

AFRP 加固二次受力 RC 梁抗弯性能有限元分析

张智梅,白世烨,张振波

(上海大学 土木工程系,上海 200072)

摘要:利用 ABAQUS 有限元软件对 AFRP 布加固钢筋混凝土梁的抗弯性能进行非线性有限元分析,并将有限元模拟结果与试验结果进行比较,以此验证所建模型的正确性。利用验证后的有限元模型深入分析各项影响因素对二次受力加固梁抗弯性能的影响,模拟结果表明 FRP 加固 RC 梁存在合理配布率和最优加固长度的问题;此外预载程度较高,二次受力因素对 RC 梁的抗弯性能有较大的影响。

关键词:钢筋混凝土梁;二次受力;抗弯承载力;芳纶纤维布;非线性有限元

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

Study on the flexural behavior of RC beams strengthened with AFRP sheets under the secondary load

ZHANG Zhi - mei, BAI Shi - ye, ZHANG Zhen - bo

(The Civil Engineering Department, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper uses ABAQUS software to study the bending load capacity of simply supported RC beams strengthened with AFRP sheets and the comparative analysis is done between the experimental data and the simulation data in order to verify the correctness of the finite element model. In addition, based on the above correct finite element model, various parameters studies on the bending capacity of the second - load beams is in the further discussion. The simulation results show that there is a problem of reasonable distribution rate and optimal reinforcement length in the field of study on RC beams strengthened by FRP; In addition, a higher degree of pre - loaded stress influence the flexural behavior of RC beams greatly.

Key words: RC beams; under the secondary load; bending load capacity; AFRP sheets; nonlinear finite element

芳纶纤维增强复合材料(简称 AFRP)因其抗拉性能强、耐腐蚀、质量轻、耐疲劳等诸多优点,在结构加固工程中得到了广泛的应用和发展。目前国内外学者^[1-3]对 AFRP 布外贴加固钢筋混凝土梁进行了大量研究,形成了比较成熟的理论体系。不过,大多数的试验研究和相关有限元模拟主要集中在一次受力问题上,对二次受力问题的研究较少。然而在实际工程中,钢筋混凝土梁往往因为不能满足安全条件或正常使用条件时才进行加固,且加固之前构件均属于持载或不完全卸载这种情况^[4]。所以本文研究 AFRP 布外贴加固二次受力 RC 梁的抗弯性能更具有现实意义。

基于上述情况,本文利用 ABAQUS 有限元软件对已有试验^[5]进行数值模拟分析,并将有限元结果与试验结果进行对比,以此验证所建模型的正确性,然后利用验证后的模型深入分析各项影响因素对二次受力梁抗弯性能的影响,从而为加固工程实践提供理论依据。

1 有限元分析

1.1 有限元模拟的试验简介

本文所模拟的钢筋混凝土梁试验来自于文献[5]。试验梁截面尺寸为宽度×高度=120 mm×

200 mm,长度为 1 400 mm,箍筋、架立筋、受拉纵筋均为 HPB235 钢筋,混凝土强度等级为 C30,梁中纵向受拉钢筋配筋率为 0.65%,为适筋梁。AFRP 布每层厚度为 0.182 mm,宽度为 120 mm,弹性模量为 127 GPa,极限抗拉强度为 2 744 MPa,极限拉应变为 0.024。

试验梁采用四点弯曲加载模式,如图 1 所示。各试验梁的加固情况和试验结果列于表 1。

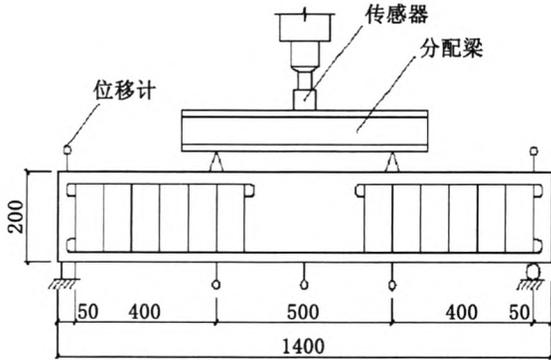


图1 试验加载装置

Fig.1 Experiment equipment

表 1 各试验梁加固情况和试验结果

Tab.1 Reinforcement information and experimental result of RC beams

试件编号	加载历程	加固量	极限荷载 /kN	跨中挠度 /mm
B0-1	无,对比梁	无	46.5	8.35
B1-1	无,直接加固	1AFRP	72.3	7.55
B1-2	无,直接加固	2AFRP	75.8	7.51
B2-1	加载 40% P_{u1} → 持载加固	1AFRP	70.5	7.67
B2-2	加载 60% P_{u1} → 持载加固	1AFRP	68.3	7.89
B2-3	加载 80% P_{u1} → 持载加固	1AFRP	59.7	8.11

备注: P_{u1} 为通过试验得到的未加固组梁 B0-1 极限荷载值。AFRP 前面数字代表层数。

1.2 有限元模型的建立

本文利用 ABAQUS 有限元软件对上述试验进行非线性数值模拟,并采用分离式模型的方式^[6]来建立加固梁,即根据混凝土、钢筋、AFRP 布不同的材料属性采取不同的单元形式进行设置。混凝土采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 单元,AFRP 布采用 S4R 单元。混凝土材料属性利用 ABAQUS 提供的混凝土损伤塑性模型进行设置。其中混凝土的受拉和受压本构关系采用《混凝土结构设计规范》^[7]所提供相应的关系式,AFRP 布设置为理想线弹性材料,钢筋设置为理想弹塑性材料。

在模型所设置的相互作用模块中,假定钢筋与混凝土之间、AFRP 布与混凝土之间均不发生粘结滑移,其中分别采用嵌入式约束、绑定约束来定义钢筋与混凝土之间、AFRP 布与混凝土之间的相互作用。此外,为了避免荷载作用下产生的应力集中导致计算难以收敛,本模型在支座处和加载点处分别设置了 4 个刚性垫块。根据简支梁的受力特点,在左、右两侧梁端下部的钢垫块底部中线处的节点分别约束其 4 个方向的自由度($U_2 = 0, U_3 = 0, UR_1 = 0, UR_2 = 0$)和 5 个方向的自由度($U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0, UR_1 = 0, UR_2 = 0$)。

为了考虑二次受力对加固梁的影响,本模型设置了两个分析步,分两次进行加载,再利用生死单元的设置^[8]来实现其二次受力效果。根据上述条件,建立的有限元模型结果如图 2(a)所示;其中嵌入在混凝土内部的钢筋模型如下图 2(b)所示。

文献[8-9]研究认为,混凝土单元长度为最大骨料直径的两倍左右时,结果比较合理。因此,在本文分析过程中取混凝土单元长度为 50 mm 左右。网格划分均按部件来划分,网格种子按边布种。网格划分的结果如图 2(c)所示。

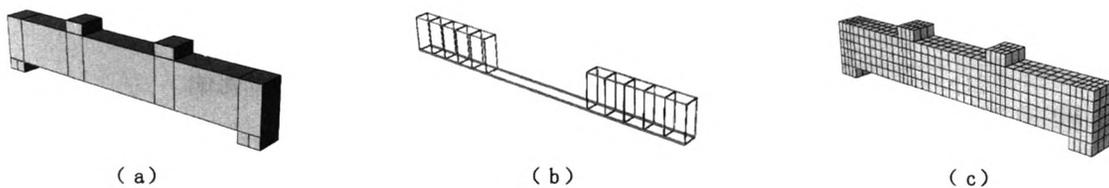


图2 有限元模型的建立与网格划分

Fig.2 Finite element model and meshing

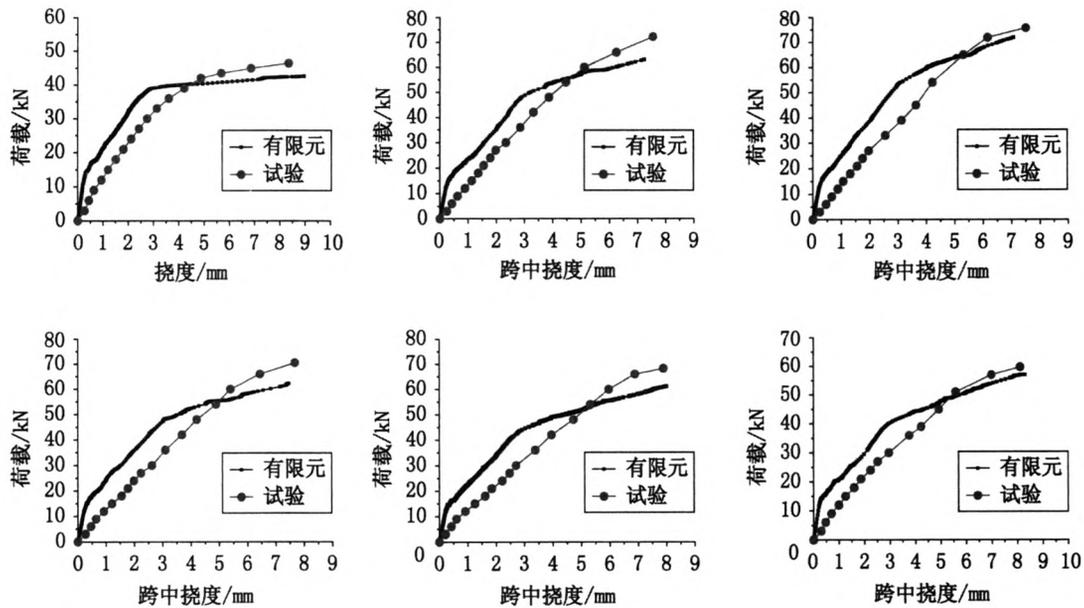


图3 试验与有限元得到的荷载—跨中位移曲线对比

Fig.3 The comparison of load-displacement curve between experiment and finite element analysis

2 模拟结果与试验结果对比

为了验证上述建立的有限元模型的正确性,本文将有限元分析得到的梁的荷载—跨中挠度曲线与相应的试验结果进行对比分析,其比较结果如图3所示。

从图3的对比情况来看,有限元模拟得到的荷载—挠度曲线的整体趋势与试验结果比较吻合,其极限荷载值及其相应挠度的误差均控制在15%以内。说明本文所建立的有限元模型是正确可靠的。

3 影响因素分析

本文利用验证后的有限元模型,进一步探讨AFRP布加固层数、AFRP布加固长度和二次受力预载程度影响因素对二次受力加固梁抗弯性能的影响。

3.1 二次受力预载程度的影响

为了研究不同预载程度的初始荷载对钢筋混凝土梁抗弯性能的影响,本文根据上述试验B0-1梁的相关材料和几何参数建立模型,然后分别对其施加B0-1梁极限荷载值的20%、40%、60%、70%、80%、90%、92%、96%、100%,持载加固1层AFRP布后,再次加载直至加固梁破坏。其预载程度对RC梁极限荷载的影响结果见图4。(图中极限荷载提高程度是指各二次受力加固梁极限荷载值比B0-1对比梁提高的程度。预载程度是指初

始荷载与B0-1对比梁极限荷载的比值)。

通过图4的分析可以看出:当预载程度超过70%时,二次受力加固梁极限抗弯承载力显著降低。而预载程度较小时,二次受力影响因素对RC梁抗弯承载力的影响并不显著。因此本文认为对于预载程度较低的损伤梁而言,可采取持载加固的方式来提高RC梁的承载力;而对于预载程度较高的损伤梁而言,可采取卸载加固。

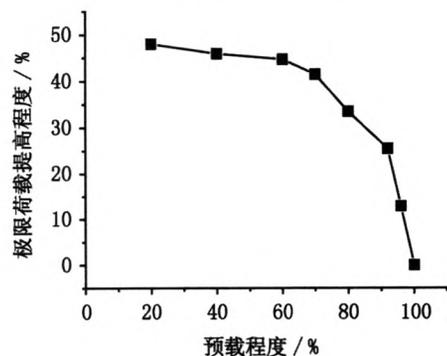


图4 预载程度与极限荷载提高幅度关系图

Fig.4 The relationship between the increase ratio of the ultimate bearing capacity and preloading level

3.2 AFRP布加固层数的影响

AFRP布加固层数影响因素比较方案列于表2。表2中除了AFRP布粘贴层数和加载历程有所改变外,其余参数均与上述试验B0-1梁一致。其有限元分析比较结果见图5。从图5中我们可以得出以下结论:

1)无论在二次受力情况下还是直接加固情况下,AFRP 布粘贴层数的增加均可以明显提高 RC 梁的屈服荷载和极限荷载,尤其是极限荷载的提高更为显著。但是 AFRP 布层数的增加并不能有效提高 RC 梁的开裂荷载。

2)与二次受力情况相比,直接加固情况下 AFRP 布层数的改变对 RC 梁极限荷载的影响更大。B3 梁极限荷载比 B1 梁提高 22.0%,而 C3 梁极限荷载比 C1 梁提高 12.8%。

3)无论在二次受力情况下还是直接加固情况下,纤维布层数的增加并不与其极限荷载的提高程度呈线性关系,而是随着加固层数的提高,其极限荷载的提高程度趋于平缓。因此,对于 AFRP 布粘贴层数而言,存在一个合理配布率的问题。

4)在预载程度较高的二次受力作用下,加固梁的极限荷载比粘贴层数相同的 AFRP 布直接加固梁均有所降低,降低幅度为 15% 左右。而其挠度比加固层数相同的 AFRP 布直接加固梁均有所提高,提高幅度为 17% 左右。这说明无论 AFRP 布粘贴层数多大,预载程度较高的二次受力因素均对 RC 梁的抗弯性能都有着较大影响。

表 2 AFRP 布加固层数比较方案

Tab. 2 The comparison plan of AFRP sheet layer

梁编号	加载历程	加固层数
A	不加固	无
B1	无,直接加固	1AFRP
B2	无,直接加固	2AFRP
B3	无,直接加固	3AFRP
C1	加载至 80% Pul→持载加固	1AFRP
C2	加载至 80% Pul→持载加固	2AFRP
C3	加载至 80% Pul→持载加固	3AFRP

备注: P_{u0} 为通过试验得到的未加固组梁 A 极限荷载值。AFRP 前面数字代表层数。

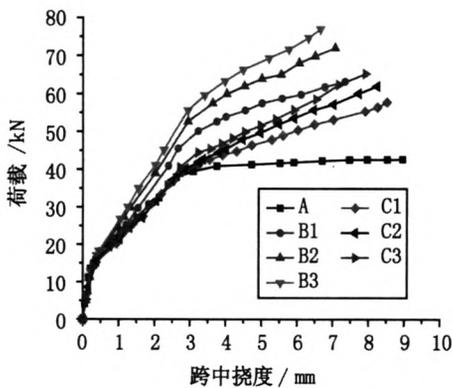


图5 AFRP布加固层数比较结果

Fig. 5 The comparison result of AFRP sheet layer

表 3 AFRP 布粘贴长度比较方案

Tab. 3 The comparison plan of AFRP sheet length

梁编号	加载历程	AFRP 布长/mm
D	不加固	无
E1	无,直接加固	700
E2	无,直接加固	900
E3	无,直接加固	1 100
E4	无,直接加固	1 300
F1	加载至 80% Pul→持载加固	700
F2	加载至 80% Pul→持载加固	900
F3	加载至 80% Pul→持载加固	1 100
F4	加载至 80% Pul→持载加固	1 300

备注: Pul 为通过试验得到的未加固组梁 D 极限荷载值。AFRP 前面数字代表层数。以上加固梁 AFRP 加固层数均为 1 层。

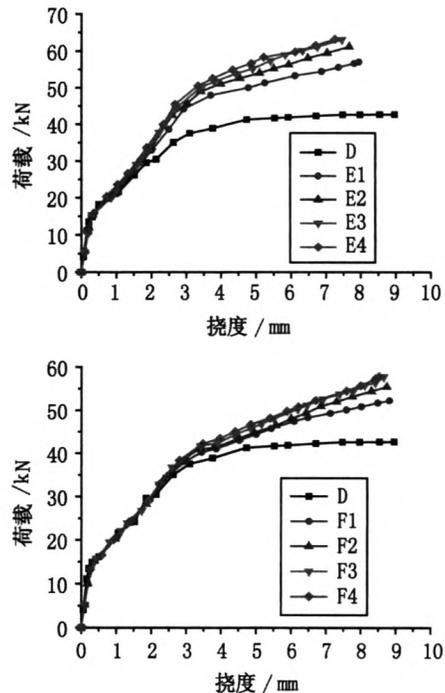


图6 AFRP布粘贴长度比较结果

Fig. 6 The comparison result of AFRP sheet length

3.3 AFRP 布加固长度的影响

AFRP 布加固长度影响因素比较方案列于表 3,表 3 中除了 AFRP 布加固长度和加载历程有所改变外,其余参数均与上述试验 B0 - 1 梁一致。其有限元比较结果见图 6。从对比图 6 中我们可以得出以下结论:

1)无论在直接加固情况下还是二次受力情况下,AFRP 布长度的增加均可以提高 RC 梁的屈服荷载和极限荷载,尤其是极限荷载的提高更为显著。此外,与二次受力情况相比,直接加固情况下

AFRP 布长度的改变对 RC 梁极限荷载的影响更加显著。

2) 无论是二次受力情况还是直接加固情况, AFRP 布的粘贴长度越长, 其 RC 梁极限荷载就越大, 但并不是越长越好^[10]。本次模拟发现当 AFRP 布的粘贴长度超过 900 mm 之后, 其 RC 梁极限荷载提高并不显著, 因此存在一个最优加固长度的问题。

3) 在预载程度较高的二次受力作用下, 二次受力梁极限荷载比粘贴相同长度的 AFRP 布直接加固梁均有所降低, 降低幅度为 8% 左右。而其挠度比粘贴相同长度的 AFRP 布直接加固梁均有所提高, 提高幅度为 15% 左右。这说明无论 AFRP 布粘贴长度多大, 预载程度较二次受力因素对 RC 梁的抗弯性能都有着较大影响。

4 结论

1) 无论在二次受力情况下还是直接加固情况下, 加固梁随着 AFRP 加固层数的增加, 其极限荷载的提高程度趋于平缓。因此, 对于 AFRP 布粘贴层数而言, 存在一个合理配布率的问题。

2) 无论是二次受力情况还是直接加固情况, AFRP 布的粘贴长度越长, 其 RC 梁极限荷载就越大, 但并不是越长越好。加固梁随着 AFRP 粘贴长度的提高, 其极限荷载的提高程度趋于平缓。因此, 对于 AFRP 布粘贴长度而言, 存在一个最优加固长度的问题。

3) 当预载程度超过 70% 时, 持载加固的 RC 梁承载力显著降低。而预载程度较低时, 二次受

力对 RC 梁的承载力影响并不显著。因此本文认为对于预载程度较小的损伤梁而言, 可采取持载加固的方式来提高 RC 梁的承载力。而对于预载程度较高的损伤梁而言, 应采取卸载加固。

参考文献:

- [1] 王树森, 刘寒冰. 碳纤维加固混凝土梁抗弯性能的非线性有限元分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(4): 61-64.
- [2] XINZHENG LU, ZHUANG TAN. Finite element analysis for debonding in the interface between FRP sheet and concrete[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 45-50.
- [3] ESFAHANI M R, KIANOUSH M R, TAJARI A R. Flexural behavior of rein - forced concrete beams strengthened by CFRP sheets[J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2428-2444.
- [4] 张智梅, 孙志洋. 内嵌 CFRP 板加固已损伤 RC 梁抗弯性能的试验研究[J]. 四川建筑, 2012, 10(6): 67-71.
- [5] 魏凝. 芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究和理论分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [6] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [7] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [8] 梁利利. FRP 筋混凝土梁受弯性能分析和数值模拟[D]. 汕头: 汕头大学, 2012.
- [9] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] 滕锦光, 陈建飞, S T 史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

(责任编辑 刘存英)