

大跨度曲线预应力桥梁 预应力钢束的张拉控制研究

郭自兴, 黄金枝, 代泽兵

(上海交通大学, 建筑工程与力学学院 200240)

摘 要: 预应力在大跨度曲线桥梁中的使用, 给预应力的分析研究以及张拉施工提出了新的问题, 尤其是施工中的一些问题亟待解决, 如摩擦系数、曲率等的改变, 都会给预应力的分布带来不利的影响。现有的力学模型又无法满足解决这些问题的需求, 建立一种适用于大跨度曲线预应力桥梁预应力钢束张拉施工的新模型是必要的。本文给出了预应力钢束张拉的控制模型, 并在施工中得以验证, 取得了令人满意的效果。该模型不仅可以解决一些诸如摩擦系数这类可确定因素的变化问题, 亦可处理一些不确定因素给施工所带来的影响。按照这一模型所规定的方式进行施工, 大大改善了预应力在钢束中的分布情况, 提高预应力的使用效果是显著的。

关键词: 大跨度; 预应力; 张拉; 控制

中图分类号: TU755.9, U448.42 **文献标识码:** A

1 引言

现代施工技术和结构工程的飞速发展给预应力结构的实际应用开辟了广阔天地, 在桥梁方面预应力的应用更加广泛, 施工方式有预制和现浇, 文献[1]给出了节段预制桥梁的一种标准化体系。由于预应力结构的复杂性, 从各个方面对其进行研究是必要的。文献[2]从设计方面进行了研究, 给出了一种优化设计方法。文献[3]对冒梁和柱的连接处所使用的预应力的抗震性能进行了研究, 认为使用预应力可以改善这类节点的抗震性能。

为了确保预应力混凝土这样的复杂结构, 在施工阶段以及整个使用期内的安全性和适用性性能, 人们做了大量的研究。文献[4]认为有必要建立一般的和精确的分析模型, 并进一步指出这样的模型必须包含以下几个方面:

(1) 在施工过程中结构构造的变化。例如, 结构的纵向和横向形状, 临时支撑的安放, 预应力索的张拉以及铰的定位。

(2) 由于混凝土的徐变和收缩、预应力钢筋的

松弛以及混凝土参数随时间的改变而引发的结构的时效性(Time-dependent structural effects), 同时还要考虑结构的每一部分或单元不同的浇铸和承载期龄。

(3) 真实地考虑材料性能和结构特征, 应考虑非线性应力-应变关系、混凝土的开裂和压碎、钢筋的屈服和张拉强化等。对细长结构的变形方面必须考虑二阶项的影响以及均衡。

兼备以上三方面的分析依赖于结构特性的描述^[4]:

(1) 在施工过程中, 要考虑施工次序的评估以及计划措施, 以便达到计划目标。

(2) 在结构的使用期内, 要计算应力的再分布, 避免开裂或过大的变形, 并且在任何时候都应保证结构的功能性、耐用性及其美观。

(3) 在荷载增加直至破坏之间, 无论是在施工中、施工后以及长期使用过程中, 都要计算结构的承载能力。

文献[5]利用在一定程度上满足以上要求的力

收稿日期: 2001-12-06; 修改日期: 2002-04-31

作者简介: 郭自兴(1964), 男, 河北人, 博士生, 主要从事大跨度桥梁结构研究;

黄金枝(1941), 男, 福建人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程研究;

代泽兵(1975), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事桥梁结构研究

学模型对施工中预应力筋张拉过程的摩擦系数的反算进行了研究,反映施工中所存在的不确定因素对预应力的损失造成了不小的影响。而施工中不确定因素的影响就精确建模来讲,直接影响上述所要求的各个方面,同时我们并不能把不确定因素精确化。因此本文认为对预应力钢筋或钢束在施工过程中的模型应为某种控制模型。

对于施工过程而言预应力钢筋或钢束的控制模型要比一般的力学模型更为精确。首先控制模型可以处理由施工过程中所产生的不确定因素对结构最终性能的影响。再者可以指导施工过程,以部分地消除不确定因素对结构的影响,使得成品结构更为接近设计要求。从而可以获得更为优质的施工质量。

施工实践证明,对于大跨度曲线预应力桥梁预应力钢束的张拉施工,张拉难以到位,当达到张拉控制力时,张拉位移仍然达不到设计要求。造成这种情况的主要因素一般是施工中的一些不确定因素所带来的摩擦系数增大以及预应力钢筋或钢束曲率的改变等。而在张拉时已经无法再测定钢筋或钢束的曲率,因此依然使用现有的力学模型进行计算来指导施工,就难以达到设计要求。因此无论是理论上还是实践上都需要建立新的模型来分析这一过程,并给施工以指导。

2 预应力钢筋或钢束控制模型

2.1 预应力钢筋或钢束的一般模型

设曲线预应力钢束的空间位置可表示为:

$$\mathbf{r} = \{x(s), y(s), z(s)\}^T \quad (1)$$

如图1所示。图中 \mathbf{m} 为正交于 \mathbf{n} 、 \mathbf{s} 的单位向量, \mathbf{n} 为曲率方向的单位向量, \mathbf{s} 为切向单位向量。

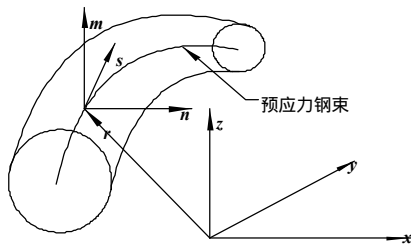


图1 构件中的预应力钢束

Fig.1 Tendons in structure

为分析空间预应力钢束的受力情况,可在图1所示的空间预应力钢束中任取一微段,如图2所示。图中 p_m 、 p_s 、 p_n 为相应方向的外力分量。设所取微段的长度为 ds ,并设微段中点处预应力钢束的张

力为 $P(s)$ 。则微段两端的张力分别为:

$$P(s) + \frac{1}{2} \frac{dP(s)}{ds} ds \quad \text{和} \quad P(s) - \frac{1}{2} \frac{dP(s)}{ds} ds$$

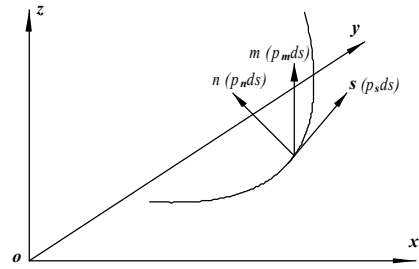


图2 钢束微段

Fig.2 An infinitesimal tendon segment

由平衡关系以及考虑到关系式:

$$\frac{ds}{ds} = \mathbf{k} \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, \mathbf{k} 为 s 点的曲率。于是得:

$$P \mathbf{k} \mathbf{n} + \frac{dP}{ds} \mathbf{s} = -p_s \mathbf{s} - p_n \mathbf{n} - p_m \mathbf{m} \quad (3)$$

将上式写作标量形式为:

$$p_n = -\mathbf{k} P \quad p_s = -\frac{dP}{ds} \quad p_m = 0$$

由正压力和摩擦力的关系:

$$p_s = \pm \mu p_n \quad (4)$$

可得:

$$\frac{dP}{ds} = \pm \mu \mathbf{k} P \quad (5)$$

上式即为预应力钢筋或钢束的平衡方程。

2.2 预应力钢筋或钢束的控制模型

公式(5)是预应力钢筋或钢束的一般力学模型,其中的 μ 和 \mathbf{k} 是设计值。而在施工过程中,由于种种原因很难保证其值不变。因此在施工过程中如果仍然按照上式指导施工,就无法得到满意的结果。文献[2]给出了关于 μ 在施工中的跟踪计算,但没有考虑 \mathbf{k} 的变化对预应力钢筋或钢束内力的影响,依然是用预应力钢筋或钢束的一般力学模型进行分析计算的,对张拉过程的具体施工缺乏具体的指导意义。

为了对象曲线预应力桥梁中所遇到的这种超长预应力钢筋或钢束,在张拉施工过程中有比较明确的指导性,并能够处理难以消除的不确定性所带来的影响,从控制论的角度出发,建立相应的控制模型是合适的也是必要的。

由于施工中的不确定因素,施工过程中的 μ 和 \mathbf{k} 已经不再是设计值,记实际值为 $\bar{\mu}$ 和 $\bar{\mathbf{k}}$,在(5)加上控制项,于是预应力钢筋或钢束的控制模型可

表示为：

$$\frac{d\bar{P}}{ds} = \pm \bar{m}\bar{k}\bar{P} + u(s) \quad (6)$$

其中 $u(s)$ 为控制律。由于上式中 k 是 s 的函数，因此该控制模型是一‘时变’系统。为简便起见，记

$$\bar{a}(s) = \pm \bar{m}\bar{k} \quad (7)$$

于是(6)可写为：

$$\frac{d\bar{P}}{ds} = \bar{a}(s)\bar{P} + u(s) \quad (8)$$

此即为预应力钢筋或钢束的控制模型。

2.3 控制律的设计

对于预应力钢筋或钢束的一般力学模型(5)，其解为：

$$P(s_2) = P(s_1) \exp(\pm \int_{s_1}^{s_2} \bar{m}\bar{k} ds) \quad (9)$$

其中 $P(s_1)$ 和 $P(s_2)$ 分别为预应力钢筋或钢束在 s_1 和 s_2 处的内力。设

$$a(s) = \pm \bar{m}\bar{k} \quad (10)$$

于是(9)可写为：

$$P = P(s_1) \exp[\int_{s_1}^{s_2} a(s) ds] \quad (11)$$

方程(8)的解为：

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \bar{P}(s_1) \exp[\int_{s_1}^{s_2} \bar{a}(s) ds] \\ &+ \exp[\int_{s_1}^{s_2} \bar{a}(s) ds] \int_{s_1}^{s_2} \{u(s) \exp[-\int_{s_1}^s \bar{a}(t) dt]\} ds \end{aligned} \quad (12)$$

当 s_1 为张拉端时，由 $P(s_1)$ 和 $\bar{P}(s_1)$ 的物理意义可知

$$\bar{P}(s_1) = P(s_1) \quad (13)$$

于是(12)式可写为：

$$\begin{aligned} \bar{P} &= P(s_1) \exp[\int_{s_1}^{s_2} \bar{a}(s) ds] \\ &+ \exp[\int_{s_1}^{s_2} \bar{a}(s) ds] \int_{s_1}^{s_2} \{u(s) \exp[-\int_{s_1}^s \bar{a}(t) dt]\} ds \end{aligned} \quad (14)$$

设

$$e(s) = \bar{P} - P \quad J(u) = \int_0^s e \times e ds$$

为使 \bar{P} 能够接近于设计值 P ，令

$$dJ = 0 \quad (15)$$

可得

$$dJ = 2 \int_0^s (\int_0^s \bar{b} ds) [P_0 \bar{a}(\bar{a} - a) + \bar{a}^2 \int_0^s u \bar{b} ds] duds = 0 \quad (16)$$

其中：

$$a(s) = \exp[\int_0^s a(s) ds] \quad \bar{a}(s) = \exp[\int_0^s \bar{a}(s) ds]$$

$$\bar{b}(s) = \exp[-\int_0^s \bar{a}(s) ds]$$

整理得

$$P_0(\bar{a} - a) + \bar{a} \int_0^s u \bar{b} ds = 0 \quad (17)$$

解得

$$u(s) = \frac{1}{\bar{b}} \frac{d}{ds} \left[-\frac{\bar{a}}{P_0(\bar{a} - a)} \right] \quad (18)$$

2.4 控制律的性质分析

由(18)式可得

$$u(s) = \left[\frac{\bar{a}'a - \bar{a}a'}{P_0(\bar{a} - a)^2} \right] \left(\frac{1}{\bar{b}} \right) \quad (19)$$

其中

$$\bar{a}' = \frac{d\bar{a}}{ds} \quad a' = \frac{da}{ds}$$

由(8)式可以看出， $u(s)$ 的物理意义为沿钢筋或钢束分布力的集度，亦即，具有钢筋或钢束内力梯度的性质。显然，如果 $a(s) = \bar{a}(s)$ ，则必有 $a(s) = \bar{a}(s)$ ，即当摩擦系数和预应力钢筋或钢束的曲率都满足设计要求时，由(16)式可以看出此时有 $u(s) = 0$ 。如果 $a(s) \neq \bar{a}(s)$ ，则 $a(s) \neq \bar{a}(s)$ ，即当摩擦系数和预应力钢筋或钢束的曲率有一项或均不满足设计要求时，则 $u(s)$ 可由(19)式确定。而事实上，摩擦系数和预应力钢筋或钢束的曲率完全满足设计要求的情况并不多见。

2.5 控制律的级数形式

为了计算的简化，可设

$$u(s) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i s^i \quad (20)$$

代入(16)得

$$\begin{aligned} &\int_0^s (\int_0^s \bar{b} ds) [P_0 \bar{a}(\bar{a} - a) + \bar{a}^2 \int_0^s (a_0 + \sum_{i=1}^n a_i s^i) \bar{b} ds] \\ &\cdot (da_0 + \sum_{i=1}^n s^i da_i) ds = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

即

$$\begin{aligned} &da_0 \left\{ \int_0^s [P_0 \bar{g}\bar{a}(\bar{a} - a)] ds + a_0 \int_0^s \bar{g}^2 \bar{a}^2 ds \right. \\ &+ \sum_{j=1}^n a_j \int_0^s \bar{g}\bar{a}^2 \int_0^s \bar{b} s^j ds ds \left. + \sum_{i=1}^n da_i \left\{ \int_0^s s^i [P_0 \bar{g}\bar{a}(\bar{a} - a)] ds \right. \right. \\ &\left. \left. + a_0 \int_0^s \bar{g}^2 \bar{a}^2 s^i ds + \sum_{j=1}^n a_j \int_0^s \bar{g}\bar{a}^2 s^i \int_0^s \bar{b} s^j ds ds \right\} \right\} = 0 \end{aligned}$$

其中

$$\bar{g} = \int_0^s \bar{b} ds$$

于是有

$$\begin{aligned} b_0 + c_0 a_0 + \sum_{j=1}^n d_{0j} a_j &= 0 \\ b_i + c_i a_0 + \sum_{j=1}^n d_{ij} a_j &= 0 \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} b_0 &= \int_0^s [P_0 \bar{g} \bar{a} (\bar{a} - a)] ds & b_i &= \int_0^s s^i [P_0 \bar{g} \bar{a} (\bar{a} - a)] ds \\ c_0 &= \int_0^s \bar{g}^2 \bar{a}^2 ds & c_i &= \int_0^s \bar{g}^2 \bar{a}^2 s^i ds \\ d_{0j} &= \int_0^s \bar{g} \bar{a}^2 \int_0^s \bar{b} s^j ds ds & d_{ij} &= \int_0^s \bar{g} \bar{a}^2 s^i \int_0^s \bar{b} s^j ds ds \end{aligned}$$

由方程(22)求解出 a_0 及 a_i ，再代入(20)即可获得级数形式的控制律。

对于一般的工程问题， n 可以只取很小的自然数，往往取 2 或 3 就可以满足要求，使得计算大为简化，同时也使得在预应力钢筋或钢束中所附加的内力之分布更加明确。

2.6 施工中控制的实现

对于后张法施工，难于准确测量预应力钢筋或钢束的曲率和摩擦系数，故如何确定 $\bar{a}(s)$ 成了实现施工控制的关键。在上述控制律的设计当中可以看到， $\bar{a}(s)$ 包容了预应力钢筋或钢束的曲率和摩擦系数，在施工过程中如能确定其中之一就可以确定 $\bar{a}(s)$ 。文献[2]给出了计算实际摩擦系数的方法，而将曲率和摩擦系数的变化折算成摩擦系数的改变，即假定 $k = k$ ，这在上述计算中是可行的。于是便可在计算方面确定了控制律中需要已知 $\bar{a}(s)$ 的问题。

由于 $u(s)$ 并不是施工过程中所固有量，采用什么样的施工措施可以使得在施工过程中产生相当于 $u(s)$ 的作用，也是应该考虑的问题。事实上这一问题可以通过分级张拉和主动回缩来解决，即这里的回缩并非指锚固时的被动回缩，而是经分析计算而确定的主动回缩。经回缩后残留在预应力钢筋或钢束中力的梯度便近似地构成了下一级张拉的控制项 $u(s)$ ，如此一级一级地张拉与回缩直到最终满足设计要求。

3 工程实例

某市内环高架公路某段曲线预应力桥，在预应力钢束张拉施工过程中，由于种种不确定因素的影响，无法实现一次性张拉成功；当采取分级张拉法后取得了较好的效果。

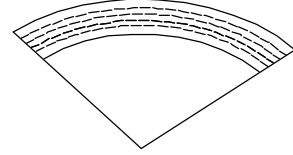


图 3 箱梁平面示意图

Fig.3 The curved box girder

图 5 是受控张拉和非受控张拉的结果比较。从图中可以看出受控张拉比非受控张拉的预应力分布更为均匀，效果更为显著，以及经过受控张拉可以充分消除由于摩擦和一些不确定因素所带来的预应力损失。对于简单张拉所造成的近 40% 的预应力损失，经控制张拉可缩减到不足 20%，消除预应力损失的程度极为显著。

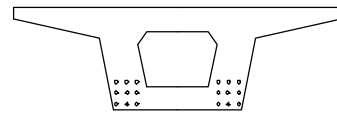


图 4 截面示意图

Fig.4 A cross-section of the curved box girder

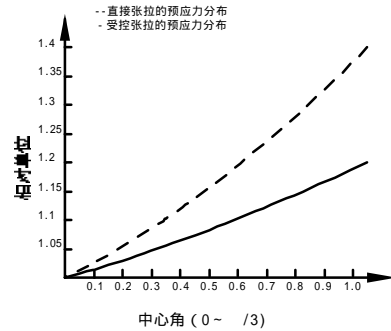


图 5 预应力分布图

Fig.5 Distribution of the prestressing in tendons

4 结论

在大跨度曲线预应力桥梁的预应力钢束张拉过程中存在着许多有待于进一步解决的问题，其中尤为显著的就是由于摩擦和不确定因素所引起的预应力损失，以及由此而带来的一次性张拉的难以实现，本文所提出的预应力钢束张拉控制模型，基本上解决了上述问题，并经验证效果是显著的。但尚需指出的是，有公式(19)所给出的控制律在起始点处是零比零型的不定值，给计算与编程都会带来

很多的困难,而本文中所给出的控制律的级数形式解决了这一问题。但设计控制律的控制方法有诸多形式,可以进一步的进行研究与探讨。

参考文献:

- [1] Sarah L Billington, Robert W Barnes, and John E Breen. A precast segmental substructure system for standard bridges[J]. PCI Journal, July-August, 1999, 1(44): 56-73.
 - [2] Mostafa A Hassanain, Robert E Loov. Design of prestressed girder bridges using high performance concrete—an optimization approach[J]. PCI Journal, March-April, 1999, 1(44): 40-55.
 - [3] S Sriharan, M J Nigel Priestley, and Frieder Seible. Enhancing seismic performance of bridge cap beam-to-column joints using prestressing[J]. PCI Journal, July-August, 1999, 1(44): 74-91.
 - [4] P J S Cruz, A R Mart, and P Roca. Nonlinear time-dependent analysis of segmentally constructed structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3): 278-287.
 - [5] 郭自兴, 黄金枝, 张家春. 曲线预应力混凝土桥梁中预应力钢束的力学模型及其工程应用[J]. 上海交通大学学报, 2002, 3(36): 373-375.
- Guo Zixing, Huang Jinzhi and Zhang Jiachun, The model of prestressing tendons in curved prestressed concrete bridges and its engineering application, Journal of Shanghai Jiaotong University[J]. 2002, 3(36): 373-375.

STUDY OF THE TENSION WITH CONTROL OF TENDONS IN CURVED PRESTRESSED LONG SPAN CONCRETE BRIDGE GIRDERS

GUO Zi-xing , HUANG Jin-zhi , DAI Ze-bing

(Shanghai Jiaotong University, Building Engineering and Mechanics College, 200240, China)

Abstract: The use of prestressing in curved large span bridges results in new problems to analysis and construction. Especially, some problems in construction have to be solved, for example, friction coefficients and curvature change, which would affect significantly the distributing of prestressing in tendons. The available mechanics models are helpless to solve these problems. It is necessary to establish a new model that is applicable to the tension of tendons in curved prestressed large span concrete bridge girders. The model of tension under control given in this paper can deal with the above problems, and has been validated in practical engineering. The results are satisfactory. The model can not only solve the problems of friction coefficients and curvature change in practice but also deal with some uncertainties. Constructions with reference to the model have improved the distributing of prestressing in tendons.

Key words: long span; prestress; tension; control