DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.09.023 2013,30(09):114-118

# 海工水泥对提高混凝土工程抗侵蚀能力的实践研究

谢 放,马志登,黄康华,童丽芬
(浙江省水利水电勘测设计院,杭州 310002)

**摘要**:为了解决海洋环境中大体积水利工程混凝土的抗侵蚀能力和现场配制海工混凝土的质量控制问题,提出了直接使用海工水泥来简化现场混凝土拌制,并通过工程的施工实例以室内试验和现场检测数据进行分析,研究了海工水泥混凝土的耐久性能。结果表明:海工水泥混凝土拌制简单、具有很高的抗氯离子渗透能力,能满足海洋环境水利工程混凝土结构的耐久性、强度及其他工作性能要求。实例数据与分析对进一步开展相关研究和海工水泥的应用具有重要的参考价值。

**关 键 词**:沿海环境;混凝土耐久性;海工水泥;试验研究
**中图分类号**:TV42;TV523;TU528 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)09-0114-05

## 1 研究背景

随着我国经济的高速发展,沿海水利工程大量兴建,海洋环境中混凝土结构工程的耐久性问题越来越引起关注。我国在这方面的研究起步较晚,特别是海洋环境中水利工程大体积混凝土的耐久性研究还没有系统的研究成果。许多项目建设单位和施工单位迫切希望解决相关的技术问题,为此,本文专题研究沿海水利工程中使用海工水泥制备混凝土结构的抗侵蚀能力问题。

主要研究目的有以下几点:①提高海洋环境下大体积混凝土工程的设计水平和施工质量,为待建、在建的类似水利工程提供参考;②研究用海工水泥制备混凝土的抗氯离子侵渗能力;③丰富和发展海工混凝土在水利工程耐久性控制方面的相关技术和经验。

## 2 沿海水利工程的耐久性问题

沿海水利工程的主要结构大部分是混凝土结构。而且从目前的发展情况来看,在今后数十年内,沿海水利工程建设所采用的材料将仍以混凝土结构为主。众所周知,混凝土工程一旦出现耐久性问题,其修复难度非常大,所以,沿海水利工程应十分注重耐久性设计。长期以来,众多沿海水利工程主要使用普通水泥,在现场根据要求拌制相应的耐海水侵蚀混凝土,但是由于现场拌制工艺及质量控制问题,一些结构很难达到理想的设计使用寿命。不良施工会影响混凝土结构的耐久性,如混凝土拌制工艺缺陷、掺合料用量不够正确、钢筋保护层厚度不足等,这些都会使混凝土结构无法达到预定的使用年限。影响沿海水利工程耐久性的原因众多,除了结构设计、施工维护等因素外,其使用的建筑材料是最为重要的因素之一。

针对沿海地区水利工程的耐久性问题,目前的解决手段主要是采用现场配制高性能抗侵蚀海工混凝土。现场配制存在的问题有:配制技术缺乏统一标准,配制过程比较复杂,给施工以及工程质量控制带来不便,也不利于节约生产和施工成本。近年来各类使用者对海洋工程材料质量的要求越来越高,单体工程量越来越大,不仅要求以混凝土为基础材料的建筑工程具有较高的耐久性,而且对其他性能也提出多方面的要求,如水化热和抗裂性等等。因此,无论是从原材料生产的角度,还是从设计和施工的角度,都迫切需要将现场添加各种抗海水侵蚀辅料配制海工混凝土,转变为直接应用海工水泥配制耐侵蚀海工水泥混凝土。

考虑到现场配制海工混凝土在质量控制上的复杂性和不确定性,有关水泥生产厂家研制出了相应的海工水泥。它的主要成份是水泥熟料、活性混合材等,由于它应用细微化技术和复合化技术,激活了矿渣、粉煤灰等材料的潜在活性,从而使得这种水泥的抗侵蚀与耐磨等性能都得到了增强[1]。如浙江

**收稿日期**:2012-12-26; **修回日期**:2013-04-23
**作者简介**:谢 放(1956-),男,浙江宁波人,教授级高级工程师,从事水利水电工程设计与咨询、水利信息化建设方面的研究,(电话)13906505042(电子信箱)xf@zjwater.gov.cn。

三狮集团特种水泥有限公司在 1999 年就申报并通过了海工水泥新产品专利,2000 年被评为国家级新产品,并在台州椒江某围涂工程应用,当年就使用海工水泥 2 000 余吨。该产品在初次应用时,为保证工程混凝土的各项性能,均在试验室对所用材料进行试拌检测,使其各项性能达到设计指标。混凝土运到现场后,对其多项工作性能进行了检测,如坍落度和黏聚性等均符合要求,无离析和泌水现象。

## 3　耐久性影响因素与提升要点

混凝土耐久性研究已经有了相当长的历史,从 20 世纪 60 年代起,每年都要召开相关国际性学术会议进行交流探讨。截止目前,已有许多成熟的结论,本课题正是基于这些成果展开进一步的研究分析工作,研究内容主要体现在 3 个方面,即工程所处环境影响、破坏机理和各种掺合料作用。

### 3.1　海水环境影响

研究海洋环境中工程耐久性问题,首先要了解工程所处环境情况。我国沿海大部分海水中的盐类总含量超过 3%,其中氯化钠的含量最高。对于本课题主要研究区域——浙江省,由于当地雨量充沛及多条江河的淡水汇入,其沿海地区的海水盐度比其他地区稍低,并随季节、温度、地点、涨落潮而变化,因此浙江海水盐度是一个变化的值。如宁波海域冬季平均盐度2.795%,夏季平均盐度为3.183%。本项目所研究的台州和温州 2 个地区,其平均海水表层的盐度为2.8% ~3.34%。

### 3.2　主要破坏因素

影响海洋环境中水利工程耐久性及结构破坏的因素主要是盐类侵蚀作用和钢筋锈蚀作用,这也是水利工程设计的主要控制指标[2]。由大量的研究成果可知,氯盐环境中最主要的侵蚀介质是氯离子($Cl^-$)。它容易通过混凝土中的毛细孔到达钢筋表面,导致钢筋表面钝化膜的破坏和钢筋的进一步锈蚀,并随着铁锈的体积膨胀,造成结构开裂,此后环境中的水、$CI^-$等有害物质更易侵入混凝土结构,导致工程结构的破坏[3]。因此,要保障沿海地区水利工程结构的耐久性,研究工作重点是要有效阻断氯离子的侵入通道,关注氯离子的渗透量和渗入速度,这些通常与混凝土的水灰比、养护龄期、掺合料的数量及质量[4]等有关。

### 3.3　掺合料的作用

研究发现,由于优质粉煤灰、磨细矿渣粉、硅粉等掺合料具有解絮、分散、增浆、微集料效应以及水化后期的火山灰活性效应,掺入后可以显著改善混凝土的孔结构[5],而孔结构(包括孔隙率和孔径分布)对氯离子的扩散有较大影响。研究还表明,由于掺合料的合适加入,使得在混凝土中有更多的水化物存在,这些物质所具有的结合能力,促使氯离子相对会比较稳定。同时,粉煤灰、矿渣粉等掺合料本身具有化学结合力,也可有效减慢氯离子的渗入速度。可见,混凝土中加入掺合料将使混凝土中的孔结构得到改善,同时结合大量游离的氯离子,这对阻止氯离子渗透,延缓钢筋腐蚀起到显著作用。

因此,要提高沿海水利工程耐久性宜注重以下 2 点:①应用高强度混凝土,工程结构中能够采用高强度的混凝土,不仅提高了构筑物的整体性能和强度,也能够明显地提升这些工程的抗海水侵蚀能力,同时,可以大幅度降低工程结构表面产生裂缝。②提高混凝土密实性,密实性越高就意味着混凝土结构中的孔隙越少,氯离子等有害物入侵的数量和速度自然降低,从而提高了结构的抗侵蚀能力。

## 4　应用研究实例

根据上述讨论,要解决沿海水利工程大体积混凝土现场配制海工混凝土的质量控制问题,应用海工水泥是一条可行之路,遗憾的是至今类似研究较少,特别是以实际工程为背景的应用研究更小。因此,本课题的研究重点是探讨直接应用海工水泥拌制成海工混凝土的抗侵蚀能力。

### 4.1　实例成果

为检验海工水泥的实际应用效果,本课题对台州和温州 2 个地区使用海工水泥的工程进行实地踏勘、观测和钻孔取样检测。这些工程运行时间从 1 a 到 7 a 不等。检测方法是将使用海工水泥与未使用海工水泥的混凝土结构进行工程质量对比,并实际获取混凝土表面裂缝、钢筋锈蚀程度等第一手资料。

实例工程氯离子浓度实测结果见表 1 和表 2。方法是分别对普通混凝土结构和海工水泥混凝土结构,在海水基准面以上 5 m 高程(工程 1)和1.5 m(工程 2)处进行钻孔取样。取样分 8 个区段,每个区段水平深度间隔为 5 m。氯离子浓度测试采用丹麦生产的快速氯离子浓度测试仪。

图 1 为某围垦工程 5 m 高程处氯离子浓度随深度变化规律。各曲线氯离子浓度随侵蚀深度增加而逐渐减小,且普通混凝土各深度处的氯离子浓度显著大于海工水泥混凝土,表明海工水泥混凝土抗氯离子侵入能力更加优越。

表 1 工程 1 氯离子浓度检测结果

Table 1 Measured results of the concentration of chloride ion in project No. 1

| 类别 | 高程/m | 各区段水平深度氯离子浓度(占混凝土质量百分比)/% | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2.5 mm | 7.5 mm | 12.5 mm | 17.5 mm | 22.5 mm | 27.5 mm | 32.5 mm | 37.5 mm |
| 海工混凝土 C25 | 5 | 0.027 0 | 0.022 0 | 0.015 0 | 0.011 0 | 0.008 5 | 0.010 0 | 0.010 0 | 0.009 4 |
| 普通混凝土 C25 | 5 | 0.110 0 | 0.111 0 | 0.115 0 | 0.079 0 | 0.046 0 | 0.022 5 | 0.022 3 | 0.016 1 |

表 2 工程 2 氯离子浓度检测结果

Table 2 Measured results of the concentration of chloride ion in project No. 2

| 类别 | 高程/m | 各区段水平深度氯离子浓度(占混凝土质量百分比)/% | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2.5 mm | 7.5 mm | 12.5 mm | 17.5 mm | 22.5 mm | 27.5 mm | 32.5 mm | 37.5 mm |
| 海工混凝土 C25 | 1.5 | 0.039 | 0.070 | 0.077 | 0.068 | 0.048 | 0.051 | 0.040 | 0.036 |
| 普通混凝土 C25 | 1.5 | 0.298 | 0.240 | 0.166 | 0.100 | 0.084 | 0.063 | 0.044 | 0.038 |

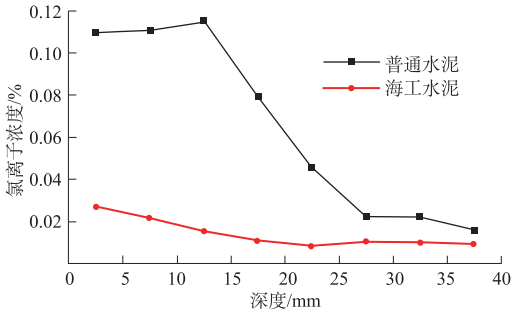



图 1 5 m 高程处氯离子浓度随深度变化规律

Fig. 1 Variation of chlorine ion concentration with depth at elevation 5 m

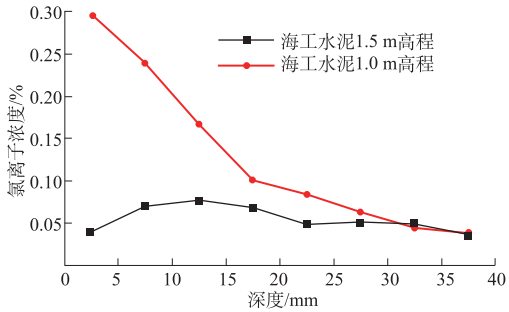



图 2 1.0,1.5 m 高程处氯离子浓度随深度变化规律

Fig. 2 Variation of chlorine ion concentration with depth at elevations 1.0 and 1.5 m

图 2 为某海闸1.0,1.5 m高程处海工水泥混凝土中氯离子浓度随深度变化情况。随着高程的增加,各深度处氯离子浓度相应减小,这是因为随着高程的增加,混凝土表面接触海水的时间相应减小。1.5 m高程所处的环境已近似大气区域,因此检测得到的氯离子浓度很小。

## 4.2 实例数据分析

(1) 从表 1 和表 2 中可以看出,在同一工程中采用海工水泥的混凝土中氯离子浓度比未采用海工水泥的大幅度减小。

(2) 表 3 列出了氯离子扩散系数的计算结果。氯离子扩散系数可更直接反映混凝土抗氯离子的渗入性能。由表中可见:海工水泥混凝土(MC)氯离子扩散系数较普通混凝土(OPC)整整小了一个数量级,表明海工混凝土抗氯离子渗透性能较优。

表 3 氯离子侵蚀曲线拟合结果

Table 3 Results of curve fitting of chloride ion corrosion

| 检测地点 | 编号 | 氯离子浓度/% | 氯离子扩散系数/($10^{-6}$ $mm^2 \cdot s^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 某围垦工程 | OPC-1.5 | 0.470 50 | 1.815 68 |
| | OPC-5 | 0.140 20 | 1.430 98 |
| | MC-5 | 0.025 89 | 0.708 22 |
| 某海闸工程 | MC-1 | 0.327 09 | 0.914 08 |

除了优良的耐久性外,海工水泥配制的混凝土还具有良好的工作性能,适应性也较好。温州某水闸工程海工水泥混凝土不同龄期、不同配方试样的各项常规指标测试结果表明:所配制的 C40 海工水泥混凝土,均满足目前沿海水利工程的设计要求。其主要的物理化学试验数据见表 4、表 5。

对该水闸工程采用某品牌42.5级海工水泥,课题组还委托国家建筑材料测试中心对其潜在膨胀性

表 4 某品牌 42.5 级海工水泥物理力学性能试验成果

Table 4 Test results of physical and mechanical performance for a 42.5 grade marine cement

| 项目品种 | 比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$) | 标准稠度用水量/% | 凝结时间/min | | 抗折强度/MPa | | 抗压强度/MPa | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 初凝 | 终凝 | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| 海工水泥(标准) | ≥400 | — | ≥45 | ≤600 | 3.5 | 6.5 | 17.0 | 42.5 |
| 海工水泥(1) | 431 | 27.2 | 197 | 271 | 5.1 | 9.1 | 22.0 | 48.3 |
| 海工水泥(2) | 421 | 27.1 | 197 | 276 | 5.6 | 9.1 | 22.8 | 44.1 |

表 5　某品牌 42.5 级海工水泥化学性能试验成果

Table 5　Test results of chemical properties of a 42.5 grade marine cement

| 项目 | 耐腐蚀性系数 $k$ | 三氧化硫含量/% |
|---|---|---|
| 42.5 级海工水泥(标准) | ≥0.9 | ≤4.0 |
| 某品牌 42.5 级海工水泥 | 1.1 | 2.88 |

能、浸泡抗侵蚀性能进行了检验。检测结果为:潜在膨胀性能为0.053%;浸泡抗侵蚀性能为1.12。

### 4.3　实例结果评价

实例结果表明,采用海工水泥拌制的海工混凝土各项指标良好,特别是具有较好的抵抗氯离子渗透能力,所以,海工水泥混凝土完全满足沿海水利工程混凝土结构的耐久性要求,同时也满足工程结构其他各项设计要求。

从工程实例的整体效果来看,各工程采用海工水泥拌制的混凝土在早强要求得到满足的同时,后期强度增长也达到设计要求。而且在抗侵蚀和抗冲磨方面的性能明显优于普通水泥,特别适合沿海大体积的水利工程。此外,海工水泥的安定性、三氧化硫、氧化镁等指标都达到了相关标准,水化热也小于普通水泥,对大体积混凝土的裂缝控制特别有利[6]。而且,海工水泥充分利用工业废料,从节能环保角度来看,值得推广应用。

直接采用海工水泥制备海工混凝土,减少或避免了常规现场配制海工混凝土过程中的不足,诸如各种掺合料计量误差、人工操作失误、材料受气候环境影响等不利因素,使得工程施工质量控制得到提高,这对于大体积混凝土施工特别有利。

但是,海工水泥没有大面积使用,除了目前对其有些性能还有待研究之外,还有如下的内在原因:首先,其价格相对较高;其次,它的早强时间相对较长,这对潮汐环境下大体积混凝土施工有不利影响;另外,由于相关的标准规范尚在制定中,将其在设计和施工中大量推广应用还不够成熟。

## 5　结　语

当前,我国正处于大规模的建设时期,沿海水利工程混凝土建筑物承受氯盐侵害是不可避免的。为了保证工程项目的正常使用和安全运营,需要提高这些工程混凝土的耐久性能,以降低氯盐的侵蚀危害。本文的实例数据分析表明,对于沿海水利工程而言,为了解决海洋环境大体积混凝土的抗侵蚀能力问题,积极推广应用海工水泥势在必行。

本文从水泥基材到实际工程运行多个方面,开展沿海地区水利工程混凝土结构的海工水泥应用实践研究,探明了海工水泥混凝土的各项工作性能,特别是取得了抗侵蚀能力方面的成果,对今后水利工程应用海工水泥和进一步开展相关研究有一定的参考价值。

**参考文献:**


[1] 文寨军,王　晶,张忠伦. 海工水泥的试验研究[J]. 中国建材科技, 2001,(5):47 – 49. (WEN Zhai-jun, WANG Jing, ZHANG Zhong-lun, *et al*. Experimental Study on Marine Cement[J]. China Building Materials Science & Technology, 2001,(5):47 – 49. (in Chinese))

[2] 亢景富. 混凝土硫酸盐侵蚀研究中的几个基本问题[J]. 混凝土,1995,(3):9 – 18. (KANG Jing-fu. Several Basic Problems in the Research of Concrete Sulfate Corrosion[J]. Concrete, 1995,(3):9 – 18. (in Chinese))

[3] 曹双寅,朱伯龙. 酸性腐蚀环境中钢筋混凝土结构的耐久性预测[J]. 结构工程师, 1990,(1):37 – 45. (CAO Shuang-yin, ZHU Bo-long. Prediction of Durability of Reinforced Concrete Structure in the Environment of Acid Corrosion [J]. Structural Engineers, 1990,(1):37 – 45. (in Chinese))

[4] 翁友法,张　东. 超细矿渣掺量对高强混凝土力学性能的影响[J]. 港口工程, 1998,(12):23 – 26. (WENG You-fa, ZHANG Dong. Influence of Amount of Super Fine Slag Added in High Strength Concrete upon Its Mechanical Property [J]. China Harbour Engineering, 1998,(12):23 – 26. (in Chinese))

[5] 游宝坤,建筑结构裂渗控制新技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,1998. (YOU Bao-kun. New Technology of Controlling Cracking Seepage of Buildings[M]. Beijing: China Building Materials Press, 1998. (in Chinese))

[6] 王玉香. 海洋工程水泥的研究和开发[J]. 上海建材, 2005,(4):10 – 12. (WANG Yu-xiang. Research and Development of Marine Engineering Cement[J]. Shanghai Building Materials, 2005,(4):10 – 12. (in Chinese))


(编辑:王　慰)

# Case Study on Using Marine Cement to Improve the Corrosion Resistance of Concrete Projects

XIE Fang, MA Zhi-deng, HUANG Kang-hua, TONG Li-fen
(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

**Abstract**: To improve the durability of mass concrete in hydraulic engineering and control the quality of field-mixed marine concrete, marine cement was directly used to simplify the in-situ mixing. The durability of marine cement-based concrete was investigated by field reconnaissance, sample inspection, laboratory test, and data analysis of existing hydraulic concrete structures. The results show that the method of mixing marine cement-based concrete is simple, and the concrete has good performance of resisting chloride penetration, which meets the requirements of durability, strength, and other working performances for hydraulic structure in marine environment. The example data and analysis in this paper could be a reference for related researches and applications.

**Key words**: coastal environment; durability of concrete; marine cement; case study

(上接第 105 页)

# High Volume Fly Ash Concrete for Hydraulic Engineering in Cold and Arid Regions

QIN Zi-peng, DU Ying-ji, TIAN Yan
(College of Water Resources and Architectural Engineering,
Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract**: The freeze-thaw damage of concrete is a severe problem for hydraulic structure in cold and arid regions in Northwest China. In this research, we investigated the mechanical properties, freeze-thaw resistance and impermeability of fly ash concrete with uniform strength and water-cement ratio at different ages. The strength of high volume fly ash concrete in the early stage was lower than common ones, but the strength grew rapidly in the mid-late ages. The freeze-thaw resistance, self-healing ability and the impermeability of fly ash concrete with uniform strength were not significantly weakened when fly ash content was increased. When the water-cement ratio and the fly ash content were 0.35 and 50% respectively, the mechanical properties, freeze-thaw resistance and impermeability of the concrete were prominent and able to meet the requirements of water project construction in the northwest cold and arid regions.

**Key words**: cold and arid regions; fly ash content; curing time; concrete

欢迎投稿 欢迎订阅
本刊电子信箱:cjkb@163.net