

文章编号:1673-2049(2008)03-0001-05

CFRP 加固海工混凝土结构的抗 Cl^- 侵蚀试验研究

赵国藩¹, 陈凤山², 高 潮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. 大连水产学院 土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:通过 2 组室内快速渗透试验,验证了混凝土表面黏贴碳纤维复合材料(CFRP)能够有效地阻止 Cl^- 向混凝土中渗透;第 1 组试验验证了 CFRP 材料对 Cl^- 阻隔的有效性;第 2 组试验则进一步验证了在混凝土表面黏贴 CFRP 对 Cl^- 阻隔的作用。试验结果表明,对于海工混凝土结构,表面黏贴 CFRP 除了具有加固的作用以外,还具有阻隔 Cl^- 的作用,进而可以延长加固结构的腐蚀诱导期。因此,当进行沿海混凝土结构 CFRP 加固设计时,建议考虑将 CFRP 和其他表面防护措施共同使用,并组成完整的表面防护体系。考虑到表面黏贴 CFRP 对 Cl^- 的隔离作用是在一定时间内有效的,基于 Fick 第二定律,给出了海工混凝土结构外包 CFRP 加固后的寿命预测方程,为沿海混凝土结构 CFRP 加固设计及加固后耐久性评估提供了依据。

关键词:碳纤维复合材料; Cl^- ;阻隔作用;防护体系;剩余耐久寿命

中图分类号:TU528.33

文献标志码:A

Test Research on Chloride Ions Attack of Coastal Concrete Structure Reinforced by CFRP

ZHAO Guo-fan¹, CHEN Feng-shan², GAO Chao²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Fisheries

University, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The function that carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bonded externally prevents effectively chloride ions from entering concrete was confirmed by two groups of laboratory accelerated penetration tests. The effectiveness of CFRP material to prevent chloride ions was confirmed by tests of type 1; and similar conclusion was also drawn in the test of type 2 when CFRP externally bonded on concrete specimens. Test results show that, for coastal concrete structures, there is not only function of strengthening of CFRP, but also that of preventing chloride ions from penetrating into concrete, and consequently to prolong the initiation period of rebars corrosion. It is also confirmed by test that there is similar function of CFRP and coating on the surface of concrete to shield concrete against chloride ions. Therefore, it is suggested that CFRP bonded externally and coating or other surface prevention measures are applied jointly to form an integrated surface prevention system when CFRP is applied in strengthening coastal concrete structures. Considering the limitation involving with time of the effective shielding

function of CFRP, an equation used for residual lifetime prediction of concrete structures bonded externally with CFRP is derived from Fick’s dispersion law. Overall, the conclusion may be used for reference when CFRP is applied to strengthen coastal concrete structures.

Key words: carbon fiber reinforced polymer; chloride ion; obstructing function; system of corrosion prevention; residual durability life

0 引言

根据各国大量对沿海地区混凝土结构调查的结果^[1-2]可知,Cl⁻ 侵蚀到混凝土结构体内而引发钢筋腐蚀,是目前该类结构承载力或其他功能在远未达到其设计使用寿命时,就发生过早失效的主要原因。这种失效方式的主要机理是:Cl⁻ 由外及里,通过渗透的方式向混凝土中侵入;当钢筋表面 Cl⁻ 浓度(质量分数,下文同)达到某一临界值时,就会导致钢筋表面钝化膜的破坏,一旦水分和氧等必要条件充足,钢筋就开始腐蚀;由于钢筋腐蚀过程中,腐蚀产物会较原来钢的体积有若干倍的膨胀,由此产生的膨胀力一般会引起保护层混凝土开裂,严重的则会导致保护层混凝土剥落^[3]。这样,必然影响到结构承载力或其他使用功能,造成的耐久性问题极为突出。

近些年来,碳纤维复合材料(CFRP)加固技术是各国研究、应用的热点之一。但是,目前各国研究的重点几乎都是研究其在提高结构承载力方面的作用,而对于加固后它在其他方面作用的研究则很少见^[4]。为了证明混凝土外包 CFRP 能阻止 Cl⁻ 向混凝土中渗透,本文中笔者进行了室内快速渗透试验,并同表面涂层隔离的效果进行了对比,提出可以将表面黏贴的 CFRP 作为混凝土防护体系的组成部分;并基于 Fick 第二定律,建立了表面黏贴 CFRP 加固沿海混凝土结构耐久性寿命的预测方程,为 CFRP 加固沿海混凝土结构设计及耐久性评估提供了一定依据。

1 第 1 组试验

1.1 试验概况

试验中所使用的碳纤维复合材料包括 CYMAX L200-C 0.111 mm 针织型碳纤维布和 Araldite XH 180 A/B 浸渍树脂。

试验装置如图 1 所示。其中,图 1(a)为试验装置构造;图 1(b)为渗透试验。该试验装置的设计,是按照文献[5]中对表面涂层进行耐久性质量评定的装置设计的。和文献[5]中对涂层制备不同的是,

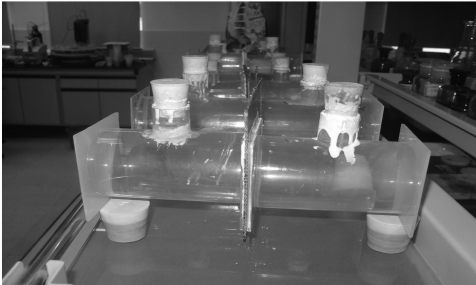
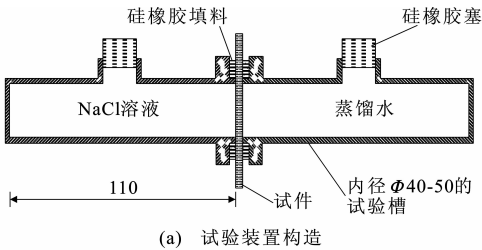


图 1 Cl⁻ 透过 CFRP 的快速渗透试验装置(单位:mm)

Fig.1 Equipment for Fast Chloride Ions Penetration Resistance Test of CFRP (Unit:mm)

CFRP 薄片的制备中,没有使用基底树脂和找平材料,而是直接用浸渍树脂和碳纤维材料制作成的复合材料。

1.2 试验结果及分析

表 1 为 CFRP 抗 Cl⁻ 渗透试验滴定结果,为便于说明问题,还做了几种涂料的类似试验作为对比,见表 2。

表 1 CFRP 抗 Cl⁻ 渗透试验滴定结果

Tab.1 Titration Results of Fast Chloride Ions Penetration Resistance Test of CFRP

碳纤维层数	NaCl 溶液浓度/%	试验编号	Cl ⁻ 浓度/%	Cl ⁻ 透过 CFRP 的渗透量/[mg·(cm ² ·d) ⁻¹]	备注
1	3.0	S1	0.030 8	0.118 5	
	3.0	S2	0.059 0	0.226 9	
2	3.0	B1	0.022 8	0.087 7	
	3.0	B2	—		值小,测不出
3	16.5	B3	0.032 0	0.123 1	
	3.0	T1	0.028 6	0.110 0	
	16.5	T2	—		值小,测不出
	16.5	T3	0.036 3	0.139 6	

表 2 几种防腐涂料的抗 Cl⁻ 渗透试验结果

Tab. 2 Titration Results of Fast Chloride Ions Penetration

Resistance Test of Several Coatings

涂料名称	漆膜(干膜)厚度/ μm	Cl ⁻ 透过涂层片的渗透量/ $[\text{mg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$
EPOTAR HB 厚膜型环氧 沥青漆(立邦涂料)	300	8.82×10^{-4}
力士创科水性 环氧底漆/水性 环氧漆(双组分)	300	6.94×10^{-4}
HI-PON 20 环氧 灰白底漆/MICAS E 环氧云铁底漆/ HI-PON 50 聚氨酯面漆	50/ (75×2)/ 50	1.08×10^{-3}

从表 1、2 的渗透量对比可以看出:①CFRP 对抗 Cl⁻ 渗透性的能力比较显著;②浸渍碳纤维片的抗 Cl⁻ 渗透性、稳定性还不如目前海港码头上应用的涂料。

2 第 2 组试验

2.1 主要试验材料及测试仪器

试验中所使用的碳纤维复合材料包括 CYMAX L200-C0.111 mm 针织型碳纤维布、Araldite XH 180 A/B 浸渍树脂、Araldite XH 7307 A/B 基底树脂;找平材料为 Araldite XH 130 A/B/C 环氧砂浆;试验中使用的涂料为广州四航工程技术研究院开发的 SHJ-D7202 环氧重防腐涂料;滴定仪器为瑞士产的 785DMP Titraino 电位滴定仪。

2.2 试验设计

试件设计如图 2 所示。试验设计主要基于以下几方面的考虑:

- (1)对于所有需要浸渍的试件(基准试件除外)而言,为保证外界 Cl⁻ 向混凝土按照一维方向扩散和渗透,除指定暴露面按照设计进行处理以外,其余 5 个面均用玻璃胶(硅酮)密封。
- (2)为了便于 Cl⁻ 在混凝土中扩散和渗透,混凝土试件制作时采用 0.6 这一较大的水灰比。
- (3)除了基准试件不进行表面处理和浸渍外,其余试件在完成表面处理并固化 6 d 后,参照文献[4],统一在浓度为 16.5% 的盐水中浸渍 1 个月。
- (4)试件浸渍完成后,按照图 3 所示,在指定暴露面进行抽芯,然后对抽取的圆柱芯样沿着由外及里、按照每层 1 mm 的深度研磨取样,以便测定不同深度混凝土中的 Cl⁻ 浓度。为了减少周边因素对

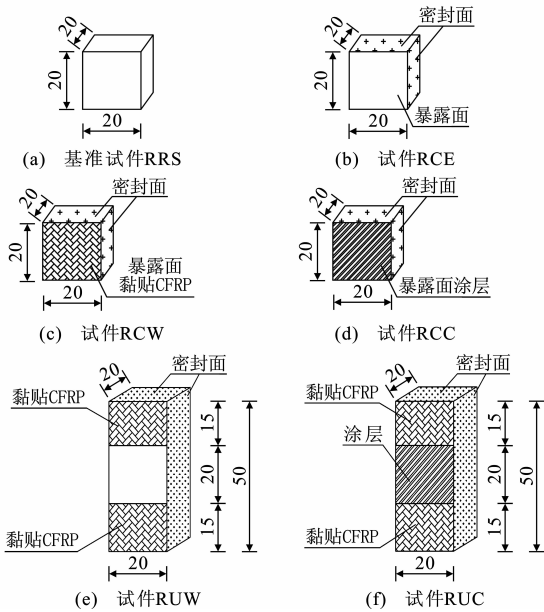


图 2 试件设计(单位:cm)

Fig. 2 Design of Specimens (Unit:cm)

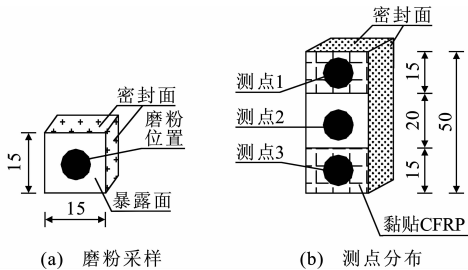


图 3 浸渍后试件抽芯位置(单位:cm)

Fig. 3 Drilling Location on Specimens After Being Immersed (Unit:cm)

Cl⁻ 分布测量结果的影响,各抽芯位置均选在暴露面的中间位置。

(5)为了增强试验的稳定性,图 2 中所示试件都制作了 2 个平行试件,每个试件的编号就是在图 2 所示分类后加上-1 和-2 以区分。此外,对于尺寸为 50 cm×15 cm×15 cm 的试件,根据图 3 顺序对其测点按照 1、2、3 进行顺序编号,见表 3。

2.3 试验结果及分析

本次试验中,按照每层 1 mm 的厚度,从暴露表面依次磨取 8 层粉样,然后按照文献[6]的方法进行电位滴定(倭尔哈德法),以测定沿厚度方向的 Cl⁻ 分布状况。图 4~6 为根据电位滴定测得的各种暴露表面条件下 Cl⁻ 在混凝土中的分布。根据实测,涂层厚度平均值在 200~330 μm 之间。

图 4 和图 5 分别给出了表面黏贴 CFRP 和使用涂层并浸渍后混凝土中 Cl⁻ 的分布与完全暴露测点、

表 3 试件及磨粉采样编号

Tab. 3 Number of Specimens and Milling Samples			
试件分类	试件编号	磨粉采样编号	暴露面表面条件
基准试件	RRS	RRS	
RCE	RCE-1	RCE-1	暴露
	RCE-2	RCE-2	暴露
RCW	RCW-1	RCW-1	CFRP 外包
	RCW-2	RCW-2	CFRP 外包
RCC	RCC-1	RCC-1	涂层
	RCC-2	RCC-2	涂层
RUW	RUW-1	RUW-1-1	CFRP 外包
		RUW-1-3	CFRP 外包
		RUW-1-2	暴露
	RUW-2	RUW-2-1	CFRP 外包
		RUW-2-3	CFRP 外包
		RUW-2-2	暴露
RUC	RUC-1	RUC-1-1	CFRP 外包
		RUC-1-3	CFRP 外包
		RUC-1-2	涂层
	RUC-2	RUC-2-1	CFRP 外包
		RUC-2-3	CFRP 外包
		RUC-2-2	涂层

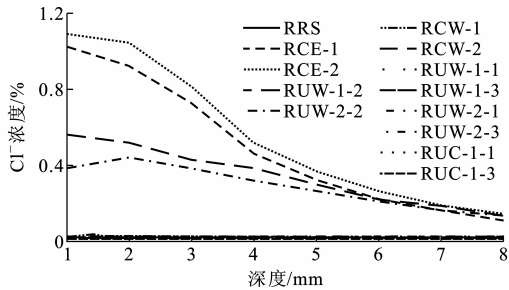


图 4 表面黏贴 CFRP 的 Cl⁻ 分布对比
Fig. 4 Chloride Ions Distribution Comparisons of CFRP Bonded on Concrete

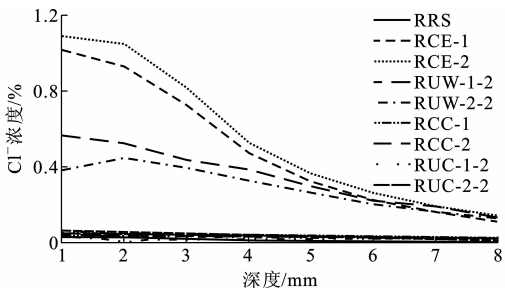


图 5 具有表面涂层的 Cl⁻ 分布对比
Fig. 5 Chloride Ions Distribution Comparisons of Coating on Concrete

基准试件测点的对比。根据图 4、5 中 Cl⁻ 的分布曲线,通过与没有表面防护的完全暴露试件的比较可以看出,无论是表面黏贴 CFRP,还是采用表面涂

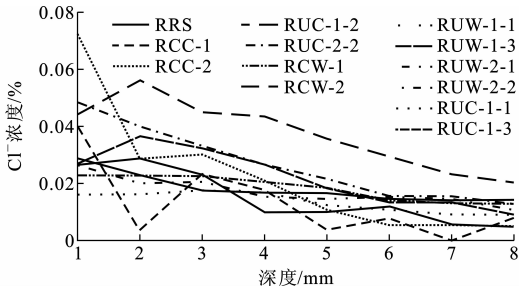


图 6 表面涂层且表面黏贴 CFRP 的 Cl⁻ 分布对比
Fig. 6 Chloride Ions Distribution Comparisons of Coating and CFRP Bonded on Concrete

层,浸渍后混凝土中 Cl⁻ 的浓度都远远低于完全暴露试件的。这说明这些表面防护对 Cl⁻ 的隔离作用非常显著。

由图 6 可以看出,采用表面涂层和表面黏贴 CFRP 的表面处理以后浸渍,混凝土中 Cl⁻ 分布与基准试件的数据很接近,说明几乎没有 Cl⁻ 侵入混凝土中。这一结论在图 4、5 中也得到了很好的验证。同时,由图 6 还可以看出,表面涂层和表面黏贴 CFRP 具有极为相近的隔离 Cl⁻ 的作用。从这一结果可以得到一个非常有益的启示:对于海洋大气环境下的混凝土结构而言,采用 CFRP 进行强度加固设计时,可以考虑其对 Cl⁻ 的隔离作用,并可以考虑和表面涂层一起组成混凝土构件的表面防护体系。

3 CFRP 加固混凝土结构剩余寿命预测及耐久性评估

对于表面黏贴 CFRP 对 Cl⁻ 的隔离作用,可以这样解释:鉴于 CFRP 是由碳纤维和以环氧树脂为主要组分的浸渍和黏结材料组成的复合材料,尤其是环氧树脂的致密填充作用,使得整个复合材料层形成了一层致密的隔离带,对于将侵入混凝土中的环境水分来说,起到了屏障的作用。这一机理与环氧涂层的作用是类似的。

从经济性来看,对于沿海混凝土结构采用 CFRP 加固设计时,表面黏贴 CFRP 的数量应该以强度要求为准,同时考虑到 CFRP 在黏贴处对 Cl⁻ 的隔离作用。对于没有黏贴 CFRP 的混凝土表面,采用环氧涂层或其他表面防护措施。这样,在混凝土结构加固后,就形成了完整的表面防护 Cl⁻ 的体系。

目前对于混凝土结构耐久使用寿命的预测模型多以钢筋腐蚀诱导期为准,而对于沿海混凝土结构采用 CFRP 加固后的剩余寿命预测和耐久性评估

而言,也可考虑基于这一模型。实质上,利用这一模型进行耐久寿命预测,就是估算Cl⁻在混凝土中扩散至钢筋表面达到其临界浓度的时间。考虑到CFRP材料中环氧树脂组分有粉化等的老化可能性,沿海混凝土结构评估采用CFRP加固后的剩余耐久寿命,可以认为由2个时间段组成:CFRP对Cl⁻的有效阻隔时间 t_f ;表面CFRP对Cl⁻的有效阻隔作用失效后,Cl⁻在混凝土中扩散,最终使钢筋表面Cl⁻达到临界浓度的时间 $t-t_f$,其中 t 为总的剩余耐久寿命。

对于Cl⁻在混凝土中的扩散浓度,目前各国大多是按照Fick第二定律来进行计算,所以,可以基于Fick第二定律构建出沿海混凝土结构CFRP加固后的剩余耐久寿命预测方程,即

$$C_d = \gamma_{cl} \{ (C_0 - C_i) [1 - e_f \frac{c}{2 \sqrt{D_d(t-t_f)}}] + C_i \} e_f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

式中: C_d 为钢筋处的Cl⁻浓度; C_0 为混凝土表面的Cl⁻浓度; C_i 为黏贴CFRP时,钢筋处的Cl⁻浓度; $e_f(x)$ 为误差函数; c 为保护层厚度; D_d 为Cl⁻扩散系数; t_f 取CFRP及其他表面防护(诸如表面环氧涂层)对Cl⁻的有效阻隔时间二者中的较小值; γ_{cl} 为安全系数。

需要指出的是,关于 t_f 的取值问题,由于CFRP用于土木结构的历史不是很长,目前几乎没有这方面的可靠数据。参照JSCE的设计建议^[7],对于普通环境条件下黏贴的单层CFRP薄片,有效屏蔽时间规定为10年,而在恶劣环境条件下取为5年,如海洋环境下的浪溅区。对于2层或更多层的情况,该时间可以延长。总体来说, t_f 的取值尚需要依据大量采集的现场数据。

4 结 语

(1)通过2组快速渗透试验,验证了黏贴CFRP对Cl⁻的有效阻隔作用,而且验证了试验的稳定性与可重复性。

(2)黏贴CFRP对Cl⁻的有效阻隔作用,应在沿海混凝土结构CFRP加固中考虑进去。

(3)对于Cl⁻的阻隔而言,表面黏贴CFRP和表面环氧涂层具有相近的作用,因此可以考虑二者共同组成沿海混凝土结构CFRP加固后的表面防护

体系。

(4)采用CFRP加固的沿海混凝土结构,其剩余寿命预测由2个时间段组成,即CFRP及其他表面防护对Cl⁻的有效阻隔时间,以及Cl⁻在混凝土中扩散至钢筋表面达到其临界浓度的时间。

(5)沿海混凝土结构采用CFRP加固后的剩余耐久寿命预测,可考虑采用基于Fick第二定律的方程来进行。

参考文献:

References:

- [1] 潘德强,洪定海,郑恩慧,等. 华南海港钢筋混凝土码头锈蚀破坏调查报告[R]. 南京:南京水利科学院,1981:1-8.
PAN De-qiang, HONG Ding-hai, ZHENG En-hui, et al. Investigation Report of Concrete Corrosion and Damage of Seaport Wharf in South China[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute,1981:1-8.
- [2] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2002:51-54.
JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Durability of Concrete Structures[M]. Beijing:Science Press,2002:51-54.
- [3] 陈奋健. 既有海工混凝土结构耐久性 & 维修加固对策[C]//邢 锋,明海燕. 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法. 北京:人民交通出版社,2004:480-486.
CHEN Fen-jian. Durability and Maintaining Countermeasure of Existing Marine Concrete Structure[C]//XING Feng, MING Hai-yan. Durability and Design Method of Concrete Structure in Littoral. Beijing: China Communications Press,2004:480-486.
- [4] NT Build 443, Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration[S].
- [5] JTJ 275—2000, 海港工程混凝土防腐蚀技术规范[S].
JTJ 275—2000, Criterion of Anti-corrosion Technology in Marine Engineering Concrete[S].
- [6] JTJ 270—98, 水运工程混凝土试验规程[S].
JTJ 270—98, Test Criterion of Water Carriage Engineering Concrete[S].
- [7] MARUYAMA K. Strengthening of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials[C]//University of British Columbia. Proceedings of the Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions. Vancouver: University of British Columbia Press,2001:1987-1996.