

# 基于分形理论的损伤 RC 梁裂纹开展研究

李智<sup>1,2</sup>, 田仲初<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004; 2.中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** 锈蚀会导致既有钢筋砼(RC)结构受力性能退化,进而降低其正常使用寿命。文中通过对 6 片锈蚀 RC 梁抗弯试验结果的分析,得到了锈蚀梁抗弯性能随锈蚀率变化的规律;依据分形理论,得到了锈蚀 RC 梁表面开裂过程中的分形特性,探讨了裂缝分维数随腐蚀程度及荷载作用等参数的变化规律,结果表明裂缝分维数随荷载值的增大而增大,极限强度下裂缝分维数随腐蚀程度的增大而减小。

**关键词:** 桥梁;钢筋砼梁;钢筋锈蚀;荷载裂纹;分形理论;承载力

**中图分类号:** U445.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)01-0179-04

腐蚀在钢筋砼(RC)构件内的发生是渐进和不易观测的,在构件的受弯能力产生显著变化之前,一般不会被发现。力筋腐蚀引起的构件表面开裂需很长时间,这对构件的正常使用往往是十分危险的。钢筋锈蚀是在原始锈蚀(如氯化物环境下的锈蚀)和钢筋微裂缝耦合作用下共同进行的,微裂缝可导致钢筋在很低的锈蚀情况和正常使用荷载下发生脆断。为此,对 RC 桥梁的残余使用寿命进行合理预测相当重要。荷载作用会导致裂纹的产生,构件外表面裂缝是反映结构使用过程中受力状况的关键因素。关于 RC 结构裂纹开展随损伤程度变化的相关研究表明:荷载作用下,锈蚀 RC 结构的裂纹发展较复杂,无明显规律,但基本满足分形特征。目前,对于锈蚀 RC 结构的荷载裂纹在开裂过程中是否具有分形特性尚未达成共识,仍需进一步研究与分析。该文设计制作 6 根 RC 梁,通过加载得到各级荷载作用下的裂纹分布,分析锈蚀 RC 梁表面裂纹的分维数与荷载和锈蚀率之间的关系。

## 1 试验方案

制作 6 根不同损伤程度的 RC 试件,砼保护层厚度为 30 mm,箍筋间距 100 mm,全长设置 19 根箍筋。对照梁的编号为 B1(锈蚀率为零),其余 5 片梁的编号为 B2~B6。图 1 为试验梁尺寸及配筋。

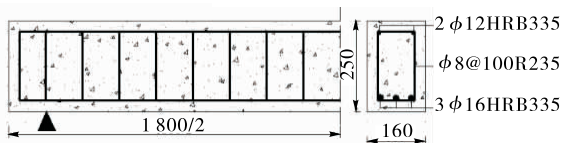


图 1 试验梁尺寸及配筋(单位:mm)

构件内钢筋的锈蚀通过人工加速锈蚀的方法完成。RC 试验梁的锈蚀情况见图 2。

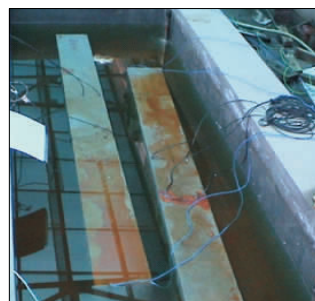


图 2 试验梁的锈蚀情况

为方便不同荷载作用下裂纹的观测,对梁进行网格划分。采用四分点进行试验加载,加载设计考虑构件的纯弯矩区域的距离为 600 mm,加载点与支座间的距离均为 500 mm。试验梁的整体布局形式见图 3。

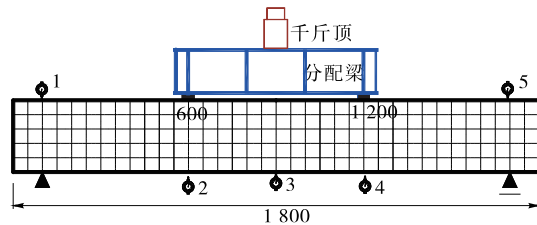


图 3 试验梁加载示意图(单位:mm)

## 2 试验结果

加载试验结束后对砼梁进行破损试验,取出钢筋对其表面的锈蚀程度进行观测,钢筋表面出现大量锈坑,钢筋锈蚀以单面锈蚀即局部坑蚀为主。对

钢筋的锈蚀率进行测量,找到锈蚀损失最大的截面,利用游标卡尺对其局部深度进行测量,得到钢筋的截面锈蚀率(见表1)。

表1 RC梁钢筋锈蚀率

试验梁编号	锈蚀率/%	试验梁编号	锈蚀率/%
B1	0.00	B4	20.63
B2	8.53	B5	28.74
B3	15.32	B6	40.41

图4为各构件的荷载—跨中挠度曲线。从中可见,锈蚀会导致RC梁的抗弯承载力下降。

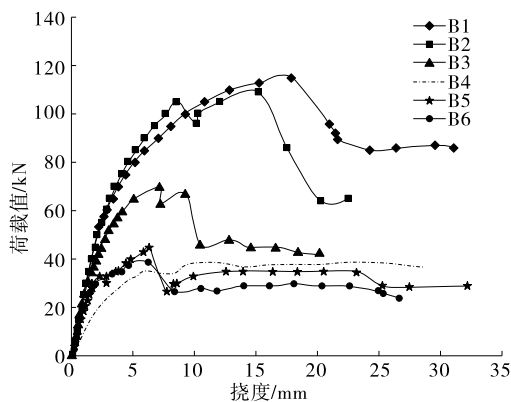


图4 各梁荷载—跨中挠度曲线

为分析腐蚀RC梁的裂纹发展特性,描绘出构件在破损失效情况下的裂纹示意图(见图5)。



图5 试验梁的裂纹分布

### 3 裂纹分布的分形描述

试验过程中,用黑色水彩笔描绘出裂缝的具体位置及延伸情况,并标注每条裂缝对应的荷载值;对所有裂缝的各参数进行测量,标明构件整体开裂的高度趋势。将锈蚀RC梁的失效形式与未锈蚀梁的情况进行对比,得到锈蚀RC梁裂缝形状、开展方式、扩展速度等的变化。荷载试验结束后,对裂缝进行拍照,通过绘制在砼梁上的方格确定裂缝出现的位置。

裂纹的数量通常用单位长度、面积或体积内的裂纹数量来表示,故又称为裂纹密度。实际结构的

裂纹产生原因有很多,各种性质的裂纹互相交错,很难确定每条裂纹的具体属性,采用裂纹密度的分析方法在工程实践中存在较大局限。因此,采用分维数进行估计。公式如下:

$$D = \log N(r) / \log(1/r)$$

式中: $D$ 为分维数; $N(r)$ 为裂纹的单元网格数; $r$ 为边长。

荷载作用下各试验梁的 $\log N(r) - \log(1/r)$ 关系曲线见图6~11。从中可见,分维数 $D$ 随荷载的增大而增大。

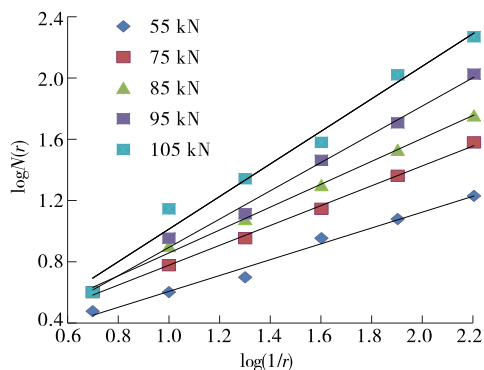


图6 B1梁的 $\log N(r) - \log(1/r)$ 关系曲线

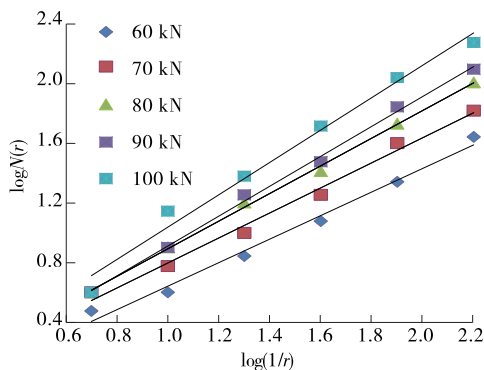


图7 B2梁的 $\log N(r) - \log(1/r)$ 关系曲线

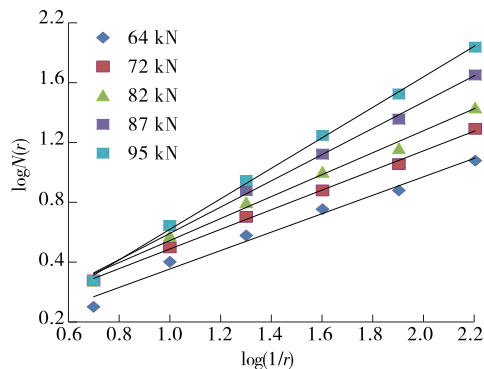
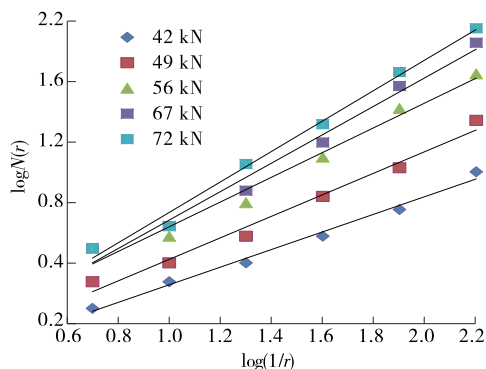
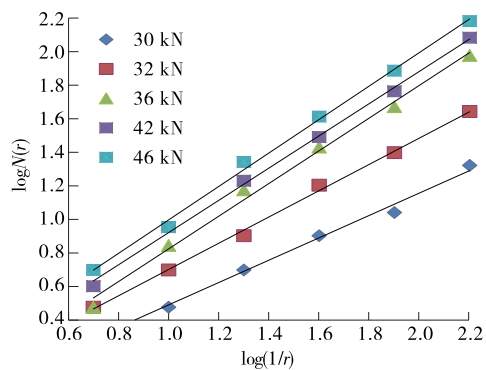
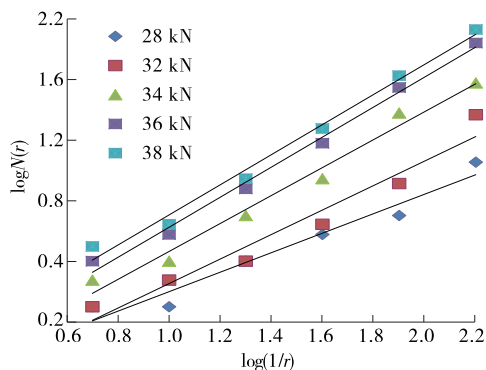


图8 B3梁的 $\log N(r) - \log(1/r)$ 关系曲线

图 9 B4 梁的  $\log N(r) - \log(1/r)$  关系曲线图 10 B5 梁的  $\log N(r) - \log(1/r)$  关系曲线图 11 B6 梁的  $\log N(r) - \log(1/r)$  关系曲线

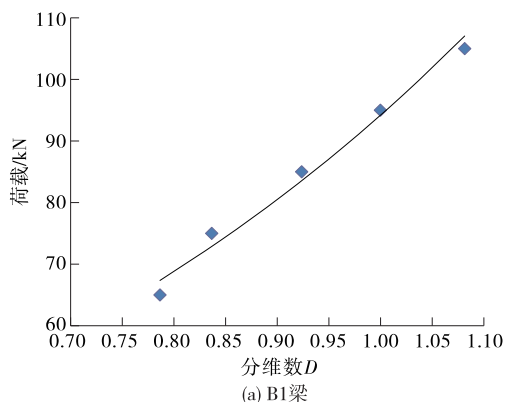
## 4 裂纹分形特性与各因素的关系

### 4.1 裂纹分维数与荷载之间的关系

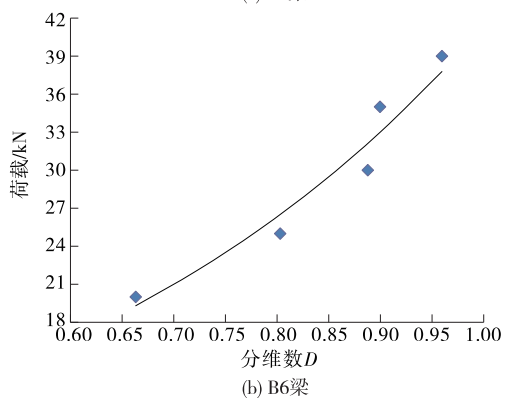
为 3 研究裂纹分维数  $D$  随着荷载大小的变化规律,绘制锈蚀损伤最小和最大试验梁的  $\log N(r) - \log(1/r)$  曲线(见图 12)。从中可见,裂纹分维数的增长速率随构件锈蚀率的增加而增大。

### 4.2 裂纹分维数与极限荷载的关系

图 13 为极限荷载与分维数之间的关系。从中可见,锈蚀 RC 梁表面裂纹分维数随极限荷载的增加而增大。



(a) B1梁



(b) B6梁

图 12 分维数与荷载的关系

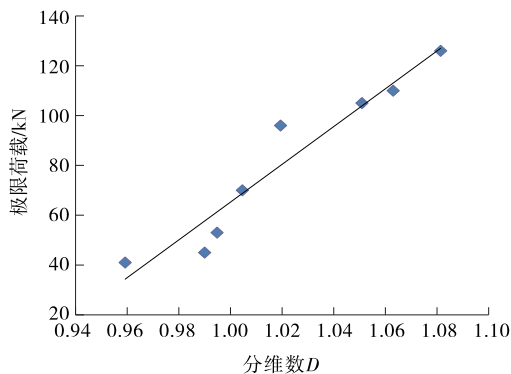


图 13 分维数与极限荷载的关系

### 4.3 裂纹分维数与锈蚀率的关系

图 14 为裂纹分维数与锈蚀率之间的关系。从中可见,随着腐蚀率的增大,腐蚀 RC 梁表面裂纹的分维数逐渐减小。

## 5 结论

(1) 不同大小荷载状态下,锈蚀 RC 构件表面裂纹的发展形态具有几何分形特性。

(2) 锈蚀 RC 构件表面裂纹的分维数随荷载的增大而增大。

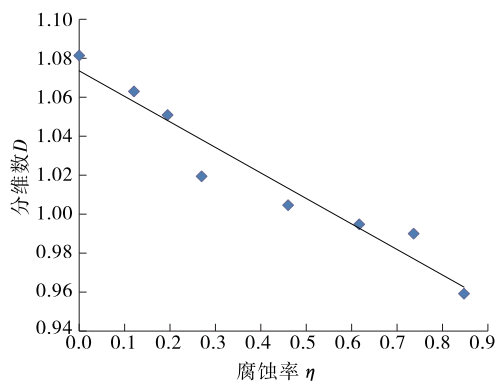


图14 分维数与锈蚀率的关系

(3) 既有 RC 梁在极限强度下砼表面裂纹的分维数随锈蚀率的增大而减少。

锈蚀后 RC 结构的裂纹发展具有明显的分形特点。该文定性分析了裂纹分维数随各因素的变化规律,但所采用的人工加速锈蚀的方法与大气环境下的构件锈蚀存在差异,需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Almusallam A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars [J]. Construction and Building Material, 2001, 15(8).
- [2] K Bhargava, A K Ghosh, Y Mori, et al. Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(8).
- [3] L Chernin, D V Val, K Y Volokh. Analytical modelling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement [J]. Materials and Structures, 2010, 43(4).
- [4] Congqi Fang, Karin Lundgren, Mario Plos, et al. Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete

[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10).

- [5] Pritchard B, Chubb M. Concrete bridge integrity assessment [A]. Garas F K, Clarke J L. Structural assessment: the use of full and large scale testing [C]. 1987.
- [6] 史庆轩, 牛荻涛, 颜桂云. 反复荷载作用下腐蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4).
- [7] 王小惠. 腐蚀钢筋混凝土梁正截面抗弯承载力的研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2006, 3(6).
- [8] 张建仁, 余常, 王磊, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁开裂的分形特征 [J]. 交通科学与工程, 2010, 6(1).
- [9] 范颖芳, 周晶, 冯新. 受锈蚀钢筋混凝土构件破坏过程的分形行为 [J]. 工程力学, 2002, 19(5).
- [10] 夏晓慧. 基于裂纹特征的锈蚀钢筋混凝土构件损伤预测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [11] 王倩, 姚林, 刘建强, 等. 基于分形理论的混凝土裂纹对钢筋锈蚀影响的研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(6).
- [12] B B Mandelbrot. Fractal geometry of nature [M]. San Francisco: W H Freeman and Co, 1982.
- [13] L R Bishnoi, R P Vedula. Prediction of air leakage and aerosol transport through concrete cracks with a fractal based crack morphology model [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265.
- [14] Savas Erdem. X-ray computed tomography and fractal analysis for the evaluation of segregation resistance, strength response and accelerated corrosion behaviour of self-compacting lightweight concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 61.

收稿日期: 2016-04-25

(上接第 162 页)

计算确定, 通道两侧脚手架加设斜杆; 洞口顶部铺设封闭的防护板, 两侧设置安全网。通行机动车的洞口设置安全警示和防撞设施。

#### 5 结语

长沙磁浮工程跨梯塘路(45+70+45) m 现浇连续梁支架采用盘扣式脚手架施工。该文结合该工程, 重点对碗扣式脚手架与盘扣式脚手架进行了比选, 同时介绍了盘扣式脚手架的施工工艺和技术控制要点。2015 年 4 月 26 日该联连续梁一次性整体现浇完成, 确保了工程质量和安全、节约了施工成本。该桥的顺利实施为后续大面积推广盘扣式脚手

架施工提供了很好的经验和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 窦军帅. 浅谈新型盘扣式支架在现浇箱梁施工的应用 [J]. 山西交通科技, 2014(5).
- [2] 彭成炎, 丰保卫, 朱斌泉. 承插型盘扣式支架在现浇箱梁中的应用 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2014(3).
- [3] JGJ 128-2010, 建筑施工承插盘扣式钢管支架安全技术规范 [S].
- [4] JGJ 162-2008, 建筑施工模板安全技术规范 [S].
- [5] 杨乐绪. 复杂钢管贝雷满堂支架设计与施工安全控制 [J]. 公路与汽运, 2016(5).

收稿日期: 2016-10-20