

文章编号:1006-7329(2000)03-0064-05

# 钢筋混凝土框架“强柱弱梁”及 轴压比限值的概率分析

TU375.401

14

64-68

袁贤讯, 易伟建

(湖南大学 土木系, 湖南 410082)

**摘要:**从可靠度校准的角度分析了现行建筑抗震设计规范“强柱弱梁”和轴压比限值的概率意义。结合框架和节点试验结果,表明现行规范规定的柱梁弯矩比并不能有效地防止柱铰机构的形成;不同抗震等级框架的轴压比限值的失效概率相差较大。本文认为,在保证相同的延性失效概率的前提下,可以通过提高柱梁抗弯强度比来放宽规范轴压比的限制。最后,探讨了进一步研究的思路和方法。

**关键词:**轴压比;强柱弱梁;可靠度校准;钢筋混凝土框架

**中图分类号:**TU375.4

**文献标识码:**A

现行建筑抗震设计规范(GBJ11-89)(以下简称“规范”)的基本思想是三水准设防,二阶段设计,以达到“小震不坏,大震不倒”的抗震设防目标。“小震不坏”要求结构在众值烈度地震作用下处于弹性工作状态,规范通过小震作用下的承载能力验算来保证,其目标可靠指标,延性破坏为1.5<sup>[1]</sup>。“大震不倒”,即结构在罕遇烈度地震作用下结构尽管屈服但仍处于稳定状态,以确保人员免受伤亡,这就要求结构具有良好的变形性能和足够的耗能能力,规范通过概念设计、抗震构造以及大震作用下的弹塑性变形验算等手段来加以保证,规范弹塑性变形的目标可靠指标为2.3<sup>[1]</sup>。

框架柱轴压比是影响其变形性能和破坏形态的主要因素之一。轴压比越大,框架柱延性越小。因此,规范对框架柱的轴压比作了较为严格的限制。但是,过严的轴压比限制在实际结构设计中会带来一些问题。首先,由于轴压比限制,柱截面尺寸将加大,结果容易形成短柱(尤其是高层建筑的底层柱),柱延性进一步恶化,而规范对短柱的轴压比要求更严。再者,在实际工程中,由于轴压比的限制,框架柱按计算所得的纵向钢筋配筋率很低,往往是构造配筋,造成不合理现象。此外,柱截面的一味加大亦将加大地震作用。

那么,柱轴压比限制是否可以放宽?设计人员宥于规范,而规范又没有加以引导。尽管规范条文说明谓“预计不可能进入屈服的柱”可不要求柱在大偏压下破坏。但是,什么是“预计不可能进入屈服的柱”?符合“强柱弱梁”要求的柱是不是就不会屈服?另外,规范轴压比限值是根据对称配筋柱大小偏压分界状态的轴压比并考虑了国内外工程实践经验而制定的,那么,满足规范轴压比限值的框架柱以大偏压形式破坏的概率有多大?弄清以上这些问题,对于理解规范,灵活运用规范是大有裨益的。

本文从可靠度分析的角度分析了“强柱弱梁”及规范轴压比限值的概率意义,结合实际震害规律及试验现象,讨论了放宽轴压比限值的可能性,最后探讨了进一步研究的思路和方法。

## 1 “强柱弱梁”与框架破坏机构

历次震害分析表明,柱铰机构的形成是导致框架结构整体失稳甚至倒塌的主要原因。因此规范

• 收稿日期:1999-10-15

基金项目:国家教委高校博士点专项基金资助项目(98053207)

作者简介:袁贤讯(1976-),男,江西泰和人,硕士生,主要从事建筑结构工程研究

要求钢筋混凝土框架结构应该设计成梁铰机构,尽量避免柱铰机构尤其是层间侧移机构的形成。其具体实现办法即“强柱弱梁”的设计准则,即在梁柱节点处柱梁弯矩比应符合以下规定:

一级框架:

$$\Sigma M_c = 1.1 \Sigma M_{bu} \quad (1)$$

或

$$\Sigma M_c = 1.1 \lambda_y \Sigma M_b \quad (2)$$

二级框架:

$$\Sigma M_c = 1.1 \Sigma M_b \quad (3)$$

式中各符号意义见文献[2]。按照文献[3]的分析,实际工程中对一级框架,可近似地按(4)式计算。

$$\Sigma M_c = 1.35 \Sigma M_b \quad (4)$$

文献[1]校准了规范 TJ11-78 中的抗震承载力验算公式的可靠度,但对于象上式那样作用效应经过调整后其可靠指标有多大的问题却没有得到解决。下面就从可靠度校准的角度分析按现行规范设计的框架柱在设计基准期内众值烈度地震作用下形成塑性铰的概率。

抗震承载力验算基本公式为:

$$R^d / Y_{RE} \leq S^d \quad (5)$$

式中  $R^d$ ,  $S^d$  分别为抗力及作用效应的设计值,即“验算点”(Checking Point),  $Y_{RE}$  为地震抗力调整系数。从可靠度校准的角度,可取  $R^d = Y_{RE} S^d$ ,再取常见的地震作用组合,即

$$R^d = Y_{RE} (Y_G S_{GEX} + Y_{EA} S_{EHA}) \quad (6)$$

构造功能函数:

$$Z = R - S_{GE} - S_{EA} \quad (7)$$

随机变量  $R$ ,  $S_{GE}$  及  $S_{EA}$  分别为构件的抗力、重力荷载代表值产生的作用效应及水平地震作用效应。文献[4]指出抗力  $R$  服从对数正态分布,恒载服从正态分布,楼面活载服从极值 I 型。文献[5]的分析表明,地震作用在众值烈度下服从极值 I 型。根据可靠性基本理论,当失效概率大于  $10^{-3}$  时,可靠指标  $\beta$  对变量概率分布类型不敏感。因此假设以上三个变量相互独立且均服从正态分布,对于可靠指标在 2.0 左右的构件地震可靠度分析是合理的。于是有:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_{S_{GE}} - \mu_{S_{EA}}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_{GE}}^2 + \sigma_{S_{EA}}^2}} \quad (8)$$

式中:  $\mu_R = \alpha_R R_k = \alpha_R Y_{RE} R^d$  为抗力的平均值;

$\mu_{S_{GE}} = \alpha_{GE} S_{GEk}$  为重力荷载代表值产生的作用效应的平均值;

$\mu_{S_{EA}} = \alpha_{EA} S_{EHA}$  为水平地震作用效应的平均值。

$\sigma_R$ ,  $\sigma_{S_{GE}}$ ,  $\sigma_{S_{EA}}$  分别为它们的标准差,可用各自的变异系数与其均值相乘得到。用表 1、2 给出的统计参数 [4,5,6],本文分析了框架梁、柱在众值烈度下承载能力的可靠度。应当注意,按式(8)计算的可靠指标与地震作用效应和重力荷载代表值作用效应的比值有关。随着  $\rho = S_{EHA} / S_{GEk}$  的增大,可靠指标  $\beta$  减小。本文取常见  $\rho = 0.25 \sim 3.0$  进行分析,取其平均值,结果见表 3。

表 1 构件的抗力统计参数

受力状态	$Y_{RE}$	$\gamma_R$	$\chi_R = \mu_R / R_k$	$\delta_R$
受弯	0.75	1.100	1.13	0.10
大偏压	0.80	1.136	1.16	0.13

从表 3 发现,满足规范“强柱弱梁”设计要求的框架柱进入屈服形成塑性铰的概率在不同的抗震等级间具有较大差别。尽管机构失效的概率需结构体系水平的可靠性分析,但从框架梁、柱间失效概率的对比我们可以间接地发现,“强柱弱梁”对保证梁铰机构的实现概率在不同抗震等级间相差较大。

表2 作用效应的统计参数

荷载类型	恒 载	地震作用	重力荷载代表值 <sup>[注]</sup>
$\gamma_s$	1.2	1.3	1.2
$x_s = \mu_s / S_k$	1.06	1.06	0.90
$\delta_s = 0.07$	0.07	0.30	0.10

注:重力荷载代表值等于恒载标准值加50~80%的活载,活载又分为持久性和临时性荷载。对于办公楼和住宅,上表取三者比例为8:1:1。

表3 按现行抗震规范设计构件的抗震可靠度

构 件	框架梁	柱 脚				
		一 级 框架柱	二 级 框架柱	三、四级 框架柱	一 级	二 级
可靠指标	1.44	2.64	1.86	1.60	3.02	2.36
失效概率	0.075	0.004 1	10.031	0.055	0.001 3	0.009 1

还应注意,规范的柱梁弯矩比只考虑了梁筋超配和梁纵筋的超强以及强化。而实际上,除以上因素外,实际框架结构的楼板参与工作,高阶振型的影响,以及柱双向受力等因素都将减小实际的柱梁弯矩比,从而使表3中柱子的失效概率提高。按规范“强柱弱梁”设计的框架在试验中仍可发现柱铰的形成可以证明这一点<sup>[7-9]</sup>。由此看来,所谓控制框架失效机构的设计思想对于以上这种纯粹用调整柱梁弯矩比来实现的办法是不现实的。正是基于这种认识,规范对柱延性仍然采取了较为谨慎的延性构造措施,轴压比限值即是为保证框架柱延性的一项构造措施。下面分析满足规范轴压比限值的框架柱以大偏压破坏的概率。

## 2 规范轴压比限值的概率意义

规范轴压比限值是通过对称配筋柱大小偏压分界状态的轴压比并考虑了国内外工程实践经验而制定的。设 $\rho_N$ 表示规范轴压比限值,即 $N^d / f_c^d b h \leq \rho_N$ ,取 $N_d = \rho_N f_c^d b h$ 。那么有 $\mu_N = \frac{x_N \rho_N}{x_f \gamma_f \gamma_N} \mu_f b h$ ,构造功能函数:

$$Z = \xi_b - N / f_{cm} b h_0 \quad (9)$$

$Z > 0$ 表示框架柱的破坏形态将是小偏压形式,否则其破坏形态将是小偏压方式。式中随机变量 $\xi_b = \frac{0.8}{1 + \epsilon_y / \epsilon_{cu}}$ 为对称配筋柱的界限相对受压区高度,取 $\xi_b = \frac{0.8}{1 + \mu_{\epsilon_y} / \mu_{\epsilon_{cu}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{\mu_f / E_s}{\mu_{\epsilon_{cu}}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{405 / 210\,000}{0.003\,3}}$   
 $= 0.505$ (Ⅱ级钢筋), $\delta_{\xi_b} = 0.1$ 。又由于 $f_{cm} = 1.1 f_c$ , $h \approx 1.1 h_0$ ,上述功能函数可以改写为:

$$Z = \xi_b - N / f_c b h \quad (10)$$

假设随机变量 $\xi_b, N, f_c$ 均为相互独立的正态变量。那么根据可靠性基本理论,由误差传递公式,可得:

$$\beta_{\xi} = \frac{\mu_{\xi_b} - \mu_N / \mu_f b h}{\sqrt{\sigma_{\xi_b}^2 + \left(\frac{\sigma_N}{\mu_f b h}\right)^2 + \left(\frac{\mu_N \sigma_{f_c}}{\mu_f^2 b h}\right)^2}} = \frac{\mu_{\xi_b} - x_N \rho_N / x_f \gamma_f \gamma_N}{\sqrt{\sigma_{\xi_b}^2 + (x_N \rho_N / x_f \gamma_f \gamma_N)^2 (\delta_N^2 + \delta_f^2)}} \quad (11)$$

式中 $\gamma_f, \gamma_N$ 分别为材料分项系数和作用效应分项系数,取1.35和1.2; $x_f, x_N$ 分别为材料和效应的均值与标准值之比,取1.33和1.06; $\delta_f, \delta_N$ 分别为材料和效应的变异系数,取0.17和0.1。由此可得满足规范轴压比限值的框架柱以大偏压破坏的概率见表4,可见不同抗震等级的框架柱以大偏压破坏的概率相差较大。

表4 轴压比的概率意义

	一 级	二 级	三 级
轴 压 比	0.7	0.8	0.9
可靠指标	1.98	1.26	0.65
以大偏压方式破坏的概率	0.976	0.896	0.742
$P(C)$	0.004	0.028	0.041

实际建筑结构中的框架柱,其加载途径可以模型化为两个折线段(如图1示)。首先是竖向荷载作用在柱中产生轴力,弯矩很小(OA段);其后在水平荷载作用(风、水平地震)下,框架柱承受弯矩作用,轴力变化很小(AB段)。按照这个模型化加载途径,若以A表示事件“框架柱达到其抗弯承载力”,以B表示事件“框架柱的轴压比小于界限相对受压区高度”,以C表示事件“框架柱以大偏压方式形成塑性铰”,那么,显然有 $C=A \cap B$ 。对于钢筋混凝土偏压柱,其抗弯承载能力与其所受轴向力有关,亦即与轴压比水平有关,因此事件A、B之间应是相关的。应该特别指出的是,上节关于框架柱承载力的可靠度分析是从规范可靠度校准的角度来讨论的,并没有直接从柱子的承载能力的 $N \sim M$ 相关性来讨论,亦即上节对框架柱的可靠度分析实质上是在轴向力假定不变前提下的一个条件抗弯可靠度分析。 $P(C) = P(AB) = P(A|B)P(B)$ 。根据以上分析,表3所给出的失效概率就是 $P(A|B)$ ,表4中“以大偏压方式破坏的概率”就是 $P(B)$ ,从而 $P(C)$ 易得。由表4我们可以发现,三、四级框架破坏的概率比一、二级框架相差许多。此外,不同抗震等级框架间的这种可靠性差别是否合适仍值得进一步探讨。

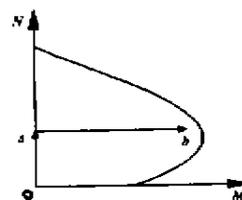


图1 框架柱模型化加载路径

我们认为,“强柱弱梁”更准确地应理解为规范通过规定柱梁间弯矩比来控制框架各构件形成塑性铰的先后次序,进而控制各构件之间延性要求的差异。而轴压比限值的不同又间接地反映了框架柱延性能力的差异。因此,若固定框架柱以大偏压方式形成塑性铰的概率,即维持 $P(C)$ 恒定,那么,从理论上而言,可以通过调整柱梁弯矩比来调节轴压比的限值。

### 3 放宽轴压比限制的途径与措施

本质上讲,规范轴压比限值的根本目的在于保证柱具有一定的延性。以上对轴压比的讨论是基于二值逻辑的,即若轴压比小于界限相对受压区高度,则认为柱子的破坏形态是延性的,否则就是脆性的,至于不同轴压比下的大偏压破坏的延性差异并没有考虑。因此以上结论只是初步性的。

如前所述,人为调整柱梁弯矩比来控制框架失效机构的设计思想并不有效,因此规范又对框架柱的延性采取了谨慎的保证措施。本文认为,要根本上解决轴压比限值给设计带来的矛盾,须从整体结构的延性要求及延性能力两方面着手,实现延性的定量化设计。具体地须从以下几个方面进行研究。

1) 柱的延性要求要从整个结构的失效破坏机构着手,研究不同破坏机构的可能性(即失效概率)以及不同破坏机构对各构件延性的要求。对于这个问题的研究,须全面综合考虑影响结构失效模式的各种因素。

2) 影响柱子延性的因素除轴压比之外,尚有箍筋的形式及数量、纵向钢筋配筋率、柱剪跨比以及材料强度及变形性能等。细致分析各种影响因素的重要程度,可以从延性能力上提供一种放宽轴压比限制的可能性和途径。

3) 结合延性能力和延性要求两方面的研究成果,以“大震不倒”为设计目标,在基于结构延性或结构耗能的抗震设计方法的框架中调整轴压比限值。

## 4 结 论

1) 不同抗震等级的框架柱失效概率相差较大。按“强柱弱梁”设计思想,柱梁间失效概率的差异间接地反映了柱、梁形成塑性铰的顺序。但已有的试验与分析表明,规范提供的柱梁弯矩比并不能保证柱子不出现塑性铰。

2) 限制轴压比是为了保证框架柱在大偏压状态下破坏以满足延性要求,不同抗震等级的框架以大偏压方式破坏的概率相差较大。从“大震不倒”的角度来看,有可能通过调整柱梁弯矩比来调整轴压比限值。

3) 建议从结构体系可靠度及结构失效模式的角度分析柱子的延性要求,同时综合考虑影响柱延性能力的各种因素的重要程度,二者结合起来,才有可能对现行规范轴压比限值的松严作出理性的判断。

## 参考文献:

- [1] 高小旺,等. 现行抗震规范可靠度水平的校准[J]. 土木工程学报, 1987, 20(2)
- [2] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(S)(GBJ11-89)
- [3] 陈富生. 《建筑结构设计新规范综合应用手册》[J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [4] 中华人民共和国国家标准. 建筑结构设计统一标准(S)(GBJ68-84)
- [5] 高小旺, 鲍霭斌. 地震作用的概率模型及其统计参数[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1)
- [6] 欧进萍, 等. 结构随机地震作用及其统计参数[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994, 27(5)
- [7] 徐云鼎, 等. 低周反复荷载下两跨三层钢筋混凝土框架受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1986, 7(2)
- [8] 印文铎, 等. 两层钢筋混凝土框架结构拟动力地震反应试验研究[J]. 土木工程学报, 1990, 23(3)
- [9] 朱伯龙, 陈裕周. 双向低周反复荷载作用下钢筋混凝土梁—柱边节点的性能[J]. 第二届地震工程会议论文集(第一卷), 武汉, 1987

## Probability Analysis on "Strong Beam and Weak Beam" and Axial Compression Ratio in RC Frame

YUAN Xian-xun, YI Wei-jian

(Civil Engineering College, Hunan University, 410082, China)

**Abstract:** In the view of reliability calibration, this paper analyzes the probabilistic sense of the provisions of "Strong Column and Weak Beam" and axial compression ratio in aseismic criteria (GBJ 11-89), which demonstrates that there is much difference between different aseismic ranks of RC frame. The authors suggest that it is possible to make axial compression ratio larger by adjusting the moment capacity ratio between column and beam. Finally, the direction and method of further studies are proposed.

**Keywords:** axial compression ratio; strong column and weak beam; reliability calibration; RC frame