

文章编号:1674-599X(2022)04-0109-07

端部嵌贴 CFRP 加固混凝土结构有限元分析

吴凡,吴攀,彭晖,邓继华

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:为解决表面粘贴和表层嵌贴 CFRP 加固混凝土结构的端部剥离问题,本研究提出一个新型加固方法—端部嵌贴加固(TE),设计了不同加固长度的单剪拔出试验,对比分析其黏结承载力、破坏模式及 CFRP 应变分布情况。运用 ABAQUS 有限元分析软件对试样进行非线性数值分析,研究了混凝土等级、槽尺寸大小等各因素对模型界面黏结性能的影响。研究表明:采用 Spring2 非线性弹簧,实现 CFRP 板条、混凝土与树脂胶之间的滑移是可行的。端部嵌贴方法能有效提高界面黏结性能,嵌贴段锚固作用较好,但沿板宽方向与中央部分的黏结应力不一致。采用合适的槽宽,提高混凝土等级,能有效提高端部嵌贴 CFRP 与混凝土的界面黏结性能。

关键词:端部嵌贴;CFRP 板;单剪拔出试验;有限元分析

中图分类号:TU37

文献标志码:A

Finite element analysis of concrete structure reinforced by terminal embedded the CFRP strips

WU Fan, WU Pan, PENG Hui, DENG Jihua

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To solve the end peeling problem of externally bonded and near surface mounted CFRP reinforced concrete structures, a new terminal embedded (TE) reinforcement method was proposed in the present study. Single shear pull-out tests with different reinforcement lengths were designed to compare and analyze the bonding capacity, the failure mode and the CFRP strain distribution. Nonlinear numerical analysis is conducted by using ABAQUS software to study the effects of various factors such as concrete grade and slot size on the bonding behavior of model interface. The test results show that the slippage between CFRP strips, concrete and resin glue can be simulated by using the Spring2 nonlinear springs. The TE method can effectively improve the interface bonding performance. The embedding section shows good anchoring performance. However, the bonding stress along the width of CFRP strip is not uniform. It is suggested that proper groove width and high-grade concrete can improve the bonding performance at the interface between the CFRP strips and the concrete.

Key words: terminal embedded; CFRP strip; single shear pull-out test; finite element analysis

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastic, 简称为 CFRP)具有质量轻、强度高及抗疲劳性能好等优点,在土木工程领域得到了广泛应用,其加固技术和施工工艺也日愈完善,矩形板条是其最常见的截面形状^[1-2]。目前,国内外常用的 CFRP 板加固方法主要分为两类:表面粘贴(externally bonded, 简称为 EB)和表面嵌贴(near surface mounted, 简称为 NSM)。

近年来,许多学者对 EB 和 NSM CFRP 加固技术进行了大量研究。研究表明,剥离破坏是 CFRP 加固混凝土结构的主要破坏模式之一,尽管 NSM 加固技术可有效缓解 CFRP 的黏结问题,但其端部的剥离破坏和大量的开槽工作增加了许多问题^[3-4]。因此,通过合理的构造形式规避这些缺陷的新型 CFRP 板加固混凝土结构方法亟待开发。

收稿日期:2021-03-31

作者简介:吴凡(1996—),女,长沙理工大学硕士生。

CFRP板、树脂胶与混凝土的界面黏结性能是影响结构发生剥离破坏的基础,而混凝土强度、槽尺寸大小、CFRP埋置深度等均为界面黏结性能的主要影响因素。郭樟根等人^[5]运用修正梁的试验方法,考察了混凝土强度和黏结长度等因素对EB CFRP、NSM CFRP与混凝土界面黏结性能的影响。SENA-CRUZ^[6]认为混凝土强度对黏结承载力没有影响。CARO等人^[7]提出了增大混凝土强度可显著提升界面黏结性能的结论。DE LORENZIS等人^[8]考察了槽的大小对界面黏结性能的影响。TENG等人^[9]采用有限元软件建立CFRP板加固模型,探究各因素对界面黏结性能的影响。还有不少学者对界面黏结性能也进行了研究^[10-13],但目前所得结论均缺少普适性。

本研究提出端部嵌贴(*terminal embedded*, 简称为TE)CFRP板加固混凝土结构的方法。该方法将混凝土槽分为两段,在自由端部的一小段开槽,将CFRP嵌入作为嵌贴段,嵌贴段通过倾斜槽与加载端连接为过渡段。因此,本研究对端部嵌贴CFRP加固混凝土棱柱体进行单剪拔出试验,研究剪切应力作用下端部嵌贴CFRP加固混凝土试件的破坏模式,分析其中的应力传递过程。运用ABAQUS有限元软件,根据试验得到的荷载-滑移曲线,对拔出试件进行有限元模拟,分析不同因素对界面黏结性能的影响。

1 试验设计

1.1 试验材料

采用标号为C40的普通混凝土,测量同时浇筑、同条件养护、尺寸大小为150 mm×150 mm×150 mm试块的强度。CFRP板条尺寸大小为3 mm(厚)×50 mm(宽)。黏结剂采用Sikadur-30CN环氧树脂胶,在实验室常温养护7 d后达到标准强度。材料的性能参数见表1。

表1 加固材料性能参数

Table 1 Properties of reinforcement materials				
材料名称	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %	抗压强度/ MPa
CFRP板	2 561.1	140.20	1.96	
环氧树脂胶	31.9	2.63	1.47	
C40		33.36		41.38

1.2 试验参数

本研究设计了3个CFRP板加固混凝土棱柱体试件,试件横截面尺寸大小为200 mm(宽)×220 mm(高),并在浇筑前预留矩形截面槽,该槽位于试件200 mm长边的正中间,考虑到钢筋混凝土保护层的厚度,设计槽深度为25 mm,槽宽为60 mm。加载时保持轴向拉力,除嵌贴段与过渡段长度外,在过渡段前预留50 mm长度的外贴段,外贴段开5 mm浅槽。典型单剪拉拔试件剖面如图1所示,具体试验参数见表2。

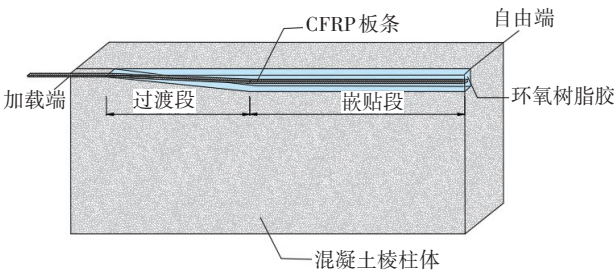


图1 单剪拉拔试件剖面

Fig. 1 Section of single shear pull-out specimen

表2 试验参数设计

Table 2 Design of test parameters					
试件 编号	嵌贴段 长度/mm	过渡段 长度/mm	槽尺寸 大小/ mm×mm	混凝土 强度等级	试件总长/ mm
L500+200	500	200	60×25	C40	750
L400+200	400	200	60×25	C40	650
L300+200	300	200	60×25	C40	550

注:试件编号LA+B,其中,A为嵌贴段长度,mm;B为过渡段长度,mm。

1.3 试验加载与量测

本研究采用单剪拉拔试验方法,加载装置如图2所示。试验采用千斤顶进行加载,为防止加载过程中出现偏心等情况,应注意千斤顶、传感器和CFRP板条的轴心保持在同一直线上。加载过程中,以5 kN为一级控制加载,级间间隔3 min,记录每一级荷载下CFRP应变和加载端滑移值。位移计设置在加载端端部,将应变片与应变采集仪相连。应变片布置如图3所示,以距离自由端20 mm处为起点,每50 mm布置1个应变测点,直至加载黏结另一端。

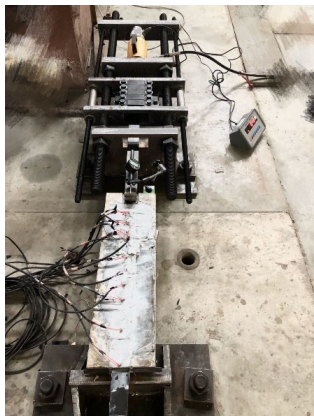


图2 拉拔试验加载装置

Fig. 2 Loading device for shear pull test

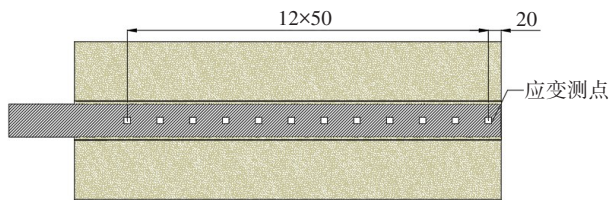


图3 CFRP板应变布置(单位:mm)

Fig. 3 Layout CFRP strips strain(unit:mm)

2 试验现象及分析

试件的黏结承载力能直观反映试件的黏结性能,各试件的黏结承载力情况见表3。试件破坏形态如图4~6所示。

表3 试验结果
Table 3 Test results

试件编号	黏结承载力/kN	滑移值/mm	破坏模式
L500+200	145	9.85	CFRP剥离
L400+200	140	11.05	CFRP剥离
L300+200	125	11.79	CFRP剥离



图4 L500+200 试件破坏

Fig. 4 The destruction of the L500+200 specimen



图5 L400+200 试件破坏

Fig. 5 The destruction of the L400+200 specimen



图6 L300+200 试件破坏

Fig. 6 The destruction of the L300+200 specimen

从图4~6可以看出,本试验的破坏模式为界面剥离破坏。从试验过程中可以发现,树脂胶裂缝呈半月形,表明CFRP沿板宽方向的黏结刚度与靠近板中央部分的不一致。靠近板中央部分的滑移较大,黏结刚度较弱,而靠近板边部分,由于受到槽侧混凝土的约束,其滑移值小,黏结刚度较大。

各试件的荷载-端部滑移曲线如图7所示。从图7中可以看出,嵌贴段长度越长,其曲线斜率越大,试件的界面黏结刚度越大。在过渡段长度相同的情况下,增加嵌贴段长度,黏结承载力会增加,滑移会减小,表明嵌贴段提供了较好的锚固作用。

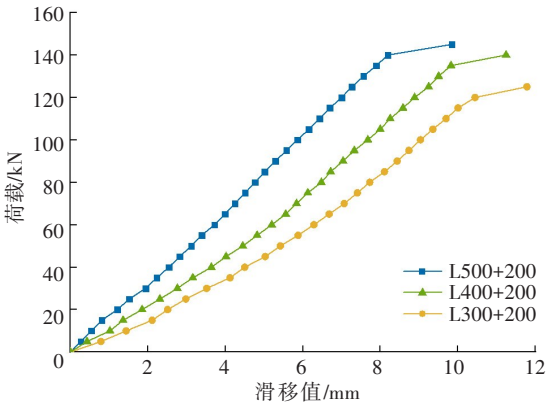


图7 荷载-滑移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves

L300+200的CFRP应变分布如图8所示。当荷载增大到70 kN时,其应变突然增大,表明加载端部树脂界面开始软化剥离,与试验在荷载为70 kN时发出轻微啪响声情况相符。从图8可以看出,当荷载为110 kN时,CFRP板应变分布为嵌贴段内CFRP板的应变值很小,表明绝大部分CFRP板拉伸应力是由过渡段的黏结剪应力平衡,而试件荷载加载至125 kN时出现破坏,表明过渡段提供了88%以上的黏结承载力。

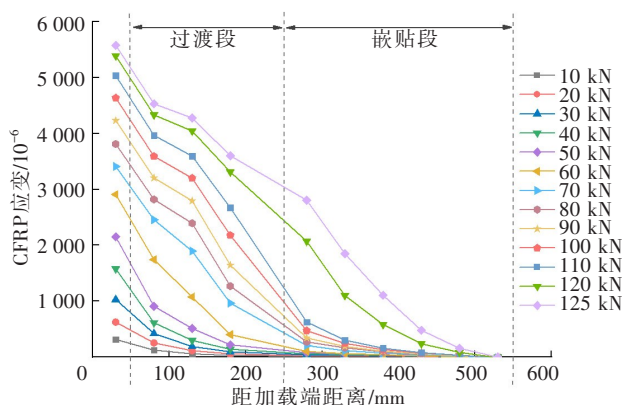


图8 L300+200 CFRP板应变分布

Fig. 8 CFRP strip strain distribution of the L300+200

3 有限元模拟

3.1 有限元模型的建立

运用ABAQUS有限元分析软件对试验进行非线性数值分析,并将计算结果与试验值进行比较,验证数值模型的准确性^[14]。在该模型基础上,考虑混凝土等级、槽的大小等因素对模型黏结性能的影响。

在本模型中,混凝土和FRP均采用八节点六面体缩减积分的三维实体单元(C3D8R)。混凝土本构选用塑性损伤本构,FRP定义为理想线弹性材料。边界条件设定试块某一面完全固定。为防止应力集中,建立参考点。通过Coupling与CFRP板条表面相互作用,在约束和加载点处采用Coupling方式定义加载面。选用20 mm网格划分模型,提高裂缝模拟精确度。为使模型收敛,选用位移加载模式对模型进行加载。

为准确模拟CFRP与混凝土的黏结性能,本研究选用Spring2非线性弹簧单元模拟CFRP与混凝土

之间的黏结情况,并采用Python语言实现Spring2弹簧的批量导入。建模时,需在CFRP与混凝土节点之间添加两组分别代表法向和切向的弹簧。对于法向弹簧,考虑到发生黏结破坏时法向变形远小于切向变形,本模型中将法向弹簧刚度 K_n 定义为100 000 kN/mm。对于切线弹簧,其黏结-滑移关系根据试验所得到的数据换算成F-D曲线来确定。最终建立的有限元模型如图9所示。

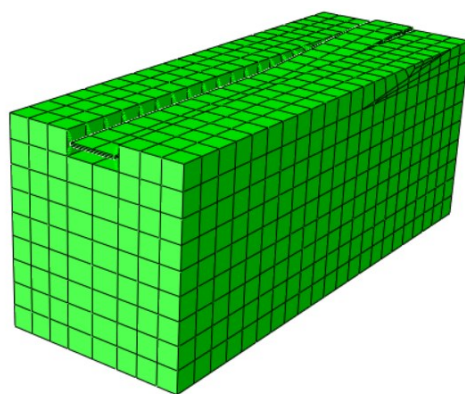


图9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

3.2 有限元结果分析

3.2.1 模拟结果的验证

通过ABAQUS软件模拟得到试件的荷载和滑移值,试验值与模拟值的对比情况见表4,L500+200试件的荷载-滑移曲线对比如图10所示。从表4和图10中可知,模拟值与试验值吻合良好。黏结荷载值随嵌贴段长度增加而增大,与试验结论一致。因此,采用ABAQUS软件能有效模拟端部嵌贴CFRP加固试件的受力过程,得到较为准确的极限状态值,且Spring2非线性弹簧能较好地模拟CFRP板、混凝土与树脂胶之间的滑移。对比发现,各试样滑移值较黏结承载力误差大,这可能是由于该模型未考虑沿板宽方向的黏结应力不一致的情况,使得弹簧刚度大于试验黏结刚度。

表4 试验值与模拟值对比

Table 4 Comparison of test and simulate values

试件编号	模拟值		误差/%	
	黏结承载力/ kN	滑移值/ mm	黏结承载力	滑移值
L500+200	146	8.75	0.7	10.2
L400+200	144	9.17	2.8	17.0
L300+200	118	10.72	5.6	9.0

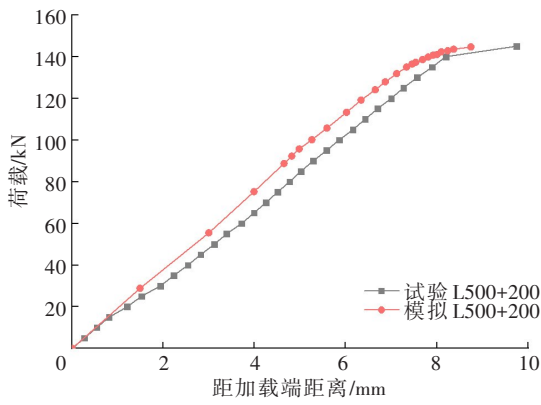


图 10 荷载-滑移对比曲线

Fig. 10 Comparison curves load-displacement

3.2.2 因素分析

许多研究表明,混凝土强度会影响试件刚度,混凝土强度对界面黏结性能有重要影响^[15-16]。因此,本研究基于 L400+200 模型验证结果,通过修改 INP 文件中的混凝土材料参数,改变混凝土本构关系,建立了一组 C20~C60 的有限元模型,探究混凝土强度对黏结性能的影响,黏结承载力随混凝土等级变化曲线如图 11 所示。有限元模拟结果见表 5。

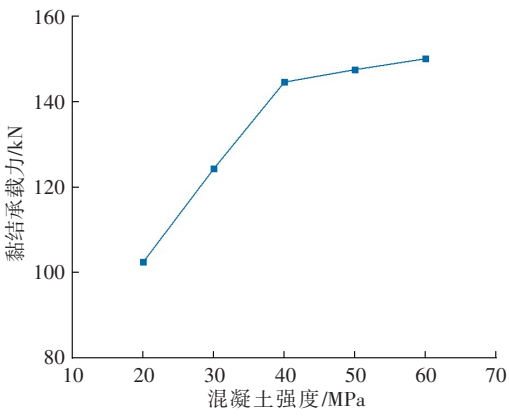


图 11 黏结承载力随混凝土等级变化

Fig. 11 The variation of bearing capacity with concrete grades

表 5 有限元模拟结果

Table 5 Finite element simulation results

试件编号	黏结承载力/ kN	滑移值/ mm	最大黏结 剪应力/MPa
L400+200-C20	102	7.54	4.33
L400+200-C30	124	8.75	5.08
L400+200-C40	144	8.97	5.32
L400+200-C50	147	7.75	5.56
L400+200-C60	150	7.35	5.59

从图 11 可看出,黏结承载力随混凝土强度提高而增大。混凝土等级从 C20 提升至 C40,黏结承载力从 102 kN 提高至 144 kN,提高了 41%,而混凝土等级超过 C50 后,黏结承载力仅提高了 5%,提升幅度不明显。

不同混凝土强度试件荷载随着滑移变化的情况如图 12 所示。从图 12 可以看出,荷载较小时,各试件的滑移值比较接近,随着荷载的增加,界面开始发生剥离,黏结刚度随界面剥离的发展逐渐退化。混凝土强度越高,曲线斜率越大,即黏结刚度越大,其滑移值越小。这表明随着混凝土强度增大,CFRP 和胶层之间的约束越大,CFRP 的滑移会越小。通过有限元模拟分析,说明混凝土强度对黏结强度存在不可忽视的影响。

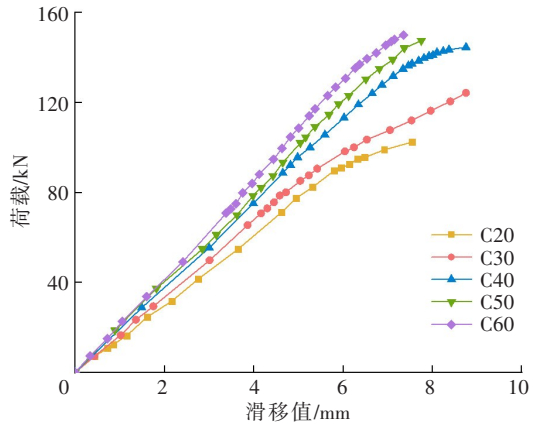


图 12 不同混凝土强度荷载-滑移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of specimen with different strength

槽的尺寸大小会影响到 FRP 与混凝土之间的黏结剂的厚度、大小和几何形状,还会影响 FRP 材料与槽内树脂的结合情况,以及 FRP、胶层和混凝土三者之间的相对位置关系^[17]。本研究设计了 5 种不同尺寸大小的槽,分析槽宽、槽深对黏结强度的影响。有限元计算结果见表 6。

表 6 有限元模拟结果

Table 6 Results obtained by finite element simulation

试件编号	黏结承载力/ kN	滑移值/ mm	最大黏结 剪应力/MPa
L400+200-W60	144	8.97	5.32
L400+200-W70	140	8.87	5.17
L400+200-W80	132	8.03	4.81
L400+200-H15	132	7.95	4.72
L400+200-H35	148	7.35	5.08

注:槽宽变化时,槽深统一为 25 mm;槽深变化时,槽宽统一为 60 mm。W 为槽宽,H 为槽深。

不同槽尺寸试件荷载随滑移的变化规律如图 13 所示。从图 13 可以看出,槽宽越大,黏结承载力越小,滑移越大。这是由于环氧树脂胶的弹性模量和刚度均小于混凝土的,随着槽宽增加,环氧树脂会增多,胶层更容易发生变形,且加大槽宽后削弱了槽侧面混凝土对 CFRP 的约束作用,削弱了黏结性能。因此,随着槽宽增加,界面黏结强度降低。槽深的变化改变了 CFRP 嵌入的深度。对于同一黏结长度而言,相当于改变了过渡段 CFRP 转折区角度,槽深越大,弯折角度越大。在拉伸应力作用下,混凝土和树脂形成的径向压力越大,转折段提供的黏结强度越大。从图 13 还可以看出,L400+200-W80 和 L400+200-H15 的荷载-滑移曲线较为接近,前者略高于后者,这说明过大的槽宽或过浅的槽深均降低了其黏结性能,槽深过浅时尤为明显。

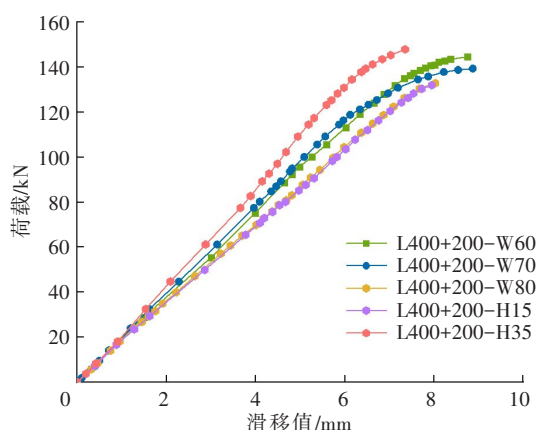


图 13 不同槽尺寸试件荷载-滑移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of specimen with different slot size

4 结论

本研究对端部嵌贴 CFRP 加固混凝土试件进行了单剪拔出试验,并运用 ABAQUS 有限元软件对其进行了非线性有限元分析,讨论了混凝土等级和槽宽对其界面黏结性能的影响,得出以下结论:

1) 端部嵌贴方法能有效提高界面黏结性能。嵌贴段很好地发挥了锚固作用,嵌贴段长度越大,滑移越小,界面黏结性能越强。

2) 树脂胶裂缝呈半月形,这说明沿 CFRP 板宽方向的黏结刚度不一致,靠近板中央部分黏结刚度较弱。由于受到槽侧混凝土的约束,靠近板边部分

的黏结刚度较好。

3) 运用 ABAQUS 有限元软件模拟端部嵌贴 CFRP 加固试件的受力过程,可得到较为准确的极限状态值。采用 Spring2 非线性弹簧,实现 CFRP 板、混凝土与树脂胶之间的滑移。

4) 混凝土强度会影响界面黏结强度,提高混凝土等级能增大界面黏结承载力,但混凝土等级超过 C50 后,黏结承载力提高不明显。

5) 槽宽、槽深均会对界面黏结强度产生影响。过大的槽宽或过浅的槽深均会造成黏结性能降低,当槽深过浅时尤为明显。

参考文献 (References):

- [1] 杨杰平. 某现浇连续箱梁桥裂缝原因及加固技术分析 [J]. 公路与汽运, 2020 (1): 118-120. (YANG Jieping. Analysis of crack causes and reinforcement technology of a cast-in-place continuous box girder bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (1): 118-120. (in Chinese))
- [2] AL-SAAD N T K, MOHAMMED A, AL-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2019 (209): 748-769.
- [3] ARAM M R, CZADERSKI C, MOTAVALLI M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams [J]. Composites Part B (Engineering), 2008, 39(5): 826-841.
- [4] TENG J G, CHEN J F. Mechanics of debonding in FRP-plated RC beams [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2009, 162(5): 335-345.
- [5] 郭樟根, 孙伟民, 闵珍. FRP 与混凝土界面黏结性能的试验研究 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2006, 28(6): 37-42. (GUO Zhanggen, SUN Weimin, MIN Zhen. Experimental study on bond behavior between FRP-concrete interface [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 28(6): 37-42. (in Chinese))
- [6] SENA-CRUZ J, BARROS J A O, AZEVEDO A F M, et al. Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips [D]. Braga: University of Minho, 2005.
- [7] CARO M, JEMAA Y, DIRAR S, et al. Bond performance of deep embedment FRP bars epoxy-bonded into concrete

- [J]. *Engineering Structures*, 2017(147):448-457.
- [8] DE LORENZIS L, NANNI A. Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(2):123-132.
- [9] TENG J G, ZHANG S S, CHEN J F. Strength model for end cover separation failure in RC beams strengthened with near-surface mounted (NSM) FRP strips [J]. *Engineering Structures*, 2016(110):222-232.
- [10] 李荣, 滕锦光, 岳清瑞. 嵌入式CFRP板条-混凝土界面黏结性能的试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(8):31-34. (LI Rong, TENG Jinguang, YUE Qingrui. Experimental study on bond behavior of nsm CFRP strips-concrete interface [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(8):31-34. (in Chinese))
- [11] CRUZ J S, BARROS J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete [J]. *Computers & Structures*, 2013, 82(17-19):1513-1521.
- [12] DE LORENZIS L, RIZZO A, LA TEGOLA A. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2002, 33(8):589-603.
- [13] REZAZADEH M, BARROS J, RAMEZANSEFAT H. End concrete cover separation in RC structures strengthened in flexure with NSM FRP: analytical design approach [J]. *Engineering Structures*, 2016(128):415-427.
- [14] 张海霞, 何禄源. 基于ABAQUS的表面内嵌CFRP筋黏结滑移性能数值模拟分析[J]. *工程力学*, 2014, 31(S1):239-244. (ZHANG Haixia, HE Luyuan. Numerical simulation analysis on bond-slip behavior of concrete strengthened with near-surface mounted CFRP bars based on ABAQUS [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(S1):239-244. (in Chinese))
- [15] 彭晖, 丑佳璇, 孙溢, 等. 表层嵌贴CFRP-混凝土结构的黏结性能研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(12):156-166. (PENG Hui, CHOU Jiaxuan, SUN Yi, et al. Bond behavior of near-surface-mounted CFRP to concrete structure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(12):156-166. (in Chinese))
- [16] 肖亚鑫, 鲁乃唯, 陈方怀. 钢-超高性能混凝土组合板连接件的抗剪性能[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(1):44-49. (XIAO Yaxin, LU Naiwei, CHEN Fanghuai. The shear capacity of steel-ultra-high performance concrete composite board connectors [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(1):44-49. (in Chinese))
- [17] COELHO M R F, SENA-CRUZ J M, NEVES L A C. A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015(93):1157-1169.
- (责任编辑:罗容;校对:欧兆虎 李脉;英文编辑:陈璐)

(上接第108页)

(in Chinese))

- [7] TAO L J, DING P, YANG X R, et al. Comparative study of the seismic performance of prefabricated and cast-in-place subway station structures by shaking table test [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020(105):103583.
- [8] 刘惠敏. 地下铁道明挖区间装配式衬砌力学特性研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2003. (LIU Huimin. Study on the mechanics characters of the fabricated linings in the subway constructed by open-cut method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [9] 刘建洪. 明挖装配式地铁车站结构设计优化及施工过程力学特性研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2007. (LIU Jianhong. Study on the design optimization of the fabricated structure of the subway station constructed by open-cut method and the mechnaical behaviour of construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [10] LIU T J, LU J D, WANG D, et al. Experimental investigation of the mechanical behaviour of wall-beam-strut joints for prefabricated underground construction [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021, 15(1):1-19.
- [11] SU H F, LIU W N, LIU F C. Preliminary ideas of the metro station constructed by shield tunneling method combined with prefabricated method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014(580-583):1013-1018.
- (责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:栗森)