

带永久锚具的预应力芳纶纤维布 加固技术研究

杜修力¹ 张建伟¹ 邓宗才¹ 何唯平²

(1 北京工业大学 北京 100022 2 海川实业股份有限公司 广东深圳 518040)

摘要:开发带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固技术,给出带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固混凝土受弯构件的施工工艺,进行预应力芳纶纤维布的应力松弛损失试验研究,进行预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的受弯、受剪及疲劳性能试验研究,进行温度对芳纶纤维布配套黏结材料的力学性能影响试验研究。试验结果表明,带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁与未加固的基准梁相比,开裂荷载显著提高,屈服荷载、极限荷载、疲劳寿命及开裂后的抗弯刚度明显提高;使用环境温度在60℃以下时,芳纶纤维布的配套树脂胶与底胶的黏结强度不会发生软化现象。试验研究及分析表明,带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固技术可显著改善混凝土受弯构件使用阶段的力学性能。

关键词:预应力 芳纶纤维布 加固 混凝土结构

引言

近年来,外贴纤维布的加固方法由于耐腐蚀、施工方便快捷、自重小、不占用使用空间等优点而成为一项新兴加固技术。当使用非预应力纤维布加固混凝土受弯构件时,钢筋完全发挥强度时纤维布才发挥出不到20%的强度,难以抑制结构的变形与裂缝的发展^[1]。纤维布高强度的特点仅在梁中主筋屈服以后才得以充分发挥,而在主筋屈服前,纤维布所起的作用有限。因此,它对提高被加固构件的开裂荷载及屈服强荷载作用不是十分明显,对受弯构件在使用阶段的性能改善有限。为了更加充分而合理地利用纤维布高强度的特点,取得更好的加固效果,进行预应力加固是有效的途径。预应力加固的构件在承受荷载之前纤维布就已经发挥了相当的强度,既有效地利用了纤维布的高强度,又能抑制构件的变形和裂缝的发展,从而解决纤维布强度与弹性模量比值高的问题。

目前,碳纤维(CFRP)布由于其优异的力学性能,已被广泛用于结构加固领域,并且国内外一些学者开展了预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件的技术研究工作^[2-9]。但因为碳纤维布的抗剪强度低、抗冲击强度差,延性和柔韧性较

差,在张拉过程中容易出现纤维丝断裂现象,使得施加的预应力不能超过其极限强度的30%^[2],预应力水平较低。笔者根据芳纶纤维(AFRP)布具有较高的抗剪和抗冲击强度,且柔软易于弯折,在张拉过程中不容易出现纤维丝断裂现象,可以施加高水平预应力的特点,开发出了能对AFRP布施加高水平预应力的永久锚具及张拉、锚固等一整套加固施工工艺。在此基础上,进行了带永久锚具的预应力AFRP布加固混凝土受弯构件的力学性能研究工作。

1 加固施工工艺研究

根据纤维布抗剪强度低的特性,结合预应力锚具应具有构造简单、加工制作方便、现场施工方便的要求,笔者借鉴国内外关于纤维布锚具的最新研究成果和工程实践,开发出了适合钢筋混凝土受弯构件加固的预应力AFRP布平板式锚具及其锚固方式(如图1、图2所示)。该锚具不仅可以对AFRP布施加高水平预应力($\geq 1600\text{MPa}$),而且可以实现纤维布与加固构件的充分黏结,有利于工程应用和推广,具有实用性、可行性。其加固施工工艺是:将纤维布在张拉之前先用环氧树脂将其两端粘贴在平板式锚具上,待树脂完全固化后,将锚具安装到固定支架上,然后以加固构件上的固定支架为反力架对其进行张拉,张拉完毕后将锚具锚固在支架上,并

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《土木工程学报》2007, NO. 1)

将纤维布通过环氧树脂粘贴到加固构件上,使其通过黏结力与加固构件共同工作。

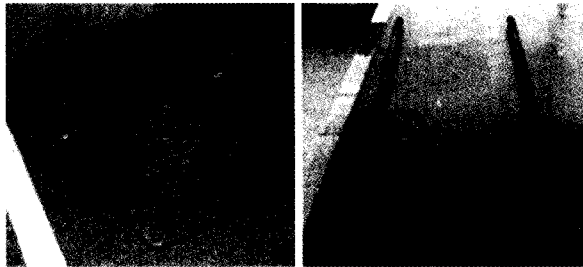


图1 平板式锚具

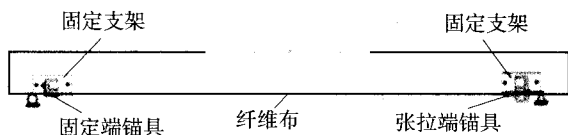


图2 预应力AFRP布加固混凝土梁示意图

2 预应力AFRP布的应力松弛损失研究

由于目前缺乏预应力水平及温度对芳纶纤维布应力松弛损失影响的试验数据,本文进行了9个预应力AFRP布试件的应力松弛损失测定,测试装置如图3所示。AFRP布为深圳海川实业股份有限公司提供的AFS-40型芳纶纤维布,其名义极限抗拉强度为2060MPa,弹性模量为 1.18×10^5 MPa,设计厚度为0.193mm。施加的预应力水平为AFRP布极限强度的40%~70%,试验平均温度值分别为10℃、20℃和30℃。试验结果表明:

- ①当AFRP的预应力水平为其极限强度的40%~70%时,其应力松弛损失值为其极限强度的7%~15%;
- ②预应力AFRP布的应力松弛损失值随预应力水平的提高而增大;
- ③预应力AFRP布的应力松弛损失值随温度的提高而增大;
- ④预应力AFRP布的应力松弛损失在前200h之内,可基本完成全部损失的80%以上。

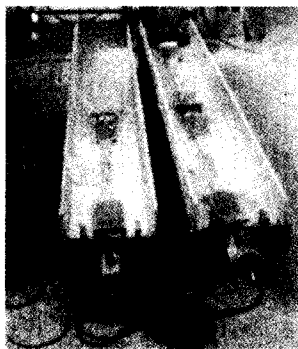


图3 AFRP布的应力松弛损失试验装置

3 预应力AFRP布加固混凝土梁的受弯性能研究

3.1 试验概况

共进行10根矩形截面钢筋混凝土梁的试验研究,其中1根为钢筋混凝土基准梁B0,3根为非预应力AFRP布加固梁,6根为预应力AFRP布加固梁,变化参数为加固层数和预应力水平。试验梁的几何尺寸、配筋及加载方式如图4所示。所有试件的混凝土均按同一配合比制作,设计等级为C25,实测立方体抗压强度为32.7MPa。

非预应力AFRP布加固梁的梁端粘贴两道100mm宽的AFRP布U形箍进行锚固,以防止纵向AFRP布在梁端发生早期脱黏破坏。预应力AFRP布加固梁的工艺是:先在AFRP布的两端安装锚具,在梁上安装永久固定支架,然后打磨梁底混凝土、涂刷底胶,底胶硬化后将AFRP布固定端锚具与梁上的固定支架连接,在梁底涂刷黏结树脂胶,将AFRP布的张拉端锚具安装到固定支架上,以梁上固定支架为反力架对AFRP布进行张拉,达到张拉控制应力后将张拉端锚具固定在支架上,在AFRP布外侧再次涂刷黏结树脂胶,使其与梁底混凝土充分黏结,最后进行黏结树脂胶养护。试验梁的编号及加固参数见表1。

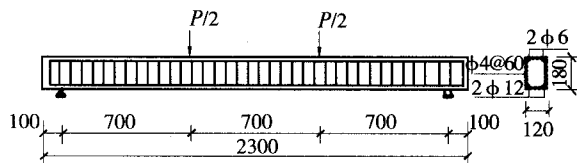


图4 受弯性能试验的试件尺寸及配筋图

表1 受弯性能试验梁的加固参数

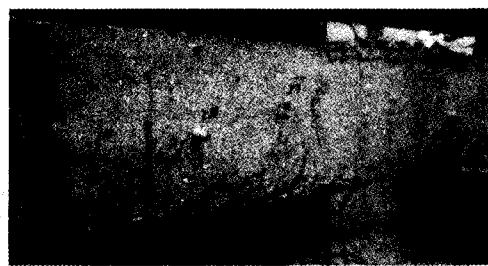
试件编号	加固状况	AFRP布层数	AFRP布宽度(mm)	AFRP布张拉控制应力
B0	未加固	0	-	-
SBI	非预应力加固	1	100	0
SBII	非预应力加固	2	100	0
SBIII	非预应力加固	3	100	0
PSBI	预应力加固	1	100	55%极限强度
PSBII-1	预应力加固	2	100	45%极限强度
PSBII-2	预应力加固	2	100	55%极限强度
PSBII-3	预应力加固	2	100	65%极限强度
PSBIII-1	预应力加固	3	100	45%极限强度
PSBIII-2	预应力加固	3	100	55%极限强度

注:极限强度为AFRP布的名义极限抗拉强度(2060MPa)。

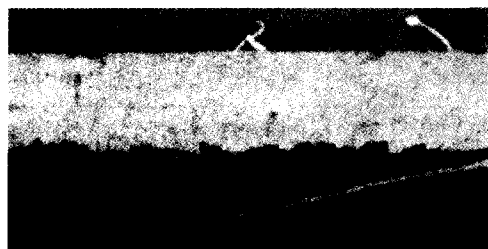
3.2 试验结果及分析

试验中, 基准梁B0是典型的适筋梁破坏; 梁SBI破坏时, 受压区混凝土没有破坏, 纤维布突然断裂, 试件发生卸载; 梁SBII破坏时, 受压区混凝土变形达到了极限压应变, 随着荷载与变形的增长混凝土不断的剥落, 纤维布先局部剥离, 最后断裂, 试件发生卸载; 梁SBIII破坏时, 纤维布局部剥离, 最终梁因受压区混凝土被压碎而失效; 梁PSBI、PSBII-1、PSBII-2、PSBII-3、PSBIII-2破坏时, 受压区混凝土没有破坏, 纤维布突然断裂, 试件发生卸载; PSBIII-1破坏时, 受压区混凝土被压碎, 纤维布在局部剥离后突然断裂, 试件发生卸载。所有试验梁在破坏时其受拉纵筋均达到了屈服状态。试件破坏时, AFRP布已经达到很高的应力应变水平, 被拉断时巨大的应变能急剧释放出来, AFRP布断裂处的混凝土被扯碎形成一个很大的缺口, 暴露出受拉纵筋。

预应力加固梁的破坏形态以纤维布拉断、受压区混凝土完好为主要破坏形态, 即预应力梁的破坏由AFRP布发生断裂破坏所控制。部分试件的破坏照片如图5所示。



(a) 非预应力AFRP加固梁SB III

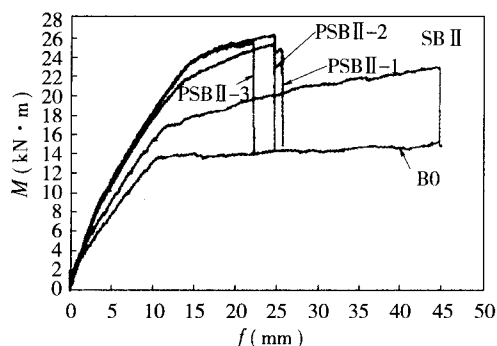


(b) 预应力AFRP加固梁PSB III-2

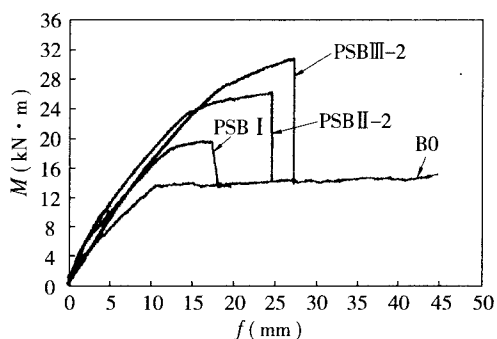
图5 部分试件的破坏照片

部分试验梁的跨中“弯矩-挠度”曲线对比如图6所示。其中, 图6(a)二层AFRP布加固梁的曲线, 图6(b)为相同预应力水平但不同层数的AFRP布加固梁的曲线。

各加固试验梁的承载力与未加固的基准梁B0相比, 非预应力AFRP布加固梁SBI、SBII和SBIII的开裂弯矩分别提高了12%、13%和16%, 屈服弯矩分别提高了13%、23%和29%, 极限弯矩分别提高了26%、50%和65%; 预应力AFRP布加固梁PSBI、PSBII-1、PSBII-2、PSBII-3、PSBIII-1和PSBIII-2的开裂弯矩分别提高了114%、170%、254%、290%、264%和306%, 屈服弯矩分别提高了38%、60%、74%、74%、84%和101%, 极限弯矩分别提高了29%、65%、71%、66%、101%和101%。



(a) 二层AFRP布加固梁



(b) 相同预应力水平的AFRP布加固梁

图6 跨中“弯矩-挠度”曲线对比

在相同预应力水平下(55%极限强度), 预应力纤维布配置量对加固梁的开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩的提高幅度影响如图7所示; AFRP布配置量相同时(二层), 预应力水平对加固梁的开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩的提高幅度影响如图8所示; 图中, M_0 为基准B0的跨中弯矩, M_2 为非预应力AFRP布加固梁SBII的跨中弯矩, A_f 为AFRP布的横截面积, A_s 为梁的受力纵筋面积, σ_{con} 为AFRP布的张拉控制应力, f_u 为AFRP布的极限抗拉强度。

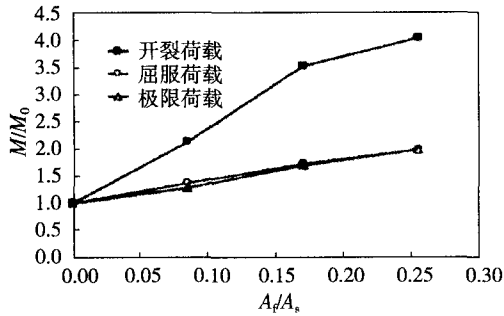


图7 预应力AFRP布配置量与承载力的关系

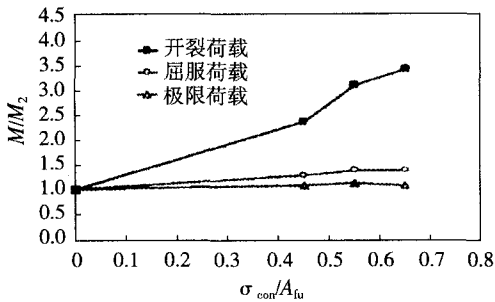


图8 AFRP布的预应力水平与承荷力的关系

3.3 结论

试验梁的受弯试验研究表明：

(1) 非预应力芳纶纤维布加固的钢筋混凝土梁与未加固的基准梁相比，极限弯矩明显提高，屈服弯矩有所提高，开裂弯矩提高不明显；

(2) 预应力芳纶纤维布加固的钢筋混凝土梁与未加固的基准梁相比，开裂弯矩显著提高，屈服弯矩与极限弯矩明显提高；

(3) 预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的初始抗弯刚度与基准梁基本相同，开裂后的抗弯刚度明显提高；

(4) 预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的延性比基准梁和非预应力芳纶纤维布加固梁低；

(5) 预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力，随着AFRP布配置量的增加而增大，但呈非线性比例关系；

(6) 预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的开裂弯矩和屈服弯矩，随着AFRP布预应力水平的提高而增大，但呈非线性比例关系；AFRP布的预应力水平对加固梁的极限弯矩影响很小。

4 预应力AFRP布加固混凝土梁的受剪性能研究

4.1 试验概况

共进行了7根矩形截面钢筋混凝土梁的试验研究，其中1根为非预应力AFRP布加固基准梁SB-0，6根为预应力AFRP布加固梁。试件的尺寸及配筋如图9所示。混凝土设计强度等级为C25，其立方体抗压强度实测值为20.6MPa。

加固梁的AFRP布层数为两层，纤维布宽为100mm。在6个预应力加固的混凝土梁中，有3个梁在剪压区侧面进行了AFRP布抗剪加固，加固方式如图10所示。试验梁的编号及加固参数见表2。

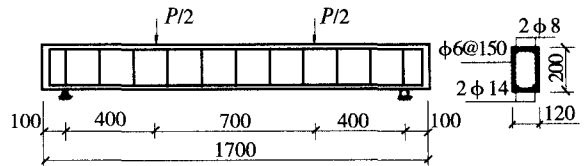


图9 受剪性能试验的试件尺寸及配筋图

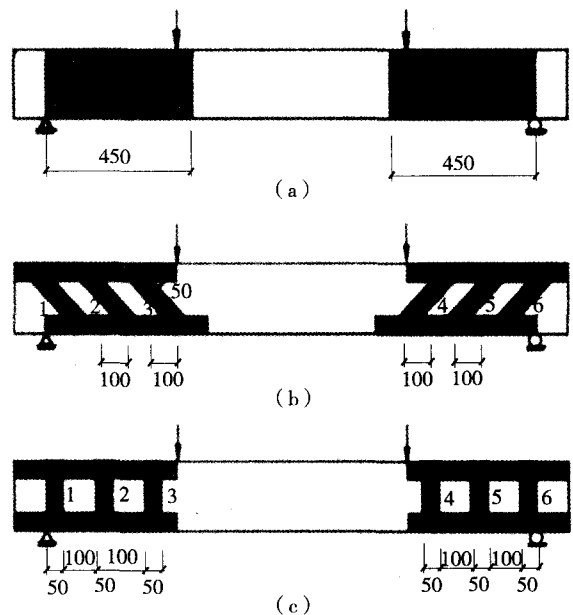


图10 梁侧面抗剪加固方式

表2 受剪性能试验梁的加固参数

试件编号	加固状况	AFRP布宽度(mm)	AFRP布张拉应力	AFRP布抗剪加固方式
B0	未加固	-	-	-
SB-0	非预应力	100	0	-
PSB-1	预应力	100	925MPa(45% f_{tu})	-
PSB-2	预应力	100	1135MPa(55% f_{tu})	-
PSB-3	预应力	100	1340MPa(65% f_{tu})	-
PSB-4	预应力	100	1135MPa(55% f_{tu})	满贴
PSB-5	预应力	100	1135MPa(55% f_{tu})	斜向条带
PSB-6	预应力	100	1135MPa(55% f_{tu})	竖直条带

注： f_{tu} 为AFRP布的名义极限抗拉强度(2060MPa)。

4.2 试验结果及分析

非预应力加固梁SB-0的破坏形态为典型的剪压破坏(图11a)。进行预应力加固但未进行抗剪加固的试验梁有两种破坏形态,一种为典型的剪压破坏,一种为预应力芳纶纤维布拉断。其中,PSB-1、PSB-3为剪压破坏(图11b、d),与非预应力加固梁SB-0相比,其纯弯区的竖向裂缝较少,延伸高度较低,宽度较小;PSB-2为预应力芳纶纤维布在集中力作用点附近拉断(图11c),在纤维布拉断之前,试验梁的裂缝发展特征与剪压破坏的PSB-1、PSB-3的裂缝发展特征基本相同,当主要斜裂缝形成并发展到一定程度以后,预应力纤维布突然断裂,致使该试验梁未能出现剪压破坏形态。进行预应力加固的同时又进行抗剪加固的试验梁,其破坏形态分为两种:一种为预应力芳纶纤维布拉断,纯弯段受压区混凝土完好;一种为纯弯段受压区混凝土压碎,预应力芳纶纤维布拉断。其中,PSB-4为纤维布在锚具端部拉断,纯弯段受压区混凝土完好(图11e);PSB-5为纤维布在纯弯段内拉断,纯弯段受压区混凝土完好(图11f);PSB-6为纯弯段受压区混凝土压碎后纤维布在纯弯段内拉断,且受压区的构造钢筋压曲(图11g)。

图12为试验梁SB-0和PSB-1的破坏照片。

试验梁的“荷载-跨中挠度”曲线对比如图13所示。其中,图13(a)为不同预应力水平的试验梁对比曲线,图13(b)为相同预应力水平不同抗剪加固方式的试验梁对比曲线。与非预应力AFRP布加固梁SB-0相比,进行预应力加固的PSB-1、PSB-2和PSB-3的开裂荷载分别提高了28%、101%和142%,屈服荷载分别提高了8%、34%和37%,极限荷载分别提高了4%、29%和37%;既进行预应力加固又进行抗剪加固的梁PSB-4、PSB-5和PSB-6,其开裂荷载分别提高了100%、111%、99%,屈服荷载分别提高了26%、32%、16%,极限荷载分别提高了32%、52%、26%。

由图13可见:对于加固梁,无论AFRP布预应力水平高低,在荷载较小时,其外加荷载主要

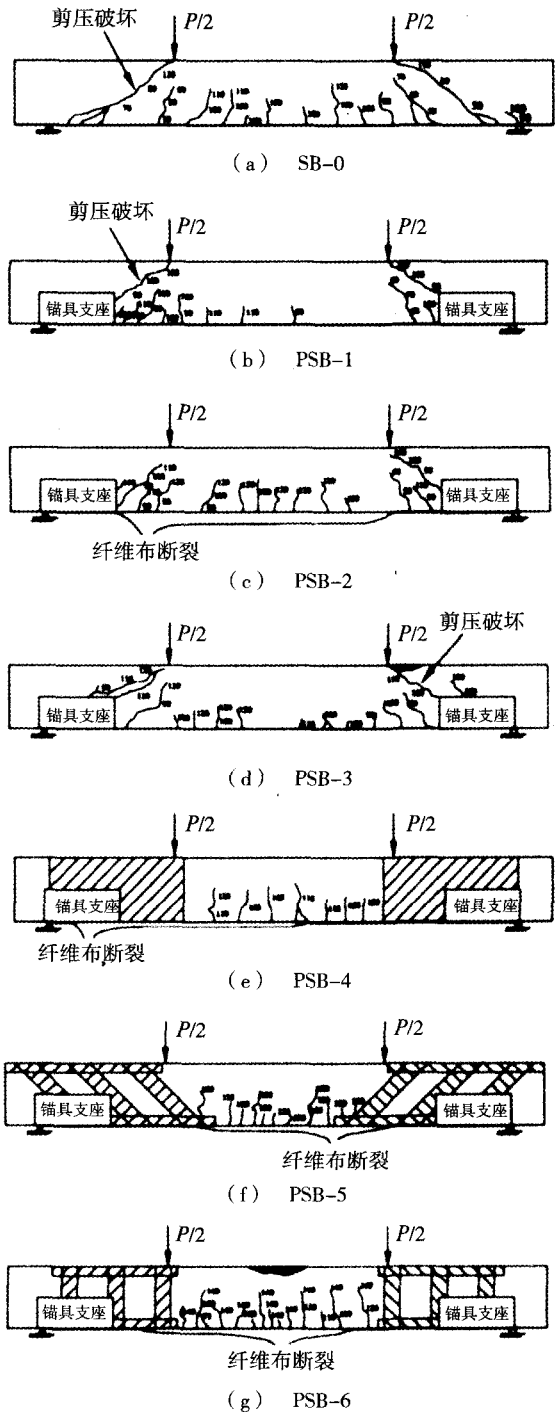


图11 受剪性能试验梁的破坏形态

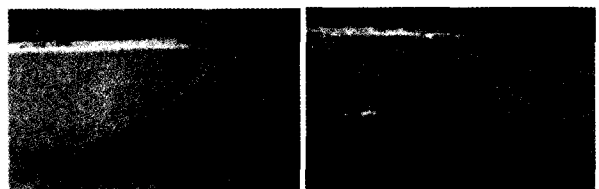


图12 受剪性能部分试验梁的破坏照片

由混凝土、钢筋及AFRP布共同承担, AFRP布的加固效果并未明显发挥出来, 加固梁的跨中挠度基本相同, 即其初始刚度基本相同; 随着荷载的增加, 混凝土梁出现弯曲裂缝和剪切斜裂缝, 预应力加固梁因混凝土的预压力作用, 相对于非预应力加固梁, 其裂缝出现的较晚并且宽度较小, 延伸速度较慢, 从而导致梁的刚度相对增加, 等荷载情况下跨中挠度相对较小。

当使用不同预应力水平的芳纶纤维布对混凝土梁底面进行加固, 不在剪压区进行抗剪加固时, 在剪跨比较小的外荷载作用下, 混凝土梁的破坏是剪压区的混凝土发生剪切破坏, 因此加固梁的延性主要受混凝土性能的影响, 预应力AFRP布对其影响不大。当在混凝土梁底面进行预应力AFRP布加固的同时, 使用非预应力AFRP布对其剪压区进行抗剪加固, 在剪跨比较小的外荷载作用下, 混凝土梁的破坏不是剪切破坏, 而是预应力AFRP布被拉断或纯弯段受压区混凝土压碎, 预应力AFRP布和混凝土的材料性能得到了较充分的发挥, 加固梁的延性相对于不进行抗剪加固的梁有了明显提高, 如图13(b)所示。

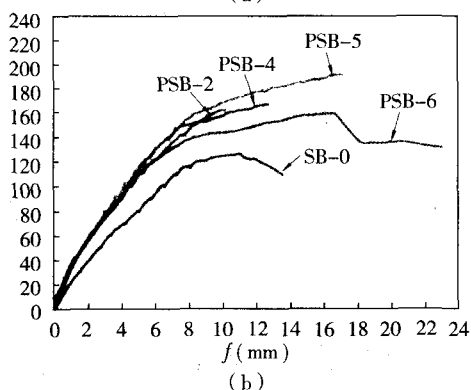
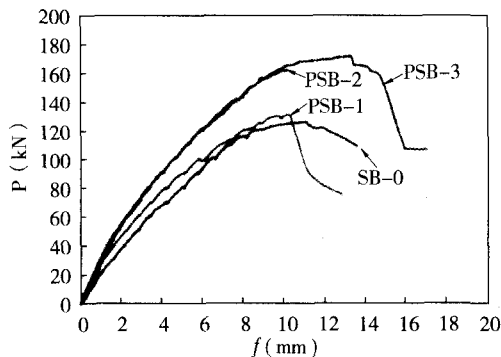


图13 “荷载-跨中挠度”曲线对比

4.3 结论

试验梁的受剪试验研究表明:

- (1) 预应力芳纶纤维布加固的钢筋混凝土梁与非预应力芳纶纤维布加固的基准梁相比, 开裂荷载显著提高, 屈服荷载与极限荷载明显提高;
- (2) 预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的初始刚度与非预应力芳纶纤维布加固梁的初始刚度基本相同, 开裂后的刚度明显提高;
- (3) 预应力芳纶纤维布加固的钢筋混凝土梁, 当发生剪切破坏时, 其延性与基准梁相差不大;
- (4) 在梁底进行预应力芳纶纤维布加固和在剪压区进行芳纶纤维布抗剪加固的钢筋混凝土梁, 其延性因加固梁不在发生剪切破坏而有所提高;
- (5) 预应力芳纶纤维布加固的钢筋混凝土梁, 其抗剪承载力随着AFRP布预应力水平的提高而增大。

5 预应力AFRP布加固混凝土梁的疲劳性能研究

5.1 试验概况

共设计了7根矩形截面钢筋混凝土梁, 其中3根为非预应力AFRP布加固梁(2根进行静力试验, 1根进行疲劳试验), 4根为预应力AFRP布加固梁(全部进行疲劳试验), 变化参数为预应力水平。试验梁的几何尺寸、配筋及加载方式如图14所示。所有试件的混凝土均按同一配合比制作, 设计等级为C30, 实测立方体强度为40.4MPa。

非预应力AFRP布加固梁的梁端粘贴两道100mm宽的AFRP布U形箍, 其间距为100mm, 层数为1层, 以防止纵向AFRP布在梁端发生早期脱黏破坏。预应力AFRP布加固梁的加固方案如图2所示, 试验梁的编号及加固参数见表3。

试验加载方式采用两点集中加载。2根非预应力加固梁进行静载试验, 以确定构件的极限弯矩 M_u , 其余5根梁进行疲劳试验, 按两种不同荷载水平分别加载: ① $M_{min}^f=0.25M_u$, $M_{max}^f=0.55M_u$, 疲劳200万次后变更荷载上限至 $M_{max}^f=0.70M_u$; ② $M_{min}^f=0.25M_u$; $M_{max}^f=0.65M_u$, 疲劳200万次后变更荷载上限至 $M_{max}^f=0.75M_u$ 。疲劳试验机最大加载量程为100kN, 疲劳荷载加载频率为4.6Hz, 荷载在上、下限之间按照正弦规律变化。

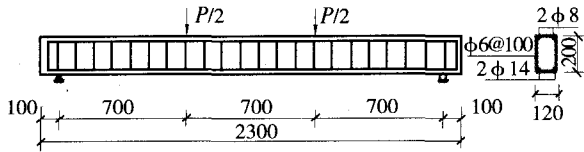


图14 疲劳性能试验的试件尺寸及配筋图

表3 疲劳性能试验梁的加固参数

试件编号	加固状况	加固层数	加固 AFRP布宽度(mm)	AFRP布张拉控制应力	AFRP布数量
SB0	非预应力	2	100	0	3
PSB45	预应力	2	100	925MPa(45%极限强度)	2
PSB55	预应力	2	100	1135MPa(55%极限强度)	1
PSB65	预应力	2	100	1340MPa(65%极限强度)	1

5.2 试验结果及分析

各试验梁的疲劳寿命实测值和最终破坏形态见表4, 其中, N_f 为梁破坏时的累计疲劳循环次数。部分试件的破坏照片见图15和图16。

表4 疲劳寿命实测值

试件编号	疲劳加载水平	疲劳寿命 N_f (万次)	破坏形态
SB0	(2)	208.6	纵筋断裂
PSB45-1	(1)	312.1	最大残余裂缝宽度为1.08mm
PSB45-2	(2)	278.8	纵筋断裂
PSB55	(2)	296.4	最大残余裂缝宽度为0.7mm
PSB65	(2)	363.2	纵筋断裂

注: (1) $M_{min}^f / M_{max}^f = 0.25M_u / 0.55M_u (0.70M_u)$;

(2) $M_{min}^f / M_{max}^f = 0.25M_u / 0.65M_u (0.75M_u)$ 。



图15 SB0的破坏照片



图16 PSB45-2的破坏照片

由表4可见, 在相同加载情况下, 预应力AFRP布加固混凝土梁的疲劳寿命比非预应力AFRP布加固混凝土梁的疲劳寿命明显提高, 且随着AFRP布预应力水平的提高, 加固梁的疲劳寿命相应提高。这主要是由于AFRP的预应力水平越高, 相同疲劳荷载作用引起的加固梁纵筋拉应力幅值越小。

5.3 结论

试验梁的疲劳试验研究表明:

(1) 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的疲劳性能明显好于非预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的疲劳性能, 与非预应力芳纶纤维布加固的试验梁相比, 预应力芳纶纤维布加固的试验梁的疲劳寿命提高了33%~74%;

(2) 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的疲劳寿命随着预应力水平的提高而增大;

(3) 芳纶纤维布加固混凝土梁的疲劳破坏源于受拉纵筋的疲劳破坏, 芳纶纤维布的疲劳性能优于钢筋的疲劳性能;

(4) 预应力芳纶纤维布的平板式永久锚具的锚固方式具有可靠的耐疲劳性能。

6 温度对AFRP布配套黏结材料的力学性能影响研究

在实际加固工程中, 纤维布加固的混凝土结构常处于日照环境下, 在炎热的夏季, 其表面温度较高。当使用环境的温度超过一定程度时, 纤维布的配套黏结材料将会出现软化现象, 导致其黏结强度降低。在预应力纤维布加固结构中, 软化现象会使黏结材料产生塑性变形, 引起预应力损失。为了掌握温度对芳纶 (AFRP) 布配套黏结材料力学性能影响, 笔者开展了此方面的一些研究工作。

6.1 温度对黏结树脂胶与钢板之间正拉黏结强度的影响

共设计了6组试件, 每组4个试件, 试件制作及加载方式如图17所示, 钢标准块尺寸为40mm×40mm。试验条件分别为: ①常温; ②在60℃的环境下持时6h; ③70℃持时6h; ④80℃持时6h; ⑤90℃持时6h; ⑥100℃持时6h。



图17 黏结树脂与钢板的正拉黏结强度试验

试验实测结果见表5。从表5可见,温度在70℃以下时,黏结树脂胶与钢板之间的正拉黏结强度没有退化;当温度达到80℃时,黏结树脂胶与钢板之间的正拉黏结强度出现了下降,下降幅度为14%,随着温度的升高,下降幅度增大,温度达到100℃,下降幅度为74%。

表5 黏结树脂胶与钢板之间的正拉黏结强度实测结果

试验条件	正拉黏结力(kN)				黏结强度均值(MPa)	相对值
	试件1	试件2	试件3	试件4		
常温	10.50	8.55	8.30	9.50	5.76	1.00
60℃	9.65	9.30	10.15	9.45	6.03	1.05
70℃	12.30	12.25	13.65	11.0	7.69	1.34
80℃	7.20	7.55	8.25	8.50	4.93	0.86
90℃	3.65	4.00	4.50	4.25	2.56	0.44
100℃	2.20	3.15	1.80	2.40	1.49	0.26

6.2 温度对黏结树脂胶与混凝土之间的正拉黏结强度的影响

共设计了6组试件,每组5个试件,参照CECS146:2003《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[10]中“碳纤维片材配套树脂类黏结材料与混凝土的正拉黏结强度测定方法”的规定进行试件制作与试验。图18为试验加载装置,钢标准块尺寸为40mm×40mm,混凝土试块尺寸为70mm×70mm×70mm,混凝土试块预切缝深度2~3mm、宽度1~2mm。混凝土的立方体抗压强度为36.8MPa,混凝土的劈拉强度为3.25MPa。试验条件分别为:①常温;②在60℃的环境下持时6h;③70℃持时6h;④80℃持时6h;⑤90℃持时6h;⑥100℃持时6h。

试验实测结果见表6。表中:A_f表示试件的破坏形式为混凝土试块破坏,B_f表示试件的破坏形式为黏结树脂与混凝土间复合涂层界面破坏,C_f表示试件的破坏形式为芳纶纤维片材内部破坏(本试验中未发生此类破坏),D_f表示芳纶纤维片材与钢标准块之间的黏结失效破坏。

从表6可见,温度在60℃以下时,黏结树脂胶与混凝土之间的正拉黏结强度试验的有效试件为混凝土破坏,树脂胶没有软化;当温度为70℃、80℃时,黏结树脂胶与混凝土之间的正拉黏结强度试验的有效试件为复合涂层界面破坏,树脂胶与底胶界面出现软化现象,温度越高,软化程度越大;当温度达到90℃以上时,所有试件的破坏均为黏结失效破坏。

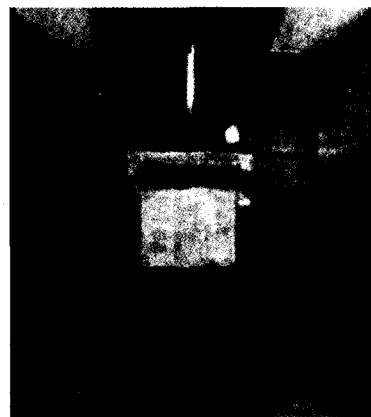


图18 黏结树脂与混凝土的正拉黏结强度试验装置

表6 黏结树脂胶与混凝土的正拉黏结强度实测结果

试验条件	正拉黏结力(kN)					有效黏结强度均值(MPa)
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5	
常温	5.15	1.50	7.30	7.10	4.60	4.08
	A _f	D _f	A _f	A _f	D _f	A _f
60℃	4.10	1.80	4.20	6.50	4.20	2.97
	A _f	D _f	A _f	A _f	A _f	A _f
70℃	3.00	2.60	2.50	1.40	0.80	1.75
	B _f	B _f	D _f	D _f	D _f	B _f
80℃	2.55	2.00	1.55	0.80	1.40	1.43
	B _f	B _f	D _f	D _f	D _f	B _f
90℃	0.20	0.40	0.45	0.50	0.45	—
	D _f	D _f	D _f	D _f	D _f	D _f
100℃	0.40	0.40	0.35	0.30	0.25	—
	D _f	D _f	D _f	D _f	D _f	D _f

6.3 温度对AFRP布加固混凝土梁受弯承载力的影响

为了研究温度对AFRP加固混凝土梁承载力的影响,本文进行了7组试件的试验研究,其

中, 1组为未加固素混凝土梁, 6组为1层AFRP布加固的素混凝土梁, 每组3个试件, 试件尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 550\text{mm}$, 混凝土的立方体抗压强度为 36.8MPa , 加载方式如图20所示。试验条件分别为: ①常温; ②在 60°C 的环境下持时6h; ③ 70°C 持时6h; ④ 80°C 持时6h; ⑤ 90°C 持时6h; ⑥ 100°C 持时6h。

各组试件的破坏形态为:

(1) 未加固的素混凝土梁在常温条件下, 弯曲裂缝在梁的中间部位产生, 迅速向上开展, 使梁丧失承载能力, 最终只形成一条弯曲裂缝。

(2) AFRP布加固的素混凝土梁在常温条件下, 弯曲裂缝首先在梁的中间底部产生, 随后向上开展, 并随着荷载的增加出现多条裂缝。开始时裂缝发展较快, 但后期受到梁底AFRP布的限制而发展缓慢, 并在支座处出现剪切斜裂缝, 剪切斜裂缝迅速开展, 最终导致试件发生剪切破坏, AFRP布与梁黏结完好, 没有脱黏现象, 如图19所示。

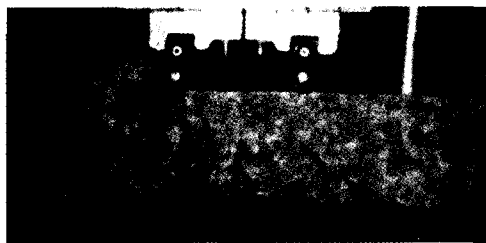


图19 加固梁在常温下的破坏形态

(3) AFRP布加固的素混凝土梁在 60°C 的环境下持时6h后, 其破坏特征与常温条件下的破坏特征相同。

(4) AFRP布加固的素混凝土梁在 70°C 的环境下持时6h后, 有2个试件的破坏特征与常温条件下的破坏特征相同; 1个试件最终破坏时出现了弯曲裂缝以外的AFRP布与梁底所涂底胶脱黏现象, 导致梁的受弯承载力降低, 如图20所示, 这表明较高温度使树脂胶与底胶的黏结强度发生了退化。

(5) AFRP布加固的素混凝土梁在 80°C 的环境下持时6h后, 3个试件在加载初期的破坏

特征与常温条件下的破坏特征相同, 但最终破坏时, 2个试件是弯曲裂缝以外的AFRP布与梁底所涂底胶脱黏, 导致梁的受弯承载力降低; 1个试件是在混凝土剪切破坏后, 剪切斜裂缝以外的AFRP布与梁底所涂底胶脱黏。

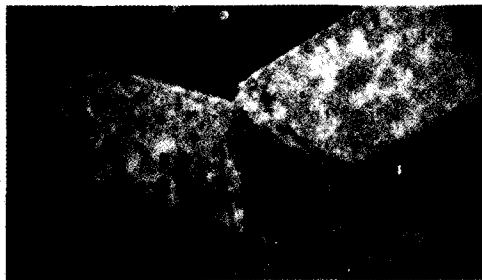


图20 加固梁在 70°C 下的脱黏破坏形态

(6) AFRP布加固的素混凝土梁在 90°C 的环境下持时6h后, 有2个试件的破坏特征与常温条件下的破坏特征基本相同, 只是弯曲裂缝数量相对少些, 开展高度相对低些; 1个试件最终破坏时出现了弯曲裂缝以外的AFRP布与梁底所涂底胶脱黏现象。

(7) AFRP布加固的素混凝土梁在 100°C 的环境下持时6h后, 3个试件的最终破坏均为弯曲裂缝以外的AFRP布与梁底所涂底胶脱黏破坏, 这表明树脂胶与底胶的黏结强度的软化程度较大。

各试件受弯承载力的实测结果见表7。综合表7及各组试件的破坏形态可见: 当环境温度在 60°C 以下时, 试件的破坏为混凝土剪切破坏, 黏结树脂胶与混凝土之间没有发生脱黏现象, 试件的承载力大小取决于混凝土强度, 树脂胶没有软化。

表7 AFRP布加固混凝土梁受弯承载力实测结果

加固状态	试验条件	承载力(kN)			承载力均值(kN)
		试件1	试件2	试件3	
未加固	常温	12.0	11.5	13.0	12.2
	常温	52.0	51.5	55.5	53.0
	60°C	47.5	51.5	38.0	49.5
AFRP布加固	70°C	37.0	44.5	43.5	41.7
	80°C	36.5	31.5	43.5	37.2
	90°C	31.0	37.0	39.0	35.7
	100°C	22.0	29.0	25.0	25.3

6.4 结论

当环境温度在70℃以下(含70℃)时,芳纶纤维布的配套树脂胶与钢板之间的黏结强度不会发生软化现象;当温度在60℃以下(含60℃)时,芳纶纤维布的配套树脂胶与底胶的黏结强度不会发生软化现象。

7 结语

带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁与未加固的基准梁相比,开裂荷载显著提高,屈服荷载、极限荷载及疲劳寿命明显提高;其初始抗弯刚度与基准梁基本相同,开裂后的抗弯刚度明显提高。本文开发的带永久锚具的预应力芳纶纤维布加固技术可供工程应用参考。

参考文献

- [1] Triantafillou TC, Deskovic N. Innovative prestressing with FRP sheets:mechanics of short-term behaviors[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1991, 117(7):1652-1672
- [2] Wu Zhishen, Niu Hedong. New concept and applications of FRP laminates for strengthening infrastructure[C]/Fifth China-Japan-US Joint Conference on Composite Materials, CJAJCC-5 Proceedings, 2002:36-49
- [3] Wight R G, Green MF, Erki MA. Prestressed FRP sheets for post-strengthening reinforced concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4):214-220
- [4] Saadatmanesh H, Ehsani M R. RC beams strengthened with GFRP plates:part I:experimental study[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117(11):3417-3433
- [5] Triantafillou T C, Deskovic N, Deuring M.Strengthening concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets[J].ACI Structural Journal, 1992, 89(3):235-244
- [6] Meier U. Strengthening of structures using carbon fiber/epoxy composites[J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(6):341-351
- [7] 尚守平, 彭晖, 童桦, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003,24(5):24-30(Shang Shou ping, Peng Hui, Tong Hua, et al.Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):24-30(inChinese))
- [8] 飞渭, 江世永, 彭飞飞, 等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2):56-60(Fei Wei, Jiang Shi yong, Peng Fei fei, et al.Experimental study on flexural strength of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Sichuan Building Science, 2003, 29(2):56-60(inChinese))
- [9] El-Hacha R, Wight R G, Green M F.Prestressed carbon fiber reinforced polymer sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2004,8(1):3-13
CECS 146:2003碳纤维片材加固混凝土结构技术规程
- [10] [S](CECS146:2003 Technical specification for strengthen-ing concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate [S](in Chinese))
- [1] 144~145. (in Chinese)
- [3] 戴竞. 轻骨料混凝土桥的现状与发展[J]. 公路, 2002, (12):7~11.
Dai Jing. The status quo and development of light-weight-concrete [J]. Highway, 2002, (12): 7~11. (in Chinese)
- [4] 曹诚, 杨玉强. 高强轻集料混凝土在桥梁工程中应用的效益和性能特点分析[J]. 混凝土, 2000, (12): 27~29.
Cao Cheng, Yang Yuqiang. The properties and benefit analysis about using high-strength light aggregate concrete on bridges [J]. Concrete, 2000, (12): 27~29. (in Chinese)
- [5] 朱聘儒, 邓景纹, 高永孚. 轻骨料混凝土工程实例简述[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, 16(1): 53~57.
Zhu Pinru, Deng Jingwen, Gao Yongfu. A brief introduction to the use of LWAC in engineering projects [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2003, 16(1): 53~57. (in Chinese)
- [6] Thomas A Holm, Theodore W Bremner. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments [R]. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, 2000.
- [7] Melby Karl. Use of high strength LWAC in Norwegian bridges [C]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. Kristiansand, Norway, 2000. 47~56.
- [8] 龚洛书. 轻骨料混凝土的研究和应用文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
Gong Luoshu. The research and application collections of light aggregate concrete [C]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1981. (in Chinese)
- [9] JTJ 021-89, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
JTJ 021-89, General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [10] JTJ 023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.
JTJ 023-85, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridge and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 1985. (in Chinese)
- [11] 王振宇. 高强轻骨料混凝土的长期变形和力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
Wang Zhenyu. Long term deformation characteristics and mechanical properties of high strength LWAC [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)

(上接第8页)