

王贵珍,谭潜,魏俊彪,等.最小剪力系数及其调整方法对超高层建筑地震响应的影响[J].地震工程学报,2019,41(5):1161-1169.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1161

WANG Guizhen, TAN Qian, WEI Junbiao, et al. Influence of Minimum Shear Force Coefficient and Its Adjustment Methods on the Seismic Response of Super High-rise Buildings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1161-1169. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1161

最小剪力系数及其调整方法对超高层建筑地震响应的影响

王贵珍¹, 谭潜², 魏俊彪³, 王丽萍⁴

(1. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260; 2. 中机中联工程有限公司, 重庆 400045;
3. 中国瑞林工程技术有限公司, 江西 南昌 330038; 4. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要:超高层结构地震剪力响应由振型分解反应谱法得到的结果经常不能满足规定的最小剪力系数要求。为此,文章简述剪力系数的概念和调整方法,以具有不同剪力系数的两个模型对比分析结构弹性、弹塑性地震响应差异,探讨剪力系数对超高层结构地震响应的影响。以通过强度和刚度调整使最小剪力系数满足规范要求的两个模型,分析不同调整方法引起的结构响应的合理性。结果表明:满足最小剪力系数的结构的弹性基底剪力大、层间位移角较小,结构的弹塑性位移响应也较小,受力状态优于不满足最小剪力系数的结构,安全性得到了提高。结构弹性倾覆力矩需求和弹塑性基底剪力按刚度调整大于按强度调整;结构弹塑性最大顶点位移和层间位移角响应相差不大,但出现刚度大、层间位移角也大的与抗震理论相悖的情况;在满足抗震要求的情况下,构件的受力状态则是按强度调整更优,构件截面更加经济合理。

关键词:最小剪力;超高层建筑结构;地震响应;强度和刚度调整方法;抗震性能

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1161-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1161

Influence of Minimum Shear Force Coefficient and Its Adjustment Methods on the Seismic Response of Super High-rise Buildings

WANG Guizhen¹, TAN Qian², WEI Junbiao³, WANG Liping⁴

(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;

2. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400045, China;

3. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330038, Jiangxi, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Seismic shear force response of super high-rise structures, calculated by the mode-superposition response spectrum method, cannot meet the requirements of the minimum shear force

收稿日期: 2018-12-20

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjA1266); 国家自然科学基金资助项目(51408092)

第一作者简介: 王贵珍(1977-), 女, 湖北仙桃人, 硕士, 副教授, 研究方向: 路桥工程教学实践与结构分析。

E-mail: suiyoueruge4321@163.com。

通信作者: 谭潜(1982-), 男, 湖南隆回人, 博士, 博士后研究生, 研究方向: 结构抗震与防灾减灾研究。E-mail: tanqianzl@sina.cn。

coefficient in code. Therefore, the concept and adjustment method of minimum shear force coefficient were sketched in this paper. Two models with different shear force coefficients were then adopted to analyze their differences in structural elasticity and elasto-plastic seismic response, and discuss the influence of shear coefficient on the seismic response of super-tall buildings. Finally, the minimum shear force coefficient of the two models was adjusted to satisfy code requirements through strength and stiffness adjustment methods; rationality of the structural response induced by different methods was then analyzed. Results demonstrated that, compared with the structure without a specified minimum shear force coefficient, the elastic base shear force of the structure with a specified minimum shear force coefficient was larger, and story drift ratio and elasto-plastic displacement responses were smaller, i.e., the safety of the structures was enhanced. The elastic overturning moment demand and elasto-plastic base shear values of the two models, adjusted by the stiffness adjustment method, were greater than those adjusted by the strength adjustment method. Using the two methods, the maximum vertex displacement and story drift ratio were similar, although there was an abnormal situation wherein the story drift ratio changed with stiffness. In terms of meeting seismic requirements, stress condition of the components was superior and the component cross-section more reasonable and economical by using the strength adjustment method.

Keywords: minimum shear force; super-tall building structure; seismic response; strength and stiffness adjustment method; seismic performance

0 引言

世界超高层建筑近年在数量和高度都有很大的突破,目前中国已建成的超高层建筑在高度和数量上都首屈一指^[1-2]。而相关学者对阪神和智利地震中高层建筑震害的调查分析表明:高层建筑遭遇大震时损伤难以预估^[3-4]。因此,在中国,超高层结构在地震作用下的响应、损伤、破坏以及抗倒塌已引起广泛关注^[5-8]。其中,超高层建筑设计中剪力响应太小,不能满足规范的最小值要求是引起广泛争议的一大难题。设计地震剪力是影响结构抗倒塌能力的主要因素之一,是给定延性水准的结构重要的抗震性能控制参数^[9]。规定其限值体现地震剪力的重要性,在国外规范中也都有相应的规定^[10-12]。目前,中国的抗震设计方法认为最小剪力限值在保证结构的安全上发挥着举足轻重的作用,需要对其加以控制。于此,对超高层结构中最小剪力系数不满足时需要进行调整已经形成了广泛的共识,但最小剪力限值对结构响应有什么影响,在认识上有差异;在最小剪力不满足的情况下如何进行调整,哪种方法能更好地解决目前遇到的问题上意见大相径庭,出现了调整刚度和调整强度两种方法。本文描述了规范中剪力系数的概念^[13-16]。选取合适的地震波,通过满足与不满足最小剪力系数要求的模型,分析最小剪力系数对结构弹性和弹塑性地震响应的影响,同时,探讨最小剪力系数的强度和刚度调整方法对结构地震

响应的影响,厘清方法的合理性。

1 最小剪力限值及调整方法

在中国规范中^[17-18],剪力系数是为了保证结构地震后的安全性而人为设置的重要的控制参数,需满足式(1),它限定了最小地震作用的取值(表1)。而关于剪力系数的本质来源,不同的研究者却有不同的理解,廖耘等^[13]从剪力系数与地震影响系数及振型参与质量系数的关系推导出其本质[见式(2)],提出最小剪力系数不满足要求并不代表刚度太小或者质量太大,对最小剪力系数不满足要求调整刚度的做法提出了异议。黄吉峰等^[14]以理想的弯曲型和剪切型悬臂结构作为基本分析模型从力学的角度推导了剪力系数的内涵[见式(3)、(4)],得到其与场地特征周期和阻尼比无关的结论。而扶长生等^[15]则从动力学的立场推导了剪力系数的通用表达式[见式(5)],得到了与廖耘推导的最剪力系数相同的表达式[式(2)],且关于“最小剪力系数不满足并不代表刚度太小或者质量太大”的结论相似,但最终其把剪力系数重点引到了第一阶振型上来。剪力系数的影响因素很多,文献[16,19]也总结了基本周期、场地类别、结构总质量水平、阻尼比、周期折减系数等的影响。文献[20-21]描述了中、美最小剪力系数与反应谱的关系(见图1)。图1反映出长周期结构的地震响应往往在规定的限值以下,这与目前设计

表 1 楼层最小地震剪力系数值

Table 1 Minimum shear force coefficient of story

类别	6度(0.05g)	7度(0.1g)	7度(0.15g)	8度(0.2g)	8度(0.3g)	9度(0.4g)	取值
	0.04	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32	α_{max}
扭转效应明显或基本周期小于 3.5 s 的结构	0.008	0.016	0.024	0.032	0.048	0.064	$0.20\alpha_{max}$
基本周期大于 5.0 s 的结构	0.006	0.012	0.018	0.024	0.036	0.048	$0.150\alpha_{max}$

注:基本周期介于 3.5~5.0 s 间的结构,可插入取值。

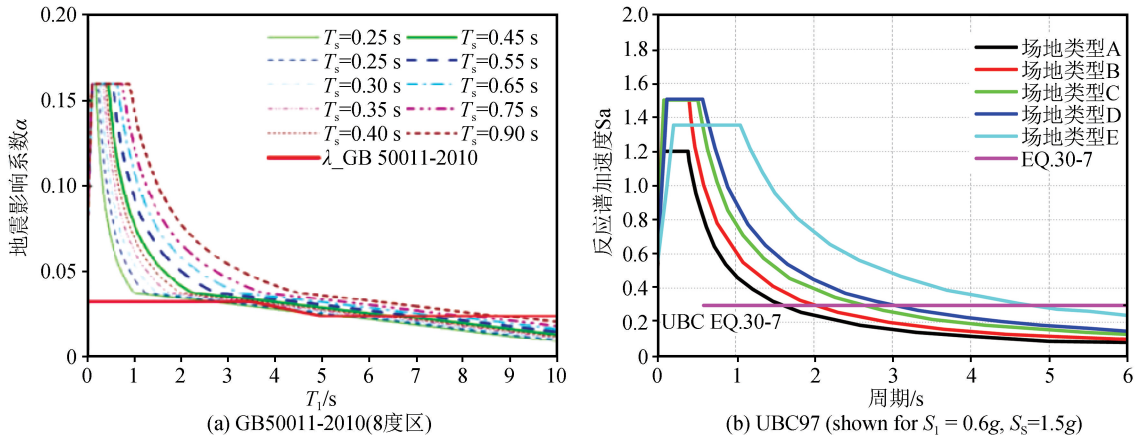


图 1 最小剪力系数限值和不同场地反应谱

Fig.1 Limit value of minimum shear force coefficient and response spectra in different sites

中碰到的问题一致,整体归结为反应谱值下降很快,而超高层结构周期较长处在反应谱的下降段。由此可见,这不是某一个因素单一决定的结果。

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

式中: V_{Eki} 为第*i*层对应于水平地震作用标准值的楼层剪力; λ 为剪力系数;对竖向不规则结构的薄弱层,需乘以 1.15 的增大系数; G_j 为第*j*楼层重力荷载代表值; n 为结构计算总层数。

$$\lambda = \sqrt{\sum_{j=1}^m \alpha_j^2 \times (\theta_j)^2} \quad (2)$$

式中: α_j 为各振型地震影响系数; θ_j 为各振型参与质量系数。

$$\lambda_b = 2 \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{\gamma_j^2 A_a^2(\omega_j, \xi_j)}{(l\mu_j)^2}} \quad (3)$$

$$\lambda_s = \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{\gamma_j^2 A_a^2(\omega_j, \xi_j)}{(lk_j)^2}} \quad (4)$$

式中: λ_b 为弯曲型结构的剪力系数; λ_s 为纯剪切型结构的剪力系数; γ 为振型参与系数; $\mu^4 = \frac{\omega^2 m}{EI}$; ω 为振动圆频率; ξ 为阻尼比; $k, l = \pi \left(i - \frac{1}{2} \right)$, ($i = 1, 2, \dots, \infty$); l 为计算杆长; $A_a(\omega_j, \xi_j) = S_a(\omega_j, \xi_j) / g$, $S_a(\omega_j, \xi_j)$ 为反应谱; g 为重力加速度。

$$\lambda_f = \left(\frac{M_j^{eff}}{M} / \frac{\lambda_{f1}}{\lambda_f} \right) \alpha_1 \quad (5)$$

式中: M 为结构总质量; M_j^{eff} 为第*j*振型等效单自由度的有效振型质量; λ_{fj} 为第*j*振型的底部剪力系数; α_1 为第一振型的地震影响系数。

从最小剪力系数的本质概念和影响因素出发来保证高层建筑的安全,需要针对不同的影响因素考虑其不同的调整方法,使结构的最小地震响应满足最小剪力系数需求。文献[17-18]中的刚度调整方法分为两种情况:(1)只有底部总剪力略小于规定,而中、上部楼层均满足最小值时:当 $0 \leq T \leq T_g$ 时,全楼采用统一的地震剪力放大系数 $\frac{\lambda_{min}}{\lambda_0}$;当 $T_g \leq T \leq 5T_g$ 时,顶部地震作用增加值可取位移作用和加速度作用的平均值,中间各层的增加值可以根据底层和顶层的值按线性分布。且 $\Delta V_{Eki} > (\lambda_{min} - \lambda_i) G_{Ei} = \Delta \lambda G_{Ei}$ 。当 $5T_g \leq T \leq 6$ 时,则各楼层均需按底部的剪力系数差值 $\Delta \lambda_0$ 增加该层的地震剪力。(2)当底部总剪力相差较多、或多数楼层不满足时,结构的选型和总体布置需要重新调整,即调整刚度,不能仅采用乘以增大系数的方法处理。文献[22]中提倡的强度调整方法也有两种情况:(1)当小震弹性计算的基底剪力满足最小地震剪力要求,仅部分楼层不满足要求时,可以直接放大这些楼层的地

震剪力使其满足剪力系数要求。(2)当小震弹性计算的基底剪力不满足最小剪力要求,则全楼层的地震剪力均应放大,放大系数 $\eta = \frac{V_{\min}}{V_{Eki}}$,放大后的基底剪力宜取按底部剪力法算得的总剪力的85%和规范规定的最小地震剪力的较大值。目前,调整刚度和调整强度两种观点并存。而在工程实践中,发现前一种方法还有很多问题不能解决,且与抗震设计的初衷不一致,而后一种方法需要抗震基本理论的阐述和更多的工程检验。两种调整方法的合理性需要进一步的分析。

2 结构分析输入

为了分析剪力系数对结构响应的影响和厘清调整方法的合理性,本文设计了4个规则丙类建筑模型算例,处于7度(0.1g)区,场地类别都为II类,以模型A和B分析最小剪力系数对结构地震响应的

影响,基底剪力系数分别为1.6%和1.32%。地震分组为第二组,场地特征周期值0.4s,层高均为3.3m,层数28层。以模型C和D分别分析强度和刚度调整方法对结构抗震性能的影响,基底剪力系数分别为1.36%和1.6%。地震分组为第一组,场地特征周期值0.35s,层高均为3.3m,层数为55层。楼屋面活载标准值均为2kN/m²,楼面恒荷载标准值为2.5kN/m²(不包括楼板自重),屋面恒载标准值为6kN/m²,荷载组合取100%恒载和50%活载。模型的平面布置见图2,基本信息列于表2。地震动输入参照PEER方法,使选择的地震动与规范反应谱均值和形状在主要周期段一致。对模型A和B,选取3条Chi-Chi地震波作为地震动输入,分析剪力系数对结构响应的影响。对模型C和D分析调整方法对结构抗震性能的影响,采用6条地震波作为地震动输入。地震波信息列于表3。

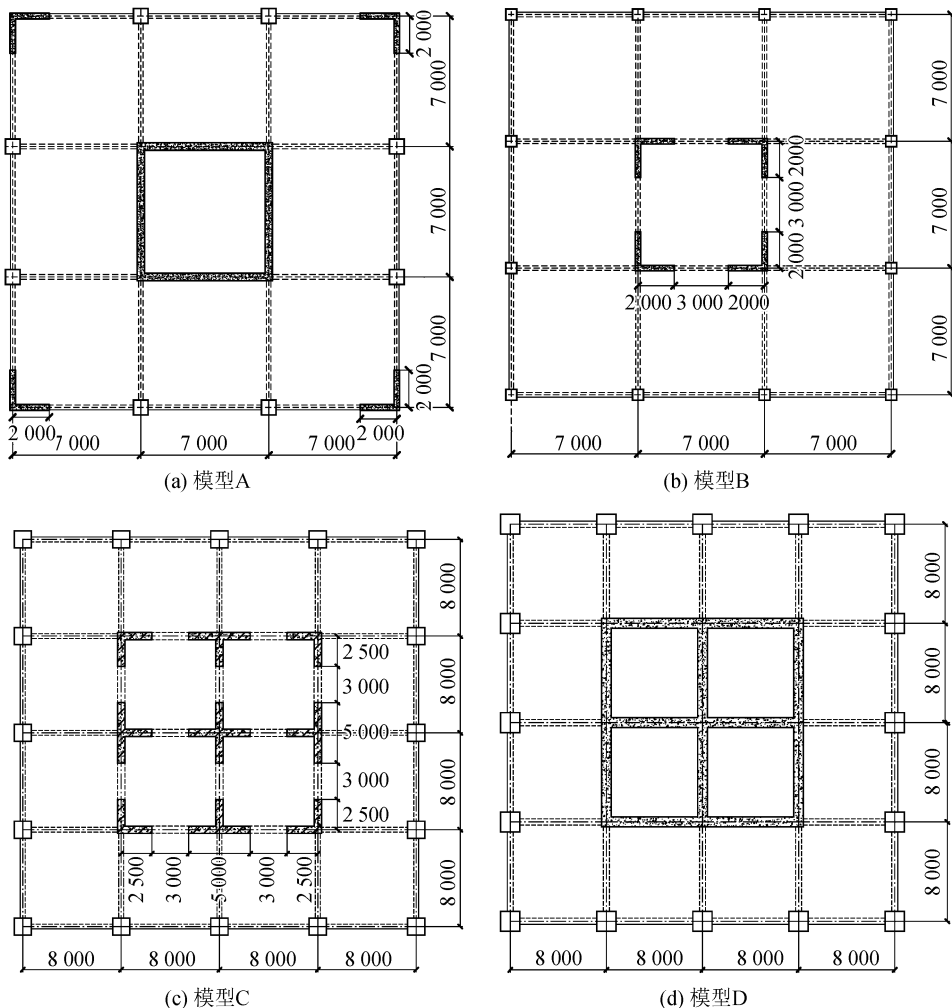


图2 模型结构平面布置图(单位:mm)

Fig.2 The plan layout of structural models(Unit:mm)

表 2 结构模型基本信息

Table 2 Essential information of models

模型	楼层范围	剪力墙厚度 /mm	柱截面尺寸 /mm×mm	墙、柱 混凝土	梁、板 混凝土	剪力系数 /%
模型 A	1~10	400	800×800	C40	C40	1.6
	11~28	300	800×800	C40	C40	
模型 B	1~10	400	800×800	C40	C40	1.32
	11~28	300	800×800	C40	C40	
模型 C	1~10	600	1 400×1 400	C60	C40	1.36
	11~20	500	1 300×1 300	C60	C40	
	21~30	500	1 200×1 200	C60	C40	
	31~40	400	1 100×1 100	C60	C40	
	41~55	300	1 000×1 000	C60	C40	
模型 D	1~10	800	1 600×1 600	C60	C40	1.6
	11~20	700	1 500×1 500	C60	C40	
	21~30	700	1 400×1 400	C60	C40	
	31~40	600	1 300×1 300	C60	C40	
	41~55	500	1 200×1 200	C60	C40	

表 3 地震波信息

Table 3 Information of seismic waves

名称	序号	地震	年代	台站	震级
NGA_no_1361_KAU020-N	Wave-1	Chi-Chi, Taiwan	1999	KAU020	7.62
NGA_no_1434_TAP049-E	Wave-2	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP049	7.62
NGA_no_1443_TAP069-N	Wave-3	Chi-Chi, Taiwan	1999	TAP069	7.62
NGA_173IMPVALL.H-E10_FN	Wave-4	Imperial Valley-06	1979	EICentro array	6.53
NGA_181IMPVALL.H-E06_FN	Wave-5	Imperial Valley-06	1979	EICentro array	6.53
NGA_182IMPVALL.H-E07_FN	Wave-6	Imperial Valley-06	1979	EICentro array	6.53
NGA_737LOMAP.AGW_FN	Wave-7	LomaPrieta	1989	Agnews StateS Hospital	6.93
NGA_1510CHICHI.TCU075_FN	Wave-8	Chi-Chi	1999	Tcu075	7.62
NGA_1545CHICHI.TCU120_FN	Wave-9	Chi-Chi	1999	Tcu120	7.62

3 剪力系数对结构响应的影响

3.1 弹性基底剪力与层间位移角

基底剪力和层间位移角是控制结构破坏与倒塌

的两个重要指标,对比这两个指标能很好地说明结构的抗震性能的差异。模型 B 与 A 的基底剪力系数分别为 1.32%、1.6%,模型 B 不满足规范关于最小剪力系数的要求,模型 A 则满足要求。如图 3 所示

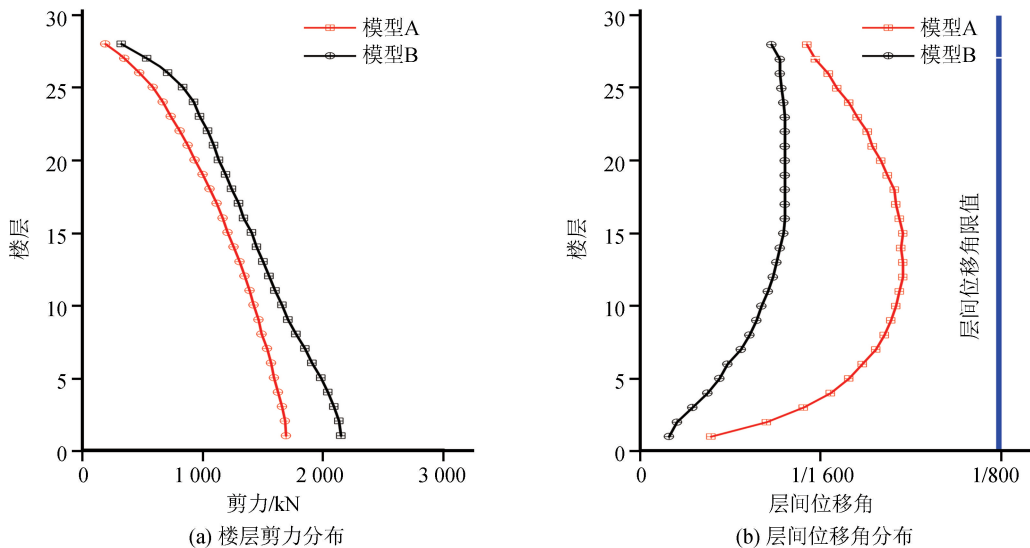


图 3 楼层剪力与层间位移角

Fig.3 Floor shear force and story drift ratio

的弹性反应谱分析结果中,模型 A、B 都满足最小层间位移角要求。满足最小剪力系数要求的模型 A 由于刚度较大,承担的地震剪力也大,而层间位移角小,说明结构 A 承受了较大的地震作用而产生破坏性的位移较小,最小剪力系数能够控制结构的位移,使结构的变形不至于太大而超过极限变形,以此保证结构的安全。

3.2 构件的弹塑性屈服

结构构件震后的损伤能更好地说明剪力系数这个指标对结构性能的影响,在弹塑性分析后构件的破坏状态列于表 4。基于模型 A、B 是框筒结构,剪力墙刚度大,按照抗震设计原理分配的地震作用也

大,受到较大地震作用的剪力墙都发生屈服,而框架柱是此类结构的二道防线,分配的地震作用相对小,产生的损伤也较剪力墙小,从模型 A、B 的损伤状态来看,A 中剪力墙钢筋最大应变与屈服应变的比值却较模型 B 的比值要小。说明模型 A 剪力墙的抗震性能要优于 B。模型 A、B 中框架柱只在顶部的少数部位的柱子进入塑性,且模型 A 的柱子屈服较 B 少,二道防线也就更可靠。表明在相同的地震动输入下,改变地震作用在不同构件上的分配,在一定程度上减少构件屈服,提高结构抗震的冗余度。总的来说,满足最小剪力系数的结构在受力状态上更好。

表 4 结构构件的屈服状态

Table 4 Yield condition of structural member

地震波	剪力墙				框架柱			
	模型 A		模型 B		模型 A		模型 B	
	是否屈服	$\frac{\epsilon_{su}}{\epsilon_{sy}}$	是否屈服	$\frac{\epsilon_{su}}{\epsilon_{sy}}$	是否屈服	屈服楼层	是否屈服	屈服楼层
Wave-1	屈服	1.2	屈服	1.4	未屈服	-	未屈服	-
Wave-2	屈服	1.3	屈服	1.4	未屈服	-	屈服	27~28
Wave-3	屈服	1.4	屈服	1.6	屈服	27~28	屈服	26~28

注: ϵ_{su} 是钢筋的极限应变, ϵ_{sy} 是钢筋的屈服应变。

3.3 弹塑性位移和层间位移角

通过弹塑性位移和位移角的控制,满足“两阶段设计”的第二阶段的要求,通过输入三条地震动分析发现:高频段(弹性段)的位移响应基本一致,在低频段(结构进入塑性),模型 B 的顶点最大位移值要远远大于模型 A, Wave-3 作用时差异最大, Wave-1 时差异最小(表 5),模型 B 更容易发生超越极限位移的破坏。说明结构满足规范规定的最小剪力系数,可以减小结构的顶点最大位移,使结构更安全。由

图 4 可知,模型 A 的层间位移角小于 B,最大层间位移角相差较大,三条地震记录得到的层间位移角的

表 5 顶点位移最大值

Table 5 The maximum vertex displacement

地震波	模型 A		模型 B		差异 /%
	最大位移 /mm	时间 /s	最大位移 /mm	时间 /s	
Wave-1	208.57	23.02	246.68	30.493	18.3
Wave-2	254.75	5.925	307.19	17.925	20.6
Wave-3	222.88	10.57	279.18	17.39	25.2

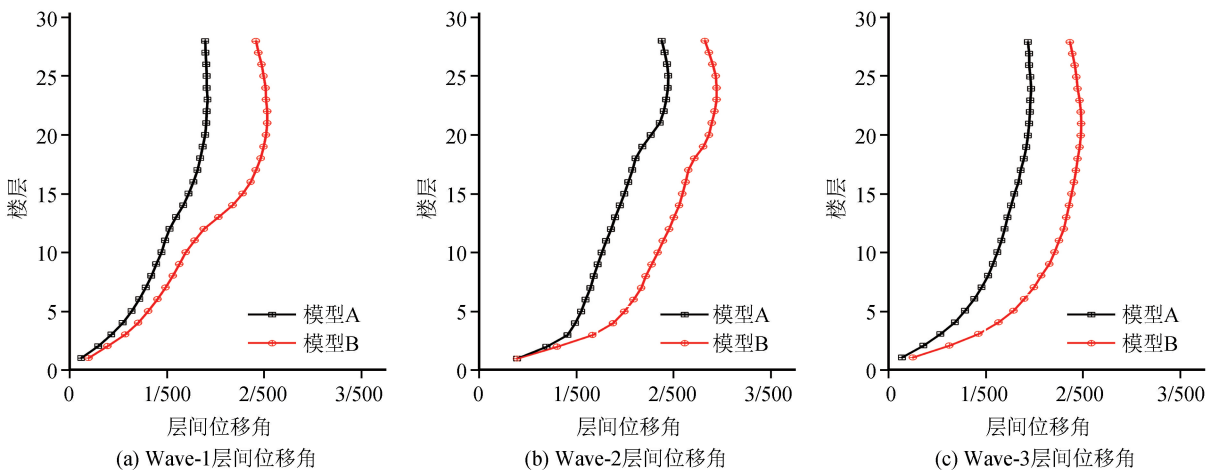


图 4 楼层最大层间位移角

Fig.4 The maximum story drift ratio of structure

差距都在 25%左右。限定结构最小剪力系数可以明显减小结构最大弹塑性层间位移角。说明限定最小剪力系数的结构,其结构响应相对减小,表明最小剪力系数的限定是有必要的。

4 调整方法的合理性

4.1 弹性剪力与倾覆力矩

模型 C 的基底剪力系数只有 1.36%,不满足最小剪力系数要求。调整强度,增大其地震作用,使其受到的地震作用满足规范要求。模型 D 设计时加大刚度,满足规范基底剪力系数 1.6%的要求。模型

C 的重力荷载代表值 69 391 t,D 为 98 285 t,由表 2 和重力荷载代表值可以看出结构 D 的材料消耗比 C 要多。结构抗震性能除了考虑基底剪力外,结构整体的倾覆力矩也是十分重要的关键,由所选 6 条地震记录的弹性时程分析得到的结构在地震作用下的楼层剪力平均值和倾覆力矩平均值可知(图 5),模型 C 和 D 相比,两个结构基底剪力和基底倾覆力矩值相差较大。且模型 D 比 C 大很多,说明超高层建筑这种通常由压弯承载力控制结构设计的结构,调整强度的模型 C 比调整刚度的模型 D 对地震作用的需求明显要小很多,且具有更好的经济性。

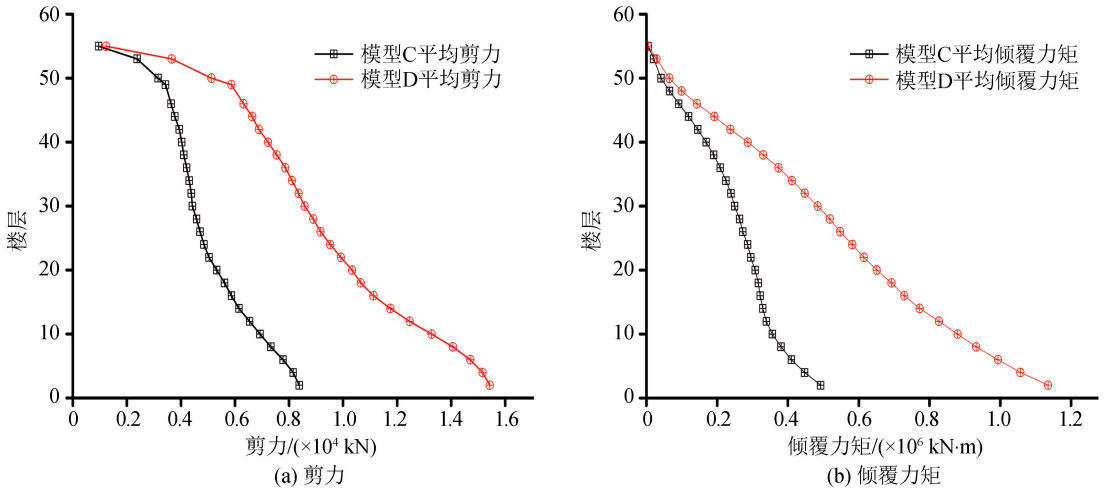


图 5 地震作用剪力和倾覆力矩

Fig.5 Shear force and overturning moment under earthquake action

4.2 弹塑性时程分析楼层剪力

模型的弹塑性楼层剪力分布如图 6 所示。两个模型在地震作用下的基底剪力差异较大,在 6 条地震记录的分析中模型 D 的剪力都大于 C,主要是由于模型 D 按刚度调整,侧向刚度比模型 C 大很多,随着地震动的输入,虽然两模型的刚度均有退化,但模型 D 的刚度退化较少,从而使基底剪力响应较大,且要比模型 C 大很多。分配的地震作用也就相应加大。结合表 2 中的构件截面可知,在弹性设计中,尽管通过增加梁、柱截面尺寸和剪力墙厚度增大了刚度,使结构的基底剪力满足了最小剪力系数要求,但受到的楼层剪力变大,实际上增大了地震作用。结构截面和受力都不够合理,且在实际中大大增加了耗费的人力、物力和财力。

4.3 弹塑性层间位移角

判断调整方法的合理性可以从最大顶点位移和层间位移角响应入手。经分析,结构的最大顶点位移相差不大,最大不超过 15%。由图 7 可知,在地

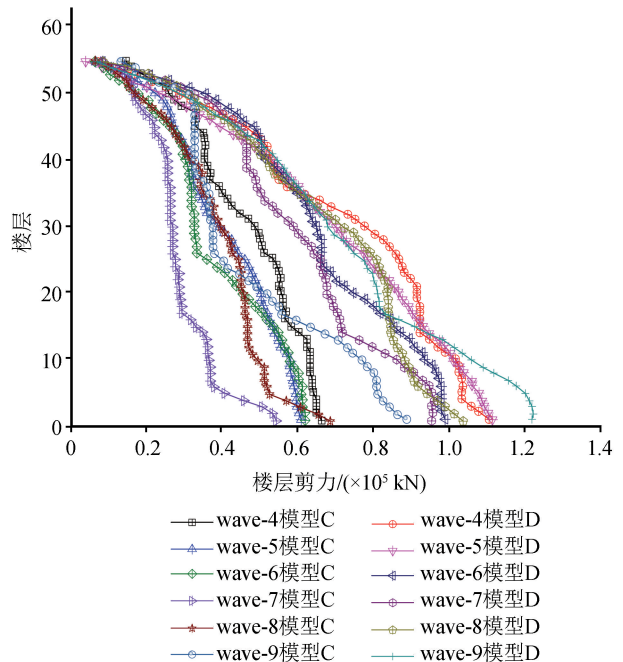


图 6 楼层剪力分布图

Fig.6 The distribution of floor shear force

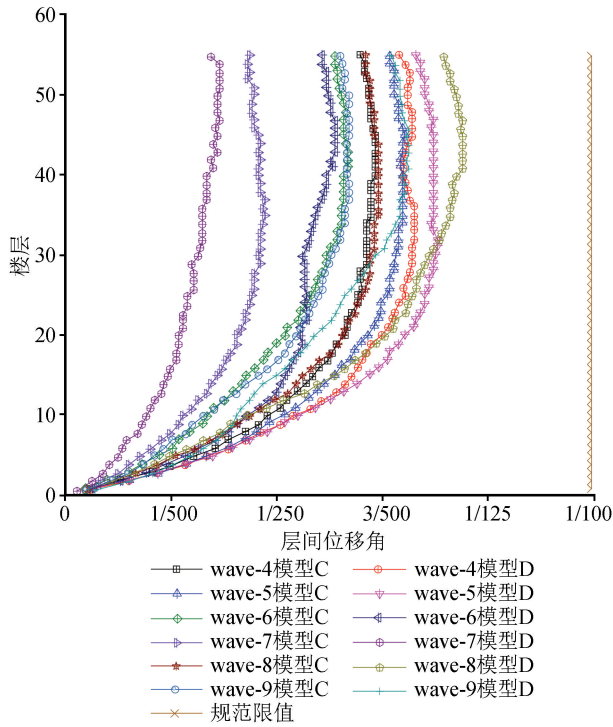


图7 楼层最大层间位移角

Fig.7 The maximum story drift ratio of structure

震作用下,两个模型的层间位移角均满足 1/100 的限值。层间位移角相差最大也不超过 22%,其中, Wave-8 产生的差异值最大。在 Wave-6 作用下,按照刚度调整的模式 D 比按照强度调整的模式 C 的最大层间位移角还要大。说明按刚度调整的方法,并没有改善对结构位移的响应。位移控制效果反而是强度调整的好,而与刚度调整有相似的抗震性能,说明按强度调整,达到相同的抗震性能,保证结构的安全性的同时,会花费更少的材料,结构更合理。

5 结论

在超高层结构中最小剪力系数经常不满足规范要求,引出对最小剪力系数的设置影响和调整方法合理性的探讨,采用 PEER 的选波方法,选取与规范反应谱拟合较好的实际地震动分析最小剪力系数对结构受力以及相应地震响应的影响。判断强度调整和刚度调整方法的合理性,得出以下结论:

(1) 满足最小剪力系数的结构弹性阶段的基底剪力响应较不满足的结构大,层间位移角要小,弹塑性阶段,能够减小结构的弹塑性位移。其剪力墙和框架柱的受力状态要优于不满足的结构。限定结构的最小剪力系数,能减小结构在罕遇地震作用下的响应,改善剪力墙和框架柱的受力状态,保证结构的

安全,有一定的必要性。

(2) 按强度调整的结构在弹性时程分析时的基底剪力和倾覆力矩需求比按刚度调整的结构小。弹性设计中,调整刚度满足了最小剪力系数要求,获得了一个较大的楼层剪力,实际上同时也增大了地震作用,对结构基底剪力影响较大,从而使结构受力不够合理,让结构更加危险;结构的弹塑性剪力分布也同样是刚度大的结构大,结构弹塑性最大位移和层间位移角响应相差不大,但出现刚度大,层间位移角也大的与抗震理论相悖的情况。

(3) 对比按照强度调整和按照刚度调整的结构,按照刚度调整的结构梁、柱和剪力墙截面大很多。从而承担的地震剪力响应也较大,而弹塑性位移和层间位移角相差不大。说明满足相同的抗震性能需求,按刚度调整的模式截面需要较大,重量也有很大增加,设计实现难度较大且需要花费更多的材料,而没有对位移响应带来改善,按强度调整的结构构件截面经济上更合理。

参考文献(References)

- [1] The Skyscraper Center (theGlobal Tall Building Database of the CTBUH). The 100 Tallest Completed Buildings in the World[EB/OL].<http://www.skyscrapercenter.com/buildings>.
- [2] 赵西安.一些超高摩天大楼的结构[C]//第二十三届全国高层建筑结构会议论文集.广州,2014:373-396.
ZHAO Xian.Structure of Some Super-high Skyscrapers[C]// Proceedings of the 23rd National High-rise Building Structure Conference.Guangzhou,2014:373-396.
- [3] 周颖,吕西林.智利地震钢筋混凝土高层建筑震害对我国高层建筑设计的启示[J].建筑结构学报,2011,32(5):17-23.
ZHOU Ying,LUXilin.Lessons Learnt from Damages of Reinforced Concrete Tall Buildings in Chile Earthquake and Revelations to Structural Design in China[J].Journal of Building Structures,2011,32(5):17-23.
- [4] 徐永林.软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾 8 级地震对上海高层建筑影响的估计[J].西北地震学报,2004,26(4):309-314.
XU Yonglin.Amplification Response of Ground Motion on Soil and Influence Estimation of Taiwan M8 Earthquake to Shanghai High-Buildings[J].Northwestern Seismological Journal,2004,26(4):309-314.
- [5] LI Q S,WU J R.Correlation of Dynamic Characteristics of a Super-Tall Building from Full-Scale Measurements and Numerical Analysis with Various Finite Element Models[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2004,33(14):1311-1336.
- [6] BAKER W F,KORISTA D S,NOVAK L C.Burj Dubai;Engi-

- neering the World's Tallest Building[J].The Structural Design of Tall and Special Buildings,2007,16(4):361-375.
- [7] 卢啸,陆新征,张万开,等.特大地震下超高层建筑的倒塌模拟[J].中国科学(技术科学),2011,41(11):1405-1416.
LU Xiao,LUXinzheng,ZHANG Wankai,et al.Collapse Simulation of a Super High-Rise Building Subjected to Extremely Strong earthquakesSci China Tech Sci[J].Science in China(Series e),2011,41(11):1405-1416.
- [8] 吴迪,霍维刚,熊焱,等.某高层框架-剪力墙基础隔震结构地震响应分析[J].华南地震,2017,37(2):65-70.
WU Di,HUO Weigang,XIONG Yan,et al.Analysis of Seismic Response of a High-Rise Frame-Shear Wall Base-Isolated Structure[J].South China Journal of Seismology,2017,37(2):65-70.
- [9] KHOSE V N,SINGH Y,LANG D H.A Comparative Study of Design Base Shear for RC Buildings in Selected Seismic Design Codes[J].Earthquake Spectra,2012,28(3):1047-1070.
- [10] NZS 1170.5:2004 Structural Design Actions:Part 5: Earthquake Actions: New Zealand[S].Wellington, New Zealand: Standards New Zealand,2004.
- [11] ASCE 7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers,2005.
- [12] EN 1998-1 (Eurocode8), Design for Structures for Earthquake Resistance,Part 1:General Rules,Seismic Actions and Rules for Buildings[S].Brussels,Belgium:European Committee for Standardization (CEN),2004.
- [13] 廖耘,容柏生,李盛勇.剪重比的本质关系推导及其对长周期超高层建筑的影响[J].建筑结构,2013,43(5):1-4.
LIAO Yun,RONGBaisheng,LI Shengyong. Derivation of Shear-Gravity Ratio and Its Effect on Long-Period Super High-Rise Buildings[J].Building Structure,2013,43(5):1-4.
- [14] 黄吉锋,李党,肖丽.建筑结构剪重比规律及控制方法研究[J].建筑结构,2014,44(3):7-12.
HUANG Jifeng,LI Dang,XIAO Li.Study on Control Method and Rules of Seismic Shear-Weight Ratio for Building Structure[J].Building Structure,2014,44(3):7-12.
- [15] 扶长生,张小勇,周立浪.长周期超高层建筑最小底部剪力系数[J].建筑结构,2014,44(10):1-6.
FU Changsheng,ZHANGXiaoyong,ZHOU Lilang.Minimum Base Shear Coefficient for Long Period Super High-Rise Buildings[J].Building Structure,2014,44(10):1-6.
- [16] 方小丹,魏琰.关于建筑结构抗震设计若干问题的讨论[J].建筑结构学报,2011,32(12):46-51.
FANG Xiaodan,WEI Lian.Discuss on Issues of Seismic Design of Building Structures[J].Journal of Building Structures,2011,32(12):46-51.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011—2010[S].Beijing:China Building Industry Press,2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Technical Specification for Concrete Structures of High-rise Building;JGJ 3—2010[S].Beijing:China Building Industry Press,2010.
- [19] 左琼,罗开海.我国《建筑抗震设计规范》基底剪力系数研究[J].建筑结构学报,2012,33(6):29-34,95.
ZUO Qiong,LUO Kaihai.Study on Seismic Base Shear Factor in Chinese 'Code for Seismic Design of Buildings'[J].Journal of Building Structures,2012,33(6):29-34,95.
- [20] UBC97, Uniform Building Code[S].Whittier, CA.. International Conference of Building Officials,1997.
- [21] 汪大绥,周建龙,姜文伟,等.超高层结构地震剪力系数限值研究[J].建筑结构,2012,42(5):24-27.
WANG Dasui,ZHOU Jianlong,JIANG Wenwei,et al. Research on Seismic Shear Gravity Ratio Limit for Super High-Rise Buildings Higher than 500m [J]. Building Structure,2012,42(5):24-27.
- [22] 广东省住房和城乡建设厅.高层建筑混凝土结构技术规程:DBJ 15-92-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province. Technical Specification for Concrete Structures of High-rise Building;DBJ 15-92-2013[S].Beijing:China Building Industry Press,2013.