

GAOHAN DIQU HUNNINGTU MIANBAN DUISHIBA DE
JISHU JINZHAN LUNWENJI

高寒地区混凝土面板堆石坝的 技术进展论文集

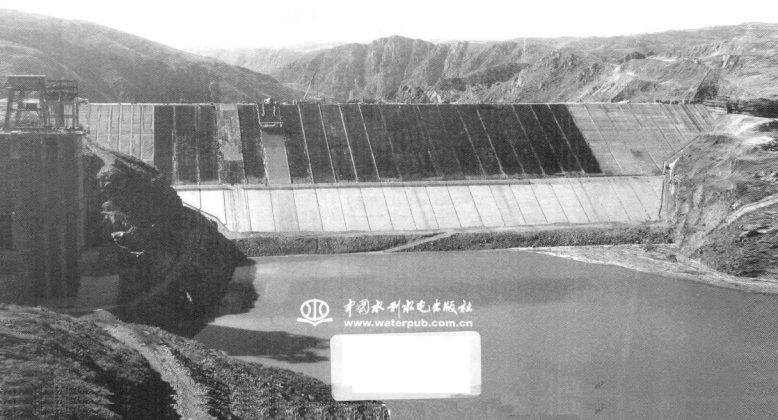
中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编
中国水利水电第十一工程局有限公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高寒地区混凝土面板堆石坝的 技术进展论文集

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编
中国水利水电第十一工程局有限公司



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本论文集共收录论文 42 余篇,分别介绍了高寒地区面板堆石坝工程实践的经验总结和科研试验结果,包括在建吉勒布拉克和卡基娃高坝工程的筑坝材料、防渗结构、基础处理等设计和施工经验,已建吉林台一级、公伯峡、十三陵蓄能上水库、丰宁、查龙、积石峡、武川、小石峡等工程的设计、施工和运行管理及后期修补总结以及其他工程。基本反映了我国高寒地区混凝土面板堆石坝建设过去和近年来的经验和和技术发展水平,涵盖了高寒地区筑坝的主要技术内容。

本书可供水利、水电、地质、岩土、建设管理、安全监测等有关部门的勘测、设计、施工、科研、管理人员阅读,也可供相关专业的高校师生及科研单位的技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集 / 中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会, 中国水利水电第十一工程局有限公司编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-5170-1225-2

I. ①高… II. ①中… ②中… III. ①寒冷地区—堆石坝—混凝土面板坝—文集 IV. ①TV641.4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第203460号

书 名	高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集
作 者	中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	210mm×285mm 16开本 16印张 485千字
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集》

编 纂 委 员 会

顾 问：蒋国澄 冯文彬 衡富安

主 编：周建平 杨泽艳 杨和明

副 主 编：张宗亮 黄晓辉 吴毅瑾

编 委：（按姓氏笔画排列）

马月俊 孔宪京 王亚文 王富强 孙 役

孙永娟 孙来成 冯文彬 付兴安 朱 晟

张予玲 张宗亮 刘 娟 余 挺 何无产

吴晓铭 吴毅瑾 杨泽艳 杨和明 陈振文

周建平 钟彦祥 徐泽平 徐更晓 黄晓辉

温灵芳 蒋国澄 熊泽斌 喻葭临 衡富安

责任编辑：王富强 温灵芳

代序

《高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集》

中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会和中国水利水电第十一工程局有限公司 2013 年将在新疆维吾尔自治区阿勒泰地区联合召开技术研讨会，研讨的主题是高寒地区混凝土面板堆石坝建设经验。

中国混凝土面板堆石坝建设起步虽晚，但发展极快，无论是数量、高度、工程规模、施工速度，还是技术难度方面，都居于世界前列。由于中国国土幅员辽阔，混凝土面板堆石坝建设覆盖全国四面八方，建坝中遇到的各种恶劣自然条件众多，如深覆盖、强地震、严寒酷暑、高边坡、岩溶等地质缺陷等，都依靠科技进步成功地建设起许多高坝、大库、大水电站。这些工程多年来一直正常运行，造福一方。在工程实践中还积累了丰富的经验和科学实验成果，指导着后续的混凝土面板堆石坝工程建设和运行。

J. B. Cooke 报道了在寒冷地区建设的混凝土面板堆石坝，如美国的 Courtright，坝高 98m，位于高程 2500m 处；Cabin Creek，坝高 55m，位于高程 3360m 处，最低气温都在 -40°C ，建造时也没有采取特殊措施。Cabin Creek 坝建于 20 世纪 60 年代，已安然运行了几十年。因此他认为在寒冷气候条件下的混凝土面板堆石坝的设计准则不需要做大的变更，就可以适应这些极端恶劣的气候条件。近年来建设的冰岛 Karahnjukar 混凝土面板堆石坝，坝高 198m，也处于寒冷地区，冬季气温可达 -25°C ，设计和施工中采取了一些适应性的措施。

中国东北、华北、西北、西南及其他高海拔的严寒、寒冷地区，已建成或正在建设起许多混凝土面板堆石坝。其中有处于高纬度的黑

龙江的莲花坝，坝高72m，新疆的山口坝，坝高39m，新疆的吉勒布拉克坝，坝高146.3m，都在北纬48°左右，最低气温分别为-45.2℃、-44.8℃及-49℃。有些处在高寒山区，如西藏的查龙水电站，坝高38.6m，坝顶高程4386m，最低气温-41.2℃，楚松水电站，坝高40m，坝顶高程4190m。坝址最低气温在-30℃以下的有十余座，在-20℃以下的更多。早期修建的工程因对寒冷气候条件的负面影响认识不足，工程出现了一些问题，经采取一些针对性的措施，修补处理后能正常运行。这次会议上，就收到了有关单位和科技人员编写的论文40余篇，其中近半数都论及寒冷地区混凝土面板堆石坝的筑坝技术。其中不但有工程实践的经验总结，也有科学实验成果的介绍，内容极为丰富，足以为后续工程借鉴。

寒冷地区混凝土面板堆石坝的筑坝技术宜注意的问题可归纳如下：

(1) 坝体。寒冷地区存在水的冻胀问题，为保证面板稳定，要求水位变幅区附近的垫层料有较好的排水性能，需适当加大其渗透系数。坝体各种填筑料的填筑质量是冬季施工的关键，而水更是其中的关键。一方面由于不能加水碾压，物料中含有的水分冻结会对压实产生干扰，使料物不能得到正常的压实，虽然可以采用减薄铺层厚度、加大压实功能、坝面连续施工等措施得到改善，但即使冬季施工得到与暖季施工同样的干密度，也不能得到同样的压实结构，在再次充水时仍将有因堆石料湿化而引起的变形。冬季在表面和混入填筑体内的固态水在融解时也会有融沉作用。在负温不太严重的地区，或确有需要时，冬季填筑施工要按照规范要求采取相应的措施，保证填筑质量。对采用挤压边墙固坡时，还要对挤压边墙混凝土浇筑采取增温保温措施。也可在天气回暖后向填筑体大量补水，或使下部坝体泡水，以进一步增加其施工期的变形。

(2) 混凝土面板。混凝土的冻融破坏是影响其耐久性的主要因素。要考虑的气候条件是当地的极端最低温度、每年的冻融次数、昼夜温差、温度年变幅等，特别是每年的冻融次数对混凝土寿命的影响

比最低气温更大。如北京十三陵抽水蓄能电站上水库，当地最低气温约为 -22°C ，而每年冻融次数却达到140余次，因此比东北地区的混凝土冻害更为严重。结合十三陵上库的研究成果表明室内冻融试验1次约相当于现场冻融12次，可由此粗估混凝土的寿命。另一个重要因素是水的作用，对水位变动区的影响大，而对水下和水位变动区以上的部分几无影响或影响较小。有条件的工程冬季使水库在高水位下运行，对抗冻也是有利的。

为此在面板混凝土设计上，一般都采用较高的混凝土强度等级，如C30W12F300。适度增加钢筋含量，双层双向配筋，或上部面板配表层钢筋。在混凝土配比设计中，要优选各种原材料，使用高效减水剂和引气剂，采用低坍落度，尽量降低水灰比和减少用水量，掺加聚丙烯纤维等措施，以提高混凝土的抗冻、抗渗、抗裂性能。

面板混凝土的裂缝可使库水渗入而增强其冻融危害。除提高面板混凝土自身的抗裂性能以外，对坝体填筑碾压密实、留预沉降期等措施，也可减少因坝体变形引起裂缝的可能性。在混凝土面板表面增加一个柔性的防渗、保温涂层，封闭裂缝，增强混凝土的抗渗性，减少水的入渗，对提高混凝土的耐久性是有利的。现在有的工程已经采用水泥基渗透结晶型材料、聚脲、弹性聚氨酯等涂料作为涂层材料，虽增加一些费用，效果还是明显的。

有的工程采用涂抹黑色憎水涂料，如柯柯亚、查龙等使用的改性沥青涂料，使库水与面板混凝土之间留一层不冻水，使两者不会黏结在一起而受冻害。

选择适当的面板混凝土浇筑时机和及时的保温保湿养护措施也是很重要的。不能在负温下浇筑。浇筑后混凝土强度尚低时受到寒潮冲击，易于发生裂缝及影响混凝土质量的事故。特别是在浇筑后很快进入冬季，更需做好保温养护，直到水库蓄水。

(3) 表层接缝止水系统。表层接缝止水系统常规的设计是在缝顶填塞塑性止水材料后，用膨胀螺栓及钢压条锚固在混凝土面板上。这种止水结构中膨胀螺栓顶部和螺母是凸出在混凝土表面以外的，冰冻

及冰盖下水位变化时，因冻融降低表层止水的锚固力及冰冻对膨胀螺栓、压条及盖板的拉拔力、剪切力，使对表层接缝止水系统受到损害，其主要表现为固定盖板用的膨胀螺栓被拔出，角钢或扁钢压条弯曲，盖板底部进水引起冻胀等。有时大块浮冰的撞击也会破坏表层止水。

针对性的防治措施是：采用下卧式的表层止水结构，采用平头膨胀螺栓，消除其突出部分；锚固孔用胶黏剂密封；在表面盖板底部与混凝土面板连接处涂抹较厚封边剂，锚固时可避免混凝土表面不平的影响而达到紧密接触，防止渗水；采用加筋橡胶盖板，以提高抗冲击和抗刺破能力。

(4) 冬季施工。本次会议上有多篇论文介绍了高寒地区混凝土面板堆石坝的冬季施工技术，有些工程已经蓄水运行，由于考虑各种影响因素，并采取相应措施，效果良好。但都反映出冬季施工要增加投入，采取很多附加措施，使得效率低，成本高，质量不易保证，机械设备损耗大，对施工进度也不一定有很大好处。因此如布勒吉拉克工程采取冬季停工4个月的措施，由于安排合理，对工程整体进度并没有造成影响，而且收到明显效益。在严寒地区，冬季施工要付出相当代价，不是有特别需要，采取冬季停工也不失为有益的选择。

(5) 安全监测。寒冷地区的面板堆石坝工程还应做好安全监测设施的防冻措施。水位变动区的监测设施，如接缝止水上部的测缝计，面板中的温度计、钢筋计，周边缝下部的渗压计等，需采取防冻破坏措施，尤其面板表面的监测设施还要防冰挂破坏，或在布置上尽可能避开这一区域。大坝表面监测设施及下游坝坡上观测房内的水管式沉降仪等，也需采取防冻措施，必要时可采用防冻液替代水作为水管式沉降仪的传导液。

蒋国澄

2013年7月16日

前 言

高寒地区混凝土面板堆石坝筑坝技术是恶劣自然条件下建设面板堆石坝的重要课题之一。我国在高纬度和高海拔等高寒地区建成的面板坝已超过 20 座。已建莲花、小山、山口、喀浪古尔、查龙等面板堆石坝，坝址极端最低气温低于 -40°C ，有的坝址年最大温差超过 80°C ，10 多座工程的坝址极端气温低于 -30°C ，建设和运行经受了严峻的考验。这些严寒和寒冷地区的面板堆石坝都采取了技术上的应对措施，目前运行总体良好。随着我国水利水电工程建设的发展，还有多座在建和拟建的面板堆石坝位于高寒地区，有的极端最低气温接近或超过 -50°C ，最大坝高达到或超过 200m。

我国在高寒地区建设面板堆石坝积累了丰富经验，已有大量技术总结和文献报道，但针对高寒地区筑坝技术的专题交流不多，总结和交换这些工程的筑坝技术是中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会的职责和使命。为此，中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会和中国水利水电第十一工程局有限公司协商，依托目前我国纬度最高、极端气温最低的新疆吉勒布拉克高面板堆石坝工程，联合召开专题技术研讨会议。会议的主题是“高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展”。

征文通知发出后，备受建设各方的重视，得到了业内同仁的积极响应，各委员单位的代表积极撰写论文。这次征稿收到论文 42 篇，其中综合研究论文 2 篇，高寒地区在建工程论文 13 篇，高寒地区已建工程论文 17 篇，其他工程论文 10 篇，著名面板堆石坝专家蒋国澄教授为论文撰写了序言。综合性论文主要介绍了高寒地区面板堆石坝接缝止水安全性和耐久性的科研试验内容；高寒地区在建工程论文主要介绍了新疆吉勒布拉克和四川卡基娃高面板堆石坝的设计、施工技术，涉及筑坝材料、防渗结构、基础处理等内容；高寒地区已建工程论文主要介绍吉林台一级、公伯峡、十三陵蓄能上水库、丰宁、查龙、积石峡、武川、小石峡等工程的设计、施工和运行管理及后期修补方面的内容；其他工程

相关论文不一定与主题直接联系，但都是实际工程的经验总结，这次一并纳入论文集参与交流。蒋国澄教授分别就坝体、混凝土面板、表面接缝止水、冬季施工和安全监测等高寒地区面板堆石坝建设需重点关注的技术问题进行了归纳提炼。

总之，本次所收论文内容丰富，既有高寒地区面板堆石坝的试验研究，又有在建工程的经验介绍，还有已建工程的经验总结，涉及科研、设计、施工、运行管理和后期修补，基本反映了我国高寒地区混凝土面板堆石坝建设过去和近年来的经验和技术发展水平，涵盖了高寒地区筑坝的主要技术内容，另有其他工程的经验介绍。相信这本论文集加上会议交流和现场考察一定能给工程技术人员带来全新的感受，启发技术与管理上的智慧，促进技术与管理水平的提高，更好迎接新形势下水利水电工程的机遇与挑战。

感谢各会员单位的精心组织和安排，各级领导的关心和支持，各位作者的辛勤耕耘和劳动。由于汇编时间仓促，编者水平有限，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2013年7月

目 录

代序

前言

· 综合研究 ·

冰盖对面板堆石坝接缝止水体系的安全性影响研究	李敬玮 何旭升 赵 波 (3)
面板坝接缝止水体系耐久性研究	何旭升 赵 波 李敬玮 (11)

· 在建工程 ·

JL.BLK 水电站混凝土面板堆石坝设计	马洪玉 李梦楚 (19)
JL.BLK 水电站混凝土面板堆石坝防冻措施	马洪玉 孙新宁 (23)
JL.BLK 水电站混凝土面板坝填料设计	余华英 (27)
某水电站工程面板趾板基础黄铁矿处理设计	余华英 (32)
天然砂砾石料用于严寒地区面板堆石坝垫层料的特性研究	杨和明 何无产 吴艳书 (35)
新疆吉勒布拉克面板堆石坝施工技术	韩振方 何无产 高 伟 (42)
胶凝砂砾石技术在吉勒布拉克面板堆石坝工程的应用	何无产 徐 超 李阳泰 (48)
新疆吉勒布拉克水电站面板堆石坝反渗排水设计与实践	何无产 杨井国 (52)
吉勒布拉克面板堆石坝混凝土挤压边墙施工技术	温灵芳 王 旭 杨井国 (56)
吉勒布拉克面板堆石坝坝体填筑分期研究与实践	马月俊 温灵芳 刘 军 (62)
吉勒布拉克面板坝过渡料相对密度试验研究与探讨	何无产 徐 超 吴艳书 (66)
新疆吉勒布拉克面板堆石坝趾板帷幕灌浆施工工艺	张 华 田虎军 陆 路 (73)
吉勒布拉克面板堆石坝坝基黄铁矿化学灌浆施工技术分析	田虎军 张 华 陈建文 (77)

· 已建工程 ·

新疆吉林台一级水电站混凝土面板砂砾——堆石坝坝体反向排水与封堵设计	杨作才 (85)
新疆吉林台一级水电站混凝土面板砂砾——堆石坝面板防裂措施研究	陶 然 杨作才 (89)
新疆吉林台一级水电站大坝施工管理及施工技术	王 泉 周怡文 (94)
吉林台一级混凝土面板砂砾——堆石坝坝基 F32 特大断层处理技术	田维忠 (99)
异型滑模在吉林台一级水电站大坝趾板工程中的应用	王永平 田维忠 (103)
公伯峡水电站大坝变形性状分析	张 猛 朱锦杰 滕世敏 李得英 (108)
公伯峡水电站面板应力分析	朱锦杰 张 猛 李得英 (115)
公伯峡面板堆石坝面板竖向裂缝机理分析	朱锦杰 王玉洁 张 猛 (122)
十三陵抽水蓄能电站上水库全库盆混凝土面板衬砌防渗设计及运行情况	吴吉才 (128)

丰宁水电站混凝土面板表层止水修补设计	王 勇	王 可	(136)
高寒地区混凝土面板坝设计和面板冻融破坏及修复	吕明治	吴 奎	鲁红凯 (139)
高寒地区混凝土面板堆石坝渗漏原因分析及治理	郭海志	刘 儒	(151)
高寒干燥地区混凝土面板堆石坝面板防裂技术研究与应用	王星照		(158)
寒冷地区武川水库混凝土面板堆石坝施工技术	吴仕奇	徐更晓	杨和明 (164)
严寒地区低温季节面板堆石坝施工质量控制工法	王永平	罗松涛	温永胜 李振坤 (171)
卡基娃面板堆石坝一期填筑施工技术探讨			朱海燕 (179)
高寒地区混凝土冬季施工			吴海军 (184)

· 其 他 工 程 ·

黄坛古贤水利枢纽混凝土面板堆石坝设计与研究	刘亚丽	刘庆亮	萧燕子	朱天平	(189)
紫坪铺水利枢纽大坝混凝土面板震损裂缝处理技术			张 涛	黄俊伟	(199)
苏家河口水电站面板堆石坝监测成果分析	董泽荣	姜云辉	袁建波	黄仕俊	(204)
地质雷达在堆石坝面板脱空缺陷检测中的应用研究	姜云辉	黎利兵		李一兵	(211)
杨东河水电站面板堆石坝度汛方案选择与实施	刘延科		孙训君		(216)
杨东河水电站面板堆石坝一期混凝土面板施工技术			孙训君		(222)
杨东河水电站面板堆石坝填筑料开采爆破试验技术			孙训君	郑国强	(228)
白岩河面板堆石坝砂浆固坡施工技术				赵海涛	(233)
水下处理面板坝混凝土破损施工工艺			苏 乔		(237)
喷涂聚脲弹性涂料试验研究及其在水电工程中应用			刘广胜		(239)

高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集

综合研究



冰盖对面板堆石坝接缝止水体系的安全性影响研究

李敬玮 何旭升 赵波

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室

水利部水安全重点实验室 北京 100038)

摘要: 本文针对北方冬季寒冷低温条件,研究了结冰现象对止水体系锚固系统安全性的影响程度。通过设计实验室模型试验,模拟测定了不同降温速率下结冰所产生的冻胀对锚固系统的拉拔破坏力值及冰与螺栓冻结强度、冰与扁钢压条及橡胶盖板的冻结强度等参数。研究了冻融循环对膨胀螺栓在 C30 混凝土中的锚固力及不同灌封型式的影响。在分析水位变化而引起的冰盖对止水锚固系统的破坏作用基础上,结合试验测试结果,提出了寒冷地区止水锚固体系设计施工中应注意的主要问题和建议。

关键词: 混凝土面板堆石坝 止水体系 冻胀 锚固

1 研究背景

面板堆石坝在我国水电工程建设中被广泛采用,其面板接缝的止水结构体系在大坝的安全运行中占有重要位置。中国水利水电科学研究院在“九五”、“十五”期间对止水体系,包括结构和材料进行了深入、系统的研究,提出了如图 1 所示的止水结构,目前国内高面板坝工程通常采用这种结构。

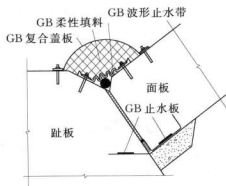


图 1 典型止水结构

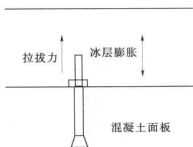


图 2 冰对膨胀螺栓冻胀拉拔力

止水体系普遍采用的锚固系统采用膨胀螺栓和扁钢压条将止水盖板锚固在混凝土面板和趾板上。北方寒冷地区冬季库区结冰形成冰盖,由于库区水位的频繁变化,冰盖会对止水锚固体系产生较大的影响,甚至造成止水体系局部出现膨胀螺栓拔出而失去锚固功能的情况,如牡丹江莲花面板坝、吉林小山坡面板坝及青海小干沟面板坝等都出现过结冰造成的止水体系局部破坏现象^[1]。因此,研究寒冷地区面板坝工程止水体系及提高安全运行措施至关重要。

本文总结分析了寒冷地区库区结冰对止水锚固体系的破坏作用,结合具体的模拟试验研究,讨论了止水体系安全运行要求及工程建议。

2 结冰对止水锚固系统的破坏方式

止水体系在库区结冰过程中会与冰之间产生冻结,包括止水盖板和扁钢压条与冰的冻结。随着水位的变化,会因冰的移动趋势产生作用于止水锚固系统的力,造成止水体系局部出现膨胀螺栓拔出、角钢被拉弯、止水带被撕裂等破坏现象。经过总结和分析,结冰的破坏作用主要包括以下几种方式:

①冻融对锚固螺栓锚固力的影响。由于膨胀螺栓锚固孔没有进行密封处理或处理不当,水进入孔内,

使孔内混凝土表面受到冻融破坏,并且孔内水的结冰膨胀作用对膨胀螺栓和混凝土之间的紧密接触造成影响,从而降低锚固螺栓的锚固力;②结冰过程中出现的冰层对锚固螺栓的冻胀拉拔力,图2说明了冻胀拉拔力产生的原因,即降温过程中冰与膨胀螺栓外露部分冻结,随着温度的降低,冰层的膨胀对螺栓产生冻结拉拔力;③由于冰盖与止水体系的冻结,主要包括与膨胀螺栓外露部分、扁钢压条以及盖板,在水位变化时对锚固系统产生破坏拉拔力以及剪切力;④库区大块浮冰对止水体系的撞击破坏作用。

本文针对以上影响因素分别进行了试验研究。

3 试验研究

3.1 冰层对膨胀螺栓冻胀拉拔力测定

3.1.1 试验原理和方法

将旋有螺母的 M10 的膨胀螺栓立于水槽中央(螺母端向下),见图3。螺栓下端端粘上一薄层塑性 GB 胶,以避免螺栓顶端受到冰的膨胀力作用。螺栓没入水中 30mm,螺栓水面上端同样粘上一层塑性 GB 胶,以保证在冰膨胀过程中螺栓受力长度不变。螺栓上顶端与应力传感器接触,整个测量过程中保持应力传感器与水槽底部的距离不变。通过应力传感器就可以对冰在膨胀过程中施加在螺栓上的力进行测量。为了消除降温过程中试验仪器的系统误差,试验中针对每一降温速率分别进行水槽中有水和无水试验,无水试验结果作为空白试验,以消除测量系统降温引起的误差。试验中分别采用 40℃/2h、40℃/4h、40℃/6h 的降温速度降温,然后恒温 1~2h。

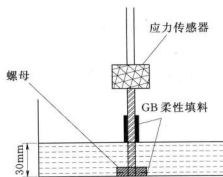


图3 冰对螺栓的拉拔力测量

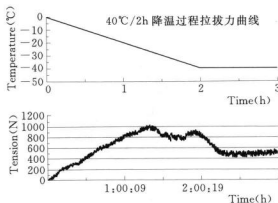


图4 冰层膨胀产生的冻胀拉拔力

3.1.2 测试结果

不同的降温速率得到的冻胀拉拔力列于表1中。试验结果表明,降温速率越大拉拔力越大。图4是降温速率为 40℃/2h 得到的冻胀拉拔力曲线,由于实际降温速率远小于实验采用的降温速率,所以实验得到的最大拉拔力应大于实际运行中的拉拔力。为确保工程安全,30mm 长度冻结螺栓选择试验中最大拉拔力值 $F_{\text{冰膨胀拉拔}} = 1016\text{N}$ 作为估算基础。

表1 不同降温速率下的最大拉拔力

降温速率	40℃/2h	40℃/4h	40℃/6h
最大压力值 (N)	1016	682.6	696

3.2 冰盖与止水体系的冻结力测定

3.2.1 测试方法

冰与扁钢压板冻结强度测定方法见图5。试验将金属板固定在水面上,下表面接触水,放入低温

箱 12h, 使金属板下表面与冰冻结在一起, 然后在拉力机上拉拔, 测试破坏强度。同理, 测试 GB 橡胶盖板及螺栓与冰的冻结强度。螺栓与冰的冻结力测试示意图见图 6。

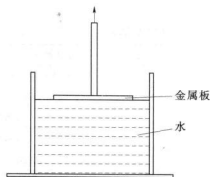


图5 冰与金属压板冻结力测试

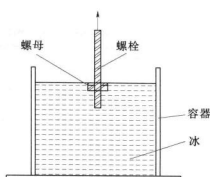


图6 螺栓冻结拉拔测试

3.2.2 测试结果

表 2 为不同的冻结温度下测定的止水体系中不同材料与冰的冻结强度数据。

表 2 冰层与止水体系冻结力数据

冻结温度 (°C)	-10	-20	-30	-40
膨胀螺栓冻结力 (kN)	1.96	3.39	1.43	1.27
扁钢压板冻结强度 (MPa)	0.307	0.314	0.240	0.208
橡胶盖板冻结强度 (MPa)	0.014	0.014	0.018	0.021

试验结果表明, 螺栓与冰的冻结拉拔破坏力最大为 3.39kN; 扁钢与冰冻结强度最大为 0.314MPa; 橡胶盖板冻结强度最大为 0.021MPa。

3.3 膨胀螺栓锚固力试验研究

膨胀螺栓锚固力的大小是止水系统密封可靠的基础, 特别是低温存在结冰现象的情况下, 其大小直接关系到止水系统运行的可靠性。本试验中采用工程应用普遍的 M10 膨胀螺栓。

3.3.1 膨胀螺栓锚固力测定

在膨胀螺栓锚固系统中, 膨胀螺栓螺母的上紧力是很重要的一个参数, 螺母的松紧程度直接影响到膨胀螺栓所能提供的锚固力。试验中采用体积为 150mm×150mm×150mm 的 C30 混凝土试块, 一面的中心打孔锚固 M10mm×120mm 膨胀螺栓, 植入深度 80mm。采用不同力矩上紧螺母。停放 24h 后进行拉拔试验。表 3 是试验中得到的螺母上紧力与膨胀螺栓拉拔力之间的关系。

表 3 膨胀螺栓螺母上紧力与其提供拉拔力的关系

螺母上紧力 (Nm)	3	5	8	10
拉栓拉拔力 (kN)	25.39	26.68	32.64	32.37
破坏形式	螺栓脱出	螺栓脱出	螺栓断裂	螺栓断裂

由试验数据可见, 膨胀螺栓提供的锚固力随着螺母上紧力的提高而提高, 当上紧力矩达到 8Nm 以上时, M10 规格的膨胀螺栓拉断, 达到了 M10 螺栓所能提供的锚固力极限值。其提供的最大锚固力超过 32kN。

3.3.2 锚固孔不同密封方式的冻融破坏程度比较

为了研究锚固孔不同密封方式的锚固效果, 实验中选择了不使用灌注密封剂、采用 SK 环氧粘接剂灌注及采用 GB 弹性密封剂灌注密封三种方案进行对比试验。

实验中采用 100mm×100mm×100mm 的混凝土试件, 按照三种实验方案安装膨胀螺栓, 埋入深