



荷载作用下钢筋混凝土构件 裂缝宽度的计算比较

章少兰, 仲维亮

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 混凝土构件裂缝开展宽度计算是水工结构重要的验算内容之一。对现行国际常用规范的裂缝计算方法进行介绍, 比较分析各国规范的异同点, 通过实例分析各国规范的计算规律, 结合近年来对于裂缝宽度的研究成果, 对我国现行港工规范裂缝宽度计算公式提出改进建议, 为涉外工程提供参考。

关键词: 钢筋混凝土; 裂缝; 国际标准

中图分类号: O 653; TP 72

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)11-0014-06

Comparison of international code provisions on concrete crack prediction

ZHANG Shao-lan, ZHONG Wei-liang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The crack width prediction is one of the most important contents in concrete structure design. This paper compares different international code provisions and analyzes the calculation conclusion based on the case studies. Combining with the current study on the crack with, some suggestions on current Chinese code are proposed, which could be useful for overseas projects.

Keywords: concrete structure; crack; international code

混凝土产生裂缝的原因十分复杂, 归纳起来有荷载作用引起的裂缝和非荷载因素引起的裂缝两大类, 国内外的裂缝宽度计算主要是针对荷载作用下弯曲裂缝宽度进行的。自 20 世纪 30 年代以来, 各国学者做了大量的研究工作, 提出了多种计算理论, 但至今对钢筋混凝土构件裂缝宽度的计算理论未取得一致的看法。这些不同观点反映在各国规范关于裂缝开展宽度的计算公式有较大差别。

1 钢筋混凝土构件裂缝宽度计算方法及控制标准

1.1 我国现行 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[1]

钢筋混凝土矩形、T 型、倒 T 型、I 型和圆形

截面受拉、受弯和偏心受压构件, 其最大裂缝宽度可按下列公式计算:

$$\omega_{\max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{c + d}{0.30 + 1.4 \rho_{te}} \right) \quad (1)$$

式中: α_1 为构件受力特征系数, 受弯构件取 1.0, 大偏心受拉构件取 0.95, 偏心受拉构件取 1.1, 轴心受拉构件取 1.2; α_2 为考虑钢筋表面形状的影响系数, 光面钢筋取 1.4; 带肋钢筋取 1.0; α_3 为考虑作用的准永久组合或重复荷载影响的系数, 取 1.5, 对于短暂状况的正常使用极限状态作用组合取 1.0~1.2, 对于施工期可取 1.0; σ_s 为钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力, 对矩形、T 型、倒 T 型、I 型截面, $\sigma_s = M / (0.87 A_s h_0)$; E_s 为钢筋

收稿日期: 2015-04-22

作者简介: 章少兰 (1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计研究工作。

弹性模量; c 为最外排纵向受拉钢筋的保护层厚度, 当 c 大于 50 mm 时, 取 50 mm; d 为钢筋直径, 当采用不同直径时, 取其加权平均的换算直径; ρ_{te} 为纵向受拉钢筋的有效配筋率。

我国现行 JTS 151—2011 《水运工程混凝土结构设计规范》^[1] 综合考虑结构的功能要求、环境条件对钢筋的腐蚀影响等因素对构件裂缝控制进行等级划分。对允许出现裂缝的构件, 最大裂缝宽度不应超过规定的限值 (表 1)。

表 1 JTS 151—2011 裂缝宽度控制标准		
港口	区域	裂缝宽度/mm
淡水港	水上区	0.25
	水位变动区	0.25
	水下区	0.40
海水港	大气区	0.20
	浪溅区	0.20
	水位变动区	0.25
	水下区	0.30

1.2 英标 BS 8110-2^[2] 及 BS 5400-4^[3]

英标 BS 8110-2 混凝土表面裂缝宽度按下列公式计算:

$$\omega = \frac{3 a_{cr} \varepsilon_m}{1 + 2 \cdot \frac{a_{cr} - c_{min}}{h - x}} \quad (2)$$

式中: a_{cr} 为裂缝计算点到最近控制裂缝宽度钢筋表面的距离; c_{min} 为纵向钢筋的最小保护层厚度; x 为混凝土受压区高度; h 为截面总高度; ε_m 为裂缝计算位置的混凝土应变, 可按式计算:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_l - \frac{b_l (h - x) (a - x)}{3 E_s A_s (d - x)} \quad (3)$$

式中: a 为梁顶到计算点之间的距离; b_l 为受拉钢筋位置梁的宽度; d 为梁顶到受拉钢筋质心之间的距离; ε_l 为不考虑应力钢化效应裂缝计算点处的应变, 可按式计算:

$$\varepsilon_l = \frac{M}{E_s A_s (d - x/3)} \cdot \frac{(h - x)}{(d - x)} \quad (4)$$

英国桥梁标准 BS 5400-4 中裂缝开展宽度计算公式与 BS 8110-2 类似, 两个规范都考虑了受拉硬化效应, 主要区别在于 BS 5400-4 引入了混凝土受拉硬化缩减系数, 该系数为可变作用产生的弯矩

与永久作用产生的弯矩比值, 当该系数大于或等于 1 时, 受拉硬化效应消失。BS 5400-4 中裂缝计算点的混凝土应变 ε_m 计算公式如下:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_l - \frac{3 \cdot 8 b_l h (a - x)}{\varepsilon_s A_s (h - x)} \left(1 - \frac{M_q}{M_g} \right) \times 10^{-9} \quad (5)$$

式中: ε_s 为不考虑拉伸硬化的受拉钢筋应变; M_g 为永久作用产生的内弯矩; M_q 为可变作用产生的弯矩。在计算受拉区混凝土应变时, 考虑了混凝土受拉区应力与徐变影响, 取混凝土弹性模量为短期模量的一半以反映长期作用影响。

BS 8110-2 中根据外观要求提出裂缝控制标准为 0.3 mm, 对于腐蚀环境中的构件裂缝开展宽度计算值不应超过 0.3 mm, 当开裂可能削弱结构的工作性能 (如防水) 时, 宜取其他限值。

BS 5400-4 要求混凝土构件的裂缝开展不应影响结构的外观和耐久性。工程师应根据结构的需求和暴露环境进行合理的裂缝控制, 在缺乏调研资料的情况下, 可按规范给出的推荐裂缝宽度限制标准控制 (表 2)。

表 2 BS 5400-4 裂缝宽度推荐控制标准		
环境	结构	裂缝宽度/mm
极端腐蚀环境: 构件位于海水或 pH≤4.5 的环境	海洋工程结构与沼泽水接触的结构	0.10
强烈腐蚀环境: 与除冰盐接触环境、海水盐雾区	道路两侧混凝土挡墙近海混凝土结构	0.15
腐蚀环境: 强降雨地区、干湿交替环境	桥梁结构底面埋置于土中的结构	0.25
温和环境: 地面以上结构、对以下作用完全遮蔽的环境: a) 降雨, b) 除冰盐, c) 海水浪溅区	受桥梁路面保护结构、表面有防水层结构、永久性模板、水下结构	0.25

1.3 美标 ACI 318

ACI 318-95^[4] 建议配置变形钢筋梁的裂缝宽度计算公式如下:

$$\omega_{max} = 11 R \sigma_s \sqrt[3]{c_b A} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中: R 为从受拉混凝土表面与从钢筋质心到中和轴距离之比; σ_s 为钢筋应力; A 为包围一根钢筋的混凝土有效面积, 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;

c_b 为受拉区边缘至最外层钢筋截面形心的距离。
ACI 318-02^[5] 版规范裂缝控制部分删除了 Z 系数法, 采用控制受拉钢筋间距的方法控制裂缝。其与受拉面最近的钢筋最大间距为:

$$S = \frac{95\,000}{f_s} - 2.5c \leq 300 \times \frac{252}{f_s} \tag{7}$$

式中: f_s 为使用荷载下钢筋的拉应力, 可通过计算得到, 也可按照 0.6 倍的屈服强度进行估算; c 为钢筋的保护层厚度。

ACI 318-05^[6] / 11^[7] 版规范中钢筋最大间距公式改为:

$$S = 380 \times \frac{280}{f_s} - 2.5c \leq 300 \times \frac{280}{f_s} \tag{8}$$

式中: f_s 及 c 的物理意义同式(7), 应力估算改为 2/3 倍的屈服应力。

需要注意的是, 对于腐蚀性强或需要防水的结构, 仅仅根据以上公式计算并不充分, 此时需要专门的研究和措施。

ACI 224R-01^[8] 规定了裂缝控制的标准, 具体数值见表 3。

表 3 ACI 224R-01 裂缝宽度控制标准	
暴露条件	裂缝宽度/mm
干燥空气或有保护膜	0.41
潮湿、湿空气、土	0.30
防冻化学制品	0.18
海水及海水飞溅、干湿循环	0.15
挡水结构, 无压力管除外	0.10

1.4 欧标 EN 1992-1-1^[9]

欧标 EN 1992-1-1 混凝土裂缝宽度按下列公式计算:

$$\omega_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \tag{9}$$

式中: $S_{r,max}$ 为最大裂缝间距; ε_{sm} 为相应荷载组合下钢筋平均应变; ε_{cm} 为裂缝间混凝土平均应变; $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ 可按下列式计算:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} &= \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \\ \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} &\geq 0.6 \times \frac{\sigma_s}{E_s} \end{aligned} \right. \tag{10}$$

式中: σ_s 为钢筋应力; α_e 为弹性模量比, $\alpha_e =$

E_s/E_{cm} ; $\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$; k_t 为考虑荷载持续时间的系数, 对短期荷载 $k_t = 0.6$, 对长期荷载 $k_t = 0.4$ 。

当受拉区有粘结钢筋布置在合理的闭合中心 (间距 $\leq 5 (c + \Phi/2)$) 时, 最大裂缝间距可按下列式计算:

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff} \tag{11}$$

式中: ϕ 为钢筋直径, 当截面采用混合钢筋直径时, 应采用等效钢筋直径; c 为钢筋的保护层厚度; k_1 为考虑钢筋粘结特性的系数, 对高粘结强度钢筋, $k_1 = 0.8$, 对光面钢筋, $k_1 = 1.6$; k_2 为考虑应变分布的系数, 受弯时 $k_2 = 0.5$, 仅受拉时 $k_2 = 1.0$; k_3 、 k_4 由执行欧洲规范国家的国家附录确定, 推荐取 3.4、0.425。

当受拉区有粘结钢筋间距大于 $5 (c + \Phi/2)$ 或受拉区采用无粘结钢筋时, 最大裂缝间距可按下列式计算:

$$S_{r,max} = 1.3 (h - x) \tag{12}$$

式中: x 为开裂截面受压混凝土高度。

欧标 EN 1992-1-1 规定应控制混凝土裂缝宽度, 使其不影响结构的正常使用、耐久性且外观可接受。裂缝宽度限制值应综合考虑结构功能、性质及成本。不同国家应按本国附录进行查询, 在缺乏资料情况下, 可采用表 4 建议值。

表 4 欧标裂缝宽度建议控制标准	
暴露等级	裂缝宽度/mm
无腐蚀环境 X0 碳化腐蚀的干或永湿环境 XC1	0.4
碳化腐蚀的其他环境 XC2, XC3, XC4 氯化物腐蚀的环境 XD1, XD2 海水氯化物腐蚀的环境 XS1, XS2, XS3	0.3

1.5 欧标 CEB-FIP

欧标 CEB-FIP^[10-11] 裂缝宽度计算公式如下:

$$\omega_{max} = 1.7 \omega_m \tag{13}$$

$$\omega_m = S_{rm} \varepsilon_{smr} \tag{14}$$

$$S_{rm} = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + K_1 K_2 \frac{d}{\rho_{te}} \tag{15}$$

$$\varepsilon_{smr} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] > 0.4 \times \frac{\sigma_s}{E_s} \tag{16}$$

式中: ω_{max} 、 ω_m 分别为最大裂缝宽度和平均裂缝

宽度; S_{rm} 为平均裂缝间距; ε_{smr} 为钢筋相对平均应变, 即钢筋与周围混凝土平均应变的差值; c 为混凝土保护层厚度; s 为钢筋间距; d 为钢筋直径; 有效配筋率 $\rho_{te} = A_s/A_{te}$; A_{te} 为混凝土有效受拉面积, 为钢筋质心到构件受拉表面的 2.5 倍, 半径为 $7.5d$; K_1 为钢筋粘结性能系数, 对高粘结钢筋 $K_1 = 0.4$, 对光面钢筋 $K_1 = 0.8$; K_2 为构件拉应力分布影响系数, 纯弯构件 $K_2 = 0.125$, 纯拉构件 $K_2 = 0.25$; σ_{sr} 为混凝土到达极限抗拉强度开裂后截面中的钢筋应力; β_1 为钢筋性能影响系数, $\beta_1 = 1/(2.5K_1)$; β_2 为荷载持续时间和重复作用影响系数, 对于首次加载取 1.0, 对于持续加载或多次循环加载取 0.5。

对于潮湿、海水环境下的裂缝开展宽度限值为 0.30 mm (考虑外观及耐久性的需要), 对于干燥环境裂缝宽度限值可以适当放宽, 对于暴露于除冰剂的混凝土结构, 其最大裂缝开展宽度可以依据混凝土质量、构件厚度、是否有涂层等因素会同业主决定。

2 各裂缝计算模式及考虑因素的比较

2.1 计算理论的分类

目前的裂缝计算模式大致可以分为 4 类: 1) 粘结滑移理论; 2) 无滑移理论; 3) 滑移-无滑移理论; 4) 基于试验的数理统计模型。

JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》的最大裂缝宽度公式采用的是基于试验的数理统计方法, 是用平均裂缝宽度乘以扩大系数的方法确定的, 没有考虑钢筋间距及受拉钢化的影响。

英标的计算方法主要是依据 Beeby 的研究成果, 认为混凝土构件受拉表面裂缝宽度主要由计算点至受拉纵筋的距离、计算点距中性轴的距离、按平截面假定得出的计算点处混凝土拉应变等因素决定。在计算拉区混凝土应变时, 考虑了混凝土拉区应力与徐变影响, 取混凝土弹性模量为短期模量的一半来反映长期作用影响。

美国 ACI 318-95 以前的版本采用的是基于

Gergely 等提出的 Z 系数法公式, 由大量试验数据的数理统计得到。ACI 318-02 及以后的版本采用的是无滑移理论, 认为与最大裂缝宽度有关的因素有最大裂缝间距、开裂截面的钢筋应变以及根据平截面假定得到的受拉混凝土表面应变与钢筋处平均应变的比值。

欧标 EN 1992-1-1 及欧洲混凝土协会规范采用了滑移-无滑移理论, 认为最大裂缝宽度计算值等于裂缝间的钢筋平均应变和混凝土平均应变之差乘以最大裂缝间距。

各主要规范计算公式所依据的计算模式见表 5。

表 5 各规范计算理论				
规范	1)	2)	3)	4)
JTS 151-2011				√
BS 5400-4 BS 8110-2			√	
ACI 318-95				√
ACI 318-11		√		
EN 1992-1-1			√	
CEB-FIP				√

2.2 各个规范考虑影响因素对比

我国 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》及美标 ACI 318-95^[4] 都采用了数理统计模式, 考虑了钢筋应力、钢筋直径、有效配筋率、保护层厚度、受力特征、粘结特性的影响。两者均没有考虑钢筋间距、受拉钢化的影响。美标 ACI 318-95 采用正常使用极限状态的标准组合但不考虑荷载长期作用对裂缝宽度的影响。我国 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》采用正常使用极限状态下的准永久组合, 考虑长期作用对裂缝宽度的影响。

英标 BS 8110 及 BS 5400 没有考虑钢筋直径及受力特性的影响, 采用正常使用极限状态标准组合, 考虑长期作用对裂缝宽度的影响。

美标 ACI 318-11 采用的是无滑移理论, 只考虑了钢筋应力、保护层厚度、钢筋间距及粘结特性的影响, 计算较为简单。

欧标 EN 1992-1-12 及欧洲混凝土协会规范考

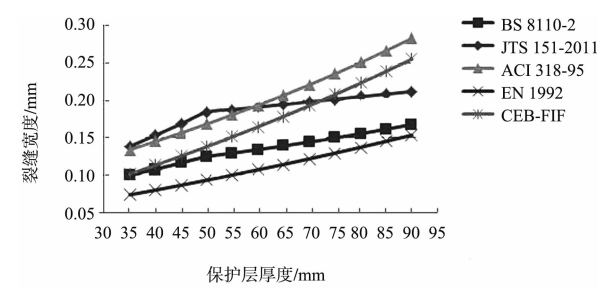
考虑影响因素较为全面，采用正常使用极限状态准永久组合并考虑长期作用对裂缝宽度的影响，计算相对复杂繁琐。

各主要规范考虑影响因素见表 6。

表 6 各规范考虑的影响因素									
标准	钢筋应力	钢筋直径	有效配筋率	保护层厚度	钢筋间距	受拉刚化	受力特征	粘结特征	荷载作用性质
JTS 51-2011	√	√	√	√			√	√	√
BS 5400-4 BS 8110-2	√		√	√	√	√		√	√
ACI 318-95	√		√	√			√	√	
ACI 318-11	√			√	√			√	
EN 1992-1-1	√	√	√	√	√	√	√	√	√
CEB-FIP 1990(MC90)	√	√	√	√	√	√	√	√	√

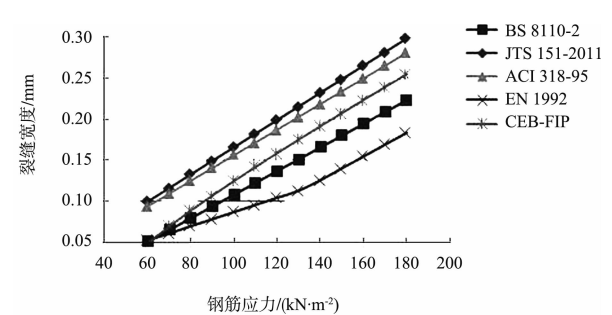
3 不同规范算例对比分析

以一矩形梁为例，分别采用我国现行 JTS 151—2011、英标 BS 8110-2、美标 ACI 318-95、欧标 EN 1992-1-1、欧标 CEB-FIP 比较不同规范中保护层厚度、钢筋应力、钢筋间距、钢筋直径与裂缝宽度的关系，各影响因素与裂缝宽度的关系见图 1~4。



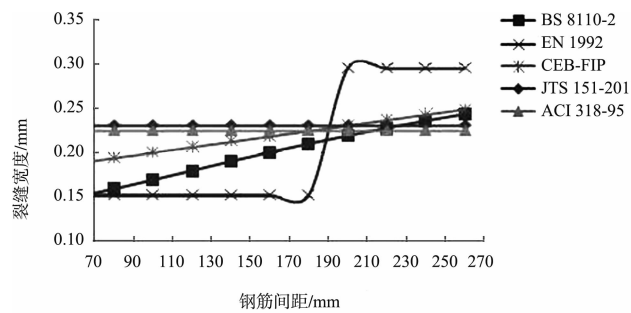
注：弯矩：80 kN/m²，梁高：500 mm，梁宽：450 mm，主筋：4根25 mm。

图 1 保护层厚度与裂缝宽度的关系



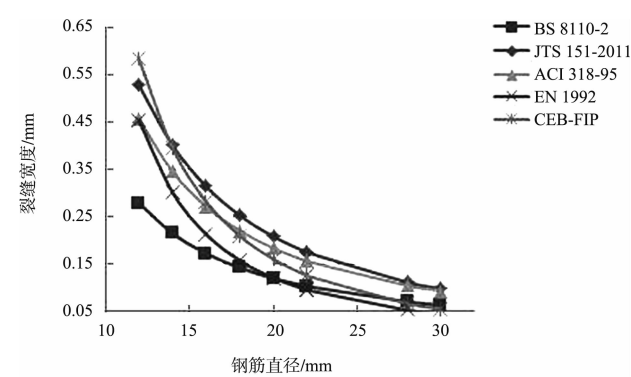
注：梁高：500 mm，梁宽：450 mm，主筋：4根25 mm，保护层：50 mm。

图 2 钢筋应力与裂缝宽度的关系



注：弯矩：100 kN/m²，梁高：500 mm，保护层：30 mm，主筋：4根20 mm。

图 3 钢筋间距与裂缝宽度的关系



注：弯矩：60 kN/m²，梁高：500 mm，梁宽：450 mm，保护层：50 mm。

图 4 钢筋直径与裂缝宽度的关系

由以上各图可以看出，依据各个规范的计算结果相差较大，我国现行 JTS 151—2011 规范计算值偏大，欧洲标准计算结果最小，最大值可以达到最小值的 2 倍。

由图 1 可以看出，裂缝开展宽度随着保护层厚度增大增加，BS 8110 在保护层大于 50 mm 时裂

缝增大趋势减缓,我国现行 JTS 151—2011 规范在保护层大于 50 mm 时裂缝增大趋势减缓更为明显。其他规范计算结果显示,裂缝宽度随保护层厚度增大基本呈线性增加。

由图 2 可以看出,我国现行 JTS 151—2011、美标 ACI 318-95、欧标 CEB-FIP 裂缝宽度随钢筋应力基本呈线性增加;英标 BS 8110、欧标 EN 1992 由于考虑了应力钢化效应,裂缝宽度随钢筋应力增大而增大的趋势放缓。

由图 3 可以看出,对于我国现行 JTS 151—2011 及美标 ACI 318-95,裂缝宽度不受钢筋间距的影响,即裂缝计算公式中不考虑钢筋间距变化的影响因素。欧洲混凝土协会 CEB-FIP 及 BS 8110,裂缝宽度随着钢筋间距增大呈线性增大,BS 8110 增加速率较大。对于欧标 EN 1992,在受拉钢筋间距小于 $5(c + \Phi/2)$ 时,裂缝宽度随着钢筋间距的增大为一常数,在钢筋间距大于 $5(c + \Phi/2)$ 之后,裂缝宽度突然增大,之后仍然保持为一常数。结合欧标 EN 1992 的计算公式可以得出,钢筋间距布置在合理的闭合中心时(间距 $\leq 5(c + \Phi/2)$),裂缝宽度不受钢筋间距变化的影响。

由图 4 可以看出,在保持截面和弯矩不变的情况下,增大钢筋直径,裂缝宽度均有明显减小,其中以 BS 8110 受直径影响变化较缓。这也反映了按照 BS 8110 进行结构设计常常不是裂缝计算控制的原因。

4 对我国交通部规范的建议

我国交通部规范采用数理统计公式,已经沿用较长时间,设计人员较为熟悉,计算简捷。公式中当保护层厚度 c 大于 50 mm 时不考虑保护层对于裂缝宽度计算值的影响。其主要目的在于加大保护层厚度对耐久性的有利作用。既然在港工规范规定的裂缝宽度允许值中未加考虑,那么在裂缝宽度的计算值中也就不再考虑保护层的影响,否则会使公式使用者产生保护层越薄、对裂缝控制越容易的错觉。故公式计算所得的裂缝宽度不能看成为混凝土结构表面裂缝宽度,而是出于耐久性要求,认为在钢筋保护层厚度为 50 mm 位置

满足裂缝控制限值即能满足 50 a 的使用寿命^[12]。因此建议混凝土构件在按照规范进行裂缝宽度计算的同时,按照实际保护层厚度计算构件表面裂缝宽度,计算所得裂缝宽度按照外观要求进行限制。

有研究指出^[13],配筋率较高的构件中混凝土的受拉钢化效应影响较小,但是在配筋率较低的构件中混凝土应力钢化效应不宜忽略,建议在低配筋率的时候引入混凝土应力钢化系数予以考虑。

近年的研究表明,横向裂缝只在裂缝截面附近很短范围内造成钢筋锈蚀,它只导致钢筋锈蚀的提前而不控制锈蚀的速度和程度,但是对于配置有箍筋的构件,横向裂缝对于箍筋来说为顺箍筋裂缝,顺箍筋裂缝出现后会造成混凝土成片剥离,尤其在高温、高盐地区,钢筋腐蚀速率较高,将会对结构的耐久性造成不良影响。交通部规范中的最小保护层厚度为受力钢筋保护层厚度,对于配置有箍筋且直径超过 6 mm 时,保护层厚度需要额外增加 5 mm。目前实际工程中,常用箍筋直径多为 10、12、16 mm,从耐久性角度考虑,建议保护层厚度从箍筋表面起算,裂缝计算公式中的保护层厚度从箍筋边缘起算。

5 结语

1) 我国现行 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》及美标 ACI 318-95 采用的是数理统计模式,英标及欧标采用的则是滑移-无滑移理论。

2) 各国规范考虑的影响因素不同,欧标 EN 1992-1-12 及欧洲混凝土协会规范考虑的影响因素较全面,我国现行规范 JTS 151—2011 及美标 ACI 318-95 没有考虑受拉钢化和钢筋间距的影响因素,英标 BS 8110 及 BS 5400 则没有考虑钢筋直径及受力特性的影响。

3) 裂缝宽度均随保护层厚度增大,基本呈线性增加,我国现行规范 JTS 151—2011 在保护层大于 50 mm 时增大趋势明显减缓。

4) 设计人员在工程中应结合工程所在地的暴露条件、气候(温度、湿度)、结构设计寿命、保护层厚度、表观要求等因素来选择相应的计算方法和控制标准。

(下转第 46 页)