

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

李晓琴¹, 陈建飞^{2,3}, 陆 勇⁴, 杨贞军⁵, 许清风⁶

(1. 昆明理工大学建筑工程学院土木系, 云南 昆明 650000; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 3. 贝尔法斯特女王大学建筑与土木规划学院, Belfast, BT9 5AG 英国; 4. 爱丁堡大学工程学院基础设施和环境研究所, Edinburgh, EH9 3JL 英国; 5. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 6 上海市建筑科学研究院, 上海 200032)

摘要: 基于局部损伤混凝土模型建立了 FRP-混凝土搭接接头的精细有限元模型, 对其界面在准静态荷载和动力荷载下的粘结性能进行了研究. 将准静态有限元模拟结果与 FRP-混凝土搭接接头单剪试验数据进行了比较, 同时完成了该局部损伤混凝土模型的各参数分析, 详细讨论了混凝土断裂带宽度和断裂能等因素对有限元计算的影响. 该模型计算得到的准静态荷载-滑移及应变分布曲线均接近试验结果, 且通过数值分析还能详细展示 FRP-混凝土界面的损伤、传递及破坏过程, 预测构件的静态承载能力和 FRP-混凝土粘结滑移行为. 在此准静态精细有限元模型基础上引入与应变率相关的混凝土动力增强因子 (dynamic increasing factor, DIF), 针对不同加载速率下 FRP-混凝土粘结滑移行为进行了初步讨论, 指出高加载速率会导致 FRP-混凝土界面承载能力的提高和有效搭接长度的增长, 并扩大破坏区域的范围.

关键词: 局部损伤模型; RP-混凝土搭接接头; 动力增强因子(DIF); 加载速率; 动态粘结滑移

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0062-04

Numerical analysis of FRP-concrete bond behaviour based on a local concrete damage model

LI Xiaoqin¹, CHEN Jianfei^{2,3}, LU Yong⁴, YANG Zhenjun⁵, XU Qingfeng⁶

(1. Faculty of Civil Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University 325035, China; 3. School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's University Belfast, Belfast, UK, BT9 5AG; 4. Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering, University of Edinburgh, UK, EH9 3JL; 5. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 6. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: A meso-scale finite element model is presented for investigating the FRP-concrete bond behaviour under static and dynamic loadings. It adopts a local concrete damage model. A large number of single shear tests under static pull-off loading were modeled. It is demonstrated that the developed model can satisfactorily simulate the static debonding behaviour, in terms of the load-carrying capacity and the local bond-slip behaviour. A preliminary study of the effect of the dynamic loading rate on the debonding behaviour was also conducted by considering a dynamic increase factor for the concrete strength as a function of strain rate. It is shown that a higher loading rate leads to a higher load-carrying capacity, a longer effective bond length, and a larger damaged area of concrete in the single shear loading scenario.

Key words: local concrete damage model; FRP-concrete bonded joints; dynamic increasing factor (DIF); loading rates; dynamic bond-slip

近年来, 部分研究者将 FRP (纤维增强复合材料) 外包加固混凝土结构应用于抵抗冲击、爆炸和地震荷载. FRP 与混凝土粘结界面是外贴 FRP 加固混凝土结构中的薄弱环节^[1]. 由 FRP-混凝土界面的粘结强度所决定的 FRP 有效应力已经被广泛认可为评价 FRP 加固效果的关键指标^[2]. 相关试验结果表明, FRP-混凝土界面剥离破坏是外贴 FRP 加固混凝土结构在动态荷载下的一种主要破坏形式^[3]. 然而, 目前针对该问题的研究仍局限于 FRP 加固混凝土构件在动态荷载下的试验研究, 或只关注加固整体结构宏观响应特征的数值分析. 目前国际上仅有

De Lorenzis 等^[4]提出了基于一系列简化假定 (如忽略了惯性力且不考虑材料的应变率等) 的一个脉冲荷载下的 FRP-混凝土界面粘结滑移行为的简化理论模型, 且其准确性还未得到验证. 针对动态荷载下 FRP-混凝土界面材料性研究的相关内容还非常少. 根据外力施加方式的不同, 材料的强度可分为静力强度和动力强度. 混凝土在高应变率下动力抗拉强度可提高至静力强度的 8-10 倍^[5]. 在加固措施得当的情况下, FRP-混凝土的剥离破坏一般发生在距外贴 FRP 10 mm 以内的混凝土薄层中, 因此混凝土是影响 FRP-混凝土粘结强度的关键因素. 由于动

收稿日期: 2014-08-29

修改稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (NSFC 51308271); 云南省科技计划应用基础研究计划面上项目 (2013FB018); 教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 李晓琴 (1983-), 女, 博士, 讲师, 主要从事 FRP、混凝土、结构抗爆炸和冲击数值模拟研究. E-mail: Xiaoqin.Li@foxmail.com

态荷载下 FRP-混凝土的界面剥离破坏情况比较复杂, 很难通过试验直接测量其界面行为. 同时, 由于混凝土材性的复杂性, 也很难得到考虑非线性的界面行为的解析模型. 除了试验和理论研究, 有限元法是最常用来研究 FRP-混凝土界面行为的方法^[6], 而模拟混凝土的损伤与破坏对此至关重要. 本研究建立了 FRP-混凝土搭接接头的精细有限元模型, 并通过与一系列搭接接头单剪试验数据比较验证了其在准静态荷载下的准确性. 同时引入与应变率相关的混凝土动力增强因子(DIF)这一混凝土材性指标, 针对不同加载速率下 FRP-混凝土粘结滑移行为进行了有限元计算分析.

1 混凝土模型

在有限元分析中通常有两种模拟混凝土裂缝发展的方式: 基于连续理论的弥散裂缝模型 (smeared crack model)^[7]和采用显式分析算法的离散裂缝模型 (discrete crack model)^[8]. 尽管后者能够比较清晰的模拟出单条裂缝的发展情况, 但是这种模拟方式依赖于网格重构^[8]或者嵌入 cohesive 单元^[9], 导致计算量的成倍增加, 因此不适用于模拟裂缝分布密集且须在精细尺度描述整个破坏过程的 FRP-混凝土界面剥离情况. 相比而言, 用应力应变曲线描述混凝土本构关系且不存在网格重构问题的弥散裂缝模型更适合用于剥离破坏分析. 混凝土弥散裂缝模型又分为局部损伤混凝土模型和非局部损伤混凝土模型两种. 在局部模型中, 每个单元通过应力应变曲线独立表达混凝土的损伤和破坏; 而在非局部模型中, 混凝土的损伤由指定的断裂带宽和单元尺寸决定的一组相邻的单元共同承担. 在准静态荷载试验条件下, 混凝土试块单向受拉的断裂带宽度大致等于三倍的最大骨料尺寸 $3d_{\max}$ ^[7]. 尽管 $3d_{\max}$ 可以引入到非局部模型中设置为有限元断裂带宽, 然而目前还没有相关研究给出比较可靠的测量动力荷载下的混凝土断裂带宽度的试验数据. 值得注意的是, 在 FRP-混凝土剥离过程中, 混凝土的破坏深度一般均在 10 mm 以内, 且具体剥离深度与混凝土强度等级、FRP 材料选用、粘结情况和荷载条件等都有关系, 而一般混凝土骨料尺寸都在 10-40 mm 之间. 剥离破坏的深度已经远小于 $3d_{\max}$. 因此运用非局部模型模拟 FRP-混凝土剥离破坏过程很难给出合适的断裂带宽. 且非局部模型耗费的计算量比局部模型大得多, 在精细有限元计算中普遍采用的仍是局部模型.

本研究选用基于 LSDYNA 显示算法的 K&C 局部损伤混凝土模型^[10]的增补版, 72_Rel3 号材料. 该局部损伤混凝土模型引入了偏应力张量第三不变量对破坏面的影响和三个强度极限面 (初始屈服面、最大破坏面和残余应力面三个互相独立的应力面) 的概念, 考虑了材料的损伤、应变率和静水压力对屈服应力的影响, 能综合反映材料的拉伸与压缩损伤、应变率效应、应变硬化、软化和失效等现象, 能全面反映混凝土材料在不同应力状态下的静、动态力学行为, 是目前在瞬态分析程序中广泛应用的能够比较完整的表达混凝土塑性损伤的本构模型之一. K&C 局部损伤混凝土模型根据抗压强度为 45.6 MPa 的混凝土的各试验特征量设置了该混凝土本构模型的参数. 在使用上, 用户仅输入混凝土的抗压强度就能自动生成其它变量完成计算, 也可以根据混凝土具体的抗拉、抗压试验数据按需要调整校核相关参数.

2 FRP-混凝土静态单剪试验模拟

FRP-混凝土粘结滑移行为通常通过 FRP-混凝土搭接接头单剪试验测量^[11](图 1). 首先将 Wu 等 (2001)^[12]中的 S-CFS-400-25 号试件用于模拟并将模拟结果与试验数据进行比较. 该搭接接头由 $275 \times 100 \times 100$ mm (长×宽×高) 的混凝土试块和粘贴在试块表面的 0.22 mm 厚、40 mm 宽的 FRP 片组成, FRP 片的搭接长度是 250 mm. 混凝土的抗压强度为 57.6 MPa, FRP 片的弹性模量为 230 GPa. 考虑到计算量的问题, 有限元模型没有采用搭接接头本身的高度尺寸, 而采用了 45mm 的缩减尺寸模型^[6].

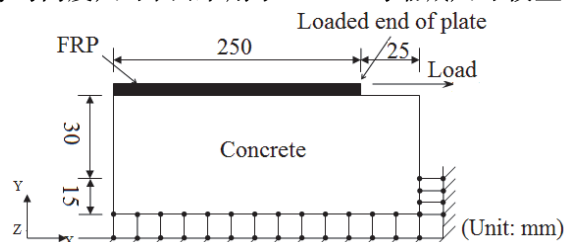


图 1 FRP-混凝土搭接接头面内单剪试验有限元模型
Fig.1 FE model of FRP-concrete joint

模拟 FRP 加固混凝土结构的剥离破坏过程一般来说有两种方式: 1) 一种方式是在 FRP 与混凝土之间引入一层界面单元, FRP-混凝土发生界面剥离破坏时, 界面单元依次失效. 这种模拟方式由已知的 FRP-混凝土粘结滑移模型来定义界面单元的本构关系, 因此并不适合本研究; 2) 另外一种方式没有界面单元, FRP 单元直接联系混凝土单元, 界面的剥离破坏由粘结在 FRP 片附近的混凝土单

元的破坏来实现. 试验证明正常的剥离破坏一般发生在接近 FRP 片的混凝土层中^[2], 后一种模拟方式不仅有其试验依据, 而且具备推导粘结滑移模型本身的能力^[6]. 本研究拟通过第二种模拟方式建立能够准确预测准静态 FRP-混凝土搭接接头界面粘结滑移行为的有限元模型, 并考量动态荷载下的 FRP-混凝土粘结滑移情况. 有限元模型采用了与 Lu 等 (2004)^[6]模型相似的边界条件和几何尺寸. 计算收敛性的分析研究采用了 2.5mm、1mm 和 0.5mm 的网格尺寸. 由于计算量的约束, 该模型被进一步简化为两维 (2D) 的平面应力模型. 有限元模型计算所得的力、应力、应变和滑移量等数值均根据文献^[11]的宽度效应参数进行修正后再与试验数据相比较.

图 2 展示了 3 种尺寸网格下计算出的力-滑移曲线. 由图 2 可知, 随着网格尺寸减小搭接接头抗剪承载能力逐步增加, 但是 1 mm 的计算结果与 0.5 mm 的计算结果已经相当接近, 证明了该有限元模型计算结果的网格收敛性. 该模型所得最终承载能力为 14.5 kN (0.5 mm 网格), 与 14.1 kN 的试验值^[12]和文献^[6]的模拟值 13.8 kN 都非常接近. 图 3 展示了不同加载阶段 FRP 应变分布曲线. 每个荷载阶段 FRP 应变分布均非常接近试验数据和文献^[6]的模拟值. 该有限元模型还被用于计算模拟了 73 组混凝土搭接接头试验, 模拟结果与试验数据、文献^[6]和文献^[11]的模拟结果均比较接近. 其中有限元模拟计算所得 FRP 界面承载能力 P_{FE} 与试验值 P_{test} 比值的平均值达到了 0.997, 协方差为 10.9%, 而根据文献^[11]理论模型的计算所得的 FRP 界面承载能力 P_{pre} 与实验值 P_{test} 比值的平均值为 0.999, 协方差为 9.34%. 由此可见, 基于 K&C 局部损伤混凝土模型的有限元模型能较好地模拟 FRP-混凝土搭接接头静态粘结滑移的情况.

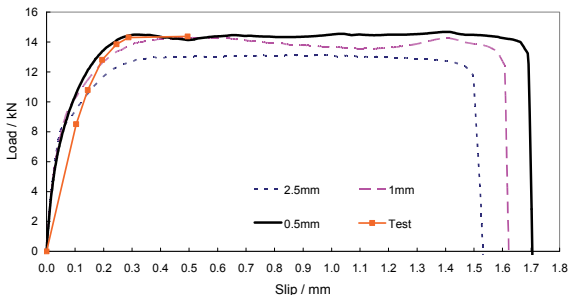


图 2 S-CFS-400-25 号试件^[12]模型荷载-滑移曲线
Fig.2 Load-slip curves (specimen S-CFS-400-25^[12])

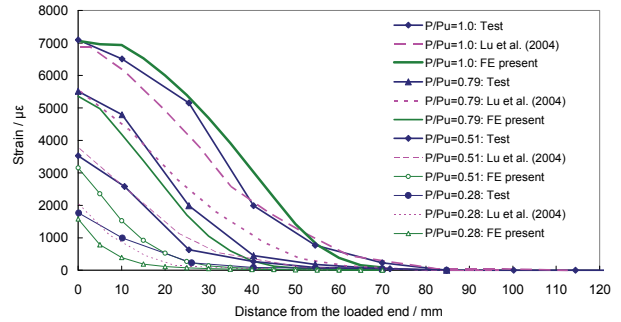


图 3 S-CFS-400-25^[12]应变分布曲线比较
Fig.3 Strain distribution comparison(S-CFS-400-25^[12])

3 动态荷载下的 FRP-混凝土粘结滑移模拟

3.1 混凝土的动态增强因子 DIF

当混凝土结构受动力荷载致使应变率高到一定程度时, 混凝土强度相比准静态荷载条件下会显著增加. 这种增强效应一般通过动态强度和静态强度的比值来表达, 即动力增强因子 DIF. 在 K&C 局部损伤混凝土模型中, 与应变率相关的 DIF 是重要的材料属性之一. 本文采用 CEB-FIP (1993)^[13]中的混凝土抗压 DIF 曲线 (公式 1-4) 和 Malvar 等 (1998)^[5]改进的 CEB-FIP 抗拉 DIF 曲线 (公式 7~10) 定义了混凝土的动力材性:

$$DIF = f_c / f_{cs} = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1.026\alpha_s} \text{ for } \dot{\epsilon} \leq 30 / s \quad (1)$$

$$DIF = f_c / f_{cs} = \gamma_s (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} \text{ for } \dot{\epsilon} > 30 / s \quad (2)$$

其中, $\dot{\epsilon}$ 为应变率 (30×10^{-6} 至 $300/s$), $\dot{\epsilon}_s$ 是准静态情况下的应变率, $30 \times 10^{-6}/s$, f_c 是当前动态抗压强度值, f_{cs} 是静态抗压强度值:

$$\log \gamma_s = 6.456\alpha_s - 2 \quad (3)$$

$$\alpha_s = 1 / (5 + 9f_{cs} / f_{co}) \quad (4)$$

当混凝土抗拉应变率在 10^{-6} 到 $160/s$ 之间时:

$$DIF = f_t / f_{ts} = (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^\delta \text{ for } \dot{\epsilon} \leq 1 / s \quad (5)$$

$$DIF = f_t / f_{ts} = \beta (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)^{1/3} \text{ for } \dot{\epsilon} > 1 / s \quad (6)$$

其中: f_t 是应变率 $\dot{\epsilon}$ 下的抗拉强度值, f_{ts} 是 $\dot{\epsilon}_s = 10^{-6}/s$ 下的准静态抗拉强度值, 且:

$$\log \beta = 6\delta - 2 \quad (7)$$

$$\delta = 1 / (1 + 8f_{cs} / f_{co}) \quad (8)$$

3.2 应变率对 FRP-混凝土粘结滑移模型的影响

对 S-CFS-400-25 号有限元模型施加动态荷载, 并同时引入混凝土的 DIF 与应变率的材料关系曲线. 动态荷载采用速度控制, 使破坏发生在特定匀速条件下. 从不同加载速率下的荷载-滑移曲线 (图 4) 可看出, 随着加载速率的提高, FRP-混凝土搭接接头的抗剪承载能力显著增大, 而最终剥离破坏

时 FRP 滑移量也明显增长, 例如: 当加载速率在 0.1 mm/s 时, 最大承载力为 18.3 kN, 剥离破坏时的 FRP 滑移量为 0.25 mm; 而当加载速率达到 100 mm/s 时, 最大承载力为 44.3 kN, 剥离破坏时的 FRP 滑移量增加到 2.0 mm. 且从模型破坏发展过程中可以看出随着加载速率提高, 剥离破坏深度也逐渐加深. 这表明随着应变率的提高, 更多区域的混凝土都参与到 FRP-混凝土界面剥离破坏中, 而不仅仅是几毫米深度的混凝土随 FRP 脱离混凝土试块. 由此可见, 高应变率下混凝土强度和断裂能的增加这一材料属性将对 FRP-混凝土剥离破坏模式产生影响. 然而, 目前的初步研究结果仅局限于剥离破坏发生在混凝土层当中的情况, 并未包含胶层界面剥离破坏的情况. 不同材料在同一应变率下的 DIF 是不同的, 不同材料随应变率的增强效应也不同, 因此如果胶层或胶、混凝土混合薄层界面的动态材料强度低于混凝土的相应动态材料强度, 剥离破坏的发生区域将会转向更薄弱的界面, 而该模型将不能模拟此类情况.

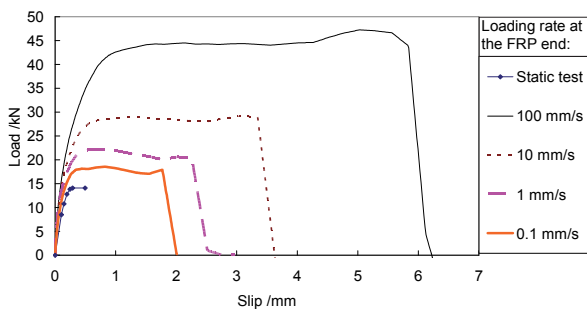


图 4 各加载速率下的 S-CFS-400-25 号试件^[12]荷载滑移曲线
Fig.4 Load-slip curves under different loading rates

4 结论

1) 对 FRP-混凝土剥离破坏的研究, 混凝土模型的选择至关重要. 在现有有限元模拟条件下, 局部损伤混凝土模型仍然优于其它类型的混凝土模型.

2) 基于 K&C 局部损伤混凝土模型运用 LSDYNA 显式算法进行精细有限元模拟, 建立了能准确预测静态 FRP-混凝土搭接接头粘结滑移性能的模型. 该模型能详细展示 FRP-混凝土界面的损伤、传递及破坏过程, 并能预测构件的静态承载能力和 FRP-混凝土粘结滑移行为.

3) 在准静态精细有限元模型的基础上, 本文通过引入混凝土动力增强因子 DIF, 进一步探讨了在高加载速率下 FRP-混凝土粘结滑移行为, 有限元计算结果表明当剥离破坏发生在混凝土层时, 高加

载速率会导致 FRP-混凝土界面承载能力的增强和有效搭接长度的增长, 并扩大破坏区域的范围.

参考文献 References

- [1] 任伟, 张岗, 赵煜. 基于有效粘贴长度的纤维片材加固 RC 梁斜截面计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 672-676.
REN Wei, ZHANG Gang, ZHAO Yu. The calculation method for FRP strengthening RC beam based on effective bond length[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 672-676.
- [2] 叶列平, 陆新征, 滕锦光, 等. FRP 片材加固混凝土梁剥离承载力计算及设计[J]. 建筑结构, 2007, 37(12): 82.
YE Leiping, LU Xinzheng, TENG Jinguang, et al. Design models for debonding strength of RC beams strengthened with FRP sheets or plates [J]. Building structure, 2007, 37(12): 82.
- [3] BUCHAN P A, CHEN J F. Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures-a state-of-the-art review [J]. Composites, Part B: Engineering, 2007, 38(5-6): 509-522.
- [4] DE Lorenzis L, LA Tegola, A. Bond of FRP laminates to concrete under impulse loading: a simple model [C]//Proc. International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), Hong Kong, China, pp. 503-508.
- [5] MALVAR L J, CRAWFORD J E. Dynamic increasing factors for concrete [R]. Naval facilities engineering service center, Port Hueneme, CA.
- [6] LU X Z, YE L P, TENG J G et al. Mesoscale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete[J]. Engineering structures, 2004, 27(4): 564-575.
- [7] BAZANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Materials and Structures (RILEM, Paris), 1983, 16(3): 155-177.
- [8] YANG Z J, CHEN J F, Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(1): pp. 3-13.
- [9] YANG Z J, SU X T, CHEN J F, et al. Monte Carlo simulation of complex cohesive fracture in random heterogeneous quasi-brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(17): 3222-3234.
- [10] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(9/10): 847-873.
- [11] CHEN J F, TENG, J.G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(7): 784-791.
- [12] WU Z S, YUAN H, Yoshizawa H, et al. Experimental/analytical study on interfacial fracture energy and fracture propagation along FRP-concrete interface[J]. ACI Special Publication, 2001, 201: 133-152.
- [13] Comité Euro-International du Béton[S]. CEB-FIP Model Code, 1990, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993.

(本文编辑 吴海西)