

文章编号:1006-7329(2003)03-0030-06

## 抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的功能和取值\*

余瑜, 谭周玲, 傅剑平, 白绍良

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**钢筋混凝土抗震框架梁的端部是保证结构抗震延性和塑性耗能能力的关键部位。本文以梁端截面的开裂弯矩与屈服弯矩的关系为基础,分析了梁端正、负弯矩受拉钢筋最小配筋率在保证框架抗震性能中的作用。通过与有关国家规范最小配筋率相应规定的对比,对我国修订后规范抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的取值方案进行了分析评价,并给出了进一步改进的建议。

**关键词:**钢筋混凝土; 框架; 抗震性能; 构造措施; 最小配筋率

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

## Function and Limiting Value of Minimum Ratio of Reinforcement for Tension Reinforcement in Seismic Frame Beams

YU Yu, TAN Zhou - ling, FU Jian - ping, BAI Shao - liang

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

**Abstract:** The ends of reinforced concrete beam in seismic frame are critical positions that ensure ductility and plastic energy dissipation capability of the structure. Based on the relation between cracking moment and yield moment of beam end section, the functions of minimum ratios of reinforcement for tension reinforcement of the beam end in positive and negative moment areas in ensuring seismic behavior of the structure are studied in this paper. Through comparing these ratios with those used in other countries, the scheme for the limiting value of the minimum ratio of reinforcement, adopted in revised design code of China, is evaluated and some suggestions are put forward.

**Keywords:** reinforced concrete; frame; seismic behavior, structural measures; minimum ratio of reinforcement

1999年我国部分专家提出了“应大幅度提高我国建筑结构可靠度”的建议,其中证明我国可靠度过低的主要论据之一是我国钢筋混凝土结构构件的纵筋最小配筋率与国外规范相比取值过低。为了查明我国《混凝土结构设计规范》GBJ10-89的纵筋最小配筋率取值与国外规范相比处于什么水准以及所需要的合理取值水准,本文作者受该规范修订组委托,对受拉和受压纵筋最小配筋率的功能作了进一步研究,对各国规范有关规定作了较细致的对比分析。这项研究中有关非抗震结构梁类构件受拉钢筋最小配筋率的分析研究结果已在另文中发表<sup>[1]</sup>。本文将着重说明抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的功能,介绍各国规范有关规定的对比结果,对修订后规范的取值方案进行评价,并提出进一步改进建议。

\* 收稿日期:2003-02-28

作者简介:余瑜(1975-),女,重庆涪陵人,讲师,硕士生,主要从事钢筋混凝土结构研究。

## 1 抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的作用

如图1所示,抗震框架各跨梁端在重力荷载下一般受负弯矩作用;而左、右交替的水平地震作

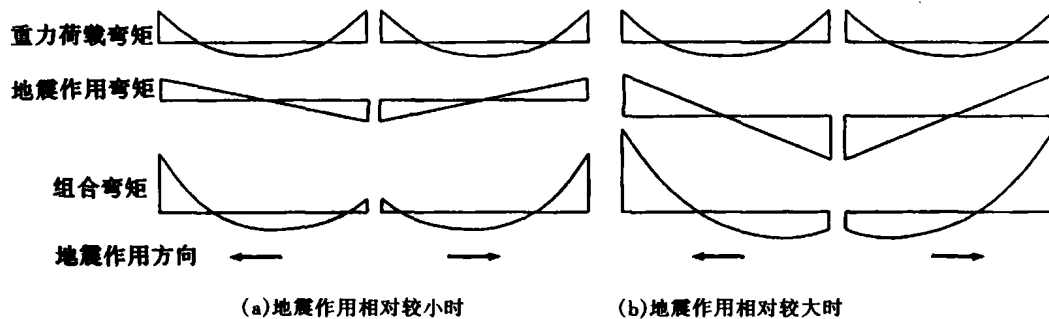
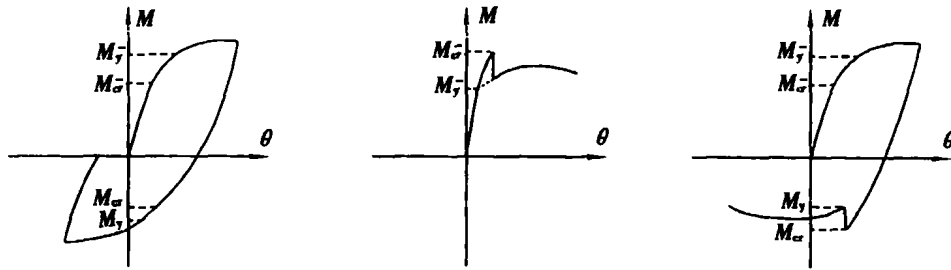


图1 常遇地震作用相对较小和相对较大时梁端交替作用的组合弯矩

用所引起的通常为线性变化的正、负三角形弯矩图,其反弯点在跨度中间部分。根据水平地震作用的大小,梁端组合弯矩可能出现两类不同的交替变化特征。若水平地震作用相对较小(如6度或7度设防地区,见图1a),在向左及向右地震作用交替出现时,每侧梁端将形成从较大负弯矩到较小负弯矩交替变化的格局。若水平地震作用相对较大(如8度或9度设防地区,见图1b),则每侧梁端将形成较大负弯矩和一定大小的正弯矩交替出现的格局。在后一种情况下,虽然正弯矩值总小于负弯矩绝对值,但随着地震作用的增大(例如从8度区到9度区),正弯矩值与负弯矩绝对值的比值将相应增大。

梁端负弯矩受拉钢筋(上部纵筋)和正弯矩受拉钢筋(有正弯矩作用时的下部纵筋)是根据常遇地震下的相应组合弯矩由抗震受弯承载力计算公式确定的。一旦有再大的设防烈度地震或更大的罕遇地震作用,则所引起的更大梁端负曲率通常都能使上部梁筋进入屈服后变形状态。而对于下部梁筋,则可能出现两种不同情况。当常遇地震作用下未形成组合正弯矩时,更大的地震作用将使组合弯矩变为正值。如果这时梁下部纵筋配置数量不是过少,则下部纵筋常可能不致进入屈服后状态;这在6度和7度设防地区的框架中是常见的。但在8度或9度设防地区,因常遇地震下已经形成了一定大小的正弯矩,故当更大地震作用时,下部梁筋通常也将进入正弯矩作用下的屈服后变形状态。根据抗震基本要求,当梁端在负弯矩或正弯矩作用下进入屈服后变形状态之后,都应保持其相应的对负弯矩或正弯矩的基本抗弯能力直到罕遇地震所引起的结构非弹性变形状态,或者说具有罕遇地震所需要的延性;同时,还应能通过其非弹性滞回性能耗散地震输入的能量,减小强震下的结构非弹性反应。

但为了保证梁端具有上述抗震性能,还有一个必须满足的条件,即上部纵筋和下部纵筋的数量都必须使由实际配筋算得的抗负弯矩能力 $|M_{\text{u}}^-|$ 和抗正弯矩能力 $M_{\text{u}}^+$ 分别大于相应方向的截面开裂弯矩 $|M_{\text{c}}^-|$ 和 $M_{\text{c}}^+$ ,即应满足 $|M_{\text{u}}^-| \geq |M_{\text{c}}^-|$ 和 $M_{\text{u}}^+ \geq M_{\text{c}}^+$ 的基本要求。因为只有这样,当截面首次受到较大的组合负弯矩或组合正弯矩作用时,才能如图2a所示,先开裂,后屈服,并保证形成屈服后符合抗震要求的滞回性能。但是在工程中有可能出于某些原因而选用了过大的梁截面,使常遇地震下的组合弯矩小于截面在相应弯矩作用方向的开裂弯矩。这时,截面在该方向常遇地震组合弯矩作用下一般将不会开裂,但若钢筋数量仍按常遇地震组合弯矩确定,则一旦出现更大地震,使组合弯矩超过了截面开裂弯矩,并导致截面受拉区开裂,则由于开裂前原来由受拉区混凝土承受的拉力转由数量不足的受拉钢筋承担,钢筋将立即进入屈服后变形状态,且形成较大的塑性应变,在最不利情况下甚至被拉断。在图2b中给出了当上部钢筋配筋率偏低,即 $|M_{\text{c}}^-| > |M_{\text{u}}^-|$ 时,截面开裂前后的梁端弯矩-转角曲线。在图2c中则给出了当上部钢筋数量足够,但下部钢筋配筋率过低时的类似不利情况。从中可以清楚看出,开裂后截面抗弯能力的陡降以及随后的塑性变形迅速发



(a) 当  $|M_y^-| > |M_σ^-|$  且  $|M_y^+| > |M_σ^+|$  时      (b) 当  $|M_y^-| < |M_σ^-|$       (c) 当  $|M_y^-| > |M_σ^-|$  但  $M_y^+ < M_σ^+$  时

图2 梁端上、下纵筋配筋率不同情况下的  $M-\theta$  曲线

育和甚至有可能导致的截面失效。鉴于一旦出现这种情况,梁端将在相应方向丧失受弯承载力,无法保证结构在后续动力反应过程中的延性和塑性耗能能力,因此,在抗震设计中应着力防止发生这种情况。具体办法是对正、负弯矩受拉钢筋规定适度的最小配筋率,以使由受拉钢筋形成的截面抗弯能力大于该弯矩作用方向的截面开裂弯矩;或者更准确地说,是保证以较高的概率实现  $M_{\text{max}}^+ > M_{\text{cr}}^+$  和  $|M_{\text{max}}^-| > |M_{\text{cr}}^-|$ 。这一基本要求也可以概括写成沿每个弯矩作用方向均应使下列事件以足够高的概率发生:

$$A_f z > \gamma f_i W_0 \tag{1}$$

其中  $z$  为开裂后截面在承载力极限状态下的内力臂;  $W_0$  为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩;  $\gamma$  为截面抵抗矩的塑性影响系数,其取值详见修订后规范<sup>[2]</sup>的式(8.2.4)。在考虑混凝土和钢筋强度的离散性后,上述基本要求也可以体现为使钢筋强度  $f_y$  足够低时的  $A_f z$  仍大于混凝土强度  $f_i$  足够高时的  $\gamma f_i W_0$ 。

从以上叙述可以看出,式(1)所示的确定抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的基本思路与目前多数国家采用的确定非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率的准则是类似的(参见文献[1])。其区别在于,为了使抗震框架具备必要的延性性能,其最小配筋率的取值应比非抗震情况明显偏严,目的是使式(1)的情况以更高的概率出现。

除此之外还应指出,若梁端在负弯矩作用方向已满足  $|M_{\text{max}}^-| > |M_{\text{cr}}^-|$  的基本要求,即图3 I-I 截面中上部梁筋的受拉屈服已经会发生在截面上部受拉区开裂之后,但若  $|M_{\text{max}}^-|$  超出  $|M_{\text{cr}}^-|$  的幅度不大,则因梁端范围内负弯矩变化梯度较大(见图1),即使当梁端 I-I 截面在受力最充分时由于钢筋进入强化而使截面抗弯能力达到了  $|M_y^-| + |\Delta M^-|$  (见图3),但在预计将出现第二条弯曲裂缝的 II-II 截面处,对应的作用弯矩  $M_2$  仍未能超过截面开裂弯矩,因此在该截面处就不会出现第二条裂缝。这将使梁端负弯矩塑性铰区在强震过程中始终只有唯一的一条弯曲裂缝,并使全部负弯矩方向的塑性变形集中发生在 I-I 截面附近很短的一段受拉钢筋上,使其塑性应变过大,甚至被拉断。这一现象已为多次试验所证实。一旦出现这种现象,将使梁端无法充分发挥其延性和塑性耗能能力。要防止出现这一情况,就需要将梁端上部钢筋的最小配筋率取得比式(1)的基本要求更高,以便在  $|M_{\text{max}}^-|$  和  $|M_{\text{cr}}^-|$  之间拉开足够的差距,使负弯矩塑性铰区能形成两条或两条以上的负弯矩裂缝,梁端负弯矩塑性变形能分布在一个足够大的塑性铰区长度上。已经完成的非线性动力反应分析结果表明<sup>[3]</sup>,在8度和9度区的设防烈度地震作用下,梁端就已将普遍出现负弯矩塑性铰,罕遇地震下负弯矩方向的塑性转动更大,因此应以上

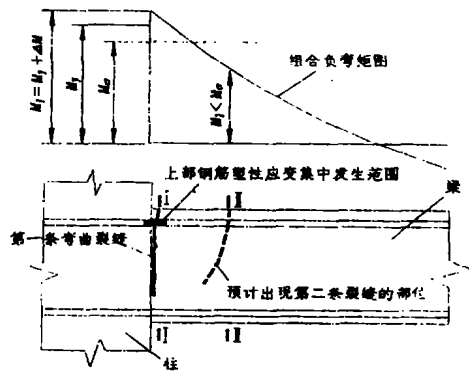


图3 梁端负弯矩受拉钢筋数量较少时可能形成的不利受力状态 (梁箍筋及柱配筋未画出)

述更严格的要求来确定上部纵筋的最小配筋率。但在6度或7度区的设防烈度地震作用下,负弯矩塑性铰一般只在个别梁端出现,只有在罕遇地震作用下,梁端负弯矩塑性铰方才较普遍出现,故其上部梁筋最小配筋率可在8度、9度区取值的基础上适度放松。

由于如图1所示,梁端正弯矩的变化梯度不大,故在正弯矩作用方向不会形成上述可能只出现一条弯曲裂缝的不利局面。因此,即使是在8度或9度地区,梁端下部受拉纵筋的最小配筋率仍可按式(1)的基本要求确定,而不必进一步增大。

## 2 各国规范抗震框架梁受拉钢筋的最小配筋率取值

### (1) 美国规范和新西兰规范

美国 ACI318-02 规范<sup>[4]</sup>和 新西兰 NZS3101(95) 规范<sup>[5]</sup>均规定,抗震框架梁任意截面上部和下部钢筋(不论该结构所在地区的地震作用取值高低)的最小配筋率(用公制表示)均取为:

$$\rho_{\min} = \sqrt{f_c} / (4f_{yk}) \quad (2)$$

其中,  $f_c$  为圆柱体抗压强度的规范取值,其统计含义根据 ACI318-02 第 5.3.2.1 条的规定为统计平均值减去 1.34 倍标准差。为了便于对比,需换算成我国的混凝土强度等级,具体换算方法见文献[1];  $f_{yk}$  为钢筋抗拉强度标准值;式中最小配筋率的定义均为  $\rho_{\min} = A_{s, \min} / b_w h_0$ , 其中  $b_w$  为梁肋宽度。美国规范还规定,最小配筋率尚不应小于  $1.38 / f_{yk}$  (已换算成公制),新西兰规范则无比规定。

### (2) 加拿大规范

加拿大 CSA-A23.3-94 规范<sup>[6]</sup>规定,抗震框架内任意截面的上部和下部钢筋的最小配筋率(不论该结构所在地区的地震作用取值高低)均取为:

$$\rho_{\min} = 1.4 / f_{yk} \quad (3)$$

其中最小配筋率按  $\rho_{\min} = A_s / b_w h_0$  确定。

### (3) 欧共体抗震规范

欧共体建筑结构抗震设计试行标准 EC8<sup>[7]</sup>规定,沿梁的各个截面中受拉钢筋的最小配筋率均取为:

$$\rho_{\min} = 0.5 f_{tm} / f_{yk} \quad (4)$$

其中  $f_{tm}$  为混凝土抗拉强度平均值,取值相当于  $f_{tm} = 0.30(0.8 f_{ck})^{2/3}$ 。折算成我国混凝土强度等级的  $f_{tm}$  详见文献[1]。

### (4) 日本规范

日本《建筑法规》实施细则中多年来一直取抗震框架梁正、负弯矩各控制截面受拉钢筋的最小配筋率为:

$$\rho_{\min} = 0.04 \quad (5)$$

### (5) 我国规范修订前后的规定

我国修订前 GBJ10-89 规范的抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率取值如表 1 所示。

表 1 我国 GBJ10-89 规范抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率取值

抗震等级	梁支座	梁跨中
一级	0.004	0.003
二级	0.003	0.0025
三、四级	0.0025	0.002

修订后的我国规范因非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率适度提高了取值水准,且采用了特征值表达式与定值下限相结合的取值方法,即取  $\rho_{\min} = 0.45 f_t / f_y \geq 0.02$ , 因此,抗震最小配筋率在保持原规范的取值作为定值下限的前提下,也增加了相应的特征值表达式,这意味着混凝土强度等

级较高时进一步增大了最小配筋率取值,具体见表 2。

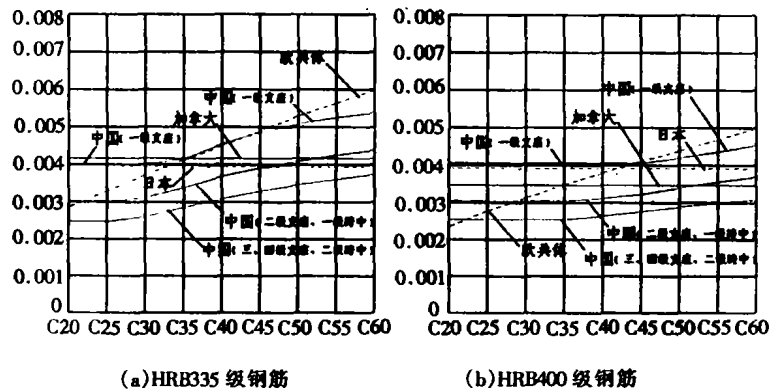
表 2 我国修订后规范 GB50010-2002 抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率

抗震等级	梁支座	梁跨中
一级	0.004 和 $0.8f_i/f_y$ 中的较大值	0.003 和 $0.65f_i/f_y$ 中的较大值
二级	0.003 和 $0.65f_i/f_y$ 中的较大值	0.002 5 和 $0.55f_i/f_y$ 中的较大值
三、四级	0.002 5 和 $0.55f_i/f_y$ 中的较大值	0.002 和 $0.45f_i/f_y$ 中的较大值

### 3 各国规范取值的对比分析和对我国更合理取值的建议

在图 4a、b 中分别给出了对应于我国 HRB335 级和 HRB400 级钢筋强度的各国抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率取值的对比,其中各国规范中的  $f_c'$  和  $f_{tm}$  都已折算成与我国混凝土强度等级对应的值(因 HPB235 级钢筋已很少作为抗震结构主筋使用,故不再给出与其对应的对比结果)。

从图 4 的对比结果可以看出,在框架梁常用的混凝土强度等级范围内,例如从 C20 到 C45,各国取值,其中包括我国修订后规范对一级抗震等级支座受拉钢筋的取值,



(a) HRB335 级钢筋

(b) HRB400 级钢筋

图 4 各国抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率对比

应该说总体相差不大,远不如非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值那样相互差别悬殊。而且我国修订后规范一级抗震等级支座取值在各国取值中属偏高者,因此在抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率的取值问题上,至少对一、二级抗震等级而言,已不存在我国取值偏低的问题。

从图 4 还可以看出,总的来说各国规范采用的有两类取值方案。一类取最小配筋率与混凝土无关,其中包括日本、加拿大和我国修订前规范,但加拿大规范取最小配筋率与钢筋强度标准值成反比。另一类则主要使用特征值表达式,其中包括欧共体、美国、新西兰和我国修订后规范。但总的来看,在框架梁常用混凝土强度等级范围内,这两种取值方案的差距并不很大,因此,没有实质性差异。

我国规范与所有其它国家规范的主要差别是我国规范取最小配筋率与抗震等级有关,也可以说与结构所在地区地震作用大小有关,而且支座和跨中(也就是指上部梁筋与下部梁筋)的最小配筋率取值不同;但其它国家对这些情况则全不加区别。本文作者认为,根据本文前面对抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率功能的分析,保持不同抗震等级和上部与下部梁筋最小配筋率取值的一定差别是道理的,但有必要根据抗震性能需要和分析结果对我国修订后规范的具体取值提出以下修改建议。

1) 如果取 HRB335 级钢筋和 C30 混凝土为校准点,并认为当取混凝土抗拉强度为平均值加两倍标准差,而钢筋抗拉强度取设计值就已经能满足混凝土强度取值足够高,而钢筋强度取值足够低的基本要求,也就是以足够高的概率实现式(1)的基本要求,则由式(1)算得的与 HRB35 级钢筋和 C30 混凝土对应的最小配筋率约为 0.003 5。因此,可以认为取  $\rho_{\min} = 0.7f_i/f_y \geq 0.003 5$  已能满足式(1)的基本要求,于是建议以此作为一级抗震等级下部梁筋最小配筋率的取值标准。而一级抗震等级的上部梁筋则可取得比这一标准更高,例如仍取修订后规范的规定  $\rho_{\min} = 0.8f_i/f_y \geq 0.004$ 。

2) 根据已有的结构非弹性动力反应分析结果可知,属于 8 度区的一般框架结构,即按我国二级抗震等级设计的框架结构,其梁端在大震下所达到的非弹性变形状态与 9 度区按一级抗震等级

设计的框架结构没有实质性差别,故建议将二级抗震等级的最小配筋率要求提成与一级抗震等级相同。

3) 已有非弹性动力反应分析结果表明,7度区按三级抗震等级设计的框架结构在设防烈度地震下梁端一般只有个别部位出现负弯矩塑性铰,罕遇地震下负弯矩铰方才普遍出现。另外,在三、四级抗震等级下,当罕遇烈度地震作用时,仍不能避免正弯矩作用下的截面开裂,故下部梁筋的最小配筋率仍不应过低。故本文作者认为,对三、四级抗震等级取用修订后规范二级抗震等级的最小配筋率值可能较为适当。

4) 因负弯矩作用下的框架梁支座截面在有现浇板时实为翼缘位于受拉区的倒T形截面。但为了方便设计,规范所规定的最小配筋率不论是对上部梁筋还是下部梁筋仍是  $\rho_{\min} = A_{s, \min} / b_w h_0$  计算,其中  $b_w$  为梁肋宽度。但同时应对支座两侧现浇板有效宽度内与梁肋平行方向板筋的最小配筋率(包括沿板上、下表面的钢筋)另外作出规定。

以上建议汇总于表3中。

表3 建议用于我国规范的抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率

抗震等级	梁端上部纵筋	梁全长下部纵筋
一、二级	0.004 和 $0.8f_t/f_y$ 中的较大值	0.003 5 和 $0.7f_t/f_y$ 中的较大值
三、四级	0.003 和 $0.65f_t/f_y$ 中的较大值	0.002 5 和 $0.55f_t/f_y$ 中的较大值

注:表中最小配筋率对正、负弯矩作用下的各截面均按  $\rho_{\min} = A_{s, \min} / b_w h_0$  计算,其中  $b_w$  为梁肋宽度。梁支座两侧有效板宽范围内与板平行的上、下板筋对板截面的总配筋率对一、二级抗震等级不宜小于0.004,对三、四级抗震等级不宜小于0.003。

## 参考文献:

- [1] 谭周玲,余瑜,傅剑平,白绍良.非抗震梁受拉钢筋最小配筋率取值分析与建议[J].重庆建筑大学学报.2003, 25(2):37-42.
- [2] GB 50010-2002,混凝土结构设计规范[S].
- [3] 韦锋,杨红,白绍良.对我国不同烈度区钢筋混凝土框架现行抗震规定的初步理论[J].重庆建筑大学学报, 2001,23(6):1-9.
- [4] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)[S]. An ACI Standard, reported by ACI Committee 318, American Concrete Institute.
- [5] New Zealand Standard, NZS3101: Part 1: 1995, Concrete Structures Standard, Part 1 - the Design of Concrete Structures [S].
- [6] CSA A23.3-94, Design of Concrete Structures, Structures (Design)[S]. Canadian Standards Association, 1994.
- [7] European Prestandard, ENV 1998 1-3, Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, European Committee for Standardization[S]. February 1995.