

# 基于性能化的土建结构抗震设计方法研究

李 聪

河北省建筑材料工业设计研究院有限公司 河北石家庄 050000

**摘 要：**伴随着社会经济持续发展，城市化进程加快，土建结构规模越来越大，复杂程度与日俱增。地震这一难以预料的自然灾害给土建结构安全性带来严峻挑战。传统抗震设计方法多是凭借经验与规范，很难满足现代土建结构安全性，经济性及使用功能等方面的全面需求。所以基于性能化抗震设计方法已经逐渐得到了人们的普遍重视与运用。这种方法面向结构实际性能需求，采用科学合理的设计手段来保证结构在地震中满足预期性能目标，并尽可能减少地震灾害给结构与人带来的损失，文章就此展开了探讨。

**关键词：**性能化；土建结构；抗震设计；设计方法

## 引言

传统抗震设计方法多基于规范经验公式及经验数据，注重结构刚度与强度设计而忽略实际性能表现。该方法通常不能完整地反映地震中结构的实际响应，易造成设计上的过分保守或者缺陷，是不经济和安全的。尤其是传统的方法很难有效地处理复杂高耸的结构。以性能化为基础的土建结构地震设计方法的研究不仅学术价值高，而且工程应用前景广阔。对其性能化设计方法进行系统研究与改进，能够增强土建结构抗震能力、降低地震灾害带来的危害、确保人民生命财产安全。同时性能化设计方法利于优化结构设计、增强设计科学性与经济性、促进土建工程领域技术进步。

## 一、性能化抗震设计理论基础

### 1. 性能化设计的基本概念

性能化设计最基本的概念就是通过制定清晰的结构性能目标与准则来保证建筑在地震及其他灾害中具有期望的安全性，功能性与经济性。与传统以强度为基础的设计方法不同，性能化设计注重结构在地震作用下的真实性能，注重结构变形能力，破坏模式以及使用功能等方面的复原。性能化设计一般由设置若干性能水平组成，例如立即使用（Immediate Occupancy, IO）、生命安全（Life Safety, LS）以及防倒塌（Collapse Prevention, CP），每一个水平都对应着不同地震强度与结构状态。

性能化设计时采用参数化指标如位移角，楼层剪力，基底剪力以及构件塑性铰转动角度对结构抗震性能进行评价。位移角作为评估结构整体变形能力大小的一个关键参数，一般设置在不大于一定限值才能确保其稳定；

楼层剪力与基底剪力是用来度量结构内地震力分布与传递的指标；塑性铰转动角度又体现了结构中局部构件塑性变形能力及耗能能力。

性能化设计流程一般由地震需求分析、结构分析、性能评估三个主要环节组成。地震需求分析是利用概率地震危险性分析来确定设计地震动的参数，而结构分析则是利用线性或者非线性来模拟地震中结构的反应，性能评估是基于前述的各项参数来对建筑结构的抗震性能进行全面的评估和确认。在此过程中性能目标的制定就显得格外重要，既要考虑建筑的目的，重要程度及使用要求等因素，又要综合经济因素及实际工程情况，保证设计方案既能满足安全性能要求，又有合理经济性。

### 2. 结构构件性能指标

主要性能指标有构件变形能力、强度及耗能能力，它们对结构安全性及使用功能有直接影响。变形能力一般用位移，位移角或者转角来表示，它反映了地震中构件变形的大小，如梁柱节点位移角就是一个关键参数，它可以预示出结构弹塑性变形。强度指标一般由剪力，弯矩及轴力组成，利用它们可对构件承受地震力的能力进行评价，以保证结构不失稳不倒塌。

耗能能力作为又一重要性能指标主要由构件滞回性能及耗能系数表示。滞回性能体现了反复加载过程中构件的变形特性与能量耗散能力，高耗能能力构件能有效地吸收与耗散地震能量，降低结构震动响应时滞回曲线区域越大说明构件耗能能力越强。另外构件的延性是一个重要性能指标，延性良好的构件能够在地震作用下经受住更大的变形，不会产生脆性破坏，延性一般用延性系数或者塑性转角等指标进行度量。

在实际的设计过程中，确定这些性能指标需要进行细致的分析和计算，常用的方法包括非线性静力分析（如Pushover分析）和非线性动力时程分析等，利用这些分析方法可得到构件对地震的反应数据并由此确定构件性能指标的真实数值。对不同种类构件来说，它们的性能指标是不一样的，如梁体、柱体、剪力墙体等性能指标各有侧重，梁体性能指标集中在弯矩与剪力两个方面，在柱的设计中，轴力和弯矩的组合效应受到了更多的重视，而剪力墙则需要综合考虑其整体剪切变形与局部弯曲变形之间的协同效应。

## 二、土建结构抗震性能需求分析

### 1. 地震作用下土建结构的响应特性

土建结构在地震中的响应特征表现为位移、速度、加速度和内力。地震动所产生的惯性力会引起结构的震动，而结构刚度、阻尼以及质量的分布情况直接影响着结构的动力响应。在地震发生时，结构可能会经历如弹性、弹塑性乃至破坏等多个阶段。其位移反应可以通过层间位移角（IDR）来评估，而加速度反应则对非结构部件和设备的安全性产生影响。更具体地说，地震导致的剪力（ $V$ ）和弯矩（ $M$ ）会在柱体、梁结构等部件中形成内部力量，这些内部力量需要通过特定的截面设计和材料的强度来进行抵抗。对高层建筑而言，PGA（峰值加速度）与SA（反应谱加速度）作为关键参数决定着结构设计地震力大小。另外，结构的固有振动周期（ $T$ ）与地震活动特性的匹配度对其响应特性产生了显著的影响，长周期的结构在长周期地震活动中可能会出现共振，从而引发较大的位移和内部应力。通过对结构地震响应特性进行分析，能够对结构进行优化设计，改善结构抗震性能，保证结构地震时的安全性以及使用功能。

### 2. 抗震性能目标的确定

性能目标需要兼顾建筑用途、重要性、经济性以及地震风险。常用性能目标有完好、可用、可修、防倒塌四个级别。完好的目标要求小震下的结构具有弹性而不发生明显的破坏；可使用目标需要允许中震条件下的轻微损伤而不会对使用功能造成影响；可修的目标需要大震时使结构发生可修破坏；防倒塌的对象要求极大震时结构不能整体坍塌，以保证人员的安全。这些目标通过设定相应的设计参数来实现，例如峰值加速度（PGA）、层间位移角（IDR）以及内力指标（剪力 $V$ 和弯矩 $M$ ）。设计过程中需要通过非线性静力推覆分析与时程分析来验证不同地震下结构的反应是否达到了预期性能目标。合理设定抗震性能目标可以综合考虑经济性与实际使用

要求，同时确保结构安全，优化结构设计并改善其抗震性能。

### 3. 结构性能水平与设计需求的关系

结构性能水平和设计需求之间的关系，对土建结构抗震设计效果有着直接的影响。不同性能水平相应于不同设计需求及验算指标。完好水平要求在小震作用下结构保持弹性，无明显损伤，可使用水平要求在中震作用下结构允许轻微损伤但不影响使用功能，可修水平要求大震时结构容许产生可修的破坏，而防倒塌水平则要求大震时不会出现整体倒塌以保证人员安全。这些性能指标是通过特定的设计参数来达成的，例如峰值加速度（PGA）、层间位移角（IDR）以及内力指标（剪力 $V$ 和弯矩 $M$ ）。在确定性能水平时，还要考虑到建筑物的使用情况、重要性以及经济性。对医院、学校等重要建筑提出了更高的性能目标来保证震后仍然能够正常投入使用，普通住宅则可采取更低性能目标来降低造价。设计者需借助性能评估工具以及地震风险评估数据来合理地确定设计参数以保证结构能够在符合安全性与经济性要求的同时实现其期望抗震性能。

## 三、性能化抗震设计方法

### 1. 性能化设计的基本步骤

性能化设计基本程序包括确定性能目标、地震需求分析、结构分析及设计，性能评估及设计调整。首先，要根据建筑物的目的、重要性以及所处位置的地震风险确定特定的抗震性能目标，如完好、可用、可修及防倒塌级别。接下来，进行地震需求的详细分析，并确定设计地震动的各项参数，这包括峰值加速度（PGA）、设计反应谱以及地震动的时程记录等。在随后进行结构分析时，都会用到上述参数。

在进行结构的分析和设计时，根据性能目标和地震的需求参数，对结构进行弹性和非弹性的评估。常见的评估方法有非线性静力推覆分析（Pushover Analysis）和时程分析，这些分析有助于评估结构在不同地震作用下的响应特性，如层间位移角（IDR）、结构变形和内力分布（剪力 $V$ 和弯矩 $M$ ）。通过上述分析可找出结构薄弱环节并找出需强化处。

其次，性能评估对于保证设计达到预期目标至关重要，依据分析结果对不同性能目标的结构性能进行了评价，并对其是否达到设计要求进行判定。若评估结果表明部分性能目标不达标则需调整设计。在进行设计调整时，可能需要调整结构部件的尺寸和材料的强度，或者采纳新的抗震措施，例如加入阻尼器或隔震设备，以增

强结构的抗震能力。

## 2. 结构性能目标的确定方法

结构性能目标制定方法涉及到很多因素，其中包括建筑物的使用情况、重要性、地震风险以及经济性。性能目标设定的第一步就是要依据建筑物的重要程度及使用功能来清楚地了解建筑物在地震中的期望性能。比如对医院、消防站这些关键设施都要求制定更高的性能目标比如小震时完好无损，中震时可以投入使用，大震时可以维修以及极大震时防止倒塌等等。对于常规的住宅和办公建筑，可以选择较为简单的性能指标。

依据规范及实际需要选取了适当地震动参数并加以分析。常用参数有峰值加速度（PGA），设计反应谱加速度（ $S_a$ ）以及地震动时程记录等。以这些参数为依据，对地震需求进行了分析，并确定了结构对各种地震的响应，例如层间位移角（IDR），结构变形以及内力分布等。对结构弹塑性分析采用了非线性静力推覆分析与时程分析相结合的方法，并利用这些方法对不同性能目标的结构性能进行了评价。

性能目标的设定也需要兼顾经济性，结构安全性等。为了实现公式化的表达，我们可以设定目标位移（demand）、容量曲线（capacity）和性能点（performance point）。性能点是容量曲线和需求曲线的交点，表示结构在特定地震作用下的实际响应。利用基于位移的方法（如ATC-40和FEMA-273），通过以下公式评估性能点：

$$C_m = C_{1C} C_{2C} C_{3C}$$

其中 $C_m$ 为修正系数， $C_1$ 为模态参与因子， $C_2$ 为阻尼修正系数， $C_3$ 为质量修正系数。通过上述计算来评价该结构是否达到了预期性能目标。依据分析结果对截面尺寸、材料强度及构造措施等设计参数进行了调整，以保证结构在地震过程中满足预期的性能水平。持续地进行评估与调整是保证设计达到性能目标的重点，利用这些手段，能够达到对结构进行优化设计、增强抗震性能、保证地震作用下结构可靠、安全的目的。

## 3. 基于性能的设计方法及其应用

性能化设计方法是通过制定清晰的性能目标来保证结构在各种地震强度作用下呈现期望行为。该方法一般由以下几个环节组成：制定性能目标、地震需求分析、结构分析、性能评估、优化设计。性能目标一般划分为小震完好、中震可用，大震可修以及极大震防倒塌等，相应地震动水平及结构响应也各不相同。

在进行地震需求分析的过程中，需要确定一系列

关键参数，包括峰值加速度（PGA）、设计反应谱以及地震动的时程记录等。这些参数用于后续的结构分析，以评估结构在地震作用下的响应特性，如层间位移角（IDR）、结构变形和内力分布（剪力V和弯矩M）。非线性静力推覆分析（Pushover Analysis）和时程分析是两种常用的分析方法，通过这些分析，可以识别结构的薄弱环节并确定其抗震性能。

性能评估阶段通过对结构实际响应及预期目标进行计算对比来判断其是否达到设计要求。如果结果显示部分性能目标不达标，则需进行设计调整，例如修正构件尺寸，增加材料强度或者采取新型抗震构造措施等。具体调整可包括增设阻尼器，隔震装置或者完善节点设计等措施来改善结构整体抗震性能。

性能化设计方法被广泛地应用于实际工程。比如在高层建筑，桥梁以及重要公共设施等领域，使用这种方法能够有效地改善结构抗震性能，保证结构在地震作用下的安全以及使用功能。通过对设计参数及构造措施的持续优化，以性能为核心的设计方法可以达到经济、合理抗震设计、增强建筑物韧性与可靠性、满足不同地震强度要求等目的。该方法的使用在促进结构安全性的同时，也显著减少地震灾害给人类生活及财产造成的损失。

## 结束语

性能化设计方法既对传统抗震设计思路进行了理论改进，同时也在实践中显示出突出的应用价值。尤其在高层建筑，桥梁及关键公共设施设计时，这种方式通过增强结构韧性及可靠性来保证结构在地震作用下的使用效果，减少地震灾害给人类生活及财产造成的损失。

## 参考文献

- [1] 韩小雷, 傅钦昭, 季静, 等. “两水准两阶段”抗震性能化设计方法及工程应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(21): 8.
- [2] 李涛. 某超限高层建筑基于性能抗震研究分析[D]. 贵州大学, 2019.
- [3] 祖庆华, 孙志坚, 李明. 基于有限元的整体式钢结构货架抗震设计的方法研究[J]. 物流技术与应用, 2019(2): 5.
- [4] 周秀梅. 建筑结构设计抗震性能化设计要点探讨[J]. 汽车博览, 2021(22): 265-266.