

文章编号: 1000-4750(2009)08-0251-06

FRP(纤维增强聚合物)片材单面搭接性能分析

李 杉, *任慧韬, 黄承逵, 崔云飞

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024)

摘 要:《碳纤维片材加固修复混凝土结构施工技术规范》给出了 CFRP(碳纤维增强聚合物)与 CFRP 搭接长度不应小于 100mm, 其合理性仍需要进一步研究分析。该文根据单面搭接一维经典弹性理论, 考虑胶层的弹塑性, 推导了 FRP 单面搭接“有效搭接长度”的计算公式。并手工制作了 12 组 FRP 单面搭接试件, 对搭接试件进行静力拉伸试验, 考察了 FRP 与 FRP 界面的粘结应力分布, 对有效搭接长度进行了分析。试验结果分析表明: 对任何搭接长度, 最大剪应力发生在搭接的端部区域; CFRP 的有效搭接长度大约在 75mm—100mm, GFRP(玻璃纤维增强聚合物)的有效搭接长度大约在 100mm—125mm 之间, 公式计算的有效长度与试验结果基本吻合。所得结论为 CFRP 片材加固混凝土技术规范提供一定的参考。

关键词: 纤维增强聚合物; 单面搭接; 有效搭接长度; 粘结应力; 试验研究

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A

BEHAVIORS OF FRP (FIBER REINFORCED POLYMER) SINGLE LAP BOND

LI Shan, *REN Hui-tao, HUANG Cheng-kui, CUI Yun-fei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In “Technical Specifications for Strengthening Concrete Structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate”, the overlap length of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) is required to be 100mm at least. To examine the rationality of this requirement, based on the classical elasticity theory and elastic-plastic property of adhesive, a simplified formula to calculate the effective bond length of FRP single lap bond (SLB) is presented. Twelve groups of FRP SLB specimens were made by hand, and they were tested under static loading. The shear stress distribution in the overlap zone was measured, which leads to the derivation of the effective bond length of FRP SLB. The test results indicate that the maximum shear stress occurs at the ends of the overlap zone for any overlap length; and the effective bond length is estimated to be between 75 mm and 100 mm in Carbon specimens and between 100 mm and 125 mm in Glass specimens. The computed results using the presented formula were in agreement with experimental ones. This study confirms the requirement in “Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate”.

Key words: fiber reinforced polymer; single lap bond; effective bond length; bond stress; experimental study

随着 FRP 在混凝土结构加固中的广泛运用, 将会涉及到 FRP 与 FRP 的搭接问题, 比如: FRP 加固结构柱, 粘贴多层纤维片材, 由于构造要求需要把两片纤维片材连接在一起, 这些都需要进行纤维

收稿日期: 2008-04-22; 修改日期: 2008-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608013)和国家重大基础研究前期研究专项基金项目(2004CCA04100)

作者简介: 李 杉(1979—), 男, 云南昆明人, 博士生, 主要从事 FRP 加固混凝土及耐久性研究(E-mail: Lsdlut@yahoo.com.cn);

*任慧韬(1973—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 主要从事结构物检测、加固与耐久性研究(E-mail: renhuitao@dl.cn);

黄承逵(1941—), 男, 辽宁盖州人, 教授, 博导, 主要从事混凝土、纤维混凝土与加固理论研究(E-mail: huangck@dlut.edu.cn);

崔云飞(1982—), 男, 河南周口人, 硕士生, 从事 FRP 加固混凝土耐久性研究(E-mail: cllcyf@163.com).

片材搭接。搭接是通过胶粘剂把两种或者同种材料连接在一起共同工作，搭接段担任着传递荷载的作用。由于搭接段中存在较大的应力集中现象，其可靠性是保证整体结构正常使用的前提。目前，《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》CECS146规定碳纤维片材的搭接长度不应小于 100mm^[1]。而文献[2]的试验表明使碳纤维片材搭接充分发挥粘结性能的临界长度大约 75mm，玻璃纤维片材的临界长度大约 50mm。文献[3]给出了确定长度的经验公式与方法。文献[4]对碳纤维片材搭接长度为 150mm、200mm、250mm 和 300mm 进行了试验，研究表明了应力传递大约在 65mm 范围内，大约 70%—75%的应力发生在端头 15mm 范围内。文献[5]研究了搭接长度为 100mm 时的碳纤维片材和玻璃纤维片材界面耐久性问题，试验表明对于碳纤维片材搭接，搭接长度为 100mm 可以满足冻融条件下搭接界面的传力要求，对于玻璃纤维片材，破坏形式为剥离破坏，破坏发生在片材的搭接处，表明搭接长度为 100mm 时不能满足界面传力要求。文献[6]进行了搭接长度为 100mm 的 GFRP 剪应力分布以及粘结滑移的试验研究，认为 Her^[7]的搭接力学解析式适用于短搭接，对于长搭接，文中根据试验结果假定应变满足三元一次方程，求导后剪应力分布服从二元一次方程，说明在长搭接接头中，应力梯度为零的位置仅发生在搭接接头的中点，这和已有的试验结果与理论分析^[8-11]存在一定分歧。

目前我国 CFRP 加固规范中还没有相应的试验规程以及“有效搭接长度”的计算公式；并且对纤维片材搭接试验研究较少。本文推导了 FRP 与 FRP 搭接的“有效搭接长度”，并对两类纤维片材进行不同搭接长度的试验研究。

1 搭接长度分析

FRP 厚度一般比较薄，可以忽略胶层的正应力。从圆环扭转剪切所得到的胶层 $\tau-\gamma$ 曲线发现胶粘剂存在一定塑性区，可近似认为胶层为理想的弹塑性材料^[8]。单搭接的试件模型见图 1，受力分析见图 2，胶层理想弹塑性曲线见图 3。

在进行有效搭接长度分析时，作了如下假定：

- 1) FRP 轴向应力不随厚度变化；
- 2) 胶层的剪应力不随厚度变化；
- 3) 忽略胶层、FRP 温度应力；
- 4) FRP 为线弹性材料，胶层为理想弹塑性材料。

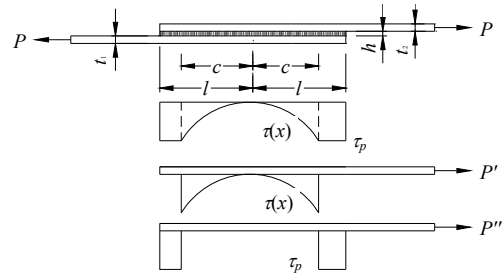


图 1 搭接试件模型

Fig.1 Geometric profile of SLB

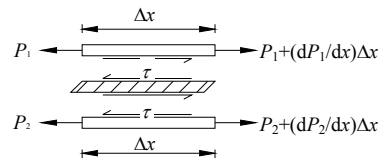


图 2 搭接接头微元体

Fig.2 The free-body diagram of SLB

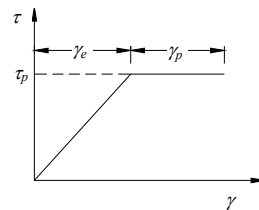


图 3 胶层弹塑性曲线

Fig.3 Elastic-plastic $\tau-\gamma$ curve of adhesive

当 $x \leq |c|$ ，即在弹性区域内，根据图 2，利用简单的平衡及变形条件得到弹性区域内剪应力表达式^[7-8,12]：

$$\tau(x) = \frac{P' \cdot \lambda}{2} \left[\frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\sinh(\lambda \cdot c)} - \frac{E_2 \cdot t_2 - E_1 \cdot t_1}{E_2 \cdot t_2 + E_1 \cdot t_1} \cdot \frac{\sinh(\lambda \cdot x)}{\cosh(\lambda \cdot c)} \right] \tag{1}$$

其中：
$$\lambda^2 = \frac{G_a}{h} \left(\frac{1}{E_2 \cdot t_2} + \frac{1}{E_1 \cdot t_1} \right)$$

式中： G_a 、 h 分别为胶层的剪切模量和厚度； E_1 、 E_2 、 t_1 、 t_2 分别为上层与下层搭接件的弹性模量和厚度； c 为二分之一弹性区长度； P' 为弹性区域单位宽度上的荷载。

一般情况下，FRP 搭接试件的两搭接件参数相同，即 $E_1 = E_2 = E_F$ ， $t_1 = t_2 = t$ ，式(1)可变换为：

$$\tau(x) = \frac{P' \cdot \lambda}{2} \left[\frac{\cosh(\lambda \cdot x)}{\sinh(\lambda \cdot c)} \right] \tag{2}$$

其中：
$$\lambda^2 = \frac{2G_a}{h \cdot E_F \cdot t}$$

当 $x = \pm c$ 时，剪应力为最大值，即 τ_p ：

$$\tau_{\max} = \tau_p = \frac{P' \cdot \lambda}{2} \left(\frac{\cosh(\lambda \cdot c)}{\sinh(\lambda \cdot c)} \right) = \frac{P' \cdot \lambda}{2 \cdot \tanh(\lambda \cdot c)} \quad (3)$$

则弹性区荷载为:

$$P' = \frac{2 \cdot \tau_p \cdot \tanh(\lambda \cdot c)}{\lambda} \quad (4)$$

当 $x > |c|$, 胶层进入塑性阶段, 由静力平衡条件得:

$$\begin{aligned} P'' &= 2\tau_p \cdot (l - c), \\ P' &= P - P'' = P - 2\tau_p \cdot (l - c). \end{aligned} \quad (5)$$

联合式(4)和式(5)得:

$$\frac{2\tau_p \cdot \tanh(\lambda \cdot c)}{\lambda} = P - 2\tau_p \cdot (l - c) \quad (6)$$

由式(6)得:

$$l = \frac{P}{2 \cdot \tau_p} + c - \frac{1}{\lambda} \cdot \tanh(\lambda \cdot c) \quad (7)$$

$$\text{则 } L = 2l = \frac{P}{\tau_p} + 2c - \frac{2}{\lambda} \cdot \tanh(\lambda \cdot c) \quad (8)$$

式中: L 为搭接长度; P 为单位宽度上的荷载总值; P'' 为塑性区域的单位宽度上的荷载, τ_p 为胶层峰值剪应变对应的剪应力。

由式(1)可知, 弹性范围内最大剪应力与 λ 和 c 有关, 而 $\lambda = \sqrt{\frac{2G_a}{h \cdot E_F \cdot t}}$, 即胶层参数和搭接件参数一定时, 最大剪应力只与搭接长度有关。表 1 给出了 λ 为定值时, $\tanh(\lambda \cdot c)$ 随搭接长度的变化值。

表 1 搭接参数表

Table 1 Parameters of SLB

$2c/\text{mm}$	λ	$\tanh(\lambda \cdot c)$	$\lambda \cdot c$	τ_{\max}/P
1	0.616	0.2987	0.308	1.031
2	0.616	0.5484	0.616	0.562
3	0.616	0.7279	0.924	0.423
5	0.616	0.9122	1.540	0.338
10	0.616	0.9958	3.081	0.309
15	0.616	0.9998	4.621	0.308
20	0.616	1.0000	6.161	0.308
25	0.616	1.0000	7.701	0.308
30	0.616	1.0000	9.242	0.308

从表 1 中看出, 搭接长度 c 超过一定长度后, $\tanh(\lambda \cdot c)$ 项的值不再随搭接长度的增加而增加, 说明超过此长度, 承载力不再随长度增加而增大。即 $\lambda \cdot c$ 超过一定值后, 承载力不随搭接长度变化, 界面应力传递完成, 定义此时对应的搭接长度为弹性

搭接长度。从以上分析可以得出当 $\tanh(\lambda \cdot c)$ 为定值 1 时, 界面剪应力传递完成, 弹性承载力不随搭接长度的增加而增加。故当 $\tanh(\lambda \cdot c) = 1$ 时有:

$$\lambda \cdot c = 6.161 \quad (9)$$

由式(9)得:

$$c = \frac{6.161}{\lambda} \quad (10)$$

把式(10)和 $\tanh(\lambda \cdot c) = 1$ 代入式(8)近似得:

$$L = \frac{P}{\tau_p} + \frac{11}{\lambda} \quad (11)$$

考虑到胶层极限剪应力的离散性, τ_p 乘以系数 0.8^[8]。考虑到混凝土加固中 FRP 搭接时多为手工制作, L 乘以安全系数 K , 则式(11)变为:

$$L = K \cdot \left(\frac{P}{0.8 \cdot \tau_p} + \frac{11}{\lambda} \right) \quad (12)$$

其中: $\lambda^2 = \frac{2G_a}{h \cdot E_F \cdot t}$; K 的取值根据可靠性方法进行统计计算。

2 试验概述

试验采用工程加固中比较常见的碳纤维片材与玻璃纤维片材。碳纤维片材来自东丽 UT70-20, 胶粘剂采用大连凯华公司生产的碳纤维片材建筑结构胶, 受拉弹性模量为 2711.7MPa, 泊松比取 0.33; 玻璃纤维片材来自国内生产, 胶粘剂采用南京产玻璃纤维片材配套胶, 受拉弹性模量为 2605.7MPa, 泊松比取 0.33。所采用的纤维片材基本力学性能见表 2。

表 2 FRP 材料基本物理力学性能

Table 2 Materials properties of FRP sheet

FRP	厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/(%)
CFRP	0.111	4331	214.4	2.06
GFRP	0.169	2138	63.1	3.53

试验采用单面搭接试件, 由于混凝土结构规范中没有相应的试验标准, 试件设计与制作参照《胶粘剂拉伸剪切强度测试方法》GB7124-86 以及文献[2,6]进行, 搭接宽度均为 25mm, 搭接接头长度 BL 分别为 25mm、50mm、75mm、100mm、125mm 和 150mm, 搭接的上层片材在端部背面粘贴一层 90mm 长的等宽度纤维片材垫层, 下层片材则在端部正面粘贴, 两个端头的加强片采用 70mm 长的铝片粘贴, 试件形式见图 4。

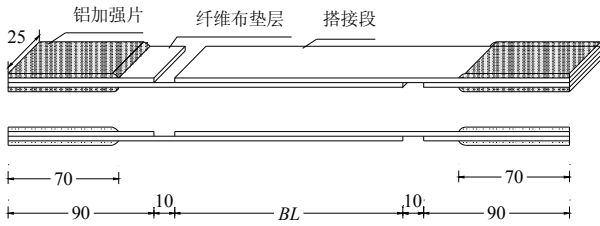


图 4 FRP 搭接试件
Fig.4 FRP SLB specimen

每个长度等级设计 6 个试件，25mm 长度等级的试件没有进行应变测量，其余试件采用粘贴应变片进行应变分布试验，详细应变片布置见图 5，其中 $X_1=(BL/2-6)/2$, $X_2=X_3=(BL/2-6)/4$ 。试验在 1000kN 电液伺服万能试验机上进行，试验采用位移控制，加载速率为 0.5mm/min。荷载和应变值采用 IMC 动态应变采集系统自动采集。

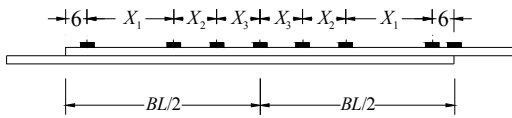


图 5 FRP 搭接试件的应变片置
Fig.5 Strain gauged FRP SLB specimen

3 试验结果与分析

3.1 破坏荷载与破坏形态

CFRP 与 CFRP 搭接试件的破坏荷载值见图 6，从试件的破坏形态来看，可归类为三种典型破坏形式：1) 搭接端附近 FRP 拉断，这类破坏主要由于材料的抗拉强度不足；2) 剥离破坏，这类破坏主要由于界面剪应力不足，包括了胶层的内聚破坏和 FRP 与胶层的界面破坏；3) 界面剥离一段后纤维片材拉断，这类破坏处于界面剥离破坏与材料拉断破坏的一个临界区间。GFRP 与 GFRP 搭接试件的破坏形态也属于这三类。

图 7 给出了同一类纤维片材的荷载比值(各搭接长度荷载值比上 25mm 的荷载值)与搭接长度的关系。对于 25mm 的 CFRP 短搭接试件，破坏主要由于界面剥离破坏，破坏荷载低，随着搭接长度的增加，破坏荷载有所提高，破坏主要由于材料强度不足引起的 FRP 拉断破坏。从图 7 可以看出，搭接长度 75mm—150mm 之间的各搭接长度较 25mm 搭接试件均提高 10%以上，搭接长度 100mm 时的破坏荷载最大，相比 25mm 搭接试件提高了 18%，超过 100mm 后荷载没有增大的趋势，在这区间各长度的荷载波动较小，表明超过一定搭接长度后，长

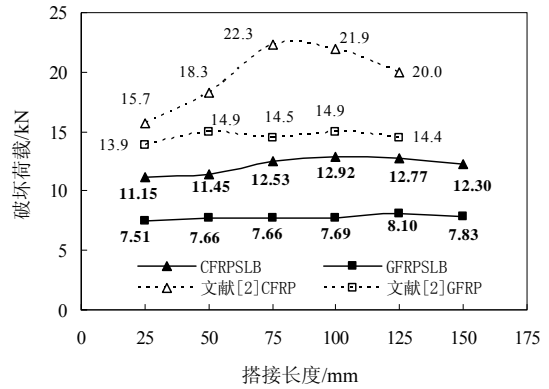


图 6 破坏荷载与搭接长度关系

Fig.6 Failure load vs bond length for FRP SLB

度的增加不能有效提高承载力，即超过一定搭接长度后由纤维布拉断控制荷载基本不变。文献[2]试验得出搭接长度 75mm 能使 CFRP 充分发挥粘结性能，超过 75mm 后强度降低，和本文的试验结果有所差异。文献中超过 75mm 后强度降低的原因可能是由于施工工艺、试验环境、纤维片材以及胶粘剂性能等因素造成。同时也说明了 CFRP 片材搭接长度与胶粘剂、CFRP 材料性能和施工工艺等有关。

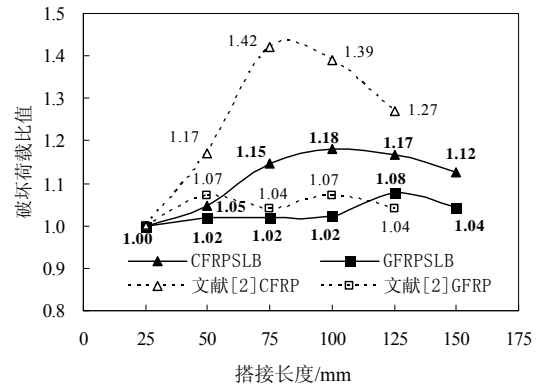


图 7 破坏荷载比值与搭接长度关系

Fig.7 Ratio of failure load vs bond length for FRP SLB

搭接长度在 25mm—100mm 的 GFRP 搭接试件破坏均未出现 GFRP 拉断破坏，破坏荷载值变化较小；搭接长度为 125mm 和 150mm 的试件破坏形式主要是 GFRP 拉断破坏，破坏荷载值有所增大。图 7 可以看出，搭接长度 125mm 时的破坏荷载最大，相比 25mm 搭接试件提高了 8%，超过 125mm 后荷载值有微弱降低的趋势，这可能是由于试件制作时引起的误差。手工制作不可能使全部纤维处于拉直状态，部分纤维丝不可避免出现弯曲，当由 FRP 拉断控制荷载时，这部分弯曲的纤维丝使得纤维不能同时受力，在 FRP 片材中出现应力集中现象，所以在由 FRP 破坏荷载控制的长度范围内，会出现荷载

降低现象。

3.2 界面剪应力

由于纤维片材的厚度很小，可以认为上层片材与下层片材之间仅传递剪应力。根据各级荷载作用下测定的纤维片材拉伸应变，由纤维片材的受力平衡得到*i*点附近短距离内界面平均剪应力：

$$\tau_i = E_F t_F \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad (13)$$

式中： ε_i 和 ε_{i-1} 为纤维片材测点*i*与*i-1*的应变； Δx 为测点*i*与*i-1*之间的距离； E_F 和 t_F 分别为纤维片材弹性模量和厚度； τ_i 为测点*i*的剪应力。

根据式(2)和式(13)计算各搭接长度在不同荷载作用下剪应力。CFRP 搭接试件的剪应力分布见图 8—图 12。由试验得到的剪应力分布在各搭接长度中均呈非线性分布，搭接的两端剪应力最大，中点处剪应力最小，中点两侧的应力分布基本呈对称性。随着搭接长度的增加，中部剪应力逐渐减小，当搭接长度超过 75mm 后，中部一定长度内剪应力梯度变化非常小，试验结果和式(2)计算的结果基本吻合，说明在式(2)的基础上进行推导是可行的。根据 CFRP 搭接的应力分布来看，CFRP 搭接试件的有效粘结长度大约在 75mm—100mm 之间。

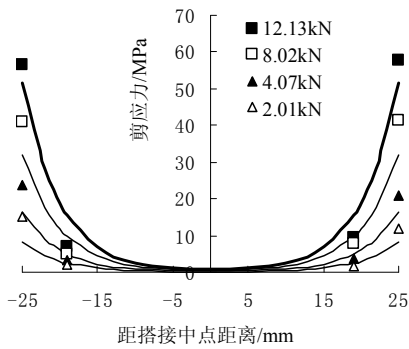


图 8 CFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=50)
Fig.8 Shear stress profile for a CFRP SLB (BL=50)

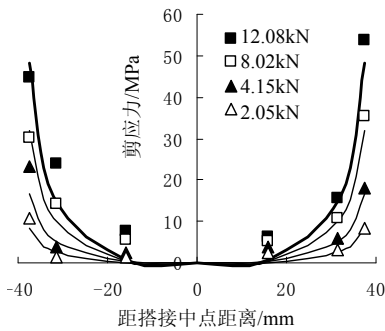


图 9 CFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=75)
Fig.9 Shear stress profile for a CFRP SLB (BL=75)

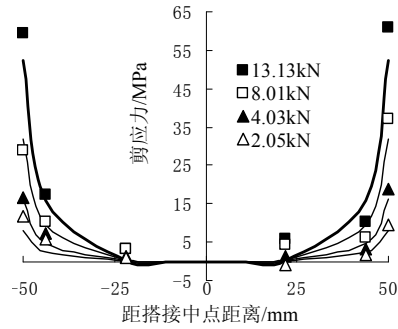


图 10 CFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=100)
Fig.10 Shear stress profile for a CFRP SLB (BL=100)

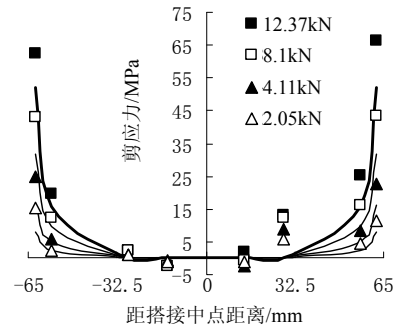


图 11 CFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=125)
Fig.11 Shear stress profile for a CFRP SLB (BL=125)

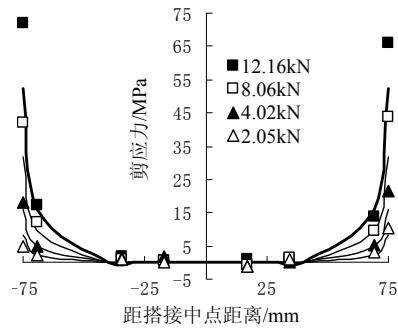


图 12 CFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=150)
Fig.12 Shear stress profile for a CFRP SLB (BL=150)

图 13—图 15 给出了搭接长度为 100mm、125mm 和 150mm 的 GFRP 试件剪应力分布。根据 GFRP 搭接的界面应力分布来看，GFRP 搭接试件的有效粘结长度大约在 100mm—125mm 之间。

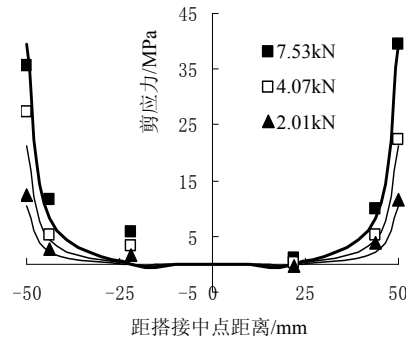


图 13 GFRP 搭接的平均剪应力分布图(BL=100)
Fig.13 Shear stress profile for a GFRP SLB (BL=100)

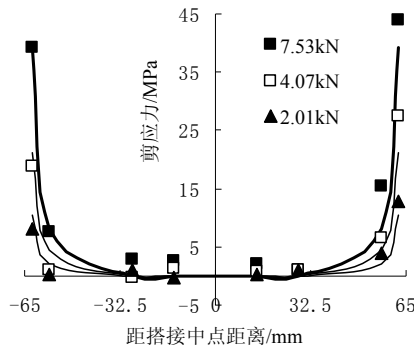


图 14 GFRP 搭接的平均剪应力分布图($BL=125$)

Fig.14 Shear stress profile for a GFRP SLB ($BL=125$)

根据式(12)计算搭接长度时,安全系数 K 取值采用概率方法,把每组搭接长度看作一个样本计算强度的变异系数,选取概率 $\alpha=0.05$,计算得到安全系数的范围。经计算后每组搭接安全系数 K 约在 1.1—1.5 之间。取安全系数最大值代入式(12)计算搭接长度,得到 CFRP 搭接有效长度为 85.88mm, GFRP 搭接有效长度为 108.16mm。

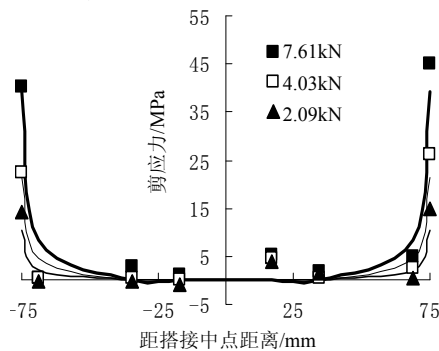


图 15 GFRP 搭接的平均剪应力分布图($BL=150$)

Fig.15 Shear stress profile for a GFRP SLB ($BL=150$)

4 结论

本文进行了 FRP 搭接长度的公式推导以及 CFRP 搭接试验和 GFRP 搭接试验,可以得出以下结论:

(1) 本文给出的有效搭接长度的公式考虑了粘结胶体参数、FRP 材料参数以及施工工艺参数的影响,试验结果证明了搭接长度与这些参数有关。通过试验中 FRP 界面应力的传递可以看出,CFRP 有效搭接长度大约在 75mm—100mm 之间;GFRP 大约在 100mm—125mm 之间,由公式计算的有效长度和试验结果吻合。公式中对施工工艺参数的取值通过一定量的样本进行统计分析得到。

(2) 试验表明对任何搭接长度,最大剪应力区发生在搭接的端部。对于不同工况搭接长度对应一个临界值,超过这临界值以后,长度的增加不再提高搭接承载力。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. CECS146: 2003, 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
China Engineering Construction Standardization Association. CECS146: 2003, Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [2] Parvathy U. Behaviour of FRP-to-FRP and FRP-to-concrete bond [D]. Canada: University of Toronto, 2003.
- [3] 夏文干, 赵桂芳, 曾令况. 胶粘剂和胶接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
Xia Wen'gan, Zhao Guifang, Zeng Lingkuang. Adhesive and bond technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [4] Ohno S, Miyanchi Y, Keu T, Higashibata Y. Bond Properties of CFRP Plate Joints [C]// JCI. The Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Sappora Japan, Japan Concrete Institute, 1997: 241—248.
- [5] 任慧韬. 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
Ren Huitao. Study on basic theories and long time behavior of concrete structures strengthened by fibre reinforced polymers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [6] Homam S M. Fibre reinforced polymers (FRP) and FRP-concrete composites subjected to various loads and environmental exposures [D]. Canada: University of Toronto, 2005.
- [7] Her S C. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints [J]. Composite Structure, 1999, 47 (1): 673—678.
- [8] 汪裕炳, 张全纯. 复合材料的结构连接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
Wang Yubing, Zhang Quanchun. Constructure joints of composites materials [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [9] Li G, Sullivan P L, Thring R W. Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints [J]. Composite Structures, 1999, 46(4): 395—403.
- [10] Li G, Sullivan P L. Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2001, 21(3): 211—220.
- [11] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
Shen Guanlin. Mechanics of composites materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese)
- [12] Tsai M Y, Oplinger D W, Morton J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints [J]. International Journal of Solids Structures, 1998, 35(12): 1163—1185.