

混凝土构件直接粘贴 CFRP 加固 的腐蚀界限研究*

李国豹，苏林王，李平杰，萧澎伟

(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：为弥补现有规范不足、解决不同腐蚀等级构件碳纤维加固效果参差不齐的问题，在氯化钠溶液中通电模拟海洋腐蚀环境，加速腐蚀出不同腐蚀程度的 RC 梁，粘贴 CFRP 加固后进行加载试验，通过分析不同腐蚀程度构件承载力损失和直接粘贴、凿除粘贴两种 CFRP 处理方式的加固效果，研究腐蚀等级对海工 RC 梁 CFRP 抗弯加固的影响，并探讨直接粘贴 CFRP 加固的腐蚀界限。结果表明，在低腐蚀等级条件下，直接粘贴 CFRP 加固能有效减小腐蚀梁在荷载作用下的主裂缝宽度，减缓梁开裂的时间，提高抗弯承载力和整体刚度，但随腐蚀等级的增加，这些作用越来越弱，当梁腐蚀裂缝宽度超过 1 mm、主筋锈蚀率达 15% 时，直接粘贴 CFRP 加固已不再适合。

关键词：腐蚀构件；锈胀裂缝宽度；钢筋锈蚀截面损失；CFRP；直接粘贴；腐蚀界限

中图分类号：TV 431 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)03-0158-07

Corrosion threshold for concrete structures bonded directly strengthened with CFRP

LI Guo-bao, SU Lin-wang, LI Ping-jie, XIAO Peng-wei

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

Abstract: To compensate for the existing norms lack in technology applications of harbor concrete structures strengthened by CFRP and solve the spotty problem of components with different corrosive grades strengthened with CFRP, powered by NaCl solution to simulate the corrosive marine environment, RC beams were accelerated corroded to different grades, and the comparison tests of corrosion beams flexural strengthened with CFRP were carried out. By analyzing capacity loss and reinforcement effects of the beams with different corrosion degrees, the effects of corrosion grades on RC beams flexural strengthened with CFRP were studied in this paper and the corrosion threshold between bonded directly with CFRP and bonded after chiseling off in the strengthening of RC Beams were discussed. The results showed that, within a certain corrosion threshold, the corrosion grades had significant effects on the flexural strengthening of corrosion RC beams bonded with CFRP, and bonded directly with CFRP can effectively reduce the width of the main cracks, decrease the cracking time, and improve the capacity and overall stiffness of corrosion beams. However, such strengthening effects became more and more insignificant with the increase of corrosion grade. As the RC beams corroded to a certain level, the directly bonded with CFRP was no more suitable for the strengthening, and the corrosion crack width 1 mm and corrosion section loss rate 15% as the threshold between directly bonded with CFRP and bonded after Chiseling off for the strengthening were determined.

Keywords: corrosion beams; corrosive cracks width; steel corrosion rate; CFRP; bonded directly; corrosion threshold

收稿日期：2014-12-18

*基金项目：中国交通建设科技研发项目（2007-ZJKJ-04）

作者简介：李国豹（1984—），男，硕士，工程师，从事结构检测评估鉴定、维修加固方面的研究工作。

碳纤维复合材料（简称 CFRP）具有很高的强度质量比、极好的耐腐蚀性能及耐久性，是一种比较理想的混凝土结构加固材料，在土建、民建等领域得到广泛应用。我国在碳纤维加固技术应用于水工方面起步较晚，王友元等^[1-2]较早地开展了这方面的科研课题，研究发现外贴碳纤维（CFRP）加固对提高腐蚀构件承载力和耐久性、抑制锈胀开裂等方面均具有明显的作用，表明了碳纤维加固技术在水工方面的适用性及优越性。但由于时间原因以及较为恶劣的海洋环境，该技术在水工方面尚未得到普遍推广，在实际应用过程中还存在一些技术问题需要解决，比如针对不同腐蚀等级的腐蚀构件直接粘贴 CFRP 加固效果参差不齐等。

行业规范^[3]以腐蚀构件表面裂缝宽度 0.3 mm 作为采用直接粘贴碳纤维加固的界限，超过 0.3 mm 时需对裂缝进行修补处理，但在实际工程中，由于海洋环境的复杂性，结构腐蚀程度往往不均匀，且多数情况腐蚀较为严重，以腐蚀裂缝宽度 0.3 mm 作为直接粘贴 CFRP 加固的界限是偏于安全的一种做法，但若能在安全的前提下，将直接粘贴 CFRP 加固的范围加以扩大，无论是从材料耗费上，还是施工工期上考虑，都有可观的经济效益。因此，有必要对不同腐蚀等级的混凝土构件的碳纤维加

固开展相关研究，寻求更加合理的界限范围。

国内刘沐宇等^[4]对 CFRP 加固不同损伤度钢筋混凝土梁进行了研究，但与不同腐蚀构件有所区别；国外 Rajan Sen 等学者^[5-7]对构件腐蚀条件下粘贴 CFRP 进行过研究，但多数是针对纤维布或者构件碳纤维加固后的抗腐蚀性，个别研究了锈蚀 RC 梁 CFRP 加固后在静载和疲劳荷载下的力学性能，成果相对较少，且未见针对腐蚀等级影响碳纤维加固效果的研究。为此，本文针对海港混凝土构件锈蚀程度不一的特点，模拟海洋腐蚀环境加速腐蚀出不同开裂程度的构件，通过对 2 种粘贴 CFRP 加固方式的试验对比分析，研究腐蚀等级对碳纤维加固的影响规律，寻求更加合适的直接粘贴 CFRP 加固的界限范围。

1 试验设计及试验过程

1.1 试件设计及制作

试验以高桩码头中腐蚀开裂最具代表性的纵梁作为模拟对象，根据梁受力相似原理，试件设计为四点弯曲简支梁，考虑到实验室条件，按相似理论进行缩小，试验梁混凝土设计强度等级为 C30，尺寸设计为 1 400 mm × 150 mm × 250 mm（长×宽×高），主筋为 $\phi 12$ mm 的光圆钢筋，保护层厚度 2 cm，配筋构造如图 1 所示。

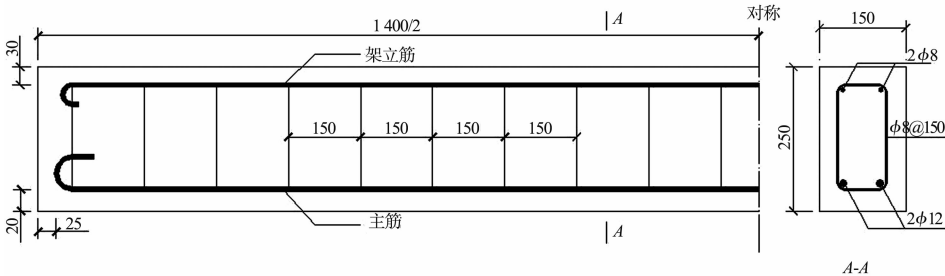


图 1 试验梁配筋构造

1.2 试件腐蚀

待试件制作完成浸水养护 29 d 后，通过电化学通电并辅以干湿交替循环法进行加速腐蚀（图 2）。腐蚀等级的划分（表 1）以 JTJ 302—2006《港口水工建筑物检测与评估技术规范》中混凝土构件外

观劣化度划分标准为基础并进行细化，并以试验完成后测试的钢筋截面损失进行等级确认。试验时通过法拉第定律理论估算与半电池电位法检测腐蚀电位、裂缝宽度测试仪测试锈胀裂缝宽度相结合的方法进行试件腐蚀状态判定。



图 2 试件加速腐蚀

表 1 腐蚀等级划分标准

等级	裂缝宽度	钢筋截面损失率 η
A	无	0
B	局部有微小锈蚀裂缝，裂缝宽度 $<0.3\text{ mm}$	$\leq 5\%$
C1	裂缝较多，部分为顺筋连续裂缝，裂缝宽度 $<1.0\text{ mm}$	$5\% < \eta \leq 15\%$
C2	裂缝宽度在 $1.0 \sim 3.0\text{ mm}$	$15\% < \eta \leq 50\%$
D	大面积顺筋连续裂缝，裂缝宽度 $>3.0\text{ mm}$	$> 50\%$

1.3 蚀构件损伤分析

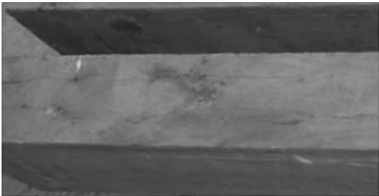
构件腐蚀完成后（图 3）按照腐蚀等级划分标准进行分类，从外观上看，B 级至 D 级构件均存在由于腐蚀产生的顺筋开裂，开裂程度随着级别的增加而增加。为了分析构件的损伤程度，以便为后续加固处理方式的选择提供依据，抽取不同腐蚀等级的试验梁进行抗弯承载力加载试验，试验完成后将试件打碎，对主筋锈蚀情况进行测试，试验结果（表 2）显示，随着腐蚀等级的增加，较之未腐蚀梁，构件承载力下降越厉害，B 级约 5%，C1 级约 10%，C2 级约 20%，D 级则下降接近 50%，而相应的钢筋锈蚀率与承载力下降幅度基本吻合。

表 2 各等级腐蚀构件基准梁承载力试验结果

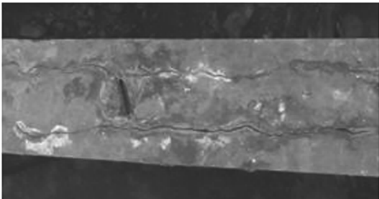
腐蚀等级	构件编号	裂缝宽度/mm	钢筋锈蚀率 $\eta/\%$	极限荷载 P_{max}/kN
A	A0-1			102.74
B	B0-1	0.3	3.58	99.39
C1	C01-2	0.7	8.03	93.71
C2	C03-1	1.5	16.92	82.00
D	D0-2	3.5	39.14	58.58



a) B级



b) C1级



c) C2级



d) D级

图 3 各腐蚀等级试件典型外观

同时，试验过程还发现，对于腐蚀等级较低的 B 级、C1 级构件，钢筋截面损失和锈蚀产物的量均相对较少，在荷载作用下，钢筋与混凝土之间的共同作用与未腐蚀量梁差别不大，基本上仍然呈现出适筋梁的破坏特征，表明在腐蚀较轻的情况下钢筋与周围混凝土没有发生明显的粘结滑移；而随着腐蚀等级的增加，氯离子不断渗透，钢筋不断锈蚀，锈蚀产物也不断增加，在荷载作用下，锈蚀钢筋与周围混凝土之间粘结力急剧下降，率先发生粘结滑移，随后钢筋很快屈服，承载力下降比较明显。

1.4 固处理方式

为比较不同腐蚀等级试件不同 CFRP 粘贴加固

方法的加固效果, 进一步确立腐蚀构件直接粘贴碳纤维加固的腐蚀界限, 各等级腐蚀量均采用干铺法直接粘贴和凿除粘贴 2 种加固方法, 粘贴方式为在梁底部受弯拉区域沿梁的纵向粘贴。凿除粘贴时首先是凿除锈蚀钢筋周围松动混凝土或者凿除原有保护层, 对锈蚀钢筋进行除锈处理, 然后采用聚合物环氧砂浆对保护层进行修补, 最后再用干铺法粘贴 CFRP 加固。

试验加固用的碳纤维布为台湾重亿公司生产

的 Cymax L200-C, 其规格为 200 g/m², 其出厂材料性能参数如表 3 所示。试验使用的粘结剂采用中交四航工程研究院研发的湿表面粘结剂(专利号 200710027191.0), 界面粘结力满足 ≥2.5 MPa 规范要求。各等级腐蚀梁加固处理方式见表 4。

表 3 碳纤维材料参数			
弹性模量 E/GPa	断裂伸长率	极限强度 f_u/MPa	极限应变/ 10^{-6}
235	0.016 8	3 250	16 800

表 4 各等级腐蚀两种粘贴 CFRP 加固梁承载力结果								
腐蚀等级	试件编号	钢筋截面损失率/%	加固处理方式	极限载荷/ kN	承载力提高幅度/%		最大腐蚀裂缝宽度/ mm	备注
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
A	A0-1		未加固	102.74				未腐蚀基准梁
B	B0-1	<5	未加固	99.39	-3.26		0.2	B 级基准梁
	B1-1-1		直接粘贴 1 层	140.54	36.80	41.40	0.2	
C1	C01-2	5~15	未加固	93.71	-8.79		0.8	C1 级基准梁
	C11-1-1		直接粘贴 1 层	135.53	31.90	44.63	0.6	
	C1Z-1-1		凿除粘贴 1 层	132.18	28.70	41.05	0.7	
C2	C03-1	15~50	未加固	82.00	-20.19		2.0	C2 级基准梁
	C13-1-1		直接粘贴 1 层	125.49	22.10	53.04	1.5	
	C2Z-1-1		凿除粘贴 1 层	145.56	41.70	77.51	1.1	
D	D0-2	>50	未加固	58.58	-42.98		3.5	D 级基准梁
	D1-1-1		直接粘贴 1 层	55.23	-46.20	-5.72	3.5	
	DZ-1-1		凿除粘贴 1 层	76.98	-25.10	31.41	4.6	

注: ③列为钢筋最大截面损失率; ⑥列承载力提高幅度相对于未腐蚀基准梁 A0-1; ⑦列承载力提高幅度相对于各等级未加固基准梁; 负号表示较基准梁低。

1.5 抗弯加载

试验梁粘贴 CFRP 加固, 粘接胶固化 7 d, 进行抗弯加载试验。分级加载, 在钢筋屈服以前, 每级加载 5 kN (油压表对应 3 MPa), 钢筋屈服后每级加载 2 MPa, 接近破坏时, 每级荷载降至 1 MPa, 每级加载时间 5 min, 每级加载后观测裂缝扩展情况, 用裂缝宽度测试仪量测裂缝宽度, 并记录 2 支座的沉降量, 同时用荷载-位移曲线显示跨中挠度随荷载的变化, 用静态应变仪显示梁混凝土、主筋及碳纤维各测点的应变值。

2 加固效果及分析

2.1 抗弯承载力

将不同腐蚀等级两种方式粘贴加固梁的承载力试验结果汇总 (表 4), 并对各等级试验梁承载力进行比较 (图 4), 可以看出, 与未腐蚀基准梁

相比, B 级直接粘贴碳纤维加固梁承载力提高幅度为 36.8%, C1 级 31.9%, C2 级 22.1%, D 级为负值, 随着腐蚀等级的增加, 构件承载力提高幅度逐渐降低, 即直接粘贴碳纤维加固的效果在下降; 而与各等级未加固基准梁相比, C1 级切割凿除粘贴加固后承载力提高幅度与直接粘贴梁相当, C2 级和 D 级凿除粘贴承载力均好于直接粘

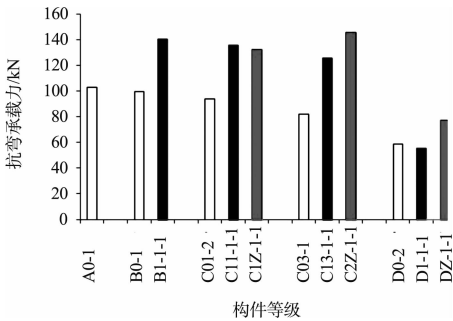


图 4 两种粘贴加固方法各等级构件承载力比较

贴, D 级直接粘贴甚至起不到加固的效果, 表明腐蚀等级达到 C2 及以上时, 采用切割凿除粘贴加固效果要优于直接粘贴加固。

2.2 抗弯刚度

从试验梁荷载-位移曲线(图 5)来看, 未加固基准梁破坏时跨中挠度达到 22 mm, 而无论是直接粘贴还是凿除粘贴加固梁, 跨中挠度均低于未加固基准梁, 且挠度曲线斜率较未加固基准梁要大, 表明碳纤维加固对挠度的改善较为明显, 加固后梁的整体刚度有很大提高; 但是在荷载相同的条件下, 腐蚀等级越高, 梁跨中位移越大, 表明腐蚀开裂对加固梁整体刚度有较大影响, 高等级比低等级腐蚀梁直接粘贴加固效果要差。另外, C1 级凿除粘贴加固梁与直接粘贴加固梁相比, 破坏时二者挠度相当, 而 C2 级凿除粘贴加固梁比直接粘贴时破坏挠度要小。

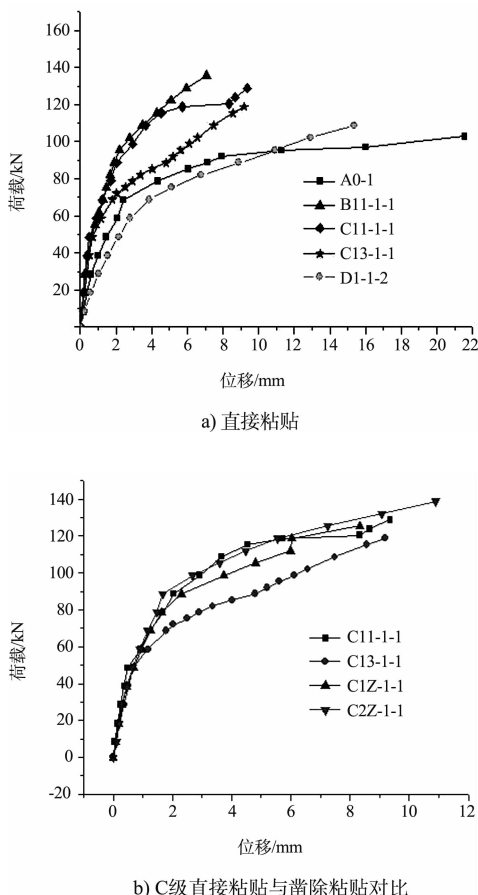


图 5 两粘贴方式加固梁荷载-跨中位移曲线

2.3 结构应变

腐蚀梁直接粘贴加固时, 由于梁受到腐蚀,

受拉钢筋截面受到损失, 腐蚀严重时混凝土松动, 钢筋与混凝土之间局部产生滑移, 荷载较小时钢筋、混凝土、碳纤维三者能够较好地发挥共同作用, 但随着荷载逐渐增大时, 混凝土由于开裂退出工作, 钢筋由于截面损失, 很快达到屈服, 梁很快由于钢筋和混凝土作用失效, 从内部开裂, 碳纤维发生剥离, 利用率较低, 随着腐蚀等级的增大, 尤其是 C2 级以上时, 这种现象更为明显(图 6)。相比直接粘贴梁, 切割凿除粘贴加固梁由于凿除了钢筋周围松动混凝土, 钢筋与混凝土之间的滑移有所减弱, 随着腐蚀等级的增加, 较大荷载下钢筋、混凝土及碳纤维三者之间的共同作用要好于直接粘贴加固梁。

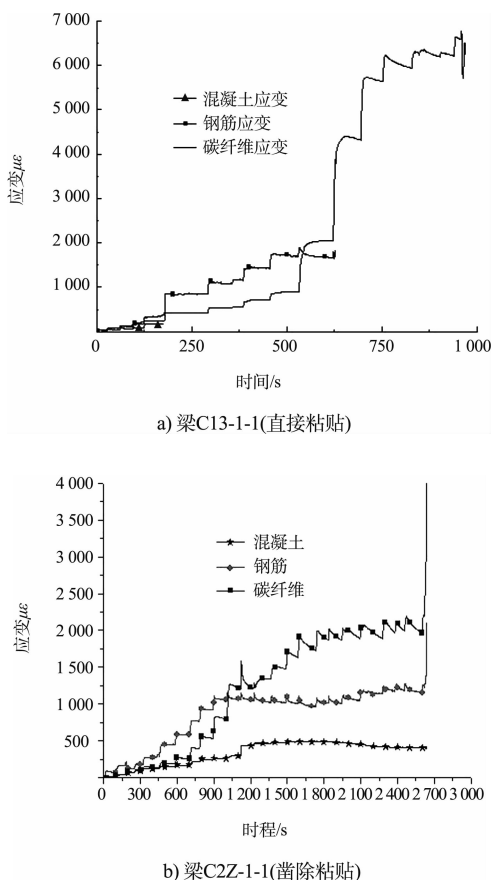


图 6 C2 级试验梁混凝土、钢筋、碳纤维三者应变关系

2.4 破坏模式及裂缝发展

从破坏模式(图 7)来看, 对于直接粘贴加固梁, B 级、C1 级均发生类似适筋梁破坏, C2 级为在梁受弯剪部位碳纤维发生剥离破坏, 而 D 级试验梁近似少筋梁脆性破坏, 表明随着腐蚀等级

的增加, 梁发生脆性破坏的机率在增大, 这与挠度和应变分析的结果比较吻合。究其原因, 腐蚀较严重的梁 (C2 级以上), 钢筋因锈蚀截面积大大减小, 加载过程未发生明显屈服便断裂, 致使碳纤维尚未充分发挥作用, 梁便已经从内部破坏, 不适合采用直接粘贴 CFRP 进行加固。而对于采用切割凿除粘贴 CFRP 加固的 C2 级腐蚀梁, 碳纤维被拉断破坏, 表明破坏时碳纤维已充分发挥作用, 加固效果较好。

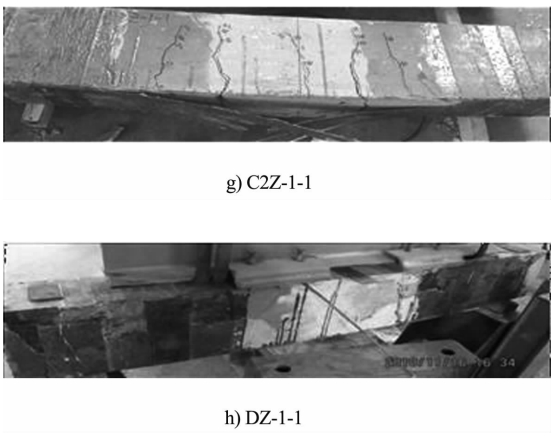
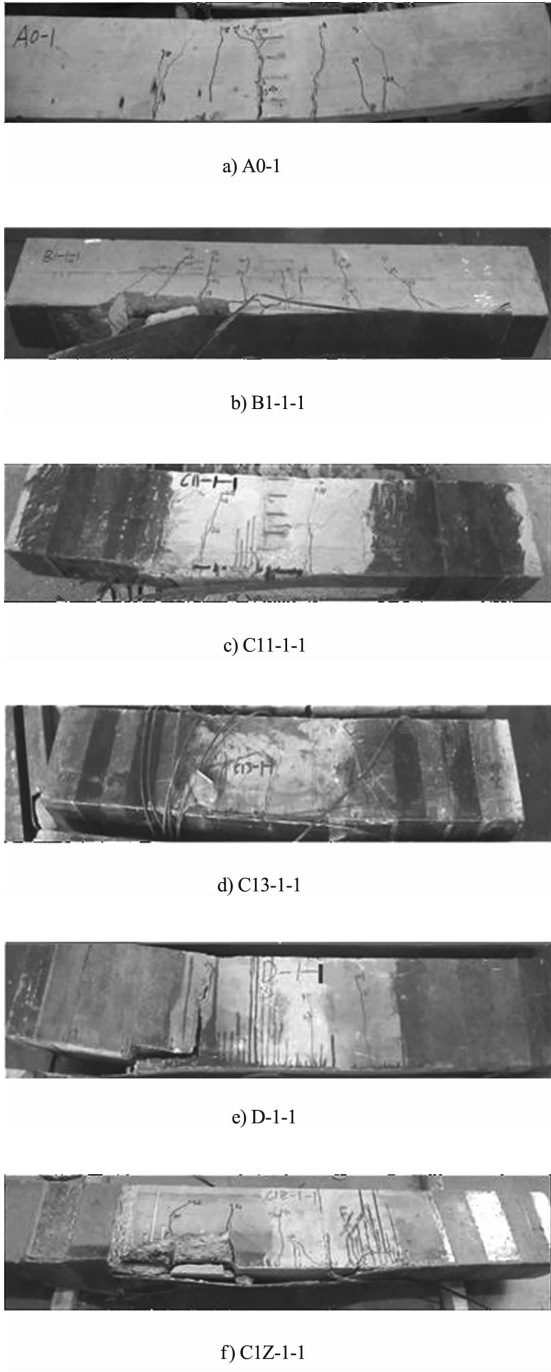


图 7 试验梁加载破坏模式

另外, 从裂缝开展来看, 基准梁 (A0-1) 破坏前最大裂缝达到 10 mm, 腐蚀加固梁破坏前最大裂缝要小, 且裂缝扩展较为缓慢, 表明碳纤维加固能有效减小裂缝宽度, 减缓梁开裂时间, 但随腐蚀等级的增加, 这种作用在逐渐减弱。B 级和 C1 级梁, 直接粘贴碳纤维布后能有效阻止原先裂缝的扩展, 但 C2 级和 D 级梁, 直接粘贴碳纤维布并不能很好地阻止原先裂缝的扩展, 并且梁发生类似少筋梁脆性破坏的机率在增大。

3 直接粘贴 CFRP 加固腐蚀界限

根据腐蚀构件的损伤分析, 腐蚀较轻 (B 级、C1 级) 的试验梁因锈蚀产物少, 钢筋与周围混凝土之间的粘结力损失相对较小, 荷载作用下二者保持共同受力的情况与未腐蚀梁差别较小, 而腐蚀较为严重 (C2、D 级) 的梁, 由于钢筋锈蚀以及锈蚀导致钢筋与周围混凝土的粘结力损失较大, 在加载过程中各方面性能与未腐蚀梁相比下降较大。

同时, 综合抗弯承载力、抗弯刚度、结构应变、破坏模式及裂缝发展等方面对直接粘贴和凿除粘贴两种 CFRP 粘贴方法加固效果的对比分析, 可以得出: 对于腐蚀等级较轻 (B 级和 C1 级) 的试件, 直接粘贴 CFRP 加固即可以达到理想的加固效果, 而当构件腐蚀到 C2 级及以上时, 直接粘贴 CFRP 加固各方面指标较差, 更宜采用凿除粘贴 CFRP 进行加固。

另外,根据碳纤维加固对海工钢筋混凝土结构锈胀的约束作用研究^[2]成果,钢筋混凝土构件表面粘贴碳纤维布以后,由于碳纤维布与粘结剂组成的复合材料在混凝土表面形成一层屏障,不仅可以有效地封闭原有裂缝,阻止海水中氯离子的渗透,在受力过程中又能有效地抑制锈胀裂缝的扩展,从根本上消除或削弱了钢筋发生锈蚀的机会,能有效提高海工混凝土结构的抗腐蚀能力(图8),可见对于不同腐蚀等级构件粘贴 CFRP 加固后结构整体耐久性差别不大,较之未粘贴碳纤维梁耐久性均有提高。

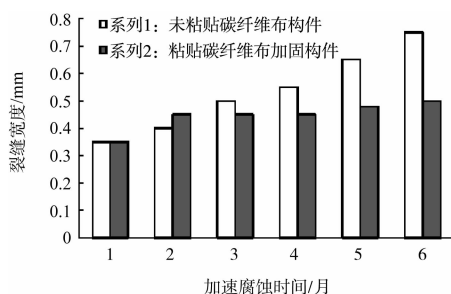


图8 不同时间段粘贴碳纤维布
与未粘贴碳纤维布构件裂缝宽度比较

因此,综上所述,当以裂缝宽度和钢筋截面损失率进行腐蚀等级划分时,以 C1 级和 C2 级的分级界限(腐蚀裂缝宽度 1 mm、截面损失率 15%)作为直接粘贴与凿除粘贴 CFRP 加固的界限较为合理。即当构件腐蚀裂缝宽度小于 1 mm、钢筋锈蚀截面损失率小于 15% 时,可直接粘贴 CFRP 加固;当构件腐蚀裂缝宽度达到 1 mm、钢筋锈蚀截面损失 15% 及以上时,须凿除锈蚀钢筋周围松散混凝土,然后对钢筋进行除锈或植筋,重新恢复混凝土保护层后,再粘贴 CFRP 进行加固。

4 结语

由于海洋环境的复杂性,老旧钢筋混凝土构件往往腐蚀程度不一,多数较为严重,CFRP 加固效果参差不齐,折射出针对不同腐蚀程度的混凝土构件,粘贴碳纤维加固处理方法应有所区别。现有规范规定的直接粘贴 CFRP 加固的界限偏于

保守,工程实践存在诸多不便。本文通过试验研究得出了腐蚀等级对海工 RC 梁 CFRP 抗弯加固的影响规律,寻求到更加合理的直接粘贴碳纤维加固的腐蚀界限。

1) 直接粘贴 CFRP 加固腐蚀梁能有效减小其在荷载作用下的主裂缝宽度,减缓梁开裂的时间,提高梁抗弯承载力和整体刚度,但随构件腐蚀等级的增加,这些作用越来越弱,加固效果越来越差。

2) 当构件腐蚀裂缝宽度小于 1 mm、钢筋锈蚀截面损失率小于 15% 时,可直接粘贴 CFRP 加固;否则,须凿除锈蚀钢筋周围松散混凝土,对钢筋进行除锈或植筋,重新恢复保护层后,再粘贴 CFRP 加固。

本文研究成果有利于碳纤维加固技术在海港混凝土结构中应用推广,同时也为相关规范的修订提供参考。

参考文献:

- [1] 王友元,苏林王,吕黄,等.海工混凝土结构碳纤维加固成套技术研究报告[R].广州:中交四航工程研究院有限公司,2008.
- [2] 王友元,苏林王,李国豹.碳纤维加固对海工钢筋混凝土结构锈胀的约束作用研究[J].水运工程,2009(10): 47-51.
- [3] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].
- [4] 刘沐宇,刘其桌,骆志红,等.CFRP 加固不同损伤度钢筋砼梁的抗弯试验[J].华中科技大学学报:自然科学版,2005(3): 58-61.
- [5] Sen R, Shahawy M, Sukmar S, et al. Duability of carbon pre-tensioned elements in maring environment [J]. ACI Structural Journal, 1998(1): 716-724.
- [6] Debaiky A S, Green M F, Hope B B. Carbon fiber-reinforced polymer wraps for corrosion control and rehabilitation of reinforced concrete columns [J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(2): 129-137.
- [7] Sobhy M, Khaled A. CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4): 228-236.

(本文编辑 郭雪珍)