷天气浇筑的新鲜碾压混凝土层在短时间内能被上一层碾压混凝土层所覆盖，则上一层混凝土实质上对下一层起到了保温毡的作用。所以从生产的观点以及层间良好粘合的观点出发，承包商和工程师在寒冷的天气浇筑碾压混凝土都会设法接近连续地进行。

在寒冷天气下，为了提高混凝土浇筑温度，在配料和拌和时能合理加热的组分是骨料和水。从实用观点来看，把大体积碾压混凝土中所用的大量骨料加热是昂贵的，因此很少采用这种办法。而另一方面，加热拌和水很方便，因此在寒冷天气条件下拌和碾压混凝土通常是加热拌和水。但有些情况下，单靠加热拌和水不足以提供进行完全水化作用和养护而必须维持最低混凝土温度所

需要的全部热量。尽管水的比热是矿物骨料的 5 倍，但为了达到浇筑时具有零坍落度的稠度，在碾压混凝土中需要的水量是很少的。

对于寒冷天气下浇筑碾压混凝土，还应尽量减少从拌和楼到仓面的热量损失。碾压混凝土的运输和浇筑比常规混凝土费时，在此过程中发生较大的热量损失。热量损失在拌和楼和仓面之间的运输设备周围的大气中，因为大多数运输设备不加覆盖。如果摊铺和压实的时间过长，也会损失热量。同时还应认识到，除夜间浇筑外，在运输、摊铺和碾压的过程中也会从日辐射获得一些热量。把运输机械上的碾压混凝土遮盖起来，失去热量与否是难以评估的，因为还有其他一些影响因素，例如风、气温、云层和设备配置等，各个工程工地各不相同。下列的浇筑做法有助于在运输、摊铺和压实过程中保存拌和料中的热量：

(1) 尽量安排在白天浇筑碾压混凝土，以便从太阳辐射获得热量。这一做法的有效性取决于地形、每天的日照时间和日照天数。

(2) 在多风天气不浇碾压混凝土，因为碾压混凝土中的热量会因风的冷却作用而散失。

(3) 尽快碾压混凝土，以使新浇筑层的表面尽快被覆盖和保护。

用隔热材料把暴露的业经压实的浇筑层表面覆盖起来，是尽量减少新鲜碾压混凝土热量损失的有效方法。能迅速展开和撤走的保温毡是碾压混凝土浇筑层平整表面的最好隔热材料。保温毡还能保持碾压混凝土中的水分，起妥善养护的作用。

根据新埃尔默托马斯坝、彼得森坝和圣克鲁斯坝的施工实践，国外学者总结了在寒冷天气条件下浇筑碾压混凝土的经验与教训，建议的技术要求如下<sup>[22]</sup>：

(1) 当气温低于 5℃ 时，可以浇筑碾压混凝土，但必须对全部暴露的混凝土表面提供经批准的寒冷保护措施不少于 7d。当气温低于 -5℃ 时，不得浇筑碾压混凝土。

(2) 新鲜碾压混凝土的最低温度是：1) 当气温在 -1℃ 以上时，拌和物的温度为 7℃；2) 当气温为 -18℃ ~ -1℃ 时，拌和物的温度为 10℃；3) 碾压后的温度为 5℃。

(3) 在碾压前应测量仓面碾压混凝土温度。

(4) (非强制规定) 在寒冷天气条件下浇筑碾压混凝土时，应在浇筑层内安装热电偶，以监测碾压混凝土的温度。热电偶设置的部位应由工程师确定，即按设计图纸安装。

(5) 工程师应检测经压实的碾压混凝土浇筑层的表面和内部的温度。若碾压混凝土的实测平均温度低于 5℃，应立即用帆布、保温毡覆盖碾压混凝土，或采取其他经批准的保护措施直到其温度上升到 5℃ 以上，或直到浇筑上一层碾压混凝土为止，决不允许碾压混凝土的表面温度低于 0℃。

(6) 应检测被覆盖的碾压混凝土的表面及内部的温度, 若检测的温度显示保护措施无效, 应增加保护措施, 直到碾压混凝土表面温度上升到 5℃ 以上。

(7) 当气温低于 0℃ 时, 应对经压实的碾压混凝土表面进行水养护, 且养护水不得结冰。减少碾压混凝土的养护水量或取消水养护。

(8) 当预测气温低于 0℃ 达 6 h 时, 应在坝肩浇筑碾压混凝土的前 3 d 用保温毡覆盖将与碾压混凝土接触的坝肩部位, 在即将浇筑碾压混凝土之前将保温毡摘掉。

(9) 若暴露的碾压混凝土浇筑层在浇筑后 24 h 内未初凝, 应清除该浇筑层未水化的部分, 清除后的表面在浇筑上一层碾压混凝土之前应按冷缝进行处理。

## 5 研究水平分析

寒冷地区碾压混凝土坝的筑坝技术涉及大坝的温控与防裂、结构设计、防渗设计、施工等各个方面, 各国的研究重点与建坝思路也存在较大差异, 当前各方面的研究水平分析如下:

(1) 关于寒冷地区碾压混凝土坝的温控与防裂, 各国已充分认识到其重要性和难度, 除尽量采用发热量较低的水泥、优化混凝土配合比以外, 在具体的温控措施如降低混凝土浇筑温度、通水冷却、施工期临时保温、大坝上、下游面长期保温、越冬层面保温等方面也进行了广泛的研究并取得了较多的研究成果。但对于在寒冷地区浇筑碾压混凝土坝, 由于大坝稳定温度低, 而夏季浇筑混凝土最高温度较高, 在施工过程中大坝温控指标之一的基础温差取值是一个难点, 至今未能有效解决。另外, 关于寒冷地区碾压混凝土大坝的温控防裂措施也是值得继续研究的课题。

(2) 国外关于碾压混凝土坝的诱导缝的研究相对较少, 主要为在工程中应用的介绍<sup>[20]</sup>, 而关于诱导缝理论分析的报道还未见到。国内对于碾压混凝土诱导缝的研究相对开展的较多, 其中包括对诱导缝模型试验方面的研究<sup>[21]</sup>、诱导缝断裂模型理论方面的研究, 及诱导缝数值计算方面的研究等。目前对于诱导缝的研究主要存在以下两个方面的问题: 等效强度模型中有效裂纹扩展量计算不准确的问题, 以及等效强度模型考虑因素不全面的问题。针对上述存在的问题, 碾压混凝土诱导缝等效强度研究的发展趋势主要归纳为提高模型中有效裂纹扩展量计算的准确性和在模型中考虑长轴因素的影响两个方面。

(3) 关于碾压混凝土坝本身的防渗设计, 如日本、俄罗斯普遍采用的 RCD 形式和国内近年来普遍采用的二级配 RCC 防渗, 目前技术已比较成熟。国外近年来提出了由坝体本身来满足稳定要求、防渗功能采用专门防渗系统的体现功能分开的设计理念。该设计理念在蒙古泰西尔坝中得到了成功实施, 对于寒冷地区筑坝具有重要的意义。因为大坝一旦采用这种理念进行设计, 寒

冷地区碾压混凝土坝的温控工作可以进一步简化，为此值得我国借鉴和继续研究。

(4) 碾压混凝土在冬季施工代价较高，但如养护和防护措施得当，对控制温度裂缝也具有有利的一面。但此种措施主要是在工期紧迫的条件下针对浇筑量不大的工程而采用的一种措施。对于大型工程，国际上的通用做法仍然是停浇越冬。但国外冬季浇筑碾压混凝土的一些工程经验和教训，值得我国借鉴。

## 6 对本专题发展的若干建议

2001 年以后，我国在西北寒冷及高寒地区修建碾压混凝土坝方兴未艾，如甘肃的龙首拱坝，新疆的石门子拱坝、特克斯山口重力坝、喀腊塑克重力坝、冲乎尔重力坝等。另外，东北地区的丰满老坝重建也选定了碾压混凝土重力坝型，计划于 2011 年开工建设。

但在寒冷地区修建碾压混凝土坝，仍有一些问题未得到妥善解决，需要进一步关注和探索。

(1) 近年来我国国内碾压混凝土坝基本采用的还是富胶凝材料，在寒冷及高寒地区也是如此，这势必给大坝的温控防裂带来很大的难度。目前，随着国内碾压混凝土坝在寒冷地区建设高潮的到来，业主方及设计方已充分认识到在这些地区修建碾压混凝土坝成败的关键不是常规设计，而是温控设计。而寒冷地区碾压混凝土坝具有不同于南方地区的独特的温度及应力变化规律，应就此方向做进一步的深化研究，提出适合寒冷及高寒地区碾压混凝土温控防裂的成套完善技术措施。

(2) 在寒冷地区修建混凝土坝由于其稳定温度低、气温年变幅大、寒潮频繁，极易出现裂缝。为防止大坝混凝土裂缝，基于以往理论研究的成果和已建工程的经验教训，朱伯芳在 2004 年提出了“全面温控，长期保温，结束无坝不裂历史”的新的温控防裂思路。与旧的温控思路相比，新思路着重强调长期保温的重要性。近年来，随着大量混凝土大坝工程的开工建设，保温防裂的思想已经深入到业主、设计及施工等参建各方，但关于大坝保温材料的开发、施工工艺、耐久性方面的研究及实施还亟待完善。20 世纪 60、70 年代，草袋和草帘是我国常用的混凝土坝面保温材料，但其耐久性差，一旦腐烂将导致保温效果锐减，干燥时易引发火灾，现已很少应用。随着塑料工业的发展，混凝土坝的表面保温目前主要采用聚苯乙烯板、聚氨酯泡沫涂层和聚苯乙烯被等。工程实践证明：这些保温材料的保温效果是比较好的，但其在坝运行过程中，受到水泡、风吹、日晒、冻胀、冰拉等环境因素的影响，其耐久性往往会大幅下降。目前国内外关于长期保温材料的选择和施工工艺方面还不成熟。因此应在现有保温材料的基础上，研究开发适合寒冷地区大坝混凝土长期保温的复合型保温板及其成熟的施工工艺，使其既能满足保温的要求，又

能满足耐久性要求。

(3) 关于寒冷地区大坝诱导缝的设置, 也应结合温度控制作为一个重要的研究方向。这对于简化寒冷地区碾压混凝土坝的温控措施, 消减高应力区的应力, 保证大坝的安全具有重要的意义。

(4) 关于寒冷地区碾压混凝土坝防渗功能采用专门防渗系统的体现功能分开的设计理念, 值得进一步深化研究, 包括对防渗材料的选择、施工、大坝混凝土的配合比调整等方面均有待进一步跟进研究。

## 参考文献

- 1 《碾压混凝土筑坝技术在中国的推广与应用》，弗骥鸣，水利部科技推广中心，中国水利学会 2001 学术年会论文集，p249~p252。
- 2 《福建省大田县坑口碾压混凝土试验坝 20 年回眸》 张志 陈以确，《中国碾压混凝土坝 20 年》 p565~569。
- 3 《2006 年底碾压混凝土坝综述》 Dunstan, M.R.H 第五届碾压混凝土坝国际研讨会， p23~p33。
- 4 《严寒地区碾压混凝土重力坝温度应力研究与温度控制防裂技术》 王成山 大连理工大学博士学位论文
- 5 《严寒地区碾压混凝土重力坝的温度裂缝及其防治》 王福林 杜士斌，《水利水电技术》第 32 卷，2001 年第一期。
- 6 CROW,R.D.,DOLEN,T.P.,OLIVERSON,J.E. and PRUSIA,C,D. Mix design investigation-Roller Compacted Concrete construction, Upper Stillwater,Utah
- 7 SMOAK,W.G. Crack repairs to Upper Stillwater dam,*construction international* ,ACI, Chicago, February 1991.
- 8 Barnett, Bruce and Ringel, Jan. “Upper Stillwater Crack Repair.” Proceedings of Association of Dam Safety Officials
- 9 30ars’ History of Roller-compacted Concrete Dams in Japan, Isao Nagayama and Shigeharu Jikan
- 10 NAGATAKI,S. YANAGIDA, T. and OKUMURA, T. Construction of recent RCD concrete dam projects in Japan.
- 11 RCC 大坝坝体防渗新技术——蒙古泰西尔大坝坝体防渗设计与施工，中国混凝土网
- 12 《寒冷天气下碾压混凝土的浇筑》 【美】 Y.K.乔伊等 水利水电快报 2003.年 10 月 第 24 卷第 20 期。
- 13 《观音阁水库碾压混凝土大坝设计和施工中的几个问题》 薛永生 《水利发电》1994 年第 04 期
- 14 《桃林口水库大坝混凝土裂缝处理》 祁立友 周世龙 王育琳 《河北水利》2006 年第 03 期
- 15 《白石碾压混凝土重力坝预留缝的研究与应用》王成山 韩国城等 《水利学报》 2003 年第 09 期
- 16《浅谈某严寒地区碾压混凝土坝施工质量控制》曹海 夏世法等 《南水北调与水利科技》 2009 年第 4 期

- 17 《重力坝设计新思路》孙君森 林鸿镁 《水力学报》 2004 年第 02 期
- 18 《干燥严寒地区的龙首拱坝 RCC 研究与应用》田育功 奚向军 《第五届碾压混凝土坝研讨会》
- 19 《Cold Weather Concrete》 Technical Bulletin TB-0106
- 20 BobL.Whitfield.Gemembrane Application for an RCC Dam[J].Geotextiles and Geomembranes, 1996(14):253-264.
- 21 《碾压混凝土坝诱导缝研究进展》毕重 齐立杰等 《辽宁工业大学学报》 2008 年 10 月 第 28 卷第 05 期

负责人：夏世法

参与人员：鲁一晖、陈改新、岳跃真、李秀琳