

NaCl 溶液侵蚀下混凝土/环氧树脂 界面黏结-分离本构试验

王小萌¹, WANG Jialai², 周储伟¹

- (1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京, 210016;
2. 美国阿拉巴马大学 土木、建筑与环境工程系, 美国 塔斯卡卢萨, 35401)

摘要: 采用楔入劈裂法对混凝土/环氧树脂界面 I 型断裂力学性能进行试验研究, 得到界面的黏结-分离的本构关系, 并对硅烷偶联剂是否能在 NaCl 溶液环境下对混凝土/环氧树脂界面的性能起到改善作用进行验证。研究结果表明: 极限黏结强度和断裂能量随浸泡时间的增长而呈指数下降趋势; 在 I 型荷载的作用下, 对比组试件的破坏模式为混凝土的拉伸破坏; 随着浸泡时间增长, 试件的破坏模式逐渐转变为混凝土/环氧树脂界面的剥离; 混凝土/环氧树脂界面的黏结性能可通过硅烷偶联剂改善。

关键词: 混凝土/环氧树脂界面; I 型断裂; 黏结-分离本构; 硅烷偶联剂

中图分类号: TU335

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)02-0415-07

Experiment of traction-separation law of concrete/epoxy interface subjected to NaCl solution

WANG Xiaomeng¹, WANG Jialai², ZHOU Chuwei¹

- (1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing 210016, China;
2. Civil, Construction and Environmental Engineering, The University of Alabama, Tuscaloosa 35401, USA)

Abstract: The mechanical property of mode I concrete/epoxy interface was studied by wedge split test method, and the traction-separation law was obtained. Whether the silane coupling agent was able to improve the performance of concrete/epoxy interface under NaCl solution was also analyzed. The results show that both the ultimate bond strength and the fracture energy decrease exponentially with soaking duration. Under mode I loading, the failure mode of the control specimen is tensile failure of the concrete. With the increase of soaking duration, the failure mode of the interface specimen was gradually turned into adhesive failure along the concrete/epoxy interface. The performance of the concrete/epoxy interface can be improved by the application of silane coupling agent.

Key words: concrete/epoxy interface; Model I fracture; traction-separation law; silane coupling agent

收稿日期: 2017-02-06; 修回日期: 2017-03-22

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(11272147, 10772078); 航空科学基金资助项目(2013ZF52074); 机械结构力学及控制国家重点实验室基金资助项目(0214G02); 国家重点实验室开放基金资助项目(IZD130011353, IZD150021556); 江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX_0220); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(2014)(Projects(11272147, 10772078) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2013ZF52074) supported by the Chinese Aviation Science Fund; Project(0214G02) supported by the Fund of State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures; Projects(IZD130011353, IZD150021556) supported by the State Key Laboratory Open Fund; Project(KYLX_0220) supported by the Jiangsu Province Postgraduate Training Innovation Project; Project(2014) supported by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions)

通信作者: 周储伟, 博士, 教授, 从事工程力学以及复合材料力学研究; E-mail: zcw@nuaa.edu

随着社会现代化进程的不断推进,土木工程领域的重心也逐渐由新建工程转向现役结构的加固与修复。目前,对既有钢筋混凝土建筑进行维修加固的措施和方法已经非常多,其中在实际工程中应用比较广泛、技术比较成熟、被业内普遍认同的维修加固方法之一就是粘贴加固法。其中纤维增强复合材料 FRP 由于质轻高强、施工简便等优点,在粘贴加固材料中脱颖而出,得到越来越多的应用。由于 FRP 加固钢筋混凝土结构的效果高度依赖于 FRP/混凝土界面的黏结质量,因此,近年来关于 FRP/混凝土界面性能的研究越来越受到关注, AHMED 等^[1]的研究表明,界面黏结性能不佳会导致 FRP 在纤维断裂点附近产生不良的应力分布和显著的应力集中,这种应力集中会导致 FRP 的剥离和脱层。CORONADO 等^[2]发现,一旦界面应力超过阈值,界面附近的混凝土基底处便会出现大量的微裂纹,这种微裂纹会逐渐成长为宏观裂纹并且会导致界面过早失效。TOUNSI 等^[3-5]研究了 FRP 混凝土界面的剪切滑移关系和剥离机理,这些研究主要考虑外荷载接近界面极限剪切强度时界面的失效机理。程惠莹等^[6]采用四点弯试验测得了 GFRP(玻璃纤维增强复合材料)/混凝土界面在 II 型模态控制下的断裂韧度,并引入一种适用于评价 GFRP/混凝土界面断裂性能的理论分析模型。QIAO 等^[7]采用三点弯试件对 FRP/混凝土界面在冻融及干湿循环作用下的 I 型断裂特性进行了研究,并总结出界面承载力与断裂能与循环次数之间的关系。祝涛等^[8]开展了 CFRP(碳纤维增强复合材料)与混凝土的正拉黏结试验,使用 3 种胶黏剂,分别在干燥与潮湿环境中养护,对比发现经潮湿养护后,胶黏剂层与混凝土的界面受到不利的影响,各种胶对应试件的正拉黏结强度均有不同程度的下降,破坏形式由混凝土内聚破坏多转变为黏附破坏或混合破坏。卢亦焱等^[9]开展了海水浸泡作用下 FRP/混凝土界面黏结性能的可靠性研究,结果表明:FRP/混凝土界面断裂能服从正态分布,随着腐蚀时间的增加,可靠度指标会先迅速降低后缓慢降低。赵莹莹^[10]研究了海洋环境下 CFRP/混凝土的界面黏结疲劳性能,试验结果表明:盐溶液腐蚀后的试件,在疲劳荷载作用下的剥离破坏界面随腐蚀龄期的增加逐渐向胶层发展,剥离距离随应力水平的提高而增长。同时,在环境因素下,试件的疲劳寿命更短,且离散性更大。樊付权等^[11-12]对海洋环境下 CFRP/混凝土界面的破坏过程及破坏形态进行了研究,试验得到了 CFRP/混凝土界面黏结滑移关系的本构模型。隋莉莉等^[13]对受盐酸、氢氧化钠及硫酸盐溶液侵蚀的 CFRP/混凝土黏结试件进行了双面剪切试验,探讨了不同侵蚀介质、侵

蚀时间对 CFRP 与混凝土界面的黏结破坏模式及平均黏结强度-滑移曲线的影响规律,试验结果表明:侵蚀作用会显著增加界面滑移变形,酸和盐溶液的侵蚀作用会显著降低试件黏结强度,而碱溶液侵蚀对黏结强度无明显影响。综上所述,加固结构在长期使用过程中是否能够满足安全要求已成为加固设计需要考虑的重要问题之一。对于港口设施及海工建筑物来说,由于长期处在海水浸泡或盐雾腐蚀的特殊环境下,其结构因海水的物理和化学作用而被破坏,大大加速了结构发生早期破坏的进程,从而影响了结构的安全使用性能。因此,对处在海洋环境中的钢筋混凝土结构的补强加固的研究具有一定的实践意义和工程应用价值。本文作者采用 3.5%(质量分数)的 NaCl 溶液对试件进行浸泡,模拟海洋环境对界面的黏结性能的影响。此外,考虑到实际上 FRP/混凝土界面中存在的裂纹不仅仅是 II 型(滑开型),也可能包含有 I 型(张开型)、III 型(撕开型),甚至也可能是复合型裂纹。而目前界面研究中 I 型断裂的研究较少,尚不充分,无论从试验数据积累方面还是理论研究方面均有大量研究有待进行。此外,已有研究表明^[14],硅烷偶联剂对 FRP/混凝土界面的力学性能有一定的改善作用,然而,在其他环境条件下,硅烷偶联剂的作用有待进一步研究。为此,本文作者对硅烷偶联剂是否能在海洋环境下改善 FRP/混凝土界面的性能进行验证。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与试件的制作

本试验采用的环氧树脂为 FYFE.Co.LLC 生产的 Tyfo TC,树脂 A 与固化剂 B 的质量比为 100:23,体积比为 100:30。混凝土的组成为水泥(美国生产的 Type I)、细沙(细度模数为 2.1)、粗砂(细度模数为 3.2)。根据 ASTM C33/C33M^[15]以及 ASTM C192/C192M^[16],其质量比 $m(\text{水}):m(\text{水泥}):m(\text{细沙}):m(\text{粗砂})=0.400:1.000:0.865:1.135$ 。

试件由 2 个混凝土试块通过环氧树脂黏结而成,尺寸如图 1 所示。混凝土 28 d 抗压强度为 78 MPa。在刷环氧树脂之前,混凝土试块需要黏结的那一面要进行喷砂处理,除去表面的浮浆层,再用高压气体冲洗。试件中取一部分,对其表面进行特殊处理,采用道康宁公司生产的 Z-6137 水解的氨基乙基氨基丙基硅烷作为偶联剂,配置 1%硅烷水溶液(质量分数),室温下水解 1 h,期间不定期搅拌,以防止生成硅胶沉积。充分水解后将硅烷溶液不断刷在混凝土黏结面上,2 h

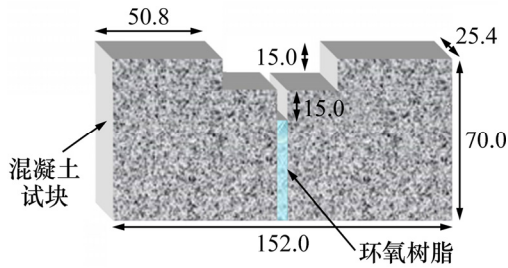


图 1 试件尺寸(单位: mm)
Fig. 1 Dimension of specimen

后,将处理过的试件放在 93 °C 预热的烘箱中放置 1 h。然后取出放至室温后再将 2 块进行黏结制作成标准试件。在粘贴时提前用特氟龙胶带预制出 15 mm 的裂缝。为了控制胶层厚度,在制作时采用橡胶间隔布置在试件四角,控制环氧树脂厚度为 1.5 mm。

采用 3.5%(质量分数)的 NaCl 溶液模拟海水对试件进行浸泡,具体试验方案如表 1 所示,其中每组包括 3 个同等的试件。在达到指定浸泡时间之后,将试件取出,对其表面进行喷漆处理,以便于 DIC 仪器对试件表面的点的位移进行读取。

表 1 试验方案试件编号

Table 1 Specimen number of test scheme

方案	浸泡时间			
	0	4 周	8 周	16 周
无硅烷	1-0	1-1	1-2	1-3
有硅烷	2-0	2-1	2-2	2-3

1.2 试验方法

试验测试材料 I 型断裂能的方法主要有三点弯法、紧凑拉伸法、直接拉伸法、楔入劈裂法等。其中紧凑拉伸法、直接拉伸法最初用于测试金属等材料断裂参数,虽然也被用于混凝土的断裂研究,但由于试件安装不方便、对中较难等原因,目前较少采用该方法来研究混凝土的断裂特征。而楔入劈裂法将直接施加的压力变为水平向两端的推力,形成张开型裂纹的受力状态,试件制作简单、易于安装。因此,本文选择楔入劈裂法^[17]进行混凝土/环氧树脂界面 I 型断裂试验研究。试验加载装置为 MTS QTest(如图 2~3 所示),试验由位移控制,加载速率为 0.2 mm/min。对混凝土/环氧树脂界面施加的压力通过 MTS QTest 控制程序自动采集。试件的位移场由 DIC 系统测得,拍照间隔为 15 s。

图 4 所示为楔块受力及传力示意图。由图 4 可见:

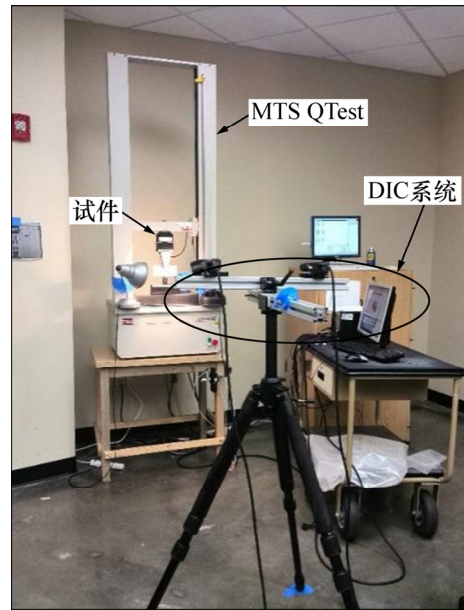


图 2 楔入劈裂试验体系示意图
Fig. 2 Schematic diagram of wedge splitting test

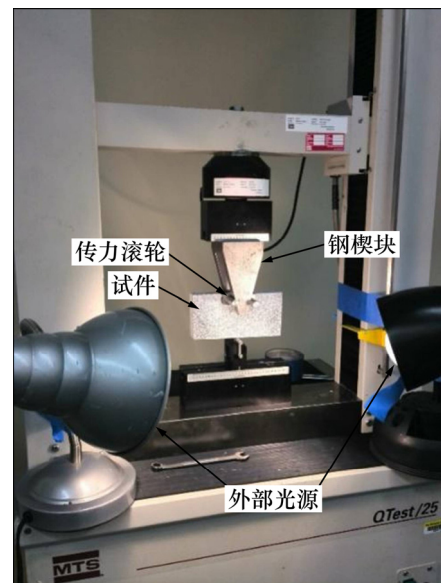


图 3 楔入劈裂试验体系示意图(局部)
Fig. 3 Schematic diagram of wedge splitting test(Part)

MTS QTest 在楔形压块上施加竖向力 P_v 转化成劈裂力 P_{sp} , 从而使试件产生 I 型断裂的破坏模式。 P_{sp} 可通过以下计算得到。图 5 所示为混凝土/环氧树脂界面计算示意图。对于图 5 所示的楔形压块,根据竖直方向力的平衡可得

$$\frac{P_v}{2} = \mu P_N \cos \theta + P_N \sin \theta \quad (1)$$

式中: P_N 为楔块对传力装置的压力。

根据式(1)可得 P_N 的表达式:

$$P_N = \frac{P_V}{2(\mu \cos \theta + \sin \theta)}$$

其中 P_V 的数值由 QTest 读取可得。对于楔块两侧的传力夹具，根据水平方向受力平衡可得

$$P_{sp} = P_N (\cos \theta - \mu \sin \theta) \quad (2)$$

根据上式以及 P_N 的表达式可得

$$P_{sp} = \frac{P_V (1 - \mu \tan \theta)}{2(\mu + \tan \theta)} \quad (3)$$

对于本试验，摩擦因数 $\mu=0.2$ ，楔块侧边与竖直方向的夹角 $\theta=13^\circ$ 。

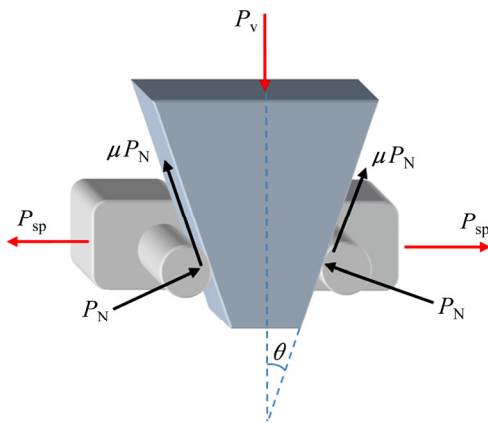


图 4 楔块受力及传力示意图
Fig. 4 Sketch map of force for wedge

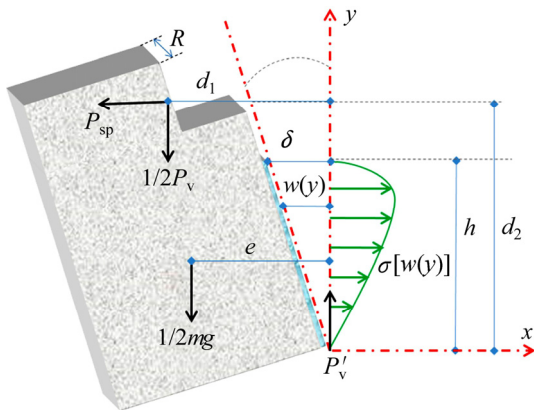


图 5 混凝土/环氧树脂界面计算示意图^[17]
Fig. 5 Schematic diagram of concrete/epoxy interface

2 试验结果及分析

2.1 黏结-分离本构分析

RAHULKUMAR 等^[18-20]认为 2 个独立参数(断裂能 G 、工程应力峰值 τ 或界面张开位移 Δ_f)足够建立界面 CZM 本构。根据 DIC 系统测得的试件位移场，对 2 个试块上位于界面端部 2 点进行位移差的分析，即

可得到界面端部的裂缝张开位移。由于混凝土试件的刚度远大于环氧树脂的黏结界面，在分析时可将混凝土试件近似看作刚体。在如图 5 所示的坐标系下，裂缝张开位移 $w(y)$ 的表达式为

$$w(y) = \frac{\delta}{h} y \quad (4)$$

式中： δ 为界面端部的裂缝张开位移； h 为裂缝长度。根据混凝土试块的弯矩平衡可得

$$P_{sp} d_2 + \frac{1}{2} P_V d_1 + \frac{1}{2} mge = R \int_0^\delta \sigma y dy \quad (5)$$

式中： d_1 、 d_2 和 e 分别为 P_V 、 P_{sp} 以及混凝土试块自重 mg 的力臂； σ 为界面张开应力； R 为试件厚度。将式(4)代入式(5)可得^[17]

$$\int_0^\delta \sigma(w) w dw = \frac{1}{R} \left(\frac{\delta}{h} \right)^2 \left(P_{sp} d_2 + \frac{1}{2} P_V d_1 + \frac{1}{2} mge \right) \quad (6)$$

于是，通过式(7)即可得到裂缝张开位移 δ 与张开应力 σ 的关系曲线。界面的断裂能 G_I 可通过对式(7)进行积分得

$$G_I = \int_0^\delta \sigma(\delta) d\delta \quad (7)$$

图 6 所示为对比组以及浸泡 16 周的试件黏结-分离本构典型曲线，从图 6 可以看出：在试验开始时，应力与界面端部裂缝张开位移近似成正比，在达到峰值后，界面开始开裂，应力开始迅速下降；随着界面端部裂缝张开位移的增长，应力下降的速率逐渐放缓，直至界面全部分离。经 NaCl 溶液浸泡之后，界面峰值应力以及界面断裂能有明显的下降。根据式(6)与式(7)计算可得界面的强度与断裂能随浸泡时间的变化分别如图 7 和图 8 所示。

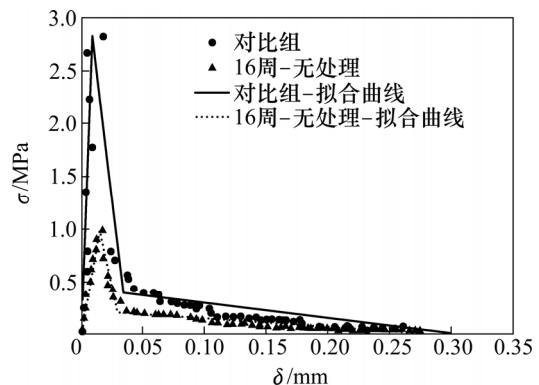


图 6 混凝土/环氧树脂黏结-分离本构
Fig. 6 Traction-separation law of concrete/epoxy interface

从图 7 和图 8 可以看出：界面强度与断裂能随时间不断下降，但是下降的速率不断减小，呈现明显的非线性关系；随着浸泡时间增长，界面在水、氯离子等外界环境的联合作用下，各方面性能总会逐渐下降

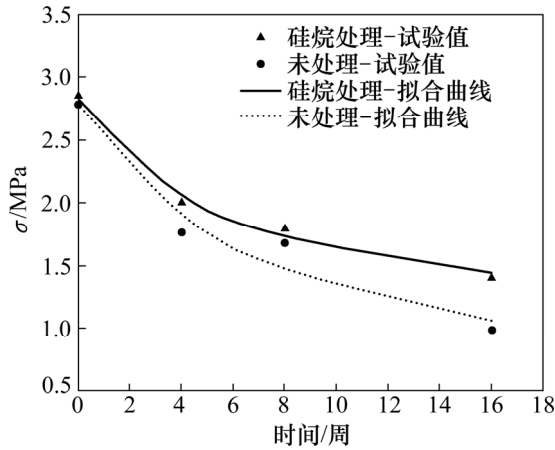


图7 浸泡时间对混凝土/环氧树脂界面强度的影响
Fig. 7 Evolutions of strength of concrete/epoxy interface as function of soaking duration

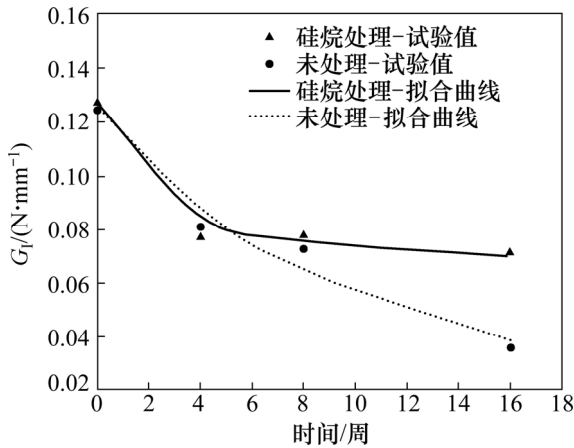


图8 浸泡时间对混凝土/环氧树脂界面 I 型断裂能的影响
Fig. 8 Evolutions of fracture energy of mode I concrete/epoxy interface as a function of soaking duration

至接近它的寿命终点。材料热老化理论的基础是化学反应动力学中的阿伦尼乌斯公式, 即化学反应速率 k 可由下式进行描述:

$$k = A \exp[-\Delta E / (RT)] \quad (8)$$

式中: ΔE 为化学反应活化能; R 为玻尔兹曼气体常数; T 为热力学温度; A 为表观频率因子, 分子热运动时碰撞频率的量度。其中 k 越大, 参与化学反应的分子就越多, 材料的老化程度也就越深, 该材料离寿命终点也就越近, 因此, 它的大小就可以表征该材料的老化寿命或残余强度。实际上, 温度越高, 化学反应速度往往越快, 化学反应完成的时间越短。同理, 在相同温度下, 化学反应时间越长, 化学反应完成的程度越大。因此, 假设界面力学性能表征量 M 和温度的关系, 与 M 和浸泡时间 t 的关系存在一定的相似性, 若

令 $a=A, b=-\Delta E / R$, 则式(8)可进一步改为

$$M = a \exp[b / (t + t_0)] \quad (9)$$

式中: a, b 和 t_0 均为材料常数, 需要通过相应的老化试验来得到。采用试验数据进行拟合所得的界面强度以及断裂能与浸泡时间关系为:

$$\sigma_{si} = 0.96 \exp[10.77 / (t + 9.98)] \quad (10)$$

$$\sigma = 0.38 \exp[33.80 / (t + 17.01)] \quad (11)$$

式中: σ_{si} 为经硅烷处理之后的界面强度; σ 为未经过处理的界面强度。

$$G_{si} = 0.062 \exp[2.19 / (t + 3.05)] \quad (12)$$

$$G = 0.0009 \exp[257.08 / (t + 51.70)] \quad (13)$$

式中: G_{si} 为经硅烷处理之后的断裂能; G 为未经过处理的断裂能。当 $t \rightarrow +\infty, M_{t \rightarrow \infty} = a$ 时, 其为材料的长期(或平衡)力学指标。硅烷处理过的界面与未处理组相比, a 更大, 说明硅烷处理之后的界面的耐久性更好。

混凝土/环氧树脂界面可采用三线性模型进行简化, 简化后的各试件本构如图9所示。

由图9可知: 随着浸泡时间的增加, 混凝土/环氧树脂界面强度与刚度不断下降。采用硅烷对界面进行处理之后的试件, 与界面未经处理的试件相比, 强度下降速率变缓, 说明硅烷对提高黏结质量起到了一定的作用。硅烷偶联剂可在有机物(混凝土)与有机物(环氧树脂)表面之间形成化学键, 增强界面黏结强度。此外, 虽然经硅烷处理之后的界面刚度并没有明显的增长, 但是峰值张开位移增加, 提高了界面的抗变形力。

简化后界面的黏结-分离本构表达式如下:

$$\sigma = \begin{cases} K\delta, & 0 \leq t < \delta_0 \\ b_2 - a_2\delta, & \delta_0 \leq t < \delta_1 \\ b_3 - a_3\delta, & \delta_1 \leq t < \delta_m \end{cases} \quad (14)$$

式中的各参数如表2所示。

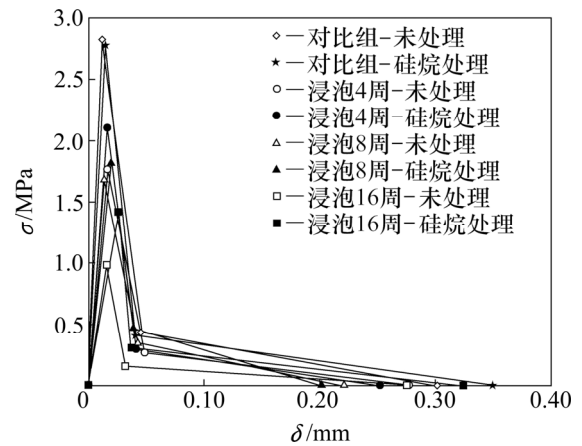


图9 混凝土/环氧树脂界面黏结-分离三折线本构
Fig. 9 Tri-linear traction-separation laws for concrete/epoxy interface

表 2 混凝土/环氧树脂界面黏结-分离三折线本构参数

Table 2 Tri-linear traction-separation law parameters of concrete/epoxy interface

参数	0 周		4 周		8 周		16 周	
	无处理	硅烷处理	无处理	硅烷处理	无处理	硅烷处理	无处理	硅烷处理
σ_0/MPa	2.819	2.781	1.768	2.013	1.682	1.817	0.986	1.415
K	234.917	184.784	106.378	121.779	120.920	92.047	61.204	54.930
a_2	71.454	91.171	42.397	68.359	45.651	70.093	52.297	98.488
b_2	3.676	4.153	2.473	3.143	2.317	3.201	1.829	3.952
a_3	1.712	1.348	1.191	1.422	1.989	2.865	0.638	1.073
b_3	0.516	0.470	0.330	0.358	0.440	0.579	0.175	0.348
δ_0/mm	0.012	0.015	0.017	0.017	0.014	0.020	0.016	0.026
δ_1/mm	0.045	0.041	0.052	0.042	0.043	0.039	0.032	0.037
δ_m/mm	0.301	0.349	0.277	0.252	0.221	0.202	0.275	0.324

2.2 破坏模式分析

在加载初期, MTS 压力示数随夹头位移的下降呈线性增长关系, 当压力增大到一定值后, 界面开始产生微小裂缝, MTS 压力与夹头位移之间的关系进入非线性阶段, 直到裂缝突然开展, MTS 压力迅速下降。随着裂缝宽度的扩展, 楔形压块提供的劈拉力 P_{sp} 也在逐渐变小, 此时试件的承载力很小, 随着黏结界面面积的逐渐减小, 直到界面全部断裂。不同浸泡周期下试件的破坏模式如图 10 所示。

从图 10 可以看出: 经过浸泡之后, 试件的破坏模式也在改变。对比组干燥试件的破坏模式为混凝土破坏, 随着浸泡时间延长, 破坏面上的混凝土附着量逐渐减少, 破坏模式也从混凝土破坏向混凝土/环氧树脂界面破坏转变。经过硅烷处理后的界面, 混凝土残留更多, 黏结效果得到提高, 有助于防止水以及氯离子对界面的侵入, 从而提高了界面的黏结强度。

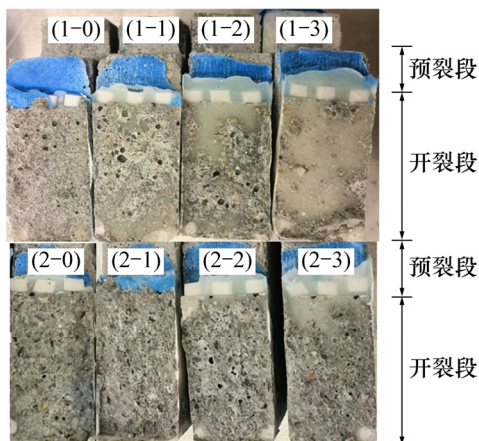


图 10 楔入劈裂试件的破坏模式

Fig. 10 Failure debonded modes of wedge splitting test specimens

3 结论

1) NaCl 溶液的作用会对混凝土/环氧树脂界面的力学性能产生较大的影响, 界面强度与断裂能与浸泡时间呈现明显的指数关系。

2) 通过硅烷对混凝土表面进行处理后, 虽然在干燥状态下界面性能无明显的改善, 但是随着浸泡时间的增加, 黏接界面 I 型断裂强度与断裂能提高程度更加明显。在浸泡 16 周后, 经硅烷处理过的界面的强度与断裂能分别比未处理对照组的高出 101.19% 与 43.51%。虽然经硅烷处理后的界面刚度并未得到显著提升, 但是界面峰值张开位移增加, 提高了界面的抗变形能力。

3) NaCl 溶液侵蚀下混凝土/环氧树脂界面性能的破坏模式也发生了变化, 由混凝土破坏转变为混凝土破坏与界面破坏混合破坏的模式。经硅烷处理的界面, 在同等浸泡时间下, 混凝土破坏的面积比例大于未处理界面的面积比例。进一步证明硅烷偶联剂对界面抗盐侵蚀能力有一定的改善作用。

参考文献:

- [1] AHMED O, GEMERT D V, VANDEEWALL L. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams[J]. Cement & Concrete Composites, 2001, 23(1): 3-19.
- [2] CORONADO C A, LOPEZ M M. Damage approach for the prediction of debonding failure on concrete elements strengthened with FRP[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(4): 391-400.
- [3] TOUNSI A, BENYOUCEF S. Interfacial stresses in externally

- FRP-plated concrete beams[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007, 27(3): 207-215.
- [4] FERRACUTI B, SAVOI M, MAZZOTTI C. A numerical model for FRP-concrete delamination[J]. *Composites Part B Engineering*, 2006, 37(4): 356-364.
- [5] PECCE M, CERONI F. Modeling of tension-stiffening behavior of reinforced concrete ties strengthened with fiber reinforced plastic sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(6): 510-518.
- [6] 程惠莹, 刘庆辉, 乔丕忠. II型模态控制下的 GFRP-混凝土界面断裂韧度测定[J]. *力学季刊*, 2016, 37(1): 114-123.
CHENG Huiying, LIU Qinghui, QIAO Pizhong. Mode II dominated fracture toughness evaluation of GFRP-concrete interface[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2016, 37(1): 114-123.
- [7] QIAO Pizhong, XU Yingwu. Mode-I fracture and durability of FRP-concrete bonded interfaces[J]. *Water Science and Engineering*, 2008, 1(4): 47-60.
- [8] 祝涛, 李杉, 李伟捷, 等. 碳纤维布与混凝土正拉黏结性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(3): 1-4.
ZHU Tao, LI Shan, LI Weijie, et al. Experimental investigation on normal tensile bonding property between CFRP and concrete[J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(3): 1-4.
- [9] 卢亦焱, 杨婷, 李杉, 等. 海洋环境下 FRP-混凝土界面黏结退化的可靠性分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(9): 79-84.
LU Yiyan, YANG Ting, LI Shan, et al. Reliability analysis of deterioration of FRP-concrete bonded interface in sea environment[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2014, 36(9): 79-84.
- [10] 赵莹莹. 海洋环境下 CFRP-混凝土界面黏结疲劳性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2015: 69-70.
ZHAO Yingying. Experimental study on interfacial bond fatigue performance of CFRP-concrete under marine environment[D]. Qingdao: Qingdao Technological University. College of Civil Engineering, 2015: 69-70.
- [11] 樊付权. 海洋环境下 CFRP-高性能混凝土界面黏结性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2015: 51-52.
FAN Fuquan. Study on the properties of CFRP high performance concrete under marine environment[D]. Qingdao: Qingdao Technological University. College of Civil Engineering, 2015: 51-52.
- [12] 张建. 海洋环境下 CFRP 及 CFRP-混凝土界面性能的耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2013: 69-70.
ZHANG Jian. Durability study on CFRP and the interfacial performance between CFRP and concrete in sea environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology. College of Civil Engineering, 2013: 69-70.
- [13] 隋莉莉, 王代玉, 王震宇. 侵蚀介质下 FRP 与混凝土界面黏结性能[J]. *低温建筑技术*, 2016, 38(4): 4-6.
SUI Lili, WANG Daiyu, WANG Zhengyu. Interfacial bonding behavior between FRP and concrete under corrosive medium[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2016, 38(4): 4-6.
- [14] 何小兵, 严波, 申强. GFRP/CFRP-混凝土界面剪切性能[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(6): 1004-1011.
HE Xiaobin, YAN Bo, SHEN Qiang. Interfacial shear performance GFRP/CFRP composite of interply hybrid and concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(6): 1004-1011.
- [15] ASTM C33/C33M, Standard specification for concrete aggregates[S].
- [16] ASTM C192/C192M, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory[S].
- [17] AMIDI S. Characterization and modeling of long-term behavior of FRP-to-concrete interface in aggressive environments[D]. Tuscaloosa: University of Alabama. Department of Civil Construction and Environmental Engineering, 2015: 173-193.
- [18] RAHULKUMAR P, JAGOTA A, BENNISON S J, et al. Cohesive element modeling of viscoelastic fracture: application to peel testing of polymers[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(13): 1873-1897.
- [19] MOHAMMED I, LIECHTI K M. Cohesive zone modeling of crack nucleation at bimaterial corners[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(4): 735-764.
- [20] HUTCHINSON J W, EVANS A G. Mechanics of materials: top-down approaches to fracture[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(1): 125-135.

(编辑 刘锦伟)