

不锈钢筋 混凝土结构研究

BUXIUGANGJIN
HUNNINGTU JIEGOU YANJIU

张劲泉 李承昌 郑晓华 张江威 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

不锈钢筋 混凝土结构研究

张劲泉 李承昌 郑晓华 张江威 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是关于不锈钢钢筋混凝土结构研究方面的专著,全书共七章,主要总结了混凝土结构的腐蚀及提高耐久性的各种方法,分析其优点和不足。在分析不锈钢的分类和性能基础上,在国内首次开发研究,重点研究了 530 级不锈钢筋的力学、工艺、与混凝土黏结、耐氯离子耐腐蚀性能及不锈钢筋混凝土梁破坏试验,分析了不锈钢筋与普通钢筋性能的差异,给出了不锈钢筋混凝土构件设计方法,为其在腐蚀环境中应用提供理论支撑,并简单介绍了部分国内工程应用情况。

本书可为从事沿海工程设计、海洋资源开发、公路桥梁、港口码头等专业的科研人员、工程技术人员参考,也可作为高等院校的教师、研究生、本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

不锈钢筋混凝土结构研究/张劲泉等编著. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2015. 10
ISBN 978-7-114-12431-0

I. ①不… II. ①张… III. ①钢筋混凝土结构—研究

IV. ①TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 183573 号

书 名:不锈钢筋混凝土结构研究

著 作 者:张劲泉 李承昌 郑晓华 张江威

责任编辑:崔 建

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11.5

字 数:260 千

版 次:2015 年 10 月 第 1 版

印 次:2015 年 10 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12431-0

定 价:58.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着“一带一路”国家战略的推进,贸易和物流迅速的发展,跨海桥梁、港口码头等重要基础设施大规模兴建,这些设施主要采用钢筋混凝土结构。钢筋混凝土通常采用普通碳素钢筋作为骨架,由于钢筋锈蚀引起的混凝土开裂和剥落、降低结构使用寿命问题已引起各方面的极大关注,尤其是在氯化物等腐蚀介质含量高、使用除冰盐和海洋环境中,这个问题尤为突出,因此,采取经济有效的措施,预防和控制钢筋混凝土结构的腐蚀破坏,是世界各国普遍关心的研究课题。

当前,提高钢筋混凝土结构耐久性的措施可归纳为两大类,一类是针对混凝土自身采取的措施,如采用高性能混凝土、增加保护层厚度以及喷涂硅烷防护等;另一类是针对钢筋易腐蚀采取的措施,主要有使用钢筋阻锈剂、环氧涂层钢筋、耐腐蚀的复合钢筋(如镀锌钢筋和不锈钢包覆钢筋)以及阴极防护等。第一类的高性能混凝土由于使用了较多的胶凝材料,很难避免混凝土表面不出现裂缝,这些细微的裂缝给腐蚀介质提供了渗透路径;混凝土保护层厚度过大会限制构件力学性能的发挥、造成经济上的浪费,且更宜出现表面收缩裂缝;混凝土表面涂层对已经出现了微裂缝的混凝土构件效果不佳,且其有效作用时间仅15年左右,不能满足长期的耐久性要求。第二类的钢筋阻锈剂的保护年限一般为25年,在海洋建筑的水位变动区和浪溅区,海水侵蚀导致阻锈剂流失,其保护年限更短;环氧涂层钢筋在施工过程中涂层容易遭到破坏;阴极保护若出现需保护的钢筋没有完全的电连续性、阴极系统和阳极系统短路等,可使阴极保护系统失效。因此这些措施存在着不足,不能完全解决钢筋混凝土结构的腐蚀问题。

充分利用不锈钢的耐蚀等优异性能,在钢筋混凝土结构受海洋环境及其他腐蚀介质侵蚀的部位采用不锈钢筋代替传统碳素钢筋,彻底解决钢筋腐蚀病害,延长钢筋混凝土结构使用年限,提高其耐久性,为钢筋混凝土结构防腐提供新思路,为“一带一路”国家战略保驾护航。

本书主要总结了混凝土结构的腐蚀及提高耐久性的各种方法,分析其优点和不足,在分析不锈钢的分类和性能基础上,在国内首次开发研究,重点研究了530级不锈钢筋的力学、工艺、耐氯离子耐腐蚀性能的黏结、不锈钢筋混凝土梁及不锈钢筋混凝土构件腐蚀试验,为其在腐蚀环境中应用提供理论支撑,并在部分国内大型工程中得以应用。

本书是交通运输部科技项目《桥梁用不锈钢筋研发与应用(2011318223880)课题组》的主要研究成果。在课题研究及本书成稿过程中,李清富、赵尚传、王辉绵、曹娇婵、耿会涛、刘汉勇、林世旭、李威、欧阳平、朱坚、黄德耕、俸荣臻、张恒瑜等人参与了相关工作,为本书成稿做出贡献,在此对他们表示衷心感谢,同时也衷心感谢交通运输部公路科学研究所和北京公科固桥技术有限公司对本书的大力支持。

因时间仓促,作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请各位续者谅解并批评指正。

著 者
2014年11月

目 录

1 钢筋混凝土结构的腐蚀	1
1.1 混凝土结构中的钢筋锈蚀	1
1.2 钢筋混凝土结构的腐蚀破坏	5
1.3 混凝土结构桥梁腐蚀现状	7
2 提高钢筋混凝土结构耐久性的方法	16
2.1 高性能混凝土	16
2.2 增大混凝土保护层厚度	17
2.3 混凝土表面涂层	18
2.4 钢筋阻锈剂	21
2.5 环氧涂层钢筋的应用	23
2.6 阴极保护	25
2.7 不锈钢包覆钢筋	36
2.8 热镀锌钢筋	36
2.9 不锈钢筋	39
3 不锈钢的分类及性能	44
3.1 不锈钢的分类	44
3.2 各国不锈钢牌号表示方法	52
3.3 不锈钢的物理性能	55
3.4 不锈钢的力学(机械)性能	57
3.5 不锈钢的耐腐蚀性能	65
4 不锈钢筋的力学及工艺性能	82
4.1 不锈钢筋的基本力学性能	82
4.2 不锈钢筋的工艺性能	102
4.3 不锈钢筋与混凝土的黏结性能	110
5 不锈钢筋的耐腐蚀性能	120
5.1 不锈钢筋在含 Cl^- 的混凝土孔隙液中的腐蚀试验	120
5.2 不锈钢筋混凝土模拟构件加速腐蚀试验	124
5.3 不锈钢筋混凝土构件加速腐蚀试验	136

5.4	不锈钢筋盐雾腐蚀试验及腐蚀后力学性能	140
6	不锈钢筋混凝土构件试验研究	148
6.1	试验梁设计	148
6.2	试验过程	151
6.3	试验分析	152
7	不锈钢筋的工程应用	157
7.1	园里溪桥	157
7.2	红树林大桥	160
7.3	港珠澳大桥	165
	参考文献	167

1 钢筋混凝土结构的腐蚀

1.1 混凝土结构中的钢筋锈蚀

根据热力学原理,暴露于自然环境中的铁具有被锈蚀的趋向,即还原为低能量状态的氧化铁。但实践表明:即使在潮湿环境中或有可能氧化的环境中,优质混凝土中的钢筋是不会锈蚀的,这是由于混凝土孔隙中溶液的 pH 值为 12 ~ 13,钢筋在这种高碱性条件下,只要含有少量氧气,由于初始的电化学腐蚀,都会迅速形成一层非常致密、厚 $(2 \sim 10) \times 10^{-9} \text{ m}$ 的尖晶石固熔体 Fe_3O_4 - $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 膜,这层膜牢牢吸附于钢筋表面上,使钢筋很难继续进行阳极反应。从电化学上看,正是由于混凝土中的钢筋由活态转化为钝态,因此这层膜叫钝化膜。如果混凝土所固有的这种致钝化特性能长期保持,在钢筋混凝土结构的整个使用寿命期间,钝化膜都是稳定的,但是有两种不同的机理可能破坏钝化膜:

- (1) 混凝土碳化, CO_2 与混凝土孔隙溶液中的碱性物质起化学反应,导致 pH 值低于 10;
- (2) 氯离子等酸性离子侵蚀,使孔隙中溶解的氯离子含量超过临界值。

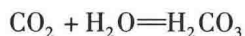
1.1.1 混凝土碳化

当水泥遇水后,发生化学反应形成水化硅酸钙 CSH 胶凝和氢氧化钙。其中一部分氢氧化钙和其他碱性化合物会溶于孔隙溶液中,但大部分仍以固态结合在硬化水泥浆体中。当空气中二氧化碳扩散到混凝土孔隙溶液中时,与溶解的氢氧化钙起中和反应,此时该孔隙溶液中的 pH 降低,即混凝土发生碳化。

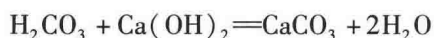
碳化过程可分为三个阶段:

第一阶段是 CO_2 通过扩散到达混凝土中;

第二阶段是 CO_2 溶解到孔隙溶液中形成少量的碳酸:



第三阶段是碳酸与溶解到孔隙溶液中的氢氧化钙发生化学反应形成碳酸钙和水:



当孔隙溶液中的氢氧化钙由上述反应消耗掉时,反应产物将周围毛细孔堵塞,不再有更多的氢氧化钙参与中和反应,此时孔隙溶液的 pH 便由原来的 12 降到 8.5 左右。在这种条件下,钢筋钝化膜遭到破坏,即去钝化,从而导致钢筋的锈蚀。图 1-1 描述了钢筋锈蚀速度与孔隙溶液中 pH 值的关系。

碳化深度可以通过 Fick 的时间开方定律来描述:

$$X = \sqrt{2D \frac{C_1}{C_2} t} \quad (1-1)$$

式中: X ——碳化深度, mm;

D —— CO_2 在混凝土中的扩散系数, $\text{mm}^2/\text{年}$;

C_1 ——空气中 CO_2 的浓度, kg/m^3 ;

C_2 ——单位体积混凝土碳化所需要的 CO_2 量, kg/m^3 ;

t ——碳化时间, 年。

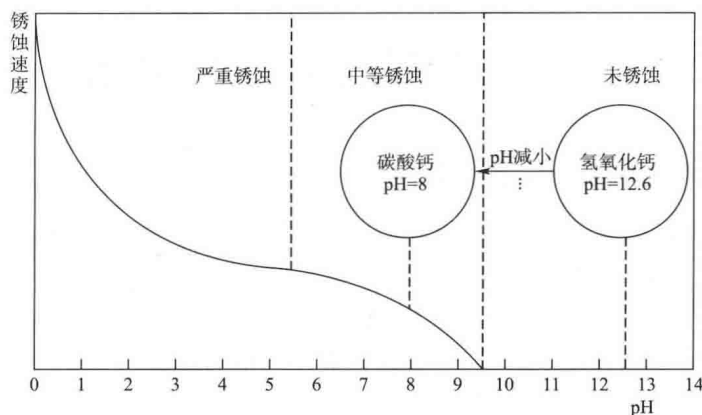


图 1-1 钢筋锈蚀速度与混凝土孔隙溶液 pH 的关系

由上式可知,影响碳化的因素可归纳为以下几点:

(1) 含水率。碳化速度与混凝土饱和状态有关,若混凝土孔隙中充满了水分,则 CO_2 无法扩散进去,即扩散系数 D 趋近于零。而在干燥的混凝土中,尽管 CO_2 扩散系数很大,但是由于孔中的水量不足以发生碳酸化反应,混凝土碳化仍无法进行。最适宜混凝土碳化的相对湿度为 65% ~ 75%。

(2) 混凝土养护条件。混凝土成型后,若其表面没有足够的水分以保证继续水化,则导致表面区域的高孔隙率,从而降低了抵抗 CO_2 的扩散能力。

(3) 裂缝及缝隙。 CO_2 的扩散系数 D 在开裂或没有良好成型的混凝土中与密实混凝土相比要增大很多。

(4) 空气中 CO_2 的浓度。农村地区空气中 CO_2 的浓度为 0.04%,城市空气中为 0.4%。在某些空间中,如制奶、制酒厂房以及停车场内, CO_2 的含量为自然空气中的 30 倍。

(5) 水泥种类。氢氧化钙的含量与水泥的种类有关。例如,在高炉矿渣水泥或粉煤灰水泥的水化产物中,氢氧化钙的含量比普通硅酸盐水泥要低。

1.1.2 氯离子侵蚀

由于混凝土结构在许多情况下与含有氯离子的溶液接触,氯离子以扩散的方式或由毛细孔吸附而被传输到混凝土内部的钢筋表面。

氯离子导致钢筋锈蚀是一个很复杂的电化学过程,这个过程可比作电池反应。电池的电极是引起阳极或阴极作用于钢筋的不同表面。与充电电池不同的是,该锈蚀过程是不可逆的。锈蚀电池的电压由钢筋表面的电位差形成。钢筋锈蚀所需的电位差是由混凝土与钢筋接触部分的局部不同通风条件、钢筋表面的不均匀性或钢筋表面锈蚀产物的不均匀性所形成的。在混凝土中,钢筋总存在电位差,如果由钢筋表面的阴阳极组成的锈蚀电池具有活性的话,那么电流就流过阴阳极,根据法拉第定律,电流与铁电离速度成正比,锈蚀过程见图 1-2。氯离子引起钢筋锈蚀过程如下:

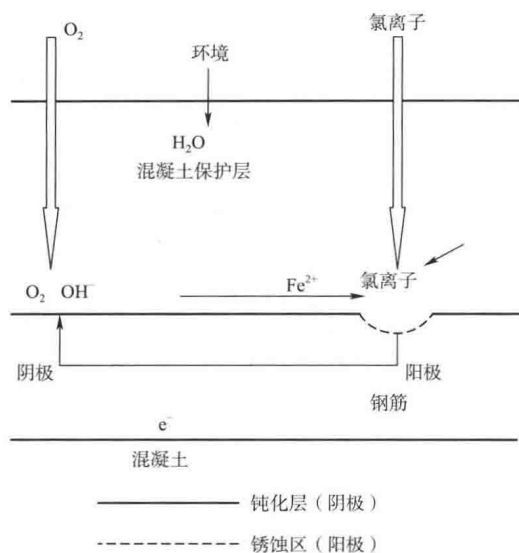
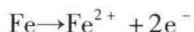
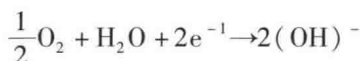


图 1-2 氯离子侵蚀钢筋锈蚀机理

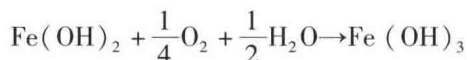
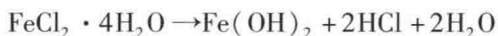
(1) 在阳极,铁失去电子变成铁离子,由于水溶液氯化铁($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)的形成,钢筋表面钝化膜破坏。阳极反应如下:



(2) 在阴极,电子、水、氧气转化为氢氧根离子。阴极反应并不引起钢筋的任何损伤,相反可起到保护钢筋的作用,这称为阴极保护。阴极反应如下:



(3) 氢氧根离子通过阴阳极之间所产生的带电区域向阳极方向传递带有负电荷的离子。在阳极附近, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 向含氧量较高的混凝土孔溶液中迁移,分解为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。根据温度和通风条件,这些中间产物可能继续反应,生成最终的铁锈。



如前所述,钢筋表面的氯化物必须达到一个临界值,钢筋才会发生腐蚀并维持在较高的腐蚀速度,该临界值称为混凝土的氯化物临界浓度。氯化物临界浓度是表征混凝土中钢筋耐腐蚀性能的一项十分重要的指标。不同混凝土构件、同一构件中不同位置的氯化物极限浓度都会不同,这是因为钢筋腐蚀发生的因素有很多,主要有:混凝土孔隙溶液中的氢氧根离子浓度、钢筋的电位、钢筋/混凝土界面的孔隙。其他影响氯化物临界浓度的还有:水泥成分、含湿量、水灰比和温度等。

目前,世界上对氯化物临界浓度测定尚没有统一的标准试验方法,因此,对氯化物浓度也没有统一的规定。多年来,对于氯化物极限浓度值和氯化物浓度的表达方式存在一定的争议。最常用的表达方法有:氯化物质量占水泥质量的百分比、单位质量混凝土中的 Cl^- 的质量和 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 。

表 1-1 是美国混凝土协会标准《Guide to Durable Concrete》(ACI 201.2R-08)、《Protection of Metals in Concrete Against Corrosion》(ACI 222R-01)和《Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary》(ACI 318-08)对混凝土中氯离子含量的规定。表 1-2 是我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)对桥梁混凝土氯离子含量的规定。表 1-3 是我国《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ 275—2000)对海港工程混凝土氯离子含量的规定。

ACI 混凝土中氯离子含量的限定值(占水泥质量百分比,%)

表 1-1

混凝土类型		ACI 201.2R-08	ACI 222R-01	ACI 318-08
预应力钢筋混凝土		0.06	0.08	0.06
普通钢筋 混凝土	湿环境,有氯盐	0.10	0.10	0.15
	一般环境,无氯盐	0.15	—	0.30
	干燥环境或有外防护层	无规定	0.20	1.00

JTG D62—2004 混凝土中氯离子含量的限定值(占水泥质量百分比,%)

表 1-2

环境类别	环境条件	最大氯离子含量	
		钢筋混凝土	预应力钢筋 混凝土
I	温暖或寒冷地区的大气环境、与无侵蚀性的水或土壤接触的环境	0.30	0.06
II	严寒地区的大气环境、使用除冰盐环境、海滨环境	0.15	
III	海水环境	0.10	
IV	受侵蚀性物质影响的环境	0.10	

JTJ 275—2000 混凝土中氯离子含量的限定值(占水泥质量百分比,%)

表 1-3

预应力混凝土	钢筋混凝土
0.06	0.10

一些研究者认为,氯离子引起混凝土中钢筋去钝化应取决于钢筋周围混凝土中的 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$,而不是单纯的氯离子含量。Hussian 给出的值为: $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] \leq 0.60$ 。Diamond 综合各方面的研究成果,发现不同的 pH 值碱溶液中具有不同的 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 临界值,能否将 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 作为临界值指标目前尚无定论。

另一个问题是使用游离氯化物浓度还是总氯化物浓度。混凝土中的氯化物有两种存在形式:一种溶解于混凝土孔隙溶液中,是水溶性的;另一种已经与水泥水化产物结合,是酸溶性的。一般认为,游离氯离子参与氯化物的传输和钢筋的腐蚀过程,结合的氯化物一般不参与这两个过程。当环境发生改变,游离氯离子浓度发生变化时,已结合的氯化物含量也会随之改变,以达到新的平衡。

1.2 钢筋混凝土结构的腐蚀破坏

1.2.1 钢筋混凝土结构腐蚀破坏的原因

桥梁钢筋混凝土结构通常具有较大的钢筋保护层厚度和高质量混凝土,桥梁暴露于海洋环境以及冬季使用除冰盐,导致氯化物向钢筋混凝土结构中渗透,并最终穿透保护层,是造成桥梁钢筋混凝土结构腐蚀破坏的主要原因。

图 1-3 是使用除冰盐桥面板钢筋腐蚀的典型实例,桥面板顶层钢筋附近混凝土中的氯离子浓度要远远大于底层钢筋附近混凝土中氯离子的浓度,这样就形成了宏观腐蚀电池。顶层钢筋成为大的阳极区,底层钢筋成为大的阴极区,混凝土成为电解质,绑扎钢筋的扎丝等金属成为金属导体。

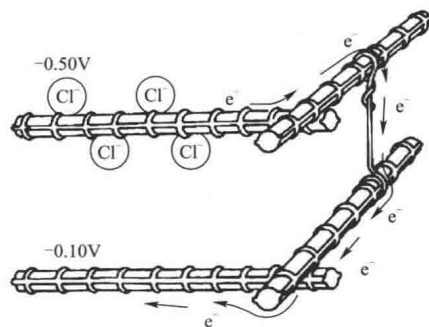


图 1-3 桥面板氯离子浓度差引起的钢筋腐蚀

海洋环境中的桥梁,其钢筋混凝土结构处于直接暴露和间接暴露两种环境,直接暴露包括部分或全部浸泡在海水中的钢筋混凝土结构,间接暴露包括沿海岸线建造的不与海水直接接触的钢筋混凝土结构。

处于直接暴露在海上的钢筋混凝土结构,根据腐蚀程度的不同分为四个区域:水下区;水位变动区;浪溅区;大气区。水位变动区和浪溅区是腐蚀最为严重的区域,这是因为结构物在高潮时被海浪溅湿,低潮时水分蒸发,混凝土表层孔隙液中的氯离子浓度增高,并不断向混凝土内扩散,使钢筋周围孔隙液的氯离子浓度较易增大到破坏钢筋钝化膜的临界浓度,同时又处于含盐雾的潮湿大气中,混凝土具有足够湿度,但又不饱水,有充分氧气渗入,具备钢筋锈蚀所必需的条件。水下区混凝土饱水,由于缺氧,阴极反应困难,故腐蚀较轻。

处于间接暴露环境的钢筋混凝土结构遭受空气中氯离子的腐蚀,混凝土密实度和保护层厚度在阻止氯离子侵入和腐蚀开始发生的时间上起着重要的作用。因为温度、湿度和电阻率对腐蚀速度影响很大,热带海洋环境中的钢筋混凝土腐蚀更加严重。

暴露在大气环境下的混凝土结构破坏主要可归于以下因素:混凝土的腐蚀、含盐和硫酸盐气候的影响、由温差和干缩反应引起的早期裂缝。混凝土损坏最危险的现象是钢筋腐蚀引起混凝土的剥落。据报道,位于阿拉伯湾沿岸的钢筋混凝土框架结构在短短 15 年内就发生混凝土损坏的现象,其主要原因有两个:一个是混凝土内钢筋的腐蚀,另一个是混凝土的裂缝扩展引起硫酸盐的侵入。

引起混凝土结构损坏的还有其它因素,如高温、高湿并带有尘土、混凝土早期裂缝、钢筋保护层厚度不够、含盐的环境加速了化学侵入等。在沿海岸区域的钢筋混凝土结构长期受到海风和海水的侵袭,水和盐分渗入混凝土,腐蚀钢筋引起混凝土剥落;海岸区域的尘土、水及大气中氯化物和硫酸盐的含量也很高,也能引起混凝土破坏;混凝土的早期裂缝是由于混凝土的收缩、早期温度变化和沉陷产生的,造成湿气、盐及硫酸等很容易进入混凝土和钢筋内部,从而造成钢筋锈蚀和混凝土破坏;钢筋保护层厚度不够,混凝土表面的砂浆也容易受

含盐气候的影响和硫酸盐的侵入而发生破坏,硫酸盐的侵入是由于钙、镁等金属类硫酸盐与一定量的水化物的反应而导致体积增加,从而引起裂缝的扩展,混凝土也由此逐渐失去颗粒间的黏聚力而变松散。

1.2.2 钢筋混凝土结构腐蚀破坏模型

从微观的角度来看,混凝土是一种非均匀、多裂隙、多相的颗粒状复合材料。从宏观的角度来看,混凝土是由集料颗粒和水泥基体构成的脆性材料。由于各种因素的影响,在受力前混凝土材料内部就存在先天性的微裂纹、微孔隙。受力后,原有微裂纹、微孔隙尖端应力集中区扩展成为微裂纹区,新微裂纹的形成,随着受力的增加,这两者相互连接和贯通,最终形成宏观裂缝。这个过程即为混凝土材料所特有的从内部微裂纹发展到裂缝扩展形成断裂的过程。

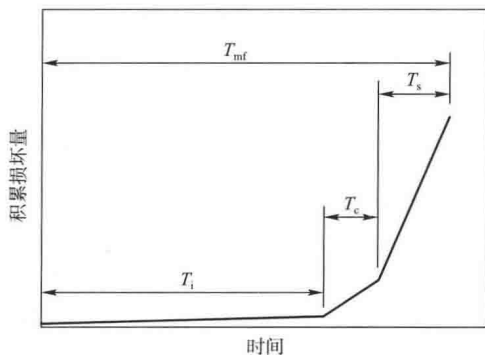


图 1-4 钢筋混凝土腐蚀破坏模型

钢筋锈蚀产物形成后,体积膨胀,在钢筋周围混凝土中开始产生膨胀力。这个锈胀力最终使钢筋周围混凝土的微裂纹或微孔隙扩展成为宏观裂缝,随着锈胀力的增加,裂缝将进一步发展。裂缝的位置可能在水泥浆体内或是水泥浆与集料的界面上,裂缝发展到集料位置时会受到集料的抑制,从而改变裂缝发展的方向。

钢筋腐蚀引起的结构破坏过程可以用图 1-4 所示的模型来表示,它包括腐蚀开始和腐蚀发展两个阶段。

(1) 腐蚀开始阶段。从混凝土投入使用到氯离子从混凝土表面通过混凝土孔隙向钢筋表面扩散直至达到氯化物极限浓度,使得钢筋去钝化即开始腐蚀止,这段时间用 T_i 表示。腐蚀开始阶段与很多因素有关,包括钢筋种类、环境、氯化物、保护层厚度、混凝土类型等。氯化物的传输速度与混凝土材料有关,而氯化物极限浓度则与钢筋材料有关。如果混凝土没有裂缝,特别是宽度大于 0.3mm 的裂缝,那么腐蚀开始阶段与混凝土渗透性、保护层厚度、水泥种类、钢筋的耐腐蚀性能有关。但是,如果混凝土存在裂缝,那么钢筋的耐腐蚀性能就是影响腐蚀开始时间的唯一因素。对于质量差或开裂的混凝土,腐蚀开始可能只有几年。

(2) 腐蚀发展阶段。从钢筋腐蚀开始发展到严重腐蚀,以致结构构件的承载能力不足,或对破坏的构件进行更换比维修更加经济时止,这段时间用 T_p 表示。腐蚀发展阶段取决于钢筋开始腐蚀后的腐蚀速度,腐蚀速度在很大程度上取决于混凝土的电阻率、氧含量和湿度、钢筋的种类和环境条件。

腐蚀发展阶段又可分为两个时期:

① 从钢筋开始腐蚀到混凝土表面出现裂缝,这段时间用 T_c 表示;

② 混凝土表面裂缝发展为严重胀裂、剥落破坏,即已达到不可容忍的程度,这段时间用 T_s 表示。

构件的使用寿命 T_{mf} 为腐蚀开始阶段和腐蚀发展阶段时间之和,即

$$T_{mf} = T_i + T_p = T_i + T_c + T_s$$

正常情况下,在腐蚀破坏的3个时期 T_i 、 T_c 和 T_s 中,通常 T_i 最长,它是决定构件使用寿命的主要因素。

1.3 混凝土结构桥梁腐蚀现状

桥梁是国民经济的重要基础设施,钢筋混凝土结构在桥梁中被广泛应用。目前,人们已经意识到在某些暴露的环境中,钢筋混凝土的寿命并不像通常期望的那么长,钢筋混凝土一般采用普通碳素钢筋作为骨架。由于钢筋锈蚀而引起的混凝土开裂和剥落,从而降低结构使用寿命问题已引起各方面的极大关注,尤其是在碳化物、硫化物、氯化物含量高的环境中,以及在使用除冰盐的道路桥梁和海洋环境中,这个问题尤为突出。因此,采取经济有效的措施,预防和控制桥梁钢筋混凝土结构的腐蚀破坏,已成为世界各国普遍关心的研究课题。

1.3.1 国外混凝土结构桥梁腐蚀

有报道称,在美国国家材料顾问委员会1987年公布的一份报告显示,美国大约有253000座桥梁的桥面处于破坏状态,其中许多桥梁使用年限尚不足20年,并预计以后每年还会有约35000座桥梁发生破坏。

20世纪初,以美国为首的西方国家在大量使用道路除冰盐之后的5~15年内,陆续出现了以钢筋腐蚀为主要特征的破坏现象。1981年,美国50万座桥梁中,有1/4受到腐蚀破坏;美国1991年在提交国会的报告《国家公路和桥梁现状》中指出,美国当时的全部混凝土工程价值约6万亿美元,而每年用于维修的费用高达300亿美元;1993年受到腐蚀破坏的桥梁超过桥梁总数的1/2,其中40%已承载力不足。美国威斯康星州9700座桥梁桥面板破坏,原因大多是冬季使用除冰盐所致。

美国联邦公路管理局(FHWA)一份报告显示,1998年美国桥梁15%~20%存在结构缺陷,大多是因腐蚀造成的,钢筋腐蚀对整个美国经济造成的损失为2760亿美元,其中桥梁基础设施的直接损失为83亿美元,预计因交通受阻及通行能力降低造成的间接损失超过直接损失的10倍。因钢筋腐蚀的桥梁修复费用为1550亿美元,是这些桥梁初建费的4倍。据美国公路战略研究计划的估计,到20世纪末,除冰盐造成美国公路损失可达4000亿美元。

根据美国国家桥梁分类目录(NBI)的统计,截至2003年,美国大约有58万座桥梁,其中约有16.5万座存在问题,占桥梁总数的28%,美国的桥梁设计寿命基准期为75年,而桥梁的实际使用平均寿命为44年,州际桥梁的平均使用寿命仅为39年;在美国,平均每年有150~200座桥梁部分或完全倒塌,这些桥梁的平均寿命不足20年,仅修复费用每年就高达900亿美元。

美国正投入大量资金用于桥梁的维护,根据美国联邦公路管理局的报告,2004年“联邦公路桥梁计划”提出的桥梁维修预算费用为51亿美元,而美国实际支出66亿美元用于桥梁的维修,另外各州和地方债券又增加了39亿美元用于桥梁维修。2006年,美国大约有7.4万座桥梁(约占总数的12%)有结构缺陷,有缺陷桥梁占桥梁总数的百分比见图1-5。

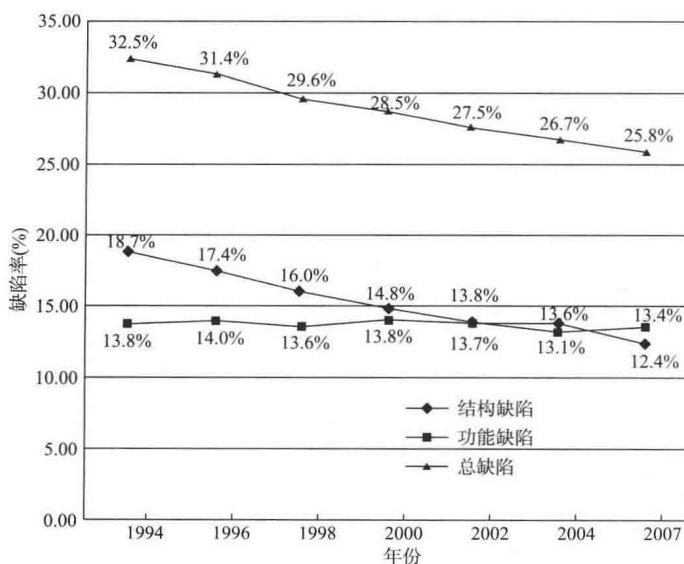


图 1-5 美国有缺陷桥梁占桥梁总数的百分比

据美国国家公路与运输协会 (AASHO) 2007 年 9 月份的资料, 全美 59 万多座桥梁中, 6.3 万多座桥龄在 9 年以内, 36 万多座桥龄在 10 ~ 49 年之间, 16.3 万多座桥龄在 50 ~ 100 年之间, 9900 多座桥龄在 100 年以上。

美国俄勒冈州建于 20 世纪 50 年代的沿海桥梁没有采取防腐措施, 在运行了 40 年后遭受到严重的破坏, 需要重建。

图 1-6 是具有 40 年桥龄的 Brush Creek 桥的破坏情况, 图 1-7 是建于 1927 年的 Rocky Creek 桥的破坏情况。

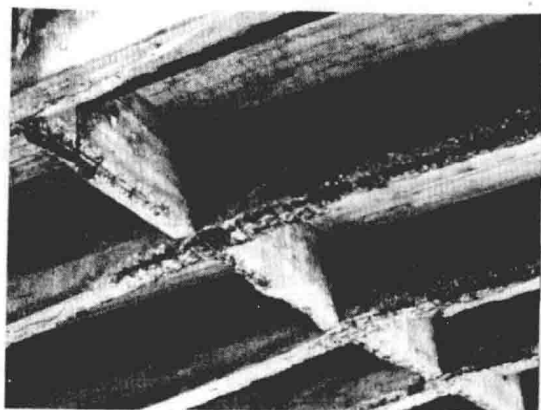


图 1-6 Brush Creek 桥破坏情况

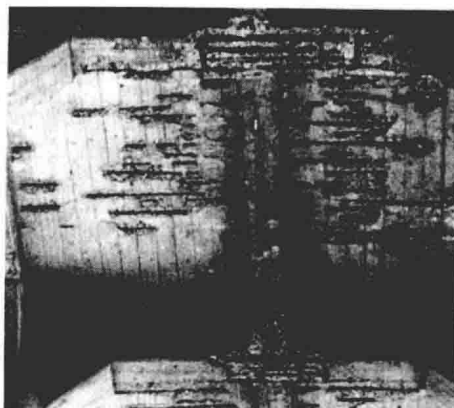


图 1-7 建于 1927 年的 Rocky Creek 桥破坏情况

1998 年英国高速公路桥梁因除冰盐引起腐蚀的损失仅在英格兰与威尔士两地就达 6.2 亿英镑, 全国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用高达 200 亿英镑。

20 世纪 90 年代, 英国调查统计了 271 个混凝土工程劣化破坏事例, 其中碳化锈蚀占

17%,环境氯盐锈蚀占33%,由混凝土原材料带入的内部氯盐锈蚀占5%,以上三项钢筋锈蚀总和占55%,其余混凝土冻蚀占10%,混凝土磨蚀占10%,混凝土碱集料反应破坏占9%,硫酸盐化学腐蚀占4%,其他原因导致的腐蚀破坏占7%。

英国也有受除冰盐危害的典型事例,如英格兰岛中部环形线的快车道上有11座1972年建成的混凝土高架桥,建造费为2800万英镑,建成两年后就发现了钢筋锈蚀造成的混凝土顺筋裂缝现象,1974~1989年的15年间,其修补费用高达4500万英镑,为初始造价的1.6倍,至2004年,累计修复费用达到建桥费用的6倍。

德国每年投入公路养护费用200多亿马克,其中用于公路养护60多亿马克,德国柏林市某座大型立交桥,由于使用除冰盐,使用年限不足20年,钢筋腐蚀破坏严重,不得不在其旁边另建一座新立交桥。除经济损失外,在修复旧桥和建设新桥的过程中,也带来了交通和影响市容与人民生活等问题。

在加拿大,大面积使用除冰盐对基础设施的腐蚀破坏特别突出。如修复所有被腐蚀破坏的基础设施,费用要超过5000亿美元。加拿大安大略省负责16500km公路和2500座桥梁的管理工作,作为冬季维护方案之一,对许多桥梁采用撒除冰盐除冰雪,每次氯化钠的平均用量为每公里两车道130kg,结果到20世纪60年代,除冰盐中氯离子侵入已明显成为钢筋腐蚀而造成钢筋混凝土结构过早破坏的原因,其中一些桥梁尽管使用寿命还没有达到10年,但由于腐蚀严重不得不进行更换。

在丹麦,以丹麦哥本哈根地区为主,调查了102座桥梁,其中50%的桥梁有严重的钢筋腐蚀破坏问题,其主要原因是使用了除冰盐。

著名的克罗地亚Krk桥(克尔克桥),又名铁托桥(图1-8),是世界著名大跨度钢筋混凝土拱桥。该桥位于萨格勒布西南,1980年建成,全桥由跨度390m(大陆至圣马尔科岛)和244m(圣马尔科岛至克尔克岛)的两座钢筋混凝土上承式拱桥组成,是连接大陆和亚得里亚海上克尔克岛的公路和管道两用桥。桥面宽11.4m,设有双车道,桥面下敷设油管、输水管及工业管道共17条管道。拱桥的宽度与跨度之比仅及1/30,异常纤细,是该桥的设计特点。拱圈为单箱三室截面,用预制构件从两端悬臂拼装,至跨中合龙。跨度390m的主拱,其拱趾设在有撑杆的水中斜墩上,基础采用半浮运的气压沉箱。

该桥所处环境非常恶劣,海水含盐量约为3.5%,冬季风大,夏季高温。在桥梁运营后仅6年的1986年夏季,对桥梁进行了第一次检测,结论为桥梁有一些严重的结构破坏问题,必须立即维修,对混凝土结构必须进行保护,以防止氯离子的侵蚀。

在日本,其大规模基础设施建设始于20世纪60年代,稍晚于其他西方发达国家,其混凝土结构的早期劣化成为社会问题也较西方国家稍晚,大约到20世纪80年代初才引起工程界的关注。其主要问题是混凝土碱集料反应以及使用海砂和海洋环境下氯盐引起的钢筋锈蚀。

澳大利亚新南威尔士Eurobodalla郡委员会对其管辖的18座混凝土桥梁进行监测表明,18座桥梁中有4座的承台和柱出现了腐蚀破坏。这4座桥梁位于靠近海滨的海洋环境中,柱由于直接和海水接触或通过风的作用,受到氯离子侵蚀侵入,导致混凝土开裂和出现锈迹,其中一些柱腐蚀严重,出现了混凝土胀裂和分层破坏。图1-9是其中的Short beach creek桥柱开裂情况。

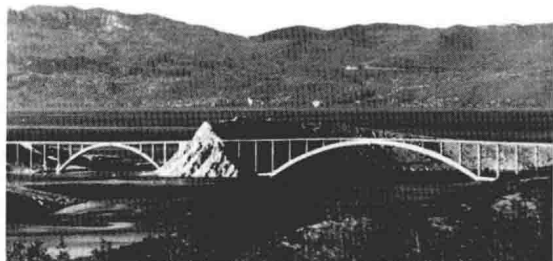


图 1-8 建于 1980 年的 Krk 桥(铁托桥)全貌



图 1-9 Short beach creek 桥柱开裂情况

欧美等发达国家的桥梁发展历程表明,如果对桥梁没有从材料组成、设计、施工各个环节考虑桥梁结构的耐久性,那么将会在其运营和后期维护中付出巨大的经济代价。

1.3.2 国内混凝土结构桥梁腐蚀

我国已是工业大国,为适应贸易及物流发展,每年会新建大量跨海大桥、港口码头。目前我国已是桥梁大国,每年新建的桥梁约占世界桥梁总数的一半。截至 2014 年,我国已建成公路桥梁 75.7 万余座,共计 4257.9 万余延米,特别是建造了一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化程度和科技含量高的特大型跨海大桥,如东海大桥、杭州湾跨海大桥、青岛海湾大桥、舟山连岛工程、崇海越江工程、湛江海湾大桥等。

我国现有的 75 万多座桥梁中,混凝土桥梁占到了 90% 以上,我国已经成为名副其实的桥梁大国。根据发达国家的经验,按照其正常的材料、设计和施工技术工艺水平来控制,混凝土桥梁在运营 20 ~ 30 年后,仍然会有 20% ~ 30% 出现耐久性问题。我国的混凝土桥梁建设在原材料选择、结构设计和施工技术等环节均落后于西方发达国家,如按照我国目前的技术水平进行桥梁建设,可以推断这些桥梁今后所面临的耐久性问题将会比西方发达国家今天所面临的问题更为严重。另外,从近些年来我国公路桥梁普查情况看,混凝土桥梁的耐久性问题已开始显现出来,居高不下的危桥数量以及繁重的桥梁维修任务大多与桥梁耐久性不足有关。

北京西直门立交桥 1979 年建成并投入使用,使用不到 20 年就已拆除重建。北京市曾列专题,对路桥的耐久性问题做了详尽的调查研究 and 试验工作,得到基本一致的看法:除去先天因素(设计、施工质量等),就环境影响而言,撒除冰盐所造成的钢筋腐蚀与混凝土冻融破坏,是路桥过早破坏的主要因素。除北京外,天津等城市的桥梁也已经出现同样的问题,我国北方地区高速公路、桥梁等均有氯盐腐蚀破坏的现象。

天津滨海新区在气候上属于寒冷地区,地质上属于盐碱滩涂地带,很多区域的地下水中氯盐、硫酸盐、镁盐含量都高于海水。夏宝驹等人对天津滨海新区桥梁的耐久性状况进行了调研,发现桥梁的病害非常严重。主要问题有:桥梁伸缩缝下盖梁端头破损;至少有 70% 以上的桥梁伸缩缝发生渗水漏水,对应其下的所有盖梁都有不同程度的冻蚀、钢筋锈蚀、梁体表面裂缝,而且其中的一些桥梁运营仅仅 10 年左右;桥梁上部结构中,桥梁泄水孔渗漏侵蚀也是常见的病害形式;桥梁的防撞护栏下部是病害发生的主要部位,也是氯盐腐蚀和混凝土中性化最为直接的部位;另外,在桥梁下部结构中,墩柱根部的氯盐腐蚀和盐蚀也