

中国、美国、欧洲混凝土规范的裂缝宽度计算

杜毛毛

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要:运用国内外钢筋混凝土受弯构件的短期裂缝宽度试验资料,从计算方法、计算参数及计算精度3个方面对中国、美国、欧洲混凝土规范的裂缝宽度计算模式进行了比较分析.在此基础上,结合我国规范的裂缝宽度计算模式,提出了钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算的建议公式.结果表明,建议公式计算值与实测值符合得更好.

关键词:高强钢筋;受弯构件;裂缝宽度计算模式;混凝土规范

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Calculation of crack width of Chinese, American and European concrete codes

DU Mao-mao

(College of Civil Eng., Huaqiao Univ., Quanzhou 362021, China)

Abstract:The calculating modes of crack width of Chinese, American and European concrete codes were compared considering their calculating methods, parameters and precisions according to the previous experimental data of short-term crack width of reinforced concrete flexural members. Based on the comparison and the calculating mode of crack width of Chinese concrete code, the suggested formula for maximum crack width of reinforced concrete flexural members was proposed. The results showed that the calculating values of suggested formula agreed well with the test ones.

Key words:high-strength steel bars;flexural member;crack width calculating mode;concrete code

0 引言

自1930年代以来,国内外学者对混凝土结构裂缝的形成机理、影响因素等进行了广泛的研究,提出了各种不同的裂缝宽度计算理论和公式.这些公式考虑的参数不同,其表达形式各具特点,归纳起来可分为2类,即半理论半经验公式和数理统计公式^[1].半理论半经验公式是依据黏结滑移理论、无滑移理论和黏结滑移-无滑移综合理论,通过分析裂缝开展的机理,推导出相应的理论计算公式,再

利用试验资料确定公式中的相关系数而得到的.黏结滑移理论认为,裂缝的开展是由于钢筋与混凝土之间变形不协调、出现了相对滑移而产生的,影响裂缝宽度的主要变量为钢筋直径与配筋率的比值和钢筋应力;无滑移理论认为,构件表面的裂缝主要由钢筋周围混凝土不同程度的回缩形成,钢筋与混凝土之间的滑移可略去不计,影响裂缝宽度的主要因素是混凝土保护层厚度;黏结滑移-无滑移综合理论既考虑了钢筋可能出现的滑移,也考虑了混凝土保护层厚度对裂缝宽度的影响.数理统计公式

收稿日期:2011-08-14

基金项目:华侨大学高层次人才科研启动费项目(11BS106)

作者简介:杜毛毛(1979—),男,江西省永修县人,华侨大学讲师,博士,主要研究方向为混凝土结构.

是通过分析大量的试验资料,筛选出影响裂缝宽度的主要因素,再进行数理统计分析而得到的.不同计算理论和公式的精确度以及与试验结果的吻合程度如何,是值得探讨的问题.本文拟结合我国现阶段大力推广使用500 MPa高强度钢筋这一现实情况^[2-4],通过收集整理国内外钢筋混凝土受弯构件的短期裂缝宽度试验资料,从计算方法、计算参数及计算精度3个方面,对中国、美国、欧洲混凝土规范的裂缝宽度计算模式进行比较分析.在此基础上,结合GB 50010—2002^[5]的裂缝宽度计算模式,提出钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算的建议公式.

1 计算方法

1.1 我国规范 GB 50010—2002

该规范计算最大裂缝宽度的思路是^[6]:先确定短期荷载作用下的平均裂缝间距和平均裂缝宽度,根据裂缝宽度变异性的统计资料,给出一定保证率下的裂缝宽度作为最大裂缝宽度,再进一步考虑长期荷载作用的影响,并以此作为最终设计依据.该规范基于黏结滑移-无滑移综合理论,给出的最大裂缝宽度计算公式为

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (1)$$

式中, α_{cr} 为构件受力特征系数,对钢筋混凝土受弯构件取2.1; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; σ_{sk} 为按荷载效应标准组合计算的纵向受拉钢筋应力; 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; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径; ρ_{te} 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.

1.2 美国规范 ACI 318—08^[7]

该规范不直接进行裂缝宽度的计算,而是通过控制钢筋间距来控制裂缝宽度.钢筋间距 s 应满足的条件为

$$s \leq 15 \left(\frac{40\,000}{f_s} \right) - 2.5c_c \quad s \leq 12 \left(\frac{40\,000}{f_s} \right)$$

式中, f_s 为使用荷载下的受拉钢筋应力, c_c 为受拉底面边缘至最近受拉钢筋表面的距离.

该方法是在R. J. Frosch^[8]建议的最大裂缝宽度计算公式基础上提出的.R. J. Frosch根据无滑移理论建立了短期荷载作用下的最大裂缝宽度计算公式

$$w_s = 2 \frac{f_s}{E_s} \sqrt{d_c^2 + d_s^2} \quad (2)$$

式中, w_s 为侧面纵向受拉钢筋重心水平处的最大裂缝宽度; d_c, d_s 分别为最外层纵向受拉钢筋重心至受拉底面边缘和侧面边缘的距离.

1.3 欧洲规范 EN 1992—1—1: 2004^[9]

该规范基于黏结滑移-无滑移综合理论,采用特征裂缝宽度 w_k 来验算混凝土构件的裂缝宽度,其计算公式为

$$w_k = S_{r,\max} \frac{\sigma_s - \kappa_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s}$$

式中, $S_{r,\max}$ 为最大裂缝间距,且有

$$\begin{cases} S_{r,\max} = \frac{k_3 c + k_1 k_2 k_4 d}{\rho_{p,eff}} & s \leq 5(c + d/2) \\ S_{r,\max} = 1.3(h - x) & s \geq 5(c + d/2) \end{cases}$$

式中, σ_s 为开裂截面受拉钢筋的应力; κ_1 为与荷载持续时间有关的系数,短期荷载取0.6; $f_{ct,eff}$ 为混凝土即将开裂时的抗拉强度平均值; $\rho_{p,eff}$ 为钢筋的有效配筋率; α_e 为钢筋弹性模量与混凝土平均弹性模量之比; d 为钢筋直径; k_1 为考虑钢筋黏结特性的系数,高黏结钢筋取0.8,光圆钢筋取1.6; k_2 为考虑应变分布的系数,对受弯构件取0.5; k_3, k_4 分别取为3.4和0.425; h 为截面高度; x 为计算裂缝宽度时正常使用状态下的受压区高度.

2 计算参数

上述3种规范裂缝宽度计算公式所考虑的参数见表1,表中还给出了裂缝宽度计算点所处的位置.表1显示,欧洲规范考虑的参数最全面,其次为我国规范,美国规范考虑的参数最少.

3 计算精度

为了比较上述3种规范裂缝宽度公式的计算精度,笔者收集整理了290根钢筋混凝土梁的752个最大裂缝宽度试验数据样本^[10].在比较之前,首先要说明几点:

1) 上述3种规范中,除美国规范外,其余规范计算的裂缝宽度均为侧面纵向受拉钢筋重心水平处的最大裂缝宽度或特征裂缝宽度.因此,所收集整理的试验数据都是该位置处的最大裂缝宽度,未包括平均裂缝宽度.

表1 各规范裂缝宽度公式考虑的参数

类别	GB 50010—2002	ACI 318—08	EN 1992—1—1: 2004
钢筋应力	√	√	√
钢筋直径	√		√
钢筋间距		√	√
钢筋黏结性能	√		√
有效配筋率	√		√
保护层厚度	√	√	√
受拉刚化	√		√
作用时间	√		√
构件受力特征	√		√
砼拉伸变形	√		√
侧面钢筋处	√		√
受拉底面处		√	

2) 考虑到美国规范不直接进行裂缝宽度计算,为与其他规范公式比较,此处采用 R. J. Frosch 提出的侧面纵向受拉钢筋重心水平处的最大裂缝宽度公式②进行对比计算. 另外,该公式是计算配置带肋钢筋梁在短期荷载作用下的最大裂缝宽度,故在对比计算时不包括配置光圆钢筋梁的数据,且不考虑荷载长期作用的影响.

3) 各规范裂缝宽度公式均未考虑箍筋对裂缝宽度的影响,因而这些试验数据样本都来自纯弯段未配置箍筋的试验梁.

将收集整理最大裂缝宽度实测值分别与各规范公式计算值进行比较,结果见表2. 表中 μ 为实测值与计算值比值的均值, δ 为该比值的变异系数.

由表2可得如下结论:

表2 各规范裂缝宽度公式计算精度比较

类别			GB 50010—2002	ACI 318—08	EN 1992—1—1: 2004
HRB335 钢筋梁	背景	μ	0.980	1.434	1.078
	资料	δ	0.232	0.273	0.269
258个 样本	所有	μ	0.914	1.223	0.894
		δ	0.239	0.278	0.299
400 MPa 钢筋梁 (166个样本)		μ	0.869	1.125	0.836
		δ	0.232	0.332	0.295
500 MPa 钢筋梁 (328个样本)		μ	0.795	1.152	0.831
		δ	0.255	0.252	0.265
大保护层梁 (280个样本)		μ	0.797	0.996	0.728
		δ	0.256	0.252	0.239
所有钢筋梁 (752个样本)		μ	0.852	1.170	0.853
		δ	0.252	0.282	0.286

1) 随着钢筋强度等级的提高,基于黏结滑移—无滑移综合理论的我国规范和欧洲规范的计算精度均逐渐降低. 对配置 400 MPa 和 500 MPa 高强钢筋混凝土梁,2 部规范的计算结果均比实测值偏大 20% 左右. 基于无滑移理论的美国规范对各个钢筋强度等级的计算结果均比实测值偏小较多.

2) 对规范背景资料,我国规范的计算精度最高,其次为欧洲规范,美国规范的计算精度最低.

3) 对保护层厚度 ≥ 40 mm 的大保护层钢筋混凝土梁,基于保护层厚度是影响裂缝宽度的主要因素这一无滑移理论的美国规范计算精度最高,其他规范的计算结果偏离实测值 30% 左右.

4) 从总体上来看,3 部规范的计算精度均不甚理想,各规范公式的计算结果偏离实测值约 15% 左右.

4 建议公式

由上述比较分析可知,我国规范的裂缝宽度公式对配置 HRB335 普通钢筋混凝土受弯构件的适应性较好,但对配置 400 MPa, 500 MPa 高强钢筋以及大保护层混凝土受弯构件的计算精度较差. 为得到适合我国应用的裂缝宽度计算公式,使该公式对各种情况均有较好的适应性,笔者收集整理了 800 个过往国内外钢筋混凝土梁的最大裂缝宽度试验数据样本(由于此处包括了配置光圆钢筋梁的试验数据样本,因而比前述的 752 个数据样本要多),通过对这些试验数据进行非线性回归分析,并结合我国规范的计算模式,提出了钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度建议计算公式

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.6c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (3)$$

式中,对配置 HRB335 普通钢筋混凝土受弯构件,取 $\alpha_{cr} = 2.1$;对配置 400 MPa, 500 MPa 高强钢筋混凝土受弯构件,取 $\alpha_{cr} = 1.9$. 其余各符号意义与式①相同.

将收集整理的最大裂缝宽度实测值分别与我国规范计算公式和本文建议公式③的计算值进行比较,结果见表3. 由表3可知,无论是对配置 HRB335 普通钢筋混凝土梁,还是对配置 400 MPa, 500 MPa 高强钢筋混凝土梁以及保护层厚度 ≥ 40 mm 的大保护层钢筋混凝土梁,相比我国规范,建议公式③计算的最大裂缝宽度与实测值均符合得

更好。

表3 本文建议公式计算值与实测值的比较

类别		我国规范公式	本文建议公式
普通钢筋梁 (298个样本)	μ	0.904	0.971
	δ	0.253	0.252
高强钢筋梁 (502个样本)	μ	0.812	0.993
	δ	0.249	0.253
大保护层梁 (318个样本)	μ	0.788	0.971
	δ	0.258	0.257
所有钢筋梁 (800个样本)	μ	0.846	0.985
	δ	0.256	0.253

5 结论

本文从计算方法、计算参数及计算精度3个方面,在对中国、美国、欧洲混凝土规范的裂缝宽度计算模式进行比较分析的基础上,结合我国规范的裂缝宽度计算模式,提出了钢筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算的建议公式,计算结果与实测值的比较表明,建议公式的计算值与实测值符合得更好。

参考文献:

[1] 赵国藩,李树瑶,廖婉卿,等.钢筋混凝土结构的裂缝

控制[M].北京:海洋出版社,1991.

- [2] 王铁宏.亟需推广应用高强钢筋和高性能混凝土[J].建设科技,2005,4(6):28.
- [3] 李空军,杨勇新,王希伟.高强钢筋在混凝土结构工程中的应用[J].广东土木与建筑,2008,36(5):15.
- [4] 汪红蕾.中国建筑将进入高强钢筋时代[J].建筑,2011,58(19):6.
- [5] GB 50010—2002,混凝土结构设计规范[S].
- [6] 李志华,苏小卒,赵勇,等.荷载作用下钢筋混凝土梁的裂缝控制规范比较[J].武汉理工大学学报,2010,32(13):67.
- [7] ACI 318—08, Building code requirements for structural concrete and commentary[S].
- [8] Frosch R J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete[J]. ACI Structural J, 1999, 96(3): 437-442.
- [9] EN 1992—1—1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures(part 1-1): general rules and rules for buildings[S].
- [10] 杜毛毛.配500MPa钢筋后张有黏结预应力混凝土梁受弯性能研究[D].上海:同济大学,2010.