

王玉君, 沈朝勇, 黄襄云. 厚层橡胶隔震支座竖向刚度计算及其影响因素分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 132-142. [WANG Yujun, SHEN Chaoyong, HUANG Xiangyun. Vertical Stiffness Calculation of Thick Rubber Bearing and Its Influencing Factors Analysis[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 132-142]

## 厚层橡胶隔震支座竖向刚度计算及其影响因素分析

王玉君<sup>1,2</sup>, 沈朝勇<sup>1,2</sup>, 黄襄云<sup>1,2</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405)

**摘要:** 采用国家标准中普通薄层隔震橡胶支座的竖向刚度公式计算厚层橡胶隔震支座的竖向压缩刚度值, 一般会偏大较多。通过对厚度橡胶支座进行竖向压缩静力试验研究的基础上, 运用ABQUES大型通用有限元软件对影响厚层橡胶支座竖向刚度的相关参数进行了展开分析研究, 探讨了各影响因素的变化规律, 提出竖向刚度公式修正公式, 并将此竖向刚度公式与其他竖向刚度公式进行对比。结果表明, 当厚层橡胶支座第一形状系数小于7时, 本文给出的厚层橡胶隔震支座的竖向压缩刚度公式可以给出相对比较准确的结果。

**关键词:** 厚层橡胶支座; 静力试验; 竖向刚度公式; 有限元模拟; 第一形状系数

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0132-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.15

## Vertical Stiffness Calculation of Thick Rubber Bearing and Its Influencing Factors Analysis

WANG Yujun<sup>1,2</sup>, SHEN Chaoyong<sup>1,2</sup>, HUANG Xiangyun<sup>1,2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology,  
Guangzhou 510405, china)

**Abstract:** The vertical compression stiffness of thick rubber bearing calculated by using the vertical stiffness formula of ordinary thin layer rubber bearing in the national standard is generally larger than that of the thick layer rubber bearing. Based on the static test of vertical compression of thick rubber bearing, this paper analyzes and studies the related parameters affecting the vertical stiffness of thick rubber bearing by using ABQUES large general finite element software, discusses the variation law of each influencing factor, proposes the correction formula of vertical stiffness formula, and compares this vertical stiffness formula with other vertical stiffness formulas. The results show that when the first shape coefficient of the thick layer rubber bearing is less than 7, the vertical compression stiffness formula of the thick layer rubber isolation bearing given in this paper can give relatively accurate results.

**Keywords:** TRB; Static test; Vertical stiffness formula; Finite element simulation; The first shape coefficient

收稿日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51991393); 国家自然科学基金项目(51578168)联合资助。

作者简介: 王玉君(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事工程隔震和抗震研究。

E-mail: 2112016036@e.gzhu.edu.cn

通信作者: 沈朝勇(1972-), 男, 副研究员, 主要从事工程隔震和抗震研究。

E-mail: shency@gzhu.edu.cn

## 0 引言

基础隔震是将隔震支座位于建筑物与基础之间,起到一种耗能减震效果。大量研究是集中在水平隔震方面,竖向隔震技术进展缓慢,近几十年的灾害记录表明,一些竖向地震动的加速度峰值要超过水平地震动<sup>[1]</sup>。采取竖向隔震技术很有必要。

19世纪20年代,隔震建筑的思想就已经初具雏形,在南斯拉夫的一栋小学建筑中使用方形厚叠层橡胶支座,在此后的地震反应中隔震效果显著<sup>[1]</sup>。我国的隔震建筑研究始于上世界60年代末,我国第一栋使用叠层橡胶支座的建筑是在广州大学周福霖院士的主持下建造的,采用23个隔震支座的八层框架结构。厚层隔震橡胶支座是由厚层橡胶与钢板硫化而成,在受到竖向压力时,产生较大的竖向变形,在竖向隔震技术中应用广泛。王涛<sup>[3-4]</sup>采用厚层橡胶支座对核电厂反应堆厂房进行竖向隔震,因其降低楼层反应谱峰值,能有效的避开大部分设备管道的固有频率范围,竖向隔震效果很好。厚层橡胶支座广泛应用于地铁舒适度评估,能有效的实现地铁周边的隔震设计<sup>[5]</sup>。

关于厚层橡胶支座力学性能的研究也有很多,杨彦飞等<sup>[6]</sup>通过对传统的普通橡胶支座、厚层橡胶支座的力学性能试验发现厚层橡胶支座的竖向刚度约为普通橡胶支座的1/6~1/10。何文福团队<sup>[7]</sup>研究得出厚层橡胶支座有良好的水平和竖向力学性能,能基本满足支座承载力的需要,但较大的轴压敏感性使得竖向刚度公式误差较大,厚层橡胶支座的竖向刚度理论值与试验值的误差达到461.2%。

如何确定厚层橡胶支座的竖向刚度也有着诸多讨论。Lindley<sup>[8]</sup>引入修正系数,它与橡胶剪切模量有关,橡胶越软,修正系数越接近1。Yabana<sup>[9]</sup>考虑橡胶受到竖向压力会产生沿着厚度方向的线性变形,提出线性修正的方法。朱玉华<sup>[10]</sup>得出关于竖向压力与 $S_1$ 的竖向刚度拟合公式,模拟预测中存在竖向刚度随着竖向压力逐步减小的现象。邹立华<sup>[11]</sup>采用回归方式引入关于 $S_1$ 的修正系数,此竖向刚度拟合公式忽略了竖向压力变化带来的影响。李吉超<sup>[12]</sup>则是考虑得出关于橡胶层压缩模量、面积、厚度变化的积分修正方法。

以上公式的模拟缺少有限元试验的辅助或试验样本较少。

本文进行厚层橡胶隔震支座的竖向压缩试验,

并将多种不同几何参数的厚层橡胶支座进行有限元建模,分析竖向刚度影响因素;提出厚层橡胶支座竖向刚度公式修正因子,拟合出修正因子是一个关于 $S_1$ 与竖向压力的二元多项式,并验证其可行性。

## 1 试验体与试验装置

### 1.1 试验体设计

本文设计制作了单层橡胶厚度为61 mm、钢片厚度为5 mm双层厚橡胶支座,具体几何参数见表1,构造和尺寸如图1

$$S_1 = \frac{D}{4t_r} \quad (1)$$

$$E_c = E_0(1 + 2kS_1^2) \quad (2)$$

$$E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b} \quad (3)$$

$$K_v = \frac{E_{cb}}{nt_r} A \quad (4)$$

式中: $D$ 为橡胶外径; $n$ 为橡胶层数; $t_r$ 单层橡胶层的厚度; $S_1$ 为第一形状系数; $E_0$ 为弹性模量,通常是橡胶剪切模量 $G$ 的三倍; $E_c$ 为压缩时的弹性模量, $k$ 为修正系数,在这里取0.874, $E_b$ 为体积弹性模量,通常取1960 MPa, $E_{cb}$ 为修正后的弹性模量, $A$ 为橡胶截面面积, $K_v$ 为竖向刚度。根据《橡胶支座第3部分:建筑隔震橡胶支座 GB 20688.3—2006》<sup>[13]</sup>,厚层橡胶支座竖向刚度为0.417 kN/mm。

### 1.2 静力试验

本次厚层橡胶支座竖向拟静力试验是在广州大学抗震试验中心完成的,试验加载装置采用100 kN竖向液压伺服万能材料压缩机,为提高试验精确度,采用三个支座并联的形式,试验过程图2。

参考规范《隔震橡胶支座试验方法 GB/T20688.1—2007》<sup>[14]</sup>进行了厚层橡胶隔震支座的竖向刚度检测,单个支座竖向荷载设计值 $P_0$ 取为34 kN,采用竖向压力在0.7倍 $P_0$ 到1.3倍 $P_0$ 之间往复变化的方式进行加载。往复加载四次,计算支座的竖向刚度 $K_v$ 第3次循环的竖向刚度。

图3为三个并联TRB竖向荷载-位移关系曲线。

计算得到的三个并联D220 TRB竖向刚度为5.363 kN/mm,即单个厚层支座竖向刚度为1.788 kN/mm,将得出的试验数据与理论值进行对比,误差高达328.8%。很显然,传统计算公式对橡胶层较厚、竖向压缩量大的支座已不适合。

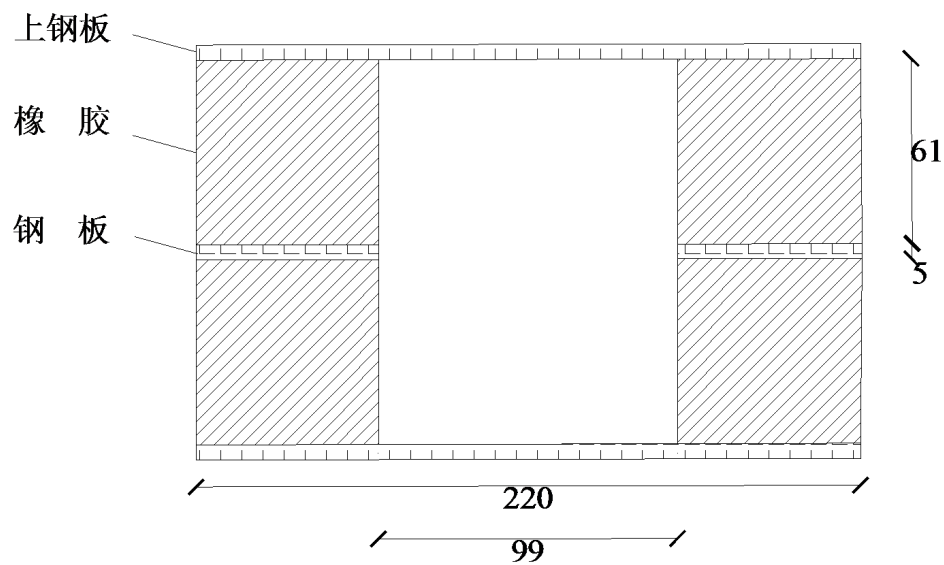


图1 橡胶构造几何图

Fig.1 Geometry of rubber structure



(a)厚层橡胶支座 (b)试验操作过程

图2 厚层橡胶支座试验步骤

Fig.2 Test steps of thick rubber bearing

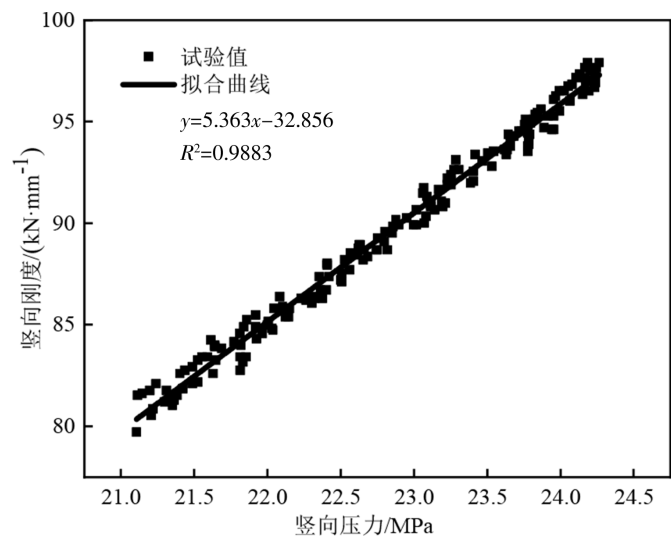


图3 第三次竖向荷载一位移关系曲线

Fig.3 The vertical load–displacement relationship curve of the third cycle

表1 隔震支座设计参数表

Table1 Parameter of thick rubber isolation bearing

参数	厚层橡胶支座
剪切模量 $G/\text{MPa}$	0.392
弹性模量 $E_0/\text{MPa}$	1.176
体积模量 $E_v/\text{MPa}$	1960
橡胶修正系数 $k$	0.874
竖向作用力 $/\text{kN}$	34
竖向压力 $/\text{MPa}$	1.12
第一形状系数	0.496
第二形状系数	1.8

2 厚层橡胶支座精细化建模

对多种不同几何模型的厚层橡胶支座的竖向压缩试验,以求出其修正公式及其影响因素,往往不太实际,本文意通过多工况的有限元模拟,得到上述所求。

首先考虑有限元模拟的可靠性,以本文的D220厚层橡胶支座为研究对象,用ABAQUS建立支座有限元模型。橡胶材料选择为G4,剪切模量为0.392 MPa,计算中考虑几何非线性,钢材材料为Q235,弹性模量选 $2.06\times 10^5\text{ MPa}$ ,泊松比为0.3。

建立支座整体的几何模型,支座的上下封板、夹层钢板采用八节点六面体单元C3D8R,橡胶材料一般选择基于应变能密度超弹性材料的本构关系,采用杂交单元C3D8H单元,本文采用Neo-Hookean模型,对于G值为0.392的橡胶材料,参数取值如下: $C10=0.196$ , $D1=0.001$ 。 $C10$ 为应变

能密度系数, $D1$ 为体积压缩相关系数。

橡胶与钢板之间是高温硫化而成,部件创建过程忽略橡胶与钢板层之间的粘结强度问题,使得橡胶与钢板共用节点。在实际加载过程,支座上下表面与机器是刚性连接,故此,固定下封板的平动与转动六个自由度,固定上封板的转动自由度。在后处理过程中,可通过计算下表面中心位置的竖向反力,以及上表面中心位置的竖向位移,计算竖向刚度。图4为厚层橡胶支座的模型。

《橡胶支座第4部分:普通橡胶支座GB20688.4—2007》<sup>[15]</sup>中规定,硬度为50的天然橡胶拉伸强度为18 MPa,夹层钢板的强度设计值为215 MPa。

当竖向压力为4 MPa时,即竖向作用力为121.262 kN,支座最大应力为40.24 kN,出现在支座的夹层钢板,而橡胶层最大应力为6.9 MPa,两者均为未达到强度设计值,支座有一定的强度和稳定性。此时支座的竖向刚度为1.751 kN/mm,与试验值相差2.22%,有效验证了有限元模拟的可靠性。

3 多工况有限元模拟

3.1 竖向刚度影响因素分析

下文将研究厚层橡胶支座外径 $D$ 、中心孔径 $d$ 、橡胶厚度 $t_r$ 、剪切模量 $G$ 、竖向压力 $P$ 、橡胶层层数 $n$ 对厚层橡胶支座竖向刚度的影响。在保证其余参数不变的情况下,设计了18个支座,基本参数见表2。

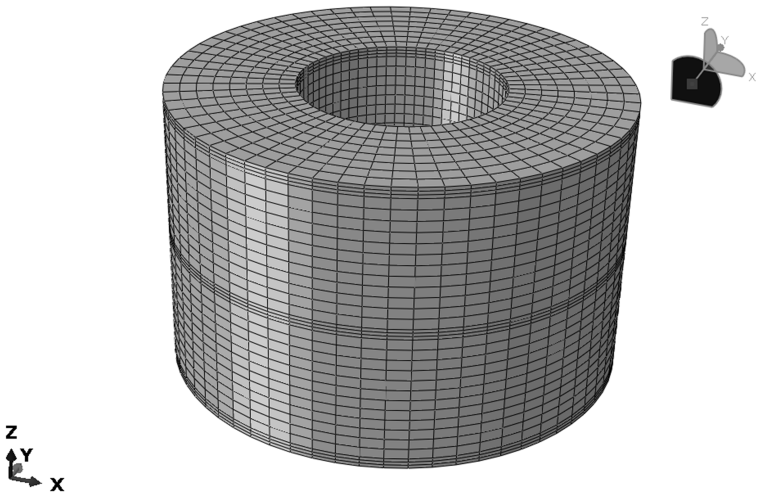


图4 厚层橡胶支座建模与分网

Fig.4 Modeling and meshing of thick rubber bearing



表2 支座基本参数  
Table 2 Basic parameters of bearing

编号	支座外径 $D$ /mm	中孔直径 $d$ /mm	单层橡胶厚 度/mm	橡胶层数 $n$	单层钢板厚度 /mm	内部钢板 层数	橡胶剪切模量 /MPa	$S_1$
1	250	0	22	2	5	1	0.392	2.84
2	500	0	22	2	5	1	0.392	5.68
3	800	0	22	2	5	1	0.392	9.09
4	1000	0	22	2	5	1	0.392	11.36
5	500	80	22	2	5	1	0.392	4.77
6	500	160	22	2	5	1	0.392	3.86
7	500	320	22	2	5	1	0.392	2.05
8	500	80	10	2	5	1	0.392	10.5
9	500	80	15	2	5	1	0.392	7
10	500	80	40	2	5	1	0.392	2.63
11	500	80	60	2	5	1	0.392	1.75
12	500	80	22	2	5	1	0.48	4.77
13	500	80	22	2	5	1	0.55	4.77
14	500	80	22	2	5	1	0.8	4.77
15	500	80	22	2	5	1	1	4.77
16	500	80	14.67	3	5	2	0.392	7.15
17	500	80	11	4	5	3	0.392	9.54
18	500	80	8.8	5	5	4	0.392	11.93

3.1.1 橡胶层支座外径  $D$  的影响

橡胶支座外径对实际竖向刚度的影响是直观的，支座参数选择表中的1~4，在轴向压力为4 MPa下，随着支座外径的增大，竖向刚度呈非线性增大，且外径越大，竖向刚度增加的越快。支座外径在1000 mm时候，竖向刚度达到近5000 kN/mm，相应的竖向变形量也十分小，无法通过隔震支座自身的变形起到一种耗能的效果，此时的橡胶支座不适合用做隔震支座，故选择支座外径较小的支座。如图5。

3.1.2 橡胶层中心孔径  $d$  的影响

实践中，厚层橡胶支座中心会预留一些孔径，来安装铅芯棒，以此达到竖向—水平三维隔震效果，因此考虑中心孔径对竖向刚度的影响很有必要。由图6可知，竖向刚度随着中心孔径的增大而减小，近似呈线性递减，且对于直径较大的支座，下降得越明显。

3.1.3 橡胶层  $G$  值的影响

实际工程中可能会遇到不同  $G$  值的隔震橡胶支

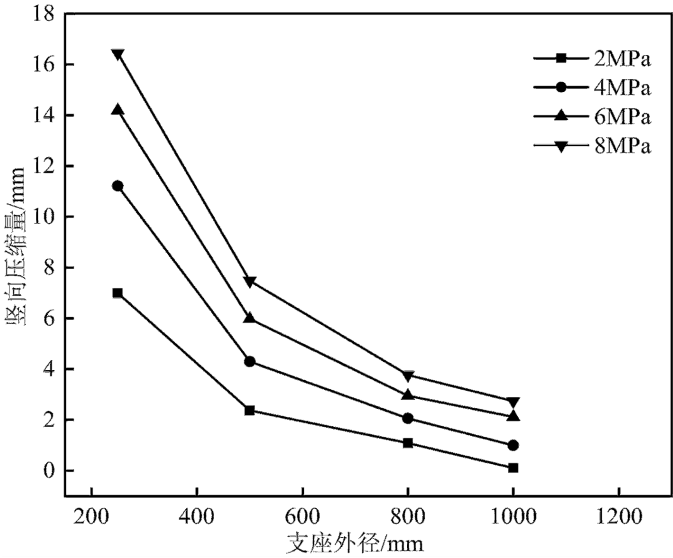
座，此处分析了不同竖向压力、不同  $G$  值的厚层橡胶支座，由图7可得竖向刚度随着橡胶层  $G$  值的增大呈线性增加，且在相同  $G$  值的情况下，随竖向压力的增大呈正比。

3.1.4 单层橡胶层厚度  $t_r$  的影响

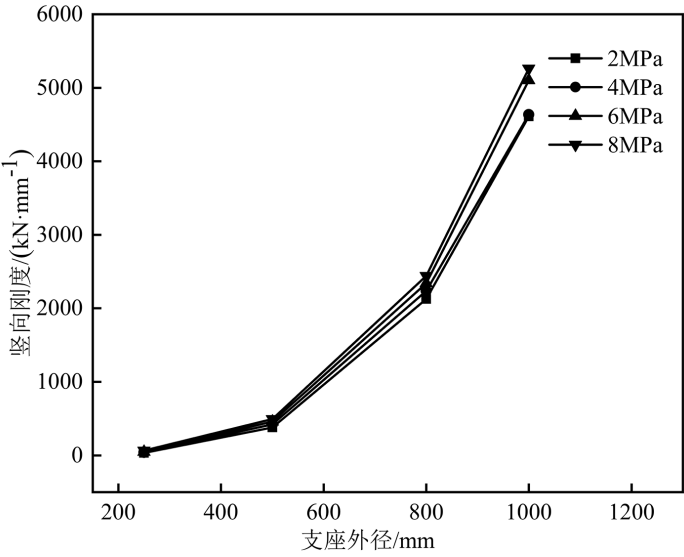
改变橡胶单层厚度，研究其对竖向刚度的影响。由图8所示，随着橡胶层厚度的增大，竖向刚度是非线性减少的，主要原因是橡胶层厚度越大，内部钢板对橡胶的约束能力越弱，橡胶的套箍效应就越弱，刚度就越小。橡胶厚度在(10~20)时的竖向刚度下降速度要大于厚度在(22~60)时的。

3.1.5 橡胶层层数  $n$  的影响

保证橡胶层总厚度不变，增加橡胶层层数，由于橡胶层层数的增加，钢板的层数也在增加，在4 Mpa的作用下，竖向刚度呈递增趋势，且递增速度逐渐上升，层数过大，竖向变形会越小，当选择厚层橡胶支座为竖向隔震支座时候，实际工程中应合理的选择橡胶层层数。



(1) 竖向压缩量



(2) 竖向刚度

图5 支座外径对竖向刚度的影响

Fig.5 Influence of bearing outer aperture on vertical stiffness

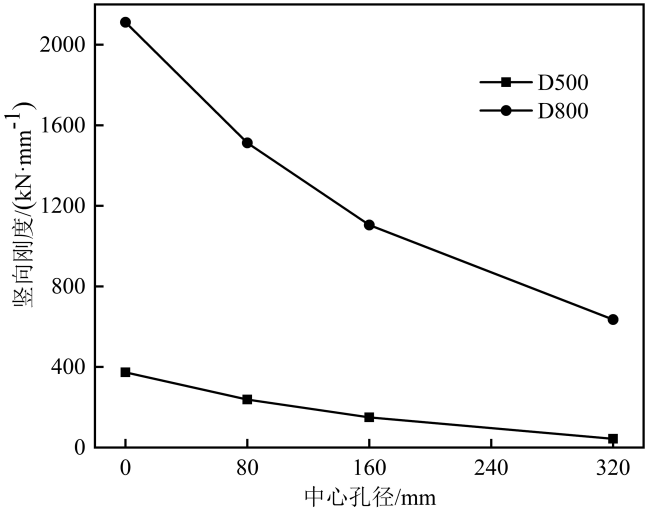


图6 支座中心孔径对竖向刚度的影响

Fig.6 Influence of bearing center aperture on vertical stiffness

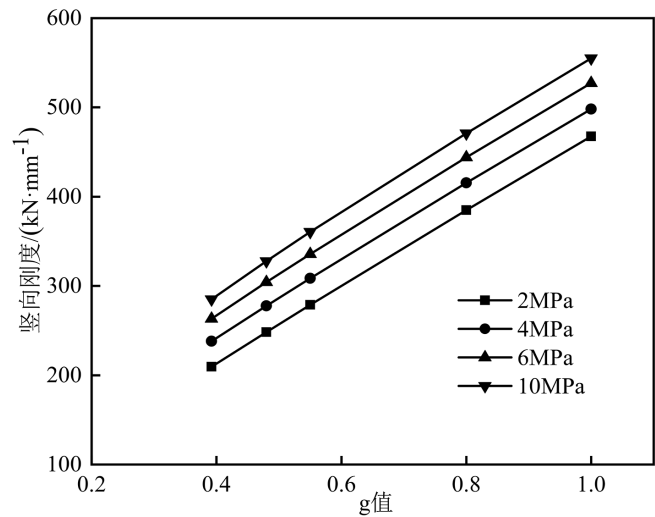


图 7  $G$  值对竖向刚度的影响  
Fig.7 Influence of  $G$  value on vertical stiffness

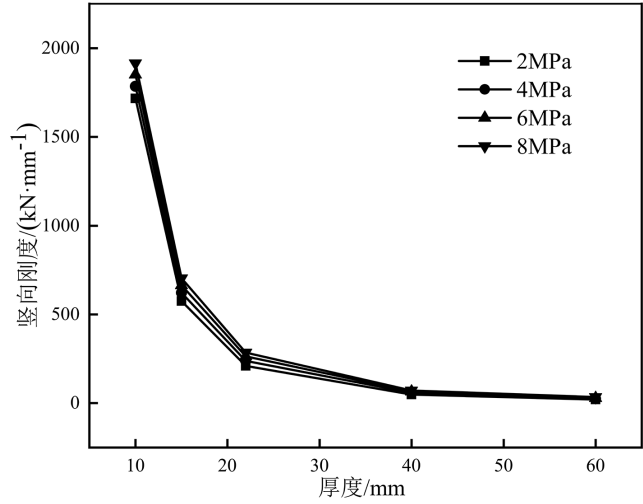


图 8 橡胶层厚度对竖向刚度的影响  
Fig.8 Influence of rubber layer hickness on vertical stiffness

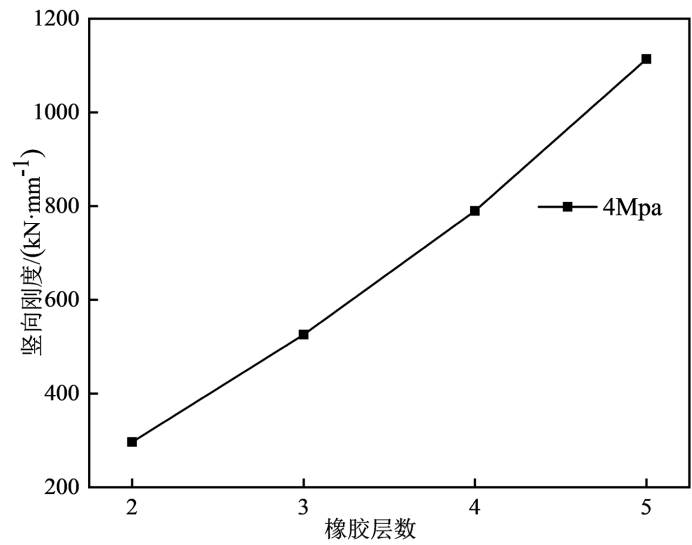


图 9 橡胶层数对竖向刚度的影响  
Fig.9 Influence of rubber layers on vertical stiffness

3.1.6 竖向压力的影响

为研究不同竖向压力下，厚层橡胶支座竖向刚度的影响，选取表2中所有几何参数下的支座，选择4 MPa作用下的厚层支座橡胶的竖向刚度结果

为基准，归一化后不同竖向压力的刚度比值，并拟合成函数。如图10所示，刚度比值随竖向压力致呈线性增加，拟合公式是一条斜率为0.044的直线。

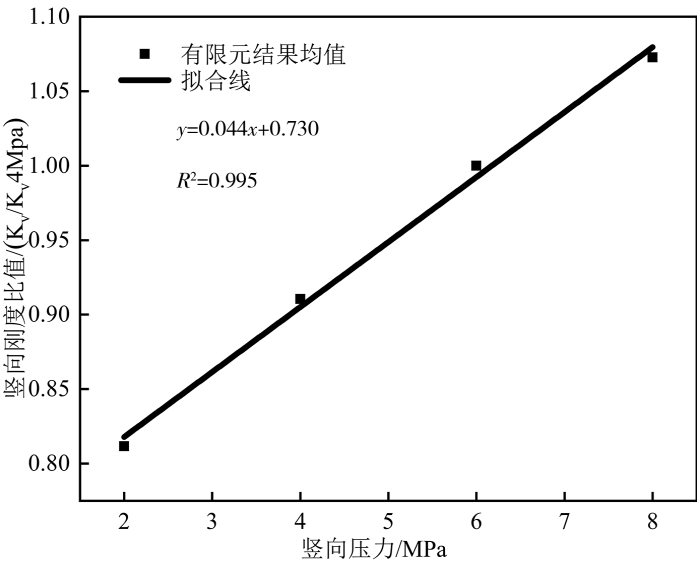


图10 不同竖向压力下的竖向刚度比值  
Fig.10 Vertical stiffness ratio under different vertical pressures

4 厚层橡胶支座竖向刚度的修正

4.1 厚层橡胶支座竖向刚度公式的修正

上节可知，厚层橡胶支座竖向刚度的大小跟橡胶层的厚度、层数、直径有关， $S_1$ 与橡胶层变形

约束有关。  
第一形状系数 $S_1$ 是橡胶受约束面积与单层橡胶的自由表面积之比。将上述结果进行归纳，以竖向压力为4 MPa为例，得出在不同 $S_1$ 下的竖向刚度的大小关系，将实际值进行拟合，近似呈五次项曲线，如图11所示。在 $S_1$ 小于7时，有较强的拟合性。

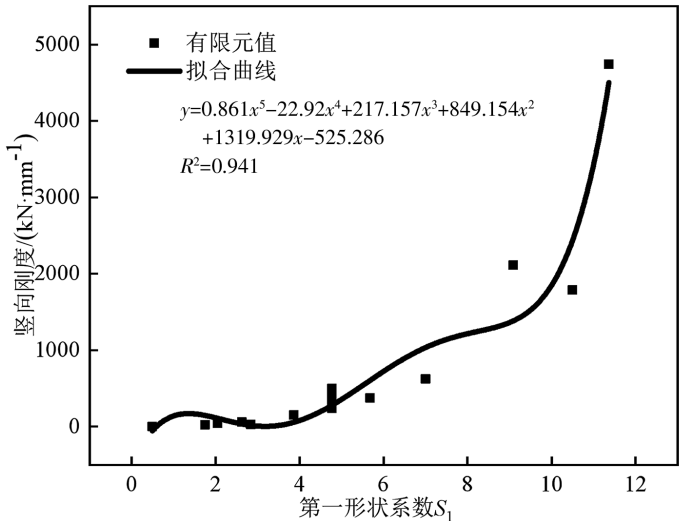


图11 不同 $S_1$ 下的竖向刚度  
Fig.11 Vertical stiffness under different  $S_1$  values



提出竖向刚度修正公式，引入修正因子 $\beta$

$$K_v^{-1} = \beta \frac{E_{cb}}{nt_r} A$$

( 5 )

式中， $\beta$ 为厚层橡胶支座竖向刚度的修正系数，是

一个关于竖向压力一次项， $S_1$ 为五次项的二元多项式； $K_v^{-1}$ 为竖向刚度修正公式

如图 12，通过二元函数拟合，结果如下：

$$\beta = 1.954 - 1.142*S_1 + 0.55*S_1^2 - 0.118*S_1^3 + 0.011*S_1^4 - 0.0003*S_1^5 + 3.749*(\frac{s}{s_0})$$

$$- 2.249*S_1*\frac{s}{s_0} + 0.609*S_1^2*\frac{s}{s_0} - 0.062*S_1^3*\frac{s}{s_0} + 0.002*S_1^4*\frac{s}{s_0}$$

( 6 )

式(6)中： $s_0$ 为设计压力，在此是 4 MPa。

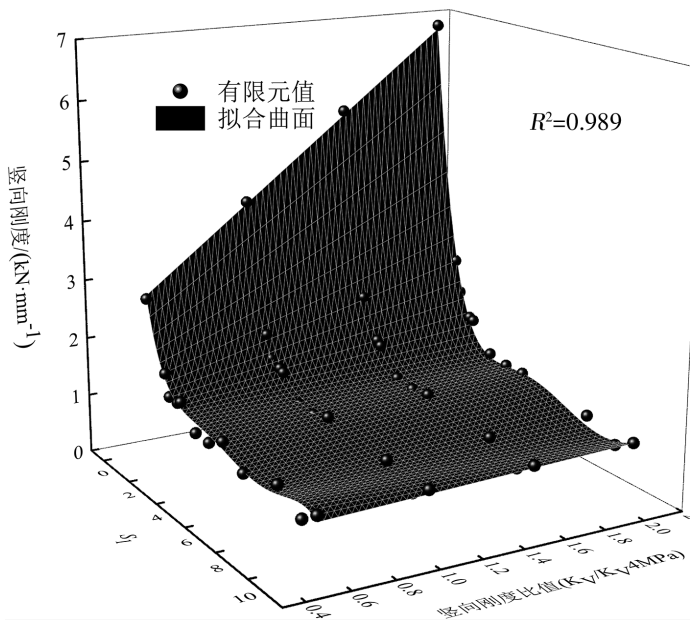


图 12  $\beta$ 的拟合公式  
Fig.12 The fitting formula of  $\beta$

表 3 厚层橡胶支座竖向刚度结果对比  
Table 3 Comparison of vertical stiffness of thick rubber bearing

外径 /mm	中孔直径 /mm	单层橡胶厚度 /mm	橡胶层数/n	修正因子/ $\beta$	有限元结果 /(kN·mm <sup>-1</sup> )	公式结果 /(kN·mm <sup>-1</sup> )	误差率 /(%)
600	100	25	2	1.56	431.67	439.94	1.91
400	50	22	2	1.81	168.61	168.53	0.05

4.2 竖向刚度公式的验证

取橡胶层剪切模量为 0.392 MPa，竖向压力取为 4 MPa，支座内钢板均为 5 mm 的 D600 与 D400 厚层橡胶支座进行有限元分析，并将有限元结果与竖向刚度修正公式进行对比。结果如表 3，可以看出有修正公式与厚层橡胶支座竖向刚度有限元结

果吻合，对应的误差分别在 1.91%、0.05%，有效验证了公式在  $S_1$  小于 7 时的吻合性。

5 竖向刚度公式的对比

本文将拟合出的公式与线性修正与积分修正方法进行对比。线性修正方法考虑支座在压缩时

会产生  $d_v$  的竖向位移, 橡胶层总厚度减小, 刚度可按式计算:

$$K_v = \frac{E_{cb}}{nt_r - d_v} A \quad (7)$$

式中:  $d_v$  为橡胶层竖向压缩量

积分修正考虑了在橡胶受压缩后的变形在沿橡胶层厚度方向变化是呈抛物线形式, 不仅产生了竖向压缩, 还产生了一定量的横向变形, 这种积分计算的方式如下:

$$\frac{1}{K_v^2} = \int_{-\frac{tr-d}{2}}^{\frac{tr-d}{2}} \frac{1}{E_{cb} A(x)} dx = \int_{-\frac{tr-d}{2}}^{\frac{tr-d}{2}} \frac{4}{\pi E_{cb} D(x)^2} dx \quad (8)$$

取外径为 500 mm, 内径为 80 mm 的厚层橡胶支座, 橡胶的剪切模量 0.392 MPa, 保持钢板厚度不变, 钢板与橡胶层层数不变, 改变橡胶层单层

厚度, 使得第一形状系数分别为 1.75、3.5、4.77、10.5。将拟合的公式与两种计算方法进行比较, 结果如图 13。

厚层橡胶支座第一形状系数  $S_1$  小于 7 时, 有限元结果与拟合公式较为吻合, 误差分别为 7.16%、7.05%、14.49%、16.4%, 但在  $S_1$  为 10.5 时, 误差高达 307.36%, 明显已不适用, 此拟合公式适用于  $S_1$  小于 7 时;  $S_1$  小于 7 时, 积分算法的竖向刚度值明显大于其他两种算法, 比线性算法高了 1.87 倍, 比本文提出的拟合公式高了 1.6 倍, 推测原因是积分算法考虑了厚层橡胶支座在受到竖向压缩后, 是体积变形, 竖向变形量小, 竖向刚度会增大; 对厚度较小的叠层橡胶支座而言, 采用线性算法更为合适。

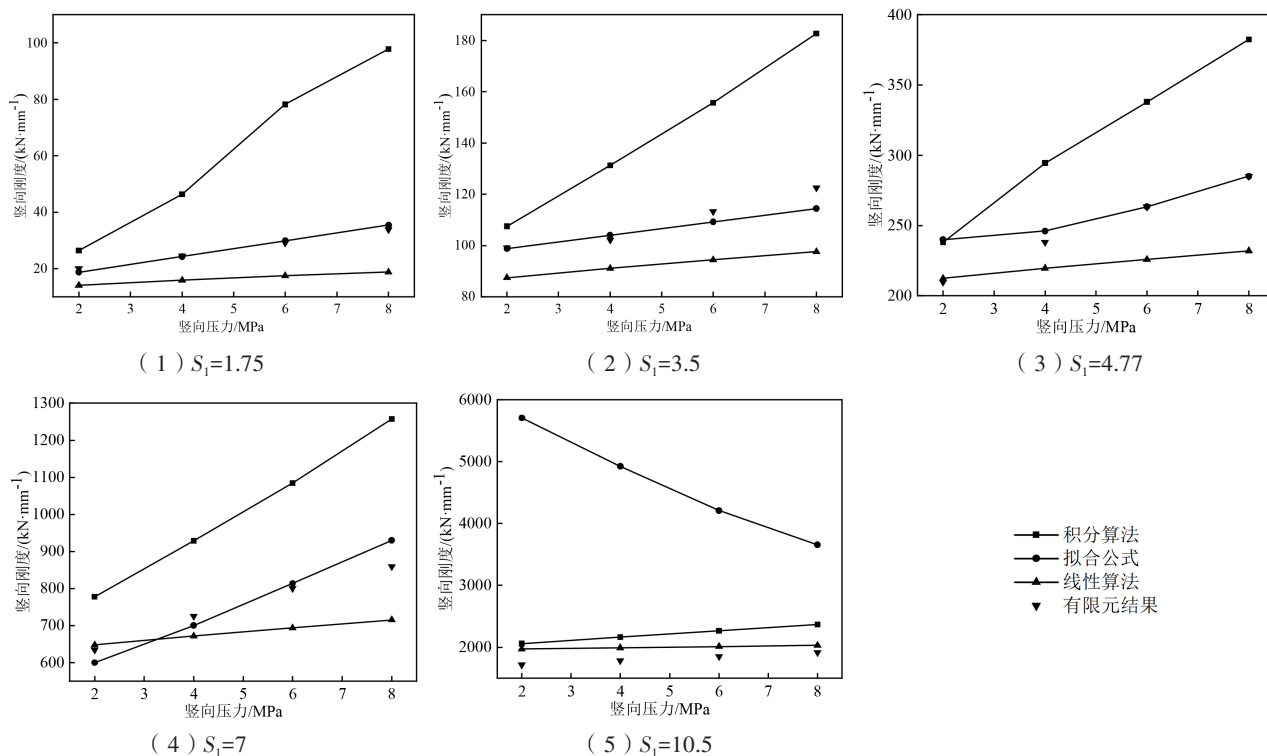


图 13 不同  $S_1$  下几种算法的对比图

Fig.13 Comparison of several algorithms under different  $S_1$  value

## 6 结论

本文在进行厚层橡胶支座的竖向压缩试验的基础上, 采用有限元软件对厚层橡胶隔震支座竖向刚度影响因素进行了分析, 并拟合出了厚层橡胶支座竖向刚度公式修正公式, 研究表明:

(1) 厚层橡胶隔震支座竖向刚度的大小跟单层橡胶层厚度、支座内径呈反比, 随橡胶层剪切模量  $G$ 、竖向压力、支座外径、橡胶层数的增加而增加。竖向刚度不足以全面反映橡胶支座的竖向性能, 竖向变形量也需要考虑在内, 选择合适尺寸的厚层橡胶支座很重要。

(2) 厚层橡胶的竖向刚度跟竖向压力、 $S_1$  有关,

提出竖向刚度拟合公式,通过拟合竖向刚度修正因子与 $S_1$ 、竖向压力的曲线,发现修正因子是一个关于 $S_1$ 为五次项、竖向压力为一次项的二元多项式,此公式适用于 $S_1$ 小于7时,公式计算结果与有限元结果误差在16.4%以内。

(3)将本文拟合的公式与线性算法、积分算法进行对比,积分算法的结果会明显高于其他两种算法,对于第一形状系数小于7时,可以用本文拟合的公式,对于形状系数大于7的橡胶支座,可以用线性算法作为计算。

### 参考文献

- [1] 谢鹏,付康. 竖向减隔震技术的研究现状[J]. 江西建材, 2017(24):57-58
- [2] Seigenthaler R. Earthquake-proof building supporting structure with shock absorbing damping elements[J]. Schweizerische Bauzeitung, 1970(20):102-109.
- [3] 王涛,王飞,丁路通. 核电厂三维隔震技术的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 2012,45(S1):238-242.
- [4] 王涛,李吉超,王飞. 针对核电厂三维隔震的厚层橡胶支座力学性能研究[J]. 核动力工程, 2015,36(05):37-40.
- [5] Yu L, You Z. Simulation of cyclic loading tests for asphalt mixtures using user defined models within discrete element method[J]. Geotechnical Special Publication, 2008 (179): 742-749.
- [6] 杨彦飞,何文福. 橡胶隔震支座基本力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2010,26(05):6-9.
- [7] 何文福,刘文光,杨彦飞,等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(03):258-263.
- [8] Lindley P B. Load-compression relationships of rubber units [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1966, 1 (3):190-195.
- [9] Yabana S, Matsuda A. Mechanical properties of laminated rubber bearings for three-dimensional seismic isolation[C]// Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: WCEE, 2000.
- [10] 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(09):1189-1194+1233.
- [11] 邹立华,饶宇,黄凯,等. 预应力厚层橡胶支座隔震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(02):76-82.
- [12] 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(09):157-165.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 橡胶支座 第3部分:建筑隔震橡胶支座 GB/T 20688.3—2006 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 橡胶支座 第4部分:普通橡胶支座:GB/T20688.4—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.