

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.02.003

# 上下表面有相对转动的橡胶隔震支座 水平力学性能研究

徐忠根<sup>1</sup>, 朱祥盛<sup>1</sup>, 邓长根<sup>2</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究上下表面有相对转动的橡胶隔震支座水平力学性能, 利用有限元分析软件 ABAQUS 分析了支座无初始转角和有初始转角时的支座水平性能, 进而得出了水平刚度与水平剪应变之间的变化趋势。结果表明: 在小剪应变下, 支座的水平刚度先随转角的增大而减小, 接着随转角的增大而增大, 最终趋于相等; 与无转角相比, 水平刚度随转角增大而增大, 使得支座在设防烈度下具有较大的安全富余; 在工程受力范围内, 竖向压力对水平刚度的影响较小。

**关键词:** 隔震技术; 橡胶隔震支座; 大跨度空间结构; 初始转角

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0016-05

## Horizontal Mechanical Properties of Rubber Bearings with Relative Rotation Between Upper and Lower Faces

XU Zhonggen<sup>1</sup>, ZHU Xiangsheng<sup>1</sup>, DENG Changgen<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to analyze the horizontal mechanical properties of the rubber bearings with relative rotation between upper and lower faces, this paper use the finite element software ABAQUS to analyze the horizontal mechanical properties with and without initial rotation angle, the varying trends of horizontal stiffness and shear strain are obtained. The results show that when shear strains are small, the horizontal stiffness of bearings decreases at first with the increases of the rotation, and then increases, and finally tended to equal. Comparing results without rotation the values of the horizontal stiffness increases with the increases of the rotation, so it has a large safety margin under the seismic precautionary intensity. The vertical pressures have little effect on the horizontal stiffness in the engineering stress range.

**Keywords:** seismic isolation technique; rubber bearings; large-span spatial structures; initial rotation angle

隔震结构能减小地震力传递至上部结构, 减轻上部结构破坏, 保护建筑构件和减轻二次破坏, 被认为是一种新型有效的减震技术。基础隔震是指在结构物底部与基础面(或底部柱顶)之间设置隔震装置, 从而通过延长结构周期(2 s ~ 4 s)来达到减小上部结构加速度反应(降为传统结构的 1/4 ~ 1/12)<sup>[1]</sup>, 其良好的隔震效果已多次在实际工程中得到体现。除基础隔震外, 国内许多学者还进行了层

间隔震方法及相关研究, 得出了层间隔震也有较好的隔震效果<sup>[2-6]</sup>。目前, 隔震结构中应用最广泛和成熟的隔震装置是隔震橡胶支座, 该支座是由多层橡胶和多层薄钢板交替叠合经高温硫化粘结而成, 两者紧密连接, 钢板的存在约束了橡胶的侧向变形, 使支座具有很大的竖向承载能力; 橡胶的存在使得支座水平向刚度较小, 在地震作用下能提供较大的水平变形, 从而减轻地震灾害。规范<sup>[7]</sup>规定支座最

收稿日期: 2016-12-25

修稿日期: 2017-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678172, 51478330, 51408142)

作者简介: 徐忠根(1965—), 男, 浙江金华人, 教授, 研究员, 主要从事隔震和钢结构稳定方面的研究。E-mail: xuzhonggen@263.net

通讯作者: 朱祥盛(1991—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为隔震方面的研究。E-mail: 549191056@qq.com

大水平变形应大于其有效直径的 0.55 倍和支座内部橡胶总厚度 3 倍二者的较大值。因此,橡胶隔震支座的水平性能是决定支座力学性能优劣的关键指标,虽然国内外关于上下表面无初始转角隔震支座的力学性能已有大量研究,但对于上下表面有相对转角的隔震支座力学性能研究较少,而大跨度空间结构中经常使用橡胶隔震支座且大跨度空间结构具有支座转动问题<sup>[8-10]</sup>。

周锡元等<sup>[11]</sup>较早对叠层橡胶支座的稳定性进行理论分析,建立组合橡胶支座分析模型,用等效均质柱模型推导了支座临界力方程和水平刚度系数计算公式,接着对参数特殊分析,得出橡胶支座与 R/C 柱串联时的水平刚度计算公式,同时也得出了柱顶转角计算公式。刘文光等<sup>[12]</sup>对柱端有转角的隔震橡胶支座进行了试验研究,研究了橡胶支座在恒定或变化回转角发生剪切变形时的力学性能,结果表明,采用柱端隔震时,在一定范围回转角和剪切变形的影响下,铅芯和非铅芯橡胶支座具有可靠的力学性能。Ravari A K 等<sup>[13-14]</sup>基于 Haringx 理论,提出了支座有初始转角的简化计算模型,并推导了支座不

同边界条件下发生初始转角时不同截面处位移、转角及水平刚度理论计算公式,还通过数值分析和试验数据来证明理论计算模型的有效性。

本文首先用有限元分析软件 ABAQUS 分析了两种不同直径支座无初始转角时的水平性能;接下来用有限元方法分析了它们在水平位移加载方向与转角同方向下的支座水平性能,并得出了水平刚度与水平剪应变之间的变化趋势;最终将有限元分析结果与试验结果进行对比分析。

## 1 支座概况

本课题研究对象采用天然橡胶隔震支座,为了避免分析结果的偶然性,采用了 RB-1(直径为 200 mm 的天然橡胶隔震支座)和 RB-2(直径为 400 mm 的天然橡胶隔震支座)两种不同直径支座。直径为 200 mm 的支座上下封板厚度为 10 mm,支座总高度(含上下封板)为 83.78 mm;直径为 400 mm 的支座上下封板厚度为 15 mm,支座总高度(含上下封板)为 132.58 mm。支座相关参数见表 1。

表 1 支座参数

支座编号	$D/\text{mm}$	$D_0/\text{mm}$	$t_r/\text{mm}$	$t_s/\text{mm}$	$n_r$	$n_s$	橡胶层总厚度/mm	$S_1$	$S_2$
RB-1	200	40	2.58	1.5	16	15	41.3	18.0	4.84
RB-2	400	80	3.81	2.0	18	17	68.6	25.5	5.83

注:  $D$  为支座直径;  $D_0$  为支座内部孔洞直径;  $t_r$  为单层橡胶厚度;  $t_s$  为单层钢板厚度;  $n_r$  为橡胶总层数;  $n_s$  为钢板总层数;  $S_1$  为第一形状系数;  $S_2$  为第二形状系数。

## 2 有限元分析

采用大型有限元分析软件 ABAQUS, 钢板材料采用 Q235 钢, 钢板弹性模量  $E$  取  $2.06 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu$  取 0.3, 钢板考虑线弹性; 橡胶材料本构模型采用 Neo-Hooke 模型, 剪切模量  $G$  取 0.55 MPa, 橡胶材料参数  $C_{10}$  取 0.275 MPa, 橡胶材料参数  $D_1$  取 0.001 MPa。采用六面体结构划分, 橡胶材料采用三维八结点线性六面体杂交单元 C3D8H, 钢板采用三维八结点线性六面体非协调单元 C3D8I, 支座模型及网格划分见图 1。

### 2.1 加载控制

分析计算时先采用位移控制来实现初始转角, 转角方向统一与  $X$  轴同向, 支座转角设有 0.000 rad、0.010 rad 和 0.015 rad, 共 3 组; 接着施加竖向压力, 为了模拟实际工程要求, 竖向压力  $\sigma$  设有 10

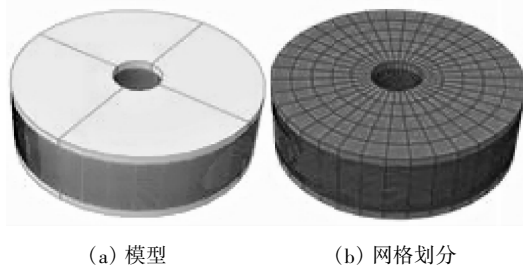


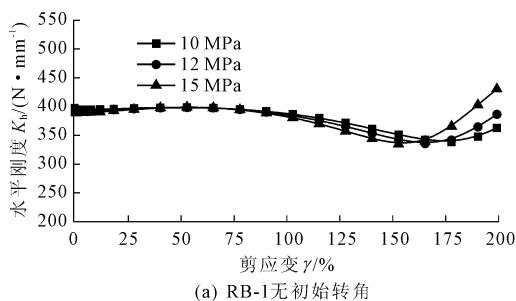
图 1 支座模型及网格划分

MPa、12 MPa 和 15 MPa, 共 3 组; 最终保持竖向压力不变, 进行  $X$  向水平位移加载, 旨在模拟地震水平力传递与初始转角同向, 水平位移以 25% 剪应变(水平位移与橡胶总厚度比值)为梯度。分析水平刚度为  $K_{50}$ (支座在水平剪应变为 50% 时的水平有效刚度, 相当于多遇地震时)、 $K_{100}$ (支座在水平剪应变为 100% 时的水平有效刚度, 相当于设防烈度地震

时)的数值及水平刚度与剪应变之间的变化趋势。

## 2.2 无初始转角水平刚度分析

图 2 表示两种不同直径支座  $X$  向水平位移加载下的水平刚度 - 剪应变曲线。从图 2(a)、图 2(b) 可看出, 支座水平刚度先随剪应变的增大而减小, 隔震层能发生较大水平位移, 具有较好的隔震效果; 接



着在大剪应变下支座水平刚度增大, 并且水平刚度增大趋势随支座直径的增大而有所增大, 此时对隔震层的水平侧移起限位作用, 使结构在强地震中不致产生过大的水平位移<sup>[1]</sup>。从图中还可看出, 在小剪应变下, 水平刚度随竖向压力变化不大; 在大剪应变下, 水平刚度会随竖向压力的增大而减小。

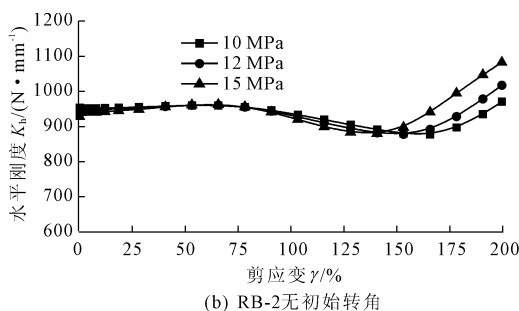


图 2 不同直径支座的水平刚度 - 剪应变曲线

表 2、表 3 分别给出了 RB-1 和 RB-2 在  $X$  向水平位移加载下的水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  之间的比值(以  $K_{100}$  为基准)。由表 2 和表 3 可知,  $K_{50}$  与  $K_{100}$  相差不大, 符合文献[15]所述的按多遇地震验算时 50% 剪应变的水平刚度稍大于按设防烈度地震验算时 100% 剪应变水平刚度的规定; 水平刚度  $K_{100}$  随竖向压力的增大而减小。

表 2 RB-1 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

竖向压力 /MPa	水平刚度/( $N \cdot mm^{-1}$ )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
10	397.6	388.1	1.024
12	397.9	385.8	1.031
15	398.7	382.9	1.041

表 3 RB-2 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

竖向压力 /MPa	水平刚度/( $N \cdot mm^{-1}$ )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
10	958.4	937.4	1.022
12	959.1	932.1	1.029
15	959.9	925.6	1.037

根据文献[16], 天然橡胶隔震支座水平刚度计算公式如下:

$$K_h = \frac{GA_s}{T_r} \quad (1)$$

式中:  $K_h$  为支座水平刚度;  $G$  为剪切模量;  $A_s$  为支座有效承压面积;  $T_r$  为支座橡胶总厚度。该公式为支座在常温下的水平刚度计算公式, 竖向压力一般为

10 MPa, 水平剪应变为 100%。根据该公式, 代入相应支座参数, 求得水平剪应变为 100% 时的水平刚度为:

$$RB-1, K_h(100\%) = 401.6 \text{ N/mm} \quad (2)$$

$$RB-2, K_h(100\%) = 967.5 \text{ N/mm} \quad (3)$$

与有限元结果对比, 偏差分别为 3.36% 和 3.11%, 均在 5% 以内, 有限元分析结果与理论计算吻合很好。

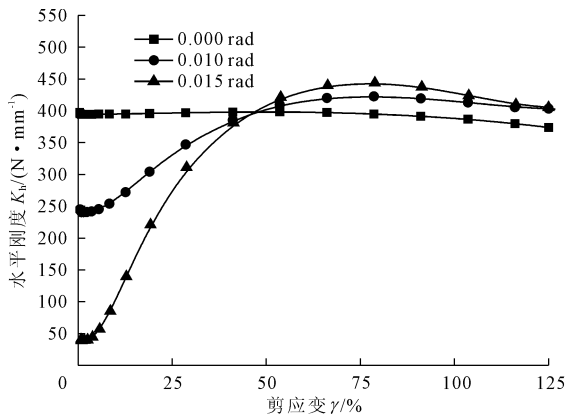
## 2.3 有初始转角水平刚度分析

### 2.3.1 RB-1 的水平刚度分析

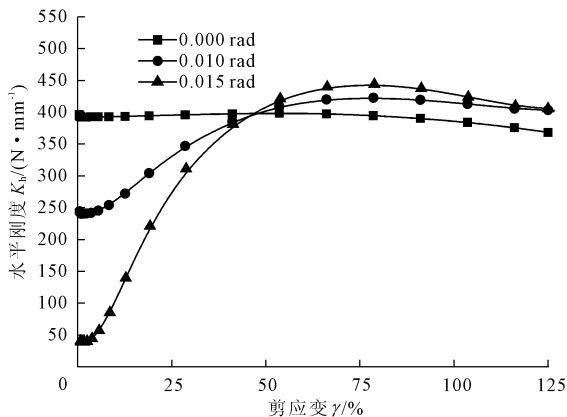
图 3 表示竖向压力  $\sigma$  为 10 MPa、12 MPa 和 15 MPa, 初始转角为 0.000 rad、0.010 rad 和 0.015 rad 时的水平刚度 - 剪应变曲线。从图 3 可看出, 有初始转角下, 当剪应变小于 75% 时, 水平刚度随剪应变的增大而增大, 接着随剪应变的增大而减小, 减小幅度逐渐变缓; 当剪应变小于 47.5% 时, 水平刚度随转角的增大而减小, 接着随转角的增大而增大, 最终趋近于相等; 与 0.000 rad 转角相比, 当剪应变小于 47.5% 时, 有转角的支座水平刚度都小于 0.000 rad 转角的支座水平刚度, 后来有转角的支座水平刚度大于 0.000 rad 转角的支座水平刚度。

表 4、表 5 和表 6 分别表示竖向压力  $\sigma$  为 10 MPa、12 MPa 和 15 MPa, 初始转角为 0.000 rad、0.010 rad 和 0.015 rad 时的水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  之间的比值(以  $K_{100}$  为基准)。从表中可看出, 工程压力范围内, 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值变化不大;  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值都随转角的增大而增大;  $K_{50}/K_{100}$  的值

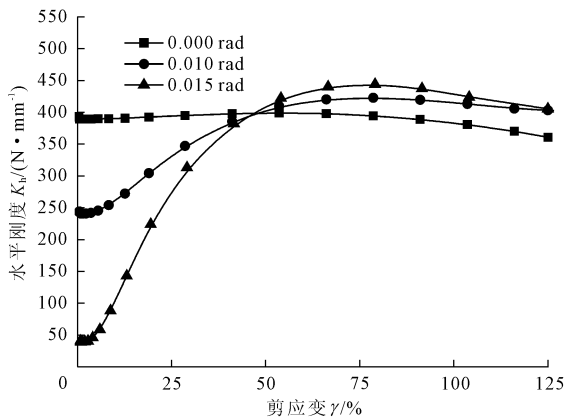
随转角的增大而减小。



(a) 竖向压力为10 MPa



(b) 竖向压力为12 MPa



(c) 竖向压力为15 MPa

图 3 不同竖向压力作用下的水平刚度 - 剪应变曲线(RB-1)

表 4  $\sigma = 10$  MPa 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	398.2	389.3	1.023
0.010	401.9	414.8	0.969
0.015	407.7	428.3	0.952

表 5  $\sigma = 12$  MPa 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	397.9	385.8	1.031
0.010	401.8	415.1	0.968
0.015	407.8	428.2	0.952

表 6  $\sigma = 15$  MPa 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	398.7	382.9	1.041
0.010	401.8	415.0	0.968
0.015	407.9	428.2	0.953

### 2.3.2 RB-2 的水平刚度分析

图 4 表示竖向压力  $\sigma$  为 10 MPa、12 MPa 和 15 MPa,初始转角为 0.000 rad、0.010 rad 和 0.015 rad 时的水平刚度 - 剪应变曲线。从图 4 可看出,有初始转角下,当剪应变小于 75% 时,水平刚度随剪应变的增大而增大,接着随剪应变的增大而减小,减小幅度逐渐平缓;在剪应变 50% 之前,水平刚度随转角的增大而减小,接着随转角的增大而增大,最终趋近于相等;与无转角相比,当剪应变小于 50% 时,有转角的支座水平刚度都小于无转角的支座水平刚度,后来有转角的支座水平刚度大于无转角的支座水平刚度。

表 7、表 8 和表 9 分别表示竖向压力  $\sigma$  为 10 MPa、12 MPa 和 15 MPa,初始转角为 0.000 rad、0.010 rad 和 0.015 rad 时的水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  两者的比值(以  $K_{100}$  为基准)。从表中可看出,在工程受力范围内,水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值变化不大; $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值都随转角的增大而增大; $K_{50}/K_{100}$  的值随转角的增大而减小。

表 7  $\sigma = 10$  MPa 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	958.7	942.4	1.017
0.010	964.4	1028.3	0.938
0.015	968.9	1057.1	0.917

表 8  $\sigma = 12$  MPa 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	959.1	932.1	1.029
0.010	964.4	1028.6	0.938
0.015	969.3	1057.1	0.917

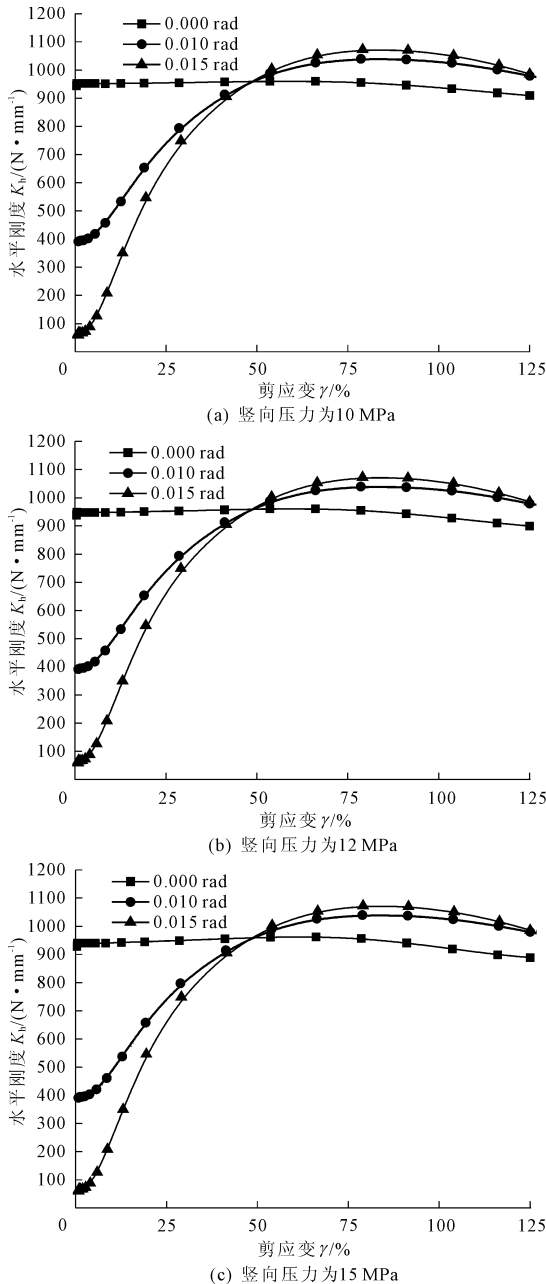


图 4 RB-2 不同竖向压力作用下的水平刚度 - 剪应变曲线

表 9  $\sigma = 15 \text{ MPa}$  水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的值及其比值

转角 /rad	水平刚度/( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ )		比值 $K_{50}/K_{100}$
	$K_{50}$	$K_{100}$	
0.000	959.9	925.6	1.037
0.010	964.4	1028.4	0.938
0.015	969.4	1057.3	0.917

### 2.3.3 与试验结果对比分析

根据文献[12]的试验结果,建立了与之一致的支座模型 RB-3(直径为 300 mm 的天然橡胶隔震

支座),RB-3 支座参数见表 10。

表 10 RB-3 支座参数

$D/\text{mm}$	$D_0/\text{mm}$	$t_r/\text{mm}$	$t_s/\text{mm}$	$n_r$
300	60	2.6	2.4	24
$n_s$	橡胶层总厚度/mm		$S_1$	$S_2$
23	62.4		23.1	4.8

接着用有限元方法分析了 RB-3 的水平性能,并与试验结果作对比。表 11 给出了 RB-3 竖向压力  $\sigma$  为 10 MPa,转角为 0.010 rad 水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的有限元分析结果和试验结果与支座 0.000 rad 转角时相应水平刚度的比值,比值均以 0.000 rad 下剪应变为 100%时的水平刚度值基准化得到,且 0.000 rad 下剪应变为 100%时的水平刚度的实验值和有限元分析结果分别为 652.5 N/mm、635.4 N/mm(且有限元结果与试验结果吻合较好,误差为 2.7%,在 5%之内)。

表 11 有限元方法分析与试验对比

分析方法	水平刚度/( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ )		比值	
	$K_{50}$	$K_{100}$	$K_{50}/K'_{100}$	$K_{100}/K'_{100}$
有限元	647.2	671.9	1.02	1.06
试验	783.0	698.2	1.20	1.07

注:有限元一栏  $K'_{100}$ 取 0.000 rad 的水平刚度有限元值 635.4 N/mm,试验一栏取 0.000 rad 时试验值 652.5N/mm。

由表 11 可知,水平刚度  $K_{50}$ 、 $K_{100}$  的有限元分析结果与试验结果偏差分别为 18%、1%,有限元分析结果与文献[9]试验结果吻合较好。

## 3 结论

通过对上下表面有相对转角的两种不同直径隔震支座同向水平位移加载(水平位移加载与转角同方向)进行了水平刚度有限元分析,并且与无转角时的支座水平刚度对比分析,得出以下结论:

(1) 当剪应变较小时,两种不同直径支座水平刚度先随转角的增大而减小,接着随转角的增大而增大,最终趋近于相等。

(2) 当剪应变小于 75%时,有初始转角的支座水平刚度随剪应变的增大而增大,后来随剪应变的增大而减小,减小幅度逐渐平缓。

(3) 在工程受力范围内,竖向压力对水平刚度的影响较小。

(下转第 70 页)

(上接第 20 页)

(4) 与无转角相比,水平刚度  $K_{100}$  的值随转角增大而增大,在地震设防烈度下具有较大的安全富余。

### 参考文献:

- [1] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.
- [2] 徐忠根,胡敏茵,周福霖.房屋建筑中间层隔震研究[J].工程抗震与加固改造,2004(5):23-28.
- [3] 王社良,李慧亮,刘苗苗,等.层间隔震结构的智能混合控制研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):102-105.
- [4] 王社良,曹晓辉.框架结构层间滑移隔震结构隔震效果分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):30-33.
- [5] 黄鹏云,杨 鹏,陈杰平,等.柱顶隔震结构首层柱子设计及动力弹塑性分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):95-99.
- [6] 刘勇军,裘喜芸,许海艳.大底盘层间隔震结构抗震性能研究[J].水利与建筑工程学报,2011,9(2):152-154.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011-2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [8] 翁光远.大跨空间网壳结构竖向及水平地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):32-35.
- [9] 严 慧,董石麟.板式橡胶支座节点的设计与应用研究[J].空间结构,1995,1(2):33-40.
- [10] 薛素铎,张毅刚,曹 资,等.中国空间结构三十年抗震研究的发展与展望[J].工业建筑,2013,43(6):105-116.
- [11] 周锡元,韩 森,曾德明,等.橡胶支座与 R/C 柱串联隔震系统水平刚度系数[J].振动工程学报,1999,12(2):157-165.
- [12] 刘文光,周福霖,庄学真,等.柱端隔震夹层橡胶垫力学性能试验研究[J].地震工程与工程振动,1999,19(3):121-126.
- [13] Ravari A K, Othman I B, Ibrahim Z B, et al. Variations of horizontal stiffness of laminated rubber bearings using new boundary conditions[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(14):3065-3071.
- [14] Ravari A K, Othman I B, Ibrahim Z B, et al. P- $\Delta$  and end rotation effects on the influence of mechanical properties of elastomeric isolation bearings[J]. Journal of Structure Engineering, 2012, 138(6):669-675.
- [15] 中国工程建设标准化协会工程抗震委员会.叠层橡胶支座隔震技术规程:CECS126:2001[S].北京:[出版者不详],2001.
- [16] Elastomeric Seismic-protection Isolators - Part 1: Test Methods: ISO 22672 - 1: 2005[S]. Switzerland, [s. l]: [s. n], 2005.