

文章编号: 1000-1301 (2006) 03-0094-03

非经典振型分解法求混凝土房屋及其 上钢塔的地震响应

王依群, 王华明

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 钢结构与混凝土结构阻尼比不同, 混凝土房屋与其顶上钢塔组成了非比例阻尼结构系统。本文用非经典振型分解法求解该类结构系统的线弹性地震响应, 发现只用前几阶振型响应迭加的结果即可逼近直接积分法的精确度。

关键词: 非比例阻尼; 振型分解法; 钢筋混凝土; 钢塔; 地震响应

中图分类号: P315.961

文献标识码: A

Non-classical mode superposition method for earthquake response of a reinforced concrete building with a steel tower at top it

Wang Yiqun, Wang Huaming

(College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The damping ratio of steel structures and RC structures are different. A reinforced concrete building with a steel tower at top it composes a non-proportional damping system. The non-classical modal superposition method is used for the elastic earthquake response analysis of this system in this paper. An example is calculated, and it is found that a few modes can provide sufficiently accurate results compared to the direct integration method.

Key words: non-proportional damping; modal superposition; reinforced concrete; steel tower; earthquake response

引言

钢结构与混凝土结构阻尼比不同, 混凝土房屋与其顶上钢塔组成了非比例阻尼结构系统。为避免采用直接积分法^[1,4]耗时多及结构高阶自振周期对积分步长要求较小的限制, 本文探讨用非经典振型分解法求解该类结构系统的线弹性地震响应。

1 非经典振型分解法

一般线弹性结构的动力方程为:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = FP(t) \quad (1)$$

一实际工程有上千个自由度, 直接求解方程要花费大量的计算机时间。对于线弹性结构可采用振型分解法计算, 其广义阻尼矩阵为: ${}^T C = C^*$, 这里 T 为振型矩阵。当阻尼满足比例阻尼条件时, C^* 是对角

收稿日期: 2005-12-25; 修订日期: 2006-03-20

作者简介: 王依群 (1953-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震方面研究。

阵,称为经典的振型叠加法。非比例阻尼时, C^* 是满阵,方程仍耦合。对此降阶的动力方程组积分,将有限阶振型反应叠加就得到整个结构系统的动力响应^[1],此即非经典的振型分解法。

2 顶上有钢塔的混凝土结构

钢结构塔的阻尼比一般为 0.01、混凝土结构的阻尼比一般为 0.05,两者的组合构成了非比例阻尼结构系统,阻尼矩阵采用文献 [2、4] 表达式。以下举一算例表明上述方法的有效性。

2.1 算例简况

某 10 层钢筋混凝土框架及其顶上钢塔如图 1~图 3 所示。钢筋混凝土构件尺寸及材料性质见文献 [3],钢塔构件尺寸及材料性质见文献 [4]。

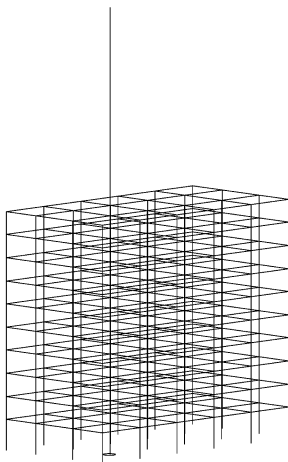


图 1 算例简图

Fig 1 Structural layout of the 10-story RC frame with a steel tower atop it

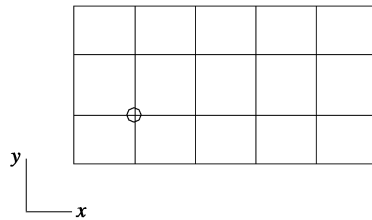


图 2 俯视图

Fig 2 Roof plan of the example

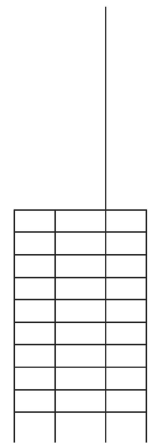


图 3 侧立面

Fig 3 Elevation of the example

在结构基础 X 向施加峰值调整为 70Gal 的 El Centro 波,对该结构系统按二部分不同阻尼比(混凝土框架阻尼比取 0.05,钢塔阻尼比取 0.01)进行计算。为比较起见,还计算了混凝土框架和钢塔阻尼比均取 0.05,即比例阻尼的情况。框架楼面采用刚性平面假定,系统共有 792 个自由度。采用 Newmark 逐步积分方法进行了三维弹性动力时程计算。

2.2 算例结果分析

钢筋混凝土框架前二阶自振周期分别为: 3.239s 和 2.554s,钢塔前二阶自振周期分别为: 1.578s 和 0.5703s。再根据阻尼比 0.05、0.01 确定各自相应的瑞雷阻尼系数。整个系统的前二阶自振周期分别为: 3.264s 和 2.579s。直接积分法和取不同振型反应数目叠加的钢塔顶、框架顶 X 向位移响应计算结果如图 4~图 6 所示,图中 direct 代表直接积分、 m 代表 m 阶振型响应叠加的结果。由图 4~图 6 可见,5 个振型响应叠加结果可与直接积分结果接近。第一阶振型为 Y 向平动振型,所以在三图表示的 X 向位移响应中,第一阶振型响应所占比重很小。

由三图比较可见,对于刚度几乎不变且阻尼比也不变的框架部分,仅两个振型反应的叠加就与直接积分的结果相当接近(图 5),这是由于二阶以上振型主要是钢塔的变形。而对刚度突变后又逐渐减小且阻尼比不变(图 6)、和阻尼比减小(图 4)的钢塔,有两点值得注意:(1)要有相对多的振型反应参与叠加才能达到与直接积分结果接近的程

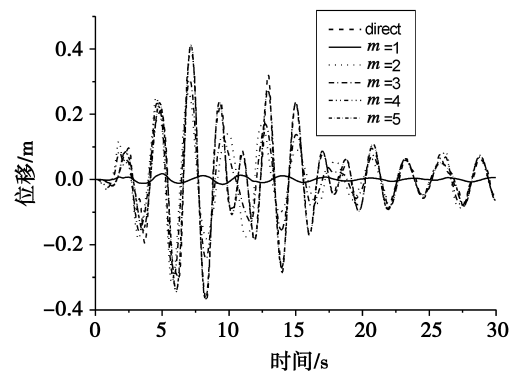


图 4 钢塔顶 X 向位移响应时程

Fig 4 Horizontal displacement at the top of the steel tower in X direction

度, (2)较少振型反应叠加的时程曲线波峰、波谷的位置也与直接积分结果差距较大。从图形上看,非比例阻尼情况(图4)相对于比例阻尼情况(图6),这两点更显著,这种差别显然是非比例阻尼特性造成的。为弥补此影响,对非比例阻尼系统应增加参与响应叠加的振型阶数。

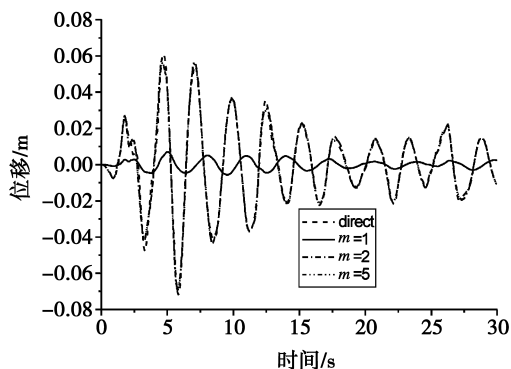


图5 钢筋混凝土框架顶 X 向位移响应时程

Fig 5 Horizontal displacement at the roof of the RC frame in X direction

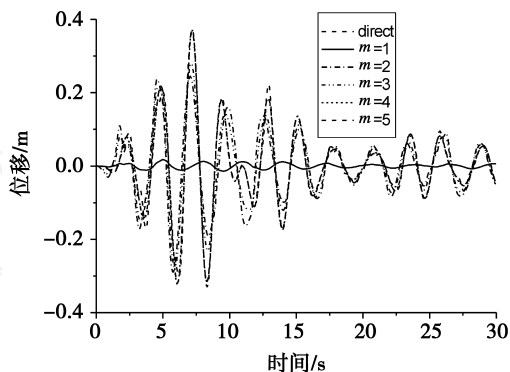


图6 钢塔顶按 0.05 比例阻尼 X 向位移响应时程

Fig 6 Horizontal displacement at the top of the steel tower in X direction with proportional damping ratio 0.05

如将此问题当成比例阻尼系统计算(阻尼比 0.05 的结果见图 6),则钢塔顶 X 向位移最大值为 0.366m,而按非比例阻尼系统计算相应值为 0.388m;即按比例阻尼计算的结果偏小(此例小了 5.7%)。

考察钢塔最下面单元弯矩计算精度(前几阶与前 30 阶振型叠加结果比)随参与叠加振型阶数的变化,发现此例前 5 阶时达 89%,前 10 阶时达 99.8%。

此例在 pentium4 微机 Windows XP 操作系统下,直接积分位移计算耗时 82s,取 5 阶振型非经典振型叠加计算耗时 11s,可见效率很高。

3 结语

混凝土楼顶钢塔“鞭梢效应”是由于钢塔刚度和阻尼均小于混凝土房屋的双重因素造成的,忽视二者中任一因素都将造成安全隐患。

高阶振型对顶塔地震响应有较大影响,要较准确地得到顶塔的地震响应,须增加参与叠加的振型阶数;考虑非比例阻尼特性时,参与叠加的振型阶数还应有所增加。

参与叠加的振型阶数应比满足位移精度要求的振型阶数至少多一倍以上时才能达到满意的内力结果,这点文[5]按比例阻尼计算结果相同。

参考文献:

- [1] Anil K Chopra. Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering (Second Edition) [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [2] 王依群, 李忠献. 不同阻尼特性材料组合结构的弹塑性动力时程响应计算[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 76~80.
- [3] P. E. Pinto. Seismic design of concrete structures [M]. 1987. 62~64.
- [4] 王依群, 滕祥泉, 安国亭. Earthquake analysis for the system of RC building with a steel tower[J]. Transactions of Tianjin University, 2005, 11(5): 376~380.
- [5] 丁幼亮, 李爱群. 高振型对高层建筑顶部钢塔楼地震反应的影响分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 100~102.