

碳纤维布 (CFRP) 与钢结构粘结性能的试验研究

齐爱华 张振华

(天津市建筑科学研究院 天津 300193)

摘要:采用弯拉试验方法对碳纤维布与钢构件粘结性能进行了试验。研究了碳纤维布粘贴厚度、宽度与长度对粘结强度的影响。试验结果表明:随着粘贴厚度的增加,极限承载力逐渐增加,但不是简单的线性关系;随着粘贴宽度与钢试件的宽度比值增加,极限承载力逐渐降低;纤维布与钢结构的有效粘结长度大约在120~150 mm之间。

关键词:碳纤维布 (CFRP) 钢结构 粘结性能

1 引言

碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber-Reinforced Polymer, 以下简称CFRP) 由于具有高强、质轻、高弹模、耐腐蚀等优点,被广泛的应用于土木工程结构的加固工程中,尤其是对混凝土结构的加固,已经取得了大量的科研成果。

但是由于钢材与CFRP力学性能上的差异,以及在工程结构中的相互作用与传统的钢结构加固方法相差较大,所以目前国内外对于CFRP加固钢结构的研究还处于初步的探索研究阶段。

CFRP加固结构构件的技术主要是应用粘结剂将CFRP片材粘贴在受损构件的表面,使一部分荷载通过胶层传递到CFRP片材上,降低了受损构件损伤部位的应力水平,从而达到加固的效果,延长了构件的使用寿命。CFRP与钢结构的界面粘结是确保CFRP布和钢结构共同作用,充分发挥CFRP布强度的关键所在。因此,了解和掌握CFRP布与钢结构之间的粘结性能及其变化规律具有重要的实际意义,它将为CFRP加固钢结构提供科学依据,为进一步的研究打下基础。

本文设计了一系列CFRP布与钢结构粘结性能试验,分析了碳纤维布与钢结构之间应力传递和分布规律,并对其破坏机理进行初步探讨。

2 试验概述

采用弯拉受力状态下试件的粘结性能试验 (试件加载如图1所示),研究粘贴纤维布的长

度、厚度与宽度三个变量对界面粘结强度的影响,共设计了48个试件。CFRP与钢结构的粘结长度共5种:50mm、80mm、120mm、150mm和180mm;粘贴层数为三种:1层、2层、3层;粘结宽度为20mm、40mm、50mm、60mm。试件编号详见表1。

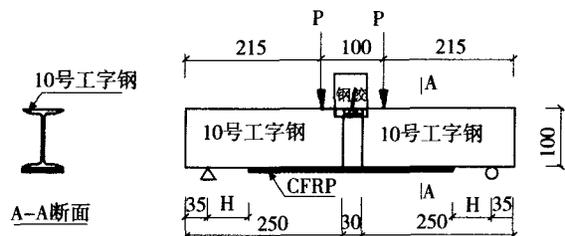


图1 试件加载示意图

注:图中H随CFRP设计长度的变化而变化,单位:mm

表1 试件明细表

试件编号	试件个数	长度(mm)	宽度(mm)	层数
C180-60-1	3	180	60	1
C180-60-2	3	180	60	2
C180-60-3	3	180	60	3
C80-60-1	3	80	60	1
C80-60-2	3	80	60	2
C80-60-3	3	80	60	3
C120-60-2	3	120	60	2
C50-60-2	6	50	60	2
C150-60-2	3	150	60	2
C120-20-2	6	120	20	2
C120-40-2	6	120	40	2
C120-50-2	6	120	50	2

试验中钢构件采用10号工字钢。采用日本生产的UT70-30型碳纤维布和大连凯华加固公司生产的JGN-T型建筑结构胶,其力学性能见表2、3。试验在1000kN的电液伺服万能试验机上进行,加载采用位移控制,加载速率为0.1 mm/min。

表2 UT70-30型碳纤维片材力学性能

纤维重量 (g/m ²)	设计厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	弹性模量 ($\times 10^5$ MPa)
300	0.167	4380	1.9	2.30

表3 JGN-T型建筑结构胶力学性能

抗拉强度 (MPa)	受拉弹性模量 (MPa)	伸长率 (%)	抗弯强度 (MPa)	钢-钢拉伸抗剪 强度标准值(MPa)
52.5	2711.7	2.5	93.4	18.32

3 试验结果及分析

随着荷载的增加,CFRP与钢结构的剥离从梁跨中预留口处向支座端进行。破坏发生比较突然,在跨中部位CFRP与钢结构粘结面上产生较大的剪应力和法向正应力,当钢结构-胶界面上的剪应力和法向正应力超过钢结构与粘结剂之间的粘结强度时,就会导致纤维布与钢结构之间的剥离破坏。所有试件的破坏均为剥离破坏,其破坏形态分以下四种:(1)钢界面与粘结胶层之间的剥离破坏,剥离破坏完成后,胶层全部粘结在纤维布上,纤维布一端完全剥离,另外一段与钢结面仍然粘结在一起;

(2)胶层发生破坏,剥离完成后,胶层一部分粘结在钢试件上,一部分粘结在纤维布上;

(3)剥离破坏完成后,纤维布发生竖向剪切破坏,纤维布各有一条粘在两个钢梁上;

(4)试件在承载力很小的时候发生剥离破坏,破坏发生在胶-钢界面,钢结构表面散布着斑驳的黑点,剥离下来的纤维布上隐约可以看到一些暗红色,这说明粘贴纤维布之前的表面处理工作做得不完全,这在实验过程中是应该尽量避免的。

3.1 粘结长度的影响

试验采用了5种粘贴长度:50mm、80mm、120mm、150mm、180mm,研究了不同粘结长度对粘结性能的影响,其结果参见图2。粘结长度

较长的试件,在剥离破坏的最后阶段,粘结界面剥离时间较长;粘结长度较短的试件,剥离不明显。试件主要的破坏形态为钢界面与粘结胶层之间的剥离破坏。图2给出了不同粘结长度的试件对应的极限荷载,从图中可以看出碳纤维试件的极限荷载随着粘结长度的增大而不断增大,直到120mm。在随后粘贴的180mm纤维布的试件的极限荷载平均值略有降低,降低的原因是因为试件C180-60-2-3#由于粘结不完全导致过早剥离造成的,而另外两个试件C180-60-2-1#、C180-60-2-2#的极限荷载跟粘结长度为120mm、150mm的试件的极限荷载相差无几。可见正常状态下粘结长度为180mm的试件与粘结长度为120mm、150mm的试件的极限荷载基本相等。说明碳纤维布与钢结构之间存在一个有效粘结长度,粘结长度没有达到有效粘结长度时,极限承载力随着粘结长度的增加而增加,但并不是成比例增加,当粘结长度超过有效粘结长度后,极限承载力不再随着粘结长度的增长而变化,而是趋于稳定状态。根据本次试验结果,碳纤维布与钢结构之间的有效粘结长度在120~150mm之间。

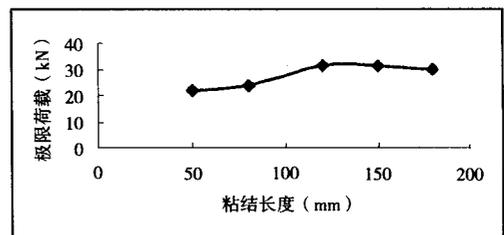
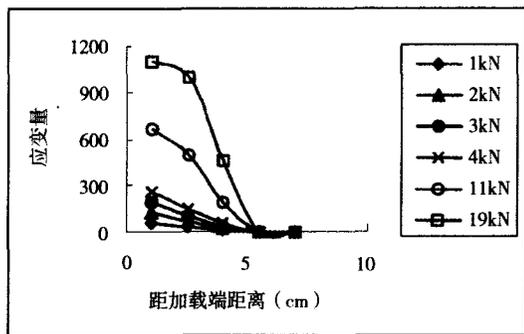
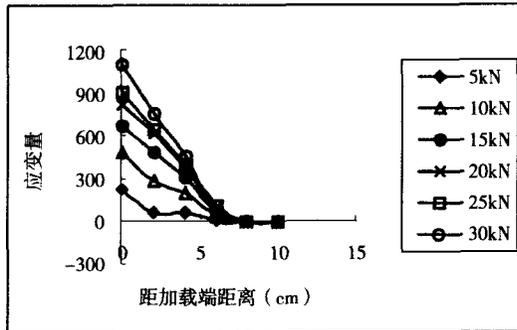


图2 对应不同粘结长度的极限荷载

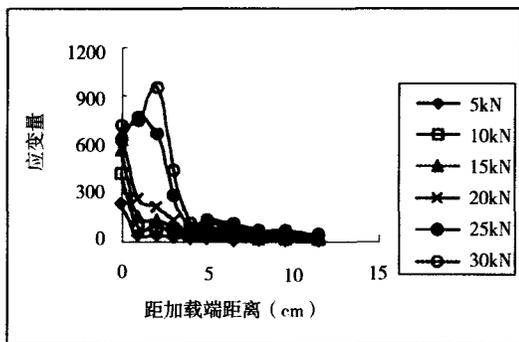
图3中a)、b)、c)、d)给出了粘结长度分别为80mm、120mm、150mm、180mm,宽度为60mm,层数为2层的试件在不同荷载作用下试件应变传递,从中可以看出,随着荷载的不断增大,剪力传递始终发生在一段距离内,这个距离就是有效粘结长度,纤维布上剪力传递的趋势是:距离跨中越远,应力越小,在有效粘结长度范围内,应力梯度较大,超过有效粘结长度后,应变的变化很小,剪力传递微弱。图中还表明,随着荷载的增大,传力区域也随之增大,到达有效粘结长度后,传力区域不再增大。可以看出,碳纤维试件的有效粘结长度在120~150mm之间,与上面根据极限荷载得出的结论相符。



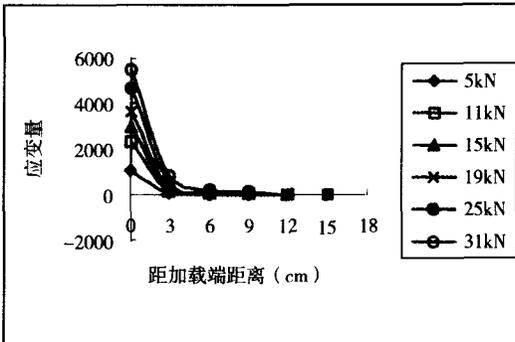
a) 试件C80-60-2在不同荷载下的应变分布



b) 试件C120-60-2在不同荷载下的应变分布



c) 试件C150-60-2在不同荷载下的应变分布



d) 试件C180-60-2在不同荷载下的应变分布

图3 试件在不同荷载下的应变分布

3.2 粘结层数的影响

为了研究粘贴不同纤维布厚度对粘结性能的影响, 试验设计了宽度为60mm, 长度为80mm和180mm, 厚度分别为1层、2层、3层纤维布的两组试件。图4给出了两组试件在分别粘贴1层、2层、3层纤维布时对粘结性能的影响, 从实验结果可以看出, 粘结长度为80mm、粘结宽度为60mm的试件, 粘贴两层的碳纤维布比粘贴一层碳纤维布所测得的平均极限承载力提高了23.24%; 粘贴三层碳纤维布比粘贴一层碳纤维布所测得的平均极限承载力提高了128.75%。粘结长度为180mm, 粘结宽度为60mm的试件, 粘贴两层碳纤维布比粘贴一层碳纤维布所测得的平均极限承载力提高了30.26%; 粘贴三层碳纤维布比粘贴一层碳纤维布所测得的平均极限承载力提高了107.48%。而不是简单的两倍和三倍的关系。数据显示, 随着碳纤维布粘结厚度的增加粘结强度有了显著的提高, 但并不是成比例增加。

3.3 不同宽度比对粘接强度的影响

本试验同时研究了不同宽度比(碳纤维布宽度 b_f 与工字钢翼缘宽度 b_s)对粘结强度的影响,

本文分别设计了0.333、0.667、0.833、1.0四种宽度比, 四组试件的粘结强度的试验结果比较见图5。

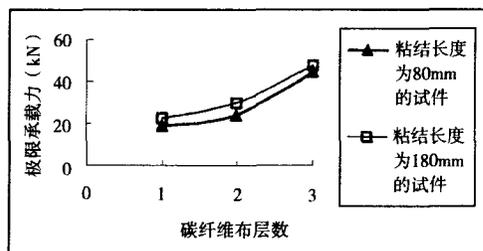


图4 不同层数纤维布对粘结性能的影响

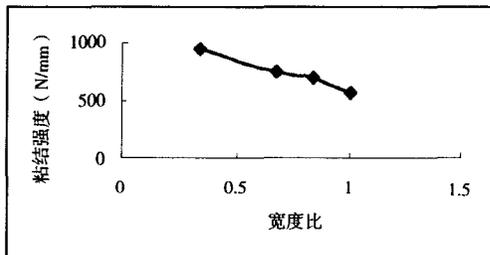


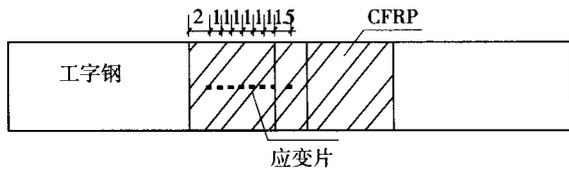
图5 不同宽度比试件粘结强度

由图5可以看出, 试件的粘结强度随着宽度比 b_f/b_s 的增加而减小。这是由于碳纤维布两侧的钢材对碳纤维布起到了有利的约束作用, 随宽

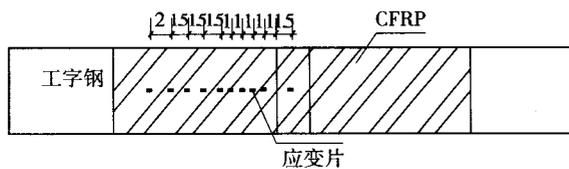
度比的增加,这种约束越来越小,如图5所示,当 b_f/b_s 达0.833时,这种约束的作用变得很小。

4 CFRP加固钢结构的应力分析

通过上述试验研究可以看出,在荷载传递过程中,钢结构与粘结胶层、粘结胶层与FRP之间的界面起着至关重要的作用。由于CFRP材料和钢结构的弹性模量、抗拉强度等力学性能都比粘结胶层高出很多,所以粘结界面处于弱势,破坏往往发生于此,试验结果证明亦是如此。因此,分析界面的应力状态对于了解荷载的传递机理和界面的破坏是非常重要的,本章对处于弯拉状态的试件进行了应力分析(图6中a)、b)给出了应变片测点布置图)。



a) C80-60-2试件应变片布置图



b) C150-60-2试件应变片布置图

注:图中数据单位:mm

图6 应变片布置图

如图7给出了剪应力的示意图和计算公式。

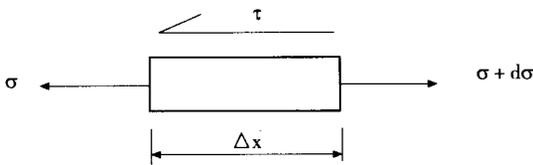


图7 CFRP的受力分析

$$\sigma \cdot \tau \cdot t + \tau \cdot b \cdot V_x = (\sigma + d\sigma) \cdot b \cdot t \quad (2.1)$$

$$\tau \cdot b \cdot V_x = d\sigma \cdot b \cdot t \quad (2.2)$$

$$\tau = \frac{d\sigma}{\Delta x} \cdot T \quad (2.3)$$

$$\tau = E \cdot \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{V_x} \cdot t \quad (2.4)$$

上述公式中, b 代表纤维布的宽度, t 代表纤维布的厚度, E 代表纤维布的弹性模量, ε 分别表示 $i+1$ 点和 i 点的应变。

由公式(2.4)可以计算出各组试件在不同测点间的剪应力,如图8~图11给出了在不同荷载作用下各测点之间的应力分布,从图8、9中可以看出,剪应力在一段距离内传递,由跨中预留缺口处开始逐渐传向支座端,在第一个测点和第二个测点之间的应力最大,并且这个应力随着荷载的增加而增加,然后剪应力的传递逐渐微弱,而且荷载较小时,剪应力传递的区域也较短,随着荷载的增加,剪应力的传递区域逐渐增加。当荷载增加到一定程度时,剥离开始产生,此时应力的峰值开始后移,如图10、11所示,在荷载达到极限荷载附近时,第一测点和第二测点之间的应力值减小,说明剥离破坏已经传递到了第二个测点的位置,随后的几个测点之间的应力不断增大,应力峰值也在后面的几个测点之间出现,越接近极限荷载应力峰值的出现区域越靠后,应力峰值出现的测点区域说明剥离破坏将会在该区域产生。

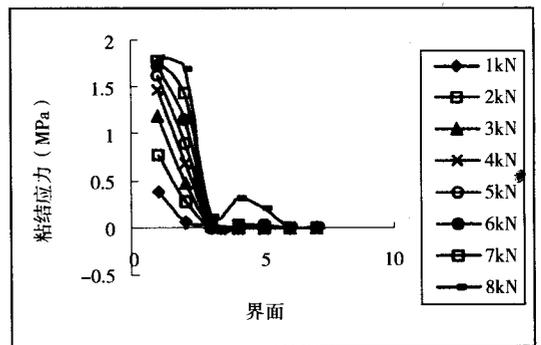


图8 试件C80-60-1应力分布

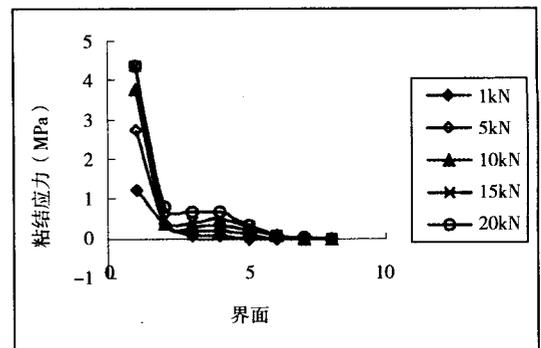


图9 试件C150-60-2应力分布

(下转第16页)

5 直线弹性孔道转向器在南宁大桥上的应用

转向器共27个钢绞线孔道，孔道之间的中心距为35mm（两根钢绞线的中心距为35mm），导向套管采用 $\phi 30\text{mm}$ 、壁厚3.5mm的弹性材料管，中间采用隔板定位支撑，两端用弹性材料导向板定位端口。两根套管之间的间距有5mm，在套管间隙间填充砂浆料，可保证填充密实，并具有足够的抗压强度，从而保证各导向套管之间的定位，并使转向器满足整体刚度的要求。图6为安装在横隔梁的横隔板处的直线弹性孔道转向器实物图，图7为建设中的南宁大桥。

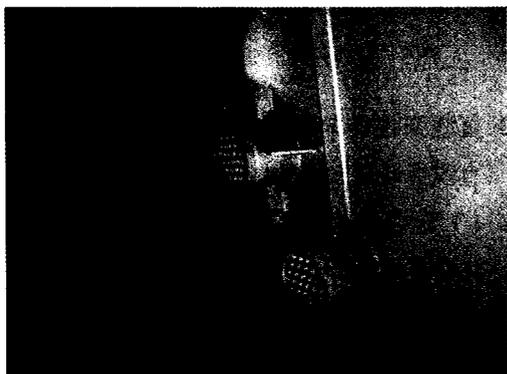


图6 安装好的直线弹性孔道转向器



图7 建设中的南宁大桥

6 小结

大跨径曲线桥梁非对称外倾拱桥由于结构独特，需要设计全新的桥梁拉索转向器的来平衡主梁横向分力，直线弹性孔道转向器成功地在南宁大桥上应用，说明这种设计是成功的。同时，这种直线弹性转向器也可以应用于其它曲率半径大，转向角小的工程中。

参考文献

- [1] 《南宁大桥设计图册》. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院.
- [2] 苏寅申主编. 《桥梁施工及组织管理》[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [3] 王凡主编. 《桥梁预应力混凝土施工技术及标准规范实施手册》[M]. 吉林: 吉林电子出版社, 2004.

(上接第12页)

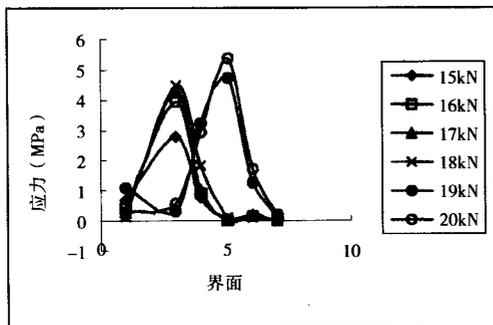


图10 试件C80-60-1在邻近剥离荷载作用下的应力分布

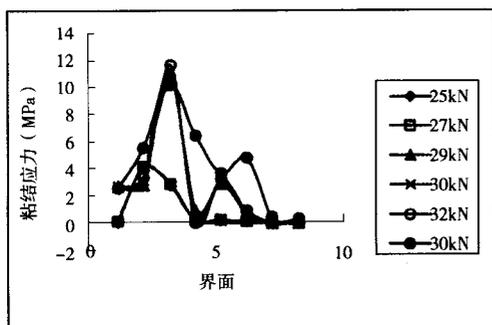


图11 试件C150-60-2在邻近剥离荷载作用下的应力分布

5 结语

本文采用弯拉试验方法对纤维布与钢结构的粘结性能进行了试验，研究了不同粘结参数对粘结强度影响，初步得出了如下几点结论：

(1) 碳纤维布与钢结构之间的粘结存在有效粘结长度，粘结长度没有达到有效粘结长度时，极限承载力随着粘结长度的增加而增加，但并不是成比例增加，当粘结长度超过有效粘结长度后，极限承载力不再随着粘结长度的增长而变化，而是趋于稳定。本次试验得出的碳纤维布与钢结构之间有效粘结长度在120~150mm之间。

(2) 极限承载力随着粘贴的纤维布层数的增加而增加，但不是简单的倍数关系。在粘贴多层CFRP时，应尽量使层间粘结充分，避免层间分离。

(3) 碳纤维布与钢结构界面的宽度比对粘结强度有一定的影响，试件的粘结强度随着宽度比 b_f/b_s (b_f : 碳纤维布宽度; b_s : 工字钢腿宽度) 的增加而减小。