

剪切型悬挂结构动力特性的研究

徐彬¹, 黄丽艳²

(1. 云南省教育厅, 云南 昆明 650223; 2. 昆明理工大学 建工院, 云南 昆明 650051)

摘要: 建立了剪切型悬挂结构的连续化模型, 从无限自由度剪切杆的运动方程出发, 给出了悬挂结构与主体结构之间的运动关系表达, 引入边界条件, 推导出了剪切型悬挂结构的频率及振型方程. 应用 MATLAB 编程, 结合算例, 对剪切型悬挂结构的频率及振型进行了求解, 从结果的分析来看, 悬挂结构具有较好的减震效果.

关键词: 悬挂结构; 连续化模型; 动力特性

中图分类号: TU972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)03-0056-03

Study on Dynamic Characteristics of the Shear Structure with Suspended Structures

XU Bin¹, HUANG Li-an²

(1. Department of Education in Yunnan, Kunming 650223, China;

2. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: A continuous model of the shear structure with suspended structures is founded. The motorial relationship of the suspended structure and main structure is given based on the primate equation of infinite element and the frequency equation, and the form of vibration is solved by introducing the border refrains. At the same time, an example is offered in which the frequency and form of vibration of the shear structure are induced by using MATLAB language. The result shows that the shear structure with suspended structures has the better anti-seismic functions.

Key words: suspended structure; continuous model; dynamic behavior

0 引言

悬挂结构是将结构的部分荷载(如楼板)通过吊杆悬挂于大梁或柱上形成的一种复合结构体系. 研究表明, 这种结构体系具有良好的抗震性能. 近年来, 国内的一些学者对其动力特性和减震性能进行了一些数值分析和试验研究^[1-3]. 文中采用了连续化模型, 从无限自由度剪切杆的运动方程出发, 引入边界条件, 给出了剪切型悬挂结构的频率和振型的解析表达式. 应用该表达式, 结合算例, 计算了剪切型悬挂结构的频率和振型.

1 基本假定与计算模型

1.1 基本假定:

- 1) 悬挂大梁的抗弯刚度无穷大;
- 2) 吊杆与大梁之间节点视为铰接;
- 3) 悬挂楼层采用单摆模型.

收稿日期: 2003-12-03. 基金项目: 云南省应用基础研究基金项目(项目编号: 2000E004R), 云南省教育厅科学研究基金项目(项目编号: 011106), 昆明理工大学课外学术创新基金.

第一作者简介: 徐彬(1963~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 高层建筑结构, E-mail: xb679610@sina.com.cn

1.2 计算模型

采用的计算模型如图 1. 其中: \bar{m}_1, \bar{m}_2 为主体结构的均布质量; m 为悬挂楼层的质量; GA_1, GA_2 为主体结构的剪切刚度.

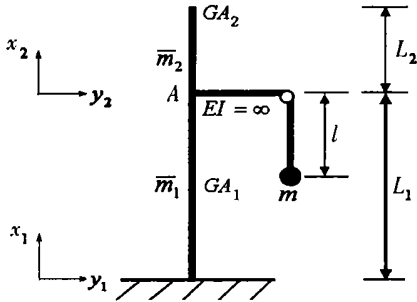


图 1 框架悬挂结构的动力计算模型

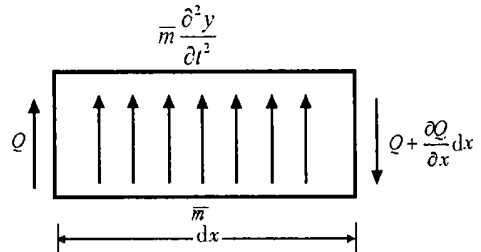


图 2 作用在微段上的力

2 剪切杆运动方程的推导^[4-5]

取一剪切杆微段分析如图 2 所示, 其平衡条件为:

$$\sum Y = 0$$

可得等截面剪切杆的动平衡方程:

$$\frac{\partial^2 \gamma}{\partial^2 x} - \frac{\bar{m}k}{GA} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

令 $K = \frac{GA}{k}$ 代入(1) 式, 其中 k 为截面剪应力不均匀系数, 可得等截面剪切杆的自由振动方程:

$$\frac{\partial^2 \gamma}{\partial^2 x} - \frac{\bar{m}}{K} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} = 0 \tag{2}$$

设其解为 $y(x, t) = y(x) \sin(\omega t + \varphi)$ 代入(2) 式整理后得自由振动方程:

$$\frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} + \lambda^2 y(x) = 0 \tag{3}$$

其中

$$\lambda^2 = \frac{\bar{m}}{K} \omega^2$$

其一般解为

$$y(x) = A \sin \lambda x + B \cos \lambda x \tag{4}$$

式中 A, B 为积分常数, 由边界条件确定. 将结构自悬吊梁的位置分为上下两段

上段: $y_2(x_2) = C \sin \lambda x_2 + D \cos \lambda x_2$

下段: $y_1(x_1) = A \sin \lambda x_1 + B \cos \lambda x_1 \tag{5}$

对于悬挂结构, y_g 为悬挂质点的位移, y_{L_1} 为 A 点位移, 则其运动方程为:

$$m\ddot{y}_g + \frac{mg}{l}(y_g - y_{L_1}) = 0 \tag{6}$$

其中: $y_{L_1} = y_2(0, t) = y_1(L_1, t) = y_1(L_1) \sin(\omega t + \varphi)$

设其解为 $y_g(x, t) = y_g(x) \sin(\omega t + \varphi)$, 并令 $\bar{\omega}^2 = \frac{g}{l}$ 代入(6) 式整理后得

$$y_g = \frac{\bar{\omega}^2}{\bar{\omega}^2 - \omega^2} y_1(L_1) \tag{7}$$

引入边界条件确定常数

$$y_1(0) = 0, y_2'(L_2) = 0, y_1(L_1) = y_2(0)$$

由悬吊大梁结点处水平力平衡(见图 3), 有

$$\sum Q = 0$$

即 $K_2 y_2'(0) + \frac{mg}{l}(y_g - y_1(L_1)) = K_1 y_1'(L_1)$

令 $\beta = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega^2}}$, 则 $\frac{mg}{l}(y_g - y_1(L_1)) = m\omega^2\beta y_1(L_1)$

将以上四个方程式整理得:

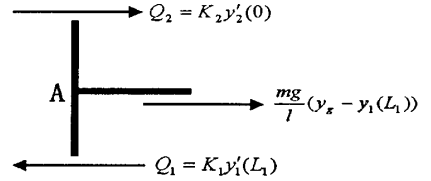


图3 结点受力图

$$\begin{cases} B = 0 \\ C \cos \lambda_2 L_2 - D \sin \lambda_2 L_2 = 0 \\ A \sin \lambda_1 L_1 - D = 0 \\ -AK_1 \lambda_1 \cos \lambda_1 L_1 + Am\omega^2\beta \sin \lambda_1 L_1 + CK_2 \lambda_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对于方程组(8), A, C, D 不能同时为 0, 否则结构处于无振动状态. 故有:

$$\begin{vmatrix} 0 & \cos \lambda_2 L_2 & -\sin \lambda_2 L_2 \\ \sin \lambda_1 L_1 & 0 & -1 \\ -K_1 \lambda_1 \cos \lambda_1 L_1 + m\omega^2\beta \sin \lambda_1 L_1 & K_2 \lambda_2 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

即

$$\begin{vmatrix} 0 & \cos \frac{n}{n+1} \lambda_2 L & -\sin \frac{n}{n+1} \lambda_2 L \\ \sin \frac{1}{n+1} \lambda_1 L & 0 & -1 \\ -K_1 \lambda_1 \cos \frac{1}{n+1} \lambda_1 L + m\omega^2\beta \sin \frac{1}{n+1} \lambda_1 L & K_2 \lambda_2 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

整理得:

$$K_1 \lambda_1 \cos \lambda_1 L_1 \cos \lambda_2 L_2 - K_2 \lambda_2 \sin \lambda_1 L_1 \sin \lambda_2 L_2 - m\omega^2\beta \sin \lambda_1 L_1 \cos \lambda_2 L_2 = 0 \quad (11)$$

特别地, 当 $m = 0, k_1 = K_2, \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 时可得等截面无悬挂结构的方程:

$$\cos(\lambda L) = 0 \quad (12)$$

利用 $\lambda_i^2 \frac{m_i}{K_i} \omega^2$ ($i = 1, 2$ 分别代表已悬挂位置为分界的主结构的下段和上段), 采用 MATLAB 编程计算即可求出结构的频率, 方程组(8)中, 令 $A = 1$, 求出 C, D ($B = 0$) 代入(5)中即得结构的振型函数.

3 算例分析

四层框架结构如图4所示^[6], 主结构的均布质量 $\bar{m} = 5.728 \times 10^4 \text{ kg/m}$, 主结构的抗剪刚度 $K = 1.4419 \times 10^5 \text{ kN/m}$, 楼层质量 $m = 42.26 \text{ t}$, 悬挂长度 $l = 0.5 \text{ m}$, 层高 $H = 3.3 \text{ m}, = 13.2 \text{ m}$.

3.1 频率

框架悬挂结构的频率与无悬挂框架结构的频率值见表1.

表1 框架悬挂结构的频率与无悬挂框架结构的频率的比较

悬挂位置	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
无悬挂	5.970 5	17.911 6	29.852 6	41.793 6	53.734 7	65.675 7
第一层	4.362 9	6.027 3	17.966 8	29.884 6	41.797 5	53.737 7
第二层	4.278 7	6.154 8	17.944 1	29.871 3	41.806 9	53.744 9
第三层	4.204 8	6.272 2	17.921 1	29.858 1	41.816 2	53.752 2
第四层	4.157 2	6.311 3	17.976 4	29.890 1	41.820 1	53.755 2

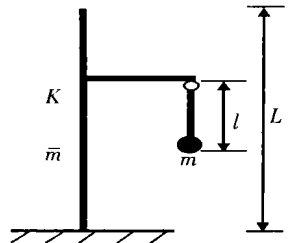


图4 四层框架悬挂结构

由表1可知, 受悬挂的影响, 结构的第一阶频率降低, 对结构的抗震有利; 随着悬挂位置的上升, 结构的基频减小, 悬挂在最顶层减震效果最好.

(下转第62页)

的选取、结构细部构造处理等,看似平常,却是结构设计艺术性的集中体现,是检验结构设计水平的重要指标,对结构工程造价有较大的影响。

3 结束语

设计阶段的投资控制是工程项目全过程中投资控制的重中之重。为有效地从根本上控制工程造价,取得良好的投资效益,应把控制重点转移到建设前期间段上来,尤其是设计阶段这一投资控制管理的盲区,更应受到重视。控制工程造价最有效的手段,是技术与经济的紧密结合,克服长期以来设计工作中技术与经济相分离的现象。即在设计阶段通过技术比较、经济分析和效果评价,力求做到在技术先进条件下的经济合理,及经济合理基础上追求技术先进,把控制造价的观念渗透到每一项技术与设计措施之中。

参考文献:

- [1] 王卓甫, 欧阳红祥. 工程项目控制[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000. 40~ 52.
- [2] 关柯, 王宝仁, 丛培经. 建筑工程经济与企业管理[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1997. 123~ 134.
- [3] 姚仁. 工程建筑监理概论[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2000. 210~ 218.
- [4] 钱昆润, 葛笏圃, 红星. 建筑经济与建筑技术经济[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993. 48~ 56.
- [5] 罗鼎材. 国内外建设工程造价的确定与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997. 82~ 96.
- [6] 徐大图. 工程造价的确定与控制[M]. 北京: 中国计划出版社, 1997. 104~ 115.
- [7] 尹贻林. 工程造价管理相关知识[M]. 北京: 中国计划出版社, 1997. 115~ 128.

(上接第58页)

3.2 悬挂结构挂于顶层时的振型图

注: 图中实线为无悬挂框架结构的振型, 虚线为悬挂框架结构的振型。

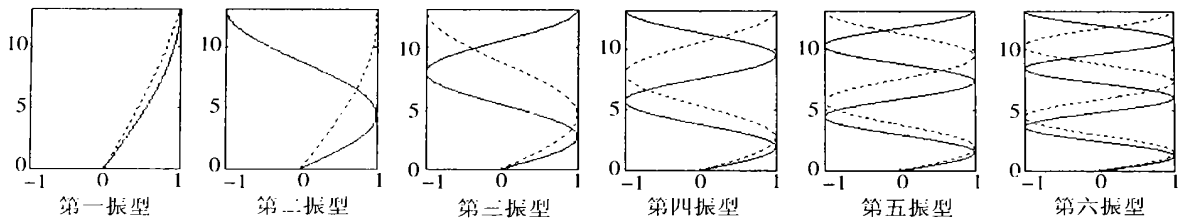


图5 悬挂结构挂于顶层时的前六阶振型图

4 结论

悬挂结构因受悬挂的影响,在地震力的作用下结构的第一阶频率降低,对结构的抗震有利;随着悬挂位置的上升,结构的基频减小,悬挂在最顶层减震效果最好。

参考文献:

- [1] 王玉朋, 魏琰. 悬吊质量结构的抗震计算及减震性能分析[J]. 建筑结构, 1990, (5): 2~ 8.
- [2] 徐彬, 田毅, 李佳彬. 悬挂结构动力特性分析[A]. 第十七届全国高层建筑结构学术交流会议论文集[C]. 杭州: 2002, 364~ 368.
- [3] 黄丽艳. 悬挂结构自由振动理论分析[毕业设计论文][D]. 昆明: 昆明理工大学建筑工程学院, 2002. 32~ 46.
- [4] R W 克拉夫著. 结构动力学[J]. 王光远译. 北京: 科学出版社, 1981. 195~ 197.
- [5] 杨弗康. 结构动力学[J]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 99~ 101.
- [6] 郑和平. 悬挂结构抗震性能的研究[毕业设计论文][D]. 昆明: 昆明理工大学建筑工程学院, 2001. 29~ 31.