

改进型橡胶隔震支座力学性能研究

王 朋^{1,2,3}, 于 彬², 史庆轩^{1,2,3}, 戎 翀²

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055

3. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 隔震结构设计的关键环节在于隔震层中隔震支座的设计。在实际隔震设计中, 隔震支座水平刚度越小, 对应隔震效果越突出, 与此同时, 隔震支座还要满足罕遇地震下足够的变形要求以防止其超限破坏, 因此, 设计中对于隔震支座的刚度需求存在一定的矛盾。本文以多级设防为目标, 在普通橡胶支座的基础上设计出改进型隔震支座, 通过数值模拟分析, 研究该支座的力学性能、耗能能力, 最终建立简化恢复力模型。研究结果表明: 改进型隔震支座在不同工况下能表现出变刚度特性, 通过合理设计可以有效地解决传统橡胶支座存在的矛盾问题。

关键词: 改进型隔震支座; 力学性能; 恢复力模型

中图分类号: TU352.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0180-06

Study on mechanical property of improved rubber isolation bearings

WANG Peng^{1,2,3}, YU Bin², SHI Qingxuan^{1,2,3}, RONG Chong²

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China (XAUAT), Xi'an 71005, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 71005, China;

3. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education(XAUAT), Xi'an 71005, China)

Abstract: The key link of isolation structure design is the design of isolation bearing in isolation layer. In the actual isolation design, the smaller the horizontal stiffness of the isolation bearing is, the more prominent the isolation effect is. At the same time, the isolation bearing also needs to meet enough deformation requirements under rare earthquakes to prevent its out-of-limit failure. Therefore, there are certain contradictions in the stiffness requirements of the isolation bearing in the design. In this paper, aiming at multi-level fortification, an improved isolation bearing is designed on the basis of ordinary rubber bearing. Through numerical simulation analysis, the mechanical properties and energy dissipation capacity of the bearing are studied, and a simplified restoring force model is finally established. The results show that the improved isolation bearings can show variable stiffness characteristics under different working conditions, and the contradiction problems existing in the traditional rubber bearings can be effectively resolved by rational design.

Key words: improved isolation bearings; mechanical property; restorative force model

隔震技术作为一种新型结构振动控制技术, 目前广泛应用于实际工程中, 其中叠层橡胶隔震体系由于其便于施工、控制效果好等优点, 成为一种兼具安全、经济、有效的振动控制方法。但是目前传统橡胶隔震支座^[1]存在种种限制和不足, 在设计中若以隔震效果为目标, 则不利于罕遇地震下隔震层的位移控制, 若以控制强震下隔震层位移为目标, 则削弱了整体结构的隔震效果, 两者存在一定矛盾, 难以在设计中兼顾。为了提高

隔震装置在结构中的隔震效果, 国内外学者通过加装与结构相连的耗能装置、限位装置, 采用新材料制作支座等方法来进行优化设计, 如韩森等^[2]设计制作了软弹簧等多种组合软碰撞限位器与隔震支座进行协同工作, 通过振动台试验证明限位器可以有效减小隔震层位移; Wilde 等^[3]首次将形状记忆合金(SMA)索与隔震装置组合, 显著提高了支座的耗能能力; Yang 等^[4]开发了一种具有自供电能力的磁流变液隔震支座, 可以通过控制电

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178159, 52178505, 52108171)

第一作者: 王 朋(1987—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事钢—混凝土组合结构与混合结构、工程结构抗震研究。E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn

通信作者: 于 彬(1997—), 男, 硕士生, 主要从事钢—混凝土组合结构与混合结构研究。E-mail: a1070000@163.com

流强度控制支座的水平刚度;高杰等^[5,6]通过支座串并联的方式,实现了支座水平刚度的多级控制。

本文以多级设防为目标提出了一种改进型铅芯橡胶隔震支座,即在小震下提供较小的水平刚度延长结构周期提高隔震效果,在大震下提供阻尼和较大的水平刚度,防止支座由于产生过大位移而破坏。本文通过数值模拟对该支座的竖向压缩、水平压剪力学性能进行分析,研究支座限位间距、铅芯布置形式等对支座耗能性能的影响,最终建立该支座三折线型简化恢复力模型。

1 改进型隔震支座构造及工作原理

橡胶隔震支座的水平刚度作为支座设计中重要水平性能,它决定了支座在地震作用下的隔震效果。通过公式(1)可以发现橡胶支座的水平刚度与橡胶的剪切模量呈正相关,因此可以通过减小橡胶的剪切模量来降低橡胶支座的水平刚度。

$$K_h=GA/T_r \tag{1}$$

式中: K_h 为橡胶支座水平刚度; G 为橡胶层剪切模量; A 为橡胶层水平面面积; T_r 为橡胶层总厚度。

支座构造如图 1 所示,上部分橡胶层采用高模量橡胶,在中间孔隙加入耗能铅芯,并在支座下连接板预留间距布置钢挡板,改进支座设计规格及构造均符合现行国家标准相关规定^[7-10]。支座共分两种工况:当支座中间钢板水平位移 δ 小于限位装置预留距离 d 时为第一工况,反之,当 $\delta > d$ 时为第二工况。支座在第一工况下提供较小的水平刚度,提高隔震效果;支座在第二工况下,只有上部橡胶层和铅芯发生剪切变形,提供较大的水平刚度和阻尼,防止支座发生过大位移满足大震下的变形要求。

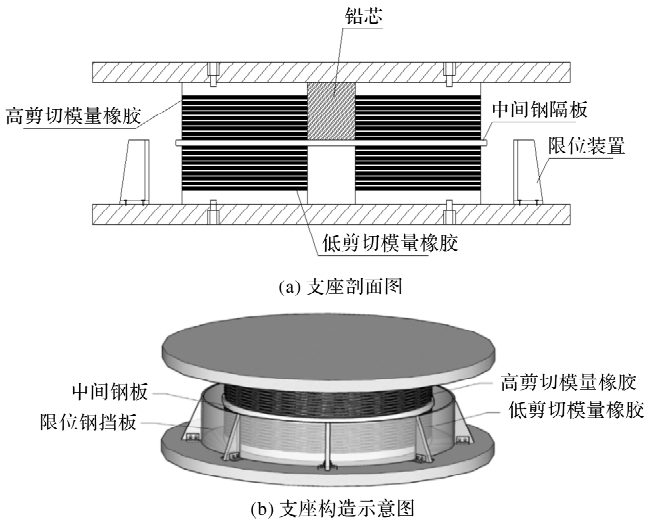


图 1 改进型橡胶隔震支座
Fig. 1 Improved rubber isolation bearings

2 改进型隔震支座力学性能数值模拟

2.1 有限元模型建立

橡胶作为一种典型的超弹性材料,在外力作用下能够发生大位移大应变,表现出复杂的材料非线性和几何非线性,本次模型采用 Mooney-Rivlin 模型^[11]来定义橡胶材料;铅芯采用理想弹塑性本构模型,其弹性模量为 16 GPa,泊松比为 0.44,屈服强度 13 MPa;铅芯橡胶支座中变形主要由橡胶层承担,钢板和封板始终处于弹性状态,可视理想线弹性材料,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3。

支座中橡胶采用 C3D8RH 杂交单元,隔震支座的夹层钢板主要作用是对橡胶层的水平剪切起到限制作用,封板主要作用是传递上部竖向和水平荷载,所以隔震支座中钢材均无扭转变形,本次模型采用 C3D8R 实体单元,该改进型隔震支座模型网格划分如图 2 所示,具体规格见表 1,设置限位装置,使其在支座剪应变 γ 为 50% 后生效。该支座模型形状系数 S1、S2 分别为 21、5,为了方便计算,未考虑橡胶保护层。

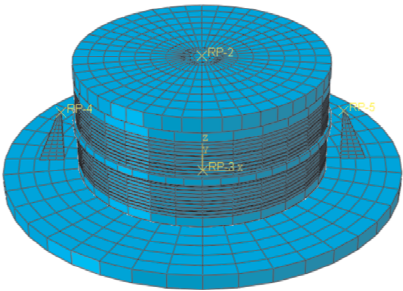


图 2 改进型隔震支座模型网格划分
Fig. 2 Meshing of improved isolation bearing model

为研究改进支座的竖向压缩力学性能及水平压剪力学性能,分别对支座施加 5 MPa、10 MPa、12 MPa、15 MPa 的竖向压缩应力;以位移控制对支座进行水平剪切变形为 50%、75%、100%、125%、150%、175%、200% 的循环滞回加载。

表 1 隔震支座模型参数
Tab. 1 Model parameters of isolation bearing

参数	尺寸/层数
有效直径/mm	500
中心孔径/mm	80
橡胶层厚度/mm	5
钢板厚度/mm	2.5
封板厚度/mm	20
上层橡胶剪切模量/MPa	0.55
下层橡胶剪切模量/MPa	0.35
橡胶层层数	20
钢板层数	19

2.2 改进型隔震支座压缩力学性能

分别提取改进型隔震支座模型在不同压应力下竖向位移、荷载,得到支座的竖向荷载位移曲线,如图3所示。可以发现,随着竖向压应力的增加,曲线斜率几乎不变,支座竖向荷载和位移基本呈线性增加。如表2所示,计算支座竖向压缩刚度结果可以发现,竖向刚度随着压应力的增大而略微提高,这是因为支座的竖向刚度取决于橡胶的刚度,在受压过程中,夹层钢板对橡胶层的约束效应增强,此时三向受力的橡胶层弹性模量提高,竖向承载力增强,对应竖向压缩刚度也随之提高。

表2 改进型隔震支座竖向刚度

Tab. 2 Vertical stiffness of improved isolation bearings

压应力 /MPa	竖向位移 /mm	竖向荷载 /kN	竖向刚度 /kN·mm ⁻¹
5	0.270 95	981.748	3 623.35
10	0.541 77	1 963.5	3 624.23
12	0.650 06	2 356.19	3 624.57
15	0.812 46	2 945.24	3 625.09

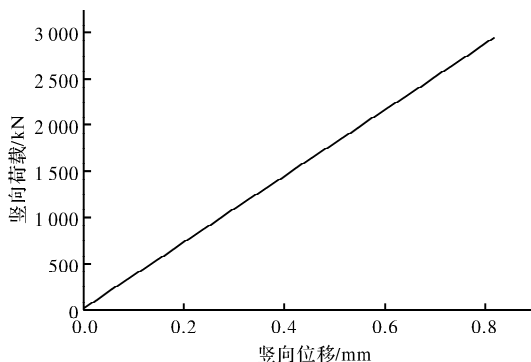


图3 支座竖向荷载-位移关系

Fig. 3 Vertical load-displacement of bearings

2.3 改进型隔震支座水平压剪力学性能

改进型隔震支座进行水平剪切变形循环滞回,加载后得到各个剪切应变下支座的滞回曲线,如图4所示,根据滞回曲线结果按照下式(2)计算支座等效水平刚度,并将求得等效水平刚度沿水平剪切变形变化绘制成图5。

$$K_{eq} = \frac{(F^+ - F^-)}{(\delta^+ - \delta^-)} \quad (2)$$

式中: K_{eq} 为支座等效水平刚度; δ^+ 、 δ^- 分别为滞回曲线最大水平正位移和最大水平负位移; F^+ 、 F^- 分别为滞回曲线最大水平正位移和最大水平负位移对应水平剪力。

由图4和图5表明,当 $\gamma < 25\%$ ($\delta < 25$ mm) 时,滞回曲线的斜率几乎不变,此时支座上部铅芯未屈服,支座的水平刚度不变,几乎不具有耗能能力;当 $25\% < \gamma < 50\%$ 时,滞回曲线斜率降

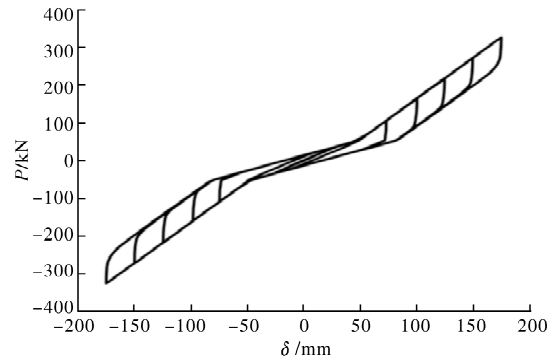


图4 支座水平剪切滞回曲线

Fig. 4 Horizontal shear hysteresis curve of bearing

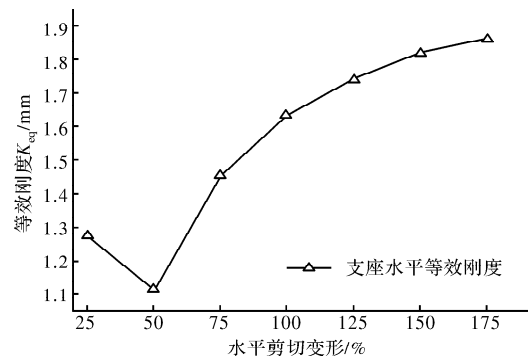


图5 支座等效水平刚度

Fig. 5 Equivalent horizontal stiffness of bearings

低,此时上下两部分橡胶层协同工作,等效刚度下降;当 $\gamma > 50\%$ 时,仅由上部橡胶剪切,滞回曲线斜率上升并且滞回环的面积不断增大,耗能能力不断增强。这表明设置在 $\gamma = 50\%$ 处的限位装置将支座工况分为两种:①当支座水平剪应变 $\gamma < 50\%$ 时为第一工况,如图6(a)所示,此时支座下部低剪切模量橡胶部分率先发生剪切变形,提供较小的水平刚度,此时具有较好的隔震效果;②当支座水平剪应变 $\gamma > 50\%$ 时为第二工况,如图6(b)所示,此时限位装置限制了下部低剪切模型橡胶变形,而上部高剪切模量橡胶开始发生剪切变形,提供更大的水平刚度,此时铅芯开始充分发挥耗能作用。

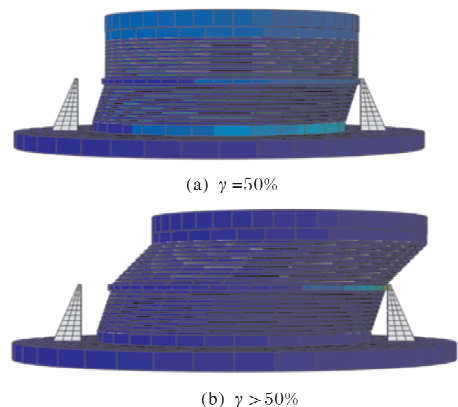


图6 改进型橡胶隔震支座剪切变形

Fig. 6 Shear deformation of improved isolation bearings

2.4 改进型隔震支座耗能性能

选取铅芯厚度, 限位装置生效距离作为参数, 控制单一变量研究其对改进型隔震支座耗能能力的影响。

图7为支座内铅芯直径分别为40 mm、60 mm、80 mm时支座的滞回曲线及耗能图, 可以发现支座在工况1($\gamma < 50\%$)时, 支座耗能较低, 通过计算得出当铅芯直径分别为40 mm、60 mm、80 mm时, 支座在剪应变 $\gamma = 25\%$ 处耗能为185.30 J、201.65 J、38.41 J, 当铅芯直径为最大(80 mm)时耗能却最小, 这是由于铅具有一定的初始刚度, 铅芯屈服位移随直径而增大, 80 mm铅芯在支座 $\gamma = 25\%$ 时还未屈服, 几乎没有耗能效果; 当支座在工况2($\gamma > 50\%$)时, 由图7(a)可以发现, 支座滞回环随着铅芯直径的增大而越饱满, 此时支座耗能随铅芯直径的增大而增大, 铅芯直径越大, 支座耗能性能越好。

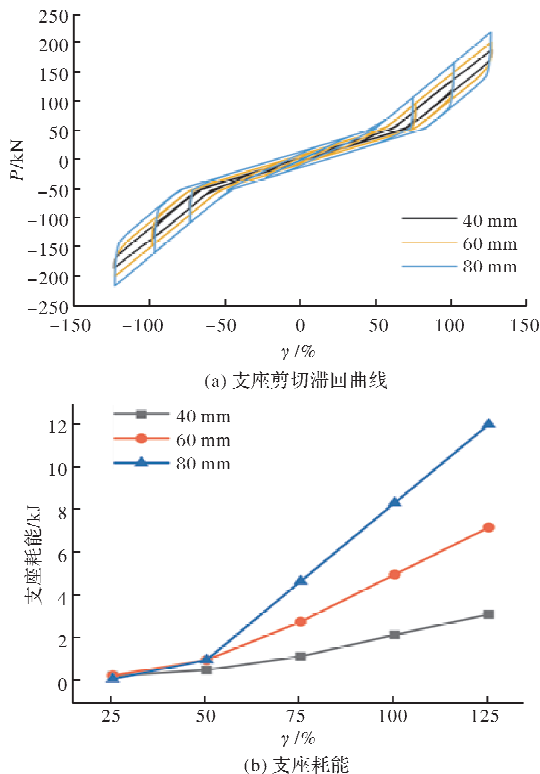


图7 不同铅芯厚度下支座的耗能性能

Fig. 7 Energy dissipation of bearings with various thicknesses of lead core

图8为支座分别在剪应变50%、75%、100%处生效限位的滞回曲线及耗能图, 可以发现, 限位装置安装距离仅控制支座的工况。在支座未限位前(工况1), 限位距离不影响支座的耗能, 例如当支座 $\gamma = 50\%$ 时, 3个支座耗能皆为923.69 J;

在支座限位后(工况2), 支座同一剪应变下, 支座耗能性能随支座限位距离的减小而提高, 这是由于在未发生限位时, 支座剪切变形主要由下部橡胶层承担, 越早发生限位, 上部铅芯越早发挥其耗能特性。

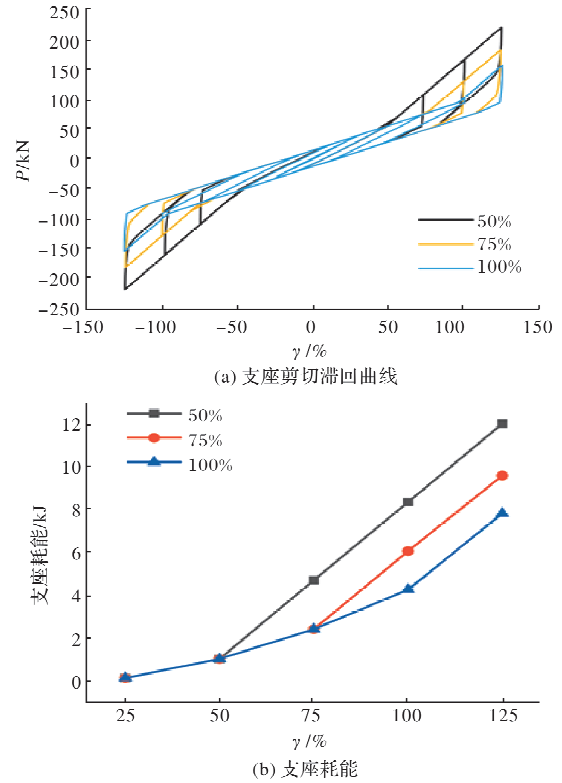


图8 不同限位距离下支座的耗能性能

Fig. 8 Energy dissipation of bearings with different limit distances

2.5 改进型隔震支座恢复力模型

由于橡胶属于超弹性材料, 其表现出力学特性较为复杂并且其与铅芯之间的相互作用机制很难用力学理论去解释, 因此建立橡胶支座恢复力模型时, 一般采用会对其进行简化。根据有限元分析结果与计算, 得出改进型隔震支座简化恢复力模型, 如图9所示。

如图9(a)所示, 当支座处于第1工况(支座水平剪切位移 δ 小于限位装置生效距离 d)时, 恢复力模型简化为双线型模型, 图中 k_1 为支座屈服前刚度, k_2 为屈服后刚度, x_y 为屈服位移, x_1 为水平位移极限值。

(1)OA段为正向弹性阶段, 初始刚度 k_1 为下部橡胶层刚度:

$$k_1 = G_1 A / T_r \quad (3)$$

(2)AB段为屈服塑性阶段, 屈服刚度 k_2 为上下橡胶层并联刚度:

$$k_2 = \frac{G_1 G_2 A}{(G_1 + G_2) T_r} \quad (4)$$

如图9(b)所示,当支座处于第2工况(支座水平剪切位移 δ 大于限位装置生效距离 d)时,恢复力模型简化为三折线型模型,图中 k_1 为支座屈服前刚度, k_2 、 k_3 为屈服后刚度, x_y 为屈服位移, x_1 为限位装置生效距离, x_2 为水平位移极限值。

(1)OA段为正向弹性阶段,初始刚度 k_1 为下部橡胶层刚度:

$$k_1 = G_1 A / T_r \quad (5)$$

(2)AB段为屈服塑性阶段,屈服刚度 k_2 为上下橡胶层并联刚度:

$$k_2 = \frac{G_1 G_2 A}{(G_1 + G_2) T_r} \quad (6)$$

(3)BC段为屈服硬化阶段,屈服刚度 k_3 为上部橡胶层刚度:

$$k_3 = G_2 A / T_r \quad (7)$$

式中: G_1 、 G_2 分别为下、上层橡胶层剪切模量; A 为橡胶层水平面面积; T_r 为橡胶层总厚度。

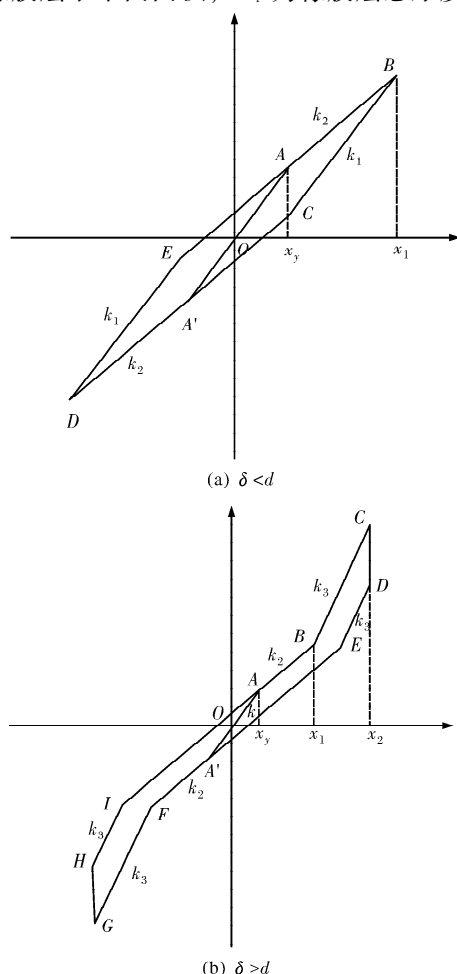


图9 改进型橡胶隔震支座恢复力模型

Fig. 9 Restoring force model of improved rubber isolation bearings

3 结论

对改进型隔震支座的力学性能进行数值模拟分析,并得到简化恢复力模型,得到以下结论:

(1)改进型隔震支座在竖向压应力下,橡胶层中间环区形成核心受压区,支座竖向压缩刚度随压应力的增大而增大;在水平压剪作用下,当支座 $\gamma < 50\%$ 时,支座剪切位移主要由下半部橡胶层变形承担,当 $\gamma > 50\%$ 时,支座剪切位移由上半部橡胶层及铅芯变形承担;

(2)改进型隔震支座在未限位前水平刚度小,隔震性能充分发挥,几乎无耗能能力;在限位后,铅芯充分发挥耗能特性,支座耗能性能随铅芯厚度的增大而增大;

(3)改进型隔震支座共分为两种工况,在第一工况下提供较小的水平刚度,提高隔震性能;支座在第二工况下,可以提供较大的水平刚度和阻尼,防止支座发生过大位移满足大震下的变形要求。

参考文献 References

- [1] MOSTAGHEL N, TANBAKUCHI J. Response of sliding structures to earthquake support motion[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(6): 729-748.
- [2] 韩森,孙欢,段燕玲. 近断层地震作用下基础隔震层弹簧限位振动台试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(5): 127-131.
- [3] HAN Miao, SUN Huan, DUAN Yanling. Shaking table test study on spring limiting deformation to base isolation layer under near-field ground motion [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(5): 127-131.
- [4] WILDE K, GARDONI P, FUJINO Y. Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges[J]. Engineering Structures, 2000, 22(3): 222-229.
- [5] YANG L, CHRISTIE M D, SUN S, et al. Integration of an omnidirectional self-powering component to an MRE isolator towards a smart passive isolation system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106853.

- [5] 高杰, 薛彦涛. 并联变刚度隔震支座试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(6): 17-20.
GAO Jie, XUE Yantao. Experimental research on parallel-connected variable stiffness seismic isolation[J]. Industrial Construction, 2018, 48(6): 17-20.
- [6] 高杰, 薛彦涛, 肖从真, 等. 串联型变刚度叠层橡胶隔震支座试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 109-113.
GAO Jie, XUE Yantao, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on variable stiffness laminated rubber isolation bearing of series connection type[J]. Building Structure, 2020, 50(6): 109-113.
- [7] 中国工程建设标准化协会. 叠层橡胶支座隔震技术规程: CECS 126: 2001. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber beating isolators; CECS 126: 2001. [S]. Beijing: Standard Press of China, 2001.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 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.
Standardization Administration. Rubber bearings Part 1: Seismic-protection isolators test methods; GB/T 20688.1-2007. [S]. Beijing: Standard Press of China, 2007.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 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, 2006.
Standardization Administration. Rubber bearings Part 3: Elastomeric seismic-protection isolators for buildings; GB/T 20688.3-2006. [S]. Beijing: Standard Press of China, 2006.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 橡胶支座 第4部分: 普通橡胶支座: GB/T 20688.4-2007. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration. Rubber bearings Part 4: Normal rubber bearings; GB/T 20688.4-2007. [S]. Beijing: Standard Press of China, 2007.
- [11] MOONEY M. A theory of large elastic deformation [J]. Appl Phys, 1940, 11: 582-592.

(编辑 桂智刚)