

# 混凝土-环氧树脂黏结界面的断裂性能分析

张远森, 余江滔, 陆洲导

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

**摘要:** 采用夹心楔入劈拉试件并结合双 K 断裂模型研究混凝土-环氧树脂黏结界面断裂性能。相比于原混凝土试件, 环氧树脂注胶后形成的夹心试件的起裂荷载、极限荷载、双 K 断裂参数以及断裂能均有增长, 而黏聚断裂韧度值没有提高; 粗糙界面试件的黏聚断裂韧度试验值与采用软化曲线计算得到的黏聚断裂韧度计算值相等, 光滑界面试件由于壁效应的存在, 黏聚断裂韧度较低。可以认为环氧树脂注胶技术推迟了裂缝的再开展, 使得起裂断裂韧度提高, 采用起裂断裂韧度代入裂缝偏折判断条件进行界面裂缝偏折判断时, 结果与试验相符。

**关键词:** 楔入劈拉法; 混凝土-环氧树脂黏结界面; 界面断裂韧度; 起裂断裂韧度; 壁效应

**中图分类号:** TU57<sup>+</sup>8.11, TU317<sup>+</sup>.9

**文献标志码:** A

## Analysis on Fracture Properties of Concrete-Epoxy Interface

ZHANG Yuanmiao, YU Jiangtao, LU Zhoudao

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Sandwiched wedge splitting method and double-K fracture model were used to study the fracture properties of concrete-epoxy interface. Compared to the prototype specimens, the cracking load, ultimate load, double-K fracture parameters and fracture energy of the sandwiched specimens formed by epoxy injection improve, while the cohesive fracture toughness shows no improvement. To specimens with rough interface, the cohesive fracture toughness value calculated with soften curve is identical with that of the test. And the cohesive fracture toughness value of specimens with smooth interface is lower than that of specimens with rough interface because of the wall effect. It is assumed that the epoxy injection technique helps postpone the developing of cracks in sandwiched specimens, which improves the initial fracture toughness. The initial fracture

toughness is used to judge interface crack deflection, and the results agree well with the tests. It is recommended that the initial fracture toughness be used to characterize the fracture properties of concrete-epoxy interface.

**Key words:** wedge splitting method; concrete-epoxy interface; interface fracture toughness; initial fracture toughness; wall effect

环氧树脂材料因具有高强、耐磨、抗渗、抗冻和良好的抗冲击性能, 广泛应用于水利水电、工民建等领域, 成为研究和应用发展最快的建筑材料之一<sup>[1]</sup>。在抗震加固工程中, 环氧树脂作为胶黏剂与高强纤维材料结合形成 FRP (fiber reinforced polymer) 用以加固钢筋混凝土构件及结构。国内外相关研究<sup>[2-4]</sup>表明, 这样一种修复系统能够有效恢复或者提高被加固对象的抗震性能; 作为灌浆材料, 环氧树脂具有黏度低、渗透性好、机械强度高优点, 用于工程中混凝土裂缝的修补, 可发挥其防渗补强的功能, 提高结构的耐久性, 延长使用寿命<sup>[5]</sup>。环氧树脂注胶修复混凝土裂缝保证了混凝土的完整性, 使受损开裂的混凝土的性能能够恢复到未受损的水平<sup>[6-8]</sup>。

对于混凝土-环氧树脂黏结界面, 许多学者进行了相关研究。Coronado<sup>[9]</sup>提出利用软化曲线来表征界面的断裂性能。利用劈拉试验和三点弯曲梁试验获得的混凝土-环氧树脂胶界面的抗拉强度  $f_t$ 、尺寸效应断裂能  $G_f$  与黏聚断裂能  $G_F$  3 个参数可得到软化曲线。通过试验比较发现, 素混凝土试件得到的抗拉强度  $f_t$ 、黏聚断裂能  $G_F$  与黏结界面的相应参数值处于同一数量级, 可比性不大, 而尺寸效应断裂能  $G_f$  相差较大, 最大达 64%, 可以作为表征混凝土-环氧树脂界面断裂性能的主要参数。Lau<sup>[10]</sup>利用环氧树脂-混凝土 I 型及复合型断裂四点弯曲梁试件研究

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51008235)

第一作者: 张远森(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为混凝土结构抗震加固。E-mail: abeier04201@126.com

通讯作者: 余江滔(1975—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火及抗震加固。E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

了混凝土与环氧树脂胶的黏结界面断裂韧度在不同湿度与温度环境下的变化规律. Moetaz<sup>[11]</sup>采用普通水泥和耐硫酸盐波兰水泥制作一批试件,在劈裂后采用三种不同的环氧树脂胶进行加固并分别放置在不同的环境来测定黏结界面的受拉强度、受压强度、黏结强度,表征在不同环境中黏结界面的耐久性. Hong-chol Shin<sup>[12]</sup>研究不同温度级别下环氧树脂与混凝土黏结界面的疲劳性能. 拓展到混凝土与其他材料的黏结界面性能. Walter<sup>[13]</sup>采用楔入劈拉法研究了钢材与混凝土黏结界面的Ⅰ型断裂性能,并通过反演方法分析(inverse analysis)获得钢-混凝土界面的软化曲线. Kishen<sup>[14]</sup>采用楔入劈拉法研究了岩石和混凝土的黏结界面的Ⅰ型断裂能. Qiao<sup>[15]</sup>采用带缺口的三点弯曲梁研究混凝土与玻璃纤维和碳纤维两种复合材料的黏结面的Ⅰ型断裂能.

通过以上研究可以发现,断裂韧度、软化曲线、界面强度(受拉、受压、受剪强度等)、断裂能等参数均被单独用来表征界面的性能,由于这些参数值与界面裂缝的发展过程有密切的关系,而且界面裂缝的偏向与发展会影响这些参数值,所以必须从界面裂缝发展全过程来描述和把握黏结界面断裂性能. 混凝土双 K 断裂模型采用起裂断裂韧度与失稳断裂韧度来判定裂缝的起裂和失稳,描述混凝土材料中裂缝发展经历的起裂、稳定扩展和失稳扩展的断裂破坏过程,由于混凝土与环氧树脂黏结界面裂缝同样也存在起裂、稳定扩展和失稳扩展的破坏过程,本文采用夹心楔入劈拉试件并结合双 K 断裂模型来研究混凝土-环氧树脂黏结界面断裂性能.

1 试件设计及加载制度

本文采用的楔入劈拉试件为标准试件<sup>[16]</sup>,尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,如图 1 所示. 试件

的预制裂缝长度均为 80 mm. 混凝土采用商品混凝土, C30、C50、C70 分别表示混凝土强度等级为 C30、C50 与 C70 的楔入劈拉试件,试件断开后采用环氧树脂胶进行修复后的试件分别表示为 RC30、RC50、RC70,故该试件环氧树脂与混凝土的黏结面为自然断开面; KC30 试件为采用环氧树脂胶直接将预制好的半边试件黏结起来,故黏结面为自然浇筑光滑面. 楔入劈拉试件参数见表 1. 在修复试件过程中,在预制裂缝位置放置双面胶带,防止环氧树脂浸入. 如果有少许环氧树脂浸入,则采用锯片进行切割,以保证具有相同长度的预制裂缝. 混凝土试件室内养护 28 d 后进行初次楔入劈拉试验,试件在环氧树脂注胶后养护 28 d,然后进行再次楔入劈拉试验.

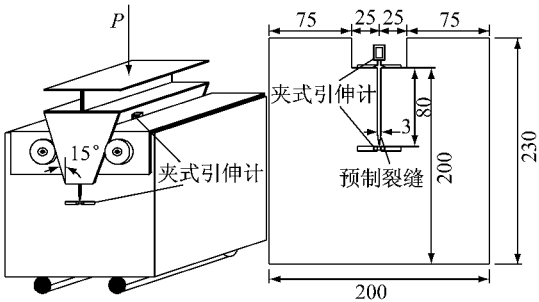


图 1 楔入劈拉法加载装置及试件尺寸(单位:mm)  
Fig.1 Configuration of wedge splitting test: loading arrangement and specimen shape (unit: mm)

试验均在 1 000 kN 的电液伺服万能试验机上进行,利用动静态数据采集系统进行试验数据采集. 劈拉试验中在预制裂缝开口处及预制裂缝尖端安装量程为 10 mm 的夹式引伸计,以测得试块的裂缝口开口位移  $s$ . 试验中控制试验机先以力加载,加载速率为  $30\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ ,目标值为 2 000 N,然后以位移控制,加载速率为  $0.15\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,至试验结束,以保证试验得到稳定的  $P$ - $s$  曲线.

表 1 楔入劈拉试件参数  
Tab.1 Specimens of the wedge splitting method

试件	环氧树脂	$t/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$a_0/\text{mm}$	$h_0/\text{mm}$	数量/个	影响因素
C30		200	200	80	3	6	混凝土
RC30	XH160A/B	200	200	80	3	3	环氧树脂
KC30	XH160A/B	200	200	80	3	6	界面情况
C50		200	200	80	3	5	混凝土
RC50	XH160A/B	200	200	80	3	5	环氧树脂
C70		200	200	80	3	4	混凝土
RC70	XH160A/B	200	200	80	3	4	环氧树脂

注:  $t$  为试件厚度;  $d$  为试件高度;  $a_0$  为试件预制裂缝长度;  $h_0$  为试件上刀口的厚度.

环氧树脂胶为由 Araldite 公司生产的 XH160A/B 环氧树脂胶裂缝修补胶及 XH111

Normal A/B 封闭胶. 两者力学性能参数见表 2(力学性能参数由 Araldite 公司提供).

表2 修复材料力学性能参数

Tab.2 Mechanic property of epoxy

环氧树脂	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	与混凝土黏结强度(7 d后)/MPa	抗压强度/MPa	粘度/(m·Pa·s)	适用期/min
XH160 A/B	22.3	21	31	94	200	15~25
XH111 A/B	24.0	36	3.62(破坏发生在混凝土中)	73	65000	25

## 2 再次楔入劈拉试验试件界面破坏情况

如图2所示,试件 RC30 为粗糙黏结界面试件,破坏主要发生在混凝土中,从断裂面上看,许多粗骨

料也发生了断裂.试件 KC30 为光滑界面,主要从胶体附近混凝土处破坏,多为骨料与砂浆的界面开裂,有明显的壁效应,从断裂面上还可以看到明显的环氧树脂胶的浸润和渗透效果.试件 RC50 与 RC70 为粗糙黏结界面试件,新裂缝相对于原裂缝与小于  $10^\circ$  的角度偏出,破坏在混凝土内,没有发现壁效应.

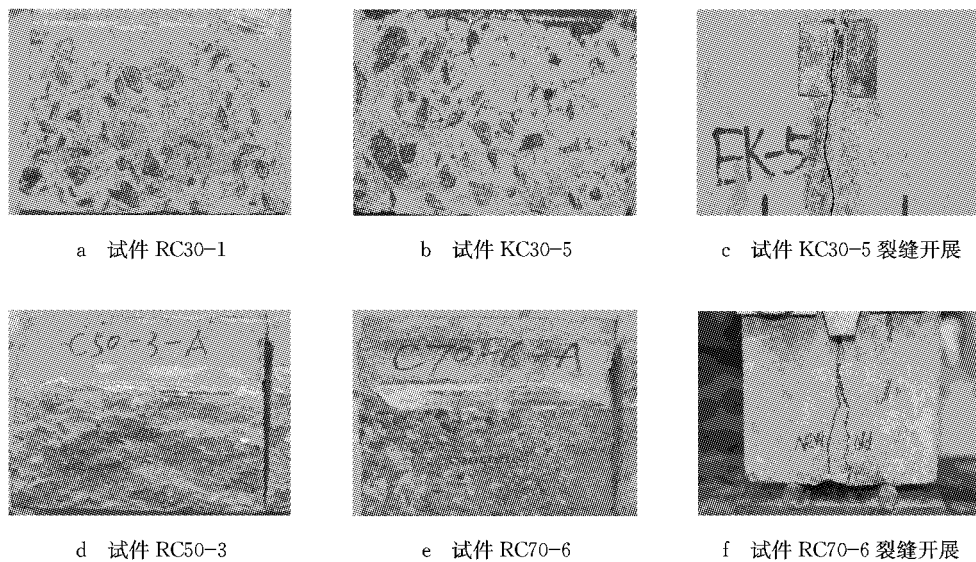


图2 注胶修复试件楔入劈拉试验后断面图

Fig.2 Interface profile diagrams of repaired specimens after WST

## 3 修复前后试件断裂参数分析

### 3.1 $P-s$ 曲线

图3为各试件在修复前后的  $P-s$  曲线.对比修复前后  $P-s$  曲线可以发现,相比于原 C30, C50, C70 试件, RC30, RC50, RC70 试件的峰值荷载有比较明显的提高,其  $P-s$  所包围的全曲线面积也比原试件有所增大,说明试件经修复后断裂能增大.而光滑界面的 KC30 试件的峰值荷载明显降低.

### 3.2 荷载、断裂韧度的比较

根据试验获得的  $P-s$  曲线可以得到试件的起裂荷载  $P_{ini}$ 、极限荷载  $P_{max}$ , 双 K 断裂韧度  $K_{Ic}$  的计算公式如下<sup>[17-18]</sup>:

$$K_{Ic} = \frac{P \times 10^{-3}}{td^{1/2}} f(\alpha) \quad (1)$$

$$f(\alpha) = 3.675[1 - 0.12(\alpha - 0.45)] / (1 - \alpha)^{3/2} \quad (2)$$

式中:相对缝长  $\alpha = a_c/d$ . 临界等效裂缝长度  $a_c$  的计算公式如式(3)所示,其中弹性模量  $E$  根据  $P-s$  曲线的初始柔度  $c_i$  进行计算.

$$a_c = (h + h_0) \left\{ 1 - \left[ \frac{13.18}{\frac{s_c E t}{P_{max}} + 9.16} \right]^{1/2} \right\} h_0 \quad (3)$$

式中: $h$  为试件高度; $s_c$  为裂缝张口位移临界值.

每组试件试验结果的平均值  $\mu$ 、方差  $\sigma$  与变异系数  $c_v$  见表3.

试件修复前后起裂荷载与极限荷载变化见图4.为了区分每组试件,图4中  $X$  轴坐标设置为试件的混凝土等级,为了明显区别试件修复前、后的值,特意将修复后试件的  $X$  坐标值向右偏离一段距离列出,下同.通过图4可以发现,修复前,各试件的起裂荷载和极限荷载随着混凝土等级的提高而增大,试

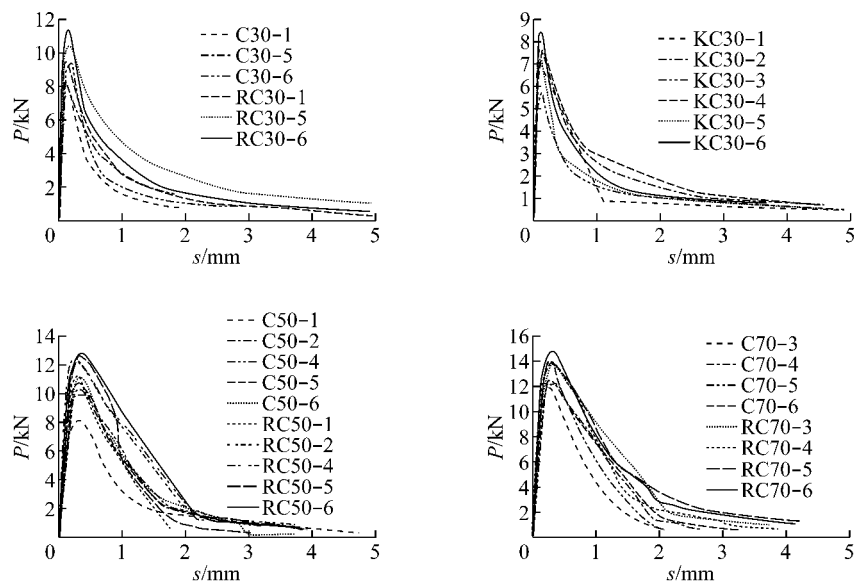


图 3 试件的  $P-s$  曲线  
Fig.3  $P-s$  curves

表 3 楔入劈拉法试验结果

Tab.3 Test results from WSTs

试件	$P_{ini}$			$P_{max}$			$K_{Ic}^{ini}$			$K_{Ic}^{un}$			$K_{Ic}^c$		
	$\mu/kN$	$\sigma/kN$	$c_v/\%$	$\mu/kN$	$\sigma/kN$	$c_v/\%$	$\mu/(MPa \cdot m^{1/2})$	$\sigma/(MPa \cdot m^{1/2})$	$c_v/\%$	$\mu/(MPa \cdot m^{1/2})$	$\sigma/(MPa \cdot m^{1/2})$	$c_v/\%$	$\mu/(MPa \cdot m^{1/2})$	$\sigma/(MPa \cdot m^{1/2})$	$c_v/\%$
C30	4.10	0.44	11	8.55	0.64	7	0.36	0.04	11	1.32	0.07	5	0.96	0.05	5
RC30	5.75	0.77	13	10.46	0.78	8	0.51	0.07	13	1.48	0.05	3	0.97	0.05	6
KC30	5.75	0.59	10	7.38	0.82	11	0.51	0.05	10	0.83	0.12	15	0.32	0.10	32
C50	7.51	0.88	12	10.11	1.06	10	0.67	0.08	12	1.71	0.10	6	1.04	0.05	5
RC50	9.20	0.88	10	12.36	0.53	4	0.82	0.08	10	1.83	0.04	2	1.01	0.07	7
C70	8.86	0.69	8	12.63	0.73	6	0.79	0.06	8	1.73	0.12	7	0.94	0.12	13
RC70	10.18	0.46	4	14.04	0.34	2	0.91	0.04	4	1.90	0.05	2	0.99	0.07	7

注:  $K_{Ic}^{ini}$  为起裂断裂韧度;  $K_{Ic}^{un}$  为失稳断裂韧度;  $K_{Ic}^c$  为粘聚断裂韧度。

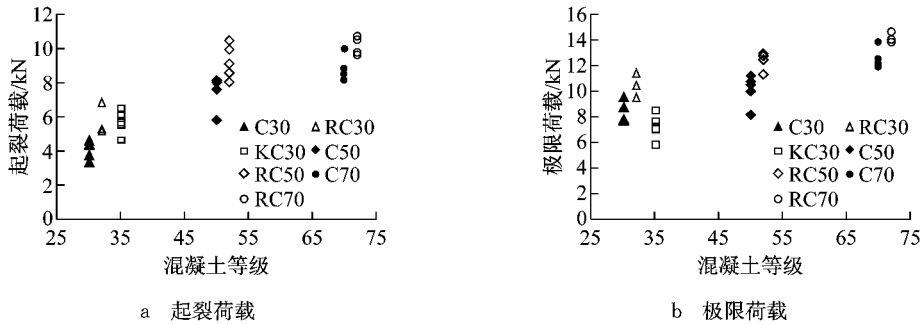


图 4 试件修复前后起裂荷载与极限荷载变化

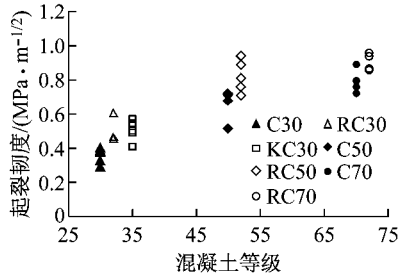
Fig.4 Variation of  $P_{ini}$  and  $P_{max}$  of specimens before and after repairing

件在注胶修复后,RC30,RC50,RC70 的起裂荷载得到提高,增幅分别为 40.24%,22.50%,14.90%,认为注胶修复推迟了裂缝的开展,极限荷载也得到提高,增幅分别为 22.33%,22.26%,11.16%;光滑黏结面试件 KC30 的起裂荷载增大,增幅为 40.24%,但极限荷载明显下降,因为该组试件有明显的壁效应存在,其

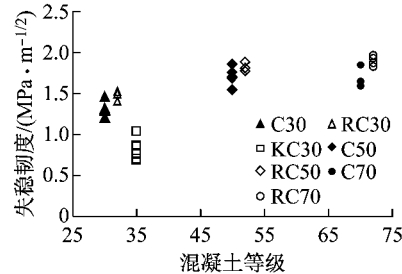
极限荷载低于同批次的其他试件,降幅为13.68%。

试件修复前后双 K 断裂参数变化见图 5。同样可以发现,各试件修复前的起裂韧度和失稳韧度随着混凝土等级的提高而增大,在注胶修复后,试件 RC30,RC50,RC70 起裂韧度得到提高,增幅分别为 41.67%,22.39%,15.19%,失稳韧度也得到提高,

增幅分别为 12.12%, 7.02%, 9.82%; 光滑黏结面试件 KC30 的起裂韧度出现增长, 增幅为 41.67%, 但是失稳韧度明显下降, 降幅为 37.12%。另外, 通过  $P-s$  曲线可以计算得到试件在修复前后的断裂能, 如图 6 所示。



a 起裂断裂韧度



b 失稳断裂韧度

图 5 试件修复前后双 K 断裂参数变化

Fig.5 Variation of double-K fracture parameters of specimens before and after repairing

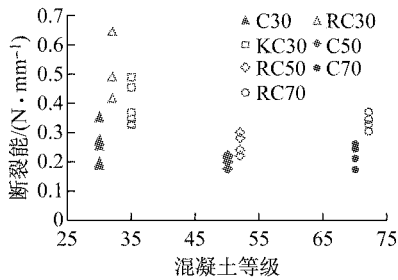


图 6 试件修复前后断裂能变化

Fig.6 Variation of fracture energy of specimens before and after repairing

### 3.3 黏聚断裂韧度

通过起裂断裂韧度、黏聚断裂韧度以及失稳断裂韧度三者的关系, 可以计算得到试件的黏聚韧度值  $K_{Ic}^c$ , 见图 7。

$$K_{Ic}^{ini} + K_{Ic}^c = K_{Ic}^{un} \quad (4)$$

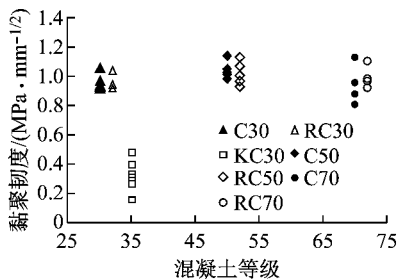


图 7 试件修复前后黏聚韧度变化

Fig.7 Variation of  $K_{Ic}^c$  of specimens before and after repairing

试件 C30(RC30), C50(RC50), C70(RC70) 在初次与再次试验时, 计算得到的黏聚韧度平均值分别为 0.96(0.97), 1.04(1.01), 0.94(0.99)  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 可以认为试验黏聚韧度值几乎没有变化。对高

图 6 所示。由于对不同混凝土等级的试件的  $s$  取值标准不一样, 导致最后计算得到的断裂能并不统一。但是同样可以发现, 各试件在注胶修复后断裂能都明显提高。

强混凝土 C50 与 C70, 采用文献[19-20]提出的双线性软化曲线, 而对于 C30 混凝土采用文献[21]的软化曲线并结合权函数法[22]分别计算各混凝土的黏聚韧度值。素混凝土试件与环氧树脂夹心试件均采用上述同一软化曲线分别获得黏聚韧度计算值  $K_{Ic}^c$ , 结果见表 4。可以发现, 不仅素混凝土试件的计算黏聚韧度值  $K_{Ic}^c$  与试验黏聚韧度值  $K_{Ic}^c$  吻合很好, 而且夹心试件的计算值与试验值也吻合很好。这与裂缝的开展路径是相关的, 裂缝起裂后偏出黏结界面, 完全在混凝土中发展, 那么按照双 K 断裂模型的假设, 可以采用素混凝土的软化曲线代替夹心试件的软化曲线。如果从物理机理上来讲, 对于混凝土与环氧树脂来说, 从黏结树脂开始深入混凝土 1~2 mm 区域是黏结树脂的渗透层, 可见环氧树脂对混凝土的浸润深度不大, 通过试件的破坏情况可以发现裂缝多数在原混凝土中开展。当裂缝偏出界面且在混凝土中发展时, 修复前与修复后的试件的大部分混凝土的断裂性能并没有发生改变, 断裂过程中黏聚力也没有增强, 所以根据黏聚断裂韧度的计算理论, 可计算得到同样的黏聚断裂韧度。

对于试件 RC30 与 KC30, 其裂缝的发展如图 8 所示。试件 KC30 因为黏结界面为光滑界面, 在自然浇筑时具有壁效应, 在黏结界面附近形成薄弱区, 而且在黏结过程中没有除去表面上的浮浆, 试件在再次楔入劈拉试验时, 裂缝偏出后会沿 a 路线发展, 而试件 RC30 的黏结界面为自然断开面, 没有壁效应的存在, 试件在再次楔入劈拉试验时, 裂缝偏出后相当于从 b 路线发展。这两种开展路径导致了黏结断裂韧度的差异。通过图 7 可以发现, 试件 KC30 的黏聚断裂韧度明显低于其他同批次试件。根据起裂

表 4 黏聚断裂韧度试验值与计算值

Tab.4 Test values and the calculated values of  $K_{Ic}$

试件	$K_{Ic}/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	$K_{Ic}'/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	试件	$K_{Ic}/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	$K_{Ic}'/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	试件	$K_{Ic}/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )	$K_{Ic}'/$ (MPa · m <sup>1/2</sup> )
C30-1	0.92	1.01	C50-1	1.03	1.24	C70-3	0.96	0.95
C30-2	0.92	0.87	C50-2	1.14	1.10	C70-4	0.88	1.02
C30-3	0.93	0.92	C50-4	1.05	1.03	C70-5	1.13	1.18
C30-4	0.97	0.96	C50-5	0.99	1.04	C70-6	0.81	0.92
C30-5	0.94	1.18	C50-6	1.02	1.14			
C30-6	1.06	0.99	RC50-1	0.93	0.93			
RC30-1	1.04	0.92	RC50-2	1.11	0.98			
						RC70-3	0.97	0.89
			RC50-4	1.06	0.99	RC70-4	0.99	1.06
RC30-5	0.94	0.93	RC50-5	0.96	0.92	RC70-5	0.93	1.03
RC30-6	0.92	0.88	RC50-6	1.00	0.90	RC70-6	1.11	1.12

断裂韧度、黏聚断裂韧度以及失稳断裂韧度三者的关系,当裂缝偏出界面在混凝土中发展时,通过上文分析可知黏聚断裂韧度没有发生变化,而起裂断裂韧度和失稳断裂韧度不断增大,那么可以归结为起裂断裂韧度的提高,导致了失稳断裂韧度的提高,相比于原混凝土试件的原裂缝,环氧树脂注胶技术推迟了裂缝的再开展,使得各项参数都相应得到提高。

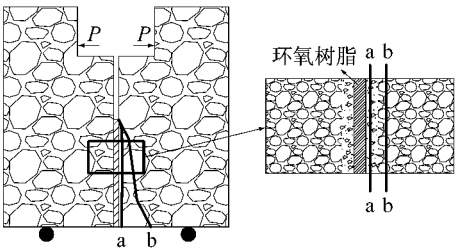


图 8 环氧树脂与混凝土的壁效应

Fig.8 Wall-effect of epoxy-concrete interface

3.4 裂缝的偏折判断

对于界面裂缝来说,当满足式(5)条件时,界面裂缝发生偏折并进入混凝土中<sup>[23]</sup>。

$$\frac{\Gamma_i}{\Gamma_s} > \frac{G}{G_{\max}^i} \quad (5)$$

式中: $\Gamma_i$  为界面断裂韧度; $\Gamma_s$  为混凝土断裂韧度; $G$  为界面裂缝能量释放率; $G_{\max}^i$  为偏折裂缝最大能量释放率。

夹心试件在再次试验时,界面裂缝起裂后偏向混凝土中,所以采用起裂断裂韧度  $\Gamma_i^{\text{ini}} = \frac{(K_{Ic}^{\text{ini}})^2}{E}$  进行计算验算, $\bar{E}$  为修复后试件的弹性模量。界面裂缝能量释放率  $G$  与偏折裂缝最大能量释放率  $G_{\max}^i$  的比值一般都小于 1<sup>[14]</sup>,而通过表 5 可以发现,除试件 RC70-3 外,界面起裂断裂韧度  $\Gamma_i^{\text{ini}}$  与混凝土起裂断

裂韧度  $\Gamma_s^{\text{ini}}$  的比值要大于 1,所以根据式(5)判断,不同混凝土强度的夹心试件的界面裂缝在起裂后均偏出,在混凝土中发展,这与试验现象也一致。这说明在裂缝起裂时,可以采用起裂断裂韧度来进行裂缝的偏折判断。

表 5 界面裂缝的偏折判断

Tab.5 Verification of prediction criteria

试件	$\Gamma_i^{\text{ini}}/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	$\Gamma_s^{\text{ini}}/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	$\Gamma_i^{\text{ini}}/\Gamma_s^{\text{ini}}$
RC30-1	9.00	4.06	2.22
RC30-5	9.55	7.17	1.33
RC30-6	16.19	9.57	1.69
RC50-1	21.05	8.05	2.62
RC50-2	17.29	14.61	1.18
RC50-4	14.24	14.06	1.01
RC50-5	26.64	16.30	1.63
RC50-6	20.67	13.39	1.54
RC70-3	20.56	25.99	0.79
RC70-4	27.13	16.64	1.63
RC70-5	28.81	16.60	1.73
RC70-6	22.28	19.66	1.13

4 结论

本文采用夹心楔入劈拉试件并结合双 K 断裂模型研究环氧树脂与混凝土黏结界面断裂性能,通过 3 组不同混凝土等级的夹心楔入劈拉试件的楔入劈拉试验,可以得到以下结论:

(1) 注胶后形成的环氧树脂夹心试件相比于原混凝土试件,在相同加载条件下测得的起裂荷载、极限荷载、起裂断裂韧度、失稳断裂韧度以及断裂能都得到不同程度的增长,且随着混凝土强度等级的提高而增大,这些参数都可以反映环氧树脂与混凝土的黏结界面的断裂性能。

(2) 当裂缝偏入混凝土时,夹心试件的黏聚断

裂韧度的试验值与采用软化曲线计算得到的黏聚断裂韧度计算值相比较,两者几乎相等,说明可以按照双K断裂模型的假设,采用原混凝土的软化曲线代替夹心试件的软化曲线。

(3) 由于壁效应的存在,会在环氧树脂与混凝土的黏结界面附近形成薄弱区,造成较低的黏聚断裂韧度,所以在黏结界面处理时,需要对混凝土表面进行处理,除去浮浆,暴露粗骨料。

(4) 可以将起裂断裂韧度作为表征环氧树脂与混凝土黏结界面的断裂性能的参数,相比于混凝土的原裂缝,环氧树脂注胶技术推迟了裂缝的再开展,使得各项断裂参数都得到提高;采用起裂断裂韧度来进行界面裂缝偏折判断时,判断结果与试验相符,说明在裂缝起裂时,可以采用起裂断裂韧度来进行裂缝的偏折判断。

## 参考文献:

- [1] American Concrete Institute. Use of epoxy compounds with concrete[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1998.
- [2] 余江滔,陆洲导,张克纯. 震损钢筋混凝土框架节点修复后抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12): 64.  
YU Jiangtao, LU Zhoudao, ZHANG Kechun. Experimental study on seismic behavior of strengthened RC column-beam joints damaged by simulated earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(12): 64.
- [3] Ekenel M, Myers J J. Durability performance of RC beams strengthened with epoxy injection and CFRP fabrics [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (6): 1182.
- [4] Thanoon A W, Jaafar S M, Kadir A R, *et al.* Repair and structural performance of initially cracked reinforced concrete slabs [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19 (8): 595.
- [5] 杨斌,魏涛,李珍. 混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料及其标准[J]. 新型建筑材料, 2008(4): 71.  
YANG Bin, WEI Tao, LI Zhen. Epoxy resin grouting material for concrete cracks and its standard [J]. New Building Materials, 2008(4): 71.
- [6] Adin A M, Yanklevsky Z D, Farhey N D. Cyclic behavior of epoxy-repaired reinforced concrete beam-column joints [J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(2): 170.
- [7] Karayannis G C, Chaliotis E C, Sideris K K. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections [J]. Journal of Earthquake Engineering, 1998, 2 (2): 217.
- [8] French W C, Thorp A G, Tsai W J. Epoxy repair techniques for moderate earthquake damage [J]. ACI Structural Journal, 1990, 87 (4): 416.
- [9] Coronado C A, Lopez M M. Experimental characterization of concrete-epoxy interfaces [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(4): 303.
- [10] Lau D, Büyüköztürk O. Fracture characterization of concrete/epoxy interface affected by moisture [J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(12): 1031.
- [11] El-Hawary M, Al-Khaiat H, Fereig S. Effect of sea water on epoxy-repaired concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(1): 41.
- [12] Shin H, Miyauchi H, Tanaka K. An experimental study of fatigue resistance in epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the temperature effect [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1316.
- [13] Walter R, Østergaard L, Olesen J F, *et al.* Wedge splitting test for a steel-concrete interface [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(17): 2565.
- [14] Kishen C M, Saouma E V. Fracture of rock-concrete interfaces: laboratory tests and applications [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(3): 325.
- [15] Qiao P, Xu Y. Evaluation of fracture energy of composite-concrete bonded interfaces using three-point bend tests [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(4): 352.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. DL/T 5332—2005. Norm for fracture test of hydraulic concrete [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [17] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
XU Shilang. Fracture mechanics of concrete [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [18] 卜丹. 楔入式紧凑拉伸断裂试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
BU Dan. Experimental study using wedge-splitting test on compact tension specimens [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [19] 高淑玲, 王玲, 徐世烺. 高强混凝土双K断裂参数测试及计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 28.  
GAO Shuling, WANG Ling, XU Shilang. Tests and methods of double-K fracture parameters for high strength concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 28.
- [20] 李家康, 王巍. 高强混凝土的几个基本力学指标[J]. 工业建筑, 1997, 27(8): 50.  
LI Jiakang, WANG Wei. Basic mechanical indexes of high strength concrete [J]. Industrial Construction, 1997, 27(8): 50.
- [21] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, part 1: experimental investigation of crack propagation [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 111.
- [22] Kumar S, Barai S V. Determining the double-K fracture parameters for compact tension and wedge splitting tests using weight function [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(7): 935.
- [23] Hutchinson J W, Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials [J]. Advances in Applied Mechanics, 1992, 29(64): 63.