

预应力混凝土超静定结构的 初内力预应力法*

方德平 林雨生

(华侨大学土木工程系,泉州 362011)

摘要 讨论按预应力法设计超静定结构的计算过程,提出初内力预应力法而不引入主弯矩、次弯矩概念,并给出工程实例的计算. 本方法具有计算简捷、概念明确的特点.

关键词 预应力混凝土,初内力,预应力法,超静定结构,弯矩

分类号 TU 378.1

现代预应力砼结构根据所处环境、性能要求和所用材料特点,越来越多地被设计成有限预应力砼或部分预应力砼. 在预应力砼结构的设计和计算中,需要引入一个代表施加预应力量的技术名称,统称为“预应力法”,定义为有效预压应力与使用荷载产生的应力之比^[1]. 预应力法在设计、计算中,具有公式简单,概念明确的特点. 本文在超静定结构中运用预应力法进行设计、计算方面,作了初步探讨,提出初内力预应力法而不再引入主弯矩、次弯矩概念. 初内力预应力法,无论是对静定结构或者超静定结构而言,都具备概念明确统一、计算简单和受力过程清晰的特点.

1 初内力和主弯矩及次弯矩^[2]

预应力引起结构变形的因素有:(1) 预应力筋对截面形心线的偏心所产生的弯矩;(2) 预应力筋对截面所产生的剪力和轴力,分别称为主弯矩 M_{\pm} 、主剪力 Q_{\pm} 和主轴力 N_{\pm} ,总称为主内力. 如果结构是静定的,变形不受任何约束,那么梁中砼的应力合力就是 $M_{\pm}, Q_{\pm}, N_{\pm}$. 如果结构是超静定的,变形会受到支承的约束,结构在预应力作用下会产生附加的弯矩、剪力和轴力,分别称为次弯矩 M_{\mp} 、次剪力 Q_{\mp} 和次轴力 N_{\mp} ,总称为次内力. 由主内力的定义可知,梁的主内力仅与预应力筋形状和预应力数值有关,而与梁所受到的约束无关. 由于有了次内力,超静定结构在预应力作用下,砼的应力合力等于主内力加次内力. 刚架的主内力图如图 1 所示,次内力图如图 2 所示.

事实上,预应力的效应就是在结构砼中建立有益的应力状态以消减外荷载产生的应力状态,达到减小挠度、提高抗裂性,发挥高强钢筋和砼强度的目的. 这种有益的应力,是在外荷载施加前就已具备,称之为初应力,其合力称为初内力,分别记为 $M_{\text{初}}, Q_{\text{初}}, N_{\text{初}}$. 显然,初内力等于

* 本文 1994-04-30 收到

主内力加次内力,初内力又称综合内力。

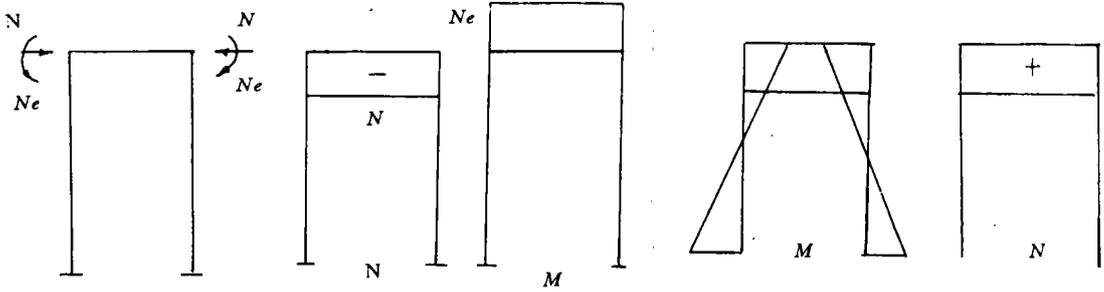


图1 刚架主内力图

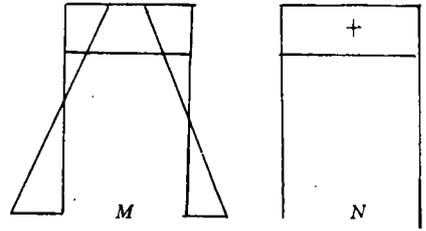


图2 刚架次内力图

把预应力筋对梁的作用转化为等效荷载施加在结构上,结构的内力就为初内力.求得初内力,就明确了结构中砼、非预应力筋和预应力筋的应力状态,以及预应力效应,因而包含所有的信息而无须再求主、次弯矩.

2 传统的预应力度法计算过程

在传统的预应力度法计算中,把次内力作为一种“外荷载”施加在结构上,以下为其计算过程^[3].

- (1) 计算外荷载作用下的内力并合理布置预应力筋曲线.
- (2) 确定预应力度 λ 值.

$$\lambda = \sigma_{pc} / \sigma_{sc}, \quad (1)$$

$$\sigma_{pc} = N_p / A_0 + N_p e_{po} / W_0, \quad (2)$$

式中 N_p 为有效预压力,即主轴力; A_0 为构件换算面积; W_0 为构件换算截面抗弯模量; e_{po} 为预应力筋偏心距; σ_{pc} 为构件砼的有效预压应力; σ_{sc} 为外荷载产生的砼拉应力.

- (3) 从式(1)、(2)中求得 N_p, σ_{pc} , 考虑预应力损失后,配预应力筋应为

$$A_p = \frac{N_p}{(0.75 \sim 0.80) \sigma_{con}}, \quad (3)$$

式中 A_p 为预应力筋面积, σ_{con} 为张拉控制应力.

- (4) 计算预应力损失和初内力,求取次弯矩 M_k .

(5) 将次弯矩和外荷载产生的弯矩迭加作为全部荷载作用下的弯矩图,利用该弯矩图重新计算 σ_{sc} , 并从式(1)中求出新值的 λ (σ_{pc} 由主内力求得,主内力与约束无关,为不变值). 新值的 λ 作为实际和确切的预应力度,用来复核应力、抗裂等的合理性.

- (6) 对梁进行极限状态的计算,确定所需非预应力筋的面积.

3 初内力预应力度法的计算过程

预应力度法是一种简明和直观的计算方法,它的提出大大地推进了预应力结构的实际应用.此法运用在超静定结构中,引用了主、次内力,使概念多样化、复杂化.我们在初内力预应力度法中完全放弃主、次弯矩的概念,使计算更为简明和清晰,易于为工程界所接受.

预应力的效应就是建立起砼的初应力和初内力。也就是说, 只有初内力是实际存在的和能真实反映出砼的预压受力状态。虽然主、次内力之和等于初内力, 但从一定意义上来说, 这两种“人造出”的内力, 不能直接反映出砼的预压受力状态。预应力结构中砼的受力可明确地分为两个阶段: 一是未承受外荷的张拉受力阶段, 即初内力阶段; 二是外荷载作用下的受力阶段, 即 σ_{sc} 。因此, 一个明确的预应力度应该是施加应力后的砼的预压应力(由初内力计算), 与外荷载产生的拉应力之比。对于节 2 中的预应力度 λ 的定义, 我们认为是不够确切的(在上述步骤(5)中重新计算), 在一些特殊情形下, 也不够真实。步骤(5)中预应力度为

$$\lambda_{(5)} = \sigma_{pc} / (\sigma_{sc} + \sigma_{Nk}),$$

对图 1 的结构而言, 随着柱子的刚度增加, σ_{pc} 不变, M_{Nk} 增加, 但 $|M_{Nk}| < |M_{\pm}|$, 且由 M_{Nk} 引起的拉应力 $\sigma_{Nk} < \sigma_{pc}$ 。所以当柱子刚度增加到一定程度并承担相当部分预应力时, $\lambda_{(5)}$ 的数值并不会显著地降低, 从而不能真实地描述梁预应力减少以致导致预应力度降低。

另一方面, 在预应力结构中, 梁较为轻巧、修长, 其刚度较小, 而柱距较大, 因此柱截面较大, 刚度也较大。梁中的次轴力随柱刚度的增大而增大。预应力结构中刚度的一大一小, 说明忽略了次轴力的影响是不恰当的, 所以在节 2 中步骤(5)的 $\lambda_{(5)}$ 是不够准确的。为此, 我们提出了初内力预应力度法, 其计算步骤如下: (a) 计算外荷载作用下的内力, 合理布置预应力筋曲线; (b) 确定初内力预应力度 $\lambda_{初}$, 求得 $\sigma_{pc初}$, 即

$$\sigma_{pc初} = \lambda_{初} / \sigma_{sc}, \quad (4)$$

式中 $\sigma_{pc初}$ 为初内力产生的砼预压应力, 即 $\sigma_{pc初} = N_{初} / A_0 + M_{初} / W_0$; (c) $\sigma_{pc初}$ 与有效预压力 N_p 成线性关系, 所以只要求出单位预压力作用下控制截面的初内力 $\sigma_{pc初单}$, 即得

$$N_p = \frac{\sigma_{pc初}}{\sigma_{pc初单}} \times 1; \quad (5)$$

(d) 按式(3)计算预应力筋面积, 选取适当的系数, 使扣除损失后的预应力值为 N_p ; (e) 对梁进行承载能力极限状态计算, 确定所需非预应力筋面积。

4 计算实例分析

下面通过一个具体工程^[4], 来分别计算传统的预应力度 λ 和初内力预应力度 $\lambda_{初}$ 。这是一个两层两跨的对称结构, 取其半边结构进行分析。结构的尺寸、外荷载以及在外荷载作用下的弯矩图, 如图 3 所示。根据图 3 弯矩, 采用三段抛物线的预应力筋布置。扣除各种预应力损失后, 其等效荷载和 $M_{初}$ 如图 4 所示。从预应力值及索型几何形状可容易求得主弯矩和主轴力, 进而求出次内力。在图 4 中的梁下方, 圆括号内的数值为梁的初轴力, 方括号内的数值则为梁的次弯矩和次轴力。

附表给出了结构各控制截面的应力和预应力度等数值。表中 λ_1 表示节 2 步骤(2)中 λ , $\lambda_1 = \sigma_{pc} / \sigma_{sc}$; λ_2 表示节 2. 步骤(5)中 λ , $\lambda_2 = \sigma_{pc} / (\sigma_{sc} + \sigma_{Mk})$, λ_3 表示在节 2 步骤(5)中考虑了次轴力的影响, $\lambda_3 = \sigma_{pc} / (\sigma_{sc} + \sigma_{Mk} + \sigma_{Nk})$, $\lambda_{初}$ 为初内力预应力度, $\lambda_{初} = \sigma_{pc初} / \sigma_{sc}$ 。从附表可以看出, 按传统的预应力度法计算, 初设的 λ_1 和最终的 λ_2 有相当的差值。当这一差值超出了合理范围, 就得重新设定 λ_1 并按节 2 的步骤重新计算, 所以在某些情况下需要迭代计算。文中算例是两层结构, 柱子的刚度较小, N_{Nk} 较小, σ_{Nk} 也较小, λ_3 与 λ_2 较接近。但对高层结构而言, 因柱子刚度较大, 故不考虑 σ_{Nk} 的影响是不准确的。表中 $\lambda_{初}$ 与 λ_2 或 λ_3 的差值较小, 这说明对一般结构而

言,两种算法都是适用的.

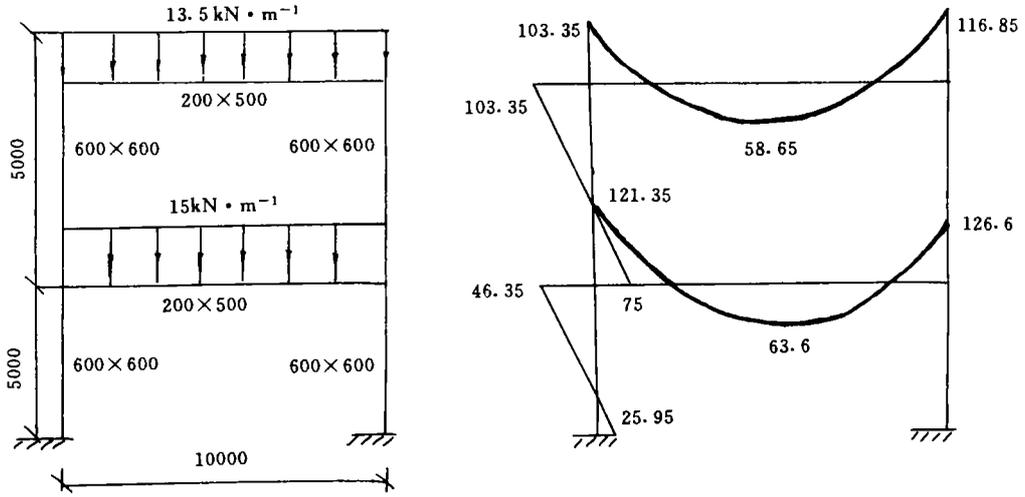


图3 结构的几何尺寸(mm)和外荷载及其弯矩图(kN·m)

附表 结构中控制截面应力和预应力度

σ 与 λ 值	顶梁左	顶梁中	顶梁右	楼梁左	楼梁中	楼梁右
σ_{sc}/MPa	12.400	7.000	14.020	14.560	7.630	15.190
$\sigma_{pc初}/\text{MPa}$	11.680	8.890	12.000	13.440	9.890	12.670
σ_{pc}/MPa	10.840	10.460	10.070	11.900	11.560	11.220
$\sigma_{M次}/\text{MPa}$	-0.800	1.400	-2.000	-1.800	1.750	-1.700
$\sigma_{N次}/\text{MPa}$	-0.043	-0.043	-0.043	0.260	0.260	0.260
λ_1	0.870	1.490	0.710	0.820	1.520	0.740
λ_2	0.930	1.240	0.830	0.930	1.230	0.830
λ_3	0.940	1.250	0.840	0.910	1.200	0.810
$\lambda_{初}$	0.940	1.270	0.860	0.920	1.290	0.830

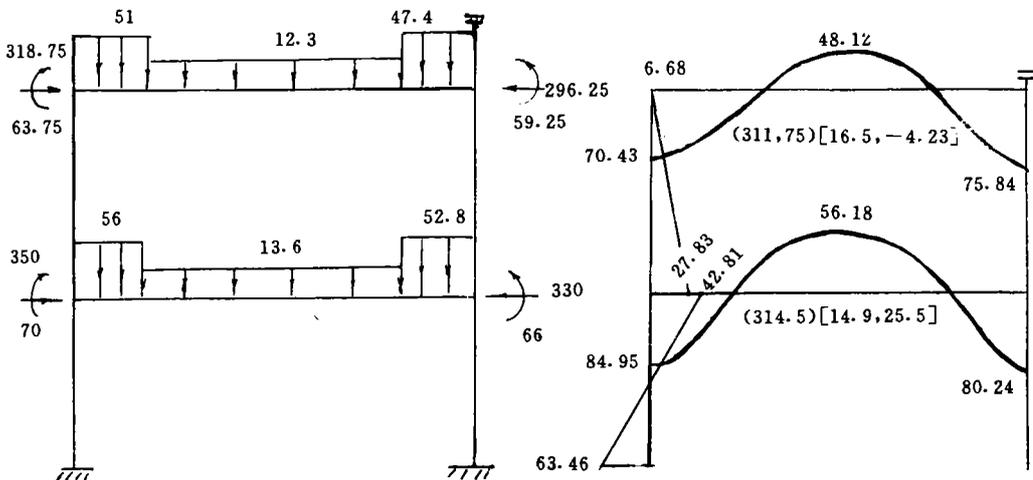


图4 结构的等效荷载和 $M_{初}, N_{初}, M_{次}, N_{次}$ 值(kN·m)

5 结论

应用初内力预应力度法的优点在于:

- (1) 放弃了主、次内力概念,以初内力作为预应力的效应,概念准确,受力过程清晰;
- (2) 设计选定的合理的预应力度,即为结构的真实预应力度,无须迭度计算;
- (3) 简化了计算过程.

参 考 文 献

- 1 陈惠玲. 部分预应力结构设计的应力比“预应力度法”. 建筑结构,1993,(1):3~9
- 2 杨建明. 预应力砼超静定结构次弯矩的简捷计算. 建筑结构学报,1993,(3):23~31
- 3 王克显. 无粘结部分预应力多层多跨框架的设计应用. 建筑结构,1993,(12):40~43
- 4 林太珍. 高效预应力混凝土工程实践. 北京:中国建筑工业出版社,1993.104~108

Prestress Degree Method Based on Initial Internal Force for the Use of PC Statically Indeterminate Structure

Fang Deping Lin Yusheng

(Des. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A discussion is made on the calculation of statically indeterminate structure by the design method of prestress degree. Thus the authors propose prestress degree method based on initial internal force instead of introducing the concepts of primary and secondary bending moments; and give the calculation of an engineering example. The method is characterized by its forthright calculation unequivocal concept.

Keywords Prestressed concrete, initial internal force, prestress degree, statically indeterminate structures, bending moment