

钢筋混凝土预制构件裂缝宽度检验的可靠性分析

程凯凯, 姚继涛

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西西安 710055)

摘要: 基于结构可靠性理论的原理和钢筋混凝土预制构件的结构性能检验方法, 分析了钢筋混凝土预制构件在进行裂缝宽度检验时的可靠指标计算方法, 对钢筋混凝土预制构件裂缝宽度检验时规范所规定的允许值进行了可靠度评估, 确定了钢筋混凝土预制构件裂缝宽度检验时构件可靠指标的大小.

关键词: 钢筋混凝土; 预制构件; 正常使用极限状态; 裂缝宽度检验; 可靠指标;

中图分类号: U445.7

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2014)03-0376-04

结构的极限状态分为两类: 承载能力极限状态和正常使用极限状态^[1]. 目前, 对结构的可靠度研究主要是关于承载能力极限状态的, 有关研究成果已被纳入结构可靠度统一标准和相应的设计规范, 在实际工程中已经显示出它的科学性和合理性, 而对于结构正常使用极限状态可靠度分析尚处于探索阶段, 理论方法尚不成熟, 统计资料也不充足^[2]. 虽然结构超过正常使用极限状态不会造成灾难性的破坏或损失, 但会严重影响结构的使用性能, 随着对建筑物功能要求的提高, 正常使用极限状态也受到人们的重视. 因此, 有必要对结构构件正常使用极限状态的可靠度问题进行研究.

钢筋混凝土预制构件, 由于关系到广大人民的生命财产安全, 按期、按批量进行结构性能检验是预制厂每天进行的日常工作. 其结构性能检验指标有三项: 强度指标(承载力)、刚度指标(变形)和抗裂度指标或裂缝宽度指标. 基于结构可靠性理论的原理和钢筋混凝土预制构件的结构性能检验方法, 本文分析了钢筋混凝土预制构件在进行裂缝宽度检验时的可靠指标计算方法. 构件的失效是一个渐进过程, 可靠与失效之间存在模糊状态, 正常使用极限状态下裂缝宽度检验的最大裂缝宽度允许值也是人为规定的, 如对于设计要求的最大裂缝宽度限值为 0.2 mm 的预制构件, 规范规定检验时其最大裂缝宽度允许值 $[\omega_{\max}]$ 为 0.15 mm, 而实际检验时, 构件裂缝宽度达到 0.14 mm、0.15 mm 或 0.16 mm, 并无太大区别, 不能笼统的认为只要裂缝宽度实测值超出 0.15 mm 构件就不合格, 出于理论和逻辑的考虑, 显然这也是不合理的. 因此, 有必要对钢筋混凝土预制构件裂缝宽度检验时规范所规定的允许值进行可靠度评估, 使得基于试验的结构性能检验不仅仅是关于对试验结果的分析, 即只考虑试验结果是否满足检验标准的要求, 而是从概率的角度对钢筋混凝土预制构件裂缝宽度的检验方法进行分析 and 探讨.

1 结构可靠性

结构可靠度是结构在规定的条件和时间内, 完成预定功能的能力. 结构构件可靠指标的计算方法有精确方法和近似方法. 目前, 采用精确方法计算结构的可靠指标是比较困难的, 而且也是不经济的. 因此, 比较实用的方法是只考虑基本变量平均值和标准差的“一次二阶矩法”^[3-4]. 本文将采用该方法计算钢筋混凝土预制构件正常使用极限状态下裂缝宽度检验的可靠指标.

2 预制构件裂缝宽度检验极限状态方程的建立

2.1 规范“GB50010-2010”最大裂缝宽度的计算

根据《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》^[5]的规定, 钢筋混凝土受拉、受弯和偏心受压构件及预应力混凝土轴心受拉和受弯构件, 按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度可按下列公式计算:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi (\sigma_s / E_s) (1.9 c_s + 0.08 d_{eq} / \rho_{te}) \quad (1)$$

其中:

$$\psi = 1.1 - 0.65 (f_{tk} / \rho_{te} \sigma_s) \quad (2)$$

收稿日期: 2013-11-27

修改稿日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50278401)

作者简介: 程凯凯(1990-), 女, 博士生, 主要从事工程结构可靠性设计方面的研究. E-mail: chengkai_kai_1990@126.com

对于钢筋混凝土构件, 在荷载的准永久组合作用下, 受拉区纵向普通钢筋的应力为

$$\sigma_s = M_q / 0.87 A_s h_0$$

(3)

将(2)、(3)式代入(1), 可得

$$\omega_{\max} = (\alpha_{cr} / E_s) [1.1 (M_q / 0.87 A_s h_0) - 0.65 (f_{tk} / \rho_{te})] [1.9 c_s + 0.08 (d_{eq} / \rho_{te})]$$

(4)

式(1)~(4)中各符号意义详见文献[5]. 因此, 钢筋混凝土预制构件的最大裂缝宽度可以根据(4)计算.

2.2 规范中关于钢筋混凝土构件裂缝控制等级、最大裂缝宽度限值及其检验时允许值的规定

国家标准《混凝土结构设计规范(GB50010-2010)》^[5]中规定, 钢筋混凝土构件的最大裂缝宽度应符合下式规定:

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim}$$

(5)

式中: ω_{\max} 为构件的最大裂缝宽度; ω_{\lim} 为构件最大裂缝宽度限值.

钢筋混凝土结构构件裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值见表 1.

根据国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范 GB50204-2002》^[6]中, 预制构件的裂缝宽度检验应符合下式要求:

$$\omega_{s, \max}^0 \leq [\omega_{\max}]$$

(6)

式中: $\omega_{s, \max}^0$ 为在荷载标准值下, 受拉主筋处的最大裂缝宽度实测值(mm); $[\omega_{\max}]$ 为构件检验的最大裂缝宽度允许值, 按表 2 取用.

2.3 预制构件裂缝宽度检验时极限状态方程的建立

根据国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范(GB50204-2002)》^[6]中关于预制构件的裂缝宽度检验要求, 可以建立裂缝宽度检验时的极限状态方程, 对于给定的预制构件, 可以通过该极限状态方程评估其裂缝宽度达到检验时最大裂缝宽度允许值的可靠指标和失效概率.

对于正常使用极限状态, 钢筋混凝土构件采用下列极限状态设计表达式进行验算:

$$S \leq C$$

(7)

式中: S 为正常使用极限状态荷载组合的效应设计值; C 为结构构件达到正常使用要求所规定的变形、应力、裂缝宽度和自振频率等的限值.

对给定的钢筋混凝土预制构件进行裂缝宽度检验时, 以构件最大裂缝宽度实际值达到构件检验时最大裂缝宽度允许值作为构件裂缝宽度检验极限状态的标志, 其极限状态表达式以该构件裂缝宽度为构件检验时最大裂缝宽度允许值时所产生的弯矩进行表示, 即极限状态方程可表达为

$$g(X) = M_1 - M$$

(8)

其中:

$$M_1 = (\omega_{\lim} [E_s / (\alpha_{cr} (1.9 c_s + 0.08 (d_{eq} / \rho_{te}))) + 0.65 (f_{tk} / \rho_{te})] (0.87 A_s h_0 / 1.1)$$

(9)

M 为预制构件检验时, 构件裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值 0.15 mm、0.2 mm 和 0.25 mm^[6]时所产生的弯矩值.

3 可靠性分析及计算实例

3.1 可靠性分析

在进行预制构件裂缝宽度检验的可靠性分析时, 做出如下假设:

- ①在计算可靠指标时, 假定所有的随机变量均服从正态分布;
- ②由于缺乏各基本变量之间的相关性信息, 所以假设所有基本变量是不相关的;
- ③式(9)中弯矩值 M_1 考虑了荷载长期作用的影响, 而预制构件检验时, 由于试验持续荷载时间不可能

表 1 钢筋混凝土结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值(mm)

Tab.1 Crack control level and the maximum crack width limit for structural members of reinforced concrete (mm)

环境类别	钢筋混凝土结构	
	裂缝控制等级	ω_{\lim}
一		0.30 (0.40)
二 a	三级	0.20
二 b		
三 a、三 b		

注: 对处于年平均相对湿度小于 60%地区一类环境下的受弯构件, 其最大裂缝宽度限制可采用括号内的数值.

表 2 构件检验的最大裂缝宽度允许值 (mm)

Tab. 2 The maximum allowable values of crack width of inspected members (mm)

设计要求的最大裂缝宽度限值	0.2	0.3	0.4
$[\omega_{\max}]$	0.15	0.20	0.25

无限延长,即检验时所测裂缝宽度系短期值,随着荷载持续时间的增加,裂缝还会继续发展^[7],因此,按(8)计算得到的可靠指标 β 偏大.

3.2 计算实例及结果分析

某预制钢筋混凝土矩形截面简支梁^[8],截面尺寸 $b\times h=150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,计算跨度 $l_0=2\ 360\text{ mm}$,混凝土强度等级为 C30,钢筋采用 HRB400,受压构造钢筋均采用 2Φ10.

对该预制构件进行可靠性分析时,将以下随机变量作为基本变量:钢筋弹性模量(E_s)、混凝土抗拉强度(f_{tk})、梁截面有效高度(h_0)、钢筋截面面积(A_s)、梁保护层厚度(c)和构件裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值 0.15 mm 时所产生的弯矩值(M).各基本变量的统计特性见表 3.

计算表明,该构件进行裂缝宽度检验时,当裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值 0.15 mm 时,其可靠指标 $\beta=0.61$,失效概率为 $P_f=0.27$.构件实际裂缝宽度小于 0.15 mm 时,可靠指标 $\beta>0.61$,大于 0.15 mm 时,可靠指标 $\beta<0.61$.这样,对基于试验的结构性能检验,就可以根据影响构件裂缝宽度的各个因素并考虑经济性等进行相应的生产控制和检验评定,从概率的角度对钢筋混凝土预制构件裂缝宽度指标进行检验并给出合理地评估.

同样,当构件裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值 0.2 mm 和 0.25 mm 时,构件的可靠指标 β 和失效概率为 P_f 见表 4.均满足《建筑结构可靠度设计统一标准(GB50068-2001)》^[1]给出的结构构件正常使用极限状态可靠指标 0-1.5 的要求.

为了研究各个基本变量对可靠指标的影响,将可靠指标计算过程中各基本变量的灵敏度系数列于表 5.从表 5 可以看出,灵敏度系数随着最大裂缝宽度允许值的不同而发生变化,但总体趋势相当,即灵敏度系数数值有变化,但灵敏度位次并没有发生改变.其中,对可靠指标影响最大的是模型计算不确定系数^[10],其次是钢筋弹性模量、钢筋截面面积、保护层厚度和截面有效高度等.

当上述构件中各影响因素(M 、 E_s)的数字特征不同时,其可靠指标分析表明:按最大裂缝宽度允许值检测所得到的构件可靠指标不完全相同,而且 K_M 对可靠指标的影响很大^[11],见表 6.因此,规范规定的最大裂缝宽度允许值并不能完全反映预制构件的合格性,即检验时还应结合构件的实际情况,综合评定其性能.

表 5 裂缝宽度检验的灵敏度分析

Tab.5 The sensitivity analysis of crack width inspection

$[\omega_{\max}]$	灵敏度系数 α /%					
	E_s	f_{tk}	h_0	A_s	c	M
0.15	26.59	0.90	8.89	15.56	10.09	94.17
0.20	29.44	0.66	9.71	17.08	11.06	92.87
0.25	31.08	0.53	10.17	17.91	11.60	92.06

表 3 各基本变量的统计参数

Tab.3 Statistical parameters of all basic variables

基本变量	符号	标准值	均值系数 κ_x	变异系数 δ_x
钢筋弹性模量/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	E_s	2.0×10^5	1.0	0.06
混凝土轴心抗拉强度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	f_{tk}	2.85	1.42066	0.18
截面有效高度/mm	h_0	270	1.0	0.02
钢筋面积/ mm^2	A_s	157	1.0	0.035
混凝土保护层厚度/mm	c	25	1.0	0.024
弯矩值/ $\text{kN}\cdot\text{m}$	M	11.33	1.0	0.266

注:以上各基本变量的统计参数根据文献[9]得到的,系数 δ_M 的取值需要对其展开统计工作进行确定,这里根据[9]暂取为 0.266.

表 4 预制构件检验时裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值时的可靠指标和失效概率

Tab.4The reliability indexes and failure probabilities of prefabricated member with its crack width up to the maximum allowable values of crack width

设计要求的最大裂缝宽度限值	0.2	0.3	0.4
$[\omega_{\max}]$	0.15	0.20	0.25
可靠指标	0.61	1.11	1.42
失效概率/%	27.09	13.35	7.78

表 6 基本变量数字特征不同时的可靠指标

Tab.6 The reliability indexes with different number characteristics of basic variables

$[\omega_{\max}]$	均值系数		变异系数		可靠指标
	M	E_s	M	E_s	
0.15mm	1.1	1.0	0.266	0.06	0.23
	1.1	1.0	0.266	0.08	0.22
	0.9	1.0	0.266	0.06	1.07
	0.9	1.0	0.266	0.08	1.04

4 结论

本文研究了钢筋混凝土预制构件结构性能检验时,构件裂缝宽度达到国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范(GB50204-2002)》^[6]规定的最大裂缝宽度允许值 0.15mm、0.2mm 和 0.25mm 时构件所具有的可靠指标和失效概率。使得基于试验的结构性能检验不仅只是关于对试验结果的分析,即只考虑试验结果是否满足检验标准的要求,而是对钢筋混凝土预制构件裂缝宽度检验方法进行了概率的分析和探讨,从而对检验结果给出可靠性评估。通过分析,可以得到以下结论:

(1)按构件裂缝宽度达到最大裂缝宽度允许值进行预制构件检验的可靠性分析时,影响可靠指标的因素很多,有房屋类别、房屋所处环境、构件受力形式、构件截面高度、钢筋直径、混凝土保护层厚度、混凝土抗拉强度和构件裂缝宽度限值及检验允许值等。因此,在裂缝宽度检验过程中,对构件的检验项目不仅只是对裂缝宽度的测量,同时应该检验影响裂缝宽度的以上各主要因素,得到各基本变量的统计特性,对其检验结果进行可靠性计算及合理地评估。

(2)构件所处环境不同,设计要求的最大裂缝宽度也不同,对构件进行裂缝宽度检验,当其裂缝宽度达到规范规定的相应最大裂缝宽度允许值时,所具有的可靠指标是不同的。构件所处环境越好,设计要求的最大裂缝宽度越大,为了确保构件的可靠性,检验时应对其具有更高的要求,即计算所得的相应的可靠指标越大。

(3)可靠指标计算结果表明,按国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范(GB50204-2002)》^[6]规定的最大裂缝宽度允许值控制检验的条件下,所得可靠指标在 0~1.5 的范围内。

(4)在可靠指标的计算过程中,根据文献[9]取 δ_M 为 0.266,这就需要进一步展开统计工作以确定该值的合理性。

参考文献 Reference

- [1] 中华人民共和国建设部. (GB50068-2001)建筑结构可靠度设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
Ministry of construction of the People's Republic of China.(GB50068-2001)Unified standard for reliability design of building structures [S].Beijing:China Architecture and Building Press,2001.
- [2] 孙晓燕,黄承逵.既有钢筋混凝土桥梁正常使用极限状态可靠度分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2006,33(4):21-25.
SUN Xiaoyan, HUANG Chengkui. Methods of reliability based on serviceability limited state for existing reinforced concrete bridges[J].Journal of Hunan University:Natural Sciences,2006,33(4):21-25.
- [3] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
ZHAO Guofan, JIN Weiliang, GONG Jinxin. The structural reliability theory [M].Beijing: China Architecture and Building Press,2000.
- [4] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版社,1990.
WU Shiwei. The reliability analysis of structures [M].Beijing: China communication press, 1990.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. (GB50010-2010)混凝土结构设计规范 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Housing and urban-rural development of the People's Republic of China.(GB50010-2010)Code for design of concrete structures [S].Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [6] 中华人民共和国建设部.(GB50204-2002)混凝土结构工程施工质量验收规范 [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
Ministry of construction of the People's Republic of China.(GB50204-2002)Code for acceptance of constructional quality of concrete structures [S].Beijing: China Architecture and Building Press,2002.
- [7] 潘景龙.混凝土结构性能评定与检验[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1997.
PAN Jinglong. The performance assessment and test of concrete structures[M].Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press,1997.
- [8] 金伟良,陆春华,王海龙.500级高强钢筋混凝土梁裂缝宽度试验及计算方法探讨[J].土木工程学报,2011,44(3):16-23.
JIN Weiliang,LUChunhua,WANGHailong. Experiment and calculation of crack width of reinforced concrete beams with 500MPa steel bars[J].China Civil Engineering Journal,2011,44(3):16-23.
- [9] 史志华,胡德忻,陈基发,等.钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态可靠度的研究[J].建筑科学,2000,16(6):4-11.
SHI Zhihua,HUDEXIN, CHEN Jifa, et al. Research on reliability of serviceability limit states for structural members of reinforced concrete[J].Building Science, 2000,16(6):4-11.
- [10] 赵羽习,金伟良.正常使用极限状态下混凝土结构构件可靠度的分析方法[J].浙江大学学报:工学版,2002(6):674-679.
ZHAO Yuxi,JINWeiliang.Methods of reliability based on serviceability limited state for concrete structural members[J].Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2002,36(6):674-679.
- [11] 余敏利.钢筋混凝土受弯构件正常使用极限状态的可靠度研究[D].广州:华南理工大学,2012.
YU Minli.Analysis on Reliability of Serviceability Limit States for Reinforced Concrete Flexural Members[D].Guangzhou: South China University of Technology,2012.

Analysis on the technical attribute of urban residential building energy consumption index—Xi'an City as an example

ZHANG Weihua¹, HU Zhen², LIU Jiaping¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstracts: By selecting residential buildings in Xi'an City as examples, this paper presents a practical survey of thermal parameters' residents' income and family population in the residential buildings of different time, different floor areas and different structures. The distribution of heat consumption of different quality grade construction unit is established through filed testing, computation and simulative analysis on the thermal property and heat consumption of these buildings.

Key words: urban residential building; energy consumption; energy consumption per unit area

(本文编辑 沈波)

(上接第 379 页)

Reliability analysis of crack width inspection for prefabricated members of reinforced concrete

CHENG Kaikai, YAO Jitao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the principle of structural reliability theory and the structural performance inspection method for prefabricated member of reinforced concrete, the calculation method of the reliability index is analyzed for prefabricated member of reinforced concrete under the crack width inspection. For prefabricated members of reinforced concrete, reliability evaluation was carried out for the allowable values of crack width that specified in code. Reliability indexes were established as its crack width was inspected.

Key words: reinforced concrete; prefabricated member; serviceability limit states; crack width inspection; reliability index;

(本文编辑 吴海西)

中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊 收录证书

西安建筑科技大学学报. 自然科学版

依据文献计量学的理论和方法, 通过定量与定性相结合的综合评审, 贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊, 特颁发此证书。

证书编号: CSCD2013C-0746

有效期: 2013 年-2014 年

发证日期: 2013 年 7 月

查询网址: www.sciencechina.ac.cn

中国科学院文献情报中心
中国科学引文数据库

