

功能分离型减震耗能支座组件的试验研究与数值模拟

吴金¹, 姜兰潮^{1*}, 刘立妍², 孙浩然³

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 建研地基基础工程有限责任公司, 北京 100013;
3. 中铁建工集团第一建设有限公司, 北京 100160)

摘要: 在减震球型钢支座的基础上, 本文提出了一种新型功能分离型自复位耗能支座, 其减震耗能组件由耗能钢元件与钢板弹簧元件以类似系杆拱的形式组成。本文采取试验与数值模拟相结合的研究方法分析其减震机理和减震效果, 设计进行了耗能元件 LYP100 钢材的材料性能试验、板簧元件的刚度性能试验, 同时对减震耗能组件进行了拟静力加载试验和数值模拟研究。研究结果表明: LYP100 钢材滞回曲线饱满, 耗能性能优良; 钢板弹簧在横向荷载作用下工作性能稳定, 可以为减震耗能组件提供稳定的刚度; 在工作过程中, 板簧元件始终保持弹性状态, 实现了支座的自复位功能, 耗能元件在加载初期就进入塑性状态, 实现了塑性耗能。

关键词: 自复位耗能支座; 耗能钢元件; 钢板弹簧元件; 拟静力试验; 有限元分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0032-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240328001

Experimental Study and Numerical Simulation on the Components of a Functionally Separated Energy Dissipation Bearing

WU Jin¹, JIANG Lanchao^{1*}, LIU Liyan², SUN Haoran³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. CABR Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. China Railway Construction Group First Construction Co., Ltd., Beijing 100160, China)

*Corresponding author: lcjiang@bjtu.edu.cn

Abstract: On the basis of the damping spherical steel bearing, a new type of functionally separated self-centering energy dissipation bearing is proposed. The energy dissipation steel element and the plate spring element form the damping energy dissipation component in the form of similar tied arch. In this paper, the research method of combining test and numerical simulation is adopted to analyze the damping mechanism and damping effect. The LYP100 steel material performance test of energy dissipation element and the stiffness performance test of plate spring element are designed and carried out. At the same time, the quasi-static loading test and numerical simulation of the damping energy dissipation component are carried out. The results show that the hysteresis curve of LYP100 steel is full and the energy dissipation capacity is excellent. The plate spring has stable working performance under lateral load, which can provide stable stiffness for energy dissipation components. During the working process, the plate spring element always maintains the elastic state and realizes the self-centering function of the bearing. The energy dissipation element enters the plastic state at the initial stage of loading and realizes the plastic energy dissipation.

Keywords: self-centering energy dissipation bearing; energy dissipation steel element; plate spring element; quasi-static test; finite element analysis

收稿日期: 2024-03-28

作者简介:

吴金(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程结构抗震、减震方面的研究。E-mail: 22121166@bjtu.edu.cn。

通信作者:

姜兰潮(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震、减震方面的研究。E-mail: lcjiang@bjtu.edu.cn。

在建筑结构的抗震设计研究中,传统方式通常是提高结构的强度、刚度和延性,但随着大跨度、超高层建筑结构的发展,传统抗震方法已不能完全适应结构的安全需求。相对于传统的抗震设计,减震耗能技术利用结构中布置的耗能器耗散地震输入能量,从而实现减震的目的^[1-2]。在减隔震支座中增设耗能器可以实现隔震与耗能技术的融合,阻尼器具有较高的抗震耗能能力,目前已有针对多种新型金属阻尼器的研究^[3-5]。孙建鹏等^[6]利用钢板的平面外变形作为耗能方式,提出了钢板-板式橡胶复合式减隔震支座,并对屈曲耗能型钢板的力学特性进行了详细的研究分析。

具有自复位能力的减震耗能支座便于在工程应用中修复替换,延长了支座使用寿命,是目前减震耗能支座的发展方向。方蓉等^[7]提出了一种自复位摩擦耗能支座,使用复位弹簧作为储能复位、约束构件,利用缠绕索作为约束、耗能构件,结合振动台加载试验对其减震效果进行了研究。孙晓东^[8]提出了一种新型 SMA 记忆合金滚动碟簧减隔震支座,通过试验与数值模拟研究验证了该新型支座优异的隔震效果。

2000年,崔玲等^[9]首次将钢板弹簧应用于建筑结构中,研制出了一种利用钢板弹簧进行减震的球型钢支座,如图1所示。水平地震作用通过支座的球型铰传递给放置在球铰两旁的板簧元件,增大了上部结构的自振周期,且钢板弹簧因其较高的屈服强度可以实现球型钢支座的复位功能,支座可承受压力、拔力和剪力,还可通过内部设置的球铰实现方向转动,支座减震性能优越,机理清晰明确。

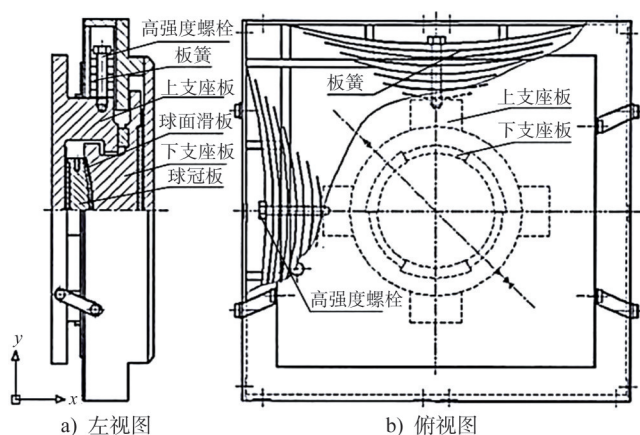


图1 万向承载抗震减震球型钢支座

Fig. 1 Universal anti-vibration spherical steel support

李小鹏^[10]提出了在图1所示的支座板簧之间叠加低屈服点耗能钢板,由板簧和耗能钢板共同组成减震耗能组件(图2),低屈服点钢板受弯进入弹塑性状态而耗散地震能量,从而实现支座在地震作用下同时具备复位与耗能功能。孙浩然^[11]在此基础上制作了减震耗

能元件足尺模型,并进行了拟静力试验和参数分析,研究表明构件表现出了一定的耗能能力,并且具备稳定的复位性能。

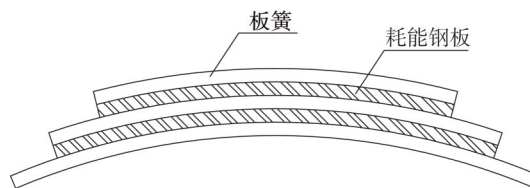


图2 支座减震耗能组件

Fig. 2 Seismic energy dissipation component

罗杨洋^[12]在上述基础上,提出将板簧与耗能钢板独立布置,以类似系杆拱的构造形式工作,设计了一款新型减震耗能组件(图3),实现了板簧与软钢功能分离的特点,易于更换。郑子豪^[13]通过试验验证了循环荷载作用下板簧元件的工作性能,采用理论分析与数值模拟方法研究了减震耗能组件各设计参数对其力学性能的影响,初步提出了组件的实用计算模型与设计方法。

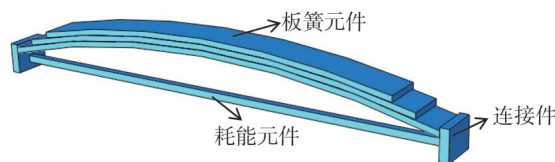


图3 新型减震耗能组件

Fig. 3 New damping energy dissipation component

针对提出的减震耗能组件,先前研究多集中在组件性能的数值模拟及参数化研究,其实际的减震耗能效果仍需试验验证,本文在以往研究的基础上,采取试验与数值模拟相结合的研究方法,继续深入分析其工作机理和减震耗能效果。

1 耗能材料性能试验研究

1.1 试验设计

本文设计采用的耗能材料为LYP100钢材,属于低屈服点钢。低屈服点钢延性好、强屈比高、在往复荷载作用下滞回性能好,广泛应用于结构的耗能装置中^[14-15]。通过对LYP100钢材进行材料性能试验研究,分析其在单向拉伸作用以及循环荷载作用下的力学特性。

单调拉伸试验根据《金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温拉伸试验》(GB/T 228.1—2021)^[16]的要求,试件采用比例试样尺寸制作。循环加载试验过程中,为避免试件发生失稳现象,循环加载试件尺寸采用较小的试验标距直径比,试件具体尺寸如图4所示。

单调拉伸试验采用WAW600万能试验机进行加载,采用标距为50 mm、最大变形量为25 mm的电子引伸计

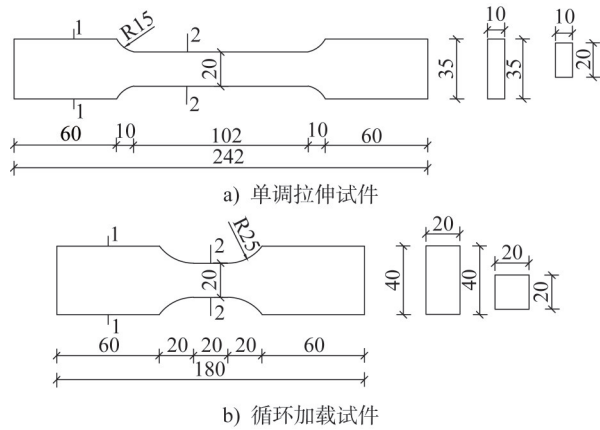


图4 材料性能试验试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 4 Specimen dimension diagram of material performance test (unit:mm)

测量试件的应变。循环加载试验采用电液伺服万能疲劳

试验机进行加载,采用标距为10 mm的电子引伸计来测量试件的应变,引伸计的拉量程为40%,压量程为10%。耗能材料性能试验的加载制度如表1所示,其中A1~A3为单调拉伸试件,B1~B8为循环加载试件。

1.2 试验结果

单调拉伸试验的三组试件试验结果相似,其中试件A1的工程应力-应变曲线如图5所示。从图中可以看出,LYP100材料的弹性阶段比较短暂,材料在屈服之后强度增长幅度减小,材料的强屈比较大、延性性能良好,且在屈服之后依旧保持良好的承载能力。选取应变在1%以内的工程应力-应变曲线,可以看到材料出现了屈服平台,读取下屈服点作为材料的屈服强度。综合三组试件试验数据,LYP100材料具有很好的延性性能,屈服后强化特征明显,各项力学性能稳定,具有良好的耗能能力。

表1 材料性能试验加载制度

Table 1 Loading system of material performance test

试件编号	加载制度
A1、A2、A3	弹性阶段以 $0.06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 匀速拉伸加载;屈服后以 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 匀速拉伸加载至试件断裂
B1、B2	关于应变 $\epsilon = 0$ 对称加载,先拉后压,以1%应变等幅值加载15圈
B3、B4	关于应变 $\epsilon = 0$ 对称加载,先拉后压,以2%应变等幅值加载15圈
B5、B6	关于应变 $\epsilon = 0$ 对称加载,先拉后压,从0.4%应变开始以等应变增量0.4%加载至总应变为2%,每级循环加载2次
B7、B8	关于应变 $\epsilon = 0$ 对称加载,先拉后压,从0.4%应变开始以等应变增量0.2%加载至总应变为2%,每级循环加载2次

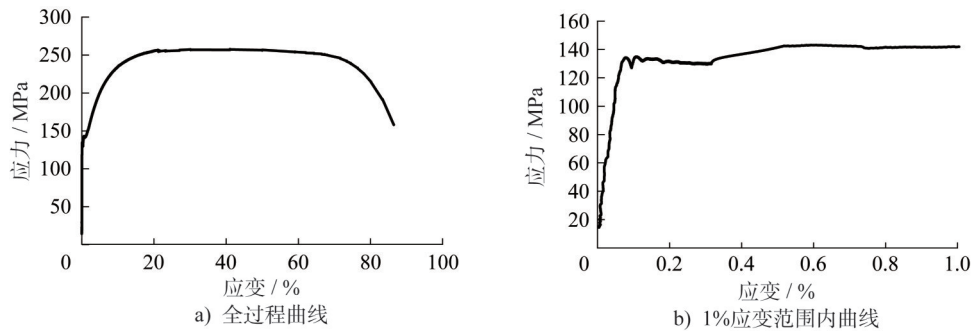


图5 单调拉伸试件(试件A1)的工程应力-应变曲线

Fig. 5 Engineering stress-strain curves of monotonic tensile specimen (specimen A1)

循环加载试验中,由于试件受初弯曲或初偏心等因素的影响,试件B2、B4、B6、B8在循环加载受压过程中出现了较大的屈曲现象,以四个试件B1、B3、B5、B7的试验结果分析LYP100钢材在循环加载作用下的力学性能,循环加载试件的工程应力应变曲线如图6所示。

从曲线可以看出:在等幅值加载作用下,试件B1和B3在加载初期出现了屈服平台,本次试验设置了15圈的等幅值加载,随着加载的重复进行,LYP100钢材的应力值都有一定的提高,表现出循环硬化的特征;在变幅值加

载作用下,试件B5和B7试验曲线饱满,包围面积显示了材料具备优良的耗能性能;从加卸载曲线来看,其斜率与材料的初始弹性模量基本一致。

2 板簧刚度性能试验研究

2.1 试验设计

钢板弹簧在汽车领域应用较为广泛,对板簧材料60Si2Mn的材料性能已有较多研究,国内学者隋福楼等^[17]设计试验研究了60Si2Mn钢板弹簧材料的力学性

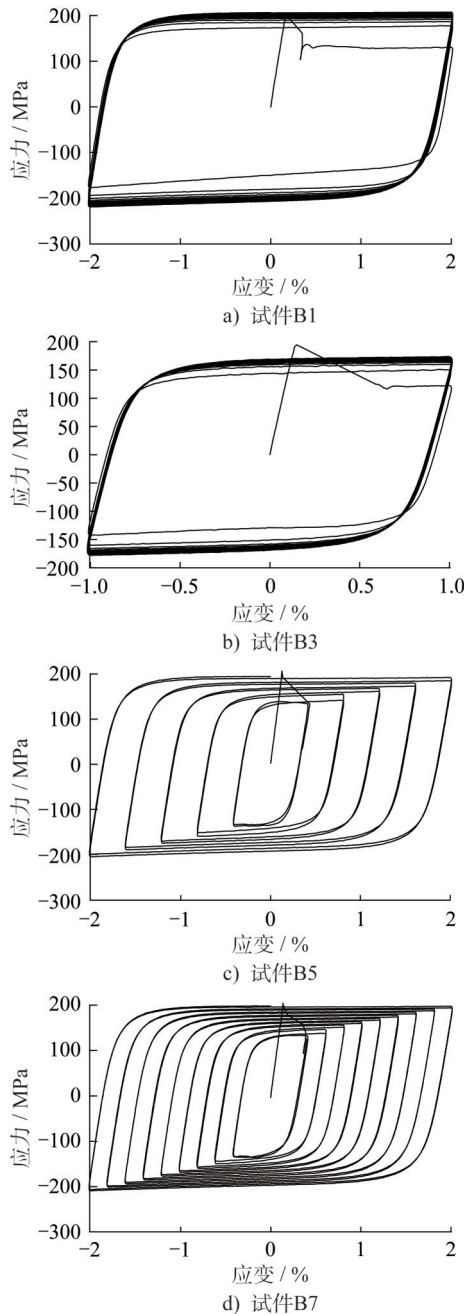


图6 循环加载试件的工程应力-应变曲线
 Fig. 6 Engineering stress-strain curves of cyclic loading specimens

能,其具有屈服强度高、工作性能稳定、防腐性好、使用寿命长等优良性能。为了评估支座减震耗能组件板簧元件的刚度特性及其自复位能力,本节通过进行钢板弹簧刚度性能试验研究,绘制钢板弹簧的荷载-位移曲线,观察板簧元件加卸载时的受力形态,预测试件的力学行为。

板簧的刚度性能试验采用三组相同参数的试件,分别编号为1、2、3号。钢板弹簧试件由三片材料相同的板簧钢片叠加而成,尺寸如图7所示,主板簧的水平长度为

1 100 mm,板簧试件的弧高高度为90 mm,板簧元件各簧片宽度均为90 mm,每层钢板端部相对于相邻簧片在水平方向各缩短50 mm,板簧元件中间用高强螺栓连接固定。

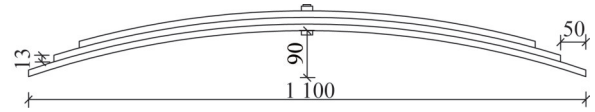


图7 板簧试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 7 Dimension diagram of plate spring specimen (unit: mm)

试验采用千斤顶机械力加载系统(图8),由图1中支座减震耗能组件的实际工作状态可知,组件在球型钢支座中在跨中顶部受垂直于板簧的横向荷载,因此试验在板簧弧顶垂直施加荷载,符合实际的受力状态。试验过程中作动器沿垂直于板簧试件的方向匀速加载,试验采用荷载控制,加载制度如图9所示,对每组试件分别加卸载两次,采用位移计记录试件跨中位移,分别绘制三组板簧试件的荷载-位移曲线。

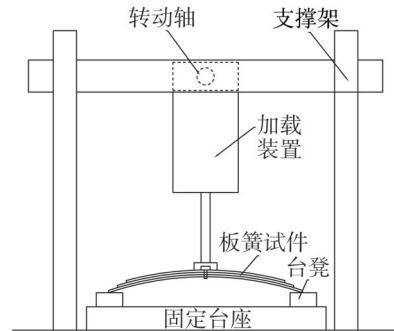


图8 试验加载示意图

Fig. 8 Test loading diagram

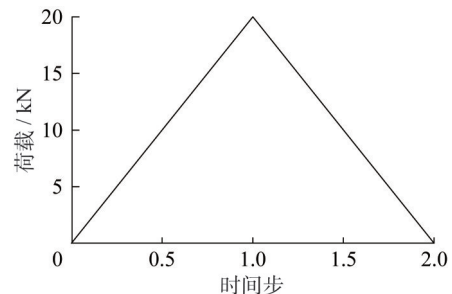


图9 试验加载制度

Fig. 9 Test loading system

试验时调节板簧试件的形心位置与作动器保持在同一条直线上,防止板簧元件发生平面外扭曲。试件两端与台凳之间放置聚四氟乙烯板减小摩擦力,使板簧试件在加载过程中两端可以沿水平方向自由移动。

2.2 试验结果

三组试件的荷载-位移曲线形状相似,各曲线在峰值点处的数据几乎相同,其中1号板簧试件试验曲线如图10所示,图中两条曲线为试件的加载曲线和卸载曲线。由图可知:试验的加载曲线与卸载曲线并不一致,卸载曲线位于加载曲线之下,加卸载曲线之间的变形差随着荷载增大而增大;板簧试件卸载结束后并没有回到加载初始点,即试件存在很小的残余变形。

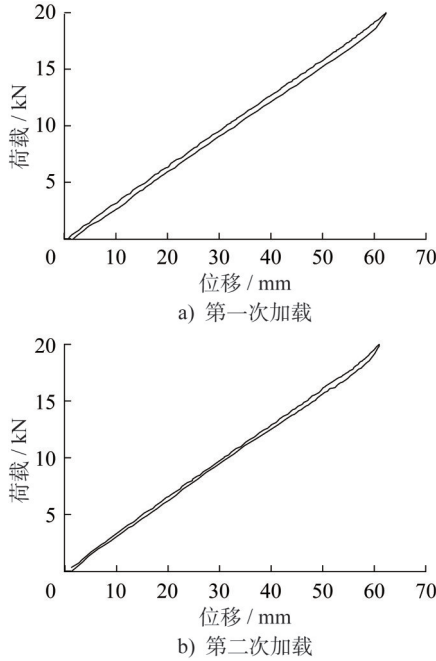


图10 1号板簧试件试验曲线

Fig. 10 Test curves of No. 1 plate spring specimen

加载结束后,试件的残余变形和自复位比如表2所示,由表可知,板簧元件的残余变形均在2 mm以内,因为多片板簧之间存在摩擦和阻尼作用以及试件与聚四氟乙烯板之间摩擦的影响,试件在弹性工作范围内没有实现完全复位,但自复位比均达到98%以上,满足减震耗能组件工作的需要。

表2 试件的残余变形和自复位比

Table 2 Residual deformation and self-centering ratio of specimens

试件编号	1	2	3
残余变形/mm	1.81	1.33	0.94
自复位比/%	98.0	98.5	98.9

注:自复位比=(板簧拱高-残余变形)/板簧拱高。

3 减震耗能组件拟静力试验研究

3.1 试验设计

本文制作了三架足尺减震耗能组件用于拟静力加载

试验,采用单向低周往复加载研究分析组件的实际工作性能,三架试验试件均采用相同的构造形式,分别编号为1、2、3号。

拟静力试验试件的几何构造如图11所示,其中板簧元件宽度90 mm,耗能元件宽度与高度均为16 mm,减震耗能组件整体呈对称设计。板簧材料为60Si2Mn,耗能材料为LYP100钢材,连接钢板采用高强度钢材,元件之间采用焊接连接固定。

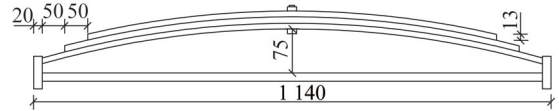


图11 拟静力加载试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 11 Dimension diagram of quasi-static loading specimen (unit: mm)

拟静力加载试验的加载装置如图12所示,采用拉绳式位移计采集位移数据,荷载数据由加载系统自动采集,采集频率均为2 Hz。减震耗能组件与台座之间放聚四氟乙烯板用于减小摩擦力的影响,使组件沿水平方向能够产生变形。试验加载过程中,耗能元件的长细比较大,在恢复阶段容易受压发生弯曲变形,因此试验中设置如图13所示的防屈曲装置,以保证耗能元件的塑性变形耗能。



图12 拟静力加载试验图

Fig. 12 Diagram of quasi-static loading test

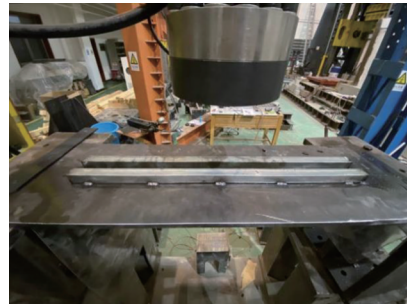


图13 防屈曲装置

Fig. 13 Anti-buckling device

参考文献[11,13]与《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[18]中,拟静力试验采用位移控制的加载方

式,设置加载作动器垂直于减震耗能组件进行匀速的单向往复加载,加载制度如图14所示,最大加载幅值取组件最大工作位移75 mm,即上层板簧元件与下层软钢之间的最大高度差。

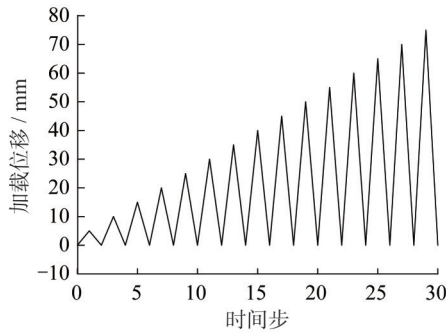


图14 拟静力加载试验的加载制度

Fig. 14 Loading system of quasi-static loading test

3.2 试验现象

2号试件在试验过程中由于板簧无侧向约束,试件存在初偏心使试件因偏心受压而发生平面外扭曲破坏,在实际支座中由于球型钢支座外框架的约束,不会发生这种失稳。以1号和3号试件为例进行研究分析,两组试件在加载过程中试验现象相似,减震耗能组件沿水平方向对称变形,板簧元件的各层钢板始终贴合在一起,没有出现明显的缝隙,在卸载恢复阶段,减震耗能组件可以实现整体复位变形,试件每级卸载结束后存在一定的残余变形。

当加载位移达到75 mm时,组件达到最大工作位移(图15),上层板簧元件几乎与下层软钢贴合,连接钢板在端部因受力出现了明显的向内屈曲现象,下层耗能元件被拉伸,组件拉伸达到最大长度,经测量组件水平长度为1 160 mm,较未加载前组件水平长度增长了20 mm。

3.3 试验结果与分析

(1) 滞回曲线

滞回曲线可以清晰地反映减震耗能组件在拟静力加载试验过程中的变形承载情况,1号和3号试件的滞回曲线如图16所示。由图可知:本次试验进行单向低周往复加载(只压不拉),试验得到第一象限的试件滞回曲线,组件的滞回曲线呈现为狭长的纺锤形状,两个试件的滞回曲线外形特征相似;每级加载结束后,试件出现了残余变形并逐级累积,每级滞回环并不能完全恢复到加载起点。

(2) 骨架曲线

在试件的滞回曲线上提取按照加载制度分级加载的各个荷载峰值点绘制试件的骨架曲线,如图17所示。由图可知:减震耗能组件的加载过程分为弹性阶段和弹塑性



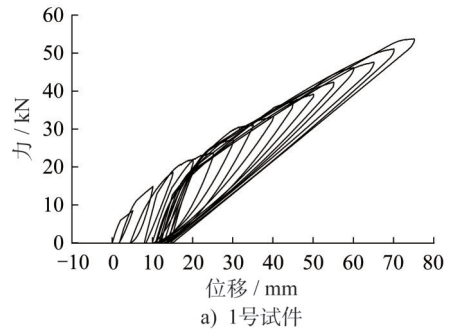
a) 试件最大变形



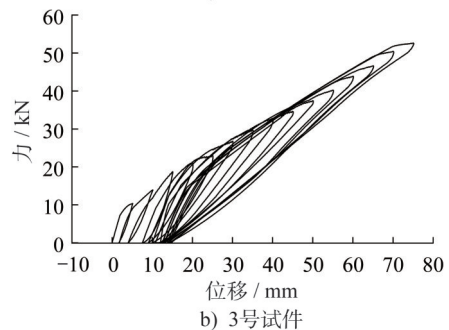
b) 组件端部变形

图15 试验现象

Fig. 15 Test phenomena



a) 1号试件



b) 3号试件

图16 滞回曲线

Fig. 16 Hysteretic curves

阶段,在位移为10 mm左右,组件由短暂的弹性进入弹塑性工作阶段;减震耗能组件的承载力随着加载的进行持续保持增长,弹塑性阶段承载力增长幅度小于弹性阶段承载力增长幅度;两个试件的屈服点均在10 mm左右,1号和3号试件的最大承载力分别为52.65 kN和50.63 kN。

(3) 延性系数

采用位移延性系数可以评估减震耗能组件进入弹塑

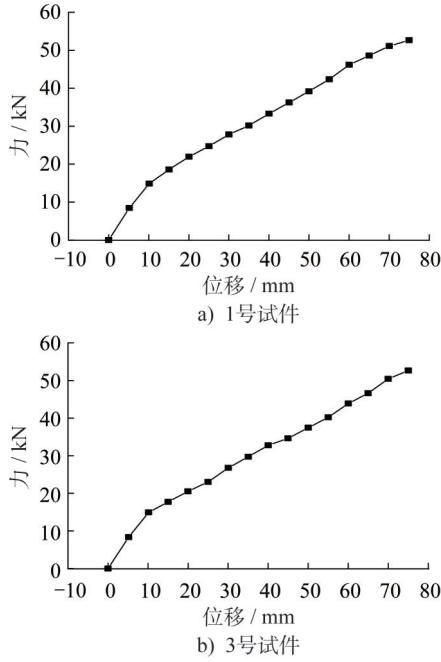


图 17 骨架曲线

Fig. 17 Skeleton curves

性工作阶段时的变形能力,位移延性系数 μ 可按式(1)计算,计算结果如表3所示。由表可知,减震耗能组件的延性系数均值为7.34,组件具有良好的塑性变形能力;1号和3号试件的最大工作位移、屈服位移基本一致,减震耗能组件的工作性能稳定。

$$\mu = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_{\max} 为试件的最大工作位移; Δ_y 为试件的屈服位移。

表 3 试件延性系数

Table 3 Ductility coefficient of specimens

试件编号	最大工作位移/mm	屈服位移/mm	位移延性系数 μ
1	74.999	10.153	7.38
3	75.022	10.132	7.30
平均值	—	—	7.34

(4) 累积耗能

由滞回曲线的每个滞回环的面积逐级累加可计算得到试件累积耗能增长曲线,如图18所示。在加载的最初阶段,钢板间的摩擦作用提供了一定的能量耗散。随着加载位移的增大,耗能元件塑性发展使能量耗散,组件的累积耗能增长幅度逐渐增大,1号和3号试件的最大累积耗能分别为3708 kN·mm和3477 kN·mm。

(5) 能量耗散系数

本次拟静力试验为单向循环加载,且每级加载的滞

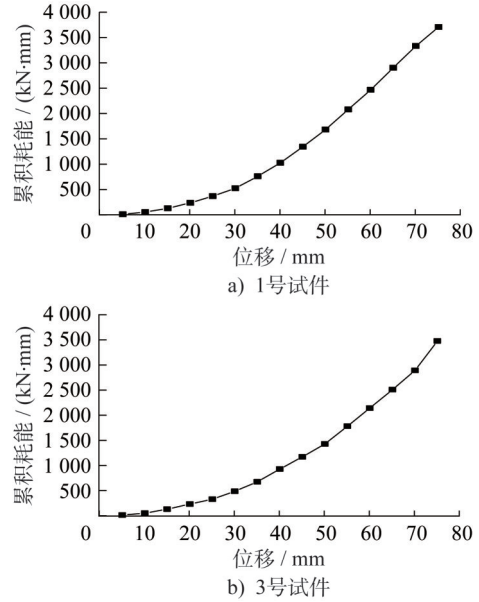


图 18 累积耗能增长曲线

Fig. 18 Curves of cumulative energy dissipation

回环起点有明显的向右平移现象,因此减震耗能组件的能量耗散系数 E 按图19所示的计算图计算,具体计算公式为式(2):

$$E = \frac{S_{ABC}}{S_{ABD}} \quad (2)$$

式中: S_{ABC} 为图19中滞回曲线ABC包围的面积; S_{ABD} 为图19中三角形ABD的面积。

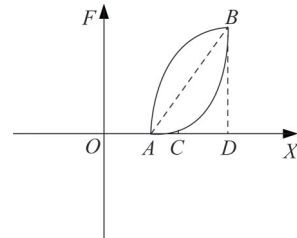


图 19 能量耗散系数计算图

Fig. 19 Calculation diagram of energy dissipation coefficient

能量耗散系数变化曲线如图20所示,从图中可以看出:减震耗能组件的能量耗散系数在加载初期快速增大,在位移为20 mm左右出现曲线的转折点;在荷载的往复加载作用下,试件的损伤不断累积,导致耗能材料的能量耗散能力下降,组件的滞回曲线呈现更为狭长的纺锤形状,能量耗散系数逐渐下降。两个试件的变化趋势基本相同,1号和3号试件的最大能量耗散系数分别为0.83和0.78。

(6) 残余位移曲线

提取每级加载结束后试件的残余位移,绘制曲线如

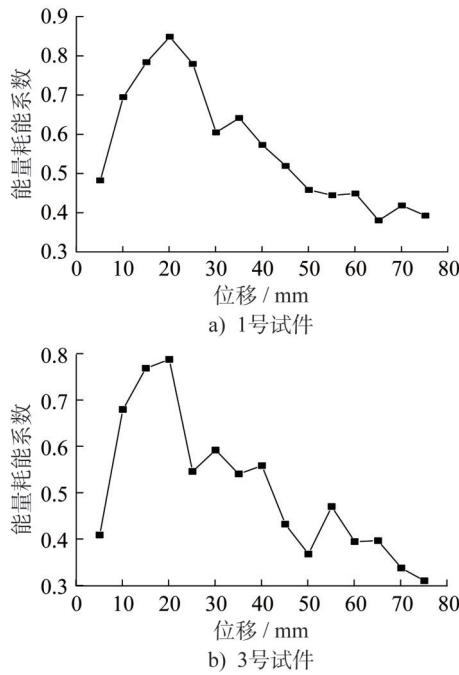


图 20 能量耗散系数变化曲线

Fig. 20 Curves of energy dissipation coefficient

图 21 所示,用以评估减震耗能组件的自复位能力。从图中可以看出:随着加载的进行,每级加载结束后的残余变形逐渐累积,累积速度逐渐减小,加载后期,组件的残余位移增长较小,残余变形相对稳定地保持在一定水平;加载结束后,1号和3号试件的残余位移分别为 14.8 mm 和 13.7 mm,自复位比分别为 80.3% 和 81.7%,减震耗能组件的复位效果良好。

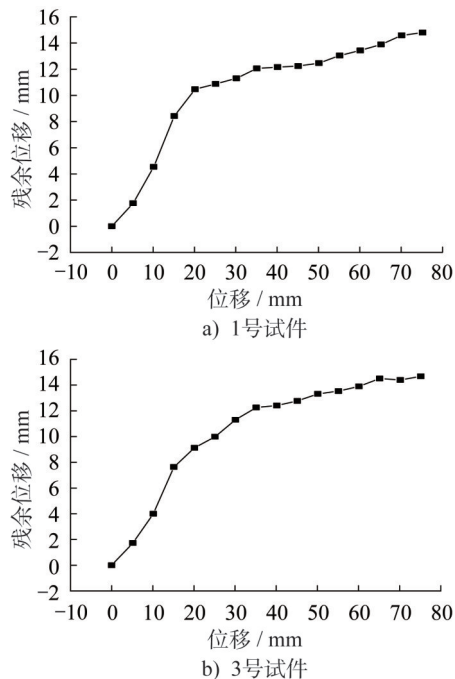


图 21 残余位移变化曲线

Fig. 21 Curves of residual displacement

(7) 刚度退化曲线

试件在循环加载过程为单向加载(只压不拉),因此在滞回曲线分析中,按式(3)计算得到试件的割线刚度 K_i ,绘制刚度退化曲线如图 22 所示。

$$K_i = \frac{F_i}{x_i} \quad (3)$$

式中: F_i 为第 i 次加载的荷载峰值点; x_i 为第 i 次加载的位移峰值点。

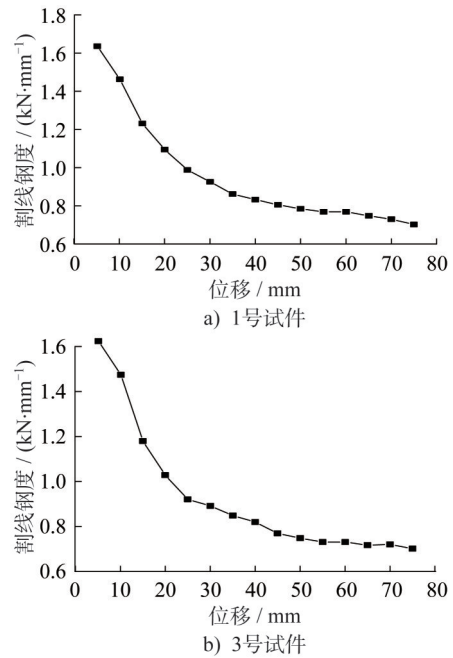


图 22 刚度退化曲线

Fig. 22 Stiffness degradation curves

由图 22 可以看出:加载前期,组件刚度退化程度明显,试件整体刚度随试件弹塑性发展逐渐降低,随着加载位移的增大,耗能元件大部分区域进入塑性,产生较大的塑性变形,在塑性发展阶段,组件的刚度退化曲线逐渐趋于平缓;1号和3号试件的割线刚度退化率分别为 57.1% 和 57.5%。

4 减震耗能组件数值模拟研究

4.1 有限元模型概况

采用 ABAQUS 有限元分析软件进行减震耗能组件的单向低周往复加载模拟分析,与试验结果结合,对减震耗能组件工作过程中的应力与应变变化情况进行深入研究。

根据拟静力试验的约束和边界条件,对有限元模型进行一些假定和等效处理。认为加载作动器和连接件的刚度无穷大;作动器施加的荷载方向始终竖向垂直于试件拱顶,加载点位于拱顶的中心;在板簧元件模型中间设置参考点与组件中面耦合,并设置 x 方向的固定约束,模拟螺栓的固定作用;忽略试件连接钢板与聚四氟乙烯板

之间的摩擦作用,认为组件在水平 x 方向自由无约束;设置耗能元件 z 方向和 y 方向的约束,模拟试验中防屈曲装置的固定作用;减震耗能组件各元件之间采用绑定连接,协同变形。

建立的数值模拟模型如图 23 所示,模型采用 C3D8R 单元模拟,即八节点六面体线性减缩积分单元,此单元具有较好的变形与应力解析能力,计算时间少,并且在弯曲荷载下也不容易发生剪切自锁现象。板簧元件的网格间距在 x 和 z 方向为 25 mm, y 方向为 7 mm;耗能元件和连接板网格间距为 10 mm,作动器网格间距为 20 mm。耗能材料 LYP100 的本构参数按材性试验标定的参数选取,板簧材料 60Si2Mn 的本构参数按厂家实际提供的参数选取,有限元模拟采用拟静力试验的加载制度。

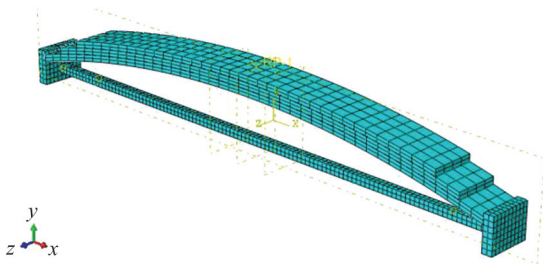


图 23 减震耗能组件有限元模型

Fig. 23 Finite element model of energy dissipation component

4.2 模拟结果

(1) 模拟曲线与试验曲线的对比

模拟结果和 1 号试件的试验曲线的对比图如图 24 所示,由图可以看出组件的模拟曲线形状与试验曲线相似,滞回环面积饱满,承载力稳定增长,与试验结果相符,组件的最大承载力、最大工作位移以及残余变形等数据在曲线上能够较好的吻合。由于试验中各元件的连接与防屈曲装置难以达到最理想的约束条件,以及试验环境与测量误差等因素的影响,在加载位移较小时存在较大承载力误差,试验荷载值小于模拟曲线中各级加载的荷载值。

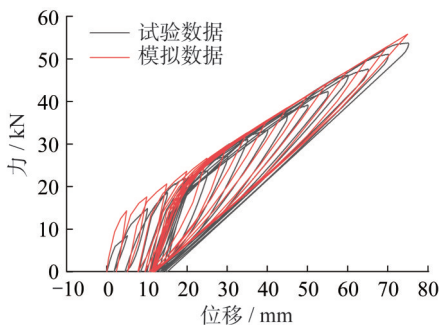


图 24 滞回曲线对比图

Fig. 24 Comparison of hysteretic curves

数值模拟得到的累积耗能与试验累积耗能对比表如表 4 所示,计算得到的模拟结果与试验结果相比误差在 10% 以内。综合滞回曲线的对比情况,模拟结果与试验结果吻合,数值模拟效果较好,可以认为建立的有限元模型符合试验要求。

表 4 累积耗能对比

Table 4 Comparison of cumulative energy dissipation

试件编号	累积耗能/(kN·mm)	误差/%
1号试件	3 708	2.9
3号试件	3 477	9.7
有限元模拟	3 815	—

注:误差=(模拟累积耗能-试验累积耗能)/试验累积耗能。

(2) 耗能元件的应力及塑性应变分析

通过拟静力加载试验难以判断减震耗能组件中各项元件的应力应变情况,采用数值模拟的研究方法可以分别以板簧元件、耗能元件作为研究对象,分析两个元件在不同加载级时的应力和塑性应变发展情况。

在加载位移为 10 mm 时,耗能材料刚进入塑性耗能阶段,整个耗能元件均出现塑性耗能段,塑性应变值很小,随着加载位移增大,塑性耗能段的整体塑性应变值也随之增大。耗能元件在最大加载位移 75 mm 时应力和塑性应变分布情况如图 25 和图 26 所示,在加载位移为 75 mm 时,耗能元件的最大应力为 216.5 MPa,最大塑性应变为 1.185%。

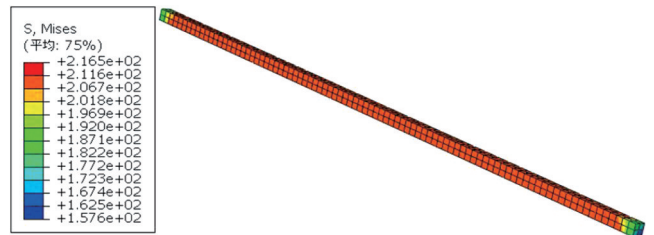


图 25 耗能元件应力云图(单位:MPa)

Fig. 25 Stress contour of energy dissipation element (unit: MPa)

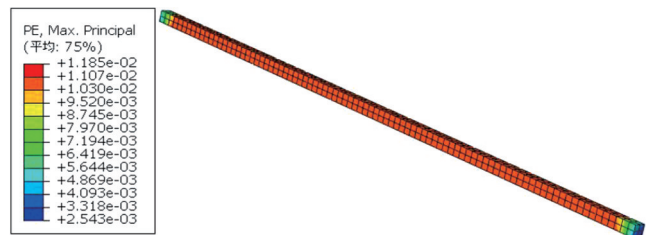


图 26 耗能元件塑性应变云图

Fig. 26 Plastic strain contour of energy dissipation element

(3) 板簧元件的应力及塑性应变分析

当加载位移为 75 mm 时,有限元模型中板簧元件的

应力和塑性应变分布情况如图 27 和图 28 所示。从图中可以看出,达到最大工作位移时,板簧元件仍处于弹性范围内,没有出现塑性应变;前两层钢板弹簧在中间区域出现应力最大值,第三层钢板弹簧拱脚处因与连接板连接出现应力集中现象。

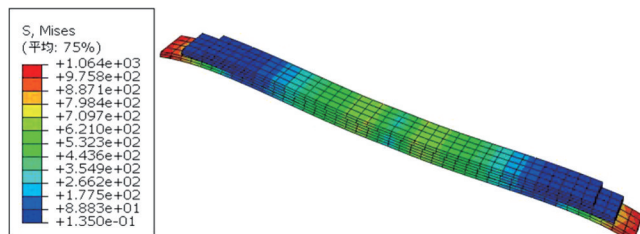


图 27 板簧元件应力云图(单位:MPa)

Fig. 27 Stress contour of plate spring element (unit:MPa)



图 28 板簧元件塑性应变云图

Fig. 28 Plastic strain contour of plate spring element

从耗能元件和板簧元件的应力、应变情况可以看出,耗能元件以及板簧元件作为减震耗能组件的核心组成部分,分别承担着耗能与复位的功能。板簧元件在加卸载过程中始终保持弹性工作状态,使减震耗能组件在卸载过程中实现自复位,耗能元件在外部荷载加载初期进入塑性变形阶段,整个耗能元件都参与耗能,实现了两种材料的充分利用。

5 结论

本文对一种功能分离型自复位耗能支座的核心减震耗能组件的工作性能进行了研究,该组件由板簧元件、耗能元件和连接件组成,构造简单、工作机理清晰。得到的主要结论如下:

(1) 减震耗能组件在拟静力加载试验中各元件分工明确,组件整体可以实现协同变形;数值模拟各元件的应力应变情况表明减震耗能组件可实现耗能与复位功能分离,工作机理清晰明确。

(2) 减震耗能组件的拟静力试验中试件表现出了良好的耗能能力和承载能力。1号和3号试件的滞回曲线呈现为狭长的纺锤形状,组件承载力稳定增长。

(3) 减震耗能组件的残余位移增长幅度以及刚度退

化趋势都随着加载位移的增大而减小。1号和3号试件的自复位比分别为80.3%和81.7%,割线刚度退化率分别为57.1%和57.5%,组件具有良好的自复位能力。

参考文献:

- [1] 李祚华,葛磊,齐一鹤,等.配置耗能减震部件的模块化结构抗震性能优化设计[J].建筑结构学报,2023,44(增刊2):272-281.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.S2.0027.
LI Zuohua, GE Lei, QI Yihe, et al. Seismic performance optimization design for modular structure with energy dissipation component[J].Journal of Building Structures,2023,44(Suppl.2):272-281.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.S2.0027.(in Chinese)
- [2] 贺拥军,向禹帆,周绪红,等.布置黏滞阻尼器的格构式拱形刚架减震控制研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(2):50-56.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.02.004.
HE Yongjun, XIANG Yufan, ZHOU Xuhong, et al. Research on the vibration reduction of latticed arch frame with viscous dampers[J].Progress in Steel Building Structures,2022,24(2):50-56. DOI: 10.13969/j. cnki. cn31-1893.2022.02.004. (in Chinese)
- [3] VENGHIAC V M, BUDESCU M. The experimental analysis of an innovative yielding metallic damper [J]. Mathematical Modelling in Civil Engineering, 2015, 11(2):38-45.DOI:10.1515/mmce-2015-0009.
- [4] ISSA A S, ALAM M S. Seismic performance of a novel single and double spring-based piston bracing[J].Journal of Structural Engineering,2019,145(2):04018261.DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002245.
- [5] SHIRINKAM M R, RAZZAGHI J. Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box-Shaped Dampers (BSD) [J]. Structures, 2020, 23: 766-778. DOI:10.1016/j.istruc.2019.12.018.
- [6] 孙建鹏,孙文武,张家驹,等.屈曲耗能型钢板在减隔震支座研发中的应用[J].应用力学学报,2021,38(6):2268-2274. DOI:10.11776/cjam.38.06.B236.
SUN Jianpeng, SUN Wenwu, ZHANG Jiaju, et al. Application of buckling energy dissipating steel plate in the research and development of seismic isolation bearing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(6):2268-2274. DOI:10.11776/cjam.38.06.B236. (in Chinese)
- [7] 方蓉,康路明,张文学,等.自复位摩擦耗能支座减隔震机理及试验研究[J].振动与冲击,2021,40(23):83-90. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.23.012.
FANG Rong, KANG Luming, ZHANG Wenxue, et al. Seismic reduction and isolation mechanism and tests for self-reset and friction energy-dissipating pedestal [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(23):83-90. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.23.012. (in Chinese)
- [8] 孙晓东.新型SMA-滚动碟簧隔震支座的力学性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2013.

- SUN Xiaodong. The mechanical property study on the new SMA-disc spring isolation with ball returning system[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 崔玲, 徐国彬. 万向承载、万向转动、抗震、减振球形钢支座的研制[C]//第九届空间结构学术会议论文集. 杭州: [出版者不详], 2000: 833-838.
- CUI Ling, XU Guobin. Development of spherical steel bearings for universal bearing, universal rotation, seismic resistance and vibration reduction [C]//Proceedings of the 9th National Conference on Spatial Structure. Hangzhou: [s. n.], 2000: 833-838.
- [10] 李小鹏. 一种新型球型钢支座减震性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- LI Xiaopeng. Study on vibration-absorption performance of a new spherical bearing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [11] 孙浩然. 自复位球型钢支座减震耗能构件的试验研究及数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- SUN Haoran. Numerical simulation and experimental research of self-centering steel spherical bearing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [12] 罗杨洋. 一种功能分离的新型减震支座的减震性能和设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- LUO Yangyang. Study on vibration-absorption performance and design method of a new spherical bearing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [13] 郑子豪. 功能分离型自复位减震耗能支座的力学机理与设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- ZHENG Zihao. Study on the mechanical mechanism and design method of a new type of steel spherical bearing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [14] 石文龙, 陶正华, 张福寿. 低屈服点钢研究进展与力学性能数据分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 175-183. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.01.175.shiwl.021.
- SHI Wenlong, TAO Zhenghua, ZHANG Fushou. Research progress and mechanical properties data analysis of low yield point steel [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 175-183. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.01.175.shiwl.021. (in Chinese)
- [15] 温东辉, 宋凤明, 刘自成, 等. 建筑抗震用低屈服点钢的生产与应用[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(5): 16-19, 62.
- WEN Donghui, SONG Fengming, LIU Zicheng, et al. Manufacture and application of low yield point steel used for earthquake resistant [J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(5): 16-19, 62. (in Chinese)
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [17] 隋福楼, 于淑敏, 赵宇, 等. 汽车板簧材料与工艺试验[J]. 金属热处理, 2000, 25(9): 38-40. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2000.09.018.
- SUI Fulou, YU Shumin, ZHAO Yu, et al. Plate spring material of truck and its technological test [J]. Heat Treatment of Metals, 2000, 25(9): 38-40. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2000.09.018. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)