

FRP 板与混凝土湿粘结界面的剪切性能试验研究

张 普^{a,b}, 朱 虹^{a,b}, 陈 泉^{a,b}, 孟少平^{a,b}, 刘晓艳^{a,b}

(东南大学 a. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室; b. 城市工程科学技术研究院 南京 210096)

摘 要:采用 7 种不同的粘结树脂,通过 2 批双剪试件的拉伸剪切试验研究了拉挤成型玄武岩纤维复合板与后浇混凝土湿粘结界面的力学性能,并将其与在既有混凝土表面外贴 FRP 形成的干粘结界面进行了比较,通过对比两者的破坏特征、荷载位移曲线、有效粘结长度、粘结滑移关系、界面断裂能以及粘结破坏机理,深入地研究了湿粘结界面的性能。结果表明:湿粘结的粘结强度仅为干粘结的 1/2~2/3,但 2 种界面的有效粘结长度相差不大。最后,基于试验数据提出了适用于湿粘结界面的剪切滑移本构模型。

关键词:湿粘结;界面;粘结;有效粘结长度;断裂能

中图分类号:TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)03-0074-06

Experimental Analysis of Shear Performance of Wet-bonding Interface between FRP Plate and Concrete

ZHANG Pu, ZHU Hong, CHEN Quan, MENG Shao-ping, LIU Xiao-yan

(a. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education;

b. International Institute for Urban Systems Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

Abstract: By adopting seven kinds of adhesive resins, the mechanical properties of the interface between pultruded Basalt fiber reinforced polymer plates and cast-in-place concrete is studied according to two groups of stretching double-shear test. And it is compared with the dry-bonding interface between BFRP plates and the precast concrete. Further study is conducted by comparing the damage features, load-displacement curves, effective bond length, bond slip relationship and interface fracture energy between the two interfaces. It is found that the effective bond length of the two interfaces are similar, but the bond strength of the wet-bonding is about half of the dry-bonding. Finally, the shear stress-slip model is proposed for the wet-bonding interface based on the experimental data.

Key words: wet-bonding; interfaces; bond; effective bond length; fracture energy

湿粘结界面以及湿粘结与剪力键的综合界面是 FRP-混凝土组合梁中经常采用的界面形式,它是先在 FRP 模板表面上刷一层粘结剂,在粘结剂开始发粘但是尚未固化时浇筑混凝土形成界面的一种方法^[1-6]。干粘结是相对于湿粘结而言的,是指 FRP 板材与预制混凝土之间通过树脂粘结形成界面的方式。与干粘结相比,湿粘结具有施工方便快速的优

点。该文拟对湿粘结界面的性能进行研究,并和干粘结界面进行比较。

目前已有不少学者对湿粘结进行了研究。1995 年,Deskovic 创新设计的 FRP 型材-混凝土组合梁中率先使用了这种界面方式,然而湿粘结界面的组合梁发生了剥离破坏^[7]。1998 年,Canning 等人通过 FRP 组合梁的受弯试验比较了 6 种界面方式的

收稿日期:2010-11-24

基金项目:国家十一五支撑计划项目(2006BAJ03B07);国家自然科学基金资助项目(50908045)

作者简介:张 普(1982-),男,博士生,主要从事 FRP 材料在土木工程中的应用研究,(E-mail)zhp1243@163.com。

朱 虹(通讯作者),女,博士,副教授,(E-mail)seuzhuhong@gmail.com。

效果,结果表明采用环氧树脂的湿粘界面效果略差于干粘,但是考虑到新建组合结构的实际施工,湿粘却是最实用的界面方式^[8]。接着, J. Hulatt^[9]、邵一心、吴智深、朱海棠等人^[1-4]对湿粘界面承载力进行了试验研究。然而,不同研究者的研究结果仍然存在较大差异,其主要原因是不同的研究者采用的树脂不同;其次,不同的混凝土强度、FRP板材以及施工方法也会对结果产生影响。

为了减少FRP板的制作工艺和混凝土强度对界面性能的影响,该文统一采用拉挤成型的玄武岩纤维(Basalt fiber reinforced polymer, BFRP)复合板,并在同一批次中采用相同的混凝土等级。通过2批BFRP板-混凝土湿粘界面的双剪试验研究,比较了7种不同的粘结树脂的湿粘性能,并与干粘进行了对比。研究表明,湿粘界面的粘结效果不如干粘界面,前者的粘结强度仅为后者的1/2~2/3,但2种界面的有效粘结长度相差不多。与干粘相比,湿粘具有施工方便快速的优点,可以灵活的配合使用剪力键以获得超过干粘的粘结性能^[6],因而仍然具有大规模应用的潜力。

1 试验研究

试验试件的制作方法尺寸参数遵照此类试验常采用的日本相关规程^[10]的规定。采用的双剪试件尺寸以及BFRP板上的应变片布置见图1。从加载端到自由端的应变片编号依次为0、1、…、7。双剪试件为100 mm×100 mm×500 mm的混凝土棱柱体,中间用木块隔开,棱柱体中心的螺栓在木块处断开。试件侧面布置位移计以测量2块混凝土间的相对位移。双剪试件的2个面分别记为A面和B面。

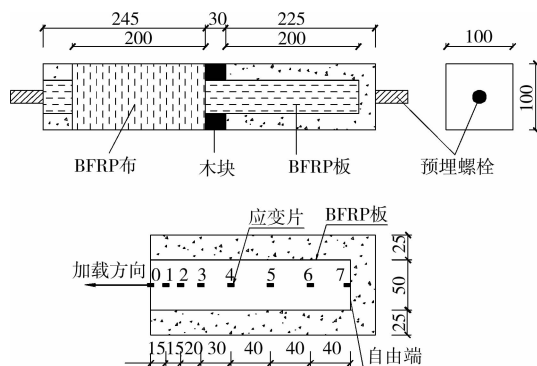


图1 双剪试件尺寸及应变片位置示意图

所有双剪试件均采用钢模制作。湿粘试件的制作方法为:先将BFRP板材放入钢模中,固定BFRP板位置,在BFRP板上刷粘结树脂,然后放置预埋螺栓,浇筑混凝土,振捣并养护成型。干粘试件

的制作方法为先将混凝土试件养护成型,然后基面处理,刷底涂树脂、找平树脂和粘结树脂,最后粘贴BFRP板。

设计了2批次BFRP板材-混凝土湿粘界面的双剪试验来研究湿粘界面性能。第1批试验测试承载力初步比较6种不同粘结树脂的湿粘性能。在此基础上,限定3种类型的胶,其中1种类型为新增,通过测试极限承载力、应变和变形,完成了第2批12个试件的双剪试验,并深入分析了湿粘界面的性能。BFRP板的材性见表1。2批次双剪试件的试验参数见表2、表3。第1批混凝土强度46.4 MPa;第2批混凝土强度40.9 MPa。试验装置以及数据采集系统见图2;试验加载制度采用按位移加载控制,加载速度为2 mm/min。



图2 试验装置以及数据采集系统

表1 BFRP板参数

宽度/mm	厚度/mm	f_u /MPa	E_t /GPa	$\epsilon_{tu}/\mu\epsilon$
50	1.51	1 048.8	39.5	26 550

表2 第1批双剪试验参数与结果

试件编号	粘结方式	粘纤维板用胶	试件数量	破坏特征	极限承载力/kN
DB	干粘	NG	1	I	26.10
LK	湿粘	Lica130	1	II	11.56
CH	湿粘	CH-1A	1	II	9.27
FRS	湿粘	FRS-CB	1	II	11.42
FCS	湿粘	FCS	1	II	11.29
NG	湿粘	NG	1	II	14.42
Sika	湿粘	Sikadur-30	2	II	12.27

2 试验结果分析

2.1 破坏特征

干粘与湿粘界面破坏特征对比见图3、表2和表3。图3a)为干粘界面破坏特征,图3b)和图3c)为2种不同树脂的湿粘界面破坏特征。构件上的A表示A面破坏,B表示B面破坏。由图3可见,2种界面的破坏模式有所不同,干粘能够粘下一层混凝土,加载端部粘下块状混凝土,表现为混凝土层的破坏(特征I);而湿粘只能粘下一层砂浆,

加载端部未能粘下块状混凝土,表现为胶层与混凝土界面的破坏(特征 II)。采用不同粘结树脂的湿粘结界面具有相似的破坏特征。

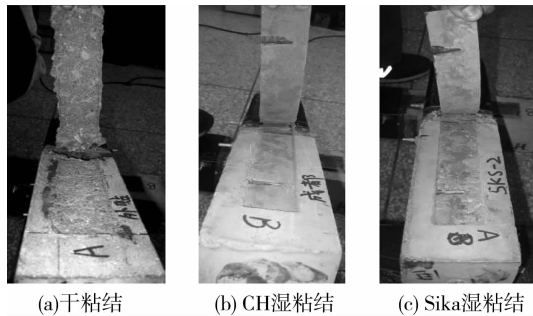


图 3 干粘结与湿粘结破坏特征

2.2 荷载位移曲线

各试件的荷载位移曲线见图 4,横坐标为侧面 2 个位移计读数的平均值,纵坐标为整个试件的承载力。从图 4 和表 3 可知:第 1 批中 6 种不同树脂的湿粘结界面承载力略有差别,其中 NG 胶的承载力为 14.42 kN, CH-1A 胶的承载力最小为 9.27 kN;第 2 批中采用 3 种不同粘结树脂的湿粘结界面承载力略有差别,其中 SY 胶和 NG 胶界面的承载力较为接近,分别为 18.79 kN 和 18.69 kN,而 FRS-CB 胶湿粘结界面的承载力只有 15.42 kN。湿粘结界面的承载力和延性不如干粘结。第 1 批中湿粘结的平均承载力为干粘结的 0.36~0.56 倍,第 2 批中湿粘结的平均承载力为干粘结的 0.56~0.68 倍。这种差异主要是由于 2 批次所采用的湿粘结树脂和混凝土强度不同而引起的。

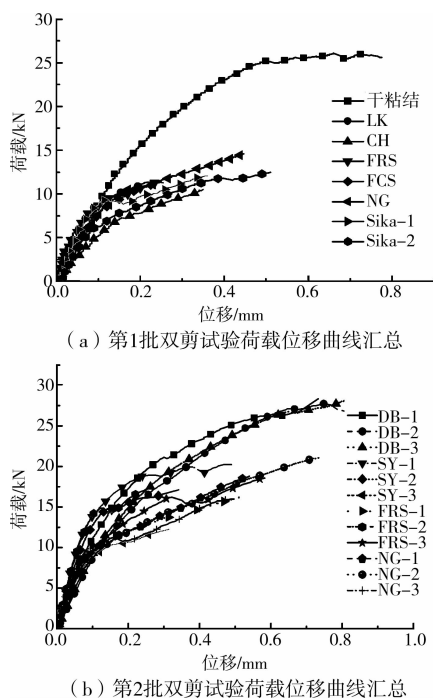


图 4 荷载位移曲线汇总

2.3 有效粘结长度和平均粘结强度

通过 BFRP 板上不同位置处的应变片读数可以得到应变分布图。湿粘结和干粘结的应变分布图具有相同的变化规律。荷载较小时,只有加载端附近的 FRP 承受荷载,而加载端附近的应变分布基本呈现线性分布;随着荷载的增大,参与受力的 FRP 长度增加,靠近加载端的应变增长。当参与受力的 FRP 长度达到有效锚固长度的长度后,荷载不再增加,加载点处的应变达到峰值,随后应变峰值点向自由端移动,剥离从加载端向自由端发展。

由于篇幅所限,文中仅列出几个典型的应变分布图(图 5)。由图 5 可知,湿粘结和干粘结 2 种界面方式的应变分布有一定的相似性,但是峰值应变有较大差别。湿粘结界面的应变峰值在 3 500 $\mu\epsilon$ 左右,而干粘结的应变峰值一般在 4 700 $\mu\epsilon$ 左右,这也是干粘结界面承载力高于湿粘结界面的原因。

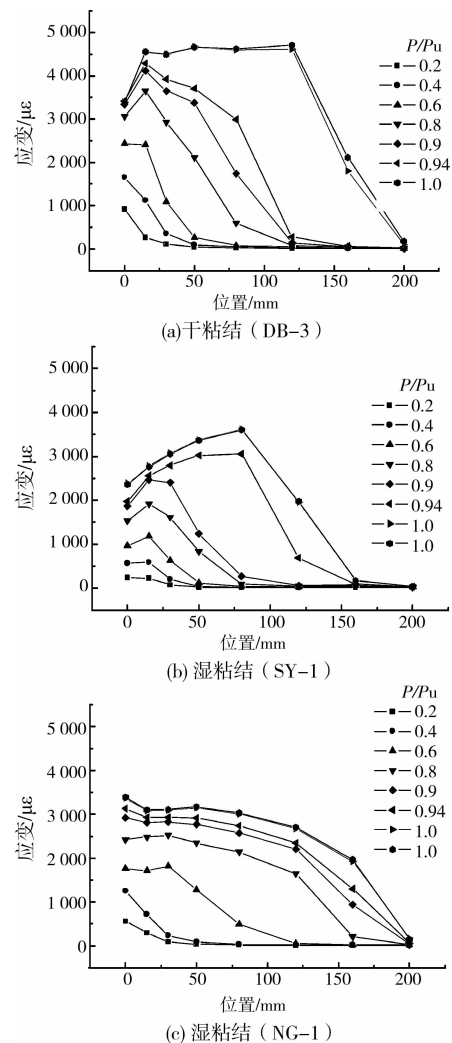


图 5 第 2 批试件的应变分布图

粘结界面的一个重要特点是其存在一个有效粘结长度,当粘结长度超过这个值,界面的承载力将不

再提高。目前有效粘结长度的计算方法没有统一的标准;文献[11]中有效粘结长度的定义是应变分布曲线上从加载点到应变趋近于零的点之间的距离;在达到开裂荷载之前,有效粘结长度保持为常数,开裂之后,有效粘结长度线性增大。采用文献[11]中的方法,取初始有效粘结长度为其计算有效粘结长度,其值见表 3。由表 3 知,湿粘结合界面的有效粘结长度略大于干粘结合界面,约为干粘结合的 1.03~1.16

倍。所有试件的粘结长度在 60~81.6 mm 之间。得到有效粘结长度以后,平均粘结强度可以按照式(1)计算,计算结果见表 3。可见,湿粘结合的平均剪切粘结强度约为干粘结合的 1/2~2/3。

$$\tau_m = \frac{F}{2bl_e} \quad (1)$$

式中, τ_m 为平均剪切粘结强度; F 为双剪试件的承载力; b 为 FRP 板宽度; l_e 为 FRP 板与混凝土界面的有效粘结长度。

表 3 第 2 批双剪试验参数与结果

粘结方式	试件编号	纤维板用胶	破坏特征	极限承载力/kN		极限位移/mm		有效粘结长度/mm		粘结强度/MPa		最大剪应力/MPa		最大滑移/mm		$G_f/(N \cdot m^{-1})$	
				S	AV	S	AV	S	AV	S	AV	S	AV	S	AV		
干粘结合	DB-1		I	26.89		0.691		61.2		8.78		4.90		0.631		0.63	
	DB-2	FRS	I	27.74	27.67	0.876	0.835	67.2	65.0	8.25	8.60	5.62	5.26	0.539	0.612	0.66	0.65
	DB-3		I	28.40		0.937		64.7		8.77		5.26		0.650		0.67	
湿粘结合	SY-1		II	20.30		0.489		76.5		5.31		2.975		0.409		0.35	
	SY-2	SY	II	17.35	18.79	0.342	0.471	81.6	75.3	4.25	5.03	1.99	2.71	0.252	0.355	0.26	0.30
	SY-3		II	18.72		0.582		67.9		5.52		3.175		0.404		0.30	
湿粘结合	FRS-1		II	16.40		0.516		76.8		4.27		2.38		0.358		0.23	
	FRS-2	FRS	II	17.60	15.42	0.261	0.364	71.9	72	4.89	4.27	1.98	2.28	—	0.267	0.26	0.21
	FRS-3		II	12.30		0.314		67.2		3.66		2.5		0.176		0.13	
湿粘结合	NG-1		II	19.00		0.540		59.5		6.37		2.755		0.447		0.31	
	NG-2	NG	II	21.00	18.69	0.735	0.590	72.8	67.1	5.77	5.60	2.35	2.77	0.461	0.424	0.38	0.30
	NG-3		II	16.10		0.495		69.1		4.66		3.215		0.365		0.22	

注: S 代表单个试件的试验值; AV 代表各试件平均值;

2.4 粘结滑移关系

拉伸剪切试验加载的过程中, FRP 和混凝土的变形并不同步, FRP 上的应变发展较快, 而混凝土上的应变发展较慢, 这种变形的不协调将在界面层产生剪应力。

应变片各点间的粘结剪应力按下式计算^[12]:

$$\tau_{b,i} = -\frac{(\epsilon_{f,i} - \epsilon_{f,i-1})t_f E_f}{\Delta l_{b,i}}, i = 0, 1, \dots, 7 \quad (2)$$

式中, $\tau_{b,i}$ 为 i 和 $i-1$ 点间的平均粘结剪应力; $\epsilon_{f,i}$ 为 i 点处的应变值; $\Delta l_{b,i}$ 为 i 和 $i-1$ 点的间距; t_f 、 E_f 分别为 FRP 板的厚度和弹模。

应变片位置处各点的滑移量按照下式计算:

$$S_i = S_{i-1} - (\delta_{f,i} - \delta_{m,i}) \approx S_{i-1} - \delta_{f,i}, i = 0, 1, \dots, 7 \quad (3)$$

$$\delta_{f,i} = \frac{\epsilon_{f,i} - \epsilon_{f,i-1}}{2} \Delta l_{b,i} + \epsilon_{f,i-1} \Delta l_{b,i} \quad (4)$$

式中, S_i 为 i 点处的滑移量, $S_7 = 0$; $\delta_{f,i}$ 为 i 点处 FRP 板的伸长量; $\delta_{m,i}$ 为 i 点处混凝土块的伸长量。

按照上式计算得到的最大粘结剪应力和最大的滑移值见表 3。由表 3 可知, 干粘结合的最大粘结剪应力为 5.62 MPa, 约为湿粘结合最大剪应力的 2 倍。

干粘结合的滑移值在 0.61 mm 左右, 而湿粘结合的滑移值在 0.27~0.42 mm 之间。图 6 给出了有代表性的湿粘结合与干粘结合剪应力-滑移 (τ - s) 关系曲线, 并和 2 个现有的粘结合滑移本构模型 (Nakaba 模型^[12]、Lu 模型^[13-16]) 进行了对比。由图 6 可知: Nakaba 模型曲线与干粘结合界面的试验结果较为接近, 误差较小; 而与湿粘结合界面的试验曲线相差较远, 因此不能适用于湿粘结合界面。而 Lu 模型曲线则与湿粘结合试验的剪切滑移曲线相对比较接近, 而且两者的形状非常相似, 但该模型过高估计了湿粘结合的最大剪应力。Lu 模型的表达式如下:

$$\tau = \tau_{\max} \sqrt{s/s_0} \quad s \leq s_0 \quad (5)$$

$$\tau = \tau_{\max} e^{-a(s/s_0-1)} \quad s > s_0 \quad (6)$$

$$\tau_{\max} = 1.5\beta_w f_t \quad (7)$$

$$s_0 = 0.0195\beta_w f_t \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{G_f}{\tau_{\max} s_0} - \frac{2}{3}} \quad (9)$$

式中, τ_{\max} 为最大界面剪应力; f_t 为混凝土抗拉强度; β_w 为 FRP 板-混凝土宽度影响系数。

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - b_t/b_c}{1.25 + b_t/b_c}} \quad (10)$$

式中, b_f 为 FRP 板宽度; b_c 为混凝土棱柱体的宽度。

$$G_f = 0.308\beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad (11)$$

式中, G_f 为 FRP 板与混凝土粘结界面的断裂能理论值。

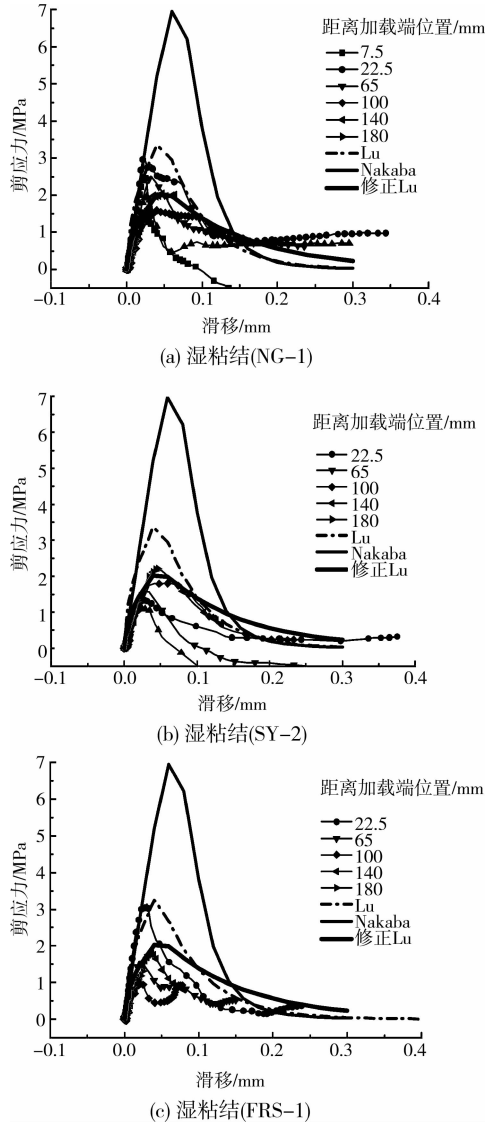


图 6 剪应力-滑移关系曲线

采用试验得到的湿粘结界面最大剪应力平均值对 Lu 模型中的最大剪应力折减,即最大剪应力按照式(12)进行计算;其最大断裂能按照式(13)计算,而其余参数计算仍然采用 Lu 模型的计算方法。为了便于对比,将上述修正后的计算方法称为修正 Lu 模型。

$$\tau_{\max} = 1.5\varphi_1\beta_w f_t \quad (12)$$

$$G_f = 0.308\varphi_2\beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad (13)$$

$$s_0 = 0.0195\varphi_3\beta_w f_t \quad (14)$$

式中, φ_1 为最大剪应力折减系数; φ_2 为断裂能折减系数; φ_3 为峰值滑移量修正系数。

基于试验数据的分析,湿粘结界面修正 Lu 模型的修正系数可按照如下取值: $\varphi_1 = 0.6$ 、 $\varphi_2 = 0.8$

和 $\varphi_3 = 1.0$ 。采用 NG 树脂、SY 树脂和 FRS 树脂的湿粘结典型试件的粘结滑移试验与理论曲线对比见图 6;最大剪应力理论与试验比较见图 7;由图 6 和图 7 可见,修正后的 Lu 模型能够较好的预测湿粘结界面的剪应力滑移关系。

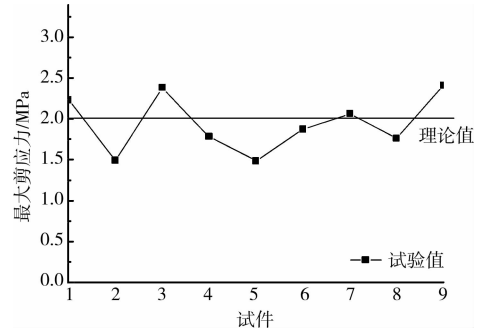


图 7 最大剪应力试验值与理论值比较

2.5 断裂能

随着荷载的增加,最大剪应力和滑移量逐渐增加,因此界面断裂能也在不断增加。当界面断裂能达到其临界值时,界面层剪应力较大处的初始缺陷将产生不稳定扩展,最终发生界面的剥离。最大界面断裂能 G_f 为界面粘结滑移曲线所包含的面积。已有研究表明,FRP 混凝土界面承载力与 G_f 的平方根成正比,而与粘结滑移曲线的具体形式无关。根据已有的基于断裂力学的理论推导粘结界面的断裂能可按照下式计算^[17]:

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{2b_f^2 E_f t_f} \quad (15)$$

式中, P_{\max} 为 FRP 板与混凝土之间单面剪切的承载力,在双剪试件中 $P_{\max} = F/2$;

按照式(15)计算得到的断裂能见表 3。由表 3 可知,湿粘结界面的断裂能的平均值在 0.21~0.30 N/m 之间;而由经验公式(13)预测得到的第 2 批湿粘结试件的理论值为 0.245 N/m;可见式(13)能够较好的预测湿粘结界面断裂能。由表 3 可知,湿粘结界面的断裂能仅为干粘结断裂能的 1/3 左右。

2.6 湿粘结与干粘结剪切性能存在差异机理分析

FRP 片材与混凝土之间的粘结作用力在 FRP 片材、粘结剂和梁下表面混凝土 3 层材料中有效传递是保证 FRP 和混凝土共同工作的基础。粘结失效的实质是由于在 FRP、混凝土表层以及两者之间的粘结材料层中不可避免地存在细观尺度上的初始缺陷(如裂纹、孔隙、夹层等),在荷载作用下,当断裂能达到其临界值时,这些初始缺陷就将产生不稳定扩展,最终导致粘结失效^[18]。对于干粘结,在施工可靠的情况下,由于工程上常用粘结剂的抗剪强度一般高于混凝土,故 FRP 片材与混凝土之间的界面剥离通常是发生于粘结剂与混凝土界面区靠近混凝土

土的一侧。剥离破坏主要发生在粘结胶未浸润的混凝土薄层中。界面发生剥离行为主要是因为混凝土的抗拉强度达到极限而产生裂缝^[18]。而对于湿粘粘界面,粘结剂与新浇混凝土作用,同时固化,混凝土中的水分容易对粘结树脂的固化产生影响,更容易产生初始缺陷,界面发生剥离主要是因为胶层与混凝土表面砂浆面层的粘结失效,因此其界面粘结强度较低。

3 结 论

1)湿粘粘界面承载力与混凝土强度、粘结树脂、纤维材性、温度湿度以及施工质量等因素有关。就所采用的7种环氧树脂而言,采用不同树脂的湿粘粘界面承载力有所差别,其中SY胶和NG胶的湿粘粘性能最优。

2)拉挤成型BFRP板与混凝土湿粘粘界面和干粘粘界面相比,具有如下特点:湿粘粘的极限承载力、最大剪应力和最大滑移量均明显小于干粘粘界面;有效粘粘长度略大于干粘粘;平均粘粘强度约为干粘粘的1/2~2/3倍;断裂能为干粘粘的1/3左右。

3)基于湿粘粘界面的试验数据对Lu模型进行了修正,修正后的Lu模型能够较好地预测湿粘粘界面的剪切滑移关系。

参考文献:

- [1] ZHISHEN WU, WENXIAO BI, NAOKI SAKUMA. Innovative externally bonded FRP-concrete hybrid flexural members[J]. *Composite Structures*, 2006, 72(3): 289-300.
- [2] SHAO Y, WU Z S, BIAN J. Wet-bonding between FRP laminates and cast-in-place concrete [C]// *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Hong Kong, P. R. China, 2005: 91-96.
- [3] LI L, SHAO Y X, WU Z S. Durability of wet bond of hybrid laminates to cast-in-place concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(2): 209-216.
- [4] 田小岩. HFRP及其与现浇混凝土粘聚力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007.
- [5] ZHU H T, ZHANG Q M, TIAN X Y, et al. Analysis on effective bonding length between hybrid fiber reinforced plastics and casting-in-place concrete[G]// XU B, XIAO Y, RU J P, et al. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts*. 2008: 766-769.
- [6] 刘晓艳. FRP-混凝土组合梁受弯性能试验研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2010: 30-35.
- [7] CANNING L, HOLLAWAY L, THOME A M. An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam [J]. *Construction and Building Materials*, 1999, 13(8): 417-426.
- [8] NORDIN H, TALJSTEN B. Testing of hybrid FRP composite beams in bending[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2004, 35(1): 27-33.
- [9] HULATT J, HOLLAWAY L, THORNE A. Short term testing of hybrid T beam made of new prepreg material[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, 7(2): 135-144.
- [10] JSCE Working Group on Retrofit Design of Concrete Structures in Specification Revision Committee. *Guidelines for Retrofit of Concrete Structures* [M]. Tokyo: JSCE Concrete Committee, 1999.
- [11] BIZINDAVYI L, NEALE K W. Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1999, 3(4): 153-160.
- [12] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(3): 359-367.
- [13] 陆新征, 谭壮, 叶列平, 等. FRP布-混凝土界面粘粘性能的有限元分析[J]. *工程力学*, 2004, 21(6): 45-50. LU XIN-ZHENG, TAN ZHUANG, YIE LIE-PING, et al. Finite element analysis of debonding at the interface between FRP sheet and concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(6): 45-50.
- [14] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP片材与混凝土粘粘性能的精细有限元分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(5): 74-82. LU XIN-ZHENG, YE LIE-PING, TENG JIN-GUANG, et al. Meso-scale finite element analysis of FRP-to-concrete bond behavior[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(5): 74-82.
- [15] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘粘滑移本构模型[J]. *建筑结构学报*, 2005, (4): 10-18. LU XIN-ZHENG, YE LIE-PING, TENG JIN-GUANG, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 10-18.
- [16] LU X Z, YE L P, TENG J G, et al. Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(4): 564-575.
- [17] WU Z S, YUAN H, YOSHIZAWA H, et al. Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface[J]. *ACISP*, 2001: 201-208, 133-152.
- [18] 郭樟根, 孙伟民, 闵珍. FRP与混凝土界面粘粘性能的试验研究[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2006, 28(6): 37-42. GUO ZHANG-GEN, SUN WEI-MIN, MIN ZHEN. Experimental study on bond behavior between FRP-concrete interface[J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, 28(6): 37-42.