

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.03.002

# 基于 ANSYS 的预应力砼转换梁 张拉施工模拟分析研究

程火焰<sup>1</sup>, 陈思杭<sup>1</sup>, 李 迅<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 长沙星电电力勘测设计有限公司, 湖南 长沙 410015)

**摘 要:** 结合实际工程背景, 选取一根具有代表性的预应力砼转换梁, 基于 ANSYS 建立有效计算模型, 详细模拟分析预应力筋分段张拉的施工过程, 通过对模拟计算结果分析, 得到有关应力应变及变形的特点, 以此提出有关设计及施工方面的建议, 望能给工程实际运用提供借鉴。

**关键词:** 预应力砼; 转换梁; 分段张拉; ANSYS 模拟

中图分类号: TU378.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)03-0006-06

## Simulation Analysis on Tension Construction of Prestressed Concrete Transfer Beam Based on ANSYS

Cheng Huoyan<sup>1</sup>, Chen Sihang<sup>1</sup>, Li Xun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;  
2. Changsha Xingdian Electric Power Survey and Design Co., Ltd., Changsha 410015, China)

**Abstract:** Combined with practical engineering background, selects a representative prestressed concrete transfer beam to establish an effective computing model based on ANSYS, and simulates and analyzes the segmented tensioning construction process of prestressed tendons. Through the analysis of simulation results, obtains the related stress strain and deformation characteristics, and based on it, proposes some design and construction suggestions applications for practical project references.

**Keywords:** prestressed concrete; transfer beam; segmented tension; ANSYS simulation

在高层建筑预应力张拉的实际施工过程中, 常常会出现一些影响施工质量的问题。施工技术人员大多是以张拉施工过程中, 同步进行的质量检测数据为施工做参考及质量评定, 但这受测试设备及测试环境等因素的影响, 不够全面和准确。因此, 本文结合实际工程背景, 选取一根具有代表性的预应

力砼转换梁, 基于 ANSYS 建立有效计算模型, 模拟分析预应力筋分段张拉的施工过程, 并通过对模拟计算结果的分析, 得到有关应力应变及变形的特点, 以此提出有关设计及施工方面的合理建议, 为工程的实际运用提供借鉴。

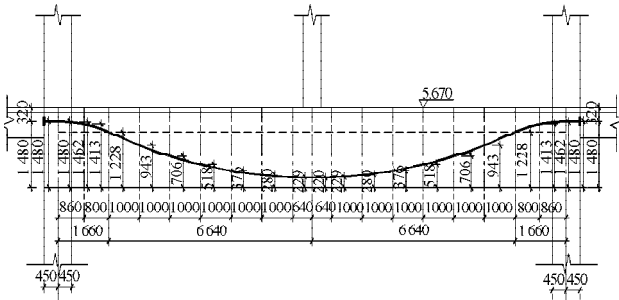
收稿日期: 2014-03-26

作者简介: 程火焰 (1969-), 男, 江西鄱阳人, 湖南科技大学副教授, 主要研究方向为工程结构鉴定与加固,  
E-mail: 578526700@qq.com

通信作者: 陈思杭 (1989-), 男, 湖南株洲人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为工程结构鉴定与加固,  
E-mail: 85342919@qq.com

## 1 工程概况

本工程中的预应力转换梁,是采用后张法施工的有粘结预应力混凝土转换梁。跨度 16.6 m, 截面尺寸为 800 mm × 1 800 mm, 混凝土强度为 C40。预应力筋采用直径为 15.24 mm (1 × 7), 极限抗拉强度标准值 1 860 MPa 的低松弛预应力钢绞线。非预应力筋规格: 箍筋采用 HRB235, 间距为 100 mm; 纵筋、抗扭钢筋采用 HRB400。金属波纹管规格为: 内径 70 mm (7 孔), 共放置 8 根波纹管, 靠近梁外侧布置 4 根, 内侧布置 4 根成对称布置。分 2 次进行张拉, 施工至转换层以上 2 层第 4 层楼面时, 先张拉内侧一排 (4 根) 预应力筋; 房屋裙楼五层封顶后张拉外侧一排 (4 根) 预应力筋。控制张拉力为  $0.75 \times 1860 \times 140 \times 7 = 1367.1$  (kN)。根据托柱式转换梁的设计理论, 将模型简化成一个集中荷载作用于转换梁跨中。在转换梁两批张拉施工前, 分别有 2 层和 4 层荷载通过梁上托柱以集中荷载的形式传递至梁跨中。根据 PKPM-SATWE 模块中各荷载工况下构件内力, 计算出第一次张拉和第二次张拉施工前跨中集中荷载: 第一次张拉时为 1 056.5 kN, 第二次在第一次的基础上增加至 2 112.9 kN。具体预应力筋布置如图 1 所示, 图中所示粗线为两排波纹管中心的矢高, 在定位波纹管矢高时应将图中所示矢高  $\pm h/2$ , 其中  $h$  表示两排波纹管中心的最小距离 200 mm。



注: 图中数据单位为 mm。

图 1 转换梁 YKL1 预应力筋布置图

Fig. 1 Prestressed tendons layout of transfer beam YKL1

## 2 本构模型的确立

### 2.1 材料单元类型

本文的有限元分析, 主要采用软件 ANSYS 对混凝土结构进行模拟。ANSYS 专门开发了 Solid65 单元, 它基于 8 节点每个节点 3 自由度的三维参数, 还增加了混凝土材料参数、开裂、压碎、应力释放及整体式钢筋模型<sup>[1]</sup>, 能较好地对混凝土结构进行模拟。因此, 本文以 Solid65 来对混凝土进行模拟, 普通钢筋

和预应力筋均采用 3D 杆单元 Link8 单元模拟。

### 2.2 混凝土与普通钢筋、预应力筋的组合

#### 2.2.1 混凝土与普通钢筋的组合

利用 ANSYS 分析钢筋混凝土时, 混凝土与钢筋的组合方式主要有分离式和整体式<sup>[2]</sup>。为更符合工程实际, 考虑到钢筋与混凝土之间的黏结和滑移, 本文采用分离式进行分析, 即把混凝土和钢筋以不同的单元分开建模; 然后将混凝土单元与沿着梁截面宽度方向分布的普通纵筋单元及箍筋单元采用公用节点的方式实现组合。混凝土单元与沿着梁截面高度方向分布的抗扭钢筋单元, 通过 CEINTF 命令耦合  $x, y, z$  3 个方向的自由度进行组合。

#### 2.2.2 混凝土与预应力筋的组合

在预应力混凝土结构分析时, 混凝土与预应力筋的组合方式通常有等效荷载法和实体力筋法<sup>[2]</sup>。考虑到本模型是模拟张拉施工, 为得到较准确的模拟分析结果, 本文选择实体力筋法。即采用实体切分法先将混凝土与预应力筋进行切分, 然后混凝土单元与预应力筋单元采用公用节点的方式实现组合。

### 2.3 本构模型的选择

混凝土作为一种复合型材料, 在荷载作用下产生的变形有一定机率的不可恢复性, 此时用弹性理论研究并不合适, 常运用于金属材料研究的弹塑性理论则较为严密<sup>[3]</sup>。

混凝土本构关系是根据 GB50010—2010《钢筋混凝土设计规范》中的本构模型确定, 在 ANSYS 中通过选用 MKIN 本构模型实现。具体的实现方式是通过输入 5 个 (应变、应力) 点来确定的本构曲线, 上升段采用 GB50010—2010《钢筋混凝土设计规范》规定的公式, 下降段则采用 Hognestad 的处理方法, 即当  $\varepsilon_c \leq 0.0020$  时,

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{0.0020} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中:  $\sigma_c$  是应力值;

$\varepsilon_c$  是应变值;

$f_c$  是混凝土抗压强度设计值。

当  $0.0020 < \varepsilon_c \leq 0.0033$  时,

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon_c - 0.0020}{0.0033 - 0.0020} \right) \right]. \quad (2)$$

混凝土本构关系如图 2 所示。普通钢筋和预应力钢筋采用的本构模型是理想弹塑性本构模型, 在 ANSYS 中通过选用 BISO 本构模型来实现。钢筋 HRB235、HRB400、钢绞线的弹性模量分别为: 2.1e5, 2.0e5, 1.95e5 MPa。处理方法为

$$\text{当 } 0 \leq \varepsilon \leq \frac{f_y}{E} \text{ 时,} \quad \sigma = E\varepsilon, \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  是应力值;

$\varepsilon$  是应变值;

$f_y$  是钢筋抗拉强度设计值;

$E$  是弹性模量。

$$\text{当 } \varepsilon > \frac{f_y}{E} \text{ 时,}$$

$$\sigma = f_y \circ \quad (4)$$

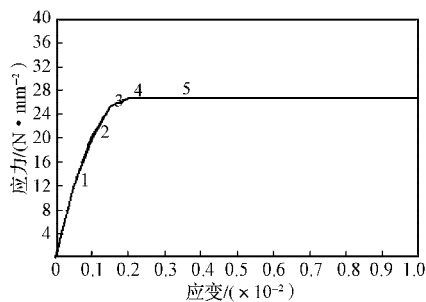


图2 混凝土本构关系图

Fig. 2 Concrete constitutive relations

预应力筋本构关系如图3所示。

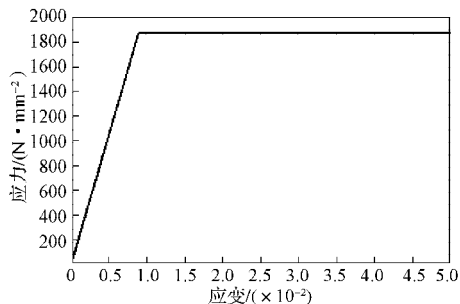


图3 预应力筋本构关系

Fig. 3 Prestressed tendon constitutive relations

由于混凝土问题的有限元分析具有高度的非线性性,混凝土材料的抗拉强度非常低,属于“一拉就裂”的材料<sup>[4]</sup>。计算时,混凝土单元一旦出现开裂情况,就会出现单元刚度矩阵奇异,导致计算难以收敛,几乎不可能一次计算就收敛,所以需要反复调整单元尺寸和荷载步,才能使得计算收敛并得到较理想的计算结果。由于计算模型具有对称性,建模时只建立四分之一模型,然后在对称面上施加对称边界条件,可以减少大量单元数,从而节省大量计算时间。

### 3 计算模型建立

#### 3.1 网格的划分

单元划分采用映射划分,每个混凝土单元的形状都是六面体,计算模型中混凝土单元一共有5 810

个,普通钢筋单元8 129个,预应力筋单元96个,单元总数为14 035个。所建立的有限元模型 $x$ 方向取为梁的长度方向, $z$ 方向为梁的截面高度方向, $y$ 方向为梁的截面宽度方向;模型关于 $x=0$ 面和 $y=0$ 面对称即可得到整体的有限元模型。网格沿梁截面高度方向的纵筋间距划分,如图4所示。

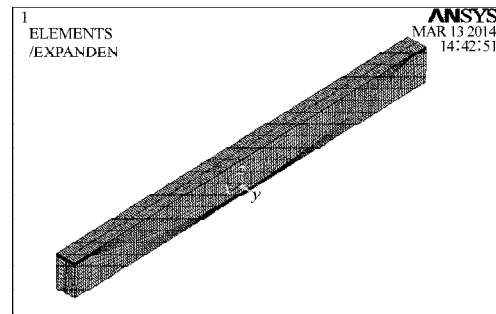


图4 模型网格划分图

Fig. 4 The model mesh diagram

#### 3.2 荷载及预应力的施加

1) 在计算时,跨中集中荷载采用均布面荷载加载,荷载作用位置为整体有限元模型的跨中正上方,作用面大小为上端柱的截面面积。

2) 预应力施加的方法主要有初应变法和降温法<sup>[5]</sup>。考虑实际张拉施工过程中会产生预应力损失,所以选择用降温法。根据热胀冷缩原理,为力筋单元设定一个初始温度,并且给定一个温降值,使得力筋单元产生一个收缩变形,此初始应变将使力筋产生预拉作用,这个预拉作用即为模型的预应力。钢筋的温降值公式为

$$\Delta T = \frac{P}{EA\alpha}, \quad (5)$$

式中:  $\Delta T$  为预应力筋的降温值;

$P$  为预应力的施加值;

$E$  为预应力筋的弹性模量;

$A$  为预应力筋的截面面积;

$\alpha$  为预应力筋的线膨胀系数。

#### 3.3 约束条件、加载方式及收敛准则的选择

按简支梁对模型进行分析计算。对于计算模型,约束梁端部 $x=8 200$ ,底端整条线的 $z$ 方向自由度,然后对 $x=0$ 面和 $y=0$ 面施加对称约束。在计算时,为模拟施工过程,分4步进行加载,第一步施加外荷载,第二步给梁上排预应力筋施加预应力,第三步再次施加外荷载,第四步给梁下排预应力筋施加预应力。每一步计算时,荷载子步设置为100,收敛准则通过 $cnvtol, u, 0.05, 0$ 来控制,即采用位移控制,二范数收敛准则,允许误差为0.05。

## 4 计算结果分析

### 4.1 预应力筋应力

张拉施工阶段, 第一次张拉时预应力筋的轴向应力变化如图5~6所示; 第二次张拉时预应力筋的轴向应力变化如图7~8所示。

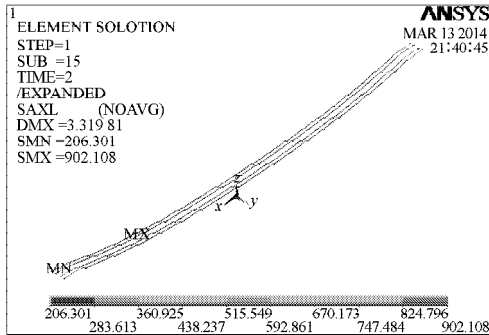


图5 上排预应力筋第一次张拉轴向应力云图

Fig. 5 The axial stress nephogram of upper row prestressed tendons at the first time tensioned

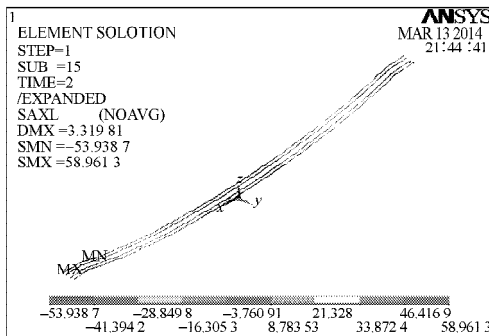


图6 上排预应力筋第一次张拉时下排预应力筋轴向应力云图  
Fig. 6 Axial stress nephogram of bottom row prestressed tendons at the first time tensioned of upper row prestressed tendons

由图5可知, YKL1梁在进行第一次张拉上排预应力筋时, 上排预应力筋的应力变化由跨中至反弯点后支座为902.1~747.5 MPa。这里与直线型预应力筋的应力变化有所不同, 直线型预应力筋的应力变化从跨中到支座一般不大, 这是由于曲线型的预应力筋在转换大梁中起的作用决定的。转换大梁通常跨中截面受到正弯矩且较大, 而端部受负弯矩且与跨中比较小, 另外还需提供一定的抗剪能力。在梁跨中, 力筋通常弯曲至梁底部且需提供较大的抵抗正弯矩的能力; 而梁端部, 力筋通常弯曲至梁顶部, 提供一定抵抗负弯矩作用及增加斜截面的抗剪能力即可。

由图6和图8可知, 预应力筋张拉施工采用分段张拉时, 对未张拉预应力筋应力变化有一定影响, 表现为由跨中至端部的压应力, 但值均较小。

由图5和图7可知, 在第一次张拉施工过程中, 跨中截面的预应力损失达到35%; 第二次张拉施工

中, 跨中截面的预应力损失达到50%。这说明后张法的有粘结曲线型预应力筋张拉施工, 摩阻损失较大, 主要原因是, 首先, 本工程预应力张拉施工采用的是后张法有粘结预应力张拉施工, 相对来讲, 在张拉过程中, 预应力筋与混凝土建立起的粘结力会使预应力筋与孔道壁间的摩擦更大。其次, 由于预应力筋的形状为曲线形, 在预应力筋放张时, 受到曲线孔道的反摩擦阻止, 造成预应力孔道摩阻损失加大; 最后, YKL1预应力梁在张拉之前梁侧面、底面已出现不同程度的裂缝, 使得预应力筋在张拉时, 部分预应力需要抵消导致裂缝产生及继续发展的混凝土拉应力, 从而提高构件的抗裂性。实际施工宜在施工工艺和养护工作两方面来设法减少预应力的损失。

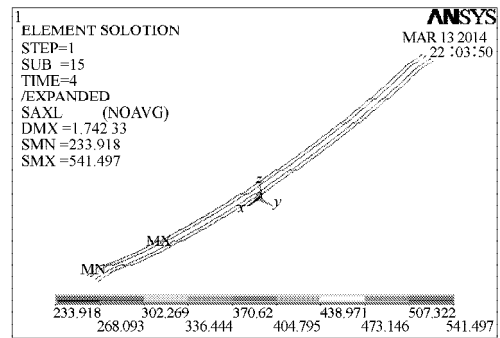


图7 下排预应力筋第二次张拉轴向应力云图

Fig. 7 Axial stress nephogram of bottom row prestressed tendons at the second time tensioned

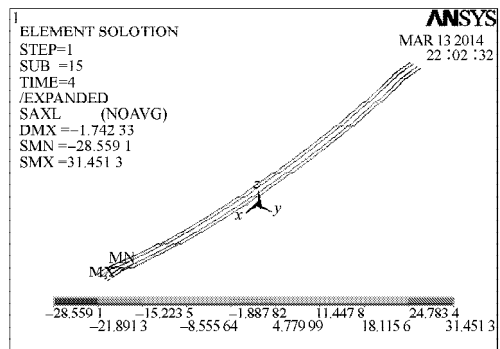


图8 下排预应力筋第二次张拉时上排预应力筋轴向应力云图

Fig. 8 Axial stress nephogram of upper row prestressed tendons at the second time tensioned of bottom row prestressed tendons

### 4.2 非预应力钢筋应变

张拉施工阶段, 非预应力钢筋轴向应变变化如图9~10所示。由图9~10可知, 当YKL1梁进行第一次张拉时, 梁跨中至端部的非预应力筋应变变化为449~207  $\mu\epsilon$ 范围内的压应变; 当YKL1梁进行第二次张拉时, 梁跨中至端部的非预应力筋应变变化为155~58.9  $\mu\epsilon$ 范围内的压应变, 最大压应变和最大拉应变都出现在支座上部一些区域, 这主要是由边界处

应力集中引起的。

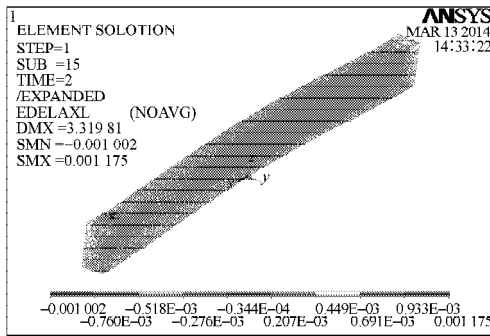


图9 YKL1梁第一次张拉非预应力筋轴向应变云图  
Fig. 9 Axial strain nephogram of non-prestressed steel bars at the first time tensioned of YKL1 beam

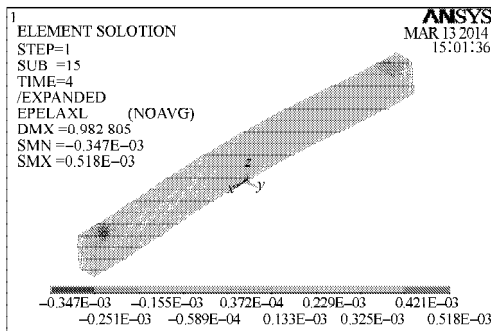


图10 YKL1梁第二次张拉非预应力筋轴向应变云图  
Fig. 10 Axial strain nephogram of non-prestressed steel bars at the second time tensioned of YKL1 beam

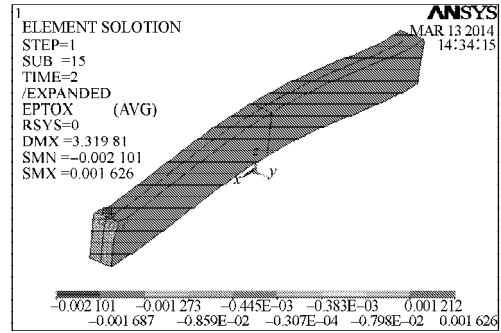


图11 YKL1梁第一次张拉混凝土轴向应变云图  
Fig. 11 Axial strain nephogram of concrete at the first time tensioned of YKL1 beam

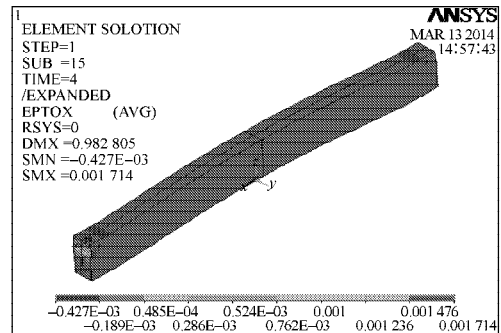


图12 YKL1梁第二次张拉混凝土轴向应变云图  
Fig. 12 Axial strain nephogram of concrete at the second time tensioned of YKL1 beam

### 4.3 混凝土应变

张拉施工阶段混凝土轴向应变变化如图11~12所示。由图11可知，在YKL1梁进行第一次张拉时，混凝土跨中底部至支座上部沿预应力筋布置区域内的应变较大，约为 $-445\mu\epsilon$ ；跨中上部和支座约为 $-30.7\mu\epsilon$ 。由于应力集中，最大压应变和最大拉应变都出现在梁支座上部的一些区域。

由图12可知，在YLL1梁进行第二次张拉时，混凝土应变与第一次相比已经分布较均匀，约为 $-189\mu\epsilon$ ，支座上部边界处一些区域达到 $-427\mu\epsilon$ 。

需要指出的是，在进行张拉施工模拟分析施加第一次转换梁上集中荷载的过程中，梁体底部及侧面会出现不同程度裂缝，正好与实际施工相符；而混凝土结构的模型一旦出现裂缝便会造成单元矩阵异常从而导致计算无法收敛，此时，可通过调试荷载加载的子步来尽量避免。联系工程实际，出现此现象的原因主要是由于设计人员对配置普通钢筋的选择问题。若按普通钢筋最小配筋率计算，则会出现偏少，而上部楼层荷载大预应力筋还未工作，导致梁体开裂；若按预应力度大小来配置普通钢筋，则会出现配置过多，进而拉裂混凝土。这都是设计人员应避免的问题。

### 4.4 张拉施工阶段的混凝土起拱

张拉施工阶段混凝土的起拱值如图13~14所示。

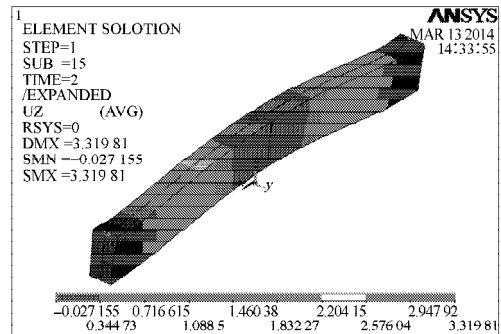


图13 YKL1梁第一次张拉起拱值  
Fig. 13 Arch camber value of YKL1 beam at the first time tensioned

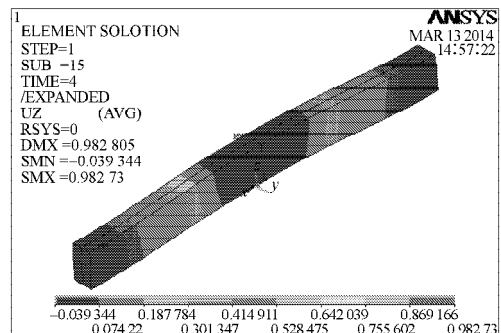


图14 YKL1梁第二次张拉起拱值  
Fig. 14 Arch camber value of YKL1 beam at the second time tensioned

由图 13 和图 14 可知, ANSYS 分析计算的第一次张拉施工和第二次张拉施工预应力砼转换梁的跨中起拱值分别为 3.32 mm 和 0.98 mm, 均未超过混凝土规范允许值, 这说明施工方案和模型建立方法及加载方式选择的正确。联系工程实际, 在预应力张拉施工之前, 采用梁上预加荷载, 即在转换梁张拉施工前先往上施工一定层数及采用分段张拉的方法, 能够有效地降低预应力张拉时的起拱值。具体荷载的大小、形式, 可用模拟分析软件进行调试及变换, 计算出具体结果为施工人员提供参考。

## 5 结语

本文基于有限元理论, 针对实际工程选取的预应力砼转换梁进行有效计算模型建立, 详细介绍了模型建立方法及加载方式等的选择, 对今后曲线型预应力筋的混凝土梁结构模型的建立提供一定参考。通过较详细的张拉施工模拟, 总结出后张法有粘结曲线型预应力筋张拉施工时, 应力、非预应力筋及混凝土应变在张拉施工时的变化规律, 结合工程实际, 提出了设计及施工方面的相关建议, 望能为工程实际提供参考。

### 参考文献:

[1] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 320.

Jiang Jianjing, Lu Xinzheng, Ye Liepin. Concrete Structural Finite Element Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 320.

[2] 程琛. 预应力混凝土框架梁的张拉监控与实测分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.

Cheng Chen. The Pretension Monitor and Testing Analysis of Pre-stressed Concrete Frame Beam[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.

[3] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 443-451.

Wang Xinmin. ANSYS-Based Engineering Structure Numerical Analysis[M]. Beijing: People's Communications Press, 2007: 443-451.

[4] 程源. 增大截面法加固钢筋混凝土梁的二次受力分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

Cheng Yuan. Study on the Secondary Stress Analysis of Reinforced Concrete Beams by the Method of Enlarging Section[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[5] 陈军, 周安, 詹炳根, 等. 曲线箱梁桥预应力筋张拉顺序的数值模拟及优化[J]. 工程与建设, 2011, 25(1): 1-3.

Chen Jun, Zhou An, Zhan Binggen, et al. Numerical Simulation and Optimization of Tension Sequence of Curve Girder Bridge Prestressed Tendons[J]. Engineering and Construction, 2011, 25 (1) : 1-3.

(责任编辑: 邓光辉)

