

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220823003

厚层铅芯橡胶支座竖向性能敏感性及其不确定性*

薛斌, 卢文胜, 任祥香, 朱玉华

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 厚层橡胶支座稳定的竖向性能有利于实现竖向隔震(振), 为量化材性及尺寸变异性对厚层铅芯橡胶支座(TLRB)竖向性能的影响, 设计了基于概率密度演化理论(PDEM)的分析框架。建立数值模型并试验验证, 以三类平面尺寸的支座为对象, 考虑第一形状系数(S_1)、第二形状系数(S_2)影响, 采用GF偏差选点策略进行竖向刚度的敏感性分析, 结合我国现行规范的误差规定, 基于PDEM开展不确定性分析。结果表明: S_1 是影响竖向性能敏感性的关键因素, 而 S_2 的影响可忽略, 基于敏感性结果提出了支座生产质量控制的关键参数; S_1 是影响竖向性能不确定性的关键因素, 支座非线性压缩过程会加剧竖向性能的不确定性, 基于不确定性分析结果拟合了参数变异性与竖向刚度置信区间的定量经验关系; 支座平面尺寸效应对敏感性及其不确定性分析结果的影响较小。研究结论可为TLRB的加工制造过程与竖向隔震(振)可靠性评估提供参考。

关键词: 厚层铅芯橡胶支座(TLRB); 竖向性能; 概率密度演化理论(PDEM); 敏感性; 不确定性

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0453-10

Sensitivity and Uncertainty on Vertical Performance of Thick Lead-rubber Bearings

XUE Bin, LU Wensheng, REN Xiangxiang, ZHU Yuhua
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The stable vertical performance of thick lead-rubber bearings (TLRB) is conducive to achieving vertical isolation (vibration). An analytical framework based on the probability density evolution method (PDEM) is designed to quantify the influence of material and dimensional variability on vertical performance uncertainty of TLRB. The robustness of this numerical model is validated through comparison with experimental results. Three types of bearings with typical plane sizes are taken as objects, considering the influence of the first shape factor (S_1) and the second shape factor (S_2). The sensitivity of vertical stiffness is analyzed based on the GF-discrepancy for point selection. An uncertainty analysis is carried out using PDEM with error requirements of Chinese current code. The results show that S_1 is the key factor affecting the sensitivity of vertical performance while the influence of S_2 can be ignored. Based on the sensitivity results, the key parameters of bearing production quality control are proposed. S_1 is also the key factor affecting the uncertainty of vertical perfor-

* 收稿日期:2022-08-23;修回日期:2023-01-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51578411)、地震工程国际联合实验室重点项目(ILEE-IJRP-P2-P3-2017)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021D11)资助

作者简介:薛斌(1992—),男,博士研究生。主要从事建筑结构隔震研究。E-mail: xuebin_tji@tongji.edu.cn

通讯作者:任祥香(1988—),女,博士。主要从事建筑结构隔震及结构试验技术研究。E-mail: xiangxiangren@tongji.edu.cn

mance. The nonlinear compression process of TLRB aggravates the uncertainty of vertical performance. The quantitative relationship between parameter variations and the confidence interval of vertical stiffness was established by employing fitting techniques. The effect of bearing plane size has little influence on the sensitivity and uncertainty results. The findings of this research can provide references for the manufacturing process and vertical isolation reliability evaluation of TLRB.

Keywords: thick lead-rubber bearing; vertical performance; probability density evolution method; sensitivity; uncertainty

0 引言

近年来,国内隔震技术的工程应用快速增加,与此同时竖向隔震技术也得到了发展,作为选择之一,厚层橡胶支座在竖向隔震(振)中具有较大应用前景,可用于核电设施、地铁临近建筑等场景。国内外研究人员对此进行了一系列研究。盛涛等^[1]在某地铁站附近进行了足尺模型试验,检验了厚层橡胶支座对提高地铁邻近建筑室内舒适度的有效性。周颖等^[2]采用厚层橡胶支座对某地铁上盖结构进行了隔震设计,经合理设计实现了减振效果。T. Fukasawa 等^[3]研究和开发了用于钠冷却快堆的厚层橡胶支座,以实现竖向与水平隔震效果。F.Cilento 等^[4]对采用厚层橡胶支座隔震的框架结构进行了振动台试验,结果显示竖向隔震效果良好。

厚层橡胶支座竖向性能特征不同于普通橡胶支座,为促进其在竖向隔震(振)中的应用,国内外研究人员对此进行了一系列研究。朱玉华等^[5]设计了厚层铅芯橡胶支座并进行力学性能试验,基于试验结果对竖向刚度的理论公式进行了修正。X.X. Ren 等^[6]对厚层铅芯橡胶支座的竖向压缩性能进行了试验研究与有限元分析,发现了支座压缩硬化现象。李吉超等^[7]对厚层橡胶支座的力学性能进行了系统的试验研究,并对支座竖向刚度理论公式进行了修正。A.Orfeo 等^[8]通过试验与有限元分析研究了厚层橡胶支座的力学性能,并详细探讨了支座局部力学性能的发展规律。准确评估厚层橡胶支座竖向性能是实现竖向隔震(振)的关键,以上等学者为此进行了深入地研究。然而,在加工制造过程中,橡胶支座实际材料性能及尺寸不可避免存在变异,导致厚层橡胶支座实际竖向性能产生不确定性,从而影响了结构竖向隔震(振)效果的发挥。因此有必要对厚层橡胶支座的竖向性能进行敏感性分析及不确定性分析,为支座生产质量控制及竖向隔震

评估提供重要的参考依据。

以往敏感性或不不确定分析研究多限于单一平面尺寸支座,同时少有关于第一形状系数(S_1)、第二形状系数(S_2)影响的相关研究^[9-10]。传统确定性计算很难反映出材料及尺寸参数的偏差所带来的不确定性特征,概率密度演化理论(PDEM)能够实现概率空间与物理空间的解耦,与经典的 Monte Carlo 方法相比,其计算量小、结果稳定^[11],可获得精细的响应概率信息。

本文以三类平面尺寸的 TLRB 为研究对象,考虑 S_1 、 S_2 的影响,设计了基于 PDEM 的一体化分析框架,先后进行敏感性与不确定性分析,得到了厚层支座竖向性能质量控制的关键参数,建立了从参数变异性到支座竖向刚度不确定性的定量关系。

1 分析框架

基于概率密度演化理论(PDEM)^[12],本文设计的敏感性及不确定性一体化分析框架如下。

1.1 敏感性分析步骤

步骤一:将工况数记为 a ,每个工况均应进行参数概率空间选点及确定赋得概率。选用 Sobol 点集,以 GF-偏差^[13]作为调整方法在基本随机向量 Θ 的分布空间选取离散点,数目记为 n 。敏感性分析中随机参数分布空间属于一维空间 $\theta_{i,q} = \theta_{1,i,q}$,其中 $i=1,2,\dots,a,q=1,2,\dots,n$,确定各点对应赋得概率 $P_{i,q} = \int p_{\Theta}(\theta) d\theta$ 。

步骤二:选点完成后,进行物理方程求解,获得各工况点集的竖向刚度值集合,记为 $K_v = (k_{1,q}, k_{2,q}, \dots, k_{a,q})$ 。

步骤三:求得各工况竖向刚度集合的变异系数 $\delta_i = \sigma_i / \mu_i$,均值 $\mu_i = \sum_{q=1}^n k_{i,q} \cdot P_{i,q}$,标准差 $\sigma_i = \sqrt{\sum_{q=1}^n (k_{i,q} - \mu_i)^2 \cdot P_{i,q}}$,对比 δ_i 大小完成敏感性分析。

1.2 不确定性分析步骤

步骤一与步骤二基本同1.1节,仅将其中的随机参数分布空间改为多维空间 $\theta_{i,q}=(\theta_{1,i,q}, \theta_{2,i,q}, \dots, \theta_{s,i,q})$,其中 s 为分析维数,即随机参数的总数。

步骤三:采用了静力加载方法,引入虚拟的时间参数^[14],从而获得竖向刚度的时间导数 $\dot{K}_v(\theta_{i,q}, t)$ 。根据竖向刚度值集合和赋得概率,求解一维概率密度演化方程为:

$$\frac{\partial p_{K,\theta}(k, \theta_{i,q}, t)}{\partial t} + \dot{K}_v(\theta_{i,q}, t) \frac{\partial p_{K,\theta}(k, \theta_{i,q}, t)}{\partial k} = 0 \quad (1)$$

采用有限差分法求解该偏微分方程,累计求和,将上述所有 $p_{K,\theta}(k, \theta_{i,q}, t)$ 累计,即可得到各分析工况的数值解:

$$p_{K,\theta}(k, t) = \sum_{q=1}^n p_{K,\theta}(k, \theta_{i,q}, t) \quad (2)$$

$p_{K,\theta}(k, t)$ 即为关于竖向刚度 K ,和时间 t 的概率密度曲面。当时间 t 取某一定值时,则表示为 t 时刻关于 K 的概率密度函数曲线(PDF),基于PDF曲线对各分析工况结果进行不确定性分析。

2 数值模型有效性验证

为验证数值模型的有效性,将数值结果与试验进行对比,支座设计参数见表1。采用ABAQUS程序的Python脚本接口建立了参数化模型,橡胶采用C3D8H单元,Ogden本构^[15-16],Ogden模型是目前广泛应用于O形圈、密封圈等橡胶部件的分析模型,一阶Ogden模型($N=1$)可简化为Mooney-Rivlin,尤其是三阶Ogden模型($N=3$)能更好地匹配橡胶本构关系^[17-19],其应变能密度见公式(3):

表1 用于模型验证的LRB300设计参数

设计参数	取值
支座直径 D/mm	300
橡胶层厚度 t_r/mm	4.5
橡胶层数 n	25
铅芯(中孔)直径 d/mm	60
钢板层厚度 t_s/mm	2
橡胶剪切模量 $G/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	0.42
铅芯屈服强度 $Y/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	12.5
铅芯泊松比 P	0.44
铅芯弹性模量 $E/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	17 500

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J-1)^{2i} \quad (3)$$

式中, μ_i 和 α_i 为材料参数,选取三阶Ogden模型,初始剪切模量 G 满足关系式(4)^[16, 20]:

$$G = \sum_i^N \mu_i \quad (4)$$

铅芯采用C3D8单元,理想弹塑性本构。薄钢板采用C3D8I单元,理想弹塑性本构,接触均考虑为绑定,支座的有限元模型剖面如图1所示。试件编号分别为LRB300#1、LRB300#2及LRB300#3,试验压应力为10 MPa,按照规范要求^[21]进行试验,取第三次循环结果计算竖向刚度。

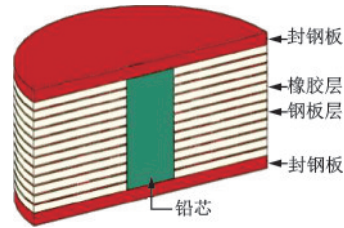


图1 模型剖面

Fig.1 Model Cross section

试验与有限元结果的力—位移曲线如图2所示,由图可知,试验结果表现出不确定性,但滞回曲线与有限元模拟总体较为契合。有限元模型竖向刚度验证结果见表2,由表2可知,试验均值与数值解之比为0.90。因此,说明所用有限元模型较为可信。

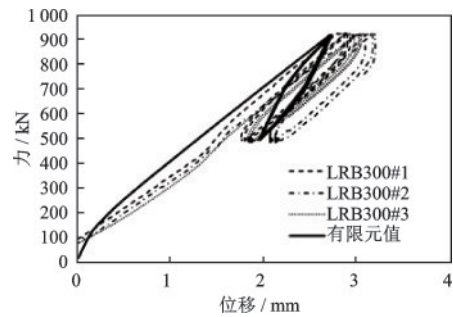


图2 力—位移曲线

Fig.2 Force-displacement curves

表2 模型刚度验证结果

试件	$K_v/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$			比值
	试验值	试验均值	数值解	
LRB300#1	411			
LRB300#2	451	421	470	0.90
LRB300#3	401			

3 研究的支座类型

支座按平面尺寸分三类:小尺寸 $D=300\text{ mm}$,中等尺寸 $D=600\text{ mm}$ 和大尺寸 $D=1\ 200\text{ mm}$ 。按

S_1 分为两类:第一类为 $S_1=5\sim 15$ 的厚层支座,是主要研究对象,第二类为 $S_1=31.3\sim 42.9$ 的普通支座,作为对照研究。按 S_2 分为两类:第一类为 $S_2=5$ 的厚层支座,第二类为 $S_2=3.3$ 的厚层支座。分析选用的支座类型见表3。

表3 分析选用的支座类型
Table 3 Bearing types for analysis

支座类型	编号	D/mm	d/mm	t_r/mm	n	t_s/mm	S_1	S_2
LRB300(普通)	-1	300	60	2.4	25	2	31.3	5
	-1	300	60	5	12	2.5	15.0	5
TLRB300(厚层)	-2	300	60	7.5	8	3.5	10.0	5
	-3	300	60	15	4	7.5	5.0	5
	-2a	300	60	7.5	12	3.5	10.0	3.3
LRB600(普通)	-1	600	100	4.1	29	2.3	36.6	5
	-1	600	100	10	12	5	15.0	5
TLRB600(厚层)	-2	600	100	15	8	7.5	10.0	5
	-3	600	100	30	4	15	5.0	5
LRB1200(普通)	-1	1 200	220	7	28	3.5	42.9	5
	-1	1 200	220	20	12	10	15.0	5
TLRB1200(厚层)	-2	1 200	220	30	8	15	10.0	5
	-3	1 200	220	60	4	25	5.0	5

4 竖向刚度敏感性分析

正态或近似正态分布在工程随机性领域有广泛的应用背景,本文假定参数的随机性均以正态分布表达。影响铅芯橡胶支座竖向刚度的参数较多,基于已有文献资料^[5, 9-10, 22],选取四个尺寸参数及四个材性参数作为随机参数,敏感性分析工况见表4,为研究不同变异系数对参数敏感性的影响,考虑 $\delta_i=0.02, 0.06, 0.10$, 8个随机参数共24个分析工况。不同选点数对应的GF偏差曲线如图3所示,由图可知,GF偏差随工况选点数增加而减小,本研究选点数确定为30,此时计算精度与成本较为平衡。

依据1.1节敏感性分析步骤获得各参数对应的 K_v 变异系数,变异系数越大,表明该参数敏感性越强。图4~图6分别为对应直径300、600、1 200 mm的支座不同 S_1 时的 K_v 变异系数变化趋势图。

其中,图4(a)、图5(a)、图6(a)为普通支座结果,支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径对应 K_v 变异系数峰值为0.06~0.19,而钢板层厚度对应峰值不大于0.01,因此尺寸参数中支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径敏感性较强,钢板层厚度敏感性较弱。铅芯泊松

表4 敏感性分析工况

Table 4 Cases for sensitivity analysis

类别	工况数	随机参数	变异系数 δ_i
尺寸	3	支座直径 D	0.02
	3	橡胶层厚度 t_r	0.06
	3	铅芯(中孔)直径 d	0.10
	3	钢板层厚度 t_s	
材性	3	橡胶剪切模量 G	0.02
	3	铅芯屈服强度 Y	0.06
	3	铅芯泊松比 P	0.10
	3	铅芯弹性模量 E	

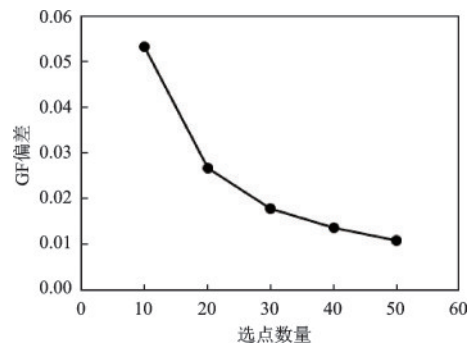
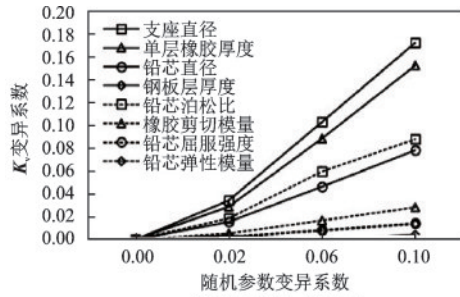
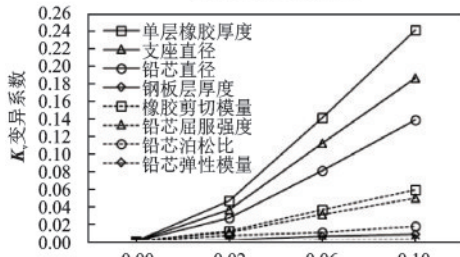


图3 GF偏差曲线

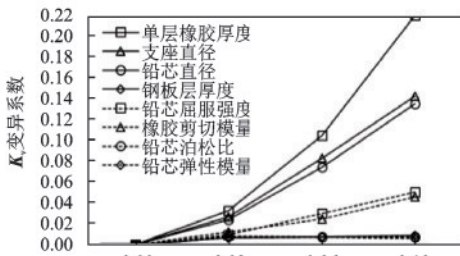
Fig.3 GF-discrepancy curve



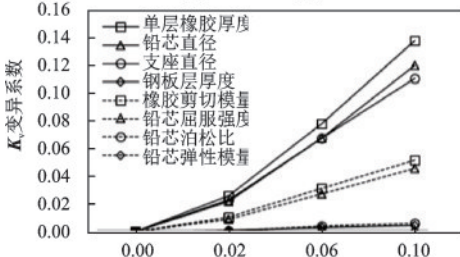
(a) LRB300-1, $S_1=31.3$



(b) TLRB300-1, $S_1=15$



(c) TLRB300-2, $S_1=10.0$

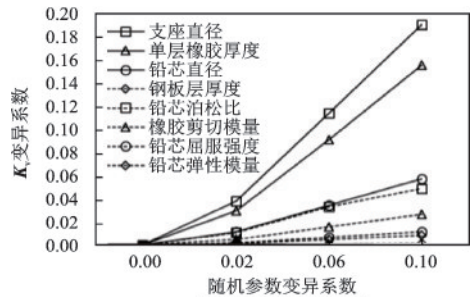


(d) TLRB300-3, $S_1=5.0$

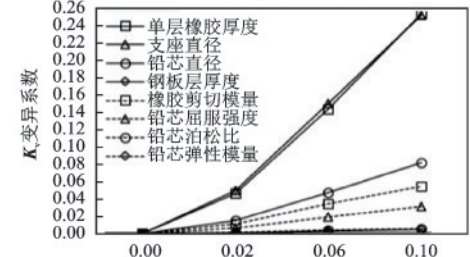
图4 不同 S_1 的 K_v 变异系数($D=300$ mm)
Fig.4 Variation coefficient of K_v for different S_1 ($D=300$ mm)

比、橡胶剪切模量对应 K_v 变异系数峰值为0.02~0.06,而铅芯屈服强度、铅芯弹性模量对应峰值约为0.01,因此材性参数中铅芯泊松比、橡胶剪切模量敏感性较强,铅芯屈服强度、铅芯弹性模量敏感性较弱。

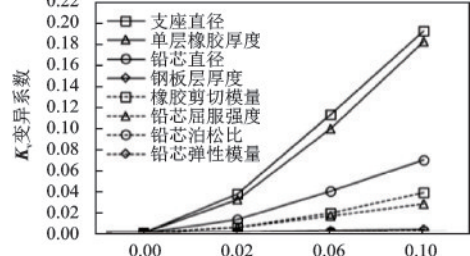
图4(b)、图5(b)、图6(b)为 $S_1=15$ 的厚层支座结果。如图所示,支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径对应 K_v 变异系数峰值为0.08~0.26,而钢板层厚度对应峰值不大于0.01,因此尺寸参数中支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径敏感性较强,钢板层厚度敏感性较弱。橡胶剪切模量、铅芯屈服强度对应 K_v 变异



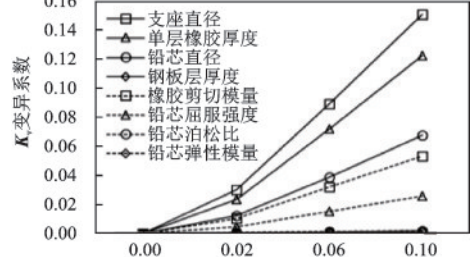
(a) LRB600-1, $S_1=31.3$



(b) TLRB600-1, $S_1=15$



(c) TLRB600-2, $S_1=10.0$



(d) TLRB600-3, $S_1=5.0$

图5 不同 S_1 的 K_v 变异系数($D=600$ mm)
Fig.5 Variation coefficient of K_v for different S_1 ($D=600$ mm)

系数峰值为0.03~0.06,而铅芯泊松比、铅芯弹性模量对应峰值约为0.01,因此材性参数中橡胶剪切模量、铅芯屈服强度敏感性较强,铅芯泊松比、铅芯弹性模量敏感性较弱。

图4(c)、图5(c)、图6(c)为 $S_1=10$ 的厚层支座结果。如图所示,支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径对应 K_v 变异系数峰值为0.07~0.22,而钢板层厚度对应峰值不大于0.01,因此尺寸参数中支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径敏感性较强,钢板层厚度敏感性较弱。橡胶剪切模量、铅芯屈服强度对应 K_v 变异

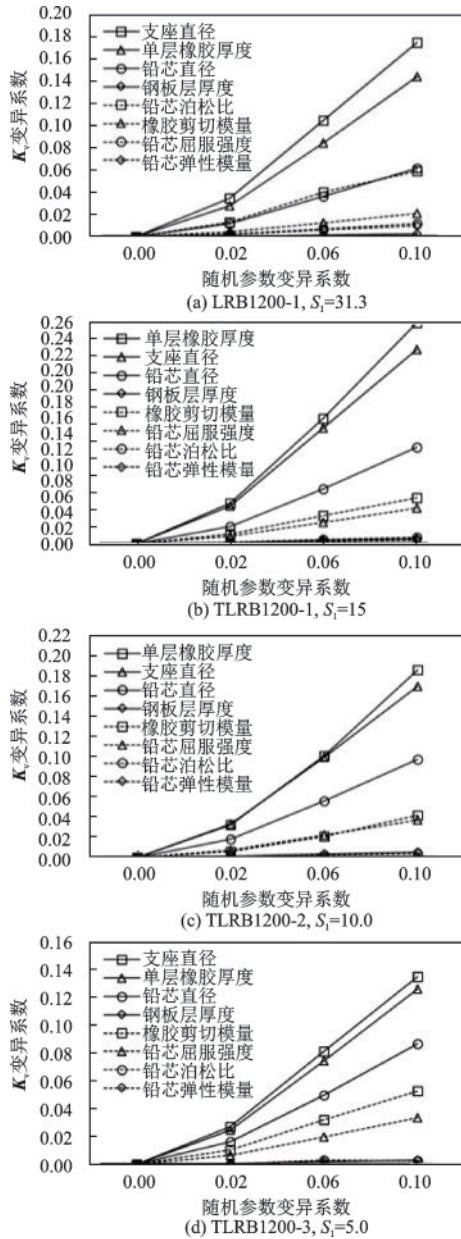


图6 不同 S_1 的 K_v 变异系数($D=1\ 200\text{ mm}$)

Fig.6 Variation coefficient of K_v for different S_1 ($D=1\ 200\text{ mm}$)

系数峰值为0.03~0.05,而铅芯泊松比、铅芯弹性模量对应峰值不大于0.01,因此材性参数中橡胶剪切

模量、铅芯屈服强度敏感性较强,铅芯泊松比、铅芯弹性模量敏感性较弱。

图4(d)、图5(d)、图6(d)为 $S_1=5$ 的厚层支座结果。如图所示,支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径对应 K_v 变异系数峰值为0.07~0.15,而钢板层厚度对应峰值不大于0.01,因此尺寸参数中支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径敏感性较强,钢板层厚度敏感性较弱。橡胶剪切模量、铅芯屈服强度对应 K_v 变异系数峰值为0.03~0.05,铅芯泊松比、铅芯弹性模量对应峰值不大于0.01,因此材性参数中橡胶剪切模量、铅芯屈服强度敏感性较强,铅芯泊松比、铅芯弹性模量敏感性较弱。

表5为不同 S_2 的 K_v 变异系数结果,可以发现当 S_2 由5.0变为3.3时,各随机参数对应 K_v 变异系数变化较小,各参数敏感性大小关系保持不变。因此, S_2 对参数敏感性关系的影响可忽略。

当参数变异系数从0.02、0.06至0.10变化时,以上规律基本一致,因此在该变异范围内,参数变异性大小不影响竖向刚度参数敏感性关系。

敏感性结果归纳于表6。表6显示, S_1 的变化影响了参数敏感性关系,其中铅芯泊松比、铅芯屈服强度发生了敏感性程度的跳跃。在此做出一定机理解释:10 MPa压应力下的支座等效塑性应变云图如图7所示,由图7可以发现,相比 $S_1=31.3$, $S_1=10$ 时单层橡胶较厚,铅芯受橡胶约束较弱,铅芯横向膨胀变形相对自由,泊松比反映材料横向变形能力的弹性常数,因此泊松比变化对支座竖向刚度的影响较小。 $S_1=10$ 时铅芯大量区域应力超过屈服强度,产生塑性变形,铅芯屈服强度变化会改变塑性区的范围,因此对支座竖向刚度的影响较大。

因此,在支座生产制造中对表6敏感参数的质量控制给予足够的重视,且注意厚层支座与普通支座之间敏感参数不同。

表5 $S_2=5.0$ 与 $S_2=3.3$ 的 K_v 变异系数之差

Table 5 Difference of variation coefficient of K_v between $S_2=5.0$ and $S_2=3.3$

随机参数 变异系数	铅芯弹性模量	铅芯泊松比	钢板层厚度	橡胶剪切 模量	铅芯屈服 强度	铅芯直径	支座直径	橡胶层厚度
$\delta_i=0$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\delta_i=0.02$	0.000	-0.001	-0.002	0.003	-0.001	-0.003	0.001	-0.002
$\delta_i=0.06$	-0.001	-0.001	-0.005	-0.004	0.000	-0.001	0.001	-0.002
$\delta_i=0.10$	-0.002	-0.001	-0.006	-0.004	0.000	0.000	0.000	0.025

表 6 参数敏感性

Table 6 Parameter sensitivity

支座类型	尺寸参数		材料参数	
	敏感参数	弱敏感参数	敏感参数	弱敏感参数
普通支座 $S_1 > 30.0$	支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径	钢板层厚度	铅芯泊松比、橡胶剪切模量	铅芯屈服强度、铅芯弹性模量
厚层支座 $S_1 \leq 15.0$	支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径	钢板层厚度	橡胶剪切模量、铅芯屈服强度	铅芯泊松比、铅芯弹性模量

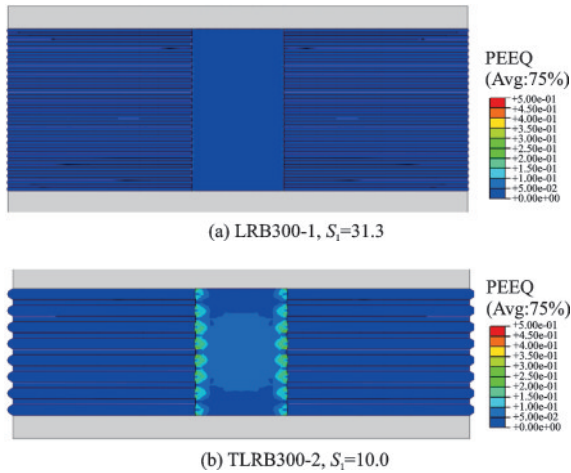


图 7 支座等效塑性应变云图(10 MPa)

Fig.7 PEEQ of bearings(10 MPa)

5 TLRB 竖向刚度不确定性分析

为减小计算规模,提高分析效率,不确定分析选取敏感参数作为随机参数。《建筑隔震橡胶支座》^[23]规定,橡胶层厚度误差为设计值的 $\pm 10\%$,支座直径误差为设计值的 $\pm 1\%$ 与 $\pm 5\text{ mm}$ 的较小值,铅芯(中孔)直径误差为设计值的 $\pm 1.5\text{ mm}$,考虑误差服从正态分布,根据质量控制的 3σ (σ 为标准差)原则^[24],可得各尺寸参数的变异系数,材性敏感参数变异系数假设为 X ,各参数的变异系数取值详见表 7。为研究 X 取值与 TLRB 竖向刚度不确定性之间的关系,每个分析支座均考虑 $X=0, 0.02, 0.06, 0.10$ 四种工况,每个工况随机选点数为 100。

表 7 参数的变异系数

Table 7 Variation coefficients of parameters

支座	支座直径	铅芯直径	橡胶层厚度	橡胶剪切模量、铅芯屈服强度
TLRB300-(1~3)	0.003	0.008	0.033	
TLRB600-(1~3)	0.003	0.005	0.033	$X=0, 0.02, 0.06, 0.10$
TLRB1200-(1~3)	0.001	0.002	0.033	

5.1 竖向刚度 PDF 曲线

依据 1.2 节不确定分析步骤,可求得竖向刚度 PDF 曲线,如图 8~图 10 所示,分别对应 TLRB300、TLRB600、TLRB1200 三类厚层支座。参数随机性均以正态分布表达,但 PDF 曲线并非严格遵循正态分布,出现了多峰和偏态等不确定性分布现象,这是由于 TLRB 压缩是显著的非线性过程。 S_1 越小,PDF 曲线峰值随 X 增加下降越明显,说明 S_1 的变化对 TLRB 竖向刚度不确定性程度的影响显著,且 S_1 越小受变异系数 X 影响越大。对于三类平面尺寸支座,以上结果均成立。

5.2 置信区间

采用置信区间对竖向刚度不确定性进行量化。由于 TLRB 尺寸参数变异性已由《建筑隔震橡胶支座》^[23]相关要求换算得到,因此在一定置信水平下,竖向刚度的置信区间大小与 S_1 、材性参数变异系数 X 相关。采用 95% 的置信水平求解置信区间 $(1 \pm C)K_n$,将 C 定义为置信区间系数,系数分布结果如图 11 所示。图 11 显示当 S_1 相同时,若 X 一定,不同平面尺寸支座的 C 值接近。因此,偏保守考虑对 C 值包络,对包络值拟合得到适用于 TLRB 的公式(5)。采用公式(5)拟合包络值得到的曲线效果如图 12 所示,通过与包络值对比,由图可见公式(5)的拟合效

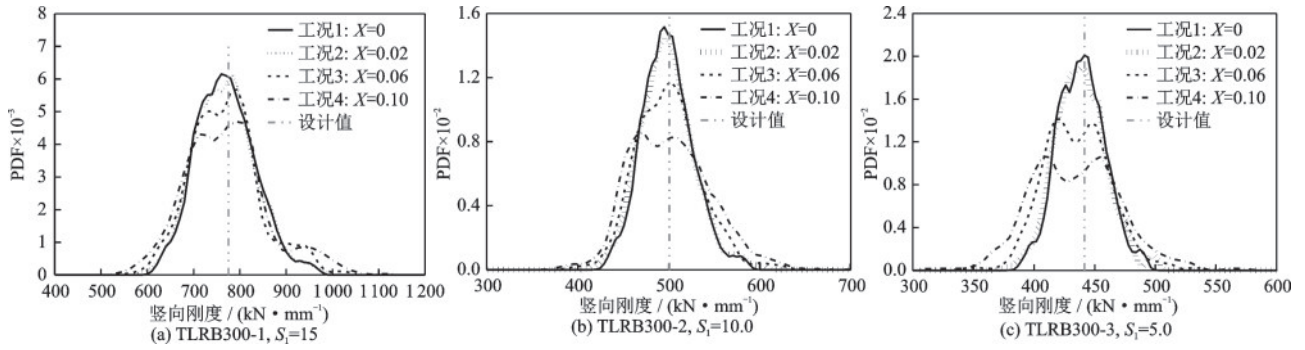


图8 竖向刚度PDF曲线(TLRB300型)

Fig.8 PDF curves of vertical stiffness (Type: TLRB300)

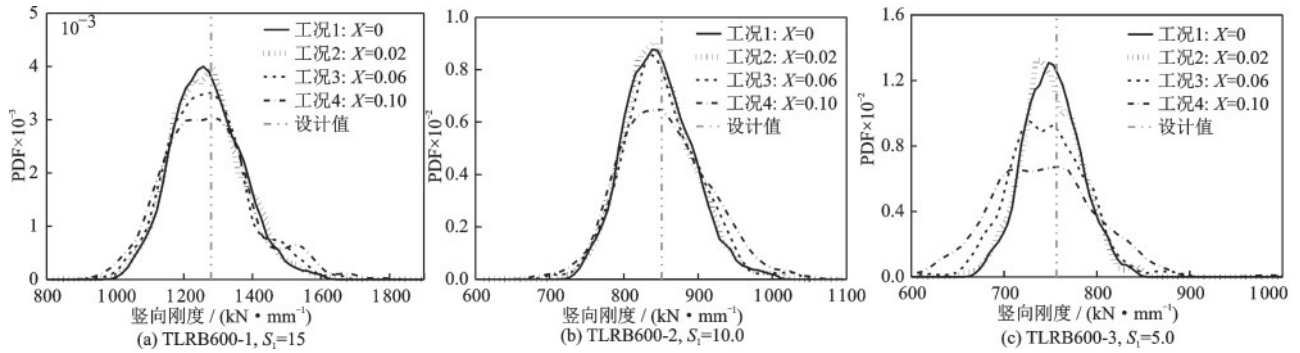


图9 竖向刚度PDF曲线(TLRB600型)

Fig.9 PDF curves of vertical stiffness (Type: TLRB600)

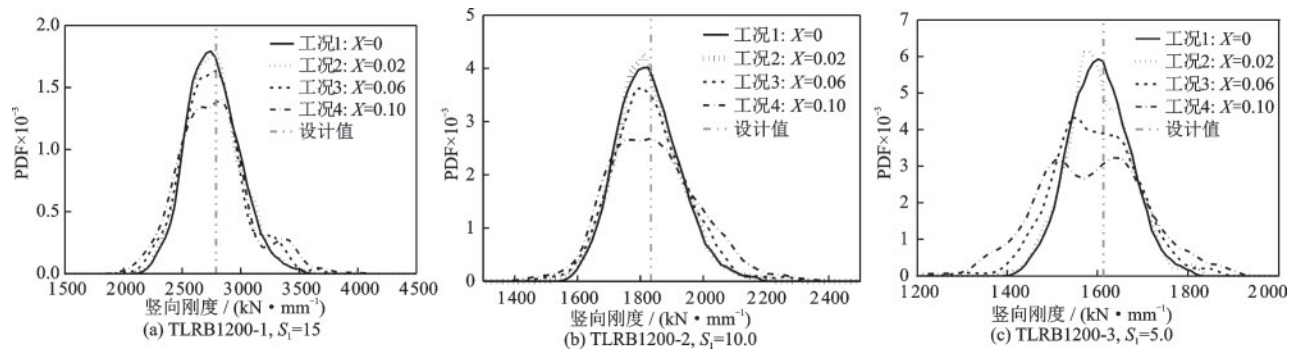


图10 竖向刚度PDF曲线(TLRB1200型)

Fig.10 PDF curves of vertical stiffness (Type: TLRB1200)

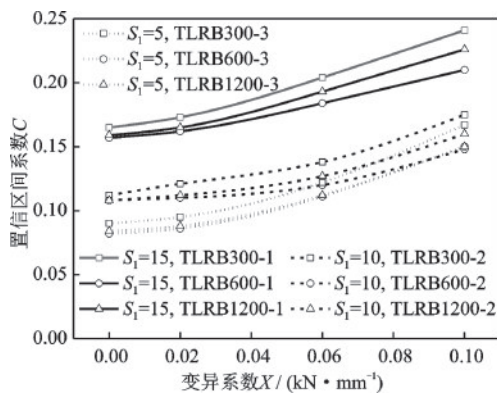


图11 置信区间系数分布

Fig.11 Distribution of confidence interval coefficient

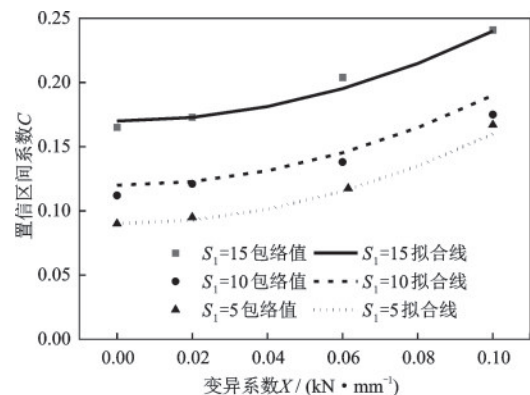


图12 公式拟合效果

Fig.12 Formula fitting effect

果较好,所得拟合公式一方面可评价厚层铅芯橡胶支座竖向性能不确定性,另一方面可为竖向隔震(振)可靠性评估提供参考。

$$C = 0.08 + 7X^2 + 0.09(S_1/S_0)^2, R^2 = 0.96 \quad (5)$$

式中, $S_0=15$ 为厚层橡胶支座第一形状系数上限值。

6 结 论

设计了基于PDEM的分析框架,研究TLRB竖向性能的敏感性与不确定性,主要结论如下:

(1)建立了支座参数化数值模型,可实现批量分析,试验验证了模型的有效性,试验结果显示出不确定性,说明了不确定性研究的客观现实意义。

(2)所设计的一体化分析框架,能较好地衔接敏感性分析和不确定性分析,提高分析效率,具备一定参考价值。

(3) S_1 是影响竖向性能敏感性的关键指标,而 S_2 的影响可忽略,通过等效塑性应变云图可做出物理机理解释。 S_1 是影响竖向性能不确定性的关键指标,此外,厚层铅芯橡胶支座自身的压缩非线性亦会加剧竖向性能的不确定性程度。支座平面尺寸效应对厚层橡胶支座竖向性能敏感性及其不确定性分析结果影响较小。

(4)尺寸参数中支座直径、橡胶层厚度、铅芯直径,材料参数中橡胶剪切模量、铅芯屈服强度对厚层铅芯橡胶支座竖向性能的敏感性较强,而钢板层厚度、铅芯泊松比、铅芯弹性模量敏感性较弱。因此,在厚层铅芯橡胶支座的制造加工中,建议对敏感性较强的参数提出更高的质量控制要求。

(5)采用了置信区间表达竖向刚度不确定性的量化信息,所得拟合公式可为厚层铅芯橡胶支座竖向性能不确定性评价及竖向隔震(振)可靠性评估提供参考。

参考文献:

[1] 盛涛,李亚明,张晖,等.地铁邻近建筑的厚层橡胶支座基础隔振试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(2):35-40.
Sheng T, Li Y M, Zhang H, et al. Field experiment study of subway nearby building's base isolation by laminated thick rubber isolator[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 35-40.(in Chinese)

[2] 周颖,陈鹏,陆道渊,等.地铁上盖多塔楼隔震与减振设计研究[J].土木工程学报.2016,49(增1):84-89.
Zhou Y, Chen P, Lu D Y, et al. Design and seismic response analysis for multiple buildings with large podium using inter-story isolation technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(Sup1): 84-89.(in Chinese)

[3] Fukasawa T, Okamura S, Yamamoto T, et al. Research and development of rubber bearings for sodium-cooled fast reactor: ultimate properties of half-scale thick rubber bearings based on breaking tests[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of The Asme, 2018, 140(1): 011401.

[4] Cilento F, Vitale R, Spizzuoco M. Analysis of the experimental behaviour of low shape factor isolation rubber bearings by shaking table investigation[Z]. Pistoia: 2017.

[5] 朱玉华,艾方亮,任祥香,等.厚层铅芯橡胶支座力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1189-1194.
Zhu Y H, Ai F L, Ren X X, et al. Mechanical properties of thick lead-rubber bearings[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(9): 1189-1194. (in Chinese)

[6] Ren X X, Lu W S, Zhu Y H, et al. Compressive behavior of low shape factor lead-rubber bearings: Full-scale testing and numerical modeling [J]. Engineering Structures, 2020, 209:110030.

[7] 李吉超,尚庆学,罗清宇,等.厚层橡胶支座的力学性能试验研究[J].振动与冲击.2019,38(9):157-165.
Li J C, Shang Q X, Luo Q Y, et al. Tests for mechanical performance of thick rubber bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 157-165.(in Chinese)

[8] Orfeo A, Tubaldi, E, Muhr A H, et al. Mechanical behaviour of rubber bearings with low shape factor[J]. Engineering Structures, 2022, 266: 114532.

[9] Dezfuli F H, Alam M S. Sensitivity analysis of carbon fiber-reinforced elastomeric isolators based on experimental tests and finite element simulations[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(2): 1025-1043.

[10] Ahmadipour M, Alam M S. Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2017, 140: 39-50.

[11] 李杰.工程结构可靠性分析原理[M].北京:科学出版社,2021.
Li J. Fundamental of structural reliability analysis [M].

- Beijing: Science Press, 2021.(in Chinese)
- [12] 刘章军,陈建兵. 结构动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- Liu Z J, Chen J B. Structural dynamics [M]. Beijing: China Water&Power Press, 2012.(in Chinese)
- [13] Chen J B, Yang J Y, Li J. A GF-discrepancy for point selection in stochastic seismic response analysis of structures with uncertain parameters[J]. Structural Safety, 2016, 59: 20-31.
- [14] 陈建兵,李杰. 随机结构动力可靠度分析的极值概率密度方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004(6): 39-44.
- Chen J B, Li J. The extreme value probability density functionbased method for dynamic reliability assessment of stochastic structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004(6): 39-44.(in Chinese)
- [15] Ogden R W. Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1972, 326: 565-584.
- [16] 江胜华,侯建国,何英明,等. 纤维橡胶支座的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增1): 227-232.
- Jiang S H, Hou J G, He Y M, et al. Mechanical study of fiber reinforced elastomeric isolator[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup1): 227-232.(in Chinese)
- [17] Kim B, Lee S B, Lee J, et al. A comparison among neo-hookean model, mooney-rivlin model, and ogden model for chloroprene rubber[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(5): 759-764.
- [18] Saidou A, Gauron O, Busson A, et al. High-order finite element model of bridge rubber bearings for the prediction of buckling and shear failure [J]. Engineering Structures, 2021, 240: 112314.
- [19] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶工业, 2014, 61(8): 453-457.
- Yan S, Wang W. Determination of material parameters for rubberlike hyperelastic constitutive models[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(8): 453-457.(in Chinese)
- [20] Systèmes Dassault. 2014a. ABAQUS/CAE 6.13 user's manual. Abaqus Ver. 6.13 documentation. Providence, RI: Dassault Systèmes.
- [21] 橡胶支座第1部分:隔震橡胶支座试验方法:GB/T 20688.1-2007 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [22] 苏键,温留汉·黑沙,周福霖. 方形叠层橡胶隔震支座竖向力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(7): 20-24.
- Su J, Wen Liu-Han H S, Zhou F L. Experimental study of square laminated rubber bearings on the vertical mechanic characteristics for isolation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(7): 20-24.(in Chinese)
- [23] 建筑隔震橡胶支座:JG/T 118-2018[S].北京:中国标准出版社, 2018.
- [24] 洪华圣,邓汉忠. 工程中的概率概念[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017: 417.
- Ang A H-S, Tang W. Probability concepts in engineering[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2017: 417.(in Chinese)

(本文编辑:赵霞)