

文章编号: 1000-4750(2006)10-0136-05

多高层建筑顶部塔楼的水平地震作用研究

*张文芳, 靳金平

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 研究了多、高层建筑顶部塔楼的水平地震作用, 当采用底部剪力法简化计算时, 对塔楼地震作用增大系数 β_n 作了理论和计算分析, 指出了 β_n 的控制因素为主体结构基本周期 T_1 、塔楼与主体的周期比 T_n/T_1 和重力荷载比 G_n/G , 并对现行高层混凝土规范中的 β_n 作了改进。分析中采用基于有限元理论的振型分解反应谱法建模计算, 共计算了 258 种工况, 根据这些结果给出了简化法中的修正系数 β_n 值及实用表格, 可供工程设计使用。

关键词: 地震工程; 顶部塔楼; 水平地震作用; 增大系数; 周期比

中图分类号: TU351.2; TU311.3 文献标识码: A

HORIZONTAL EARTHQUAKE EFFECTS ON SMALL TOWERS ON THE TOP OF TALL BUILDINGS

*ZHANG Wen-fang, JIN Jin-ping

(College of Architectural and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Horizontal earthquake effects on the protruding small towers on the top of tall buildings are investigated. Incremental coefficient is analyzed to adjust the horizontal earthquake effects on the tower by base-shear method. It is pointed out that the controlling factors of incremental coefficient include basic period of the main structure, period ratio and gravitational load ratio between the tower and the main structure. The incremental coefficient from Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building is improved. Mode superposition method based on finite element model is used to compute seismic effects under 258 conditions. Based on the results, an incremental coefficient table is supplied for practical design.

Key words: earthquake engineering; top tower; horizontal earthquake effect; incremental coefficient; period ratio

根据现行抗震规范^[1], 当结构高度较低、质量和刚度沿高度分布较均匀时, 可用底部剪力法计算其水平地震作用。对于普通多、高层建筑而言, 一般要设置机房、水箱间等突出部分, 由于其刚度和质量发生突变, 易产生显著的鞭梢效应。国内外学者进行了一些试验分析^[2]和理论计算^[3], 提出了一些实用算法^[4,5]。若将顶部塔楼作为一个质点、并采用底部剪力法计算时, 塔楼的计算结果一般偏小, 因此需乘以一个增大系数 β_n 进行修正。

关于增大系数, 文[1]统一简化规定取 3.0; 高层混凝土结构规程^[6](以下简称《高规》)在附录 B

中给出了增大系数表格(部分摘录于表 1), 表 1 中, T_1' 为结构(含塔楼)的基本周期, K 和 G 分别为主体结构各层侧移刚度和重力荷载代表值的平均值, K_n 和 G_n 分别为塔楼的侧移刚度和重力荷载代表值, 从中可见, 增大系数不是一个定值。

《高规》中的 β_n 值是采用了文[5]的研究结果(且文[5]基于计算值统一增加了 0.5)。文[5]在分析中仅采用了主体 10 层、塔楼 1 层的结构模型, 通过改变楼层刚度达到不同的周期 T_1' , 且周期变化范围较大(0.25s~1.50s), 这与实际结构不符, 相当于用刚度极大的 10 层结构来表征 $T_1' = 0.25s$ 的多层房屋, 或

收稿日期: 2005-03-03; 修改日期: 2005-06-09

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20051053)

作者简介: *张文芳(1967), 男, 山西壶关人, 教授, 博士, 从事工程结构抗震与减震控制研究工作(E-mail: zhangwf2002@sina.com);

靳金平(1979), 男, 山西长治人, 硕士生, 从事工程结构抗震与减震控制研究。

用刚度较柔的 10 层结构来表征 $T_1'=1.50s$ 的高层结构。从后面分析可看到,在结构 T_1' 、 G_n/G 和 K_n/K 作为控制参数不变时,主体层数对 β_n 的影响较显著。而表 1 没有反映层数影响。层数变化将会引起塔楼与主体间其它特征参数的变化,从而影响增大系数取值,这也是本文的切入点。

表 1 《高规》给出的塔楼地震作用增大系数

Table 1 Incremental Coefficients of Earthquake Effect on Towers on the Top of Buildings from the Specification

T_1'/s	G_n/G	K_n/K			
		0.001	0.01	0.05	0.10
0.50	0.01	2.6	<u>1.9</u>	1.7	1.7
	0.05	2.1	2.4	<u>1.8</u>	1.8
	0.10	2.2	2.4	2.0	<u>1.8</u>
1.00	0.01	4.8	2.9	2.7	2.7
	0.05	3.6	4.3	<u>2.9</u>	2.7
	0.10	2.4	4.1	3.2	<u>3.0</u>

另一方面,分析发现,表 1 的 β_n 值在一定的 T_1' 下出现有规律的重复现象或数值接近。例如, $T_1'=0.50s$ 时,带下划线值 1.9、1.8、1.8 基本相等; $T_1'=1.00s$ 时,带下划线值 2.9、2.9、3.0 也基本相等。当 T_1' 为其它值也类似。进一步分析发现,当出现上述情况时, G_n/G 与 K_n/K 之比接近 1 或其它定值。上述表明, β_n 值还与结构的某本质参数有更直接的关系,而 G_n/G 、 K_n/K 不能完全反映结构特征。

1 增大系数的理论分析

1.1 楼层集中质量模型与底部剪力法

楼层集中质量模型是将各楼层的质量分别集中于各楼层标高处形成多个质点系的简化模型^[7]。

底部剪力法是基于上述模型并只考虑基本振型贡献的简化方法,如前所述,有一定的适用范围。对于顶部带塔楼结构,底部剪力法的计算公式为

$$F_{Ek} = 0.85\alpha(T_1') \sum_{i=1}^n G_i \quad (1)$$

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{Ek} (1 - \delta_{n-1}) \quad (2)$$

$$V_i = \sum_{k=i}^n F_k \quad (3)$$

其中对于主体顶层及塔楼,修正为

$$V'_{n-1} = V_{n-1} + \delta_{n-1} F_{Ek} \quad (4)$$

$$V'_n = \beta_n V_n \quad (5)$$

式中, $\alpha(T_1')$ 为相应于基本周期 T_1' 的水平地震影响系数; G_i 、 H_i 为质点 i 的重力荷载代表值和计算高度; δ_{n-1} 为顶层附加地震作用系数; V_i 为 i 层的

地震剪力; V'_{n-1} 、 V'_n 为顶层及塔楼层地震剪力修正值。

1.2 塔楼增大系数 β_n 的影响因素理论分析

按楼层集中质量模型的振型分解反应谱法,水平地震下,顶部塔楼的地震剪力 V_n 计算公式为

$$V_n = \sqrt{\sum_{j=1}^m [\gamma_j X_{nj} G_n \alpha(T'_j)]^2} = G_n \sqrt{\sum_{j=1}^m [\gamma_j X_{nj} \alpha(T'_j)]^2} \quad (6)$$

式中, X_{nj} 为 j 振型塔楼质点的水平位移; m 为振型组合的个数; γ_j 为 j 振型的参与系数。

从上式可知,顶部塔楼地震剪力 V_n 的控制因素为 G_n 、 T'_j 、 $\alpha(T'_j)$ 、 X_{nj} 和 γ_j 。而从式(1)~式(3)可见,底部剪力法计算 V_n 时,主要考虑了上述因素中的 G_n 、 T_1' 和 $\alpha(T_1')$,只适度考虑了 X_{n1} 和 γ_1 的影响。因而还应将 V_n 乘以增大系数 β_n 进行修正。

对于增大系数 β_n ,显然需考虑剩余因素的影响,即其它振型周期 T'_j 、 X_{nj} 和 γ_j 。为此,这些因素的影响可从特征方程^[8]来进一步观察:

$$[K]\{X\} = \omega^2 [M]\{X\} \quad (7)$$

改写为 $K_n [K']\{X\} = \omega^2 G_n [M']\{X\} / g \quad (8)$

即 $[K']\{X\} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} [M']\{X\} \quad (9)$

或 $[K']\{X\} = (T_n / T')^2 [M']\{X\} \quad (10)$

$$T_n = 2\pi / \omega_n = 2\pi \sqrt{G_n / g K_n} \quad (11)$$

式中, $[K]$ 、 $[M]$ 为结构的刚度和质量矩阵; $\{X\}$ 为振型向量; ω 、 T' 为结构自振圆频率和周期; ω_n 、 T_n 、 K_n 为塔楼的自振圆频率、周期和水平刚度; $[K']$ 、 $[M']$ 为改写后的刚度和质量矩阵,其元素可视为 K_n/K 、 G_n/G 的函数。

由式(10)可看出,增大系数 β_n 控制因素可归结为 T_n 、 G_n/G 、 K_n/K 及层数 n 。当已知 T_1' 时,可去掉非独立因素 K_n/K ,取控制因素为 T_1' 、 T_n/T_1' 、 G_n/G 和 n 。进一步地,由于 T_1' 与 T_n 相关,且可能受 T_n 影响较大,为以后工程计算方便,可将其中的控制因素 T_1' 改取主体结构(不含塔楼)的基本周期,记为 T_1 。

由此可见,上述控制因素与《高规》相比,有下列三方面改进:一、采用主体结构(不含塔楼)的基本周期 T_1 ,在底部剪力法中按 T_1 计算 $\alpha(T_1)$;二、不再采用 K_n/K ,而代之以更能反映带塔楼结构的特征参数 T_n/T_1 ;三、兼顾了层数影响。

2 分析方案

下面将在上述理论分析基础上,采用基于有限

元理论的振型分解反应谱法^[9] ,并利用 ANSYS 分析软件,引入抗震设计反应谱来计算各振型的地震作用,用完全二次型法(CQC)组合。根据这些结果给出简化法中塔楼地震作用的增大系数值。

分析中取如图 1 所示结构平面。其中,主体柱 700mm × 700mm,塔楼柱 400mm × 400mm,横梁 300mm × 700mm,纵梁 250mm × 400mm;层高均取 3.3m。

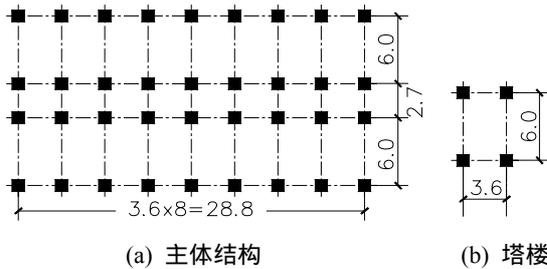


图 1 模型平面简图/m

Fig.1 Plane Sketch of the Structures

利用下列方法实现不同的结构参数:(1)取主体各层 $G_i = 5919\text{kN}$ 不变,且主体取材料质量密度 $\rho = 2500\text{kg/m}^3$ 不变;(2)通过改变塔楼材料的质量密度使 G_n/G 分别取为 0.01、0.05、0.10;(3)通过采用合理的层数和合理范围内调整梁柱弹性模量的方法,使主体结构达到所需的周期值 T_1 ;(4)通过改变塔楼梁柱的弹性模量,并经试算使 T_n/T_1 达到所需值。

分析中取 8 度,II 类场地,设计地震分组第一组,阻尼比 0.05,按文[1]规定的地震影响系数计算加速度反应谱。并采用下列步骤^[10]:(1)利用 ANSYS 建立结构有限元模型,梁柱用 BEAM4 单元,楼板用 SHELL63 单元,用上述方法调整结构参数;用子空间迭代法得到基本周期和振型;沿结构横向输入加速度反应谱,用振型分解反应谱法计算。(2)利用后处理模块(POST1),选择塔楼柱底部单元,用单元表显示沿激励方向的节点力,并用其中的求和命令求得地震剪力 $V_{n\text{谱}}$;主体底部总剪力 $V_{1\text{谱}}$ 通过求结构的约束反力得到。(3)用底部剪力法计算底部总剪力 V_1 及塔楼地震剪力 V_n 。根据振型分解反应谱法结果给出增大系数 $\beta_n = V_{n\text{谱}}/V_n$,并可比较两种方法的底部总剪力 $V_{1\text{谱}}/V_1$ 。

3 计算分析

3.1 层数对增大系数 β_n 的影响分析

首先,按《高规》中的控制因素分析层数的影

响。利用与实际相符的结构,且为便于对 K_n/K 值控制,采用基于层间剪切模型的振型分解反应谱法编制了程序进行计算。表 2 列出了 $T'_1 = 0.50\text{s}$,主体层数为 4 层~10 层时共 48 种工况下的结果。

表 2 采用文[6]中的控制因素分析主体层数对 β_n 的影响

Table 2 Influences of Story Number on Incremental Coefficients Using the Controlling Factors in Reference [6]

主体层数	G_n/G	K_n/K			
		0.001	0.010	0.050	0.100
4	0.01	5.31(1.10)	3.85(0.35)	0.95(0.16)	0.91(0.11)
	0.05	0.86(2.43)	2.36(0.78)	1.94(0.35)	1.30(0.25)
	0.10	0.76(3.46)	2.94(1.10)	1.34(0.49)	1.53(0.35)
6	0.01	2.60(0.76)	1.53(0.24)	0.96(0.11)	0.94(0.08)
	0.05	1.24(1.68)	1.47(0.54)	1.42(0.24)	1.23(0.17)
	0.10	0.88(2.40)	2.20(0.76)	1.80(0.34)	1.33(0.24)
8	0.01	1.61(0.58)	1.57(0.18)	0.97(0.08)	0.95(0.06)
	0.05	2.27(1.30)	1.61(0.41)	1.39(0.18)	1.16(0.13)
	0.10	1.11(1.85)	1.55(0.58)	1.41(0.26)	1.28(0.18)
10	0.01	1.46(0.47)	2.36(0.15)	0.97(0.07)	0.96(0.05)
	0.05	5.59(1.06)	2.93(0.33)	1.42(0.15)	1.12(0.11)
	0.10	1.58(1.50)	1.43(0.47)	1.56(0.21)	1.24(0.15)

注:括号内数据为塔楼与主体结构的周期比 T_n/T_1 。

从中可见:(1)当 T'_1 、 K_n/K 和 G_n/G 一定时, β_n 随层数的不同而有较大变化,而《高规》中的 β_n 是仅按主体 10 层的结构得出的,是不适当的。(2)将表 1 中 $T'_1 = 0.50\text{s}$ 时的 β_n 值(减去 0.5)与表 2 主体 10 层时的本文结果比较,也发现有较大差异。经分析,文[5]中的结果可能有误,譬如在文[5]的表 1 中,10 层结构各层质量均为 5000kN,当塔楼与主体楼层质量相等时, $K_n/K = 0.001$ 与 $K_n/K = 1$ 下的结构基本周期之比均只有 1.28,这是不对的。分析表明,上述情况下的比值应为 4.4 之大。因此《高规》按主体 10 层给出的 β_n 也可能有误。(3)虽然 T'_1 、 K_n/K 和 G_n/G 不变时, β_n 随层数变化,但 T'_1 和 G_n/G 不变且 T_n/T_1 接近时,层数对 β_n 的影响不大。

表 3 用本文的控制因素分析主体层数对 β_n 影响

Table 3 Influences of Story Number on Incremental Coefficients Using the Controlling Factors in This Paper

主体层数	G_n/G	T_n/T_1				
		0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
4	0.01	1.72	1.76	2.98	6.91	3.01
	0.05	1.55	1.75	2.69	3.43	2.07
	0.10	1.45	1.66	2.28	2.49	1.66
6	0.01	1.79	1.75	2.98	8.33	3.11
	0.05	1.67	1.75	2.86	4.17	2.25
	0.10	1.53	1.70	2.52	3.01	1.75
8	0.01	1.84	1.79	3.02	9.21	3.15
	0.05	1.68	1.77	2.99	4.68	2.18
	0.10	1.60	1.73	2.71	3.41	1.91
10	0.01	1.91	1.76	2.99	9.60	3.28
	0.05	1.74	1.78	3.03	5.07	2.48
	0.10	1.67	1.75	2.80	3.70	2.00

其次,采用本文提出的控制因素分析层数对 β_n 的影响。用基于有限元模型的振型分解反应谱法,对 $T_1 = 0.50s$ 层数为 4~10 共 60 种工况进行了计算,得到的 β_n 如表 3 所示。从中可见,当 T_1 、 G_n/G 、 T_n/T_1 不变时, β_n 随层数增加而呈有少许增大趋势,但波动很小($T_n/T_1=1.0$ 时除外);当 $T_n/T_1=1.0$ 时, β_n 随层数的增加而明显增大。

因此,若采用本文提出的控制因素,对于一定周期 T_1 及 $T_n/T_1 \neq 1$ 的结构,可采用某个合理的层数计算 β_n ,而层数变化的影响可忽略不计。

3.2 周期比 T_n/T_1 对增大系数的影响分析

利用表 4 的结构参数,用 ANSYS 计算了 T_1 为 0.25s~1.50s(相应主体层数为 3 层~15 层),以及不同 G_n/G 、 T_n/T_1 值情况下共 150 种工况下的增大系数,见表 5。从中看到, T_n/T_1 对 β_n 有显著影响:

表 4 不同工况下采用的结构参数

Table 4 Structure Parameters under Different Conditions

主体结构基 本周期 T_1/s	主体结构		塔楼材料质量密度 $\rho/(kg/m^3)$		
	层数	梁柱弹性模量 $E/(N/m^2)$	$G_n/G=0.01$	$G_n/G=0.05$	$G_n/G=0.10$
0.25	3	2.50×10^{10}	860	4300	8600
0.50	6	2.90×10^{10}	860	4300	8600
0.75	9	3.19×10^{10}	860	4300	8600
1.00	12	3.45×10^{10}	860	4300	8600
1.50	15	2.53×10^{10}	860	4300	8600

(1) 当 $T_n/T_1=1.0$ 时, β_n 明显提高达到最大值,这是由于塔楼与主体共振所致;(2) 当 $T_n/T_1 > 1.0$ 时, β_n 随着周期比的增大而减小;(3) 当 $T_n/T_1 < 1.0$

时, β_n 一般随周期比的减小而减小,同时也看到在 $T_1 \geq 0.75s$ 、 $T_n/T_1 = 0.2 \sim 0.4$ 时, β_n 又略有增大,增大的程度随着 T_1 而变化。分析认为,这是由于塔楼周期 T_n 与主体的其它周期接近而引起了共振,尽管如此,主体结构的其它周期对 β_n 的影响并不大。

此外,从表 5 也可看到, G_n/G 和 T_n/T_1 一定时, β_n 一般随 T_1 的增大而增大;当 T_1 及 T_n/T_1 一定时, β_n 随 G_n/G 的增大而减小,在 $T_n/T_1=1.0$ 时减小幅度最大。分析认为这些是由于结构高振型反应所占比例随参数变化所导致的。

3.3 底部总剪力分析

表 5 还列出了振型分解反应谱法与底部剪力法计算的结构底部总剪力之比 $V_{1谱}/V_1$ 。从中可见, $V_{1谱}/V_1$ 的变化范围是 0.68~1.01,大多处于 0.9~1.0 之间,因而,带塔楼时用底部剪力法计算的底部总剪力总体上具有较好的精度,也是较安全的;在 $T_n/T_1=1.0$ 附近时, $V_{1谱}/V_1$ 较小,约为 0.68~0.8,这是由于塔楼的 TMD 减震作用引起的,也说明此时用底部剪力法计算偏保守。

综上,建议一般结构可采用表 5 来计算塔楼增大系数,当 T_n/T_1 位于 0.9~1.1 之间时,宜采用振型分解反应谱法计算,并注意:(1) T_1 可采用顶点位移法等简化计算,并宜考虑非承重墙体的影响予以折减。(2) 地震影响系数 α 按主体周期 T_1 计算。(3) 增大后的地震作用仅用于塔楼自身及直接相连的主体结构构件计算,增大部分不应往下传递。

表 5 塔楼水平地震作用效应增大系数 β_n 及 $V_{1谱}/V_1$

Table 5 Incremental Coefficients of Horizontal Earthquake Effects on the Small Tower and the Value of $V_{1谱}/V_1$

主体结构 周期 T_1/s	T_n/T_1 G_n/G	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6
		0.25	0.01	1.14/0.98	1.27/0.98	1.47/0.98	2.54/0.95	3.98/0.89	5.48/0.73	4.47/0.82	2.90/0.92
	0.05	1.15/0.98	1.19/0.97	1.43/0.95	2.16/0.87	2.63/0.77	2.77/0.69	2.34/0.72	1.92/0.77	1.40/0.89	1.00/0.93
	0.10	1.09/0.97	1.15/0.96	1.37/0.93	1.82/0.83	2.02/0.75	2.06/0.70	1.92/0.70	1.71/0.74	1.26/0.83	0.94/0.88
0.50	0.01	1.77/0.96	1.79/0.96	1.75/0.95	2.98/0.94	4.82/0.91	8.33/0.76	5.96/0.86	3.11/0.93	1.51/0.95	1.00/0.95
	0.05	1.62/0.95	1.67/0.94	1.75/0.93	2.86/0.88	3.87/0.78	4.17/0.67	3.06/0.77	2.25/0.86	1.31/0.92	0.92/0.94
	0.10	1.50/0.94	1.53/0.93	1.70/0.91	2.52/0.83	3.01/0.72	3.01/0.68	2.31/0.73	1.75/0.78	1.20/0.89	0.87/0.91
0.75	0.01	2.66/0.97	2.60/0.97	1.94/0.97	3.17/0.96	5.17/0.94	11.2/0.76	6.23/0.90	3.19/0.95	1.56/0.96	1.01/0.97
	0.05	2.25/0.96	2.24/0.96	1.95/0.95	3.12/0.91	4.48/0.83	4.86/0.73	3.72/0.83	2.44/0.90	1.42/0.94	0.96/0.95
	0.10	2.03/0.95	2.17/0.94	1.91/0.93	2.88/0.86	3.63/0.77	3.62/0.70	2.70/0.78	2.10/0.86	1.31/0.92	0.92/0.94
1.00	0.01	3.62/0.99	3.21/0.99	2.04/0.99	3.31/0.99	5.74/0.97	14.1/0.76	6.11/0.95	3.22/0.98	1.56/0.99	1.03/0.99
	0.05	2.99/0.99	2.70/0.98	2.05/0.98	3.31/0.95	5.02/0.87	5.88/0.77	3.58/0.88	2.69/0.94	1.46/0.97	1.05/0.95
	0.10	2.68/0.98	2.50/0.97	2.02/0.97	3.13/0.91	4.17/0.81	4.00/0.76	3.22/0.84	2.35/0.90	1.37/0.96	0.96/0.97
1.50	0.01	5.37/1.01	3.51/1.01	2.18/1.01	3.58/1.01	6.30/0.99	16.9/0.79	6.59/0.98	3.42/1.00	1.78/1.01	1.28/1.01
	0.05	4.23/1.01	3.03/1.00	2.18/1.00	3.51/0.98	5.41/0.91	7.41/0.79	4.86/0.91	3.05/0.97	1.72/1.00	1.26/1.00
	0.10	3.77/1.00	2.78/0.99	2.17/0.99	3.36/0.95	4.61/0.86	4.84/0.79	3.86/0.87	2.73/0.94	1.66/0.98	1.24/0.99

注：“/”后的数值为 $V_{1谱}/V_1$ 的值

4 算例

某 10 层框架-抗震墙结构办公楼平面如图 2, 突出部分为框架, 其平面 $3.9\text{m} \times 6.0\text{m}$ 。结构高度为 $4.5+3.3 \times 9+3.3=37.5\text{m}$ 。主体柱 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ 、塔楼柱 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$; 主体横梁 $300\text{mm} \times 650\text{mm}$ 、纵梁 $300\text{mm} \times 500\text{mm}$; 塔楼梁 $250\text{mm} \times 600\text{mm}$ 。抗震墙厚 250mm 。 $G_1=11407\text{kN}$, $G_2 \sim G_9=10755\text{kN}$, $G_{10}=9011\text{kN}$, $G_{11}=664\text{kN}$ 。8 度 II 类场地, 设计地震第一组, 梁柱混凝土为 C30。求塔楼横向水平地震作用。

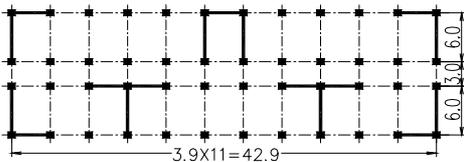


图 2 平面简图/m

Fig.2 Plane Sketch of the Structure

(1) 用底部剪力法按本文 β_n 计算。经计算, 横向周期 $T_1=0.466\text{s}$, $\alpha(T_1)=0.123$, $\delta_{n-1}=0$; $F_{Ek}=11260\text{kN}$, 塔楼剪力 $V_{11}=136.8\text{kN}$ 。

$$T_n/T_1=0.46/0.47=0.98; G_n/G=0.062。$$

查表 5 得 $\beta_n=4.0$, 从而塔楼地震剪力修正值为 $V'_{11}=4.0 \times 136.8=547.2\text{kN}$ 。

(2) 用底部剪力法按《高规》中 β_n 计算。经计算, $T'_1=0.592\text{s}$, $K_n/K \approx 0.001$, $G_n/G=0.062$, 查得 $\beta_n=2.1$, 考虑到其中 β_n 增加了 0.5, 取 $\beta_n=1.6$, 得 $V'_{11}=1.6 \times 97.4=155.8\text{kN}$ 。

(3) 用 ANSYS 建模计算。用 ANSYS 建模求得了主体结构横向周期 $T_1=0.466\text{s}$, $T_n=0.462\text{s}$; 并求得 $V'_{11}=611.8\text{kN}$ 。

再如, 若塔楼层的侧移刚度增大 1 倍, T_n/T_1 变为 0.71, 按本文得 $V'_{11}=2.4 \times 136.8=328.3\text{kN}$, 按《高规》得 $V'_{11}=1.6 \times 136.8=218.9\text{kN}$ 。

比较上述结果可见, 按本文增大系数计算结果是正确的, 而按《高规》计算的结果偏差较大。

5 结语

通过对多高层结构突出塔楼水平地震作用的理论和计算分析, 得到其地震作用增大系数的控制因素为 T_1 、 G_n/G 和 T_n/T_1 。指出了《高规》中不合

理之处及存在的问题。利用上述控制因素和表 5 的增大系数, 可进行工程结构的抗震计算。

参考文献:

- [1] GB 50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB 50011-2001.Code for seismic design of buildings [S]. China Building and Architecture Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 赵西安, 王万里. 带塔楼高层建筑在地震时的动力反应[J]. 建筑结构学报, 1987, 8(4): 67~77.
Zhao Xi'an, Wang Wanli. Dynamic response of tall building with tower under earthquake [J]. Journal of Building Structures, 1987, 8(4): 67~77. (in Chinese)
- [3] Kimura Eiichi, Konno Tomonori. Earthquake effects on steel tower for microwave antennas atop building [J]. Review of the Electrical Communication Laboratories, 1975, 23(3-4): 301~315.
- [4] 梁兴文. 带屋面突出物的高层建筑水平地震力的实用算法 [J]. 建筑结构, 1997, 7: 31~33.
Liang Xingwen. Practical algorithm of the horizontal seismic forces of the tall building with tower [J]. Building Structure, 1997, 7: 31~33. (in Chinese)
- [5] 邵弘, 赵西安. 高层建筑突出屋面小塔楼的地震力[J]. 建筑结构, 1987, 1: 2~7.
Shao Hong, Zhao Xi'an. The earthquake force of the protruding small tower in tall building [J]. Building Structure, 1987, 1: 2~7. (in Chinese)
- [6] JGJ 3-2002. 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, 2002.
JGJ 3-2002. Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 沈聚敏, 周锡元. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
Shen Jumin, Zhou Xiyuan. Aseismic engineering [M]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2000. (in Chinese)
- [8] Ray Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures (2nd Edition) [M]. USA: Computers and Structures Inc., 1995.
- [9] 杨桂通, 张善元. 弹性动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
Yang Guitong, Zhang Shanyuan. Elastic dynamics [M]. Beijing: China Railway Press, 1988. (in Chinese)
- [10] 博弈创作室. ANSYS7.0 工程结构分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Boyi Workroom. ANSYS7.0 Project structural analysis technique and example [M]. Beijing: China Water and Electricity Press, 2003. (in Chinese)