

文章编号:1671-2579(2004)05-0082-03

# 沿海桥梁混凝土抗侵蚀技术应用

麦加恩<sup>1</sup>, 段乃民<sup>2</sup>

(1. 广州市市政工程机械施工有限公司, 广东 广州 510060; 2. 广东省路桥建设发展有限公司)

**摘 要:** 海上桥梁建设越来越多, 但海洋环境对混凝土的侵蚀破坏使混凝土的耐久性降低, 从而直接影响到桥梁的使用安全和寿命, 该文通过海水对混凝土侵蚀的机理研究分析, 结合混凝土抗侵蚀的成功工程实例, 提出在海洋环境中如何提高桥梁的抗侵蚀性能。

**关键词:** 混凝土; 抗侵蚀; 技术应用

沿海地区混凝土建筑物受到海洋环境中诸多物理、化学因素的作用, 混凝土耐久性降低, 钢筋过早锈蚀, 结构物的寿命缩短, 因此长期以来海洋环境对混凝土的破坏作用在国内外工程界受到高度的重视。

## 1 有害化学物质侵蚀类型和机理

海洋环境对混凝土的有害影响主要来自于有害化学物质, 如氯离子、硫酸盐、硫酸镁、 $\text{CO}_3^{2-}$  等。

通常硫酸盐侵蚀主要表现在混凝土硬化后, 混凝土中铝酸三钙与硫酸盐反应生成硫铝三钙(钙矾石), 钙矾石晶体生长可产生较大的膨胀力, 引起混凝土开裂破坏。海水中的硫酸盐侵蚀则不同, 它的主要成分是硫酸镁, 硫酸镁与水化硅酸钙反应生成易溶于水的氢氧化镁, 这种作用可持续进行到水化硅酸钙完全分解为止, 这是海水腐蚀混凝土结构的主要原因。

氯离子是混凝土内钢筋锈蚀的主要因素, 这种侵蚀作用可解释为铁离子和氯离子在水和氧共同参与下的一种电化学反应, 这种反应可持续进行直至钢筋彻底锈蚀。就外部环境而言由于混凝土具有一定的透水性, 海水及潮湿环境中的氯离子可渗透进入混凝土内一定深度, 当有充足的水分和氧参与时钢筋锈蚀就会发生。但混凝土中的氯离子不仅仅来自于海水中的氯化物, 在自然界中也广泛存在。工程用水、水泥及许多外加剂含有氯离子, 河水及河砂中也含少量氯离子, 海岸的集料中亦含较多的氯离子。

二氧化碳在充足水分参与下生成碳酸, 碳酸与混凝土中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成  $\text{CaCO}_3$ , 使混凝土碳化, 碳化由混凝土表面向内部发展。试验数据表明: 混凝土中 pH 值保持大于 12.5, 即可对钢筋起到良好的保护作用, 而碳化反应可使混凝土内部 pH 值降低至 8.5 左右, 在这种低 pH 值条件下, 钢筋表面钝化膜破坏导致钢筋锈蚀。碳化反应还会降低混凝土强度。由于温度高、蒸发量大, 沿岸地区海水中含有较高浓度的二氧化碳, 海水中的  $\text{CO}_2$  以碳酸根离子形式存在, 碳酸与混凝土中氢氧化钙反应生成碳酸钙, 碳酸钙会与二氧化碳水溶液进一步反应生成易溶于水的碳酸氢钙, 其他水泥矿物质也会发生分解使混凝土受到侵蚀。这种侵蚀的结果会使浸泡于海水中的混凝土构造物不断剥蚀, 最终造成严重破坏。

碱—集料反应生成碱—硅酸盐凝胶, 吸水膨胀会导致混凝土开裂破坏, 海水中这种反应造成的膨胀更加强烈。反应发生必备条件有 3 个: 集料具有碱活性; 混凝土中含一定量的可溶性碱; 混凝土有一定湿度。活性集料是引起碱—集料反应的主要因素, 安山岩、流纹岩、千枚岩、硅质石灰岩和白云质石灰岩等均为碱活性集料; 另外, 控制混凝土含碱量、使用外加剂及防水处理也非常重要。

## 2 混凝土抗侵蚀技术

混凝土的抗侵蚀应从设计方案、施工技术和原材

收稿日期: 2004-05-31

作者简介: 麦加恩, 男, 大学本科, 工程师。

料控制 3 个环节入手,且还要解决好以下三方面的问题: 控制混凝土内部有害化学物质的含量, 对外部有害化学物质的防护和隔离, 结构钢筋的保护。

### 2.1 控制混凝土内部有害化学物质含量

沿海地区混凝土中硫酸盐、氯盐和碱的含量均应受到一定的限制。

广东省湛江港对建于 1956 年的钢筋混凝土高桩码头进行的检查资料显示,混凝土所用海砂含盐量高达 534 mg/L,混凝土海盐含量过高成为导致码头面板及横梁钢筋普遍锈蚀的主要原因。

日本学者曾就中东地区集料中高硫酸盐含量对混凝土的侵蚀进行了研究,认为海湾地区钢筋混凝土的侵蚀及钢筋锈蚀不仅是氯离子和碳化的作用,混凝土内含大量硫酸盐加之高温作用是重要原因。

混凝土内钢筋过早锈蚀是我国南方地区混凝土建筑物破坏的问题之一,而这种破坏的主因是氯离子侵蚀。我国华南沿海港口钢筋混凝土建筑物的有关调查表明,当钢筋周围混凝土含盐量(以氯离子含量对烘干砂浆重量的百分数计)超过 0.1%~0.3%时,即使混凝土未出现裂缝,大多钢筋也已锈蚀。

广东省深圳盐坝高速公路是较具代表性的工程项目之一,路线地处深圳东部沿海,线位沿海岸线布设,部分路段直接穿越海湾。在设计中曾对这一地区的盐侵害进行了专项调查,根据盐田港区收集的资料显示,港区沿岸海水大约含 3.7%的溶解盐类,主要阳离子为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ ,主要阴离子有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等,沿海河流下游水中均存在海潮倒灌现象,含盐量不稳定,但均达严重侵害程度;海砂含盐量约 0.4%左右,其他砂石料氯离子含量差异较大,工程自采硅酸盐水泥含氯离子量约为 0.008%。地勘报告显示,沿线地下水均具有盐侵蚀性,跨河跨海构造物都面临着海水的直接侵害。根据附近港区建设的经验,参照了以下相关标准,对设计混凝土提出了详细的严格的要求。混凝土内部硫酸盐含量参照我国建设部标准及我国《水运工程混凝土施工规范》(JTJ 268-96),规定粗集料和细集料中硫酸根离子含量不得大于其重量的 1%,拌和水中硫酸根离子含量不得大于其重量的 0.22%。氯离子含量参照我国《水运工程混凝土施工规范》(JTJ 268-96)及美国 ACI201 标准(表 1),规定处于氯盐直接作用下的钢筋混凝土,其氯离子限值 0.15%;预应力混凝土氯离子限值为 0.06%;一般钢筋混凝土氯离子限值为 0.35%。

另外对工程施工进行严格要求,对钢筋混凝土构

表 1 ACI 201.2R-77 氯离子限值

构件类别	暴露前混凝土中水溶性氯离子限值/%
预应力混凝土	0.06
潮湿环境受氯盐作用的钢筋混凝土	0.15
潮湿环境无氯盐作用的钢筋混凝土	0.10
地面上干燥环境中的钢筋混凝土	不限值

造物的用料及混凝土生产应进行严格的试验监测,按有关规定及设计要求严格控制含盐量。

针对可能存在碱—集料反应条件的结构混凝土限制水泥中的碱含量不大于 0.6%,混凝土中水泥、骨料及其他材料的含碱总量应不大于  $3 \text{ kg/m}^3$ ;通过严格检验避免采用碱活性骨料,应用火山灰质混合材;禁用含碱量较高的添加剂。

### 2.2 与外部有害化学物质隔离

隔离混凝土外部有害化学物质首先应提高混凝土不透水性,另外还可采用混凝土表面防护涂层、加大结构尺寸、场地处理等措施。影响混凝土透水性的因素很多,低水灰比、适当的水泥用量、级配良好的集料、精细的施工和良好的养护都是设计、生产不透水的优质混凝土所必须的。

前面提到的广东省湛江港混凝土高桩码头调查资料显示,该工程所用混凝土水灰比为 0.65,水泥用量约  $304 \text{ kg/m}^3$ ,海水含盐量为 23~30 g/L。海水直接作用以及混凝土水灰比较大、透水性高、施工质量不良是钢筋混凝土构件严重侵蚀破坏的另一个重要原因。

广东省深圳梅观高速公路某大桥,运营 5 年后上部结构预应力混凝土连续箱梁出现开裂,箱梁外部混凝土发黑有剥落,剥落处钢筋已严重锈蚀,裂缝中有白色沉淀物析出。在对该桥加固过程中发现箱梁混凝土施工质量差,通气孔阻塞,内部积存深达 1 m 的污水,构造钢筋出现锈蚀。该地区气温高、雨水多且含盐量大,混凝土质量差加之结构缺陷致使箱梁混凝土在碳化及水和氯离子侵入的共同作用下钢筋大量锈蚀、混凝土侵蚀损坏严重。

我国港口工程技术规范,建议设计中严格规定:钢筋混凝土结构,混凝土水灰比不大于 0.5,浪溅区不大于 0.45;水泥用量不小于  $360 \text{ kg/m}^3$ ,浪溅区不小于  $400 \text{ kg/m}^3$ ;保护层最小厚度 5 cm,浪溅区最小厚度 6 cm;粗集料最大粒径应不大于保护层厚度的 4/5; 预应力混凝土,混凝土水灰比宜低于 0.4,最大不得大于 0.45;保护层厚度 75 mm,浪溅区为 90 mm;混凝土水泥用量和粗集料最大粒径要求同上。

仅仅降低水灰比和增加保护层厚度只是延缓了钢筋的锈蚀,而不能防止混凝土受到海水的侵蚀和冲刷。海水中及强侵蚀地区直接接触有害环境介质的混凝土构件(如桥梁下部),加大几何尺寸是必要的,同时混凝土表面应有防护涂层。

通过在新疆乌奎高速公路盐渍土侵蚀地区、深圳机荷高速公路以及盐田港码头等工程项目中防护涂层的使用情况看,常用的防护涂层如沥青类或高分子树脂类涂膜主要依靠其良好的附着性封堵混凝土表面微小孔隙,杜绝有害物质向混凝土内部渗透,但其缺点在于热稳定性差、易老化剥落。不太适用于南方沿海及高温地区。

无机渗透性防护材料 20 世纪 80 年代初期广泛应用于西德、丹麦、美国、比利时等国。这种材料涂刷在混凝土表面后会向混凝土内部渗透,堵塞毛细孔,在混凝土表层形成一定厚度的致密防护层,防护效果好,不会老化剥落,但其延展性及抗裂性差,随混凝土开裂深度超过涂料渗入层厚度而丧失防护功能。近年来国内外工程界均研究开发了多种新型防护材料,其中以所谓“生物水泥”型防护材料最为成功,这种由有机化合物、硅砂和硅酸盐水泥充分搅拌而成的粉状混合物,涂抹在混凝土表面后化合物溶液会渗入混凝土表层,在外部水分作用下具有防护功能的化合物晶体不断生长封闭孔隙,从而防止水分和有害物质向混凝土内部渗透,当发生一定程度的混凝土开裂时,化合物晶体在裂缝渗入的水分作用下会继续生长,封堵裂隙,维持防护功能,目前在国内外不少工程已引进这种新型防护材料。

在深圳盐坝高速公路两座跨海湾及河口的大桥下部桥墩,采用了目前国内成功使用过的一种加拿大产“生物水泥”型防护材料,并在该层防护外涂刷耐高温高分子树脂防护涂膜,形成防侵蚀、防冲刷的高效防护层(图 1)。

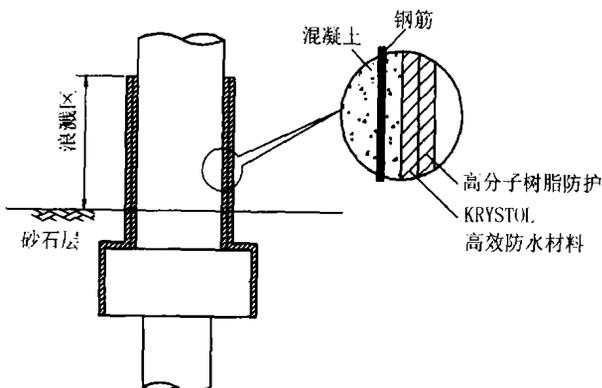


图 1 防侵蚀、防冲刷的高效防护层

### 2.3 结构钢筋保护

钢筋阻锈剂的应用在国外比较广泛,主要为亚硝酸钙、亚硝酸钠或某些有机物等碱性物质,其原理基于钢筋受氯离子侵蚀的电化学现象,亚硝酸根离子与铁离子和氢氧根离子作用生成不溶于水的情性三氧化二铁,增加了钢筋表面的钝化膜,在氯离子侵蚀过程中减少了铁离子成为电解质,从而起到阻锈作用。使用钢筋阻锈剂会加大混凝土含碱量,这会有害于碱—集料反应,混凝土含活性集料不宜采用高碱度的阻锈剂。

钢筋保护还有诸如阴极保护法、钢筋防锈涂层法等多种方法。

刚刚投入运营的广东省深圳某高速公路的一次预制 T 梁现浇桥面板普查中,多数桥面板取芯结果显示钢筋有不同程度的锈蚀现象,由于这部分构件较薄(平均厚度仅 15 cm),钢筋保护层较小,且桥面构件疲劳度高易裂,该地区临近海洋高温多雨,雨水及空气中含盐量高,对这类构件的侵害是显而易见的,在这类轻薄构件混凝土中适当使用阻锈剂是非常必要的。

深圳盐坝高速公路设计和施工中,在严格检验混凝土骨料碱活性的前提下,积极建议在钢筋及预应力构件中使用钢筋阻锈剂,推荐使用亚硝酸钙或其他优质阻锈剂,因为有些阻锈剂如亚硝酸钠的存在使混凝土具有凝结时间不稳定、析盐等缺点。阻锈剂使用前应通过试验掌握其对混凝土塌落度、初凝、终凝及早期强度的影响。

## 3 结语

沿海地区道路工程的抗侵蚀问题涉及的范围很广泛,无论设计和施工都应根据本地区的工程环境作好专项调查并采取有效的工程措施。文中介绍的仅是目前应用于道路工程的部分较成熟的经验,未对于诸如高性能混凝土、添加剂、优质混凝土施工手段及模板技术等,有待通过工程实践和广大工程技术人员共同探讨。

### 参考文献:

- [1] 刘秉京. 混凝土技术[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [2] 建筑研究设计院,等. 公路桥梁工程病害防治及检测修复实用技术大全[M]. 长春:长春出版社,2002.
- [3] 高东光. 桥位设计[M]. 北京:人民交通出版社,1995.