

DOI:10.11918/202008095

端锚 CFRP - 混凝土界面剥离全过程解析模型

董坤¹, 荆范华¹, 郝爱江², 李鹏¹, 郝建文³

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛, 266100; 2. 滨州市公路勘察设计院, 山东 滨州, 256600; 3. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250000)

摘要: 端部锚固是一种控制 CFRP - 混凝土黏结界面剥离和提高界面承载力的有效措施。为研究端部锚固下 CFRP - 混凝土黏结界面的剥离过程, 引入指数型界面黏结 - 滑移本构, 推导了黏结界面剥离全过程的解析模型, 得到了黏结界面滑移、黏结应力、CFRP 应变和应力分布表达式, 上述解析模型得到了试验结果的良好验证。基于解析模型, 给出了黏结界面的最大黏结力、有效黏结长度和剥离荷载的计算方法, 并分析了不同黏结长度对界面剥离全过程受力行为的影响。分析表明: 相比纯外贴黏结界面, 端部锚固黏结界面的有效黏结长度有所增加, 且剥离荷载随黏结长度的增加而降低, 并趋近于纯外贴黏结界面的极限承载力; 当黏结长度较长时, 其剥离荷载与最大黏结力相差不大, 此时端部锚固力很小; 当黏结长度较短时, 端部锚固会更早地参与承担荷载, 其剥离荷载接近 CFRP 拉断荷载。

关键词: 混凝土结构; CFRP 加固; 端部锚固; 解析模型; 剥离行为

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2021)04 - 0071 - 09

Analytical models of the whole debonding process of CFRP-to-concrete interface with end anchorage

DONG Kun¹, JING Fanhua¹, HAO Aijiang², LI Peng¹, HAO Jianwen³

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Binzhou City Highway Survey and Design Institute, Binzhou 256600, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250000, China)

Abstract: End anchorage is an effective measure to control the debonding of CFRP-to-concrete bond interface and improve the interface bearing capacity. To study the debonding process of CFRP-to-concrete interface with end anchorage, the exponential bond-slip model was introduced to establish analytical models. The distribution expressions of interfacial slip, bond stress, CFRP axial strain and stress were obtained. The proposed models were well verified by experimental results. Based on the analytical models, the calculation methods of the maximum bond force, effective bond length, and debonding load were established, and the influence of different bond lengths on the mechanical behaviors of the interface during the debonding process was analyzed. Results show that the effective bond length of the bonded interface with end anchorage was longer than that of the external bonded interface. The debonding load decreased with the increase of the bond length, approaching the ultimate bearing capacity of the external bonded interface. When the bond length was long, there was little difference between the debonding load and the maximum bond force, and the end anchoring force was small. When the bond length was short, the end anchorage would bear the load earlier, and the debonding load was close to the CFRP breaking load.

Keywords: concrete structure; CFRP strengthening; end anchorage; analytical model; debonding behavior

碳纤维增强聚合物 (CFRP) 是一种轻质高强的材料, 外贴 CFRP 材料加固和修复混凝土结构已成为目前加固工程中一种普遍的选择。CFRP 加固技术不但能够提高结构的极限承载力, 同时还能提供较好的抗腐蚀效果^[1-2]。在实际工程中, CFRP - 混凝土黏结界面的端部剥离是 CFRP 加固混凝土结构

的典型破坏模式^[3-4], 不但会导致 CFRP 强度的有效利用率降低, 并且将导致加固构件脆性破坏。因此, ACI 委员会建议, 可采用附加端部锚固的措施来增加极限荷载和避免黏结界面端部的剥离破坏^[5]。

针对端部锚固措施, 国内外学者开发了一系列不同的锚固装置和方法, 试验表明锚固手段可以有效地控制端部剥离^[6]。覃银辉等^[7]基于一种自锁式的端部锚固装置, 进行了 CFRP - 混凝土黏结界面剪切试验, 试验中锚固效果突出, 施加端部锚固后的破坏模式为 CFRP 片材拉断, 黏结界面承载力得到显著提升。Barris 等^[8]采用钢压板加螺栓的方式对 CFRP 端部进行锚固, 试验表明, 通过对螺栓施加

收稿日期: 2020 - 08 - 23

基金项目: 国家自然科学基金(52008384);

中国博士后科学基金(2019M652477);

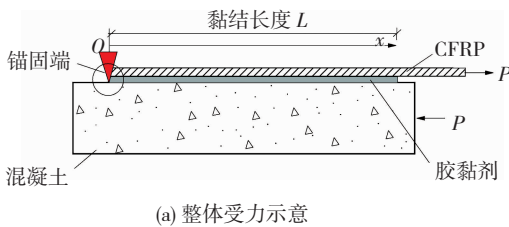
青岛市博士后研究人员应用研究项目(861905042002)

作者简介: 董坤(1987—), 男, 博士, 讲师

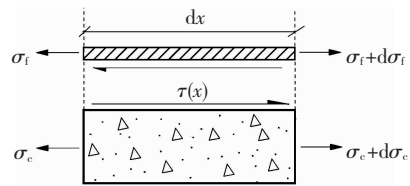
通信作者: 李鹏, superlipeng0621@126.com

足够的扭矩也能够实现端部完全锚固的效果。另外,周英武等^[9]、卓静等^[10]、Zhou 等^[11]还研究了不同形式的端部锚固装置对 CFRP 加固梁抗弯性能的提升,发现通过合理的端部锚固,能够极大的提高构件的受弯承载力和 CFRP 强度利用效率。在理论研究方面,李春良等^[12]建立了端部锚固 CFRP 加固结构的界面黏结应力解析模型,但该模型忽略黏结界面产生的滑移,会对黏结界面的黏结应力水平造成偏高的预测。Zhang 等^[13]和 Sturm 等^[14]基于双线性界面黏结滑移本构,采用分段积分求解方法分别模拟了端部单个和多个纤维束锚固黏结界面的受力全过程,获得了黏结界面加载端荷载-滑移关系及界面黏结性能分布模型。Chen 等^[15]则采用三线性分段界面黏结-滑移本构,给出了加固界面极限承载力预测模型。上述理论研究中均采用线性分段的界面黏结-滑移本构形式,无法连续的体现黏结界面的非线性强化及软化行为,且较少涉及对端部锚固下有效黏结长度和最大界面黏结力的探讨。

本文基于端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面的剪切受力模型,引入了双参数指数型界面黏结-滑



(a) 整体受力示意



(b) 微元体受力示意

图 1 端部锚固 CFRP-混凝土的单面剪切受力示意

Fig. 1 Schematic diagram of single-lap shear test of CFRP-to-concrete interface with end anchorage

根据图 1(b)中微元体的受力情况,可建立平衡方程:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{\tau}{t_f} = 0 \\ \sigma_f t_f b_f + \sigma_c t_c b_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_f 和 σ_c 分别为 CFRP 和混凝土的轴向应力, t_f 和 t_c 分别为 CFRP 和混凝土的厚度, b_f 和 b_c 分别为 CFRP 和混凝土的宽度, τ 为界面黏结应力。

CFRP、混凝土以及黏结界面的物理关系为

$$\begin{cases} s = u_f - u_c \\ \sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_f \frac{du_f}{dx} \\ \sigma_c = E_c \varepsilon_c = E_c \frac{du_c}{dx} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_f 和 u_c 分别为 CFRP 和混凝土的轴向变形量, ε_f 和 ε_c 分别为 CFRP 和混凝土的轴向应变, E_f 和 E_c 分别为 CFRP 和混凝土的弹性模量, s 为黏结界面的相对滑移量。

联立式(1)、(2)可得

移本构,建立了表征端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面剥离全过程的解析模型,该解析模型得到了试验结果的良好验证。利用解析模型,建立了最大界面黏结力、黏结界面剥离承载力和有效黏结长度的计算方法,并对不同黏结长度界面的剥离全过程进行了分析。

1 黏结界面剥离行为解析模型

1.1 黏结界面微分平衡方程

在黏结界面剥离行为的解析模型建立过程中,做出如下基本假设:1)黏结界面仅承受切向黏结应力,不承受法向应力;2)不考虑黏结层厚度,黏结层的性质在界面黏结-滑移本构中予以体现;3)CFRP、混凝土材料均为弹性体,非线性力学特征仅存在于黏结界面;4)CFRP 片材所受正应力沿厚度方向均匀分布,不考虑宽度方向的应力变化;5)锚固端为完全锚固,在受力过程中锚固位置处的 CFRP 片材不产生滑动。

图 1 给出了端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面的单面剪切受力示意图。

$$\frac{ds}{dx} = (1 + \rho) \varepsilon_f \quad (3)$$

式中: $\rho = E_f t_f b_f / (E_c t_c b_c)$ 对于常见的 CFRP 加固混凝土构件,值一般小于 0.01,对界面黏结行为的影响较小,在本文后续推导过程中暂忽略不计。

联立式(1)~(3)可得黏结界面微分平衡方程:

$$\tau = E_f t_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} = E_f t_f \frac{d^2 s}{dx^2} \quad (4)$$

1.2 黏结微分平衡方程的求解

界面黏结-滑移本构是分析 CFRP-混凝土黏结界面剥离过程的关键。Dai 等^[16]提出了如式(5)所示的双参数指数型界面黏结-滑移本构,该本构的待定参数少,表达形式为一条光滑的曲线,能够简洁有效地反映 CFRP-混凝土的界面黏结-滑移非线性行为。相比于双线性或三线性本构模型,基于指数型本构所推导得到的荷载-滑移关系式和各物理量分布表达式相对统一,不分段的单一表达式便可反映黏结界面剥离全过程的行为。目前,该本构已广泛应用于 CFRP-混凝土界面力学行为的解析

分析中^[17-18]。

$$\tau(s) = E_t t_f A^2 B (1 - e^{-Bs}) e^{-Bs} \quad (5)$$

式中 A 和 B 为黏结界面参数,可通过黏结界面剪切试验或简化计算方法^[19]求得。

联立式(4)~(5)可得

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = A^2 B (1 - e^{-Bs}) e^{-Bs} \quad (6)$$

由于锚固端 CFRP 应变暂时是未知的,假定其值为 ε_0 ,该值的求解方法将在后续给出。结合式(3)对图1(a)中端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面进行分析,可得边界条件:

$$\begin{cases} x = 0, \frac{ds}{dx} = \varepsilon_0, s = 0 \\ x = L, \frac{ds}{dx} = \frac{P}{E_t t_f b_f} \end{cases} \quad (7)$$

对式(6)进行一次积分可得

$$\left(\frac{ds}{dx}\right)^2 = A^2 (1 - e^{-Bs})^2 + C_1 \quad (8)$$

式(8)中 C_1 为常数项。结合边界条件式(7)中的第一项可得

$$\frac{ds}{dx} = A \sqrt{(1 - e^{-Bs})^2 + (\varepsilon_0/A)^2} \quad (9)$$

$$y = \frac{1 + \varphi^2}{1 + \varphi^2 \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2})} \quad (14)$$

最后,结合 $y = e^{-Bs}$ 可得界面滑移分布的计算公式:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \frac{1 + \varphi^2 \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2})}{1 + \varphi^2} \quad (15)$$

联立式(3)和式(15),可得 CFRP 应变分布的计算公式:

$$\varepsilon_f = A\varphi + \frac{A\varphi [\cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) - 1]}{1 + \varphi^2 \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2})} \quad (16)$$

同时结合式(2)可得 CFRP 的正应力分布计算公式:

$$\sigma_f = E_t A\varphi + \frac{E_t A\varphi [\cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) - 1]}{1 + \varphi^2 \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2})} \quad (17)$$

联立式(1)和式(17)可得界面黏结应力分布的计算公式:

$$\tau(x) = E_t t_f \frac{A^2 B \varphi (1 + \varphi^2) [\sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) - 1]}{[1 + \varphi^2 \cosh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABx \sqrt{1 + \varphi^2})]^2} \quad (18)$$

将边界条件式(7)中第二项代入式(3)及式(16)可得

$$P = E_t b_f t_f A\varphi + \frac{E_t b_f t_f A\varphi [\cosh(ABL \sqrt{1 + \varphi^2}) - 1]}{1 + \varphi^2 \cosh(ABL \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABL \sqrt{1 + \varphi^2})} \quad (19)$$

结合 $\varphi = \varepsilon_0/A$,式(19)给出了外荷载 P 与锚固端 CFRP 应变的一一对应关系。此时,在给定的荷载下可以求得唯一的锚固端 CFRP 应变 ε_0 ,进而可根据式(15)~(19)求得其他物理量表达式。

将 $x=L$ 代入式(15)可得黏结界面加载端的滑移计算公式:

$$s(L) = \frac{1}{B} \ln \frac{1 + \varphi^2 \cosh(ABL \sqrt{1 + \varphi^2}) + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh(ABL \sqrt{1 + \varphi^2})}{1 + \varphi^2} \quad (20)$$

联立式(19)、(20)即可求得黏结界面加载端的荷载-滑移响应曲线。

令 $y = e^{-Bs}$, $y_0^2 = 1 + (\varepsilon_0/A)^2$,并将其代入式(9)可得

$$-\frac{1}{By} \frac{dy}{dx} = A \sqrt{(1-y)^2 - (1-y_0^2)} \quad (10)$$

对式(10)进行积分可得

$$-\frac{1}{y_0} \ln \left(\frac{\sqrt{y^2 - 2y + y_0^2} + y_0}{y} - \frac{1}{y_0} \right) = -ABx + C_2 \quad (11)$$

式(11)中 C_2 为常数项,对上式化简可得变量 y 的表达式

$$y = \frac{2y_0^3 e^{ABxy_0 - C_2 y_0}}{y_0^2 e^{2ABxy_0 - 2C_2 y_0} + 2y_0 e^{ABxy_0 - C_2 y_0} + (1 - y_0^2)} \quad (12)$$

根据边界条件知 $y(0) = 1$,将其代入式(12)可求解得

$$C_2 = \frac{1}{y_0} \ln \frac{y_0}{y_0^2 - 1 + y_0 \sqrt{y_0^2 - 1}} \quad (13)$$

然后令 $\varphi = \varepsilon_0/A$,并将 $y_0^2 = 1 + \varphi^2$ 和常数 C_2 代入式(12)得

2 解析模型的验证

为验证解析模型的正确性和适用性,设计并进行了端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面的单剪试验。试验中试件信息见表 1,包括 3 组不同黏结长度的端部锚固 CFRP 布加固混凝土试件,以及 1 组纯外贴 CFRP 布加固混凝土试件,每组 3 个试件。如图 2 所示,本文试验使用 5 mm 厚的 45 号钢板设计了新型自锁锚固装置,其工作原理是将 CFRP 布端部反向覆盖开洞钢板,然后将咬合钢板从上部压紧并采用 8.8 级 M8 螺栓固定,利用摩擦力和机械咬合力将 CFRP 布可靠地固定于锚固装置上。该装置满足 JGJ 145—2013《混凝土结构后锚固技术规程》第 6.1.1~6.1.3 条的机械锚固强度验算要求。被加固试件混凝土弹性模量为 25.5 GPa,混凝土 28 d 立方体抗压强度为 37.6 MPa;实测涂胶固化后的 CFRP 布弹性模量为 220 GPa,抗拉强度为 2 870 MPa。试验获取了 CFRP 应变数据和界面荷载-滑移曲线,并与解析模型进行了对比。

表 1 试件信息表

Tab. 1 Information of specimens

试件编号	试件尺寸/mm	黏结长度/mm	黏结宽度/mm	CFRP 厚度/mm	端锚形式	螺栓扭矩/(N·m)
EB-200-1~3		200			无端锚	0
EA-100-1~3	400×200×200	100	50	0.167	自锁锚固	15
EA-150-1~3		150			自锁锚固	15
EA-200-1~3		200			自锁锚固	15

注:试件编号中“EB”代表纯外贴试件,“EA”代表端部锚固试件,“200”代表黏结长度为 200 mm,“1~3”代表该组试件中第 1~3 个试件。

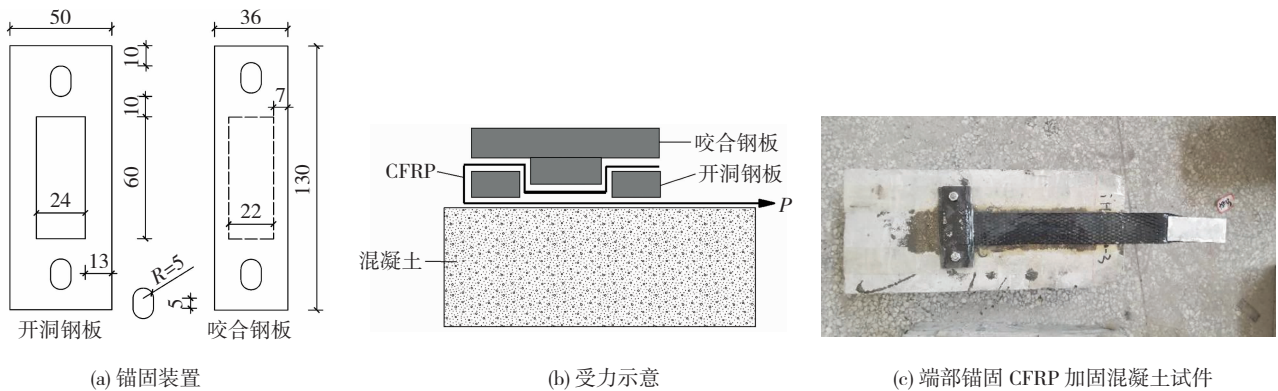


图 2 新型自锁锚固装置及端锚 CFRP 加固试件示意

Fig. 2 Schematic diagram of new type self-locking anchorage device and CFRP strengthened specimen with end anchorage

图 3 给出了解析模型与试验结果的对比,其中将 3 个 EB-200 试件的应变数据按照文献[20]中的积分方法换算,可得距离加载端 50 mm 处的界面黏结应力与界面滑移数据,通过对试验数据拟合可得黏结-滑移本构公式(5)中的界面参数 $A = 0.0075$, $B = 12$,见图 3(a)。根据图 3 荷载-滑移曲线及 CFRP 应变分布曲线的对比可知,解析模型与试验结果吻合较好。图 3(b)部分试件荷载-滑移曲线的水平段数值和最终的 CFRP 拉断荷载数值均略低于理论值(13.5 kN 和 23.96 kN),推测是由于试验过程中碳纤维布宽度的裁剪误差和胶黏剂的涂刷不均匀导致。

3 界面黏结特征

3.1 界面平衡方程的求解

根据图 1 及前文推导的解析模型,可以得到整

个加固界面的外荷载由端部锚固力和界面黏结力共同来承担,数学表达式为

$$P = P_a + P_b \quad (21)$$

式中: P 是外荷载, P_a 是端部锚固力, P_b 是界面黏结力,也就是界面黏结应力沿整个黏结面的积分值

$$\int_0^L \tau(x) b_f dx。$$

根据锚固点受力平衡关系和式(17)可知,端部锚固力 P_a 为

$$P_a = b_f t_f \sigma_f(0) = E_f b_f t_f A \varphi \quad (22)$$

结合式(19)、(21)、(22)可得到界面黏结力 P_b 为

$$P_b = \frac{E_f b_f t_f A \varphi [\cosh \xi - 1]}{1 + \varphi^2 \cosh \xi + \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \sinh \xi} \quad (23)$$

式中 $\xi = ABL \sqrt{1 + \varphi^2}$ 。

图 4 以试验试件 EA-150 的参数为例,给出了加载过程中上述各部分的变化关系。

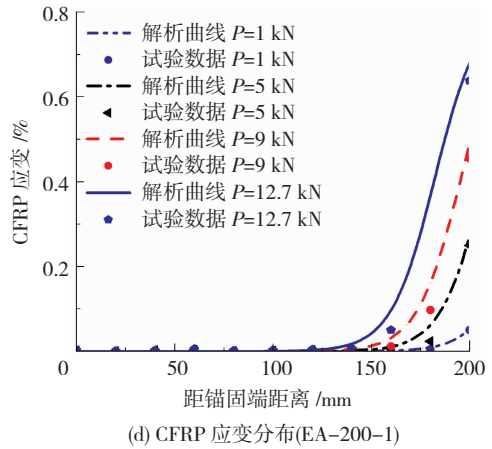
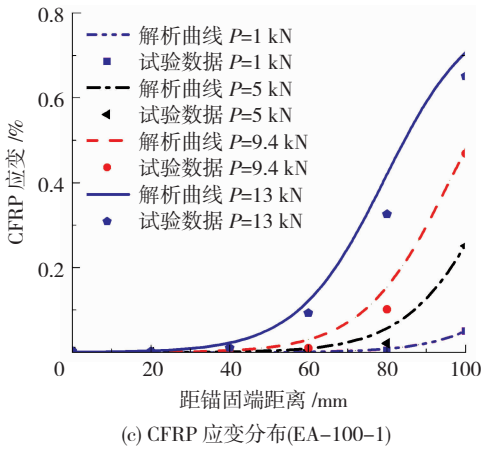
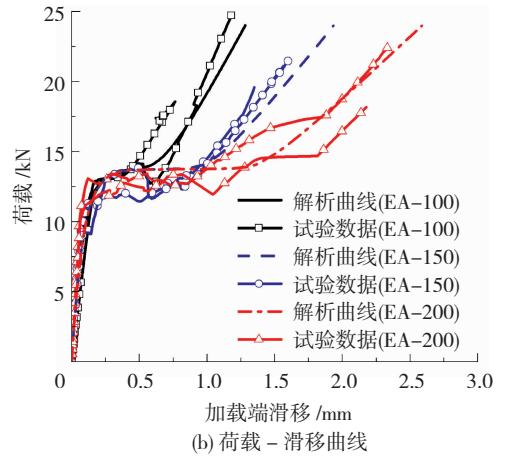
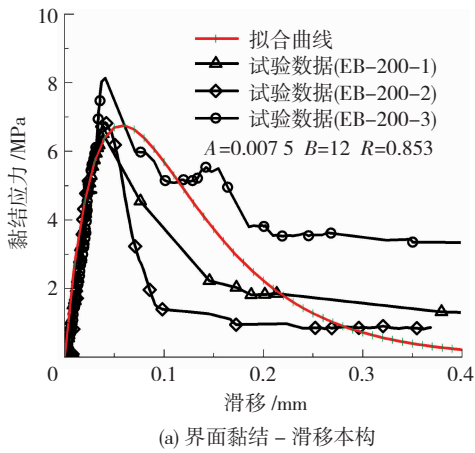


图 3 解析模型与本文试验结果对比

Fig. 3 Comparisons between analytical and experimental results

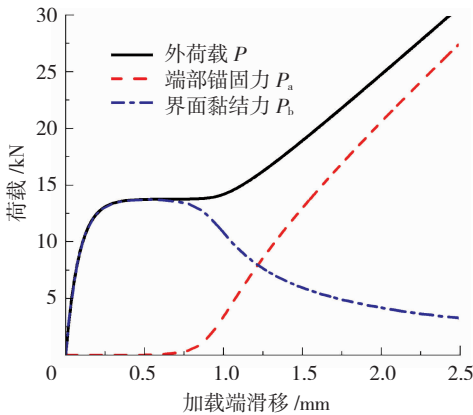


图 4 P、Pa、Pb 与滑移对应关系

Fig. 4 Relation between P, Pa, Pb, and slip

对式(23)求导取极值,可得到给定黏结长度 L 后,最大界面黏结力的表达式为

$$P_{b,0} = \frac{E_f b_f t_f A \varphi_0 [\cosh \xi_0 - 1]}{1 + \varphi_0^2 \cosh \xi_0 + \varphi_0 \sqrt{1 + \varphi_0^2} \sinh \xi_0} \quad (24)$$

式中 $\xi_0 = ABL \sqrt{1 + \varphi_0^2}$,且 φ_0 通过下式求得

$$(\varphi_0^2 \cosh \xi_0 + \frac{\varphi_0^3}{\sqrt{1 + \varphi_0^2}} \sinh \xi_0 - ABL \varphi_0^3 - 1) \times (\cosh \xi_0 - 1) = \varphi_0^2 \xi_0 \sinh \xi_0 \quad (25)$$

将 φ_0 依次带入式(19)和式(22)即可求得对应

最大界面黏结力 $P_{b,0}$ 的外荷载 P_0 和端部锚固力 $P_{a,0}$ 。图 5 给出了不同黏结长度时, $P_{b,0}$ 及其对应的 P_0 、 $P_{a,0}$ 的变化曲线。图中数据均作无量纲处理:纵坐标为各荷载 ($P_{b,0}$ 、 $P_{a,0}$ 、 P_0) 与 $E_f b_f t_f A$ 的比值,横坐标为界面参数 A、B 与黏结长度 L 的乘积。

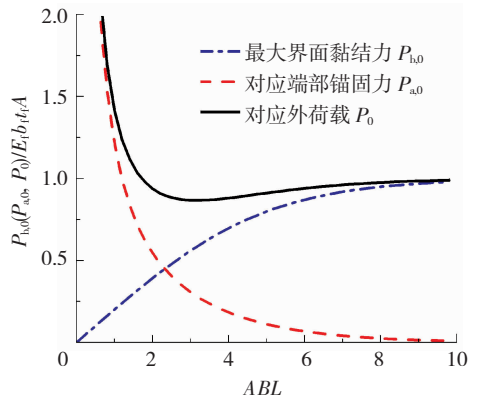


图 5 Pb,0、Pa,0、P0 与黏结长度对应关系

Fig. 5 Relation between Pb,0, Pa,0, P0, and bond length

由图 5 可知,随着黏结长度不断增加, $P_{b,0}$ 与对应的 $P_{a,0}$ 分别呈现单调递增和单调递减的趋势,并分别趋近于 1 和 0; $P_{b,0}$ 对应的 P_0 呈现先递减后小幅度递增的趋势,并最终趋近于 1。当黏结长度较大时, P_0 基本都由黏结力来承担,而端锚装置几乎

不提供锚固力,此时界面状态与纯外贴情况几乎完全一致;反之,当黏结长度较小时, P_0 大部分都由锚固力承担,此时的界面状态与有端锚无黏贴情况几乎一致。

3.2 有效黏结长度

根据图 5 中 3 条曲线数据,图 6 给出了最大界面黏结力 $P_{b,0}$ 及对应端部锚固力 $P_{a,0}$ 所承担荷载的比例与黏结长度的关系。令 $P_{b,0}$ 承担荷载的比例为 α , 对应 $P_{a,0}$ 承担荷载的比例为 β , 通过对图 6 的曲线进行拟合, 给出 β 的简化表达式

$$\beta = 1 - \alpha =$$

$$\begin{cases} 0.51 \tanh(-0.54ABL + 1) + 0.63, & 0 \leq ABL \leq 4 \\ \tanh(-0.27ABL) + 1, & ABL > 4 \end{cases} \quad (26)$$

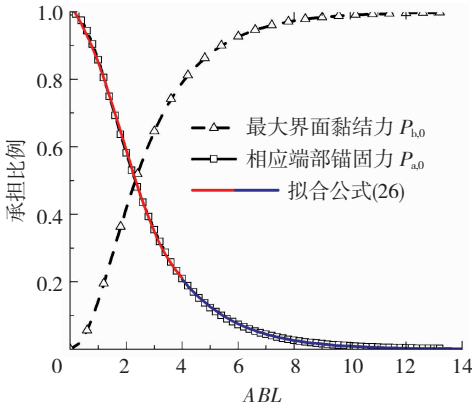


图 6 各部分荷载比例变化曲线

Fig. 6 Load proportion curves of each component

类比纯外贴 CFRP 加固情况,随着黏结长度增加,当最大界面黏结力 $P_{b,0}$ 占外荷载的 96% 以上时,对应的黏结长度即为黏结界面的有效黏结长度^[21]。对式(26)第二段求反函数,即可得到端部锚固 CFRP - 混凝土黏结界面的有效黏结长度计算公式

$$L_{\text{eff}} = \frac{1.85}{AB} \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}, \alpha \geq 0.96 \quad (27)$$

文献[19]中给出了考虑自由端滑移时,纯外贴 CFRP - 混凝土界面的最大黏结力承担荷载的比例 α 为

$$\alpha = \begin{cases} 1.761 \tanh(0.142ABL), & 0 \leq ABL \leq 2 \\ \tanh(0.332ABL - 0.132), & ABL > 2 \end{cases} \quad (28)$$

同样,对式(28)第二段求反函数,可得纯外贴 CFRP - 混凝土黏结界面的有效黏结长度计算公式

$$L_{\text{eff}} = \frac{1.5}{AB} \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} + \frac{0.4}{AB}, \alpha \geq 0.96 \quad (29)$$

图 7 给出了纯外贴和端部锚固黏结界面的有效黏结长度的对比。由图 7 可知,相比于纯外贴黏结界面,在同一承担荷载的比例 α 下,端部锚固黏结

界面所需的有效黏结长度有所增加,两者差值约为 $1/AB$;端部锚固 CFRP - 混凝土黏结界面的有效黏结长度至少应为 $7.2/AB$ 。

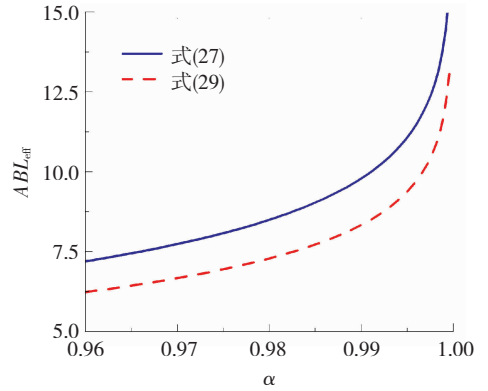
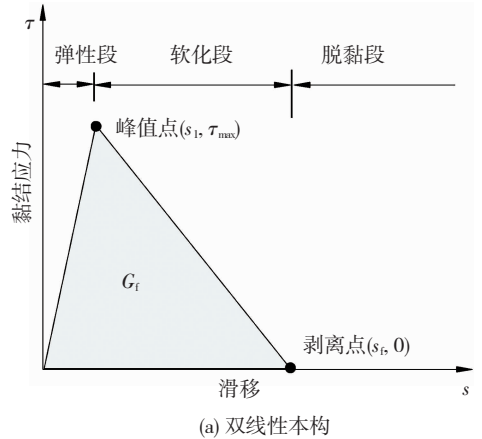


图 7 有效黏结长度与 α 对应关系

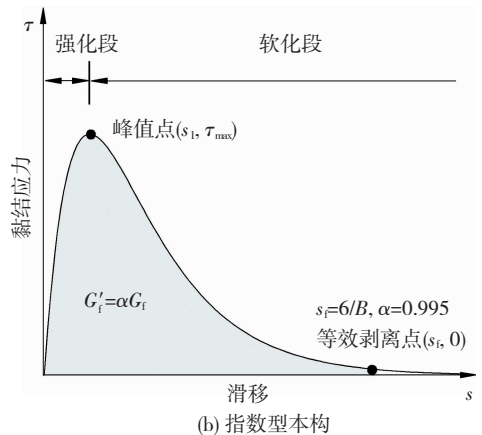
Fig. 7 Relation between effective bond length and α

3.3 界面剥离荷载

如图 8 所示,不同于双线性界面黏结 - 滑移本构,双参数指数型界面黏结 - 滑移本构仅存在黏结应力强化段和软化段,软化段后不存在剥离点(即 $\tau = 0$ 点),因此无法直接给出对应于加载点黏结应力为 0 时的剥离荷载,而双线性界面黏结 - 滑移本构存在剥离点($\tau = 0$ 点)。借鉴有效黏结长度的取值方法,可在双参数指数型界面黏结 - 滑移本构曲线的软化



(a) 双线性本构



(b) 指数型本构

图 8 黏结 - 滑移本构模型中剥离点的计算方法

Fig. 8 Calculation method of debonding point in bond-slip model

段上取极限滑移 $s_f = 6/B$, 见图 8(b), 结合式(5) 计算此时本构曲线与 x 轴所围面积可占完整曲线所围面积(即断裂能 G_f)的 99.5%。因此,可认为当加载端滑移达到 $s_f = 6/B$ 时,该点开始剥离,此时外荷载即为剥离荷载。

将 $s(L) = 6/B$ 代入式(20),并结合式(19)即可求得黏结界面剥离荷载为

$$P_{db} = E_f b_f t_f A \varphi_{db} + \frac{E_f b_f t_f A \varphi_{db} [\cosh \xi_{db} - 1]}{1 + \varphi_{db}^2 \cosh \xi_{db} + \varphi_{db} \sqrt{1 + \varphi_{db}^2} \sinh \xi_{db}} \quad (30)$$

式中 $\xi_{db} = ABL \sqrt{1 + \varphi_{db}^2}$, 其中 φ_{db} 满足

$$\ln \frac{1 + \varphi_{db}^2 \cosh \xi_{db} + \varphi_{db} \sqrt{1 + \varphi_{db}^2} \sinh \xi_{db}}{1 + \varphi_{db}^2} = 6 \quad (31)$$

图 9 给出了剥离荷载 P_{db} 及其对应的界面黏结力 $P_{b,db}$ 和端部锚固力 $P_{a,db}$ 随黏结长度变化曲线,同时与对应最大界面黏结力的外荷载 P_0 的对比。

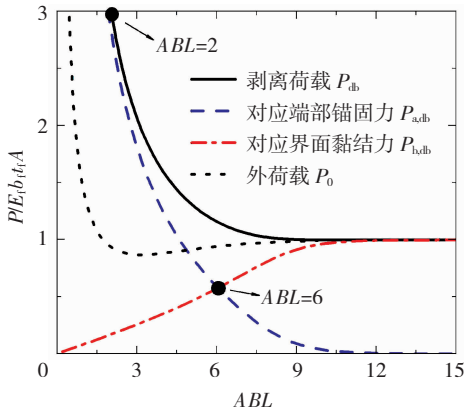


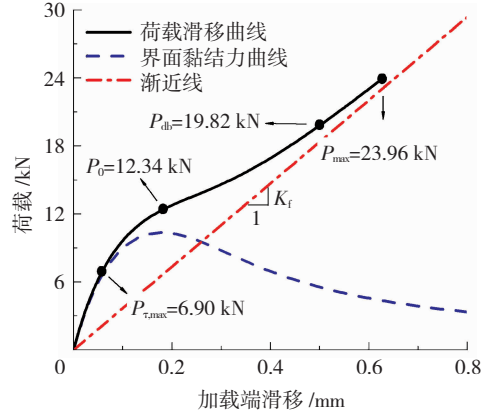
图 9 剥离荷载及其对应黏结力、锚固力与黏结长度的关系
Fig. 9 Relation between debonding load and corresponding bond force, anchoring force, and bond length

对于纯外贴界面,其剥离荷载随黏结长度的增加而增大,且趋近于其上限 $E_f b_f t_f A$ [21]。而由图 9 可看出,端部锚固黏结界面的剥离荷载随着黏结长度的增加而减小,且趋近于其下限 $E_f b_f t_f A$ 。这是因为在黏结长度较短时,在 CFRP 发生剥离前,端部锚固发挥了较大的作用。当 $ABL < 6$ 时, $P_{a,db}$ 可承担一半的剥离荷载;而当 $ABL < 2$ 时, $P_{a,db}$ 几乎承担全部剥离荷载。通过与外荷载 P_0 的对比还可以看出,当界面黏结应力积分最大,也即达到最大界面黏结力时,其对应的外荷载始终小于剥离荷载,且随着黏结长度的增加逐渐趋近于剥离荷载。

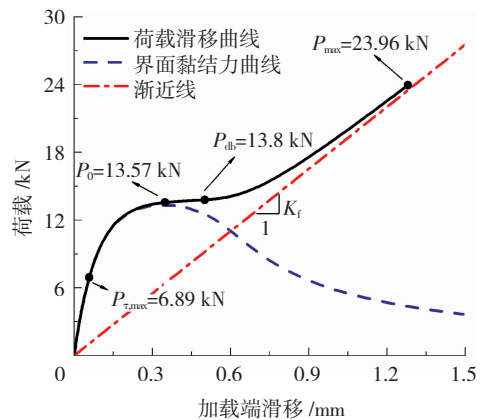
4 黏结界面剥离全过程行为

以本文试验的材料属性为计算参数,根据 3.2 节有效黏结长度的计算公式,取 $\alpha = 0.97$ 得到该工况下的有效黏结长度为 $L_{eff} = 83$ mm。分别选取 50 mm ($L < L_{eff}$) 和 100 mm ($L > L_{eff}$) 两种黏结长度对

端部锚固 CFRP-混凝土黏结界面剥离全过程行为进行分析,同时,选取加载过程中达到的 4 个荷载时刻进行对比,分别为:1)加载端黏结应力最大时的荷载 $P_{\tau,max}$;2)界面黏结力最大时的荷载 P_0 ;3)界面剥离荷载 P_{db} ;4)CFRP 片材拉断时的荷载 P_{max} 。图 10 给出了两种黏结长度下的加载端荷载-滑移曲线。



(a) $L=50$ mm



(b) $L=100$ mm

图 10 两种黏结长度下荷载-滑移曲线

Fig. 10 Load-slip curves under different bond lengths

由图 10 可看出,当 $L > L_{eff}$ 时,荷载-滑移响应明显呈现 3 个阶段。加载初期,荷载-滑移响应呈现快速增长的趋势。随着外荷载的增加,荷载-滑移响应进入一个“平台”阶段,外荷载增长缓慢,整个界面处于剥离由加载端向锚固端发展的过程,“平台”长度取决于黏结长度的大小;加载后期,曲线凹凸性发生变化,存在一条渐近线并向其靠拢。而当 $L < L_{eff}$ 时,荷载-滑移曲线分段不明显,不存在“平台”阶段,仅存在凹凸性的转变。不同于纯外贴 CFRP 加固情况下的剥离荷载即失效荷载,端部锚固界面在加载端出现界面剥离后,由于端部锚固力的存在,黏结界面所承担的外荷载仍可持续增长,剥离持续向锚固端发展,直至 CFRP 达到极限抗拉强度发生断裂,即加固失效。此时曲线的斜率趋向于 CFRP 的轴向抗拉刚度 $K_f = E_f b_f t_f / L$ 。

图 11 给出了按照式(16)和式(18)计算出的两种黏结长度下 CFRP 应变和黏结界面黏结应力分布

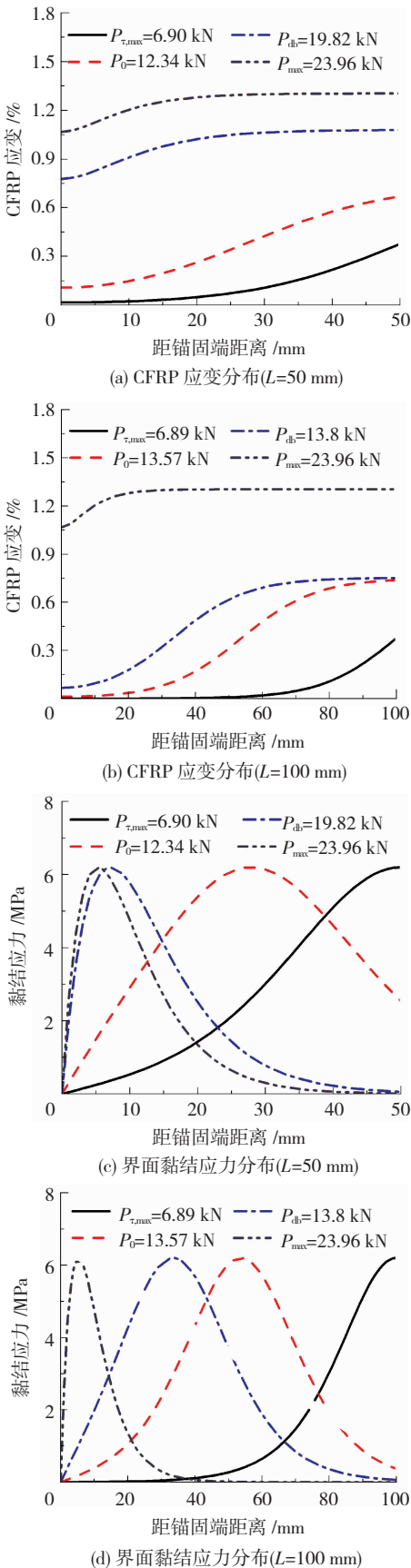


图 11 两种黏结长度下 CFRP 应变和界面黏结应力分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of CFRP strain and interfacial bond stress under different bond lengths

曲线。由图 11(a)、(b)可知,相比于黏结长度 $L < L_{eff}$ 的结点, $L > L_{eff}$ 时剥离荷载较小,黏结界面会更早剥离,且剥离时靠近锚固端位置的应变值处于较低水平;对于 $L > L_{eff}$ 结点,黏结界面黏结力最大时与界面剥离时应变分布及数值均相差不大,对于 $L < L_{eff}$ 结点,剥离荷载时应变分布情况更接近拉断荷载。由图 11(c)、(d)可知,在剥离过程中,黏结应力峰值不断由加载端向锚固端移动,对于 $L < L_{eff}$ 结点,靠近锚固端位置的黏结界面会更早地参与承担荷载,且在界面黏结力最大时已发挥较大作用。另外,当 CFRP 拉断时,在靠近锚固端一定长度区域内仍存在黏结应力,因为端部锚固的存在限制了固定端的相对滑移,阻止整个黏结界面的快速剥离失效,进而保证了 CFRP 材料强度的有效利用。

5 结论

1) 基于双参数指数型界面黏结-滑移本构,采用解析方法推导了端部锚固下 CFRP-混凝土黏结界面滑移、黏结应力、CFRP 应力和应变分布以及荷载-滑移响应的表达式,并将所得解析公式与试验结果进行了对比,吻合情况较好。

2) 对端部锚固 CFRP-混凝土界面黏结特征进行了分析,建立了端部锚固下最大界面黏结力、有效黏结长度和界面剥离荷载的计算模型。分析表明,端部锚固 CFRP-混凝土界面的有效黏结长度至少应为 $7.2/AB$,黏结界面的剥离荷载随黏结长度的增加而降低,且趋近于 $E_t b_t t_r A$ 。

3) 对于黏结长度较大的端锚 CFRP-混凝土界面,其界面黏结应力积分最大时的外荷载与剥离荷载相差不大,且剥离荷载值小于黏结长度较短黏结界面的情况;而对于黏结长度较短的 CFRP-混凝土界面,端部锚固能够更早地参与承担荷载,阻止整个界面剥离失效,其剥离荷载更接近 CFRP 拉断荷载。

参考文献

[1] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 99
 FENG Peng. Development and application of composite in civil engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 99. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2014.09.013

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范:GB 50608—2010[S]. 北京:中国计划出版社, 2010
 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010

[3] YUAN Hong, TENG Jinguang, SERACINO R, et al. Full-range

- behavior of FRP-to-concrete bonded joints [J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 553. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.11.006
- [4] 叶苏婷,孙延华,熊光晶.基于“梁段”模型的FRP加固混凝土梁端界面剥离破坏分析[J].工程力学,2012,49(2):101
YE Surong, SUN Yanhua, XIONG Guangjing. Analysis on end debonding failure of FRP strengthened RC beams based on a “beam segment” model[J]. Engineering Mechanics, 2012,49(2):101
- [5] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures; ACI 440.2R - 17[S]. Michigan: American Concrete Institute, 2017
- [6] 付婷婷,冯少云,范文忠. FRP片材锚固方法的对比分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(12):75
FU Tingting, FENG Shaoyun, FAN Wenzhong. Comparable analysis of anchoring methods of FRP sheets[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(12): 75. DOI:10.3969/j.issn.1003-0999.2016.12.014
- [7] 覃银辉,周朝阳,李恒通.端锚CFRP-混凝土黏结界面受剪性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2016(8):50
QIN Yinhui, ZHOU Chaoyang, LI Hengtong. Experimental research on shear behavior of CFRP-concrete interface with end-anchored[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(8): 50. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2016.08.012
- [8] BARRIS C, CORREIA L, SENA-CRUZ J. Experimental study on the bond behaviour of a transversely compressed mechanical anchorage system for externally bonded reinforcement [J]. Composite Structures, 2018, 200: 217. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.05.084
- [9] ZHOU Yingwu, CHEN Xilong, FAN Zhiheng, et al. Bond behaviors of FRP-to-concrete interface under the control of a novel end-anchorage system[J]. Composite Structures, 2017, 168: 130. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.056
- [10] 卓静,李唐宁,章庆学,等.锚固多层碳纤维布加固钢筋混凝土梁的试验研究[J].建筑结构,2006(3):25
ZHUO Jing, LI Tangning, ZHANG Qingxue, et al. Test on beams strengthened with multi-layers carbon fiber sheets anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage[J]. Building Structure, 2006(3):25
- [11] ZHOU Chaoyang, YU Yanan, XIE Enli. Strengthening RC beams using externally bonded CFRP sheets with end self-locking [J]. Composite Structures, 2020, 214: 112070. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112070
- [12] 李春良,李凯,张立辉,等. CFRP端部被锚固后加固钢结构的界面黏结行为[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):113
LI Chunliang, LI Kai, ZHANG Lihui, et al. Interfacial bond behavior of CFRP reinforced steel structures with end anchorage [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 113. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.020
- [13] ZHANG Huawen, SMITH S T, GRAVINA R J, et al. Modelling of FRP-concrete bonded interfaces containing FRP anchors [J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.080
- [14] STURM A B, VISINTIN P, VACULIK J, et al. Analytical approach for global load-slip behaviour of FRP plates externally bonded to brittle substrates with anchors [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 160: 177. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.024
- [15] CHEN Cheng, CHENG Liyuan, SUI Lili, et al. Design method of end anchored FRP strengthened concrete structures [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 143. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.081
- [16] DAI Jianguo, UEDA T, SATO Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method [J]. Composite Structures, 2005, 9(1): 52. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(52)
- [17] GAO Wanyang, DAI Jianguo, TENG Jinguang. Analysis of Mode II debonding behavior of fiber-reinforced polymer-to-substrate bonded joints subjected to combined thermal and mechanical loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 136: 241. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2015.02.002
- [18] BISCAIA H C, CHASTRE C, SILVA M A G. Analytical model with uncoupled adhesion laws for the bond failure prediction of curved CFRP-concrete joints subjected to temperature [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 89: 63. DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.01.008
- [19] DONG Kun, HU Kexu. Development of bond strength model for CFRP-to-concrete joints at high temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: 264. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.088
- [20] 童谷生,艾博雯. FRP-混凝土界面黏结滑移关系研究进展 [J]. 混凝土, 2016(8): 1
TONG Gusheng, AI Bowen. Research advance of FRP-concrete interface bond-slip relationship [J]. Concrete, 2016(8): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2016.08.001
- [21] DAI Jianguo, UEDA T, SATO Y. Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1):133. DOI: 10.3151/jact.4.133

(编辑 赵丽莹)