

加载频率对铝合金减震器动力特性的影响¹

尤红兵 赵凤新

(中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

摘要 铝合金减震器是一种适用于电瓷型电气设备的新型减震器, 其动力特性对减震效果有重要影响。根据断路器等电气设备的特点, 定制了相应的铝合金减震器。通过铝合金减震器滞回特性试验, 研究了加载频率对其动力特性的影响。同时以不同加载频率下得到的骨架曲线作为材料的本构关系, 研究了加载频率对单自由度体系弹塑性地震反应的影响。研究表明: 在相同输入下, 采用不同本构关系的单自由度体系, 其相对位移峰值、永久位移及塑性耗能均有较大差异, 应重视加载频率对铝合金减震器动力特性的影响。

关键词: 加载频率 铝合金减震器 动力特性 单自由度体系 地震反应

引言

铝合金减震器是一种适用于电瓷型电气设备的新型减震器, 其动力特性对减震效果有重要影响。由于地震是随机荷载, 作用频率是时刻变化的。在测定铝合金减震器动力参数时, 大多采用固定的频率进行加载, 这样得出的参数与实际动力分析不太相符, 所以研究加载频率对铝合金减震器动力特性的影响具有重要的理论和实际意义。

近年来, 许多学者研究了加载频率对不同材料动力特性的影响。张建明等(1990)、李定乾等(2009)、Jiang Minmin等(2010)分别研究了加载频率对饱和砂土、粘性土、海相粘土动力特性的影响; 李夕兵等(2007)给出了不同频率载荷作用下的岩石节理本构模型; 马吉成等(2008)研究了加载频率对混凝土损伤的影响。此外, 何玉怀等(2008)还研究了加载频率对高温合金疲劳裂纹扩展性能的影响。对于铝合金减震器, 李亚琦等(2005)研究了长周期和速度脉冲对铝合金减震器减震效果的影响, 给出了其适用范围。由于我国在电气设备的减震、隔震方面的研究工作目前仍在起步阶段, 加载频率对铝合金减震器动力特性影响研究的相关文献还未见报道。

为全面研究铝合金减震器的动力特性, 本文进行了加载频率对其拉伸特性影响的试验。同时以不同加载频率下得到的骨架曲线作为材料的本构关系, 研究了加载频率对单自由度体系弹塑性地震反应的影响。

1 基金项目 地震行业科研专项(工业电气设备地震安全研究, 编号: 200708034)资助

[收稿日期] 2011-07-10

[作者简介] 尤红兵, 男, 生于1970年。副研究员。主要研究领域: 地震工程。E-mail: hbyou@126.com

1 铝合金减震器及动力特性试验

1.1 铝合金减震器及试验简介

高压电气设备多由脆性瓷套组成，固有频率一般在 1—10Hz 之间，与地震波的卓越频率接近；而且设备的阻尼比较小，动力放大系数很大。此类设备在地震中极易破坏，抗震性能较差。安装铝合金减震器后，能改变设备体系的频率和阻尼参数，将大大降低设备的地震反应，是提高其抗震能力最简单、有效、经济的措施。

铝合金减震器的主要成分为金属铅，其中添加了少量的其它金属。它利用铝合金的塑性变形来吸收地震能量，能有效提高电气设备的抗震能力。此类减震器克服了橡胶减震器的缺点，具有耐老化、耐低温、耗能性能稳定、承载力大、寿命长、造价低等优点。铝合金减震器具有较好的减震效果，减震率不低于 40%，并能在不拆卸设备的条件下简便更换，达到《高压电气设备减震技术规定 (DL GJ160-2003)》(中国电力规划设计协会, 2004)对减震器的技术要求。目前，铝合金减震器已经用于天津盘山电厂 500kV 的隔离开关等电气设备减震中。

为研究铝合金减震器在 LW36-252 /T3150-40 型瓷柱式 SF6 断路器减震中的应用，根据断路器的特点，定制了相应的铝合金减震器(尤红兵等, 2010)。为研究加载频率对铝合金减震器动力特性的影响，委托中国铁道科学研究院金属及化学研究所进行了试验。铝合金减震器及 MTS810 材料试验机如图 1 所示。



图 1 铝合金减震器及 MTS810 材料试验机

Fig. 1 The lead alloy absorber and MTS810 material testing machine

试验采用位移控制方式，加载频率分别为：0.2Hz、0.5Hz、1.0Hz、2.0Hz、5.0Hz、10.0Hz。位移变化为：0→a→-a→2a→-2a→3a…→6a→-6a→7a→-7a→8a→-8a，其中 a=0.5mm、0.8mm。

1.2 试验结果

图 2 和图 3 分别为 a=0.5mm、0.8mm 时，不同加载频率下得到的拉压滞回曲线及由各滞回环顶点的连线确定的骨架曲线。

从图中可以看出，随着加载频率的增大，达到相同的位移所需的拉(压)力也逐渐加大。采用不同的加载频率，将得到不同的骨架曲线，说明加载频率对铝合金减震器的动力特性有重要影响。如当 a=0.5mm 时，铝合金减震器压缩 1.9mm 所需的压力分别为 34.99kN (0.2Hz)、35.86kN (0.5Hz)、37.15kN (1.0Hz)、38.64kN (2.0Hz)、41.05kN (5.0Hz)，最大相差 17.3%；

当 $a=0.8\text{mm}$ 时, 不同加载频率下, 屈服力分别为: 35.53kN (0.2Hz)、 38.03kN (0.5Hz)、 40.32kN (1.0Hz)、 42.29kN (2.0Hz)、 42.81kN (5.0Hz)、 42.90kN (10.0Hz), 最大相差 20.7% 。

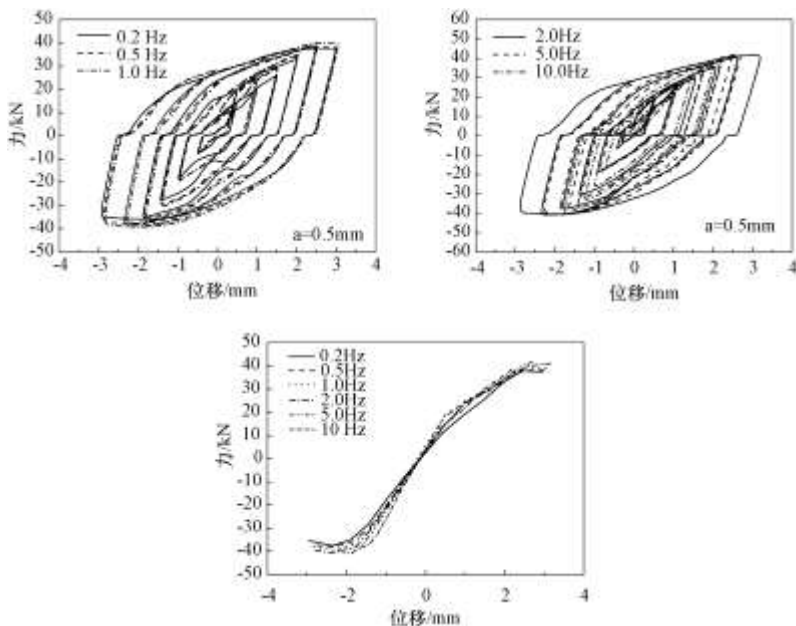


图 2 铅合金减震器滞回曲线及骨架曲线 ($a=0.5\text{mm}$)

Fig. 2 The hysteretic and skeleton curve of the lead alloy absorber ($a=0.5\text{mm}$)

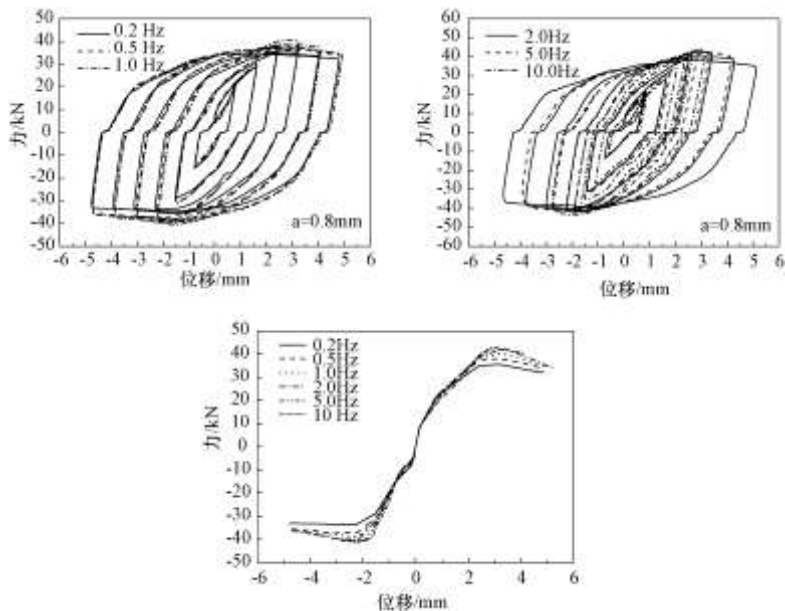


图 3 铅合金减震器滞回曲线及骨架曲线 ($a=0.8\text{mm}$)

Fig. 3 The hysteretic and skeleton curve of the lead alloy absorber ($a=0.8\text{mm}$)

2 单自由度体系弹塑性地震反应

以 $a=0.8\text{mm}$ ，不同加载频率下得到的骨架曲线（图 3）作为材料的本构关系，研究加载频率对单自由度体系弹塑性地震反应的影响。

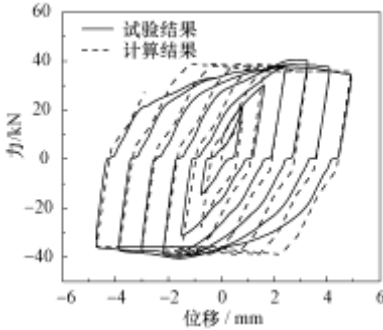


图 4 计算结果与试验结果比较

Fig. 4 Comparison of numerical results and experimental results

利用 ANSYS 软件，建立了单自由度体系弹簧-质点模型。水平弹簧采用 COMBIN39 单元，本构关系采用图 3 所示的力-位移骨架曲线。质点采用 MASS21 质量单元，沿水平方向运动。图 4 为根据加载频率为 1.0Hz 时得到的力-位移骨架曲线，计算所得滞回曲线与相应试验滞回曲线的比较。从图中可以看出，二者基本一致，计算方法较准确可靠。

水平输入地震波选择 EL-CENTRO 波和 SAN FERNANDO 波（图 5），加速度最大幅值调整为 0.1g 时的加速度反应谱如图 5 所示，卓越周期分别为 0.55s、0.15s。图中 a 表示加速度， S_a 表示加速度反应谱的谱值， g 为重力加速度单位， t 表示时间， T 表示自振周期，单位为 s。计算分析时，将加速度最大幅值分别调整为： $A_{\max}=0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$ 。

由于铝合金减震器刚度所限，得到的力-位移骨架曲线不适合研究周期较长的单自由度体系弹塑性地震反应，因此选取自振周期从 0.05s 到 1.0s 的单自由度体系进行分析计算。

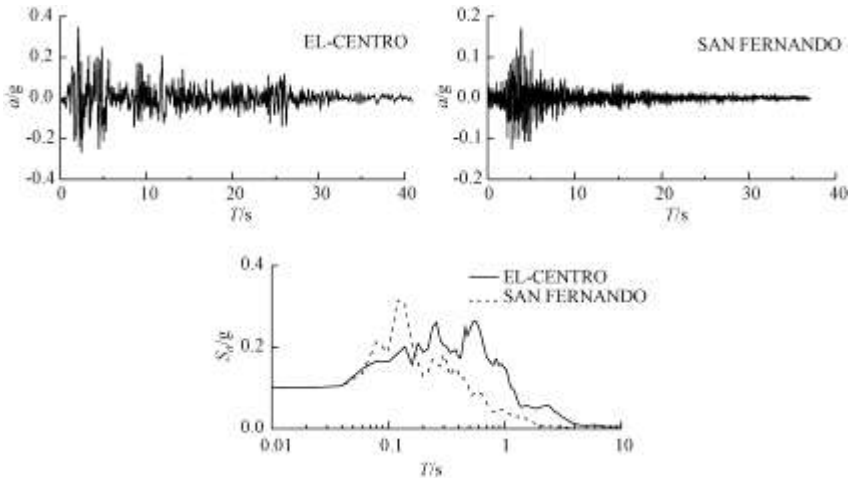


图 5 输入地震波及其加速度反应谱

Fig.5 Input seismic wave and its acceleration response spectrum

2.1 对峰值加速度的影响

图 6 给出了输入 EL-CENTRO 波，加速度峰值分别为 0.1g、0.2g、0.4g 时，单自由度体系加速度反应的峰值随体系自振周期的变化曲线。图 7 为输入 SAN FERNANDO 波时的相应结果。图中 0.2Hz、0.5Hz、1.0Hz、2.0Hz、5.0Hz、10.0Hz 分别表示采用相应加载频率得到的本构关系和单自由度体系地震反应。从图中可以看出，采用不同本构模型得到的峰值加速度

变化不大。当 $A_{max}=0.1g$ 、 $0.2g$ 、自振周期在 $0.1s-0.2s$ 时，峰值加速度最大相差不超过 10%；其他结果最大相差不超过 5%。因此，可不考虑加载频率对峰值加速度的影响。

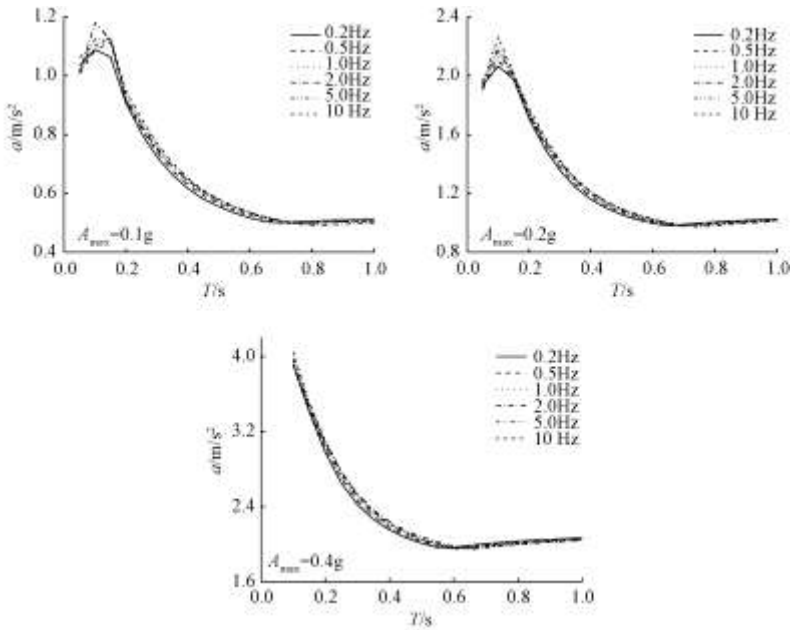


图 6 峰值加速度随自振周期的变化 (EL-CENTRO 波)

Fig. 6 Variation of the peak value of acceleration with natural period of vibration (EL-CENTRO wave)

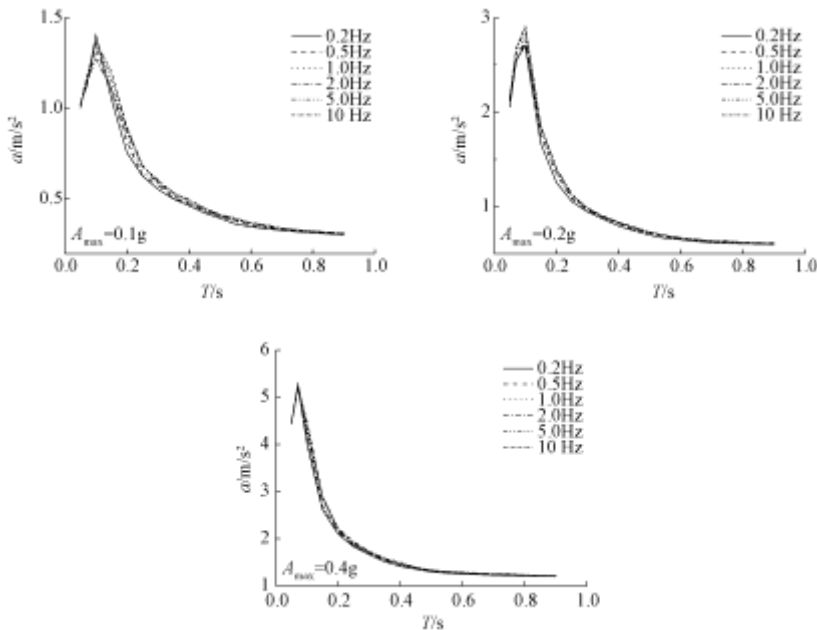


图 7 峰值加速度随自振周期的变化 (SAN FERNANDO 波)

Fig. 7 Variation of the peak value of acceleration with natural period of vibration (SAN FERNANDO wave)

2.2 对相对位移峰值的影响

图 8 和图 9 分别给出了输入不同地震波, 加速度峰值为 0.1g、0.2g、0.4g 时, 单自由度体系的相对位移峰值 d_{\max} 随体系自振周期的变化曲线。为方便比较, 将图 8 中各曲线值 d_{\max} 除以 0.2Hz 的相应结果 d_{02} , 得到不同本构模型位移相对比值随自振周期的变化, 如图 10 所示。

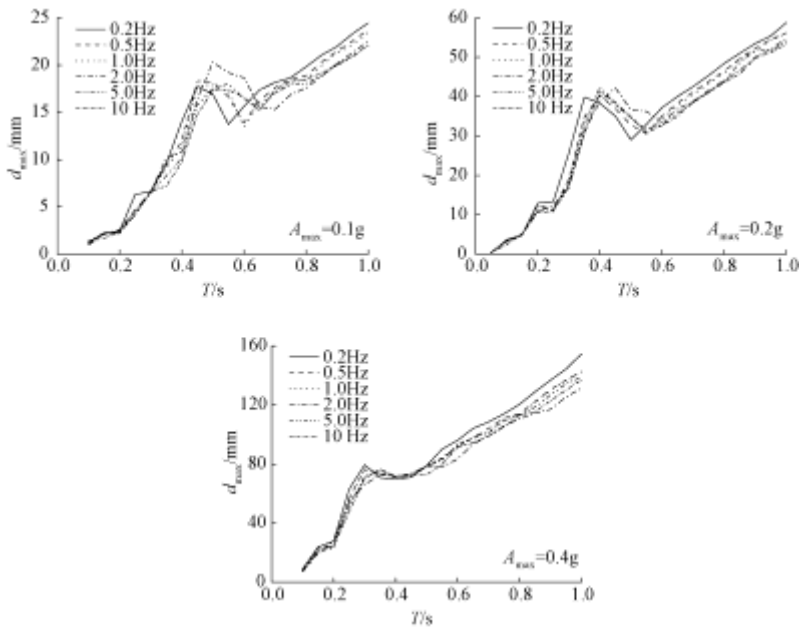


图 8 相对位移峰值随自振周期的变化 (EL-CENTRO 波)

Fig. 8 Variation of the peak value of the relative displacement with natural period of vibration (EL-CENTRO wave)

从图中可以看出, 无论是输入 EL-CENTRO 波, 还是输入 SAN FERNANDO 波, 相对位移峰值随自振周期的变化规律基本相同。当输入加速度峰值相同时, 采用不同本构关系的单自由度体系, 其相对位移峰值有较大差异。其中 0.2Hz 结果与 2.0Hz 结果相差最大, 应重视加载频率对峰值位移的影响。

如当输入 EL-CENTRO 波、加速度峰值 $A_{\max}=0.1g$ 、自振周期 $T=0.55s$ 时, 位移相对比值 d_{\max}/d_{02} 分别为: 1.0 (0.2Hz)、1.21 (0.5Hz)、1.25 (1.0Hz)、1.397 (2.0Hz)、1.31 (5.0Hz)、1.27 (10.0Hz), 最大相差 39.7%, 最小相差 21%; 当加速度峰值 $A_{\max}=0.2g$ 、自振周期 $T=0.3s$ 时, 0.2Hz 结果与 2.0Hz 结果相差 34.3%; 当输入 SAN FERNANDO 波、加速度峰值 $A_{\max}=0.1g$ 、自振周期 $T=0.50s$ 时, 位移相对比值 d_{\max}/d_{02} 分别为: 1.0 (0.2Hz)、0.964 (0.5Hz)、0.948 (1.0Hz)、0.67 (2.0Hz)、0.876 (5.0Hz)、0.862 (10.0Hz), 最大相差 33%。

另外, 输入加速度峰值对不同模型的相对位移反应也有重要影响。输入加速度峰值越大, 相对位移峰值的差异越小。如当 $A_{\max}=0.1g$ 时, 相对位移峰值最大相差 39.7%; 当 $A_{\max}=0.2g$ 时, 相对位移峰值最大相差 34.3%; 当 $A_{\max}=0.4g$ 时, 相对位移峰值最大相差 24.2%。

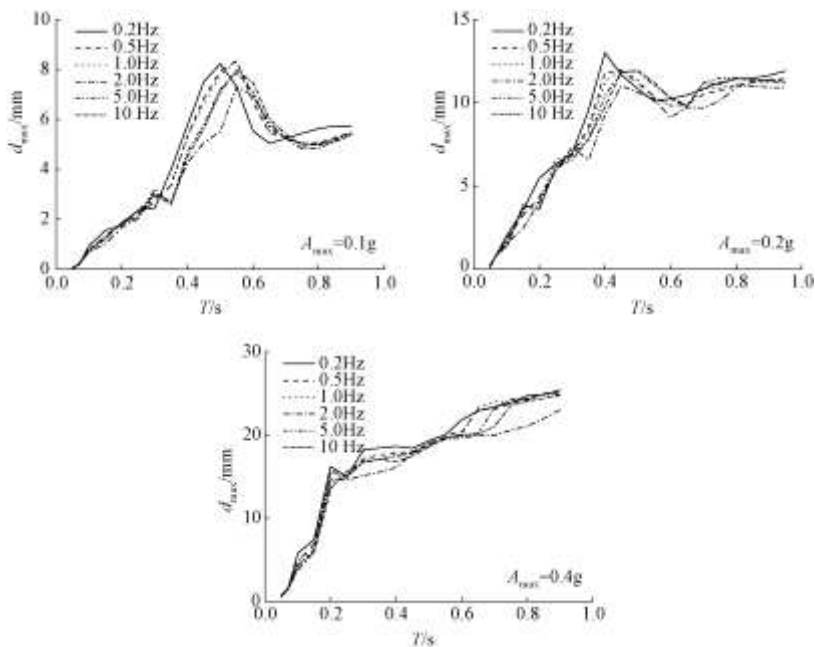


图 9 相对位移峰值随自振周期的变化 (SAN FERNANDO 波)

Fig. 9 Variation of the peak value of the relative displacement with natural period of vibration (SAN FERNANDO wave)

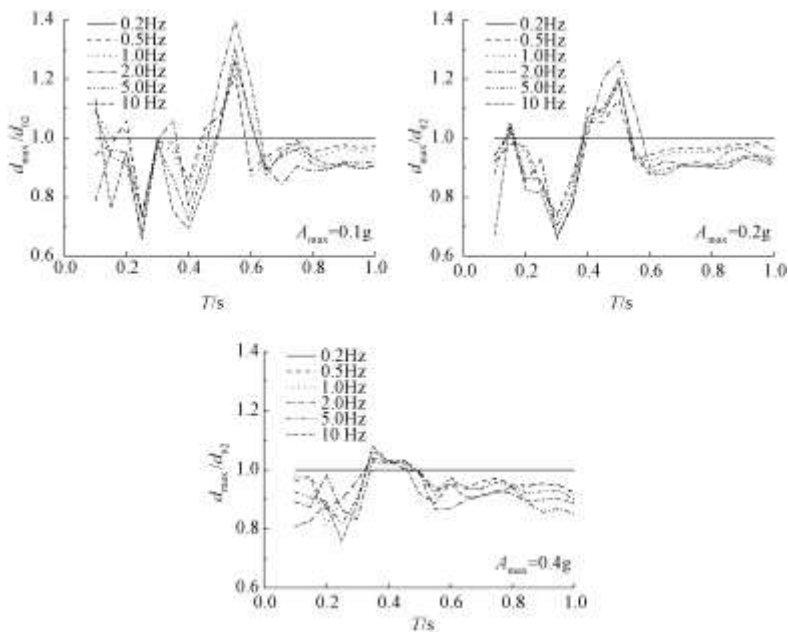


图 10 位移相对比值随自振周期的变化 (EL-CENTRO 波)

Fig. 10 Variation of the relative displacement ratio with natural period of vibration (EL-CENTRO wave)

2.3 对永久位移的影响

图 11 和图 12 分别给出了输入不同地震波，加速度峰值为 0.1g、0.2g、0.4g 时，单自由

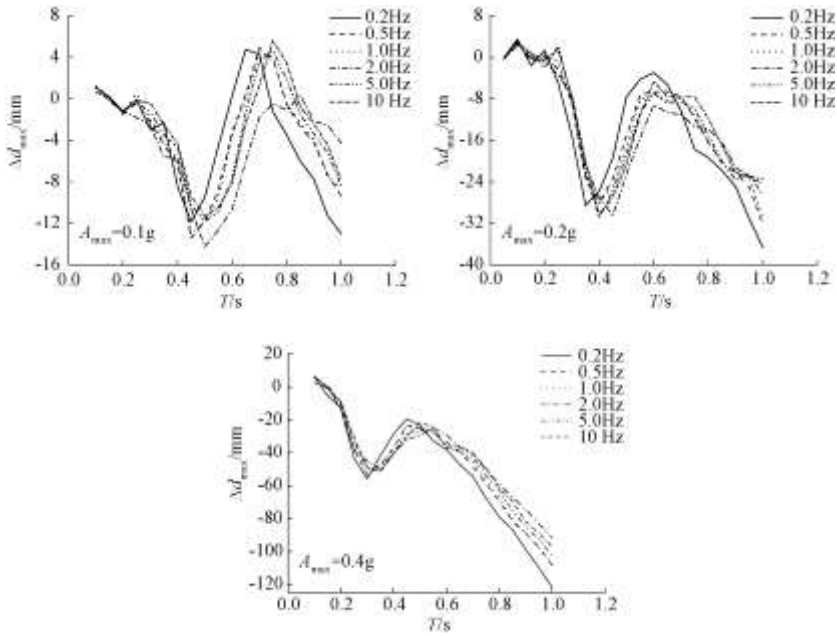


图 11 永久位移随单自由度体系自振周期的变化 (EL-CENTRO 波)

Fig. 11 Variation of the permanent displacement with natural vibration period of SDOF (EL-CENTRO wave)

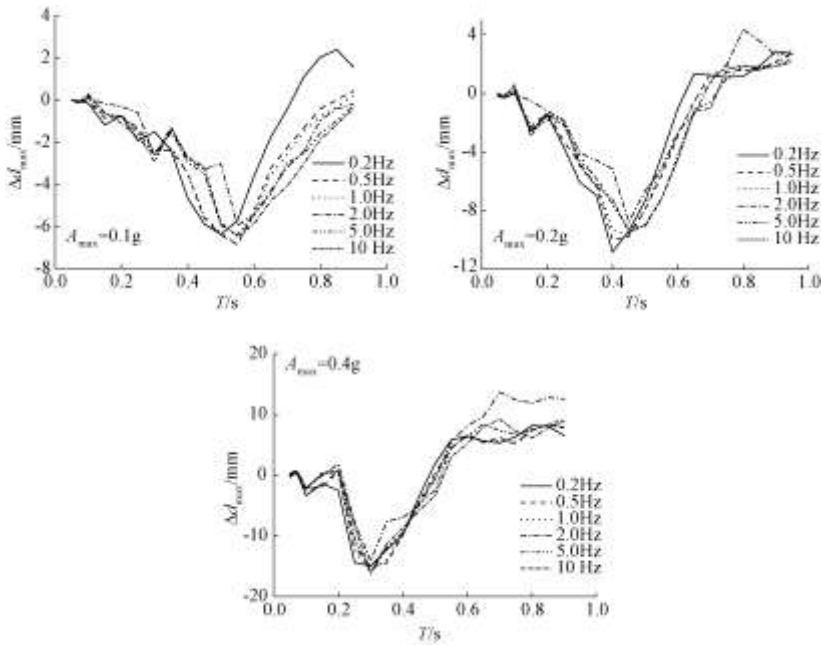


图 12 永久位移随单自由度体系自振周期的变化 (SAN FERNANDO 波)

Fig. 12 Variation of the permanent displacement with natural vibration period of SDOF (SAN FERNANDO wave)

度体系的永久位移峰值 Δd_{\max} 随体系自振周期的变化曲线。从图中可以看出, 当输入相同时, 采用不同本构关系得到的永久位移有较大差异。如当输入 EL-CENTRO 波、加速度峰值 $A_{\max}=0.1g$ 、自振周期 $T=0.6s$ 时, 永久位移分别为: 0.26mm (0.2Hz)、-3.24 mm (0.5Hz)、-3.63 mm (1.0Hz)、-10.68 mm (2.0Hz)、-7.74 mm (5.0Hz)、-8.10mm (10.0Hz)。其中, 0.2Hz 结果与 2.0Hz 结果相差 41 倍, 与 0.5Hz 结果相差 12 倍。永久位移过大, 将严重影响结构的使用和寿命, 应重视加载频率最终对结构永久位移的影响。

自振周期对永久位移也有重要影响, 在 0.1s—0.4s 内不同本构关系得到的永久位移差异较小, 而在 0.4s—1.0s 内永久位移差异较大。如当输入 SAN FERNANDO 波、加速度峰值 $A_{\max}=0.1g$ 、自振周期 $T=0.3s$ 时, 永久位移分别为: -1.5mm (0.2Hz)、-2.64mm (2.0Hz), 相差 1.76 倍; 自振周期 $T=0.7s$ 时, 永久位移分别为: -0.44mm (0.2Hz)、-3.20mm (2.0Hz), 相差 7.27 倍。

2.4 对能量反应的影响

研究结构在地震等作用下的耗能特性, 是能量分析研究方法的重要内容。滞回耗能与弹性应变能之和为恢复力-位移曲线所围的面积, 代表质点运动过程中恢复力所做的功。随着结构塑性变形的发展, 滞回耗能随着结构非线性变形的变化而起主导作用。滞回耗能能够反应地震动持时对结构的影响, 并可作为衡量结构的累计损伤的一个重要指标 (史庆轩等, 2005; 杨文星等, 2006)。

图 13 和图 14 分别给出了输入不同地震波, 加速度峰值为 0.1g、0.2g、0.4g 时, 单自由度体系的滞回耗能随体系自振周期的变化曲线。图 15 还给出了输入 EL-CENTRO 波, 加速度峰值 $A_{\max}=0.1g$ 、0.2g、0.4g, 自振周期为 0.5s 时的滞回耗能历程。

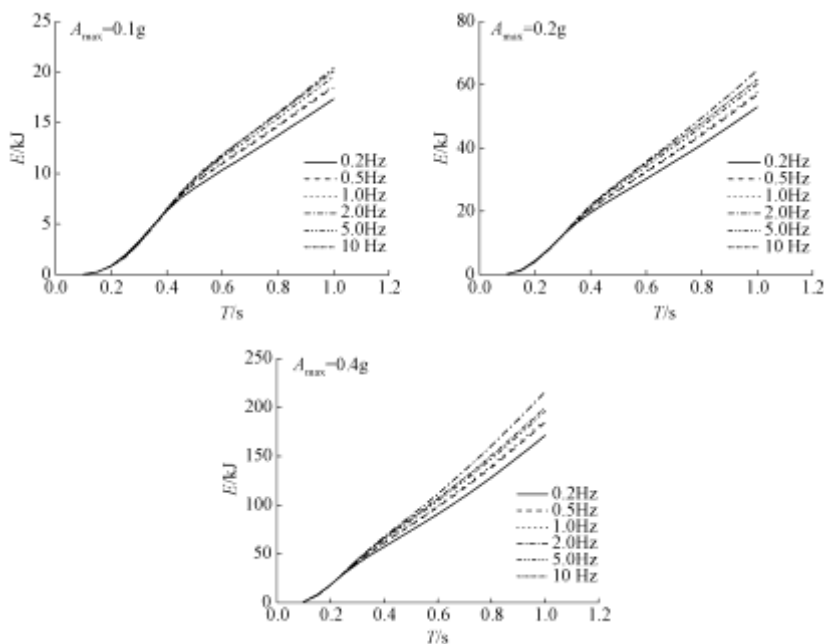


图 13 塑性耗能随自振周期的变化 (EL-CENTRO 波)

Fig. 13 Variation of the plastic energy dissipation with natural vibration period of SDOF (EL-CENTRO wave)

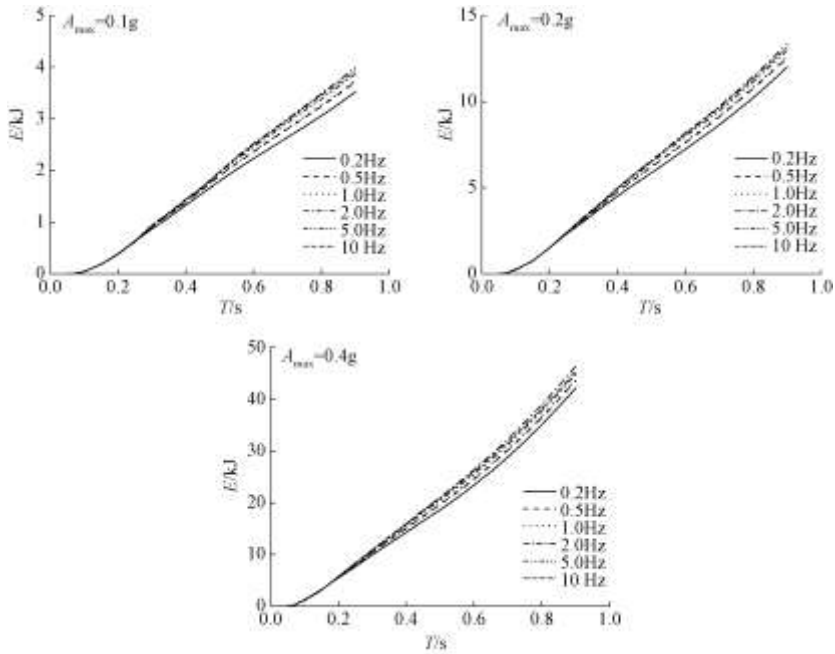


图 14 塑性耗能随自振周期的变化 (SAN FERNANDO 波)

Fig. 14 Variation of the plastic energy dissipation with natural vibration period of SDOF (SAN FERNANDO wave)

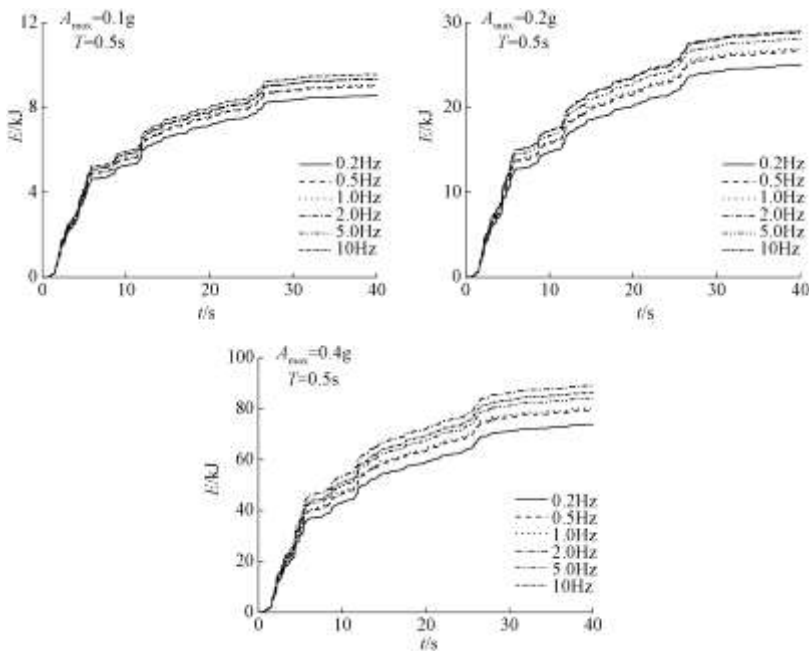


图 15 塑性耗能时程 (EL-CENTRO 波)

Fig. 15 Time history of the plastic energy dissipation (EL-CENTRO wave)

从图中可知，滞回耗能随自振周期的增大而相应增大，但由不同本构关系得到的滞回耗能变化幅度不同。0.2Hz 结果在 6 条曲线的最下方，滞回耗能的增速最小；2.0Hz 结果在 6 条

曲线的最上方, 滞回耗能的增速最大。在相同地震输入下, 2.0Hz 模型滞回耗能最大, 0.2Hz 模型滞回耗能最小。如当输入 EL-CENTRO 波、加速度峰值 $A_{\max}=0.4g$ 、自振周期 $T=1.0s$ 时, 2.0Hz 模型与 0.2Hz 模型滞回耗能比值达 1.26。

3 结论

通过铝合金减震器的动力试验, 研究了加载频率对其动力特性的影响。同时以不同加载频率下得到的骨架曲线作为材料的本构关系, 研究了加载频率对单自由度体系弹塑性地震反应的影响。

(1) 采用不同的加载频率, 将得到不同的骨架曲线, 说明加载频率对铝合金减震器的动力特性有重要影响。

(2) 利用不同本构关系得到的单自由度体系加速度反应差别不大, 不同加载频率对加速度反应影响较小, 最大与最小比值不超过 10%。

(3) 在相同输入下, 采用不同本构关系的单自由度体系, 其相对位移峰值有较大差异。其中 0.2Hz 结果与 2.0Hz 结果相差最大, 最大相差达 39.7%, 应重视加载频率对峰值位移的影响。

(4) 在相同的地震输入下, 采用不同本构关系得到的永久位移有数倍差异。

(5) 由不同本构关系得到的滞回耗能变化幅度不同。在相同地震输入下, 2.0Hz 模型滞回耗能最大, 0.2Hz 模型滞回耗能最小。

限于篇幅, 加载频率对多自由度体系弹塑性地震反应的影响将另文讨论。

参考文献

- 何玉怀, 郭伟彬, 蔚夺魁, 2008. 加载频率对直接时效 GH4169 高温合金疲劳裂纹扩展性能的影响. 失效分析与预防, **3** (1): 10—14.
- 李定乾, 张微伟, 印江涛, 2009. 加载频率对粘性土动力特性影响的试验研究. 建筑技术开发, **36** (1): 7—9.
- 李夕兵, 王卫华, 马春德, 2007. 不同频率载荷作用下的岩石节理本构模型. 岩石力学与工程学报, **26** (2): 247—253.
- 李亚琦, 李小军, 刘锡荟, 2005. 铝合金减震的动力特性及适用范围. 地震学报, **27** (1): 86—95.
- 马吉成, 覃英宏, 2008. 高周加载频率对混凝土损伤的影响. 路基工程, **136** (1): 87—88.
- 史庆轩, 杨文星, 门进杰, 2005. 单自由度体系非线性地震能量反应的计算. 建筑科学与工程学报, **22** (2): 25—29.
- 杨文星, 罗少锋, 2006. 单自由度体系地震能量反应的计算. 西安科技大学学报, **26** (1): 40—43.
- 尤红兵, 赵凤新, 2010. 瓷柱式 SF6 高压断路器抗震性能分析. 震灾防御技术, **5** (4): 418—427.
- 张建明, 王稳祥, 1990. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响. 岩土工程学报, **12** (1): 89—97.
- 中国电力规划设计协会, 2004. 高压电气设备减震技术规定 (DL GJ160-2003). 北京: 中国电力出版社.
- Jiang Minmin, Cai Zhengyin, Cao Pei et al., 2010. Effect of Cyclic Loading Frequency on Dynamic Properties of Marine Clay. Soil Dynamics and Earthquake Engineering (GSP 201), See: Proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference, 340—346.

Effect of Loading Frequency on Dynamic Properties of Lead Alloy Absorber

You Hongbing and Zhao Fengxin

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

Abstract Lead alloy absorber is a new type of absorber suitable for porcelain electrical equipments. The dynamic behavior of this absorber has great influence on its seismic-reduced effect. The lead alloy absorbers are custom-made according to the characteristics of the circuit-breaker. By hysteretic test of the lead alloy absorber, the effect of loading frequency on dynamic properties of this absorber is studied. Taking the skeleton curve obtained under different loading frequency as the constitutive relationship, the influence of loading frequency on elastic-plastic seismic response of single-degree-of-freedom (SDOF) system is discussed. It is shown that the peak value of the relative displacement, the permanent displacement and the plastic energy dissipation are quite different for the SDOF system using different constitutive relationship under the same input motion. Attention should be paid to the effect of loading frequency on dynamic properties of lead alloy absorber.

Key words: Loading frequency; Lead alloy absorber; Dynamic properties; SDOF system; Seismic response