

铝合金减震器的动力特性及适用范围*

李亚琦¹⁾ 李小军¹⁾ 刘锡荟²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局地震工程研究中心

摘要 通过典型高压断路器的振动台实验及有限元模型计算, 分析了铝合金减震器的减震效果. 实验分析结果表明, 铝合金减震器不仅降低了断路器的加速度反应和应变反应, 而且没有增加断路器的位移反应. 其最大应变降低量平均达到 30%, 且输入地震动越强, 减震效果越明显. 有限元模型计算分析进一步论证了铝合金减震器的减震效果, 尤其是具有丰富长周期地震动和速度脉冲地震动作用下的减震效果. 基于断路器的地震破坏模式, 本文将减震器的减震效果定义为断路器瓷柱最大应变的降低率. 综合计算结果和振动台试验结果, 本文初步确定了铝合金减震器的适用范围.

关键词 铝合金减震器 长周期 速度脉冲

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

引言

我国大量城市和城市群处于高地震危险区, 例如: 京津及环渤海地区的城市群、东南沿海地区的城市群、苏杭地区的城市群等. 在这些地区, 城市之间的距离特别近, 城市之间通过生命线系统紧密相连, 人口十分稠密, 单位面积的社会财富远远高于全国的平均水平(高孟潭, 2003). 同时, 由于城市群的发展, 使得震中位于城市市区的潜在危险性大大增加. 历史地震资料表明, 大地震的破坏范围可能达到几十万平方公里, 完全覆盖整个城市群, 造成严重的经济损失. 城市群的地震灾害有一个特点, 即多个城市受灾, 但不同城市受灾程度有明显的区别. 这使得城市群内各城市之间可以建立联防互救的救灾体系, 最大限度地减轻地震灾害造成的损失.

城市群生命线基础设施相互关联, “牵一发而动全局”, 因此, 可靠的生命线系统是建立联防互救体系的重要保证. 电力系统是生命线系统的重要组成部分, 它的失效或破坏会造成严重的灾害和难以估量的经济损失. 供电系统的瘫痪, 不仅极大地影响生产建设、生活秩序, 而且会引发危险的次生灾害. 更为重要的是, 供电系统的破坏将直接影响震后救灾, 使得城市之间的自救互救工作无法开展. 因此, 提高电力系统的抗震性能, 对于城市群抗震救灾至关重要.

电瓷型电气设备是电力系统中最基本的组成元件. 毫不夸张地说, 每一个设备破坏都可能造成变电站或者发电厂的失效, 从而导致电力系统失效. 同时, 由于这种设备使用瓷

* 科技部社会公益性研究项目“城市群防震减灾综合研究”和地震科学联合基金(102012)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1003.
2003-10-21 收到初稿, 2004-03-16 收到修改稿, 2004-04-12 决定采用.

作为绝缘材料,而瓷的抗拉性能差,易发生脆性断裂.因此,提高电瓷型电气设备的抗震能力是提高电力系统抗震能力的关键点.

根据电瓷型设备的震害特点以及动力特性可知,安装减震器是提高设备抗震能力的非常有效的措施.减震器可以改变设备的自振特性,增大阻尼,从而减轻震害.铝合金减震器是一种应用于电瓷型电气设备的新型减震器,它克服了目前普遍应用的橡胶减震器的一些缺点.由于铝合金减震器开发的时间很短,还没有经历真实地震的考验.同时,铝合金减震器的理论研究也很欠缺,几乎没有考虑非线性性能的分析.为此,本研究首先利用高压断路器的振动台试验和有限元方法探讨铝合金减震器的减震效果;然后,利用有限元方法,分析了在振动台试验无法模拟一些类型的地震动(即长周期成分丰富的地震动以及含有速度脉冲的地震动)输入下,铝合金减震器的减震效果;最后,结合振动台实验和有限元分析结果,给出了铝合金减震器的适用范围.

1 振动台实验

1.1 试验设备以及振动台

LW11-252/Q瓷柱型六氟化硫断路器由北京北开电气股份有限公司生产,其结构如



图1 LW11-252/Q瓷柱型六氟化硫
断路器结构示意图

图1所示.铝合金减震器的结构如图2所示.

模拟振动台系统是中国水利水电科学研究院抗震研究所结构振动实验室所属的三向六分量大型振动台.



图2 铝合金减震器

1.2 试验设计

1.2.1 试验波形选取

1) 自振特性试验.目前振动台试验中用于测试自振特性的试验,主要包括白噪声试验方法和正弦扫描试验方法,本次试验采用单轴 $0.1 \sim 120$ Hz、幅值为 1.5 m/s^2 的白噪声作为振动台输入.

2) 时间历程试验.对于原型电气设备带支架体系和原型电气装置体系,比较接近实际

运行状态, 振动台输入用人工合成的地震动比较合理(国家技术监督局, 中华人民共和国建设部, 1996). 本次试验亦采用人工地震动作为时间历程试验的输入波形.

一般来讲, 人工地震动的目标反应谱采用规范和标准给出的设计反应谱, 本次试验采用《电力设施抗震设计规范》给出的设计反应谱作为目标反应谱. 其中, $\alpha_{\max}$ 取值 5 m/s^2 , T_g 取值 0.55 s , 阻尼比取值 5% . 依据这一反应谱合成的人工地震动时程 A_s 如图 3 所示.

考虑到规范中的设计反应谱是平均的、经验的结果, 缺乏针对性, 本次试验还根据断路器的动力特性和华北地区基岩地震动参数衰减关系(霍俊荣, 1989), 自行设计了一条目标反应谱. 这也是本次试验设计与其它试验不同之处. 依据断路器的结构特性以及同类产品的振动台试验结果, 本研究初步判定断路器的自振周期约在 $0.1 \sim 0.4 \text{ s}$ 范围内. 为了使得断路器经受严格的试验考核, 设计地震动的主频段应涵盖这个周期范围. 根据这一要求, 合成的人工地震动加速度时程 A_s 示于图 4.

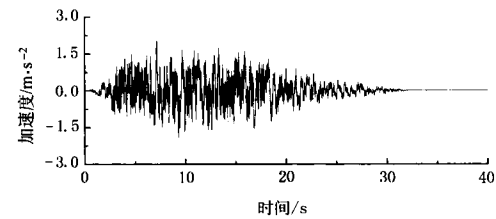


图 3 人工地震动加速度时程 A_s .

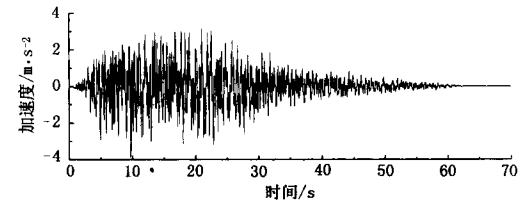


图 4 人工地震动加速度时程 A_s .

1.2.2 试验工况

根据 LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器的结构形式以及安装减震器的目的(减小支持瓷柱根部的应变), 铝合金减震器安装在支持瓷柱与支架的连接处. 为了对比安装减震器前后的试验结果, 本次试验分为两种工况进行, 即未安装减震器工况和安装减震器工况. 每种工况均进行了白噪声试验、时间历程试验. 本研究约定未安装减震器试验称为工况 1, 安装减震器试验称为工况 2.

1.3 试验数据处理和分析

本次试验得到了大量的数据, 研究主要分析了断路器的动力放大系数和铝合金减震器的减震效果. 以断路器顶部的加速度反应代表断路器的动力放大系数, 以支持瓷柱根部的应变反应代表减震器的减震效果, 实验的主要结果列于表 1. 实验结果表明: 人工地震动输入下, 安装减震器后 x 方向加速度反应平均减小 10% , y 方向减少 15% ; x 方向支持瓷

表 1(a) 人工地震动输入下断路器的放大系数

方向	项目	$A_s(2.5)/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		$A_s(2.5)/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		$A_s(4.0)/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		$A_s(4.0)/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
x	台面输出	2.1	2.3	2.0	2.5	3.8	3.9	4.2	4.1
	顶部输出	10	10.4	13.8	13.3	18.1	22	24.6	24
	放大系数	4.8	4.5	6.9	5.2	4.8	5.7	5.9	5.9
y	台面输出	2.3	2.4	2.2	2.3	4.1	4.3	4.2	4.6
	顶部输出	10.2	9.1	13.4	12.0	15.8	15.6	24.1	19
	放大系数	4.5	3.8	5.6	5.2	3.9	3.6	5.7	4.1

表 1(b) 人工地震动输入下断路器瓷柱根部的最大应变

方向	瓷柱根部 应变	$A_s(2.5)/m \cdot s^{-2}$		$A_s(2.5)/m \cdot s^{-2}$		$A_s(4.0)/m \cdot s^{-2}$		$A_s(4.0)/m \cdot s^{-2}$	
		工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
x	$\epsilon/10^{-6}$	105	86	145	119	194	177	254	196
	ϵ/α_0	500	374	725	476	524	460	605	478
	减震效果		25%		34%		12%		21%
y	$\epsilon/10^{-6}$	105	75	134	90	165	136	260	140
	ϵ/α_0	457	313	558	391	402	320	619	304
	减震效果		32%		30%		20%		51%

柱根部应变平均减少 23%， y 方向减少 33%。由此可见铝合金减震器的减震效果很好，且 y 方向的效果强于 x 方向的效果。如果仅考虑控制瓷柱破坏的瓷柱根部应变，则减震效果更为明显。

2 有限元计算

2.1 LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器的有限元模型

从图 1 中可以看出，由于钢制储气瓶的质量较大，即使是遭受水平单向地震动作用，结构在运动过程中也将出现扭转运动。为了考虑扭转运动的影响，采用简单的二维有限元分析并不够，因此本研究采用三维有限元模型进行动力分析。

1) 整体模型。LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器的有限元模型如图 5a 所示，瓷柱为体单元、瓷柱与支架连接处的钢板为壳单元、支架的柱和梁为梁单元、钢制的储气瓶为梁单元、支架内部的气动装置为体单元。单元总数为 972 个，其中梁单元 173 个，壳单元 463 个，体单元 336 个，结点数为 1 409。

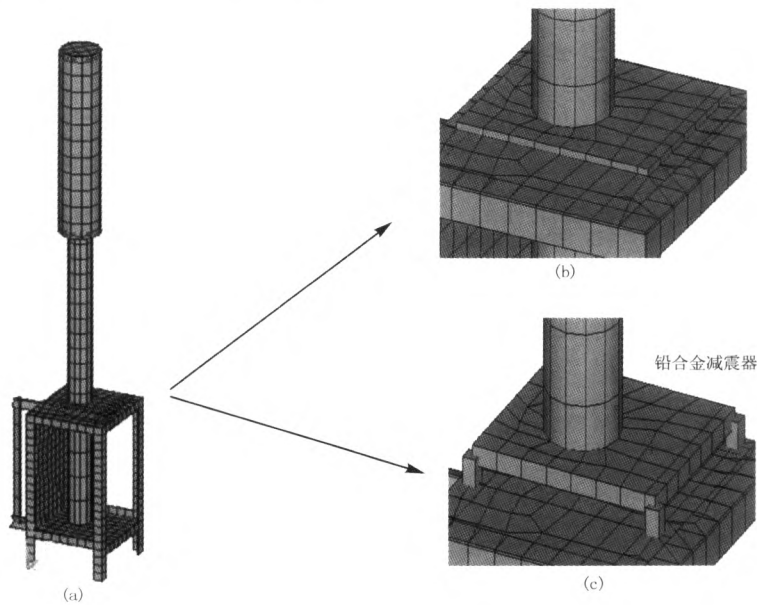


图 5 LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器的有限元模型

(a) 整体模型；(b) 无减震器时子结构连接形式；(c) 安装减震器后子结构连接形式

2) 子结构法的应用. 假设断路器本身是线弹性体系, 只有减震器具有非线性特性, 为此本研究采用有限元子结构法, 以便减少计算量. 铝合金减震器位于瓷柱与支架连接处, 因此在安装减震器的地方将有限元模型分为两个子结构. 未安装减震器时, 瓷柱下端钢板的下表面为两个子结构的结合处(图 5b); 安装减震器后, 代表减震器的杆单元即为子结构的连接单元(图 5c). 这样, 在进行计算时, 我们可以只对感兴趣的部件(如瓷柱)进行子结构展开分析.

3) 铝合金减震器——塑性杆单元. 铝合金减震器的主要成分为铝, 其中添加了少量的其它金属. 图 6 所示为 RLP56A 型铝合金减震器的拉压滞迴特性. 从图中可以看出滞迴曲线非常饱满, 显示了典型的金属弹塑性特征.

根据减震器的结构形式可知, 与设备一同承受地震作用时, 减震器的变形主要为拉伸压缩变形, 因此本研究采用塑性杆单元模拟减震器.

本研究采用双线性弹塑性模型描述减震器的滞迴特性(李亚琦, 2002). 该模型的 3 个参数, 即弹性刚度 k_e 、塑性刚度 k_p 和屈服位移 u_y , 由以往减震器的试验数据得到, 具体的做法见图 7: 首先由图 6 中滞迴环顶点的连线确定骨架曲线, 然后采用“通用屈服弯矩法”求屈服力和屈服位移. 即从原点做弹性理论值 OL 与过极限荷载点 G 的水平线相交于 L , 过 L 作垂线与骨架曲线交于 I , 连接并延长 OI 与 HG 交于 M 点, 过 M 作垂线与骨架曲线交于 B , B 点即为假定的屈服点.

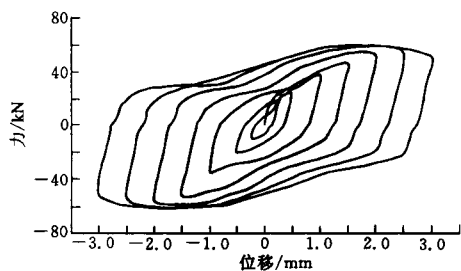


图 6 铝合金减震器滞迴特性

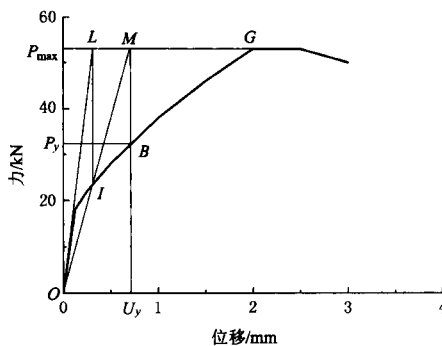


图 7 双线性模型参数的确定方法

2.2 计算结果与试验结果的比较

为了验证有限元模型(包括未安装减震器与安装减震器两种模型)的合理性, 本研究进行了有限元模型的模态分析, 并将计算得到的自振特性与试验结果进行了对比. 同时, 本研究利用振动台试验记录的台面加速度时程作为有限元模型的基底输入, 将所得计算结果与振动台试验结果进行比较.

1) 自振特性. 表 2 与图 8 列出了两种工况的试验结果与计算结果. 从中可以看出, 有限元计算结果与试验结果非常相近, 尤其是第一阶振动特性.

2) 地震动时程输入结果比较. 本文比较了两种工况不同地震动时程输入下, 瓷柱顶部加速度时程记录及其反应谱, 以及支持瓷柱根部应变时程的试验结果和计算结果. 表 3 给出了设备顶部加速度反应最大值和支持瓷柱根部应变的最大值.

表 2 自振频率的试验结果与计算结果的比较

工况	方向	第一阶自振频率/Hz		第二阶自振频率/Hz	
		试验结果	计算结果	试验结果	计算结果
1	x	4.0	4.0	8.7	8.4
	y	4.4	4.4	11.7	13.0
2	x	3.8	3.8	8.2	7.2
	y	4.2	4.1	11.3	12.3

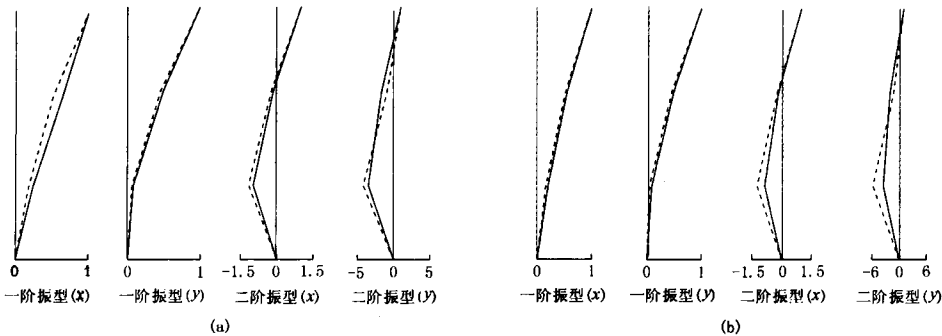


图 8 安装减震器前后一、二阶振型的试验结果与计算结果的比较

(a) 未安装减震器；(b) 安装减震器

表 3 设备顶部加速度反应最大值和支持瓷柱根部应变最大值计算值与实验值的比较

工况	输入方向	输入波形	输入峰值加 速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	加速度最大值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		应变最大值/ 10^{-6}	
				试验结果	计算结果	试验结果	计算结果
1	x	A_s	2.5	10.0	7.4	103	101
1	x	A_s	2.5	13.8	13.8	144	122
1	x	A_s	4.0	18.2	14.2	191	211
1	x	A_s	4.0	24.6	18.7	246	244
1	y	A_s	2.5	10.2	8.4	90	104
1	y	A_s	2.5	13.4	9.5	130	121
1	y	A_s	4.0	15.9	16.3	158	196
1	y	A_s	4.0	24.1	17.4	241	225
2	x	A_s	2.5	10.4	7.7	84	102
2	x	A_s	2.5	13.3	9.3	119	106
2	x	A_s	4.0	22.0	13.2	176	165
2	x	A_s	4.0	24.0	15.8	191	170
2	y	A_s	2.5	9.1	7.0	75	90
2	y	A_s	2.5	12.0	7.5	89	99
2	y	A_s	4.0	15.6	19.8	134	130
2	y	A_s	4.0	19.0	10.5	139	134

从表 3 给出的计算结果与试验结果来看，瓷柱根部应变值的差异相对较小，而顶部加速度值差异较大。本研究认为产生差异的主要原因是：计算时阻尼值按照瑞利阻尼条件确定，可能与实际情况不符；计算时未考虑断路器在非线性性能，仅考虑了减震器的非线性影响，而实际上，断路器在支架试验时可能进入非线性，尤其是输入幅值较大的情况；计算时采用的材料参数为平均意义的参数，而试验设备的材料参数由于加工时的不确定因素与平均意义的参数存在差异。此外，试验时一些外在因素的影响，使得试验数据也存在一定的偏差。总体来讲，有限元计算结果与试验结果很接近，有限元模型较为合理。

3 特殊地震动输入

3.1 长周期成分丰富的地震动

长周期成分丰富的地震动在实际的地震中经常遇到。例如, 1985 年墨西哥地震和 1999 年台湾集集地震, 而且这些地震带来了巨大的经济损失和人员伤亡。既然如此, 在研究新型的铅合金减震器的减震效果时, 就不能不考虑到这种类型的地震动下减震器的减震效果。因此, 本研究设计了两个长周期成分丰富的人工地震动进行减震效果的讨论。其中, 地震动 AL1 为震级 8.0 级、震中距 107 km 情况下的地震动。利用地震动衰减关系(霍俊荣, 1989)得到相应于峰值加速度 2.25 m/s^2 的加速度反应谱及人工合成的地震动加速度时程, 如图 9 所示。地震动 AL2 为震级 8.5 级、震中距 113 km 情况下的地震动。利用地震动衰减关系得到相应于峰值加速度 3.9 m/s^2 的加速度反应谱及人工合成的地震动加速度时程, 如图 10 所示。

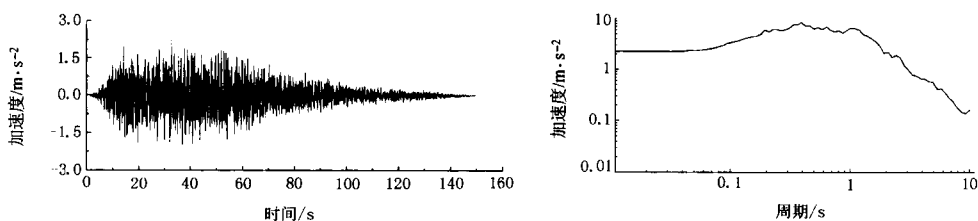


图 9 地震动 AL1 的加速度时程和加速度反应谱

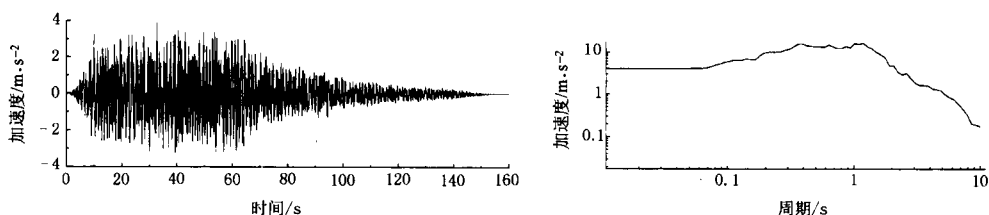


图 10 地震动 AL2 的加速度时程和加速度反应谱

3.2 含有速度脉冲的近场地震动

近年来, 由于城市扩张, 使得发震断层通过城市的可能性越来越大, 地震的损失越来越严重。1994 年美国北岭地震和 1995 年日本兵库县南部地震, 都属于发震断层通过人口密集城市的情况, 造成了严重的损失(Iwan, Toki, 1998)。同样, 1999 年台湾集集地震也属于类似的情况。由于城市发展, 近场地震动发生的频率越来越高。研究表明, 近场地震动对于建筑结构等的影响也与其它地震动不同。因此, 越来越多的人研究近场地震动对建筑结构、工程设备的影响。而近场地震动对瓷型高压电气设备, 以及铅合金减震器减震效果的影响还是一个未知的问题。为此, 本研究选择了集集地震的近场地震动记录进行计算分析来探讨这一问题。

集集地震的地震动记录由台湾强震观测网提供(Shin *et al.*, 2000), 断层附近强震台网的布置见图 11 所示。其中, 一些台站的地震动记录显示了强烈的速度脉冲。本研究以断层北部 TCU068 台站和 TCU074 台站的東西向地震动作为输入地震动, 地震动加速度时程与速度时程示于图 11。

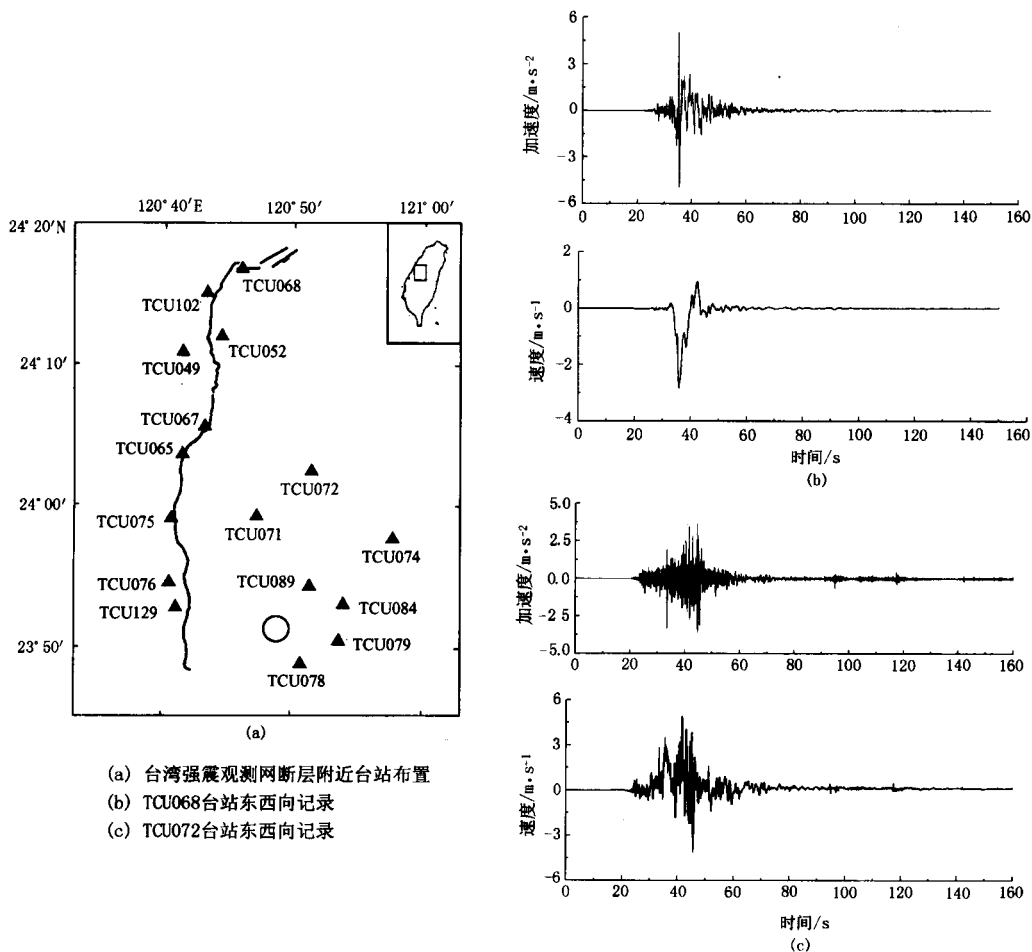


图 11 含有速度脉冲的近场地震记录

3.3 计算结果

长周期成分丰富的地震动输入下的计算结果列于表 4。从断路器顶部绝对加速度反应和瓷柱根部应变反应可以看出, 铝合金减震器的减震效果不明显。分析铝合金减震器的减震原理不难理解这一结果, 其减震原理为: ① 利用塑性变形消耗地震动输入能量; ② 改变设备体系的自振周期, 使其远离地震动输入加速度反应谱的平台段对应的周期。对于中短周期成分丰富的地震动输入, 减震器可以使得设备体系的自振周期加长, 设备反应远离输入主频段, 从而降低设备的反应。而对于长周期成分丰富的地震动输入, 安装减震器后设备体系的自振周期加长, 但并未离开输入主频段, 反而可能进入输入地震动反应谱结果较大的频段, 使得设备的反应加大。图12给出了振动台

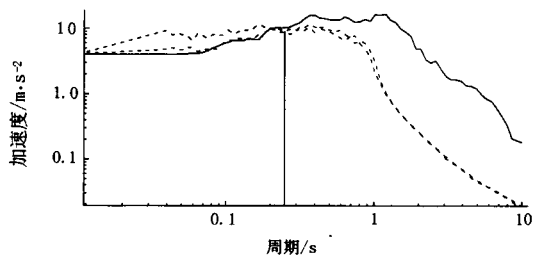


图 12 振动台输入地震动反应谱与
地震动 AL2 反应谱的关系

——地震动 AL2 反应谱; —— 振动台试验输入反应谱

试验输入反应谱和地震动 AL2 的反应谱, 它们的关系成分证明了这一点. 因此, 在地震动 AL1 和 AL2 的作用下, 虽然减震器的塑性耗能降低了设备的反应, 但是设备体系自振周期的延长却加大了设备反应. 两种效应的叠加使得设备体系反应降低很小, 减震效果不显著.

对于含速度脉冲近场地震动作用, 铅合金减震器不仅没有降低设备的反应, 反而有加大的情况(表 4). 图 13 给出了在 TCU068 台站东西向地震记录的作用下, 铅合金减震器的内力-变形滞迴曲线. 由图中可以看出, 大部分作用时间内, 减震器的变形近似于弹性变形, 塑性耗能能量很小. 因此, 减震器的减震效果不明显. 另外, 安装减震器后, 设备体系的自振特性改变, 在一些情况下, 设备体系的反应可能加大.

表 4 未安装减震器和安装减震器断路器反应的对比

工 况		绝对加速度 最大值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	应变最大值 / 10^{-6}
x 方向 AL1 输入	未安装减震器	10.3	148
	安装减震器	8.4	124
	减震效果	18.4%	16.2%
y 方向 AL1 输入	未安装减震器	7.4	107
	安装减震器	7.6	107
	减震效果	-2.7%	0%
x 方向 AL2 输入	未安装减震器	16.3	233
	安装减震器	14.8	214
	减震效果	9.2%	8.2%
y 方向 AL2 输入	未安装减震器	12.2	180
	安装减震器	11.9	165
	减震效果	2.5%	8.3%
x 方向 TCU068 输入	未安装减震器	14.7	208
	安装减震器	13.7	204
	减震效果	6.8%	1.9%
y 方向 TCU068 输入	未安装减震器	12.0	173
	安装减震器	12.4	175
	减震效果	-3.3%	-1.2%
x 方向 TCU074 输入	未安装减震器	12.4	149
	安装减震器	12.8	152
	减震效果	-3.2%	-2.0%
y 方向 TCU074 输入	未安装减震器	10.9	140
	安装减震器	8.5	113
	减震效果	22.0%	19.3%

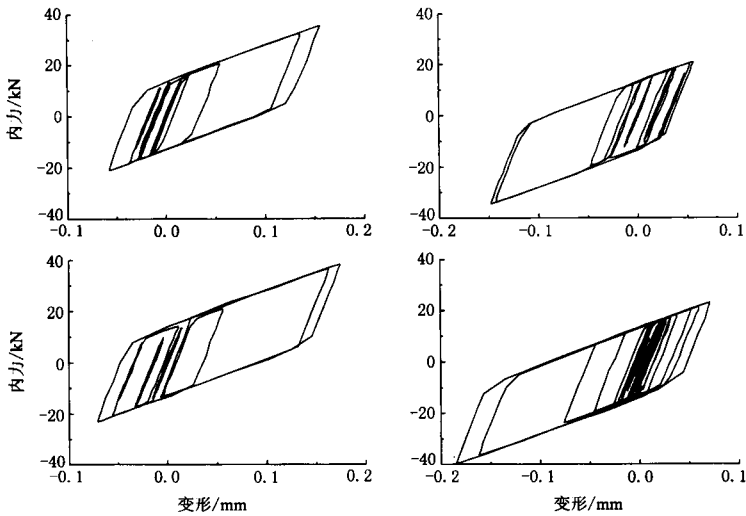


图 13 TCU068 台站东西向地震记录输入下的铅合金减震器内力-变形滞迴曲线

4 结语

本研究基于振动台试验分析及有限元计算分析结果, 探讨了铅合金减震器用于瓷型高压断路器设备的减震特性及减震效果. 研究表明, 铅合金减震器的利用存在一定的

适用范围。总结研究的主要结果如下:

1) 对于中短周期成分丰富的地震动(大多数地震产生的地面运动均属于这种情况), 铅合金减震器的减震效果良好。从控制断路器破坏的指标——瓷柱根部应变来看, 安装减震器可使瓷柱根部应变最大反应降低 30% 左右。同时, 铅合金减震器不会明显增大断路器顶部的加速度反应及位移反应。

2) 对于长周期成分丰富的地震动, 铅合金减震器减震效果不明显。在此类地震环境下慎用铅合金减震器。

3) 含有速度脉冲的近场地震动作用时, 由于铅合金减震器的塑性耗能量很低, 减震效果很差。在此类地震环境下, 不应使用铅合金减震器。

参 考 文 献

- 高孟潭. 2003. 城市群地震灾害特点与防震减灾对策[J]. 中国地震, 19(2): 103~108
- 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 1996. 电力设施抗震设计规范(GB50260-96)[M]. 北京: 中国计划出版社, 6~7
- 霍俊荣. 1989. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 89~136
- 李亚琦, 李小军, 胡聿贤. 2002. 安装铅合金减震器的 LW11-252/Q 瓷柱型六氟化硫断路器振动台试验及有限元分析[A]. 见: 王椿镛, 齐霄高编. 新世纪地震工程与防震减灾[C]. 北京: 地震出版社, 294~304
- Iwan W D, Toki K. 1998. *Proceedings of the U S Japan Workshop on Mitigation of Near-Field Earthquake Damage in Urban Areas*[C]. Sponsored by U S National Science Foundation, Japan Society for the Promotion of Science, 1~2
- Shin T C, Kuo K W, Lee W H K, *et al.* 2000. A preliminary report on the 1999 Chi-Chi earthquake[J]. *Seism Res Lett*, 71(1): 25~30

DYNAMIC BEHAVIOR AND APPLICABILITY OF LEAD ALLOY ABSORBER

Li Yaqi¹⁾ Li Xiaojun¹⁾ Liu Xihui²⁾

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *Earthquake Engineering Research Centre, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

Abstract: The paper describes the damping effect of Lead Alloy Absorber (LAA) by shake table test and finite element method of a kind of high-voltage electrical equipment, LW11-252/Q SF₆ Circuit Breaker (LSCB). The strain reduction of the porcelain bushing of LSCB is defined as the damping effect of LAA in the paper based on the damage pattern of test equipment under earthquake. The test results show that LAA has reduced the acceleration response and strain response of the LSCB, at the same time, it does not increase the displacement response of the LSCB. There is a reduction of 30% in the strain of porcelain pipe. Moreover, the stronger the input ground motion is, the larger the reduction will be. The finite element method also indicates the damping effect of LAA, especially under ground motions with significant long period contents and ground motions with velocity pulse. Combined with the test results and calculation results, the paper gives the applicability of LAA finally.

Key words: Lead Alloy Absorber; long period; velocity pulse