

考虑 FRP 筋实际受力的粘结滑移 试验方法研究

孙 丽¹,王 超¹,杨泽宇¹,张春巍²,乔丕忠¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033)

摘 要 目的 基于 Losberg 试验和双筋对拉试验提出一种研究 FRP 筋粘结滑移性能的试验新方法—四筋对拉试验,以得到更准确的 FRP 筋与混凝土之间的粘结滑移本构关系。方法 考虑 FRP 筋实际受力状态,同时拉拔四根 FRP 筋,分析不同试验方法、FRP 筋直径、粘结长度对 FRP 筋与混凝土之间粘结性能的影响。结果 四筋对拉试验与 Losberg 试验和双筋轴心对拉试验粘结滑移曲线趋势相似;四筋对拉试验数据的离散性较小,标准试件粘结长度为 $5d$ 、直径为 12 mm,四筋对拉试验粘结应力比 Losberg 拉拔试验和双筋对拉试验下粘结应力降低了 18% 和 3%;试件的破坏形式主要为 GFRP 筋肋剪切破坏以及肋间混凝土剪切破坏。结论 与传统试验方法相比,四筋对拉试验方法与结构的实际受力情况更符合,得到的数据结果更精准,可以作为研究 FRP 筋粘结滑移性能的一种新方法。

关键词 FRP 筋;四筋对拉试验;双筋对拉试验;Losberg 拉拔试验

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Bond-Slip Test Method under Considering of FRP Bar Actual Stresses

SUN Li¹, WANG Chao¹, YANG Zeyu¹, ZHANG Chunwei², QIAO Pizhong¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033)

Abstract: Based on the Losberg pull-out test and the double-bar symmetric pull-out test, a new test method to study the bond-slip mechanism of FRP bar is symmetric pull-out test. Then considering the actual stress of FRP bars, four FRP bars are pulled at the same time, and the influence of different test methods, FRP bar diameter and bond length on the bond performance between FRP bars and concrete are analyzed. The test results show that the curves trend of quadratic-bar symmetric pull-out test are similar to that of Losberg pull-out test and the double-bar symmetric pull-out test, the discreteness of the data in the quadratic-bar symmetric pull-out test is small.

收稿日期:2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(52078310,51878420);辽宁省“兴辽英才计划”-科技创新领新人才项目(XLYC1902038)

作者简介:孙丽(1974—),女,教授,博士研究生导师,主要从事防灾减灾等方面研究。

Theoretical analysis of the test results indicate that FRP bar with a diameter of 12 mm, the bond stress of quadratic-bar symmetric pull-out test is 18% and 3% lower than that of Losberg pull-out test and double-bar symmetric pull-out test when the bond length is 5 d. The failure mode is the slight damage of the rid surface, and the shear of the concrete between the ribs of the GFRP bar. Through comparison between the quadratic-bar symmetric pull-out test and the tradition pull-out test, quadratic-bar symmetric pull-out test is more in line with the actual force of the structure and the data obtained is more accurate. The double-bar symmetric pull-out test can be used as a test method for bond-slip FRP bar.

Key words: FRP bar; quadratic-bar symmetric pull-out test; double-bar symmetric pull-out test; Losberg pull-out test

在工业与民用建筑领域里,钢筋混凝土结构广泛应用于各类工程中,但一些处于腐蚀环境下的建筑物,钢筋会发生严重腐蚀,极大地影响了建筑物的耐久性能,对结构造成了严重的破坏^[1-4]。为了解决钢筋锈蚀对建筑物耐久性能的不利影响,国内外专家经过多年研究,提出将纤维聚合塑料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)应用在混凝土结构中,可以有效地解决钢筋锈蚀的问题^[5-14]。

FRP 筋与混凝土之间良好的粘结性能是二者可以协同工作的基础。近年来,国内外专家对 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能进行了大量研究。薛伟辰^[15]基于标准拉拔和梁式试验,探讨了两种试验方法对 FRP 筋与不同种类混凝土之间粘结强度的影响,建立了 FRP 筋与混凝土粘结滑移本构关系模型,并给出了曲线上特征点的含义及滑移量的计算公式。欧进萍^[16]通过拉拔试验发现,混凝土强度较高时试件发生 FRP 筋剪切破坏;混凝土强度较低时,试件主要发生混凝土劈裂破坏。高丹盈^[17]通过拉拔试验研究混凝土强度对粘结性能的影响时发现,FRP 筋混凝土之间粘结应力的增长规律不符合普通钢筋混凝土之间粘结应力的增长规律,且 FRP 筋与混凝土之间的粘结应力与相对粘结面积有关,直径越大,相对粘结面积越小,粘结应力越小。孙丽^[18]通过拉拔试验发现,在混凝土拌合物中掺杂纤维,可以提高 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能。王磊^[19]通过标准拉拔

试验研究粘结长度对粘结性能的影响时发现,粘结应力沿着粘结长度分布不均匀,导致粘结应力随着粘结长度的增加而明显降低。

从国内外粘结滑移试验研究中发现,在粘结失效模式中,混凝土劈裂破坏使构件的承载力降低,影响结构的安全性和使用性,这说明拔出破坏是理想的破坏形式。Losberg 拉拔试验是通过承压板将力传至混凝土,减小了裂缝发生的可能性,进而提高了粘结强度;而实际结构在受力后变形发展是不受外部承压板限制的,因此该试验方法得到的粘结滑移性能与实际结构受力情况不完全相符。2017 年,沈阳建筑大学孙丽提出了一种新型粘结滑移试验方法——双筋轴心对拉试验方法。此方法在两端 FRP 筋上加载,荷载直接由 FRP 筋传递到混凝土,端部没有承压板的限制,与结构实际受力情况相符。但由于双筋对拉试件在浇筑过程中不容易保证受力的对拉筋完全处于同一轴线上,导致试验过程中得到的数据不够准确。基于此,笔者在双筋对拉试验基础上,提出四筋对拉试验方法,该方法即保证了试件粘结滑移情况尽可能的与实际结构受力相符,又可以减小试验误差,得到的试验数据更加准确。

1 四筋对拉试验粘结滑移试验

1.1 试件设计

四筋对拉试件的长×宽×高为 300 mm×300 mm×150 mm,试验使用一对

长×宽×高 300 mm×150 mm×20 mm 的钢板作为传力装置,钢板两端各有两个固定 FRP 筋的凹槽,可以同时两根 FRP 筋进行加载,每个钢板中心焊一根长为 100 mm、直径为 22 mm 的螺纹钢,主要作用是将拉力传到 FRP 筋上(见图 1)。试验装置为沈阳建筑大学的万能试验机,该试验机自身具有数据采集系统,可以将试件加载端所受的力和位移进行动态采集。试件制作时,将其中一个钢板的螺纹钢一侧夹在试验机的固定端夹头上,再将试件自由端的两根筋从一侧放入钢板的 U 形口位置,并将加载端一侧钢板的两个 U 形口套住 GFRP 筋,使用锚具将两端的 GFRP 筋固定,最后通过试验机的加载端夹头夹住钢板焊接的螺纹钢,试件安装完成。加载方式为位移控制加载,速度为 0.2 mm/s,在 GFRP 筋自由端布置一个百分表,用以监测筋自由端的位移。试验装置见图 2。

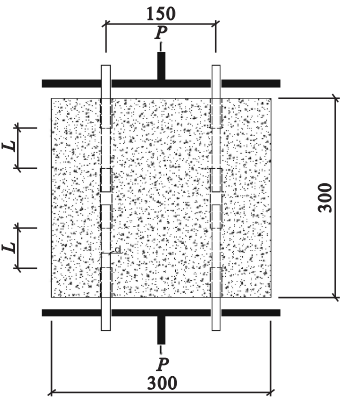


图 1 四筋对拉试验

Fig. 1 Quadratic-bar symmetric pull-out test

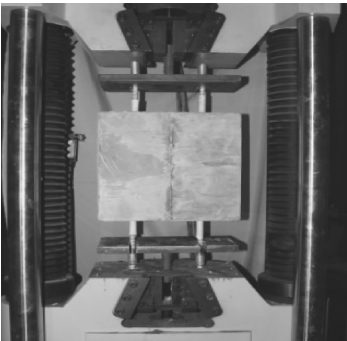


图 2 试验装置

Fig. 2 Test device

1.2 粘结应力计算公式

传统粘结滑移试验的粘结应力计算方法为 FRP 筋的极限荷载 F_{\max} 与单根 FRP 筋粘结段表面积 S 的比值:

$$\tau_0 = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\pi d l_a} \tag{1}$$

式中: τ_0 为 FRP 筋粘结强度实测值,MPa; F_{\max} 为 FRP 筋破坏的最大荷载实测值,kN; d 为 FRP 筋公称直径,mm; l_a 为 FRP 筋埋入长度,mm。

四筋对拉试验的粘结应力计算方法为 FRP 筋的总极限荷载 F_{\max} 与两根 FRP 筋粘结段表面积 S 的比值:

$$\tau_0 = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{2\pi d l_a} \tag{2}$$

对比式(1)、式(2)可知,四筋对拉试验同时研究 4 根 FRP 筋的粘结应力。由于混凝土是一种非均质材料,FRP 与混凝土之间粘结存在着一定的非线性,单筋拉拔的粘结试验结果必然存在离散性,四筋对拉试验可以保证 FRP 筋与混凝土之间的粘结应力研究在同样条件下得到的试验数据更准确,进而减小试验误差。

2 GFRP 筋与混凝土粘结滑移性能试验

笔者采用 Losberg 拉拔试验、双筋对拉试验、四筋对拉试验三种试验方法进行研究,每种试验分为 5 组,每组 3 个试件,共 45 个试件。试验采用海宁安捷复合材料有限责任公司生产的 GFRP 筋,极限抗拉强度为 730 MPa,玻璃纤维体积分数约为 70%,树脂体积分数约为 30%,试验采用带肋 GFRP 筋,混凝土强度设计等级为 C30。试验加载设备为电液伺服万能试验机,最大拉力为 300 kN,最大行程为 1 000 mm,粘结荷载和滑移量自动实时采集。试件参数见表 1。

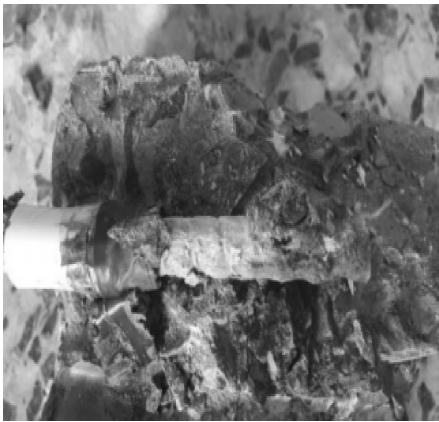
表 1 拉拔试件参数
Table 1 List of pull-out specimens

试验方法	试件编号	直径/ mm	粘结长 度/mm	试件 数量/个
Losberg	L-12-30-3d	12	3d	3
	L-12-30-5d	12	5d	3
	L-12-30-7d	12	7d	3
	L-10-30-5d	10	5d	3
	L-14-30-5d	14	7d	3
	D-12-30-3d	12	3d	3
双筋对拉	D-12-30-5d	12	5d	3
	D-12-30-7d	12	7d	3
	D-10-30-5d	10	5d	3
	D-14-30-5d	14	5d	3
四筋对拉	W-12-30-3d	12	3d	3
	W-12-30-5d	12	5d	3
	W-12-30-7d	12	7d	3
	W-10-30-3d	10	5d	3
	W-14-30-3d	14	5d	3

3 试验结果与分析

3.1 试验现象及破坏形式

Losberg 拉拔试件与双筋对拉试件的破坏形式主要表现为 GFRP 筋的拔出破坏,破坏形式分为两种:GFRP 筋肋剪切破坏(见图 3(a))和 GFRP 筋肋间混凝土剪切破坏(见图 3(b))。从图 3(a)可以看出,对于破坏形式为 GFRP 筋肋受剪破坏的试件,其内部 GFRP 筋的粘结段破坏明显,筋肋几乎被混凝土磨平。发生此种破坏现象的试件,通常其 GFRP 筋直径较小,且筋肋的抗剪强度低于混凝土抗剪强度。从图 3(b)可以看出,GFRP 筋肋间混凝土发生剪切破坏,随着筋体拔出,带出少量混凝土碎渣,发生此种现象的试件多为 GFRP 筋直径较大,肋间形成较高的楔形混凝土,此处混凝土抗剪强度较低,容易发生肋间混凝土剪切破坏现象。



(a)GFRP筋肋剪切破坏



(b)肋间混凝土剪切破坏

图 3 GFRP 筋与混凝土粘结破坏形式

Fig. 3 Failure characteristics of GFRP bar-to-concrete axial pull-out bonded specimens

四筋对拉 GFRP 筋与混凝土粘结破坏形式如图 4 所示。从图中可以看出,四筋对拉试件破坏形式从外观来看主要发生了 GFRP 筋的拔出破坏和混凝土局部劈裂破坏,剖开发生拔出破坏的试件,发现内部破坏与轴心拉拔试验破坏方式相同,均发生 GFRP 筋肋剪切破坏(见图 4(a))和肋间混凝土剪切破坏(见图 4(b)),并且参数相同的试件发生破坏方式相

同,但与轴心拉拔试验相比,四筋对拉试验的粘结应力较小。试验中只有极少数试件发生了局部劈裂破坏(见图 4(c)),发生此种破坏的试件,GFRP 筋直径较大,分析原因是 GFRP 筋直径较大,在较大的拉拔力作用下,试件发生破坏,混凝土的劈裂抗拉强度较低,试件发生破坏时达到了混凝土的劈裂抗拉强度,进而造成混凝土的局部劈裂破坏。



(a)GFRP筋肋剪切破坏



(b)肋间混凝土剪切破坏



(c)局部混凝土劈裂破坏

图 4 四筋对拉 GFRP 筋与混凝土粘结破坏形式
Fig. 4 Failure characteristics of GFRP bar-to-concrete quadratic-bar symmetric pull-out bonded specimens

3.2 荷载 - 滑移曲线

由式(1)和式(2)计算得到 GFRP 筋与混凝土之间的粘结强度结果见表 2。GFRP 筋破坏典型粘结滑移曲线如图 5 和图 6 所示,图中曲线为平均粘结应力。从图中可以看出,四筋对拉试验和双筋对拉得到的粘结滑移曲线总体比 Losberg 试验曲线低,并且滑移量小。分析原因是 Losberg 试验中端部的承压板装置限制了混凝土开裂,进而提高了混凝土与 GFRP 筋之间的粘结应力。

表 2 拉拔试验结果

Table 2 Comparison result of pull-out tests		
试件编号	极限荷载平均值/kN	粘结应力平均值/MPa
L-12-30-3d	11. 192	8. 254
L-12-30-5d	18. 080	8. 000
L-12-30-7d	22. 573	7. 132
L-10-30-5d	14. 975	9. 538
L-14-30-5d	23. 004	7. 476
D-12-30-3d	9. 512	7. 015
D-12-30-5d	15. 308	6. 771
D-12-30-7d	19. 344	6. 112
D-10-30-5d	14. 053	8. 951
D-14-30-5d	19. 490	6. 334
W-12-30-3d	9. 129	6. 733
W-12-30-5d	14. 830	6. 559
W-12-30-7d	18. 534	5. 856
W-10-30-5d	13. 247	8. 438
W-14-30-5d	18. 613	6. 049

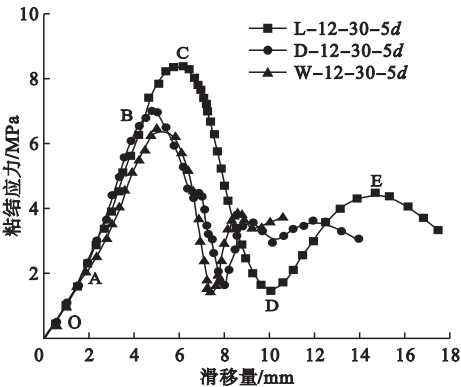


图 5 拔出破坏典型粘结滑移曲线

Fig. 5 Typical bond slip curves of pull-out failure

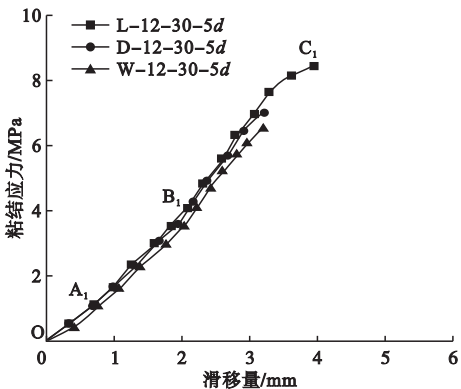


图 6 劈裂破坏典型粘结滑移曲线

Fig. 6 Typical bond slip curves of split failure

GFRP 筋混凝土粘结滑移破坏主要有两种形式,一种是拔出破坏,其粘结滑移曲线上皆有完整的波峰(见图 5),出现一个波峰后 GFRP 筋肋或其肋间的混凝土被剪坏,因此之后的第二个、第三个波峰值均比第一个波峰小很多。三种试验得到的是具有相同趋势的典型粘结滑移曲线,发生拔出破坏的试件粘结滑移曲线分为 O-A 微滑移端、A-B 滑移段、B-C 微上升段、C-D 下降段、D-E 残余段五个部分。另外一种劈裂破坏,典型粘结滑移曲线只有上升段(见图 6),粘结滑移曲线只有 O-A₁ 滑移段、A₁-B₁ 滑移段和 B₁-C₁ 上升段。

3.3 四筋对拉试验与传统试验粘结应力对比

将四筋对拉试验所得到的粘结应力与双筋轴心对拉试验和 Losberg 试验所得到的粘结应力进行对比,结果见图 7。从图中可以

看出,直径和粘结长度对不同试验方法所得到的粘结应力影响较小,Losberg 试验所得到的粘结应力最大,四筋对拉试验和双筋对拉试验得到的粘结应力基本相同。当 GFRP 筋直径为 12 mm、粘结长度为 5 d 时,四筋对拉试验得到的粘结应力比 Losberg 拉拔试验和双筋轴心对拉试验得到的粘结应力分别降低了 18% 和 3%。这也证明了 Losberg 拉拔试验要通过承压板来传递反力,造成混凝土受压,并且承压板不是绝对光滑的,对混凝土产生“套箍效应”,限制其开裂,进而提高了 GFRP 筋与混凝土之间的粘结应力,因此 Losberg 拉拔试验测得的粘结应力会比另外两种试验大。混凝土当中的 GFRP 筋受拉的时候端部并未有承压板作用,Losberg 试验方法的受力情况与实际工程受力情况相差较大,并且试验结果大于实际情况,偏于不安全。

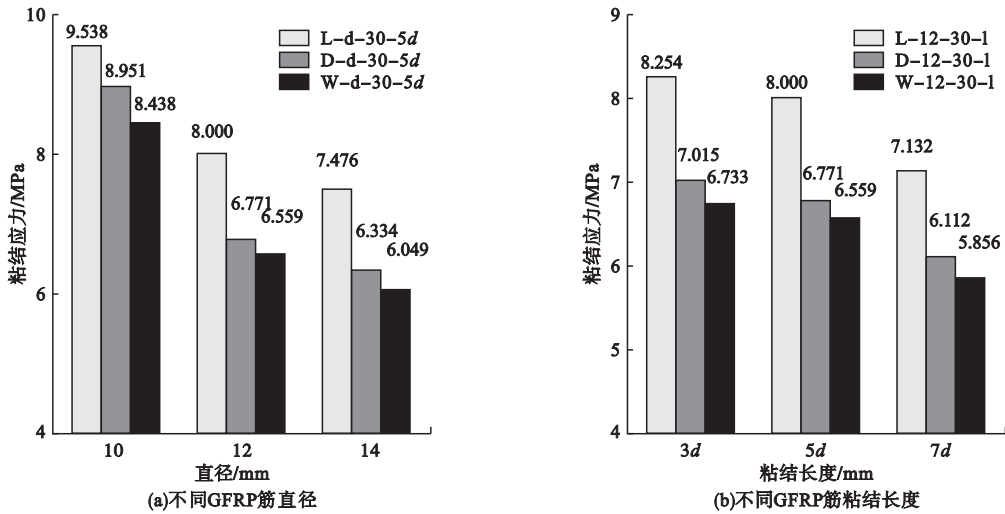


图 7 三种试验方法粘结应力对比

Fig. 7 Comparison of bond stress of three different test

四筋对拉试验是在双筋轴心拉拔试验的基础上提出来的,四筋对拉试验方法即可以保证 GFRP 筋的受力情况更符合实际,也克服了双筋对拉试验的轴心对中问题造成的试验误差,同时得到的粘结应力是 4 根 GFRP 筋的平均粘结应力,可以减小试验误差,得到的数据更准确。

4 结 论

- (1) 笔者基于 Losberg 试验和轴心对拉试验,提出四筋对拉试验,四筋对拉试验方法可以减小 GFRP 筋与混凝土之间粘结应力的试验误差,得到的试验数据更准确。
- (2) 同样条件下,四筋对拉试验和双筋

对拉试验得到的粘结滑移曲线低于 Losberg 拉拔试验的粘结滑移曲线。

(3) Losberg 拉拔试件与轴心对拉试件的破坏形式为拔出破坏,四筋对拉试件的破坏形式为拔出破坏和局部劈裂破坏。

参考文献

- [1] WON J P, PARK C G, KIM H H, et al. Effect of fibers on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete [J]. Composites part b: engineering, 2008, 39 (5): 747 - 755.
- [2] 马中军, 张树, 刘沐宇. 混凝土内钢筋锈蚀规律随机性的研究 [J]. 混凝土, 2012, 4 (3): 43 - 45.
(MA Zhongjun, ZHANG Shu, LIU Muyu. Study on randomness of corrosion law for steel bar in concrete [J]. Concrete, 2012, 4 (3): 43 - 45.)
- [3] MALVAR L J, COX J V, COCHRAN K B. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete [J]. Journal of composites for construction, 2003, 7 (2): 154 - 163.
- [4] HARAJI M, ABOUNIAI M. Bond performance of GFRP bars in tension: experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines [J]. Journal of composites for construction, 2010, 14 (6): 659 - 668.
- [5] 刘志威. 装配式 FRP 筋混凝土节点研究 [J]. 建材世界, 2016, 37 (2): 28 - 31.
(LIU Zhiwei. Refabricated FRP tendons concrete node research [J]. The world of building, 2016, 37 (2): 28 - 31.)
- [6] 郭恒宇, 张继文. FRP 筋与混凝土粘结滑移性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2006, 202 (8): 1 - 4.
(GUO Hengying, ZHANG Jiwen. Experimental study on bond behaviors between FRP tendons and concrete [J]. Concrete, 2006, 202 (8): 1 - 4.)
- [7] WANG Jingfei, ZHANG Lin. Seismic response of extended end plate joints to concrete-filled steel tubular columns [J]. Engineering structures, 2013, 49 (9): 876 - 892.
- [8] SUN Li, LI Chuang, ZHANG Chunwei. The strain transfer mechanism of fiber bragg grating sensor for extra large strain monitoring [J]. Sensors, 2019, 30 (2): 256 - 271.
- [9] SUN Li, WEI Minghai, ZHANG Chunwei. Experimental study on the behavior of GFRP reinforced concrete columns under eccentric axial load [J]. Construction and building materials, 2017, 152 (6): 214 - 225.
- [10] LI Chuang, SUN Li, XU Ziqiang, et al. Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2020, 89 (5): 156 - 173.
- [11] SUN Li, WANG Shinguang. Experiment research on mechanical behavior of eccentrically loaded short concrete column reinforced with GFRP bars [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2014, 31 (4): 23 - 28.
- [12] SUN Li, YANG Zeyu, JIN Qiao, et al. Effect of axial compression ratio on seismic behavior of GFRP reinforced concrete columns [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2020, 12 (3): 196 - 215.
- [13] ZHU C Y, ZHAO Y H, SUN L. Seismic performance of FRP-reinforced concrete-filled thin-walled steel tube considering local buckling [J]. Journal of reinforced plastics and composites, 2018, 37 (9): 592 - 608.
- [14] 朱春阳, 王可心, 孙天娇, 等. 考虑粘结滑移的 FRP 筋混凝土柱偏压性能 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36 (2): 220 - 228.
(ZHU Chunyang, WANG Kexin, SUN Tianjiao, et al. Bias compression behavior of FRP concrete columns considering bond slip [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36 (2): 220 - 228.)
- [15] 薛伟辰. 不同试验方法对 GFRP 筋粘结强度的影响研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2003 (5): 10 - 13.
(XUE Weichen. Study on influence of different test methods on bond strength of GFRP rebars [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2003 (5): 10 - 13.)
- [16] 王勃, 欧进萍, 张新越, 等. FRP 筋与混凝土粘结性能的试验研究 [J]. 低温建筑技术, 2006 (1): 39 - 41.
(WANG Bo, OU Jinping, ZHANG Xinyue, et al. Experimental evaluation on bond properties of FRP bars to concrete [J]. Low temperature architecture technology, 2006 (1): 39 - 41.)
- [17] 高丹盈, BRAHIM B. 纤维聚合物筋与混凝土粘结性能的影响因素 [J]. 工业建筑, 2001, 31 (2): 9 - 14.
(GAO Danying, BRAHIM B. Influential factors of bond properties between fiber reinforced polymer rebars and concrete [J]. Industrial construction, 2001, 31 (2): 9 - 14.)
- [18] 孙丽, 杨泽宇, 朱春阳, 等. GFRP 筋纤维混凝土粘结滑移性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53 (增刊 2): 1 - 6.
(SUN Li, YANG Zeyu, ZHU Chunyang, et al. Study on bonding properties of reinforced composite concrete structure with fiber materials [J]. China civil engineering journal, 2020, 53 (S2): 1 - 6.)
- [19] 王磊, 毛亚东, 陈爽, 等. GFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (2): 286 - 292.
(WANG Lei, MAO Yadong, CHEN Shuang, et al. Experimental research on bond performance between GFRP bars and the coral concrete [J]. Journal of building materials, 2018, 21 (2): 286 - 292.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)