

# 胶层厚度对预应力碳纤维板加固砼梁 界面剪应力影响试验研究<sup>\*</sup>

马第江, 吴亚玲, 余进

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 通过对 9 片砼梁进行预应力碳纤维板放张试验, 分析了预应力放张后碳纤维板应变及界面剪应力大小和分布规律。结果表明, 胶层厚度对碳纤维板放张后的板端界面剪应力大小有显著影响, 界面剪应力随胶层厚度增加而减小, 胶层厚度为 4 mm 时界面剪应力达到最小值; 厚度超过 4 mm 时, 界面剪应力随胶层厚度的增加而增加。

**关键词:** 桥梁; 预应力碳纤维板; 胶层厚度; 界面剪应力; 砼梁

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)01-0161-04

在预应力碳纤维板加固砼梁技术中, 碳纤维板放张时会引起板端界面剪应力集中, 过大的剪应力会使粘结界面出现裂缝甚至产生剥离, 从而引起预应力失效和整个结构剥离破坏。大量试验和理论研究表明: 影响粘结界面剪应力大小的主要因素包括碳纤维板初始预应力水平、弹性模量和厚度及粘结胶层的剪切刚度和厚度等。Triantafillou T. C. 等给出了结构端部不发生剥离破坏情况下碳纤维板的最大初始预应力水平计算公式, 但该理论公式的表达式是一个隐函数, 各影响因素并不明确; 牛赫东等基于破坏力学概念对界面剪应力、FRP 应变分布、有效传递长度进行了理论推导, 得出影响因素包括碳纤维板的弹性模量、厚度、宽度、粘结胶层的刚度等, 但并未考虑粘结胶层厚度对界面剪应力的影响; Mazumdar S. K. 等通过试验证明粘结胶层厚度对碳纤维板—砼界面的粘结性能有巨大影响, 粘结强度随胶层厚度的增加而增加, 胶层厚度增加到某一量值时, 粘结强度不增反减, 而碳纤维板—砼界面粘结强度与界面剪应力间有显著的关系。该文对 9 片砼梁进行预应力碳纤维板放张试验, 通过对放张后梁底碳纤维板的应变分布、界面剪应力大小和分布情况, 研究胶层厚度、初始预应力度对界面剪应力大小和分布的影响, 并基于试验结果和理论计算分析拟合碳纤维板放张后板端界面剪应力计算公式。

## 1 试验方案

9 根钢筋砼试件采用同一尺寸, 截面尺寸为 120

mm×250 mm, 全长 1 500 mm, 净跨 1 400 mm, 砼设计强度为 C40。所有砼试件的配筋情况相同, 其中梁底受拉主筋采用 2 $\phi$ 20 HRB335 热轧钢筋, 架立筋配有 2 $\phi$ 10 HRB335 热轧钢筋, 箍筋配有  $\phi$ 6 热轧钢筋, 箍筋间距为 1× $\phi$ 6@750+14× $\phi$ 6@100+1× $\phi$ 6@75。砼试件的截面和配筋布置见图 1, 试件编号与参数见表 1。

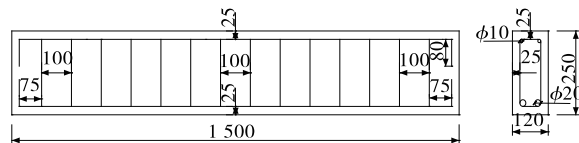


图 1 试件尺寸与配筋示意图(单位: mm)

表 1 试件编号和试验参数

试件编号	初始应力/ MPa	初始应变/ $\mu\epsilon$	胶层厚度/ mm
L-0.1P-2	250	1 560	2
L-0.1P-4	250	1 536	4
L-0.1P-6	250	1 569	6
L-0.2P-2	500	3 038	2
L-0.2P-4	500	3 028	4
L-0.2P-6	500	3 108	6
L-0.3P-2	750	4 650	2
L-0.3P-4	750	4 550	4
L-0.3P-6	750	4 567	6

注: 试件编号中,  $P$  表示碳纤维板的极限抗拉强度, 0.1 $P$  表示碳纤维板施加的预应力为极限抗拉强度值的 10%, 其他以此类推; 末尾数字表示粘结胶层厚度。

<sup>\*</sup> 基金项目: 长沙理工大学开放基金项目(15DK03)

试验采用不同直径的钢珠控制粘结胶层厚度,钢珠直径为 2、4 和 6 mm。试验中所用碳纤维板由 SIKa 公司提供,型号为 S512 型,板材厚度为 1.2 mm,宽度为 50 mm,抗拉强度为 2 461 MPa。胶粘剂采用 SIKa 公司提供的 Sikadur30 环氧树脂,受拉弹性模量为 2 632 MPa。使用预应力碳纤维板张拉机具对碳纤维板进行预应力张拉和放张。为防止碳纤维板在放张过程中发生板端剥离破坏,试件端部都附加环形碳纤维布锚固,端部锚固形式见图 2。

试验主要测量试验梁跨中截面和梁底碳纤维板应变、钢筋应变。应变片测点布置见图 2。

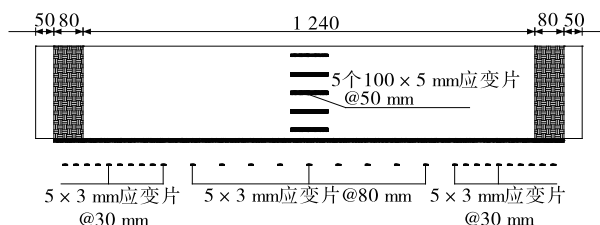


图2 应变测点布置(单位:mm)

## 2 试验结果及分析

### 2.1 碳纤维板应变分布规律

图3为初始预应力不同而胶层厚度相同的 L-0.1P-4、L-0.2P-4、L-0.3P-4 砼梁试件放张完成后碳纤维板的应变分布,胶层厚度为 2、6 mm 的应变分布规律与图3大致相同。

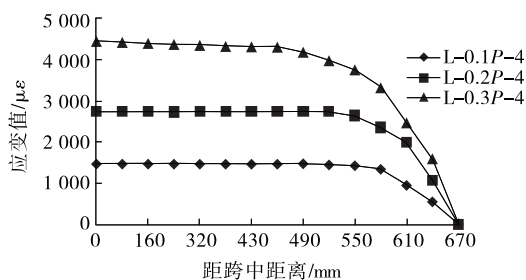


图3 放张后碳纤维板应变分布

由图3可知:碳纤维板应变分布规律为端部应变接近于零,应变值向跨中逐渐增加至一定粘结长度后趋于稳定,稳定值大致等于张拉初始应变值。这是因为放张完成后碳纤维板端部的预应力损失最大,中部位置一段长度预应力损失最小。表2为各试件的有效传递长度。

### 2.2 影响预应力有效传递长度的相关因素

(1) 初始预应力水平。试件 L-0.1P-4、L-0.2P-4、L-0.3P-4 的初始预应力分别为碳纤维

表2 各试件的有效传递长度 mm

试件编号	有效传递长度	试件编号	有效传递长度
L-0.1P-2	128.9	L-0.2P-6	131.8
L-0.1P-4	103.4	L-0.3P-2	214.6
L-0.1P-6	121.4	L-0.3P-4	174.6
L-0.2P-2	129.6	L-0.3P-6	234.2
L-0.2P-4	107.2		

板极限抗拉强度的 10%、20%、30%,传递长度分别为 103.4、107.2、174.6 mm。表明初始预应力越大,碳纤维板的预应力传递长度越大,尤其当碳纤维板的初始预应力超过其极限抗拉强度的 20%时,该规律表现越明显。

(2) 粘结胶层厚度。对比试件 L-0.1P-2、L-0.1P-4、L-0.1P-6,其初始预应力相同,胶层厚度分别为 2、4、6 mm,预应力有效传递长度分别为 128.9、103.4、121.4 mm。表明胶层厚度为 4 mm 时界面剪应力有效传递长度最短,粘结胶层厚度对界面应力有效传递长度有显著影响。

### 2.3 碳纤维板与砼界面剪应力大小和分布

采用传统量测方法计算碳纤维板与砼界面的粘结剪应力,即采用 TDS530 静态应变测试仪测取碳纤维板上应变片数值,再利用静力平衡原理与差分法计算试验梁各位置碳纤维板与砼界面间的局部平均粘结剪应力  $\tau$ 。计算公式如下:

$$\tau = E_f t_f \frac{d\epsilon_f}{dx} \quad (1)$$

式中:  $E_f$  为碳纤维板的弹性模量;  $t_f$  为碳纤维板的厚度;  $d\epsilon_f$  为相邻应变片的应变差值;  $dx$  为相邻应变片中心之间的距离。

预应力碳纤维板放张后,碳纤维板应变在板端接近于零,随着有效传递长度向跨中迅速增加接近初始张拉应变值,板端部的碳纤维板应变变化值最大,所以界面剪应力在板端最大,各试验梁在板端发生界面剪应力集中现象。界面剪应力从板端部向跨中迅速减小,碳纤维板中部位置剪应力很小,几乎接近于零(见图4)。其他试验梁的界面剪应力分布规律与图4相似。

从图4可看出:碳纤维板初始预应力水平越高,放张后板端界面剪应力越大。为防止板端发生碳纤维板剥离破坏,应减小碳纤维板的初始预应力水平。但已有研究表明,较大的初始预应力更能发挥碳纤维材料的高强度优势,改善加固梁的受力性能。因

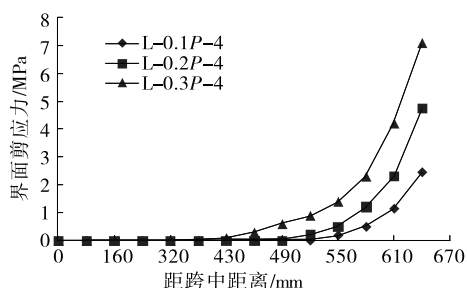


图4 不同初始预应力水平砼梁放张后界面剪应力分布

此,在保证较大初始预应力水平下对加固梁板端的界面剪应力集中现象进行试验研究显得尤为重要。而在相同预应力水平下,试件 L-0.1P-4 在有效粘结长度内界面剪应力比试件 L-0.1P-2、L-0.1P-6 都小(见图 5),在碳纤维板端部,试件 L-0.1P-2、L-0.1P-4、L-0.1P-6 的最大剪应力分别为 2.45、1.92、2.24 MPa,表明随粘结胶层厚度的增大,界面剪应力减小,在 4 mm 时达到最小值,胶层厚度大于 4 mm 时界面剪应力又继续增大。因此,在对砼梁进行预应力碳纤维板加固时,粘结胶层厚度控制在 4 mm 时能抑制碳纤维板端部发生界面剪应力集中现象,减小界面剪应力值,防止加固梁板端发生早期剥离破坏。

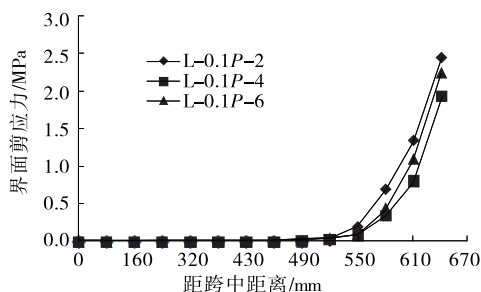


图5 不同粘结胶层厚度砼梁放张后界面剪应力分布

### 3 板端界面剪应力理论分析

牛赫东等基于破坏力学概念,遵循线性无软化 and 双线性软化模型两种碳纤维板-砼界面本构关系,阐明了剪应力集中的影响因素,推导出基于线性无软化模型的理论计算公式如下:

$$\tau(x) = \sigma_p \sqrt{\frac{\tau_f^2}{2G_f E_2} \frac{t_2}{1 + \alpha t_2}} \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\cosh(\beta_1 x)} \quad (2)$$

$$\alpha = -\frac{E_2 b_2}{E_1} \left( \frac{1}{b_1 t_1} + \frac{t_n^2}{I_1} \right) \quad (3)$$

式中: $\tau(x)$  为界面剪应力; $\sigma_p$  为初始预应力大小; $\tau_f$

为界面剪切强度; $G_f$  为单位面积粘结单元剥离所需能量; $E_2$  为碳纤维板的弹性模量; $E_1$ 、 $I_1$  分别为砼的弹性模量和惯性矩; $b_1$ 、 $b_2$  分别为砼梁宽度和碳纤维板宽度。

式(2)是基于碳纤维板-砼界面的本构关系推导的,而界面本构关系很难用理论公式去推导,只能通过试验求得,这样就增大了求解界面剪应力的难度。而且该公式并没有考虑粘结胶层厚度这个参数,而根据前文所述胶层厚度对界面剪应力有很大影响,直接影响加固梁是否会发生早期剥离破坏。

郭馨艳等基于图 6 所示力学分析模型及如下假设推导了式(4)、式(5)所示界面剪应力分布计算公式:1) 砼、粘结胶层及碳纤维板都呈线弹性变形;2) 砼梁简支的变形符合平截面假定;3) 界面剪应力在胶层厚度上分布均匀。

$$\tau(x) = -\frac{GN_{pf}}{t_a E_{cf} A_{cf} \lambda} \left( \frac{e^{-\lambda l_{cf}}}{1 + e^{-\lambda l_{cf}}} \right) e^{\lambda x} + \frac{GN_{pf}}{t_a E_{cf} A_{cf} \lambda} \left( \frac{1}{1 + e^{-\lambda l_{cf}}} \right) e^{-\lambda x} \quad (4)$$

$$\lambda^2 = G \frac{b}{t_a} \left[ \frac{1}{E_{cf} A_{cf}} + \frac{1}{E_b A_b} + \frac{h(h + 2t_a + t_{cf})}{4E_b I_b} \right] \quad (5)$$

式中: $G$  为胶层的剪切模量; $N_{pf}$  为碳纤维板的初始张力; $t_a$  为胶层厚度; $E_{cf}$ 、 $E_b$  分别为碳纤维板和砼梁的弹性模量; $A_{cf}$ 、 $A_b$  分别为碳纤维板和砼梁的横截面积; $h$  为砼梁高; $t_{cf}$  为碳纤维板厚度。

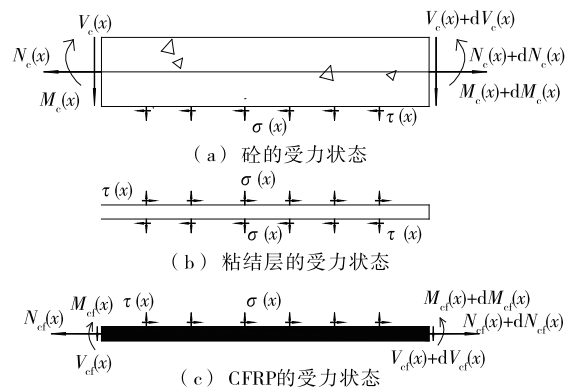


图6 砼梁单元的力学分析模型

将试件参数代入式(4)进行计算,结果见图 7。由图 7 可知:在粘结胶层厚度为 2、4 mm 时,试验结果与理论计算结果较接近,平均误差在 10% 左右。但当胶层厚度变为 6 mm 时,理论计算结果与试验结果相差很远。因为式(4)中界面剪应力计算值与胶层厚度成反比,胶层厚度越大界面剪应力越小,而

这与试验结果相违背(试验结果表明界面剪应力在胶层厚度为4 mm时达到最小值,胶层厚度大于4 mm时界面剪应力又开始增大)。所以式(4)只适用于加固砼梁粘结胶层厚度不大于4 mm时的界面剪应力计算。

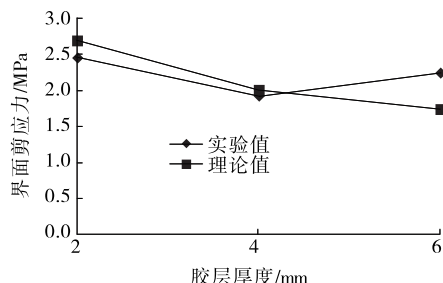


图7 界面剪应力与胶层厚度的关系

通过对实测数据的拟合,引入粘结胶层厚度综合系数 $\alpha$ 的概念,使公式适用于胶层厚度大于4 mm的情况:

$$\tau_1(x) = \alpha \tau(x)$$

$$\alpha = \left(\frac{t_a}{4}\right)^{0.628}$$

式中: $\alpha$ 为胶层厚度综合参数; $t_a \geq 4$  mm。

#### 4 结论

(1) 随着碳纤维板初始预应力水平的增加,加固梁板端界面剪应力增加,界面剪应力与初始预应力大小成正相关关系。

(2) 粘结胶层厚度对加固梁板端界面剪应力有显著影响,胶层厚度从2 mm增加到4 mm时,界面剪应力减小,相应的有效传递长度减小;胶层厚度增加到6 mm时,界面剪应力反而增加,传递长度也相应增加。

(3) 根据试验数据对比分析了现有界面剪应力理论计算公式的缺陷,论证了式(4)在胶层厚度为2和4 mm时计算结果的准确性,根据试验结果拟合了胶层厚度为6 mm时的界面剪应力理论计算公式。

#### 参考文献:

- [1] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3).
- [2] Al-Emrani M, Kligler R. Analysis of interfacial shear stresses in beams strengthened with bonded prestressed laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(4-5).
- [3] Woo S K, Nam J W, Kim J H, et al. Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12).
- [4] Zhishen Wu, Hedong Niu. Shear transfer along FRP-concrete interface in flexural members[J]. Journal of Material, Concrete Structures and Pavements, JSCE, 2010, 49(662).
- [5] Wu Z, Yin J, Niu H. Some Recent achievements in FRP bonding techniques[A]. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering[C]. 2001.
- [6] 郭馨艳, 黄培彦, 郑小红. 预应力FRP加固RC梁的受力分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7).
- [7] 岳清瑞, 李庆伟, 杨勇新. 预应力碳纤维布放张时受力性能分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(4).
- [8] Triantafillou T C, Deskovic N. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(7).
- [9] 牛赫东, 吴智深. 预应力FRP纤维布粘结补强技术中的界面剪切应力传递[A]. 全国土木工程用纤维增强复合材料[C]. 2002.
- [10] Mazumdar S K, Mallick P K. Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites[J]. Polymer Composites, 1998, 19(2).

收稿日期: 2017-04-12

(上接第160页)

程[S].

[9] GB/T 50082-2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S].

[10] Lapin J, Gabalcova Z. Solidification behaviour of TiAl-based alloys studied by directional solidification technique[J]. Intermetallics, 2011, 19(6).

[11] 张鹏, 赵铁军, 戴建国, 等. 硅烷改性混凝土防水与抗氯离子性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3).

[12] 李兵, 陈双庆. 株洲建宁大桥砼防腐涂装设计与施工[J]. 公路与汽运, 2008(4).

收稿日期: 2017-03-21