

ICS 27.140

P 59

备案号: J1056—2010

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5241—2010

---

## 水工混凝土耐久性技术规范

Technical specifications for durability of hydraulic concrete



2010-05-24 发布

2010-10-01 实施

---

国家能源局 发布

## 目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 术语	3
4 总则	5
5 冻融	6
5.1 一般规定	6
5.2 混凝土原材料	6
5.3 混凝土配合比	7
5.4 施工与质量评定	8
6 环境水侵蚀	9
6.1 一般规定	9
6.2 混凝土原材料	9
6.3 混凝土配合比	10
6.4 施工与质量评定	11
7 冲磨与空蚀	12
8 混凝土中钢筋的锈蚀	13
8.1 一般规定	13
8.2 混凝土原材料和配合比	13
8.3 结构构造	14
8.4 施工与质量评定	14
9 碱—骨料反应	16
9.1 一般规定	16
9.2 混凝土原材料和配合比	17
9.3 骨料的碱活性检验	17

9.4 施工与质量评定 .....	18
附录 A (规范性附录) 混凝土的总碱量计算方法 .....	20
条文说明 .....	21

## 前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于下达 2003 年行业标准项目补充计划的通知》(发改办工业[2003] 873 号)的要求制定的。

本标准在总结国内外近 20 年水工混凝土耐久性方面的研究成果和先进经验的基础上,参考国内外相关标准,针对水工混凝土的特点编制而成。

本标准突出了水工混凝土材料的耐久性设计、施工工艺、质量评定及相关技术措施,主要内容包括冻融、环境水侵蚀、冲磨与空蚀、混凝土中钢筋的锈蚀、碱—骨料反应等。

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院。

本标准主要起草人:蔡跃波、陈改新、丁建彤、林宝玉、马锋玲、纪国晋、胡智农。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心(北京市白广路二条 1 号,100761)。

# 1 范围

本标准规定了水工混凝土冻融、环境水侵蚀、冲磨与空蚀、混凝土中钢筋的锈蚀、碱—骨料反应等耐久性技术要求。

本标准适用于大、中型水电水利工程。其他工程可参照执行。



## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 176 水泥化学分析方法
- GB/T 2847 用于水泥中的火山灰质混合材料
- GB/T 8077 混凝土外加剂匀质性试验方法
- GB/T 18046 用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB/T 18736 高强高性能混凝土用矿物外加剂
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB/T 50287 水利水电工程地质勘察规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计规范
- DL/T 5055 水工混凝土掺用粉煤灰技术规范
- DL/T 5057 水工混凝土结构设计规范
- DL/T 5082 水工建筑物抗冰冻设计规范
- DL/T 5100 水工混凝土外加剂技术规程
- DL/T 5144 水工混凝土施工规范
- DL/T 5150 水工混凝土试验规程
- DL/T 5151 水工混凝土砂石骨料试验规程
- DL/T 5180 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准
- DL/T 5207 水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范
- DL/T 5330 水工混凝土配合比设计规程
- DL/T 5387 水工混凝土掺用磷渣粉技术规范
- DL/T 5388 水电水利工程天然建筑材料勘察规程

## 3 术 语

下列术语和定义适用于本标准。

- 3.0.1 胶凝材料 **cementitious material; binder**  
混凝土原材料中具有胶结作用的水泥和粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉、磷渣粉、天然火山灰等矿物掺合料的总称。
- 3.0.2 水胶比 **water to binder ratio**  
混凝土拌和物中用水量与胶凝材料总量的质量比。
- 3.0.3 碱—骨料反应 **alkali-aggregate reaction**  
硬化混凝土中的碱与骨料中的活性矿物发生化学反应，结果导致混凝土发生膨胀、开裂甚至破坏的特征。
- 3.0.4 混凝土的总碱量 **total alkali content of concrete**  
单位体积混凝土中水泥、掺合料、外加剂等原材料的质量与其有效碱含量乘积的总和，单位为  $\text{kg/m}^3$ 。
- 3.0.5 有效碱含量 **effective alkali content**  
混凝土原材料中能参与碱—骨料反应的碱的含量，以当量  $\text{Na}_2\text{O}$  表示，即  $\text{Na}_2\text{O}$  含量与 0.658 倍的  $\text{K}_2\text{O}$  含量之和，单位为 %。
- 3.0.6 碱—硅酸反应活性骨料 **alkali-silica reactive aggregate**  
含有非晶体或结晶不完整的二氧化硅、在适当条件下可能产生碱—骨料反应的骨料。

## 3.0.7

碱—碳酸盐反应活性骨料 alkali-carbonate reactive aggregate

含有特定结构构造的微晶白云石、在适当条件下可能产生碱—骨料反应的骨料。

## 4 总 则

4.0.1 为了规范水工混凝土的耐久性技术要求,提高水工混凝土耐久性设计、施工、验收和质量评定水平,制定本标准。

4.0.2 在制定水工混凝土耐久性技术要求时,应遵循下列基本原则:

1 应根据水工建筑物的等级、所处自然环境条件、施工与运行管理条件、损坏的后果以及维修的难易程度,对耐久性问题进行专门论证,提出安全可靠、技术先进、因地制宜、经济合理的耐久性技术要求。

2 对于1级水工建筑物,应针对影响耐久性的主要因素,进行试验研究和论证。

3 对涉及耐久性要求的工程,应提出明确的施工工艺、质量控制及其运行管理技术要求。

4 在采用新技术、新材料、新工艺和新设备解决耐久性问题时,应进行试验研究和论证。

4.0.3 水工混凝土耐久性技术除应符合本标准规定外,尚应符合国家现行的有关标准。



## 5 冻 融

### 5.1 一 般 规 定

5.1.1 对于大坝混凝土和受风化、冻融作用的其他水工结构混凝土，应明确规定抗冻等级，并做好混凝土结构的防渗透与排水设计。

5.1.2 混凝土的抗冻等级分为 F400、F300、F200、F150、F100、F50 六级，抗冻等级的测定应按 DL/T 5150 规定的试验方法进行。对于海水或盐湖环境中的水工结构，应采用实际环境的水进行混凝土抗冻试验。对于承载薄壁钢筋混凝土结构，其混凝土在达到规定冻融循环次数后的相对动弹性模量应不低于 80%。

5.1.3 大体积混凝土的抗冻等级分区应大于结构所处运行环境的混凝土最大冻深，分区厚度不宜小于 2m。

5.1.4 水工混凝土的抗冻等级要求应符合 DL/T 5057 和 DL/T 5082 的规定。

### 5.2 混 凝 土 原 材 料

5.2.1 配制有抗冻要求的混凝土宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥。

5.2.2 可掺用粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉、磷渣粉、天然火山灰等活性掺合料。粉煤灰应为符合 DL/T 5055 要求的 I 级或 II 级粉煤灰；硅灰的品质应符合 GB/T 18736 的规定；磨细矿渣粉的品质应符合 GB/T 18046 的规定，比表面积宜在  $350\text{m}^2/\text{kg} \sim 500\text{m}^2/\text{kg}$  范围内；磷渣粉的品质应符合 DL/T 5387 的规定；天然火山灰的品质应符合 GB/T 2847 的规定。掺加其他类型的活性掺合料应进行试验论证。

5.2.3 有抗冻要求的混凝土应掺加适量的引气剂和高效减水剂，

引气剂和高效减水剂的品质应符合 DL/T 5100 的要求；选用外加剂品种，尤其是引气剂时，应进行原材料组合适应性试验，并应考虑与混凝土运输、振捣时间和方式、环境温度的适应性。

5.2.4 骨料的品质应符合 DL/T 5144 的有关规定。

### 5.3 混 凝 土 配 合 比

5.3.1 有抗冻要求的混凝土配合比设计按 DL/T 5330 的规定进行，并应通过试验确定。常态混凝土的含气量宜控制在表 5.3.1 所列的范围内；碾压混凝土的含气量可相应降低 0.5%~1.0%。

表 5.3.1 有抗冻要求的混凝土含气量

最大骨料粒径 mm	含气量 %	
	抗冻等级 $\geq \text{F200}$	抗冻等级 $\leq \text{F150}$
10	$7.0 \pm 1.0$	$6.0 \pm 1.0$
20	$6.0 \pm 1.0$	$5.0 \pm 1.0$
40	$5.5 \pm 1.0$	$4.5 \pm 1.0$
80	$4.5 \pm 1.0$	$3.5 \pm 1.0$
150	$4.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$

注 1：若试验采用湿筛混凝土，含气量应按湿筛后混凝土的最大骨料粒径控制。  
 注 2：皮带机运输和高频振捣会造成混凝土含气量损失，对于抗冻等级大于等于 F200 的混凝土，宜控制振捣后混凝土（湿筛二级配）的含气量大于等于 3.0%，并宜控制现场或模拟现场的硬化混凝土的气泡间距系数小于  $300\mu\text{m}$ 。  
 注 3：当水胶比小于等于 0.40 时，混凝土的含气量可降低 1.0%。

5.3.2 不同抗冻等级的常态混凝土的最大水胶比应符合表 5.3.2 的规定；碾压混凝土的水胶比宜相应减小 0.05。

表 5.3.2 有抗冻要求的混凝土最大水胶比

抗冻等级	F300	F200	F100	F50
最大水胶比	0.45	0.50	0.55	0.58



5.3.3 有抗冻要求的混凝土中的掺合料掺量应根据混凝土配合比试验确定,其中粉煤灰的掺量应符合 DL/T 5055 的规定;硅灰的掺量不宜超过 10%;磨细矿渣粉的掺量宜在 40%~70% 范围内。

#### 5.4 施工与质量评定

5.4.1 混凝土施工应符合 DL/T 5144 的规定。

5.4.2 有抗冻要求的混凝土含气量的现场检测频次应不低于坍落度或  $VC$  值的检测频次,含气量的允许偏差范围为  $\pm 1.0\%$ 。

5.4.3 低温季节施工时,应根据具体情况采取保温措施,防止混凝土早期受冻。受冻前,大体积混凝土的抗压强度不应低于 7.0MPa;非大体积混凝土和钢筋混凝土的抗压强度不应低于设计强度等级的 85%。

5.4.4 现场混凝土抗冻性能的检验采用机口随机取样。每次成型 3 个  $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$  棱柱体试件为一组,在标准养护室养护到设计龄期,按 DL/T 5150 规定的方法进行抗冻试验。同一强度等级混凝土抗冻试件的取样数量应符合以下规定:大体积混凝土每  $2000\text{m}^3\sim 5000\text{m}^3$  取 1 组,非大体积混凝土每  $500\text{m}^3\sim 1000\text{m}^3$  取 1 组或每类构件取 3 组;或按 DL/T 5144 的规定执行,按每季施工的主要部位取样成型 1~2 组。

5.4.5 宜在仓面取样进行抗冻试验对比,取样量为机口取样量的 10%。

5.4.6 评定混凝土的抗冻性能以机口取样成型试件的抗冻试验结果为准。钢筋混凝土的取样检测合格率不应低于 90%,大体积混凝土的取样检测合格率不应低于 80%。

## 6 环境水侵蚀

### 6.1 一般规定

6.1.1 当环境水对水工混凝土具有侵蚀性时,应根据环境水的侵蚀类型和侵蚀程度进行混凝土的防侵蚀设计。

6.1.2 判别环境水对混凝土的侵蚀性时,应搜集流域地区或工程建筑物场地的气候条件,冰冻资料,海拔高程,岩石性质,环境水的补给、排泄、循环和滞留条件以及污染情况等资料。

6.1.3 环境水对混凝土侵蚀性的判别标准,应符合 GB 50287 的规定。

### 6.2 混凝土原材料

6.2.1 配制耐侵蚀混凝土宜选用硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥,水泥的混合材宜为矿渣和粉煤灰。有抗硫酸盐侵蚀要求时,宜选用抗硫酸盐水泥。

6.2.2 可掺用粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉等活性掺合料。粉煤灰应为符合 DL/T 5055 要求的 I 级或 II 级粉煤灰;硅灰的品质应符合 GB/T 18736 的规定;磨细矿渣粉的品质应符合 GB/T 18046 的规定,比表面积宜在  $350\text{m}^2/\text{kg}\sim 500\text{m}^2/\text{kg}$  范围内;掺加其他类型的活性掺合料应进行试验论证。

6.2.3 在年平均气温低于  $15^\circ\text{C}$  的中等或强硫酸盐侵蚀环境下,胶凝材料中若含有石灰石粉,宜进行关于碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀的试验论证。

6.2.4 骨料的品质应符合 DL/T 5144 的有关规定。



### 6.3 混凝土配合比

6.3.1 不同矿物掺合料的掺量应根据混凝土的施工环境条件、拌和物性能、力学性能以及耐久性要求通过试验论证。

6.3.2 根据工程的环境特点和设计要求,混凝土中应适量掺加能提高混凝土抗渗性和密实性的外加剂。

6.3.3 当环境水对混凝土具有侵蚀性时,应根据侵蚀类型和侵蚀程度按表 6.3.3 控制与环境水接触的混凝土的最大水胶比,满足混凝土的抗渗等级要求。

表 6.3.3 耐侵蚀混凝土的技术要求

侵蚀程度	宜用的水泥品种及掺合料	最大水胶比	抗渗等级
弱侵蚀	硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,并采取下列措施之一: ① 掺磨细矿渣粉; ② 掺粉煤灰; ③ 掺硅灰	0.50	≥W8
	抗硫酸盐水泥 ( $C_3A$ 小于 5%)	0.50	
中等侵蚀	中抗硫酸盐水泥,或熟料中 $C_3A$ 含量小于 8% 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,并采取下列措施之一: ① 掺磨细矿渣粉; ② 掺粉煤灰; ③ 掺硅灰	0.45	≥W10
	高抗硫酸盐水泥	0.45	

6.3.4 对强侵蚀性环境水,应进行专门试验论证,并应根据具体情况采用防水层、降低环境水侵蚀性、排水、换填土、降低地下水位及设防护层等工程措施。

6.3.5 受环境水侵蚀的水工钢筋混凝土的保护层厚度应按

DL/T 5057 的规定执行。

### 6.4 施工与质量评定

6.4.1 混凝土的施工与质量评定应符合 DL/T 5144 的规定。

## 7 冲磨与空蚀

7.0.1 有抗冲磨防空蚀要求的水工泄水建筑物护面混凝土技术应按 DL/T 5207 的规定执行。

## 8 混凝土中钢筋的锈蚀

### 8.1 一般规定

8.1.1 水工钢筋混凝土结构的防钢筋锈蚀耐久性,应根据结构的设计使用年限、使用环境条件进行设计。

8.1.2 水工钢筋混凝土结构所处的环境条件类别可按 DL/T 5057 的规定划分。

8.1.3 对于接触氯化物的四、五类环境,当同一结构中的不同构件或同一构件中的不同部位所处的环境类别不同时,宜区别对待,并应提出使用过程中的检测与维护的要求。

### 8.2 混凝土原材料和配合比

8.2.1 在海水等含氯化物介质环境中,宜采用掺量大于等于 50% 的磨细矿渣粉或多元复合矿物掺合料混凝土。在海水环境下,不宜单独采用抗硫酸盐水泥配制混凝土。

8.2.2 混凝土中最大氯离子含量应符合 DL/T 5057 的规定。氯离子含量测定方法应符合 GB/T 50476 的规定。

8.2.3 钢筋混凝土的最低强度等级、最大水胶比和单方混凝土中的最小水泥用量,对一、二、三类环境和不接触氯化物的四、五类环境,应符合 DL/T 5057 的规定;对接触氯化物的四、五类环境,除满足 DL/T 5057 的规定外,尚应符合 GB/T 50476 的规定。

8.2.4 在接触氯化物的三、四、五类环境中,宜在设计中提出混凝土的氯离子扩散系数  $D_{RCM}$  指标,并应符合 DL/T 5057 的规定。氯离子扩散系数  $D_{RCM}$  宜按 GB/T 50082 中的 RCM 法测定。



### 8.3 结 构 构 造

8.3.1 结构构造应符合 DL/T 5057 的规定。

8.3.2 对于接触氯化物的三、四、五类环境中的水工钢筋混凝土结构,结构构造尚应符合以下规定:

- 1 纵向受力钢筋的最小直径宜不小于 16mm。
- 2 包括纵向钢筋、箍筋和分布钢筋以及预应力筋在内的钢筋的保护层厚度应满足 GB/T 50476 中的有关要求。
- 3 宜减少混凝土结构构件表面的暴露面积,并避免表面的凹凸变化;构件的棱角宜做成圆角。
- 4 在接触氯化物的四、五类环境中,对 1 级水工建筑物,宜采取下列一项或多项外加防腐措施:混凝土表面涂层、混凝土表面硅烷浸渍、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂、电化学保护等。
- 5 后张预应力混凝土结构对预应力体系的耐久性防护措施应符合 GB/T 50476 的要求。
- 6 施工缝、伸缩缝等结构缝的设置宜避开局部环境作用不利的部位,否则应采取有效的防护措施。
- 7 暴露在混凝土结构构件外的吊环、紧固件、连接件等铁件,应与混凝土中的钢筋隔离,否则应采用可靠的防护措施。

### 8.4 施 工 与 质 量 评 定

8.4.1 水工钢筋混凝土的施工与质量评定应符合 DL/T 5144 的要求。

8.4.2 对于接触氯化物的三、四、五类环境中的钢筋混凝土构件,施工与质量评定尚应符合以下规定:

- 1 钢筋保护层垫块宜定型生产,可用砂浆、纤维砂浆或细石混凝土制作,不宜采用工程塑料制作。垫块的抗氯离子侵入性和强度应高于构件本体混凝土。保护层垫块的尺寸应保证混凝土保护层厚度的准确性,其形状应有利于钢筋的定位。构件侧面和底

面的垫块应至少为 4 个/ $\text{m}^2$ 。绑扎垫块和钢筋的铁丝头不得伸入保护层内。

2 保护层厚度的施工质量验收应按 GB/T 50476 的规定执行。

3 新浇混凝土应至少养护 28d 后,才能与海水等氯化物接触,否则应采取专门的防护措施。

4 应采取适当施工措施,避免混凝土产生早期温度裂缝和收缩裂缝。

5 预应力混凝土结构的施工应符合 GB/T 50476 的有关规定。

6 施工中宜检测混凝土拌和物中的氯离子含量,确认其是否符合 8.2.2 的要求。连续施工过程中,检测频率宜为每周 1 次。当原材料品种或来源发生改变时,应增加检测 1 次。

7 施工中宜检测混凝土的氯离子扩散系数  $D_{\text{RCM}}$ ,确认其是否符合 8.2.4 的要求。连续施工过程中,检测频率宜为每周 1 次。当原材料品种或来源、混凝土配合比发生改变时,应增加检测 1 次。



## 9 碱—骨料反应

### 9.1 一般规定

9.1.1 混凝土宜采用非碱活性骨料；如无法避免使用碱活性骨料时，应采取有效的抑制措施，并通过试验论证。

9.1.2 根据表 9.1.2-1 对环境类别进行划分。使用碱活性骨料配制混凝土时，应根据 DL/T 5180 对水工建筑物级别的划分，按表 9.1.2-2 的要求对混凝土的总碱量进行限制。

表 9.1.2-1 环境分类

环境类别	环境条件
干燥环境	构件四周及混凝土内部相对湿度小于 80%，并且不暴露于外部水源
潮湿环境	直接与水、潮湿土壤接触的混凝土工程；干湿交替环境等
含碱环境	潮湿并且外部有供碱环境

表 9.1.2-2 混凝土中最大总碱量限制  $\text{kg/m}^3$

骨料类型		碱—硅酸反应活性骨料			碱—碳酸盐反应活性骨料		
水工建筑物级别		1 级	2 级、3 级	4 级、5 级	1 级	2 级、3 级	4 级、5 级
环境 条件	干燥环境	3.0	3.5	不限制	3.0	3.5	不限制
	潮湿环境	2.5	3.0	3.5	用非碱活性骨料		
	含碱环境	用非碱活性骨料			用非碱活性骨料		

注 1：对三级配和四级配混凝土的总碱量应折算成相应二级配混凝土的总碱量后进行最大总碱量限制。

注 2：混凝土的总碱量计算见附录 A。

9.1.3 使用碱活性骨料配制混凝土时，除应对混凝土的总碱量进

行限制外，还应同时采取安全有效的抑制措施，如掺加 F 类粉煤灰、磨细矿渣粉、硅灰、沸石粉等活性矿物掺合料。

### 9.2 混凝土原材料和配合比

9.2.1 使用碱活性骨料配制混凝土时，宜满足下列要求：

1 宜采用低碱水泥，水泥的碱含量应不大于 0.60%。水泥品种宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥。

2 宜掺用粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉等活性掺合料。粉煤灰应为符合 DL/T 5055 要求的 I 级或 II 级 F 类粉煤灰，粉煤灰的碱含量不宜大于 2.0%；硅灰的品质应符合 GB/T 18736 的规定；磨细矿渣粉的品质应符合 GB/T 18046 的规定，比表面积宜在  $350\text{m}^2/\text{kg} \sim 500\text{m}^2/\text{kg}$  范围内。掺加其他类型的活性掺合料应进行试验论证。

3 宜采用无碱或低碱含量的外加剂。

4 骨料的品质应符合 DL/T 5144 的有关规定。不得采用海水或未经淡水充分冲洗的海砂配制混凝土。

9.2.2 混凝土配合比设计试验应结合碱—骨料反应抑制措施进行。在满足混凝土各项设计指标及和易性的条件下，宜适当降低胶凝材料用量，并应控制混凝土的总碱量满足表 9.1.2-2 的要求。

9.2.3 采用掺加活性掺合料作为抑制措施时，掺合料的种类、掺量应通过抑制试验确定。粉煤灰掺量不宜少于 20%，或磨细矿渣粉掺量不宜少于 50%。

### 9.3 骨料的碱活性检验

#### 9.3.1 取样

1 从砂砾料料场和人工骨料料场取样时，应符合 DL/T 5388 的有关规定。

2 从成品料堆取样时，应对不同料源分别取样。先将取样部位表层的骨料铲除，对于细骨料（砂），应分别从每批骨料 8 个均



均匀分布的部位取得数量大致相等的细骨料混合成 1 组样品。对于粗骨料（碎石或卵石），应分别从每批骨料 15 个均匀分布的部位取得数量大致相等的粗骨料混合成 1 组样品。样品应混合均匀，再用四分法缩取。

3 每组试样的最小取样量应满足 DL/T 5151 的要求。

### 9.3.2 检验方法

1 骨料的碱活性检验按照 DL/T 5151 中的规定执行。碱—硅酸反应活性检验宜采用“岩相法”、“砂浆棒快速法”和/或“混凝土棱柱体试验法”；碱—碳酸盐反应活性检验宜采用“岩相法”和“碳酸盐骨料的碱活性检验”方法。

2 混凝土碱—骨料反应危害抑制措施有效性试验方法，除采用工程实际骨料、活性掺合料按工程实际混凝土配合比中的掺用情况确定以外，其他应按 DL/T 5151 规定的“砂浆棒快速法”或“混凝土棱柱体试验法”执行。对 1 级和 2 级水工混凝土建筑物，宜采用“混凝土棱柱体试验法”进行不少于 2 年的长期观测。

### 9.3.3 评定标准

按 DL/T 5151 中规定的评定标准进行骨料的碱活性评定。当采用“岩相法”或“砂浆棒快速法”进行碱活性检验时，若评定结果为骨料具有碱活性，则应继续进行“混凝土棱柱体试验法”检验，并以“混凝土棱柱体试验法”评定结果为准。

混凝土碱—骨料反应危害抑制措施有效性试验评定标准如下：当参照“砂浆棒快速法”进行试验时，若 28d 龄期试件长度膨胀率小于 0.10%，则将该掺量下掺合料抑制混凝土碱—骨料反应危害评定为有效。当参照“混凝土棱柱体试验法”进行试验时，若 2 年龄期试件长度膨胀率小于 0.04%，则将该掺量下掺合料抑制混凝土碱—骨料反应危害评定为有效。

## 9.4 施工与质量评定

9.4.1 1 级水工建筑物所用的混凝土砂、石骨料每年均宜进行碱

活性检验。

9.4.2 采用碱活性骨料时，每批出厂水泥、掺合料、外加剂均应提供碱含量检测报告。使用单位应定期对进场混凝土原材料进行验收检验。未经检测的混凝土原材料不得在工程中的应用。

9.4.3 采用碱活性骨料的混凝土工程验收时，应将预防混凝土碱—骨料反应的技术措施、混凝土总碱量控制等资料一并作为工程验收时必备的资料。

## 附录 A

(规范性附录)

## 混凝土的总碱量计算方法

A.1 水泥和掺合料的碱含量按 GB/T 176 进行检验。外加剂的碱含量按 GB/T 8077 进行检验。

A.2 配制混凝土时,水泥、外加剂、掺合料所含碱量中,能参与碱—骨料反应的有效碱含量,宜按以下规定取用:

A.2.1 水泥中所含的碱均为有效碱含量。

A.2.2 粉煤灰中碱含量的 20% 为有效碱含量。

A.2.3 磨细矿渣粉中碱含量的 50% 为有效碱含量。

A.2.4 硅灰中碱含量的 50% 为有效碱含量。

A.2.5 外加剂中所含的碱均为有效碱含量。

A.2.6 其他矿物掺合料的有效碱含量宜通过试验研究确定。

A.3 混凝土的总碱量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 按下式计算:

混凝土的总碱量 = 水泥含碱量 + 外加剂含碱量 + 掺合料中有效碱含量

## 水工混凝土耐久性技术规范

## 条文说明



## 目 录

1 范围	23
5 冻融	24
5.1 一般规定	24
5.2 混凝土原材料	26
5.3 混凝土配合比	28
5.4 施工与质量评定	29
6 环境水侵蚀	30
6.1 一般规定	30
6.2 混凝土原材料	30
6.3 混凝土配合比	31
8 混凝土中钢筋的锈蚀	34
8.1 一般规定	34
8.2 混凝土原材料和配合比	34
8.3 结构构造	35
8.4 施工与质量评定	36
9 碱—骨料反应	38
9.1 一般规定	38
9.2 混凝土原材料和配合比	42
9.3 骨料的碱活性检验	44

## 1 范 围

本标准适用于大、中型水电水利工程，小型水电水利工程和火电厂、核电站、风电场等其他电力行业的水工混凝土和钢筋混凝土结构工程可参照本标准执行，例如火电厂和核电站的取水建筑物、沿海火电厂的煤码头、火电厂的冷却塔、风电场风机的钢筋混凝土底座、位于沿海滩涂上与水接触的输电线路铁塔钢筋混凝土基础等。



## 5 冻 融

### 5.1 一 般 规 定

5.1.1 有抗冻性要求的混凝土对原材料品质要求较高,混凝土含气量对原材料品质和配合比波动敏感,对施工水平的要求也较高。另外,耐冻融混凝土还具有良好的抗渗性和抗风化能力。随着认识水平的提高,抗冻性已逐渐成为混凝土耐久性和质量的评价指标,因此,对于重要工程必须明确规定混凝土的抗冻等级。

工程调查发现,许多按原定设计运行工况不具备饱水条件的水工混凝土结构或部位在实际运行中由于运行条件改变,或被天然降水、渗漏水饱和而遭受严重冻融破坏,如大坝的下游面、溢洪道底板和反弧段,因此要求混凝土结构应做好防渗与排水设计。

5.1.2 混凝土的抗冻等级按照 DL/T 5057—2009 划分,抗冻等级的龄期由设计根据具体工程情况确定,一般常态混凝土为 28d~90d,碾压混凝土为 90d~180d。F400 抗冻等级适用于比 F300 更恶劣的运行环境,如严寒和寒冷地区的抽水蓄能电站混凝土结构的水位变化区。

含盐水质环境,如海水、硫酸盐和盐湖,对混凝土的冻融作用比较复杂,一般表现为加重混凝土的冻融破坏。但也有文献报道在某盐卤水中冻融的混凝土试件,其相对动弹性模量降低和质量损失均减小,这可能与盐卤水的冰点较低有关。因此,本条特别提出,对于海水或盐湖环境中的水工结构,应采用实际环境的水进行混凝土抗冻试验。

DL/T 5150—2001 规定,混凝土相对动弹性模量下降至初始值的 60%或质量损失率达 5%时,即可认为混凝土已经冻坏,并以相应的冻融循环次数作为该混凝土的抗冻等级。但当相对动弹

性模量降低到 60%时,混凝土的抗压强度将降低 40%~50%,劈裂抗拉强度下降 50%~70%,这对于承载的薄壁钢筋混凝土结构偏于不安全。我国水运工程大量采用薄壁钢筋混凝土结构,其规范中以相对动弹性模量降到 75%时的冻融循环次数作为混凝土的抗冻等级。日本土木学会的混凝土标准中规定,对于多次接触水或高饱水环境中厚度小于 20cm 的薄壁结构,经快速冻融试验后的相对动弹性模量应不小于 85%,一般遇水环境应不小于 70%,对重要结构物还应乘 1.1 的系数。美国混凝土结构设计规范 ACI 318 规定,有抗冻要求的混凝土经过 300 次快速冻融后的相对动弹性模量应不小于 60%。因此,从提高工程运行安全考虑,本条规定,对于承载薄壁钢筋混凝土结构,其混凝土在达到规定冻融循环次数后的相对动弹性模量应不低于 80%。

本条中的“薄壁钢筋混凝土结构”指最小尺寸小于或等于最大冻深的结构,对于负温区面积超过结构承载面积 1/3 的钢筋混凝土结构,也应该考虑冻融损伤对结构承载力的影响,适当提高混凝土的抗冻性能。

5.1.3 DL/T 5082—1998 中 6.1.3 规定:“大体积混凝土分区采用不同抗冻等级时,其分区厚度可根据计入太阳辐射作用的热学计算,或根据类似建筑物运行资料确定的负温区再加 0.5m,温和地区的分区厚度不得小于 0.5m。”《混凝土重力坝设计规范》(DL 5108—1999)中 11.5.9 规定:“同一浇筑块中混凝土强度等级不宜超过两种,分区厚度尺寸最小为 2m~3m。”考虑到水工结构物的尺寸一般较大,抗冻等级分区与强度分区应该统一,故本条规定分区厚度不宜小于 2m,厚度小于 2m 的结构宜设为一个分区。

5.1.4 本条与 DL/T 5057—2009 和 DL/T 5082—1998 的规定一致。但应该注意 DL/T 5057 和 DL/T 5082 提出的抗冻等级要求仅仅是最低要求。我国典型地区近 50 年气温及年冻融循环统计结果见表 1。



表1 我国典型地区近50年气温及年冻融循环统计表

地区	极端最低气温 ℃	平均年温差 ℃	年平均负温天数 d	年平均冻融循环次数 次
北京	-27.4	53.2	120	84
长春	-36.5	66.5	172	120
西宁	-26.6	52.1	169	118
宜昌	-9.8	41.8	18	18

年冻融循环次数除了取决于工程所在地域的气候环境外，还与结构表面局部小气候环境密切相关。如丰满大坝上游面为向阳面，1985年10月至1986年4月实测上游坝面正负温变化次数为132次；下游面为背阴面，实测正负温变化次数为21次，坝顶44次。位于吉林省鸭绿江中游的云峰水电站大坝，坝区气候寒冷，年正负温变化次数达80~90次；大坝溢流面朝向东南，受日照时间长，太阳照射使溢流面表面温度升高6℃左右，致使溢流面年正负温度变化次数达135次，发生了比较严重的冻融破坏。

## 5.2 混凝土原材料

5.2.1 本条结合我国当前国情规定了配制有抗冻要求的混凝土宜采用的水泥品种。实际上，使用矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥及复合硅酸盐水泥也能配制出满足一定抗冻等级要求的混凝土，欧洲和北美国家都有较长时间的应用实践。美国规范 ACI 318 仅对暴露在除冰盐环境中的混凝土限制了水泥中混合材（掺合料）最大用量：符合 ASTM C618 的粉煤灰或火山灰不超过25%，符合 ASTM C989 的磨细矿渣粉不超过50%，符合 ASTM C1240 的硅灰不超过10%，粉煤灰或火山灰、磨细矿渣粉和硅灰的总和不超过50%，粉煤灰或火山灰和硅灰的总和不超过35%（同时粉煤灰或火山灰不超过25%，硅灰不超过10%）；而对非除冰盐冻

融环境则没有严格限制。我国目前的水泥生产现状是水泥厂商不能及时提供水泥中混合材的品质和掺量，因此为有效控制工程质量，掺合料宜在工程现场掺加，不宜采用矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等掺有大量混合材的水泥品种。

5.2.2 有抗冻要求的混凝土对原材料品质波动比较敏感，因此保证所用掺合料来源可靠、质量稳定十分重要。磨细矿渣粉比表面积越大，活性越高，但在一定掺量范围内，比表面积过大，会导致混凝土绝热温升、自生体积收缩和干缩显著增大。从温控防裂角度考虑，磨细矿渣粉比表面积不宜超过500m<sup>2</sup>/kg，但低于300m<sup>2</sup>/kg会增加常态混凝土的泌水，且活性明显降低。已在大坝混凝土中成功应用的其他掺合料还有凝灰岩（漫湾）、凝灰岩—磷矿渣双掺料（大朝山）、锰铁矿渣—石灰石粉双掺料（景洪）等。

5.2.3 引气和降低水胶比是提高混凝土抗冻性的必要手段，因此配制抗冻混凝土必须掺用引气剂和高效减水剂；混凝土的含气量水平和水胶比根据设计抗冻等级通过试验确定。

试验室进行混凝土含气量测定和抗冻试件成型均按照标准的试验方法。而实际工程的混凝土出机后，要经过较长距离的运输，到仓面后摊铺平仓，然后振捣密实，且常态混凝土浇筑普遍采用高频振捣器，其中的运输、摊铺和高频振捣都会造成不同程度的含气量损失。含气量损失过大会导致实际浇筑体混凝土的抗冻性能显著降低。

三峡工程混凝土施工检测表明，混凝土机口含气量平均值为4.4%~5.2%，从机口到入仓（皮带机运输）含气量减小约0.5%~0.7%；仓面混凝土经高频振捣器振捣60s，平均含气量由振捣前的4%减小到3.7%，含气量损失0.3%；仓面振捣对混凝土抗冻性的影响见表2。



表2 仓面振捣对混凝土抗冻性的影响

编号	设计要求	级配	水胶比	粉煤灰掺量 %	含气量测试时间	含气量 %	抗冻性能		
							冻融次数	相对动弹模 %	质量损失 %
S322	R <sub>30</sub> 300 F250W10	三	0.45	20	振捣前	2.8	100	58.8	-0.27
S323					振捣后	2.6	100	47.1	-0.02
S331					振捣前	4.1	250	82.4	0.07
S332					振捣后	4.0	250	78.2	0.06
S367	R <sub>30</sub> 150 F100W8	四	0.55	40	振捣前	5.8	300	81.3	3.29
S368					振捣后	5.0	300	83.6	3.76

一般情况下,在混凝土中引入的气泡平均半径越小,气泡就越稳定,含气量损失也越小,且含气量损失对混凝土抗冻性能的影响越不明显。为保证实际浇筑体混凝土的抗冻性,宜选用所引入气泡平均半径小于100 $\mu\text{m}$ 的优质引气剂。

5.2.4 DL/T 5144—2001 规定,粗骨料的吸水率不应超过2.5%, $D_{20}$ 、 $D_{40}$  粒径级的含泥量不应超过1%, $D_{80}$ 、 $D_{150}$  粒径级的含泥量不应超过0.5%;有抗冻要求混凝土的细骨料含泥量不应超过3%。该规定没有对于不同的抗冻等级提出不同的骨料含泥量和吸水率要求。实际上,骨料含泥量和吸水率对混凝土抗冻性能的影响比较显著,因此配制抗冻等级大于F200的混凝土,宜选用低吸水率骨料,并注意严格控制骨料的含泥量。

### 5.3 混凝土配合比

5.3.1 本条对常态混凝土含气量的规定与DL/T 5082—1998一致,补充了最大骨料粒径为10mm的混凝土的含气量要求。和常态混凝土相比,在碾压混凝土中引气相对比较困难,引气剂掺量一般为常态混凝土的数倍,但引入气泡的平均半径较小,因此含

气量可相应降低0.5%~1.0%。

5.3.2 本条对常态混凝土最大水胶比的限制,与DL/T 5082—1998一致。碾压混凝土的掺合料掺量较大,因此水胶比宜相应减小。

### 5.4 施工与质量评定

与DL/T 5144—2001、DL/T 5082—1998的有关规定一致。现场混凝土抗冻性能检验的取样频次和数量,由于不同工程的混凝土方量相差悬殊而存在很大差异。对于大型工程,即使每1万 $\text{m}^3$ 取一组试样也会使现场检测面临繁重的抗冻试验工作量。因此,5.4.4的规定同时采纳了DL/T 5082—1998和DL/T 5144—2001对取样数量的不同规定,具体执行可依实际情况而定。

由于条文说明5.2.3所述的原因,机口与仓面混凝土的含气量或气泡结构可能存在较大差异,尤其是高频振捣后。采用某些高效减水剂和引气剂时,仓面混凝土的含气量损失比较明显。为了控制实际结构混凝土的抗冻性,宜在仓面少量取样进行抗冻性试验对比。



## 6 环境水侵蚀

### 6.1 一般规定

环境水的侵蚀类型和侵蚀程度的判定,以及环境水对混凝土侵蚀性的判别标准依据自 GB 50287—2006。

### 6.2 混凝土原材料

我国新修订的水泥标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)中规定的通用水泥有六个品种:

(1) 硅酸盐水泥有 P·I 和 P·II 两种,其中 P·I 无任何混合材, P·II 允许掺不超过 5% 的粒化高炉矿渣或石灰石粉作混合材。

(2) 普通硅酸盐水泥,允许掺大于 5% 且小于等于 20% 的活性混合材料,其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合该标准中 5.2.4 条的非活性混合材料或不超过水泥质量 5% 且符合该标准中 5.2.5 条的窑灰代替。

(3) 矿渣硅酸盐水泥,生产水泥时允许掺大于 20% 且小于等于 70% 的粒化高炉矿渣等量替代水泥熟料,并分为 A 型和 B 型。

(4) 火山灰质硅酸盐水泥,允许有大于 20% 且小于等于 40% 的火山灰质材料作为混合材等量替代水泥熟料。

(5) 粉煤灰硅酸盐水泥,允许大于 20% 且小于等于 40% 的粉煤灰等量替代水泥熟料。

(6) 复合硅酸盐水泥,由两种(含)以上符合该标准中 5.2.3 条的活性混合材料或/和符合该标准中 5.2.4 条的非活性混合材料组成,其中允许用不超过水泥质量 8% 且符合该标准中 5.2.5 条的窑灰代替。

用户在使用其中掺有混合材的水泥时,往往不清楚所加入的混合材的品种、质量和数量。为有效控制混凝土的质量并发挥混合材的作用,在配制耐侵蚀混凝土时,宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,并将活性矿物材料以掺合料的形式另行掺入。

GB 175 允许硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥中的非活性混合材选用石灰石粉。根据国内外相关的工程调查和研究成果,在气温低于 15℃ 的低温、潮湿环境中,石灰石粉的掺入有导致水泥基材料产生碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀的可能。英国标准 BS 8500-2:2002 Concrete — Complimentary British Standard to BS EN 206-1 中规定,含有 6%~20% 石灰石粉的石灰石粉水泥仅可用于  $\text{SO}_4^{2-}$  含量小于 400 mg/L 的地下水环境。GB/T 50476—2008 规定:“硫酸盐环境中的水泥和矿物掺合料中,不得加入石灰石粉。”因此本标准中规定,在处于低温的硫酸盐侵蚀环境下,宜控制石灰石粉在胶凝材料中的掺量,并进行关于碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀的试验论证。

国内外大量的研究成果表明,矿物掺合料有利于改善混凝土的耐久性。粉煤灰、磨细矿渣粉和硅灰用于水工混凝土,在工程中应用技术较成熟,有相应的产品技术标准以保证掺合料的质量,在配制耐侵蚀混凝土时可优先采用。

### 6.3 混凝土配合比

6.3.1 配合比设计是保证混凝土耐久性的关键环节之一,水工混凝土中掺入适量的矿物掺合料可以改善混凝土施工性能,减少水化热,提高混凝土质量和耐久性能,是提高混凝土耐侵蚀性能的重要技术措施。我国水工混凝土开展掺合料的应用研究较早,现在大中型水电工程混凝土已普遍掺用掺合料。

6.3.2 外加剂对混凝土性能具有良好的改善作用,掺用外加剂是制备高性能混凝土的关键技术之一。掺入减水剂或高效减水剂降



低混凝土水胶比,在混凝土中掺引气剂引入适量的封闭气孔,均有利于提高混凝土的耐久性。掺入其他能提高混凝土密实性和抗渗性的外加剂也能提高混凝土的耐侵蚀性能,但目前外加剂品种繁多,产品质量参差不齐,选用时要注意不同外加剂的使用功能和特点,以及与水泥和其他外加剂复掺时的相容性。

6.3.3 本条参照国内其他行业耐侵蚀混凝土的防护措施,结合水工混凝土的特点而提出。限制混凝土的最大水胶比和胶凝材料用量是国内外设计、施工标准中保证混凝土耐久性的常用做法,本条没有对胶凝材料用量提出限值,是考虑水工混凝土的特点。水工混凝土的最大骨料粒径往往大于其他行业的混凝土,随骨料粒径增加,混凝土达到相同工作性时的用水量降低,胶凝材料用量减少,但混凝土的强度和耐久性能并不会降低。因此本条没有对胶凝材料用量给出最小用量限值。选用较低的水胶比有利于提高混凝土的密实性,降低混凝土的渗透性,对提高混凝土的耐久性是有利的。本条以混凝土最大水胶比限制和抗渗性比一般混凝土高一个等级,作为耐侵蚀混凝土的防护措施之一。

控制水泥熟料中  $C_3A$  含量有利于改善混凝土的抗裂性,提高抗硫酸盐侵蚀性能。GB 748—1996《抗硫酸盐硅酸盐水泥》中也是根据  $C_3A$  含量的不同将抗硫酸盐水泥分为中抗硫酸盐( $C_3A$  小于 5%)和高抗硫酸盐( $C_3A$  小于 3%)两种,并对  $C_3S$  含量提出了控制指标。从熟料矿物成分看,抗硫酸盐水泥也是硅酸盐水泥的一种,我国将其作为一个品种单独列出。中热硅酸盐水泥也对  $C_3S$  和  $C_3A$  含量提出控制要求,我国也作为一个品种单独列出,当采用时可参照抗硫酸盐水泥的  $C_3A$  含量采取相应的防护措施。

6.3.4 对于强侵蚀性环境水,仅靠表 6.3.3 中给出的技术措施难以有效预防环境水侵蚀破坏,因此除对混凝土配合比需要进行试验论证,提高混凝土本身的耐侵蚀性能外,还需考虑采取本条所列的隔离、排水等附加工程措施,降低环境水对混凝土的侵蚀性。

若水工结构的局部构造中存在水分蒸发浓缩条件,中等侵蚀性环境水会转化为强侵蚀性环境水,造成混凝土的严重破坏,也应考虑采用附加工程措施。

6.3.5 本条参照 DL/T 5057—2009 制定。



## 8 混凝土中钢筋的锈蚀

### 8.1 一般规定

8.1.1 针对水工钢筋混凝土的钢筋锈蚀问题,根据不同的设计使用年限进行设计,是规范的发展趋势,GB/T 50476—2008 和 DL/T 5057—2009 都已采用了这样的设计原则。

8.1.2 对环境条件进行更细致的划分,是国内外规范的发展趋势,如欧洲规范 EN 206 和我国规范 GB/T 50476—2008。DL/T 5057—2009 与 DL/T 5057—1996 相比,环境条件类别从 4 类增加到 5 类,既部分适应上述趋势,又兼顾了设计人员的习惯。故本标准采用 DL/T 5057—2009 的规定。

8.1.3 对于海洋环境中的水工建筑物,不同构件或同一构件中的不同部位可能处于不同的环境类别,如火电厂煤码头栈桥的桥墩,可能处于水位变动区(四类环境)或浪溅区(五类环境),对此需采取不同的措施。

严酷环境下,通过及时的检测与维护可避免过早、过严重的破坏,延长建筑物的使用寿命,因此应提出这方面的要求。

### 8.2 混凝土原材料和配合比

8.2.1 工程经验表明,采用大掺量磨细矿渣粉高性能混凝土和以粉煤灰、磨细矿渣粉、硅灰等多元复合的矿物掺合料混凝土,是提高氯化物环境下水工建筑物耐久性的一个有效措施。

抗硫酸盐水泥  $C_3A$  含量低(小于等于 5%),而混凝土中  $C_3A$  有利于提高混凝土抗氯盐能力,所以不宜单独采用。

8.2.2 值得注意的是,在限制混凝土中最大氯离子含量时,DL/T 5057—2009 以占水泥质量的百分比作为指标,而 GB/T 50476—

2008 则以占胶凝材料质量的百分比作为指标,后者考虑到了胶凝材料中含有较多矿物掺合料的情况。

混凝土中氯离子含量,可对所有原材料的氯离子含量进行实测,然后加在一起确定;也可以从新拌混凝土和硬化混凝土中取样化验测得。GB/T 50476—2008 对氯离子的具体测试方法作出了规定。

氯离子能与混凝土中胶凝材料中的某些成分结合,所以从混凝土中取样测得的水溶氯离子量要低于测自原材料中的数值。为偏于安全,对重要工程也可用酸溶值控制。

8.2.3 对于接触氯化物的四、五类环境,GB/T 50476—2008 的规定比 DL/T 5057—2009 更严格。

8.2.4 根据国内外的发展趋势,本标准采用 RCM 法作为抗氯离子侵入性指标。最近几年在国内用得较多的 ASTM C1202 快速电量法的缺点较多,用于水胶比低于 0.4 的矿物掺合料混凝土时误差较大。GB/T 50082—2009 规定的 RCM 法与国际上的有关标准一致。

### 8.3 结构构造

8.3.2 对于接触氯化物的三、四、五类环境,本条借鉴了 GB/T 50476—2008 从保证耐久性的角度出发对有关构造作出的详细规定。

细直径钢筋对锈蚀比较敏感,故对受力主筋限制了最小直径。

GB/T 50476—2008 对保护层厚度的要求比 DL/T 5057—2009 等电力行业标准的要求严格。且 GB/T 50476—2008 在钢筋的混凝土保护层厚度定义中,除了纵向受力钢筋外,还包括了箍筋和分布钢筋;在后张法预应力筋的保护层厚度定义中,不是从钢筋表面算起,而是从套管或孔道外边缘算起。

暴露面积越大,越增加氯化物侵蚀的机会;表面凹陷部位易造成水分和盐分积累;棱角部位受到两个侧面的环境作用容易造



成碰撞损伤,且在氯盐环境下容易受两个方向的氯盐侵入,因此在可能条件下应尽量避免上述情况。

大量调查表明,当混凝土结构物处于容易导致钢筋锈蚀的环境时,仅仅依靠混凝土自身难以确保长期有效地保护钢筋,宜采取外加防腐蚀措施。具体可参考JTJ 275《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》。

实际工程中,后张预应力混凝土构件由于预应力筋的锈蚀产生了一些耐久性问题,且对结构物的安全影响较大。GB/T 50476—2008对此进行了专门规定。

结构缝设置宜避开海水水位变动区、浪溅区等局部环境作用不利的部位;难以避开时,应采取设置止水片等措施。

埋入混凝土中并部分暴露在外的一切铁件等的锈蚀都将扩散,若与配筋接触,则构成宏观腐蚀电耦,加剧配筋锈蚀,并加速埋入件的腐蚀。

#### 8.4 施工与质量评定

8.4.2 在DL/T 5144—2001基础上,对于接触氯化物的三、四、五类环境,本条进行了一些必要的补充规定。

减少保护层厚度的施工偏差,对保障耐久性有重要意义,故应通过控制垫块的制作和安装、加强保护层厚度准确性控制。工程塑料与保护层混凝土的界面黏结不如砂浆—混凝土界面,界面可能成为氯离子和水分侵入的通道,故不宜采用工程塑料制作垫块。目前的海工混凝土结构施工中,垫块数量就是按照至少4个/m<sup>2</sup>控制的。

GB/T 50476—2008对保护层厚度的施工质量验收考虑了施工负偏差,且按最外侧钢筋控制,要求更为严格。

GB/T 50476—2008从保证耐久性的角度出发,对预应力混凝土结构的施工进行了更严格更具体的规定,应予遵守。

沿海施工中,为了控制海砂的使用和避免骨料受含盐水汽的

污染,检测混凝土拌合物氯离子含量是一个有效措施,日本和我国台湾地区的有关标准中也采用了这项措施。

由于氯离子扩散系数的检测和相应的验收评定实践经验还有限,目前的国家和行业标准中,对氯离子扩散系数的检测频次尚无一致性的意见。本条从必要性和可行性出发,规定连续施工过程中的检测频率为每周一次。



## 9 碱—骨料反应

### 9.1 一般规定

9.1.1 碱—骨料反应是引起混凝土耐久性下降的主要原因之一，因为碱—骨料反应的危害不仅在于使混凝土结构的强度大大降低，而且由于出现裂缝加剧了环境水及其他介质的侵蚀和冻融等破坏作用，从而大大缩短了混凝土建筑物的使用寿命。自20世纪40年代美国首次发现碱—骨料反应以来，先后在加拿大、法国、南非、英国、澳大利亚、西班牙、瑞士等国家都发生了碱—骨料反应引起的混凝土开裂和破坏的工程实例。我国从1990年代开始，陆续在北京、天津、山东、陕西、内蒙古、河南等地相继发现了立交桥、机场、大型预应力混凝土铁路桥梁和轨枕、工业和民用建筑因碱—骨料反应而破坏，造成惊人的损失。因此，本标准规定混凝土宜采用非碱活性骨料。如无法避免而使用碱活性骨料时，应采取有效的抑制措施，并通过试验论证。

9.1.2 本条参考国内外的分类方法，制定了针对碱—骨料反应的环境分类。

大坝混凝土体积庞大，内部水分几乎不散失，因此大坝混凝土所处的环境应划分为潮湿环境。含碱环境如直接与高含盐碱地、海水、含碱工业废水等接触的环境。

国际上针对碱—骨料反应对环境的分类不尽相同，但基本类似，见表3。

表3 国际上针对碱—骨料反应确定的环境分类

国家/地区	环境分级	定义或解释
RILEM	3类： E1：不会与外来水分接触 E2：暴露于外界水分  E3：暴露于外界水分，并且有加劇的因素	——室内混凝土，或有覆盖保护的混凝土； ——室内混凝土，但是室内湿度大；暴露于大气中或者没有侵蚀性的泥土中；至少一个方向尺寸为1m或以上的大体积混凝土内部； ——暴露于除冰盐、海水、盐雾；有冻融循环并且潮湿；高温并且潮湿
加拿大	3类： 1：非大体积，干燥 2：大体积，干燥 3：所有混凝土暴露于湿润空气或被掩埋、浸泡	“大体积”构件至少有一个方向的尺寸 $\geq 1\text{m}$ ； “干燥”环境指构件四周平均相对湿度 $<60\%$ ，一般指建筑物内部环境； 干燥环境中，大体积混凝土因内部湿度较高仍有可能存在碱—硅酸反应的危险； 一个非大体积构件长期浸泡在海水中时并不比暴露于潮湿空气、埋于地下、浸于纯水中更有碱—硅酸反应风险，因为海水中的碱浓度（NaCl浓度 $<32\text{g/L}$ ，相当于 $0.55\text{M}$ NaCl或Na）比大多数混凝土孔溶液的碱度要低，而环境中氯离子扩散深度一般限于几个厘米
丹麦	3类： 惰性环境  中等环境  侵蚀性环境	——包括干燥、非侵蚀性环境，一般为室内环境； ——包括潮湿、非侵蚀性室内外环境、流动的或者静止的淡水环境； ——包括含有盐和烟雾的气体、海水以及含盐水
法国	4类： 1级 2级 3级 4级	——干燥或者微湿（RH $<80\%$ ）； ——潮湿或与水接触； ——潮湿并且有冻融和除冰盐； ——海上环境
德国	3类： D：干燥 M：潮湿 M+A：潮湿并且有外部碱源	——建筑物内部； ——外表暴露的部位； ——暴露于海水或者除冰盐



表3(续)

国家/地区	环境分级	定义或解释
爱尔兰	2类: 1级	——在结构物的整个服役期间内,除短时间外,相对湿度低于80%,或者结构物与潮湿环境隔离; ——其他环境
	2级	
香港 (Read 和 Anderson 2002年建议)	3类: 干燥	——可以保持干燥,变湿的风险很小,比如大气环境下的建筑物内部; ——潮湿环境,接触雨水或者地下水; ——潮湿环境并且有盐类或者化学物质的侵蚀,如港口
	暴露 严重	
	3类: E1 E2	——非大体积,干燥; ——大体积,干燥;所有混凝土暴露于湿空气、冷凝水、雨水、自来水、地下水或者其他水源; ——暴露于潮湿环境,并且有外界侵蚀如冻融循环、海港工程干湿循环、长期高温等
	E3	
新西兰		“大体积”构件至少有一个方向的尺寸 $\geq 0.5\text{m}$ ; “干燥”环境指构件四周平均相对湿度 $< 60\%$ ,并且不暴露于外部水源; 干燥环境中大体积混凝土因内部湿度较高仍有可能存在碱—硅酸反应的危险; 一个非大体积构件长期浸泡在海水中时并不比暴露于潮湿空气、埋于地下、浸于纯水中更有碱—硅酸反应风险,因为海水中的碱浓度( $\text{NaCl}$ 浓度小于 $32\text{g/L}$ ,相当于 $0.55\text{M NaCl}$ 或 $\text{Na}$ )比大多数混凝土孔溶液的碱度要低,而环境中氯离子扩散深度一般限于几个厘米

本条对混凝土的最大总碱量的限值参照国内外相关标准制定。国际上,对于混凝土安全碱含量问题,仍是有争议的。英国交通部和水泥学会都认为混凝土的总碱量控制在 $3.0\text{ kg/m}^3$ 以下是安全的。新西兰水泥和混凝土协会规定混凝土的总碱量低于 $2.5\text{ kg/m}^3$ 是安全的。南非标准(SABS 0100-Part II)中则规定混凝土的总碱量必须低于 $2.1\text{ kg/m}^3$ 才是无害的。国际材料与结构研

究实验室联合会(RILEM)2003年4月提出的《减少混凝土中碱—骨料反应的国际标准》草案中,对于不同活性的骨料提出了不同的总碱量限制指标。对于低活性骨料,没有对混凝土总碱量的限度提出要求;对于中等活性骨料,混凝土总碱量的限度为 $3.0\text{ kg/m}^3$ 或 $3.5\text{ kg/m}^3$ ;对于高活性骨料,混凝土总碱量的限度为 $2.5\text{ kg/m}^3$ 。

早在1993年,我国就提出了《混凝土碱含量限值标准》(CECS 53:93),该标准中对混凝土总碱量的限值见表4。

表4 混凝土总碱量限值(CECS 53:93)  $\text{kg/m}^3$ 

环境条件	混凝土最大总碱量		
	一般工程	重要工程	特殊工程
干燥环境	不限制	不限制	3.0
潮湿环境	3.0 (条件不许可时,可放宽至3.5)	3.0	2.1
含碱环境	3.0 (要求对混凝土进行表面涂层以防碱渗入,否则需换用非活性骨料)		换用非活性骨料

《高强混凝土结构技术规程》(CECS 104:99)中规定:为防止破坏性碱—骨料反应,当结构处于潮湿环境且骨料有活性时,混凝土的总碱量不宜大于 $3.0\text{ kg/m}^3$ ,超过时应采取抑制措施。

《铁路混凝土工程预防碱—骨料反应技术条件》(TB/T 3054—2002)中对混凝土总碱量的限值还与结构类型有关。该标准规定混凝土结构分为三类:I类结构——普通钢筋混凝土结构物,II类结构——大中型钢筋混凝土结构及重要预制构件,III类结构——不允许发生开裂破坏的工程及重要预制构件。对总碱量的限值见表5。



表5 混凝土总碱量限值 (TB/T 3054—2002)  $\text{kg/m}^3$ 

骨料类型	碱—硅酸反应活性骨料			碱—碳酸盐反应活性骨料		
结构类型	I类	II类	III类	I类	II类	III类
干燥环境	不限制	3.5	3.0	不限制	用非碱活性骨料	
潮湿环境	3.5	3.0	2.1	用非碱活性骨料		
含碱环境	3.0	用非碱活性骨料		用非碱活性骨料		

注 1：处于含碱环境中的 I 类结构在限制混凝土总碱量的同时，应对混凝土表面作防水防腐涂层处理，否则应换用非碱活性骨料。

注 2：当钢筋混凝土及预应力混凝土桥跨结构混凝土所用骨料具有碱活性时，混凝土的总碱量不得超过  $3.0\text{kg/m}^3$ ，否则应换用非碱活性骨料。

清华大学冯乃谦等采用小混凝土柱法检验矿物质超细粉对碱—碳酸盐反应的抑制作用, 即使沸石粉掺量高达30%、磨细矿渣粉掺量高达60%、硅灰掺量高达30%, 都不能有效抑制碱—碳酸盐反应的膨胀。唐明述等研究了低碱水泥、粉煤灰和磨细矿渣粉对碱—碳酸盐反应膨胀的影响, 使用低碱水泥, 粉煤灰对水泥的取代量为70%, 磨细矿渣粉对水泥的取代量为90%时, 才能有效降低碱—碳酸盐反应膨胀, 这在实际工程中很难实现。Graffan 和 Cadu 的研究结果表明, 若要阻止混凝土的碱—碳酸盐反应膨胀, 混凝土中的有效碱必须低于  $0.8\text{kg/m}^3$ , 相当于总碱量为  $1.3\text{kg/m}^3$ , 这在实际工程中也很难满足。国内外大量试验结果表明, 对抑制碱—硅酸反应有效的锂盐和火山灰质材料对抑制碱—碳酸盐反应不起明显作用。到目前为止, 仍没有一种实际工程中切实可行的抑制碱—碳酸盐反应膨胀的措施。因此, 本条规定在潮湿、含碱环境中的工程不得使用具有碱—碳酸盐反应活性骨料。

## 9.2 混凝土原材料和配合比

9.2.1 水泥是混凝土中碱的主要来源, 目前, 有关混凝土碱—骨料反应或耐久性的相关标准、规范中, 对水泥碱含量的控制基本均采用《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007) 中对低碱水泥的规

定, 即水泥中碱含量不大于0.6%。

由外加剂带入混凝土中的碱含量是不容忽视的。由于外加剂用量较小, 致使人们常常忽视外加剂对碱—骨料反应的影响。其实, 某些外加剂带入混凝土的碱量有时要多于水泥带入的碱量, 如以硫酸钠为主要成分的早强剂, 以铝酸钠为主要成分的速凝剂, 以硝酸钠、亚硝酸钠、碳酸钾为主要成分的防冻剂, 这类外加剂中含有的可溶钾、钠含量往往较高, 且这类外加剂本身的掺量也较高, 一般占胶凝材料用量的2%~5%, 使混凝土的总碱量大大增加。根据统计, 每立方米混凝土中由高碱外加剂带入的碱量可高达  $1\text{kg/m}^3$ ~ $16\text{kg/m}^3$ 。因此, 当使用碱活性骨料时, 应严格控制外加剂中的碱含量。《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2003) 中规定: 当使用碱活性骨料时, 由外加剂带入的碱含量不得超过  $1.0\text{kg/m}^3$ 。三峡工程标准规定, 外加剂中硫酸钠含量应小于8%。南水北调工程中线干线工程标准《预防混凝土工程碱骨料反应技术条例(试行)》要求高效减水剂含碱量不超过10%。

海水或海砂带入的碱都是能参与碱—骨料反应的有效碱。在英国建筑研究所 BRE 的指南性文件 BRE Digest 330 中, 通过测试受海水污染的骨料中的氯离子含量, 折算出其碱含量, 并计入混凝土的总碱量。在缺乏适当骨料的地区, 若使用海砂, 应经充分冲洗, 控制海砂带入的碱量, 满足混凝土总碱量的要求。

9.2.3 本条是根据以往大量试验结果并参照国内其他相关标准制定的。

试验表明, 粉煤灰对抑制混凝土的碱—硅酸反应具有良好的效果, 但只有当粉煤灰的掺量达到一定量时, 才能有效抑制混凝土的碱—硅酸反应。同一掺量下, I级粉煤灰和II级粉煤灰抑制碱骨料反应的效果基本相同。因此, 粉煤灰的掺量因素大于品质因素对抑制效果的影响。国内结合南水北调中线工程、锦屏一级水电站等诸多工程, 参照“砂浆棒快速法”, 用不同粉煤灰掺量等量替代水泥进行碱活性骨料抑制效能的大量试验结果表明, 对于



14d 膨胀率在 0.10%~0.20% 的活性骨料, 20% 掺量的 I、II 级粉煤灰对骨料的碱—硅酸反应具有很好的抑制效果, 膨胀曲线 1 年龄期仍平缓; 对 14d 膨胀率大于 0.20% 的活性骨料, 粉煤灰掺量为 5%~15% 时, 其 28d 膨胀率大多介于 0.10%~0.20% 之间, 抑制效果不明显; 粉煤灰掺量 20% 时, 其 28d 膨胀率小于 0.10%, 抑制有效, 但多数膨胀曲线仍不收敛; 粉煤灰掺量 30% 以上时, 粉煤灰有明显的抑制作用; 粉煤灰掺量 35% 以上时, 试件基本不发生膨胀。

国内外针对磨细矿渣粉对碱—骨料反应抑制效果的大量试验研究表明, 磨细矿渣粉掺量达到 50% 以上时, 才可有效抑制碱—硅酸反应。以中国水利水电科学研究院针对多个水电站玄武岩碱—硅酸反应活性骨料的砂浆棒快速法研究为例, 玄武岩骨料 14d 膨胀率大于判定值 0.2%, 为碱—硅酸反应活性骨料, 当用不同磨细矿渣粉等量替代水泥 20%、30%、40% 时, 均不能有效抑制骨料的碱—硅酸反应, 只有当磨细矿渣粉掺量达到 50% 以上时才可有效抑制。

北京市工程建设标准《预防混凝土结构工程碱集料反应规程》(DBJ 01—95—2005) 中规定: 采用矿物掺合料抑制措施时, 粉煤灰掺量宜在 20% 以上, 或磨细矿渣粉掺量在 50% 以上, 或硅灰取代水泥 10% 以上, 同时控制混凝土总碱量。《混凝土碱含量限值标准》(CECS 53:93) 中规定: 一般情况下, 要求矿渣粉对水泥的置换率(重量)不小于 50%, 粉煤灰不小于 20%, 硅灰为 10%。

### 9.3 骨料的碱活性检验

9.3.1 成品料场取样方法参照《铁路混凝土工程预防碱—骨料反应技术条件》(TB/T 3054—2002) 制定。

9.3.2 关于骨料碱—硅酸反应活性鉴别方法, DL/T 5151—2001 规定了“岩相法”、“化学法”、“砂浆长度法”、“砂浆棒快速法”以及“混凝土棱柱体试验法”, 其中的“化学法”和“砂浆长度

法”由于与实际工程中的情况对应性差或检测慢反应性的碱—硅酸盐活性骨料时容易漏判, 在美国、加拿大等国外的规范中已经弃用, 因此本标准中不推荐使用此两种方法。

关于碱—硅酸反应活性抑制试验方法, DL/T 5151—2001 中只规定了“抑制骨料碱活性效能试验”一种方法。由于该方法主要借鉴了 1959 年美国 ASTM C 441 试验规范, 采用高活性的石英玻璃砂和高碱水泥进行试验, 与实际工程情况相差较大, 其所用骨料、判据以及可靠性受到广泛质疑, 一般认为该方法只适用于特定的骨料和特定的配合比。加拿大、美国等已经将其废除, 并参照砂浆棒快速法 (ASTM C 1260) 发展了新的试验规范 ASTM C 1567—08 和 CSA A23.2—28A (2004 年)。因此, 本条借鉴 ASTM C 1567 和 CSA A23.2—28A, 推荐参照 DL/T 5151—2001 中的“砂浆棒快速法”进行碱活性抑制试验; 同时借鉴 ASTM C 1293 和 CSA A23.2—14A, 推荐参照 DL/T 5151—2001 中的“混凝土棱柱体试验法”进行碱活性抑制试验。

和“砂浆棒快速法”相比, “混凝土棱柱体试验法”的试验条件与实际情况更接近。因此对于重要的水电工程, 如 1 级、2 级水工混凝土建筑物, 若采用“砂浆棒快速法”抑制混凝土碱—骨料反应危害评定为有效后, 工程即可实施, 但同时还宜采用“混凝土棱柱体试验法”进行不少于 2 年的长期观测。

9.3.3 进行骨料碱活性检验时, 由于“砂浆棒快速法”采用 80℃、1Mol NaOH 溶液浸泡砂浆试件, 试验龄期短、试验条件偏离实际情况较远, 而“混凝土棱柱体试验法”采用 38℃、相对湿度不小于 95% 的环境下养护混凝土试件, 试验龄期长, 试验条件与实际情况更接近, 因此, 国际材料与结构研究试验室联合会 (RILEM) 制定的 AAR—0《测试方法综合使用指南》(2004 年) 规定, 当两种方法得出的结果不同时, 应以“混凝土棱柱体试验法”为准。加拿大 CSA A23.2—27A 也明确规定使用“混凝土棱柱体试验法”作为骨料是否具有碱活性的最终判据。



当使用“砂浆棒快速法”判断抑制措施有效性时,美国 ASTM C 1567 和加拿大 CSA A23.2-28A 规定的判据为 14d 膨胀率低于 0.10%, 美国联邦航空局西北分局和内布拉斯加州公路局规定的判据为 28d 膨胀率低于 0.10%, 我国南水北调中线工程采用的判据也是 28d 膨胀率低于 0.10%。

当使用“混凝土棱柱体试验法”判断抑制措施有效性时,美国 ASTM C 1293、加拿大 CSA A23.2-28A 等标准规范中都规定判据为 2 年膨胀率低于 0.04%。本条参照这些国外规范制定。