

海洋混凝土构筑物防腐蚀译文集

中国人民解放军
海军后勤部 海洋钢筋混凝土构筑物防腐蚀研究课题组

编者的话

这本《海洋混凝土构筑物防腐蚀译文集》是由中国人民解放军海军后勤部重点科研项目“海洋钢筋混凝土构筑物防腐蚀研究”课题组组织翻译和编辑出版的，它汇集了国外近年来在这一领域的一些主要研究成果。这个课题组成员包括中国人民解放军海军湛江基地，中国科学院福建物质结构研究所二部、国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院、北京科技大学、水利部交通部南京水利科学研究院等单位。

中国腐蚀与防护学会理事长、北京科技大学张文奇教授生前对编辑本译文集给予了极大的关怀，并在百忙中为本文集撰写了序言。中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土学会理事、苏州混凝土水泥制品研究院技术顾问蒋家奋教授对本文集亦给予了很大的关怀和指导，并为一些译文作了审订。在本文集的译编过程中，还得到课题组柯朝宗、邱富荣、周正、吴荫顺等同志们的大力支持，在此谨表示衷心的感谢。本译文集主编为陈德明同志。

因受篇幅限制，本译文集将原文参考文献作了省略。

由于编者水平有限，自揣不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1991年3月

目 录

腐蚀问题的经济影响.....	(1)
混凝土海洋构筑物腐蚀破坏的评估.....	(4)
混凝土中钢筋腐蚀的一些研究.....	(10)
论钢筋混凝土的阴极保护.....	(16)
用硅铁阳极和焦炭屑复盖层的桥面板的阴极保护.....	(32)
埃耳加特系统.....	(39)
钢筋混凝土结构阴极保护的新概念—导电材料的利用.....	(42)
关于混凝土中钢筋阴极保护使用导电材料的最新研究成果.....	(54)
导电混凝土相组成和结构的特征.....	(58)
保证海水中混凝土内部钢筋的完整性.....	(61)
超高耐久性混凝土的开发.....	(64)
用于波特兰水泥混凝土的埋置参比电极之评述.....	(68)
混凝土中钢筋的腐蚀监控.....	(72)
采用电化学阻抗技术对阴极保护的混凝土结构进行监控.....	(78)

腐蚀问题的经济影响

〔美国〕 T·J· 赫尔*

在美国进入80年代头几年的时候,美国上下无不关注国内下部结构的损坏问题,这些结构包括给水系统、排水系统、公路及桥梁。更换这些损坏结构的预算已达数万亿美元。在这次会议上,我们将集中讨论一个方面,即下部结构的一个部分——我国的公路桥梁问题。

如果我们承认已经公布的某些预算,那么美国就可能由于预埋钢筋的腐蚀而蒙受30多万座桥面板的损失。而且因为腐蚀在继续不断地侵蚀破坏着钢筋,桥的这一损失数量还在逐年增长。

腐蚀不断增长的问题

腐蚀过程不是静止的,也不总是线性的。通常,在腐蚀过程中,在头5年内发生的腐蚀量在随后2.5年内即可形成,而在其后的1.25年内又可再次形成,如此不断发展下去。腐蚀过程一旦开始,它就成为一种自发的进程。讨论腐蚀的经济影响问题,就必须考虑到腐蚀过程的这一自然现象。所以,即使不加上通货膨胀的因素,现在由于腐蚀而造成的损失也会继续增长。

任其腐蚀的损失

直接损失

在美国50多万座桥面板中,有30万座桥面板现在有待于阴极保护。也就是说,这些结构基本完整,尚可修复和应用阴极保护系统。

其余的20万座桥面板,许多标明过往车辆需降低载重量,甚至关闭了。目前有待阴极保护的桥面板数量将会自动减少,这些桥面板也会落到“要更换”的地步。这个范畴正在不断扩大。

*作者为美国全国腐蚀工程师协会主席,本文是他于1985年2月在德克萨斯州圣安东尼奥市举行的《钢筋混凝土桥面板阴极保护》会议上的报告——译者注。

目前更换一座桥面板的代价约为每平方英尺34美元。如果这30万座桥面板任其腐蚀,则更换这些面板的直接损失将超过1122亿美元。

$$\begin{aligned}\text{损失经费} &= 300000 \text{桥} \times 11000 \text{英尺}^2 \times 34 \text{美元} / \text{英尺}^2 \\ &= 112200000000 \text{美元}\end{aligned}$$

(公认的桥面板平均面积为11000平方英尺)。这笔代价是按现在的美元计算的,尚未计入通货膨胀的影响或更换那些结构正在腐蚀的桥梁的费用。

在美国和加拿大桥面板混凝土内钢筋的腐蚀问题多年来已经众所周知。通过试验和通过各种系统的研究,证明只有阴极保护才能制止腐蚀。关键的一点是,不要在结构严重损坏到不可收拾,而只能采取更换时才应用阴极保护。延缓腐蚀但不能制止它的方案只能推迟投资的时间,到时美元将更不值钱。显然,任其腐蚀是极其耗费的。

间接损失

1122亿美元可以支付更换30万座桥面板的费用,但不可能是美国由于钢筋腐蚀造成的全部代价。许多看不见的损失可能远远超过直接损失。这些间接损失来自五个方面:

1) 对地方经济造成的商业亏损:当一座桥面板封闭进行更换时,对地方经济的影响是很大的。最近在费城封闭一座桥,使当地商业损失几百万美元。

2) 失去机会:更换桥面板的资金是从用于其他项目的投资中提取的。

3) 资金亏损:联邦和州政府的预算中,最大项目之一是借款利息。1122亿美元的支出肯定会增加借款及其利息。

4) 个别公司的损失:在匹兹堡,只不过一座桥降低荷载额定值,就迫使美国钢铁公司的卡车每次往返绕行26英里,从而使该公司的营运成本每年增加1.2百万美元。

5) 安全:由于腐蚀造成人员伤亡的桥梁事故,其损失带来的经济和人事影响难以和经济损失相比较,这种损失简直无法估量。

要估计腐蚀造成的间接损失,如若可能,也是困难的。保守的估计可能是直接损失1122亿美元的两到三倍。

而谁来支付这笔巨大的腐蚀代价呢?是美国的纳税者。每次当他在加油站给汽车加油时,他就得多付出一笔钱。

阴极保护的节省金额

目前,安装一套阴极保护系统预计为每平方英尺桥面板7美元。随着阴极保护系统安装得越益增多,以及系统的不断简化,该造价还会不断降低。如果现在30万座桥都采用阴极保护,则造价可能为231亿美元:

$$\begin{aligned}\text{阴极保护的造价} &= 300000 \times 11000 \text{英尺}^2 \times 7 \text{美元} / \text{英尺}^2 \\ &= 23100000000 \text{美元}\end{aligned}$$

用于阴极保护231亿美元的支出将会使美国公众直接节省891亿美元。如果计入通货膨胀

胀和更换桥面板的看不见的损失，则891亿美元的节省金额还要增加好几倍。

桥面板的阴极保护系统至少具有30年的有效设计寿命。实际下，许多阴极保护元件有着更长的寿命。倘若一个阴极保护系统已经运行了30年，而且没有发生腐蚀，则为了使桥面板再延长30年的寿命，可将该系统重新更换。

简 要 结 论

腐蚀的桥面板对整个美国经济的影响大得可能造成经济失调。更换桥面板直接耗费的1122亿美元是美国从未有过的最大支出中的一项。由于腐蚀过程递增的自然性质，这笔开支可能要在很短的几年之内即须付出。结构上无效的桥面板不可能推迟到下一个预算年再更换。

采用阴极保护至少能使腐蚀损失费用减少891亿美元。多年来阴极保护用在管道、船舶水罐及其他结构上证明是行之有效的，现在桥面板必须用它来保护。任其腐蚀下去的损失太大了。

对这个代价高昂的问题打算如何办呢？目前正在开展的三个方面的工作就是专门针对桥面板问题的：

1) 全国腐蚀工程师协会正在设立一个联合工作组 (Joint Task Force)，专门研究钢筋混凝土结构的腐蚀问题。它将邀请技术、贸易、专业协会以及政府部门等30个有关单位的代表参加。该联合工作组旨在消除许多公众和私人方面的重复工作，推荐合适的联合工作以便有效地解决问题，同时向公众宣传如何才能取得经济效益而又安全可靠。

2) 全国腐蚀工程师协会正在研制专门针对混凝土构筑物中钢筋腐蚀问题的三个标准。一个是关于新构筑物的设计依据，第二个是关于这些构筑物的阴极保护，第三个是关于现有构筑物的腐蚀控制的维护及修复依据。

3) 第三个方面是美国各州公路与运输工作者协会的新战略研究计划业已集资，用以考虑桥面板问题的哪些方面可以投资研究。

所有感兴趣的和有关人员、单位，都必须全力以赴来制止腐蚀，因为腐蚀正在破坏美国的许多钢筋混凝土桥面板。任其腐蚀下去在经济上绝不可取。它对联邦政府、各州和地方政府的巨大经济负担将是难以承受的，因为这笔负担必将由纳税人——你和我来支付。

陈德明、邱富荣译自

« Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks »,
San Antonio, Texas, February 12—13, 1985, pp. 1—3

混凝土海洋构筑物腐蚀破坏的评估

〔美国〕 V·M巴斯洛夫, M·R罗简斯基

本文是关于腐蚀破坏的工程评估。构件现场的数据是在1976—1982年间由以色列港务局在海法市伊斯杜德(亚实突)港和埃拉特港实施扩大调查计划期间收集的。本文讨论的是在四个港口码头上进行检查的第二阶段的结果。海法的货码头和客货码头都是相当陈旧的钢筋混凝土构筑物,为40年代和50年代初典型的海洋结构。亚实突的散装码头和埃拉特的主码头代表新一代的港口构筑物,其特点是扩大使用了预应力混凝土。

一、混凝土海洋构筑物使用寿命中的几个主要阶段

预埋钢筋会形成腐蚀已被认为是不可避免的,对海洋构筑物的性能到何时,其腐蚀变成不可接受的程度,进行评估是很有必要的。在与此有关的研究中,对此通常至少有三种解释:

(1) 离开纯化后的任何情况都是不可接受的。这种解释是涉及到钢筋在某特定点(局部)时的腐蚀,不允许有的损失。显然,这一看法对实际工程评估太为保守。

(2) 混凝土保护层初裂后的腐蚀为不可接受。混凝土保护层开裂标志着腐蚀发展的一个重要阶段,因为裂缝的形成使供氧量大大增加。无论如何,在大多数情况上,伴随初裂而导致的钢损失,其量虽小,却足以使结构构件的使用寿命缩短到不可接受的程度。

(3) 在“出现腐蚀”和“出现严重腐蚀”之间可能存在某一时期。这一说法可以理解为,在钢筋失去纯化保护后,甚至混凝土保护层已开裂或剥落后,很长期时间海工构筑物的腐蚀才能变得严重。根据这种理解,结构的使用寿命可以认为有下列几个主要阶段:

t_1 —从施工到出现初始可见腐蚀迹象的时间(腐蚀破坏的初始发展)

t_2 —从出现腐蚀到主要构件变为危急时刻的时间(即对于海洋构筑物而言腐蚀变得严重)。

本文主要涉及第二阶段,它又可分为如下两个时期(图1):

t_1 —区域型损坏的发展

t_2 —在开口裂缝和剥落处钢筋的腐蚀

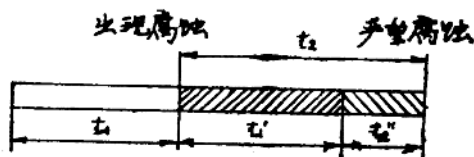


图1 混凝土海洋构筑物使用寿命的主要阶段

二、非预应力混凝土构件腐蚀破坏的工程评价

腐蚀缺陷的初始发展

在海洋构筑物中，腐蚀的初始迹象变为可见的期间是很不确定的。本文作者之一证明，在建成仅1年之后的海洋混凝土桩上就出现了特有的棕色（1970—1971年，苏联伊利切夫斯克克里海港）。在亚实突港（地中海）的使用表明，比较普遍的早期腐蚀迹象可能出象在建成7~8年之后的混凝土码头上。分析检验结果清楚地表明，损坏的主要原因是混凝土保护层不足（与设计规范相比）。可以这样假定，在地中海的环境下，50毫米厚的均匀保护层可以防止海洋腐蚀的出现至少为期15年（时间 t_1 ）。这个期限小于某些理论的预计，因为混凝土保护层的厚薄实际上不是影响腐蚀速度的唯一参数。在现场某些地方的渗透率可能大大高于用于计算碳化状况或氯离子穿透的数值。

腐蚀破坏和结构富余度

根据海洋构筑物非预应力混凝土设计规范评价检验结果时，通常发现有某些抗腐蚀破坏的富余度。下面是这种富余度的主要原因，

钢裕量：施工中钢筋使用的实际数量一般大于结构设计所要求的数量。“额外的”钢面积是由于实际设计要求计算钢筋配置或钢筋间距在施工中要进行更换所致。与实际设计依据和分析要求相比，在形成的实际钢面积中增加5%至10%是常见的。

在裂缝和剥落处钢的实际损失：从损坏的物理模型的理论分析以及实验室试验都表明，为使混凝土保护层开裂所需的转化为腐蚀产物的钢总量是小的（零点几毫米）。海洋构筑物的主要非预应力构件通常都用粗钢筋（从 $\varnothing 25$ 毫米到 $\varnothing 36$ 毫米）配筋，实际上只要用最低钢筋含钢量即可满足要求（例如桩帽）。所以，可以料到，原直径的微少损失都会引起开裂和剥落。

这一点可以用海法市客货码头桩的腐蚀来说明。该结构（混凝土桩基上的混凝土面板）在检验时已经使用了27年（图2（A））。观察表明，用8根 $\varnothing 25$ 毫米钢筋配筋的混凝土桩在水面上钢筋受到普遍腐蚀的作用。这种破坏在世界各地的港口都屡见不鲜，但是当时在以色列发现混凝土桩遭受海洋腐蚀是首例。约有31%的桩（总数851根中的260根）显示出不同程度的腐蚀破坏特征，即从个别角上的裂缝到混凝土保护层的完全剥落（图2（C））。图2（D）中的曲线表明，在剥落揭露的所有情况下（52处的随机试样），发现保护层厚度小于

60毫米的设计值,大多数约45毫米,在有些情况下,薄到20毫米。在剥落的桩角上进行的现主筋直径测量指明,钢损失一般为1.0—1.5毫米,未曾超过2.0毫米。在钢面积方面,对于 $\varnothing 25$ 毫米的钢筋而言,这相当于(平均)10%的损失。可以料想,在除敞露剥落以外的地方,钢面积的腐蚀损失会更小。考虑到先前提到的常有设计富余量,可以断定桩的结构承载能力没有减少这是有道理的。对于检验实际情况而言,说明一点是重要的,这个结论对一个结构的腐蚀情况给出了深刻的印象。

已腐蚀钢筋的埋入:观察表明,即使在混凝土保护层完全剥落之后,钢筋在混凝土内一般保持良好的预埋状态。在大多数情况下,海法和亚实码头面板和桩帽上钢筋暴露的部分为钢筋直径的1/10到1/4以内。在海法的客货码头的情况下,桩角上混凝土保护层的剥落

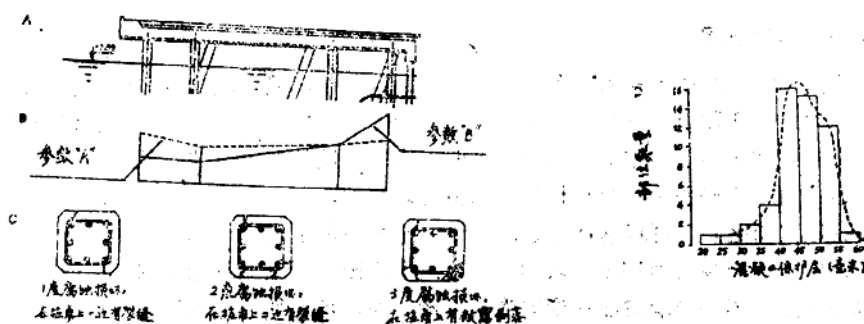


图2 海法客货码头钢筋混凝土桩的腐蚀

仅是由于有一小部分钢筋暴露的结果(实际上,在检查期间没有钢筋暴露是确定钢损失中的主要问题)。这种现象的一种可能的解释在腐蚀过程的机理中可以找到,它是以远离暴露表面强度大大降低为特征的一例如,具有25毫米保护层的25毫米钢筋的外表面边上比在钢筋背面上的腐蚀速度快六倍。这在实际上导出两个结论:

(1) 初始剥落面主要沿着钢筋的外表面边上发展。

(2) 表面剥落后,钢筋可以沿其周边的主要部分对周围的混凝土保持较好的粘附力。钢筋周围混凝土的完全损坏是很罕见的,废弃构筑物大都具有这一特征。在有效构筑物的正常维修工程中,按规范要求,需将围绕钢筋的损坏的混凝土凿去。

腐蚀破坏的分布:剩余结构承载力的评价可能需要分析腐蚀破坏的分布。富余度的两个原因常与此分析有关:

(1) 混凝土构件内应力的重分布;

(2) 最大腐蚀破坏发生在不受最大荷载的部分构件(或结构)上的可能性。

例如,海法客货码头剥落处在个别角上有10%钢筋面积的损耗,这就相当于分布在桩的中和轴的同一直线上的所有钢筋上有3%的损耗。

应该注意的是,在检查该构筑物期间,背面桩排比前面桩排更加遭受腐蚀的作用。这种

现象对于敞开的顺岸码头是典型的。它是受背墙垂直面上反射波幅的增强引起的（图2（A））。为了评价构筑物可能遭受的破坏，采用了腐蚀发展的三个级别（“度”），如图2（C）所示。然后计算两个参数：

A—桩排中全部腐蚀“度”的总和与该桩排中损坏的桩数之比

B—桩排中全部腐蚀“度”的总和与该桩排总数之比

按照定义，“A”表示遭受腐蚀作用的桩损坏的“平均”程度，而“B”表示所有桩损坏的“平均”程度。从图2（B）显而易见，对于码头的背部，所有桩损坏的“平均”程度“B”大大地增加，在同时，遭受腐蚀作用的桩损坏的“平均”强度“A”对于所有四个桩排仍然约为常数。结论是，对于个别的桩而言，腐蚀破坏度不取决于它们在码头中的位置，而在背面桩排中所观察到的腐蚀破坏的增加，是由于受作用桩的数量。这个结论为结构评价提供了基础，因为它可以将腐蚀破坏叠加在荷载分布形式上。进而分析表明，尽管在后面桩排腐蚀范围较大，但它不会立即形成结构上的问题。

损坏的前期阶段

在评估相对于检查结果存在的结构富余度时，显然，当局部腐蚀缺陷初始扩展后，被调查的构筑物仍然可以使用相当长的时间。局部腐蚀缺陷基本上不可能降低刚性框架结构的总载重能力，添加的安全限度就是从这一事实产生的。所以，在个别缺陷累积到构成区域型破坏之前尚需很长时间。在海法的客货码头，使用27年之后，仅有1%的低甲板表面上有开口的破裂。在海法的货码头，使用40年之后，面板的下表面被裂缝破裂所复盖，面板的相应值为9%，横梁为3%。在以色列各港口观察总的表明，对于在非预应力结构中初始腐蚀缺陷发展到区域型破坏（时间 $t_{1/2}$ ）至少需要10到15年。

在某些情况下，对于某一组结构构件腐蚀破坏变得严重，而其余的结构一直处于良好的状况。图3（A）提供了海法货码头混凝土面板边梁钢筋腐蚀的资料。如前所述，面板一般有一定程度的剥落。然而，边梁发现受到严重破坏，可能是机械磨损和腐蚀作用一起造成的。在特定位置上对原直径为28毫米的钢筋进行了测定，结果发展平均钢损失为12毫米或为横截面的三分之二。这显然远远超过合格的程度。

如前所述，最大的腐蚀发展是在垂直于混凝土表面的方向上。所以，测量必须在同样的方向进行。在多数情况下，这是不可能的，因为钢筋的背部一直牢固地埋在混凝土内（图3（B））。除非损坏发展到钢筋完全分离（或钢筋后面的混凝土很容易除去）的程度才能进行测量（图3（C））。因此，取样不得不受局部破坏情况的限制。

图3（A）中提供的数据，是在货码头建成之后40年内收集的，遗憾的是，关于开口剥落中钢筋腐蚀的速度没有得出任何资料。如果这个速度类似于海法和亚实突其他海洋构筑物上暴露钢筋的腐蚀速度（水线区以上最大值为0.1毫米/年），则对于预定的使用寿命（图1时间 $t_{1/2}$ ）至少可以添加8到10年。

混凝土海洋构筑物有较长的“起死回生”期，这是港口工程师所熟知的现象。因钢筋腐蚀而使混凝土海洋构筑物功能就失去的情况是很少的。在维修计划中也认识到存在很大的结

构裕量,有时腐蚀超过原横截面一半的钢筋才需要更换。

三、预应力构件性能的评价

预应力构件因为混凝土强度较高和质量控制较好,通常具有良好的耐久性。在以色列(在地中海和红海)各港口检查预应力混凝土桩,一般都证实了这一设想。在使用15到17年之久的预应力混凝土桩上观察不到腐蚀迹象。然而,下述若干实例说明,在上部结构中的预应力构件有着基本不同的情况。

上部结构中预应力构件的腐蚀

亚实突(地中海)散装码头:在进行第二

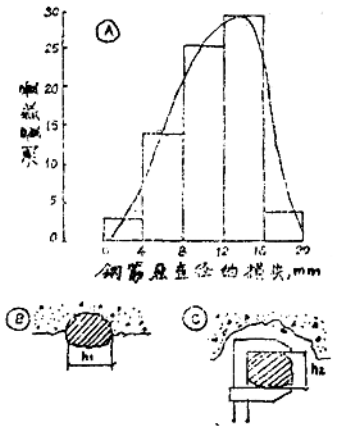


图3 海法货码头上钢筋的腐蚀

次探索检查时,该码头已经使用了16年。在上部结构的主预应力梁中发现有呈开裂和剥落状的典型腐蚀破坏。破坏集中在两处(图4):

- (1) 在穿过梁的后张钢丝索附近腹板的中部(梁总数的36%受到腐蚀);
- (2) 边角—在9.5毫米的预应力钢绞线上面(梁总数的40%受到腐蚀)。

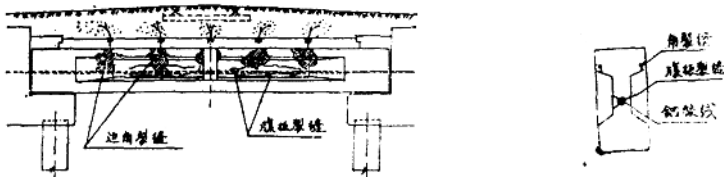


图4 亚实突散装码头上预应力梁的腐蚀

用肉眼观察,腐蚀破坏的外部表现形式看来与普通钢筋上面混凝土保护层的损坏没有不同。但是,埋入钢材的相对损失却大得多。在后张钢丝索周围除去破损混凝土的梁腹板上,有七处钢丝索横截面的平均损失约70%(总损失在50%到87%范围内)。在边角附近,9.5毫米钢绞线原横截面的平均损失仅20%。在检查过的11处当中,有三处边角钢绞线的所有7根钢丝全都腐蚀了。

埃拉特(红海)的主码头:在检查时该码头已经使用15年。在20%的预制的预应力面板上,发现混凝土保护层是封闭剥落和开口剥落状的明显的损坏迹象。有19处(被检查板的3%),在开口剥落范围内所有的预应力钢绞线都完全腐蚀。

在预应力桩和桩帽之间施工缝附近发现有程度类似的腐蚀破坏（图 5（A））。在这种类型连接的冷缝附近不可避免出现的横裂缝成了在预应力钢丝索上腐蚀浸蚀的孔道。在 23% 被检查的桩头上出现混凝土保护层开裂和剥落。在有开口剥落的 26 个桩头上（总数的 4%），所有（或几乎所有）暴露的钢丝索发现完全受到腐蚀。

埃拉特主码头的桩头可以作为与预应力钢筋腐蚀有关的另一特点的绝好例证，这一特点是区域型损坏的趋势。因为腐蚀钢绞线之间的距离较经常变动，故而它们的压力场重叠，并产生公共剥落（图 5（B）），而不是局部缺陷（图 2（C））

腐蚀破坏可见迹象的说明

海洋构筑物预应力和非预应力构件腐蚀开裂结构蕴涵（structural implications）基本上不同，这可以从损坏的物理模型以及从不同直径钢筋周围应力分布的有限元分析中得出，而检测结果最能清楚地证明这一点。在粗钢筋附近出现腐蚀裂缝表示其原横截面的

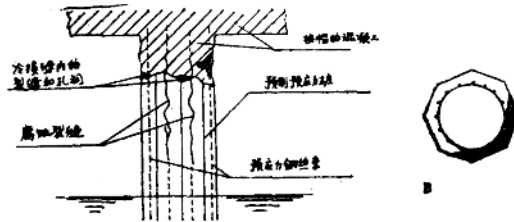


图 5 埃拉特主码头上桩帽界面附近钢绞线的腐蚀

损失比较少。这是因为，伴生的腐蚀产物数量足以产生裂缝或甚至导致完全剥落。来自预应力钢丝索上所产生的腐蚀产物当量（以诱导应力条件表示）会相应形成更显著的体截面的减少。

这些见解对于检测结果的说明会有很大的影响。在普通钢筋上面混凝土保护层的开裂，在大多数情况下并不意味着严重的结构破坏。相反对于预应力钢绞线上面的腐蚀开裂却是严重的。

预应力混凝土海洋构筑物使用寿命的主要阶段也可以看成是完全不同的。在腐蚀初始可见迹象出现后，在局部面上没有结构富余度。但还有大量的富余度在总体上可以发现，即由于这样的事实，某些钢绞线即使局部完全破坏也不足以引起结构构件的破坏。换句话说， t_2 （图 1）的期限对预应力结构较短，仅由 t_1 部分（区域型损坏的发展）组成。

结 论

（1）检验结果表明，“严重腐蚀”的定义必须根据海洋构筑物使用寿命的实际来评

价，而不是根据局部腐蚀发展中的主要阶段来评价。

(2) 海洋混凝土构筑物抗腐蚀损坏的富余度有若干原因。它们包括设计的允许应力，应力重分布以及最大腐蚀和最大荷载的部位不在一起的可能。

(3) 检验结果表明，非预应力构件中的初裂和剥落通常不表示结构损坏。在出现腐蚀破坏后可以指望有相当长的使用寿命。

(4) 预应力构件的腐蚀开裂是严重损坏的迹象，它表明钢绞线横截面损失较大和该结构使用寿命的减少。

陈德明，柯朝宗 译自 F I P, 1989、N 2

蒋家奋校

混凝土中钢筋腐蚀的一些研究

[新加坡] S. 罗伊, C. 马西

摘 要

混凝土中钢筋不易发生腐蚀是由于在钢筋表面形成一种普通显微镜看不出其厚度的使钢筋钝化的无孔氧化膜的缘故。由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解所造成的混凝土孔隙中高 PH 值使钢筋钝化。在钝化条件下，混凝土中钢筋并不腐蚀。但是，由于混凝土的碳化作用造成 PH 值的降低或者由于氯离子的作用钢筋钝的消失均能引起钢筋的腐蚀，从而使混凝土开裂继而使混凝土剥落。本文作了简短的简言之后，分析了氯化物、碳化作用、配合比设计和实际施工等的影响，描述了钢纤维增强混凝土中纤维腐蚀的情况，接着介绍了诸如环氧涂层、镀锌、阴极保护和使用阻锈剂等保护方法。本文还报导了使用五种不同种类的波特兰水泥所制作的砂浆来代替混凝土主要是为了获取更好的均匀性。当然，我们希望从上述试验中得到的结果能完全适合于混凝土，因为氯离子的去钝化作用并不受惰性粗集料的影响。在用 1 份水泥、2 份砂和 0.45 份盐溶液制成的砂浆块体中埋置两块钢筋，对于每种水泥使用五种浓度不同的盐溶液制得五种块体，然后使用 PARC 恒电位仪测得阳极和阴极极化情况。从数据中可以看出高含盐量引起埋置钢筋的较大腐蚀。另外，从这些腐蚀数据也可看出水泥型号对埋置钢筋腐蚀行为的影响。在使用不同类型水泥和不同浓度盐溶液所制成的试块中钢筋腐蚀电位的测试证实了上述极化数据。

一、混凝土中钢筋的腐蚀

1. 前言

混凝土一般对埋置在其中的钢筋具有保护作用。由于混凝土混合料中水泥水化释放出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，它使混凝土孔隙中的水具有高碱性，混凝土中钢筋周围有高碱性的水存在，从而使腐蚀得以防止。然而如果发生如下情形，混凝土中钢筋还是有可能发生腐蚀。

- (i) 混凝土受氯化物污染
- (ii) 混凝土碳化作用
- (iii) 不良的配合比设计
- (iv) 质量低劣的实际施工

2. 氯化物的影响

英国建筑科学研究院评定了由于氯化物所引起的腐蚀危险。

- 低 (氯离子含量 $0 \sim 0.4\%$)
- 中 (氯离子含量 $0.4 \sim 1.0\%$)
- 高 (氯离子含量 1.0% 以上)

(注：所用百分比为氯离子对水泥的重量百分比)

美国联邦公路局控制氯离子与水泥的重量百分比在 0.2% 以下。

现行英国钢筋混凝土标准规定混合物氯化物总含量与水泥的重量比必须控制在 0.4% 以下，并要防止额外增加 CaCl_2 。

氯化物的存在并不降低混凝土中钢筋周围水的 PH 值，但氯化物破坏了钢筋表面的保护膜，提供凹陷侵蚀。凹陷侵蚀的结果是每个阳极点的 PH 值降低，由此腐蚀趋势进一步增大。氯离子不会因腐蚀反应消耗，因此它们还可参与新的侵蚀。由于腐蚀产物比原始反应物具有更大的体积，从而产生较大的突发应力，引起混凝土的开裂和剥落。这时更多的腐蚀性物质能接触到钢筋，于是腐蚀侵蚀会以更快的速度进行。

含氯粗集料、未经冲洗的海砂或杂质水（如废水、海水等）可以导致氯化物污染。在五、六十年代，氯化物曾特意以 CaCl_2 的形式用作促凝剂和抗冻剂。从水化前混合料中所带来的氯化物，如果是化学结合组成固体化合物就可能没有害处。如果氯化物进入已完成水化后的混凝土，它能增加混凝土孔隙中游离氯离子的浓度从而增加腐蚀危险。因此，在混凝土中氯化物进入的时间是极其重要的，它决定着有否腐蚀危险。

3. 碳化的影响

二氧化碳能与混凝土孔隙水中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应从而降低其 PH 值。12 年的平均碳化深度大约为 20mm ，最大为 32mm 。在环境相同的条件下，碳化速度取决于混凝土的密实度。

多孔混凝土密实性低，渗透性高，从而对碳化表现出较低的阻力。其它酸性气体污染物象二氧化碳那样也能降低混凝土孔隙水中 PH 值而导致钢筋腐蚀。酸性气体腐蚀（归因于二氧化碳或其它酸性气体污染物），一旦接触到钢筋，腐蚀即开始发生。通常这种腐蚀被限制在从表层往里的一定深度范围内，这种腐蚀一般来说比较均匀。

房屋及其他建筑物中的混凝土通常暴露在氯化物和二氧化碳同时存在的条件下，而这种组合提高了腐蚀的危险性。二氧化碳能从含氯络合物，例如于稳定性需要高 PH 值的氯铝酸盐中分解出自由氯离子。氯化物和碳化影响这些问题在高渗透性混凝土（大的水灰比）和质量低劣的实际施工（如缺乏覆盖）中则更为严重。在某些地区，使用除冰盐液促使结构物表层污染，这是另一种因素。

4. 配合比设计的影响

使用富灰配合比时钢筋腐蚀的危险比少灰配合比要小。富灰配合比提高了工作度，它们通常比少灰配合比具有较低的水灰比，并具有较高的抗压强度。工作度不变时，通过使用塑化剂可保持浆体与集料体积之比不变，并可降低水灰比。正如使用缓凝剂和引气剂一样，将来，塑化剂将会大量采用。

5. 实际施工的影响

通过对16座建筑物约10000次保护层的测量，评定了各种工程中的不同，并阐明了不同构件（梁、板等）、工程大小（楼层数目）、完成形式（现浇或预制）等各种调查结果的变化。在17项工程中，有一项工程保护层超过规定要求的79%，在另一项工程中低于18%。在保护层厚度超过规定保护层厚度0.6的基础上来比较时，评比中最好的工程仅列为第三。这些研究尽管不能发现任何能解释上述观察结论不同的内在联系，但从中可以领会到施工质量低劣的存在，并认识到在施工中为防止钢筋腐蚀采用更好的质量控制的必要性。

二、钢纤维增强混凝土中钢纤维的腐蚀

当钢筋直径增大时，混凝土开裂和剥落的危险增大。混凝土中钢纤维的腐蚀和钢丝网水泥网格的腐蚀一样，腐蚀产物的体积沿着一种独特的线路聚集堆积，但一般说来，它并不足以引起开裂和较大的剥落。在钢纤维增强混凝土中，钢纤维随机地分布在水泥浆基体中，在这类复合组成物中，当钢纤维在复合组成物的表面时，它们直接暴露在外界环境，它的最小保护层甚至是零。在未开裂的钢纤维增强混凝土中钢纤维的腐蚀不是一个问题，暴露在恶劣环境下几年也没有发现未开裂混凝土的破坏。在钢纤维增强混凝土中，钢纤维的直径一般小于0.5毫米，剥落通常不会发生。由于钢纤维随机地分布在水泥基体中，腐蚀渐渐发生，也很少象一般常见的从表面往里进行那样。

必须超过一定的 $[Cl^-] / [OH^-]$ 值, 腐蚀才能发生。当这个比值增大时, 腐蚀危险增大, 但现在对这个临界值的大小还没有一致的意见。钢纤维具有很大的表面积对体积的比值, 同普通的钢筋相比, 它具有巨大的表面积, 与碱性水泥浆基体结合好, 对钢纤维增强混凝土中, 凹孔中由于氯离子扩散慢和氢氧根离子浓度高, 钢筋重新钝化。在凹孔中, 阳极形成, 相邻的钝态金属变为阳极。在这类腐蚀中阴极对阳极的面积比是很重要的。在钢纤维增强混凝土中, 阴极面积小, 所以即使腐蚀开始发生, 后来的速度也很慢。已经证实, 在一个相对湿度在65%~85%范围内的地区, 一个钢纤维增强混凝土水罐即使仅有5~10mm的保护层, 但它也能有超过100年的安全使用期。

三 保护方法

1. 环氧涂层

在美国, 桥面板广泛采用给钢筋涂上环氧涂层来保护混凝土中的钢筋。已涂环氧涂层的钢筋不论是自然的还是加速的海洋暴露试验都具有极好的腐蚀抑止作用。即使对于已损坏的涂层, 已涂环氧层的钢筋所受到的损害不仅很小并可忽略, 而且同未涂的和镀锌保护的钢筋相比要小得多。

2. 镀锌钢筋

实践中也采用镀锌钢筋。在波特兰水泥的PH值下, 碱性足以使锌溶解形成可溶性的锌酸盐和释放出气体氢。锌的溶解发生在最初的一、二个小时内, 浇注以后, 在混凝土的初凝前就发生。由于锌的溶解, 释放出气体氢包围在钢筋周围, 从而使钢筋与混凝土的粘结力大大减弱。锌的溶解可以通过使用铬酸盐使之钝化而得以阻止。铬酸盐大约以水泥重量的70 P P m浓度加入就能导致钝化和阻止锌的溶解。六价铬起钝化作用, 铬酸盐可以以铬酸钠或三氧化铬的形成加入, 铬也可以直接掺入到钢筋中。

锌要比钢具有更好的抵抗氯化物侵蚀的性能。混凝土的碳化作用使PH值降低, 这也同样引起锌的腐蚀, 但其腐蚀速度是最低的。

3. 阴极保护

钢的阴极保护在土壤或海洋中是很普遍的。但由于混凝土的高电阻, 钢筋阴极保护存在着一些设计上的困难, 直到近期才开始被工程实际应用。早期的设计是高硅铸铁阳极外涂导电表层(石油炼焦或沥青混合物), 外再覆盖一层辅助的沥青混凝土层。当今使用的阳极是网状镶板阳极(如镀有钛的), 用混凝土或灰口铁作外罩把它安装在混凝土表层。导电聚合物丝网也可作为阳极。

导电涂层系统可以适用于任何形状任何方位, 并不带来外加重量和空间限制方面的问题。

题。喷镀锌涂层混凝土看来象是这一种系统,电可以通过用环氧粘结于混凝土表面的铜、黄铜、不锈钢丝而施加到结构物上。对于顶部表面暴露于车辆交通的桥面板或停车场面板,电线可以连接到板的底表面上,再通过板的中心槽来连接。

控制标准列述如下:

1) 在早期,至少是使所有的电位都必须改变到最大阳极电位以下。

2) 关闭外加电流4小时时的100mV的电位偏移是另外一个标准。如果偏移值小于100mV,则外加电流有待增加。

发现仅 $5 \sim 20 \text{ mA/m}^2$ 的电流密度满足于该标准的要求,无论在低氯或高氯环境下,都能提供良好的保护。

3) 电位不得超过 $-1100 \text{ mV (C. S. E.)}$ 。

4. 使用腐蚀抑制剂

亚硝酸钙作为混凝土的一种外加剂能使钢筋钝化继而阻止钢筋腐蚀。但是,亚硝酸盐具有促凝作用,必须同时使用缓凝剂来抵消这种附加的影响。希望通过进一步研究工作,从中能找到一种合适的化合物,这样,表面的钢筋混凝土通过适当的外加剂就能保护。

四、在氯化物环境中混凝土内钢筋腐蚀的一些试验研究

通过卧式磨光机把钢筋试片(片钢 $7.6 \text{ Cm} \times 2.5 \text{ Cm}$)磨细具有相当好的表面光洁度,把边挫平以除去氧化物和其他污染物。每个试片经丙酮漂洗以除去油污、油脂等,再经蒸馏水清洗。使用胶合板模来制作混凝土试块(尺寸为 $2.5 \times 5.1 \times 7.6 \text{ Cm}$)。经过上述过程处理的两个钢筋试片被埋置在混凝土块体中。混凝土采用1份水泥、2份砂和0.45份盐溶液。盐溶液采用五种不同的NaCl浓度2%、1%、0.5%、0.1%、和0%。对在新加坡广泛采用的五种水泥进行了研究,简称A、B、C、D、E。混凝土块体浇注以后在试模中养护24小时,然后用PARC恒电位仪测定,研究极化情况。埋置在混凝土中的两片钢筋,一片作为工作电极,另一片作为它的相对电极。使用Ag/AgCl参比电池。每个块体然后放在同样盐液中进行极化试验。

首先,朝着正的或不易起化学反应的方向增加电位差测得阳极极化电位。断开,使电极发生去极化作用。然后测量阴极极化情况。图1给出用水泥A制作样品的试验结果。B、C、D的结果相类似。图2是E类水泥混凝土的极化曲线图。图3表示对所有水泥随氯含量增加,阳极电流密度相应增加,图中看出E类水泥在这方面特别明显。图4给出了五种不同的水泥和每种水泥五种氯离子浓度下的腐蚀电位。图中发现E类水泥具有比其他种类水泥更大的负电位。极化曲线图也证实了对于所有的水泥当其氯化物含量增加时腐蚀程度增加。对E类水泥混凝土而言,这方面表现得更为明显。