

不同规范下钢筋混凝土结构裂缝的计算与控制分析

龙挺枝, 禹智涛

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要:以我国规范 GB 50010—2002 设计好的梁为基础, 通过换算公式把个别已知的参数值转化为美国规范 ACI318-89 和欧洲规范 Eurocode2 (EN 1992-1-1; 2004) 中相应的取值, 再对这三种规范下钢筋混凝土结构的最大裂缝宽度的计算与控制进行比较分析。结果表明, 我国规范的最大裂缝宽度计算值比美国规范、欧洲规范的要大, 但在相似的工作环境下, 我国规范对最大裂缝宽度的控制却相对较严。

关键词:钢筋混凝土结构; 裂缝宽度; 耐久性; 粘结滑移

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0205-04

Analysis of Calculation and Control for the Crack of Reinforced Concrete Structure Based on Different Code

LONG Ting-zhi, YU Zhi-tao

(Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510000, P. R. China)

Abstract: Based on the beam have been designed by the code for design of concrete structures in China, the value of some parameters were converted into the corresponding value which are from the code in America and Europe by the conversion formula, and then the calculation and control of the maximum crack width of reinforced concrete structure come from these three code were compared and analyzed. The results show that the value of the maximum crack width obtained from the code in China is larger than American and European, but under the similar work environment, the control of the maximum crack width with the code in China is relatively stricter.

Key words: reinforced concrete structure; crack width; durability; bond-slip

裂缝宽度既是钢筋混凝土结构正常使用极限状态设计的验算要求之一, 又是决定混凝土结构耐久性状态的一个重要指标。因此, 对钢筋混凝土结构裂缝宽度的研究具有重要的意义。目前由于各国对裂缝的认识和研究深度不同, 关于裂缝宽度的计算公式有数十种之多, 且绝大多数是以实验室的实验为基础, 并以经验公式表达计算方法, 故计算结果离散较大。兹举波兰希古拉(S. sygula)和英国毕比节(Aw. Beeby)的统计表为例, 他们用不同国家规范计算同一构件的最大裂缝宽度, 误差最大的达 300% 之多^[1], 从我们调研的资料看, 实际工程检测的裂缝宽度与规范公式计算的裂缝宽度也有误差。可见对于裂缝宽度计算问题的探索是很有必要的。

目前国内外对裂缝宽度计算的研究大致上可以分为 3 种: 一是以实验数据为基础, 与理论公式计算值作对比, 从而对现行规范的计算公式作出修正^[2-4]; 二是对多种规范的裂缝计算公式进行对比, 分析各自的适用性; 再分别与实验数据对比, 观察哪种规范的计算公式与实验数据更相符^[4-7]; 三是对新的计算方法的探讨与研究^[8-11]。本文对中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)^[12] (以下简称规范 GB

50010)、美国规范 ACI318-2005^[13] (以下简称规范 ACI 318) 和欧洲规范 Eurocode2 (EN 1992-1-1; 2004)^[14] (以下简称规范 Eurocode2) 对裂缝宽度的计算与控制方法作了详尽的介绍, 并以规范 GB 50010 设计好的梁为基础, 通过换算公式把已知的参量转化为规范 ACI 318 和规范 Eurocode2 中相应的量值, 再对这 3 种规范的最大裂缝宽度的计算与控制进行比较分析。

1 基于不同规范的裂缝宽度计算与控制方法

国内外研究者根据各自的试验成果, 曾提出过许许多多的裂缝宽度计算公式, 这些公式大体上可以分为 2 种类型, 即半理论半经验公式和数理统计公式。目前, 比较多的研究者及国家规范采用半经验半理论公式, 其中, 规范 Eurocode2 中的验算裂缝宽度的计算公式是基于粘结滑移理论建立的, 规范 ACI318 采用的裂缝宽度计算公式是基于无粘结滑移理论, 而规范 GB 50010 中验算裂缝宽度的计算公式则体现了粘结滑移——无滑移综合理论^[15-17]。一般而言, 各公式所考虑的计算参量也是有所不同, 因而各种规范所采用的裂缝宽度计算公式及其控制方法都存在着较大差异。

1.1 中国规范 GB 50010—2002^[12]

规范 GB 50010 依据综合理论建立起的裂缝宽度的计算公式为

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \varphi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{2g}}{\rho_{te}} \right), \quad (12)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87A_s h_a}, \quad (13)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s + A_p}{A_{te}}. \quad (14)$$

式中： ω_{\max} 为按荷载的标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度。 α_{cr} 为构件受力特征系数，取值可参照文献[12]中的表 7.1.2-1。 φ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，当 $\varphi < 0.2$ 时，取 $\varphi = 0.2$ ；当 $\varphi > 1$ 时，取 $\varphi = 1$ ；对直接承受重复荷载的构件取 $\varphi = 1$ ； σ_{sk} 按荷载效应的标准组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力或预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力； M_k 为按标准组合计算的弯矩； A_s 为受拉区纵向非预应力钢筋截面面积； h_a 为截面有效高度。 E_s 为钢筋弹性模量； c 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离(mm)，当 $c < 20$ 时 $c = 20$ ，当 $c > 65$ 时取 $c = 65$ ； d_{2g} 为受拉区纵向受拉钢筋的等效直径，按

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \text{ 计算；} d_i \text{ 为受拉区第 } i \text{ 种纵向钢筋的公称直径，} n_i \text{ 为受拉区第 } i \text{ 种纵向钢筋的根数，} v_i \text{ 为受拉区第 } i \text{ 种纵向钢筋的相对粘结特征系数，具体取值可参照文献[12]表 7.1.2-2；} \rho_{te} \text{ 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率；} A_p \text{ 为受拉区纵向预应力钢筋截面面积，} A_{te} \text{ 为有效受拉混凝土截面面积；对轴心受拉构件，取构件截面面积；对受弯、偏心受压和偏心受拉构件，取 } A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f \text{，此处的 } b_f、h_f \text{ 为受拉翼缘的宽度、高度。}$$

规范 GB 50010 规定，在设计钢筋混凝土构件时，应根据构件所处的环境类别确定相应的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值进行裂缝控制验算。目前我国规范把结构构件正截面的裂缝控制等级分为三级，对于普通的钢筋混凝土结构一般都属于三级，即允许出现裂缝的构件，计算的最大裂缝宽度不得超过允许值($\omega_{\max} \leq \omega_{\lim}$)。规定的裂缝限值 ω_{\lim} 如表 3 所示。

表 1 GB 50010—2002 的裂缝宽度限值(mm)

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	最大裂缝宽度	裂缝控制等级	最大裂缝宽度
一	三	0.3(0.4)	三	0.2
二	三	0.2	—	—
三	三	0.2	—	—

(环境类别的具体划分可参照文献[12]、[18])

1.2 美国规范 ACI318—89^[13]

规范 ACI318 采用杰格里-鲁兹(Gergely-Lutz)公式，该公式由大量试验数据经过数理统计得到，但实质上它们是无滑移理论更综合的表达式，考虑了钢筋约束区等众多因素和侧保护层厚度的影响。其建议配置变形钢筋梁的裂缝宽度计算公式为

$$\omega_{\max} = 11.02\beta f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-6} \text{ mm}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{h-x}{s-x}, \quad (7)$$

$$\frac{x}{d} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{h}{d} \right)^2 + \alpha_E \left[\rho \left(\frac{d}{d} \right) + \rho \right]}{\frac{h}{d} + \alpha_E (\rho + \rho)}, \quad (8)$$

$$A = \frac{A_{rk}}{n} = \frac{2b(h-d)}{n}, \quad (9)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_E M_a (d - x_{dr})}{I_{cr}}. \quad (10)$$

如果构件未配置受压钢筋，则 σ_s 按式(11)计算

$$\sigma_s = \frac{M_a}{A_s \left(d - \frac{x_{cr}}{3} \right)}. \quad (11)$$

式中： β 为受拉表面至中和轴与钢筋中心至中和轴距离之比； x 为受压区高度； ρ 为受拉钢筋的配筋率， $\rho = \frac{A_s}{bh_0}$ ； ρ' 为受压钢筋的配筋率， $\rho' = \frac{A_s'}{bh_0}$ ； $\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$ 为钢筋与混凝土弹性模量比，而这里的 $d、d'$ 则是相当于中国规范中的 $h_0、a'_0$ ； d_c 为从受拉表面至最靠近该面的钢筋中心距离； M_E 为构件承受的未乘系数的弯矩； d 为截面有效高度； I_{cr} 为开裂截面的惯性矩； x_{cr} 为开裂截面的受压区混凝土高度； A 为包围一根钢筋混凝土的面积，等于包围全部钢筋、且形心相同的混凝土有效受拉总面积除以钢筋根数； A_{rk} 表示与受拉钢筋形心相重合的混凝土面积； n 为钢筋的根数； σ_s 为裂缝截面的钢筋拉应力，也可取规定屈服强度 f_y 的60%。

美国 ACI 224 委员会建议的混凝土结构的容许裂缝宽度如表 2 所示。

表 2 ACI318 规定的容许裂缝宽度

暴露条件	容许裂缝宽度	
	in	mm
干燥空气或有保护膜	0.016	0.41
潮湿、湿空气、土	0.012	0.30
防冻化学制品	0.007	0.18
海水及海水飞溅、干湿循环	0.006	0.15
挡水结构，无压力管除外	0.004	0.10

1.3 欧洲规范 Eurocode2(EN 1992-1-1:2004)^[14]

规范 Eurocode2 采用特征裂缝宽度验算混凝土构件的裂缝。特征裂缝的宽度计算公式为

$$\omega_k = s_{r,\max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \quad (1)$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_c \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_c \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_c}{E_s}, \quad (2)$$

$$s_{r,\max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4}{\rho_{peff}}, \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{M_d}{A_s \left(d - \frac{x_{cr}}{3} \right)}, \quad (4)$$

$$\frac{x_{cr}}{d} = -\alpha_E (\rho + \rho') + \left[\alpha_E^2 (\rho + \rho')^2 + 2\alpha_E \left(\rho' \frac{d'}{d} + \rho \right) \right]^{0.5}. \quad (5)$$

式中： ω_k 为裂缝宽度特征值； ϵ_{sm} 为相关荷载组合下的钢筋平

均应变; ϵ_{sm} 为裂缝间混凝土的平均应变; $s_{r,max}$ 为裂缝最大间距; α_e 为钢筋弹性模量与混凝土平均弹性模量之比; $f_{ct,eff}$ 为混凝土即将开裂时的抗拉强度平均值,可取 $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 0$ 。

$3f_{ct,eff}^2$; $\rho_{p,eff}$ 为有效配筋率,可按 $\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_F}{A_{c,eff}}$ 计算; ξ_1 为预

应力筋与普通钢筋直径不同时的粘结强度调整系数; $A_{c,eff}$ 为有效受拉区面积,即受拉钢筋周围高度为 $h_{c,ef}$ 区域混凝土的面积, $h_{c,ef}$ 取 $2.5(h-d)$ 、 $\frac{h-x_{cr}}{3}$ 、 $\frac{h}{2}$ 中的最小值; σ_s 为开裂截面受拉钢筋的应力,对与先张构件,可用 $\Delta\sigma_p$ 代替 σ_s , $\Delta\sigma_p$ 为混凝土从零应变算起的预应力筋应力的变化; M_d 为按准永久组合,构件跨中截面的弯矩设计值; x_{cr} 为开裂截面的受压区混凝土高度; ρ 为受拉钢筋的配筋率, $\rho = \frac{A_s}{bh_0}$; ρ' 为受压钢筋的配筋率, $\rho' = \frac{A'_s}{bh_0}$; $\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$ 为钢筋与混凝土弹性模量比,而这里的 d 、 d' 则是相当于中国规范中的 h_0 、 α'_s ; k_t 为依赖于荷载持续时间的系数,短期荷载 $k_t = 0.6$; 长期荷载 $k_t = 0.4$ 。 ϕ 为钢筋直径; 当截面内使用不同直径的钢筋时,采用等效钢筋直径 ϕ_{eq} , 如当截面内有 n_1 根直径为 ϕ_1 和 n_2 根直径为 ϕ_2 钢筋时,可按 $\phi_{eq} = \frac{n_1\phi_1^2 + n_2\phi_2^2}{n_1\phi_1 + n_2\phi_2}$ 计算; c 为混凝土保护层厚度; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为考虑钢筋粘结特性的系数: 对高粘结强度钢筋,取 0.8; 对光面钢筋(如预应力筋),取 1.6; 考虑应变分布的系数: 受弯时取 0.5; 仅受拉时取 1.0; 偏心受拉或局部受拉时,按式 $k_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_1}$ 计算; 由执行欧洲规范国家的国家附录确定,建议取 3.4 和 0.425; ϵ_1 、 ϵ_2 为所考虑截面边缘开裂截面计算的拉应变较大值和较小值。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

根据规范 Eurocode2 的裂缝控制条件 $\omega_k \leq \omega_{lim}$, 按照不同的暴露等级,对混凝土结构最大裂缝宽度限值 ω_{lim} 的进行规定,如表 1 所示。

2 不同规范裂缝宽度对比分析时的参数转换

由于上述三种规范在个别参数的定义及其所依据的实验方法是有差异的,文献[4~6]在使用国内外不同的裂缝计算公式进行计算与比较时,并没有明确提出对算例中个别参数的换算问题,如果在计算过程中缺少了这一步,很可能造成对比结果失真。因而为了实现可比性,使其对比结果有意义。我们需要把中国规范中个别参数值转化为其在美国、欧洲规范下的取值。下面以混凝土的轴心抗压强度为例。

我国《普通混凝土力学性能实验方法》(GB/T 50081—2002)规定用边长为 150 mm 的立方体为标准试件,在温度 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 和相对湿度 95% 以上的潮湿空气中养护 28 d,按

标准制作和试验方法(以每秒 $0.2 \sim 0.3 \text{ N/mm}^2$ 的加荷速度)测得的强度称为混凝土的立方体抗压强度,具有 95% 保证率的立方体抗压强度作为混凝土的强度等级,也称标准立方体抗压强度,用 $f_{cu,k}$ 表示;用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体试件确定混凝土的抗压强度作为混凝土结构设计的强度指标,称为轴心抗压强度,用 f_{ck} 表示。

美国规范将设计中采用的混凝土强度称为规定的强度,是用圆柱体试件(通常为 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$),按《现场混凝土试件制作和养护的操作规则》(ASTM C31)的规定,在 70°K (21.1°C) 左右温度下湿养护 28 d,然后按《混凝土圆柱体试件抗压强度实验方法》(ASTM C39/C39M—05)在实验室以规定的加载速度进行实验而测得的,用 f'_c 表示。欧洲规范的混凝土强度等级则是根据欧洲标准《硬化混凝土试验》规定了抗压强度试验试件的形状和尺寸(可采用边长为 100 mm 或 150 mm 的立方体试件、或 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆柱体试件)、制作和养护及试验方法,以 28 d 龄期的混凝土抗压强度特征值为基础确定的,用混凝土圆柱体抗压强度特征值或立方体抗压强度特征值 $f_{ck,cube}$ 表示。

正由于上述的差异,因此我们需要对其进行换算,可以参照文献[18]中的式(3-4)~(3-8)对混凝土的轴心抗压强度进行转换,如中国规范中混凝土强度等级为 C30 的轴心抗压强度的标准值为 20.1 MPa,经过换算后,相应于美国的轴心抗压强度的规定值为 25.3 MPa 以及欧洲的轴心抗压强度特征值为 25 MPa。类似地,我们可以对混凝土的轴心抗拉强度、混凝土弹性模量和钢筋的强度、钢筋弹性进行转换。限于篇幅原因,本文就不一一列出,具体可参照文献[18]。

3 算例分析

3.1 实例计算

—按规范 GB 50010—2002 设计的钢筋混凝土梁, II 类环境条件,截面尺寸 $250 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$, 中心跨度为 $l = 5.4 \text{ m}$, 承受的均布永久荷载 $g_k = 15 \text{ kN/m}$, 均布可变荷载 $q_k = 10 \text{ kN/m}$, 配置 $4\phi 20$ HRB400 级受力钢筋,混凝土强度等级为 C30,保护层厚度 $c = 30 \text{ mm}$, 裂缝宽度容许值为 0.2 mm 。

根据以上信息,根据文献[18]中的表 3—6、表 3—8、表 3—13,可得到混凝土强度等级为 C30 的经过换算得到的不同规范里的轴心抗压强度、轴心抗拉强度及其相应的混凝土弹性模量,如表 4~6 所示。

表 4 混凝土轴心抗压强度的标准值、规定值和特征值(MPa)

规范	GB 50010—2002	ACI318—89	Eurocode2
C30	20.1	25.3	25

表 5 混凝土轴心抗拉强度的标准值、规定值和特征(MPa)

规范	GB 50010—2002	ACI318—89	Eurocode2
C30	2.01	1.67	1.8

表 6 中美欧混凝土弹性模量 E_c (E_{cm}) (MPa)

规范	GB 50010—2002	ACI318—89	Eurocode2
C30	2.01	1.67	1.8

于是可以根据式(1)~(5)、式(6)~(11)和式(12)~(14)分别可求得欧洲规范、美国规范和中国规范中的最大裂缝宽度值,如表7所示。

表7 最大裂缝宽度计算值(mm)

规范	GB 50010—2002	ACI318—89	Eurocode2
w_{max}	0.126	0.112	0.074

3.2 结果分析

1)由算例结果可以发现,对于同一根钢筋混凝土梁,在同一荷载同一环境的作用下,其最大裂缝宽度的计算结果所使用的规范不同而不同。中国规范 GB50010 的计算值是最大的,欧洲规范 Eurocode2 的计算值最小,美国规范 ACI318 的计算值与中国规范的较接近。

2)由于各国规范中的最大裂缝宽度计算公式是有差异的,因而在对裂缝宽度控制等级的划分及其取值也存在一定程度上的差异。在该算例中,设计的工作环境条件为中国规范中的 II 类,近似地对应于美国规范的的暴露条件为:潮湿、湿空气、土和欧洲规范的暴露等级:XC2, XC3, XC4, 其裂缝宽度限值则均为 0.3 mm。由于中国规范的裂缝宽度允许值为 0.2, 比其都要小,而最大裂缝宽度的计算值却是最大的,因此在裂缝的控制要求上,我国规范 GB 50010 比美、欧规范反而较为严格。

3)从文中还能发现,出现三种规范的取值之所以不同,除了是因为计算公式的不同外,还应该与其参量的定义以及计算取值的不同有关。

4 结论

1)对于同一根按中国规范设计的梁,利用美国和欧洲规范计算的最大裂缝宽度值较小,且与裂缝宽度允许值相差较大,反映出中国规范在设计要求上稍偏保守,不利于经济性。建议在个别较好的环境条件下,混凝土裂缝宽度的限值可适当放宽。

2)由于计算公式的不同以及科学依据的不充分,致使各国在划分允许裂缝宽度等级及其取值时产生了差异,因此如何使各国规范在最大裂缝宽度的计算和规定允许值上做得更科学,更统一,还有待国内外学者作更进一步的研究。

参考文献:

[1] Beeby A. W, Syguia S. 梁板结构按不同规范计算的设计裂缝宽度统计图[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:325-326.

[2] 秦想姣,刘礼刚. 钢筋砼旧梁裂缝宽度计算公式的修正[J]. 公路与汽运,2009,(1):111-114.

QIN Xiangjiao, LIU Ligang. The modifications crack width calculation formula for old reinforced concrete beam[J]. Highway & Automotive Application, 2009,(1):111-114.

[3] 张昊宇,郑文忠. 对用名义拉应力控制预应力混凝土受弯构件裂缝宽度方法的2点改进[J]. 铁道科学与工程学报,2006,3(6):25-30.

ZHANG Haoyu, ZHENG Wenzhong. Two pieces of improvement on the crack width control method using nominal tensile stress for prestressed concrete flexural member[J]. Journal Of Railway Science And Engineering, 2006,3(6):25-30.

[4] 王元战,赵冲久,丁嵬,等. 钢筋混凝土构件裂缝宽度计算方法[J]. 海洋工程,2008,26(4):111-116.

WANG Yuanzhan, ZHAO Chongjiu, DING Wei, et al. Investigation on calculation methods for crack width of reinforced concrete members [J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(4): 111-116.

[5] 李志华,赵勇,尚世仲. 钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法的比较[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(2):11-14.

LI Zhihua, ZHAO Yong, SHANG Shizhong. Comparison of crack width equations for reinforced concrete members with flexure[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(2): 11-14.

[6] 卢钦先,胡狄. 钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度控制下得钢筋应力[J]. 工业建筑,2008,38(4):46-49

LU Qinxian, HU Di. Stress of reinforcement in reinforced concrete flexural members with controlled crack width[J]. Industrial Construction, 2008, 38(4): 46-49.

[7] 李晓克,管俊峰,赵顺波,等. 现行规范钢筋混凝土梁裂缝宽度验算公式对比[J]. 人民黄河,2009,31(10):114-116.

LI Xiaoke, GUAN Junfeng, ZHAO Shunbo, et al. Comparison of crack width equations for reinforced concrete beam with the current specification[J]. Yellow River, 2008, 38(4): 46-49.

[8] 田双珠,丁嵬,王元战. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土构件裂缝宽度计算方法[J]. 水道港口,2008,29(5):351-357.

TIAN Shuangzhu, DING Wei, WANG Yuanzhan. Crack width calculation methods of reinforced concrete member based on ANSYS[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(5): 351-357.

[9] 李晓克,管俊峰,赵顺波,等. 钢筋混凝土裂缝宽度相似性与计算方法[J]. 长江科学院院报,2010,27(6):62-65.

LI Xiaoke, GUAN Junfeng, ZHAO Shunbo, et al. Similitude ratio and calculation method of crack of RC beams[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6): 62-65.

[10] 陆春华,金伟良,蒋遼宇,等. 基于黏结-滑移效应的钢筋混凝土梁裂缝宽度数值计算[J]. 中南大学学报,2011,42(5):1400-1405.

LU Chunhua, JIN Weiliang, JIANG Aoyu, et al. Numerical analysis for crack width of reinforced concrete beam with bond-slip effect[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(5): 1400-1405.

[11] 夏敏,侯建国. 钢筋混凝土简支梁裂缝宽度相似率计算公式探讨[J]. 四川建筑科学研究,2011,37(1):11-15.

XIA Min, HOU Jianguo. Research on the formula of crack width similitude in the reinforced concrete simple beam[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(1): 11-15.

[12] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002

[13] ACI318-89, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3. American Concrete Institute, Detroit, MI, 1992.

[14] Euro-code 2: Design for concrete structures Part 1: General roles and rules for buildings (prEN1992-1-1:2004)

[15] 赵国藩,周氏. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[16] 周志祥. 高等钢筋混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[17] 江见鲸,李杰,金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[18] 贡金鑫,魏巍巍,胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.