

质量沿竖向分布不均匀的工业建筑的抗震计算

仇安兵¹ 黄毅华²

1. 北京科技大学; 2. 中冶京诚工程技术有限公司

摘要:《抗规》中没有对质量沿竖向分布不均匀的工业建筑是否需要采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算作出明确规定, 本文结合实际工程和相关民用技术规程对此进行了探讨, 并针对如何应用弹性时程补充计算结果给出了相关的建议。

关键词: 竖向不规则; 结构抗震; 弹性时程

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2022. 06. 077

一、前言

《建筑抗震设计规范》(简称《抗规》) 5. 1. 2条对各类建筑结构的抗震计算做了详细的规定, 其中第三款规定, “特别不规则的建筑、甲类建筑和表5. 1. 2-1所列高度范围的高层建筑, 应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算, 可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值。”对于本款中规定的特别不规则的建筑, 条文说明中明确说参照规范表3. 4. 2的规定。表3. 4. 2-1规定了平面不规则的类型, 由扭转不规则的定义可知, 质量平面分布不规则属于扭转不规则。表3. 4. 2-2规定了竖向不规则的类型, 从其定义来看, 质量沿竖向分布不均匀并不属于这表中规定的类型。因此5. 1. 2条第三款中的特别不规则的建筑的定义并不包含质量沿竖向分布不均匀的情况。质量竖向分布特别不均匀的结构是否需要采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算, 目前《抗规》中没有明确的规定, 本文试图对这个问题进行探讨。

二、反应谱和时程计算方法的分析

(一) 振型分解反应谱法

《抗规》中规定的振型分解反应谱法是把结构的基本振型进行分解, 然后求出单振型的地震作用, 再进行组合求出地震作用标准值的效应。以不进行扭转耦联计算的振型分解反应谱法为例简单分析一下质量沿竖向分布不均对计算结果的影响。结构j振型i质点的水平地震作用标准值, 按下列公式进行计算:

$$F_{ji} = \alpha_j \gamma_j X_{ji} G_i (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$$

$$\gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} G_i}{\sum_{i=1}^n X_{ji}^2 G_i}$$

F_{ji} ——j振型i质点的水平地震作用标准值;

α_j ——相应于j振型自振周期的地震影响系数;

X_{ji} ——j振型i质点的水平相对位移;

γ_j ——j振型的参与系数。

$$S_{EK} = \sqrt{\sum S_j^2}$$

S_{EK} ——水平地震作用标准值的效应;

S_j ——j振型水平地震作用标准值的效应。

由以上各式可知振型分解反应谱法实际上是一种拟静力的计算方法, 质量和刚度对计算结果的影响只是体现在结构的各个振型分量中, 从严格意义上来讲此法并不能真实地反映结构的动力响应。

(二) 弹性动力时程法

在弹性动力时程分析中, 结构的系统平衡方程一般可表达为:

$$MX''(t) + CX'(t) + KX(t) = -MZ''(t)$$

M、C、K——分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵;

$X(t)$ 、 $X'(t)$ 、 $X''(t)$ ——分别为位移、速度、加速度;

$Z''(t)$ ——为地面运动加速度。

由上式中可知, 弹性动力时程分析时, 几何不规则是通过刚度矩阵来表达, 结构的质量分布情况是通过质量矩阵来表达的, 时程分析的结果能客观地反应结构的动力响应。

(三) 二种抗震计算方法比较

由以上分析可知, 振型分解反应谱法先对结构的振型进行分解, 分别求地震作用标准值, 然后对各个振型的地震标准值用完全二次型方根法进行组合, 对于在规范规定高度范围内的规则结构, 此法的计算结果与时程分析结果基本相近。当结构的高度超出规定范围, 几何不规则或质量分布不均匀时, 振型分解反应谱法的计算结果可能出现偏不安全的情况, 因此《抗规》5. 1. 2条第三款规定的建筑需采用时程分析法进行补充计算, 但参照该条说明条文可知, 该条中的特别不规则的建筑不包含质量沿竖向分布不均匀的建筑, 但《高层建筑混凝土结构技术规程》第3. 3. 4条第三款规定质量沿竖向分布特别不均匀的高层建筑结构应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算。《高层民用建筑钢结构技术规程》第5. 3. 2条第四款也规定竖向特别不规则的建筑, 宜采用时程分析法作补充计算。虽然《高层建筑混凝土结构技术规程》和《高层民用建筑钢结构技术规程》都明确规定了其适用范围为高层民用建筑, 未涉及工业建筑, 但却都说明了振型分解反应谱法用于分析质量沿竖向分布不均匀的结构时存在缺陷, 应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算。

综上所述, 质量沿竖向分布不均匀的工业建筑的抗震计算时, 应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算。

三、工程实例

(一) 工程简介

某工程的磨煤厂房, 宽度方向为10. 4m, 长度方向为60m, 高52m, 共14层。地区设防烈度为7度(0. 15g), 设计地震分组为第一组, 场地类别为4类,

磨煤的主要设备集中在9层，其他各层设备较少，该层的质量与相邻下一层的质量比为264%，结构的质量沿竖向分布严重不均匀，属于竖向不规则结构，其结构面和3D示意图如图1所示。

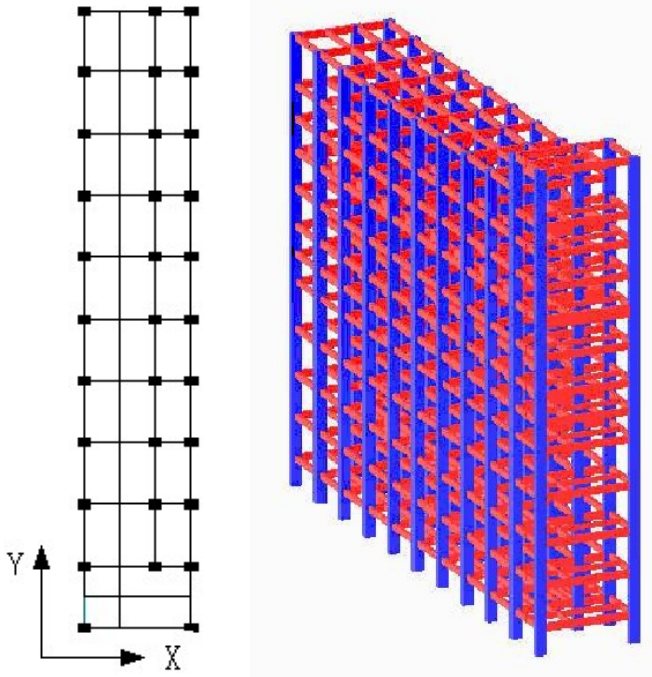


图1 结构平面和3D示意图

(二) 结构抗震计算

用SATWE对本工程进行地震分析，振型分解反应谱法计算得到地震作用下的二个方向的楼层反应力曲线如图2所示。从楼层反应力曲线中可以看出，该结构的质量沿竖向分布严重不均，9层的地震力明显比其他层大。

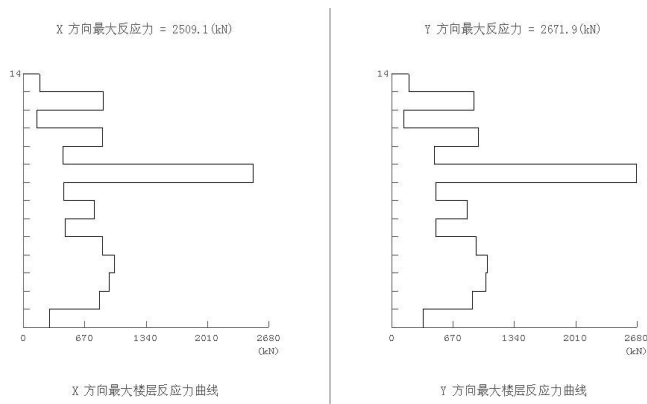


图2 楼层反应力曲线图

根据前面的分析可知，该结构应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算，且应取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值。

根据《抗规》要求按建筑场地类别和设计地震分组选择二组实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲

线。在SATWE中选择两条自然波TH3TG065和TH4TG065，一条人工合成波RH1TG065。波的信息如下：

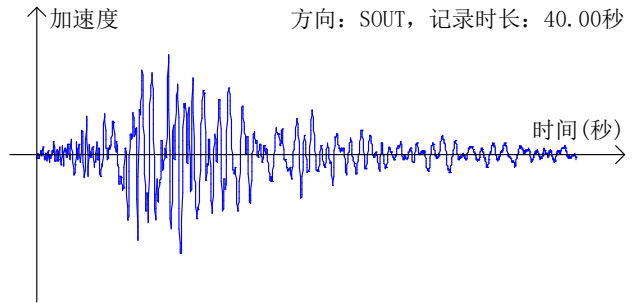


图3 TH3TG065波信息

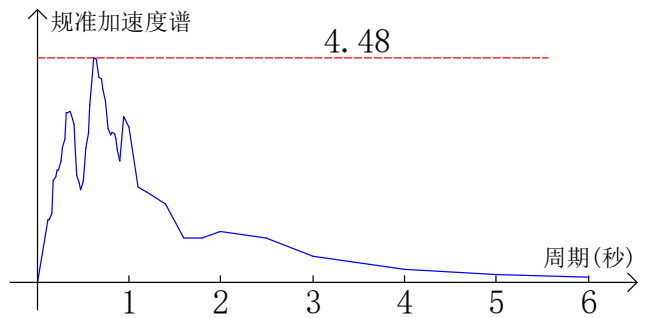


图4 TH3TG065规范加速度谱

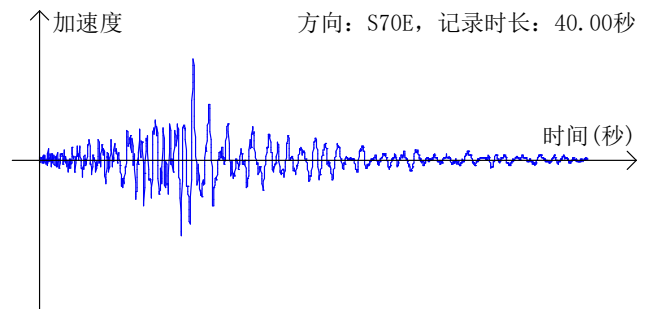


图5 TH4TG065波信息

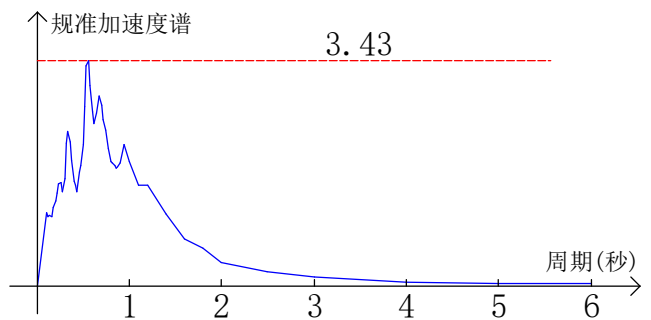


图6 TH4TG065规范加速度谱

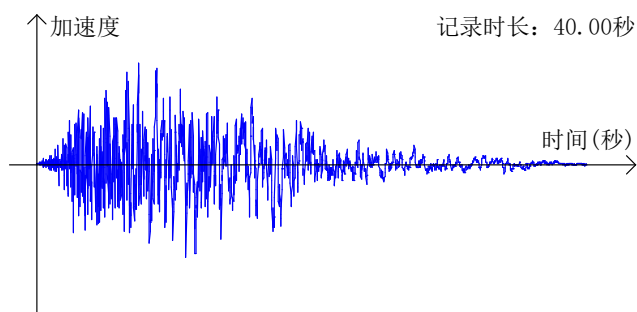


图7 RH1TG065波信息

计算结果见表1, 三条波分别在X向和Y向作用下结构的底部剪力均大于反应谱的65%, 三条波作用下结构底部剪力的平均值大于反应谱的80%, 满足规范的要求。

表1 反应谱与时程分析底部剪力结果比较

	反应谱	TH3TG065	TH4TG065	RH1TG065	三波平均
X向底部剪力	6926.83	6945.90	6453.20	7966.20	7121.77
Y向底部剪力	7250.14	8308.20	5493.10	7753.90	7185.07
X向百分比(%)	-	100.28	92.91	123.45	89.40
Y向百分比(%)	-	114.59	66.12	141.16	92.66

分别统计结构在X向和Y向的楼层剪力, 对时程平均和反应谱的结果进行比较, 见图8和图9。

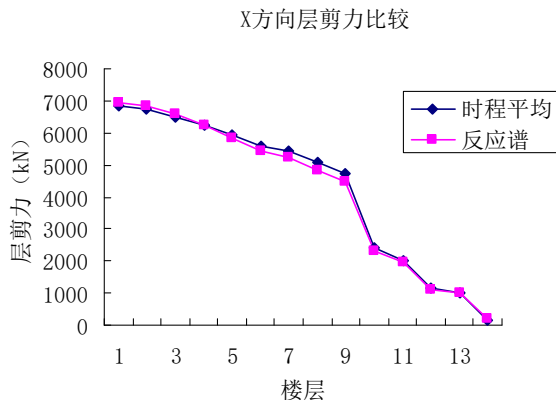


图8 X方向剪力对比

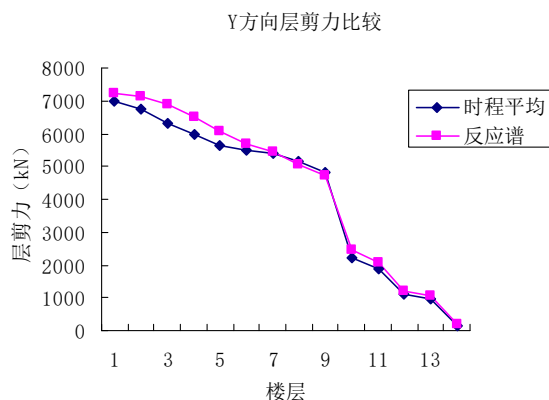


图9 Y方向剪力对比

由图8可知在X方向, 5~12层时程平均的层剪力都大于反应谱的层剪力, 最大的差值为1.06倍。从图9可以看出在Y方向, 7~9层时程平均的层剪力大于反应谱的层剪力, 最大差值为1.03倍。由此可见, 反应谱的结果并不能包住弹性时程的结果, 用弹性时程对结构进行补充计算是有必要的。

(三) 弹性时程分析结果的应用

《抗规》第5.1.2条第3点规定, “可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值”, 关于这条规定的应如何执行, 规范并未作明确的规定。工程中通常有两种方法可以实现: (1) 将反应谱的地震力乘以放大系数进行放大, 让其结果可以包住时程平均的结果; (2) 将每条时程波当作一种工况, 将这三种时程工况进行组合, 得到时程平均的结果, 把时程平均的结果当作一个地震工况进行荷载组合, 这样操作即采用弹性时程分析的构件内力响应包络值的多波平均值与振型分解反应谱法计算结果二者的较大值直接进行构件设计。相关文献指出第二种做法可能使得构件配筋较大, 因为在时程分析过程中, 构件内力的最大响应具有不同步性, 采用包络值进行设计会使得构件内力, 尤其是压弯构件内力偏于保守。鉴于结构设计的经济性和操作的方便性, 建议采用第一种方法进行设计。

四、结论

本文针对质量沿竖向分布不均匀的工业建筑是否需要采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算做了深入的探讨, 从理论上, 对反应谱法和弹性时程分析法进行比较, 并结合实际工程进行分析, 得出如下结论:

(1) 对于质量沿竖向分布不均匀的工业建筑, 参照UBC的规定, 相邻楼层质量比大于150%时, 可定义为竖向不规则的建筑;

(2) 从理论分析可知, 反应谱法并不真实地能反映结构的动力响应, 通过工程实例可见, 反应谱的结果可能出现包不住弹性时程的结果, 结合民用技术规程的规定, 本文认为质量沿竖向分布不均匀的工业建筑应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算;

(3) 采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算时, 《抗规》中提出取二者结果的较大值, 本文结合实际工程的应用, 并且参考相关文献, 建议将反应谱的地震力乘以放大系数进行放大, 让其结果可以包住时程平均的结果。

参考文献

[1] 杨志勇, 黄吉锋. 弹性、弹塑性时程分析法在结构设计中的应用[J]. 建筑结构. 技术通讯 2007, 1.
 [2] 1997 UNIFORM BUILDING CODE [S].
 [3] 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2008) [S].
 [4] 高层建筑混凝土结构技术规程 (JGJ 3-2002) [S].
 [5] 高层民用建筑钢结构技术规程 (JGJ 99-98) [S].