

# 西藏水工混凝土的冻蚀及防治措施

陈青生<sup>1</sup>, 王政章<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000)

**摘要:**介绍西藏水工混凝土冻蚀的实地调查情况. 结果表明, 海拔3700 m以上的水工混凝土冻蚀现象较为普遍, 海拔4500 m以上的藏北高原的水工混凝土冻蚀情况严重. 西藏水工混凝土产生冻蚀的主要原因是西藏独特的自然气候条件, 抗冻强度设计较低、缺乏施工质量监督机制等. 根据部分试验结果, 建议采取提高水工混凝土的设计抗冻标准和完善水利工程施工质量监督机制等措施来防治西藏水工混凝土的冻蚀.

**关键词:**水工混凝土; 冻蚀; 防治措施; 西藏

**中图分类号:** TV431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2001)06-0026-04

西藏大部分地区属于干旱和半干旱气候类型, 水资源时空分布很不均匀, 旱、洪灾害十分频繁. 独特的自然地理和气象条件决定了西藏地区的农业只能是灌溉、补充灌溉型农业. 另外, 西藏地区由于缺少煤炭资源, 工业与民用电力能源除了依靠极少数的地热发电和柴油发电外, 大部分依靠水力发电. 在水力发电中, 又由于受地质和人口分布等因素的影响, 发电方式多数是以小型引水式发电站为主. 在这些灌溉和发电枢纽中, 许多混凝土水工建筑物已产生冻融剥蚀破坏, 有的已不能发挥正常作用, 有的已完全不能发挥作用. 为此, 西藏自治区水利厅将水工混凝土的冻害列为西藏水利工程中首要解决的问题. 基于对西藏地区、特别是西藏那曲地区的水工建筑物冻害的调查, 针对西藏水泥厂生产的水泥及西藏地产混凝土掺合料进行了抗冻性试验研究, 探讨了西藏水工混凝土冻害发生的特点和机理, 提出了增强西藏水工混凝土抗冻性能的措施.

## 1 冻蚀典型实例

### 1.1 拉萨市水工建筑物的冻蚀实例

拉萨市是西藏自治区的经济文化中心, 该市所辖一区(拉萨市城关区)和7个县, 海拔3500 m~7200 m, 该市的能源主要由羊湖抽水蓄能电站、羊八井地热电站、纳金水电站、平措水电站和献多水电站等提供. 在平措和献多水电站的建筑物中, 发现有混凝土的冻蚀现象. 其中平措水电站中5孔溢流坝的冻融剥蚀达10多处, 深度平均为3~4 cm, 最深达

6 cm, 引水渠道的防渗衬砌也由于结冻起壳产生剥蚀(图1), 每年需20~30万元人民币进行维修. 献多水电站拥有一条9 km长的引水渠道, 渠道采用预制混凝土板衬砌, 该水电站建筑物中存在的混凝土冻蚀主要发生在渠道衬砌和进水闸的闸墩上(图2), 渠道的冻蚀约每10年维修一次, 每次约需维修经费50万元.



图1 平措水电站渠道的冻蚀

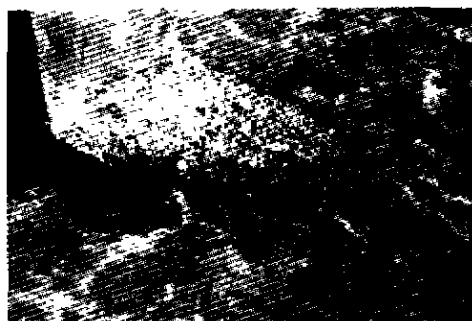


图2 献多水电站进水闸闸墩的冻蚀

基金项目: 水利部重点开发研究基金资助项目(S29833)

作者简介: 陈青生(1964—), 男, 安徽青阳人, 副研究员, 主要从事水利工程施工研究



图3 比如县水电站溢流坝的冻蚀

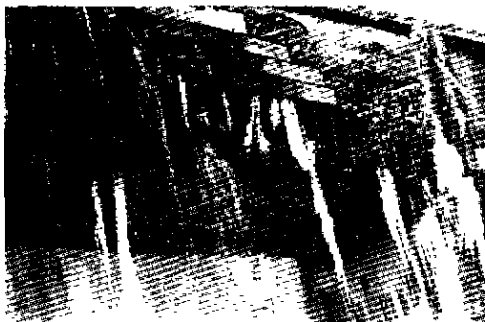


图4 索县水电站渡槽边墙及底板的冻蚀

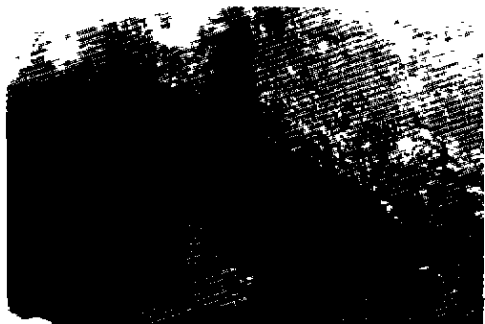


图5 索县水电站前池边墙的冻蚀

## 1.2 藏北地区水工建筑物的冻蚀实例

藏北地区为高原湖盆区,位于昆仑山、唐古拉山和冈底斯-念青唐古拉山之间,主要包括那曲和阿里两地区,约占西藏自治区面积的2/3,其海拔高度在3600~7110m之间,平均海拔4500m以上,该地区幅员辽阔,水力发电是其主要的能源,水工建筑物中的混凝土冻蚀现象比较普遍,1989年,那曲地区兴建的比如县水电站的溢流坝,冻蚀深度达30~40cm,如图3所示,溢流坝坝顶高程由于冻蚀而降低,目前已不能保持正常蓄水位;1990年兴建的索县水电站的渡槽、渠道衬砌、前池及闸墩的冻蚀情况非常严重(图4、图5、图6),这些建筑物已不能发挥其原有的设计功能;1992年兴建的“八五”工程——查龙水电站和申扎水电站及阿里地区的日土水电站都存在混凝土的严重冻蚀现象,这些水工混凝土的冻蚀破坏,已经严重影响到水利枢纽发挥正常的效应,造成了巨大的经济损失。

## 2 冻蚀的成因分析

a. 自然气候条件因素. 青藏高原奇特多样的地形、地貌和受高空空气环流的影响,形成了复杂而又独特的气候,其主要特点为:①日照时数高,辐射强烈,全区年平均日照数在1600~3400h之间,大部分地区年日照数为3100~3400h,年总辐射量值高达5880~7900MJ/m<sup>2</sup>,比同纬度的我国东部平原高出0.5~1倍;②气温低,温差大,全区年平均气温在-5.6℃~20℃之间,极端最低温度低于-20℃,月平均气温大多数在18℃以下,霜冻期约占全年的2/3以上,表1列出了西藏主要气象(站)台的气候特征值,另外,西藏的气候同我国东北寒冷地区的气候相比,最大的特点是年冻融期较长,冻融循环频繁,这是西藏地区水工混凝土产生冻蚀的主要客观因素。

b. 混凝土强度偏低. 据西藏水工建筑物混凝土冻蚀情况调查资料,西藏水工渠道混凝土的强度等级一般为C10~C15,水灰比在0.625以上,调查过程中还发现,在距索县水电站冻蚀严重的渡槽(图4)不足200m处,有一座索河大桥,该桥建于1962年,当初是由苏联专家设计的,桥墩历经近40年,仍完好无损,但由于现已难调查到该桥墩的设计资料,所以不能确定该桥墩的混凝土强度等级,根据常规概念,桥墩的混凝土等级一定较高,据此推测西藏的水工混凝土在强度方面不能满足高寒地区的抗冻要求。

c. 忽视抗冻性指标. 渠道混凝土的设计强度不应低于文献[1]中混凝土强度的最小允许值,对于西藏这样的高寒地区的过水渠道,抗冻强度还应比文献[1]中的数值提高一级,西藏水工混凝土的水灰比也远远大于文献[1]所规定的值,大部分达到0.8以上<sup>①</sup>,在设计水工混凝土的配合比时,也没有将抗冻性能作为主要指标考虑。

d. 缺乏施工质量监督机制. 由于西藏恶劣的高原气候及相对落后的经济环境,水利工程的施工队伍的技术水平也比较落后,同时又由于过去缺少水利工程施工质量的监督机制,造成过去水利工程的



图6 索县水电站闸墩的冻蚀

①西藏自治区水利局,西藏自治区水利学会,西藏水利工作手册,1991,5.

表1 西藏自治区主要气象台(站)的气候特征

| 台(站)名 | 海拔高度<br>/m | 多年平均<br>气温/℃ | 极端气温/℃ |       | 霜冻期<br>/d | 最大冻土<br>深度/cm | 多年平均日<br>照时数/h | 年均降水<br>量/mm |
|-------|------------|--------------|--------|-------|-----------|---------------|----------------|--------------|
|       |            |              | 最高     | 最低    |           |               |                |              |
| 拉 萨   | 3648.7     | 7.6          | 29.4   | -16.5 | 255       | 26            | 3014.0         | 355          |
| 那 曲   | 4507.0     | -1.7         | 22.6   | -41.2 | 365       | 281           | 2889.8         | 406          |
| 山 南   | 3551.7     | 8.4          | 30.0   | -18.2 | 222       | 22            | 2936.3         | 410          |
| 日喀则   | 3836.0     | 6.3          | 28.2   | -25.1 | 247       | 67            | 3232.5         | 420          |
| 昌 都   | 3306.0     | 7.6          | 33.4   | -20.7 | 235       | 81            | 2356.9         | 478          |
| 林 芝   | 3000.0     | 8.6          | 30.2   | -15.3 | 195       | 14            | 2057.0         | 654          |

表2 混凝土配合比

| 试验组次    | 水灰比  | 水泥/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 水/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 砂子/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 石子/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 火山灰/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 引气剂 |
|---------|------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----|
| C35 I   | 0.35 | 394                      | 138                     | 558                      | 1342                     | 0                         | —   |
| C35 II  | 0.35 | 394                      | 145                     | 538                      | 1342                     | 19.7                      | 水剂  |
| C35 III | 0.35 | 394                      | 152                     | 519                      | 1342                     | 39.4                      | 粉剂  |
| C25 I   | 0.45 | 316                      | 149                     | 567                      | 1377                     | 15.8                      | —   |
| C25 II  | 0.45 | 316                      | 156                     | 582                      | 1377                     | 31.6                      | 水剂  |
| C25 III | 0.45 | 316                      | 142                     | 614                      | 1377                     | 0                         | 粉剂  |
| C15 I   | 0.60 | 242                      | 160                     | 670                      | 1355                     | 24.2                      | —   |
| C15 II  | 0.60 | 242                      | 145                     | 694                      | 1355                     | 0                         | 水剂  |
| C15 III | 0.60 | 242                      | 152                     | 682                      | 1355                     | 12.1                      | 粉剂  |

施工质量无法保证,这也是目前西藏的许多水工建筑物产生冻蚀破坏的一个主要因素。现在对工程质量的重视程度提高及施工质量监督机制的逐步完善,由于施工质量造成的冻蚀破坏会逐渐减少,甚至会逐渐消失。

### 3 冻蚀的防治措施

#### 3.1 提高水工混凝土的设计抗冻性能

防止西藏水工混凝土产生冻蚀破坏,关键是要提高混凝土的抗冻性能。本文对由西藏拉萨水泥厂生产的水泥及取自拉萨河的砂石骨料所配制的混凝土进行了抗冻试验,同时针对西藏地区水工混凝土工程中没有应用引气剂的历史,对引气剂改善混凝土的抗冻性能进行了分析。另外,对掺入西藏羊八井火山灰的混凝土性能进行了研究。根据水工混凝土的一般要求,选择 C15、C25、C35 三种强度等级的混凝土进行设计。为了研究各个因素对抗冻性能的影响,采用了正交试验设计方法。在混凝土配合比设计中采用三因素正交试验,考虑的三种影响因素为:①水灰比  $W/C$ ;②火山灰替代水泥的比例;③引气剂类型(固定含气量)。根据文献[2]介绍的正交方法设计了研究混凝土的抗冻配合比,见表2。混凝土冻融试验的试件尺寸为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 。试验采用快冻试验法<sup>[3]</sup>,冻结时控制混凝土试件的中心温度为  $-15^{\circ}\text{C} \sim -17^{\circ}\text{C}$ ;融化时,试件中心温度控制为  $6^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$ 。一次冻融循环为 3 h 左右,试件在冻结和融化过程中均处于全浸水状态(即饱水状态)。冻融设备采用国产 TDR1 全自动混凝土冻融试验机。

试验按 SD105-82《水工混凝土试验规程》的规定进行。混凝土抗压强度、抗折强度、动弹性模量的测试也都按该规程进行。试验研究了标准养护和蒸汽养护条件下的抗压和抗折强度对比、不同引气剂对混凝土抗冻性能的影响、西藏火山灰掺入量对混凝土强度及抗冻性能的影响以及混凝土强度对抗冻性能的影响等。由于混凝土抗冻性能的主要衡量指标为动弹模和质量损失,因此试验中对其进行了测定、测定结果列于表3。该试验结果表明,对于不使用引气剂的情况,根据质量损失指标,C15、C25 和 C35 标号的混凝土只能分别承受 70 次、100 次和 200 次左右的冻融循环,使用了引气剂后,其分别能承受 150 次、200 次和 300 次的冻融循环,说明即使使用引气剂,低强度的混凝土(C15)还是较易冻蚀,而高强度的混凝土(C35),即使不使用引气剂也能承受 200 次的冻融循环而不被严重冻蚀。因此,在设计西藏高寒地区水工混凝土时,如使用引气剂,建议采用 C25 级混凝土,如不使用引气剂,建议采用 C35 级混凝土。研究中所使用的两种引气剂都能提高混凝土的抗冻性能,无较大差别,如要满足 F300 的抗冻要求,还需结合 C35 等级混凝土使用。另外西藏羊八井火山灰在水泥中的掺量可达 15%~20%,此时对混凝土的强度没有很大的影响。

#### 3.2 完善水利工程施工质量的监督机制

施工质量是发挥混凝土设计性能的重要保证,在进行水工混凝土的施工时,必须建立严格的质量监督机制,严把质量关,把施工质量的检查和控制贯彻在施工的全过程,使施工质量达到设计标准。

表3 混凝土试件冻融后的动弹模和重量损失

| 冻融循环次数 | 相对动弹模 <sup>*</sup> /% |        |         |       |        |         |       |        |         | 重量损失/% |        |         |       |        |         |       |        |         |
|--------|-----------------------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|--------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
|        | C15 I                 | C15 II | C15 III | C25 I | C25 II | C25 III | C35 I | C35 II | C35 III | C15 I  | C15 II | C15 III | C25 I | C25 II | C25 III | C35 I | C35 II | C35 III |
| 25     | 91.4                  | 93.4   | 95.6    | 96.2  | 95.8   | 96.0    | 98.2  | 99.2   | 99.6    | 0.2    | 0.1    | 0.15    | 0.2   | 0.12   | 0.1     | 0.03  | 0.0    | 0.0     |
| 50     | 88.2                  | 87.3   | 93.3    | 88.2  | 93.9   | 94.6    | 97.6  | 98.2   | 98.1    | 3.1    | 1.8    | 0.18    | 1.6   | 0.19   | 0.2     | 0.10  | 0.0    | 0.1     |
| 75     | 84.5                  | 86.2   | 92.3    | 75.0  | 92.3   | 92.8    | 96.5  | 97.1   | 96.0    | 5.6    | 2.9    | 0.20    | 2.3   | 0.23   | 0.3     | 0.22  | 0.1    | 0.1     |
| 100    |                       | 83.6   | 89.6    | 58.5  | 90.9   | 89.4    | 93.3  | 95.3   | 95.4    |        | 3.1    | 1.15    | 4.8   | 0.90   | 0.7     | 0.30  | 0.2    | 0.2     |
| 125    |                       | 79.2   | 87.8    |       | 89.3   | 88.3    | 91.6  | 93.8   | 95.0    |        | 4.0    | 2.60    |       | 1.20   | 1.3     | 1.15  | 0.6    | 0.2     |
| 150    |                       | 76.3   | 86.3    |       | 88.2   | 87.5    | 89.5  | 92.6   | 94.3    |        | 4.2    | 3.50    |       | 1.50   | 1.8     | 1.90  | 0.9    | 0.3     |
| 175    |                       | 70.8   | 79.6    |       | 84.3   | 86.5    | 87.2  | 91.8   | 92.3    |        | 5.5    | 5.20    |       | 1.70   | 2.4     | 3.20  | 1.1    | 0.9     |
| 200    |                       |        |         |       | 79.6   | 78.2    | 82.0  | 90.9   | 90.2    |        |        |         |       | 3.20   | 3.4     | 4.00  | 1.8    | 1.4     |
| 225    |                       |        |         |       | 75.0   | 74.3    | 77.0  | 90.0   | 88.6    |        |        |         |       | 5.90   | 5.6     | 6.00  | 2.5    | 2.0     |
| 250    |                       |        |         |       |        |         |       | 89.0   | 86.0    |        |        |         |       |        |         |       | 3.0    | 2.9     |
| 275    |                       |        |         |       |        |         |       | 87.0   | 84.0    |        |        |         |       |        |         |       | 4.2    | 4.0     |
| 300    |                       |        |         |       |        |         |       | 85.0   | 81.6    |        |        |         |       |        |         |       | 5.3    | 4.8     |

注:根据文献[3],出现下列任何一种情况,则停止冻融循环试验:①相对动弹模达到60%;②重量损失达到5%。

a. 施工组织设计中,应包括施工质量检查和控制的内容和方法。大、中型工程必须设立工地质量控制和检查试验室,备好仪器设备,固定质检人员。小型工程也应有负责质检的人员和必要的质检仪器设备。

b. 根据设计确定的内容和方法,编制质检工作手册,对质量检测人员进行必要的培训,使其能熟练掌握质检的理论和方法。

c. 施工开始前,质检人员应提前到达施工现场,对备料、原材料的堆放与储存等都要进行抽样检查和试验,使原材料的性能满足设计要求。否则,应设法更换,改善堆放、储存方法,或调整其原设计的混凝土配合比。

d. 如渠道为土基,填筑时应控制施工时的含水量和干密度,使干密度不小于设计干密度,其离差系数应小于0.15,一般干密度应不小于 $1.65 \text{ t/m}^3$ 。开挖时要严格控制渠道断面尺寸,如为石基,应主要控制其断面的尺寸和平整度。

e. 施工开始后,大、中型工程必须先进行工地试验性施工,检验原设计配合比是否合理,确定施工

机具的有关参数和施工时的铺料的厚度等,如配合比不妥,应进行调整。

f. 施工时要严格控制材料的配合比,各原材料称量误差应控制在允许的范围之内,允许称量偏差一般为:水和水泥 $\pm 2\%$ ,骨料 $\pm 3\%$ ,外加剂 $\pm 1\%$ 。

g. 严格按招投标制度选择工程施工队伍,确保有一定技术力量的施工单位承建工程,并建立施工单位交纳工程质量保证金制度,以确保工程质量满足设计要求。

#### 参考文献:

- [1] 水利部农村水利司,中国灌溉排水技术开发培训中心. 渠道防渗工程技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1998.
- [2] 郁飞. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国标准出版社, 1999.
- [3] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999(1): 41~49.

(收稿日期:2001-06-22 编辑:张志琴)

### 《西北水电》杂志征订启事

《西北水电》杂志系国家电力公司西北勘测设计研究院主办的技术性期刊,1982年创刊,国内外公开发行。《西北水电》杂志为陕西省优秀科技期刊;中国学术综合评价数据库来源期刊;中国科技论文统计源期刊;中国科学引文数据库来源期刊;中国学术期刊(光盘版)入编期刊;《北极星》网站入网期刊。

《西北水电》杂志以推动西北地区水利水电科技进步为宗旨,主要刊登有关大、中型水利水电工程的科技论文,设置有水文与资料、地质与勘测、水工与施工、机电与金属结构、计算机技术、科研与试验、专题研究、工程监理、经营与管理、国外译文、国内外学术活动简讯等栏目。本刊为季刊,全年4期,每季末出版,刊号CN61-1260/TV,大16开,彩色封面及封底,2002年每期订价5.50元,全年22元(包括邮寄费)。欢迎在当地邮局征订(邮发代号52-130),也可直接与本刊编辑部联系订阅。

银行汇款单位:《西北水电》杂志社;开户银行:西安市商业银行工商支行南大街分理处;帐号:115-03-01-889-000085-77;邮局汇款:地址:710065 陕西省西安市电子工业园区丈八东路18号;单位:国电公司西北勘测设计研究院《西北水电》编辑部;电话:(029)8280709,8280708;联系人:王燕,罗绮。