

钢筋混凝土结构构件的震害损伤失效分析

雷鸿君, 缪升, 王爱文

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 通过建立钢筋混凝土结构构件损伤值概念, 在结构构件综合损伤指标的基础上提出了服从威布尔分布的地震损伤失效概率模型, 初步探讨了利用该模型对结构构件进行损伤等级划分, 从而在实际结构构件设计和震后结构构件可靠性评估的方法, 并给出了算例。

关键词: 威布尔分布; 钢筋混凝土结构构件; 损伤; 可靠性

中图分类号: TB122

文献标识码: A

文章编号: 1007-855X(2001)02-043-04

0 引言

采用概率方法来进行地震危险性分析已为大多数人所接受, 由于地震作用的随机性、复杂性, 使得可靠性分析成为了一种研究地震作用的有效方法. 目前我国的抗震规范中, 对建筑结构、构件是以其最大反应为作可靠性分析的验算指标, 实际上, 结构构件在地震作用下的损伤破坏是多种因素的累积结果, 采用单一的最大反应指标不能确切地描述结构的弹塑性破坏强度及全面反映地震动的强度、频谱和持时的作用, 在此基础上的可靠性分析是有一定局限性的. 因此, 采用不同的方法研究结构构件在地震作用下的双重或多重损伤破坏模型的可靠性分析方法, 对研究结构构件的安全是有益的. 本文拟采用服从威布尔分布的损伤模型来分析地震作用下钢筋混凝土结构构件的损伤演变及可靠性.

1 地震作用下的损伤模型

1.1 损伤概念

借用损伤力学的观点定义结构构件的损伤就是结构构件在使用过程中出现的所有缺陷和不足; 损伤过程就是在外荷载、温度或环境效应等劣化因素的作用下, 结构构件发生的强度、刚度退化, 变形、能量耗散增长等性能逐渐劣化的渐进不可逆过程. 为了定量研究结构构件的损伤及其演变过程, 可以构造如下单调递增的连续函数:

$$D = D(x_1, x_2, \Lambda, x_n) \quad (1)$$

式中 D 为损伤值, 其大小反映结构构件的损伤程度, D 值的增长即代表了结构构件在使用过程中损伤逐渐累积的过程; $x_i (i = 1, 2, \Lambda, n)$ 为劣化因素, 这里称损伤随机变量.

1.2 震害损伤模型

钢筋混凝土结构构件在强地面运动下的受力性能有两个重要特点: 第一, 结构构件变形大, 在地震动持续时间短的情况下, 是结构构件损伤的主要原因; 第二, 在地震反复荷载作用下, 其滞变耗能增大, 材料性能发生退化, 如果地震作用持续时间较长, 结构构件滞变能耗累积所造成的损伤比重将加大, 甚至成为结构构件损伤的主要原因. 因此, 采用变形和滞变耗能双重破坏准则来描述钢筋混凝土结构构件的震害损伤破坏是恰当的. 这里采用 Park 等人提出的双重破坏指标^[3]:

$$D = \frac{x_m}{x_u} + \frac{\beta_c}{Q_y x_u} \varepsilon(\tau) \quad (2)$$

式中, x_m 为结构构件的最大位移反应, x_u 为一次加载下的极限位移; Q_y 为屈服强度, $\varepsilon(\tau)$ 为结构构件在时间 τ 内累积的滞变能量, β_c 为吸能因子, 反映了循环加载对结构构件损伤的影响, 其值非负, 由试验分析确

收稿日期: 2000-12-18;

第一作者简介: 雷鸿君(1973. 5~), 男, 在读硕士研究生; 主要研究方向: 防灾减灾及工程抗震.

定.

为简便计, 设变形损伤分量 $D_d = \frac{x_m}{x_u}$, 滞变耗能损伤分量 $D_e = \frac{\beta_c}{Q_y x_u} \varepsilon(\tau)$.

考虑到地震动的持续时间及不平稳特征, 地震荷载对结构构件的损伤可表示为:

$$D_t = D_{dt} + D_{et} \quad (3)$$

式中 $D_{dt} = \frac{x_t}{x_u}$, x_t 表示时刻 t 以前结构构件的最大位移反应.

D_t 为地震作用时刻 t 前结构构件的损伤程度, $D=0$ 表示结构构件无损伤, 处于安全状态; $D \geq 1$ 表示达到或超过结构构件的极限破坏界限; $0 < D < 1$ 则表示结构构件处于两者之间的某一损伤状态.

2 可靠性分析

2.1 失效分布函数的选择

在震害失效分析中, 通常采用正态分布或者对数正态分布. 正态分布的统计推断比较成熟, 公式较简单, 但难以确切描述震害的随机性, 分布中出现负值不符合实际情况, 对数正态分布较之正态分布趋于合理, 处理失效数据一般得到较为保守的结果, 但是无法处理震害指数为 0 的情况, 且用来拟合震害损伤分布, 从失效率函数的角度来看是存在问题的, 对数正态分布的失效率函数开始阶段是上升的, 然后又下降, 但从震害损伤失效机理来看, 失效率应是递增的, 最后一段总要上升. 而威布尔分布的失效函数是单调递增, 因此选择威布尔分布来拟合钢筋混凝土结构构件的震害损伤失效较符合震害损伤的实际情况, 与对数正态分布相比, 在分布带中心部分差别不大, 但在尾部区域有较大差别. 两种分布差别如图 1 所示.

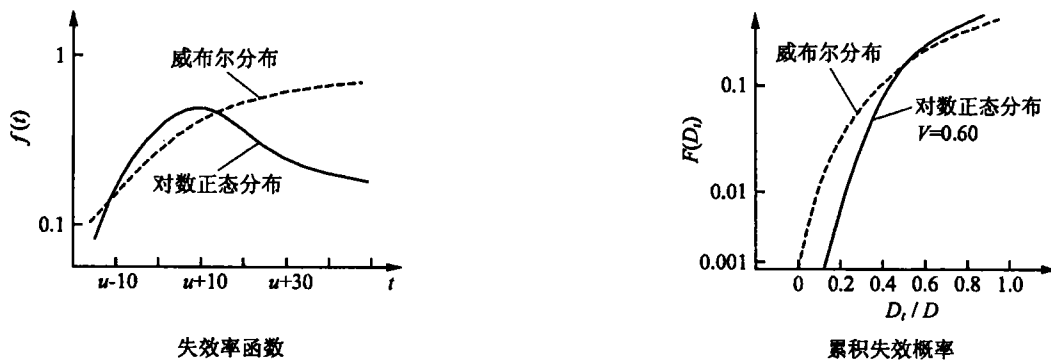


图1 威布尔分布和对数正态分布的比较

2.2 震害损伤两参数威布尔模型

在地震作用下, 假设钢筋混凝土结构构件的损伤服从威布尔分布. 本文采用两参数模型, 损伤值的分布函数和概率密度分布函数如下:

$$F(D) = 1 - \exp[-(D/\eta)^\beta] \quad (4)$$

$$f(D) = (\beta/\eta)(D/\eta)^{\beta-1} \exp[-(D/\eta)^\beta] \quad (5)$$

β 为形状参数, η 为尺度参数. 相应的均值、标准差和变异系数分别为:

$$\mu_D = \eta \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (6)$$

$$\sigma_D = \eta [\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)]^{1/2} \quad (7)$$

$$V_D = \frac{[\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)]^{1/2}}{\Gamma(1 + 1/\beta)} \quad (8)$$

式中 $\Gamma(*)$ 为 Gamma 函数, β, η 为非负值, 由实测数据拟合所得. 本文采用相关系数优化法^[4], 设

$$X_i = \ln D_i, Y_i = \ln \left(\ln \frac{1}{1-F_i} \right), \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中 F_i 为百分位秩, 则:

$$\beta = L_{XY} / L_{XX}, \eta = \exp(\bar{X} - \bar{Y}) L_{XY} / L_{XX} \quad (9)$$

其中,

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum Y_i, \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$L_{XX} = \sum X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum X_i \right)^2$$

$$L_{XY} = \sum X_i Y_i - \frac{1}{n} \sum X_i \sum Y_i$$

实际运用时, 先根据地震动试验数据或实际检测到的结构构件的地震反应, 按照第二部分方法计算出地震作用下各幅值相应的损伤值, 由这些测点数值所组成的样本集合进行数据拟合, 求得 β, η 值后, 进行可靠性分析.

3 工程应用

3.1 建筑结构构件可靠性设计

根据建筑物或结构构件的典型类别, 通过试验手段或者地震实测的统计数据进行数值拟合, 求得震害损伤值 D 的威布尔模型参数 α, β , 将震害程度定量化, 确定不同等级的损伤指标. 与规范采用的三概率水准相适应, 确定结构构件的三个损伤指标, 即安全指标 D_s , 可修指标 D_r , 破坏指标 D_d , 计算式为:

$$D^* = \eta (-\ln P^*)^{1/\beta} \quad (10)$$

式中, P^* 为各级水准烈度 (众值烈度、基本烈度和罕遇烈度) 50 年超越概率, D^* 为相应损伤指标, 如第二水准烈度 (基本烈度) 50 年超越概率为 10%, 则可修损伤指标为: $D_r = \eta (-\ln(0.1))^{1/\beta}$. 在结构构件可靠性设计中, 影响损伤值的原因有很多, 要完全建立相关关系需要大量的试验工作, 实际设计时, 可以根据设计的主要内容及允许的损伤指标, 控制主要结构参数. 计算模型表示为:

$$\begin{cases} \text{求: 设计变量 } x_1, x_2, \dots \\ \text{使: } \begin{cases} D \leq D^* \\ [x_i]_{\min} \leq x_i \leq [x_i]_{\max} \end{cases} \end{cases}$$

上式意义为设计结构构件的主要结构参数, 如弹性模量, 钢筋等级、面积等等, 使结构在各水准烈度下的损伤设计值不大于结构的允许损伤指标, 同时满足结构参数的其他限制. 如钢筋混凝土梁柱的设计, 尽管影响其损伤值分析的因素有很多, 但是通常在实际设计时的主要内容只是确定截面大小和纵向受力筋, 因此可以这两项为构件的控制参量, 通过试验建立控制参量与损伤值的联系.

3.2 算例

参考文献 [2] 的例子, 设有单层剪切型非线性钢筋混凝土结构, 如图 2, 结构参数与材料性能指标如表

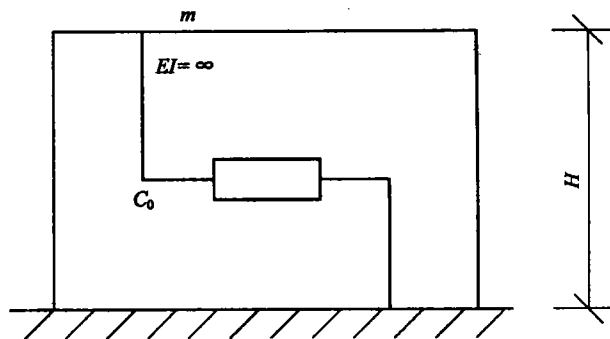


图 2 剪切型单自由度结构

表 1 结构参数与材料指标

M /kg·s ² ·cm ⁻¹	C_0 /kg·s·cm ⁻¹	H /cm	R_g /kg·cm ⁻²	E_g /kg·cm ⁻²	R_c /kg·cm ⁻²	E_c /kg·cm ⁻²
65	145	400	3 400	2.0×10 ⁶	95	2.55×10 ⁵

注: 混凝土标号为 C20; 钢筋为 II 级.

1, 假设地震烈度为Ⅶ度, 地震动参数为 $S_0 = 63.98 \text{ cm}^2/\text{s}^3$, 场地土为Ⅰ类, 其卓越频率与阻尼比为 $\omega_g = 20.94 \text{ rad/s}$, $\xi_g = 0.72$. 试进行结构可靠性设计.

测定不同截面、配筋的随机变形反应及耗能反应, 由(9)式计算威布尔模型统计参数 $\beta = 2.7, \eta = 0.4$, 计算结构损伤值如表2. 由(10)式计算三指标分别为: $D_s = 0.4 \times (-\ln 0.632)^{1/2.7} = 0.3$,

$D_r = 0.545, D_d = 0.654$, 由计算结果及表2可知, 在Ⅶ度地震下, 要保证该种结构不损坏的最小截面尺寸为 $45 \text{ cm} \times 54 \text{ cm}$, 配筋率大于1.4%; 可修的最小截面为 $40 \text{ cm} \times 48 \text{ cm}$, 配筋率大于1.2%; 不倒塌, 则必须保证截面最小尺寸为 $40 \text{ cm} \times 48 \text{ cm}$, 配筋率大于1%.

4 结语

本文在结构地震综合损伤模型的基础上, 初步提出采用威布尔分布来进行结构构件的可靠性设计和安全评估的方法, 并对其实际应用做了初步尝试; 由于地震作用和结构对地震响应的随机性, 采用概率方法进行结构构件设计和安全评估有着其必然性, 但方法必须建立在大量试验或实测数据的基础上; 威布尔分布在地震损伤分析有其优点, 难点在分布参数的准确估计上, 因此, 通过大量细致的试验工作, 建立完善的结构构件设计专家系统是一项复杂而有意义的工作. 限于作者水平有限, 文章有不足甚至错误之处, 敬请指正.

参考文献:

- [1] 李桂青. 结构可靠度[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1989. 230~255.
- [2] 牛荻涛, 欧进萍. 非线性钢筋混凝土抗震结构的随机破损分析与设计[M]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, (9): 8~16.
- [3] Young-Ji Park, Alfredo H S Ang. Mechanistic Seismic Damage Modes for Reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering. ASCE, 1985, April: 45~57.
- [4] 傅惠民, 高镇同. 确定威布尔分布三参数的相关系数优化法[J]. 航空学报, 1990, 11(7): 323~327.
- [5] 章在墉. 地震危险性分析及其应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 222~252.

The Seismic Damage Failure Analysis of R.C Structure or Element

LEI Hong-jun, MIAO Sheng, WANG Ai-wen

(The Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: In this paper a new conception about the value of damage was established on the members of Reinforced Concrete (R.C) structure. Considering the synthetic damage factors of R.C, a model based on probability of seismic damage failure was created, which complies with the distribution of Weibull. With this model members of R.C structures were divided by their damage degrees. This method can be applied in designing the members of R.C structures or the reliability of them after the earthquake. Some examples were also given.

Key words: Weibull distribution; R.C structure or members; damage; reliability

表2 不同截面、配筋的计算损伤值

截面	配筋率			
	0.010	0.012	0.014	0.016
35 mm×42 mm	1.190 9	0.895 4	0.782 1	0.723 7
40 mm×48 mm	0.554 4	0.510 9	0.473 4	0.450 9
45 mm×54 mm	0.354 3	0.318 3	0.290 8	0.276 7
50 mm×60 mm	0.219 3	0.195 6	0.178 3	0.165 5