

文章编号:1004-4736(2008)01-0030-04

# 体外预应力混凝土梁非线性有限元数值建模分析

熊辉霞<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1</sup>

(1. 南阳理工学院土木工程系, 河南 南阳 473004;

2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**体外预应力混凝土结构在新建结构和旧有结构加固方面得到了广泛运用, 由于其体外索和梁体在受力过程中变形不相协调的特点使计算比较困难, 采用有限元进行数值分析是常用的一种方法. 体外预应力混凝土结构有限元建模有其特殊性, 如何建立有限元模型是正确分析的基础. 本文详细介绍了如何运用 ANSYS 对体外预应力混凝土简支梁进行有限元建模及全过程分析, 包括单元选取、本构关系的选用、网络的划分、计算的设置等, 最后通过实例验证了该建模方法的正确性.

**关键词:**体外预应力梁; 本构关系; 破坏准则; ANSYS

中图分类号: TU 375.1 文献标识码: A

## 0 引言

体外预应力混凝土结构是指在混凝土梁体外使用无粘结预应力钢筋, 通过锚固端和梁相连接, 通过中间转向块使索偏转的一种预应力结构, 是后张预应力混凝土结构体系的一个重要分支. 斜拉桥的再度发展和节段施工法在桥梁建设中的大量应用以及旧有建筑物的加固等, 为体外预应力的发展创造了有利条件<sup>[1,2]</sup>. 体外预应力混凝土结构在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的各种性能是设计者关注的问题, 而我国现行规范还没有提出一种有效的计算方法. 国外规范大都是以实验数据为基础建立起来的, 但这些实验数据大多是以小梁为研究对象, 和实际结构有一定出入; 另外, 实验梁的数量、形式、材料都不可能包含所有可能的体外预应力结构的规律. 因此, 解决此问题常采用有限元数值分析, 而体外预应力混凝土结构建模有其特殊性, 正确建立有限元模型是进行数值分析的基础.

有限元法是在连续体力学领域应用的一种数值分析方法. ANSYS 是由美国 ANSYS 公司开发的用于微机平台的大型有限元分析软件. 用 ANSYS 分析钢筋混凝土结构时, 在弹性及线弹性阶段一般可取得满意的结果, 因此适合于分析预应力混凝土结构<sup>[3,4]</sup>. 本文以单折线体外预应力混凝土简支梁为例, 采用 ANSYS 有限元分析软件对混凝土梁进行了非线性有限元三维建模及全过程分析.

## 1 单元选择

**a. 混凝土单元.** ANSYS 的 SOLID65 单元是专为混凝土、岩石等抗压能力远大于抗拉能力的非均匀材料开发的单元<sup>[5]</sup>. SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型. 该实体模型可具有拉裂与压碎的性能. 在混凝土的应用方面, 如用单元的实体性能来模拟混凝土, 而用加筋性能来模拟钢筋的作用. 该单元也可用于其它方面, 如加筋复合材料(如玻璃纤维)及地质材料(如岩石). SOLID65 单元具有八个节点, 每个节点有三个自由度, 即 X、Y、Z 三个方向的线位移; 还可对三个方向的含筋情况进行定义.

**b. 非预应力钢筋单元.** 非预应力钢筋可采用两节点的 Link8 单元, 每个节点有三个自由度, 可以在 X、Y、Z 三个方向平移, 该单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等功能<sup>[5]</sup>.

**c. 体外预应力筋单元.** 体外预应力筋可采用 Link10 来模拟, 该单元是一个两节点单轴拉压单元, 不考虑抗弯、抗剪, 每个节点有三个自由度, 对应于 X、Y、Z 三个方向平移. Link10 单元具有塑性变形、徐变、应力刚化、超弹和大变形能力<sup>[5]</sup>.

**d. 预埋钢板单元.** 在 ANSYS 有限元分析中, 如果约束或荷载直接加在混凝土节点上, 很可能在节点附近产生应力集中, 从而使附近的混凝土突然破坏, 造成求解失败. 因此, 要在锚固和加载处预埋钢板. 预埋钢板可采用三维实体单元 SOLID45 来模拟.

**e. 转向块单元.** 转向块可采用三维实体单元

收稿日期: 2006-10-20

作者简介: 熊辉霞(1974-), 男, 河南新野人, 博士生, 讲师. 主要从事预应力混凝土结构理论与工程应用研究.

SOLID45 来模拟。

## 2 本构关系

### 2.1 混凝土本构关系

混凝土单元需要定义破坏准则和本构关系。混凝土破坏准则采用 W-W 破坏准则,其参数的输入可通过 tb、conc 和 tldata 等命令来完成。但在 ANSYS 中输入必要的参数后,仅定义了混凝土的 W-W 破坏准则和缺省的本构关系(认为混凝土开裂和压碎前均为线性的应力应变关系,而开裂和压碎后采用 W-W 破坏准则)。这和实际情况不相符,混凝土实际上是一种弹塑性材料,需要考虑其非线性,而 ANSYS 默认的本构关系是线弹性的。因此,要在材料性质中加入反映其本构关系的特性。ANSYS 能提供非线性弹性本构关系和弹塑性本构关系,可通过 TB 和 MISO 输入混凝土的应力应变关系来确定本构关系。输入的时候要注意第一点应力和应变的比值与初始弹性模量要一致,否则程序运行会出现错误。本次计算采用了二次曲线+水平直线段的形式(也可采用实际实验得出的应力应变关系),以便于收敛。应力应变关系如下:

$$0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0 \quad \sigma = f_c [2\epsilon/\epsilon_0 - (\epsilon/\epsilon_0)^2] \quad (1)$$

$$\epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{cu} \quad \sigma = f_c \quad (2)$$

式(1)(2)中, $\epsilon$  为混凝土的应变; $\epsilon_0$  为相应于棱柱体抗压强度的混凝土压应变,取 0.002; $\epsilon_{cu}$  为混凝土的极限压应变,取 0.003 3; $\sigma$  为混凝土的应力; $f_c$  为混凝土棱柱体抗压强度设计值。

在 ANSYS 中输入混凝土材料性质的数据如下:混凝土容重  $\gamma_c = 25 \text{ N/mm}^3$ ;弹性模量  $E_c = 30\,000 \text{ N/mm}^2$ ;极限抗压强度  $f_c = 13.4 \text{ MPa}$ ;极限抗拉强度  $f_t = 1.34 \text{ MPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.2$ ;张开裂缝的剪切传递系数取 0.3,闭合裂缝的剪切传递系数取 1.0;关闭压碎开关,即单轴抗压强度取 -1;应力应变曲线如图 1 所示,取曲线上六点输入即可。

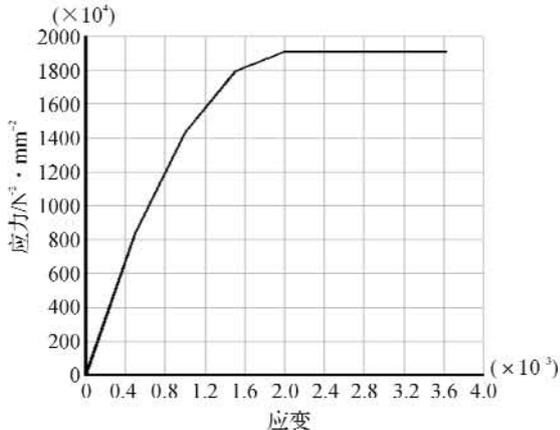


图 1 混凝土应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship of concrete

### 2.2 非预应力筋本构关系

在分析计算中,通常把钢筋应力-应变曲线简化成双折线形式,在 ANSYS 分析中使用经典的双折线形随动强化(BKIN)。需要输入的数据如下:屈服强度  $f_y = 210 \text{ MPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.3$ ;应力应变关系如图 2 所示。

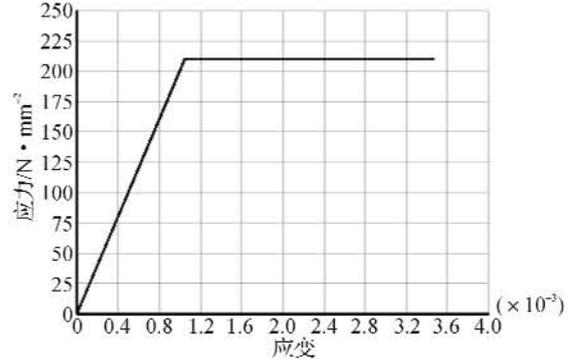


图 2 混凝土钢筋应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of steel

### 2.3 体外预应力筋本构关系

采用同非预应力筋一样的本构模型。体外预应力筋的材料性质数据如下:屈服强度  $f_y = 1\,670 \text{ MPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.3$ ;应力应变关系如图 3 所示。

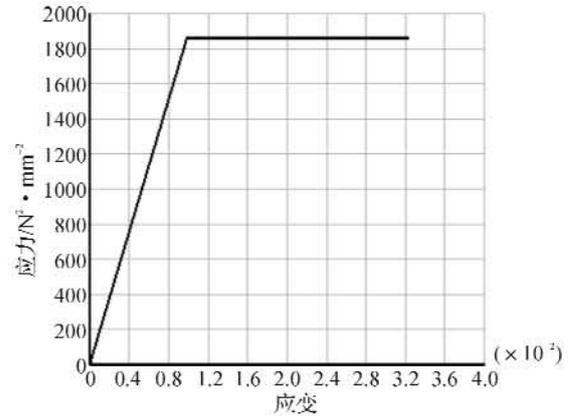


图 3 钢绞线应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of tendon

### 2.4 转向块和预埋钢板

转向块和预埋钢板的弹性模量  $E$  可取实际值的 20 倍,相当于其弹性模量无穷大,不考虑它们的变形。

## 3 模型及单元网格划分

分析中采用一次建模的方法,即把混凝土梁和体外预应力筋的模型一次建立起来。对于混凝土梁,由于模型中非预应力筋(拉、压钢筋及箍筋)采用离散的 Link8 单元,钢筋较多,可采用网格直接生成法建立模型。

在分析中假定体外预应力筋可自由滑移,与

转向块之间没有摩擦,故把钢绞线相应自由度与转向块处相应自由度耦合起来,y 方向位移受到约束,X 方向可自由伸缩.体外预应力筋单元划分以锚固端、转向块为分界点.

混凝土单元尺寸为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ,非预应力筋单元尺寸为  $50\text{ mm}$ ,体外预应力筋在转向块之间不再细分.

以设单转向块梁为例,建立的有限元模型如图 1 所示.

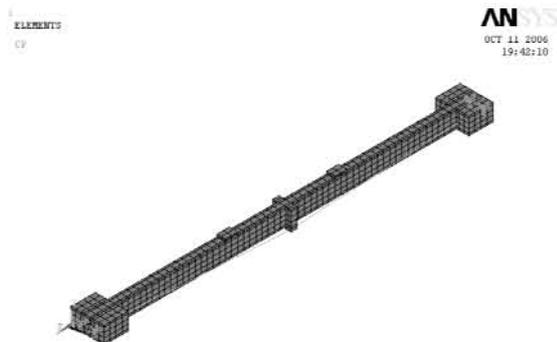


图 4 单折线体外预应力混凝土梁有限元模型

Fig. 4 Finite element modeling of simple-fold line external prestressed concrete beam

#### 4 边界条件及加载

梁的左侧约束 X、Y、Z 三个方向,右侧约束 Y、Z 两个方向,以此模拟梁简支状态.

在 ANSYS 分析中,对实体模型加载有三种方法:a.等效为节点荷载施加在节点上;b.直接施加在单元上;c.作为面荷载施加在面上.由于模型都承受集中荷载,采用第一种加载.梁自重按体积力考虑,设定重力加速度为  $9.80\text{ m/s}^2$ ,随所在单元的激活而自动计入.

对实体模型施加体外预应力主要有两方法:

a.等效荷载法.将预应力筋的作用以荷载的形式作用于混凝土结构,优点是建模简单,不必考虑预应力钢筋的具体位置,网格划分比较简单,程序收敛也比较容易,对结构在预应力作用下的整体效应容易求得,在按杆系结构分析时应用较多.缺点是当预应力钢筋的布置比较复杂时,用等效荷载法模拟比较困难,而且可能产生较大误差,在外荷载作用下,难以考虑外荷载和预应力钢筋的共同作用,不能模拟预应力钢筋在外荷载作用下的应力增量.

b.实体力筋法.实体力筋法是同时考虑预应力钢筋和混凝土的作用,用 Solid 单元模拟混凝土,用 Link 单元模拟预应力钢筋,优点是预应力的模拟可以采用初应变法或降温法,降温法就是

给体外筋单元施加温度值来模拟张拉预应力的值,温度值通过张拉预应力的值反算得到.其中降温法比较简单,同时还可以模拟预应力筋的应力损失及其在外荷载作用下的应力增量;由于预应力钢筋的位置一定,可以比较真实的模拟预应力钢筋对结构的影响和作用;作用在梁上的任何荷载都是由力筋和混凝土共同承担,可以得到预应力钢筋在任何外荷载作用下的应力和应变;可以模拟预应力钢筋的应力损失的影响.因为降温法的优点,建模时采用了此方法施加预应力.等效公式为:

$$T = \frac{F}{AE\delta} \quad (3)$$

(3)式中,T为施加的温度;F实际施加的力;E预应力筋弹性模量;A预应力筋面积; $\delta$ 预应力筋的线膨胀系数.

#### 5 有限元方程求解

用 ANSYS 来分析钢筋混凝土结构时,计算收敛是比较困难的,其主要影响因素是网格密度、子步数、收敛准则和收敛精度等.网格密度、子步数的选取一般凭借工程经验.

a.加载子步采用迭代法求解,求解时采用多荷载步,每荷载步又设若干子步.步长较大,则每一步荷载量较大,计算收敛速度较快,但很容易发散.步长较小,则每一步荷载增量小,有利于计算的收敛,但耗费计算时间较长.本次建模最小子步步长设为 2,最大子步步长设为 50,程序会在期间自动选择.

b.收敛准则主要有力的收敛(F)、位移的收敛(U)、弯矩的收敛(M)和转动的收敛(ROT).在混凝土计算中,一般选择力的收敛而不同时使用位移收敛,否则会带来收敛困难.本文选择力的收敛.收敛精度默认值是 0.1%,根据计算精度一般可放宽到 5%.

#### 6 分析

用以上建模方法对作者课题组的实验梁四<sup>[6]</sup>的自振频率进行了非线性有限元分析,分析中混凝土单元为 Solid65,非预应力钢筋和钢绞线采用 Link8 及 Link10 单元.混凝土应力-应变曲线采用二次曲线+水平直线段的形式.分析结果如表 1,可见,ANSYS 计算值与实测值间比较接近,误差一般在 5% 以内,精度较高,说明用 ANSYS 建立的模型比较符合实际情况,在计算中的一些假定是正确的.

表1 体外预应力混凝土简支梁自振频率实测值和计算值

Table 1 Measured value and calculational value of vibration frequency of external prestressed beam

预应力/kN	实测值/Hz	ANSYS算值/Hz	相对误差/%
0	24.55	24.50	0.19
9	24.52	24.21	1.27
18	24.48	24.11	1.50
27	24.42	23.7	2.95
36	24.39	23.65	3.03
45	24.37	23.52	3.49
54	24.29	23.36	3.83

## 参考文献:

[1] Harajjal M H. Strengthening of concrete beams by external prestressing[J]. PCI Journal, 1993, 38 (6):

76-88.

[2] Alkhairi F M, Naaman A E. Analysis of externally prestressed with unbolted internal or external tendons [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1993, 119 (9): 2680-2700.

[3] 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,1991, 23-28.

[4] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996, 12-14.

[5] 郝文化. ANSYS在土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005, 172-174.

[6] 张耀庭,邱继生. ANSYS在预应力钢筋混凝土结构非线性分析中的应用. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(4): 20-23.

## Nonlinear finite element modeling analysis of external prestressed concrete beam

XIONG Hui-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanyang Institute of Tech., Nanyang, 473004, China,

2. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074 China)

**Abstract:** External prestressed concrete structures have been widely used in new buildings and reinforcement of old buildings. Because the deformation of prestressing tendon and the beam is not compatible, it is difficult to calculate. Finite element analysis is a common calculational method. Modeling of finite element analysis of external prestressed concrete beam has its particularity. How to build the model is the basis of the proper analysis. In this paper, how to build the model of the external prestressed concrete beam by ANSYS was introduced in detail, including how to select element, how to select constitutive relation, division of lattice, setting of calculation etc. An example was given to verify the accuracy of the modeling method at last.

**Key words:** external prestressed beam; constitutive equations; failure criterion; ANSYS

本文编辑:萧宁