

文章编号:1000-582X(2003)02-0132-04

碳纤维布加固混凝土结构有限元分析*

王小荣¹, 蹇开林¹, 刘敏¹, 陈国福²

(1. 重庆大学资源及环境学院, 重庆 400044; 2. 重庆建筑科学研究院, 重庆 400012)

摘要:用碳纤维布(CFRP)加固混凝土结构后,应力发生了重分布,存在二次受力问题,国内外很多的学者对其进行了大量的研究。总结了这些方法,分析了它们各自的优劣。在此基础上,提出了一种新的研究方法,就是基于大型通用商业有限元软件 Ansys 上进行二次开发。通过加入相应的新单元、本构关系、破坏准则等。所得结果与实验值比较吻合。

关键词:碳纤维布; 加固; 有限元; Ansys; 二次开发

中图分类号: TB121

文献标识码: A

碳纤维布(CFRP)在混凝土结构维修加固上的运用,近年来得到了很大的发展。由于混凝土结构用碳纤维布加固后,载荷增加,存在应力滞后状况,应属二次受力问题(原结构在加固前已处的受力状态,称为第一次受力状态。对原结构加固后,后加固部分构件变形分到部分荷载效应而受力,叫作第二次受力^[1]),具有很大的复杂性,目前的研究是分散的,表层的。大量的加固工程采用了折减系数法。而折减系数法往往因人、因地、因建筑物的不同而变化较大。而要进行加固设计的计算,就必须搞清楚加固后混凝土构件及碳纤维布的应力是如何重分布的。

国外,如日本、美国等发达国家在利用碳纤维加固混凝土结构方面较早,在80年代就开始大量应用了,对其的加固机理研究也较早。研究的成果也比较成熟,并且有了自己的碳纤维布加固建筑结构设计规范^[2]。国内是从90年代引入了碳纤维布加固建筑结构的加固机理开始于1996年左右。

由于此问题的复杂性及其重要性,国内的很多科研院所都投入了大量的人力,物力来进行研究。采用了很多种方法来进行研究,并取得了许多成果^[2]。但到目前为止,还没有统一的认识,也没有制定相应成熟的规范^[1]。

鉴于此,笔者总结了这些研究成果,分析了它们的优缺点。在此基础上,提出了一种新的研究碳纤维加固机理的方法。就是基于大型 Ansys 软件进行二次开发。对如何进行二次开发作了详细论述。

通过查阅大量文献资料,总结众多学者的研究方法,可归纳为以下两种主要方法:

1)通过做大量的实验来研究碳纤维布的加固机理如天津大学赵彤博士领导的一个中日合作项目。此项目是与日本九州产业大学工学部建筑学科的河村博之教授合作开展的名为“碳纤维布加固补强建筑结构研究”的国际合作项目。该项目对碳纤维布补强加固混凝土结构的受力特性和破坏机理进行了深入分析,并对碳纤维材料与粘接剂的材料性能;碳纤维布约束混凝土的受力特性;碳纤维布补强加固钢筋混凝土受弯构件的正截面承载力及斜截面承载力;碳纤维布补强加固钢筋混凝土柱正截面承载力及改善钢筋混凝土柱的抗震性能等各个方面进行了全面进行了研究,并得出了很多的重要结论和公式^[2]。

另外有的学者是在实验的基础上,再结合已有的建筑其他规范,如《混凝土结构设计规范》和借鉴国外的碳纤维布加固设计规范,如日本的 ACI-440 委员会 FRP 设计指南中关于 CFRP 强度取值的相关规定来推导碳纤维布加固设计计算的公式^[3]。

在所得出的公式中都是在利用所得实验数据,再试图用数理统计等数学方法,用材料力学,弹性力学,并加以很多假设,如:①假定初始时混凝土受压应力-应变关系为线性关系,来计算碳纤维布的滞后应变,②达到受弯承载力极限状态前,碳纤维布与混凝土之间粘接可靠,不发生粘接剥离破坏等,来确定碳纤维布的加固机理^[2-4]。这样一方面这些为了简化计算而作的假设,就会对设计和计算造成很大的误差,另一方面花去很多的人力,财力。并且很多现象无法做出合理的力学解释,如在加固柱时,无法解释分段包比全包效果好的原因;在优化碳纤维布的层数及分段包的距离时,

* 收稿日期:2002-06-21

作者简介:王小荣(1973-),男,四川渠县人,重庆大学在读硕士,主要从事建筑结构方面的研究。

靠实验是很难得到的。如图 1 所示^[2]。

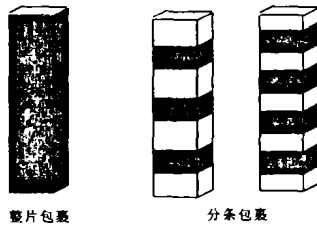


图 1 碳纤维布包裹形式

2) 用有限元方法来进行研究

这里又分为两种情况：①一些学者用大型的通用软件(如 Marc, Ansys)来进行研究。如实施“国家攀登计划和国家自然科学基金项目”的很多学者。采用的有限元模型就是把用碳纤维布加固后的钢筋混凝土当作一个整体来划分单元,并且仅考虑了线性状态^[5]。因为这些有限元分析软件并非都有用户定制的系统,因此用它们来处理一些特殊问题就非常粗糙,忽略了粘结层的特殊性质、新材料的本构关系、新的破坏准则等,这样得出的结果肯定会与实际的相差很大。②一些学者通过实验,如汕头大学的谢慧才等,完全自己开发了有限元程序,该软件考虑了粘接层的作用,建立了一个单元-节理元,并把钢筋和混凝土分别划分了单元,但并没有考虑钢筋和混凝土之间的破坏形式^[6]。这一方面费时、费财,另一方面其计算的精度及通用性仍有疑问^[7]。

1 基于 Ansys 有限元法

通过以上的分析,在吸取众多学者的研究方法及其成果的基础上,笔者采用新的方法来研究,就是基于大型软件 Ansys 进行二次开发。这可节约人力和财力和提高计算精度。

大型通用软件 Ansys 在土木工程上的运用是非常优秀的,具有强大的线性和非线性处理能力,Ansys 是被国内的大多从事土木工程研究的学者所熟悉的,并且提供给用户许多友好的二次开发接口环境。如 APDL (Ansys Parameter Design Language), UIDL (User Interface Design Language) 以及编写宏命令等,另外,还

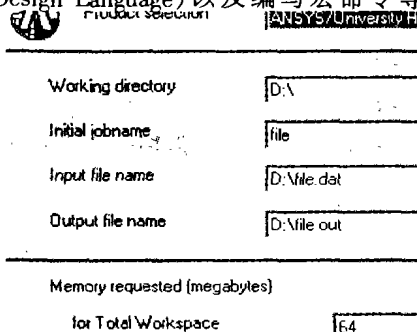


图 2 AnsysB 运行界面

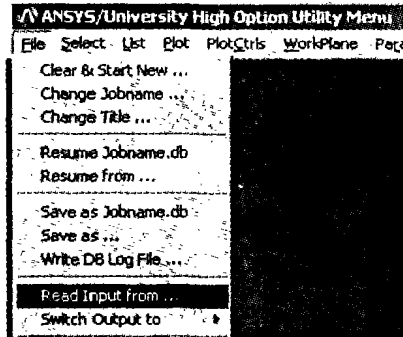


图 3 主菜单读入界面

提供了一个批处理程序 AnsysB.exe, 它可以直接读取以文本格式存储的命令流文件^[8], 如图 2 所示; 或者在 File 菜单下的 Read input from 也是可以读入命令流文件, 如图 3 所示。在里面可加入符合用户需要的用户单元, 以及相应的本构关系和破坏准则等, 再利用 Ansys 优秀的前处理 (Preprocessor), 求解 (Solution), 后处理功能就可得到很好的效果。

2 基本原理

1) 随着研究的深入, 人们对混凝土, 钢筋的本构关系有了更深入的认识。所以首先要确定混凝土和钢筋的合适的本构关系; 现在混凝土和钢筋的本构表述很多, 用户可通过实验来选择自己比较合适的本构关系, 或者自己建立本构关系。本问题的本构关系可采用 Darwin - Pecknold 正交异性模型; 钢筋设为双特性强化材料, 其应力应变关系为^[6,9]:

$$\sigma_x = \begin{cases} E_s \epsilon & \sigma_f \leq \sigma_{fy} \\ f_y + (\epsilon - \epsilon_y) E_T & f_y < \sigma_f \leq \sigma_{fu} \\ 0 & \sigma_f \geq \sigma_{fu} \end{cases}$$

2) 钢筋和混凝土之间的破坏形式的确定, 可处理成粘接 - 滑移的破坏状态。现在钢筋混凝土结构有限元模型主要有三种: ①整体式, 将钢筋和混凝土作为一个整体来划分单元 ②分离式, 这与整体式刚好相反, 将混凝土和钢筋各自划分成足够小的单元, 按照混凝土和钢筋不同的力学性能, 选择多种不同的单元形式 ③组合式, 这种模型是介于整体式和分离式之间, 假定钢筋和混凝土两者之间的相互粘接很好, 不会有相对滑移。于是在单元分析时, 可分别求得混凝土和钢筋对刚度矩阵的贡献, 组成一个复合的单元的刚度矩阵^[10-12]。根据已有软件的情况单元确定的计算模型采用分离式: 对钢筋和混凝土分别划分单元, 混凝土单元为 3D 实体单元 (Ansys 中的 Solid65 单元), 钢筋为线单元 (Ansys 中的 Link8 单元), 然后在钢筋和混凝土单元在同一坐标位置的节点之间增设虚拟的双弹簧联接单元 (Ansys 中的 Spring 单元, 也可对两个单弹簧单元进行单元组合, 构成这个新单元, 具体方法可参见文献

[4])。如图4所示^[7,10]。

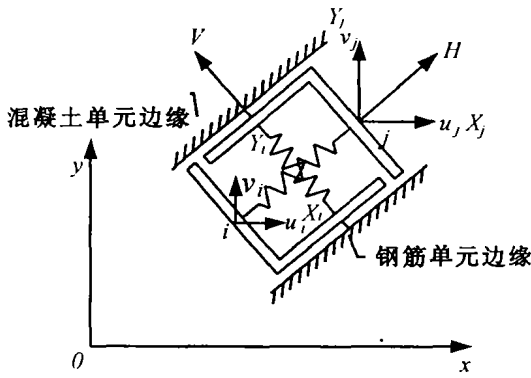


图4 双弹簧联接单元

粘接滑移关系的经验公式可采用以下国内外目前比较公认的具有代表性的关系式：

Nilson 整理实验结果拟合的粘接 - 滑移关系的经验公式：

$$\tau = 9.8 \times 10^3 s - 5.74 \times 10^6 s^2 + 0.836 \times 10^9 s^3 \quad (1)$$

Houde 和 Mirza 从 62 个变形钢筋模拟缝间粘结强度的试件和 6 个模拟锚固粘结强度的梁端实验得出一个考虑了混凝土抗压强度 f_c 影响的四次多项式：

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

东南大学宋启根教授拟合的公式：

$$\tau = 67.17 \times 10^3 s - 21.72 \times 10^6 s^2 + 2.19 \times 10^9 s^3 \quad (3)$$

以上的式子中, τ 以 Mpa 计, 滑移以 cm 计。

清华大学滕智明教授提出的 $\tau - s$ 关系为：

$$F_2(x) = \sqrt{4 \frac{x}{l_a} \left(l - \frac{x}{l_a} \right)} \quad (5)$$

$$F_1(s) = As + Bs^2 + Cs^3 + Ds^4 \quad (6)$$

式中, A, B, C, D 为常数; c/d 为覆盖层相对厚度; f_u 为混凝土的劈裂强度; l_a 为钢筋的埋置长度; x 为钢筋的埋置深度^[8]。

3) 碳纤维布, 粘结层(环氧树脂)都是一种新型的材料, 现在的很多的软件都还未建立它们的本构关系, 所以还需建立两者的本构关系。可通过实验来测定碳纤维布和粘接剂的基本力学性能, 从而推导其本构关系。现在国内外在这方面都做了很多的试验, 试验数据是很容易得到的^[2,9-13]。

4) 混凝土与碳纤维布之间的粘结层是研究的主要课题, 它包括了两个方面: 一是接触面的本构关系, 尤其是剪应力和剪切变形之间的关系; 二是接触面单元, 它是有限元计算中用以模拟接触面变形的一种特殊单元。目前以接触摩擦单元, Goodman 单元(当初是被用来模拟岩石节理的单元, 也叫节理元), Desai 的薄层单

元为代表^[10-13]。从本问题看来, 采用 Goodman 单元最为合适, 并选择无厚度的四结点单元。如图 5 所示。这种单元是一种退化了的四边形单元^[6]。而现在的大型软件中都没有这个单元, 所以必须开发一个这样的单元。要推导其单元刚度矩阵, 平面粘塑性本构关系^[10,14-15]。

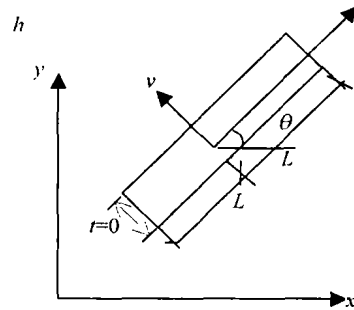


图5 界面粘结单元

建立新单元的接口如下:(假设 ANSYS 安装目录为 C:\ANSYS56; 假设用户工作目录为 D:\user)

① 拷贝相关文件

```
D:\user > copy c:\ansys55\custom\user\intel\uec101.F
```

```
D:\user > copy c:\ansys55\custom\user\intel\uel101.F
```

② 编辑 uel101.F

将下面的程序段

```
c
call TrackBegin('uel101')
c
c --- define initial data
c --- elmdat pointers defined in elparm
mat = elmdat(PMAT)
```

在这里加入用 FORTRAN6.0 以上编写的单元的刚度矩阵。注意设置好路径, 不然有些库文件不能正确连接。

③ 行编译连接(参见用户命令)

5) 制作一个有好的用户界面, 将软件进行封装, 以提高其通用性。

3 算例分析

如图 6 所示试件尺寸为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 试件所用混凝土材料为 C40 中砂碎石混凝土, 布置了 2 根直径为 30 mm 的受力钢筋, 没有分布钢筋等。碳纤维布的厚度为 0.165 mm, 其弹性模量为 $3.1 \times 10 \text{ Mpa}$ 。

对于探讨碳纤维布增强混凝土构件的破坏机理, 推导其本构关系, 荷载—扰度曲线无疑是重要依据。其实验和有限元分析结果对比如图 7 所示。

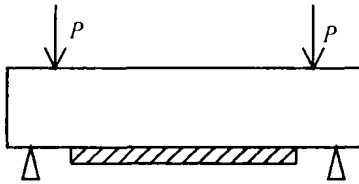
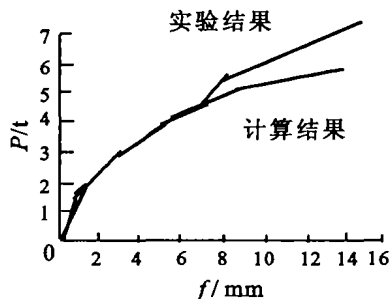


图 6 加固混凝土梁简图

图 7 荷载—挠度曲线
(实验结果来自文献[16])

4 结 论

从图 7 以及计算数据和实验数据来看,有限元计算的结果与实验数据的误差在 10% 左右,是在允许的误差范围内的。造成这种误差的主要因素有两个方面,一方面来自实验本身的误差,如测试的精确,粘结层的施工质量等;另一方面来自有限元计算中的对钢筋与混凝土和粘结层的粘结力的取值判断等。

长期以来,研究钢筋混凝土结构,都采用大量实验的方法,靠拟合实验数据所得的经验公式来进行设计和计算。随着有限元和计算机技术的不断发展,钢筋混凝土结构的力学分析也得到迅猛发展。力学问题的分析大量开始采用计算机仿真分析。

大型有限元软件 Ansys 等是混凝土非线性有限元分析的利器,若能有效的使用这一工具,便节约大量实验而无须耗费巨额资金,还能对一些靠实验无法解决的问题求得普遍解答。

参考文献:

- [1] 王孔藩. 力学在建筑结构诊断、加固中的广义延拓[A]. 第六届建筑物鉴定与加固论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999. 15-30.
- [2] 赵彤, 谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [3] 叶列平, 催卫, 岳清国, 等. 碳纤维布加固混凝土构件正截面受弯承载力分析[J]. 建筑结构, 2001, 3: 3-5.
- [4] 胡孔国, 陈小兵, 岳清瑞, 等. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. 建筑结构, 2001, 31: 63-65.
- [5] 黄彦虎, 黄小清. 纤维版增强混凝土缺口梁破坏过程数值分析[J]. 华南理工大学学报, 2001, 28(6): 57-60.
- [6] 谢慧才, 刘金伟, 熊光晶. 钢筋混凝土修补梁实验研究和有限元分析[A]. 第五届全国建筑物鉴定与加固改造学术论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 240-245.
- [7] 赵昕, 李杰. 层间隔震结构隔震垫的有限元模拟[J]. 建筑结构, 2001, 31, (3), 66-68.
- [8] 刘龙强, 吴胜兴, 周继凯. ANSYS 软件分析钢筋混凝土粘接滑移关系的二次开发实践[J]. 工程力学增刊, 2001, (SO)85-89.
- [9] 罗苓隆. 碳纤维布加固技术应用与发展中的几个问题[A]. 第五届建筑物鉴定与改造文集[C]. 北京: 建材工业出版社, 1998, 136-141.
- [10] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土非线性有限元理论与应用[J]. 同济大学出版社, 1997.
- [11] GOODMAN RE. Methods of Geological Engineer in Discontinuous Rocks[M], west publishing company, USA, 1976. 20-33.
- [12] 詹先仪. 非线性有限元分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987.
- [13] 张凤翻. 混凝土结构加固修补片材的选材和使用[J]. 建筑结构, 2001, 31(2): 6-8.
- [14] 安关峰, 高大钊. 接触面弹性本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 88-91.
- [15] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实现[M]. 西安: 西北大学出版社, 1999.
- [16] 陈东. 碳纤维布加固混凝土梁应力分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1998.

Finite Element Analysis of Concrete Structures Strengthened with Carbon Fiber Sheet

WANG Xiao-rong¹, JIAN Kai-lin¹, LIU Min¹, CHEN Guo-fu²

(1. College of Resource & Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Construction Research Institute, Chongqing 400012, China)

Abstract: Stress redistributes after the concrete structures strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheet. It is a question of secondary loading. Many scholars have studied it and got a lot of achievements. This paper summarizes the methods and analyzes their advantage and shortcoming. Based on it, a new method is proposed. The method is developing in large-scale general software—Ansys by using adding new elements, constitutive relationship, failure criterion, and so on. The calculation formula agrees with the experimental data.

Key words: carbon fiber reinforced polymer sheet; strengthening; secondary loading; finite element; developing

(责任编辑 刘道芬)