

文章编号:1673-2049(2010)04-0014-05

粘贴预应力碳纤维布钢梁的放张效应

周朝阳, 黄 林, 贺学军

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:基于线弹性物理关系假定和变形协调关系,推导了粘贴预应力片材加固梁张拉力释放后片材预应力和胶层剪应力的分布方程,得到了梁的有效预应力及预应力损失计算公式,并且按共轭梁法推导了预应力引起的反拱计算公式;利用自主开发的一套简易的张拉锚固装置对碳纤维布施加预应力,然后与工字型钢试验梁粘贴,待胶固化后进行粘贴预应力碳纤维布加固钢梁的放张试验。分析结果表明:试验结果与计算结果吻合很好,理论分析结果具有合理性和正确性,为深入研发预应力碳纤维片材加固技术并建立相关的设计理论奠定了基础。

关键词:受弯构件;加固;预应力;碳纤维布;放张效应;反拱

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Effect of Releasing Pretension for Steel Beams Bonded with Prestressed Carbon Fiber Sheet

ZHOU Chao-yang, HUANG Lin, HE Xue-jun

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: The effect of releasing pretension was investigated for flexural members externally bonded with prestressed laminate. Based on the assumption of linear elastic physical relationship and the compatibility of deformation, the equations of distribution were derived for stresses of laminate, respectively on interface and at cross sections of a beam. The calculation formulae were obtained for effective prestress and prestress loss. The calculation formulas of camber deflection were deduced by adopting the method of conjugate beam. A set of easy prestressing devices was developed to exert pretension to carbon fiber sheet. The prestressed strip was mechanically anchored at both ends and then bonded to a steel beam with I-shaped section. After the adhesive dried the mechanical anchor was loosed, the effect of releasing pretension was measured. Analysis results show that the test results agree well with the calculated results, and the rationality and correctness of the theoretical expressions are verified. This will serve as the foundation for the further development of strengthening technology with prestressed carbon fiber sheet and establishment of the related design theory.

Key words: flexural member; strengthening; prestress; carbon fiber sheet; effect of releasing pretension; camber deflection

收稿日期:2010-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50778176);湖南省自然科学基金重点项目(08JJ3105);湖南省自然科学基金重点项目(09JJ3098);湖南省建设科技计划项目(2007-31);湖南省科技计划重点项目(2010FJ2001)

作者简介:周朝阳(1964-),男,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:joeyzcn@163.com。

0 引言

在土木工程结构补强修复工程中,各类纤维增强聚合材料(FRP)的应用日益广泛,主要用于外贴加固,其普遍做法是把纤维布或板(统称片材)通过胶合剂简单地粘贴在结构物表面,该做法存在片材强度利用率很低、不能有效改善构件正常使用阶段的性能等问题^[1]。为了克服这些缺点,人们提出了粘结预应力纤维片材增强受弯构件的方法^[2-14],其基本步骤是:首先对片材进行张拉,然后将片材粘贴在梁的受拉面,待胶合剂固化后,再从两端将片材切断。但迄今为止只有少量的试验研究成果发表,且主要是验证该方法对混凝土梁的加固效果,系统的理论分析工作还很少见。本文中笔者拟通过分析和试验,对粘贴预应力碳纤维布加固工字型钢梁的放张效应进行较为全面的研究,包括片材、胶层和梁截面的应力(含有效预应力和预应力损失)以及梁的反拱,这将为深入研发预应力片材加固技术并建立相关的设计理论提供必要的基础。

1 应力分析

以被加固梁的中点为原点,建立的坐标系如图1所示,其中 N 为片材张力, L 为梁长的一半, l 为梁底所粘贴片材长度的一半, l_0 为片材一端与相应梁端之间的距离。

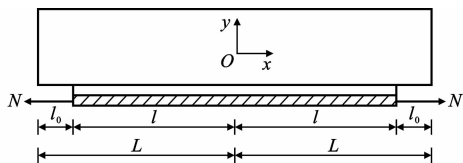


图1 片材放张前的梁

Fig. 1 Beam Prior to Releasing Pretension of Sheet

图2为放张引起的变位。设原点右边某段梁初始长度为 x , 所用片材宽度为 b_p , 厚度为 t_p , 在张拉应力 $\sigma_{p0}(x)$ 作用下相对初始状态伸长 $u_{p0}(x)$ 后, 片材长度也达到 x 。待粘结胶完全固化后, 片材两端放张, 依靠界面粘结剪力的作用, 梁底将受压缩短 $u_b(x)$, 而片材将保留一部分伸长, 记为 $u_p(x)$, 但相对张拉到位、放张之前的状态, 片材缩短了 $u_{p0}(x) - u_p(x)$, 它与梁底受压缩短之差即为胶层上、下界面沿纵向的相对位移, 由此产生剪切变形, 设胶层厚度为 t_a , 则离原点 x 处的胶层剪应变 γ 为

$$\gamma = \frac{u_{p0}(x) - u_p(x) - u_b(x)}{t_a} \quad (1)$$

假定所有材料都处在弹性工作阶段, 相应的胶

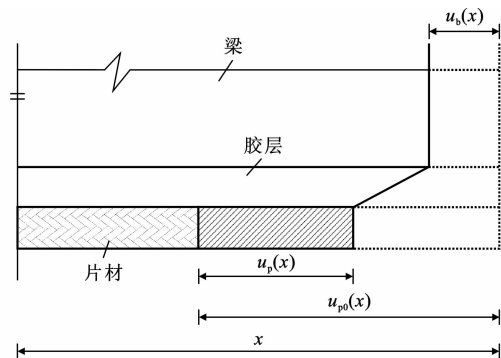


图2 放张引起的变位

Fig. 2 Deformation Due to Releasing Pretension

层剪应力 $\tau(x)$ 为

$$\tau(x) = \frac{G_a}{t_a} [u_{p0}(x) - u_p(x) - u_b(x)] \quad (2)$$

式中: G_a 为胶层的剪切模量。

对式(2)求得

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left[\frac{du_{p0}(x)}{dx} - \frac{du_p(x)}{dx} - \frac{du_b(x)}{dx} \right]$$

考虑线弹性物理关系有

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left[\frac{\sigma_{p0}(x)}{E_p} - \frac{\sigma_p(x)}{E_p} - \frac{\sigma_b(x)}{E} \right] \quad (3)$$

式中: $\sigma_{p0}(x)$ 、 $\sigma_p(x)$ 分别为放张前、后片材的预应力; $\sigma_b(x)$ 为梁底纤维的预压应力; E_p 为片材的弹性模量; E 为梁的弹性模量。

图3为梁截面的正应力分布。片材拉力在梁底纤维中产生的预压应力 $\sigma_b(x)$ 为

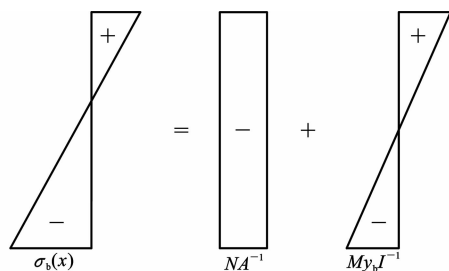


图3 梁截面的正应力分布

Fig. 3 Distributions of Normal Stresses at Section of Beam

$$\sigma_b(x) = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} y_b = \left(\frac{b_p t_p}{A} + \frac{b_p t_p y_b^2}{I} \right) \sigma_p(x) \quad (4)$$

式中: M 为横截面弯矩; A 、 I 分别为梁的截面面积和惯性矩; y_b 为梁底纤维到截面中性轴的距离。

令 $\alpha = \frac{b_p t_p}{A} + \frac{b_p t_p y_b^2}{I}$, 则式(4)变为

$$\sigma_b(x) = \alpha \sigma_p(x)$$

将 $\sigma_b(x) = \alpha \sigma_p(x)$ 代入式(3)得

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_a}{t_a} \left[\frac{\sigma_{p0}(x)}{E_p} - \frac{\sigma_p(x)}{E_p} - \frac{\alpha \sigma_p(x)}{E} \right] \quad (5)$$

取片材微段 dx (图 4), 由平衡条件得

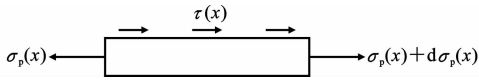


图 4 FRP 片材微段受力平衡

Fig. 4 Force Equilibrium of FRP Sheet Element

$$[\sigma_p(x) + d\sigma_p(x) - \sigma_p(x)]b_p t_p + \tau(x)b_p dx = 0 \quad (6)$$

即

$$\tau(x) = -t_p \frac{d\sigma_p(x)}{dx} \quad (7)$$

对式(7)求导, 代入式(5)得

$$\frac{d^2 \sigma_p(x)}{dx^2} - \frac{G_a}{t_a t_p} \left(\frac{1}{E_p} + \frac{\alpha}{E} \right) \sigma_p(x) = -\frac{G_a \sigma_{p0}(x)}{t_a t_p E_p} \quad (8)$$

由式(8)得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p(x) &= A \sinh(\beta x) + B \cosh(\beta x) + \frac{\sigma_{p0}(x)}{1 + \alpha n_p} \\ \beta^2 &= \frac{G_a}{t_a t_p} \left(\frac{1}{E_p} + \frac{\alpha}{E} \right), n_p = \frac{E_p}{E} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

考虑边界条件: 当 $x=0$ 时, $\frac{d\sigma_p(x)}{dx} = 0$; 当 $x=l$

时, $\sigma_p(x) = 0$ 。由此可求出

$$A = 0, B = -\frac{\sigma_{p0}(x)}{(1 + \alpha n_p) \cosh(\beta l)} \quad (10)$$

$$\sigma_p(x) = \frac{\sigma_{p0}(x)}{1 + \alpha n_p} \left[1 - \frac{\cosh(\beta x)}{\cosh(\beta l)} \right] \quad (11)$$

由式(7)得

$$\tau(x) = \frac{\beta t_p \sigma_{p0}(x) \sinh(\beta x)}{1 + \alpha n_p \cosh(\beta l)} = \frac{G_a \sigma_{p0}(x) \sinh(\beta x)}{\beta t_a E_p \cosh(\beta l)} \quad (12)$$

取半跨梁长, $\tau(x)$ 在胶层端部取得最大值, 此后迅速减小; 而片材的拉应力在端部为 0, 经过一段传递长度的积累后, 接近一常量, 在跨中达到最大, 可称之为有效预应力。 $\tau(x)$ 、 $\sigma_p(x)$ 的分布见图 5。

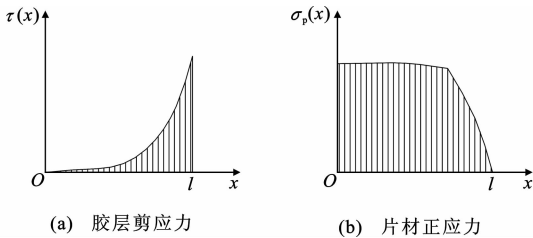


图 5 半跨梁长的胶层剪应力和 FRP 片材正应力分布

Fig. 5 Distribution of Interfacial Shear Stress and Normal Stress in FRP Along Half-span of Beam

片材的有效预应力 σ_{pe} 为

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{p0}(x)}{1 + \alpha n_p} \quad (13)$$

放张时弹性缩短引起的预应力损失 σ_{le} 为

$$\sigma_{le} = \frac{\alpha n_p}{1 + \alpha n_p} \sigma_{p0}(x) \quad (14)$$

2 反拱计算

在片材的预应力作用下, 梁将产生反向挠度, 或称之为反拱, 可采用共轭梁法计算。两端放张后, 片材的预应力对梁截面产生的弯矩 $M_p(x) = \sigma_p(x) \cdot b_p t_p y_b$, 该弯矩沿粘贴界面长度方向分布, 其半边图形与图 5(b) 相似, 不再绘出。

图 6 为梁任意截面虚拟单位集中力加载及相应弯矩, 其中坐标系与图 1 相同, a 、 b 分别为虚拟单位集中力 P 与图 6 左、右支座的距离。计算梁中任意一点的反拱时, 在该点加一个与反拱同向的 P , 相应的弯矩 $M_1(x)$ 表达式为

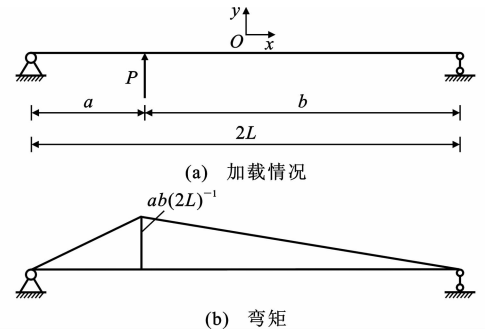


图 6 梁任意截面虚拟单位集中力加载及相应弯矩

Fig. 6 Virtual Unit Load and Corresponding Bending Moments of Arbitrary Beam Section

$$M_1(x) = \begin{cases} \frac{b}{2L}(L+x) & -L \leq x \leq a-L \\ \frac{a}{2L}(L-x) & a-L < x \leq L \end{cases} \quad (15)$$

按照共轭梁法, 将预应力产生的弯矩图与虚拟单位集中力作用下的弯矩图进行图乘, 任意一点的反拱 v 可表示为

$$v = \left[\int_{-L}^{a-L} M_p(x) M_1(x) dx + \int_{a-L}^L M_p(x) M_1(x) dx \right] / (EI) \quad (16)$$

将 $M_p(x)$ 、 $M_1(x)$ 表达式代入式(16), 并结合式(11)得

$$v = \frac{M_{pe}}{EI} \left\{ \frac{ab - (L-l)^2}{2} + \frac{ab \sinh[\beta(L-a)]}{L \beta \cosh(\beta l)} - \frac{(L-l) \sinh(\beta l)}{\beta \cosh(\beta l)} + \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{\cosh[\beta(L-a)]}{\cosh(\beta l)} - 1 \right] \right\} \quad (17)$$

式中: M_{pe} 为有效预应力产生的弯矩, $M_{pe} = t_p b_p y_b \sigma_{pe}$ 。

当计算跨中挠度时, 在式(17)中取 $a=b=l$, 得

跨中反拱为

$$v=M_{pe}\{Ll-\frac{l^2}{2}-\frac{\sinh(\beta l)}{\beta\cosh(\beta l)}(L-l)-\frac{1}{\beta^2}[1-\frac{1}{\cosh(\beta l)}]\}/(EI) \tag{18}$$

特别地,当 $l=L$ 时,即预应力片材沿梁跨全长粘贴,跨中反拱的简化计算公式为

$$v=M_{pe}\{\frac{l^2}{2}-\frac{1}{\beta^2}[1-\frac{1}{\cosh(\beta l)}]\}/(EI) \tag{19}$$

3 试验验证

对钢梁粘贴预应力碳纤维布固化后的放张效应进行了测试。试件基本参数为:钢梁截面为工字型,截面高度 125 mm,翼缘宽 125 mm,翼缘厚 9 mm,腹板厚 6.5 mm;梁长 $2L=1\ 500\text{ mm}$,粘贴区段长 $2l=1\ 200\text{ mm}$;碳纤维布厚 0.167 mm,宽度为 75 mm,弹性模量和抗拉强度分别为 230、3.45 GPa;胶合剂为 SIKADur330 胶,剪切模量 $G_a=2.16\text{ GPa}$ 。试件制作时,利用笔者开发的一套简易的张拉锚固装置,先将碳纤维布机械锚固在一根刚度较大的辅助钢梁上,再施加预应力,然后把试验梁粘贴在预应力碳纤维布上。待胶固化后进行放张试验,放张过程中,4 人同时使用扳手对辅助梁两端锚具上的 4 个螺栓旋转相同的角度,以达到均匀放张的目的,图 7 为放张试验现场。



图 7 放张试验
Fig. 7 Experiment of
Releasing Pretension

为了保证碳纤维布的张拉均匀并了解碳纤维布的应力变化,试件制作前在同一碳纤维布两侧位置粘贴 2 个沿布纵向的应变片,利用应力-应变关系,可通过测量应变得到应力。预张力释放前后试验梁跨中截面碳纤维布的应变测量结果见表 1。根据式(13)和线弹性物理关系,放张后纤维应变理论表达式为 $\epsilon_{pe}=\epsilon_{p0}/(1+\alpha n_p)$, ϵ_{p0} 、 ϵ_{pe} 分别为放张前、后纤维应变,将试验参数代入,所得计算结果一同列入表 1 中。此外,表 1 还给出了跨中反拱的理论值和实测值(采用千分表测得)。对比结果表明,放张后应变实测值与理论值之比为 0.99,反拱实测值与理论值之比为 0.98,误差很小,说明本文中的分析结果是合理、适用的。

表 1 释放预张力引起的跨中反拱及碳纤维布应变变化
Tab. 1 Camber Deflection and Variation of FRP Strains at
Midspan Due to Releasing Pretension

| 梁 编号 | 放张前应变 | 放张后应变/ 10^{-6} | | 跨中反拱/mm | |
|---------|----------------|------------------|-------|---------|---------|
| | 实测值/ 10^{-6} | 实测值 | 理论值 | 实测值 | 理论值 |
| SB1. 13 | 1 932 | 1 897 | 1 909 | 0.055 1 | 0.056 2 |

笔者也曾尝试过施加更大的预应力以进行放张效应测试,但放张时预应力碳纤维片材与钢梁表面之间发生了剥离现象。这说明,如果需要承担和保持较大的预应力,仅靠粘结是难以胜任的,必须采取更可靠的锚固措施,如安装机械锚具。

4 结 语

- (1)根据片材、胶层及受弯构件在张拉力释放前后的变形协调关系,推导了粘贴预应力片材加固梁的胶层剪应力和片材预应力的分布方程,结果表明,胶层剪应力在胶结区中段很小并趋于 0,片材预应力在中部较长区段接近一常量。由此得到了放张引起的预应力损失和放张后的有效预应力。
- (2)根据片材预应力分布函数,给出了粘贴预应力碳纤维片材加固梁的反拱计算方法和计算公式。
- (3)对粘贴预应力碳纤维布加固工字型钢梁的放张效应测试表明,本文中的分析结果是合理、适用的。
- (4)本文中的理论分析成果是针对线弹性材料推导得到的,适用于预应力不大的情况。若需保持更大的预应力,必须采用机械锚具等更可靠的锚固措施。

参考文献:

References:

[1] 周朝阳,贺学军,王兴国,等.连续纤维加固结构技术及其发展中的若干问题[J].施工技术,2003,32(6):4-6.
ZHOU Chao-yang, HE Xue-jun, WANG Xing-guo, et al. Some Problems of Structural Strengthening Technology with FRP and Its Development[J]. Construction Technology, 2003, 32(6): 4-6.

[2] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N, DEURING M. Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets [J]. ACI Structure Journal, 1992, 89(3): 235-244.

[3] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Innovative Prestressing with FRP Sheets: Mechanics of Short-term Behavior[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(7): 1652-1672.

- [4] GARDEN H N, HOLLAWAY L C. An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates[J]. Composites Part B, 1998, 29(4): 411-424.
- [5] QUANTRILL R J, HOLLAWAY L C. The Flexural Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams by the Use of Prestressed Advanced Composite Plates[J]. Composite Science and Technology, 1998, 58(8): 1259-1275.
- [6] 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]. Building Science Research Sichuan, 2003, 29(2): 56-60.
- [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.
- [8] 王兴国, 周朝阳, 曾宪桃, 等. 外贴预应力 GFRP 板加固混凝土梁抗弯试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(3): 351-354.
WANG Xing-guo, ZHOU Chao-yang, ZENG Xian-tao, et al. Tests of Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by Bonding Prestressed GFRP Plates [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(3): 351-354.
- [9] 周朝阳, 王兴国. 端锚有粘结预应力纤维片材加固混凝土梁的受弯承载力[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 45-50.
ZHOU Chao-yang, WANG Xing-guo. Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Pre-stressed with End-anchored and Length-bonded FRP Laminates [J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 45-50.
- [10] 周朝阳, 王兴国, 肖菲菲. 先张后粘 FRP 的钢筋混凝土构件抗弯能力分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(1): 183-187.
ZHOU Chao-yang, WANG Xing-guo, XIAO Fei-fei. Analysis of Flexural Capacities for RC Members Bonded with Pre-tensioned FRP[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 183-187.
- [11] 曾宪桃, 王兴国, 丁亚红. 粘贴预应力 FRP 板加固砼梁预应力方法的研究[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2002, 21(3): 222-225.
ZENG Xian-tao, WANG Xing-guo, DING Ya-hong. Several Experimental Methods of RC Beam Strengthened with Prestressed FRP Plates[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science, 2002, 21(3): 222-225.
- [12] 卢亦焱, 陈 娟, 黄银燊, 等. 预应力 FRP 加固工程结构技术研究进展[J]. 中国工程科学, 2008, 10(8): 40-44.
LU Yi-yan, CHEN Juan, HUANG Yin-shen, et al. New Progress in Study of the Technology of Strengthening Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastics [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(8): 40-44.
- [13] 程永春, 李春良, 刘寒冰, 等. 碳纤维与混凝土界面粘结应力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 46-49.
CHENG Yong-chun, LI Chun-liang, LIU Han-bing, et al. Computation Method of Interfacial Stresses Between CFRP and Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 46-49.
- [14] 邬晓光, 张柳煜, 郝 毅, 等. 碳纤维加固钢筋混凝土梁的受弯全过程分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 53-57.
WU Xiao-guang, ZHANG Liu-yu, HAO Yi, et al. Flexural-tensile Strength of Concrete Beams in Complete Course of Reinforcement with Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP)[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 53-57.