

# 建筑结构基于性能的抗震设计方法

郭锐娥<sup>1</sup> 马贞荣<sup>2</sup>

1. 西安思源学院 陕西 西安 710038; 2. 西安科技大学高新学院 陕西 西安 710100

**摘要:** 基于性能的抗震设计是建筑结构抗震设计的一个新的重要发展; 作为一种更合理的设计理念, 它代表了未来结构抗震设计的发展方向, 本文阐述了基于性能的抗震设计理论的提出背景, 地震设防水准, 结构的性能水平及其量化指标, 抗震设计的目标性能, 以及常用的抗震设计方法, 提出了目前基于性能的抗震设计理论研究中存在的主要问题和今后需要进一步研究的方向。

**关键词:** 基于性能的抗震设计方法; 抗震研究; 抗震设计方法

**Abstract:** Seismic design based on the performance is an important, new development in anti-Quake architectural structure design. As a more reasonable design concept, it represents the development direction of the future anti-Quake architectural structure design. This essay explains the background based on the anti-Quake architectural structure design, earthquake fortification level, structural performance levels and its quantitative indicators, the target performance of seismic design, and generally used seismic design methods, and then proposed the main problems of the theoretical research in anti-Quake architectural structure design and the further research direction of the future.

**Key words:** seismic design based on the performance, seismic research, seismic design method

## 一、引言

目前各国抗震规范中普遍采用的“小震不坏、中震可修、大震不倒”设防水准被认为是目前处理地震作用高度不确定性的最科学合理的对策, 这种设计思想在实践中也取得了巨大的成功。事实上, 在发达国家和地区, 即使在人口高度密集的城市周边区域, 由于绝大多数建筑物按现行的抗震规范设计或加固, 重大地震灾害造成的人员伤亡已经明显下降, 然而这种设计思想是以保障生命安全为主要设防目标的, 尽管它可以做到大震时主体结构不倒以保障生命安全, 但它可能导致中小震下结构正常使用功能的丧失而引起巨大的经济损失。特别是随着经济的发展, 结构物内的装修、非结构构件、信息技术装备等的费用往往超过结构物的费用, 这种损失会更加严重。

基于性能的抗震设计<sup>[1-10]</sup>(Performance Based Seismic Design)思想是20世纪90年代初由美国学者提出, 它是使设计出的结构在未来的地震灾害下能够维持所要求的性能水平。投资-效益准则和建筑结构目标性能的“个性化”是基于性能的抗震设计的重要思想。基于性能的设计克服了目前抗震设计规范的局限性。在基于性能的设计中, 明确规定了建筑的性能要求, 而且可以用不同的方法和手段去实现这些性能要求, 这样可以使新材料、新结构体系、新的设计方法等更容易得到应用。

## 二、建筑结构基于性能的抗震设计理论

### (一) 基于结构性能抗震设计理论的研究内容

基于性能的抗震设计是以结构抗震性能分析为基础, 根据建筑物的重要性和用途的不同以及业主的特殊要求确定其性能目标, 依此提出不同的抗震设防水准, 使设计的建筑物在未来不同的抗震等级地震作用下达到预期的抗震性能目标。除了抗震设计方法, 基于性能的抗震设计理论还包括目标性能的目标, 它是整个设计的基础和关键, 主要包括以下三个方面:

#### 1. 地震设防水准

在设计基准期内, 定义一组参照的地震风险和相应的设计水平, 是基于性能设计理论的一个重要目标。文献[11]认为基于性能的设计理论应追求能控制结构可能发生的所有地震波谱的破坏水准, 为此, 需要根据不同重现期选择所有

可能发生的对应于不同等级的地震动参数的波谱, 这些具体的地震动参数称为地震设防水准, 分为常遇、偶遇、罕遇和稀遇地震, 并给出了其重现期和超越概率, 表1为几种地震设防水准。

表1 地震设防水准

FEMA273	SEAOC Vision 2000	ATC40	GB50011-2001
—	50% /30年	—	—
—	—	—	63.2% /50年
50% /50年	50% /50年	50% /50年	—
20% /50年	—	—	—
10% /50年	10% /50年	10% /50年	10% /50年
2% /50年	10% /100年	5% /50年	2~3% /50年

#### 2. 结构的性能水平及其量化指标

结构的抗震性能水平表示结构在特定的某一地震水准下一种有限程度的破坏, 包括结构和非结构构件破坏以及因它们破坏引起的后果, 主要用结构易损性、结构功能性和人员安全性来表达。文献[12]提出按照不同的地震动水平将结构的性能水准分为四级, 即功能完好、功能连续、控制破坏与损失、保证安全。文献[13]提出了简化的三级性能水准, 即可继续使用、修复后可再使用、保证安全。

#### 3. 抗震设计的目标性能

结构的抗震设计的目标性能是针对某一地震设防水准而期望达到的抗震性能等级, 抗震设计目标性能的建立需要综合考虑场地特征、结构功能与重要性、投资与效益、震后损失与恢复重建、潜在的历史或文化价值、社会效益及业主的承受能力等诸多因素。FEMA273规定的目标性能如表2所示。我国抗震规范的目标性能实际是: 小震不坏, 中震可修, 大震不倒。

表2 FEMA273规定的目标性能

地震风险	性能水平			
	正常使用	立即入住	生命安全	防止倒塌
50% /50年	A	B	C	D
20% /50年	E	F	G	H
10% /50年	I	J	K	L
2% /50年	M	N	O	P

FEMA273的目标性能考虑了三类目标性能:

基本安全目标为: K+P

加强目标为: K+P+ (A, E, I, M) 或 (B, F, J, N) 的任意一个, O

有限目标为: K, P, C, D, G, H

(二) 基于性能的抗震设计方法

目前基于性能的抗震设计仍延续了现行的结构设计体系, 强调结构的位移性状和非线性静力分析, 主要有以下三种方法。

1. 位移影响系数法

位移影响系数法的基本原理: 认为非线性 SDOF 体系的最大位移等于具有相同阻尼和刚度的弹性 SDOF 体系的最大位移乘以一个和强度折减系数 R、周期  $T_e$  等有关的位移修正系数:

$$\Delta_i = C_R \delta_e = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2}$$

式中:  $\Delta_i$ ,  $\delta_e$  分别为非线性和线性体系的最大位移;  $C_R = C_0 C_1 C_2 C_3$  为位移修正系数;  $C_0$  为反映等效单自由度体系 (SDOF) 位移与建筑物顶点位移关系的修正系数;  $C_1$  为利用弹性位移估计弹塑性位移的修正系数;  $C_2$  为反映滞回环形状对最大位移反应影响的调整系数;  $C_3$  为反应效应对位移影响的修正系数;  $S_a$  为 SDOF 体系的等效自振周期和阻尼比对应谱加速度反应;  $T_e$  为结构等效自振周期。

2. 直接基于位移的方法

国内外学者对基于位移的抗震设计理论进行了大量的研究, 并提出了适用于不同类型结构的基于位移的抗震设计方法。

基于位移的计算方法 (DCB) 需要对结构的期望位移最大值进行计算, 然后进行结构设计, 使结构和构件的变形能力超过期望位移最大计算值。

基于位移限值的迭代计算方法 (IDSB) 与基于位移的计算方法相似, 不同的是结构的位移限值是给定的, 在进行结构设计时, 需求对结构体系进行反复修改, 直到计算分析的位移值小于位移限值, 整个设计过程需要迭代计算。

直接基于某一限值位移的方法 (DDSB) 是从某一给定的目标位移出发开始结构设计, 并得到结构的需求强度、刚度等, 最后得到满足某一设计地震水平的目标位移, 该方法的设计过程不需要迭代, 也不需要预先设计。

3. 能力谱方法<sup>[14]</sup>和改进的能力谱方法

能力谱法最早是在 1975 年由 Freeman 等提出的, 是目标位移估计的常用方法。能力谱法的一个显著特点是: 使用线性等效的方法。该方法对结构在地震作用下的“需”与“供”较为明确, 有助于结构性能目标的选取。

三、目前建筑结构基于性能抗震设计方法需要解决的问题

(一) 抗震设防水准的完善

目前世界各国各种规范文件对抗震设防水准的规定不尽相同, 有的用四种地震风险水平, 有的用三种, 没有统一的标准, 如表 1 所示。对于多遇地震我国的地震设防水准偏低, 这就会导致在第一阶段抗震设计时, 设计强度和弹性变形偏小, 而对于常遇地震和罕遇地震则与美国规范持平。另外, 为了满足结构在地震作用下具有不同的抗震性能或变形性能, 三种抗震设防水准是不够的, 例如, 从小震到大震, 50 年的

超越概率相差较大, 仅仅用一个中震来划分远远不能满足业主或投资者对未来地震作用下结构的抗震性能表现的要求。因此, 结合我国的经济水平以及地震区域的分布特点, 提出更完善的抗震设防水准是当前地震工作者的一项重要任务。

(二) 结构抗震性能指标的量化与细化及多重指标的研究

目前对于基于性能的抗震设计, 主要还是采用基于位移或变形的的设计方法, 以位移、变形或位移角为控制指标。由此, 产生三个问题: 一是如何将业主对结构的抗震性能要求量化为具体的变形指标; 二是控制指标的细化问题, 例如, 我国抗震规范对结构在小震和大震作用下的层间位移角进行了限定, 但是对于中震作用或者其它地震风险水平作用下的变形没有相关规定, 这就需要对结构在较大范围的中震作用区域的控制指标进行细化; 三是多重指标的使用, 有的学者<sup>[15]</sup>认为仅仅采用变形作为结构抗震性能的控制指标是不够的, 应该使用两个或多个性能参数。

(三) 抗震设计方法的进一步改进

位移影响系数法只是一种衡量结构整体抗震水平的评估方法, 无法提供具体楼层和主要构件的损坏情况。另外, 该方法需要确定的系数较多, 每一个系数的取值的变化都会对结果产生较大的影响, 使计算结果与结构的实际最大非线性位移会产生较大的误差。

直接基于位移的方法采用的是替代结构, 由于替换结构的刚度是对应于最大位移时的割线刚度 (或初始刚度), 其周期一般比弹性结构的周期长 (或小) 许多。近年来的研究表明, 近场强震效应、结构构件的滞回特性等对结构位移反应谱具有较大的影响。

在能力谱方法中, 需要将原型多自由度结构体系转化为等效单自由度体系, 而现有的转化方法都是以结构反应的单一振型为基础, 这对于多高层结构体系来说, 将产生比较大的误差; 通常的能力谱方法都只适用于规则结构, 而对于抗侧刚度沿结构高度方向分布不均匀的结构体系或楼层平面内扭转反应比较明显的结构体系, 该方法是否适用需要进一步的研究。

四、结论

本文阐述了基于性能的抗震设计理论的提出背景, 对基于性能的抗震设计理论研究和设计方法进行了总结, 针对各项研究内容和设计方法, 提出了目前基于性能的抗震设计理论研究中存在的主要问题, 为今后进一步研究指明了方向。

作者简介:

郭锐娥 (1981—), 女, 汉, 陕西省咸阳市, 西安思源学院, 研究生, 讲师, 主要研究方向: 土建工程

马贞荣 (1978—), 女, 汉, 陕西省韩城市, 西安科技大学高新学院, 本科学历, 讲师, 主要研究方向: 工程造价

参考文献:

[1] 小谷俊介 (叶列平译). 日本基于性能结构抗震设计方法的发展建筑结构 [J]. 2000, 30 (6): 6~9.  
[2] 史庆轩. 钢筋混凝土结构基于性能的抗震研究及破坏评估 [D]. 西安建筑科技大学申请博士学位论文, 2002.  
[3] [美] Peter M. Sheater 著, 陈章立译《地震学引论》, 地震出版社 2008.2  
[4] 汪梦甫, 周锡元. 基于性能的建筑结构抗震设计 [J]. 建筑结构. 2003, 33 (3): 59~61.  
[5] FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Report FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.