

文章编号:1006-7329(2003)02-0037-06

# 非抗震梁受拉钢筋最小配筋率取值分析与建议\*

谭周玲, 余瑜, 傅剑平, 白绍良

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**通过对各有关国家混凝土结构设计规范中非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值规定的对比分析,展示了有关这类最小配筋率取值的国际总体情况,指明了各国规范中存在抗震与非抗震情况取值相同和抗震与非抗震情况取值高低不同的两种取值体系,和各国正在向有模型的取值方案过渡的总体趋势;并在这一认识的基础上,为我国国家标准《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)提出了修订这类最小配筋率取值的建议。

**关键词:**钢筋混凝土; 建筑结构; 构造措施; 受拉钢筋最小配筋率

**中图分类号:** TU375.1

**文献标识码:** A

1999年国内部分专家提出了“有必要大幅度提高我国建筑结构设计可靠度”的建议,其中论据之一就是我国钢筋混凝土结构构件最小配筋率的取值与国外某些规范相比明显偏低。此建议受到《混凝土结构设计规范》修订组的高度重视。为了全面查明国外规范最小配筋率取值情况,形成合理的取值思路和取值标准,本文第三、四作者受修订组委托,会同第一、二作者对有关情况作了较全面考察和对比分析,并为我国修订后的《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)<sup>[1]</sup>提出了非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率的取值建议。该建议经修订组研究并经审查会通过后已反映在修订后规范的第9.5.1条中。

通过对比分析查明,各国设计规范梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值存在着两种体系。一种是对抗震及非抗震情况取用相同的最小配筋率,如美国 ACI318-02 规范<sup>[2]</sup>和新西兰 NZS3101(1995)规范<sup>[3]</sup>。这两本规范中都同时包含有抗震及非抗震条文。由于需要满足抗震情况下对最小配筋率的更严格要求,故其非抗震最小配筋率取值很高。另一种是对抗震及非抗震情况分别取用大小不同的最小配筋率。属于这一类的如欧共体混凝土结构设计规范 EC2<sup>[4]</sup>和抗震设计规范 EC8<sup>[5]</sup>以及我国修订前的 GBJ10-89 规范。其中非抗震最小配筋率的取值水准自然比第一种取值体系明显偏低。在不包含抗震条文的英国 BS8110(1997)规范<sup>[6]</sup>和德国 DIN1045(2001)规范<sup>[7]</sup>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-A23.3-94 规范<sup>[8]</sup>,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高。各国规范非抗震最小配筋率的取值对比详见后文图1。

通过对比分析还查明,各国梁类构件受拉钢筋最小配筋率的取值方法可分为有模型的方法和经验法两类。有模型的方法系指以截面受拉区混凝土开裂后受拉钢筋不致因配置过少而立即进入屈服后的较大塑性变形状态作为确定受拉钢筋最小配筋率的准则,也就是以即将开裂时的截面受弯承载力(也常称“开裂弯矩”)  $M_{cr}$  等于按受拉区开裂后的截面由实配受拉钢筋计算出的受弯承载力  $M_{ua}$  作为确定最小配筋率的依据,即

$$M_{cr} = M_{ua} \quad (1)$$

式(1)也可以写成:

$$\gamma_f W_0 = A_s f_y z \quad (2)$$

\* 收稿日期:2003-03-28

作者简介:谭周玲(1971-),女,广西全州人,讲师,硕士,主要从事钢筋混凝土结构研究。

式(2)对于矩形截面可进一步写成:

$$\gamma f_i W_0 = \rho_{\min} f_y (1 - 0.5 \rho_{\min} f_y / f_c) b h_0^2 \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中,  $W_0$  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, 其取值详见我国修订后规范第 8.2.4 条;  $z$  为按受拉区开裂截面计算受弯承载力时的内力臂。从式(3)可以看出, 因  $\rho_{\min}$  很小, 等式右侧括号内第二项可以忽略不计, 因此, 所有按式(1)准则确定的最小配筋率, 最终均可用下式表达:

$$\rho_{\min} = \alpha f_i / f_y \quad (4)$$

式中为待定常数。

自 20 世纪 80 年代以来, 已有越来越多的国家取用式(1)作为确定受拉钢筋最小配筋率的准则, 其中有美国、加拿大、新西兰和德国规范以及欧共体抗震规范 EC8。当考虑可靠度因素时, 从式(3)可以看出,  $f_i$  取值水准越高,  $f_y$  取值水准越低, 所得  $\rho_{\min}$  就越大, 意味着不出现截面开裂后受拉钢筋立即进入屈服后较大应变状态的概率也就越高。因此, 可以通过调整  $f_i$  和  $f_y$  的取值水准实现对  $\rho_{\min}$  的合理取值。

受拉钢筋最小配筋率取值的经验法是指直接给出  $\rho_{\min}$  的取值规定, 而没有完整的受力模型作为取值准则。取用这种方法的例如有欧共体 EC2 规范、英国规范和我国修订前的规范。但其中也从不同角度考虑了一些因素对  $\rho_{\min}$  取值的影响, 如欧共体和英国规范取  $\rho_{\min}$  与钢筋强度成反比关系, 而我国修订前规范根据混凝土强度等级高低取用两档大小不等的  $\rho_{\min}$  值。所考虑的这些因素的影响规律与有模型方案的趋势有一定的近似性。

## 1 各国非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值

为了统一对比条件, 以下对比均以单筋矩形截面梁作为对象, 且将各国规定全部改用我国钢筋等级和混凝土强度等级表达。其中, 钢筋强度可用我国相应强度取值代入, 混凝土强度则需换算。

### 1) 美国规范与新西兰规范

美国规范和新西兰规范的抗震及非抗震最小配筋率取值相同。

美国 ACI318-02 规范第 10.3.1 条规定矩形截面梁类构件受拉钢筋最小配筋率为:

$$\rho_{\min} = 3\sqrt{f_c} / f_{yk} \text{ (英制单位)} \quad (5)$$

且不小于  $200 / f_{yk}$  (英制单位), 折算成公制后为“且不小于  $1.38 / f_{yk}$ ”。

将式(5)换算成公制后为:

$$\rho_{\min} = \sqrt{f_c'} / (4f_{yk}) \quad (6)$$

而这恰是新西兰 NZS3101(95)规范第 8.4.3.1 条对梁类构件受拉钢筋最小配筋率的取值(新西兰规范未规定  $\rho_{\min}$  不小于  $1.38 / f_{yk}$  的下限条件)。

美国和新西兰规范取用的混凝土圆柱体抗压强度  $f_c'$  的统计定义为(见 ACI318-02 规范第 5.3.2.1 条):

$$f_c' = \bar{f}_{cy} (1 - 1.34\delta) \quad (7)$$

而国际统一规定则定义圆柱体抗压强度标准值  $f_{cuk}$  为:

$$f_{cuk} = \bar{f}_{cy} (1 - 1.645\delta) \quad (8)$$

式中  $\bar{f}_{cy}$  为圆柱体抗压强度平均值,  $\delta$  为混凝土强度变异系数。同时, 参照欧共体 EC2 规范和德国规范 DIN1045(2001)的定义, 圆柱体抗压强度标准值  $f_{cuk}$  与立方体(150 mm 边长)抗压强度标准值  $f_{cuk}$  之间的关系对于不大于 C60 的混凝土取为  $f_{cuk} = 0.8f_{cuk}$ ; 而我国立方体抗压强度标准值符合国际统一定义, 它与我国轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$  之间的关系为  $f_{ck} = 0.67f_{cuk}$ , 而我国轴心抗压强度设计值  $f_c$  与标准值  $f_{ck}$  之间的关系为  $f_c = f_{ck} / 1.4$ 。综合以上关系即可写出:

$$f'_c = \frac{0.8 \times 1.4(1 - 1.34\delta)f_c}{0.67(1 - 1.645\delta)} = \frac{1.67f_c(1 - 1.34\delta)}{(1 - 1.645\delta)} \quad (9)$$

上式全由各类强度之间的关系导出,不存在英制与公制的换算问题,于是可按我国修订后规范给出的各混凝土强度等级的  $f_c$ ,并借用我国规范对各混凝土强度等级取用的变异系数(参见修订后规范第4.1.3条条文说明)由上式求得与各混凝土强度等级对应的  $f'_c$  值。再将该  $f'_c$  和我国各等级钢筋的强度标准值代入式(6),即可求得与我国材料强度等级对应的美国和新西兰规范的  $\rho_{\min}$  值。具体计算结果见表1。

表1 折算成我国材料强度等级后的美国及新西兰规范最小配筋率取值

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	17.28	21.19	25.21	29.29	33.35	36.84	40.15	43.98	47.60
HPB235, $f_{yk} = 235$ N/mm <sup>2</sup>	0.004 42 <sup>①</sup>	0.004 90 <sup>①</sup>	0.005 34 <sup>①</sup>	0.005 76 <sup>①</sup>	0.006 14	0.006 46	0.006 74	0.007 06	0.007 34
$\rho_{\min}$ HRB335, $f_{yk} = 335$ N/mm <sup>2</sup>	0.003 10 <sup>①</sup>	0.003 44 <sup>①</sup>	0.003 75 <sup>①</sup>	0.004 04 <sup>①</sup>	0.004 31	0.004 53	0.004 73	0.004 95	0.005 15
HRB400, $f_{yk} = 400$ N/mm <sup>2</sup>	0.002 60 <sup>①</sup>	0.002 88 <sup>①</sup>	0.003 14 <sup>①</sup>	0.003 38 <sup>①</sup>	0.003 61	0.003 79	0.003 96	0.004 14	0.004 31

注①:根据美国 ACI318-02 规范,  $\rho_{\min}$  对于 HPB235 级、HRB335 级和 HRB400 级钢筋尚分别不应小于 0.00587、0.00412 和 0.00345, 故相应栏内的  $\rho_{\min}$  应分别取用这些下限值。但新西兰 NZS3101 规范无此要求,  $\rho_{\min}$  仍按表中数值取用。

### 2) 加拿大规范

加拿大 CSA - A23.3 - 94 规范的抗震及非抗震最小配筋率取值方法不同。

加拿大规范第 10.5.1.1 条规定,非抗震梁类构件受拉钢筋的最小配筋率应从下列条件导出:

$$1.2M_{cr} = M_{ua} \quad (10)$$

其中,在计算  $M_{cr}$  时,取  $f_t = 0.6\sqrt{f'_c}$  (公制)。因加拿大 CSA - A23.1 规范规定的混凝土圆柱体抗压强度规范值的统计定义为  $f'_c = \bar{f}_{cy}(1 - 1.4\delta)$ , 故从式(9)可以改写出与我国混凝土强度等级对应的加拿大  $f'_c$  值为:

$$f'_c = \frac{1.67f_c(1 - 1.40\delta)}{(1 - 1.645\delta)} \quad (11)$$

而在计算  $M_{ua}$  时,按该规范规定,钢筋抗拉强度应取  $0.85f_{yk}$ 。若  $M_{cr}$  按我国规范规定的方法计算(见修订后规范式(8.2.3-6),因加拿大规范未规定  $M_{cr}$  的具体算法),其中,对矩形截面取  $\eta = 1.55$  (见我国修订后规范表 8.2.4),并近似取  $W_0 = 1.075(bh^2/6)$  (其中 1.075 为考虑受拉钢筋对截面抵抗矩影响而近似取用的系数)和  $h = 1.05h_0$ ; 在  $M_{ua}$  计算中近似取  $z = 0.95h_0$ , 则从式(2)可得:

$$\rho_{\min} = \frac{1.2 \times 1.55 \times 1.075 \times 1.05^2 \times 0.6\sqrt{f'_c}}{0.85 \times 0.95 \times 6f_{yk}} = 0.273 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_{yk}} \quad (12)$$

由上式求得的与我国材料强度等级对应的加拿大规范  $\rho_{\min}$  取值如表 2 所示。

表2 折算成我国材料强度等级后的加拿大规范最小配筋率取值

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	17.03	20.92	24.94	29.02	33.05	36.51	39.85	43.64	47.24
HPB235, $f_{yk} = 235$ N/mm <sup>2</sup>	0.004 79	0.005 31	0.005 80	0.006 26	0.006 68	0.007 02	0.007 33	0.007 67	0.007 85
$\rho_{\min}$ HRB335, $f_{yk} = 335$ N/mm <sup>2</sup>	0.003 36	0.003 73	0.004 07	0.004 39	0.004 69	0.004 92	0.005 14	0.005 38	0.005 60
HRB400, $f_{yk} = 400$ N/mm <sup>2</sup>	0.002 82	0.003 12	0.003 41	0.003 68	0.003 92	0.004 12	0.004 31	0.004 51	0.004 69

### 3) 德国规范

德国 DIN1045 规范只适用于非抗震情况。

新修订的 DIN1045 规范 2001 年版已从防止构件一开裂就失效的角度将受拉钢筋最小配筋率作为保证构件延性性能的基本要求写入了其 5.3 节极限状态设计总要求中。具体则规定  $\rho_{\min}$  按式(1)的准则确定。其中在计算  $M_{cr}$  时对  $f_t$  取该规范表 9 给出的平均值  $f_{tm}$  (取  $f_{tm} = 0.30f_{ctk}^{2/3}$ , 其中  $f_{ctk}$

为圆柱体抗压强度标准值),在计算  $M_{ua}$  时取钢筋抗拉强度标准值。由于  $f_{cyl} = 0.8f_{cuk}$ ,故在按我国混凝土强度等级计算  $f_{tm}$  时,取用的公式即为:

$$f_{tm} = 0.3(0.8f_{cuk})^{2/3} \quad (13)$$

同样在  $M_{cr}$  计算中取  $\gamma = 1.55$ ,取  $W_0 = 1.075(bh^2/6)$  和  $h = 1.05h_0$ ,在  $M_{ua}$  计算中取  $z = 0.95h_0$ ,则可求得德国规范  $\rho_{min}$  的计算公式为:

$$\rho_{min} = \frac{1.55 \times 1.075 \times 1.05^2 f_{tm}}{0.95 \times 6 f_{yk}} = 0.322 \frac{f_{tm}}{f_{yk}} \quad (14)$$

由上式求得的与我国材料强度等级对应的德国规范  $\rho_{min}$  取值如表 3 所示。

表 3 折算成我国材料强度等级后的德国规范最小配筋率取值

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
$f_{tm}(\text{N/mm}^2)$	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.7	4.0
HPB235, $f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$	0.002 60	0.003 01	0.003 43	0.003 84	0.004 11	0.004 52	0.004 80	0.005 07	0.005 48
$\rho_{min}$ HRB335, $f_{yk} = 335 \text{ N/mm}^2$	0.001 83	0.002 12	0.002 40	0.002 69	0.002 88	0.003 17	0.003 36	0.003 56	0.003 84
HRB400, $\rho_{min} = 400 \text{ N/mm}^2$	0.001 53	0.001 77	0.002 01	0.002 25	0.002 42	0.002 66	0.002 82	0.002 98	0.003 22

#### 4) 欧共体规范及英国规范

欧共体规范 EC2(1992)和英国规范 BS8110(1997)均只适用于非抗震情况。

这两本规范均取矩形截面梁类构件受拉钢筋最小配筋率为:

$$\rho_{min} = 0.6/f_{yk} \quad (15)$$

欧共体 EC2 规范还规定不应小于 0.001 5。与我国钢筋强度标准值对应的这两本规范  $\rho_{min}$  取值如表 4 所示。

表 4 按我国钢筋等级确定的欧共体规范和英国规范最小配筋率取值

$f_{yk}(\text{N/mm}^2)$	235	335	400
$\rho_{min}$	0.002 55	0.001 79	0.001 5

#### 5) 我国修订前的最小配筋率取值及修订后取值建议

我国修订前规范对受弯构件受拉钢筋的最小配筋率取值方法简单,当混凝土强度等级不大于 C35 时,取  $\rho_{min} = 0.001 5$ ;当不小于 C40 时,取  $\rho_{min} = 0.002$ 。

从各国规范最小配筋率取值的综合情况及演变趋势看,以下几点是可以肯定的。

第一,每本规范都必须首先确定,是选择非抗震与抗震情况取值相同的方案还是选择取值不同的方案。我们认为,因为抗震及非抗震情况下考虑最小配筋率的出发点不完全相同,取值要求的严格程度不同,加之我国规范一直采取抗震与非抗震情况取值不同的方案,故继续采用这一方案较为合理。

第二,对梁类构件的受拉钢筋采用本文式(1)作为确定最小配筋率的准则是各国规范的演变趋势。我们认为这种基于受力模型的最小配筋率确定方法较有说服力,故建议我国规范也采用这一准则。

第三,德国规范把防止构件一开裂就失效作为极限状态设计的延性基本要求有一定的合理性,为此,就需要使开裂后不立即失效事件出现的概率足够高。

我国梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值宜在原规范基础上适度提高。但首次提高不宜幅度过大,宜控制在工程界可接受范围内。今后有条件再进一步适度提高。本文作者的具体建议是取:

$$\rho_{min} = 0.45f_t/f_y \quad (16)$$

经规范修订组讨论后,认为可加下限条件,即  $\rho_{min} \geq 0.002$ 。经审查会正式通过后,这一方案已纳入修订后规范第 9.5.1 条。

按这一方案得出的梁类构件受拉钢筋最小配筋率的取值见表 5。

表 5 我国修订后规范梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
HPB235, $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$	0.00236	0.00272	0.00306	0.00336	0.00366	0.00386	0.00405	0.00420	0.00437
$\rho_{\min}$ HRB335, $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$	0.00200	0.00200	0.00215	0.00236	0.00257	0.00270	0.00284	0.00294	0.00306
HRB400, $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$	0.00200	0.00200	0.00200	0.00200	0.00214	0.00225	0.00236	0.00245	0.00255

## 2 各国取值对比

在图 1a、b、c 中分别给出了当采用的钢筋等级为 HPB235、HRB335 和 HRB400 时各国梁类构件受拉钢筋最小配筋率的取值。从中可以看出,抗震与非抗震情况取值相同的两个国家,即美国和新西兰,为了满足抗震需要,最小配筋率取值很高,这从非抗震情况看是没有必要的。加拿大非抗震最小配筋率取值已高过各国抗震最小配筋率取值,似乎也嫌过高。在其它抗震与非抗震情况分开

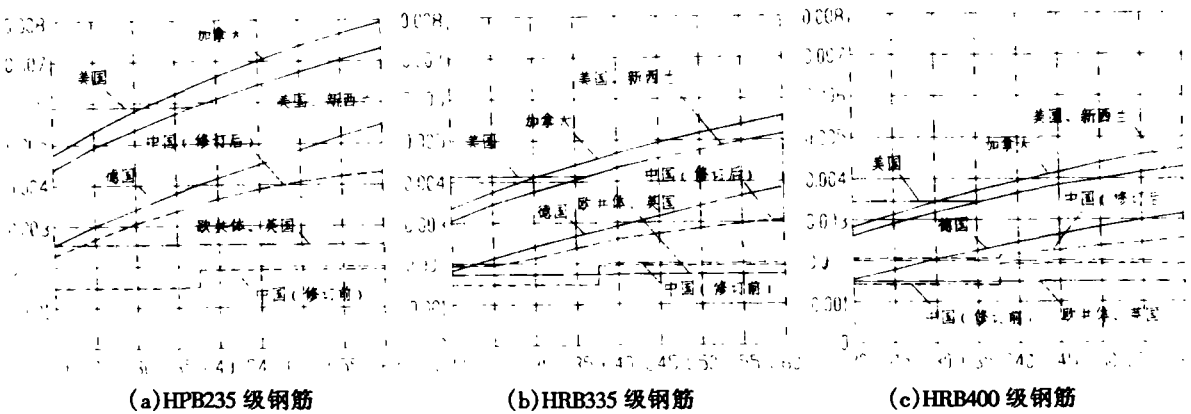


图 1 各国规范非抗震梁类构件受拉钢筋最小配筋率取值对比

取值或没有抗震规定的规范中,最小配筋率取值均相对较低,其中以德国规范相对最高,中国修订后规范次之。应该说,德国的最小配筋率取值就非抗震情况而言其保证率相对要充分一些。中国规范如有条件可在此次修订已作调整的基础上再将最小配筋率取值稍事提高。

## 3 小结

1) 1999 年国内部分专家以我国最小配筋率取值比美国偏低过多作为我国建筑结构安全性水准过低的论据之一。从以上综合分析看,这一论据有一部分是不充分的。这是因为美国规范对抗震及非抗震情况取用的最小配筋率相同,全按抗震需要取用,这对非抗震情况而言取值过高,因此,用我国非抗震取值与美国抗震取值对比理由欠充分。

2) 国内部分专家认为我国非抗震最小配筋率取值偏低也有一定道理。在此次规范修订中,我国规范对于梁类构件受拉钢筋采用了以“构件开裂后不立即失效”作为确定最小配筋率的准则,并适度提高了取值水准。从规范颁布实施后的反应看,这一取值水准是工程界可以接受的。但本文作者认为,为了进一步提高构件开裂后不立即失效的保证率,今后有条件时还可将取值进一步提高,例如提到  $\rho_{\min} = 0.5f_t/f_y$  或  $\rho_{\min} = 0.55f_t/f_y$ 。

3) 此次修订规范沿袭原规范做法,仍对所有的“受弯构件”取用相同的  $\rho_{\min}$ 。但根据国外经验,这一取值主要适用于梁类构件、预制单向板和悬臂板,而对于现浇楼盖板和屋盖板,因有二维受力效应存在,两个方向相互扶持,故最小配筋率可维持在例如  $\rho_{\min} = 0.55/f_y$  的水平上,应另作规定。建议在再次修订规范时考虑此问题。

4) 在采用式(1)准则确定受拉钢筋最小配筋的构件中,如果把式(1)也从可靠度的角度来考虑,除去混凝土和钢筋强度的离散特征之外,可能还应考虑两个因素,一个是根据构件所在结构的受力特点,实现作用的最不利弯矩超过开裂弯矩的可能性大小;另一个是一旦出现截面受拉区开裂后受拉钢筋配置过少的局面,所引起的后果的严重程度。例如,在简支和悬臂构件中,可能将导致受拉钢筋拉断和构件折断;而在超静定梁中,则一般只会使相应截面转角过大,裂缝过宽。在确定最小配筋率时应全面考虑这些因素的影响。

抗震情况下框架梁受拉钢筋最小配筋率的对比见另文。

### 参考文献:

- [1] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [2] 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, 2002.
- [3] New Zealand Standard, NZS 3101:Part 1:1995, Concrete Structures Standard, Part 1 - the Design of Concrete Structures[S].
- [4] 陈定外译, 结构用欧洲规范, 欧洲规范 2, 混凝土结构设计——第 1 篇 总原则和房屋建筑各项规定[S]. 中国建筑科学研究院结构研究所, 1995 年 8 月.
- [5] European Prestandard, ENV 1998 1-3, Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures, European Committee for Standardization[S]. February 1995.
- [6] British Standard, Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Construction, BS8110[S]. 1997.
- [7] Deutsche Norm, DIN 1045-1, Tragwerk aus Beton, Stahlbeton and Spannbeton, Teil 1: Bemessung and Konstruktion [S]. July 2001.
- [8] CSA - A23.3-94, Design of Concrete Structures. Structures (Design), Canadian Standards Association[S]. 1994.

## A Study of Limiting Values for Minimal Ratio of Longitudinal Tensile Reinforcement in Non - seismic Reinforced Concrete Beams

TAN Zhou - ling, YU Yu, FU Jian - ping, BAI Shao - liang  
(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Various limiting values available in some countries' design codes of concrete structures for minimal ratio of longitudinal tensile reinforcement in non - seismic reinforced concrete beams are studied. In this paper, the international overall situations on the limiting value were illustrated. It is pointed out that there exists two different schemes for the limiting values: the limiting value in seismic situations identical with or different from that in non - seismic situations and now most of countries trend to adopt limiting values based on models. Some suggestions are put forward for revisions of the limiting values for minimal ratio of longitudinal tensile reinforcement in China's Design Code of Concrete Structure (GBJ 10 - 89).

**Keywords:** reinforced concrete; building structure; constructional measure; minimal ratio of longitudinal tensile reinforcement