

# 滨海土壤环境下混凝土方桩的耐久性研究

陈新华<sup>1</sup>, 金伟良<sup>2</sup>

(1. 温州市交通规划设计研究院, 浙江 温州 325000; 2. 浙江大学结构工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 对埋置在渗透性依次减弱的4种滨海土壤环境中、且常年浸没于地下水位以下的同一批混凝土预制方桩构件进行检测, 发现桩的钢筋锈蚀轻微, 混凝土无碳化迹象, 氯离子浓度分布曲线对应于4种不同的土壤环境呈现有规律的变化, 而混凝土强度比原来的设计值有所提高这一检测结果作了分析和解释, 并得出结论: 土壤的渗透性与混凝土遭受的侵蚀程度有直接关系, 弱渗透性的土层与强渗透性的土层相比, 可以显著减少氯离子向构件内的运移, 同时也可以减轻硫酸盐对混凝土的侵蚀。由此可见, 长期处于弱渗透性土壤环境中且位于地下水位以下的钢筋混凝土, 其受到的侵蚀会相对有所缓解。

**关键词:** 桩基础; 钢筋混凝土; 渗透性; 氯离子; 硫酸盐

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)05-0018-03

## Research on Durability of Concrete Cube Piles under the Coastal Soil Condition

Chen Xinhua<sup>1</sup>, Jin Weiliang<sup>2</sup>

(1. Wenzhou Institute of Urban Communication Planning & Design, Wenzhou Zhejiang 325000, China;

2. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Series of concrete cube piles, which are buried in four different types of coastal soil with the gradient of permeability and also below the groundwater perennially, are tested. It shows that rebase are slightly corroded while no carbonization happens, the distribution of chloride is in an apparent rule according to the different soil conditions and the strength of concrete are reinforced. Those testing results are analyzed and it concluded that the corrosion condition of concrete is related to the permeability of soil, soil with lower permeability is better in resisting chloride and sulfate. Reinforced concrete, which is buried in the soil with low permeability and also below the groundwater perennially, is not easy to be corroded.

**Key words:** pile foundation; reinforced concrete; permeability; chloride ion; sulfate

由氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀, 是造成钢筋混凝土结构破坏的重要原因, 特别是对于海工结构和冬季使用除冰盐的结构。目前, 对氯离子影响钢筋锈蚀的研究极为广泛, 是耐久性研究领域的重要内容之一。

在通常情况下, 水泥水化形成的混凝土内部的高碱性环境, 使钢筋表面形成一层致密的钝化膜, 从而使钢筋免受腐蚀。然而 pH 值下降时, 这一钝化膜会被破坏, 在氧、水分存在的条件下, 就将发生钢筋的电化学锈蚀。而氯离子对钢筋混凝土结构的侵蚀机理就在于: 到达并累积在钢筋表面, 使钢筋附近的 pH 值降低, 由此破坏钝化膜, 并形成腐蚀电池, 同时起去

极化作用和导电作用<sup>[1]</sup>。所以, 氯离子是极强的去钝化剂, 并在钢筋腐蚀过程中起催化剂的作用。

## 1 现场环境

浙江某发电厂一期厂房建于1977年, 距离海岸很近。厂方拟在旧厂房厂址上改建新厂房, 新厂房的建设中需要考虑是否可继续使用旧厂房已有的大量桩基础, 因此需要对桩基础进行检测, 以了解方桩钢筋混凝土目前的质量状况, 从而确定桩基础中钢筋和混凝土的可利用状态。

收稿日期: 2007-08-02

作者简介: 陈新华(1956-), 男, 浙江温州人, 温州市交通规划设计研究院高级工程师, 主要从事道路与桥梁工程设计工作。

本次检测的方桩为同一批预制方桩, 由同一家厂商生产。在不同的4个位置挖掘4个桩坑, 坑深约4 m, 地下水位约低于地表1 m, 桩顶约在地表下2 m, 也就是说, 所有的桩都是长期浸没于水下的。各桩坑的土质情况见表1。另外, 从现场抽水和观察的情况看, 第3个桩坑土层的渗透性要比第4个桩坑好。4个桩坑土层的渗透性为依次变弱。所有桩坑均离海很近, 最远的桩坑距离海岸不超过300 m。地下水均为含盐分很浓的水。

表1 各桩坑土质描述

Table 1 Descriptions of the geotechnical in each pile pit

桩坑编号	土质描述
1	碎石、粗砂夹泥, 渗透性好。
2	上面3 m 为回填土, 夹含较多砖石瓦块, 渗透性好; 下层为硬粘土, 渗透性差。
3	灰色的淤泥, 含有有机质成分, 渗透性差。
4	灰黑色淤泥, 含有有机质成分, 渗透性差。

## 2 混凝土强度检测

使用回弹仪和钻芯2种方法对混凝土的强度进行检测。根据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23-92), 使用回弹仪对开挖出的桩基础, 共4个桩坑, 31根桩逐一检测。取芯则在开挖出的4个桩坑中, 每个坑选择3根桩, 每根桩伸出水面长度不小于1.5 m, 并在每根桩上选择上、中、下3个位置钻芯, 共计12根桩36个芯样, 测定芯样的抗压强度, 并根据《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03: 88)对结果进行换算。回弹仪法测得强度为24.4 MPa, 钻芯法测得强度的为24.37 MPa。另外, 在每个桩坑内的芯样平均强度依次为26.31 MPa, 22.96 MPa, 25.31 MPa, 24.30 MPa。

回弹仪法和钻芯法测得的混凝土强度值十分接近, 其强度等级相当于C37, 比原来设计的C30略高, 这主要是混凝土在湿养环境下继续水化的结果。而各个桩坑中的方桩混凝土的强度则有一些差异。

## 3 侵蚀情况检测

### 3.1 芯样外观和碳化深度检测

从外观看, 这批方桩使用了较大粒径的骨料, 最大粒径超过45 mm的很多。芯样表面没有开裂、灰浆剥落等劣化特征。钢筋布置较密, 保护层平均厚度28.9 mm, 但很不均匀, 标准差为10.7 mm, 有很多不足20 mm, 这显然是过薄的。钢筋锈蚀不明显, 基本上处于未锈蚀或微锈蚀状态。按照《水运工程混凝土试验规程》(JTJ 270-98)对芯样进行碳化检测, 结果表明, 所有的芯样均未发生碳化。

### 3.2 氯离子浓度检测

对钻取的芯样进行抗压强度测试后, 在每个桩坑所取的芯样中选择其中一根桩的芯样, 将其切片、粉碎, 使用RCT对其进行自由氯离子浓度的检测, 以其占混凝土质量的百分数表示。RCT是丹麦的Germann Instruments A/S公司生产的快速检测混凝土中氯离子浓度的仪器, 通过使用不同的萃取液, 既可检测混凝土中酸溶性氯离子即全部氯离子的浓度, 也可以检测水溶性氯离子即自由氯离子的浓度, 是一种快捷有效的检测手段。对RCT的介绍可以参阅文献[2]。检测结果如图1, 每条氯离子浓度分布曲线对应其所在桩坑位置,  $x$ 为到混凝土表面的距离。

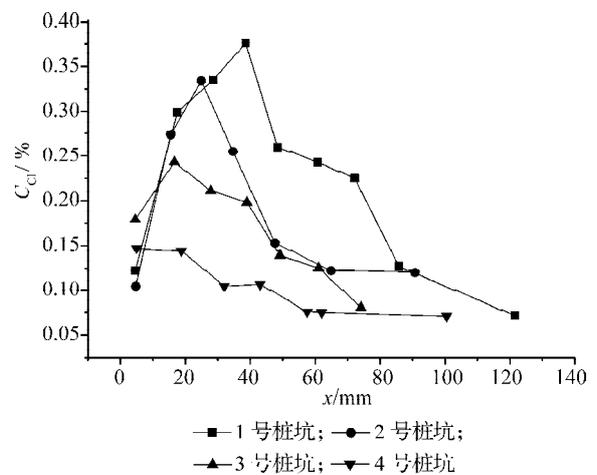


图1 各桩坑内方桩芯样的氯离子浓度分布情况  
Fig. 1 Chloride distributions of the core samples in each pile pit

图1中4条曲线都不是很平滑, 这可能跟混凝土中的骨料有关。骨料粒径过大, 导致检测结果出现了一定的离散性。

使用线性曲线拟合方法<sup>[3]</sup>计算表面氯离子浓度和氯离子扩散系数, 计算结果见表2。

表2 各桩坑内所检测试件的  $C_s$  和  $D_{Cl}$   
Table 2  $C_s$  and  $D_{Cl}$  of the samples in each pile pit

桩坑编号	检测项目	
	$C_s / \%$	$D_{Cl} / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.701 6	$15.05 \times 10^{-7}$
2	0.471 3	$6.52 \times 10^{-7}$
3	0.348 3	$9.62 \times 10^{-7}$
4	0.163 9	$8.17 \times 10^{-7}$

注:  $C_s$  为表面氯离子浓度;  $D_{Cl}$  为氯离子扩散系数。

从理论上讲, 既然是同一批方桩产品, 其  $D_{Cl}$  应当是一致的或相近的。计算结果有一点离散, 可能是桩本身在生产过程中造成的差异, 也可能是由于检测过程导致的误差等。不过大体而言, 除了1号桩坑之外, 其

它3个桩坑数值比较接近,特别是3号桩坑和4号桩坑。

### 3.3 对检测结果的分析和解释

从氯离子浓度的检测结果可以看出,无论是哪个桩坑中取出的芯样,混凝土中氯离子浓度都很高。本文检测的是自由氯离子浓度 $C_f$ ,而不是全部氯离子。通常进入混凝土中的氯离子可以分成2部分——固化氯离子和自由氯离子。一般认为,对钢筋锈蚀起作用的为自由氯离子。通过对大量的码头调查、暴露试验和现场取样,得到华南和东海海港码头混凝土结构的氯离子临界浓度(占混凝土)分别为0.105%~0.145%和0.125%~0.150%<sup>[4]</sup>。可以看出,即使按保护层平均厚度估计,钢筋表面的自由氯离子浓度也已经大大超过了临界值(曲线1,2,3)或即将达到临界值(曲线4)。桩体混凝土中氯离子浓度如此之高,可能不仅是由于桩体长期埋置于滨海土壤、浸没在盐水中的缘故。值得注意的是氯离子浓度分布曲线中最低的2个点,即曲线1的最后一个点和曲线4的最后一个点,这2个点位置较深,且数值接近,可以看作是混凝土自身含有的氯离子浓度。这2点的氯离子浓度要高于现行《混凝土结构设计规范》对混凝土中最大氯离子浓度规定值,加上在检测破碎的芯样时发现其中夹有小贝壳,因此推断这批方桩在生产时很可能掺入了海砂。

在氯离子浓度达到临界值的情况下,钢筋表面的钝化膜已经被破坏,但混凝土中的钢筋没有发生严重锈蚀,应归因于土壤和地下水中氧气的匮乏。土壤和地下水中的氧主要来自于大气,在近地表附近浓度最高,随着深度的增加迅速减少,而海水中氧的浓度只有淡水中的80%<sup>[5]</sup>。缺少氧的参与,铁基体无法失电子而被氧化,也就不会发生锈蚀;同样,混凝土没有发生碳化,可能也是由于二氧化碳含量很低造成的。就此而言,当钢筋混凝土构件位于地下水水位以下时,土壤和地下水对其有保护作用。

对比4个桩坑环境中的氯离子浓度分布情况,可以发现3个规律:

- 1) 氯离子浓度分布曲线依次降低,即4条曲线的峰值和表面氯离子浓度 $C_s$ 都依次降低;
- 2) 第1、2、3条曲线均为先上升后下降,而第4条曲线开头部分也是较平的一段;
- 3) 第1、2、3条曲线的上升段是越来越短的,即峰值点到混凝土表面的距离越来越小。

4条曲线依次降低,与芯样所处的环境,也就是4个桩坑的情况有关。4个桩坑均离海岸很近,其地下水的组分及浓度与海水相近<sup>[6]</sup>,可以认为4个桩坑内的地下水构成是一致的。各桩坑内土层的渗透性依次减弱,而氯离子侵入混凝土的程度也依次减弱,这反映出土壤的渗透性对混凝土受氯离子侵蚀程度有直接影响。土壤的渗透性越弱,受到的氯离子侵蚀程度就

越轻。

从表2的数据可以看出,土壤的渗透性对混凝土内氯离子浓度的影响主要体现在 $C_s$ 值上。方桩长期埋置在土中且浸没于地下水水位以下,不受干湿、冻融、毛细管作用和盐类结晶侵蚀等因素的影响,扩散是氯离子进入混凝土的主要途径。扩散主要是依靠浓度差,而由于土层的渗透性较弱,使得混凝土表面附近的氯离子在扩散进入混凝土后,没有得到迅速的补充,浓度梯度变小,扩散作用被弱化。因此,弱渗透性的土层类似于一个保护层,水和有害离子在其中的运移都会变得缓慢,从而有效地保护了混凝土。

第1、2、3条曲线均为先上升后下降,而第4条曲线前2个点数值也比较接近。氯离子浓度分布曲线中的上升段通常是由碳化和硫酸盐引起。文献[7]解释了碳化和硫酸盐侵蚀对氯离子侵蚀的影响。氯离子的迁移速度比其它离子快,先于其它离子进入混凝土内部。在迁移过程中,一部分氯离子被水泥石中的 $C_3A$ 结合生成 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel盐),这就是混凝土对氯离子的固化作用。根据水泥混凝土化学原理,Friedel盐是AFm家族中的一种,AFm相的结构特征决定了其易于与许多阴离子相结合,包括硫酸根和碳酸根。AFm水化物的稳定性不同且生成顺序的优先性不同,硫酸根优先于碳酸根,碳酸根优先于氯离子。碳化将从Friedel盐中置换出氯离子,生成更稳定的AFm相,被释放出氯离子在碳化区前沿造成氯离子富集,孔隙液中氯离子浓度增高。硫酸盐侵蚀过程与碳化过程类似,只是程度还要强烈一些。但是,由于Friedel盐仅微溶于水,无论是碳酸根还是硫酸根,其对氯离子的置换作用都是缓慢的,需要若干年。所以,氯离子的存在可以减缓硫酸盐的侵蚀作用,正是基于这个原因。

事实上,在土壤和地下水环境中,硫酸盐侵蚀是一种非常普遍的现象。海水中也含有大量的硫酸根离子,只是与氯离子相比较少而已。前面的检测已经表明,由于方桩长期浸没于水下,没有发生碳化,那么氯离子曲线的上升段表明是受到了硫酸盐侵蚀的影响。曲线1、2、3的上升段是越来越短的,即峰值点距离表面越来越近,表明硫酸盐的侵入深度在逐渐减小。这反映出弱渗透性的土层不仅可以减轻氯离子对混凝土的侵蚀,也可以减轻硫酸根对混凝土侵蚀。

就所检测的桩基础现阶段的情况而言,桩身混凝土强度仍然符合要求,钢筋基本上无锈或微锈,虽然其中钢筋附近的氯离子浓度已远高于诱发钢筋锈蚀的临界值,但是地下环境起到了有效的隔离作用,使得氧气无法入侵,从而丧失了钢筋锈蚀的前提条件。硫酸盐侵蚀在大量氯离子存在的情况下被抑制,也无干湿、冻融、毛细管作用和

(下转第24页)