文章编号：1000-8608(2008)05-0698-04

潮湿混凝土表面使用 CFRP 加固试验研究

陈凤山*[1]， 赵国藩[1]， 潘德强[2]

（1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2.广州四航工程技术研究院，广东 广州 510230）

摘要：使用广州四航工程技术研究院研制的湿固化结构用粘结剂，进行了同 Araodite 牌粘结剂的正拉对比试验.试验结果说明该湿固化粘结剂在潮湿混凝土表面应用时的正拉性能与干燥混凝土表面时相近，也不低于 Araodite 牌粘结剂在干燥表面时的性能.此外，还进行了两类粘结剂应用于钢筋混凝土梁粘贴加固的加载对比试验，也很好地验证了湿固化粘结剂优良的适用性.本研究成果对于在沿海钢筋混凝土结构中推广碳纤维加固技术，具有重要的意义.

关键词：潮湿混凝土表面；碳纤维复合材料；湿固化；粘结性能
中图分类号：TU375 **文献标志码**：A

0 引 言

采用外部粘贴碳纤维布加固混凝土结构，以改善其结构性能的技术在国内外已有广泛的试验研究和工程应用，取得了一批成果.与其他采用外部粘贴材料的加固结构技术相似，该技术通过在混凝土构件的外表面粘贴碳纤维布，使碳纤维布与混凝土共同受力，达到加固的目的.国内外大量的研究与应用实践结果表明，用碳纤维布加固混凝土结构的效果主要取决于碳纤维布与混凝土两者之间粘结性能.因此，在碳纤维布加固混凝土结构技术的研究中，粘结性能一直是重要研究内容之一.

在海港水工建筑物粘贴碳纤维加固中，一个突出的问题就是，由于受到潮汐和海水浪溅的影响，需要加固的结构构件经常处于潮湿状态.目前，国内外开发的碳纤维粘结材料仅适用于干燥的混凝土表面.因此，国内外的规范（规程）都规定碳纤维复合材料仅能用于混凝土表面干燥时的加固[1,2].至于海港水工建筑物处于浪溅区和水位变动区（潮差区）的加固，因为受到碳纤维粘结材料的局限，还没有研究和应用.本文应用广州四航工程技术研究院研究开发的、适用于潮湿和干燥表面的环氧树脂配套粘结材料，试验研究碳纤维布与混凝土的粘结性能，以满足港口水工建筑物应用碳纤维布维修加固的技术需要.

1 正拉试验

1.1 试验概况

正拉试验的试件制备、试验过程基本上参照文献[1]附录 A 的方法.所有试件均是同一批制作完成，湿表面粘结试块的制作，是在粘贴 CFRP 前预先在水中浸润 2 d，用湿毛巾擦去表面的游离水后，再涂刷浸渍底胶.所有试件粘贴碳纤维布之后至少固化 7 d，方可进行正拉试验.

试验之前，用无齿锯将正拉钢板与周围的碳纤维布切割开，确保受力面积统一.

试验中使用的碳纤维复合材料有

(1)台湾生产的重亿碳纤维布 Cymax L200-C；

(2)广州四航工程技术研究院生产的湿表面粘结剂（GSIT，简称湿胶）；

(3)市场上常见的爱牢达（Araodite）配套胶（简称干胶）（底胶 XH7307A/B 和浸渍胶

收稿日期：2006-11-15； 修回日期：2008-07-02.
作者简介：陈凤山*（1968-），男，博士；赵国藩（1924-），男，教授，博士生导师，中国工程院院士.

XH180A/B).

为研究湿胶是否具有普遍适用性，试验设计了两个因素：不同强度等级（C35、C45、C55、C80）、不同混凝土表面状况（干燥表面、潮湿表面）. 作为代表性研究，对干胶进行了在 C80 混凝土干燥和潮湿两种表面状况下的正拉试验.

1.2　试验结果与分析

试验结果见表 1、2 和图 1～3. 具体如下：

表 1　使用市售爱牢达配套胶时的正拉试验结果

Tab. 1　Result of tension adhesion testing by adhesives named Araodite available on market

混凝土强度等级	表面状态	试件数量	正拉强度试验均值/MPa
C80	湿表面	8	1.36
	干表面	6	3.84

表 2　使用广州四航工程技术研究院生产的湿表面粘结剂时的正拉试验结果

Tab. 2　Result of tension adhesion testing by adhesives developed by Guangzhou Sihang Institute of Technology

对应的混凝土强度等级	试件数量	试验均值/MPa	
		潮湿混凝土面	干燥混凝土面
C80	4	3.86	4.21
C55	6	2.74	3.09
C45	6	2.26	2.56
C35	6	2.47	2.49

注：上排为用于干燥混凝土表面时的形态，下排为用于潮湿混凝土表面时的形态

图 1　爱牢达粘结材料（干胶）正拉试验破坏形态

Fig. 1　Failure conditions of tension adhesion testing when Araodite adhesives are applied

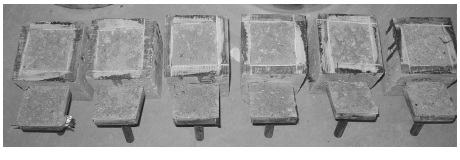

图 2　GSIT 湿胶粘贴试件的破坏形态

Fig. 2　Failure conditions of tension adhesion testing when GSIT adhesives are applied

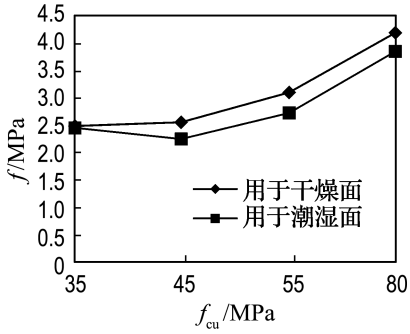

图 3　湿胶分别粘贴于干、湿混凝土表面时的正拉强度 f 对比

Fig. 3　Strength f comparison of tension adhesion testing when GSIT adhesives are applied on wet concrete surface and dry surface

（1）表 1 是干胶分别粘贴在干燥和潮湿混凝土表面的正拉试验结果，混凝土强度等级为 C80. 从试验数据可以明显地看出，当干胶在潮湿混凝土表面粘贴时，正拉强度比在干燥表面粘贴时低很多. 试验破坏形态，也显示了在潮湿表面时破坏界面发生在混凝土与碳纤维之间的界面处（见图 1 下面一排试件）.

（2）图 2 中给出了应用湿胶试件的破坏形态. 试验结果显示，无论是干燥混凝土表面，还是潮湿混凝土表面，破坏界面都在混凝土中，破坏面基本呈“碗状”，即破坏面中部距原始界面较远，而边缘距原始界面较近，实际破坏面的面积大于受拉钢板投影面积. 这证实了粘结剂粘结性能的可靠性.

（3）表 2 和图 3 的试验结果分析表明，湿胶应用于潮湿混凝土表面时，得到的正拉强度比应用干燥表面时要低一些，但降低不多，大约相当于干燥表面的 91.3%. 尽管如此，也能满足规范（规程）中对粘结强度的要求.

（4）图 3 还显示，随着混凝土强度的提高，湿胶的正拉强度也随着提高，即粘结强度与混凝土强度相关. 其主要原因就是它与混凝土之间有着很好的粘结性能，表现为混凝土被拉坏. 此外，无论是应用干燥混凝土表面，还是潮湿混凝土表面，正拉强度随着混凝土强度变化的规律相似.

2　CFRP 加固梁的粘结性能

为研究湿胶在构件中的适用性，还进行了湿胶和干胶应用钢筋混凝土梁的粘结性能试验.

2.1 试验概况

试验梁的混凝土强度等级为 C45，梁的设计、加载方式[4]如图 4 所示. 为保证试验中试验梁底所粘贴 CFRP 受力明确且对称受力，在制作梁时，事先在下翼缘留出沿梁横向贯通的缺口作为预设缝. 为保证在粘贴 CFRP 时缺口不至于被环氧树脂填充而失去其作用，粘贴前用泡沫塑料填充预设缝.

与正拉试验类似，模拟潮湿表面的试验梁先进行表面打磨等表面处理，在水池中浸润 3 d 后取出，用湿毛巾去掉游离态水，最后粘贴 CFRP. 在试验梁底对称粘贴单层 CFRP，因为预设缝的尺寸很小，所以可以看做跨中任一侧 CFRP 的长度为锚固长度. 为了便于了解粘结剂的粘结效果，在 CFRP 上没有采取任何其他附加锚固措施（如 U 形压条之类）. 固化 7 d 以后进行加载试验.

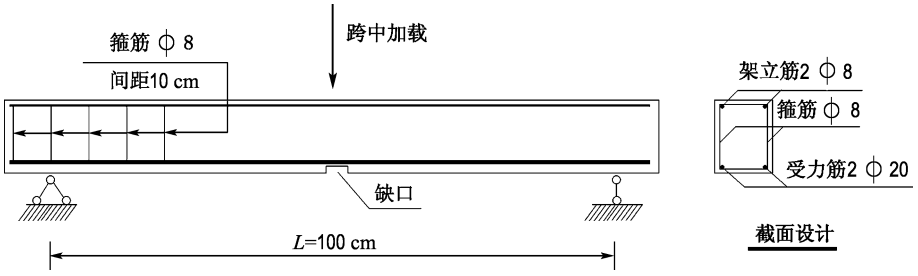

图 4 钢筋混凝土梁粘结性能试验梁设计

Fig. 4 Design drawing of reinforced concrete beam for adhesion testing

2.2 试验结果分析

表 3 中关于承载力的结果，反映了各种 CFRP 粘贴情形下 CFRP 与混凝土梁之间协同工作能力的优劣. 表中除了干胶在潮湿混凝土表面粘贴时承载力最低外，其余各种情况下的承载力都接近. 干胶粘贴在潮湿混凝土表面，承载能力提高幅度较小，具体表现为试验梁破坏前就发生了 CFRP 端部剥离（见图 5），说明粘结力比较低.

表 3 CFRP 加固试验梁的粘结力试验结果

Tab. 3 Testing result for adhesion purpose of CFRP strengthening beams

碳纤维锚固长度/cm	粘结剂	表面状况	试件编号	破坏荷载/kN
50	干胶	干燥	DD-1-1	155
			DD-1-2	145
	湿胶	潮湿	WW-1-1	150
			WW-1-2	150
45	湿胶	干燥	WD-2-1	145
			WD-2-2	135
		潮湿	WW-2-1	135
			WW-2-2	135
	干胶	干燥	DD-2-1	135
			DD-2-2	140
		潮湿	DW-2-1	105
			DW-2-2	110

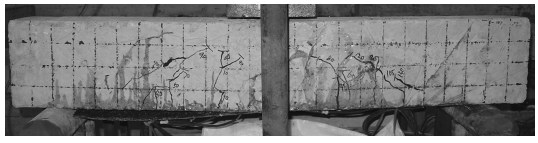

图 5 试验中发生 CFRP 剥离的情形

Fig. 5 Debonding of CFRP in testing

从承载力提高的比较可以看出，湿表面粘结剂（简称湿胶）无论粘贴于潮湿混凝土表面，还是干燥混凝土表面，其粘结力都不低于 Araodite 牌粘结剂（简称干胶）粘贴于干燥混凝土表面. 从破坏形态上看，试验梁破坏时尚未发生 CFRP 的剥离（见图 6）. 这充分说明这种湿胶可以应用于海工混凝土结构的浪溅区和潮差区的加固.

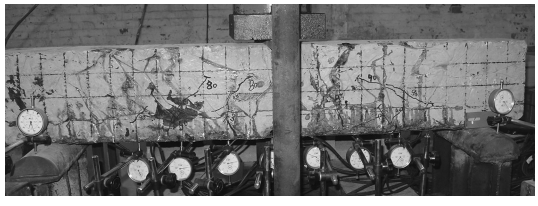

图 6 试验梁破坏时仍未发生 CFRP 剥离情形

Fig. 6 No debonding of CFRP when failure of beam occurs in testing

3　结　论

(1)正拉试验结果显示，湿表面粘结剂(湿胶)的基本性能完全符合文献[1]的要求，说明该胶可以用于潮湿混凝土表面粘贴 CFRP 进行加固；

(2)CFRP 加固梁的试验也证实，在潮湿混凝土表面粘贴 CFRP 可以达到目前在干燥混凝土表面的承载力提高幅度，说明这种湿胶与潮湿混凝土表面之间具有良好的粘结性能.

参考文献：

[1] 中国工程建设标准化协会. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程(送审稿)[S]. 北京：中国计划出版社，2001

[2] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structure[S]. America：ACI，2000

[3] 王荣国，武卫莉，谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1999

[4] 中华人民共和国建设部. GB 501512—92 混凝土结构试验方法标准[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1992

Test research on rehabilitation with CFRP bonded externally on moist concrete surface

CHEN　Feng-shan*[1]，　ZHAO　Guo-fan[1]，　PAN　De-qiang[2]

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China；
2. Guangzhou Sihang Institute of Technology, Guangzhou 510230, China)

Abstract: Comparisons of bond tests between moisture-curable adhesives developed by Guangzhou Sihang Institute of Technology and those of Araodite adhesives are done, and the tests results demonstrate that there is similar bond of the moisture-curable adhesives bonded on wet and dry concrete surface, and the values of bond are not lower than those of Araodite adhesives bonded on dry concrete surface. In addition, comparing loading tests is also done for the two kinds of adhesives bonded on wet and dry beam surface, and the tests results ulteriorly confirm that there is good feasibility of the moisture-curable adhesives used on wet concrete surface for strengthening. The results are very helpful for CFRP to be used in strengthening coastal reinforced concrete.

Key words: moist concrete surface; carbon fiber reinforcement polymer; condensate under moist conditions; adhesive properties