

锈蚀钢筋再生混凝土梁力学性能试验 研究及 ANSYS 分析

曹芙波^{1,2}, 丁兵兵¹, 王晨霞^{1,2}, 王宇¹

(1. 内蒙古科技大学, 包头 014010; 2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要:通过对钢筋通电加速锈蚀的方法,对 12 根不同钢筋锈蚀率下粗骨料取代率为 100% 再生混凝土梁的三分点加载试验,分析相同强度条件下不同钢筋直径和锈蚀率的再生混凝土梁力学性能的影响。结果表明:当钢筋锈蚀率小于 10% 时,钢筋与再生混凝土的粘结强度足以保证两者能够共同工作,此时试验梁发生材料强度破坏模式;当钢筋锈蚀率超过了 10% 时,钢筋与再生混凝土的粘结强度不足以保证两者共同工作,此时试验梁发生粘结失效破坏模式。基于 ANSYS 有限元软件对不同钢筋锈蚀率的再生混凝土梁进行模拟分析,并对锈蚀钢筋再生混凝土梁跨中截面的荷载-应力关系曲线进行验算,通过有限元结果与试验结果对比,验证了有限元分析模型的可靠性。

关键词:再生混凝土梁;锈蚀率;力学性能;ANSYS

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2015)S1-0035-06

Experimental and ANSYS analysis of mechanical property on corroded reinforced recycled concrete beams

Cao Fubo^{1,2}, Ding Bingbing¹, Wang Chenxia^{1,2}, Wang Yu¹

(1. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract: Through the method of reinforced electrifying corrosion, three points loaded test were carried out on 12 recycled aggregate concrete beams with 100% coarse aggregate replacement rate and different corrosion rate, and the effect of mechanical properties under the same strength conditions of different steel diameter and corrosion rate of recycled aggregate concrete beams were analyzed. Results show that when the steel corrosion rate is less than 10%, the bond strength of steel and recycled concrete beams sufficient to ensure that both can work together, and the test beams occurred damage mode of material strength; when the steel corrosion rate is greater than 10%, the bond strength of steel and recycled concrete beams insufficient to ensure that both can work together, and the test beams occurred damage mode of bond failure. Based on ANSYS finite element software with different reinforcement corrosion rate of recycled concrete beams simulation analysis, and the load-stress curve of the cross section of the corroded reinforced recycled concrete beams were checked, through the finite element results compared with the test results, verify the reliability of the finite element analysis model.

Key words: recycled concrete beam; corrosion rate; mechanical properties; ANSYS

再生混凝土^[1] (recycled concrete, RC)是指利用废弃混凝土经破碎加工获得再生集料,部分或全部代替天然集料配制而成的新型混凝土,也可称再生骨料混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC)。再生混凝土,不仅从根本上解决废弃混凝土的处置问题,同时还可以节约资源,减轻污染,保护环境,符合当下建设节能社会和国家加强自主创新能力的背景^[2]。目前,国内外学者对于锈蚀钢筋混凝土梁,已经有了一些研究成果^[3-5],但很少对钢筋锈蚀后再生混凝土梁的研究。文中通过锈蚀钢筋混凝土梁的静荷载试验,对再生混凝土受弯构件可靠度及耐久性等方面进行了部分研究,为今后系统研究提供参考。

1 实验概况

1.1 实验材料与混凝土配合比

水泥采用内蒙古草原牌的 42.5 级普通硅酸盐水泥;再生混凝土梁纵筋直径为 12 和 14 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋和架力筋均采用直径为 8 mm 的 HPB235 级钢筋;细骨料采用普通工地用砂;外加剂采用聚羧酸减水剂,符合《混凝土外加剂》GB8076—2008^[6]的要求;水为普通自来水。在实验配合比设计中充分考虑再生骨料的吸水率和孔隙率,增加附加水,配比见表 1。

表 1 再生混凝土配合比

设计强度	单位体积用量/(kg·m ⁻³)					水胶比	粗骨料取代率/%
	水	水泥	砂	石	减水剂		
C30	215.0	390.9	664.8	997.2	1.1	0.55	100

1.2 实验梁设计

梁试件截面为 $b \times h \times L = 120 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$,净跨 1.5 m。实验梁底部纵筋分别为 2 Φ 12/14、上部架立筋为 2 Φ 8、箍筋为 Φ 8@100。试件尺寸及配筋如图 1 所示。制作试件时为防止箍筋和架立筋被锈蚀,在箍筋 4 个直角处分别贴上绝缘胶带与环氧树脂,纵向钢筋与箍筋、箍筋与架立筋均用尼龙扎带绑扎。最后,所有试件均采用平卧浇筑。

1.3 电化学加速锈蚀

加速锈蚀采用湿通电法如图 2 所示,直接将试件浸泡在电解质溶液(5%的氯化钠溶液)中,把钢筋当作阳极,把不锈钢片当作阴极,再通以恒定电流,形成电解池。在电流的作用下,阳极(钢筋)释放电子,钢筋表面被氧化成亚铁离子,达到锈蚀目的。这种锈蚀装置锈蚀速度快,锈蚀程度可以通过改变通

电电流大小和通电时间进行控制。

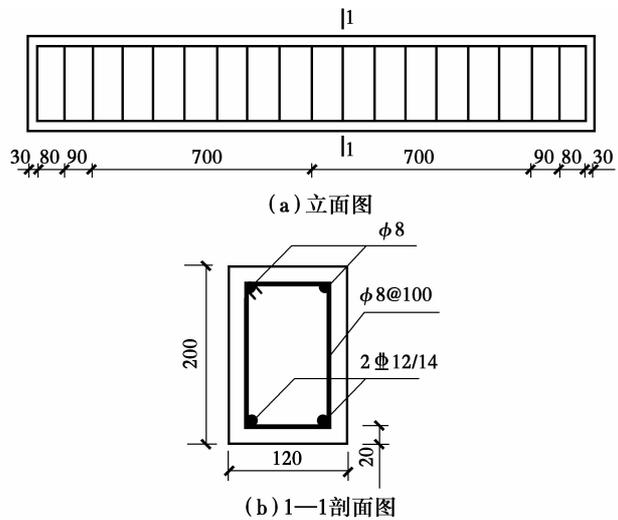
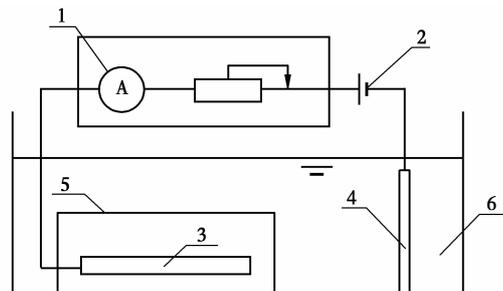


图 1 试件配筋及截面尺寸

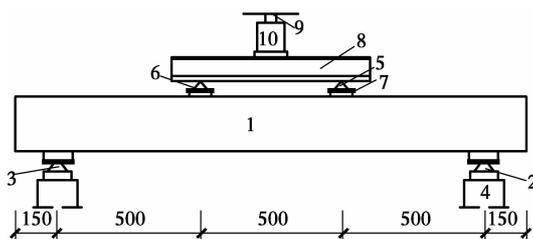


注: 1—调控系统; 2—恒定直流源; 3—阳极(欲锈蚀钢筋)
4—阴极(不锈钢片); 5—混凝土试件; 6—5%氯化钠溶液

图 2 钢筋加速锈蚀装置示意图

1.4 加载装置

试验采用 30 t 的手动千斤顶加载,并且在梁三分点位置通过分配梁对称施加荷载,压力传感器固定在千斤顶上测定竖向荷载,加载装置见图 3。实验依据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[7]采用荷载控制方法进行加载,再生混凝土梁开裂前每级荷载取 0.5 kN,再生混凝土梁开裂后每级荷载取 1 kN,直到试验梁破坏停止加载。



注: 1.试验梁; 2.滚动铰支座; 3.固定铰支座; 4.支墩;
5.分配梁滚动铰支座; 6.分配梁固定铰支座;
7.集中力下的垫板; 8.分配梁; 9.反力梁及龙门架;
10.千斤顶

图 3 加载装置图

2 实验结果分析

2.1 试验梁的破坏模式

试验梁基本参数如表 2 所示。

试验中,由于钢筋锈蚀的程度不同,试验梁发生了弯曲破坏和粘结-剪切破坏 2 种破坏模式。

1) 钢筋的锈蚀改变了试验梁的破坏模式,当钢筋锈蚀率较小时,试验梁发生弯曲破坏模式,但随着锈蚀程度的发展,试验梁依次出现弯曲破坏和粘结-剪切破坏模式。

2) 钢筋锈蚀程度改变了试验梁破坏的控制因素,导致试验梁由材料强度破坏向粘结失效破坏模式的转变。研究表明:当钢筋锈蚀率小于 10% 时,锈蚀率对钢筋与再生混凝土间的粘结强度影响较小,此时试验梁发生材料强度破坏模式;而当钢筋锈蚀率超过了 10% 时,钢筋与再生混凝土间的粘结强度不足以保证两者共同工作,此时试验梁发生粘结失效破坏模式。

表 2 试验梁基本参数

试验梁编号	钢筋设计锈蚀率/%	钢筋实际锈蚀率/%	配箍率/%	破坏荷载/kN
RCBD12(1)	0	0	1.08	82.12
RCBD12(2)	2.5	2.16	1.08	74.00
RCBD12(3)	4.5	4.19	1.08	69.36
RCBD12(4)	7.0	6.72	1.08	60.71
RCBD12(5)	10.0	9.31	1.08	58.11
RCBD12(6)	15.0	13.05	1.08	51.67
RCBD14(1)	0	0	1.48	106.92
RCBD14(2)	2.5	2.36	1.48	98.41
RCBD14(3)	4.5	4.47	1.48	89.79
RCBD14(4)	7.0	6.29	1.48	82.66
RCBD14(5)	10.0	9.58	1.48	77.96
RCBD14(6)	15.0	12.34	1.48	72.76

2.2 跨中截面再生混凝土应力分析

根据图 4 分析,在试验梁开裂前,再生混凝土的抗拉强度比受拉区再生混凝土的最大拉应力大,试验梁跨中截面再生混凝土应力呈线性分布;随着荷载的逐渐增大,受拉区再生混凝土开裂,开裂的再生

混凝土退出工作,开裂部分的再生混凝土拉应力接近为 0,此时受压区再生混凝土应力增长速度比受拉区快,中和轴上移,最后受压区再生混凝土被压碎,梁达到极限强度。

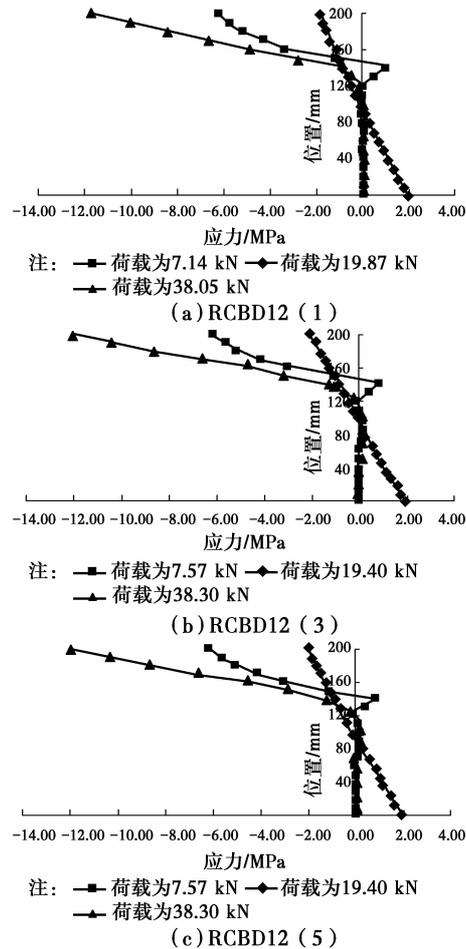


图 4 跨中截面再生混凝土荷载-应力关系曲线

2.3 钢筋与再生混凝土之间的相对滑移

图 5 给出了 RCBD12(1)~RCBD12(6), 6 根钢筋再生混凝土梁的纵向钢筋与再生混凝土之间的相对滑移分布曲线。

根据图 5 分析,在荷载较小时(受拉区再生混凝土开裂之前),纵向钢筋与再生混凝土之间的相对滑移很小,并且沿钢筋纵向成近似抛物线的形式分布;随着荷载的增加,裂缝的出现改变了钢筋与再生混凝土之间的相对滑移量,此时钢筋与再生混凝土之间的相对滑移呈现波浪线的形式分布;当荷载继续增加,受拉区混凝土裂缝的数量基本保持不变,导致曲线上的波峰与波谷的位置基本不发生变化。

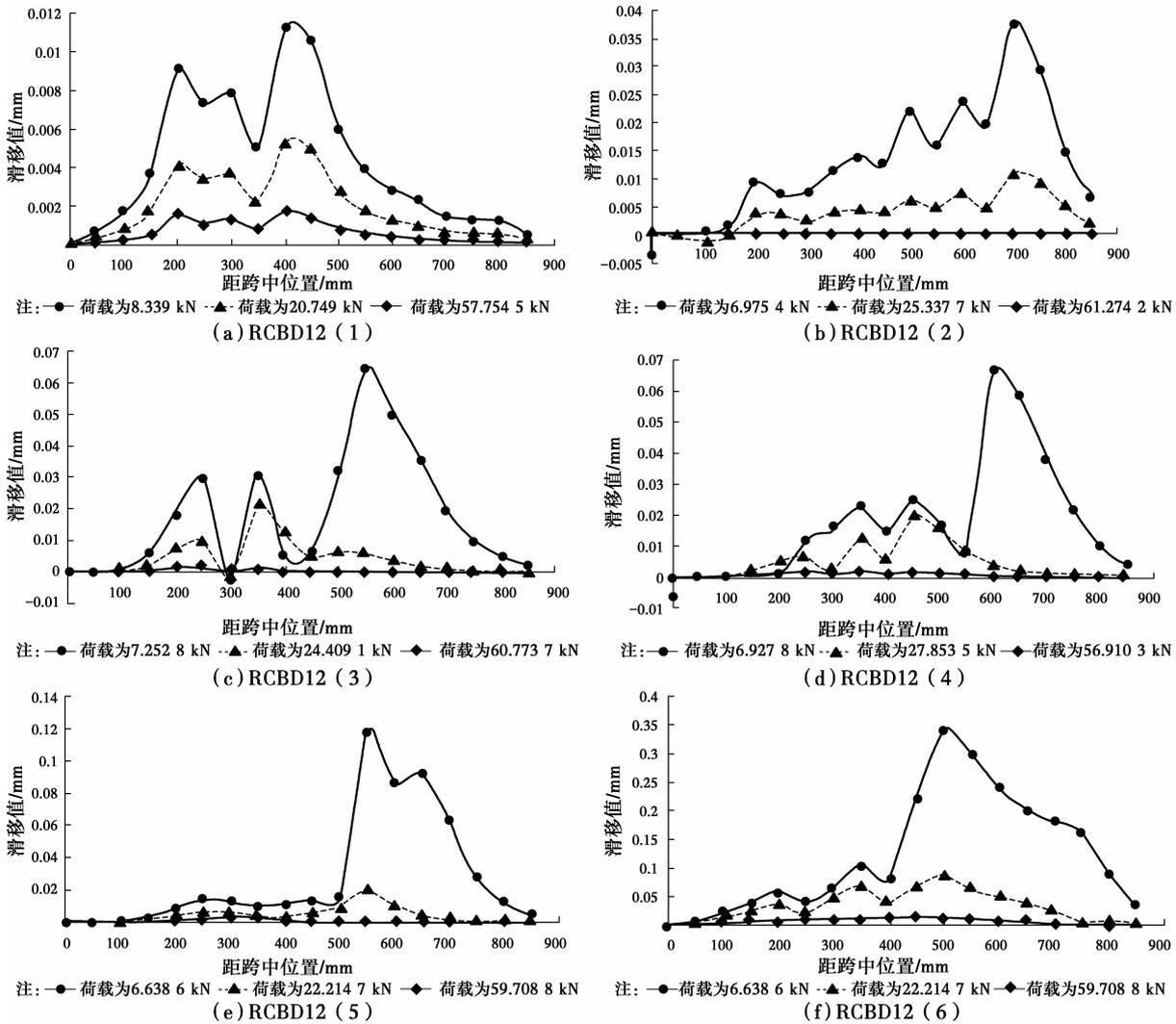


图 5 钢筋与再生混凝土相对滑移分布图

3 锈蚀钢筋再生混凝土梁有限元模拟分析

3.1 试验梁有限元模型的建立

在建立钢筋混凝土有限元模型的过程中,根据钢筋的处理方式不同,将有限元模型分为:分离式、组合式和整体式 3 种。由于钢筋锈蚀导致加载过程中钢筋与再生混凝土存在相对滑移,故采用分离式模型建模,钢筋、再生混凝土以及钢筋与再生混凝土之间的粘结滑移均在 ANSYS 单元库中选择适合的单元模拟。根据实体建模法来建立锈蚀钢筋有限元模型,首先根据试验梁的几何尺寸和钢筋长度建立实体模型,对实体模型采用映射网格划分工具划分网格得到有限元模型。为了加速收敛和减少求解时间,取试验梁的 1/4 模型建立有限元模型,如图 6 所示。

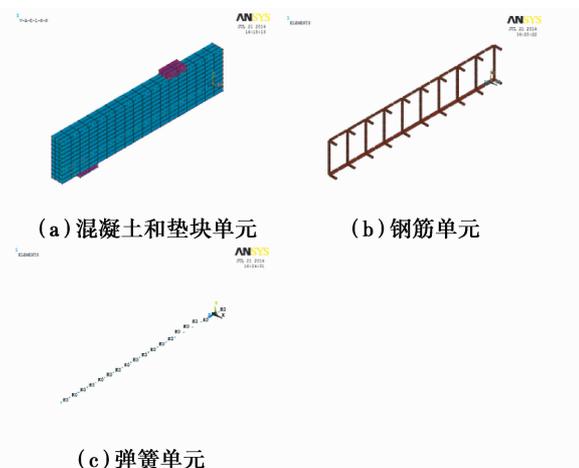


图 6 单元模型图

3.2 混凝土单元、钢筋单元以及粘结单元的組合

在每个钢筋单元节点与钢筋节点对应的混凝土单元节点处设置 3 个分别沿 X、Y、Z 方向的不同刚

度且无几何体积的非线性弹簧,如图 7 所示。3 个非线性弹簧独立存在且拥有各自的刚度,其中,模拟钢筋与混凝土之间的粘结滑移作用采用平行于纵向钢筋方向的非线性弹簧 (K_z),模拟钢筋与混凝土的径向作用采用垂直于钢筋方向的 2 个非线性弹簧 (K_x, K_y)。钢筋纵向方向的滑移是钢筋与混凝土之间的主要滑移,故 K_x, K_y 取比 K_z 大 2 个数量级即可,即不考虑在垂直于钢筋方向的滑移^[8]。

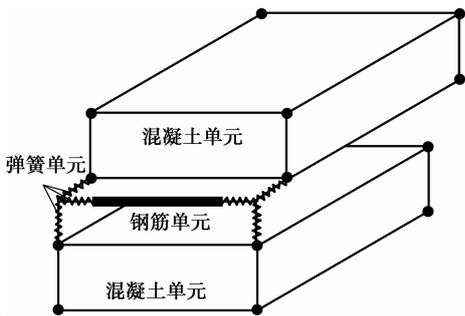


图 7 混凝土、钢筋以及非线性弹簧单元的组合

根据图 8 分析,荷载加载完成后跨中钢筋应力已经达到 486 MPa,表明钢筋已经屈服,此时再生混凝土最大压应力达到 28.2 MPa,小于再生混凝土的单轴抗压强度 29.9 MPa,表明 RCBD12(1)梁的破坏模式属于适筋梁破坏。

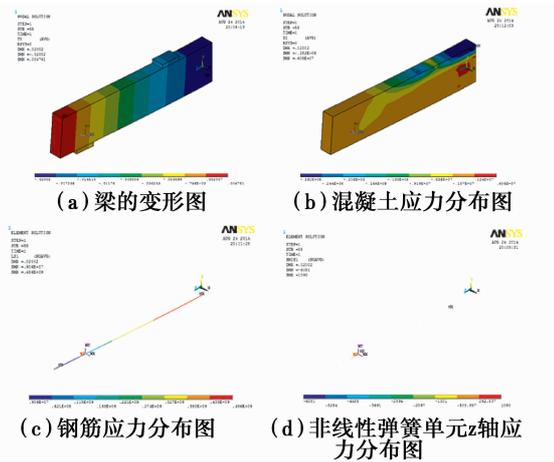


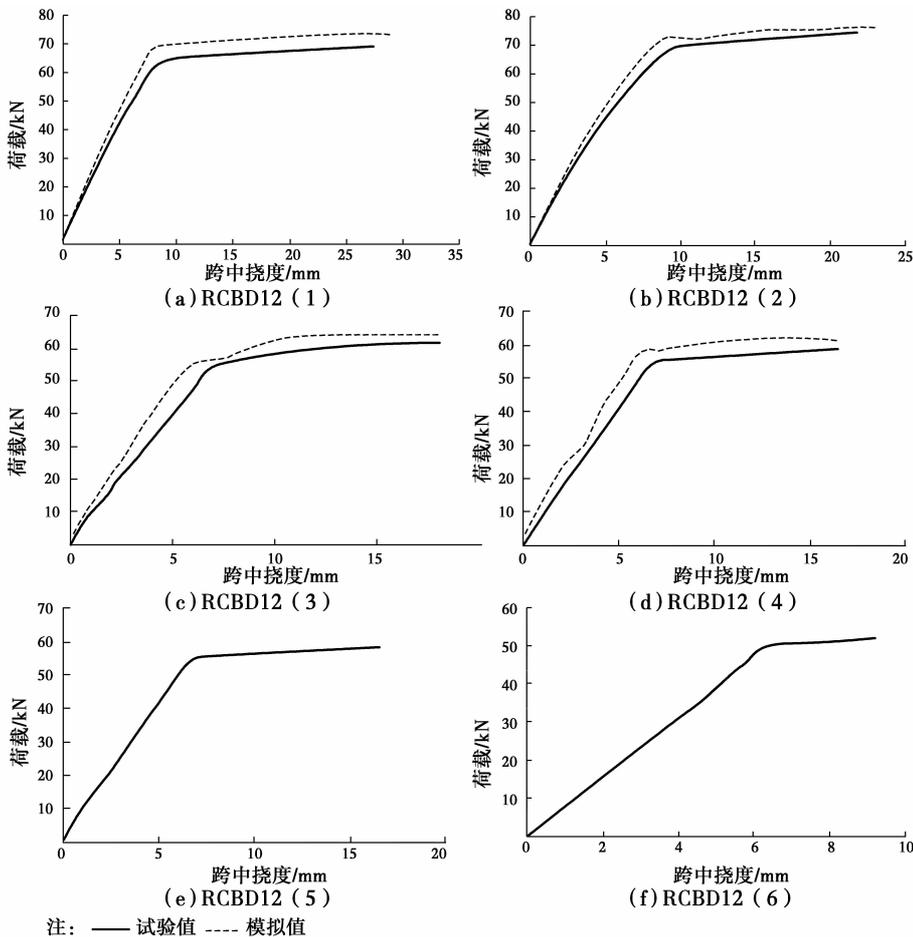
图 8 试验梁模拟变形和应力图

3.3 有限元计算试验梁的变形和应力

按照建立的有限元模型并采用位移加载方式分析,图 8 给出了 RCBD12(1)梁的计算结果。

3.4 试验梁的荷载-挠度曲线

分别将静载试验与有限元模拟得到的荷载-挠度曲线进行对比,如图 9 所示。



注: —— 试验值 --- 模拟值

图 9 荷载-挠度曲线试验值与模拟值对比

从图 9 中可以看出两者的荷载-挠度曲线的趋势走向和变化过程基本相同。从 ANSYS 计算得到的试验梁的荷载-挠度曲线得到:当荷载较小时,试验梁的荷载与挠度按照线性关系逐级增加,故梁处于弹性工作状态;当荷载继续增大,试验梁受拉区再生混凝土开裂,此后梁的荷载-挠度曲线逐渐向挠度方向偏转,挠度的增长速度比荷载的增长速度快。

4 结 论

1)通过对不同锈蚀程度的试验梁的破坏模式分析可得,当钢筋锈蚀率小于 10%时,锈蚀率对钢筋与再生混凝土之间的粘结性能影响较小,此时梁由于材料强度遭到破坏而发生弯曲破坏,属于延性破坏;当钢筋锈蚀率大于 10%时,钢筋的锈蚀严重破坏了钢筋与再生混凝土之间的粘结性能,此时试验梁由于钢筋与再生混凝土的粘结失效而发生粘结-剪切破坏,属于脆性破坏。

2)钢筋锈蚀削弱了钢筋与再生混凝土之间的粘结力,随着钢筋锈蚀率的增加,钢筋与再生混凝土之间的相对滑移将增大。

3)通过对试验梁的荷载-跨中挠度曲线的分析可得,钢筋的锈蚀对试验梁开裂荷载影响不大,但会明显降低试验梁的屈服荷载和破坏荷载,并且钢筋锈蚀会削弱钢筋与再生混凝土之间的粘结性能,使

试验梁刚度减小;通过对试验梁的荷载-跨中挠度曲线与有限元模拟曲线的对比分析,两种曲线较为接近,发展趋势一致,并且两者的极限荷载吻合较好,验证了有限元分析模型的可靠性。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 杜婷,李惠强,覃亚伟,等. 再生混凝土未来发展的探讨[J]. 混凝土,2002(4):49-50.
- [3] 孙彬,牛获涛,王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报,2008,41(11):1-6.
- [4] 刘超,白国良. 再生混凝土梁抗弯承载力计算适用性研究[J]. 工业建筑,2012,42(4):10-12.
- [5] 王小惠. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面抗弯承载力研究[J]. 混凝土与水泥制品,2006(3):39-42.
- [6] GB 8076—2008 混凝土外加剂[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [7] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国标准出版,2012.
- [8] 朱伯龙. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海:同济大学出版社,1985.

(编辑 陈移峰)