

# 钢筋混凝土结构锈胀开裂及裂缝扩展试验研究

王显利<sup>\*1,2</sup>, 郑建军<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;  
2. 北华大学 交通建筑工程学院, 吉林 吉林 132013;  
3. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 采用加速腐蚀试验, 系统地研究了钢筋直径、混凝土强度、腐蚀电流密度、保护层厚度、钢筋位置和类型等因素影响下钢筋混凝土锈胀开裂及裂缝扩展的规律. 试验结果表明: 腐蚀电流密度对锈胀开裂时间的影响最为显著, 其他依次为钢筋直径、保护层厚度、混凝土强度; 锈胀裂缝随时间增长呈线性增大趋势; 各种因素对锈胀裂缝扩展的影响程度依次为腐蚀电流密度、保护层厚度、混凝土强度和钢筋直径; 腐蚀电流密度越大、保护层厚度越小, 锈胀裂缝扩展越快; 混凝土强度等级越高、钢筋直径越小, 锈胀裂缝扩展越缓慢. 对比分析发现, 钢筋位于上部和相同腐蚀电流下采用变形钢筋时, 锈胀开裂晚且裂缝扩展更缓慢; 钢筋位于角部时开裂早且裂缝扩展快. 分析了各种因素影响机理并提出了提高耐久寿命的措施.

**关键词:** 钢筋混凝土; 腐蚀; 裂缝; 耐久寿命

**中图分类号:** TU375.5 **文献标志码:** A

## 0 引言

钢筋混凝土锈蚀损伤耐久性问题已成为国内外广为关注的研究热点<sup>[1]</sup>. 已有的评估标准认为混凝土保护层一旦开裂耐久寿命便终结. 然而, 大量的研究表明, 混凝土保护层锈胀开裂时钢筋的锈蚀率很小, 钢筋与混凝土间的粘结性能无明显退化, 这时的损伤累积还不足以对结构的承载力构成威胁<sup>[2,3]</sup>. 工程中, 很多钢筋混凝土结构锈胀开裂后仍在继续使用, Sakai 建议将耐久性极限状态裂缝宽度定为 0.8 mm, 有关鉴定标准甚至将混凝土保护层纵向裂缝宽度 1 mm 作为耐久寿命终结的标志<sup>[4]</sup>. 对实际工程的耐久性评估, 也不可能对所有部位通过取样进行耐久性评价, 而裂缝宽度是较为容易获取的, 同时又是结构设计时的一个基本参数. 因而, 对混凝土保护层锈胀开裂及开裂后的裂缝宽度扩展进行研究, 以便在不破坏结构安全的情况下, 通过外观检查, 根据锈胀裂缝宽度与相关因素之间的关系合理准确地进行结构耐久寿命评估、确定维修加固策略以及基于耐久

性的结构设计无疑具有重要意义.

已有的混凝土保护层锈胀开裂及开裂后裂缝宽度扩展方面的研究成果可以归为理论分析和实验研究两方面, 典型的理论分析如 Bažant 根据钢筋锈蚀的理论物理模型, 提出了混凝土保护层开裂的简化计算方法<sup>[5]</sup>, 但未得到实验的证实<sup>[6]</sup>. Dagher 等<sup>[7]</sup>、Pantazopoulon 等<sup>[8]</sup>和郑建军等<sup>[9]</sup>分别基于弥散裂缝模型, 应用断裂力学对保护层锈胀开裂进行了研究. 金伟良等<sup>[10]</sup>用弹性力学方法研究了锈胀力机理并提出了锈胀力的理论计算公式. Vu 等<sup>[11]</sup>和 Li 等<sup>[12]</sup>分别基于概率和可靠度理论研究了保护层锈胀开裂耐久寿命. Zheng 等<sup>[13]</sup>和 Li 等<sup>[14]</sup>分别建立了锈胀裂缝宽度的理论预测模型. 实验方面, Andrade 等<sup>[3]</sup>研究了腐蚀电流、保护层厚度、钢筋位置不同时锈胀开裂前、开裂后的变形发展情况, 以及开裂时刻、裂缝达到控制宽度时刻的钢筋锈蚀量. 但实验中没有考虑钢筋直径和混凝土强度的影响, 故缺乏系统性. 文献<sup>[7]</sup>研究了钢筋锈蚀率、直径、间距和保护层厚度对锈胀开裂的影响并建立了锈胀开裂预测模型.

收稿日期: 2007-03-15; 修回日期: 2009-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178003); 吉林省科技发展计划资助项目(20080152).

作者简介: 王显利\*(1972-), 男, 博士, 副教授, E-mail: rehardwxi@tom.com; 郑建军(1963-), 男, 教授, 博士生导师.

Alonso 等<sup>[15]</sup> 得出了裂缝宽度与钢筋截面损失呈线性关系的结论. Vidal 等<sup>[16]</sup> 通过对长期暴露的 2 根实验梁, 研究建立了锈胀裂缝宽度和钢筋锈蚀量的经验关系. Vu 等<sup>[17]</sup> 研究了混凝土保护层厚度和水灰比不同时的锈胀开裂和裂缝发展情况, 并提出了裂缝宽度预测的经验公式.

尽管近年来钢筋混凝土锈蚀损伤问题得到了较为广泛的研究, 但大量的研究集中在钢筋锈蚀开始和混凝土保护层锈胀开裂过程方面<sup>[18]</sup>, 而对保护层开裂后裂缝宽度扩展方面的研究很少<sup>[12]</sup>. 本文采用快速腐蚀试验, 通过外加电流加速钢筋腐蚀, 系统地研究钢筋直径、混凝土强度、腐蚀电流密度、保护层厚度、钢筋类型和钢筋位置等因素变化情况下, 钢筋混凝土锈胀开裂及裂缝宽度的发展规律, 并分析各种因素对锈胀开裂及裂缝扩展的影响机理, 提出提高耐久寿命的措施.

## 1 试验方法与过程

### 1.1 试验设计及材料

为考察不同因素对混凝土保护层锈胀开裂时间及裂缝宽度扩展的影响, 试验综合考虑钢筋直径、混凝土保护层厚度、混凝土强度等级、腐蚀电流密度大小 4 种因素, 每种因素设置 3 个水平, 为控制试验工作量, 采取正交试验设计, 共需 9 组试件. 针对实际结构构件中大量地采用变形钢筋、梁柱等构件角区位置布筋以及梁板构件的上部负弯矩处配筋等情况, 增加 3 组对比试件, 分别为钢筋布置于小梁上部对比第 4 组、变形钢筋对比第 4 组、钢筋布置小梁下部对比第 9 组. 全部试验累计 12 组, 每组试件数为 3 个, 共计 36 个. 标准试件采用图 1 所示的小梁, 靠下侧居中布置钢筋, 钢筋长度为 400 mm, 两端各留出 10 mm 以便浇筑试件时用以固定钢筋及试验时连接导线.

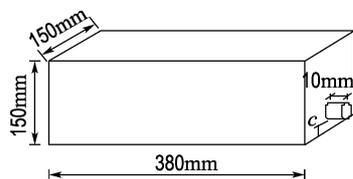


图 1 RC 梁试件形式

Fig. 1 Type of RC beam specimens

混凝土制备采用大连小野田水泥厂生产的 425 号和 525 号早强硅酸盐水泥; 河砂; 最大粒径为 10 mm 的瓜子石. 混凝土配合比及力学性能指标见

表 1. 直径分别为 8、12、16 mm 的光圆钢筋和直径 12 mm 的变形钢筋, 各项指标均符合国家标准.

表 1 混凝土配合比及力学性能

Tab. 1 Mix proportions and mechanical properties of concrete specimens

混凝土等级	$m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{石}):m(\text{水})$	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
C20	1 : 2.51 : 4.02 : 0.64	2.33	15.28	25.5
C30	1 : 1.56 : 3.12 : 0.57	2.83	34.85	31.2
C40	1 : 1.37 : 3.19 : 0.49	3.78	43.34	32.5

### 1.2 试验方法

先对钢筋除锈, 清洗擦干后置于干燥箱中干燥待用. 浇筑试件时, 利用预留的钢筋端头使钢筋位置得以固定, 浇筑过程中谨防隔离剂沾污钢筋. 对应每个试验号的试件数为 3 个, 同时浇筑伴随试件用以测定混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度及弹性模量, 试件浇筑完毕后 24 h 拆模, 水中养护 28 d 取出置于干燥阴凉处, 编号待用. 打磨钢筋端部, 焊接螺母用以绑扎导线, 为避免端头部分钢筋及导线锈蚀, 开始通电之前用环氧树脂密封. 将准备好的试验槽涂漆防锈, 然后在其中配制质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液, 将试件置于试验槽中让盐水浸过试件表面. 直流稳压电源阳极接钢筋, 阴极接不锈钢板, 通过可调电阻控制电路电流大小, 如图 2 所示. 为使钢筋锈蚀均匀, 通入电流前将试件浸泡 3 d. 开始通电时, 由于溶液的浓差极化作用, 腐蚀电路中的电流有所波动, 但很快就达到稳定, 其间要跟踪调整电流的大小. 通电后每天随机监测电路电流, 每 12 h 监测试件开裂情况, 待保护层开裂后, 沿每个试件长度方向均匀选取 5 个测点每隔 15 h 用精度 0.02 mm 的思韦尔裂缝宽度观测仪测量裂缝宽度值并记录. 为减小测量时的读数误差, 测量前需先擦洗裂缝口溢出物, 使试件上表面高于水面并用吹风机将表面吹

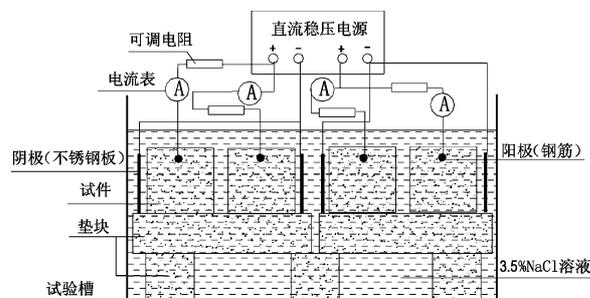


图 2 快速腐蚀试验示意图

Fig. 2 Schematic of accelerated corrosion test

干,待锈胀裂缝宽度达 1 mm 左右时停止试验.

### 1.3 试验结果

混凝土保护层锈胀开裂受多种因素的影响,而各组号试件的设计参数不同,故出现第一条可见裂缝和停止试验的时间也有所不同,多数试件的开裂始于端部,裂缝平行于钢筋方向,初始裂缝一般不连续,但随着时间的推移裂缝逐渐贯通,典型的裂缝扩展如图 3 所示.裂缝扩展过程中不断有白色、棕红色和黑褐色物质从裂缝中渗出.因多数试件开裂时刻的裂缝是局部的,加之混凝土材料自身的不均匀性,因而相同的观测时间不同测点处裂缝宽度并不相同.以  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别代表钢筋直径 8、12 和 16 mm;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别代表混凝土保护层厚度 20、

25、30 mm;  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别代表混凝土强度等级 C20、C30、C40;  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  分别代表腐蚀电流 100、150、180  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,当裂缝扩展至 1 mm 左右停止试验时,试验所记录的各组试件裂缝宽度随时间变化的全曲线如图 4(每图中的 15 条曲线分别对应于每组 3 个试件,每个试件的 5 个测点)所示.

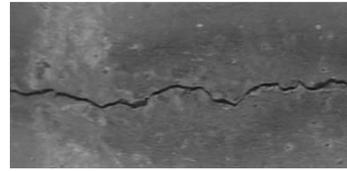


图 3 典型的裂缝扩展形式

Fig. 3 Type of crack propagation

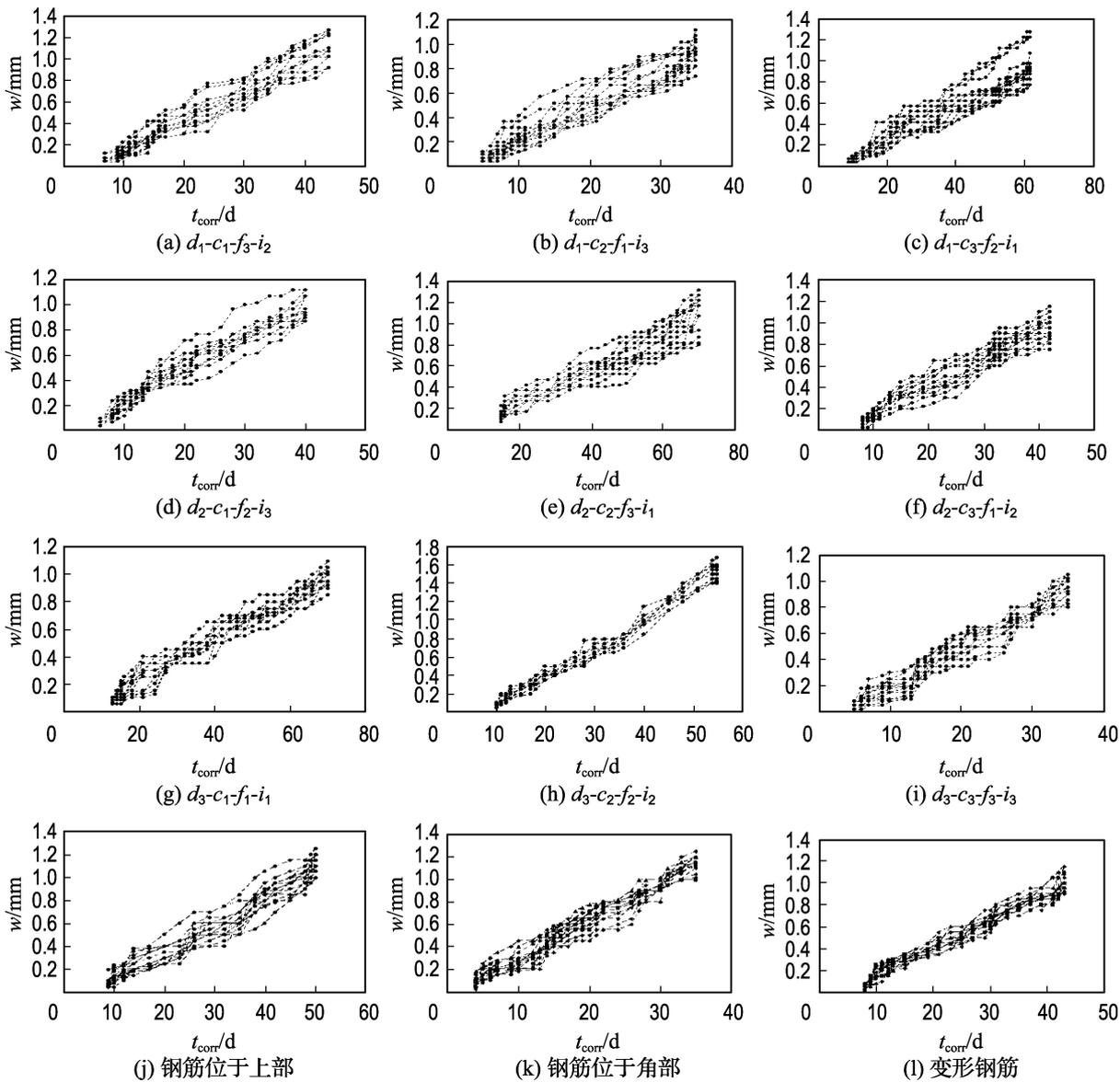


图 4 试验结果

Fig. 4 Experimental results

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 腐蚀开裂时间

钢筋混凝土锈蚀损伤耐久寿命可分为3个阶段：(1)从结构建成使用到钢筋开始锈蚀；(2)从钢筋开始锈蚀到保护层开裂；(3)从保护层开裂到裂缝宽度达到某一容许值。由此可见，保护层锈胀开裂时间是耐久寿命评估的一个重要组成部分。不同因素对锈胀开裂时间影响的敏感性可以通过对

试验观测的锈胀开裂时间的极差分析得到，开裂时刻钢筋直径、保护层厚度、混凝土强度和腐蚀电流密度的极差分别为2.00、1.50、0.67和3.17。显然，腐蚀电流密度的极差最大，因而对锈胀开裂时间的影响程度最大，这与Li等<sup>[14]</sup>的理论分析一致。而钢筋直径的影响程度大于保护层厚度和混凝土强度等级的影响，这与金伟良等<sup>[10]</sup>所得的结论吻合。锈胀开裂时间受各种因素的影响趋势见图5。

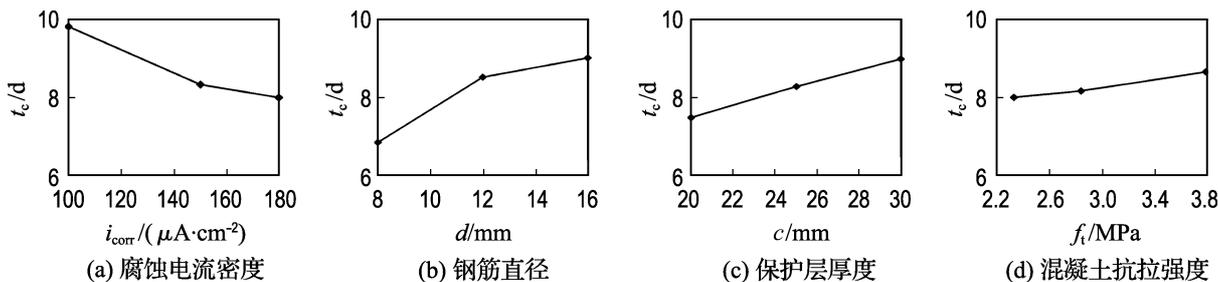


图5 各种因素对腐蚀开裂时间  $t_c$  的影响

Fig. 5 Effects of various parameters on the time-to-cracking  $t_c$

从图5(a)可以看出，开裂时间随着腐蚀电流密度的增大而减小。这是由于腐蚀电流密度越大，锈蚀产物生成越快，保护层开裂也就越早。然而，腐蚀开裂时间还受锈蚀产物膨胀率的影响，这与孔隙液的pH和供氧情况等有关<sup>[6]</sup>，当腐蚀速率较大时，供氧相对不足，铁锈的体积膨胀率有所降低，因而，图中所反映的开裂时间与腐蚀电流密度的非线性趋势与Vu等<sup>[17]</sup>的结论并不矛盾。

图5(b)表明腐蚀开裂时间随着钢筋直径的增大而增大。这是因为锈胀开裂时刻，相同的保护层厚度，其内壁处应有相同的张开位移，钢筋直径越大所需锈层厚度越大，因而所需的锈蚀时间也就越长。

不同的混凝土保护层厚度对锈胀开裂时间的影响如图5(c)所示，从该图可以看出，保护层厚度越大，锈胀开裂时间越长。原因在于保护层厚度越大，外围混凝土的刚度越大，约束铁锈体积膨胀的能力也就越强，在其他条件相同的情况下，所需的锈蚀产物就越多，因而，锈胀开裂时间更长。

图5(d)反映出开裂时间随混凝土抗拉强度的提高而增大。原因是混凝土抗拉强度的增强直接提高了混凝土保护层的承载力，从而延缓了锈胀开裂时间。但是，图5(d)也表明，混凝土强度对锈胀开裂时间的影响并不十分明显。

### 2.2 裂缝宽度扩展规律

根据图4的试验结果，可以得到每组试件的平均裂缝宽度(每组3个试件，每个试件5个测点的裂缝宽度平均值)随时间的增长而增大的规律，如图6所示(图中曲线(a)~(l)分别对应图4中(a)~(l)各图)，从该图可以看出，在各种因素作用下，平均裂缝宽度随时间变化整体上呈线性增长。

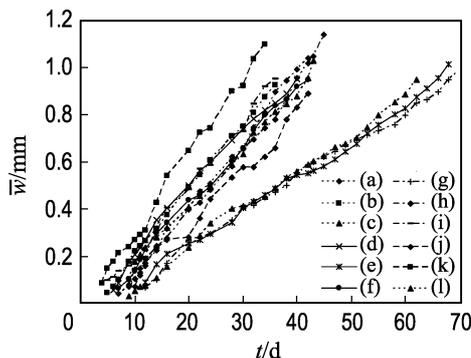


图6 平均裂缝宽度随时间的变化

Fig. 6 Average crack width versus time

不同因素影响下的裂缝扩展进度不同，为了研究各种因素对裂缝扩展的影响规律，取每组试件20、25和30d的平均裂缝宽度进行分析。表2列出了各种因素20、25和30d对裂缝宽度均值的极差，由此可见，在试验因素水平变化范围内，

腐蚀电流密度极差均为最大,说明腐蚀电流密度对锈胀裂缝扩展的影响最显著,其他因素的影响程度依次为混凝土保护层厚度、混凝土强度和钢筋直径。

表2 不同锈蚀时间的极差统计

Tab. 2 Statistical R for different corrosion time

极差	腐蚀电流密度	保护层厚度	混凝土强度	钢筋直径
R <sub>20</sub>	0.239 1	0.020 8	0.005 4	0.003 4
R <sub>25</sub>	0.281 6	0.015 2	0.012 9	0.008 1
R <sub>30</sub>	0.343 3	0.010 7	0.009 7	0.003 5

### 2.2.1 腐蚀电流密度对裂缝宽度扩展的影响

图7反映了腐蚀电流密度对平均裂缝宽度的影响,可以看出,平均裂缝宽度随腐蚀电流密度的增大而增加。这是因为腐蚀电流密度越大,锈蚀产物生成速率越大,而裂缝宽度与锈蚀产物生成量呈线性关系<sup>[17]</sup>。电流较大时,锈蚀产物没有更充分的时间向周围孔隙及外界扩散,使得钢筋与混凝土界面间的膨胀压力更大,进而导致裂缝扩展更快。依据法拉第定律,钢筋锈损量与腐蚀电流密度大小成正比,从已有的研究成果看,混凝土表面裂缝的发展与钢筋锈损量的增加成正比,由此可以推断表面裂缝的发展与腐蚀电流密度成正比。然而加速腐蚀试验中的钢筋混凝土试件,混凝土的存在会使通入钢筋中的电流杂散,即实际测得的电流并不能完全用于钢筋的阳极腐蚀,加之相同的钢筋损失量下,裂缝扩展受锈蚀产物体积膨胀率影响,这与锈蚀产物的组分有关,主要取决于供氧条件,供氧充足则锈蚀产物氧化充分,体积膨胀率相对较大,裂缝扩展相对较快,而当腐蚀电流密度较大时,供氧相对不足致使体积膨胀率相对较小,裂缝扩展也相对较慢,因而,图7显示了腐蚀电流密度与裂缝宽度并不完全呈线性关系。从图7还可以看出,裂缝宽度越大,随锈蚀电流的变化

越明显,其非线性也越明显,原因在于较大的裂缝给氧气和锈蚀产物的传输提供了更便捷的通道。加速腐蚀试验中外加电流对锈蚀损伤的影响直接关系到研究成果向实际应用的转化,国内外虽在这方面进行了一些研究<sup>[6,15,19]</sup>,但至今尚没有统一的量化方法,仍需进一步研究。实际海洋工程中钢筋的腐蚀电流密度是由氯离子侵入诱导的电位差引起的,故采用抗渗性好的混凝土可以提高钢筋混凝土结构的耐久寿命。

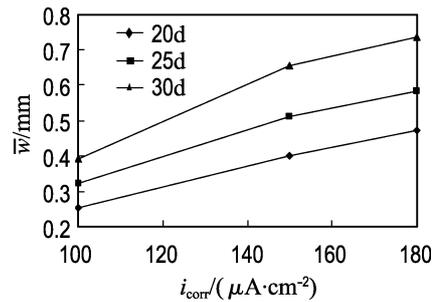


图7 平均裂缝宽度随腐蚀电流密度的变化

Fig. 7 Effect of corrosion current density on average crack width

2.2.2 保护层厚度对裂缝宽度扩展的影响 从图8可以看出,随着混凝土保护层厚度增加,裂缝宽度趋于减小,混凝土保护层锈胀开裂由锈蚀产物体积膨胀使保护层环向受拉所致,锈胀开裂始于混凝土钢筋表面处,保护层越厚,表面开裂时刻钢筋表面处的裂缝口张开位移越大。故当其他条件相同时,保护层厚度越大,裂缝宽度越小。另外,保护层厚度越大其环向剩余刚度也越大,这也是保护层厚度较大时裂缝扩展缓慢的主要原因。已有的研究成果已经证明,较大的保护层厚度可以延长钢筋锈蚀开始时间和保护层锈胀开裂时间,可见,采用较大厚度的保护层对于提高混凝土结构的整个耐久寿命都是有益的。

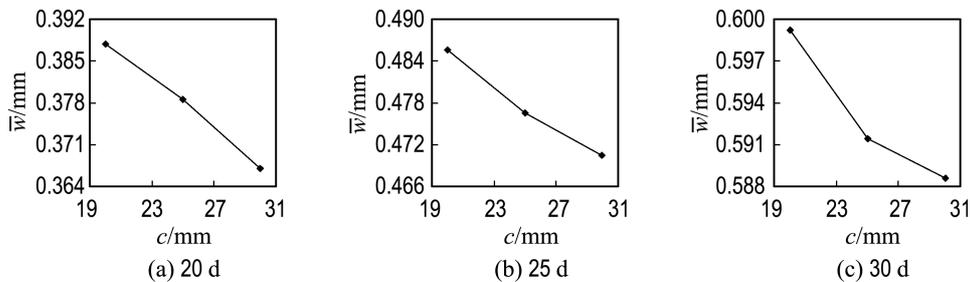


图8 保护层厚度对平均裂缝宽度的影响

Fig. 8 Effect of cover thickness on average crack width

2.2.3 混凝土强度对裂缝宽度扩展的影响 保护层开裂以后,虽然开裂面上的混凝土已不受环向拉应力作用,但是在锈胀力作用下,靠近钢筋表面处开裂面以外的混凝土将受到弯曲拉应力的作用,正是该应力的反力阻碍着裂缝的扩展,而混凝土强度越高,其阻碍裂缝扩展作用越强,裂缝扩展越缓慢.随着锈蚀产物体积的增加,弯曲拉应力不断增大,直至产生新的内裂缝.混凝土强度影响内裂缝的出现和发展,强度高的混凝土内裂缝出现得较晚,裂缝发展也较慢,对铁锈体积膨胀的约束

作用也就越强,裂缝宽度达到控制值的时间也就越长.图9虽然显示随着混凝土抗拉强度的提高,裂缝宽度减小,但从图中数据可以看出裂缝宽度变化并不明显.一般认为保护层锈胀开裂及裂缝宽度扩展源于锈蚀产物膨胀产生的对混凝土内壁的挤压力,属于多轴应力场,还须从多轴应力强度角度加以进一步的综合研究.单从本文试验结果所反映的趋势来看,采用高强度混凝土可以提高锈蚀损伤的第2和第3阶段耐久寿命.

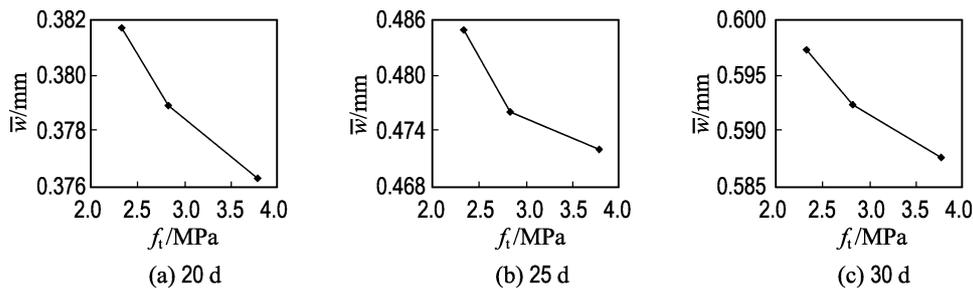


图9 混凝土抗拉强度对平均裂缝宽度的影响

Fig. 9 Effect of concrete strength on average crack width

2.2.4 钢筋直径对裂缝宽度扩展的影响 图10显示在其他条件相同的情况下,锈胀裂缝随着钢筋直径的增大而有所增加.这主要是因为若要达到相同的裂缝宽度,钢筋直径越大所需的锈层厚度越小<sup>[15]</sup>,所需的锈蚀产物也就越少,且对应相同的锈蚀产物生成率,较大直径的钢筋具有更大的有效表面积,电化学腐蚀的氧气供应相对比较充分,锈蚀产物的体积膨胀率也大一些.由此可

见,从阻碍锈胀裂缝宽度扩展的角度出发,配置大直径钢筋是不利的,但从前面的分析结果看,大直径钢筋对锈胀开裂耐久寿命是有利的,而从整个试验过程看来,保护层锈胀开裂所需的时间相对很短,而且结构的抗裂性也要求钢筋在截面内分布均匀.因而,小直径钢筋对于结构耐久性设计是有益的.钢筋直径大小对裂缝扩展的影响尚需从力学机理上加以分析.

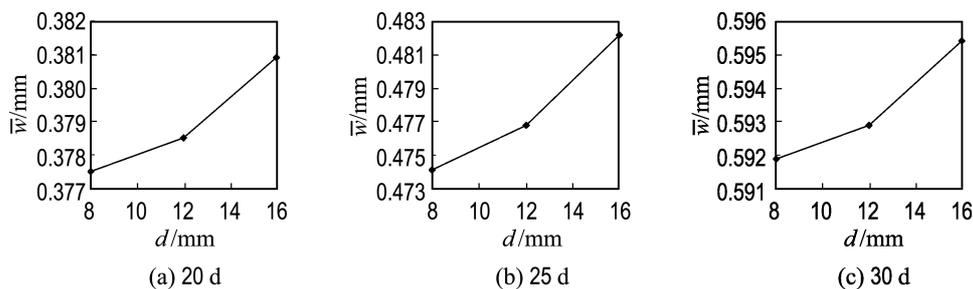


图10 钢筋直径对平均裂缝宽度的影响

Fig. 10 Effect of steel bar diameter on average crack width

### 2.3 钢筋对开裂时间及裂缝扩展的影响

对比图4(d)与图4(j)可以发现,当其他因素相同时,钢筋位于试件上部比位于下部时保护层

开裂时间更晚,裂缝扩展也更加缓慢,这是浇筑混凝土时,振捣泛浆使上部混凝土密实性更好、强度更高所致.比较图4(k)与图4(i)可见,当其他条

件不变时,钢筋位于试件角部比位于试件中间时保护层开裂早,锈胀裂缝扩展也更快一些,这是因为角区边缘混凝土与边中混凝土相比缺乏连续性,对裂缝扩展的约束能力比一般边中位置要差.图4(1)与图4(d)的对比反映出当采用相同的腐蚀电流时,配置变形钢筋的保护层开裂晚于配置光圆钢筋的混凝土,锈胀裂缝的扩展也略慢,原因在于腐蚀电流相同,变形钢筋比光圆钢筋表面积大,实际流过变形钢筋表面的电流密度要小于流过光圆钢筋表面的电流密度.

### 3 结 论

(1)采用加速腐蚀试验,系统地研究了钢筋混凝土锈胀开裂和裂缝扩展规律,结果显示,钢筋混凝土锈胀裂缝宽度随时间增长整体上呈线性变化趋势;所考察的4种因素对锈胀开裂时间的影响程度大小依次为腐蚀电流密度、钢筋直径、保护层厚度和混凝土抗拉强度;对锈胀裂缝扩展的影响程度大小依次为腐蚀电流密度、保护层厚度、混凝土强度和钢筋直径.

(2)正交试验分析表明:混凝土保护层开裂时间随着腐蚀电流密度的增大而减小,而随着钢筋直径、保护层厚度和混凝土抗拉强度的增加而增长;腐蚀电流密度越大,钢筋直径越大,锈胀裂缝发展越快;保护层厚度越大,混凝土强度越高,锈胀裂缝扩展越慢.但从保护层厚度、混凝土强度和钢筋直径对裂缝宽度扩展的影响可见,纵坐标数值差异很小,可能尚在离散误差范围内,鉴于试验方法与统计方法等原因,以上3种因素对裂缝宽度扩展的影响规律还需更广泛的研究.

(3)试验结果也表明,与一般边中位置比较,当钢筋位于上部时,保护层锈胀开裂较晚,裂缝扩展也较缓慢;当钢筋位于角区时,保护层开裂较早,裂缝扩展也较快;当腐蚀电流相同时,配置变形钢筋的保护层开裂较晚,裂缝扩展也慢于配置光圆钢筋的保护层.

(4)采用高强混凝土、增大保护层厚度及采用小直径钢筋可以延长钢筋混凝土锈蚀损伤耐久寿命.

### 参 考 文 献:

[1] MELCHERS R E, LI Chun-qing. Phenomenological

- modeling of reinforcement corrosion in marine environments [J]. *ACI Materials Journal*, 2006, **103**(1):25-32
- [2] STEWART M G, VAL D V. Multiple limit states and expected failure costs for deteriorating RC bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 2003, **8**(6):405-415
- [3] ANDRADE C, ALONSO C. Cover cracking as a function of bar corrosion: part I - experimental test [J]. *Materials and Structures*, 1993, **26**:453-464
- [4] JGJ 125—99 危险房屋鉴定标准 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2000
- [5] BAŽANT Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures — Theory [J]. *Journal of Structural Division*, 1979, **105**(6):1137-1153
- [6] LIU Y, WEYERS R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, **95**(6):675-681
- [7] DAGHER H J, KULENDRAN S. Finite element modeling of corrosion damage in concrete structures [J]. *ACI Structural Journal*, 1992, **99**(3):267-276
- [8] PANTAZOPOULON S J, PAPOULIA K D. Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, **127**(4):342-351
- [9] 郑建军,周欣竹, LI Chun-qing. 钢筋混凝土结构锈蚀损伤的解析解[J]. *水利学报*, 2004, **12**:62-68
- [10] 金伟良,赵羽习,鄢 飞. 钢筋混凝土构件的均匀钢筋锈胀力的机理研究[J]. *水利学报*, 2001, **7**:57-62
- [11] VU K A T, STEWART M G. Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, **131**(11):1681-1689
- [12] LI C Q, MELCHERS R E. Time-dependent serviceability of corrosion-affected concrete structures [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2006, **58**(9):567-574
- [13] ZHENG J J, ZHOU X Z, XU S L. Prediction of crack width of chloride contaminated reinforced concrete structures [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, **302/303**:610-617
- [14] LI C Q, MELCHERS R E, ZHENG J J. An

- analytical model for corrosion induced crack width in reinforced concrete structures [J]. **ACI Structural Journal**, 2006, **103**(4):479-487
- [15] ALONSO C, ANDRADE C, RODRIGUEZ J, *et al.* Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion [J]. **Materials and Structures**, 1998, **31**:435-441
- [16] VIDAL T, CASTEL A, FRANCOIS R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete [J]. **Cement and Concrete Research**, 2004, **34**:165-174
- [17] VU K A T, STEWART M G, MULLARD J. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models [J]. **ACI Structural Journal**, 2005, **102**(5):719-726
- [18] CAIMS J, DU Y, LAW D. Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interface [J]. **Construction and Building Materials**, 2007, **21**:190-197
- [19] MAADDAWY T A E L, SOUDKI K A. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete [J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2003, **15**(1):41-47

## Experimental study of corrosion-induced crack initiation and propagation of reinforced concrete structures

WANG Xian-li<sup>\*1,2</sup>, ZHENG Jian-jun<sup>3</sup>

- ( 1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. College of Traffic Construction Engineering, Beihua University, Jilin 132013, China;  
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China )

**Abstract:** An accelerated corrosion test was performed systematically to investigate the rules of time-to-cracking and crack propagating of RC affected by corrosion. The experimental variables studied include diameter of steel bar ( $d$ ), concrete strength ( $f_t$ ), corrosion current density ( $i_{\text{corr}}$ ), thickness of concrete cover ( $c$ ), position and types of steel bars, etc.. Test results show that the sequence of the factors affecting the time-to-cracking is  $i_{\text{corr}}$ ,  $d$ ,  $c$  and  $f_t$  in turn; the corrosion crack width increases linearly with the time; the sequence of the factors affecting the crack width propagating is  $i_{\text{corr}}$ ,  $c$ ,  $f_t$  and  $d$  in turn. Moreover, the rate of crack propagating increases as  $i_{\text{corr}}$  and  $d$  increase. While it decreases with the increasing of  $c$  and  $f_t$ . The crack width of the case of the deformed bar increases more slowly than that of the specimen of plain bar with the same corrosion current density. When plain bar is upside of the specimens, the crack propagation rate is slower than that of the contrasted specimens. And when plain bar is at the corner of the specimens, it is faster than that of the contrasted ones. Based on the analyzed experimental results, measures to improve service life of RC are derived.

**Key words:** reinforced concrete; corrosion; crack; service life