

文章编号: 1673-2049(2011)01-0006-05

混凝土受弯构件受拉钢筋最小配筋率

屈文俊, 方 瑾, 周国全

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 简述了中国不同时期的混凝土设计规范对非抗震情况和抗震情况下受拉钢筋最小配筋率的取值及确定原则, 同时对比分析了各国混凝土设计规范中 2 种情况下混凝土受弯构件受拉钢筋最小配筋率的规定及确定方法; 通过实例对各国规范的最小配筋率取值进行了比较, 建议了最小配筋率的确定原则。结果表明: 各国规范多以“截面开裂后, 构件不致立即失效”为确定最小配筋率的原则, 但对非抗震构件所取的最小配筋率相差较大, 对抗震区最小配筋率的取值, 除中国规范偏低外, 其他国家规范大体相当。

关键词: 钢筋混凝土; 受弯构件; 受拉钢筋; 最小配筋率; 抗震框架梁

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A

Minimum Reinforcement Ratio of Tensile Reinforcement for Concrete Flexural Members

QU Wen-jun, FANG Jin, ZHOU Guo-quan

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Authors simply analyzed the minimum reinforcement ratio and its determination principles under the non-seismic-resistance and seismic-resistance situations, which were referred to the Chinese concrete design codes in different periods. Meanwhile, the values and determinations of the minimum reinforcement ratio of tensile reinforcement for concrete flexural members under two circumstances were comparative analyzed. Limiting values of the minimum reinforcement ratios in different codes were compared through an example, and the method to determine the minimum reinforcement ratios was suggested. The results show that the concrete design codes of different countries described “the member is not failure immediately after cracking” as the principle to determine the minimum reinforcement ratio. There is a big difference on the minimum reinforcement ratio for non-seismic-resistance member in each code, but for seismic-resistance area, the reinforcement ratio is quite similar in each code, except that the reinforcement ratio in Chinese code is lower than the others.

Key words: reinforced concrete; flexural member; tensile reinforcement; minimum reinforcement ratio; seismic frame beam

0 引言

钢筋混凝土受弯构件的最小配筋率取值是一个

比较复杂的问题。目前世界各国钢筋混凝土受弯构件受拉钢筋最小配筋率的取值方法基本上有 2 种: 模型法和经验法。模型法是指截面受拉区混凝土开

裂后,受拉钢筋由于配置过少而立即屈服进入强化阶段,此时的受拉钢筋配筋率即是最小配筋率;经验法是指直接给出最小配筋率的取值,而没有完整的受力模型作为取值准则,但从不同角度考虑了一些因素对最小配筋率取值的影响。对于抗震区,各国规范又给出了相应的最小配筋率,其基本思想与目前多数国家采用的确定非抗震构件受拉钢筋最小配筋率的准则是类似的,区别在于为了使抗震构件具备必要的延性,该取值比非抗震情况偏严。尽管思路是清楚的,但各国规范给出的值相差较大,最小配筋率是否应该考虑裂缝限值对其取值的影响值得讨论。

1 中国规范

1.1 规范的变更

中国混凝土结构设计的最小配筋率建议值基本沿用前苏联 20 世纪五六十年代的规定^[1]。

在 20 世纪 60 年代后期颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》(BJG 21—66)就照搬前苏联规范 HNTY 123-55,其中规定的受拉钢筋截面面积与混凝土计算截面面积比的最小百分率:当混凝土标号为 100~150、200 和 300~400 时,CT.0 和 CT.3 号钢分别为 10%、15% 和 20%;CT.5 和 25ГC 号钢制造的热轧变形钢筋分别为 10%、10% 和 15%。

1974 年颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74)则参照前苏联《预应力混凝土结构设计规范》(CH 10—57),规定的受弯构件最小配筋率:当混凝土标号为 200 及以下时为 10%;当混凝土标号为 250~400 时为 15%。

在《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)中,限于当时的经济条件,最小配筋率没有普遍提高,规定的受弯构件最小配筋率:当混凝土强度等级不大于 C35 时为 15%;当混凝土强度等级为 C40~C60 时为 20%。

现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)^[2]中钢筋混凝土构件最小配筋率建议值的理论基础是依据混凝土开裂时钢筋混凝土构件不立即失效(裂而不断)的原则,并按照一定的可靠度保证加之工程经验,最终建议了最小配筋率。综合考虑中国工程实践经验和经济等多方面影响因素,规定钢筋混凝土结构受弯构件及偏心受拉、轴心受拉构件一侧的受拉钢筋的最小配筋率不应小于 0.2% 和 $0.45f_t/f_y$ (f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; f_y 为钢筋抗拉强度设计值)的较大值,并注明轴心受拉构

件和小偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按构件的全截面面积计算;受弯构件、大偏心受拉构件一侧受拉钢筋的配筋率应按全截面面积扣除受压翼缘面积 $(b'_i - b)h'_i$ (b'_i 为受压区翼缘宽度; b 为腹板宽度; h'_i 为受压区翼缘高度)后的截面面积计算。最小配筋率 0.2% 是延续《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)的取值,带有经验性,最小配筋率 $0.45f_t/f_y$ 则是基于以下模型进行推证的。

确定受弯构件最小配筋率的基本方法是使混凝土截面的开裂弯矩 M_{cr} 等于截面的极限弯矩 M_u ,按单筋矩形截面考虑,根据文献^[3]可得

$$x_{cr} = \left[\left(1 + \frac{2\alpha_E A_s}{bh} \right) / \left(1 + \frac{\alpha_E A_s}{bh} \right) \right] \frac{h}{2} \approx \frac{h}{2}$$

$$M_{cr} = 0.292(1 + 2.5\alpha_A) f_t b h^2$$

式中: $\alpha_A = 2\alpha_E \frac{A_s}{bh}$; x_{cr} 为换算截面受压区高度; α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; A_s 为受拉区纵向非预应力钢筋的截面面积; b 为截面宽度; h 为截面高度。

根据现行 GB 50010—2002 规范可知, $M_u = f_y A_s (h_0 - x/2)$, 令 $M_{cr} = M_u$, 即

$$0.292(1 + 2.5\alpha_A) f_t b h^2 = f_y A_s (h_0 - x/2) \quad (1)$$

式中: h_0 为截面有效高度; x 为混凝土受压区高度。

由于配筋率很小,取 $\alpha_A \approx 0.027$ 。令 $A_s = \rho_{min} b h$, $x = x_{cr} = 0.5h \times 0.8 = 0.4h$, $h_0 = 0.935h$, 整理得纵向受力钢筋的最小配筋率 $\rho_{min} = 0.424 \frac{f_t}{f_y}$ 。

规范规定的最小配筋率是在构件正截面的抗弯能力不应小于该截面开裂弯矩的条件下推导出来的,也就是说,它只是从强度方面的要求考虑,而没有考虑使用功能及其他方面的要求,即该建议值没有考虑最小配筋率与裂缝宽度限值协调的问题。

修订规范时从受力机理角度进一步探讨了纵向钢筋最小配筋率的取值,对比分析了国外规范的相应规定。在确定继续保持最小配筋率取值从非抗震到抗震且随抗震等级逐步提高的前提下,对非抗震结构中受弯、偏心受拉和轴心受拉构件的受拉纵向钢筋最小配筋率改用特征值表达式与下限值相结合的取值方案,使其取值水准适度提高;通过对抗震框架梁受拉纵向钢筋最小配筋率增加特征值表达式,适度提高了其在混凝土强度等级偏高情况下的取值和非抗震受压构件与抗震框架柱纵向钢筋最小配筋率的取值;新增了基础底板最小配筋率的取值规定。

1.2 抗震区钢筋混凝土梁最小配筋率的取值

以抗震框架梁为例分析中国规范对受弯构件受拉钢筋最小配筋率的取值,修订前《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)规定的抗震框架梁受拉钢筋最小配筋率取值如表1所示。

表1 GBJ 10—89 规范抗震框架梁
受拉钢筋最小配筋率取值

Tab.1 Limiting Values of Minimum Reinforcement
Ratios of Tensile Reinforcement for Seismic
Frame Beams in GBJ 10—89 %

抗震等级	梁支座最小配筋率	梁跨中最小配筋率
一级	0.40	0.30
二级	0.30	0.25
三、四级	0.25	0.20

中国现行规范和非抗震设计时一样引入了与混凝土抗拉强度设计值和钢筋抗拉强度设计值相关的特征值参数 f_t/f_y ,并在保持原规范的取值作为定值下限的前提下,按纵向受拉钢筋在梁中的不同位置 and 不同抗震等级,给出了相对于非抗震设计留有不同富裕度的纵向受拉钢筋最小配筋率的取值,如表2所示。

表2 GB 50010—2002 规范抗震框架梁
受拉钢筋最小配筋率取值

Tab.2 Limiting Values of Minimum Reinforcement
Ratios of Tensile Reinforcement for Seismic Frame
Beams in GB 50010—2002

抗震等级	梁支座最小配筋率	梁跨中最小配筋率
一级	0.40%和 0.80 f_t/f_y 的较大值	0.30%和 0.65 f_t/f_y 的较大值
二级	0.30%和 0.65 f_t/f_y 的较大值	0.25%和 0.55 f_t/f_y 的较大值
三、四级	0.25%和 0.55 f_t/f_y 的较大值	0.20%和 0.45 f_t/f_y 的较大值

由此可见,在抗震框架梁中,不论是上部纵筋还是下部纵筋,其最小配筋率一般都应按高于非抗震情况下梁类构件受拉钢筋的最小配筋率取值,抗震等级越高,最小配筋率越大。而提高梁端下部纵筋的数量有助于改善梁端塑性铰区在负弯矩作用下的延性性能,所以 GB 50010—2002 规范根据中国试验结果和设计经验并参考国外规范对梁端下部钢筋的最小配置比例也有规定。

2 国外规范

2.1 美国规范

美国规范对非抗震情况和抗震情况取用相同的

最小配筋率。

根据美国目前普遍采用的美国混凝土协会规范 ACI 318-05^[4]规定,在分析结果要求配置受拉钢筋的每个受弯构件截面中,一般最小配筋面积 $A_{s,min}$ 按下式计算

$$A_{s,min} = \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \geq \frac{200}{f_y} b_w d \quad (2)$$

式中: f'_c 为混凝土抗压强度设计值; b_w 为腹板宽度; d 为从受压边缘到钢筋截面形心之间的距离,即截面有效高度。

对于翼缘受拉的静定构件,最小配筋面积也采用式(2)计算,只是其中的 b_w 应由 $2b_w$ 或翼缘宽度两者中的较小值代替,则最小配筋率 $\rho_{min} = \frac{A_{s,min}}{b_w d} = \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y}$,且 ρ_{min} 不小于 $200/f_y$ 。

美国规范确定最小配筋率的基本原则和中国规范相同,即 $M_{cr} = M_u$,并综合考虑其他影响因素来确定。美国规范中开裂弯矩 M_{cr} 按下式计算

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (3)$$

式中: f_r 为抗折模量,美国规范中规定,对于普通混凝土 $f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$; I_g 为关于重心轴的截面惯性矩; y_t 为毛截面形心轴到钢筋表面的距离,忽略钢筋直径。

2.2 加拿大规范

(1)非抗震构件

加拿大规范 CSA A23.3-04^[5]中规定,非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率由下式确定

$$M_u \geq 1.2M_{cr} \quad (4)$$

对开裂弯矩 M_{cr} 的确定和美国规范相同,则配筋面积 A_s 为

$$A_s = \frac{0.2\sqrt{f'_c}}{f_y} b d \quad (5)$$

式中: b 为构件受压面宽度。

(2)抗震构件

规范 CSA A23.3-04 中规定,抗震框架内任意截面的上部和下部钢筋的最小配筋率(不考虑该结构所在地区的地震作用取值)均取为

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_{yk}} \quad (6)$$

式中: f_{yk} 为钢筋抗拉强度特征值。

2.3 欧洲规范

考虑到避免由于裂缝的形成而影响结构的使用

以及结构耐久性的要求,欧洲规范 CEB-FIP^[6]中提出一个基于试验结果简化的公式来确定考虑裂缝控制的钢筋最小配筋面积 $A_{s,\min}$,即

$$A_{s,\min} = k_c k f_{ct,\max} A_{ct} / \sigma_{s2} \quad (7)$$

式中: A_{ct} 为开裂前混凝土受拉面积; σ_{s2} 为钢筋应力,当锚固充分时,可近似等于 f_{yk} ; $f_{ct,\max}$ 为当裂缝刚出现时,混凝土抗拉强度的上限值; k 为考虑拉区混凝土应力非线性分布的修正系数,对于矩形截面,当截面高度 $h < 0.3$ m 时, $k = 0.8$,当截面高度 $h > 0.8$ m 时, $k = 0.5$; k_c 为按拉应力分布不同形式分类的系数,只受拉力取 1.0,只受弯曲取 0.4,拉弯组合取 0.4~1.0。

Eurocode 2^[7]仍沿用式(7),仅对其中一些系数进行了调整,即

$$A_{s,\min} = k_c k f_{ct,\text{eff}} A_{ct} / \sigma_{s2} \quad (8)$$

式中:当裂缝刚出现时 $f_{ct,\text{eff}} = f_{ctm}$, f_{ctm} 为混凝土轴心抗拉强度平均值,若裂缝在早于 28 d 前开展,则 $f_{ct,\text{eff}}$ 为开裂时混凝土的抗拉强度,小于 f_{ctm} ;对于矩形截面,当 $h < 0.3$ m 时, $k = 1.0$,当 $h > 0.8$ m 时, $k = 0.65$ 。

为了避免构件发生脆性破坏,CEB-FIP 中规定,当钢筋等级为 S220 时,钢筋最小配筋率为 0.25%;当钢筋等级为 S400 和 S500 时,钢筋最小配筋率为 0.15%。

在 Eurocode 2 中,同样为保证构件不发生脆性破坏或过大的裂缝等,最小配筋面积除要满足式(8)以保证裂缝宽度满足要求外,还要求

$$A_{s,\min} = \frac{0.26 f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \quad (9)$$

式中: $A_{s,\min} > 0.001 3 b_t d$ 。

欧洲规范的式(9)应该是从避免发生强度破坏的角度确定的。

(1) 非抗震构件

欧洲规范 Eurocode 2 只适用于非抗震情况,其受弯构件受拉钢筋最小配筋率为

$$\rho_{\min} = \frac{0.6}{f_{yk}} \quad (10)$$

式中: $\rho_{\min} > 0.15\%$ 。

(2) 抗震构件

欧洲建筑结构抗震设计试行标准 Eurocode 8^[8]规定,沿梁的各个截面中受拉钢筋的最小配筋率均取为

$$\rho_{\min} = \frac{0.5 f_{tm}}{f_{yk}} \quad (11)$$

式中: f_{tm} 为混凝土抗拉强度平均值。

2.4 德国规范

德国规范 DIN 1045-1^[9]只适用于非抗震情况,其在第 5.3 条极限状态设计总要求中对延性的规定为:最小配筋率要考虑到避免出现一个构件发生初始裂缝却无任何征兆就破坏的情况,即相当于中国 GB 50010—2002 规范中由强度要求决定的最小配筋率 $\rho_{s,\min}$

$$\rho_{s,\min} = 0.16 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (12)$$

德国规范 DIN 1045-1 由裂缝控制的钢筋最小配筋面积与 CEB-FIP 一致。

2.5 英国规范

英国规范 BS 8110-1:1997^[10]则与欧洲规范均只适用于非抗震情况。

英国规范直接给出了最小配筋率的取值规定,而没有完整的受力模型作为取值准则。英国规范规定受弯构件受拉钢筋最小配筋率 ρ_{\min} 为

$$\rho_{\min} = \frac{0.6}{f_{yk}} \quad (13)$$

3 各国规范的对比

各国规范中梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值存在着 2 种体系:一种是对非抗震及抗震情况取用相同的最小配筋率,如美国 ACI 318-05 和新西兰规范,这 2 个规范中都同时包含有非抗震及抗震条文,由于需要满足抗震情况下对最小配筋率取值更高的要求,故其非抗震最小配筋率取值也很高;另一种是对非抗震及抗震情况分别取用大小不同的最小配筋率,如欧洲规范和抗震设计规范 Eurocode 8 以及中国规范 GBJ 10—89,其中非抗震最小配筋率的取值水准比第 1 种取值体系明显偏低。在不包含抗震条文的英国 BS 8110-1:1997 和德国 DIN 1045-1 规范中,非抗震受拉钢筋最小配筋率的取值总体上也处于这种偏低水准。比较特殊的是加拿大 CSA A23.3-04 规范,该规范对非抗震和抗震最小配筋率取值不同,而且非抗震最小配筋率取值比美国和新西兰规范还大。

下面以混凝土强度等级为 C30、钢筋型号为 HRB335 的矩形截面混凝土梁为例,对比分析各国规范最小配筋率的取值,如图 1 所示,其中,中国 A 为中国规范抗震三、四级跨中;中国 B 为中国规范抗震二级跨中和抗震三、四级支座;中国 C 为中国规范抗震一级跨中和抗震二级支座;中国 D 为中国规范抗震一级支座。

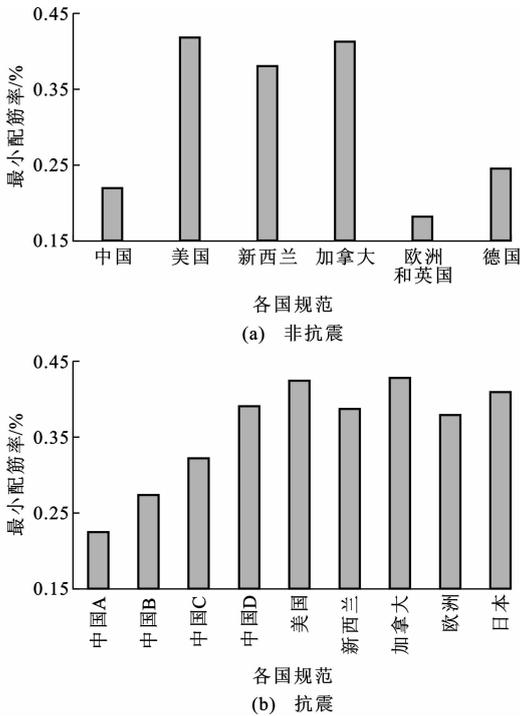


图1 各国规范混凝土梁受拉钢筋
最小配筋率的取值

Fig. 1 Limiting Values of Minimum Reinforcement Ratios of Tensile Reinforcement for Reinforced Concrete Beams Among Codes

以非抗震情况来看,折算成中国规范材料强度后的欧洲和英国规范最小配筋率取值为 $\rho_{\min} = 0.179\%$;除美国和新西兰规范的取值不能类比外,折算成中国规范材料强度后加拿大规范的 $\rho_{\min} = 0.407\%$,两者相差约 120%。这些规范中,欧洲规范是经验取值,并考虑了裂缝和耐久性问题,但与不考虑裂缝因素的规范相比要小。

抗震规范中,除中国规范的取值偏低外,其他规范大体在一个水准上。

4 结语

(1)综合来看,各国规范多以“截面开裂后,构件不致立即失效(裂而不断)”为原则来确定受拉钢筋的最小配筋率,欧洲和英国规范以考虑强度、裂缝以及耐久性要求,按经验提出了最小配筋率取值。各国规范对非抗震构件所取的最小配筋率相差较大,表明对该问题的认识具有模糊性。

(2)在考虑抗震区混凝土构件的延性要求情况下,各国规范对抗震区混凝土构件的最小配筋率都有所提高,除中国规范偏低外,其他国家规范的最小配筋率大体相当。

(3)经验取值中虽考虑了强度、裂缝宽度以及耐久性的影响,但取值明显低于模型公式中的取值,表明对该问题的认识存在明显的不足。

(4)建议最小配筋率按强度模型、裂缝控制模型以及耐久性因素进行综合确定。

(5)从本质上说,最小配筋率的确定不完全是技术问题,还反映了某一地区和时代的发展水平,因而具有一定的社会性和政策性。

参考文献:

References:

- [1] 徐友邻,周 氏. 混凝土结构设计规范理解与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
XU You-lin, ZHOU Di. Comprehension and Application on Code for Design of Concrete Structures[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2002.
- [2] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002,Code for Design of Concrete Structures[S].
- [3] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海:同济大学出版社,2004.
GU Xiang-lin. Basic Principles of Concrete Structures [M]. Shanghai:Tongji University Press,2004.
- [4] ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary[S].
- [5] CSA A23. 3-04, Design of Concrete Structures[S].
- [6] CEB-FIP, Model Code 1990[S].
- [7] EN 1992-1-1; 2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1; General Rules and Rules for Buildings[S].
- [8] EN 1998-1-1; 2004, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings[S].
- [9] DIN 1045-1, Plain, Reinforced and Presressed Concrete Structures. Part-1: Design and Construction[S].
- [10] BS 8110-1; 1997, Structural Use of Concrete. Part 1: Code of Practice for Design and Construction[S].