

# 预应力钢纤维混凝土梁的挠度试验及数值计算

田芳<sup>1</sup>,何天淳<sup>1</sup>,程赫明<sup>1</sup>,金立兵<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650224; 2. 郑州工程学院,河南 郑州 450052)

**摘要:** 在试验的基础上,对预应力钢纤维混凝土梁的挠度曲线进行了分析,并且利用有限元分析的方法,用 ANSYS 软件对预应力钢纤维混凝土梁的变形进行了模拟计算,提出了预应力在 ANSYS 中的表示方法.从试验结果和模拟结果比较中,论证了模拟方法的可行性,为以后的预应力钢纤维混凝土构件分析工作提供了借鉴经验.

**关键词:** 钢纤维混凝土梁;预应力;挠度;ANSYS

**中图分类号:** TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)02-0060-04

## Test and Numerical Calculation of Steel Fiber Reinforced Prestressed Concrete Beam

TIAN Fang<sup>1</sup>, HE Tian-chun<sup>1</sup>, CHENG He-ming<sup>1</sup>, JIN Li-bing<sup>2</sup>

(1. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The deflection curve for Steel Fiber Reinforced Prestressed Concrete Beams (SFRPCB) is analyzed based on the experiment, and the deflection curve is simulated and calculated by using ANSYS through the Finite Element Method (FEM). The way to express the prestressed force in ANSYS is provided. From the contrast of test and simulation result, it has been proved that the simulated way is feasible, which offers references to the future analysis of steel fiber reinforced prestressed concrete framework.

**Key words:** Steel Fiber Reinforced Concrete Beam (SFRCB); prestress; deflection; ANSYS

## 0 引言

预应力钢筋混凝土结构自 1928 年法国学者弗来西奈 (Freyssinet) 研究成功后<sup>[1]</sup>, 经过数十年的研究开发与推广应用, 取得了很大进展. 大量的国内外建筑土木工程实践充分证实了预应力混凝土改善了钢筋混凝土结构的抗裂性能, 提高了结构的刚度, 是当代工程建设中的一种高新结构技术.

钢纤维混凝土是在混凝土中均匀乱向地掺入适量的、不连续的短钢纤维而形成的一种复合材料. 钢纤维的乱向分布能阻止混凝土内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发生和发展, 因此对其抗拉强度和以主拉应力控制的抗剪强度、抗弯强度、抗扭强度等有明显的改善作用. 试验研究表明, 当纤维体积率在 1% ~ 2% 范围内, 抗拉强度提高 25% ~ 50%, 抗弯强度提高 40% ~ 80%, 抗剪强度提高 50% ~ 100%, 抗压强度提高 0% ~ 20%. 另外, 其抗冲击、抗疲劳、裂后韧性、耐久性也有较大的改善<sup>[2]</sup>.

由于结合了预应力钢筋混凝土构件和钢纤维混凝土的优点, 预应力钢纤维混凝土结构更能满足现代建筑以及桥梁的要求. 通过在钢纤维混凝土构件中施加预应力, 进一步增强了截面的延性, 使正常使用状态下截面变形减小. 本文通过试验的方法对预应力钢纤维混凝土梁的弯曲变形性能进行了研究, 并用 ANSYS 软件对预应力钢纤维混凝土梁的变形进行了模拟.

收稿日期: 2004-06-11. 基金项目: 云南省自然科学基金项目 (项目编号: 2001A0008M).

第一作者简介: 田芳 (1978.4 ~ ) 女, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 预应力钢纤维混凝土弯曲性能. E-mail: tftfkm@hotmail.com.

## 1 试验概况

试验梁为2根预应力钢纤维混凝土梁,截面尺寸 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,跨度1300 mm.纵向预应力钢筋为2根钢绞线, $\phi = 15.24 \text{ mm}$ .纵向非预应力受拉钢筋采用热轧HPB235级钢筋,2根,型号为 $\phi 14$ .架立筋、箍筋采用热轧HPB235级钢筋(圆钢),架立筋型号为 $\phi 8$ ,2根;箍筋型号为 $\phi 6.5$ ,箍筋间距 $s = 150 \text{ mm}$ .钢纤维为切削微扭纤维,长度 $l$ 为30 mm,换算直径 $d$ 为0.5~0.6 mm,长径比为50~60,其体积率为1.0%.采用425普通硅酸盐水泥,中砂,卵石(最大粒径10 mm).混凝土基体的设计强度为C40.加载方式为两点对称加载,梁的剪跨比 $\lambda = 1.5$ .钢纤维混凝土的配合比(质量比)为:水泥:455  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,水:200  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,砂:990  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,碎石:914  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,钢纤维:78  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,外加剂(减水剂):2.05  $\text{kg}/\text{m}^3$ .水灰比( $W/C$ )为0.44<sup>[3]</sup>.

## 2 试验结果

在本次试验中,采用的是无粘结预应力钢纤维混凝土梁.由于预应力筋是上下对称布置在梁内,见图1,梁体没有反拱度.在没有外荷载作用时,预应力钢纤维混凝土梁的变形按零计算.

图2所示的荷载-挠度曲线是取用该试验中两根预应力钢纤维混凝土梁的挠度平均值.

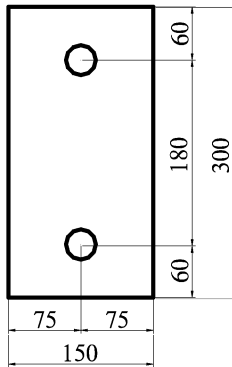


图1 钢绞线布置图

Fig.1 Steel skewing thread arrangement graph

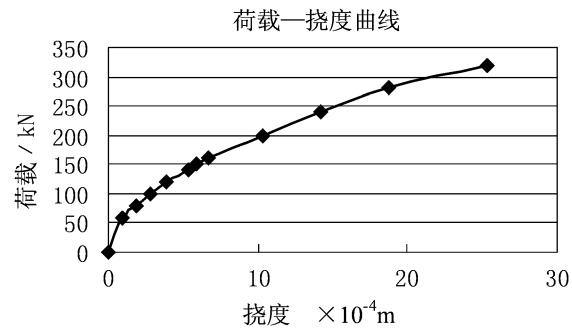


图2 预应力钢纤维混凝土梁的荷载-挠度曲线

Fig.2 Curve of SFRCB load deflection

由试验测得的预应力钢纤维混凝土梁的荷载—挠度曲线可以看出:在加载初期,预应力钢纤维混凝土梁的荷载挠度曲线为线性.主要因为预应力钢纤维混凝土梁的弯矩值较小,截面上混凝土和钢筋应力都不大,梁受拉边缘拉应变小于混凝土的极限拉应变,混凝土未开裂,梁的整个截面参与受力,钢纤维的增强作用尚未发挥,这与钢纤维混凝土梁的变形规律基本相同<sup>[4]</sup>.当荷载达到极限荷载(试验梁的破坏荷载是400 kN)的25%左右,受拉边缘的混凝土基体的应变达到极限拉应变,受拉区出现较大的变形;在受压区,由于压应力还远小于其抗压强度,预应力钢纤维混凝土梁处于弹性阶段.但是随着外部荷载的增加,特别是在受拉区混凝土开裂以后(试验梁的初裂荷载是160 kN),钢纤维的阻裂作用明显,这时预应力钢纤维混凝土梁受拉区的拉力有钢筋和钢纤维共同承担使梁的刚度提高,挠度明显降低,裂缝的发展也因钢纤维的阻裂作用变得缓慢.最后受压区混凝土出现水平裂缝,预应力钢纤维混凝土梁由于混凝土被压碎而破坏.此时受拉区裂缝宽度很大,钢纤维的增强效果基本上消失.在这次试验中,没有观测到预应力钢纤维混凝土梁挠度曲线的下降阶段,这是与钢纤维混凝土梁的挠度曲线有显著不同的地方<sup>[4]</sup>.正是这里体现了预应力混凝土构件和钢纤维混凝土的结合的优势,构件的弯曲延性明显增强,这为今后预应力钢纤维混凝土构件的应用提供了理论基础.

## 3 计算机模拟计算

利用大型通用有限元分析软件ANSYS对预应力钢纤维混凝土梁的弯曲变形进行模拟,计算采用与弯曲试验试件同尺寸的实体单元模型.

钢纤维混凝土采用整体式模型<sup>[5]</sup>,主要由于钢纤维弥散在整个混凝土当中,无法将钢纤维和混凝土分别划分单元,并且把单元视为连续均匀的材料,通过调整单元的材料力学性能来体现钢纤维的作用,计算中材料的屈服强度提高了30%<sup>[2]</sup>,材料的弹性模量和泊松比按试验实测的数值来确定.钢纤维混凝土采用 SOLID65,是一种八节点三维实体单元,能够计算混凝土拉裂和压碎.钢纤维混凝土本构关系选用单轴作用下的混凝土的本构关系模型 MISO(Multilinear Isotropic Hardening),在混凝土受压区带有下降段;混凝土的破坏准则选用 CONC 模型.

钢筋采用三维桁架单元 LINK-8,单元有两个节点,每个节点有3个自由度.钢筋的本构关系采用 BKIN(Bilinear Kinematic Hardening),该模型应用 von-mises 屈服准则以及各向同性工作强化的假定,可以用于大应变分析,BKIN 模型假设总应力的范围等于屈服应力的两倍,以包括辛格效应.

钢筋钢纤维混凝土则采用分离式模型<sup>[6,7]</sup>,即钢筋和混凝土作为不同的单元来处理,各自被划分为足够小的单元.这种方法的前提是钢筋和混凝土刚性连接,无相对滑移.通过钢绞线施加的预应力按其大小平均分布在梁两端的节点上.

为了和试验实际更好的吻合,计算机模拟加载跟实际情况一样.取初始载荷同样为60 kN,然后以每20 kN为一个级别递增.

表1 试验梁的荷载—跨中挠度试验结果<sup>[3]</sup>与模拟结果

Tab.1 Test results and model results in lode - middle deflection of test beam

荷载/kN	80	100	140	160	200	240	280
试验值( $\times 10^{-4}$ m)	0.185	0.278	0.533	0.673	1.03	1.42	1.878
模拟值( $\times 10^{-4}$ m)	0.174	0.291	0.536	0.656	0.918	1.11	1.376

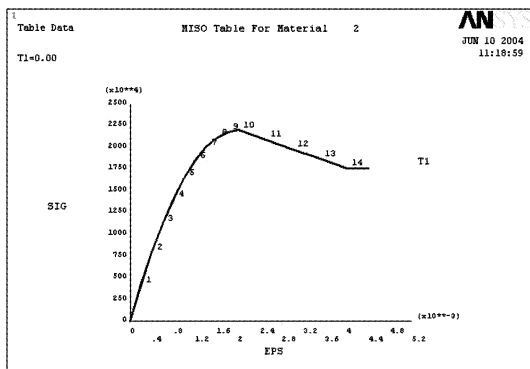


图3 钢纤维混凝土的单轴应力应变曲线

Fig.3 Single axis stress - strain curve of SFRC

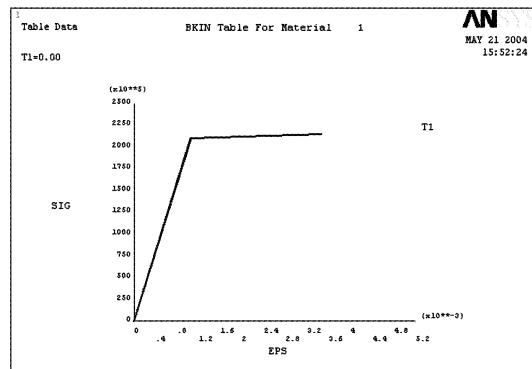


图4 钢筋的应力应变曲线

Fig.4 Stress - strain curve of reinforcing bar

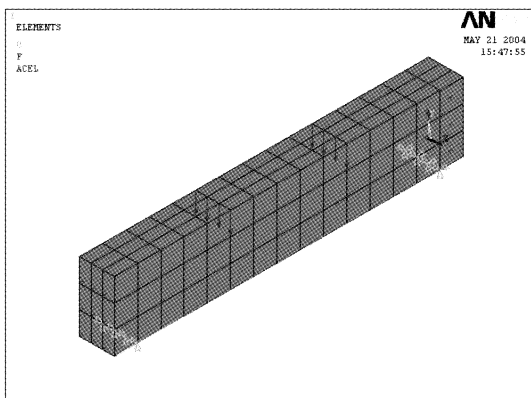


图5 计算模型

Fig.5 Model of calculation

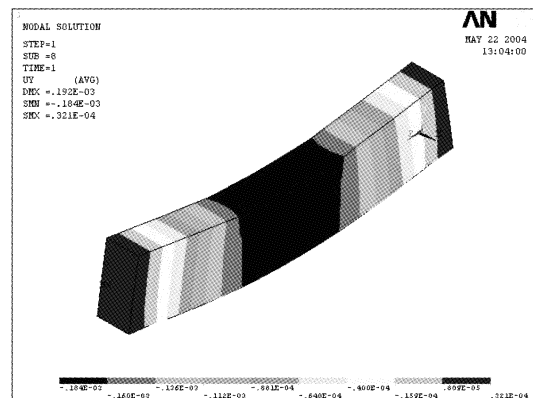


图6 SFRCB的变形图(80 kN)

Fig.6 Deflection graph of SFRCB (80 kN)

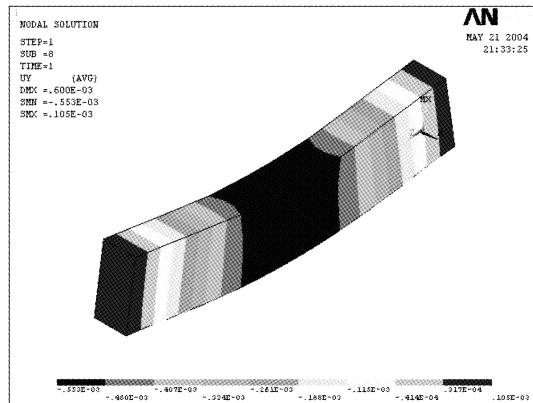


图 7 SFRPCB 变形图 (140 kN)

Fig.7 Deflection graph of SFRPCB (140 kN)

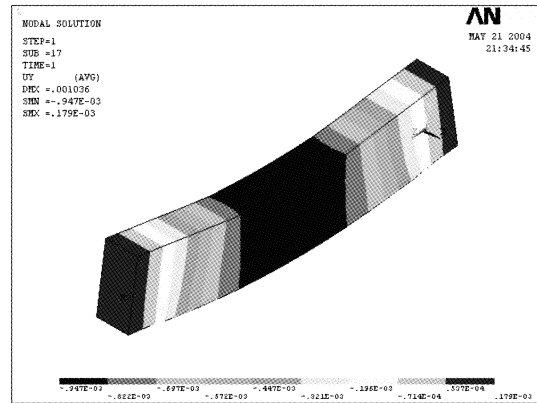


图 8 SFRPCB 的变形图 (200 kN)

Fig.8 Deflection graph of SFRPCB (200 kN)

#### 4 结论

由表 1 可以看出,在预应力钢纤维混凝土初裂前,即在正常使用阶段,由 ANSYS 计算的结果与试验结构的相对误差都在 6% 以下,是在误差允许的范围.这表明了本文提出的预应力在钢纤维混凝土梁中的表示方法以及选用的钢筋钢纤维混凝土的模型是合理的,利用 ANSYS 软件对预应力钢纤维混凝土梁的模拟计算是可行的.但是在达到开裂荷载后,两者的差距明显,相对误差都大于 10%,显然这些值不能真实反映预应力钢纤维混凝土梁的变形,若想得到比较精确的模型结果,模拟中的一些模型参数和求解方法还值得研究.

利用 ANSYS 施加预应力时,按其大小平均分布在节点的方法,有利于简化计算模型,节省计算时间.

长期以来,研究钢筋混凝土结构,都是采用大量试验的方法,依靠拟合试验数据所得到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.

大型有限元分析软件 ANSYS 是混凝土非线性有限元分析的利器.它在建模、求解和后处理中都有很强大的功能,而且还支持用户的二次开发.若能有效的使用这一工具,便节省试验而无须耗费巨额资金,还能对一些靠试验无法解决的问题求得普遍解答.

#### 参考文献:

- [1] 房贞政. 无粘结与部分预应力结构[M]. 北京:人民交通出版社,1999.1~3.
- [2] 赵国藩,彭少民,黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.89~124.
- [3] 金立兵. 预应力钢纤维混凝土梁斜截面承载能力及抗裂强度研究:[硕士学位论文][D]. 昆明:昆明理工大学建筑工程学院,2002.
- [4] 程庆国,高路彬,徐蕴贤,等. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.77~84.
- [5] 吕西林,金国芳,等. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1996.72~73.
- [6] 石少卿,尹平,张湘冀. 利用 ANSYS 软件分析粘钢前后钢筋混凝土梁的裂缝[J]. 地下空间,2003,23(2):207~209.
- [7] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1994.91~93.