

预应力梁张拉过程对柱内力影响的分析与监测

胡长明^{1,2}, 付燎原¹, 郭艳¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:为研究框架结构柱在预应力梁张拉过程中的内力情况,在已有的框架柱的次内力研究的基础上,通过对某预应力工程框架柱的计算和监测,对框架柱在张拉过程中的次内力变化规律进行了分析.分析结果表明,梁的轴向压缩在柱中引起的第三弯矩较大,在设计中不能忽略,对比监测数据和数值模拟结果可知:预应力梁的张拉使柱顶的内侧和柱底的外侧受拉,使柱顶的外侧和柱底的内侧受压,应力与张拉荷载基本呈线性关系.研究成果可为类似工程的设计与施工提供参考,为相关规范的编制提供可靠数据.

关键词:预应力混凝土;框架结构;第三弯矩;数值分析;现场监测

中图分类号: TU378.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)05-0609-05

近年来,由于预应力框架结构较普通框架结构能获得较大的跨度来满足更大空间的建筑需求而在建筑工程中的应用日益增多.在预应力筋进行张拉时,梁产生轴向压缩变形,与之连接的框架柱和剪力墙等竖向构件会约束梁的变形,从而影响预应力向梁的传递.同时,框架柱上会产生次剪力和次弯矩,柱子有可能在次内力作用下开裂.为了分析预应力张拉时侧向约束对结构的影响,许多学者对竖向构件约束作用给预应力混凝土构件设计带来的影响进行了深入分析,然而对竖向构件中产生的次内力给竖向构件本身设计的影响讨论不多,这就导致在实际工程中由于此因素的考虑不足而出现工程事故问题,长沙市滨江·君悦香邸小区10号楼地下室墙、柱及预应力顶板开裂和长沙宜居·莱茵城预应力地下室顶板及地下室剪力墙开裂就是这方面的例子^[1],由此可见现行的有侧向约束的预应力混凝土超静定结构的设计方法存在缺陷.《混凝土结构设计规范》^[2]以及《无粘结预应力混凝土结构技术规程》^[3]规定通过次内力考虑侧向约束对后张预应力混凝土超静定结构预加力的影响,这表明了次内力已经作为设计时的考虑因素,但是规范并没有给出具体的次内力计算方法,难于对实际设计时提供参考.在单层单跨的情况下,郑毅敏^[4]给出了边柱次弯矩的理论计算公式,但是没有考虑由于梁的轴向压缩变形,结构柱产生侧移,该侧移又引起柱中的附加弯矩,即第3弯矩的影响.由于在结构整体分析时并没有考虑张拉力张拉对整个结构的影响,按此进行设计的竖向构件的抗力可能会有不同程度的不足.张得峰^[5]认为,柱中第三弯矩与外荷载引起的弯矩方向相反,不考虑该附加弯矩对结构设计是有利的,但在大跨度预应力框架结构中,柱截面会随着梁跨度和截面尺寸的增加而增大,柱的刚度越大,这种影响就越大,尤其在施工阶段,由于张拉时梁模板及支撑均未拆除,竖向荷载作用很小,若附加剪力及次弯矩较大,会使柱端发生破坏^[6].为此,严薇^[7]从理论上分析了预应力梁由于轴向压缩对柱中弯矩的影响,认为在某些情况下柱中第三弯矩是不容忽视的.

以上学者通过理论对预应力张拉过程中的柱内力进行了分析,但在实际中对预应力张拉过程中柱内力情况的监测较少,本文通过对一个单层单跨预应力框架工程的计算分析和监测,表明在预应力框架结构框架柱的设计当中应当考虑柱的第三弯矩,从而进行合理的配筋,使框架柱的设计更加合理、安全.

1 工程概况

西安曲江紫汀苑地下会所工程位于西安市芙蓉南路,单层框架结构,总建筑面积4 011 m².在⑥~

收稿日期:2011-12-31 修改稿日期:2012-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50978219);陕西省教育厅专项科研项目(12JK0898)

作者简介:胡长明(1963-),男,河南信阳人,博士,教授,从事土木工程建设与管理研究.

⑯/⑮~①为游泳池,游泳池结构顶板由7根600 mm×1 800 mm YKL、2根500 mm×1 500 mm WKL及250 mm厚的钢筋混凝土楼板组成,梁跨度为24 m,柱高8.8 m.预应力筋采用1 860级低松弛优质钢绞线,张拉控制应力为 $0.75f_{ptk}$,即1 395 MPa,直径 $D=15.20$ mm,截面面积为 140 mm^2 .混凝土达到100%设计强度后张拉有粘结预应力钢筋.预应力梁和柱混凝土强度均采用C40,柱截面尺寸为:700 mm×1 200 mm,梁的截面尺寸为:600 mm×1 800 mm,见图1.

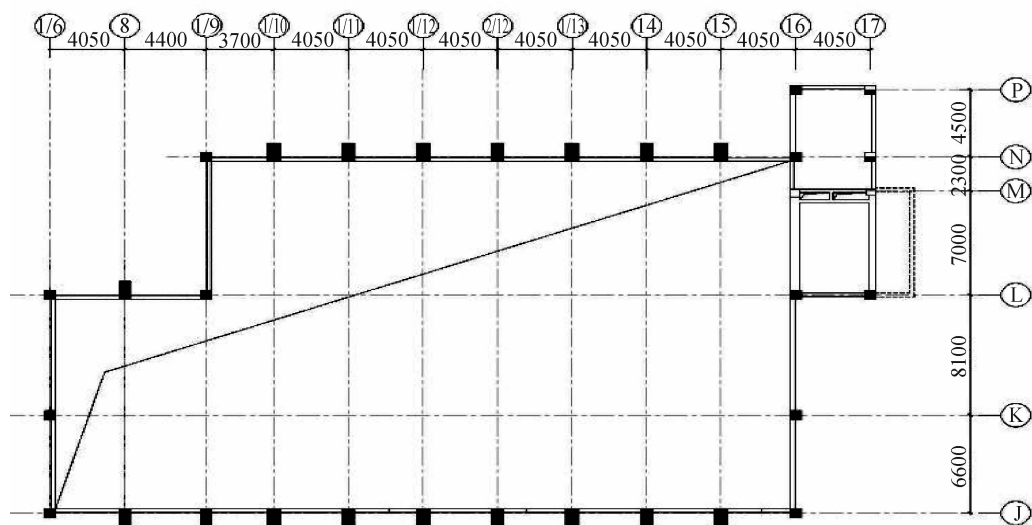


图1 地下会所平面图(单位:mm)

Fig. 1 Plan of underground club

2 框架柱次弯矩的计算

对于预应力混凝土构件,预应力效果的建立是通过预应力筋在结构上的等效荷载来实现的,梁上预应力筋对结构引起的等效荷载可由三部分组成^[9],第一部分是由预应力筋曲率变化在构件中间产生的径向力,此部分力相当于等效荷载正反分段均布荷载(预应力筋按二次曲线布置时);第二部分是由于预应力筋在梁端的偏心而引起的梁端集中弯矩;第三部分是预应力筋通过锚具作用在梁端引起的等效集中轴向压力。

现把预应力作用在柱中引起的次弯矩记为 M' ,上述第一部分和第二部分作用在柱中引起的次弯矩记为 M_1 ,第三部分作用在柱中引起的次弯矩记为 M_2 ,即第三弯矩^[8].则

$$M' = M_1 + M_2 \quad (1)$$

根据我国有关规程,预应力构件的设计内力由外荷载(主要是竖向荷载)作用产生的内力与构件中引起的次内力叠加得到,对于柱子,其设计弯矩值按下式计算:

$$M_c = M_{cq} + M' \quad (2)$$

式中: M_c 为柱子弯矩设计值; M_{cq} 为外荷载作用值; M' 为由预应力作用引起的次弯矩。

2.1 次弯矩 M_1 的计算

设有图2所示的单层单跨预应力框架,根据文献^[9]提出的计算公式,常采用约束弯矩法计算边柱的次弯矩公式如下:

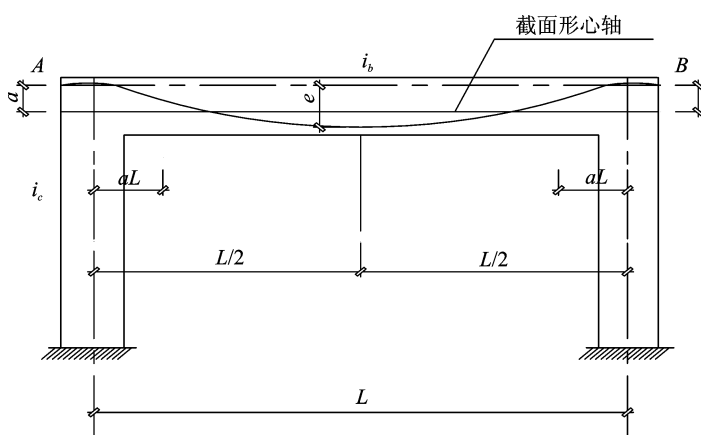


图2 预应力框架结构

Fig. 2 Prestressed frame structure

$$M_A = \frac{N_P}{24} [(17 - 26\alpha + 12\alpha^2)e + (-1 + 10\alpha - 12\alpha^2)e - 6(5a - a)] = \frac{N_P}{3} [2(1 - \alpha)e - 3a] \quad (3)$$

柱顶的弯矩分配系数:

$$u = \frac{2}{2 + \frac{i_b}{i_c}} \quad (4)$$

因此,可求得柱顶在预应力作用下的次弯矩 M_1 , 设竖向荷载在柱中引起的弯矩为正, 则次弯矩应为负值.

$$M_1 = -uM_A = -\frac{N_P}{3} \left[\frac{2}{2 + \frac{i_b}{i_c}} [2(1 - \alpha)e - 3a] \right] \quad (5)$$

对于此工程, 每个梁采用 4 束钢绞线, 且每束钢绞线由 7 根张拉筋组成, 总的预应力损失按 23% 估计, 已知 $e = 1.38 \text{ m}$, $\alpha = 0.12$, $a = 0.6 \text{ m}$, 则代入上述公式可得 $M_1 = -576 \text{ kN} \cdot \text{m}$

由公式计算出柱顶在预应力作用下的次弯矩 M_1 可以看出: 它使柱顶内侧受拉, 外侧受压. 但是上述公式没有把柱的第三弯矩考虑到次弯矩的计算当中.

2.2 次弯矩 M_2 的计算

下面以图 3 所示的单层单跨预应力框架来求解第三弯矩 M_2 [10]:

框架梁在轴向预压力 N_P 作用下, 将在框架顶部产生侧移变形 Δ_1 , 对于梁如不考虑柱的约束作用, 则在 N_P 作用下将产生自由压缩变形 Δ , 且 $\Delta = \frac{N_P \times \frac{L}{2}}{EA}$, A 为梁的截面面积. 实际上由于受到柱的弹性约束, 框架梁最后的压缩变形应为 Δ_1 , 而 Δ_2 为

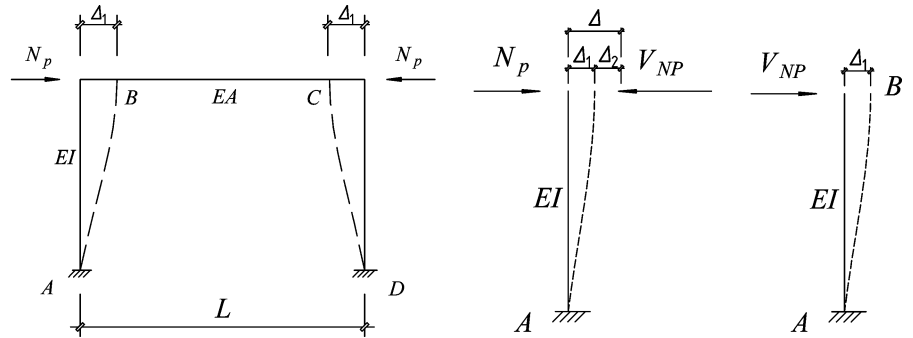


图3 单层单跨预应力框架

Fig. 3 Single prestressed frame structure

框架梁受到柱的阻止所产生的回弹变形, 由变形协调条件显然有

$$\Delta_1 = \Delta - \Delta_2 \quad (6)$$

对于两端固定柱 AB, 且假定两端无转动, 当柱顶产生侧移变形 Δ_1 时, 则在柱中产生剪力 V_{NP} , 和反时针的弯矩 M_{NP} , 由力学分析可知 V_{NP} , M_{NP} 与 Δ_1 的关系为

$$V_{NP} = \frac{12EI}{H^3} \Delta_1 \quad (7)$$

$$M_{NP} = \frac{6EI}{H^2} \Delta_1 \quad (8)$$

而梁的回弹变形 Δ_2 也是在 V_{NP} 作用下的轴向变形:

$$\Delta_2 = \frac{V_{NP} \times \frac{L}{2}}{EA} \quad (9)$$

将 Δ, Δ_2 式代入(6)有:

$$\Delta_1 = \frac{N_P \times \frac{L}{2}}{EA} - \frac{V_{NP} \times \frac{L}{2}}{EA} = (N_P - V_{NP}) \frac{\frac{L}{2}}{EA} \quad (10)$$

再将(10)式代入(7)、(8)式, 并整理可得:

$$\frac{V_{NP}}{N_P - V_{NP}} = \frac{6IL}{H^3 A} \quad (11)$$

$$\frac{M_{NP}}{N_P - V_{NP}} = \frac{3IL}{H^2 A} \quad (12)$$

把实际参数代入上式计算后可得,由梁轴向变形引起的第三弯矩为 $M_{NP} = -460 \text{ kN} \cdot \text{m}$,即 $M_2 = -460 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

计算结果可以看出,由梁轴向变形引起的第三弯矩已经不容忽视,且由(11)(12)式可见,随着柱刚度,梁跨度的增大及梁截面尺寸的减小,柱内力 V_{NP} 、 M_{NP} 也将增大,由于在大跨预应力框架结构中,柱刚度、跨度均较大,预应力度较大,因此,有必要验算第3弯矩的大小及其对柱的影响.当第三弯矩较大时,在进行柱的内力分析及配筋时应考虑进去.

需要说明的是,上式只是假定柱两端无转角的情况下,在简单的单层单跨的基础上进行了计算分析,计算精度较差,但进行一般的分析尚可,若要准确的分析,要采用有限元程序进行分析.

3 有限元分析及现场应力测试

由于地下会所是由多个构件组成的复杂超静定结构.在预应力计算当中,如果采用简化计算模型会带来较大误差,因此采用有限元程序 ANSYS 软件对结构进行分析.根据工程设计实际参数,一个梁共有四束预应力筋,每束力筋的面积为 980 mm^2 ,每束力筋张拉力为 1093 kN ,弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$,质量密度为 7921 kg/m^3 ;混凝土弹性模量为 $3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$,质量密度为 2300 kg/m^3 .采用实体力筋法来模拟预应力混凝土结构,混凝土采用 SOLID95 单元,力筋采用 LINK8 单元建立模型,在混凝土单元与力筋单元之间建立约束方程,施加力后建立有限元模型应力如图4所示.

为了了解框架柱的实际受力状态,在预应力张拉施工过程中对框架柱进行测试,在框架柱顶和柱底的内外表面处贴应变片来测试预应力张拉对框架柱的影响.测量1/10轴与N轴处的框架柱,框架柱的测点布置如图5所示.在柱内外表面的柱顶和柱底共选取8个平面依次布点,每个平面贴2个应变片,应变片呈对称布置,间距为300mm,如图5所示.

考虑到张拉其他柱子会对本测试构件造成影响,所以在其他柱都张拉完成后,本测试构件张拉前开始测试,持续到本构件张拉结束后一段时间,测试结果如图6,图7所示(平面7的点由于被工人不小心破坏,图中没有给出应力值).

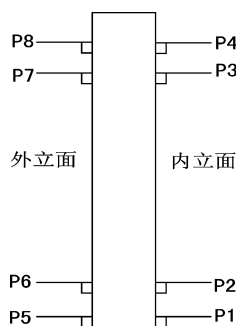


图5 测点布置图
Fig. 5 Layout drawing of measured points

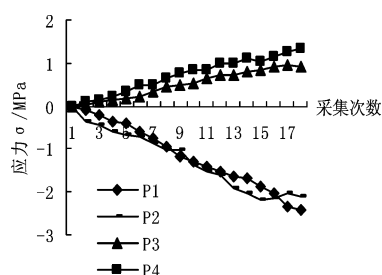


图6 柱内表面应力图
Fig. 6 Stress diagram of inner surface of column

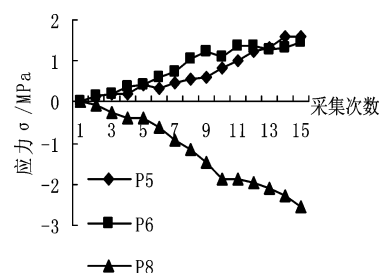


图7 柱外表面应力图
Fig. 7 Stress diagram of outer surface of column

表1给出了框架柱在预应力张拉后的测点应力结果和有限元计算结果的对比,测试结果是张拉1小时后多次测试的平均值.从表1中可以看出,预应力梁张拉时,框架柱参与了共同工作.柱顶的外侧

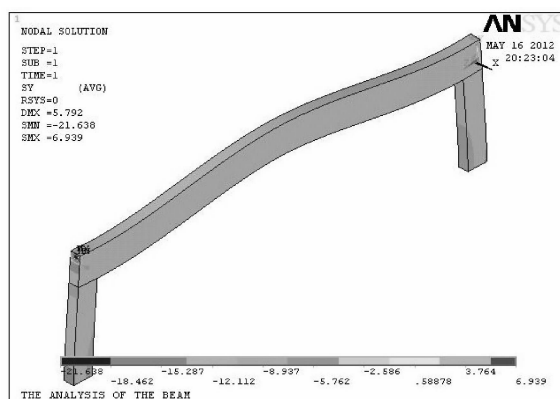


图4 模型应力图
Fig. 4 Stress diagram of model

和柱底内侧的测试结果为负值,表明混凝土处于受压状态;柱顶内侧和柱底外侧的测试结果为正值,表明混凝土处于受拉状态。混凝土表面的应力值随荷载的逐步增加而近似于线性增加,且测试值与计算值比较吻合。实测应力的值小于对应的计算应力,分析原因认为,在实际中还会由于墙以及板的约束,使侧向变形减小,从而使次弯矩减小。

4 结 论

本文通过对某预应力框架结构进行计算分析和监测,其表面应力值没有达到混凝土的抗拉和抗压强度极限,无裂缝产生,表明该结构的设计合理,施工安全可靠。同时结合有限元模拟进行对比分析,得出如下结论:

(1)在施工阶段,由于张拉时梁模板及支撑均未拆除,竖向荷载很小,若第三弯矩很大,则会造成结构的损坏,所以在设计框架柱截面时应考虑其第三弯矩,在进行施工验算阶段,其验算值应取施工阶段相应的值,而不是最终结果。

(2)由实验数据可知,预应力梁张拉使柱顶外侧和柱底内侧的混凝土处于受压状态,柱顶内侧和柱底外侧的混凝土处于受拉状态。

(3)应力与张拉荷载基本呈线性关系,待加载完成1 h后基本稳定。

参考文献 References

- [1] 陈大川,林元烁.单层超长预应力平板-柱结构侧限分析[J].工业建筑,2012,42(2):58-61.
CHEN Da-chuan, LIN Yuan-shuo. Analysis of lateral restraint effects for super-long one-storey prestressed slab-column structure[J]. Industrial Construction, 2012, 42(2): 58-61.
- [2] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
GB50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] JGJ92—2004 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
JGJ92—2004 Technical specification for concrete structures prestressed with unbonded tendons[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [4] 郑毅敏,李伟兴,黄鼎业.预应力框架顶层边柱的配筋量控制[J].四川建筑科学研究,2001,27(3):5-7.
ZHENG Yi-min, LI Wei-xing, HUANG Ding-ye. Reinforcement control of the side column on the top floor of PPC frame[J]. Building Science Research of Sichuan, 2001, 27(3): 5-7.
- [5] 张德峰,吕志涛.侧向约束对预应力混凝土框架压力的影响[J].建筑结构,2001,31(5):51-52.
ZHANG De-feng, LÜ Zhi-tao. Influence of Lateral Restraints on the Compressive Force of Prestressed Concrete Frame Structure[J]. Building Structure, 2001, 31(5): 51-52.
- [6] 王春武,孟少平.预应力混凝土框架结构的侧向约束分析[J].工业建筑,2007,37(8):47-50.
WANG Chun-wu, MENG Shao-ping. Analysis of lateral restraints of prestressed concrete frame structures[J]. Industrial Construction, 2007, 37(8): 47-50.
- [7] 严薇,马利振.考虑预应力梁轴向压缩对柱中弯矩的影响[J].重庆大学学报:自然科学版,2003,26(11):117-119.
YAN Wei, MA Li-zhen. The Effect on the Column Moment Considering Compress of Prestressed Concrete Beam[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(11): 117-119.
- [8] 杜拱辰,米祥友.世纪之交的预应力新技术[M].北京:专利文献出版社,1998.
DU Gong-chen, MI Xiang-you. The New Technology of Prestressed of Turn of the Century[M]. Beijing: Patent Literature Publishing House, 1998.
- [9] 熊学玉,李伟业,黄鼎业.预应力混凝土超静定结构的次内力简捷计算[J].工业建筑,1998,28(2):13-18.
XIONG Xue-yu, LI Wei-xing, HUANG Ding-ye. Convenient calculation for secondary interior force under restraint in prestressed concrete statically indeterminate structure[J]. Industrial Construction, 1998, 28(2): 13-18.

(下转第626页)

表1 应力测试值与理论值计算值比较

Tab. 1 Comparison of test values with theoretical values

编号	实测值/MPa	理论值/MPa
P1	-2.079	-2.951
P2	-1.985	-2.468
P3	1.008	1.656
P4	1.251	1.681
P5	1.425	1.586
P6	1.386	1.613
P7	—	-3.897
P8	-2.763	-3.412

Analysis on the dynamic characteristics of equipment-structure interaction for the main building of a transformer substation

WEN Bo¹, XU Hao-xuan¹, HOU Cong-xia², NIU Di-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shijiazhuang vocational technology institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Substation is a special kind of industrial architecture, because electric equipments in the main structure have so many characteristics such as complex form, large weight and various sitting styles etc. There is a very complicated dynamic interaction between the electrical equipments and the main structure. In this paper, the types of substations are classified. Both the 3-D calculation models involving interaction of structure-electrical equipments and the model of electrical equipments themselves are established. The traditional structure models without interaction of structure-electrical equipments are also set up for comparison. The dynamic characteristics of main structure, electrical equipments and their interaction are received by modal analysis. The results can provide some valuable reference in seismic design and earthquake response analysis of the similar substations.

Key words: main structure; electrical equipments; interaction; modal analysis

Biography: WEN Bo, Ph. D., Associate Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991361286, E-mail: wenbo_mail@163.com

(上接第 613 页)

[10] 吕志涛, 孟少平. 现代预应力混凝土设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

LÜ Zhi-tao, MENG Shao-ping. Design of Modern Prestressed Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

[11] 李瑞鸽, 杨国立, 张耀庭. 预应力混凝土梁模态分析的有限元软件实现[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(2): 188-192.

LI Rui-ge, YANG Guo-li, ZHANG Yao-ting. Modal analysis of prestressed concrete beam with finite element software[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2012, 44(2): 188-192.

Analysis and monitoring of the influence of the column's force on the prestressed frame beam tensioning

HU Chang-ming^{1,2}, FU Liao-yuan¹, GUO Yan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to explore the force of the frame column in the process of prestressed frame beam tensioning based on the former research of secondary interior force of the frame column and through the calculation and monitoring of the column of a prestressed frame structure, the changing regularity of secondary interior force of the frame column in the process of the prestressed frame beam tensioning is analyzed. The results indicate that the third moment generated by axial deformation of beam is larger. So the third moment shall not be ignored in design. By comparison of monitoring data with results of numerical simulation, the inner side of the top of columns and the outside of the bottom of columns are in tension. Meanwhile the outside of the top of columns and the inner side of the bottom of columns are in compression. There is a linear relation between stress and tension loading. Research results can be used as reference for design and construction of similar projects. It will provide reliable data for the establishment of relevant standards.

Key words: prestressed concrete; frame structure; third moment; numerical analysis; on-site monitoring

Biography: HU Chang-ming, Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13609161448, E-mail: hu_tm@163.com