



# 基于 CT 扫描技术的混凝土结构 裂缝宽度与钢筋锈蚀率相关性分析\*

李平杰, 应宗权, 苏林王

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230)

**摘要:** 为了了解混凝土结构的裂缝宽度与钢筋锈蚀率之间的关系, 同时掌握裂缝宽度及钢筋锈蚀率的无损检测技术, 特别采用 CT 扫描技术, 对一批加速腐蚀的混凝土构件进行测试, 得到了混凝土构件的裂缝宽度及锈蚀率, 分析钢筋锈蚀率与裂缝宽度的相关性。从分析的结果来看, 钢筋锈蚀率与裂缝宽度的相关曲线与其它学者研究的曲线趋势一致, 但变化率有所不同, 该曲线可以为揭示混凝土结构裂缝宽度与钢筋锈蚀率变化规律提供参考, 同时 CT 扫描技术可以推广应用在混凝土无损检测中。

**关键词:** 混凝土; CT 扫描; 裂缝宽度; 锈蚀率; 腐蚀

**中图分类号:** TU 377; U 65

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)06-0046-04

## Analysis of correlation between crack width and steel corrosion ratio of concrete structure based on industrial computed tomography

LI Ping-jie, YING Zong-quan, SU Lin-wang

(Key Laboratory of Harbor and Marine Structure Durability Technology Ministry of Transport, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** To obtain the relationship between crack width and steel corrosion ratio of the structure, and grasp the nondestructive testing technology of it, we adopt the CT scanning technology to test the accelerated corrosion concrete members, and analyze the correlation between crack width and steel corrosion ratio. The results show that the correlation curve of crack width and steel corrosion ratio is in the same trend of other researchers' curves, but the change rate is different. The curve can be referenced for change law of concrete structure crack width and reinforcement corrosion rate. Meanwhile, the CT scanning technology can be applied to concrete nondestructive testing.

**Keywords:** concrete; CT scanning; crack width; corrosion ratio; corrosion

影响钢筋混凝土结构耐久性的因素众多, 其中, 混凝土中钢筋锈蚀引起的锈裂损伤被认为是当今影响混凝土结构耐久性的首要因素。而裂缝宽度作为混凝土锈胀开裂结果的直观表现, 与钢筋锈蚀程度具有相关性。关于锈胀裂缝和钢筋锈蚀程度关系的问题, 众多国内外学者开展了相关

研究工作。各学者基于试验数据拟合提出的钢筋锈蚀率和混凝土表面锈胀裂缝宽度预测经验公式, 表达有所不同, 但直线变化趋势是一致的, 原因是各个公式基于不同的试验方法、检测手段有所不同, 可能导致较大偏差, 得到的经验公式有一定的局限性。为此, 依据《港口水工建筑物检测

**收稿日期:** 2015-12-18

\***基金项目:** 交通运输建设科技项目 (201332849A090)

**作者简介:** 李平杰 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 从事结构工程研究工作。

与评估技术规范》中对钢筋混凝土构件腐蚀等级的划分情况,采用自制加速腐蚀仪对钢筋混凝土试验梁进行加速腐蚀,对于腐蚀等级达到C级或D级的试验梁,采用CT扫描技术测试裂缝宽度及钢筋锈蚀率,进而探讨混凝土结构裂缝宽度与钢筋锈蚀率的相关性。

## 1 前期经验公式

目前,国内外众多学者对钢筋混凝土锈蚀开裂问题开展了大量的研究,以下列举基于试验数据拟合钢筋锈蚀率与混凝土表面锈胀裂缝宽度关系的主要经验公式。

Rodriguez等<sup>[1]</sup>通过试验,建立了表面裂缝宽度 $W_A$ 的经验公式,即

$$W_s = 0.05 + \beta \left[ \delta - \left( 83.8 + 7.4 \cdot \frac{C}{d} - 22.6 f_t \right) \right] \quad (1)$$

式中: $\beta$ 的取值决定于钢筋在混凝土梁中的位置,对于顶部钢筋 $\beta$ 为0.010 0,对于底部钢筋 $\beta$ 为0.012 5。

Zhang等<sup>[2]</sup>对2根在氯盐环境中放置14、23 a的梁进行观测研究。假定钢筋均匀锈蚀,建立了钢筋平均截面损失面积 $\Delta A_s$ 与裂缝宽度 $W_s$ 之间的关系,即

$$W_s = 0.191 6 \Delta A_s + 0.164 \quad (2)$$

应宗权等<sup>[3]</sup>通过数值模拟的方法对钢筋锈蚀率与裂缝宽度的关系进行研究,研究表明:保护层厚度一定而钢筋的直径不同,钢筋锈蚀导致的径向膨胀与裂缝宽度间存在线性关系,且直线的斜率并无明显变化,径向膨胀位移与裂缝间关系可表达为:

$$w_c = k \delta_c \quad (3)$$

式中: $\delta_c$ 为混凝土径向膨胀位移; $w_c$ 为裂缝宽度;线性系数 $k$ 约为1.5。

Vidal等<sup>[4]</sup>对2根在氯盐环境下分别暴露14、17 a的3 m长钢筋混凝土梁进行研究。通过失重法测量计算钢筋不同位置处的锈蚀情况,并测量相应位置处的表面裂缝宽度,建立了裂缝宽度和

钢筋锈蚀截面损失面积的关系,即

$$W_s = 0.057 5 (\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \quad (4)$$

式中: $\Delta A_s$ 为钢筋截面损失面积( $\text{mm}^2$ ); $\Delta A_{s0}$ 为混凝土表面出现第1条裂缝时的钢筋截面损失面积。

Vu等<sup>[5]</sup>引入了混凝土品质 $C/(wc)$ 这一概念,即混凝土保护层厚度与水灰比的比值,其中 $wc$ 为水灰比。通过试验得出,从保护层表面开裂至裂缝发展到一定宽度所需的时间 $t$ 与 $C/(wc)$ 存在非线性关系,即

$$t = A \left( \frac{C}{wc} \right)^B \quad (5)$$

式中: $A$ 、 $B$ 为系数,对于不同的裂缝宽度,有不同的取值。

赵羽习<sup>[6]</sup>以某一试件为例,给出了上述部分模型对表面裂缝宽度的预测结果(图1)。

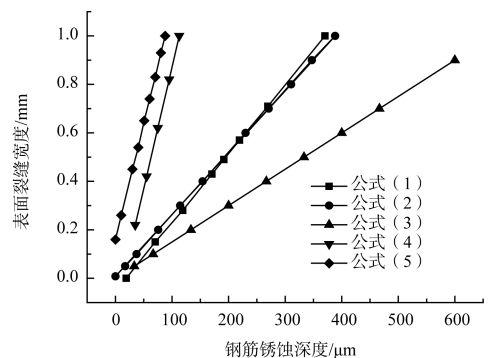


图1 不同模型对表面裂缝宽度的预测结果

从公式(1)~(5)可以看出,混凝土表面裂缝宽度与钢筋的锈蚀程度基本成线性关系。

## 2 试验过程及分析

### 2.1 试件设计

试验梁设计,以实际高桩码头中腐蚀开裂最具代表性的纵梁作为模拟对象,试验梁长1 400 mm、宽150 mm、高250 mm,并按适筋梁进行配筋设计。纵向水平钢筋采用2根 $\phi 12$ Ⅱ级光圆钢筋,钢筋保护层厚度上层为20 mm、下层为30 mm,混凝土材料配合比为水泥:砂:碎石:水=1:1.32:2.54:0.52,立方体抗压强度为33.3 MPa。构件尺寸及分布情况见图2。

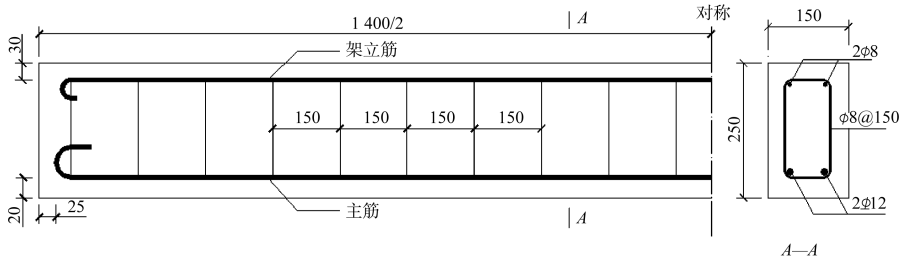


图 2 试件配筋构造 (单位: mm)

通过电化学通电并辅以干湿交替循环法进行加速腐蚀,待试件浸水养护 28 d 后,采用自制加速腐蚀仪对钢筋混凝土试验梁进行加速腐蚀,得到腐蚀等级达到 C 级和 D 级的试验梁(图 3)。



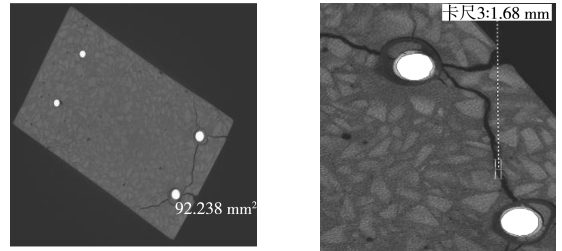
图 3 锈蚀试验梁

对锈蚀试验梁进行 CT 扫描, C 和 D 级梁各扫描 10 个试件, 每个试件扫描 5 次。

## 2.2 试验结果

### 2.2.1 混凝土 CT 图像分析

CT 扫描技术的工作原理是在被测构件无损状态下,利用 X 射线从多个方向扫描被检测物体某一断层,用专门的探测器把经过被检物体射线衰减后的信息采集下来,通过计算机采用专门的图像重建算法,把被扫描断面以二维或三维灰度图像形式展现出来,其检测直观结果就是被检物体断层图像。代表性试件 CT 扫描结果见图 4。



c) D断面扫描

d) D断面扫描放大

图 4 CT 扫描结果

从 CT 扫描结果可知,钢筋的锈蚀为非均匀性锈蚀,初步分析结果为钢筋保护层厚度越大则锈蚀程度越小。此外,相邻的钢筋由内部贯通裂缝连接,证明钢筋的位置、数量及直径对钢筋的锈蚀程度有影响。

### 2.2.2 混凝土表面裂缝宽度与钢筋锈蚀率的相关性分析

通过上述试验过程,得到保护层厚度为 17 和 34 mm、直径为 12 mm 的钢筋的锈蚀深度与对应裂缝宽度的关系(图 5)。

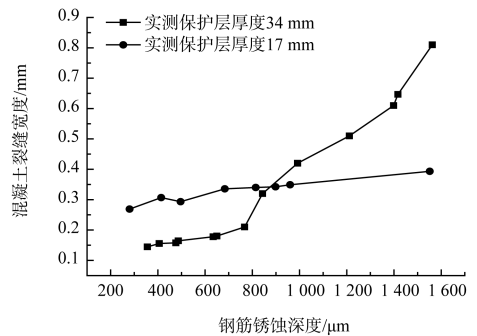
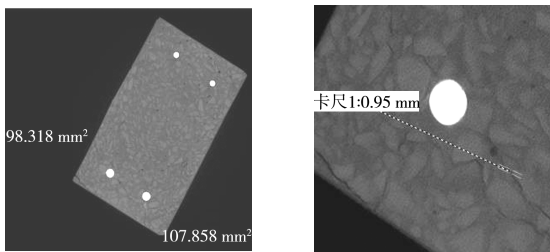


图 5 钢筋锈蚀深度与表面裂缝宽度的关系

目前,一般将混凝土锈胀开裂分为铁锈自由膨胀、混凝土保护层承受拉力、混凝土保护层锈胀开裂 3 个阶段<sup>[7-8]</sup>。但由于本次试验条件有限,故为混凝土开裂后的研究。从图 5 可以初步判断,



a) C断面扫描

b) C断面扫描放大

混凝土开裂后,保护层厚度为 34 mm 的钢筋表面裂缝宽度与钢筋锈蚀深度的模型可用 3 折线来描述,当锈蚀深度大约为 450  $\mu\text{m}$  时,开始了裂缝宽度的第 1 次较快增长,直至锈蚀深度为 600  $\mu\text{m}$ ,开始了裂缝宽度的第 2 次快速增长,与第 1 次直线斜率相比,第 2 次增长速度更快。其原因是,随着裂缝宽度的增加,加大了钢筋与外界的接触面积,加快了锈蚀速度,锈胀力的不断加大,增加了裂缝的宽度。而实测保护层厚度为 17 mm 的钢筋无第 2 次增长趋势,经过第 1 次增长后,裂缝宽度趋于稳定。

### 3 基于试验的公式修正

本次试验结果与前期研究成果预测模型对比见图 6。

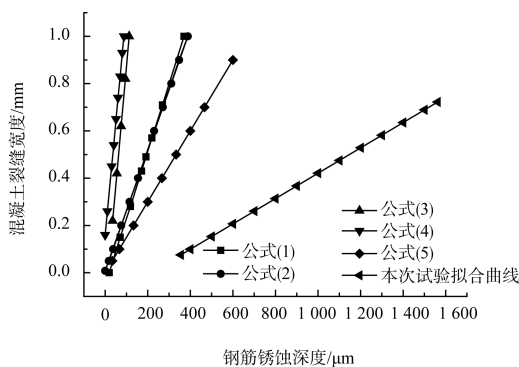


图 6 本次研究与前期研究成果对表面裂缝宽度的预测模型对比

为了更直观地描述裂缝深度与表面裂缝宽度的相关性,对实测保护层厚度 34 mm 的试验结果进行线性回归,得到表面裂缝宽度  $W_s$  与锈蚀深度  $\delta$  的线性关系,该公式适合锈蚀深度  $\delta$  大于 200  $\mu\text{m}$  的情况。

$$W_s = 3.6116 \times 10^{-4} \delta - 0.11472 \quad (6)$$

本文的预测模型与其它模型相比,锈蚀深度相同时裂缝宽度小,原因为本试验研究采用的保护层厚度相对比较小,钢筋锈蚀附着物的流失速度大于其它模型,锈胀力相对小,导致裂缝开展比较缓慢。

### 4 结论

1) CT 扫描技术对混凝土的裂缝宽度及钢筋锈蚀率的检测可行,得到的结果可靠。

2) 混凝土开裂后,表面裂缝宽度与钢筋锈蚀深度的模型可用 3 折线来描述。若混凝土保护层厚度太小,钢筋锈蚀的速度小于或等于钢筋锈蚀附着物沿着裂缝流失的速度,导致锈胀力没有继续变大,从而裂缝宽度没有继续变宽,基本趋于稳定。

3) 一般情况下,相同钢筋锈蚀深度下,保护层厚度越小,表面裂缝宽度越大。为了更直观描述裂缝深度与表面裂缝宽度的相关性,建立了二者的预测模型,裂缝宽度  $W_s$  与锈蚀深度  $\delta$  的线性关系为  $W_s = 3.6116 \times 10^{-4} \delta - 0.11472$ ,该公式适合锈蚀深度  $\delta$  大于 200  $\mu\text{m}$  情形。

### 参考文献:

- [1] Rodriguez J, Ortega L M, Casal J, et al. Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Durability of Building Materials and Components. London: [s.n.], 1996: 117-126.
- [2] 张伟平.混凝土结构的钢筋锈蚀率损伤预测及其耐久性评估[D].上海:同济大学,2009.
- [3] 应宗权,吕黄,苏林王.钢筋锈蚀率与锈胀裂缝宽度的关系探讨[J].港口工程,2010(5): 175-178.
- [4] Vidal T, Castel A, Francois R. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 165-174.
- [5] Vu K, Stewart M G, Mullard J. Corrosion-induced cracking: Experimental data and predictive models[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 719-726
- [6] 赵羽习.钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J].东南大学学报:自然科学版,2013(5): 1122-1134.
- [7] 郑建军,周欣竹.钢筋混凝土结构锈蚀损伤的解析解[J].水利学报,2004,35(12): 62-68.
- [8] 王海龙,金伟良,孙晓燕.基于断裂力学的钢筋混凝土保护层锈胀开裂模型[J].水利学报,2008,39(7): 863-869.

(本文编辑 武亚庆)