

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.010



表层嵌贴预应力 CFRP 板条加固 钢筋混凝土梁的应力传递行为

苏鹏^a, 李恒^a, 丑佳璇^a, 彭晖^{a,b}

(长沙理工大学 a. 土木与建筑学院; b. 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 长沙 410114)

摘要:表层嵌贴预应力 FRP 板条加固钢筋混凝土结构技术可充分发挥 FRP 材料强度,且不需设置永久锚具,具有较大的潜力。以试验得到的嵌贴 FRP 混凝土粘结-滑移关系为基础,建立了嵌贴预应力 CFRP 板条与混凝土的粘结应力微分方程,并根据边界条件推导了方程的解析解,得到了嵌贴预应力 CFRP 板条放张后界面粘结应力、CFRP 拉伸应力的分析模型。与试验结果比较表明,该模型得出的界面粘结应力及 CFRP 拉伸应力与试验结果吻合较好。在此基础上,考虑放张后 CFRP 混凝土界面不出现剥离的条件,分析了粘结界面能抵抗的最大容许预应力。

关键词:表层嵌贴;CFRP 板条;预应力;粘结-滑移关系;应力传递

中图分类号:TU378.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0068-09

Stress transfer of reinforced concrete beam strengthened with near-surface mounted prestressed CFRP strips

Su Peng^a, Li Heng^a, Chou Jiaxuan^a, Peng Hui^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technique for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: Due to the advantages of making full use of high strength of FRP and saving the cost of premature anchorages for prestressed FRP, the technique of strengthening with prestressed near-surface mounted (NSM) FRP was considered as a potential technique for strengthening of reinforced concrete structures. The bond behavior of the NSM CFRP strip in the stress transfer length after releasing the prestress was studied. Based on the bond slip constitutive relationship obtained from experimental research, the

收稿日期:2016-03-04

基金项目:国家自然科学基金(51578078);国家重点基础研究发展计划(973)(2015CB057701);湖南省科技计划(2014FJ4176);湖南省教育厅科学研究重点项目(14A005);长沙市科技计划(K1508020-31)

作者简介:苏鹏(1991-),男,主要从事桥梁结构耐久性性能研究,(E-mail)1027833712@qq.com。

彭晖(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,(E-mail)anchor1210@126.com。

Received:2016-03-04

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51578078); National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (No. 2014FJ4176); Scientific Research Key Project in Hunan Province Department of Education (No. 14A005); Science and Technology Plan of Changsha (No. K1508020-31)

Author brief: Su Peng(1991-), main research interest: bridge structure durability performance, (E-mail)1027833712@qq.com.

Peng Hui(corresponding author), professor, PhD, doctoral supervisor, (E-mail) anchor1210@126.com.

differential equation of the bond stress at the NSM FRP-concrete interface was established. Then the analytical solution of the differential equation was acquired according to the boundary conditions, and the equations of distribution of the bond stress at the bonded interface and the tensile stress of CFRP were presented. The theoretical results were in good agreement with the test results, which indicated that the equations could be used to predict the distribution of bond stress at the NSM FRP-concrete interface after prestressing force release. Moreover, the maximum allowable pre-stress was obtained by considering no debonding at the bonded joint to be induced due to pre-tension release.

Keywords: near-surface mounted(NSM); CFRP strips; prestressed; bond-slip relationship; stress transfer

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)作为一种新型加固材料,由于其质量轻、力学性能强、易于成型和耐久性能好等优点,已在土木工程结构特别是混凝土桥梁加固中得到了广泛应用。传统的外贴(Externally Bonded, EB)FRP 加固技术由于其工艺简单、方便,广受工程界欢迎。但 EB FRP 难以充分发挥 FRP 的高强材料性能^[1],并且 EB FRP 混凝土界面易剥离。为了充分发挥 FRP 的高强性能,对 FRP 预先施加预应力,这样预应力外贴 FRP 技术就得到了开发和利用^[2-3]。另一方面,为了解决 EB FRP 与混凝土界面易剥离的问题,并更好保护 FRP,表层嵌贴(Near-Surface-Mounted, NSM)FRP 技术得到了开发和利用^[4-6]。这项技术将 FRP 筋或板条嵌入预制的混凝土槽中并填入环氧树脂胶用来粘结 FRP 与混凝土,通过扩大 FRP 混凝土之间的粘结面积来增强两者间的粘结能力,但也没能很好地发挥 FRP 的高强性能。最近出现的预应力 NSM FRP 技术通过对嵌贴的 FRP 预先施加预应力实现了对 FRP 强度的充分利用,并更显著地提高了结构的受力性能,同时 NSM FRP 混凝土的粘结能力可为预应力提供锚固,从而节省预应力加固技术中所需要的机械锚具费用,具有较显著的技术经济优势和广阔的应用前景^[7-8]。

与传统的预应力混凝土结构不同,预应力 NSM 加固是将 FRP 嵌贴在混凝土保护层中,FRP 中的预应力通过 FRP 混凝土间的粘结传递至被加固结构。因此,FRP 混凝土间的粘结能力决定了放张预应力后 FRP 与混凝土之间的应力传递行为,这种应力传递又对预应力 NSM FRP 加固结构的性能有着重要影响。预应力过大时,FRP 混凝土之间的粘结可能无法抵抗应力传递所产生的过大剪应力,发生粘结剥离甚至破坏;预应力过小,则无法充分发挥 FRP 的高强性能,造成技术经济上的低效和浪费。因此,研究放张后 FRP 混凝土间的应力传递行为并确定

粘结界面所能承受的预应力容许水平,对于应用和推广预应力 NSM FRP 加固技术至关重要。

目前,部分研究人员对 EB 预应力 CFRP 放张端部的粘结应力分布进行了研究,并提出了不设置永久锚具条件下 EB CFRP 的最大容许预应力水平^[9-10]。但由于外贴 CFRP 与混凝土间的粘结能力有限,实际工程结构采用外贴预应力 CFRP 加固时多设置了永久锚具。如前所述,FRP 板条的预应力由嵌贴 FRP 混凝土间的粘结能力实现锚固,在不考虑槽壁混凝土破坏的条件下,FRP 与混凝土间的粘结性能决定了可锚固的预应力最大值。关于 NSM FRP 与混凝土的粘结性能目前已经开展了一定的研究^[11],学者们分别调查和分析了开槽构造^[12-13]、槽边距^[14-15]等因素对 NSM FRP 混凝土粘结性能的影响,建立了多个局部粘结强度模型^[16-17]。另外,Badawi 等^[18]研究了不同表面形式、不同应力水平的预应力 NSM FRP 筋放张后的传递长度,但针对预应力 NSM FRP 放张后,FRP 混凝土界面粘结应力分布及应力传递行为的研究工作尚未见报道。

本文在通过试验研究考察嵌贴 CFRP 板条与混凝土间的粘结-滑移行为的基础上,获得了考虑残余摩擦力的三线性粘结滑移本构关系,建立了预应力放张后嵌贴 FRP 板条与混凝土界面的粘结应力分布模型,并分析了粘结界面所能抵抗的最大预应力,为表层嵌贴预应力 CFRP 加固技术的应用和发展提供了理论依据和指导。

1 嵌贴 FRP 混凝土粘结-滑移关系及加固梁模型

通过拔出试验,考察了嵌贴 CFRP 板条与混凝土间的粘结行为^[19],共进行了 33 个表层嵌贴 CFRP 加固混凝土试件的单剪试验,试件设计及试验装置如图 1、2 所示。试件由素混凝土棱柱体和嵌

贴的 CFRP 板条组成,混凝土棱柱规格及强度如表 1 所示,棱柱体表面均制作了 30 mm 深度的预制槽用于嵌贴 FRP。试件加固采用美国 Aslan 公司生产的 500 型 CFRP 板条,截面尺寸分别为 16 mm×2.0 mm 和 16 mm×4.5 mm;粘结树脂采用瑞士 Sika 公司生产的 Sikadur-30 型树脂,厂商提供的各种加固材料力学性能指标如表 2 所示。通过分析试验结果发现,粘结破坏后界面还存在一定的残余粘结承载力,这是由于在表层嵌贴 FRP 混凝土界面剥离后,由于存在混凝土与树脂胶的粘结约束,在剥离界面上仍然存在一定的残余摩擦力(图 3)。据此,在应力传递长度内的粘结应力分布分析中采用了如图 4 所示的考虑残余摩擦力的简化三线型粘结滑移模型。在此基础上,基于张珂等^[10]提出的外贴预应力 FRP 放张后粘结行为假设与分析方法,构建考虑残余摩擦力的嵌贴预应力 FRP 放张后的粘结应力分布分析模型。

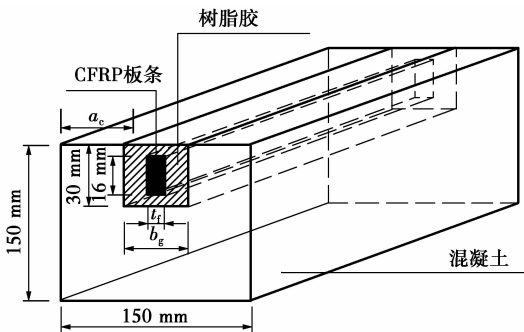


图 1 试件尺寸

Fig. 1 The Dimension of specimens



图 2 试验平面图

Fig. 2 Plan view of test

表 1 混凝土棱柱体规格

Table 1 The concrete specification

混凝土棱柱体尺寸	混凝土强度等级
150 mm×150 mm×300 mm	C15、C40、C60
150 mm×150 mm×500 mm	

表 2 加固材料力学性能

Table 2 Properties of FRP and epoxy

材料类型	拉伸强度/MPa	拉伸模量/MPa
Aslan500 型 CFRP 板条	2 068	131 000
Sikadur-30 型树脂	24~27	11 200

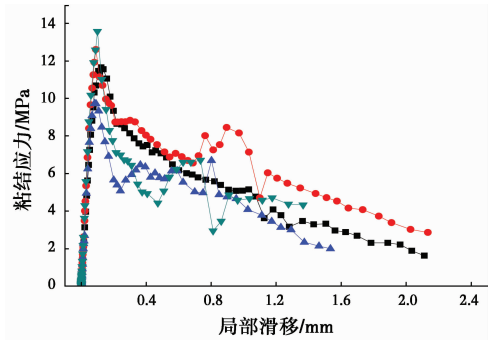


图 3 试验得到的表层嵌贴 CFRP 与混凝土局部粘结-滑移曲线

Fig. 3 Curves of bond stress versus slip of interface between NSM CFRP and concrete from experimental study

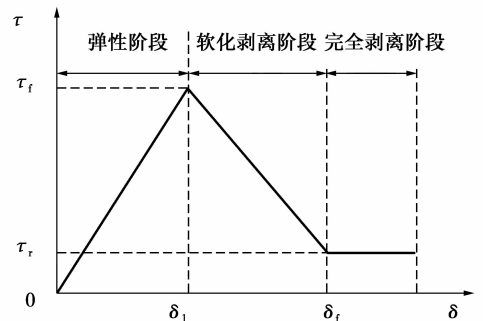


图 4 嵌贴 CFRP 与混凝土界面粘结-滑移本构模型

Fig. 4 Bond-slip relationship of interface between NSM FRP and concrete

以预应力 NSM FRP 加固钢筋混凝土梁为对象进行分析,如图 5 所示,梁支座间净跨 $2L_1$;梁底嵌贴预应力 CFRP 板条,粘结长度为 $2L$;混凝土梁宽 t_c ,高 b_c ;CFRP 宽 t_{CF} ,厚 b_{CF} ;弹性模量 E_{CF} ;混凝土槽宽 t_g ,高 b_g ,加固截面如图 6 所示。CFRP 板条采取两端对称张拉,由于跨中 CFRP 未发生变形,以跨中为坐标原点建立坐标系,仅对对称结构右侧进行分析, $x-x$ 截面处 CFRP 变形如图 7(a)所示,虚线和实线分别表示 CFRP 放张前和放张后的位置,放张之前 CFRP 位置 $u_1(x)$,放张之后 CFRP 发生回缩,新的位置 $u_0(x)$ 。微元段 CFRP 表面应力状态如图 7(b)所示。

如前所述,考虑残余摩擦力的简化三线型模型及粘结-滑移本构关系模型分别如图 4、式(1)所示。

$$\begin{cases} \tau(\delta) = \tau_f \frac{\delta}{\delta_1}, & 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \tau(\delta) = \frac{\tau_f - \tau_r}{\delta_f - \delta_1}(\delta_f - \delta) + \tau_r, & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_f \\ \tau(\delta) = \tau_r, & \delta \geq \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_f 为最大粘结剪应力; τ_r 为残余摩擦应力; δ_1 为最大粘结剪应力对应的粘结-滑移值; δ_f 为最大粘结-滑移值。根据文献[19]的试验研究(所用材料:混凝土强度 C40, CFRP 板条截面 2 mm×16 mm, CFRP 名义拉伸强度 2 068 MPa, 弹性模量 131 GPa), 得到局部粘结-滑移曲线各特征点的平均值: $\delta_f = 1$ mm, $\delta_1 = 0.1$ mm, $\tau_f = 13.6$ MPa, $\tau_r = 4.2$ MPa。

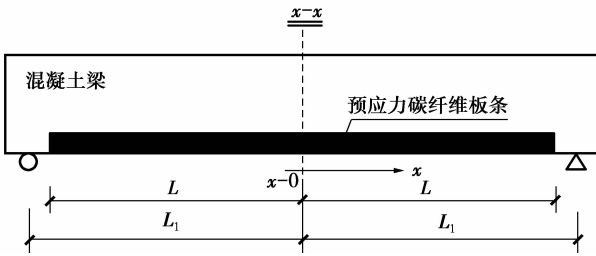


图 5 表层嵌贴预应力 CFRP 加固梁平视图
Fig. 5 Plan view of beam strengthened with prestressed NSM CFRP

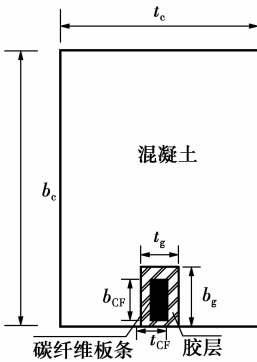


图 6 CFRP 加固梁横截面
Fig. 6 Cross section of beam strengthened with prestressed NSM CFRP

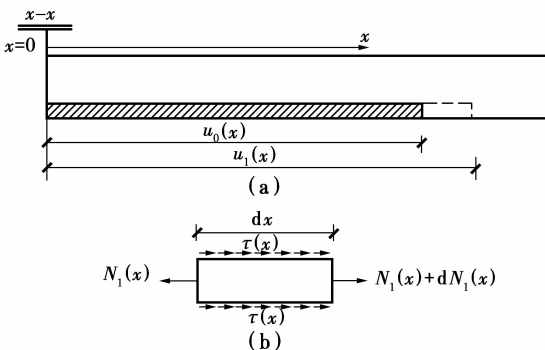


图 7 应力传递长度内 CFRP 应力状态
Fig. 7 Stress of CFRP in stress transfer length

2 端部粘结应力分析

σ_{p0} 为初始施加碳纤维 FRP 的预应力, 放张前 CFRP 应力处处相等, 均为 σ_{p0} , 放张后定义坐标 x 处 CFRP 应力降低至 $\sigma_1(x)$, CFRP 中拉应力为 $N_1(x)$, 界面剪应力为 $\tau(x)$ 。

假定: 混凝土无压缩变形; CFRP 板条截面尺寸和弹性模量在受拉过程中都不会发生改变; 界面剪应力 (CFRP 相对滑移 $(\tau\delta)$ 关系采用式 (1) 所给出的三线性关系。

放张后 CFRP 板条在梁端相对滑移最大, 跨中横截面相对滑移为零, 剪应力从跨中向梁端逐渐增大, 其变化规律为: 当初始应力 σ_{p0} 较小, 端部 CFRP 滑移 $\delta(L) < \delta_1$ 时, 粘结剪应力分布如图 8 所示, 从端部向跨中逐渐减小; 增大 σ_{p0} 至放张后 $\delta(L) = \delta_1$ 时, 定义 σ_{p0} 为 $\sigma_{p0,0}$, 剪应力分布如图 9 所示, 在端部界面剪应力达到 $\tau(L) = \tau_f$; σ_{p0} 继续增大, $\delta_1 < \delta(L) < \delta_f$, 从端部向跨中界面剪应力先增大后减小, 分布如图 10 所示; σ_{p0} 继续增大, 当 $\tau(L) = \tau_r$ 时, 剪应力分布如图 11 所示, 若继续增大 σ_{p0} , CFRP 将发生剥离, 定义此时的 σ_{p0} 为 $\sigma_{p0,max}$ 。

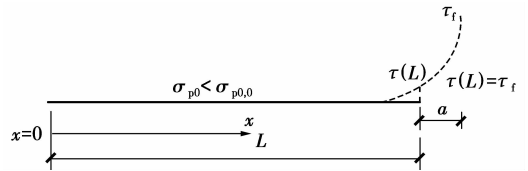


图 8 粘结应力弹性分布状态
Fig. 8 Elastic distribution of bond stress

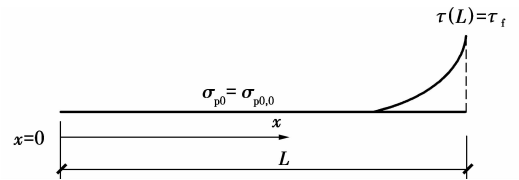


图 9 粘结应力弹性分布界限状态
Fig. 9 Limitation of elastic distribution of bond stress

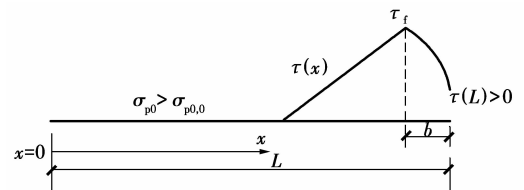


图 10 粘结应力非线性分布状态
Fig. 10 Inelastic distribution of bond stress

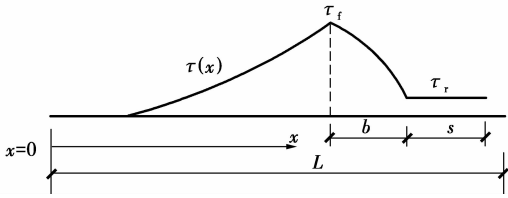


图 11 界面粘结剥离状态

Fig. 11 Debonding at the bonded interface

2.1 粘结端部滑移值 $\delta(L) \leq \delta_1$ 时

在此状态, $0 \leq \delta \leq \delta_1$, $0 \leq \tau \leq \tau_f$, CFRP 板条、混凝土、胶层之间变形协调。当初始预应力 σ_{p0} 较小时, $\tau(x)$ 处于上升状态且未达 τ_f , 如图 8 所示。此时定义 $x = L + a$ 时, $\tau(x)$ 达到理论上的 τ_f , a 为引入的虚拟参数。引入式(1)三线性剪切滑移关系

$$\tau(x) = \tau_f \frac{\delta}{\delta_1} = \tau_f \frac{u_0(x) - u_1(x)}{\delta_1} \quad (2)$$

两侧对 x 求导, 得

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{\tau_f}{\delta_1} \left[\frac{\sigma_{p0}}{E_{CF}} - \frac{\sigma_1(x)}{E_{CF}} \right] \quad (3)$$

两侧继续对 x 求导, 得

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = -\frac{\tau_f}{E_{CF}\delta_1} \frac{d\sigma_1(x)}{dx} \quad (4)$$

由图 7(b) 中力平衡可知

$$dN_1(x) = -\tau(x)L_{per}dx \quad (5)$$

$$dN_1(x) = d\sigma_1(x)b_{CF}t_{CF} \quad (6)$$

联立式(5)和式(6), 有

$$\frac{d\sigma_1(x)}{dx} = -\frac{\tau(x)L_{per}}{b_{CF}t_{CF}} \quad (7)$$

式中: L_{per} 为破坏界面的周长, 当试件破坏在胶层与混凝土界面时, 有 $L_{per} = 2b_g + t_g$; 试件破坏在胶层与 CFRP 板条界面时, $L_{per} = 2b_{CF} + 2t_{CF}$ 。

合并式(4)和式(7), 得到微分方程

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = \frac{\tau_f L_{per}}{E_{CF}\delta_1 t_{CF} b_{CF}} \tau(x) = \lambda_1^2 \tau(x) \quad (8)$$

式中: $\lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_f L_{per}}{E_{CF}\delta_1 t_{CF} b_{CF}}}$ 。

式(8)的解析解为^[20]

$$\tau(x) = C_1 \cosh(\lambda_1 x) + C_2 \sinh(\lambda_1 x) \quad (9)$$

式中: C_1 、 C_2 为待定系数, 边界条件为

$$\begin{cases} \tau(0) = 0 \\ \tau(L+a) = \tau_f \\ \sigma_1(L) = 0 \end{cases}$$

代入式(9), 得

$$\begin{cases} C_1 = 0, C_2 = \frac{\tau_f}{\sinh[\lambda_1(L+a)]} \\ a = \frac{1}{\lambda_1} \operatorname{arcsinh}\left[\frac{E_{CF}\lambda_1\delta_1 \cosh(\lambda_1 L)}{\sigma_{p0}}\right] - L \end{cases} \quad (10)$$

代入式(3)、式(9), 得 $\tau(x)$ 、 $\sigma_1(x)$ 表达式为

$$\begin{cases} \tau(x) = \tau_f \frac{\sinh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L+a)]} \\ \sigma_1(x) = \sigma_{p0} - E_{CF}\lambda_1\delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L+a)]} \end{cases} \quad (11)$$

当 $a = 0$ 时, 剪应力分布如图 8 所示, 此时 $\tau(L) = \tau_f$, $\sigma_{p0,0} = \sigma_{p0} = \frac{E_{CF}\lambda_1\delta_1}{\tanh(\lambda_1 L)}$, 通过计算比较可知, 当式中碳纤维板条粘结长度宏观上有一定尺寸(如 $L > 100$ mm)时, $\tanh(\lambda_1 L)$ 趋于 1, 即

$$\sigma_{p0,0} \approx E_{CF}\lambda_1\delta_1 = \sqrt{\frac{\tau_f E_{CF}\delta_1 L_{per}}{t_{CF} b_{CF}}}$$

当 $\tanh(2) \approx 0.97$, 即 $\lambda_1 L = 2$ 时, 可得到弹性状态的有效粘结长度为: $L_{e,e} = \frac{2}{\lambda_1}$ 。

2.2 粘结端部滑移值 $\delta_1 < \delta(L) \leq \delta_r$ 时

当 σ_{p0} 从 $\sigma_{p0,0}$ 开始继续增大时, 剪应力分布如图 9 所示, 定义 $\tau(L-b) = \tau_f$, 定义 b 为软化长度, 与弹性状态推导类似, 当 $0 \leq x \leq L-b$ 时, 式(9)依然成立。

对于下降段 ($L-b \leq x \leq L$), 由三线性粘结-滑移本构关系

$$\tau(x) = \frac{\tau_f - \tau_r}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) + \tau_r = \frac{\tau_f \delta_f - \tau_r \delta_1}{\delta_f - \delta_1} + \frac{(\tau_r - \tau_f)}{\delta_f - \delta_1} [\mu_0(x) - \mu_1(x)] \quad (12)$$

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} = -\frac{\tau_r - \tau_f}{(\delta_f - \delta_1)E_{CF}} \frac{d\sigma_1(x)}{dx} \quad (13)$$

将式(7)代入式(13), 得

$$\begin{aligned} \frac{d^2\tau(x)}{dx^2} &= -\frac{\tau_r - \tau_f}{(\delta_f - \delta_1)E_{CF}} \left(-\frac{\tau(x)L_{per}}{t_{CF}b_{CF}}\right) = \\ &= \frac{(\tau_r - \tau_f)L_{per}}{(\delta_f - \delta_1)E_{CF}t_{CF}b_{CF}} \tau(x) = -\lambda_2^2 \tau(x) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\lambda_2 = \sqrt{\frac{(\tau_r - \tau_f)L_{per}}{(\delta_f - \delta_1)E_{CF}t_{CF}b_{CF}}}$ 。

微分方程(14)的解为

$$\tau(x) = C_3 \cos(\lambda_2 x) + C_4 \sin(\lambda_2 x) \quad (15)$$

式中: C_3 、 C_4 为待定系数。

考虑边界条件

$$\begin{cases} \tau(0) = 0 \\ \tau(L-b) = \tau_f (\text{上升段}) \\ \tau(L-b) = \tau_f (\text{下降段}) \\ \sigma_1(L-b) (\text{上升段}) = \sigma_1(L-b) (\text{下降段}) \end{cases} \quad (16)$$

代入式(9), 解出 C_1 、 C_2 。

$$\begin{cases} C_1 = 0 \\ C_2 = \frac{\tau_f}{\sinh[\lambda_1(L-b)]} \end{cases} \quad (17)$$

将 C_1, C_2 代入 $\tau(x), \sigma_1(x)$ 表达式(11),得到式(18)。

$\tau(x)$ 上升段 ($0 \leq x \leq L-b$)

$$\begin{cases} \tau(x) = \frac{\tau_f \sinh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L-b)]} \\ \sigma_1(x) = \sigma_{p0} - E_{CF} \lambda_1 \delta_1 \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh[\lambda_1(L-b)]} \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)分别代入式(15)和式(18),解得 C_3, C_4 为

$$\begin{cases} C_3 = \tau_f \cos[\lambda_2(L-b)] + \lambda_4 \sin[\lambda_2(L-b)] \\ C_4 = \tau_f \sin[\lambda_2(L-b)] - \lambda_4 \cos[\lambda_2(L-b)] \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\lambda_4 = \frac{\lambda_1 \delta_1 (\tau_f - \tau_r)}{\lambda_2 (\delta_f - \delta_1) \tanh[\lambda_1(L-b)]}$ 。

则有

$\tau(x)$ 下降段 ($L-b \leq x \leq L$)

$$\begin{cases} \tau(x) = \tau_f \cos[\lambda_2(L-b-x)] + \lambda_4 \sin[\lambda_2(L-b-x)] \\ \sigma_1(x) = \sigma_{p0} - \frac{E_{CF} \lambda_2 (\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} \cdot \{ \tau_f \sin[\lambda_2(L-b-x)] - \lambda_4 \cos[\lambda_2(L-b-x)] \} \end{cases} \quad (20)$$

对软化段长度 b 进行求解,考虑边界条件

$$\sigma_1(L) = 0 \quad (21)$$

联立式(20)、式(21),有

$$\sigma_{p0} = \frac{E_{CF} \lambda_2 (\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} [\tau_f \sin(\lambda_2 b) + \lambda_4 \cos(\lambda_2 b)] \quad (22)$$

一旦软化区域完全发展后,界面开始出现剥离,此时, $\tau(L) = \tau_r, b = b_{\max}, b_{\max}$ 为最大软化段长度,结合式(20)可得到

$$\tau(x) = \tau_f \cos(\lambda_2 b) - \lambda_4 \sin(\lambda_2 b) = \tau_r$$

可推导出

$$b_{\max} = \frac{1}{\lambda_2} \left[\arccos \frac{\tau_r}{\sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2}} - \arccos \frac{\tau_f}{\sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2}} \right] \quad (23)$$

将 b_{\max} 代入式(20)得出 $\sigma_{p0, \max}$

$$\sigma_{p0, \max} = \frac{E_{CF} \lambda_2 (\delta_f - \delta_1)}{\tau_f - \tau_r} \sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2} \quad (24)$$

3 试验结果与分析

3.1 CFRP 预应力放张后的粘结应力分布

实施了预应力 NSM CFRP 加固钢筋混凝土梁受力性能的试验研究(图 12、图 13),其中分别用初

始应力 448 和 1 000 MPa 的嵌贴 CFRP 板条对混凝土梁试件进行加固。加固试件的参数如下:混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 41$ MPa;CFRP 宽度 $b_{CF} = 16$ mm;厚度 $t_{CF} = 2.0$ mm;弹性模量 $E_{CF} = 131$ GPa;开槽深度 $b_g = 30$ mm,槽宽 $t_g = 10$ mm;CFRP 粘结长度为 2 900 mm。



图 12 预应力 NSM CFRP 板条加固梁构件

Fig. 12 Strengthening beam with prestressed NSM CFRP



图 13 加固构件静力试验

Fig. 13 Monotonic test of strengthened beam

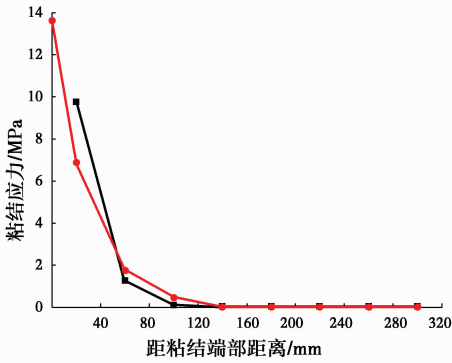
放张过程中 CFRP 板条与混凝土之间的界面应力可以通过测量 CFRP 板条的受拉应变并代入式(25)得到。

$$\tau\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right) = E_{cf} t_f \frac{\epsilon_{x_{i+1}} - \epsilon_{x_i}}{x_{i+1} - x_i}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (25)$$

式中: $\tau\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right)$ 为两测点之间的粘结应力, x_i 和 x_{i+1} 分别为应变片测点“ i ”和“ $i+1$ ”的横坐标, $\epsilon_{x_i}, \epsilon_{x_{i+1}}$ 为相对应的 CFRP 板应变值, E_{cf} 为 CFRP 板弹性模量, t_f 为 CFRP 板厚度。

图 14 为初始应力为 448 MPa 的 CFRP 板条放张后,界面粘结应力分布的理论曲线和试验曲线对比,此时测点粘结端部的粘结应力达到最大粘结剪应力 τ_f ,从图中可以看出理论曲线与试验曲线吻合良好, $\tau_f \approx 13.6$ MPa。图 15 初始应力为 1 000 MPa 的 CFRP 板条放张后,界面粘结应力分布的理论曲

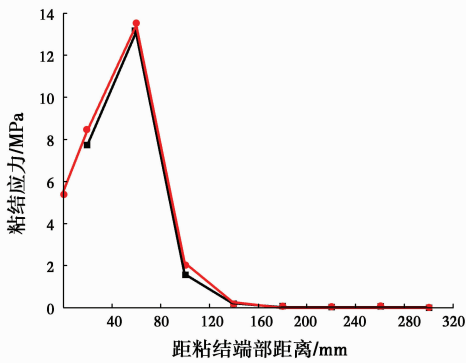
线与试验曲线对比,理论曲线与试验曲线吻合较好,说明本文提出的模型可用于预测嵌贴预应力 CFRP 放张后的界面粘结应力。图 14、图 15 的理论值主要计算过程分别见表 3、表 4。



注: — 放张 448 MPa 时试验值 — 放张 448 MPa 时理论值

图 14 放张 448 MPa 时粘结应力分布

Fig. 14 Distribution of bond stress after releasing 448 MPa



注: — 放张 1 000 MPa 时试验值 — 放张 1 000 MPa 时理论值

图 15 放张 1 000 MPa 时粘结应力分布

Fig. 15 Distribution of bond stress after releasing 1 000 MPa

表 3 放张 448 MPa 时理论计算值

Table 3 The theoretical calculation values after releasing 448 MPa

距自由端距离/mm	距粘结端部距离/mm	$\lambda_1 x$	$\sinh(\lambda_1 x)$	$\sinh[\lambda_1(L+a)]$	$\tau(x)$ / MPa
0	300	0	0	14 283.39	0.00
20	260	0.68	0.74	14 283.39	0.00
60	220	2.05	3.83	14 283.39	0.00
100	180	3.42	15.27	14 283.39	0.01
140	140	4.79	60.03	14 283.39	0.06
180	100	6.16	235.77	14 283.39	0.22
220	60	7.52	925.98	14 283.39	0.88
260	20	8.89	3 636.78	14 283.39	3.46
300	0	10.26	14 283.39	14 283.39	13.60

表 4 放张 1 000 MPa 时理论计算值

Table 4 The theoretical calculation values after releasing 1 000 MPa

距自由端距离/mm	距粘结端部距离/mm	$\lambda_1 x$	$\sinh(\lambda_1 x)$	$\sinh[\lambda_1(L+a)]$	$\tau(x)$ / MPa
0	300	0	0	3 636.78	0
20	280	0.68	0.74	3 636.78	0
60	260	2.05	3.83	3 636.78	0.01
100	220	3.42	15.27	3 636.78	0.06
140	180	4.79	60.03	3 636.78	0.13
180	140	6.16	235.77	3 636.78	0.28
220	100	7.52	925.98	3 636.78	2.08
260	60	8.89	3 636.78	3 636.78	13.6
下降段计算		$\tau_f \cos[\lambda_2(L-b-x)]$	$\lambda_4 \sin[\lambda_2(L-b-x)]$		
280	20	10.826 739 66	-2.299 708 342		8.5
300	0	8.453 895 568	-2.976 642 257		5.4

3.2 最大容许预应力

如前所述,试验得到的粘结-滑移曲线各特征点的平均值为: $\tau_f = 13.6$ MPa, $\tau_r = 4.2$ MPa, $\delta_f = 0.1$ mm, $\delta_r = 1$ mm。另根据试件参数和试验结果,可得破坏面周长

$$L_{per} = 36 \text{ mm}; \lambda_1 = \sqrt{\frac{\tau_f L_{per}}{E_{CF} \delta_f t_{CF} b_{CF}}} = 0.034 2$$

$$\sigma_{p0,0} \approx E_{CF} \lambda_1 \delta_f = 447.7 \text{ MPa}$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{(\tau_f - \tau_r) L_{per}}{(\delta_f - \delta_r) E_{CF} t_{CF} b_{CF}}} = 0.009 47$$

$$\lambda_4 = \frac{\lambda_1 \delta_f (\tau_f - \tau_r)}{\lambda_2 (\delta_f - \delta_r) \tanh[\lambda_1 (L-a)]} = 3.772$$

弹性状态有效粘结长度 $L_e, e = \frac{2}{\lambda_1} = 58.48$ mm

最大软化段长度

$$b_{max} = \frac{1}{\lambda_2} \left[\arccos \frac{\tau_r}{\sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2}} - \arccos \frac{\tau_f}{\sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2}} \right] = 104.94 \text{ mm}$$

不考虑发生剥离的条件下,粘结界面可抵抗的最大容许预应力为

$$\sigma_{p0,max} = \frac{E_{CF} \lambda_2 (\delta_f - \delta_r)}{\tau_f - \tau_r} \sqrt{\tau_f^2 + \lambda_4^2} = 1 662.9 \text{ MPa}$$

4 结论

基于试验得到的界面剥离后存在残余摩擦的三线性粘结-滑移本构关系,提出了预应力放张后 FRP

板条与混凝土界面粘结应力的微分方程,并根据边界条件推导出了方程的解析解,得到了放张后应力传递长度内,界面粘结应力和 FRP 拉伸分布的分析模型。与试验结果对比分析,理论结果与试验结果吻合良好,表明得到的嵌贴 FRP 粘结应力分布的分析模型具有一定精度,可为表层嵌贴预应力 CFRP 加固技术的应用和发展提供理论依据和设计指导。必须指出,本文所建立的模型是基于不考虑混凝土槽壁破坏的前提下,预应力放张后粘结界面的应力传递行为,以及 CFRP 混凝土界面可抵抗的最大预应力水平。但槽壁发生破坏时不同厚度、不同强度的混凝土槽壁可抵抗多大的预应力,针对槽壁破坏,可进行有效的锚固措施及这些锚固措施对结果存在多大程度的影响,有必要针对这些因素开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 尚守平,彭晖,童桦. 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 S P, PENG H, TONG H. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):24-30. (in Chinese)
- [2] ABHIJIT M, GOPAL L R. Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 822-828.
- [3] 杨勇新,李庆伟,岳清瑞. 预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力损失试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(4):5-8, 18.
YANG Y X, LI Q W, YUE Q R. Experimental research on prestress loss in technique of concrete structure strengthened with prestressed CFRP concrete [J]. Industrial Construction, 2006, 36(4): 5-8, 18. (in Chinese)
- [4] 姚谏,朱晓旭,周延阳. 混凝土表层嵌贴 CFRP 板条的黏结承载力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1):34-38, 169.
YAO J, ZHU X X, ZHOU Y Y. Bond failure loads of near surface mounted CFRP strips bonded to concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(1):34-38, 169. (in Chinese)
- [5] DELORENZIS L, TENG J. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 119-143.
- [6] RAHAL K N, RUMAIH H A. Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars [J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 53-62.
- [7] 彭晖,张建仁,何贤锋,等. 表层嵌贴预应力 CFRP-strip 加固钢筋混凝土梁的受力性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29(Sup1): 79-85, 91.
PENG H, ZHANG J R, HE X F, et al. Study of mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted prestressed CFRP strips [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Sup1): 79-85, 91. (in Chinese)
- [8] HÅKAN N, BJÖRN T. Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP [J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(1): 60-68.
- [9] 彭晖,尚守平,刘兴彦. 预应力碳纤维片材张放后端部粘结应力分析[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(2): 66-70.
PENG H, SHANG S P, LIU X Y. Analysis of bond extremities interfacial stress of prestressed CFRP laminate after releasing [J]. Journal of Transport Science and Ineering, 2009, 25(2): 66-70. (in Chinese)
- [10] 张珂,叶列平. 预应力碳纤维布界面粘结应力及最大张拉预应力分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(7):96-99.
ZHANG K, YE L P. Analysis of maximum tensioned prestress and interfacial bond stress of prestressed CFRP sheets [J]. Industrial Construction, 2007, 37(7): 96-99. (in Chinese)
- [11] JOSÉ M D S C, JOAQUIM A O D B. Bond between near-surface mounted carbon-fiber reinforced polymer laminate strips and concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6):519-527.
- [12] BLASCHKO M. Bond behaviour of cfrp strips glued into slits [C]// Proceedings RPRCS-6. Singapore: World Scientific, 2003; 205-214.
- [13] PARRETTI R, NANNI A. Strengthening of RC members using near surface mounted FRP composites: design overview [J]. Advances in Structural Engineering, 2004, 7(6): 469-83.
- [14] HASSAN T, RIZKALLA S. Bond mechanism of near-surface-mounted fiber-reinforced polymer bars for flexural strengthening of concrete structures [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6): 830-839.
- [15] DELORENZIS L. Strengthening of RC structures with

- near surface mounted frp rods [D]. University of Lecce, Italy, 2002.
- [16] HASSAN T, RIZKALLA S. Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2003, 7(3): 248-257.
- [17] 姚谏, 朱晓旭, 周延阳. 混凝土表层嵌贴 CFRP 板条的黏结承载力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 34-38, 169.
- YAO J, ZHU X X, ZHOU Y Y. Bond failure loads of near surface mounted CFRP strips bonded to concrete [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(1): 34-38, 169. (in Chinese)
- [18] MOATAZ B, NORAN W, KHALED S. Evaluation of the transfer length of prestressed near surface mounted CFRP rods in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1474-1479.
- [19] PENG H, HAO H X, ZHANG J R, et al. Experimental investigation of the bond behavior of the interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 11-19.
- [20] SMITH S T, TENG J G. Interfacial stresses in plated beams [J]. Engineering Structures, 2001, 23(7): 857-871.
- [21] 彭晖, 高勇, 谢超, 等. FRP-混凝土界面粘结行为的参数影响研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4): 489-498.
- PENG H, GAO Y, XIE C, et al. On the influence parameters on bonding behavior of FRP-concrete interface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4): 489-498. (in Chinese)
- [22] ALI M S M, OEHLERS D J, GRIFFITH M C, et al. Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints [J]. Engineering Structures, 2008, 30(7): 1861-1868.

(编辑 王秀玲)