

文章编号:1671-6833(2007)01-0060-04

预应力 FRP 增强 RC 梁界面剪应力分析

郭馨艳, 黄培彦, 杨 怡, 郑小红

(华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 粘贴预应力纤维增强复合材料(FRP)片材对土木建筑结构进行加固和修复, 可以提高工程效率. 从理论分析着手, 推导了预应力 FRP 片材增强 RC 梁界面层的剪应力的计算公式, 分析了预应力作用下 FRP 片材和混凝土之间的界面层剪应力分布, 并通过有限元对碳纤维薄板(CFL)增强 RC 梁作了数值实验验证. 探讨了初始预应力施加量, FRP 片材的厚度以及界面层厚度对界面剪应力的影响.

关键词: 界面剪应力; FRP 片材; 预应力; RC 梁

中图分类号: O 346.1; TU 377 **文献标识码:** A

0 引言

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)粘贴加固技术已广泛应用于钢筋混凝土建筑(结构)物的加固和维修工程中. 然而, 现有的 FRP 片材粘贴加固技术是被动加固技术, FRP 片材的抗拉强度没有得到充分的发挥, 构件的抗弯刚度提高幅度不大, 混凝土中的裂缝等缺陷无法闭合. 因此, 采用预应力 FRP 片材加固混凝土结构(主动加固技术)将是一种更有前途的新技术^[1-8]. 但是, 在预应力 FRP 片材作用下, FRP 端部界面层的剪应力和正应力分布与无预应力作用下相比会发生改变, 容易造成界面剥离破坏. 因此, 研究预应力 FRP 增强 RC 结构中 FRP 片材与混凝土的界面层的应力分布, 对于探明增强构件的破坏机理具有重要的意义.

有关预应力 FRP 片材与混凝土的界面的应力分析, 国内外的研究还很有限. Triantafillou^[7] 给出了不发生端部剥离破坏情况下的最大预应力的理论计算公式, 但最大预应力的表达式是一个隐函数, 影响参数不明确. 为了深入探讨预应力 FRP 片材与混凝土的界面的应力分布, 笔者以预应力纤维(FRP)片材增强 RC 梁为对象, 理论推导其界面的剪应力的计算公式, 并通过有限元计算进行对比分析, 为预应力 FRP 片材增强 RC 梁的端部抗剪加固设计及其破坏模式的分析提供理论依据.

1 界面剪应力分析

1.1 力学分析模型

以矩形 RC 梁为研究对象, 对 FRP 片材施加以张力 N_{pt} , 然后将 FRP 片材粘贴在 RC 梁底部, 待 FRP 片材和混凝土粘结牢固后释放张力 N_{pt} , 并将预应力 RC 梁施加外载进行弯曲受力分析. 在外载作用下预应力 FRP 片材增强 RC 梁单元的力学分析模型如图 1 所示. 为了简化计算模型, 外载作用下混凝土与 FRP 片材的界面层的剪应力分布计算基于以下假设进行:

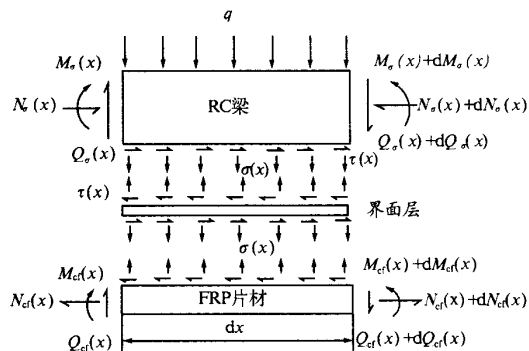


图 1 RC 梁单元的力学分析模型

Fig. 1 Mechanical Model of RC beam element

- (1) 不考虑梁自重对界面应力的影响;
- (2) 混凝土、界面层以及 FRP 片材都呈线性弹性变形;

收稿日期:2006-10-08;修订日期:2006-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10272047);广东省自然科学基金资助项目(020856)

作者简介:郭馨艳(1971-),女,河南开封人,华南理工大学讲师,博士研究生,主要从事 FRP 片材加固技术研究.

万方数据

(3) RC 梁简支,其变形符合平截面假定;

(4) 计算界面层剪应力时,忽略 FRP 和界面层的弯曲变形;

(5) 界面层剪应力不随其厚度变化.

1.2 界面的剪应力

根据弹性理论,由图 1 并考虑假设(2),有

$$\tau = G \left(\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = G \left(\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

式中, G 为界面层的剪切模量; $u(x, y)$, $v(x, y)$ 分别为界面任一点的横向和纵向位移.

当单元体受力变形时,由几何关系,有

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y \partial x} = \frac{1}{t_a} \left(\frac{du_{cf}}{dx} + \frac{du_b}{dx} \right) = \frac{1}{t_a} (\varepsilon_{cf} + \varepsilon_b) \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 v(x, y)}{x^2} = \frac{dM(x)}{dx} \frac{1}{(EI)_t} \quad (4)$$

式中: t_a 为界面层厚度; u_{cf} 和 u_b 分别为 FRP 片材和钢筋混凝土的横向位移; $(EI)_t$ 为 FRP 增强 RC 梁的整体抗弯刚度. 而 FRP 片材和钢筋混凝土的轴向正应变 ε_{cf} 和 ε_b 分别为^[8]

$$\varepsilon_{cf} = - \frac{dM_{cf} \cdot t_{cf}/2}{E_{cf} \cdot I_{cf}} - \frac{d(N_{pf} - N_{pe})}{E_{cf} A_{cf}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_b = - \frac{dM_b \cdot \frac{h}{2}}{E'_b \cdot I_b} - \frac{dN_b}{E'_b A_b} \quad (6)$$

式中: E_{cf} 和 E'_b 分别为 FRP 板的弹性模量和钢筋混凝土的当量弹性模量; I_{cf} 和 I_b 分别为 FRP 板和 RC 梁的转动惯量; A_{cf} 和 A_b 分别为 FRP 板和 RC 梁的横截面面积; h 为 RC 梁高度; t_{cf} 为 FRP 板的厚度; N_{pe} 为释放张力 N_{pf} 后 FRP 片材上的张力.

根据假设 4),

由式(2)、式(4)~式(6),得出

$$\frac{\partial^2 \tau(x)}{\partial x^2} = G \left\{ \frac{1}{t_a} \left[\frac{1}{E_{cf} A_{cf}} \left(\frac{dN_{pf}}{dx} + \tau(x)b \right) + \frac{\tau(x)b}{E_b A_b} + \frac{h}{2} \tau(x)b \left(\frac{h}{2} + t_a + \frac{t_{cf}}{2} \right) \right] + \frac{dM(x)}{dx} \cdot \frac{1}{(EI)_t} \right\} \quad (7)$$

式中: b 为 RC 梁宽度.

当 RC 梁只受到均匀分布预应力 FRP 作用,不考虑 q 时,上式可改写为

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} = \lambda^2 \tau \quad (8)$$

式中: $\lambda^2 = G \left[\frac{1}{t_a} \left(\frac{1}{E_{cf} A_{cf}} + \frac{1}{E_b A_b} + \right) \right]$

$$\frac{h/2(h/2 + t_a + t_{cf}/2)}{E_b I_b} \Big] \quad (9)$$

解微分方程(8),其通解为

$$\tau(x) = c_1 e^{\lambda x} + c_2 e^{-\lambda x} \quad (10)$$

考虑边界条件:

$$\tau(l_{cf}/2) = c_1 e^{\lambda l_{cf}/2} + c_2 e^{-\lambda l_{cf}/2} = 0 \quad (11)$$

$$\text{和 } N_{pe}(x=0) = 0 \quad (12)$$

可求得系数 c_1 和 c_2 分别为

$$c_1 = - \frac{GN_{pf}}{t_a E_{cf} A_{cf} \lambda} \left(\frac{e^{-\lambda l_{cf}}}{1 + e^{-\lambda l_{cf}}} \right) \quad (13)$$

$$c_2 = \frac{GN_{pf}}{t_a E_{cf} A_{cf} \lambda} \left(\frac{1}{1 + e^{-\lambda l_{cf}}} \right) \quad (14)$$

将式(13)和(14)代入式(10),可求解预应力 FRP 片材增强 RC 梁中混凝土与 FRP 片材之间的界面层的剪应力.

2 算例及有限元分析

2.1 试件及数据

作为算例,笔者以预应力碳纤维薄板(CFL)增强 RC 梁为对象. 简支 RC 梁尺寸为 1 850 mm × 100 mm × 200 mm,跨距为 1 600 mm;混凝土的设计强度等级为 C40,极限抗压强度 f_{cu} 为 46.9 MPa,弹性模量 E_c 为 34.4 GPa;主筋采用 $\Phi = 10$ mm、架立筋采用 $\Phi = 8$ mm 的 II 级钢筋,其弹性模量为 210 GPa;碳纤维薄板(CFL)的计算厚度为 0.23 mm,弹性模量为 230 GPa,抗拉强度 3 000 MPa;粘结剂是环氧树脂胶,剪切模量为 3.7 GPa,弹性模量 10 GPa;界面层的计算厚度为 0.1 mm.

2.2 计算结果与有限元分析

当碳纤维薄板(CFL)粘贴长度为 1 600 mm、并对 CFL 施加其 20% 抗拉强度极限的预应力时^[9],由式(10)求得增强 RC 梁界面的剪应力示于图 2. 由图 2 可知,界面的剪应力在 CFL 的端部超过 11 MPa,接近界面层的抗剪强度. 抗剪强度 11 MPa 是推算值,尚需试验验证.

为了验证上述界面层剪应力理论公式的正确性,本文还运用 Ansys 软件并采用分离式计算模型对 CFL 增强 RC 梁进行了有限元分析. 计算中,混凝土选用 Solid 65 单元,钢筋选用 Link 8 单元,界面层和 CFL 采用 Solid 45 单元,并假定钢筋与混凝土、混凝土和 CFL 之间固接,采用共用节点的方式连接.

在与理论计算条件相同时,由有限元方法得到的计算结果与理论计算结果一同示于图 2. 由图可知,两种方法的计算结果吻合得较好. 其中,

剪应力的最大误差为 15.0%。

3 界面剪应力的主要影响参数

影响预应力 FRP 片材增强 RC 梁界面的剪应力的因素较多,如 RC 梁的几何尺寸、界面层的剪切模量、界面层厚度、FRP 片材和混凝土的弹性模量、FRP 片材的厚度、初始预应力等等。作者以 RC 梁为研究对象,基于式(10),仅仅讨论初始预应力、FRP 片材厚度和界面层厚度对预应力 FRP 片材与混凝土之间的界面层剪应力分布的影响。

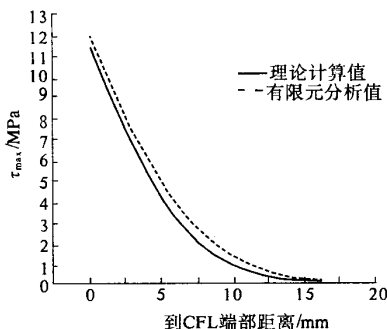


图2 20%预应力作用下界面的剪应力

Fig.2 Shear stress on interface under 20% virtual prestress

3.1 初始预应力的影响

除初始预应力变化外其他参数不变,利用式(10),可求得在不同初始预应力作用下的界面剪应力。根据计算可得,对于同一 RC 梁,施加的张力越大,即初始预应力值越大,界面剪应力的最大值也随着增加。当界面剪应力达到界面层的剪切强度 τ_i 时,界面就会发生剥离破坏。

3.2 FRP 片材厚度的影响

固定其它参数,使 CFL 的厚度变化,由式(10)得到界面的剪应力与 FRP 片材的厚度有关。FRP 片材越厚,其端部的剪应力就越大,容易造成端部界面层的剥离破坏。假设算例中界面层的剪切强度为 11 MPa,在 20% 预应力作用下,CFL 厚度为 0.2 mm 时就有可能产生剥离破坏。为了减小端部的应力可以考虑在靠近片材端部减小 FRP 片材的厚度,也可以采取锚固等措施防止 FRP 片材在其端部产生剥离破坏。

3.3 界面层厚度的影响

算例中,除界面层厚度变化外其他参数均不变。CFL 薄板增强 RC 梁界面的剪应力与界面层厚度有较大的关系,在不同预应力作用下界面层厚度与最大剪应力的关系如图 3 所示。粘结层厚

度越大,界面端部剪应力就越小,在设计时增加端部的粘贴厚度有利于防止端部的早期剥离破坏。

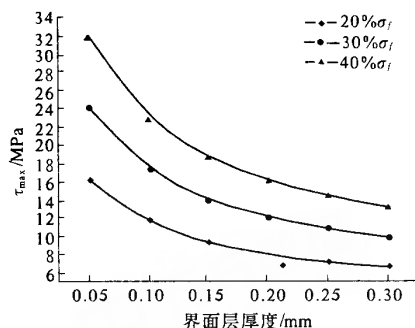


图3 界面层厚度对界面最大剪应力的影响

Fig.3 Influence of adhesive thickness to the maximum interfacial shear stress

4 结论

作者推导了预应力 FRP 片材增强 RC 梁在外载作用下的界面剪应力计算公式,并利用有限元分析进行了比较,两者计算结果吻合较好。通过分析 RC 梁的几何尺寸,粘结层的剪切模量和粘结层厚度,FRP 片材和混凝土的弹性模量,FRP 片材的厚度等都会对界面的剪应力产生影响,其中初始预应力,界面层厚度对界面应力影响较大。由于混凝土的抗剪强度低于粘结胶的剪切强度,混凝土也容易发生剥离,片材端部要进行锚固或抗剪加固,锚固和抗剪加固的长度和方式根据片材端部的最大应力进行设计。

由于本文的公式推导采用了线弹性假设,因此,对于非线性和弹塑性的情况另作探讨。

参考文献:

- [1] WIGHT R G, EL-HACHA R, ERKI M A. Prestressed and non - prestressed CFRP sheet strengthening: damaged continuous reinforced concrete beams[J]. International Journal of Materials & Product Technology. 2003, 19 (1-2): 96 - 107.
- [2] GUO X Y, HUANG P Y, ZHENG X H. Mechanical analysis lose of prestressed FRP laminates for strengthening RC beams [J]. Key Engineering Materials, 2006, (306): 559 - 564.
- [3] ROBERTS T M. Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams[J]. The Structural Engineer. 1999, 67(12): 229 - 233.
- [4] DENG J, MARCUS L M K, STUART S J M. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP

- plate[J]. Composite Structures, 2004(65):205-215.
- [5] EL-HACHA R, WIGHT R G, GREEN M F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3):305-313.
- [6] 黄培彦, 周绪平, 赵琛. FRP 片材在土木工程中应用的几个关键力学问题[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(11):101-105.
- [7] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Innovative prestressing with FRP sheets innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1991, 117(7):1652-1672.
- [8] 陈翠峰, 黄培彦. 碳纤维薄板增强钢筋混凝土梁的抗弯刚度分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(增刊):10-13.
- [9] 郭馨艳, 黄培彦, 郑小红. 预应力 FRP 片材加固 RC 梁的受力分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(7):6-10

Interfacial Shear Stresses Analysis of RC Beams Strengthened with Prestressed FRP

GUO Xin-yan, HUANG Pei-yan, YANG Yi, ZHENG Xiao-hong

(College of Traffic & Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Bonding prestressed fiber reinforced polymer (FRP) plate can be used to strengthen and repair civil engineering structures effectively. Based on the theoretical analysis, this paper deduces computing formulas to discuss the distributions of shear stresses on interfacial layer between the prestressed FRP plate and concrete members of strengthened RC beams, and validates the interfacial shear stresses of the RC beams strengthened with carbon fiber laminate (CFL) by FEM. The research discusses the applied prestress value, the thickness of CFL and adhesive affecting the interfacial shear stresses.

Key words: interfacial stress; FRP plate; prestress; RC beam

(上接第 59 页)

Experimental Study on Rapid Hydraulic Impact Compaction (RHIC)

FENG Zhong-xu¹, LIU Ben-xue¹, ZHAO Kan², LIU Huai-zhi¹

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technique and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Communication, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper puts forward a new device-RHIC adapting to the abutment compaction, and establishes the dynamic model. According to the experiment data of RHIC, it analyses the relationship between the impacting times, the value of settlement and the degree of compaction. The data indicates that the more the impacting times is, the more the total value of settlement is. The maximum settlement will be obtained after the 15th impacting is completed. However, the degree of compaction is above 95% on the surface and the average degree of compaction is above 93% after the 12th impacting is completed, and the degree of compaction can meet the challenge of the construction when the backing depth is about 1.5m. It shows that RHIC has the characteristic of the good compatibility effects and the high compaction depth.

Key words: rapid hydraulic impact roller (RHIC); backing compaction; the degree of compaction; settlement