

文章编号:1673-9469(2010)02-0025-05

基于 Ansys 碳纤维加固混凝土梁的裂缝模拟分析

石欠欠,姜新佩

(河北工程大学 水电学院,河北 邯郸 056021)

摘要:利用 Ansys 有限元软件建立了在单调荷载作用下钢筋混凝土梁的模型,在对未加固梁和碳纤维布加固梁的开裂荷载、极限荷载与相应实验结果对比的基础上,分析了加固梁在不同荷载下纤维布和混凝土的应力变化,模拟了两种梁的裂缝分布和开展规律。结果表明,Ansys 模拟加固混凝土梁的开裂荷载和极限荷载与实验值的最大误差为 10.2%,碳纤维布的工作过程与实际相吻合,裂缝的分布及开展也符合试验现象。

关键词:Ansys;碳纤维布;应力;裂缝

中图分类号:TU375

文献标识码:A

Cracking simulative analysis of reinforced carbon fiber reinforced concrete beam based on Ansys

SHI Qian-qian, JIANG Xin-pei

(College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056021, China)

Abstract:With finite element model of Ansys software, the model of reinforced concrete beam is established under monotonous loads. At the basic of cracking and ultimate loads between Ansys calculate value and experimental ones, the stress changing of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) and concrete are analyzed at different loads. The cracking and development rules are also simulated. The results show that the maximum error of Ansys calculate values and experimental ones is in 10.2%, function of the CFRP conform to experimental ones, the distribution and development of crack also accord with experimental ones.

Key words:Ansys; CFRP; stress; crack

碳纤维加固混凝土结构是纤维加固材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)技术中一种应用较普遍,性能较好的混凝土结构补强加固新技术。由于其适应性好,对几何外形复杂的结构构件可迅速便捷的粘贴加固,从而在土木工程领域得到广泛应用。据不完全统计,国内外应用碳纤维布(CFRP)对桥梁、道路、隧道、建筑物等多种混凝土结构进行了加固^[1]。日本、美国等国家编制了一系列碳纤维材料加固混凝土结构设计及施工标准和指南用于指导加固设计及施工^[2]。限于试验分析的随机性,实验数据的离散型,及受外界干扰因素多,在 CFRP 加固混凝土梁抗弯试验的基础上,利用有限元分析软件 Ansys 对加固前后梁的开裂荷载及极限荷载,混凝土开裂的全过程进行模拟再现试验历程,为以后计

算机模拟分析替代试验分析提供模型。

1 试验设计及有限元分析

1.1 分析模型及材料参数^[3]

Ansys 模拟采用与试验梁相同的结构及配筋方式(图 1)。混凝土设计强度 C25、弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4$ Mpa、泊松比 $\mu = 0.2$ 、抗拉强度由公式 $f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$ 换算得到;钢筋、CFRP 的参数分别见表 1 和表 2,CFRP 粘贴长度为 3 000mm,试验模型采用 3 分点加载法。在有限元软件计算过程中考虑到节点数目的多少将影响计算速度及收敛性,因此在建模时未考虑箍筋的作用。

收稿日期:2010-01-07

基金项目:河北省建工新产品研究计划(2005-104)

作者简介:石欠欠(1986-),女,河北藁城人,硕士研究生,从事结构工程方面的研究。

表 1 试验用钢筋的材料力学性能

Tab.1 The mechanical property of reinforcing bar

性能参数	钢筋直径	泊松比	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	屈服强度/Mpa	极限强度/Mpa
受拉钢筋	Φ10	0.3	24.3	36.7	310	468
受压钢筋	Φ6	0.3	9.3	14.8	329	523

表 2 碳纤维布材料的主要力学性能

Tab.2 The main mechanical property of CFRP

厚度/mm	宽度/mm	密度/(g·m ⁻²)	抗拉强度/Mpa	弹性模量/Mpa	极限拉应变	泊松比
0.17	100	220	3 550	2.35 × 10 ⁵	0.015	0.17

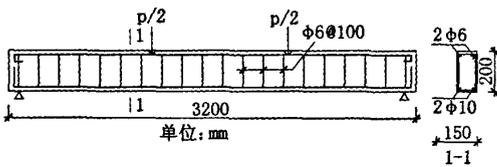


图1 试验梁模板及配筋图

Fig.1 The figure of form and reinforcing bar of beams

1.2 基本假定

1)在 Ansys 分析中采用分离式模型即混凝土(SOLID65) + 钢筋(LINK8) + CFRP(SHELL41)来模拟各个材料,所以认为各个接触面之间有很好的粘结力无相对滑移^[4]。

2)在加载过程中各种材料应变满足变形协调原理^[5]。

3)RC 梁具有足够的抗剪能力。

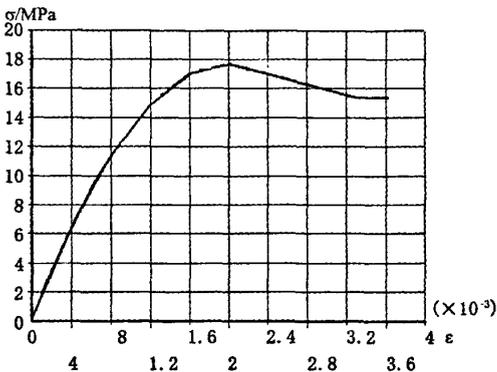


图2 混凝土应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete

1.3 本构关系

1)混凝土采用标准试验所测定的应力应变关

系,见图 2。

2)钢筋均为理想的弹塑性材料^[6],见图 3。

3)CFRP 为正交各向异性的线弹性材料, $\sigma_f = E_f \epsilon_f$, ϵ_f 为其极限拉应变。

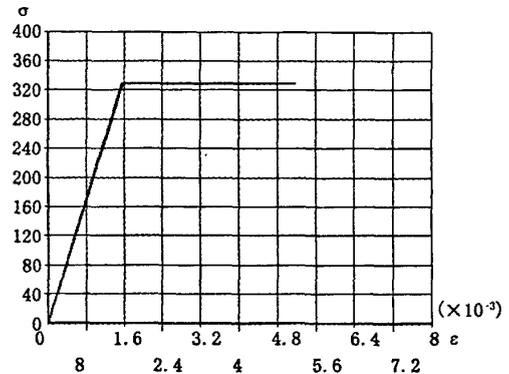


图3 钢筋应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of reinforcing bar

2 混凝土结构的开裂模型

混凝土最重要的特征之一是它的抗拉强度很低,在低荷载作用时就会产生裂缝,使结构带裂缝工作。裂缝的产生会引起周围应力的突然变化和刚度的降低,这是引起钢筋混凝土非线性重要因素,因此裂缝模拟的合理与否是正确分析钢筋混凝土结构的关键之一。目前对于钢筋混凝土结构的裂缝模拟方法主要有两种,即弥散裂缝模式和分布裂缝模式^[7-8]。一般的有限元软件中均采用分布模拟方式,这种方法在模拟混凝土达到极限状态甚至开裂后能较好的描述混凝土的开裂过程。

Ansys 有限元分析中的模拟裂缝是通过修正应力应变关系,引入垂直于裂缝表面方向上的一个缺陷平面来表示在某个积分点出现裂缝。Ansys 中的 Pcrack 命令将裂缝描述为第一裂缝,在所裂

面用红色的圆形轮廓线显示,在此基础上由剪力传递作用产生后续裂缝分别为第二裂缝及第三裂缝分别用绿色和蓝色轮廓线显示。此外 Ansys 还可以记录开裂以后各个荷载步下的裂缝情况,对裂缝的发展可以跟踪分析。

Solid65 单元的状态为张开裂缝、闭合裂缝、压碎和完整单元共四种,本文采用张开裂缝单元应用多轴应力状态下的混凝土的失效准则,表达式如下

$$\frac{F}{f_c} - S > 0$$

其中 F —主应力($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)函数; S —失效面; f_c —单轴抗拉强度。

若应力状态不满足上式则不发生开裂;若应力状态满足上式并存在有拉伸应力将导致开裂。在 Ansys 中通过引入一个剪切力传递系数 β_i 来模拟后续荷载在裂缝表面产生滑动或剪切时的剪切力的损失。在实际中这些传递的剪切力主要有钢筋与混凝土间粘结剪应力、碳纤维与混凝土间粘结剪应力和开裂面的相对微小错动而产生的界面正应力三种形式^[9-10],在模拟过程中必须加以考虑。对于一般的梁而言 $\beta_i = 0.5$;对于深梁 $\beta_i = 0.25$;对于剪力梁 $\beta_i = 0.125$ 。在建立实体模型时采用钢筋和混凝土的分离式的三维模型即混凝土(SOLID65) + 钢筋(LINK8) + CFRP(SHELL41) 取 $\beta_i = 0.5$ 。

3 结果与分析

3.1 荷载分析

表 3 Ansys 计算值与试验值对比分析

Tab.3 Cracking load and ultimate load between Ansys calculate value and experimental one

梁号	开裂荷载			极限荷载		
	试验值/kN	计算值/kN	相对误差/%	试验值/kN	计算值/kN	相对误差/%
A 未加固梁	6.00	6.61	10.2	22.5	23.4	4.0
B 加固梁	7.50	7.84	4.5	26.5	28.59	7.8

表 3 对比了 Ansys 的计算值和试验值,其中仅梁 A 的开裂荷载计算误差较大,其余数据吻合较好,能反应工程实际情况。计算值和试验结果之间的差异性,主要是由于实际在加载过程中碳纤

维布的剥离、构件之间的滑移、材料的不均匀性等造成。

碳纤维加固以后梁的开裂荷载提高不是很大,B 梁的开裂荷载较 A 梁提高 25%,主要是因为对于碳纤维加固梁碳纤维布在使加荷载初期并没有发挥作用,直至裂缝的出现。这在裂缝分布模拟图中也有所反映,初裂时裂缝的分布范围及扩展高度都相差不多。对于极限荷载 B 梁较 A 梁提高约 18%,这表明 CFRP 加固梁对提高梁的极限承载力是有一定效果的。

3.2 加固梁材料应力分析

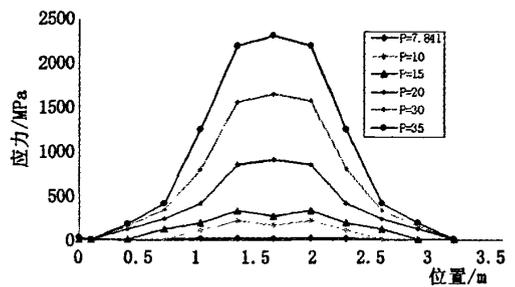


图 4 加固梁沿纵向碳纤维布应力分布

Fig.4 CFRP stress distribution of forced beam along vertical

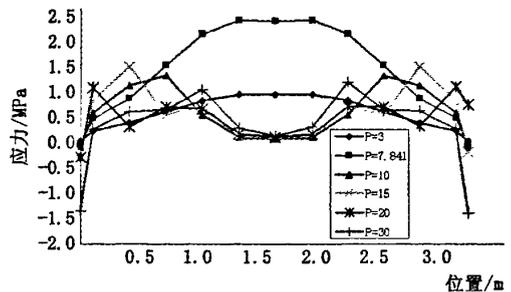


图 5 加固梁底面混凝土沿纵向应力分布

Fig.5 Concrete stress distribution of forced beam along vertical

图 4 所示为 CFRP 在荷载 7.84kN、10kN、15kN、20kN、30kN、35kN 时沿纵向应力分布情况,可以很明显发现当加固梁的承载力达到开裂荷载之前,CFRP 应力很小并趋近于零,说明在梁出现裂缝之前,CFRP 由于很薄几乎不承担力的作用,应力主要由钢筋和混凝土来承担;随着荷载的继续施加,开裂以后应力重新分配 CFRP 应力逐步增大,尤其是在纯弯段应力增长迅速,在达到开裂荷载 7.84kN 以后应力急剧增加,在跨中截面处由

200Mpa 增至 910Mpa, 增长约 3.5 倍。与梁中部的 CFRP 应力相比, 端部则很小; 当接近破坏荷载时, 梁中部碳纤维应力最大。这与加固梁发生剥离破坏时首先从纯弯段开始, 而后向端部延伸的试验现象相符合。

图 5 所示为混凝土在荷载 3kN、7.84kN、10kN、15kN、20kN、30kN 时应力沿梁的纵向分布情况, 在较小荷载作用下即裂缝未出现时受拉区的钢筋、CFRP 和混凝土共同工作, 各承受一部分的拉应力; 当荷载增加到开裂荷载时, 混凝土所受的拉应力达到最大值 2.35Mpa; 开裂以后混凝土的应力分布发生突变, 受拉面积迅速减小, 跨中基本不存在受拉区。在裂缝截面处(主要在跨中部位)裂开的混凝土不再承受拉力, 原先由受拉混凝土承受的拉应力就转移由钢筋和 CFRP 承担; 当荷载增加到钢筋屈服时 CFRP 的受拉作用完全发挥, 这也是 CFRP 在开裂荷载以后应力急剧增长的主要原因。由此可见对碳纤维布的模拟符合其实际工作过程, 该模型的建立与实际加固梁相一致。

3.3 未加固梁和 CFRP 加固梁的裂缝分析

纵观 Ansys 模拟各梁的裂缝发展过程, 在加载初期梁体各材料处于线弹性工作阶段没有裂缝出现, 当达到开裂荷载时对于单元而言也就是最大拉应力(A 梁 2.33 Mpa, B 梁 2.35 Mpa)超过混凝土的抗拉强度 2.32 Mpa 时, 首先出现第一裂缝如图 6 所示, 图中 A、B 两根梁的裂缝情况, 纯弯段内均出现明显的弯曲裂缝, 剪跨段内没有裂缝。并且两根梁的裂缝分布范围、开裂和扩展情况相差不多, 这正体现了 CFRP 在混凝土开裂前几乎不受力的工作特性。

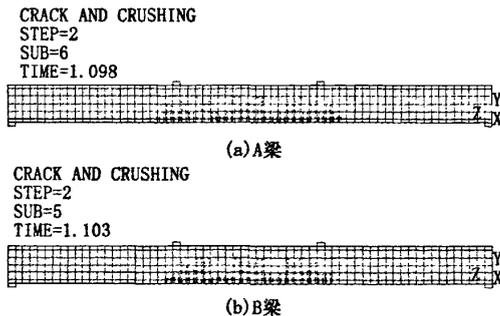


图6 初裂时裂缝分布图

Fig.6 Initial crack distribution of beam

随着荷载逐渐增加, 梁底部的拉应力逐渐增大, 裂缝沿梁体的长度和高度不断发展, 第二、第

三裂缝逐渐扩展。当达到极限荷载时, 裂缝贯穿整个梁体截面, 梁体发生破坏。当沿纵向剖开梁体时发现其内部的裂缝多为第一裂缝, 表面以后两种裂缝居多, 这说明梁的裂缝发展是由表面到内部的延伸。

当 A、B 两个梁发生破坏时其三种裂缝的分布明显不同。梁 A 发生破坏时第一裂缝分布在(从梁的左端算起)350 ~ 2 850mm 的范围内, 其中在跨中的 200mm 范围内已贯穿全梁; 第二裂缝多分布在 700 ~ 2 500mm, 梁高 0 ~ 60mm 范围, 仅有少数分布在跨中处高度为 100 ~ 180mm 的范围内; 第三裂缝主要分布在梁底部三分之一跨长附近。梁 B 发生破坏时第一裂缝绝大多数分布在 200 ~ 3 000mm 范围内, 并在支座附近伴随少量的裂缝, 其中加载点之间的部分第一裂缝已贯通全梁, 其它部分的裂缝开展较充分; 第二、第三裂缝的开展范围几乎相近, 主要分布在梁长 600 ~ 2 600mm, 梁高 0 ~ 140mm 范围内。在试验过程中加固梁较未加固梁破坏时裂缝出现的比较多, 且密度大间距小, 在相同的荷载作用下, 裂缝的长度也短呈现中间宽两边窄的形状。

4 结论

1) Ansys 能够模拟出各种材料在加载时的应力分配, 并给出具体数值使得可以量化梁的工作情况, 加固截面各材料的应力分配关系模拟与实际吻合, 为工程设计时的应力分析提供快速有效的途径。

2) Ansys 软件可以非常直观的模拟碳纤维加固前后梁的开裂等非线性情况, 并且可以记录各荷载子步下的混凝土开裂状态。

3) 虽然碳纤维布本身抗弯刚度低, 不能阻止混凝土开裂, 但是可以延缓中和轴的上移, 使梁的刚度沿梁的全长分布较为均匀, 从而改善了梁的整体性, 增强了梁的截面抗弯刚度, 有效的帮助了钢筋承受拉应力。

参考文献:

- [1] 岳清瑞, 陈小兵, 牟宏远. 碳纤维材料(CFRP)加固修补混凝土结构新技术[J]. 工业建筑, 1998, 28(11): 1-5.
- [2] PETER H, ALEXANDER M, THOMAS J. Reinforced concrete structures [J]. Concrete International, 1998, 20(3): 53-60.

- [3] 姜新佩, 刘丽娜, 邓子辰. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 492 - 497.
- [4] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] 王小燕, 闫博文, 姜新佩. 预应力碳纤维加固 RC 梁的有限元分析[J]. 华北水利水电学报, 2009, 30(2): 40 - 44.
- [6] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 袁勇. 混凝土结构早期裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 张可禾, 周立欣, 董亚男. CFRP 加固带裂疑向板的计算及有限元分析[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(4): 301 - 305.
- [9] 邓子辰, 姜新佩. 预应力碳纤维加固混凝土梁技术问题探讨[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 15 - 18.
- [10] 姜新佩, 王小燕, 刘丽娜. 预应力碳纤维加固 RC 梁挠度和裂缝计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 10 - 13

(责任编辑 马立)

(上接第 21 页)前用了较多荷载子步数且产生较小位移,具有良好的性能。有限元仿真分析能够较好地模拟湿式外包钢加固 RC - L 形柱的力学性能,可以取代部分实体实验,为实际工程应用提供可靠的参考。

参考文献:

- [1] GHOBABAH A, SAID A. Shear strengthening of beam - column joints[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24: 881 - 888.
- [2] HADIMNS. Behavior of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading [J]. *Composite Structures*, 2007, 77(1): 92 - 96.
- [3] 刘瑛, 赵金先, 荣强. 湿式外包钢加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 105 - 111.
- [4] GB50367 - 2006, 混凝土结构加固设计规范[S].

- [5] 张俊杰, 何陶. 型钢轻骨料混凝土梁正截面受弯裂缝实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 9(6): 482 - 485.
- [6] 李华, 黎立云. 钢管混凝土组合节点的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(1): 25 - 28.
- [7] 芳枋, 卫建祥, 慈军, 等. 工程结构的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(3): 30 - 33.
- [8] 谢征勋, 谢敏. 工程事故与安全 - 结构加固技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] 王吉忠, 杨辉, 王苏岩. CFRP 加固高强混凝土柱试验及有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(增刊): 6 - 10.
- [10] 郝文化, 肖新标. ANSYS7.0 实例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(责任编辑 马立)

(上接第 24 页)

参考文献:

- [1] PARK S, CHOI S, SIKORSKY C, *et al.* Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(18 - 19): 5034 - 5050.
- [2] GB50292 - 99. 民用建筑可靠性鉴定标准[S].
- [3] 杨志民. 未确知信息的数学处理方法[J]. 中国管理科学, 2000, 11(8): 192 - 196.
- [4] 浦津修. 关于鉴定评级分级标准问题[J]. 工业建筑, 1990, 20(11): 5 - 8.
- [5] 陈少杰, 顾祥林, 张伟平. 层次分析法在既有建筑结构体系可靠性评定中的应用[J]. 结构工程师, 2005, 21(2): 31 - 35.

- [6] 顾祥林, 陈少杰, 张伟平. 既有建筑结构体系可靠性评估实用方法[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 12 - 17.
- [7] 丁传波, 关柯, 李恩霖. 施工企业安全评价研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(3): 214 - 215.
- [8] 杨树标, 胡光园, 李荣华. 建筑结构的复合加层减震分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 1 - 4
- [9] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] FABIAN C H. Analysis of events in recent structural failures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(7): 1468 - 1481.
- [11] WALKER A C. Study and analysis of the first 120 failure cases, structural failures in buildings[M]. London: The Institution of Structural Engineers, 1981.

(责任编辑 马立)

基于Ansys碳纤维加固混凝土梁的裂缝模拟分析

作者: 石欠欠, 姜新佩, SHI Qian-qian, JIANG Xin-pei
作者单位: 河北工程大学, 水电学院, 河北, 邯郸, 056021
刊名: 河北工程大学学报(自然科学版) 
英文刊名: JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING (NATURAL SCIENCE EDITION)
年, 卷(期): 2010, 27 (2)
被引用次数: 2次

参考文献(10条)

1. 岳清瑞;陈小兵;牟宏远 [碳纤维材料\(CFRP\)加固修补混凝土结构新技术](#) 1998 (11)
2. PETER H;ALEXANDER M;THOMAS J [Reinforced concrete structures](#) 1998 (03)
3. 姜新佩;刘丽娜;邓子辰 [预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的实验研究](#)[期刊论文]-[西北工业大学学报](#) 2007 (04)
4. 郝文化 [ANSYS土木工程应用实例](#) 2005
5. 王小燕;闫博文;姜新佩 [预应力碳纤维加固RC梁的有限元分析](#)[期刊论文]-[华北水利水电学院学报](#) 2009 (02)
6. 过镇海;时旭东 [钢筋混凝土原理和分析](#) 2006
7. 袁勇 [混凝土结构早期裂缝控制](#) 2004
8. 张可禾;周立欣;董亚男 [CFRP加固带裂疑向板的计算及有限元分析](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2009 (04)
9. 邓子辰;姜新佩 [预应力碳纤维加固混凝土梁技术问题探讨](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007 (04)
10. 姜新佩;王小燕;刘丽娜 [预应力碳纤维加固RC梁挠度和裂缝计算](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2008 (04)

本文读者也读过(10条)

1. 许天璇. XU Tian-xuan [ANSYS对预应力混凝土纯扭梁的有限元分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2007, 33 (8)
2. 王小燕. 闫博文. 姜新佩. WANG Xiao-yan. YAN Bo-wen. JIANG Xin-pei [预应力碳纤维布加固RC梁的有限元分析](#)[期刊论文]-[华北水利水电学院学报](#)2009, 30 (2)
3. 张英楠. ZHANG Ying-nan [基于ANSYS的碳纤维约束混凝土结构有限元分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2010, 36 (33)
4. 邵晓健. 万彧. SHAO Xiao-jian. WAN Yu [碳纤维加固RC柱的爆炸动力响应分析](#)[期刊论文]-[佳木斯大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 28 (5)
5. 应蔚中. 古增密. YING Wei-zhong. GU Zeng-mi [高强碳纤维布加固混凝土板的有限元分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#) 2010, 36 (13)
6. 杨小军. YANG Xiao-jun [碳纤维布加固混凝土板的非线性有限元分析](#)[期刊论文]-[山西建筑](#)2005, 31 (22)
7. 李江. 张兴亮. LI Jiang. ZHANG Xing-liang [基于ANSYS的CFRP加固钢筋混凝土梁正截面抗弯模拟](#)[期刊论文]-[安徽建筑工业学院学报\(自然科学版\)](#) 2009, 17 (4)
8. 曾祥蓉. 江世永. 陈进. 王薇. 蔡永君 [基于ANSYS的预应力CFRP布加固混凝土梁有限元分析](#)[期刊论文]-[后勤工程学院学报](#)2004, 20 (3)
9. 唐小林. 王波. 邝新宇 [碳纤维加固钢筋混凝土梁受弯极限承载力仿真分析在有限元软件中的实现](#)[期刊论文]-[新型建筑材料](#)2006 (8)
10. 韩有旺. 李九红. 陈战波. 雷腊梅. 逯鹏. 冯茜. HAN You-wang. LI Jiu-hong. CHEN Zhan-bo. LEI La-mei. LU Peng. FENG Qian [ANSYS在纤维布加固钢筋混凝土梁的非线性分析的应用](#)[期刊论文]-[西北水力发电](#)2006, 22 (4)

引证文献(2条)

1. 郑文英. 赵慧. 王建祥 [CFRP加固技术在某工程中的应用](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2012 (1)
董蛟震. 梁玉国. 魏志涛 [内嵌碳纤维板条加固混凝土梁抗弯性能试验研究](#)[期刊论文]-[河北工业科技](#) 2013 (6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb201002008.aspx