

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0078-05

基于等效保证率的混凝土梁裂缝控制水平研究

李 扬, 戴 欣

(湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对不同国家及行业有关混凝土结构裂缝控制标准的安全度设置水平差异巨大,且缺少量化指标用于判断裂缝控制标准安全度设置水平的现状,通过在传统的裂缝宽度计算公式中扩展短期保证率的概念,提出“等效保证率”的概念。可用于定量比较国内外不同裂缝控制标准的安全度设置水平,为裂缝控制标准的修订提供依据,对当前主流技术规范中弯曲构件裂缝宽度计算公式的“等效保证率”进行计算和分析。在此基础上,提出了 GB 50010—2010 裂缝宽度计算公式的修订建议;裂缝宽度公式的计算保证率适当降低。

[关键词] 混凝土构件; 裂缝宽度; 等效保证率; 裂缝控制

[中图分类号] TU318

[文献标识码] A

目前,国内外混凝土结构有各种裂缝发展机制和裂缝宽度计算理论。刘雪等^[1]对混凝土裂缝成因进行了总结,魏威^[2]对混凝土裂缝的有效预防措施做了详细介绍,刘晶^[3]在结构设计层面对裂缝控制进行了探讨。各国混凝土建筑设计规范中的裂缝控制标准规定存在一定甚至显著差异^[4],这使得难以比较和分析不同标准裂缝控制标准之间的安全设置水平。同时,裂缝控制标准的安全水平以及裂缝宽度计算理论的水平设定范围尚未确定。在前一阶段,一些学者围绕上述问题从不同角度进行了相关研究;李志华等^[5]提出利用短期效应组合,考虑部分荷载的长期效应来检查裂缝宽度,并提出了裂缝长期膨胀系数的新公式。李春秋等^[6]研究了不同国家的桥梁规范,对我国桥涵规范和港工规范中的裂缝控制条文提出了若干建议。杨俊军等^[7]通过深入引入裂缝宽度计算理论,提出了对当前裂缝宽度计算公式的改进。上述研究主要将基于公式计算的裂缝宽度值与在相同或相似条件下测量的裂缝宽度值进行比较。校正裂缝宽度计算公式的准确性具有一定的工程研究价值。

但是,考虑到混凝土结构裂缝宽度的随机性,裂缝宽度计算公式所采用的理论、以及公式参数的取值等受到研究者试验条件以及观测条件的影响和限

制,难以取得一致性的结论。据此,拟从安全度设置水平角度出发,提出等效保证率这一量化指标,可用其对不同规范混凝土结构裂缝控制标准的安全度设置水平进行定量比较分析,为裂缝控制标准的修订提供依据。通过对比研究中国现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[8]、“公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范”^[9](JTG D62—2012)、“水工混凝土结构设计规范”^[10](SL191—2008)、“水运工程混凝土结构设计规范”^[11](JST151—2011)、“水工混凝土结构设计规范”^[12](DT/T5057—2009)以及欧洲规范(EN1992-1-1: 2004)^[13],提出了中国混凝土结构设计规范裂缝宽度计算公式的相应修订建议。为相关领域的标准修订和研究提供参考。

1 等效保证率概念

1.1 保证率的定义

首先假设横向裂缝宽度计算公式如

$$w = W(\tau_s, \tau_l, a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

其中: τ_s 是短期横向裂缝宽度扩展因子; τ_l 为反映长期作用效应影响的参数, a_1, a_2, \dots, a_n 是其他计算参数,包括荷载效应,材料保护层的厚度,拉伸区域中钢筋的直径等。

假设给出了所有相关的计算参数,根据式(1)

[收稿日期] 2018-09-04

[基金项目] 国家自然科学基金(51508171);湖北省桥梁安全监控技术及装备工程技术研究中心开放基金(QLZX2014004)

[第一作者] 李 扬(1986—),男,宁夏石嘴山人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为混凝土裂缝控制及工程结构可靠度

[通信作者] 戴 欣(1994—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为极端温度混凝土力学性能

由标准组合(荷载效应 F_k) 计算的最大横向裂缝宽度值是 w_{ck} , 那么由于荷载效应 F_k , 实际部件的最大横向裂缝宽度值 w_{sk} , 超过 w_{ck} 的概率是 $P(w_{ck} > w_{sk})$, 即为在式(1) 中采用标准组合计算横向裂缝宽度时的保证率, 这正是传统意义上的保证率概念, 被称为传统担保率, 担保率受短期横向裂缝宽度扩展系数 τ_s 影响^[8]。

1.2 等效保证率的概率意义

结合现有荷载统计调查表明: 作用在构件上的实际恒定荷载效应的平均值基本上接近恒定荷载效应的标准值(两者的比率是 1.06)。并且在设计参考期间恒定荷载效应的变化系数仅为 0.07^[6]。因此, 可以认为作用在构件上的实际恒定荷载效应近似等于设计参考期间的恒定荷载效应的标准值。虽然作用在构件上的实际活荷载效应具有一定随机性, 但在设计基准期内该活荷载效应通常不超过设计规定的活荷载效应标准值^[6]。综上, 可以认为在设计基准期内构件实际承受的总荷载效应超过标准组合(荷载效应为 F_k) 的概率很小。近似 F_k 作为在设计参考期间作用于实际部件的最大荷载效应, 对应于设计参考期间的部件可能发生的最大横向裂缝宽度值是由 F_k 引起的最大横向裂缝宽度值 w_{sk} 。因此 P_k 也就可以理解为按式(1) 采用标准组合计算得到的横向裂缝宽度最大值 w_{ck} 不在设计参考期间, 最大横向裂缝宽度值 w_{sk} 可能出现在部件上的概率。 P_{qk} 和 P_{fk} 可以分别理解为根据式(1) 通过准永久组合和频率组合计算。横向裂缝宽度最大值 w_{cq} 、 w_{cf} 不被设计基准期内构件上可能出现的最大横向裂缝宽度值 w_{sk} 超越的概率。可见, 本文的等效保证率概念实质上是将原有的短期横向裂缝宽度计算保证率延伸为设计基准期内的横向裂缝宽度计算保证率。

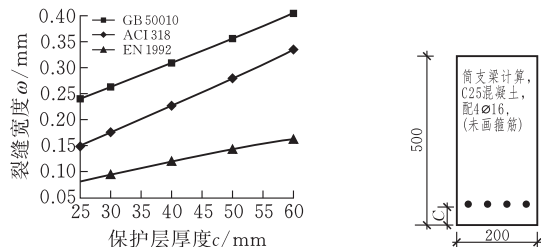
我国住建部、交通部和水利部各自分管的混凝土结构设计规范, 算法大不相同, 但公式基本上都涉及了以下几个与裂缝控制安全相关且相互独立的因素: 短期裂缝宽度计算公式的保证率, 荷载效应的组合, 长期效应的影响以及混凝土伸长率对裂缝的影响。计算裂缝宽度公式的主要区别在于荷载效应的组合: GB50010—2010 和 JST151—2011 采用的是准永久组合, JTG D62—2012 采用的是频遇组合, 而 DT/ T5057—2009 和 SL191—2008 则采用的是标准组合。

中国标准 GB 50010—2010 给出的裂缝宽度计算公式主要由原南京工业大学丁大钊研究组和中国建筑科学研究院^[14] 提出。基本思路是: 首先确定短期荷载下的平均裂缝间距和平均裂缝宽度, 然后根

据裂缝宽度变化的统计, 给出一定保证率下的裂缝宽度作为最大裂缝宽度。并进一步考虑负荷的长期影响作为最终设计基础的影响。GB 50010—2010 规范中裂缝最大宽度与平均宽度之比为 1.66, 相当于计算保证率 95%。最后, 裂缝宽度乘以长期裂缝扩展系数 1.5。计算保证率 95% 表示在短期负荷下, 实际产生的最大裂缝宽度超过裂缝宽度计算值的概率大约有 5 种可能。

1.3 国内各规范最大裂缝宽度计算值的差异

通过举例说明, 使用不同部门的具体结构设计规范计算同一弯曲构件的最大裂缝宽度。例 1 基于中国荷载的部分荷载系数, 选择 $h = 500$ mm, $b = 200$ mm, 混凝土强度等级为 C25。配置 4 B16 的 HRB335 级钢筋, 永久荷载产生的弯矩为 70 kN·m, 活载为 35 kN·m, 作为标准尺寸构件的裂缝宽度计算参数, 结果如图 1 所示。



(a) 裂缝宽度值与保护层厚度的关系 (b) 算例截面尺寸及配筋信息

图 1 国内不同规范裂缝宽度计算值比较

1.4 建立等效保证率的概念

由图 1 可以看出, 在相同条件下使用国内不同行业标准给出的裂缝宽度计算公式, 计算得到的裂缝宽度值有所不同。结合 GB50010—2010 中给出的裂缝宽度计算公式, 在其他条件不变的前提下, 通过计算各行业标准的裂缝宽度公式得到的计算值, 带入 GB50010—2010 中的公式, 通过调整受力特征系数, 达到新的计算值和初始值相同的效果。然后, 将与新的力特性系数对应的新计算保证率称为规格的裂缝宽度计算公式的等效保证率。为了方便理解, 以下列两式为例:

$$\omega_1 = \alpha_c \tau_s \tau_1 \psi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (2)$$

$$\tau_s = \tau_{sm} + u \times \delta_{\tau_s} \quad (3)$$

$$\omega_2 = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c + d}{0.30 + 1.4\rho_{te}} \right) \quad (4)$$

公式(2)是 GB 50010—2010 规范的裂缝宽度计算公式。方程(3)是通过测试短期荷载下钢筋混凝土梁的裂缝得到的。依据文献^[15] 可知 $\tau_{sm} = 1.0$, $\delta_{\tau_s} = 0.4$ 。式(4)是 JTG D62—2012 规范的裂缝宽度计算公式, 具体参数取值参见 JTG D62—2012。计算等效保证率的思路为: 在计算条件一定情况下, 将式

(4)计算得到的裂缝宽度值 ω_2 代替 ω_1 后代入式(2)中;在相同的计算条件下,通过使用等式(2)获得相应的短期裂缝宽度膨胀系数 τ_s ;基于此时的 τ_s ,根据式(3)求出 u 值,由此根据文献^[15]中给出的裂缝宽度的开展分布曲线,得到对应的保证率值,该保证率

表 1 不同规范对应不同条件的等效保证率

各种规范	保护层厚度	荷载效应比 $\rho=M_Q/M_G$					
	c/mm	0	0.10	0.25	0.50	1.00	2.00
GB 50010	30	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	40	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
JTG D62	30	0.78	0.73	0.68	0.61	0.53	0.46
	40	0.96	0.95	0.92	0.89	0.84	0.80
JST 151	30	0.78	0.74	0.69	0.6	0.46	0.29
	40	0.96	0.95	0.93	0.88	0.8	0.63
SL 191	30	0.52	0.70	0.88	0.98	0.99	0.99
	40	0.64	0.80	0.94	0.99	0.99	0.99
DT/T5057	30	0.12	0.27	0.56	0.89	0.99	0.99
	40	0.30	0.56	0.85	0.99	0.99	1

综合数据可以看出,不同国内规范等效保证率大小的差异反映其相应裂缝控制标准严格程度的差异,除了水工混凝土结构的设计规范外,其他规范的等效保证率基本都是随着荷载效应比的增加而增大。另外,随着保护层的厚度增加,等效保证比率也相应增大。当保护层的厚度小时,GB50010—2010规范计算的裂缝宽度值大于其他规范相同条件下的等效保证率计算值,但随着保护层厚度的增加,其他各行业规范的计算值相比较更大,由图 1 可以看出,GB50010 在保护层厚度大于 45 mm 时裂缝增大趋势减缓,这是因为 GB50010 规范适用于房屋和一般结构的钢筋混凝土结构设计,而其他行业规范也有特定的应用范围。各种规格对保护层的厚度有不同的要求。

1.5 国外各规范最大裂缝宽度计算值差异

美国规范 ACI 318—14 不直接计算裂缝宽度,而是通过控制钢筋的间距来控制裂缝宽度^[16]。1999 年之前规格版本的最大裂缝宽度计算公式主要基于 Gergely 和 Lutz 在康奈尔大学的实验结果。认为拉伸裂纹的宽度与拉伸钢的应力之间的关系最大,保护层的厚度也是重要的参数。此外还与钢筋周围混凝土面积有关,但和钢筋直径关系不大^[17]。自 1999 年以来,该规范已经改为基于 Frosch 提出的裂缝计算公式的新方法。基本思想是通过钢筋的应变和最大裂缝间距确定侧面钢筋水平位置高度处的裂缝宽度。乘以 β 得到张紧底面的裂缝宽度。混凝土构件的裂缝控制对象是由标准荷载效应的组合引起的混凝土构件的拉伸表面的最大短期裂缝宽度。Frosch^[18]公式如下:

可称为对应式(4)的等效保证率。在实施例 1 之后,保护层的厚度选择为 30 mm 和 40 mm,并且每个保护层使用不同的负载效应比 ρ 。选取 ρ 为 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 几个常用值。等效保证率的计算结果如表 1 所示。

$$\omega_c = 2 \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \beta \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}$$

式中: d_c 是从张力区的底面到最靠近面的张紧钢筋的质心的距离; β 是从张力区的表面到中性轴的距离与从杆的重心到中性轴的距离的比率。上述变量的原理和范围在文献^[13]中有详细说明。欧盟规范 EN1992-1-1: 2004 计算裂缝宽度的基本思路为:根据相邻裂缝间钢筋与混凝土的平均应变与最大裂缝间距的差异,确定最大裂缝宽度

$$\omega_k = S_{r,\max} \left[\frac{\sigma_s - \frac{k_t f_t}{\rho_{p,\text{eff}}} (1 + \alpha_e \rho_{p,\text{eff}})}{E_s} \right]$$
$$\begin{cases} S_{r,\max} = \frac{k_3 c + k_1 k_2 k_4 d}{\rho_{p,\text{eff}}} & s \leq 5(c + d/2) \\ S_{r,\max} = 1.3(h - x) & s \geq 5(c + d/2) \end{cases}$$

式中: $S_{r,\max}$ 为裂缝间距; $\rho_{p,\text{eff}}$ 为有效配筋率; k_t 为与荷载作用时间长短相关的系数。关于上述各变量的取值原则和范围详见 EN 1992-1-1:2004。

各国裂缝控制的标准有所不同,考虑到现行美国规范 ACI 318—14 允许的钢筋间距是基于混凝土受拉底面的最大裂缝宽度,所以本文将其换算为沿钢筋水平位置高度处的裂缝宽度,这样有利于进行对比,进而计算出相应的等效保证率。

沿用上述算例 1,求出各规范所需的各类参数,计算相应的最大裂缝宽度,其结果见图 2 所示,其等效保证率如表 2 所示。

从图 2 可以看出,根据每个规范的计算结果是完全不同的。目前我国 GB 50010—2010 的计算量一般过大,欧洲标准计算结果较小,最大值可达到最小值的两倍。各种规格的计算结果表明,随着保护层厚度的增加,裂缝宽度呈线性增加。

需要指出的是,虽然等效保证率不能完全取代可靠性指标 β 来反映裂缝宽度计算公式的安全水平,但是将裂缝控制的严格性与各种规格进行了比较。本文中的等效保证率方法可以作为避免繁琐的 β 计算的合理尝试,并对各种标准安全设置的大小差异进行定量判断。它为中国相关研究人员提供了参考和借鉴^[19]。

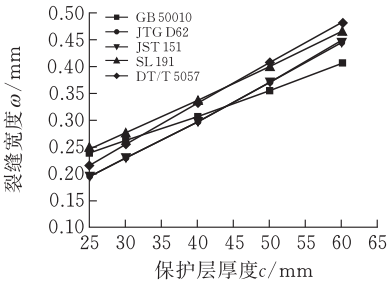


图 2 各国规范裂缝宽度计算值比较

表 2 各国规范对应不同条件的等效保证率

各种规范	保护层厚度 c/mm	荷载效应比 $\rho=M_Q/M_G$					
		0	0.10	0.25	0.50	1.00	2.00
GB 50010	30	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	40	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
ACI 318 (基于 Frosch)	30	0	0	0.001 16	0.028 47	0.647 47	0.990 00
	40	0	0.000 62	0.006 72	0.111 99	0.902 39	1.000 00
EN 1992-1-1	30	0	0	0.000 06	0.002 13	0.256 84	0.876 50
	40	0	0	0.002 65	0.006 75	0.585 62	0.990 00

2 裂缝宽度验算的建议

以等效保证率作为参考指标,综合比较国内外计算出的最大裂缝宽度值明显偏大。另外,与美国和欧洲规范给出的裂缝宽度计算公式相比,我国裂缝宽度计算公式的计算保证率也明显较高;并且我国还考虑了长期裂缝宽度,允许的裂缝宽度规格比国外规格略微保守。因此可以初步做出判断:与国外裂缝控制的安全设定水平相比,我国 GB 5010—2010 规范裂缝控制的安全水平较高。此外,相比较国外规范,中国规范主要通过计算裂缝宽度值后和规范限值对比,而美国和欧洲规范却通过多种方法,从不同角度进行控制分析,对裂缝宽度的直接计算方法进行了理论分析。允许的裂缝宽度限制的要求也考虑了不同的暴露水平和负荷组合,因而显得更加详实具体。关于混凝土梁的裂缝控制,将当前的 GB50010—2010 规范与之前版本的 02 版规范进行了比较。前者仅考虑了荷载效应和裂缝之间的混凝土伸长率对裂缝宽度的组合的影响系数 α_c 。短期裂缝宽度的扩展因子 τ_s 没有修正,即计算保证率仍为 95%。综上所述,GB 50010—2010 的裂缝宽度计算公式应提出修正:裂缝宽度公式的安全保证率适当降低。

3 结论

- 1)提出了“等效保证率”的概念,可作为判断国内外裂缝宽度计算公式安全性的判据。
- 2)中国各种裂缝宽度的计算值随着保护层厚度的增加而线性增加。当保护层的厚度大于 45 mm 时,当前规范 GB50010—2010 显著减慢。

- 3)在相同条件下,根据中国标准 GB 50010—2010 计算的裂缝宽度大于美国标准和欧盟标准公式。中国 GB 50010—2010 规定的裂缝宽度允许值比欧美法规更严格。
- 4)根据目前 GB 50010—2010 中裂缝宽度的计算公式,提出修改后的建议:裂缝宽度公式的计算保证率适当降低。

[参 考 文 献]

[1] 刘雪,郭远臣,王雪,等. 混凝土裂缝成因研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2173-2178.

[2] 魏威. 建筑工程混凝土裂缝原因及有效预防思考[J]. 工程施工, 2018, 7(1): 270-270.

[3] 刘晶. 建筑结构设计控制裂缝的措施[J]. 规划设计, 2018, 7(1):99-100.

[4] 贡金鑫,胡家顺,魏巍巍.中美欧混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007: 517-561.

[5] 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): 67-71.

[6] 李春秋,陈肇元. 荷载作用下混凝土构件裂缝控制的若干问题[J]. 建筑结构, 2007, 37(1): 114-119.

[7] 杨君君,尹磊. 国内外混凝土结构设计规范中裂缝控制的比较分析[J]. 建材世界, 2013(2):22-24.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

[9] 中交公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D62—2004[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.

[10] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范:SL 191—2008[S].北京:中国水利水电出版社, 2009.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社, 2011.

[12] 中华人民共和国国家能源局. 水工混凝土结构设计规范:DL/T 5057—2009[S].北京:中国电力出版社, 2009.

[13] ECS. EN 1992—1—1:2004 Design of concrete structures: Part1: General rules and rules for building[S]. European Committee for Standardization, 2004.

[14] ACI. Building code requirement for structural concrete (ACI 318—14) and commentary (ACI 318—14)[S]. Detroit: American Concrete Institute, 2014.

[15] Gergely P, Lutz L A. Maximum crack width in reinforced concrete flexural members: Causes, mechanisms, and control of cracking in concrete[M]. ACI special publication SP-20, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1968:87-115.

[16] Frosch R J. Another look at cracking and crack control inreinforced concrete [J]. ACI Structure Journal, 1999, 96(3):437-442.

[17] 李扬,侯建国. 国内外混凝土构件裂缝控制安全度设置水平的比较[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 124-127.

Crack Control Safety Level in Concrete Beams Based on Equivalent Guarantee Rate

LI Yang, DAI Xin

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: Considering the sharp differences in the safety level of the concrete structure crack control standards between different countries and industries, and the lack of quantitative indicators for judging the relative size of the crack control standards of safety level, this paper proposed a new concept named “equivalent guarantee rate”by extending the concept of short term guarantee rate in the traditional formula of crack-width calculation. The proposed concept could be applied as an index to evaluate the safety level different domestic and foreign crack control standards and provide evidence for revising the standards of crack control. Based on the calculation and comparison of the current mainstream norms by flexural crack-width calculation formula of “equivalent guarantee rate”, the revised suggestions of the flexural crack-width formula in GB 50010-2010 were presented; the flexural crack-width formula’s calculation should be appropriately lowered.

Keywords: concrete member; crack-width; equivalent guarantee rate; crack control

[责任编辑: 裴 琴]