

·工程抗震·

随机参数结构的抗震模糊可靠度分析

陈以新 (厦门大学建筑系)

提要: 本文利用随机有限元方法, 基于变形破坏准则, 综合考虑了结构参数的随机性, 场地类别的模糊性, 各震害等级界限的模糊性, 地震烈度的随机性与模糊性等一系列不确定因素对结构抗震可靠度的影响, 提出了随机参数结构的抗震模糊可靠度的综合评判方法。以一幢 12 层的框剪结构作为算例得到了该结构在使用期限内对各震害等级的模糊可靠度。研究表明, 上述诸不确定因素都能影响结构的抗震可靠度, 综合考虑诸不确定因素的影响可使结构的抗震可靠度分析更为科学。本文的研究成果可用于对现有建筑结构进行抗震可靠度评估, 并可用于指导基于可靠度理论的结构抗震设计。

关键词: 随机有限元 振震 随机性 模糊性 可靠度

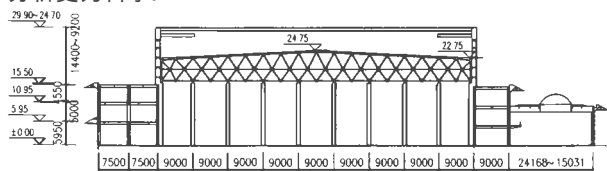
ASEISMIC FUZZY RELIABILITY ANALYSIS OF RANDOM PARAMETER STRUCTURE

Chen Yixin (Dept. of Architecture, Xiamen University)

Abstract: By use of random finite element method, the influence in seismic design of structures based on deformed failure principle is discussed in this paper. The influence factors include structural parameter randomness, ground classification fuzzy, earthquake damage magnitude scale fuzzy, earthquake intensity scale randomness and fuzzy. And Comprehensive aseismic fuzzy reliability judgement method is put forward. Through the calculation of a twelve-storey wall-frame structure, its fuzzy reliability ver earthquake damage magnitude scale in validate tenure of use is obtained. The research result show that aseismic reliability is influenced by the above factors, aseismic reliability analysis method accounting into the above factors in more scientific. The existing buliding's aseismic reliability is eyaluated and seismic design based on reliability is guided by this research result.

Keywords: Random finite element earthquake resistance Randomness Fuzzy Reliability

关于结构的抗震可靠度研究近年来一直是颇为活跃的研究领域, 然而由于问题的复杂性, 以往的学者在进行结构的可靠度分析时, 常常只计入一项至两项不确定因素的影响。事实上, 结构抗震可靠度的分析的不确定性除了地震发生的随机性外, 还包括烈度等级界限划分的模糊性, 场地类别划分的模糊性, 结构临界破坏界限的模糊性, 结构参数的随机性模糊因素的因响, 分析了随机参数结构的抗震模糊可靠度。以一幢 12 层的框剪结构作为算例, 结出了在使用期限内当刚度、质量、阻尼同时变异时, 该结构对各模糊震害等级的可靠度。本文提出的可靠度评判方法综合考虑了诸多随机因素、模糊因素的影响, 使得结构的抗震可靠度分析更为科学。



1、随机有限元分析

采用民间剪切模型, 计算简图如图 1 所示, 地震作用下, 剪切型结构的动力方程可表示为:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} + \dots = -[M] \{\ddot{x}_0\}(t) \quad (1)$$

当质量、阻尼和刚度为随机变量时, 即结构的特性矩阵 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 为随机矩阵时, 结构的地震响应为随机反应, 动力方程(1)成为随机微分方程。当考虑结构参数的随机性时, 将结构的参数用一阶矩和二阶矩表示, 则第 1 层的质量、阻尼系数、层间刚度分别为

$$\left. \begin{aligned} m_i &= m_{i0}(1 + C_{mi}l_i) \\ C_i &= C_{i0}(1 + C_{ci}l_i) \\ K_i &= k_{i0}(1 + C_{ki}l_i) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 m_{i0} 、 C_{i0} 、 k_{i0} 分别为参数 m_i 、 C_i 、 K_i 的一阶矩即期望值; C_{mi} 、 C_{ci} 、 C_{ki} 分别为参数 m_i 、 C_i 、 K_i 的二阶参数, 这里是变异系数, l_i 为均值等于 0 方差等于 1 的随机变量。

$$\text{即: } E(l_i) = 0 \quad \text{Var}(l_i) = 1$$

将质量矩阵 $[M]$ 、刚度矩阵 $[K]$ 、阻尼矩阵 $[C]$ 以及楼层位移 $\{x\}$ 按 Taylor 级数展开, 略去三阶及以上的高次项, 再代入动力方程(1), 即得到具有随机变量 l_i 、 l_j 的方程。由于 l_i 、 l_j 为随机变量, 要使方程恒成立, 必须使 l_i 、 l_j 的系数项对应相等, 这样便得到随机有限元的递推公式^[1]:

$$[M]^{(0)} \{\ddot{x}\}^{(0)} + [C]^{(0)} \{\dot{x}\}^{(0)} + [K]^{(0)} \{x\}^{(0)} = -[M]^{(0)} \{\ddot{x}_0(t)\} \quad (3)$$

$$[M]^{(0)} \{\ddot{x}\}^{(1)} + [C]^{(0)} \{\dot{x}\}^{(1)} + [K]^{(0)} \{x\}^{(1)} = -[M]^{(0)} \{\ddot{x}_0(t)\} - [M]^{(1)} \{\ddot{x}\}^{(0)} - [C]^{(1)} \{\dot{x}\}^{(0)} - [K]^{(1)} \{x\}^{(0)} \quad (i=1, \dots, n) \quad (4)$$

$$[M]^{(0)} \{\ddot{x}\}^{(2)} + [C]^{(0)} \{\dot{x}\}^{(2)} + [K]^{(0)} \{x\}^{(2)} = -[M]^{(1)} \{\ddot{x}\}^{(1)} - [C]^{(1)} \{\dot{x}\}^{(1)} - [K]^{(1)} \{x\}^{(1)} - [M]^{(2)} \{\ddot{x}\}^{(0)} - [C]^{(2)} \{\dot{x}\}^{(0)} - [K]^{(2)} \{x\}^{(0)} \quad (i, j=1, \dots, n) \quad (5)$$

通过求解随机有限元的递推方程, 即(3)~(5)式, 可得各层的地震动响应均值和标准差历时曲线

2. 基于场地类别模糊性的人工地震波的输入

参考文献[2]选取覆盖层厚度及平均剪切波速为评定因子, 以《抗震规范》[3]提出的场地分类标准为基础评定场地类别。为表述方便, 先将论域定义为 $[I_1, IV_1]$ 10 种情况如表 1 所示。

表 1 场地类别论域

场地土类型 (m/s)	场地覆盖层厚度 d (m)				
	0	$0 < d_v \leq 3$	$3 < d_v \leq 9$	$9 < d_v \leq 80$	$d_v > 80$
坚硬场地土 ($V_{sm} > 500$)	I_1	—	—	—	—
中硬场地土 ($500 \geq V_{sm} > 250$)	—	I_2		II_2	
中软场地土 ($250 \geq V_{sm} > 140$)	—	I_3	II_2	III_1	—
软弱场地土 ($V_{sm} \leq 140$)	IV_1	I_4		II_3	

相应评定因子的隶属函数假设为正态型 $\mu(x) =$

$$e^{-\left(\frac{x-k}{t}\right)^2} \quad (6)$$

式中 x 可以是覆盖层厚度,也可以是平均剪切波速或地基土平均承载力,系数 k 和 t 可根据当评定因子等于平均值,其隶属函数等于 1 及当物理范围的边界介于二者之间隶属度相等的原则确定,可参与文献[2]。

在给定评定因子的隶属函数的情况下,可采用下式求出表 1 中 10 种情况的模糊向量 I 为 $I=L \times R$ (7)

式中 R 为表 1 中所述情况与评定因子间的模糊关系,可根据式(6)确定; L 为评定因子对评定对象所起作用的模糊集。采用加权综合算法,即考虑 L 为

$$L = \frac{0.6}{d_v} + \frac{0.4}{V_{sm} \text{ 或 } R} \quad (8)$$

d_v 为覆盖层厚度, V_{sm} 为平均剪切波速, R 为地基土平均承载力。

若将表 1 中 10 种情况与《抗震规范》[3] 中的场地类别看作一个映射,则根据模糊数学的基本理论可求出给定模糊向量 I 的情况下,场地类别的模糊向量 C 为

$$C = \frac{V(I_j)}{I} + \frac{V(II_j)}{II} + \frac{V(III_j)}{III} + \frac{V(IV_j)}{IV} = \frac{C_1}{I} + \frac{C_2}{II} + \frac{C_3}{III} + \frac{C_4}{IV} \quad (9)$$

式中 V 为取大运算。

有了场地类别的模糊子集,以 C_1, C_2, C_3, C_4 的平方为权综合考虑各类场地土的影响,可得场地特征期的模糊评判值 T_g 为

$$T_g = \sum_{i=1}^4 \frac{C_i^2}{T_{gi}} / \sum_{i=1}^4 \frac{C_i^2}{T_{gi}} \quad (10)$$

式中 $\frac{1}{T_{gi}}$ 为具体地对第 i 类场地的隶属度, T_{gi} 为按《抗震规范》[3] 确定的第 i 类场地土的特征周期。

有了场地特征周期的模糊评判值 T_g , 根据《抗震规范》[3] 就可以确定具体场地的模糊 α 反应谱,即地震影响系数曲线。有了场地的模糊综合反应谱,依据文献[4] 中具有天然地震特征的人工地震波拟合反应谱法,编写了与目标反应相拟合的具有天然地震特征的人工地震波合成程序,经调试成功后,得到所需的人工地震波。

3. 考虑破坏状态模糊性的抗震可靠度分析

抗震结构在地震作用下的震害程度可划分为以下 5 个等级: $\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\} = \{ \text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌} \}$ 。这些破坏等级的定义具有很强的模糊性,从一个等级到相邻的等级是逐渐过渡的,不应该也不可能用结构用结构反应的某个确定值作为界限来截然分开。

我们用 B_i ($i=1, 5$) 表示这个 5 个模糊等级,即震害等级的论域可定义为^[5]: $\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5\} = \{ \text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌} \}$ 。每个模糊等级都结构反应 $x(t)$ (可以是位移、内力或累积能量反应等) 的值域上的模糊子集。在本文中,用结构的层间变形破坏指数即结构的层间位移角 x 来描述结构的破坏状态。计结构“不发生 B_i 或更高等级破坏”的模糊安全域为 B_i^* , 选取适当的函数,当 $x \geq 0$ 时, B_i^* 的隶属函数可以表示为:

$$\mu_{B_i^*}(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq d_{i-1}) \\ \frac{1}{2} \left[1 - \sin \left(\frac{x-d_{i-1}}{d_i-d_{i-1}} - \frac{1}{2} \right) \pi \right] & (d_{i-1} < x \leq d_i) \\ 0 & (x > d_i) \end{cases} \quad (11-a)$$

当 $x < 0$ 时, B_i^* 的隶属函数可以表示为:

$$\mu_{B_i^*}(x) = \begin{cases} 0 & (-d_{i-1} \leq x < 0) \\ \frac{1}{2} \left[1 - \sin \left(\frac{x-d_{i-1}}{d_i-d_{i-1}} - \frac{1}{2} \right) \pi \right] & (-d_i \leq x < -d_{i-1}) \\ 0 & (x < -d_i) \end{cases} \quad (11-b)$$

d_i ($i=1, 5$) 为模糊界限特征值,取不同破坏状态下结构层间极限位移角的均值,如表 2 所示^[6]

表 2 模糊界限特征值

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
1/500	1/350	1/150	1/80	1/33

设结构第 j 层“不发生 B_i 或更高等级破坏”的模糊可靠度 $P_{ij}(B_i^*)$

$$P_{ij}(B_i^*) = \int_{-d_i}^{d_i} \mu_{B_i^*}(x) f_j(x) dx \quad (12)$$

$f_j(x)$ 为在确定性地震烈度作用下结构第 j 层的最大层间位移角的概率密度函数,假定层间位移角满足对数正态分布,则

$$f_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln x}} \exp \left[-\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{2\sigma_{\ln x}^2} \right]^2 \quad (13)$$

$$\text{其中 } \mu_{\ln x} = \ln \left(\frac{\mu_j}{\sqrt{1 + \delta_j^2}} \right) \quad \sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln(1 + \delta_j^2)}$$

式中 μ_j, δ_j 分别为第 j 层最大层间位移角的均值及变异系数,已在随机有限元分析中得出。

若基于各层的破坏是个独立重复试验的假定,偏于安全地取结构体系“不发生 B_i 或更高等级破坏”的模糊可靠度为

$$R_r(B_i^*) = \prod_{j=1}^n P_{ij}(B_i^*) \quad (14)$$

式中 n 为结构的层数

4. 考虑地震烈度模糊性的抗震可靠度分析

鉴于目前我国地震学界、地震工程界及抗震设计中采用烈度的离散论域,为充分利用现有的地震危险性分析的成果,仍然采用烈度的离散论域,但每一个烈度等级应该是连续论域 $[0, 12]$ 上的一个模糊子集,称为模糊烈度等级 I_j 。模糊烈度 I_j 是个模糊区间,它在区间有中点值等于 1,在相邻烈度区间交界处对两个烈度的隶属度等于 0.5。根据以上特征,其隶属函数可写为^[7]

$$\mu_{I_j}(I) = \frac{1}{2} \left[\cos(I - I_j) \pi + 1 \right] \quad I [I_j - 1, I_j + 1] \quad (15)$$

若将原离散烈度等级 I_j 理解为模糊烈度为 I_j , 相应也有

$$P(I_j) = P(I_j) \quad (16)$$

结构在使用期内发生破坏的概率按下式计算:

$$P_f = \sum_j P(I_j) P_f(I_j) \quad (17)$$

式中, $P_f(I_j)$ 为结构遭遇模糊烈度 I_j 的地震时的破坏概率,可用下式计算:

$$P_f(I_j) = \sum_{I=1}^{I_j+1} \mu_{I_j}(I) P_f(I) \quad (18)$$

式中 $P_f(I)$ 为结构遭遇烈度 I 的地震时的破坏概率。

5. 算例

某已建 12 层框剪结构,计算简图如图 2、图 3 所示。设计烈度为 7 度,所在场地覆盖层厚度为 27m,平均剪切波速为 220.5m/s。各层的刚度、质量和阻尼的变异系数 C_k, C_m, C_c , 均为 0.1。

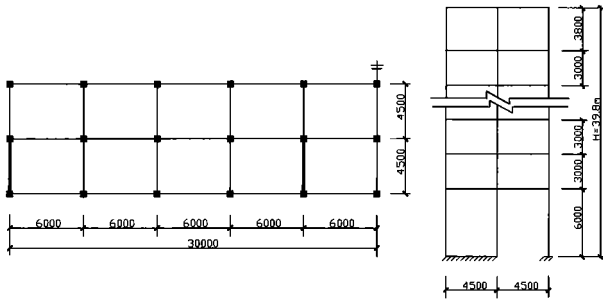


图2 平面简图 图3 剖面简图

根据式(7)、(8)、(6)可求得表1中10种情况的模糊向量

模糊向量 \tilde{I} 为

$$\tilde{I} = (0.6 \ 0.4)$$

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.64 & 0.9 & 0.0 & 0.0 & 0.48 & 0.0 \\ 0.0 & 0.35 & 0.86 & 0.0 & 0.35 & 0.86 & 0.0 & 0.86 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{0.0}{I_1} + \frac{0.14}{I_2} + \frac{0.34}{I_3} + \frac{0}{I_4} + \frac{0.52}{II_1} + \frac{0.88}{II_2} + \frac{0.0}{II_3} + \frac{0.34}{III} + \frac{0.5}{III} + \frac{0.0}{IV_1}$$

根据式(9)取隶属度大者得到场地类别模糊向量 \tilde{C}

$$\tilde{C} = \frac{0.34}{I} + \frac{0.88}{II} + \frac{0.5}{III} + \frac{0.0}{IV_1}$$

假定该场地受远震影响,根据式(10)及《抗震规范》^[3]可得该场地的模糊特征周期

$$T_g = \frac{\sum_{i=1}^4 \tilde{C}_i^2 T_{gi} + \sum_{i=1}^4 \tilde{C}_i^2}{\sum_{i=1}^4 \tilde{C}_i^2}$$

$$0.25 \times 0.34^2 + 0.4 \times 0.88^2 + 0.55 \times 0.5^2 = 0.42(s)$$

根据《抗震规范》^[3],可求得模糊 α 反应谱即地震影响系数曲线。基本烈度为7度时(即 $\alpha_{max}=0.225$),该场地的模糊 α 反应谱曲线如图4中虚线所示。图4中还给出了各类场地的 α 反应谱曲线。由图中可见,最终的设计反应谱既不同于按隶属度最大原则确定的谱,也有别有其他隶属度的谱。

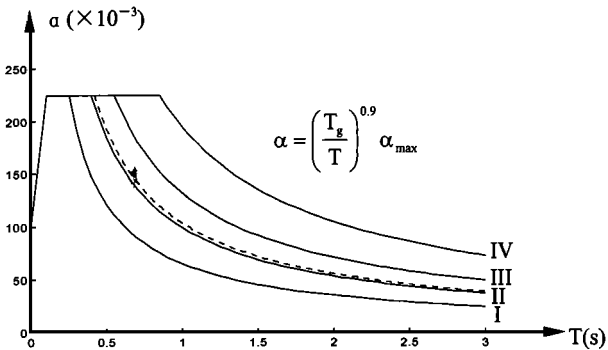


图4 各类场地反应谱和模糊反应谱

(----) 各类场地反应谱 (—) 模糊反应谱

采用具有天然地震特征的人工地震波合成方法,拟合该场地的模糊反应谱(拟合误差 < 5%),得到该场地的人工地震波时程曲线如图5所示。该场地的人工地震波反应谱曲线及模糊目标反应谱曲线如图6中所示。由图6可见人工地震波反应谱曲线与模糊目标反应谱曲线基本上吻合的。

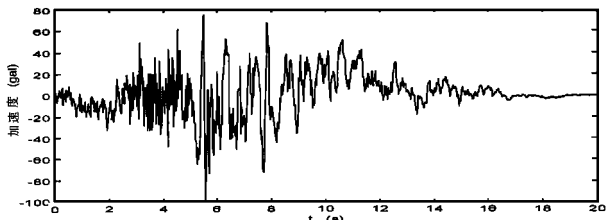


图5 人工地震波时程曲线

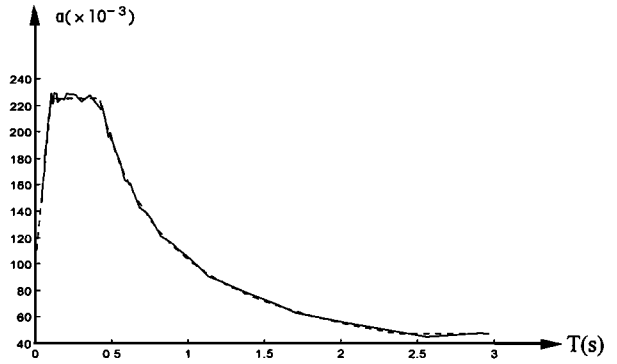


图6 人工地震波反应谱曲线

模糊反应谱曲线……

输入拟合的人工地震波,在随机有限元分析的基础上考虑各震害等级界限的模糊性和地震烈度的随机性与模糊。计算了在各模糊烈度等级的地震作用下,当刚度、质量、阻尼同时变异时($C_k=C_m=C_c=0.1$),该结构体系对各模糊震害等级的可靠度(为节省篇幅,数据结果略去)。并计算了使用期限内,当刚度、质量、阻尼同时变异时,该结构体系对各模糊震害等级的可靠度,如表3所示。

表3 使用期限内结构对各模糊震害等级的可靠度

模糊破坏状态	B_2^*	B_3^*	B_4^*	B_5^*
模糊可靠度	0.924869	0.980962	0.997836	0.999944

结语

本文综合考虑了结构参数的随机性,场地类别的模糊性,各震害等级界限的模糊性,地震烈度的随机性与模糊性等一系列随机因素、模糊因素的影响,研究了随机参数结构的抗震模糊可靠度。结果表明,上述一系列不确定因素都能影响结构的抗震可靠度,综合考虑诸不确定因素的影响可使结构的抗震可靠度分析更为科学。本文的研究成果可用于对现有的框架、剪力墙及框剪结构进行抗震可靠度评估,并可用于指导基于可靠度理论的结构抗震设计。

参考文献

- [1] 陈虬,赵雷,随机参数结构的地震可靠度分析,《工程力学增刊》,519~523,1997
- [2] 苏经宇,周锡元,谭健,场地类别模糊综合评定实用方法,岩土工程学报,12卷3期,1990
- [3] 建筑抗震设计规范(GBJ11-89),中国建筑工业出版社,北京,1989
- [4] 刘小弟,苏经宇,具有天然地震特征的人工地震波研究,工程抗震,3期,1992
- [5] 欧进萍,王光远,基于模糊破坏准则的抗震结构动力可靠性分析,地震工程与工程振动,6卷1期,1986
- [6] 钟益村,高小旺,龙明英,钢筋混凝土框架结构抗震鉴定方法,建筑科学,3期,1988
- [7] 李桂青,曹宏,李秋胜,霍达,结构动力可靠性理论及其应用,地震出版社,北京,1993