

轴压比对竖向荷载下预应力混凝土框架的影响*

潘 峰, 简 斌, 王正霖

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:在预应力框架中轴压比除对结构的延性性能产生影响外,还将对框架内力产生影响。通过四组共24榀预应力框架的电算并结合已有的参考文献,分别从二阶效应、框架柱的轴向变形及与普通混凝土框架比较三个方面研究和探讨了轴压比对只承受竖向荷载作用的预应力框架的影响。研究表明,轴压比对只承受竖向荷载作用的预应力框架的影响与普通混凝土框架基本一致,但也存在一些自身特点。总体上来说,轴压比对预应力框架的影响较普通混凝土框架显著,但通常情况下影响仍较小。

关键词:预应力混凝土框架;轴压比;二阶效应

中图分类号:TU378.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2004)06-0044-05

The Effect of Axial Compression on the Prestressed Concrete Frame under Vertical load

PAN Feng, JIAN Bin, WANG Zheng - lin

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China)

Abstract: For prestressed frames, the axial compression ratio will affect not only the ductility of structures but also the structural internal force. Based on the computer - calculation for four groups of 24 prestressed frames combined with the references, in this paper, the effects of axial compression ratio on the prestressed frames are studied and discussed through three aspects: the second - order effect, the axial deformation of frame - columns and the comparison with ordinary concrete frames. The study results show that the effects of axial compression ratio on the prestressed frames and the ordinary concrete frames are basically consistent, but there are some self - born characteristics. As a whole, the effect of axial compression ratio on the prestressed frames is more notable than that on the ordinary concrete frames, but under common situation the effect is small.

Keywords: prestressed concrete frame; axial compression ratio; second - order effect

对于竖向荷载作用下预应力框架弯矩重分布的影响因素,重庆大学土木工程学院已经进行了较深入的研究。文献^{[1][2]}结合四榀单层单跨预应力框架的试验,从截面的相对受压区高度、次弯矩、预加水平荷载、预应力度及侧向约束等方面对预应力框架的弯矩重分布进行了详细的分析探讨,并给出了一些具体的设计建议及计算公式。以上文献均未将框架柱轴压比列入影响因素之内,未对其进行分析。而在实际工程中,预应力框架柱中轴压比较大的现象却时有发生,如多高层预应力框架的底层柱等。鉴于以上情况,重庆大学土木工程学院又进行了两榀接近足尺的预应力框架试验^[3]。为配合试验现象的分析,本文选取具有一定代表性的四组共24榀预应力框架进行了电算,结合已有的参考文献就轴压比对预应力框架的影响进行了初步的探讨。

* 收稿日期:2004-07-20

作者简介:潘 峰(1977-),男,湖北安陆人,硕士生,主要从事预应力混凝土结构方面的研究。

1 预应力框架算例

1.1 算例设计

本文分别对两组各六榀单跨预应力框架(DK1~DK6)和六榀两跨预应力框架(SK1~SK6)进行分析。框架梁各项参数保持不变,截面尺寸为150 mm×400 mm,跨度为9 m。框架梁混凝土为C40,框架柱混凝土为C30,混凝土弹性模量均按规范规定取值。预应力筋均为12 ϕ^5 高强碳素钢丝,其强度标准值 f_{pk} 取1 570 N/mm²,张拉控制应力 $0.75f_{pk}$,预应力损失取20%,有效预加力为221.95 kN。预应力筋采用四段抛物线,在支座处距梁顶100 mm,在跨中处距梁底50 mm,两端反弯点距支座均为1.35 m。各预应力框架通过对柱截面尺寸及柱顶轴力等参数的变化来控制各框架柱轴压比及梁柱线刚度比,具体参数详见表1。为了便于对比分析,表中列出的柱设计轴压比仅考虑了柱顶轴力,不包括跨间荷载。需说明的是,在计算过程中均考虑了跨间荷载的作用。

表1 预应力框架参数

构 件	参 数				
	柱截面尺寸/mm ²	柱高/m	柱顶轴力 F /kN	柱设计轴压比	梁柱线刚度比
DK1 SK1	300×400	2.25	0	0.0	0.135
DK2 SK2	200×350	2.25	0	0.0	0.303
DK3 SK3	150×300	2.25	0	0.0	0.642
DK4 SK4	300×400	2.25	1 290	0.752	0.135
DK5 SK5	200×350	2.25	753	0.752	0.303
DK6 SK6	150×300	2.25	484	0.752	0.642

2.2 算例加载方案

为了充分反映轴压比导致的框架柱轴向压缩不均对结构产生的影响,对组DK和SK组均采用两种不同的加载方式,具体加载方式见图1。其中, F 代表柱顶集中力,荷载大小参见表1。对于不同的加载方案,均在框架梁三分点位置施加集中荷载。根据试验现象^[3],取 $P=80$ kN,计算对应的结构内力。

2.3 计算结果

采用通用有限元程序SPA2000对结构内力进行弹性计算,在计算过程中框架梁柱均被处理成杆单元。计算得出了各预应力框架初始状态下的综合弯矩(含第三弯矩)及加载后考虑等效荷载和跨间荷载的总弯矩。二者相减,即得到各榀预应力框架在外荷载作用下的荷载弯矩值。在计算

过程中均考虑了二阶效应的影响。限于本文的篇幅,仅将最终的荷载弯矩值列于表2、表3中,其他数据请参见文献^[3]。

3 结果分析

此节将就柱轴压比对不同梁柱线刚度比下,只承受竖向荷载作用的单跨、两跨预应力框架内力的影响进行一些初步的探讨。在分析过程中,将柱轴压比对框架内力的影响分为框架柱的轴向变形及二阶效应两部分。对于框架柱的轴向变形情况只有在方案二即非对称施加柱顶轴力的情况下才会对结构内力产生影响,方案一的情况下仅存在二阶效应的影响。同时轴压比对预应力框架的影响相对于普通混凝土框架而言存在一些自身的特点,本文将从上述三个方面对其进行探讨。

国内学者对轴压比对结构延性的影响已经做了大量的研究^[4-6],根据多种因素给出普通混凝土结构的轴压比限值。文献^[7]规定,对柱无需施加预应力的框架柱的轴压比限值不应低于普通钢筋混凝土

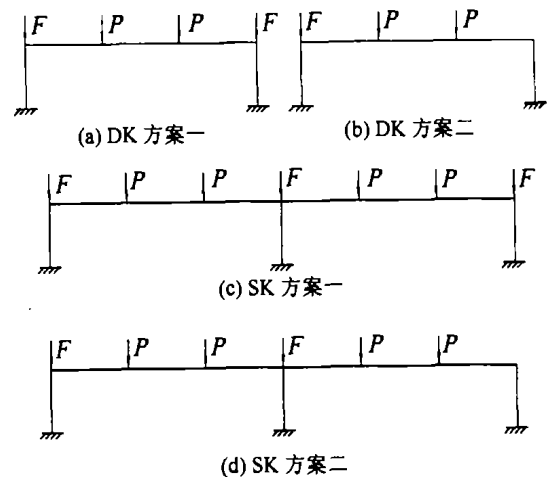


图1 加载方案图

框架柱的有关规定;对柱需施加预应力的框架柱轴压比限值,应用预应力等效荷载的概念,将部分预应力混凝土偏压构件柱等效为承受预应力荷载的非预应力偏心受压构件。由于将预应力考虑为外荷载,故可采用普通钢筋混凝土框架柱轴压比的限制要求。轴压比对结构延性的影响不是本文研究的重点,下文不再专门讨论。

表2 DK(SK)预应力框架方案一荷载弯矩(kN·m)

构 件	柱底(边柱底)	柱顶(边柱顶)	梁跨中(梁跨中)	-(梁内支座)
DK(SK)	63.647(53.517)	149.33(138.02)	92.083(85.953)	-(171.43)
DK2(SK2)	63.355(52.778)	138.88(120.49)	103.84(90.671)	-(180.50)
DK3(SK3)	57.634(44.647)	121.81(96.176)	122.91(97.183)	-(193.03)
DK4(SK4)	64.201(54.021)	149.29(137.93)	92.138(85.980)	-(171.47)
DK5(SK5)	63.978(53.294)	138.77(120.31)	103.97(90.721)	-(180.60)
DK6(SK6)	58.307(45.127)	121.58(95.863)	123.18(97.269)	-(193.19)

注:本文中各截面位置均参见图1;括号内数据为SK系列数据。

表3 DK(SK)预应力框架方案二荷载弯矩(kN·m)

构 件	左柱底(左边柱底)	左柱顶(左边柱顶)	梁跨中(左跨跨中)	右柱顶(左梁内支座)
DK4(SK4)	63.918(53.815)	149.17(137.87)	92.111(85.983)	149.45(171.54)
DK5(SK5)	63.793(53.187)	138.62(120.27)	103.90(90.730)	139.03(180.63)
DK6(SK6)	58.203(45.092)	121.42(95.852)	123.04(97.289)	121.97(193.17)
构 件	-(右边柱底)	-(右边柱顶)	-(右跨跨中)	右柱底(右梁内支座)
DK4(SK4)	-(53.723)	-(138.07)	-(85.951)	63.932(171.39)
DK5(SK5)	-(52.886)	-(120.53)	-(90.663)	63.541(180.48)
DK6(SK6)	-(44.684)	-(96.187)	-(97.166)	57.738(193.05)

注:因柱顶集中力 F 为零,因此方案二DK1~DK3(SK1~SK3)数据均同方案一。括号内数据为SK系列数据。

3.1 二阶效应影响

通过对表2计算结果的分析,可以总结出二阶效应对结构内力的影响规律如下:

1) 对于单跨预应力框架,在梁柱线刚度比一定的情况下,随着轴压比的增大,框架柱底部荷载弯矩增大,柱顶荷载弯矩减小,梁跨中荷载弯矩增大。且梁柱线刚度比越大,这一现象越明显,但总体影响仍很小。例如表2中:梁柱线刚度比为0.642,轴压比由DK3的0增大到DK6的0.752时,柱底荷载弯矩分别为57.634 kN·m和58.307 kN·m,增大幅度仅为1.2%,其它截面荷载弯矩变化幅度均小于0.3%。

2) 对于两跨预应力框架而言,与单跨预应力框架类似,在梁柱线刚度比一定的情况下,随着轴压比的增大,柱顶截面及梁边支座截面处的荷载弯矩减小,其余各控制截面荷载弯矩均增大,但影响幅度也很小。例如表2中:梁柱线刚度比为0.642,轴压比由DK3的0增大到DK6的0.752时,柱底荷载弯矩分别为44.647 kN·m和45.127 kN·m,增大幅度仅为1.1%,其它截面荷载弯矩变化幅度均小于0.4%。

以上现象主要是由于随着轴压比增大,在柱顶节点处 $P-\delta$ 效应将起类似于降低柱线刚度的作用,从而使柱顶截面一阶弯矩略有减小。而柱底为固定端,其一阶曲率将因 $P-\delta$ 效应而增大,各弯矩也必然相应增大。该现象与无侧移的普通混凝土框架二阶效应现象是一致的。计算结果表明其影响幅度很小,可以忽略不计。

3.2 框架柱轴向压缩的影响

轴压比越大,框架柱的轴向变形亦越大,若所有框架柱轴向变形相同时框架梁不会有附加变形,则框架柱轴向变形不会对框架内力产生影响。同榀框架各框架柱轴向变形不等,则必然会在框架中产生附加内力。

由表2、3、5可以看出,对于单跨预应力框架,非对称轴压比的存在,将导致左侧柱底的荷载弯矩增大,柱顶及梁端荷载弯矩减小,与二阶效应一致。而右侧柱两端弯矩均增大,梁跨中弯矩略有增大。随着梁柱线刚度比增大,单跨框架对称轴两侧对应截面弯矩的差值越来越大。

由表2、3、5还可以看出,对于两跨预应力框架,随着轴压比的增大,左跨边柱底弯矩增大,柱顶弯矩减小,而右跨柱两端弯矩均增大。左跨各截面荷载弯矩较右跨对应截面弯矩变化幅度大,这种情况随着

梁柱线刚度比的增大而显得更加明显。

表4 $P = 1 \text{ kN}$ 作用下 DK(SK)预应力框架荷载弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)

构 件	左柱底(左边柱底)	左柱顶(左边柱顶)	梁跨中(左跨内支座)	右柱底(右边柱底)	
方 案 一	DK1(SK1)	0.790 5(0.665 5)	1.855 8(1.717 8)	1.144 3(2.140 0)	0.790 5(0.665 5)
	DK2(SK2)	0.782 3(0.654 0)	1.716 7(1.494 9)	1.283 4(2.250 2)	0.782 3(0.654 0)
	DK3(SK3)	0.707 1(0.551 1)	1.440 8(1.134 8)	1.553 8(2.428 1)	0.707 1(0.551 1)
方 案 二	DK4(SK4)	1.403 8(1.235 4)	1.2554(1.920 0)	1.144 3(1.880 9)	0.160 8(0.461 5)
	DK5(SK5)	1.179 0(1.069 0)	1.331 6(1.735 6)	1.283 5(1.918 7)	0.385 6(0.598 4)
	DK6(SK6)	1.036 9(0.975 8)	1.147 4(1.482 0)	1.555 0(1.963 2)	0.375 5(0.598 2)

表5 $P = 80 \text{ kN}$ 作用下 DK(SK)预应力框架荷载弯矩 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)

构 件	左柱底(左边柱底)	左柱顶(左边柱顶)	梁跨中(左跨内支座)	右柱底(右边柱底)	
方 案 一	DK1(SK1)	63.647(53.517)	149.33(138.02)	92.083(171.43)	63.647(53.517)
	DK2(SK2)	63.355(52.778)	138.88(120.49)	103.84(180.50)	63.355(52.778)
	DK3(SK3)	57.634(44.647)	121.81(96.176)	122.91(193.19)	57.634(44.647)
方 案 二	DK4(SK4)	63.918(53.815)	149.17(137.87)	92.111(171.54)	63.932(53.723)
	DK5(SK5)	63.793(53.187)	138.62(120.27)	103.90(180.63)	63.541(52.886)
	DK6(SK6)	58.203(45.092)	121.42(95.852)	123.04(193.17)	57.738(44.684)

注:括号内数据为 SK 系列数据。

总体来说框架柱轴向压缩对单跨或两跨预应力框架的影响十分相似,均是导致轴压比大的一侧边柱底弯矩增大,柱顶弯矩减小,而轴压比较小一侧的边柱两端弯矩均增大。通过计算 $P = 1 \text{ kN}$ 作用下的 DK 和 SK 框架荷载弯矩,结合表 4 及表 5 数据可知框架柱轴向压缩对结构内力影响的大小取决于柱顶轴力与跨间荷载的比例,柱顶轴力相对于跨间荷载越大,其影响亦越大。到一定程度,边柱柱底弯矩将超过边柱柱顶弯矩,最终可能导致结构以边柱底出现塑性铰的形式破坏。

3.3 与普通混凝土框架的比较

预应力框架边柱顶弯矩远大于一般跨度的普通混凝土框架,加之预应力的存在将提高框架梁的开裂荷载,因而框架柱顶通常开裂较早,后期裂缝的发展也较充分。但随框架柱轴压比的增大,柱顶截面平均压应力增大,开裂荷载显著提高,故柱顶截面开裂时梁端截面的富裕承载力总体较轴压比小的框架少。随着荷载的增加梁端截面很快出现塑性铰,其截面弯矩增长缓慢,导致柱顶裂缝的发展停滞。由此可见,在预应力框架中轴压比将有利于边柱顶处裂缝的控制。

由于预应力的作用必将导致框架梁的轴向压缩,即导致该层柱顶截面相对于柱底截面而言存在一个水平位移,对于轴压比较大的框架而言,该现象将进一步放大其二阶效应产生的影响。

1) 对于多层预应力框架而言,各层二阶效应放大的程度因施工方式的不同而存在差异。当采用“全部浇筑,一次张拉”的施工方法时,仅有底层两柱端存在较大相对水平位移,故底层二阶效应影响最大,以上各层影响均较小,可以忽略。当采用“逐层浇筑,逐层张拉”的施工方法时,各层两柱端均存在一定的相对水平位移,其中顶层两柱端相对位移最大^[8],故顶层二阶效应影响最大,其他各层影响均较小。

2) 对于多跨预应力框架而言,由于框架梁总长度较大,在预应力的作用下,梁总的压缩量也较大。通常中跨柱顶位移较小,越靠近边跨的框架柱柱顶位移越大。因而随着轴压比的增大,在多跨预应力框架的边跨,二阶效应产生的影响将远大于多跨普通混凝土框架,在某些情况下,边柱底弯矩有可能增大 10% 以上。

3.4 与试验现象的对比

结合两榀足尺预应力框架试验现象可以看出,轴压比较小的预应力框架边柱顶最先开裂,且结构破坏时,裂缝宽度达到 0.3 mm。轴压比较大的预应力框架边柱顶晚于框架梁端开裂,裂缝最终宽度小于 0.1 mm。两榀框架极限荷载相差不大^[3]。以上现象均与理论分析吻合,一方面表明,在预应力框架中边柱轴压比增大将有利于边柱顶处裂缝的控制;另一方面,轴压比对预应力框架的影响主要表现在内力重分布的过程中,在实现完全内力重分布的情况下,对结构极限承载能力影响不大。

4 结论

通过以上计算分析,对竖向荷载作用下单跨或跨度相差不大的两跨预应力框架可得出以下结论:

1) 单跨和两跨预应力框架中,轴压比变化引起的二阶效应与普通混凝土框架类似,对结构荷载内力的影响虽存在,但即使在影响最大的柱底截面变化幅度也很小,故而可以忽略不计。

2) 对于同榀框架中各框架柱轴向变形不等的框架,轴压比的变化将影响结构内力,且这种影响的大小取决于柱顶轴力与跨间荷载的比例。柱顶轴力相对于跨间荷载越大,其影响亦越大,并且在某种情况下,边柱柱底弯矩将超过边柱顶弯矩,最终可能导致结构边柱底出现塑性铰。

3) 预应力框架中柱轴压比的提高将有利于边柱顶处裂缝控制。同时由于框架梁的轴向压缩,结构内的二阶效应影响将进一步增大,特别是在多跨预应力框架的边跨表现得更为明显,不可忽略其影响。

参考文献:

- [1] 孙新敏. 跨间竖向荷载作用下预应力框架内力重分布的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [2] 屈凯锋. 竖向及水平荷载作用下后张预应力框架的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [3] 潘峰. 轴压比对两跨预应力框架影响的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [4] 肖建庄,朱伯龙. 钢筋混凝土框架柱轴压比限值试验研究[J]. 建筑结构学报,1998,19(5):2-7.
- [5] 肖建庄,张建荣,秦灿灿. 混凝土框架柱轴压比限值分析[J]. 建筑结构,2000,30(2):33-35.
- [6] 白绍良,张友为,黄宗明. 不同轴压比下钢筋混凝土柱的低周疲劳性能[J]. 重庆建筑大学学报,1997,19(3):1-6.
- [7] 中华人民共和国行业标准. 预应力混凝土结构抗震设计规程(2001征求意见稿)[Z]. 北京,2001.
- [8] 简斌,吴春华. 多层预应力混凝土框架侧向约束对梁轴力的影响[J]. 建筑结构,2004,34(4):25-27.

(上接第43页)

重要还在于使得 $\frac{l^2 G I_k}{\pi^2 E I_\omega}$ 具有了明确的力学含义,即组成衰减系数。

同样当梁承受其他荷载作用形式时,或是其他边界条件如悬臂梁,外伸梁等均可按上述原理方便的算出临界弯矩,将另撰文详述。

参考文献:

- [1] 李开禧. 钢梁柱中两杆端变形增量的相关方程[J]. 重庆交通学院学报,1989,8(4):26-36.
- [2] W.F.chen. 梁柱分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1997.
- [3] 吕烈武. 钢结构构件稳定理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [4] 陈永庆,李开禧. 薄壁构件一阶分析的新方法[J]. 重庆建筑大学学报,2000,22(5):102-106.
- [5] 李开禧,赵广坡. 薄壁梁的单元刚度矩阵及其应用[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(5):35-38.
- [6] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.