

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805048

博物馆结构隔震前后楼层反应谱及设计谱

王 亚,杨维国,王 萌,刘 佩

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:为得到博物馆隔震前后的楼层反应谱及设计谱以进行附属结构的防震设计,首先建立了非隔震、隔震两种博物馆结构有限元模型,并通过环境振动测试验证模型的准确性.然后选取了 7 条罕遇地震波进行时程分析,通过加速度峰值、频谱两参数进行隔震前后的楼层波及其与地震波的差异分析.进而将楼层波作为输入,通过 MATLAB 程序计算非隔震、隔震结构对应的楼层加速度反应谱,并根据地震抗震设计谱理论拟合用于附属结构设计的楼层设计谱.研究表明:有限元模型的动力特性与振动实测结果吻合较好;隔震后楼层加速度峰值较非隔震峰值降低约 75%,楼层波卓越频率均与两种结构对应的自振频率相吻合,结构起主控作用;楼层反应谱是地震波与主结构共同作用的结果,反映二者的特性;最后得到了加速度标准化设计谱曲线及数学表达,隔震前、后设计谱划分区段不同,非隔震楼层设计谱有 1 个平台段,隔震楼层设计谱有 2 个平台段,设计谱研究成果可用于不同结构内部展陈等附属结构的防震设计.

关键词:非隔震;隔震;楼层波;频谱;楼层加速度反应谱;设计谱

中图分类号: TU311;TU317

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0125-08

Floor response spectrum and design spectrum of museum structure before and after isolation

WANG Ya, YANG Weiguo, WANG Meng, LIU Pei

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To obtain the floor response spectrums and design spectrums of museum before and after isolation and perform seismic protection design for accessory structure, two finite element models of seismic non-isolated and isolated museums were established and verified through environment vibration tests. Seven seismic motions were selected, and the difference between floor waves and seismic waves was analyzed through peak acceleration and frequency spectrum. Taking the floor waves as the input, the floor acceleration response spectrums before and after isolation were calculated through MATLAB. The design spectrums were fitted according to the theory of seismic design spectrum. The results show that the dynamic characteristics of finite element model (FEM) are in a good agreement with test values. The peak acceleration of isolated structure is about 75% lower than that of the non-isolated structure. The predominant frequency of floor waves is the natural frequency of structure, which is mainly controlled by the main structure. The floor acceleration response spectrums are the results of earthquake working together with structure, which reflects the characteristics of both. The floor acceleration design response spectrums and mathematical formulas are obtained and divided into different sections before and after isolation. The non-isolated design response spectrum has 1 flat and the isolated design response spectrum has 2 flats. The research results of the design spectrum can be used in the seismic protection design of the accessory structures in different structures.

Keywords: seismic non-isolation; seismic isolation; floor wave; frequency spectrum; floor acceleration response spectrum; design spectrum

近些年强烈地震对文物造成巨大损害^[1-2]. 目前抗震设计规范^[3]只保证了馆舍及人员的安全,文物防震规范^[4]也只是对文物有初步的安全要求,缺乏相关的防震研究方法,亟需开展展陈等附属结构

的防震研究. 结构隔震前后的动力特性差异较大,地震下的楼层响应也大为不同. 但目前基本都将地震波作为展陈文物的分析输入,没有考虑馆舍传递的影响^[5],应建立结构模型,分析楼层波与地震波的差异,并用楼层波作为附属结构防震分析的输入.

楼层反应谱是附属结构抗震设计重要依据^[6]. 目前楼层反应谱的研究主要针对考虑土-结构相互作用的核电站类结构,复杂且不适用于隔震结构. 经

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 北京交通大学基本科研业务费(2017YJS145);

国家自然科学基金(51578046)

作者简介: 王 亚(1990—),女,博士研究生;

杨维国(1973—),男,教授,博士生导师

通信作者: 杨维国, wgyang1@bjtu.edu.cn

典楼层反应谱方法^[7]适用于质量较轻的附属结构,不考虑与主结构之间的动力相互作用,具有理论清晰、计算简便的优势.近年来,Sankaranarayanan 等^[8]建立了多种结构的二维固结分析模型,以经典反应谱的方法研究了结构线性及非线性阶段的楼层反应谱. Chaudhuri 等^[9]对一个 8 榀钢框架进行参数分析,计算附属结构响应.当前相关研究主要针对非隔震结构,对隔震结构楼层反应谱的研究相对较少,并欠缺用于附属结构设计的设计反应谱.

本文选取国内某大型博物馆,建立非隔震、隔震两种有限元模型,通过环境振动实测验证模型准确性.选取 7 条罕遇地震波进行时程分析,从加速度幅值、频谱两方面研究隔震前后楼层波及与地震波的差异.并以楼层波作为分析输入,对非隔震、隔震结构楼层反应谱进行计算,拟合出用于展陈等附属结构设计的标准化设计谱,指导附属结构设计,形成附属结构的防震设计方法,研究路线见图 1.

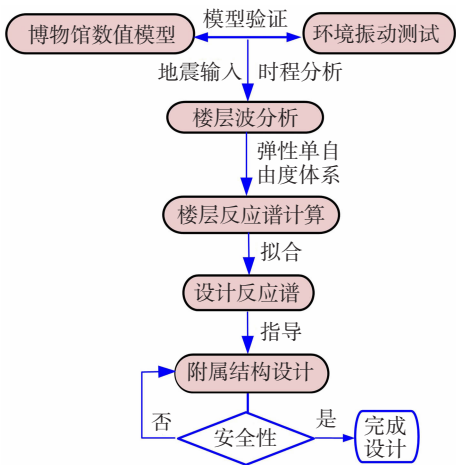


图 1 研究路线
Fig. 1 The research route

1 两种博物馆模型建立与验证

研究基础为国内某博物馆,建筑平面为回字形,平面尺寸 100 m×100 m,总高 37.2 m.地上 6 层,地

下 2 层,1~3 层为展厅,层高 7.6 m;4~5 层层高 3.8 m;6 层层高 2.6 m.结构 1~3 层为型钢混凝土框架—钢支撑体系,4~5 层为混凝土框架结构.工程所在地区的抗震设防烈度为 8 度,设计地震分组为第 2 组,场地类别为Ⅲ类,基本加速度值为 0.2 g.

实际结构为隔震结构,隔震层设在地下一、二层之间.隔震支座采用铅芯 LRB800、LRB1000 和无铅芯 LB800、LB1000 四种橡胶支座,共 166 个.根据荷载大小以单支和双支的形式进行平面布置.

1.1 结构有限元模型建立

为研究结构隔震前后的楼层波及楼层反应谱特性,建立了博物馆隔震前后的两种三维精细有限元模型,即“隔震、非隔震”两种基础形式,如图 2 所示.由于隔震层将上部结构与地面隔开,不考虑隔震层以下部分对上部结构的影响.非隔震模型结构底部采用固结的约束形式.

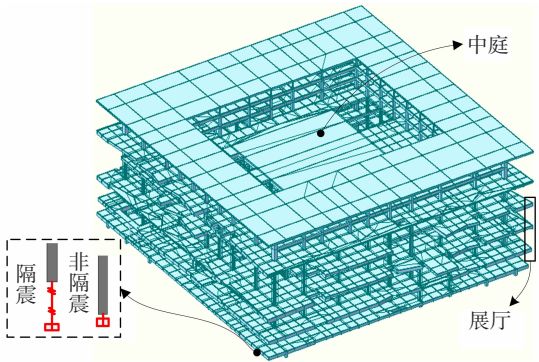


图 2 博物馆结构有限元模型
Fig. 2 Finite element model of the museum structure

博物馆模型采用 MIDAS/Gen 建立.其中网架结构为空间铰接的杆系模型,框架梁、柱均用梁单元模拟,剪力墙用墙单元模拟,楼板用板单元模拟.结构整体模型为高次超静定结构,杆件单元是单向受力单元,同时结构采用刚性楼板的假定.非隔震模型结构底部采用固结的约束形式,隔震模型的 4 种规格橡胶隔震支座的参数见表 1.

表 1 橡胶隔震支座规格参数

Tab. 1 Parameters of rubber isolation bearings

支座	竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服前水平刚度/ (kN·m ⁻¹)	屈服后水平刚度/ (kN·m ⁻¹)	屈服力/kN	支座刚度/ (kN·m ⁻¹)	等效水平刚度/ (kN·m ⁻¹)	等效阻尼比/%
LRB800	3 270	16 149	1 242	161	—	2 108	556
LRB1000	5 221	24 597	1 892	251	—	3 212	847
LB800	2 885	—	—	—	1 191	—	—
LB1000	4 649	—	—	—	1 815	—	—

1.2 模型自振特性分析

对隔震、非隔震结构模型进行特征值分析,得到前 20 阶的模式计算结果.非隔震模型、隔震模型的自振周期分别为 1.15 s、3.34 s.两种模型前三阶振

型见图 3,其中灰色轮廓表示变形前,蓝色表示变形后.采用隔震技术后主结构周期延长.同时,第二阶振型由“扭转”变为“Y 向平动”,改善了结构的扭转效应,对结构较为有利.

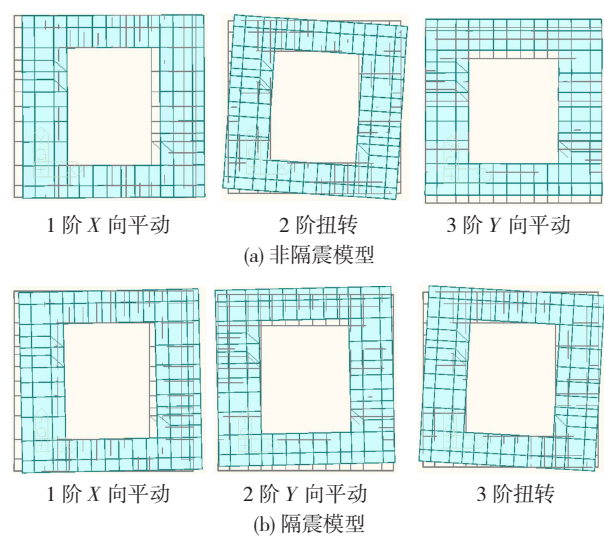


图 3 模型前三阶振型

Fig. 3 The first three mode shapes

1.3 模型振动实测验证

对实际博物馆结构进行环境振动测试,以验证模型准确性.测试采用 INV3018C 型 8 通道的 24 位信号采集仪,941B 型拾振器,利用软件 DASP - V10 进行信号采集及记录.进行了水平向和竖向 2 工况的测试,测试现场见图 4(a)、(b).工况 1:一层大厅的 4 角点布置 8 个水平向的加速度传感器,分别为测点 1~4,如图 4(c)所示;工况 2:在博物馆东南角楼梯间的各层楼板均布置 2 个水平加速度传感器.采样频率均为 512 Hz,采样时长为 20 min.

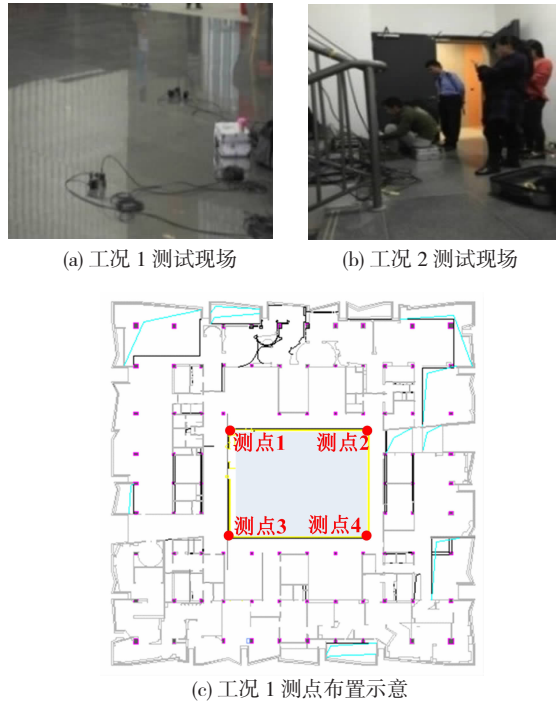


图 4 环境振动测试

Fig. 4 Environmental vibration test

动力特性识别方法为通过最小二乘技术改进的频域分解法^[10];利用测试时程计算可得各工况的功

率谱密度(PSD)及奇异值谱(SV).利用奇异值谱峰值识别得到结构振型;利用奇异值谱峰值附近数据的相关函数跨越零点次数来确定自振频率.

提取博物馆模型前 3 阶模态.环境振动测试为微振动,支座并未发挥隔震作用,故与非隔震模型的结果进行对比,见表 2.非隔震有限元模型模态与振动实测识别结果相符合,验证了模型的准确性,可用于后续地震作用下的时程分析.

表 2 振动实测与有限元模态对比

阶数	自振频率/ f /Hz		振型	
	实测	有限元(非隔震)	实测	有限元(非隔震)
1	0.90	0.88	X 向平移	X 向平移
2	1.65	1.60	扭转	扭转
3	2.26	2.21	Y 向平移	Y 向平移

2 隔震前后楼层波特性分析

2.1 地震波的选取与计算

对 2 种结构模型进行罕遇地震时程分析,输入加速度最大值为 0.4 g .从 PEER 太平洋地震数据库中,按照抗震设计规范^[3]目标反应谱(场地、地震分组等)选取合适的地震波^[11],生成对应的地震反应谱,并与目标反应谱进行对比.本文共选取 7 条地震波(5 条实际地震波:Imperial, Superstition719, Superstition724, San Fernando, Taft; 2 条拟合人工波:RG1, RG2).将生成的目标反应谱与地震波反应谱均值进行对比,见图 5.地震波反应谱均值与目标谱拟合度较好,选波合理.

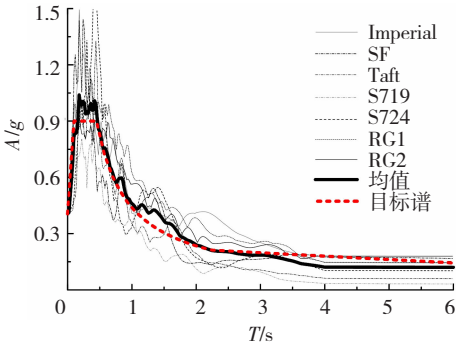


图 5 地震波反应谱与目标谱对比

Fig. 5 Comparison of earthquake response spectra and target spectrum

考虑到非隔震模型在罕遇地震作用下会进入到塑性阶段,在进行地震波时程分析时需给结构布置塑性铰.梁铰为弯矩($M-M$)塑性铰,武田三折线滞回准则.柱为轴力弯矩相关的(PMM)铰,随动硬化滞回准则.将选取的 7 条波沿结构 X 轴与 Z 轴双向输入,进行地震作用下的时程分析.模型同楼层的楼层波无差异,故提取楼层同一位置处的楼层波进行

分析,共 9 个楼层位置处的 63 条波.选取幅值、楼层波卓越频率 2 个主要特征参数,分析隔震前后楼层波与地震波的差异.

2.2 加速度幅值差异

地震波输入的加速度峰值为 4 m/s^2 ,为研究隔震前后楼层波幅值的差异,提取非隔震、隔震模型每层 7 条楼层波的加速度峰值均值 $A_{\max}$ 进行对比,见图 6. 其中 -2 层为隔震层,1~3 为展厅.

由图 6(a)可知,非隔震结构各层的加速度峰值 $A_{\max}$ 基本均大于地震波峰值 4 m/s^2 ,且随着层数的增加递增,顶层峰值为 6 m/s^2 ,非隔震结构对地震作用有放大效应.由图 6(b)可知,隔震结构各层加速度峰值 $A_{\max}$ 均较小,范围为 $1\sim 2\text{ m/s}^2$,隔震后楼层加速度明显降低.2 种模型展厅处 $A_{\max}$ 最低,由于展厅位于地上 1~3 层,楼层位置低,且这 3 层在型钢混凝土框架的基础上增加了钢管支撑,增加了展厅处结构的局部刚度,降低了结构变形和加速度响应.图 6(b)中,1~3 层展厅处的加速度峰值约为 1.1 m/s^2 ,较非隔震加速度峰值降低约 75%.

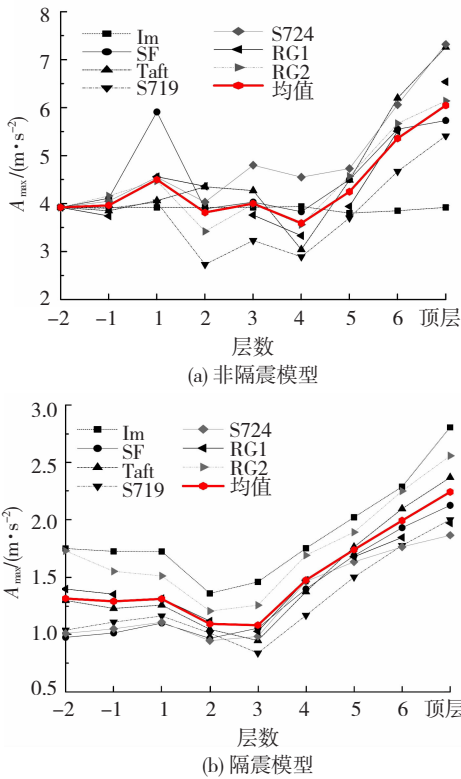


图 6 加速度峰值-层数变化曲线

Fig. 6 Curve of peak acceleration-layer

2.3 频谱差异

为进一步分析隔震前后楼层波及与地震波的差异,通过快速傅里叶变换得到非隔震、隔震结构各层楼层波的频谱曲线^[12],并与地震波频谱特性进行对比.同时,为了较清晰地判断隔震前后楼层波主要的频段,本文定义每层的 7 条楼层波频谱均值曲线峰

值点对应的峰值频率为楼层波卓越频率,并对比分析隔震前后楼层波卓越频率与地震波卓越频率、结构自振频率的关系,对比结果见图 7,其中,地震的卓越频率为 1.12 Hz (卓越周期为 0.9 s).

由图 7(a)、(b)可知,隔震后结构周期延长,自振频率由 0.88 Hz 降低至 0.33 Hz ,并远离地震波的卓越频率 1.12 Hz ;无论非隔震结构还是隔震结构,各层提取的楼层波卓越频率均与对应的结构自振频率相吻合,随着层数增加保持不变.故楼层波卓越频率反映结构的自振特性,结构起主控作用;楼层波频谱与地震波频谱相差较大,高频成分得到削弱,说明地震波在结构传递中,结构对地震波频率有一定的过滤作用,隔震结构滤波作用更加明显.

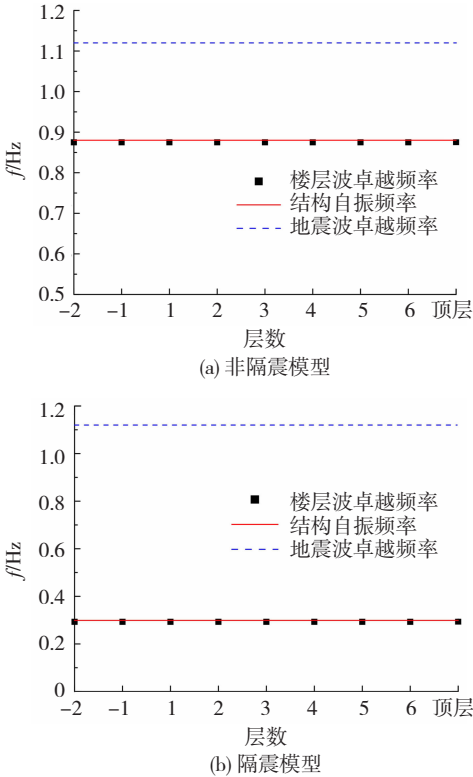


图 7 楼层波卓越频率

Fig. 7 Predominant frequency of floor waves

综上分析,结构隔震前后所得楼层波与地震波在加速度幅值、频谱上差异均较大,且隔震后楼层波 $A_{\max}$ 与卓越频率显著降低.故在进行展陈等附属结构地震分析时应该根据具体结构类型(隔震与否),提取合适的楼层波作为其分析输入,而非地震波.

3 楼层反应谱分析及拟合

3.1 楼层反应谱计算理论

为估计馆内展陈等轻质附属结构的加速度响应,对非隔震、隔震结构楼层加速度反应谱进行计算,并分析楼层不同位置对楼层反应谱的影响以及分析隔震前后反应谱的特性差异.为便于分析,本文

采用经典楼层反应谱的计算方法,基本假定:

- 1) 附属结构计算模型为弹性单自由度体系.
- 2) 鉴于附属结构质量远小于所在楼层质量,不考虑附属结构与主结构的动力相互作用.
- 3) 水平方向只考虑 X 向的时程输入.

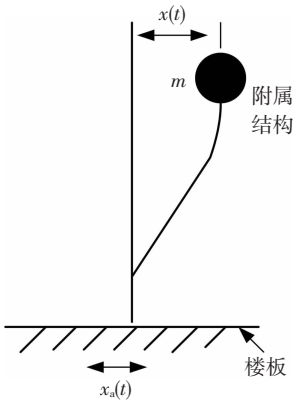


图 8 楼层反应谱计算简图

Fig. 8 Calculation diagram of floor response spectrum

图 8 为附属结构计算简图,楼层反应谱计算方法:对于固定在刚性楼板上的弹性单自由度体系,在楼层运动水平位移分量 $x_a(t)$ 作用下发生振动.设弹性体系的质量为 m ,刚度为 k ,阻尼系数为 c ,其运动平衡方程^[13] 为

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = -mx''_a(t), \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为质点相对楼板的位移. 设 $\xi = c/(2m\omega)$, $\omega^2 = k/m$,代入式(1) 可得

$$x''(t) + 2\xi\omega x'(t) + \omega^2 x(t) = -x''_a(t). \quad (2)$$

假设体系的初位移和初速度均为 0,式(2) 微分方程的解可以利用 Duhammel 积分算得

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_d} \int_0^t x''_a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau, \quad (3)$$

式中: $\omega_d = \omega \sqrt{1-\xi^2}$ 为有阻尼自振频率. 对 $x(t)$ 求两次导数可得到加速度 $x''(t)$,即可得对应的楼层加速度反应谱为

$$S_a = |x''(t)|_{\max} = \left| \omega_d \int_0^t x''_a(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \left(1 - \frac{\xi^2}{1-\xi^2} \sin \omega_d(t-\tau)\right) d\tau \right|_{\max}. \quad (4)$$

3.2 楼层加速度反应谱分析

通过 MATLAB 编程和中心差分法进行计算,阻尼比为 0.05. 为验证程序的准确性,先输入 7 条地震波,得到弹性单自由度体系的加速度反应谱,见图 9. 与规范地震目标反应谱进行对比,二者吻合度高,进而验证了 MATLAB 程序的准确性.

将非隔震、隔震模型各提取的 63 条楼层波作为输入,得到每层位置处的 7 条加速度反应谱,其均值即为每层位置处的楼层波加速度反应谱(横坐标为附属结构周期,纵坐标为对应的加速度峰值). 两种

模型对应的展厅及其上下层(-1 层 ~4 层) 的反应谱曲线及全楼层反应谱曲线见图 10.

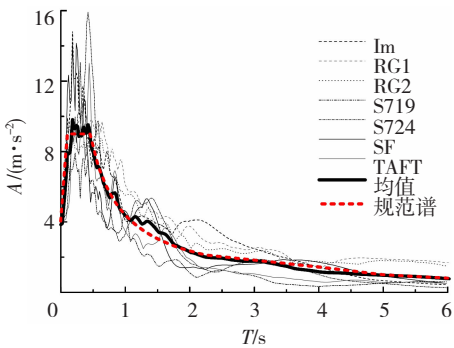


图 9 MATLAB 程序验证 (地震波)

Fig. 9 MATLAB program verification (earthquake waves)

由图 10(a) 可知,非隔震楼层波计算所得楼层反应谱的幅值均较大,当附属结构周期接近非隔震结构自振周期 1.15 s 时,会出现一个明显的峰值(第 2 个峰值),且随着层数的增加峰值增大. 这是由于附属结构与主结构发生共振. 由图 10(b) 可知,隔震楼层波的楼层反应谱的幅值较图 10(a) 明显降低,当附属结构周期接近隔震结构自振周期 3.34 s 时,同样会出现一个明显的峰值且随层数增加幅值增大,与非隔震楼层反应谱结论相似. 图 10(a)、(b) 中反应谱的第一个峰值较大,对应周期较小,这是由于附属结构对应周期接近地震卓越周期.

综合图 10 结果可知,楼层反应谱是地震波与主结构共同作用的结果. 附属结构全周期段内,隔震与非隔震楼层反应谱曲线特性不同,且隔震楼层反应谱值并非均低于非隔震反应谱值,说明隔震并非对所有周期的附属结构均有利. 展柜等附属结构需要根据不同类型结构的楼层反应谱进行设计.

3.3 楼层加速度设计谱拟合

1~3 层展厅是结构的关键位置,为了提高安全性,取展厅区域的 3 条反应谱进行包络值拟合,得到用于展陈设计的楼层加速度设计谱. 为了分析结构隔震前后对反应谱的影响,对比分析非隔震、隔震 3 个楼层的均值反应谱,见图 11. 由图 11 可知:附属结构周期 $T < 2.7$ s 时,非隔震楼层反应谱值远大于隔震值,即 $A_{\text{非隔震}} > A_{\text{隔震}}$; 当 $T > 2.7$ s 时, $A_{\text{非隔震}}$ 稍小于 $A_{\text{隔震}}$,相差不大. 隔震前后均值谱差别较大,主结构隔震并不利于长周期的附属结构,需要根据不同类型结构的反应谱进行设计拟合.

3.3.1 拟合理论

本文拟合是根据抗震设计规范^[3] 拟合地震设计谱的理论. 通常归一化的设计反应谱由几个特征参数确定,其中最主要的是反应谱平台值和特征周期^[14]. 本文拟合的方法是采用标准化的设计反应谱

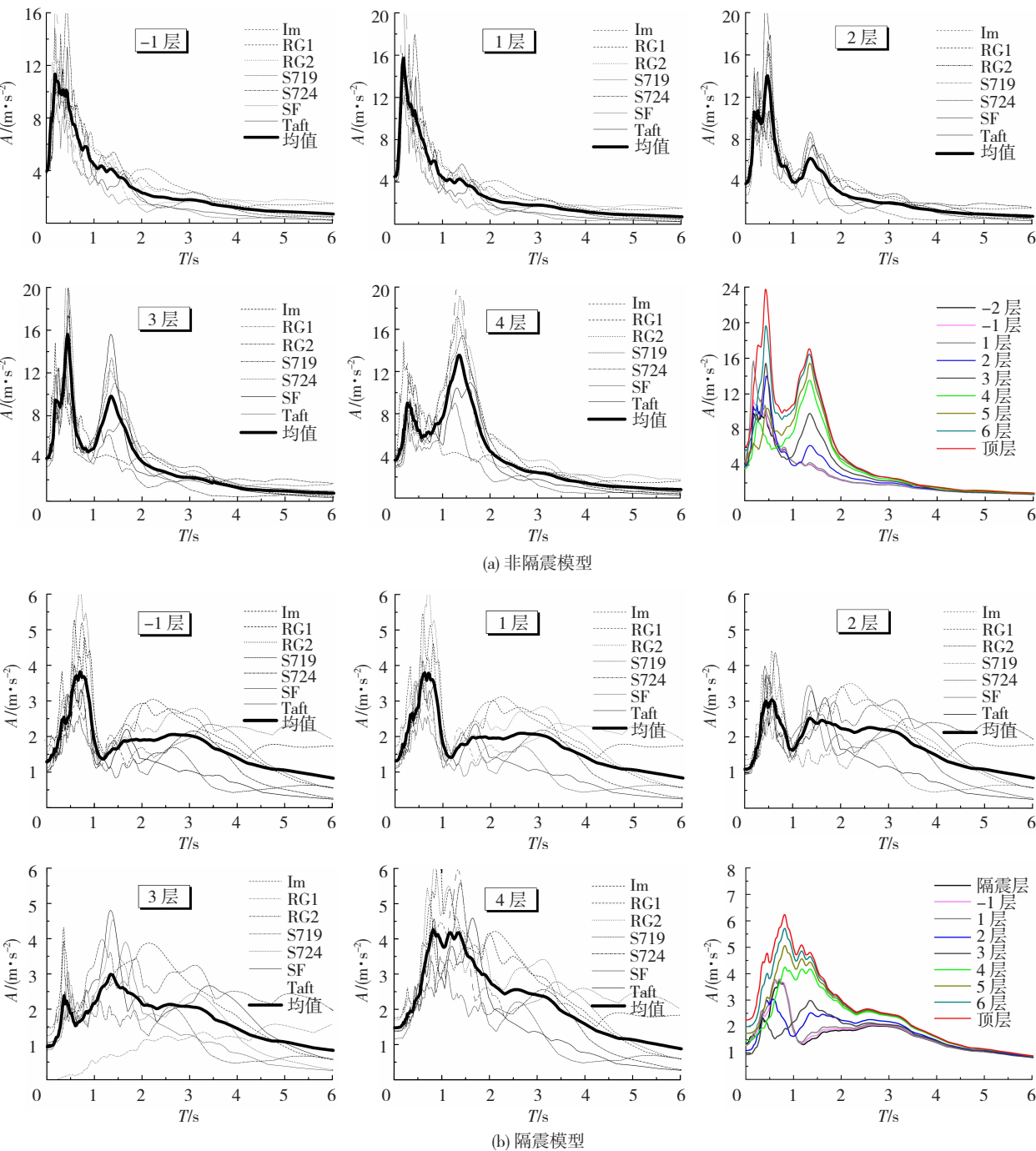


图 10 各楼层位置的楼层加速度反应谱

Fig. 10 Acceleration response spectrum at all floors

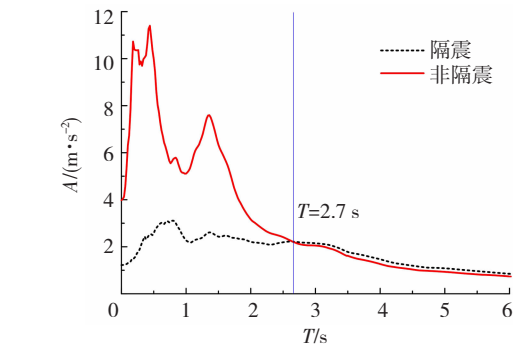


图 11 楼层的均值反应谱

Fig. 11 Average value of floor response spectrums

形式,利用动力放大系数谱来表示,定义公式为

$$\beta(T) = S_a(T)/A_{\max}, \tag{5}$$

式中: $\beta(T)$ 表示自振周期为 T 的单自由度体系对加速度的放大系数,也称为标准化反应谱; $S_a(T)$ 指加速度反应谱; $A_{\max}$ 为加速度峰值.

楼层加速度反应谱除以对应的每一条波的加速度峰值 $A_{\max}$,再经过统计平均与平滑处理,可以得到比较规则化的标准反应谱简化曲线^[15],见图 12.

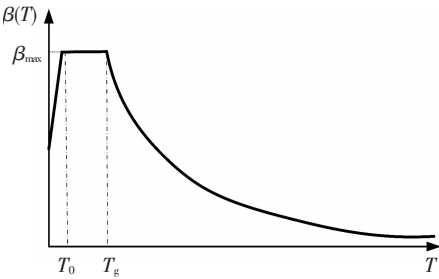


图 12 标准化设计反应谱

Fig. 12 Normalized design response spectrum

图 12 中标准化设计反应谱的数学表达为

$$\beta(T) = \begin{cases} 1.0 + (\beta_{\max} - 1.0)T/T_0, & 0 \leq T \leq T_0; \\ \beta_{\max}, & T_0 < T \leq T_g; \\ \beta_{\max} (T_g/T)^\gamma, & T_g < T \leq T_m. \end{cases} \quad (6)$$

3.3.2 楼层标准化设计谱

$T = 0$ 时的加速度值为楼层波的加速度峰值 $A_{\max}$ 。根据式(5)可计算得隔震、非隔震结构楼层加速度标准化的反应谱曲线 $\beta(T)$ ，即为标准化拟合的对象曲线。对 1~3 层的标准化反应谱曲线采用式(6)的形式进行分段包络值拟合。考虑到实际设计时的便宜性，且 1~3 层展厅处的 $A_{\max}$ 差别不大，最终提出 1 条标准化楼层设计反应谱曲线，见图 13。

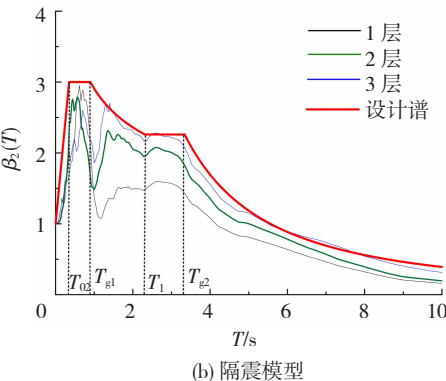
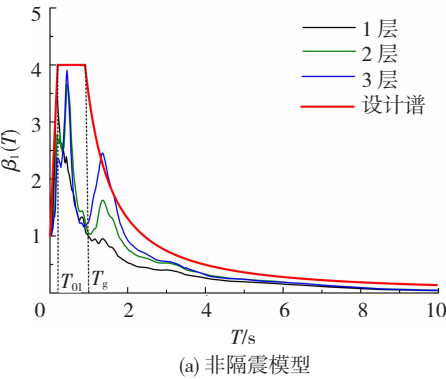


图 13 楼层标准化设计反应谱

Fig. 13 Floor wave design response spectrums

由图 13(a) 可知，非隔震标准化反应谱有 2 个峰值，对应的附属结构周期分别为稍低于地震卓越周期 0.9 s、稍高于结构自振频率 1.15 s。第 1 个峰

值明显高于第 2 个，且 2 个峰值之间周期段较短，但结构自振周期在此周期段内，故附属结构设计周期应避开此周期段，偏于安全考虑，在进行设计谱拟合时，忽略此周期段的曲线低谷并综合考虑 2 个峰值。图 13(a) 对非隔震标准化设计谱的拟合共分为 3 段：1) 直线上升段， $T_{01} = 0.2$ s；2) 平台段， $\beta_{\max} = 4.0$ ， $T_g = 1.0$ s，为两个峰值对应的周期均值，即地震特征周期和非隔震结构自振周期的平均值；3) 曲线下下降段，下降段衰减指数 $\gamma = 1.6$ 。图 13(a) 对应的非隔震楼层标准化设计谱的数学表达为

$$\beta_1(T) = \begin{cases} 1.0 + 3T/0.2, & 0 \leq T \leq T_{01}; \\ 4.0, & T_{01} < T \leq T_g; \\ 4(1.0/T)^{1.6}, & T_g < T \leq T_m. \end{cases} \quad (7)$$

由图 13(b) 可知，隔震标准化反应谱有 3 个峰值。前 2 个峰值分别对应地震卓越周期和结构的高阶周期，二者之间的周期段较短，拟合时忽略此周期段内的曲线低谷。第 3 个峰值接近结构的自振周期 3.34 s，附属结构在此周期段与主结构发生共振。综上，隔震结构标准化设计谱的拟合考虑第 1、3 峰值，有两个特征周期值及两个平台段，共分为 5 段：

1) 直线上升段， $T_{02} = 0.3$ s；2) 第 1 个平台段， $\beta_{\max1} = 3.0$ ， $T_{g1} = 0.9$ s，对应地震卓越周期；3) 第一个曲线下下降段，下降段衰减指数 $\gamma_1 = 0.3$ ， $T_1 = 2.3$ s；4) 第 2 个平台段， $\beta_{\max2} = 2.3$ ， $T_{g2} = 3.34$ s，对应隔震结构的自振周期；5) 第 2 个曲线下下降段，下降段衰减指数 $\gamma_2 = 1.6$ 。图 13(b) 对应楼层标准化反应谱的数学表达为

$$\beta_2(T) = \begin{cases} 1.0 + 2T/0.3, & 0 \leq T \leq T_{02}; \\ 3.0, & T_{02} < T \leq T_{g1}; \\ 3(0.9/T)^{0.3}, & T_{g1} < T \leq T_1; \\ 2.3, & T_1 < T \leq T_{g2}; \\ 2.3(3.34/T)^{1.6}, & T_{g2} < T \leq T_m. \end{cases} \quad (8)$$

总结图 13 拟合规律可知：未隔震结构周期较短，接近地震卓越周期，故图 13(a) 非隔震楼层设计谱有 1 个平台段， T_g 对应地震卓越周期与结构自振周期的平均值；隔震后结构周期延长，远离地震卓越周期，图 13(b) 中隔震楼层设计谱有 2 个平台段， T_{g1} 、 T_{g2} 分别对应地震卓越周期和结构自振周期。

综上，楼层反应谱是地震波与结构共同作用的结果，反映二者的特性。结构自振周期与地震卓越周期接近时有 1 个平台段，远离时有 2 个平台段。图 13 所示楼层标准化设计谱对于不同地区、周期的博物馆普遍适用，根据地震波选波来源和具体的结构周期来调整设计谱中 T_g 、地震卓越周期 T_{g1} 、结构自振周期 T_{g2} 的取值及平台段峰值。

3.3.3 附属结构响应

非隔震、隔震结构对应的 1~3 层的加速度峰值最大值分别为 $A_{\max\text{非隔震}} = 4.0 \text{ m/s}^2$ 、 $A_{\max\text{隔震}} = 1.3 \text{ m/s}^2$ ，故由式(5)可得楼层反应谱计算公式：

$$S_{a\text{非隔震}}(T) = 4.0\beta_1(T), \quad (9)$$

$$S_{a\text{隔震}}(T) = 1.3\beta_2(T). \quad (10)$$

根据反应谱的计算公式和图 13 标准化设计谱即可计算附属结构对应的加速度响应，完成展陈文物的隔震设计。对于非隔震结构，楼层加速度峰值较大，反应谱峰值较高，采取隔震装置等必要手段延长附属结构的周期后可有效降低附属结构响应。为保证 $\beta_1(T) < 1$ ，应控制附属结构周期 $T > 2.5 \text{ s}$ 。

隔震楼层反应谱也在结构自振周期 3.34 s 处出现第二个峰值(平台段)，延长附属结构周期未必均有利，故进行文物展陈设计时需要避开结构周期，为保证 $\beta_2(T) < 1$ ，应控制附属结构周期 $T > 5.5 \text{ s}$ 。

阻尼比也是控制展陈等附属结构响应的重要指标^[16]。故为降低展陈等附属结构响应，可通过调节周期和增大阻尼的方法实现。

4 结 论

1) 非隔震结构有限元模型的自振特性与振动实测识别结果相符合，验证了模型的准确性。非隔震、隔震结构模型的自振周期分别为 1.15、3.34 s。

2) 结构隔震前后所得楼层波及与地震波在加速度幅值、频谱上差异均较大。非隔震结构对地震波有放大作用，隔震较非隔震峰值降低约 75%，隔震效果显著；两种结构各层的楼层波卓越频率均与对应的结构自振频率吻合，随着层数增加保持不变，故楼层波卓越频率反映结构的自振特性，结构起主控作用。

3) 形成了博物馆类结构内部附属结构防震设计方法，得到了展厅处加速度标准化设计谱曲线及对应公式。当非隔震结构周期接近地震卓越周期时，楼层设计谱有 1 个平台段， T_g 对应地震卓越周期与结构自振周期的平均值；隔震楼层设计谱有 2 个平台段， T_{g1} 、 T_{g2} 分别对应地震的卓越周期和结构自振周期。该规律对于不同地区、周期的博物馆也是普遍适用的，根据地震波选波来源和结构周期来调整设计谱中 T_g 、地震卓越周期 T_{g1} 、结构自振周期 T_{g2} 的取值及平台段峰值。

4) 根据楼层加速度设计谱曲线(图 13)及数学表达(式(7)~(10))，可完成附属结构的加速度响应计算及隔震设计。对于非隔震结构，为保证 $\beta_1(T) < 1$ ，应控制附属结构周期 $T > 2.5 \text{ s}$ ；对于隔震结构，为保证 $\beta_2(T) < 1$ ，应控制附属结构周期 $T > 5.5 \text{ s}$ 。

参考文献

- [1] 马伯涛, 王毅, 杨维国, 等. 博物馆文物微振疲劳试验与分析研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 62. MA Botao, WANG Yi, YANG Weiguo, et al. Slight fatigue tests and numerical analysis for museum collections[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 62. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.23.011
- [2] PARISI F, AUGENTI N. Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34(1): 735. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.005
- [3] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [4] 馆藏文物防震规范: WW/T 0069—2015[S]. 北京: 中华人民共和国国家文物局, 2015
- [5] 苏晓雪. 馆藏可移动文物防震性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013
- [6] 寇苗苗. 非结构构件的抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013
- [7] 高仕军. 隔震结构楼层反应谱分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
- [8] SANKARANARAYANAN R, MEDINA A. Acceleration response modification factors for nonstructural components attached to inelastic moment-resisting frame structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(14): 2189. DOI: 10.1002/eqe.724
- [9] CHAUDHURI S R, VILLAVARDE R. Effect of building nonlinearity on seismic response of nonstructural components: aparametric study[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(4): 661. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(661)
- [10] 刘佩, 连鹏宇. 基于环境振动测试的框架结构主裙楼动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 176. LIU Pei, LIAN Pengyu. Dynamic characteristics analysis of a frame structure with the main building and podium based on ambient vibration test data[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 176. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.10.028
- [11] 刘沛, 杨文健. 中美抗震设计中地震波选取方法比较研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 8. LIU Pei, YANG Wenjian. Comparative study on the ground motion selection methods in Chinese and American codes[J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 8. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2013.06.007
- [12] GARBACZ A, PIOTROWSKI T, COURARD L, et al. On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134(1): 311. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.064
- [13] CHOPRA A K. 结构动力学理论及其在地震工程上的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 255
- [14] 郭晓云, 薄景山, 张宇东, 等. 抗震设计反应谱的标定方法[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 66. GUO Xiaoyun, BO Jingshan, ZHANG Yudong, et al. Methods of calibrating seismic design response spectrum[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 66
- [15] 谢礼立, 徐龙军. 基于双规准反应谱的抗震设计谱[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1860. XIE Lili, XU Longjun. Seismic design spectra derived from bi-normalized response spectra[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1860. DOI: 10.11918/j.issn:0367-6234.2007.12.003
- [16] 曹加良, 施卫星, 刘文光. 长周期隔震结构基于反应谱理论的地震响应预测研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 42. CAO Jialiang, SHI Weixing, LIU Wenguang. The seismic response prediction of long-period seismic isolated structures based on response spectrum theory. [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 42. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2011.09.017

(编辑 赵丽莹)