

高层建筑结构抗震设计中的剪重比问题

魏 琰, 韦承基, 王 森

(深圳市力鹏工程结构技术有限公司, 深圳 518034)

摘要 对高层建筑抗震设计中的剪重比问题进行了讨论, 分析了场地类别对剪重比的影响, 提出了判断基底剪重比是否满足规范规定的 β 公式, 指出规范对剪重比限值的规定中未考虑场地类别的影响是不妥的。对于不满足规范要求的高层建筑, 采用增大结构刚度的方法来增大基底剪重比是难以奏效的, 适宜的方法是通过周期折减系数来增大楼层地震剪力, 当仍不能满足规范要求时, 将不满足的楼层处的地震剪力按规范要求放大, 以满足规范要求。

关键词 高层建筑; 抗震设计; 剪重比; 限值

中图分类号 TU318.1 **文献标识码** A **文章编号** 1002-848X(2014)06-0010-04

Shear-weight ratio study in seismic design of high-rise building structure

Wei Lian, Wei Chengji, Wang Sen

(Shenzhen Li Peng Structural Engineering Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

Abstract: The problem of shear-weight ratio in seismic design of high-rise building structure was discussed. The influence of site category on shear-weight ratio was analyzed and the formula β was provided to judge whether the shear-weight ratio meets the code requirements. The influence of site category on shear-weight ratio limit value in the code is not considered, which is inappropriate. For the high-rise buildings, the floor seismic shear of which can not meet the code requirements, the increment of the structure rigidity to raise the shear-weight ratio is unacceptable. The suitable method is to reduce the period reduction factor rationally to enlarge the floor seismic shear force to meet the code requirements. When the floor seismic shear force still can not meet the requirements, the floor seismic shear forces of small values should be enlarged according to the code to meet the requirements.

Keywords: high-rise building; seismic design; shear-weight ratio; limit value

0 引言

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1] (简称抗规)及《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[2] (简称高规)规定:水平地震剪力系数(本文称为剪重比)剪重比等于楼层地震作用(楼层地震剪力)与重力荷载代表值的比值,是抗震设计的重要控制指标之一,且为规范的强制性条文。

抗规条文说明 5.2.5 条提到:地震影响系数在长周期段下降较快,对于基本周期大于 3.5s 的结构,由此计算所得的水平地震效应可能太小。而对于长周期结构,地震动态作用中的地面运动速度和位移可能对结构的破坏更具影响,但是规范所采用的振型分解反应谱法尚无法对此做出估计。

出于对结构安全的考虑,规范^[1,2]提出了各楼层水平地震剪力对应剪重比最小值的要求,即规定了不同抗震设防烈度下楼层剪重比的限值,当计算结构水平地震作用效应的剪重比小于规范^[1,2]规定的限值时,须对楼层设计用的地震剪力进行相应的调整。规范^[1,2]以规定剪重比限值的方式来控制基底和楼层最小地震剪力的做法对保证结构的抗震安全性是有一定作用的,但对剪重比限值的合理性以

及实际设计中怎样合理地调整剪重比以满足规范^[1,2]限值的要求,还存在不同的看法,以下对此进行研讨并提出相应的建议。

1 规范^[1,2]剪重比限值的实质含义

抗规 5.2.5 条和高规 4.3.12 条表述如下:水平地震作用计算时,结构各楼层对应于地震作用标准值的剪力应符合下式要求:

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

式中: V_{Eki} 为第 i 层对应于水平地震作用标准值的剪力; λ 为水平地震剪力系数(剪重比),不应小于抗规表 5.2.5(高规表 4.3.12)规定的楼层最小地震剪力系数值(剪重比限值),对于竖向不规则结构的薄弱层,尚应乘以 1.15 的增大系数; G_j 为第 j 层的重力荷载代表值; n 为结构计算总层数。

考虑到首层基底剪力是评价整个结构抗震受力的基本要素,以下以基底剪力为准来进行讨论^[3,4]。对于首层基底剪力,式(1)可改写为:

$$V \geq \lambda \sum_{j=1}^n G_j = \lambda gM \quad (2)$$

作者简介:魏琰,研究员,Email: wl2002111@163.com。

式中 $M = \sum_{i=1}^n M_i$ 为各楼层质量总和,即高层结构的总质量; g 为重力加速度。

规范^[1,2]和式(2)规定:高层建筑在水平地震作用下的基底剪力不能小于结构重力荷载代表值的 λ 倍。这一规定的内在含义是什么呢?经分析可以认为这一规定实质上是假设了一个对应于Ⅱ类场地的单质点结构(图1),质量为 ξM (即高层建筑总质量 $M = \sum_{i=1}^n M_i$ 的 ξ 倍),其周期与高层建筑结构的基本平动周期 T 相同, ξ 为质量调整系数。 $T=3.5\text{s}$ 时, $\xi=1.00$; $T=5.0\text{s}$ 时, $\xi=0.88$;中间为线性变化。这一对应的单质点结构在地震作用下的基底剪力即为规范^[1,2]规定的对应于高层建筑许可的基底剪力限值。

也可以这样解释,规范^[1,2]规定的内在含义是设置了一个对应于Ⅱ类场地,质量为 M ,周期为 T (M, T 均与对应的高层建筑相同)的单质点结构: $T=3.5\text{s}$ 时,基底剪力为对应高层建筑的基底剪力限值(图2); $T=5.0\text{s}$ 时,基底剪力限值为 $0.88M$ 质量时单质点结构的基底剪力;中间为线性变化。上述论断可以进行如下证明。

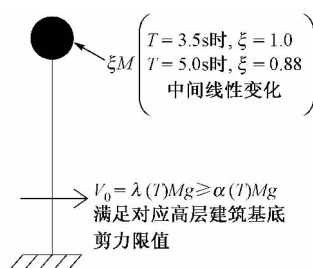


图1 Ⅱ类场地
单质点结构

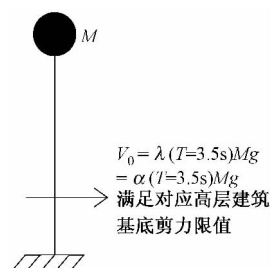


图2 Ⅱ类场地 $T=3.5\text{s}$
时的单质点结构

单质点结构的质量为 ξM 时,地震作用下基底剪力 V_0 为:

$$V_0 = \alpha g \xi M \quad (3)$$

式中 α 为反应谱地震影响系数。

当此值相当于规范^[1,2]规定的基底剪力时:

$$\alpha g \xi M = \lambda g M \quad (4)$$

得:

$$\xi = \lambda / \alpha \quad (5)$$

不难求得,Ⅱ类场地、抗震设防烈度7度、 $T=3.5\text{s}$ 时, $\alpha=0.0016$, $\lambda=0.0016$; $T=5.0\text{s}$ 时, $\alpha=0.00136$,由抗规^[1]表5.2.5可知, $\lambda=0.0012$, $\lambda < \alpha$ 。由式(5)可得:

$$\xi = \frac{0.012}{0.0136} = 0.88$$

当周期 T 值在 $3.5 \sim 5.0\text{s}$ 之间时, ξ 在 $1.00 \sim 0.88$ 内线性变化。

2 场地类别对剪重比限值的影响

如上所述,规范^[1,2]中剪重比限值的水准对应于Ⅱ类场地的地震作用,那么其他场地类别的限值是否需要调整呢?试作如下分析。

规范^[1,2]反应谱地震影响系数 α 值在周期 $T \geq 5T_g$ (T_g 为场地特征周期)的下降段由下式确定:

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

式中: $\alpha_{\max}$ 为地震影响系数最大值; γ 为衰减系数,阻尼比取 0.05 时, $\gamma=0.9$; η_1 为直线下降段的下降斜率调整系数; η_2 为阻尼调整系数。

高规4.3.8条对 η_1, η_2 的取值有相应规定,代入式(6)后可得:

$$\alpha = (0.2349 - 0.02T + 0.1T_g) \alpha_{\max} \quad (7)$$

式(7)表明 α 值与场地特征周期 T_g (即场地类别)有关,且其影响是不可忽略的。表1为不同场地类别在 $T=3.5, 5.0\text{s}$ 时的地震影响系数值,中间为线性变化。

不同场地类别和烈度的 α 值

表1

周期 T/s	场地类别	6度	7度	8度	9度
3.5	I	0.0075	0.0150	0.0300	0.060
	II	0.0080	0.0160	0.0320	0.064
	III	0.0085	0.0170	0.0340	0.067
	IV	0.0090	0.0180	0.0360	0.072
5	I	0.0065	0.0130	0.0260	0.052
	II	0.0068	0.0140	0.0270	0.054
	III	0.0072	0.0144	0.0288	0.057
	IV	0.0080	0.0160	0.0320	0.064

如第1节所述,规范^[1,2]规定的地震作用下高层建筑基底剪力限值在周期 $T=3.5\text{s}$ 时,即相当于Ⅱ类场地、同周期 T 、同总质量 M 时对应单质点结构的基底剪力,那么基底剪重比 λ 限值应反映出不同场地类别的影响,由式(5)得:

$$\lambda = \xi \alpha \quad (8)$$

式中: $T=3.5\text{s}$ 时, $\xi=1.0$; $T=5.0\text{s}$ 时, $\xi=0.88$;中间为线性变化。

得到不同场地类别时的剪重比限值如表2所示,表中是根据对规范^[1,2]规定对应于Ⅱ类场地的认识推导至其他场地类别所得到的结果,是否妥当,尚需进一步研究和讨论。

3 何时会出现剪重比小于规范^[1,2]规定限值

设计实践中的大量计算表明,对于Ⅰ,Ⅱ类场地往往底层剪重比最小,不能满足规范^[1,2]对剪重比限值的要求。在地震作用下,结构底层第 j 振型下的基底剪力 V_{0j} 为:

不同场地类别和烈度的剪重比限值 表 2

周期 T/s	场地类别	6 度	7 度	8 度	9 度
3.5	I	0.007 5	0.015 0	0.030 0	0.060
	II	0.008 0	0.016 0	0.032 0	0.064
	III	0.008 5	0.017 0	0.034 0	0.067
	IV	0.009 0	0.018 0	0.036 0	0.072
5	I	0.005 7	0.011 4	0.023 0	0.046
	II	0.006 0	0.012 0	0.024 0	0.048
	III	0.006 4	0.012 7	0.025 4	0.051
	IV	0.007 0	0.014 0	0.028 0	0.056

$$V_{0j} = M_j^* g \alpha_j \quad (9)$$

$$M_j^* = \frac{(\sum_i m_i \phi_j)^2}{\sum_i m_i \phi_i^2} \quad (10)$$

$$M = \sum_j M_j^* \quad (11)$$

式中: α_j 为第 j 振型对应的地震影响系数; M_j^* 为第 j 振型的参与质量; ϕ_j 为第 j 振型的位移。

基底剪力 V_0 可用第 1 振型基底剪力 V_{01} 表示:

$$V_0 = V_{01} \sqrt{1 + \sum_{i=2}^n \frac{V_{0i}^2}{V_{01}^2}} \quad (12)$$

式中 V_{0i} 为第 i 振型基底剪力 ($i=2, 3, \dots, n$)。

令第 1 振型基底剪力比 η 为:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=2}^n \frac{V_{0i}^2}{V_{01}^2}}} \quad (13)$$

可得:

$$V_0 = \frac{V_{01}}{\eta} = \frac{M_1^* \alpha_1 g}{\eta} \quad (14)$$

假定基底剪重比满足规范^[1,2]要求,则即应满足下式要求:

$$\frac{V_0}{Mg} = \frac{M_1^* \alpha_1 g / \eta}{Mg} \geq \lambda \quad (15)$$

用 α 代换基本平动周期 T (第 1 振型) 对应的地震影响系数 α_1 , 即基底剪重比 $\alpha \frac{M_1^* / M}{\eta}$ 应大于等于 λ , 也可写成:

$$\frac{M_1^* / M}{\eta} \geq \frac{\lambda}{\alpha} \quad (16)$$

将式(14)代入式(16), 可得剪重比是否满足规范^[1,2]要求的判别式为:

$$\beta = \frac{M_1^* / M}{V_{01} / V_0} \geq \frac{\lambda}{\alpha} = \xi \quad (17)$$

式中 β 为结构的第 1 振型参与质量比与第 1 振型基底剪力与总剪力之比的比值, 如果 $\beta > \lambda / \alpha = \xi$, 则结构满足规范^[1,2]剪重比限值的要求, 反之则不满足规范^[1,2]要求, 需作调整。

式(17)清楚地表明, 调整判别式 β 值与调整结构第 1 振型特征、结构总质量、基底剪力有关, 而通过调整结构刚度或重量来满足规范^[1,2]要求是十分困难的。

4 周期折减系数对剪重比限值的影响

在实际工程设计中, 按高规^[2]要求, 需引入小于 1.0 的周期折减系数, 这会增大结构的楼层剪力与基底剪力。设增大后的第 1 振型基底剪力和结构的基底剪力分别为 V_{01}^* 和 V_0^* , 则不难证明:

$$V_{01}^* = \zeta_1 V_{01} \quad (18)$$

其中剪力系数 ζ_1 按下式计算:

$$\zeta_1 = \frac{V_{01}^*}{V_{01}} = \frac{\alpha(T_1^*)}{\alpha(T_1)} > 1 \quad (19)$$

式中: $\alpha(T_1)$ 和 $\alpha(T_1^*)$ 分别为结构基本平动周期为 T_1 和乘以周期折减系数的周期 T_1^* 的地震影响系数。

$$V_0^* = \zeta_0 V_{01}^* \quad (20)$$

其中剪力系数 ζ_0 按下式计算:

$$\zeta_0 = \sqrt{1 + \sum_{i=2}^n \left(\frac{V_{0i}^*}{V_{01}^*} \right)^2} > 1 \quad (21)$$

将 V_0^* 代入式(17)得周期折减后的判别值 β^* 为:

$$\beta^* = \zeta_0 \zeta_1 \eta \left(\frac{V_0^*}{V_{01}^*} \frac{M_1^*}{M} \right) = \zeta_0 \zeta_1 \eta \beta \quad (22)$$

由于 V_0^* 必大于 V_0 , 可得 $\zeta_0 \zeta_1 \eta > 1$, 即 $\beta^* > \beta$ 。可见, 乘以周期折减系数后, 由于楼层剪力和基底剪力的增大, 可提高判别值 β , 使之较易于满足剪重比限值的要求。

5 对 $T > 5.0s$ 时剪重比限值的考虑

规范^[1,2]规定结构基本平动周期 $T > 5.0s$ 时, 剪重比限值取 $T = 5.0s$ 时的值, 但实际上结构周期较长时, 大量地震记录天然波的分析表明, 基底剪力明显比规范值小, 因此宜进一步进行研究, 将剪重比限值适当降低。

6 使剪重比满足规范^[1,2]限值的方法

对于实际工程中遇到的超高层结构底部楼层剪重比小于规范^[1,2]限值的情况, 有以下解决办法:

(1) 通过放大楼层地震剪力 (不传递), 使各楼层的剪重比满足规范^[1,2]规定限值的要求, 客观上既满足了规范^[1,2]的要求, 实际上又增大了楼层抗剪承载力的安全性。

(2) 适当在规范^[1,2]规定范围内取周期折减系数的较小值, 提高判别值 β , 使之满足规范^[1,2]剪重比限值的要求, 如乘以周期折减系数后仍不能满足

规范^[1,2]要求时,可采用方法(1)补充进行。

(3) 提高结构刚度,减小结构基本周期,提高判别值 β ,以满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。此法与抗震设计基本概念不相符,且实际上当超高层建筑结构形式、总高度、质量和刚度分布确定后,要作出较大调整是难以做到的,从理论上讲,要通过刚度或质量调整使第1振型参与质量比有较大的增大、第1振型基底剪力比有较大的减小是很困难的。

7 工程案例

某超限高层为框筒结构,共55层,总高度为258m,抗震设防烈度为7度,场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第一组。结构基本周期为5.80s,结构总重量为16 750 440kN,计算取15个振型,其有效质量系数为96%,水平地震影响系数 $\alpha = 0.0123$,规范^[1,2]规定的剪重比限值 $\lambda = 1.20\%$ 。

在不考虑周期折减时, X 方向的基底剪力为15 623kN,以 X 方向振动为主的第1振型对应的基底剪力为14 150kN,第1振型的剪力比为90.56%,相应的第1振型参与质量比为68.54%。代入式(17),得 $\beta = 75.68\%$, $\xi = 97.56\%$, $\beta < \xi$,即结构不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。计算得 X 方向1~15层的剪重比为0.93%~1.18%,这些楼层均不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。由式(16)求得结构底层剪重比为0.93%,与计算所得结果一致。为解决剪重比不满足规范^[1,2]限值的问题,需要对结构进行调整。

(1) 采用增大结构刚度的方法对剪力墙做如下调整:将厚400mm的墙加厚至600mm;将厚250,200mm的墙加厚至300mm。在不考虑周期折减时,将结构基本周期由5.80s减小为5.63s,结构的总重量增大为1 702 182kN,水平地震影响系数 $\alpha(T) = 0.0122$,有效质量系数为96%,第1振型的剪力比为90.49%,第1振型参与质量比为68.87%,规范^[1,2]规定的剪重比限值 $\lambda = 1.20\%$ 。将以上数值代入式(17),得 $\beta = 76.11\%$ (比原结构的 $\beta = 75.68\%$ 增加很少), $\xi = 97.56\%$, $\beta < \xi$,结构还是不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。计算得到 X 方向1~15层的剪重比为0.95%~1.19%,这些楼层仍不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。可见,加厚剪力墙的改进效果很有限,正如第4节中分析的,由 β 的表达式的性质可知,欲通过调整结构刚度或重量使结构满足规范^[1,2]剪重比限值的要求是十分困难的。

(2) 采用周期折减的方法:考虑周期折减系数为0.85,计算得 X 方向1~7层的剪重比为1.09%

~1.19%,这些楼层不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。再考虑周期折减系数为0.8,计算得 X 方向1~4层的剪重比为1.10%~1.18%,仍有4个楼层的剪重比不满足规范^[1,2]剪重比限值的要求,但已有明显的改善,此时再对不满足规范^[1,2]剪重比限值要求的楼层采取放大层剪力的方法解决。

8 结语

抗规强制性条文规定剪重比限值是为了保证楼层剪力不小于一定限值,从而提高结构安全度,以防范目前尚无法确切估计的地震动加速度和位移分量的破坏,对保证结构的抗震安全性是有利的。但超高层建筑结构底部楼层剪重比不满足规范^[1,2]限值要求在Ⅰ,Ⅱ类场地中是经常发生的,规范^[1,2]对剪重比限值的规定未考虑场地类别的影响是不妥的。对于不满足规范^[1,2]要求的高层建筑结构,采用增大结构刚度的方法来增大基底剪重比是难以奏效的。适宜的方法是通过乘以周期折减系数,增大楼层地震剪力,进行周期折减后仍不能满足要求时,可对不满足的楼层处的地震剪力进行放大(不传递),以满足规范^[1,2]剪重比限值的要求。

参 考 文 献

- [1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 魏珪. 建筑结构抗震设计[M].北京:万国学术出版社,1991.
- [4] 魏珪. 钢筋混凝土高层建筑抗震设计手册[M].北京:地震出版社,1991.

(上接第3页)

何,还是值得探讨的。控制结构扭转周期比并未能直接控制楼层和其竖向构件在水平地震作用下的扭转角及竖向构件产生的扭矩,而这对竖向构件的抗震承载力和安全性是有直接影响的。建议应重视楼层竖向构件在地震作用下产生的层间扭转角和扭矩,并对构件进行考虑扭矩作用在内的抗震安全性验算和配筋构造。

参 考 文 献

- [1] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 魏珪. 高层建筑结构位移控制研讨[J].建筑结构,2000,30(6):27-30.
- [3] 魏珪,王森. 扭转不规则建筑竖向构件考虑扭矩影响的抗震验算方法[J].建筑结构,2006,36(7):8-10,20.