

# 性能化设计方法在超限高层结构设计中的应用

黄治蓉

广西华蓝工程管理有限公司

**摘要：**横县天和悦府二期为两栋152.65m的超高层建筑。设防烈度为7度0.1g，第一组。简要介绍了该项目情况、主要特点及抗震性能目标。通过实际超限工程的设计步骤，介绍了性能化设计方法的原理及应用，以及如何利用静力推覆分析来验证结构是否满足预定的性能目标。

**关键词：**设计步骤；抗震性能化设计；弹性时程分析；静力弹塑性分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.18.112

## 引言

众所周知抗震性能是结构设计中非常重要的一部分，近几十年来，随着人们生活水平的提高，我国对建筑结构抗震设计的研究也越来越深，结构抗震设计的国家规范《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）和《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ3-2010）的规定在不断的修订中也越来越细致。随着社会的发展，城市中的摩天大楼也逐渐增加，把超高层结构做得既安全可靠又经济合理是结构设计中作者的首要任务。笔者从事高层结构设计多年，现结合自己的工程经验，在超限高层结构设计的方法做出解释，期望引起讨论。

## 一、结构抗震性能化设计方法的介绍

在做超限高层结构计算分析时，首先要根据高规3.11.1条确定结构抗震性能目标<sup>[1]</sup>。需要根据设防类别、烈度、场地状况、经济性等因素综合考虑。鉴于人类对地震不确定性的研究尚少，对结构抗震性能的判断难以做到精确，只能尽可能让设计出的结构在地震作用下有较为合理的屈服机制，因此在抗震性能目标选用时宜偏于安全。实际工程中，抗震性能目标的选用需要综合考虑各项因素，还需征求业主和相关专家的意见。由表高规3.11.1可知，所有的性能目标都要求小震弹性。表格中性能水准1就是要求弹性设计。性能水准2要求关键构件及普通竖向构件弹性设计，且要求耗能构件抗剪承载力按弹性设计，抗弯不屈服设计。性能水准3要求关键构件及普通竖向构件的抗剪承载力按弹性设计，抗弯承载力按不屈服设计，部分耗能构件抗弯进入屈服阶段，但其抗剪承载力按不屈服设计，并且要进行大震不倒验算。性能水准4要求关键构件按不屈服设计，部分竖向构件进入屈服阶段，但要求其抗剪截面验算（即剪压比）要满足规范要求，并且要进行大震不倒验算。性能水准5要求关键构件按不屈服设计，较多竖向构件可进入屈服阶段，但同一楼层不能全部屈服，竖向构件

的抗剪截面验算应满足规范要求，也就是剪压比不能超限，并且要进行大震不倒验算。性能水准3、性能水准4和性能水准5都要求进行弹塑性分析来深度论证结构是否能达到预期的性能水准<sup>[2]</sup>。

高规表3.11.1

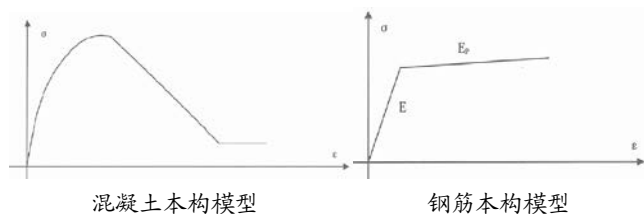
性能目标		性能水准			
		A	B	C	D
地震水准	多遇地震	1	1	1	1
	设防烈度地震	1	2	3	4
	预估罕遇地震	2	3	4	5

## 二、等效弹性分析方法及弹塑性分析方法

性能化设计在实际操作中分为两种：一种是用等效弹性分析方法，另一种是弹塑性分析方法。我们平时做的常规的结构（非超限、非减隔震）设计时，都是用弹性方法分析，且目前的分析软件也都在弹性分析方法下才能得出结构的计算结果指标及构件的配筋数值。然而结构在遇到设防地震或者罕遇地震时，都会出现不同程度的损伤和变形，而弹性分析方法是一种线性分析方法，并未考虑到结构损伤和变形后的材料非线性和几何非线性，但配筋的计算结构又必须用弹性分析方法才能得到，因此需要改变某些计算参数来近似考虑材料非线性和几何非线性，这种方法就称为等效弹性分析方法。通过调整结构的周期折减系数、连梁刚度折减系数、结构阻尼比等，近似等效非线性。通常认为：一、在中震或大震的情况下，填充墙已开裂，此时填充墙的刚度对主体结构的影响很小，因此结构周期不再折减。二、在中震、大震下，认为连梁已开裂甚至屈服，刚度退化，因此折减比较多，折减系数比较小，但不小于0.3。三、结构阻尼比，在大震下，随着结构刚度退化严重，阻尼比也增加，混凝土结构大震下阻尼比取0.07。通过这样调整计算参数，用弹性的方法计算，设计就能满足预期的性能水准。高规3.11.3节中的计算公式都是用于等效弹性分析方法<sup>[1]</sup>。

然而，等效弹性分析方法毕竟是等效，是近似。因此规范规定了性能水准3到性能水准5的结构都应进行弹塑性计算分析。非线性分析包括静力推覆分析（pushover）和弹塑性动力时程分析。对于较规则、高度超限不多且基本周期小于4s的结构，可以考虑采用静力弹塑性分析。对于不规则项较多的，或高度超限较多的，周期较长的，或性能水准5的结构就必须采用动力弹塑性分析方法。这两种非线性分析是看结构的塑性发

展情况及结构损伤程度。让我们把控大局看是否做到了大震不倒，是否满足了预设的性能目标，并不会配有配筋结果出来给我们做构件设计。



混凝土本构模型

钢筋本构模型

### 三、抗震性能化设计如何应用到实际工程

确定完结构抗震性能目标之后，就开始结构建模，做多遇地震下的结构计算。我国是按两阶段三水准做设计。两阶段：正常使用极限状态和承载能力极限状态

三水准：小震（多遇地震）弹性，中震（设防地震）不屈服，大震（罕遇地震）不倒。我们平常做的设计，只做了小震弹性设计，中震和大震都是通过构造措施来满足，也就是说，常规的结构（非超限、非减隔震）在多遇地震下计算满足了，并满足了抗震构造措施（如箍筋加密，最小最大配筋率，轴压比等等），就可以认为已经满足中震不屈服，大震不倒。而超限项目的设防水准要求高于三水准，不能只算多遇地震，用构造要求去满足设防地震和罕遇地震，这个思路已经行不通了。因此专家前辈们摸索出抗震性能化设计方法，用于在结构抗震性能在三水准的基础上做相对准确的提高。之所以说是相对准确，是因为真实的地震作用大小有着很大的不确定性，人类只能通过统计以往发生过的地震，对其进行数据处理，得到某个地区某种场地下的一条反应谱，并预估出一个相对比较靠谱（接近反应谱）的地震作用去作用到结构上。这也是人类在目前对大自然的认知程度上能做出的较为合理的设计方法。在此，笔者用实际工程天和悦府项目为例，阐述抗震性能化设计如何在实际工程中应用。



图为天和悦府超限高层

本项目为南宁市横县天和悦府二期，天和悦府总用地面积为 $38071\text{m}^2$ ，其中二期占地面积为 $1582.79\text{m}^2$ ，二期总建筑面积为 $59367.57\text{m}^2$ ，其中地上建筑面积为 $51386.02\text{m}^2$ ，地下建筑面积： $7361.7\text{m}^2$ 。项目基地呈

南北走向矩形形态，地势基本平坦。地下二层，地上共2栋楼（47层，带一层商业裙楼），主塔楼高度 $156.25\text{m}$ ，为剪力墙结构，设防烈度为7度 $0.1\text{g}$ ，第一组，场地类别为I1类；裙房为框架结构，层高 $5\text{m}$ ，开间 $3.1\text{m}\sim 6.2\text{m}$ ，进深均为 $8.4\text{m}$ 。根据本场地及地下室竖向的剖面分析，地下室顶板面的标高（ $60.2\text{m}$ ）与室外自然地面（地块周边沿路标高约为 $59.5\sim 59.8\text{m}$ 左右）的高差仅为 $0.4\text{m}$ 左右，且为填土自然放坡过渡至室外地面，地下室可视全埋式地下室。基础为筏板基础，持力层为中风化灰岩。

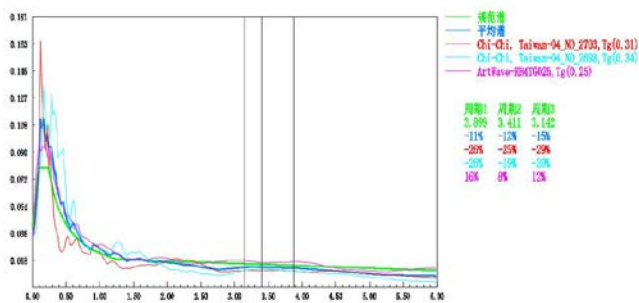
由高规表3.3.1-2可知，7度区B级高度钢筋混凝土剪力墙结构的最大适用高度为 $150\text{m}$ 。本项目为 $156.25\text{m}$ 大于 $150\text{m}$ ，所以属于超B级高度的超限高层项目。抗震性能目标定位“C级”。由表3.11.1可知，结构在小震、中震、大震下对应的性能水准分别为1、3、4。

首先要做小震设计，在多遇地震作用下，结构各项指标及各个构件均要满足规范要求，而衡量结构主体是否满足小震弹性的一个重要指标就是位移角小于 $1/1000$ 。小震弹性满足之后，就要进行设防烈度地震下性能水准3的计算分析，此时作用分项系数取1，材料强度采用标准值，周期折减系数取1，不计算风荷载，不考虑偶然偏心和双向地震，这样就是等效弹性分析方法的实际操作，当各个构件均未出现超筋或截面验算超限的情况时，即可认为该结构中震下能满足性能水准3。接下来要进行在预估罕遇地震作用下性能水准4的计算分析，此时作用分项系数取1，材料强度采用极限值乘以 $0.85$ ，周期折减系数取1，阻尼比取 $0.07$ ，连梁刚度折减取 $0.03$ ，不计算风荷载，不考虑偶然偏心和双向地震，当各个构件均未出现超筋或截面验算超限的情况以及位移角未超过 $1/120$ 时，即可初步认为该结构在预估罕遇地震下能满足性能水准4，但还需做非线性分析，统计结构在预估罕遇地震作用下考虑几何非线性和材料非线性之后的损伤程度，深度论证该结构在大震下是否能满足性能水准4。

### 四、弹性时程分析的补充计算

在高规4.3.4条规定，7度区大于 $100\text{m}$ 的丙类高层结构应采用弹性时程分析方法进行多遇地震下的补充计算。前面所说的小震弹性计算，是用反应谱的方法做的计算。所谓反应谱就是人类通过对自然界每次地震的监测统计及数据处理后绘制出的谱曲线，反应谱随着设防烈度、场地类别、地震分组的不同而变化，反应谱并不是地震波，而是一种理论假设值。而弹性时程分析则是直接把真实的地震波输到计算程序里，让地震波能量直接作用在结构计算模型上，看结构位移角是否能满足弹性要求（即 $1/1000$ ），当然地震波的选择在高规中要相应的规定，也是非常靠谱的，即地震波谱曲线的平均值与规范反应谱在结构自振周期处相差在 $20\%$ 以内。这样

的补充验算才更能接近实际情况<sup>[3]</sup>。



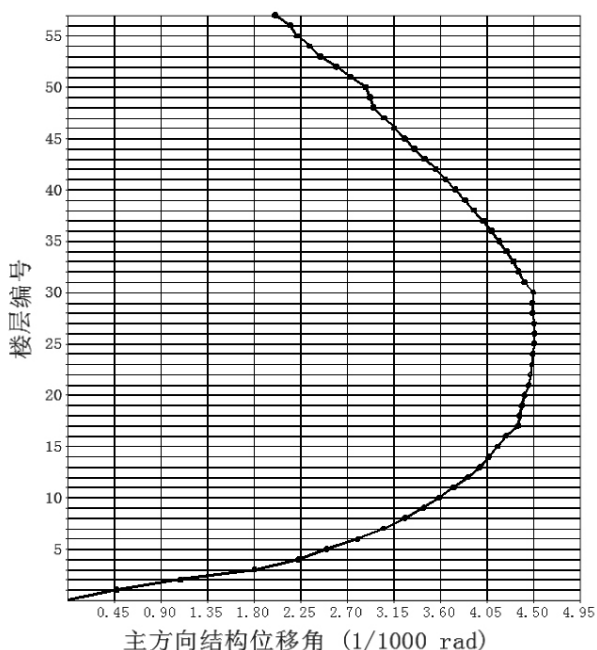
规范谱与反应谱对比图

### 五、弹塑性分析计算

在高规3.7.4条规定了哪些结构需要做弹塑性分析计算，在高规3.11.3的性能化设计中规定，性能水准3

至性能水准5均应做弹塑性分析计算。弹塑性分析的可以较准确且直观地看出结构的薄弱部位，结构的损伤程度，塑性铰出现的位置等，为合理的结构设计提供了有利的依据。本工程在预估罕遇地震作用下，需满足性能水准4的性能目标。可采用动力弹塑性或者静力弹塑性非线性分析方法。本工程采用PKPM系列软件的EPDA进行了静力推覆分析。

Pushover分析<sup>[4]</sup>作为一种简化的弹塑性分析方法。以评估此建筑主体结构在罕遇地震作用下的抗震性能。通过分析每一步加载时的塑性铰发展情况、构件损伤程度以及达到性能点时的结构状态，可以直观地判断出结构是否满足性能目标。而大震不倒的判断依据则是结构弹塑性位移角未超限。



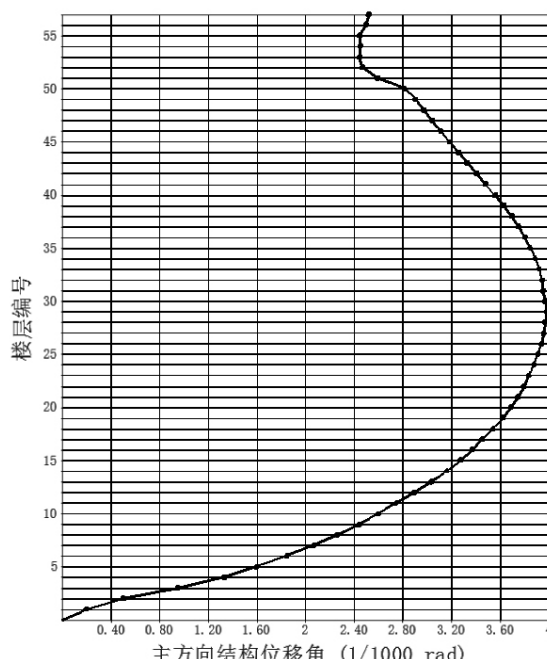
相应的数据文件:第44加载步结构主向位移角曲线.TXT

X方向性能点主方向位移角曲线图

通过弹塑性分析，本工程在结构达到性能点前，塑性铰最早出现于结构的地上1层，这些楼层也是结构破坏时塑性铰主要集中的区段，中部的楼层仅少数剪力墙处于损伤工作状态；从塑性铰的出现发展规律，看出梁发挥了耗能的作用，保证了剪力墙的正常工，满足了性能目标。

### 结束语

随着社会发展，人们的生活水平不断提高，对建筑结构安全性能的要求也越来越高。本文以天和悦府超高层住宅设计为例，介绍了抗震性能化设计的方法及应用，以及弹性时程分析的补充验算、弹塑性分析的深度论证。通过从普通的小震弹性计算到大震满足预定性能目标的操作步骤、理论及方法的阐述，让读者能把抗震性能化设计应用于实际工程的结构设计中。



相应的数据文件:第38加载步结构主向位移角曲线.TXT

Y方向性能点主方向位移角曲线图

### 参考文献

- [1]朱炳寅.高层建筑混凝土结构技术规程应用与分析 JGJ3-2010[M].中国工业出版社,2012(08):112.
- [2]朱炳寅.建筑抗震设计规范应用与分析 GB50011-2010[M].中国工业出版社,2012(08):104.
- [3]舒云峰.重庆国瑞中心塔楼结构设计[J].建筑结构,2020,50(21):16-18.
- [4]北京金土木软件技术有限公司.Pushover分析在建筑抗震的应用[M].北京:中国工业出版社,2010.

作者简介:黄治蓉(1990年02月),男,汉族,广西钦州,学历:本科,职称:中级,职务:结构设计师,研究方向:结构设计。