

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.005

# 无粘结预应力混凝土梁的变形分析

喻攀, 罗许国

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 对于无粘结预应力混凝土梁的变形, 普遍采用与有粘结预应力混凝土梁相同的方法进行近似计算。由于 ANSYS 软件功能强大, 将其用于无粘结预应力混凝土梁变形的精确分析, 并通过实例详细介绍了接触分析法, 为无粘结预应力混凝土梁的设计和研究提供一种有效的分析方法。

**关键词:** 无粘结预应力; 混凝土梁; 变形; ANSYS; 接触分析

中图分类号: TU323.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)01-0018-05

## The Deformation Analysis of Unbonded Prestressed Concrete Beam

Yu Pan, Luo Xuguo

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

**Abstract:** A method based on the ordinary bonded prestressed technology is widely used to approximately calculate the deformation of unbonded prestressed concrete beam. Because of ANSYS software powerful, it can be used for the deformation analysis of unbonded prestressed concrete beam, and the contact analysis method is introduced in detail through an example. Provides on effective method for the design and research of unbonded prestressed concrete beam.

**Keywords:** unbonded prestress; concrete beam; deformation; ANSYS; the contact analysis method

## 0 引言

无粘结预应力混凝土结构具有施工方便、速度快的优点, 在工业与民用建筑中得到了广泛应用。无粘结预应力筋仅在梁体的两端锚固, 其中间段与周围混凝土之间没有粘结, 可以纵向滑动, 所以无粘结预应力混凝土结构的受力性能不同于有粘结预应力混凝土结构。然而, 目前的无粘结、有粘结预应力结构均采用相同的挠度计算方法, 其计算结果与实际情况不符<sup>[1-5]</sup>。

ANSYS 软件是进行结构有限元分析的有效工具。目前, 用于无粘结预应力混凝土结构计算分析

的方法主要有 2 种: 等效荷载法<sup>[6-7]</sup>和节点耦合法<sup>[8]</sup>。等效荷载法建模简单, 容易求得结构在预应力作用下的整体效应, 但不能进行细部分析; 节点耦合法可较好地模拟梁体变形时预应力筋与混凝土孔壁的相对滑动, 但无法考虑无粘结预应力筋与混凝土孔壁之间的摩擦。ANSYS 软件具有强大的接触分析能力, 可将无粘结预应力筋与周围混凝土之间的相互作用作为接触问题来处理。

## 1 试验梁模型

本文按照文献[9]中的模型, P1 试验梁的实际长

收稿日期: 2011-11-08

作者简介: 喻攀(1985-), 男, 湖北汉川人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为桥梁与隧道工程,

E-mail: wkd\_1985yp@126.com

度为 3.9 m, 跨度为 3.7 m。P1 梁为无粘结预应力直线布筋梁, 试验梁的结构形式和配筋如图 1 所示。由材料试验测得, 普通钢筋的屈服强度  $f_y=336$  MPa, 弹性模量  $E_s=2.1 \times 10^5$  MPa; 钢绞线的屈服强度  $f_{py}=1\ 827$  MPa, 弹性模量  $E_{py}=2 \times 10^5$  MPa; 混凝土的立方体抗压强度  $f_{cu}=47.18$  MPa, 混凝土弹性模量  $E_c=3.256 \times 10^4$  MPa。

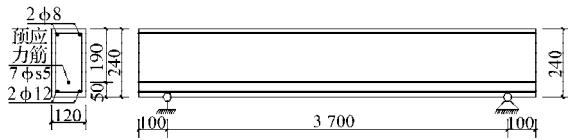


图 1 P1 梁结构布置图

Fig. 1 Structural layout of beam P1

在试验过程中, 先对 P1 梁分级施加预应力至 120 kN, 测量不同大小的预应力作用下梁的上拱变形。随后, 在距梁两端支座 1.4 m 处进行对称加载, 先用质量块进行加载, 然后用千斤顶加载到破坏, 获得从加载到破坏全过程的挠度数据。

## 2 有限元建模与求解

在试验梁的有限元分析中, 采用分离式模型, 即分别建立混凝土单元和钢筋单元, 并在预应力筋锚固处共用节点, 在试验梁中间段通过接触单元来模拟预应力筋的滑移和摩擦效应。在网格划分时, 用六面体单元划分网格, 为避免由网格过密而造成混凝土局部区域的提前破坏, 混凝土单元尺寸取值为 100 mm。同时, 对于预应力效应的模拟采用了降温法, 即给预应力筋施加等效温度荷载  $\Delta t$ ,

$$\Delta t = \sigma / (\alpha E_s),$$

式中:  $\sigma$  为预应力;

$\alpha$  为钢筋的线膨胀系数;

$E_s$  为预应力筋的弹性模量。

### 2.1 本构关系

混凝土采用 SOLID65 单元, 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 TBDATA 等命令来完成。混凝土本构关系采用多线性随动强化模型, 应力-应变关系按 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup> 选取, 其关系如下:

当  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$  时,

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

当  $\varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$  时,

$$\sigma_c = f_c. \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中:  $\varepsilon_c$  为混凝土的压应变;

$\varepsilon_0$  为对应于棱柱体抗压强度时的混凝土压应变, 取值为 0.002 0;

$\varepsilon_{cu}$  为混凝土的极限压应变, 取值为 0.003 3;

$\sigma_c$  为混凝土的应力;

$f_c$  为混凝土棱柱体的抗压强度设计值。

普通钢筋和预应力钢筋均采用两节点的 LINK8 单元, 普通钢筋的应力-应变关系可采用理想弹塑性模型, 其应力-应变关系如下:

当  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$  时,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s; \quad (3)$$

当  $\varepsilon_s > \varepsilon_y$  时,

$$\sigma_s = f_y. \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中:  $\sigma_s$  为普通钢筋的应力;

$E_s$  为普通钢筋的弹性模量;

$\varepsilon_s$  为普通钢筋的应变;

$f_y$  为普通钢筋的极限应变。

由预应力钢筋的材料参数可知, 当混凝土梁破坏时预应力钢筋还不会屈服, 即  $\varepsilon_p \leq \varepsilon_{py}$ , 因此, 预应力钢筋的应力-应变关系为

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_p. \quad (5)$$

式中:  $\sigma_p$  为预应力钢筋的应力;

$E_p$  为预应力钢筋的弹性模量;

$\varepsilon_p$  为预应力钢筋的应变。

### 2.2 接触单元的选取及参数的确定

ANSYS 软件支持面-面接触、点-面接触和点-点接触 3 种接触方式<sup>[11]</sup>。无粘结预应力筋与混凝土之间的相互作用属于面-面接触的问题, 但采用面-面接触的分析方法会出现建模困难以及占用大量计算资源等问题。点-点接触单元主要用于模拟点-点的接触行为, 它适用于接触面之间有较小相对滑动的情况。如果 2 个面上的节点一一对应, 相对滑动又可忽略不计, 2 个接触面挠度保持小量, 就可用点-点接触单元来求解面-面接触问题。因此, 可采用 Contac52 点-点接触单元来模拟无粘结预应力筋与混凝土孔壁之间的面-面接触。

模拟过程中, Contac52 单元中需要输入的实常数有: 法向接触刚度、切向接触刚度、摩擦系数和初始间隙大小等。

接触问题都需要定义法向接触刚度, 过大的接触刚度可能会引起总刚度矩阵的病态, 而造成收敛困难。对大多数的接触分析, 法向接触刚度可按式 (6) 来估算。

$$K_n = f E h, \quad (6)$$

式中： $K_n$ 为法向接触刚度；

$f$ 为控制接触协调性的因子，通常在0.01和100之间取值；

$E$ 为材料弹性模量，如果接触发生在2种不同的材料间，考虑使用弹性模量较小者；

$h$ 为特征接触长度，对于点对点的接触问题，通常取 $h=1$ 。

对于本试验中的模型，法向接触刚度 $K_n$ 的取值为 $10^5$  Mpa。

切向接触刚度可取一个较大的值，但不要大到影响收敛性，一般来说，切向接触刚度应比法向接触刚度小1~3个数量级，此处取 $10^4$  Mpa。

摩擦因数在Contac52单元中可作为实常数给出。无粘结预应力筋的摩擦因数可根据JGJ 92—2004《无粘结预应力混凝土结构技术规程》<sup>[12]</sup>取值，对于钢绞线可取0.09。

点对点接触单元中的两接触节点是不能重合的，需要设置一个初始间隙。建模时以初始节点位置为基础进行计算，取0.01 mm。

### 2.3 接触对的建立

在建模时，将力筋的两端节点与相近的混凝土节点在 $X, Y, Z$  3个方向耦合，对于力筋的中间段节点，采用建立点-点接触单元的方法来模拟力筋的滑移和摩擦效应。在划分预应力筋和混凝土网格时，不能采用自由划分的方式，应采用LSEL命令选出需要划分的线，然后用LESIZE命令设置划分的段数，最后进行混凝土单元的划分。这样可保证混凝土单元在预应力筋方向的划分与预应力筋一致，即两者节点的一一对应。同时，混凝土节点和预应力筋节点不能重合，要保持一个很小的距离。

划分好混凝土和预应力筋网格后，需在混凝土节点和预应力筋节点之间建立接触对。建立接触对可采用2种方法：直接用E命令在两节点之间建立接触单元，或用EINTF命令在2个接触面的界面上生成接触单元。后者更便捷，但前提是混凝土单元和预应力筋单元的网格划分要一致。

部分Ansys命令流如下：

!设置接触单元参数

et,2,contac52

mp,mu,2,0.09!定义摩擦因数为0.09

r,2,1e5,0.01,2,1e4 !法向刚度，初始间隙，初始条件，粘性刚度

.....

!划分预应力筋网格

lsel,s,line,390

latt,3,3,3

lesize,all,100

lmesh,all

!划分混凝土网格

vsel,s,loc,z,100,3800

vsel,r,loc,y,0,243

vatt,1,1,1

esize,100

mshape,0

mshkey,1

vmesh,all

.....

!建立接触单元

type,2

mat,2

real,2

\*do,i,4,39,1

e,i,842-i

\*enddo

.....

!施加预应力荷载

lsel,s,line,,390

bfl,all,temp,-428 !降温428 °C

### 2.4 加速收敛的方法

由于考虑了混凝土和钢筋的材料非线性，开裂前程序容易收敛，当混凝土开裂后，随着荷载的增大程序收敛变得越来越困难。可考虑从以下几个方面来加速收敛过程：不考虑混凝土压碎；在预应力筋的锚固和集中荷载作用处均容易出现应力集中的现象，在此处设置10 mm的钢垫板；子步数NSUBST的大小可以根据收敛过程追踪图分析确定，如果实际范数曲线在收敛范数曲线以上较长且不能收敛，可增大该值；收敛困难时可以改变收敛准则，当为力加载时采用位移准则，当为位移加载时采用力准则；用CNVTOL命令来调整收敛精度，收敛精度可放宽至5%。

## 3 ANSYS 计算与试验结果比较

按接触分析法计算所得的P1试验梁变形，见图2和图3。同时，分别采用节点耦合法、等效荷载法以及GB 50010—2002<sup>[10]</sup>相关公式进行计算分析，结果见表1和表2。

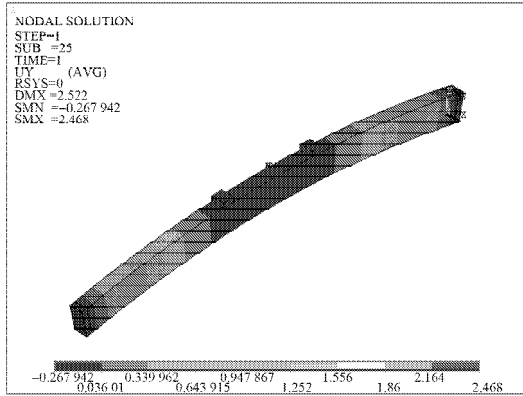


图2 预加力为120 kN时的梁体上拱

Fig. 2 The beam deformation under prestress of 120 kN

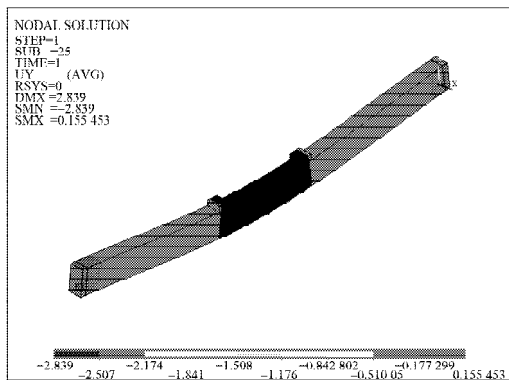


图3 集中荷载为29.145 kN时的梁体下挠

Fig. 3 Down deflection of beam under concentrated loads of 29.145 kN

表1 P1梁跨中上拱结果

Table 1 Deformation in the middle of beam P1

有效 预应力/kN	试验值/ mm	挠度计算值/mm			
		接触 分析	耦合 分析	等效 荷载	规范 计算
20	0.200 0	0.397 2	0.399 8	0.422 7	0.490 0
40	0.660 0	0.800 0	0.805 0	0.845 4	0.990 0
60	1.140 0	1.197 0	1.205 0	1.268 0	1.480 0
80	1.560 0	1.594 0	1.605 0	1.691 0	1.970 0
100	2.060 0	2.002 0	2.016 0	2.124 0	2.470 0
120	2.450 0	2.468 0	2.438 0	2.573 0	2.960 0

表2 P1梁跨中挠度结果

Table 2 Down deflection in the middle of beam P1

有效 预应力/kN	试验值/ mm	计算值/mm			
		接触 分析	耦合 分析	等效 荷载	规范 计算
9.686	0.982 8	1.648 4	1.647 6	1.683 3	2.120 0
17.227	2.396 8	2.886 2	2.926 4	2.974 4	3.770 0
24.283	3.921 3	4.076 0	4.123 0	4.201 0	5.320 0
27.861	5.038 3	4.923 0	5.057 0	5.132 0	6.100 0
29.145	5.221 3	5.307 0	5.407 0	5.530 0	6.380 0

注：表2中P1梁跨中挠度是相对于跨中反拱点的相对位移，即跨中绝对位移加上表1中相应的上拱值。

从表1和表2可看出，运用规范计算得出的结果与试验值相差较大，偏于保守。基于ANSYS的3种有限元方法整体上都能较好地模拟P1试验梁的变形，但采用接触分析法所得的结果与试验值最接近。当试验梁承受荷载时，无粘结预应力筋的滑移和摩擦效应都会使预应力减小。而节点耦合法仅能考虑滑移，等效荷载法和规范法既不能考虑滑移也不能考虑摩擦，使得试验梁在计算过程中所承受的预应力偏大，无法真实反应试验梁的受力情况，所以与试验结果相差较大。

从表1还可看出，计算值均大于试验值，而且在预应力荷载较小时计算误差较大，随着预应力荷载的增加，计算误差呈减小的趋势，这是因为试验梁的刚度还跟预应力度的大小有关，且随着预应力度的增加而逐渐减小。

#### 4 结论

当按照普通有粘结预应力结构的挠度计算方法处理无粘结预应力结构时，其计算结果偏大，过于保守。

采用接触分析的方法能准确地模拟无粘结预应力筋与混凝土孔壁之间的滑移和摩擦效应；耦合分析法仅能考虑其滑移而不能考虑摩擦，造成预应力损失较实际值要小，计算所得变形值大于实际变形值；等效荷载法既不能考虑滑移也不能考虑摩擦，更无法进行细部分析，只能粗略计算梁体变形。

对于无粘结预应力混凝土结构，预应力筋的滑移和摩擦效应对结构的变形有较明显的影响，因此在运用ANSYS进行分析计算时采用接触分析的方法能获得更为精确的结果。

#### 参考文献：

[1] 张耀庭, 孙尧州, 张正哲. 预应力钢筋混凝土梁挠度计算研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2006, 23(4): 27-30.  
Zhang Yaoting, Sun Yaozhou, Zhang Zhengzhe. Study on Deflection Calculation of Prestressed Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2006, 23(4): 27-30.

[2] 林泉, 楼徐燕, 楼铁炯, 等. 无粘结预应力混凝土梁的强度与变形特性研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 77-81.  
Lin Quan, Lou Xuyan, Lou Tiejiong, et al. Research on Strength and Deformation Characteristics of Unbonded

- Prestressed Concrete Beams[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(3): 77-81.
- [3] 楼铁炯, 郭乙木, 王振林, 等. 任意截面无粘结预应力混凝土梁的极限非线性分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 77-80.
- Lou Tiejiong, Guo Yimu, Wang Zhenlin, et al. Nonlinear Analysis of Unbonded Prestressed Beams with Arbitrary Section at Ultimate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 77-80.
- [4] 徐满意, 孙熙平, 马津渤. 基于振动法检测预应力混凝土梁有效应力的实验研究及有限元分析[J]. 水道港口, 2008, 29(6): 432-437.
- Xu Manyi, Sun Xiping, Ma Jinbo. FEM and Experiment Research on Effective Stress of Prestressed Concrete Beam by Vibrating Method[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(6): 432-437.
- [5] 谢奕欣. 无粘结预应力混凝土梁的非线性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- Xie Yixin. Nonlinear Analysis of Beams Prestressed with Unbonded Tendons[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [6] 王红囡, 刘华波, 宋爽. 预应力混凝土结构非线性分析中 ANSYS 的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(1): 43-45.
- Wang Hongnan, Liu Huabo, Song Shuang. Application of ANSYS in Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structure[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(1): 43-45.
- [7] 杨海旭, 刘晚成, 王海飙, 等. 无粘结预应力筋等效荷载的特性与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(8): 1087-1089.
- Yang Haixu, Liu Wancheng, Wang Haibiao, et al. Characteristics and Applications of Equivalent Loads in Unbonded Prestressed Tendons[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(8): 1087-1089.
- [8] 司炳君, 孙治国, 谢永杰. ANSYS 软件在无粘结预应力混凝土箱型梁承载力分析中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(6): 8-11.
- Si Bingjun, Sun Zhiguo, Xie Yongjie. The Application of ANSYS Software to the Bearing Capacity Analysis of Unbonded Prestressed Concrete Box Girder[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(6): 8-11.
- [9] 汪霞利. 无粘结预应力简支梁非线性有限元分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- Wang Xiali. Nonlinear Finite Elements Method of Unbonded Prestressed Simply Supported Concrete Beams[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [10] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 108-110.
- The Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50010—2002 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002: 108-110.
- [11] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 271-272.
- Liu Tao, Yang Fengpeng. Proficient in ANSYS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 271-272.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ 92—2004 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 18.
- China Academy of Building Research. JGJ 92—2004 Technical Specification for Concrete Structures Prestressed with Unbonded Tendons[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004: 18.

(责任编辑: 邓光辉)