

预应力框架弯矩调幅设计应注意的几个问题*

许 军, 黄 音, 陈明政, 王正霖

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 预应力框架弯矩调幅规律与连续梁相比有着自己的特点, 通过对柱梁线刚度比、外荷载形式、次弯矩和柱铰可行性几个方面进行分析, 希望对预应力框架弯矩调幅设计提供一点参考和帮助。

关键词: 预应力框架; 弯矩调幅; 柱梁线刚度比; 荷载形式; 次弯矩; 柱铰

中图分类号: TU378.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)01-0051-04

Several Matters to be Noticed During the Moment Modulation Design of Prestressed Concrete Frame

XU Jun, HUANG Yin, CHEN Ming-zheng, WANG Zheng-lin

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

Abstract: The moment modulation of prestressed concrete frame has some differences compared with that of continuous beam. Based on the analysis of ratio of column linear rigidity to beam one, form of load, second moment and plastic hinge in column, this paper is intended to get some helpful advise for moment modulation design.

Keywords: prestressed concrete frame; moment modulation; ratio of column linear rigidity to beam one; form of load; second moment; plastic hinge in column

超静定预应力混凝土结构, 在达到承载能力极限状态前, 结构各构件以及构件各截面间总要发生程度不等的内力重分布。对于结构的极限荷载, 有很多考虑塑性内力重分布的计算方法, 如极限平衡法、塑性铰法、变刚度法、强迫转动法、弯矩调幅法以及非线性全过程分析方法等^[1], 其中大多数计算繁冗, 实际设计应用不便。只有弯矩调幅法因其计算简便实用, 能够发挥结构潜力、节约材料和方便连续配筋等优点而应用最为广泛。

弯矩调幅法简称调幅法, 就是对结构按弹性方法所算得的弯矩值进行适当调整, 通常是对那些绝对值较大的截面弯矩进行调整, 然后按调整后的内力进行截面设计和配筋构造。对于单跨超静定结构, 弯矩调幅设计是在弹性荷载弯矩图的基础上, 对弯矩绝对值较大的截面进行适当调整, 然后根据力的平衡条件确定其他截面的设计弯矩, 按调整后的弯矩进行截面设计和配筋构造。对于多跨超静定结构, 由于存在活荷载最不利组合的影响, 弯矩调幅设计应在弹性弯矩包络图的基础上, 适当降低绝对值较大的弯矩。由于弯

矩包络图中最大负弯矩和最大正弯矩不可能在同一荷载组合下出现, 因此其余截面仍可能以调幅前活荷载最不利组合时的弹性弯矩设计值进行截面设计, 不用人为加大配筋, 这样的调幅设计更趋于经济和合理。

关于超静定预应力混凝土结构弯矩调幅设计的现有规定是基于连续梁试验研究的, 对预应力框架的试验研究则相对较少。由于框架柱的影响, 预应力框架荷载弯矩分布、次弯矩分布以及弯矩的调幅特点与连续梁比较还是有一定区别的。

1 规范规定及工程经验

在一系列超静定预应力混凝土结构的试验研究和大量实际工程经验的基础上, 我国混凝土结构设计规范 GB50010-2002^[2] 规定, 对后张法预应力混凝土框架梁及连续梁, 当截面受压区高度时, 可允许有限量的弯矩重分配, 其调幅值最大不得超过 10%; 同时可考虑次弯矩对截面内力的影响, 但总调幅值不宜大于 20%。当时, 不应考虑内力重分布。混凝土结构设计规范 GB50010-2002 条文说明第 6.1.8 条所给出的

* 收稿日期: 2005-07-20

作者简介: 许 军 (1979-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士生, 主要从事预应力混凝土结构研究。

相关公式为:

$$(1 - \beta)M_d + \alpha M_{sec} \leq M_u \quad (1)$$

式中, $\beta = 1 - M_a/M_d$ 定义为直接弯矩的调幅系数, 即荷载弯矩调幅系数。 M_a 为调整后的弯矩值, M_d 为按弹性分析算得的荷载弯矩设计值, M_{sec} 为预应力次弯矩, M_u 为构件正截面受弯承载力设计值; β 的变化幅度是: $0 \leq \beta \leq \beta_{max}$, β_{max} 为最大调幅系数。 α 为次弯矩消失系数, 次弯矩随结构构件刚度改变和塑性铰转动而逐步消失, 当 $\beta = 0$ 时, 取 $\alpha = 1.0$; 当 $\beta = \beta_{max}$ 时, 可取 α 接近为 0。

根据内力重分布过程中混凝土受压区相对高度 ξ 、配筋率 ρ 、张拉控制应力 σ_{con} 和次弯矩 M_{sec} 的大小及其对内力重分布的影响, 目前在进行超静定预应力混凝土结构的弯矩调幅设计时, 人们容易认同的有以下两点:

- 1) 截面相对受压区高度 $\xi \leq 0.3$;
- 2) 总调幅量控制在 20% 以内。

虽然规范提到了 β 可正可负 (β 取正表示支座处的弹性荷载弯矩向跨中调幅; β 取负表示跨中的弹性荷载弯矩向支座处调幅), 但只对 β 取正时做了规定, 并未涉及 β 取负时的问题。

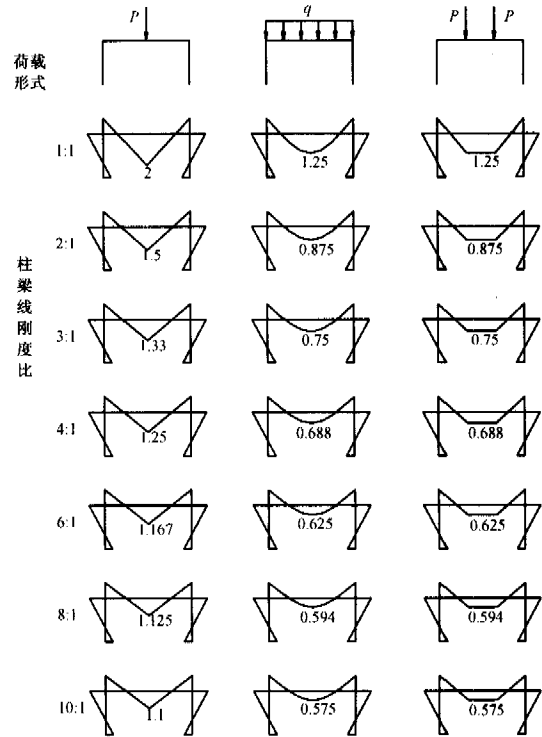
2 对几个问题的探讨

正如前面所提到的, 关于预应力结构的调幅规定和建议都是以连续梁的试验研究和工程经验为基础的, 由于框架柱的影响, 预应力框架的内力重分布有着自己的特点。框架的弹性荷载弯矩分布、预应力次弯矩分布与连续梁并不完全相同, 预应力框架的弯矩调幅设计也应该根据其实际情况合理进行。本文将对柱梁线刚度比和荷载形式、柱铰以及次弯矩对预应力框架调幅的影响加以讨论和分析。

2.1 柱梁线刚度比和荷载形式

混凝土框架计算中, 把混凝土弹性模量 E 和杆件截面惯性矩 I 的乘积 EI 称为截面弹性刚度, EI 除以杆件长度 L 则称为线刚度。因为弹性计算方法是不考虑杆件截面配筋影响的, 所以只需要混凝土框架柱和梁的线刚度代表框架的几何特征, 再加上外荷载作用形式就能决定框架的弹性内力分布。图 1 示出单层单跨框架柱、梁线刚度比为 1: 1 ~ 10: 1 时, 框架梁上分别作用一个或两个集中荷载、均布荷载得出的弹性弯矩分布图。框架弯矩调幅设计即是以此类外荷载作用下的弹性弯矩分布图为基础的。从图 1 中可以看出: 单层单跨框架在框架梁跨中作用一个集中荷载时, 梁跨中弯矩一般将大于支座负弯矩绝对值; 若要两者相等; 理论上只有柱梁线刚度比为无穷大。当框架梁上作用

均布荷载或在三分点上作用两个集中荷载时, 随柱梁线刚度比的变化, 梁支座负弯矩绝对值可能大于或小于跨中正弯矩。



(跨中的数据为跨中弯矩与梁端弯矩绝对值的比值)

图 1 不同柱梁线刚度比、荷载形式下框架弹性弯矩对比图

按照弯矩调幅设计方法, 一般把截面弯矩绝对值大的适当降低, 连续梁的弯矩调幅因其支座负弯矩绝对值一般大于跨中正弯矩, 习惯采用降低支座弯矩相应增加跨中弯矩的“正调法”。根据弯矩调幅法的基本概念, 框架梁既有“正调法”, 也有降低跨中弯矩、相应增加梁端弯矩的“反调法”, 还有正负弯矩截面强度接近时的少量调幅甚至不必调幅。因为在工程实际中, 应采取对设计有利的调幅, 不能为调幅而调幅。还值得注意的是, 当框架梁跨中弯矩较大需要采用“反调法”时, 梁跨中一个截面配筋减少将带来梁端和柱端多个截面弯矩增加, 配筋也增加, 因此需要从适用、构造、经济等方面综合评价, 慎重考虑。在弯矩调幅设计中, 若外荷载弹性计算弯矩没有进行调幅, 则应考虑弹性初始次弯矩, 因为弹性方法计算时外荷载弯矩必须与次弯矩进行组合。

2.2 柱铰的可行性

对柱端截面强度大于梁端截面强度的“柱强于梁”框架, 在弯矩调幅设计中, 框架梁的调幅采用梁两端和梁跨中的“三铰机构”作为理想的承载能力极限状态, 这是大家容易接受的, 因为人们习以为常的连续梁弯矩调幅设计就是类似这样进行的。对梁端截面强度大于柱端截面强度的“梁强于柱”框架, 塑性铰的出

现位置就值得我们探讨。对“梁强于柱”框架,在外荷载作用下塑性铰首先出现在柱端而非梁端,由支撑梁的两柱顶截面和梁跨中截面(或一个柱顶截面、梁跨中截面和另一个梁端截面)组成的“三铰机构”仍然适用于框架梁的弯矩调幅设计^[3]。单层框架以及多层框架的顶层,柱顶出现塑性铰不会造成整个框架破坏,应该是允许的。框架结构顶层框架梁端弯矩往往较大,边柱柱顶由于弯矩平衡需要配置较多的钢筋,构造复杂,而且顶层以下相邻层的截面和配筋都会受到影响,在经济上也不理想。如果在框架顶层柱顶截面设置塑性铰,即适当降低弯矩,恰当配筋,上述若干矛盾将会迎刃而解,结构设计更加经济合理。再从框架顶层柱顶截面塑性转动能力来看,由于框架顶层柱,特别是边柱,所承受的轴力一般不是很大,边柱柱顶截面弯矩较大,一般属于大偏心受压构件。由于框架柱多为对称配筋,截面相对受压区高度通常较小,一般可以保证塑性铰塑性转动能力需要。对于框架结构来说,一般只有在顶层边节点才有可能出现梁端强于柱端的情况,在顶层边节点的抗震设计中也允许考虑将塑性铰控制在柱端^[4],而不必苛求一定为“强柱弱梁”。

在预应力混凝土框架的顶层,由于框架梁连续配置的曲线预应力筋在支座附近上弯承受负弯矩,梁端截面抗弯强度往往大于柱顶截面,即“梁强于柱”。为此,在我们已完成的预应力框架对比试验中将一榀框架的塑性铰控制在柱顶形成,其试件尺寸、配筋如图2所示。试验采取梁跨中单点竖向加载,加载到40 kN

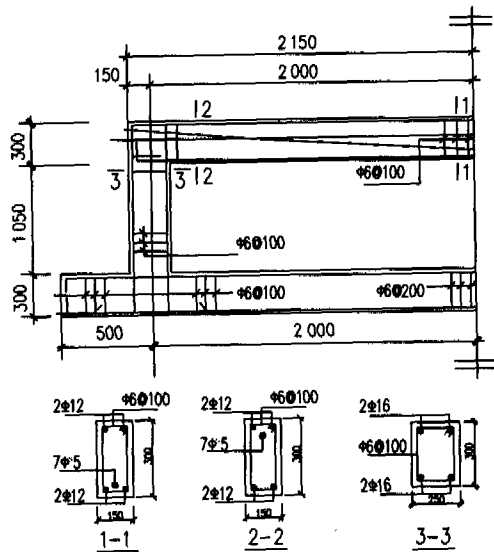


图2 框架配筋图

时柱顶开裂,50 kN时框架梁跨中开裂,梁端在加载到100 kN时才开裂。随着荷载的增大,柱顶和跨中的裂缝发展的比较充分,柱顶裂缝宽度在加载到140 kN时就达到了1.5 mm,跨中加载到155 kN时也达到了1

mm;而梁端裂缝不但出现较晚而且出现后发展非常缓慢,在加载到160 kN形成三铰机构破坏时仅有0.25 mm。加载到115 kN时柱顶钢筋屈服出现塑性铰,到135 kN时跨中非预应力钢筋屈服,而梁端的非预应力钢筋始终没有屈服。从图3框架各关键截面的荷载-曲率关系可以得知:在荷载达到135 kN时柱顶塑性铰的塑性转动能力开始显现,到145 kN时跨中的塑性铰塑性转动能力开始显现,加载到160 kN时由于跨中受压区混凝土压溃而框架无法继续持荷,此时柱顶内侧混凝土也出现了起皮现象。由于试验中框架柱承受的轴力不是很大,而弯矩较大,虽然塑性铰首先出现在柱顶,但因柱顶为对称配筋,实际截面相对受压区高度不大,框架是以跨中的混凝土压溃而宣告结构破坏,可见柱顶塑性铰具有良好的塑性转动能力,保证了弯矩调幅的实现。这榀框架的柱顶截面总调幅量(荷载弯矩调幅及预应力次弯矩调幅)达到了25.61%,从而通过试验证明了框架柱柱顶设置塑性铰的可行性。

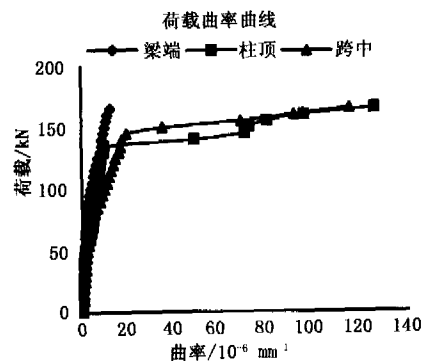


图3 框架荷载-曲率曲线

2.3 次弯矩的作用

超静定预应力结构由于张拉引起的变形受到多余约束的限制存在预应力次弯矩,弯矩调幅设计中总调幅包括荷载弯矩调幅和次弯矩调幅两部分。受力过程中由于构件截面混凝土开裂、受拉非预应力钢筋屈服等原因引起截面刚度变小且各截面刚度变化幅度不等,从而引起荷载弯矩的重分布;同时由于构件截面刚度变小,约束作用减弱,次内力变小。随着荷载的增加,结构构件各截面刚度退化程度加重,荷载弯矩的重分布不断增大;而构件刚度的不断降低必然引起次弯矩逐步减小,所以说随着荷载的增加,荷载弯矩调幅量增大,次弯矩调幅量减小,二者此消彼长^[5]。

预应力次弯矩,在预应力框架梁弯矩调幅设计中也像连续梁那样起着重要作用。但须注意,预应力框架梁的次弯矩除预应力等效荷载产生的次弯矩外还有轴向压缩变形引起的次弯矩。预应力连续梁在竖向预应力等效荷载作用下,在梁的中间支座处产生的次弯矩通常为正弯矩,如图4(a)所示,它与向下作用的恒

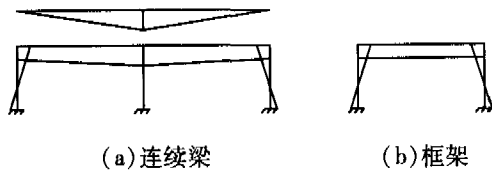


图4 预应力等效荷载次弯矩示意图

载和活载产生的中间支座负弯矩反号,降低了负弯矩的绝对值,而弯矩调幅设计通常是把梁中支座处较大的负弯矩值适当降低并相应增加梁跨中的正弯矩值。因连续梁计算模型带有理想滚轴支承,连续梁在轴向预应力作用下的轴向变形将不产生次弯矩,因此预应力次弯矩在连续梁弯矩调幅设计中一般起有利作用。在竖向预应力等效荷载作用下,无论是单跨还是多跨的预应力框架,其支座处产生的次弯矩总是正弯矩,如图4(b)所示。因此等效荷载次弯矩对框架梁弯矩“正调幅”也起有利作用。由于框架梁弯矩调幅还可能有的“反调幅”,故要注意当预应力框架梁由正弯矩调向负弯矩的“反调幅”时,等效荷载次弯矩可能会起不利作用。同时如图5所示,预应力框架梁在预应力作用下的轴向缩短变形受到框架柱的约束,往往在端支座处产生的次弯矩会是正弯矩,而相邻中支座次弯矩则为负弯矩,因此轴力次弯矩在弯矩调幅设计中可能起有利作用,还可能起不利作用。

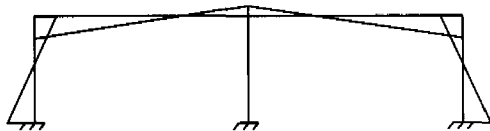


图5 框架轴力次弯矩示意图

次弯矩有多大,是弯矩调幅设计中值得关心的问题。根据较多的工程实践和试验分析^[5-9],在符合相对受压区高度和总调幅量控制在以内的情况下,一般荷载弯矩调幅多为荷载弯矩的以上,等效荷载次弯矩大体为或更大一些,轴力次弯矩仅为。由于次弯矩不仅是变化的,而且与荷载弯矩调幅也是密不可分的,故弯矩调幅的最简便方法是通过荷载弯矩乘以适当的总调幅系数后的总调幅量来进行控制,这一总调幅量包含了荷载弯矩调幅和次弯矩调幅的总和。当次弯矩与荷载弯矩反号(即次弯矩起有利作用)时,其存在降低了弯矩重分布对塑性铰转动能力的要求,从而有可能提高弯矩总调幅。参照预应力连续梁的研究成果^[10],可以取此类框架节点的总调幅量不超过。反之,当等效荷载次弯矩、轴力次弯矩中的一项或两项起不利作用时,由于次弯矩调幅的存在将降低外荷载弯矩调幅的能力,故本文建议:出于安全考虑,当等效荷载次弯矩起有利作用而轴力次弯矩起不利作用时,总调幅量控制在之间;当等效荷载次弯矩起不利作用或

等效荷载次弯矩和轴力次弯矩都起不利作用时,总调幅量控制在之间。

4 小结

预应力混凝土框架弯矩调幅设计除遵循截面相对受压区高度及总调幅量控制在以内两点以外,还应注意以下几点:

1) 柱梁线刚度比和荷载形式决定框架的内力分布,框架弯矩调幅设计以外荷载弹性弯矩分布图为基础。框架弯矩调幅有支座向跨中的“正调法”,也允许跨中向支座的“反调法”。还有正负弯矩截面强度接近时的少量调幅或不必要调幅。预应力框架外荷载弹性弯矩没有调幅时,必须与弹性初始次弯矩进行组合。采用“反调法”时,需要综合评价并注意次弯矩的分布和所起的作用。

2) 预应力框架顶层边柱柱顶设置弯矩调幅需要的塑性铰是可行的,往往可以改进结构设计。

3) 次弯矩在预应力框架弯矩调幅设计中起着重要作用。框架弯矩调幅考虑次弯矩影响的总调幅量,当次弯矩全部起有利作用时不超过;当等效荷载次弯矩起有利作用而轴力次弯矩起不利作用时控制在之间;当等效荷载次弯矩起不利作用时或等效荷载次弯矩和轴力次弯矩都起不利作用时控制在之间。

参考文献:

- [1] CECS 51:93,钢筋混凝土连续梁和框架考虑内力重分布设计规程[S].
- [2] GB50010-2002,中华人民共和国行业标准.混凝土结构设计规范[S].
- [3] 徐诗童,黄音,陈明政,等.“梁强于柱”、“等强梁柱”单层单跨框架实验研究[J].重庆建筑大学学报,2005,27(2):41-45.
- [4] 中国建筑科学研究院主编.混凝土结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [5] 赵博.两跨非对称加载预应力混凝土框架的试验研究[D].重庆大学,2004.
- [6] 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].重庆大学,2002.
- [7] 屈凯峰.竖向及水平荷载作用下后张预应力框架的试验研究[D].重庆大学,2002.
- [8] 潘峰.轴压比对两跨预应力框架影响的试验研究[D].重庆大学,2004.
- [9] 简斌.对后张有粘结部分预应力混凝土连续梁次内力及内力重分布规律的试验及研究[D].重庆大学,1998.
- [10] 简斌,孙新敏,王正霖.后张有粘结预应力混凝土框架弯矩调幅的实验[J].重庆大学学报,2004,27(4):107-110.