

钢筋混凝土结构构件体系可靠度分析

赵会香¹, 吴胜兴², 夏颂佑³

(1. 安徽省水利厅综合技术协调处, 安徽合肥 230022; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098;
3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 结合钢筋混凝土结构构件的开裂特性,提出了在非线性随机有限元基础上求解体系可靠度的简化计算模型,在此基础上解决了承载能力极限状态下正截面钢筋混凝土梁体系可靠度及正常使用极限状态下钢筋混凝土结构构件限制裂缝开展宽度体系可靠度计算问题,算例分析表明本文方法是合理可行的.

关键词 非线性随机有限元,钢筋混凝土结构,体系可靠度

中图分类号 :TU375 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)03-0111-03

目前,钢筋混凝土结构的可靠度计算主要集中在杆件结构系统,有关非杆件系统的研究极少,本文拟在这方面做一些探索研究.对钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态下的可靠度计算,传统方法采用规范给出的验算公式,从而只能人为假定各经验系数的统计参数.如果直接在非线性随机有限元基础上求解,可以回避以上困难,从而能在一定程度上解决钢筋混凝土结构构件承载能力和正常使用极限状态实际可靠度真值计算问题.

1 钢筋混凝土结构构件体系可靠度计算模型

要确定结构构件体系可靠度,必须知道其失效模式,对于钢筋混凝土杆件结构体系,可用机构分支理论寻求失效模式,但对属于非杆件系统的一般钢筋混凝土结构构件,由于它们的失效模式很复杂,因而有关其体系可靠度的求解仍处于初步探索阶段.注意到普通钢筋混凝土结构构件的破坏几乎都是由裂缝开始,最终破坏是在很多裂缝截面中的一个(或一个以上)截面上发生,因此可以利用裂缝截面的破坏性质简化钢筋混凝土结构构件体系可靠度计算模型.

钢筋混凝土结构构件通常是带裂缝工作的,从严格意义上讲,每个裂缝截面或大或小都存在破坏的可能,根据文献[1],可以假定任意两裂缝截面间是不相关的,若结构构件有 n 个裂缝截面,那么 n 中任一截面的破坏都标志着整个系统的失效,从而其系统可靠度问题可模型化为有 n 个元件的串联系统,每个裂缝截面对应一种失效模式,一般讲各失效模式的失效概率是不同的,在实际计算中,对已求得失效概率的各裂缝截面,可根据精度要求进行筛选,删除失效概率在数量级上远远小于最大失效概率的截面,即保留主要失效模式,最后根据这些主要失效模式求解体系可靠度.假定主要失效模式数为 n ,体系可靠度计算公式可简化为^[2]:

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_{fi} - \sum_{j < i=2}^n P_{fi} P_{fj} \tag{1}$$

在工程结构设计中,结构构件的极限状态可分两类:承载能力极限状态和正常使用极限状态.以下就这两种极限状态分别讨论钢筋混凝土结构构件体系可靠度求解方法.

2 承载力极限状态钢筋混凝土梁正截面体系可靠度

钢筋混凝土梁根据梁内配筋的多少,可分为适筋梁、超筋梁和少筋梁.对于钢筋混凝土单筋矩形截面适筋梁,其失效模式是受拉纵向钢筋先达到屈服,经一段流幅后,压区混凝土边缘应变达到其极限压应变,最终以该部位混凝土压碎而丧失承载力,因此对某一失效模式 i 可建立相应的极限状态方程

收稿日期:1998-10-15
作者简介:赵会香(1970—)女,甘肃天水人,博士,水工结构专业,主要从事钢筋混凝土结构及随机有限元方面的研究.

$$g_{ia}(X) = f_y - \sigma_s$$

(2)

$$g_{ib}(X) = \varepsilon_{cu} - \varepsilon_2$$

(3)

式中 $X=[X_1, X_2, \dots, X_3, X_n]$ 为随机向量; f_y ——钢筋的屈服强度; σ_s ——钢筋计算拉应力, $\sigma_s = \sum_{l=1}^m \Delta\sigma_{sl}$, $\Delta\sigma_{sl}$ 为钢筋单元的增量应力, m ——增量总级数; ε_{cu} ——混凝土非均匀受压时的极限压应变; ε_2 ——压区边缘混凝土主压应变, $\varepsilon_2 = \sum_{l=1}^m \Delta\varepsilon_{2l}$, $\Delta\varepsilon_{2l}$ 为混凝土单元的主压应变. 由于 ε_{cu} 的统计参数很难得到, 故采用 Darwin 和 Pecknold 破坏模式^[3]将式(3)等效为用应力表示的受压区混凝土极限状态方程:

$$g_{ib} = (\sigma_2 + 3.65\sigma_1)f_c - (\sigma_1 + \sigma_2)^2$$

(4)

记 A 为事件 $g_{ia}(X) \leq 0$, B 为事件 $g_{ib}(X) \leq 0$, 则失效模式 i 的失效概率为:

$$p_{fi} = P[g_{ia}(X) \leq 0 \cap g_{ib}(X) \leq 0] = P(A \cap B) = P(AB) = P(A)P(B|A)$$

(5)

由式(2)可求出受拉钢筋屈服的可靠指标 β_{fia} 及对应的失效概率 p_{fia} , 即有

$$P(A) = p_{fia}$$

(6)

再根据式(4)可求出钢筋屈服状态时截面受压区边缘混凝土单元压碎的可靠指标 β_{fib} 及对应的失效概率 p_{fib} , 即

$$P(B|A) = p_{fib}$$

(7)

于是,

$$p_{fi} = P(AB) = p_{fia}p_{fib}$$

(8)

采用文献[2]的钢筋混凝土非线性随机有限元计算方法, 在荷载增量步迭代过程中, 能求得整个梁的所有主要裂缝截面位置, 每一裂缝截面对应一种失效模式, 于是可由式(8)求出对应的失效概率 p_{fi} , 根据精度要求保留主要失效模式, 再由式(1)求解梁的体系可靠度.

对于钢筋混凝土正截面少筋梁和超筋梁, 可建立与式(2)和式(3)类似的极限状态方程求解体系可靠度.

算例1: 如图1所示集中荷载作用下的简支梁, 跨度为 $l = 1800\text{ mm}$, $b \times h = 200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, $h_0 = 375\text{ mm}$, 混凝土强度等级为 C_{25} , 泊松比 $\mu = 0.167$, 截面底部配置4根纵向受力钢筋 $4\Phi 12$, 随机变量统计特性见表1.

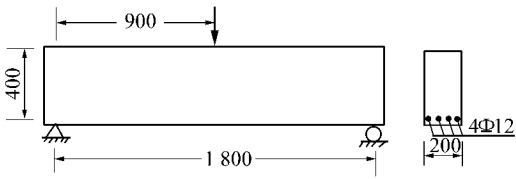


图1 计算模型

Fig.1 Computation model

表1 随机变量统计特性

Table 1 Statistical characteristics of random variables

	P/N	E_s/MPa	E_0/MPa	f_y/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa	S/mm
分布	正态	正态	正态	正态	对数正态	对数正态	正态
均值	75 000	2.0×10^5	2.9×10^4	350	24.31	2.50	0.05
变异系数	0.2	0.033	0.05	0.10	0.19	0.16	0.30

用笔者研制的钢筋混凝土非线性随机有限元程序计算, 混凝土、钢筋、粘结单元数分别为 1 440, 72, 73, 荷载共分 15 级, 当荷载增加到 $\mu p = 75\text{ kN}$ 时, 计算结果见表 2, 梁内共产生 6 条裂缝, 对于失效概率小于 10^{-10} 的截面, 可作为极小概率事件而略去, 于是得主要失效模式数为 5, 代入式(1)计算得体系失效概率 $p_f = 0.277\,569 \times 10^{-6}$, 对应的体系可靠指标 $\beta = 5.01 > 3.7$, 达到了一级建筑物承载能力目标可靠指标的要求, 说明此简支梁在设计荷载作用下是十分安全的.

表2 计算结果

Table 2 Computational results of example one

裂缝截面编号	位置/mm	$P(A)$	$P(B A)$	失效概率 p_{fi}	可靠指标 β_i	体系可靠指标 β
1	562.5	0.134×10^{-10}	0.281×10^{-9}	0.376×10^{-20}		
2	837.5	0.861×10^{-6}	0.114×10^{-2}	0.982×10^{-9}	7.19	
3	862.5	0.199×10^{-5}	0.768×10^{-2}	0.153×10^{-7}	5.66	
4	887.5	0.263×10^{-5}	0.420×10^{-1}	0.110×10^{-5}	5.18	
5	912.5	0.346×10^{-5}	0.435×10^{-1}	0.151×10^{-6}	5.10	
6	1 137.5	0.814×10^{-7}	0.332×10^{-2}	0.270×10^{-9}	8.92	

3 正常使用极限状态钢筋混凝土结构构件体系可靠度

许多设计经验表明, 正常使用极限状态在某些情况下, 往往对截面的选择和材料的用量起控制作用. 本

文仅对正常使用极限状态下钢筋混凝土构件控制裂缝宽度方面的可靠度分析作一探讨 ,作为推进这方面工作的一个尝试 ,其思路和方法用于钢筋混凝土构件挠度可靠度分析也是可能的。

根据文献 [2] ,采用非线性随机有限元计算手段 ,对于某一开裂稳定后的裂缝 ,可对其上所有单元建立极限状态方程 :

$$g(X)=w_s-w=0$$

(9)

式中 : w_s ——正常使用允许最大裂缝宽度 ,mm ; w ——实际计算最大裂缝宽度 ,mm. w_s, w ——随机变量 ,因限制裂缝宽度的可靠指标值较小 ,通常在 1~2 之间 ,对应失效概率大于 10^{-3} ,因而可靠指标值对 w_s 的统计分布类型不敏感 ,可近似认为服从正态分布^[4] ,变异系数可暂取 $\delta_{us}=0.10$ ^[5]。

由式 (9) 用非线性随机有限元可求出某一裂缝截面上所有单元的可靠指标 β_{ij} 及对应的失效概率 p_{fij} ,用最大裂缝宽度所在单元的失效概率代表该裂缝截面的失效概率 p_{fi} ,然后根据精度要求保留主要裂缝截面 ,即找出主要失效模式 ,于是可用式 (1) 求解体系可靠度。

算例 2 :仍取算例 1 简支梁模型 ,随机变量及统计特性不变。

表 3 列出了允许最大裂缝宽度均值 $\mu_{us}=0.3\text{ mm}$,变异系数 $\delta_{us}=0.10$,服从正态分布时的计算结果 ,对应体系可靠指标 $\beta=1.564$,在规范规定的 1~2 范围内 ,说明该简支梁达到了正常使用极限状态的可靠度要求水平。

4 结 束 语

表 3 算例 2 的计算结果

Table 3 Computational results of example two

裂缝截面编号	位置 /mm	最大裂缝宽度均值/mm	失效概率 p_{fi}	可靠指标 β_i	体系可靠指标 β
1	562.5	0.022	0.152×10^{-5}	4.664	$\beta=1.564$ ($p_f=0.58892 \times 10^{-1}$)
2	837.5	0.022	0.449×10^{-2}	2.606	
3	862.5	0.020	0.846×10^{-2}	2.382	
4	887.5	0.020	0.163×10^{-1}	2.131	
5	912.5	0.053	0.293×10^{-1}	1.887	
6	1137.5	0.024	0.372×10^{-3}	3.365	

分析表明本文方法是合理可行的。钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态的可靠度分析目前仍很不成熟 ,本文采用钢筋混凝土非线性随机有限元计算手段直接求解每条裂缝的最大开裂宽度及可靠度 ,避开了传统分析中用规范给出的验算公式时无法确定各经验系数的统计参数这一困难 ,在一定程度上解决了钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态实际可靠度真值的计算问题。

参考文献 :

[1] 解伟. 水工混凝土结构可靠度研究[D][学位论文]. 南京 :河海大学 ,1997.
[2] 赵会香. 钢筋混凝土非线性随机有限元及可靠度分析[D][学位论文]. 南京 :河海大学 ,1998.
[3] 宋玉普, 赵国藩. 钢筋混凝土结构分析中的有限单元法[M]. 大连 :大连理工大学出版社 ,1994. 38~50.
[4] 赵国藩. 钢筋混凝土构件裂缝控制可靠度的近似概率分析[J]. 工业建筑 ,1984(1) :23~29.
[5] GBJ10—89 混凝土结构设计规范[S].

System Reliability Analysis of Reinforced Concrete Structures

ZHAO Hui-xiang WU Sheng-xing XIA Song-you

(1. The Water Conservancy Department of Anhui Province ,Hefei 230022 ,China ;

2. College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098 ,China ;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098 ,China)

Abstract : In consideration of the cracking characteristics of reinforced concrete structures ,a simplified model for calculating system reliability by use of nonlinear SFEM is presented. Thus ,the system reliability of bending RC structures under serviceability limit states of controlling cracking width is solved. The analysis of calculation examples shows that the method is reasonable and feasible.

Key words : nonlinear SFEM ;RC structures ;system reliability