



FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型

芦思羽 陈德 吴昊

DYNAMIC SHEAR SLIP MODEL FOR FRP-CONCRETE INTERFACE

LU Si-yu, CHEN De, WU Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1081>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数值模拟中混凝土类材料应变率效应曲线的惯性效应修正

MODIFICATION OF DIF-STRAIN RATE CURVE OF CONCRETE-LIKE MATERIALS IN NUMERICAL SIMULATION OF SHPB EXPERIMENTS

工程力学. 2018, 35(12): 46-53 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.10.0764>

超高韧性水泥基复合材料动态压缩力学性能的数值模拟研究

NUMERICAL SIMULATION ON DYNAMIC COMPRESSIVE BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH TOUGHNESS CEMENTITIOUS-COMPOSITES

工程力学. 2019, 36(9): 50-59 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.03.0147>

闭孔泡沫金属三维细观模型建模方法

MESOSCOPIC METHODOLOGY FOR THE THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF CLOSED-CELL METALLIC FOAM

工程力学. 2017, 34(8): 212-221 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.02.0098>

基于细观模拟的轻骨料混凝土动态压缩破坏及尺寸效应分析

DYNAMIC COMPRESSIVE FAILURE AND SIZE EFFECT IN LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE BASED ON MESO-SCALE SIMULATION

工程力学. 2020, 37(3): 56-65 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.01.0012>

混凝土材料真实动态强度及率效应机理研究

RESEARCH ON THE ACTUAL DYNAMIC STRENGTH AND THE RATE EFFECT MECHANISMS FOR CONCRETE MATERIALS

工程力学. 2018, 35(6): 58-67 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.02.0101>

砂浆材料SHPB实验及惯性效应的数值模拟研究

SHPB TEST AND NUMERICAL INVESTIGATION ON THE INERTIA EFFECT OF MORTAR MATERIAL

工程力学. 2018, 35(7): 187-193 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0244>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2025)04-0167-12

FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型

芦思羽, 陈 德, 吴 昊

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 与混凝土粘结界面的动态剪切滑移关系是冲击荷载作用下 FRP 外贴加固混凝土结构安全评估与设计的基础。基于 4 组 FRP-混凝土界面动态单剪试验数据和有限元分析软件 LS-DYNA 中 *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE 材料模型, 建立了耦合应变率效应的界面动态剪切滑移模型。进一步基于该模型对另外 3 组动态单剪试验进行了数值模拟, 通过对比界面粘结滑移关系、荷载-位移曲线和 FRP 应变时程, 验证了建立的模型和参数计算方法的适用性。将上述模型应用于 FRP 加固 RC 板和梁的落锤冲击试验的数值模拟分析中, 并与常用的 FRP-混凝土界面接触表征方法 (共节点、tiebreak 和 cohesive) 进行了对比。结果表明: 共节点方法预测的跨中挠度偏小, 而 tiebreak 和 cohesive 接触的预测结果偏大, 该文建立的界面动态剪切滑移模型预测精度最高。

关键词: FRP-混凝土界面; 动态剪切滑移模型; 冲击; 数值模拟; 应变率效应

中图分类号: TU398+.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.12.1081

DYNAMIC SHEAR SLIP MODEL FOR FRP-CONCRETE INTERFACE

LU Si-yu, CHEN De, WU Hao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The dynamic shear-slip relationship of FRP-concrete interface is the basis for safety assessment and design of FRP externally strengthened concrete structures under impact loading. A dynamic interfacial shear slip (DISS) model considering strain rate effect is established based on four sets of dynamic single shear test data on FRP-concrete interface and *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE material model in the finite element analysis software LS-DYNA. Numerical simulations based on DISS model are further conducted for three other sets of single shear tests. The applicability of the established model and methods of parameter calculations are verified through the comparisons of interfacial bond stress-slip relationships, load-displacement curves and FRP strain time-histories. Numerical simulations of the impact tests on FRP strengthened RC slabs and RC beams are conducted, in which the interface is described by DISS model, and the results are compared with the results of commonly used methods for FRP-concrete interface contact (share nodes, tiebreak and cohesive). It shows that the simulated midspan deflection based on share nodes method is smaller than the test result, while the results of tiebreak and cohesive contact method are larger than the test results, and the results based on DISS model have the highest accuracy.

Key words: FRP-concrete interface; dynamic shear slip model; impact; numerical simulation; strain rate effect

混凝土结构在服役期间可能遭受车、船和落石等冲击荷载作用, 纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 因其轻质高强、施工便捷和耐腐蚀等优异性能被广泛应用于混凝土结构的

抗冲击加固改造中^[1-4]。因此, FRP-混凝土界面粘结性能的研究对于冲击荷载作用下 FRP 外贴加固混凝土结构的评估与设计具有重要的研究价值。已有学者在 FRP-混凝土界面的静态粘结滑移性能

收稿日期: 2022-12-18; 修改日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078379)

通信作者: 吴 昊 (1981—), 男, 陕西人, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土材料与结构抗冲击爆炸研究 (E-mail: wuhaocivil@tongji.edu.cn).

作者简介: 芦思羽 (1999—), 女, 四川人, 硕士生, 主要从事结构防灾减灾研究 (E-mail: 2132249@tongji.edu.cn);

陈 德 (1992—), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事结构防灾减灾研究 (E-mail: 1910396@tongji.edu.cn).

方面开展了全面深入的试验^[5-7]和数值仿真^[8-9]研究工作,提出了相应的静态粘结滑移模型^[10-12]。本文主要关注 FRP-混凝土界面的动态剪切性能。

试验研究方面:YUAN 等^[13-17]基于 Instron 高速拉伸机开展了加载速率在 $8.33 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)和玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)与普通和钢纤维增强混凝土界面的动态单剪试验,对应的 FRP 应变率为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 1.7 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$,分析了混凝土强度、钢纤维体积分数和粗骨料粒径等因素对界面动态剪切性能的影响,并拟合得到考虑上述影响因素的界面动态剪切滑移模型。LI 等^[18]基于改进的分离式霍普金森压杆开展了动态单剪试验(滑移率为 $4 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),分析了 CFRP 粘结宽度、长度和混凝土强度对界面动态剪切性能的影响,得出:混凝土强度增大使界面剪切性能的应变率敏感性降低;粘结宽度减小使其承载能力降低,破坏模式由 CFRP 与混凝土剥离转变为 CFRP 断裂。LI 等^[19]基于高速拉伸机开展了加载速率在 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的单剪试验,对应的 FRP 应变率为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 78.56 \text{ s}^{-1}$,结果表明:界面粘结强度、峰值剪应力和峰值滑移量均随应变率的提高而增大,FRP 的有效粘结长度对应变率不敏感。

界面动态剪切滑移模型方面:LI 等^[18]基于 FRP-混凝土界面的动态单剪试验结果和 LU 等^[11]建立的双线性准静态界面剪切滑移模型,通过拟合试验数据,引入界面峰值剪应力和断裂能的动态增强因子(dynamic increasing factor, DIF),建立了界面的动态剪切滑移模型。LI 等^[19]基于开展的动态单剪试验,回归分析得到了适用于应变率为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 90 \text{ s}^{-1}$ 的界面粘结强度、峰值剪应力和峰值滑移量的 DIF 经验公式。李晓琴等^[20]基于系列 FRP-混凝土动态单剪试验的数值模拟结果,引入了界面峰值剪应力和断裂能的 DIF,对 LU 等^[11]提出的准静态双线性界面剪切滑移模型进行了改进,提出了适用于滑移率在 $10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型。LI 等^[21]基于商用有限元软件 LS-DYNA 编写了 FRP-混凝土界面动态粘结滑移模型用户自定义程序,对单剪试验、三点弯曲试验和 FRP 加固钢筋混凝土梁的动态加载试验开展了数值模拟分析和试验对比验证。

数值仿真研究方面:表征 FRP-混凝土界面的方式有共节点^[22]、tiebreak 接触^[23-24]、cohesive 接触^[25]和 cohesive 单元^[26]。YUAN 等^[25]利用 LS-DYNA 建立了 FRP-混凝土界面动态单剪试验的 3D 有限元模型,利用 tiebreak 接触描述界面并得到试验^[17]结果的验证。CAGGIANO 等^[27]采用零厚度 cohesive 单元建立了 FRP-混凝土单剪试件的有限元模型,基于修正的经典过应力粘塑性方法考虑界面粘结性能的应变率效应,并试验验证了加载速率在 $0.007 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \sim 70 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内零厚度 cohesive 单元表征界面的准确性。肖云逸和章子华^[28]利用 ABAQUS 开展了加载速率在 $0.2 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1} \sim 200 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的 FRP-混凝土动态单剪试验的数值模拟,对应的应变率范围为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,界面采用零厚度 cohesive 单元并得到试验^[26]验证。

综上,目前针对高加载速率下 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型和剪切剥离的数值模拟研究工作相对较少,FRP-混凝土界面的数值表征方法尚不统一,且界面动态剪切滑移模型的准确性和适用性有待进一步验证。本文针对 FRP-混凝土界面的动态剪切滑移关系开展理论模型和数值模拟工作。首先基于 4 组 FRP-混凝土动态单剪试验数据和 LS-DYNA 中 *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE 材料模型,建立了耦合应变率效应的界面动态剪切滑移模型;然后,基于上述模型,对另外 3 组 FRP-混凝土动态单剪试验进行了数值模拟,通过对比界面剪切滑移关系、荷载-位移曲线和 FRP 应变时程,检验建立模型和参数计算方法的适用性;最后应用上述模型对 FRP 加固 RC 板和梁的落锤冲击试验进行了数值模拟分析,评估了常用的 FRP-混凝土界面表征方法(共节点、tiebreak 和 cohesive)的适用性。本文工作可为冲击荷载作用下 FRP 外贴加固混凝土结构的评估与设计提供参考。

1 动态剪切滑移模型

本节基于 YUAN 等^[13-15]和 LI 等^[19]开展的 FRP-混凝土界面动态单剪试验,对商用有限元分析程序 ANSYS/LS-DYNA R11 中 *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE(*MAT_240)材料模型参数进行标定,建立了耦合应变率效应的界面动态剪切滑移模型。

1.1 模型建立

ANSYS/LS-DYNA 中可用于描述 FRP-混凝土

界面的材料模型有：*MAT_138、*MAT_184、*MAT_185、*MAT_186、*MAT_240和*MAT_279，其中仅*MAT_240能够考虑应变率效应，其本构模型可表示为三线性和分离关系，由线弹性上升段，平台段以及线性下降段组成，如图1(a)所示。图中： S 和 T 、 E_t 和 E_n 、 δ_{t1} 和 δ_{n1} 、 δ_{t2} 和 δ_{n2} 、 δ_{tf} 和 δ_{nf} 分别为界面的剪切和法向拉伸的强度、刚度、屈服滑移量、失效起始滑移量和失效滑移量。 G_p 和 G_c 分别为平台段覆盖的面积和曲线包裹的总面积，即界面变形塑性阶段的断裂能和界面总断裂能。该模型可退化为双线性模型，即： $\delta_{t1} = \delta_{t2}$ 和 $\delta_{n1} = \delta_{n2}$ ，分别代表界面的剪切和拉伸峰值滑移量，如图1(b)所示。

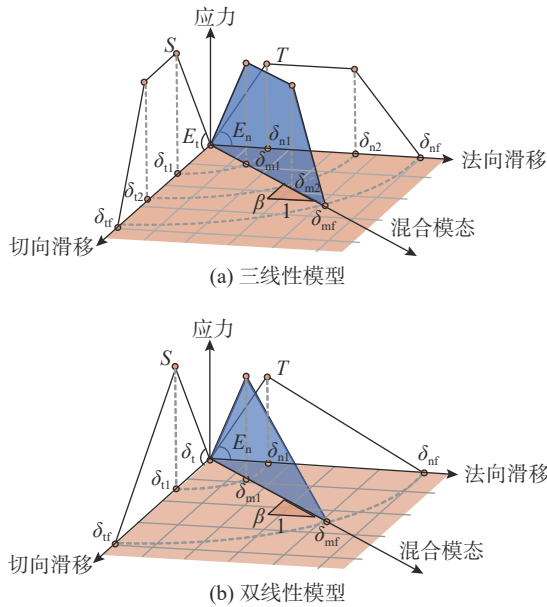


图1 界面牵引-分离关系

Fig. 1 Traction-separation relationships of the interface

*MAT_240材料模型通过考虑界面峰值剪应力和断裂能的应变率效应来表征动态剪切滑移关系，其耦合应变率效应的界面峰值剪应力 S 和界面断裂能 G_{2C} 表达式分别为：

$$S = S_0 + S_1 \max(0, \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)) \quad (1)$$

$$G_{2C} = G_{2C_0} + (G_{2C_INF} - G_{2C_0}) \exp(-\dot{\epsilon}_G/\dot{\epsilon}) \quad (2)$$

式中： $\dot{\epsilon}$ 为应变率； S 和 S_0 分别为当前和准静态界面峰值剪应力； $\dot{\epsilon}_s$ 为界面峰值剪应力的转换应变率； G_{2C} 和 G_{2C_0} 分别为当前和准静态界面断裂能； G_{2C_INF} 为界面断裂能的上限值； S_1 和 $\dot{\epsilon}_G$ 为拟合参数。其中， S_0 和 G_{2C_0} 由FRP-混凝土界面准静态剪切试验确定， S_1 、 $\dot{\epsilon}_s$ 、 G_{2C_INF} 和 $\dot{\epsilon}_G$ 通过试验数据拟合确定。以 S_0 和 G_{2C_0} 为基准对式(1)和式(2)进行归一化处理，为：

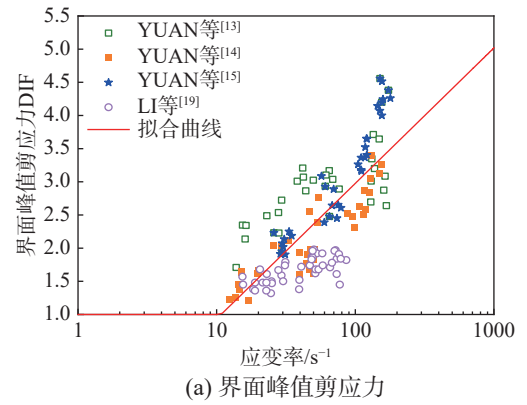
$$DIF_S = \begin{cases} 1, & \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_s \\ 1 + (S_1/S_0) \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s), & \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_s \end{cases} \quad (3)$$

$$DIF_G = 1 + (G_{2C_INF}/G_{2C_0} - 1) \exp(-\dot{\epsilon}_G/\dot{\epsilon}) \quad (4)$$

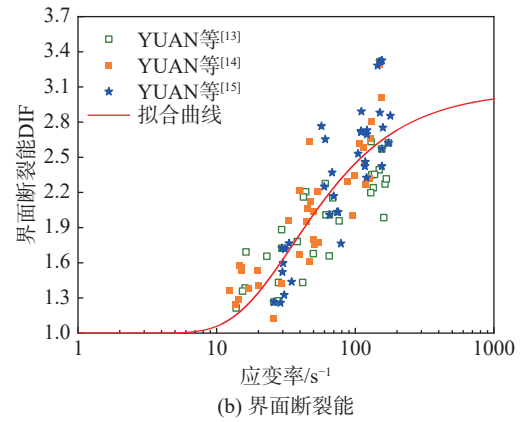
式中， DIF_S 和 DIF_G 分别为界面峰值剪应力和断裂能的动态增强因子，即分别为动态和准静态界面峰值剪应力之比，以及动态和准静态界面断裂能之比。

1.2 模型参数确定

基于YUAN等^[13-15]和LI等^[19]开展的FRP-混凝土界面动态单剪试验，对式(3)和式(4)进行拟合，拟合结果如图2、式(5)和式(6)所示。



(a) 界面峰值剪应力



(b) 界面断裂能

图2 界面峰值剪应力和断裂能的DIF

Fig. 2 DIF of interfacial bonding strength and fracture energy

考虑应变率效应的界面峰值剪应力DIF计算公式：

$$DIF_S = \begin{cases} 1, & \dot{\epsilon} \leq 10.768 \text{ s}^{-1} \\ 1 + (S_1/S_0) \ln(\dot{\epsilon}/10.768), & \dot{\epsilon} > 10.768 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

考虑应变率效应的界面断裂能DIF计算公式：

$$DIF_G = 1 + (G_{2C_INF}/G_{2C_0} - 1) \exp(-35.777/\dot{\epsilon}), \quad (6)$$

式中， S_0 和 G_{2C_0} 直接采用准静态相关试验的数据，当试验数据缺乏时可按照LU等^[11]双线性模型确定，如下式所示：

$$S = \begin{cases} S_0(s/s_0), & s \leq s_0 \\ S_0(s_f - s)/(s_f - s_0), & s_0 < s \leq s_f \\ 0, & s > s_f \end{cases} \quad (7)$$

$$S_0 = 1.5\beta_w f_t, s_0 = 0.0195\beta_w f_t, s_f = 2G_{2C_0}/S_0, \\ \beta_w = \sqrt{(2 - b_f/b_c)/(1 + b_f/b_c)}, \\ G_{2C_0} = 0.308\beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad (8)$$

式中: S 和 S_0 分别为界面当前剪应力和峰值剪应力; s 、 s_0 和 s_f 分别为界面当前滑移量、峰值滑移量和界面失效滑移量; f_t 为混凝土抗拉强度; β_w 为粘结宽度系数; G_{2C_0} 为界面断裂能; b_f 和 b_c 分别为 FRP 和混凝土试件的宽度。

2 模型验证

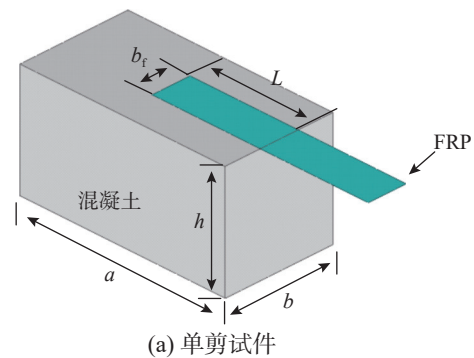
本节进一步基于 LS-DYNA 对 LI 等^[18] 和 YUAN 等^[16-17] 开展的另外 3 组 FRP-混凝土动态单剪试验开展数值模拟, 通过对比试验和模拟预测结果, 验证建立的 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型的适用性。

2.1 试验简介

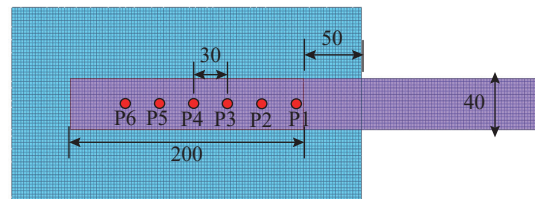
图 3 为 LI 等^[18] 和 YUAN 等^[16-17] 的动态单剪试件示意图, a 、 b 和 h 分别表示混凝土试块的长、宽和高, b_f 和 L 为 FRP 的粘结宽度和长度, 具体试验参数见表 1 所示。试验^[16-17] 中沿 FRP 表面中心线等间距粘贴六个应变片 (P1~P6, 间距为 30 mm), P1 位于粘结和未粘结区域的边界, P6 位于 FRP 自由端附近, 如图 3(b) 所示。

2.2 有限元模型

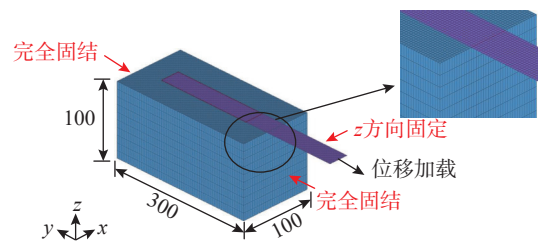
利用 LS-DYNA 建立了表 1 试验的 3D 有限元模型, YUAN 等^[16-17] 试验的有限元模型如图 3(b)~图 3(c) 所示。混凝土采用 *MAT_272 (Riedel-Hiermaier-Thoma 模型, 即 RHT 模型)^[29], 该模型嵌入了与压力相关的弹性极限面、失效面方程和残余强度面方程, 主要用于描述混凝土在冲击荷载作用下初始屈服强度、失效强度及残余强度的变化规律。FRP 采用 *MAT_54 材料模型, 具体取值见表 2。以 LI 等^[18] 的单剪试件编号为例, 32 MPa-0.8 mm·s⁻¹ 表示试件的混凝土强度为 32 MPa, 加载速率为 0.8 mm·s⁻¹。混凝土采用 8 节点缩减积分实体单元, FRP 采用 4 节点壳单元, 界面采用 8 节点零厚度 cohesive 单元, 界面模型参数取值如表 3 所示。对混凝土的前后表面施加固定边界条件, 对 CFRP 面外 z 方向施加位移约束, 采用位移加载方法对 CFRP 加载, 如图 3(c) 所示。



(a) 单剪试件



(b) 有限元模型俯视图



(c) 有限元模型轴测图

图 3 单剪试件示意图和有限元模型 /mm

Fig. 3 Diagram of single shear specimen and finite element model

表 1 试验参数

Table 1 Parameters of tests

试验	长×宽×高 $a \times b \times h$ mm	FRP 粘贴		混凝土 单轴抗压 强度/MPa	加载速率/ (mm·s ⁻¹)
		宽度 b_f mm	长度 L mm		
LI 等 ^[18]	190×100×100	33	150	32	0.8/8/80
YUAN 等 ^[16]	300×150×150	40	200	22.40/30.14/42.34	1000/8000
YUAN 等 ^[17]	300×150×150	40	200	30.14	1000/3000/5000/8000

表 2 单剪试验中 FRPs 材料参数

Table 2 Material parameters of FRPs in single shear tests

试验	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	失效 应变	厚度/ mm
LI 等 ^[18]	1600	0.1	750	82.7	0.009	0.50
YUAN 等 ^[16]	1600	0.1	1333	72.0	0.019	0.12
YUAN 等 ^[17]	1600	0.1	1333	73.0	0.0188	0.12

以单剪试件 32 MPa-0.8 mm·s⁻¹ 为例, 对数值模拟中单元尺寸进行敏感性分析。模型各部分 (混凝土、FRP 和粘结界面) 的单元尺寸相同, 分别为 2 mm、2.5 mm、3 mm、4 mm、5 mm、7 mm 和 10 mm, 计算得到的荷载-位移曲线如图 4 所示。

表 3 单剪试验中界面模型参数

Table 3 Parameters of the interfacial model in single shear tests

试验	试件编号	准静态界面断裂能 $G_{2C0}/(N \cdot mm^{-1})$	界面断裂能上限值 $G_{2C \text{ INF}}/(N \cdot mm^{-1})$	拟合参数 $\dot{\epsilon}_G/s^{-1}$	准静态界面峰值 剪应力 S_0/MPa	拟合参数 S_1/MPa	界面峰值剪应力的 转换应变率 $\dot{\epsilon}_S/s^{-1}$	塑性断裂能 比值FG2
LI等 ^[18]	32 MPa-0.8/80 mm·s ⁻¹	0.750	2.303	35.777	5.097	4.520	10.786	0.001
	22 MPa-1/8 m·s ⁻¹	0.570	1.750	35.777	1.765	1.565	10.768	0.001
YUAN等 ^[16]	30 MPa-1/8 m·s ⁻¹	0.945	2.901	35.777	3.130	2.776	10.768	0.001
	42 MPa-1/8 m·s ⁻¹	1.050	3.224	35.777	4.830	4.283	10.768	0.001
YUAN等 ^[17]	30 MPa-1/3/5/8 m·s ⁻¹	0.795	2.441	35.777	2.155	1.911	10.768	0.001

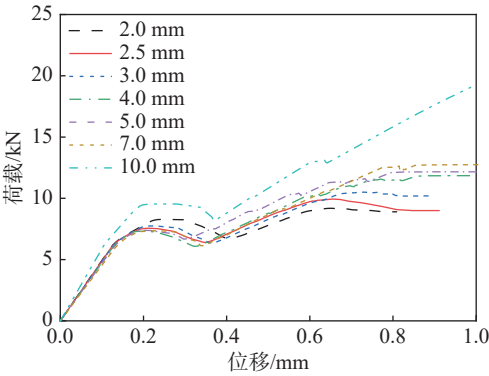


图 4 网格敏感性分析
Fig. 4 Mesh sensitivity analyses

结果表明：随着网格尺寸的减小，第一个峰值荷载趋近于 7.5 kN，当网格尺寸小于 3 mm 后结果趋于收敛。综合考虑计算效率和精度，采用 2.5 mm 作为模型粘结区域混凝土、CFRP 和界面单元的网格尺寸，混凝土沿 z 方向网格尺寸为 10 mm，如图 3(b) 所示。

2.3 结果对比

图 5(a)~图 5(c) 分别对比了 LI 等^[18] 和 YUAN 等^[17] 的试验荷载-位移曲线和数值模拟结果，其中荷载和位移均基于 FRP 应变数据计算得出。可以看出：试验和模拟的荷载-位移曲线形状基本相似，初始斜率吻合较好，模拟预测的极限荷载与试验结果相比，误差均低于 6.29%。从图 5(c) 中可以看出 30 MPa-3 m·s⁻¹ 和 30 MPa-8 m·s⁻¹ 试验和数值模拟曲线有明显差异。主要原因在于试验中 FRP 剥离通常发生在混凝土层中，混凝土材料的非均质性导致剥离发生位置随机，进一步导致强动载下剥离过程中 FRP 的应变抖动；在数值模拟中，通常假设剥离破坏发生在粘结界面中 (MAT_240)，无法反映出上述应变的抖动现象。

图 6(a)~图 6(c) 分别对比了试验与数值模拟得到的界面剪应力-滑移曲线。可以看出：曲线形状基本相似，可分为线性上升段和软化段，且上升段斜率吻合较好。模拟得到的界面峰值剪应力与 LI

等^[18] 试验结果相比，最大偏差为 10.9%；与 YUAN 等^[16] 试验结果相比，偏差均不超过 3.90%。此外，模拟得到的界面断裂能 (曲线包围的面积) 与上述

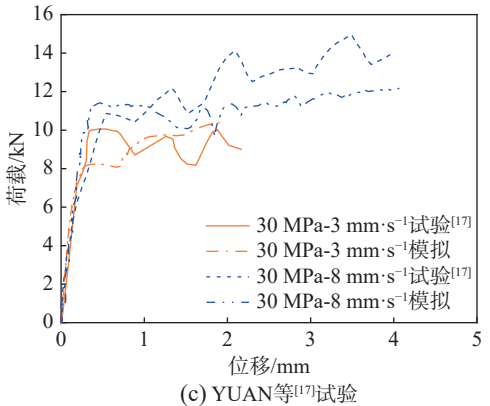
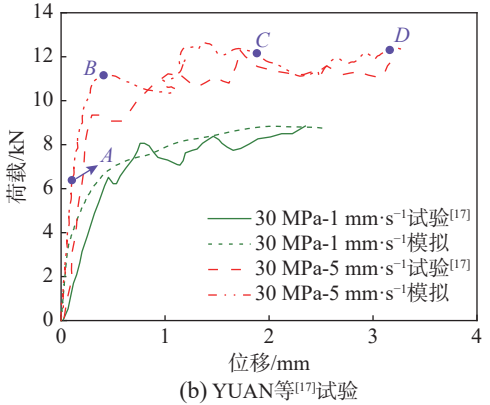
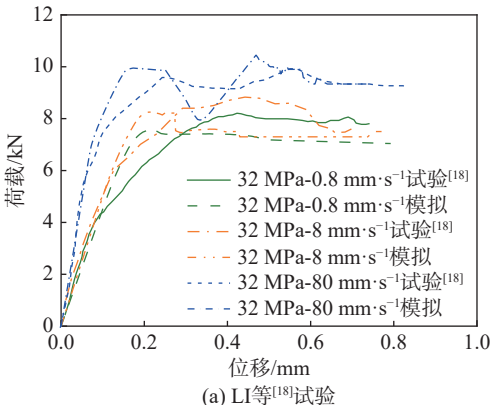


图 5 试验与模拟的荷载-位移曲线对比
Fig. 5 Comparisons of test and simulated load-displacement curves

两组试验结果的最大误差分别为 5.12% 和 4.9%。

以 YUAN 等^[17] 试验中 $30 \text{ MPa} \cdot 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 试件为例, 图 7 给出了不同加载时刻的界面损伤和 FRP 应变云图, 其中 A~D 各时刻对应的荷载-位移状态已标注在图 5(b) 中。可以看出, 加载到 A 时刻, 即约 50% 极限荷载时, 界面单元未出现损伤, FRP 未发生剥离, 其应变集中于加载端; 到 B 时刻后, 即达到约 88% 的极限荷载后, FRP 剥离从加载端向自由端扩展, 界面单元损伤和 FRP 应变也由加载端向自由端发展; 从 B~C 时刻, 荷载缓慢增加到极限荷载, 界面单元损伤和 FRP 剥离扩

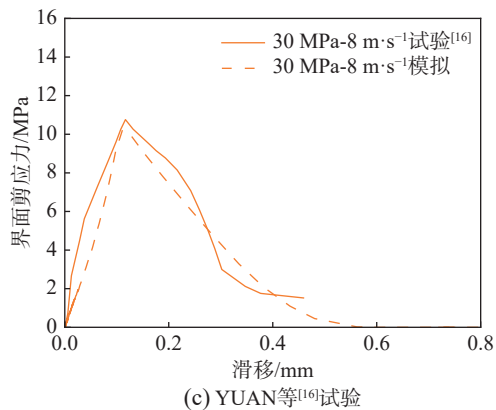
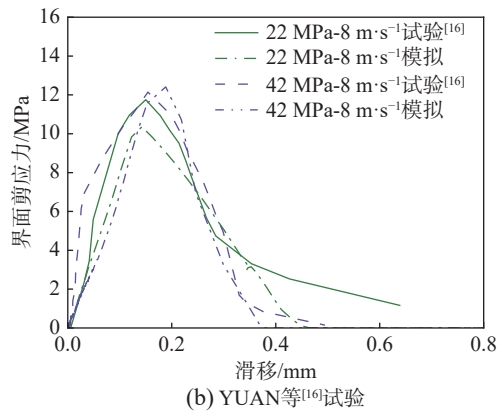
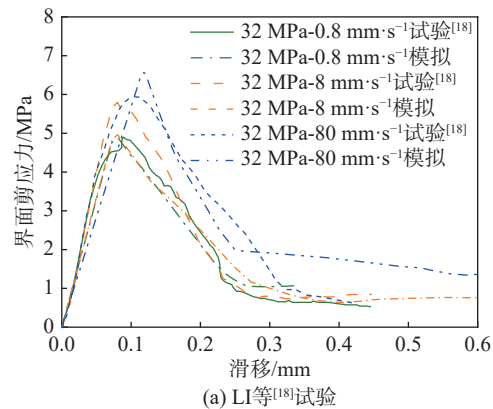


图 6 试验与模拟界面粘结剪应力-滑移曲线对比
Fig. 6 Comparisons of test and simulated interfacial bond stress-slip curves

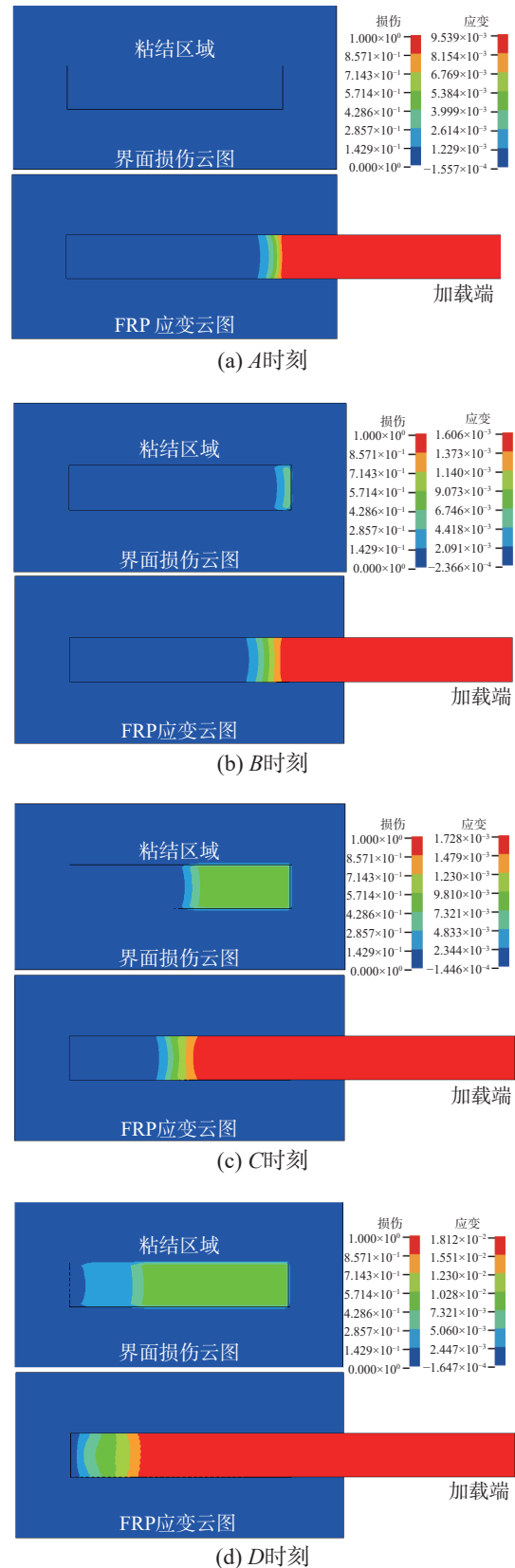


图 7 界面损伤和 FRP 应变云图

展到粘结区域的中间位置; 继续加载到 D 时刻, 荷载基本保持恒定, 界面单元完全损伤, FRP 与混凝土完全剥离。

图8对比了FRP应变时程的两组试验数据^[16-17]和数值模拟结果。可以看出,试验与模拟得到的FRP应变时程曲线吻合较好,极限FRP应变值的最大误差为12.02%。

从图5、图6和图8的对比可以看出,数值仿真结果与FRP-混凝土动态单剪试验数据吻合较好,从而验证了本文建立的耦合应变率效应的界面动态剪切滑移模型的适用性。

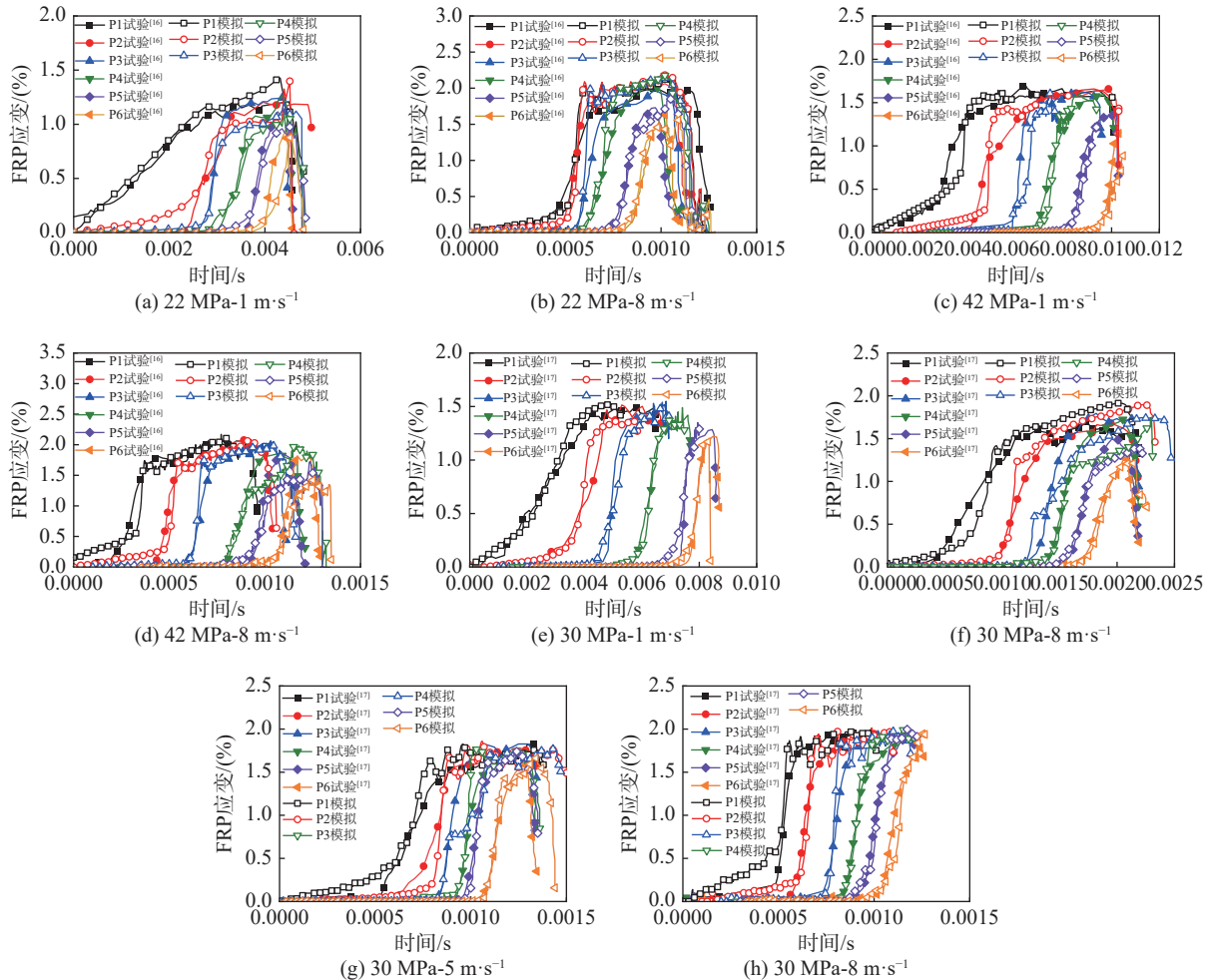


图8 试验与模拟FRP应变时程曲线对比

Fig. 8 Comparisons of test and simulated FRP strain-time histories

3 模型应用

本节基于提出的界面动态剪切滑移模型,以及常用的FRP-混凝土界面表征方法(共节点、tiebreak接触和cohesive接触),对FRP布加固RC板^[30]和梁^[31]的落锤冲击试验进行了数值模拟分析,进一步验证提出的界面动态剪切滑移模型描述FRP加固混凝土构件界面的适用性,并对比了四种不同的界面表征方法的计算精度和效率。

3.1 FRP-RC板落锤冲击试验^[30]

YOO等^[30]试验研究了FRP布加固四边简支RC双向板的抗低速冲击性能,本文选取NC-NF(未加固RC板)和NC-F(双面粘贴FRP布加固的RC

板)试验进行数值分析。RC板的长度、宽度和厚度分别为1600 mm、1600 mm和140 mm,采用双层双向配筋,钢筋直径均为13 mm,钢筋的间距分别为240 mm和210 mm,如图9(a)所示。混凝土抗压强度为40 MPa,钢筋的屈服强度为400 MPa,CFRP的抗拉强度为4900 MPa,弹性模量为230 GPa,极限应变为2.1%,厚度为0.34 mm。模型所有部件的网格尺寸均为10 mm,混凝土采用8节点缩减积分实体单元,FRP采用4节点壳单元,界面采用8节点cohesive单元,钢筋采用梁单元,NC-F试件的有限元模型如图9(b)所示。四边约束支座简化为刚体,初始边界条件为完全固定。

基于LS-DYNA建立了不同FRP-混凝土界面

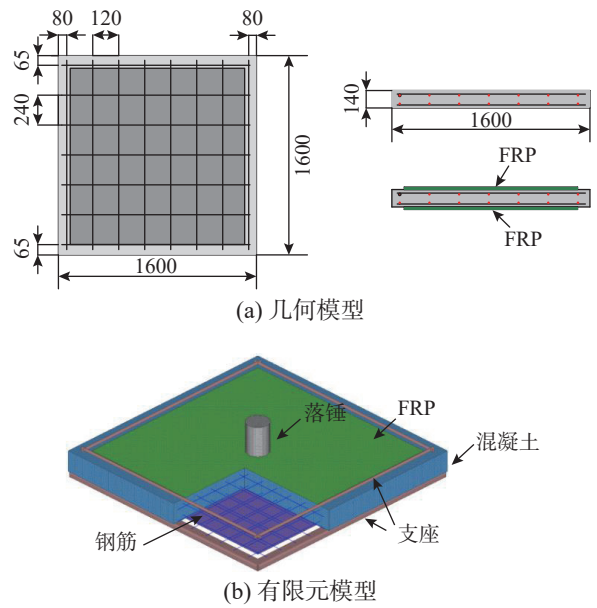


图 9 NC-F 模型 /mm
Fig. 9 NC-F model

表征方法的四种有限元模型，分别为：考虑界面动态剪切滑移关系的 MAT_240 模型、共节点模型、采用 *CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_

TO_SURFACE 接触的 tiebreak 接触模型和采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK OPTION=9 接触的 cohesive 接触模型。混凝土均采用 RHT 模型，钢筋采用 *MAT_3 材料模型，失效应变为 0.2，CFRP 采用 MAT_54 材料模型，具体参数见表 4。MAT_240 模型、tiebreak 接触模型和 cohesive 接触模型的具体参数取值见表 5，其中 tiebreak 接触模型仅考虑极限剪切应力，而 cohesive 接触模型参数与 MAT_240 模型参数基本相同，其区别仅在于不考虑应变率效应，“—”表示模型无需该参数。需要指出的是，考虑到 FRP-混凝土界面法向拉伸数据缺乏且试验中均未观察到法向剥离的现象，有限元模型中未考虑 FRP-混凝土界面的法向失效。

表 4 RC 板落锤冲击试验中 FRP 材料参数
Table 4 Material parameters of FRP of drop weight impact tests on RC slabs

密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	失效应变	厚度/mm
1600	0.1	4900	230	0.021	0.34

表 5 RC 板落锤冲击试验中界面模型参数
Table 5 Parameters of the interfacial model of drop weight impact tests on RC slabs

模型类别	准静态界面断裂能 $G_{2C,0}/(N\cdot mm^{-1})$	界面断裂能上限值 $G_{2C,INF}/(N\cdot mm^{-1})$	拟合参数 $\dot{\epsilon}_G/s^{-1}$	准静态界面峰值 剪应力 S_0/MPa	拟合参数 S_1/MPa	界面峰值剪应力的 转换应变率 $\dot{\epsilon}_S/s^{-1}$	塑性断裂能 比值FG2
MAT_240	0.340	1.043	35.777	3.929	3.484	10.768	0.001
tiebreak接触模型	—	—	—	3.929	—	—	—
cohesive接触模型	0.340	—	—	3.929	—	—	—

图 10(a) 给出了试验和模拟的 NC-NF 板底面损伤结果，试验中板底出现大量由中心向边缘扩散的辐射状裂纹，且在中心区域存在环向裂纹，板底中心损伤较为严重；从数值模拟损伤云图可以看出，板底部中心损伤严重，且存在大量由板中心向边缘扩展的辐射状损伤条带，破坏模式与试验现象较为吻合。其中数值模拟结果未出现延伸至角部的斜向裂纹，其主要原因在于数值模拟中对试验边界条件进行了一定程度的简化。图 10(b) 进一步给出了试验和模拟的 NC-NF 板底中心挠度结果，试验和模拟得的板底最大挠度分别为 23.41 mm 和 20.67 mm，相对误差为 11.7%；残余挠度分别为 7.75 mm 和 8.24 mm，相对误差为 6.32%，模拟与试验结果吻合较好，验证了未加固 RC 板有限元模型的准确性。

基于验证的未加固 RC 板有限元模型，进一步开展 FRP 加固 RC 板的落锤冲击试验的数值仿真

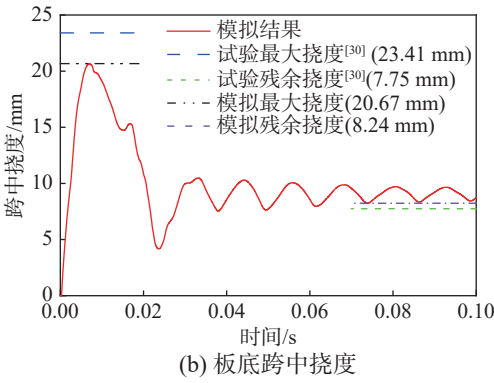
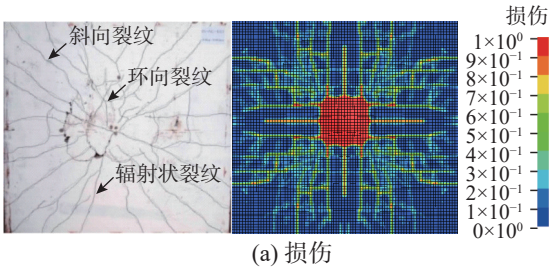


图 10 NC-NF 试验与模拟结果对比
Fig. 10 Comparisons of test and simulation results for NC-NF

分析。图 11(a) 为 NC-F 板的试验跨中挠度和四种模型模拟结果的对比, 图 11(b)~图 11(e) 分别为四种模型模拟和试验的支座反力时程曲线对比图。由图 11(a) 对比可以看出, MAT_240 模型的最大挠度和残余挠度与试验结果吻合较好, 最大挠度偏差仅为 2.72%, 残余挠度偏差为 14.95%; 共节点模型由于假定 FRP 与混凝土之间为完美粘结, 高估了二者之间的粘结强度, 导致最大挠度和残余挠度相较于试验结果偏小, 误差分别达 33.49% 和 48.45%; 由于 tiebreak 接触和 cohesive 接触模型都不能考虑界面动态力学性能, 所得最大挠度和残余挠度均大于 MAT_240 模型结果, 其最大挠

度与试验结果误差分别为 2.66% 和 4.34%, 相应残余挠度误差分别为 26.88% 和 34.69%。图 11(b)~图 11(e) 可以看出, 相较于其他三种界面模型, MAT_240 模型得到的支座反力时程曲线与试验吻合最好, 其第一个峰值反力相对误差为 13.79%。相应的共节点、tiebreak 接触和 cohesive 接触模型的支座反力峰值误差分别为 36.05%、5.84% 和 7.19%。tiebreak 和 cohesive 接触模型得到的接触力抖动更明显, 其主要原因可能是接触的强非线性和模型的不连续性。综合对比最大挠度、残余挠度和支座反力等, MAT_240 模型结果与试验吻合最好。

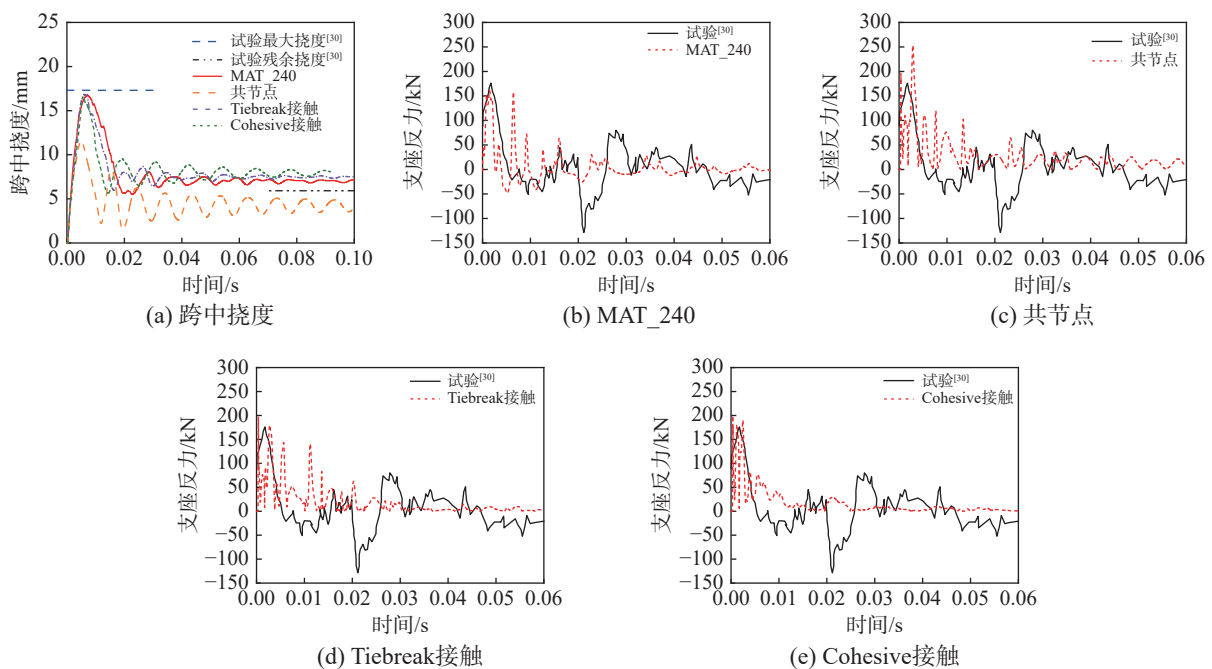


图 11 NC-F 试验与模拟结果对比

Fig. 11 Comparisons of test and simulation results for NC-F

此外, 基于 CPU 型号为 Intel Core i7-8700@3.2 GHz 的计算平台, MAT_240、共节点、tiebreak 接触和 cohesive 接触模型的计算时长分别为 55 min、42 min、74 min 和 97 min, MAT_240 模型的计算效率略低于共节点模型, 高于 tiebreak 接触和 cohesive 接触模型。进一步需要指出的是, tiebreak 接触算法不能考虑接触界面的损伤软化, 而 cohesive 接触算法考虑了接触界面的损伤软化, 因此前者计算效率高于后者。

3.2 FRP-RC 梁落锤冲击试验^[31]

KISHI 等^[31]对 FRP 布加固的 RC 梁开展了一系列落锤低速冲击试验。选取 NI-H2.5(未加固的 RC 梁, 落锤冲击高度 2.5 m) 和 CI-H2、CI-H2.5、

CI-H3(梁底部粘贴 CFRP 布, 落锤冲击高度分别为 2 m、2.5 m 和 3 m) 试验进行数值模拟。图 12(a)~图 12(b) 分别给出了 CI-H 试件的几何模型和有限元模型。梁的净跨度为 3400 mm, 宽 200 mm, 高 250 mm, 梁上部和下部分别配置两根直径为 19 mm 的纵筋, 箍筋直径为 10 mm 间距为 100 mm。NI-H2.5 和 CI-H 试件的混凝土抗压强度分别为 32 MPa 和 33 MPa, CFRP 抗拉强度为 3400 MPa, 弹性模量为 245 GPa, 极限应变为 1.39%, 厚度为 0.33 mm, NI-H2.5 和 CI-H 模型中钢筋的屈服强度分别取 382 MPa 和 403 MPa, 失效应变均为 0.2。混凝土、钢筋和 CFRP 材料模型和网格尺寸与 4.1 节相同, 模型和界面参数分别见表 6 和表 7 所示。

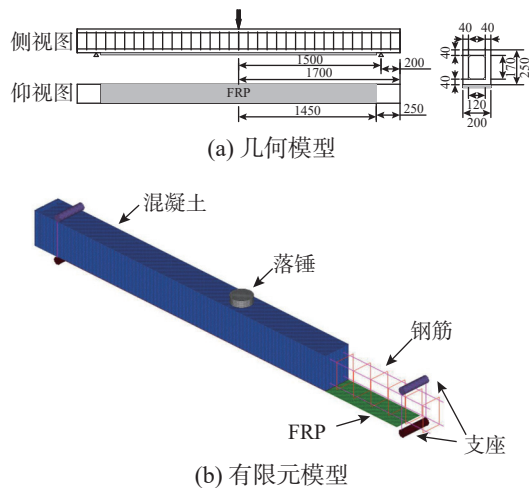


图 12 CI-H 模型 /mm
Fig. 12 CI-H model

图 13(a) 给出了试验和模拟的 NI-H2.5 梁损伤结果，试验中梁出现跨中竖向弯曲裂缝和剪切斜

裂缝，支座附近出现从梁上部向下部扩展的竖向裂缝；数值模拟的梁跨中损伤明显，由上向下部发展的裂纹分布于梁 1/4 跨处，可以看出模拟中板底部损伤与试验结果吻合较好。图 13(b) 给出了 NI-H2.5 梁的试验和数值模拟跨中挠度时程，可以看出，试验和模拟得到的最大挠度分别为 85.6 mm 和 80.5 mm，误差为 5.96%；振动周期分别为 46.8 s 和 48.8 s，相对误差为 4.27%，数值模拟结果与试验结果吻合较好，验证了未加固 RC 梁有限元模型的准确性。

表 6 RC 梁落锤冲击试验中 FRP 材料参数
Table 6 Material parameters of FRP of drop weight impact tests on RC beams

密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	失效应变	厚度/mm
1600	0.1	3400	245	0.0139	0.33

表 7 RC 梁落锤冲击试验中界面模型参数
Table 7 Parameters of the interfacial model of drop weight impact tests on RC beams

模型类别	准静态界面断裂能 $G_{2C} \text{ } \vartheta /(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	界面断裂能上限值 $G_{2C} \text{ }_{INF} /(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	拟合参数 $\dot{\epsilon}_G / \text{s}^{-1}$	准静态界面峰值 剪应力 S_0 / MPa	拟合参数 S_1 / MPa	界面峰值剪应力的 转换应变率 $\dot{\epsilon}_S / \text{s}^{-1}$	塑性断裂能 比值 FG2
MAT_240	0.267	0.819	35.777	3.180	3.484	10.768	0.001
tiebreak 接触模型	—	—	—	3.180	—	—	—
cohesive 接触模型	0.267	—	—	3.180	—	—	—

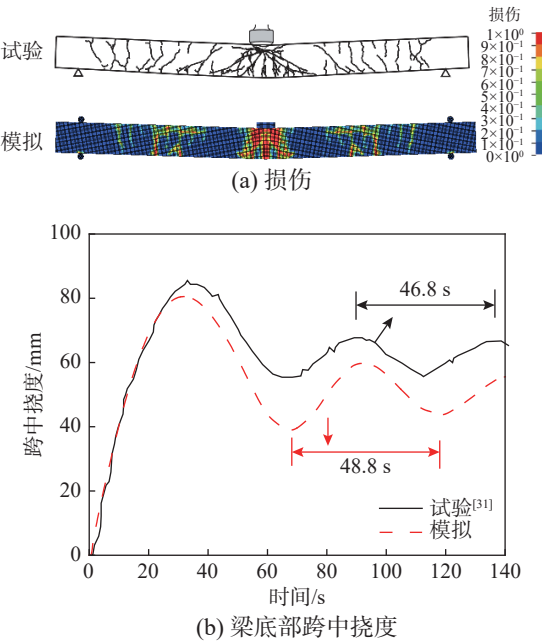


图 13 NI-H2.5 试验与模拟结果对比
Fig. 13 Comparisons of test and simulation results for NI-H2.5

进一步开展 FRP 加固 RC 梁的落锤冲击试验的数值仿真分析。图 14(a)~图 14(c) 分别为三种冲击速度下 CI-H 梁的试验和模拟跨中挠度对比图，图 14(d)~图 14(f) 对比了相应的冲击力时程。以

CI-H2.5 为例，MAT_240 模型的最大挠度误差为 2.95%，冲击力峰值误差为 10.12%；共节点模型同样由于完美粘结的假定高估了二者之间的粘结强度，导致最大挠度和残余挠度较试验结果偏小，最大挠度和冲击力峰值误差分别达 2.07% 和 10.98%。此外，由于 tiebreak 接触和 cohesive 接触模型均不能考虑界面力学性能的应变率增强效应，预测的最大挠度和残余挠度较试验结果偏大，其最大挠度误差分别为 3.58% 和 4.96%，冲击力峰值误差分别达 8.04% 和 10.51%。从图 14(a)~图 14(c) 中可进一步得出，梁挠度时程曲线的初始斜率基本相同，表明采用不同界面模型对梁抗弯刚度的影响不大。挠度产生偏差的主要原因为不同界面模型采用的剪切滑移关系不同。通过上述对比进一步表明建立的 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型适用于 FRP 加固 RC 梁的抗冲击数值模拟分析。此外，基于同样的计算平台，以 CI-H2 为例，上述 MAT_240、共节点、tiebreak 接触和 cohesive 接触模型的计算时长分别为 238 min、234 min、255 min 和 325 min，得出 MAT_240 模型的计算效率略低于共节点模型，高于 tiebreak 接触和 cohesive 接触模型。

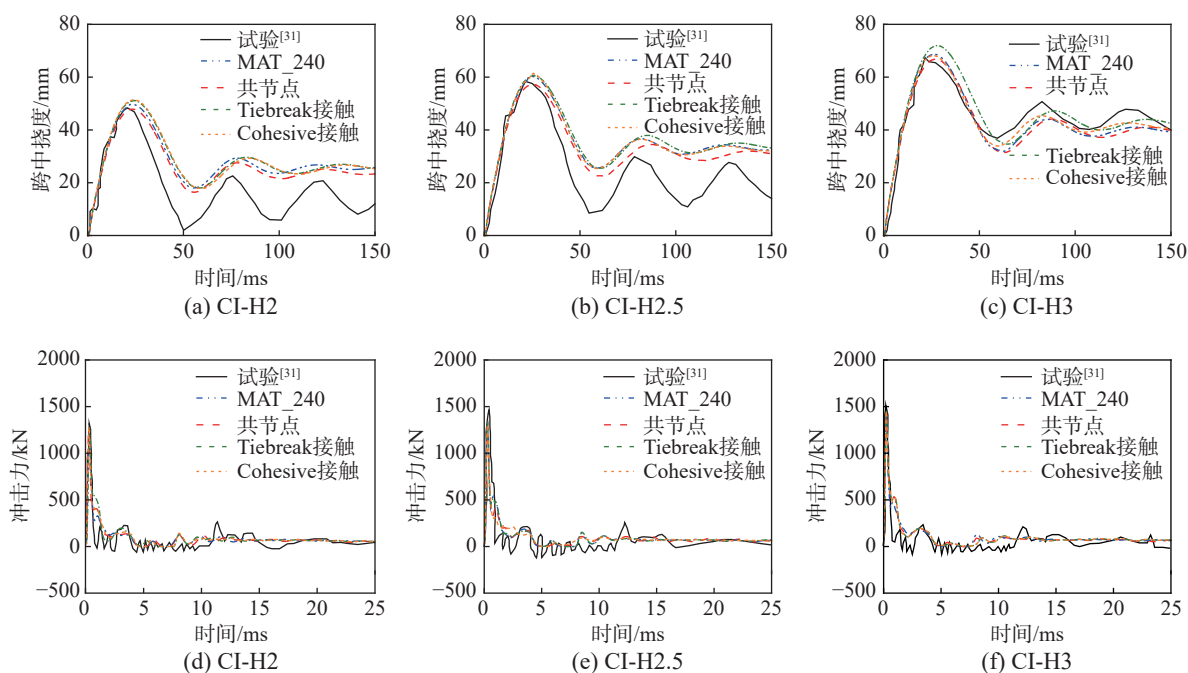


图 14 CI-H 系列试验模拟与试验结果对比

Fig. 14 Comparisons of simulation and test results of CI-H tests

4 结论

针对 FRP-混凝土界面的动态剪切滑移关系, 本文开展了理论分析和数值仿真工作, 主要工作和结论如下:

(1) 通过对 FRP-混凝土动态剪切试验数据进行分析, 基于 *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE_ELASTOPLASTIC_RATE 材料模型, 建立了 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型, 给出了应变率效应参数的计算方法。

(2) 基于建立的界面动态剪切滑移模型, 对 FRP-混凝土动态单剪试验进行了数值模拟, 通过对比界面粘结滑移关系、荷载-位移曲线和 FRP 应变时程曲线, 验证了建立的 FRP-混凝土界面动态剪切滑移模型、参数计算和数值模拟方法的适用性。

(3) 进一步开展了 FRP 加固 RC 板和梁落锤冲击试验的数值模拟, 与常用的 FRP-混凝土界面表征方法 (共节点、tiebreak 接触和 cohesive 接触) 进行了对比。结果表明: 共节点建模方法预测的板和梁跨中挠度偏小; tiebreak 和 cohesive 接触未考虑界面的应变率效应, 跨中挠度偏大。提出的界面动态剪切滑移模型结果与试验数据吻合较好, 且计算效率与共节点模型相比无明显降低。

参考文献:

[1] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯, 等. FRP加固混凝土结构[M].

李荣, 滕锦光, 顾磊, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 266—268.

TENG Jinguang, CHEN Jianfei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. Translated by LI Rong, TENG Jinguang, GU Lei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 266—268. (in Chinese)

[2] 董坤, 郝建文, 李鹏, 等. 环境温差下FRP-混凝土界面粘结行为分析[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 117—126.

DONG Kun, HAO Jianwen, LI Peng, et al. Studies on the bond performance of FRP-to-concrete interfaces under environmental temperature difference [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 117—126. (in Chinese)

[3] 张雨笛, 程小卫, 李易, 等. FRP布加固混凝土框架结构抗连续倒塌的精细有限元分析[J]. 工程力学, 2022, 39(12): 151—164.

ZHANG Yudi, CHENG Xiaowei, LI Yi, et al. A detailed numerical analysis for the progressive collapse of concrete frame substructures strengthened with FRP strips [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(12): 151—164. (in Chinese)

[4] 张书颖, 陈适之, 韩万水, 等. 基于集成学习的FRP加固混凝土梁抗弯承载力预测研究[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 245—256.

ZHANG Shuying, CHEN Shizhi, HAN Wanshui, et al. Study on prediction of FRP strengthened reinforced concrete beam's moment bearing capacity based on ensemble learning algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(8): 245—256. (in Chinese)

[5] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.

LU Xinzhen. Studies on FRP-concrete interface [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)
- [7] SHI J W, CAO W H, WU Z S. Effect of adhesive properties on the bond behaviour of externally bonded FRP-to-concrete joints [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 177: 107365.
- [8] LU X Z, YE L P, TENG J G, et al. Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(4): 564 — 575.
- [9] 吴业飞, 陈伟球. 基于内聚力模型的FRP-混凝土粘结强度分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(7): 113 — 119.
WU Yefei, CHEN Weiqiu. Cohesive zone model based analysis of bond strength between FRP and concrete [J]. *Engineering Structures*, 2010, 27(7): 113 — 119. (in Chinese)
- [10] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(7): 784 — 791.
- [11] 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.
- [12] KO H, MATTHYS S, PALMIERI A, et al. Development of a simplified bond stress-slip model for bonded FRP-concrete interfaces [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 142 — 157.
- [13] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Strain rate effect on interfacial bond behaviour between BFRP sheets and steel fibre reinforced concrete [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 174: 107032.
- [14] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Interfacial bond behaviour between hybrid carbon/basalt fibre composites and concrete under dynamic loading [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 99: 102569.
- [15] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Effect of aggregate size on the dynamic interfacial bond behaviour between basalt fiber reinforced polymer sheets and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116584.
- [16] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Influence of concrete strength on dynamic interfacial fracture behaviour between fibre reinforced polymer sheets and concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 229: 106934.
- [17] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Dynamic interfacial bond behaviour between basalt fiber reinforced polymer sheets and concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 202: 587 — 604.
- [18] LI G, TAN K H, FUNG T C. Experimental study on CFRP-concrete dynamic debonding behavior [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110055.
- [19] LI Z X, ZHANG X J, SHI Y C. Experimental study on the dynamic bond behavior between CFRP and concrete under different slip rates [J]. *Engineering Structures*, 2020, 216: 110788.
- [20] 李晓琴, 陈建飞, 陆勇. 快速荷载下的FRP-混凝土界面粘结滑移模型[C]//第九届全国建设工程FRP应用学术交流会议论文集. 重庆: 重庆市山区桥梁与隧道工程重点实验室省部共建国家重点实验室培育基地, 2015: 179 — 182.
- LI Xiaoqin, CHEN Jianfei, LU Yong. A FRP-concrete bond slip model under dynamic load [C]// Proceedings of the 7th National Construction Engineering Application of FRP Academic Exchange. Chongqing, 2015: 179 — 182. (in Chinese)
- [21] LI G, TAN K H, FUNG T C, et al. A coupled dynamic cohesive zone model for FRP-concrete mixed-mode separation [J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113872.
- [22] 叶锋. FRP-混凝土粘结性能的有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
YE Feng. Finite element analysis on bond capability of FRP-concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [23] KIM H J, YI N H, KIM S B, et al. Debonding failure analysis of FRP-retrofitted concrete panel under blast loading [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2011, 38(4): 479 — 501.
- [24] SOLTANI H, KHALOO A, SADRAIE H. Dynamic performance enhancement of RC slabs by steel fibers vs. externally bonded GFRP sheets under impact loading [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110539.
- [25] YUAN C, CHEN W S, PHAM T M, et al. Finite element modelling of dynamic bonding behaviours between fibre reinforced polymer sheet and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255: 118939.
- [26] 张裕华. 冲击荷载下FRP-混凝土界面剥离机理研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
ZHANG Yuhua. Study on the mechanism of FRP-concrete interfacial debonding under impact [D]. Ningbo: Ningbo University, 2017. (in Chinese)
- [27] CAGGIANO A, MARTINELLI E, SCHICCHI D S, et al. A modified Duvaut-lions zero-thickness interface model for simulating the rate-dependent bond behavior of FRP-concrete joints [J]. *Composites Part B:Engineering*, 2018, 149: 260 — 267.
- [28] 肖云逸, 章子华. 基于内聚力模型的快速荷载下CFRP-混凝土界面剪切剥离模拟[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(4): 82 — 88.
XIAO Yunyi, ZHANG Zihua. Numerical simulation of interfacial debonding between CFRP and concrete under rapid loading [J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2020, 33(4): 82 — 88. (in Chinese)
- [29] Livermore Technology Software Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971, Volume I-II[M], LSTC, May 2014.
- [30] YOO S J, YUAN T F, HONG S H, et al. Effect of strengthening methods on two-way slab under low-velocity impact loading [J]. *Materials*, 2020, 13(24): 5603.
- [31] KISHI N, KOMURO M, KAWARAI T, et al. Low-velocity impact load testing of RC beams strengthened in flexure with bonded FRP sheets [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(5): 04020036.