

预应力与非预应力AFRP加固腐蚀 钢筋混凝土梁疲劳性能研究

邓宗才 李 凯

(北京工业大学 北京 100022)

摘要: 对非预应力芳纶布 (AFRP) 加固和带永久锚具的预应力AFRP加固锈蚀钢筋混凝土梁的疲劳性能进行研究。通过疲劳试验, 探讨预应力水平和钢筋锈蚀程度对加固梁疲劳破坏机制、疲劳寿命、挠度等的影响。试验结果表明: 预应力AFRP与非预应力加固梁的疲劳破坏机制相同, 都为纵筋的疲劳断裂; 预应力AFRP加固锈蚀混凝土梁的抗疲劳特性明显优于非预应力加固梁; 预应力水平越高, 中度腐蚀梁加固后疲劳寿命越高; 锈蚀率越高, 梁的疲劳寿命越低, 重度锈蚀梁疲劳寿命的降低幅度比中度锈蚀梁更明显。通过与光面钢筋对比, 获得锈蚀纵筋的等效疲劳切口系数 K_f 。结果表明, 钢筋锈蚀率的增加会导致 K_f 增大, 从而导致锈蚀梁疲劳寿命明显降低。基于试验结果, 建立了预应力AFRP加固中度腐蚀钢筋混凝土梁疲劳寿命的计算公式, 供桥梁加固设计参考。

关键词: 锈蚀 预应力 AFRP 混凝土梁 疲劳

引言

氯离子引发的钢筋锈蚀已成为工程界非常关注的重要问题。氯离子的侵蚀会破坏钢筋表面的钝化保护膜, 导致钢筋锈蚀, 钢筋锈蚀会影响结构使用性和耐久性, 甚至导致结构失效。混凝土桥梁、海洋采油平台等结构, 在长期反复荷载作用下, 会受到疲劳损伤。在锈蚀与疲劳荷载的耦合作用下, 桥梁寿命会大幅下降。

纤维增强复合材料 (FRP) 具有抗疲劳性能优异和耐腐蚀等优势, 是加固腐蚀混凝土梁, 提高其疲劳寿命的理想材料。FRP不但能够提高梁的寿命, 而且对钢筋有保护作用。目前一些学者研究了FRP加固未腐蚀混凝土梁的疲劳性能^[1-6], 而关于FRP加固锈蚀混凝土梁疲劳性能的研究甚少^[7-9], 本文研究了芳纶纤维布加固锈蚀混凝土梁的疲劳特性, 将为桥梁加固提供参考数据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了7根矩形截面混凝土梁, 其中1根未腐蚀未加固的标准梁, 2根为非预应力AFRP加固锈蚀梁 (纵筋锈蚀率分别为6%、12%), 4根为预应力AFRP加固锈蚀梁, 变化参数为AFRP预应力水平 (控制应力分别为纤维布强度45%和65%) 和纵筋锈蚀率 (中度6%、重度12%)。梁长2300mm、宽120mm、高200mm, 净跨2100mm。纵向受拉钢筋均为 $2\phi 12$ (HRB335), 纵筋配筋率为1.05%。箍筋为直径4mm的8#铁丝, 间距60mm。架立筋为 $2\phi 6$ 钢筋 (HPB235)。梁几何尺寸、配筋及加载方式如图1所示。钢筋力学性能见表1。所有试件的混凝土均按同一配合比制作, 设计等级C30, 实测抗压强度40.4MPa。梁采用芳纶布加固, 其名义抗拉强度为2060MPa, 弹性模量为 1.18×10^5 MPa, 设计厚度为0.193mm。

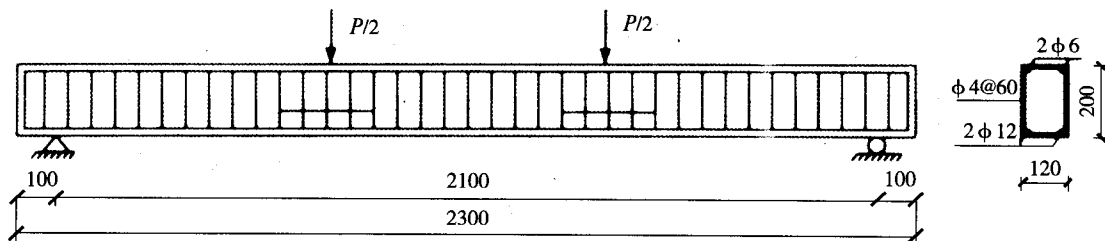


图1 试件参数与配筋图 (单位: mm)

表1 钢筋力学性能

规格	屈服强度 (MPa)	峰值强度 (MPa)	延伸率 (%)	弹性模量 (MPa)
φ4	326	438	27	2.03×10^5
φ6	467	531	12	2.04×10^5
φ12	420	632	20	2.07×10^5

在箍筋表面涂绝缘防腐涂料,使其与纵筋隔离,防止电流通过而发生锈蚀。在纵筋加载点以外涂绝缘防腐涂料,只让纯弯段纵筋腐蚀,以模拟工程中梁沿纵向非均匀锈蚀情况。为防止受腐蚀梁纯弯段与未腐蚀剪切段相交处纵筋发生断裂破坏,放置4根长300mm的φ6钢筋,并在此处局部加密箍筋。

1.2 腐蚀方案

用电化学方法使梁内受拉纵筋锈蚀。将混凝土梁浸泡在5%NaCl溶液中若干天后,将连接钢筋的导线与恒定直流电源的阳极相接,而直流电源的阴极则与溶液中的不锈钢片相接,通过NaCl溶液形成回路,使阳极钢筋锈蚀。

用法拉第定律估计钢筋锈蚀量。锈蚀量、电流强度及通电时间关系为:

$$m = \frac{Ita}{nF} \quad (1)$$

式中: m 为钢筋质量损失; I 为电流强度; t 为通电时间; a 为铁的原子量(55.85),化学反应中电子的计量系数 n 为2; F 为法拉第常数,等于96490C/mol。

腐蚀过程中控制钢筋锈蚀率分别为6%、12%。腐蚀电流为0.2A,通电时间分别为178h和356h。试验完成后,将钢筋取出,用草酸清洗掉铁锈,求得各梁纵筋实际锈蚀率见表2。

表2 试验梁加固参数

试件编号	腐蚀程度	纵筋锈蚀率 (%)	预应力水平 (%)	AFRP张拉控制 应力(MPa)
B0	0	0	0	未加固
SBⅡ	中度	5.6	0	0
PSBⅡ45	中度	6.1	45	925
PSBⅡ65	中度	5.9	65	1340
SBⅢ	重度	10.5	0	0
PSBⅢ45	重度	10.6	45	925
PSBⅢ65	重度	11.9	65	1340

1.3 加固方案

所有梁均采用2层宽100mm的AFRP加固,各梁具体腐蚀率与预应力值列于表2。试件编号中Ⅱ和Ⅲ分别表示中、重度腐蚀,45和65表示AFRP预应力水平分别为45%和65%。AFRP的加固工法详见文献[10]。

1.4 观测内容及加载方案

主要测试内容:疲劳寿命、挠度、裂缝宽度、受压区混凝土应变、受拉纵筋应变、受拉AFRP应变、疲劳破坏形态。在梁跨中以及两端支座处分别安装1个位移计测量位移,在梁跨中截面的纵筋、混凝土受压区及AFRP上粘贴电阻应变片以测量应变,人工测绘裂缝并使用读数放大镜测量裂缝宽度。

采用两点集中加载方式。疲劳加载最小值 P_{\min}^f 与最大值 P_{\max}^f 的比值为0.2。疲劳加载频率为4.6Hz,荷载在上、下限之间按照正弦规律变化。

疲劳加载程序如下:①加静载:从0开始分级加载至疲劳上限荷载 P_{\max}^f ,每级荷载下测定挠度及跨中截面应变,然后卸载至0。②疲劳加载:增加振幅拉开上下峰值施加疲劳动荷载,在疲劳循环次数分别达到10万次、50万次、90万次后停机加静载。从0开始分级加载至 P_{\max}^f ,每级荷载下测定挠度及跨中截面应变,了解疲劳后挠度及应变变化情况,然后卸载至0,继续加疲劳荷载,直至试件破坏。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态与机制

由于预先锈蚀使混凝土保护层出现顺筋裂缝(如图2所示),疲劳破坏时,混凝土保护层全部剥落,各试验梁的破坏形式都是受拉纵筋首先疲劳断裂。



图2 腐蚀梁保护层顺筋裂缝

各梁最终裂缝扩展及破坏形态如图3所示。可见：①SB II 和SB III 梁比B0梁的裂缝稀疏，分布不均匀，裂缝宽度较大，且裂缝扩展较快，说明纵筋锈蚀降低了梁抗裂性能。②PSB III 45与PSB II 45梁相比，前者裂缝较多，裂缝宽度较大，说明腐蚀率增大时，梁破坏时裂缝数目增多、裂缝宽度增大。③PSB II 45与SB II 相比，前者裂缝分布均匀，且裂缝变小，说明预应力加固能限制梁裂缝扩展。④PSB II 65、PSB III 65梁分别比PSB II 45梁、PSB III 45梁的裂缝更密，分布更均匀，并且裂缝宽度较小，即随着AFRP预应力水平的增加梁破坏时的裂缝宽度变小。

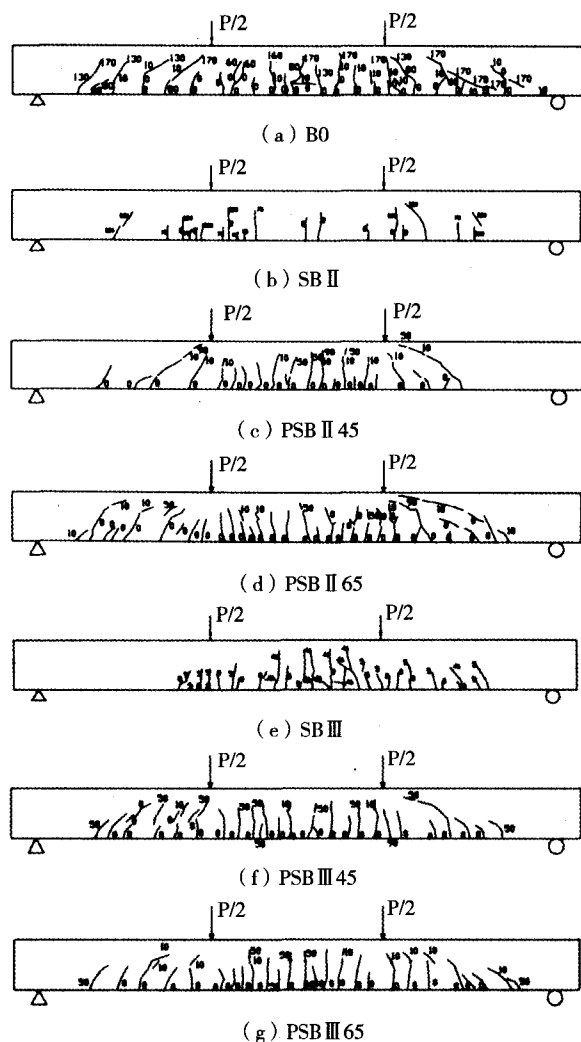


图3 各试验梁破坏形态图

2.2 疲劳寿命

各梁疲劳寿命实测值列于表3。试验发现：

①对于AFRP预应力加固中等腐蚀钢筋混凝土梁，预应力水平越高，其抗疲劳寿命越大，如PSB II 65梁疲劳加载值比PSB II 45高18%，但前者的疲劳寿命比后者高2.6%。②纵筋锈蚀率对预应力加固梁的寿命影响较大，如PSB III 65比PSB II 65疲劳加载值小15%，但前者的疲劳寿命比后者低37.5%。③预应力加固梁的疲劳性能优于非预应力加固，如PSB II 65梁比SB II 疲劳荷载高100%，但疲劳寿命只比后者低30%。④重度腐蚀后预应力加固梁PSB III 45、PSB III 65的平均寿命比非预应力加固梁SB III的寿命提高117%。可见，重度腐蚀梁采用预应力加固后对疲劳寿命的提高更为显著，原因是预应力明显降低了锈蚀纵筋的疲劳应力幅。

表3 各梁疲劳寿命实测值

试件编号	锈蚀率 (%)	腐蚀程度	预应力水平 (%)	荷载 (kN)	寿命 (万次)
B0	0	未腐蚀	未加固	25	200
SB II	5.6	中度	0	32.5	171
PSB II 45	6.1	中度	45	55	117
PSB II 65	5.9	中度	65	65	120
SB III	10.5	重度	0	32	41
PSB III 45	10.6	重度	45	55	103
PSB III 65	11.9	重度	65	55	75

2.3 挠度

图4为疲劳次数对梁残余挠度和最大挠度的影响，可以看出，试验开始时曲线变化较显著，残余挠度发展很快，随着荷载重复次数的增加，残余挠度增加非常缓慢，曲线基本上是一簇平行线，抗弯刚度基本保持不变。

相同循环次数下各梁的“荷载-跨中挠度”曲线比较如图5所示。可以看出，在疲劳荷载相近情况下，经过相同循环次数后，SB II 梁比B0梁的残余挠度减小了20%；65%预应力加固梁比45%预应力加固梁的残余挠度减小了4%~9%。表明：预应力水平增加，提高了梁抗弯刚度，减小了梁残余挠度。重度锈蚀梁比中度锈蚀梁的残余挠度增加了10%~37%，这表明纵筋锈蚀率越高，梁抗弯刚度越低，残余变形越大。

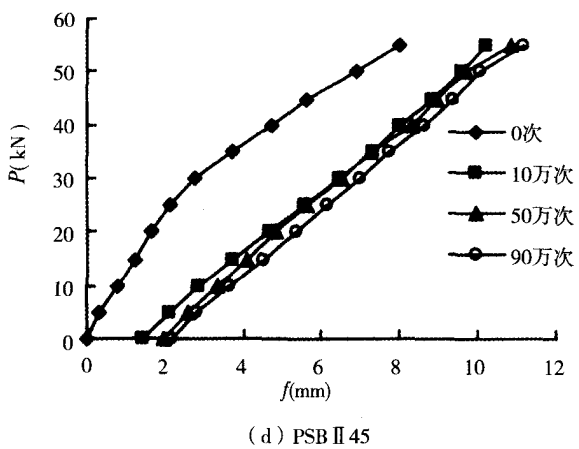
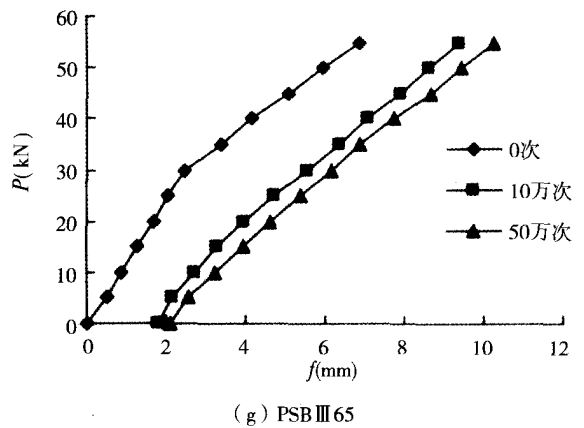
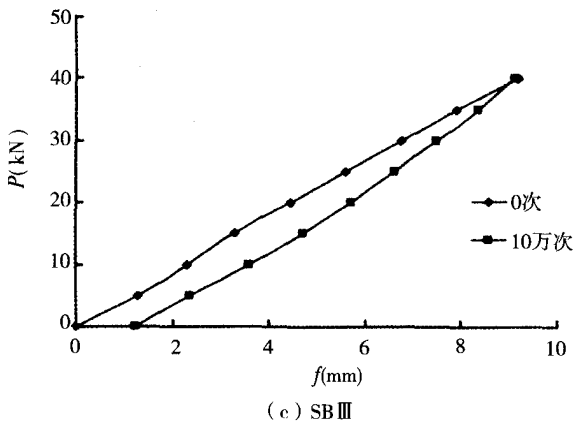
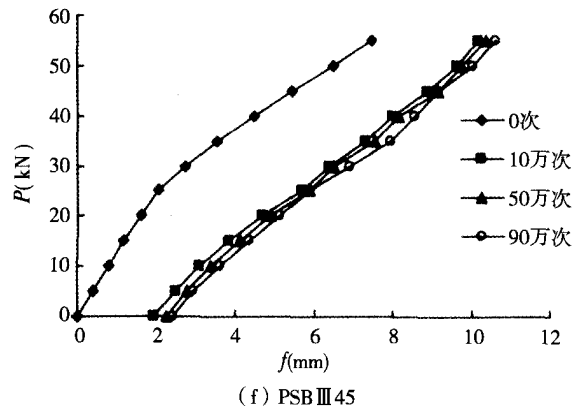
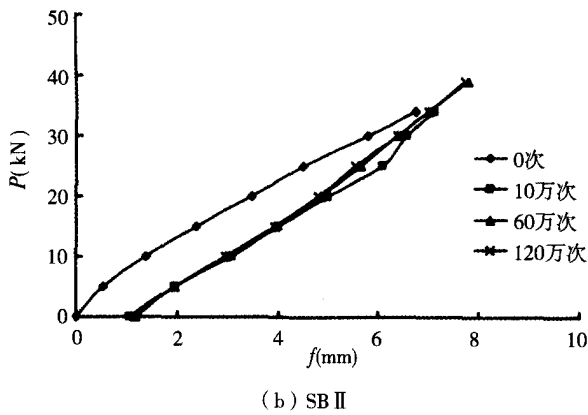
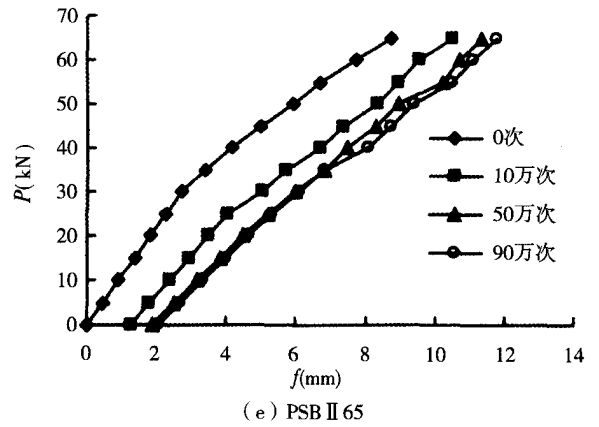
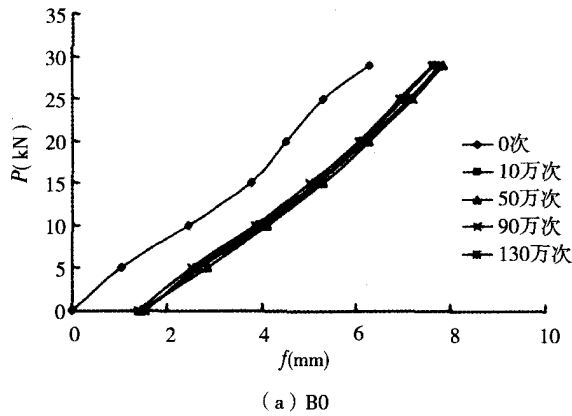
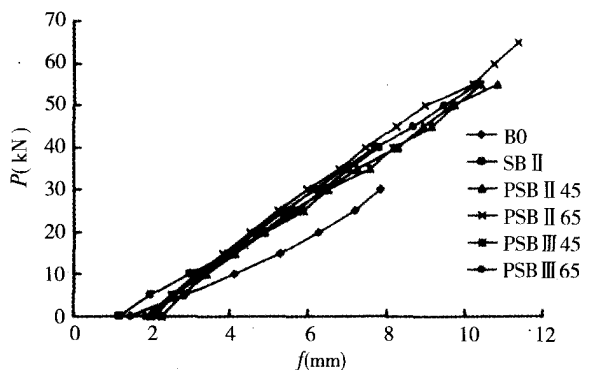


图4 不同疲劳次数后各梁的“荷载-挠度”曲线比较



2.4 应变

图6~图7为疲劳次数对加固梁中纵筋、AFRP和混凝土最大应变值的影响。可见：疲劳循环次数对纵筋、AFRP最大拉应变的影响较大，对混凝土最大压应变影响较小。图8为PSB II 45和PSB III 45材料应变与循环次数关系的对比，可以看出PSB III 45材料应变值大于PSB II 45，即锈蚀率大的梁材料应变值较大。

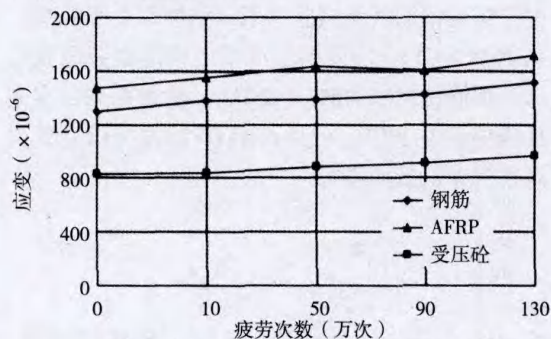


图6 SB II 材料应变与循环次数的关系

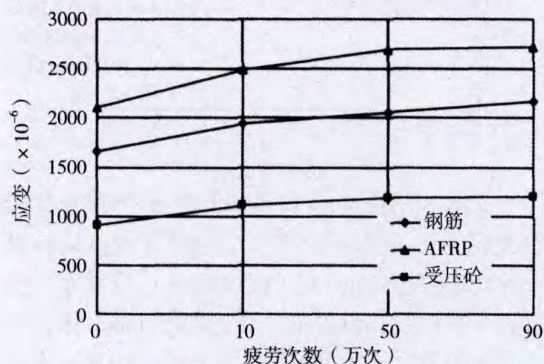


图7 PSB II 45材料应变与循环次数的关系

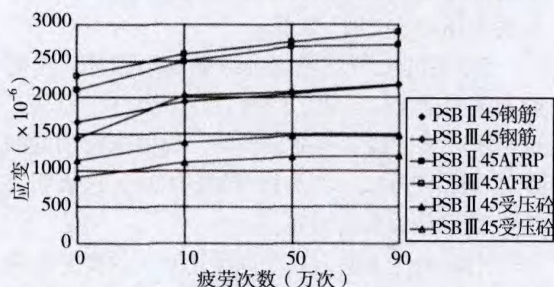


图8 PSB II 45和PSB III 45材料应变与循环次数的关系对比

3 钢筋锈蚀对疲劳寿命的影响

3.1 钢筋锈蚀情况

纵筋锈蚀后的表面情况如图9所示。对于中度锈蚀钢筋，表面的锈坑增大了应力集中，造成

其疲劳寿命下降。对于重度锈蚀钢筋，锈坑大面积出现，并且钢筋肋部已经全部被腐蚀掉，因此钢筋疲劳寿命进一步下降。

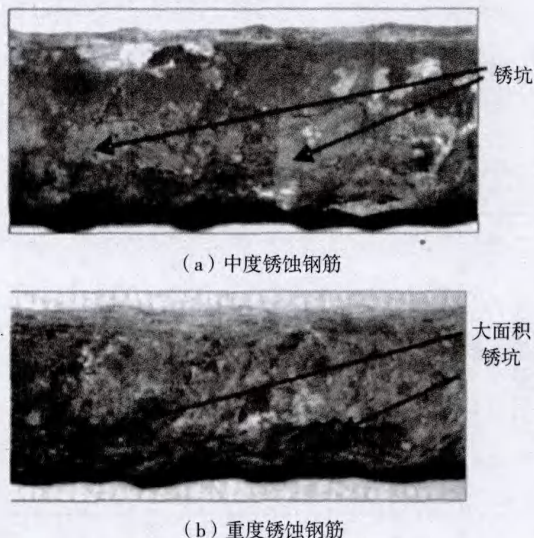


图9 不同腐蚀程度钢筋的表面状况

3.2 疲劳切口系数分析

用疲劳切口系数可以表示锈蚀钢筋的疲劳特性。 K_f 有小的变化，梁疲劳寿命将显著改变。表4总结了按文献[9]中方法求得的纵筋最大、最小名义拉应力，切口根部最大名义应力，局部应力幅、应变幅和相对于光面钢筋的疲劳切口系数。图10列出了不同腐蚀率下疲劳切口系数。

未锈蚀钢筋的疲劳切口系数为1.65，这是由于钢筋的肋造成的应力集中引起的。钢筋锈蚀至5.6%到11.9%时，平均疲劳切口系数为1.86，与未锈蚀钢筋相比有明显的增大，这表明钢筋的锈蚀会显著影响其疲劳寿命。由图10还可以看出疲劳切口系数随锈蚀率的增大而增加。对于中度锈蚀钢筋，其疲劳切口系数比较接近，平均疲劳切口系数 $K_f=1.77$ ，这表明中度锈蚀情况下，锈蚀钢筋的表面锈蚀情况比较接近，对疲劳寿命的影响也比较接近。对于重度锈蚀钢筋，疲劳切口系数差别较大，平均值 $K_f=1.95$ ，这表明重度锈蚀情况下钢筋表面锈蚀不均匀，有可能出现局部的严重锈坑，这将对疲劳寿命有较大的影响，因此重度锈蚀对钢筋的疲劳寿命削减更加严重。

表4 疲劳理论分析结果

试件	名义应力		最大局部应力 (MPa)	局部应变		K_f	K_f 平均值	
	最大 (MPa)	最小 (MPa)		应力幅 (MPa)	应变幅 ($\mu\epsilon$)			
未腐蚀梁	B0	353	45	437	504	2477	1.65	1.65
	SB II	311	22	431	520	2569	1.82	
中度腐蚀梁	PSB II 45	345	21	439	544	2709	1.71	1.77
	PSB II 65	333	23	439	540	2689	1.77	
	SB III	326	30	463	601	3077	2.09	
重度腐蚀梁	PSB III 45	359	26	442	547	2729	1.67	1.95
	PSB III 65	298	22	449	566	2845	2.10	

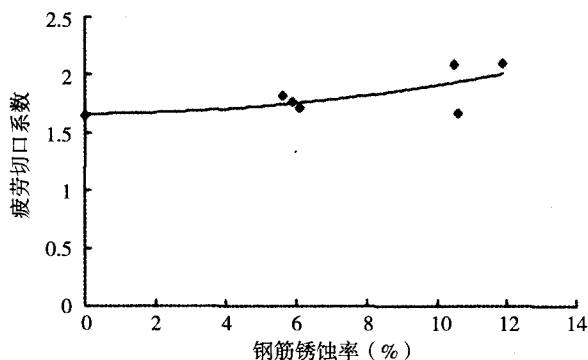


图10 钢筋锈蚀率-疲劳切口系数关系

4 疲劳寿命计算分析

基于试验数据建立了中度腐蚀梁的疲劳方程式：

$$\lg N = 15.05 - 3.5878 \lg S \quad (2)$$

式中： N 为疲劳寿命， S 为应力幅。重度腐蚀梁试验数据离散性大，未获得疲劳方程。

将疲劳寿命与应力幅的试验值列于图11，可见：锈蚀率高的梁试验数据位于左下方，可知纵筋的锈蚀会显著降低梁的疲劳寿命。中度锈蚀梁的疲劳寿命低于未锈蚀梁；重度锈蚀梁的疲劳寿命低于中度锈蚀梁。

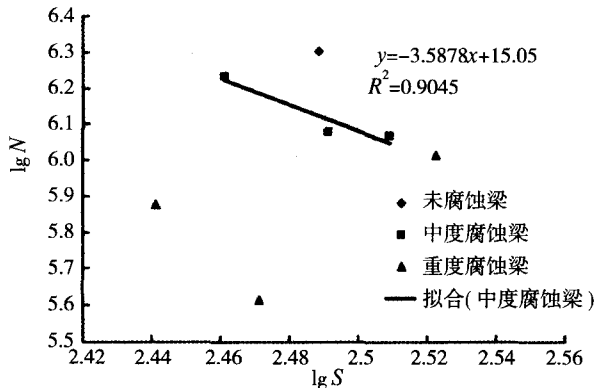


图11 AFRP加固混凝土梁的疲劳S-N曲线

现将已有锈蚀梁疲劳寿命试验值列于图12。文献[11]是1997年从东北地区梅集线混凝土梁板

中采集的钢筋疲劳试验结果，锈蚀率小于4.5%；文献[9]为CFRP加固腐蚀混凝土梁的疲劳试验结果，钢筋锈蚀率为5%~12%，二者数据均在本文加固梁的左下方。可见，AFRP加固可以显著提高锈蚀梁的疲劳寿命。

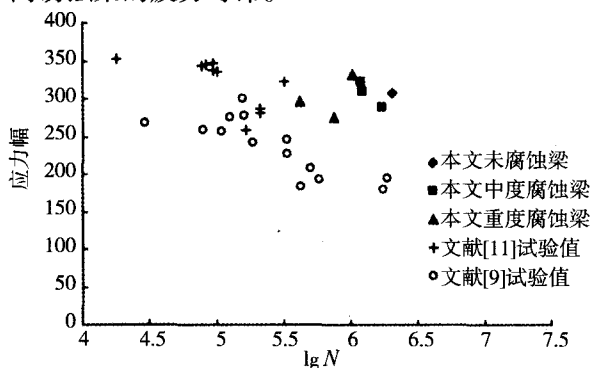


图12 疲劳寿命的比较

文献[8]用日本tow和加拿大sika碳纤维布加固中度腐蚀梁（腐蚀率9%）。两种加固方式：第一种U型缠绕加固方式（I型加固），纤维布方向垂直于梁轴线，包裹梁底及梁高150mm；第二种抗弯加固方式（II型加固），与第一种加固方式不同的是在梁底沿长度方向粘贴宽度为100mm、长度为1800mm的纤维布。

5根梁的疲劳试验均为纵筋断裂破坏。未腐蚀未加固梁（标准梁）的疲劳寿命为73.29万次，这是所有梁中疲劳寿命最长的。腐蚀未加固梁的疲劳寿命8.7万次，约为标准梁的12%，这表明腐蚀对疲劳寿命影响明显。

用tow布、U型方式加固梁（TI）的疲劳寿命为21.7万次，约为标准试件的30%，是腐蚀未加固梁的2.5倍。U型加固提高了纵筋与混凝土间的黏结强度，梁上纵向压条承受了部分应力，提高了构件的疲劳寿命。U型加固和梁上纵向压条的综合效应是减少了纵筋中应力幅，提高了疲劳寿命，另外纵向压条起到了承担部分压应力的作用。

试件用tow布,采用第二种抗弯加固方式,疲劳寿命是51.7万次,是标准梁的70%,是腐蚀未加固梁CU的6倍。这种状况是由于用U型箍及纵向FRP布抗弯加固,纵向布明显减少了纵筋中疲劳应力幅。与TI试件比较,疲劳寿命提高了140%,是由于纵向布的抗弯增强作用。

sika布加固腐蚀梁的疲劳寿命为32.65万次,是标准梁的45%,是腐蚀未加固梁的3.75倍。试件用sika布加固后疲劳寿命比用tow布加固梁高50%,这是由于sika布复合材料的力学性能优于tow布复合材料。

FRP布加固使腐蚀梁的疲劳寿命明显提高,但不能使腐蚀引起的疲劳寿命的损失完全消失。所有疲劳试件的破坏都是始于钢筋的断裂,即疲劳寿命由纵筋寿命决定,不是由FRP布及混凝土疲劳寿命决定,未完全发挥FRP布疲劳性能良好的优势。腐蚀使纵筋出现明显的锈坑,增加了应力集中的程度,对于疲劳寿命影响很大。

腐蚀梁中纵筋疲劳寿命比未腐蚀梁低,因此加固的腐蚀梁的疲劳寿命低于标准梁。除非FRP布粘贴量足够大,明显减少腐蚀纵筋中应力幅,这样腐蚀加固梁寿命才可能与标准梁接近。

5 结论

通过试验与理论分析,获得以下主要结论:

(1) AFRP加固锈蚀钢筋混凝土梁的疲劳破坏均是由于纵向钢筋的疲劳破坏引起的,未发生AFRP疲劳破坏、AFRP锚固端疲劳破坏和FRP与混凝土界面之间的脱粘破坏。加固梁的疲劳寿命取决于腐蚀纵筋的疲劳寿命。

(2) 中度腐蚀梁PSB II 65和PSB II 45,前者疲劳荷载比后者高18.2%,但前者的疲劳寿命比后者高2.6%。说明预应力水平由45%提高到65%,明显提高了中度腐蚀梁的疲劳寿命。

纵筋锈蚀率对预应力加固梁疲劳寿命影响较大,PSB III 65比PSB II 65梁疲劳加载值小15%,但前者的疲劳寿命比后者低37.5%。

预应力加固梁的疲劳性能优于非预应力加固梁,PSB III 45比SB III梁疲劳荷载高72%,但前者疲劳寿命是后者的1.5倍。这是由于预应力FRP降低了纵筋的疲劳应力幅值,提高了梁中纵筋的疲劳寿命。

预应力加固重度腐蚀梁PSB III 45、PSB III 65

的平均寿命比非预应力加固梁SB III的寿命提高117%。即重度腐蚀梁采用预应力加固后,疲劳寿命提高显著,原因是预应力降低了锈蚀纵筋应力幅,对于有明显锈坑的纵筋,降低其疲劳应力幅,将会显著延长疲劳寿命。

(3) 用疲劳切口系数可以估算腐蚀钢筋混凝土梁的疲劳寿命。中度、重度腐蚀梁 K_f 平均值分别为1.77和1.95。重度腐蚀梁 K_f 的微小增大,将导致梁疲劳寿命的明显下降。

(4) 疲劳荷载相近时,经过相同循环次数后,SB II梁比B0梁的残余挠度减小了20%;当腐蚀率相同时,65%预应力加固梁比45%预应力加固梁的残余挠度减小了4%~9%。即预应力水平增加,提高了抗弯刚度,减小了残余挠度。

在疲劳荷载和疲劳次数相近时,锈蚀率增大,梁中纵筋和粘贴的AFRP布的拉应变增大。

参考文献

- [1] Kum ar S V, GangaRao H V S. Fatigue response of concrete desks reinforced with FRP rebars [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(1): 11-16
- [2] 李源, 张兴虎, 张保印等. 碳纤维布加固混凝土梁的疲劳试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34 (4): 22-24 (Li Yuan, Zhang Xinghu, Zhang Baoyin, et al Fatigue experim ental study on concrete beam strengthened with carbon fiber reinforced plastics sheet [J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 22-24 (in Ch inese))
- [3] 刘沐宇, 李开兵. 碳纤维布加固混凝土梁的疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38 (9): 32-36 (Liu Muyu, Li Kaibing. Fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 32-36(in Chinese))
- [4] Wight R G, GreenM F, ErkiM A. Prestressed FRP sheets for poststreng thening re inforced concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 214..220
- [5] A idoo J, H arries K A, Petrou M F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer-strengthened reinforced concrete bridge girders [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6): 501-509
- [6] Christos G P, Michael F P, KentA H. Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 246-253
- [7] Almusallam A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(8): 361-368
- [8] SobhyM, Khaled S, Tmi T. CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 228-236
- [9] SobhyM, Khaled S, Tmiothy T. Postrepair fatigue performance of FRP-repaired corroded RC beams: expermental and analytical investigation [J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(5): 441-449
- [10] 邓宗才, 李建辉. 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁抗弯性能试验及理论分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(10): 101-105 (Deng Zongcai ,Li Jianhui.Experiment and theoretical research on flexural perform ance of RC beams strengthened with prestressed AFRP sheets[J]. Industrial Construction,2007, 37 (10): 101-105(in Chinese))
- [11] 曹建安, 文雨松. 锈蚀钢筋的疲劳试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16 (4): 15-18(Cao Jianan, Wen Yusong.Fatigue expermental study on corrosion reinforcement [J].Journal of Changsha Railway University, 1998, 16 (4): 15-18(in Chinese))