

文章编号:1673-2049(2008)02-0056-08

中、美规范中受压构件的正截面承载力计算

叶列平, 宋世研

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:对中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和美国 ACI 318M—05 规范中钢筋混凝土受压构件的最小和最大配筋率、正截面轴心受压、偏心受压承载力及其配箍构造的规定进行了对比分析。结果表明:对于轴心受压构件,美国规范中受压承载力的折减系数小于中国规范;随着受力状态由大偏心受压向小偏心受压过渡,美国规范抗力折减系数的变化与构件的受力破坏特征有关,而中国规范的抗力折减系数基本不体现大、小偏心受压构件受力破坏特征的影响;对于高强混凝土,中国规范在确定混凝土材料强度标准值时引入了脆性系数,而美国规范通过较高的配箍率规定来保证高强混凝土构件的受力破坏特征与普通混凝土一致。

关键词:钢筋混凝土;受压构件;正截面承载力;最大和最小配筋率;配箍率;安全储备;结构抗力折减系数

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Calculation of Design Methods for Flexure and Axial Strength of RC Columns in Chinese and American Codes

YE Lie-ping, SONG Shi-yan

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A calculation and comparison of maximum and minimum reinforcement ratio, axial compression of normal cross section, eccentric compression capacity as well as transversal reinforcement configuration strength under combined flexure and axial forces, details of ties for RC columns were presented between *Chinese Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2002) and American Code ACI 318M—05. Results show that firstly, for axial compression members, the strength reduction factor of American Code is smaller than that of Chinese Code; secondly, from the eccentric loaded column with tension failure to that with compression failure, the structural strength reduction factor of American Code changes with the failure mode, while that of Chinese Code does not; thirdly, for high-strength concrete, the brittleness factor is introduced to determine the nominal concrete material strength in Chinese Code, while a relatively larger stirrup reinforcement ratio is used in American Code to ensure that the failure mode of high-strength concrete is same to that of common concrete.

Key words: reinforced concrete; compressed member; bearing capacity of normal cross section; maximum and minimum reinforcement ratio; stirrup reinforcement ratio; safety margin; structural strength reduction factor

收稿日期:2008-04-05

基金项目:教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(704003)

作者简介:叶列平(1960-),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:ylp@tsinghua.edu.cn。

0 引言

文献[1]中对中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002^[2],以下简称中国规范)和美国 ACI 318M—05^[3]规范(以下简称美国规范)的钢筋混凝土构件正截面受弯承载力进行了对比分析。本文中笔者进一步对两国规范的受压构件正截面承载力的设计规定、计算方法和计算结果进行对比分析。两国规范的设计表达式和材料强度之间的换算关系见文献[1](材料强度换算关系在文献[4]的基础上修正而得出)。与文献[1]相同,本文中主要比较两国规范结构抗力的差异。

1 最小和最大配筋率

1.1 最小配筋率

为改善受压构件破坏时的脆性特征,避免混凝土突然压溃,并使受压构件具有一定的抗偶然偏心作用的能力,以及减小在持续压应力下混凝土徐变与收缩的影响^[5],中国规范规定了受压构件中纵向受力钢筋的最小配筋率,即全部纵向钢筋的最小配筋率为0.6%,一侧纵向钢筋的最小配筋率为0.2%(中国规范第9.5.1条规定);当采用HRB400级和RRB400级钢筋时,全部纵向钢筋最小配筋率为0.5%;当混凝土强度等级为C60以上时,全部纵向钢筋的最小配筋率为0.7%。由此可见,中国规范受压构件最小配筋率的规定还考虑了钢筋和混凝土强度差别的影响,即在使用高强钢筋时可降低最小配筋率,而在使用高强混凝土时又适当增加最小配筋率。

美国规范规定最小配筋率的原因与中国规范考虑的因素基本一致,但美国规范规定受压构件中全部受力钢筋的最小配筋率为1%,明显高于中国规范,并且已覆盖了中国规范在使用高强混凝土时0.7%的最小配筋率规定。可能是因为最小配筋率太高的原因,使得美国规范不再考虑钢筋强度和混凝土强度变化对最小配筋率的影响。

查阅美国规范给出的研究报告^[6],美国规范确定最小配筋率为1%的原因如下:螺旋箍筋柱的最小配筋率为1%;普通箍筋柱的最小配筋率为0.5%,最终偏于安全地取1%。关于螺旋箍筋柱的最小配筋率大于普通箍筋柱的问题,该研究报告中认为,这是由于螺旋箍筋是在柱出现很大变形后才能发挥有效的约束作用。

中国规范仅规定螺旋箍筋柱可用于轴心受压构

件,但没有明确规定螺旋箍筋柱的最小纵筋配筋率(中国规范第9.5.1条规定,似可取与普通混凝土柱相同的最小纵筋配筋率),也没有规定螺旋箍筋柱可用于偏心受压。关于螺旋箍筋柱是否可以用于偏心受压柱或压弯柱,建议对中国规范开展进一步的研究工作。

1.2 最大配筋率

中国规范规定全部纵向钢筋的最大配筋率不宜超过5%,而美国规范为8%。两国规范做出该规定,均是考虑纵向钢筋过多会产生拥挤,从而影响混凝土浇筑质量^[7-10]。但是该规定与采用的钢筋直径及施工技术等因素有关,与构件的受力特性关系不大。

2 轴心受压构件承载力

对于轴心受压构件,中国规范规定的极限受压承载力计算公式为

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A + f'_y A'_s) \quad (1)$$

式中: φ 为稳定系数; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; A 为构件截面面积,当纵筋配筋率大于3%时, A 应扣除纵筋截面的面积; f'_y 为纵筋抗压强度设计值; A'_s 为全部纵筋截面面积。本文中主要讨论正截面受压承载力,故在轴心受压时,相当于按式(1)的短柱计算,即稳定系数 $\varphi=1.0$,因此有

$$N_u = 0.9(f_c A + f'_y A'_s) \quad (2)$$

式中:系数0.9主要是考虑可能存在的初始偏心,即在轴心受压情况,当按考虑初始偏心距 e_a 的偏心受压构件正截面承载力计算,其受压承载力具有与式(2)相近的结果。

美国规范规定的短柱受压承载力计算公式为

$$N_u = 0.8\Phi[0.85f'_c(A - A_{st}) + f_{yk}A_{st}] \quad (3)$$

式中: Φ 为结构抗力折减系数,对轴心受压取 $\Phi=0.65$; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度标准值; f_{yk} 为纵筋抗压强度标准值(美国规范中的符号为 f_y); A_{st} 为全部纵筋截面面积。系数0.8是考虑分析中未涉及的荷载偶然偏心。

由式(2)和式(3)对比可见,中国规范式(2)中的系数0.9相当于美国规范式(3)中的系数0.8。根据文献[1]中介绍的两国规范设计表达式,美国规范式(3)中的结构抗力折减系数 Φ ,相当于中国规范设计表达式中混凝土材料分项系数 $\gamma_c=1.4$ 和钢筋材料分项系数 $\gamma_s=1.1$ 的抗力综合折减效果,但由式(2)很难提取出相当于美国规范结构抗力折减系数 Φ 的显式表示,为此笔者通过算例来比较式(2)和式

(3)轴心受压承载力储备的差别(不考虑荷载项的储备差别)。

算例结构截面尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$, 混凝土为 C30 级, 钢筋为 HRB400 级, 配筋率范围为 $0.5\% \sim 5.0\%$ 。图 1 为美国规范式(3)与中国规范式(2)之比 $[(N_u(\text{美})/N_u(\text{中}))]$, 后文用 μ 表示]随配筋率的变化情况, 该比值范围为 $0.735 \sim 0.830$ 。由此可见, 美国规范式(3)比中国规范式(2)偏于保守, 其主要原因有 2 个: 一是美国规范式(3)中的系数 0.8 比中国规范式(2)中的系数 0.9 小; 二是美国规范结构抗力折减系数 $\Phi = 0.65$, 小于中国规范的混凝土材料分项系数 $\gamma_c = 1.4$ 和钢筋材料分项系数 $\gamma_s = 1.1$ 的抗力综合折减效果, 并且中国规范的抗力综合折减效果随着配筋率的增加而减小, 从而导致式(3)与式(2)的比值随着配筋率的增加而减小。

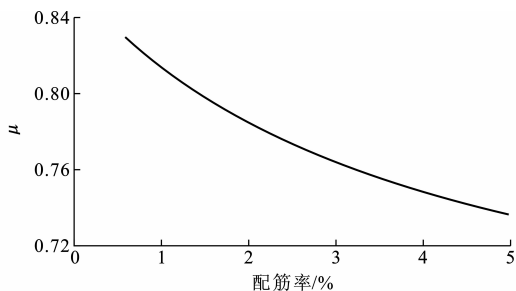


图 1 轴心受压承载力比较

Fig. 1 Comparison of Bearing Capacity of Axial Compression

美国规范式(3)中的系数 0.8 和中国规范式(2)中的系数 0.9, 都是考虑了偶然偏心的影响, 但美国规范考虑偶然偏心影响的程度更大。如去除该系数的影响, 用美国规范的抗力折减系数 Φ 与中国规范的混凝土材料分项系数 $\gamma_c = 1.4$ 和钢筋材料分项系数 $\gamma_s = 1.1$ 的综合折减效果(相当于美国规范的抗力折减系数 Φ)的对比反映了两国规范短柱轴心受压承载力的安全储备对比。根据美国规范抗力折减系数 Φ 的概念, 中国规范的抗力综合折减系数 Φ_c 按式(4)确定

$$\Phi_c = \frac{N_u}{N_k} \quad (4)$$

式中: N_k 为采用材料强度标准值按中国规范式(2)计算得到抗压承载力。式(4)得到的中国规范抗力综合折减系数 Φ_c 与美国规范结构抗力折减系数 $\Phi = 0.65$ 的对比见图 2。由图 2 可见, Φ_c 随着配筋率的增加而增大, 这是因为当配筋率较小时, 混凝土抗压贡献占主导地位, Φ_c 约为 0.735; 而随着配筋率的增加, 钢筋抗压贡献逐渐增大, 因钢筋材料分项

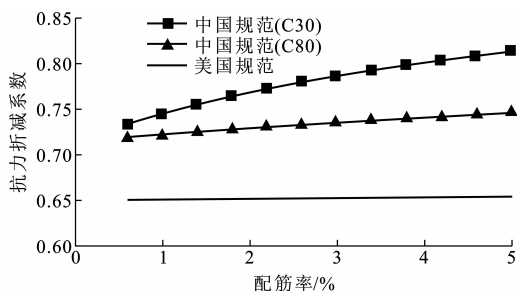


图 2 结构抗力折减系数比较

Fig. 2 Comparison of Structural Strength Reduction Factors

系数 $\gamma_s = 1.1$ 小于混凝土材料分项系数 $\gamma_c = 1.4$, 导致中国规范的抗力综合折减系数 Φ_c 随配筋率增大而逐渐增大($\rho = 5\%$ 时, $\Phi_c = 0.83$), 这意味着随着配筋率的增大, 受压脆性破坏特征有所缓和, 承载力储备程度相应有所减小, 这在概念上有一定的合理性。而美国规范则认为轴心受压构件的破坏都是受压脆性破坏, 故按受压脆性破坏特征统一取相同安全储备。两国规范不同设计方法的优缺点、安全储备差别及其合理性还有待进一步研究。

在混凝土强度等级提高, 同样配筋率情况下, 混凝土的抗压贡献占总承载力的比例增大, 且对于大于 C40 级的混凝土, 中国规范还考虑了脆性折减系数, 因此中国规范的抗力综合折减系数 Φ_c 随混凝土强度等级的提高会进一步减小, 当采用 C80 级混凝土时, $\Phi_c = 0.72 \sim 0.74$, 但仍大于美国规范的结构抗力折减系数 $\Phi = 0.65$ 。综上所述, 美国规范的轴心抗压承载力计算公式比中国规范保守。

3 偏心受压构件正截面承载力

中国规范偏心受压承载力计算是采用材料强度设计值, 按等效矩形方法进行计算。美国规范偏心受压承载力所用计算理论与中国规范相同, 其承载力计算表达式为

$$\left. \begin{aligned} M_u &= \Phi M_n \\ N_u &= \Phi N_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: M_n 、 N_n 分别为采用材料强度标准值计算得到的名义受弯、受压承载力; M_u 为截面的计算弯矩; N_u 不得超过按式(3)计算的轴压承载力。对于普通箍筋柱, 结构抗力折减系数 Φ 随最外侧受拉钢筋应变值由大偏心受压时的 0.90 逐渐变化到小偏心受压时的 0.65, 见图 3; 而对于螺旋箍筋柱, Φ 则从 0.90 变化到 0.70。中国规范对偏心受压承载力的计算没有做规定。

由图 3 可以看出, 对正截面受压承载力, 美国规

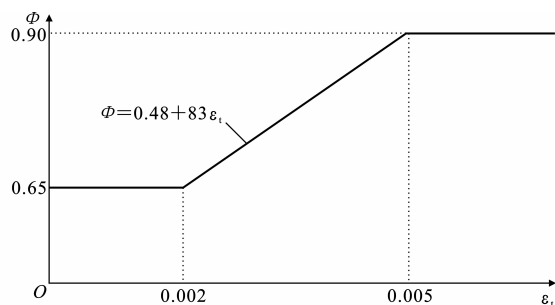


图 3 美国规范正截面承载力结构抗力折减系数

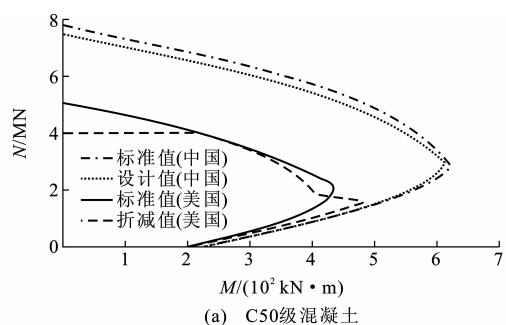
Fig. 3 Structural Strength Reduction Factor of Bearing Capacity of Normal Cross Section in American Codes

范关于结构抗力折减系数 Φ 取值随构件破坏特征的变化而变化的原因是:大偏心受压(最外侧受拉钢筋应变 $\epsilon_t \geq 0.005$ 时)为受拉延性破坏,且承载力的离散性主要取决于受拉钢筋,离散性较小,故结构抗力折减系数 Φ 较大;而小偏心受压(最外侧受拉钢筋应变 $\epsilon_t < 0.002$ 时)为受压脆性破坏,且承载力的离散性主要取决于混凝土,离散性较大,故结构抗力折减系数 Φ 较小。

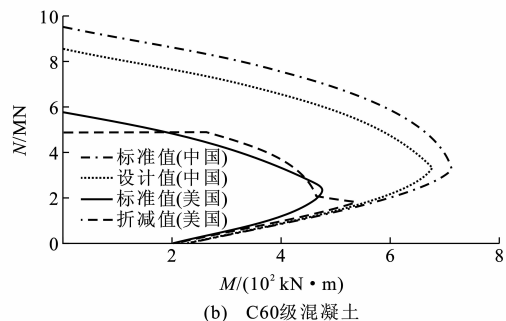
由于两国规范正截面受压承载力的具体计算表达式有较大差异,以下通过算例来比较两国规范的受压承载力。截面尺寸 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, $a = a' = 40\text{ mm}$ (a 为受拉钢筋形心到受拉边缘的距离; a' 为受压钢筋形心到受压边缘的距离);混凝土分别取 C50(C50 级以下与 C50 级情况相似)、C60、C70、C80 级;钢筋取 HRB400 级,对称配筋,共配置 $8\Phi 20$,总配筋率为 1.256% 。按两国规范方法分别计算得到受压承载力的 N - M 相关曲线并进行对比。为便于全面对比,按中国规范偏心受压承载力公式计算时,分别考虑材料强度设计值和标准值 2 种情况进行计算。按美国规范计算时,则分别给出式(5)的 M_n 、 N_n 和 M_u 、 N_u 。各混凝土强度等级按两国规范计算得到的 N - M 相关曲线对比见图 4。

由图 4 可以看出,混凝土强度不超过 C50 级时,两国规范按材料强度标准值的计算结果差别不大,而受压承载力的设计值有所差别,主要表现在:

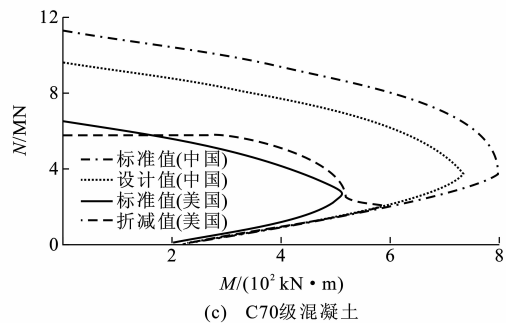
- (1)对最外侧受拉钢筋应变 $\epsilon_t \geq 0.005$ 的大偏心受压范围,美国规范的受压承载力计算结果略大于中国规范。
- (2)当 ϵ_t 为 $0.002 \sim 0.005$ 时,美国规范因结构抗力折减系数 Φ 值的减小,受压承载力迅速减小。
- (3)在 $\epsilon_t < 0.002$ 后小偏心受压范围(对于 HRB400 级钢筋, $\epsilon_t = 0.002$ 相当于大小偏压的界限



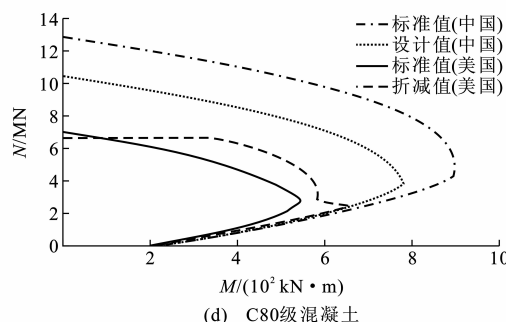
(a) C50级混凝土



(b) C60级混凝土



(c) C70级混凝土



(d) C80级混凝土

图 4 N - M 相关曲线对比

Fig. 4 Comparison of N and M Relative Curves

状态),美国规范的受压承载力基本与中国规范相同。

(4)当接近轴心受压时,由于美国规范规定偏心受压构件的受压承载力不得超过式(3)的轴心受压承载力,故偏心受压承载力出现水平段;而中国规范在接近轴心受压的小偏心范围(计算中已考虑初始偏心距 e_n),偏心受压构件的受压承载力随偏心距减小而缓慢增加,并逐渐接近式(2)的轴心受压承载力,表现出偏心受压构件的受压承载力与轴心受压承载力计算的连续性。

由图 4 还可以看出,随着混凝土强度的增加,在小偏压范围,中国规范按材料强度标准值的计算结果明显小于美国规范,这主要是由于中国规范混凝土强度标准值考虑了脆性折减系数,且随混凝土强度等级的提高脆性折减系数减小。由于此原因,导致随着混凝土强度的增加,美国规范的偏心受压承载力的设计值逐渐高于中国规范的设计值。对高强混凝土构件,美国规范的受压承载力设计值高于中国规范,这不是因为美国规范没有考虑高强混凝土的脆性特征,而是美国规范采取了较高的配箍构造要求,控制了受压构件的脆性破坏特征。为此,以下进一步介绍两国规范受压构件的箍筋构造规定的对比。

4 受压构件箍筋构造要求

中国规范对非抗震结构受压构件配箍所做的规定如下:

- (1)箍筋间距不应大于 400 mm 及构件的短边尺寸,且不应大于 $15d$, d 为纵向受力钢筋的最小直径。
- (2)箍筋直径不应小于 $d'/4$, 且不应小于 6 mm, d' 为纵向受力钢筋的最大直径。
- (3)当柱中全部受力钢筋的配筋率大于 3% 时,箍筋直径不应小于 8 mm; 间距不应大于纵向受力钢筋最小直径的 10 倍, 且不应大于 200 mm。

美国规范对非抗震结构受压构件配箍所做的规定如下:

- (1)箍筋间距不得超过 16 倍纵向钢筋直径、48 倍箍筋直径及构件短边尺寸。
- (2)当纵筋直径不超过 32 mm 时,箍筋直径不得小于 10 mm; 当纵筋直径为 36、43、57 mm 或采用并筋时,箍筋直径不得小于 13 mm。

由以上两国规范的规定可知,关于箍筋间距的规定,纵筋配筋率较小时两国规范相仿,纵筋配筋率较大时美国规范要求略低;而关于箍筋直径的规定,则可看出美国规范要求明显高于中国规范。另外,美国规范规定使用的钢筋最小屈服强度为 280 MPa, 箍筋最高屈服强度为 550 MPa(美国规范钢筋的屈服强度最高可达到 825 MPa); 而中国规范一般普遍用 HPB235 级钢筋作箍筋,实际工程中最高可用到 HRB400 级钢筋。总体来讲,美国规范中对箍筋的最小配筋率要求要高于中国规范。

除此之外,两国规范关于箍筋的构造要求存在较大差别。美国规范规定:箍筋的布置应使得每根柱角上的钢筋以及每隔一根纵筋均由箍筋的拐角作为横向支撑,此箍筋的内夹角不应超过 135° , 任意纵筋与这种有横向支撑纵筋的净距不应大于 150 mm。这一规定保证了半数以上的纵筋都能得到可靠的约束,而其余纵筋的约束也能得到一定程度的保证。与其相应,中国规范只规定了下列情况应设置复合箍筋或拉筋:偏心受压柱截面高度大于 600 mm 时;柱截面短边尺寸大于 400 mm 且各边纵向钢筋多于 3 根时;或当柱截面短边尺寸不大于 400 mm 而各边纵向钢筋多于 4 根时。但中国规范对复合箍筋及拉结筋的数量及其具体构造并没有明确规定,故不能保证全部纵筋得到相对可靠的约束。

鉴于两国规范关于配箍规定的差别,当纵筋数量较多时,按美国规范配箍,同一截面上的箍筋肢数会大于中国规范的要求。再加之美国规范对箍筋直径的规定高于中国规范,故美国规范对箍筋的限制要比中国规范严格。

以上配箍规定主要是针对非抗震结构。由于美国规范非抗震结构的配箍要求比中国规范高,为此再进一步将美国规范非抗震结构配箍要求与中国规范抗震结构的配箍要求进行对比,观察美国规范非抗震结构配箍要求高到什么程度。

对于抗震结构,中国规范规定受压构件箍筋加密区的箍筋最大间距和最小直径应满足表 1 的要求^[11]。箍筋加密区的体积配筋率:一级不应小于 0.8%, 二级不应小于 0.6%, 三、四级不应小于 0.4%; 非箍筋加密区的体积配筋率不小于加密区的 50%。箍筋间距:一、二级框架柱不应大于 10 倍纵向钢筋直径,三、四级框架柱不应大于 15 倍纵向钢筋直径。

表 1 加密区箍筋的最大间距和最小直径
Tab. 1 Maximum Distances and Minimum Diameters in Steel Densified Zone mm

抗震等级	箍筋最大间距(采用较小值)	箍筋最小直径
一	$6d, 100$	10
二	$8d, 100$	8
三	$8d, 150$ (柱根 100)	8
四	$8d, 150$ (柱根 100)	6(柱根 8)

将中国抗震结构的箍筋规定与美国规范对比可见,对于箍筋加密区,中国规范箍筋间距约为美国规范的 1/2,但是箍筋直径的要求仍低于美国规范。

对于非箍筋加密区,箍筋间距要求有所放宽,与美国规范要求接近。下面再通过算例进一步比较两国规范最小体积配箍率的差异。截面尺寸 300 mm×300 mm,保护层厚度取 25 mm,仅在四角配置 4 根纵筋,纵筋直径为 20 mm。按两国规范分别配箍,体积配箍率见表 2。由表 2 可见,美国规范对体积配筋率的要求已经达到中国抗震规范中箍筋加密区三级抗震的要求。

表 2 体积配箍率的对比

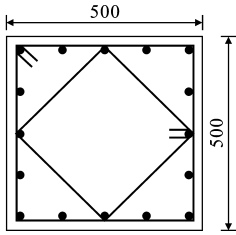
Tab. 2 Comparison of Volume Transversal Reinforcement Ratios				%	
中国规范的体积配箍率			美国规范的 体积配箍率		
抗震结构					
抗震等级	箍筋加密区	非箍筋加密区	非抗震结构		
一	0.80	0.40	0.15	0.42	
二	0.60	0.30			
三	0.40	0.20			
四	0.40	0.20			

再进一步以一配置复合箍筋的受压构件为例,采用式(6)的配箍特征值 λ_v ,对两国规范配箍规定结果进行对比

$$\lambda_v = \rho_v \frac{f_{yv}}{f_c} \tag{6}$$

为使两国规范概念统一,计算式(6)时, ρ_v 取箍筋体积配箍率; f_{yv} 取箍筋屈服强度标准值;对于 f_c ,中国规范取轴心抗压强度标准值,美国规范取 0.85 倍圆柱体抗压强度标准值。

截面尺寸 500 mm×500 mm,保护层厚度取 25 mm,纵筋直径 20 mm,纵筋配筋率 2%。为便于比较,两国规范的配箍特征值均按图 5 形式配箍。



两国规范配箍特征值的比较见图 6(图 6 中 γ 为美国规范与中国规范的配箍特征值的比值)。由图 6 可以看出,两国规范的配箍特征值均随混凝土强度增大而减小,但美国规范的配箍特征值为中国规范的 2.6~3.0 倍。对比中国抗震结构框架柱对复合箍筋配箍特征值要求(表 3)可见,在混凝土强度较低(C30 级以下)时,美国规范的最小配箍特征值规定已达到了中国抗震结构框架柱箍筋加密区的最小配箍特征值要求,其他情况低于中国抗震结构框架柱箍筋加密区的最小配箍特征值

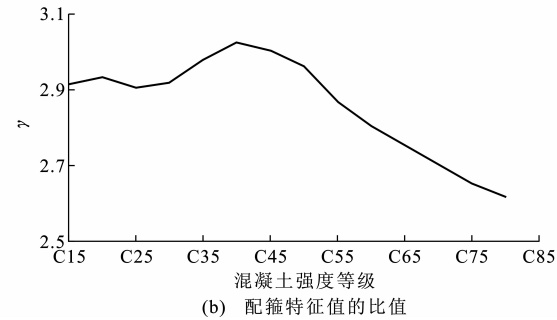
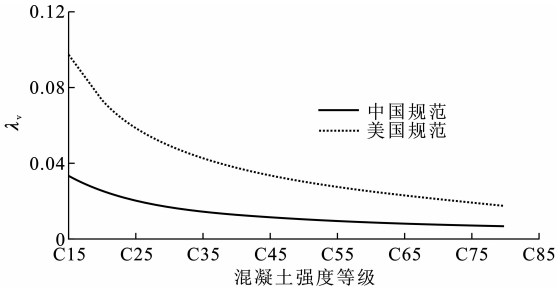


图 6 配箍特征值的对比

Fig. 6 Comparison of Transversal Characteristic Values

表 3 加密区最小配箍特征值

Tab. 3 Minimum Transversal Reinforcement Characteristic Values in Steel Densified Zone

抗震等级	不同柱轴压比下的最小配箍特征值								
	≤0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.05
一	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16	0.18		
二	0.06	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19
三	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16	0.17

要求。对于箍筋非加密区,如取加密区的 50% 近似计算,美国规范的配箍特征值规定已部分达到中国规范三级抗震的要求。

综上所述,美国规范对受压构件配箍的规定明显高于中国规范,已部分达到了中国抗震结构框架柱非箍筋加密区的要求。由此可见,美国规范是通过较高的配箍要求来避免高强混凝土的脆性破坏,并使得高强混凝土的强度得到充分利用,这是值得我们借鉴的。因为,目前中国大多数地区都有抗震设防要求,受压构件的配箍率都比较高,在这种情况下对高强混凝土的强度进行脆性折减,不利于充分发挥高强混凝土的作用。

5 承载力折减系数

以下进一步比较两国规范受压构件承载力计算公式的安全储备差别。与第 2 节相同,用美国规范的结构抗力折减系数 Φ 与中国规范的混凝土材料分项系数 $\gamma_c=1.4$ 和钢筋材料分项系数 $\gamma_s=1.1$ 的综合折减效果(相当于美国规范的抗力折减系数 Φ)

的对比反映两国规范受压构件承载力的安全储备对比。美国规范的承载力折减系数即为式(5)中的 Φ 。

为与美国规范的单一抗力折减系数 Φ 进行比较,按中国规范偏心受压构件承载力公式计算时,抗力综合折减系数 Φ_c 取 N - M 相关曲线中矢量 (M_u, N_u) 与 (M_k, N_k) 的矢长,即

$$\Phi_c = \frac{\| (M_u, N_u) \|}{\| (M_k, N_k) \|} \tag{7}$$

式中: N_k 、 M_k 分别为按材料强度标准值由中国规范公式计算得到的受压承载力和相应的受压承载力。

以下仅对 C50 级混凝土进行比较,两国规范的抗力折减系数 Φ 的对比见图 7,比较中没有考虑两国规范受压承载力标准值绝对值的差异,主要比较两国规范各自抗力设计值相对于抗力标准值的折减程度,该折减系数反映了两国规范受压构件承载力计算公式的安全储备大小。

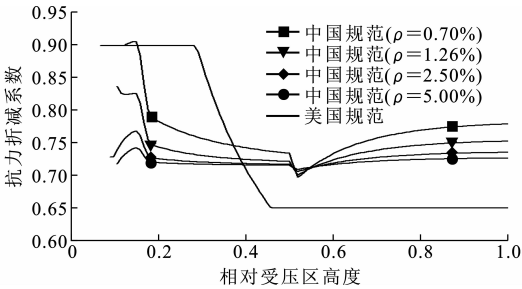


图 7 C50 级混凝土偏心受压承载力的结构抗力折减系数比较

Fig.7 Comparison of Structural Strength Reduction Factors Under Eccentric Compression Bearing Capacity of C50 Concrete

由图 7 可以看出,在大偏心受压破坏范围,多数情况下中国规范的抗力折减系数 Φ_c 低于美国规范,即比美国规范的安全储备大;而在小偏心受压范围,中国规范的抗力折减系数 Φ_c 均高于美国规范,而且中国规范的抗力折减系数 Φ_c 随相对受压区高度 ξ 的增加非但没有减小,反而有缓慢上升的趋势,这似乎不太合理,因为偏心距越小,受压构件的延性较差,其承载力安全储备应有所提高。造成该现象的原因是,对于同样的相对受压区高度,标准值 M_k/N_k 并不等于设计值 M_u/N_u ,故按式(7)计算的矢长之比出现了这种情况,这是钢筋和混凝土材料分项系数取不同值带来的结果。

由图 7 还可以看出,中国规范从大偏心受压到小偏心受压,随着受压构件性能的变化,抗力折减系数 Φ_c 的变化比较复杂,这是因为中国规范的抗力折减系数 Φ_c 是混凝土材料分项系数与钢筋材料分

项系数的综合折减效果。随着配筋率的增大,钢筋对受压承载力的贡献增大,构件脆性破坏特征有所改善, Φ_c 随之增大;另一方面,随着混凝土强度的增大,混凝土部分对受压承载力的贡献增大, Φ_c 随之减小。与美国规范抗力折减系数 Φ 仅跟受压构件破坏特征有关的情况相比,中国规范受压构件结构抗力折减系数 Φ_c 的这种复杂变化情况,既有其合理的一面,也有其复杂的一面,两者的优缺点及合理性有待进一步研究。

6 结 语

(1)对于轴心受压构件,美国规范考虑偶然因素影响对受压承载力的折减较大;而中国规范轴心受压构件的系数取为 0.9,这主要考虑了与小偏心受压承载力计算的连续性。

(2)随着受力状态由延性破坏的大偏心受压向脆性破坏的小偏心受压过渡,美国规范的抗力折减系数由 0.9 降至 0.65,其变化与构件的受力破坏特征有关。中国规范受压构件的结构抗力折减系数在大偏心受压与小偏心受压区段基本持平,大部分在 0.73 附近,且混凝土强度和配筋率的变化也有影响,但基本不体现大、小偏心受压构件受力破坏特征的影响。

(3)对于高强混凝土,中国规范在确定混凝土材料强度标准值时引入了脆性系数,使得高强混凝土的强度折减较大,没有充分发挥其高强的优势。而美国规范通过较高的配箍构造规定来保证高强混凝土构件的受力破坏特征与普通混凝土一致,没有考虑高强混凝土的脆性对强度折减,这更有利于发挥高强混凝土的优势。

参考文献:
References:

[1] 宋世研,叶列平.中、美混凝土结构设计规范正截面受弯承载力的计算对比分析[J].建筑科学,2007,23(7):28-33.
SONG Shi-yan, YE Lie-ping. A Comparison of Design Methods for Flexure of RC Beams Between Chinese and American Design Codes for RC Structures[J]. Building Science, 2007, 23(7): 28-33.

[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] ACI 318M—05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].

- [4] 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
CHEN Zhao-yuan, ZHU Jin-quan, WU Pei-gang. High Strength Concrete and Its Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [5] 叶列平. 混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
YE Lie-ping. Concrete Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [6] RICHART F E. Reinforced Concrete Column Investigation Tentative Final Report of Committee 105[J]. ACI Journal, 1933, 29(5): 275-282.
- [7] NILSON A H. 混凝土结构设计[M]. 过镇海,方鄂华,庄崖屏,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
NILSON A H. Design of Concrete Structures[M]. Translated by GUO Zhen-hai, FANG E-hua, ZHUANG Ya-ping, et al. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [8] 马玉平,马 昕,崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.
MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [9] 叶列平,王宇航. 中、美规范钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力的计算对比[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1): 88-95.
YE Lie-ping, WANG Yu-hang. Calculation and Comparison of Shear Strength of RC Beams Between Chinese and American Codes[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1): 88-95.
- [10] 杨 璐,王元清,石永久,等. 中国、欧洲钢-混凝土组合梁的设计规范比较[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 34-37.
YANG Lu, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, et al. Design Code Comparison of Steel-concrete Composite Beam of China and Europe[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 34-37.
- [11] GB 50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].

(上接第 55 页)

- [5] 刘 涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
LIU Tao, YANG Feng-peng. Master ANSYS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] 傅志方. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
FU Zhi-fang. Modal Analysis Theory and Application[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.
- [7] 张智勇. 精通 MATLAB 6. 5[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
ZHANG Zhi-yong. Master MATLAB 6. 5[M]. Beijing: Beihang University Press, 2003.
- [8] 任伟新. 环境振动系统识别方法的比较分析[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2001, 29(6): 80-86.
REN Wei-xin. Comparison of System Identification Methods Using Ambient Vibration Measurements[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2001, 29(6): 80-86.
- [9] 涂文戈,邹银生,陈理庆,等. 雷达波在混凝土无损检测中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 82-86.
TU Wen-ge, ZOU Yin-sheng, CHEN Li-qing, et al. Application of Radar Wave in Nondestructive Testing of Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 82-86.
- [10] 常 军. 基于曲率模态的钢筋混凝土梁多点损伤位置识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 24-27.
CHANG Jun. Curvature Model Based Many Damage Locations Identification of Reinforced Concrete Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 24-27.
- [11] 叶见曙,张 剑,赵新铭. 基于 Novozhilov-柔度理论的连续弯箱梁桥位移参数 Kalman 滤波识别[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 65-70.
YE Jian-shu, ZHANG Jian, ZHAO Xin-ming. Kalman Filtering Identification for Displacement Parameters of Continuous Curved Box Girder Bridge Based on Novozhilov-flexibility Theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 65-70.
- [12] 常 军,张启伟,孙利民. 基于随机子空间结合稳定图的拱桥模态参数识别方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(1): 21-25.
CHANG Jun, ZHANG Qi-wei, SUN Li-min. Identified Method of Arch Bridge Modal Parameters Based on Stochastic Subspace Combined with Stabilization Diagram[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 21-25.