

# 试论沿海水工建筑物低渗透高密实表层混凝土 施工质量控制要点

朱炳喜

(江苏省水利科学研究院, 江苏 扬州 225002)

**摘要:** 总结提升沿海涵闸混凝土耐久性和低渗透高密实表层混凝土施工技术研究成果, 以及应用项目掘苴新闸下移工程和三里闸拆建工程2座沿海挡潮闸混凝土配合比优化设计、施工质量控制的经验, 提出江苏沿海水工建筑物低渗透高密实表层混凝土施工质量控制要点。

**关键词:** 沿海水工建筑物; 低渗透高密实; 表层混凝土; 质量控制

**中图分类号:** TV431 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 11-0001-08

## Discussion on construction quality control points of low permeability and high dense surface concrete in coastal hydraulic structures

ZHU Bingxi

(Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Yangzhou 225002, Jiangsu)

**Abstract:** Through summarizing and promoting the research results of concrete durability of coastal sluice and construction technology of low permeability and high dense surface concrete, applying the experience of optimum design of concrete mix ratio and construction quality control for 2 coastal tidal gates such as Juejuxin sluice move down project and Sanli sluice demolition project, the construction quality control points of low permeability and high dense surface concrete in Jiangsu coastal hydraulic structures were put forwards.

**Key words:** coastal hydraulic structures; low permeability and high dense; surface concrete; quality control

## 0 引言

江苏沿海海岸线全长约 954 km, 建设大量的挡潮闸等水工建筑物, 混凝土受碳化、氯离子侵蚀、冻融侵蚀、化学侵蚀等劣化作用。作者在总结“提升沿海涵闸混凝土耐久性关键技术”和“低渗透高密实表层混凝土施工技术”2项科研项目研究成果及其在如东掘苴新闸下移工程和大丰三里闸拆建工程应用情况的基础上, 提出实现表层混凝土

低渗透高密实是提高沿海水工混凝土抗侵蚀能力的关键技术, 混凝土选用优质常规原材料, 配合比应以耐久性为目标, 开展配合比优化设计, 采用低用水量低水胶比和中等矿物掺合料用量配制技术, 加强混凝土生产、浇筑和养护等施工过程质量控制, 严重腐蚀环境在模板内侧粘贴透水模板布, 进一步提高表层混凝土的密实性。

## 1 混凝土原材料选择要点

收稿日期: 2017-08-11

**基金项目:** 江苏省水利科技项目: 提升沿海涵闸混凝土耐久性关键技术研究与应用(2015029), 低渗透高密实表层混凝土施工技术研究及应用(2013018)

**作者简介:** 朱炳喜(1966-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事混凝土耐久性和施工技术研究。

### 1.1 胶凝材料

水泥宜优先选择 52.5 级普通水泥或硅酸盐水泥, 水泥中的混合材宜为矿渣或粉煤灰, 比表面积小于  $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 标准稠度用水量小于 28%, 游离氧化钙含量小于 1.5%, 碱含量小于 0.6%, 混凝土拌和时水泥温度不宜高于  $60^\circ\text{C}$ 。

宜选用 F 类 I 级、II 级粉煤灰, 烧失量小于 3.0%; S95 级矿渣粉的比表面积宜小于  $450 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

### 1.2 骨料

应选用质地坚硬密实、颗粒级配连续、吸水率低、空隙率小、粒形良好、清洁的骨料, 不应使用碱活性骨料。骨料品质应符合《水利工程预拌混凝土应用技术规范》(DB32/T 3261-2017) 的规定。

细骨料宜为细度模数 2.5 ~ 3.0 的 II 区天然河砂, 钢筋混凝土不应使用海砂。粗骨料宜使用单级石灰岩碎石 2 级配或 3 级配混合配制, 钢筋混凝土中粗骨料最大粒径宜符合表 1 的规定。

表 1 钢筋混凝土中粗骨料最大粒径

钢筋保护层厚度 (mm)	25	30	35	40	45	50	$\geq 55$
粗骨料最大粒径 (mm)	16	16	20	20	25	25	31.5

### 1.3 外加剂

钢筋混凝土宜选用高效减水剂或高性能减水剂, 有抗冻要求的混凝土应使用引气剂。

### 1.4 水

混凝土拌和与养护用水不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害物质, 氯离子含量不超过  $1000 \text{ mg/L}$ , 硫酸根离子含量不大于  $2200 \text{ mg/L}$ , pH

值不小于 4。

## 2 沿海水工混凝土所处环境

江苏沿海挡潮闸下游海水中氯离子含量  $2000 \sim 18600 \text{ mg/L}$ , 在干湿交替环境下对钢筋混凝土结构内的钢筋具有中等或强的腐蚀性; 硫酸根离子含量  $300 \sim 2600 \text{ mg/L}$ , 对混凝土构成中等或强腐蚀。地下水中硫酸根离子含量  $130 \sim 2380 \text{ mg/L}$ , 对混凝土结构具有弱或中等腐蚀性。沿海水工混凝土所处环境作用等级可按最严重的氯盐环境或硫酸盐环境取值, 详见表 2<sup>[1]</sup>。

## 3 配合比设计要点

### 3.1 氯盐侵蚀环境混凝土低用水量低水胶比配制原则

沿海水工混凝土配制以提高密实性、耐久性和防裂为目的, 满足施工阶段工作性能、抗裂性能

和服役阶段抗碳化、抗氯离子侵蚀、抗冻、抗渗和抗硫酸盐侵蚀等耐久性能要求。

混凝土配合比推荐采用“一优四掺一中二低”配制技术, 即: 选用优质常规原材料, 掺入高性能减水剂和优质引气剂, 复合掺入粉煤灰、矿渣粉, 矿物掺合料中等掺量, 配合比参数采取低用水量和低水胶比。

表 2 江苏沿海水工混凝土环境作用等级

环境类别	环境条件	环境作用等级	构件示例
氯化物环境	长期在水下或土中	III -C	底板、灌注桩、沉井等水下或土中的构件
	海水水位变化区, 轻度盐雾作用区	III -D	闸墩、翼墙、胸墙、排架、工作桥
	海水浪溅区, 重度盐雾作用区	III -E	闸墩、翼墙、胸墙、排架、工作桥
硫酸盐侵蚀环境	$\text{SO}_4^{2-}$ 含量: 水中 $200 \sim 1000 \text{ mg/L}$ , 土中 $300 \sim 1500 \text{ mg/kg}$	IV -C	底板、灌注桩、沉井、地下连续墙、闸墩、翼墙
	$\text{SO}_4^{2-}$ 含量: 水中 $1000 \sim 4000 \text{ mg/L}$ , 土中 $1500 \sim 6000 \text{ mg/kg}$	IV -D	底板、灌注桩、沉井、地下连续墙、闸墩、翼墙
	$\text{SO}_4^{2-}$ 含量: 水中 $\geq 4000 \text{ mg/L}$ , 土中 $\geq 6000 \text{ mg/kg}$	IV -E	底板、灌注桩、沉井、地下连续墙、闸墩、翼墙

尤其重要的是尽可能降低混凝土的用水量, 因为只有降低用水量才能减少胶凝材料的用量, 也才能降低混凝土的水化热。在固定混凝土中胶凝材料的组成 (PO42.5 水泥 250 kg/m<sup>3</sup>+ 粉煤灰 70 kg/m<sup>3</sup>+ 矿渣粉 70 kg/m<sup>3</sup>)、砂率以及拌和物的坍落度 (180 mm) 相同条件下, 比较 7 组不同水胶比和用水量的混凝土 56 d 电通量和 84 d 氯离子扩散系数测试, 结果见图 1、图 2。在试验条件下, 随着用水量的增加, 混凝土水胶比也随之增加, 混凝土电通量和氯离子扩散系数均显著增加, 图 1、图 2 表明随着单位用水量的增加, 混凝土抗氯离子渗透性能降低, 也说明控制混凝土用水量和水胶比是氯盐环境混凝土配合比设计的关键。

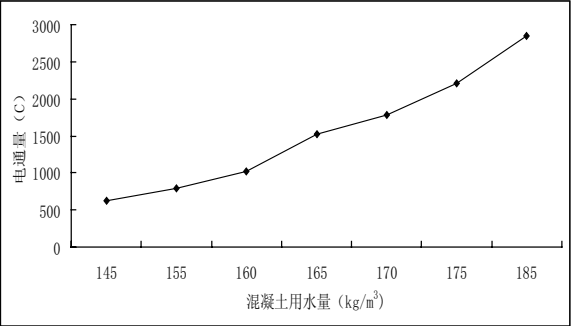


图 1 混凝土用水量与电通量关系图

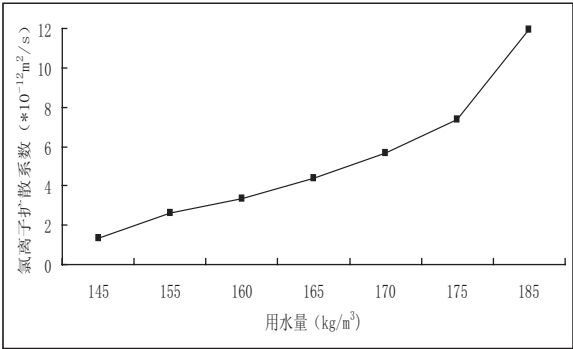


图 2 混凝土用水量与氯离子扩散系数关系图

3.2 配合比设计考虑的因素与对策

混凝土配合比设计阶段通过优化设计, 筛选耐久性能和抗裂性能满足要求的原材料和配合比, 混凝土配合比设计考虑的因素以及采取的技术措施见表 3。

3.3 混凝土耐久性能试验

3.3.1 氯离子扩散系数

配合比设计混凝土氯离子扩散系数试配值按式(1)计算:

$$D_{cu, o} \leq D_{cu, k} - k\sigma \tag{1}$$

式中:

$D_{cu, o}$ —混凝土氯离子扩散系数配制值;

表 3 沿海水工混凝土配合比设计考虑因素与技术措施

序号	结构部位	特点	配制要求	试验参数		技术措施
				拌和物	硬化混凝土	
1	灌注桩地连墙	采用混凝土顶升, 依靠自重形成密实混凝土	流动性好、粘聚性好, 具有自密实性, 可能有抗硫酸盐侵蚀要求	坍落度 扩展度 坍落度损失 凝聚性与保水性	强度 抗硫酸盐等化学侵蚀性能	控制水胶比和用水量 掺合料掺量 >35% 减水剂减水率 ≥ 20%
2	底板消力池	体积大 水化热温升高 一次浇筑量大 浇筑时间长	工作性好、水化热低、抗裂性好, 耐久性能满足要求	坍落度 坍落度损失 凝结时间 含气量 凝聚性与保水性	强度 抗渗等级 抗硫酸盐等化学侵蚀性能 温升 早期抗裂性能 收缩率	控制水胶比和用水量 掺合料掺量 >35%, 减少水泥用量, 适当增加粉煤灰用量 减水剂减水率 ≥ 20% 控制入模温度
3	闸墩 站墩翼墙 排架胸墙 工作桥 公路桥	体积较大 水化热温升可能较高 浇筑时间较长 散热面积大 墩墙受先浇混凝土约束易裂 桥梁钢筋密集养护要求高	工作性好、水化热低、抗裂性好、体积稳定性好, 耐久性能满足要求	坍落度 坍落度损失 凝结时间 含气量 凝聚性与保水性	强度 耐久性能指标 温升 (排架、胸墙、桥梁除外) 早期抗裂性能 收缩率	控制水胶比和用水量 掺合料掺量 >30%, 减水剂减水率 ≥ 25% 掺入引气剂 掺入抗裂纤维 控制入模温度

$D_{cu, k}$ —设计要求的混凝土氯离子扩散系数, 设计未要求的按表 4 选取<sup>[1]</sup>;

$k$ —氯离子扩散系数保证率系数。当保证率为 85%、95% 时,  $k$  值分别取 1.04、1.645;

$\sigma$ —氯离子扩散系数标准差。按统计资料取值, 若无近期统计资料, C30 及以下的混凝土取  $0.3 \times 10^{-12} \sim 0.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ; C35 ~ C50 混凝土取  $0.2 \times 10^{-12} \sim 0.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[2]</sup>。

### 3.3.2 混凝土电通量

混凝土电通量应符合设计要求; 设计未规定的, 建议按表 4 取值。

### 3.3.3 碳化试验

混凝土抗碳化性能应符合设计要求; 设计未规定的, 设计使用年限 100 年、50 年的混凝土, 对应的人工快速试验碳化深度应分别小于 10 mm 和 20 mm<sup>[1]</sup>。

### 3.3.4 抗冻试验

混凝土抗冻性能应符合设计要求; 设计未规定的宜符合表 5 的规定<sup>[1]</sup>。

### 3.3.5 抗渗试验

混凝土抗渗性能应符合设计要求。

### 3.4 混凝土早期抗裂与收缩性能对比试验

配合比设计阶段宜通过早期抗裂和收缩率的对比试验选择体积稳定性较好的配合比。混凝土早期抗裂性能与收缩率应满足设计要求; 设计未规定的, 建议早期刀口抗裂试验单位面积上的总开裂面积宜在  $100 \sim 400 \text{ mm}^2/\text{m}^2$  之间, 非接触法 72 h 收缩率小于  $300 \times 10^{-6}$ 。

### 3.5 混凝土配合比推荐参数

(1) 目前混凝土配合比参数存在的问题: 图 3、图 4 分别为作者调研的近几年水利工程应用预拌混凝土的用水量和水胶比统计频率直方图, 大部分混凝土的用水量高于《水工混凝土耐久性技术规范》(DB32/T 2333-2013) 的要求, 混凝土的水胶比大部分也超出《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》(SL654-2014) 不大于 0.45 的规定。

(2) 沿海水工混凝土配合比主要配制参数及拌合物主要性能指标建议, 见表 6<sup>[3]</sup>。

表 4 混凝土抗氯离子渗透性能控制指标

设计使用年限	100 年		50 年	
环境作用等级	Ⅲ -D	Ⅲ -E	Ⅲ -D	Ⅲ -E
84 d 龄期氯离子扩散系数 ( $\times 10^{-12}, \text{m}^2/\text{s}$ )	$\leq 4.5$	$\leq 3.5$	$\leq 5.0$	$\leq 4.5$
56 d 龄期电通量 (C)	$< 1200$	$< 800$	$< 1500$	$< 1000$

表 5 混凝土抗冻性能等级

环境条件	六垛闸以南沿海水工混凝土		六垛闸以北沿海水工混凝土	
	100 年	50 年	100 年	50 年
氯化物环境的大气区	$\geq \text{F50}$	$\geq \text{F50}$	$\geq \text{F100}$	$\geq \text{F50}$
氯化物环境浪溅区、水位变化区	$\geq \text{F100}$	$\geq \text{F50}$	$\geq \text{F200}$	$\geq \text{F100}$

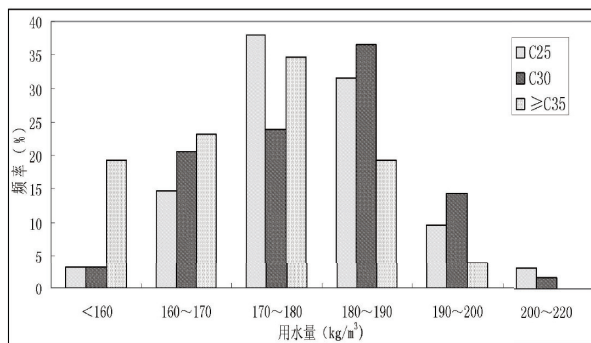


图 3 190 组混凝土用水量统计频率直方图

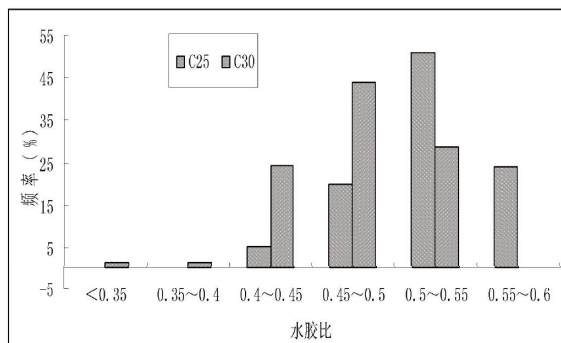


图 4 190 组混凝土水胶比统计频率直方图



表 6 混凝土配合比主要配制参数与拌和物性能指标

部位	强度等级	配合比参数控制范围					拌合物性能		
		胶凝材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )	矿物掺合料掺量 (%)	粉煤灰与矿渣粉质量比	用水量 (kg/m <sup>3</sup> )	砂率 (%)	水胶比	含气量 (%)	坍落度 (mm)
灌注桩	C30	350 ~ 370	35 ~ 50		< 175		0.45 ~ 0.5	—	
	C35	380 ~ 410	35 ~ 55	0.5 ~ 1.5	< 170	40 ~ 44	0.40 ~ 0.45	—	180 ~ 220
	C40	400 ~ 430	35 ~ 55		< 160		0.36 ~ 0.40	—	
底板	C30	340 ~ 360	35 ~ 50		< 175		0.42 ~ 0.48		
	C35	360 ~ 390	35 ~ 55	0.8 ~ 1.2	< 165	36 ~ 42	0.40 ~ 0.45	2.5 ~ 4.0	140 ~ 180
	C40	380 ~ 420	35 ~ 55		< 160		0.36 ~ 0.40		
排架 工作桥 闸墩 翼墙 胸墙	C35	370 ~ 390	30 ~ 50		< 160		0.38 ~ 0.40		
	C40	380 ~ 420	35 ~ 55		< 155		0.36 ~ 0.38		
	C45	390 ~ 430	35 ~ 55	0.8 ~ 1.2	< 150	36 ~ 42	0.35 ~ 0.38	3.5 ~ 5.5	140 ~ 180
	C50	410 ~ 450	35 ~ 55		< 145		0.33 ~ 0.36		

注: 1、C30 混凝土宜选用 P·O 42.5 水泥, C35 ~ C50 混凝土宜优先选用 P·O 52.5 水泥、P·I 52.5 水泥或 P·II 52.5 水泥。  
2、矿物掺合料用量应根据水泥质量选择, 一般为: P·I 52.5>P·II 52.5>P·O 42.5。

4 混凝土施工要点

(1) 混凝土制备、浇筑、养护应符合《水闸施工规范》SL27-2014、《水工混凝土施工规范》SL677-2014 以及《水利工程预拌混凝土应用技术规范》(DB32/T 3261-2017) 等规定。

(2) 重要结构和关键部位混凝土生产前, 施工单位应检查原材料备料情况, 生产过程中施工单位应驻厂检查原材料、配合比、计量、拌和物质质量等, 监理单位必要时驻厂监理。

(3) 到工混凝土应安排专人核验送货单, 核对混凝土强度等级、配合比, 目测检查混凝土拌和物外观, 检测混凝土坍落度、含气量等。不符合要求的混凝土不应入仓。

(4) 浇筑过程中应采取措施防止混凝土产生离析, 排除混凝土泌水、积水。运输途中以及浇筑过程中严禁向混凝土中加水。

(5) 混凝土浇筑完毕应覆盖暴露的混凝土表面, 6 ~ 18 h 后应进行保湿养护, 降温阶段宜覆盖土工布、草帘等材料保温养护。

将带模养护作为重要的养护措施。沿海地区常年平均风速在 3 m/s 左右, 延长带模养护时间,

可以避免过早拆模引起的混凝土表面湿度骤降、内外温差增加。混凝土早期收缩试验也表明, 混凝土表面覆盖的塑料薄膜在 10 d 揭去后, 15 h 内会产生 50 ~ 70 个微应变, 混凝土收缩应力会出现突变。模拟掘直新闸下移工程和三里闸混凝土浇筑、养护情况, 现场制作大板试件, 混凝土模板分别为胶合板和胶合板内衬透水模板布, 拆模时间对混凝土氯离子扩散系数、碳化深度的影响见图 5 和图 6。大板试验表明, 随着带模养护时间的延长, 混凝土氯离子扩散系数和碳化深度降低, 14 d 拆模后的氯离子扩散系数、碳化深度与标准养护的基本接近; 模板布侧混凝土的氯离子扩散系数和碳化深度明显比胶合板低。

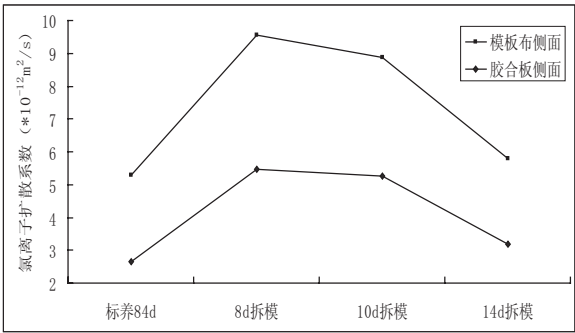


图 5 拆模时间对混凝土氯离子扩散系数影响

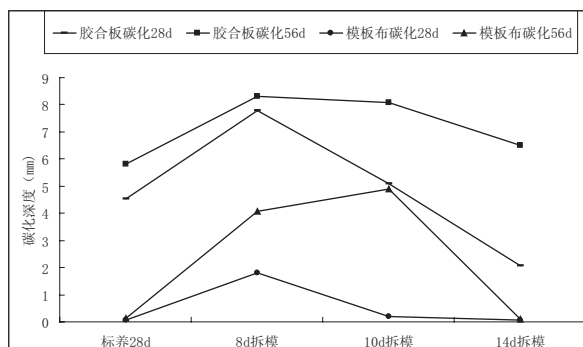


图 6 拆模时间对混凝土碳化深度影响

因此,沿海混凝土带模养护时间不宜少于 10 ~ 14 d,带模养护期间宜松开模板补充养护水。未掺矿物掺合料的混凝土持续湿养护时间不应少于 14 d,掺矿物掺合料的混凝土不应少于 21 d,大掺量矿物掺合料混凝土不应少于 28 d。气温低于 5℃时应按冬季施工技术措施进行保温养护,不应洒水养护。

(6) 有温度控制要求的混凝土,宜对混凝土内部温度、温度应力进行计算,制定混凝土浇筑、养护、温控设计和温度监测方案。在合理选用原材料和配合比基础上,可采取水管冷却、埋入块石、掺入抗裂纤维等措施;混凝土入仓温度应符合设计要求,设计未规定的,入仓温度不宜大于 28℃;夏天宜对骨料进行遮阳,骨料的温度不宜高于 30℃,拌和水的温度不宜高于 20℃。

施工过程中宜采用混凝土无线测温仪自动监测环境、模板、混凝土表面与中心温度,并根据温度监测结果及时调整温度控制技术措施。一般要求混凝土内部最高温度不宜大于 65℃,且温升值不宜大于 50℃。混凝土内部温度与表面温度之差不宜大于 25℃,表面温度与环境温度之差不宜大于 20℃,混凝土表面温度与养护水温度之差不宜大于 15℃。混凝土内部降温速率不宜大于 2 ~ 3℃/d。

(7) 设计使用年限为 100 年的沿海水工建筑物处于Ⅲ-E 环境的闸墩、翼墙、胸墙、排架、工

作桥等结构构件,可在模板内侧粘贴一层透水模板布,浇筑过程中排除表层混凝土部分水和气泡,进一步提高表层混凝土的密实性。

## 5 质量检验与验收要点

预拌混凝土到达施工现场后,应逐车检测混凝土工作性,现场自拌混凝土应逐盘检测混凝土工作性。

混凝土抗压强度试验组数及评定方法应符合《水利工程施工质量检验与评定规范第 2 部分:建筑工程》(DB32/T 2334.2-2013)的规定,现场实体结构混凝土强度应符合设计要求。

同一单位工程,设计要求的各个耐久性检验项目,具有相同设计强度等级的构件,每 3000 m<sup>3</sup> 混凝土为 1 批次,不足 3000 m<sup>3</sup> 的以 1 批次计,每批次抽检不少于 1 组<sup>[1]</sup>。每个工程每季度浇筑的混凝土宜进行 1 次收缩率测试。混凝土抗碳化性能、抗冻性能、抗渗性能应符合设计要求。混凝土氯离子扩散系数采用非统计法进行评定,需同时满足公式(2)、(3)的规定:

$$D_{n-} \leq D_{cu, k} \quad (2)$$

$$D_{max} \leq 1.1D_{cu, k} \quad (3)$$

式中:

$D_{n-}$ —混凝土 84 d 氯离子扩散系数平均测试值;

$D_{max}$ —混凝土 84 d 氯离子扩散系数最大测试值。

工程验收前宜对现场水上构件混凝土的碳化深度进行测试,每批次浇筑的构件测点不宜少于 10 个,测点间距不少于 1 m,实体混凝土的碳化深度宜符合表 7 建议的控制指标<sup>[4]</sup>。水上构件还可采用 Torrent 气体渗透性测试仪测试混凝土表面透气性能,测试宜在混凝土浇筑后 90 d 内进行,每类构件不宜少于 20 个测区,测区间距不少于 2 m,表面透气性系数宜符合表 8 建议的控制指标<sup>[5]</sup>。

表 7 现场实体混凝土自然碳化深度控制指标

设计使用年限 (a)	自然碳化深度 (mm)				
	28d	90d	150d	240d	365d
50	≤ 2.0	≤ 3.5	≤ 4.5	≤ 5.7	≤ 7.1
100	≤ 1.4	≤ 2.5	≤ 3.2	≤ 4.1	≤ 5.0

表 8 混凝土表面透气性系数建议控制指标

设计使用年限 (a)	环境条件	环境作用等级	表面透气性系数 ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )
100	水位变化区和轻度盐雾作用区	Ⅲ -D	$\leq 0.9$
	浪溅区和重度盐雾作用区	Ⅲ -E	$\leq 0.70$
50	水位变化区和轻度盐雾作用区	Ⅲ -D	$\leq 1.0$
	浪溅区和重度盐雾作用区	Ⅲ -E	$\leq 0.90$

6 应用工程实例

6.1 大丰三里闸拆除重建工程

三里闸设计使用年限为 50 年, 共 3 孔, 单孔净宽 8.0 m。混凝土设计指标为 C35 F50 W6, 水胶比限值为 0.4, 主筋保护层厚度 60 mm。

水泥为 52.5 普通水泥, 粉煤灰为 F 类Ⅱ级灰, 矿渣粉为 S95 级; 细骨料为长江中砂, 细度模数 2.7, 碎石为 5 ~ 31.5 mm 连续粒级, 引气减水剂的减水率为 28%。

混凝土配合比见表 9, 混凝土性能检验结果见表 10, 混凝土抗碳化和抗氯离子渗透能力满足

表 9 三里闸和掘苴新闸混凝土配合比

工程名称	部位	配合比 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )								水胶比	坍落度 ( mm )
		水泥	粉煤灰	矿渣粉	JD-FA2000	砂	碎石	水	减水剂		
三里闸	闸墩翼墙排架	200	100	100	——	767	1058	139	6.4	0.35	140 ~ 180
掘苴新闸	闸墩翼墙排架	250	60	80	——	715	1119	155	5.5	0.40	140 ~ 180
	胸墙	250	40	70	35	715	1120	155	5.9	0.39	140 ~ 180

表 10 三里闸和掘苴新闸混凝土性能检验结果

工程名称	部位	实体强度 ( MPa )	碳化深度 ( 28d, mm )	氯离子扩散系数 ( 84d, $\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ )	电通量 ( 56d, C )	抗渗性能	抗冻性能	表面透气性系数 ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )	
								几何均值	95% 置信区间
三里闸	胸墙	37.8 ~ 39.3	2.3 ~ 3.6	1.825 ~ 3.365	466 ~ 1043	> W12	> F200	0.511	[0.001, 0.808]
	闸墩翼墙	39.8~44.4	4.5~9.2	2.373	765			0.313	[0.013, 0.194]
刘埠水闸	闸墩翼墙排架	39.9 ~ 49.9	7.0 ~ 12.3	3.816	750 ~ 800	> W12	F200	0.242	[0.001, 1.242]
	胶合板侧	36.7 ~ 41.6	8.2 ~ 12.3	1.103 ~ 1.975	859			0.307	[0.096, 0.491]
	模板布侧	54.6 ~ 60	1.2 ~ 7.3	0.969	675			0.050	[0.020, 0.092]

注: 1、混凝土碳化深度测试试件包括标准养护 28 d 试件、大板试件和实体芯样试件。  
2、电通量和氯离子扩散系数测试试件为标准养护试件。

100 年设计使用年限的要求<sup>[6]</sup>。

## 6.2 如东掘苴新闻闸下移工程

掘苴新闻闸下移工程共 5 孔,每孔净宽 10.0 m。闸室、下游翼墙等主要建筑物设计使用年限为 50 年。闸墩、翼墙、胸墙、排架和工作桥混凝土设计指标为 C35 F50 W6, 水胶比限值为 0.4, 主筋保护层厚度 60 mm。

水泥为 42.5 普通水泥, 粉煤灰为 F 类 II 级灰, 矿渣粉为 S95 级; 细骨料的细度模数为 2.53, 碎石为 5 ~ 31.5 mm 连续粒级; 外加剂为聚羧酸缓凝型减水剂, 减水率为 25%, 减水剂中复合引气剂。胸墙混凝土中掺入 JD-FA2000 超细掺合料, 为改进型硅粉, 45  $\mu\text{m}$  方孔筛筛余 2.25%,  $D_{97} < 11 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} < 4 \mu\text{m}$ , 平均粒径 3 ~ 6  $\mu\text{m}$ , 比表面积 1000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , 7 d、28 d 活性指数分别为 81%、109%。施工过程中在胸墙的下游迎海面胶合模板上粘贴透水模板布。

混凝土配合比见表 9, 混凝土性能检验结果见表 10。测试结果表明掘苴新闻闸闸墩、翼墙、排架混凝土基本满足碳化 100 年的技术要求。闸墩、翼墙和排架 84d 氯离子扩散系数满足 III-E 环境下 50 年使用年限要求。胸墙混凝土中掺入 JD-FA2000 超细矿物掺合料, 进一步提高混凝土抗氯离子渗透能力, 满足 III-E 环境 100 年的技术要求; 下游迎海面采用模板布后, 混凝土碳化深度、氯离子扩散系数和电通量均低于使用普通胶合板模板的混凝土, 表面透气性系数也显著降低, 反映表层混凝土的密实性显著提高<sup>[7]</sup>。

## 6.3 掘苴新闻和三里闸混凝土抗氯盐渗透能力与调研工程比较

掘苴新闻和三里闸混凝土电通量明显低于调查的 7 个在建工程 (见图 7), 掘苴新闻的氯离子扩散系数也明显低于调研的工程 (见图 8), 这是由于调研的在建工程混凝土用水量和水胶比均大于掘苴新闻和三里闸的缘故。掘苴新闻混凝土总体上的抗碳化能力和抗氯离子渗透能力要低于三里闸, 也与掘苴新闻混凝土的用水量和水胶比高于三里闸有关。

## 7 结语

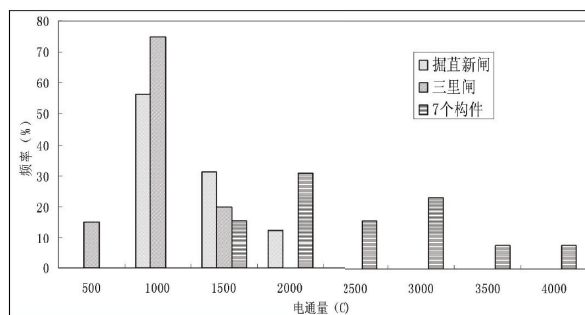


图 7 2 座应用工程和调研工程电通量比较

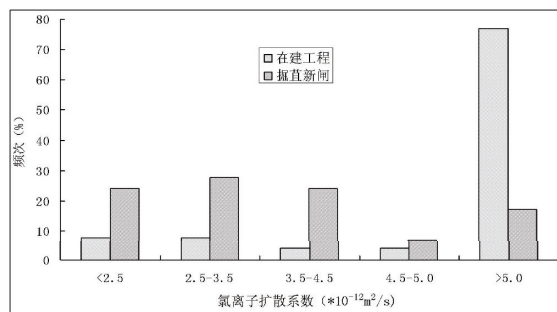


图 8 掘苴新闻和调研工程氯离子扩散系数比较

施工过程中优选原材料, 采用低用水量低水胶比配制技术, 加强施工过程质量控制, 延长带模养护时间, 保证持续湿养护时间, 严重腐蚀环境采用透水模板布防腐附加措施, 都是提高沿海海水工混凝土抗侵蚀能力、满足使用年限目标、实现表层混凝土低渗透高密实关键技术要点。

## 参考文献:

- [1] DB32/T 2333-2013, 水利工程混凝土耐久性技术规范[S].
- [2] 王昌将, 沈旺, 宋晖. 金塘大桥建设关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015:152-152.
- [3] 江苏省水利科学研究院. 沿海水工建筑物低渗透高密实表层混凝土施工质量控制要点[R]. 2017(1).
- [4] DGJ32/TJ206-2016, 城市轨道交通工程高性能混凝土质量控制技术规程[S].
- [5] 王珍兰, 许旭东, 夏炎, 等. 水工混凝土表面透气性检测分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(3): 49-53.
- [6] 江苏省水利科学研究院. 大丰三里闸拆除重建工程提高混凝土耐久性应用总结报告[R]. 2017(7).
- [7] 江苏省水利科学研究院. 低渗透高密实表层混凝土施工技术及应用研究技术报告[R]. 2017(1).

(责任编辑: 王宏伟)