

# 基于“投资-效益”准则的抗震性能目标优化决策

唐 玉<sup>1</sup>, 郑七振<sup>2</sup>, 楼梦麟<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. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 以结构在地震作用下的破坏程度为依据将结构性能水平划分为五级, 并选取结构的层间位移角为定量控制指标, 建立了“结构破坏程度-结构性能水平-层间位移角”之间的对应关系, 该划分细化和量化了现行规范规定的三级性能水平, 为设计人员和业主提供更多选择, 使结构抗震设计更加灵活, 同时以“投资-效益”准则为基本原则, 结合地震危险性分析, 建立了改进的结构全寿命总费用模型, 该模型不仅考虑了结构的初始造价, 而且充分根据结构性能失效的特点考虑了结构在各级性能水平下的损失期望, 全面注重了结构性能、安全及社会经济等因素, 为实现基于性能的结构抗震设计提供了有效的理论依据和可靠的计算方法。

**关键词:** 基于性能的抗震设计; 结构性能水平; 抗震性能目标; “投资-效益”准则; 全寿命周期总费用

**中图分类号:** TU318.1

**文献标识码:** A

## Optimization of Seismic Performance Objectives Based on Cost-effectiveness Criterion

TANG Yu<sup>1</sup>, ZHENG Qizhen<sup>2</sup>, LOU Menglin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on the structure damages in earthquake, the structure performance was classified into five levels. The inter-story drift was adopted as the quantitative control index of the deformation, and the relationship among the damages, the five-level performance and the inter-story drift was also revealed. This classification was built on the basis of the three-level performance according to “Chinese code for seismic design of building (GB50011-2010)”, which provided more options for designers and owners. Meanwhile, based on the “cost-effectiveness” criterion and seismic hazard analysis, a modified structural life-cycle cost model was presented. The proposed model considered not only the structural initial cost but also the failure loss expectation on different performance

levels. The model is of great significance to the performance-based seismic design, which pays full attention to the performance of structures, security and social economy.

**Key words:** performance-based seismic design; performance level; seismic performance objectives; “cost-effectiveness” criterion; structural life-cycle cost

各国抗震设计规范中普遍采用的“小震不坏、中震可修、大震不倒”设计思想被认为是目前处理结构安全性与经济性关系最为合理的对策。然而, 这种设计思想仍以保障生命安全为单一设防目标, 抗震设计仍采用基于强度(或承载力)的设计方法, 尽管能保证结构在遭遇大震时不发生倒塌从而确保生命安全, 但是还不能有效控制结构, 特别是非结构构件在中、小震作用下的破坏程度。随着经济的发展, 建筑装修、非结构构件及各类设备等的费用往往高于结构本身的费用, 导致因震后损坏而造成的直接或间接经济损失远远超过单纯结构破坏造成的损失<sup>[1]</sup>。这种新的经济损失模式使人们逐渐认识到, 单纯注重结构安全已无法满足设计者乃至业主对结构抗震性能的需求, 理想的抗震设计必须综合考虑技术、经济、社会等诸多因素的影响。

本文以基于性能的抗震设计(performance-based seismic design, PBS)为背景, 以改进和优化结构性能水平和抗震性能目标的划分和计算方法为目标展开讨论, 目的是使获得的抗震性能目标优化决策能较好地弥补现有抗震设计只注重结构安全而忽略结构性能损失控制的缺陷, 为划分结构性能水平及确定抗震性能目标提供可靠依据, 为实现基于性能抗震设计提供有利平台。

## 1 PBS 设计理论

基于性能的抗震设计理论自 1997 年由美国的

Bertero<sup>[2]</sup>提出以来,就得到了世界各国地震工程界的广泛关注.该理论针对每一级抗震设防水准划分出若干具有确定性的结构性能水平,设计人员根据业主的需求选择合适的抗震性能目标进行结构设计,以期使结构在遭受未来可能的地震作用时能够维持所要求的性能水平,其破坏程度和经济损失能被业主所接受.因此,PBSD 设计理论的首要问题就是结构性能水平的划分和抗震性能目标的确定.

结构性能水平是一种有限的极限破坏状态,是指对应于不同的地震设防水准,结构或非结构构件可能产生的最大破坏程度.结构性能水平的确定涉及结构构件和非结构构件的破坏、室内物件和设施的损坏以及场地条件等因素,其划分应全面考虑生命安全、财产安全以及结构的正常使用功能<sup>[3]</sup>.目前,各国采用的结构性能水平划分方法有三水准(如我国的《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010<sup>[4]</sup>)、四水准(美国的 FEMA273<sup>[5]</sup>)甚至五水准,尽管不同等级的结构性能水平有明确的定义,但都是从定性的角度给出的,缺乏具体明确的量化,在实际设计中很难得到保证.为了便于工程应用与评估,不同等级的结构性能水平应具有明确的量化指标.然而现阶段还没有形成一个统一、明确的结构性能水平划分方法,也没有一个确定的参数能够合理地表示结构的性能水平.

抗震性能目标是 PBSD 设计得以实现的前提和基础.它是指在一定超越概率的地震发生时,结构期望的最大破坏状态应保持在何种水平.破坏状态水平的设定直接关系到结构设计的可行性,若水平定的很高,尽管可以提高结构的安全性,却大大增加了建设投入的费用;而若水平定的过低,则在降低建设投入的同时也提高了结构未来的使用风险和维护成本.因此,性能目标的确定也要综合考虑结构类型、建筑造价、地震损失、社会效益以及业主的承受能力等因素<sup>[6]</sup>.自 20 世纪 80 年代以来,国际上出现了多水准的抗震性能目标,如 FEMA273<sup>[5]</sup>中建议将具有不同使用要求的建筑物划分为三类设防目标:基本目标、重要目标和特殊目标以及我国现行抗震设计规范<sup>[4]</sup>采用“小震不坏”、“中震可修”、“大震不倒”的“三水准”设防.

在 PBSD 设计中,“投资-效益”准则被认为是现阶段确定结构抗震性能目标的一个比较合理的重要原则.根据这一准则,结构设计应按照预期的结构性能,利用所拥有的资源,寻求足够安全且能为社会及业主接受的设计及维修方案,即在结构的初始造价

与未来的损失期望中达到一种优化平衡,使结构在整个寿命周期内总费用最小<sup>[7]</sup>.

## 2 结构性能水平的量化

近几十年来,国内外学者对表征结构抗震性能水平的参数设定进行了大量研究并提出了许多评价指标,包括强度指标、变形指标、能量指标、变形和能量双参数指标等<sup>[8-10]</sup>.Williams<sup>[11]</sup>等人曾对这些指标进行了比对分析,认为所有指标的计算结果均存在较大的离散性,但结构的损伤程度仍主要取决于变形.因此,尽管单纯的变形指标不能全面描述结构在地震作用下的反应,但该指标可以较好地以定量形式表达结构的性能水平,且其概念简单、应用方便,因而在实际工程中仍以变形(尤其是层间变形)作为评价标准.我国现行规范<sup>[4]</sup>采用层间变形来描述“小震、中震、大震”三性能水平,并针对不同类型结构规定了弹性和弹塑性状态下的层间位移角限值,如表 1 所示.

表 1 我国抗震设计规范的层间位移角限值  
Tab.1 Inter-story drift defined in “Chinese code for seismic design of building”

结构类型	弹性变形	弹塑性变形
钢筋混凝土框架	1/550	1/50
钢筋混凝土框架-抗震墙	1/800	1/100
钢筋混凝土框架抗震墙	1/1 000	1/120
多、高层钢结构	1/300	1/50

文献<sup>[12]</sup>在已有研究成果的基础上,针对钢框架结构的变形取决于框架梁、柱及节点综合作用的特点,同时为了符合我国现行规范和实际工程震害分析的习惯,仍采用层间变形指标对结构的性能水平进行划分.文中通过对收集的 22 个钢框架结构试验共 58 组薄弱层层间位移角实测数据进行统计分析,得到了钢框架结构在不同性能水平下的层间位移角限值,从而达到量化结构性能水平的目的.表 2 给出了钢结构性能水平的划分结果及与之对应的层间位移角的关系.

## 3 抗震性能目标的优化决策

### 3.1 基于“投资-效益”准则的性能目标优化模型

确定合理的结构抗震性能目标是基于性能抗震设计的前提和基础.若性能目标定的太高,尽管可以提高结构的安全性,但同时增加了工程造价;若定的太低,又会增加未来的使用风险和维修费用.目前对抗震性能目标的研究中,认为比较合理的是“投资-

表 2 钢结构性能水平的划分

Tab.2 Classification of performance levels for steel structures

性能水平	功能状况与破坏状态描述	层间位移角限值
基本完好	结构功能完好,无破坏或基本无破坏;所有设备及系统都不受影响;居住安全,人员安全	<1/300
轻微破坏	结构功能基本连续,不受扰或轻度受扰,有轻微破坏;部分设施稍作修理即可使用;居住安全受到轻微影响	1/300~1/143
中等破坏	结构功能受扰,非结构构件与设施受到中等破坏,结构破坏但不威胁生命安全,人员较易疏散;震后需修复方可继续使用,经济损失比较可观	1/143~1/100
严重破坏	结构功能严重受扰,结构与非结构构件部分破坏严重,但不至于倒塌;震后不宜居住,可能会危及生命安全;修复在经济和技术上都不可行	1/100~1/50
接近倒塌	结构功能完全丧失,主体结构倒塌;多有严重伤亡事故,不可修复	>1/50

效益”准则. 该准则要求设计者对结构的全寿命总费用(包含初始造价和失效损失期望两个方面)进行评估. 由于失效损失期望是概率意义上的量,具有不确定性,而且结构的抗震设计本身也存在大量的不确定因素,因此全寿命总费用也是基于概率意义的,应该采用基于可靠度的设计方法. 然而,结构体系可靠度的计算是一个十分复杂的过程,需要考虑所有可能造成结构失效的因素,这显然是不可能的. 鉴于此,为了避免直接求解结构体系可靠度,本文将体系可靠度与结构的某种性能联系起来,提出基于“投资-效益”准则的抗震性能目标优化模型,即结构全寿命周期总费用模型:

$$W_{\min}(x, I_d) = \alpha_1 C_1(x, I_d) + \alpha_2 \sum_{i=1}^5 P_{Fi}(x, I_d) C_{Fi}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \geqslant 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$$
$$\text{s. t. } P_{Fi}(x) \leqslant [P_{Fi}]$$
$$g_j(x) \leqslant 0 \quad j = 1, \cdots, m \quad (1)$$

式中: $W_{\min}(x, I_d)$ 为目标函数; $x$ 为设计变量; $I_d$ 为设防烈度; $\alpha_1, \alpha_2$ 为加权系数,其值取决于设计人员和业主对结构初始造价和损失期望的不同要求; $C_1(x, I_d)$ 为结构的初始造价; $P_{Fi}(x, I_d)$ 为基于性能*i*的结构失效概率; $[P_{Fi}]$ 为相应的目标值; $C_{Fi}$ 为该性能失效时的损失值; $P_{Fi}(x, I_d) C_{Fi}$ 为该性能失效时的损失期望值; $g_j(x) \leqslant 0$ 为与设计方法有关的确定性约束条件. 对于多、高层结构的抗震设计,结构层间变形是衡量结构破坏程度和性能水平的主要指标,因此在多、高层结构基于性能的抗震设计中仍以层间变形作为结构的设计变量.

该模型的优点在于概念明确. 一方面,考虑到结构不同功能失效时其损失期望不同,目标函数中的结构失效损失期望以“结构若干重要性能(如基本完好、轻微破坏、中等破坏等)的失效概率×相应的失效损失值”,代替传统的“体系可靠度×体系失效损失值”,回避了一般意义上的体系可靠度计算,这种做法既充分考虑了结构性能失效的特点,又体现了全面注重结构的性能、安全及社会经济条件;另一方

面,该模型与国际标准《结构可靠性总原则》(ISO 2394)<sup>[13]</sup>确定的可靠性目标水平模型设计思想一致.

3.2 全寿命总费用评估

由式(1)可以看出,基于“投资-效益”准则的结构抗震设计实际上把问题转化为以结构全寿命周期总费用最小为目标函数的基于可靠度的结构优化设计问题,而结构全寿命周期总费用的评估是实施这一优化设计的关键和难点.

3.2.1 初始造价的评估

在模型中,初始造价  $C_1(x, I_d)$ 包括材料费用、施工费用、装修费用和设备费用等. 初始费用的评估一般采用两种方法:一是直接根据结构具体的设计方案进行估算;二是建立某一类结构初始费用与设计参数(如设计强度等)之间的近似关系. 前者针对结构的“个性”,主要在某一个结构的具体设计阶段采用,该方法计算简单;后者针对结构的“共性”,需要通过对其一类结构进行研究归纳后得到近似关系,这种方法更适合结构的概念设计或初步设计阶段<sup>[1]</sup>.

在结构设计初期,初始造价是设计变量和设防烈度的函数,这里约定  $A(x, I_d)$ 为按设计变量  $x$  和设防烈度  $I_d$  得到的结构设计方案. 一般来说,即使按照统一的规范进行结构设计,不同的设计者给出的设计方案  $A(x, I_d)$ 也会不尽相同,从而导致初始造价与设计变量  $x$  和设防烈度  $I_d$  之间不存在一一对应的关系. 也就是说,初始造价  $C_1(x, I_d)$ 是  $x$  和  $I_d$  的多值函数,因而式(1)中的目标函数在理论上是不能成立的. 但是,如果结构的几何构造和材料确定后,经结构截面优化设计所得到的造价最小的设计方案  $C_{\min}(x, I_d)$ 是唯一的,即  $C_{\min}(x, I_d)$ 是单值函数,应该以此表达式代替  $C_1(x, I_d)$ 的表达. 此外,从逻辑上  $C_1(x, I_d)$ 也应该取相应的最小造价,因为浪费的设计方案是不能够被设计者和业主接受的.

3.2.2 结构失效损失期望的评估

评估失效损失期望  $P_{Fi}(x, I_d) C_{Fi}$ 是一个很复杂的问题,它不仅仅是工程问题,还涉及到政治、社会、

经济等因素.按照结构全寿命周期总费用模型进行结构设计时,尽管回避了一般意义上的体系可靠度的计算,但是采用数值方法计算基于性能的失效概率  $P_{Fi}(x, I_d)$  仍然是非常困难的.因此,需要引入以下两个假定来解决这个难题.

假定 1:将本文划分的五级结构性能水平与现行规范中规定的三水准抗震设防目标,即“小震不坏”、“中震可修”、“大震不倒”联系起来,把基本完好等同于小震不坏,中等破坏等同于中震可修,严重破坏等同于大震不倒.

假定 2:约定按现行规范的做法确定小震、中震和大震的烈度等级关系,即小震烈度比设防烈度低 1.55 度,大震烈度比设防烈度高 1.00 度.

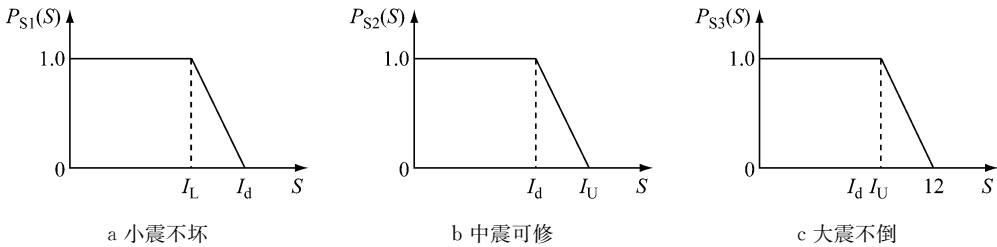


图 1 三设防要求的可靠度

Fig.1 Reliability of the three-fortification requirements

将五级结构性能水平与三水准设防要求联系起来后,同样可以建立在地震烈度  $S$  下,结构  $A(x, I_d)$  发生超过  $B_i$  级水平的概率  $P_F[B_i^*, A(x, I_d) | S]$ ,如图 2 所示.比如,若将抗震设防目标定为“中等破坏”,则表示当地震烈度小于设防烈度时,不会发生严重破坏和接近倒塌,当地震烈度大于大震烈度时,必然会发生严重破坏或接近倒塌,中间近似作线性处理.其他曲线有类似解释.

利用  $P_F[B_i^*, A(x, I_d) | S]$ ,结合所在地区的地震危险性分析<sup>[6, 14]</sup>结果,可以得到结构全寿命周期内结构可能遭遇的震级概率密度分布函数  $f_S(S)$ ,从而求得结构  $A(x, I_d)$  发生大于  $B_i$  级水平的失效概率为

$$P_{Fi}[B_i^*, A(x, I_d)] = \int_0^{12} f_S(S) P_{Fi}[B_i^*, A(x, I_d) | S] dS \tag{2}$$

即

$$\begin{cases} P_{F1}[B_1, A(x, I_d)] = 1 - P_{F1}[B_1^*, A(x, I_d)] \\ P_{Fi}[B_i, A(x, I_d)] = P_{Fi-1}[B_{i-1}^*, A(x, I_d)] - P_{Fi}[B_i^*, A(x, I_d)] \\ P_{F5}[B_5, A(x, I_d)] = P_{F4}[B_4^*, A(x, I_d)] \end{cases} \quad i = 2, 3, 4 \tag{3}$$

基于上述假定及最优设防烈度原则<sup>[6]</sup>,本文近似处理了结构在各级性能水平下的失效概率.令结构的性能水平为事件  $B_i, i=1\sim5$ ,并定义

- (1)  $P_F[B_i, A(x, I_d)]$ :结构达到  $B_i$  级水平的概率.
- (2) 事件  $B_i^*$ :结构发生超过  $B_i$  级水平的破坏.
- (3)  $P_F[B_i^*, A(x, I_d)]$ :结构超过  $B_i$  级水平的概率.
- (4)  $P_F[B_i^*, A(x, I_d) | S]$ :当结构遭遇烈度为  $S$  的地震作用时超过  $B_i$  级水平的概率.

根据三水准的设防要求,结构  $A(x, I_d)$  在遭遇烈度为  $S$  的地震作用时不坏、可修及不倒的可靠度可近似表示为如图 1 所示的关系.图中,  $I_L, I_d, I_U$  分别表示小震烈度、设防烈度和大震烈度.

结构的失效损失  $C_F$  可分为直接损失和间接损失,直接损失主要包括结构失效时所需的维修、加固和更换费用(包含结构构件、非结构构件及设备),间接损失则包括人员伤亡的损失及产生的社会、政治、心理上的损失等.从其表达式可以看出,它既与不同失效模式的失效概率有关,也与该失效模式的损失值有关,而失效损失值的评估需通过大量的实际震害调查才能得到比较合理的数据.

综合文献<sup>[15-16]</sup>的研究成果,按照我国实际工程震害分析的习惯,并基于已划分的五级性能水平,得到结构在不同性能水平失效时引起的直接经济损失以及不同重要性的建筑物在不同性能水平失效时间间接损失值与直接损失值之比,如表 3、表 4 所示.

表 3 结构破坏等级下的损失值(与初始造价之比)					
Tab.3 Losses under the structural ruin ranks (divided by the initial cost)					
直接损失 $C_{Fi}$	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	接近倒塌
	0.02	0.10	0.30	0.70	1.00

这样,结构全寿命总费用模型可以调整为

$$W[A(x, I_d)] = \alpha_1 C_{1\min}[A(x, I_d)] + \alpha_2 \sum_{i=1}^5 P_{Fi}(B_i, A(x, I_d)) C_{Fi} \tag{4}$$

$\alpha_1, \alpha_2 \geq 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$

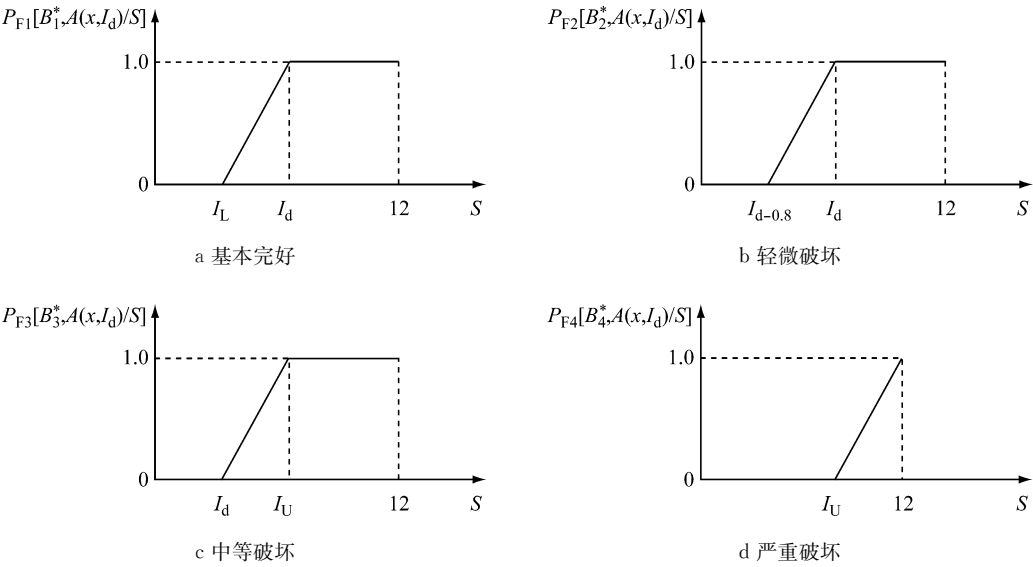


图 2 基于性能水平  $i$  的失效概率曲线

Fig.2 Curves of failure rate based on the level  $i$

表 4 建筑物在不同破坏状态下的间接损失值与直接损失值之比  
Tab.4 The ratio of indirect loss divided by direct loss under different ruining conditions

建筑类型	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	接近倒塌
甲类建筑	0	0	1.0~10.0	10.0~30.0	50.0~200.0
乙类建筑	0	0	0.5~1.0	3.0~6.0	8.0~20.0
丙类建筑	0	0	0.5	2.0	6.0
丁类建筑	0	0	0.2	1.0	2.0

由此可见,调整后的结构全寿命总费用模型具有以下几个优点:

- (1)目标函数中不仅考虑了结构的初始造价,而且考虑了结构的损失期望,这一点对于基于性能的结构抗震设计尤为必要.
- (2)考虑了五级失效准则,比现行规范给出的三水准更加具体化.
- (3)充分利用建筑场地地震危险性分析的成果.
- (4)计算方法符合规范规定的设计方法,设计过程采用了最小造价设计,因此该模型是可行的.

4 算例

某钢框架结构的设计使用年限为 50 年,丙类建筑.该工程所在场地的设计地震烈度为 7 度,设计地震分组为第一组,IV 类场地,设计基本地震加速度值为 0.1*g*.场地特征周期为  $T_g=0.65$  s.设定结构在罕遇地震作用下的抗震性能达到“中等破坏”性能水平,选取结构层间位移角的限值为 1/100.结构选型、框架梁和框架柱的截面参数如图 3 所示.

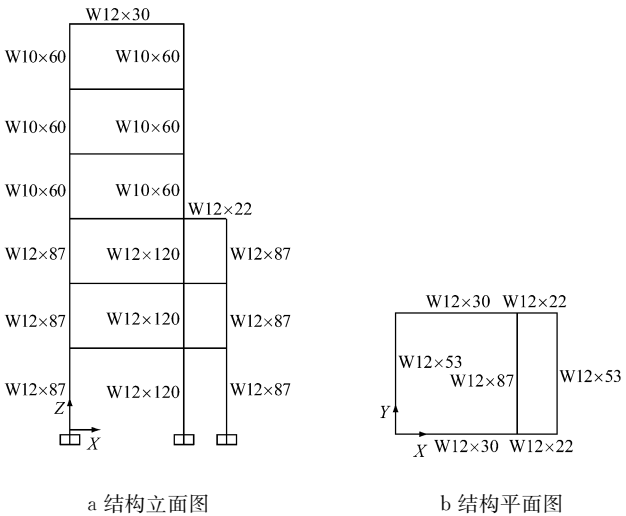


图 3 6 层平面不规则钢框架结构(单位:mm)  
Fig.3 A 6-story irregular plane steel structure(unit:mm)

4.1 初始造价

本文直接根据上述设计方案对该建筑的初始造价进行估算.为简化计算,初始造价不考虑施工费用、装修费用等,仅计及其材料费用.经计算,该建筑物总用钢量为 28.73 t,设定建筑钢材价格为 10 000 元·t<sup>-1</sup>,则初始造价为

$$C_1(x, I_d) = 28.73 \times 10\,000 = 287\,300 \text{ 元}$$

4.2 结构失效损失期望

参考《中国地震动参数区划图》GB 18306—2001<sup>[17]</sup>给出的全国 50 年超越概率 10%的烈度分布,对建筑物所在场地区域进行地震危险性分析,并

引入以下几个假定:① 场地区域内的潜在震源区仅有一个. ② 在潜在震源区内,地震发生的可能性处处相同. ③ 地震发生的时间过程符合泊松模型,即场地区域内地震发生在空间上均匀分布,在时间上平稳分配. ④ 地震带内大小地震的比例遵从修正的震级-频度关系.

则在全寿命周期内,结构可能遭遇的震级概率密度分布函数<sup>[18]</sup>可表示为

$$f_S(S) = k\beta e^{-\beta S}$$

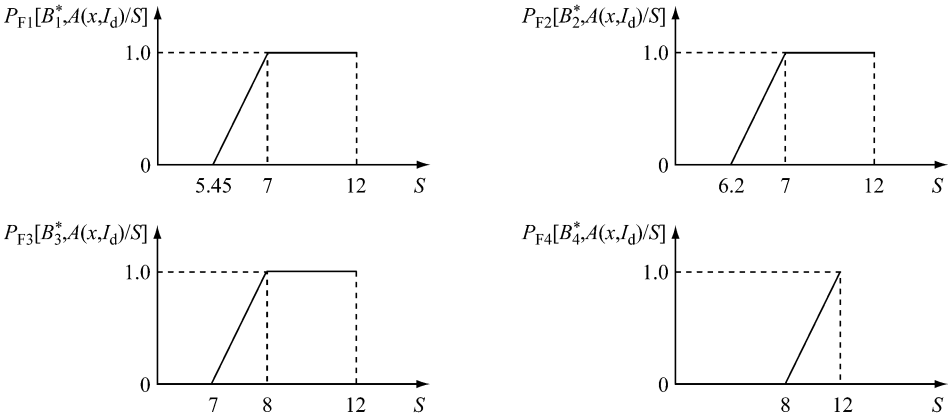


图 4 设防烈度为 7 度时基于各性能等级的失效概率

Fig.4 Curves of failure rate based on different performance levels for 7 degree

根据式(3)可以计算出结构发生大于  $B_i$  级水平的失效概率为

$$\begin{aligned} P_{F1}[B_1^*, A(x, I_d)] &= \int_0^{12} f_S(S) P_{F1}[B_1^*, A(x, I_d) | S] dS = \\ &= \int_{5.45}^6 129.5 \times 1.19 e^{-1.19S} \frac{S-5.45}{1.55} dS = 0.015 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{F2}[B_2^*, A(x, I_d)] &= \int_0^{12} f_S(S) P_{F2}[B_2^*, A(x, I_d) | S] dS = 0 \\ P_{F3}[B_3^*, A(x, I_d)] &= P_{F4}[B_4^*, A(x, I_d)] = 0 \end{aligned}$$

于是,

$$\begin{cases} P_{F1}[B_1, A(x, I_d)] = 1 - P_{F1}[B_1^*, A(x, I_d)] = 0.985 \\ P_{Fi}[B_i, A(x, I_d)] = P_{F1}[B_1, A(x, I_d)] = 0.015, i = 2, 3, 4 \\ P_{F5}[B_5, A(x, I_d)] = P_{F4}[B_4^*, A(x, I_d)] = 0 \end{cases}$$

由表 3、表 4 可知,结构发生  $B_i$  级破坏时的损失值  $C_{Fi}$ (与初始造价之比)取值为: $C_{F1}=0.02C_1, C_{F2}=0.10C_1, C_{F3}=0.45C_1, C_{F4}=2.10C_1, C_{F5}=7.00C_1$ ;加权系数  $\alpha_1, \alpha_2$  分别取为 0.4 和 0.6,则该结构全寿命周期内的总费用为

$$\beta = b \ln 10$$
$$k = \begin{cases} 0 & S \geq S_u, S < S_0 \\ \frac{1}{e^{-\beta S_0} - e^{-\beta S_u}} & S_0 \leq S < S_u \end{cases}$$

其中,  $S_0$  为起算震级(本文设为 4.0 级),  $S_u$  为地震带震级上限(本文取为 6.0 级);  $b$  值取 0.517 55<sup>[19]</sup>.

本工程的设防烈度为 7 度,由图 2 可以得到结构基于各性能等级的失效概率,如图 4 所示.

$$\begin{aligned} W &= \alpha_1 C_{1\min} + \alpha_2 \sum_{i=1}^5 P_{Fi}(B_i, A(x, I_d)) C_{Fi} = \\ &= 0.4 \times 287\,300 + 0.6 \times (0.02 + 0.10 + 0.45 + 2.1) \times 287\,300 = 575\,174.6 \text{ 元} \end{aligned}$$

5 结论

(1) 本文通过分析和总结国内外相关规范所规定的结构性能水平的划分方法,结合我国抗震设计实践并充分考虑结构各系统的破坏程度,提出了结构性能五级水平,即“基本完好”、“轻微破坏”、“中等破坏”、“严重破坏”及“接近倒塌”. 这种划分细化了我国现行规范规定的“小震”、“中震”和“大震”三级性能水平,为设计人员和业主提供更多的选择,使结构抗震设计更加灵活.

(2) 为了将基于性能的抗震设计与我国现行规范统一起来,便于结构分析和设计参数的应用,根据钢结构的破坏特点,仍采用层间位移角作为结构性能水平的量化指标.

(3) 利用“投资-效益”准则,提出了一种抗震性能目标的优化模型,即结构全寿命周期总费用模型. 该模型中的目标函数不仅考虑了结构的初始造价,

而且充分根据结构性能失效的特点考虑了结构在各级性能水平下的损失期望. 这样既全面注重了结构的性能、安全及社会经济等条件,又与现行规范确定的可靠性目标水平模型设计思想一致.

(4)鉴于直接评估失效损失期望十分复杂,本文引入了两个假定. 根据最优设防烈度原则,利用建筑场地地震危险性分析成果,近似处理了结构在各级性能水平下的失效概率. 同时,基于已划分的五级性能水平,本文也给出了结构在不同性能水平失效时引起的直接经济损失以及不同重要性的建筑物在不同性能水平失效时的间接损失值与直接损失值之比.

(5)本文提出的结构全寿命总费用模型同时考虑了结构的初始造价和损失期望,充分利用建筑场地的地震危险性分析成果,全面注重了结构性能、安全及社会经济等条件,为实现基于性能的结构抗震设计提供有效、简单的计算方法和理论依据.

参考文献:

[1] 程耿东,李刚. 基于功能的结构抗震设计中一些问题的探讨[J]. 建筑结构学报,2000,21(1):5.  
CHENG Gendong, LI Gang. Some key problems on performance-based seismic design[J]. Journal of Building Structures,2000,21(1):5.

[2] Bertero R D, Vertero V. Performance-based seismic engineering:the need for a reliable conceptual comprehensive approach[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002,31:627.

[3] 李刚,程耿东. 基于性能的结构抗震设计——理论、方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.  
LI Gang, CHENG Gendong. Performance-based seismic design—theory, method and application[M]. Beijing: Science Press,2006.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R China. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2010.

[5] FEMA. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency,1996.

[6] 谢礼立,马玉宏,瞿长海. 基于性态的抗震设防与设计地震动[M]. 北京:科学出版社,2009.  
XIE Lili,MA Yuhong,QU Changhai. Performance-based seismic design and design ground motion[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[7] Structural Engineers Association of California (SEAOC). Performance based seismic engineering of buildings [R]. [S.l.]:SEAOC,1995.

[8] Banon H,Biggs J M,Irvine H M. Seismic damage in reinforced concrete frames[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1981,107(9):1713.

[9] Stephen J E, Yao J T P. Damage assessment using response measurement[J]. Journal of Structural Division, ASCE,1987, 113(4):787.

[10] Jeong G D,Iwan W D. Effect of earthquake duration on damage of structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1988,16(8):1201.

[11] Williams M S,Villemure I,Sexsmith R. Evaluation of seismic design indices for concrete elements loaded in combined shear and flexure[J]. ACI Structural Journal,1997,94(3):315.

[12] 唐玉. 平面不规则钢结构基于性能抗震设计方法研究[D]. 上海:上海理工大学环境与建筑学院,2011.  
TANG Yu. Performance-based seismic design analysis for the irregular plane steel structure[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology,2011.

[13] ISO. ISO2394 General principles on reliability for structures [S]. [S.l.]:ISO,1998.

[14] 高玉锋,张健. 地震危险性分析研究[M]. 北京:科学出版社, 2007.  
GAO Yufeng, ZHANG Jian. Earthquake risk analysis [M]. Beijing: Science Press,2007.

[15] 高小旺,李荷,肖伟,等. 工程抗震设防标准若干问题的探讨[J]. 土木工程学报,1997,30(6):52.  
GAO Xiaowang,LI He,XIAO Wei, et al. Discussion on several problems of engineering aseismic level [J]. China Civil Engineering Journal,1997,30(6):52.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 24335—2009 建(构)筑物地震破坏等级划分[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.  
National Standard of the People’s Republic of China. GB/T 24335—2009 Classification of earthquake damage to buildings and special structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2001.  
National Standard of the People’s Republic of China. GB 18306—2001 Seismic ground motion parameter zonation map of China[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2001.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB17741—2005 工程场地地震安全性评价技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R China. GB 17741—2005 Code for seismic safety evaluation of engineering sites[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005.

[19] 朱刚,高孟潭,任雪梅. 中国城市直下型地震危险性分析研究[J]. 中国地震,2007,23(2):124.  
ZHU Gang, GAO Mengtan, REN Xuemei. Analysis of seismic hazard in the cities of China [J]. Earthquake Research in China,2007,23(2):124.