

FRP-螺栓联合加固 RC 梁粘结性能试验研究

张 峰¹, 牛平霞¹, 李树忱¹, 孙秋彦²

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 华北水利水电学院 土木与交通学院, 郑州 450011)

摘 要:通过对 17 根跨中留有预切缝的试验梁进行破坏性加载试验,研究了 FRP-螺栓联合加固技术的粘结性能、锚固间距和合理锚固长度。结果表明,HB-FRP(FRP-锚钉联合加固技术)体系较 EB-FRP(外贴 FRP 加固法)体系的延性、承载力、FRP 的剥离应力等都有较大的提高。在试验数据及理论分析的基础上,提出了 HB-FRP 和 EB-FRP 中部裂缝引起的剥离强度计算公式以及较为合理的锚固间距估算公式,计算结果与试验结果吻合较好。所得结果可为联合加固的进一步研究及工程上的应用提供一定的依据。

关键词:FRP-螺栓联合加固;纤维增强复合材料;粘结性能;锚固间距;合理锚固长度

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0007-07

Experimental Analysis on Bonding Behavior of Hybrid-Bonding of FRP

ZHANG Feng¹, NIU Ping-xia¹, LI Shu-chen¹, SUN Qin-yan²

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250061, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, P. R. China)

Abstract: In order to study the bond behavior, anchorage space and reasonable anchorage length of hybrid-bonding of FRP, the destructive tests of 17 experiment beams which with mid-span pre-cutting fissures have been done. Compared with EB-FRP system, it is found that HB-FRP system is improved a lot in ductility, bearing capacity, FRP's peeling stress and so on. The formulas for calculating HB-FRP and EB-FRP's induced peeling strength by middle crack and a more reasonable estimation formula for anchorage space are presented based on the experimental data and theoretical analysis. Calculating results are coincided with experimental results, which can serve as a reference for further researches and engineering applications.

Key words: hybrid-bonding of FRP; fiber reinforced plastics (FRP); bonding behavior; anchorage space; reasonable anchorage length

利用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic Polymer,简称 FRP)对混凝土构件进行加固、改造和维修在工程实际中得到了广泛的认可。外贴 FRP 加固法(EB-FRP 加固法)是目前使用最广泛、操作最为灵活、同时也是最易掌握的一种加固方法^[1-3]。但是外贴 FRP 加固法有 2 个致命的缺陷:一是 FRP 材料与原结构的过早剥离^[4-5],使得 FRP 的利用率仅有

15%~35%^[6];二是这种加固方法的破坏模式趋近于脆性^[7-8]。为了解决这 2 个问题,香港城市大学提出了 FRP-锚钉联合加固(HB-FRP)的方法,该技术通过在混凝土构件中 FRP 两侧打设钢钉,并通过机械紧固件与 FRP 粘结在一起,以阻止 FRP 与梁底的分离,进而改善脆性的破坏模式^[9]。

FRP 加固构件早期剥离的界面应力传递状态

收稿日期:2010-05-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50539080,50727904);973 计划项目(2010CB732002,2007CB209407);高等学校博士学科点专项科研基金(20100131120042)

作者简介:张峰(1978-),男,博士,主要从事桥梁加固理论研究,(E-mail)zhangfeng2008@sdu.edu.cn。

之一就是中部弯曲裂缝引起的界面剥离[4],因此中部剥离问题在 FRP 加固混凝土构件中是非常重要的。目前主要通过正拉试验、单剪试验、双剪试验、修正梁、压剪试验等研究外贴 FRP 加固法、表面内嵌法等加固方法的中部剥离问题^[9-10],对于 FRP-螺栓联合加固技术中部剥离问题的研究非常罕见。该文通过对 17 根留有预切缝的试验梁进行跨中加载试验,研究 FRP-螺栓联合加固技术的粘结性能、锚固间距和合理锚固长度。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了 17 根混凝土试件,分为 2 组。混凝土采用 C40,纵向钢筋和箍筋均采用 HRB335 级钢筋,具体截面尺寸及配筋见图 1。所有试件均用梁底外贴法粘贴 2 层尺寸为 $0.167\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ (厚度 \times 宽度)的 CFRP 布,具体粘贴的长度情况见表 1。试验的主要变化参数有研究段的粘贴长度和锚固件的间距。加固方式中“EB-FRP”是指试验梁采用外贴 FRP 的加固方式、“HB-FRP”是指 FRP-螺栓联合加固同时钢板也粘贴的加固方式。“EB-FRP”试验梁采用间隔 100 mm 的应变片间距来测量 FRP 的应变分布,其余的试件相邻 2 个扣件的两端和中部视具体情况粘贴应变片,详细位置见图 2。锚固件的钢板采用尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的高耐候性钢板;螺栓采用直径为 12 mm 的 35 号高强螺栓,详细尺寸见图 3。

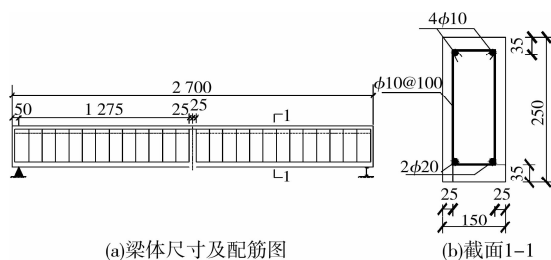


图 1 矩形梁截面尺寸及配筋图

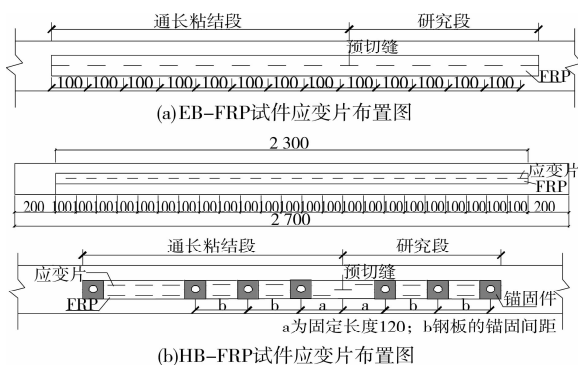


图 2 应变片布置图

表 1 FRP-螺栓联合加固技术试验试件参数

组号	梁号	加固方式	锚固长度/mm	锚固钢板间距/mm
第一组	BM1	EB-FRP	150	
	BM2/BM2-2	HB-FRP	150	150
	BM3	EB-FRP	300	
	BM4/BM4-2	HB-FRP	300	150
	BM5/BM5-2	EB-FRP	450	
	BM6	HB-FRP	450	150
	BM7	EB-FRP	600	
	BM8	HB-FRP	600	150
	BM9	EB-FRP	750	
	BM10	HB-FRP	750	150
第二组	BM8	HB-FRP	600	150
	BM11	HB-FRP	600	225
	BM12/BM12-2	HB-FRP	600	450

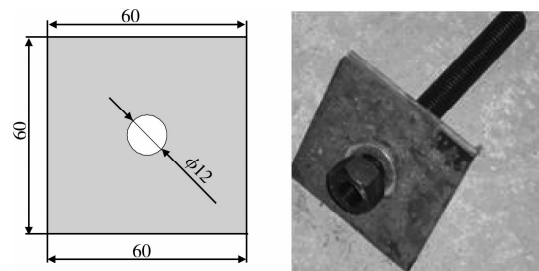


图 3 锚固件尺寸详图

1.2 试件的制作

1.2.1 EB-FRP 试验梁的制作 EB-FRP 试验梁按照湿贴法进行安装。首先对试件表面进行处理,用打磨机将混凝土表面打磨平整,用吹风机除掉表面的杂质,并保持干燥;根据生产商提供的工艺规定配置底层胶(采用 2651-A 和 2651-B 以 2:1 的比例调和均匀),采用滚筒刷将底层胶均匀的涂抹在混凝土表面,静候约 0.5 h,保证下一步工序施工时底层胶指触干燥;在底层树脂表面指触干燥后用找平胶(2614-A 和 2614-B 以 2:1 的比例调和均匀)补平混凝土表面的凹陷部位;待找平胶指触干燥后于粘贴部位涂抹浸渍胶(2654-A 和 2654-B 以 2:1 的比例调和均匀),然后将裁好的碳纤维布用手(带塑料手套)轻压粘贴于需要粘贴的部位,接着采用专用的滚筒顺纤维方向多次滚压,挤除气泡,使浸渍树脂充分浸透碳纤维布;第 1 层 FRP 浸渍胶指触干燥后再重复上一步骤,并在第 2 层 FRP 条上均匀涂抹浸渍胶;加固完成 7 d 后,即可进行加载试验,完成图见图 4。



图4 EB-FRP 试件完成图

1.2.2 HB-FRP 试验梁的制作 HB-FRP 试验梁的制作包括湿贴法及锚固件的安装,EB-FRP 试件的环氧树脂干燥后即可进行锚固件的安装。首先需要在需要安装锚固件的预孔位置放线定位,用直径为 14 mm 钻头的冲击钻预先钻孔,深度约 8 mm;清除孔内杂质;向预钻孔灌注环氧树脂(将环氧树脂和固化剂以 1:1 的比例调和),保证 FRP 与紧固件的粘结区域有一定厚度的环氧树脂;迅速将螺栓置于预钻孔内,并顺序放置钢板、垫片、螺帽;用手动的扭矩扳手对螺栓施加 55 N·m 的扭矩,使钢板与 FRP 紧密连接;根据环氧树脂规定的养护条件养护至终凝时间,即可进行试验,完成图见图 5。



图5 HB-FRP 试件完成图

1.3 试验设计

试验采用梁剪试验方法,在加载梁的底部粘贴 FRP,通过控制梁的构造和钢筋配置来保证梁的裂缝首先出现在跨中,即在梁的跨中截面纵筋不连续,并在受拉区切缝,以精准控制裂缝位置。FRP 布条在研究半跨内按设计粘结长度粘贴锚固,在另半跨内通长粘贴锚固,见图 6。所有试验均为简支,采用锚索测力计(BGK4 900/1 000 kN)作用的跨中静力加载(见图 7),通过 DT615 自动记录各项变化的参数,并用相应的程序计算出荷载值。试验量测内容包括加载大小、挠度、CFRP 的应变,试验应变及挠度(通过安装百分表测得)的数据全部由日本产的 DTS602 数据采集仪自动采集。加载采用手动千斤顶,通过锚索测力计控制加载的大小。

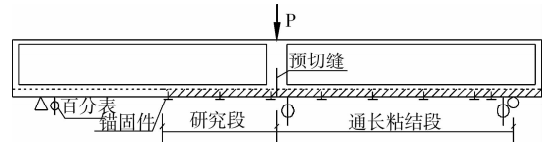


图6 试验示意图

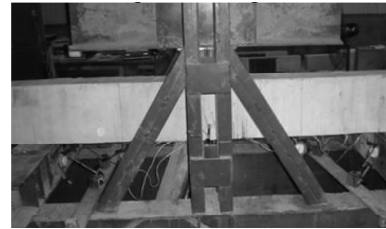


图7 试验装置图

2 试验结果及分析

2.1 荷载—跨中挠度曲线

由图 8 知,对于跨中有预切缝的 EB 和 HB 加固梁,FRP 在预切缝处开始剥离时荷载会略有下降,挠度持续增加;对于相同的 FRP 锚固长度,HB 试件

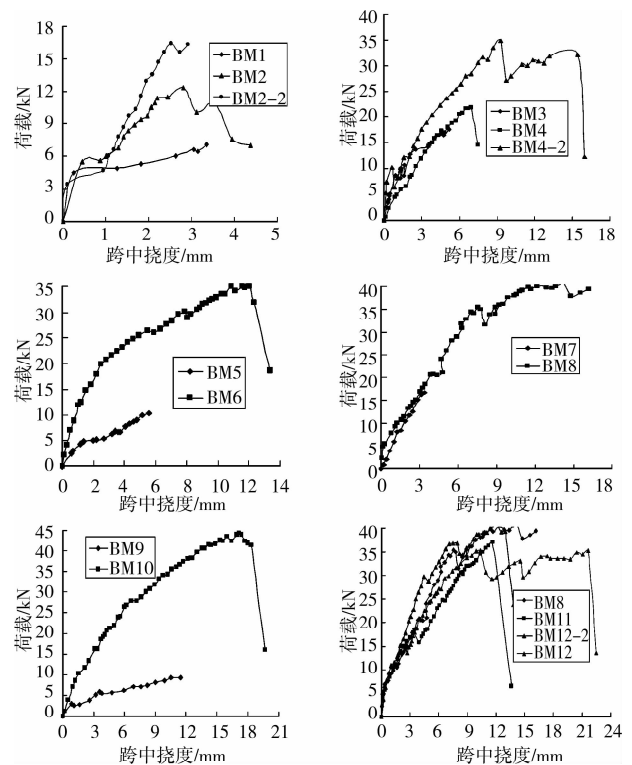


图8 荷载—跨中挠度曲线

的初始剥离荷载与 EB 试件的极限荷载非常接近;HB-FRP 梁相对于 EB-FRP 梁荷载、挠度增量非常显著,这是因为:EB-FRP 梁预切缝处界面剪切力较大,出现应力集中,使得梁出现局部剥离,且迅速向一侧端部扩展(常为较近端);对于 HB-FRP 试件,FRP 在预切缝处发生剥离时,邻近的钢扣件

会迅速阻止剥离的发展,且钢扣件的正压力减缓了 FRP 板的整体纵向滑移,使得试件整体荷载持续增长,若其产生的粘结强度超过了界面剥离的剪切应

力,则破坏表现为其它方面,如 FRP 的拉断、受压区混凝土被压碎及试件的剪切破坏等,这也是试验结果所表现出来的破坏形式,参见表 2。

表 2 FRP-螺栓联合加固技术试验结果

组号	梁号	加固方式	FRP 的有效宽度/mm	锚固长度/mm	锚固间距/mm	极限荷载/kN	控制截面大应力/MPa	应力增值/%	破坏形式
	BM1	EB-FRP	60	150		7.06	829.5	-	AF
	BM2	HB-FRP	60	150	150	12.32	1 070.37	29	AF
	BM2-2	HB-FRP	60	150	150	16.42	1 787.52	115	SF
	BM3	EB-FRP	60	300		17.59	1 228.92	-	AF
	BM4	HB-FRP	43	300	150	21.80	-	-	AF
	BM4-2	HB-FRP	40	300	150	34.90	3 244.5	-	AF
第一组	BM5	EB-FRP	60	450		10.22	1 007.79	-	AF
	BM5-2	EB-FRP	60	450		15.22	1 159.5	-	MF
	BM 6	HB-FRP	40	450	150	34.96	1 353.66	34	AF & TF
	BM7	EB-FRP	60	600		16.67	1 364.79	-	MF
	BM8	HB-FRP	40	600	150	40.56	3 664.71	224	MF & TF
	BM9	EB-FRP	60	750		9.36	759.99	-	MF
	BM10	HB-FRP	40	750	150	44.23	3 151.47	315	TF
	BM8	HB-FRP	40	600	150	40.56	3 664.71	224	MF & TF
第二组	BM11	HB-FRP	40	600	225	37.06	3 341.52	145	MF
	BM12	HB-FRP	45	600	450	35.20	3 109.26	128	MF
	BM12-2	HB-FRP	45	600	450	40.52	2 710.26	99	AF

注:1)AF 为研究段大面积剥离引起的破坏;MF 为通长粘胶段大面积剥离引起的破坏;SF 为混凝土的剪切破坏;TF 为混凝土被拉断;此处的剥离破坏均指混凝土与粘结胶界面的剥离破坏;HB 试件的预钻孔在 FRP 条的中心部位,被打断的 FRP 不再承受拉力,因此 FRP 的有效宽度应为 FRP 的宽度减去被打断的 FRP 宽度。

2)表中控制截面最大应力是指跨中 FRP 在破坏前所测得的最大应力。

2.2 FRP 应变分析

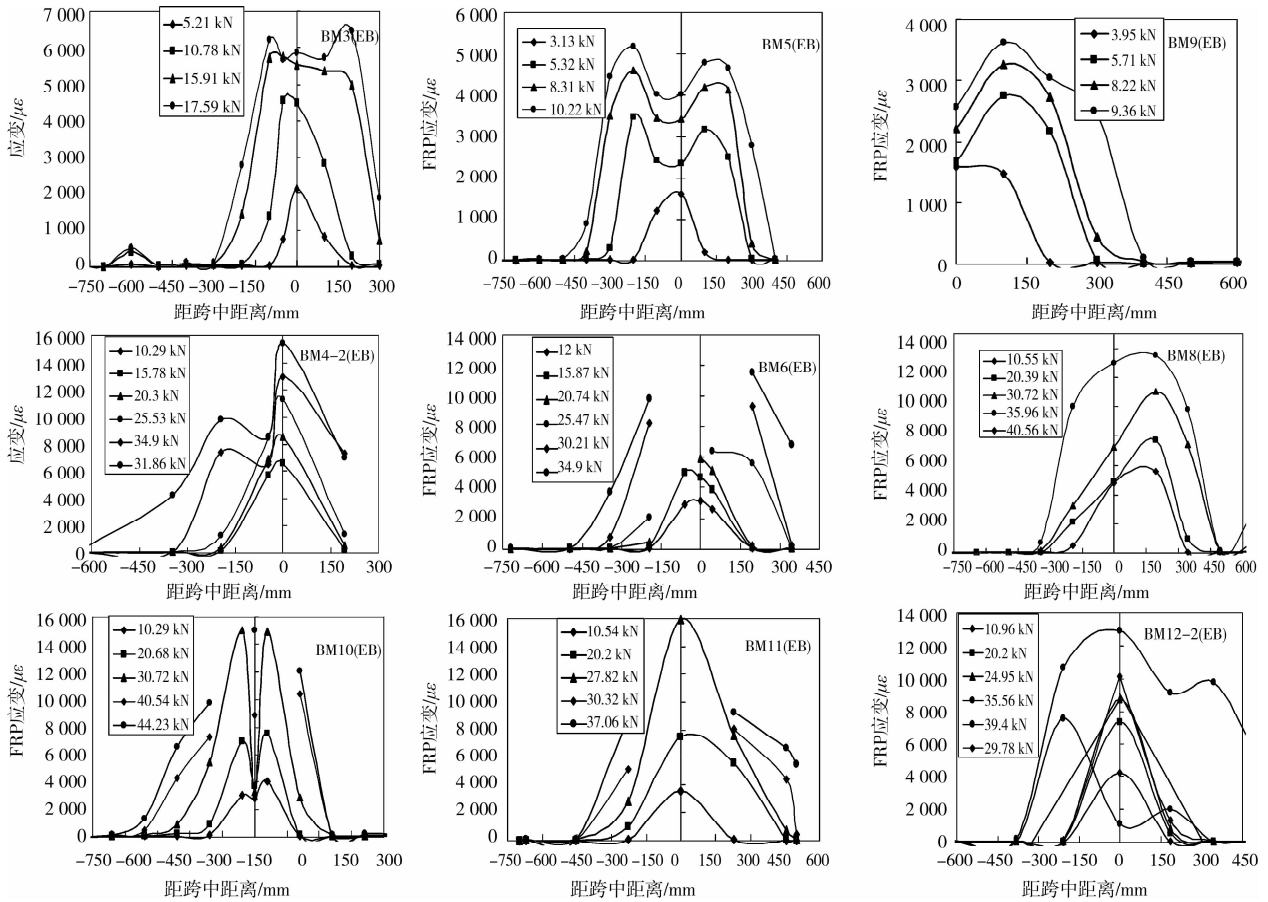
试件梁底 FRP 应变在各荷载阶段沿全梁的分布见图 9,试验梁在极限荷载作用下 FRP 的应变分布见图 10。由分布图知,FRP 在预切缝处的应变最大,所以可认为跨中截面为最危险截面,即控制截面,但是由于试件部分截面存在着应力集中,使得应变分布图有一定的突变,但是这并不影响 FRP 的整体趋势。由表 2 知相同的 FRP 锚固长度,在试件破坏之前,HB-FRP 体系跨中截面的最大剥离应力有较大的提高(129%~415%),平均提高约 246%。

2.3 破坏形式

根据对 FRP 与混凝土粘结性能问题的研究^[11-13],FRP 与混凝土粘结界面的破坏形式主要有 5 种:1)混凝土的剪切破坏;2)FRP 的拉断破坏;3)粘结胶层的剪切破坏;4)FRP 与粘结胶界面的剥离破坏;5)混凝土与粘结胶界面的剥离破坏。该试验

的破坏形式表明,HB 和 EB 试件的破坏形式实质上是一致的,与前期的研究结果非常吻合,参见表 2,试验破坏图见图 11。

FRP 加固混凝土构件的一个重要特点是其存在一个有效粘结长度,当粘结长度超过该有效长度时,FRP 的承载力不再提高^[3]。因此对于该试验,可认为当 FRP 的锚固长度超过其合理的锚固长度时,EB 试件的剥离方向具有不确定性;对于 HB-FRP,当钢板的锚固间距一定时,可预测出也应存在一个较为合理的锚固长度,当超过这个长度后,FRP 的大面积剥离方向具有不确定性,但是随着 FRP 的持续剥离,当 HB 试件产生的粘结强度比剪切应力大时,就会出现 FRP 的拉断、试件的剪切破坏等破坏形式。根据上面的分析,由第一组的试验结果知,EB 构件的合理锚固长度为 300 mm,HB 构件的合理锚固长度为 450 mm。同样,也可预测出对于 FRP 的



注:规定研究段到跨中的距离为正值

图 9 试件的 FRP 板全梁应变分布

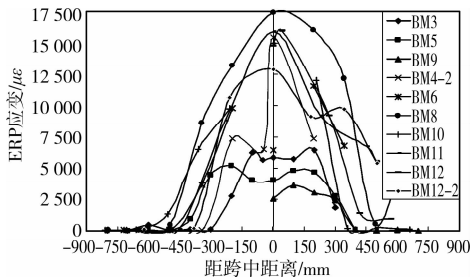


图 10 试验梁极限荷载作用下的 FRP 应变分布

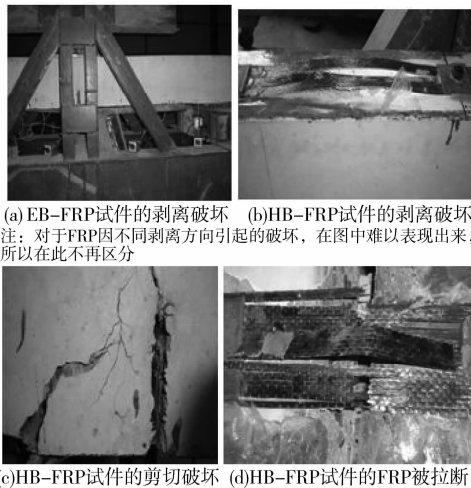


图 11 试验破坏图

某一锚固长度,必然存在一个最为合理的锚固间距,使得 FRP 的利用率最高,即 FRP 被拉断,试验结果表明,锚固间距为 150 mm(锚固长度的 1/4)时,FRP 得以充分利用。

3 中部裂缝引起的剥离强度的计算公式

3.1 EB-FRP 中部裂缝引起的剥离强度的计算公式

EB-FRP 中部裂缝引起的剥离可采用修正的 Chen and Teng 模型^[3],根据试验结果重新确定 α 值,以满足工程实际的需要。中部剥离应力公式如下:

$$\sigma_f = \alpha \beta_l \beta_L \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_{cu}}}{t_f}} \quad (1)$$

$$\beta_f = \sqrt{\frac{(2 - b_f/b_c)}{(1 + b_f/b_c)}} \quad (2)$$

$$\beta_L = 1, \text{ if } L_d \geq L_{eff} + L_a \quad (3)$$

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (4)$$

$$L_a = 2 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \approx 2 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{cu}}}} \quad (5)$$

式中: E_f 为 FRP 片材的弹性模量; t_f 为 FRP 片材的

名义厚度(不考虑树脂基质的厚度); L_d 为 FRP 片材从其充分利用截面到截断位置的长度; β_L 为 FRP 片材长度影响系数; L_{eff} 为 FRP 有效粘结长度; L_a 为锚固长度; β_t 为 FRP 片材宽度影响系数; b_t 为 FRP 片材的宽度; b_c 为混凝土梁底的宽度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度设计值。

由试验结果知合理锚固长度为 300 mm, 根据合

理的锚固长度公式 $L_d = 3 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \approx 3 \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_{cu}}}} = 376$ mm, 实测值与计算值的比值为 0.8, 可见试验值与计算值较为吻合。根据试验及要求的保守程度, 并考虑数据的离散型, 取 $\alpha = 0.55$, 试验值及计算值如表 3。

表 3 EB-FRP 试件中部剥离应力的试验值与计算值的比较

梁号	FRP 应力/MPa		试验值/ 计算值	破坏模式
	计算值	试验值		
BM1	692.62	829.50	1.20	中部剥离
BM3	975.50	1 228.92	1.26	中部剥离
BM5	975.50	1 007.79	1.03	中部剥离
BM5-2	975.50	1 159.5	1.19	中部剥离
BM7	975.50	1 364.79	1.40	中部剥离
BM9	975.50	759.99	0.78	中部剥离

由表 3 知, 除了一个计算值略大于试验值外, 其它所有的计算值都是安全的, 所以取 $\alpha = 0.55$ 用于计算 EB-FRP 中部裂缝引起的剥离应力下限值是合适的。

3.2 HB-FRP 中部裂缝引起的剥离强度计算公式

HB-FRP 系统的传力机制与 EB-FRP 的不同, 它不仅包括 FRP-混凝土界面层间剪力, 还包括 FRP-机械紧固件间的层间剪力和剥离混凝土-混凝土基底摩力, 见图 12。前期的资料表明^[11-13]: FRP-机械紧固件间的层间剪力不是很大, 可是剥离剥离混凝土-混凝土基底摩擦力是提高 FRP 加固混凝土结构的最主要的因素。

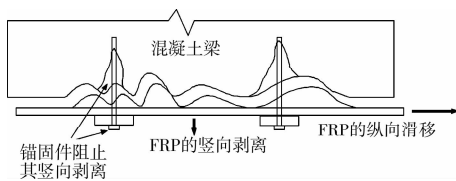


图 12 HB-FRP 加固作用机理示意图

由荷载-跨中挠度曲线的对比可知, 对于跨中有预切缝且纵向钢筋在跨中被切断的混凝土梁, HB-FRP 系统较 EB-FRP 系统的荷载增长值可认为是

从前者的初始剥离(HB 的初始剥离荷载与相应的 EB 极限荷载非常接近)开始的, 因此可近似的认为 HB-FRP 体系的粘结强度包含了 EB-FRP 体系的粘结强度以及紧固件体系增长的粘结强度。因此, HB-FRP 体系承载力计算可分为 2 个步骤: 1) 按 EB-FRP 加固梁中部剥离公式计算破坏时 FRP 板剥离应力 $\sigma_{f,EB}$ 计算; 2) 推导锚固件个数与 FRP 剥离应力增长值 Δ 关系。

步骤 1) 可按修正的 Chen and Teng 模型, 但是在 HB-FRP 体系中 EB-FRP 的粘结强度仅是其中的一部分, 当达到 EB-FRP 粘结强度的粘结强度时, 试件并不会立即破坏, 因此需对公式的系数进行修正, 以满足计算的需要。建议取 $\alpha = 1.0$, 由试验结果知 HB-FRP 体系的合理锚固长度为 450 mm。因此应注意公式中 FRP 长度影响系数 β_L 的选取。

参考单剪试验的分析方法^[14], 对第二组试验梁的结果进行分析, 见图 13。由图 13 知, HB-FRP 加固梁 FRP 应力增长值基本与紧固件的个数呈线性关系, 由斜率可知, 每个扣件的增长量为 1 013.1 MPa。

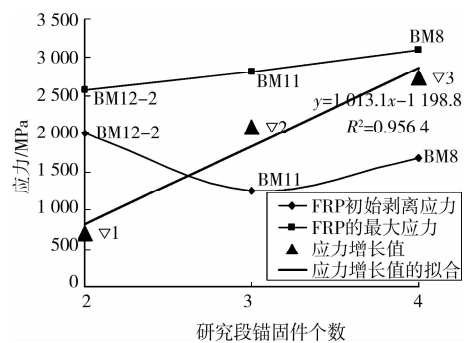


图 13 FRP 应力增量同研究段锚固件个数的关系

通过以上的分析, 可初步建立 HB-FRP 的中部剥离极限应力公式:

$$\sigma_{HB} = \alpha \beta_L \beta_t \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_{cu}}}{t_f}} + 1 013.1nk \quad (6)$$

$$\beta_t = \sqrt{\frac{(2 - b_t/b_c)}{(1 + b_t/b_c)}} \quad (7)$$

$$\beta_L = 1, \text{ if } L_d \geq L_{eff} + L_a \quad (8)$$

式中: α 取 1.0; k 取 0.9; n 为研究段的锚固件的个数。试验值与计算值的比较见表 4。

由表 4 知, 除了 BM10(该试件没有经过大面积的 FRP 剥离, 而是 FRP 直接被拉断)外, 其它所有的计算值都是安全的, 所以取 $\alpha = 1.0$, k 取 0.9, 用于计算 HB-FRP 中部裂缝引起的剥离应力下限值是合适的。由于公式推导的基础是跨中裂缝引起的剥离, 因此该公式仅适用由中部裂缝剥离(至少是大

面积剥离)导致的试件破坏的情况。

表4 HB-FRP试件中部剥离应力的试验值与计算值的比较

梁号	FRP 应力/MPa		试验值/ 计算值	破坏模式
	计算值	试验值		
BM2	3 484	2 288.81	1.52	中部剥离
BM4-2	3 244.5	2 688.08	1.21	中部剥离
BM10	3 151.47	3 811.01	0.83	FRP被拉断
BM8	3 664.71	3 436.70	1.07	中部剥离 & FRP被拉断
BM11	3 341.52	3 062.39	1.09	中部剥离 & 混凝土的剪切破坏
BM12-2	2 710.26	2 688.08	1.01	中部剥离

4 结论

通过对17根留有预切缝的试验梁进行跨中加载试验,研究FRP-螺栓联合加固技术的粘结性能、锚固间距和合理锚固长度。在试验数据及理论分析的基础上得出以下结论:

1)对于跨中有预切缝的EB和HB试件,FRP在预切缝处开始剥离时荷载会略有下降,挠度持续增加,在荷载-挠度曲线里表现为明显的突变。

2)FRP的锚固长度相同时,HB试件的初始剥离荷载与EB试件的极限荷载非常接近;HB-FRP梁相对于EB-FRP梁荷载、挠度增量非常显著。

3)合理锚固长度可由 $L_d = 3 \sqrt{\frac{E_{it}t_f}{f_{cu}}}$ 来估算;锚固间距约为合理锚固长度的1/4时,FRP的利用率较高。

参考文献:

- [1] LAWRENCE CBANK, DUSHYANT, ARORA. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP strips[J]. Composite Structure, 2007, 79: 180-191.
- [2] CECS 146:2003. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规范[S].
- [3] 李松辉, 赵国藩, 王松根. 粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 89-92.
- LI SONG-HUI, ZHAO GUO-FAN, WANG SONG-GEN. Experimental study on precracked RC beams strengthened with CFRP[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 89-92.
- [4] 腾锦光, 李荣, 顾磊. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中

国建筑工业出版社, 2005.

- [5] 杨勇新, 岳清瑞, 叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯剥离承载力计算[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 23-32.
- YANG YONG-XIN, YUE QING-RUI, YE LIE-PING. Calculation for flexural debonding bearing capacity of RC beams strengthened with carbon fiber sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(2): 23-32.
- [6] WANG ZHENYU, WU YUFEI, HE WEI. A numerical model for hybrid-bond FRP strengthened beams[C]// 第四届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会论文集, 2007: 503-517.
- [7] 颜俊辉. FRP混合粘贴技术加固混凝土梁的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [8] 郭樟根, 孙伟民, 曹双寅. FRP与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 1-5.
- GUO ZHANG-GEN, SUN WEI-MIN, CAO SHUANG-YIN. Experimental study on bond-slip behavior between FRP and concrete[J]. China Civil Engineering Journal. 2007, 40(3): 1-5.
- [9] WU YUFEI, HANG YUE. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[C]// Third international conference on FRP composites in civil engineering (CICE2006), Miami, Florida, USA.
- [10] 邢建英, 杨勇新. FRP加固构件的粘结机理综述[J]. 福建建筑, 2008, 120(6): 45-48.
- XING JIAN-YING, YANG YONG-XIN. The bonding mechanism and research of the component reinforced with FRP[J]. Fujian Architecture & Construction. 2008, 120(6): 45-48.
- [11] 郭樟根, 曹双寅. FRP与混凝土的粘结性能研究进展[J]. 特种结构, 2005, 22(2): 70-73.
- GUO ZHANG-GEN, CAO SHANG-YIN. Research advance on bond behavior between FRP and concrete[J]. Special Structures, 2005, 22(2): 70-73.
- [12] 叶锋. FRP-混凝土粘结性能的有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [13] 林紫峰. FRP加固混凝土结构界面粘结破坏机理分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2006.
- [14] HANG YUE. Experiment & Finite Element Study of Hybrid Bonding of FRP to RC Structures [D]. Hongkong: City University of HK, 2007.

(编辑 胡英奎)