

# 锈蚀钢筋混凝土梁碳纤维加固后抗剪承载力 有限元分析

李洪明<sup>1</sup>, 吴瑾<sup>1\*</sup>, 胡晓东<sup>2</sup>, 钱钧<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 应用 ABAQUS 有限元分析软件, 考虑箍筋锈蚀对其截面、屈服强度、以及箍筋和混凝土之间粘结滑移的影响, 建立了锈蚀钢筋混凝土梁碳纤维布 (CFRP) 加固后抗剪承载力模型, 并通过试验结果验证了有限元模型的正确性。利用有限元模型研究剪跨比、箍筋间距、碳纤维布的宽度和间距等参数对锈蚀梁承载力的影响规律。研究表明: 剪跨比和箍筋间距的增大均使梁斜截面承载力下降, 碳纤维布的宽度和间距比值越大, 加固效果越好。

**关键词:** 锈蚀箍筋; 碳纤维布; 加固; 抗剪承载力; 有限元分析

中图分类号: TV43

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 11-0009-04

## Finite element analysis of shear capacity of corroded reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber

LI Hongming<sup>1</sup>, WU Jin<sup>1\*</sup>, HU Xiaodong<sup>2</sup>, QIAN Jun<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu;

2. Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, Jiangsu)

**Abstract:** Considering the influence of stirrup corrosion on the cross section, the yield strength and the bond slip between concrete and stirrups, the corroded reinforced concrete beam with carbon fiber cloth (CFRP) reinforced shear capacity model was established by the finite element analysis software ABAQUS, and the correctness of the finite element model was verified by the test results. The influence law of shear span ratio, stirrup spacing and width and spacing of CFRP on the bearing capacity of corroded beams was studied by using the finite element model. The results showed that the increase of shear span ratio and stirrup spacing both decrease the bearing capacity of the inclined section of the beam, and the greater the ratio of width and spacing of CFRP, the better the reinforcement effect.

**Key words:** corroded stirrups; CFRP; reinforcement; shear capacity; finite element analysis

钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的主要因素之一, 锈蚀钢筋混凝土梁加固后的性能是结构耐久性评估及维修的重要依据。目前, 国内外对箍筋锈蚀钢筋混凝土梁斜截面承载力模型已有较

多研究<sup>[1-7]</sup>, 但对碳纤维布 (CFRP) 加固锈蚀钢筋混凝土梁抗剪性能的研究则相对甚少。本文应用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 对锈蚀钢筋混凝土梁碳纤维布加固后抗剪承载力进行研究。

收稿日期: 2017-08-19

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2016014)

作者简介: 李洪明 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土研究工作。

通讯作者: 吴瑾 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土研究工作。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 材料的本构关系

混凝土本构模型选用损伤塑性模型<sup>[8]</sup>。将总应变分解成为弹性应变  $\varepsilon_{el}$  和塑性应变  $\varepsilon_{pl}$  两部分。其表达式为<sup>[9]</sup>：

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \varepsilon_{el} = \varepsilon_{true} - \sigma_{true} / E \quad (1)$$

式中：

$\varepsilon_{true}$ —总体真实应变；

$\varepsilon_{el}$ —真实弹性应变；

$\sigma_{true}$ —真实应力；

$E$ —材料弹性模量。

混凝土的单轴应力—应变关系采用《混凝土结构设计规范》附录 C.2 中关系曲线，见图 1。

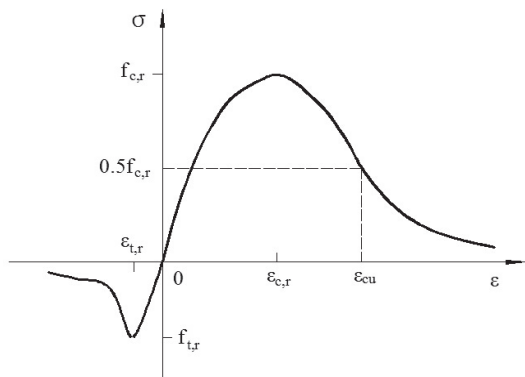


图 1 混凝土单轴应力—应变曲线

钢筋本构关系采用双折线理想弹塑性模型，对于箍筋同时考虑箍筋锈蚀对钢筋屈服强度的影响。根据文献<sup>[10]</sup>的研究结果，箍筋的本构关系表达式如下：

$$\sigma_y = \begin{cases} f_{yvk} \times (1 - 1.608\eta) & 0 < \eta \leq 5\% \\ f_{yvk} \times (0.962 - 0.848\eta) & \eta > 5\% \end{cases} \quad (2)$$

式中：

$\sigma_y$ —箍筋屈服应力；

$f_{yvk}$ —箍筋屈服强度标准值；

$\eta$ —箍筋锈蚀率。

双折线理想弹塑性模型假设钢筋在屈服前都为线弹性，一旦屈服就进入理想塑性状态，应变增加，应力不再增加，应力应变关系为一条平直线，如图 2 所示。

CFRP 本构关系采用线性模型，如图 3 所示。当达到 CFRP 的极限应变时，CFRP 断裂，认为其不能再承受荷载。其应力—应变关系为：

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (0 \leq \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu}) \quad (3)$$

式中：

$\sigma_f$ —CFRP 应力；

$E_f$ —CFRP 弹性模量；

$\varepsilon_f$ —CFRP 应变；

$\varepsilon_{fu}$ —CFRP 极限拉应变。

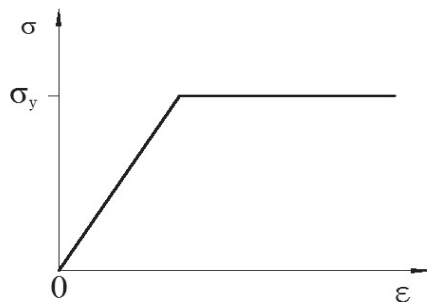


图 2 钢筋理想弹塑性模型

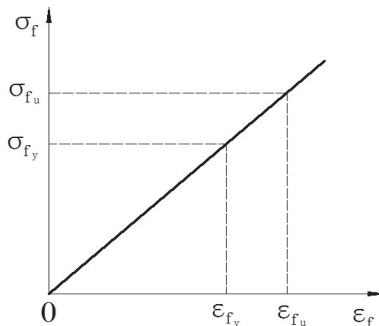


图 3 碳纤维布本构模型

### 1.2 结构单元的选择

混凝土单元选用 C3D8R (三维八节点减缩积分实体单元)。对于 C30 混凝土，膨胀系数取  $0.826 \times 10^{-5}$ ，膨胀角  $30^\circ$ ，偏心率 0.1，双轴和单轴极限抗压强度比 1.16，不变应力比 0.6667，粘聚系数 0.003，拉伸恢复系数取 0，压缩恢复系数取 1。钢筋单元选用两节点线性桁架单元 T3D2。钢筋单元需输入的材料参数有：密度、弹性模量、剪切模量、泊松比和屈服应力—塑性应变曲线。碳纤维布单元选用壳单元 S4R<sup>[11]</sup>，即四节点减缩积分四边形壳单元。CFRP 单元需输入的材料参数有：弹性模量和泊松比。

### 1.3 粘结滑移模拟

在 ABAQUS 中，通过混凝土的拉伸硬化考虑钢筋和混凝土之间的相互作用，认为混凝土开裂后应力并未完全释放，仍有一部分抗拉能力，钢筋的存在使得荷载可以在混凝土单元裂缝间传递。根据试验结果分析，CFRP 在梁破坏时，并未发生剥离破坏。因此，本模型采用在混凝土与 CFRP 界

面采用 Tie 命令来模拟混凝土和纤维布的粘结滑移问题。

#### 1.4 模型建立与网格划分

加载过程中, 梁的加载点及支座处容易应力集中, 在建模时在梁加载点和支座处设置钢垫片, 以增加接触面积和刚度。混凝土单元尺寸约为 30 mm, 钢筋的单元尺寸约为 15 mm, CFRP 的单元尺寸约为 7.5 mm。网格划分完后, 混凝土、钢筋、碳纤维布有限元模型如图 4 所示。

## 2 有限元模型验证

模型验证的实验结果来自文献<sup>[11]</sup>。

### 2.1 破坏模式

图 5 为有限元模型计算达到的碳纤维布加固锈蚀梁破坏模式图。由图可知, 试验梁破坏时, 形成了从支座到加载点的裂缝。由碳纤维布的应力云图可以看出, 斜裂缝贯穿的部位应力较两端的大, 这与试验观测的结果也是相一致的。

综上所述, 采用有限元模型模拟锈蚀钢筋混凝土梁碳纤维布加固后梁的破坏模式是可行的, 模拟结果具有可靠性。

### 2.2 荷载—挠度曲线

ABAQUS 计算结果与试验结果的荷载—跨中挠度曲线如图 6。根据图 6 可知, 对于碳纤维布加固的锈蚀梁, 模拟结果与试验结果的荷载—跨中挠度比较相似, 也同样表明建立的有限元模型具

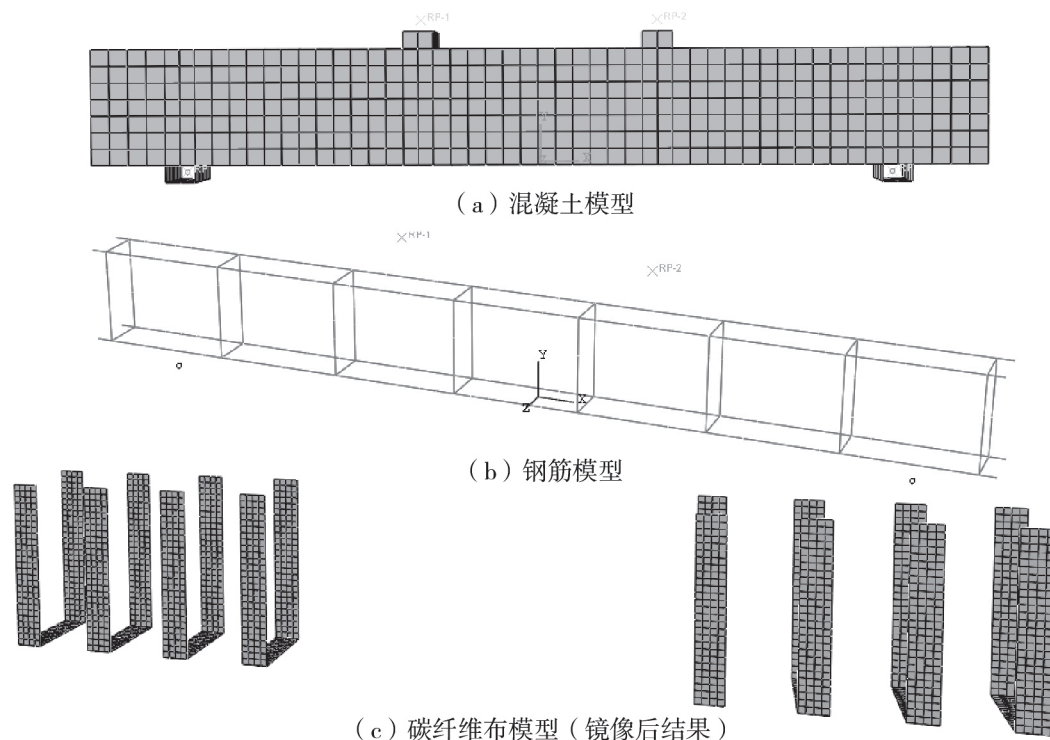


图 4 网格划分后各部件有限元模型

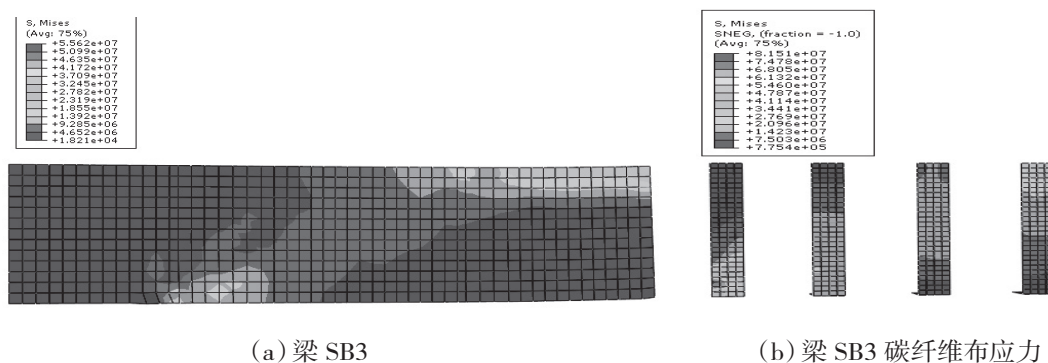
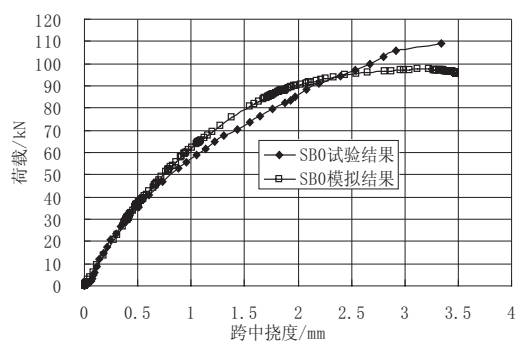
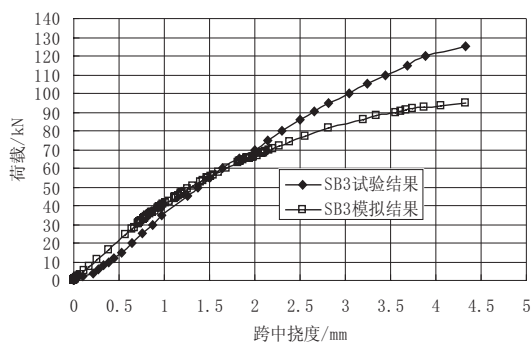


图 5 计算的锈蚀加固梁破坏模式

有一定的合理性。



(a) 梁 SB0



(b) 梁 SB3

图6 荷载—跨中挠度曲线比较

### 3 参数分析

#### 3.1 剪跨比对抗剪承载力的影响

通过有限元计算模型,分析剪跨比对锈蚀梁抗剪承载力的影响。图7为梁B3抗剪极限承载力与剪跨比的关系曲线,公式计算是根据文献<sup>[11]</sup>公式(4.18)。从图7得知,不论是公式计算结果,还是有限元模拟结果,梁的抗剪极限承载力均随着剪跨比增加而减小。

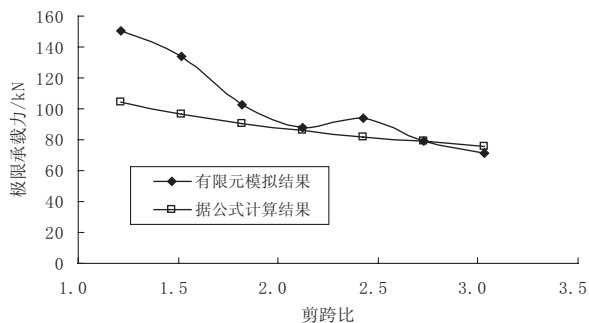


图7 梁抗剪极限承载力与剪跨比关系曲线

从图7还可得知,公式计算的结果比有限元计算的结果偏小,有限元计算结束的标准是混凝土的塑形变形到达极限,不能继续受荷,故计算的结果会偏大些。剪跨比在2.0~3.0之间时,两者的计算结果比较接近;当剪跨比小于1.5时,两者的计算结果偏差很大,因为一般认为剪跨比小于1.5时,梁发生斜压破坏,已经不在计算控制的范围内,设计时应避免剪跨比过小。

#### 3.2 箍筋间距对抗剪承载力的影响

箍筋间距和箍筋截面都对梁的配箍率会产生影响,试验分析了箍筋截面面积对抗剪承载力影响,通过有限元模拟箍筋的间距对梁抗剪承载力的影响。图8为锈蚀梁B3抗剪极限承载力与箍筋间距关系曲线。由图8知,箍筋的间距越大,梁抗剪承载力越低;公式计算的结果比有限元模拟结果低,但两者的变化规律相似。

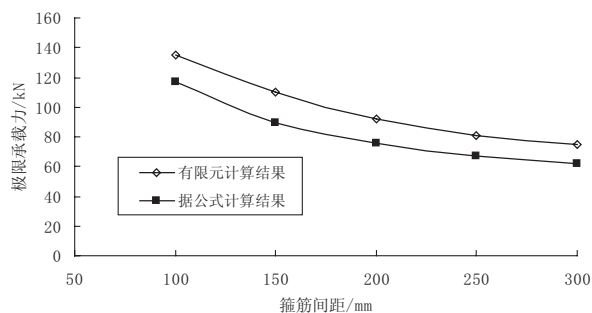


图8 梁抗剪极限承载力与箍筋间距关系曲线

#### 3.3 CFRP宽度和间距比值对抗剪承载力的影响

图9为梁B3梁极限抗剪承载力与碳纤维布宽度和中心间距比值关系曲线。从图9得知,不论是公式计算结果,还是有限元模拟结果,梁的抗剪承载力均随着碳纤维布宽度和中心间距比值增加而增大。

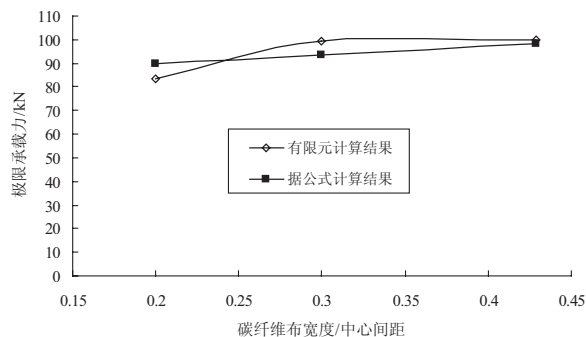


图9 梁抗剪极限承载力与CFRP宽度和中心间距比值关系曲线

(下转第16页)

(上接第12页)

## 4 结论

本文应用 ABAQUS 有限元分析软件, 建立了锈蚀 RC 梁斜截面 CFRP 加固后抗剪承载力模型, 并通过实验结果验证了有限元模型的可靠性。应用该有限元模型分析剪跨比、箍筋间距以及 CFRP 宽度和间距的比值 3 种参数对梁抗剪承载力的影响, 研究结果表明: 剪跨比和箍筋间距的增大均使梁斜截面承载力下降, 碳纤维布的宽度和间距比值越大, 加固效果越好。

### 参考文献:

- [1] 徐善华, 牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土简支梁斜截面抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 98-103.
- [2] 熊进刚, 霍艳华. 锈蚀钢筋混凝土简支梁斜截面受剪性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 10-13.
- [3] 赵羽习, 金伟良. 锈蚀箍筋混凝土梁的抗剪承载力分析

- [J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 19-24.
- [4] 余璠璟. 锈蚀钢筋混凝土梁斜截面性能试验研究和分析[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [5] 李冰, 高向华, 王小惠, 等. 局部区段锈蚀的钢筋混凝土梁抗剪承载力试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(6): 60-65.
- [6] 翟飞格. 箍筋锈蚀配斜筋 RC 梁抗剪承载力研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [7] 余常. 基于软化桁架理论的锈蚀 RC 梁抗剪承载力研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [8] 梁利利. FRP 筋混凝土梁受弯性能分析和数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [9] 孙乐娟. 混凝土-FRP 筋相互作用的非线性数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [10] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47.
- [11] 李洪明. 箍筋锈蚀钢筋混凝土梁及 CFRP 加固后抗剪性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

(责任编辑:王宏伟)