

文章编号:1673-2049(2017)04-0041-07

有初始转角的隔震支座在不同方向地震水平力作用下的力学性能研究

徐忠根¹, 朱祥盛¹, 邓长根²

(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:为了研究大跨度空间结构支座转动问题,对上下表面发生相对转动的橡胶隔震支座水平力学性能进行了研究。运用有限元分析软件 ABAQUS 研究了支座无初始转角时的水平性能,分析了有初始转角橡胶隔震支座在 X 向、Y 向和 45° 向水平位移加载下的支座水平力学性能,得出了水平刚度与剪应变之间的变化关系。结果表明: X 向和 45° 向水平位移加载时,在小剪应变下,支座水平刚度随初始转角的增大而减小,之后随初始转角的增大而增大; Y 向水平位移加载下,在大剪应变之前,水平刚度随初始转角的增大而减小,之后随初始转角增大而增大;与无初始转角相比,有初始转角的橡胶隔震支座水平刚度较大,使得其在地震设防烈度下的隔震效果较差;在工程受力范围内,3 种不同水平位移加载下,竖向压力的变化对水平刚度的影响较小。

关键词:大跨度空间结构;橡胶隔震支座;初始转角;水平刚度;设防烈度

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Research on Mechanical Properties of Rubber Bearings with Initial Rotation Under Horizontal Seismic Forces in Different Directions

XU Zhong-gen¹, ZHU Xiang-sheng¹, DENG Chang-gen²

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

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

Abstract: In order to analyze the bearing rotation of large-span spatial structures, the horizontal mechanical properties of the rubber bearings with relative rotation between upper and lower faces were studied. The finite element software ABAQUS was used to analyze the horizontal mechanical properties of rubber bearings without initial rotation. Then the horizontal mechanical properties of rubber bearings with initial rotation were analyzed when the horizontal displacement loading in X direction, Y direction and 45° direction. Finally, the varying trends of horizontal stiffness and shear strains were obtained. The results show that when shear strains are small, the horizontal stiffness of bearings decreases with the increases of the rotation at first, and then increases at X direction and 45° direction. When shear strains are large, the horizontal stiffness decreases with the increases of the rotation angle at first, and then increases at Y direction. Comparing with rubber bearings without initial rotation, the horizontal stiffness of the rubber bearings with initial rotation is larger, which makes the seismic isolation effect under seismic fortification intensity worse. In the range of engineering stress, the vertical pressures have little

收稿日期: 2017-02-12

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

作者简介: 徐忠根(1965-), 男, 浙江金华人, 教授, 工学博士, E-mail: xuzhonggen@263.net。

effect on the horizontal stiffness under three different horizontal displacement loading directions.

Key words: large-span spatial structure; rubber bearing; initial rotation; horizontal stiffness; fortification intensity

0 引言

隔震技术通过延长结构基本周期来达到减小上部结构加速度反应且减轻上部结构损坏的隔震效果,使得上部结构在地震作用下作整体“平动”,地震结束时还能很好地恢复原状^[1-2]。橡胶隔震支座通常由多层橡胶和多层钢板交替叠合经高温硫化黏结而成,隔震支座具有巨大的竖向刚度,从而能承受建筑物巨大的竖向压力,水平橡胶层的存在使得隔震支座具有较小的水平刚度,从而保证结构在地震水平分力下能发生较大的水平变形,从而使得建筑上部结构能避开地震危害。

刘文光^[3]通过试验研究了叠层橡胶支座和铅芯橡胶支座回转角对支座力学性能的影响,得出回转刚度与竖向压力和剪切变形三者间的关系,并且拟合出了回转角限值计算公式。刘彦辉等^[4]研究了橡胶隔震支座与地下室悬臂柱组成的串联隔震体系的力-位移($P-\Delta$)效应及叠层橡胶隔震支座转动问题,通过建立简化力学模型,推导出考虑 $P-\Delta$ 效应及叠层橡胶隔震支座转动共同作用下的串联隔震体系的频率方程,然后通过数值分析法求解该串联隔震体系的频率与振型。Ravari 等^[5-6]基于 Haringx^[7]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、转角及水平刚度的理论计算公式,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。结果表明,与支座上下端无初始转角相比,在相同竖向压力下,支座水平位移、内部弯矩和剪力偏大,而水平刚度变小,并且理论分析结果与数值分析结果及试验数据吻合较好。He 等^[8]也根据 Haringx^[7]理论,采用考虑了具有转动、竖向压力和剪切变形的支座分析模型,研究了支座的非线性转动刚度和剪切刚度,并用试验验证了分析模型的有效性,结果表明,支座转动情形下产生的转角对支座力学性能影响较大。周锡元等^[9-10]对叠层橡胶支座的稳定性进行理论分析,由建立的组合橡胶支座分析模型出发,用等效均质柱模型推导了临界力方程和水平刚度系数计算公式,然后对参数进行特殊分析,得出橡胶支座与钢筋混凝土柱串联隔震体系整体水平刚度的计算公式,同时也得出了柱顶转角的计算公式。

隔震支座水平性能是决定隔震效果优劣的重要指标之一。虽然国内外对无初始转角的橡胶隔震支座力学性能已有大量的理论和试验研究,但是关于上下表面有初始转角的隔震支座力学性能研究较少。随着大跨度空间结构中橡胶隔震支座的大量使用,大跨度空间结构常伴有支座转动问题^[11-12],为了研究上下表面有初始转角的橡胶隔震支座水平性能,本文首先用有限元分析软件 ABAQUS 分析了 2 种不同直径支座无初始转角时的水平性能;然后为了模拟地震水平力传递的多向性,分别分析了有初始转角橡胶隔震支座在 X 向、 Y 向和 45° 向水平位移加载下的支座水平性能,并得出了水平刚度与水平剪应变之间的变化趋势,以及相关结论和研究展望;最后根据前人试验结果,建立了与之一致的支座模型,进行了橡胶隔震支座水平性能有限元分析,并将有限元分析结果与试验结果对比。

1 支座概况

本文研究采用天然橡胶隔震支座,为避免分析结果的偶然性,采用 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)2 种支座。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。支座上下封板相对较厚,内有螺栓孔,封板与连接钢板之间用内六角螺栓连接。根据文献^[13]的试验结果建立了天然橡胶隔震支座 RB-3 模型。相关支座参数见表 1。

2 有限元分析

采用大型有限元分析软件 ABAQUS 进行建模,钢板材料采用 Q235 钢,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。钢板弹性模量 E 取 2.06×10^5 MPa,泊松比 ν 取 0.3,钢板考虑线弹性。采用六面体结构划分,钢板采用三维八节点线性六面体非协调单元 C3D8I,橡胶材料采用三维八节点线性六面体杂交单元 C3D8H^[14]。对于模型边界条件,支座下端

表 1 支座参数
Tab.1 Parameters of Bearings

支座编号	D/mm	D_0/mm	t_r/mm	t_s/mm	n_r	n_s	T_r/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
RB-3	300	60	2.60	2.4	24	23	62.4	23.1	4.80

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; T_r 为橡胶层总厚度; S_1 为第一形状系数; S_2 为第二形状系数。

完全固定,无平动和转动自由度;支座上端的转动自由度被约束,平动自由度不约束,使得支座可以发生平动位移。支座模型及网格划分见图 1。

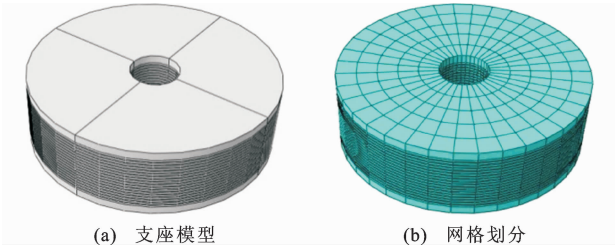


图 1 支座模型及网格划分
Fig.1 Bearing Model and Mesh Generation

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,具体实现方法为:根据初始转角的大小,以支座上表面中心为参考点,对称控制支座上表面 Z 向(ABAQUS 全局坐标系)的位移,通过 ABAQUS 软件上的解析场功能,建立支座竖直方向(Z 向,ABAQUS 全局坐标系)与支座直径方向(X 向,ABAQUS 全局坐标系)内各数值之间的函数关系,从而实现初始转角。例如,直径为 200 mm、初始转角为 0.01 rad 的支座 Z 向与支座直径内各数值之间的函数关系为

$$Z=-0.01X \quad -100\leq X\leq 100 \quad (1)$$

初始转角方向统一与 X 轴(ABAQUS 全局坐标系)同向,支座初始转角 β 设有 0(无初始转角),0.01,0.015 rad 共 3 组;然后施加竖向压力,为了模拟实际工程要求,竖向压力 σ 设有 10,12,15 MPa 共 3 组;最后保持竖向压力不变,进行水平位移 X 向(发生初始水平位移的方向定义为 X 向)、 Y 向(与之垂直的支座面内方向为 Y 向)和 45°向(与之成 45°的支座面内方向为 45°向)加载,旨在模拟地震水平力的多向传递,水平位移以 25%剪应变(水平位移与橡胶总厚度比值)为梯度,分析水平刚度与剪应变之间的变化趋势。全局坐标系及支座参考点(支座上表面参考点 P)见图 2。

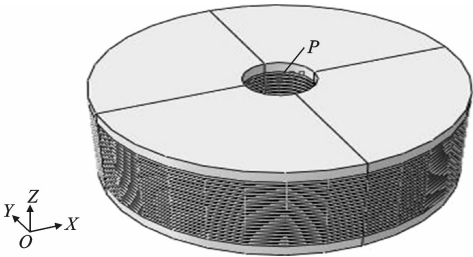


图 2 全局坐标系及参考点
Fig.2 Global Coordinate System and Reference Point

2.2 无初始转角水平刚度分析

支座水平刚度是根据水平力与水平位移之间的导数关系求得,支座水平力是由支座上表面各节点水平力的代数和求得。图 3,4 分别为 2 种不同直径支座无初始转角时 X 向水平位移加载下的水平刚度-剪应变曲线。从图 3,4 可以看出: X 向水平位移加载下,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,使得上部结构整体“平动”,具有较好的隔震效果;然后由于橡胶“硬化”现象,水平刚度在大剪应变下突然增大,并且水平刚度增大趋势随支座直径的增大而有所提前,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^[1]。从图 3,4 还可以看出: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。

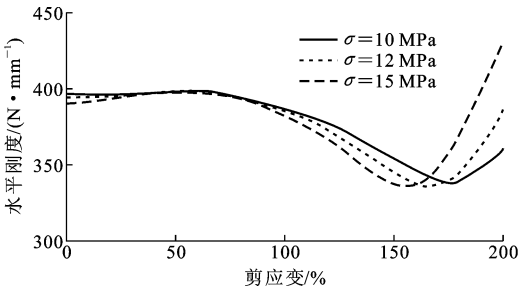


图 3 无初始转角时 RB-1 的水平刚度-剪应变曲线
Fig.3 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-1 Without Initial Rotations

RB-1 和 RB-2 无初始转角且 $\sigma=10$ MPa 时 X 向水平位移加载下的水平刚度 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

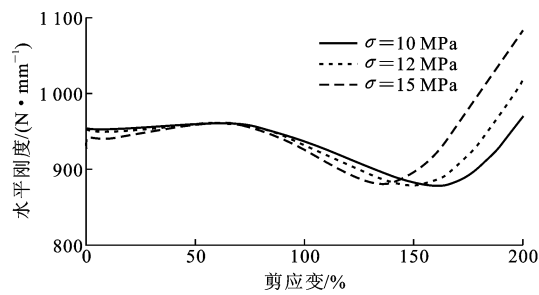


图 4 无初始转角时 RB-2 的水平刚度-剪应变曲线

Fig. 4 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-2 Without Initial Rotations

地震)分别为 388.9,940.7 N·mm⁻¹。

参考文献[15],天然橡胶隔震支座水平刚度计算公式如下

$$K_h = GA_s / T_r \quad (2)$$

式中: K_h 为支座的水平刚度; A_s 为支座的有效承压面积。

公式(2)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 RB-1, RB-2 的水平刚度分别为 401.6, 967.5 N·mm⁻¹。

与有限元结果对比,偏差分别为 3.16% 和 2.77%,均在 5% 以内,有限元分析结果与理论结果吻合很好。

2.3 有初始转角水平刚度分析

2.3.1 水平位移加载与初始转角同向

图 5,6 分别为不同竖向压力作用下 2 种不同直径支座在初始转角 β 与水平位移同向时的水平刚度-剪应变曲线。从图 5,6 可以看出:当剪应变小于 50% 时,由于初始转角增大,内部钢板和橡胶的黏结逐渐变差,水平刚度随初始转角的增大而减小,之后由于橡胶“硬化”程度随初始转角增大而提高,水平刚度随初始转角的增大而增大;与 0 rad 初始转角相比,当剪应变小于 50% 时,由于有初始转角的支座内部钢板与橡胶的黏结程度次于无初始转角的支座,因此有初始转角的支座水平刚度小于 0 rad 初始转角的支座水平刚度,之后由于有初始转角的支座橡胶“硬化”程度高,水平刚度大于 0 rad 初始转角的支座水平刚度。此外,从图 5,6 还可以看出,在工程受力范围内,竖向压力的变化对水平刚度影响较小。

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。竖向压力 σ 为 10 MPa,水平位移

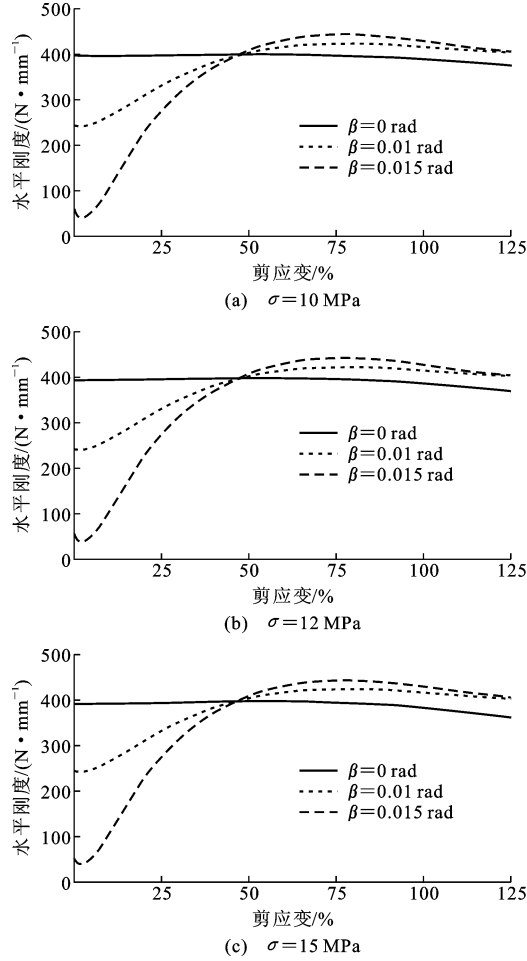


图 5 X 向水平位移加载下 RB-1 的水平刚度-剪应变曲线

Fig. 5 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-1 Under X-direction Horizontal Displacement Loading

加载与初始转角同向,初始转角为 0.01 rad 时, RB-3 水平刚度 K_{100} 的有限元分析结果和试验结果分别为 671.9,698.2 N·mm⁻¹,与支座 0 rad 初始转角时相应水平刚度(分别为 635.4,652.5 N·mm⁻¹)的比值分别为 1.06,1.07。

由此可知,水平刚度 K_{100} 的有限元分析结果与试验结果偏差约为 1%,有限元分析结果与文献[13]试验结果吻合较好。

2.3.2 水平位移加载与初始转角垂直

图 7,8 分别为不同竖向压力作用下 2 种不同直径支座有初始转角及 Y 向水平位移加载下的水平刚度-剪应变曲线。从图 7,8 可以看出,当剪应变小于 150% 时,水平刚度随着初始转角的增大而减小,这主要是因为随着初始转角的增大,支座内部钢板与橡胶黏结性逐渐变差所致,之后由于橡胶“硬化”程度随初始转角增大而提高,水平刚度随初始转角的增大而增大,且初始转角为 0.015 rad 时的水平刚度增大幅度要大于初始转角为 0.01 rad 时的水

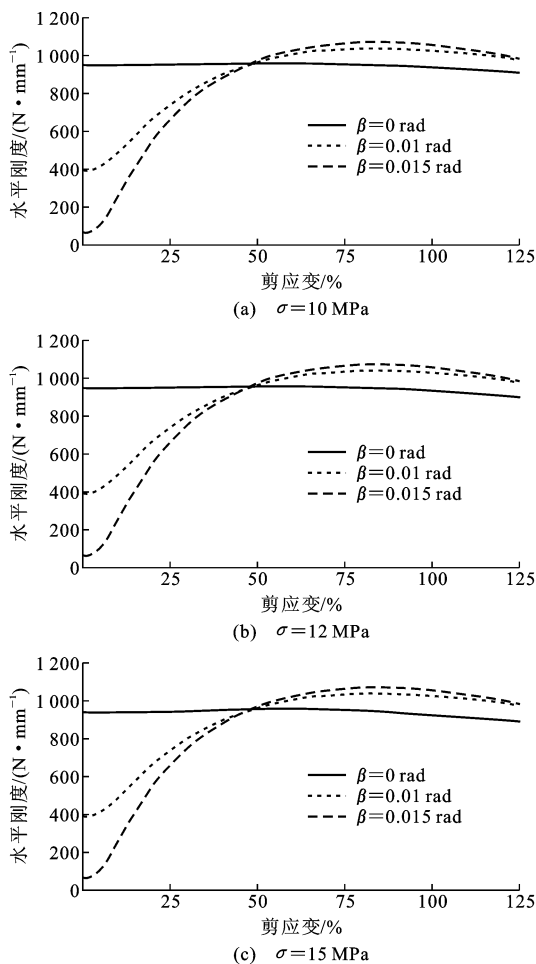


图6 X向水平位移加载下RB-2的水平刚度-剪应变曲线

Fig. 6 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-2

Under X-direction Horizontal Displacement Loading

平刚度增大幅度。从图7,8还可以看出,与0 rad初始转角相比,在100%剪应变之前,由于有初始转角的支座内部钢板与橡胶的黏结程度次于无初始转角的支座,水平刚度小于0 rad时的水平刚度,之后由于有初始转角的支座橡胶“硬化”程度高,水平刚度逐渐大于0 rad时的水平刚度。此外,从图7(c),8(a)~(c)可以看出,对于无初始转角支座,由于橡胶“硬化”现象,隔震橡胶支座0 rad初始转角在大剪应变下水平刚度突然增大,且内部钢板与橡胶黏结性优于有初始转角支座,大剪应变下有初始转角支座水平刚度小于无初始转角支座的水平刚度。另外,从图7,8还可以看出,在工程受力范围内,竖向压力的变化对水平刚度影响较小。

2.3.3 水平位移加载与初始转角成45°向

图9,10分别为不同竖向压力作用下2种不同直径支座有初始转角及45°向水平位移加载下的水平刚度-剪应变曲线。从图9,10可以看出:当剪应变小于65%时,由于内部钢板与橡胶之间的黏结逐

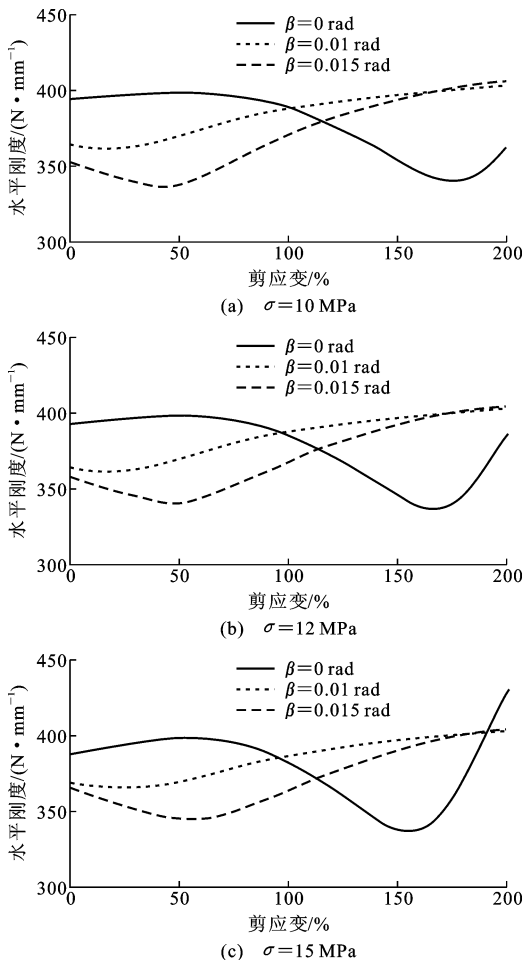


图7 Y向水平位移加载下RB-1的水平刚度-剪应变曲线

Fig. 7 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-1

Under Y-direction Horizontal Displacement Loading

渐变差,水平刚度随初始转角的增大而减小,之后由于橡胶“硬化”程度随初始转角增大而提高,水平刚度随初始转角增大而增大。与0 rad初始转角相比,当剪应变小于65%时,由于有初始转角的支座内部钢板与橡胶的黏结程度次于无初始转角的支座,有初始转角的支座水平刚度小于0 rad初始转角的支座水平刚度;当剪应变大于65%时,由于初始转角增大,橡胶“硬化”程度提高,水平刚度随初始转角的增大而增大,有初始转角的支座水平刚度大于0 rad初始转角的支座水平刚度,使得有初始转角的橡胶隔震支座在设防烈度下的隔震性能要比无初始转角的橡胶隔震支座隔震性能差。此外,从图9,10还可以看出,在工程受力范围内,竖向压力的变化对水平刚度影响较小。

3 结语

(1) X向与45°向水平位移加载时,在小剪应变下,由于初始转角增大,内部钢板与橡胶的黏结性逐

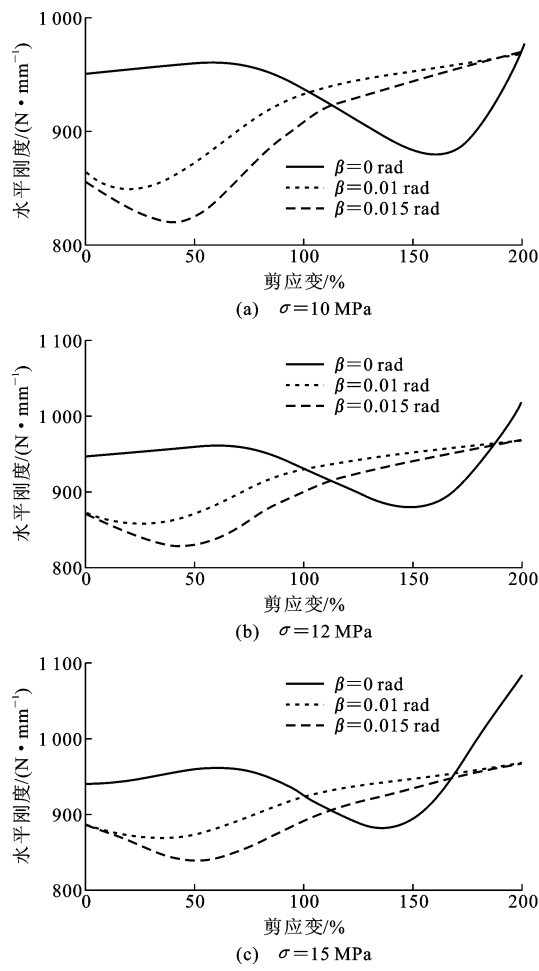


图 8 Y 向水平位移加载下 RB-2 的水平刚度-剪应变曲线
Fig. 8 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-2 Under Y-direction Horizontal Displacement Loading

渐变差,水平刚度随初始转角的增大而减小,之后由于橡胶“硬化”程度随初始转角增大而提高,水平刚度随初始转角的增大而增大,且 X 向水平刚度有限元分析结果与试验结果吻合较好。

(2)Y 向水平位移加载时,在大剪应变下,由于初始转角增大,内部钢板和橡胶的黏结性逐渐变差,水平刚度随初始转角的增大而减小,之后由于橡胶“硬化”程度随初始转角增大而提高,水平刚度随初始转角的增大而增大。

(3)X 向、Y 向和 45°向水平位移加载下,与无初始转角相比,水平刚度 K_{100} 的增大使得有初始转角的隔震橡胶支座在地震设防烈度下的隔震效果要差些。

(4)在工程受力范围内,3 种不同水平位移加载下,竖向压力的变化对水平刚度的影响较小。

(5)Y 向和 45°向水平位移加载下的试验验证会在后期开展。

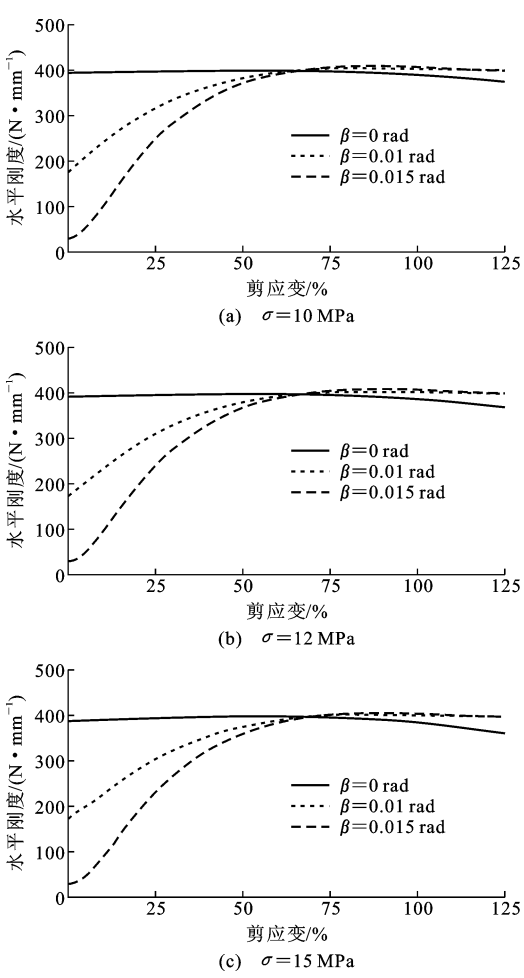


图 9 45°向水平位移加载下 RB-1 的水平刚度-剪应变曲线
Fig. 9 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-1 Under 45°-direction Horizontal Displacement Loading

(6)橡胶隔震支座有初始转角的其他力学性能将在后期做理论和试验研究。

参考文献:

References:

[1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
ZHOU Fu-lin. Engineering Structural Vibration Control[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.

[2] ZHOU X Y, HAN M, YANG I. Study on Protection Measures for Seismic Isolation Rubber Bearings[J]. Journal of Earthquake Technology, 2003, 40 (2/3/4): 137-160.

[3] 刘文光. 橡胶隔震支座位学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京:北京工业大学, 2003.
LIU Wen-guang. Mechanics Properties of Rubber Bearings and Earthquake Response Analysis of Isolation Structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.

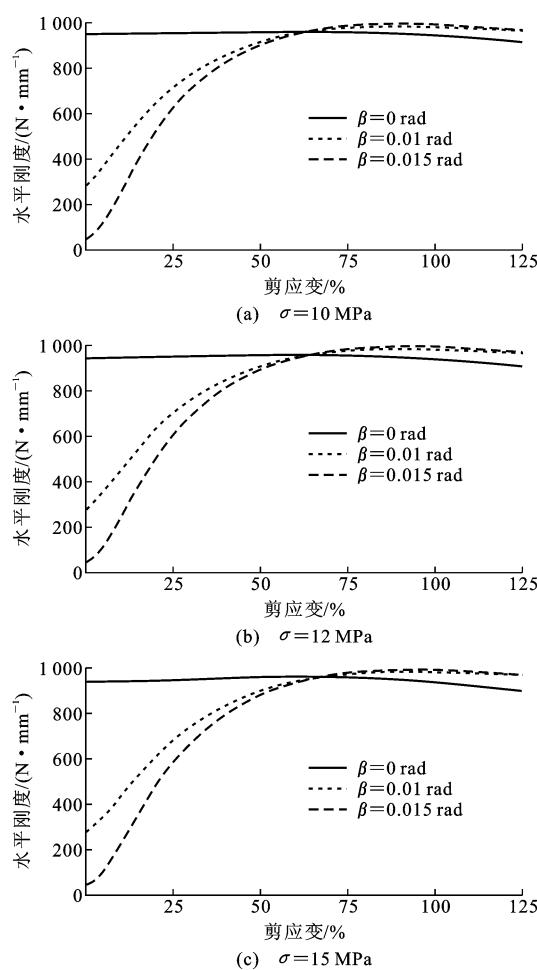


图 10 45°向水平位移加载下 RB-2 的水平刚度-剪应变曲线
Fig. 10 Horizontal Stiffness-shear Strain Curves of RB-2 Under 45°-direction Horizontal Displacement Loading

[4] 刘彦辉,周福霖,谭平,等.考虑隔震支座转动及 P-Δ 效应的串联隔震结构响应研究[J].土木工程学报,2015,48(9):60-66.
LIU Yan-hui,ZHOU Fu-lin,TAN Ping,et al. Study of Dynamic Response of Serially Isolated Structure Considering P-Δ Effect and Rotation of Bearings[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(9):60-66.

[5] RAVARI A K,OTHMAN I B,IBRAHIM Z B,et al. P-Δ and End Rotation Effects on the Influence of Mechanical Properties of Elastomeric Isolation Bearings [J]. Journal of Structural Engineering,2012,138(6): 669-675.

[6] 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.

[7] HARINGX J A. On Highly Compressible Helical Springs and Rubber Rods and Their Application for Vibration-free Mountings [J]. Philips Research Re-

ports,1948,3(6):401-449.

[8] HE W F,LIU W G,YANG Q R,et al. Nonlinear Rotation and Shear Stiffness Theory and Experiment Research on Rubber Isolation[J]. Journal of Engineering Mechanics,2012,138(5):441-449.

[9] 周锡元,韩森,曾德民,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.
ZHOU Xi-yuan,HAN Miao,ZENG De-min,et al. Horizontal Rigidity Coefficient of the Serial System of Rubber Bearing with Column[J]. Journal of Vibration Engineering,1999,12(2):157-165.

[10] 周锡元,马东辉,曾德民,等.用刚性板连接的组合橡胶支座水平刚度计算方法[J].土木工程学报,2000,33(6):38-44.
ZHOU Xi-yuan,MA Dong-hui,ZENG De-min,et al. A Formula for Horizontal Stiffness of Composited Isolators[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(6):38-44.

[11] 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):33-40,22.
YAN Hui,DONG Shi-lin. Design and Application Research of Plate-type Rubber Supporting Joint[J]. Spatial Structures,1995,1(2):33-40,22.

[12] 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.
XUE Su-duo,ZHANG Yi-gang,CAO Zi,et al. Prospect and Further Development of Seismic Research on Spatial Structures over Last Thirty Years in China [J]. Industrial Construction,2013,43(6):105-116.

[13] 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.
LIU Wen-guang,ZHOU Fu-lin,ZHUANG Xue-zhen,et al. Mechanic Characteristics of Rubber Bearings in Column Top Isolation System[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1999,19(3):121-126.

[14] WARN G P,WEISMAN J. Finite-element and Experimental Investigation of the Post-buckling Stability of an Elastomeric Seismic Isolation Bearing [C]// SENAPATHI S,CASEY K,HOIT M. Structures Congress 2010. Orlando:ASCE,2010:1452-1461.

[15] ISO 22672-1: 2005, Elastomeric Seismic-protection Isolators — Part 1: Test Methods[S].