

张拉施工方案对预应力混凝土 多层框架梁设计的影响

邬喆华¹, 卫纪德², 唐锦春¹, 郑文忠², 楼文娟¹

(1.浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 多层预应力混凝土框架结构的施工多采用“逐层浇筑, 逐层张拉”或“数层浇筑, 数层张拉”的施工方案, 而现行设计方法是假定“整体浇筑, 整体张拉”的施工方案进行设计计算。显然设计的计算模型与实际施工方案不吻合。由于在“逐层浇筑, 逐层张拉”时, 下层张拉对上层未建结构内力无影响, 因此结构内力的设计值与实际值将出现偏离。本文根据结构力学原理分别建立了现行设计法中预应力综合弯矩和次弯矩偏离实际值大小的相对差公式, 结合施工的具体情况对预应力混凝土框架梁进行了计算分析。框架梁内力的设计值偏离实际值的大小受张拉施工方案、所在层、所处部位、结构的跨数、梁柱线刚度比、荷载等各种因素的影响。当采用现行设计法以整榀框架为计算模型时, 按本文提供的方法对框架梁控制截面处内力进行修正, 可以满足抗裂和承载力的要求。

关键词: 预应力混凝土; 框架; 施工工艺; 预应力等效荷载

中图分类号: TU378 文献标识码: A 文章编号: 1006-6780(2002)03-0035-06

Influence of construction processes upon beam performance of multi-story prestressed concrete frame

WU Zhe-hua¹, WEI Ji-de², TANG Jin-chun¹, ZHENG Wen-zhong², LOU Wen-juan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Applying the principle of structural mechanics, the formula for estimating the relative deviation of internal force from the normal design to the reality according to construction processes are provided. Some factors such as floors, spans, sites, loads and the ratio of column to beam having influence upon structural performance are discussed. By calculated MPCF, the resultant and secondary moment taken from varied construction process are compared to that of designing model. Then the relation of the relative moment deviation and the ratio of column to beam are drawn. It is suggested that calculated model should accord with the construction process when designing MPCF. The simple design method is put forward to satisfy the requirement for ultimate cracking capacity during normal service and ultimate bearing capacity of prestressed beams in MPCF.

Key words: prestressed concrete frame; construction technique; equivalent load

1 问题的提出

多层预应力混凝土框架结构体系具有跨度大, 内耗少, 工艺布置灵活, 结构性能好, 已广泛应用于工业厂房、仓库及大型公共建筑中。预应力混凝土框架结构的施工多采用“逐层浇筑, 逐层张拉”

或“数层浇筑, 数层张拉”施工方案。现行的设计方法是假定“整体浇筑, 整体张拉”的施工方案进行计算。以逐层法为例, 由图1(未建成结构用虚线表示, 建成结构用实线表示)知设计的计算模型不能真实地反映实际的施工情况。由于在“逐层浇筑, 逐层张拉”时, 下层张拉对上层未建结构内力无影响, 因此结构内力的设计值将偏离实际

值^[1]。那么,这种偏离是否会对框架梁正常使用阶段的抗裂性及承载能力存在不利的影响?如果存在,该如何估算内力偏离值的大小,并对框架梁哪些部位(跨中、支座)予以加强?

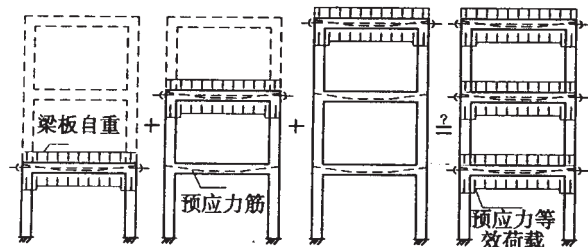


图1 “逐层浇筑,逐层张拉”与现行设计法的计算模型

Fig.1 Two calculated models

本文根据结构力学原理,建立了按现行设计法计算所得内力偏离实际值大小的相对差公式。结合施工的具体情况,分析了不同层数、跨数、梁柱线刚度比等各种因素对预应力混凝土框架梁内力计算结果的影响,提出了简捷的方法供在设计中参考。

2 理论公式的建立

预应力等效荷载在框架结构中引起的弯矩为综合弯矩 $M_{综}$,它是由两项弯矩迭加而成的。一项是预应力筋对构件截面中和轴偏心产生的弯矩,称为主弯矩 $M_{主}$;另一项是由主弯矩引起的结构变形受到约束产生的约束反力,从而在结构中产生弯矩,称为次弯矩 $M_{次}$ 。 $M_{综}$ 和 $M_{次}$ 分别影响结构正常使用阶段的抗裂性及承载能力。

框架梁上的荷载按作用形式可分三种,如图2所示。图中载a为端部轴向力;载b为跨内荷载(均布、集中);载c为集中弯矩,记 M^p 。预应力等效荷载作用形式包含上述三种,梁板自重荷载在作用形式上主要属于载b。载a对框架梁的 $M_{综}$ 和 $M_{次}$ 的影响很小,可以忽略^[2]。载b可依据在杆单元上的任何变形所作虚功相等原则换算成杆端的等效固端弯矩,记 M^{pf} ,其荷载类型与载c相同。因此可在结点弯矩作用下讨论施工过程对框架梁内力的影响^[3]。

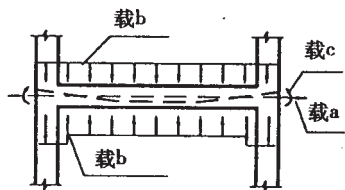


图2 荷载类型

Fig.2 Typical loads

根据弯矩分配法,杆 ik 的 i 结点处预应力综合弯矩为杆 ik 的固端弯矩和各层结点不平衡弯矩传递值之和,即

$$M_{综ik} = M_{ik}^{pf} + \sum_{j=1}^n \left(\sum_{(j)} ((M_{jl}^p - M_{jl}^{pf}) \mu_{ik}^{jl}) \right) \quad (1)$$

式中:总和号 $\sum_{(j)}$ 为环绕 j 结点的总和。 $\sum_{(j)} (M_{jl}^p - M_{jl}^{pf})$ 为 j 结点的不平衡弯矩。 n 为框架总结点数。 μ_{ik}^{jl} 为 j 结点不平衡弯矩对杆 ik 的 i 结点所产生的弯矩传递系数。当任一 j 结点处非零的不平衡弯矩均相同时,如等跨框架,且各跨框架梁等配束的情况,则有

$$M_{综ik} = M_{ik}^{pf} + M^f \sum_{j=1}^m \sum_{(j)} \mu_{ik}^{jl} = M_{ik}^{pf} + M^f \mu_{ik} \quad (2)$$

记

$$M^f = M_{jl}^p - M_{jl}^{pf}; \mu_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{(j)} \mu_{ik}^{jl} \quad (3)$$

式中: $j=1, 2, \dots, m$ 为有非零的不平衡弯矩的结点号。 μ_{ik} 为在任一 j 结点非零的不平衡弯矩作用下杆 ik 的 i 结点总的弯矩传递系数。

由于在一般情况下,均能满足各层杆端的预应力主弯矩等于预应力集中弯矩的条件,即:

$M_{主ik} = M_{ik}^p$,则杆 ik 的 i 结点处预应力次弯矩为

$$M_{次ik} = M_{综ik} - M_{主ik} = M^f (\mu_{ik} - 1) \quad (4)$$

由式(2),(4),并结合图1可知:现行设计法所得的结构内力设计值偏离实际值主要是因为施工过程中结构变化引起的 μ_{ik} 与设计中的全结构的 μ_{ik} 不同而造成的。

进而可得现行设计法中梁 ik 在 i 结点处的预应力综合弯矩与实际值偏离的相对差为

$$\delta_{1ik} = (M_{综ik}^C - M_{综ik}^D) / M_{综ik}^D \quad (5)$$

代入式(2)得

$$\begin{aligned} \delta_{1ik} &= M^f (\mu_{ik}^C - \mu_{ik}^D) / (M_{ik}^{pf} + M^f \mu_{ik}^D) \\ &= \Delta \mu_{ik} / (\alpha_{ik} + \mu_{ik}^D) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:上标 C, D 分别为考虑施工方案和按现行设计法进行计算。 $\Delta \mu_{ik}$ 为考虑施工方案时与现行设计法所得的在梁 ik 的 i 结点处弯矩传递系数的差值, $\Delta \mu_{ik} = \mu_{ik}^C - \mu_{ik}^D$; α_{ik} 为梁 ik 等效固端弯矩与结点 j 不平衡结点弯矩的相对比值, $\alpha_{ik} = M_{ik}^{pf} / M^f$ 。

梁 ik 在结点 i 处的预应力次弯矩与实际值偏

离的相对差为

$$\delta_{2ik} = (M_{次ik}^C - M_{次ik}^D) / M_{次ik}^D = \Delta \mu_{ik} / (\mu_{ik}^D - 1) \quad (7)$$

同理不难得出在各层梁板自重均相同时梁板自重逐层施加与现行设计法一次性施加引起的框架梁 ik 在结点 i 处弯矩与实际值偏离的相对差为

$$\delta_{3ik} = \Delta \mu_{ik} / (\mu_{ik}^D - 1) \quad (8)$$

由式(6)知,框架梁的 $M_{次}$ 相对差 δ_1 不仅与梁柱线刚度比有关,而且与预应力等效荷载中的载 b 引起的 $M_{次}^{bf}$ 及载 c 引起的 $M_{次}^p$ 有关.由式(7)知,框架梁的 $M_{次}$ 相对差 δ_2 仅与梁柱线刚度比有关,而与预应力等效荷载大小无关.它是 $M_{次}$ 相对差的上限.由式(8)知,由于梁板自重逐层施加框架梁 ik 在结点 i 处 δ_3 与 δ_2 相等,因此当梁板自重与预应力等效荷载相当时 δ_3 要大于 δ_1 .

3 计算比较

3.1 基本的计算模型

通过大量的对称和不对称多跨多层框架电算结果分析,比较了各张拉施工方案最终建立在框架中的内力与设计值的差别,得出:(1)可用三层框架的顶层、中间层、底层的内力差别来分别模拟多层框架的顶层、中间各层、底层的内力差别;(2)在同一张拉施工方案中,三、四、五等多跨框架梁内力的相对差较为接近.因此跨数可仅在单、双、三跨内讨论;(3)框架梁内力差别主要与本层框架梁柱线刚度比有关.当其它层的框架梁柱线

刚度比、预应力等效荷载与本层不同时,对本层影响不大.在各张拉施工方案中多跨内结点的非零不平衡弯矩引起的内力差主要集中在内支座,而在边跨中、边支座处较小.因此可仅在边结点弯矩作用下对等跨且梁柱线刚度比均相同的框架进行计算分析;(4)张拉施工方案可分为四种典型:A方案:“逐层浇筑,逐层张拉”;B方案:“数层N浇筑,数层N张拉”;B₁方案:“先逐层浇筑,逐层张拉;后数层N浇筑,数层N张拉”;B₂方案:“先数层N浇筑,数层N张拉;后逐层浇筑,逐层张拉”;C方案:“数层N浇筑,数层(小于N)张拉”;D方案:“整樁浇筑,整樁张拉”(相当于现行设计法).

3.2 框架梁 $M_{次}$ 相对差 δ_2 的分析

分别取三层框架、单、双、三跨,梁柱线刚度比 $n=1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, \dots, 8$,进行框架梁 $M_{次}$ 相对差 δ_2 分析,其结果见图3~5.(1)各张拉施工方案建立的框架梁支座弯矩与现行设计法的差别:底层: $\delta_2^{B_1} > \delta_2^A > \delta_2^{B_2} > \delta_2^C > \delta_2^D$,其它层: $\delta_2^A > \delta_2^{B_2} > \delta_2^{B_1} > \delta_2^C > \delta_2^D$.其中上标为各张拉施工方案.A方案建立的框架梁内力差($M_{次}$ 相对差)最大,C方案建立的框架梁内力与现行设计法(D方案)所得较为接近,见图3.(2)在同一张拉施工方案中,框架梁 $M_{次}$ 相对差最大处发生在中间各层,其次位于底层,顶层最小.(3)框架梁 $M_{次}$ 相对差随梁柱线刚度比 n 增加而增大.当 $n=8$ 时,趋向收敛,底层达35%,中间各层为45%,顶层为25%.(4)双跨和多跨的框架梁 $M_{次}$ 相对差大于单跨.特别是当 $n<1$ 时,

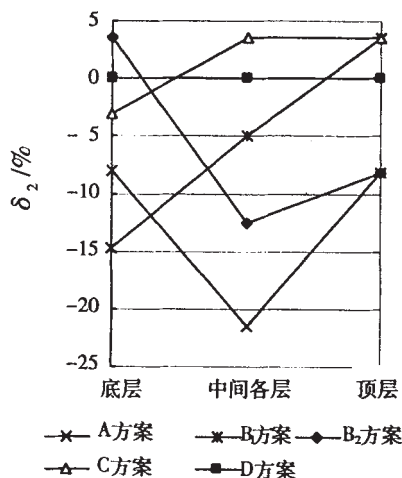


图3 单跨预梁柱线刚度比为1时各层梁支座次弯矩相对差

Fig.3 Relative deviation of secondary moment at beam supports in single-span frame($n=1$)

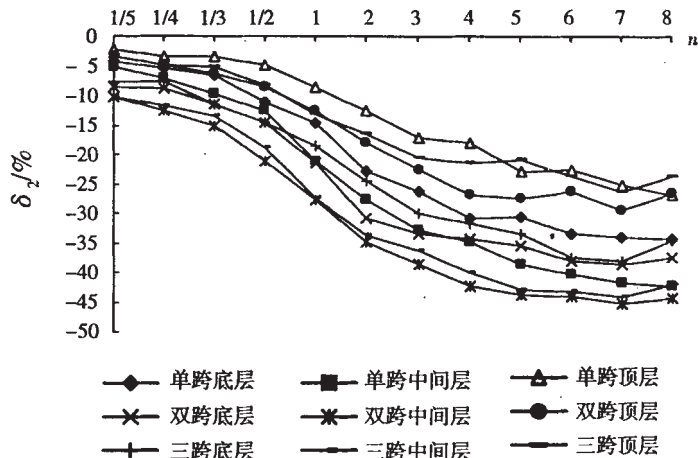


图4 单、双、三跨逐层法各层梁边支座次弯矩相对差

Fig.4 Relative deviation of secondary moment at beam supports in different span frame

双跨和多跨结构 $M_{次}$ 相对差约为单跨两倍左右。(5)双跨和多跨的框架梁 $M_{次}$ 相对差主要集中在边跨支座处,而内支座、边跨跨中、内跨跨中 $M_{次}$ 相对差均明显小于边跨支座,且随梁柱线刚度比增加变化不大,一般在10%以内。(6)各张拉施工方案建立在框架梁中的 $M_{次}$ 与现行设计法比较:边跨支座、边跨跨中、内跨跨中处(多跨情况)偏小;而跨中(单跨情况)、内支座(多跨情况)处偏大。

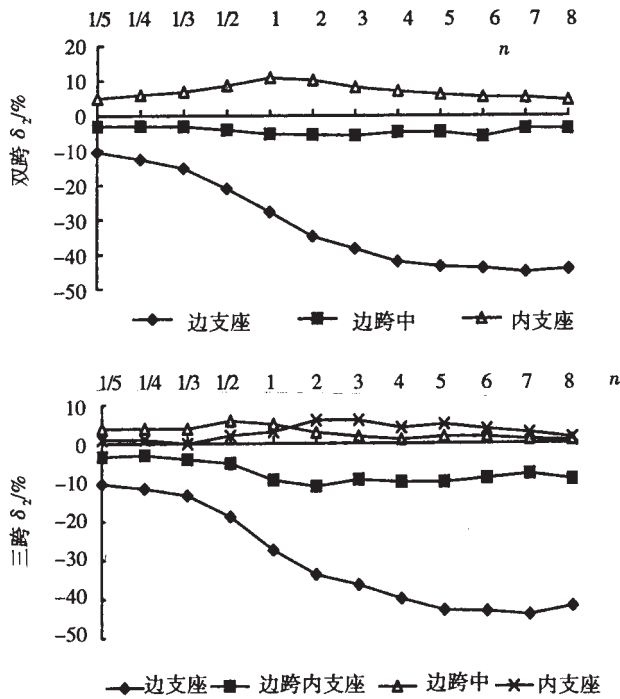


图5 逐层法中间层梁次弯矩相对差
Fig.5 Relative deviation of secondary moment at mid-floor beams

3.3 框架梁 $M_{综}$ 相对差 δ_1 的分析

六层框架,单、双、三跨,板梁柱混凝土强度等级C40,楼面及屋面板厚均为180 mm。底层和其它层的层高分别为5 m和4.2 m。柱截面宽×高为600 mm×800 mm,T形梁高分别按高跨比1/12,1/15,1/18取^[4],梁宽取高的1/3~1/4,有效翼缘宽取为20 h_f' 。预应力筋筋形为二次抛物线形。反弯点在0.15 L处(L为梁的跨度)。预应力筋的混凝土保护层为80 mm。在单位端部预加力 $N=1000$ kN作用下。考虑预应力损失。其中混凝土徐变,预应力筋松弛产生的损失占10%左右;预埋波纹管 $\kappa=0.0015$, $\mu=0.25$;锚具变形和钢筋回缩值 $a=5$ mm。张拉控制应力 $\sigma_{CON}=1300$

N/mm²,两端张拉。张拉施工方案有A,B(“两层浇筑,两层张拉”)和D三种。计算表明,矩形框架梁截面由于中和轴在梁的中部,故相对差很小。T形梁的 $M_{综}$ 相对差为(图6):(1)各张拉施工方案建立的框架梁支座弯矩与现行设计法的差别: $\delta_1^A > \delta_1^B > \delta_1^D$ 。(2)在同一张拉施工方案中,框架梁支座处 $M_{综}$ 相对差最大,发生在中间各层,其次位于底层,顶层最小。(3)梁柱线刚度比 $n < 1$ 时,框架梁 $M_{综}$ 相对差呈增大趋势;在 $n=1\sim 3$ 时,呈稳定状; $n > 3$ 时呈下降趋势。(4)单跨跨中和支座

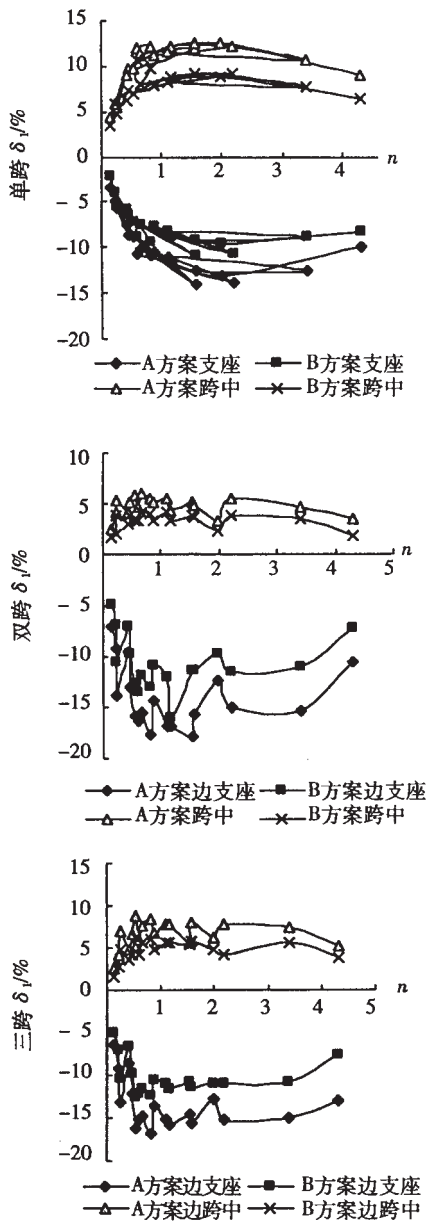


图6 中间层梁综合弯矩相对差
Fig.6 Relative deviation of resultant moment at mid-floor beams

处 $M_{综}$ 相对差要小于双跨和多跨的相应部位。(5)单跨跨中和支座处 $M_{综}$ 相对差较为接近。双跨和多跨边支座处 $M_{综}$ 相对差要大于跨中处。(6)框架梁跨中和支座处 $M_{综}$ 相对差在3%~18%之间,张拉施工方案A、B建立的框架梁 $M_{综}$ 在边支座处要小于现行设计法,而在跨中、内支座处要大于现行设计法。

4 工程算例

某工业厂房,五层,双跨,跨度为15m+18m,底层、中间层、顶层层高分别为6.2m、4.8m、4.2m,现浇楼板。T形梁截面 $b_f'\times b\times h\times h_f'=3000\text{ mm}\times 350\text{ mm}\times 1200\text{ mm}\times 120\text{ mm}$;柱截面宽 \times 高为600 mm \times 800 mm。楼屋面分别配低松弛预应力钢绞线18根、12根7 ϕ 5,抛物线形,反弯点在0.15L处。楼屋面梁板自重分别为28、35 kN/m。

逐层法的施工方案所得的 $M_{综}$ 和 $M_{次}$ 与现行设计法计算结果进行比较,见图7和图8。图中在梁支座或跨中处第一、二排数据分别为现行设计法、逐层法所得的内力,第三排为根据式(6)、(7)、(8)所得的相对差,第四排为由图4、5和6查得的相对差。由图知,查图所得的 δ_1 和 δ_2 与考虑施工情况所得结果基本吻合。两者的偏差主要是由结构和荷载不对称引起的。同时也说明本文的图可满足对一般框架结构的分析。

在现行设计法中,预应力等效荷载与梁板自重都是施加在整框框架结构上。考虑预应力等效荷载与梁板自重均是逐层施加的计算结果如图9和图10所示。图中在梁支座或跨中处第一、二排数据分别为现行设计法和考虑荷载逐层施加进行计算所得的内力。其中图9为梁板自重(标准值)作用下与 $M_{综}$ 的迭加;图10为梁板自重(设计值)作用下与 $M_{综}$ 的迭加。逐层法与现行设计法差别较大,但由于预应力效应与自重效应相反,迭加后两者计算结果很接近,如图9、10所示。因此当预应力等效荷载与梁板自重相当时,现行设计法对结构构件的抗裂性及承载能力影响不大。如果当梁板自重与预应力等效荷载不相当时,按现行设计法计算就可能存在隐患。如重载下的普通混凝土框架,大活载下的重工业厂房。因此

在设计中宜按两者实际情况进行计算,再内力组合。

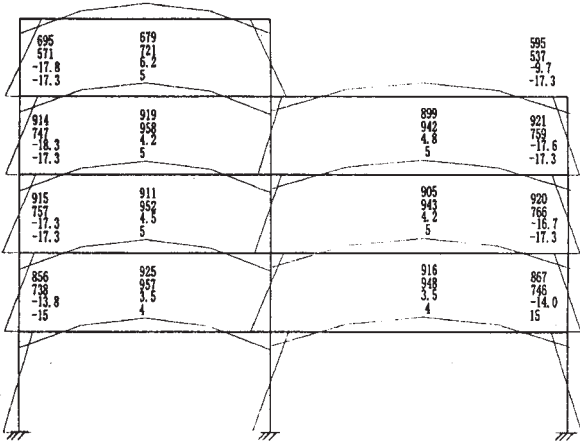


图7 预应力综合弯矩相对差的计算
Fig.7 Relative deviation of resultant moment

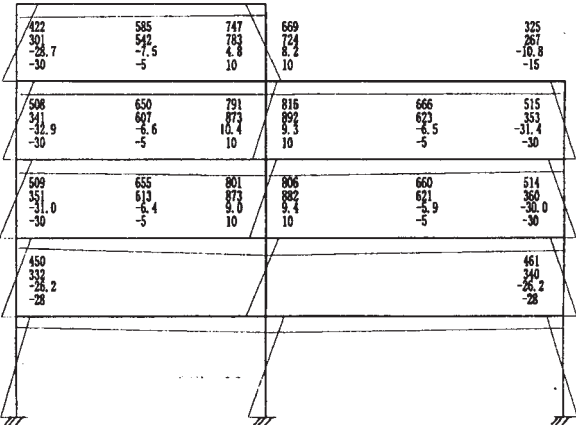


图8 预应力次弯矩相对差的计算
Fig.8 Relative deviation of secondary moment

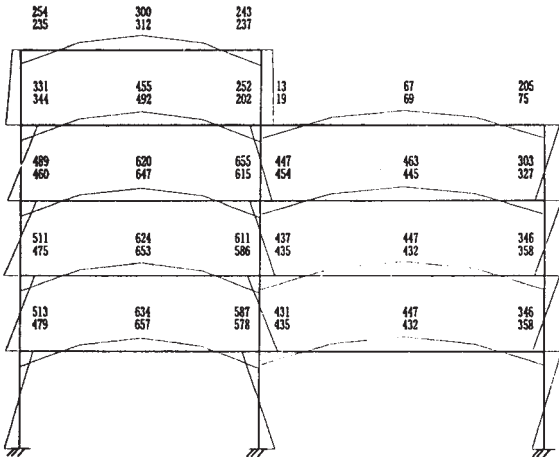


图9 梁板自重作用下与预应力综合弯矩的组合
Fig.9 Self-weighted added to resultant moment

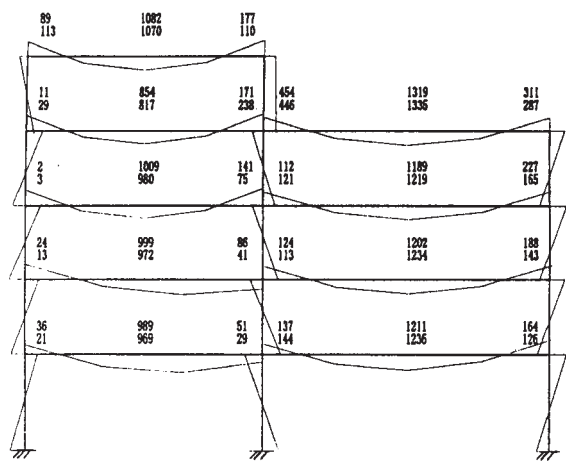


图10 梁板自重作用下与预应力次弯的组合
Fig.10 Self-weighted added to secondary moment

5 结 语

通过结合施工具体情况对预应力混凝土框架梁计算结果的分析,得出各荷载(预应力等效荷载、梁板自重及其它恒载、活载)作用下的结构内力和变形应分别采用各自的结构分析模型. 框架梁内力的设计值偏离实际值的大小受张拉施工方案、所在层、所处部位(边跨、内跨、跨中、支座)、结构的跨数、梁柱线刚度比、预应力等效荷载和梁

板自重等各种因素的影响. 梁柱线刚度比小于1时,可不考虑张拉施工方案对预应力框架梁设计的影响. 预应力等效荷载与梁板自重相当时,逐层法施工所得的最终弯矩与设计较为接近,而此时数层法施工所得的最终弯矩偏离设计值要比逐层法大. 其主要是由梁板自重逐层施加引起的. 当采用现行设计法以整榀框架为计算模型,如需准确计算预应力等效荷载、梁板自重荷载作用下的框架内力,尚应根据施工具体情况按梁柱线刚度比及相应的结构形式,由本文所给的图中数据选定控制截面处内力的放大系数.

本文仅对预应力框架梁进行了讨论,框架柱并未涉及. 在梁柱线刚度比减小时,柱内力(弯矩)与现行设计法所得差别增大,尚需进行验算.

参 考 文 献:

[1] 陈晓宝. 预应力混凝土多层框架结构的预应力次内力[J]. 工业建筑,1995(6):13-16.
[2] 邬 华. 框架梁考虑轴向变形时有效预应力计算与分析[J]. 浙江建筑,1997(6):19-22.
[3] 邬 华. 考虑施工因素对预应力混凝土框架结构性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1995.
[4] 郑文忠,卫纪德. 大跨预应力混凝土框架结构设计方法的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1995(增刊):255-262.