

# 高层建筑抗震设计“剪重比”指标探讨

陈太泉

三亚市建协施工图设计审查有限公司 三亚 572000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20138

**[摘要]** 本文介绍了剪重比的来历及规范相关规定,深入分析了剪重比限值仅与抗震设防烈度相关以及剪重比作为判断结构布置合理性指标的合理性和局限性,探讨了调整结构布置法与加大地震剪力法两种剪重比调整方法的适用场景与效果,并根据分析结果提出了完善剪重比限值规定、结合多指标判定结构布置合理性、优化剪重比调整方法等相关建议。

**[关键词]** 剪重比;长周期;高层建筑;抗震设计

## 引言

剪重比是结构抗震设计中的一项重要控制指标,《建筑抗震设计标准》GB/T 50011-2010<sup>[1]</sup>与《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2010<sup>[2]</sup>均对水平地震剪力系数(即剪重比)最小值作出了规定。

随着高层、超高层建筑的日益增多,剪重比相关问题逐渐凸显。设计实践中,剪重比限值规定有时存在矛盾或不尽合理之处,调整剪重比以满足规范要求也面临诸多困难。因此,不少设计人员与学者对剪重比限值的合理性及调整方法的有效性提出了疑问。

针对上述问题,本文首先阐述剪重比的由来与规范规定,继而对其合理性及调整方法进行分析与讨论,最终提出相应建议。

## 1 剪重比的来历及规范的相关规定

### 1.1 剪重比的来历

规范<sup>[1,2]</sup>所采用的设计反应谱是基于大量强震加速度记录统计分析的加速度反应谱。然而,由于强震记录仪在长周期段的记录范围有限,且数据处理过程中过滤掉部分长周期分量,导致设计反应谱在长周期段存在先天不足,即地震影响系数下降过快,使得按此计算的地震作用可能偏小,对结构安全不利。此外,长周期建筑对地震中的长周期分量更为敏感,可能引发共振,增大震害风险,而振型分解反应谱法难以准确估计此类效应。为此,规范设定了最小剪重比,以控制结构底部及各楼层的最小地震剪力,弥补长周期建筑地震效应估计不足的缺陷。

### 1.2 规范的相关规定

规范<sup>[1,2]</sup>对剪重比规定如下:

$$V_{EKi} \geq \lambda \sum_{j=1}^n G_j \quad (1)$$

式(1)中:  $V_{EKi}$ ——第  $i$  层地震剪力标准值;

$\lambda$ ——水平地震剪力系数(剪重比),其值不小于规范<sup>[1]</sup>

表 5.2.5 的规定;

$G_j$ ——第  $j$  层重力荷载代表值;

$n$ ——结构计算总层数;

同时,规范<sup>[1]</sup>第 5.2.5 条的条文说明对剪重比不满足时地震剪力的调整提出了相关要求:第一,结构底部总剪力与规范限值相差不大,其余部位的楼层剪力均满足时,直接放大各楼层的地震剪力;第二,结构底部总剪力与规范限值相差较多时,应调整结构选型及总体布置,从而加大结构所受到的地震剪力。

## 2 剪重比合理性探讨

### 2.1 最小剪重比限值考虑因素不全

从规范<sup>[1]</sup>表 5.2.5 中可将最小剪重比限值解读为:

$$\lambda_{\min} = 0.2 \alpha_{\max}, \quad T < 3.5s; \quad (2)$$

$$\lambda_{\min} = 0.15 \alpha_{\max}, \quad T > 5.0s; \quad (3)$$

3.5s 至 5.0s 区间的  $\lambda_{\min}$  按线性插值;

由式(2)、(3)可见,规范规定的最小剪重比  $\lambda_{\min}$  仅与抗震设防烈度相关。然而,据规范中的反应谱曲线,当地震基本周期大于特征周期  $T_g$  时,地震影响系数不仅与烈度有关,还受阻尼比和场地特征周期影响。因此,现行最小剪重比限值以“一刀切”方式对随特征周期、阻尼比变化的反应谱进行限制,可能导致在某些情况下限制过严,某些情况下

又偏松。

从反应谱理论来看,若长周期段加速度反应谱能真实反映地震动,则其本身就构成一条随参数变化的“限值线”。在同一烈度下,由于最小剪重比限值固定不变,而实际反应谱随场地条件等参数变化,可能高于或低于该限值,从而出现限制程度不一致的现象。

图 1 直观展示了这一问题:在相同烈度下,随着特征周期  $T_g$  增大,反应谱曲线上抬,与固定限值线的间距加大。这意味着,建于软土地地(特征周期高)的高层建筑更容易满足剪重比限值,而建于硬土地地(特征周期低)的同类建筑反而可能不满足。这与规范设定最小剪重比的初衷相违背。

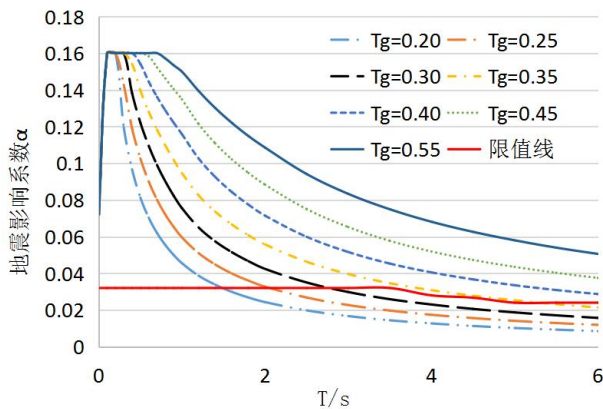


图1 设计反应谱与剪重比限值线关系示意

规范引入最小剪重比本是为了弥补长周期段反应谱对地震动估计的不足。软土地地易引发长周期地震动,与高层建筑共振风险更高,本应更严格控制其剪重比,但现行规定却在此类场地上放宽了限制,不利于抗震安全。因此,有必要在确定最小剪重比限值时考虑场地特征周期等相关因素,以避免出现不合理与控制失效的情况。

### 2.2 剪重比作为判断结构布置合理性指标的探讨

规范<sup>[1]</sup>第 5.2.5 条的条文说明指出,底部剪重比与剪重比限值相差较多时,表明结构布置不合理,需调整结构布置。可见,规范将剪重比作为评估结构布置合理性的参考指标之一。然而,是否仅因剪重比不足就直接判定“结构布置不合理”并强制调整,有待商榷。

从抗震设计基本概念角度探讨。剪重比不满足限值,说明结构在某烈度下所受楼层剪力小于规范设定的最低要求。由设计反应谱曲线可知,在结构基本周期  $T > T_g$  的区段内,周

期越短,地震影响系数  $\alpha$  越大,即地震作用越强。因此,为提高剪重比,常需增加结构侧向刚度以缩短周期,从而增大地震剪力。然而,若结构已满足规范规定的位移角限值且具有一定安全富余,再刻意加大刚度以求满足剪重比,则与“在满足变形与稳定要求的前提下,结构宜保持适度柔性,有利于降低地震作用,提高延性耗能能力<sup>[4]</sup>”的基本抗震概念相违背。因此,若结构已有足够的侧向刚度储备(如层间位移角远小于限值),仅为满足剪重比而进一步增加刚度,可能导致结构地震作用不必要的增大,反而对抗震不利。

从“满足剪重比限值与抗震设防烈度的关系”方面探讨。剪重比的概念源于底部剪力法<sup>[4]</sup>,对高层多质点体系有:

$$\lambda = \frac{F_{EK}}{\sum_{j=1}^n G_j} = 0.85\alpha \quad (4)$$

式中  $F_{EK}$ ——结构总水平地震标准值;

$G_{eq}$ ——等效总重力荷载,多质点取 85%总重力荷载代表值;

$\alpha$  ——地震影响系数;

再由规范的设计反应谱曲线可知:

当  $T_g < T \leq 5T_g$  时,地震影响系数

$$\alpha = \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \alpha_{max} \quad (5)$$

当  $5T_g < T$  时,地震影响系数

$$\alpha = [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)] \alpha_{max} \quad (6)$$

将式(4)(5)、(6)以及 2.1 节中的式(2)、(3)代入

$\lambda \geq \lambda_{min}$  可得:

$$0.85 \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \geq 0.2 \quad (\text{或 } 0.15) \quad (7)$$

$$0.85 [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)] \geq 0.2 \quad (\text{或 } 0.15) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知,剪重比满足最小限值等同于满足式(7)或(8),这意味着,“满足剪重比限值”与抗震设防烈度无关。如此便可能出现如下情况:两栋场地条件、阻尼比、结构形式、高度相同的建筑,分别位于 6 度区和 8 度区,若均需通过调整结构布置满足相同的剪重比限值,则要求两栋建筑的基本周期相同,即抗侧刚度一致。这对 8 度区可能合理,但对 6 度区而言,此刚度显然过高,导致材料浪费和结构性能未能充分发挥。

从以上分析可以看出,当底部剪重比不满足限值而要求结构调整,会出现一些不合理的现象。结构布置是否合理,不能仅凭剪重比单一指标判断。剪重比与平面及竖向规则性、刚度分布、层间位移角、舒适度、轴压比等多因素相互关联<sup>[3]</sup>。若剪重比偏低,但层间位移角远小于限值、轴压比适中、无明显薄弱层,则不应简单判定为布置不合理;反之,若剪重比不足且伴随层间位移角、轴压比偏大、刚度突变等情况,则需调整结构布置。

### 3 剪重比调整方法探讨

规范<sup>[1]</sup>提出了两种剪重比调整方法:当底部剪重比与限值相差不大时,可直接放大地震剪力(方法一);相差较多时,则需调整结构形式和布置(方法二)。方法一操作简便且效果直接,但若底部剪重比显著不足,是否必须采用方法二?其实际效果如何?以下进行分析。

由第1.2节式(1)可知,影响剪重比的有地震剪力和结构重量两个因素。地震剪力又由地震影响系数控制,在场地特征周期与阻尼比确定的情况下,地震影响系数主要取决于结构基本周期。因此,提高剪重比需从减轻结构重量或缩短基本周期两方面入手。

减轻结构重量在实际工程中余地有限,对提升剪重比作用甚微。而缩短基本周期则需大幅提高抗侧刚度。在长周期区段,反应谱曲线下下降平缓,意味着周期需显著减小才能略微提高地震影响系数,进而小幅提升剪重比。此举将导致结构材料用量激增,承载力远超实际需求,造成经济浪费。文献<sup>[5, 6, 7]</sup>的研究也有类似观点。

相比之下,直接放大地震剪力虽简便高效,但其适用性需进一步验证。文献<sup>[8]</sup>的弹塑性分析表明,经此法调整后,结构在不同地震水准下的位移角及抗震性能均满足规范要求。文献<sup>[6]</sup>对某7度区高层建筑的显示,调整后结构刚度与抗震承载力均符合标准。

综上,当底部剪重比显著不足时,采用“调整结构布置法”不仅效率低下,且易导致材料浪费与承载力富余。而“放大地震剪力法”在保证结构安全的前提下更为经济高效。因此,在一般情况下可优先采用方法一。然而,若剪重比不足源于结构平面、竖向规则性差或刚度、质量分布不均,则仍应以调整结构布置为主。

### 4 结论和建议

通过对剪重比合理性及调整方法的分析,本文提出以下建议:

(1)完善剪重比限值规定:现行剪重比限值仅与设防烈度相关,未能全面考虑场地特征周期等因素,建议增加相关参数的考量,以提升规定的科学性与适用性。

(2)多指标综合判定结构合理性:剪重比不宜作为判定结构布置合理性的唯一指标,应结合层间位移角、轴压比、刚度分布、规则性等多指标综合评估,避免片面结论。

(3)优化剪重比调整方法:在结构其他指标均满足规范要求的前提下,可直接采用放大地震剪力的方法调整剪重比;若结构存在明显规则性缺陷或刚度、质量分布不均,则应以调整结构布置为主。

### [参考文献]

- [1]GB/T50011-2010 建筑抗震设计标准[S].
  - [2]JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
  - [3]王亚勇.关于建筑抗震设计最小地震剪力系数的讨论[J].建筑结构学报,2013,2(34):37-44
  - [4]赵杰林.建筑抗震设计剪重比调整方法讨论[J].工程建设与设计,2015,5(6):36-39
  - [5]赵杰林.6度抗震设防剪重比问题探讨[J].建筑结构,2016,13(46):52-56
  - [6]姚永革,严仕基,郑建东.对2010版新《抗规》对最小剪重比规定的合理性探讨[J].广东土木与建筑,2012,2(6):3-8
  - [7]魏琰,韦承基,王森.高层建筑结构抗震设计中的剪重比问题[J].建筑结构,2014,6(44):10-13
  - [8]赵昕,蔡锦伦,秦朗,等.基于剪重比敏感性的超高层结构优化设计方法[J].建筑结构学报,2021,2(42):27-36
  - [9]张万开,甄伟,李伟峥,等.沈阳金廊330m超高层塔楼结构抗震设计[J].建筑结构,2021,19(51):83-88
  - [10]金灿国,蔡凤维.建筑结构剪重比分析探讨及对规范限值的建议[J].广东土木与建筑,2019,4(26):29-33
- 作者简介:陈太泉(1977-)男,海南三亚人,高级工程师,硕士,研究方向:建筑工程。