

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.113



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



GFRP 带肋筋黏结性能试验研究与简化本构模型

张望喜^{a,b}, 刘鑫^b, 胡彬彬^b, 向贞航^b, 袁超^b, 易伟建^{a,b}

(湖南大学 a. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室; b. 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 为研究 GFRP(glass fiber reinforced polymer)带肋筋与混凝土之间的黏结性能并改进已有本构模型的实用性, 制作 14 组试件进行梁端式试验, 探讨混凝土强度、保护层厚度、配置箍筋以及 GFRP 带肋筋之间相互作用对黏结性能的影响。采用位移控制加载方式进行试验, 测试并记录加载力、自由端滑移值和加载端滑移值, 观察黏结界面的破坏情况, 基于试验结果提出简化黏结-滑移本构模型的方法。结果表明: 梁端式试验主要发生拔出破坏和劈裂破坏; 黏结-滑移曲线的滑移值与肋间距有关, 波峰间距基本与肋间距一致; 混凝土强度和配置箍筋会影响黏结界面的破坏模式和损坏程度, 进而影响黏结-滑移性能; 增加保护层厚度对黏结-滑移性能的有利影响在一定范围内有效; 二次拉拔试验结果表明, 试件中 GFRP 带肋筋的黏结性能存在相互影响。黏结-滑移简化本构模型能较好地拟合试验数据, 且进一步增强了实用性。

关键词: 带肋筋; 梁端式试验; 黏结-滑移性能; 黏结-滑移本构模型

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2025)06-0123-10

Experimental study on the bonding performance of GFRP ribbed bars and simplified constitutive model

ZHANG Wangxi^{a,b}, LIU Xin^b, HU Binbin^b, XIANG Zhenhang^b, YUAN Chao^b,
YI Weijian^{a,b}

(a. Hunan Provincial Key Lab on Diagnosis for Engineering Structures; b. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: To investigate the bond performance between glass fiber reinforced polymer (GFRP) ribbed bars and concrete and improve the practicality of existing constitutive models, 14 sets of specimens were prepared for beam-end tests, which aimed to explore the influences of concrete strength, thickness of cover, stirrup configuration and the interaction between GFRP ribbed bars on the bond performance. The tests were conducted using displacement-controlled loading; loading force, free end slip value, and loading end slip value were recorded, the failure mode of the bond interface was observed, and a method for proposing a simplified bond-slip constitutive model was proposed based on the test results. The results showed that the beam-end tests mainly resulted in pull-out and splitting failures; the slip value of the bond-slip curve was related to the rib spacing, and the peak spacing was essentially consistent with the rib spacing; concrete strength and

收稿日期: 2023-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(52078201)

作者简介: 张望喜(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事结构基本理论、结构抗震与防连续倒塌性能研究, E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn。

Received: 2023-04-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078201)

Author brief: ZHANG Wangxi (1971-), PhD, professor, main research interests: basic theory of structure, seismic analysis of reinforced concrete structures and anti progressive collapse performance research, E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn.

configuration of stirrups would affect the failure mode and damage degree of the bond interface, thereby affecting bond-slip performance; the increase in cover thickness had a beneficial effect on the bond-slip performance within a certain range; the results of the second pull-out test showed that there was a mutual influence on the bond performance of the GFRP ribbed bars in the specimens. The simplified bond-slip constitutive model can accurately fit the test data and further enhance the practicality of the constitutive model.

Keywords: ribbed bars; beam-end test; bond-slip behavior; bond-slip constitutive model

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋已在海港工程、岛礁建设、无磁建筑等中得到了应用^[1],并取得了良好的社会效益。FRP 筋的表面形式对 FRP 筋与混凝土的黏结性能有重要影响。表面带肋是 FRP 筋常见的表面形式,对表面带肋 FRP 筋黏结性能的研究具有重要工程意义。

肋参数会影响 FRP 筋的黏结性能。郝庆多等^[2]通过中心拉拔试验发现,玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)带肋筋的最佳肋间距为筋直径的 1 倍,最佳肋高度为筋直径的 6%;Gu 等^[3]发现,GFRP 筋最优的肋深度为 1.0 mm,肋间距为 0.8 倍筋直径;Chen 等^[4]发现,肋高对黏结性能影响较大,肋高越大,黏结强度越高。而现有常用 FRP 筋黏结-滑移本构模型 MBPE 模型^[5]和 CMR 模型^[6]需要基于试验结果确定本构方程中的参数,对于试验的依赖性较强,也未在本构方程中单独设置参数考虑肋设置的影响。

对于 FRP 筋与混凝土在不同条件下黏结-滑移性能的研究,大多数学者仍采用中心拔出试验^[4,7-12]、梁式试验^[13-15]。中心拉拔试验装置简单,操作性强,但在实际工程中几乎不存在中心拉拔试验试件的应力情况^[16-17]。而梁式试验克服了中心拉拔试验的缺点,可以基本模拟出梁端锚固区弯矩和剪力对黏结性能的影响^[18],但试验试件尺寸偏大,试验成本较高,不如拉拔试验简单方便。ACI 408R-03^[19]介绍了测量钢筋与混凝土黏结-滑移性能的梁端式试验,其装置简单易测量,且试件内部应力与实际受弯构件状态相似。

笔者对表面带肋 FRP 筋的黏结性能进行研究,并将有关肋的参数引入到本构方程中,以期减少黏结-滑移本构模型对试验的依赖性,获得更为实用的本构方程。以 GFRP 带肋筋为例,设计了测量 FRP 筋黏结-滑移性能的梁端式加载装置,通过梁端式试验研究混凝土强度、保护层厚度、箍筋和 GFRP 筋之间的相互影响对 GFRP 筋与混凝土黏结-滑移性能的影响。

1 试验概括

1.1 试验材料

采用 C20、C40 和 C60 三种强度等级的混凝土,

采用硅酸盐水泥,浇筑试件时每种混凝土强度等级预留 3 组标准混凝土立方体试块,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[20]的规定,在压力试验机上进行立方体抗压试验,实测结果见表 1。GFRP 筋由拉挤成型工艺制成,表面形式为螺旋带肋,见图 1,设置 10、14、18 mm 三种不同直径,不同直径 GFRP 带肋筋材料性能及肋参数见表 2。

表 1 实测混凝土立方体抗压强度

Table 1 Measured compressive strength of concrete cubes

强度等级	f_{cu1}/MPa	f_{cu2}/MPa	f_{cu3}/MPa	f_{cu}/MPa
C20	31.70	33.76	32.63	32.70
C40	41.26	40.47	42.41	41.38
C60	58.68	54.72	62.09	58.50

注: f_{cu1} 、 f_{cu2} 、 f_{cu3} 、 f_{cu} 分别为实测第 1 组、第 2 组、第 3 组混凝土立方体抗压强度和混凝土立方体抗压强度平均值。



图 1 GFRP 带肋筋

Fig. 1 GFRP ribbed bars

表 2 GFRP 筋材料性能及肋参数

d/mm	f_{fu}/MPa	E_f/GPa	w/mm	h/mm
10	817.1	56.4	10.4	1.2
14	757.2	54.1	11.1	1.1
18	592.5	48.6	10.9	2.2

注: d 为 GFRP 筋直径(GFRP 筋内径,不含肋高); f_{fu} 为 GFRP 筋抗拉强度; E_f 为 GFRP 筋弹性模量; w 为 GFRP 筋肋间距; h 为 GFRP 筋肋高度。

1.2 试件设计及制备

试件尺寸设置为 300 mm × 300 mm × 400 mm, GFRP 筋长度为 1 500 mm, 黏结长度为 5d, 两端未黏结段均设置 PVC 套管, 控制黏结段长度, 并用双面胶填充 GFRP 筋和试件内 PVC 管端头处的孔隙, 保证 GFRP 筋位于 PVC 管的中心, 防止浇筑混凝土时水泥浆进入孔隙中。每个试件设置两根 GFRP 筋, 分为 L 侧和 R 侧, 分别为面向加载端左侧和右侧。

的筋材,所有试件均先对L侧GFRP筋加载,再对R侧GFRP筋加载。有箍筋试件采用直径为10 mm表面带肋的GFRP筋作为箍筋,箍筋间距统一取80 mm。加载处采用黏结式锚具进行锚固,外部为带螺纹的钢套管,内部灌入高强环氧树脂AB胶。试验试件如图2所示,试件编号由5部分组成,设置为ABCDE,其中A表示混凝土强度标号,B表示

GFRP筋直径,C表示纵筋边缘至试件外侧面距离,D表示是否设置箍筋(N表示不设置箍筋,Y表示设置箍筋),E表示GFRP筋位置(L表示从加载端面视图的左侧纵筋,R表示右侧纵筋(见图2))。例如20d10c25NL表示混凝土强度为C20,筋直径为10 mm,纵筋边缘至试件外侧面距离为25 mm,不设置箍筋,为左侧纵筋。

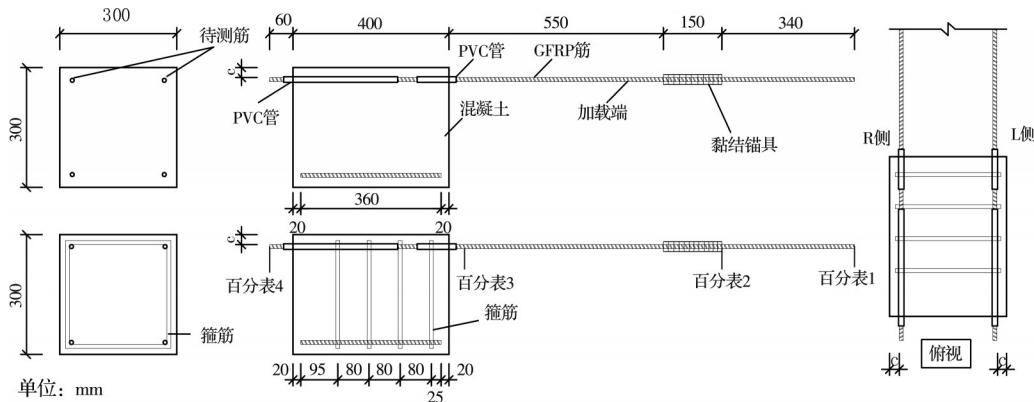


图2 试件示意图

Fig. 2 Diagram of the specimens

试验装置如图3所示。在加载端依次安装穿心式千斤顶、穿心式力传感器以及与黏结式锚具配套的钢垫片和螺母。从左至右安装4个百分表,依次为百分表1~4,1和2用于观察黏结式锚具的是否发生滑移,3和4分别测量加载端和自由端滑移值,试块自由端上部设置千斤顶,施加5 kN的力,起到限位和模拟梁端受力的作用。构件受力示意图如图4所示,在保证试件受力与ACI 408R-03^[19]梁端试验试件受力基本一致的条件下考虑试验的可操作性,试件设置为水平放置,同时在自由端下设置垫板,试件下部垫板尺寸均为80 mm×300 mm,垫板一侧与试件边对齐。为保证GFRP筋和周围混凝土同时处于受拉状态,根据ACI 408R-03^[19]中所述“压力必须远离钢筋,其距离约等于钢筋在混凝土中的嵌入或黏结长度”,故加载端固定钢座与试件加载端正面接触的尺寸为160 mm×300 mm。

1.3 试验结果

在5d的黏结长度下可以认为黏结应力沿

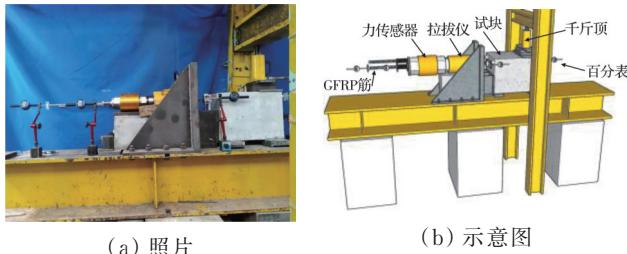


图3 试验装置

Fig. 3 Test setup

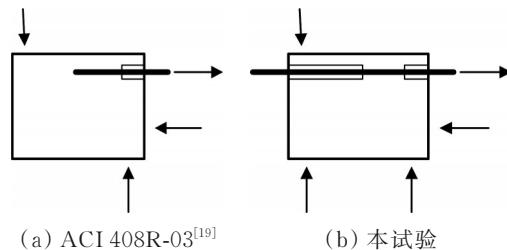


图4 梁端式试验受力示意图

Fig. 4 Force diagram of the beam-end test

GFRP筋黏结段均匀分布^[21],GFRP筋与混凝土黏结应力按式(1)计算。

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (1)$$

式中: τ 为黏结应力, MPa; F 为施加的拉拔力, N; l_a 为黏结长度, mm; d 为GFRP筋直径, mm。

由于GFRP筋的弹性模量较低,加载端未黏结部分GFRP筋的弹性变形不可忽略,加载端真实滑移按式(2)计算。

$$s = s_m - \delta_e \quad (2)$$

式中: s_m 为百分表测得的加载端GFRP筋的滑移量; δ_e 为在加载端拉拔力 F 作用下未黏结段GFRP带肋筋的弹性伸长量。

$$\delta_e = \frac{F}{E_f A_f} L \quad (3)$$

式中: A_f 为GFRP筋横截面面积; L 为未黏结段GFRP筋长度。为避免因无黏结区域计算弹性伸长计算带来的误差以及减小黏结区域筋材弹性伸长

对试验结果的影响,试验黏结-滑移曲线中的滑移值均采用自由端滑移值。

14 个拉拔试件的试验结果如表 3 所示。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

编号	破坏模式	τ_u/MPa	τ_r/MPa	s_u/mm	s_r/mm
20d10c25NL	P	4.15	1.65	4.22	9.50
20d10c25NR	P	2.56	1.08	3.43	8.00
20d10c35NL	-	-	-	-	-
20d10c35NR	P	3.28	1.00	2.84	9.07
20d10c45NL	P	5.40	1.56	2.80	8.44
20d10c45NR	P	3.21	1.13	2.61	8.52
20d10c25YL	P	6.11	3.49	3.01	7.51
20d10c25YR	P	3.98	1.12	3.66	9.51
40d10c25NL	P	6.02	2.24	2.17	8.04
40d10c25NR	P	3.73	1.82	2.60	8.51
40d10c35NL	P	7.11	2.22	2.02	9.01
40d10c35NR	P	4.47	1.95	2.42	8.50
40d10c45NL	P	6.67	3.26	2.49	8.95
40d10c45NR	P	4.93	1.17	3.82	8.50
40d10c25YL	-	-	-	-	-
40d10c25YR	P	3.45	1.91	3.51	8.51
40d14c25NL	P	5.43	2.23	4.00	9.00
40d14c25NR	P	4.42	1.73	3.51	9.00
40d14c25YL	P	6.01	2.71	4.00	9.52
40d14c25YR	P	4.15	1.84	4.02	9.50
40d18c25NL	P	4.79	1.13	4.52	10.51
40d18c25NR	S	10.06	-	3.40	-
40d18c25YL	P	5.37	1.87	5.01	10.02
40d18c25YR	S	11.54	-	3.79	-
60d10c25NL	P	8.12	3.05	4.50	13.00
60d10c25NR	P	4.47	1.77	4.51	11.50
60d10c25YL	P	9.50	5.08	4.50	12.50
60d10c25YR	P	6.48	3.31	4.00	12.06

注:P 表示拔出破坏;S 表示剪裂破坏; τ_u 、 s_u 为峰值黏结应力和对应的滑移值; τ_r 、 s_r 为黏结应力首次下降最低点对应的黏结应力和滑移值; - 表示没有数据。

1.4 黏结破坏特征

试验中主要观察到有 2 种黏结破坏形式: 拔出破坏和剪裂破坏。

GFRP 筋发生拔出破坏时, 混凝土试件表面未观察到明显裂缝(图 5 中 L 侧筋), 试验过程稳定, GFRP 筋滑移值逐渐增加; 当发生剪裂破坏时, 加载前期比较稳定, 未出现肉眼可见的裂缝, 接近峰值荷载时, 发出剧烈声响, 沿 GFRP 筋周围混凝土表面出现大量的裂缝, 呈现出明显的“锥形”(图 5 中 R 侧筋), 同时黏结应力急剧下降, 呈现出脆性破坏特征。随着荷载的继续施加, 裂缝宽度逐渐增大, 但不产生新的裂缝。

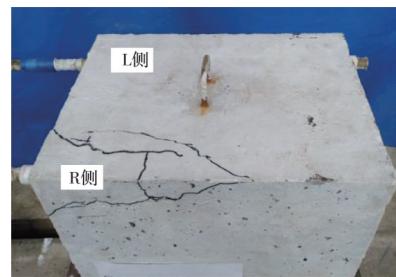


图 5 试件破坏形态照片

Fig. 5 Photo of specimen damage forms

1.5 黏结-滑移曲线

GFRP 筋典型黏结-滑移曲线如图 6 所示, 整个曲线分为 4 段。

无滑移段: 试验初期, 自由端 GFRP 筋基本不会发生滑移, 此时黏结力主要由混凝土中水泥浆与 GFRP 筋之间的化学胶着力组成。

上升段: 当自由端 GFRP 筋产生了滑移, 黏结段化学胶着力随之消失。随着拉拔力的不断增加, 自由端开始出现滑移, 初始滑移缓慢, 荷载-滑移曲线斜率较大, 类似于一条直线, 而后滑移值增大, 斜率逐渐减小。

下降段: 过黏结应力峰值点后, 黏结应力迅速下降, 下降段的滑移量基本与 1/2 肋间距一致。

残余段: 当混凝土强度不高时(图 6 中曲线 40d10c25NL), 残余段以类似于“波”的形式向下传递, 同时观察到发生拔出破坏试件黏结-滑移曲线波峰之间的距离与 GFRP 筋肋间距基本一致。Wu 等^[22]在试验中也获得了类似规律, 因此, 笔者认为“波”的形状与筋材表面形式有关, 这与 Fahmy 等^[12]的观点也一致; 当混凝土强度较高时(图 6 中曲线 60d10c25NL), 残余段近似为一条直线, 曲线 40d18c25NR 为试件发生剪裂破坏。

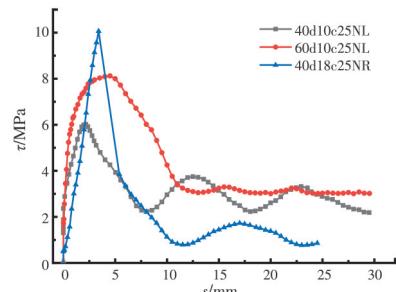


图 6 典型黏结-滑移曲线

Fig. 6 Typical bond-slip curves

在残余段, 波谷的黏结应力值略有减小, 几乎不变, 综合考虑在残余段发挥作用的主要是摩擦力和机械咬合力, 机械咬合力会显著增加黏结应力, 摩擦力会因为界面磨损逐渐变小或不变。因此, 将波谷区域以下定义为摩擦力对黏结力的贡献, 黏结-

滑移曲线与波谷之间为机械咬合力对黏结力的贡献,见图7,以便更加系统地分析黏结力随各个影响因素的变化。

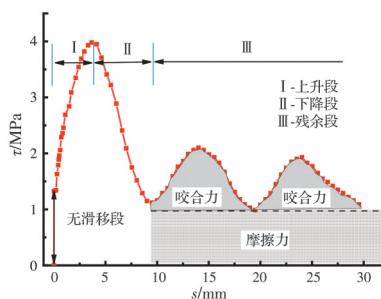


图7 黏结应力组成示意图

Fig. 7 Diagram of bond stress composition

2 影响因素分析

2.1 混凝土强度对黏结性能的影响

不同强度混凝土GFRP筋黏结-滑移曲线见图8。从图8可以看出,混凝土强度越高,黏结刚度越大,越不容易滑动,残余段黏结摩擦力越高。混凝土强度为C20、C40时,残余段机械咬合力对残余段黏结力的贡献较大,表现为曲线波动幅值较大;混凝土强度为C60时,机械咬合力对残余段黏结力贡献较小,表现为曲线波动幅值较小。将试件沿GFRP筋剖开发现,当混凝土强度为C40时,黏结段

GFRP筋肋表面发生轻微磨损,黏结段混凝土表面无明显的凸起;当混凝土强度为C60时,黏结段GFRP筋表面肋损坏严重,肋基本被剪坏,黏结段混凝土表面存在明显的凸起。曲线的幅值在一定程度上反映了界面的损伤程度,因此,混凝土强度对界面黏结性能的影响主要体现在黏结界面损伤位置。在相同肋间距和肋高度的条件下,混凝土强度越高,肋间混凝土抗剪强度越大,界面破坏主要为GFRP筋表面肋剪坏,此时界面机械咬合力基本失效,界面摩擦力发挥主要黏结作用。反之,界面破坏主要为混凝土损坏,此时机械咬合力仍能发挥一定作用。但肋间混凝土抗剪强度不仅仅由混凝土强度控制,也会受到筋材表面形式的影响^[2]。

2.2 保护层厚度对黏结性能的影响

不同保护层厚度对黏结-滑移曲线的影响见图9。随着保护层厚度的增加,曲线上升段的斜率逐渐增加,说明混凝土保护层厚度越大,初始黏结刚度越大。保护层厚度从25~35 mm对黏结性能的影响比保护层厚度从35~45 mm时更加明显,当保护层厚度由25 mm增加至35 mm时,黏结强度和黏结刚度有所提高,残余段机械咬合力作用显著增加,但是当保护层厚度由35 mm增加至45 mm,试件黏结强度下降,且残余段机械咬合力增加不明

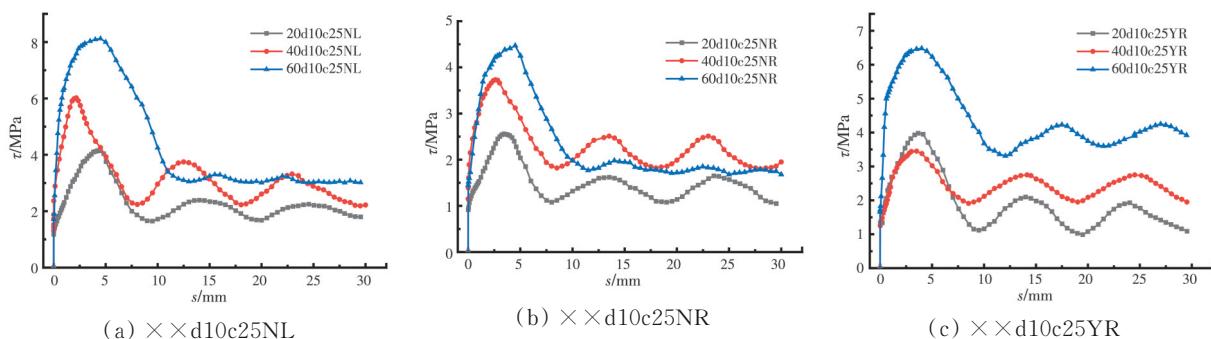


图8 混凝土强度对黏结强度的影响

Fig. 8 Effect of concrete strength on bond strength

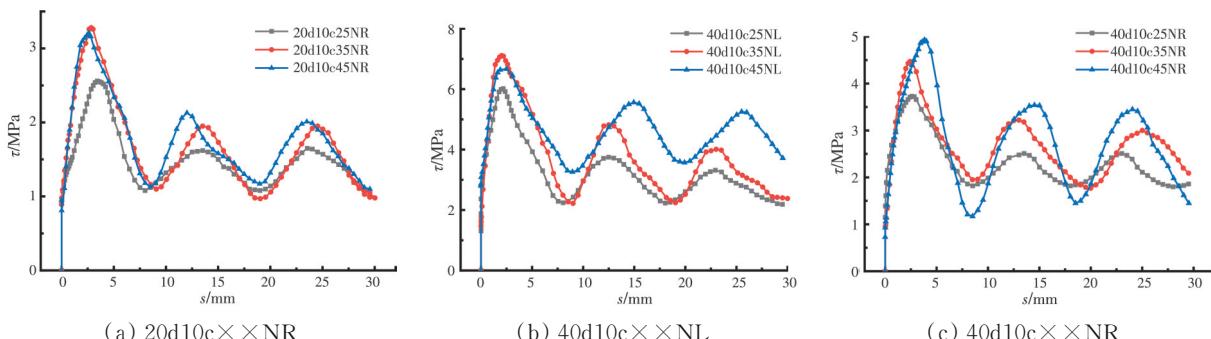


图9 保护层厚度对黏结强度的影响

Fig. 9 Effect of cover thickness on bond strength

显,说明保护层厚度的增加对黏结强度的有利影响有限。

2.3 箍筋和 GFRP 筋间相互作用对黏结性能的影响

配置箍筋对 GFRP 筋黏结性能的影响见图 10。通过对比发现,配置箍筋的试件 GFRP 筋黏结刚度、黏结强度、残余段摩擦力较未配置箍筋的试件高。将试件剖开可以发现,无箍筋试件黏结段

GFRP 筋肋表面有轻微磨损,黏结段混凝土无明显凸起,而有箍筋试件黏结段 GFRP 筋肋表面出现部分磨损,黏结段混凝土表面有部分凸起。由此可知,箍筋的存在影响了 GFRP 筋界面破坏,从肋间混凝土被剪坏向 GFRP 筋肋被剪坏转变,即箍筋对混凝土产生了约束效应,增强了肋间混凝土的压力,进而增强了肋间混凝土的抗剪能力。

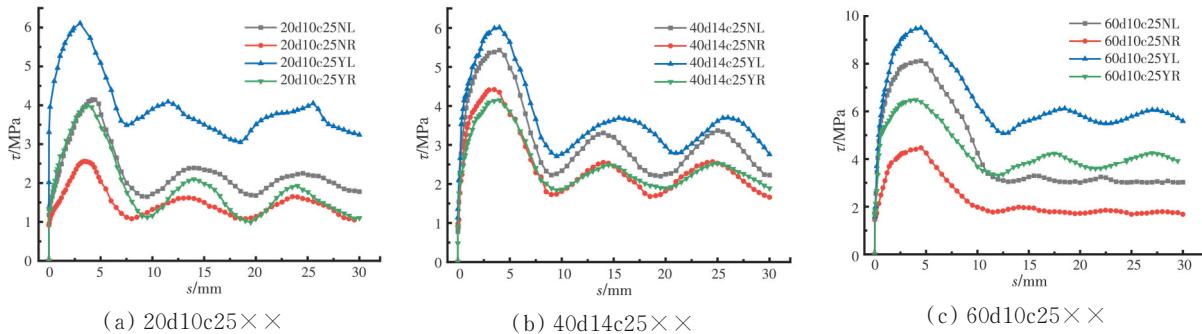


图 10 箍筋对黏结强度的影响
Fig. 10 Effect of stirrups on bond strength

试验发现,先对 L 侧 GFRP 筋进行拉拔试验,再对 R 侧 GFRP 筋进行拉拔试验,在 GFRP 筋净距较大的前提下,黏结性能差距较大。由表 3 和图 10 可知,同一构件后进行拉拔试验的 GFRP 筋的黏结强度和残余段摩阻力比先进行拉拔试验的 GFRP 筋低,这是因为,先进行试验的 GFRP 筋试件在拉拔过程中产生的垂直于 GFRP 筋表面的法向力使 GFRP 筋之间混凝土产生了微裂缝,造成的混凝土内部损伤导致混凝土块对后加载 GFRP 筋的约束效果减弱,影响了初始阶段黏结刚度和黏结强度,降低了残余段界面机械咬合力和摩阻力。

发生劈裂破坏的构件峰值黏结应力较高,黏结-滑移曲线上升段基本呈线性关系(见图 11),可能是因为试件在黏结段与非黏结段临界 PVC 管处产生了试验设计外的黏结阻力,增强了黏结强度,因而造成 GFRP 筋周围径向应力增加,导致混凝土块的劈裂破坏。

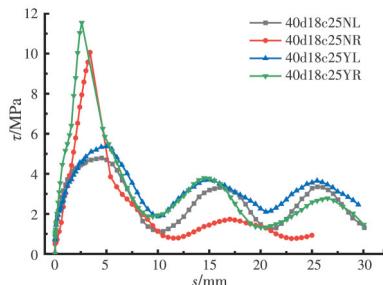


图 11 不同破坏形式曲线图
Fig. 11 Curves of different failure modes

3 黏结-滑移本构

GFRP 筋与混凝土的黏结-滑移性能通过黏结-滑移本构体现,从 Malvar^[23]首次提出考虑筋材类型和混凝土围压影响的 FRP 筋与混凝土黏结-滑移关系之后,学者们陆续提出了不同的本构模型。

Cosenza 等^[5]通过修正钢筋与混凝土黏结-滑移的 BPE 模型,提出了 FRP 筋的 MBPE 模型。

$$\begin{cases} \tau/\tau_b = (s/s_b)^\alpha, & s \leq s_b \\ \tau/\tau_b = 1 + p - p(s/s_b), & s_b \leq s \leq s_r \\ \tau = \tau_r, & s \geq s_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 和 p 为通过试验拟合的参数; τ_b 和 s_b 为峰值黏结应力和对应的滑移值; τ_r 为摩擦力提供的黏结应力,取黏结应力第 1 次下降段的最低点的值; s_r 为计算出来的 τ_r 对应的滑移值。

Cosenza 等^[6]提出了只拟合曲线上升段的 CMR 模型。

$$\tau = \tau_m (1 - \exp(-s/s_r))^\beta \quad (5)$$

式中: τ_m 为峰值黏结应力; s_r 和 β 为拟合参数。

高丹盈等^[24]以黏结-滑移曲线的 3 个关键点为基础,提出了连续曲线模型

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 (2\sqrt{s/s_0} - s/s_0), & 0 \leq s < s_0 \\ \tau &= \tau_0 \frac{(s_u - s)^2 (2s + s_u - 3s_0)}{(s_u - s_0)^3} + \\ & \quad \tau_u \frac{(s - s_0)^2 (3s_u - 2s - s_0)}{(s_u - s_0)^3}, & s_0 \leq s < s_u \\ \tau &= \tau_u, & s > s_u \end{aligned} \quad (6)$$

式中: τ_0 和 s_0 为峰值黏结应力及对应的滑移值; τ_u 和 s_u 为残余段黏结应力及对应的滑移值。

张海霞等^[25]根据84个FRP筋混凝土试件拉拔试验结果,提出黏结-滑移本构模型

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_m (2(s/s_m) - (s/s_m)^2), s \leq s_m \\ \tau &= \tau_m - \frac{\tau_m - \tau_r}{s_r - s_m} (s - s_m), s_m \leq s < s_r \\ \tau &= \tau_r, s > s_r\end{aligned}\quad (7)$$

式中: τ_m 和 s_m 为峰值黏结应力及对应的滑移值; τ_r 和 s_r 为残余段黏结应力及对应的滑移值。

通过试验发现,下降段滑移值基本与1/2肋间距一致,但当界面破坏为GFRP筋肋破坏时,则不再保持一致;残余黏结强度与峰值黏结强度的比值大部分处于0.3~0.5区间,平均为0.4,见表4。故引入残余黏结应力及对应滑移值与峰值黏结应力及对应滑移值的关系,减少本构模型中的未知参数,简化本构模型。从试验参数少的角度出发,选择高丹盈连续曲线模型^[24]和张海霞模型^[25]进行简化,并验证简化模型的可行性。

简化高丹盈连续曲线模型^[24]

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_u (2\sqrt{s/s_u} - s/s_u), 0 \leq s < s_u \\ \tau &= \tau_u \left[\frac{(s_u + 0.5w - s)^2 (2s + 0.5w - 2s_u)}{(0.5w)^3} + \right. \\ &\quad \left. k \frac{(s - s_u)^2 (2s_u + 1.5w - 2s)}{(0.5w)^3} \right], s_u \leq s < s_u + 0.5w \\ \tau &= k\tau_u, s > s_u + 0.5w\end{aligned}\quad (8)$$

简化张海霞模型^[25]

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_u (2(s/s_u) - (s/s_u)^2), s \leq s_u \\ \tau &= \tau_u - \frac{(1-k)\tau_u}{0.5w} (s - s_u), s_u \leq s < s_u + 0.5w \\ \tau &= k\tau_u, s > s_u + 0.5w\end{aligned}\quad (9)$$

式中: τ_u 和 s_u 为峰值黏结应力及对应的滑移值; k 的取值范围为0.3~0.5,建议取中位数0.4; w 为GFRP筋表面肋间距。

简化的本构模型需要通过试验获得的参数只有峰值黏结应力及对应的滑移值,进一步增强了本构模型的实用性。

图12、图13分别为试验获得的黏结-滑移曲线和郝庆多等的GFRP筋拉拔试验曲线^[2]与简化本构模型、MBPE模型和CMR模型的对比,以验证简化模型的适应性,可以看出:

1)对于无滑移段,MBPE模型、CMR模型、高丹盈模型较张海霞模型能更准确反映无滑移段特性。

2)对于上升段,通过试验数据拟合参数得出的

表4 本构模型相关数据表

Table 4 Data table related to constitutive models

编号	$2s_u/w$	$2(s_r - s_u)/w$	τ_r/τ_u
20d10c25NL	0.81	1.02	0.40
20d10c25NR	0.66	0.88	0.42
20d10c35NR	0.55	1.20	0.30
20d10c45NL	0.54	1.08	0.29
20d10c45NR	0.50	1.14	0.35
20d10c25YL	0.58	0.87	0.57
20d10c25YR	0.70	1.13	0.28
40d10c25NL	0.42	1.13	0.37
40d10c25NR	0.50	1.14	0.49
40d10c35NL	0.39	1.34	0.31
40d10c35NR	0.47	1.17	0.44
40d10c45NL	0.48	1.24	0.49
40d10c45NR	0.73	0.90	0.24
40d10c25YR	0.68	0.89	0.55
40d14c25NL	0.72	0.90	0.41
40d14c25NR	0.63	0.99	0.39
40d14c25YL	0.72	0.99	0.45
40d14c25YR	0.72	0.99	0.44
40d18c25NL	0.83	1.10	0.24
40d18c25YL	0.92	0.92	0.35
60d10c25NL	0.87	1.63	0.38
60d10c25NR	0.87	1.34	0.40
60d10c25YL	0.87	1.54	0.53
60d10c25YR	0.77	1.55	0.51

MBPE模型与试验数据吻合最好;CMR模型未使用峰值黏结应力点处的数据,因此在峰值黏结应力处有时存在一定误差;高丹盈模型曲线包络面积多数大于试验曲线,张海霞模型曲线包络面积则小于试验曲线;化学胶着力提供黏结应力与峰值黏结应力的比值较小时,张海霞模型较高丹盈模型准确,反之,比值较大时,高丹盈模型较为准确。

3)对于下降段,可以看出,引入肋间距和残余黏结应力与峰值黏结应力比值后,本构模型模拟具有相当程度的可靠性,大部分情况下能够反映黏结-滑移本构特性;当破坏为GFRP筋肋剪坏时,引入肋间距参数计算的残余应力对应的滑移值存在较大误差;在选取试验曲线中,残余黏结应力与峰值黏结应力比值取0.4符合大多数曲线,但部分曲线存在较大误差,需进一步深入研究。

由此可见,采用引入肋间距和残余黏结应力与峰值黏结应力比值的简化方法具有一定可行性,且大大简化了本构模型的使用。在未来研究中,继续深入展开峰值黏结应力对应滑移值特性的研究,以期获得摆脱试验制约的可以在有限元模拟中使用的黏结-滑移本构曲线。

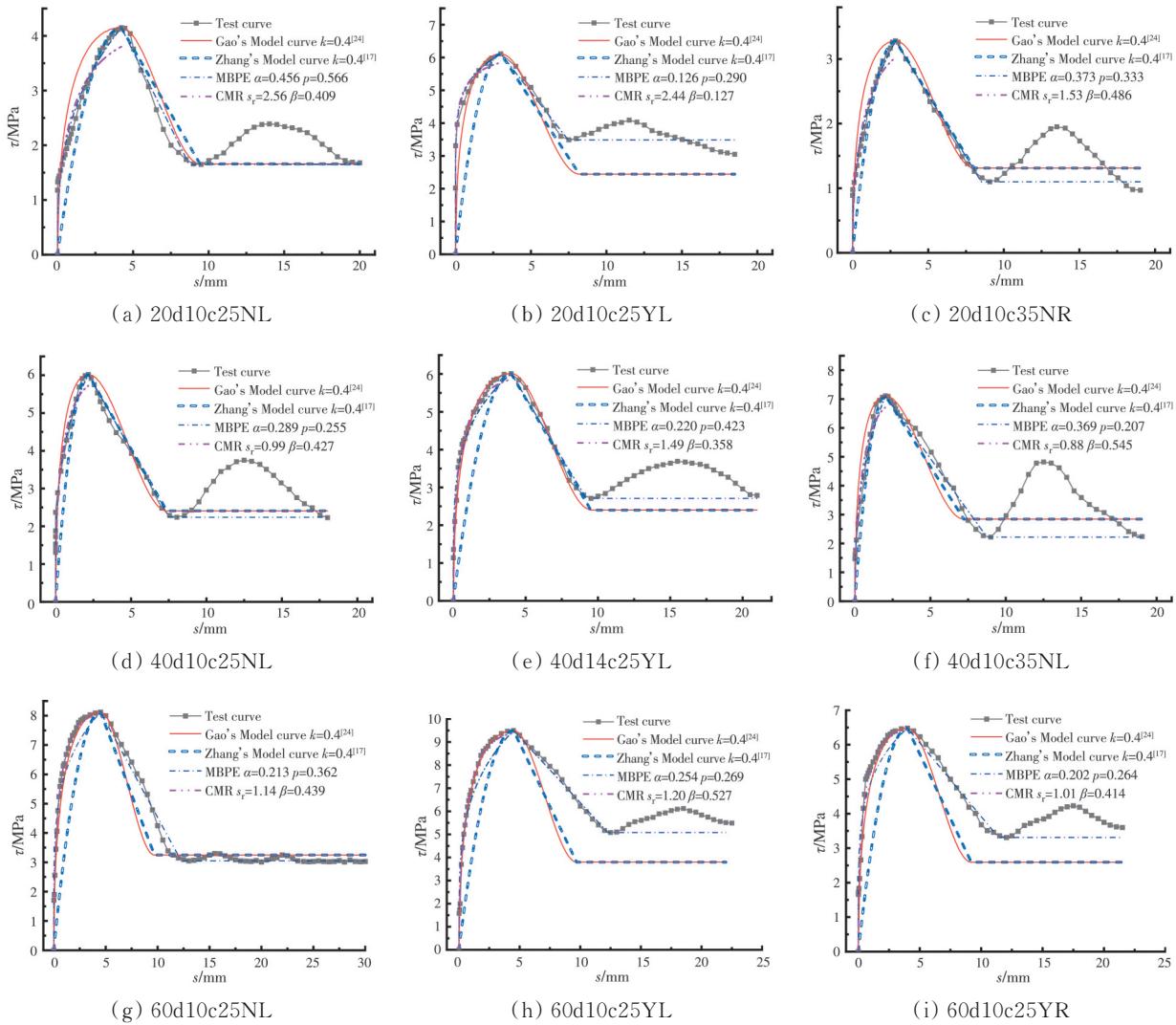


图 12 试验曲线与模型曲线对比

Fig. 12 Comparison of test curves and model curves

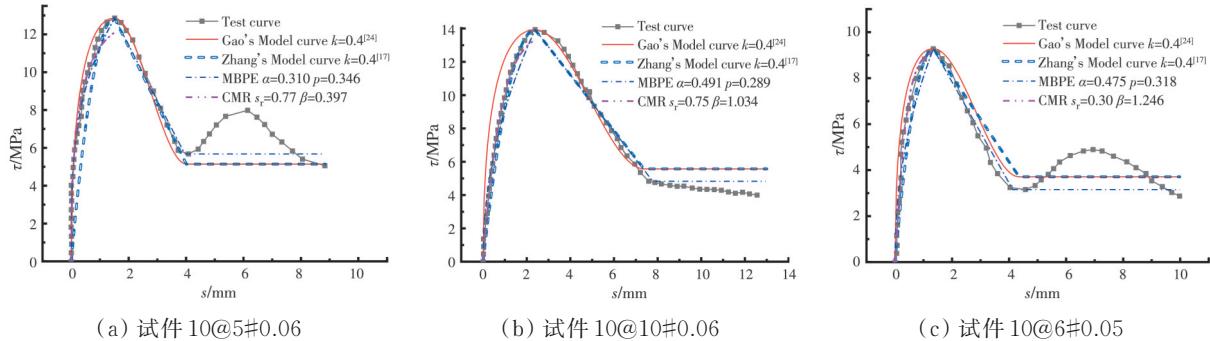


图 13 郝庆多试验曲线与模型曲线对比

Fig. 13 Comparison of HAO test curves and model curves

4 结论

通过 14 组 GFRP 带肋筋与混凝土试件的梁端式试验、破坏机理研究和影响因素分析, 得出如下结论:

1) GFRP 带肋筋与混凝土黏结性能与筋材表面肋间距有关, 试验得到 GFRP 带肋筋黏结-滑移曲线

的波峰间距与肋间距基本一致。

2) 混凝土和 GFRP 筋表面肋的相对抗剪强度影响黏结界面的破坏模式和破坏程度, 混凝土强度的增加会增强界面黏结强度、上升段黏结刚度和残余段摩阻力; 保护层厚度的增加可以增强黏结刚度和黏结强度, 但这种有利影响有限, 当混凝土保护层厚度超过一定值, 对黏结强度的增强作用不明

显;箍筋会增加黏结界面混凝土的约束,增强压力,提高肋间混凝土抗剪能力,影响黏结界面的破坏形态和损伤程度;二次拉拔试验结果表明,GFRP带肋筋之间的黏结强度存在相互影响。

3)通过加入GFRP带肋筋表面肋间距和统计得出的残余段黏结应力与峰值黏结应力的比值简化的黏结-滑移本构模型,较大程度地拟合了试验曲线,增加了本构模型的实用性,为GFRP带肋筋与混凝土黏结性能研究提供了一种思路,即在保证一定精度的条件下,简化黏结-滑移本构模型,力求使本构模型的建立只与峰值黏结应力有关,以获得脱离试验制约、可以在有限元模拟中方便使用的本构模型。

参考文献

- [1] 尹世平,华云涛,徐世烺. FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(1): 134-150.
YIN S P, HUA Y T, XU S L. A review on research progress and application of concrete structures internally reinforced with FRP bars[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 134-150.
- [2] 郝庆多,王言磊,侯吉林,等. GFRP带肋筋黏结性能试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 158-165, 179.
HAO Q D, WANG Y L, HOU J L, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 158-165, 179. (in Chinese)
- [3] GU X Y, YU B, WU M. Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 407-415.
- [4] CHEN L J, LIANG K, SHAN Z W. Experimental and theoretical studies on bond behavior between concrete and FRP bars with different surface conditions [J]. Composite Structures, 2023, 309: 116721.
- [5] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1(2): 40-51.
- [6] Cosenza E, Manfresi G, Realfonzo R. Analytical modeling of bond between FRP reinforcing bars and concrete [C]//Non Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2). Ghent, Belgium: 1995.
- [7] GOORANORIMI O, SUARIS W, NANNI A. A model for the bond-slip of a GFRP bar in concrete [J]. Engineering Structures, 2017, 146: 34-42.
- [8] 胡成超,高奎,涂建维,等. GFRP筋与箍筋约束混凝土之间黏结性能的试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(10): 13-20.
- HU C C, GAO K, TU J W, et al. Experimental research on bond behavior between GFRP bars and stirrups-confined concrete [J]. Composites Science and Engineering, 2020(10): 13-20. (in Chinese)
- [9] ROLLAND A, ARGOUL P, BENZARTI K, et al. Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117160.
- [10] ZHANG B, ZHU H, WU G, et al. Improvement of bond performance between concrete and CFRP bars with optimized additional aluminum ribs anchorage [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118012.
- [11] ROSA I C, FIRMO J P, CORREIA J R, et al. Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed GFRP bars in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122: 104119.
- [12] FAHMY M F M, AHMED S A S, WU Z S. Bar surface treatment effect on the bond-slip behavior and mechanism of basalt FRP bars embedded in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 122844.
- [13] SALEH N, ASHOUR A, LAM D, et al. Experimental investigation of bond behaviour of two common GFRP bar types in high-strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 610-622.
- [14] AL-SALLOUM Y, ALAOUD L, ELSANADEDY H, et al. Bond performance of GFRP bar-splicing in reinforced concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2022, 26(2): 04022006.
- [15] ABBAS H, ELSANADEDY H, ALAOUD L, et al. Effect of confining stirrups and bar gap in improving bond behavior of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar lap splices in RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2023, 365: 129943.
- [16] GUDONIS E, KACIANAUSKAS R, GRIBNIAK V, et al. Mechanical properties of the bond between GFRP reinforcing bars and concrete [J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(4): 457-466.
- [17] 张望喜,胡彬彬,王冠杰,等. FRP筋与混凝土黏结性能研究进展及本构模型改进[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(2): 111-122.
ZHANG W X, HU B B, WANG G J, et al. Research progress on bond behavior between FRP bars and concrete and improvement of constitutive model [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(2): 111-122. (in Chinese)
- [18] BASARAN B, KALKAN I. Development length and bond strength equations for FRP bars embedded in concrete [J]. Composite Structures, 2020, 251: 112662.

- [19] ACI Committee 408. Bond and development of straight reinforcing bars in tension: ACI 408R-03 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2003: 6-7.
- [20] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019:12-14. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 12-14. (in Chinese)
- [21] YAN F, LIN Z B, YANG M J. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 98: 56-69.
- [22] WU L L, XU X, WANG H, et al. Experimental study on bond properties between GFRP bars and self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126186.
- [23] MALVAR L J. Bond stress-slip characteristics of FRP rebars [R]. Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme CA, 1994.
- [24] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土黏结-滑移本构模型[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 41-43, 82. GAO D Y, ZHU H T, XIE J J. The constitutive models for bond slip relation between FRP rebars and concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 41-43, 82. (in Chinese)
- [25] 张海霞, 朱浮声. 考虑黏结-滑移本构关系的FRP筋锚固长度[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(4): 43-46. ZHANG H X, ZHU F S. Study on the anchorage length of FRP bars with bond-slip constitutive relationship [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(4): 43-46. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)