

文章编号:1672-9331(2019)01-0051-07

# 大跨径体内外混合配束连续刚构桥有限元分析

邓继华<sup>1,2</sup>, 许斌林<sup>1</sup>, 黄学文<sup>3</sup>, 涂文强<sup>1</sup>, 彭 晖<sup>1</sup>, 田仲初<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114; 2.广州大学 工程抗震研究中心,广东 广州 510405; 3.安徽省交通控股集团有限公司,安徽 合肥 230088)

**摘 要:** 为了准确模拟体外预应力筋的受力行为,以一座大跨径体内外混合配束连续刚构桥为例,分别采用带刚臂杆单元和考虑自由滑移的体外筋单元模拟体外预应力筋,进行了考虑混凝土收缩徐变效应和节段施工特点的有限元分析,其中,自由滑移的体外筋模型是基于体外预应力筋与转向块之间可自由滑动而导致体外预应力筋在全(换)长范围内为常应变构件的受力特点而建立。从关键截面挠度、弯矩、体外筋轴力方面对比分析了各模型的计算结果。研究表明,三种不同计算方式下连续刚构桥的内力和挠度区别不大,但是体外筋应力的区别较大,在需精确考量体外筋轴力值的情况下,对同类桥梁进行计算时应慎重考虑。

**关键词:** 连续刚构桥; 体内外混合配束; 单元模型; 收缩徐变; 有限元分析

中图分类号: TU378.2

文献标识码: A

## Finite element analysis for long-span concrete continuous rigid frame bridge with mixed arrangement of internal and external tendons

DENG Ji-hua<sup>1,2</sup>, XU Bin-lin<sup>1</sup>, HUANG Xue-wen<sup>3</sup>,  
TU Wen-qiang<sup>1</sup>, PEN Hui<sup>1</sup>, TIAN Zhong-chu<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
2.Earthquake Engineering Research and Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;  
3.Anhui Provincial Communications Holdings Group Co. Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract:** An accurate simulation for externally prestressing tendon of structure is the key problem of finite element analysis. An long-span concrete continuous rigid frame bridge with arrangement of internal and external tendons is taken as example, simulation of externally prestressing tendon by using truss elements with rigid arms and external tendons elements for free sliding are made respectively. The proposed method of analysis is formulated for considering shrinkage and creep of concrete as well as segmental construction, which external tendons elements for free sliding are based on the external tendons are members for the normally elastic strain caused by the free sliding between external tendons and deviators. Some numerical examples are solved to verify the reliability and correctness of the various models. It is shows that there is little difference between the internal force and deflection of the continuous rigid frame bridge under three different calculation methods, but there is a

收稿日期:2018-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478049);安徽省交通科技项目(AHGS2014-5);广东省自然科学基金项目(2015A030310141);中国博士后基金项目(2014M562154);湖南省教育厅青年基金项目(14B008);湖南省科技重大专项(2015GK1001-1)

通讯作者:邓继华(1975-),男,湖南冷水江人,长沙理工大学副教授,博士,主要从事桥梁结构方面的研究。E-mail: jihuadeng@sina.com

big difference in the stress of external tendon, in the case of accurate calculation of the stress of external tendon, the calculation of similar bridges should be carefully considered.

**Key words:** continuous rigid frame bridge; mixed arrangement of internal and external tendons; model; shrinkage and creep; finite element analysis

大跨径预应力混凝土连续刚构桥以其造价经济、施工方便和养护简单等优点,被广泛应用于我国 300 m 跨径范围内的桥梁<sup>[1]</sup>。但是此类桥梁在运营一段时间后,普遍出现以主梁持续下挠和梁体开裂等为特征的性能退化问题。该问题在国外同类桥梁上也同样存在,严重时甚至导致桥梁垮塌或拆除<sup>[2-4]</sup>。为避免或减轻上述问题对桥梁使用性能的影响,很多研究人员从设计、施工及运营等方面提出了有针对性的措施,其中,对连续刚构桥主梁施加体外预应力筋被认为是既适合于旧桥加固设计、又适合于新桥设计所采取的有效措施<sup>[5-6]</sup>。在进行体内体外混合配束的大跨径连续刚构桥结构分析时,如何准确模拟体外预应力筋的受力行为非常重要,大部分已有研究都是基于 MIDAS、ANSYS 等商业程序进行结构分析,其中,对体内有黏结筋和体外无黏结筋都是不加区别地采用杆单元或带刚臂杆单元模拟<sup>[5-9]</sup>。由于体外无黏结预应力筋与主梁除在锚固块和转向块处有接触外,其余地方两者是独立的,其受力行为与体内有黏结筋有很大不同,上述处理是否合适还有待研究。

在不考虑体外筋与转向块之间摩擦的前提下,体外筋可视为两端固结在两个锚固块处,在包括转向块处的全长范围内可自由滑动的构件,其应变在全长范围内均相等。基于该受力特点,文献<sup>[10]</sup>建立了体外无黏结有限元计算模型,并对一体外预应力简支梁进行了分析,效果很好。由于该模型较难与现有商业程序融合(因转向块数量不同,涉及梁单元的节点数也不同,难以形成统一的单元刚度矩阵,结构总刚矩阵也不再具有稀疏特征,难以一维压缩存储),至今尚未用于大跨径连续刚构桥等复杂结构的分析。基于此,作者采用该体外筋有限元模型,结合已有的桥梁线弹性分析程序<sup>[11]</sup>,利用初应变法<sup>[12,13]</sup>来考虑混凝土的收缩徐变效应,建立大跨径体内外混合配束连续刚构桥有限元分析模型;编制程序,对安徽曹河大桥(主跨 115 m 的连续刚构桥)进行考虑混凝土收缩徐变效应和节段施工特点的结构分析,重点

考察基于带刚臂杆单元和自由滑移体外筋单元模拟体外预应力筋对桥梁受力行为的影响,所得结论可为结构分析人员参考。

## 1 有限元分析模型和方法

### 1.1 自由滑移体外筋单元模型

该模型<sup>[10]</sup>的主要特点是认为体外预应力筋与转向块之间可自由滑动,因而体外预应力筋在其全长范围内为常应变构件。以图 1 所示的三段四节点杆单元模型为例,介绍其在结构坐标系下单元刚度矩阵的求解方法。

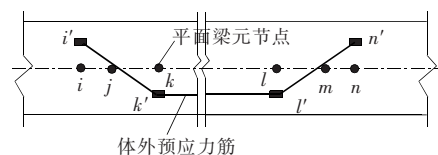


图 1 多段多节点杆单元模型

Fig. 1 Multi segment-node truss element model

图 1 中,  $i, \dots, n$  为平面梁单元节点,  $i', k', l', n'$  为与  $i, k, l, n$  对应的锚固块和转向块处位置点,在结构坐标系  $xy$  (图中未示出)下,对于平面梁单元,设各节点坐标为  $(x_m, y_m)$ ,  $m = i, \dots, n$ ,发生的节点位移为  $[u_m \ v_m \ \theta_m]^T$ ,  $m = i, \dots, n$ ;对于体外预应力筋,设各节点坐标为  $(x_m, y_m)$ ,  $m = i', k', l', n'$ ;对于体外预应力筋上任意一节点,比如  $i'$ ,设其节点位移为  $[u_{i'} \ v_{i'} \ \theta_{i'}]^T$ ,在小位移假定下,它与平面梁上对应节点的位移有以下关系:

$$\begin{bmatrix} u_{i'} \\ v_{i'} \\ \theta_{i'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_i - y_{i'} \\ 0 & 1 & x_{i'} - x_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在得到如式(1)所示的体外预应力筋各节点的位移用平面梁单元节点位移表示的计算式后,体外预应力筋  $i'k'l'n'$  的总伸长量  $\Delta L_{i'k'l'n'}$  可用  $\delta_{ikln} = [u_i \ v_i \ \theta_i \ u_k \ v_k \ \theta_k \ u_l \ v_l \ \theta_l \ u_m \ v_m \ \theta_m]^T$  表示为:

$$\Delta L_{i'k'l'n'} = F \cdot G \cdot S \cdot \delta_{ikln}. \quad (2)$$

在前面已提及的体外预应力筋在其全长范围内为常应变构件的基础上,体外预应力筋应变  $\varepsilon_{i'k'l'n'}$  的计算式为:

$$\varepsilon_{i'k'l'n'} = \Delta L_{i'k'l'n'} / L_{i'k'l'n'} = \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\delta}_{ikln} \quad (3)$$

式(2)中的  $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{S}$  以及式(9)中  $\mathbf{B}$  的具体表达式可见文献[10]。式(3)中  $L_{i'k'l'n'}$  为体外预应力筋  $i'k'l'n'$  的初始长度。

运用虚功原理可得到体外预应力筋三段四节点杆单元在结构坐标系下的刚度矩阵  $\mathbf{K}_{i'k'l'n'}$  为:

$$\mathbf{K}_{i'k'l'n'} = E\mathbf{A}\mathbf{B}^T\mathbf{B}/L_{i'k'l'n'} \quad (4)$$

式中:  $E$ 、 $A$  分别为体外预应力筋的弹性模量和截面积。

当体外预应力筋的初张拉力为  $N^0$  时,它所引起的等效节点力  $\mathbf{F}_{i'k'l'n'}^0$  为:

$$\mathbf{F}_{i'k'l'n'}^0 = N^0 \cdot \mathbf{B}^T \quad (5)$$

## 1.2 收缩徐变效应分析

以徐变系数<sup>[12,13]</sup>来表示混凝土在常应力  $\sigma$  作用下徐变应变的计算式为:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{D} \varphi(t, \tau) \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_c$  为混凝土常应力  $\sigma$  从初始时刻  $\tau$  到计算时刻  $t$  所产生的徐变应变;  $D$  为应力矩阵;  $\varphi(t, \tau)$  为加载龄期  $\tau$ 、计算龄期  $t$  时的混凝土徐变系数。

为适应大跨桥梁徐变分析所具有的变结构变应力特点,程序采用增量法来进行。将整个求解时间轴分为  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $\dots$ 、 $t_n$ 、 $t_{n+1}$  等时刻,  $\Delta\sigma_0$ 、 $\Delta\sigma_1$ 、 $\dots$ 、 $\Delta\sigma_n$ 、 $\Delta\sigma_{n+1}$  为作用在各时刻的应力增量。下面以在  $t_n$  时刻、在  $\Delta t_{n+1}$  ( $t_n - t_{n+1}$ ) 时段内为例,介绍基于初应变法的单元徐变等效节点力增量计算方法。

假定结构的应力和材料常数不随时间而变化,由式(6)可得  $\Delta t_{n+1}$  ( $t_n - t_{n+1}$ ) 时段内的徐变增量为:

$$\Delta\varepsilon_c^{n+1} = \sum_{i=0}^n (\Delta\sigma_i/D) \Delta\varphi(t, \tau_i) \quad (7)$$

式中:  $\Delta\sigma_i$  为时间轴上  $t_i$  时刻的应力增量。

将  $\Delta\varepsilon_c^{n+1}$  作为初应变,计算出其等效节点力增量,并将其作用于  $\Delta t_{n+1}$  时段末,按有限元的基本方法,单元徐变等效节点力增量可表示为:

$$\Delta f_{n+1}^c = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \Delta\varepsilon_c^{n+1} dV = \sum_{i=0}^n \int_V [\mathbf{B}^T \Delta\sigma_i dV \Delta\varphi(t, \tau_i)] \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_i = \mathbf{D}(\Delta\varepsilon_{e,i} - \Delta\varepsilon_{c,i}) = \mathbf{D}\Delta\varepsilon_{e,i} - \mathbf{D}\Delta\varepsilon_{c,i} \quad (9)$$

式中:  $\Delta\varepsilon_{e,i}$  如前述为节点位移增量所引起的应变增量;  $\Delta\varepsilon_{c,i}$  为混凝土徐变(上一时步)初应变增量。

$$\int_V \mathbf{B}^T \Delta\sigma_i dV = \int_V \mathbf{B}^T \Delta\varepsilon_{e,i} dV -$$

$$\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \Delta\varepsilon_{c,i} dV = \Delta f_{e,i} + \Delta f_{c,i} = \Delta f_i \quad (10)$$

式中:  $\Delta f_{e,i} = \int_V \mathbf{B}^T \Delta\varepsilon_{e,i} dV$  为由节点位移增量引起的杆端力增量;  $\Delta f_{c,i} = - \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \Delta\varepsilon_{c,i} dV$  为由初应变  $\Delta\varepsilon_{c,i}$  引起的固端力增量。

将式(10)代入式(8),得:

$$\Delta f_{n+1}^c = \sum_{i=0}^n \Delta f_i \Delta\varphi(t_{n+1}, \tau_i) \quad (11)$$

按式(11) 计算单元的徐变等效结点力时,需记录单元徐变杆端内力的历史  $\Delta f_i$ 。参照已有文献可知,只需将徐变系数  $\varphi(t, \tau_i)$  表达为指数函数的形式,就可实现通过递推公式来求得  $\Delta f_{n+1}^c$ 。

与上述徐变效应分析方法相同,混凝土收缩应变对结构的影响也可作为初应变问题来计算,具体方法见文献[12,13],此处不赘述。

## 1.3 程序设计思路

依据桥梁的实际施工步骤,在时间轴上划分时间步(时间步数还需考虑成桥运营后收缩徐变效应计算步数),输入每一个时间步上新施加或去除的单元数、节点数、约束数、荷载数(荷载类型和荷载值),对每一个时间步进行如下计算。

计算本时间步新施加荷载的等效节点力(需计入上一时间步的收缩徐变等效结点力),计算截止到本时间步安装的混凝土梁单元和预应力筋杆单元刚度矩阵,并叠加形成结构总刚矩阵,依据截止到本时间步存在的约束对等效节点力矩阵和结构总刚矩阵进行边界处理,平衡方程求解得到节点位移增量,计算杆端力增量并叠加形成杆端力总量,依据初应变法计算下一时步的收缩徐变等效结点力。

对所有时间步按上述步骤进行循环。

程序设计中应注意的是,体内有黏结筋和体外无黏结筋在张拉阶段只考虑初始张拉力的等效节点力,预应力筋本身对结构刚度矩阵的贡献需在张拉阶段的下一个阶段才计入,该处理方法与斜拉桥分析中对斜拉索的处理方法是相同的。

应指出的是,相对于已有程序<sup>[11]</sup>,本研究程序是在该程序的基础上加入了收缩徐变效应和自由滑移体外筋单元分析模块。

## 2 程序验证

拟从多阶段施工、收缩徐变效应和体外筋方面对本研究程序进行验证。

**例 1** 如图 2 所示,3×30 m 等截面混凝土连续梁,主梁截面几何特性为: $A=4\text{ m}^2$ , $I=4\text{ m}^4$ ,容重 $\rho=25\text{ kN/m}^3$ ,弹性模量 $E_c=3\times10^4\text{ MPa}$ 。三跨连续梁在支架上分三次现浇,各梁段依次浇筑后经养护 7 d 后落架,前后梁段落架时间相隔 14 d。第一段现浇 36 m,即第一孔再加 6 m 悬臂,养护 7 d 后落架经 7 d 准备后在支架上浇筑第二段 30 m,即第二孔浇完;再加第三孔浇 6 m,养护 7 d 后落架再经 7 d 准备后在支架上浇筑最后一段 24 m,同样养护 7 d 后落架成桥。

计算中将主梁均匀分成 45 个单元、46 个结点。为便于比较,收缩徐变效应的计算模式及各项参数均与文献<sup>[12]</sup>相同。中间支点处弯矩计算结果列于表 1。由表 1 可以看出,本研究结果与其他文献的结果吻合良好。

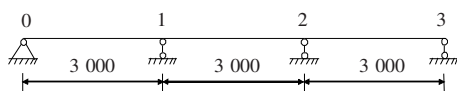


图 2 计算结构示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of calculation structure (Unit: mm)

表 1 中支点弯矩比较

Table 1 Comparison of bending moment of middle fulcrum (kN·m)

项目	弯矩值	文献[14]	文献[15]	文献[12]	本研究
不计徐变	支点 1		-4 930	-4 940	-4 940.4
	支点 2		-6 999	-7 022	-7 022.4
计徐变	支点 1	-8 476	-8 056	-7 990	-8 015.4
3 y	支点 2	-9 161	-8 900	-8 838	-8 905.3

**例 2** 图 3 所示为体外预应力简支梁桥,混凝土弹性模量 $E_c=30\text{ GPa}$ ,混凝土梁截面面积 $A_c=0.5\text{ m}^2$ , $I_c=1/24\text{ m}^4$ ,体外预应力筋弹性模量 $E_s=200\text{ GPa}$ ,截面面积 $A_s=0.030\text{ m}^2$ ,荷载 $P=30\text{ kN}$ 对称作用于两个三分点处。计算结果见表 2。由表 2

可以看出,本研究计算结果与文献<sup>[10]</sup>的完全相同。

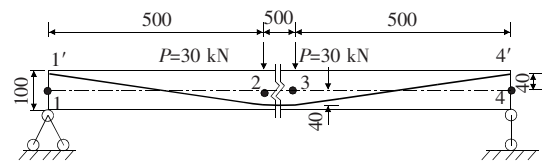


图 3 集中力作用的体外预应力梁(单位:cm)

Fig. 3 Externally prestressed beams subjected to concentrated forces (Unit: cm)

表 2 位移和内力计算结果

Table 2 Results of displacement and internal force calculation

方法	节点 2 挠度/mm	节点 1 转角/(°)	节点 2 转角/(°)	体外筋轴力/kN
文献[10]	-2.123	-0.031 1	-0.013 9	71.3
本研究	-2.123	-0.031 1	-0.013 9	71.3

以上两个算例说明,本研究程序的计算结果是可信的。

## 3 实桥分析

安徽曹河大桥地处皖西大别山区,是连接岳西县与武汉高速公路上的控制性工程。曹河大桥主桥为双幅 63 m+115 m+63 m 的连续刚构桥,设计荷载为公路 I 级,主梁为单箱单室变截面 PC 连续箱梁,箱梁顶板宽 12 m,底板宽 6.5 m;墩顶梁高 7 m,跨中梁高 3 m。在预应力筋布置方面,主梁采用横、纵双向预应力结构,并在纵向预应力筋中采用体内一体外混合配束体系:体内预应力钢束用于满足结构在施工与使用状态的受力要求,体外预应力钢束用于抵消体内预应力钢束长期应力损失的不确定性带来的不利影响。在全桥合龙以后进行初次张拉,在成桥运营阶段,视桥的使用状况在合适时机张拉或补张拉。

该桥实桥及体外筋的布置分别如图 4 和图 5 所示。该桥其他具体参数值见文献<sup>[6]</sup>。

在对该桥进行考虑混凝土 10 y 收缩徐变效应和分阶段施工的计算中,计算阶段共分为 69 个,其中,前面 52 个阶段分别模拟桥墩施工及主梁悬臂施工至最终中跨合龙(包含相应阶段的体内预应力筋单元张拉安装),第 53 阶段为全桥体外预

应力筋单元张拉安装,第 54 阶段为二期恒载施工,后面 15 个阶段为收缩徐变效应计算阶段。考虑到收缩徐变效应都基本遵循指数函数规律,因此各计算阶段时间间隔也是按对数函数来计算选取<sup>[12]</sup>。在本桥的有限元模型中,将每一个桥墩划分成 18 个普通平面梁单元,主梁划分成 92 个普通平面梁单元,全桥体内筋用 1 550 个带刚臂杆单元模拟,对体外筋则按以下三种方式进行模拟。



图 4 安徽曹河大桥立面图

Fig. 4 Elevation of Caohe bridge in Anhui province



图 5 部分体外预应力筋图

Fig. 5 Partial external prestressed tendon diagram

方式一:完全参照体内筋的处理方法来处理体外筋。根据每一个体外筋节段(就是锚固块到相邻转向块或两个相邻转向块之间的一段)经过的主梁单元数,将其划分成同样数量的带刚臂杆单元,其中,每个边跨体外筋划分成 27 个带刚臂杆单元,中跨体外筋划分成 46 个带刚臂杆单元。全桥共 129 个节点,1 760 个单元(含 110 个平面梁单元,1 650 个带刚臂杆单元)。

方式二:根据每个边跨含 2 个体外筋节段,中跨含 3 个体外筋节段的实际情况,将边跨体外筋划分成 2 个带刚臂杆单元,中跨体外筋划分成 3 个带刚臂杆单元。全桥共 129 个节点,1 667 个单元(含 110 个平面梁单元,1 557 个带刚臂杆单元)。

方式三:用前述的自由滑移体外筋单元分别

模拟边跨和中跨体外筋,全桥共 129 个节点,1 663 个单元(含 110 个平面梁单元,1 550 个带刚臂杆单元和 3 个自由滑移体外筋单元)。

表 3~5 分别列出了各关键阶段部分内力、位移的计算结果。

表 3 中跨跨中挠度计算结果

Table 3 Midspan mid-span deflection calculation results

方式	第 53 阶段体外预应力筋张拉产生的增量位移	第 54 阶段二期恒载施工产生的增量位移	第 54 阶段二期恒载施工后的总位移	10 y 收缩徐变效应后的总位移
方式一	8.6	-29.2	0.38	-14.3
方式二	8.6	-29.2	0.36	-14.4
方式三	8.6	-29.2	0.37	-14.3

注:位移值为正表示主梁往上挠,为负表示往下挠。

从表 3 可以看出,三种方式计算得到的各关键阶段中跨跨中挠度基本相同;由于混凝土收缩徐变效应,中跨跨中存在长期往下挠的趋势。

表 4 混凝土主梁弯矩计算结果

Table 4 Calculation results of bending moment of concrete girder (kN · m)

方式	位置	第 53 阶段体外预应力筋张拉产生的增量弯矩	第 54 阶段二期恒载施工产生的增量弯矩	第 54 阶段二期恒载施工后的总弯矩	10 y 收缩徐变效应后的总弯矩
方式一	中跨跨中	-1 389	21 530	11 140	-218.6
	墩顶	34 500	-75 300	130 100	77 870.0
方式二	中跨跨中	-1 389	21 520	11 130	-311.4
	墩顶	34 500	-75 500	129 900	76 860.0
方式三	中跨跨中	-1 389	21 510	11 120	-346.9
	墩顶	34 500	-75 600	129 800	76 650.0

从表 4 可以看出,体外筋张拉在墩顶截面和中跨跨中产生的弯矩按三种方式计算得到的值完全相同,在二期恒载施加产生的增量弯矩及总弯矩方面,方式二与方式三基本相同,但与方式一略有差别,但差别不大;在考虑 10 y 收缩徐变效应后,三者之间就有一定的差别,如以方式三的计算结果为准确值,则方式二的墩顶弯矩和中跨跨中弯矩误差分别为 0.27% 和 10.2%,则方式一的墩顶弯矩和中跨跨中弯矩误差分别为 1.59% 和 37.0%。

但考虑到量值均较小,此项差别对设计的影响基本可以忽略。

表5 体外筋轴拉力计算结果

Table 5 Calculation results of axial tension of external tendon kN

方式	位置	第53阶段体外预应力筋张拉产生的增量轴力	第54阶段二期恒载施工产生的增量轴力	第54阶段二期恒载施工后的总轴力	10 y收缩徐变效应后的总轴力
方式一	边跨	5 000	4.3	5 004.3	4 594.2
	中跨	7 500	35.3	7 535.3	6 704.2
方式二	边跨	5 000	-3.5	4 996.5	4 566
	中跨	7 500	21.3	7 521.3	6 618
方式三	边跨	5 000	-4.6	4 995.4	4 565.8
	中跨	7 500	21.8	7 521.8	6 621.4

注:方式一和方式二的值均为平均值;计算中未计入体外筋的重量。

对表5而言,各种计算方式得到的结果性质与表2类似,此处不赘述。但应指出的是,按方式一计算得到的每一根体外筋单元轴力差别较大,以10 y收缩徐变效应后的计算结果为例,对于边跨体外筋,最大值和最小值分别为4 914 kN和4 477 kN,中跨体外筋最大值和最小值分别为7 194 kN和6 216 kN;方式二的则差别小些,边跨体外筋两个节段的值分别为4 568 kN和4 564 kN,中跨体外筋三个节段的值分别为6 714 kN、6 426 kN和6 714 kN。

#### 4 结论

作者在已有桥梁线弹性分析程序的基础上,引入自由滑移的体外筋单元,以初应变法考虑混凝土的收缩徐变效应,研制了可用于分阶段施工的大跨径体内外混合配束连续刚构桥结构分析的程序,得到如下结论。

1) 根据体外筋模拟方式的不同,采用3种计算模式对安徽曹河大桥(主跨115 m的连续刚构桥)进行了计算分析,方式二与方式三计算结果差别不大,但方式一与前两种方式有一定的差别。但考虑到量值均较小,此差别对设计的影响基本可以忽略。

2) 尽管三种计算方式得到的体外筋平均轴力值相差不大,但方式一与方式二的计算值,特别是

方式一,沿体外筋轴向差别较大,在需精确考量体外筋轴力值的情况下,本研究建议采用方式三,即利用自由滑移的体外筋单元来进行相关分析。

#### 〔参考文献〕

- [1] 项海帆.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.  
XIANG Hai-fan, Conceptual bridge design[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] 石雪飞,杨琪,阮欣.已建大跨径PC梁桥过量下挠及开裂处治技术[M].北京:人民交通出版社,2010.  
SHI Xue-fei, YANG Qi, RUAN Xin, Treatment technology for excessive downward warping and cracking of long-span PC girder bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [3] 王国亮,谢峻,傅宇方.在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J].公路交通科技,2008,25(8):52-56.  
WANG Guo-liang, XIE Jun, FU Yu-fang, Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 52-56.
- [4] 楼庄鸿.大跨径梁式桥的主要病害[J].公路交通科技,2006,23(4):84-87.  
LOU Zhuang-hong, Main faults in large span beam bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 84-87.
- [5] 黄海东,向中富,牛洪,等.连续刚构桥体外索加固约束效应分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(4):520-524.  
HUANG Hai-dong, XIANG Zhong-fu, NIU Hong, Xu, et al. Analysis of the restraint in continuous rigid frame bridge retrofitted by external post-tensioning[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 27(4): 520-524.
- [6] 黄学文,胡守旺,刘洋,等.体内体外混合配束连续刚构桥主梁下挠及处治分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2015(3):68-76.  
HUANG Xue-wen, HU Shou-wang, LIU Yang, et al. Processing analysis of main girder for long-span concrete continuous girder bridge with mixed arrangement of internal and external tendons[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Nature Science, 2015(3): 68-76.
- [7] 袁爱民,钱守龙,周元华,等.体内体外混合配束节段预制箱梁的数值模拟[A].第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册)[C].北京:人民交通出版社,



- 2014;356-362.
- YUAN Ai-ming, QIAN Shou-long, ZHOU Yuan-hua, et al. Numerical simulation of prefabricated box girder with mixed beam matching of internal and external tendons[A]. Chinese Society of Civil Engineering. Proceedings of the 21st National Conference on Bridges; volume one[C]. Beijing: China Communications Press, 2014;356-362.
- [8] 郑伟, 吴毅彬, 袁鑫, 等. 体外预应力索加固大跨径连续刚构桥空间受力计算分析[J]. 公路, 2014(1):26-30.
- ZHENG Wei, WU Yi-bin, YUAN Xin, et al. Calculation and analysis of spatial forces of long span continuous rigid frame bridges strengthened by external prestressed cables[J]. Highway, 2014(1):26-30.
- [9] 陶庆东, 刘跃国. 体内体外混合预应力配束连续刚构桥力学性能对比分析[J]. 施工技术, 2017, 46(2):63-68.
- TAO Qing-dong, LIU Yue-guo. Comparative analysis of the mechanical properties of the in-vivo and in-vitro mixed prestressed continuous rigid frame bridge[J]. Construction Technology, 2017, 46(2):63-68.
- [10] 李传习, 夏桂云, 贺玲凤, 等. 体外预应力混凝土梁有限元分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2003, 31(S1):104-106.
- LI Chuan-xi, XIA Gui-yun, He Ling-feng, et al. Finite element analysis of externally prestressed concrete bridge[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 31(S1):104-106.
- [11] 颜东煌, 田仲初, 李学文. 桥梁结构电算程序设计[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1999.
- YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, LI Xue-wen. Design of computing for bridge structures program [M]. Changsha: Hunan University Press, 1999.
- [12] 颜东煌, 田仲初, 李学文, 等. 混凝土桥梁收缩徐变计算的有限元方法与应用[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2):55-58.
- YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, LI Xue-wen, et al. Finite element method and application for the shrinkage and creep of concrete bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2):55-58.
- [13] 邓继华, 邵旭东, 谭平. 几何非线性与徐变共同作用下三维杆系结构有限元分析[J]. 工程力学, 2015(6):117-123.
- DENG Ji-hua, SHAO Xu-dong, TAN Ping. Finite element analysis for 3-D frame structures under combined actions of geometric nonlinearity and creep [J]. Engineering Mechanics, 2015(6):117-123.
- [14] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988:291-297.
- FAN Li-chu. Prestressed concrete continuous beam bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1988:291-297.
- [15] 王书庆. 徐变自动增量分析方法及其在BRCAD系统中的实现[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会一九九九年桥梁学术讨论会论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 1999:822-826.
- WANG Shu-qing. The method of automatic incremental creep analysis and its realization in BRCAD system[A]. Proceedings of the Bridge Symposium 1999, Bridge and Structural Engineering Society of China [C]. Beijing: China Communication Press, 1999:822-826.

## (上接第9页)

- WANG Kui-hua, MA Shao-jun, WU Wen-bin. Active earth pressure of cohesive soil backfill on retaining wall with curved sliding surface[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5):732-738.
- [14] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华. 曲线滑裂面下有限宽度填土主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(7):2029-2035.
- YANG Ming-hui, DAI Xia-bin, ZHAO Ming-hua. Calculation of active earth pressure for limited soils with curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7):2029-2035.
- [15] 杨贵, 王阳阳, 刘彦辰. 基于曲线滑裂面的挡墙主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8):2182-2188.
- YANG Gui, WANG Yang-yang, LIU Yan-chen. Analysis of active earth pressure on retaining walls based on curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8):2182-2188.
- [16] 交通部第二公路勘察设计院著. 公路设计手册: 路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- Second Highway Survey and Design Institute of the Ministry of Communications. Highway design handbook: subgrade[M]. Beijing: China Communication Press, 1996.