

# 中低速荷载下 FRP 与混凝土界面本构模型开发

李晓琴<sup>1</sup>, 陈前均<sup>1,4</sup>, 陈建飞<sup>2</sup>, 陶毅<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 贝尔法斯特女王大学 建筑与土木规划学院, 英国 贝尔法斯特 BT9 5AG;  
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 云南震安减震科技股份有限公司, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, 简称 FRP)常被用于加固钢筋混凝土结构, FRP 与混凝土的粘结性能是确保加固效果的关键, 但目前缺乏合适的考虑 FRP 与混凝土界面行为非线性和滑移速率效应的本构模型。本研究基于 LS-DYNA 子程序开发平台, 进行了本构模型开发, 该模型考虑了界面本构非线性关系及滑移速率效应对界面剪切模态断裂能  $G_f^I$  的影响, 完整定义了中低速荷载(滑移速率为  $10^{-7} \sim 10^{-3}$  m/s)作用下 FRP 与混凝土界面的动态粘结-滑移关系。采用该模型对 FRP 与混凝土界面单元受中低速荷载作用的纯剪切模态进行有限元模拟, 有限元计算结果表明, 该本构模型可以准确反映中低速荷载作用下 FRP 与混凝土界面的动态粘结-滑移关系。

**关键词:** FRP; 混凝土; 中低速荷载; 界面本构; 模型开发

**中图分类号:** TU375.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2019)02-0219-04

## Constitutive model development of FRP-to-concrete interface under middle/low loading rates

LI Xiaoqin<sup>1</sup>, CHEN Qianjun<sup>1,4</sup>, CHEN Jianfei<sup>2</sup>, TAO Yi<sup>3</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan 650500, China;  
2. School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's Univ. Belfast, Belfast BT9 5AG, UK;  
3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
4. Yunnan Qualcesaye Seismic Isolation Technology Co., Ltd, Kunming 650217, China)

**Abstract:** Fiber reinforced polymer(FRP) can be used to strengthen the concrete structure. The bond behaviors between FRP and concrete significantly affect effectiveness of FRP retrofitting. There is a lack of appropriate constitutive model which includes both bond-slip nonlinearity consideration and strain/slip rate effects. In the current study, based on the LS-DYNA subroutine working platform, a material model is developed. The model considered the nonlinearity of the interface constitutive relationships and the effects of strain/slip rate on the shear mode fracture energy  $G_f^I$ . A dynamic bond-slip relation of FRP-to-concrete interface under middle/low loading rates ( $10^{-7} \sim 10^{-3}$  m/s) can be completely defined with this developed model. The model is further used to simulate FRP-to-concrete interface elements under middle/low speed loading in shear mode tests. Finite element analysis results show that this developed constitutive model can be used for representing the dynamic behavior of FRP-to-concrete interface under middle/low loading rates accurately.

**Key words:** FRP; concrete; middle/low loading rates; constitutive relation of the interface; material model development

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer/Plastic, 简称 FRP)因其轻质高强、耐腐蚀性和施工性能好等优越性, 已经被广泛应用到钢筋混凝土结构加固领域<sup>[1]</sup>。FRP-混凝土界面的粘结性能是确保 FRP 和混凝土共同受力, 充分发挥 FRP 性能, 确保加固效果的关键。FRP-混凝土界面粘结-滑移关系反映了界面的粘结性能, 是 FRP 外贴加固混凝土结构受力分析的基础, 同时界面粘结-滑移模型的精确性是 FRP 加固混凝土结构设计中的

关键因素。

目前, 已有大量试验研究了 FRP-混凝土界面的粘结性能<sup>[2-5]</sup>, 并提出了界面的粘结-滑移本构关系。其中, Lu 等<sup>[2]</sup>基于精细单元的有限元模拟方法提出了 FRP-混凝土界面粘结-滑移模型, 其模型的精确性通过与试验数据的对比得到了验证<sup>[4-5]</sup>, 被用于 FRP-混凝土界面单元的本构定义<sup>[6]</sup>。但 Lu 等<sup>[2]</sup>提出的模型仅基于准静态荷载作用下的 FRP-混凝土界面, 不能考虑滑移率效应对本构关系的

收稿日期: 2018-10-01

修改稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (NSFC51308271 NSFC51408478); 昆明理工大学分析测试基金项目 (2017M20162110027)

第一作者: 李晓琴(1993—)女, 副教授, 博士, 主要从事 FRP 在结构加固领域的研究。E-mail: xiaoqin.li@foxmail.com

影响。施嘉伟等<sup>[7]</sup>对 57 个 FRP-混凝土双面剪切试件进行快速加载试验,试验结果表明,界面断裂能和最大剪应力等界面性能随应变率的提高而增大,FRP-混凝土界面性能具有应变率效应。以上研究结果表明,FRP-混凝土界面受动荷载作用时,需要考虑滑移率效应的影响。Li 等<sup>[8]</sup>考虑了界面滑移率  $\dot{s}$  对 FRP-混凝土界面切向粘结-滑移本构关系的影响,提出了 FRP-混凝土界面在不同滑移速率条件下,动力放大系数  $\alpha_{\text{DIF}}$  的计算公式。利用放大切向最大粘结应力及第 II 模态下界面的断裂能  $G_{\text{I}}^{\text{II}}$ ,可建立 FRP-混凝土界面切向动态本构关系。

涉及 FRP-混凝土界面的有限元应用研究中<sup>[9-10]</sup>,常在 FRP 和混凝土单元之间引入 Cohesive 单元作界面单元,并采用 FRP-混凝土界面的切向粘结-滑移关系定义 Cohesive 单元的切向本构关系,通过 Cohesive 单元来模拟界面的剪切性能及破坏过程。上述模拟方式须基于准确的 FRP-混凝土界面粘结-滑移模型。目前,在 FRP-混凝土界面切向粘结-滑移性能有限元研究中涉及加载速率效应的研究较少;并且采用 Cohesive 单元作为 FRP-混凝土界面单元时,缺乏合适的考虑 FRP 与混凝土界面行为非线性及滑移速率效应的 Cohesive 单元本构模型。

本文依据 Lu 等<sup>[2]</sup>提出的准静态荷载条件下切向粘结-滑移本构关系和 Li 等<sup>[8]</sup>提出的  $\alpha_{\text{DIF}} - \dot{s}$  关系,首先构建了 FRP-混凝土界面切向的动态粘结-滑移关系,再基于 LS-DYNA 的材料子程序模块,进行 Cohesive 单元材料本构模型开发,该本构模型考虑了界面非线性性能及滑移率效应。最后,采用所开发的本构模型,对单个 Cohesive 单元进行纯剪切状态下的有限元模拟,结果表明,该本构模型可以用于反映中低速荷载作用下 FRP 与混凝土界面的动态粘结-滑移关系。

## 1 FRP-混凝土界面动态粘结-滑移本构关系

Lu 等<sup>[2]</sup>基于精细单元的有限元模拟方法提出了三种 FRP-混凝土界面粘结-滑移模型,分别被命名为精确模型、简化模型和双线性模型。三种模型中,简化模型在保证精度的基础上又具有较为简洁的表达公式,适用于有限元中 FRP-混凝土界面单元的本构定义<sup>[11]</sup>,因此本研究选取 Lu 等<sup>[2]</sup>提出的简化模型作为界面单元在准静态下的本构关系。

Li 等<sup>[8]</sup>利用有限元研究了动态荷载下滑移速率对 FRP-混凝土界面粘结-滑移关系的影响,认为

考虑滑移速率的动态粘结滑移关系比静态情况下有所增强,将粘结滑移关系的动力放大系数  $\alpha_{\text{DIF}}$  定义为动态与静态断裂能比的平方根,同时又提出了  $\alpha_{\text{DIF}} - \dot{s}$  关系的计算公式。

本研究采用 Li 等<sup>[8]</sup>提出的中低速荷载(对应的滑移速率为  $10^{-7} \sim 10^{-3}$  m/s)下的  $\alpha_{\text{DIF}}$ ,分别将 Lu 等<sup>[2]</sup>提出的准静态加载下界面切向的最大粘结应力  $\tau_{s,\text{max}}$  及其对应的滑移量  $S_{s,0}$  放大  $\alpha_{\text{DIF}}^2$  倍,同时将界面第 II 模态下的断裂能放大倍,得到动态粘结-滑移本构关系。提出的 FRP-混凝土界面动态粘结-滑移本构关系具有如下特点:曲线上升段为幂函数形式,下降段为指数函数形式,整体呈非线性特征,反映了 FRP-混凝土界面行为非线性;界面第 II 模态下的断裂能和界面最大粘结应力等界面性能随应变率的提高而增强,该本构关系考虑了滑移率效应的增强作用。

## 2 本构模型子程序开发

### 2.1 已有 Cohesive 单元材料模型

目前,在最新版本 R10.0 的 LS-DYNA 中,直接用于 Cohesive 单元的材料模型包括: \* MAT\_138、\* MAT\_184、\* MAT\_185、\* \* MAT\_186、\* MAT\_240 和 \* MAT\_279。Cohesive 单元的本构关系一般被认为是为应力和位移之间的关系,上述 6 种模型中除 \* MAT\_186 和 \* MAT\_279 以外的其他 4 种材料模型的切向粘结-滑移本构关系都为线性或多段线性关系。Cohesive 单元受荷载作用时,上述 4 种材料模型都将本构关系的上升段定义为线弹性,随着滑移量的增加,粘结应力线性上升到最大值,之后部分材料模型开始损伤并线性软化。LS-DYNA 中另外一个非线性的材料模型是 \* MAT\_279,其本构关系包含线性上升段和指数形的软化段。虽然这两种模型可以反映非线性的本构关系,但却都没有考虑滑移速率效应对本构关系的影响。目前,仅 \* MAT\_240 能考虑滑移速率对切向粘结-滑移本构关系的影响,其定义了 Cohesive 单元有效应变率和  $\alpha_{\text{DIF}}$  的关系,但此模型的本构关系整体呈梯形形状,不能反映界面非线性性能。

总之,目前 LS-DYNA 中直接用于 Cohesive 单元的材料模型,缺乏合适的考虑界面行为非线性和滑移速率效应的本构模型。本文将依据提出的 FRP-混凝土界面动态粘结-滑移关系,基于 LS-DYNA 的材料子程序开发平台进行 Cohesive 单元本构模型子程序开发。

## 2.2 本构模型子程序开发

建立 LS-DYNA 的自定义材料本构模型子程序, 需要利用 Windows 操作平台下的 FORTRAN 编译器和 Microsoft Visual C++, 以完成材料模型的程序代码编写. 根据 LS-DYNA 的自定义 Cohesive 单元材料模型子程序要求, 将本文提出的 FRP-混凝土界面动态粘结-滑移关系编程. 所定义的材料本构模型子程序, 在 LS-DYNA 的求解 K 文件中采用自定义材料卡片, MAT\_USER\_DEFINED\_MATERIAL\_MODELS 调用. 根据所定义子程序及 Cohesive 单元材料模型的要求, 需要在上述材料卡片中定义的材料参数有, 材料密度:  $\rho$ , 建立三维单元时, 密度应按体积分布(单位  $\text{g}/\text{mm}^3$ ), 建立平面单元时, 密度按面积分布(单位  $\text{g}/\text{mm}^2$ ). 还需要定义的材料参数包括混凝土的抗压强度  $f_c$  (单位 MPa)、混凝土的抗拉强度  $f_t$  (单位 MPa, 当该值置空或定义为 0 时, 子程序将自动计算混凝土的抗拉强度取值)、FRP-混凝土界面的宽度比系数  $\beta_w$ 、是否考虑滑移速率的影响的控制参数等.

## 3 子程序测试与验证

采用所开发的本构模型子程序进行了单个 Cohesive 单元验证试验, 即以单个单元作为计算模型, 利用开发的子程序赋予单元材料特性, 进行单元在纯剪切条件下的计算, 并将 LS-DYNA 的计算结果与本研究提出的动态粘结-滑移本构关系对比.

### 3.1 单个 Cohesive 单元模型的建立

在 LS-DYNA 中建立单个 Cohesive 单元, 单元设置成边长为 10mm 的立方体. 单元的纯剪边界条件如图 1 所示, 即 1 到 8 号节点约束 X 和 Y 方向的位移恒为 0, 令 1、2、3 和 4 号节点发生沿 Z 轴正方向的位移, 同时令 5、6、7 和 8 号节点发生沿 Z 轴负方向的位移. 为了避免初始加速度对 LS-DYNA 的计算结果造成影响, 通过 \*DEFINE\_CURVE\_SMOOTH 的方式控制各个节点的速度, 以实现位移控制加载, 采用这种加载方式同时可以获得本构关系的下降段. 加载过程中节点 1、2、3、4 与节点 5、6、7、8 上的速度大小应保持相同, 方向相反.

### 3.2 不考虑滑移率效应的子程序验证

采用本研究开发的本构模型子程序对上述单个 Cohesive 单元进行材料本构定义, 首先在不考虑

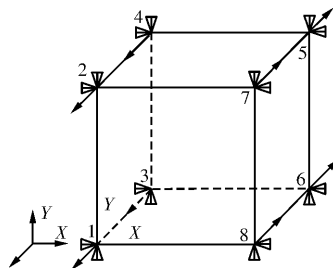


图 1 单个 Cohesive 单元纯剪边界条件

Fig. 1 Pure shear constraints of single cohesive element

滑移率效应情况下对子程序进行验证. 用于本构模型定义的材料参数包括: 混凝土的抗压强度:  $f_c = 30 \text{ MPa}$ , 混凝土的抗拉强度:  $f_t = 3 \text{ MPa}$ ; FRP-混凝土宽度比系数:  $\beta_w = 0.707$ . 采用上述材料参数, 基于本研究提出的本构关系可以确定具体的 FRP-混凝土界面粘结-滑移本构关系, 如图 3 所示. 在单个 Cohesive 单元模型的有限元计算结果中, 可以获得单元的粘结应力和界面相对滑移量等信息, 可以绘制两者的关系, 即 LS-DYNA 的本构关系计算结果, 其反应也就是子程序所实现的本构关系, 将该曲线一并绘制于图 2 中.

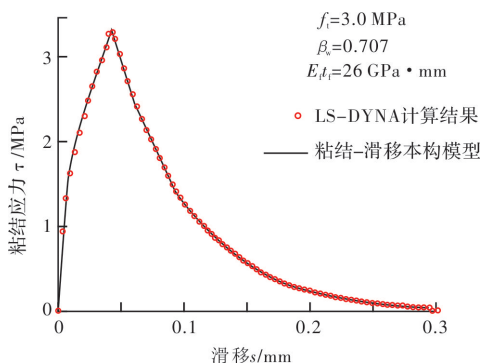


图 2 子程序计算结果和本构模型对比

Fig. 2 Comparison of subroutine calculation results with constitutive model

采用自定义的材料子程序时 LS-DYNA 的计算结果和本研究提出的粘结-滑移关系完全重合. 分析具体的计算结果, LS-DYNA 计算出的最大粘结应力约为 3.3515 MPa, 对应的界面滑移量约为 0.0436 mm, 极限滑移量约为 0.2932 mm, 而基于材料参数的本构关系中最大粘结应力为 3.3525 MPa, 对应的界面滑移量为 0.0436 mm, 极限滑移量为 0.2929 mm. 对比发现三组数据都十分接近, 其误差不超过 0.1%. 上述结果表明开发的本构模型子程序在不考虑滑移率效应的情况下, 计算结果是合理的且稳定的, 所开发的子程序符合 FRP-混凝土界面非线性性能的要求.

### 3.3 考虑滑移率效应的子程序验证

仍采用上述单个 Cohesive 单元模型, 在考虑滑

移率效应情况下对子程序进行验证. 为了得到不同的滑移速率下的计算结果, 对于加载方式需要进一步控制, 在 \* DEFINE\_CURVE\_SMOOTH 卡片中, 控制加载最大速率分别为:  $0.5 \times 10^{-7}$  m/s、 $0.5 \times 10^{-5}$  m/s 和  $0.5 \times 10^{-3}$  m/s 以实现不同的滑移速率. 因为模型的加载设置中, 控制单元相对两个面上节点的速度大小相同, 方向相反, 因此, 基于上述加载速率, 模型相对表面实际的滑移率是加载速率的 2 倍. 其他材料参数设置与 3.1 节中的设置完全相同. 基于本研究提出的动态粘结-滑移本构关系和上述材料参数, 不同滑移率下的本构曲线如图 3 所示. 同样 LS-DYNA 的计算结果中, 也可以获得不同加载速率下单元的粘结应力与滑移量等信息, 由 LS-DYNA 的计算结果绘制的粘结-滑移曲线一并绘制于图 3 中.

在考虑滑移率效应时, 本构模型子程序在不同滑移率下的粘结-滑移曲线模拟结果与考虑  $\alpha_{\text{DIF}}$  的动态粘结-滑移本构曲线完全重合. 进一步对比不同滑移率下的最大粘结应力及其对应的滑移量与极限滑移量的具体数值, 有限元模拟结果与动态本构关系计算结果, 两者对应数值的相对误差都不超过 0.5%, 说明所开发的子程序符合 FRP-混凝土界面考虑加载速率效应的要求.

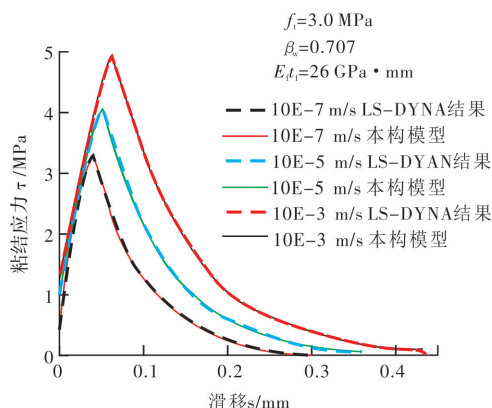


图3 不同滑移率时的计算结果与动态本构模型对比

Fig. 3 Comparison of calculation results with dynamic constitutive models at different slip rates

## 4 结语

针对中低速荷载作用下 FRP 与混凝土界面的粘结-滑移本构关系进行了研究, 并基于提出的 FRP-混凝土界面动态粘结-滑移本构模型, 进行了 Cohesive 单元材料模型子程序本构开发. 对所提出的本构模型子程序进行了单个 Cohesive 单元纯剪状态的模拟验证, 模拟结果表明, 所开发的本构模型子程序在中低速荷载下满足界面性能非线性和

考虑加载速率效应的要求.

## 参考文献 References

- [1] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
TENG Jinguang, CHEN Jian fei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [2] LU X Z, TENG J G, Ye L P, et al. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. Engineering Structures, 2005, 27(6):920-937.
- [3] 李晓琴, 陈建飞, 陆勇, 等. 基于局部损伤混凝土模型的 FRP-混凝土界面有限元分析研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1):62-65.  
LI Xiaoqin, CHEN Jian fei, LU Yong, et al. Numerical analysis of FRP-concrete bond behavior based on a local concrete damage model [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(01):62-65.
- [4] 孙延华, 叶苏荣, 熊光晶, 等. CFRP-混凝土界面黏结-滑移关系试验 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6):959-964.  
SUN Yanhua, YE Su rong, XIONG Guang jin, et al. Experiment on the bond-slip relationship of CFRP to concrete interface [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6):959-964.
- [5] 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 Hui, GAO Yong, XIE Chao, et al. On the influence of parameters on bonding behavior of FRP-concrete interface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4):489-498.
- [6] GODAT A, Labossière P, NEALE K W, et al. Behavior of RC members strengthened in shear with EB FRP: Assessment of models and FE simulation approaches [J]. Computers & Structures, 2012, 92:92-93 (3):269-282.
- [7] 施嘉伟, 朱虹, 吴智深, 等. FRP 片材-混凝土界面应变率效应试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(12):99-107.  
SHI Jia Wei, ZHU Hong, WU Zhishen, et al. Experimental study of the strain rate effect of FRP sheet-concrete interface [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12):99-107.
- [8] LI X Q, CHEN, J F, LU Y. FRP-to-concrete bond-slip behaviour under dynamic loading [C]//In Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Vancouver Canada: CICE 2014 International Institute for FRP in Construction (IIFC), 2014.
- [9] Mostafa A A B, Razaqpur A G. Finite element model for predicting post delamination behaviour in FRP-Retrofitted beams in flexure [J]. Construction & Building Materials, 2017, 131(30):195-204.
- [10] CHEN G M, CHEN J F, TENG J G. On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP [J]. Construction & Building Materials, 2012, 32:13-26.
- [11] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2):161-174.

(编辑 沈 波)