

文章编号: 1004- 4574( 2010) 01- 0110- 06

# 基于成本 - 效益准则的 高层 RC 框架结构优化设计 ( I ) ——方法

陈 跃<sup>1,2</sup>, 吕西林<sup>1</sup>

( 1 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2 浙江万里学院, 浙江 宁波 315100)

**摘 要:** 成本 - 效益准则是基于性能的抗震设计的重要原则, 该准则在设计中除了考虑技术要素外, 还考虑经济、社会等诸多因素, 它所追求的设计目标为结构在其寿命周期内的总造价最小。因此, 结构全寿命造价评估是基于性能的抗震设计的基本问题。在已有全寿命造价优化模型的基础上, 提出了三目标函数全寿命造价优化模型。与已有的全寿命造价模型相比, 该模型除考虑结构初始造价、损失期望外, 还考虑了反映结构设计与施工复杂性的构件截面类型数量; 另外, 还将结构在其运行期间的检查、维护费用及由于优化导致建筑使用面积变化所引起的租金收益影响也列入到结构全寿命造价中。最后, 基于所提出的优化模型, 给出了以多目标遗传算法为搜索引擎、运用 MATLAB 语言开发的高层 RC 框架结构基于成本 - 效益准则的自动优化程序流程图。

**关键词:** 全寿命造价; 优化模型; 多目标遗传算法; 高层 RC 框架结构; 成本 - 效益准则; Pushover 分析  
中图分类号: TU 318 文献标识码: A

## Cost-benefit criterion-based optimum design of highrise RC frame structure( I ) : methodology

CHEN Yue<sup>1,2</sup>, LYU Xilin<sup>1</sup>

( 1. The Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China  
2. Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

**Abstract** Cost-benefit criterion is an important principle for performance based seismic design. Economic, social and many other factors are considered in the criterion in addition to some designing techniques, and its pursuit of design goal is a minimum life-cycle cost for structures. Therefore, the structural life-cycle cost assessment is a basic problem for performance based seismic design. In this paper, life-cycle cost optimal model (LCCM) with three objective functions was proposed. Comparing to existing LCCM, the model considers the number of component cross section kinds reflecting complexity of structural design and construction besides the initial cost and expected loss. In addition, structural inspection and maintenance costs during its operation and rental income influence owing to change of the construction area were considered in this new LCCM. And a flow chart of auto optimal program of high-rise RC frame structure based on cost-benefit criterion was provided by using MATLAB programming language and multi-objective genetic algorithm was used as optimal search engine.

**Key words** life-cycle cost; optimizing model; multi-objective genetic algorithm; high-rise RC frame structure; cost-benefit criterion; pushover analysis

收稿日期: 2008- 05- 18 修订日期: 2009- 06- 21

基金项目: 国家自然科学基金科学基金项目 (编号: 50338040); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (编号: 50621062)

作者简介: 陈跃 (1975- ), 男, 讲师, 主要从事结构抗震与结构优化研究。E-mail: chezailail@163.com

在美国 (1994 年, 北岭)、日本 (1995 年, 阪神) 与中国 (2008 年, 汶川) 等震害调查中表明, 由结构破坏而带来的经济损失是惊人的, 远远超出了预期的估计。这就足以充分说明抗震设计, 在强调生命安全同时, 必须考虑经济损失。因此, 需要采用更加合理的设计原则, 来处理初始投资和风险之间的关系, 这就是成本 - 效益准则。成本 - 效益准则作为基于性能抗震设计的一个基本原则, 反映了现代结构抗震设计思想的一个重要转变, 即从以往只注重结构安全, 向全面注重结构性能、安全及经济等诸多方面发展。根据成本 - 效益准则, 结构设计应按照结构性能的要求, 利用所拥有的资源, 寻求合理的、满意的、足够安全经济的设计方案, 即在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡。传统基于成本 - 效益准则的优化是将结构初始造价、损失期望直接相加得出最小全寿命造价。这样处理的结果是使最终的优化结果为单一的解, 导致业主只能比较被动地接受优化结果, 无法发挥业主的主动参与性。鉴于以上考虑, 本文在已有全寿命造价优化模型的基础上<sup>[1]</sup>, 提出了三目标函数全寿命造价优化模型。与已有全寿命造价模型相比, 该模型除考虑结构初始造价、损失期望外, 还考虑了反应结构设计复杂性的构件截面类型数量; 另外, 还将结构在其运行期间的检查、维护费用及由于优化导致建筑使用面积变化所引起的租金收益影响 (以下简称为: 面积租金收益) 也列入到结构全寿命造价中。最后, 基于所提出的优化模型, 采用多目标遗传算法搜索引擎, 运用 MATLAB 语言开发了高层 RC 框架结构基于成本 - 效益准则的自动优化程序。

## 1 三目标函数全寿命造价优化模型

本文所提出的 3 目标函数全寿命造价优化模型如式 (1) 所示:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X, \\ & (a) \quad C_0(X), \\ & (b) \quad E[X] = E\left[\sum_{i=1}^{N(t)} \sum_{j=1}^k C_j \cdot e^{-\lambda t} \cdot P_{ij}(X, t_j)\right] + \int_0^t [C_m(X) - C_r(X)] \cdot e^{-\lambda t} dt, \\ & (c) \quad \text{钢筋混凝土构件截面类型数量,} \\ & \quad \text{s.t. 设计规范的各种约束条件} \end{aligned} \quad (1)$$

对应于不同破坏水平的层间位移角限值指标。

式 (1) 中 (a) 项  $C_0(X)$  为新建项目或加固翻新的建筑结构造价, 即为结构的初始造价, 一般包括: 混凝土、钢筋和模板等; 式 (1) 中 (b) 项  $E[X]$  为建筑结构损失期望, 包括:  $E\left[\sum_{i=1}^{N(t)} \sum_{j=1}^k C_j \cdot e^{-\lambda t} \cdot P_{ij}(X, t_j)\right]$  为在未来地震作用下的损失期望;  $\int_0^t [C_m(X) - C_r(X)] \cdot e^{-\lambda t} dt$  为在未来使用期内结构运行时的检查与维护费用及面积租金收益的组合。其中  $C_m$  为每年的检查与维护费用,  $C_r$  为每年面积租金收益;  $X$  为设计变量, 本研究中为构件截面尺寸和配筋率 (以矩形截面为例);  $i$  为作用在结构上的可变水平荷载数量及其组合;  $t$  为结构的设计基准期;  $N(t)$  为在  $t$  时间内发生突发水平荷载的数量;  $C_j$  为在第  $j$  个破坏水平被超越时的损失值;  $\lambda$  为每年的折现率;  $P_{ij}$  为在第  $i$  随机的水平荷载发生时, 第  $j$  个破坏等级的损坏概率;  $k$  为所考虑的破坏等级个数; 式 (1) 中 (c) 项描述结构设计与施工的复杂性, 以构件截面尺寸不同来衡量。本模型有 3 个目标函数, 即结构初始造价、损失期望和构件截面类型数量, 优化约束条件为设计规范的各种约束条件及对应于不同破坏水平的层间位移角限值指标。

### 1.1 损失期望的确定

本研究中可变水平荷载只考虑地震作用, 并且将地震按每年发生率为  $\nu$  的泊松过程来模拟。根据文献 [1] 可知, 式 (1) 中 (b) 项可以转化为:

$$E[X] = (C_1 P_1 + C_2 P_2 + \dots + C_k P_k) \frac{\nu}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{(C_m - C_r)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (2)$$

其中:  $C_k$  为第  $k$  个破坏水平的损失值,  $P_k$  为第  $k$  个破坏水平的失效概率。

#### 1.1.1 损失值的确定

本文运用 Wen 和 Kang 损失值估算模型<sup>[2]</sup>进行结构损失值的估计。在 Wen 和 Kang 的研究中, 将结构的破坏水平分为 7 个等级, 并采用结构层间变形作为评估指标。结构失效损失值  $C_j$  按式 (3) 计算:

$$C_j = C_j^{dan} + C_j^{con} + C_j^{rel} + C_j^{eco} + C_j^{inj} + C_j^{fat}. \tag{3}$$

参考王光远等<sup>[3]</sup>在其研究中给出对应于 5 个不同地震破坏水平的损失值, 本文给出拓展后 7 个破坏水平对应的损失值, 见表 1。本文将表 1 损失值数据与 Wen 和 Kang 估算模型相结合, 进行 RC 框架结构基本损失费用的估算。

表 1 对应于不同的地震破坏水平的损失值

Table 1 Damage loss values corresponding to different destructive levels of earthquake

破坏水平	I	II	III	IV	V	VI	VII
破坏状态	完好	很轻微破坏	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	接近倒塌	倒塌
损失值	0	0.1C	0.2C	0.9C	2.3C	4.4C	6.5C

注: C 为结构的初始造价;

### 1.1.2 破坏水平失效概率的确定

根据式 (2) 可知, 要想求损失期望  $E[X]$ , 需计算对应于各层间位移角性能指标破坏水平的失效概率  $P_k$ , 而  $P_k$  是通过与相应于该破坏水平地震发生的超越概率建立关系来求解的, 故需首先确定结构在给定地震作用下的超越概率  $P_E$ 。  $P_k$  与  $P_E$  的关系如式 (4) 所示<sup>[11]</sup>:

$$P_E(\Delta > \Delta_c) = -\frac{1}{v \cdot t} [\ln(1 - P_k(\Delta - \Delta_c))]. \tag{4}$$

由文献 [4] 知, 根据对我国华北、西北和西南地区 45 座城镇地震危险性分析, 确认我国地震为极值 III 型分布, 50a 超越概率为 63.2% 的地震烈度定义为小震, 50a 超越概率为 10% 的地震烈度为中震, 50a 超越概率为 2% ~ 3% 的地震烈度为大震。当抗震设防烈度为 7 度时, 3 个地震烈度所对应的地震影响系数最大值分别为 0.08 0.23 0.50, 对应于小震而言,  $P_E$  为 63.2%、中震时为 10%、大震时则为 2% ~ 3%, 参考文献 [5], 本研究中按 2% 取; 小震、中震与大震一年超越概率为 2%, 0.2% 与 0.4%。

运用非线性分析软件 DRAN-2DX<sup>[6,7]</sup> 对研究中的 RC 框架进行 Pushover 分析, 从而可以求出结构在遭受小震、中震及大震作用下的最大层间位移角。参考文献 [8], 可将所求出对应于小震、中震及大震的最大层间位移角与超越概率以对数正态曲线的方式进行拟合, 由此可以得到最大层间位移角与地震超越概率之间关系曲线, 如图 1 所示。按照所给出的层间位移角破坏水平性能指标, 再依据此对数正态曲线, 可以容易地得出对应于各层间位移角的地震超越概率  $P_E$ 。求得  $P_E$  后, 再依据式 (4) 可以求出对应于不同破坏水平的失效概率  $P_k$ 。

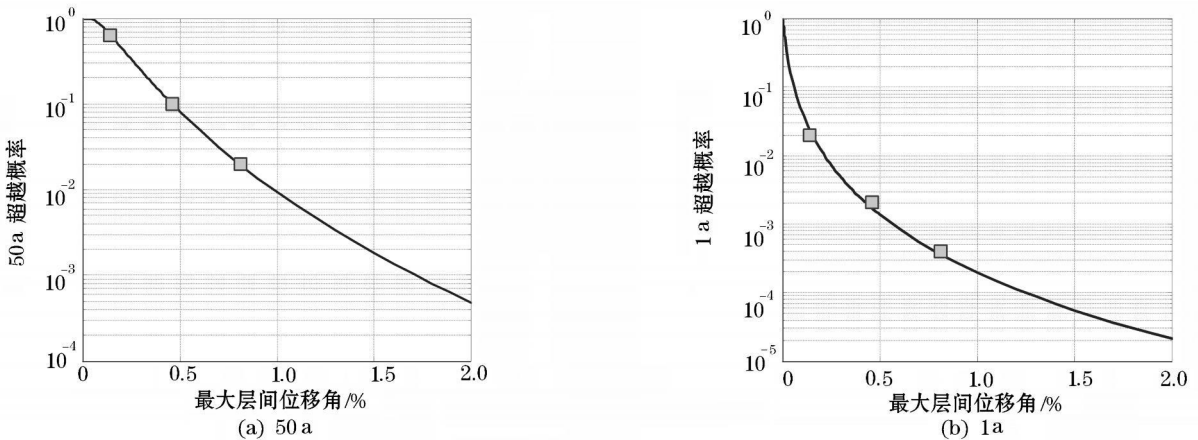


图 1 某结构设计方案 50 年与一年小震、中震及大震下超越概率与结构最大层间位移角对数正态拟合曲线

Fig. 1 Logarithmic normal fitting curves between structural maximum inter-story drift and exceedance probabilities of 50 years and 1 year under small moderate large earthquakes respectively for a structural design plane

### 1.1.3 检查、维护费用与面积租金收益的确定

建筑结构建成以后, 随着时间的延续, 其性能会向着不良的方向发展, 失效的概率也随之增大。建筑结构运行时首先由正常运行状态发展到异常状态, 然后再发生故障。如果不及时进行检查、维护, 将会影响其正常运行。持续到一定时刻时, 可能会导致建筑结构的使用功能部分或完全丧失。因此, 为了避免这种情况的发生, 就必须通过对于已建并投入使用的建筑结构进行定期检查、维护, 以便及早地发现问题, 防患于未然, 从而保持结构应有的工作性能并延长使用寿命。本文研究中建议将 RC 框架结构检查与维护费用取为

0.5 元 / (m<sup>2</sup> · a), 故有:

$$C_m = 0.5 \text{ 元} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \times (\text{房屋结构总建筑面积}) \quad (5)$$

另外, 本研究中 RC 框架结构租金取 120 元 / (m<sup>2</sup> · a)。故有:

$$C_r = 120 \text{ 元} / (\text{m}^2 \cdot \text{a}) \times (\text{房屋结构总建筑面积}) \quad (6)$$

结构检查与维护费用和面积租金收益确定后, 就可运用式 (2) 求得  $E[X]$ 。至此就可以运用式 (1) 基于成本 - 效益准则的三目标函数全寿命造价优化模型, 以 MATLAB 语言为平台进行 RC 框架结构的优化设计, 优化程序流程见图 2。

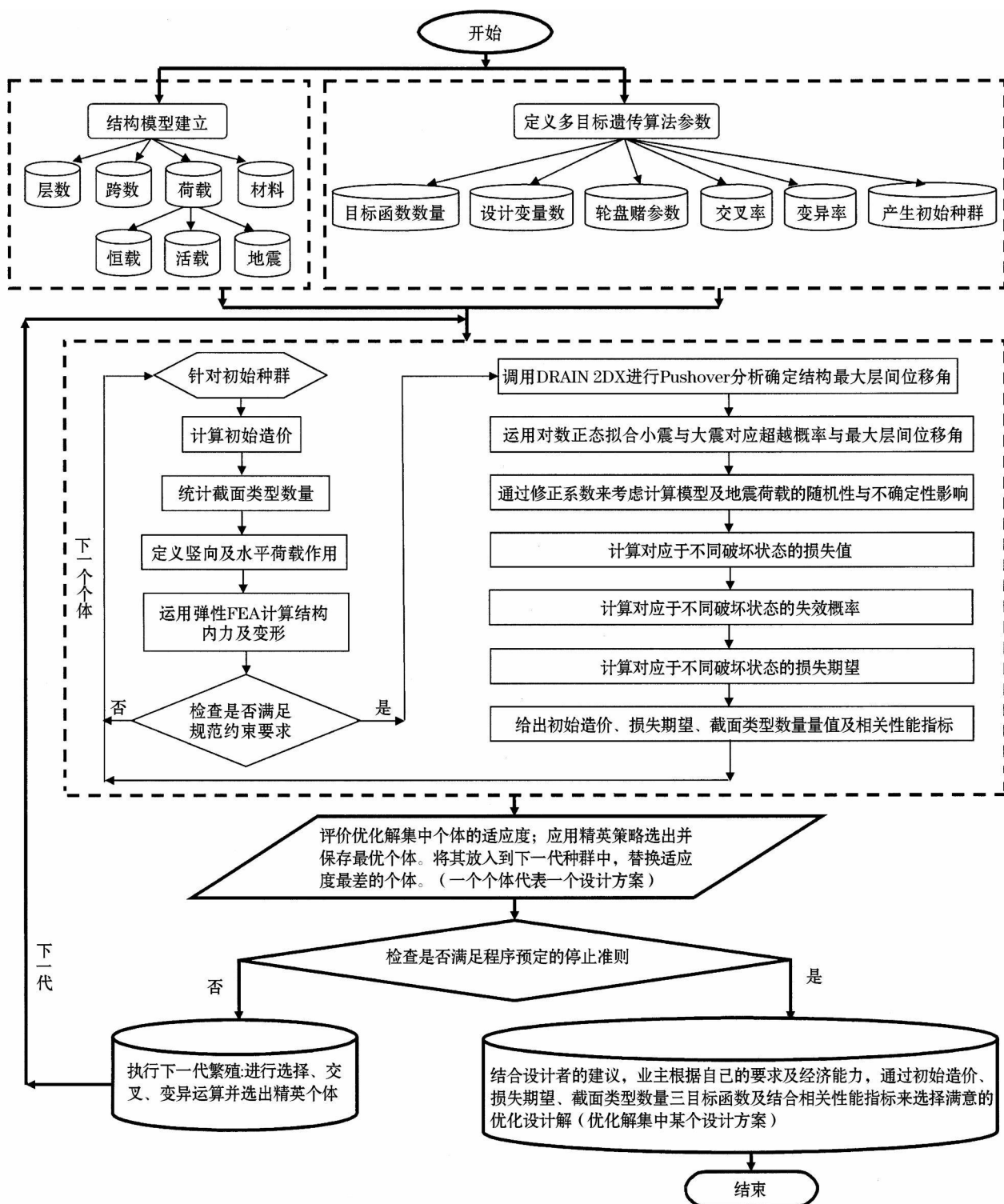


图 2 基于成本 - 效益准则的高层 RC 框架结构优化设计流程

Fig 2 Cost-benefit based optimal design flow chart of high-rise RC frame structure

### 1.2 用户自定义层间位移角性能水平的确定

本研究的其中一个显著特点是业主可以自行选择具有不同置信水平 ( confidence level CL) 的层间位移角破坏水平性能指标。文献 [4] 给出 RC 框架结构破坏水平层间位移角数值, 对应的破坏水平性能指标有 4 个。为了能使用上述所提的优化模型, 将文献 [4] 的破坏水平性能指标按线性插值方法拓展为 6 个 (即增加两个破坏水平), 见表 2。依据表 2 中 RC 框架结构破坏水平层间位移角数值, 可以求出与其对应的破坏水平失效概率, 再通过破坏水平失效概率及相应损失值可以得出结构在寿命周期内的损失期望。这即是以往常规全寿命造价优化设计计算损失期望的方法, 并没有考虑地震作用及结构模型本身所存在的随机性与不确定性影响, 在本文中可暂时将其视为初始值。

表 2 线性插值拓展后的结构破坏水平与层间位移角性能指标关系 (初始值)

Table 2 Relation between levels of structural damage and inter-story drift after expansion of linear interpolation (original value)

破坏水平	I (完好)	II (很轻微破坏)	III (轻微破坏)	IV (中等破坏)	V (严重破坏)	VI (接近倒塌)	VII (倒塌)
层间位移角	< 1/550	1/550~ 1/330	1/330~ 1/250	1/250~ 1/125	1/125~ 1/75	1/75~ 1/50	> 1/50

文献 [8] 应用 “随机与不确定性修正因子” 的方法来考虑随机性与不确定性对损失期望的影响。在运用 “随机与不确定性修正因子” 方法时有两种实施的途径: 一是通过修正因子修改破坏水平失效概率, 保持破坏水平层间位移角性能指标不变; 二是通过修正因子修改破坏水平层间位移角性能指标或增加结构计算最大层间位移角指标, 而保持初始破坏水平失效概率不变。本文选用第二种途径来考虑随机性与不确定性对损失期望的影响, 见图 3 所示。

作为研究目的, 本文给出 6 套对应于置信水平为 CL40, CL50, CL60, CL70, CL80, CL90 (即: 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%) 时的层间位移角性能指标, 见表 3; 与初始值的比较曲线见图 4。对于一个不情愿接受结构在未来遭受风险较高地震破坏及损失的业主, 则可以选择高置信水平所对应的层间位移角性能指标; 相反, 则可选择较低的置信水平。

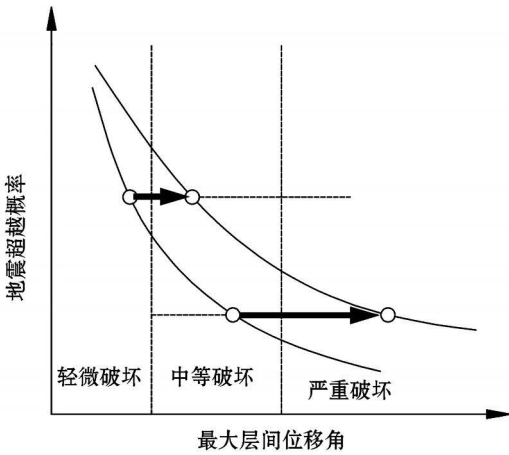


图 3 增加结构计算的最大层间位移角  
Fig 3 Increasing the value of calculated structural maximum inter-story drift

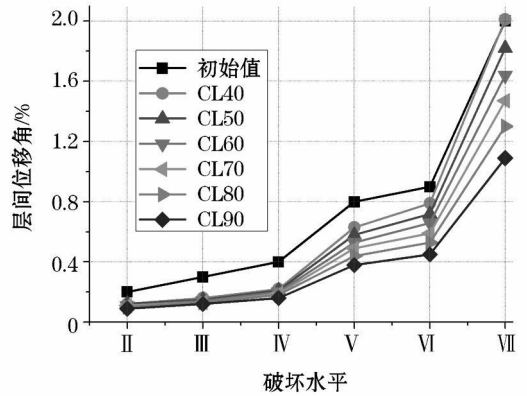


图 4 不同破坏水平与对应层间位移角性能指标  
Fig 4 Relation between levels of structural damage and inter-story drift

表 3 对应于不同置信水平层间位移角性能指标

Table 3 Inter-story drift angle behavior indices corresponding to different confidence levels

破坏水平	置信水平							
	初始值	CL40	CL50	CL60	CL70	CL80	CL90	
I 基本完好	$\Delta < 1/55$	$\Delta < 1/833$	$\Delta < 1/833$	$\Delta < 1/909$	$\Delta < 1/909$	$\Delta < 1/1000$	$\Delta < 1/1111$	
II 很轻微破坏	$1/550 \leq \Delta < 1/330$	$1/833 \leq \Delta < 1/625$	$1/833 \leq \Delta < 1/667$	$1/909 \leq \Delta < 1/714$	$1/909 \leq \Delta < 1/769$	$1/1000 \leq \Delta < 1/769$	$1/1111 \leq \Delta < 1/833$	
III 轻微破坏	$1/330 \leq \Delta < 1/250$	$1/625 \leq \Delta < 1/455$	$1/677 \leq \Delta < 1/476$	$1/714 \leq \Delta < 1/500$	$1/769 \leq \Delta < 1/526$	$1/769 \leq \Delta < 1/556$	$1/833 \leq \Delta < 1/625$	
IV 中等破坏	$1/250 \leq \Delta < 1/125$	$1/455 \leq \Delta < 1/159$	$1/476 \leq \Delta < 1/172$	$1/500 \leq \Delta < 1/189$	$1/526 \leq \Delta < 1/204$	$1/556 \leq \Delta < 1/227$	$1/625 \leq \Delta < 1/263$	
V 严重破坏	$1/125 \leq \Delta < 1/75$	$1/159 \leq \Delta < 1/127$	$1/172 \leq \Delta < 1/139$	$1/189 \leq \Delta < 1/152$	$1/204 \leq \Delta < 1/169$	$1/227 \leq \Delta < 1/189$	$1/263 \leq \Delta < 1/222$	
VI 接近倒塌	$1/75 \leq \Delta < 1/50$	$1/127 \leq \Delta < 1/50$	$1/139 \leq \Delta < 1/55$	$1/152 \leq \Delta < 1/61$	$1/169 \leq \Delta < 1/68$	$1/189 \leq \Delta < 1/77$	$1/222 \leq \Delta < 1/92$	
VII 倒塌	$\Delta \geq 1/50$	$\Delta \geq 1/50$	$\Delta \geq 1/55$	$\Delta \geq 1/61$	$\Delta \geq 1/68$	$\Delta \geq 1/77$	$\Delta \geq 1/92$	

## 2 结论

(1) 在已有全受命造价模型的基础上, 本文提出了三目标函数造价模型。与已有全寿命造价模型相比, 该模型除考虑结构初始造价、损失期望外, 还考虑了反应结构设计与施工复杂性的构件截面类型数量, 并将其应用到高层 RC 框架结构基于成本 - 效益优化设计中;

(2) 研究还将结构在其运行期间的检查、维护费用及由于优化导致建筑使用面积变化所引起的租金收益影响 (面积租金收益) 也列入到结构全寿命造价中, 与以往全受命造价模型相比, 本文模型所考虑的影响造价因素更加全面;

(3) 通过用户自定义层间位移角性能水平来考虑地震作用及结构模型本身所存在的随机性及不确定性影响; 另外, 用户也可以通过选择不同的层间位移角性能水平来主动参与设计过程;

(4) 研究给出了高层 RC 框架结构基于成本 - 效益优化设计程序流程图, 通过该流程图可以很明确地了解 and 把握优化设计的全过程。

## 参考文献:

- [ 1 ] Y. K. Wen & Y. J. Kang. Minimum Building Lifecycle Cost Design Criteria - I Methodology [ J ]. Journal of Structural Engineering, 2001, Vol 127( 3 ): 330- 337.
- [ 2 ] Y. K. Wen & Y. J. Kang. Minimum Building Lifecycle Cost Design Criteria - II Applications [ J ]. Journal of Structural Engineering, 2001, Vol 127( 3 ): 338- 346.
- [ 3 ] 王光远, 季天健, 张鹏. 抗震结构全寿命预期总费用最小优化设计 [ J ]. 土木工程学报, 2003, 36( 6 ): 1- 6.
- [ 4 ] 王光远等. 工程结构与系统抗震优化设计的实用方法 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [ 5 ] Min Liu et al., Optimal seismic design of steel frame buildings based on life cycle cost considerations [ J ]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, Vol 32( 9 ): 1313- 1332.
- [ 6 ] V. PPRAKASH & G. H. POWELL, DRAN - 2DX Base Program Description and User Guide, 1993 Department of civil Engineering University of California, Berkeley, California USA.
- [ 7 ] G. H. POWELL, DRAN - 2DX Element Description And User Guide For Element Type 01, Element Type 02, Element Type 04, Element Type 06, Element Type 09, Element Type 15, 1993 Department of civil Engineering University of California, Berkeley, California USA.
- [ 8 ] Min Liu et al., Multiobjective optimization for performance- based seismic design of steel moment frame structures [ J ]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, Vol 34 ( 3 ): 289- 306.