

文章编号:1673-9469(2010)02-0022-03

基于未确知数学理论的建筑结构可靠性分析

焦利军,李军

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:本文结合结构可靠性评估特点,应用未确知测度、置信度的概念,建立了基于未确知测度的工程结构可靠性评估模型,并结合工程实例,验证该模型在处理大量不确定性影响因素时丢失信息少,得到的评估结果能够客观全面地反映结构可靠性。该评价方法操作相对简单,满足工程需要,更加实用。

关键词:结构可靠性;未确知数学;等级评价;不确定性因素

中图分类号: TU311.2

文献标识码: A

Structural reliability of building based on unascertained mathematics

JIAO Li-jun, LI Jun

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: For the features of structural reliability assessment, the unascertained measure model and the incredible degree were applied to establish a model of evaluating of structure reliability based on unascertained measuring. Practical project was used to verify the efficient of the model by dealing with many uncertainty factors with less loss of information, and the assessment results received can be objectively and comprehensively reflect the structural reliability. The evaluation method was relatively simple to meet project needs and was practically.

Key words: structural reliability; unascertained mathematic; rank evaluation; uncontained factors

既有结构可靠性评估的理论基础是结构体系可靠性理论,主要包括以下3项内容:寻找和构建结构体系主要失效模式;根据失效模式的极限状态方程计算模式失效概率;由主要失效模式的模式失效概率计算体系的失效概率。由于工程结构一般具有很高的冗余度,失效模式多,且失效模式之间的相关性复杂。对于既有结构,因为要考虑各失效模式在已经历的荷载历史中的表现既验证模式问题,使得实效概率的计算更复杂。针对上述3个内容国内外学者进行了大量的研究工作。目前,通过评级进行结构体系的可靠性评估不失为一种实用可行的方法。

我国现行《民用建筑可靠性鉴定标准》均采用评级的方式评估结构体系的可靠性。然而,现有的评级方法没有考虑不同构件对结构体系可靠性的不同影响,评定结果往往和实际情况有一定差

距;且对于复杂结构,现有方法不易操作,在实际工程中较难应用。

本文运用未确知测度评价模型,结合工程结构可靠性评估的特点,根据已建立的工程结构可靠性的4个状态等级,构造结构可靠性状态评估的未确知测度模型,从而合理准确地确定工程结构的可靠性状态等级。

1 可靠性状态评价

1.1 可靠性评价等级的划分

结构可靠性等级评价是对工程结构自身抗力条件、荷载因素和整体结构的形式及环境因素的综合评价。评级时首先根据结构可靠性,把结构划分为适合的可靠性等级。从结构设计的角度来

看,对建筑结构可靠性的评估结果一般是取两个互补集合,即可靠与不可靠。但从建筑管理和使用的角度来看,划分成两个集合评定起来并不适用于现实中的复杂情况;而如果划分得过多,则由于级差小,以及分级标准的困难和管理管理工作的复杂化,使得评估工作更难操作。

文献[2]中建立了 4 个等级:第一等级为可靠,第二等级为基本上可靠能正常使用,第三等级为需要维修,第四等级为不能继续使用必须立即采取措施。根据工程实践经验,将结构划分成 4 个等级是非常恰当的。建立对应的评价等级集合 U 为

$$U = \{a_1, a_2, a_3, a_4\} = \{\text{一级, 二级, 三级, 四级}\}$$

表 1 工程结构可靠性状况的影响指标体系

Tab.1 Influence index system on reliability of the project structure

	板 $C_1(0.060)$
结构自身	柱 $C_2(0.326)$
抗力条件	主梁 $C_3(0.107)$
$A_1(0.48)$	次梁 $C_4(0.18)$
可靠	墙体 $C_5(0.326)$
性状	风荷载 $C_6(0.18)$
况评	雪荷载 $C_7(0.22)$
价	载状况
$A_2(0.22)$	地震作用 $C_8(0.28)$
	自重 $C_9(0.32)$
其他因素	结构设计水平 $C_{10}(0.36)$
$A_3(0.3)$	工程施工水平 $C_{11}(0.33)$
	地基及周围设施状况 $C_{12}(0.31)$

1.2 评价因素集合的确定

评价因素集合 C 如表 1 所示,将最下层的 12 个指标作为工程结构可靠性综合评价的因素,则有 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{12}\}$ 。其主要其指标空间记为 X ,则 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}$ 。用 x_i 表示可靠性状况的第 i 个测量值,对 x_i ,有 p 个评价等级 a_1, a_2, \dots, a_p 。评价空间记为 U ,则 $U = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 第 k 级 a_k 比第 $k+1$ 级“强”,记为 $a_k > a_{k+1}$ 。若 $a_1 > a_2 > \dots > a_p$,称 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 是评价空间 U 上的一个有序分割类。各个指标的取值采用定性指数取值方法,相对指数组别见表 2。

表 2 可靠性等级相对指数表

Tab.2 The relative index of reliability grade

可靠性等级	a	b	c	d
相对指数	1	3	5	7

现根据工程设计的应用规范、以往实际历史经验并结合可靠性等级相对指数表对影响工程结构可靠性评估的各指标进行指数量化,得出指标数(表 3)。

表 3 可靠性评价指标的估算、测量数据表

Tab.3 The estimation and tested date of reliability evaluation index

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
数值	1	2	2.5	1.5	4.5	1	3.5	1.5	4.5	6.5	1.5	7

2 工程结构可靠性评价的未确知测度模型

2.1 单指标未确知测度

若 $u_{ik} = u(x_i \in c_k)$ 表示测量值 x_i 属于第 k 个评价等级 c_k 的程度,则 u 满足

$$0 \leq u(x_i \in c_k) \leq 1 \tag{1}$$

$$u(x_i \in U) = 1 \tag{2}$$

$$u | x_i \in \bigcup_{i=1}^k c_i = \sum_{i=1}^k u(x_i \in c_i) \tag{3}$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p; l = 1, 2, \dots, k$; 式(2)称为 u 对评价空间 U 满足“归一性”;式(3)称为 u 对评价空间 U 满足“可加性”。称满足式(1)、(2)、(3)的 u 为未确知测度,简称测度。称矩阵

$$(u_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{np} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{4}$$

为单指标测度评价矩阵。

2.2 指标权重

用 w_i 表示指标 x_i 的权重, w_i 满足

$$0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^n w_i = 1 \tag{5}$$

称 (w_1, w_2, \dots, w_n) 为指标权重向量。

由表 1 评价指标体系采用结合文献[5]确定各指标权重。其中第一评价层次分为 $W = \{w_{A_1}, W_{A_2}, W_{A_3} = \{0.48, 0.22, 0.3\}\}$ 。

第2层次中权重大小分配分别为

$$A_1 = \{0.060, 0.326, 0.107, 0.180, 0.326\};$$

$$A_2 = \{0.180, 0.220, 0.280, 0.320\};$$

$$A_3 = \{0.360, 0.330, 0.31\};$$

最终确定12种影响指标权重为

$$(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9, w_{10}, w_{11}, w_{12}) \\ = (0.03, 0.15, 0.05, 0.08, 0.15, 0.04, 0.048, \\ 0.062, 0.07, 0.108, 0.099, 0.095)$$

2.3 多指标综合测度评价向量

若 $u_k = u(M \in c_k)$ 表示被评价对象可靠性状况 M 属于第 k 等级的程度, 则

$$u_k = \sum_{i=1}^n w_i u_{ik} \quad (6)$$

因为, 显然有 $0 \leq u_k \leq 1$, $\sum_{k=1}^p u_k = 1$, 所以式(6)确定的 u_k 是未确知测度, 称向量

$$u_k = (u_1, u_2, \dots, u_p) \quad (7)$$

为多指标综合测度评价向量。

2.4 置信度识别准则

$\{a_1 > a_2 > \dots > a_p\}$ 为评价空间 U 的一个有序分割类, 置信度 $\lambda = 0.5$, 令

$$k_0 = \min \left\{ k : \sum_{i=1}^k u_i > \lambda, k = 1, 2, \dots, p \right\} \quad (8)$$

则判断可靠性状况 M 属于第 k_0 个等级 c_{k_0} 。

当评价空间 U 被有序分割时, 最大隶属度识别准则将不再适用。

3 工程实例

某一建筑物可靠性评估的各因素测量估算数据见表3, 该建筑工程结构可靠性全影响指标空间为 $X = \{u_1, u_2, \dots, u_{12}\}$, 评价空间 $U = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ 。

3.1 单指标测度函数构造

构造单指标测度函数 $u(x_i \in c_p)$, 以求得各测度值 u_{ik} , 并求出评价对象 M 的测度空间 $(u_{ik})_{12 \times 4}$, $1 \leq i \leq 12, 1 \leq k \leq 4$ 。根据表1指标的划分标准, 按分级标准从严考虑, a_1 级指标特征值以区间数给出者取区间下限值作为 a_1 级标准; a_4 级指标特征值取区间上限值作为 a_4 级标准; a_2 、 a_3 级则取区间数的中值作为分级标准。根据未确知

测度的定义, 可以构造出所有评价指标的测度函数, 由测度函数求出各单指标的测度值 u_{ik} 。由表3的测量、估算数据及建立的各个指标测度函数, 得单指标测度评价矩阵为

$$(u_{ik})_{12 \times 4} = \begin{array}{cccc|l} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & u_i \\ 1 & 0 & 0 & 0 & u_1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & u_2 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 & u_3 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & u_4 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 & u_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & u_6 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & u_7 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & u_8 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 & u_9 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0.75 & u_{10} \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & u_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & u_{12} \end{array}$$

3.2 多指标综合测度评价向量

影响建筑结构可靠性的因素见表1, 各个因素对于工程结构可靠性评估的权重向量为

$$(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9, w_{10}, w_{11}, w_{12}) \\ = (0.03, 0.15, 0.05, 0.08, 0.15, 0.04, 0.048, \\ 0.062, 0.07, 0.108, 0.099, 0.095)$$

由单指标测度评价矩阵及指标权重向量按公式(6)用 Matlab 进行计算得出多指标综合测度评价向量为

$$u_k = (0.3383, 0.2638, 0.2040, 0.1760) \quad (9)$$

3.3 置信度识别

取置信度 $\lambda = 0.6$, 由公式(8)和综合评价向量式(9)可以判别该工程结构可靠性评价等级为二级, 即基本可靠能正常使用。

4 结论

在应用本文提出的未确知数学模型对实际工程结构的可靠性进行评价过程中, 针对结构的各个受力情况进行综合评定, 合理地量化不同构件在受力时的可靠性状况。从评价的过程可以看出, 不仅整个结构体系的可靠性可以从量化结果判断得到, 而且结构的各个构件的可靠性状况也可以从评价矩阵中直观看出, 为结构的检修加固工作提供了数据参考, 更为实用。(下转第29页)

- [3] 姜新佩, 刘丽娜, 邓子辰. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 492 - 497.
- [4] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] 王小燕, 闫博文, 姜新佩. 预应力碳纤维加固 RC 梁的有限元分析[J]. 华北水利水电学报, 2009, 30(2): 40 - 44.
- [6] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 袁勇. 混凝土结构早期裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 张可禾, 周立欣, 董亚男. CFRP 加固带裂疑向板的计算及有限元分析[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(4): 301 - 305.
- [9] 邓子辰, 姜新佩. 预应力碳纤维加固混凝土梁技术问题探讨[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 15 - 18.
- [10] 姜新佩, 王小燕, 刘丽娜. 预应力碳纤维加固 RC 梁挠度和裂缝计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 10 - 13

(责任编辑 马立)

(上接第 21 页)前用了较多荷载子步数且产生较小位移,具有良好的性能。有限元仿真分析能够较好地模拟湿式外包钢加固 RC - L 形柱的力学性能,可以取代部分实体实验,为实际工程应用提供可靠的参考。

参考文献:

- [1] GHOBABAH A, SAID A. Shear strengthening of beam - column joints[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24: 881 - 888.
- [2] HADIMNS. Behavior of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading [J]. *Composite Structures*, 2007, 77(1): 92 - 96.
- [3] 刘瑛, 赵金先, 荣强. 湿式外包钢加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(1): 105 - 111.
- [4] GB50367 - 2006, 混凝土结构加固设计规范[S].

(上接第 24 页)

参考文献:

- [1] PARK S, CHOI S, SIKORSKY C, *et al.* Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(18 - 19): 5034 - 5050.
- [2] GB50292 - 99. 民用建筑可靠性鉴定标准[S].
- [3] 杨志民. 未确知信息的数学处理方法[J]. 中国管理科学, 2000, 11(8): 192 - 196.
- [4] 浦津修. 关于鉴定评级分级标准问题[J]. 工业建筑, 1990, 20(11): 5 - 8.
- [5] 陈少杰, 顾祥林, 张伟平. 层次分析法在既有建筑结构体系可靠性评定中的应用[J]. 结构工程师, 2005, 21(2): 31 - 35.

- [5] 张俊杰, 何陶. 型钢轻骨料混凝土梁正截面受弯裂缝实验[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 9(6): 482 - 485.
- [6] 李华, 黎立云. 钢管混凝土组合节点的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(1): 25 - 28.
- [7] 芳枋, 卫建祥, 慈军, 等. 工程结构的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008, 25(3): 30 - 33.
- [8] 谢征勋, 谢敏. 工程事故与安全 - 结构加固技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] 王吉忠, 杨辉, 王苏岩. CFRP 加固高强混凝土柱试验及有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(增刊): 6 - 10.
- [10] 郝文化, 肖新标. ANSYS7.0 实例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(责任编辑 马立)

- [6] 顾祥林, 陈少杰, 张伟平. 既有建筑结构体系可靠性评估实用方法[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 12 - 17.
- [7] 丁传波, 关柯, 李恩霖. 施工企业安全评价研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(3): 214 - 215.
- [8] 杨树标, 胡光园, 李荣华. 建筑结构的复合加层减震分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 1 - 4
- [9] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] FABIAN C H. Analysis of events in recent structural failures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(7): 1468 - 1481.
- [11] WALKER A C. Study and analysis of the first 120 failure cases, structural failures in buildings[M]. London: The Institution of Structural Engineers, 1981.

(责任编辑 马立)