

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701005



# 锈蚀钢筋混凝土梁的力学性能 及拱效应分析

王磊<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>2</sup>, 钟立恒<sup>2</sup>, 毛亚东<sup>2</sup>

(1. 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 对锈蚀率为0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%的钢筋混凝土梁进行力学试验, 分析试验梁的挠度、钢筋应变等指标随荷载及锈蚀率的变化规律, 揭示不同锈蚀率钢筋混凝土梁受荷过程钢筋应力传递规律, 以及荷载等级、钢筋锈蚀率与锈蚀钢筋混凝土梁的拱效应关系。结果表明: 钢筋锈蚀会引起钢筋与混凝土间粘结性能退化, 钢筋应力呈现由跨中向两端传递的趋势, 锈蚀梁承载机理趋于拱效应, 锈蚀钢筋混凝土梁的拱效应随着荷载等级与钢筋锈蚀率的增加而增强。

**关键词:** 拱效应; 钢筋混凝土; 粘结性能; 锈蚀率

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)01-0024-07

## Analysis of Mechanical Properties and Arch Effect of Corroded Reinforced Concrete Beams

WANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, ZHONG Liheng<sup>2</sup>, MAO Yadong<sup>2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Based on the mechanical test of the reinforced concrete (RC) beams with different corrosion ratios of the reinforcement, including 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15% and 18%, the indexes of the deflection and the steel strain of the test beams were analyzed with the various loads and corrosion ratios, to investigate the reinforcement stress of the test beams with different corrosion ratio during the load process, and the relationship among the arch effect of corroded reinforced concrete beams, the load grade and reinforced corrosion ratio. The results show that the reinforcement corrosion degrades the bond performance between steel and concrete; the stress of steel bar transfers from the mid-span to the beam end. In addition, the load-bearing mechanism of corroded beam tends to arch effect; the arch effect of corroded reinforced concrete beam enhances with the increase of the load level and the steel bar corrosion ratio.

**Keywords:** arch effect; reinforced concrete; bond performance; corrosion ratio

当混凝土结构中的钢筋受到外界环境不利因素作用时,往往会发生锈蚀现象。锈蚀使钢筋本身的材性发生较大变化,堆积的锈蚀产物也会造成钢筋与混凝土间粘结性能退化,从而导致锈蚀钢筋混凝土结构的力学性能和破坏机理发生较大的变化。此类问题一直是国内外学者关注和研究的热点<sup>[1-12]</sup>。本文通过分析锈蚀钢筋混凝土梁中钢筋不同位置上应力的传递规律,从钢筋混凝土间粘结性能的角度阐明锈

收稿日期: 2016-05-10

通信作者: 王磊(1977-),男,教授,博士,主要从事混凝土结构耐久性的研究。E-mail: tianmu77@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51268009); 广西矿冶与环境科学实验室中心项目(KH2011ZD007)

蚀钢筋混凝土梁受力过程的承载机理,揭示锈蚀钢筋混凝土梁不能完全由“梁效应”向“拱效应”转化的原因,得出锈蚀钢筋混凝土梁的拱效应与荷载、钢筋锈蚀率之间的关系。

# 1 试验概况

## 1.1 试件设计与制作

以 14 根钢筋混凝土梁(1 300 mm×70 mm×150 mm)为研究对象.混凝土设计强度等级为 C30.梁纵筋保护层厚度为 25 mm,混凝土配合比为水泥:砂:石子:水=1.00:1.71:3.15:0.49.为了在加速锈蚀试验中增加混凝土的导电能力,采用质量分数为 5%的 NaCl 溶液代替水配制混凝土.混凝土立方体抗压实测强度为 33.32 MPa.受拉纵筋采用直径为 14 mm 的 HRB400 螺纹钢筋;架立筋采用直径为 10 mm 的 HPB335 光圆钢筋;箍筋采用直径为 6 mm 的 HPB335 的光圆钢筋.梁的构造图,如图 1 所示。

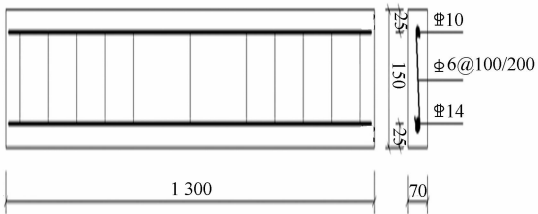
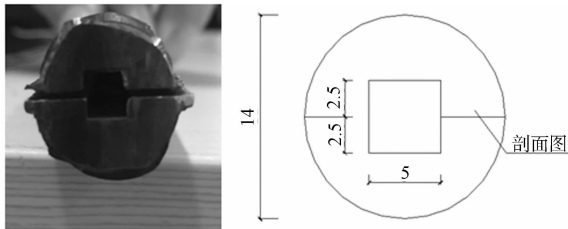


图 1 梁构造图(单位:mm)

Fig.1 Beam configuration (unit:mm)

试验选取钢筋内贴应变片的方法.采用线切割方法对纵筋进行加工处理后,将应变片贴于钢筋内,将长度为 1 280 mm 的钢筋沿轴向对半劈开,用铣床在劈开的两半钢筋内侧加工尺寸为 2.5 mm×5.0 mm(合拢后为 5 mm×5 mm)的凹槽,如图 2 所示.在钢筋槽内贴箔式电阻应变片(基底尺寸为 2 mm×3 mm),如图 3 所示.首个应变片与最后一个应变片距端部 40 mm,每隔 400 mm 贴一片,上下交错布置,合拢后应变片间距为 200 mm,应变片从左至右编号为 1~7.应变片用细直径的多股导线从钢筋内部引出,用环氧树脂灌满整个凹槽,并将两半钢筋粘合起来。



(a) 成品图

(b) 剖切面示意图

图 2 钢筋加工成品图及剖切面示意图(单位:mm)

Fig.2 Steel bar and its section (unit:mm)

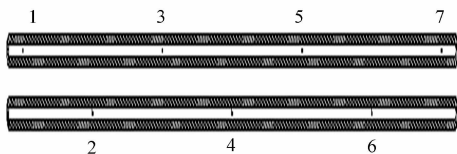


图 3 钢筋应变片布置及编号

Fig.3 Steel bar strain gauge arrangement and serial number

制作了锈蚀率分别为 3%,6%,9%,12%,15%,18%的混凝土试验梁,标记为 A~F 试件,另将未锈蚀 G 作为对比试件.采用木模水平浇筑钢筋混凝土梁,如图 4 所示.1 d 后拆模,标准养护条件下,养护 28 d.将试验梁置于质量分数为 5%的 NaCl 溶液中,采用直流电对钢筋混凝土梁中钢筋进行加速锈蚀,理论锈蚀率依据法拉第定律计算,控制电流大小和时间,使钢筋达到试验所需的预定锈蚀率。

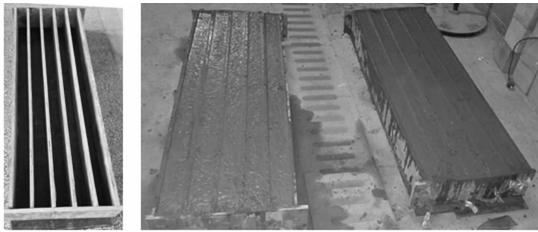


图 4 模板制作及混凝土浇筑

Fig.4 Formwork and concrete pouring

## 1.2 试验装置及加载方式

试验梁简支于支座上,利用油压千斤顶和大刚度的分配梁对试件进行三分点分级加载,通过压力传感器读取荷载数值.根据 GB 50152—1992《混凝土结构试验标准》规定,加载初期采用荷载控制方法进行加荷,每级加载 1.5 kN;后期控制加荷速度,每级加载 0.5 kN,直到混凝土压碎或者钢筋屈服.支座和跨中位置放置位移百分表,试验装置如图 5 所示。

## 1.3 实验现象

试件梁破坏现象,如图 6 所示.在荷载水平较低时,试件梁表面未出现裂缝,随着荷载增大,试件跨中纯弯段和靠近座的弯剪段底部相继出现与纵筋垂直的受拉裂缝,荷载继续增大时,纯弯段裂缝宽度向

上延伸,弯剪段裂缝向加载点延伸。

当试验梁锈蚀率较小时,试件纯弯段裂缝发展较弯剪段快,随着荷载继续增大,可以看见纯弯段一条主裂缝宽度明显增大,并向上延伸,跨中混凝土逐渐被压碎剥落,即梁发生弯曲破坏。

当纵筋锈蚀率较大时,弯剪段裂缝发展比纯弯段快,逐渐形成临界剪切斜裂缝,荷载继续增大临界裂缝继续向加载点延伸,宽度继续增大,达到极限荷载时,纵筋屈服甚至被拉断,试件剪压区混凝土开始被压缩,即试件发生剪压破坏。

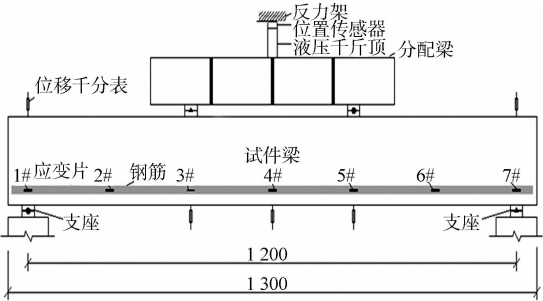
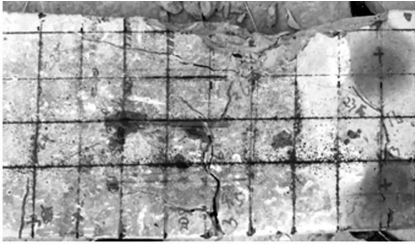


图 5 试验装置及 AE 传感器布置图(单位:mm)  
Fig. 5 Test setup and arrangement  
of AE sensors (unit:mm)



(a) 弯曲破坏



(b) 剪压破坏

图 6 试件梁破坏现象  
Fig. 6 Specimen beam damage

2 试验结果及分析

2.1 不同锈蚀率钢筋混凝土梁荷载-挠度分析

不同锈蚀率钢筋混凝土梁荷载-挠度( $F-\Delta$ )曲线,如图 7 所示。由图 7 可知:随着锈蚀率的提高,试验梁的极限承载力与变形均表现出下降的趋势。在加载初期,挠度曲线呈线性增长,至一定荷载后,挠度增加加快;接近极限荷载时,在荷载增加较小的情况下,挠度不断增加,梁的破坏呈延性破坏形式。随着锈蚀率的不断增加,较高锈蚀率的试验梁变形能力明显下降,试验梁在荷载作用下的屈服阶段不再明显存在,由于锈蚀钢筋的塑性随着锈蚀量的增大而降低,加之锈蚀钢筋有效面积减少,高锈蚀率试验梁破坏时表现为脆性破坏。

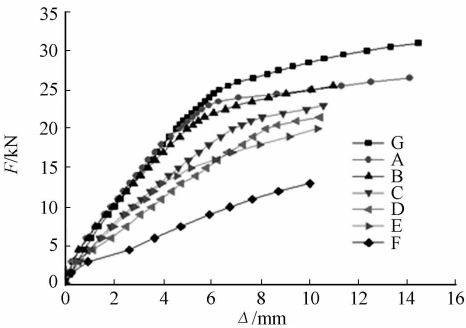


图 7 不同锈蚀率钢筋混凝土梁荷载-挠度曲线  
Fig. 7 Load-deflection curve of RC beams  
with different corrosion ratios

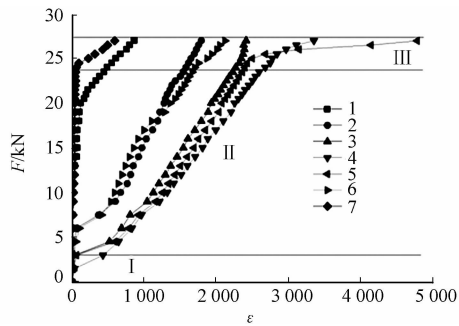
2.2 不同锈蚀率钢筋混凝土梁钢筋应变分析

由各试验梁中受力主筋上钢筋 7 个应变片的测量值,可得钢筋锈蚀率不同的钢筋混凝土梁荷载-钢筋( $F-\epsilon$ )应变曲线,如图 8 所示。

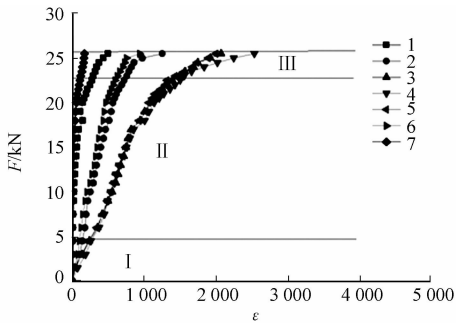
由图 8 可知:在荷载达到试验梁的开裂荷载之前,各组梁钢筋应变较小,钢筋应变随荷载的增加呈线性增加,此时,应力由混凝土与钢筋共同承担。荷载达到开裂荷载时,曲线产生突变,这是由于混凝土开裂后,混凝土应力由裂缝截面处的钢筋承担,故钢筋上产生较大的应变。在加载后期,钢筋达到屈服,在承载力增加很小的情况下,钢筋应变仍迅速增长,直到梁达到极限承载力。锈蚀率不同的各组梁钢筋两端的应变较小,越靠近纯弯段钢筋应变越大,纯弯段 3~5 号应变片读数始终大于其他应变片读数。低锈蚀率钢筋混凝土梁钢筋应变曲线与三分点加载时弯矩图有较好一致性,即纯弯段弯矩值最大,对应为钢筋应变值大,越往梁端弯矩值越小,对应钢筋应变值越小。在加载初期,高锈蚀率梁应变曲线与弯矩图

也有较好对应性. 在加载后期, 梁端钢筋应变增长明显较快, 这是由于锈胀裂缝的存在, 钢筋发生了滑移, 钢筋应力由跨中向梁端传递.

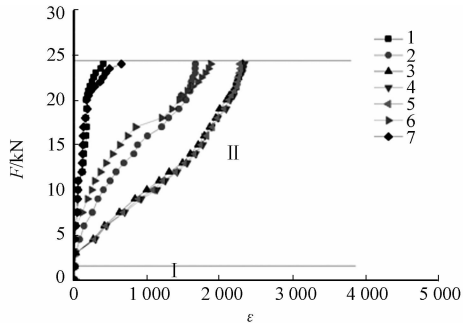
由图 8 可知: 低锈蚀率钢筋混凝土梁的破坏过程可分为梁初始裂缝的形成阶段、梁弹性阶段、梁破坏阶段等 3 个阶段. I 阶段为梁初始裂缝的形成过程, 此阶段应变曲线呈比例直线变化; 在 I 阶段与 II 阶段交接点, 初始裂缝产生, 梁开始进入弹性阶段, 此阶段为裂缝发展阶段, 初始裂缝不断扩展, 且新裂缝不断形成, 混凝土开裂后, 混凝土应力由裂缝界面处的钢筋承担, 钢筋应



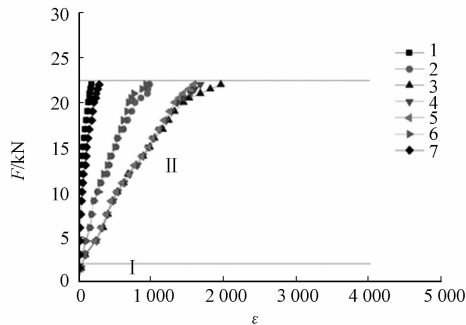
(a) A 组



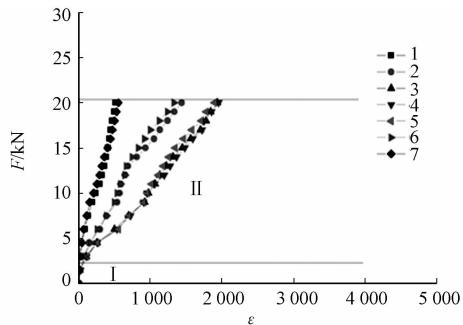
(b) B 组



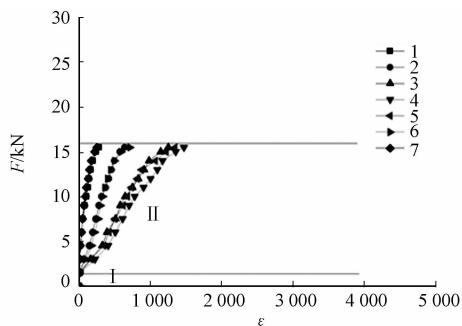
(c) C 组



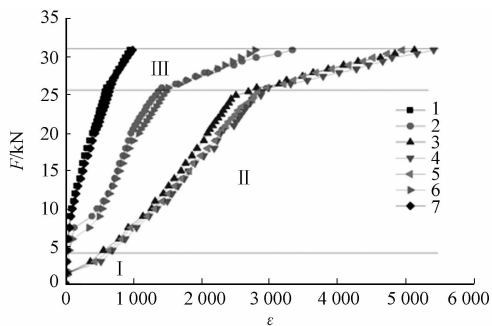
(d) D 组



(e) E 组



(f) F 组



(g) G 组

图 8 不同锈蚀率钢筋混凝土梁荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-stress curve of RC beams with different corrosion ratios

变不断增长; 在 II, III 阶段的交接处则为梁的屈服点.

由图 8 还可知: 低锈蚀率梁有明显的屈服点, 钢筋屈服后, 梁随即进入 III 阶段, 即破坏阶段, 此阶段钢筋应变迅速增长, 混凝土压碎, 梁发生延性破坏; 高锈蚀率钢筋混凝土梁无明显屈服点, 钢筋应变随加载值增大而增大, 直至梁破坏, 钢筋延性降低, 破坏呈脆性破坏形式.

不同锈蚀率钢筋混凝土梁各位置应变与纯弯段应变比值, 如表 1 所示. 表 1 中:  $m$  为梁端部应变与纯弯段应变的比值;  $n$  为梁 1/2 最大弯矩处应变与纯弯段应变的比值. 由表 1 可知:  $m, n$  随梁的加载值

的提高而提高,这说明锈蚀钢筋混凝土梁中锈胀裂缝的存在,使钢筋与混凝土的粘结面粘结性能退化,粘结力减弱;随着荷载的增加,钢筋需要更多的粘结段参与工作以获取更大的粘结力,呈现出应力由跨中向两端传递的趋势。

表 1 不同锈蚀率钢筋混凝土梁各位置应变与纯弯段应变比值

Tab. 1 Strain ratio of different positions to pure bending section in RC beam with different corrosions

F/kN	A		B		C		D		E		F	
	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
10.0	0.02	0.47	0.04	0.46	0.06	0.5	0.07	0.5	0.23	0.55	0.23	0.56
13.0	0.03	0.48	0.05	0.49	0.07	0.52	0.09	0.51	0.28	0.58	0.26	0.61
17.0	0.04	0.50	0.07	0.51	0.08	0.53	0.13	0.56	0.28	0.64	0.30	0.64
20.0	0.04	0.51	0.10	0.52	0.11	0.53	0.16	0.61	0.28	0.72	—	—
21.5	0.06	0.52	0.12	0.51	0.14	0.57	0.22	0.69	—	—	—	—
23.0	0.07	0.52	0.15	0.53	0.17	0.59	—	—	—	—	—	—
25.5	0.10	0.54	0.15	0.58	—	—	—	—	—	—	—	—
27.0	0.12	0.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

钢筋与混凝土间粘结应力由锚固区粘结应力提供,梁加载过程中应力传递,如图 9 所示。

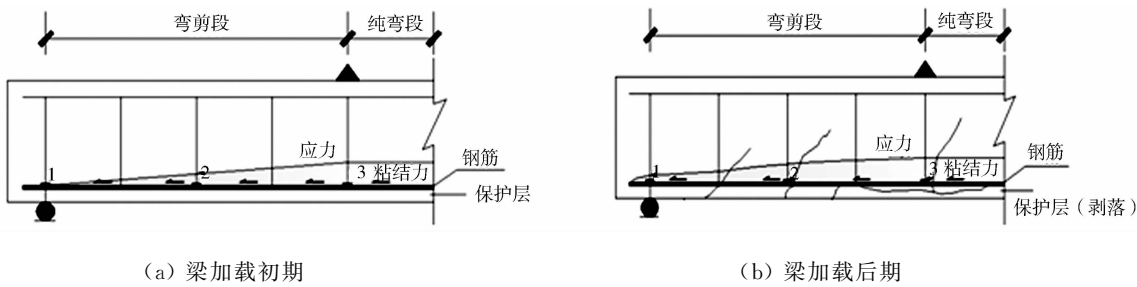


图 9 锈蚀钢筋混凝土梁加载过程应力传递图

Fig. 9 Stress transfer of corroded RC beams during loading

2.3 锈蚀钢筋混凝土梁拱效应的影响因素

在加载过程中,随荷载的增加,锈蚀梁中钢筋与混凝土间粘结性能逐渐退化,锈胀裂缝宽度逐渐变大,直至混凝土下部保护层剥离,梁下部混凝土逐渐退出工作,如图 10 所示。锈蚀梁的承载机理逐渐由梁向拱转化,钢筋锈蚀率越大的钢筋混凝土梁随着荷载值的增加,梁临近破坏时,应变比值越大。这是因为随着钢筋锈蚀率越大,梁临近破坏时,剪跨区域附近的纵筋和混凝土之间的粘结应力随之变小。

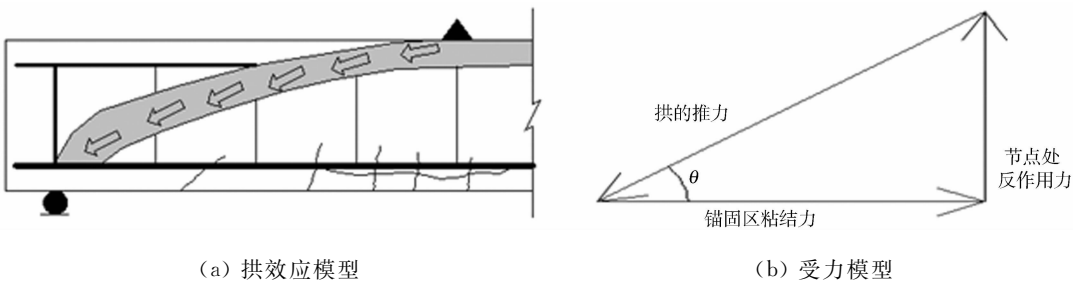


图 10 拱效应示意图

Fig. 10 Arch effect diagram

由表 1 可知:应变比值的最大增幅只是由初始的 0.5 左右增至 0.7 左右,这表明锈蚀梁在加载过程中的承载机理不是由“梁”完全转化成“拱”,而只是介于梁效应与拱效应之间,主要存在以下 4 个方面的原因。1) 剪跨比对拱效应的影响。拱效应的承载力与拱的推力角( $\theta$ )有关。其中,推力角则与梁的剪跨比有关,剪跨比越小,推力角越大,梁的拱效应越明显;剪跨比越大,推力角越小,梁的拱效应越弱。试验中,各组锈蚀梁的剪跨比为 3.6,剪跨比较大,故梁不能由梁效应向拱效应完全转化。2) 锚固长度对拱效应的影响。锈蚀梁加载至后期,梁内的粘结应力主要由锚固区的粘结力提供,锚固段越长,拱效应越明显。试验中,钢筋锚固长度为 40 mm,锚固长度较小,也是影响拱效应的原因之一。3) 箍筋对纵筋的约束

作用. 试验中, 试验梁内箍筋的存在, 约束了纵筋的滑移, 混凝土的剥离只是与纵筋下表面接触界面以下部分剥离, 纵筋上表面仍是嵌固在混凝土中, 纵筋与混凝土间的粘结力仍然存在. 当混凝土开裂后, 钢筋与混凝土间的粘结强度因横向钢筋的存在而继续增加, 使锈蚀梁的承载机理不能完全由“梁”转为“拱”. 4) 钢筋与混凝土间摩擦力的存在. 高锈蚀率钢筋混凝土梁由于锈胀裂缝的存在, 可将其看为两端锚固, 梁跨无粘结作用的钢筋混凝土梁. 在加载过程中, 由于梁端锚固作用, 混凝土受压变形后与底部纵筋接触产生的摩擦力提供了钢筋与混凝土间协同作用所需的力, 使钢筋与混凝土变形保持一致.

2.4 不同锈蚀率钢筋混凝土梁拱效应的计算

为了研究锈蚀钢筋混凝土梁在加载过程中承载机理的转化过程, 采用文献[9]中锈蚀钢筋应力-应变( $\delta$ - $\epsilon$ )关系的数学模型, 如图 11 所示.

结合试验加载过程中锈蚀钢筋应变的数据, 利用相关计算公式, 对各组不同锈蚀率钢筋混凝土梁在加载过程中拱效应形成时的拱拉力进行计算与分析, 可以得到锈蚀钢筋屈服强度  $f_{y,c}$ 、极限强度  $f_{u,c}$  计算式<sup>[10]</sup>为

$$f_{y,c} = f_{y,0}(1 - 0.021\eta_s), \tag{1}$$

$$f_{u,c} = f_{u,0}(1.018 - 0.019\eta_s). \tag{2}$$

式(1),(2)中:  $\eta_s$ 、 $f_{y,0}$ 、 $f_{u,0}$  分别为钢筋锈蚀率、钢筋名义屈服强度、钢筋名义极限强度. 当屈服平台存在时, 取模型 a 计算, 屈服平台消失时, 采用模型 b 计算.

根据式(1),(2), 可得试验梁锈蚀钢筋屈服强度  $f_{y,c}$ 、极限强度  $f_{u,c}$ , 如表 2 所示. 锈蚀钢筋混凝土梁在屈服阶段与极限破坏阶段时锈蚀钢筋的拉力  $F_{y,c}$ 、 $F_{u,c}$  为

$$F_{y,c} = f_{y,c} \cdot A_s, \tag{3}$$

$$F_{u,c} = f_{u,c} \cdot A_s. \tag{4}$$

式(3),(4)中:  $A_s$  为锈蚀钢筋截面面积. 根据式(3),(4), 由图 11 模型可计算出锈蚀钢筋混凝土梁在加载过程中各级荷载下锈蚀钢筋拉力  $F$ , 并通过各组不同锈蚀率钢筋混凝土梁梁端与纯弯段钢筋应变片比值  $m$ , 锚固段粘结力  $F_a$  的大小为

$$F_a = F \cdot m. \tag{5}$$

钢筋混凝土梁受压区高度为

$$x = \xi \cdot h_0. \tag{6}$$

式(6)中:  $\xi$  为相对界限受压区高度,  $\xi=0.518$ ;  $h_0$  为有效截面高度.

拱效应作用下的推力角为

$$\tan \theta = (h_0 - x/2)/l. \tag{7}$$

式(7)中:  $l$  为弯剪段长度, 由式(6),(7)可计算处推力角  $\theta=11.72^\circ$ .

拱拉力  $T$  为

$$T = F_a/\cos \theta. \tag{8}$$

各组不同锈蚀率钢筋混凝土梁拱效应作用下的拱拉力值及相关参数, 如表 3 所示. 由表 3 可知: 随着荷载等级的增加, 拱拉力逐渐增大, 拱效应逐渐明显; 相同大小的荷载作用下, 拱拉力大小随着锈蚀率的增加而增加; 锈蚀率低的梁, 梁效应高于拱效应, 锈蚀率为 3% 的 A 组锈蚀钢筋混凝土梁在加载后期拱拉力占梁承载力的 29.6%, 而随着锈蚀率的增加, 当钢筋锈蚀率  $\geq 12\%$  时, 锈蚀钢筋混凝土梁中拱效应大于梁效应, 锈蚀率为 18% 的 F 组试验梁在加载后期拱拉力与承载力比值为 68.8%, 相对锈蚀率最

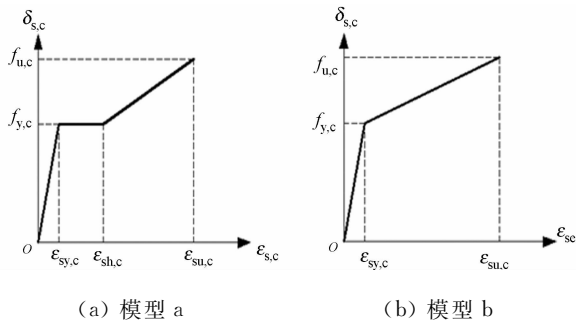


图 11 锈蚀钢筋应力-应变模型

Fig. 11 Strain-stress model of corroded reinforcement

表 2 不同锈蚀率钢筋混凝土梁屈服强度与极限屈服强度  
Tab. 2 Yield strength and ultimate strength of RC beam with different corrosions

组别	$f_{y,c}/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_{u,c}/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$A_s/\text{mm}^{-2}$
A	374.8	518.94	125.03
B	349.6	488.16	121.17
C	324.4	457.38	117.30
D	299.2	426.60	113.43
E	274.0	395.82	109.56
F	248.8	365.04	105.70

低的 A 组梁,拱效应提升了 39.2%,这说明锈蚀钢筋混凝土梁在加载过程中,梁效应逐渐减弱,拱效应逐渐增强,且拱效应随着荷载和钢筋锈蚀率的增加而增强。

表 3 不同锈蚀率钢筋混凝土梁拱效应作用下拱拉力值

Tab. 3 Arch thrust under arch effect of RC beam with different corrosions

F/kN	$\theta/(^{\circ})$	A		B		C		D		E		F	
		$F_a/\text{kN}$	T/kN	$F_a/\text{kN}$	T/kN	$F_a/\text{kN}$	T/kN	$F_a/\text{kN}$	T/kN	$F_a/\text{kN}$	T/kN	$F_a/\text{kN}$	T/kN
10.0	11.72	0.31	0.32	0.76	0.78	1.23	1.26	1.34	1.37	4.39	4.48	4.65	4.75
13.0	11.72	0.68	0.70	1.25	1.27	1.92	1.96	2.27	2.32	6.79	6.94	6.83	6.97
17.0	11.72	1.36	1.39	2.40	2.45	2.79	2.85	4.51	4.60	9.36	9.56	11.45	11.70
20.0	11.72	1.77	1.81	3.68	3.76	4.20	4.29	8.53	8.71	12.08	12.33	—	—
21.5	11.72	2.56	2.61	5.07	5.18	6.69	6.83	10.54	10.77	—	—	—	—
23.0	11.72	3.29	3.36	6.36	6.49	9.18	9.37	—	—	—	—	—	—
25.5	11.72	5.60	5.72	9.06	9.25	—	—	—	—	—	—	—	—
27.0	11.72	7.83	8.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
拱拉力比例(%)		—	29.6	—	36.3	—	40.7	—	50.1	—	61.6	—	68.8

### 3 结 论

- 1) 在低锈蚀率钢筋混凝土梁加载的过程中,跨中钢筋应变与挠度的变化规律具有较好的一致性。高锈蚀率钢筋由于钢筋锈蚀、锈胀裂缝的存在,梁在加载过程中,钢筋滑移导致梁两端钢筋的应变值明显增加。
- 2) 钢筋锈蚀会导致钢筋混凝土梁破坏形式发生变化,低锈蚀率钢筋混凝土梁破坏呈现延性破坏形式;而高锈蚀率钢筋混凝土梁在加载过程中,钢筋无明显屈服点,试验梁加载破坏过程无明显屈服阶段,发生脆性破坏。
- 3) 随着钢筋锈蚀率的增大,钢筋混凝土梁中钢筋与混凝土间粘结性能退化,使钢筋混凝土梁承载机理由梁效应向拱效应转变。
- 4) 在加载过程中,较高锈蚀率的试验梁随着粘结性能的变化,梁承载机理的转化,梁效应逐渐减弱,拱效应逐渐增强。

### 参考文献:

[1] 张永利. 锈蚀钢筋混凝土构件粘接性能及承载性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011:3-12.

[2] 吴锋,卓杨,张章. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度退化研究[J]. 水运工程,2013(3):86-90.

[3] 袁迎曙,贾福萍,蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报,2001,34(3):47-52.

[4] 梁岩,罗小勇,肖小琼,等. 锈蚀钢筋混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(10):95-100.

[5] 沈德建,吴胜兴. 大气环境锈蚀钢筋混凝土梁力学性能试验研究及分析[J]. 土木工程学报,2009,42(8):75-82.

[6] 邢国华,牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土梁的受弯分析模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(1):193-201.

[7] CASTEL A. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beam (Part1): Experimental study of corroded beams[J]. Materials and Structures,2000,33(9):539-544.

[8] CASTEL A. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beam (Part2): Bond and notch effects[J]. Materials and Structures,2000,33(9):545-551.

[9] 张伟平,商登峰,顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(5):586-592.

[10] 吴庆,袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报,2008,41(12):42-47.

[11] 张平生,卢梅,李晓燕. 锈损钢筋的力学性能[J]. 工业建筑,1995(9):41-44.

[12] 孙晓东. 主筋锈蚀钢筋混凝土梁疲劳试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2006:1-55.

(责任编辑:钱筠

英文审校:方德平)