

文章编号:1671-6833(2005)03-0055-03

二期荷载下碳纤维加固钢筋混凝土梁非线性有限元分析

张雷顺, 黄秋风, 王 娟, 黄书岭

( 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 为了探讨碳纤维布加固钢筋混凝土梁在二期荷载作用下的变形规律, 使用 Visual Basic 编制了二期荷载作用下碳纤维布加固钢筋混凝土梁的非线性有限元程序, 计算结果表明与试验结果吻合较好, 用该程序能较好地模拟、分析加固梁的受力过程, 通过扩展分析, 提出了对梁加固时应注意的有关问题。  
**关键词:** 二期荷载; CFRP; 加固; 非线性有限元  
**中图分类号:** TU 448.27 **文献标识码:** A

0 引言

目前, 国内外虽然对 CFRP(碳纤维布) 加固钢筋混凝土梁进行了大量的试验研究和相应的数值模拟分析计算<sup>[1]</sup>, 但主要侧重初始为零应力状态下的梁; 在实际加固工程中, 有相当多的构件是无法或不易卸载的, 这就需要开发研究适用于二期荷载作用下的非线性有限元分析程序。在二期荷载作用下进行加固, 此时梁为非零应力状态, 有的甚至于已存在裂缝, 而加固层为零应力状态。当施加二期荷载时, 与梁在零应力状态加固施加荷载相比, 梁的工作性态将有较大区别。本文作者针对这些特点, 在程序编制时采用了一些技术措施和方法, 较好地解决了程序设计中碰到的困难, 编制了适用于一期和二期何载下的 CFRP 加固钢筋混凝土梁的非线性有限元分析程序。该程序可供加固分析计算使用, 也可为进行加固理论研究参考。

1 程序编制

有限元模型采用分离式, 混凝土为四结点矩形单元, 钢筋和 CFRP 采用线单元。为模拟钢筋和混凝土之间的黏结滑移, 在两者之间加入了双弹簧黏结单元。

1.1 本构关系和破坏准则

混凝土单向受力下的本构关系采用 Saenz 表达式<sup>[2]</sup>, 双向受力下的本构关系及破坏准则采用钢筋混凝土有限元分析中常用的 D-P 模式<sup>[3]</sup>和

K-G 破坏准则<sup>[4]</sup>。

钢筋一般都处于单轴受力状态, 因此, 其应力应变关系采用理想弹塑性模型。

黏结单元采用 Houde 和 Mrza 的经验公式<sup>[5]</sup>

$$\tau = (5.30 \times 10^2 s^3 - 2.52 \times 10^4 s^2 + 5.87 \times 10^5 s^3 - 5.47 \times 10^6 s^4) \sqrt{\frac{f_c}{40.7}} \quad (1)$$

其中  $f_c$  为混凝土抗压强度,  $N/mm^2$ ;  $\tau$  为黏结应力,  $N/mm^2$ ;  $s$  为相对滑移量,  $mm$ 。

碳纤维布本构关系取为线性, 其表达式为

$$\sigma_{frp} = E_{frp} \epsilon_{frp} \quad (2)$$

其中:  $\sigma_{frp}$  为碳纤维布的应力,  $N/mm^2$ ;  $E_{frp}$  为碳纤维布弹性模量;  $\epsilon_{frp}$  为碳纤维布的应变。

1.2 单元破坏后的处理

1.2.1 混凝土单元

对于双向应力状态下的单元, 当受拉应力  $\sigma_1$  或应变先达到开裂条件, 将该方向拉应力调整为零, 同时将材料在这一方向的弹性模量调整为零。在  $\sigma_2$  方向上, 由于  $\sigma_1$  调整为零后, 变成单向受力状态, 所以, 将材料在  $\sigma_2$  方向上的弹性模量  $E_2$  调整为单向受力下相应的弹性模量; 同时根据这一方向的实际应变值, 由单向应力应变关系重新确定此方向的应力值。然后根据单向拉或压破坏条件, 确定其是否破坏。

作上述调整之后, 在开裂的一瞬间, 单元失去平衡, 应将产生的不平衡应力转化成不平衡结点力, 一部分传递给钢筋和 CFRP, 其余的传递给混

收稿日期:2005-03-09; 修订日期:2005-05-26

作者简介:张雷顺(1950—), 男, 河南省郑州市人, 郑州大学教授, 主要从事钢筋混凝土基本理论、混凝土非线性有限元分析及混凝土工程补强加固技术研究。

凝土, 并采用 N-R 修正法<sup>[9]</sup>, 将其并入下一级荷载增量进行计算.

对于双向应力状态下的单元, 若受压方向先达到破坏条件, 应把单元所有应力调整为零, 两个方向上的弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$  调整为零; 同时, 将所有应力转化为不平衡结点力分配给混凝土.

1.2.2 CFRP 单元

在梁的整个受荷过程中, 碳纤维布的应力应变状态基本处于线性状态, 因此, CFRP 不产生不平衡应力.

1.3 二期荷载下的程序编制

为模拟二期荷载的作用, 程序采用了生死单元法: 结构在二期荷载作用下, 碳纤维布不参与受力, 结构总刚中不包含碳纤维布单刚的贡献, 施加二期荷载时, 将碳纤维布单刚集成到总刚中.

程序中假定 CFRP 和混凝土完全粘结. 在二期荷载作用下, 结构各结点产生的累加位移为  $\{\delta_{-1}\}$ , CFRP 单元刚度集成到总刚后, 施加荷载增量  $\{\Delta R_i\}$ , 结构各结点产生位移增量  $\{\Delta \delta\}$ , 此时的累加位移为  $\{\delta\} = \{\delta_{-1}\} + \{\Delta \delta\}$ . 对于 CFRP 单元, 施加二期荷载时, 单元的结点位移  $\{\delta_{-1}\}^e$  为零, CFRP 单元刚度集成到总刚后, 施加荷载增量  $\{\Delta R_i\}$ , 碳纤维布单元的累加位移  $\{\delta\}^e = \{\delta_{-1}\}^e + \{\Delta \delta\}^e$ .

可以看出, 碳纤维布存在应变滞后现象, 即碳纤维布在粘贴以前, 混凝土单元已存在位移  $\{\delta_{-1}\}$ , 此时的碳纤维布位移为零, 碳纤维布滞后应变为  $\{\epsilon_{fip0}\} = [B] \{\Delta \delta_{-1}\}$ .

在施加二期荷载时, 如果混凝土单元破坏, 应将混凝土的不平衡结点力传递给相应的钢筋单元. 施加二期荷载时, 按照分配比例<sup>[1]</sup>将混凝土的不平衡结点力传递给 CFRP 和钢筋单元.

2 程序计算结果与试验结果对比分析

2.1 对比试验简介<sup>[7]</sup>

试验设计 6 根 CFRP 抗弯加固简支梁, 均采用矩形截面, 计算跨度 1 600 mm. 6 根试验梁分为 3 组, 分别配置了 2Φ8、2Φ10、2Φ12 的 HPB 235 型钢筋, 每组中一根试验梁预制的最大裂缝宽度控制在 0.05 mm 左右, 另一根预制的最大裂缝宽度控制在 0.20 mm 左右. 混凝土设计强度等级为 C25.

试验值与程序计算值的对比见表 1.

表 1 CFRP 抗弯加固简支梁破坏荷载  
试验值与程序计算值对比  
Tab. 1 Comparison of bending resistance of simple beam  
between the value of experiment and program's result

梁 号	砼强度等级 /MPa	截面尺寸 /mm	试验值 /kN	考虑二期荷载	
				一次受力 计算值/kN	计算值-一期荷 载值/kN /kN
BM8-1	27.7	200×112	42	36	48
BM8-2	24	197×110	41	33	30
BM10-1	22.4	207×112	56	54	42
BM10-2	24	210×107	53	48	45
BM12-1	22.5	200×112	60	51	48
BM12-2	22	203×107	65	51	48

说明: BM8-1 中, 8 为钢筋直径, 1 为同一组梁的序号.

2.2 二期荷载情况下的抗弯承载力

从表 1 中可以看出, 在不考虑二期荷载情况下, 程序计算值与试验值比较接近; 考虑二期荷载作用时, 程序计算的试验梁抗弯承载力大部分都有不同程度的降低, 降低幅度大概在 10% 左右.

2.4 二期荷载情况下的荷载挠度曲线图

从图 1 中看出, 在弹性阶段, 考虑二期荷载作用的试验梁挠度与不考虑的挠度基本相同; 当试验梁进入非线性阶段后, 相同荷载下试验梁的挠度值随二期荷载的增加而增大, 且二期荷载越大, 最终结构破坏时的挠度越大, 尤其二期荷载增大到破坏荷载的 30% 时, 挠度随荷载的增长明显加快.

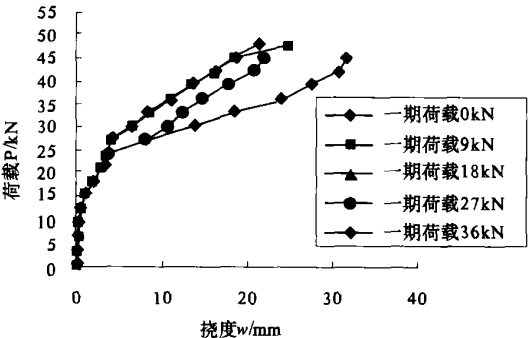


图 1 一期荷载的大小对荷载挠度曲线的影响  
Fig. 1 Effect of the different first  
load on load displacement curves

2.5 二期荷载情况下的荷载 CFRP 应力曲线

由于碳纤维布是在一期荷载施加后才参与受力,因此,其应力与不存在二期荷载作用试验梁的碳纤维布应力相比要小.从图 2 中可以看出,一期荷载越大,碳纤维布的滞后应变越大,结构破坏时碳纤维布的应力越小,通常达不到碳纤维布的抗拉强度,碳纤维布高抗拉强度的优点得不到发挥.因此,CFRP 适用于一期荷载较小的结构加固,使用 CFRP 加固前,应尽量卸除施加在结构上的荷载.

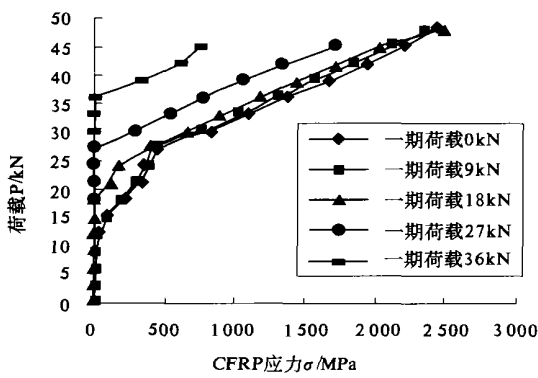


图 2 一期荷载的大小对荷载 CFRP 应力曲线的影响  
Fig.2 Effect of the different first load on load stress of CFRP curves

3 结论

- (1) 本文作者编制的非线性有限元程序较好地模拟分析了碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受力过程,所得结果与试验值吻合较好.
- (2) 程序的扩展分析表明,过大的一期荷载对于加固不利,使用 CFRP 加固时,应尽量卸除施加在结构上的荷载.

参考文献:

[ 1 ] 赵建立.碳纤维加固钢筋混凝土梁非线性有限元分析[ D ]. 郑州: 郑州大学, 2004.

[ 2 ] 沈聚敏,王传志,江见鲸.钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

[ 3 ] DARWIN D, PECKNOLD D A. Nonlinear biaxial stress-strain law for concrete[ J ]. ASCE, 1977, 103( EM2 ): 229~241.

[ 4 ] 过镇海. 钢筋混凝土原理[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 108~109.

[ 5 ] MRZA S M, HONDE J. Study of bond stress slip relationship in reinforced concrete[ J ]. ACI, 1979, 76( 1 ): 19~46.

[ 6 ] 康清梁,张雷顺,宋玉普. 钢筋混凝土有限元分析[ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 152~153.

[ 7 ] 蔺新燕. 碳纤维加固钢筋混凝土梁试验研究与分析[ D ]. 郑州: 郑州大学, 2004.

The Non linear Finite Element Analyses of CFRP reinforcement of RC Beams Under Secondary Loads

ZHANG Lei -shun , HUANG Qu -feng , WANG Juan , HUANG Shu -ling

(School of Environmental and Hydraulic Engineering , Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002,China)

**Abstract :** In order to study the deformation rule of the CFRP reinforcement of RC beams under secondary loads ,a non linear finite element program of Visual Basic on RC beam reinforcement with carbon fiber reinforced polymer under the second load is completed in this paper .It indicates that the consequence of program is credible by comparing the result of program with the experiment .The program can well simulate and analyze the load bearing process of the reinforced beams .After further analysis this paper presents the relevant problems to which attention should be paid when the beams are reinforced .

**Key words :** secondary loads ; CFRP ; reinforcement ; non linear finite element