

[文章编号] 1002-8528(2009)05-0004-06

基于人群行走仿真的 楼板振动分析方法及反应谱公式推导

韩小雷^{1,2}, 陈学伟¹, 毛贵牛¹, 郑 宜¹, 季 静^{1,2}

(1. 华南理工大学 高层建筑结构研究所, 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

[摘 要] 楼板在人群行走振动下的加速度成为评价楼板结构适用性的重要指标。欧美规程对楼板振动问题采用单自由度的稳态响应分析方法, 该方法过于简化, 理论公式适用性不强。本文编制了可与有限元分析软件接口的人行荷载时程生成程序 FVAP。基于多自由度楼板模型, 实现人群行走致使楼板振动的时程分析方法, 对特定边界条件、跨度及阻尼的楼板体系进行时程分析, 并将计算结果与楼板人行荷载试验进行对比, 表明该时程分析方法能较精确反映楼板人致振动的特性。本文还应用此方法对不同跨度、厚度及不同阻尼比的楼板结构进行算例分析, 回归得出基于多自由度模型的楼板振动加速度反应谱计算公式。该公式适用于房屋建筑的楼板舒适度的评估, 为实际工程中大跨度楼板的舒适度评估提出了具有工程意义的计算方法。

[关键词] 楼板振动; 时程分析; 人行荷载仿真; 加速度反应谱

[中图分类号] TU311.3; TU312⁺.1 **[文献标识码]** A

Research on Analysis Method for Floor Vibration and Formula Derivation of Response Spectra Based on Simulation of Crowd Walking

HAN Xiao-lei^{1,2}, CHEN Xue-wei¹, MAO Gui-niu¹, ZHENG Yi¹, JI Jing^{1,2}

(1. Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Key Laboratory of Subtropics Architecture of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

[Abstract] Occupant comfort, when large-span floor systems are subjected to crowd-induced vibrations, has become an important index to evaluate serviceability of structures. Harmonic vibration analysis procedure which takes floor system as a simply-supported single-degree of freedom system is introduced in European and American codes to deal with floor vibrations, which is oversimplified and inapplicable in many situations. This paper proposes a program FVAP (Floor Vibration Analysis Program) for the generation of load induced by human activities. Based on a multiple-degree of freedom model for floor vibration, the floor system with special boundary condition, span and damping is analyzed by time-history method which can be realized by an auto-interface for common finite element programs. Compared with the results of crowd-induced load experiment, the analytical results confirmed the accuracy of this analysis procedure in representing the characteristics of the crowd-induced floor vibrations. This method was applied to plenty of floor system analyses with different performance objectives, shapes and boundary conditions, and a formula of acceleration response spectra was obtained by regression method based on the multiple-degree of freedom model for the floor vibration. The research shows that the formula proposed in this paper is applicable for floor systems comfort evaluation of building structures and can offer a calculation method of considerable engineering significance for the comfort evaluation of the large span floor system in practical engineering.

[Key words] floor vibrations; time-history analysis; crowd walking stimulation; acceleration response spectra

0 研究背景

楼板振动问题是人体工程学与结构工程学的交叉课题, 国内研究工作较少。美国、日本、欧洲等一

些国家对此进行过一些研究并发布过有关设计指南, 如英国混凝土协会发布的《Critical review of guidelines for checking vibration serviceability of post-tensioned concrete floors》^[1]; 英国钢结构协会 (SCI) 与英国建筑业研究和信息协会 (CIRIA) 发布的《Design Guide on the Vibration of Floors》^[2]; 英国 SCI 发布的《Design Guide on the Vibration of Floors in

[收稿日期] 2008-08-28

[作者简介] 韩小雷 (1964-), 男, 博导, 教授

[联系方式] dinochen1983@yahoo.com.cn

Hospitals》^[3];美国钢结构协会(AISC)发布《Floor Vibration due to Human Activity》^[4]及加拿大国家建筑法规《National Building Code of Canada》^[5];我国现行规范标准还没有这方面规定。CHEN^[6]和 PAVIC^[1]的研究表明,采用有限元的时程分析可以得到非常理想的计算结果,但由于荷载处理的复杂性,实际应用中非常困难。

本文基于人群行走的规律,通过编制程序实现人群行走仿真模拟,生成人行走的荷载时程数据,自动接口有限元软件,避免了荷载数据处理的麻烦,实现楼板振动的时程分析。应用此方法对不同板厚、跨度及阻尼情况的楼板结构进行算例分析,回归得出基于多自由度模型的楼板振动加速度反应谱计算公式。

1 人行荷载仿真程序编制

楼板振动主要是由人群活动的动力荷载引起的,人群活动过程可以通过人群数量、每个人的体重、每个人的行走起点、行走方向、行走模式(包括步距、频率、冲击放大系数)等属性进行描述。为了得到楼板各点的荷载时程,需要对人群活动进行数值仿真。由于人群活动具有随机性,为简化仿真模型可做出以下假定:

- (1) 人的行走模式、开始时间是随机的;
- (2) 行走路线为直线,行人匀速行走;
- (3) 行人自重为 $700 \pm 145\text{N}$,属于正态分布随机变量。

根据上述理论,本文通过面向对象语言编制了人行荷载生成程序 FVAP(Floor Vibration Analysis Program),对特定行走边界的人群行走进行仿真,并得到人致动力荷载的时程数据。程序界面如图 1 所示。

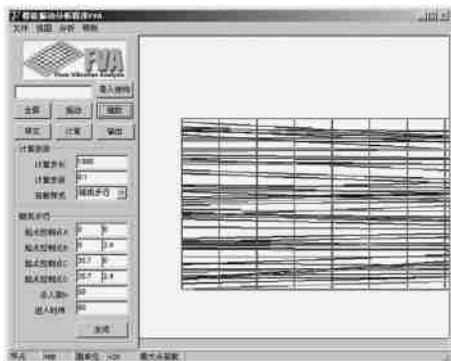


图 1 FVAP 界面

示,可导入楼板信息,划定活动边界、定义人群数量等。

通过该程序生成楼板动力荷载时程数据流量大,为方便工程应用,程序自动与结构有限元软件如 SAP2000、ETABS、MIDAS 等软件接口,实现数据流的导入。通过有限元软件可以对楼板进行动力时程分析。时程分析流程图如图 2 所示。

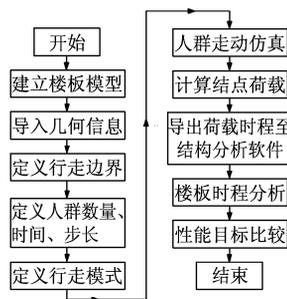


图 2 时程分析流程图

Wheeler 对一两跨的钢结构的人行天桥进行人行荷载试验^[9]。本文中时将时程分析结果同该试验结果进行对比,证明该分析方法的正确性。该天桥为两跨的钢结构,天桥截面如图 3 所示。天桥两跨长度分别为 16.32m 和 19.83m,楼板采用 16mm 的钢板,主梁采用截面 460UB 型钢,楼板与钢梁上翼缘焊接。在活荷载为 3.5kN/m^2 作用下的静力挠度为 $L/503$,其中 L 为主跨的长度。

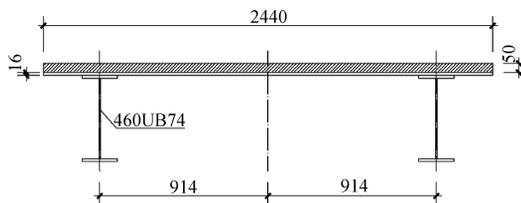


图 3 天桥截面图

通过程序计算生成荷载时程文件,并自动导入 SAP2000 中,该模型中某结点在行走人数为 60 人时荷载时程曲线如图 4 所示。

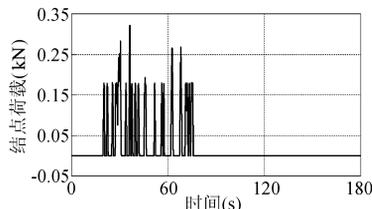


图 4 结点 430(N=60)竖向荷载时程

对人群数量为 1、15、30、60 人的四种工况下的楼板振动进行分析。四种工况下楼板竖向加速度时程如图 5 所示。

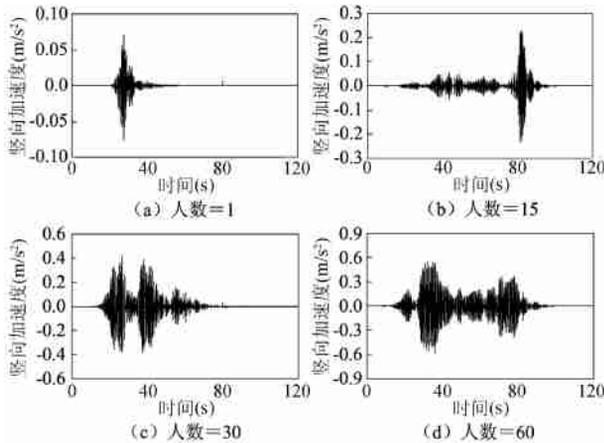


图 5 四种工况下竖向加速度时程曲线

四种工况的竖向加速度最大值与 Wheeler 进行的人行荷载试验进行对比,对比结果如图 6 所示。图中表明该时程分析结果比实测结果略大,其主要原因是外围结构的支承作用和阻尼的增大以及高阶模态的影响导致的差异。由此可以认为时程分析的结果比实际的结构效应偏于安全,可用于楼板振动分析。

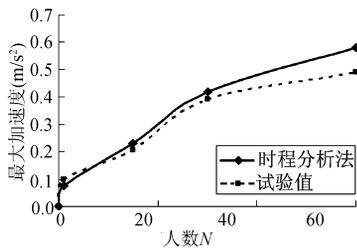


图 6 人行天桥最大加速度与人数关系

2 楼板振动时程分析

本文进行基于多自由度楼板模型的大量有限元算例分析,通过时程分析方法验算并归纳了楼板的振动性能。

2.1 建立有限元模型

采用有限元软件 SAP2000 对结构进行分析。分析模型为杆系单元与壳单元的整体模型,如图 7 所示。为简化分析,只对关注的楼板区域(即中跨楼板)进行网格细分,划分网格大小应小于步距(取 500mm),以便于节点时程荷载的输入。下端柱脚约束为铰接,上端柱脚释放竖直方向上的位移约束。

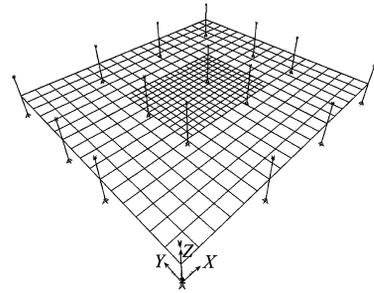


图 7 楼板结构有限元模型

2.2 人群移动仿真及荷载时程生成

楼板振动与行人数量有关,在楼板时程分析之前,应先确定人群密度。民用建筑楼板的活荷载按其不同使用功能按照我国《建筑结构荷载规范》^[10]取,以商场大厅为例,活荷载为 3.5 kN/m^2 ,频遇系数为 0.6,有效活荷载为 $3.5 \times 0.6 = 2.1 \text{ kN/m}^2$,相当于 $2.0 \div 0.7 = 3 \text{ 人/m}^2$ 的人群密度。不同荷载类情况下的人群密度值见表 1。在算例中根据楼板的面积即可得到人行荷载的总人数,见表 2。

表 1 不同荷载类别的人群密度取值

建筑类别	活荷载标准值 (kN/m^2)	频遇值 系数	有效活荷载 (kN/m^2)	人群密度 (人/m^2)
办公楼、医院	2	0.5	1	1.43
教室、会议室	2	0.6	1.2	1.71
食堂、餐厅	2.5	0.6	1.5	2.14
礼堂、剧场看台	3	0.5	1.5	2.14
商场大厅	3.5	0.6	2.1	3.00
无固定座位看台	3.5	0.5	1.75	2.50
健身房、舞厅	4	0.6	2.4	3.43

表 2 不同楼板及进入行人数量

楼板			人群密度(人/m^2)				
B (m)	L (m)	A (m^2)	1.43	2.14	2.50	3.00	3.43
6	6	36	51	77	90	108	123
4	6	24	34	51	60	72	82
3	6	18	26	39	45	54	62
2	6	12	17	26	30	36	41
3	3	9	13	19	23	27	31
4	4	16	23	34	40	48	55
8	8	64	91	137	160	192	219
10	10	100	143	214	250	300	343

3 人群致使楼板振动规律分析

为了考虑不同荷载形式与不同楼板形式,包括楼板形状、板跨、板厚及材料阻尼比等给楼板振动带

来的影响,以楼板振动最大竖向加速度值为性能目标,分别作了以下分析对比。

3.1 人行路径的影响

分析工况:附加恒载 1.5kN/m^2 ,活荷载 2.0kN/m^2 ,阻尼比设为 0.05 ,分别取楼板结构跨度为 $6\text{m} \times 2\text{m}$, $6\text{m} \times 3\text{m}$, $6\text{m} \times 4\text{m}$, $6\text{m} \times 6\text{m}$ (板厚取为 120mm) 进行时程分析,结果取五组随机荷载时程样本得到的竖向加速度平均值,如图8所示。

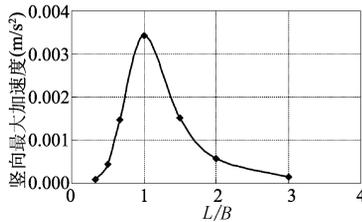


图8 人行路径对楼板加速度的影响

由图8可知:

(1) 由于控制相同的板厚,即结构刚度随板跨的增加而减小。在相同的板厚和外荷载情况下,保持矩形板一边相同,另一边变化时,随着 L/B 增加,楼板竖向振动加速度值先不断增加,到 $L = B$ 时得到极值,然后随着 L/B 的增加开始减小;

(2) L/B 值互为倒数,即矩形板形状相同,人群荷载行走路径不同(人群从长跨边或是短跨边进入楼板)。

将这两组结果相比较,其竖向加速度最大值基本相同,可以得知,楼板竖向振动加速度值与人群荷载的路径没有关系。

3.2 宽跨比的影响

分析工况:附加恒载 1.5kN/m^2 ,活荷载 2.0kN/m^2 ,阻尼比设为 0.05 ,分别取楼板结构跨度为 $6\text{m} \times 2\text{m}$, $6\text{m} \times 3\text{m}$, $6\text{m} \times 4\text{m}$, $6\text{m} \times 6\text{m}$ 。为了得到不同宽跨比矩形板在相同外荷载挠度基本相同的情况,采取了取不同板厚的方法。按照传统单自由度楼板体系理论,控制挠度相同,即结构的整体刚度近似。板厚分别取为 40 、 75 、 120 和 240mm ,控制楼板最大竖向位移大致相同为 0.94mm 左右。结果取五组随机荷载时程样本得到的竖向加速度平均值,如图9所示。由图可知:

(1) 在 L/B 值分别为 $1/3$ 、 3 和 1 的情况下楼板振动的竖向加速度值为极小值,在 L/B 为 $1/2$ 和 2 处得到了极大值;

(2) 一般当 L/B 值为 $2 \sim 3$ 时,即可认为楼板为单向板。从算例结果可得知,当控制楼板挠度相似时,单向板楼板振动竖向加速度值随着 L/B 的增加而减小,即长边跨度相同时,短跨边越小,楼板振动竖向加速度值越小;

(3) 当 L/B 小于 2 时,可认为楼板为双向板,从算例结果中可以得知,当控制楼板挠度相似时, L/B 越接近于 1 ,双向板楼板振动竖向加速度值越小。可认为控制相同挠度的双向板中,方形板对楼板振动加速度值的约束效果最好;

(4) 从 L/B 值互为倒数的结果比较得知,其竖向加速度最大值基本相同,可以进一步证明 3.1 中的结论:楼板竖向振动加速度值与人群荷载的路径没有关系。

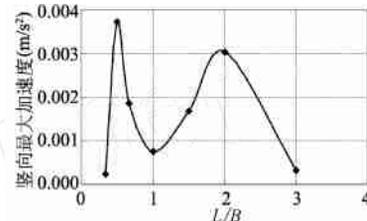


图9 宽跨比 L/B 对楼板加速度的影响

3.3 外荷载、楼板跨度及厚度的影响

本文研究外荷载,结构阻尼比,自振频率与楼板振动竖向最大加速度值的关系。算例的楼板结构属性如表3所示,人群密度及进入行人数量如表2所示,共制作 $5 \times 5 \times 6 = 150$ 个楼板算例,每个算例进行五个随机人群荷载样本的时程分析,以得到人群致使楼板振动的规律。

表3 方形板算例属性

B (m)	L (m)	板厚选取 (mm)			
		80	100	120	150
3	3	80	100	120	150
4	4	80	100	120	150
6	6	120	150	180	200
8	8	180	200	220	240
10	10	220	240	260	280

3.3.1 外荷载的影响

将控制条件取为相同板跨、板厚(即控制楼板结构的刚度),改变楼板结构的外荷载得到的结果进行分析。由计算结果可知:

(1) 结构刚度不变,随着有效活荷载的增加,楼板挠度增加,楼板结构的周期变长。但是周期和竖

向最大位移的增加量都很小,而且随着板厚的增加,两者的增量越来越小。

(2) 板跨及板厚确定,即结构的刚度确定。人群荷载的增加导致结构激振力增加,但结构的受激振质量也在增加,楼板振动竖向最大加速度值变化规律不是很明显。

3.3.2 楼板跨度的影响

在此部分将控制条件取为相同板厚、外荷载,而改变楼板结构的跨度得到的结果进行分析。取 180mm 在 3、4、6 和 8m 跨的典型算例结果进行分析,不同系列数据为不同有效活荷载情况(单位: kN/m^2),结果如图 10 所示。图 10 中有二个系列有效活荷载均为 1.5kN/m^2 ,前者由活荷载 2.5kN/m^2 ,频遇值系数为 0.6 得到;后者由活荷载 3.0kN/m^2 ,频遇值系数为 0.5 得到。

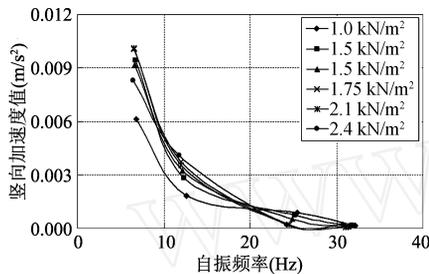


图 10 180mm 板在不同板跨、不同人群密度下最大竖向加速度响应

由图 10 可知板厚不变,板跨增加时,结构刚度降低,结构自振频率变小,其频率分布为 5~30Hz 左右。楼板振动的竖向加速度值受外荷载影响不大,其值随着板跨增加而增加。

3.3.3 楼板厚度及阻尼比的影响

板厚的取值不仅影响到荷载作用,而且还影响到结构的刚度。在此部分比较相同板跨和外荷载下的算例结果。图 11 为阻尼比分别为 0.02 与 0.05 时的计算结果(取楼板自振频率范围为 4~20Hz)。相同板跨及外荷载,不同板厚的计算结果基本在同一自振频率区段。在同一频率区段中按外荷载取值分为不同系列,板厚对楼板振动加速度值的影响可从图 11 中看出。

楼板竖向加速度值,并不能得到因为板厚增加,楼板结构挠度减小,其值也减小的规律。在同一频率区段内,楼板振动竖向加速度值随楼板厚度变化即结构自振频率变化有明显振荡现象,单调增加板

厚不能总是得到楼板振动的竖向加速度值减小的效果。如图中楼板结构自振频率为 9~15Hz(板跨为 6m)时的计算结果,楼板振动竖向加速度值随着板厚的增加先增加后减小。

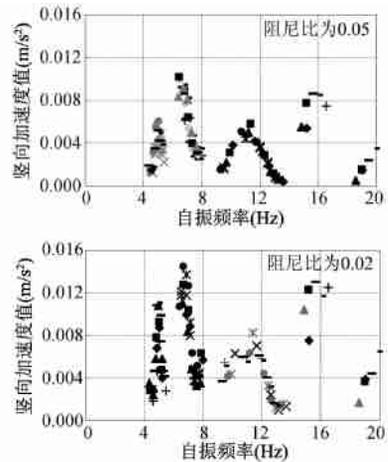


图 11 板厚及阻尼比对楼板加速度的影响

阻尼比对楼板振动的影响比较明显,阻尼比越大,楼板振动竖向加速度大值越小。

4 加速度反应谱公式推导

根据大量算例,选取自振频率在 4~14Hz 范围内的算例结果进行归纳分析,参考 AISC/CISC 在名为“Floor Vibration Due to Human Activity”的钢材设计资料中提出的评价方法^[11],推导出适用自振频率在 4~14Hz 范围内的楼板振动加速度反应谱公式。

假定 $a/g = P/W$,即楼板振动加速度表达式可写成:

$$a/g = \alpha \times (P/W) = (e / \beta) \times (P/W) \quad (1)$$

式中, P 为人们行走产生的作用力(kN); W 为结构阻抗有效重量(kN); g 为重力加速度(9.8m/s^2); e 为关于结构自振频率 f_n 的无量纲参数; β 为结构阻尼比。

楼板振动竖向加速度值与阻尼比成反比,将其余影响因素归并为关于楼板结构自振频率 f_n 的无量纲参数 e ,根据算例结果进行参数分析,回归得到关于 f_n 的四次多项式:

$$\begin{aligned} &= -0.0143f_n^4 + 0.5172f_n^3 - 6.7737f_n^2 \\ &+ 37.4984f_n - 76.1053 \end{aligned} \quad (2)$$

拟合情况如图 12 所示,回归得到的反应谱计算公式可以较好的描述楼板振动竖向加速度值在楼板

结构自振频率 4~14Hz 范围内的震荡现象。

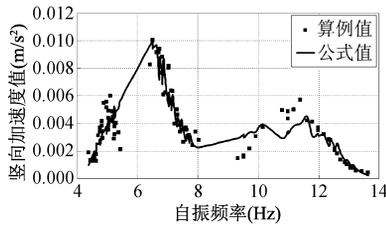


图 12 算例值与公式值比较

5 结论

对于人行荷载导致的楼板振动,通过限制其位移或自振频率可以达到限制振幅的目的,但对加速度的控制效果不是十分的理想。然而使用者对舒适度的要求主要体现为对楼板振动加速度的要求,在高频区段甚至有可能是速度的要求,所以针对楼板竖向振动加速度设计思考是必要的。

随着计算机技术的发展,楼板振动分析应该从简化计算发展到计算机分析。本文通过编制程序实现了人行荷载的仿真并得到人行荷载时程。通过数据流的导入导出实现楼板振动的有限元分析,该方法能反映楼板结构的动力特性与荷载的时程特性,且便于工程应用。根据大量算例分析,归纳出了楼板振动的加速度反应谱方法,对于工程应用有一定参考意义。

[参考文献]

- [1] PAVIC A, REYNOLDS P, WALDRON P. Critical review of guidelines for checking vibration serviceability of post-tensioned concrete floors[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(3): 21~31.
- [2] WYATT, T. A. Design guide on the vibration of floors[S]. A steel Construction Institute, 1989.
- [3] S.J. Hicks, P.J. Devine, Design guide on the vibration of floors in hospital[S]. The Steel Construction Institute, 2004.
- [4] Murray TM, Allen DE, Ungar EE. Floor vibration due to human activity[S]. 11th Steel Design Guide Series. 1997.
- [5] National Research Council of Canada. The Supplement to the National Building Code of Canada[S]. Ottawa, 1995.
- [6] CHEN Y. Finite element analysis for walking vibration problem for composite precast building floors using ADINA: modeling, simulation, and comparison[J]. Computer and Structures, 1999, 72(4): 109~126.
- [7] Bachmann, Case studies of structures with man-induced vibration [J]. Journal of Structural Engineering. 110(2), 1992, 401~418.
- [8] J. G. S da Silva, P. C. G da S. Vellasco, S. A. L de Andrade, An evaluation of the dynamical performance of composite slabs [J]. Computers and Structures, 2003, 81, 1905~1913.
- [9] Sarah E. Muring, Bruce R. Ellingwood, Guidelines to minimize floor vibration form building occupants [J]. Journal of Structural Engineering. Vol. 120. 1994, 507~526.
- [10] 国家标准 GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S].
- [11] J. G. S da Silva, P. C. G da S. Vellasco, S. A. L de Andrade, Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads [J]. Computers and Structures, 2007, 85, 1693~1703.

(上接第3页)

从本文的计算结果看,加铅隔震垫中含铅量的反向设置效应更加明显,例如,当上部结构刚度偏心距比为 0.3 时,隔震层初始刚度偏心距比要达到约 0.15,才能使减扭效应最佳。

5 结论

本文在高阻尼橡胶垫单向双折线非线性假设的基础上,运用塑性流动法则,建立了平扭耦联隔震体系隔震层的双向非线性弹塑性本构关系计算模型及其动力计算方程。通过隔震层模型的计算分析,得到以下结论:在橡胶垫中加铅,且适当选取屈服比,

可以较好的抑制隔震体系的地震效应和隔震层的位移;隔震层初始刚度偏心距沿上部结构刚度偏心距反向适当位置设置时,可以使隔震体系的扭转效应明显减低。

[参考文献]

- [1] 李向真. 平转耦联隔震体系的简化模型及有关参数变化的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 3, 163~166.
- [2] 向伟明, 李向真. 考虑扭转耦联隔震结构简化体系的地震时程反应分析及有关参数的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2004, 6, 15~19.
- [3] 武田寿一. 建筑物隔震、防振与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997, 4.